

# 거시환경요인과 복합제품시스템의 기술진화: 원자력 발전 플랜트의 사례를 중심으로\*

곽기호\*\* · 김원준\*\*\* · 김민기\*\*\*\* · 조창연\*\*\*\*\*

## <목 차>

- I. 서론
- II. 이론적 배경
- III. 원자력 발전 플랜트 기술진화와  
정책 · 경제 · 사회적 요인의 영향
- IV. 결론

**국문초록** : 복합제품시스템이란 고도의 엔지니어링과 설계 기술이 집약되어 있는 복잡한 시스템 형태의 제품으로 국가 경제 발전 및 에너지, 교통, 통신 등 사회 인프라 구축과 밀접하게 연계되어 있다. 이에 따라 복합제품시스템의 기술진화를 이해하기 위해서는 기술개발 주체의 기술진보 노력을 넘어서 복합제품시스템을 둘러싼 거시환경요인이 기술진화에 미친 영향을 복합적으로 고찰하는 것이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 원자력 발전 플랜트 사례를 중심으로 복합제품시스템 기술진화에 대한 정책, 경제, 그리고 사회적 요인의 영향을 종단적으로 서술하였다. 인터뷰에 기반한 1차 자료와 다양한 참고 문헌에 기반한 2차 자료를 복합적으로 활용한 결과, 원전 기술의 진화는 “원자력의 평화적 활용을 위한 응용연구”(1950

\* 이 논문은 2015년도 정부재원(교육과학기술부 인문사회연구역량강화사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2015-S1A3A-2046742).

\*\* 부경대학교 기술경영전문대학원 기술경영학과 조교수, 제1저자 (cloudnine@pknu.ac.kr)

\*\*\* 한국과학기술원 기술경영학과 부교수, 공동저자 (wonjoon.kim@kaist.edu)

\*\*\*\* 한국과학기술원 경영대학 조교수, 공동저자 (minki.kim@kaist.ac.kr)

\*\*\*\*\* 한국원자력연구원 감사부, 교신저자 (cycho@kaeri.re.kr)

년대~1960년대), “원자력 발전 시장 확산-1차 르네상스”(1970년대), “원자력 발전 안전성 제고와 후발국의 추격”(1980년대~2000년대 후반), 그리고 “원자력 발전 시장 2차 르네상스를 위한 안전성의 최우선화와 차세대 원자로 기술 개발”(2010년대 후반~현재)의 4단계에 걸쳐 진행되는 것으로 나타났다. 또한 각 단계별 기술진화에 있어 각국의 에너지 정책과 원자력 발전 연구개발 투자와 같은 정책적 요인, 경기 사이클에 의한 전력 수요의 변화, 전력원 간 경쟁과 같은 경제적 요인, 그리고 안전성에 대한 사회적 수용과 환경오염에 대한 인식 등의 사회적 요인 등이 중요한 영향을 미쳤음을 확인하였다. 본 사례 연구는 보다 거시적인 관점에서 복합제품시스템의 기술진화를 고찰할 수 있는 이론적 접근방법을 제시하였다는 점에서 그 의미가 있다. 따라서 복합제품시스템을 육성하고자 하는 국가들은 기술개발 투자와 노력뿐 아니라 정책과 경제, 사회적 요인을 통합적으로 고려하여 이를 기술진화에 활용하기 위한 노력을 경주해야 할 것이다.

주제어 : 복합제품시스템, 기술진화, 거시환경요인, 원자력 발전 플랜트

---

---

# Macro-environmental Drivers and Technological Evolution of Complex Product System: Evidence from Nuclear Power Plant

Kiho Kwak · Wonjoon Kim · Minki Kim · Chang Yeon Cho

---

---

**Abstract :** Complex product systems (CoPs) is a engineering-intensive products with high-ended design technology, which are closely linked with national economic growth and development of social infrastructures. Accordingly, in order to understand the technological evolution of CoPs, it is necessary to identify the macro-environmental drivers surrounding the CoPs and their impact on the technological evolution of the CoPS. Therefore, we investigate the effect of policy, economic and social drivers on the technological evolution of CoPS by implementing the longitudinal case study on nuclear power plant during the periods between 1950 and 2010s. Based on the analysis of various sources of secondary data and primary data through interviews, we found that the technological evolution of nuclear power plant is progressed as “Phase 1: Application research for peaceful utilization of nuclear energy” between 1950s and 1960s, “Phase 2: The first renaissance of nuclear energy” during 1970s, “Phase 3: Enhancement of safety and the catch-up of latecomers in nuclear energy” between 1990s and 2000s, and “Phase 4: Top prioritization of safety and the development of next generation reactors for the second renaissance of nuclear energy” since 2010s. We also found that various kinds of policy, economic and social drivers, such as energy policy, investment in technology development, economic growth and energy demand, social acceptability and environmental concern, have affected the technology evolution of nuclear power plant at each phase. We emphasize the role of macro-environmental drivers in the technological evolution of CoPS. We also suggest that countries that endeavor to develop CoPs need to utilize those drivers for enhancing competitiveness and sustaining leadership.

Key Words : Complex product system, Technological evolution, Macro-environmental drivers, Nuclear power plant

## I. 서론

원자력 발전은 원자로에서의 핵분열 과정에서 생성되는 열로 물을 끓여 발생시킨 수증기로 전기에너지를 생산하는 것을 의미하며, 이는 설비를 갖춘 플랜트(이하 원자력 발전 플랜트)를 통해 구현된다(한국과학기술기획평가원, 2010a). 1956년 세계 최초의 원자력 발전 플랜트인 영국의 ‘칼더홀 1호기’가 건설된 이래 원자력 발전 플랜트는 저렴한 발전단가, 낮은 온실가스 배출, 발전소 장기 운영 등의 장점을 바탕으로 보급이 지속 확대되었다. 그 결과 2015년 말 현재 총 441기의 원자력 발전 플랜트(발전 용량 378 GW)가 운영 중에 있으며, 최근에는 중국, 러시아, 인도, UAE 등 신흥국을 중심으로 신규건설이 진행되고 있다(미래창조과학부, 2016). 우리나라는 1978년 고리 1호기의 상업 운전을 시작으로 2015년 말 현재 총 24기의 원자력 발전 플랜트(발전 용량 22 GW)를 운영하고 있으며, 원자력 발전 플랜트를 통해 2015년 연간 157,196 Gwh의 전력을 생산하고 있다(미래창조과학부, 2016).

그러나 1979년 미국 스리마일 원자력 발전 플랜트의 원자로 노심 용융사고, 1986년 우크라이나 체르노빌 원자력 발전 플랜트의 방사능 누출 사고에서 알 수 있듯이 원자력 발전 플랜트는 방사능 누출로 인한 건강위협과 환경오염 등 막대한 위험도 내포하고 있다. 실제로 두 사고로 인해 1990년대~2000년대 중반까지 세계 원자력 발전 플랜트 건설은 급격히 감소하였으며, 원자력 발전 플랜트를 보유한 미국 및 유럽 국가는 가동 중인 발전소의 단계적 폐기를 결정하였다. 이후 신흥국의 경제 성장에 따른 전력 소비 증가에 따라 2000년대 말 원자력 발전 플랜트 건설은 다시 빠르게 증가하였으나, 2011년 일본 후쿠시마 원자력 발전 플랜트의 수소폭발 및 방사능 누출 사고로 인해 원자력 발전 플랜트의 안전에 대한 사회적 우려가 다시 전세계적으로 급격히 커지게 되었다(김경신 & 조희선, 2015; Kim et al., 2013). 이에 따라 세계 원자력 발전 플랜트 신규 건설은 다시 급감하고, 유럽 주요 국가는 원자력 발전 활용을 전면 중단하겠다는 정책을 발표하였다(Schneider et al., 2012; Kunsch and Friesewinkel, 2014). 반면 우리나라 및 프랑스와 같이 전력 수급에 있어 원자력 발전에 대한 의존도가 높은 국가들은 원자력 발전에 대한 안전성을 제고하기 위한 정책을 강화함과 동시에 동 기술에 대한 사회적 신뢰 제고에 많은 노력을 기울이고 있다(Kim et al., 2014). 이러한 논의는 원자력 발전 플랜트 기술이 다양한 경제(Economy), 정책(Policy) 및 사회의 기술 수용(Social acceptance) 이슈에 직면해왔으며, 이들로부터 상당한 영향을 받으면서 진화해 왔음을 시사한다.

이와 같은 원자력 발전 플랜트의 진화에 대한 경제, 정책, 그리고 사회적 요인의 영향은 복합제품시스템(Complex Product System, CoPS)로 정의되는 원자력 발전 플랜트 고유의 기술혁신 특성에서도 확인할 수 있다(Hobday, 1998). 복합제품시스템이란 고도의 엔지니어링과 설계 기술이 집약되어 있는 복잡한 시스템 형태의 제품으로, 원자력 발전 플랜트, 항공기 엔진, 전투기, 이동통신 시스템, 철도 교통 시스템, 복합화력 발전용 가스터빈 등을 그 예로 들 수 있다(Dedehayir et al., 2014; Hobday, 1998; Park, 2013; 박기호 & 박주형, 2016). 이와 같은 복합제품시스템은 국가 경제 발전뿐 아니라 에너지, 교통, 통신 등 사회 인프라 구축과 밀접하게 연계되어있기 때문에 정부의 정책적 개입이 매우 높은 편이다(Davies and Brady, 1998; 송위진 et al., 1999). 이와 같은 복합제품시스템의 기술혁신 특성으로 말미암아 복합제품시스템의 기술진화는 단순히 기술 자체로서의 발전이 아닌 복합제품시스템을 둘러싼 사회적 영향력과 환경(Social forces and setting)에 의해 달성되거나 가속화된다고(Bijker et al., 1987; Hughes, 1983; Mayntz and Hughes, 1988; Summerton, 1995; Walker, 2000).

상기 논의로부터 우리는 원자력 발전 플랜트의 기술진화를 이해하기 위해서는 기술 자체의 복잡성뿐 아니라 거시환경요인(Macro-environmental drivers)의 영향력에 대한 고찰이 필요함을 확인할 수 있다. 그러나 원자력 발전 플랜트의 진화와 관련된 기존 논의는 플랫폼 설계 기술 확보를 통한 우리나라의 기술 추격(Son and Choung, 2014) 또는 원자력 발전기술에 대한 우리나라 사회의 수용과 인식(김경신 & 조희선, 2015; 이민재 et al., 2014; 최현도 & 안종욱, 2015; 한장희, 2012; 한장희 & 고영희, 2013), 그리고 우리나라의 원자력 발전기술 정책 수립과정과 영향(윤순진 & 오은정, 2006; 진상현, 2009) 등 각 개념이나 현상 별로 독립적으로 진행되거나, 우리나라와 관련된 이슈에 초점을 두고 있다. 다시 말해 전 지구적 거시환경요인의 관점에서 이들 요인이 어떻게 원자력 발전 플랜트의 진화에 영향을 미쳤는지를 통합적으로 고찰한 논의는 이루어지지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 복합제품시스템의 혁신 관점에서 원자력 발전 플랜트를 이해하고, 1950년대 이후 본 기술의 진화에 대한 거시환경요인의 영향을 역사적 회고 방식(Retrospective way)을 통해 고찰하였다. 이를 위해 원자력 발전 플랜트 개발과 관련한 시대별 국내외 거시환경요인을 보여주는 보고서, 학술논문 등 다양한 2차 자료와 우리나라의 원자력 분야 대표 연구기관 및 대학교 소속 전문가 인터뷰에 기반한 1차 자료를 동시에 활용하였으며, 기술진화를 둘러싼 거시환경요인의 도출은 복합제품시스템의 기술진화에 관한 기존 문헌 고찰과 Carroll and Buchholtz(2003)의 분석 틀(Analytical Framework)을 기반으로 정책, 경제, 사회를 중심으로 진행하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. II장에서는 복합제품시스템으로서의 원자력 발전 플랜트에 대한 이해와 함께 거시환경요인으로써 정책, 경제, 사회적 요인이 복합제품시스템의 기술진화에 미치는 영향을 분석하기 위한 분석 틀을 제시한다. 이어 III장에서는 원자력 발전 플랜트의 기술진화와 함께 정책, 경제, 사회적 요인이 본 기술의 진화에 미친 영향을 고찰한다. 마지막 IV장에서는 본 연구의 결론으로써 연구결과의 요약 및 시사점, 그리고 향후 연구에 대해 논의한다.

## II. 이론적 배경

### 1. 복합제품시스템으로서의 원자력 발전 플랜트

앞서 정의한 복합제품시스템에서 ‘복합(Complex)’은 동 제품이 다양한 맞춤형 생산형 부품으로 구성되어 있으며, 제품과 부품 혁신에 다양한 분야의 지식과 기술, 그리고 이해관계자를 요구함을 의미한다(Hobday, 1998; 황혜란, 1999). 이에 따라 동 시스템의 개발에는 다양한 기업 및 이해 집단이 참여하는 특성을 확인할 수 있다. 또한 ‘시스템(System)’은 부품과 부품 간 네트워크 구조, 그리고 부품의 기능 제어 관점에서 이해할 수 있다. 다시 말해 시스템이란 개별 목표를 가지는 하위 시스템들이 시스템 공통의 목표를 달성하기 위해 상호 연결된 집합체를 의미하며, 궁극적으로 이들 단위 시스템 간 상호의존관계의 제어를 통해 복합제품시스템 전체의 효율성과 성능이 결정되는 것을 의미한다(Hobday, 1998; Markard and Truffer, 2006). 이에 따라 복합제품시스템의 혁신은 기존 기술역량의 누적에 기반한 경로의존적 특성이 강한 동시에 유동적인 제품 혁신이 지속되는 특성을 가진다(Markard and Truffer, 2006). 또한 ‘복합’과 ‘시스템’ 특성으로 인해 동 기술의 개발 시 안전, 인증, 신뢰성, 환경오염과 관련한 정부 및 규제·표준 기관의 강도 높은 개입이 이루어지기도 한다(Dedehayir et al., 2014; 광기호 & 박주형, 2016). 더불어 이러한 특성은 복합제품시스템의 역할을 경제 시스템 내의 다양한 요소들과 상호작용하는 공공 인프라스트럭처로 규정하기도 한다(Lee and Yoon, 2015; Markard & Truffer, 2006).

