國內 原電 運轉에 따른 保健影響의 外部費用 評價

김경표, 강희청
한국원자력연구원, 건국대학교

2008년 4월 21일 접수 / 2008년 5월 13일 1차수정 / 2008년 5월 15일 채택

본 연구에서는 국내 4개 원전 부지에서 가동 중인 20기에 대한 보건영향을 평가하였다. 이를 위해 국제원자력기구가 최근 개발하여 보급하고 있는 원전에 대한 평가도구인 '뉴크팩스(NukPacts) 모형'을 활용하였다. 국내 원전의 부지별 피폭 경로에 따른 중대 영향인자를 분석하고 보건영향 발생 빈도를 비교하며, 보건영향의 연간 피해비용을 산출하여 발전량당 피해비용을 유럽 국가의 산출 결과와 비교하였다. 동일 배출량 조건 하에서의 상대적 중요도, 피폭 경로의 상대적 중요도 및 연도별 경향 분석 등을 통해 부지별로 가장 크게 영향을 미치는 방사성물질을 분석하여 최소 비용으로 그 효과를 극대화할 수 있는 방안을 도출하였다. 주요 입력 파라미터의 변화에 따른 영향을 분석하기 위하여 인구 밀도, 유효 배출 고도 등에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

중심어 : 원자력발전소, 보건영향, 외부비용, 뉴크팩스 모형, 영향경로, 피해비용

1. 서 론

인류의 복지 향상을 위하여 '지속가능 발전'을 추구하려면 에너지의 안정적 공급이 필수적인 요소이므로 세계 각국은 에너지 수급 균형을 위한 정책을 중점적으로 추진하고 있다. 현재 전 세계적으로 약 16억 명이 전력을 공급받지 못하고 있으며, 약 24억 명은 아직도 전통적인 바이오매스에 의존하고 있다. 이러한 측면에서 근대적인 에너지 시스템을 공급받지 못하는 세계 인구의 1/4을 포함하여 모든 인류의 에너지 수요를 충족시킬 수 있는 글로벌 에너지 안보가 절대적으로 필요하다[1]. 최근 선진국을 중심으로 온실가스 감축과 관련된 기술개발이 더욱 가속화되고 있다. 우리나라의 경우 현재 온실가스 배출이 1990년에 비해 두 배 가까이 증가하였으며, 이중 80% 이상이 에너지 사용에서 발생되고 있다. 이러한 상황 하에 선진국과 같은 온실가스 감축 의무의 부담은 우리나라 경제에 큰 타격을 줄 것이 명백하다[2]. 다행히도 우리나라는 온실가스를 직접 배출하지 않는 원자력발전을 국가 산업 발전의 원동력으로 육성한 결과, 가압경수로 16기와 가압중수로 4기 등 총 20기를 운영함으로써 전력을 안정적으로 공급하고 있다.

국가 경제 개발을 지원하고 사회 복지를 증진시키기 위하여 에너지의 이용은 필수적이지만, 어떤 기술을 사용하게 되더라도 에너지의 생산과 소비는 인류 보건 및 환경에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 특히 에너지 사용은 인체 보건, 자연생태계 및 건축물 등 다양한 수용체에 영향을 미치므로 이에 따른 피해가 발생한다. 이와 같은 피해가 에너지의 시장 가격에 반영되지 않을 경우 이를 외부비용이라 일컬으며, 전통적으로 이러한 외부효과는 무시되어 왔다. 그렇지만 유럽공동체(EC)의 '제5차 환경행동프로그램', '경제성장, 경쟁 및 고용에 대한 백서' 그리고 '에너지 백서'에서 볼 수 있듯이 외부효과의 내부화에 대한 관심이 점차 증대됨에 따라 유럽 선진국과 국제기구는 이의 중요성을 인식하게 되었다. 이러한 배경하에 1991년 국제적으로 합의된 외부효과의 평가도구를 개발하고 이를 각각의 에너지원에 대해 적용할 수 있도록 국제공동연구 프로젝트인 '익스턴이(ExternE : Extenalities of Energy)' 연구가 유럽공동체 연구개발 프로그램의 일환으로 착수되었다. 이를 통해 유럽공동체는 미국과 공동으로 다양한 전력 부문의 외부효과를 정량화할 수 있도록 통일된 방법론을 개발하고 실증하는 연구를 수행하였다[3].

2007년 9월 호주에서 개최된 아·태경제협력(APEC) 정상회의가 채택한 '시드니선언'은 원자력을 'Zero-emission energy source'로 평가하는 성명서를 발표한 바 있다. 비록 원전이 온실가스를 생산하지는 않지만 원전 가동 시 기준치 이하일지라도 방사성물질을 배출하므로 이에 의한 인체 보건의 영향을 산출하여 이를 정량적으로 제시하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 국내 원전으로부터 대기 중으로 배출되는 방사성물질에 따른 인체 보건영향을 분석하고, 이의 피해비용을 정량적으로 평가함으로써 원전으로 인한 사회적 비용을 추정하고자 한다. 또한 원전 부지별로 배출되고 있는 방사성물질의 영향 정도를 분석하여 그 중요도에 따라 중점 관리 핵종을 제시함으로써 최소 비용으로 인체 보건영향을 극소화할 수 있는 방안을 도출하고자 한다.

책임저자 : 김경표, kpkim@kaeri.re.kr, 한국원자력연구원
대전광역시 유성구 대덕대로 1045

2. 연구방법과 범위

에너지 관련 국제기구는 '지속가능 발전'을 위하여 국제연합의 밀레니엄 개발목표(Millennium Development Goals)를 중점 추진하고 있으며, 이의 일환으로 에너지 발전원별 환경 영향 평가를 수행해 오고 있다. 전력 부문의 인체 보건영향 평가 측면에서 가장 주목받고 있는 연구는 유럽공동체가 1991 1997년간 수행한 '익스턴이(ExternE) 연구'이다.

이 연구는 원자력, 화석연료, 신재생에너지 발전에 대하여 전력생산을 위한 모든 연료주기에 대하여 인체 보건영향의 피해를 외부비용의 개념으로 평가한 것으로, 에너지원별 환경의 영향 분석, 위험도 평가 및 외부비용 분석으로 크게 구분할 수 있다. 유럽에서 이 연구의 결과가 이용되는 사례가 점차 많아짐에 따라 에너지 시스템의 효과적인 위험도 평가 방법으로 인정받고 있다.

