

**원전 노화관리 비용 평가 방법 개선**  
**Improvements of Calculating of NPP Aging Management Program Costs**

송택호, 박준현, 정일석

한국전력공사 전력 연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

**요 약**

계속 운전을 위한 노화관리 방안을 현장 적용 하기 위해서는 기기 정비, 개선, 교체 등의 비용이 수반된다. 이 노화관리 비용이 크기 때문에 비용에 대한 경제성 평가를 수행해야 한다. 원전수명관리는 경제성 평가 분야를 포함하는데, 1단계 원전수명관리 경제성 평가 연구에서는 동일한 송전단 전력을 생산하는 두 대안 사이의 비용 비교법을 사용하였으며 전산코드로는 PLiMEE(Plant Lifetime Economic Evaluation)를 사용하였다. 1단계 경제성 평가에서는 계속운전을 위한 준비 기간으로 5년을 가정하였고 이 기간중 연간 20일이 정기점검기간(O/H)에 추가로 소요되는 것을 가정하여 경제성 평가를 수행하였다. 그러나 2단계 연구에서는 기기 그룹별로 상세 수명평가가 이루어지고 그 결과 기기별로 수명연장 준비기간에 시행할 노화관리 방안이 도출될 예정이므로 이들 노화관리 방안에 대한 경제성을 평가하는 방법을 연구하였다. 이를 위해 EPRI 및 Palisade에서 개발한 전산코드들을 검토하고, 기존의 PLiMEE 전산코드에 추가할 노화관리 경제성 평가 알고리즘을 개발하였다.

**Abstract**

NPP(nuclear power plant) AMP(aging management program) involves various costs to carry out plant refurbishments. PLiM(plant lifetime management) consists of many areas including economic evaluation of lifetime extension. In PLiM Phase 1 research project, with PLiMEE(Plant Lifetime Economic Evaluation) computer code we calculated and compared the costs of two cases which have the same assumption that they are providing the same output power for the electric grid. In addition to this assumption, we assumed that the preparation period for plant life extension is 5 years and beside regular over haul days additional 20 days will be used in the plant refurbishment for that period each year. However, in phase 2, we are going to evaluate the residual life of SSCs(system, structure, components) and AMP will be recommended. In this situation, economic part of project should calculate AMP cost and benefit for plant life extension. In this paper, EPRI & Palisade economic computer codes are reviewed for this purpose, and the algorithms for calculating of NPP AMP costs are found out.

**1. 서론**

원전 수명관리(PLiM, plant lifetime management)는 계속운전기간을 포함한 전체 수명 기간동안 안전하고 경제적인 전원 확보 업무를 의미하는데, 경제적 측면에서 이득을 남기어야 한다. 노화관련 문제 해결 및 경제적인 원전 운영을 연구목적으로 둔 원전수명관리 1단계 연구가 전력연구원에서 1993년 11월부터 3년간 수행되었으며 1998년 7월에는 상세 수명을 평가하고

노화관리 방안을 수립하기 위한 원전수명관리 2단계 연구를 착수하였다[1].

경제성 평가 방법으로는 발전원가 비교법과 수명관리 대안 비교법이 있다. 발전 원가는 한 회계기간 동안 발생한 총 비용을 총 발전량으로 나눈 값이다. 미국과 같은 경우 전력회사가 시장경쟁 체제에 있으므로 원전 경제성 평가에서 발전원가 비교법을 사용한다[3,4]. 그러나 국내의 경우 발전소가 정지할 경우 발전소가 담당하던 부하 추종을 위해 전력을 다른 전력회사에서 사올 수 없으므로 발전소가 정지하면 미리 확보해둔 예비전원이 투입된다. 이런 관점에서 1 단계 수명관리 경제성 평가 연구에서는 동일한 송전단 전력을 생산하는 두 대안 사이의 비용 비교법을 사용하였고, 전산코드로는 자체개발한 PLiMEE(plant lifetime economic evaluation)를 사용하였다[2].

