

첨단재료의 기술혁신 특성과 한국의 연구개발전략

Characteristics of Advanced Materials Innovation and R&D Strategies for Korea

채재우*, 조규갑**, 김정흠***

<CONTENTS>

- | | |
|---------------------|----------------|
| I. 서론 | IV. 한국의 재료혁신과정 |
| II. 첨단재료 혁신의 특징과 과정 | V. 연구개발 전략 |
| III. 첨단재료의 연구동향 | VI. 맺음말 |

Abstract

Material is enabling technology that creates the product performance and the service of most industrial sectors and fields of technology. However, compared to the other fields such as IT, BT, and NT etc., relatively little attention has been paid to the research on strategy and innovation of materials technology. This bias should have resulted in the misfit of policy and less than enough investment in materials innovation.

This paper discusses the characteristics, process, and future of the materials innovation. The process and status of materials technology in Korea are analyzed based on the discussions above. Finally, some suggestions for R&D strategies of Korea are presented on the basis of the nature, trend and barriers of materials innovation.

Keyword : 재료, 기술혁신, 연구개발전략, 재료적용과정, 재료혁신특성

* 한국기계연구원 재료기술연구소 선임연구원 jaewoo@kmail.kimm.re.kr

** 부산대학교 산업공학과 교수 kkcho@pusan.ac.kr

*** 한국기계연구원 책임연구원 kimjh@kimm.re.kr

1. 서론

재료는 제품의 기술적 가능성을 제공하는 기반기술(Enabling Technology)로서 제품의 성능 및 서비스의 창출과 유통 등 모든 경제 섹터에 기본 틀을 제공한다. 이와 같이 재료는 기술 응용을 최적화하는 새로운 해법을 제공하며, 대부분의 산업기술은 재료에 직간접적으로 의존하고 있다(Cahill et al., 1999).

특히 첨단재료(Advanced Materials) 혹은 신소재(New Materials)는 기존 기술에서의 재료를 대체하고, 기존 재료에서 볼 수 없었던 우수한 특성으로 신기술 개발을 가능케 하여 사회에 엄청난 변화를 가져왔다(Vogely, 1990). 새로운 재료의 발견은 새로운 제품과 경제활동의 출현에 영향을 미쳤고, 역으로 핵심기술의 개발은 많은 새로운 재료의 개발을 촉진하였다. Jewkes et al.(1958)은 “기계 발명의 역사는 우수한 재료의 출현과 새로운 사용에 근거한다”라고 주장하고 있다. 증기엔진은 철강재료, 제트엔진은 초내열합금, 반도체는 실리콘이라는 재료가 있었기에 가능했다. 오늘날의 정보기술, 생명공학, 우주기술 등의 발전은 재료분야의 혁명적인 발전에 기인하고 있다.

이와 같이, 재료가 다양한 섹터의 기술혁신에 중요한 가능성을 제공하고 선결 기술이라는 것에 많은 사람들이 동의하고 있지만, 재료연구와 기술의 놀랄만한 파급효과는 상대적으로 소홀히 다루어져 왔다(Turner et al., 1990). 또한 재료의 혁명적인 영향력은 전기전자·항공우주 등의 기술에 비해 드러나지 않고 그 특성을 직접적으로 체감하기 어려워 조용한 혁명(Silent Revolution)으로 불리기도 한다(Dubarle, 1989; OECD 1990).

기술혁신이론가 사이에서도 재료혁신과 관련하여

나타난 변화의 본질, 중요성, 원인과 결과에 대한 합의가 부족했다. 여기에 더하여, 오늘날의 전략 및 혁신연구는 정보통신기술, 생명공학기술 등 소위 첨단기술에 집중되고 있다. 이러한 편향성은 재료산업을 비롯한 성숙기 산업의 기술개발 정보와 관심 부족으로 이어지고, 결국에는 재료기술혁신 정책의 부적합을 초래할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 첨단재료의 등장에 따른 재료혁신의 특징, 과정 및 미래의 연구방향을 살펴봄으로써 재료혁신의 본질을 파악하고, 이를 바탕으로 우리나라에서 첨단재료의 연구개발 전략을 모색하고자 한다.

II. 첨단재료 혁신의 과정과 특징

1. 첨단재료의 정의

1970년대를 기점으로 선진국에서 원재료와 전통재료의 감소현상이 나타나기 시작했다. 7대 금속광물(철강, 알루미늄, 니켈, 납, 아연, 구리, 주석)의 세계 사용량이 1970년대부터 감소하기 시작하였으며, 1990-1995년의 금속광물 가격의 가중지수가 50~60년대에 비해 절반이하로 감소하였다(World Bank, 1989). 이러한 현상은 첨단재료가 금속을 비롯한 전통재료를 대체하고 있기 때문이다.

첨단재료의 등장은 기초 재료산업에서 재료 대체(Materials Substitution) 과정과 새로운 형태의 재료간 경쟁을 발생시켰다. 특히, 전통적인 금속재료는 고분자, 복합재료, 세라믹 등의 첨단재료의 위협에 직면하게 되었다. 따라서 철강 등 기초범용재료(Commodity Materials) 내부에서도 규모와 범위의 전략 행위를 증

가시키고, 결국 첨단재료의 출현은 재료간 경쟁과 기초범용재료의 기술혁신을 가중시켰다(Kaounides, 1990).

첨단재료에 대한 정의는 여러 가지 관점에서 사용되어 왔으나 아직 공용으로 사용되는 정의는 없는 실정이다. 재료의 잠재성장률과 경제성장률 관점에서 정의할 수도 있으며(Conhedet et al., 1988), 재료가 출현한 시간의 관점(Theulon, 1989), 또한 무게대비 가격의 관점에서도 정의되어 사용되기도 한다. 일본 통산성(MITI) 산하 신소재연구회는 부가가치 창출의 관점에서 정의하고 있으며, 한국 과학기술부에서는 재료의 제조단계별 신기술적용 여부에 따라 정의하고 있다.

본 논문에서는 첨단재료를 “기존 재료를 대체하거나 새로운 가치를 창출하는 재료 및 관련 공정기술”로 정의한다. 첨단재료는 역사적으로 금속재료를 비롯한 재래식 재료를 대체하는 혁신과정의 연속이었고, 이러한 대체는 재료간 대체¹⁾와 재료내 대체²⁾를

모두 포함하고 있다. 재료 대체뿐만 아니라 재료의 기능과 특성이 시장에서 새로운 가치를 창출하거나 가능성 있다면 이것도 첨단재료의 범주에 속한다. 아울러, 본 논문에서의 재료는 가시적인 물질만이 아니라, 무형의 성형 공정기술까지 확장한다.

