

응용논문

원전에서 점수산정모형에 의한 경제성 평가  
- An Economic Evaluation by a Scoring Model in the Nuclear  
Power Plants under Uncertainty -

강 영 식\*  
Kang, Young Sig  
함 효 준\*\*  
Hahm, Hyo Joon

Abstract

Major problems involved in an electrical utility expansion planning within a time horizon are how to efficiently deal with objectives considering multiple factors and uncertainty. But justification factors in study these days have considered only quantitative factors except qualitative factors.

Therefore, the purpose of this paper is to develop a new model for economic evaluation of nuclear power plants through the scoring model with the quantitative and qualitative factors under uncertainty. The quantitative factors use a levelized generation cost method considering time value of money.

Especially, the environmental, risk, and safety factors in this paper have been also explained for the rational economic justification of the qualitative factors under uncertainty.

This paper not only proposes a new approach method using the scoring model in evaluating economy of the nuclear power plant in the long term, but also provides the more efficient decision making criterion for nuclear power plants under uncertainty.

1. 서론

전원개발은 경제발전의 원동력으로서 국가경쟁력을 강화하는데 매우 중요한 역할을 수행 할 뿐만 아니라 국민의 복지수준향상에 직접적으로 영향을 미치고 있다.

그러므로 장기적인 전원개발을 위해서는 합리적이고 체계적인 전원구성을 통하여 전력을 안정적으로 공급 해 주어야 한다. 따라서 우리 나라에서는 1973년 석유파동 이후 에너지 위기론이 제기되면서 에너지에 대한 효율적인 운영의 한 방안으로서 경제성, 사회성, 신뢰성에 능동적으로 대처 할 수 있는 원전 건설에 점점 더 비중을 두고 있다[5].

현재, 에너지원별 발전량에 대한 추이를 살펴보면, 1971년에 수력과 무연탄의 비중은 각각 12.5%, 6.9%였으며, 유류의 비중이 80.6%였다. 석유파동 이후에 에너지원의 안정적인 확보를

\* 세명대학교 산업안전공학과

\*\* 아주대학교 산업공학과

위한 다변화 정책의 결과로 1992년에 석유의 비중은 27%, 원자력의 비중은 43%로 각각 조정 이 되었으며 청정 연료의 사용확대로 LNG의 비중이 9.3%를 차지하고 있다[12]. 또한, 2000년 대에는 수력과 유류의 비중은 줄고 유연탄과 원전의 비중을 점점 더 늘려 수력 1.6%, 유류 9.2%, 원자력 43.3%, 유연탄 43.3%, LNG 10.8%가 될 전망이다[12]. 이와 같이 원전의 비중을 점점 더 향상시키는 결정적인 이유는 다른 에너지원 보다 상대적으로 저렴한 경제성을 갖추고 있으며, 사회성과 신뢰성을 겸비하여 안정적으로 전력을 공급해 줄 수 있기 때문이다.

그러나 원전에 의한 에너지원의 공급은 고도의 신뢰성을 가지고 있지만 방사능 누출이나 시스템의 이상에 의한 원전사고가 발생하면 그 피해는 체르노빌 원전사고에서 보는바와 마찬가지로 너무나 엄청난 위험을 내포하고 있는 데도 불구하고 이러한 요인을 배제하고 계량적인 요인을 위주로 하여 원전의 경제성 평가를 수행하였다. 따라서 원전에 대한 경제성을 평가 시에는 계량적인 요인뿐만 아니라 정성적인 요인인 방사능 누출과 처리비용과 연계한 환경 요인, 서브시스템들의 고장을 유발하는 위험 요인, 전체적인 관점에서 기능을 위주로 한 안전요인을 고려하는 경제성 평가에 대한 구체적이고 타당성 있는 모형이 제시되어야만 한다.

그러므로 본 연구의 목적은 불확실한 상황에서 계량적인 요인은 균등화 발전비용법 (Levelized Generation Cost Method)을 사용하여 점수화 하고 정성적인 요인은 환경 요인, 위험 요인, 안전 요인으로 세분화하여 점수화 한 점수산정 모형을 통하여 구체적이고 더욱 더 타당성을 갖는 새로운 경제성 평가 모형을 개발하는 것이다.

본 연구의 연구범위는 원전을 도입 시에 원전설비에 대한 경제성을 평가하는 계획 단계까지만을 다룬다.

본 연구의 구성은 다음과 같다.

제 1장은 서론으로 최근의 원전을 도입 시에 정성적인 요인을 고려해야하는 연구의 필요성과 목적에 대하여 묘사하였으며, 본 연구의 연구범위를 설정하였다.

제 2장은 장기 전원개발계획의 수립 시에 다수목적에 고려한 경제성 평가에 관한 기존의 연구를 분석하였다.

제 3장은 본론으로 원전을 도입 시에 계량적인 요인과 정성적인 요인을 고려한 경제성 평가 모형을 구축하는 것으로 의사결정 요인은 4가지 요인으로 분류하여 점수화 하였으며, 각 요인의 서브항목에 대한 타당성 있는 의사결정 기준을 제시하였다.

마지막으로 제 4장은 결론으로 본 모형을 적용 시에 기대효과와 추후 연구과제를 다룬다.

## 2. 기존의 연구

장기적인 전원개발계획을 수립 할 경우에는 시스템비용의 최소화, 공급신뢰도의 최대화, 환경 영향의 최소화, 실행 가능한 정책 대안의 검토에 대한 필요성, 시스템 평가 규모의 난이성, 미래의 불확실성에 대한 대응책 등 종합적으로 다수의 인자들을 고려해야만 한다. 따라서 기존의 이론적인 배경은 개별적인 목적함수를 최적화 하는 선형 계획법(Linear Programming), 주관적 효용함수(Utility Function)를 사용하여 평가하는 동적 계획법(Dynamic Programming), 그리고 투자설비용량을 연속적으로 가정하여 단위 용량 증설 여부를 결정하는 비선형 계획법(Nonlinear Programming)으로 분류하여 분석한다.

