

원자로의 정치경제학과 안전

박진희[†]
동국대학교 교양교육원

The Political Economy of Nuclear Reactors and Safety

Jin Hee Park[†]
Center of General Education, Dongguk University-Seoul

ABSTRACT

The success history of Light Water Reactors (PWR and BWR) showed how a dominant technology could be shaped in a political and economical context. The american nuclear politics, the interest of american nuclear industry, and the accumulated technological know-hows made it possible that the not inherently safe reactor-Light Water Reactor- became a prominent reactor model. The path dependency of reactor technology on LWR kept the engineers from developing a new safer reactor, even if the severe reactor accidents occurred. In order to increase safety of nuclear power system, we should understand the social shaping process of nuclear technology.

Keywords: nuclear reactor, Light Water Reactor, social shaping, path dependency, safety

I. 서 론

후쿠시마 원전 사고를 계기로 원자력 발전기술의 안전을 둘러싼 논쟁이 계속되고 있다. 쓰리마일과 체르노빌 사고를 겪으면서 원자력 발전 시스템의 안전이 상당 수준 개선되었다는 믿음이 이번 사고로 흔들리게 된 것이다. 더구나 첨단 기술력을 자랑하는 일본에서 원자력 발전 역사상 최악의 사건이 발생하자 원자력 발전 기술에 대한 회의적인 시각이 강화되고 있다. 이는 각국 정부 정책에서도 발견되는데, 원자력 발전 폐쇄를 결정하는 국가들이 하나 둘 늘고 있는 것이다. 반원전 운동의 역사가 길고 2000년에 원자력 합의를 통해 원자력 발전소 폐쇄를 결정한 바 있었던 독일은 원자력 발전소 안전성 강화 조치를 넘어 2022년에 모든 원자력 발전소를 폐쇄하겠다고 선언하였다. 독일에 이어 스위스, 벨기에가 단계적인 폐쇄를 선언하였고, 이태리에서는 원전 건설 계획을 다시 백지화하였다. 원자력 증설 계획을 갖고 있던 중국은 2020년까지 86GW 원자로 건설 계획을 60GW로 축소하기로 하였다.

이들 폐쇄 혹은 축소를 결정한 국가들과 달리 영국, 프랑스, 한국처럼 기존의 원자력 발전 정책을 변화없이 유지하겠다는 국가들도 있다. 이들 유지를 선언한 국가들에서는 현재의 안전

시스템 보완과 안전성이 강화된 신형 원자로 사용으로 원자력 발전 기술의 안전은 보장될 수 있다는 입장을 견지하고 있다. 즉, 원자로 기술의 발달이 안전성을 높여줄 것이라고 보고 있는 것이다.

원자로 기술의 안전을 확보하는 것은 폐쇄를 결정한 국가이든 유지를 결정한 국가이든 모두에게 중요한 과제이다. 당장 세계 전력 생산의 13%를 담당하고 있는 원자력 발전을 대체할 수 있는 기술이 없는 상태에서 원자력 발전소의 안전한 운영은 더욱 필요하다. 이는 한편으로 기술 개발을 담당하는 공학자들의 과제이기도 하다. 사회 안전을 최우선으로 하는 정부의 강력한 정책적 의지가 바탕이 되고 이를 기술적으로 실현하고자 하는 사회적 책임 의식이 뚜렷한 공학자들의 노력이 뒷받침된다면 실현이 불가능한 것은 아닐 것이다.

그런데 원자력 발전 기술이 진화해온 역사는 현재 공학자들 앞에 놓인 과제 수행이 공학자들의 사회적 책임 의식, 안전을 최우선으로 하는 공학 윤리 인식의 강화와 정부의 강력한 정책적 의지만으로 이루어질 수 있는 것은 아님을 보여준다. 공학자들의 원자로 안전에 대한 강조가 원자로 기술 발전을 둘러싼 정치경제적 맥락에 의해 희석되면서 기술 개발에 반영되지 않은 경우들이 역사에서 발견되고 있기 때문이다.

이 논문에서는 현재의 원자로 기술이 특정한 정치경제 맥락에서 안전이라는 요소의 별다른 개입 없이 진행되어 왔음을 보이고자 한다. 기술적 안전성 보다는 정치 경제적 주도권이 우선

Received 6 December, 2011; Revised 16 January, 2011

Accepted 31 January, 2011

[†] Corresponding Author: park0227@gmail.com

시 되어 특정 원자로 형태가 기술을 주도하게 되고, 이렇게 지배적인 기술이 토마스 휴즈가 언급하는 시스템적 관성을 획득하면서 새로운 원자로 기술의 진입을 막게 되는 과정을 살펴볼 것이다(Hughes, 1983). 또한, 원자력 발전 기술 시장의 특성으로 안전성이라는 요소가 기술 설계에 반영되기 어려운 점도 알아보고자 한다. 여기서 보여주는 원자로 기술의 사회적 형성 과정은 원자로 기술의 안전을 높이고자 하는 공학자들의 실천 전략에 시사점을 줄 수 있다고 생각한다.

사회적 형성 과정을 보이기 위해서 이 논문에서는 원자로 기술 개발 과정을 다룬 단행본, 원자로형 선택과 안전성을 두고 진행된 논쟁을 다룬 논문들을 참조하였다.

II. 본 문

현재 전 세계적으로 가동되고 있는 원자로로는 감속재와 냉각재, 핵연료에 따라 가압경수로, 비등형경수로, 중수로, 가스, 흑연감속로, 증식로로 구분된다. 이 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것이 경수로인데, 2010년 현재 경수로는 전체 원자로의 82%를 차지하고 있었다(IAEA, 2010). 이 때문에 현재의 안전 논쟁은 경수로에 집중될 수 밖에 없다. 그런데, 이 경수로가 지배적인 기술로 등장하게 되는 과정은 원자로 기술이 안전성을 중심으로 발전되어 온 것이 아님을 보여준다. 본문에서는 이 과정을 역사적으로 살펴볼 것이다.

