

글로벌 거버넌스와 기술변화: 원자력기술 사례

이대준*⁻¹, 이광석*⁻²

*-1. 한국원자력연구소, 정책연구부, 선임연구원 (e-mail: tjlee@kaeri.re.kr)

*-2. 한국원자력연구소, 정책연구부, 책임연구원 (e-mail: kslee@kaeri.re.kr)

1. 서론

기술변화에 대한 국제 정치적 환경의 중요성은 국제관계 상에서 국가간 교섭능력(bargaining power)의 차이에 따라 기술혁신과 확산성장에 차이가 발생할 수 있다는 점에서 찾아볼 수 있다(Patel, 1995). 이러한 관점에 따르면, 강대국과 약소국간의 국제관계는 기본적으로 강대국에 의해서 주도되며, 강대 선진국이 국제 기술 및 경제 활동의 ‘게임 규칙’을 제도화한다. 이 때 강대국들의 강한 교섭능력은 대부분 이들 규칙들을 강대국에 호의적으로 설정되도록 한다. 그러나 대부분의 약소 개도국은 이러한 규칙이나 제도를 설정할 때 거의 영향력을 행사하지 못하며, 강대국이 주도한 국제적인 규범을 따르게 된다(Sharif, 1988; Patel, 1995). 특히 국제적인 규칙이나 제도에 강대국의 경제적, 전략적 이해가 반영될 때, 이들 국제 체제들은 기술, 자본, 제품과 서비스 등의 남북 교역을 규제하면서 기술변화의 국제 경제적 과정에 변이를 일으킬 수 있다.

일반적으로 기술변화, 즉 기술혁신과 확산의 국제적 과정을 설명할 때 Vernon(1966)이 주장한 제품수명주기(Product Life Cycle, PLC) 모형이 매우 유용한 것으로 인정되고 있다. Vernon은 혁신이 이루어지고 확산되는 경로를 제품수명주기로 모형화하고, 그 수명주기를 따라서 기술변화의 궤적(trajjectory)이 제품의 특성 향상부터 생산 비용의 효율성 증대로 변화함을 주장하였다. 특히 국제적 기술 확산에 대해서, 최초의 혁신 발생지는 미국이라는 가정 하에, 국제 기술 확산은 시장의 선호도와 생산비용에 대응하면서 생산장소가 바뀌어 가며, 즉 미국내의 생산지가 서유럽으로 그리고 나서 다시 개도국으로 이전하면서 이루어진다고 주장하였다.

그러나 이러한 기술 혁신과 확산의 국제적 과정은 소위 기술경제적 패러다임하에서 개념화되면서 기술변화에 대한 국제 정치적 영향을 소홀히 취급하고 있다. 다시 말해서 기존의 기술변화에 관한 연구는 기술혁신과 확산의 주요 동인으로서 제품의 성능, 생산비용 그리고 시장의 선호도와 조직 및

산업 구조 등의 기술경제적 요소에 초점을 두고 있으며, 이 외에 국제정치적 역학관계가 작용하면 그 기술변화의 국제적 경로와 과정이 어떻게 달라지는 지에 대한 분석이 부족하다.

따라서 본 고에서는 개발도상국의 입장에서 기술확산에 대한 국제 정치 체제의 영향을 살펴보고자 한다. 보다 구체적으로 국제 핵비확산 체제의 형성과 변천과정에서 원자력 기술 확산에 미친 영향과 주요 인자를 분석하고자 한다. 이를 위하여 다음 장에서는 원자력 기술개발이 가지는 국제정치적 관심사항을 검토한다. 제3장에서는 국제 핵비확산체제가 원자력 기술개발에 미친 영향을 동태적으로 분석하고 그 결론과 시사점을 제4장에 요약한다.

