

재료기술의 환경패러다임 모색

A Study of R&D Paradigm For the Materials Technologies Involving
Environmental Consciousness

하재우*, 권식철**, 김성준***

〈目 次〉

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| I. 서론 | IV. 환경재료기술의 주요연구분야 |
| II. 재료의 환경기술 필요성과 배경 | V. 환경재료기술의 연구개발전략 |
| III. 환경재료기술의 정의와 기술체계 | VI. 결어 |

〈Abstract〉

The R&D paradigm for the Materials Technologies involving Environmental Consciousness(MTEC) is sought in this paper with an emphasis on the background and importance of the METC. In this paper the MTEC is defined as "Green Materials Technology", and the Green Materials Technology is classified into four categories based on life cycle of the materials; ①Ecomaterials technology(materials design), ②Envimatec technology (manufacturing process), ③Materials life technology (use & maintenance) and ④Materials recycling technology (waste disposal). Each these four categories was introduced. In conclusion, the main R&D field and strategies for the four categories of the Green Materials Technology were suggested.

Key word : 환경기술, 환경재료기술, 환경조화재료, 청정재료공정기술, 재료수명기술, 재활용재료기술

* 한국기계연구원 연구기획과 선임연구원 (hju@kmail.kimm.re.kr)

** 한국기계연구원 표면기술연구부 책임연구원 (kwon@kmail.kimm.re.kr)

*** 한국기계연구원 재료공정연구부 책임연구원 (sjkim@kmail.kimm.re.kr)

I. 서 론

오늘날의 국제적인 흐름은 “환경국부시대”를 예고할 만큼 “환경을 살리지 않으면 경제도 망하는” 새로운 시대가 도래하고 있다. 이미 세계 무역기구가 환경부담성평가, 환경관리 등을 국제 표준화하기에 이르렀고 이러한 움직임은 새로운 무역장벽을 예고하고 있다.

한편, 과거의 재료과학과 기술에서는 지구생명권의 유지와 고갈성 자원의 완전순환이용 개념을 도입하지 않고 생활의 물질적 충족과 쾌적성만을 추구하여 왔다. 이는 자원의 매장량과 폐기물을 수용할 수 있는 지구환경의 능력이 무한하다고 가정하였고 재료 개발 시에는 재료의 구조적·기능적 특성을 도출하는 것만이 최우선적 과제로 인식되었기 때문이다. 하지만 오늘날의 심각한 환경문제와 자원고갈은 여타 과학기술분야와 마찬가지로 재료연구분야에서도 재료설계·제조공정·특성평가의 각 단계에서 지구환경문제와의 종합적인 관계를 고려하지 않을 수 없게 되었다. 즉 지속가능한 성장(sustainable development)을 보증하는 21세기의 재료는 과거부터 강조되어 온 재료의 특성향상과 더불어 자원의 유한성, 폐기물량의 최소화, 재료의 재활용, 재료의 제조부터 사용·폐기까지의 모든 단계에서 환경부담을 최소화하는 연구개발 접근이 수반되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 환경을 고려한 재료기술 일명 “환경재료기술”에 대한 연구의 필요성과 출현배경을 살펴본 후 개념을 정립하고 주요 연구분야와 전략적 추진방안을 모색하는 등의 환경재료기술 패러다임을 제시하고자 한다.

II. 재료의 환경기술 필요성과 배경

사회의 기본적 구성요소인 금속재료의 사용은 청동기시대까지 거슬러 올라가는데 다양한 금속의 사용은 산업혁명이 시작된 1800년대 후반부터이다. 특히, 1960년대부터는 사용되는 금속의 종류와 양이 가속도적으로 증가하고 있다. 이것은 인구증가에 의한 것이 아니라, 현대사회가 지향하는 생활의 질 향상, 그것을 위한 대량생산·대량소비가 가장 큰 원인이 되고 있다. 금속재료뿐만 아니라 무기재료·고분자재료·목질재료·반도체재료·복합재료 등 많은 재료들은 각종 산업의 기반이 되고 물질문명의 근본을 이루고 있다.

그러나 지구 환경의 관점에서 보면 이들 재료들은 제조시 발생하는 환경 유해물질, 폐기시의 분해 곤란성, 폐기처리시의 분별 곤란성, 지하자원의 고갈, 요소분리의 불가능으로 야기되는 재이용의 곤란성 등 환경에 대한 많은 악영향을 끼치고 있다. 과거와 같이 배연처리와 배수처리 등 발생한 폐기물을 생산한 이후에 처리하는 말단처리기술과 환경정화기술은 경제적 부담과 에너지 소비가 크고 제3의 공해를 일으키는 요인이 되고 있어, 환경문제에 대한 근본적인 해결책이 될 수 없음이 판명되고 있다. 즉, 환경문제를 근본부터 해결하기 위해서는 재료 연구에 대해 새로운 개념의 구축이 필요하다. 결과적으로 재료연구는 환경문제 해결형-예방전형이 되어야 하며 그것은 환경조화설계·청정생산·재활용 등의 환경 융합성이 중점적으로 부각되어야 한다. 이와 같이 재료에 관한 연구는 앞으로 환경을 염두에 둔 방향으로 유도되어지고 있으며, 그 구체적 필요성은 다음과 같다.