1. 전쟁의 유산으로서 민간 발전용 원자로의 탄생

2차 대전이 끝난 후 원자탄 기술 개발에 참여한 미국과 연합국들에서는 전쟁 중에 축적된 이들 관련 기술들을 다양한 방식으로 활용하고자 하였다. 원자과학자들은 우라늄과 플루토늄의 핵분열 과정에서 발생하는 열을 전기 생산에 쓸 수 있을 뿐만 아니라 배나 잠수함 등의 동력으로 활용할 수 있다고 하였다. 이들 제안을 토대로 원자로 개발 기술을 확보한 미국이 먼저 잠수함용 원자로 개발을 시작하였다.

민간용 발전 가능성이 언급되기는 하였으나 1947년에 결성된 미국 원자력 위원회(Atomic Energy Commission)는 핵에너지의 군사적 이용을 더 우선시하고 있었다¹⁾. AEC의 지원 하에서 핵잠수함 개발을 추진한 사람이 하이먼 리코버였는데, 리코버는 물을 냉각재로 활용하는 경수로 기술이 잠수함 동력

에 적합하다고 믿고 있던 사람이었다. 물론, 프로젝트 수행 과정에서 당시 존재하던 다양한 기술적 대안들을 간과하고 있던 것은 아니어서 몇몇 실험실들에서 가스, 액체금속, 나트륨 냉각 방식의 원자로 제작 연구가 이루어졌고, 웨스팅하우스에서는 경수 냉각 방식 연구도 진행되었다. 하지만, 가능한 빨리 프로젝트 결과를 얻고자 했던 리코버는 아르곤 연구소 과학자로부터 프로젝트의 빠른 수행에는 경수 냉각이 가장 유력하다는 조언을 듣고는 바로 경수 원자로 제작에 들어가게 되었다(Cowan, 1990: 560). 리코버의 경수로는 1953년에 첫 핵잠수함 노틸러스(Nautilus)에 장착된 이후, 1964년까지 총 50여척의 잠수함 동력원을 담당하게 되면서 미국 원자로 기술의 핵심을 이루게 된다.

리코버의 경수로는 선박이라는 좁은 공간에 적합해야 했고 잠수함 동력을 목적으로 하고 있었기 때문에 컴팩트한 노심 구조를 취해야 했으며, 무엇보다 장기간의 견고성을 유지해야 했다. 군사용으로 개발된 기술인만큼 자금 압박을 받지 않아 고비용의 기술 설계를 용인하고 있었다. 농축 우라늄 생산 시설을 갖추고 있던 미국의 조건에 맞게 천연 우라늄 대신에 농축 우라늄을 연료로 활용하게 되어 있었다 (Mahaffey, 2010:99). 리코버는 이 원자로의 기본 골격을 토대로 가압경수로 모델을 개발하여 1957년 쉬핑포트 발전소에 설치, 미국 최초의 상업용 발전을 시작하였다. 이렇게 미국에서는 잠수함 동력용 원자로가 상업용 발전 원자로로 자연스럽게 이전이 진행되게 된 것이다. 이들 원자로 개발에는 이후 원자력 발전소 기술을 주도하게 될 웨스팅하우스, 제너럴일렉트릭, 밥콕, 월콕스, 컴버스천 엔지니어링이 참여하고 있었다(Rippon, 1984:). 이와같이 잠수함 동력으로의 군사적 활용, 미국이 보유한 농축 우라늄 기술을 활용할 수 있을 것 등이라는 요소들이 가압 경수로 개발에 영향을 미치고 있었음을 알 수 있다. 설계에서 안전의 문제는 원자로 선택에서 우선시 되고 있지는 않았다.

한편, 상업 발전용 원자로 초기 개발의 역사는 기술 선택자들이 다양했음을 보여준다. 리코버의 경수로 개발이 진행되는 동안, 미국 발전업자들 사이에서 핵에너지를 발전에 사용하고자 하는 관심이 증가하였고 미국 원자력위원회에서도 1952년부터는 발전용 원자로 개발을 우선시하게 되었다. 원자력위원회의 이런 변화의 배경에는 1953년 아이젠하워의 '원자력의 평화적 이용(Atom for Peace)' 선언이 있었다. 이 선언은 핵 기술 분야에서의 미국의 주도권을 유지하고자 한 것이었다. 미국의 강력한 보호 정책에도 불구하고 소련 역시 원자로 기술 개발에 빠른 진전을 보이고 있었다. 소련은 1951년에 이미 민간에 필요한 전기 생산을 목적으로 원자력 발전소 건설을 계획하고 원자로 개발에 들어가 있었다. 그리고는 1954년에 증식로(Fast Breeder)

1) 1950년대 초까지만 해도 AEC에서는 민간용 발전에 대한 지원을 원자력 발전의 경제성을 이유로 제한적에만 하였다. 민간용 발전을 목적으로 하는 프로젝트로 공식적인 지원을 받은 프로젝트는 1950년대 초까지 GE사의 증식로 개발 프로젝트가 유일하였다. Cowan, 1990, p. 557.

로 100kWe 출력으로 전기 생산 실험에 성공하였다(Mahaffey, 2010:96).

원자로 기술에서 소련에 뒤처지게 되면, 공산주의 진영으로 3세계 국가들이 흡수되어 미소의 힘의 균형이 깨지게 될 것이라고 본 미국 정부는 AEC를 통해 상업용 활용이 가능한 다양한 원자로 개발 프로그램들을 적극 지원하기 시작했다(Damain, 1992: 597). 여기에 전기 발전업자들도 참여하면서 다양한 원자로 개발이 가능하게 되었다. 리코버의 경수로 이외에 증식로, 나트륨가스 냉각 원자로, 중수 원자로 등 다양한 원자로 개발이 진행되었다.

