

## 원전 증기발생기 교체에 대한 확률론적 경제성평가 방법

### A Study on a Probabilistic Economic Analysis Method of Steam Generator Replacement for Nuclear Power Plants

문호림, 장창희, 박준현, 정일석

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

원자력발전소 주요기기의 교체에 대한 경제성평가는 대부분 결정론적 방법으로 수행하고 있으나 불확실성을 가진 입력변수에 따라 결과값이 매우 가변적이다. 현실세계의 불확실성을 보다 면밀히 고려하기 위해서는 확률론적 경제성평가를 수행하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 확률론적 시뮬레이션중 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 증기발생기 교체에 대한 경제성평가를 확률론적 방법으로 수행하였다. 국내 운전중인 A형 원자력발전소를 대상으로 확률론적 경제성평가를 시범적으로 수행하였다. 이를 통해 국내 A형 원자력발전소 증기발생기의 최적교체시기를 결정하였다. 확률론적 경제성평가 결과를 살펴보면 교체시기에 따른 비용차이가 크지 않았다. 이러한 방법은 향후 원자력발전소 주요기기의 교체에 관한 경제성평가지 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### Abstract

Mostly, the economic analyses for replacement of major components of nuclear power plants(NPPs) have been performed in deterministic ways. However, the analysis results are more or less affected by the uncertainties associated with input variables. Therefore, it is desirable to use a probabilistic economic analysis method to properly consider uncertainty of real problem. In this paper, the probabilistic economic analysis method and Monte Carlo simulation technique are briefly described. And the result of the probabilistic economic analysis for old steam generators are compared with the result of the deterministic analysis. The differences are not that significant. The probabilistic economy analysis method using Monte Carlo simulation will provide efficient and accurate way of economic analysis for the repair and/or replacement major components of NPPs.

#### 1. 서 론

1978년 고리 1호기의 상업운전을 시작으로 국내에는 2000년 현재 총 16기의 원자력발전소가 가동중이며 13,715 MW의 발전설비용량을 가지고 있다. 국내 원자력발전소는 전체 발전설비용량의 29%, 발전용량의 42%를 차지하며 안정적인 국내 전력수급에 중추적인 역할을 담당하고 있다. 원자력발전소는 고온, 고압의 열악한 환경하에서 가동되며 이로 인해 부식, 기계적 응력 및 진동 등이 지속적으로 작용한다. 이러한 가동중 발생조건으로 인해 주요기기에서의 결함발생 가능성이 있다. 특히, 증기발생기 1 개당 3,000~9,000여 개의 전열관으로 구성되어있으며 이들 전열관에서 발생하는 결함은 발전소의 안정적인 운전에 중요한 문제이다.

원자력발전소의 가동년수가 증가할수록 균열이 발생한 증기발생기 전열관의 개수가 증가하고 또 개별 균열의 크기도 계속 성장하는 경향을 보인다. 이로 인해 점검주기가 짧아지고 점검범위

표 1 증기발생기 교체현황

Plant	Year of Service	EFPY Oper.	Year Replaced	Repl. Cost (millions, \$)
Surry 1, 2	8, 7	4.4, 3.6	1981, 1980	94, 94
Turkey Point 3, 4	10, 9	5.2, 5.9	1982, 1983	90, 90
Obrigheim	14	11.2	1983	37
Point Beach 1	13	9.2	1984	47
H. B. Robinson	13	8.5	1984	85
D. C. Cook <sup>2</sup>	11	7	1989	115
Indian Point 3	13	6.4	1989	120
Ringhals 2	14	8.1	1989	130
Dampierre 1	9.9	7.6	1990	104
Palisades	19	8.3	1991	100
Milestone 2	17	10.9	1992	190
Doel 3	11	10	1993	98
North Anna 1	15	9.7	1993	125
Beznau 1	24	19.5	1993	50
Bugey 5	14.1	10.7	1993	91
Mihama 2	18	11.5	1994	140
Summer	11	8.3	1994	105
North Anna 2	15	11.4	1995	114
Mihama 1	25	10.1	1996	200
Takahama 1	21	13	1996	230
Almaraz 2	14	11.2	1997	-
McGuire 2	13	10.2	1997	139
St. Luice 1	22	16.1	1998	183
Byron 1	13	9.2	1998	-
Kori 1	21	14.1	1998	-
Tihange 3	13	10.5	1998	-

가 확대되며, 관막음 및 슬리브 정비량이 증가하게 된다. 이때 많은 정비비용이 소요되고 증기발생기의 성능손실을 유발시킨다. 또한 증기발생기의 누설 및 관막음 증가 등으로 인한 원자력발전소의 불시정지 및 출력감소를 발생시킬 수 있다. 지난 10년간 미국 원자력발전소의 통계를 살펴 보아도 증기발생기 문제가 계획예방정지로 인한 발전정지 다음으로 발전량 손실을 유발하는 주요 원인으로 나타났다.

표 1에 증기발생기를 교체한 원자력발전소의 호기, 상업 운전년수, 유효전출력 운전년수(Effective Full Power Years; EFPY), 교체년도 그리고 비용을 정리하였다. 지금까지 한국 1 개, 미국 11 개, 독일 1 개, 프랑스 1 개, 스웨덴 1 개, 일본 2 개의 사업자(utilities)가 총 51 개 원자력발전소에서 150 개의 증기발생기를 교체하였다[1]. 그리고 현재 20 개 원자력발전소에서 교체를 위한 증기발생기를 주문해 놓은 상태이다. 이처럼 세계적으로 증기발생기 교체에 대한 사례가 증가하고 있으며, 국내에서도 1998년 고리 1호기 증기발생기를 교체한 바 있다. 지금까지 증기발생기를 교체한 원자력발전소의 경우 대개 운전년수 7~25년, EFPY로는 3.6~19.6년 사이에 증기발생기를 교체한 것으로 나타났다. 또한 증기발생기의 심각한 문제로 인해 Trojan 원자력발전소를 조기 정지한 경우도 있다. 이러한 증기발생기 교체는 많은 예산이 소요되고 경영상의 주요판단이므로 면밀한 경제성평가를 근거로 교체여부 또는 교체시기에 대한 결론을 도출해야 한다.

국외에서는 미국, 일본 등 원자력산업 선진국을 중심으로 증기발생기 교체의 경제성에 대한 연구가 추진되어 왔다. EPRI(Electric Power Research Institute)[2]와 Westinghouse에서 증기발생기에 대한 경제성평가 방법이 개발되었으며, 최근에 EPRI에서는 Calvert Cliffs 원자력발전소의 대상으로 인허가 갱신(licence renewal)를 목적으로 증기발생기 교체에 대한 연구[3]를 수행하였다. 국내에서는 한국전력공사에서 고리 원자력발전소 1호기[4]와 울진 원자력발전소 1·2호기 증기발생기[5]의 교체 타당성 및 최적 교체시기 결정에 대한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 이들 연구의 대부분은 결정론적 시뮬레이션(deterministic simulation)으로 불확실성(uncertainty)을 가진 변수의 변화에 따라 결과값에 영향을 미치는 정도가 크며 현실세계의 불확실성을 묘사하기에는 다소 부족한 면이 있다. 현실세계의 불확실성을 고려하기 위해서는 확률론적 경제성평가를 수행하여야 한다.

