

External Cost Assessment for Nuclear Fuel Cycle

핵연료주기 외부비용 평가

Byung Heung Park^{1*} and Won Il Ko²

¹ Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, Republic of Korea

² Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

박병흥^{1*}, 고원일²

¹ 한국교통대학교, 충북 충주시 대학로 50

² 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received May 12, 2015 / Revised August 10, 2015 / Approved August 11, 2015)

Nuclear power is currently the second largest power supply method in Korea and the number of nuclear power plants are planned to be increased as well. However, clear management policy for spent fuels generated from nuclear power plants has not yet been established. The back-end fuel cycle, associated with nuclear material flow after nuclear reactors is a collection of technologies designed for the spent fuel management and the spent fuel management policy is closely related with the selection of a nuclear fuel cycle. Cost is an important consideration in selection of a nuclear fuel cycle and should be determined by adding external cost to private cost. Unlike the private cost, which is a direct cost, studies on the external cost are focused on nuclear reactors and not at the nuclear fuel cycle.

In this research, external cost indicators applicable to nuclear fuel cycle were derived and quantified. OT (once through), DUPIC (Direct Use of PWR SF in CANDU), PWR-MOX (PWR PUREX reprocessing), and Pyro-SFR (SFR recycling with pyroprocessing) were selected as nuclear fuel cycles which could be considered for estimating external cost in Korea. Energy supply security cost, accident risk cost, and acceptance cost were defined as external cost according to precedent and estimated after analyzing approaches which have been adopted for estimating external costs on nuclear power generation.

Keywords: Nuclear fuel cycle, External cost, Accident cost, Supply security cost

*Corresponding Author.

Byung Heung Park, Korea National University of Transportation, E-mail: b.h.park@ut.ac.kr, Tel: +82-43-841-5226

ORCID

Byung Heung Park <http://orcid.org/0000-0002-4808-5811>

Won Il Ko

<http://orcid.org/0000-0003-4212-0716>

국내 원자력발전은 현재 두 번째로 큰 전력 공급 방법이며 원전의 수 역시 증가되는 것으로 계획되어 있다. 그러나, 원자력 발전에 의해 발생하는 사용후핵연료에 대해서는 아직 명확한 관리 정책이 확립되어 있지 않다. 원자로 이후 핵물질 흐름과 관련된 후행 핵연료주기기는 사용후핵연료 관리를 위한 기술들의 집합이다. 따라서, 사용후핵연료 관리 정책은 핵연료주기 선택과 함께한다. 핵연료주기 선택의 중요 항목은 경제성으로 이는 사적비용과 함께 외부비용을 더해 결정되어야 한다. 직접비용인 사적비용과 달리 간접비용인 외부비용에 대한 연구는 원전에 집중되어 있으며 핵연료주기에 대한 연구는 없는 상황이다. 본 연구에서는 핵연료주기에 적용할 수 있는 외부비용 항목들을 도출하고 정량화를 시도하였다. 핵연료주기 외부비용 평가를 위해 고려될 수 있는 핵연료주기로 OT(직접처분), DUPIC(PWR-CANDU 연결), PWR-MOX(PWR 습식재처리), Pyro-SFR(파이로 처리와 고속로 연계)의 네 가지를 선정하였다. 원자력발전의 외부비용 평가에 고려되었던 항목들을 분석하여 핵연료주기에서 에너지 공급 안보비용, 사고위험비용과 수용성 비용을 외부비용 항목으로 도출하고 추산하였다.

중심단어: 핵연료주기, 외부비용, 사고비용, 공급안보비용

1. 서론

국내에서는 1970년대 2번에 걸쳐 경험한 오일쇼크로 인해 화석연료에 집중된 에너지원의 다변화가 모색되어왔다. 이러한 정책적 기초 하에서 1978년 고리 원전 1호기 운전이 시작되었으며 이 후 국내 원전의 수는 점차 늘어났다. 2014년을 기준으로 23기의 원전이 네 개 부지에서 가동되어 우리나라는 20,716 MW의 원자력 발전 설비 용량을 보유하게 되었다. 원자력은 화력에 이은 두 번째 규모의 발전 방식으로 2027년까지의 전력 수급계획을 담고 있는 '제6차 전력 수급 기본계획'에서 연평균 약 3.4%의 증가가 계획되어 있어 중장기적으로는 주요 전력 공급원으로서의 지위를 유지할 것이 예상된다.

한편, 원자력발전에 의해 발생하는 사용후핵연료에 대해서는 아직 명확한 관리 정책이 확립되어 있지 않으며 연구 개발 측면에서 정책 결정시 실행할 수 있도록 기술 확보를 위해 사용후핵연료 처리 및 처분 기술이 개발되고 있다. 국가 원자력 기술 개발 계획은 '원자력연구개발 계획'에 담겨 있으며 2016년까지를 기간으로 하는 제4차 계획에서는 소듐냉각고속로(SFR) 원형로 설계 추진과 핵비확산성 핵연료주기(Pyroprocess)기반 기술개발이 반영되었다. 이 두 기술은 서로 연계시켜 순환핵연료주기를 실현시키려는 목적으로 2008년 원자력위원회에서 확정된 '미래 원자력 시스템 개발 장기 추진 계획'의 중심 과제들이다.