PLiM 1단계 경제성 평가에서는 두 대안의 경제성을 비교하는 것이므로 이에 가장 적합한 현재 가치(present worth)를 기준으로 하였다. 1단계에서는 고리 1호기를 인허가 수명 종료(2009년) 이후 계속운전하는 경우와 그렇지 않은 경우 두 대안의 투자비용 및 이득을 현재가치로 환산하여 비교함으로써 계속운전의 경제성을 평가하였다. 고리 1호기 계속운전에 대한 경제성 평가는 PLiMEE(plant lifetime economic evaluation) 프로그램을 사용하여 분석하였다. 경제성 분석 결과는 10년 계속운전의 경우 2009년 기준 현재화된 비용으로 계속운전 투자비가 약 2300억원, 이득이 약 5600억원으로서, 이득비용비는 2.4이며 순이득은 약 3300억원 정도로 평가되었다[1].

1단계 경제성 평가에서는 계속운전을 위한 준비 기간으로 5년을 가정하였고 이 기간중 연간 20일이 정기점검기간(O/H)에 추가로 소요되는 것을 가정하여 경제성 평가를 수행하였다. 그러나, 2단계 연구에서는 기기그룹별로 수명평가가 이루어지고 그 결과 필요한 노화관리 방안이 도출될 예정이므로 2단계 연구에서 이들 노화관리 방안에 대한 경제성을 평가해 주어야 한다. 본 논문에서는 2단계 경제성 평가를 위하여 EPRI 및 Palisade에서 개발한 전산코드를 검토하였고, PLiMEE 전산코드에 추가할 노화관리 경제성 평가의 알고리즘과 순서도를 작성하였다.

## 2. 경제성 평가 전산코드

지금까지 원전 경제성 평가와 관련하여 개발된 전산코드는 PLAN60, LCMECON, PLEBE, Valuation and M of Nuc. Asset(NAM), VTESTER, Cobalt Valve, 등이 있다.

PLAN60 Code는 원전수명관리 경제성 평가를 목적으로 1989년 EPRI에서 작성된 것이다[3]. 이 전산프로그램의 입력변수는 일반 경제성 요소(할인율, 물가상승율 등)와 발전소 특성 인자, 원전 수명관리 관련 정비사항로 구성되어 있으며, 출력결과로는 발전소 수명관리별 비용현가, 발전소 정지기간, 가동을 변화량 등을 계산한다. 여기서 수명관리 관련 정비사항이라 함은 핵연료교체기간(Normal Refueling), 가동중검사(ISI), 격납용기 종합누설률시험(Containment Integrated Leak Rate Test), 원자로 소둔열처리(RPV Annealing), 사용자정의(User Defined Event) 등을 의미한다. PLAN60의 단점은 89년도에 작성된 구형 코드이므로 MS-DOS 모드에서 동작되어 사용상의 불편함을 들 수 있으며, 더 큰 문제점은 대안사이의 경제성 비교가 어렵고 이를 위해서는 계산된 비용을 생산된 전기량으로 나누어 발전원가를 계산하여 서로 비교해 주어야 하는데, 대안들이 동일한 송전단 전력을 생산하지 않기 때문에 국내상황에 적용할 경우 수명연장 경제적 타당성을 평가하지 못한다.

LCMECON 전산코드는 EPRI 기술보고서에 소개되어 있다[4,5]. LCMECON에서 사용하는 방법은 PLiMEE에서 사용한 방법과 유사하지만 최종결과를 PLiMEE에서는 순이득(net saving), 이득비용비(benefit/cost)로 표시하는 반면에 LCMECON에서는 발전원가( $\sum$ annual cost/ $\sum$ annual generation)로 표시한다. LCMECON 설명 메뉴얼(EPRI TR)에는 해외 원전의 기기 교체 보수 비용 등의 실제값이 많이 소개 되어 있으며, CCNPP가 이 전산코드를 활용하여 수명관리 경제성 평가를 하였다. 그러나 평가결과가 발전원가이므로 LCMECON 전산코드 역시 동일한 송전단 전력을 생산하는 두 대안 사이의 경제성 평가에는 적합하지 못하다.

PLEBE 전산코드는 9개의 쉬트(sheet)에 입력자료를 입력하며 평가기준년도로 부터 5년간 발생하는 비용 및 이득을 입력하게 되어 있으며 5년 이후에 발생하는 입력사항은 별도의 모듈에서 별도로 입력하도록 전산코드가 구성되어 있다[6]. 1995년 초반에 "Strategic Asset

