

원전 수명관리 경제성 평가

송택호, 정일석, 홍승열
한국전력공사 전력연구원

조성빈, 진태은
한국전력기술주식회사

요 약

원전의 수명을 결정하기 위해서는 발전소 안전성과 성능을 보증하는 기술적 측면뿐만 아니라 경제적인 측면도 고려하여야 한다. 본 논문에선 원전수명관리 경제성 평가를 수행하는 WECON 프로그램을 소개하고, 이 프로그램을 이용하여 입력 변수의 민감도를 분석하였으며, 이 결과 나타난 상위 6개의 입력변수에 대해 사례 연구를 실시하였다. 이 6가지 변수에 대한 사례연구에서 원전 수명관리의 경제적 이득은 여러가지 경우에 따라 변화 하는 것으로 나타났으며, 기기비용이 연장운전 년수에 비례하여 증가한다고 가정한 경우 무한정 연장운전이 경제적이 아니라 Optimum 연장운전 point가 있는 것으로 나타났다.

1. 서론.

원전의 수명을 결정하기 위해서는 발전소 안전성과 성능을 보증하는 기술적 측면뿐만 아니라 경제적인 측면도 고려하여야 한다. 운전중인 원전을 장기간 운전할 수록 운전기간에 비례하여 이득이 증가하나, 기기 및 구조물은 노화(aging)에 의해 열화(degradation)되고, 이렇게 노화된 발전소의 안전성과 운전성능을 유지하기 위해서는 기기 개보수 및 교체비용(equipment cost)이 수반된다. 원전수명관리는 연장운전으로 인해 얻은 이득이 연장운전에 수반된 비용보다 크면 경제적 타당성을 갖게 된다. 그러나 이득이 비용보다 작으면 설계수명전 혹은 인허가 수명전이라도 원전 폐기를 고려하여야 한다.

따라서, 원전수명관리를 위한 경제적 타당성 평가에서는 원전의 연장운전을 실시한 경우와 실시하지 않는 경우에 대한 비용과 이득을 비교하는 경제성 평가가 필요하다.[1,2]

Koji Nagano는 증기발생기 교체 및 원자로 압력용기 소둔 열처리(annealing)를 고려하는 경우, 1100MWe PWR 60년 운전이 40년 운전보다 더 경제적이라고 주장하고 있다.[3]

일반적으로 경제성 평가법은 크게 확률론적 평가법과 결정론적 평가법으로 나

낼 수 있다.[4] 그런데 경제성 평가는 미래에 나타나는 이득 및 비용을 예측하는 일이므로, 입력변수값은 여러가지 여건에 따라 변화되는 불확실성을 갖고 있다. 예를 들면, “핵연료 비용”, “운전 혹은 보수 비용”, “발전소 이용율”, “물가상승율” 같은 것들이다. 그러므로 경제성 분석은 확률론적인 방법이 보다 타당하다 할 수 있지만, 확률론적 방법으로 수행하기 위한 통계자료가 부족한 경우 민감도 분석 및 사례연구(case study)를 바탕으로 한 결정론적 방법의 경제성 평가가 유용한 경우가 많다.

H. J. Kim은 확률론적 경제성 평가방법을 이용하여 고리 1호기 연장운전의 경제적 타당성을 제시하였으며,[5] Westinghouse에서는 원전연장운전 경제성을 분석하기 위해 WECON 프로그램을 개발, 활용하고 있다.[6]

본 논문에서는 Westinghouse에서 개발한 수명연장 경제성 분석 프로그램인 WECON을 사용하여 입력변수값의 크기변화가 결과값에 미치는 영향의 정도(민감도)를 분석하였으며, 이 분석 결과로부터 민감도가 큰 상위 6개의 변수를 선정하고 이들 변수에 대해 사례연구를 실시하였다.