상기 살펴본 복합제품시스템의 ‘복합’과 ‘시스템’ 특성을 통해 우리는 원자력 발전 플랜트가 복합제품시스템의 기술혁신 특성을 보유하고 있음을 확인할 수 있다(Markard

and Truffer, 2006; Son and Choung, 2014; Walker, 2000). 먼저 원자력 발전 플랜트는 원자로뿐 아니라 핵분열, 증기 발생 및 이송, 중성자 감속, 압력 변화 제한 등 복잡한 기능을 수행하기 위한 엔지니어링 집약적 부품들이 계통(Sub System) 별로 구성되어 있으며, 계통과 부품 간의 복잡한 상호작용 및 제어를 통해 구동된다. 또한 이들 부품은 고부가가치 특성을 갖고 있어 매우 비쌀 뿐 아니라 제품수명주기도 매우 긴 편이다. 일례로 우리나라가 국산화에 성공한 APR1400 기반 원자력 발전 플랜트는 설계수명이 60년에 달하며, 1기 당 가격도 50억 달러(아랍에미리트 수주가격 기준)에 이른다<sup>1)</sup>(심의섭, 2011). 이에 따라 경험에 의한 학습과 기술역량 축적이 오랜 기간에 걸쳐 진행되기 때문에(Lester and McCabe, 1993), 원자력 발전 플랜트에 대한 후발국가의 추격은 어려운 것이 사실이다(Son and Choung, 2014).

또한 원자력 발전 플랜트는 방사능 누출 등 안전사고에 매우 민감하고, 국가적 에너지 공급과의 밀접한 관련 때문에 관련 규제가 매우 강한 편이다. 원자력 발전 플랜트의 안전 시험을 위해 오랜 기간에 걸쳐 설계 기술에 대한 검증이 소요되며 고도의 시뮬레이션 과정을 거친다(Thomas, 1988). 실제로 우리나라에서는 2011년 10월부터 원자력의 안전 규제 업무를 총괄 수행하는 기관으로 원자력안전위원회를 설립하였으며, 산하에 원자력 안전기술원, 원자력통제기술원, 원자력안전재단을 운영하는 등 안전 관련 규제 기능을 강화한 바 있다. 특히 원자력 발전에 대한 의존도가 높은 우리나라의 경우 에너지 수급에 대한 범정부 계획인 ‘에너지기본계획’, ‘전력수급기본계획’을 통해 원자력 발전 정책을 폭넓게 수립하고 개선 작업을 추진하고 있다.

## 2. 복합제품시스템의 기술진화

### — 정책, 경제, 사회적 요인의 영향에 대한 분석 틀

상기 살펴본 복합제품시스템의 ‘복합’과 ‘시스템’ 특성은 동 기술의 진화에 있어 다양한 거시환경요인이 영향을 미침을 시사한다. 본 절에서는 복합제품시스템의 기술진화 및 산업의 성장을 둘러싼 거시환경요인의 영향력을 분석하는 기존 연구 고찰을 통해 복합제품시스템의 기술진화에 영향을 미치는 세부 요인을 발굴하고자 하였다. 먼저 Hobday(1998)는 복합제품시스템의 기술진화 속도는 시장 규제와 관련한 정책과 수요 등에 의존함을 설명하였고, Walker(2000)는 영국의 산화물 연료 재처리 플랜트에 대한 사

1) 원자력 발전플랜트 4기에 대한 아랍에미리트 수주 금액 200억 달러 기준으로 산출함



레 연구를 통해 복합제품시스템의 개발을 위해서는 다양한 유형의 헌신(commitment)이 필요함을 주장하고, 특히 관련 프로젝트에 대한 이해관계 조정, 규제, 옹호의 입장에서 영국 정부의 정책적 역할과 산화물 연료의 재처리를 의뢰하는 타 국가 정부의 정책적 보조를 강조하였다. 또한 Markard and Truffer(2006)는 소비자의 발전 사업자 선택권 확대, 발전, 송배전, 전력 거래, 수요 예측 등의 분야의 신규 사업자 진입 등을 포함하는 시장 경쟁구조의 변화가 발전 분야 혁신 활동의 다양성을 높임을 연료전지에 대한 사례 연구를 통해 규명한 바 있다. 한편 Mayntz and Hughes(1988)의 연구에서는 철도, 전력, 인터넷 등의 사례연구를 통해 복합제품시스템은 그것을 사용하는 사회가 바람직하다고 생각하는 방향(Desirability)과 수용성(Acceptability)을 반영하여 사회적으로 구축됨을 설명하였다. 최근에는 이란의 발전용 가스터빈에 대한 사례 연구를 통해 복합제품시스템의 기술 추격에는 정부 정책 연계, 국내 수요 확대와 같은 우호적 경제적 요인이 추격 성과에 긍정적인 영향을 미침을 제시한 바 있다.(Kiamehr et al., 2015).

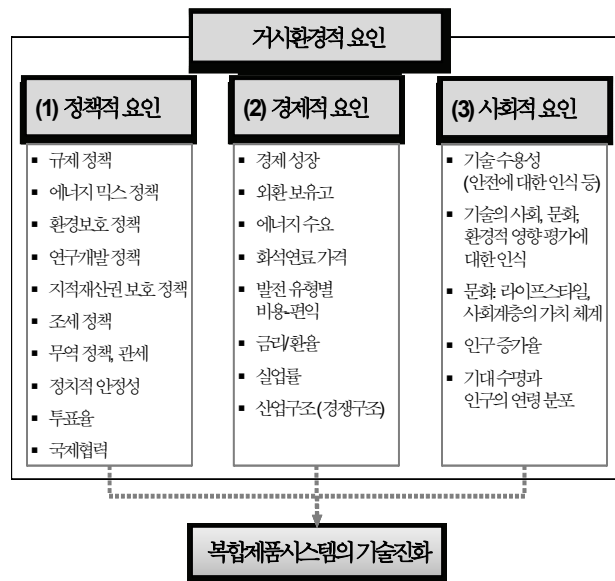
상기 제시한 기존 연구를 종합하면, 복합제품시스템의 기술진화에 영향을 미치는 거시환경 세부 요인은 크게 정책, 경제, 사회적 요인으로 정리할 수 있다. 이는 기업 및 산업의 성장에 중요한 영향을 미치는 거시환경요인으로 사회적(Society), 기술적(Technology), 경제적(Economy), 정책적(Policy) 요인을 제시한 Carroll and Buchholtz (2003)와 연계하여 이해할 수 있다. 특히 기술적 요인은 특허 보호, 연구개발 투자, 대학 설립 등 기술혁신과 관련한 정책의 관점에서 이해할 수 있다. 다시 말해 복합제품시스템의 기술진화는 대량생산제품과는 달리 ‘복합’과 ‘시스템’ 특성으로 인해 정책, 경제, 사회 등 다양한 거시환경요인과의 깊은 수준의 상호작용을 통해 달성된다는 것이다. 이와 관련하여 Kash and Rycroft(2002)는 복합제품시스템의 기술혁신은 경제적인 보상과 무관하게 거시환경요인과의 상호작용을 통해서 발생할 수 있으며, 광범위한 사회와 정치 구조, 그리고 문화적 규범에 의해서 혁신의 방향이 정립됨을 주장하였다.

실제로 우리는 상기 제시된 정책, 경제, 사회적 요인이 원자력 발전 플랜트의 이용과 보급 확산에 미친 영향에 대한 연구들을 다수 살펴볼 수 있다. Geels and Verhees (2011)는 1950년대~1980년대 네덜란드의 원자력 발전 플랜트 확산과 쇠퇴가 신념과 규범에 기반한 대중의 기술 수용을 의미하는 사회문화적 정당성(Legitimacy)과 그 정당성 속의 정책적 의사결정과 경제적 요인에 많은 영향을 받았음을 고찰하였다. 한편 Valentine and Sovacool(2010)은 에너지 수요와 공급의 발생은 과학과 공학적 영역을 넘어 특정 기술의 진화를 지지하는 기술, 사회, 정책, 경제적 요인으로 구성된 사회·기술 시스템(Socio-technical System) 내에서 이루어진다는 Hughes(1983)의 이론을 활용하여



일본의 원자력 발전 이용의 확산을 경제 발전을 위한 정부의 중앙집중적 에너지 정책 지원, 그리고 국가 발전을 위해서는 개인의 희생을 감내하는 일본 국민의 원자력 발전 플랜트에 대한 높은 사회적 수용의 관점에서 논의하였다. 이러한 논의는 비단 원자력 발전의 이용뿐 아니라 이용을 위한 기술진화에서도 정책, 경제, 사회적 요인이 미치는 영향이 큼을 시사하고 있다.

이에 따라 본 연구에서도 원자력 발전 플랜트(이하 원전)의 기술진화를 이해하기 위해 고려해야 할 거시환경요인으로 정책, 경제, 사회적 요인을 상정하고, 이들의 영향을 통합적으로 고찰하고자 한다. 예를 들어 에너지 안보 등의 관점에서 정부정책은 원전의 기술진화를 지원할 수 있을 것이다. 또한 경제 성장에 따른 전력 수요 증가, 화석 연료 가격상승 등의 경제적 요인은 원전의 기술진화에 긍정적인 역할을 할 수 있을 것이다. 한편 방사능 누출에 따른 인류의 생명에 대한 우려와 이에 따른 사회적 수용 등은 안전 및 규제 강화 측면에서 원전의 기술진화에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 이와 같은 원전 기술 혁신에 있어 정책, 경제, 사회적 요인의 중요성은 OECD(2007)의 원자력 발전 플랜트 기술의 특징과 추동 요인뿐 아니라 토픽 모델링 기법에 기반한 우리나라 국민의 원자력 발전에 대한 인식을 조사한 최현도와 안종욱의 연구(2015)에서도 확인할 수 있다. 본 연구의 분석 틀을 도식화하면 아래 <그림 1>과 같다.



주: 정책, 경제, 사회적 요인의 세부 요인은 예시적으로 기술

<그림 1> 거시환경요인이 복합제품시스템 기술진화에 미치는 영향에 대한 분석 틀

### Ⅲ. 원자력 발전 플랜트 기술진화와 정책, 경제, 사회적 요인의 영향

정책, 경제, 그리고 사회적 요인이 원자력 발전 플랜트 기술진화에 미친 영향을 고찰하기 위해 본 연구는 체계적이고 귀납적인 자료 수집과 분석을 통한 이론 정립을 목적으로 하는 토대이론(Grounded Theory)을 적용하였다(Glaser and Strauss, 1967). 따라서 본 연구는 1·2차 자료를 분해, 비교, 할당, 통합, 및 정제하는 이론적 코딩(Theoretical Coding)과 자료 간 상호작용과 연계를 파악하는 축 코딩(Axial Coding) 방식을 활용하였다(Glaser and Strauss, 1967; Strauss and Corbin, 1990). 이를 통해 본 연구는 1950년대~2010년대에 발생한 원전 기술진화와 이에 대한 거시환경요인의 영향을 기술진화의 패턴에 따라 시기별로 구분하고자 하였다.

상기 연구방법에 따라 본 연구는 원자력 발전 플랜트 개발과 관련한 시대별 국내외 정책, 경제, 사회적 사건을 확인할 수 있는 보고서, 학술논문 등 다양한 2차 자료와 우리나라의 원자력 분야 대표 연구기관의 전문가 인터뷰에 기반한 1차 자료를 동시에 활용하는 자료 삼각측정법(Data Triangulation)을 활용하였다. 1차 자료 수집과 분석은 2차 자료 수집의 신뢰성을 제고하고, 분석 결과에 대한 이해를 체계화하는데 활용하였으며(Eisenhardt, 1989; Voss et al., 2002), 결과적으로 실증의 연쇄(Chain of Evidence)를 구축함으로써 본 연구의 논의를 강화하는데 기여하였다(Beverland and Lindgreen, 2010; Yin, 2003). 더불어 연구자 전원이 자료 수집과 분석에 팀으로 참여하는 연구자 삼각측정법(Investigator Triangulation)을 활용하여 자료 수집 및 편의(Bias)를 제거하고자 하였다(Yin, 2008). 결과적으로 본 연구는 다중 삼각 측정법(Multiple Triangulation)을 적용함으로써 연구 결과의 타당성과 신뢰성을 제고하였다. 마지막으로 본 연구는 1950년대부터 현재에 이르기까지 약 60여년의 시간에 걸쳐 원자력 발전 플랜트의 기술진화를 고찰하는 종단적 연구(Longitudinal research) 방법을 사용하였다. 이를 통해 연구 결과에 대한 해석적 편의를 보정하고, 기술진화를 둘러싼 다양한 현상과 과정을 상세히 고찰하였다(Barratt et al., 2011; Siggelkow, 2007).

## 1. 원자력 발전 플랜트 기술진화

일반적으로 원자력 발전 플랜트(이하 원전) 기술은 원자로의 세대 별 진화에 따라 I 세대, II 세대, III 세대, III+ 세대, IV 세대로 분류할 수 있다(Goldberg and Rosner, 2011; OECD, 2007). 먼저 I 세대는 1950~1960년대 개발된 기술로 영국의 칼더홀(1956년~2003년), 미국의 시핑포트(1957년~1982년) 등이 대표적이다(Fischer, 1997). I 세대 원전은 국방 분야에 사용된 기술의 성숙도를 높이고, 발전용으로의 상용화를 위한 기술 검증(Proof of Concept)의 성격을 가졌다(Azevedo, 2011; Goldberg and Rosner, 2011). II 세대는 1970~1980년대에 개발된 경제성과 신뢰성이 확보된 상용화 원전의 효시로, 농축 우라늄 핵연료를 사용하는 경수로(LWR) 원자로를 채택하고 있다. 경수로 원자로에는 가압경수로(PWR)과 비등경수로(BWR) 등이 포함되며, 이 밖에도 다양한 원자로 설계 기술이 출현된 가운데 미국의 Westinghouse, Framatome(現, AREVA) GE 등이 II 세대 원전 시장을 선도하였다. 2005년 우리나라가 한국 표준형 원전으로 최초 개발한 OPR 1000도 II 세대 원전에 속한다. II 세대 원전은 40년의 운영 수명을 확보하였으며, 이에 따라 현재 운영 중인 대부분의 원전이 II 세대 원전이다(한국수출입은행, 2015). 이어 III 세대 원전은 스리마일 및 체르노빌 원전 사고가 발생한 이후인 1990년대에 설계된 원전으로 II 세대 원전에 비해 안전성 제고와 장기간의 운영 수명을 확보한 것이 특징이다. 진화된 형태의 BWR(Advanced BWR, Westinghouse)과 Advanced PWR(GE), 우리나라의 APR1400이 III 세대 원전에 해당한다(Goldberg and Rosner, 2011). 이중 우리나라의 APR1400은 Advanced PWR의 한 종류로 2009년 말 아랍에미리트 수출(4기)에 이어 2016년 12월 말 신고리 3호기 가동에 들어가는 등 후발국으로서의 기술추격은 물론 III 세대 원전 중 가장 뛰어난 가동성과를 보이고 있다(Son and Choung, 2014; 전자신문, 2016; 한국일보, 2016). 이밖에 III+ 세대는 2010년대 중반을 전후로 보급이 시작된 기술로 III 세대 원전에 비해 단순하면서도 수동적인 설계 기술을 도입함으로써 발전 용량 확대, 경제성 제고 및 천재지변에 따른 블랙아웃(대규모 정전) 등 예외적인 상황에서도 안전을 보장한 것이 특징이다(Goldberg and Rosner, 2011; 뉴시스, 2015; 수출입은행, 2015). 우리나라의 경우 III+ 세대의 원전으로 2014년 8월에 APR+에 대한 기술개발을 완료하였다(뉴시스, 2015). 마지막 IV 세대 원전은 III, III+ 세대에 비해 지속가능성, 안전성, 경제성, 핵확산 저항성을 획기적으로 개선한 차세대 원자로로 2030년 이후 상용화가 예상된다(GIF, 2014). 2002년 원자력 국제포럼(GIF)에서는 소듐냉각고속로(SFR), 초고온가스로

(VHTR), 용융염로(MSR), 가스냉각고속로(GFR), 납냉각고속로(LFR), 초임계수냉각로(SCWR)를 IV세대 원전 후보 모델로 제안하였으며(Kessides, 2012), 우리나라는 소듐냉각고속로(SFR)와 초고온가스로(VHTR)를 선택하여 개발 중이다(한국과학기술기획평가원, 2010b).

