

## 국가 경쟁력과 과학기술 혁신

본 지상 강연에서는 '국가 경쟁력과 과학기술 혁신'이라는 주제 하에 작년 12월 20일과 21일 개최되었던 해외 석학 초청 강연회의 내용을 전제한다. 이 강연회는 국가의 경제 발전에서 과학기술이 차지하는 역할과 개도국이 취해야 할 기술발전 전략을 공직자 및 일반 대중에게 파급한다는 목적 하에 개최되었다. 강연회의 연사로는 기술경제학 분야의 세계적 석학인 미국 스탠포드 대학의 네이산 로젠버그(Nathan Rosenberg) 교수와 UN 대학 신생산기술연구소(INTECH)의 찰스 쿠퍼(Charles Cooper) 교수가 초청되었다.

## 기술 혁신과 국제 경쟁력

### - 선진국 경험으로부터의 교훈-

#### Nathan Rosenberg<sup>1)</sup>

이제 20세기가 막을 내리고 21세기가 도래하고 있습니다. 좀 더 정확히 얘기하면 금세기의 93%가 지나가고 있습니다. 여기서 이제 저는 다음과 같은 질문을 던져 보고자 합니다. 즉, 현 선진 산업 국가들이 20세기 동안 쌓아왔던 경험들로부터 한국이 미래 경제 발전을 위해 어떤 교훈을 얻을 수 있을까 라는 것입니다. 미래를 위한 교훈 내재는 방향 제시를 위해 과거의 경험을 살펴본다는 것은 여러 가지 곤란한 요소를 지니고 있는 작업입니다. 역사가들은 역사가 반복된다고 하지만 옛날 한 현자는 절대 역사는 반복되지 않는다고 하지 않았습니까? 또한 한국은 지난 30여년 동안 예상 외의 커다란 산업 분야의 성과를 올려 계속해서 세계를 놀라게 하지 않았습니까?

그러므로 우선 "신흥 공업국"이란 단어가 걸맞는 한국과 같은 나라들에게 갈수록 중요해질 것이라고 생각되는, 현 선진 산업 국가들의 최근 역사를 통해 계속되고 있는 몇 가지 추세들을 말씀드리고자 합니다. 여기서 저는 신기술이 개발되고 사용되어지는 과정이 보여 주는 특성뿐만 아니라 첨단 산업 기술이 가지고 있는 특성들을 밝히는 데 초점을 두고 논의를 전개해 나갈 것입니다.

결국 저의 이번 강연은 기초 과학은 연구와 신기술 개발 사이의 관계에 주안점을 두게 될 것입니다. 그 이유는 20세기 동안 계속되고 있는 추세로서, 기술변화가 기초 과학 연구를 수행하여 거기에서 나오는 연구결과들을 기술개발에 이용하는 능력에 크게 의존하게 되었기 때문이다.

앞서 제가 갈수록 커가는 과학의 중요성에 대해 언급했지만, 여기에 주의를 요하는 점이 있습니다. 그것은 바로 신기술을 개발하고 향상시켜가는 데에 있어 과학의 역할이 갖는 중요성을 너무 과도하게 해석해서는 안 된다는 것입니다. 사실 미국 국립과학재단(American National Science Foundation)에서는 사실상 기술 혁신은 과학 지식의 응용으로 이루어진다고 정의한 바 있습니다. 물론 기술 혁신은 갈수록 기존 과학 지식의 응용과 때로는 최근 습득한 과학 지식의 응용(이 둘은 결코 같은 것이 아님)들을 포함하고 있습니다. 그러나 기술 혁신이 항상 과학에 의존하는 것은 아닙니다. 많은 기술 혁신들은 과학이 아닌 그 전단계의 기술이나 기존의 공학 지식을 이용하고 있습니다. 모든 기술들은 그 자체로서 기술 발전의 토양이 됩니다. 동기가 부여가 충분히 될 경우 어떤 한 기술을 숙지함으로써 신기술 개발의 발판을 마련할 수 있는 것입니다. 이것은 제2차 세계 대전 이후 장거리 화물 운송 분야에서 가장 획기적인 기술 혁신이라고 할 수 있는 컨테이너 이용(containerization)을 생각해 보면 알 수 있는 사실입니다. 컨테이너의 이용으로 말미암아 전세계에 걸쳐 매우 커다란 임금 비용 절감을 이룰 수 있었지만 여기에 과학 지식이 동원된 것은 아닙니다. 그러므로, 이것에 대한 특허 출원은 말도 안되는 것이지요. 누구든 이것으로 특허 출원을 하려 했다면 분

명 전세계의 조종거리가 되었을 것입니다. 여기에 쓰인 아이디어는 단지 화물집하장 또는 하역장에서의 노임 비용을 절감하기 위해서 컨테이너라는 보다 큰 상자에 화물을 넣는다는 것이었습니다. 하지만 우리가 만약 전문화된 과학적 정보에 의존하지 않는 이러한 종류의 기술 혁신들이 갖는 지속적인 중요성을 과소 평가한다면 큰 오산입니다.

그러므로 기술이란 「어떤 종류의 사건이나 활동들에 대한 총체적인 지식」으로 생각하면 유용할 것입니다. 기술은 단지 어떤 다른 영역의 활동으로부터 빌려온 지식들을 이용하는 것만은 아닙니다. 오히려 이것은 왜 그런지 설명할 수 없지만 어떤 특정 방식으로 특수한 순서에 의해 수행되는 기법, 방법, 설계를 포함하는 총체적인 지식인 것입니다. 즉 여기서의 의미는 그것이 심오한 지식은 아니라고 할 수 있습니다. 사실 인류가 단지 과학의 차원에서 이해되는 그런 기술들만 이해하는 데 그쳤다면, 기술 혁신이란 것은 이미 사라진지 오래되었을 것입니다.