본 논문에서는 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 증기발생기 교체에 대한 경제성평가를 확률론적 방법론으로 수행하였다. 이를 통해, 첫째, 국내 운전중인 A형 원자력발전소 증기발생기를 대상으로 확률론적 경제성평가를 시범적으로 수행하여 최적교체시기를 결정하였다. 둘째, 이를 향후 발생할 것으로 예측되어지는 증기발생기를 비롯한 원자력발전소 주요기기의 교체에 관한 경제성평가가 적용할 수 있도록 하고자 한다.

## 2. 관련이론

### 2.1 확률론적 시뮬레이션

시뮬레이션은 모델의 종류에 따라서 여러 종류로 구분된다. 보통 확률변수를 사용하는가 하지 않는가에 따라서 결정론적 시뮬레이션과 확률론적 시뮬레이션으로 나누기도 한다. 결정론적 시뮬레이션은 시뮬레이션의 행동(behavior)이 주어진 입력에 의해서 완전히 결정된다는 의미이다. 즉 입력이 동일하다면 알고리즘은 항상 동일한 과정을 거쳐 동일한 출력을 생산한다. 결정론적 시뮬레이션은 동일한 과정을 거치므로 기본적으로 동일한 시간을 필요로 한다. 반면에 확률론적 시뮬레이션(probabilistic simulation 또는 stochastic simulation)은 시뮬레이션의 내부에서 random-number-generator를 사용하며, 시뮬레이션의 행동이 입력 데이터뿐만 아니라 random-number-generator에 의해서 생성된 값에 의존하는 유형의 시뮬레이션을 총칭한다. 즉 동일한 시뮬레이션이라고 하더라도 각각의 수행에서 random-number-generator가 다른 값을 생성하므로 시뮬레이션은 서로 다른 과정을 거쳐서 다른 결과를 출력할 수 있다. 결과에 도달하는 과정이 다르기 때문에 걸리는 시간이 다르다. 즉, 주어진 입력 데이터에 대한 시뮬레이션의 수행시간이 고정되지 않고 수행시간이 무한 할 수도 있다.

예를 들면, 10년 동안의 발전원가를 계산하는데 실질할인율을 8.5%로 고정하고 계산한다면 결정론적 시뮬레이션이다. 그러나 현실적으로 이러한 가정은 부정확하다. 왜냐하면 경기상황이 호황이면 더 낮게 책정될 수도 있고 반대로 불경기이면 실질할인율이 더 높게 책정될 수도 있기 때문이다. 실제로 시뮬레이션을 사용하는 경우 현실상황은 복잡하고 확률적이므로 결정론적 시뮬레이션보다는 대부분 확률론적 시뮬레이션을 사용하게 된다[6].

### 2.2 Monte Carlo 시뮬레이션

확률론적 시뮬레이션 중 일반적으로 사용되는 Monte Carlo 시뮬레이션이란 동일한 입력에 대해서 서로 다른 과정을 거칠 뿐만 아니라 서로 다른 결과를 출력할 수도 있는 알고리즘을 의미한다. 이것은 시뮬레이션이 틀린 답을 출력할 수도 있다는 것이다[7].

예를 들어,  $\sin x$ 를 0에서  $\pi$ 까지 적분을 확률론적 시뮬레이션을 이용하여 계산한다고 가정하자.

$$I = \int_0^{\pi} \sin x \, dx \quad (1)$$

이것은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{Y}(n) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} = (b-a) \frac{\sum_{i=1}^n g(x_i)}{n} \quad (2)$$

여기서,

$$a = 0$$

표 2 Monte Carlo 시뮬레이션 예

시뮬레이션 횟수	x	Y
1	1.650	3.130
2	1.974	2.899
3	0.316	0.977
4	1.957	2.909
5	1.524	0.578
6	2.957	3.137
7	1.524	2.137
8	2.199	2.541
9	1.592	3.139
10	1.172	2.984
11	2.680	1.397
12	1.986	2.873
13	0.899	2.458
14	0.538	1.609
15	1.407	3.098
16	0.955	2.563
17	0.740	2.117
18	1.850	3.018
19	1.971	2.954
20	2.547	1.758
<b>Mean</b>		<b>2.409</b>

$$b = \pi$$

$$x = U(a, b), \text{ random variables}$$

$$g(x) = \sin x$$

평균  $\bar{Y}$  는 넓이  $(b-a)$ 와 높이  $g(x)$ 을 곱한 사각형 면적의 평균을 의미한다.  $\bar{Y}(n)$ 의 기대값 (expected value),  $E[\bar{Y}(n)] = I$ 임을 알 수 있다.  $n$ 이 충분히 클 때  $\bar{Y}(n)$ 은  $I$ 에 가까워진다. 0에서  $\pi$ 의 임의의 변수( $x$ )를 무작위로 생산하고 (2)식에 넣어 계산한 결과를 표 2에 나타내었다. 20번의 시뮬레이션을 수행한 결과를 살펴보면  $Y$ 의 값이 0.578에서 3.130사이, 평균값은 2.409이다. 그러나 (1)식의 정답인 2와는 약 21%정도 높게 계산되었다. 표 2에서 알 수 있듯이 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 0에서  $\pi$ 까지  $\sin x$ 의 적분한 값을 구할 때 정답이 아닌 경우도 포함될 수 있다. 시뮬레이션을 수행하여 2000번의 시뮬레이션을 수행한 결과의 평균값은 1.980이었고 20000번의 시뮬레이션을 수행한 결과의 평균값은 1.993이었다.

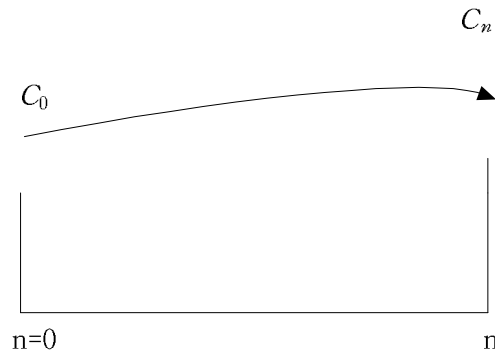
복잡한 계산과정을 없이 시뮬레이션의 횟수를 증가함으로써 Monte Carlo 시뮬레이션은 틀린 답이 나올 확률이 기하급수적으로 작아지고 결국 틀린 답이 전체 결과값에 미치는 영향은 줄어들게 되어, 결국 정답과의 오차가 줄어들고 정답에 가까워짐을 알 수 있다.