원자로의 세대 별 진화에 대한 분석을 통해 우리는 원전 기술진화가 기초·응용연구(I세대)를 거쳐 발전용 기술 확립을 통한 시장 확산(II세대), 사고 발생에 따른 안전성 확보 및 운영 수명 확대, 그리고 이를 위한 설계 표준화와 지배적 설계 정립(III세대)을 거쳐 지배적 설계 기술의 점진적 혁신을 통한 안전성 제고와 발전용량 확대(III+세대)를 달성해왔음을 확인하였다. 아울러 최근 안전성 지속 제고와 폐 핵연료 처리, 우라늄 자원 고갈의 문제 대응을 위한 IV세대 원전 기술개발이 본격화됨을 이해하였다. 이를 토대로 본 연구에서는 1950년대~2010년대에 발생한 원전 기술진화를 아래 <그림 2>와 같이 크게 4개 기간으로 구분하였다. 첫 번째 기간은 1950년대~1960년대로 “원자력의 평화적 활용을 위한 응용연구” 시기로 명명할 수 있으며, 두 번째 기간은 1970년의 “원자력 발전 시장 확산 - 1차 르네상스” 시기로 부를 수 있다. 이어 세 번째 기간은 1980년대~2000년대 후반의 “원자력 발전 안전성 제고와 후발국의 추격”으로 이해할 수 있으며, 마지막 네 번째 기간은 2010년대~현재의 “원자력 발전 시장 2차 르네상스를 위한 안전성의 최우선화와 차세대 원자로 기술 개발” 시기로 정의하였다. 이후 논의에서는 편의상 4개 기간을 1기, 2기, 3기, 4기로 부른다.

시대 구분	1 1950년대~1960년대	2 1970년대	3 1980년대~2000년대 후반	4 2010년대~현재
	“원자력의 평화적 활용을 위한 응용연구”	“원자력 발전 시장 확산 - 1차 르네상스”	“원자력 발전 안전성 제고와 후발국의 추격”	“원자력 발전 안전성의 최우선화와 원자력 발전 시장 2차 르네상스를 위한 차세대 원자로 기술 개발”
기술 진화	<ul style="list-style-type: none"> <li>기술 검증(Proof of Concept)과 1세대 원전의 태동               <ul style="list-style-type: none"> <li>잠수함 추진기관용 기술의 발전 분야</li> <li>용융 (PWR 방식, Pressurized Water Reactor)</li> <li>시제품 형태의 원자로</li> <li>경제성 확보를 위한 노력</li> </ul> </li> <li>주요 원자력 발전소 (발전용량)               <ul style="list-style-type: none"> <li>영국 칼더홀 1호기(60MW)</li> <li>미국 시핑포트(100MW)</li> <li>일본 도카이부라(166MW)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2세대 상용 원자로의 본격 도입               <ul style="list-style-type: none"> <li>경제성(규모의 경제 효과, 대량화)과 신뢰성 확보</li> <li>운전수명 40년</li> <li>다양한 원자로 설계 기술의 등장: PWR, PHWR, BWR, AGR(GCR) 등</li> </ul> </li> <li>주요 기업 등장: GE, Westinghouse, AREVA 등</li> <li>주요 원자력 발전소 (발전용량)               <ul style="list-style-type: none"> <li>브레드우드 1,2호기(1,120MW)</li> <li>고리 1호기(587MW)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>원자로 기술의 지배적 디자인 정립(3세대 원자로)과 안전성 제고               <ul style="list-style-type: none"> <li>수(피)동력 설계기술 도입</li> <li>운전수명 제고: 60년</li> <li>인적 오류의 극복을 위한 기술 개발과 안전기준, 규제 마련</li> <li>지배적 디자인 정립: PWR</li> </ul> </li> <li>주요 원자력 발전소(발전용량)               <ul style="list-style-type: none"> <li>프랑스 Civaux (1,495MW, PWR)</li> <li>영광 5/6호기 (1,000MW, PWR)</li> </ul> </li> <li>후발국의 추격               <ul style="list-style-type: none"> <li>프랑스의 원자로 설계 표준화와 3세대 원전 가동(N4, 1996년)</li> <li>한국 표준형 원전 가동: OPR 1000 (1998년, 2세대, PWR)</li> <li>우리나라의 APR1400 (3세대, PWR) 상용화(2007년) 및 아랍에미리트 수출(4기, 2009년)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3세대 원자로 점진적 혁신(3세대+)               <ul style="list-style-type: none"> <li>안전성 최우선화: 수(피)동력 설계기술 확산, 3세대 대피 대원사고 가능성 지속 감소</li> <li>원전 건설기간 단축을 위한 모듈화 공법 적용 확산</li> </ul> </li> <li>주요 원자력 발전소(발전용량)               <ul style="list-style-type: none"> <li>중국 하이양 (1,100MW, AP1000, PWR) (2017년 6월)</li> </ul> </li> <li>2011년 일본 후쿠시마 다이치 원자력 발전 플랜트의 수소폭발 및 방사능 누출 사고</li> <li>4세대 원자로 제품 혁신을 위한 6대 후보 모델 개발 중: SFR, VHTR, MSR, GFR, LFR, SCWR</li> </ul>

주: 1980년대의 경우 스리마일(1979) 및 체르노빌(1986) 원전 사고로 인해 원자력 발전 시장이 침체에 빠짐  
 자료: Goldberg and Rosner(2011), OECD(2007) 등의 문헌 조사 및 전문가 인터뷰를 통한 연구자 조사

<그림 2> 원자력 발전 플랜트의 기술 진화

## 2. 정책, 경제, 사회적 요인의 영향

본 절에서는 1차 자료와 2차 자료를 통합적으로 활용하여 원전 기술진화와 관련된 주요 정책, 경제, 사회적 요인을 도출하고, 이들 요인이 원전 기술진화에 미친 영향을 탐색적으로 고찰하였다. 그 결과는 <그림 3>과 같다. 정책, 경제, 사회적 요인을 시각적으로 구분하였으며, 이를 통해 각 요인들이 시기별로 어떻게 동태적으로 변화하였는지를 이해할 수 있도록 하였다. 각 시기별로 원전 기술진화에 영향을 미친 정책, 경제, 사회적 요인에 대한 상세한 서술은 세부 절에 제시하였다.

시대 구분	1 1950년대~1960년대	2 1970년대	3 1980년대~2000년대 후반	4 2010년대~현재
	“원자력의 평화적 활용을 위한 응용연구”	“원자력 발전 시장 확산 - 1차 트네상스”	“원자력 발전 안전성 제고와 후발국의 추격”	“원자력 발전 안전성의 최우선화와 원자력 발전 시장 2차 트네상스를 위한 차세대 원자로 기술 개발”
정책, 경제, 사회적 요인	미국 아이젠하워의 “평화를 위한 원자력? 선언 (1953)과 국제적 기술 확산	미국 전력시장의 풀링(Pooling) 제도 확산	미국의 신규 원전 건설 전면 중단 발표와 안전성 제고 기술 개발 지원	독일, 벨기에, 이탈리아 등 유럽국의 신규 원전 건설 전면 중단 정책
	미국 원자로 실증 프로그램(Power Demonstration Reactor Program, PDRP) 수립 (1955)	원전 산업 육성 정책 본격화 <ul style="list-style-type: none"> <li>우리나라: 우리나라의 원전 기자재 국산화 지원 정책 병행</li> <li>일본: 플루토늄 기반 원전 기술 개발 및 수출 동력화</li> </ul>	프랑스와 우리나라의 사회적 수용 제고를 위한 법 제정과 기관 설립	PWR 및 BWR 액연로인 우라늄 235의 고갈 대비
	세계적인 에너지 수요 증가	1, 2차 석유 파동(Oil Shock)과 석탄 가격 상승	후발국의 추격 정책 <ul style="list-style-type: none"> <li>우리나라: OPR1000(1,000MW)</li> <li>프랑스: N4 (1,450MW)</li> </ul>	신용국 중심의 원전 발주: 전력 수요 증가와 비용 절감 니즈 증대
	사회의 후호적 인식: 평화적 이용에 따른 경제 성장과 삶의 질 향상에 기여	석탄화력발전의 대기오염 유발 문제 부각	세계 경제 성장 둔화와 에너지 수요 감소, 천연가스 가격 하락	후쿠시마 사고로 인한 원자력 발전에 대한 대중 인식 악화 심화
기술 진화	<ul style="list-style-type: none"> <li>기술 검증(Proof of Concept)과 1세대 원전의 태동</li> <li>감수할 추진기관용 기술의 발전 분야</li> <li>용융 (PWR 방식, Pressurized Water Reactor)</li> <li>시제품 형태의 원자로</li> <li>경제성 확보를 위한 노력</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2세대 상용 원자로의 본격 도입</li> <li>경제성(규모의 경제 효과, 대형화)과 신뢰성 확보</li> <li>운전수명 40년</li> <li>다양한 원자로 설계 기술의 등장: PWR, PHWR, BWR, AGR(GCR) 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>원자로 기술의 지배적 디자인 정립 (3세대 원자로)과 안전성 제고</li> <li>수(수)동적 설계기술 도입</li> <li>운전수명 제고: 60년</li> <li>인적 오류의 극복을 위한 기술 개발과 안전기준, 규제 마련</li> <li>지배적 디자인 정립: PWR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3세대 원자로 점진적 혁신(3세대+)</li> <li>안전성 최우선화: 수(수)동적 설계기술 확산, 3세대 대비 대형사고 가능성 지속 감소</li> <li>원전 건설기간 단축을 위한 모듈화 공법 적용 확산</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>주요 원자력 발전소 (발전용량)</li> <li>- 영국 칼더홀 1호기(60MW)</li> <li>- 미국 시핑포트(100MW)</li> <li>- 일본 도카이부리(166MW)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>주요 기업 등장: GE, Westinghouse, AREVA 등</li> <li>주요 원자력 발전소 (발전용량)</li> <li>- 브래드워드 1,2호기(1,120MW)</li> <li>- 고리 1호기(587MW)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>주요 원자력 발전소(발전용량)</li> <li>- 프랑스 Civaux (1,495MW, PWR)</li> <li>- 영광 5/6호기 (1,000MW, PWR)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>주요 원자력 발전소(발전용량)</li> <li>- 중국 하이양 (1,100MW, AP1000, PWR) (2017년 6월)</li> <li>2011년 일본 후쿠시마 다이치 원자력 발전 플랜트의 수소폭발 및 방사능 누출 사고</li> <li>4세대 원자로 제품 혁신을 위한 6대 후보 모델 개발 중: SFR, VHTR, MSR, GFR, LFR, SCWR</li> </ul>

주:   정책적 요인,   경제적 요인,   사회적 요인

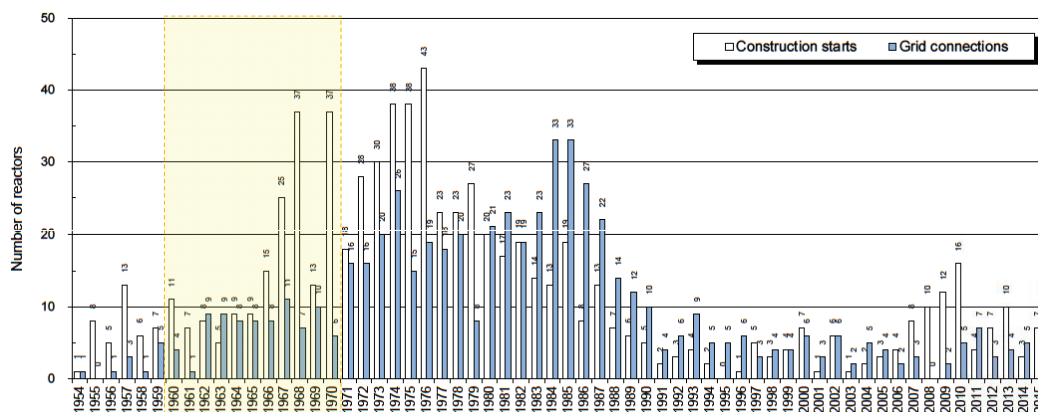
<그림 3> 원자력 발전 플랜트의 기술 진화에 영향을 미친 정책, 경제, 사회적 요인

### 2.1 1기(1950년대~1960년대), “원자력의 평화적 활용을 위한 응용연구”

먼저 1기의 발전용으로의 기술진화에 영향을 미친 정책적 요인을 고찰해보면 1945년 제2차 세계 대전 종료 후 새로운 에너지원에 대한 기대에 따른 정책 지원이 원전 기술진화를 촉진한 것으로 판단된다. 특히 미국의 경우 제2차 세계 대전 이후 구소련과 체체

경쟁관계에 있었고, 이에 따라 냉전시대가 시작됨에 따라 핵무기 경쟁과 더불어, 민수용 원자로 기술개발에서 우위를 점하기 위한 정책적 지원이 다수 촉발되었다. 이는 서유럽 국가도 마찬가지였는데, 이러한 현상을 ‘원자력 발전 경주(the nuclear power race)’라고 하였다(Walker and Wellock, 2010). 이러한 정책의 대표적인 사례는 1953년 UN 총회에서 미국 아이젠하워대통령의 “평화를 위한 원자력(atoms for peace)” 선언이다. 본 선언은 농축우라늄과 같은 중요한 핵연료 물질의 국제 판매와 함께 미국의 원자력 기술을 국제적으로 확산함으로써 세계 원자력 발전 시장에서 우위를 확보하기 위한 목적에서 비롯되었다(윤순진 & 오은정, 2006). 또한 미국은 자국 기업에 자금 지원을 통해 민간 주도의 R&D 및 국방용 추진기관을 개량한 시제품 형태의 I 세대 원전 건설을 독려했으며(Thomas, 1988), 1955년 원자로 실증 프로그램(Power Demonstration Reactor Program, PDRP) 수립을 통해 민간의 기술혁신을 체계적으로 지원하였다(Buck, 1983). 이를 통해 미국은 1957년 12월에 가압경수로 방식의 시핑포트 원전을 운영하는데 성공하였다(윤순진 & 오은정, 2006).

