

## 1. 서론

세계는 정보통신기술, 생명공학기술, 초정밀 기술을 중심으로 급속한 기술변화가 일어나고 있다. 기술혁신이 일상적으로 일어남에 따라 이 영향으로 산업에서도 창조적 파괴(creative destruction) 현상이 일상적으로 발생하고 있다. 산업 현장에서 일하는 기술자들은 지금 평생 내내 새로운 기술을 학습하느라 바쁘다.

현재 일어나고 있는 기술혁신 추세는 종합적으로 볼 때 다분야 기술융합이라는 독특한 패러다임 특징을 나타내고 있다. 기술융합은 서로 다른 기술요소들이 결합할 때 개별 기술요소들의 특성이 상실되고 새로운 특성을 갖는 기술과 제품이 탄생되는 현상이다. 과거에도 이런 기술융합 현상이 있었지만 현대의 기술융합 패러다임은 주로 정보통신기술 중심으로 여러 분야의 기술을 융합하는 것이 특징이다.

다분야 기술융합 추세의 등장은 앞으로 더욱 더 확산되고 일반화될 것으로 내다보인다. 다분야 기술융합에 의한 기술혁신은 연구개발 활동 양식에도 많은 변화를 일으킬 것이며, 연구개발 인력의 교육에도 크나 큰 변화의 물결을 몰고 올 것으로 예상된다. 이제까지 동일한 분야의 전문가들끼리 모여 연구개발 활동을 수행하였지만 다양한 기술 분야의 전문가들이

\* 기술경영연구센터 선임연구위원(e-mail: leekr@stepi.re.kr)

협력하지 않을 수 없게 될 것이다.

## 2. 다분야 기술융합의 개념과 인식

다분야 기술융합은 2개 이상의 기술요소가 화학적으로 결합하여 개별 기술요소들의 특성이 상실되고 새로운 특성을 갖는 기술과 제품이 탄생되는 현상으로 정의된다. 다양한 기술이 융합된 후 개별 요소기술의 속성이 감소하나, 단순한 기술결합은 개별 요소기술의 속성이 유지되는 차이가 있다. 달리 말하면 기술융합은 개별 요소기술의 화학적인 통합을 의미하지만 단순한 기술결합은 개별 요소기술의 물리적인 통합을 의미한다. 따라서 기술융합의 결과 탄생한 제품은 단순한 기술결합의 결과 탄생한 제품보다 훨씬 더 급진적인 혁신을 가져오는 경우가 많다. 예를 들어 MP3는 정보기술, 음향기술, 기계기술, 반도체기술 등이 융합된 혁신의 산물이라고 하는 것이 이들 기술이 단순하게 결합된 제품으로 보는 것보다 더 타당한 설명이다.

기술융합(technology fusion)이라는 용어를 사용한 학자는 일본의 Kodama(1991)였다. 그는 기술혁신에는 두 가지 형태가 있는데 하나는 기존 기술의 돌파(breakthrough)이고 다른 하나는 여러 기술의 돌파가 동시에 일어나면서 융합(fusion)하는 것이라고 하면서 융합형 기술혁신이 점점 더 많은 비중을 차지한다고 주장하였다. 고다마는 기계기술과 전자기술의 융합으로부터 생성된 수많은 메카트로닉스 제품으로부터 이런 인식을 갖게 되었다.