경제학에서는 시장에서 거래되는 상품의 가격 결정에 생

산자가 직접 투여하는 사적비용 이외 생산과정에서 발생되어 제3의 경제주체가 받는 영향을 반영한 외부비용이 포함되어야 한다는 연구들이 있어 왔다. 에너지 분야에서도 이와 같은 인식으로 외부비용에 관한 연구들이 진행되었다. 가장 주목할 만한 연구는 유럽에서 진행된 ExternE 프로젝트로 원자력을 포함한 에너지원의 생산과정에서 발생하는 환경 비용을 계산한 연구로 2000년 초 완료되었다. 한편, 국내에서는 후쿠시마 사고 이후 원자력 발전 비용에 원전의 안전비용이 포함되어야 한다는 공통된 인식 하에 여러 외부비용 평가 연구가 있어왔다. 연구자들은 각자의 외부비용 항목을 설정하고 수식적, 통계적 기법 등을 사용하여 비용을 추산하였다. 이러한 국내외 연구들에는 원자력 에너지와 여타 다른 에너지와의 경제성 비교의 기초자료를 제공하기 위한 목적이 내재되어 있었다. 좀 더 깊게 들어가면 원자력발전에서도 어떤 핵연료주기를 선택하느냐에 따라 상이한 외부비용이 발생할 수 있다. 그러나 아직까지 핵연료주기를 대상으로 경제성 비교를 위한 연구는 진행되지 않았다.

본 연구에서는 사용후핵연료 관리 정책 결정의 경제성 비교에 기초자료로 사용될 수 있는 외부비용을 핵연료주기를 대상으로 추산, 비교하였다. 이를 위해 분석 대상이 되는 핵연료주기를 네 가지로 정의하고 원자력발전을 대상으로 사용된 외부비용 항목과 방법 중 핵연료주기에 적용 가능한 부분을 도출하였으며 이를 이용하여 핵연료주기별 외부비용을 추산하였다.

외부비용은 각 연구자들이 주목하는 분야에 따라 여러

항목으로 고려되어 왔다. 본 연구에서는 핵연료주기 물량 기준으로 비교될 수 있는 항목을 선정하였으며 따라서, 지리적, 사회적 분석이 필요한 부분은 포함하지 않았다. 외부비용의 개념상 포함된 항목, 연구방법 등에 의해 정량적인 값이 변화할 수 있으나 본 연구의 결과는 동일한 기준에서 핵연료주기 외부비용 비교 평가를 위한 자료로서 활용 가치가 있을 것으로 판단된다.

2. 핵연료주기 (Nuclear fuel cycle)

우라늄 원광의 채광부터 원자로에서 핵연료로 연소된 후 배출되는 사용후핵연료에 이르는 일련의 과정을 핵연료주기 (nuclear fuel cycle)로 정의할 때 우라늄 채광부터 원자로에 도입될 수 있도록 우라늄을 핵연료로 가공하는 단계까지를 선행핵연료주기(front-end fuel cycle), 원자로에서 연소 후 나오는 사용후핵연료를 처분 또는 처리하는 공정 흐름을 후행핵연료주기(back-end fuel cycle)로 정의한다. 선행핵연료 주기는 이미 상업적으로 완성되어 후행핵연료주기 방법과는 독립적으로 거의 동일한 기술들이 적용되고 있다. 그러나, 후행핵연료 주기는 해당 국가의 정책에 따라 직접처분, 재활용 등이 고려되고 있으며 기술적으로는 경수로와 제4세대 원전인 소듐고속로 도입 여부에 따라 상이하게 구성할 수 있다.

특히, 후행핵연료 주기는 방사성폐기물 발생량과 밀접한 관련이 있어 핵연료주기에 관한 연구들은 방사성폐기물의 발생량과 종류 등을 비교하여 방사성폐기물 관리 전략 마련을 위해 시도되어왔으며[1] 한편으로는 제한된 우라늄 자원을 최대한 활용하여 지속가능한 원자력을 위한 방향 제시를 위해 진행되었다[2, 3]. 최근에는 한국 특성에 맞게 직접처분과 재활용 핵연료 주기를 포함하여 후행핵연료 정책 결정에 필요한 경제성 비교를 위한 분석 연구가 진행되어 한국에서 고려할 수 있는 네 핵연료 주기의 특성을 비교한 연구가 있었다[4, 5].

기술적 측면에서, 경수로(PWR)를 주로 사용하고 보조적으로 중수로(CANDU)를 운영하고 있는 한국에서 고려할 수 있는 핵연료 주기는 직접처분(OT, once-through), DUPIC(Direct Use of PWR spent fuel In CANDU), 습식재처리를 통한 일부 핵물질의 재순환인 PWR-MOX 재활용, 그리고 소듐고속로와 연계된 Pyro-SFR 재활용으로 요약할 수 있다.