1. 지구환경에의 부담 증대

독성물질 배출과 전이의 주요 산업원은 <표 1>

〈표 1〉 산업별 독성물질 배출량

산 업	총배출 및 전이 (Million lbs)	산 업	총배출 및 전이 (Million lbs)
화학약품	2745.77	음식물	67.80
1차 금속	756.81	가구	65.37
종이	313.25	인쇄	60.92
운송	245.32	석재/점토	47.49
합금	207.84	직물	46.08
석유	194.50	혼합제품	38.89
플라스틱	194.50	원목	37.82
전기제품	145.76	가죽	24.86
기계류	74.92	의류	2.06
측정/광학	69.54	담배	1.49

자료 : 미국환경보호국(1989년)

과 같이 재료산업분야인 기초금속·합성가공금속이 화학물질산업 다음으로 상당히 많은 독성 물질을 배출시키며 대기· 지표수· 토양· 지하 등을 오염시키고 있는 것으로 분석되어지고 있다. 따라서 재료기술이 환경보존과 개선에 기여해야 할 역할이 많음을 지적하고 있다.

100년 이하의 수명이고, 세계 매장량 내구지수가 수 30년 밖에 안되는 것도 있다. 현재와 같은 형태로 소비를 유지하면 생활의 향상에 의한 생산 소비의 증가와 인구의 폭발적 증가로 자원은 머지않아 고갈되고 말 것이다(표2 참조).

〈표 2〉 지하자원의 매장량

구 분	생산량 (1,000ton)	소비량 (1,000ton)	세계매장량 (1,000ton)	내구년수 (년)
알루미늄	109,118	17,878	21,800,000	200
구리	8,814	10,773	321,000	36
납	3,367	5,545	70,000	21
수은	6	6	130	22
니켈	937	843	48,989	52
주석	219	230	5,920	27
아연	7,325	6,972	144,000	20
철광석	864,370	924,669	151,000,000	175

2. 유한한 자원

금속자원을 살펴보면 주요한 금속의 대부분이 현재의 생산·소비구조를 변화시킬 수 없는 한

3. 재활용의 필요성

전 세계의 문명도시는 각종 폐기물과 스크랩을 재활용하지 못한 채 도시 곳곳에 방치하고

〈표 3〉 금속 등의 물질을 폐기한 경우의 문제점과 그 대책

물 질			폐기한 경우의 문제점	대책의 기본자세
금속	지표에 적은 것 (Hg,Pb,Cu,Ni,Zn, Cd,As)	고농도	상태계에 큰 피해를 일으킴	사용제한, 완전 Closed화
		저농도		분리농축
	지표에 많은 것 (Fe,Ca,Al,Mg,Mn)	고농도	집중폐기되면 피해를 일으킴	회수 재이용
		저농도	생태계의 악영향은 적음	토지환원(매립)
비금속 (P,F,Cl,I,S,Si)		지표에 적음	생태계에 피해, 악영향을 일으킴	Closed화
		지표에 많음	생태계의 악영향은 적음	파쇄 재이용 토지환원

있어 도시광산(urban mine)이라고 부르고 있으며, 방치된 금속 등의 물질은 〈표 3〉에서 보는 바와 같이 환경에 심각한 악영향을 미치고 있다. 폐기물의 대량발생, 자원의 유한성, material stock에 의한 도시광산화, 폐기장의 감소, 폐기에 의한 생태계에의 영향 등에서 도출되는 해결책은 간단하다. 폐기물과 노폐 스크랩의 회수·재이용·재활용이며, 이는 재료기술의 연구범위 확대를 의미한다.

재생자원을 사용할 경우의 에너지 소비와 환경 부담의 경감 정도를 조사해 보면 〈표 4〉와 같이 알루미늄은 스크랩을 사용하는 쪽이 원광석에 비해 약 5% 정도의 에너지 소비로 생산될 수 있다. 다른 재료도 마찬가지로 재생자원을 사용하면 광석에서 제조한 것에 비해 티타늄은 약 8%, 구리는 약 20%, 철은 약 40%

의 에너지만을 소비한다. 따라서 재생재료의 활용기술개발은 지하자원 보존과 에너지 사용량 감소를 통한 환경개선에 커다란 실마리를 제공하고 있다.

Ⅲ. 환경재료기술의 정의와 기술체계

1. 정의

환경재료기술은 “재료의 획득·사용·폐기에 이르는 전 과정을 대상으로 환경친화적이고 환경개선적인 재료의 합금설계·공정개발·폐기물처리 등을 연구하는 재료공학차원의 환경기술”이라고 정의할 수 있다. 여기서 “환경친화적”

〈표 4〉 광석과 스크랩에서 금속을 제조하는 경우의 에너지 비교

에너지 재료	Energy from Ore(EO) (10 ⁹ cal/ton)	Energy from Scrap(ES) (10 ⁹ cal/ton)	Ratio(%) (ES/EO)
티타늄	103.3	8.0	7.7
알루미늄	61.5	3.0	4.9
니켈	36.3	3.8	10.5
구리	22.8	4.5	19.7
철	8.06	3.3	40.9

〈표 5〉 과거의 재료와 환경재료의 개념비교

과거의 재료개발	환경 재료개발
고성능	고성능
고기능	고기능
무한한 자원	유한한 자원
대량폐기	재활용 / 극소량 폐기
대량생산	환경조화성
저가격화	사회적 가격
설계 함수 = F(원소, 구조, 특성, 가격, 자원량, 독성)	설계 함수 = F(원소, 구조, 특성, 가격, 자원량, 독성, 환경조화성, 재활용성)

이라는 의미는 환경에의 부담과 오염요소를 미리 예측하여 환경오염 물질이 발생되기 이전에 근원적으로 해결하려는 사전적 환경보존을 의미한다. 반면에 “환경개선”은 사후적 환경기술로서 기존의 공정중 오염물질의 배출이 불가피한 상황에서 오염물질 최소화·제거기술 및 환경정화재료의 개발, 재료수명을 연장하는 유지보수기술, 폐기물을 청정처리·재활용하는 등의 행위를 의미한다.