### 2.1 선형계획법을 이용한 원전의 경제성 평가 모형

선형계획법은 순차적인 선형계획법(Sequential Dynamic Programming)과 다목적 선형계획법(Multi-Objective Linear Programming)으로 나뉘어진다.

순차적 선형계획법은 개별적인 목적함수를 최소화하는 것으로 Rutz *et al.*[20]은 전력생산

비용, 신규 설비용량, 공중보전에 관한 목적함수를 최소화시키는 경우와 공급신뢰도를 극대화 하는 경우를 순차적인 개별 목적함수의 최적화로 시도하였다.

다목적 선형계획법은 접근하기 쉬운 형태의 모형을 적용하는데 용이한 기법으로 Kavrakoglu 와 Kiziltan[18]은 전력생산비용과 환경 영향을 개별목적함수의 최소화에 적용하였다.

그러나 순차적 선형계획법은 다목적 함수를 동시에 고려하지 못하는 단점이 있으며, 다목적 선형계획법은 변수를 제한해야하는 단점을 내포하고 있다.

## 2.2 동적 계획법을 고려한 원전의 경제성 평가 모형

불확실성 하에서 주관적 효용함수를 사용하여 평가하는 방법으로 Evans *et al.*[15], Moskowitz *et al.*[19]는 전력 생산비용과 공급신뢰도의 목적함수를 이용하여 기대효용을 극대화하였으나, 최적해의 도출을 위해 의사결정자의 선호도를 반영하는 다속성 효용함수(Multiple Attributes Utility Function)의 추정의 어려움으로 인하여 이에 대한 대응으로 다속성 가치함수(Multiple Attributes Value Function)를 사용하였다. 동적 계획법을 수정한 가장 일반적인 방법으로는 WASP(Wien Automatic System Planning)모형으로 1974년에 Jenkins와 Joy[17]에 의해 개발된 장기적인 전원개발계획 수립용 전산 모형이다. WASP모형은 IAEA(International Atomic Development Institute)가 국제원자력 시장조사를 위하여 도입하였으며, 1977년 한국개발연구원(Korea Development Institute: KDI)이 국내에 도입하여 1978년부터 한전에서 활용하고 있다. WASP모형은 확률적 시뮬레이션과 동적 계획법에 의해 계획 초 년도부터 종료 년도까지의 투자비, 운전비, 연료비, 잔존가치를 고려한 총 발전경비가 최소가 되는 후보 안을 채택하여 각 년도의 최적 건설 계획안을 도출하는 시스템비용의 최소화를 위한 최적화 기법이다.

WASP모형은 계산시간이 너무 길어 컴퓨터의 이용 및 업무 효율 상에 문제가 제기 되었으나, 운전비 계산 부분이 수학기법에 의해 수정됨으로써 계산시간이 약 70%로 단축되었다[11]. WASP모형의 입력자료는 할인율 검토, 건설단가 산정, 연료비 단가, 공급신뢰도 가격, 적정 예비율 검토, 발전소 수명기간, 발전소 특성자료, 수력 및 양수건설 계획, 자금계획과 전원개발계획의 연계, 전원계획 수립용 전산모형이 검토된다.

그러나, WASP모형의 한계점은 다음과 같다[11,17].

첫째, 정성적인 요인을 반영하는 한계로 인하여 에너지원 배분의 적정화, 파급효과 산정, 환경영향, 사회적, 정치적 요인 등의 반영이 미흡한 실정이다.

둘째, 특정 발전 원의 과잉 의존으로 입력된 기본 전제 조건에 의해 경제성 평가 시에 소프트웨어의 내부계산으로 인하여 비슷한 여건에서 평가기준에 대한 불확실성의 고려가 미흡하다.

셋째, 자금계획과의 연계가 이루어지지 않고 있어 전력사업의 경영합리화 조건에 미흡하다.

마지막으로 공급 신뢰도 기준으로 고장률을 감안한 공급 지장률(Loss of Load Probability)을 필요로 하므로 실제로 계획 수립 시에는 예비율 25% 및 공급예비율 10에서 15% 수준과 연계 검토하여 적정 수준을 산정 해야만 한다.

또한, 다속성 급전원칙(Multi-attribute Dispatching Rule)을 적용한 기법으로 Yang과 Chen[21]은 전력생산비용, 환경영향, 수입에너지의 취약성, 발전소 사고 위험을 개별 목적함수로 하여 최적화를 도출 해 내었으며, 김영창[4]은 Yang과 Chen[21]의 기법을 수정하여 WASP 모형의 선호 순서와 방법을 적용하여 가중치별 해를 산출하였다.

그러나 이 기법은 객관적 선호와 순서화 방법을 적용하였기 때문에 최적 절충 해의 도출에는 실패하였다.

## 2.3 비선형 계획법을 이용한 원전의 경제성 평가 모형

비선형 계획법의 대표적인 기법인 MNI(Model for National Investment)는 프랑스의 EDF(Electricité de France)가 197년에 개발한 모형으로, 1978년에 도입되었으나 활용상의 어려

움이 있어 그 동안 적용하지 못하다가 1988년 한전에서 자체적인 연구를 통하여 어느 정도의 활용성을 확보하게 되었다. MNI 모형은 어떤 후보 발전소의 용량을 한 단위 증가시키는 경우에 증가되는 투자비의 현재가치와 감소되는 운영비 및 공급 지장비의 현재가치를 비교하여 발전소의 단위용량 증설 여부를 결정하게 되어 요금제도와 연계가 용이한 기법이다.