최근 국제원자력기구(IAEA)는 원자력, 화력발전 및 수력발전으로 인한 환경 영향을 분석하기 위해서 '익스턴이(ExternE) 연구'에서 제시한 방법론에 의거하여 '심팩스(SimPacts : Simplified Approach for Estimating Environmental Impacts from Electricity Generation) 모형 패키지'를 개발하여 이를 회원국에 보급하고 있다. 이 패키지는 '뉴크팩스(NukPacts) 모형', '에어팩스(AirPacts) 모형'및 '하이드로팩스(HydroPacts) 모형'으로 구성되어 있다[4]. 본 논문에서는 우리나라 원전 가동 시 배출되는 기체 방사성물질에 의한 보건영향을 부지별로 평가하고 이의 외부비용을 산출하기 위하여 상기 모형 중 이에 적합한 '뉴크팩스 모형'을 사용하여 그 영향을 분석하였다.

원전의 외부비용 평가를 위하여 피폭경로별 집단선량을 산출하고 이의 피해비용을 산출하며, 선행 연구의 결과와 비교할 수 있도록 발전량당 피해비용을 산출하였다. 특히 주요 입력 변수의 변화에 따른 영향을 파악하기 위해 인구 밀도, 유효 배출 고도 등에 대한 민감도 분석을 수행하였다. '뉴크팩스 모형'의 계산 구간은 '로컬(local)'과 '광역(regional)'으로 나누어진다. 동 모형은 로컬 영역을 반경 100 km 이내로 하고, 광역은 100 1,000 km의 지역을 대상으로 하고 있다. 그러나 본 논문에서는 국내 원전의 가동에 따른 보건영향을 평가하기 위한 것이므로 광역의 범위를 100 400 km로 축소 정의함으로써 우리나라에 미치는 영향을 분석하였다.

보건영향의 외부비용을 정확하게 평가할 수 있도록 이에 필요한 입력 데이터베이스를 구축하였다. 주요 입력 파라미터 중의 하나가 국내 원전 부지 중심 반경 100 km 이내의 인구 밀도이며, 이를 산출하기 위한 기본 자료는 해당 영역 내의 인구 수와 면적이다. 본 논문에서는 한국전력공사 전력연구원이 5년마다 발간하고 있는 '원전 주변 사회 환경 자료' 중 부지 반경 80 km 이내의 인구 분포 자료를 활용하였다. 그러나 80 100 km 영역 내의 인구 분포는 이에 기술되어 있지 않으므로 이 범위에 대해서는 같은 방법으로 16개 방위별로 구분하여 추가로 산출함으로써 100 km 이내인 로컬 영역의 총 인구 수를 추산하였다.

본 논문에서는 우리나라가 채광, 정련, 변환, 농축, 재처리 등 핵연료 전주기에 대한 시설이 없으므로 원전의 정상 가동에 따른 방사성물질의 보건영향만 평가하였다. 따라서 '익스턴이(ExternE) 연구'를 통해 유럽 국가가 채광, 정련, 변환, 농축, 핵연료가공 등 선행 핵연료주기와 재처리, 중저준위 방사성폐기물 처분, 고준위 방사성폐기물 처분, 수송 등의 후행 핵연료주기의 전 과정에 대해 평가한 결과 중에서 정상 가동에 따른 보건영향만을 본 연구 결과와 비교하였다.

3. 보건영향 평가 모델 및 입력 데이터

3.1 모형의 개요

'뉴크팩스 모형'은 대기 확산의 농도 산출을 위해 가우시안 플룸 모델을 이용한다. 중대사고 시 방사성 물질의 누출로 인한 환경 영향을 평가하는 모형은 수십 종의 방사성물질을 대상으로 분석하나 정상 가동 시 기체 방사성물질의 배출로 인한 인체 영향을 계산하기 위해 개발된 코드인 '뉴크팩스 모형'은 10개의 주요 방사성물질에 대해서 분석한다. 로컬 영역 내에서의 방사성물질은 모든 방향으로 균일하게 확산하며 12개의 구간으로 나누어진 격자 내에서의 농도는 균일하다고 가정한다[5,6].

동 모형은 보건영향을 평가하기 위하여 그림 1과 같이 ⅰ) 방사성물질 오염 공기 흡입으로 인한 내부 피폭, ⅱ) 방사성 플룸에 의한 방사성물질 외부 피폭, ⅲ) 지표면에 침적된 방사성물질 오염 토양에 의한 외부 피폭, ⅳ) 오염된 음식물 섭취에 인한 내부 피폭 등 4가지의 피폭 경로를 다루고 있다[7].

피폭선량은 각각의 피폭경로별로 계산된 환경매개체의 농도에 피폭경로별 선량환산 인자(Dose conversion factor)를 곱하여 계산된다. '뉴크팩스 모형'에서 고려하는 4가지 피폭 경로별 선량환산 인자는 표 1과 같다.

'뉴크팩스 모형'은 방사선 피폭으로 인한 영향을 받는 사람들의 리스크를 평가하기 위해 표 2와 같이 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)가 제안한 위험도 계수(Risk factor)를 이용하여 보건영향의 연간 발생빈도를 계산하고, 각각에 단위 비용을 곱하여 이로 인한 피해비용을 산출한다.

3.2 입력 데이터베이스 구축

본 논문에서는 원전에 대한 '뉴크팩스 모형'으로 보건영향을 평가하기 위해 국내에서 가동 중인 원전 4개 부지의 20기 전체에 대해 6년간의 데이터베이스를 구축하였다. 원전으로부터 배출되는 기체 방사성물질에 의한 보건영향을 평가하기 위한 '뉴크팩스 모형'의 주요 입력 자료는 ⅰ) 대기 확산 및 수용체 데이터, ⅱ) 배출 및 기상 관측데이터, ⅲ) 음식물 섭취, ⅳ) 보건영향 및 피해비용 평가로 구성되며 이의 변수들을 요약하면 표 3과 같다.

2001년부터 6년간 국내 4개 원전 부지로부터 대기 중으로 배출되는 주요 10개 방사성물질의 양, 기상 자료, 부지별 대기 안정도별 발생빈도와 연평균 풍속 등 부지 특성 자료는 한국원자력수력(주)가 매년 발간하고 있는 '원전 주변 환경방사선조사보고서'의 수치를 사용하였다[9].