첨단재료는 <표 1>과 같이 기능별, 성분별, 용도별, 형태별로 다양한 분류가 가능하다. 구조재료, 기능재료로 나누는 기능별 분류는 가장 근원적인 분류방법으로서, 구조재료(Structural Materials)는 고강도, 내열, 내식 등의 구조적 특성을 가지며 건축재, 기계구조물 등에 사용된다. 반면 기능재료(Functional Materials)는 전기전자적, 광학적, 생체적 등 비구조적 특성을 가지면서 주로 전기전자제품 등에 사용된다(Cohendet et al, 1988). 가장 일반적인 첨단재료의 분류는 신금속, 파인세라믹스, 고분자재료, 복합재료이다. 이들 재료는 20세기 후반에 소개되어 시장에서 엄청난 재료 대체와 제품의 신기능을 창출하고 있다.

<표 1> 재료의 분류(Materials Classification)

기능별 분류	성분별 분류	용도별 분류	형태별 분류
구조재료 기능재료	신금속재료 파인세라믹스 고분자재료 복합재료	항공우주재료 자동차재료 전기전자재료 기계재료 건축재료 생체재료 등	Bulk 재료 Sheet 재료 Powder 재료

1) inter-material substitution: 서로 다른 특성의 재료간에 이루어지는 대체로서 철강이 사용되던 구조재료에 복합재료가 사용되는 현상 등을 일컫음.
 2) intra-material substitution: 기본적으로 같은 물성의 재료간에 이루어지는 대체로서, 예를 들어 알루미늄이 알루미늄-리튬합금으로 대체되는 현상을 일컫음.

2. 첨단재료 혁신의 특징

1) 장기의 적응과정

첨단재료의 채택은 궁극적으로 기업의 생산과정, 제품설계, 지식의 구조에 영향을 미친다. 사용하는 재료의 변화는 이를 이용하는 기술개발에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 나아가 산업구조와 기업간 지식이전에도 영향을 미친다. 재료가 사용자에게 의해서 채택되고 기업과 산업전반으로 널리 확산되는 것을 재료의 적응과정(Materials Adaptation Process)이라고 한다. 재료는 적응과정을 갖는다는 특성에 의해 다른 분야의 기술개발과는 다른 독특한 혁신과정을 거치게 된다.

첨단재료의 개발과 확산의 양상은 산업구조와 관련이 있다. 예를 들어 미국은 항공기에서, 일본은 컴퓨터·전자산업에서 중요한 신소재 개발과 확산의 역할을 수행하고 있다. 이들 국가에는 각각의 산업구조를 뒷받침하는 엄청난 첨단소재 개발자와 소비자가 상존하고 있다. 이와 같이 첨단재료의 개발과 확산은 산업의 구조적 특성으로부터 많은 영향을 받고 있다.

재료기술의 교체는 생산기술의 변화보다 더 근원적인 변화인 전체 생산공정, 제품설계에 급격한 변화를 가져올 수 있다. 생산기술은 특정 종류의 재료를 가공처리하기 위해서 개발되므로 서로 다른 재료를 처리할 수 있는 동일한 생산기술은 거의 없다. 그러므로, 생산기술 시장에서 재료기술의 변화는 이미 고착화 되어있는 생산공정, 제품설계 등 전반적인 분야에 영향을 미친다.

생산시스템 관점에서 볼 때, 생산시스템은 갈수록 규격화 정도가 감소하고, 정보가 집약화 되면서 다품종 생산체제로 되고 있다. 이러한 상황에서 첨단재료

는 제품의 다양성을 지원하면서 제품의 설계를 확대시키는 역할을 가진다(Willinger et al., 1988).

재료의 적응과정에서 사용자-공급자간의 상호작용이 기술혁신에서 역동적이고 긍정적인 효과를 가지고 있지만, 사용자-공급자간의 관성적(inertia) 관계는 여타 생산자의 새로운 첨단재료의 채택에 방해요인으로 작용할 수 있다. 신생기업은 불안정하고 생존율이 낮지만 재료기술의 확산에 결정적인 역할을 수행하고 있다. 반면에 재료기술이 안정화된 기존기업들은 새로운 재료의 수용과 혁신에 방해요인으로 작용될 수 있다. 일례로 덴마크의 창틀 재료가 목재, 시멘트에서 플라스틱으로 전환되는 과정에서 대부분의 기존 기업들은 플라스틱 재료 채택에 성공하지 못했고, 신생기업이 플라스틱 창틀 재료시장을 개척한 바 있다. 보장된 수요는 미래의 잠재적인 대규모 수요 예측을 방해하고, 기존 고객과의 안정적인 거래가 일종의 퇴출장벽으로 작용해서 신생기업이 재료확산에 더 많은 역할을 수행할 수 있는 것이다(Hansen et al., 1994).

2) 장기의 회임기간

상업화된 재료가 대중적으로 사용되는 대체기간에서의 적응과정이라는 특수한 과정을 거치면서 타 분야에 비해 상대적으로 장기적이라는 측면 외에 첨단재료 혁신의 특징 중의 하나는 기술적 발명이후 첫 상업화까지의 회임기간(Gestation Period)도 타 분야에 비해서 매우 장기적이라는 것이다. 폴리에틸렌, 판재 성형복합재(Sheet Molding Compound), 비정질합금, 금속복합재료, 구조용 세라믹(Sic, Si3N4) 등은 20년 이상의 회임기간을 가진 사례이다. 금속복합재료 중에서 보론/알루미늄 복합재는 20년 이상의 회임기간을 걸쳐 1970년대 말에서야 우주왕복선에 채용됨으로써

시장에 첫 출시되었다(Maine, 2000). 자기냉동소재는 1926년 이론적 규명이후 75년이 지난 2001년에 상온 영구자석 자기 냉장고가 출시되었다. 미국 OTA(1988) 보고서에서도 기술적 문제를 해결하고 저렴한 비용의 생산기술을 획득하기 위해서는 10-20년이 소요된다고 한다.

