

텔파이 기법을 이용한 원전사고의 종합적인 경제적 리스크 평가

장한기, 김주연, 이재기
 한양대학교 원자력공학과

2008년 6월 26일 접수 / 2008년 10월 12일 1차수정, 2008년 11월 14일 2차수정 / 2008년 11월 17일 채택

울진 원전 3,4호기의 가상적 중대사고로 인한 종합적인 경제적 리스크를 평가하였다. 이 연구의 목적을 위해 방사능 구름이 내륙을 향하는 것으로 가정하였다. 평가 과정에서 불확실한 인자의 정량화에는 전문가 판단 및 의견도출에 유용한 것으로 알려진 텔파이 기법을 이용하였다. 종합적인 경제적 리스크는 직접영향 비용과 간접영향 비용으로 구분되므로, 먼저 직접영향에 대한 비용을 평가하고, 예측된 가중치를 이용하여 직접영향 대비 간접영향 비용을 평가하였다. 행동학적 접근방법인 텔파이 문제점을 보완하기 위해 수학적 접근방법인 베이저안 기법을 자료처리 과정으로 하는 모형을 적용하여 간접영향에 대한 경제적 충격량을 예측하였다. 1D 몬테칼로분석(MCA)으로 평가한 간접피해에 대한 가중치는 평균 2.59, 중앙값 2.08로 OECD/NEA에서 제시하는 가중치 1.25보다 높게 나타났다. 작은 국토나 방사선에 민감한 대중 성향과 같은 인자들이 패널의 판단에 영향을 미칠 수 있다. 직접피해 평가모델의 모수를 U형과 V형으로 구분하고 2D MCA를 사용한 종합적 경제적 리스크는 중앙값의 50%ile을 기준으로 2006년 국내총생산의 3.9%에 해당되었으며, 직접피해 영향이 가장 큰 자산 및 전력손실 비용을 제외하면 총 경제적 리스크는 국내총생산의 2.2% 수준이었다. 이 결과는 원전 비상계획과 대응태세 준비에 대한 투자 정당화에 참조 자료로 이용될 수 있다.

중심어: 원전 중대사고, 경제적 리스크, 텔파이 기법, 베이저안 추론, 2D MCA

1. 서론

원자력발전소에서 발생하는 사고의 피해를 평가하는 방법의 하나로 사고로 인한 경제적 충격을 평가할 수 있다. 이 평가방법을 사용하면 여러 가지 영향을 비용이라는 하나의 척도로 나타낼 수 있어 다양한 영향에 대한 결합된 평가가 가능하다. OECD/NEA에 따르면 이러한 비용에 대해서는 이론적 해석, 산정목표 및 필요 등에 따라 접근방법이 다를 수 있으므로 표준화된 절차를 제시하기는 어렵다[1]. 비용평가에 대한 초기연구에서는 사고관리의 관점에서 대응책에 대한 비용평가에 주안점을 두었으나 현재의 관심사는 외부비용 및 보상비용까지 범위가 넓어졌다. 고려하는 범위가 넓은 만큼 전문가 혹은 일반인의 관점별 관심항목의 차이가 상당히 존재할 것이다. 그러므로 여러관점에 부응하기 위해서 이러한 비용평가에는 상세한 항목별 비용평가가 요구된다.

원전사고로 인한 비용에는 선정된 시나리오 및 선원항과 같은 대상 원전의 고유 특성뿐만 아니라 사회 환경 특성까지 개입되므로 계산이 쉽지 않을 뿐 만 아니라 그 결과를 다른 원전에 대한 평가와 비교하는 것도 용이하지 않다. 방법론 측면에서 우선 사고발생시 소내 및 소외 비용평가 모델과 인자

도출이 필요하다. 다음으로 도출된 인자들에 대해 국내 경제 사회 특성을 바탕으로 최적의 값을 도출해야 한다.

원전 중대사고에 대한 직접영향은 방출 선원항, 환경인자(지리, 사고시점의 기후 등) 및 비상대응 효과에 영향을 받는 반면, 간접적 영향은 사고지역의 경제시스템, 대중심리, 정치 및 국제관계 등 요인의 영향을 받게 된다. 일반적으로 간접영향에 대한 비용이라 함은 경제활동의 저하를 의미한다. 이러한 간접비용(indirect costs)을 평가하는 방법으로 위험도 회피이론(risk aversion theory)과 input-output 방법론 등이 이용되고 있지만 이는 각 국가별 경제적 특성 및 국한된 지역의 평가일 뿐 국내의 현실과는 차이가 있다[1,2]. 또한 위험 수용과 보상에 대한 국민의 인식과 기대 정도가 다른 나라와 차이가 있으므로 국내 현실이 반영되어야 한다. OECD/NEA에 따르면 간접적 영향을 고려하여 평가한 경우 총 경제적 비용은 직접피해 규모의 25% 정도 증가한다고 제시하고 있다[3].

이를 토대로 본 연구에서는 원전사고의 종합적 경제적 리스크를 평가할 때 직접영향에 대한 비용의 비율을 고려하여 간접영향에 대한 비용을 평가하는 접근법을 선택하였다. 즉, 먼저 직접영향의 스펙트럼을 분석하여 그 비용을 산정하고, 다음으로 간접영향에 대한 가중치를 평가하여 적용함으로써 총 경제적 충격량을 예측하였다. 이러한 분석의 속성 상 관련된 많은 인자들이 불확실하다. 불확실한 인자의 예측에는 관련 전문가들의 전문성에 바탕을 둔 직관을 활용하여 평

책임저자: 장한기, h.kang@rri.hanyang.ac.kr, 한양대학교 원자력공학과
 서울시 성동구 행당동 한양대학교 원자력공학과

가하는 기법인 텔파이 방법론을 적용하였으며, 확률론적 기법을 사용하여 불확실성에 대한 정량적 평가를 수행하였다. 평가대상 원전으로는 상대적으로 지역 사회환경이 단순한 울진3,4호기를 선정하였다. 이 연구의 목적을 위해 사고당시 바람이 내륙을 향하는 것으로 가정하였다.