그러나 MNI 모형은 WASP와 마찬가지로 정성적인 요인을 합리적으로 처리하지 못하며, 이론이 어렵고 발전기를 개별로 처리하지 않고 집단으로 통계 처리하는 단점을 가지고 있다.

### 3. 장기적인 원전 수립을 위한 모형의 정립

전원개발의 근원적인 목표는 저렴한 경제성과 질 좋은 전력계통의 안정성을 바탕으로 전력을 안정적으로 공급하는데 있다. 따라서 우리 나라는 위의 목표를 충실히 수행하여 최근에는 선진국 수준과 동등한 전력생산과 공급을 갖추게 되었다.

그러나 우리 나라의 전력사업은 특성적으로 볼 때 자원, 환경, 그리고 에너지 자원에 민감한 구조를 가지고 있으며, 경제성, 사회성, 기술성 및 현실성에 직접적인 영향을 받고 있다.

따라서 우리 나라의 장기적인 전원개발 계획은 WASP 모형에 의한 경제성 평가에 의해 결정되어 왔으며, 그 결과 과학적인 전원개발 계획이 수립되었다.

그러나 주로 계량적인 요인을 고려하였기 때문에 공해, 시스템의 안정성, 안전심사나 안전규제 지침의 미비에 의한 안전사고, 그리고 방사능 누출에 의한 환경적인 문제 등에서 국민을 효과적으로 납득시키지 못하는 결과를 초래하게 되었다. 이러한 문제들이 발생하게 된 근원적인 이유는 장기적인 전원개발 시에 저렴한 경제성과 공급보장성에만 역점을 두었기 때문이다.

그러므로 본 논문의 목적은 계량적인 요인뿐만 아니라 정성적인 요인을 고려하여 더 구체적이고 합리적인 새로운 경제성 평가 모형을 개발하는 것이다.

본 모형은 합리적인 의사결정 기준을 제시하기 위하여 균등화 발전비용법을 사용하여 발전원가를 산출하는 계량적인 요인과 정성적인 기준으로 방사능 유출과 연계한 환경 요인, 서비스 시스템의 고장을 유발하는 위험 요인, 기능을 위주로 한 안전 요인을 고려하는 4가지 결정인자로 분석하며, 이 결정 인자들은 선형결합으로 이루어진다.

마지막으로 각 요소에 대한 가중치를 부여하여 인자의 중요성을 반영하였으며, 이를 바탕으로 정규화된 점수산정 모형을 개발하였다.

#### 3.1 정량적 요인을 고려한 발전원가의 점수 산정 모형 : $G_i$

정량적 요인은 기존의 연구를 토대로 하여 균등화 발전비용법에서 구한 발전원가를 점수화한다. 균등화 발전비용법은 매년 비용과 발전량이 서로 다른 대안간의 비교를 위해서 화폐의 시간적 가치를 고려하여 상업운전을 시작으로 발전량도 동일 시점으로 할인하여 연도 별로 균등화한 발전원가를 말한다.

발전원가는 발전소를 건설하고 이를 수명기간 동안에 운영하여 전력을 생산하는데 소요되는 연간 총비용으로 불변가격을 기준으로 균등화한다[13]. 발전원가는 건설비(Construction Cost), 연료비(Fuel Cost), 운전유지비(Operating Cost)로 분류하여 산정 한다[16].

건설비는 전체비용 중에서 자본비가 차지하는 비중이 상당히 크며, 그 중에서 자본비의 25~30% 정도가 건설기간 중에 지급하는 이자에 해당한다. 따라서 건설비는 발전소를 건설할 시에 직접 건설비용, 간접 건설비용, 그리고 시간관련 비용으로 분류하여 산출된다.

직접비용은 발전소 건설에 필요한 기자재비, 발전소 부지, 냉각재나 감속재 등의 특수 재료, 노무비 등과 같이 직접적으로 소요되는 비용으로 구성된다. 간접비용은 자문비를 비롯한 기술 비용, 건설관리, 품질보증, 환경허용조건 등에 관련된 비용과 기타 상업운전 개시에 필요한 사

업주 비용 등이 포함되며, 사업주 비용은 부지 매입비, 인허가 비용, 예비 부품비, 시운전비 등으로 구성된다. 시간관련 비용은 건설기간 중에 지급하는 이자와 물가 상승분으로 구성된다. 이자는 건설기간 중에 투자된 자본의 기회비용(Opportunity Cost)으로 건설용도에 충당되는 차입금 및 기타 자금을 대한 비용이며, 물가상승분은 건설기간 중의 인플레이션에 따른 재료, 노무비 등의 가격 상승분을 나타낸다.

발전소의 건설비는 대안의 선택에 있어서 현재가치로의 전환이 용이하기 때문에 준공시점의 가치로 환산한 건설비용을 설비용량으로 나누어 kW당비용으로 표시한다.

발전원가의 구성요인으로 연료비는 각 발전소에 핵연료를 확보하여 사용하는데 소요되는 제반 비용을 의미하며, 소모핵 연료비, 보조연료비, 운탄회사 비용을 포함한다. 소모핵 연료비는 원자력발전소의 핵연료 사용에 따른 소모핵 연료비로 장전 핵연료의 대한 연소 도에 따라 선 각된 비용이다. 보조연료비는 원자력 발전소의 보조보일러 연료로 사용되는 경유비용 또는 중수로형 발전소에서 냉각재 및 감속재로 사용되는 중수비용이다. 운탄회사비는 연료가 발전소에 입고되어 소비되는 과정의 저유관리 및 저장관리비와 노심관리비 등을 포함한 비용이다.