미국의 “평화를 위한 원자력” 선언 이후 가장 빠르게 대응한 국가는 일본이었다. 일본은 1954년 235백만 엔의 원전 R&D 예산을 배정하고, 도시바, 히타치, 미츠비시, 후지전자 등의 기업을 중심으로 기술 개발을 추진하였다. 이후 1955년 원자력 기본법 정립과 함께 1956년 일본원자력연구소, 1957년 일본원자력개발주식회사를 연이어 설립하였으며, 1965년 영국 칼더 홀 원전기술 도입 계약을 통해 도카이무라 원전(166MW)의 운영에 성공하였다(타쿠마 마사오, 2006; 서동주, 2014; 윤순진 et al., 2011).



자료: International Atomic Energy Agency (2016), *Nuclear Power Reactors in the World*, Vienna: IAEA

<그림 4> 연도별 세계 원자력 발전 플랜트 신규 건설 및 운영 현황



1기의 원전 기술 진화에 영향을 미친 경제적 요인은 제2차 세계대전 이후의 세계적인 전력 수요 증가였다. 일례로 미국은 1950년대부터 1960년대 후반까지 전년대비 에너지 소비 증가율이 매년 5~10%에 이르렀고(EIA, 1994), 1965년~1970년 세계평균 에너지 소비 증가율 또한 연평균 6%에 달했다(BP, 2016). 이에 따라 미국, 벨기에, 캐나다, 영국, 스웨덴 등 세계 각국에서 원전이 건설되기 시작하였다(윤순진 et al., 2011; IAEA, 2016). 위의 <그림 4>에서도 알 수 있듯이 1960년~1970년 사이 착공된 원전의 수는 모두 177기에 이른다(IAEA, 2016).

상기 언급한 정책적 요인과 경제적 요인은 당시 원전 기술진화의 걸림돌이었던 낮은 경제성을 극복할 수 있는 기회로 작용하였다. 실제로 Rossin and Rieck (1978)의 연구에 따르면 1960년대 중후반까지 미국 내 원전의 kW 당 건설 비용은 석탄화력발전소에 비해 약 30% 가량 비쌌다. 또한 Lovering et al.(2016)의 자료를 활용하여 산출한 미국 원전 평균 건설 비용(2010년 기준)은 1950년대~1960년대 21.8 달러/MW로 1970년대(4.0 달러/MW)에 비해 5배 이상 높았다. 이는 단순히 경제성의 관점에서는 전력 원으로서의 원전의 가치가 매우 낮았음을 시사한다. 그러나 앞서 언급한 “평화를 위한 원자력” 선언과 같은 정책적 지원, 그리고 전력 수요 증가와 같은 경제적 요인에 대한 대응 필요성 확대는 경제성 확보 노력의 관점에서 1기 원전 기술의 진화에 긍정적인 영향을 미쳤다.

한편 1기의 경우 원전기술에 대한 사회적 인식은 우호적인 것으로 확인되었다. 1기의 원전 기술진화를 주도한 미국에서는 원전 기술진화를 가속화하는 것에서는 이견이 없었으며, 원전이 경제성장과 삶의 질 향상에 기여할 것이라는 기대가 사회전반에 확산되어 있었다(임성호, 1996). 이는 1950년대~1960년대 원전에 대한 미국 국민의 전폭적 지지를 확인한 설문조사에서도 확인할 수 있다(임성호, 1996; Balogh, 1991). 일본 또한 히로시마와 나가사키의 원자폭탄 투하에도 불구하고 ‘원자력=평화적 이용’이라는 우호적 인식이 제2차 세계대전 후 고도 성장기(1954년~1973년) 동안 광범위하게 지지되었다(서동주, 2014). 특히 일본의 최대 신문사인 요미우리신문은 원전에 대한 대중의 우호적 인식을 확산하기 위해 박람회 개최·홍보, 사설 게재 등 다양한 대중 이벤트를 전국적으로 개최하는데 크게 기여하였다(서동주, 2014).

## 2.2 2기(1970년대), “원자력 발전 시장 확산—1차 르네상스”

2기는 “Great bandwagon market”이라고 불리며 발주량과 설계 발전 용량의 대형화 관점에서 원전 시장이 본격 성장한 시기이다. <그림 4>에서도 알 수 있듯이 2기의 전



세계 원전 착공 건수는 268건으로 직전 10년 대비 50% 이상 증가하였다. 연구자의 조사 결과, 아래 <표 1>과 같이 동기간 미국의 원전 수주 실적은 161건으로 1기 대비 2배 가까이 증가하였으며, 설계 발전 용량도 36.1%나 증가하였다(EIA, 1997). 이와 같은 원전 기술진화의 원인은 정책적 요인 관점에서 미국 전력 시장의 풀링(Pooling) 제도 확산을 꼽을 수 있다(Walker and Wellock, 2010). 전력 시장 풀링 제도란 발전소 간 상호 연계를 통해 잉여 전력을 판매할 수 있는 제도로 광역 시장의 이점을 살리기 위한 정책으로 이해할 수 있다(에너지경제연구원, 2001). 원전의 경우 대형화를 통한 규모의 경제 효과를 누릴 수 있었기 때문에, 본 제도의 실시는 화석 연료 기반 발전소 대비 강력한 경쟁우위로 작용하였다(Walker and Wellock, 2010). 이에 따라 원전 설계 발전 용량은 2기에 1,000MW급으로 가파르게 상승하였으며, 이에 따라 2기에는 가압경수로(PWR), 가압중수로(PHWR), 비등경수로(BWR), 개량형 기체냉각식 원자로(AGR), 가압수형 원자로(VVER)과 같은 다양한 원자로 설계 기술이 등장하여 빠른 성장·대형화되는 원전 시장의 주도권을 확보코자 하였다. 한편으로 이러한 다양한 설계 기술 등장은 원자로의 기술적 검증이나 운영 자료 축적의 부족, 기자재 가동의 불안전성 등 기술적 불확실성을 높이는 결과를 야기하였다. 이에 따라 미국 정부는 원전 기술진화를 촉진하기 위해서는 원자력 진흥 정책과 규제 정책을 분리할 필요성을 인식하였고, 1974년에 이르러 원자력위원회(AEC)를 진흥 정책을 담당하는 에너지연구 개발청(ERDA)과 규제 정책을 담당하는 원자력규제위원회(NRC)로 개편하게 된다.

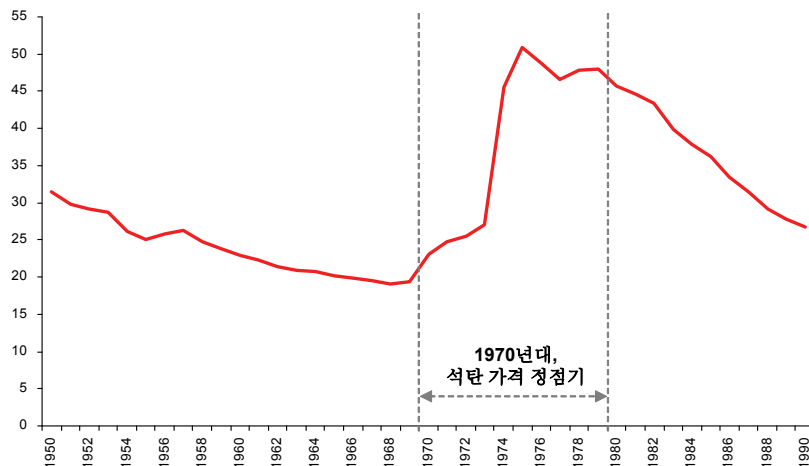
<표 1> 미국의 1950년대~1970년대 원자력 발전 플랜트 발주 동향

시기	발주 원전 수(기)	평균 설계 발전 용량(MW)
1950년대~1960년대	88	803.2
1950년대	6	139.5
1960년대	82	851.8
1970년대	161	1,092.8

자료: EIA(1997)에 기반하여 연구자 재구성

2기 원전 기술진화를 더욱 가속화시킨 경제적 요인으로는 각각 1973년과 1979년에 발생한 1, 2차 석유 파동(Oil Shock)이다. 2차례의 석유파동은 화석연료가 부족한 우리나라와 일본으로 하여금 적극적인 에너지 정책 수립의 필요성을 시사하였으며, 이에 따라 우리나라는 1978년 4월 최초의 원전으로 고리 1호기(587MW)를 가동하기에 이른다. 특히 우리나라 정부는 원전의 가동뿐 아니라 경제적 과급효과 및 에너지 안보의 극대화를 위

해 고리 3, 4호기부터 원전 기자재 국산화 지원 정책을 병행하였다. 그 결과 고리 3, 4호기의 29%, 영광 1, 2호기의 35%, 영광 3, 4호기 기자재의 74% 가량을 국산화하는데 성공하였다(윤순진 et al., 2011). 1차 석유 파동 발생 당시 연평균 10%가 넘는 전력 사용량 증가를 기록하던 일본 또한 경제성과 환경문제를 고려할 때 석유와 석탄을 대체할 수 있는 에너지원으로 원자력 발전이 최선의 선택임을 확인하고, 우라늄을 재처리하여 얻을 수 있는 플루토늄을 연료로 하는 원전 정책까지 추진하게 된다(윤순진 & 오은정, 2006; 新東亞, 2006a). 또한 일본 정부는 원전 기술을 에너지 자립뿐 아니라 주력 수출 상품으로 인식하고 이러한 정책이 국가의 지속 가능한 성장의 핵심으로 인식하였다(Valentine and Sovacool, 2010). 이밖에도 벨기에 또한 1, 2차 석유 파동을 계기로 전력원의 다양화와 분산 공급을 목적으로 원전 건설과 기술 확보 노력을 본격화하였다. 1975년 2월에 벨기에 최초의 원자력발전소인 도엘(Doel) 1호기(41.2만 kW)가 운전을 개시하였으며, 현재 가동 중인 원전 8기 모두 1, 2차 석유 파동 전후에 건설된 바 있다(IAEA, 2016). 또한 동시기 원전의 지속 가동의 관점에서 벨기에 원자력 연구소(SCK-CEN)을 중심으로 방사성 폐기물의 안전 처리와 관련한 기술 개발을 병행하였다.



자료: EIA (2004), *Annual Energy Review 2004*, Washington DC: EIA. 활용하여 연구자 재구성

<그림 5> 미국 석탄가격 추이(1950~1990, 달러/톤)

사회적 요인 관점에서는 1960년대 말~1970년대 초부터 본격적으로 대두된 석탄화력 발전에 대한 대기 오염 문제가 원전 기술의 친환경적 강점을 부각하는데 긍정적인 영향을 미쳤다. 실제로 발전부문에 대한 환경평가가 1970년대부터 본격화되고, 석탄화력발전

이 탄소 등 온실가스 배출의 주범으로 인식됨에 따라(Gielecki and Hewlett, 1994), 사회 전반에서 원전이 석탄화력 발전의 환경오염 비용을 극복할 좋은 대안이라는 인식이 확산되기 시작하였다(Walker and Wellock, 2010). 이는 1970년대 원전 시장의 1차 르네상스 기간 동안 원전의 찬성론자들의 중요한 근거로 작용하였으며, 원전 기술 혁신에 새로운 동력으로 작용하였다. 이와 같은 원전 옹호론은 1, 2차 석유 파동 이후 화석연료원을 석탄으로 변경하는 과정에서 나타난 석탄 가격 폭등 속에서 더욱 힘을 얻었다. 실제로 EIA(2004)에 따르면 당시 석탄 가격은 1970년 톤당 23.0달러에서 1975년 50.9달러로 2배 이상 상승하였다(그림 5).

### 2.3 3기(1980년대~2000년대 후반), “원자력 발전 안전성 제고와 후발국의 추격”

3기는 1979년 스리마일 원자로 노심 용융사고, 1986년 체르노빌 원자력 발전 플랜트의 방사능 누출 사고로 인해 급격히 확산된 노심 용융(Core Meltdown), 따뜻한 폐수 배출에 따른 해양 생태계의 열적 오염(Thermal Pollution) 등의 안전성 논쟁을 불식시키기 위한 노력이 집중적으로 전개된 시기이다. 양대 사고로 인해 미국은 1980년대 이후 ‘신규 원전 건설 전면 중단’이라는 정책을 펴게 되었고, 이미 주문되었던 원전의 발주가 대부분 철회되는 위기에 직면하였다(Davies, 2012; EIA, 1997).<sup>2)</sup> 이는 두 사고가 원전의 위험성에 대한 강력한 실증적 증거로써 작용하였으며, 에너지 정책에서 원전 확대를 저지하는 결정적 요인으로 작용하였음을 의미한다.

실제로 두 사고는 사회적으로는 원전 기술에 대한 대중의 우려와 안전성 논쟁을 폭발적으로 일으키게 된 계기가 되었다. 네덜란드의 경우 두 사고로 인해 반핵 운동이 급격히 확대되었으며, 안전성 확보에 대한 실제적 증명을 요구하는 여론이 확산됨에 따라 원전 확대 정책이 폐기되기에 이른다(Geels and Verhees, 2011). 일본과 핀란드 등의 원전 보유 국가에서도 체르노빌 사고 이후 원전에 대한 부정적 인식이 급격히 전개되었으며, 부정적 인식이 긍정적 인식을 상회하는 기간이 상당기간 지속되었다(OECD, 2010). 이 밖에도 Hohenemser and Renn(1988)의 연구에서 체르노빌 사고 이후 유럽 국가들의 원전 운영에 대한 반대 여론이 급격히 높아짐이 확인되었으며, 미국의 경우 자신의 거주 지역에 신규 원전 건설을 반대하는 응답 비율이 1976년 45%에서 스리마일 사고(1979년) 이후

2) 실제로 미국의 신규 원전 건설은 2013년까지 중단되었다(IAEA, 2016).