이들 발전용 원자로는 전기 생산에 필요한 충분한 양의 증기를 생성하기 위해서 잠수함 동력에 사용되었던 원자로 보다 출력이 높아야 했다. 더구나 지속적인 발전이 가능하자면 농축 우라늄을 연료로 쓰기 보다는 천연 우라늄을 연료로 쓸 수 있어야 했다. 이런 요구에 부합하는 것이 중수로였다. 그러나 중수로에 적합한 경제적 연료 개발이 당시로서는 어려운 과제여서 실용성은 높지 않았다. 50년대 말까지도 리코버의 경수로를 제외하고는 모두 발전용 원자로로서의 가능성만이 타진되고 있을 뿐이었다.

발전용 원자로가 군사적 목적에서 유래하는 것은 미국의 독특한 현상은 아니었다. 영국과 프랑스의 원자로 개발 프로그램 역시 군사적 목적을 띠고 있었다. 프랑스의 전후 복구에 핵에너지 개발이 중요하다는 담론이 지배적이 되면서 프랑스 원자력위원회(Commissariat à l'Énergie Atomique:CEA)는 1950년에 우라늄 광산 탐사와 연구용 원자로 장기 프로그램을 입안하게 된다. 이 원자력 프로그램의 목표 중 하나가 프랑스의 독자적인 원자력 무기 개발에 있는 것이 아니냐고 미국이 의혹을 제기하자 프랑스 원자력위원회는 좌파 위원들을 위원회에서 축출하여 의혹을 불식시키려고 하였다. 그러나 어떤 원자로를 제작할 것이냐를 두고 논의하는 과정은 프랑스 정부가 원자력 무기 개발을 염두에 두고 있었음을 보여주었다. 프랑스 원자력위원회는 농축 우라늄을 사용하는 미국식 원자로 대신에 천연 우라늄을 사용하는 영국식 원자로를 선택하였다. 거래가 되지 않고 있던 농축 우라늄을 사용하는 원자로를 개발하자면 수년이나 걸리는 농축 우라늄 공장을 병행해서 건설해야 했다. 연료의 문제가 있기는 했지만, 프랑스가 가스 냉각 원자로를 선택하게 된 것은 이를 통해 핵무기용 플루토늄과 전기를 동시에 얻을 수 있다²⁾는 잇점 때문이었다(Hecht, 1994: 663). 한편, 원자로 감속재를 놓고도 논의가 이어졌는데, 감속재로는 중수 대신에 흑연이 선택되었다. 1951년에 CEA에서 이미 실험용 중수 원자로

가 제작되었지만, 개발된 원자로의 감속재로는 흑연이 선택되었던 것이다. 프랑스 원자력사를 연구한 Hecht는 표면적으로는 중수 생산에 드는 어려움을 감속재 선택의 이유로 들고 있으나 실제로는 중수 원자로 연구자들이 공산주의자였기 때문에 이들을 원자력 프로그램에서 배제하기 위해 흑연을 선택하게 되었다고 한다(앞의 글, 665). 즉, 정치가 프랑스의 가스-흑연 원자로 기술을 선택한 것이었다.

영국의 경우에도 원자로 개발은 군사적 목적을 겨냥하고 있었다. 원자력 폭탄의 개발 가능성을 염두에 두고 있던 영국 역시 원자로형을 선택하는 과정에서 연료 문제 이외에 플루토늄 생성이 많은 쪽을 선호하였다. 냉각재로 가스, 감속재로 흑연을 사용하는 가스-흑연 원자로는 미국의 농축 우라늄 연료에 기댈 필요도 없었을 뿐만 아니라 핵무기에 필요한 플루토늄 생성에도 유리하였다(Rüdig, 1987: 390). 영국과 프랑스는 모두 맨해튼 프로젝트에 참여하면서 흑연 감속재를 다루는 기술을 축적하고 있던 것도 요인으로 작용하였다. 영국은 1955년에 최초의 상업용 가스-흑연 원자로 Magnox 제작에 성공하여 미국 쉬핑포트 발전소 보다 1년 앞선 1956년 Calder Hall에서 발전을 시작하였다.

이렇게 1세대의 발전용 원자로는 군사적 목적에 부응하여 설계, 제작되고 있었고 경제성이나 안전성의 요인은 원자로 설계에 개입할 여지는 없었다. 미국의 경우, 민간 전기 발전업자들에 의해 원자로 설계 연구가 이루어지기는 하였으나 원자력위원회의 지원을 받고 있어서 경제성은 큰 요인이 되지 못하였다. 프랑스와 영국의 경우는 군사 목적이 우선하고 있었으며, 핵연료를 독자적으로 확보할 수 있는 것이 원자로형 선택에서 중요한 요소로 작용하였다.

2. 미국의 원자로 원조 정책과 경수로의 성공

1955년 제네바에서 평화를 위한 원자력 사용 회의가 열렸을 때, 회의에서 논의되었던 원자로 형태는 약 100여종에 달했다. 이 숫자는 1958년이 되면서 12개로 줄어들었고, 1960년대에는 가스-흑연 원자로, 중수 원자로, 경수로 등 6종류의 원자로가 발전에 사용되더니 1975년에는 경수로와 중수로, 그 중에서도 경수로의 비중이 절대적이 되었다(Cowan, 1990: 548). 50년대 말에만 해도 경수로는 미국에서 최초 상업용 발전소에 이용되었을 뿐 영국, 프랑스 등의 국가에서 주목받지는 못하였다. 경수로는 어떻게 지배적인 지위를 획득할 수 있었을까?

기술적 잠김 현상으로 경수로 기술의 성공을 설명한 코완은 50년대 중반부터 시작된 미국의 원자력 원조 정책과 이 과정에서 축적된 경수로 운영 경험, 미국 원자력 발전 시장의 성장을 이유로 들고 있다. 소련의 핵에너지 기술 발전에 위협을 느

2) 위원회 위원들은 실제로 5년 안에 15킬로그램의 플루토늄을 얻는다는 계획도 세워두고 있었다고 한다.