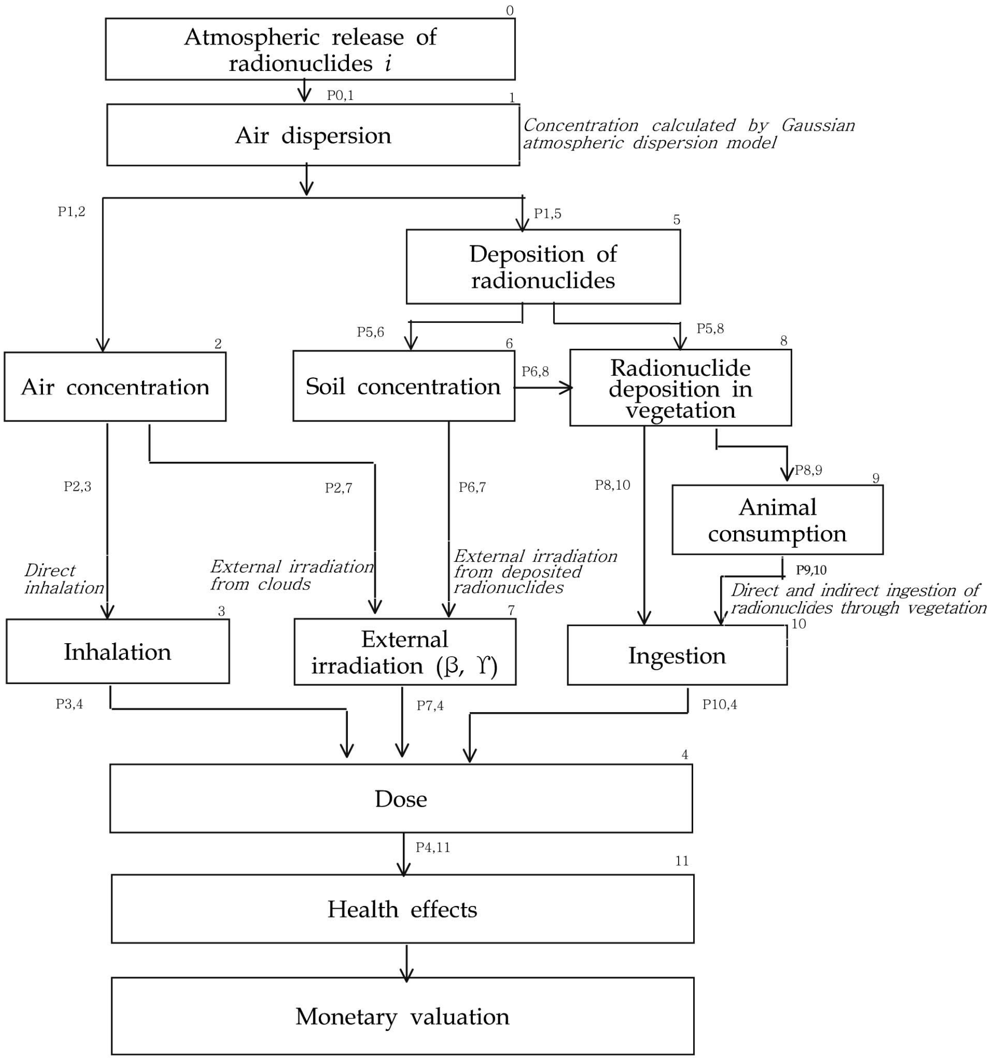


Fig. 1. Atmospheric exposure pathway in the NukPacts model (Source : European Commission DGXII (1995)).

Table 1. Dose conversion factors for exposure pathways in the NukPacts model.

Radionuclide	Half life	Dose conversion factors (Sv/Bq)			
		Inhalation (Sv/Bq)	Plume (Sv/year per Bq/m^3)	Deposited activity (Sv per Bq per m^2 · sec)	Ingestion (Sv/Bq)
H-3	12.3 years	1.73E-11	1.10E-11	-	1.80E-11
C-14	5,710 years	5.60E-10	-	-	5.60E-10
Co-58	71 days	2.90E-09	1.40E-06	1.70E-01	1.00E-09
Co-60	5.3 years	5.60E-08	4.40E-06	6.84E+00	7.20E-09
Kr-85	-	-	4.40E-09	-	-
Xe-133	-	-	5.50E-08	-	-
I-131	8.1 days	1.30E-08	4.90E-07	8.60E-03	2.20E-08
I-133	21 hours	2.30E-09	1.00E-06	1.50E-03	4.20E-09
Cs-134	2.1 years	1.20E-08	2.80E-06	2.28E+00	1.90E-08
Cs-137	30 years	1.30E-08	9.20E-07	4.10E+00	1.30E-08

* Source : Markandya A, Boyd R(1999)

Table 2. Risk factors and economic unit values for main stochastic health effects in the NukPacts model.

Health effects	Fatal cancer	Non-fatal cancer	Inhalation (Sv/Bq)
Risk factors (cases/man Sv)	5.00E-02	1.20E-01	1.00E-02
Economic unit values (US$ of year 2000/case)	1.10E+06	3.67E+05	1.10E+06

* Source : 1) ICRP(1991), 2) Markandya A, Boyd R(1999)

Table 3. Input parameters in the NukPacts model.

Category	**Contents**	**Units**
Disperation and receptor	Population and disperation parameters	persons/km^2
	Urban-rural distribution	%
	Average annual wind speed	m/sec
	Effective release height	m
	Average wet and dry deposition speed	m/sec
	Deposition velocity	m/sec
	Mean adult annual breathing rate	m^3/year
Emissions and meteorology	Release rate of radionuclides	Bq/sec
	Occurrence of stability for Pasquill stability classes(A,B,C,D,E,F)	%
Food consumptions	Average consumption rate for each of eight major food groups	kg per person · year
	Edible fraction for each of eight major food groups	%
Health effects and valuation	Risk factors for health effects	cases/man Sv
	Economic unit values for fatal and non-fatal cancer	US$/case
	Per capita GDP at PPP(purchasing power parity)	US$

4. 결과 및 논의

4.1 보건영향 평가

4.1.1 부지별 피폭경로에 따른 중대 영향인자 분석

국내 4개 원전 부지의 6개년 연도별 피폭경로의 집단선량의 추이를 분석하면 피폭경로는 대부분 호흡에 의한 내부피폭이 많았다. 월성의 경우 기준치 이하이지만 다른 부지에 비하여 발생되는 집단선량이 크게 나타났다. 최근 6년간 국내 원전으로부터 배출되는 기체 방사성물질의 각 부지별 연평균치(2001 2006년)를 모형의 입력 자료로 사용하여 피폭경로별 집단선량을 산출하면 그림 2와 같다.