3) 사용자의 보수성

재료의 장기적인 사용 실적, 품질인증 획득 혹은 신뢰성이 확보되지 않으면 사용을 꺼리는 사용자의 보수성(User's Conservatism)도 재료기술 확산에서 신중하게 고려되어야 할 요소 중의 하나이다(Wield, et al., 1995). 첨단재료 응용에 대한 사용자의 이해력 부족과 소재개발을 등한시하는 기업의 경영전략도 첨단재료 혁신 장기화의 한 원인을 제공한다(Maine et al., 2003). 즉 가용재료에 대한 설계자의 지식부족은 제품설계와 재료채택간의 분리를 강화시키고, 결국에는 재료의 회임기간 및 대체기간을 장기화시키고 있다. 또한, 첨단재료에 대한 신뢰성 확보를 위한 각종 시험평가 및 분석이 중요한 기술이슈로 떠오르고 있다. 특히, 인간의 생명과 직결되는 항공우주재료, 생체재료 등은 안전성 확보가 절대적이며, 시스템에 채용될 경우 사용자는 철저한 품질인증을 요구하고 있다.

앞에서 논의된 회임기간의 장기성, 장기의 적응과정의 필요성 및 사용자의 보수성 등은 재료혁신에 있어서 막대한 선행 투자비용을 필요로 하게 하며, 투자회수의 위험성을 높이게 되어 기업의 첨단재료 상업화의 장애요인으로 작용하고 있다(Wield et al., 1995). 기업에서 첨단재료의 선택·생산은 생산공정의 재구축, 새로운 생산장비의 구매, 조직의 재정비 등 광범위한 선행투자를 필요로 한다. 결국 이러한

막대한 투자비용 때문에 재료혁신의 대부분이 대기업과 정부에 의해서 일반적으로 주도되어 왔다(Freeman et al., 1997; OECD, 1990).

4) 재료의 다양성 증가

재료과학의 진보는 새로운 응용이 가능한 수많은 첨단재료(고분자, 세라믹, 복합재료)의 분열을 가져왔다(Marcum, 1990). 첨단재료의 출현은 제품의 성능향상과 제조편의성을 향상시킬 수 있는 이용 가능한 재료의 범위(종류)가 더욱 더 넓어졌음을 의미한다. 그리고 사용자의 입장에서 재료혁명은 더 광범위한 재료 선택권을 가질 수 있게 하였다. 자동차 1대당 1900년대에는 100종 이하의 재료가 사용된 반면에 현재는 적어도 4,000종 이상의 재료가 사용되고 있다(Clauser, 1975).

첨단재료의 등장으로 재료의 다양성이 증가함에 따라 특정한 재료의 절대적 수요량이 많지 않다는 것이다. 1985년 일본 급냉응고재료의 수요는 12톤, 형상기억합금은 6~7톤에 불과했으며, 1986년 Al-Li합금의 전 세계 수요는 400톤에 불과했다(Turner et al., 1990). 이러한 적은 수요는 채산성을 확보하는데 어려움을 가중시켜 첨단재료의 확산을 가로막고 있다.

재료 공급자 기업이 사용자 기업의 세분화된 재료 특성 요구에 대응할 수 있는 합금설계 및 공정기술을 가지게 됨으로써 수요의 분할(Segmentation)을 증대시키고 있다. 마치 사용자 기업은 재료가 아닌 기술해결책을 구매하는 것과 같이 되고 있으며, 재료산업이 점점 서비스산업으로 전환되고 있다(Turner et al., 1990). 이는 재료산업이 과거의 철강 등 범용재료에 의한 “규모의 경제”가 아니라 “범위의 경제”로 바뀌고 있음을 의미한다(Willinger et al., 1988).

사용자 기업의 제품 설계자는 과거 제한된 몇 개의 범용재료 대신에, 필요한 설계 요구조건에 가장 적합한 재료를 선택하거나 새로운 재료를 생산자와 협력하여 제조할 수 있게 되었다. 이는 재료의 주도권이 일방적인 공급자 중심(Producer-driven)에서 사용자(User-led)로 이전되는 현상을 낳고 있다(Turner et al., 1990). 사용자의 재료 선택권은 구매협상력의 증가를 의미하며, 철강 등 전통적인 재료공급자에게는 이러한 구매 협상권이 상당한 경쟁압력으로 작용하고 있다.

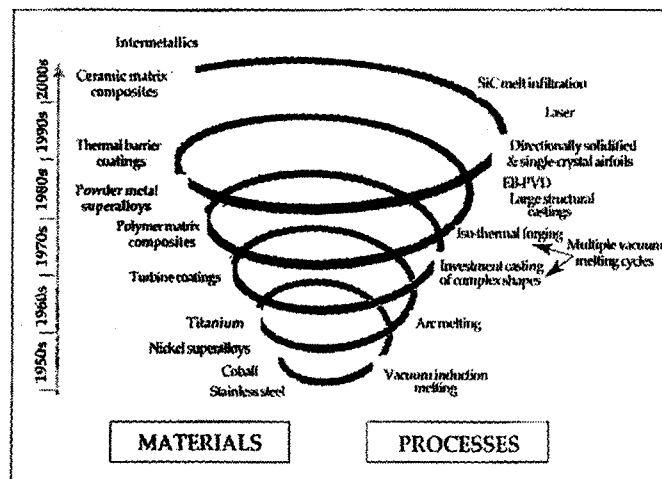
5) 재료-제품-공정 간의 밀접성 증가

지배적인 제품의 개발 가능성은 소재의 물성과 소재와 관련된 학습과정에 의해서 결정된다. 캔 포장 산업에서 캔 성형기계는 금속판재를 어떻게 소성가공하느냐의 학습과정 결과이다. 또한 금속포장 재료로 알루미늄 도입은 3조각 제품에서 2조각 제품으로 바

뀌고 드로잉공정을 확립하였다. 이와 같이 재료의 적용은 설계 및 생산프로세스의 문제이며, 신소재의 개발은 새로운 설계와 생산방법에 대한 가능성을 제공한다. 또한 신소재는 그 자체만으로 기존소재의 기술적 문제 해결과 상업적으로 경쟁우위를 제공하고 있다(Hansen et al., 1999).

첨단재료의 우수한 물성은 제품설계(Product Design)에 중요한 아이디어를 제공하고 있으며, 혁신적인 제품 창출의 필요조건으로 되었다. 첨단재료가 가져다주는 제품혁신(Materials-inspired Innovation) 사례로 세라믹 가스터빈엔진, 유리섬유, 플라스틱 포장 등을 들 수 있다. 따라서, 제품 설계과정에서 재료 전문가와의 밀접한 협력이 증가하는 경향을 보이고 있다.