Management(SAM)” 프로젝트를 미국의 한 원전에서 실시하였다. 이 프로젝트는 발전소에 냉각수를 공급하는 취수밸브(Intake Valve) 앞에 침니(Silt)가 쌓이는 것을 제거하기 위한 것이었다. 이 프로젝트는 물속에 댐을 건설하여 해안에서 취수되어 발전소까지 들어가는 냉각수 유로를 바꾸어 주는 것이었는데 그 목적은 침니의 양을 줄이는 것이었다. 만일 이 프로젝트를 실시하지 않으면 침니제거를 위한 보수작업이 빈번해질 전망이다. 이 프로젝트를 시행하기 위해서는 초기 투자비가 첫해에 필요하나 프로젝트가 성공하면 매년 개보수를 하지 않고 5년에 한번만 개보수를 하면 될 전망이다. 그러나 프로젝트의 성공여부가 불투명하였고 프로젝트를 반정도만 실행하고 침니의 양이 감소하는 것을 관찰한 후 프로젝트를 모두 시행하는 것을 고려하던 중 PLEBE 전산코드를 작성하여 프로젝트 수행에 대한 경제성을 평가하였다.

NAM(Nuclear Asset Management) 전산코드는 EPRI에서 가장 최근에 개발한 전산코드이다 [7]. 이 전산코드에서는 세가지 경우(원전수명연장의 경우, 조기폐로의 경우, 설계수명까지 운전하는 경우)의 경제성을 비교하며, 원전의 경제성을 발전원가와 전기요금(Market Price) 측면에서 검토한다. 다른 전산프로그램과 비교할 때 특이한 점은 전기요금 변동성(Volatility of Market Price)을 상세하게 반영한다는 것이며, 출력결과는 발전소 가치(station value)이다. q 발전소 가치란 평가된 발전소의 시장가격이며, 이용율(capacity factor)이 높으면 가치가 높아지고, 반면에 유지보수비(O&M Cost)가 커지면 가치는 작아진다. 발전소 가치는 폐로비용을 포함하기 때문에 음수가 될 수 있으며, NAM 코드는 설계수명까지 운전하는 경우, 조기폐로하는 경우, 수명연장 하는 경우의 발전소 가치를 모든 정보를 입력받아 각각 평가해 준다.

VTESTER는 원자로 압력용기 노화관리 경제성 평가 프로그램이다[7]. 원자로 압력용기는 중성자 조사를 받으면서 취화되고 수명기간 동안 중성자 조사취화에 대한 노화관리 프로그램이 필요한데, VTESTER를 통하여 어떤 노화관리 프로그램이 경제적으로 그리고 기술적으로 가장 타당한가를 평가 한다. VTESTER는 영향도 그림(influence diagram)을 사용하여 확률론적 측면에서 원자로 압력용기 관리전략을 도출하고 우선순위를 결정한다. VTESTER는 크게 중성자속 감소, 차폐, 열처리 세가지 대안을 평가하며, 노화관리 프로그램 시행 비용, 원자로 압력용기 연장수명기간, 가동률 증가량 등을 고려한다[8].

코발트 함유 기기는 부식으로 인해 코발트가 용액으로 나가면 방사화학 반응으로 co-60과 같은 강방사능 물질을 생성하며 작업자의 피폭량을 증가시킨다. 따라서 코발트 함유 기기에 대한 교체작업은 작업자의 피폭선량 감소에 대한 새로운 계산문제를 제시하는데, Cobalt Valve 전산코드는 이 계산문제를 풀기위한 전산코드이다. 모델이 된 발전소는 GPU Nuclear Corporation’s Oyster Creak(BWR), Wolf Creek Nuclear Operating Corporation(PWR), Northern States Power Company’s Prairie Island(PWR) 이며, 교체에 대한 경제성 평가에서 피폭선량 변화를 고려한다[9].

### 3. 원전 노화관리 방안에 대한 경제성 평가 알고리즘 작성

CCNPP(calvert cliff nuclear pwoer plant)가 경제성 평가에 사용한 LCMECON은 대안사이의 경제성을 평가하여 수명연장의 타당성을 도출한다는 면에서 PLiMEE 전산코드와 동일하나, 결과가 발전원가이다. LCMECON은 수명관리를 위한 개보수 공사를 구체적으로 평가하기 위해 공사시기, 공사기간, 공사금액을 입력하도록 전산코드가 구성되어 있는 반면에 PLiMEE 전산코드는 그렇지 않다. 원전수명관리 1단계 연구에서 PLiMEE 전산코드에 사용된 입력변수 중 하나인 수명관리 기기비용은 다음 table 1과 같은 논리로 계산되었다[1].