2. 경제적 리스크 평가 접근법

2.1 불확실성과 위험도에 대한 전문가 판단 및 의견도출

위험은 모든 인간 활동에 수반된다. 유해 화학물질에 노출되었을 때의 급성 또는 만성 보건영향일 수도 있고, 화재나 폭발, 또는 다른 사고로 인한 장비의 파손과 생산 손실 초래와 같은 경제적인 것일 수도 있으며 환경 손상일 수도 있다[4]. 본 연구는 원전 중대사고의 종합적 경제피해를 겨냥한다. 하지만, 이러한 평가에는 일정한 틀이 정립되어 있지 않다는 문제뿐만 아니라 평가 항목의 선정이나 그 정량화에 불확실성과 제약이 내재한다. 예를 들어 사고 시나리오에 따른 선원향, 장기간 오염으로 인한 환경영향, 방사선 보건영향 등은 그 복잡함에 의해 많은 불확실성 요인을 내포한다. 사고로 인한 경제적 리스크 평가는 과학적 엄밀성보다는 거시적 규모를 예측함을 목적으로 하므로 위와 같은 불확실성을 인정하면서도 제한된 시나리오에 따른 시간적, 공간적 제약 아래 평가를 수행하게 된다.

위험도 분석에서 불확실성과 관련된 중요 자료의 한정된 가용성 관점에서 전문가의 역할은 그들의 판단을 통해 가치 있는 정보를 제공하기 때문에 매우 중요하다. 특히 확률론적 위험평가(PRA)에서 불확실성은 확률분포로 재현되기 때문에 전문가의 판단이 결합된 확률분포의 정보는 매우 유용하다. 주관적으로 평가된 확률은 경험적으로 자료의 퍼짐, 자료의 독립성, 재현 가능성을 포함하고 있으며, 특히 자료의 퍼짐은 일반적으로 적은 수의 표본크기를 가질 때 현저하다. 한 예로 U.S. NRC에서는 1975년 지진으로 인한 노심손상에 대한 연간확률을 도출하기 위해 13명의 NRC 전문가들의 의견을 도출하였다. 이 결과 90% 신뢰구간에서 상한과 하한의 비율이 1000배 정도 차이를 보여 수집된 13개의 자료 중 5개만 신뢰구간에 포함되었다[5]. 또한 전문가의 판단을 통해 도출된 결과의 재현 가능성은 다른 전문가 집단의 조사결과와의 벤치마킹을 통해 가능하다. 물론 이렇게 도출된 결과가 정확한 값을 의미하는 것은 아니다. 즉 전문가의 전문성 및 지식에 기초하여 현재 일어나지 않은 사건에 대한 미래예측의 타당도를 나중에 실제로 일어난 결과로 평가하기는 어렵기 때문이다. 그렇지만 미래예측 방법은 그 정밀도와 예측결과의 정확성과는 별개로 그 방법 및 결과는 미래예측을 통한 의사결정에 효율적으로 적용될 수 있다.

2.2 전문가 판단을 도출하기 위한 텔파이 기법

텔파이 기법은 선행연구가 부족하여 전문가의 견해가 가장 중요한 자료일 때 유용한 연구방법이다. 여러 차례의 설문을 통해 전문가들 사이에 합의된 의견을 도출하는 텔파이 조사방법은 처음에 가능한 사건에 대한 전문가의 제안을 수집한 후 결과를 종합하여 참여자들에게 그들의 판단을 다시 생

각하도록 피드백과 함께 반복하는 절차로 구성된다. 이렇게 1라운드에 제시한 견해를 다시 수정하고 새로운 제안이 추가 되는 텔파이 조사에서 라운드 횟수는 두 번에서 다섯 번까지가 적절한 것으로 알려져 있다[6]. 본 연구에서는 2회에 걸쳐 텔파이 조사를 진행하였다. 첫 번째 패널조사에서 울진 3, 4호기의 원전 중대사고 시 피해지역의 범위와 영향이 미치는 기간을 감안하여 사고로 인한 직접피해로 고려해야 할 항목을 열거하고 순위를 부여하는 개방형 질문과 간접피해에 대한 스펙트럼과 경제적 충격을 전문가 직관에 근거하여 판단하는 질문으로 구성하였다. 2라운드에서는 1차 패널 조사결과를 요약하여 제시한 후 경제적 충격 규모에 대한 합의를 도출하기 위한 문항과 원전사고에서 직접영향의 주요 인자인 선원향에 대한 조사를 수행하였다.

텔파이 예측의 가장 중요한 문제는 표준화된 증거 없이 주관적인 평가에 의해서 선택된 전문가의 주관적 의견에 따라 추정된 자료의 타당도인데 이는 전문가의 합의 정도로 측정된다. 그러나 합의만으로 예측결과가 일어날 가능성이 높다고 주장하기에는 충분하지 못하다. 즉, 텔파이 방법의 문제점은 절차의 신뢰도와 결과의 타당도라고 요약할 수 있는데, 신뢰도 문제는 텔파이 방법의 적용절차를 정밀하게 표준화함으로써 해결가능하나 주관적인 의견을 객관적인 결과로 나타내는 타당도 문제는 해결되지 않는다[6,7].