기술융합과 유사한 용어로서 기술수렴

(technological convergence)이라는 용어가 종종 사용되고 있다. 기술수렴은 다양한 산업이 각자의 기술적 문제를 해결해 나가는 과정에서 일어나는 공동 기술혁신 현상이다. “기술수렴” 현상을 처음 주장한 학자는 미국 스탠포드대학교의 Rosenberg(1963)였다. 로젠버그는 1840-1910년 기간 동안 발생한 영국의 공작기계 기술혁신 역사를 분석한 결과 기계가공기술의 혁신 과정에서 흥미 있는 기술수렴 현상을 발견하였다. 당시 기술자들은 기계를 사용하여 금속을 정밀한 형태의 기구로 만들기 위하여 터닝, 밀링, 보링, 평면가공, 연삭, 다듬질 등 가공기술을 응용하고 있었다. 기술자들은 이들 가공작업을 하면서 금속의 특성으로 인해 마력 부족, 연속가공 시 피드백 곤란, 마찰열 등 공통적인 문제에 직면하였다. 이런 기술 문제들은 무기를 제작하는 공장이나 섬유공장, 자전거 공장 등 금속을 다루는 거의 모든 공장에서 공통적으로 나타났다. 로젠버그는 다양한 산업의 공장들이 이들 기술 문제들을 해결해 나가는 과정에서 일어난 공동 기술혁신 현상을 기술수렴이라고 불렀다.

로젠버그는 기술수렴 현상이 산업의 구조 변화에 중요한 동인이 되었다고 주장하였다(Rosenberg, 1982). 기술수렴 현상으로 인하여 19세기 중반에 기술의 전문화가 급속하게 발전할 수 있고, Stigler(1951)가 주장한 수직통합의 역전(vertical disintegration)이 일어났다고 주장하였다. 금속 가공공정이 많아짐으로써 다양한 가공 공정을 모두 다 한 공장에서 수행할 경우 기술적인 문제들을 해결하기 어렵고 채산성이 맞지 않기 때문에 중

요한 공정만 자체 내에서 수행하고 나머지 가공공정은 별도로 분리해서 수행하다가 나중에 독립 기업으로 발전하였다는 것이다.

어느 한 가공 공정만을 가지고 독립한 기업은 생산성이 높고 기술적인 문제를 해결하는 능력도 탁월하기 때문에 다른 산업의 유사한 가공공정을 수행해 주고 그 대가를 받는 방식으로 발전되어 나가자 수직통합의 역진 현상이 심화되었다고 한다. 로젠버그는 이런 기술의 전문가가 모든 공장에서 비슷한 성격의 가공기술이 필요했고, 또 공통적인 기술문제에 직면했기에 가능했으며, 기술전문화와 기술수렴 현상이 결국 산업성장의 원동력이 되었다고 주장하였다.

로젠버그는 19세기에 일어난 기술혁신의 추세를 신선한 통찰력으로 관찰하고 기술수렴이라는 용어로 표현했다는 점에서 높이 평가된다. 그러면 로젠버그가 본 기술수렴과 현재에 일어나고 있는 다분야 기술융합과는 어떤 차이가 있을까?

기술융합은 기술수렴에 비해 훨씬 더 강력한 의미를 갖는다. 기술통합과 마찬가지로 기술수렴은 개별 요소기술의 정체성이 약화되지 않으며 오히려 강화되는 특징을 가지나, 기술융합은 개별 요소기술의 속성이 사라지는 특성을 갖는다. 이 점에서 오늘날 편안하게 일어나고 있는 디지털기술 수렴(digital convergence) 현상은 로젠버그가 관찰하고 명명한 기술수렴 현상과 매우 유사하다.

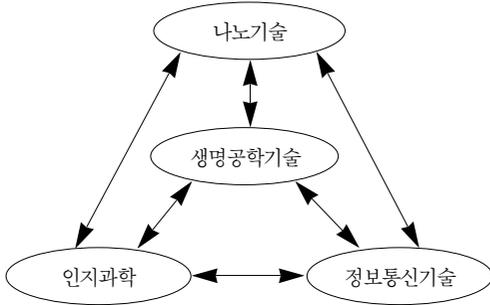
로젠버그가 발견한 기술수렴 현상은 오늘날에도 보다 더 광범위한 기술이 연관되면서 다분야 기술융합의 형태로 변형되어 일어나고 있다. 19세기에는 기계 가공기술 중심으로 기

술수렴 현상이 일어났지만 21세기에는 정보통신기술을 중심으로 디지털기술 수렴(Seok-Ji Park, 2004)과 다분야 기술융합이 급속하게 일어나고 있다. 다분야 기술의 결합과 통합이 요구되는 복잡시스템 제품의 기술혁신에 관해서는 시스템 통합 차원에서 많은 연구가 있었지만, 결합이나 통합을 뛰어 넘는 의미를 갖는 다분야 기술융합에 대해서는 보다 더 많은 연구가 필요할 것이다.