4.1.2 부지별 피폭경로 영향 비교

국내 원전 부지별 피폭경로의 특성을 비교할 수 있도록 6년간 연평균치(2001 2006년)를 입력 데이터로 사용하여 각 부지의 피폭경로별 구성비를 나타내면 그림 3과 같다. 고리와 영광 원전 부지에서는 대부분 호흡과 플룸의 영향이 크게 나타났다. 그 이유는 주요 배출 방사성물질이 호흡에 영향을 크게 미치는 트리튬이고, 플룸의 영향이 큰 ^{85}Kr, ^{133}Xe이기 때문이다. 이에 비하여 울진의 경우는 보다 다양한 피폭경로에 의해 영향을 받고 있다. 이것은 다른 원전에 비해 상대적으로 입자상 방사성물질인 코발트와 요오드가 많이 배출되었기 때문이다. 한편, 월성 원전 부지의 경우는 ^{14}C이 다량 배출되어 음식물 섭취에 의한 내부 피폭의 영향이 크며, 또한 트리튬도 다른 원전에 비해 수십 배 많이 배출되고 있다. 이와 같이 월성이 다른 부지에서는 거의 검출되지 않는 ^{14}C을 배출하고 있으며, 이것이 음식물 섭취에 의한 피폭에 큰 영향을 미치고 있다. 또한 트리튬의 배출량이 다른 부지에 비해 월등히 많으므로 호흡과 음식물 섭취에 의한 피폭영향에 중요한 영향을 주고 있다.

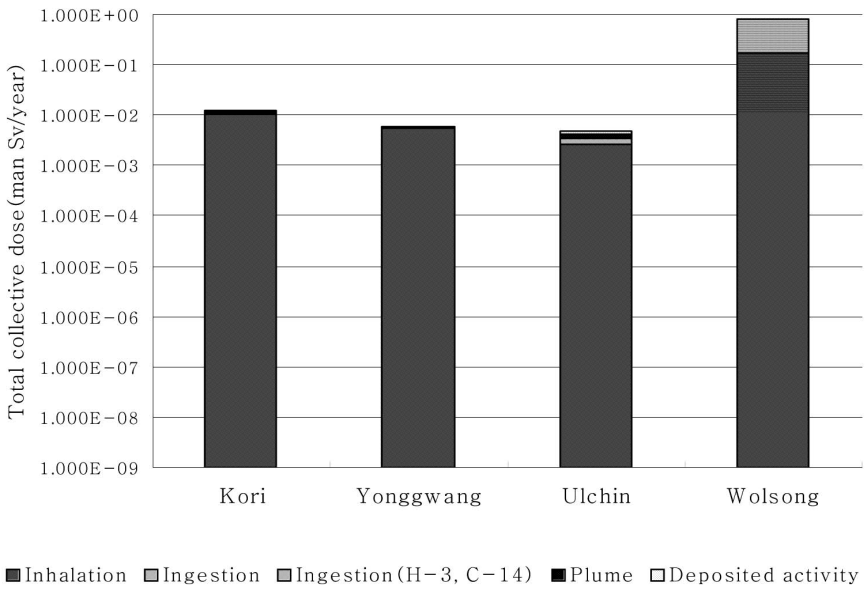


Fig. 2. Total collective dose via an atmospheric exposure pathway with input data for a six years annual atmospheric release from nuclear power plants.

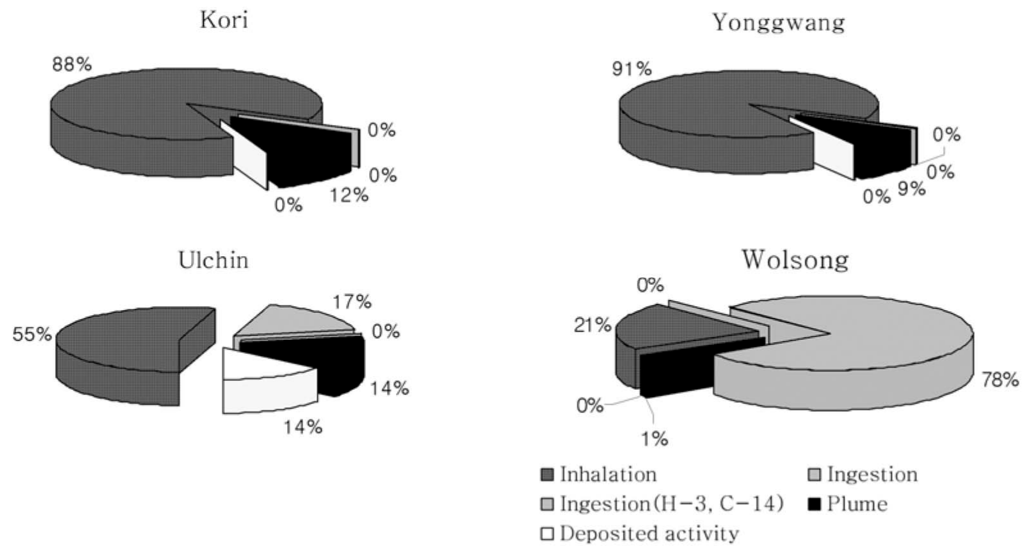


Fig. 3. Influence of the atmospheric exposure pathway by nuclear power plant site.

4.1.3 보건영향의 연간 피해비용 산출

2001 2006년간 국내 원전으로부터 배출되는 기체 방사성물질의 각 부지별 평균치를 모형의 입력 자료로 사용하여 부지별 보건영향의 피해비용을 산출하면 그림 4와 같이 국내 원전 4개 부지 모두 유전적인 영향은 극미하지만 암사망에 의한 보건영향이 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 월성의 경우는 다른 부지에 비하여 상대적으로 큰 피해비용을 보이고 있다. 월성을 제외한 3개 원전 부지를 비교하면 고리, 영광, 울진의 순서로 피해비용이 크게 나타나고 있다. 울진의 경우에는 인구 밀도가 다른 부지에 비해 적기 때문에 같은 양의 방사성물질이 배출된다고 할지라도 이에 영향을 받는 인구가 상대적으로 매우 적음을 알 수 있다. 그러나 월성 부지의 경우에는 전체적으로 배출되는 방사성물질의 종류는 적지만 비교적 영향이 큰 트리튬이 기준치 이하이지만 다른 부지에 비해 많이 배출되고 있다. 또한 가압경수로형 원전에서는 배출되지 않는 ^{14}C이 배출될 뿐만 아니라 그 양도 매우 크기 때문에 가압중수로형 원자로를 가진 월성 부지가 다른 부지에 비해 보건영향으로 인한 피해비용이 매우 크게 나타나고 있다.