발전원가의 구성요인으로 운전유지비는 발전소를 운용하는데 소요되는 비용 중 연료비를 제외한 모든 비용으로 폐로비용을 포함하여 인건비, 수선유지비, 그리고 경비로 분류되며, 발전소 평균 이용률을 기초로 하여 추정된다. 또한, 균등화된 발전원가를 산출하기 위해서 건설비는 준공되는 시점에 일시불로 지불하며, 할인률은 8%로 가정한다[6].

균등화된 발전원가를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{발전원가(원/kWh)} &= \text{고정비원가} + \text{변동비원가} & (3.1) \\ &= \frac{\text{건설단가(원/kW)} \times \text{고정비용(\%)}}{8760 \times \text{이용률} \times (1 - \text{소내소비율})} + \frac{\text{열소비용(kcal/kWh)} \times \text{연료비단가}}{\text{발열량(kcal/kg)} \times (1 - \text{소내소비율})} \end{aligned}$$

따라서 불변가격을 기준으로한 균등화 발전비용의 발전원가는 할인률( $i'$ )과 자본회수계수(Capital Recovery Factor: CRF')를 사용하여 구하면 다음과 같다[6].

$$\bar{C}' = \text{CRF}' \times \frac{\sum_{t=1}^N C_t}{(1+i)^t}, \quad i' = \frac{(1+i)}{(1+f)} - 1, \quad \text{CRF}' = \frac{i'(1+i')^N}{(1+i')^N - 1} \quad (3.2)$$

$\bar{C}'$  = 불변가격을 기준으로 균등화 발전비용법에 의한 발전원가

$C_t$  =  $i$ 대안에서  $t$ 년도의 발전원가

그러므로 균등화 발전비용법에 의해 정규화한 식과 기호는 다음과 같다.

$$G_i^o = \frac{\bar{C}'}{G_m}, \quad 0 < G_i^o \leq 1 \quad (3.3)$$

$G_i^o$  = 대안으로 등장한 발전원가의 상대점수

$\bar{C}'$  = 균등화 발전비용법에 의해 환산한 각 대안  $i$ 에 대한 발전원가의 절대평가 점수

$G_m$  =  $\bar{C}'$  중에서 최대값

### 3.2 정성적인 요인 중 환경적 요인 : $E_i$

화석 연료의 사용으로 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ), 황산화물( $\text{SO}_x$ ), 질소산화물( $\text{NO}_x$ ) 등 각종 오염 가스 배출의 급증으로 인하여 온실효과, 산성비, 오존층 파괴 등의 결과를 초래하였다. 이와 더불어 저렴한 경제성과 안전성을 바탕으로 원자력의 사용이 증가하면 할수록 그만큼 이산화탄소의 발생량이 줄어 들게되어 유연탄 화력발전에 비해 환경 친화적인 특성을 갖게된다.

그러나 원전을 가동하거나 방사능 폐기물이 국제원자력기구에서 허용하는 4등급 이상의 유출 사고가 수반되는 경우에는 엄청난 환경의 파괴가 초래한다는 것을 체르노빌 원전 사고에서 경험하게 되었다. 또한, 최근에 1999년 7월 12일 일본의 쓰르가 원전에서는 원자로 속에 있는 재생열교환기의 스테인레스 배관 이음매에서 길이 8cm에 폭 0.2mm 가량 균열로 인하여 14시

간 동안 방사능이 함유된 것으로 추정되는 냉각수 89t이 외부로 누출되는 중대한 사고가 발생하였다. 따라서 설계단계에서 공통적으로 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기 등이 안전기능 수행 시에 예상되는 환경조건에 적합한 것인가를 분석해야만 한다[7]. 또한, 원자로 시설에 방사선 안전관리를 전담하는 조직을 갖추어야만 하는 것이다.

본 절에서는 환경적 요인으로 환경적 설계요소와 방사능 조직의 요소로 구분하여 각각의 항목에 가중치를 부여하였으며, 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E_i = se_1 + oe_2, 0 \leq E_i \leq 4 \tag{3.4}$$

$E_i$  = 대안으로 등장한 환경적 요인의 절대평가 점수

$se_1$  = 대안으로 등장한 원전 설비의 구조물 점수

$oe_1$  = 원자로 시설에서 대안으로 등장한 방사선 안전관리 요소의 평가 점수

차세대 원자로의 설계수명은 40년에서 60년으로 증가함에 따라 안전성의 향상을 위해 중대 사고 대처설비에 대해 중대사고 환경조건하에서 성능 수행을 분석해야한다[7]. 따라서 원전 설비의 구조물 요소( $se_1$ )는 차세대 원자로의 가동 시에 안전성 관련 기능의 수행능력에 대해 분석하였다.

<표-1> 원전에서 원전 설비의 구조물 점수와 가중치

원전에서 설비 구조물의 기능	모수	가중 점수치
중요 구조물과 기기가 자연현상과 외부사건에 의해 발생 가능한 영향에 대해 관련 기능의 수행능력이 양호	$se_{j11}$	1
중요 구조물과 기기가 자연현상과 외부사건에 의해 발생 가능한 영향에 대해 관련 기능의 수행능력이 비 양호	$se_{j11}$	0
서브 시스템과 기능이 양호	$se_{j12}$	1
서브 시스템과 기능이 비 양호	$se_{j12}$	0

$se_{j11}$  = 대안의 j상태에서 서브 원전의 상태 1

$se_{j12}$  = 대안의 j상태에서 서브 원전의 상태 2

$$se_1 = \frac{\sum_{j=1}^4 (se_{j11} + se_{j12})}{n_1}, 0 \leq se_1 \leq 2 \tag{3.5}$$

$n_1$  = 대안에서 총 서브 원전 체제의 수

방사선 안전관리 조직( $oe_2$ )은 원자로 시설의 관리구역 내에서 작업하는 종사자의 피폭방사선량을 측정하기 위한 장비나 내부 피폭선량을 평가하기 위한 프로그램을 중점적으로 분석한다.

