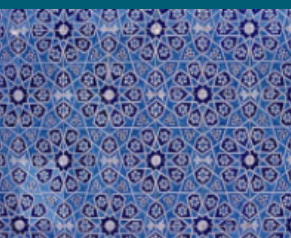
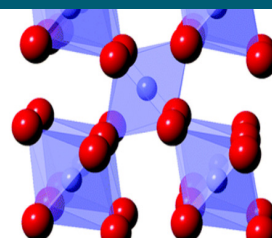
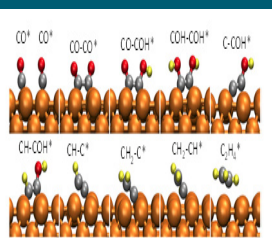


융합연구리뷰

Convergence Research Review

전통문화, 현대과학기술을 만나
부활을 꿈꾸다
—
화학원료 이제
태양빛으로부터 만든다



C o n v e r g e n c e R e s e a r c h R e v i e w

Contents

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2017 December vol.3 no.12

- 01 편집자 주
- 04 전통문화, 현대과학기술을 만나 부활을 꿈꾸다
- 46 화학원료 이제 태양빛으로부터 만든다



발행일 2017년 12월 14일

발행인 하성도

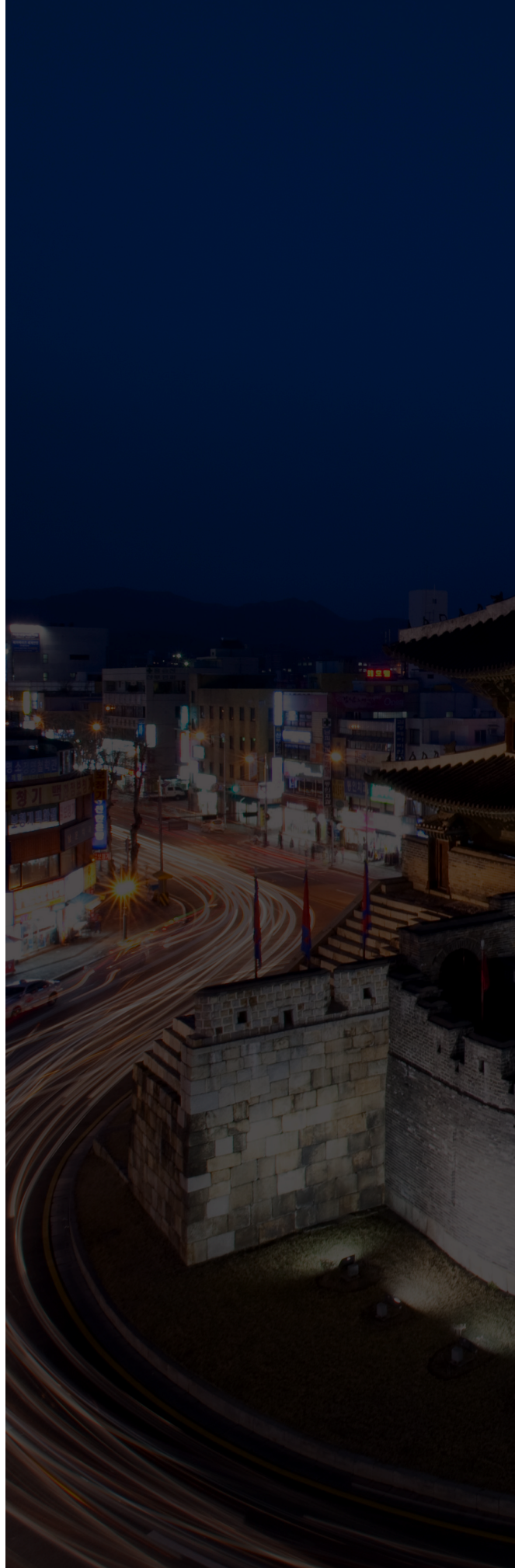
편집인 서덕록 김보림

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 승일미디어그룹주식회사 Tel. 1800-3673



[편집자주]

| 전통문화, 현대과학기술을 만나 부활을 꿈꾸다

우리나라는 세계적으로 케이팝, 드라마, 게임 등 다양한 문화콘텐츠들이 선풍적인 인기를 끌며 ‘한류’ 열풍을 일으켰다. 이렇듯 현재는 과거와는 다르게 문화가 상품으로써 가치를 지니고 국가적인 경쟁력으로까지 이어지는 시대가 되었다. 그러나 우리나라는 최근 ‘한류’를 일으킨 최신 문화콘텐츠 뿐만 아니라 우수한 전통문화를 갖고 있음에도 불구하고 산업계 내 기술역량 부족으로 전통문화자원에 내재된 가치의 세계화 수준은 낮은 상태이다.

우리나라의 전통문화에 대해 전문가들은 “잠재력이 높으나 실용성이 낮고, 가격이 높아 대중화가 쉽지 않다”고 평가하고 있다. 이러한 전통문화의 한계점을 극복하기 위해 KIST에서는 전통문화에 과학기술을 접목하여 새로운 가치를 부여하기 위한 연구를 진행하고 있다. 이러한 연구는 기술적 한계에 부딪혀 대중화에 다가가지 못했던 잠재력 높은 전통문화에 과학기술을 더해 높은 품질과 가치를 부여함으로써 새로운 시장 창출로 이어질 수 있다.

이에, 본 호 1부에서는 KIST 전통문화과학기술연구단을 통해 전통문화와 과학기술의 융복합 연구에 대해 살펴보고자 한다. 전통문화와 과학기술이란 전혀 다른 두 분야의 융합이 기존의 전통문화에 새로운 가치를 창출하고, 향후 전통문화산업 육성에 기여하여 새로운 ‘한류’ 열풍을 일으키기를 기대해 본다.

| 화학원료 이제 태양빛으로부터 만든다

오늘날 인류가 직면한 가장 큰 문제점 중 하나로 으로 화석 연료의 고갈과 지구온난화가 꼽히고 있다. 그러나 여전히 대부분의 화학제품들은 화석연료로 생산되고 있고 지구온난화 현상은 심화되고 있다. 이를 해결하기 위해 온난화의 원인이 되는 이산화탄소를 배출하지 않고, 무제한 이용가능한 에너지원인 태양빛을 이용하려는 연구가 세계적으로 진행되고 있다.

우리가 알고 있는 먹이사슬의 가장 하위에 있는 식물은 유일하게 지구상에서 광합성을 통해 스스로 에너지를 생산할 수 있는 생물이다. 식물은 태양빛을 이용해 물과 이산화탄소로부터 수소, 탄소, 산소로 구성된 에너지원인 탄수화물을 생산한다. 이와 같이 자연의 식물에서 일어나는 광합성을 모방하여 태양빛을 에너지원으로 물과 이산화탄소로부터 고부가가치화합물을 만들어내는 방법을 ‘인공광합성’이라고 한다. 인공광합성 기술은 화학공학 전 분야와 바이오공학 등이 융합된 순환형 에너지 생산기술로, 미래의 신성장동력원이 될 수 있는 기술로써 전 세계적으로 주목받고 있다.

이에 본 호 2부에서는 KIST 청정에너지연구센터 인공광합성 연구팀을 통해 인공광합성의 핵심 기술이라고 할 수 있는 물 산화 촉매 기술과 이산화탄소 환원 촉매 기술에 대한 최신 연구 동향을 살펴보고자 한다. 향후 인공광합성 기술이 미래 화학산업의 근간이 되는 날이 오길 기대해본다.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2017 December vol.3 no.12

<http://crpc.kist.re.kr>

01

전통문화, 현대과학기술을 만나 부활을 꿈꾸다

한국과학기술연구원 **도정만** 박사 (kistdoh@kist.re.kr)

한국과학기술연구원 **한호규** 박사 (hghahn@kist.re.kr)



01 서론

『전통문화자원과 과학기술 융합』이라는 간단한 문장 속에는 과거와 현재, 현재와 미래, 정신과 물질, 인문학과 자연과학, 문화·예술과 과학기술, 삶과 미지 등 여러 가지 의미가 함축되어 있어 한 마디로 설명하기 어려운 측면이 있다. “전통은 무슨 의미입니까”하고 누군가가 물으면 곧바로 명쾌하게 설명하기 곤란하며, 과학, 기술, 융합이라는 단어 역시 그러하다. 따라서 전통, 문화, 과학, 기술이란 단어들이 갖는 의미를 숙고하면서 글을 시작하고자 한다. 어쩌면 이들 단어의 의미를 정확하게 파악하는 것 자체가 이미 융합 연구에 한 발을 내딛었다는 것을 의미할 수도 있기 때문이다.

전통문화의 근간을 이루는 전통문화자원은 전통문화양식(생활)과 전통문화예술을 포함한다. 전통문화양식은 인간의 삶과 밀접한 의·식·주 즉, 그리고 일상생활에 필수적인 전통의류, 전통음식, 전통건축, 전통공예를 포함한다.¹⁾ 인간의 정신을 윤택하게 만드는 전통문화예술은 전통음악, 전통무용, 전통미술, 전통연회 등을 포함한다. 전통문화자원은 국가 브랜드²⁾를 높이고 세계적 공감대를 형성할 수 있는 귀중한 자원임과 동시에 독점적 시장 창출과 새로운 부가 가치를 창출할 수 있는 국가와 민족의 고유자산으로서 그 활용 가치가 대단히 높다고 할 수 있다. 전통문화자원을 활용하기 위한 방안으로 다음과 같이 2가지로 나누어진다. 첫째, 보존·복원, 유지·계승 같은 전통적 활용, 둘째, 1990년대 후반부터 관심을 가지기 시작한 관광 및 산업적인 활용으로 나눌 수 있다. 우리나라의 경우 문화재청 산하 문화재연구소 및 (사)한국문화재보존과학회를 중심으로 보존·복원 및 유지·계승과 관련된 전통적 활용을 위한 연구는 지속적으로 추진되고 있으나 전통문화자원의 현대적·산업적 활용은 미진한 것이 현실이다.

최근의 제4차 산업혁명에서 명확하게 보여주듯이 경제·사회·산업 환경은 매우 빠르고 폭넓게 변화하고 있다(표 1). 과학기술이 급격히 발달함에 따라 각종 제품을 값싸게 공급함으로써 인간의 삶은 결핍 사회에서 풍요로운 사회로 변화되었다. 제품 생산을 주로 노동력에 의존하였던 과거 산업사회에서는 경제 규모가 커짐에 따라 그에 따른 고용도 증가하였으나 과학기술이 고도로 발달된 최근에는 경제 규모는 커지는 데 반해 고용은 오히려 감소하고 있다. 또한, 최근 소비자의 기호가 획일적으로 대량 생산되는 제품보다는 자신만의

개성이 있는 소량 다품종, 맞춤형 제품을 선호하는 쪽으로 변화되고 있다.

표 1. 과거와 현재/미래의 환경변화 내용

항목	시간	과거	현재/미래
경제 사회 환경		결핍된 사회	풍요로운 사회
		고용을 수반한 경제 성장(산업사회)	고용 증가 없이 경제 성장 → 실업 유발
우리나라 위상		빠른 추격자(Fast Follower)	선도자(First Mover)
제품 및 서비스		대량 생산, 사후 대응 중심, 제조 중심	소량 다품종, 맞춤형, 사전예방 중심, 융합형서비스 중심
시장(소비자) 상황		보급	선택
		획일성	다양성

우리나라의 전통문화산업의 업체당 연간 평균 매출액은 8,800만원으로 뿌리산업 업체당 연간 평균 매출액 21,600만원의 40% 수준에 불과하다. 뿐만 아니라 품질 및 생산성이 낮고 현대 생활·소비 환경에 적합한 상품화가 미흡하여 전통문화산업체 대부분이 영세한 수준에 머물러 있으며 전통문화자원의 대중화 및 산업적 활용도 제대로 이루어지지 않고 있다. 과학기술정보통신부(구 미래창조과학부)에서는 우리나라 전통문화 자원에 내재된 무한한 산업적·경제적·사회적·문화적·현대적 활용 가치를 인지하고 『첨단과학기술과 전통문화기술의 융복합을 통한 전통과학기술 발전방안 기획 연구』³⁾와 『한국전통문화프리미엄연구사업 예비타당성 조사 기획 연구』⁴⁾를 수행하고, 이를 바탕으로 『과학기술을 통한 한국전통문화 프리미엄 창출 전략』⁵⁾을 발굴하였다. 이는 우리나라의 전통문화자원과 과학기술 융합 R&D를 통하여 전통문화자원으로부터 새로운 부가가치를 창출하고, 전통문화산업의 생태계를 활성화시키기 위한 방안이다. 본 기고에서는 『한국전통문화프리미엄 창출 전략』의 수립 배경 및 주요 내용 그리고 이에 대한 조치로 실행되고 있는 『전통문화융합연구사업』에 대해 개괄적으로 살펴보고 우리나라 전통문화와 현대과학기술 융합 R&D 및 전통문화산업체가 나아가야 할 방향에 대한 필자의 의견을 제시해 보고자 한다.

1 전통문화, 현대과학기술을 만나 부활을 꿈꾸다

2 융합연구로 이제 태양동이 뜨겁고 뜨겁다

02 본론

2.1 전통문화산업 국내외 현황

2.1.1 국외 현황

2.1.1.1 일본

우선 세계적으로 전통문화자원을 가장 잘 활용하고 있는 나라인 일본의 전통공예산업 및 유네스코에서 지정한 공예와 민속예술 창의도시의 현황을 살펴보고자 한다.

전통문화자원과 과학기술의 융합과 가장 밀접한 관련을 갖고 있는 분야 중 하나는 과학기술에 기반한 전통공예분야이며 전통공예자원의 유지·계승을 넘어서 전통공예산업으로 발전시킨 나라 중 하나가 일본이라고 할 수 있다. 일본에서는 1974년 전통적 공예품산업 진흥에 관한 법률(전산법)을 제정하여 일본 전통공예 산업을 체계적으로 지원해 오고 있다<그림 1>. 2017년 4월 현재 총 215 품목이 전통공예품으로 지정되어 있으며 전통공예품으로 지정되기 위해서는 다음과 같은 5가지 지정 요건을 충족시켜야 한다.

- 1) 일본인의 생활에 밀착해 일상생활에서 사용되고 있을 것
- 2) 주요 공정이 수작업 중심(수공업적)으로 이루어질 것
- 3) 기술기법이 100년 이상의 역사를 가지고 오늘날까지 계속되고 있을 것
- 4) 100년 이상의 역사를 가진 전통 원료를 사용할 것
- 5) 일정한 지역에서 지역산업으로 성립되고 있을 것

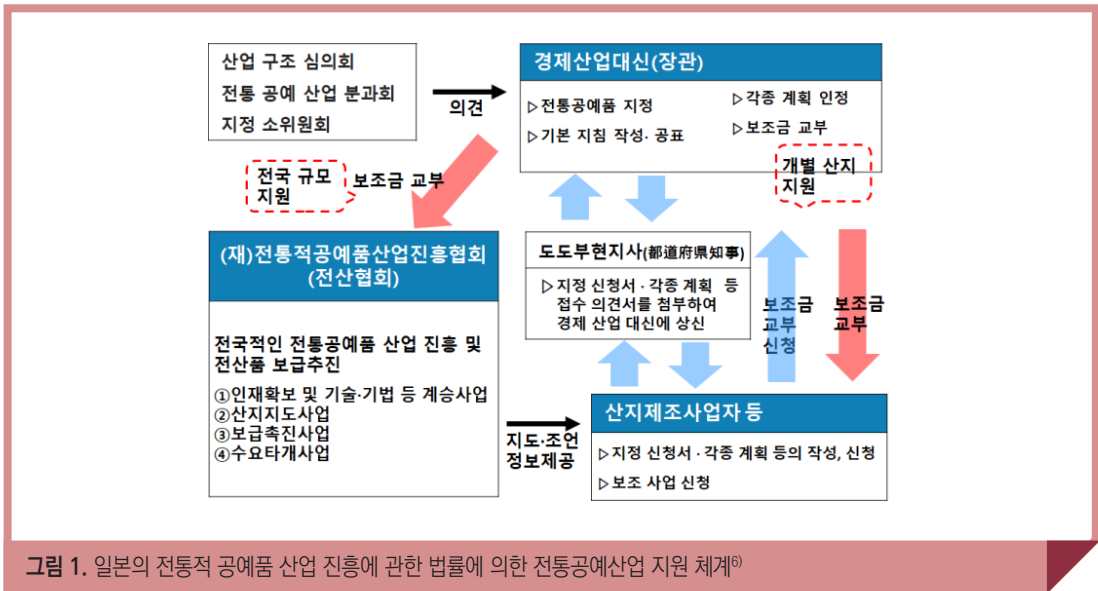


그림 1. 일본의 전통적 공예품 산업 진흥에 관한 법률에 의한 전통공예산업 지원 체계⁶⁾

일본 정부가 지원하는 전통공예품 지원 사업은 크게 두 가지로, 개별 산지를 직접 지원하는 전산 지원 보조금사업과 (재)전통공예산업진흥협회가 실시하는 각종 진흥사업으로 구성되어 있다.⁶⁾ 개별 산지에 직접 지원(전산 지원 보조금)하는 사업은 상품개발·전시회 등의 수요 개척 사업, 후계자 육성 사업 등의 비용 일부를 보조하는 사업이다. (재)전통공예산업진흥협회가 실시하는 전통공예산업을 진흥하기 위한 주요 사업으로는 인재 확보 및 기술·기법 계승사업, 산지 지도사업, 보급 촉진사업, 수요 타개사업 등 네 가지가 있다.⁶⁾ 이들 네 가지 각 진흥사업의 구체적인 내용을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 인재 확보 및 기술·기법 등의 계승사업: 전승된 기술의 유지·개선을 목적으로 한 후계자 육성 지원
- 2) 산지 지도사업: 전통 공예품에 대한 표시 적정화 및 실시 촉진을 도모하기 위한 검사 지도원 산지 파견 및 조사·지도 등
- 3) 전통공예품 보급 촉진사업: 전통공예품 및 전시회 등에 대한 홍보 실시, 전통공예품의 역사적 배경, 전통공예사의 기술·기법 등에 대한 정보 제공 등
- 4) 전통공예품 수요 타개사업: 우수 전통공예품을 소개, 공모전, 신상품 개발을 목적으로 디자이너와 프로듀서 및 산지 사업자의 교류회, 상품 개발을 위한 연구회 등 지원. 현대 라이프 스타일에 맞는 제품을 전시회 출품 지원 등

일본의 경우 1974년부터 『전통적 공예품 진흥에 관한 법률』을 지정하여 전통적 공예품 산업을 지속적으로 지원해 오고 있음에도 불구하고 전통공예산업 기업수, 종사자수 및 생산액은 지속적으로 감소하고 있다. 2012년 전통공예산업 기업체 수는 전산법 시행 이후 최전성기인 1979년(34,043사)에 비해 약 1/3(13,567사)로 감소되었고 종사자수는 1979년(288,000명)에 비해 약 1/4(69,635명)로 감소되었으며 생산액은 1983년(5,400억엔)에 비해 약 1/5(1,040억엔)로 감소되었다.⁷⁾

표 2. 일본 전통적 공예품 산업 현황 (전산법 시행 이후 통계자료에 근거)

항목	2012년 기준	참고
종사자수	69,635인	288,000인(1979년)
기업수	13,567기업	34,043기업(1979년)
생산액	1,040억엔	5,400억엔(1983년)

*전통적공예품산업진흥협회 홈페이지 자료⁷⁾

포춘지 선정 500대 기업의 평균수명도 40~50년 정도에 지나지 않는 등 일반적으로 기업이 50년 이상을 지속하기가 어려운 현실에도 불구하고 일본에는 창업 이래 1,000년 이상 존속하고 있는 장수기업이 7개, 500년 이상은 32개, 200년 이상은 3,113개(200년 이상 장수기업 총수는 57개국에 7,212사), 100년 이상은 약 5만 개가 존재하고 있다. 일본 장수기업의 평균 존속 기간은 197.8년, 세대수는 7.2대, 종업원수는 115.7명으로 조사되었으며 종업원 규모는 300명 미만인 중소기업이 89.4%로 대부분 차지하고 300~999명은 6.3%, 1,000명 이상은 3.7%이다.⁸⁾ 대부분의 장수기업은 에도시대(江戸時代, 1603~1867, 25.9%)와 메이지시대(明治時代, 1868~1912, 67.3%)에 창업(93.2%)되었으며 에도시대 이전(1602년)은 2.0%에 불과하다. 에도시대 이전에 창업된 대표 기업으로는 마루야하초미소(まるや八丁味噌, 1337년 창업, 미소), 다이고쿠야(大國屋, 1555년 창업, 총포 및 화약), 스미토모 금속광산(住友金屬鑛山, 1590년 창업) 등이 있다. 에도(江戸)에서 메이지(明治)시대에 창업된 대표적 기업으로는 요메이슈(養命酒, 1602년 창업, 약주), 기코만(キッコーマン, 1917년 창업, 간장), 도시바(東芝, 1875년 창업), 가오(花王, 1887년 창업, 화장품) 등을 들 수 있다.⁸⁾

장수기업들은 주로 식품, 요리, 제과, 주류 등 식생활과 의류, 의약, 화장품, 그릇, 문방구 등 일상생활과 밀접한 관련이 있는 생활 밀착형 기업, 고유기술로 소재·부품을 생산하는 기업, 다도와 서도, 화도 등 전통문화와 밀접한 제품을 생산하는 기업, 여관과 같이 가족단위로 영위할 수 있는 패밀리형 기업 등 네 가지로 분류되며 다양한 분야에서 일본의 문화를 선도하고 있다.

예를 들면, 일본의 대표적인 음식인 스시(寿司)와 소바(蕎麦)는 지금도 일본인의 생활 깊숙이 자리잡은 대표적인 전통요리이고 에키벤(驛弁)은 여행시 필수적으로 구입하는 도시락이다. 와가시(和菓子)와 지자케(地酒)는 각 지방 고유의 과자와 술로서 관광객 및 선물용으로 인기를 끌고 있다. 기모노(着物)는 결혼식, 장례식, 명절, 대학 졸업파티 등 행사시에는 빠짐없이 입는 전통의상으로 자리 잡고 있다. 천연식물에서 전통적인 비법으로부터 용각산은 진해거담제로 개발 상품화하고, 시세이도 화장품은 일본의 美를 대표하는 브랜드로 군림하고, 노리타케 식기는 전 세계의 가정, 호텔, 레스토랑에서 애용되는 고품격과 전통을 자랑하는 식기 브랜드로 유명하다.

장수기업은 식품, 요리, 제과, 주류 등 식생활과 의류, 의약, 화장품, 그릇, 문방구 등 일상생활은 물론 건축, 여관에 이르기까지 다양한 분야에서 일본의 전통문화를 선도하고 있다. 에키벤(驛弁)은 일본의 독특한 식문화로 기차역이나 차내에서 판매하는 도시락으로 그 지방의 자연환경, 역사 등 많은 문화가 담겨 있고, 온천여관은 여행시 필수코스로서 자리 잡고 있으며 문화재 및 사찰의 건축 복원 등의 분야에서도 세계 최고기술을 자랑하고 있다. 일본의 장수기업들은 전통적으로 계승된 소재와 기술에 첨단 과학기술을 융합하고 현대의 트렌드에 적합한 첨단소재와 부품을 개발하여 세계시장을 지배하고 있을 뿐만 아니라 고용안정과 일본의 문화형성에도 선도적 역할을 담당하고 있다.⁸⁾ 이들 장수기업들이 달러당 엔화가 80엔까지 떨어지는 위기 상황을 견디어 낸 데 이어 1990년대 장기불황에서 탈출할 수 있었던 주된 요인은 핵심 부품·소재 기술에서 경쟁력을 확보한 강소기업이 중추적 역할이 있었다. 특히, 일본의 장수기업은 고유기술로 개발한 첨단부품·소재로 세계시장을 지배하고 있을 뿐만 아니라 일본의 고용안정과 문화형성에도 선도적 역할을 담당하고 있다. 일본경제가 1980년대의 엔고와 1990년대의 장기불황에서 벗어나게 된 것도 소재·부품 등에서 첨단기술을 보유하고 있는 장수기업의 역할이 컸던 것으로 평가되고 있다.

또한 최근에는 쿨재팬(Cool Japan) 정책을 통하여 전통문화자원과 현대 과학기술의 융복합 또는 전통문화자원에 현대적인 감각의 디자인을 더하여 세계인이 선호하는 상품 개발 및 판매 촉진에 매진하고 있다.

2.1.2 유네스코 창의 도시 - 공예와 민속예술 분야

유네스코 창의도시와 공예와 민속예술 분야 지정의 주안점은 해당도시의 공예와 민속예술분야의 오랜 전통 유무, 공예와 민속예술의 현대적 생산기반, 공예 제작자 수와 지역 민속 예술가 수, 공예와 민속예술 관련한 직업양성 센터의 규모, 공예와 민속예술 홍보 노력(축제, 전시, 박람회, 마켓 등), 박물관, 공예품점, 지역 예술박람회 관련 인프라 규모 등이다.⁹⁾ 2017년 12월 기준으로 미국 산타페, 이집트 아스완, 일본 가나자와, 한국 이천, 중국 항저우를 비롯하여 총 37여개¹⁰⁾ 도시들이 유네스코 창의도시 공예와 민속예술 분야의 도시로 지정되었고 그 일부의 특징을 살펴보면 다음과 같다<표 3>.