2. 원자력 기술의 국제 정치적 민감성

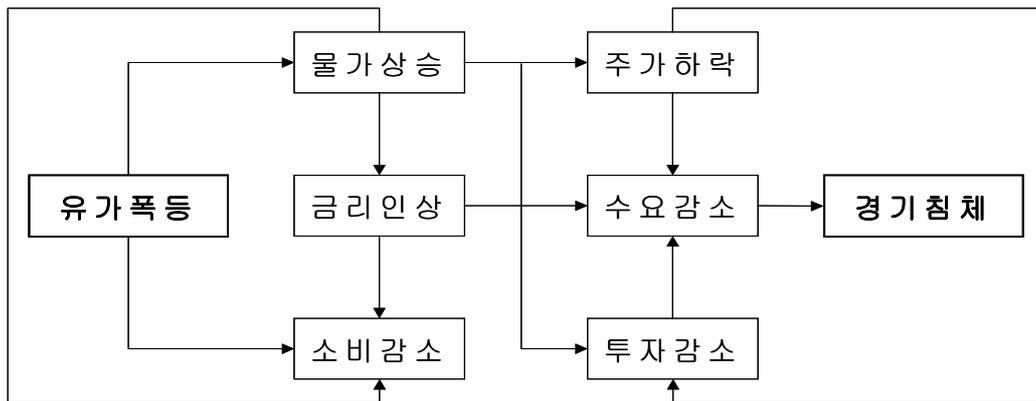
에너지의 이용개발에 초점을 둘 때, 원자력 기술은 제품(현재까지는 주로 전기)을 생산하기 위해서, 연료공급, 원자로 운전, 폐기물 관리 등 하위 기술시스템이 수직적으로 연계되며, 각각의 하위시스템은 수 만개의 부품, 기기, 장치 등이 여러 개의 계층으로 연결된 매우 복잡한 기술로 분류된다. 이처럼 수직적으로 연계된 기술시스템을 포괄적으로 핵연료주기라고 일컬으며, 크게 선행핵연료주기, 원자력 발전 그리고 후행핵연료주기 등 3단계로 구분된다. 이처럼 원자력기술, 즉 핵연료주기기술은 우라늄의 원자핵분열 반응시 발생하는 에너지를 이용하여 전기를 생산하고 사용된 핵연료를 처리·처분하는 화학적, 물리적 과정의 집합이다(Albright et al., 1997). 선행핵연료주기(이하 선행핵주기라고 함)는 원자력발전소의 연료를 준비하는 단계로서, 우라늄 광물의 채광, 정련, 농축을 거쳐 핵연료 집합체를 제작·생산하기까지의 과정이다. 원자력발전 단계에서는 핵연료집합체가 원자로에 장전되어 핵분열 반응을 일으키면서 발생하는 에너지가 이용가능한 전기적 에너지로 변환된다. 후행핵연료주기(이하 후행핵주기라고 함)는 원자로에서 인출된 사용후핵연료를 폐기물로 직접 처분하거나, 사용후핵연료에 포함된 감손우라늄 또는 플루토늄과 같은 유용한 핵종을 이용하기 위한 재처리과정을 포함한다.

사용후핵연료를 재처리 할 경우 직접처분의 경우와 비교하여 우라늄자원의 이용을 이론상으로는 60-70배까지 증가시킬 수 있기 때문에 한국과 같은 자원빈국의 경우에는 사용후핵연료의 재활용에 상당한 관심을 가지고 있다. 그러나 원자력 기술의 개발은 그 과정에서 얻어질 수 있는 핵무기급 물질, 즉 고농축 우라늄 또는 플루토늄의 군사적 전용가능성 때문에 국제적으로 매우 민감한 현안이 된다.

(1) 국가 에너지 안보와 경제

2003년 2월 26일 이라크전의 위기감이 고조되면서 뉴욕에서 서부 텍사스산 중질유(WTI) 가격이 배럴당 40달러까지 치솟았다. 이는 지난 1990-91년 제1차 걸프전 이후 12년만에 최고치를 기록한 것이다. 우리나라의 경우에는 원유 도입단가가 1년 전보다 58%나 상승하고, 원자재 수입은 25% 늘어났으며, 반도체장비, 자동차부품 등 자본재 수입도 44% 증가되면서, 2003년 들어 수출 호조에도 불구하고 수입이 큰 폭으로 증가하면서 무역수지가 두 달 연속 적자를 냈다(인터넷한겨레, 2003. 3. 2).