미래의 다분야 기술융합을 실현하는데 중요한 부분을 구성하는 기술은 나노기술, 생명공학기술, 정보통신기술, 인지과학으로 여겨지고 있다. 미국의 왈라스는 “인지과학은 기술융합을 왜 그리고 어떻게 하는가를 생각하는 분야이며, 나노기술은 사람이 기술융합의 가시적 산물을 구체적으로 형상화할 수 있으며, 생명공학기술은 그것이 가능하도록 작용하고, 정보통신기술은 이것을 통제하고 추적하는 역할을 담당한다”고 설명하였다(Roco and Bainbridge, 2002). 왈라스가 인지과학을 다분야 기술융합의 중요 요소로 간주한 것은 현대 기술융합에서 사회과학 지식이 중요하게 기여하고 있다는 것을 의미한다. 그는 이 설명을 기초로 다분야 기술융합의 기본 요소를 <그림 1>과 같이 사면 삼각뿔(tetrahedron)의 형태로 나타냈다.

나노기술, 생명공학기술, 정보통신기술, 인지과학 간의 상호작용을 나타내는 사면삼각뿔은 다분야 기술융합의 현대적 추세를 나타내는 것일 뿐 다분야 기술융합이 이들 4가지 기술요소 만에 의하여 이루어지는 것은 아니다. 일본 통상산업성(1993)은 기술융합이 통신·전자기술, 휴먼기술, 생명공학, 기계·생

〈그림 1〉 다분야 기술융합의 핵심요소기술을 나타내는 사면삼각뿔



자료: Roco and Bainbridge(2002)

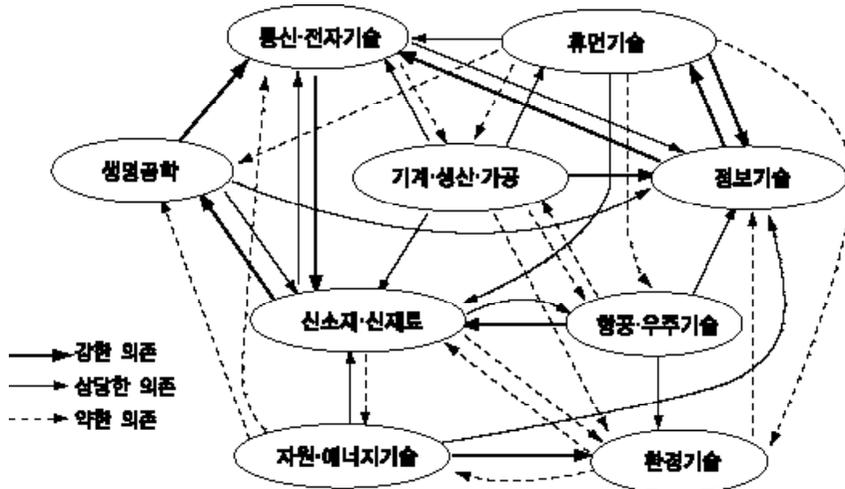
산·가공기술, 정보기술, 신소재기술, 항공·우주기술, 자원·에너지기술, 환경기술 간에 폭 넓은 상호작용을 통하여 이루어지고 있음을 〈그림 2〉와 같이 나타냈다. 이들 기술요소들 중에서도 통신·전자기술-정보기술, 휴먼기술-정보기술, 통신·전자기술-신소재·신재

료기술, 생명공학기술-신소재·신재료기술 간의 상호작용이 비교적 왕성한 것으로 나타났다.