표 3. 유네스코 지정 창의도시의 지정연도 및 특징

공예와 민속예술 창의도시	지정연도	지정도시 특징
산타페(미국)	2005	- 전통기술, 일상적 예술작업
아스완(이집트)	2005	- 공예, 보석 세공 등 문화유산
가나자와(일본)	2009	- 전통공예, 조각박물관, 수공업 교육센터
이천(한국)	2010	- 지역축제 개최
중국(항저우)	2012	- 전통공예, 전통과 현대의 융합

문화와 통상이 합류하는 다문화의 전통이 이어진 미국 산타페

산타페는 인구 7만 명 수준의 소도시이지만 인구에 비교하여 문화 사업체 수가 미국에서 가장 많은 도시로 창의산업 분야에서 연간 11억 달러(한화 1조 2천억원)의 경제적 효과를 창출하고 있으며, 전체 산타페의 노동자 6명 중 1명이 창의산업에 종사하고 있다. 세계 최대 규모인 산타페 국제민속 예술시장(SantaFe International Folk Art Market)은 2004년에 시작되었는데, 34개국에서 온 95명의 예술가들이 전시에 참여했고 175만 달러(한화 19억원)에 이르는 민속예술 작품을 판매하였다.⁹⁾

고대 파라오의 전통과 현대의 공예예술이 공존하는 이집트 아스완

누비아 예술(Nubia Art)이라고 일컫는 독특한 전통 관습과 문화를 간직한 곳으로 관광, 공업, 농경, 어업 등의 활동이 어우러지는 도시로서 최근에는 오랜 역사를 가진 점토, 카펫, 구슬 수공예 등 민속 예술이 주목 받고 있다. 아스완시는 수공예 인력 지원을 위해 다양한 방식의 기금을 조성하고 있다. 그 중에서도 사회발전기금(Social Development Fund, SDF)은 젊은이들이 주도하는 수공예 분야 소규모 프로젝트를 활성화 함으로써 실업 문제를 해결하고 일할 기회를 제공하고 있다. 아스완시는 6개 지역에 수공예 생산을 통한 빈곤퇴치 프로그램을 시범 운영하고 있다.⁹⁾

전통공예의 현대적 재해석, 내생적 발전 도모하는 일본 가나자와(Kanazawa)

45만 명이 거주하는 일본의 전통적인 민속공예 도시로 1583년 건축된 가나자와성을 중심으로 도시가 형성되었으며 가나자와만의 독특한 사무라이문화와 다양한 민속공예도 옛 모습 그대로 보존되고 있다. 금박공예, 염색기법(카가유젠), 칠기, 도자기 등 22종의 전통공예품 공방들이 가나자와성 주위에 분포하며 인구대비 전통예술 및 공예 부문 무형문화재의 숫자가 일본에서 제일 많다. 초기에는 공예분야에서 교토지방의 앞선 디자인 및 기술과 결합된 형태로 발전하였으나 후에 가나자와만의 독특한 스타일을 만들어냄으로써 지금은 교토보다도 더 우수한 제품을 생산한다고 평가받고 있다. 『혁신이 지속되지 않는다면 전통은 단지 전통으로서 남아있을 뿐이다』라는 슬로건 하에 전통자원을 연구하여 부가가치를 창출하는 방향을 찾아냄으로써 경제적으로도 긍정적인 효과를 낳았으며, 발전된 창의경제는 다시 연구개발을 지속시키는 원동력으로 작용하고 있다. 가나자와는 이런 맥락에서 문화와 산업이 잘 연계되어 있는 도시로 발전하였으며 예술작품에 담긴 전통 문화 정신은 가나자와의 산업에 혁명적인 변화를 가져다주었다. 이러한 가나자와의 탄력적인 소비시장은 공예품에 대한 가나자와 시민들의 높은 수준 뿐 아니라 기업체들의 투자로 이루어지고 있으며, 이 소비시장이 결국 창의경제의 바탕이라고 할 수 있다.⁹⁾

중국 수공업품의 요람 항저우

항저우는 중국 수공업품의 요람으로 알려져 있으며 공예와 민속예술의 긴 역사와 유서 깊은 전통을 가지고 있다. 중국 국가무형문화유산에 무려 8개의 항목이 등록되어 있다. 항저우는 전통공예 기술을 육성할 뿐만 아니라, 전통 공예품과 기술을 현대화하고 경제에도 도움이 될 수 있도록 끊임없이 노력하고 있다. 항저우는 정책적인 측면뿐 만 아니라 재정적인 측면에서 창의산업에 도움이 되는 환경 육성을 위해 장기간동안

1 전통문화, 현대과학기술의 만나, 부활을 꿈꾸다

2 환경친화적 경제 모델이 부각된 미래다

공예품을 지역 전략의 핵심에 놓는 등 공예산업 육성에 대한 확고한 의지를 보여주었다. 항저우는 공공참여 및 공공-민간 협력 시스템을 통해 연구, 교육 센터와 산업 협회의 강력한 지원을 받아 창의산업을 개선하고 있다. 또한, 중국은 유네스코 인류무형유산 목록에 난징(南京)의 윈진(云锦) 문직공예(문직, 비단 직조기술, Craftsmanship of Nanjing Yunjin brocade)와 레공예술(Regong arts, 불교회화 및 조각 총칭), 중국 전지공예(종이를 접어 가위로 무늬를 내어 부채에 오려 붙이는 것) 등 공예와 관련된 항목을 상당수 보유하고 있다. 이처럼 중국의 발달한 전통 공예기술을 기반으로 저장성 항저우시는 다양한 공예기술에 집중 투자를 하고 있다. 특히 울음이 세밀히 짠 비단, 중국양식의 접이식부채, 우산 등의 제품을 제조하는 공예기술 발전을 특화하고 있다.⁹⁾

2.2 국내현황

문화체육관광부에서 지원한 『전통문화의 효율적 육성을 위한 전문지원단체 설립방안 연구』¹¹⁾에 의하면 우리나라 전통문화산업체의 영세한 사업규모와 전근대적인 유통구조는 소득의 감소로 이어지고 이는 열악한 작업환경으로 이어져 인력양성에 어려움을 초래하고 전승기술 단절과 소비 감소로 이어지는 악순환이 지속되고 있다. 이러한 전통문화산업의 악순환 구조를 선순환 구조로 바꾸기 위한 대안으로 세계적인 트렌드에 맞춘 홍보·마케팅에 의한 국내외 소비자 증대, 국가·지역별 체계적인 지원을 통한 글로벌 사업 규모화, 다양한 판로확보 및 합리적인 유통구조를 통한 새로운 수요 창출, 기술 전승 활성화를 통한 인력의 고급·전문화, 산·학·연 기관별 육성을 통한 체계적인 인력 양성 등을 제안하고 있다.

또 다른 보고서 『공예문화 중장기 진흥정책 수립을 위한 기초연구』¹²⁾에 의하면 우리나라 전통문화산업의 약점을 소규모 영세 사업체, 소재·기술·제품 개발연구의 미비, 창장 및 제작실태 현황 파악 미비, 전통과 예술의 지나친 강조로 인한 소비자 지향 제작의 부재, 기술인력의 고령화, 공예재료 및 기술연구 부족으로 품질 저하, 영세한 생산 영역으로 제품 개발의 연구 부족 등에 있다고 지적하고 있다.

필자의 현장방문 및 경험에 의하면, 전통문화산업 또는 전통문화에 관련성이 높은 분야에 오래 종사하였거나 전통문화와 관련성이 높고 나이가 많을수록 전통문화자원의 산업적·실생활에 활용보다는 전통문화의 보존·복원, 유지·계승, 원리규명 등을 중요하게 보는 경향이 높았다. 이와 같은 현상은 우리나라 전통문화 관련 정책을 주로 문화체육관광부, 문화재청, 문화예술 관련 인문사회학자들이 주도적으로 수행하여 온 결과가 아닌가 한다.

이제부터는 전통문화자원의 산업적 측면을 더 살펴보기로 한다. 우리나라 전통문화산업은 구한말 격변기, 일제 강점기, 6.25전쟁, 그리고 급격한 산업화와 도시화 과정에서 심각한 단절의 아픔을 겪었다. 자료¹¹⁾에 의하면, 현재의 전통공예산업의 87.6%, 전통의류산업의 83.8%가 1980년대에 설립되었고, 전통식품산업의 82.2%, 전통건축산업의 82.0%가 1990년대 이후에 설립되었다. 따라서 수백 년 동안 이어온 전통 소재와 기술을 바탕으로 전통 문화산업을 지속적으로 계승·발전해온 유럽(프랑스, 이탈리아, 독일, 영국 등), 일본, 중국, 터키 등과 달리 전통의 맥이 극심하게 단절된 우리나라 전통문화산업을 획기적으로 발전시키기 위해서는 선진국과 차별화된 전략이 필요하다. 전통문화가 계승·유지되면서 당시의 사회환경 속에서 꾸준히 발전해온 문화 선진국에서는 주로 판매를 위한 전략으로 접근한다면 우리나라에서는 전통문화산업의 가치사슬에서 가장 높은 비중(49.7~56.1%)을 차지하는 생산·제작 부문을 강화하여 전통문화산업의 생태계를 활성화하여야 한다. 다시 말하면, 전통문화상품의 품질과 밀접한 관련이 있는 제품의 생산·제작에 사용되는 원료 가공 및 소재·공정기술을 강화하여 제품의 기초를 튼튼하게 한 다음, 나아가서 판매·유통, 상품화 단계에서 현대적 감각에 맞는 예술과 디자인을 적용하여 소비자가 원하는 가성비 높은 상품을 만들 필요성이 있다.

우리나라 전통문화산업의 총 시장 규모는 2010년 기준으로 25.1조원, 종사자는 285,375명, 종업원 1인당 매출규모는 8천8백만원 정도로 추정하고 있다(표 4 참조).¹³⁾

표 4. 우리나라 전통문화산업(전통공예·전통의류·전통식품·전통건축 산업) 현황

구분	전통공예	전통의류	전통식품	전통건축	합계
모집단수(개)	8,059	6,782	8,950	5,763	29,554
종사자(명)	43,935	68,737	107,245	65,458	285,375
시장규모 (백만원)	2,688,183	5,118,705	9,639,015	7,661,854	25,107,757
1인당 매출 (백만원)	61	74	90	117	88

*전통문화산업 실태조사 및 종합육성계획 수립을 위한 기초연구¹³⁾

우리나라 전통문화산업을 전통공예, 전통의류, 전통식품, 전통건축 산업으로 분류하고 이들 현황을 차례대로 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1 전통공예산업

2011년도 국내 전통공예 분야 매출규모는 약 9천2백억원에 이르는 것으로 추정되고 있는데 이는 2007년 매출규모인 8천6백억원보다 약 6백억원 정도 상승되었다. 공예 품목 중 도자공예가 46.4%로 가장 높은 비중을 차지하고 목공예 21.4%, 섬유공예 9.7%, 금속공예 8.7% 순이다. 현재 운영 중인 공방(또는 업체)의 유형을 나누면 전승공예가 43.0%로 가장 높은 비율을 차지한다. 다른 방법으로 공예를 분류해보면, 현대공예는 40.7%, 공예산업은 19.8%, 취미공예는 16.8% 순이다. 우리나라 공예의 대부분을 차지하는 전승공예, 현대공예, 취미공예는 예술을 지향한다고 볼 수 있으며, 일상생활과 산업에 활용될 수 있는 제품을 생산하는 공예산업은 19.8%로 매우 낮은 비율을 차지하고 있다. 공예업체의 사업형태는 개인사업체(1,379개, 90.6%), 법인(53개, 3.5%), 기타(90개, 5.9%) 순으로, 개인 사업체가 90.6%로 대부분을 차지하며, 법인은 3.5%에 불과한 실정이다. 공예업체의 인력 분포는 1인 기업이 46.5%로 절반가량을 차지하고, 2인 25.8%, 3~4인 16.0%, 5인 이상 11.7% 순이며, 평균 직원 수는 2.84명에 불과하다. 한편, 우리나라 공예업체의 평균 운영 기간은 약 18년이며, 전체의 87.6%에 이르는 업체들이 1980년 이후 창업한 것으로 나타났다. 사업시작 시점이 1980년대 이전 62개사(14.4%), 1981~1990년 102개(18.4%), 1991~1999년 151개(30.2%), 2000~2005년 126개(25.26%), 2006년 이후 59개(11.8%)로 구성되어 있으며, 전체 공예산업체의 85.6%가 1980년 이후 창업되었다. 소재별 매출 규모는 도자공예가 415억원(45.0%)으로 가장 높게 나타났고, 목공예 135억(14.6%), 금속공예 106억(11.5%), 섬유공예 74억(8.0%), 칠공예

66억(7.2%), 기타 48억(5.2%), 종이공예 46억(5.0%), 석공예 18억(2.0%), 가죽공예 7.6억(0.8%), 유리공예 6.5억(0.7%) 순이다.^{12)~14)}

표 5. 공예품 지역별·소재별 매출 현황 (단위: 백만원)

	금속공예	도자공예	목공예	철공예	석공예	유리공예	섬유공예	종이공예	가죽공예	기타	전체
전체	105,769	415,010	134,815	66,606	18,278	6,485	73,961	46,331	7,559	48,445	923,259
서울/수도권	69,002	223,603	63,986	61,441	6,706	5,447	56,623	20,734	6,202	31,106	544,850
강원/중부권	2,623	26,327	15,115	382	5,611	283	2,418	6,229	256	4,687	63,931
호남/제주권	17,385	66,353	28,601	2,663	5,008	451	6,226	7,629	472	7,545	142,333
대구/경북권	9,542	21,369	14,711	-	339	186	3,743	6,484	295	2,475	59,144
부산/경남권	7,217	77,357	12,402	2,120	615	118	4,952	5,254	335	2,631	113,002

*공예산업 실태조사(문화체육관광부(2011)¹⁴⁾

2.2.2 전통의류산업

국내 전통의류산업 시장 규모는 2010년 기준으로 5.1조원, 종사자수는 68,737명이며 1인당 매출은 7천4백만원에 상당한다. 세부 업종별로는 섬유복식·제품 도소매 임대업과 섬유제품·염색가공업이 종사자 수나 시장규모에서 가장 앞서 있다. 전통의류산업체의 사업시작 시점은 1980년대 이전이 81개(16.2%), 1981~1990년 103개(20.6%), 1991~1999년 161개(32.2%), 2000~2005년 94개(18.8%), 2006년 이후가 61개(12.2%)로 전체 전통의류 산업체의 83.5%가 1980년 이후에 설립되었다. 현재 운영 중인 전통의류 산업체 유형은 개인사업체가 75.8%, 법인사업체 21.6%로 기업형 보다는 개인이 운영하는 가내수공업과 개인상점 형태가 대부분을 차지하는 등 영세한 것으로 나타났다.¹³⁾

2.2.3 전통식품산업

국내 전통식품산업 시장규모는 2010년 기준으로 9.6조원, 종사자수는 10만7천명, 1인당 매출은 90백만원 정도로 추정하고 있다. 세부업종별로는 전통식품 도소매업과 식재료 가공·저장 처리업 분야가 종사자 수나 시장규모 면에서 가장 앞선 것으로 나타났다. 분야별 매출규모(2004년 기준)는 장류가 7,204억원으로 가

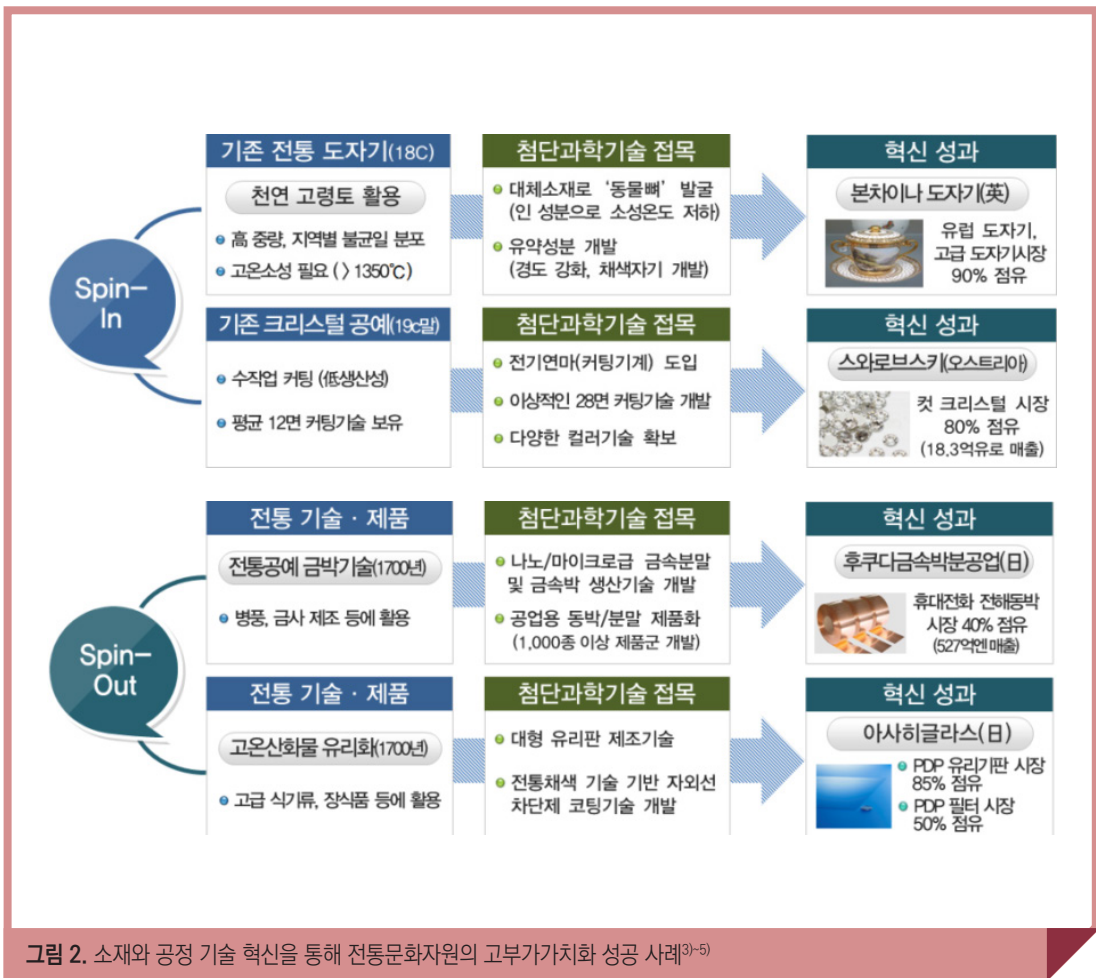
장 높고 김치류(6,643억), 민속주류(6,137억), 차류(3,843억), 두부류(3,128억), 한과(677억), 발효음료(407억), 목류(307억) 순으로 발효식품 매출이 전체 매출의 71.9%로 높은 비중을 차지하고 있다. 우리나라 전통식품산업체의 설립연도는 1989년 이전 89개사(17.8%), 1990~1999년 152사(30.4%), 2000~2005년 157사(31.48%), 2006년 이후 102사(20.4%)로 전체 업체의 82.2%가 1990년대 이후에 설립되었으며 개인사업체가 86.2%, 법인사업체가 8.6%로 개인사업체 비율이 압도적으로 높고 매출액 5억원 미만 업체들의 매출 합이 전체 전통식품산업 매출액(2009년)의 71.6% 차지하고 있다. 한편 재래식 생산업체가 41.9%(949개), 현대식 가공업체가 56.9%(1,105개)로 생산방식의 비율은 현대식이 재래식보다 약간 높게 나타났다. 재래식 생산의 경우 가내수공업 형태가 81.2%(664개), 대량 생산이 18.3%(150개)로 가내수공업이 대부분을 차지하고 있다. 또한 생산 형태는 자체 생산이 94.2%로 대부분을 차지하고 주문자상표 부착 생산(2.6%)이나 계약 제조(1.6%)는 극히 저조하게 나타났으며 종업원수 10인 이하의 업체가 전체의 74.3%를 차지하고 10~49인 업체가 22.1%, 50인 이상이 2.7%를 차지하고 있다.¹³⁾

2.2.4 전통건축산업

우리나라 전통건축산업의 시장규모는 2010년 기준으로 7.66조원, 종사자수는 6만 5천명, 1인당 매출은 1억1천7백만 원으로 전통문화산업 각 분야(의류·식품·건축·공예) 중 1인당 매출액이 가장 크고, 세부업종별로는 건축공정별 공공사업이 종사자 수나 시장규모에서 가장 앞선다. 전통건축산업체의 사업 시작 시점은 1989년 이전 70개사(14.0%), 1990~1999년 166사(33.2%), 2000~2005년 171사(34.2%), 2006년 이후 73사(14.6%)로서 전체 업체의 82% 이상이 1990년 이후에 설립되었다. 전통건축산업체는 문화재 관련 기업, 현대건축설계사무소, 대목장 중심 업체 등으로 분류되는데, 문화재 수리업체는 문화재 보수공사를 통해 축적된 시공기술을 바탕으로 전통문화산업을 이끌고 있으나 현대화된 시공기술 축적과 기술개발이 미흡하여 산업화 및 생활화가 미흡하고, 현대 건설업체는 현대 건설의 산업적 구조와 시스템의 이해를 바탕으로 전통건축에 현대적 요구를 적극 수용함으로써 전통건축의 산업화에 기여하고 있다. 또한, 소수의 무형문화재 장인을 제외한 대부분의 장인들은 현대 건설업체의 하도급을 받아 전통건축에 참여하는 실정으로 현대화된 전통건축산업을 이끌어 가는데 한계가 있다.¹³⁾

2.3 성공사례

전통문화자원 또는 기술에 현대과학기술을 접목하여 전통문화산업을 혁신한 사례(spin-in), 타 산업분야에 전통소재·기술을 적용 또는 활용하여 전통기반 신산업을 창출(spin-out)한 대표 사례는 아래 <그림 2>와 같다.



① 전통문화, 현대과학기술 접목한다. 브랜딩을 포함한다.

② 융합연구로 이어져 태생기업이 대기업으로 변신한다.

2.3 국외 성공사례

2.3.1 spin-in: 전통문화자원 또는 제품에 현대과학기술을 적용한 사례

유럽도자기

1709년 독일 작센공화국 마이센의 뵘처에 의해 개발된 유럽의 경질자기 제조기술은 1719년에 오스트리아로, 1723년 스웨덴, 1735년 이탈리아, 1738년 프랑스, 1747년 영국, 1771년 덴마크, 1809년 핀란드, 1839년 헝가리로 확산됨으로써 그 동안 중국과 일본 도자기 수입에 전적으로 의존하던 유럽의 경질자기 시대가 활짝 열리는 계기가 되었다.¹⁵⁾ 한편 도자기 원료인 카오리나이트(고령토 또는 고령석)가 부족한 영국에서는 1748년 토마스 프라이에 의해 동물 뼈를 태워 아교질과 지방질을 제거한 흰색 골회를 도자기 원료로 사용한 본 차이나가 개발되었다. 1789~93년 사이에 조지아 스포드에 의해 골회에 차이나 스톤과 고령토를 일정 비율 첨가하는 기술 개량이 이루어짐으로서 본차이나는 세계적인 명품 도자기의 대명사가 되었으며 유럽 고급 도자기 시장의 90%를 점유하게 되었다.

스와로브스키 보석공예

선진국 여성 5명 중 적어도 1명이 가지고 있는 보석 중 하나가 바로 스와로브스키 크리스탈이다. 스와로브스키는 1895년 다니엘 스와로브스키(1862~1956)가 오스트리아 티롤주의 와튼즈에 설립한 크리스탈 제조 및 판매 회사로 작은 장식품부터 패션 제품에 이르기까지 10만 개 이상의 제품을 생산하여 세계 크리스탈 업계를 선도하는 기업으로 성장하였다. 1895년 전기기계를 이용하여 크리스탈을 자르는 혁신적인 기계를 발명하여 기존 12면 커팅에서 28면 가공기술로 원료(규석, 탄산칼슘, 산화납)의 적절한 배합 및 크리스탈의 결정화 기술, 발색기술들을 개발하고 이들을 융합하여 無결점 크리스탈의 새로운 세계를 창출함으로써 전세계 가공 크리스탈 시장의 80% 이상을 점유하게 되었다. 전세계 170여 국가에 약 2,800개 매장을 가지고 있는 스와로브스키 크리스탈 부분의 2016년도 매출은 26억유로, 종업원수 27,000명으로 스와로브스키 전체 매출(33.6억유로)의 77%, 전체 종업원(32,000명) 수의 87.5%를 점유하고 있다.¹⁶⁾

세계 명품 브랜드

2016년 미국 경제전문지 포브스가 선정한 세계에서 가장 가치 있는 브랜드 TOP100 중에 세계 명품 브랜드 8개가 순위 100위 내에 당당히 이름을 올렸다. 짧게는 수십 년 길게는 수백 년 동안 같고 닳은 장인정신을 바탕으로 전통의 맥을 이어가면서 전통에 현대 소재와 과학기술을 접목하여 소비자들이 선호하는 우수한 품질의 상품들을 제조·판매하고 있다.¹⁷⁾ 여성이라면 적어도 하나쯤 갖고 싶어 하는 이들 명품에는 독특한 디자인과 예술성을 내포하고 있으며 남들이 쉽게 따를 수 없는 뛰어난 품질과 한정 마케팅을 통하여 아무나 쉽게 소유할 수 없는 귀한 물건이라는 이미지를 각인시킴으로서 소비자들의 구매 욕구를 촉진시킬 뿐만 아니라 고객에게 우월감을 유발시키기도 한다. 또한 이들 명품의 성공비결은 오랫동안 같고 닳은 장인정신과 기술을 바탕으로 철저한 품질관리와 전통과 현대의 융합을 통해 보다 우수한 품질을 구현하고 상품에 역사와 전통, 문화와 예술을 접목함으로써 고품격 이미지를 만들고 스토리텔링, 효과적인 VIP 마케팅 및 브랜드 관리, 고가 전략 등을 통하여 고품격 이미지와 마니아 층을 형성시킨 결과라고 할 수 있다.¹⁸⁾

표 6. 2016년도 세계의 명품 브랜드 순위 및 매출 규모¹⁷⁾

순위	브랜드명	브랜드가치 (억\$)	TOP100 순위	설립연도(주요 제품)	국가
1	루이비통 (Louis Vitton)	273	19	1854년 가방 제작으로 시작하여 핸드백, 여행가방, 가죽제품, 액세서리, 신발 등을 제조·판매	프
2	구찌 (Gucci)	120	44	1921년 가죽 제품 매장으로 시작하여 가방, 의류, 시계 등을 제조·판매	이
3	에르메스 (Hermes)	117	48	1837년 마구용품 및 안장 제작으로 시작하여 가방을 전문적으로 제조·판매	프
4	까르띠에 (Cartier)	101	58	1847년 보석 세공 공방으로 시작하여 주얼리, 손목시계, 향수, 필기구 등을 제조·판매	프
5	롤렉스 (Rolex)	88	64	1908년 설립된 스위스 명품 시계회사로 기계식 손목시계 제조·판매	스
6	코치 (Coach)	75	78	1941년 작은 가죽 경영 공방으로 시작한 미국 명품 브랜드로 가죽 제품, 신발, 옷, 기성복, 시계, 여행용 액세서리, 스카프, 선글라스, 향수, 보석 등을 제조·판매	미
7	샤넬 (Chanel)	72	80	1910년에 설립된 패션브랜드로 오트 쿠튀르, 기성복, 향수, 보석, 장신구 등을 제조·판매	프
8	프라다 (Prada)	68	97	1913년 가죽 제품으로 출발한 패션 브랜드로 여행용 가방, 가죽 액세서리, 화장품 케이스 등을 전문적으로 제조·판매	이

※ 이(이탈리아), 프(프랑스), 스(스위스), 영(영국), 미(미국)

(주)노리타케

1904년 창업한 세계 최대의 고급 도자기 및 연마제(숫돌) 전문업체로 수작업으로 섬세하게 그림을 그려 넣어 아름답게 만든 초기 도자기는 유럽으로 다량 수출되었다. 아르 데코(1910년대 중반부터 1930년대에 걸쳐 유행한 기하학적 도형을 모티브로 한 기호적 표현이나 원색에 의한 비교 표현 등의 특징을 가지는 장식)를 기조로 한 정교한 디자인의 식기는 지금도 사랑 받고 있다. 특히 올드 노리타케로 불리는 이 시기의 제품은 도자기 애호가들의 컬렉션 아이템이 되고 있으며 전후 일본에 주둔한 미군 장병들이 귀국할 때 기념품으로 많이 구입하였으며 1953년까지 판매된 프리미어 노리는 일부 애호가들에 의해 지금도 각광받고 있다. 제2차 세계 대전으로 다수의 숙련된 장인과 생산설비를 잃고 전쟁 이전과 같은 고품질의 제품을 생산할 수 없게 된 시기에는 일시적으로 『로스 차이나』라는 브랜드로 도자기를 수출하였으나 고품질의 도자기를 재생산할 수 있게 된 시기부터는 노리타케라는 브랜드를 다시 사용하게 되었다. 또한, 노리타케는 일본의 경제 발전에 따라 도자기 이외에 산업용 전자 부품, 파인 세라믹스 등의 분야에도 진출하여 2016년 기준으로 종업원수 5,089명, 총매출 1,088억엔으로 일본을 대표하는 세라믹 기업으로 성장하였다.¹⁹⁾

일본 전통주, 사케

일본의 전통주인 사케(또는 니혼슈(日本酒))는 쌀, 누룩, 물을 원료로 발효·숙성시켜 만드는 발효양조주이다. 사케는 헤이안시대(794~1185년)부터 일본의 사찰에서 만들던 소보슈(僧坊酒)로부터 변화를 거듭하여 청주라는 이름 그대로 맑은 술로 정립되었다. 사케 이전에는 탁주가 주를 이루었다. 사케에는 종류에 따라 양조알코올 등의 부가재료나 조미료가 첨가되는 경우도 있으나 쌀과 물, 누룩, 효모를 기본으로 한다는 점은 크게 다르지 않다. 쌀은 사케의 가장 기본적이고 중요한 원료로 술맛의 기본 뼈대를 잡아주는 재료다. 사케가 만들어지는 과정은 쌀의 도정, 도정된 쌀을 찍기에 넣어 고두밥(찐쌀)으로 만든 후 고두밥, 누룩, 효모를 섞고 용기에 넣어 보관한다. 누룩곰팡이에 의해 쌀의 전분이 포도당으로 바뀌면, 효모에 의해 포도당이 알코올로 바뀌는 발효과정을 거쳐 술이 된다. 모든 종류의 술을 제조하는 데는 발효과정이 필수적이기 때문에 효모는 술과 떼려야 뗄 수가 없는 존재다. 쌀이 술맛의 기본 골격을 형성한다면, 효모는 술맛의 스타일을 완성한다 해도 과언이 아니다. 같은 쌀로 술을 빚었더라도 효모의 종류가 달라지면 완전히 다른 술로 탄생하는 경우가 허다하고 특별한 효모를 사용해서 술을 빚을 경우 그 효모의 이름을 술의 이름으로 사용하기도 한다. 일본양조협회에서는 현대적 미생물학 기술을 이용하여 1906년 1호 효모를 시작으로 다양한 『협회효모』를 배양하여 사케 업체에 배급하고 있다. 협회효

모 가운데 YK35로 명명된 협회9호가 가장 널리 사용되고 있다. 그 밖에 각 지방자치단체에서도 자체적으로 효모를 개발하기도 하고 일부 양조장에서는 자신들만의 고유 효모 종을 개발하여 사용하기도 한다.²⁰⁾