<표-2> 원전에서 방사선 안전관리 조직의 점수와 가중치

원전에서 방사능 안전관리 조직의 기능	모수	모수의 가중 점수치
원자로 시설의 관리구역 내에서 측정 장비와 피폭선량의 평가프로그램의 기능이 양호	$oe_{j11}$	1
원자로 시설의 관리구역 내에서 측정장비와 피폭선량의 평가 프로그램이 비 양호	$oe_{j11}$	0
서브 시스템과 방사선 관리 조직의 기능이 양호	$oe_{j12}$	1
서브 시스템과 방사선 관리 조직의 기능이 비 양호	$oe_{i12}$	0

$oe_{j11}$  = 대안의 j상태에서 서브 원전의 상태 1

$oe_{j12}$  = 대안의 j상태에서 서브 원전의 상태 2

$n_2$  = 대안에서 총 서브 원전 체제의 수

$$oe_1 = \frac{\sum_{j=1}^4 (oe_{j11} + oe_{j12})}{n_2}, 0 \leq oe_2 \leq 2 \tag{3.6}$$

따라서 환경요인을 구체적으로 평가하기 위하여 대안 i중에서 최댓값으로 나누어준 상대점수 치로 정규화 하였다. 환경 요인을 정규화한 식과 기호는 다음과 같다.

$$E_i^o = \frac{E_i}{E_m}, 0 < E_i^o \leq 1 \tag{3.7}$$

$E_m$  = 대안 i중에서 최댓값

$E_i^o$  = 불확실성을 최소화하기 위해 정규화한 각 대안 i에 대한 환경 요인의 상대평가 점수

### 3.3 정성적인 요인 중 위험 요인 : $R_i$

국제원자력기구에서는 원전 사고의 위험을 8등급으로 분류하여 0등급은 안정성과 방사선에 영향이 없는 고장인 반면에 1~3등급은 일반적인 고장(Incident)이며, 4~7등급은 방사선에 의한 영향이 있는 사고(Accident)로 분류하였다. 이러한 분류 체계는 국제원자력기구에서 정해진 바에 따라 전 세계적으로 통용되고 있는 기준이다[16].

그러므로 본 절에서는 위험 요인을 세분화하여 국제원자력기구가 제시하는 사고 기준( $ir_1$ ), 안전성 관련 설비의 기준으로 하는 위험요소( $fr_2$ ), 그리고 각 대안의 원전의 신뢰도를 유지하기 위한 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator: EDG)의 신뢰도( $rr_3$ )로 분류하여 위험 요인을 구체적으로 분석한다. 정성적인 요인 중에서 위험 요인을 점수화 하기 위한 식과 기호 정의는 다음과 같다.

$$R_i = ir_1 + fr_2 + rr_3, 2 \leq R_i \leq 16 \tag{3.8}$$

$R_i$  = 대안으로 등장한 정성적인 요인에 대한 위험 요인의 절대평가 점수

$ir_1$  = 국제원자력기구의 사고 기준에 의해 대안으로 등장한 사고 점수

$fr_2$  = 대안으로 등장한 원자로 시설에서 안전성 관련 설비를 기준으로한 고장 점수

$rr_3$  = 대안으로 등장한 원전의 신뢰도를 유지하기 위한 EDG 신뢰도 평가 점수

국제원자력기구가 제시하는 사고 기준을 중심으로 점수화 하면 다음과 같다.

<표-3> 국제원자력기구의 사고 기준을 중심으로 원전 사고 등급의 점수

IAEA의 사고 기준에 의한 위험 가능성	판정 기준	점수
안전성이나 방사선 누출에 전혀 영향이 없음	안전에 무관	7
안전대책이 결여된 가능성 또는 운전상의 이상상태	이상상태	6
안전규정의 재평가를 필요로 하는 기술상의 고장이나 이상상태	고장	5
외부로 방사능 누출, 작업자 파괴 폭 5렘 이상, 안전 계통의 추가고장으로 인해 사고상태로 진전 가능성 내재	심한 고장	4
외부 누출로 인한 조사선량율이 0.5렘 정도, 약간의 노심 손상, 작업자 조사선량이 1백렘	중요설비사고	3
핵분열 생성물의 일부가 외부로 누출, 방사선 비상계획의 부분적 수정, 노심의 심한 손상	외부위협사고	2
핵분열 생성물의 외부 누출, 지역 방사선 비상계획의 전면수정	심각한 사고	1
많은 노심 파편이 외부로 유출, 건강상 급성질환 유발 가능성 존재, 장기적인 환경영향 초래	대형사고	0

단, 원전 사고 점수의 범위는  $0 \leq ir_1 \leq 7$ 이다.

사고의 위험을 분석하는 경우에 재해를 유발하는 원인은 중대한 위험보다는 발생가능성이 있는 위험요소를 집중적으로 분석하여 사고 발생을 근원적으로 차단해야 한다[14]. 따라서 사고 가능성이 내재되어 있는 원자로 냉각재 압력경계의 건전성, 원자로를 정지시키고 안전하게 유지하기 위한 능력, 또는 소외피폭을 유발할 수 있는 사고를 방지하거나 사고의 결과를 완화할 수 있는 필요한 설비에 대한 분석이 이루어 져야한다[9,10]. 사고 가능성에 관련된 주요 설

비 요소를 분석한 점수는 다음과 같다.