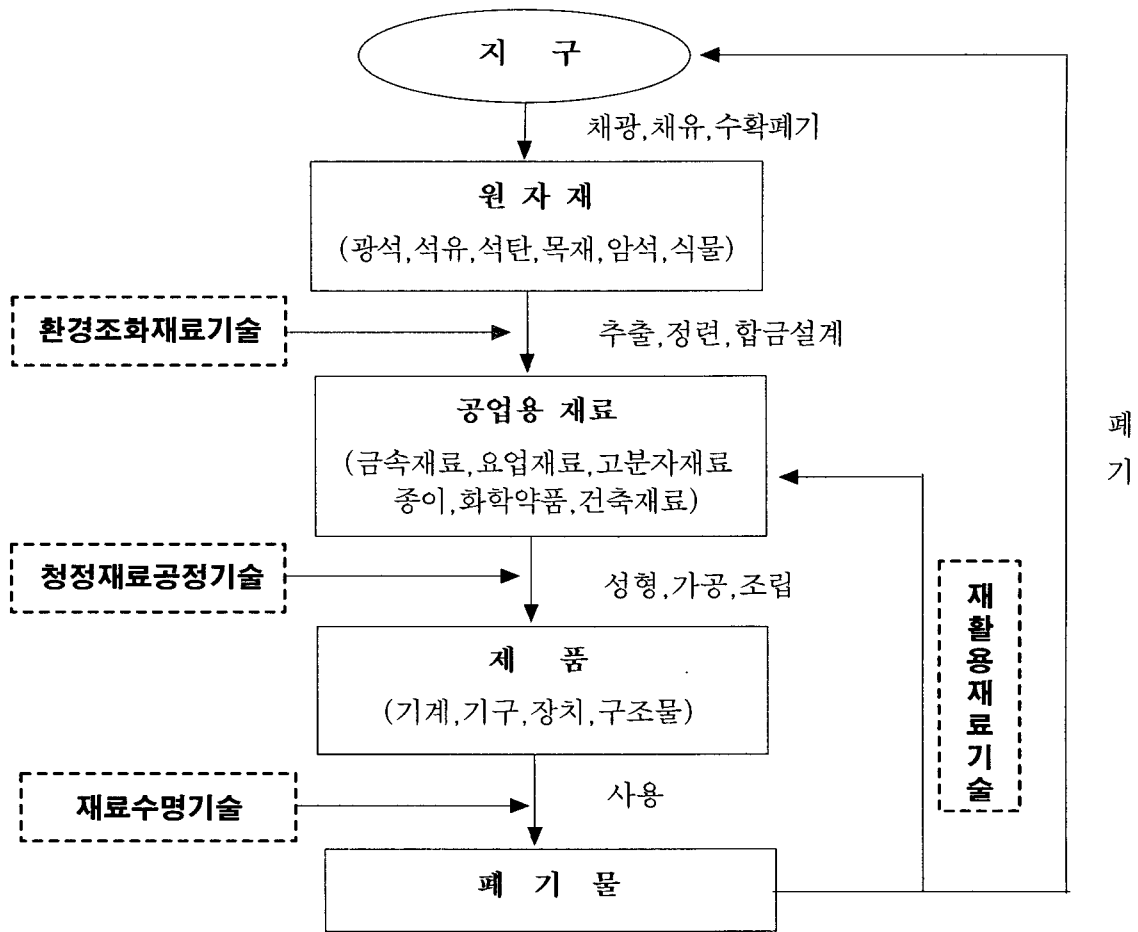
환경재료기술(green materials technology)은 그 동안 독립된 기술체계로 분류되기보다는 종전의 재료기술체계 내에서 요소별로 필요에 의해 연구가 진행되어 왔다고 볼 수 있다. 그러나 환경문제가 심각히 대두되면서 재료공학 전반에 걸쳐 환경을 고려한 새로운 연구분야의 개척과 연구의 필요성이 제기됨에 따라 하나의 체계화된 기술분류로 정의하는데 무리가 없을 정도로 이르렀다.

재료의 물성향상과 비용효과만을 목적함수로 설정한 종전의 재료연구에서 “환경”이라는 요소를 추가한 새로운 연구개발형태가 증가하고 있

는 추세이다. 예를 들면, 합금설계시 재료의 재활용과 재생을 고려하거나, 도금·열처리 등 오염물질배출 공정을 청정화 공정으로 대체하거나, 폐기물은 완전 재활용과 처리·용이화 등의 관점에서 재료연구가 이루어지고 있다.

2. 기술분류 체계

재료의 일반적인 수명주기는 〈그림 1〉과 같이 자연에서 원광석을 채취하여, 합금설계·소재가공·부품성형·제품가공조립·사용·폐기의 단계를 거친다. 앞에서 정의한 바와 같이 환경재료기술의 연구대상이 재료수명의 주요 단계이므로 기술분류도 재료의 수명주기와 연관시켜 체계화 하였다. 따라서, 본 연구에서는 첫째 재료설계과정에서의 “환경조화재료기술”, 둘째 소재·부품 제조공정에서의 “청정재료공정기술”, 셋째 재료 사용단계에서 유지보수기술인 “재료수명기술”, 넷째 재료 폐기단계에서의 “재활용 재료기술”로 환경재료기술의 연구영역과 분류체계를 정립하였다.