이시카와현 야마나카칠기

이시카와현 야마나카 지역에 칠기가 만들어지기 시작한 것은 지금으로부터 400년 전인 16세기 후반으로 거슬러 올라간다. 400년의 역사와 전통을 가진 야마나카 칠기기술은 장인들의 눈과 손을 통해 대대로 계승되어 왔다. 초기에는 나무를 다듬기만 한 목공예품을 제조·판매하였으나 18세기 중엽 전국의 유명 옷칠 장인들을 초빙하여 스펀지비키, 슈도메누리, 고마누리 등 다양한 옷칠기법을 도입하게 되었다. 그 결과 단순한 토산품이 미술공예품으로 전환됨에 따라 야마나카칠기는 지역산업으로 발전하게 되었다. 녹로를 사용해 나무를 켜는 기술이 특징인 야마나카칠기에서 나무결의 아름다움을 돋보이게 해주는 옷칠기법 『후키우루시』은 독특한 특징 중 하나이다. 개화기(메이지 유신)에 이르러 합성수지를 소재로 한 값싸고 튼튼한 근대칠기를 도입하는 등 새로운 라이프 스타일에 맞는 식기를 개발함으로써 야마나카칠기는 전통칠기와 더불어 생산액 측면에서 일본 제일의 칠기산지로 발전하게 되었다. 야마나카 상공회는 전통기술과 현대적 디자인을 접목하여 유럽시장을 타깃으로 한 브랜드 『NUSSHA』를 만들었다. 유럽시장에 정통한 밀라노 거주 디자이너 도미타 카즈 히코(富田一彦)에 의해 디자인되고 기획·제작된 『NUSSHA Japanware』는 유럽적인 미래 생활의 정교한 에센스와 일본의 전통적인 제조의 미학이 어우러진 색다른 테이블 웨어(식탁용 식기)이다. 천을 폴리에스테르 수지와 함께 압축 성형하고 화려한 일본식 디자인과 진주 색상, 다른 소재와의 조화를 이룬 NUSSHA Japanware는 프랑스 메종오브제에서 높은 평가를 받은 이후 인테리어샵이나 박물관 선물판매점을 중심으로 판매되고 있다. 원래 해외 브랜드로 시작하였으나 일본 국내에서도 수요가 증가함에 따라 현재는 역수입 형태로 NUSSHA Japanware는 일본 국내에도 팔리게 되었다.²¹⁾

세계인의 입맛을 사로잡은 기꼬만(1961년 창업)

300년 전통의 자연 발효기술로 빚어낸 기꼬만 간장은 색이 옅어 요리 본연의 색을 유지하면서도 깊은 풍미를 느낄 수 있어 세계인이 가장 선호하는 간장 대표 브랜드 중 하나이다. 기본형은 대두, 소맥, 소금, 물을 혼합하여 6개월 이상 자연 발효한 제품으로 다양하고 깊은 맛을 느낄 수 있는 100% 양조간장이다. 다시마와 가다랑어포 엑기스를 잘 배합하여 이상적인 맛을 구현함으로써 많은 사람들이 선호하게 만든 기꼬만의 대표 브랜드 혼쯔유, 혼쯔유의 염분과 당질을 약 30% 가량 줄이고 가다랑어와 굴 다시를 더해 풍미를 향

상시킨 겐넨쯔유, 양질의 다시마를 사용하여 만든 다시다 맛 소스는 육수의 맛이 중요한 요리나 다른 재료와 혼합하여 사용하기 좋게 만들어진 소스용 간장이다. 기꼬만은 2016년도 종업원수 5,622명, 매출 4083.7억 엔, 순이익 1996.4억엔의 세계적인 식품회사로 도약하였다.²²⁾ 이밖에도 일본에는 스시의 이즈우(1830년 창업), 소바의 혼케오하리아(1465년 창업), 에키벤의 스료켄(水了軒, 1888년 창업), 제과의 도라야(1520년 창업), 청주의 사우라(1724년 창업), 여행시 필수코스인 자리 잡은 온천여관의 호시(718년 창업), 건축의 콘고구미(578년 창업), 기모노의 치소(千總, 1555년 창업), 의약의 류카쿠산(1871년 창업), 화장품의 시세이도(1872년 창업), 식기 및 도자기의 노리타케(1904년 창업) 등 본업에 충실한 많은 장수기업들이 존재한다.

2.3.2 spin-out: 타산업분야에 전통소재·기술을 적용 또는 활용 - 본업의 연장선에서 고유기술을 새로운 산업에 응용

고란사

고란사는 전통도자기 제조업체로서 꾸준히 새로운 소재와 기술을 개발하여 현대산업에 필요한 제품을 제조하고 있다. 지금으로부터 약 140년 전인 1875년에 창립하였으며 전통도자기 기술을 응용하여 1877년 일본 최초로 상업용 저압 절연애자를, 1913년 고압 절연애자를, 1972년에는 고순도 알루미늄을, 2000년에는 고순도 h-BN 복합체를 개발하는 등 지속적으로 소재와 공정기술 개발하고 혁신을 통하여 발전해 오고 있다. 특히 절연용 애자 원료인 흙에 자체 개발한 고순도 알루미늄을 첨가하여 애자의 내화도 및 절연특성을 향상시켰다. 현재의 고란사 매출을 살펴보면 도자기 분야가 전체 매출의 35%, 세라믹 절연재 분야 50%, BN 및 Si₃N₄ 파인세라믹 분야가 15%를 차지하는 등 고란사 전체 매출에서 전통도자기가 차지하는 비율이 점차 감소하고 산업용 세라믹의 매출이 지속적으로 증가되고 있다.²³⁾

후쿠다금속박분공업(주)(1700년 창업)

지금으로부터 300년 전인 1700년부터 교토에서 금박(箔)과 금분을 제조하는 회사로 창업하여 금·은 박막과 분말 제조의 외길을 걸어온 기업 승계기업으로 공업용 비철금속 박과 분말을 전문적으로 제조해 온 장수기업이다. 단순히 금박을 전통적인 방법으로 생산하는 것에 머물지 않고 에도시대부터 전통적인 병풍, 금칠회화, 호화로운 사찰 불단 제조에 사용되던 금박의 오랜 세월을 걸친 제조과정에서 습득한 기술과 노하우를 바탕으로 메이지시대부터는 금·은·동·니켈과 같은 비철금속의 산업화에 주력하여 왔다. 그 결과 에너지/전자, 생활, 자동차, 산업자재 등에 널리 사용되는 비철분말(직경 0.25~24 μ m)과 비철박막(두께 1.5~300 μ m)을 전문적으로 생산하는 강소기업으로 발전하였다. 특히 지속적인 연구를 통해 현대식 압연법, 전해법, 환원법,

가스 및 고압 물분사법 등과 같은 새로운 기술을 개발하여 다양한 조성의 비철 분말 및 박막 제조에 적용함으로써 2016년도 종업원수 545명, 총매출 473.1억엔, 경상이익 25.9억엔, 1천여 종에 달하는 제품군을 갖춘 일본 대표 중견기업으로 성장하였다.²⁴⁾

구레다케(1902년 창업)

한반도에서 전래된 떡 기술을 활용하여 글자의 대소는 물론 각 획을 붓과 동일하게 쓸 수 있는 “붓펜”을 개발한 데 이어 골프장의 눈을 빨리 제거할 수 있는 용설제, 캄캄한 산길 도로의 길안내를 하는 자동발광표지 등 고유기술을 활용한 다양한 신제품들을 개발하여 왔다. 6세기경 한반도에서 불교와 함께 전래된 떡과 붓의 제조기술, 금박기술, 건축기술 등은 일본인의 정신구조 및 기술 발달에 커다란 영향을 미쳤는데 이들 기술의 변화과정은 일본의 장수기업이 본업의 연장선상에서 기술 진보를 도모하고 있다는 사실을 알 수 있다. 붓펜, 용설제, 자동발광표지는 모두 다 떡의 제조기술을 기초로 한 카본기술이 응용된 제품이다.⁶⁾

유신주조(1854년 창업)

오랜 세월동안 갈고 닦은 청주의 양조방법과 아주 유사한 제조법으로 세계 최초로 수분유지 효과가 탁월한 아토피 피부염 치료제를 개발하는 등 최첨단 효소와 미생물, 바이오 테크놀로지를 이용하여 세계 최고 수준의 제품을 개발하고 있다. 유신주조의 아토피 피부염 치료제는 청주와 동일하게 쌀을 발효시킨 엑기스가 원료로 사용되는데 고두밥(찜쌀)과 누룩균 등을 섞어 저장탱크에 넣어 발효시켜 제조한다. 음식물 제조에 사용하여 왔던 발효기술을 이용하여 유전자 변형 등과 같은 부작용이 없는 총 36종의 라이스 파워 엑기스를 개발하여 이 중 9종을 실용화하였다. 특히 제조과정에서 첨가되는 누룩균, 효모, 유산균 등 미생물의 종류와 양, 성숙기간 등을 조절하여 다양한 특징을 가지는 제품을 탄생시켰다.⁶⁾

하야시바라(1883년 창업)

발효기술을 이용하여 감자와 고구마 등의 전분을 맥아로 분해하여 물엿(감미료)을 제조하던 회사였으나 발효라는 본업기술을 발전시켜 꿈의 당질이라고 불리는 트레할로스(Trehalose)를 개발하였다. 효모균에 대한 20년 이상 장기 연구를 통하여 감자나 옥수수의 전분으로부터 트레할로스를 대량 추출하는 기술을 개발하여 트레할로스 가격을 1kg당 종전의 1/100 수준인 300엔까지 낮춤으로써 주먹밥, 컵라면, 각종 냉동식품, 과자류, 요구르트, 주스, 캔커피 등의 식음료 제품의 원재료로 사용되던 설탕을 대체할 수 있게 되었다. 트레

할로스를 천연 식용재료인 감자나 옥수수로부터 추출하기 때문에 안전성에도 문제가 없으며 아프리카 깔따구(*Polypedilum Vanderplanki*)가 가지고 있는 트레할로스의 특성도 그대로 유지시킴으로서 건조와 냉동에 강하고 보존성이 뛰어나 냉동식품이나 컵라면 등에 주로 사용되고 있다. 또한 트레할로스는 수술 후 발생하기 쉬운 장기조직의 유착 후유증 방지도 이용되고 있을 뿐만 아니라 물을 끼얹는 것만으로 혈액으로 사용할 수 있는 건조혈액 개발로 이어져 장기간 혈액의 보존과 운반의 문제도 해결하였다.⁶⁾

2.4 국내 성공사례

2.4.1 spin-in: 전통문화자원 또는 제품에 현대과학기술을 적용한 사례

김치

김치는 한국의 대표 저장 발효식품이다. 김치의 종류는 다양하지만 오늘날 우리가 주로 먹는 매운 김치에는 고춧가루와 젓갈 등의 조미료가 첨가되고 부재료로 갓, 마늘, 생강, 파 등이 첨가되는데 지방에 따라 제조과정이나 종류가 조금씩 다르다. 김치는 전통적으로 각 가정에서 담가 먹었으나 최근에는 김치의 맛과 안정성을 향상시키기 위해 종균을 개발하여 사용하는 경향이 증가되고 있다. 대상 종가집에서는 내선성 류코노스톡 메센테로이드라는 종균을 개발하여 김치에 사용해 왔으나 최근에는 기존 류코노스톡 메센테로이드와 아종까지는 동일하나 유전자 배열이 상이한 뛰어난 풍미와 맛의 보존·저장 기능이 우수한 김치유산균인 류코노스톡 메센테로이데스 종가집김치아이(*Leuconostoc mesenteroides* subsp. *jonggajibkimchii*) 종균을 새롭게 개발하여 2017년도부터 종가집김치에서 생산하는 김치에 사용하고 있다. 또한 CJ 하선정김치에서는 탄산감을 개선시켜 김치의 맛을 향상시킨 류코노스톡 시트리움(*Leuconostoc citreum* CJGN34) 균주와 김치에 추가하는 건강 기능성을 개선한 프로바이오틱 유산균, 아토피 치료와 피부면역개선 효과를 가진 락토바실러스 플란타룸(*Lactobacillus plantarum* CJLP-133)을 김치종균으로 사용하고 있다. 미생물의 유전체 연구를 통하여 전통적인 김치보다 맛, 기능, 신선도 및 보존성 등이 우수한 김치들이 개발되어 우리 식탁에 오르고 있다는 사실은 고무적이다. 우리나라 전통이 보다 계승·발전되기 위해선 현대과학기술이 전통 속으로 유입되어 전통의 장점은 유지하고, 전통의 단점은 보완된 일반 대중들이 선호하는 상품들이 많이 나올 필요성이 있다.

전통 유기그릇

원료인 구리와 주석을 1200℃ 이상의 온도에서 녹여 기름이 발라진 물판(주철물드)에 용탕을 부어 주입한 후 톱밥으로 덮어 식힌 바둑(바둑돌 모양의 둥근 금속 덩어리)을 제조한다. 이렇게 제조된 바둑을 불에 달군 망치로 두들겨 얇은 판재를 만든 후 치구를 이용하여 수작업으로 판재를 그릇 형태로 성형한 다음 인성을 부여하기 위해 고온으로 가열하여 급냉처리 한다. 마지막으로 표면연마 및 마무리 작업을 거쳐 전통 유기그릇을 완성한다. 하지만 최근에는 터키에서 도입한 기술인 “물이 채워진 물판에 용탕을 주입”하여 급냉하는 방식으로 바둑을 제조한다. 불에 달군 바둑을 현대식 압연기를 이용하여 얇은 판재로 제조하고 프레스 성형기를 이용하여 판재를 그릇 형태로 만든 다음 CNC 기계를 이용하여 표면 연마 및 마무리를 하는 등 전통유기 제조기술에 현대적인 기술과 다양한 형상의 현대적 디자인들이 접목되고 있다. 현재 수십억의 매출을 달성한 국내 유기 업체의 대부분은 전통을 그대로 고수하기보다는 전통에 현대기술과 디자인을 접목하여 품질과 디자인이 우수한 제품들을 생산하고 있다. 또한 일부 스테인리스 가공업체들이 현대식 주조, 압연, 성형, 가공기술을 적용하여 가성비 높은 유기그릇을 제조하는 시도들이 등장하고 있는데 유기그릇 분야에 스테인리스 가공업체들의 등장은 전통유기업체에게는 커다란 위협이 될 것으로 예상된다<그림 3>.

성중사 범종

1954년 설립된 성중사는 국내 최고의 역사와 전통을 자랑하는 범종 전문 제작사로 세계평화의 종(1만관)을 비롯한 7000관 이상 범종 6구, 대만 불광산사종(6700관)을 비롯한 6000관급 범종 4구, 서울 보신각종(5300관)을 비롯한 5000관 규모 범종 11구, 강릉 시민의 종(3000관)을 비롯한 3000관 규모 범종 11구, 조계사종(2000관)을 비롯한 2000관 규모 범종 25구, 싱가포르 복해선원종(1000관)을 비롯한 1000관 규모 범종 140여 구 등 총 8000여구에 달하는 범종을 제작하여 국내외 주요 사찰과 암자, 지방자치단체 등에 납품한 국내 최다 실적을 보유하고 있는 회사이다. 2002년 충북 진천으로 공장을 확장 이전함으로써, 6000평 부지에 50톤까지 주조할 수 있는 최신 용해설비와 주조시설을 갖추게 된 성중사는 그 규모와 설비에 있어 세계 최대를 자랑하고 있다. 특히 성중사는 세계에서 유일하게 3가지 주조공법을 모두 사용하여 범종을 제작하는 회사로 목적 및 용도에 따라 전통주조법인 밀랍주조법과 현대식 주조법인 사형주조법과 펌세트 주조법을 이용하여 범종을 제작하고 있다.²⁵⁾ 특히 성중사는 10여년의 독자적인 연구 끝에 완성된 전매특허 밀랍주조공법은 전통주조기법으로 범종 표면의 문양이 섬세할 뿐만 아니라 소리까지도 우수한 최고의 범종제작기법이다<그림 3>.

1 전통문화, 현대과학기술을 만나 부활을 꿈꾸다

2 융합연구로 이제 태양방이 뜨겁고 뜨겁다



그림 3. 전통 유기그릇(좌) 및 성종사 범종 문양(우)

2.4.2 spin-out: 타 산업분야에 전통소재·기술을 적용 또는 활용 - 본업의 연장선에서 고기술을 새로운 산업에 응용

김치 냉장고 덩채

우리 조상들은 전통적으로 가을에 만든 김치를 땅속에 묻어 보관하여 왔다. 이는 땅속의 온도가 일정해 김치의 신선도를 유지하고 발효하는데 적합하기 때문이다. 실제로 11월 하순 우리나라의 땅속 온도 섭씨 5도와 한겨울의 땅 속 온도 영하 1도는 김치 맛을 최상으로 만들어 주는 온도로 알려져 있다. 그러나 도시화가 급속히 진행되면서 김치를 땅에 묻어 보관하는 것은 사실상 불가능하게 되었다. “프랑스에는 와인냉장고가 있고 일본에는 생선냉장고가 있는데 왜 우리나라에는 김치를 위한 냉장고가 없을까”라는 의문에서 탄생한 김치냉장고 ‘덩채’는 등장과 함께 순식간에 주부들의 마음을 사로잡았다. 당시 중소기업에 불과했던 만도기계는 1993년 김치연구소를 설립하고 3년간 100만 포기의 김치를 담그며 수많은 실험을 하는 등 각고의 노력 끝에 1995년 11월 드디어 “덩채”라는 그 동안 듣도 보도 못한 김치냉장고를 선보임으로써 국내 가전업계의 새로운 이정표를 마련하였다. 덩채의 폭발적인 인기가 이어지자 삼성전자와 LG전자 등 굴지의 가전업체들도 김치냉장고 시장에 가세하면서 디자인은 물론 기술도 크게 개선되어 현재는 과일·야채·육류 등도 얼지 않은 신선한 상태로 오랫동안 보관이 가능하게 되었다. 김치의 원래 어원은 중국에서 채소 절임음식을 뜻하는 “저(菹)”가 우리나라에서 한자어로 “침채(沈菜)”라 번역되고 “침채(沈菜)”가 팀채-덩채-짐채-김채-김치로 변한 것으로 알려져 있다. 김치냉장고를 최초로 만들어 대중화시킨 만도는 전통 김장독 원리를 이용하여 만든 김치 냉장고 이름을 김치의 역사적 어원인 “덩채”라고 작명하였다. 김치냉장고 이름을 덩채로 스토리텔링한 만도는 당시 우리나라를 대표하는 가전 3사를 누르고 공전의 히트작을 만드는 데 성공하였다.

2.5 과학기술을 통한 한국전통문화프리미엄 창출 전략

2.5.1. 추진 배경

전통문화자원은 우리 생활양식(衣·食·住)의 기반이자 세계적 공감대 형성과 독점적 신시장 및 새로운 부가가치를 창출할 수 있는 잠재력을 보유하고 있다. 그러나 전통문화산업체의 영세성·저생산성·저품질, 현대 생활과 소비 환경에 적합한 제품화 미흡, 산업적 활용분야 제한(관광·콘텐츠 위주) 등으로 인하여 대중화와 산업화의 한계에 직면하고 있다. 전통문화산업을 획기적으로 발전시키기 위해서는 소재·기술·제품의 개량·개선 및 혁신이 요구되나 전통문화산업체 자체의 기술 역량 및 자생적 산업 생태계 구축이 미흡하여 스스로 발전하기 곤란한 실정이다. 전통문화자원을 산업화하고 그 가치를 일상생활에서 향유하기 위해서는 전통문화자원과 현대과학기술의 융합을 통한 창조적 계승·발전이 필요한 시점이다. 전통문화 원형의 보존·복원 차원을 넘어 산업적 가치를 재발견하고 새로운 아이디어와 첨단과학기술 접목을 통한 현대적 재해석 및 재창조가 필요하며(그림 4) 이를 통해 전통문화산업체가 직면한 기술적 한계를 극복하는 한편, 인간·환경·생활 친화적인 새로운 산업적 수요와 시장 창출이 필요한 시점이다.

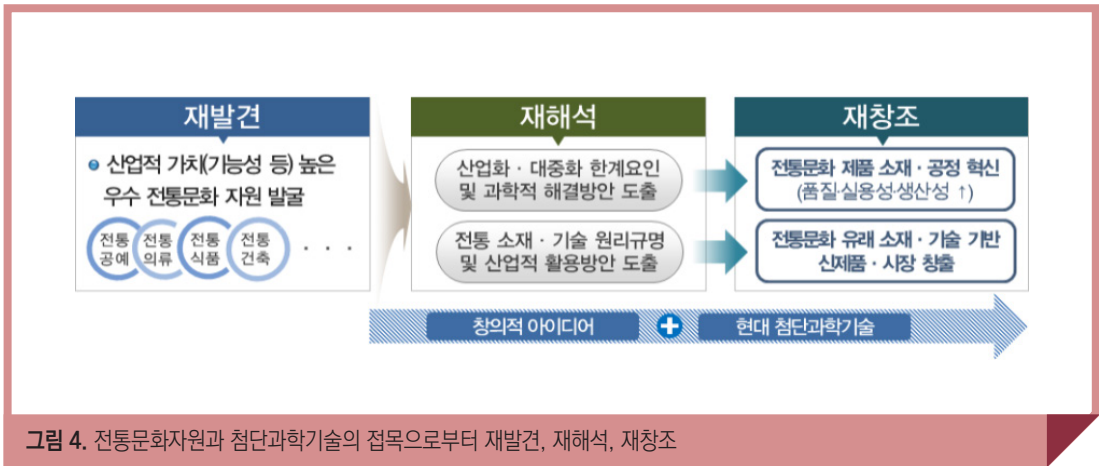


그림 4. 전통문화자원과 첨단과학기술의 접목으로부터 재발견, 재해석, 재창조

전통문화산업의 가치사슬(생산 활동에서 부가가치가 창출되는 과정)은 5단계 즉, 소재·가공, 제조·생산, 기획·마케팅, 유통·서비스, 소비 항목으로 분류된다. 전통문화산업의 분야별 가치사슬 분석에 따르면 분야

에 따라 다소간이 차이는 있었으나 모든 분야에서 생산과 제작이 가장 높은 비율을 차지하고, 건축을 제외한 나머지 세 분야에서 판매·유통이 다음 순위를 점하고, 기획·마케팅, 서비스 순이다. 지금까지는 대체로 전통문화산업의 발전을 위해서 마케팅, 유통·서비스에 많은 노력을 기울여 왔다. 근본적으로 전통문화산업을 발전시키기 위해서는 가치사슬에서 가장 중요한 부분을 차지하는 생산·제작 분야와 생산·제작에 필수적인 소재·가공 분야를 강화하여 기존 전통문화산업의 가치를 거양한다면 전통문화산업의 획기적인 발전을 도모할 수 있다고 생각된다. <그림 5> 모든 산업의 주춧돌 역할을 하는 부품소재 기술 진보 없이 우리나라 전통문화산업의 획기적인 발전을 기대하기 곤란하다.



그림 5. 전통문화산업의 가치사슬과 부가가치 창출과정

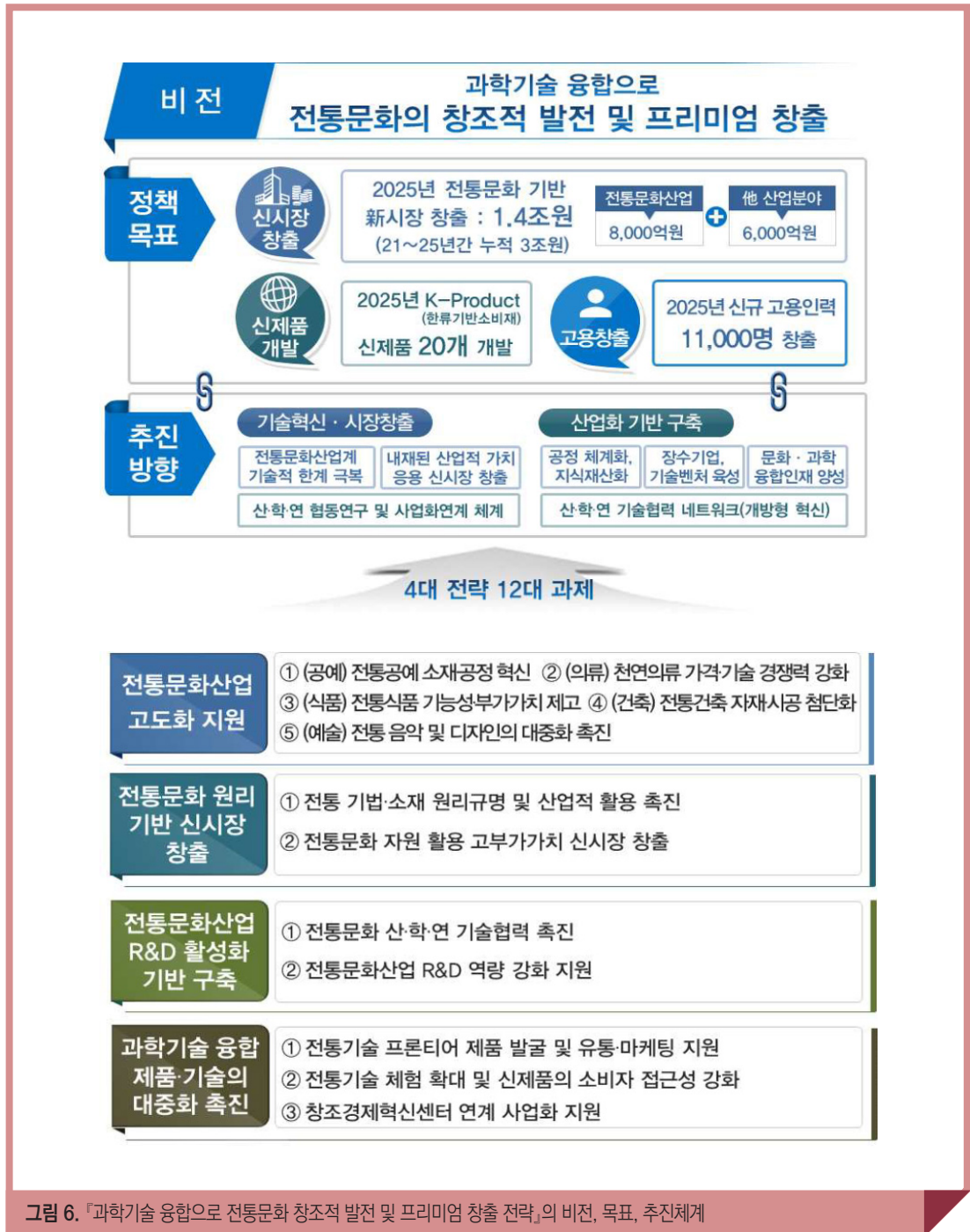


그림 6. 『과학기술 융합으로 전통문화 창조적 발전 및 프리미엄 창출 전략』의 비전, 목표, 추진체계

① 전통문화, 현대과학기술에 만나 프리미엄을 만든다.

② 융합인재 양성을 통해 창의력이 넘치는 인재가 나온다.

2.5.2 비전 및 추진전략

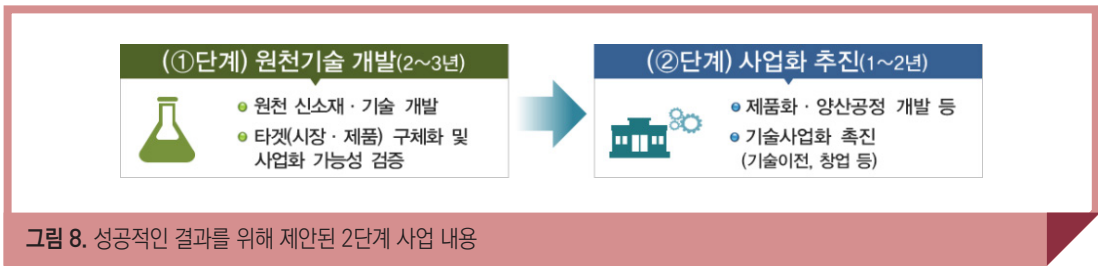
전통문화산업의 생태계를 활성화시키고 전통문화자원과 과학기술 융합으로부터 새로운 부가가치와 고용을 창출하기 위해서는 먼저 국가가 해야 할 일, 국가 또는 개인(공무원, 연구자, 전통문화산업체 종사자 등)이 하고 싶은 일, 마지막으로 국가 또는 개인이 할 수 있는 일들을 명확히 정의·분류하고 이를 바탕으로 단순히 문화 선진국의 정책을 추종하기보다는 우리나라 실정에 적합한 정책을 수립할 필요성이 있다.