<표-4> 사고 가능성을 방지하기 위한 안전성 설비의 탄력성 점수와 총 점수

사고 가능성을 방지하기 위한 설비의 탄력성 점수	상태	점수
기계의 움직임으로 작동하는 기기의 오작동, 구조적 건전성을 유지하거나 유동을 차단하기 위한 유동차단기기의 고장	단일고장	4
원전에서 수명기간 중에 사고 발생 가능성은 없지만 발생 시에 대량 방사능 누출이 예상되는 사고	극히 발생하지 않을 것 같은 사고	3
원전에서 수명기간 중 한번 일어날 가능성 있는 사고	거의 발생하지 않는 사고	2
원전에서 일년 중 한번 일어날 수 있는 사고	보통사고	1

단, 사고 가능성을 방지하기 위한 설비의 탄력성 점수의 범위는  $1 \leq fr_2 \leq 4$ 이다[1,22].

원전에서 안전하게 시스템의 기능을 수행하기 위한 척도로 신뢰도를 이용한다. 따라서 원전의 시스템의 신뢰도가 높으면 높을수록 그만큼 위험의 발생 가능성은 줄어들게 된다.

그러나 정상교류전력인 소외전력이 상실되면 원자로 잔열 제거, 비상 노심 냉각 및 격납 건물 열 제거 등 필수 안전기능의 수행에 필요한 부하에 전력을 공급하기 위해 EDG가 정상적으로 가동되어야 한다. 따라서 설계 시부터 원전의 수명시간까지 높은 수준의 기동 및 운전신뢰도를 유지해야만 한다. 원전의 신뢰도를 유지하기 위해 EDG의 신뢰도 점수는 <표-5>와 같다.

<표-5> 대안으로 등장한 EDG 신뢰도 평가 점수

대안으로 등장한 EDG의 신뢰도 점수	기능 상태	점수
99.8% 이상	최우수	5
99.6-99.8% 미만	우수	4
99.4-99.6% 미만	보통	3
99.2-99.4% 미만	미흡	2
99.4% 미만	불량	1

단, EDG의 신뢰도 점수의 범위는  $1 \leq rr_3 \leq 5$ 이다.

위험 요인을 표준화하기 위하여 대안 i중에서 최댓값으로 나누어준 상대 점수치로 정규화 하였다. 위험 요인을 정규화한 식과 기호는 다음과 같다.

$$R_i^o = \frac{R_i}{R_m}, 0 < R_i^o \leq 1 \tag{3.9}$$

$R_m$  = 대안 i중에서 최댓값

$R_i^o$  = 불확실성을 최소화하기 위하여 정돈한 각 대안 i에 대한 위험요인의 상대평가 점수

### 3.4 안전성 요인 : $S_i$

첨단 기술이 고도화하면 할수록 시스템 적인 측면에서 사고의 위험을 최소화할 수 있는 안전성의 문제가 큰 이슈로 대두되고 있다. 특히, 원전은 방사능의 외부 누출을 예방하기 위하여 다섯 가지의 다중방호개념(Defense in Depth Concept)으로 설계되었다. 세부적으로 살펴보면, 새끼손가락 끝마디 정도 크기로 연쇄 핵반응이 일어나는 핵연료 펠릿을 약 3~4cm 핵연료 봉으로 싸여있으며, 핵연료 봉은 냉각재인 물 속에 잠겨있고 핵 연료봉과 냉각재가 2차, 3차의 방사능 방호층을 형성하고 있다. 4차 방어 막으로 방사능 방호층은 밀폐된 원자로 용기로 둘러싸여 있으며, 마지막으로 약 1m 두께의 철근 콘크리트로 둘러싸인 격납 건물로 형성되어 방사능의 외부 누출을 엄격하게 관리하고 있다[8]. 따라서 본 절에서는 안전성 요인을 원전에서 안전한 운영과 이상이 발생할 경우에 대처하기 위해 소프트웨어의 신속한 처리능력(ps), 사고가



발생했을 경우에 안전장치의 신속한 처리능력(as<sub>2</sub>), 인적에러를 최소화하는 인간 공학적 요소(hs<sub>3</sub>), 그리고 안전관리(ms<sub>4</sub>)면에서는 안전 운전 훈련, 운전원의 절차서 및 고장응급 처치에 대한 능력으로 구분하여 체계적으로 안전 요인에 대한 점수산정 모형을 개발하였다[1,2].

안전성 요인을 계량화한 식과 기호 및 용어 정의는 다음과 같다.

$$S_i = ps_1 + as_2 + hs_3 + ms_4, \quad 3 \leq S_i \leq 16 \quad (3.10)$$

S<sub>i</sub> = 대안으로 등장한 원전의 안전성 절대평가 점수

ps<sub>1</sub> = 대안으로 등장한 원전의 소프트웨어에 대한 안전성 점수

as<sub>2</sub> = 대안으로 등장한 원전의 안전장치의 처리능력에 관한 평가 점수

hs<sub>3</sub> = 대안으로 등장한 원전의 인적에러의 평가 점수

ms<sub>4</sub> = 대안으로 등장한 원전의 안전관리에 대한 평가 점수

원전에서 시스템적인 측면에서 볼 때 안전, 품질, 생산성 등을 지속적으로 유지하기 위해서는 설비를 도입하는 단계에서 각 서브 시스템들을 체계적으로 분석, 평가 할 수 있는 소프트웨어의 기능을 극대화한 프로그램이 필수적이다. 원전을 효율적으로 운영하기 위한 소프트웨어의 처리능력에 대한 점수는 <표-6>과 같다.