2. 경제성 분석 방법

WECON 프로그램은 수명관리의 두가지 시나리오(scenario), 즉 PLIM과 NO PLIM 시나리오의 비용을 계산하고 두 비용의 차이를 수명관리의 경제적 이득(PLIM Saving)으로 간주한다.

PLIM 시나리오는 연장운전을 위해 기기정비 및 교체를 시행하고 연장운전 기간 만큼 대체 전원의 건설을 연기시키는 대안이며, NO PLIM 시나리오는 연장운전을 실시하지 않고 인허가 종료시점에 원전을 폐로하며, 폐로이전에 대체 전원을 건설하여 원전 수명종료시점에 이 대체 전원을 가동시켜 동일한 전력을 공급하는 시나리오이다.

이 프로그램에서 사용되는 입력변수는 “연간고정비율”, “원전이용율”, “연장운전 이후의 이용율 변화”, “원전에 대한 연간 핵연료 재장전일수” 등 모두 29가지이며, 사용자가 이들 변수의 타당한 값을 입력하여 수명관리 경제성을 분석한다.

WECON은 건설, 보수, 연료, 대체전력 비용 등과 같은 호기별 비용을 기준년도(reference year)에 현가화시키며 시간에 따라 변화되는 이득치를 계산하기 위해 물가상승율을 적용시킨다.

이러한 알고리즘을 사용하는 WECON 프로그램은 물가상승율은 실질할인율보다 항상 작다라는 가정을 두고 있기 때문에, 미래에 발생하는 모든 비용은 기준년도에 현가화 시킬 때 작아지며, 기준년도로부터 시간이 멀어지면 멀어질수록 그 현가화된 비용은 더욱 작아진다. PLIM Senario와 NO PLIM Senario는 원전 수명종료후 미리 건설된 25년 수명의 대체 화전이 동일한 전력을 공급하고, 이 화전의 수명이 다하면 또 다른 화전으로 계속해서 전력을 공급하도록 구성되어 있다.

정확한 경제성 비교를 위해서는 무한 갯수의 대체 전원에 대한 비용을 현가로 계산을 해야 하지만, 일정기간 이후의 비용은 기준년도에 현가화 시킬 때 무시할

수 있을 정도로 작아지게 되므로 WECON 프로그램에서는 원전 수명종료후 3번째 화전까지의 기간을 분석기간(study period)으로 정하고 있다.

3 경제성 평가

3.1 민감도 분석

입력변수의 값들은 경영환경, 경제적 여건, 발전소 고유상황에 따라 변동될 수 있는 값들이다. 따라서 경제성 평가시 이들 입력변수의 값을 신중하게 결정하여야 하며, 어떤 입력변수가 결과에 어느정도의 영향을 미치며, 그 중 큰 영향을 미치는 입력변수는 무엇이며 그들의 영향은 어느정도인지를 파악해 볼 필요가 있다.

Westinghouse에서 권고하고 있는 입력변수의 최대 최소값을 기본으로 하여 민감도 분석 연구를 수행하였다. 입력변수의 최대값을 넣었을 경우의 원전수명관리 비용절감액과 최소값을 넣었을 경우의 비용절감액을 계산한 뒤, 이 둘의 비용절감액의 차이의 절대값을 비교함으로써 “어떤 변수가 결과에 얼마나 영향을 미치는가”를 조사하였다. 민감도 분석은 Westinghouse의 WECON 프로그램을 사용하였으며 분석결과는 Table 1에 나타내었다. “화석연료의 열에너지 비용”, “물가상승율”, “원전해체비용”등등은 변수값 변화가 결과에 큰 폭으로 영향을 미치는 반면에 “연간 핵연료 재장전일수”는 결과에 가장 작은 폭으로 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

이 민감도 연구자료를 바탕으로 상위 6위까지의 변수들을 대상으로 다음과 같이 사례연구(Case Study)를 실시하였다.