〈그림 6〉은 전통문화산업 발전을 위한 4대 전략분야와 12대과제로부터 『과학기술 융합으로 전통문화 창조적 발전 및 프리미엄 창출 전략』의 비전, 목표, 추진체계를 나타낸 것으로 신시장 창출, 신제품 개발 및 고용창출 등의 정책 목표와 기술혁신·시장창출과 산업기반구축 등의 추진방향을 포함한다. 『과학기술 융합으로 전통문화 창조적 발전 및 프리미엄 창출』은 범부처 협력을 통하여 이루고자 하는 비전으로 각 부처의 중점분야 및 역할은 아래 〈그림 7〉과 같다.



『과학기술 융합으로 전통문화 창조적 발전 및 프리미엄 창출 전략』의 성공적인 결과를 위하여 다음과 같은 2단계 사업을 제안하였다(그림 8). 전통 소재·기술의 기술적 한계를 극복하고 프리미엄 신제품·시장 창출이 가능한 파급력이 높은 원천 신소재·기술 및 다양한 산업과 제품에 확대 적용 가능한 플랫폼형 기술 개발을

지향하며 1단계 사업(2~3년)에서는 원천기술을 개발하고 타겟(시장·제품) 구체화 및 사업화 가능성을 검증하고 2단계 사업(1~2년)에서는 제품화 및 양상공정 개발을 통하여 기술 사업화(기술이전, 창업 등)를 촉진한다. 전통 소재·기술 노하우를 가진 장인, 제조·생산기업, 대학·출연연, 사업화 지원기관 등 융합·협동연구체계 구축을 통하여 산학연 협동연구를 지원하고, 신제품·기술에 문화적 가치를 입힐 수 있도록 문화·예술·인문·역사학계 전문가 등이 참여하는 스토리텔링 연구를 병행 추진하도록 한다.



전통문화고도화로부터 전통소재·기술 기반 신시장 창출을 위한 중점적 지원 분야를 살펴보면 <그림 9>와 같다.

- 1) 기존 제품의 기술적 한계 극복을 통한 새로운 수요 창출(생활용품 등) 분야
- 2) 산업계의 기술역량 고도화가 가능한 전통문화산업 중 과학기술 접목으로 기술혁신·시장창출 효과가 높은 분야
- 3) 민간 자체 개발이 어렵고 기술개발 위험·효과가 큰 분야
- 4) 전통문화자원에 내재된 우수한 산업적 가치(내구성, 친환경성, 건강기능성 등)를 활용한 신소재·기술 개발이 가능하고 문화·기술적 가치가 융합된 인간·환경·생활친화형 신제품 및 신시장 창출효과가 높은 분야(생활·건강, 친환경건축, 첨단소재) 분야



① 전통문화, 현대과학기술을 만나, 부활을 꿈꾸다

② 환경친화적 소재 개발이 부각된 분야

전통문화산업 R&D 활성화를 위한 기반 구축 추진방법은 <그림 10>과 같다.

- 1) 산학연 협동연구를 통한 전통 소재·기술의 한계를 극복
- 2) 프리미엄 신제품·시장 창출
- 3) 글로벌 시장에서 기술선도 또는 독점적 시장을 창출할 수 있는 파급력이 높은 원천 신소재·공정기술 개발
- 4) 단일 제품화를 위한 기술개발보다는 다양한 산업과 제품에 확대 적용 가능한 플랫폼형 기술개발



그림 10. 전통문화산업 R&D 활성화 기반 구축 추진방향

기술개발과 아울러 이를 사업화하고 유통 마케팅까지 연결할 수 있는 전주기적 지원체계를 확립해야 한다 <그림 11>. 범정부, 민·관 협력을 통해 융합 신제품의 사업화·마케팅·대중화 촉진하기 위하여 관계부처·지자체, 공공·민간 전통문화 진흥기관, 교육·사업화 전문기관 등의 협력체계를 구축하고, 신기술 융합형 신제품의 사업화·마케팅을 지원할 수 있는 기술개발 - 사업화 - 유통·마케팅 연계 기술사업화의 전주기 지원체계 구축한다.

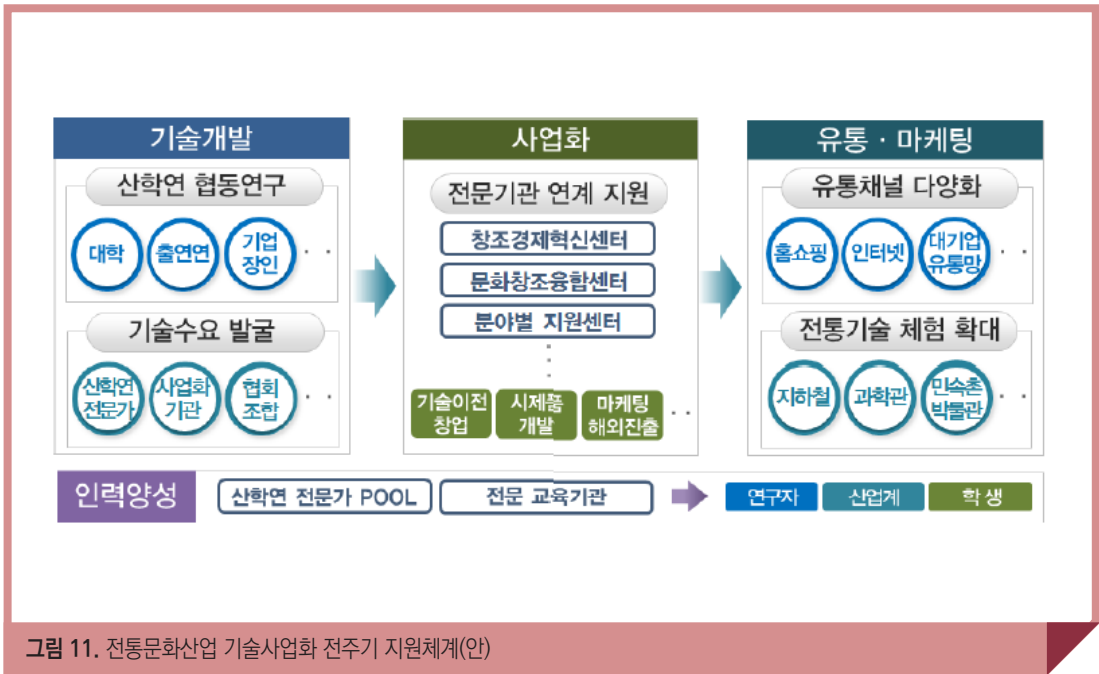


그림 11. 전통문화산업 기술사업화 전주기 지원체계(안)

2.5.3 추진 전략

국내 전통문화산업의 현실을 고려하여 연구주제 발굴방식을 Top-down 과 Bottom-up의 두 가지 추진 방법을 제안한다.

Top-down 방법은 전통문화산업을 획기적으로 발전시키기 위해 국가적으로 필요한 과제 또는 전통문화 자원과 현대과학기술 융합 R&D를 통한 고부가가치 신산업을 창출하기 위한 대형 연구주제를 사전기획을 통해 발굴하는 것이다. Bottom-up 방법은 연구자 또는 산업체에서 제안하는 비교적 좁은 범위의 기술개발 과 세부적인 기술개발을 위주로 산업현장에서 발생한 애로기술 해결을 포함한다.

2.5.4 전략 추진과제

시장 잠재력은 높으나 소재·공정기술의 문제로 인해 산업화 한계에 직면한 전통문화 제품의 품질·실용성·생산성 향상을 목적으로 전통 소재·기술에 현대과학기술을 접목하여 기술적 한계 극복하는 ①전통문화산업

고도화 지원 분야, 전통문화자원에 내재된 산업적·경제적·문화적 가치 재발견 및 첨단과학기술 융합으로 인간·환경·생활 친화형 신제품 및 新문화상품·서비스 창출하기 위한 ②전통문화 원리 기반 신시장 창출 분야, 전통문화산업 산·학·연 기술협력 네트워크 및 R&D 지원 인프라 구축 등을 통해, 개방형 기술혁신과 체계적 R&D 추진을 위한 기반을 조성하고, 전통문화 산업계 기술애로 해소 및 아이디어 구현, 지식재산권 확보, 문화·기술 융합인재 양성 지원 등 기술 역량 확충 및 R&D 활성화를 촉진시키기 위한 ③전통문화산업 R&D 활성화 기반 구축 분야, 우수 신제품·기술 발굴 및 유통·마케팅 지원, 문화·생활공간 소비자 접근성 강화를 통해, 전통문화·과학기술 융합 신제품 개발을 촉진시키고, 창조경제혁신센터와 연계한 전통문화 기반 창의·혁신제품 사업화를 지원하는 ④전통문화산업 R&D 활성화 기반구축 분야에 대한 R&D 과제를 지원한다.

각 분야의 전략 추진과제의 예시들은 다음과 같다.

① 전통문화산업(공예, 식품, 건축, 예술) 고도화 지원 분야

(공예) 현대 생활환경에 적합한 실용성 및 품질을 확보함으로써 대체재와 수입산의 위협을 극복하고 글로벌 매출 증대를 위한 돌파구를 마련할 수 있도록 전통공예 제품(유기, 도자, 뚝배기, 옷칠 등)의 부품 소재 및 공정기술 R&D를 지원한다. 또한 녹슬지 않는 유기, 잘 깨지지 않는 고강도 도자기, 인덕션 가열 뚝배기, 피부 알레르기 없는 속건성 옷칠 등의 개발을 지원한다.

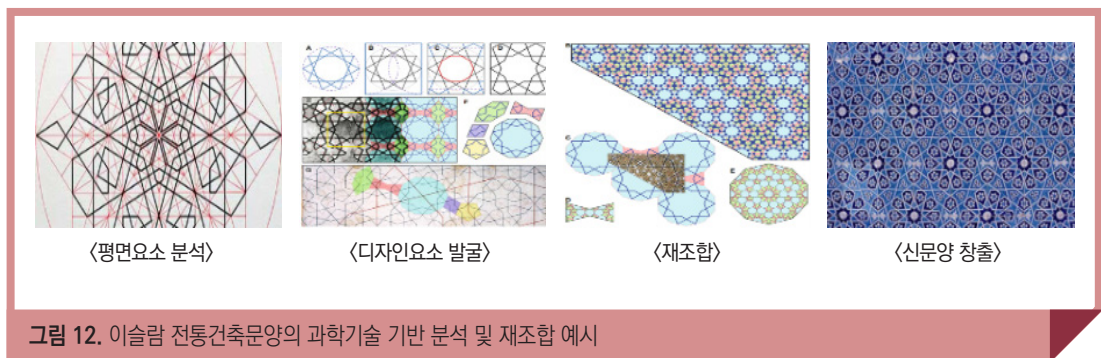
(의류) 발효·숙성 및 바이오·나노 기술 적용을 통해 염료의 추출·생산 공정을 개선함으로써 염료의 품질과 경제성을 확보하고, 인조섬유 수준의 기능성·내구성을 가진 천연섬유를 구현하여, 천연소재 제품(식품, 색조화장품 등)의 활용 범위를 확대한다. 다양한 식물소재 발굴 및 공정 개선을 통하여 고기능성을 확보하고 디자인 개선 및 가상 피팅 시스템 개발 등으로 한복의 대중화를 촉진시킨다.

(식품) 임상실험 및 과학학적 데이터를 기반으로 전통식품의 우수성과 기능성, 유효성분 등을 규명하고, 전통식품의 건강기능성을 강화함으로써 전통 식품·식재료의 부가가치를 제고한다. 또한 전통적인 미와 기능성을 동시에 확보할 수 있는 천연색소를 발굴·개발하고 인삼의 대중화를 위한 향미조절, 전통식품의 상품성 향상 지원, 인체 안전성이 우수한 천연색소 등의 개발을 지원한다.

(건축) 건조·가공 시간을 획기적으로 단축하고 기능성이 우수한 고품질 목재, 現 온수순환식 대비 에너지 효율이 높은 차세대 온돌시스템, 친환경적이고 시공비가 절감되는 저탄소 경량 한식기와 첨단 설계·

시공 기술 융합을 통한 대공간 한옥 모델 개발 등 新한옥 대중화를 촉진한다. 또한 반도체 공정에 사용되고 있는 초임계 기술을 적용하여 건조·가공 소요시간을 획기적으로 단축하고 방염·방충 물질 개발 및 표면개질을 통한 내구성·방충성을 높인 고품질 목재의 생산 기술을 개발 지원한다.

(예술) 음악·악·뇌과학 등의 융합연구를 통해 전통음악이 인체와 심리에 미치는 영향을 객관적으로 규명하고 전통음악의 가치 및 실용성을 제고하며, 전통악기(가야금, 장구 등)의 대체소재 개발 및 대량 생산체계 구축으로 품질은 우수하면서 합리적인 가격의 보급형 전통악기 보급·활성화 및 첨단 음향공학 기술 적용 전자국악기 개발로 전통 K-POP 문화 창출을 지원한다. 한편 전통문양에 대한 기하학적이고 수학적 분석을 통하여 전통기반 신문양을 발굴·패턴화하여 산업 디자인에 활용하기 위한 연구개발을 지원한다. <그림 12>는 이슬람 전통건축문양의 과학기술 기반 분석 및 재조합한 하나의 예시이다.



② 전통문화 원리 기반 신시장 창출 분야

전통문화자원과 첨단과학기술 융합을 통하여 문화자원에 내재된 산업적·문화적 가치를 인간·환경·생활친화형 신제품 및 新문화상품·서비스로 창출하기 위하여 전통문화자원에 내재된 원리를 규명한다. 산업적으로 활용하기 위한 연구를 통하여 다양한 분야에의 활용을 촉진하고 DB 구축·제공, 스토리텔링 연계 연구를 지원한다. 전통 소재·기법과 첨단기술 융합 R&D를 통하여 고부가가치 신시장을 창출하고자 한다.

(생활·건강) 인체친화·유익성 기반으로 섬유·패션, 건강기능식품, 의공학 분야 등 신시장(천연염색 의류, 조미료·프로바이오틱스 등)을 창출한다.

(친환경건축) 고유 천연물(명유, 고령토, 해초류 등) 활용 고기능성(내구성, 발수, 방충 등) 신소재(도료, 접착제, 3D프린팅용 소재 등) 개발한다.

(첨단소재) 전통소재·기법(전통제철, 옹기 다공성, 누빔기법 등) 응용으로 기존 기술적 한계를 극복(강도, 내구성, 경량화 등)한 첨단소재·부품 개발을 지원한다.

(융·복합 콘텐츠) 학습콘텐츠, 안무저작, 첨단공연, 증강현실 놀이 등 전통문화 기반 융·복합 콘텐츠 기획·제작·유통 기술을 개발한다.

(관광·전시) 가상체험 서비스, 전시·공예상품 모델링, 조명시스템 등 가상현실·실감형 오감체험 제공 차세대 관광·전시 시스템 개발을 한다.

(스토리텔링) 방대한 역사문화에 대한 스토리 창작지원 기술 개발

③ 전통문화산업 R&D 활성화 기반 구축 분야

(기술협력 촉진) 산·학·연(기업·장인, 연구·교육·사업화 기관 등) 기술 협력 및 R&D 활성화 지원 Hub 역할을 담당할 『전통르네상스지원단』을 신설하여 전통문화산업 R&D 기술수요 발굴, 정보 제공(인력, 인프라 등) 등 체계적으로 R&D 추진하기 위한 기반을 조성하고 전통문화 제품 신뢰성 확보 등을 위한 표준화(한옥, 한지, 한식 등)를 지원한다.

(R&D역량 강화 지원) 현장 기술애로 해소 및 아이디어 구현을 위한 기술(현장 1:1 기술자문(멘토링), 단기·소액 Bottom-up 현장밀착형 R&D 과제 지원 등) 개발을 통해 전통문화산업체가 직면한 기술적 한계 극복 및 사업화 문제 해결 지원, 전통문화자원의 지식재산화, 산업계 인력 재교육 등 문화·기술 융합인력 양성을 지원한다.

④ 전통문화산업 R&D 활성화 기반구축 분야

(우수 신제품·기술 발굴) 전통문화·첨단기술 융합으로 전통문화 대중화·산업화에 기여하는 『전통기술 프런티어』 제품·기술 선정(문체부의 우수문화상품) 등 정부인증 연계 지원(미래부 추천 → 문체부 심사), 공영홈쇼핑·정책매장, 인터넷, 대기업 유통망, 전시·홍보 등을 통

한 중소·벤처 우수제품의 유통채널 다양화 및 마케팅을 지원하고 숙련기술인·장인
협업 신제품의 개발 및 판로개척 등을 지원한다.

(소비자 접근성 강화) 지하철, 과학관, 민속촌, 박물관 등 문화·생활공간에서 전통기술 체험 확대 및 신제품
체험·판매 리빙랩을 구축한다.

(혁신센터 연계 사업화) 지역이 강점을 가진 분야는 혁신센터가 기획부터 참여, 유망기업 R&D 참여 및 연
구성과의 신속한 사업화를 지원한다.

<그림 13>은 전통문화산업 기술협력 네트워크(전통기술혁신 얼라이언스) 구축을 위한 전통르네상스지원
단과 전통문화기업·장인, 전통문화협회·조합, 교육기관, 전문기관, 연구기관 및 관련 타 산업분야와의 협력
관계 및 내용을 나타낸 것이다.



그림 13. 전통문화산업 기술협력 네트워크(전통기술혁신 얼라이언스)

2.6 전통문화융합연구사업

2.6.1 사업 추진배경

전통문화자원은 우리 생활양식(农·食·住)의 기반이자 세계적 공감대를 얻고 독점적 신시장을 창출할 수 있는 잠재력을 보유하고 있다. 그간 K-POP·드라마, 제조업·ICT가 “한류”를 이끌어 왔으나 전통문화에 내재된 가치의 고부가가치화 및 세계화는 부족한 상황이다. 이러한 전통문화자원의 가치를 일상생활에 향유하고 산업화하기 위해서는 현대과학기술과의 융합을 통한 창조적 계승·발전이 필요하다. 이에 전통문화자원 원형의 보존·복원을 넘어 산업적 가치의 “재발견”, 창의적 아이디어 및 신기술 접목을 통한 현대적 “재해석” 및 “재창조”를 이루기 위한 사업을 기획하였다. 전통문화자원과 첨단과학기술 융·복합을 통해 전통문화 산업계가 겪는 기술적 한계를 극복하는 한편, 인간·환경 친화적인 새로운 산업적 수요·시장 창출을 기대할 수 있다.

2.6.2 사업 내용

현재 『전통문화융합연구사업』에서 진행되고 있는 7개 연구과제의 목표, 내용 및 기대효과를 요약하면 다음과 같다. <표 7>

표 7. 전통문화융합연구사업 내용

분야	과제명 및 내용
공 예	<ul style="list-style-type: none"> • 녹슬지 않는 유기 개발 (연구목표) 한국 전통소재인 유기(紵)의 현대화를 통해 현대 산업적 수요에 적용이 가능한 첨단소재로 활용범위 확대 (연구내용) 전통 유기(紵)의 기술 고도화와 문화적 활용 가치를 높이기 위해 현장 기술 개선, 문화가치를 발굴, 주조, 열처리, 가공 등 현대기술 접목을 통해 특성이 우수한 개량 유기를 개발하여, 가볍고 값이 싸며 녹이 슬지 않는 개량유기로 유기(紵)의 대중화를 촉진하고, 항균성을 가지며 변색되지 않는 유기를 의류용 소재, 고급 브랜드 주방용 칼 제작 등에 활용
	<ul style="list-style-type: none"> • 전통 제철기술을 활용한 고강도·고인성 다층구조 소재 개발 및 상품화 (연구목표) 전통 천연염색 공정과 DTP(Digital Textile Printing) 공정기술을 활용하여, 친환경 고부가가치 섬유/의류 제품 개발 (연구내용) 고대 철제 문화재 분석, 고문헌 조사를 바탕으로 전통 제련·정련·단접기술을 표준화하고, 축적압연접합 공정 설계 및 다층구조 소재 제조 기술, 내부식, 내마모성을 향상 시킬 수 있는 합금 설계 및 미세조직 제어 기술, 전통문화에 전통기술을 접목하여 국내 및 해외 시장에서 경쟁할 수 있는 고급 주방용 칼 상품화

분야	과제명 및 내용
의류	<ul style="list-style-type: none"> • DTP용 천연잉크 제조 및 디지털 프린팅 공정기술개발 (연구목표) 전통제련·정련·단점 기술, 현대공정 및 신소재를 적용한 다층구조의 고강도·고인성 주방용 칼 제조 기술 개발 (연구내용) DTP 적용 원료염료 및 천연잉크 제조기술, DTP 적용 프린팅 공정기술, 천연잉크 DTP 제품화 기술, 천연염색-DTP 적합성 평가 플랫폼 연구를 통해 천연염색 기법으로 바탕색을 염색하고, DTP를 활용하여 우리 전통문양이나 우리 문화를 알릴 수 있는 것들을 프린팅하고, DTP 잉크는 천연성분을 가능한 많이 분리 추출하여 공정에 적용
식품	<ul style="list-style-type: none"> • 한국형 글로벌 장건강 프로젝트 (연구목표) 전통발효식품인 청국장을 기반으로 세계 최초 식물성 유익균(고초균/식물성 유산균)을 이용하여 다양한 기능을 지닌 프로바이오틱스 제품 개발 (연구내용) 장 건강 맞춤형 프리바이오틱스 소재를 탐색·발굴하고, 식물성 발효 균주와 천연소재를 이용한 다양한 장 건강 신바이오틱스 제품을 개발하며, 개발 제품에 대한 대사성 질환 관련 (항당뇨, 항비만, 면역증진, 장 기능 개선) 기능성 검증, 개발 제품에 대한 안전성 검증 및 발효 대사체 분석, 장 건강 체험프로그램 개발 및 적용에 관한 연구 수행 • 복합종균 기반 차세대 전통 발효장류 개발 (연구목표) 다중 메타오믹스 기법을 활용한 전통장류의 발효특성 및 핵심 미생물을 규명하고 고기능성 복합종균을 활용한 안전하고 표준화된 고품질 전통장류 개발 (연구내용) 다중메타오믹스 분석 및 해석기술을 활용하여 전통장류 발효 단계별 발효특성 및 핵심 미생물을 규명하고, 맛, 독소, 풍미 생성 기작 이해 및 전통장류 발효 핵심 미생물 종균 라이브러리를 구축하며, 바이오제닉아민, 독소를 생산하지 않고 전통장류의 깊은 맛과 향미를 나타내며 기능성을 가진 전통장류 발효단계별 핵심미생물의 활용한 복합종균 개발을 통해 맛과 기능이 다른 다양한 맞춤형 전통장류 생산
건축	<ul style="list-style-type: none"> • 전통 공예, 건축 소재 기반 스마트 3D 프린팅용 소재 개발 (연구목표) 전통공예 및 건축소재를 이용하여 친환경, 고강도, 고접합력 특징을 갖는 스마트 3D 프린팅 소재 및 공정 개발 (연구내용) 고내구성 전통 천연소재를 통해 기존 3D 프린팅 소재가 가지지 못했던 방수, 방부, 방충, 항균 등의 기능성 부여, 중대형 건축물 3D 프린팅에 사용할 수 있는 대량 생산이 가능한 소재 및 친환경적이며 방수, 방충, 기계적 내구성을 가진 3D 프린팅 소재 개발, 전통 건축구조물의 안정성을 유지하는 결구 방식을 도입한 3D 프린팅 공정 개발
인프라	<ul style="list-style-type: none"> • 전통문화산업 R&D Platform 구축 (연구목표) 전통문화산업 기술협력의 혁신 Hub & Spoke 역할을 수행할 전통르네상스지원단을 설립하여 전통문화산업의 부가가치 극대화 및 신산업 창출 지원 (연구내용) 전통문화산업 기반구축을 위하여 산·학·연·관 등의 전문가 인력풀을 구축하여 활용 방안 모색, 전통문화산업 정책·산업·R&D 실태조사 및 분석, 과학기술 관련 자료 DB화, 포탈 구축 및 활용을 통하여 생산자, 개발자, 소비자의 network 구축, 전통문화과학기술 R&D 수요조사 및 연구기획을 실시하여 현장 밀착형 현장 애로기술 발굴 및 지원하고, 지적재산권 강화와 연구결과 사업화 전략 도출

1 전통문화, 현대과학기술을 만나 부활을 꿈꾸다
 2 환경친화적 소재 개발을 위한 연구

03 / **나아갈 길**

앞서 살펴본 바와 같이, 일본은 1974년 전산법을 제정하여 세계에서 가장 체계적으로 전통공예산업체를 지원해 오고 있음에도 불구하고 공예산업의 기업과 종업원 수, 매출액 등이 전산법 시행 이후 최전성기인 1979년에 비해 약 1/3 이상 감소되었다. 반면 전통문화자원에 현대과학기술을 접목하여 전통을 개량·개선 및 혁신한 기업들은 전통문화산업과 신산업에서 막대한 이익과 고용을 창출하고 있다.

우리나라의 전통문화산업은 뿌리산업의 약 40% 수준에 불과한 영세성을 면치 못하고 있다. 여러 가지 조사 자료에 의하면 전통문화제품은 낮은 품질과 높은 가격으로 인해 상품 경쟁력이 떨어지고 유통구조 및 인프라가 부족하여 소비자 및 사회적 인식이 부족한 것으로 조사되었다. 또한 전통공예산업과 전통의류산업의 83% 이상은 1980년대 이후에 설립되었고 전통식품산업과 전통건축산업의 82% 이상이 1990년대 이후에 설립되는 등 전 세계에 유래가 없는 극단적인 전통의 단절을 겪었다. 전통문화산업 종사자들은 대부분 경험적 지식에 의존해 제품 생산 및 문제 해결하는 등 매우 열악한 상황에 놓여 있다. 지금까지 우리나라의 특수한 사정을 충분히 고려하지 않고 전통이 비교적 잘 유지·계승 발전한 선진국 정책을 추종함으로써 그 동안 전통문화산업의 발전을 도모하기 위해 많은 노력을 했음에도 불구하고 얻어진 결과는 기대치에 미치지 못하고 있다.

루이비통, 구찌, 에르메스, 까르띠에 등 세계 명품 브랜드, 유럽도자기, 스와로브스키 크리스탈, 일본의 전통주 사케, 야마나카칠기, 스시, 소바, 에키벤, 온천, 식기 및 도자기, 김치, 장류 등은 전통적으로 대중의 사랑과 관심을 받고 있다. 단순히 전통에만 머물지 않고 지속적인 소재 및 공정기술 개발을 통해 새로운 산업 분야에 진출한 일본의 도자기 업체인 고란사, 노리타케, 후쿠다금속박분공업, 구레다케, 유신주조, 하야시바라 등 전통기반 장수기업들은 고부가가치와 고용을 창출하고 있다. 이들 기업은 지속적인 R&D를 통해 소재와 공정기술을 개발하고 끊임없는 변화와 혁신을 통해 진화함으로써 장수기업(창업 100년 이상 지속된 기업)으로 발전하고 있다는 사실은 우리나라 전통문화산업에 시사하는 바가 크다고 할 수 있다.

문화 선진국에 비해 상대적으로 낙후된 우리나라 전통문화산업의 생태계를 활성화하고 발전시키기 위해 정부와 국민들이 무엇을 해야 하고 무엇을 할 수 있는지를 생각해 볼 필요성이 있다. 광복 70주년을 맞이한 2015년 통계청이 발표한 보도자료에 의하면 1953년 대비 우리나라의 명목 국내총생산은 31,000배 이상 증가되었고 1인당 GDP는 390배 이상으로 폭발성장을 이룩하였다.²⁶⁾ 자본과 부존자원이 부족한 우리나라 경제의 폭발성장 원동력은 자본, 노동력, R&D 3박자가 어우러진 결과가 아닌가 생각한다. 우리나라 경제 성장에 대한 R&D 기여도가 약 30.6% 정도로 평가되는 등 낙후된 산업의 발전을 촉진시키는 데 있어 R&D가 매우 중요한 역할을 담당하였다.²⁷⁾ 만일 역대 정부에서 과학기술 관련 R&D를 지원하지 않았다면 오늘날 세계 13위 경제 대국으로 성장하는 것은 불가능하였을 것이다.