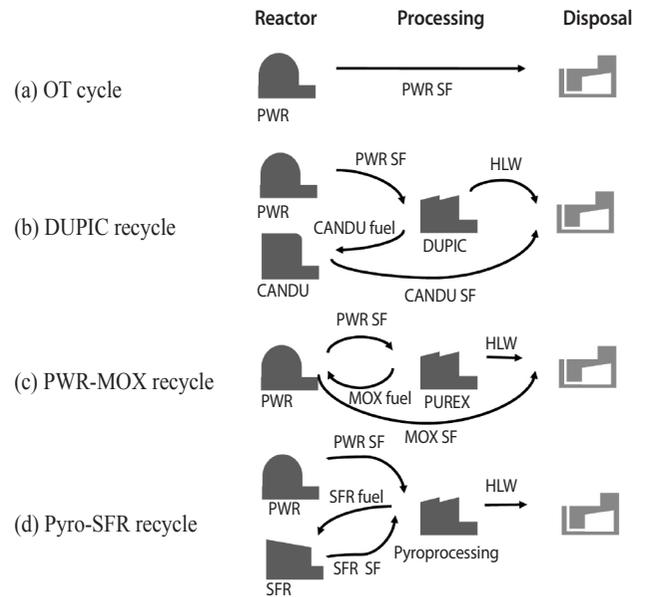


Fig. 1. Schematic flow diagrams of nuclear fuel cycles.

OT 핵연료주기에서는 원자로로부터 방출되는 사용후핵연료를 더 이상의 처리 없이 영구 처분시설로 보낸다. 따라서, Fig. 1(a)와 같이 후행 핵연료 주기를 구성하는 단계는 PWR과 처분시설뿐으로 어떠한 공정도 관계되지 않는다.

PWR에서 발생되는 사용후핵연료는 여전히 천연우라늄 수준의 핵분열성 물질을 포함하고 있다. 농축도와 연소도에 따라 변하지만 3.5wt% 농축도와 35 GWd/tHM 연소도를 기준으로 대략 0.9wt% U-235와 0.5wt% Pu-239가 사용후핵연료에 잔존하게 된다. 이 정도의 농축도는 천연우라늄을 사용하는 CANDU형 원자로에서 연료로 사용될 수 있는 수준이며 처리와 가공과정을 거쳐 분열생성물들이 제거된다면 PWR의 사용후핵연료가 새로운 연료로 CANDU에 공급될 수 있다. 이와 같이 PWR-CANDU가 연계된 핵연료 주기를 DUPIC 핵연료 주기라 하며 PWR과 CANDU 두 종류의 원자로와 PWR 사용후핵연료를 처리하여 CANDU 연료를 생산하는 DUPIC 시설 및 처리 과정에서 발생하는 폐기물과 CANDU에서 연소 후 발생하는 폐기물을 처분하는 처분장으로 핵연료 주기가 구성된다. (Fig. 1(b))

PWR 사용후핵연료를 대상으로하는 상용화된 재처리 공정은 PUREX로 산성용액에 사용후핵연료를 용해시킨 후 추출제를 사용하여 U과 Pu을 회수한 후 혼합산화물(MOX) 형태로 U과 Pu이 포함된 PWR 연료 제조를 위해 사용된다.

PUREX가 도입된 핵연료주기에서는 PWR에서 방출되는 사용후핵연료가 재처리된 후 다시 PWR에서 연소된다. 그러나 순환주기는 반복적으로 사용되지 못하고 PWR에서 방출되는 사용 후 MOX 연료는 PUREX 공정에서 발생하는 폐기물과 함께 처분된다. 이러한 핵연료주기를 Fig. 1(c)와 같이 PWR-MOX 핵연료주기라 한다.

PWR에서 조사된 후 원자로에서 배출되는 사용후핵연료 내의 U 및 TRU 원소들의 연소를 위해 고속로(SFR)와 연계된 핵연료주기가 고속로 개발과 함께 추진되고 있다. PWR-MOX 핵연료주기와는 달리 SFR에서 방출되는 사용후핵연료는 반복적으로 처리될 수 있으며 PWR과 SFR 사용후핵연료 모두 파이로공정(Pyroprocessing)을 통해 처리된다. 이와 같은 핵연료주기는 Pyro-SFR 핵연료주기라 할 수 있다. (Fig. 1(d))

각 핵연료주기에서 발생하는 물질흐름은 평형상태, 단위 전력생산 조건에서 서로 비교할 수 있다. 1 TWh 전력생산을 기준으로 평형상태 가정 하에서 계산된 물질흐름 양은 Fig. 2와 같다[4].

3. 핵연료주기 외부비용 평가

원자력 발전과 관련된 외부비용은 1) 일반적인 운전 상황에서 발생하는 비용과 2) 일시적인 사건에서 소요되는 비용으로 구분할 수 있다. 정상 운전 상태에서 발생하는 외부비용 추산을 위해 ExternE나 CASES에서는 발전과정에서 발생하는 환경오염과 그 결과로 유발되는 건강에 대한 위해 정도를 금전적인 가치로 추산하였다. 일시적인 사건의 대표적인 것은 원전의 사고 상황으로 후쿠시마 사고 이후 대두된 원자력 안전에 대한 관심을 반영하여 원전 사고시 필요한 사고위험 비용에 대한 연구들이 이에 대한 가치를 평가하였다. 에너지 공급 안보비용과 원자력시설 입지를 위한 수용성 비용 역시 일시적 사건에 관련된 비용으로 분류할 수 있다. 그러나, 입지갈등 비용과 같이 시설 설치라는 일시적 상황에 대한 비용이지만 전력생산량 또는 폐기물처분량과 같이 지속적으로 발생하는 물리적 양에 연동되어 비용이 추산되는 경우는 정상 운전 상황에서 외부비용이 결정되어야 할 것이다.