이처럼 에너지 가격상승은 단순히 에너지 부문 내에서의 경제활동에만 영향을 미치는 것이 아니라 국가 및 세계 경제 전체에 그 영향이 확산된다는 데에 그 심각성이 있다(<그림 1> 참조)에서 보여주는 것처럼, 에너지 가격이 상승하면 생산 제품가격 및 물가가 상승하고 이에 따라 소비가 위축되면서 생산투자가 감소하며 이는 후속적으로 경기침체로 이어진다. 실제로 1973년 석유 파동의 결과, 세계 경제적으로 ① 생산성 증가율이 저하되면서 이에 따른 국내총생산 성장이 둔화되었고, ② 인플레이션과 실업률의 동시 증가를 나타내는 속칭 ‘스태그플레이션’현상이 출현된 바 있다(박정기·최기련, 1997). 특히 한국과 같이 에너지의 해외의존도 뿐만 아니라 해외무역에 대한 경제의존도가 높은 경우에는 국제 유가폭등으로 국내 물가 불안이 심화되는 것 이외에 에너지 가격상승은 경제성장에 결정적인 위협 요인이 된다.



<그림 1> 유가 상승의 경제적 파급 효과(황인성, 2000)

현대사회뿐만 아니라 에너지는 인류문명의 발전과 필수 불가분의 관계

를 유지해 왔다. 불을 사용하고 에너지를 이용하게 되면서 인간은 만물의 영장이 될 수 있었다. 석탄을 이용하는 증기기관의 발명은 산업혁명을 가져왔고 석유를 이용하는 내연기관의 발명은 20세기 기계문명을 꽃피웠다. 전기, 전자, 반도체, 통신 등의 기술집약적 첨단산업은 전기를 에너지원으로 하고 있으며, 21세기에 산업 발전을 주도해나갈 것이다(신의순, 2001).

이처럼 현대사회에서 에너지가 충분하게 공급되지 않으면 인간 사회의 기능은 제대로 작동될 수가 없으며 무엇보다도 문명 그 자체를 유지하는 것이 매우 어려운 실정이다. 따뜻하고 쾌적한 주거환경, 수송, 통신, 식량, 제조, 유통 그리고 국가 안보 등 모든 개인과 조직 사회 활동은 관련 수요·공급 환경에 적응 가능한 에너지의 공급에 크게 의존한다(EFTF, 2000). 따라서 에너지 생산 능력의 확대는 현대 산업기술 특성상 곧바로 재화 및 서비스의 공급 증대로 직결되고 나아가 물질적 부와 복지의 증대로 이어지고 있다(오원철, 1997). 이에 따라 에너지 공급능력이 국가의 산업발전과 복지 수준을 결정하는 요인이 되고 있다. 즉, 풍부한 에너지자원의 확보는 부(富) 내지 풍요를 의미하게 되고 에너지의 부족은 빈곤을 의미하게 되었다(박정기·최기련, 1997).

이와 같은 에너지와 국가발전의 밀접한 관계를 일찍이 파악한 산업화된 서구 선진국들은 에너지 확보를 위해서 총력을 기울여왔으며 그 과정에서 제2차 세계대전과 같은 인류 역사상 가장 큰 재난을 초래하기에 이르렀다. 제1차 세계대전 후 재무장한 독일과 일본 등 제국주의 세력이 석유수송선을 확보하려는 과정에서 기존 국제질서를 심각하게 위협하기 시작하자 미국, 영국 등 연합국은 1940년과 1941년 이들 국가들에 대하여 차례로 석유금수조치를 선포하면서 에너지 전쟁이 일어나게 된다. 1973년 10월에 이집트, 시리아, 이스라엘 사이에 재발한 제4차 중동전을 계기로 아랍측이 석유를 무기화하기로 결정하고 중립국과 비 우호국가에 대해 원유공급을 감소 내지 중단을 결의한다. 이것이 바로 세계경제를 뒤흔든 제1차 석유위기이다. 1979년 이란 팔레비 독재정권을 무너뜨린 민주화 회교혁명의 소용돌이 속에서 이란의 대서방 석유공급량이 크게 감소된 데 이어 산유국의 유가 인상러시, 소비국의 비축 경쟁으로 유가는 1979년 초의 배럴당 12.70달러에서 연말엔 배가 넘는 배럴당 24 - 30달러 선으로 폭등하면서 제2차 석유위기가 일어났다. 1980년 후반 이라크와 쿠웨이트의 관계를 악화시킨 원인 중의 하나는 양국에 걸쳐 있는 거대한 지하 석유분지 때문이었고 그 결과가 바로 1991년의 ‘사막폭풍 작전(Operation Desert Storm)’으로 이어졌다. 미국이 중동지역에 관심을 가지는 이유 중의 하나는 페르시아만의 석유를 안정적으로 확보하고 위함이며