3.2 사례연구(Case Study)

WECON에 한전 통계자료를 사용한 경우 10년 수명연장에 약 3900억원의 연장 운전 이득을 얻을 수 있었다. 이 경우를 기준경우(Baseline case)로 정하였는데, 이 경우 “원전이용율” 값을 산정함에 있어서 최근 20년간 A원전 1호기 평균이용율을 적용으며, “물가상승율”은 0이라 가정했으며, “화석연료 열에너지비용” 계산에는 석탄, LNG, 중유, Diesel의 평균연료비용을, “원전해체비용”은 건설비의 10%로, “화전의 열효율”은 B화력 3,4호기의 값을 각각 적용했다. 여기서 물가상승율을 0이라 가정한 것은 수명연장이득값을 보수적으로 얻기 위해서였다.

1993년에는 A원전 1호기 이용율이 기준경우의 이용율 보다 11.5% 만큼 증가했었는데, 이를 Case 2로 정하고 계산해 보았다. 그 결과, 수명관리 이득이 기준경우보다 570억원이 더 증가함을 알 수 있었다. 수명관리 대상원전의 이용율이 증가하면 증가할수록 그 원전의 가치는 높아지며 따라서 그 원전을 수명연장 할 경우 이득이 이용율에 비례하여 높아지는 것으로 해석 할 수 있다.

통상적인 물가상승율(3.5%)을 적용시킨 경우를 Case 3으로 정하고 계산해 보았으며, 그 결과 수명관리 이득이 Baseline Case 보다 2910억원이 더 증가했음을 알 수 있었다. 이는 Baseline Case에서 물가상승율을 0이라 적용하여 이득을 계산한

것은 매우 보수적(conservatively)으로 적용한 것임을 알 수 있다.

기준 경우에서 “화석연료의 열에너지 비용”에 석탄, LNG, 중유, Diesel의 평균 열에너지 비용을 적용시키었는데, 이중 비용이 가장 싼 석탄연료의 열에너지 비용만을 “화석연료의 열에너지 비용”에 적용시킨 경우를 Case 4라 정하였다. 이 경우 수명관리 이득이 960억원 만큼 감소함을 볼 수 있었다. 대체 화전의 열에너지 비용이 작아지면 작아질수록 원전의 수명연장으로 인해 얻을 수 있는 이득은 그 만큼 비례하여 작아짐을 알 수 있다.

Case 5에서는 Yankee Rowe의 경우를 참고하여 기준경우 보다 페로비용을 약 4조 5천억원 더 증가시키어 계산하였다. 이 경우 수명관리 이득이 Baseline Case 보다 약 4500억원이 더 발생하였다. 결국 페로비용이 증가하면 증가 할수록 연장 운전이 경제적으로 더욱 타당한 대안임을 알 수 있다.

Case 6에서는 “대체전력비” 입력 변수에 민감도 분석시 사용한 최대값을 적용시키었다. 대체전력비를 0.379kWon/kW-hr 만큼 증가시키어 계산한 결과, 기준경우보다 약 2,000억원 정도 이득이 감소함을 볼 수 있었다. “대체전력비”는 원전이 개보수 혹은 연료 재장전을 위하여 정지되었을 때 원전이 감당하던 부하를 감당하는데 소요되는 대체전력의 비용으로 화력 혹은 원전의 대체 전원비를 말한다.

기준경우에서는 대체전력비를 화전의 평균 연료비용으로 계산하였다. 본 연구의 Case 6에서 원전수명관리 경제적 이득을 산출하기 위해서는 대체전력비의 정확한 산정이 매우 중요함을 보여주고 있다.

3.3 경제적 최적 수명연장기간.

이러한 6가지의 Case에 대해 경제적 최적 수명기간을 도출하기 위해 수명연장년수에 대한 이득을 Figure 1에 Plotting 하였다.