연구개발(R&D)에서 차지하는 기술 개발(D)의 비중

기술적 변화가 기존의 과학 지식에 의존하는 분야일지라도, 연구의 순수 과학적 측면은 상대적으로 쉬운 부분입니다. 오히려 어려움은 「새로 습득한 과학 지식을 쓸모있는 제품이나 서비스로 전환시키는데 있다」라는 사실이 자주 입증되고 있습니다. 우리는 보통 기술적인 또는 공학적인 성과들보다는 과학적인 성과들에 매우 큰 의미를 부여하고 더 우대하고 있습니다. 그러나 우리의 주된 관심사가 기업 활동이나 생산성 향상에 관련되어 있다면, 이때 정말 중요한 것은 기술적인 성과와 그것의 효율적인 이용일 것입니다. 또한 이러한 활동들이 순수한 과학 연구 활동보다 더 어렵다는 말은 그것의 물량적인 면을 생각했을 때에도 그렇다는 것입니다. 최근 미국의 통계를 살펴보면 전체 연구개발(R&D) 활동 중 3분의 2가 기술 개발(D)이었으며, 단지 12분의 1만이 기초 과학 연구였고 나머지 4분의 1은 응용 과학 연구였습니다.

획기적인 과학 연구의 성과와 그 성과를 쓸모있게 이용하는 것은 상당한 거리가 있습니다. 요즘 초전도 분야에서의 획기적인 성과와 관련하여 전세계가 흥분하고 있습니다. 물론 순수 과학적인 의미로만 볼 때에는 전세계가 흥분하는 것도 우리는 아닙니다. 하지만 이것이 이용되어 더 좋은 컴퓨터가 나오고, 자기 부상 열차가 실생활에 사용되며, 전력 손실 없는 전기의 송전이나 저장 방법이 개발되려면 앞으로도 수십 년은 기다려야 할 것입니다. 고온 초전도체에 대한 새로운 지식을 이용해 신제품을 설계한 다음 이런 새로운 제품들을 생산할 수 있는 기술을 설계하고 개발하는 일은 매우 어렵고도 많은 비용과 시간이 들어가는 일입니다. 과학사자들의 입장에서 보면 과학의 최전선에서 일어나는 진보에만 초점을 두면 충분할 것입니다. 하지만 경제학자들에게 있어서는 신제품을 설계하고 시험하며, 시제품을 제작하고, 파일럿 플랜트를 건설하며, 또한 제작 공정을 만들어내는 등의 복잡한 기술 개발 과정들에 대한 이해가 중요합니다. 이러한 것들은 특히 학계의 눈을 통해 보면 흥미로운 활동은 아닙니다. 이런 활동들로 노벨상을 타는 것도 아닙니다. 그러나 이것이 바로 기술 진보를 이루는 구성 요소들입니다.

높은 기술 개발 비용과 그 의미

과학과 기술의 접목은 모든 산업 경제 분야에서 또 다른 중요한 결과를 가져왔습니다. 즉, 첨단 기술 산업에 진입하는 데 장벽이 되는 매우 높은 연구개발 비용(R&D cost)이 그것입니다. 일반적으로 이러한 높은 연구개발 비용은 기초 과학 연구비에 기인한다고 생각하는 경향이 있습니다. 그러나 기초 과학 연구비도 사실상 급격히 증가하기는 했지만 그것보다 훨씬 중요한 비용 증가 요인은 기초 과학 연구가 아닌 기술 개발에 있습니다. 이미 서술한 바와 같이 최근 미국에서는 총 연구개발(R&D) 비용 중 적어도 3분의2가 기술 개발에 투입되어

왔습니다.

첨단 기술 산업에서 주로 살펴봐야 할 점들은 신제품의 설계 및 개발에 따르는 복잡한 과정에 필요한 확고한 과학적 토대의 부재로 말미암아 기술 개발 비용이 높다는 사실입니다. 그 단적인 예로 와류(turbulence)에 대한 확고한 이론의 미비로 기술자들이 상용 항공기 날개나 터빈의 날개를 최적화된 모양으로 만들어내는 데 한계가 있기 때문에 항공기 설계나 터빈의 설계에 드는 개발 비용은 매우 높을 수 밖에 없습니다. 또한 항공기, 전자 통신, 전력 발전소, 원유 정제 등의 산업 분야들을 예로 들어 보면 설계 요건들을 최적화하기 위해서는 원형을 설계하고 시험하며, 시험용 공장을 건설하는데 엄청나게 많은 비용이 들 수밖에 없는 것이 현실입니다. 이러한 기술 개발 작업들은 곳곳에 기술적인 불확실성 요소가 산재해 있어 엄청난 돈과 노력이 들어가는 활동입니다. 이는 항공 기술자들이 아무리 많은 풍동 실험을 해도 새로 설계된 항공기의 실제 비행시 성능을 정확히 예측하기란 불가능하다는 사실을 생각해 보면 확연해 짐을 알 수가 있습니다.

위와 같이 많은 개발 비용이 들어가는 산업 분야들에는 신기술 도입과 관련해서도 그들만이 지니고 있는 자금상의 위험 요소들이 있는데, 이들은 산업들 내외 구조 변경을 초래하는 원인이 되고 있습니다.

상용 항공기 산업분야를 한번 봅시다. 과거 몇 년간 미국의 상용 항공기 산업은 군에서 신기술들이 개발되어 몇 년간 운용된후 그 신기술들을 도입함으로써 기술 개발비의 상승을 억제할 수 있었습니다. 그 예로 보잉707은 원래 군용으로 다량 생산되었던 KC-135 유조기를 민간용으로 개조한 것입니다. 또한 보잉747기도 C-5A기의 입찰 경쟁시 보잉 사 측이 쌓아온 개발 경험의 상당한 부분을 이용해 입찰 실패 후 제작한 항공기입니다. 그러나 1950년대 들어 미사일 분야에 군의 관심이 집중되면서 군용과 민간 분야는 확연히 그 차이가 나타나게 되었고 그 때문에 민간 항공기 제작사들은 차세대 광폭 동체 제트 엔진 개발에 2.30억 달러의 막대한 비용을 들릴 수밖에 없게 되었습니다. 이와 비교해 지난 1930년대의 성공적인 DC-3기에 들어간 개발 비용은 겨우 3백만 달러를 조금 넘는 액수였습니다. 1981년 맥도널 더글라스 사는 델타 항공사가 15억달러가 넘는 돈을 선불하며 새로운 상용 항공기의 개발을 주문했음에도 델타 사 측의 제의를 거절한 바 있습니다.