군사대국 러시아가 체첸에 그렇게 집착하는 것도 페르시아만 다음으로 석유가 많이 매장된 카스피해 지역에 대한 러시아의 이해관계 때문으로 알려지고 있다.¹⁾

에너지 문제가 국제적으로 매우 민감한 현안이 되고 있는 이유는 에너지 자원의 이용 한계 때문이다. 2000년 초에 세계의 석유(확정)매장량은, 앞으로 약 40년 동안 세계소비를 충족시킬 만한 양인 1조 330억 배럴로 추정되었다. 그러나 석유 소비가 매년 2%씩 증가한다면-미 에너지부가 예측한대로-현존하는 공급량은 40년이 아니라 25년에서 30년 내에 사라질 수도 있다. 물론 미래의 새로운 기술의 도입은 지금 개발하기에 너무 먼 거리에 있거나 개발하기에 너무 어려운 조건 하에 있는-시베리아 북쪽과 대서양 심연의-개발되지 않은 유전들에서 추가로 석유공급을 할 수 있을 것이다. 그렇다 하더라도 세계는 2020년 내지 2030년까지는 재래식 석유의 심각한 부족을 겪기 시작할 것으로 예상된다(Klare/김태유·허은영 번역, 2002).

현재 경제적 타당성이 입증된 우라늄 매장량은, 현재의 소비속도(연간 약 5만 톤)를 감안하고 이를 천연 우라늄광으로부터 공급한다면, 약 40년 정도 유지가 가능할 것이다(NEA, 2000). 그러나 원자력에너지는 화석연료와 다르게 재활용의 장점을 가지기 때문에 에너지를 장기적으로 공급할 수 있다. 사용후핵연료는 재처리를 통해 MOX 핵연료로 경수로에서의 사용이 가능하며, 이 경우 천연 우라늄의 이용률은 약 30%정도 증가한다. 이러한 기술은 이미 개발 완료되어 유럽에서 상당 부분이 사용되고 있으며 일본에서도 사용되고 있다. 더 나아가 고속증식로를 도입하여 비핵분열성 우라늄 자원을 플루토늄으로 전환하여 사용한다면, 사용후핵연료를 직접 처분하는 경우보다 같은 양의 우라늄으로 60-70배 이상의 에너지 생산이 가능하다. 경우 천연우라늄은 오늘날의 사용수준으로 볼 때, 3,000년 이상 동안 충분히 사용가능하게 된다(IAEA/한원(연) 譯, 1998).