우리나라는 최근에야 과학기술정보통신부의 사업을 통해 국내외 전통문화산업 관련 자료조사 및 지속적인 토의를 거쳐 전통문화자원과 현대과학기술 융합 R&D, 그리고 전통문화산업체 애로기술 지원을 통해 문화 선진국에 비해 상대적으로 낙후된 우리나라 전통문화산업을 획기적으로 발전시키고, 전통문화자원으로부터 새로운 부가가치와 고용을 창출하기 위한 R&D 필요성을 인식하게 되었다. 향후 지속적으로 전통문화산업체를 지원하기 위해서는 범정부차원에서 1)산업의 근간을 이루는 부품소재 및 공정기술에 대한 융복합 R&D 지원과 2)R&D 수행 여력이 부족한 전통문화산업체의 애로기술 해결을 지원하는 두 가지 방향에서의 전략적인 접근이 필요하다.

전통문화산업체를 획기적으로 발전시키고 R&D를 통해 전통문화자원으로부터 새로운 부가가치 및 고용을 창출하기 위해서는 우선 융복합 R&D 연구주제 및 내용을 결정하고 이를 어떻게 성공적으로 이끌 것인가에 대한 방법론적 연구가 선행되어야 한다. 이를 기반으로 정부 정책 방향을 구체화하고 이를 지원하기 위한 연구개발 사업의 도출이 필요하다. 예를 들면, 전통의류를 만들기 위해서는 천연 동식물의 섬유를 가공하여 실을 뽑는 방적(紡績), 실(원사)로 천이나 원단을 짜는 방직(紡織), 천이나 원단을 염색하는 염색 기술 및 의류를 만드는 공정 등 여러 가지 연속 공정이 필요하다. 전통의류 관련 R&D를 기획하고자 하는 경우 원료 수급 문제, 방적, 방직, 염색 및 의류 제작 등을 종합적으로 조사 분석하고 그 결과로부터 전체 R&D 주제, 범위 및 우선순위 등을 결정한 후 진행하는 것이 타당하다. 옷칠 산업체에서는 저온·저습 대기 환경에서 빠르게 건조되는 옷칠, 실외에서 사용할 수 있도록 자외선에 강한 내자외선 옷칠, 다양한 무늬와 색채를 갖는 문양을 기물에 넣기 위한 투명 옷칠, 옷이 오르지 않는 무(無)-알레르기(Allergie) 옷칠, 옷칠 제품을 대량 생산

하기 위한 분사(spray) 기술 등을 요구하고 있다. 하지만 대부분의 연구자들은 옷칠 산업체 니즈와 관계없이 자기들이 할 수 있는 연구 내용만을 제안하게 된다. 이 경우 기술의 완성도 및 원천성이 부족하게 됨으로써 정부에서는 R&D를 지원하더라도 전통문화산업체는 별다른 도움이 되지 않는 경우가 흔히 발생하게 된다.

실제로 연구개발은 여러 가지 방법을 동원하여 한 가지만이라도 성공시킬 수 있다면 그 연구결과는 성공적인 것이 되는 반면, 전통문화상품을 성공적으로 개발하여 소비자에게까지 전달되기 위해서는 기술개발과 더불어 재현 반복성이 검증되어야 한다. 이와 함께 디자인, 예술성, 스토리텔링 등의 감성적 요소가 더해져야 할 것이다.

우리나라 전통산업체가 지속적인 변화와 혁신을 통하여 진보할 수 있다면 우리나라 전통산업 중 일부는 세계적인 명품 브랜드로 성장하고 전통문화자원을 기반으로 하는 세계적인 기업으로 발돋움하는 날이 올 수 있을 것이다. 연구자의 성공에 대한 확실한 신념, 연구에 대한 지치지 않는 열정, 끝까지 포기하지 않는 끈기를 기대하면서 글을 마치고자 한다.

저자 **도정만**

Jung Mann Doh

학력 연세대학교 금속공학 박사
한국과학기술원 재료공학 석사
울산공과대학교 재료공학 학사

경력 現) 한국과학기술연구원 물질구조연구제어센터 책임연구원

저자 **한호규**

Hoh Gyu Hahn

학력 한국과학기술원 유기화학 박사
한국과학기술원 유기화학 석사
한남대학교 화학 학사

경력 現) 한국과학기술연구원 전통문화과학기술연구단장(책임연구원)

참고문헌

1. 유동환 외 6명, 『전통문화 육성진흥방안 연구』, 문화체육관광부(2011)
2. 이동훈 외 2인, 『2012 국가브랜드지수 조사결과』, 삼성경제연구소(2013)
3. 도정만 외 9인, 『첨단과학기술과 전통문화기술의 융복합을 통한 전통과학기술 발전방안 기획 연구』, 미래창조과학부 (2015)
4. 도정만 외 9인, 『한국전통문화프리미엄연구사업 예비타당성 조사 기획 연구』, 미래창조과학부 (2016)
5. 미래창조과학부 (2016), 『과학기술을 통한 한국전통문화 프리미엄 창출 전략』
6. 經濟産業省 經濟産業省製造産業局 伝統的工芸品産業室 (헤이세이23년, 2011년), “伝統的工芸品産業をめぐる現状と今後の振興施策について”
7. 전통적공예품산업진흥협회 홈페이지 자료, 일본 전통적 공예품 산업 현황,
<http://kougeihin.jp.k.oo.hp.transer.com>
8. 정후식, 『日本企業の長壽要因 및 示唆點』, 한국은행 (2008)
9. 민동석, 『유네스코 창의도시 네트워크 길잡이-창의도시 신청에서 가입까지』, 유네스코한국위원회(2012)
10. UNESCO, “64 Cities Join the UNESCO Creative Cities Network(2017)”, <https://en.unesco.org/creative-cities/home>, “창의도시 가입현황”(2015)
11. (주)씨스톤컨설팅, 『전통문화의 효율적 육성을 위한 전문지원단체 설립방안 연구』, (문화체육관광부(2012)
12. 허보윤 외 4인, 『공예문화 증장기 진흥정책 수립을 위한 기초연구』 (2012)



13. 이원태 외 11명, 『전통문화산업 실태조사 및 종합육성계획 수립을 위한 기초연구』, 한국문화관광연구원 (2010).
14. 최정심 외 5인, 『공예산업 실태조사』, 문화체육관광부(2011)
15. Hiroaki Katsukil, “New strategy on Arita ceramic ware(有田焼の新たな 挑戦)”, Pottery Workshop at KIST, Korea(2017)
16. 스와로브스키: <https://www.swarovski.com>
17. Naver 블로그, “2016년 세계 명품 브랜드 순위와 종류”, <http://blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=guri4you&logNo=220842445736&parentCategoryNo=&categoryNo=29&viewDate=&isShowPopularPosts=true&from=search>
18. 남양호, “명품이란 무엇인가? 명품 브랜드의 탄생과 성공비결”, 삼성경제연구소(2006)
19. 노리다케(ノリタケ, noritake): www.noritake.com
20. 일본술 사케: <https://namu.wiki/w/%EC%82%AC%EC%BC%80>
21. 아마나카칠기 전통산업회관, <http://www.hot-ishikawa.jp/kanko/korean/20098.html>, “山中漆器(아마나카칠기)(1975)
22. 기꼬만(キッコマン, kikkoman): <http://www.kikkoman.com>
23. 고란샤(香蘭社, Koransa): <http://www.koransha.co.jp>
24. 후쿠다금속박분공업(주): (www.fukuda-kyoto.co.jp)
25. 성중사: <http://sungjongsas.co.kr/greeting.htm>

26. 2015-통계로 본 대한민국 광복 70년(보도자료용), 통계청 (2015)13. 이원태 외 11명,
『전통문화산업 실태조사 및 종합육성계획 수립을 위한 기초연구』, 한국문화관광연구원 (2010).
27. 신태영 : 『연구개발투자의 경제성장기여도』, 과학기술정책연구원(2004)

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2017 December vol.3 no.12

<http://crpc.kist.re.kr>

02

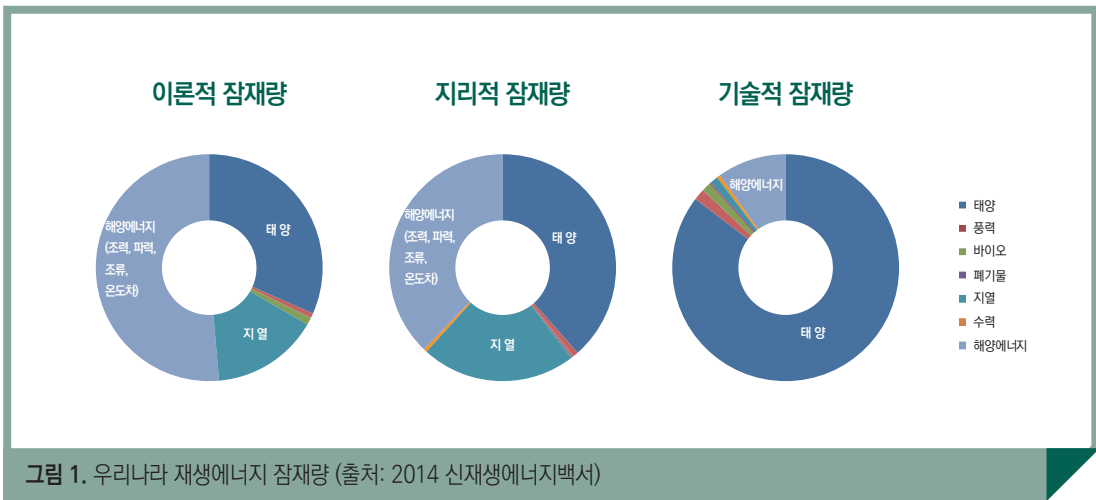
—
화학원료 이제
태양빛으로부터 만든다
—

한국과학기술연구원
민병권 박사
(bkmin@kist.re.kr)



01 서론

우리 인류는 에너지 문제에 있어서 현재 세 가지 선택지를 가지고 있다. 지금까지 에너지의 근간이었던 화석연료를 앞으로도 계속 사용하는 것, 태양, 바람, 물 등의 자연으로부터 직접 생산되는 재생에너지로 에너지 패러다임을 완전히 전환하는 것, 마지막으로 두 가지 에너지원을 모두 사용하는 것이다. 그런데 최근의 세계적 에너지 생산 동향을 보면 아주 빠른 속도로 화석에너지에서 신재생에너지로의 전환이 이루어지고 있으며 또한 탈원전 이슈가 부각되면서 신재생에너지에 대한 관심이 더욱 고조되고 있는 형국이다. 이러한 에너지 패러다임 전환에 대한 움직임은 석탄과 석유 같은 화석연료가 곧 고갈되거나, 최근 국제적 이슈로 부상한 기후변화에 대한 우려에서 비롯되었지만 근원적으로는 가까운 미래에 신재생에너지가 화석연료보다 훨씬 더 사용이 편리하고 친환경적이며 화석연료의 경제성을 넘어설 수 있을 것이라는 기대감이 큰 동력으로 작용하고 있다



우리 인류가 사용할 수 있는 다양한 재생에너지원 중에서 태양에너지는 매일 지구에 전달되고 있는 막대한 태양의 에너지를 근간으로 하고 있다. 특히 우리나라에서는 다양한 재생에너지원 중 지리적, 기술적 요소

까지 고려한다면 태양에너지가 가장 유리한 에너지원이라고 할 수 있다<그림 1>. 현재 이러한 태양에너지를 직접 전환해서 인류가 사용할 수 있는 형태로 바꾸어 주는 기술로는 태양전지 기술이 잘 알려져 있고, 일부 기술(예, 실리콘 태양전지)은 이미 상용화가 되어 우리 실생활에 쓰이고 있다. 태양전지는 태양빛을 직접 전기에너지로 전환 시켜주는 소자로서 그 동안 꾸준히 기술이 발전되어 현재 효율 20%에 근접한 태양전지 모듈들이 다양한 제품으로 설치되어 전기를 생산하고 있다. 하지만 미래의 인류에게는 전기에너지 이외에도 섬유, 플라스틱, 비료 등의 화학제품들이 반드시 필요하고, 이들을 만들기 위한 화학원료 생산은 없어서는 안 될 필수 산업이라고 할 수 있다. 현재는 화학원료들을 에너지와 마찬가지로 석탄 또는 석유와 같은 화석 연료로부터 대부분 얻고 있으나 미래의 신재생에너지 기반 사회에서는 화석연료가 아닌 자연으로부터 직접 화학원료를 생산 할 수 있는 새로운 기술이 요구되고 있다.

자연에서는 식물의 나뭇잎이 광합성 작용을 통해 태양빛, 물, 이산화탄소로부터 탄화수소화합물(포도당)을 만들어 낸다. 이러한 광합성 작용을 우리가 인위적으로 할 수 있다면 막대한 태양에너지를 활용해 우리가 원하는 화학원료들을 손쉽게 만들어 낼 수 있을 것이다. 이와 같이 태양빛을 에너지원으로 물과 이산화탄소로부터 고부가화합물, 즉 화학원료를 만들어 내는 방법을 ‘인공광합성’이라고 한다. 즉 인공광합성이란 자연계의 나뭇잎에서 일어나는 광합성을 모방하여 태양광을 에너지원으로 이산화탄소와 물로부터 수소, 탄소 및 산소로 구성되는 화합물을 합성하는 기술로 정의할 수 있다.

이러한 자연계의 광합성을 인위적인 방법으로 보다 효율적으로 구현하기 위해 다양한 인공광합성 시스템들이 제안되어 왔다. 그 중 가장 효율적일 뿐만 아니라 생성물의 분리 및 대량생산에 용이한 시스템으로서 ‘광전기화학적 인공광합성 기술’이 최근 많은 관심을 받고 있다. 광전기화학적 인공광합성 시스템은 간단하게 빛에 의해 구동되는 전기화학 반응장치라고 볼 수 있으며 <그림 2>의 개념도에서 보듯이 산화, 환원 반응이 일어나는 전극과 분리막 등 크게 세 부분의 요소기술로 나누어 볼 수 있다. 먼저 태양광을 흡수하여 전자-정공쌍을 생성하기 위한 광전극이 필요하다. 따라서 산화 및 환원 전극 중 적어도 하나는 빛을 흡수할 수 있는 광전극으로 이루어져야 한다. 또한 산화 및 환원전극 모두 각각 반응의 과전압을 최소화하기 위해 촉매 특성을 지녀야 한다. 마지막으로 산화 및 환원 반응에서 생산된 화학종들이 반대 전극의 반응에 참여하는 것을 방지하고 생성물을 원활하게 분리하기 위해 분리막이 필요하다. 즉 광전극(산화전극)은 자연 광합성의 photosystem II¹⁾, 분리막은 photosystem I²⁾, 그리고 환원전극은 캘빈사이클³⁾과 역할이 유사하다고 할 수 있다.

자연의 광합성과 마찬가지로, 인공광합성을 통해 태양광-화합물을 생산하기 위해서는 물 산화(분해) 반응이 반드시 일어나야 하며 이때 가장 많은 에너지가 필요하게 된다. 특히 과전압에 의한 에너지 손실이 크기 때문에 물 분해를 용이하게 하기 위한 촉매 기술은 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 물 산화반응 시 생성된 수소 이온은 상대전극(환원전극) 쪽으로 이동하게 되며 이 수소 이온이 직접적으로 환원이 되면 수소 기체가 발생한다. 한편, 물속에 이산화탄소가 용해되어 있으면 수소 이온과 경쟁 환원 반응을 통해 개미산(포름산), 메탄, 일산화탄소, 메탄올, 에틸렌 등 다양한 화합물들이 생성된다. 따라서 환원반응에 있어 반응 선택도는 매우 중요한 요소이며 이는 환원 전극의 촉매 특성에 의해 결정된다. 본고에서는 광전기화학적 인공광합성의 가장 핵심적 기술이라고 할 수 있는 물 산화 촉매 기술과 이산화탄소 환원 촉매 기술에 대한 최신 연구 동향에 대해 중점적으로 살펴보고자 한다.

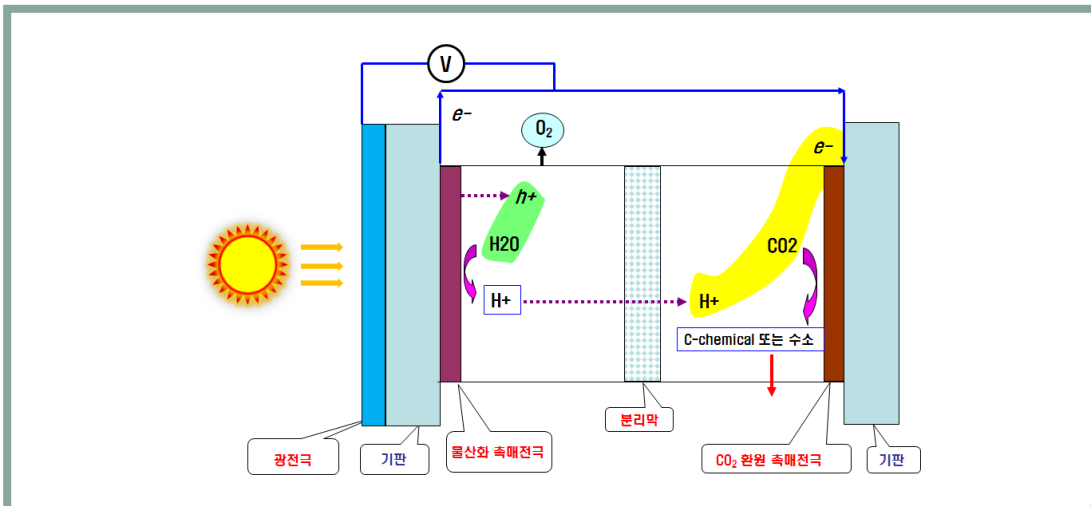


그림 2. 광전기화학적 인공광합성 시스템 개념도

- i) 광합성 반응에서 물을 분해하고 산소를 발생시키며 photosystemI에 전자를 공급하는 반응계
- ii) 광합성 반응에서 photosystemII에서 공급되는 전자를 받아 NADP를 환원하는 광화학계
- iii) 식물의 광합성의 기본회로로, 광합성의 암반응에서 이산화탄소가 유기화합물로 동화되는 순환 과정

02 본론

광전기화학적 태양광-연료 생산은 일본의 Fujishima와 Honda에 의해 처음 제안되었으며, 이 연구를 통해 이산화 타이타늄(TiO₂)과 같은 산화물 반도체를 이용, 태양광을 흡수하여 전자-정공 쌍을 생산하고 생성된 정공 및 전자가 물과 산화, 환원 반응을 일으켜 산소와 수소를 생산할 수 있다는 것을 제시하였다.¹⁾ 하지만 이산화 타이타늄과 같은 산화물 반도체는 밴드 갭(band-gap)이 태양광의 많은 부분을 차지하고 있는 가시광 영역의 빛을 흡수하기에는 너무 크기 때문에 태양광을 효율적으로 이용할 수 없다는 약점이 있다. 더군다나 전극에 사용되는 물질들은 수용액 내에서 안정성이 확보되어야 하고 산화, 환원 반응의 과전압을 낮출 수 있는 촉매적 특성을 동시에 가지고 있어야 한다. 하지만 알려져 있는 반도체 물질 중 이러한 조건을 모두 만족하는 물질은 극히 드물며 그렇기 때문에 단일 반도체 물질로 이루어진 광전극을 이용하여 광전기화학 전지를 작동하기 위해서는 외부로부터의 추가적인 인가전압이 필요하게 된다. 실제로 현재까지의 많은 광전기화학전지 연구가 이 경우에 해당한다.

광전기화학전지 개념은 물분해 수소 생산뿐만 아니라 이산화탄소로부터 화합물을 생산하는 태양광-화학물 생산 시스템에도 확장 적용되고 있다. 아직까지는 태양광-수소에 비해 연구가 많이 진행되지는 않았지만 <표 1>에서 보듯이 최근 다양한 형태의 광전기화학적 인공광합성 연구 결과들이 보고되고 있다.

표 1. 광전기화학적 인공광합성 디바이스

광전극	산화전극	환원전극	태양광-화합물 전환 효율	기관
CuFeO ₂	Pt	CuFeO ₂	1% (formate)	경북대학교 ²⁾
InP	r-STO	InP/[RuCP]	1% (formate)	Toyota ³⁾
Perovskite solar cell	IrO _x	OD-Au	6.5% (CO)	LPI-EPFL ⁴⁾
GaInP/GaInAs/Ge solar cells	CuO/SnO ₂	CuO/SnO ₂	13.4% (CO)	LPI-EPFL ⁵⁾
CIGS solar cell	Co ₃ O ₄	OD-Au	4.23% (CO)	KIST ⁶⁾
Si solar cell	IrO _x	Ag coral	6.34% (CO)	KIST

앞에서 언급했듯이 태양광-화합물 생산을 위해서는 물 산화, 이산화탄소 환원 반응이 동시에 일어나야 하며 이때 적어도 2V 이상의 많은 에너지가 필요하게 된다. 단일 반도체 물질로 이루어진 광전극을 통해 이 크기의 전압을 발생하는 것은 매우 힘들기 때문에 아직까지 높은 효율의 디바이스 구현이 보고되고 있지 않다. 반면에 단일 광전극의 기능을 광흡수-전자·정공쌍 생성과 물산화 촉매 기능으로 구분하여 광흡수-전자·정공쌍 생성을 위해서는 태양전지 기술을 응용하고 물산화 촉매로는 전기화학 촉매 기술을 도입함으로써 태양광-화합물 전환 효율을 획기적으로 향상시킨 디바이스들이 구현되었다<그림 3>.

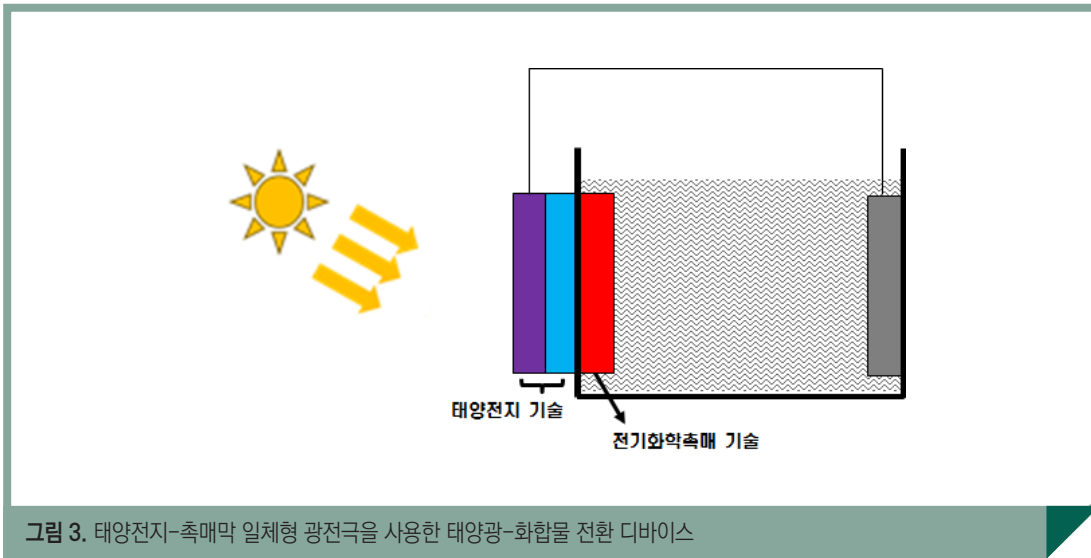


그림 3. 태양전지-촉매막 일체형 광전극을 사용한 태양광-화합물 전환 디바이스

2.1 물산화 촉매 기술

물산화 촉매 기술은 수전해 및 인공광합성 시스템의 핵심 기술 중 하나라고 할 수 있으며 아직까지 촉매 활성 및 내구성 개선을 위한 많은 연구 개발이 필요한 분야라고 할 수 있다. 본고에서는 물산화 촉매의 최근 연구동향을 촉매의 종류에 따라 구분하여 소개하고자 한다.

2.1.1 귀금속계 산화물

귀금속계 물산화 촉매는 일반적으로 루틸구조(rutile structure)의 루테튬산화물(RuO_2)과 이리듐산화물(IrO_2)이 많이 사용되고 있다. 루틸구조는 <그림 4>(a)에서 보는 것처럼 정팔면체 구조로 루테튬(Ru) 또는 이리듐(Ir) 원자가 중앙에 위치하고 모서리에 산소원자를 공유하는 구조로 되어 있으며, 일반적으로 산성조건과 염기성조건 모두에서 높은 물산화 활성도를 보인다. 이러한 이유로 많은 연구자들은 비귀금속 물질을 활용하여 루틸구조의 루테튬산화물 촉매를 모방하거나 이리듐과 루테튬의 사용량을 저감하는 연구를 활발히 진행하고 있다. 그러나 이리듐과 루테튬계 산화물의 물산화 활성도는 <그림 4>(b)에서 보는 것과 같이 촉매의 합성방법, 구조, 조성, 입자크기 등에 따라 크게 좌우된다.⁷⁾ 예를 들면 루틸구조의 이리듐산화물은 0.25V의 과전압에서 단위질량당 4 Ag^{-1} 의 전류 값을 보이지만 니켈(Ni)이 첨가된 이리듐산화물(IrO_x)은 10배 증가한 40 Ag^{-1} 의 촉매 활성을 보인다. 이 수치는 루테튬 기반 촉매의 11~14.5 Ag^{-1} 보다 높은 수치이며 니켈의 첨가를 통해 물산화 반응 메커니즘에서 옥시수산화물(MOOH) 중간생성물을 안정화시킴으로써 촉매 과전압을 크게 낮출 수 있다는 사실이 규명되었다.

물산화 반응의 활성도를 높이는 연구와 함께 내구성을 개선하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 독일 막스플랑크 연구소의 Cherevko는 실시간 고주파 유도 결합 플라즈마(in-situ ICP) 분석법을 통해 루테튬산화물이 이리듐산화물과 비교해 높은 산화 전압에서 쉽게 전해질에 이온화된다는 연구결과를 발표했다. 산성조건에서 루테튬산화물의 분해 메커니즘은 $(\text{Ru}^{4+})\text{O}_2$ 가 물산화 반응 중 수화물인 $\text{RuO}_2(\text{OH})_2$ 로 상변화가 일어나고 높은 산화 전압 영역에서 탈양자화 반응을 통해 높은 산화수를 가지는 $(\text{Ru}^{8+})\text{O}_4$ 로 변하게 된다. 높은 산화수를 가지는 루테튬산화물은 산성 전해질에 쉽게 이온화되어 촉매의 활성을 감소시킨다. 이리듐산화물의 경우 루테튬산화물과 비교해 내구성이 좋지만 장시간 높은 산화 전압에 노출될 경우 이리듐산화물도 높은 산화수를 가지는 $(\text{Ir}^{6+})\text{O}_3$ 의 형태가 되어 전해질에 쉽게 이온화된다. 이런 문제를 해결하기 위해 도핑된 이종금속 형태의 촉매와 비탄소계 담지체를 사용하여 IrO_x 의 산화수를 조절하는 연구가 제안되었다. 촉매 활성도가 높은 루테튬에 소량의 이리듐을 도핑한 $\text{Ru}_x\text{Ir}_{1-x}\text{O}_2$ 는 RuO_x 의 높은 활성을 유지하면서 이리듐의 도핑을 통해 루테튬의 이온화를 억제하여 내구성을 개선하였다.<그림 4>(b). 그리고 전도성 금속 산화물을 담지체로 사용하여 IrO_x 촉매와 담지체간의 결합력에 의해 IrO_x 의 산화수 증가를 억제하여 내구성이 개선되는 연구 결과도 보고되었다.

1 전분산화, 현대과학기술을 만나 보겠습니다.

2 화학연료, 이 제 때 양분이 꼭 필요합니다.