ExternE나 CASES에서와 같이 일반 운전 상황의 환경오염에 의한 비용을 평가하기 위해서는 오염물의 확산 범위를 결정해야 하며 이는 원전과 핵연료주기 시설의 위치와 바람의

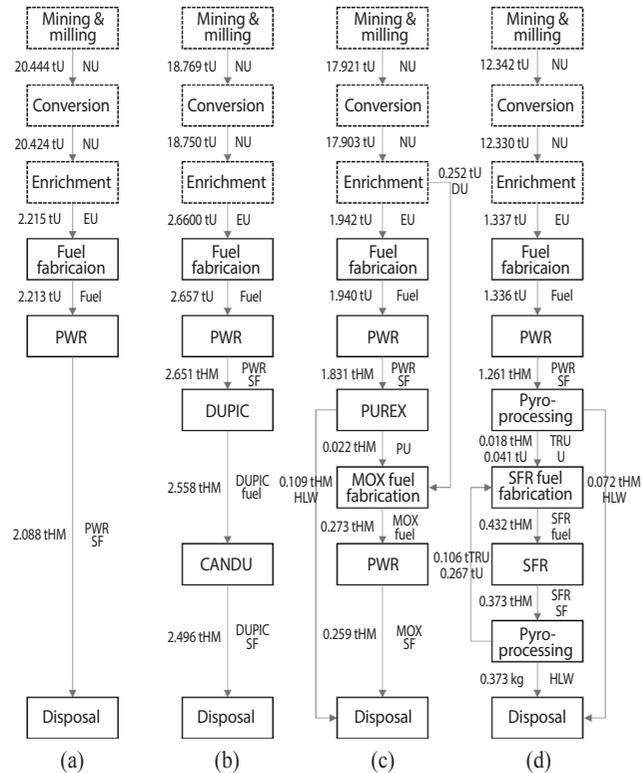


Fig. 2. Material flows based on 1 TWh power generation at equilibrium[4]: (a) OT cycle, (b) DUPIC recycle, (c) PWR-MOX recycle, (d) Pyro-SFR recycle.

방향 등 기후 특성이 반영되어야 함을 의미한다. 본 연구는 핵연료주기 사이의 외부비용 차이를 비교하기 위한 연구로 원전과 핵연료주기 시설의 입지를 특정하지는 않았다. 따라서, 일반 운전 상황에서 환경오염에 대한 비용을 다루지는 않았다.

핵연료주기에 따른 외부비용 평가를 위해서는 국내 핵연료주기들의 특성을 우선 고려해야 한다. Fig. 2와 같이 핵연료주기들은 우라늄 채광부터 시작되는 선행과 사용후핵연료의 처리/처분 과정이 중심이 되는 후행 모두를 포함하고 있으나 국내에서 우라늄 채광이나 농축이 진행되지는 않는다. 따라서, Fig. 2에서 실선 글상자로 표시된 핵연료제조에서부터 시작되는 부분을 비교해보면 핵연료주기에 따라 1) 요구되는 농축 우라늄(EU, enriched uranium) 양이 다르고 2) 필요한 원자로의 종류가 다르며 3) 처분장에 보내지는 처분 대상 물질의 양이 다른 것을 발견할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 차이들을 반영하여 1) 에너지 공급 안보비용과 2) 사고대비 비용 그리고 3) 수용성 비용을 추산하였다.

3.1 에너지 공급 안보비용

에너지 공급 안보비용은 문헌[6]에서 사용된 접근 방법을 이용하여 추산하였다. 에너지 공급 안보비용은 특정 기간 동안 어떤 에너지원의 공급이 중단되었을 때 에너지원 저장량이 크면 이를 상쇄하기 위한 기회비용이 감소한다는 개념으로 다음 식으로 계산되었다.

$$C_{Si} = \pi_i(G_i - R_i) \tag{1}$$

위 식에서 C_{Si} 는 i 종류의 에너지원에 대한 공급 안보비용이며 π_i 는 공급 중단 확률, G_i 와 R_i 는 각각 i 종류 에너지에 의해 생산된 GDP의 양과 에너지 공급 중단 시 i 에너지원의 저장량에 의해 상쇄되는 GDP 양을 의미한다.

2013년 기준 국내총생산 명목 GDP는 1,363조원(2013년 말 환율 1,045원/USD 기준)이었으며 원자력 발전으로 생산된 전력은 138.8 TWh로 전체 발전량 중 26.8%를 차지하였다. 이를 기준으로 원자력에 의한 전력생산의 기여로 발생된 GDP를 365.3조원으로 추산하였다.

현재, Table 1의 원자력 발전량인 138.8 TWh가 모두가 OT 핵연료주기로 생산되고 필요한 농축 우라늄의 1년 소비량을 저장할 수 있다면 Fig. 2의 평형 물량 계산을 기초로 계산된 국내 농축 우라늄의 저장 용량은 307.4 tU이 된다. 이러한 가정 하에서 4개의 핵연료주기별 R_i 를 계산하면 Table 2와 같다.