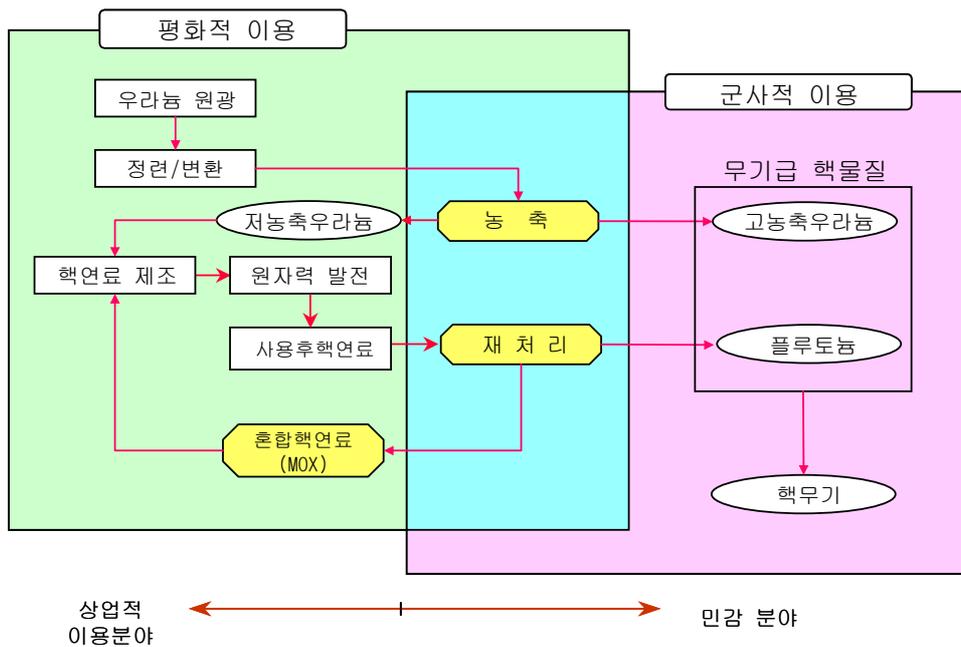
다른 한편으로, 원자력은 에너지 밀도가 높은 장점을 지닌다. 에너지 밀도는 주어진 양의 에너지를 생산하는데 사용되는 연료량으로 정의된다. 1000 MWe급의 발전소를 1년간 운전하기 위해서는 원자력의 경우에는 25톤(10 m^3)의 농축우라늄, 석유의 경우에는 1천만 배럴, 석탄의 경우에는 230만톤이 필요하다(Blumenthal & Lindeman, 1995). 우라늄을 이용한 핵연료는 고농축 에너지 연료이기 때문에, 핵연료를 안정적인 세라믹형태로써 매우 작은 부지에서 효율적인 비용으로 관리하는 것이 가능하다(NEA, 2000). 따라서 핵연료의 재순환성과 고에너지 밀도 특성 때문에 원자력은 어떠한 사태로 인해 공급이 중단되었을 때 이를 해결할 수 있는 충분한 시간을

1) 이에 대한 자세한 설명은 박정기·최기련(1997)의 P89~90 참조할 것.

제공함으로써 에너지 안보를 높인다. 이러한 장점 때문에 한국과 같은 자원빈국의 경우에는 원자력의 개발과 사용후핵연료의 재활용에 상당한 관심을 가지고 있다.

(2) 원자력 기술의 국제정치적 민감성

에너지 안보 측면보다도 원자력 기술의 개발은 그 과정에서 얻어질 수 있는 핵무기급 물질, 즉 고농축 우라늄 또는 플루토늄의 군사적 전용가능성 때문에 국제적으로 더욱 민감한 현안이 되어 왔다. 그 이유는(<그림 2> 참고)에서 보여주고 있는 평화적 이용과 군사적 악용과의 경계를 명확히 구분할 수 있는 기술적 수단이 현재까지 개발되지 못하고 있기 때문이다. 20세기 말에 세계적으로 고농축 우라늄과 플루토늄의 총량은 약 300톤으로 파악되었다. 이 양은 미국의 원자로를 20년 동안 가동시킬 수도 있는 반면에 초보적인 핵무기를 수 십 만개 만들 수 있다(Christensen *et al.*, 2000).



<그림 2> 원자력 기술의 이중용도

현실적으로 U-235의 연쇄반응을 유지하기 위한 임계질량은 약 15kg이고 Pu-239의 경우에는 5kg이 필요하다(Green *et al.*, 1980). 경수로 핵연료주기의 경우 정상적인 운전과정에 포함된 농축과 재처리 과정에서는 핵무기급 물질인 우라늄-235(U-235)와 플루토늄-239(Pu-239)가 각각 얻어질 수 있다. 우라늄-235의 농축도가 90%이상이 되면 핵무기급으로 분류된다. 평화적인

원전용으로 농축도 3-5%의 저농축 우라늄 생산하기 위한 기술은, 이론적으로는 핵무기급 고농축 우라늄 생산에 이용될 수 있다. 우라늄 농축은 동일한 화학적 성질의 상이한 핵종을 분리해내는 복잡한 물리적 과정을 필요로 한다. 비록 이 과정에서 기술적으로 매우 어려운 문제를 해결해야 하며 동시에 많은 비용이 필요하지만, 상용기술능력을 군사적으로 전용하는 것은 전혀 불가능한 문제는 아니다. 원전의 상용운전과정에서 생산되는 플루토늄의 품질은 무기용으로 직접 사용되기는 어렵다. 그러나 상당한 경제적 손실을 감수한다면, 원자로내에서 우라늄-238의 연소도를 조절하면 순도를 높이는 것이 가능하다. 1000MWe급의 경수로로는 그 운전과정에서 약 200 - 250kg의 저품위(reactor-grade) 플루토늄이 생성되며 그 양은 30 내지 40기의 핵무기를 제조하는 데 사용될 수 있다 (Holdren, 1989). 이상과 같이, 원자력 기술의 핵무기 확산성 때문에, 원자력 기술의 군사적 전용을 방지하기 위한 노력은 원자력기술의 개막과 함께 시작되어 왔다.