따라서, 상용 항공기 산업의 경우 참여 업체들은 실제 생산 비용과는 별도로 엄청난 생산 개발비용을 부담해야 하는 처지에 놓이게 되었습니다. 이러한 상황은 상대적으로 좁은 상용 항공기 시장으로 인해 더욱 더 어렵게 되어 상용 항공기의 제작에서 높은 생산성이 요구될 수 밖에 없는 부분적인 이유가 되고 있는 것입니다. 2. 3백 대 이상 팔린 항공기종은 거의 전무합니다. 이제까지 팔린 항공기들 중 총판매 대수가 1,000대를 넘는 기종은 727, 737, DC-9과 같은 세 기종에 불과합니다. 결국, 높은 개발 비용으로 인해 발생하는 극단적인 영업상의 위험은 앞으로 이 산업 분야의 기술 개발활동 전체에 걸쳐 문제가 될 가능성이 큼니다. 위험 부담을 축소시키기 위한 부분적인 장치로서 강구하게 된 부품별 하청 계약은 이미 이 산업 분야의 중요한 한 관계가 되어버렸습니다. 보잉사는 747기의 제작을 위해 6개의 하청업체를 두어 이들 업체들과 함께 항공기에 들어가는 개발비와 위험 부담을 나눠 갖게 되었으며 Pan Am, TWA, Lufthansa, BOAC과 같은 항공사들로부터 확실한 구매 서약을 받은 후야야 그 항공기 개발에 착수했습니다. 보잉 사는 그들의 차세대 항공기인 757, 767 기종의 제작을 위해 일본, 캐나다, 이탈리아, 영국 등의 많은 외국 업체들과 광범위한 하청 계약을 체결해 놓고 있습니다.

높은 개발비와 이에 따르는 대규모의 재정적 위험부담으로 인해 유럽의 Airbus사와 Concorde사의 경우와 같이 국제 컨소시움을 조직하는 추세가 증가하고 있는 실정입니다. 현재 미국에는 겨우 두 개의 상용 항공기 동체 제작 전문업체와 두 개의 상용 항공기 엔진 전

문 제작업체 밖에는 없다고는 하지만, 항공기 산업이 많은 부분 국유화되어 있는 서유럽의 경우 그 수가 미국보다도 적습니다. 게다가 기술적인 측면에서는 성공을 거두었지만 상업화에는 실패한 Concord 사는 프랑스와 영국의 정부로부터 막대한 지원을 받았기 때문에 가능할수 있었다라는 사실을 눈여겨 볼필요가 있습니다. 상용 항공기 산업의 개발비 규모와 그에 따른 재정적 위험 부담이 극도로 크긴 하지만 이런 추세는 다른 첨단 기술 산업들에서도 마찬가지입니다. 안전과 환경 보호에 대한 고려로 인해 핵발전소의 원자로 제작에 들어가는 개발비가 견잡을수 없이 치솟았습니다. 재래식 발전 장비도- 원자력이 가지고 있는 특수한 문제들을 가지고 있지 않지만- 기술적인 또는 다른 성능에 대한 불확실성 때문에 매우 높은 개발비용이 들어갈 수 밖에 없게 되었습니다. 전자 통신 분야도 매우 높은 개발비에 직면하였는데, 그 단적인 예로 AT&T 사의 제4전자 교환 시스템(=4 Electronic Switching System)에 들어간 개발 비용만 해도 약 4백만 달러에 이릅니다. 오늘날 생물 공학을 대량 생산의 이점으로 살릴 수 있을 정도의 규모로 끌어올리는데 드는 비용도 매우 높습니다. 대부분의 경우 그 비용이 너무 높아 이 생물 공학 산업에 모험 자본(venture capital)을 유치하지도 못하는 경우가 많습니다. 여기에 덧붙여 문제가 되고 있는 것은 아직 많은 신생물 공학 기술들이 신제품의 제작으로 이어지지 않고 있다는 사실입니다. 전자 산업은 위에 언급한 산업들과는 좀 다른 양상을 띠고 있기는 하지만 높은 신뢰도의 대용량 메모니칩의 설계와 개발로 말미암아 제작업체의 재정적 위험 부담이 엄청나게 커졌습니다. 회로의 집적도를 높이려는 국제적인 경쟁으로 수억달러에 이르는 개발비가 소모되었습니다. 컴퓨터 산업에서 IBM 사는 연간 연구개발 예산이 수십억 달러에 이릅니다. IBM 360 컴퓨터를 개발하는데만도 50억 달러를 투입했다고 보고되었습니다. 20년 전만 해도 새로운 약품을 개발해 시장에 내놓는데는 130만 달러가 들었으며 그것도 약2년 정도 밖에 걸리지 않았습니다. 이것은 최근 들어서 평균 5천만 달러라는 많은 비용과 8년이라는 장기간으로 늘어나게 되었습니다.

첨단 기술산업 분야에서 계속되는 개발비 증가의 결과로 앞으로 많은 종류의 기업간 또는 국가간 공동 협력 협정들이 생겨날 전망입니다. 항공기 산업에서는 이미 이러한 협정들이 등장했습니다. 예를 들면 유럽의 Airbus사, 독일과 영국 및 프랑스의 기업들이 출자한 공동 합작 기업(joint venture)인 SNECMA, 보잉사와 일본의 몇몇 항공기 제작사들 사령의 위험 분담을 위한 하청계약 협정, 일단의 일본 제트 엔진 제작사들과 영국의 Rolls-Royce 사 사이에 이루어진 공동 개발협정, 일본, 미국, 독일, , 프랑스, 영국의 업체들이 참여하는 150인승 여객기용 엔진 개발 컨소시움등이 그것들입니다. 증가하는 개발비 부담으로 다른 첨단 산업 분야들에서도 비슷한 협정들이 계속 생겨날 전망이고 이미 유럽의 상용 인공 위성 발사 로케트인 Ariane의 운용도 이런 공동 협정 하에 추진되었습니다. 결국, 극도로 높은 개발비 때문에 앞으로 첨단 기술 산업의 무대는 여러 종류의 공동 기업(joint venture)들에 의해 장악될 것으로 전망됩니다.