### 2.3 경제성평가

경제성이란 최소의 비용을 투입하여 최대의 효과를 얻고자 하는 것이며 경제성평가란 최소비용의 투자로 최대의 투자효과를 얻기 위한 방안을 모색하는 것을 말한다[8]. 즉, 임의의 투자비용에 대해 최대의 이득을 도출할 수 있는 방법을 정량적으로 판단하는 것이다. 이를 위해서는 각 대안 별로 예상되는 투자액 및 이에 대한 이득을 일정한 기준에 따라 평가하고 여러 투자대안 중 어떤 안이 최대의 효과를 나타내는지를 분석해야 한다. 이와 같이 경제성평가는 “최소비용에 의한 최대효과”를 나타내는 투자대안을 선정하기 위한 것이지만, 경우에 따라서는 단순히 “최소비용” 혹은 “최대비용” 혹은 “최대효과”를 나타내는 투자대안을 선정하기도 한다. 투자대안을 선택하는 기준으로는 다음과 같은 것들이 있다[9].

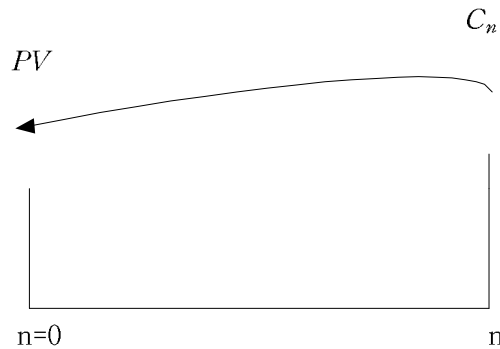
- 사용할 수 있는 투자자금이 고정된 경우에는 수입 또는 효과가 최대가 되어야 한다. 이때의 기준은 “최대효과”이다.
- 효과 또는 수입이 고정된 경우에는 “최소비용”이 기준이 된다.
- 비용과 효과가 고정되어 있지 않은 경우에는 비용과 얻어진 효과의 차가 가장 큰 것, 즉 “최소비용에 의한 최대효과”가 기준이 된다.

경제성평가를 위해서는 과거 및 현재의 현금흐름에 대한 정보를 바탕으로 미래의 현금흐름을 예측해야하며 이때 물가상승률( $e$ )과 명목할인율( $i$ )이 현금흐름을 예측하는데 가장 큰 영향을 미친다. 현재 특정 기기의 구매비용이  $C_0$ 라고 할 때 동일기기를  $n$ 년 후에 구매하는 비용  $C_n$ 은 물가상승률을 고려하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.



$$C_n = C_0 \times (i+e)^n \tag{3}$$

위와 같이 미래의 특정 시점에 발생하는 현금의 흐름을 현재의 알려진 비용으로부터 물가상승률을 고려하여 구할 수 있다. 미래의 특정시점  $n$ 년에 발생하는 비용  $C_n$ 은 그 비용이 발생하는 시점에서의 가치를 나타낸 것으로 경제성평가를 위해서는 기준시점에서의 가치, 즉 현가(present value)로 환산하여야 한다. 이때 명목할인율을 사용한다. 기준시점으로부터  $n$ 년 이후에 발생하는 비용  $C_n$ 의 현재가치는 다음과 같이 구할 수 있다.



$$PV = C_n / (1+i)^n \quad (4)$$

특정의 비용성분  $C_0$ 가  $n$ 년 이후에 발생하는 경우 해당 비용성분의 현가는 위의 두 식으로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$PV = C_0 \times \frac{(1+e)^n}{(1+i)^n} = C_0 \times \left( \frac{(1+e)}{(1+i)} \right)^n \quad (5)$$

위식을 단순화시키면

$$PV = \frac{C_0}{(1+r)^n} \quad (6)$$

여기서  $r$ 은 실질할인율이며 다음과 같이 정의된다.

$$r = \frac{(1+i)}{(1+e)} - 1 \quad (7)$$

따라서 물가상승률과 명목할인율이 고려된 실질할인율을 사용함으로써 계산을 단순화시킬 수 있다[10].

### 3. 확률론적 경제성평가

#### 3.1 평가방법

본 논문에서 수행한 증기발생기 교체에 대한 경제성평가는 2.3절에서 기술한 세 가지 투자대안 중 동일한 송전단 전력을 생산, 즉 수입이 고정된다고 가정하고 소요되는 비용들을 비교함으로써 “최소비용”을 나타내는 투자대안을 선택하였다. 이 경우 검사비용, 정비비용, 증기발생기 교체비용, 증기발생기 교체

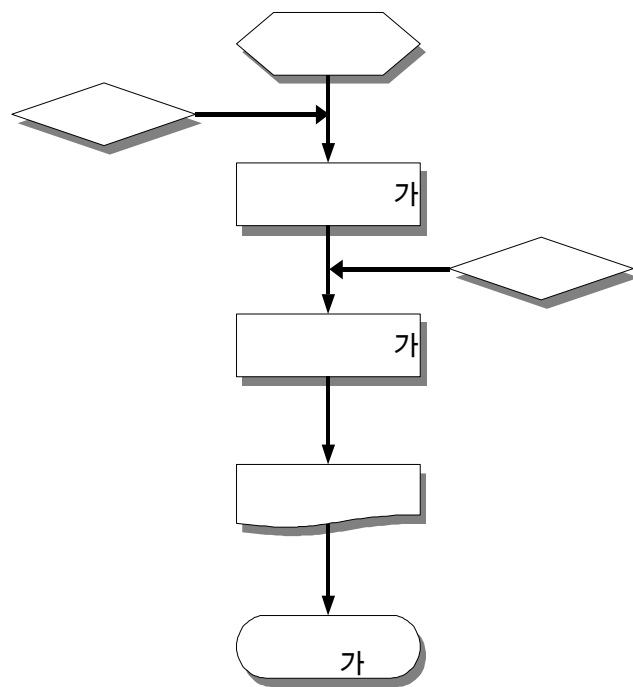


그림 2 경제성평가의 순서도

표 3 경제성평가의 입력변수

구분	구성항목
일반변수	기준년도, 실질할인율, 장기 대체전력비 단가, 단기 대체전력비 단가
성능변수	원전출력, 연료주기, 계획정지기간, 이용률, 소내전력률, 불시정지빈도, 불시정지기간
검사 및 정비변수	세관 검사물량, 세관 검사비용, 세관 정비비용, 세관 정비물량, 세관 정비비용, 세관 정비기간, 피폭량, 피폭비용
교체관련변수	교체비용, 교체년도, 교체기간, 교체 후 출력변화, 출력상승(power uprating)비용, 출력상승으로 인한 출력증가

에 따른 이득비용, 그리고 정지기간의 연장에 따른 전력손실 등을 비용으로 간주하고 이것들을 모두 합하여 총비용을 구한다. 즉, 총비용이 가장 작은 것을 경제성이 있는 방안으로 선정하는 방법이다. 이러한 방법은 1980년 EPRI에서 덴팅결함으로 인한 증기발생기 세관손상이 증가하는 경우의 증기발생기 유지, 보수방안에 대한 이득비용 분석(cost/benefit analysis) 방법으로 개발되었으며[2] 고리 1호기 증기발생기 교체 타당성평가에도 적용되었다[4].