<표-6> 원전에서 소프트웨어의 처리 능력에 대한 점수

원전에서 소프트웨어의 처리 기능	기능 상태	가중점수(W <sub>jl</sub> )
원전에서 다른 서브 시스템과 체계적이며 사고방지의 최소화 화에 적절하고 신속한 결정기준 제시	최우수	5
원전에서 다른 서브 시스템과 체계적이며 사고방지의 최소화 에 결정기준 제시	우수	4
원전에서 현재 보편적으로 쓰이며 사고방지의 기준을 제시 원전에서 새로운 프로그램에 적합치 않으며, 사고방지의 기준 분석이 미흡	보통	3
원전에 적합치 않으며 현재는 쓰이지 않음	미흡	2
	폐기	1

sn<sub>jl</sub> = 대안에서 j상태로 평가된 서브 시스템의 수

W<sub>jl</sub> = j 상태에서 소프트웨어 점수

$$ps_1 = \frac{\sum_{j=1}^5 sn_{jl} \cdot W_{jl}}{n_3}, \quad 1 \leq ps_1 \leq 5 \quad (3.11)$$

n<sub>3</sub> = 대안에서 소프트웨어에 대한 총 서브 시스템의 수

원전에서 사고가 발생할 경우에는 즉각적으로 대처할 수 있는 안전장치가 설치되어 신속하게 작동을 해야 만이 사고를 미연에 방지할 수가 있는 것이다. 따라서 원전에서 안전장치의 처리능력은 기능적인 관점에서 분석하였다. 단, 안전장치의 점수 범위는 1 ≤ as<sub>2</sub> ≤ 5이다.

<표-7> 원전에서 안전장치 이상 시에 평가 점수와 총점수

원전에서 안전장치 이상 시의 기능	기능 상태	점수	총점수
원전에 안전하고 신속하게 자동 대처	최우수	1	5
원전에 안전하나 수동 후 가능	우수	1	4
원전에서 서브시스템 수동 후 가능	보통	1	3
원전에서 상당한 시간이 필요	미흡	1	2
원전에서 대처 미흡	대체	1	1

원전에서 시스템의 안정성을 향상시키거나 시스템의 오류를 방지하기 위해서는 인간공학적 인 요소를 분석하는 연구가 선행되어야한다. 특히, 여러 인적 요인 중에서 직무분석에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 인간-기계 시스템의 공정 및 설계에 인간공학적 설계지침이 수립되어야만 한다. 따라서 본 절에서는 직무분석을 중점적으로 분석한다.

<표-8> 원전에서 인적 요소를 고려한 직무분석의 평가 점수

원전에서 인적 요소를 고려한 직무분석	기능 상태	가중점수(W <sub>j3</sub> )
원전에서 인간-기계 시스템의 직무분석 이 체계적이며 신속하며, 인지오류 분석 시에 서브시스템과 개별적, 통합적으로 일관성 있게 평가	최우수	4
원전에서 인간-기계 시스템의 직무분석이 체계적이고, 인지오류 분석 시에 서브시스템과 통합적으로 일관성 있게 평가	우수	3
원전에서 인간-기계 시스템의 직무분석이 단순하며 인지오류 분석 시에 서브 시스템과 개별적으로 평가	보통	2
원전에서 인간-기계 시스템의 분석이 미흡하며, 인지오류분석 시에 서브 시스템과 평가 방법이 미흡	미흡	1

hn<sub>j3</sub> = 대안에서 j상태로 평가된 서브 시스템의 수  
 W<sub>j3</sub> = j 상태에서 인적 요소의 평가 점수

$$hs_3 = \frac{\sum_{j=1}^5 hn_{j3} \cdot W_{j3}}{n_4}, 1 \leq hs_3 \leq 5 \tag{3.12}$$

n<sub>4</sub> = 대안에서 인적 에러에 대한 총 서브 시스템의 수

우리 나라 원전에서 1999년 1/4분기 사고 내용을 살펴보면 대부분이 안전훈련 미숙에 의한 운전원 들의 운전 사고와 운전 절차서를 미준수한 원인에 의한 사고가 주류를 이루고 있다[3]. 따라서 안전관리 면에서는 안전훈련 교육과 운전 절차서 및 고장응급 처치에 대한 능력의 철저한 분석으로 평가하려한다.

안전관리 요소에 대한 평가 점수를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$ms_4 = t_1 \cdot set_{41} + p_2 \cdot pec_{42}, 0 \leq ms_4 \leq 2 \tag{3.13}$$

t<sub>1</sub> = 안전관리 요소에서 안전 훈련 교육에 대한 가중치  
 set<sub>41</sub> = 안전 교육 훈련에 대한 점수  
 p<sub>2</sub> = 안전관리 요소에서 운전 절차서 및 응급 조치에 대한 가중치  
 pec<sub>42</sub> = 운전 절차서 및 응급 조치에 대한 점수  
 따라서 안전성 요인을 체계화하여 정규화 시킨 식과 기호는 다음과 같다.

$$S_i^o = \frac{S_i}{S_m}, 0 < S_i^o \leq 1 \tag{3.14}$$

S<sub>m</sub> = 대안 i중에서 최대값

S<sub>i</sub><sup>o</sup> = 안전 요인을 체계화하여 정리한 각 대안 i의 안전성 상대 평가점수  
 그러므로 정량적인 발전원가, 정성적인 요인으로 환경 요인, 위험 요인, 안전 요인의 가중치를 부여하여 선형결합으로 경제성 평가를 세부적으로 묘사하면 다음과 같다.

$$T_i = A_1 \cdot G_i^o + A_2 \cdot E_i^o + A_3 \cdot R_i^o + A_4 \cdot S_i^o, 0 < T_i \leq 4 \tag{3.15}$$

$$= A_1 \cdot \left( \frac{CRF \cdot \sum_{t=1}^n C_t}{G_m (1+i)^t} \right) + A_2 \cdot \left( \frac{\sum_{j=1}^2 (se_{j11} + se_{j12})}{n_1} + \frac{\sum_{j=1}^2 (oe_{j11} + oe_{j12})}{n_2} \right) / E_m$$

$$+ A_3 \cdot \left( \frac{ir_1 + fr_2 + rr_2}{R_m} \right) + A_4 \cdot \left( \frac{\sum_{j=1}^5 sn_{j1} \cdot W_{j1}}{n_3} + as_2 + \frac{\sum_{j=1}^5 hn_{j3} \cdot W_{j3}}{n_4} + t_1 \cdot set_{41} + p_2 \cdot pec_{42} \right) / S_m \tag{3.16}$$

단, T<sub>i</sub>는 불확실한 상황하에서 체계적으로 선형결합한 i대안의 총 점수이며, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>는 정량적인 발전원가, 환경, 위험, 그리고 안전성 요인에 대한 가중치이다.