그러므로 본 연구에서는 행동학적 접근 방법인 텔파이 기법의 문제점을 보완하기 위해 수학적 접근방법인 베이저안 이론을 적용하였다. 즉, 텔파이 기법을 자료 수집과정으로 하고 베이저안 방법을 자료처리 과정으로 하는 모형을 개발하여 텔파이 예측에 대한 베이저안 접근을 통해 경제적 충격량을 예측하였다. 텔파이 1차 조사 결과를 통해 우도함수(likelihood function)로 사용될 분포의 적합성을 평가하기 위해 비모수적 통계검정 방법인 카이제곱 검정(chi-square test)을 사용하였다[8]. 사후분포를 도출하기 위해서 Gibbs 샘플링에 근거한 마코프 연쇄 몬테칼로(Markov Chain Monte Carlo; MCMC) 방법을 사용하는 통계패키지인 WinBUGS[9]를 사용하였다. 베이저안 모형을 BUGS(Bayesian Inference Using Gibbs Sampling)에서 사용하는 언어로 표현하였고, 각 변수 및 모수에 대한 샘플 크기는 MC 상대오차를 5% 이내로 만족하기 위해 30000회의 통전시험(burn-in)을 포함하여 총 330000회 수행하였다.

2.3 2D 몬테칼로 기법을 통한 불확도 정량화

PRA는 원자력 분야뿐만 아니라 환경 및 화학분야 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. PRA 기법의 사용은 오랜 역사와 다양함을 가지고 있는데 최근에는 몬테칼로(Monte Carlo analysis; MCA)기법이 주목을 받고 있다[10,11]. PRA의 주요 목적은 위험 평가에 관계된 불확실성의 근원과 불확실성을 정량적으로 분석하기 위함인데, 최근 U.S. EPA는 진보된 방법론으로 2D MCA(two dimensional Monte Carlo analysis)의 유용성을 제시하고 있다[12,13]. 그림1와 그림2는 2D MCA의 단계별 진행 과정을 나타낸 것으로서 내순환로(inner loop)는 변수의 다양성(V형)을, 외순환로는 변수의 불확실성(U형)을 평가하기 위함이다. U형과 V형의 주요한 차이점은 U형의 경우 추가되는 정보로 인해 불확실성이 줄어드는 반면, V형

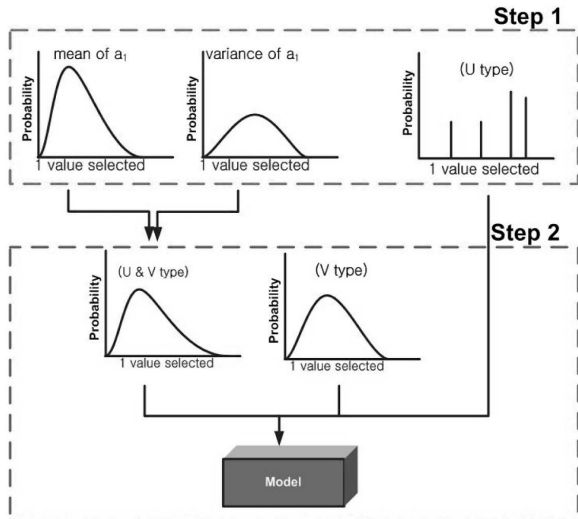


Fig. 1. Illustration of the 2D Monte Carlo simulation in Steps 1 and 2. The 2D MCA is a procedure that allows characterization of both the uncertainty and the variability in the input variables. Uncertainties in a second order variable can be treated in a 2D MCA by representing model parameters in terms of PDFs.

의 경우 정보가 추가될지라도 변수 고유의 다양성은 줄어들지 않는다. U형과 V형으로 구분된 입력변수로부터 모수(예: 평균, 분산 등)가 MCA과정을 통해 샘플링 되고 N번의 반복을 통해 최종 결과는 확률분포로 표현된다. 원전사고의 직접 비용 평가 항목 및 간접영향에 대한 충격을 평가하기 위한 실행 횟수는 내순환로에서 10,000번, 외순환로에서 250번을 실행하였으며, 결과적으로 250개의 누적분포함수(CDF)가 도출된다. 최종 시뮬레이션의 실행 횟수는 내·외 순환로 실행 횟수의 곱인 2,500,000회이다.

3. 결과 및 논의

3.1 패널의 구성 및 텔파이 조사 결과

텔파이 설문지 설계 의도에 따라 질문에 적합한 전문성을 갖춘 패널들로 구성하였다. 참고문헌[14]의 패널선정 절차에 따라 1차, 2차, 3차 단계를 거쳐 27개 기관 65명의 전문가를 선정하였다. 최종적으로 대학, 연구기관, 산업계 3그룹으로 구분하여 30명의 전문가 패널을 구성하였다. 표1에 텔파이 패널의 선정 및 참여율을 요약하였으며, 그림3에 2007년 12월을 기준으로 선정된 패널의 경력 및 학력 사항에 대한 것을 나타내었다.