긴 미국은 연합국들과의 핵연료 및 원자로 기술 공유를 거부하던 정책에서 적극적인 원자로 기술 공유 정책으로 전환하게 된다(앞의 글, 550). 특히 유럽 국가들의 원자로 기술 개발을 지원하는 Euratom과 제휴하여 유럽 각국에 경제적, 기술적 원조를 제공하였다. 유럽 국가들에 대한 기술 원조는 유럽국들이 독자적으로 원자로 기술을 개발하지 못하도록 통제하여 결과적으로 핵무기 확산을 막는다는 목적도 지니고 있었다(Rüdiger, 1987: 401).

이들 기술 제공 과정에서 ‘미국의 기술’로 선택되었던 것은 쉬핑포트 발전소에 설치된 경수로였다. 여기에는 이 경수로 개발을 주도한 리코버의 영향력이 크게 작용하였다. 다른 원자로들과 달리 이 경수소가 잠수함 동력이기는 하지만 장시간의 운전 경험으로 실용성이 입증되었던 것도 선택에 영향을 주었다. 이 경수로 모델은 60년대에 들어서면서 제너럴일렉트릭사가 선택한 비등형 경수로와 웨스팅하우스, 밥콕과 윌콕스, 컴버스천 엔지니어링사가 선택한 가압경수로로 분화 발전하게 되었다(Rippon, 1984: 260). 그리고 유럽의 기술 지원을 제너럴일렉트릭과 웨스팅하우스가 주도하게 되면서 이 두모델이 유럽 원자력 발전 시장을 주도하게 되었던 것이다.

미국의 원자로 기술 확산 정책이 유럽의 원자로 기술 개발에 어떤 영향을 주었는가는 독일의 원자로 기술 개발 역사에서 잘 드러나고 있다. 1950년대만 해도 영국, 프랑스나 미국과 달리 독일 정부는 기초 연구에 대한 지원만 하였을 뿐 민간 기업의 원자로 기술 개발에 대한 적극적인 지원은 하지 않고 있었다(Radkau, 1978: 199). 정부의 지원 프로그램 대상이 된 원자로로는 경수소가 아니라 천연 우라늄을 연료로 사용하는 중수로와 가스 냉각로였다. 한편, 공기업으로 운영되고 있는 발전 회사들에서는 풍부한 석탄으로 전기를 생산할 수 있었기 때문에 원자로 기술 개발에 큰 관심을 보이지 않았다.

그러나 미국의 원자력 확산 정책이 Euratom와의 제휴로 진행되면서 민간 기업들과 발전업자들의 원자로에 대한 관심은 커져갔다. 특히 미국 정부의 재정적 뒷받침에 의해 저렴한 비용으로 경수로를 건설할 수 있게 되고 핵연료도 안정적으로 공급받을 수 있게 되자 미국의 경수로를 도입하여 발전을 하고자 하는 발전업자들이 생겨났다(Rüdiger, 1987: 412). 발전 장비들을 생산해 온 지멘스와 AEG는 제너럴일렉트릭과 웨스팅하우스로부터 경수로 제작 허가를 독점하여 독일 내 원자로 건설을 주도하면서 60년대에 경수로 기술을 축적해갈 수 있었다. 이들 기술을 바탕으로 독일은 70년대에 독자적으로 경수로 모델을 개발하여 세계 시장으로 진출하며, 경수로 시장 확대에 기여하게 된다. 이 과정에서 중수로, 가스냉각로 기술은 쇠퇴할 수 밖에 없었다.

미국의 원조 정책은 영국의 가스-핵연료 모델을 선택한 프랑스에도 영향을 주었다. 프랑스 국영 전기회사인 EDF(Electricité de France)는 가스-핵연료 기술 개발에 집중하던 프랑스 원자력위원회(CEA)와 달리 1960년에 벨기에와 경수로 공동 개발을 시작하였다. 이어 경수로 개발에 관심을 보인 민간 회사들과 Framatome을 설립하여 웨스팅하우스로부터 경수로 제작권을 획득하여 경수로 제작을 주도하게 된다. 이런 EDF의 노선은 CEA의 역할 축소와 맞물리면서 1969년 가스-핵연료 기술 개발 노선의 공식적인 포기를 결과하였다. 이후 프랑스는 독일과 마찬가지로 미국 경수로 모델의 독자적 개발로 경수로 시장을 주도하며 경수로 확산을 이끌었다(Jasper, 1992: 654-655).

유럽 시장의 확대는 미국 국내 시장에서의 경수로 입지 강화로 이어졌다. 미국의 재정적 지원에 의해 유럽 국가들에 먼저 설치된 발전소들은 미국 원자력 발전업자들이 초기 운영 경험들을 축적하고 학습을 통한 기술 문제 해결을 가능하게 해주었다. 이들 발전소 경험으로 쌓인 데이터들은 미국 경수로의 신뢰도를 높여 놓았고, ‘사용하면서 학습하는’ 기회도 제공하여 적은 수의 발전소에 적용되고 있던 다른 원자로 기술에 대해 기술적 안정면에서 경수소가 우위를 점할 수 있게 해주었다(Green, 1986: 6). 설치된 발전소들로부터 미국의 원자로 제작사들이 획득할 수 있었던 학습 성과를 조사한 연구는 웨스팅하우스 등 제작사들은 경험을 통해 발전소 건설 비용을 낮출 수 있었을 뿐만 아니라 비용 예측의 신뢰도를 높일 수 있었음을 보여주었다(Collingridge, 1984). 운영 과정에서 문제가 발생했을 때 이에 관한 정보들을 얻을 수 있는 정보원들이 많다는 것도 경수로에 대한 선호를 높여주었다. 즉, 발전소로 가동되는 경수로들이 늘어나면서 생겨나는 네트워크 외부효과가 경수로를 시장 지배적인 기술로 부상하게 했던 것이다. 한편, 웨스팅하우스와 제너럴일렉트릭사의 터키 방식 판매도 경수로의 시장 점유를 높여주었다. 정해진 가격으로 원자력 발전소 설비 전체를 일괄로 제공하는 터키 방식의 판매는 밥콕, 윌콕스 등 상대적으로 자본력이 낮은 기업들을 시장에서 퇴출시키고 두 회사의 독점을 강화하였고 결과적으로 두 회사의 경수소가 세계 원자로 시장을 주도하게 되었던 것이다(Rippon, 1984: 260).