재료는 재료공정기술(Materials Processing Technology)과의 밀접성이 더욱 증가하고 있으며(OECD, 1990) 재료가 상품으로서 가치를 가지기 위해서는 신합금을 제조하는 공정과 부품을 성형하는 공정기술의



〈그림 1〉 제트엔진 재료와 공정개발
(자료: Schafrik et al., 2004)

뒷받침이 필수적이다. 그림 2의 제트엔진부품 개발에서 보듯이 첨단재료의 출현과 공정기술은 역사적으로 불가분의 관계를 가지면서 발전하여 왔다(Schafrik et al., 2004).

6) 동적인 비즈니스 환경으로 전환

재료혁신의 다각화와 복잡성은 새로운 과학적, 기술적 지식을 필요로 한다. 기업들은 그들이 보유하지 못한 핵심 역량을 확보하기 위해서 타 기업과의 협력을 전략적으로 추진하고 있다. 연구범위의 증가, 고가의 연구장비 공동활용, 연구비 부담해소와 신시장 접근 용이성을 들어 지역내뿐만 아니라, 국가간 혁신주체 사이에서도 협력이 1980년대 후반 들어 본격적으로 추진되고 있다. 1986년 미국기업은 일본과 400개의 합작투자에 참여하였고, 유럽의 ESPRIT 사업, 일본의 초전도체 국제공동연구(ISTEC) 등이 추진되었다(OECD, 1990). 최근에는 나노기술을 비롯한 첨단재료 분야에서 세계 각국의 협력과 네트워킹이 이루어지고 있다(TUMRS-ICAM, 2001).

전통적인 범용재료 공급자들은 첨단재료의 새로운 침입에 의해 직접적인 재료간 경쟁에 직면하게 됨으로써 재료산업과 시장의 경쟁 환경이 보다 더 치열해졌다. 첨단재료 기술은 혁신과 마케팅 전략에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 생산기능과 기업조직에도 많은 영향을 미치고 있다(Janszen et al., 1997).

3. 재료기술혁신의 원천

기술혁신전략의 수립을 위해서는 혁신의 원천에 대한 정확한 이해가 필요하다. 재료기술혁신의 원천을

기술혁신시스템 분석이론의 발전과정에 의거하여 분석해본다.

1) 기술주도 관점

기술주도(Technology-push) 관점에서 재료혁신 촉발요인은 다음과 같다. 첫째, 전후 10여년 동안 엄청난 기초과학 연구를 통해 마이크로 레벨(원자, 분자, 결정체)에서 물질의 조직구조에 대한 과학적 이해와 제어기술 습득이 재료혁신의 주요 원천이 되었다(Turner et al., 1990). 물질의 구조를 어떻게 제어하고, 재료의 물성이 구조와 어떻게 연관되어 있는지를 과학적으로 이해할 수 있게 됨으로써 과거의 물리적인 외형만을 변형시키는 것과 달리, 전적으로 새로운 재료의 설계와 제조가 가능하게 되었다(Lastres, 1994).

둘째, 1980년대부터 생산의 질적인 향상을 가능하게 한 기구조각, 제조장비, 자료처리의 발전이 구조재료 혁명의 바탕이 되었다(Flemings, 1988). 기업과 연구기관들은 첨단재료의 비교우위 확보가 장비제조 산업 등 인프라산업의 많은 노하우에 밀접한 관계가 있다는 인식이 점점 증가하고 있다. 특히 강력한 정보통신기술 및 컴퓨터 활용은 매크로 레벨에서의 재료 특성에 대한 과학적 이해 증가와 재료설계에서의 구조, 제조, 수명 등의 관계를 설명하는데 큰 도움을 가져왔다.

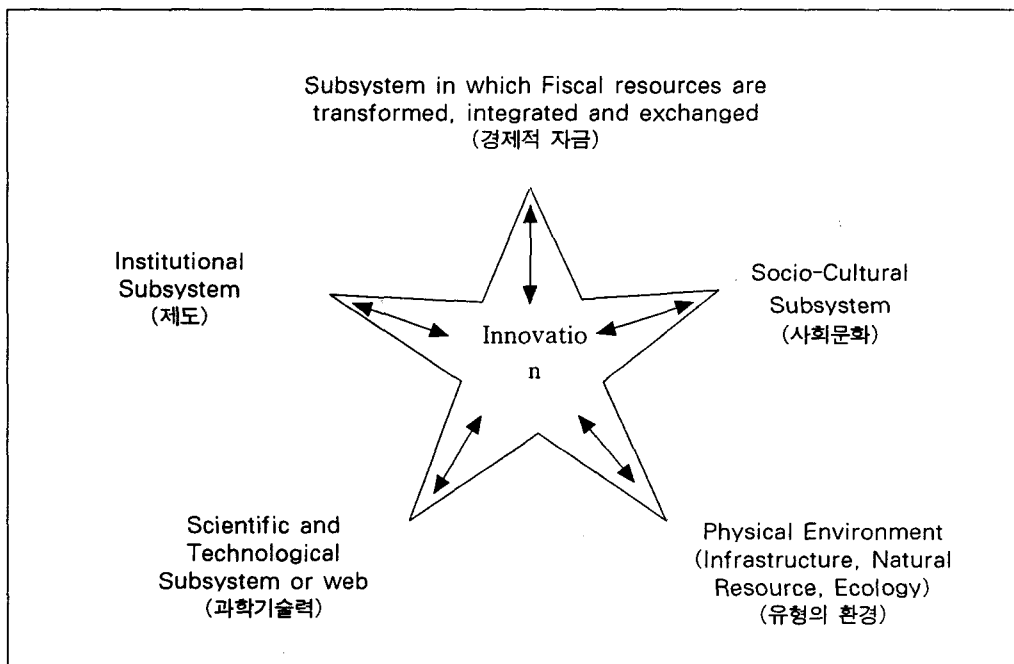
셋째, 결정체를 제어하여 설계 및 엔지니어링 차원에서 새로운 특성을 발휘하도록 하는 재료공정기술(Materials Process Technology)의 발전도 재료혁명의 촉발 요인이다(Janszen et al., 1997). 이와 같이 기술주도 관점에서 재료과학 및 혁신은 어디에서 만들어진 기술적 진보의 결과라고 할 수 있다.