이와 같이 원전 가동 중에 배출되는 방사성물질에 의한 보건영향의 피해비용 평가를 통해 배출되는 방사성물질의 종류와 이의 양이 매우 중요한 역할을 하는 변수임을 알 수 있으며, 원전 가동 시 이들 방사성물질에 대한 세심한 관리가

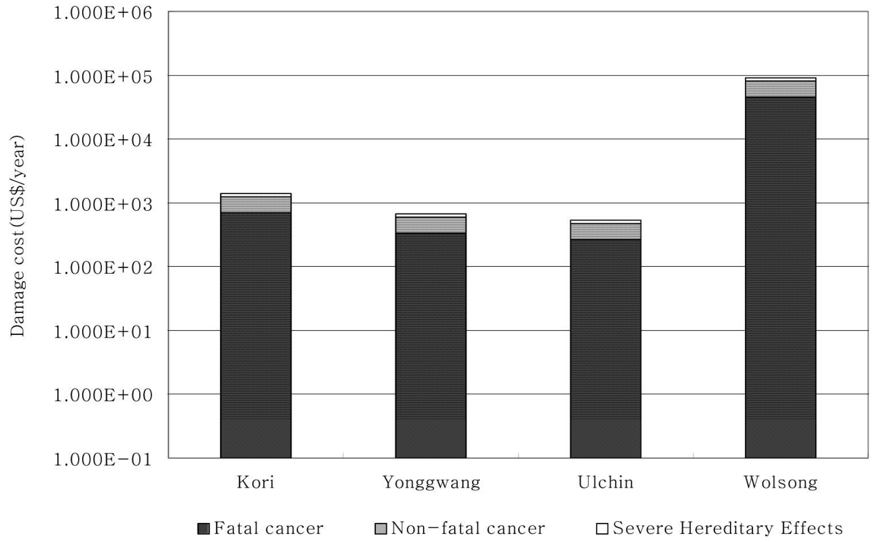


Fig. 4. Damage cost per year on the health effects with input data for a six years annual atmospheric release from nuclear power plants.

필요함을 알 수 있다. 또한 전체적인 보건영향의 비교에 있어서 주변 주민의 수도 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

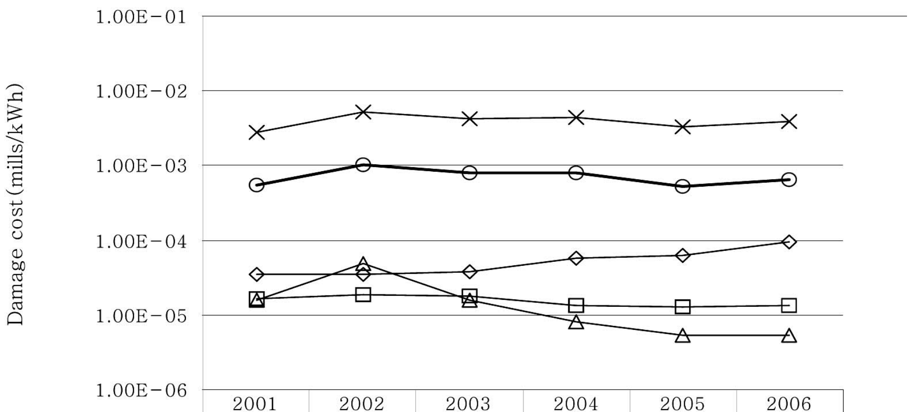
그리고 발전량을 고려한 보건영향에 따른 피해비용의 부지별, 연도별 특성은 그림 5와 같다. 가압경수로의 경우에는 인구 밀도와 전력 생산량의 차이에 의해 고리가 가장 높게 나타나고 있고 울진의 경우가 가장 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 각 부지별 발전소의 가동년수의 차이에 따라 연간 피해비용이 다르게 나타날 수 있다.

4.2 민감도 분석

4.2.1 동일 배출량 조건하에서의 핵종 영향 분석

'뉴크팩스 모형'의 입력파라미터인 각 방사성물질의 배출량이 피해 비용에 어느 정도 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 동일 배출량의 조건 하에서 상대적 중요성을 평가하였다. 이를 위한 대상 부지로는 인구 밀도가 높은 지역에 위치하고 있고 발전소가 노후된 것과 신규 원자로가 함께 운영되고 있는 고리 원전을 선정하였고, 이의 입력 데이터는 최근 6년간의 연평균치(2001 2006년)를 이용하였다. 상대적 중요도의 분석 방법은 방사성물질의 배출량을 제외하고 모든 입력 자료는 서로 같은 수치를 사용하되 방사성물질을 비교하기 위하여 이의 배출량이 각각 100 Bq/sec으로 동일하다고 가정하였다.

그림 6에 나타난 바와 같이 코발트가 가장 영향도가 크며 갑상선의 건강에 크게 영향을 미치는 요오드가 상대적 중요도가 높게 분석되었다. 불활성 기체인 ^{85}Kr와 ^{133}Xe은 그 영향이 매우 적게 나타나고 있다. 또한 트리튬의 영향이 비



	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Kori	3.41E-05	3.46E-05	3.79E-05	5.77E-05	6.15E-05	9.62E-05
Yonggwang	1.66E-05	1.86E-05	1.77E-05	1.34E-05	1.27E-05	1.33E-05
Ulchin	1.59E-05	4.75E-05	1.58E-05	7.98E-06	5.42E-06	5.39E-06
Wolsong	2.72E-03	5.19E-03	4.24E-03	4.44E-03	3.27E-03	3.92E-03
Average	5.52E-04	1.04E-03	7.76E-04	8.05E-04	5.31E-04	6.50E-04

Fig. 5. Six year damage costs trends for a normal operation of nuclear power plants by site.

교적 적은 반면에 ^{14}C의 영향이 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

4.2.2 피폭경로의 상대적 중요도

앞서 분석한 자료를 이용하여 각각의 방사성물질에 대한 피폭경로별 영향의 중요도는 그림 7에 도시된 바와 같다. 같은 배출량의 조건에서 그 영향도가 매우 큰 코발트의 경우 지표면에 침적된 방사성물질에 의한 외부 피폭이 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 불활성 기체인 ^{85}Kr와 ^{133}Xe은 침적이 일어나지 않기 때문에 플룸에 의한 외부 피폭이 전체를 차지하고 있다. 또한 정상 가동 시 보건영향에 많은 영향을 미치는 트리튬은 호흡에 의한 내부 피폭이 대부분을 차지하며, ^{14}C의 경우에는 오염된 경작물의 섭취로 인한 내부 피폭의 기여도가 매우 크다. 요오드는 '뉴크팩스 모형'이 고려하는 4가지 피폭경로에 모두 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4.2.3 인구 밀도의 변화에 따른 영향

앞서 언급한 바와 같이 기체 방사성물질에 의한 보건영향은 주변 지역의 인구 밀도와 밀접한 관계를 갖고 있으므로 인구 밀도의 변화가 피해비용에 어느 정도 영향을 미치는지 분석할 필요가 있다. 이를 위한 민감도 분석은 고리 원전을 대상으로 하며, 6년간 연평균 배출량(2001 2006년)을 입력 파라미터로 사용하였다. 인구 밀도의 변화는 856.2 명/km^2을 기준안으로 하여 10%, 15%, 20%의 범위로 각각 상한과 하한을 비교하였다.