Table 1과 비교해서 Table 2에서 보인 것과 같이 R_i 값이 G_i 값을 넘어서는 경우를 고려하여 식(1)을 다음 식(2)와 같이 수정하였다. 또한, 본 연구에서는 식(3)과 같이 선형적으로 G_i 에 시간 의존성이 부여되었다.

$$C_{Si} = \pi_i[G_i(t) - R_i] \cdot u[G_i(t) - R_i] \tag{2}$$

$$\text{where, } u[G_i(t) - R_i] = 1 \text{ for } G_i(t) - R_i > 0 \\ = 0 \text{ for } G_i(t) - R_i \leq 0$$

$$G_i(t) = 365.3t \tag{3}$$

식 (2)에서 u 는 단위스텝함수로 R_i 가 G_i 보다 큰 경우 공급 안보비용이 발생하지 않는 것을 반영하기 위해 도입되었다. 식 (3)에서 t 는 연(year) 단위의 시간이다. 최종적으로, 식 (2)에서 추산된 공급 안보비용은 시간 t 까지 생산된 전력량

Table 1. Basic data for energy supply cost estimation (End of 2013)

π_i ¹⁾	GDP (trillion KW) ²⁾	Nuclear power generation ³⁾		G_i (trillion KW)
		Amount (TWh)	Proportion (%)	
1.372×10^{-3}	1,363	138.8	26.8	365.3

¹⁾ Jun et al. [6]

²⁾ BOK (www.bok.or.kr)

³⁾ Korea Energy Economics Institute (www.keei.re.kr)

Table 2. R_i on nuclear fuel cycles (trillion KW)

OT	DUPIC	PWR-MOX	Pyro-SFR
365.3	304.2	416.7	605.2

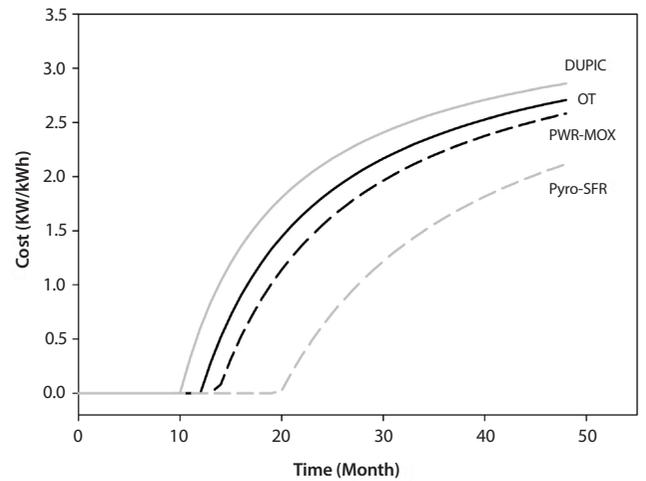


Fig. 3. Energy supply cost with nuclear fuel cycles.

단가로 계산되었다. 결과는 Fig. 3으로 도시하였다.

Fig. 3에 나타낸 것과 같이 DUPIC 핵연료주기는 단위 전력 생산당 가장 많은 우라늄을 소비하므로 우라늄 공급 중단 10개월 후부터 이를 대체하기 위한 기회비용으로 에너지 공급 안보비용이 발생하며 OT 핵연료주기, PWR-MOX 핵연료주기, Pyro-SFR 핵연료주기가 순서대로 13, 14, 22 개월부터 에너지 공급 안보비용이 발생된다. 48 개월을 기준으로 금액을 비교하면 CANDU, OT, PWR-MOX, Pyro-SFR이 각각 2.86, 2.71, 2.58, 2.11원/kWh의 공급 안보비용이 필요한 것으로 계산되어 Pyro-SFR이 가장 적은 비용이 소요될 것으로 추산되었다.

본 연구에서 사용된 가장 큰 전제는 GDP에 전력생산량을 직접적으로 연계한 것이다. 이는 문헌[6]에서 사용된 방법을

활용한 것으로 GDP에 전력이 직간접적으로 영향을 미치고 있다고 가정하는 것이다. 실제 에너지 소비량과 GDP를 연계시킨다면 국내 에너지 소비량 중 전력부분만을 고려하여 GDP를 수정할 수 있을 것이다. 다만, 이러한 계산을 위해서는 에너지 소비량과 GDP 기여에 대한 연구가 필요하다는 것은 언급할 필요가 있다.

3.2 사고위험비용

핵연료주기 과정에서 발생하는 사고는 핵연료/사용후연료 운송 사고, 원전 중대사고, 처리시설 임계사고 등 다양한 형태가 있다. 이 모든 사고 유형을 고려하여 비용을 추산하는 것은 오랜 시간의 노력이 필요하며 다양한 모델을 이용한 접근이 이루어져야 한다. 따라서, 본 연구에서는 상대적으로 연구 자료가 잘 정리된 원전 중대 사고에 대한 위험비용을 핵연료주기 별로 추산 비교하였다.

원전 중대사고 비용 평가 방법은 상호부조 방법, 손해기대치 접근법, 위험회피 비용법 등 여러 방법이 있으나 본 연구에서는 손해기대치 접근법을 이용하였다. 이는 한 국가에서 운영되는 원전의 수와 용량이 정의되어야 하는 상호부조 방법이나 설문 조사 등 사회적 자료가 필요한 위험회피 비용법에 비해 손해기대치 접근법이 개념적으로 정의된 핵연료주기 비교에 적합하기 때문이다.