3. 국제 핵비확산체제와 원자력 기술 발전

(1) 원자력 시대 개막과 미국의 독점정책

1938년 독일은 최초로 핵분열연쇄반응으로부터 거대한 에너지를 생성할 수 있음을 발견하였다. 이러한 사실은 영국과 미국을 크게 자극하였고 결과적으로 맨하탄 프로젝트를 탄생시켰다. 미국의 주도 하에 영국과 캐나다가 협력한 이 프로젝트의 목적은 군사적으로 사용하기 위한 원자력 기술과 물질을 확보하는 것이었다(Skolnikoff, 1993; Walker & Lonroth, 1983). 1945년까지 연합국은 약 20억 달러를 투입하여 원자탄을 개발하였고 그것을 태평양 전쟁에 사용하였다. 다시 말해서 소위 ‘원자력의 시대(Nuclear Age)’는 원자력의 평화적 이용이 아니라 군사적 이용으로부터 시작되었다.

1945년 일본의 히로시마와 나카사키에 투하된 핵무기의 위력을 확인한 미국은 소련 및 영국의 핵무기 개발을 저지 또는 지연시키기 위하여 원자력 지식 및 기술을 비밀화하는 핵기술 독점정책(Denial Policy)을 전개하였다. 독점정책은 1946년 제정된 미국 원자력법에 의해서 법적 체제가 구축되었으며, 그 주요 내용 다음과 같다. 첫째는 핵물질 관리에 관한 것으로, U-235, Pu-239와 같은 핵분열성 물질은 엄격한 규제 하에 원자력위원회(Atomic Energy Commission, AEC)의 독점 소유로 하고, 그 생산시설은 물론 수출입도 모두 AEC 독점으로 하였다. 둘째로 원자력 과학기술 정보는 군사적 또는 평화적 목적에 관계없이 모두 AEC의 관리 하에 두도록 하였다. 셋째, 원자

력 기술의 개발, 소유, 수출에는 AEC의 인허가를 받도록 하였다. 이처럼 독점정책이 영국과 프랑스 등 우방국을 포함한 모든 국가들과 핵물질과 정보를 포함한 어떠한 기술이전도 금지하면서 1946년의 원자력법은 미국의 수출 통제 정책의 기원이 된다(Poneman, 1982).

미국의 독점정책으로 원자력 기술과 물질의 국제적 확산이 어려워지자, 영국과 프랑스는 독자적으로 원자력 기술을 개발하기 시작하였다. 핵연료 농축기술의 도입에 실패하면서, 영국과 프랑스는 가스냉각형 원자로(Gas-Cooled Reactor, GCR)를, 캐나다는 가압중수로형 원자로(Pressurised Heavy Water Reactor, PHWR)와 관련 핵연료주기를 개발하기 시작하였다. 미국과 마찬가지로 이들 국가의 원자력 개발 목적은 초기부터 전력생산용보다는 핵무기를 위한 플루토늄을 생산하는 것이었다. 이처럼 원자력 기술 개발이 군사적 목적으로 출발하면서 원자력 기술개발에 대한 국제적인 논쟁과 분쟁이 시작되었다(Walker & Lonroth, 1983).

(2) 평화를 위한 원자력 정책과 국제 원자력기구 설립

1949년과 1952년에 구소련과 영국(1952)이 각각 자력으로 핵무기 개발에 성공하게 되자 미국은 독점정책만으로는 핵무기 확산을 효과적으로 통제할 수 없음을 깨닫게 된다. 또한 국내외적으로 원자력을 둘러싼 다음과 같은 정치경제적 환경 변화에 따라 미국은 독점정책을 포기하게 된다. 첫째, 구소련의 다른 나라에 대한 원자력 기술의 수출에 대응하고자 하였다. 구소련이 국