#### 기술 혁신의 군집화

20세기 기술혁신의 뚜렷한 특징은 기술혁신이 산업 활동이라는 영역으로 진입하는 데 소수의 출입구만을 이용한다는 것입니다. 이러한 출입구는 시간이 지남에 따라 그 위치를 변화해 갑니다. 산업혁명의 초기 단계에서는 대부분의 기술 혁신이 금속학이나 증기 기관과 같은 기계 분야에서 이루어졌습니다. 19세기 말과 20세기 초로 들어서면서 내연 기관 관련 기술뿐만 아니라 전기와 화학 분야에서도 기술 혁신이 일어났습니다. 제2차 세계대전 종전 이후 전자 산업 분야에일대 혁명이 일어났는데 특히 컴퓨터가 그 대표적인 예입니다. 다른 산업의 구조 변화는 현재 그 초기 단계를 걷고 있는데 여기에는 신복합 재료, 레이저, 생물 공학을 이용한 제품 및 생산 공정 등이 있습니다.

그러므로 산업 혁신은 한 산업 분야에서의 신기술 개발을 시작으로 산업간 기술이전이라는

과정을 통해 경제 전반에 걸쳐 영향을 미치고 있습니다. 최근 우리는 이러한 연구개발 비용이 집중되고 있는 기술 개발 주도형 산업들을 하이테크 즉, 첨단 기술 산업이라 부르고 있습니다. 그러나 이런 첨단 기술 산업 내부에서 최근 일어나고 있는 일들이 이제 겨우 경제 전반에 걸쳐 영향을 끼치기 시작했습니다.

요는 이런 몇 안되는 첨단 기술 산업들에서 창출된 기술 혁신들이 점차 그러나 체계적으로 경제 전반에 확산되고 있다는 것이고 더불어 우리가 전통적 또는 저기술 산업이라고 생각했던 산업들도 예외는 아니라는 것입니다. 사실 경제 전반에 걸친 생산성 향상은 첨단 산업 분야에서의 기술 혁신이 나머지 다른 분야들로 이동해가는 속도와 효율에 따라 크게 좌우됩니다.

결과적으로 첨단 기술이라는 것이 꼭 몇몇 소수의 제한된 분야에만 국한되며 선진산업국 경제에서만 중요하다고 생각한다면 큰 오산입니다. 컴퓨터, 마이크로프로세서 등과 같은 첨단 기술제품들은 사실상 정보 처리 작업이 이루어지는 곳이라면 어느 분야가 되었던 간에 광범위한 기능을 수행할수 있는 다목적 정보 처리 도구입니다. 우리는 흔히 자동차 산업을 전통적이고 저기술의 철판을 이용하는 산업으로서 생각하고 있지만 오늘날 자동차 산업의 현실은 우리가 생각하는 것과는 거리가 멉니다. 오늘날 생산라인에서 출고되어 나오는 자동차는 첨단 금속 공학 기술과 수 많은 전자 제어 기술의 총화입니다. 1985년 미국산 자동차에 들어가 있는 전자 부품의 평균 금액은 그로부터 5년 전보다 3배나 불어난 9백달러였습니다. 현재의 수치는 1000달러를 훨씬 웃돌고 있습니다.

자동차 설계에는 컴퓨터 시뮬레이션 기술이 이용되고 제작 공정에는 로봇 공학 기술, 컴퓨터 제어기술, 첨단 센서 및 마이크로 프로세서 등이 이용되고 있습니다. 실제로 GM사는 미국 내의 어느 자동차 제조업체보다도 더 많은 연구개발비 예산을 책정하고 있습니다.(1985년에 36달러).

19세기의 진부한 공작 기계들은 디지털 컴퓨터와 접목됨으로써 완전히 변화되었습니다. 인간이 일일이 작동시켜야만 했던 종래의 공작 기계들에 수치 제어 기술을 덧붙인 NC공작 기계는 그 이전과는 완전히 다른 경제적 잠재력을 몰고 왔습니다. 농업 분야는 일반적으로 전통 산업중의 전통산업으로 간주되고 있습니다. 그러나 미국의 농업은 과학적인 기법들을 통해 이미 오래 전에 고기술 산업 분야가 되었습니다. 미국의 농업은 유전 공학과 같은 첨단 과학 기술을 이용해 병충해에 강하고 재배 기간이 짧으며 비료가 잘드는 등의 바람직한 특성을 가진 농산물들을 생산해 내고 있습니다. 유전 공학자들은 수학 과정을 기계화하기 위해 열매를 맺는 기간이 고르고 껍질이 두꺼운 토마토를 생산해 낸 바도 있습니다.(과학자들은 현재 이 토마토의 맛을 향상시키기 위해서 열심히 연구중입니다.) 그리고 컴퓨터와 레이저 그리고 CAT 스캐너는 현재 판지 산업에서 효율성을 높이기위해 사용되고 있습니다. 또 다른 전형적인 '전통' 산업인 의류업은 많은 혁신들을 로봇이나 컴퓨터와 같은 첨단 기술 자원들에서 흡수하고 있습니다. 의상 디자이너들은 컴퓨터 스크린에서 패턴을 그립니다. 섬유위에서 나타나게 될 패턴은 그들이 스크린에서 창조되었던 것과 정확히 똑같습니다. 수십년 동안 화학 산업은 주름이 안잡히고, 접힌 곳을 기억하는 등 모든 종류의 장점을 다 가진 합성 섬유를 다양하게 개발하고 있습니다. 합성 섬유는 이제 섬유 산업계에 자연 섬유보다 더욱 중요한 투입 요소가 되고 있습니다. 섬유 산업도 역시 레이저 기술과 전자 기술로부터 많은 혁신을 받아들이고 있습니다. CAD/CAM은 섬유업계에서 고품질 패션과 대량 생산 부문에 활용되고 있습니다. 레이저는 천을 적당한 모양으로 자르는데 점점 많이 쓰이고 있습니다. 레이저도 역시 전체적인 산업 구조에서 첨단과 재래 산업 모두에서 넓게 응용되고 있는 것입니다. 레이저는 금속을 연마하고 접착시키는데 널리 쓰이고 또한 아주 미세한 수술이나 고음질 사운드의 재현, 정밀 측정, 고선명 인쇄, 광학섬유, 광섬유와 함께 통신 분야의 효율적인 자료 전송등에 쓰입니다.