손해기대치 접근법을 적용하기 위해서는 손해비용과 사고발생빈도가 필요하다. 본 연구에서 원전 중대사고에 대한 손해비용에 대해서는 문헌[7]에서 정리한 수치를 사용하였으며 사고발생빈도는 원전 종류에 따라 다르게 적용하였다. 먼저 PWR과 CANDU는 현재 상업적으로 운전 중인 원전들로 문헌[7]에서 사용한 여러 사고 발생 확률을 사용할 수 있을 것으로 판단하였다. 반면, SFR의 경우 사고 확률에 대한 국제기구나 규제기관의 자료는 찾을 수 없었다. SFR은 CDA(Core Disruptive Accident) 확률을 낮추기 위해 원자로 설계에서 피동잔열제거계통 개념 등을 반영하고 있다. 이와 같은 설계가 반영되었을 때 SFR의 CDA 확률은 연간 10^{-7} 이하가 될 것이라는 보고서가 발표된 바 있다[8].

사고확률은 연간 기준으로, 본 연구에서는 1 TWh 전력생산을 기준으로 계산된 물질흐름을 사용하였기 때문에 기준을 맞추기 위해 다음 Table 3과 같이 사고확률을 연간 8,760 시간(= 365일/년×24시간/일) 운전을 기준으로 시간당

Table 3. Accident probability with nuclear power plant types

Reference	PWR and CANDU		SFR	
	Per year	Per hour	Per year	Per hour
IAEA	0.00001	1.142×10^{-9}		
World NPP	0.00035	3.995×10^{-8}	10^{-7}	1.142×10^{-11}
Japan NPP	0.002	2.283×10^{-7}		
NRC	0.0001	1.142×10^{-8}		

Table 4. Accident probability with nuclear fuel cycle based on 1 TWh power generation

Fuel cycle	Operation time (h)	Accident probability
OT	· PWR: 1,176	· IAEA: 1.343×10^{-6} · World NPP: 4.698×10^{-5} · Japan NPP: 2.685×10^{-4} · NRC: 1.343×10^{-5}
DUPIC	· PWR: 835 · CANDU: 452	· IAEA: 1.470×10^{-6} · World NPP: 5.142×10^{-5} · Japan NPP: 2.938×10^{-4} · NRC: 1.470×10^{-5}
PWR-MOX	· PWR: 1,176	· IAEA: 1.343×10^{-6} · World NPP: 4.698×10^{-5} · Japan NPP: 2.685×10^{-4} · NRC: 1.343×10^{-5}
Pyro-SFR	· PWR: 711 · SFR: 776	· IAEA: 1.018×10^{-6} · World NPP: 2.841×10^{-5} · Japan NPP: 1.623×10^{-4} · NRC: 8.128×10^{-6}

사고확률로 변경하여 사용하였다.

핵연료주기별 각 원자로의 운전시간은 1 TWh 기준으로 문헌에 계산되어 있으며[4] 이를 기준으로 1 TWh 전력 생산 시 핵연료주기 별 사고확률은 원자로별 사고확률을 합산하여 Table 4와 같이 결정하였다. 최종적으로 세계 평균 원전 중대사고 피해비용인 58조원을 이용하여 핵연료주기별 단위 전력 생산에 대한 사고 피해 비용을 계산하여 Table 5의 결과를 얻었다.

Table 5의 결과로 DUPIC 핵연료주기에서 가장 큰 피해비용이 추산되었으며 OT와 PWR-MOX는 동일한 비용, 그리고 Pyro-SFR이 가장 적은 비용으로 계산되었다. 이는 CANDU 원자로 용량은 713 MW로 1000 MW인 PWR에 적으며 이로 인해 DUPIC 핵연료주기의 총 원전 운전시간이 가장 길기

Table 5. Accident risk cost with nuclear fuel cycle (KW/kWh)

Reference	OT	DUPIC	PWR-MOX	Pyro-SFR
IAEA	0.07789	0.08526	0.07789	0.05904
World NPP	2.725	2.982	2.725	1.648
Japan NPP	15.57	17.04	15.57	9.413
NRC	0.7789	0.8526	0.7789	0.4714

Table 6. Conflict cost on low and intermediate radioactive waste disposal site [9]

	Cost
Unit cost of low and intermediate radioactive waste disposal (million KW/m ³)	65.52
Unit cost of radioactive waste disposal of other countries (million KW/m ³)	15.31
Difference between the unit costs (million KW/m ³)	50.21
Accumulated amount of low and intermediate radioactive waste (m ³)	18,712
Total additional cost (million KW)	939.459

때문에 나타난 결과이며 SFR의 낮은 사고 확률이 반영되어 SFR의 적은 발전 용량(600 MW)에도 Pyro-SFR의 결과가 가장 적은 비용으로 추산되었다.