60%, 체르노빌 사고(1986년) 이후 70%까지 상승하였다(Renn, 1990). 이러한 논의는 당시 원전의 안전성에 대한 대중의 두려움 확대, 신뢰성 감소, 그리고 이로 인한 사회적 수용성 약화가 일부 지역 또는 국가에 국한된 문제가 아닌 전지구적인 문제였음을 시사한다.

이에 따라 동 시기의 원전 기술진화를 위한 정책 지원의 패러다임 또한 대형화, 규모의 경제효과 확보에서 안전성 제고를 위한 피동형 설계를 적용한 장기 운전수명원자로 개발, 인적 오류의 극복, 설계 표준화 추진, 그리고 지배적 설계 정립으로 바뀌게 된다. 먼저 안전성 제고의 관점에서 미국의 Westinghouse는 1986년부터 이루어진 미국 에너지부(Department of Energy)의 지원에 힘입어 사고 발생 시 작업자의 투입 없이도 스스로 원자로 냉각이 가능한 피동형(Passive) 안전 설계기술을 적용한 가압경수로(PWR) 노형의 III세대 원자로 모델 AP600을 개발하였다 (Conway, 1988). 1999년 AP600이 미국 원자력규제위원회로부터 설계 인증을 획득함으로써 세계 원자력 산업은 중대사고 발생 확률을 II세대 대비 90% 이상 감소시켰으며, 60년의 운전수명(Operating Life) 시대를 열게 된다(IAEA, 2011).

동 시기 원전 안전성 제고를 위한 또 다른 정책 지원은 인적오류(Human Error)의 극복이다. 스리마일과 체르노빌 사고의 주요 원인이 현장 운전원의 실수, 상황 대처 과정에서 명령체계의 혼란과 같은 인간의 개입에 의한 오류로 지적됨에 따라 이를 해결하기 위한 기술 개발 지원이 크게 증가하였다. 대표적으로 원전의 상태감시 및 제어, 보호 등을 담당하는 계측제어시스템(Man-Machine Interface System) 개발, 운전원 훈련을 위한 시뮬레이터 개발에 대한 지원이 동 시기에 본격 진행되었다(Swaton, et al. 1987). 특히 계측제어시스템은 1990년대 이후 디지털 방식으로 전환됨에 따라 더욱 빠른 성장을 달성하였다. 또한 다중방호개념(Defense-in-depth), 공학적 안전 설비(Engineered Safety Features), 미국 연방법 상의 일반설계기준(General Design Criteria)과 같은 다양한 안전 기준과 규제가 개발되어 원자로 설계에 적용되었다.

또한 원자로 설계의 표준화 정책은 경험 기반의 원전 인력 훈련에서 인증 기반의 원전 인력 훈련으로의 전환을 통한 원전 가동 신뢰성 제고, 심각 사고 발생 시의 대처 능력 제고, 그리고 원전 인력의 체계적 양성을 가능하게 하였다(David and Rothwell, 1996). 실제로 원자로 설계 표준화는 경험과 지식의 축적을 통해 설계 상의 오류를 사전에 탐지할 수 있는 확률을 크게 향상시키는데 기여하였다. 대표적으로 프랑스는 1980년대부터 가압경수로(PWR) 타입의 원자로 설계 표준화 정책 지원을 통해 원전 운영의 안전성을 제고하고자 하였다. 그 결과 프랑스는 1990년대 중반~2000년대 초에 걸쳐 III세대 원자로의 독자적인 설계 표준을 정립하였으며 현재 6개의 원자로 설계 표준을 보유하는 등

세계 최고 수준의 표준화를 달성하였다(WNA, 2017b; 오승규, 2015). 더불어 프랑스는 설계 표준 확보를 통해 원전 건설비용, 부품 교체, 유지보수 비용을 획기적으로 절감할 수 있었으며, 1980년 중반 이후 미국 보다 낮은 원전 건설 및 운영비용을 달성하는데 성공하였다(Dickson, 1986). 이에 따라 프랑스는 1980년대 이후 중국 및 우리나라(한울 1, 2호기) 등으로의 수출에도 성공하게 된다.

이러한 기술진화 노력은 결과적으로 가압경수로(PWR)라는 원자로 기술의 지배적 설계(Dominant Design)<sup>3)</sup> 정립을 촉발하였다. 가압경수로로는 경쟁기술인 비등경수로(BWR) 방식에 비해 발전 효율은 떨어지지만(PWR 33%, BWR 37%) 사고 시 노심 냉각 제어, 사용 후 연료 저장 안정성 측면에서 더 안전한 기술로 알려져 있다(안승규, 2012; 한국수력원자력, 2011). 실제로 가압경수로 방식은 1980년대 이후 시장 점유율이 급격히 상승하였는데, IAEA(2016)에 기반한 연구자의 분석결과 1950년대~70년대의 가압경수로 원전 건설 비중은 44.3%에 머물렀으나, 1980년대~2000년대 후반의 가압경수로 원전 건설 비중은 67.9%로 크게 증가하였다. 그 결과 2015년 12월 현재 가동 중인 원전의 63.9%, 건설 중인 원전의 85.1%가 가압경수로 방식을 채택하고 있다(표 2).<sup>4)</sup> 이와 같은 가압경수로 방식에서의 지배적 설계 정립은 이후의 원전 기술 진화가 무수히 많은 실험(Trial and Error)에 기반한 급진적 혁신보다는 점진적 혁신을 견인함을 시사한다(Abernathy, 1978; Tushman and Rosenkopf, 1992).

<표 2> 가동 및 건설 중인 원자로 유형 별 점유율(원자로 수 기준)

원자로 유형	가동 중		건설 중	
	전세계	미국/일본	전세계	미국/일본
PWR	63.9%	59.4%	85.1%	81.0%
BWR	17.7%	40.6%	6.0% <sup>1)</sup>	19.0% <sup>1)</sup>
PHWR	11.1%	0%	1.5%	0%
기타(GCR, LWGR, FBR 등)	7.3%	0%	7.5%	0%
계	100%	100%	100%	100%

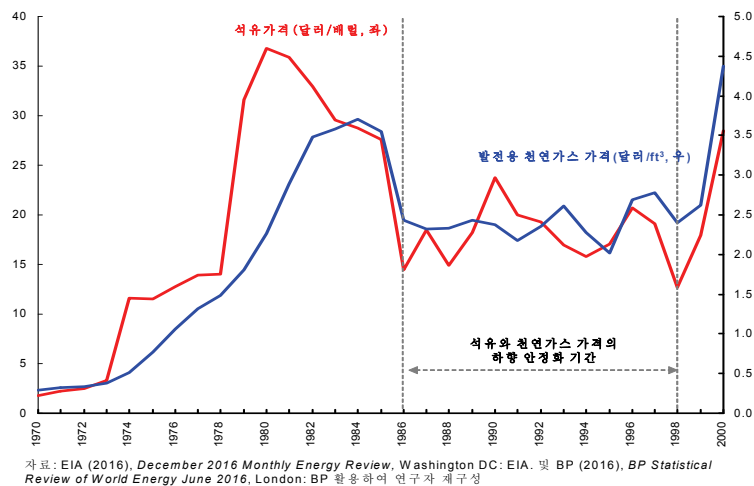
주1: 일본 내에서만 건설 중

자료: IAEA(2016)에 기반하여 연구자 재구성

3) 공식적으로 표준으로 지정되지는 않았으나 시장에서 사실상 표준(de-facto standard)으로서의 지배력을 갖춘 설계를 의미하며, 지배적 설계가 정립된 이후에는 혁신의 패턴이 제품 혁신에서 공정혁신으로 전환됨(Schilling, 2010; Utterback, 1994)

4) 비등경수로(BWR)의 경우 개발사인 GE, 히타치, 도시바에 의해 자국(일본, 미국)을 중심으로 보급되었으나, 건설 중인 원전에서의 채택률은 일본을 제외하고는 세계적으로 전무(표 2).

1990년대 초부터 이어진 세계 경제 성장 둔화와 그에 따른 에너지 수요 감소, 그리고 천연가스와 석유 가격 하락과 같은 경제적 요인 또한 III기에서의 원전 기술의 지배적 설계 정립에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 1980년대 중후반 연평균 3.8%에 이르던 세계 경제성장률은 1990년대 초중반 2.1%로 1.7%p 하락하였으며, 이로 인해 동 기간 에너지 수요 증가는 연평균 2.3%에서 0.9%로 1.4%p 하락하였다(World Bank, 2017; EC, 1997). 또한 시추 및 생산기술의 발전, 신규 유전·가스전의 지속 개발, 그리고 걸프전의 조기 종결로 인한 석유와 천연가스 가격의 하향 안정화는 원전 기술의 수요 감소에 직간접적 영향을 미쳤다. 아래 <그림 6>에서 확인할 수 있는 바와 같이 1980년대 중후반부터 1990년대 후반에 걸쳐 석유와 전력용 천연가스 가격은 각각 배럴당 17.8달러, 입방피트당 2.5달러로 매우 낮은 수준을 기록하였다. 특히 이러한 경제적 요인은 미국의 장기간 지속된 ‘신규 원전 건설 전면 중단’ 정책과 결합되어 원전 분야 주요 기업의 재무 상태를 지속적으로 악화시켰으며, 시장에서의 생존을 위한 다수의 기업 간 인수합병(M&A)을 야기하였다. 이와 같은 불황기 기업 간 인수합병은 급진적 혁신을 위한 신규 연구개발투자보다는 기업들이 보유한 기술 통합 및 가압경수로(PWR)로의 지배적 설계 정립을 견인한 것으로 판단된다.5)



<그림 6> 세계 석유 및 발전용 천연가스 가격 추이(1970~2000)

5) 스리마일 사고의 원자로를 제작한 미국의 Babcock&Wilcox(PWR 주력)는 1987년 Framatome (PWR 주력)에 인수되었으며, 미국의 Combustion Engineering(PWR 주력) 또한 1990년 과도한 부채를 견디지 못하고 ABB(BWR 주력)에 인수되었다. 이후 2000년 ABB는 원자력 사업부문을 다시 Westinghouse(PWR 주력)에 매각. 또한 2001년 독일 Siemens(PHWR 주력)는 원자력 사업부를 프랑스의 Framatome(PWR 주력)에 매각함.



한편 3기의 정책과 경제, 사회적 요인은 원전 후발국의 기술추격을 촉진하는 계기로도 작용하였다. 당시 전 세계적인 경제 성장 둔화와 천연가스와 석유 가격 하락, 그리고 스리마일과 체르노빌 사고의 여파에 따른 정책 중단과 사회적 불안 극대화가 결합되면서 원전 발주가 전세계적으로 급감하였고(그림 4), 이에 따라 세계 원전시장은 공급자 주도 시장에서 수요자 주도 시장으로 변화하였다(진상현, 2009). 이는 원전기술을 추격하기 위해 노력하던 프랑스와 우리나라에게 좋은 기회로 작용하였다. 먼저 프랑스의 Framatome은 미국의 Westinghouse과 정보공유 협정(Information Sharing Agreement, 1981년~1992년)을 통해 원자로 제작의 원천기술을 확보할 수 있는 기회를 확보하였고, 이후 Westinghouse 기술에 대한 지속적인 학습을 통해 1996년 이후 III세대 원자로 기술(1,450MW, N4 원자로)에 대한 독자적인 설계 표준을 확립하는데 성공하였다(新東亞, 2006b; NewYork Times, 1981)<sup>6)</sup>. 우리나라 또한 1987년 4월 Combustion Engineering과의 기술협력 계약 체결(1987년~1997년)을 통해 원전 기술의 도입뿐 아니라 한국형 원자로를 설계, 제작, 판매할 수 있는 기회를 확보하였다(진상현, 2009).<sup>7)</sup> 이를 통해 우리나라는 한울 3호기 가동일 기준으로 1998년 8월 독자적인 원자로 설계 기술인 OPR1000(II세대, 舊 KSNP)을 확보하였다. OPR1000을 탑재한 원전은 한울(울진) 3~6호기, 한빛(영광) 5~6호기, 신고리 1~2호기, 신월성 1~2호기 등 총 10기이다. 또한 우리나라는 1992년부터 G7 프로젝트(1992년~2001년)을 통해 III세대 원자로 독자 설계 기술 개발에 투자, 2007년 APR1400을 신고리 3호기에 탑재하는데 성공하였으며, 이후 2009년 말에는 아랍에미리트 바카라 원전에 4기를 수출하는데 성공하였다. 이에 따라 우리나라는 미국, 프랑스, 캐나다, 러시아, 일본에 이어 세계 6위의 원전 수출국가가 되었다(Hindmarsh and Priestley, 2015). 신고리 3호기는 2016년 12월 21일부터 상업운전 중이며, 아랍에미리트 바카라 원전 1호기는 2017년 5월부터 상업운전을 목표로 하고 있다. 이러한 원전 수요 감소에 따른 프랑스와 우리나라의 원자로 원천기술 확보 성과는 이와 같은 급격한 수요 감소가 후발국에게 추격을 위한 기회로 작용할 수 있다는 Lee and Marlerba(2017)의 주장과도 그 맥을 같이하고 있다.