미국의 유럽 시장 공략에도 불구하고 영국은 1960년대에도 가스-핵연료 냉각로 기술 개발을 이어갔다. 1950년대 말이 되면서 핵에너지를 이용한 발전은 일상이 되었고, 발전 효율을 어떻게 높이느냐가 영국원자력에너지국(United Kingdom Atomic Energy Authority)의 핵심 과제가 되었다. 이를 위해서는 높은 온도와 고압 상태에서 발전을 할 수 있는 원자로 개발이 시급하다고 보았고, 가스-핵연료 이외에 다른 원자로 형태도 고려하게 되었다. 이런 과정에서 1959년에 처음으로 경수로 연구가 시

작되었으나 원자력에너지국은 가스-흑연로에 더 가까운 증기발생중수로(Steam Generating Heavy Water Reactor) 연구로 기울어지게 되었다. 1960년대 초 만해도 1세대 가스-흑연로인 Magnox를 개선하여 고온 상태에서 발전이 가능하고 연료 비용을 바꾸는 것으로 이런 문제를 해결할 수 있다고 보았다.

그러나 1963년에 미국 제너럴일렉트릭사의 비등형 경수로는 당시 비용의 절반 가격으로도 전기 생산이 가능함을 보여주었다. 이에 중앙전기생산위원회(Central Electricity Generating Board)에서는 1964년 이차 원자력프로그램에 경수호와 신형가스냉각로(Advanced Gas-cooled Reactor)제작자들이 입찰에 참여할 수 있게 하고, 원자력에너지국과 협조하여 개발할 원자로 형태를 선택하였다. 원자력국과 에너지위원회는 신형가스냉각로가 영국에서는 더 싼 비용으로 전기 생산을 가능하게 해주고, 초기 연료 비용이 낮다는 경제적인 이유에서 만이 아니라 기술적인 면에서도 신형가스냉각로가 경수호보다 낫다는 점을 들어 가스냉각로를 선택하였다. 여기서 기술적인 이유로는 더 크고 값싼 터빈의 사용, 발전 중에 연료 주입이 가능한 것, 원리적인 안전성- 가스는 물과 달리 반응 속도가 느리기 때문에 비상 사태에 대처할 수 있는 시간적 여유가 경수호보다 높아 안전하다-과 발전 잠재량을 들었다(Rush et al., 1977). 이 과정에서 경수호가 안전성 면에서 취약하다는 점이 강조되었다. 이미 1963년 경수호가 안고 있던 문제들-증기발생기 관의 결함, 압력용기와 열교환기를 용접으로 연결시켜 놓아서 발생할 수 있는 냉각재 손실, 압력 용기 균열이 음속 이상으로 진행될 수 있다는 점 등-로 인해 경수로 제작 비용은 높아지고 있었다(Green, 1986: 7).

그런데, 영국이 신형가스냉각로를 미국의 경수로 대신에 2세대 원자로로 개발하기로 결정하게 된 것은 기술적인 이유에서 만은 아니었다. 프랑스의 CEA와 달리 영국 원자력국은 여전히 원자력 프로그램 전반에 대한 지휘권을 갖고 있었고, 원자로 선택에 있어서도 결정권을 갖고 있었다. 반면에 독일에서처럼 영국의 원자로 제작사들은 독자적인 제작 능력이나 외국 기술 도입을 추진할 수 있는 능력은 갖추고 있지 못하였다. 때문에 이들은 여전히 영국형 가스-흑연 원자로를 선호하고 있던 원자력국의 영향에서 벗어날 수가 없었다. 이렇게 원자력국과 같은 원자력 관련 기구들과 기업 간의 영향력의 차이가 경수호의 공세 속에서도 영국의 가스 냉각로가 생존할 수 있게 해주었다(Rüdiger, 1987: 400). 그러나 신형 원자로의 상용화가 늦어지고, 제작된 원자로 역시 서로 상이한 구조를 갖고 있어서 경수호에서처럼 학습으로 기술이 축적될 여지는 적었다. 더구나 이 신형 원자로 는 영국 이외의 시장 개척에 실패하면서 경수호의 공세에 대응할 수 없었다. 신형 원자로의 '안전'이 부각될 수 있는 상황도

아니어서 점차 원자로 모델은 세계 시장을 지배한 경수호로 수렴해갔다.

3. 경수로 기술과 안전

1970년대에 경수호가 원자로의 주도적인 모델로 성공을 거두게 된 것은 앞서 보았듯이 미국의 원자로 원조 정책, 경수로 제작사들의 기술 축적과 독일, 프랑스 등 후발 기업들의 성장에 기인한 것이었다. 발전용으로 개발된 원자로가 아니어서 경수호는 가스냉각로에 비해 발전 효율이 높은 것은 아니었다. 다만, 컴팩트한 디자인으로 건설 과정이 비교적 간단하고, 비용이 적게 든다는 점에서 경수호는 빠른 원자로 확산을 목표로 하고 있던 미국의 원자로 지원 정책에 부합하는 것이었다. 미국 제작사인 제너럴 일렉트릭과 웨스팅하우스가 이 모델 개발에 주력하게 되고, 이들이 유럽 기술 지원을 주도하게 되면서 경수호는 자연스럽게 시장 확대에 성공하게 되었다.