그림 8에 나타난 바와 같이 인구 밀도가 10%의 증감함에 따라 연간 피해비용은 ±1.87% 정도의 변화가 있고, 또한 15%와 20%의 증감에 따라 연간 피해비용은 각각 ±2.8%와 ±3.74%가 변화하는 것을 볼 수 있다. 따라서 인구 밀도의 변화에 따른 연간 피해비용의 변화는 그리 크지 않다는 것을 알 수 있으나 부지별 보건영향을 정확하게 평가하기 위해서는

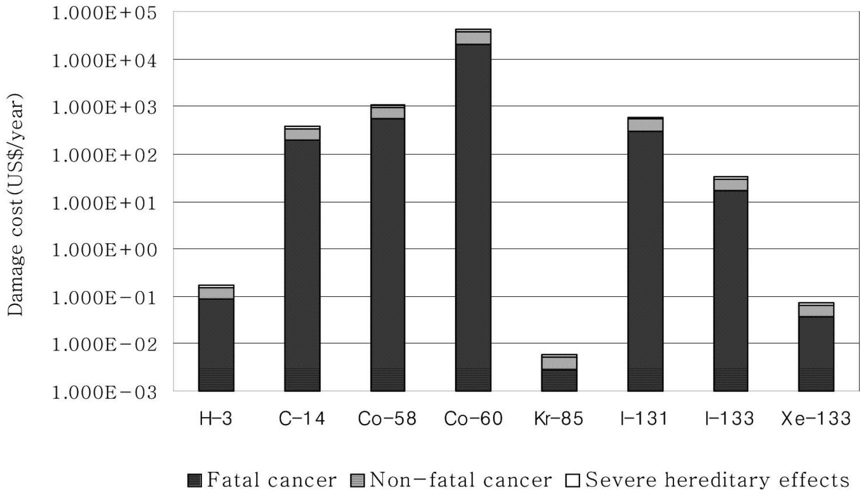


Fig. 6. Damage costs of each radionuclide under the condition of the same amount of atmospheric release rate.

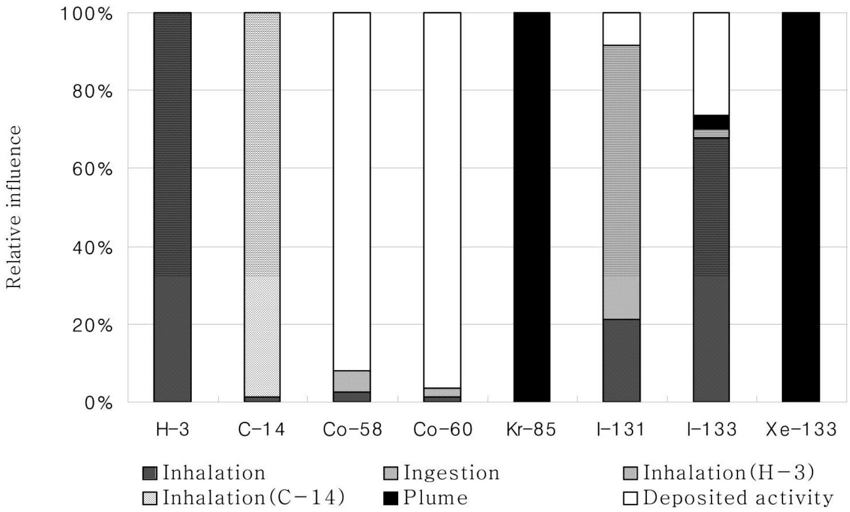


Fig. 7. Relative influence of each radionuclide under the condition of the same amount of atmospheric release rate.

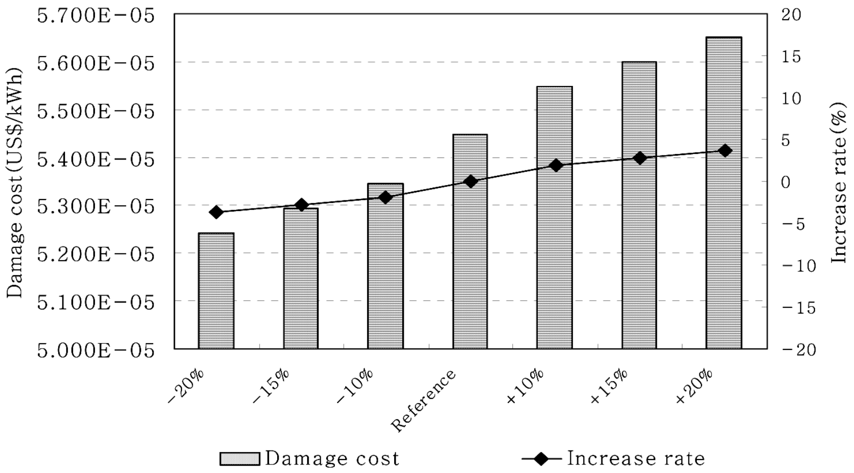


Fig. 8. Damage costs variation with a ±20% change of the reference population density.

입력 데이터로서 인구 밀도는 매우 중요하다. 또한 이 결과를 이용하여 향후 인구 수의 변화에 따른 연간 피해비용을 예측할 수도 있다.

4.2.4 유효 배출 고도의 변화에 따른 영향

방사성물질의 대기 중 배출에 의한 영향 평가는 대기 확산 이론에 기초하고 있는 바, 입력파라미터 중 유효 배출 고도를 변화시킬 때 그 결과를 비교할 필요가 있다. 이에 대한 민감도 분석은 고리 원전을 대상으로 하며, 최근 6년간 연평균 배출량(2001 2006년)을 입력파라미터로 사용하였다. 유효 배출 고도의 기준값은 10 m로 설정하여 가장 보수적인 지상 배출 고도인 1 m 뿐만 아니라 5 m, 15 m, 30 m에 대하여 각각의 변화를 산출하였다.