1차 텔파이 조사에서는 원전사고의 경제적 리스크 중 직접피해 항목을 나열하고 패널들의 직관을 바탕으로 경제적 충격을 비중 순으로 순위를 부여하는 질문을 하였다. 이는 직접피해에 대한 다양한 스펙트럼을 간략히 하고, 다음질에서 평가한 직접피해 결과순위와 패널 직관에 의한 평가 결과를 비교하여 최종결과에 대한 신뢰성을 높이기 위한 것이다. 또한 간접피해에 대한 스펙트럼을 서술하고 경제적 충격량에 예측하기 위한 질문도 포함하였다. 간접피해의 경제적 충격에 대한 전체 결과와 패널들의 전문성 부합도 및 연구의 중요성 인식에 따른 결과를 표2에 95% 신뢰구간 범위에서 내용을 요약하였다. 텔파이 기법의 장점 중 하나는 개별 응답에 대한 추적이 가능하다는 것인데, 경제적 충격량에 대한 의견을 제시하지 않은 패널들은 개별 접촉을 통해 OECD/NEA에서 제시하는 값의 적용여부를 타진하여 설문결과에 반영하였다.

2차 조사에서는 1차 조사의 문항 반응분포 결과를 제시하여 자신의 반응을 재고하고 패널 자신의 평정을 검토한 후에 문항의 적합성을 다시 평정하도록 하였다. 직접피해 항목에 대한 합의를 도출하기 위해 중요 항목에 대한 순위를 조정 한 결과는 그림4에 나타내었다. 1차 조사에서는 주민보호조

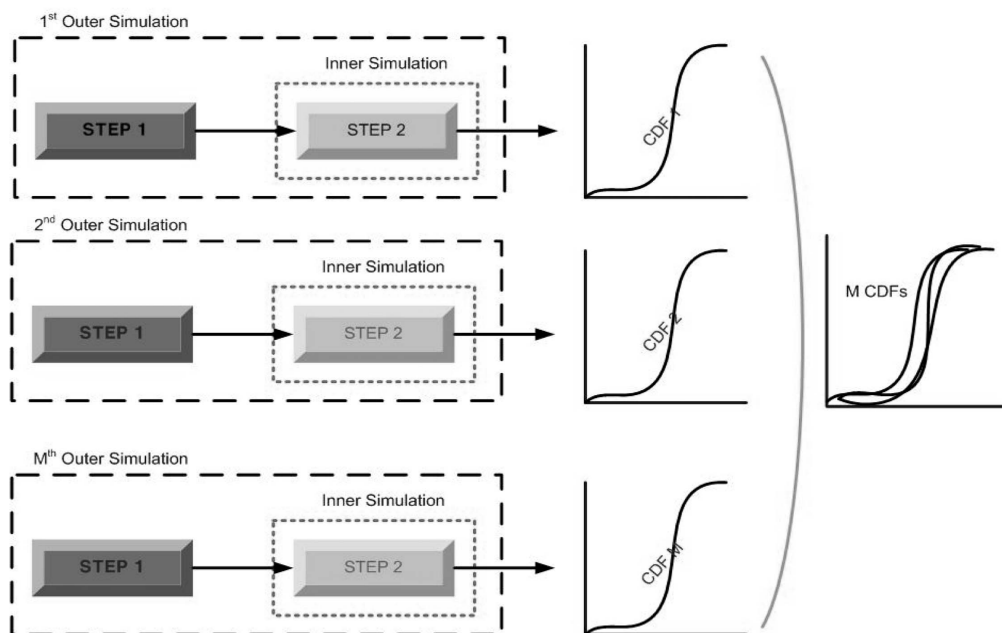


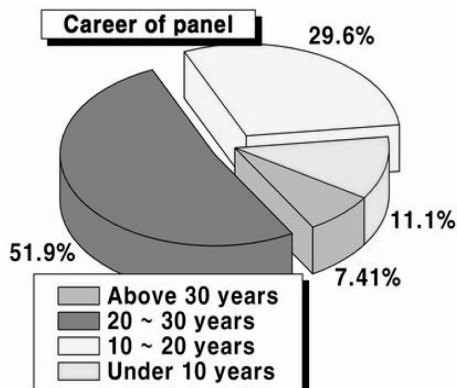
Fig. 2. Illustration of the 2D Monte Carlo simulation process. The inner loop simulates variability by repeatedly sampling values for each variable from a specific probability density function, of which parameters are selected in the outer loop.

Table 1. Summary of Delphi panels and response rates.

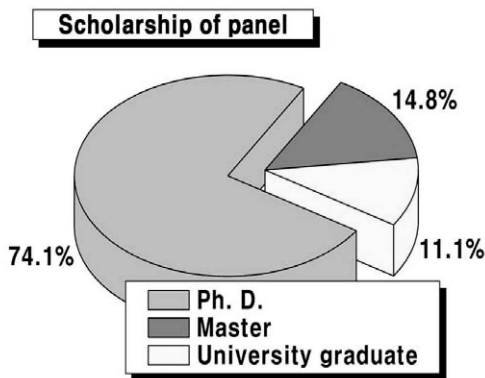
Panel group	Institution	Number of panels	Participation rate of prior survey	
			1st round	2nd round
University	Hanyang	8	5(62.5%)	3(60%)
	Kyunghee			
	Cheju			
	KAIST ¹			
Research institute	Dongguk	15	15(100%)	12(80%)
	Seoul			
	Korea			
	KAERI ²			
Industry	KINS	7	7(100%)	5(71.4%)
	KIRAMS			
	KINAC			
	KEPRI			
	NETEC			
	KHNP			
	KOPEC			
Total	KNEF	30	27(90%)	20(66.7%)

¹KAIST: Korea Advanced Institute of Science and Technology

²KAERI: Korea Atomic Energy Research Institute



(a) Career of panels



(b) Scholarship of panel

Fig. 3. Career and scholarship of panels.