이밖에 프랑스와 우리나라는 원전 기술 추격의 성공을 위해 기술개발 투자뿐 아니라 사회적 수용성을 높이기 위한 다양한 노력도 전개하였다. 프랑스는 2006년 원전 정책과

6) N4 원자로는 프랑스 Chooz 1호기(1996년 가동 시작) 등 총 4기가 운영 중에 있음

7) 시장 점유율 1위 기업인 Westinghouse가 프랑스와 정보공유 협정을 체결한 이후 2위 기업인 Combustion Engineering은 위기의식을 느끼고 보다 적극적으로 기술협력 계약에 나섬(新東亞, 2006c)



관련한 정보제공 청구권을 부여하기 위한 TSN 법 제정뿐 아니라, 독립 위원회 구성을 통한 주민토론 등 공론화, 다양한 매체를 통한 홍보와 국민 의견 수렴 등 원전기술에 대한 사회적 수용성을 높이기 위한 다양한 정책을 추진하고 있다.(오승규, 2015). 우리나라 또한 1990년 안면도의 핵 폐기장 반대 시위 이후 원전에 대한 사회적 수용성을 높이기 위한 홍보를 강화하였다. 이를 위해 1992년 원자력문화재단을 설립하고 원자력에 대한 인지와 이해, 신뢰를 확보하고자 하였으며, 이 밖에도 원전의 우수성을 부각하는 프로그램 개발, 웹홍보, 간행물 발간, 전시회 개최 등과 같은 다양한 홍보활동을 수행하고 있다(윤순진, 2011). 그 결과 우리나라 국민의 원자력 발전에 대한 긍정적 인식은 2016년 기준 80% 수준에 달하며, 필요하지 않다는 의견은 3.5%에 불과한 것으로 나타났다(한국원자력문화재단, 2016). 이와 같은 원자력 발전에 대한 사회의 긍정적 수용은 지속적인 원전 기술축적과 추격 성과에도 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

## 2.4 4기(2010년대~현재), “원자력 발전 시장 2차 르네상스를 위한 안전성의 최우선화와 차세대 원자로 기술 개발”

마지막으로 4기는 III세대 원자로 기술의 점진적 혁신을 통한 안전성의 최우선화와 급진적 혁신을 의미하는 차세대 원자로 기술 개발이 본격 시작되는 시기로 이해할 수 있다. 먼저 III세대+ 원자로 기술의 혁신은 피동형 안전 설계기술 범위의 확대를 통한 노심 손상과 같은 중대사고 빈도를 3세대 대비 크게 줄이는 데에 초점을 두고 있다. 아래 <표 3>에서도 확인할 수 있듯이 3세대+ 주요 원자로는 안전계통의 부품과 구조물, 하위 시스템에 대한 외부 전원, 이동형 기계 부품, 유체, 그리고 제어 신호의 입력이 없이도 원자로 냉각이 가능한 피동 설계를 통해 중대사고빈도를 지속적으로 낮추는 방향으로 진화되어 왔다. III세대 이후 지배적 설계로 자리매김한 가압경수로(PWR)뿐 아니라 비등경수로(BWR) 기술을 보유한 GE, Hitachi, Toshiba 또한 안전계통 설계의 피동화를 통해 가압경수로(PWR)에 빼앗긴 시장 지배력을 되찾아오기 위한 노력을 경주하고 있다. 우리나라의 한국수력원자력 또한 2014년 8월에 안전계통의 일부분에 피동형 설계를 적용한 III+세대 원자로인 APR+에 대한 표준설계인가를 취득하였다(원자력안전위원회, 2014). 또한 2016년부터 AP1000 및 ESBWR 수준의 피동형 설계기술 확보를 위한 개념 설계 기술 개발에 착수하였으며, 2019년 핵심원천기술 확보를 목표로 하고 있다(에너지경제, 2016).

이와 같은 4기의 기술 진화는 3기에서 시작된 안전성 제고 노력의 성과로 이해할 수 있으나, 2011년 3월에 발생한 일본 후쿠시마 다이치 원전의 수소폭발 및 방사능 누출 사고에 따른 안전에 대한 사회적 우려로 인해 더욱 강화되었음을 알 수 있다(Chang et al., 2013). 실제로 일본 내 원전 운영 지속 및 추가 건설에 대한 대중의 지지도는 2005년 82%에서 후쿠시마 원전 사고 직후 46%까지 하락하였으며, 미국인의 원전 추가 건설 지지도도 2008년 57%에서 2011년 3월 43%로 하락하였다(Ramana, 2011). 뿐만 아니라 동 사고 직후 전 세계를 대상으로 실시한 전력원으로서의 원전의 역할에 대한 수용도 조사 결과, 조사대상 42개국 중 40개국에서 수용도가 하락한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 성별과 연령, 소득·교육 수준과 관계없이 일정하였다(Kim et al., 2013; 김서용 & 김근식, 2014). 이는 원전에 대한 부정적인 인식이 사고가 발생하였거나, 원전을 다수 보유한 국가를 넘어 전 지구적으로 확산되었음을 의미한다. 이는 후쿠시마 원전 사고 이후 안전에 대한 대중의 우려가 매우 높아졌으며, 동시에 향후의 원전 활용은 안전성 확보라는 최우선 전제조건을 반드시 만족해야한다는 공감대가 전 지구적으로 확산되었음을 시사한다.

<표 3> 3세대 및 3세대+ 주요 원자로의 안전계통 특성 및 성능 비교

세대	3세대		3세대+			
원자로 기술 유형	APR1400	APWR	EPR	AP1000	ABWR	ESBWR
기술배경	PWR			BWR		
정상운전 시 1차 계통 작동	능동	능동	능동	능동	능동	피동
안전주입계통	능동	능동	능동	피동	능동+피동	피동
잔열제거계통	능동	능동	능동	피동	피동	피동
격납건물 냉각계통	능동	능동	능동	피동	능동	피동
중대사고빈도 (노심손상빈도)	$2.45 \times 10^{-6}/\text{yr}$	$4.6 \times 10^{-4}/\text{yr}$	$5.8 \times 10^{-7}/\text{yr}$	$5 \times 10^{-7}/\text{yr}$	$2 \times 10^{-7}/\text{yr}$	$3 \times 10^{-7}/\text{yr}$
제작사	한국수력 원자력	Mitsubishi	Framatome	Westing house/ Mitsubishi	Hitachi/ Toshiba/ GE	Hitachi/ GE
발전용량 (MW)	1,400	1,700	1,700	1,100	1,300	1,500

자료: 지식경제부 (2010), 한국전력기술 (2015), Goldberg and Rosner (2011) 및 전문가 인터뷰를 참고하여 연구자 재구성

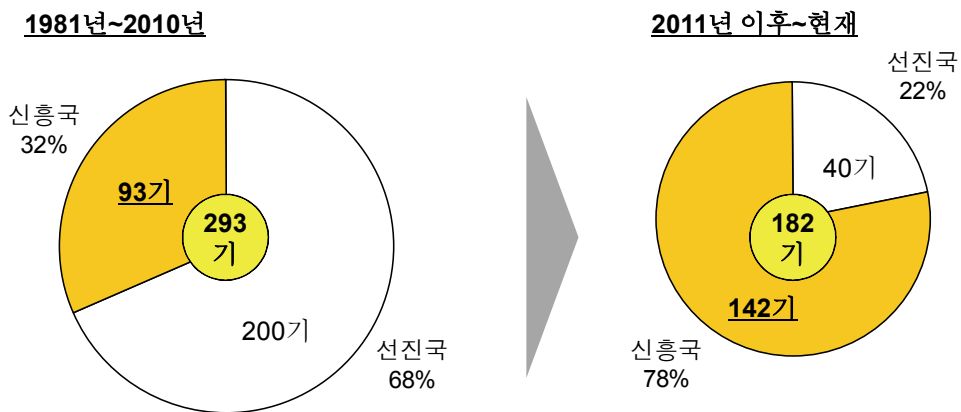
또한 후쿠시마 원전사고는 세계 각국 정부로 하여금 신규 원전 건설 중단, 노후 원전 운영 중단 및 폐기, 원전 도입 계획 백지화와 같은 보수적 원전 정책으로의 빠른 전환을 야기하였다. 대표적으로 2012년 9월 일본은 2030년까지 전력 생산에서의 원전 비중을 0%로 낮추는 ‘혁신적 에너지 환경 전략’을 발표하였다(에너지경제연구원, 2012). 원전 설비용량 2위(2015년 기준)의 프랑스 또한 2025년까지 전력 생산에서의 원전 비중을 50%까지 낮추겠다는 계획을 발표하였다(The Wall Street Journal, 2014).<sup>8)</sup> 이 밖에 독일(원전 설비용량 5위), 스위스, 이탈리아, 멕시코 등의 원전 보유 국가는 신규 원전 건설 중단, 노후 원전 운영 중단 및 폐기 정책을 발표하였으며, 태국, 필리핀, 베네수엘라 등 또한 원전 도입 계획을 폐기하고 새로운 전력원 발굴을 모색하게 된다(전진호, 2011; 정승연, 2012). 이는 원전 보급의 관점에서 후쿠시마 원전사고가 즉각적이고 광범위한 정책의 보수화를 초래하였음을 시사하며, 이러한 정책의 보수화는 안전성의 최우선화에 방점을 둔 기술진화를 지지하는 요인으로 작용하였음을 이해할 수 있다.

보수적 원전 정책과 연계하여 세계 각국은 원전의 안전성 확보를 위한 각종 조치를 취하였다. 먼저 우리나라의 경우 2011년 10월 원자력 진흥 정책과 원자력 규제 정책 분리의 일환으로 원전 안전 규제, 방재 대책 수립, 국가 핵물질 통제 등을 담당할 원자력안전위원회를 신설하였다. 또한 미국은 원자력규제위원회를 중심으로 전원 상실 등 설계 기준을 초과하는 외부 사건 발생 시의 복구와 관련한 전략 ‘Diverse and Flexible Mitigation Capability’를 발표하고, 상업 운전 중인 원전을 대상으로 이행계획서 제출 요구 및 평가를 수행하였다(원자력안전위원회, 2015). 이 밖에 캐나다는 원전의 안전성 제고 관점에서 원자로 심층방어, 비상대응 등에서 개선사항을 도출하였으며, 프랑스의 경우 최대 100억 유로 규모의 원전 안전 강화 조치를 보고, 집행한 바 있다(국회입법조사처, 2012). 각국의 이러한 조치 또한 안전성 제고를 위한 원전 기술진화를 장려하는 요인으로 이해할 수 있다.

한편 안전성의 최우선화 이외에도 III세대+ 원자로 기술 혁신은 원전의 모듈화에 초점을 두고 있다. 원전의 모듈화란 원자로 등 중요 하위 시스템의 기능과 요소부품 간의 대응을 단순화하고, 하위 시스템의 집합체인 계통(System) 내 하위 시스템 간 인터페이스의 사양을 표준화하는 것을 의미한다(한국과학기술기획평가원, 2010b). 이러한 원전의 모듈화는 ‘기능-요소부품 간 대응’과 ‘하위 시스템 간 인터페이스 표준화’에 따른 요소부품과 하위 시스템 제작비 감소 이외에도 중요 계통의 사전 제작을 통해 원전 건설기간

8) 원전 설비용량 4위의 중국은 2011년 3월~2012년 10월 사이 원전 건설을 일시 중단하고, 전면 안전점검을 실시함

단축 및 비용 절감을 기대할 수 있으며, 건설 현장에서의 제작에 따른 하위 시스템, 계통의 안전성(품질) 문제를 사전에 차단할 수 있는 장점이 있다(Sutharshan et al., 2011)<sup>9)</sup>. 실제로 III세대+ 원자로에서 글로벌 주요 원전 기업들은 원전 모듈화 기술을 통해 경제성과 안전성을 동시에 제고하는데 성공하였는데, 대표적으로 미국의 Westinghouse는 원자로 모델 AP1000을 적용한 원전 8기(중국 4기, 미국 4기, 건설 중)를 통해 공조기기(80%), 전선(80%), 배관(75%), 밸브(60%), 펌프(35%)의 사용량 대폭 감소 및 내진건물 체적 감소(50%)를 예상하고 있다(Sutharshan et al., 2011; 김좌영 et al., 2015). 이 밖에도 Toshiba는 ABWR 노형에서 200여개의 모듈을 개발하였으며, 건설 착수 전 상세설계 엔지니어링을 완성함에 따라 건설현장인력의 40% 감소를 예상하고 있다(김좌영 et al., 2015). 우리나라의 경우 SC(Steel Plate Concrete) 모듈 기술을 개발, 현재 건설 중인 신고리 5, 6호기에 적용하여 비용 절감을 기대하고 있다.



자료: International Atomic Energy Agency (2016), *Nuclear Power Reactors in the World*, Vienna: IAEA 참고하여 연구자 작성

<그림 7> 세계 원전 발주 시장의 변화: 선진국에서 신흥국으로

이와 같은 원전의 모듈화 또한 1950년대 이후 60여년에 걸친 원전 기술 혁신의 누적에 따른 결과이나, 신흥국 주도의 원전 발주 확대와 같은 경제적 요인이 모듈화 추진을 더욱 가속화시킨 계기로 작용하였다(Wade and Walters, 2011; WNA, 2017a). 이는 신흥국의 경우 원전 건설에 필요한 자금의 자체 확보가 어렵고 건설 현장 인력의 숙련도도

9) 현장 제작은 다양한 환경적 변수에 노출될 수 있고 하위 시스템 및 계통의 품질에 대한 사전 테스트가 어렵기 때문에 공장 제작에 비해 안전성 저하 가능성이 높음

높지 않아 건설기간 단축 및 그에 따른 비용 절감, 그리고 현장에서의 품질 관리 문제가 더욱 중요하기 때문이다. 경제성장에 따른 전력 수요 확대 또한 신흥국의 원전 발주 확대의 한 요인으로 꼽힌다. 실제로 2011년 이후~현재까지 완공되었거나 현재 건설 중 또는 계획 단계에 있는 원전 182기 중 142기(78%)가 신흥국에 위치할 정도로 현재 원전 시장은 신흥국 주도로 형성되고 있다. 이는 위 <그림 7>에서 확인할 수 있듯이 1981년~2010년에 완공된 원전 중 신흥국이 차지하는 비중(93기, 32%)에 비해 크게 상승하였다. 이와 같이 원전 발주시장에서의 신흥국의 비중 확대는 비용 절감을 위한 원전 모듈화에 긍정적인 영향을 미쳤으며, 향후에도 모듈화에 따른 경제성 제고 효과가 탁월한 700MW급 이하 중소형 원전 시장의 확대에도 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

마지막으로 앞서 언급한 후쿠시마 원전 사고와 함께 최근의 폐 핵연료 처리 문제 때문에 따른 대중의 원전에 대한 위험 지각 확대, 그리고 우라늄 자원 고갈과 같은 경제적 요인은 최근의 IV세대 원전 개발을 추동하는 요인으로 이해할 수 있다. IV세대 원전과 기존 세대 원전을 구분 짓는 가장 큰 차이점은 바로 핵연료인 우라늄의 분열 기술 방식이다. 구체적으로 II~III+세대의 경수로 원전은 열중성자를 활용하여 핵연료를 분열시키나, IV세대 원전은 고온과 고속의 중성자를 활용하여 지속가능성, 안전성, 경제성을 획기적으로 개선한다는 점이 있다. 예를 들어 우리나라가 주력으로 개발하고 있는 IV세대 원자로 모형 중 하나인 소듐냉각고속로(SFR, Sodium-cooled Fast Reactor)는 경수로(PWR, BWR)에서 사용한 폐 핵연료를 재활용할 수 있을 뿐 아니라, 그간 경수로 방식에서는 사용되지 못했던 우라늄 238을 핵연료로 사용할 수 있다는 점에서 60년에 불과한 우라늄 자원 매장량의 고갈 문제를 원천적으로 차단할 수 있을 것으로 기대된다(매일경제, 2008)<sup>10</sup>. 더불어 우리나라가 개발 중인 초고온가스로(VHTR, Very High-Temperature gas-cooled Reactor)의 경우 핵분열 시 때 발생하는 열을 식히는 냉각재로 물 대신 헬륨 가스를 사용함으로써 후쿠시마 원전에서 발생했던 수소폭발이나 증기폭발을 원천적으로 차단할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 핵분열 반응을 통해 1,000℃ 이상의 고온을 생성함으로써 높은 발전 효율(50%)뿐 아니라 다량의 수소를 생성함으로써 연료전지 개발과 같은 친환경에너지원 개발에도 긍정적인 역할을 할 것으로 기대된다<sup>11</sup>. 이러한 IV세대

10) 경수로 원전에서는 전세계 천연 우라늄 자원의 0.72%에 불과한 우라늄 235를 핵연료로 활용함. 그러나 소듐냉각고속로 방식은 전세계 천연 우라늄 자원의 99%를 차지하는 우라늄 235를 플루토늄 239로 변형시켜 핵연료로 활용할 수 있음(GIF, 2014).