컴퓨터가 항공 산업에 영향을 미친 것처럼 어떤 산업에서 새 기술은 다종의, 분산된 효과를 다른 산업에 미칠 수 있습니다. 상업용 항공 사업의 변하는 면모는 그 산업 내부 자체에서 행해진 연구 활동 만큼이나 그 산업에 컴퓨터가 새로운 용도로 응용되어 영향받았다고 해야 옳바를 것입니다. 컴퓨터가 항공기 및 항공 운항업에 끼친다양한 양태의 영향을 봅시다.

1. 슈퍼 컴퓨터는 풍동 터널에서 행해지던 연구의 많은 부분을 포함하여 많은 양의 기본적인 항공학 연구를 수행합니다.
2. 컴퓨터는 날개와 같은 비행기의 구체적인 부품 디자인의 비용 절감의 중요한 원천이 되어 있습니다. 컴퓨터는 보잉 747, 757, 767과 에어버스310의 날개 디자인에서 중요한 역할을 했습니다.
3. 컴퓨터는 이제 많은 자동 파일럿을 포함하여 조종 활동의 많은 부분을 맡고 있습니다.
4. 컴퓨터는 기상 위성과 함께 최적의 항로를 결정하는데 쓰이고 있습니다. 그 결과로 생기는 연료의 절감은 대단합니다.
5. 컴퓨터와 네트워크는 현재 세계를 잇는 비행기표 발권과 예약 시스템의 핵심부가 되어 있습니다.
6. 컴퓨터 시뮬레이션은 이제 비행기 조정법을 가르치는데 교수 방법으로 쓰이고 있습니다.

그래서 우리는 더 이상 경제의 좁고 구체적인 부문에만 쓰이는 첨단 기술은 생각할 수 없게 되었습니다. 이 기술들은 퍼져나가고 모든 경제 부문의 경제적 효율성에 영향을 미칩니다. 같은 의미로 전기처럼, 금세기 초에는 첨단 기술이면서 좁은 영향을 가진 것이 이제는 경제 모든 부문에 활용되고 있습니다. 비록 새기술의 기원은 몇몇 산업에만 집중되어 있지만 이 기술들은 급속히 확산되며 효과 면에서 퍼져나가는 경향이 있습니다.

#### 기술의 시스템적 성격

과학기술의 상호 작용에서 점점 중요해지는 모습은 기술이 점점 더 시스템적인 맥락에서 구현된다는 사실입니다. 대형이며 복잡한 기술 시스템들은 구성 요소들간의 호환성 문제와 상호 의존성이라는 미묘한 문제를 발생시킵니다.

'시스템화'의 가장 첨단에 와 있는 전화 산업을 봅시다. 전화 네트워크에서는 네트워크의 한 부분의 구성, 디자인, 운용이 다른 부분의 구성, 디자인, 운용의 영향을 미칩니다. 이것은 원거리 직통 전화(DDD), 터치톤, 음성 우편(voice mail) 같은 경우에서 볼 수 있습니다. 핵심적인 사항은 비용 절감과 서비스 질을 향상시킬 수 있는 기회가 - 네트워크의 다른 부분의 변화를 함께 요구하는 - 변화의 채용에 의해 일어난다는 것입니다. 또한 전화기의 오래된 성격 때문에 새 요소 기술의 개발과 연계된 "오래된"기술에 대한 고려가 있어 왔습니다.

예를 들어 20세기 들어 교환기 장치의 분야에서 세가지 주요한 신기술이 나타났습니다.(1) 단계별 장치(step-by-step) (2)교차형 장치(cross-bar) (3)전자교환 시스템입니다. 전화 네트워크가 그 서비스를 제공하려면, 비록 지금 쓰이는 단계별 장치가 50년도 더 전에 설치된 것이고 최근 설치된 전자 교환 시스템은 최신 전자 기술로부터 차용한 것이지만 이러한 각각의 교환기 기술은 서로 공존하며 상호 작용해야 합니다. 전송장치 영역에서의 시스템은 병렬 케이블(paired-wire cable). 동축 케이블(coaxial cable). 극초단파(microwave) 통신 위성(geosynchronous satellites) 등은 물론 최근의 광학(fiber optics)도입에 관련된 극적

인 변화까지 이들의 공존을 허용해야 합니다. 게다가 호환성 문제는 시스템 하드웨어의 문제가 아니라 국가 정보 송신 시스템의 핵심에 깔려 있는 소프트웨어의 호환성 문제까지 포함합니다(즉, 하드웨어가 실제로 활용되어지는 방법).

한부분의 수행 능력 변화가 다른 부분의 변화를 촉진함이 없이 이루어지는 것은 시스템의 성격상 중요한 변화가 아닙니다. 발전기의 향상은 전송 네트워크와 원거리 전기 전송 비용에서의 개선이 있을 때까지 전기 전송 비용에 제한된 영향만을 미칩니다. 이러한 보완적 활동에서의 혁신이 필요하다는 사실은 왜 명백히 중요한 기술적 돌파가 일어났음에도 불구하고 생산성 향상 곡선이 아주 천천히 움직이는 지의 이유가 됩니다. 그러므로 기술 시스템 내에서의 주요한 생산성 향상은 아무리 중요한 것이라도 해도 하나의 기술적 혁신으로부터 오는 경우가 드뭅니다. 동시에 기술 시스템 내에서의 많은 수의 개선의 연합 효과는 엄청난 것입니다.