그림 2는 경제성평가의 순서도로서 먼저, 문제정의를 하고 입력변수선정 및 결정론적 경제성평가를 수행하였다. 결정론적 경제성평가의 입력변수 중에서 결과값에 미치는 영향이 큰 변수를 확률변수로 선정하였고 이를 이용하여 불확실성을 고려한 확률론적 경제성평가를 수행하였다. 확률론적 경제성평가 결과에 대한 민감도분석을 수행하였고 최적대안을 선정하였다. 마지막으로 민감도분석 결과와 선정된 최적대안에 대한 고찰 및 평가를 하였다.

### 3.2 입력변수

입력변수는 크게 일반변수, 성능변수, 검사 및 정비변수 그리고 교체관련변수로 구분하였으며 그 상세 구성항목은 표 3에 나타내었다. 본 논문에서는 EPRI 방법론을 기반으로 선행된 증기발생기 교체에 대한 결정론적 경제성평가[5]에서 사용한 입력변수와 계산과정을 대부분 이용하였다.

### 3.3 확률변수와 확률분포 선정

3.2절에 기술한 입력변수 중 경제성평가에 미치는 영향이 크고 환경 변화에 따라 가변적인 교체비용, 불시정지빈도, 실질할인율을 확률변수로 선정하였다. 이들 변수의 변화추이와 특성을 고려하여 확률분포를 설정하였다.

#### 3.3.1 교체비용

국외의 경우, 증기발생기의 교체비용이 대부분 600억원에서 1300억원 가량 소요된 것으로 보고되었으며[1], 고리 1호기의 경우에는 증기발생기 2대를 교체하는 비용이 약 890억원이었다. 그러나 니켈과 같은 원재료비의 변동과 시공상

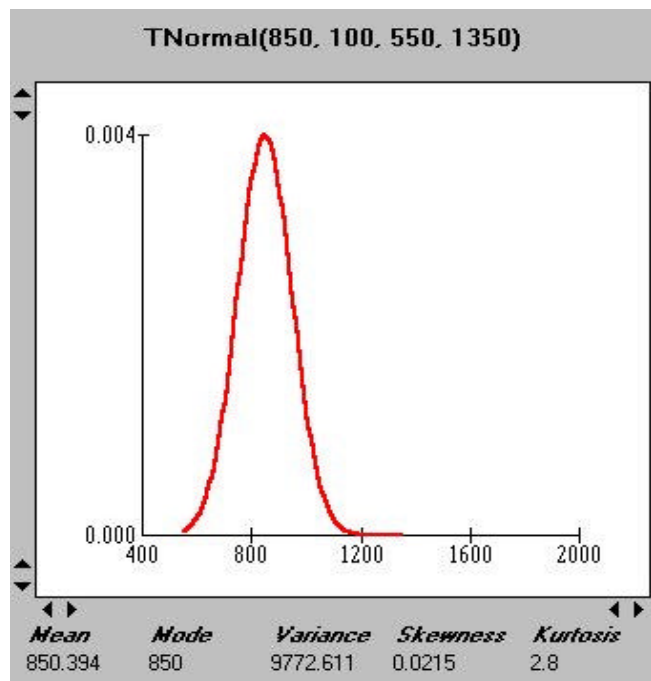


그림 3 교체비용의 확률분포

의 차이 등으로 인해 교체비용이 가변적이다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 불확실성을 고려하기 위해 그림 3에 도시한 바와 같이 정규확률분포를 사용하여 무작위로 변수를 생산하였다. 즉, 국내 A형 원자력발전소 증기발생기의 교체비용은 호기당 평균 850억원, 표준편차 100억원의 정규확률분포로 가정하였다. 그리고 생성된 변수가 550억원에서 1350억원까지( $-3\sigma \leq \text{교체비용} \leq 5\sigma$ )의 범위에 포함된 경우에만 변수로 채택하였으며 이 범위를 벗어난 변수에 대해서는 그 변수를 버리고 변수를 다시 생성하도록 하였다.

### 3.3.2 불시정지빈도

본 논문에서는 증기발생기 세관의 누설로 인한 불시정지빈도만을 고려하였으며 불시정지빈도의 확률분포는 평균 0.1회/년, 표준편차 0.1회/년의 로그정규확률분포로 가정하였다. 그리고 생성된 변수가 0에서 0.5까지( $0.1 \leq \text{불시정지빈도} \leq 0.5$ )의 범위에 포함된 경우에만 변수로 채택하였다. 이 범위를 벗어난 변수에 대해서는 그 변수를 버리고 변수를 다시 생성하도록 하였으며 매주기마다 변수를 무작위로 선정하였다. 즉, 22주기를 교체주기로 선택하고 13주기부터 30주기까지의 총누적비용을 구할 때 매주기마다 불시정지빈도를 각각 생성하도록 하였다. 그러므로 불시정지빈도의 총변수는 18개이다. 그림 4에 본 논문에서 사용한 불시정지빈도의 확률분포를 도시하였다.

본 논문에서는 불시정지빈도가 0에 치우친 곳에서 발생확률이 높고 그 평균이 0.1이 되도록 시뮬레이션하기 위해 로그정규확률분포를 택하였다. 지금까지의 가동경험을 고려할 때 불시정지빈도의 평균을 0에 가까운 값을 설정해야하나 본 논문에서는 불시정지빈도에 대한 확률분포의 평균을 다소 높게 설정하였다. 그 이유는 첫째, 누설허용기준 운전에 대한 여론의 우려를 유발할 수 있는 가능성이 있기 때문이다. 즉, 누설 허용기준 이하의 미세한 누설일지라도 여론의 우려 때문에 가동중지를 결정할 수밖에 없는 상황이 발생할 수 있는 가능성을 고려하고자 한다. 둘째, 슬리브중심 정비전략에 따라 많은 수량의 슬리브를 설치하고 운전하는데 슬리브에서 예상치 못한 결함이 발생할 수 있는 가능성이 있기 때문이다. 따라서 이에 대한 불확실성을 슬리브 손상에 의한 불시정지빈도에 포함시키고자 한다.