수명관리 기기비용이 연장운전년수에 관계없이 2400억원으로 일정하다고 가정 한 경우 Figure 1과 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 연장운전년수가 증가할수록 이득은 증가하지만, 시간이 기준년도로부터 멀어지면 멀어질수록 현가화된 이득은 작아지고 연장운전년수가 80년에 다다르면 포화(saturation)됨을 볼 수 있다.

Figure 2는 기기비용이 연장운전년수에 비례하여 증가한다고 가정한 경우이며, 이 경우 10년연장운전에 2400억원, 20년 4800억원, 30년 7200억원,....., 80년 1조 9200억원으로 기기비용값을 각각 적용시키었다.

이 경우 경제적 최적 연장운전기간은 약 25년정도로 나타났다. 결국, 원전의 경제적 최적수명의 결정은 원전수명관리 기기비용에 의해 크게 좌우됨을 알 수 있다.

기기비용을 계산함에 있어서, Wisconsin Electric[7]에서는 기기의 교체확률을 기기비용에 곱한 가중값(Weighted Cost)을 계산하였다. Duke Power[8]사에서는 교체확률에 근거한 가중값대신에 최악의 경우를 생각해서 기기비용을 산출하고 있다. 본 연구에선 기기비용을 이들 Utility 경험자료[7,8]를 토대로 매우 보수적으로 산정하였다.

그러나, 연장운전년수가 증가될 때 노화(degradation)의 정도가 얼마나 더 심화될지 알 수 없으며 기기비용이 단순히 본 연구에서 적용한 것처럼 일차함수로 증가하지만은 않을 것이다. 그것은 지수함수적으로 증가 할 수도 혹은 다른양상으로 증가할 수도 있으며, 이에 대한 연구는 향후에도 지속되어야 한다고 생각된다.

원전 수명관리 경제성 평가는 국내외 연구동향 및 통계자료의 변화를 예의주시하여 본 연구에서 수행한 6가지 경우이외에도 미래에 발생가능한 중요한 경우에 대해 Case Study를 계속 수행하여 다각도로 원전수명관리의 경제적 타당성을 평가할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문에선 원전수명관리 경제성 평가를 수행하는 WECON 프로그램을 소개하고, 이 프로그램을 이용하여 입력변수의 민감도를 분석하였으며, 이 결과 나타난 상위 6개의 입력변수에 대해 사례연구를 실시하였다.

입력변수의 민감도 분석연구 결과, “화석연료 열에너지 비용”, “물가 상승율” 등의 6가지 변수는 그 변수값 변화가 결과에 크게 영향을 미치는 것으로 드러났다.

이 6가지 변수에 대한 사례연구에서 원전 수명관리의 경제적 이득은 여러가지 경우에 따라 변화함을 볼 수 있었으며, 기기비용이 연장운전년수에 비례하여 증가한다고 가정한 경우 약 25년 정도가 경제적으로 가장 적합한 연장운전년수로 나타났다.

원전 수명관리 경제성 평가는 국내외 연구동향 및 통계자료의 변화를 예의주시하여 본 연구에서 수행한 6가지 경우이외에도 미래에 발생가능한 중요한 경우에 대해 Case Study를 계속 수행하여 다각도로 원전수명관리의 경제적 타당성을 평가할 필요가 있다.

REFERENCES

1. J. K. Joostern, "Nuclear Plant Life - A Business Decision," IAEA-CN-59/67, 1994.
2. "Nuclear Energy Cost Data Base", DOE/NE-0078, U.S. Department of Energy, 1986.
3. Koji Nagano, "The Economics of Nuclear Power Generation", 17th Japan-Korea Nuclear Industry Seminar, 1995.
4. Philippe Somville, Tractebel, "Repair-Replacement Strategies for Steam Generators in Belgium", Nuclear Plant Life Management and Extension Conference, 1995.
5. Hyun Jun Kim, "A study on Economic Viability of Life Extension of Nuclear Power Plant", The Paper for the degree of Master of Science in the Department of Nuclear Engineering of KAIST, 1993.
6. Westinghouse, "WECON Plant Lifetime Economic Model", 1995.
7. Wisconsin Electric, "License Renewal Cost/Benefit Analysis Summary",

Meeting Handour Article, 1995. 6.