수명연장 기기비용(PLEX equipment cost) 산정에서 계속운전을 위한 준비 기간으로 5년을 가정하였고 이 기간중 연간 20일이 정기점검기간(O/H)에 추가로 소요되는 것으로 가정하였다. 그러나 2단계 연구에서 기기그룹별로 수명평가가 이루어질 예정이고 그 결과 필요한 노화관리 방안이 도출될 예정이며 노화관리 방안에서 상당부분의 방안들이 기기 개보수 공사를 수반할 것으로 예상되며 공사금액, 공사시기, 공사기간 등이 구체화 될 전망이다. 2단계 노화관리 경제성 평가에서 이들 노화관리 방안에 대한 경제성을 평가해 주어야 하며 이를 위해 그림 1과 같이 노화관리 경제성 평가에 대한 알고리즘을 작성하였다. 개보수공사비용의 계산은 연간이자율

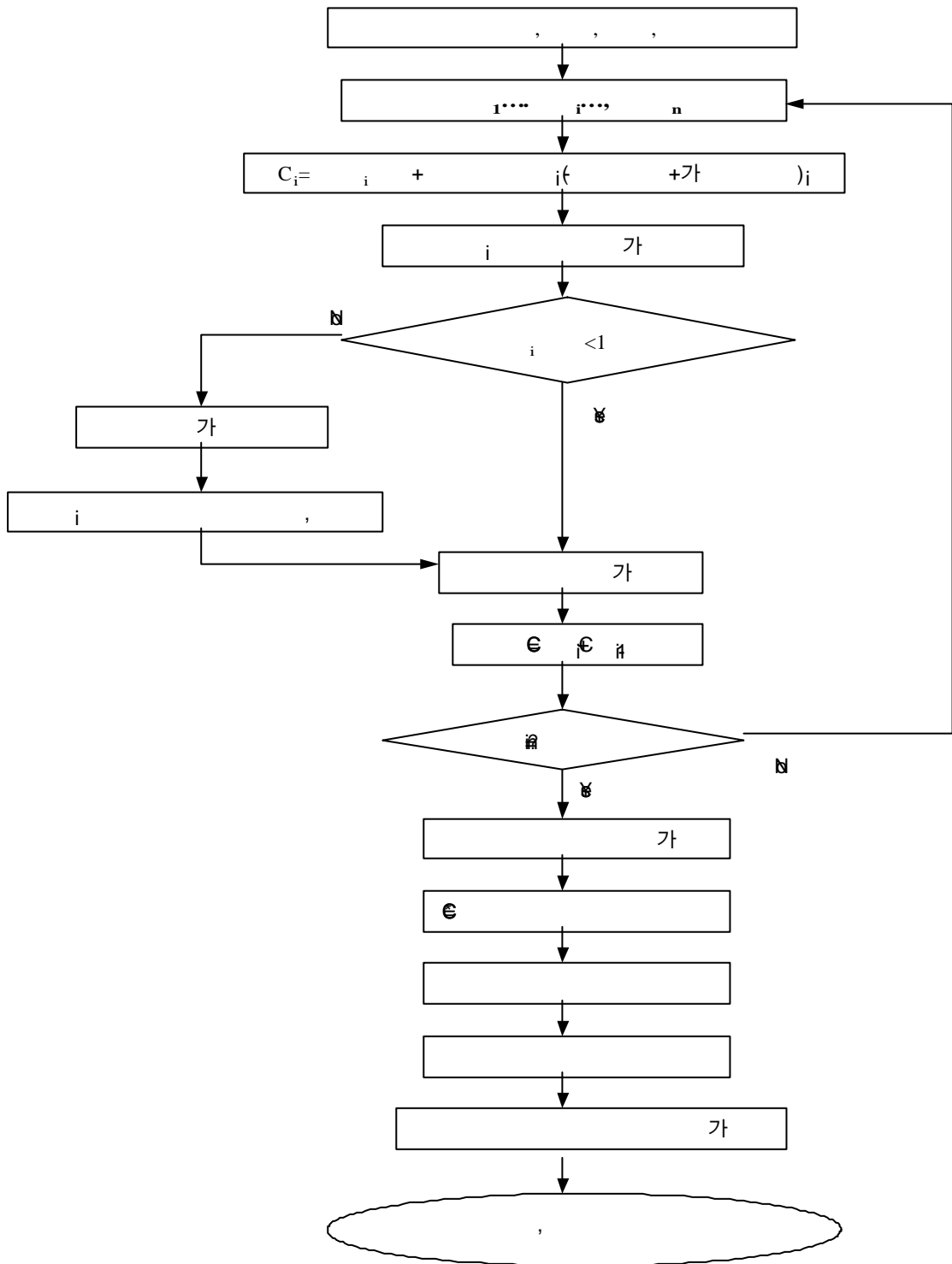


그림 1 노화관리 경제성 평가 순서도

을 고려해 주어야 하므로 1년이상의 공사와 1년미만의 공사로 나누어 공사비를 계산하였다.