〈그림 1〉 환경재료기술과 재료수명주기와의 연관관계

IV. 환경재료기술의 주요연구분야

1. 환경조화재료기술

환경조화재료(ECOMATERIALS : Environment-CONscious MATERIALS)기술은 환경친화적인 재료의 설계를 강조하는 분야로서 재료가 지녀야 하는 기계적·열적·전기전자적 물성뿐만 아니라, 재활용성·저에너지 사용·오염물질 제거 등과 같이 환경에 부담을 최소화하는 특성을 갖춘 재료를 설계하거나 이를 뒷받침하기 위한 주변기술들이라고 정의할 수 있다.

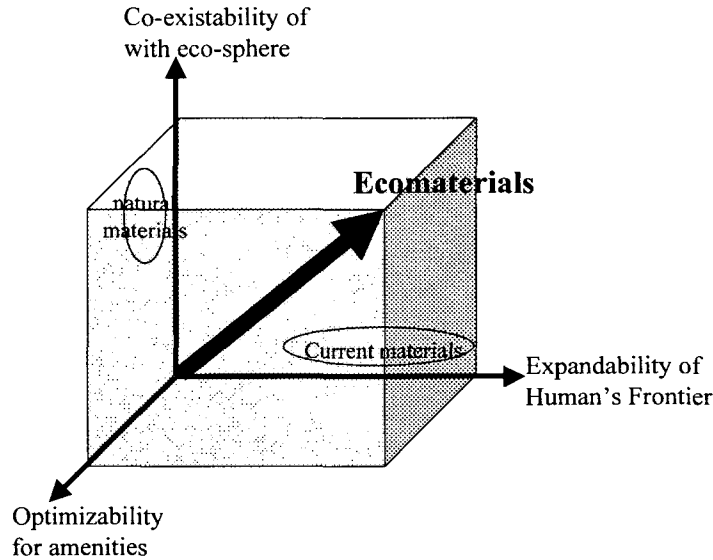
환경조화재료의 개념은 일본 미담과학기술회의 Rare Metal 연구회에서 처음으로 제안하였

다. 지금까지의 재료개발에서는 우주, 해양, 지하, 기타 극한공간으로 인류의 활동권을 확장해 가면서 개척성(frontier)이 중심적 역할을 해왔고 생활이 윤택해짐에 따라 쾌적성(amenity)이 더해져 왔다. 그러나 “인간과 자연이 조화하는 과학기술”이라는 관점에서 재료를 파악하면 재료의 제조부터 폐기까지 환경과의 조화성을 고려할 필요가 있다. 따라서 21세기의 재료는 다음 3가지를 만족시키는 방향으로 진행될 것으로 예상된다.

- ① 인간의 활동권을 넓히고 활동환경을 확장함 - 개척성(frontier)

- ② 인간의 활동권과 외부환경과의 조화를 꾀함 - 환경조화성(eco-sphere)
- ③ 활동권내에서의 생활환경에 풍족함을 부여함 - 쾌적성(amenity)

과거의 재료개발과 Ecomaterial화를 지향한 미래의 재료 개발방향을 보여주는 <그림 2>에서 앞으로의 재료개발은 3축의 합이 최대로 되는 방향으로 추구되어야 할 것이다. 일반적인



자료:일본금속재료연구소

<그림 2> 환경을 고려한 재료의 연구개발 방향

<표 6> 환경조화재료의 연구분야 및 내용

연구분야	세부 연구내용	
1. LCA (Life Cycle Assessment)	PLCA (Product Life Cycle Assessment) : 금속재료 중심	-자동차에서의 알루미늄과 철강의 LCA -알루미늄 캔과 철제 캔의 LCA 등
	MLCA (Material Life Cycle Assessment)	-여러 가지 합금원소의 LCA -합금설계시 LCA 적용에 의한 환경부담평가 -LCA 평가의 객관적 기준설정 -효과적인 LCA평가를 위한 컴퓨터프로그램 개발 등
2. 환경조화 재료	완전재활용 재료	-단순조성 범용합금(철강, Al, Ti)의 합금설계 및 제조 -컴퓨터를 이용한 재질예측 프로그램 개발 -미세조직 제어 가공열처리 기술개발 -재활용 가능 복합재료의 개발 -생분해성 플라스틱의 연구
	대체 재료	기존의 환경오염 유발 재료의 사용을 억제 또는 대체시키는 신재료 개발 기술 등 -Pb-added solder → Pb-free solder -Cd → Sn-Ni, Sn-Zn -Cr (Cr ⁺⁶) → Ni - W
	에너지 저사용재료	-LCA 평가에 의한 장수명 내열강 개발 등
3. 환경정화용 신소재	-환경정화용 소재 및 부품의 개발 -독성 금속의 무해화 폐기기술 등	

재료연구에서 발견되는 강도와 연성의 문제와 같이 Ecomaterial 연구에서는 환경조화성을 위해 개척성을 희생하게 되어 재료연구가 매력 없는 것으로 될 가능성이 있다. 그러나 최근에는 강도와 연성의 문제도 조성과 구조의 검토에 따라 강도를 떨어뜨리지 않고 고연성을 유지하는 재료가 개발되고 있어 Ecomaterial 연구도 전향적으로 발전할 가능성이 있다.

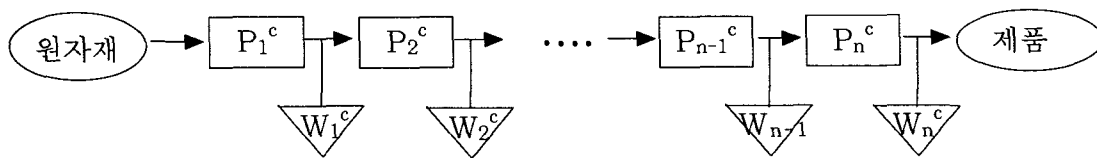
환경조화재료의 연구방향은 크게 LCA, 환경조화형 재료 그리고 환경정화용 신소재개발 등 3 분야로 나눌 수 있으며, 이 들 분야의 세부 연구분야는 <표 6>과 같이 정리해 볼 수 있다.