기술 간의 상호작용을 제공하는 경우와 받는 경우를 구분하여 살펴본다면 각 기술요소는 기술융합의 주체와 객체로서의 역할을 담당한다. 기계·가공기술, 항공·우주기술, 휴먼기술, 생명공학기술 등은 다른 기술의 융합에 투입요소로서의 역할(객체적 역할)을 주로 담당하는

한편, 통신·전자기술, 정보기술, 신소재기술, 환경기술 등은 기술융합의 주체적 역할을 수행한다. 특히, 통신·전자기술과 정보기술이 여타 기술을 활용하여 신기술을 왕성하게 창출하고 있다는 현대 기술혁신 패러다임 특성을 나타낸다.

〈그림 2〉 주요 기술 분야간 상호 의존관계



자료: 通商産業省(1993).

### 3. 다분야 기술융합 과정의 이론적 이해

다분야 기술융합의 과정은 기존 기술혁신의 과정보다는 지식창출의 일반적인 과정에 대한 이론을 응용하는 것이 적합하다. 다분야 기술융합은 한 유형의 지식을 발전시키고 혁신하여 새로운 유형의 기술로 변형시키는 것이라기보다는 지식과 지식을 결합하여 또 다른 지식을 창출해 내는 과정으로 인식되기 때문이다.

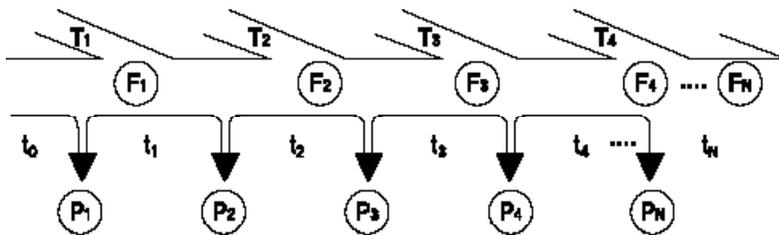
필자가 인식하고 있는 다분야 기술융합의 과정은 <그림 3>과 같이 한 요소기술 T1이 일정 시점(t1)에서 P1이라는 제품을 생산하는데 활용되어 기능 F1을 발휘하다가 T2라는 다른 요소기술과 결합하여 P2라는 신제품을 생산하는데 활용된 후 새로운 기능 F2를 생성하게 되는 일련의 결합 과정이다. 다분야 기술융합이라고 해서 여러 가지 기술이 동시에 융합되는 것이 아니라 제품(Pi)과 기능(Fi)을 생성하는데 필요한 기술요소(Ti)를 순

차적으로 융합시켜 나가는 것으로 이해된다. 따라서 기능을 많이 갖는 제품일수록 다양한 기술요소를 포함할 가능성이 높으며 그렇지 않은 제품은 적은 수의 기술요소를 채용할 가능성이 높은 것이다.

이 가설이 옳다면 시간이 지날수록 제품의 기능이 다양화되고 채용하는 기술도 많아져서 다분야 기술융합이 일반적인 현상으로 등장할 것이다. 그리고 기술이 발전한다는 것은 기술의 복잡도가 높아지는 것으로 의미함과 동시에 (Weinel and Crossland, 1989)에 다양한 기술이 융합하여 다양한 기능을 갖는 제품이 출현한다는 것을 의미하게 된다. 현대의 많은 혁신 제품들이 바로 이런 현상을 나타내고 있다는 점에서 다분야 기술융합 현상은 현대의 기술혁신을 설명하는 또 하나의 이론적인 틀이 될 수 있음을 나타내고 있다.

다분야 기술융합은 기술요소가 스스로 수행하는 것이 아니다. 기술은 무생물이기 때문에 인간이 창의력을 동원하여 특정 목적을 달

<그림 3> 다분야 기술융합의 과정 개념



주: t1, . . . . . tn: 시간  
 T1, T2, . . . . . Tn: 요소기술  
 F1, F2, . . . . . Fn: 제품의 기능  
 P1, P2, . . . . . Pn: 신제품

성하기 위하여 한 가지 기술요소와 다른 기술 요소 간 결합을 시도하게 될 때 기술융합이 일어나게 된다. 따라서 다분야 기술융합의 과정을 정밀하게 이해하기 위해서는 적어도 한 가지 이상의 지식을 보유하고 있는 창의적인 개인들을 상정하고 이들 간의 지식창출 및 교류 패턴을 이해하여야 한다.