Table 1. 기기비용 산정방법

기기	해외사례(WEPCO) <sup>㉞</sup>		고리 1발 설문조사 <sup>㉟</sup>		㉠과 ㉡중 큰 숫자 선택		보수적 결정
	개보수 비용	확률	개보수 비용	확률	개보수 비용	개보수 확률	
X기기	A	b	a	B	A	B	기기비용 = 비용*확률 A*B

### 3.1. 1년이상의 공사

사용자가 입력하는 공사비는 과거로부터 오늘까지 발생한 비용의 총합(overnight cost)이다. 수명관리 관련 공사는 발전소 정기점검기간(O/H)중에 실시하는 일상적인 정비 공사와는 성격이 다른 것이며 계속운전을 위해 실시되는 별도의 공사이며 공사 기간 역시 정기점검기간을 제외한 기간이다. 그림 2에 나타난 원전수명관리 개보수 공사의 비용 및 기간은 수명연장을 위해 투자되는 비용이며 순공사비 이외에 공사기간동안에 발생하는 대체전력비를 비용성분의 일종으로 더해줘야 하며 핵연료 절감 비용과 가변운전유지비는 비용성분에서 빼줘야 한다.

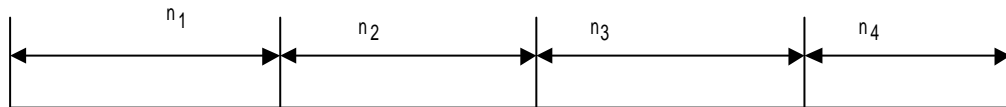


그림 2 시간연대기

비용 성분은

$$C_o = C_c + C_r \quad (1)$$

$C_c$  = 공사비용 *overnight cost*

$C_r$  = 공사기간중의 대체전력비 - 핵연료 절감 비용 - 가변운전유지비

$$C_r = (DPL \times 24 \times RK1 \times (1 - SPK1) \times 1000) \times (CORP - FSPLEX - \frac{OMVK1}{(365.25 \times 24)}) / 10^5 \quad (2)$$

DPL = 공사시행일수(일)

RK1 = 대상원전 출력(MW)

SPK1 = 대상원전 소내전력율

CORP = 대체전력비(천원/kWh)

FSPLEX = 원전수명관리 기간 원전 연료 절감비(천원/kWh)

OMVK1 = 평가대상원전의 가변운전유지비(천원/(kW x year))

$C_o$ 은 미래에 발생 예상되는 비용의 현재(present value)가 아니므로 미래의 투자시점까지 물가상승 시킨다.

$$C_1 = C_o \times (1 + e)^{*1 + *2} \quad (3)$$

여기서,

$e$  = 물가상승율

공사기간 동안의 균등가  $C_2$ 는  $C_1$ 을 공사기간으로 나누어준 값이다.

$$C_2 = \frac{C_1}{n_2} \quad (4)$$

$$C_3 = C_2 \left(\frac{1+i}{1+e}\right)^{(n_2-1)} + C_2 \left(\frac{1+i}{1+e}\right)^{(n_2-2)} + \dots + C_2 \quad (5)$$

$$\frac{1+i}{1+e} C_3 = C_2 \left(\frac{1+i}{1+e}\right)^{n_2} + C_2 \left(\frac{1+i}{1+e}\right)^{(n_2-1)} + \dots + C_2 \left(\frac{1+i}{1+e}\right) \quad (6)$$

(6) - (5) 하고 정리하면

$$C_3 = C_2 \times \left( \frac{\left(\frac{1+i}{1+e}\right)^{n_2} - 1}{\frac{(i-e)}{(1+e)}} \right) \quad (7)$$

