

증기발생기 최적 교체시기 결정에 관한 연구

허정훈¹ · 윤원영^{2*}

¹한국수력원자력(주) 원자력교육원 / ²부산대학교 산업공학과

Optimum Replacement Times for a Steam Generator

Jung-Hoon Hur¹ · Won-Young Yun²

¹Korea Electric Power Co.

²Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Busan, Korea, 609-735

This paper considers the optimum replacement times of a steam generator in nuclear power plant with failure data. It is assumed that the failure pattern of units is given as a Weibull distribution and repair and periodic preventive maintenance are performed periodically. The maximum likelihood method is used to estimate the Weibull parameters of failure distribution from failure data. Replacement, output-decreasing and maintenance costs are considered to determine the optimal replacement times by simulation. Numerical examples are included with actual failure data and cost estimators.

Keywords: stem generators, optimum replacement times, weibull distribution, maintenance costs, simulation

1. 서론

새로운 기술로 인하여 시스템이 다기능, 고기능화로 그 구조가 복잡해짐으로 인해 시스템 운용비용이 매우 크며 이의 효율적 감소를 위해 시스템 운용·지원에 있어서 효과적인 접근 방법 및 기법들이 개발되어 적용되고 있다. 운용 단계에서 시스템이 원활히 운용될 수 있도록 하기 위해서는 정비 업무가 매우 중요하다. 정비는 시스템이 요구되는 성능을 발휘하도록 시스템의 상태를 최적으로 유지시키며 고장의 발생을 예방하거나 효과적으로 처리하는 모든 활동으로 정의하고 있다. 정비를 최적으로 수행하기 위한 연구로서 고장의 수리적 모델에 의한 최적화 모델(Optimization Model)과 컴퓨터 및 정보통신 기술에 바탕을 둔 정비 방법론(Maintenance Methodology)이 있다. 최적화 모형연구는 고장을 사전에 예방하거나 고장이 나더라도 효율적인 조치를 하기 위해서 시스템의 노후화 및 수리, 정비에 대한 수학적 모형을 기반으로 검사 주기, 정비 횟수, 교체 주기 및 고장시 수리 또는 교체를 총비용이나 가용도 측면에서 최적으로 결정하기 위한 모형과 해법의 개발이다. 정비 방

법론은 정비를 보다 경제적이고 효과적으로 수행하도록 정비의 제반 활동, 조직 및 재원에 대한 관리와 더불어 새로운 정비 방법론(절차)을 제안하고 구현하는 연구이다. 정비 방법론의 발전은 최적화 모델이 가지고 있는 현장 적용성에서의 취약점을 보완하므로 여러 산업분야에서 새로운 개념과 시스템들이 개발 적용되고 있다. 특히 최근 신뢰도 중심 정비(RCM: Reliability Centered Maintenance)에서 다양한 최적화 모형을 사용할 수 있는 전반적인 절차를 제안하고 있으며 여러 분야에서 매우 활발히 사용되고 있다고 할 것이다.

본 논문은 원자력발전소(원전)의 정비와 관련된 연구이다. 원전의 경우 설비의 가동에 따른 노후화로 인한 효율성 저하와 안전성 문제는 설비의 운영에서 가장 중요한 문제로서 이의 해결을 위해 최근 연구가 매우 활발히 진행되고 있으며 원자력산업계에서는 수명연장을 통한 원자력산업의 재도약을 준비하고 있다. 원전 최대 보유국인 미국의 원전들은 기존 운영 허가 기간인 40년 이후에도 안전하며 경제적으로 운영될 수 있는 능력을 입증함으로써 2000년에 미 원자력규제위원회(NRC)로부터 20년 추가가동연장에 관한 인허가를 취득하는 데 성공하였다(KEPC, 2000b, KEPC, 2001a). 일본의 경우 원전에 대

* 연락처: 윤원영 교수, 609-735 부산시 금정구 장전동 산30 부산대학교 산업공학과, Fax: 051-512-7603, e-mail: wonyun@hyowon.pusan.ac.kr
2001년 7월 접수, 2회 수정 후 2001년 10월 게재 확정.