2) 수요견인 관점

수요견인(Demand-pull)의 관점에서 볼 때, 재료개발과 밀접한 종속관계에 있는 여타 섹터의 성장이 재료발전의 매우 중요한 요인이며, 수많은 첨단재료는 수요산업에 의해서 수행된 R&D의 결과라고 볼 수 있다. 대표적인 수요산업은 항공우주산업과 국방산업이다. 이들 분야는 구조재료개발의 강력한 견인차로서 항공우주 및 국방에서 요구하는 높은 수준의 안정성과 신뢰성 때문에 재료분야에 상당히 많은 연구개발 투자가 유도될 수 있었다. 또한 정보기술(IT)의 출현과 성장은 전자, 광학, 자성 기능을 가진 수많은 신소재의 발전을 가속화시켰다. 이와 같이 첨단재료의 80% 이상을 전자, 자본재, 항공우주에서 사용하고 있다.

3) 공급자-사용자 상호작용 관점

재료기술의 혁신 원천을 공급자와 사용자의 상호작용 관점에서 중요성을 주장하기도 한다(Cohendet, et al., 1988). 첨단재료가 주문형 재료(Bespoke Materials)화 됨에 따라 생산자와 사용자간의 연구, 설계, 생산, 그리고 시장 연계가 점점 더 의존적인 관계로 발전하고 있다. 재료 사용자와 생산자는 그들 활동을 상호 통합하는 재료전략과 전략적 제휴를 필요로 하고 있다. 공급자 기업은 중요한 선도고객(대형 자동차기업, 항공우주업체, 전자회사 등)과의 협력이 중요해 지고 있다(Wield, et al., 1995). 아울러, 사용자 기업은 새로운 재료 개발에 필요한 물성을 제공하는 역할과 함께 첨단재료 개발의 중요 요소로 되고 있다(Hansen, et al., 1994).



<그림 2> 재료혁신시스템의 동적 모형(Janszen et al., 1997)

4) 시스템적 관점

재료혁신의 원천은 하나의 요인에 종속적으로 지배되지 않고, 재료기술과 관련하는 종합적인 하부구조 (Infrastructure System)와 관련이 있다고 주장하면서, 재료혁신의 과정을 비선형의 역동적 시스템 관점에서 보는 시각도 있다. 대표적으로 Janszen et al.(1997)은 재료와 관련한 혁신시스템의 구조를 3개의 사회적 서브시스템(경제, 제도, 사회문화)과 2개의 자원과 관련된 서브시스템(무형, 유형)으로 표현하고, 각 서브시스템내의 복잡한 피드백 루프를 통해서 재료혁신의 원천과 과정을 설명하고 있다. 자동차 경량화 소재의 개발에서 보듯이 배기가스의 환경저해 문제, 자동차 배기가스 허용치 법제화, 문제해결을 위한 자금 집중 등 다양한 요인의 상호작용이 재료혁신의 원천이 되고 있다.

III. 첨단재료의 연구동향

미국, 영국, 독일 등 세계 8개국의 재료기술 예측자료에 의하면, 선진국은 재료의 경량화, 내열, 초소형화, 생체재료와 생체적합성, 다기능 및 지능화, 컴퓨터모델링과 제조공정, 장수명화, 환경친화 및 지속적 성장, 생물모방, 고객맞춤형 생산 등에 연구개발의 초점을 맞추고 있다. 또한 이러한 미래 재료들의 요구 특성은 “지속가능한 삶을 위한 재료의 사용”, “새로운 재료특성의 발견”, “재료의 지능화” 등 3가지 비전으로 분류할 수 있다(Cahill et al. 1999).

개념/설계에서부터 제품/응용에 이르는 재료공학 프로세스의 각 단계에서 살펴본 미래재료의 연구방향은 <그림 3> 와 같다(Antón et al. 2001).

<표 2> 재료 연구방향의 분류

재료의 비전	내용
지속 가능한 삶을 위한 재료의 사용	<ul style="list-style-type: none"> - 제품수명의 연장(기술변화에 적응 및 리스타일하는 설계) - 재료의 재사용 (3R - Recycling, Remanufacturing, Reuse) - 안전 (가스제거 고분자, 독성연소방지, 충격 완화) - 환경친화 (수질, 대기, 동식물, 인간에 무해한 재료)
새로운 특성의 재료	<ul style="list-style-type: none"> - 복합재료의 혁명 (수지강화, 비용감소, 분자합재료, 3차원 수지방향 제어) - 세라믹의 금속 대체(다기능화 및 안정화) - 생물모방 (구조, 접착, 효소촉진제, 인공피부 등) - 표면관련 (생체적합 의료이식, 물, 음식, 의료 필터링 메브레인, 촉매제, 센서 등) - 소자의 소형화 (Micromechanics, Nanotechnology) - 전통재료의 신형태 및 사용(공급 원료로서의 목재, 전통재료를 활성화 혹은 지능화하는 공정 등)
재료의 지능화	<ul style="list-style-type: none"> - 특성(예, 고강도, 투과성, 자석, 생체적합, 일방향 고장력 등)의 완전한 새로운 결합 - 정밀도와 고객맞춤 공정(마이크론 범위의 공차, 고객주문형 소량생산 등)

자료: Cahill et al. 1999

1. 개념 및 재료설계 단계

재료의 개념 및 설계단계에서는 자연의 우수한 특성을 모방하여 재료의 기능을 설계하는 생물모방기술(Biomimetics)의 연구가 증가할 것이다. 예를 들어 전복 껍질의 우수한 경도 혹은 거미줄의 우수한 강도 등을 재료개발에 모방하는 것이다.

또한 컴퓨터의 계산처리능력을 활용하여 특정 응용에 최적의 재료물성을 찾기 위해 수많은 재료를 스크린하는 재료설계(Combinatorial Materials Design)가 용이해 질 것이며, 이와 같이 정보기술(IT)을 활용한 재료설계가 크게 증가할 것이다.