여기서,

$i$  = 할인율, discount rate

$C_3$ 를 기준년도로 현재화하면

$$i \text{ 공사의 비용 } C_i = C_3 / (1+i)^{n_1+n_2} \quad (8)$$

### 3.2. 공사기간이 1년미만인 경우

(3)식까지는 동일하며 이식을 현재화 하기만 하면 되므로

$$C_i = \frac{C_1}{(1+i)^{n_1}} \quad (9)$$

### 3.3 투자비 회수율 반영

$n$ 개 공사비용의 총합은 다음과 같다.

$$C_a = \sum_{i=1}^{n_1} C_i \quad (10)$$

$C_a$ 를 수명연장 첫해의 현재로 계산하면,

$$C_f = C_a (1+i)^{n_1+n_2+n_3} \quad (11)$$

가 된다.

$C_f$  값에 연간고정비율을 곱하여 원전의 계속운전기간동안 매년 회수할 연간자본비용( $C_d$ )을 구한다.

$$C_d = C_f * AFCR \quad (12)$$

여기서,  
AFCR = 연간고정비율(%)

$$C_s = \frac{C_d}{(1+i)} + \frac{C_d}{(1+i)^2} + \dots + \frac{C_d}{(1+i)^{n_t}} \quad (13)$$

$$\frac{C_s}{(1+i)} = \frac{C_d}{(1+i)^2} + \frac{C_d}{(1+i)^3} + \dots + \frac{C_d}{(1+i)^{(n_t+1)}} \quad (14)$$

(14) - (13) 하면

$$C_s = C_d \times \frac{((1+i)^{n_t} - 1)}{i \times (1+i)^{n_t}} \quad (15)$$

$C_s$ 를 다시 기준년으로 현가화 하면

$$\therefore \text{노화관리 투자 비용} = \frac{C_s}{(1+i)^{n_1 + n_2 + n_3}} \quad (16)$$

를 얻게 된다.

노화관리 경제성 평가는 이 투자비용에 대한 순이익과 투자이익비용비를 산출함으로써 이루어진다.

상기 알고리즘을 PLIMEE 전산코드에 추가하여 투자비용에 대한 순이익과 투자이익비용비를 산출하고 노화관리 경제성 평가를 수행할 계획이다.

#### 4. 결론

EPRI 및 Palisade에서 개발한 원전수명관리 경제성 평가 관련 전산코드를 검토하고 활용 방안을 모색하였으나, 대부분의 전산코드가 발전원가를 계산하고 동일한 송전단 전력을 생산하는 두 대안 사이의 경제성을 평가하는 전산코드는 존재하지 않았다. 1단계 경제성 평가에서는 계속운전을 위한 준비 기간으로 5년을 가정하였고 이 기간중 연간 20일이 정기점검기간(O/H)에 추가로 소요되는 것을 가정하여 경제성 평가를 수행하였다. 그러나 2단계 연구에서는 기기그룹별로 수명평가가 이루어지고 그 결과 수명연장 준비기간에 시행할 노화관리 방안이 도출될 예정이므로 이들 노화관리 방안에 대한 경제성을 평가해 주어야 하며, 이를 위하여 2단계 수명관리 연구에서 필요한 노화관리 경제성 평가의 순서도와 알고리즘을 작성하였다. 노화관리를 위한 개보수공사 비용 계산식에서 나타난 변수는 공사기간, 공사금액(overnight cost), 공사시기, 핵연료비용, 대체전력비, 가변운전유지비, 이자율, 연간고정비율 등이며 도출된 식을 이용하여 PLIMEE 전산코드를 수정 보완하여 노화관리 경제성 평가를

수행할 계획이다.

### 참고문헌

1. 전력연구원, 원전수명관리 연구(I) 최종보고서, 1996
2. 송택호 외 2인, PLiMEE 전산코드의 작성내용 및 사용방법, Technical Memo, 전력연구원, 1998.
3. EPRI NP-6205-CCML, plant 60 : A Life Cycle Management Tool, 1989
4. EPRI TR-104326, Nuclear Plant Life Cycle Management Economics, 1995
5. EPRI TR-104615, Calvert Cliffs Nuclear Power Plant Plant Lifetime Management Study, 1995
6. EPRI TR-106421, Preliminary Engineerig Business Estimate(PLEBE), 1996
7. EPRI TR-100465, VTESTER Analysis Manual, 1993
8. EPRI TR-107169, An economic analysis of Cobalt valve replacement strategies
9. EPRI TR-106842, Valuation and Management of Nuclear Assets, 1997