한 경제성평가 시스템을 개발하였는데 이것은 원전의 기기 및 구조물의 수명에 대한 평가를 수행함과 동시에 기기의 보수와 교체, 사용환경에 대한 개선대책의 실시시기 및 그에 소요되는 비용과의 관계를 밝히고 나아가 원전의 운전 및 정비 전반에 걸친 경제성 평가가 주된 내용이다. 국내에서도 원자력발전 사업이 시작된지 20여 년이 지나면서 증기발생기 교체에 대한 경제성 평가가 있었으며 그 결과 1998년 6~9월 사이 고리 1호기 취약설비인 증기발생기(Steam Generator)를 교체했다(KEPC, 2000a). 증기발생기 교체를 위해서는 전력수급 문제와 원전의 핵연료 연소 도를 고려한 계획 예방 정비 일정에 대한 사전 검토가 필요하다. 무엇보다도 증기발생기 교체에는 막대한 비용이 소요되며 제작 등에 필요한 기간도 4~5년의 상당한 기간이 요구되는 대형 프로젝트이다. 이제 전력산업이 경쟁체제로 전환되면서 이러한 경제적인 운영이 매우 필요한 시점이 되었으며 경쟁체제에 돌입한 전력 사업의 사활은 경제성을 어떻게 극대화하느냐에 달려 있다고 할 수 있다(KEPC, 2000b). 더욱이 원자력발전 부문도 이제는 노후화에 의한 효율성 저하로 여러 가지 대형기기의 교체가 예상되고 있기 때문에 증기발생기뿐 아니라 원자력발전소의 기기를 정비하거나 교체함에 있어 최적화 모델과 같은 정비 정책이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

본 논문은 원전에서 주요 기기 중의 하나인 증기발생기의 최적 정비 정책(교체시기)의 수립에 있어서 수명 기간 내에 지속적인 수리를 해가면서 증가하게 되는 정비 비용과 증기발생기의 효율감소에 근거한 예상되는 전기 출력 감소 운전으로 인한 손해 비용을 고려해봄으로써 증기발생기의 최적 교체시기를 설정하고자 하는 문제를 다룬다. 2절에서는 원전의 정비 정책과 연구대상기에 대해 설명하며 3절에서는 최적교체주기 결정을 위한 모형의 요소들, 즉 비용요소, 고장모형 매개변수 등을 추정한다. 그리고 4절에서는 3절에서 추정된 요소들을 기반으로 최적주기를 선정하기 위한 방법론(시뮬레이션)과 실제 결과를 제시하며 5절에서는 결론을 도출하고자 한다.

2. 원자력발전소의 정비 정책

정비정책 분야 연구는 지금까지 수리적 모델에 관한 많은 연구가 되어 왔다. 최적 정비정책의 수립을 위해서는 먼저 설비의 고장의 모형가정이 중요하며 기본적으로 고장시간을 확률 변수로 취급하는 고장 모형(Black Box Model), 시간지연 모형(Delay-time Model), 다 수준 상태 모형(Multi-state Model), 마모 모형(Degradation Model), 누적손상 모형(Cumulative Damage Model) 등이 사용되고 있으며 이에 대한 다양한 정책들이 연구되었다(Park, 1986; Choi, 2001; Beichelt, 1993; Dekker, 1996; Gertsbakh, 1977; Jack, 1991; Valdes-Flores, 1989). 교체정책의 최적화기준으로는 가용도, 비용 등이 고려되어졌으며 교체시기까지의 수리 문제, 수리정도(최소수리, 불완전수리, 완전수리), 그리고 대상

기간의 길이도 중요한 요소로서 무한시평, 유한시평 등에 대한 연구들이 수행되었다(Choi, 2001; Jack, 1991).

이 절에서는 원전의 정비상황과 증기발생기에 대해 간단히 설명하고자 한다. 원전의 정비와 관련된 상황을 보면 원자력발전소의 수명관리는 먼저 주요 기기를 제외한 기기들에 대해서는 추천된 수명까지 사용하고 발전소 수명 이전에 기능이 다하면 교체하여 사용한다(고장교체방식). 그러나 주요 기기들에 대해서는 사용에 따른 열화 및 노후화 원인을 분석하고 앞으로 계속 운전할 수 있는 잔여 수명을 예측한다. 예측된 잔여 수명이 목표 수명보다 길다면 계속 운전에 지장이 없으므로 개 보수나 기기 교체를 고려하지 않으며(단, 장기 사용 기기에 대하여는 운전 성능과 안전성, 신뢰도를 남은 발전소 수명 기간동안 확인하기 위한 상태 진단 및 감시 시스템을 운용함), 잔여 수명이 목표 수명보다 작은 경우에 기기 노화 완화를 위한 예방 정비 계획을 수립하여 실시하고 잔여 수명을 향상시키고 잔여 수명을 향상시킬 수 있는 방안이 없는 경우는 성능이 다하는 시점까지 운전한 후 수리, 교체하거나 기기 자체의 재설계 또는 발전소 개 보수 계획을 수립하여 연차적으로 기기 및 계통의 수명을 향상시킨다(KEPC, 1995).