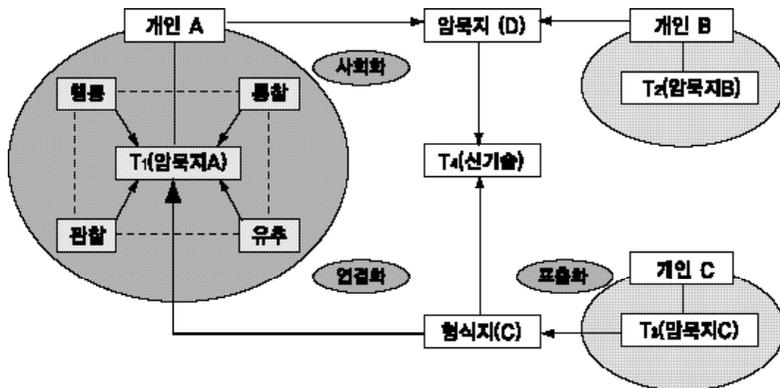
예를 들어 다분야 기술융합 현상을 이해하기 위하여 창의적인 지식인 A, B, C가 있다고 가정하자. 이들은 단순한 근로자가 아니므로 사물을 관찰하고, 유추하며 통찰하고 행동하는 지식활동을 한다. <그림 4>에 나타난 바와 같이 지식인 개인 A는 다른 사람이 갖지 않는 암묵지 A가 포함되는 기술 T1을 갖고 사회화(socialization), 연결과(combination), 표출화(externalization), 내부화(internalization) 등 지식활동을 끊임없이 전개한다. 개인 B는 마찬가지로 암묵지 B가 포함되는 기술 T2를 보유하고 지식활동을 수행하고, 개인 C는 암묵지 C가 포함되는 기술

T3를 보유하면서 개인 A나 개인 B와 지식활동을 수행한다고 가정하자.

이들은 상호작용을 통하여 각자가 갖고 있지 않은 새로운 암묵지 D를 창출하거나 새로운 형식지 C를 창출한다. 개인 A, B, C가 단순한 지식활동만을 수행하는 것이 아니라 연구 프로젝트를 공동으로 수행한다면 이들의 상호작용은 그들에게 이 때까지 존재하지 않았던 신기술 T4를 창출해 낼 수 있을 것이다. 신기술 T4는 개인 A, B, C가 각각 보유하고 있는 T1, T2, T3가 융합하여 새롭게 생성시킨 융합기술이다.

다분야 기술융합의 과정에 대한 이 같은 이론적인 해석은 개인 단위의 미시적인 관찰에서 이루어진 것이지만 Kodama(1990)는 기술융합 현상과 그 과정을 1970년대부터 메소 수준(산업 수준)에서 관찰하였다. 그는 1970년대부터 통신전자기술과 전기기계 간에 기술융합이 일어났으며, 마찬가지로 전기계와 비금속 간, 전기기계와 정밀기기 간, 철강과

<그림 4> 다분야 기술융합의 메커니즘



일반기계 간 자동차와 일반기계 간에 기술융합이 있었음을 발견하였다. 그는 1970년대 파낙사의 이나바 사장에 의하여 혁신된 NC 장치가 기계기술과 전자기술간의 융합에 의하여 탄생하였음에 주목하고 기술융합의 과정을 시대적으로 관찰한 후 기술융합 현상을 확신하였다.

Kodama는 1970년대 이런 두개 산업 간에 일어났던 기술융합 현상이 4년 후에 타 산업 간에도 폭 넓게 확산되고 있음을 관찰하였다. 식품산업과 산업화학간, 화학산업과 의약품산업 간, 화학제품제조업과 산업화학 간 등 다양한 산업 간에 이뤄지고 있음을 발견하였다. 1년 후인 1975년에도 역시 일반기계를 중심으로 자동차, 수송, 철강, 조립금속제품, 전기기계, 전자 등 관련 산업 간에 심화된 기술융합이 일어나고 있음을 확인하였다. Kodama는 기술융합 현상을 1982년에도 조사하였는데, 이때까지 융합과 관련이 없었던 세라믹, 페인트, 식품 등의 산업이 기술융합 대열에 추가하고 있음을 확인하였다. 그가 당시에 발견하지 못했지만 지금은 섬유, 고무, 펄프 및 종이, 인쇄산업에도 기술융합의 바람이 거세게 불어 신기술이 응용되고 있다.