2. 청정재료공정기술

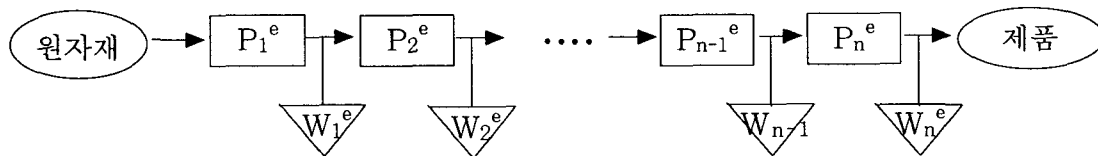
청정재료공정기술(Greener-Processed Materials Technique, Environmental-Friendly Materials Process Techniques (ENVIMATECH))은 원재료로부터 최종 제품에 이르기까지 각 단위별 재료가공 공정에서 환경오염을 절감 또는 제로화시키기 위한 공정개량 및 신공정개발과 그 활용을 위한 재료기술이다.

국제무역 환경여건상 청정생산공정으로 제조된 상품의 유통을 강화시키고 ISO 14000과 같은 인증이 요구되고 있다. 국내에서도 환경규제 강화로 기존 오염물질 사후 처리방식으로는

A) Conventional tech.



B) Envimatech.



Requirement for Envimatech.

- I) $W_n^c < W_n^e$
- II) $\sum W_n^c < \sum W_n^e$
- III) $\sum P_n^c < \sum P_n^e$

P_n : Unit process in production

c : Conventional process

e : Envimatech process(new process)

W : Pollutant for waste

<그림 3> 청정재료공정기술의 개념도

높은 환경비용이 초래되므로 오염 물질의 발생을 사전에 예방 및 최소화가 요구되고 있다. 즉 주요 오염배출원 농도 규제에서 오염배출원 총량규제에 맞는 생산체계가 요구되고 있다.

현재 국내의 도입 활용기술인 제조공정의 청정화 운영 및 시설장비의 활용 한계로 인해, 보다 더 근원적 오염 배출원을 제거하기 위한 혁신적 신공정 개발이 필요하고 이에 관한 연구개발의 수요가 증가하고 있는 실정이다. 오염배출원이 없는 청정재료공정 기술개발은 폐기물관리시스템(waste management system)을 무력화시켜 국산품의 제품 경쟁력 제고와 관련기술 기반구축에 일조할 것으로 보인다.

와 과기처에서 환경공학기술개발사업(G7)으로 공동지원 되어왔다. 이들 연구개발의 내용은 청정에너지와 청정물질이 대부분으로써 청정재료 공정기술과는 무관한 기술개발로 구성되어져 있다. 최근 들어 산업자원부 주관하에 청정생산기술개발사업이 진행되고 있으나 재료분야의 연구개발은 매우 적은 부분에 지나지 않고 있다.

따라서, 앞으로 환경친화적 공정기술의 틀 속에서 신재료기술분야가 중시되는 시점에 있으며 연구활동을 가속화시킬 필요가 있다. <표 7>에서는 청정재료공정기술에서 다루는 연구범위와 내용을 나타내고 있다.

<표 7> 청정재료공정기술의 연구분야 및 내용

연구분야	내 용	사 례
대체공정 및 신공정 (Process change)	기존의 환경오염 유발의 공정을 개량· 개선으로 대체 시킬 수 있는 신공정 기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ wet processing → dry processing ○ electroplating → vacuum metallization ○ chemical etching → plasma etching ○ CFC → CFC alternatives ○ 세정용 CFC대체 수용성 세정제 활용기술 등
공정의 재설계 (Redesign of Production Process)	기존 환경오염 유발의 생산공정을 전반적으로 공정의 획기적 전환으로 새로운 공정설계에 의한 청정재료가공설계 기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ Turbine Blade manufacture 경우 Conventional : Machining by multiple axis computer Controlled Milling machine → New design : EDM ○ 자체 유효성 절삭가공용 공구개발기술 ○ Plasma 응용 초고속 소결 기술 ○ Plasma 응용 초미세 분말제조 기술 ○ Laser 이용 반도체 Chip 청정세척 기술 ○ Laser 이용 paint stripping 기술 ○ Plasma-spray forming 기술 ○ Thixoforging 기술 ○ Electroslag Casting(ESC) 기술 ○ Super-plastic forging 기술 등

국내에서는 현재까지 각 생산공정에서 오염물질의 사후처리 위주로 기술개발을 해왔으며 이를 위해 환경설비 및 청정기술은 81년부터 산업자원부 지원하에 그리고 '92년부터는 환경부

3. 재료 수명 기술

재료수명기술은 재료가 각각의 사용 환경에 의하여 열화되어가는 과정을 최대한 연장시킬 수 있는 수명연장기술과 사용중인 재료의 열화

도를 검사하고 진단하는 재료점검기술 그리고 재료의 건전성을 평가하고 잔존 수명을 예측하는 재료평가기술로 대별할 수 있다. 각 기술에 대한 연구분야 및 내용은 <표 8>과 같다. 재료수명기술은 재료의 수명을 연장함으로써 폐기물 및 자원사용량을 최소화하는 환경보존 개념을 가지고 있다. 이렇게 함으로써 폐기물 처리로 인한 환경의 부담을 줄일 수 있음은 물론, 예기치 못한 사고로 인한 환경파괴 위험성도 방지할 수 있다.