원전의 정비방식에 따라 보면 크게 고장 발생 후에 실시하는 고장 정비와 고장 발생을 미리 예측하여 정비하는 예방 정비로 분류하고 다시 주기 정비와 예측 정비, 계획 예방 정비로 나눌 수 있다. 고장 정비는 고장이 발생하였거나 성능이 저하된 설비 또는 기기를 수리하여 원래의 기기 성능을 회복시키는 것이고, 예방 정비는 기기의 성능을 원래의 수준으로 유지시키거나 설계수명 이상 사용하기 위하여 기기 고장 발생 전에 사전 조치를 취하는 것이다. 주기 정비는 설비 운전 기간 또는 운전 회수를 기준으로 하거나 제작자의 권고 사항에 따라 규칙적인 시간 간격으로 기기를 정비하는 것으로 주요 정비 업무로서는 기기 윤활, 소모품 교체, 시험, 측정, 조정, 교정, 검사 등으로써 대부분 간단히 수행할 수 있는 부류들이 이에 속한다. 예측 정비는 설비의 운전 상태, 결함, 성능 등의 변수를 감시하고 추이를 분석한 후 고장 발생 징후를 사전에 감지하여 적절한 조치를 취하는 정비 형태이다. 기기의 성능을 연속적으로 감시하기 위한 기기 상태 감시 및 진단 시스템을 설치하여 기기 성능을 대표할 수 있는 주요 운전 및 성능변수를 수집하고 성능 변수가 변하는 경향을 분석하여 기기 상태의 이상유무와 불시고장을 사전에 예측한다. 만약에 이와 같은 방법으로 기기 고장이 사전에 예측되면 이를 예방 정비에 반영하고 예견된 사고가 발생하기 전 적절한 시기에 정비를 실시한다. 계획 예방 정비는 설비고장에 상관없이 예측 정비와 주기 정비시행에서 얻은 경험과 기기 공급자의 권고 사항을 바탕으로 사전에 기기 정비계획을 수립하여 시행하는 예방 정비로서 대부분은 발전소 연차 정비기간 동안에 수행되어 진다. 연차 정비기간 동안에는 기기 정비뿐만 아니라 가동중 검사, 기기 교체 및 개조 작업 등이 수행되는데 대부분 운전중에는 작업이 곤란한 대형 정비 작업의 경우들이다(KEPC, 1995). <그

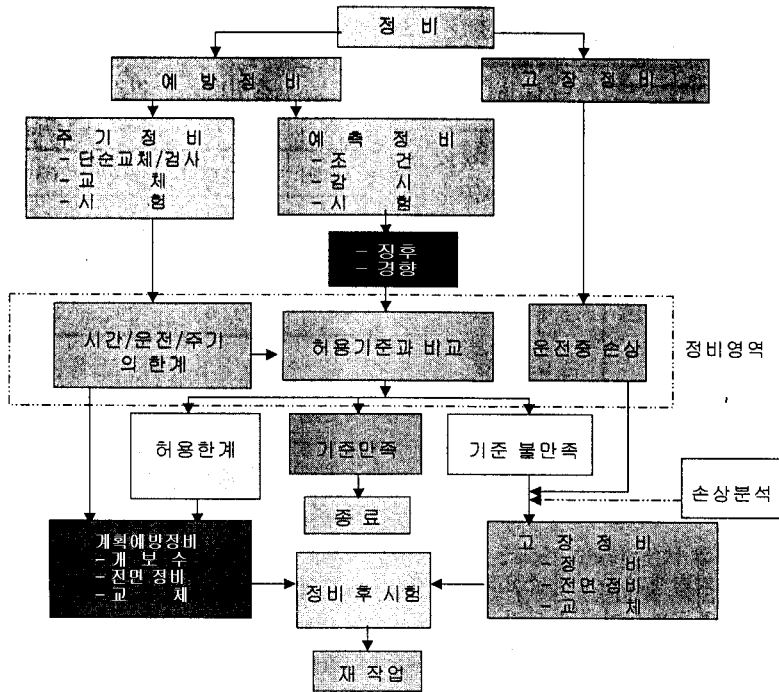


그림 1. 원자력발전소의 정비 정책(KEPC, 1995).