한편, 독일 등 유럽 국가들에 경수호들이 들어서면서 경수로 기술의 학습 기회도 늘어났다. 여기서 비롯되는 정보의 축적들은 경수호에 대한 신뢰를 높여주었다. 이런 네트워크 외부효과는 가스-흑연 원자로 지지자들의 거둬들인 가압경수호의 낮은 발전 효율과 안전 문제 지적에도 불구하고 경수호의 시장 지배를 막을 수는 없었다(Herring, 2005: 205). 원자력 기술 확보를 전후 국가부흥의 목표와 연계시키면서 원자력 프로그램을 지원한 프랑스의 합류로 경수호는 더 안전한 설계로 여겨진 가스냉각로의 시장 약화를 가속화시켰다.

1960년대 중반까지 원자로 기술의 핵심 과제는 원자로 규모를 키우고 발전 효율을 높여 더 값싼 비용으로 전기를 생산할 수 있게 하는 것에 놓여져 있었다. 발전사들로 하여금 원자력 발전을 선택할 수 있게 하기 위해서는 원자력 발전이 석탄이나 수력 발전에 비해 경제성을 보일 수 있어야 했다. 이를 위해 특히 핵연료 기술 개발이 우선시 되었다(Rippon, 1984: 262). 원자로 사이즈를 키우지 않고 효율을 높이기 위해 연료봉의 크기를 키우는 등의 기술적 변화가 이런 경제성 추구 과정에서 결과하기도 하였다. 제너럴일렉트릭은 비등형 경수호를 개선하여 절반의 가격으로 전기 생산이 가능함을 보임으로써 시장 점유를 높일 수 있었다. 이런 배경에서 가스냉각로 지지자들이 지적하는 안전 문제는 원자로 기술 선택에서 중요한 요인이 되지 못하였다.

물론, 원자로의 안전성 문제가 전혀 제기되지 않았던 것은 아니었다. 1960년대 중반부터 대형 원자로 건설이 계획되면서 이들 원자로가 들어설 부지들에 거주하던 주민들에 의해 반대 운동들이 조직되기 시작했다. 이들 원자로에서 대량의 방사능이

방출되어 지역을 오염시키고 건강을 해칠 수 있다는 것이 이 반대 운동의 이유였다(Walker, 2004: 9). 방사능 누출의 위험 문제는 1970년대 초반 환경 운동 성장과 더불어 사회적 이슈로 부상하게 되었다. 특히 1971년에 미국의 ‘우려하는 과학자 동맹(Union of Concerned Scientists)’이 원자로의 비상노심냉각 장치가 당시 계획된 대형 원자로에 적용될 수 없다는 보고서를 발표하면서 원자로 안전에 대한 우려들을 높여 놓았다(Herring, 2004: 146-147).

그러나 이들 문제제기는 경수로 기술의 안전성에 대한 근원적인 성찰을 결과하지는 못하였다. 여기에는 수출 산업으로 성장하기 시작한 원자력 발전 산업을 보호하고 원자력 기술의 주도권을 유지하고자 한 미국 정부의 적극적인 정책이 있었기 때문이다. 미국 정부는 1974년 위계적인 관료적 태도로 신망을 잃은 AEC로부터 원자로 안전에 관한 규제권을 독립 기관으로 새로 설립한 ‘원자력 규제위원회(NRC)’로 이양하는 정책을 시행하였다. 원자력 진흥과 안전에 관한 규제권을 분리하여 산업계의 이익에 무관하게 원자로 안전 정책을 실행한다는 정부의 의지를 보인 것이었다. 한편, 막 조직되기 시작한 반원전 운동 진영의 문제제기가 미디어를 통해 확산되는 것에도 적절하게 대처하였다(Walker, 2004: 10).

결과적으로 원자로 안전 문제는 정부 주도로 현재의 경수로 발전 설비의 몇몇 기술 장치 개선으로 해결되었다. 미국 원자력위원회에서도 1960년대 중반에 예측한 노심 용융 사고를 근원적으로 방지하는 해결책은 시도하지 않았다. 즉, 경수로의 기본 설계는 그대로 유지된 채, 노심 제어 기술, 전원 차단에 대비한 비상전력장치, 밸브 장치 개선 등만이 이루어졌던 것이다. 이는 당시 전문가들 사이에 공유되고 있던 노심 용융 사고 발생에 대한 인식에서 기인하는 것이기도 했다. 즉, 노심 용융 사고가 발생할 확률은 100만분의 1 정도로 예측되고 있었던 것이다(Hohenemser et al., 1977). 때문에 사고 방지 보다는 사고 발생으로 인한 방사능 누출을 최대한 방지하는 것이 더 중요했고, 따라서 여러 겹의 방호벽을 장치하는 것으로 기본 원칙이 정해졌다(Barkenbus, 1988:49). 사실 이러한 대응은 당시 까지도 원자력 발전 과정에서 결정적인 사고가 발생하지 않았고 발전의 경제성이 우선되고 있던 맥락에서 나온 자연스러운 결과라고 할 수 있다.

그런데, 이러한 안전 규제 정책과 기술 개선들이 원자로의 안전을 보장해줄 수 없다는 것이 1979년 쓰리마일 원전 사고로 드러나게 되었다. 쓰리마일 사고는 가압경수로의 안전성 문제가 구조적으로 내재되어 있다는 점을 드러내주는 것이었다. 강현 시멘트 압력 용기 내에 냉각시스템이 통합되어 비상시 냉각재를 완전히 잃어버린다면 노심 용융이 일어날 수 없는 신행

가스냉각로(Green, 1986)와 같은 다른 유형의 원자로와 달리 경수로는 구조상 냉각재 손실로 인한 노심 용융 사고를 피할 수 없다는 것이었다.

쓰리마일 사고는 미국과 유럽에 즉각적인 반원전 운동 강화로 이어졌고 이는 미국 내 원자력 발전소 건설의 즉각적인 중단을 결과하였다. 또한, 원자력 산업의 침체를 초래하였다. 그러나 경수로의 발전 경로를 바꾸지는 못하였다.