열피로 등) 등에 의해서 이다.

재료수명기술은 이러한 손상원인을 사전에 재료점검 및 평가기술을 활용한 유지보수활동으로 적극적이고 효과적인 제품의 수명연장과 환경보존 목표를 달성할 수 있다. 특히 재료수명기술은 산업체 전 분야에 해당하는 공통기술이다. 뿐만 아니라 국민 전체의 복지에 중요한 공기술이고 많은 전문 분야가 관련되는 복합기술이다.

<표 8> 재료수명기술의 연구분야 및 내용

연구 분야	연구 범위	연구 내용
수명 연장 기술	방식 기술	방식설계기법, 음극방식, 피복방식, 부식억제제, 내식재료선정, 방식관리
	내열 기술	크리프 방지, 고온산화방지
	내압 및 내하중 기술	고압 기기 기술, 균열 전파 정지
	내진 기술	피로균열전파방지, 내진 설계
	보수 기술	용접 기술, 접합 기술, 용사 기술, 클래딩 기술.
재료 점검 기술	비파괴 검사기술	초음파탐상, Acoustic Emission, Electrochemical Noise 등
	상시탐지기술	Monitoring 기술, Sensor 기술, Probe 기술 등
	열화도 계측 기술	손상 조직 계측, 균열 계측
재료 평가 기술	손상 진단 기술	Fault Tree 분석, 손상 재료 분석
	잔존 수명 예측 기술	수명관리 시스템, Database 구축
	건전성 평가 기술	재질열화도 평가, 콘크리트 구조물 안전 진단, 전문가 시스템

산업 설비나 각종 기구, 장치, 구조물 등이 그 목적에 맞도록 사용되다가 더 이상 정상적인 성능 발휘가 불가능하여 용도 폐기되는 것은 거의 대개가 그 구성 요소인 재료의 손상에서 기인한다. 따라서 설비의 안전 및 장수명화는 결국 재료수명기술의 효과적인 적용으로 이룩될 수 있다. 재료가 사용으로 인하여 제조 당시의 성능으로부터 열화·교체되어야 하는 경우에는 기계적 요인(늘어남, 비틀림, 마모 등), 환경적 요인(부식, 산화 등), 열적 요인(크리프,

4. 재활용 재료기술

재활용 재료기술은 인간의 삶의 질을 향상시키기 위해서 만들어지는 모든 제품 및 부품의 대량폐기에서 발생하는 환경오염을 저감하기 위해서 제품 및 부품의 재료를 각종 재료공학적인 과정을 거쳐 같은 제품으로 재생하거나, 다른 제품의 기본소재로 활용하는 것이다.

환경문제에 있어서 자원재활용(recycling)은 가시적인 효과를 얻을 수 있는 가장 효율적이고 잘 알려진 환경문제 해결방안 중의 하나이

다. 자원의 재활용은 유한한 자원을 지속가능하게 사용할 수 있다는 점에서 지하자원 절약과 직결되는 과제이다. 그리고 공해방지효과, 에너지 소비절감 등 재활용의 간접적인 경제성까지 합치면 그 중요성은 매우 크다. 구조용 소재는 자동차, 교량, 건축물, 산업설비 및 일반생활용품에 이르기까지 가장 중요한 소재이며 소재 전체 사용량의 95% 이상을 차지하고 있다. 그 중에서도 철강이 90%를 점하고 있으며 비철금속이 10% 정도를 차지하고 있다. 따라서 철강

태의 재료로 재활용(재사용) 되고 있는 것이 아니라, 보다 저급한 소재로 변화되고 있는 것 뿐이다. 즉 회수된 알루미늄 캔이 모두 알루미늄 캔으로, 회수된 전선이 모두 전선으로 재사용되고 있는 것은 아니다. 앞으로의 과제는 “Product to Same Product” 개념의 완전 재활용 시스템을 지향해야 한다. 그러기 위해서는 재료의 개발·설계단계로부터 재활용성을 고려하고, 사용후의 회수·해체 단계의 공정에서 완전 재활용이 가능한 방법을 지향해야 한다.

〈표 9〉 재활용 재료기술의 연구분야 및 내용

연구 분야	내 용
1. 철강재료	- 철강 및 알루미늄의 스크랩에서 기인하는 불순물원소의 영향연구 - 철강 및 알루미늄의 Tramp element 제거에 관한 연구 - 재활용시스템에 관련 연구 등
2. 알루미늄	- Can to Can 재활용 기술연구 - Al dross의 재활용 연구 등
3. 동	- 전자제품에서의 귀금속 회수기술 - 전자제품으로부터의 금속회수에 관한 Infrastructure 구축 등
4. 티타늄	- 티타늄 스크랩의 재활용 연구 등
5. 비금속	- 폐 실리콘의 재활용 연구 - 복합재료의 재활용 연구 - 도금폐액의 재활용 기술 - 폐기물 최소화를 위한 최적공정 개발 등

및 비철금속(알루미늄, 동, 티타늄 등)의 재활용 산업은 부존자원이 빈약한 우리의 실정에서 볼 때 경제성 있는 산업이라 할 수 있다.