### 3.3.3 실질할인율

실질할인율이란 재화의 시간가치의 차이를 나타내는 변수를 의미한다. 본 논문에서는 한국전력공사의 전원개발계획 수

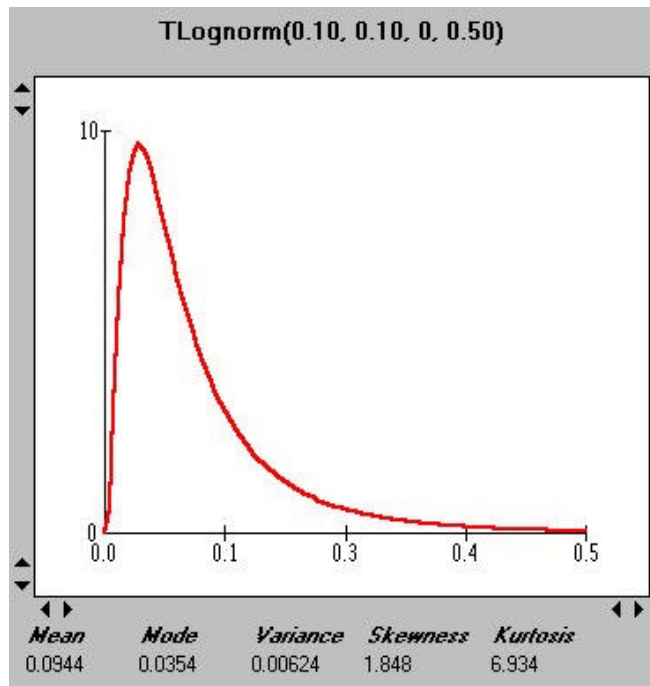


그림 4 불시정지빈도의 확률분포

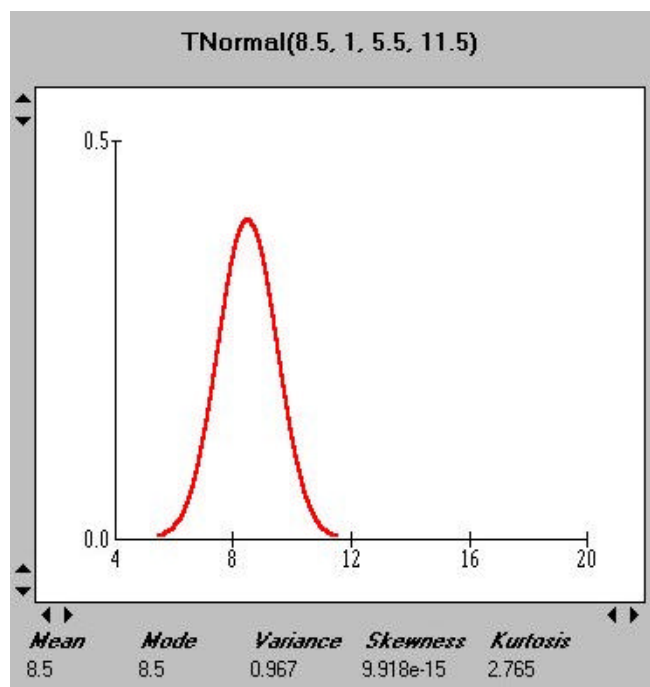


그림 5 실질할인율의 확률분포

립에 사용되는 값이 8.5%[10]인 것을 감안하여 실질할인율의 확률분포는 평균 8.5%, 표준편차 1%를 가지는 정규확률분포로 가정하였다. 그리고 생성된 변수가 5.5에서 11.5까지( $-3\sigma \leq \text{실질할인율} \leq 3\sigma$ )의 범위에 포함된 경우에만 변수로 채택하였다. 이 범위를 벗어난 변수에 대해서는 그 변수를 버리고 변수를 다시 생성하도록 하였으며 매주기마다 변수를 무작위로 선정하였다. 즉, 18주기를 교체주기로 선택하고 13주기부터 30주기까지의 총누적비용을 구할 때 매주기마다 불시정지 빈도를 각각 생성하도록 하였다. 그러므로 실질할인율의 총변수는 18개이다. 그림 5에 본 논문에서 사용한 실질할인율의 확률분포를 도시하였다. 경영환경의 변화에 따라 실질할인율이 변화할 수 있다. 그러나 경영환경과 실질할인율의 변화를 쉽게 예측하는 것은 어려우므로 확률분포함수를 이용하여 무작위로 변수를 생성하여 경제성평가를 수행함으로써 이들 변수의 불확실성을 고려하고자 한다.

### 3.4 경제성평가

#### 3.4.1 가정

##### 가. 기준년도

대안들간의 경제성을 비교하기 위하여 각 비용성분을 현가화시키는 연도, 즉 평가시점을 본 논문에서는 2000년 1월을 기준년도로 설정하였다.

##### 나. 교체 전과 교체 후의 증기발생기 건전성

증기발생기 교체 이후에는 증기발생기가 건전한 것으로 가정하였다. 따라서 증기발생기 교체 후에는 정비비용 및 대체전력비용이 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

##### 다. 출력상승 효과

증기발생기 교체 이후에는 개선된 증기발생기 성능으로 다소의 출력증가가 예상되며 본 논문에서는 이러한 출력증가 효과는 0.5%로 가정하였다. 또한 증기발생기 교체 이후 즉시 4% 출력상승을 하는 것으로 가정하였으며 이를 위한 비용은 증기발생기 교체년도에 그 비용을 추가하였다.

#### 3.4.2 확률론적 경제성평가 방법

##### 가. 현가화 방법

확률변수로 선정된 교체비용, 불시정지빈도, 실질할인율의 각각의 확률분포함수에 따라 매주기마다 독립적, 무작위로 변수를 생성하였다. 즉, Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 각 확률변수가 선택한 확률분포의 특성을 갖도록 무작위로 생산하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 이용하여 각 주기비용을 계산하였으며 2000년 1월 기준으로 현가화하였다. 경제성평가를 위해서는 각 정비방안에 따라 매년 혹은 매주기에 발생하는 각각의 비용성분들의 합을 구하여 주기별 총비용,  $C_j$ 를 구하고 (6)에 따라 기준년도로 현가화 한다. 현가화된 주기별 총비용,  $PV_j$ 를 수명말기까지 더하여 현가화된 총누적비용,  $Cum.PV$ 를 구한다.