치가 가장 중요한 항목으로 분류된 반면 2차 조사에서는 제염비용이 가장 큰 비중을 차지한다고 나타났다. 표3에는 원전사고의 경제적 피해와 공간적 범위를 한정하기 위한 델파이 설문 최종 결과를 나타내었다.

한편 직접피해의 주요 인자인 중요한 핵분열생성물 방사능 환경방출 분율은 과학적 인자이지만 발전소 특성과 사고 시나리오에 따라 큰 불확실성을 동반한다. 따라서 이 방출분율에 대해서도 2차 조사에서 패널의 견해를 물었는데 그 결과 옥소는 $13.70 \pm 12.10\%$ (95% 신뢰구간 8.2-31.9%), 세슘은 $0.048 \pm 0.096\%$ (95% 신뢰구간 0.009-2.44%)로 나타났다.

3.2 직접피해

원전사고로 인한 직접피해 비용 항목은 제염비용, 주민 보호조치(소개 및 이주), 발전회사의 자산 및 전력생산손실(대체전력비용, 발전소투자비용 손실), 보건영향 비용, 농산물 처분비용으로 최종 확정되었다. 2차 델파이 조사에서 원전사고 피해범위 설정을 하기 위해 사고에서 핵종별 방출분율에 대한 질문을 하였다. 그 결과 올진 3,4호기에 대해 수행한 PSA 결과로 도출된 19개 방출군 중 15번이 가장 유사하게 평가되었다. 방출군 15번에 근거하여 MACCS 코드로 산출한 전신 및 장기선량 분포(15)를 참조하여 직접피해에 대한 공간적 범위를 한정하였다. 올진 3,4호기를 기준으로 제염비용은 비상계획구역(반경 8~10 km)으로 한정하였고, 표본특성 및 제염 기법에 따른 제염비용은 참고문헌(16)에서 제시한 비용을 확률분포로 구현하여 평가하였다. 전신 선량이 20 mSv 이

Table 2. Indirect economic impact as cognitive power of the panel in the 1st round results.

Panel attributes		Impact on GDP[%]			
		Exclusion of no answer		Application of OECD/NEA value	
		2.5 %ile	97.5 %ile	2.5 %ile	97.5 %ile
Professional experience	High	0.08	0.42	0.08	0.27
	Midium	0.21	5.06	0.11	3.05
	Low	1.28	4.95	1.28	4.95
Importance of research	High	0.33	4.49	0.23	2.97
	Midium	0.29	2.35	0.17	1.55
Overall		0.2	3.47	0.11	2.04

Panel attributes		Impact on GRDP[%]			
		Exclusion of no answer		Application of OECD/NEA value	
		2.5 %ile	97.5 %ile	2.5 %ile	97.5 %ile
Professional experience	High	7.6	17.4	8.8	13.7
	Midium	15.7	29.74	12.66	23.7
	Low	18.68	41.32	18.68	41.32
Importance of research	High	16.87	31.13	13.92	26.08
	Midium	10.26	24.58	9.66	18.43
Overall		16.23	26.83	13.36	21.40

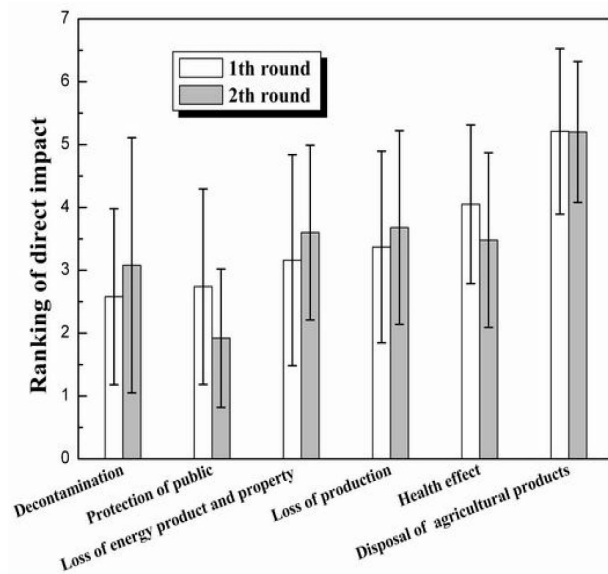


Fig. 4. Comparison of ranking of direct impact for the 1st and 2nd Delphi surveys.

하로 되는 거리 50 km를 기준으로 주민 소개시간은 6시간에서 2일, 농산물 폐기 기준은 현행 국내 지침에 따라 옥소는 2000 Bq kg⁻¹, 세슈 및 다른 장반감기 핵종은 1250 Bq kg⁻¹, 알파방출은 80 Bq kg⁻¹으로 하였다. 발전소의 수명은 추세에 따라 50년으로 하였고, 보건영향 평가를 위해 건강보험심사평가원의 2006년 암치료 비용 자료[17]를 사용하였다. 직접피해에 대한 비용평가는 전문가 직관에 의한 직접피해 순위와 다소 차이는 있지만 50 %ile의 중앙값을 기준으로 자산 및 전력 생산 손실, 제염 비용, 보건영향 비용, 농산물처분비용 순으로 평가되었다.

Table 3. Final Delphi results of indirect impact(%).