새함금의 도입은 적절히 그것을 다룰 새 기계가 개발되기 전까지는 제한적으로 쓰이게 됩니다.

제트엔진은 많은 수의 금속의 개선을 요구했고 결과적으로 그에 공헌하였습니다. 트랜지스터는 금속을 정제하는 기술에서 주요한 개선을 필요로 했고 결국 고순도 금속을 만드는 생산적 활동에 폭넓게 기여했습니다. 농업에서는 기계를 이용한 추수 기술의 도입은 기계 조작의 구체적 요구에 맞추어 곡물 자체를 제설계하도록 하는 유전학적 지식의 진전에 의해 촉진되었습니다. 그래서 미국 중서부의 거의 모든 옥수수는 기계를 통한 수확에 적합하도록 가을에 이를 때까지 대가 똑바로 자라는 품종입니다. 기계로 토마토를 추수하는 기술은 곱이 거칠거칠해서 잘 으깨지지 않는 품종을 키울 수 있을 때까지 채용되지 못했습니다.

첨단 기술 상품의 중요한 성격이 된 또 다른 시스템적 상호 의존성이 있습니다. 제품 설계의 변화와 그로 인해 제조 기술에 요구되는 변화 사이의 긴밀한 상호 의존성입니다. 최종 제품의 설계 변경은 전형적으로 이 제품이 만들어지는 공정에 관한 의미 있는 변화를 수반하는데 이것은 가끔 아주 중요한 변화이기도 합니다. 사실 이 주장도 제품 설계의 변화와 공정 변화간의 상호 의존도를 충분히 보여주지는 못합니다. 제품 속성의 변화가 이루어질 때 제조상의 근본적인 비용절감이 일어날 수 있습니다. 그러므로, 마케팅 차원에서의 최종 제품 설계의 최적화와 생산 차원에서의 제품설계사이에 긴장이 항상 존재합니다. 이렇게 제품 설계자와 생산부서를 연결시키는 것은 산업계가 로봇을 이용하면서부터 경험하고 있는 어려움처럼 아주 미묘합니다. 로봇의 성공적인 도입은 예를 들어 자동차 부품 설계의 단순화의 상당히 의존하고 있습니다. 이 단순화는 로봇이 인간을 대체할 때 생기는 문제점을 고려하면서 조립 기술에 제일 적합한 방법으로 제품을 설계하는 것입니다. 이것은 생산 디자이너와 다른 한편에 있는 제조 엔지니어 사이의 상당한 협동과 긴밀한 정보 교환을 필요로 합니다. 그러므로 전문가 사이의 효과적인 정보 교환은 시스템 집약적 산업에서 향상된 경제적 활동의 핵심적 요소가 되고 있습니다.

#### 산 · 학 연계

혁신에서의 과학이 중요성이 증대하고 있는 것은, 대학의 과학 연구의 결과를 이용하는 능력에 기술 혁신이 의존하고 있다는 것을 의미합니다. 오늘날, 그리고 미래에서의 상업적 성공은 산 · 학간 연계의 조직 구조와 인센티브 구조를 향상시키는 방법의 달려 있습니다. 이 연계 기능을 향상시키는 능력은 분명히 미래의 첨단 기술 산업에서의 리더십을 차지하는 중요한 결정 요소입니다. 이러한 향상을 위해서는 과학 연구 활동 조직이 지난 수십년간 그 성격이 변화해 왔다는 사실을 고려에 넣어야 합니다. 예를 들어, 첨단 산업에 가장 유용할 것 같은 종류의 과학적 지식은 계속 학제간으로 연구되어야 합니다. 최근에 의학은 생물

학이나 유전학, 화학 같은 '근접한' 학문의 연구뿐만 아니라 핵물리학(자기 공명 장치, 전자파 추적기, 단층 X선 촬영법), 전자학, 재료학 등에서의 연구에서 크게 도움을 받았습니다. 물론 의과학을 변화시켰던 원천들은 어느 정도는 주요 의대에서의 중한자실의 비공식적 회진에서 나왔습니다. 물리 연구에서 비롯된 측정 기구를 만드는 새 기법들은 의학에 심오한 영향을 끼쳤는데 인체의 비침투 내부 진단 기술에만 주목을 해 보아도 그렇습니다. 두 물리학자가 컴퓨터 단층 촬영(CAT Scanner) 개발로 노벨의학상을 몇 년 전에 받았을 때 이러한 역할은 두드러지게 나타났습니다. 단층 촬영, 자기 공명 장치, 초음파 장치 등은 현대 의료 행위들의 성격을 바꾸어 놓았습니다.

의약품 분야에서는 생화학, 분자 생물학과 세포학, 면역학, 신경 생물학, 과학 실험 도구 등의 관련 분야에서 급속한 진전이 있었습니다. 이 진보들은 약학 분야에서 과거 의학 연구의 특징이던 소모적이고 비싼 테스트 방법을 대체하면서 특정 목표와 속성을 지니고 있는 제품을 개발하고 있습니다.

위에 예로 든 신기술들은 불가피하게 학제간 연구의 산물입니다. 즉 성공적인 혁신은 전문가들의 긴밀한 협동을 요구합니다. 이것은 20세기의 가장 중요한 몇 가지 혁신을 포함해서 다른 많은 분야의 혁신에 대해서도 해당되는 이야기입니다. 트랜지스터는 물리학자, 화학자, 금속 공학자들의 협동적 노력의 소산이었습니다. DNA의 발견을 이끈 과학적 돌파는 화학자, 생물학자, 생화학자, 그리고 X선 기사의 노력이었습니다. 다수확 쌀품종을 비롯한 필리핀의 국제 곡물 연구소에서 개발된 생산적인 품종들은 아시아의 식량 공급 현황을 바꿔놓았는데 이는 유전공학자, 식물학자, 생화학자, 곤충학자, 재배학자의 작품이었습니다.