림 1>은 원자력발전소의 정비 정책에 관한 구성도이다.

본 논문의 연구대상 기기인 증기발생기는 노후화 됨에 따라 안전성과 경제성에 큰 영향을 초래하는 주요기기로서 원자로 냉각계통으로부터 터빈-발전기 구동을 위한 포화증기를 생산하기 위해 고온 고압의 물을 사용하며, 또한 원자로 냉각 1차 계통(원자로-증기발생기-원자로 냉각 펌프로 구성된 폐회로)과 2차 계통(증기발생기-터빈-복수기-순환수 펌프로 구성된 폐회로)을 연결하는 주요기기이다(KEPC, 1998; KEPC, 1999b; KEPC, 2000a; KEPC, 2000c; KEPC, 2000d). <그림 2>는 원자력

발전소 계통 구성을 보여 주고 있으며 증기발생기는 수많은 세관(9,868개)으로 구성되어 있으며 15개월을 1 주기(Cycle)로 하여 각 주기마다 세관에 대한 검사를 수행하고 그 결과에 따라 관 재생을 하거나 관막을 처리를 하여 설비의 지속기간인 30년(연장추세임) 동안 검사와 정비는 지속적으로 계속한다.

본 논문의 연구목표는 증기발생기의 최적 교체주기를 결정하고자 하는 것인데 증기발생기의 교체문제는 다수 기기를 동시에 고려하는 교체주기 결정문제이며 원전의 설계수명이 정해져 있으므로 유한 시평에서 최적화 문제의 범주에 포함된다 고 여겨진다. 시스템에 대한 구성을 요약하면 다음과 같다.

- 다수의 동일 부품(세관)으로 이루어진 다 부품 시스템을 동시에 운영한다.
- 총 부품 중에서 초기에 고장난 상태로 있는 부품이 존재한다.
- 과거부터 시스템을 운영해 온 경우에는 초기수명이 존재한다.

위와 같은 시스템의 최적 교체주기를 결정하기 위해 다음과 같은 몇 가지 조건을 가정한다.

- 고장시간은 와이불(Weibull) 분포를 따른다.
- 검사는 일정한 주기로 발생한다.
- 교체는 검사 시점 중에서 임의로 정한 시점에서 수행한다.
- 검사 시점에서 정비와 교체는 필요시 순간적으로 이루어진다.

3. 비용요소와 고장 자료 분석

증기발생기 최적 교체주기에 영향을 주는 비용과 고장분포의

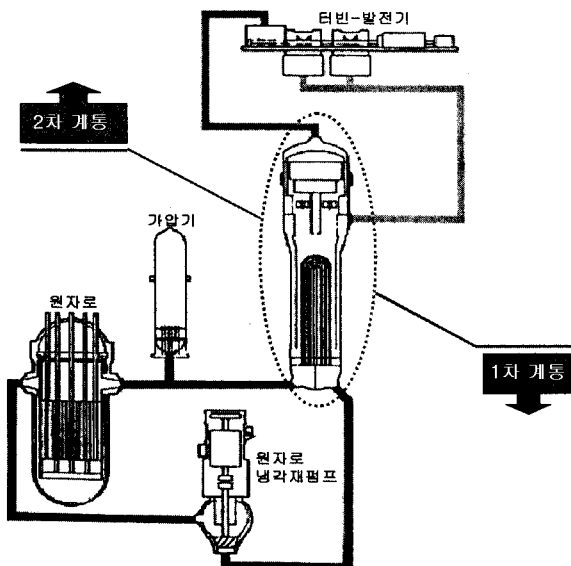


그림 2. 원자력발전소 계통 구성.