그림 9에 나타난 바와 같이 가장 보수적으로 보건영향을 미치는 고도로 1 m인 경우 가장 큰 피해비용을 나타내지만 이는 기준값에 비하여 약 0.06% 정도에 불과하다. 일반적으로 배출 고도가 증가할수록 연간 피해비용은 감소하는데 배출 고도가 가장 높은 30 m의 경우 약 0.3% 정도의 감소를 보일 뿐이다. 따라서 배출 고도에 따라 연간 피해비용의 차이는 발생하지만 이는 거의 무시할 수 있는 수준임을 알 수 있다.

4.3 유럽 5개국 원전의 외부비용과의 비교

현재 원전으로부터의 보건영향에 따른 외부비용을 비교할 수 있는 사례는 '익스턴이(ExternE) 연구' 중 원전에 대해 분석한 것 이외에는 적합한 것이 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서 산출한 결과는 유럽 5개국의 수행 결과인 약 2 7 mECU/kWh에 비하여 매우 미미한 값을 보이고 있다[10]. 여기서 ECU는 '익스턴이(ExternE) 연구' 당시의 Europe Currency Unit이다. 앞서 언급한 바와 같이 우리나라에 채광, 정련, 변환, 농축, 재처리 등 핵연료 전 주기에 대한 시설이 없으므로 본 논문에서는 원전의 정상 가동 시에 의한 보건영향을 평가 대상으로 하고 있으나, 유럽의 경우는 선후행 핵연료주기의 전 과정을 모두 평가한 것이므로 이와 같은 차이를 보이고 있다.

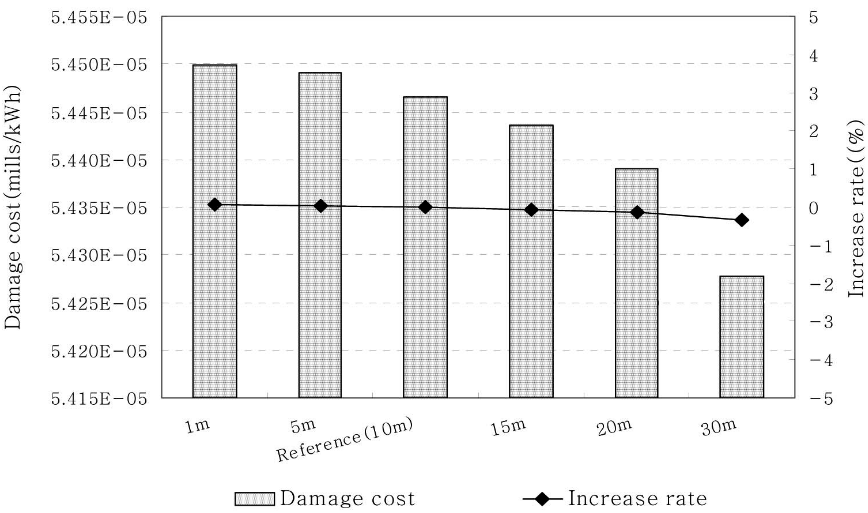


Fig. 9. Damage costs variation with a 1~30 meters change of the effective release height.

그림 10 11에 나타난 바와 같이 유럽 5개국의 선행 연구 결과에 따르면 원전의 정상 가동에 의한 피해비용은 핵연료 주기 전체를 평가한 외부비용의 2 4%를 차지하는 것으로 밝혀졌다. 영국의 경우 피해비용 2 mECU/kWh 중 정상 가동에 따른 보건영향의 피해비용은 0.079 mECU/kWh이다. 이 값은 본 연구에서 산출한 월성의 경우보다 20배가 높은 수치이다. 이것은 영국과의 국민 소득 차이에 의한 비용 환산 인자의 차이와 우리나라 원전 기술의 진보에 기인하며, 또한 영국의 사례에서 측정된 방사성핵종은 67개인 반면, 국내 원전 부지에서는 9개의 방사성핵종만 측정되고 있으므로 이와 같은 차이를 보이고 있다[11].

5. 결 론

유럽에서 국제공동연구로 수행된 '익스턴이(ExternE) 연구'는 원전과 석탄화력발전을 포함하여 12개 전력 부문을 대상으로 수행한 대규모 프로젝트이다. 본 논문에서는 국내 4개 원전 부지의 20기 전체에 대해 6년간에 걸친 데이터베이스를 구축하여 대기 중 배출되는 방사성물질의 보건영향을 종합 평가함으로써 우리나라의 사례를 제시하였다는 데 큰 의미가 있다. 그러나 국내 원전에서의 기체 방사성물질 측정 데이터가 9개에 불과하여 유럽에서 수행된 선행 연구 결과치와 비교하기에는 부족한 점이 있다.

또한 유럽의 경우 핵연료주기 시설 전체를 대상으로 하여 보건영향을 평가한 데 반하여 본 논문에서는 원전의 정상 가동 시 대기 중으로 배출되는 방사성물질의 보건영향만을 평가하였다. 이것은 국내에 핵연료 성형가공 시설을 제외하고는 선·후행 핵연료주기 시설이 없기 때문이다. 따라서 핵주기 시설 전체에 대한 평가가 수행되어야 '익스턴이(ExternE) 연구'의 한국 사례로서 그 의미를 갖으며, 이를 유럽의 선행 연구 결과와 비교할 수 있을 것이다.

한편, 대기오염에 따른 보건영향 평가에 대한 국내 연구는 대부분 유럽의 '익스턴이(ExternE) 연구'와 미국 환경청의 역학 연구 자료를 활용하고 있다. 앞으로 우리나라에서도 보건영향 관련 노출 반응 함수에 대한 학제적 연구가 체계적으로 수행되어야 하며, 이와 함께 불확실성을 최소화할 수 있도록 신뢰성 있는 통계 데이터베이스를 구축하고 이에 대한 분

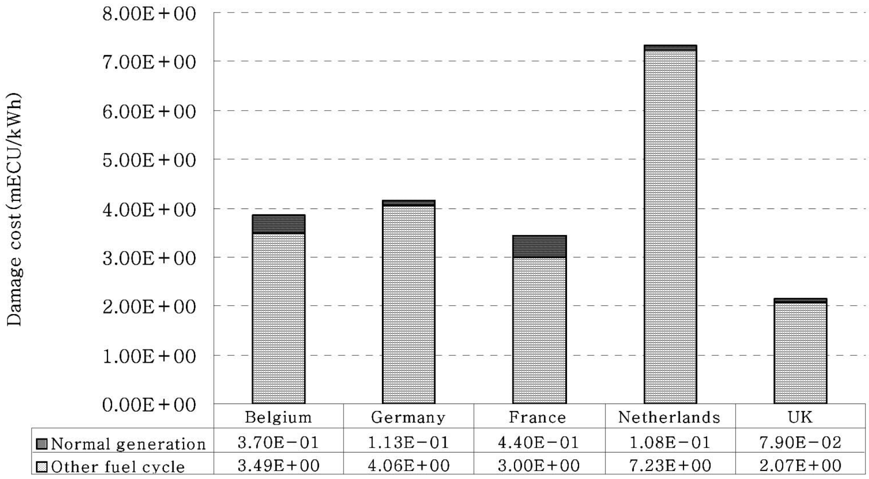


Fig. 10. Damage costs of a nuclear fuel cycle in European countries.