경수로 기술은 쓰리마일 사고 이후로도 70년대 중반에 있었던 기술 개선에서 크게 벗어나지 않았다. 다만, 기술적 보완 이외에 운전자 실수와 같은 인간 오류로 인해 발생할 수 있는 가능성을 대비해서 운전자 훈련을 강화하는 정책이 마련되었다. 비상시 작동 절차(Emergency Operating Procedures)를 정비하여 사고 대비 매뉴얼 개선도 이루어졌다(Denton, 1987: 297).

이런 경향성은 후쿠시마 이전 역사상 최대의 원자력 발전소 사고였던 체르노빌 사고 이후에도 그대로 계속되었다. 섣다른 영향을 받는 시스템들에 대한 전반적인 안전을 평가하고, 제어되지 않는 수소 연소들로 인한 격납고 손상 가능성에 대비하는 것, 격납 건물 파괴가 일어나지 않도록 설계 변경을 하는 것, 노심 용융 사고의 심각한 결과를 완화하는 방식으로 격납 건물 설계를 할 것과 같은 정책들이 보완되었다. 원전 운영을 담당하는 이들에 대한 훈련 강화, 심각한 노심 훼손에 대응하는 전략이나 격납고에 대한 효율적 관리 등이 강조되었을 뿐이다. 즉, 이들 대응책 역시 노심 용융이 일어났을 때 대처할 수 있는 방호벽을 늘리고, 비상 발전 설비를 추가하는 것으로 이전과 다르지 않았던 것이다.

두 차례의 심각한 사고에도 불구하고 경수로 기술은 여전히 원자로 시장을 주도하면서 차세대 원자로 기술의 방향을 결정하고 있다. 체르노빌 사고 이후로 원자력 발전 산업은 침체의 길로 접어들었다. 이 과정에서 원자력 산업의 독점화 경향은 가속되었고 기술 경험 역시 경수로 기술로 한정되어 축적되게 되었다. 세계적으로 원자로 시장이 축소되면서 원자로 제작사들의 합병이 가속화되었고, 신규 기업의 진입은 이루어지지 않았다. 이런 상황에서 기술 개발은 기존 원자로 제작사들에 의해 주도될 수 밖에 없었고, 이들의 기술은 경수로 기술에서 벗어나기 어려웠다. 결국 차세대 원자로 개발은 신행가압경수로 개발로 이어지게 되어, 원자로 기술의 경로 의존성은 더 강화되었다. 대부분의 공학자들 역시 이런 맥락에서 축적된 기술의 개량이 새로운 기술보다 안전을 보장할 수 있다는 결론에 도달했을 것이다.

한편, 체르노빌 이후로 원자로 안전은 이제 원자력 발전 지속 여부를 판정하는 핵심 사안이 되었다. 이런 상황에서 몇몇 핵 관련 엔지니어들이 1980년대 말부터 기존 경수로와는 전혀 다

른 구조와 원리로 작동하는 원자로 개발을 주장하기 시작했다. 이들은 노심 용융을 유발하지 않는 '원래 안전한 원자로' 개발이 원자로 기술에 대한 대중의 신뢰를 회복할 수 있을 것이라고 보았다. 원자력 발전 회사와의 이해관계를 갖지 않았던 이들 엔지니어들은 경수로 선택이 잘못된 것이었으며, 다양한 원자로 가능성들을 여러 갈래로 연구하던 50년대 연구 풍토를 재현할 필요가 있다고 보았다(Barkenbus, 1988). 이들은 원자력 발전 회사들이 계속해서 안전 시스템을 추가하게 되면서 원자로 구조도 복잡해졌을 뿐만 아니라 전기 생산 비용도 증가하게 되었다고 보았다. 이런 비용 증가를 고려하면, 전혀 새로운 원자로로 전기를 생산하는 것이 경제적으로 비합리적인 것이 아니라고 본다. '원래 안전한 원자로'는 노심의 급속한 용융 가능성을 제거하기 위해 기계적 안전 시스템보다는 연료 화학의 변화, 혹은 연료봉 구조 변화에 근거한 안전 시스템 구축을 지향한다. 이런 원자로로 언급되는 것 중의 하나로 모듈식 고온 가스모듈(Modular Hightemperature Gas Reactor) 등이 있다.

이들의 제안은 80년대 말까지만 해도 환상에 불과하다느니 현실적이지 않다느니 하는 비판을 받았으나 2000년에 들어서 4세대 원자로 개발 계획에 반영되기 시작하였다. 경수로가 지배적인 기술로 등장하면서 잊혀졌던 원자로 기술들이 새롭게 주목받게 된 것이다. 즉, 원자로 기술을 둘러싼 담론이 경제 담론에서 안전 담론으로 변화하게 되면서 이들 기술들이 새롭게 조명되기 시작했다. 아직은 이들 기술들 중에서 어떤 기술이 성공하게 될지 예측하기는 어렵다. 원자력 발전 기술 자체를 포기하는 국가가 출현하는 지금의 새로운 정치 사회 맥락이 이에 대한 예측을 더 어렵게 하고 있다. 현재는 원자로 기술에서 안전하다는 것이 무엇을 의미하는가라는 근본적인 의문까지 제기되고 있는 것이다.

III. 결 론

2000년에 결성된 GIF(Generation IV International Forum)에서는 경제성, 안전성, 환경성, 핵확산 방지의 측면에서 현재의 원자로보다 뛰어난 원자로를 설계하고자 한다. 이들 원자로는 현재와는 다른 연료 물질-입자화된 우라늄 연료, 토륨 혼합물 등을 활용하여 농축 우라늄 고갈이나 플루토늄 생성으로 인한 핵확산 가능성에 대비하면서 핵분열로 생성되는 방사성 물질 자체를 줄이고자 한다. 냉각재, 감속재들로서 상대적으로 핵분열 물질을 덜 생산하는 나트륨, 경수보다 화학 반응이 덜한 기체 냉각재 활용 등이 연구되고 있다. 경수로 원자로 개발의 경우와 달리 안전이 설계 과정에서 비중있게 다루어지기 시작했고, 연료 선택에서도 가용성 보다는 낮은 방사성 물질 생성을 고려한다는 점이 과거와 달라진 것이라고 할 수 있다.