11) 소듐냉각고속로와 초고온가스로는 앞서 3.1장에서 제시한 6개의 IV세대 원자로 후보 모형 중 기술적 구현 가능성이 가장 빨리 입증되었으며, 가장 많은 국가들이 기술개발을 추진 중인 노형임(GIF, 2014).

원전 기술 혁신은 최근 제기되고 있는 우리나라 자원 고갈 문제를 해결하고, 최근 원자력 발전의 사회적 수용성과 관련한 가장 큰 문제 중 하나인 폐 핵연료 관리의 관점에서 사회적으로도 큰 지지를 얻고 있다(최현도 & 안종욱, 2015).

## IV. 결론

본 연구는 복합제품시스템의 기술진화에 다양한 거시환경요인이 영향을 미칠 수 있음에 주목하고, 원자력 발전 플랜트의 기술진화에 대한 정책, 경제, 그리고 사회적 요인의 영향을 종단적 서술 방식을 통해 통합적으로 분석하였다. 연구결과 1950년대 원자력의 평화적 이용을 위한 각국 정부의 지원을 시작으로 발전용량의 대형화를 위한 연구개발 투자, 안전성 제고를 위한 정책 수립과 집행과 같은 다양한 정책 요인은 원전 기술진화에 많은 영향을 미침을 확인하였다. 또한 경기 활황과 불황에 따른 전력 수요의 변화, 전력원간 경쟁, 그리고 신흥국 중심의 원전 시장 확대, 우리나라 자원의 고갈 등의 경제적 요인도 원전 기술 큰 영향을 끼쳤다. 더불어 원전에 대한 대중의 기대와 대형 사고에 따른 부정적 인식의 전지구적 확산, 환경적 영향에 대한 인식, 폐 핵연료 처리의 필요성 인식과 같은 사회적 요인도 원전 기술진화에 큰 영향을 미친 거시환경 요인으로 파악되었다. 이러한 거시환경요인의 영향 속에서 발전 용량의 대형화, 그리고 다양한 원자로 설계 기술의 등장과 안전성 제고 등으로의 기술진화 방향 정립, 설계 기술의 모듈화 및 지배적 설계 정립 촉발, 후발국 원전 기술추격 등 원전 기술진화 패턴을 확인하였다. 특히 최근에는 핵연료의 고갈에 대비하고 중대 사고를 원천적으로 차단할 수 있는 차세대 원자로 기술 개발을 본격화하고 있음을 고찰하였다.

본 사례 연구를 통해 우리는 복합제품시스템 기술은 정책, 경제, 사회적 관점 등 다양한 거시환경요인과의 복잡한 상호작용을 통해 진화함을 확인하였다. 이러한 논의는 복합제품시스템에 대한 기존의 시장, 생산 및 혁신 특성 고찰과 후발국 추격에 대한 논의를 넘어서 보다 거시적인 관점에서 복합제품시스템의 기술진화를 고찰할 수 있는 이론적 접근방법을 제시하였다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다. 특히 후발국의 복합제품시스템 기술진화의 관점에서 본 연구는 시장 창출, 기술개발 및 표준화 지원과 같은 자국 정부 정책의 영향력만을 강조한 기존 연구(예: Kiamehr et al., 2015; Park, 2013)에서 밝히지 못한 선발국가의 에너지 정책 변화, 세계 경기 성장 둔화 및 사회적 수용성 제고와 같



은 경제·사회적 요인의 영향력의 중요성을 고찰함으로써 복합제품시스템 추격 이론의 확장 필요성을 제시하였다.

또한 본 연구는 정책·경제·사회적 요인과 같은 거시환경요인의 영향에 따른 복합제품시스템의 기술혁신 패턴의 변화에 대한 논의의 확장 필요성을 확인하였다. Davies (1997)는 생애 주기를 따라 제품 혁신을 거쳐 공정 혁신이 나타나는 대량생산제품과 달리 복합제품시스템은 지속적인 제품 혁신이 유지된다고 주장한 반면, 본 연구에서는 약 20여년의 III세대~III+세대 원자로에 걸쳐 지배적 설계 정립과 점진적 혁신을 발견한 것이 바로 그것이다. 당시의 지배적 설계 정립과 점진적 혁신에는 미국의 스리마일 원전 사고, 체르노빌 원전 사고에 따른 신규 원전 건설 중단 정책, 안전성 제고 요구 확대, 그리고 세계 경제 성장 둔화와 에너지 수요 감소, 그에 따른 기업 간 생존을 위한 인수 합병 등과 같은 정책·경제·사회적 요인이 긍정적인 영향을 미쳤다. 이는 이들 요인이 복합제품시스템의 기술진화에 상당한 영향을 미침을 시사하며, 각 요인의 영향에 따라 기술진화의 패턴 또는 그 주기에 변화가 발생함을 의미한다. 이러한 점에서 본 연구는 정책·경제·사회적 요인 내의 세부 요인이 복합제품시스템의 기술진화에 미친 영향을 고찰하기 위해 필요한 개념적 기반을 제공한다.

더불어 본 연구는 복합제품시스템에서 세계적인 경쟁력을 확보하거나 또는 육성하고자 하는 국가 또는 기업에 전략적 시사점을 제공한다. 먼저 현재 복합제품시스템 산업을 주도하는 국가는 자체적인 기술진보 노력 이외에도 이를 지원할 수 있는 정책·경제·사회적 요인을 인식하고, 이를 활용하기 위한 노력을 전개해야 할 것이다. 1970년대 원전의 대형화를 촉진시킨 미국 전력 시장의 풀링 제도 도입은 선발국가가 복합제품시스템 기술진화를 지원하기 위해 도입한 정책의 대표적인 사례이다. 이밖에도 복합제품시스템 주도권 확보에 긍정적인 영향을 미칠 수 있는 복합제품시스템의 전망 수요산업 육성, 복합제품시스템의 후방 공급산업의 혁신을 활용한 경쟁력 확보, 사회적 수용성을 높이기 위한 노력 등도 꾸준히 경주해야 할 것이다. 상기 노력은 지배적 설계를 정립하는데 성공한 국가나 기업에게 더욱 요구되는 바일 것이다. 반면 후발국가나 기업은 정책·경제·사회적 요인 또는 그 변화를 기술추격의 기회로 활용해야 할 것이다. 기본적으로 복합제품시스템은 개발을 위해 다양한 분야의 지식과 기술이 필요하고, 표준화된 제품의 대량 생산을 통한 학습 과정을 갖기 어려워서 이에 따라 후발국의 내부적인 혁신(endogenous innovation)만으로는 성공적인 추격을 달성하기가 매우 도전적인 분야이기 때문이다(곽기호 & 박주형, 2016). 따라서 후발국가나 기업은 선발국가의 경기 불황이나 구조조정과 같이 기술을 획득하기에 용이한 경제적 요인을 전략적으로 활용할 필요가 있다. 또한 복



합제품시스템 개발을 위한 정책 지원뿐 아니라 사회적 수용과 관련한 선발국가의 규제 강화나 보조금 삭감과 같은 선발국가의 규제적 대응을 추격의 기회로 삼는 것도 한 방법이 될 것이다. 이와 함께 추격 노력이 사회와 대중으로부터 지지를 받을 수 있도록 대중 홍보, 정책 참여 경로 마련 등 수용성 제고 노력을 아끼지 않아야 할 것이다.

다만 본 연구는 원자력 발전 플랜트라는 단일 사례에 기반하여 복합제품시스템의 기술진보에 대한 정책·경제·사회적 요인의 영향을 탐색하였다는 점에서 정책, 경제, 사회적 세부 요인의 영향력에 대한 연구결과의 일반화에 신중을 기해야 하는 한계가 있다. 또한 기존 문헌 고찰과 신문 라이브러리 자료, 전문기관 보고서, 전문가 인터뷰 등의 정형화된 사실(Stylized Facts)에 기반하여 정책·경제·사회적 요인의 영향을 고찰하고자 노력하였으나, 인과관계의 강도를 계량적으로 엄밀하게 측정하지 못한다는 한계가 있다. 향후에는 복합제품시스템의 기술진보에 대한 다중 사례를 수행하거나 거시환경요인의 영향력을 계량적으로 측정하고, 이를 바탕으로 보다 엄밀한 이론적 프레임워크를 구축하는 등 본 연구의 결과와 주장을 보다 심화할 필요가 있다.

한편 복합제품시스템을 선발국가가 여전히 주도권을 확보한 분야와 후발국가가 추격에 성공한 분야로 구분하고, 각 분야의 기술진보 패턴과 후발국가의 추격에 긍정적인 영향을 미친 정책·경제·사회적 요인을 고찰하는 것도 흥미 있는 연구주제가 될 것으로 기대된다. 더불어 상기 3대 요인 간 상호작용 효과를 분석하고, 이러한 상호작용 효과가 원전 기술진화에 미친 영향에 대해 논의하는 것도 본 연구 결과의 심화에 기여할 것이다. 마지막으로 가압경수로와 다른 경수로 방식(예: 영국의 기체 냉각형 원자로(GCR), 캐나다의 가압중수로(PHWR))이 지배적 설계로 채택되는데 실패한 원인을 고찰하는 것도 본 연구에 대한 이론적 복제(Theoretical Replication)(Yin, 2008)의 관점에서 의미 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

### (1) 국내문헌

- 곽기호·박주형 (2016), “복합제품시스템 추격을 위한 특허 기반 부상기술 탐색: 가스터빈 사례를 중심으로”, 『지식경영연구』, 제17권 제2호, pp. 27-50.
- 국회입법조사처 (2012), 『원자력 안전의 현황과 정책 및 입법 과제』, 국회입법조사처.
- 김경신·조희선 (2015), “후쿠시마 사고 전후, 대학생들의 원자력발전에 대한 위험인식 변화에 관한 연구”, 『환경정책』, 제23권 제3호, pp. 145-172.
- 김서용·김근식 (2014), “후쿠시마 원전사고 이후 세계인의 원자력 수용성 태도변화 분석”, 『한국정책학회보』, 제23권 제3호, pp. 57-89.
- 김좌영·임상준·노상훈·이병수 (2015), “원전 모듈화 국외 기술개발 현황 분석”, 『한국에너지학회 추계학술발표논문집』, pp. 223-223.
- 뉴시스, 한수원 “이보다 안전한 원전은 없다”...국산 신형 원전 ‘APR+’, 2015.7.29.
- 매일경제, 우라늄 60년후 고갈...차세대 원자력발전 기술 시급, 2008.4.29.
- 미래창조과학부 (2016), 『2016년 원자력백서』, 미래창조과학부.
- 서동주 (2014), “일본 고도성장기 ‘핵=원자력’의 표상과 ‘피폭’의 기억”, 『일본학보』, 제99집, pp. 433-448.
- 송위진·황혜란·조황희 (1999), “우리나라 복합시스템 제품의 기술혁신 특성에 대한 탐색적 연구”, 『기술혁신학회지』, 제2권 제2호, pp. 275-289.
- 심의섭 (2011), “한국의 UAE 원전사업 수주의 평가와 과제: 경제적 측면”, 『중동연구』, 제29권 제3호, pp. 161-181.
- 안승규 (2012), “유일한 에너지 대안, 원자력의 안전성 확보를 위한 노력”, 『플랜트 저널』, 제8권 제1호, pp. 4-7.
- 에너지경제, 개발 원전의 궁극 목표는 사고위험 제로화, 2016.10.9.
- 에너지경제연구원 (2001), 『주요국의 전력산업 구조개편 비교연구: 폴시장 형태에 관한 실증 분석을 중심으로』, 에너지경제연구원.
- 에너지경제연구원 (2012), 『일본의 신재생에너지 규제완화 현황 및 시사점』, 에너지경제연구원.
- 오승규 (2015), “프랑스 원전 거버넌스와 그 시사점”, 『환경법과 정책』, 제14권, pp. 49-68.
- 원자력신문, 원자력기자협회, ‘원전 해체·제염 역량강화 세미나’, 2014.7.3.
- 원자력안전위원회 (2014), 『APR+ 표준설계인가(안)』, 원자력안전위원회.
- 원자력안전위원회 (2015), 『최근 해외 신규원전 인허가 동향 및 신규기준 연구』, 원자력안전위원회.
- 윤순진 (2011), “한국의 원자력 발전과 시민인식의 현주소”, 『안과 밖』, 제31호, pp. 181-200.
- 윤순진·오은정 (2006), “한국 핵발전정책의 사회적 구성: 핵기술의 도입 초기(1954~1965년)을

- 중심으로”, 『환경정책』, 제14권 1호, pp. 37-74.
- 윤순진·김소연·정민지 (2011), “한국과 일본 원자력 사회기술체계 발전 경로의 유사성과 상이성: 관성과 역돌출부에 대한 대응을 중심으로”, 『ECO』, 제15권 2호, pp. 147-195.
- 이민재·정진섭·박기성 (2014), “원자력 발전의 위험인식, 효용인식, 투명성이 사회적 수용성에 미치는 영향”, 『기업경영연구』, 제21권 제4호, pp. 253-279.
- 임성호 (1996), “원자력정책 결정과정에 나타난 미국 국회의원들의 정치행태: 비이념성”, 『한국정치학회보』, 제29권 제3호, pp. 437-465.
- 임은정 (2014), “고도성장기 일본, 그리고 후쿠시마(福島): 원자력 도입을 둘러싼 정치경제에 대한 고찰”, 『일본연구논총』, 제39권, pp. 61-86.
- 전진호 (2011), “후쿠시마 원전사고의 국제정치: 원자력안전 거버넌스와 국제협력”, 『국제정치논총』, 제51권 제2호, pp. 183-211.
- 전자신문, 3세대 원전 글로벌 경쟁, 한국이 가장 앞서 달린다, 2016.11.6.
- 정승연(2012), “일본의 에너지정책 변화에 관한 연구: 후쿠시마 원전사고 이후를 중심으로”, 『세계지역연구논총』, 제30권 제3호, pp. 69-90.
- 지식경제부 (2010), 『2010 APR+ 기술개발 워크샵 발표자료』, 지식경제부.
- 진상현 (2009), “한국 원자력 정책의 경로의존성에 관한 연구”, 『한국정책학회보』, 제18권 제4호, pp. 123-144.
- 최현도·안종욱 (2015), “과학기술이슈에 대한 일반인의 인식분석: 토픽모델링을 활용한 원자력발전 사례”, 『기술혁신연구』, 제23권 제4호, pp. 151-176.
- 타쿠마 마사오 (2006), “일본 원자력산업의 현황 및 향후 전망”, 『원자력산업』, 제26권 제4호, pp. 36-40
- 한국과학기술기획평가원 (2010a), 『원자력 기술과 정책동향: 원자로 이용기술을 중심으로』, 한국과학기술기획평가원.
- 한국과학기술기획평가원 (2010b), 『정부R&D예산 편성지원을 위한 심층이슈 분석 - 제 4권 원전 플랜트 기술개발 현황 및 이슈분석』, 한국과학기술기획평가원.
- 한국수력원자력 (2011), 『일본 후쿠시마 원전사고 관련 Q&A』, 한국수력원자력.
- 한국수출입은행 (2015), 『2015년 세계 원전시장 및 국내 원전산업 동향』, 한국수출입은행. Vol. 2015-산업이슈-01.
- 한국원자력문화재단 (2013), 『원자력에 대한 세계 주요 인사들의 정치적 판단과 발언』, 한국원자력문화재단
- 한국원자력문화재단 (2016), 『2016년 원자력 국민인식 정기조사 결과』, 한국원자력문화재단
- 한국일보, 신고리 3호기 전력생산 시작, 2016.12.20.
- 한국전력기술, 『Investor Relations Q1 FY2015』, 한국전력기술
- 한장희 (2012), “한국수력원자력의 지역공동체 경영을 통한 원전 지역수용성 제고 전략”, 『경영학

연구」, 제16권 제2호, pp. 1-28.