본 논문에서 대상으로 설정한 국내 운전중인 A형 원자력발전소 증기발생기의 경우 재생관의 수명이 유한한 것으로 가정하였으며 수명말기에 도달하기 이전엔 유효 관막음율이 10%를 초과하여 정비한계점에 도달하는 것으로 평가되었다. 이 경우 증기발생기 교체시기는 최단기간에 교체를 추진하더라도 국내 A형 원자력발전소 모두 13주기말에나 가능할 것으로 예상된다. 따라서 12주기까지 발생하는 비용은 증기발생기 교체시기에 따른 경제성에 영향을 미치지 않으므로 현가화된 총누적비용은 13주기말부터 수명말기에 해당하는 30주기말까지의 현가화된 주기별 총비용을 합하여 구하였다.

$$\text{주기별 총비용 } C_j = \sum (\text{비용성분})$$

$$\text{현가화된 주기별 총비용 } PV_j = C_j / (1+r)^{(j\text{주기말해당년도} - \text{기준년도})}$$

$$\text{현가화된 총누적비용 } Cum.PV = \sum_{j=13}^{30} PV_j$$



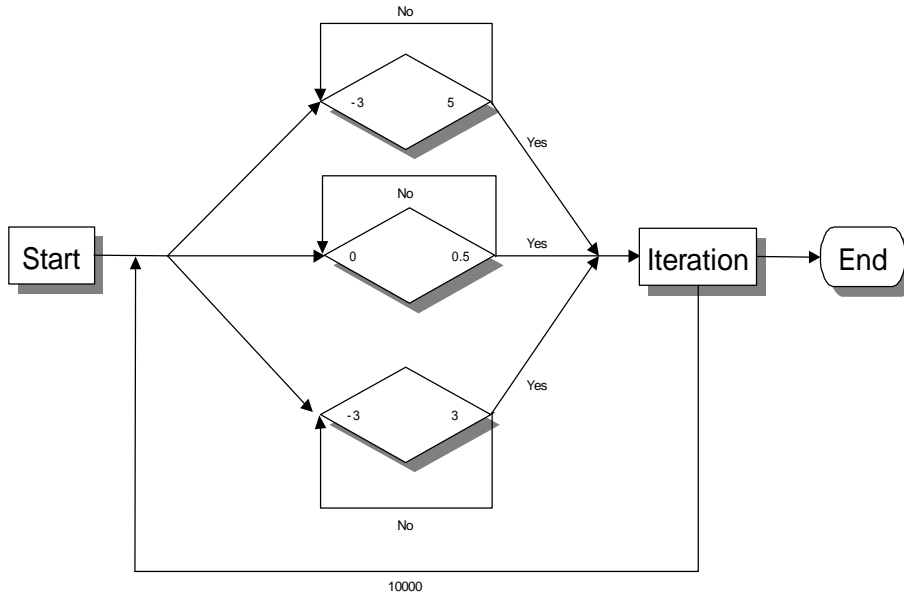


그림 6 확률론적 경제성평가의 흐름도

#### 나. 시뮬레이션 방법

그림 6에 도시한 바와 같이 13주기부터 30주기까지 교체년도를 변화시켜가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 예를 들어, 교체년도를 17주기로 선택하여 시뮬레이션을 수행한다고 가정하자. 13주기부터 30주기까지 매주기마다 교체비용, 불시정지빈도, 실질할인율이 각각의 확률분포함수에 따라 변수가 독립적으로 선정될 뿐만 아니라 무작위로 생산되도록 하여 불확실성을 고려하였다. 선정된 변수에 따라 매주기별 총비용이 계산되고 이것을 기준년도로 현재화한다. 즉, 17주기에는 증기발생기 교체비용과 출력상승 비용이 포함되어 총비용이 계산되고 그 외의 주기에는 검사 및 정비비용 등이 포함된 각 주기별 총비용이 계산된다. 다음으로 13주기부터 30주기까지의 현재화된 각 주기별 총비용을 합하여 현재화된 총누적비용을 구한다. 이렇게 10000번의 시뮬레이션을 수행하여 교체년도 17주기에 대한 총누적비용의 평균값과 95%, 5%의 상하한값, 왜도(skewness), 첨도(kurtosis) 등을 구한다.

이와 같은 방법으로 교체년도를 13주기부터 30주기까지 각각 변화시켜가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 따라서 확률변수의 매주기 변수생성을 고려한다면 총 540,000( 1 교체비용×18 불시정

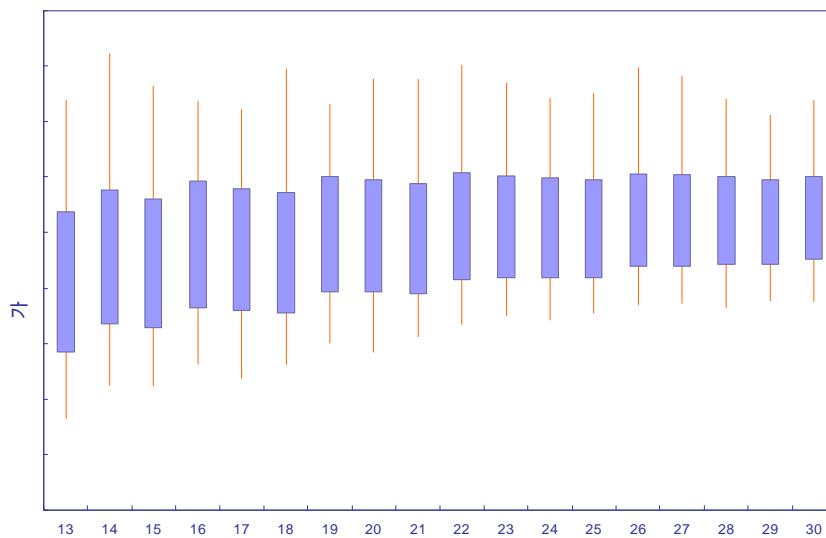


그림 7 현재화된 총누적비용의 변화

지빈도×18 실질할인율×10000 ×18 주기)번의 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 4. 평가 결과

##### 4.1 90% 신뢰도범위, Skewness 및 Kurtosis

그림 7에 국내 A형 원자력발전소의 증기발생기 교체에 대한 현가화된 총누적비용의 변화를 나타내었다. 그림 7은 교체주기마다 10000번의 시뮬레이션 수행한 결과로서 각 교체주기마다 총누적비용의 최저값과 최고값, 그리고 90% 신뢰도 범위인 5% 및 95% 상·하한 값을 표시하였으며 이를 이용하여 경영 판단자가 총누적비용의 변동폭을 쉽게 예측할 수 있다. 그림 7에서 13주기에 30주기로 갈수록 최저값과 최고값의 폭과 90% 신뢰도 범위의 폭이 작아지는 경향을 보인다. 입력변수를 선택할 때 원하는 범위에 들어오지 않은 변수는 그 값을 버리고 다시 변수를 생성하여 시뮬레이션을 수행하였기 때문에 최저값과 최고값도 의미있는 값이다. 최저값과 최고값의 차이는 333억원에서 597억원이며, 5%와 95%의 차이는 148억원에서 250억원이다.