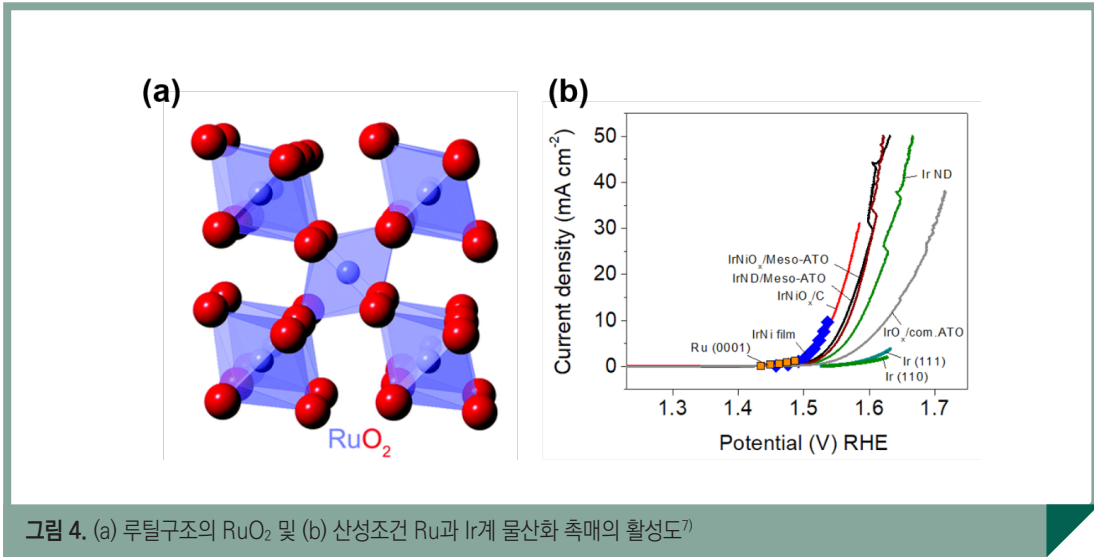


그림 4. (a) 루틸구조의 RuO₂ 및 (b) 산성조건 Ru과 Ir계 물산화 촉매의 활성화도⁷⁾

2.1.2 페로브스카이트 계열(Perovskite family)

귀금속이 아닌 페로브스카이트를 물산화 촉매에 적용하는 연구가 또한 활발히 진행 중이다. 페로브스카이트는 이리듐산화물과 같은 귀금속과 비교하여 가격이 저렴하다는 장점이 있으며 일반적 구조는 <그림 5>(a)에서 확인할 수 있듯이 'ABO₃'이다. A는 알칼리금속 또는 희토류 금속이며, B는 전이금속을 나타낸다. '(A₁²⁺)(B⁴⁺)O₃', '(A₂³⁺)(B³⁺)O₃' 또는 '(A₁²⁺)_{0.5}(A₂³⁺)_{0.5}(B^{3.5+})O₃'의 형태로 존재가 가능하며, 페로브스카이트의 전이금속 산화수는 알칼리금속(A₁)과 희토류 금속(A₂)의 도핑 조성을 통해 조절이 가능하다. 전통적 연구는 페로브스카이트의 조성을 달리하여 물산화 촉매의 활성을 높이는 연구가 집중 되었으며 일본의 Matsumoto에 의해 촉매의 전자구조와 활성이 연관성이 있음이 밝혀졌다. Matsumoto는 'La_{1-x}Sr_xFe_{1-y}Co_yO₃' 촉매에서 x와 y의 값이 커질수록 물산화 촉매의 활성이 증가한다는 연구결과를 발표했으며, 코발트(Co) 산화수 증가가 촉매활성 개선의 원인이라고 보고했다. 이런 결과는 페로브스카이트의 d 오비탈영역 전자구조에 따라 크게 좌우된다는 것을 의미하며, 실제 Bockris는 페로브스카이트의 전이금속에 있는 d 오비탈영역의 전자가 채워진 정도에 따라 (니켈 > 코발트 > 철 > 망간 > 크롬) 물산화 촉매의 활성도가 결정됨을 확인하였다. Suntivich는 분열된 d 오비탈의 e_g 영역 전자와 전이금속-산소원자 간의 공유결합을 고려하여 <그림 5>(b)에서 보는 것처럼 페로브스카이트계 물산화 촉매 중 가장 활성이 높은 'Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ}(BSCF)'

촉매를 합성하였다.⁸⁾ 이처럼 물산화 촉매의 활성과 d 오비탈의 연관성은 계산화학을 통해서도 입증되었다. Nørskov의 연구결과에 따르면 분열된 d 오비탈의 e_g 와 t_{2g} 영역의 전자들이 산소의 흡착에너지에 영향을 주어 물산화 촉매의 활성에도 영향을 준다고 설명하고 있다. 또한 Sabatier 원리에 따라 페로브스카이트 물산화 촉매와 산소와의 흡착에너지를 설명하였으며, 'LaCuO₃'의 경우 흡착에너지가 너무 강하고, 'LaMnO₃'의 경우 흡착에너지가 너무 약해 물산화 촉매로 적합하지 않다고 설명했다. 물산화 촉매로 가장 적합한 촉매는 'LaCoO₃'와 'LaNiO₃'으로 적절한 산소 흡착에너지를 가지고 물질들이며 이러한 근거로 코발트와 니켈 기반의 페로브스카이트가 높은 물산화 촉매 활성을 보임을 설명할 수 있다.

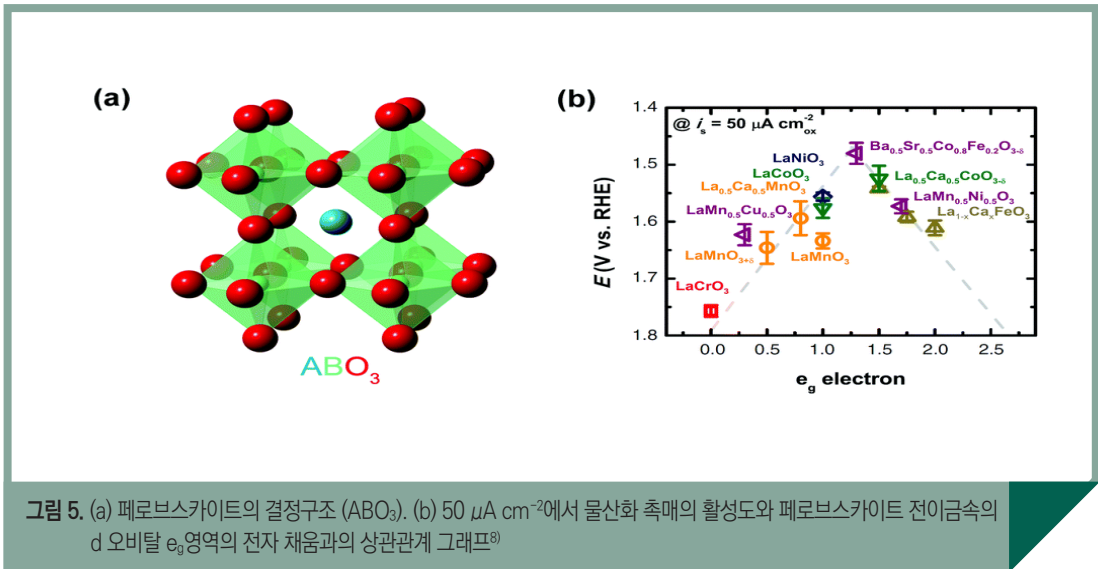


그림 5. (a) 페로브스카이트의 결정구조 (ABO₃). (b) 50 $\mu\text{A cm}^{-2}$ 에서 물산화 촉매의 활성화도와 페로브스카이트 전이금속의 d 오비탈 e_g 영역의 전자 채움과의 상관관계 그래프⁸⁾

2.1.3 스피넬 계열(Spinel family)

스피넬 화합물은 일반적으로 전기전도성이 뛰어나고 높은 전압 조건의 염기성 수용액에서 안정성을 보이며, 비귀금속 물질들로 구성되어 있어 물산화 촉매로 적합하다. 스피넬의 화학식은 A'B₂O₄이며, A'와 B'는 2족, 13족 그리고 4주기 전이금속들로 구성되어 있다. 스피넬 구조는 <그림 6>(a)에서 보는 것과 같이 다소 복잡한 구조로 되어 있으며 8면체(octahedral, Oh)와 4면체(tetrahedral, Td)의 두 결정의 조합으로 구성되어 있다. 일반적인 스피넬은 철(ferrite)과 코발트에 전이금속 또는 알칼리금속(망간, 니켈, 구리, 아연, 리

튬)이 불순물로 적용된 화합물이다. 스피넬 화합물의 물산화 촉매로의 연구는 다양한 금속 조합을 통해 촉매 활성을 높이는 연구가 집중 되었으며 단일 금속의 스피넬 산화물 촉매보다는 이중금속 스피넬 산화물 촉매의 활성이 뛰어난을 공통적으로 보고하고 있다. 중국의 Li는 다양한 조성의 스피넬 화합물을 나노섬유형태로 만들어 물산화 촉매 활성을 비교하였으며 'CoFe₂O₄ > CuFe₂O₄ > NiFe₂O₄ > MnFe₂O₄'의 순서로 촉매 활성을 보였다. 또한 Singh와 Al-Hoshan은 'Ni_xFe_{3-x}O₄'구조에서 니켈의 해리가 촉매의 활성을 높인다는 연구 결과를 발표하였다. 그리고 'M_xCo_{3-x}O₄(M=Co, Ni, Cu, Mn)'와 같이 코발트 기반의 촉매의 경우 망간을 제외한 불순물의 첨가가 물산화 촉매 활성 개선에 도움이 되었다. 이런 이중 스피넬 산화물은 물산화 반응 중 불순물이 해리되면서 촉매의 전자 구조를 바꾸는 것은 물론 중간생성물과 반응물질간의 결합조건을 최적화해줌으로서 촉매 활성을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 최근 가장 주목받고 있는 연구 분야는 물산화 반응 중 높은 산화 전압 영역에서 스피넬 화합물의 구조가 변화하는 것이다. 물산화 반응 중 철 또는 코발트에 있는 불순물이 해리되면서 동시에 스피넬 구조가 금속 수산화물(metal oxyhydroxide)로 바뀌게 되고, 높은 촉매 활성을 보여주는 연구결과를 많은 연구자들이 최근 보고하고 있으며 이런 금속 수산화물의 생성은 다음에 언급할 층구조 산화물(layer-structure oxide) 연구에 많은 영감을 주었다.

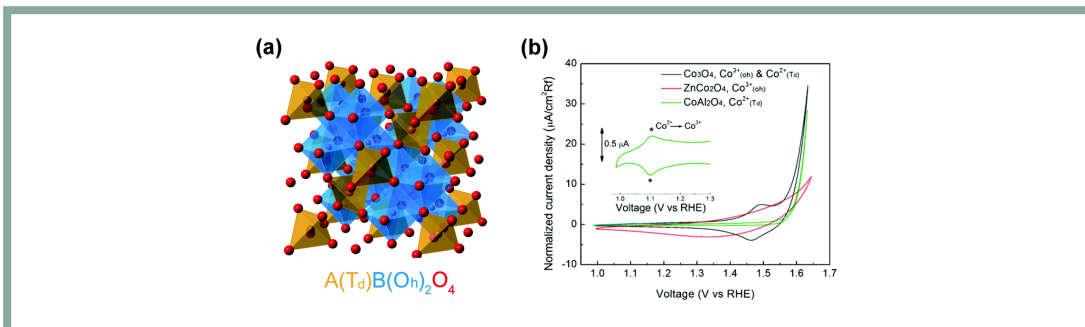


그림 6. (a) 스피넬 화합물의 결정구조 (AB₂O₄). (b) 스피넬 화합물인 Co₃O₄, ZnCo₂O₄, CoAl₂O₄의 물산화 반응 활성도 비교 그래프⁹⁾

2.1.4 층구조 산화물(Layer structure type family)

층구조 화합물은 높은 전기전도도를 가진 것으로 알려져 있으며 1970년대 알칼리 전지의 소재로 많이 사용되었다. 일반적으로 층구조를 가지는 금속 수산화물(M(OH)₂, M=전이금속)과 옥시수산화물(MOOH)은 높은 물산화 촉매 활성을 가지고 있으며 <그림 7>(a)에서 그 구조를 확인 할 수 있다. 이러한 물질은 통상 이중층수산화물(Layered double hydroxide, LDH)로 분류되며 물산화 촉매로 가장 많이 사용되는 물질은 코발트와

니켈 기반의 화합물이다. 다양한 종류의 LDH 옥시수산화물이 존재하며 <그림 7>(a)에서 보는 것처럼 산화물 층간 d-spacing의 차이에 따라 β -CoOOH와 γ -CoOOH로 구분된다. β -CoOOH의 경우 산화물 층간 물질이 수소이온(H⁺)이며, d-spacing은 약 4.6 Å이고 (3+)의 산화수를 갖는다. 반면 γ -CoOOH의 경우 산화물의 층간 물질이 물과 알칼리 물질인 Na⁺또는 K⁺가 존재하며, d-spacing은 약 7 Å이고 (>3+) 이상의 산화수를 갖는다. Subbaraman은 이런 이중층수산화물 구조를 다양한 전이금속들(니켈, 코발트, 철, 망간)에 적용하여 물 산화 반응의 활성도를 측정하였고 페로브스카이트와 동일한 경향성(니켈 > 코발트 > 철 > 망간)을 보임을 밝혀냈다. 이런 결과는 Sabatier 이론에 따라 니켈과 수산화물(OH)간의 최적화된 결합력을 근거로 제시하고 있다. Corrigan과 Trotochaud는 'NiOOH'에 불순물인 철이 첨가될 경우 물산화 촉매의 활성이 급격하게 증가함을 확인하였다.¹⁰ <그림 7>(b)에서 확인 할 수 있듯이 'Ni_{1-x}Fe_xOOH' 촉매의 철의 함량이 25%까지 증가 했을 때 물산화 반응을 위한 과전압이 200 mV 감소하였다. Song은 LDH 구조의 'NiFe' 촉매를 박리공정(exfoliation process)을 통해 단층의 'Ni_{1-x}Fe_xOOH'를 합성하여 물산화 촉매로 적용하였으며, 10mA cm⁻²에서 IrO₂의 과전압보다 낮은 ~300 mV의 수치를 보였다. LDH 구조를 가지는 'CoOOH'에 불순물인 철이 첨가 되었을 때, 'NiOOH'의 물산화 활성도 증가와 동일한 결과를 얻을 수 있었으며 망간, 크롬, 텅스텐의 첨가물이 니켈 또는 코발트 LDH 촉매에 첨가 되었을 때도 향상된 물산화 촉매 활성도를 얻을 수 있었다.

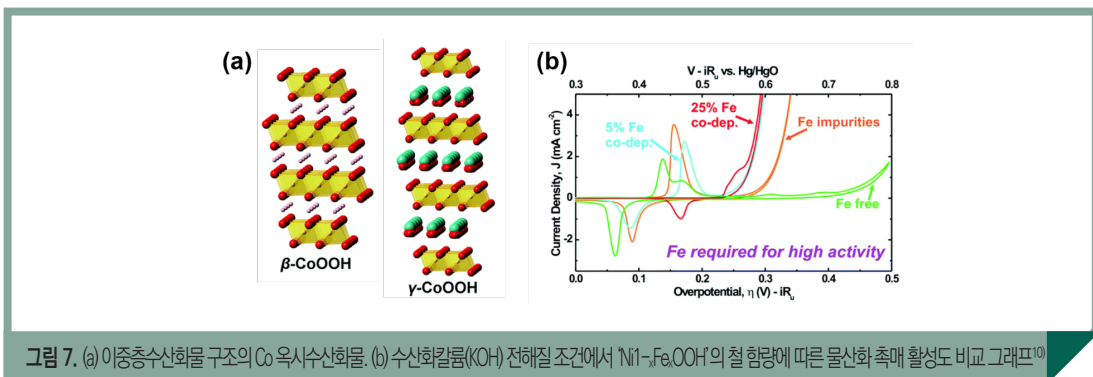


그림 7. (a) 이중층수산화물 구조의 Co 옥시수산화물. (b) 수산화칼륨(KOH) 전해질 조건에서 Ni_{1-x}Fe_xOOH의 철 함량에 따른 물산화 촉매 활성도 비교 그래프¹⁰⁾

2.1.5 칼코게나이드(Chalcogenide family)

물산화 촉매로 활용되는 칼코게나이드는 코발트와 니켈을 기본으로 황(S)과 셀레늄(Se) 그리고 텔루륨(Te)이 적용된 화합물이며 화학식은 'TC, TC₂, T9S8, Ni₃C₂, T₃S₄ (T= Co, Ni, C= S, Se, Te)'이다. 일반적으로 칼코게나이드는 물산화 반응과 수소 발생반응을 함께 할 수 있는 양기능성 촉매로 많이 활용된다. 독

일 막스플랑크 연구소의 Chen은 스테인리스스틸 메쉬에 'NiS'를 성장시켜 물산화 촉매로 사용하였으며 11 mA cm^{-2} 에서 $\sim 297 \text{ mV}$ 의 과전압을 보였다. 또한 금속 산화물 촉매의 물산화 활성도 개선 연구 접근방법과 같이 칼코게나이드 촉매에도 동일한 접근 방법이 시도 되었다. 실제로 10 mA cm^{-2} 조건에서 ' $\text{Co}_{0.85}\text{Se}$ '의 과전압은 324 mV 였던 반면 니켈이 첨가된 ' $(\text{Ni},\text{Co})_{0.85}\text{Se}$ '의 경우 과전압이 255 mV 로 촉매 활성이 개선되었다. 반응 메커니즘 연구에서 ' CoSe '과 ' NiS '가 물산화 과정 중 산화물이나 옥시수산화물로 상변이를 일으키며 물산화 촉매의 활성이 높아진다는 연구 결과가 있었다. 이런 상변이는 스피넬 계열의 물산화 촉매에서 보여지는 ' $\text{Ni}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ '에서 ' $\text{Ni}^{3+}/\text{Co}^{3+}$ '로의 산화 반응과 비슷하며 물산화 촉매의 과전압 측정에 있어 산화반응에 의한 페러데이 전류가 값이 측정될 수 있음에 주의해야한다. Liu는 <그림 8>(a)처럼 ' CoSe_2 '의 박리 공정(exfoliation process)을 통해 물산화 촉매의 활성 면적을 증가시켜 촉매 활성을 높이는 연구를 진행하였다. 그리고 최근 가장 높은 촉매 활성을 보인 칼코게나이드는 <그림 8>(b)에서 확인 할 수 있는 철이 도핑된 ' NiSe_2 '촉매로 10 mA cm^{-2} 조건에서 $\sim 195 \text{ mV}$ 의 낮은 과전압을 보였다.¹¹⁾ 물산화 반응 중 ' $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Se}_2$ '는 셀레늄의 양이 줄어들면서 산소의 양이 증가했으며, 옥시수산화물로의 상변화를 일으켰다. ' Ni_3Se_2 '의 물산화 활성은 10 mA cm^{-2} 에서 310 mV 의 과전압으로 ' NiFe-LDH '와 비슷한 촉매 활성을 보인 반면 타펠(Tafel) 기울기가 97.2 mV dec^{-1} 로 2배 이상 높은 수치를 보였다. 이런 결과는 ' Ni_3Se_2 '의 물산화 반응에서 속도결정단계가 ' NiFe-LDH '와 다름을 의미한다.

이외 유기금속, 탄소 등의 소재를 활용한 물산화 촉매 연구도 진행 중이며 일반적으로 물산화 촉매는 인가되는 전압에 따라 상이 변하거나 산화수가 변하기 때문에 실시간 분석법(in-situ UV-vis, Raman, X-ray absorption technique 등) 연구가 동반되어야 한다.

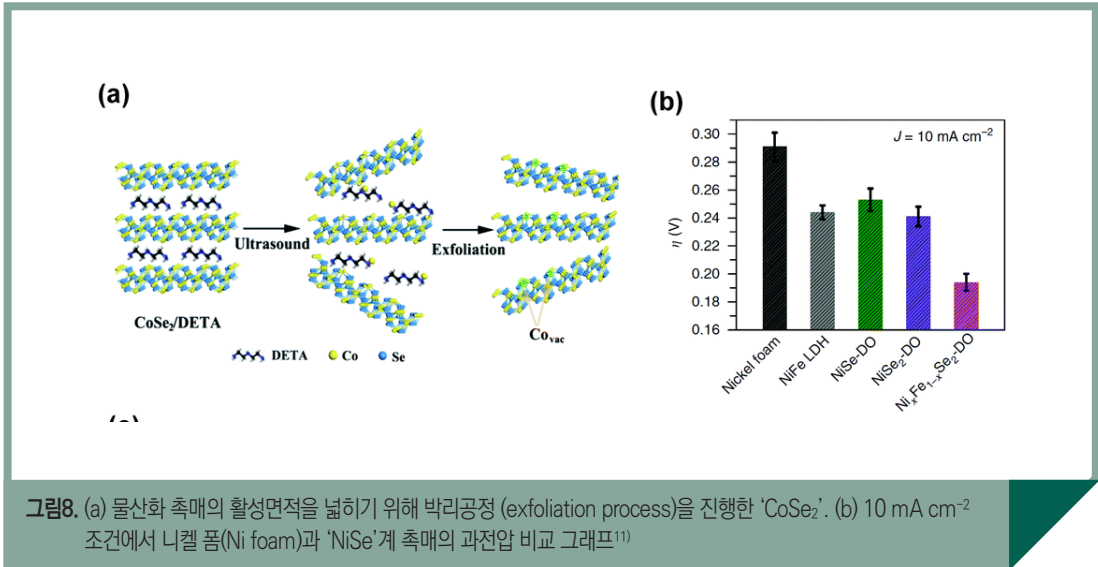


그림8. (a) 물산화 촉매의 활성면적을 넓히기 위해 박리공정 (exfoliation process)을 진행한 'CoSe₂'. (b) 10 mA cm⁻² 조건에서 니켈 폼(Ni foam)과 'NiSe'계 촉매의 과전압 비교 그래프¹¹⁾

2.2 이산화탄소 환원 촉매 기술

앞서 언급했듯이 이산화탄소의 환원을 통해 우리가 원하는 화합물을 생산하기 위해서는 고선택성 이산화탄소 환원 전기화학 촉매 기술이 매우 중요하며 촉매의 특성에 따라 포름산(HCOOH), 일산화탄소(CO), 메탄(CH₄), 에틸렌(C₂H₄), 에탄올(C₂H₅OH), 프로판올(C₃H₇OH) 등 다양한 고부가가치 연료를 생성해낼 수 있다. 또한 이산화탄소는 매우 안정한 물질이기 때문에 반응의 활성화에너지에 해당하는 과전압(overpotential)을 낮춰 전체 에너지 사용량을 최소화하기 위해서는 고효성의 전극 촉매 개발이 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 기고에서는 현재까지 상대적으로 많은 연구가 이루어진 일산화탄소, 개미산 등의 C1 화합물 생산을 위한 전기화학촉매와 최근 들어 연구가 활발히 시작되고 있는 에틸렌, 에탄올과 같은 C2 이상 화합물 생산을 위한 촉매에 관한 주제로 구분하여 최신 연구동향을 소개하고자 한다.

iv) 전극 반응에 의한 전하 이동에 기인하여 흐르는 전류

2.2.1 C1 화합물 생산 전기화학 촉매 기술

이산화탄소 환원 반응을 통해 생성될 수 있는 다양한 종류의 화합물 중 C1화합물인 포름산/포름산염(formic acid/formate, HCOOH/HCOO⁻)과 일산화탄소는 2전자 반응 경로를 거치기 때문에 다른 화합물들에 비해 비교적 쉽게 생성될 수 있다. 또한 이 두 화합물 모두 다양한 산업분야에서 높은 수요를 가지고 있기 때문에 많은 연구들이 진행되어 오고 있다.

전기화학적 이산화탄소 전환 연구를 본격적으로 시작한 일본의 Y. Hori 그룹은 주기율표에 있는 다양한 금속을 모두 테스트하여 각 원소가 가지고 있는 촉매적 특성을 조사하였다(그림 9).¹²⁾ 그 결과 금속들은 크게 4가지 군으로 분류되었는데 그 중 납(Pb), 수은(Hg), 탈륨(Tl), 인듐(In), 주석(Sn), 카드뮴(Cd), 비스무스(Bi) 등은 포름산 생성에 선택성을 보였으며 금(Au), 은(Ag), 아연(Zn), 팔라듐(Pd), 갈륨(Ga) 등은 일산화탄소 생성에 선택성을 보였다. 그 외에 유일하게 탄화수소 생산이 가능했던 금속에는 구리(Cu)가 있었으며 니켈(Ni), 철(Fe), 백금(Pt), 티타늄(Ti)은 이산화탄소 환원에 거의 활성을 보이지 않으며 이산화탄소의 경쟁반응인 수소생성반응이 발생한 것으로 보고되었다. 그렇다면 이러한 각 물질의 촉매적 활성 및 생성물의 차이는 왜 발생하는 것일까?

1A																	8B
H																	He
2A											3B	4B	5B	6B	7B		
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
		3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B								
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

그림 9. 다양한 금속에서의 이산화탄소 활성 비교¹²⁾

물질의 표면은 다양한 반응중간체(reaction intermediate)에 대한 서로 다른 결합에너지(binding energy)를 가지고 있다. 특정 반응중간체와의 결합이 강하고 약한 정도에 따라서 이산화탄소 환원의 활성은 물론 생성물의 종류가 결정 된다고 할 수 있다. 따라서 같은 2전자 반응임에도 최종 생산물이 포름산 또는 일산화탄소 등과 같이 서로 다르게 결정되는 요인 역시 반응중간체와의 결합에너지의 영향이라고 할 수 있다. Stanford University의 Thomas F. Jaramillo 그룹에서 2017년 발표한 논문에 의하면 일산화탄소와 포름산에 대한 선택도는 각각 *COOH 와 *OCHO 반응중간체에 대한 결합에너지에 의해서 결정된다고 한다(그림 10).¹³⁾ 일산화탄소 생성의 경우 *COOH 와의 결합에너지가 너무 강하지도 너무 약하지도 않은 금이 가장 이상적인 촉매이며 포름산의 경우에는 *OCHO 와의 이상적인 결합에너지를 가지고 있는 주석에서 가장 잘 생성될 수 있다고 보고하고 있다. 현재 전 세계의 많은 연구팀은 이러한 물질 고유의 특성을 고려하여 고효율, 고효율, 고내구성의 촉매를 제작하기 위해 다양한 전략으로 흥미로운 연구들을 진행하고 있다.

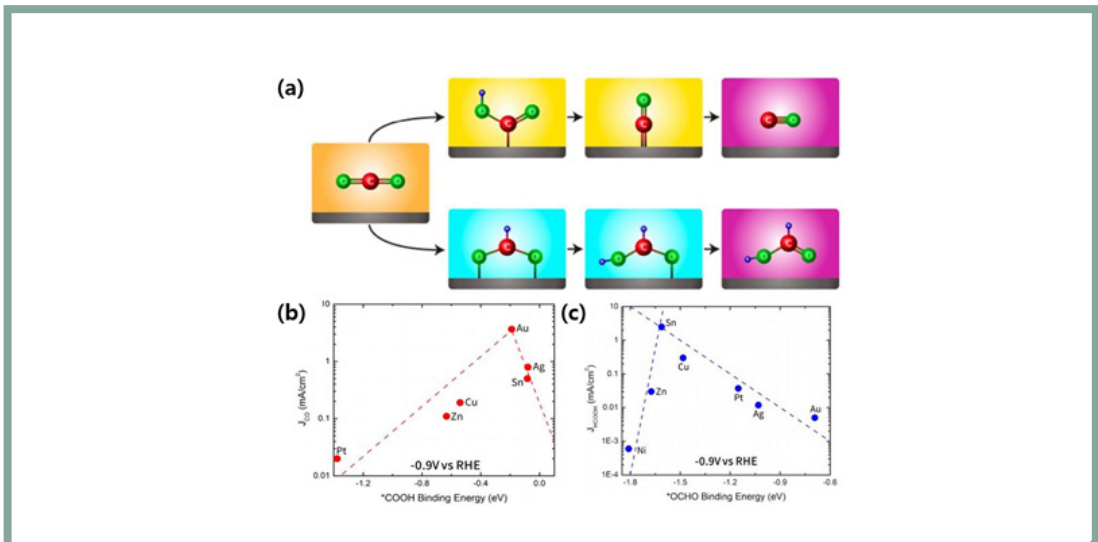


그림10. (a) 이산화탄소 전환을 통한 일산화탄소 및 포름산 생성의 메커니즘. 다양한 금속들의 (b) 일산화탄소 생성 반응중간체와의 결합에너지 및 (c) 포름산 생성 반응중간체와의 결합에너지.¹³⁾

2.2.2 일산화탄소 생성 촉매 개발

일산화탄소의 경우 전기화학적 이산화탄소 전환 시스템에서 부반응으로 발생하는 수소 기체와 함께 ‘합성 가스(syn-gas)’로서 피셔-트로프시(Fischer-Tropsch) 반응^{v)}을 통해 높은 에너지밀도를 가진 탄화수소로 전환될 수 있어 매우 높은 산업적 잠재력을 가진 화학원료라고 할 수 있다.