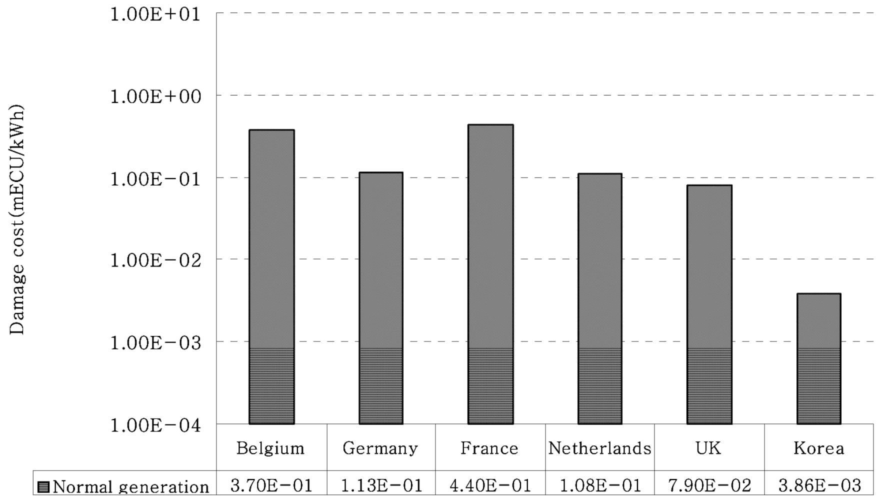


Fig. 11. Damage costs for a normal operation of nuclear power plants.

석이 뒷받침되어야 할 것이다.

아울러 원전으로부터 발생되는 기체 방사성물질의 관리와 관련하여 우리나라에서도 관리 대상 핵종의 수를 폭넓게 고려할 필요가 있다. 이에 따라 향후 기체 방사성물질 측정 데이터의 종류가 많아지면 이를 추가함으로써 보다 신뢰성 있는 분석 결과를 도출하는 것이 필요하다. 또한 선후행 핵연료주기 전 과정의 시설 중 국내에 이미 운영 중이거나 앞으로 건설될 방사성폐기물 처분장과 더불어 현재 개발 중인 사용후 핵연료 재활용 기술의 국내 적용 시 건설될 시설에 대한 보건영향 평가가 종합적으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. ElBaradei M. Nuclear power's changing picture. IAEA Bulletin. 2007 Sep;49(1):18-19.
2. 강승진. 교토의정서 곧 발효, 대비책이 필요하다. 에너지경제신문. 2005.1.28.
3. Mayerhofer P, Krewitt W, Friedrich R. Extension of the accounting framework. ExternE Core Project Final Report. 1997 Dec:1-2.
4. SimPacts. http://www.dis.anl.gov/ceeesa/programs/environmental_analysis_tools.html#simpacts
5. Markandya A, Boyd R. Valuing the human health effects of routine atmospheric releases from nuclear facility. International Atomic Energy Agency. 1999 May:1-26.
6. SENES Consultants Ltd. Review of NukPacts: an environmental assessment package. International atomic Energy Agency. 2003 Aug:2-1~13,3-1~12,A-1~5.
7. European Commission DGXII. Extern E: Externalities of Energy. 1995;Vol.1.Summary: 115.
8. ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Report No.60. Annuals of the ICRP. UK; Pergamon Press. 1991:53.
9. 한국수력원자력(주). 원자력발전소 주변 환경방사선조사보고서 2001 2006년도 연보. 각년도 익년 6월 발간
10. European Commission. External costs: research results on socio-environmental damages due to electricity and transport. Quarterly Magazine. EUR 20198. 2003:12-13.
11. AEA Technology. Power generation and the environment: UK perspective. European Commission DGXII. 1998 Jun: 117-118,133.

An External Costs Assessment of the Impacts on Human Health from Nuclear Power Plants in Korea

Kyoung-Pyo KIM, Hee Jung KANG*

Korea Atomic Energy Research Institute, Konkuk University*

Abstract - As the first comprehensive attempt at a national implementation, this study aims at assessing the external costs of major electricity generation technologies in Korea, particularly an evaluation of the impacts on human health resulting from exposures to atmospheric radiological emissions from nuclear power plants, and a monetary quantification of their damages. The methodology used for the assessment of the externalities of the selected fuel cycles has been developed by the International Atomic Energy Agency (IAEA), namely the SimPacts Model Package. The model is internationally recognized as a tool which can be applied to a wide range of fuels, different technologies and locations, for an externalities study. In this study, the relevant emissions are quantified first and then their impacts on human health are evaluated and compared. The study focused on all the nuclear power plants for the last 6 years (2001~2006) in Korea. With respect to nuclear power, the impact analysis only focuses on a power generation, however the front- and back-end nuclear fuel cycles are not included, namely uranium mining, conversion, enrichment, reprocessing, conditioning, etc., because these facilities are not present in Korea. The analysis results show that nuclear power in general, generates low external costs. The highest damage costs from the nuclear power plants among the 4 sites in Korea were estimated to be 3.9 mills/MWh, which is about 1/20th of the result for a similar case study conducted in the U.K., implemented through the ExternE project. This difference is largely due to the number of radionuclides included in the study and the amount of released radioactive emissions based on up-to-date information in Korea. In this study, the sensitivities of the major factors for nuclear power plants were also calculated. The analysis indicates that there was around a ±3% damage costs variation to a ±15% change of the reference population density and a ±1% damage cost variation to a 1~30 meters change of the effective release height, respectively. These sensitive calculations show that there is only a minor difference when the reference costs are compared.

Keywords : Nuclear power plants, Impacts on human health, externalities, NukPacts model, Impact pathway, Damage costs