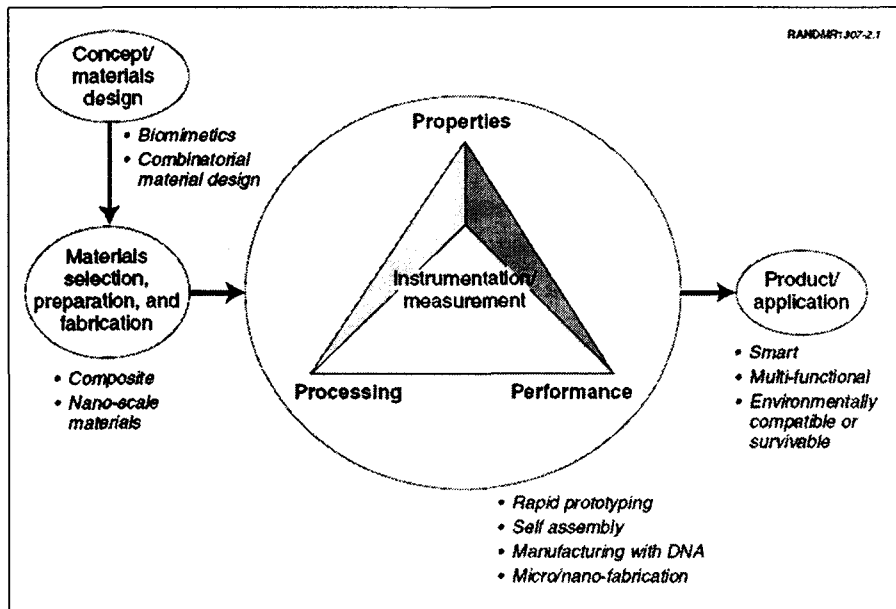
2. 재료의 선정, 준비, 제조단계

금속, 세라믹, 고분자, 생물 재료 등의 조합을 통해

다기능 특성을 갖는 복합재료의 연구와 함께, 서브마이크론(<10-6m) 혹은 나노미터(10-9m) 레벨에서 제어될 수 있는 물성을 가진 나노재료가 연구의 중요한 분야로 떠올랐다. 나노 사이즈 레벨에서의 특성은 일반적인 재료와 근본적으로 다른 특성을 나타내기 때문에 선진각국은 앞 다투어 연구개발 자금을 투자하고 신기술응용에 집중하고 있다.

3. 공정, 물성, 성능 연계단계

공정, 특성 및 성능은 복잡하게 상호 연계되어 있으며, 또한 장비와 성능평가 능력은 공정 최적화의 기반요소이다. 미래의 주요한 재료공정 중에서 급속조형(Rapid Prototyping) 기술은 컴퓨터를 이용한 설계와 제조를 결합하여 가상의 설계, 다양한 시제품 생산과 테스트를 쉽고 저렴하게 한다. 또한, 나노 수준



〈그림 3〉 The General Materials Engineering Process

자료 : Antón et al. 2001

에서의 가공은 리소그래피, 초평면가공기술 등의 특 다운 기술개발과, 어떤 조건하에서 나노스케일의 구조가 자발적으로 형성되는 자기조직화(Self Assembly) 등 물질제어식의 바텀업 기술개발이 이루어지고 있다. 또한 DNA를 이용한 제조 등 생물모방제조 기술도 중요한 연구 분야로 떠오르고 있다.

하며 또한 전자파 흡수 재료에도 활용될 수 있다. 원자레벨에서 재료 제조능력 확보는 보다 더 우수한 복합재료와 환경친화재료를 만들 수 있는 기회를 가지게 할 것이다.

IV. 한국의 재료혁신과정

4. 제품응용 단계

향후 재료기술은 재료엔지니어에게 지능형, 다기능, 환경친화 혹은 장수명의 첨단재료를 설계, 생산할 수 있는 역량을 제공할 것이다. 지능형 재료는 센서, 액츄레이터 혹은 컴퓨터와 결합하여 환경조건에 반응하고 대응하는 기능을 가진 재료로서 각종 제품에 응용될 수 있다. 다기능재료는 몇 가지 기능을 결합한 MEMS, Lab-on-a-chip과 같은 시스템이 제작 가능하게

1. 재료개발 과정

우리나라의 본격적인 첨단재료 기술개발은 1980년대 초반 정부주도의 연구개발사업이 시초이다. 1980년대는 철강산업, 석유화학산업, 조선 및 시멘트산업 등 국가기간산업의 육성과 대일무역 역조 개선을 위하여 범용기술에 대한 선진기술 모방형 소재부품국산화 및 대량생산을 위한 소재산업의 기반구축에 초점을 두었다. 국가첨단 및 기관첨단 기술개발사업을 통

〈표 3〉 연대별 소재산업구조 및 연구개발 추진전략

구 분	1980년대	1990년대	2000년대
개발단계	소재부품 국산화개발	첨단소재 선도적개발	미래신소재개발
산업구조	첨단산업	고부가가치산업	지식기반산업
개발소재	범용소재(철강재료, 자동차버퍼, 유리 등)	정밀부품소재(광학용소재, 자기헤드 등)	지능형 소재(센서, 액츄에이터 등)
사회적 관심기술	정보기술, 신소재기술, 생명공학기술 등	컴퓨터, 정보통신기술	NT, IT, BT, ST기술 및 융합기술 등
핵심산업	철강산업	자동차·반도체산업	초고속정보통신산업
기술개발 유형	모방생산기술	소재부품혁신기술	첨단기술간융합기술
산업입지	소재산업기반확충	첨단소재산업고도화	미래 신산업창출

자료 : KISTEP, 2003

하여 고온·고강도 구조재료, 가전기기용 부품소재, 고분자합성소재 등을 국가주도 혹은 민간 공동으로 개발하였다.

1990년대는 자동차산업, 전자산업, 반도체산업 등 국내 선도산업을 중심으로 세계시장에서의 경제적 우위를 점유할 수 있는 소재부품 고도화에 중점을 두었다. 대표적인 국가사업인 선도기술개발이 1992년부터 시작되면서 고밀도 정보저장·표시재료, 통신통용 부품소재, 환경정화·분리용 소재 등을 전략적으로 발굴하여 고부가가치 첨단소재 국산화 및 정밀소재부품의 산업화를 추진하였다.

2000년대 이후부터는 초고속 정보통신산업, 환경산업, 의료산업 등 차세대 성장동력 및 미래 신산업의 창출을 위해 원천기술개발에 중점을 두고 있다. 현재, 프론티어기술개발사업, 나노핵심기반기술개발사업, 신기술융합사업을 통해서 나노재료, 차세대 소재성형, 생체모방재료, 고집적 전자소재, 지능형소재, 고부가가치 주문형 소재 등의 개발이 이루어지고 있다.