① 금속기반 촉매

일산화탄소의 경우 <그림 9.10>에서 확인하였듯이 주로 금, 은, 팔라듐 등의 귀금속 계열에서 높은 환원 활성을 보임을 확인할 수 있으며 비귀금속 계열로는 아연이 유사한 특성을 지니고 있다. 이러한 본질적 특성 이외에 이산화탄소 전환은 여러 단계의 전자 전달이 필요한 매우 복잡한 반응이기 때문에 촉매의 표면 개질 및 구조개선 등 다양한 개발 전략이 필요하다.

금 촉매는 일산화탄소 생성을 위한 가장 이상적인 결합에너지를 갖기 때문에 일산화탄소 생성을 위한 과전압이 낮고 높은 전류 밀도로 표현되는 활성 및 페러데이 효율(Faradaic efficiency)로 표현되는 선택도가 높다는 장점이 있다. 금을 이산화탄소 전환 촉매로 본격적으로 이용하게 된 연구의 시작은 2012년 미국 Stanford 대학의 Matthew W. Kanan 그룹에서부터다. 기본적으로 촉매 반응 효율을 높이기 위해서는 많은 활성점(active site)^{vi)}을 공급할 수 있도록 촉매 표면적이 넓어야 한다. 따라서 이들은 금 포일(foil)을 산화시킨 다음에 다시 환원시켜 표면을 나노구조(nanostructure)화 함으로써 $-0.35 V_{RHE}$ 이라는 낮은 과전압 조건에서 90% 이상의 높은 활성을 보이는 촉매를 제조할 수 있었다. 이 그룹이 개발한 산화-환원을 통한 금속 나노구조화 기술은 ‘oxide-derived method’로 불리며 현재까지도 다양한 금속기반 촉매 제작에 응용되고 있다. 그렇다면 나노구조가 되었을 때 발생하는 금의 다양한 면 중 과연 어떤 면(facet) 혹은 점(site)이 촉매 활성에 높은 영향을 주는 것일까? 이를 규명하기 위해 미국 Brown 대학의 Andrew A. Peterson 과 Shouheng Sun 그룹은 금 나노파티클을 4-10 nm로 제작하고 각 나노파티클이 보유하고 있는 면과 점의 종류와 개수를 계산하였고 각각의 이산화탄소 환원 성능과의 연관관계를 실험적 방법과 이론적 계산

v) 1920년대 초 독일의 F. Fischer 및 H. Tropsch에 의해 개발된 일산화탄소와 수소로부터 탄화수소 혼합물을 얻는 방법

vi) 고체, 착물, 효소 등의 촉매에서 반응 물질이 흡착 혹은 배위하여 반응이 진행되는 국소적인 구조. 활성자리 또는 활성 중심이라고도 한다

(Density functional theory, DFT)을 통해 규명하였다. 결과적으로 금속 나노파티클에 있는 코너점(corner site)이 이산화탄소 환원을 위한 과전압이 가장 낮다는 것을 DFT 계산을 통해 알아냈다. 비슷한 연구 결과는 독일의 Peter strasser와 Beatriz Roldan Cuenya 그룹에 의해서도 보고되었는데 금 입자 크기가 작아질수록 즉 'low-coordinated site'가 많아질수록 반응물/반응중간체와의 강한 결합이 가능해 활성이 좋아진다고 보고하고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 높은 촉매 활성을 지닐 것 같은 구조가 미리 예측 가능해지며 금 와이어 형태 촉매, 금 바늘 형태 촉매 등의 다양한 구조들이 시도되었고 그 결과 촉매 활성도 비약적으로 증대되고 있다.

이렇게 우월한 성능을 보이는 은 촉매이지만 향후 실용화 관점에서는 소재 가격이 너무 비싸다는 치명적 단점을 가지고 있다. 실질적 상용 공정으로의 적용을 고려해 본다면 아무리 성능이 좋다 해도 귀금속인 금을 촉매로 이용하는 데는 한계가 존재할 수밖에 없다. 따라서 같은 귀금속이지만 가격은 금의 75분의 1정도로 싸면서도 우수한 촉매 성능을 보이는 은 소재를 기반으로 한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 은 촉매 디자인 전략과 마찬가지로 높은 표면적과 'low-coordinated site' 도입으로 반응중간체 안정화를 통해 일산화탄소 생성에 고효성을 보이는 다양한 은 촉매가 제작되었다. 은 나노파티클, 나노구조 은, 메조포러스 은, 클로라이드 이온을 이용한 은 나노구조 제작, 전기화학적 방법을 통한 산화처리로부터 유도된 은(oxide-derived Ag) 혹은 플라즈마를 이용한 나노 은 촉매 제조 등 다양한 접근법을 통해 꾸준한 효율 향상이 이루어지고 있으며 동시에 반응 메커니즘 연구를 통한 은의 촉매 기작에 대한 이해의 폭도 넓어지고 있다. 또한 은의 표면 결합에너지를 조절하기 위한 새로운 전략으로 산소, 질소, 황 등 이종 원소를 은에 공급해줌으로써 은의 표면 에너지를 변화시키려는 획기적인 시도들도 진행되고 있다.¹⁵⁾ 특히나 산소의 경우 산화-환원 방법과 관련하여 표면(surface) 혹은 아표층(subsurface)에 남아있는 산소의 존재와 이 산소가 반응중간체와의 결합에너지를 높일 수 있다는 것이 실험적으로 밝혀졌는데, 따라서 잔존 산소를 만들 수 있는 합성법과 환원 분위기에서 산소가 어떻게 존재할 수 있는지에 대한 연구도 진행되어 매우 높은 성능을 보이는 은 촉매의 개발이 조만간 이루어질 것으로 기대된다.

이 외에도 최근에는 아연, 팔라듐 등의 금속도 일산화탄소 생성을 위한 촉매로서 많이 관심을 받고 있으며 그동안 금과 은 촉매 개발에서 진행되어왔듯이 구조에 따른 성능과 이산화탄소 활성에 대한 원리 등이 실험 및 이론적 방법들을 통해서 규명되고 있다.

② 합금 촉매

단일 원소의 고유 특성상 구조적, 화학적 조작만으로는 도달할 수 있는 촉매 성능의 최고점에는 한계가 존재할 수밖에 없다. 따라서 이를 극복하기 위해 서로 다른 성질을 가지고 있는 두 가지 원소를 섞어 이원금속(bimetallic) 상태, 합금(alloy) 상태 혹은 코어셸(core-shell) 형태로 구현하는 방법들이 시도되고 있다. 합금 촉매를 개발하는 또 다른 이유는 금과 팔라듐과 같이 활성이 좋은 귀금속을 사용하지 저렴한 가격의 다른 비귀금속과 혼합하여 귀금속 사용량을 줄여 촉매 단가를 낮추기 위한 목적으로 시도되기도 한다. 하지만 두 원소를 조합하였을 때 반응에 영향을 미칠 수 있는 변수가 많아지며 촉매의 성능 예측이 어렵다는 단점이 있다. 하지만 최근 William A. Goddard, III와 Zhijiang Wang 그룹에서 보고한 금-철 코어셸 나노입자의 경우, 앞서 언급된 합금 촉매의 두 가지 목적을 모두 충족하면서도 -0.2 V의 낮은 과전압과 97% 정도의 높은 일산화탄소 생성효율이 90시간 동안 안정적으로 지속되는 결과를 보고해 합금 촉매의 높은 발전 가능성을 보여 주었다.¹⁶⁾ 그 외에도 팔라듐-구리, 인듐-구리 은-구리 등 다양한 많은 조합들이 시도되고 있으며 합금 촉매에 대한 이해도 점차 높아지고 있다.

③ 그 외 촉매

금속 기반 촉매 외에도 다양한 촉매들이 적용되고 있는데 그 중 하나가 연료전지 시스템의 산소환원 촉매로서 오랜 기간 개발이 진행되어왔던 탄소기반 촉매이다. 불순물 증착이나 탄소 증착에 의해 장시간 내 구성이 낮은 금속 촉매들과 달리 내구성이 좋다는 장점이 있는 탄소 기반 촉매는 이산화탄소 환원 시스템에서도 훌륭한 성능을 보이고 있다. 탄소 나노 튜브(carbon nanotube, CNT), 그래핀(graphene) 등 잘 알려져 있는 탄소 물질에 질소를 도핑해 다양한 탄소 촉매(N-doped carbon)를 제조하였으며 질소 도핑 과정에 철, 망간, 니켈 등의 금속을 함께 도입함으로써 'Metal-N-C' 촉매(예, Fe-N-C, Mn-N-C, Ni-N-C 등)를 개발할 수 있었으며 50-90%사이의 일산화탄소 생성 선택도를 기록하며 금속기반 촉매의 발전 속도를 따라잡고 있다.¹⁷⁾ 이 촉매의 경우 아직까지 활성점에 대한 명확한 규명이 필요하며 현재는 다양한 주장들이 제시되고 있다. 예로서 다양한 형태로 도핑된 질소가 활성점임을 주장하며 이에 대한 DFT 계산 결과를 통해 'pyridinic N' 또는 'quaternary N'을 활성점이라는 제안이 있으며 반면에 도핑된 질소에 인접한 탄소가 활성점임을 주장하기도 하고 질소 도핑 중 도입된 'Metal-N-C site'가 활성점임을 주장하기도 한다. 이 외에도 다양한 유기금속(organometallic) 촉매, 금속 황화물(예, MoS₂)등도 이산화탄소 환원 촉매로서 왕성한 연구 중에 있다.

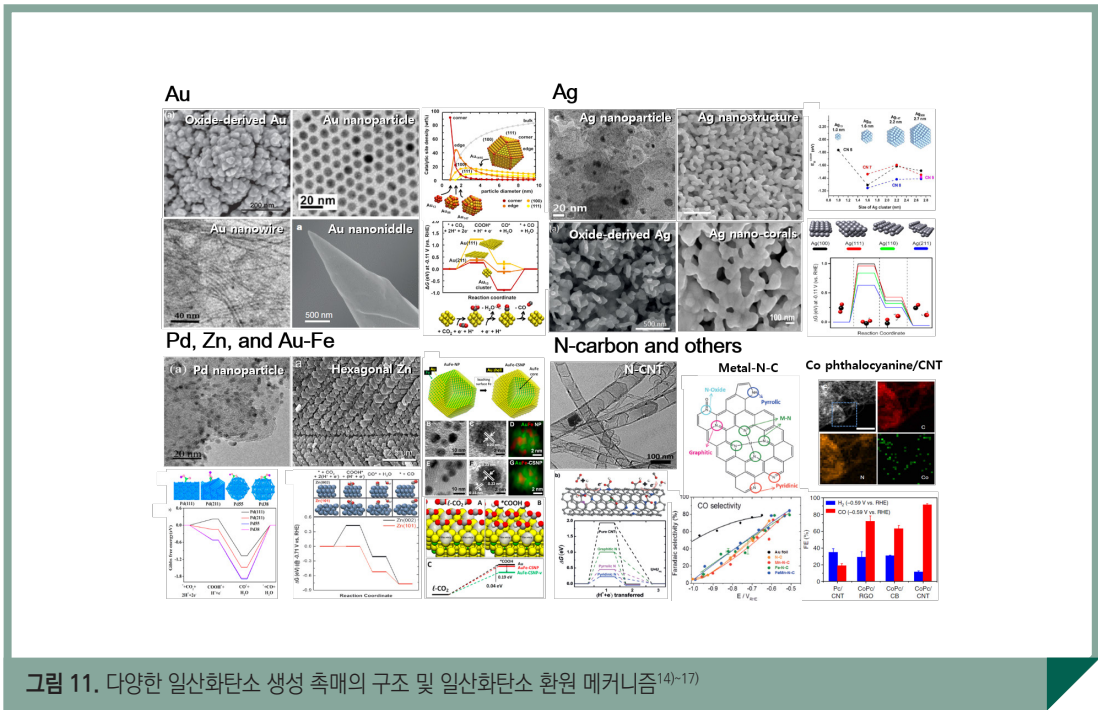


그림 11. 다양한 일산화탄소 생성 촉매의 구조 및 일산화탄소 환원 메커니즘¹⁴⁾⁻¹⁷⁾

2.2.3 포름산-포름산염 생산 촉매 개발

포름산은 가죽 생산 공정, 방직 공장, 농업 등 다양한 분야에 사용되고 있으며 최근에는 포름산을 이용한 연료전지 및 배터리의 개발에 대한 연구도 진행되고 있어 향후 포름산에 대한 수요가 증가할 것으로 전망된다.

① 금속 기반 촉매

〈그림 9, 10〉에서 볼 수 있듯이 주석, 납, 비스무스, 카드뮴, 인듐 등이 포름산 생성이 가능한 촉매로서 개발되어 왔다. 이 중에 가격, 환경적 측면은 물론 포름산 생성을 위한 반응중간체와의 표면 결합에너지를 고려하였을 때 주석이 포름산 생성에 가장 적합한 촉매로 평가 받고 있다. 주석 촉매의 포름산 생성 전극촉매로서 본격적인 개발은 2012년 Matthew W. Kanan 그룹의 연구에서 시작되었다. 당시 이 그룹에서는 구리, 금 등 다양한 금속의 산화-환원(oxide-derived) 방법을 이용하여 이산화탄소 환원 전극 촉매 적용에 집중했는데 주석의 경우에는 이산화탄소 환원 반응 시스템 내에서 실시간(In-situ) 증착을 통해 주석산화물

(SnO_2)과 주석이 동시에 존재하도록 제작하여 포름산 ~40%, 일산화탄소 ~50% 환원 성능을 보였다. <그림 10>에서 확인할 수 있듯이 주석 촉매의 경우 일산화탄소 생성 중간체인 ‘*COOH’에 대한 결합에너지도 높으므로 일산화탄소 역시 생성물로 생성될 수 있다. 하지만 이후 연구들에서는 높은 포름산 전환 활성 및 선택성을 위하여 다양한 전략들이 시도되며 90%에 달하는 높은 포름산 생성 선택도를 기록하게 된다. 우선 전극촉매의 구조를 조절하여 반응에 참여하는 활성점을 증가시켜 주는 전략을 위해 3-200 nm 사이즈의 나노입자를 제작하여 포름산 생산 선택도를 테스트하기도 하고,¹⁸⁾ 주석을 덴드라이트(dendrite) 형태로 제작하는 등 다양한 구조의 주석 촉매가 개발되었다. 특히 주석의 경우 주석산화물의 도입이 반응중간체와의 결합에너지를 높이므로 포름산으로 반응 속도를 높인다는 주장들이 있어 주석산화물의 도입을 위해 전해질의 pH를 조절하거나, 주석 촉매 제작 후 추가적인 산화 처리하는 등의 방식을 적용한 촉매들이 개발되었다. 또한 Thomas J. Meyer 교수 그룹은 주석 촉매를 담지한 탄소 지지체를 바꿔가며 지지체와 촉매간의 강한 전기적 상호작용(electronic interaction)에 따라 촉매 특성이 개선될 수 있다는 연구 결과를 보고하였었는데¹⁸⁾ 이 연구의 후속 연구로 최근 University of Science and Technology of China의 Yongfu Sun, Tao Yao 와 Yi Xie 그룹에서는 주석을 얇은 퀀텀 닷(quantum dot) 형태로 그래핀 위에 올려 극도로 얇은 주석의 ‘low-coordinated site’와 그래핀의 높은 전도성의 조합으로 반응중간체가 잘 안정화되고 전자 전달이 원활해져 90%이상의 포름산 선택도 및 50시간의 안정성을 기록하였다는 연구 결과를 보고 하였다.

이 외에도 비스무스, 납 등과 함께 흥미롭게도 Y. Hori에 의해 일산화탄소 생성촉매로 구분되었던 팔라듐도 최근 연구들에서는 포름산 생성을 위한 촉매로도 개발되고 있다.¹⁹⁾ 최근 보고된 연구에 의하면 본래 팔라듐의 주된 생성물은 포름산이고 부산물이 일산화탄소이지만 팔라듐이 일산화탄소에 쉽게 피독(poisoning) 되는 물질이기 때문에 일산화탄소가 포름산 생성의 방해물(inhibitor)로 작용하며 안정성이 감소해 포름산 생성의 특성이 보이지 않고 높은 과전압 하에서 일산화탄소만이 발생하는 것으로 해석된다. 초기 연구에서는 비스무스 역시 비극성용액(aprotic solvent)에서 이온성 액체를(ionic liquid) 사용하는 조건에서는 일산화탄소 생성 촉매로 보고가 되었지만 이온성 액체의 가격적인 한계 때문에 최근 수계에서 비스무스를 포름산 생성 촉매로 많이 이용하고 있다. 이것은 촉매가 본질적 특성 외에도 구동 환경에 의해 다양한 특성을 보일 수 있는 것으로 해석할 수 있다. 비스무스와 팔라듐의 경우 역시 나노입자와 덴드라이트, 큐브 등의 다양한 형태로 개발하여 성능을 최적화하려는 연구가 진행되고 있고 동시에 비스무스와 팔라듐 촉매에서 일산화탄소 환원을 통한 포름산 생성 메커니즘을 규명하려는 노력들이 행해지고 있다. 비스무스의 경우엔 주석과

마찬가지로 '*OCHO' 중간체를 형성한 후 포름산 생성 후속반응이 진행되는 반응 메커니즘이 에너지적으로 가장 선호되는 반응 기작이지만 팔라듐 촉매의 경우 수소이온이 팔라듐 표면에 먼저 흡착한 뒤 수소이온과 이산화탄소가 반응해 후속 반응들이 진행되어 포름산이 생성되는 것으로 메커니즘이 설명되고 있다.²⁰⁾ 이는 촉매의 종류에 따라 포름산으로의 이산화탄소 환원 반응중간체 및 메커니즘 역시 다를 수 있고 앞서 언급한 대로 구동 환경에도 영향을 받을 수 있다는 것을 시사하고 있으며 이에 대한 명확한 이해를 위해서는 더 많은 후속 연구들이 필요하다.

② 합금 촉매 및 그 외 촉매

포름산 생성 촉매를 위한 합금은 앞서 일산화탄소 생성 촉매와 마찬가지로 표면의 전기적 특성을 조절하여 반응중간체를 안정화시켜 포름산으로의 반응 선택도 및 속도를 높이기 위해 다양한 연구가 시도되었다. 팔라듐과 같은 기존 포름산 생성 촉매에 백금과 같은 이종원소를 도입하여 원소의 비율이 다양한 나노입자를 제작해 포름산 생성에 가장 좋은 활성을 보이는 조합을 찾기도 하고, 팔라듐-주석과 같이 기존 포름산 생성 촉매를 조합하여 각 금속의 산화수(oxidation state)를 높이는 전략으로 반응중간체를 안정시켜 최적화함으로써 선택도 100%의 매우 높은 포름산 생성 효율 달성하기도 하였다.²¹⁾ 또 다른 연구로는 은 나노입자 위에 주석산화물을 코어셸 형태로 합성하여 표면에 존재하는 촉매 활성을 지니는 2D 형태의 매우 얇은 껍질을 전기전도성 부분과 접합하는 전략으로 같은 전압 조건에서 벌크(bulk) 주석에 비해 30% 가량 증가한 포름산 생성 효율을 보이기도 하였다.

그 외에도 주석산화물과 같이 코발트산화물(Co₂O₃) 등의 금속 산화물과 질소를 도핑한 탄소기반 물질(예, N-doped nanoporous carbon/CNT, N-doped graphene, Polyethylenimine-enhanced N-CNT)과 같은 질소를 도핑한 탄소 기반 물질 등이 포름산 생성 촉매로 개발되고 있다.

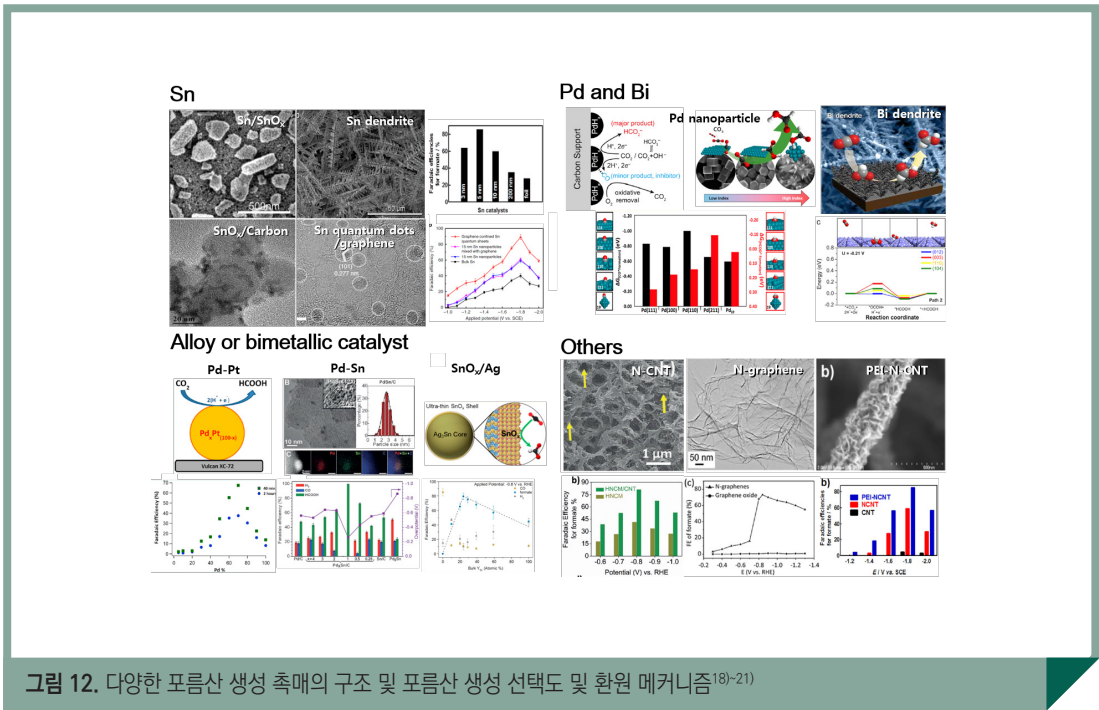


그림 12. 다양한 포름산 생성 촉매의 구조 및 포름산 생성 선택도 및 환원 메커니즘¹⁸⁾⁻²¹⁾

2.2.3 C2 이상 화합물 생산 촉매 기술

C1 화합물이 다양한 금속 촉매에 의해 생성되는 것과 달리 에틸렌, 옥살레이트, 프로필렌 등 C2 이상 화합물들은 거의 구리 기반의 촉매에 의해서만 생산되며 촉매 반응 원리 및 메커니즘 등에 대한 연구가 아직까지 많이 진행되지 않은 분야라고 할 수 있다.

① 구리 촉매의 일산화탄소 결합친화도와 이산화탄소 환원 선택도

구리 전극은 수용액 기반 이산화탄소의 전기화학적 환원을 통해 포름산, 일산화탄소, 메탄, 에틸렌, 에탄올, 프로판올에 이르는 다양한 고부가가치 연료를 생성해 낼 수 있기 때문에 큰 관심을 받고 있다. 다른 금속과는 다르게 구리 전극이 긴 탄소사슬을 가지는 연료를 생성해 낼 수 있는 이유는 'CO*' 중간체에 대한 결합에너지 차이에 기인한다. Norskov 교수 연구진의 DFT 계산 결과에 따르면 한 개의 이산화탄소는 8번의 수소화(hydrogenation) 반응단계를 거쳐서 메탄을 생성해내게 되는데, 이 때 관여하는 중간체는 순서대로

'COOH*', 'CO*', 'CHO*', 'CH₂O*', 'OCH₃*, 'O*', 'OH*' 이다<그림 13>.²²⁾ 모든 반응 단계의 한계 전위(limiting potential, U_i)는 중간체들의 선형비례관계에 기초하여 'CO*' 그리고 'OH*'에 대한 결합에너지의 함수로 나타낼 수 있다. 한계 전위가 가장 음의 값을 가지는 즉 가장 높은 과전압을 요구하는 반응 단계는 'CO₂ → COOH*', 'CO* → CHO*'이며, 'CO*'에 대한 결합친화도가 강할수록 'CO₂ → COOH*' 반응은 더 쉬워지는 반면, 'CO* → CHO*' 반응은 더 어려워진다. 구리 전극은 'CO*'에 대한 결합에너지가 중간 정도여서 메탄 생성 반응의 가장 낮은 과전압을 보여 줄 수 있다. 대조적으로 금과 은 전극의 경우, 'CO*'와 약하게 결합하기 때문에 'CO*' 탈착반응을 진행시키며, 백금의 경우 'CO*'와 강하게 결합하여 촉매 표면이 일산화탄소에 의해 고정되는 현상이 발생한다. 구리 전극이 선천적으로 가지는 일산화탄소 결합 친화도는 'CO*' 중간체가 구리 표면에 잘 안정화되도록 하며, 더 나아가서는 탄소-탄소(C-C)결합 및 수소첨가 반응이 진행되어 에틸렌, 에탄올을 생성해낼 수 있게 한다.

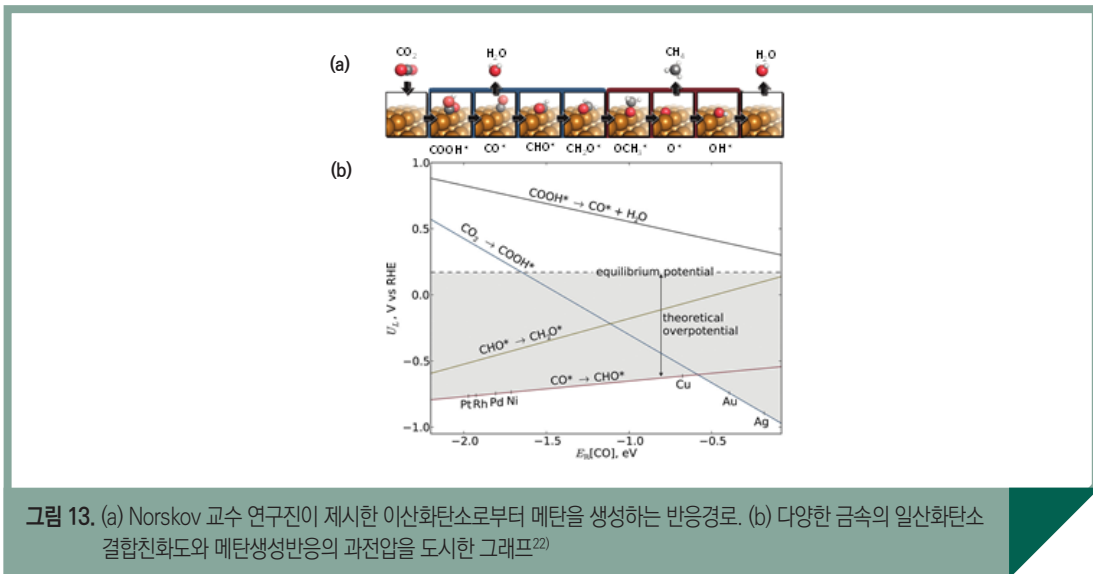


그림 13. (a) Norskov 교수 연구진이 제시한 이산화탄소로부터 메탄을 생성하는 반응경로. (b) 다양한 금속의 일산화탄소 결합친화도와 메탄생성반응의 과전압을 도시한 그래프²²⁾

② 일산화탄소 이합체화 반응을 통한 C2 화합물 생산 경로

구리 기반 촉매는 어떻게 탄소 사슬이 긴 화합물을 생성해낼까? 캘리포니아 공과대학의 Goddard 교수 연구진은 최근 구리 표면에서 이산화탄소가 환원되어 C2 생성물을 만들어내는 반응경로를 제안하였다<그림 14>.²³⁾ 우선 이산화탄소가 전자 2개와 양성자 2개를 통해 환원되어 일산화탄소가 구리 표면에 형성될 수 있다.

이 때 화학적으로 흡착된 일산화탄소는 앞서 언급하였듯이 수소첨가반응을 통해 메탄으로 전환될 수도 있지만 이와는 다르게 상대적으로 더 낮은 확률로 2개의 일산화탄소 분자 간에 탄소-탄소 결합이 형성되기도 한다. 이를 일산화탄소 이합체화(dimerization) 반응이라고 하며 이를 통해 일산화탄소가 유용한 에틸렌, 에탄올과 같은 고부가가치 화합물로 전환된다고 알려져 있다. 한편 구리 표면에서 수소 흡착 반응이 열역학 및 동역학적으로 매우 쉽게 일어나기 때문에 수소 생산 반응이 주요 경쟁 반응으로 작용하기도 한다. 즉 구리 기반 촉매의 C2 화합물 전환 선택도를 향상시키기 위해서는 일산화탄소 이합체화 반응을 촉진시킴과 동시에 수소 및 메탄 발생이 억제되어야 한다. 그렇다면 이를 달성하기 위해 제시되었던 전략에는 어떤 것들이 있을까?