새로운 통찰을 낳는 학제간 연구의 협동은 단순히 '좋은 아이디어'라고 여러 학문 부문의 연구자들이 동의했다고 해서 이루어지는 것은 아닙니다. 그 보다는 어떤 특정 학문 분야의 연구에서 풀리지 않는 문제의 출현으로부터 역사적으로 발전됩니다. 예를 들어 세포학의 경우가 그렇습니다만 문제를 해결하기 위해서는 다른 분야(즉 화학)에서 전문적으로 다루고 있는 과정들을 이해하는 것이 요구되는 것입니다. 궁극적 결과(즉 생화학)는 지식체계의 확대 과정에서 요구되는 변화의 산물입니다. 이와 비슷하게 지구 물리학은 물리학에서 개발된 방법론들이 지구의 구조와 동학을 이해하는 데에 응용이 가능하게 되었을 때 지질학에서 독립된 연구 분야가 되었습니다. 결국 새 기법들의 도입은 전통적인 물리와 화학의 경계를 효과적으로 뛰어넘는 계기가 되었습니다. 연구의 진전에 따라 어떤 분야에서 다른 분야로 건너가는 것이 필요하다는 것을 미리 예상할 수 없기 때문에, 계획이 아니라 조직상의 유연성이 중요합니다.

사실 기술적 진보의 학제간 성격은 과학적 지식 체계에서의 변화에 의해 이루어집니다. 트랜지스터에서 집적 회로로의 이전은 기계적인 가공 기술(fabrication)에서 화학적 기술로의 이전과 함께 일어났습니다. 반도체 분야에서 일어나고 있는 주요한 경향은 계속되는 전자 장치들의 크기 축소입니다. 계속적인 기술적 진보가 이전 완전히 다른 학문적 용어들을 생각해야 하는 상황까지 탄생시켰습니다. 구체적으로, 축소가 가속되는 과정에서 분석의 단위는 더 이상 고체물질이 아니라 이제는 분자 연결 고리입니다. 이 시점에서 요구되는 지식은 전자 기술자들이 훈련받았던 종류의 지식이 아닙니다. 차라리 그것은 화학 이론입니다.

학제간 연구의 증가하는 중요성은 심각한 조직적 문제들을 가져왔습니다. 나는 이미 이것이 미리 계획할 수 없는 과정이라고 말했습니다. 게다가, 그러한 연구는 자주 과학계의 전통적인 구성, 훈련, 우선 순위 및 인센티브 구조와 상충됩니다. 이것은 특별히 잘 구분되는 학문 영역을 가지고 연구와 연구 성과의 출판이 중요시되는 학계에서 잘 나타나는 일입니다. 이런 점에서 잘 정의된 학문 분과 체계를 지니고 있는 미국 대학의 조직적 구조는 문제에 대한 해결 방법이 점점 더 학제간 연구에 의존함에 따라 여러 심각한 문제와 한계를 노출하

고 있습니다. 만일 미국 대학들이 예전에 했던 것처럼 미국이 기술의 리더십을 확보하는 데 기여하려면 근본적인 변화가 필요할 것입니다.

한국의 상황은 물론 미국과 많이 다릅니다. 한국과는 달리 미국의 경우 과학 연구의 큰 부분이 대학에 집중되어 있습니다. 그럼에도 불구하고, 산업계혁신가와 과학자들을 연계시키는 것은 물론 다른 과학 분야의 영역들 간을 연계하는 것은 본래 어려움이 있습니다. 조직적 변화와 인센티브의 강화를 통해 이러한 커뮤니케이션의 통로를 향상시키는 것이 최우선적으로 고려되어야 합니다.

## 결론

저는 여러 가지 의미에서 과학 연구 능력이 갖는 순수 경제적 측면의 중요성을 과대 평가해서는 안 된다고 이미 언급한 바 있습니다. 또한 기술의 과학 의존도가 갈수록 높아가고 있다고 주장한 바 있던 하지만 제가 강조한 것은 과학에 그리 의지하지 않고도 상당한 기술 진보가 이루어져 왔다는 사실입니다. 이제 한국 경제의 국제 경쟁력을 결정하는 요인은 무엇인가 라는 물음에 비추어 이문제들에 대해 언급함으로써 이야기를 마치겠습니다.

신기술에 대해서 알아두어야 할 기본적인 사실은 국가간의 신기술 이전이 2, 30년 전보다 훨씬 빠르게 일어나고 있다는 것입니다. 여기에는 여러 가지 이유가 있습니다. 그중 가장 큰 이유는 2차 세계대전 이후 이용 가능하게 된 몇몇 신기술이 갖는 특수한 성격과 관련이 있습니다. 교통과 통신분야에서의 신기술들 즉, 제트기 원거리 통신, 컴퓨터들은 사실상 어느 나라가 그 기술들을 처음 개발했느냐에 상관없이 즉시 다른 국가들도 사용할 수 있게 합니다. 적어도 단순한 새 지식에 대한 접근의 측면에서 이야기한다면 주요 신제품 설계의 세부 사항들과 같은 것은 세계의 어느 곳이라도 즉각 이전될 수 있는 것입니다. 게다가 갈수록 고도화되어 가는 컴퓨터 지원생산 시스템들은 더욱 더 제품 생산에 요구되는 생산 기술의 이전을 가능케 하고 있습니다. 또한, 다국적 기업과 그 기업이 지니는 전세계적인 중요성은 위와 같은 기술 이전의 수행을 위해 훌륭한 제도적 장치가 됩니다. 사실 미국의 다국적 기업들은 그들의 생산 활동만을 해외에서 하고 있는 것은 아닙니다. 상대방비용과 정부 규제와 같은 여러 가지 이유로 그들의 연구개발 활동도 갈수록 해외에서 이루어 지고 있습니다(예를 들어 제약 산업). 1996년 노벨 물리학상은 두 독일 과학자에게 돌아 갔지만 그들의 연구가 수행된 곳은 스위스이고 연구소는 미국 기업 IBM의 것이었음은 연구 활동의 국제화가 어떤 것인가를 여실히 보여주고 있습니다. 끝으로 항공기 전기 통신과 같은 분야에서의 관련 개발비의 증가로 말미암아 많은 기업들이 해외 기업들을 찾아 공동 사업 협정을 맺고 있습니다. 이러한 공동 사업은 영업상의 이익과 높은 개발비의 부담을 가져오며 동시에 더욱 더 급속한 신기술의 국제적 확산을 촉진해 주고 있습니다.