2. 추진과정의 분석

앞장에서 논의된 재료혁신의 특징과 원천을 기반으로 우리나라의 첨단재료 기술개발이 추진된 과정을 분석해보면 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 첫째 연구개발 투자비가 상대적으로 미흡하다. 2002년도 국가연구개발 총예산 4조 1,794억원중 전자·정보통신 25.4%, 농수산 9.5%, 전자 8.1%인데 비하여 소재분야는 4.3%로 기술의 중요성에 비하여 국가 연구비 규모가 상대적으로 미흡한 실정이다(국가과학기술위원회, 2003). 과학기술부 특정연구개발사업에서 과제당 평균연구비가 0.6억원인 반면에, 소재분야의 경

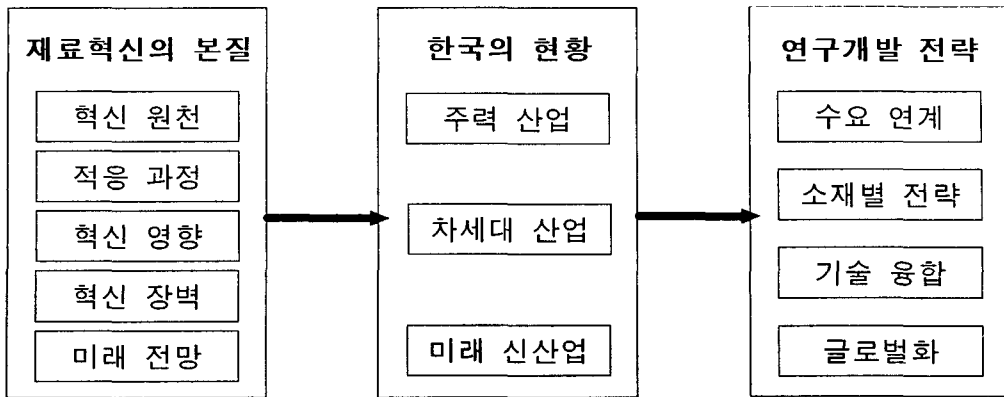
우는 0.3억원에 그치고 있다.

둘째, 시스템 연계 연구가 미흡하다. 목적 지향적 또는 시스템 연계의 기술개발이 아닌 금속, 세라믹, 고분자 등 개별 소재개발에 머물고 있다. 재료혁신 특징의 하나는 수요자 주도의 시장이라는 점과 최근 재료-제품-공정간의 밀접성이 계속 증가되고 있다는 점을 고려할 때 시스템과 연계되지 못한 기술개발 및 정보교환의 부족은 개발된 소재기술이 산업화로 응용되지 못하고 사장될 가능성이 높다.

셋째, 장단기 국가 연구개발 전략수립이 미흡하다. 소재기술은 기술의 성격상 타 기술에 비해서 정책적인 고려가 중요시 되는 분야임에도 불구하고 장기적인 연구지원 보다는 연구유행에 따라 산발적으로 지원하는 경우가 상당부분이다. 재료혁신의 특징인 장기간의 적용기간 및 회임기간 등을 고려할 때 장기간의 안목에 의거한 국가연구개발전략의 수립이 필요하다. 또한 우리나라 특성에 맞는 적절한 테마 선택, 지속적인 노력 및 투자가 요구되지만 단기적 효과 창출에 집중되고 있다.

V. 연구개발 전략

우리나라는 국가 주력산업의 고부가가치화를 위한 첨단재료·공정의 기술개발, 차세대 성장산업의 조기 산업화 및 미래 신산업 창출을 위한 원천 재료기술의 확보가 필요하다. 이러한 3가지 목표 달성을 위해 전술한 첨단재료 기술혁신의 원천, 과정, 영향, 장벽, 전망과 한국 재료개발의 국가목표 등에 기초하여 국가 차원에서 첨단재료의 연구개발 전략을 구체화하면 다음과 같다.



〈그림 4〉 재료연구개발 전략 도출과정

2. 소재별 연구개발 전략의 차별화

1. 수요산업과의 연계강화

첨단재료의 성공적인 산업화 응용을 위해서는 전방 산업의 수요를 파악하고 수요기업들과의 연계가 매우 중요하며 사용자-공급자 기업간 상호작용(User-Supplier Interaction)을 위한 전략이 요구된다. 특별한 물성을 지닌 재료의 발견과 확산은 재료로부터 파생되는 중간재와 서브시스템 시장의 새로운 확대 기회를 제공하지만, 사용자의 재료 사용에 대한 보수성은 여전히 상존하므로 수요기업의 공동참여를 통한 재료 개발 등 유인 시스템이 필요하다.

국가차원에서는 소재 사용자산업이 필요로 하는 기술수요 예측을 강화하여 공공연구기관 및 재료생산업체들에게 시장정보를 제공하고, 국가연구개발사업에서는 사용자-공급자 공동참여 과제도출이 강화되어야 한다. 재료 기술개발 결과의 상업적 활용 증대를 위해서 중·단기 엔지니어링 과제의 조화와 국산 신소재 품질인증 체계 구축이 필요하다.

재료의 다양성 증가는 제품수명주기, 시장규모, 제품응용시점 등에 따라 재료별로 상이한 기술혁신 특성을 보이고 있다. 과거의 통합형 연구개발 전략에서 각 소재별 특성에 맞는 연구개발 전략의 차별화가 필요하다. 주력산업의 고부가가치화(성숙기), 차세대성장산업과 시스템연계(성장기), 미래 신산업의 창출(도입기) 등 다변화된 국가연구개발 목표에 부합하도록 금속·세라믹·고분자 등 첨단재료를 수명주기별로 조합한 매트릭스형 연구개발 전략 수립이 필요하다.

또한, 민간과 정부의 신소재 개발역할을 명확히 정립하여 첨단재료기술의 성장 단계별 역할범위를 구분하고 균형된 시즈와 니즈창출 전략이 필요하다. 일례로 민간은 수명주기가 짧고 시장규모가 큰 재료를 중심으로 역할을 정립하고, 정부 등 공공연구기관은 리스크와 파급효과가 큰 재료 개발에 집중할 필요가 있다.

3. 이종 학문 및 집단과의 융합 강화

선진국에서는 재료의 개발은 다학제적 연구에서 출발한다고 말하고 있으며, 갈수록 이종조직과 협력 강화될 것이라고 한다. 생물모방기술, 나노기술 등을 접목한 재료기술의 개발은 필연적으로 물리, 화학, 생물, 수학, 컴퓨터 등 이종 학문과의 기술융합이 불가피하다. 이러한 기술융합 활성화를 위해서는 융합기술개발 프로그램의 확대뿐만 아니라, 이종 집단간의 기술교류 프로그램의 지원이 필요하다.

또한, 창출된 지식과 정보의 원활한 확산과 교류를 위해서 국가차원의 첨단재료 커뮤니티 구축이 필요하다. 하나의 방안으로 인터넷 커뮤니티를 구축하여 국내에서 발생하는 첨단재료와 관련한 각종 정보-연구과제, 인력 등을 공유시킴으로써 국내 연구자들의 자발적인 연구과제 모색과 상호협력·경쟁을 유발시킬 수 있을 것이다.