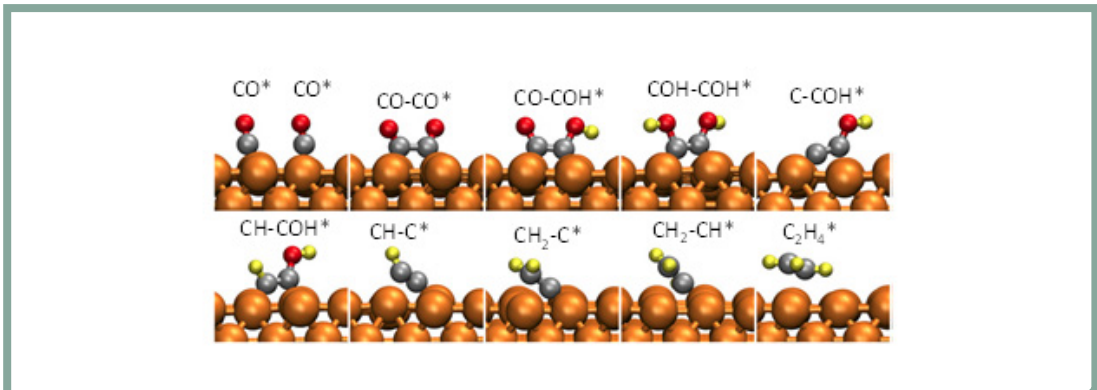


그림 14 Caltech의 Goddard 교수 연구진이 제안한 일산화탄소 이합체화 반응을 통한 에틸렌 생성 경로.²³⁾

③ 산화처리에 의해 유도된 구리(oxide-derived Cu)

Stanford 대학의 Kanan 교수 그룹은 2014년 Nature지에 산화처리에 의해 유도된 구리 전극을 이용하여 일산화탄소를 전기화학적으로 환원시킨 연구를 발표하였다. 산화처리에 의해 유도된 구리는 구리 전극을 산화시킨 후에 전기화학적으로 다시 환원시킨 구리 전극을 의미한다. 산화처리에 의해 유도된 구리 전극은 C2 연료를 55%의 선택도로 전환하였으며 이는 구리 나노입자 전극과 비교하여 11배 향상된 수치이다. 이러한 선도적 연구를 시작으로 구리 전극에 함유된 산소가 C2 생성물 선택도에 미치는 영향에 대해서 지속적으로 연구되고 있으며 여러 가설들이 제시되었다. 주요 가설 중의 하나는 촉매 표면에 형성된 산화구리(I)(Cu₂O) 상이 일산화탄소 이합체화 반응에 중요한 역할을 한다는 것이다. Goddard 교수 그룹은 순수한 구리, 산화구리(I) 표면과 산화구리(I)/구리 계면에서 일산화탄소 이합체화 반응의 자유에너지를 계산하였으며 산화구리(I)/

구리 계면에서 에너지 장벽이 매우 낮아진다는 것을 확인하였다. 한편 구리 금속 표면에 함유된 아표층 산소(subsurface oxygen)가 일산화탄소 결합에너지를 높여주어 일산화탄소 이합체화 반응을 촉진시킨다는 가설도 존재한다. 아표층 산소는 구리의 전자를 끌어당겨서 일산화탄소와 구리 간의 결합 친화도를 증가시킨다. 그 결과, 일산화탄소의 표면 밀도가 증가하여 C2 전환 선택도가 향상된다고 주장하였다.

④ 결정입계 밀도 제어

앞서 제시된 가설과는 다르게 Stanford 대학의 Kanan 교수 그룹은 산화처리에 의해 유도된 구리 전극의 활성점이 결정입계(grain boundary)와 연관성이 있다고 주장한다. 이는 실험적으로 결정입계가 뚜렷한 전극이 경계가 무너진 전극에 비해 약 12배 높은 C2 전환 선택도를 보여주었기 때문이다. 또한 일산화탄소 TPD(temperature programmed desorption)^{vii)} 측정을 통해 결정입계가 뚜렷한 전극의 경우 일산화탄소와의 결합에너지가 높은 활성점이 풍부하다는 것을 증명하였다. 최근에는 탄소나노튜브에 담지된 구리 나노입자의 결정입계 밀도를 조절하여 낮은 과전압(-0.3 V_{RHE})에서 일산화탄소로부터 70%에 달하는 C2 전환 선택도를 달성하였다(그림 15).²⁴⁾ 더 나아가서 구리 입자의 결정입계 밀도와 C2 전환 선택도 간의 명확한 상관관계를 실험적으로 도시하였다. 궁극적으로 일산화탄소 결합친화도가 높은 활성점이 C2 전환 선택도에 중요하다는 것을 규명한 셈이다.

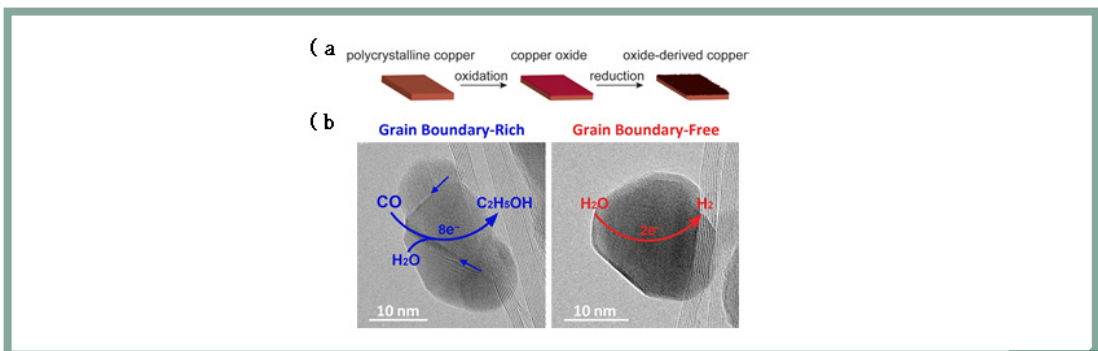


그림15. (a) Stanford 대학의 Kanan 교수 연구진이 개발한 산화처리에 의해 유도된 구리 전극의 제작방법을 나타낸 개략도. (b) 결정입계 밀도 제어를 통해 C2 전환 선택도를 향상시키는 전략.²⁴⁾

vii) 고체 표면상의 흡착종의 성질을 알기 위한 실험적 방법. 고체 시료를 일정 속도로 승온하면 흡착분자는 그 흡착강도에 따른 온도에서 이탈하며, 이때 이탈량과 온도와의 관계를 승압이탈 곡선이라 함. 이 곡선을 해석함으로써 흡착강도, 흡착종의 종류 등을 알 수 있음

① 전통문화, 현대과학기술을 만나 부활을 꿈꾸다

② 화학공업이 제1차 산업혁명을 일으킨다

⑤ 합금화 전략

앞서 소개한 것처럼 순수한 금속의 경우 일산화탄소에 대한 결합친화도가 태생적으로 결정되어 있다. 구리 전극이 상대적으로 높은 C2 전환 선택도를 보여주는 이유도 구리 고유의 특성 때문이다. 그러나 단일 원소로 구성된 금속에는 한계점이 존재한다. 바로 이산화탄소 환원 반응에 참여하는 중간체들의 결합친화도들이 서로 선형 비례관계를 가지고 있다는 점이다. 예를 들어, 'COOH*' 중간체의 흡착 자유에너지는 'H*' 및 'CO*'에 대한 흡착 자유에너지와 선형 비례 관계를 가진다. 이로 인해서 단일한 구리 금속을 이용하여 선택적으로 'CO*' 흡착을 증가시키면서 수소 생산을 억제하는 것은 이론적으로 불가능하다. 하지만, 외부 원소를 도입할 경우(즉, 합금을 형성할 경우) 핵심 중간체들에 대한 결합에너지를 독립적으로 조절하여 일산화탄소 이합체화 반응을 더욱 촉진시킬 수 있다. National University of Singapore의 Yeo 교수 연구진은 조성 비율이 조절된 구리-아연 합금을 제작하여 C2 전환 선택도를 분석하였다.²⁵⁾ 아연의 비율이 0%에서 20%로 증가함에 따라 에탄올 전환 선택도가 10%에서 30%로 증가하는 현상을 관찰하였다. 에틸렌 대비 에탄올 생산 비율이 12.5배 증가한 셈이다. 구리-아연 합금 전극에서 아연은 일산화탄소를 생성하여 구리 표면에 일산화탄소를 공급하는 역할을 하며, 구리에서 일산화탄소 이합체화 반응이 진행되는 것으로 알려져 있다(그림 16). 최근 Stanford 대학의 Jaramillo 교수 연구진은 구리-은 표면 합금 형성이 구리 전극의 수소 발생 선택도를 70% 만큼 감소시킨다고 보고하였다. 반대로 일산화탄소를 거쳐서 생성되는 탄소 화합물의 선택도는 높아졌다. 은이 구리 결정에 도입되면 구리 원소 주변 격자에 압축 변형을 발생시키게 되고 이를 통해 독립적으로 'H' 결합에너지를 감소시켜서 수소 발생을 억제하였다. 하지만 합금 전극의 경우 이산화탄소 환원 반응이 진행됨에 따라 발생하는 원자들의 이동 현상(atomic migration)을 극복하는 것이 난제로 남아 있다.

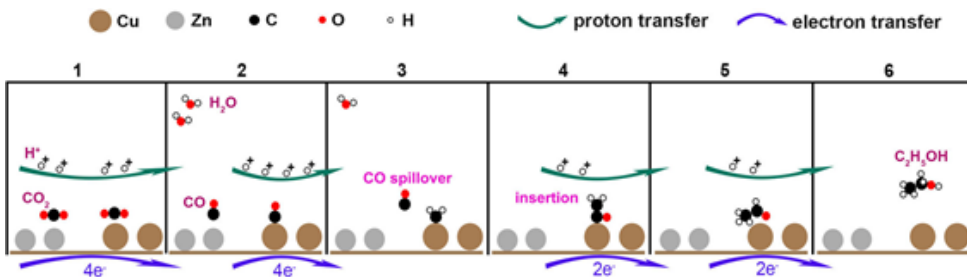


그림 16. National University of Singapore의 Yeo 교수 연구진이 제안한 구리-아연 합금 촉매의 에탄올 생성 메커니즘²⁵⁾

⑥ 나노 구조 전극 제작

수용액 기반 이산화탄소 환원 반응 시스템에서 물에 녹은 이산화탄소는 세 가지 형태의 화학종(CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-})으로 존재하며 양성자와의 반응을 통해 서로 전환이 가능하다. 이 때 이산화탄소, 탄산수소염(HCO_3^-)은 각각 탄소, 양성자의 공급처로서 작용하기 때문에 촉매 표면에서 이 반응물들의 국소적 농도(local concentration)를 조절함으로써 생성물의 선택도 조절이 가능해진다. 네덜란드 Technische Universiteit Delft의 Smith 교수 연구진은 길이와 밀도가 다양한 구리 나노선 전극을 제작하였고, 전극 모양이 반응물의 국소적 농도와 생성물 선택도에 미치는 영향을 연구하였다.²⁶⁾ 나노선의 길이와 밀도가 증가할수록 C2 전환 선택도가 선형적으로 증가하였으며, 최종적으로 이산화탄소로부터 약 40%에 달하는 C2 전환 선택도를 달성하였다. 이러한 거동은 전극 모양이 달라지면 촉매 주변의 국소 pH(local pH)가 달라지고 이에 따라 생성물의 선택도가 달라지는 것으로 설명 된다(그림 17). 국소적 pH가 높을수록 탄산수소염 농도가 감소하여 수소 발생 반응이 억제되며 일산화탄소의 수소첨가반응보다 일산화탄소 이합체화 반응이 촉진되기 때문이다. 서울대의 남기태 교수 연구진도 나노 기공이 형성되어 있는 구리 전극을 이용하여 이와 유사한 거동을 관찰한 바 있다. 기공의 폭이 좁고 깊이가 깊을수록 에틸렌(약 38% 선택도) 혹은 에탄(약 48% 선택도)를 선택적으로 만들어냈다. 이는 다결정 구리 전극과 비교하면 약 8~48배 가량 C2 전환 선택도가 향상된 것이다. 나노 기공이 형성된 구리 전극에서 국소적 pH가 낮아질 수 있었던 데는 기공의 폭이 주요한 역할을 했다고 설명한다. 폭이 30 nm일 경우 기공에서 형성되는 전기이중층의 겹침현상이 발생하여 탄산수소염 이온이 자연 확산되는 효과를 저해한다. 이러한 결과는 전해질의 질량 유속(mass flux)을 증가시킬 경우 이산화탄소 환원 반응 보다 수소 발생 반응이 증가하는 결과를 통해서도 뒷받침되었다.

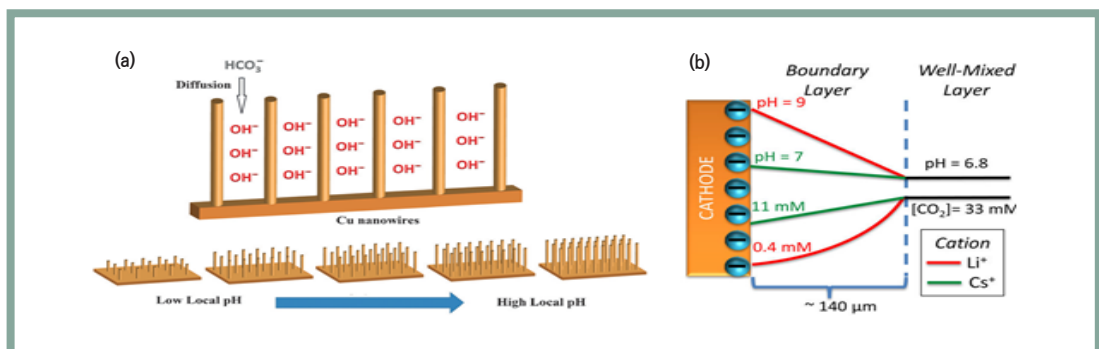


그림17. (a) 구리 나노선 전극의 길이, 밀도에 따른 국소적 pH 변화를 나타낸 그림. (b) 전기 이중층 내에서 알칼리 이온의 종 따른 국소적 pH와 이산화탄소 농도 변화.⁶⁾



⑦ 전해질 공학

앞서 촉매의 물질 특성을 조절하여 C2 전환 선택도를 향상시키는 전략을 살펴보았다. 다음으로 전해질 공학을 통해 구리 기반 촉매와 반응물의 상호작용을 증진시켜서 C2 전환 선택도를 높이는 전략을 소개하고자 한다. UC Berkeley의 Bell 교수 연구진은 전해질에 용해되어 있는 알칼리 양이온의 종류에 따라 C2 전환 선택도가 달라진다는 것을 확인하였다. 기존에 주로 사용되던 '0.1 M KHCO₃' 대신에 '0.1 M CsHCO₃'를 전해질로 사용할 경우 20% 정도 향상된 약 70%에 달하는 C2 전환 선택도를 달성할 수 있었다. 이는 양이온의 종류에 따라서 가수분해 반응을 통해 pH 변화를 완충해주는 능력이 달라지기 때문이며, 이러한 고유한 이온 특성은 국소적 이산화탄소 농도에 영향을 준다고 알려져 있다. 이온의 크기가 클수록 구리 전극 근처에서 가수분해 반응의 pK_a값은 줄어들며 그 결과 양성자를 더 쉽게 제공할 수 있다. 이를 통해 국소적 이산화탄소 농도는 증가하게 되며 수소 발생 반응 혹은 일산화탄소의 수소첨가반응이 상대적으로 억제된다. 하지만 세슘 이온(Cs⁺)이 포타슘 이온(K⁺)에 비해 가격이 12배 이상 비싸기 때문에 공업적 사용 여부에 대해서 신중한 고려가 필요할 것이다.

03 결론 및 향후 전망

다양한 형태의 광전기화학적 인공광합성 시스템 중 태양전지기술이 접목된 광전극, 물 산화, 이산화탄소 환원 촉매 전극의 융복합을 통해 제작된 시스템이 현재까지 가장 우수한 성능을 보여주고 있으며 태양광-화합물 대량생산에도 가장 적합할 것으로 여겨진다. 본 기고에서는 이러한 형태의 디바이스에서 가장 핵심 요소 기술이라고 할 수 있는 물 산화 촉매 및 이산화탄소 환원 촉매 기술의 최근 연구 동향에 대해 중점적으로 살펴보았다. 인공광합성 기술 연구개발의 최종 목표는 이미 일반화가 되어 있는 태양전지처럼 대규모로 설치되어 태양광-화합물을 대량생산하는데 있다. 이를 위해서는 아직 많은 연구개발이 필요하다고 할 수 있다. 광전기화학적 인공광합성 기술의 향후 실용화를 위해 연구개발이 필요한 핵심 요소 기술들을 열거해 본다.

- ① 광전극 기술: 물산화반응과 이산화탄소 환원 반응 모두 많은 에너지를 필요로 하기 때문에 고전압 발생이 가능한 고효율 저비용의 광전극 기술이 필요하다. 현재 실리콘 태양전지 기술이 대중화 되어 있지만 효율 향상에는 한계가 있기 때문에 새로운 기술의 도입이 필요하다. 특히 고전압 달성을 위해서는 태양전지-광촉매 탠덤형 광전극 및 탠덤형 태양전지 광전극 기술 개발이 필요할 것이다.
- ② 산화촉매기술: 인공광합성 반응은 이산화탄소의 용해도 및 수소 발생 억제를 위해 중성 수용액 조건에서의 운전이 필요하다. 하지만 현재 알려진 많은 물산화촉매들이 강알칼리 또는 강산성 수용액에서 최적화 되어 있기 때문에 중성에서 작동하는 새로운 고효율 고내구성 촉매 개발이 필요하다.
- ③ 환원촉매기술: 금, 은과 같은 귀금속을 이용할 경우 효율은 상당히 높은 수준까지 달성 가능하지만 아직까지는 내구성 확보가 전혀 되어 있지 않아 실용화에는 적합하지 않다. 따라서 지금은 효율보다도 내구성 향상 및 저가화 기술 개발이 이 기술의 실용화를 위해 절실하다고 할 수 있다. 또한 에틸렌과 같은 다탄소 태양광-화학물 생산을 위해서는 현재 구리에 국한되어 있는 적용 가능 촉매군을 확장할 필요가 있다.
- ④ 시스템기술: 우리나라뿐만 아니라 많은 지역에서 담수가 부족한 실정이다. 따라서 태양광-화학물의 대량생산을 위해서는 담수뿐만 아니라 해수를 이용할 수 있는 기술개발이 필요하다. 또한 담수의 경우도 현재 3차 증류수와 같은 정제된 물이 아닌 수돗물, 강물 등을 직접 사용했을 때 효율과 내구성을 보장할 수 있는 촉매 개발이 병행되어야 할 것이다. 한편 산화 반응과 환원 반응을 서로 다른 전해질 조건에서 작동시켜 효율을 높일 수 있다. 한 예로 물산화 반응은 염기성 조건에서 이산화탄소 환원 반응은 중성조건에서 운전할 수 있다면 양 촉매의 효율 및 내구성을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 이를 위해서는 두 전해질 조건을 지속적으로 유지시켜 줄 수 있는 이종 분리막 기술 개발이 필요하다. 또한 전해질 내 이산화탄소의 용해도는 효율 향상에 매우 중요한 요소이다. 용해도 향상은 전해질 기술 개발을 통해서도 이룰 수 있으며 아울러 가압 반응기 시스템 도입도 효과적일 수 있다.

이러한 다양한 요소기술 중 촉매의 성능은 다양한 접근 방법을 통해 지속적으로 발전되고 있으며 KIST를 포함한 국내의 여러 연구 그룹들도 큰 기여를 하고 있다. 하지만 아직도 많은 부분에 있어서 집중적 연구가 필요한 시점이다. 앞으로 지속적 연구개발을 통해 핵심 요소 기술들의 고효율 고내구성이 확보된다면 태양전지가 상용화 되어 미래 신재생에너지

① 전분산화, 현대과학기술을 만나 보물을 찾으라

② 화학합성이 제 때 양분이 풍부하면 된다

기반 사회의 근간 에너지 생산 시스템으로 각광받는 것과 마찬가지로 광전기화학적 인공광합성 기술이 미래 화학산업의 근간이 되는 날이 오게 될 것이다<그림 18>.

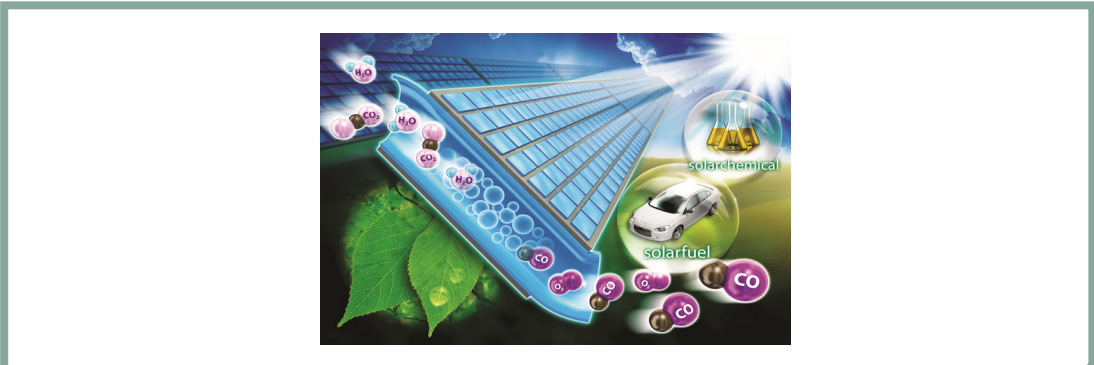


그림 18. 태양광-화합물 대량생산이 가능한 광전기화학적 인공광합성 시스템 개념도⁶⁾

저자 민병권

Byoung Koun Min

학력 Texas A&M Univ. 화학 박사
고려대학교 화학 석사
고려대학교 화학 학사

경력 現) 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터 센터장(책임연구원)
現) 고려대학교 그린스쿨대학원 학연교수

참고문헌

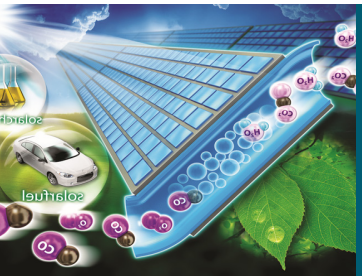
1. Fujishima, A. & Honda, K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature* 238, 37–38 (1972).
2. Kang, U. et al. Photosynthesis of formate from CO₂ and water at 1% energy efficiency via copper iron oxide catalysis. *Energ. Environ. Sci.* 8, 2638–2643 (2015).
3. Arai, T., Sato, S., Kajino, T. & Morikawa, T. Solar CO₂ reduction using H₂O by a semiconductor/metal-complex hybrid photocatalyst: enhanced efficiency and demonstration of a wireless system using SrTiO₃ photoanodes. *Energ. Environ. Sci.* 6, 1274–1282 (2013).
4. Schreier, M. et al. Efficient photosynthesis of carbon monoxide from CO₂ using perovskite photovoltaics. *Nat. Commun.* 6, 7326 (2015).
5. Schreier, M. et al. Solar conversion of CO₂ to CO using Earth-abundant electrocatalysts prepared by atomic layer modification of CuO. *Nat. Energy* 2 (2017).
6. Jeon, H. S. et al. A monolithic and standalone solar-fuel device having comparable efficiency to photosynthesis in nature. *J. Mater. Chem. A* 3, 5835–5842 (2015).
7. Suntivich, J., May, K. J., Gasteiger, H. A., Goodenough, J. B. & Shao-Horn, Y. A Perovskite Oxide Optimized for Oxygen Evolution Catalysis from Molecular Orbital Principles. *Science* 334, 1383–1385 (2011).
8. Nong, H. N. et al. Oxide-Supported IrNiOx Core-Shell Particles as Efficient, Cost-Effective, and Stable Catalysts for Electrochemical Water Splitting. *Angew. Chem. Int. Ed.* 54, 2975–2979 (2015).
9. Wang, H.-Y. et al. In Operando Identification of Geometrical-Site-Dependent Water Oxidation Activity of Spinel Co₃O₄. *J. Am. Chem. Soc.* 138, 36–39 (2016).

참고문헌

10. Trotochaud, L., Young, S. L., Ranney, J. K. & Boettcher, S. W. Nickel-Iron Oxyhydroxide Oxygen-Evolution Electrocatalysts: The Role of Intentional and Incidental Iron Incorporation. *J. Am. Chem. Soc.* 136, 6744–6753 (2014).
11. Xu, X., Song, F. & Hu, X. A nickel iron diselenide-derived efficient oxygen-evolution catalyst. *Nat. Commun.* 7, 12324 (2016).
12. Klinkova, A. et al. Rational Design of Efficient Palladium Catalysts for Electroreduction of Carbon Dioxide to Formate. *ACS Catal.* 6, 8115–8120 (2016).
13. Hori, Y., Murata, A., Kikuchi, K. & Suzuki, S. Electrochemical reduction of carbon dioxides to carbon monoxide at a gold electrode in aqueous potassium hydrogen carbonate. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, 728–729 (1987).
14. Feaster, J. T. et al. Understanding Selectivity for the Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to Formic Acid and Carbon Monoxide on Metal Electrodes. *ACS Catal.* 7, 4822–4827 (2017).
15. Zhu, W. et al. Monodisperse Au Nanoparticles for Selective Electrocatalytic Reduction of CO₂ to CO. *J. Am. Chem. Soc.* 135, 16833–16836 (2013).
16. Kim, C. et al. Achieving Selective and Efficient Electrocatalytic Activity for CO₂ Reduction Using Immobilized Silver Nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.* 137, 13844–13850 (2015).
17. Sun, K. et al. Ultrahigh Mass Activity for Carbon Dioxide Reduction Enabled by Gold-Iron Core-Shell Nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.* (2017).
18. Varela, A. S. et al. Meta-Doped Nitrogenated Carbon as an Efficient Catalyst for Direct CO₂ Electroreduction to CO and Hydrocarbons. *Angew. Chem.* 127, 10908–10912 (2015).

참고문헌

19. Zhang, S., Kang, P. & Meyer, T. J. Nanostructured Tin Catalysts for Selective Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to Formate. *J. Am. Chem. Soc.* 136, 1734–1737 (2014).
20. Koh, J. H. et al. Facile CO₂ Electro-Reduction to Formate via Oxygen Bidentate Intermediate Stabilized by High-Index Planes of Bi Dendrite Catalyst. *ACS Catal.*, 5071–5077 (2017).
21. Bai, X. F. et al. Exclusive Formation of Formic Acid from CO₂ Electroreduction by a Tunable Pd-Sn Alloy. *Angew Chem Int Edit* 56, 12219–12223 (2017).
22. Peterson, A. A. & Nørskov, J. K. Activity Descriptors for CO₂ Electroreduction to Methane on Transition-Metal Catalysts. *J. Phys. Chem. Lett.* 3, 251–258 (2012).
23. Cheng, T., Xiao, H. & Goddard, W. A. Full atomistic reaction mechanism with kinetics for CO reduction on Cu(100) from ab initio molecular dynamics free-energy calculations at 298 K. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114, 1795–1800 (2017).
24. Feng, X., Jiang, K., Fan, S. & Kanan, M. W. A Direct Grain-Boundary-Activity Correlation for CO Electroreduction on Cu Nanoparticles. *ACS Cent. Sci.* 2, 169–174 (2016).
25. Ren, D., Ang, B. S.-H. & Yeo, B. S. Tuning the Selectivity of Carbon Dioxide Electroreduction toward Ethanol on Oxide-Derived Cu_xZn Catalysts. *ACS Catal.* 6, 8239–8247 (2016).
26. Ma, M., Djanashvili, K. & Smith, W. A. Controllable Hydrocarbon Formation from the Electrochemical Reduction of CO₂ over Cu Nanowire Arrays. *Angew. Chem. Int. Ed.* 55, 6680–6684 (2016).



융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5 (TEL) 02-958-4984