한장희·고영희 (2013), “기업 이미지, 사업 이해도 및 기업 신뢰도가 원전 수용성에 미치는 영향 분석: 기업 신뢰도의 매개효과를 중심으로”, 『POSRI경영경제연구』, 제13권 제1호, pp. 125-158.

황혜란 (1999), “복합시스템 제품의 기술혁신 특성”, 『과학기술정책』, 119호, pp. 8-17.

新東亞 (2006a), 일본의 원자력 정책, 신동아, 2016년 12월호

新東亞 (2006b), 프랑스의 원자력 정책, 신동아, 2016년 12월호

新東亞 (2006c), 세계 원자력史 속에서 본 한국 원자력史-제4부, 2006년 12월호

## (2) 국외문헌

Abernathy, W. J. (1978), *The Productivity Dilemma: Roadblock to Innovation in the Automobile Industry*, Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press.

Azevedo, C. R. F. (2011), “Selection of Fuel Cladding Material for Nuclear Fission Reactors”, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, No. 8, pp. 1943-1962.

Balogh, B. (1991), *Chain Reaction: Expert Debate and Public Participation in American Commercial Nuclear Power, 1945-1975*, Cambridge: Cambridge University Press.

Beverland, M., and A. Lindgreen, (2010), “What Makes a Good Case Study? A Positivist Review of Qualitative Case Research Published in Industrial Marketing Management, 1971-2006”, *Industrial Marketing Management*, Vol. 39, No. 1, pp. 56-63.

Barratt, M., T. Y. Choi, and M. Li, (2011), “Qualitative Case Studies in Operations Management: Trends, Research Outcomes, and Future Research Implications”, *Journal of Operations Management*, Vol. 29, No. 4, pp. 329-342.

Bijker, W. E., T. P. Hughes and T. Pinch (1987), *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology*, Cambridge: MIT Press.

BP (2016), *BP Statistical Review of World Energy*, London: BP

Buck, A. L. (1983), *A History of the Atomic Energy Commission*, Washington, DC: US Department of Energy

Carroll, A. and A. Buchholtz (2003), *Business and Society: Ethics, Sustainability and Stakeholder Management, 5th ed.*, Mason: Thomson South-Western.

Chang, S. H., S. H. Kim, and J. Y. Choi (2013), “Design of Integrated Passive Safety System (IPSS) for Ultimate Passive Safety of Nuclear Power Plants”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 260, pp. 104-120

Conway, L.W. (1988), “The Westinghouse AP600 Passive Safety Systems”, Paper Presented at the International Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors, 1988.

- Cummins, W. E., M. M. Corletti, and T. L. Schulz(2003), “Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant”, Paper Presented at the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, 2013.
- Davis, L. W. (2012), “Prospects for Nuclear Power”, *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 26, No. 1, pp. 49–65
- David, P. A., and G. S. Rothwell (1996), “Measuring Standardization: An Application to the American and French Nuclear Power Industries”, *European Journal of Political Economy*, Vol. 12 No. 2, pp. 291–308.
- Davies, A. (1997), “The Life Cycle of a Complex Product System”, *International Journal of Innovation Management*, Vol. 1, No. 3, pp. 229–256
- Davies, A. and T., Brady, T. (1998), “Policies for a Complex Product System”, *Futures*, Vol. 30, No. 4, pp. 293–304.
- Dedehayir, O., T. Nokelainen and S. J. Mäkinen (2014), “Disruptive Innovations in Complex Product Systems Industries: A Case Study”, *Journal of Engineering and Technology Management*, Vol. 33, pp. 174–192.
- Dickson, D. (1986), “France Weighs Benefits, Risks of Nuclear Gamble”, *Science*, Vol. 233, pp. 930–933.
- EC (1997), *Energy in Europe, 1997–Annual Energy Review*, Bruxelles: ESAP.
- EIA (1994), *Annual Energy Review 1993*, Washington DC: EIA
- EIA (1997), *Nuclear Power Generation and Fuel Cycle Report 1997*, Washington DC: EIA
- EIA (2004), *Annual Energy Review 2004*, Washington DC: EIA
- EIA (2016), *December 2016 Monthly Energy Review*, Washington DC: EIA
- Eisenhardt, K. (1989), “Building Theories from Case Study Research”, *Academy of Management Review*, Vol. 14, No. 4, pp. 532–550.
- Fischer, D. (1997), *History of the International Atomic Energy Agency: The First Forty Years*, Vienna: IAEA
- Geels, F. W., and B. Verhees (2011), “Cultural Legitimacy and Framing Struggles in Innovation Journeys: A Cultural–performative Perspective and a Case Study of Dutch Nuclear Energy (1945 - 1986)”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 78, No. 6, pp. 910–930.
- Glaser, B. and A. L. Strauss (1967), *The Discovery of Grounded Theory*, Chicago: Aldine.
- Gielecki, M. and G. H. James (1994), *Commercial Nuclear Power in the United States: Problems and Prospects*, Washington DC: EIA
- GIF(2014), *A Technology Road Map Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*,

Paris: OECD.

- Goldberg, S. M., and R. Rosner (2011), *Nuclear Reactors: Generation to Generation*. American Academy of Arts and Sciences, Cambridge: American Academy of Arts and Sciences.
- Hindmarsh, R.A. and R. Priestley (2015), *The Fukushima Effect: A New Geopolitical Terrain*, New York: Routledge.
- Hobday, M. (1998), "Product Complexity, Innovation and Industrial Organisation", *Research Policy*, Vol. 26, No. 6, pp. 689-710.
- Hohenemser, C. and O. Renn (1988), "Shifting Public Perceptions of Nuclear Risk: Chernobyl's Other Legacy", *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, Vol. 30, No. 3, pp. 4-45.
- Hughes, T. P. (1983), *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930*, Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- IAEA (2011), *Status Report 75-Advanced Passive Pressurized Water Reactor (AP-600)*, Vienna: IAEA.
- IAEA (2016), *Nuclear Power Reactors in the World*, Vienna: IAEA.
- Kash, D. E., and R. Rycroft (2002), "Emerging Patterns of Complex Technological Innovation", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 69, No. 6, pp. 581-606.
- Kessides, I. N. (2012), "The Future of the Nuclear Industry Reconsidered: Risks, Uncertainties, and Continued Promise", *Energy Policy*, Vol. 48, pp. 185-208.
- Kiamehr, M., M. Hobday and M. Hamed (2015), "Latecomer Firm Strategies in Complex Product Systems (CoPS): The Case of Iran's Thermal Electricity Generation Systems", *Research Policy*, Vol. 44, No. 6, pp. 1240-1251.
- Kim, Y. H., M. K. Kim and W. J. Kim (2013), "Effect of the Fukushima Nuclear Disaster on Global Public Acceptance of Nuclear Energy", *Energy Policy*, Vol. 61, pp. 822-828.
- Kim, Y. H., W. J. Kim and M. K. Kim (2014), "An International Comparative Analysis of Public Acceptance of Nuclear Energy", *Energy Policy*, Vol. 66, pp. 475-483.
- Kunsch, P. L. and Friesewinkel, J. (2014), "Nuclear Energy Policy in Belgium after Fukushima", *Energy Policy*, Vol. 66, pp. 462-474.
- Lovering, J.R., A. Yip, and T. Nordhaus (2016), "Historical Construction Costs of Global Nuclear Power Reactors", *Energy Policy*, Vol. 91, pp. 371 - 382.
- Lee, K., and F. Malerba (2017), "Catch-up Cycles and Changes in Industrial Leadership: Windows of Opportunity and Responses of Firms and Countries in the Evolution of Sectoral Systems", *Research Policy*, Vol. 46, No. 2, pp. 338 - 351.
- Lee, J. and H. Yoon (2015), "A Comparative Study of Technological Learning and Organizational

- Capability Development in Complex Product Systems: Distinctive Paths of Three Latecomers in Military Aircraft Industry”, *Research Policy*, Vol. 44, No. 7, pp. 1296-1313.
- Lester, R. K. and M. J. McCabe, “The Effect of Industrial Structure on Learning by Doing in Nuclear Power Plant Operation”, *RAND Journal of Economics*, Vol. 24, No. 3, pp. 418-438.
- Mayntz, R. and T. P. Hughes (1988), *The Development of Large Technical Systems*, Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- Markard, J. and B. Truffer (2006), “Innovation processes in large technical systems: Market liberalization as a driver for radical change?”, *Research Policy*, Vol. 35, No. 5, pp. 609-625.
- NewYork Times, France Set To Build Reactors, January 24, 1981.
- OECD (2007), *Innovation in Nuclear Energy Technology*, Paris: OECD
- OECD (2010), *Public Attitudes to Nuclear Power*, Paris: OECD
- Park, T. Y. (2013), “How a Latecomer Succeeded in a Complex Product System Industry: Three Case Studies in the Korean Telecommunication systems”, *Industrial and Corporate Change*, Vol. 22, No. 2, pp. 363-396.
- Ramana, M. V. (2011), “Nuclear Power and the Public”, *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 67, No. 4, pp. 43 - 51.
- Renn, O. (1990), “Public Responses to the Chernobyl Accident”, *Journal of Environmental Psychology*, Vo. 10, No. 2, pp. 151-167.
- Rossin, A. D. and T. A. Rieck, “Economics of Nuclear Power”, *Science*, Vol. 201, No. 18, pp. 582-589.
- Schilling, M. A. (2010), *Strategic Management of Technological Innovation*, McGraw-Hill Higher Education: NewYork.
- Schneider, M., A., S. Froggatt, and S. Thomas (2012), *Nuclear Power in a Post-Fukushima World*, Washington D.C.: Worldwatch Institute.
- Siggelkow, N. (2007), “Persuasion with Case Studies”, *Academy of Management Journal*, Vol. 50, No. 1, pp. 20-24.
- Son, C. and J. Choung (2014), “Platform Design and Imitative Innovation Inside the Transition Black-box, Korean Nuclear Power Plant APR1400 Case”, *Asian Journal of Technology Innovation*, Vol. 22, No. 1, pp. 67-85.
- Summerton, J. (1995), *Changing Large Technical Systems*, Oxford: Westview Press.
- Sutharshan, B., M., Mutyala, R. P., Vijuk, and A. Mishra (2011), “The AP1000 TM Reactor: Passive Safety and Modular Design”, *Energy Procedia*, Vol. 7, pp. 293 - 302.
- Strauss, A. L., and J. Corbin (1990), *Basics of Qualitative Research: Grounded Theory Procedures and Techniques*, Thousand Oaks: Sage.



- Swaton, E., V. Neboyan, and L. Lederman (1987), "Human Factors in the Operation of Nuclear Power Plants", *IAEA Bulletin*, Vol. 29, No. 4 pp. 27-30.
- The Wall Street Journal, France to Dim Its Reliance on Nuclear Power, June 18, 2014.
- Thomas, S. (1988), "The Development and Appraisal of Nuclear Power. Part I. Regulatory and Institutional Aspects", *Technovation*, Vol. 7, No. 4, pp. 281-304.
- Tushman, M. L. and L. Rosenkopf (1992), "Organizational Determinants of Technological Change: Toward a Sociology of Technological Evolution", *Research in Organizational Behavior*, Vol. 14, pp. 311-347
- Utterback, J. M. (1994), *Mastering the Dynamics of Innovation*, Harvard Business School Press: Boston.
- Valentine, S. V., and B. K. Sovacool (2010), "The Socio-political Economy of Nuclear Power Development in Japan and South Korea", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 12, pp. 7971-7979.
- Voss, C. A., N. Tsikriktsis, and M. Frohlich (2002), "Case Research in Operations Management", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22, No. 2, pp. 195 - 219.
- Wade, D.C. and L. Walters (2011), "ARC-100: A Modular Nuclear Plant for Emerging Markets: Safety Strategy", Paper Presented at the The Second International Conference on Physics and Technology of Reactors and Applications, 2011.
- Walker, J. S., and T. R. Wellock (2010), *A Short History of Nuclear Regulation, 1946-2009*, Washington, D.C.: US Nuclear Regulatory Commission.
- Walker, W. (2000), "Entrapment in Large Technology Systems: Institutional Commitment and Power Relations", *Research Policy*, Vol. 29, No. 7, pp. 833-846.
- World Bank (2017), *GDP Growth (annual %)*. Available at: <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG> (accessed 24 January 2017).
- WNA (2017a), *Emerging Nuclear Energy Countries*. Available at: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/emerging-nuclear-energy-countries.aspx> (accessed 31 January 2017).
- WNA (2017b), *Nuclear Power in France*. Available at: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx> (accessed 25 January 2017).
- Yin, R. K. (2003), *Case Study Research: Design and Methods. 3rd edition*, Sage: London.
- Yin, R. K. (2008), *Case Study Research: Design and Methods. 4th edition*, Sage: London.

□ 투고일: 2017. 02. 13 / 수정일: 2017. 04. 08 / 게재확정일: 2017. 05. 23