Reference value	Mean	SD	2.5 %ile	97.5 %ile
GDP	1.47	1.775	0.712	4.15
GRDP	17.35	7.15	14.15	36.50

3.3 간접피해를 고려하기 위한 가중치 산출

OECD/NEA에서는 간접적 영향을 고려하여 평가할 경우 총 경제적 영향 비용은 직접적 영향 비용에 가중치 1.25를 부여하고 있으며, 모델 평가에서 이러한 간접비용은 지역내총생산(GRDP) 비용의 10%, 국내총생산(GDP) 비용의 0.2%에 해당한다. 간접피해에 대한 1, 2차 델파이 조사에서 획득한 간접적 충격에 기초하여 간접피해에 대한 가중치를 다음과 같이 산출하였다.

$$TC=DEC+IC=DEC+P_r \times F_r \times P_n \times F_n=DEC \times W \quad (1)$$

여기서 TC는 총 경제비용, DEC는 직접 외부비용, IC는 간접비용, P는 총생산(GRDP 또는 GDP), F는 간접피해 계수, W는 참고문헌 1에서 정의하는 간접비용 가중치, 첨자 r과 n은 각각 지역과 국가를 의미한다.

간접비용은 GDP 혹은 GRDP에 델파이 조사에서 획득한 간접영향이 총생산에서 차지하는 비율인 계수 F를 곱하여 계산된다. F에 대해 베이지안 기법을 적용하여 도출된 사후분포는 대수정규분포(14.6, 8.6)를 만족하였고 이 분포가 2차 설문자료 결과를 수정하기 위한 사전분포로 적용되었다. 2차 설문자료 결과의 수정을 위해 적용되는 우도함수도 대수정규분포(17.5, 7.5)를 만족했다. 최종 수정 통계량을 표4에 요

약하였다. 간접피해에 대한 GDP 및 GRDP의 비율을 OECD/NEA에서 제시하는 값과 비교하면, 베이즈 이론을 적용한 경우엔 각각 5.4 배, 1.6 배이며, 적용하지 않은 경우엔 각각 7.4 배, 1.74 배로 평가되었다.

한편, 간접피해를 고려하기 위한 가중치는 1D MCA 기법을 사용하여 평가한 결과 평균 2.59, 중앙값 2.08로 OECD/NEA에서 제시하는 값(1.25)보다 각각 107.2%, 66.4% 증가하였다.

3.4 종합적 경제적 리스크

산출된 직접피해 비용과 가중치를 사용하여 종합적인 경제적 리스크를 평가하였다. 직접피해 평가모델의 63개 모수(parameter)를 V형과 U형으로 구분하여 평가하였다. 그림5는 종합적 경제적 리스크를 얻기 위한 가중치 분포를 나타낸 것이며, 표5는 베이즈 이론을 적용한 가중치를 사용하여 평가한 종합적 경제적 리스크를 90% 신뢰구간에서 2.5, 50, 90, 95, 97.5%ile 구간 범위로 요약하였다. 총경제적 리스크는 중앙값인 50%ile을 기준으로 2006년 국내총생산(847조원)의 3.9%에 해당되었다. 직접피해 영향이 가장 큰 자산 및 전력 손실 비용을 제외하면 총경제적 리스크는 56.2% 감소되어 국내총생산의 2.2%를 차지하였다. 이 평가에 반영되지 않았지만 텔파이 조사에서 패널들이 간접피해 스펙트럼으로 언급된 의견 중 심리적인 요인 및 보상에 대한 비용을 고려한다면 총경제적 리스크는 증가할 것으로 예상된다. 그림6은 올진 3,4호기의 가상 중대사고에 대한 간접영향을 고려한 경제적 리스크의 다양성을 반영한 것이며, 그림7은 90% 신뢰구간에서 경제적 리스크에 대한 불확실성을 나타낸 것이다.

가상의 원전사고에 대한 비용평가 과정을 정규화하여 결

정론적인 방법으로 단위발전량 당 사고 비용은 다음과 같이 3단계 과정을 거쳐 산출할 수 있다. 먼저, 방사능의 대량방출로 이어지는 원전 사고가 발생한 경우 예측되는 비용과 그러한 사고가 일어날 확률(1×10^{-6} reactor-year⁻¹)을 곱하고, 다음으로 단위발전량 당 예측 사고 비용으로 표현되는 비용을 계산한다. 마지막으로 선원별 방출 분율에 따른 위험도 회피 계수(STC 15 인 경우 가중치 20)를 사용하여 단위 발전량 당 사고 예측 비용을 계산한 결과는 0.804 ₩ kWh⁻¹로 나타났다.

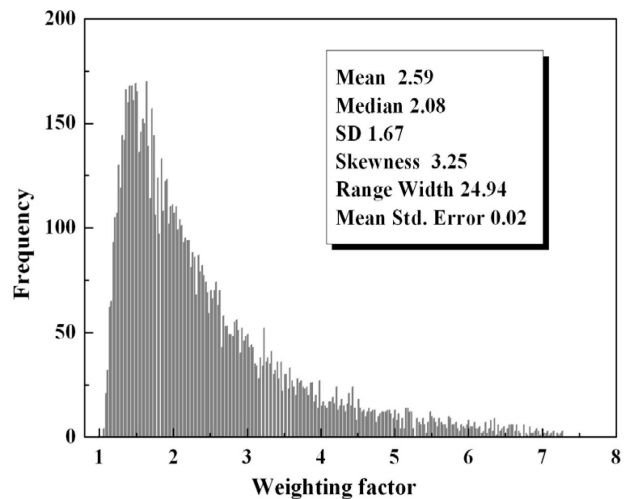


Fig. 5. Distribution of values of the weighting factor for indirect effect.

Table 4. Summary of the Bayesian updating of impact on GDP and GRDP.