4. 글로벌 R&D 협력과 네트워킹 활성화

미국 과학재단(NSF) 등 세계 각국은 재료분야에서의 국제협력과 네트워킹 구축을 위한 워크샵 개최를 주기적으로 지원하고 있다. 이러한 국제 활동을 통해서 선진국은 각국의 연구개발 동향을 파악하고 지식을 보완해 나가고 있다. 또한 일부에서는 국제 연구개발 네트워킹구축을 위해서 국제가상연구소(International Virtual Institute) 모델을 제안하기도 한다(IUMRS-ICAM, 2001).

우리나라도 선진국의 첨단재료개발에 직접적인 참여와 한국이 주도하는 국제공동연구과제 등을 추진하여 선진국의 연구동향에 발맞출 필요가 있다. 또한 세계 최고수준의 기술력 확보와 기술도입 침범 역할을 할 해외 거점 R&D 센터를 기술원천지를 중심으로 설치하고, 해외에 거주하는 우수한 한국인 과학자를 활용하여 국제 재료 네트워크 구축을 활성화시켜 나가야 할 것이다. 이러한 글로벌 협력은 한정된 국내시장의 한계를 넘어 글로벌 시장을 겨냥하는 마케팅 전략과도 연계되어야 할 것이다.

VI. 맺음말

재료의 엄청난 경제사회적 영향력에 비해 재료혁신에 대한 연구는 정보통신, 생명공학 기술 등에 상대적으로 부족한 실정이다. 재료혁신과 관련한 정보의 부족은 재료기술정책의 부적합을 초래할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 첨단재료의 등장에 따른 재료혁신의 특징, 과정 및 미래의 연구방향을 문헌고찰을 통해서 정보를 수집하고 재료혁신의 본질을 파악하였다. 이러한 재료혁신의 원인과 결과에 대한 합의를 바탕으로 우리나라의 첨단재료 연구개발 전략을 모색하였다. 지난 20여 년간의 재료 연구개발 성과를 증대시키고, 효율적인 국가 연구개발 사업 추진을 위해 본 논문에서는 수요산업과의 연계강화, 소재별 연구개발 전략 차별화, 이종학문 및 집단과의 융합 강화, 글로벌 R&D 협력과 네트워킹 활성화 전략을 제시하였다.

〈참고문헌〉

- 국가과학기술위원회(국과위), 2002년도 「국가연구개발사업 조사분석평가보고서」, 2003.
- 한국과학기술기획평가원(KISTEP), 「신소재 기술개발 추진전략(안)」, 2003.
- Abernathy, W. J., Clark, K. B., "Innovation: Mapping the winds of creative destruction", *Research Policy* 14, pp. 3-22, 1985.
- Antón P. S., Silbergliitt R., Schneider J., *The Global Technology Revolution: Bio/Nano/Materials Trends and Their Synergies with Information Technology by 2015*, RAND National Defence Research Institute, 2001.
- Cahill, E., Hernandez, H., Bellido, F., "Materials and Materials technologies : materials in the making", *Foresight : The Journal of Futures Studies, Strategic Thinking and Policy*, Vol. 1, No. 06, 1999.
- Clauser, H. R., *Industrials and Engineering Materials*, New York : McGraw-Hill, 1975.
- Cohendet, P., Ledux M. J., Zuscovitch, E., *New Advanced Materials : Economic Dynamics and European Strategy*, Berlin, Springer-Verlag, 1988
- Dubarle P., "Advanced Materials: The Silent Revolution", *OECD Observer*, 159, August-September, pp. 4-9, 1989.
- Flemings M. C., "Structural Materials : Metals, Ceramics, Polymers and Composites", *ATAS Bulletins* 5, May, 1988.
- Freeman C., Soete L., *The Economics of Industrials Innovation*, 3rd ed., London: Pinter, p. 237, 1997.
- Hansen, P. A., Serin, G., "Materials Development and Adaptability of Industrial Structure", *Technological Forecasting and Social Change*, 46, 1994.
- Hansen, P. A., Serin, G., "Materials and Strategic for Successful Innovation and Competition in the Metal Packaging Industry", *Technology in Society*, 21, 1999.
- IUMRS-ICAM, *Workshop on International Collaboration and Networking*, Cancun, Mexico, August 28, 2001.
- Janszen, F., Vloemans, M., "Innovation and the Materials Revolution", *Technovation*, 17(10), 1997
- Jewkes J., Sawers, D., Stillerman, R., *The Source of Invention*, London, Macmillan, 1958.
- Kaounides, L., "New issues and current negotiations: the materials revolution and economics development", *IDS Bulletin* 2, pp.16-27, 1990.
- Lastres, H., *The Advanced Materials Revolution and Japanese System of Innovation*, St. Martin's Press, 1994.
- Maine, E., *Innovation and Adoption of New Materials*, Dissertation for Ph. D. Thesis, University of Cambridge, 2000.
- Maine, E., Probert, D., Ashby, M., "Investing in new materials : a tool for technology managers", *Technovation*, 2003.
- Marcum, J. M., "Technical Note: Materials: the economics implication", *International Journal of Materials and Product Technology*, 5(2), 1990.
- OECD, *Advanced Materials : Policies and Technological Challenges*, Paris, 1990.
- Schafrik R., Sprague R., "Gas Turbine Materials Part 1", *Advanced Materials & Process*, p. 34, March, 2004.
- Theulon, H., "High Technology Materials, Recent

- Materials”, *STI Review*, no. 6 (Paris: OECD), 1989.
- Turner, C., Roy, R., Wield, D., “Materials : A New Revolutionary Generic Technology? Condition and Policies for Innovation”, *Technology Analysis and Strategic Management*, Vol. 2, No. 3, 1990.
- US Congress, Office of Technology Assessment, *Advanced Materials by Design: New Structural Materials Technologies*, Washington, DC, US Government Printing Office, OTA-E-351, p.1, 1988.
- Vogely W. A., “Impacts of Advanced Materials on Society”, *Materials and Society*, Vol. 14, No. 2, 1990.
- Wield, D., Roy, R., “R&D and Corporate Strategies in UK Materials- Innovating Companies”, *Technovation*, 15(4), 1995.
- Willinger, M., Zuscovitch, E., “Towards the Economics of Information-intensive Production Systems: the Case of Advanced Materials”, in G. Dosi, *Technical Change and Economic Theory*, Printer, London and New York, 1988.