Kodama가 관찰한 기술융합의 전개과정은 다분야 기술융합이 아닌 두개 분야간의 단순한 융합을 대상으로 하여 이루어진 것이다. 그는 기술융합이 처음 한두 개 산업 간에 일어나다가 점차 타 산업으로 확산되었음을 동태적으로 나타내 보였다. 1970년에 처음으로 관찰된 두개 분야간 기술융합을 1974년, 1975년, 1982년 등 4차에 걸쳐 조사하고 연도별 확산 과정을 설명하였다(이공래, 2004;

이공래·황정태, 2005). 그리고 두개 산업 분야 간에 일어난 단순한 기술융합도 여러 산업 분야의 기술과 관련되어 있음을 나타내 보여 다분야 기술융합의 가능성을 시사하였다.

#### 4. 결론 및 정책 시사점

다분야 기술융합은 요소기술들이 순차적으로 결합하여 새로운 기능을 생성하는 일련의 결합 과정이다. 따라서 기능을 많이 갖는 제품일수록 다양한 기술요소를 포함할 가능성이 높으며, 그렇지 않은 제품은 적은 수의 기술요소를 채용할 가능성이 높다. 다분야 기술융합은 기술의 복잡도가 높아지는 것을 의미함과 동시에 다양한 기능을 갖는 제품이 출현한다는 것을 의미한다. 현대의 많은 혁신 제품들이 바로 이런 현상을 나타내고 있다는 점에서 다분야 기술융합 현상은 현대의 기술혁신을 설명하는 또 하나의 이론적인 틀이 될 수 있다.

다분야 기술융합을 이해하는 데는 기술혁신의 일반이론과 마찬가지로 학습이론의 적용이 필요하다. 기술융합에 의한 혁신은 서로 다른 인지지도를 갖는 개인이 집단적 조우와 집단적 학습을 통하여 집단 인지지도를 갖는 조직 내부의 시스템 특성과 다양한 기술혁신 주체가 상호작용을 하면서 일어난다. 따라서 다분야 기술융합을 실현하기 위해서는 새로운 지식의 습득, 소화, 해석, 적용 등 지식활동이 필수적으로 요청된다.

이상과 같은 다분야 기술융합의 이론적 논의는 앞으로 많은 실증분석이 뒤따라야 함에도 불구하고 몇 가지 중요한 정책시사점을 제

공한다.

첫째, 다분야 기술융합을 촉진하기 위해서 산·학·연 협력과 함께 네트워크가 강조된다. 그 이유는 다분야 기술융합이 혁신주체의 지식 소화역량과 밀접하게 연관되기 때문이다. 네트워크는 기술혁신 주체들의 소화역량을 동시에 강화하여 혁신역량을 강화시킨다. 네트워크의 이점들을 잘 활용하는 기업은 그만큼 다분야 기술융합을 추구하는 연구개발과 기술혁신능력 강화에 유리한 위치에 있다. 그러나 네트워크 자체가 다분야 기술융합을 위한 연구개발과 기술혁신능력 형성을 보장해주는 것은 아니므로 기업이 새로운 기술지식을 습득, 소화, 해석, 적용하기 위해 부단한 노력을 기울이는 것이 전제되어야 한다.