#### 4. 결론

장기적인 전원개발 계획 시에는 무엇보다도 우선적으로 고려 해야할 요인은 안전성과 환경 요인을 철저히 분석하여 고장과 고장에 따른 파급효과를 사전에 차단하는 것이 무엇보다도 먼저 선행되어야 한다[7]. 따라서 기존의 계량적인 요인에서 탈피하여 정성적인 요인까지도 고려하여 안전, 경제성, 환경적인 문제를 분석, 평가하는데 더욱 더 현실적이며 타당성 있는 원전의 경제성 평가 모형이 요구되는 것이다.

그러므로 본 연구의 결과와 기대 효과는 다음과 같다.

첫째, 계량적인 요인인 발전원가를 위주로 한 평가에서 탈피하여 정성적인 요인으로 방사능 누출과 연계한 환경 요인, 시스템과 서브시스템들의 고장을 유발하는 위험 요인, 전체적인 관점에서 기능을 위주로 한 안전요인을 고려하여 원전의 구체적이고 타당성 있는 경제성 평가를 위하여 정규화한 점수산정 모형을 개발하였다.

둘째로, 차세대 원전을 설계 시에 인간공학적 요소와 운전 절차서 및 안전 교육 훈련을 강화하기 위하여 부분적으로 결정 요소를 가미하여 더욱 더 견고하게 새로운 형태의 경제성 평가 방법의 점수산정 모형을 개발하였다.

셋째로, 정성적인 요인을 체계적으로 분석, 평가 할 수 있기 때문에 원전 시스템의 안전성을 구체적으로 평가 할 수 있다.

마지막으로, 본 연구의 경제성 평가 모형은 기능적인 관점에서 튼튼한 방식으로 분석하였다.

추후에 다년간 연구과제로는 더욱 더 효율적인 차세대 원전을 위한 경제성 평가모형이 요구되며, 원전에서 정성적인 요인을 고려한 신뢰도 분석이 요구된다.

#### 참고문헌

- [1] 강영식의 4인, 시스템안전공학(개정판), 태성, pp. 10-248, 1999.
- [2] 강영식, 함효준, "유연생산 체제에서 점수산정 모형에 의한 경제성 평가", 대한설비관리학회지, 2(2), pp. 303-320, 1997.
- [3] 과학기술부, "원전 특별안전점검 결과", 과학기술부 공보실, 1994. 4.
- [4] 김영창, "환경문제를 고려한 다목적 전원개발에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1993. 2.
- [5] 상공자원부, "에너지 통계연보", 에너지경제연구원, 1994.
- [6] 이광수, "생애비용을 응용한 원전과 화전의 경제적 수명 설정 비교 연구", 박사학위논문, 아주대학교, 1997. 8.
- [7] 이재훈의 9인, "차세대원자로 일반안전요건 개발", 한국원자력학회 1997년도 추계학술대회 발표 논문집; 1997.
- [8] 정원대, 황미정 "원자력발전소의 안정성 및 신뢰도 평가", 한국산업안전학회지, 12(4), pp. 153-160, 1997.
- [9] 한국원자력기술원, "차세대원자로 안전규제요건 개발", KINS/GR-112, 1996.7
- [10] 한국원자력기술원, "차세대원자로 안전규제요건 개발", KINS/GR-116, 1996.7
- [11] 한국전력공사, "WASP모형의 개선에 관한 연구", 한국전력공사 기술연구원, 1985. 6.
- [12] 통상산업부와 한국전력공사, 원자력발전백서, 대성인쇄공사, 1996.

- [13] 함 효 준, 최신경제성공학, 동현출판사, 1999.
- [14] Bird, F., Management Guide to Loss Control, Institute Press, Atlanta, 1974.
- [15] Evans *et al.*, "Multiple Objective Energy Generation Planning under Uncertainty", Inst. of Industrial Engineers Transactions, 1982.
- [16] IAEA, "Development of Safety Principles for the Design of Future Nuclear Power Plants", TECDOC-801, IAEA, 1995.
- [17] Jenkins, R. T., and Joy, D. S., "Wien Automatic System Planning Package(WASP)-An Electric Optimal Generation Expansion Planning Computer Code", Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-4945, 1974.
- [18] Kavrakoglu, I., and Kiziltan, G., "Multi-Objective Strategies in Power Systems Planning", European Journal of Operational Research, 12, pp. 159-170, 1983.
- [19] Moskowitz *et al.*, "Development of a Multi-attribute Value Function for Long Range Electrical Generation Expansion", IEEE Trans. on Engineering and Management EM-25(4), 1978.
- [20] Rutz, J. L., *et al.*, "Sequential Objective linear Programming", IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, 6, PAS-98, pp. 2915-2021, 1979.
- [21] Yang, H. T., and Chen, S. L., "Incorporating a Multiple-Criteria Decision Procedure into the Combined Dynamic Programming/ Production Simulation Algorithms for Generation Expansion Planning", IEEE Trans. on Power Systems, 4(1), pp. 165-175, 1989.
- [22] Wyckoff, H., "The Reliability of Emergency Diesel Generators at U.S. Nuclear Power Plants". NSAC-109, EPRI, 1986.