3.3 수용성 비용

수용성 비용은 가장 추산하기 어려운 비용 항목으로 본 연구에서는 문헌[9]에서 채택한 것과 같이 대리변수를 이용하였다. 핵연료주기에 따라 최종 처분장에 보내지는 폐기물은 사용후핵연료(SF, spent fuel) 또는 처리공정에서 발생하는 고준위 폐기물(HLW, high-level waste)이 될 것이다. 사용후핵연료는 구조체를 해체하지 않는다면 동일한 질량의 고준위 폐기물에 비해 큰 부피를 차지하게 되므로 폐기물의 비용을 중저준위 폐기물 처분 단계에서와 같이 부피로 전환하여 계산하는 데는 어려움이 있다. Fig. 2에서 보인 것과 같이 핵연료주기별 물량 계산에서 처분장에 보내지는 폐기물의 양은 금속의 질량 단위로 제시되었다. 본 연구에서는 Table 6에서 보인 중저준위 폐기물 처분단가 차이를 대리변수로 하여 고준위 폐기물 수용성에 대한 최소 비용으로 사용

Table 7. Public acceptance cost with nuclear fuel cycle

	Amount of Waste (tHM/TWh)	Acceptance cost (KW/kWh)
OT	2.088	0.1048
DUPIC	2.469	0.1240
PWR-MOX	0.368	0.0185
Pyro-SFR	0.0724	0.0036

하였으며 1 m³에 1 tHM이 처분되는 것으로 가정하였다. 금속의 밀도는 상당히 높아 1 m³의 금속은 1 t보다 더 많은 무게를 보이지만 최종처분 단계에서는 처리과정에서 발생된 폐기물이 고화체 등과 혼합되어 처분되며 사용후핵연료는 핵연료 구조체와 함께 처분되기 때문에 이 수치를 가정하였다. 따라서, 고준위 폐기물 처분 단가 차이 단위를 50.21 백만원/tHM로하여 수용성 비용을 계산하였다.

위에서 설명된 가정을 전제로 Fig. 2에 표시된 처분량을 기준으로 계산된 핵주기별 수용성 비용은 Table 7과 같다. 수용성 비용 역시 가장 적은 폐기물을 발생시키는 Pyro-SFR 핵연료주기가 가장 낮은 것으로 계산되었다. Table 7에 제시된 수치들은 폐기물 양을 기준으로 단순 비교를 위한 것이며 실제로 수용성 비용으로 얼마가 필요할 것인지는 보다 사회적인 연구 방법으로 접근이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 사용후핵연료 정책 방향 결정에 필요한 비용 평가 방법의 한 측면으로 핵연료주기의 외부비용 평가를 수행하였다. 오랜 기간 동안 전력 생산의 한 축을 담당한 원자력은 국가 에너지 수급 계획에서 중요한 공급원으로 여겨지고 있다. 따라서, 경제성장에 의한 전력 수요 증가에 대응하여 경제적이고 안정적인 에너지를 구성하기 위해서는 화석연료 등 다양한 에너지원들 사이에서의 비교뿐만 아니라 원자력의 핵연료주기들에 대한 경제성 비교 평가 역시 필수적인 요소이다.

일반적으로 에너지분야에서 경제성을 비교할 때는 원료비, 건설비, 운영비 등 사업자가 지불해야 하는 사적비용에 중점을 두었다. 그러나, 사적비용을 시장가격으로 결정할 경우에는

에너지 생산과 분배 과정에서 발생하는 다른 경제주체들에 대한 경제적 영향이 배제되는 문제가 야기 된다. 한 경제주체의 활동에 의해 다른 경제주체가 받는 영향을 비용으로 평가할 수 있으며 이를 외부비용이라 한다. 그러므로 에너지 분야 역시 경제성 분석에 이러한 외부비용이 포함되어야 실제적인 시장가격으로 비교가 가능하게 된다.

본 연구에서는 원자력 발전과 관련된 외부비용 평가 방법을 분석하여 핵연료주기 외부비용 평가에 반영될 수 있는 항목들을 도출하였다. 핵연료주기 외부비용 평가를 위해 고려될 수 있는 핵연료주기로 OT(직접처분), DUPIC(PWR-CANDU 연결), PWR-MOX(PWR 습식재처리), Pyro-SFR(파이로 처리와 고속로 연계)의 네 가지를 선정하였다. 이들에 대한 평형상태 물질흐름을 비교를 위한 기준 상태로 설정하였다. 원자력발전의 외부비용 평가에 고려되었던 항목들을 분석하여 핵연료주기에서 에너지 공급 안보비용, 사고위험비용과 수용성 비용을 외부비용 항목으로 도출하였다.

에너지 공급 안보비용은 에너지원의 공급이 중단되었을 때 발생하는 기회비용 개념으로 에너지의 공급 중단 확률과 공급 중단에 의한 국가 경제 기여도를 비용화한 것으로 국내에 에너지원의 저장용량이 커질수록 국외로부터 들어오는 에너지원의 공급 중단에 의한 영향이 완화되는 현상을 반영하였다. 따라서, 결과는 시간에 의존하는 비용으로 계산되었다. 각 핵연료주기에 소요되는 우라늄 양이 상이하기 때문에 동일한 저장용량 하에서 가장 많은 우라늄을 소비하는 순서로 DUPIC, OT, PWR-MOX, Pyro-SFR은 농축 우라늄 공급 중단 10 개월, 13 개월, 14 개월, 22 개월 후부터 각각 안보비용이 발생하는 것으로 계산되었으며 48 개월을 기준으로 2.86, 2.71, 2.58, 2.11 원/kWh의 에너지 공급 안보비용이 각 핵연료주기별로 추산되었다.