세계 각국에서는 철을 비롯한 비철금속의 적극적인 재활용을 모색하여 환경의 부담을 줄이려는 방안을 국가 정책적으로 추진하고 있다. 그러나, 비철금속의 재활용에 있어 현재는 어느 것도 고효율의 재활용이 이루어지고 있다고 말하기 어렵다. 현재의 많은 재활용이 사용전 상

V. 환경재료기술의 연구개발전략

환경재료기술의 연구개발 전략은 기술도입과 자체기술 개발간의 관계에서 고찰 하였다. 본 연구개발 전략은 기술을 자체 개발하여 사용할 것인가 혹은 기술을 도입하여 사용할 것인가 그리고 이들 양자의 비중을 어느 선에서 결정

할 것인가 관한 것이다. 이들 양자의 비중에 따라서 연구개발 전략을 공격형·방어형·모방형·의존형¹⁾으로 크게 구분하여 타당한 전략을 선택하였다. 기타 기술의 성숙도·획득비용·획득가능성·획득시간 등의 관점에서도 바람직한 연구개발의 전략을 살펴보았다. 이러한 변수들에 입각해 4가지 환경재료기술분야의 연구개발 전략을 다음과 같이 모색하였다.

1. 환경조화재료기술의 연구개발전략

위의 4가지 연구개발 전략 중에서 “환경조화재료”는 공격형 전략(offensive strategy)에 의한 기술개발을 제안한다. 환경조화재료는 아직 미지의 기술분야이고 불확실성과 위험성으로 인하여 국내에서도 관심을 가지는 연구기관이 거의 없는 실정이다. 국외에서도 이렇다 할 연구 성과물이 없는 태동기에 불과한 실정이다. 따라서 실용화를 위한 모방과 도입할 기술이 거의 없다고 할 수 있다. 따라서, 환경조화재료 분야는 기술개발의 선두주자로 나설 수 있는 보다 적극적이고 창조적인 연구개발전략의 필요성이 제기된다. 환경조화재료는 “합금설계” 위주의 연구개발이기 때문에 실용화를 위해서는 장기적인 검증시간을 필요로 하고 있다. 이는 단기적이고 가시적 연구성과물을 요구하기 보다는 기초연구에서부터 점진적으로 응용연구로 발전을 유도하는 장기적인 미래원천 기술개발형태의 전략을 가져야 한다. 기술적 가능성을 탐색하고 기초연구에서부터 scale-up 연구 그리고 실용화 등의 과정을 거치는 거시적인 연구개발 일정을 중장기적으로 수립하여 추진해야 할 것이다.

2. 청정재료공정기술의 연구개발전략

환경파괴의 심각성이 급속히 증가하면서 청정생산기술의 연구개발 방향도 기초연구에서 현장중심의 환경연구에 초점이 맞추어져 있다. 이와 때를 맞추어 국내에서도 각종 청정생산기술 개발을 위한 국책 연구개발프로그램을 환경부·산업자원부·과학기술부 등에서 추진하고 있다. 이와 같이 청정생산기술을 중심으로 한 연구개발의 사회적 분위기가 성장기에 접어들었다고 판단된다. 따라서 재료공학기반의 청정생산기술분야에 대한 적극적인 과제도출과 가시적인 성과물 중심의 연구개발을 추진하는 전략을 수립함이 바람직하다.

또한, 국내 청정재료공정분야는 주로 도금과 열처리 분야를 중심으로 발전해 왔다. 이 두 분야가 재료공정에서 가장 심각한 수질오염을 유발시키고 눈에 드러나는 오염유발 공정이기 때문일 것이다. 그러나, 환경문제에 대한 사회적 인식이 민감해지고 오염 유출이전의 청정생산기술에 대한 관심이 증대되면서 소재가공 및 부품성형 등의 재료공정 전체가 연구의 대상이 되고 있다. 즉, 용해·주조·단조·압출·압연·소성·가공·복합재료성형 등 전 분야가 환경친화적인 공정으로 개선되어야 한다. 따라서, 도금 및 열처리 이외의 재료공정분야에 대해서도 새로운 환경친화적 사고 하에서 공정을 개선시킬 수 있는 부분을 찾고 개선하는데 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

3. 재료수명기술의 연구개발전략

재료수명기술은 재료가 사용되는 각각의 시스템에 대한 특성분석에서 이러한 재료들의 기초 원리를 확보하여 과학적인 자료로 정량화 하거

1) 김종범, 「과학기술정책론」, 대영문화사, 1993

나 데이터베이스화 하는 것이 필요하며 이를 위해서는 장기적인 기술획득 기간이 전제되어야 한다.

본 기술 분야는 재료들이 구성하고 있는 몸체인 설비와 그 설비의 사용 환경에 대한 총체적인 지식을 요구하는 복합기술이므로 다양한 배경의 연구진이 함께 참여할 필요가 있다. 또한 대상 산업분야가 거의 모든 산업분야를 총망라한 것이므로 범부처적, 범국가적인 연구시스템을 구축하는 것이 필요하다. 이렇게 하기 위해서는 관련 산학연을 총괄하고 장기적인 연구프로젝트 추진을 위한 별도의 국책연구개발단 구성이 필요하다.

4. 재활용 재료기술의 연구개발전략

재활용 재료기술은 가시적이고 단기적인 성과가 나타날 수 있는 연구분야인 만큼 산업체와 공동연구 및 협력관계를 유지하는데 초점을 두어야 한다. 그리고 비용효과적인 요소를 간과할 수 없는 분야이므로 과제 선정초기에 이에 대한 경제성 분석을 세밀히 검토하여야 할 것이다. 일반적인 저급소재로의 재활용기술은 확보하고 있으나 고급소재로의 재활용기술은 많은 애로가 있으며, 이는 합금의 설계와 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 재료의 재활용·효율적인 불순물 제거 공정과 같은 단기적 기술개발뿐만 아니라, 재활용이 용이한 재료의 설계와

같은 장기적 연구개발이 동시에 동반되어야 할 것이다.