그림 8에 확률론적 경제성평가 결과 중 왜도와 첨도를 도시하였다. 확률론적 경제성평가 결과, 분포의 치우친 정도를 측정하는 분석도구인 왜도의 값이 0.2에서 0.4로서 약간 오른쪽으로 긴 꼬리를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 그 값이 0에 가까우므로 좌우대칭에 가까운 모양을 갖는 것으로 판단할 수 있다. 분포의 모양이 얼마나 편평한가 또는 뽕족한가를 판단하는 첨도는 그 값이 3이면 정규분포특성을 갖는다. 본 확률론적 경제성평가의 평균값에 대한 첨도는 2.9에서 3.4로서 3에 가까우므로 정규분포특성을 갖는 것으로 판단할 수 있다.

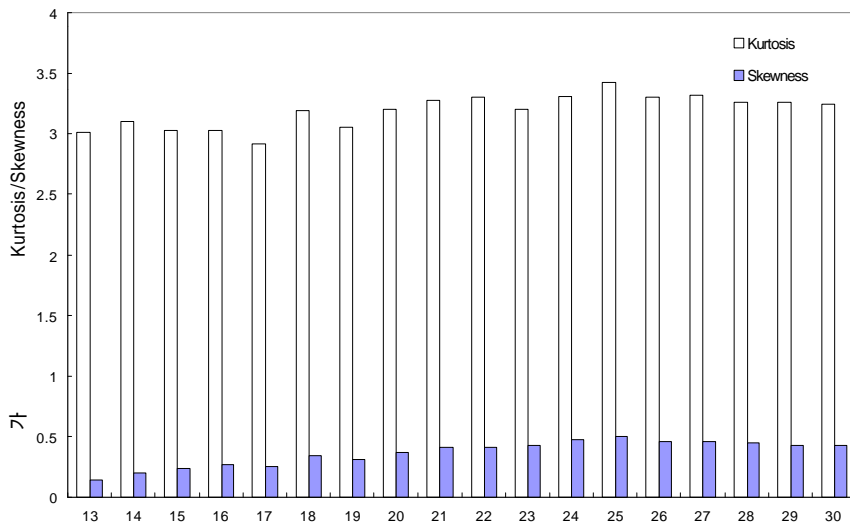


그림 8 현가화된 총누적비용의 Skewness 및 Kurtosis 변화

그림 9에 확률론적 경제성평가의 평균값과 90% 신뢰도범위, 그리고 결정론적 경제성평가 결과를 비교하여 도시하였으며 결정론적 경제성평가 결과가 확률론적 경제성평가의 평균값보다도 약 1.6~6.1% 높게 평가되었으나 유사한 결과를 보였다. 그 이유로 첫째, 확률변수의 수가 작았기 때문으로 판단된다. 본 논문에서는 증기발생기 교체에 대해 확률론적 방법으로 경제성평가를 수행하는데 본 논문의 목적이 있으므로 3.2절에 기술한 증기발생기의 교체에 대한 경제성평가의 입력 중 결과값에 가장 민감한 것으로 예측되는 교체비용, 불시정지빈도, 실질할인율만을 선택하여 확률론적 경제성평가를 수행하였다. 둘째, 선정된 확률변수는 평균값과 표준편차를 기준으로 확률분포를 생성하고 생성된 확률변수는 주어진 평균과 표준편차를 가지게 된다. 그러므로 결과값의 평균값에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 경제성평가에 가변적인 입력변수를 모두 확률변수로 선정하여 경제성평가를 수행하고, 관막음 및 슬리브 정비율에 따라 불시정지빈도를 다르게 주는 것과 같은 확률변수간의 가중치를 줌으로써 이러한 것을 보완할 수 있을 것이다. 그림 9에서 총누적비용의 평균값이 4~8% 정도씩 계단형으로 상승하는 경향을 보인다. 13주기보다 22

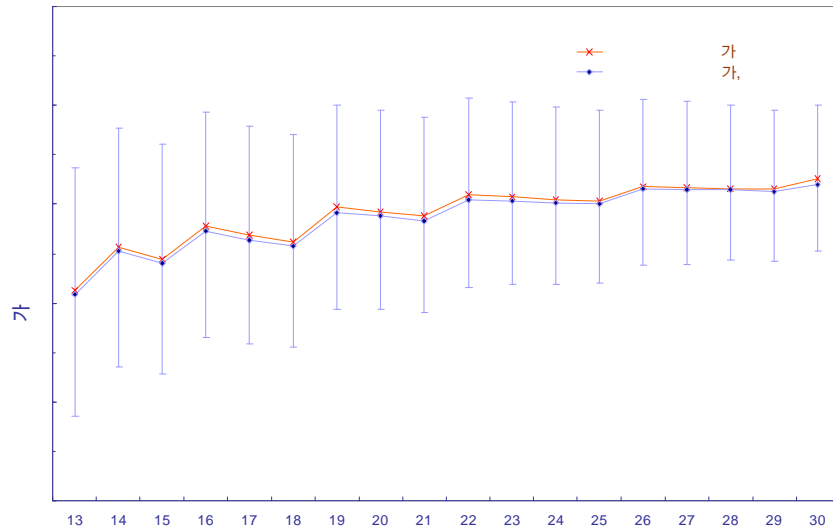


그림 9 확률론적 및 결정론적 경제성평가 비교

주기에서 총누적비용의 평균값이 23.9% 정도 높으며, 22주기보다 30주기에서 2.8% 정도 높다. 확률론적 경제성평가 결과 13주기에 교체하는 것이 경제적이고 13주기보다 30주기에서의 총누적비용의 평균값이 약 27% 정도 높으며 그 값 차이는 100억원 정도이다.

## 4.2 민감도분석

그림 10은 교체주기를 22주기로 선택했을 때의 민감도분석 결과로서 교체비용, 불시정지빈도, 실질할인율이 총누적비용에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 그림 10은 민감도분석에서 널리 쓰이는 토네이도 그래프(tornado graph)로서 One-Way Sensitivity 분석 결과이다. 즉, 한 개의 확률 변수가 독립적으로 변화할 때 총누적비용에 얼마나 영향을 주는 지를 분석하였으며, 그림 10에 각 변수에 대한 결과를 한 화 면에 표시하였다. 그림 10에서 알 수 있듯이 교체주기가 22주기일 때 현가화된 총누적비용에 가장 민감도가 큰 것은 불시정지빈도이다. 불시정지빈도만 0에서 0.5가