그러나 4세대 원자로 대부분이 연료 주기를 고려하여 증식로에 기반하고 있는데, 증식로의 안전은 높은 불확실성을 지니고 있다. 그리고 대안으로 제시되고 있는 기체 냉각재 역시 안전성에 관한 지식이 축적되어 있는 것도 아니다. 그리고 '원래 안전한 원자로'들은 아직은 대규모 지원이 이루어지지 않은 채 주변에 머물고 있다. 2030년을 목표로 하고 있는 이들 원자로가 3세대 플러스를 내놓으면서 발전 경로를 유지하고자 하는 경수로를 대체할 수 있을 것인가? 원자로 기술의 안전을 새로운 원자로 개발로 확보할 것이 아니라 재생에너지와 같은 안전한 에너지원 확보에서 찾아야 한다는 목소리들도 높아지고 있다.

처음부터 경제적인 전력 생산을 목적으로 한 것도 아니고 방사성 물질의 누출을 차단할 수 있는 안전이 강조된 것도 아닌 가압경수로가 국제 정치, 경제 맥락에서 어떻게 주도적인 지위를 차지하게 되었는가를 경수로 역사는 잘 보여주고 있다. 소련과의 경쟁에서 주도권을 유지하고자 한 미국의 경수로 기술의 적극적 지원, 이를 배경으로 성장한 미국 원자로 제작사들의 시장 지배력 확장, 경수로 확산에 따른 기술 학습 기회의 증가와 경수로 소비자 네트워크의 확장이 경수로는 주도적인 원자로 기술로 성장할 수 있었다. 미국의 정책적 지원에 의해 경수로가 원자로형을 주도하면서 원자로 후발주자인 프랑스, 독일, 일본 역시 경수로를 선택하게 되었고, 이에 따라 원자로 시장은 경수로로 수렴될 수 밖에 없었다.

이런 국제 정치, 경제 맥락에서 경수로의 안전성 문제는 이슈가 되기 어려웠고, 관련 공학자들의 기술 선택도 제한적일 수밖에 없었다. 게다가 이미 축적된 기술의 개량이 완전히 새로운 기술보다 안전을 보장해줄 수 있을 것이라는 생각도 공학자들로부터 하여금 경수로 개량을 통한 안전 문제 해결을 추구하도록 하였을 것이다. 완전히 새로운 원자로형의 안전은 사실 이미 학습된 경수로의 안전보다 예측이 불가능하기 때문이다. 원자로의 독점적인 시장 체제 역시 공학자들의 새로운 기술 시도를 어렵게 하였다.

그러나 쓰리마일, 체르노빌과 후쿠시마 사고는 이제 원자로 기술의 안전 문제를 원자로 기술의 핵심 문제로 제기하고 있다. 4세대 원자로 기술에서 환경성과 안정성이 기술 개발의 핵심으로 등장하고 있는 데서도 보이고 있다. 이들 안전 담론이 '원래 안전한 원자로' 기술의 출현을 가능하게 할 지는 원자로를 둘러싼 정치경제적 맥락이 어떻게 변화할 것인가에 달려 있는 것으로 보인다. 공학자들의 안전 기술에 대한 추구 역시 이에 영향을 받게 될 것이다.

참고문헌

1. Barkenbus, Jack N. (1988), "Prospects for inherently safe

- reactors”, *Energy Policy* Feb., pp. 49-57.
2. Cowan, Robin (1990), “Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-In”, *The Journal of Economic History*, 50(3): 541-567.
 3. Denton, H.R. (1987), “The Causes and Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident and Implications for the Regulation of U.S. Nuclear Power Plants”, *Ann.nucl. Energy*, 14(6): 295-315.
 4. Green, David (1986), “AGR v PWR- the debate continue”, *Energy Policy* Feb., pp. 4-8.
 5. Hecht, Gabrielle (1994), “Political Designs: Nuclear Reactors and National Policy in Postwar France”, *Technology and Culture*, 35(4): 657-685.
 6. Herring, Horace (2005), *From Energy Dreams to Nuclear Nightmares. Lessons from the anti-nuclear power movement in the 1970s*, Charlbury: Jon Carpenter Publishing.
 7. Hohenemser, C., R. Kaspersen, and R. W. Kates (1977), “The Distrust of Nuclear Power”, *Science*, 196: 25-43.
 8. Hughes, Thomas P.(1983), *Networks of Power: electrification on Western society, 1880-1930*, London and Baltimore, Md.: The Johns Hopkins University Press.
 9. Jasper, James M. (1992), “Gods, Titans and mortals- Patterns of state involvement in nuclear development”, *Energy Policy* July., pp. 653-659.
 10. Keck, Otto (1980), “The West German fast breeder programm- A case study in governmental decision making”, *Energy Policy* Dec., pp. 277-292.
 11. Mahaffey, James (2010), *Atomic Awakening: A New Look at the History and Future of Nuclear Power*, New York: Pegasus.
 12. Rippon, Simon (1984), “History of the PWR and its worldwide development”, *Energy Policy*, pp. 259-265.
 13. Rüdiger, Wolfgang (1987), “Outcomes of Nuclear Technology Policy: Do Varying Political Styles Make a Difference?”, *Journal of Public Policy*, 7(4): 389-430.
 14. Rush, Howard J., Mackerron, Gordon and John Surrey (1977), “The Advanced Gas-cooled Reactor- A case study in reactor choice”, *Energy Policy* June, pp. 95-102.
 15. Walker, J. Samuel (2004), *Three Miles Island. A Nuclear Crisis in Historical Perspective*, Berkeley and Los Angeles: The University of California Press.



박진희 (Jin Hee Park)

서울대자연과학대학 물리학과 졸업
 베를린공대 과학기술사학과 석,박사 졸업
 현재: 동국대학교 교양교육원 조교수 재직
 E-mail: park0227@gmail.com