더욱 더 급속한 신기술의 이전은 경제적으로 중요한 의미를 갖고 있습니다. 즉 미국과 같은 광범위하고 고도화된 과학 연구 능력을 가진 나라들에 소재해 있던 기업들에 돌아가던 경제적 이익의 감소를 가져온 것입니다. 이와 같은 과학연구 능력은 과거 첨단 과학 연구결과에 의거한 신기술 개발로 경제적 이득을 가져다 주었습니다. 바로 이점에서 오해가 없기를 바랍니다. 즉 여기서 과학연구를 수행함으로써 얻게 되는 큰 경제적 이익을 부정하는 것은 아닙니다. 오히려 제가 부정하고 있는 것은 그러한 이익들이 경제적 이익이라는 형태로 과학 연구가 수행되는 나라의 기업들에게만 흘러들어가는 것은 아니라는 것입니다.

제2차 세계대전 이후 영국이 겪은 경제적 경험을 살펴보면, 보완적인 관리 및 공학 기술이 따라 주지 않을 때나 경제 환경이 기술 혁신가 들이나 신기술 응용자들에게 높은 보상을 허락하지 못할 때, 과학이 가져오는 경제적 이득을 확보하는 것은 쉽지 않다는 것을 엿볼 수 있습니다. 얼마 전까지만 해도 영국은 미국보다 국민 1인당 노벨상 수상자 수가 많았습니

다. 그러나 그들은 그런 뛰어난 과학적 능력을 경제적 이익으로 전환시키지 못했습니다. 예를 들어 분자 생물학의 과학 혁명은 주로 영국이 이루어 낸 것인데도, 생물 공학 분야에 있어서 영국은 이렇다 할 성과를 보이지 못하고 있습니다.

한편 일본인 노벨상 수상자는 손꼽을 정도로 그 수가 적습니다. 사실 캠브리지 대학에 있는 한 단과 대학에서 수상한 노벨상의 수가 일본 전체의 수상자 수보다 훨씬 많을 정도입니다. 그러나 일본과 영국의 경제 성과를 서로 비교해 보면 꼭 일본의 과학이 세계적 수준에 도달하는 데 실패했다고 해서 자국 경제에 심각한 핸디캡이 되는 것은 아니라는 것입니다. 오히려 일본의 경험을 보면 경제 성장은 외국의 기술들을 얼마나 체계적으로 이전받고 이용하는 데 달려 있다고 해도 과언이 아닐 것입니다. 또한 적절한 관리, 공학, 조직 기술이 주어진 상태에서 많은 해외의 최신 기술들을 도입함으로써 높은 국가 경쟁력을 달성할 수 있음을 보여 주기도 합니다. 물론 산업 국가라면 고도의 과학적 능력을 갖는 것은 필수적입니다. 그러나 과학 지식과 방법을 효율적으로 사용하기 위해서 꼭 노벨상상의 과학을 수행할 필요가 있는 것은 아닙니다.

이러한 모든 것이 그리 놀라운 사실은 아닙니다. 순수 과학 연구 결과는 항상 그 이동성이 좋았습니다. 또한 최근 몇십 년 동안 적어도 기술 수혜국이 적당한 조건을 갖추었을 때에는 국가간 기술 이전도 활발히 일어나고 있습니다. 여기서 적당한 조건이라는 것은 신제품이나 공정의 빠른 상용화 능력과 관련된 분야 즉, 순수 과학 연구 능력으로부터 훨씬 아래쪽에 위치한 능력들을 의미합니다. 즉 제품 설계 과정, 생산비와 제품 성능의 최적점 결정능력 작업의 흐름을 조직하는 데 필요한 공학 기술, 먼저 응용했던 기업들로부터 관련 정보를 받아 제품 설계 과정에 빠른 수정을 가하는 능력 등을 말하는 것입니다.

거시 경제 차원에서 적당한 조건이라는 것은 활발한 저축과 투자 활동을 조장하고 특히 산업계의 인사들이 장기적인 안목에서 결정을 내리려는 의지를 갖게끔 하는 안정된 경제 환경을 의미합니다.

결국 한가지 결론이 나옵니다. 과학이 끼치는 영향은 경제적 또는 상업적 의미에 바탕을 두지 않고 논의될 경우 그의미를 잃게 됩니다.

국가 경쟁력과 경제 성장에의 기여라는 측면에서 과학에 대한 관심을 가질 때만 과학의 기여는 전통적인 경제학적 변수들로 다루어질 수 있다는 것을 인식할 필요가 있습니다.

노벨상을 탈 수 있는 과학 능력을 지닌 나라라도 적절치 못한 거시 경제학적 환경을 가지고 있다면 그러한 과학능력으로부터 경제적 이익을 많이 얻어 내지는 못할 것입니다. 한편, 과학적 능력이 다소 뒤떨어 진다 해도 적절한 거시 경제학적 조건을 만들어 낼 수만 있다면 그 나라는 기술력이라는 사다리를 빠른 속도로 기어올라 갈 수 있습니다. 하지만 이 말이 한국인 여러 분께는 별로 놀랄만한 이야기는 아닐 것입니다.

주석 1) 미국 스탠포드 대학 교수