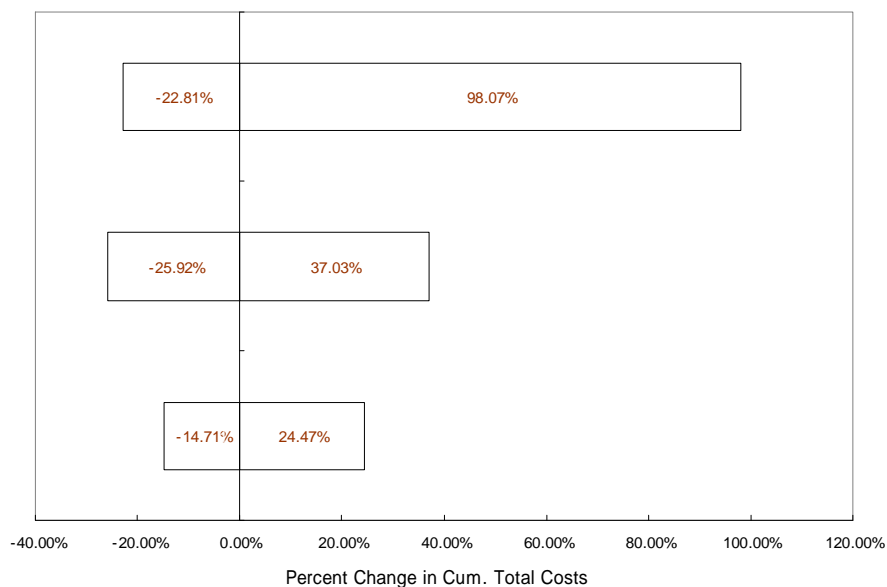


그림 10 토네이도 그래프

지 변화할 때 현가화된 총누적비용을 -22.81%에서 98.07% 정도 변화시킨다. 실질할인율만 11.5%에서 5.5%까지 변화할 때 현가화된 총누적비용이 -25.92%에서 37.03% 변화되며, 교체비용만 550억원에서 1350억원까지 변화할 때는 현가화된 총누적비용이 -14.71%에서 24.47% 변화된다.

그림 11은 교체주기를 22주기로 선택했을 때의 민감도분석 결과를 스파이더 그래프(spider graph)로 도시하였다. 토네이도 그래프는 결과값에 대한 모든 확률변수의 각각의 효과를 비교하는 반면, 스파이더 그래프는 조합된 입력값(multiple input variable)의해서 생성된 출력값(output variable)과 실제 결과값(result variable)을 비교하는 그래프이다. X 축에는 확률변수의 변화를, Y 축에는 계산된 출력값에 대한 경사 변화도(slope of change)를 도시하였다. 경사도의 모양을 통해 입력값과 출력값 사이에 선형관계가 있는지 또는 비선형관계가 있는지를 판단할 수 있다. 그림 11에 도시한 바와 같이 불시정지빈도가 변화할 때 가장 민감한 변화를 보였다. 불시정지빈도와 교체비용은 현가화된 총누적비용과 비례선형관계이며, 교체비용의 기울기는 1보다 크다. 실질할인율과 총누적비용과는 반비례선형관계이며 실질할인율의 값이 커질수록 현가화된 총누적비용은 감소한다.

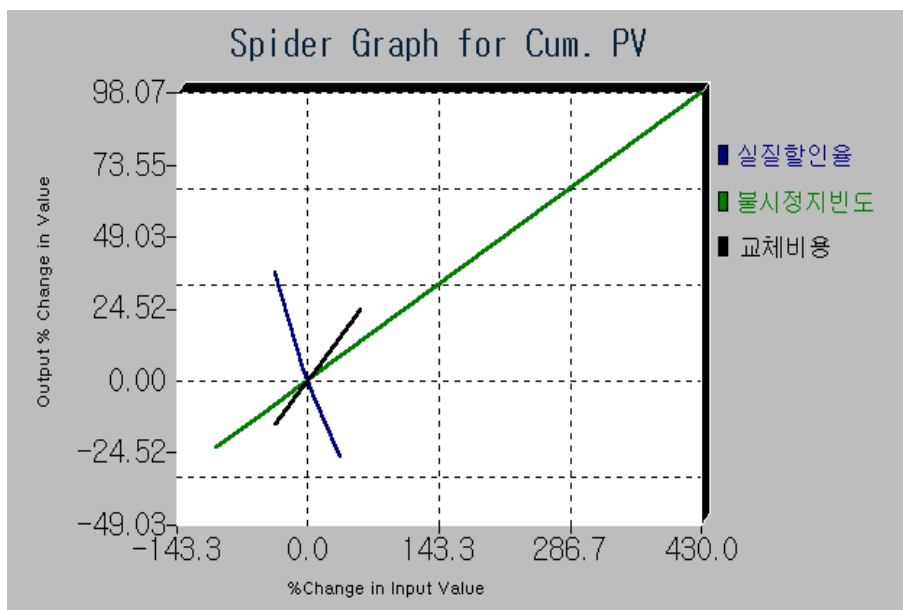


그림 11 스파이더 그래프

## 5. 결론

본 논문에서는 결정론적 시뮬레이션을 보완할 수 있는 확률론적 시뮬레이션의 장점 및 필요성을 기술하였으며 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 증기발생기 교체에 대한 경제성평가를 확률론적 방법으로 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 국내 A형 원자력발전소 증기발생기를 대상으로 증기발생기 교체에 대한 경제성평가에 민감한 영향을 미치는 교체비용, 불시정지빈도, 실질할인율의 불확실성을 고려하여 확률론적 경제성평가를 수행하였다.
- (2) 증기발생기 교체에 대한 확률론적 경제성평가 결과를 통해 증기발생기 최적교체시기는 13주기에 교체하는 것이 경제적이나 30주기에 교체하는 경우와 비교했을 때 현가화된 총누적비용의 값 차이가 서로 크지 않다.
- (3) 본 논문에서 사용한 확률론적 경제성평가 방법이 향후 국내 원자력발전소의 주요기기 교체에 대한 경제성평가지 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] Electric Power Research Institute, "Steam Generator Progress Report, Revision 14," NP-106365-R14, 1994.
- [2] Electric Power Research Institute, "PWR Steam Generator Cost-Benefit Methodology -Denting," NP-2295, 1982.
- [3] Electric Power Research Institute, "Calvert Cliffs Nuclear Power Plant Life Cycle Management/License Renewal Program, Steam Generator Decision Analysis," TR-104732, 1995.
- [4] 한국전력공사, "고리 1호기 증기발생기 교체 타당성 검토 용역, 제 1단계: 증기발생기 교체 필요성 및 최적 교체시기 결정," 1993.
- [5] 전력연구원, "울진 원전 1·2호기 증기발생기 종합대책 수립," TM.99NP09.T1999.770, 1999.
- [6] A. M. Law and W. D. Kelton, *Simulation Modeling & Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1991.
- [7] D. Vose, *Quantitative Risk Analysis, A Guide to Monte Carlo Simulation Modelling*, John Wiley & Sons Ltd., 1996.
- [8] 함효준, *경제성공학*, 동현출판사, 1999.
- [9] 한국전력공사 전력경제처, *전력경제론*, 제 4권, 전력설비투자이론, 1995.
- [10] 한국전력공사 경영정보처, 1998 회계연도 종합원가계산서, 1998.