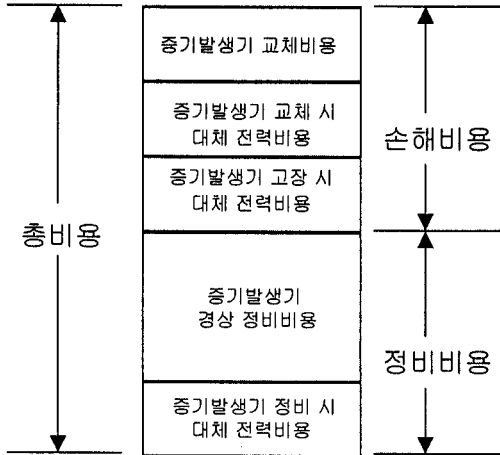


그림 3. 총비용의 정의.

모수들을 추정하고자 한다. 증기발생기 운영에 소요되는 비용 부분은 크게 세관 정비 비용, 증기발생기세관 관막음을 증가로 인한 전기 출력 감소분만큼의 손해 비용과 증기발생기 교체비용 등 3가지 비용으로 나누어 분석한다.

3.1 비용요소

증기발생기 정비와 관련된 비용은 크게 「정비 비용(Maintenance cost)」과 「손해 비용(Damage cost)」로 구분하는데 정비 비용은 주기적인 정비시 발생하는 세관검사비용, 검사 후 필요한 세관정비비용 등(정상정비비용)과 정비기간동안의 대체전력 비용 등을 포함한다(<그림 3> 참조). 손해 비용은 증기발생기 성능저하로 인해 초래되는 비용을 포함하여 증기발생기 교체를 위한 교체비용과 설치기간 중 대체전력 비용을 포함한다(KEPC, 1995; KEPC, 1998).

고리 1호기 증기발생기 최적 교체 주기분석을 위한 비용요소 추정을 위해 필요한 기본입력자료는 고리 1호기 과거 경험 자료를 토대로 조사·분석한다. 원자력발전소에서 교체시기에 대한 경제성을 평가하는 방법은 미 전력연구소(EPR)의 방법과 웨스팅하우스사에서 개발한 증기발생기 전략적 운영 모델(SGSP)을 사용하고 있다.

원자력 선진국의 세계적인 추세는 설계수명을 신장하고 있으며 국내에서도 이러한 수명 연장에 대한 계획을 검토하고 있다. 이런 점을 감안하면 설계 수명 이후 약 20년의 수명 연장 기간 동안에 증기발생기 세관 정비나 새로운 증기발생기로의 교체가 예상된다. 증기발생기 최적 교체시기를 평가하는데 영향을 주는 비용요소로서는 여러 비용요소들 중 교체주기를 다르게 하므로 변화되는 비용만을 고려하면 되므로 본 논문에서는 관막음률에 따른 세관정비 비용, 출력 감발 운전에 따른 손실, 교체시 교체비용이 주요요소들이다. 따라서 증기발생기 세관 관막음으로 한정하여 총비용 중심의 경제성 평가방식을 채택하였다(KEPC, 1999a; KPPEC, 1995).

표 1. 연도별 정비 비용

연월	정비비용 (천원)	기간 (일)	정비수량			비고
			관막음	관재생	계	
'92.01	3,875,000	30	63	330	393	
'93.05	3,116,000	34	154	97	251	
'94.08	4,300,000	33	89	118	207	
'94.11	3,992,000	29	169	182	351	

3.1.1 세관정비비용

고리 1호기는 1988년 10년차 정기 대 정비부터 지금까지 약 183억 원이 소요되었으며(<표 1> 참조), 증기발생기 세관정비 작업은 국내의 공동작업이므로 외국기술인력의 투입규모, 정비부위 등에 따라 세관 정비 비용은 주기별로 변동폭이 매우 큰 편이기 때문에 경제성 평가에 적용할 세관정비의 고정비와 단가를 직접 산출하기는 매우 어렵다. 과거의 자료를 근거로 정리해 보면 고정 비용은 전체 정비 비용의 약 18%(약 5억7천 만 원)에 달한다.