Node	2.5%	Median	Mean	97.5%	SD	Monte Carlo error
Impact on GDP[%]						
1st survey correction	3.49×10^{-15}	0.058	0.54	3.36	0.95	0.035
2nd survey correction	0.0507	1.06	1.09	2.23	0.65	0.007
Impact on GRDP[%]						
1st survey correction	0.835	13.06	14.17	34.10	9.09	0.02
2nd survey correction	1.32	14.50	16.07	40.91	10.43	0.04

Note) Burn-in trials: 30000

Table 5. Expected overall economic risk distribution based on 2D MCA results [10 B ₩]

Percentiles	Minimum	5%	Mean	Median	95%	Maximum
2.5	12,778	13,244	13,661	13,662	13,950	14,296
50	28,199	31,097	32,876	32,850	34,324	36,506
90	51,442	55,535	59,749	59,711	66,158	75,473
95	64,596	76,445	85,372	85,279	94,250	105,985
97.5	77,037	88,132	98,860	98,718	108,693	123,226

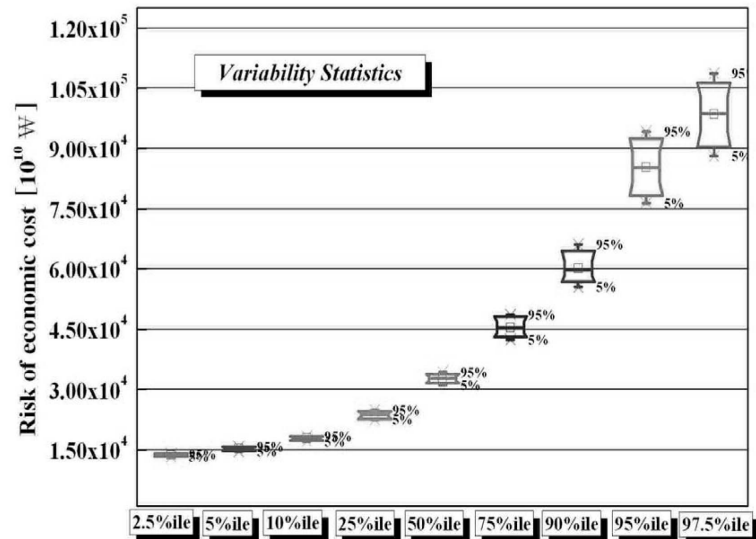


Fig. 6. Statistical summary for variability of overall economic risk from 2D MCA. The presented are 90% confidence intervals for each percentile.

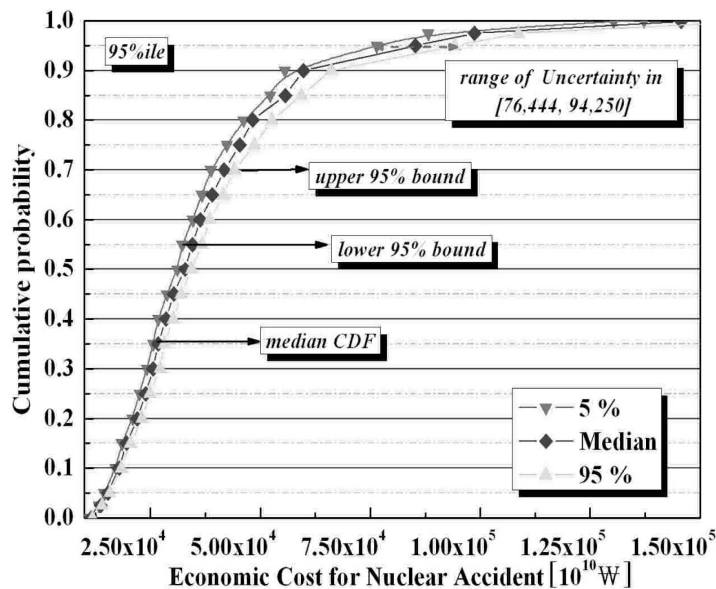


Fig. 7. 90% confidence intervals of overall economic risks for hypothetical severe accident at Uljin unit 3 or 4.

4. 결론

리스크 분석에서 불확실성과 관련된 중요한 자료의 한정된 가용성 관점에서 전문가의 역할은 그들의 판단을 통해 가치 있는 정보를 제공하므로 가상의 원전사고시 간접피해에 대한 충격량을 예측하기 위해 텔파이 기법을 이용하였다. 행동학적 접근방법인 텔파이 방법의 문제점을 보완하기 위해 베이스 이론을 적용한 모델을 개발하여 간접피해에 대한 가중치를 산출하고 원전중대사고에 따른 종합적인 경제적 리스크를 평가하였다.

확률론적 위험도 평가에서 불확실성은 확률분포로 재현되기 때문에 전문가 판단이 결합된 확률분포 정보가 유용하게 적용되었다. 경제적 리스크에 대한 다양성을 고려한 불확실성을 분석하기 위해 2D MCA기법을 사용하여 평가하였다.

울진 3,4호기에서 중대사고가 발생하고 바람이 내륙을 향한다는 전제로 평가한 총 경제적 리스크는 GDP의 3.9%로 평가되었다. 간접피해의 비중이 OECD/NEA에서 프랑스 원전에 대해 평가한 결과보다 높게 나타났는데 국토가 좁은 점, 방사선에 대한 대중의 감수성과 같은 인자가 패널의 판단에 영향을 미쳤을 수 있다. 이 평가 결과는 원전 방사선비상대책의 중요성과 투자합리화에 참조가 될 것이다.