사고위험비용은 각 핵연료주기의 원자로 구성에 주목하여 원전의 사고확률의 기초로 사고발생에 의해 피해비용을 사고위험비용으로 산정하였다. 피해비용은 문헌에서 얻은 세계 평균 원전사고 비용을 채택했으며 사고확률 역시 문헌값들을 이용하였다. 사고확률은 IAEA 기준, 세계원전운영 기준, 일본원전운영 기준, NRC 기준별로 계산하였다. IAEA 기준으로 계산된 사고위험비용을 예로 들면, Pyro-SFR 핵연료주기가 0.059 원/kWh로 가장 낮았으며 동일한 원전을 사용하는 OT와 PWR-MOX는 0.078 원/kWh, DUPIC은 0.085 원/kWh로 계산되었다. 이는 Pyro-SFR 핵연료주기에 포함된

SFR의 사고확률이 PWR과 CANDU에 비해 낮은 수치로 제공되었기 때문이다. 제4세대 원전들의 공통적인 목표가 제3세대 원전들과 비교하여 안정성을 높이는 것이므로 SFR 역시 PWR보다 낮은 사고확률을 보일 것으로 예상되나 사고확률 수치에 대해서는 지속적인 검토가 필요할 것이다.

수용성 비용은 가장 사회적인 비용으로 정확한 추산이 어렵다. 이는 사회적 항목으로 핵연료주기 사이의 기술적 차이로 발생하는 것이 아니기 때문이다. 조사된 문헌에서는 폐기물 처분 비용을 대리변수로 사용하였으며 본 연구에서도 이와 같은 접근 방식을 사용하였다. 분석된 물질 흐름에서 폐기물 양을 비교하여 폐기물 단위 중량당 발생하는 국내외 처분비용 차이를 수용성 비용으로 사용하여 OT, DUPIC, PWR-MOX, Pyro-SFR 각각 0.105, 0.124, 0.019, 0.004 원/kWh의 수용성 비용을 추산하였다. 결과는 폐기물 양이 반영된 것으로 지속적인 핵물질 재순환이 발생하는 Pyro-SFR 핵연료주기에서 가장 적은 폐기물이 발생되기 때문에 Pyro-SFR의 수용성 비용이 가장 적게 나타났다. 중저준위 폐기물 처분 비용을 다루었던 문헌과 달리 본 연구에서는 핵연료주기 최후단에서 발생하는 폐기물들이 고준위 폐기물이므로 이에 대해서는 오차가 발생할 수 있을 것으로 예상되나 핵연료주기별 차이를 비교할 수 있는 결과로는 판단된다.

종합하면, 적은 양의 우라늄을 사용하고, 사고확률이 낮은 원전을 채택하고, 적의 양의 폐기물을 발생시키는 핵연료주기 순서로 낮은 외부비용이 발생하는 것으로 나타나 Pyro-SFR의 외부비용이 가장 낮을 것으로 예상되었다. 그러나, 본 연구에서는 고려되지 않은 측면으로, 정상적인 운전 상태에서는 핵연료 가공, Pyroprocessing 등과 같이 여러 핵주기 시설이 필요한 Pyro-SFR이 가장 많은 위해물질을 방출할 가능성이 있다. 이를 계산하기 위해서는 앞서 지적했던 것과 같이 핵주기 시설의 지리적 위치와 자연, 인문 환경 등에 대한 조사와 모델 개발이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2014M2A8A5022170)을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- [1] Organization for Economic Cooperation and Development Nuclear Energy Agency, “Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management”, NEA No. 5990, OECD (2006).
- [2] Organization for Economic Cooperation and Development Nuclear Energy Agency, “Trends towards sustainability in the nuclear fuel cycle”, NEA No. 6980, OECD (2011).
- [3] Organization for Economic Cooperation and Development Nuclear Energy Agency, “Transition towards a sustainable nuclear fuel cycle”, NEA No. 7133, OECD (2013).
- [4] B.H. Park, F. Gao, E.H. Kwon, and W.I. Ko, “Comparative study of different nuclear fuel cycle options: Quantitative analysis on material flow”, *Energy Policy*, 39, 6916-6924 (2011).
- [5] W.I. Ko and F. Gao, “Economic analysis of different nuclear fuel cycle options”, *Sci. Technol. Nucl. Install.*, 2012, ID 293467 (2012).
- [6] E. Jun, W. Kim, and S.H. Chang, “The analysis of security cost for different energy sources”, *Applied Energy*, 86, 1894-1901 (2009).
- [7] D.S. Noh, “Study on appropriate power mix considering economic and social cost of nuclear power”, Korea Energy Economics Institute (2013) (in Korean).
- [8] A.M. Tentner, “Severe accident approach – Final report. Evaluation of design measures for severe accident prevention and consequence mitigation”, ANL-GENIV-128 (2010).
- [9] G.H. Hur, “Issues and challenges on nuclear power generation cost”, National Assembly Budget Office (2014) (in Korean).