정비 수량에 대한 총비용 자료('92~'94)를 비교해 보면 정비기간은 평균 32일이 소요되었으며 정비 비용은 평균 37억 원, 정비 물량은 평균 300개이다(<표 1> 참조). 이러한 분석 결과를 종합적으로 정리해 보면 관막음 수량과 관재생 수량의 분포에 따른 정비 비용은 큰 차이가 없고, 정비 비용은 실제적으로 정비 기간과 정비 총수량(관재생 + 관막음)에 따라 차이가 발생되었다(KEPC, 1998; KEPC, 2001a; KPPEC, 1995). <표 1>은 증기발생기 결합세관의 연도별 정비 비용 현황이다. 이를 바탕으로 관막음 수에 대한 정비 비용은 정비 작업시의 고정비, 관막음 정비단가와 관막음 수량으로 나누어 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^T [c_1 + c_2 \cdot n_i]$$

T: 발전소 수명(15개월 단위로 계산된 수명으로 주기(Cycle)를 적용)

n_i: 관막음 수, c₁: 고정비, c₂: 관막음 단가

비용계수는 고리 1호기 증기발생기 교체에 관한 경제성 평가 보고서의 적용 단가를 현가(Present Value)로 환산('94. 04부터 '01. 04까지 7년간 8% 적용)하여 고정비는 61,000만원, 관막음 단가는 437만원으로 적용하고자 한다(KPPEC, 1995).

3.1.2 감발 운전 손실

증기발생기 세관의 관막음률이 일정 한계 이상으로 증가하면 증기발생기의 정상설계 열 출력을 유지할 수 없기 때문에 원자로 출력을 제한해야 한다. 고리 1호기 가동 초기에는 웨스팅하우스 핵연료를 사용하였으며 관막음 한계 15%로 정해져

있었으나 국산 핵연료 사용과 함께 관막음 한계 5%를 기준으로 하고 있다. 실제 관막음 한계값의 결정에는 많은 시간과 노력이 필요하며, 별도의 상세 분석 후 결정해야 한다(참고: 1986년 원자력연구소에서 수행한 “증기발생기 관 폐쇄에 따른 안전성 분석”에서 최대 18% 관막음이 가능할 것으로 예측). 한편, 정상 상태에서의 원자로 열 출력은 증기발생기의 열 출력과 반드시 같아야 한다. 만약 관막음률의 증가로 증기발생기 열 출력이 설계치 이하로 감소하는 경우, 역시 원자로의 열 출력도 그만큼 감소해야 한다. 온도조건이 비교적 일정하다고 가정할 때, 증기발생기 열 출력은 전열면적에 의하여 결정된다. 관막음률의 증가는 전열면적의 감소를 나타내며, 관막음 한계 이상으로 증가하면 증기발생기 열 출력은 관막음 증가율에 반비례하여 감소하게 된다. 고리 1호기의 경우, 15% 이상의 관막음 상태에서 출력 감발 범위를 정확히 계산하기는 곤란하나, 1차 계통과 2차 계통의 열 평형을 유지해야 한다는 기본가정에서 출력 감발 범위(%)는 각 주기에서의 검사에 의한 정비 결과 총 관막음률 한계(10%) 이상일 때 총 관막음률(%)에서 관막음 한계(10%)를 뺀 만큼 원자로 열 출력을 낮추어야 하며 전기출력도 같은 정도(열 출력 변화 1% = 전기출력변화 1%)로 감발하는 것으로 한다. 1998년 새로 교체한 고리 1호기 증기발생기의 관막음 한계는 10(%)이며 이 기준치가 감발 운전 시점이 된다(KEPC, 1999a; KEPC, 1999b; KPPEC, 1995).

그러므로 총 관막음률이 10% 이상일 때 원자력발전소 전기 출력은 [총 관막음률 - 10]만큼의 비율로 전기 출력도 동일하게 감발 운전해야 하므로 아래와 같이 전기 출력 감발에 의한 손해 비용을 계산할 수 있을 것이다.

$$\max \left\{ 0, \left(\frac{N_i}{9868} - 0.10 \right) \right\} \times E \times W$$

N_i : 총관막음수, E : 전기출력,
 W : 단위전기판매이익 (원/kWh)

1일 전기출력은 $[587 \times 10^3 \text{ (kW)} \times 24 \text{ (hr)}] \text{ (kWh)}$ 이며, 전기요금에 대한 판매단가는 74.65(원/kWh)를, 전기 생산원가는 39.34(원/kWh)를 적용하였다(KEPC, 2001b).