둘째, 어느 유형이든지 성공적인 기술융합과 기술혁신을 위해서는 기업의 CEO를 포함, 유능한 프로젝트 리더들이 필요하다. 유능한 벤처창업자, 신뢰받는 연구책임자, 경험 많은 교수 등 다양한 분야의 리더의 존재는 다분야 기술융합을 성공적으로 추진하기 위해서 필요한 조건이다. 특히, 유능한 프로젝트 리더는 저절로 탄생하는 것이 아니라 장기적인 인력관리 및 양성 정책이 추진되고 그런 인력이 성장할 수 있는 토양이 마련될 때에 출현한다. 따라서 공공연구기관이나 대학에 근무하고 있는 프로젝트 리더들에게 리더십을 함양하고 다분야 기술융합에 관련되는 프로젝트를 수행할 때 필요한 기술혁신 경영능력을 강화하는 교육 프로그램의 개발과 교육이 시급하다.

셋째, 다분야 기술융합을 이뤄내기 위해서는 더 많은 자율성과 창의성이 발휘될 수 있

는 연구 환경의 조성이 필요하다. 창의적 사고와 자율적인 연구 분위기 조성을 위해서 정부를 비롯한 대학과 공공연구기관에게 다양성을 강조하는 정책이 추진되어야 한다. 연구기관의 연구목적과 연구사업의 특성에 부합하는 경영방식과 시스템이 다양하게 도입되는 분위기를 조성하기 위하여 상급기관이나 감독기관이 획일적인 기준이나 경영지침을 하달하는 방식의 연구기관 경영보다는 연구기관 경영진이 스스로 기술융합에 적합한 혁신경영기법을 개발하도록 장려하고 성공사례를 발굴하여 전파하는 노력이 필요하다.

넷째, 다학제적 연구풍토를 조성하기 위하여 대학원의 조직혁신과 함께 창조성을 함양하기 위한 대학원 교육제도의 혁신도 필요하다. 대학원 학생의 창조성을 함양하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있겠지만 가장 중요한 것은 학생들이 호기심을 갖는 연구주제를 스스로 찾고 또 직접 연구를 수행하여 지도교수 및 관련 전문가들로부터 평가를 받는 제도 도입이 필요하다. 선진국에서는 과학기술 지식의 창조적인 돌파(breakthrough)가 대학원 학생의 논문에서 자주 발견된다고 한다.

마지막으로 다분야 기초과학 지식과 공학 지식의 융합이 필요하므로 이를 실현하기 위한 최상의 생태계를 조성하는 것이 필요하다. 캘리포니아대학교의 로렌스연구소가 주창해 온 “팀 과학 연구(team science research)” 제도를 우리나라 대학과 공공연구기관이 받아들여 다분야 기초과학과 공학의 융합이 원활하게 일어날 수 있는 환경을 하루속히 조성하여야 하겠다.

【참고문헌】

- Kodama, F.(1995), *Emerging Patterns of Innovation: Sources of Japan's Technological Edge*, Boston: Harvard Business School Press.
- Roco, M. C. and Bainbridge, W. S.(2002), *Converging Technologies for Improving Human Performance*, Arlington, Virginia: NSF.
- Rosenberg, N.(1982), *Inside the Black Box -Technology and Economics*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Rosenberg, N.(1963), "Technological Change in the Machine Tool Industry, 1840-1910", *Journal of Economic History*, Vol. 23, No. 4, pp. 414-446.
- Seok-Ji, Park(2004), "A Prospective on the Evolution of Mobile Communications in Korea", Paper presented to the *PICMET-STEPI International Conference on Innovation Management in the Technology-Driven World*, 31 July-2 August, Seoul.
- Stigler, G.(1951), "The Division of Labor Is Limited by the Extent of the Market", *The Journal of Political Economy*, Vol. 59, No. 3, pp. 185-193.
- Weinel, I. and Crossland, P.(1989), "The Scientific Foundations of Technological Progress", *Journal of Economic Issues*, Vol. 23, No. 3, pp. 785-806.
- 日本 通商産業省(1993), 『産業科學技術の動向と課題』.
- 이공래(2004), "혁신클러스터에서의 다분야 기술융합", 『과학기술정책』, 제14권 제5호, 44-54, 과학기술정책연구원.
- 이공래·황정태(2005), 「다분야 기술융합의 혁신시스템 특성 분석」, 서울: 과학기술정책연구원 정책연구 2005-17.