VI. 결 어

본 논문에서는 환경재료기술분야의 개념을 정립하고 그 기술체계를 ①환경조화재료기술, ②청정재료공정기술, ③재료수명기술, ④재활용재료기술로 분류하였다. 이러한 분류가 독립된 연구개발 분야로서 자리 매김하기 위한 몇 가지 시사점을 다음과 같이 제시한다.

첫째, 국내의 국책 연구개발 프로그램에서 환경과 관련한 재료연구는 선도기술개발사업의 환경정화재료 개발과 소규모의 청정공정기술개발에 지나지 않는 등 아직 미약한 연구개발활동을 보이고 있다. 이는 국책 환경연구 대부분이 전통적인 환경연구 테마와 현실적인 환경오염 문제를 해결하는데 집중되어 있기 때문이다. 즉 환경에 직접적인 해악을 미치는 오염분야에 대한 개선과 대체물질·공정 연구가 환경연구의 모든 것으로 오해되고 있는 점도 없지 않다. 그리고 환경연구과제를 기획·관리하는 기술관료들도 수질·대기·소각·청정 등 환경보존을 위한 시스템에 관심이 집중되고 있다. 이는 재료의 관점에서 환경을 고려하는 사고와 제반여건이 덜 성숙되었음에 기인한다. 따라서, 전통

〈표 10〉 환경재료기술의 연구개발 추진전략

분 야	추진 전략			지원 프로그램
	연구기간	추진 방향		
환경조화재료	중장기	기초중심	공격형	중점국가연구개발사업(과학기술부)
청정재료공정	단기	응용중심	모방형	청정생산기술개발사업(산업자원부)
재료수명기술	중장기	기초중심	모방형	국책연구개발단 구성(과학기술부)
재활용재료기술	단기	응용중심	모방형	공업기반기술개발사업(산업자원부)

적인 재료연구에 환경친화적인 재료연구의 패러다임 정립이 필요하다.

둘째, 환경연구는 단일 학문이 아닌 여러 학문이 종합적으로 연계된 영역에서 수행되어야 하는 시스템적인 특성을 가지고 있다. 이는 관련되는 여러 분야간의 인적·지적·물적교류가 어느 연구분야 보다도 활발히 이루어져야 함을 시사한다. 마찬가지로 재료분야의 환경연구에서도 재료의 설계·제작·사용·유지보수·폐기 등의 전 라이프사이클을 통틀어 각 단계별 연구분야간의 교류와 연계연구를 시도하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 무엇보다 환경재료기술에 대한 확고한 개념정립과 재료의 전 라이프사이클을 대상으로 접근하는 시각이 우선되어야 할 것이다.

셋째, 일반적으로 재료기술은 시스템의 요소기술 또는 하부기술로서 사용되는 분야이다. 마찬가지로 환경재료기술은 환경시스템의 요구 특성을 대상으로 하는 재료라고 할 수 있다. 그러나 환경시스템은 자동차, 항공기, 원자력발전소 등과 같이 동작기능과 물리적인 형상을 갖는 시스템이 아니라, 개념적이고 서술적 표현에 의존하는 무형의 시스템이 대부분이다. 즉, 환경재료기술은 다분히 "concept"를 연구대상으로 하는 분야라고 할 수 있다. 따라서 환경재료기술은 물리적인 연구의 대상을 찾기에 앞서 환경과 환경연구가 가지는 개념과 특성을 충분히 인지할 필요가 있다. 즉 환경지향적인 사고하에서 접근할 때에 일반적인 재료연구가 경우에 따라서는 환경연구로서 재 정의될 수도 있다.

결론적으로 재료연구에 있어 환경에 대한 개념의 이해, 환경지향적인 사고, 환경적 요소를 염두하는 인식의 전환이 매우 중요함을 강조한다.

參 考 文 獻

- _____, 「국가 환경과학기술 종합기획연구」, 과학기술처, 1994.
- _____, 「96과학기술연감」, 과학기술처, 1997.
- 권상준, 「그린라운드」, 문운당, 1996.
- 김종범, 「과학기술정책론」, 대영문화사, 1993.
- 김상용, 「청정생산기술」, 시그마프레스, 1997.
- 민병승, 최상기, "환경오염 예방기술개발정책의 추진방향", 「과학기술정책」, 과학기술정책관리연구소, 2월호, 1997.
- 변동건, "환경정책의 수립에 있어서 기술지향주의적 접근의 한계와 대안", 「과학기술정책」, 과학기술정책관리연구소, 2월호 1997.
- _____, 「2000년을 향한 산업기술개발수요-환경산업분야」, 산업기술정책연구소, 1996.
- 이가중, 「기술혁신전략」, 나남출판사, 1990.
- 임기철, 「환경친화적 기술혁신 패러다임의 모색」, STEPI, 1994.
- 임기철, 「환경산업육성을 위한 경제적 유인대책」, 환경과학연구협의회, 1994.
- 정선양, 「환경친화적인 국가혁신체제의 모색」, 과학기술정책, 과학기술정책관리연구소, 2월호, 1997.
- _____, 「환경과학기술정책」, 환경부, 1997.
- _____, 「환경백서」, 환경부, 1996.
- 한국기계연구원, 「환경과 조화를 이루는 재료기술에 관한 조사연구」, 과학기술처, 1996.
- 한국기계연구원, 「환경재료기술의 연구기획·조사」, 1997.
- Balkind, A., S. Zarrabien and F. Engle, *Metal Finishing*, July. 19, 1996.
- Narayan, C., J. Fenton and M. Datta, *Processing of Advanced Materials* 4, 221, 1994.
- Sexton, P. A., "Asia-Pacific Interfinish" Melfourne, Victoria Australia, 1994. pp. 52-56.