텔파이 조사를 통해 패널들의 의견 중 심리적인 요인의 중요성을 언급하였지만, 이 연구에서는 직, 간접적 경제적 리스크 평가에 포함하지는 않았다. 향후 연구에서는 다른 정상가동 원전에 미치는 과급영향 등 원전사고 이후 사회적 혼란에 따라 발생할 수 있는 간접비용 및 이에 따른 기회비용도 평가할 가치가 있다고 판단된다. 국내의 특수한 상황과 여건

을 감안한다면 예측의 불확실성이 매우 크지만, 이는 동 분야에서 경제 분야 전문가들과의 공동연구를 통해 보완가능하며, 이러한 연구방법 및 결과는 원전중대사고의 경제적 리스크 예측을 위한 유용한 기반기술이 될 것으로 기대한다.

위험을 보는 관점에는 주관이 개입되고 가치판단은 환경 변화에 의해 수정된다. 따라서 이 연구 결과가 국내 원전사고의 경제적 리스크를 정확히 분석한 것으로 해석할 수는 없다. 분석의 정밀성보다는 이러한 분석을 처음으로 시도했고 그 결과 경제 피해 규모에 대한 대강을 제시했다는 점이 중요하다.

감사의 글

본 연구는 방사선안전신기술연구센터 (iTRS)와 원자력기술개발사업 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. OECD NEA. Methodologies for Assessing the Economic Consequences of Nuclear Reactor Accidents. 2000;ISBN 92-64-17658-6:11-103.
2. Eeckhoudt L, Schieber C and Schneider T. Risk Aversion and External Cost of a Nuclear Accident. Journal of Environmental Management. 2000;58:109-117.
3. OECD NEA. Nuclear Electricity Generation: What Are the External Costs?. 2003;ISBN 92-64-02153-1:11-72.
4. 한국표준협회. 신인성 관리-제3부: 적용지침-제9절: 기술적 시스템의 리스크 분석. 2002; KS A IEC 60300-3-9:1-23.
5. Ayub BM. Experts, Opinions and Elicitation. In: Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks. 1th ed. Washington D.C. : CRC press. 2001:97-124.
6. 이종성. 교육 심리 사회 연구방법론 총서 연구방법<21> : 델파이 방법. 서울; 교육과학사. 2001:7-67.

7. 이종성. 델파이 예측방법의 베이 지안 접근. 연세교육과학. 1984;25:9-19.
8. 이종성, 강계남, 김양분, 강상진, 이은실. 사회과학연구를 위한 통계방법. 제3판. 박영사. 2004:771-780.
9. Spiegelhalter D, Thomas A, Best N, Lunn D. WinBUGS User Manual. Version 1.4. 2003:http://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/.
10. Moschandreass DJ and Karuchit S. Scenario-Model-Parameter: A New Method of Cumulative Risk Uncertainty Analysis. Environment International. 2002 Mar.; 2002;28(4):247-261.
11. Hoffman FO. Guide for Uncertainty Analysis In Dose and Risk Assessments Related to Environmental Contamination. NCRP. 1996;NCRP Commentary No. 14.
12. U.S. Environment Protection Agency. Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume 3-part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment. 2001; EPA/540/R-02/002.
13. Cullen AC and Frey HC. Probabilistic Modeling Techniques. In: Probabilistic Techniques in Exposure Assessment: A Handbook for Dealing with Variability and Uncertainty in Models and Input. 1th ed. New York and London : Plenum press. 1999:181-241.
14. Okoli C, Pawlowski SD. The Delphi method as a Research Tool: an Example, Design Considerations and Applications. Information & Management. 2004;42:15-29.
15. Jae M. Risk Assessment for Source Terms using PSA Methodology. 2004: iTRS/AR-2004-12.
16. 장한기, 김주연, 이제기. 확률론적 방법을 이용한 원자력발전소 사고시 소외제염비용 경제성 영향 평가. 2007년도 춘계학술 발표회. 대한방사선방어학회. 2007:60-61.
17. Health Insurance Review & Assessment Service. 2006 National Health Insurance Statical YearBook. 2006:http://www.hira.or.kr/

A Study on the Overall Economic Risks of a Hypothetical Severe Accident in Nuclear Power Plant Using the Delphi Method

Han-Ki JANG, Joo-Yeon KIM and Jai-Ki LEE
Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

Abstract - Potential economic impact of a hypothetical severe accident at a nuclear power plant(Uljin units 3/4) was estimated by applying the Delphi method, which is based on the expert judgements and opinions, in the process of quantifying uncertain factors. For the purpose of this study, it is assumed that the radioactive plume directs the inland direction. Since the economic risk can be divided into direct costs and indirect effects and more uncertainties are involved in the latter, the direct costs were estimated first and the indirect effects were then estimated by applying a weighting factor to the direct cost. The Delphi method however subjects to risk of distortion or discrimination of variables because of the human behavior pattern. A mathematical approach based on the Bayesian inferences was employed for data processing to improve the Delphi results. For this task, a model for data processing was developed. One-dimensional Monte Carlo Analysis was applied to get a distribution of values of the weighting factor. The mean and median values of the weighting factor for the indirect effects appeared to be 2.59 and 2.08, respectively. These values are higher than the value suggested by OECD/NEA, 1.25. Some factors such as small territory and public attitude sensitive to radiation could affect the judgement of panel. Then the parameters of the model for estimating the direct costs were classified as U- and V-types, and two-dimensional Monte Carlo analysis was applied to quantify the overall economic risk. The resulting median of the overall economic risk was about 3.9% of the gross domestic products(GDP) of Korea in 2006. When the cost of electricity loss, the highest direct cost, was not taken into account, the overall economic risk was reduced to 2.2% of GDP. This assessment can be used as a reference for justifying the radiological emergency planning and preparedness.

Keywords : Severe nuclear accidents, Economic risks, Delphi method, Bayesian inference, Two-dimensional Monte Carlo analysis