8. Duke Power, " Meeting Interview Article". 1995. 6.

Table 1 Sensitivity Ranking of Input parameters

Ranking	Economic Parameters	비용 변동폭 (십억원)
1	Fossil Energy Cost(kWon/kW-hr)	2518
2	Escalation Rate	943
3	Nuclear Decommissioning Cost(kWon/kW)	606
4	PLIM Equipment Cost(Millions of kWon)	603
5	Replacement Power (kWon/kW-hr)	272
6	Capacity Factor Nuclear/Fossil	249
7	Annual Fixed Charge Rate	242
8	Fossil Construction Cost(kWon/kW)	229
9	Fossil Thermal Efficiency	225
10	Variable O&M Cost Fossil(kWon/kW-hr)	190
11	Days/Year PLIM is Performed	182
12	Variable O&M Cost Nuclear(kWon/kW-hr)	151
13	Fixed O&M Cost Fossil(kWon/kW-hr)	96
14	Fixed O&M Cost Nuclear(kWon/kW-hr)	95
15	Nuclear Fuel Cost(kWon/kW-hr)	93
16	PLIM Fixed Charge Rate	63
17	Power Rating Change	54
18	PLIM Fuel Savings(kWon/kW-hr)	20
19	Capacity Factor Change(Nuclear)	16
20	Days/Yr for Refueling	5

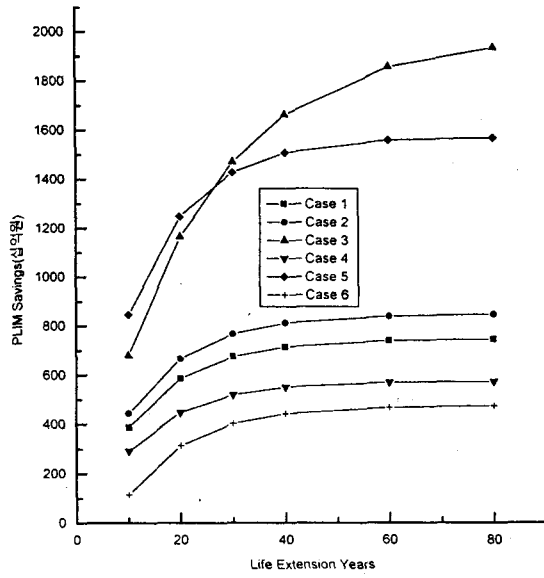


Figure 1. Case study with PLIM equipment cost fixed

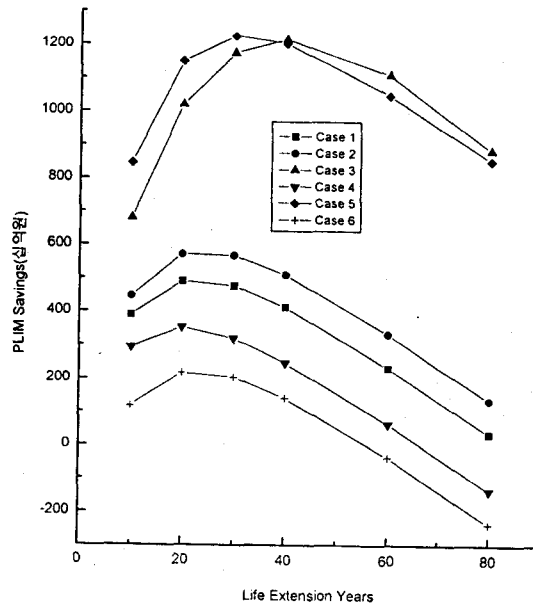


Figure 2. Case study with PLIM equipment cost in proportional to Life Extension Years