3.1.3 증기발생기 교체 비용

증기발생기 교체에 필요한 총 공사비는 원전마다 큰 차이를 나타내고 있다. 1989. 2. 3~1989. 5. 5까지 약 3개월간에 걸쳐 증기발생기를 교체한 미국 Indian Point-3호기(1,013 MWe)의 경우, 증기발생기 4개(웨스팅하우스 44 모델)를 교체하는 총비용이 약 1.2억불 소요되었으며, 비용내역은 증기발생기 제작, 수송에 4천만 불, 현장 설치공사에 6천만 불, 교체 엔지니어링, 인허가, 각종지원 업무 등에 2천만 불 등이다. 실제 증기발생기 교체작업 일수는 약 105일 걸렸다. 다양한 원전에서 우리와 유사한 모델에 대한 교체비용을 <표 2>에 정리하였다. 과거에 실시된 고리 1호기 증기발생기 실제 교체 비용은 883억 원이었다(KEPC, 1999b; KPPEC, 1995). 이 공사를 위해 미국의 웨스팅

표 2. 증기발생기 교체 비용 비교

발전소 명	운전 년수	공사기간 (일)	공사금액 (백만\$)	비 고
답피엘 3	14	399	100	공사완료연도 : 1996
미하마	25	420	200	
가 나	25	70	108	
도엘 4	9	91	122	
다가하마 1	21	164	230	
아스코 2	10	49	131	
알마라츠 1	15	80	154	
카타바 1	11	115	153	
그라벨니스2	15	33	100	

하우스사는 고리 1호기 증기발생기 교체에 필요한 비용을 공사 전 1,000~1,200억 원으로 추정하였다. 고리 1호기 증기발생기 교체 작업은 1998. 6. 19~9. 12까지 총 작업 일수는 86일이 소요되었으며 증기발생기 교체비용은 883.11억 원이었다. 본 연구에서는 증기발생기 교체 비용을 1,000억 원으로 가정한다.

3.2 고장 모형 및 고장 자료 분석

원자력발전소에서 내부 결함을 검사할 때 형상, 위치, 방사선 등으로 인하여 접근이 어려울 뿐 아니라 결함의 크기 및 성장여부를 정확히 평가하기 위하여 초음파 탐상 검사를 이용하고 있다. 특히 열 교환기의 세관 등 특정부위에 대해서는 접근성 및 검사속도 때문에 와전류 탐상 검사를 사용하고 있다. 미국을 중심으로 한 선진국에서는 손상확률 및 사전 안전성 분석(PSA)결과를 활용하여 위험도가 높은 부위를 심도 있게 검사하기 위한 방안을 구축하고 있는 추세이다. 증기발생기 세관 손상을 분석, 예측하는 방법으로는 통계학적 방법(Statistical Method)과 결정론적 방법(Deterministic Method)이 있으며 결정론적 방법은 세관손상 기구에 대한 이론적, 실험적 해석을 통하여 주요 지배인자를 파악하고 해당 원전의 측정치를 기준으로 결함의 생성/성장을 결정한다. 그러나 증기발생기에는 많은 세관들이 있고 이들 각각은 화학적 조건, 온도조건, 재료특성들이 서로 다르기 때문에 결정론적 방법을 사용하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 통계학적 방법을 사용하여 증기발생기 세관손상의 현황과 향후 경향을 예측하였다. 통계학적 방법은 세관결함이 발생할 확률밀도함수를 이용하여 경험적으로 결함 성장률을 예측한다. 과거의 세관손상 이력을 분석함으로써 확률밀도함수의 모수를 결정하고, 이것을 미래의 결함 성장 예측에 이용한다. 이 분석이 신뢰성을 갖기 위해서는 적합한 확률밀도함수를 선택하는 것이 중요하다(Choi, 2001; Park, 1989). 확률밀도함수는 미 전력연구소(EPRI)가 권장하는 와이블(Weibull) 함수를 이용한다.

표 3. 증기발생기 기간별 관막음 수량

순번	사용 기간(일)		관막음 수	비고
	~부터	~까지		
1	0	317	29	
2	317	582	7	
3	582	810	46	
4	810	1175	63	
5	1175	1621	154	
6	1621	1973	89	
7	1973	2037	169	
8	2037	2424	38	
9	2424	2817	18	

주) · '88년 정비시 '86년 11월까지 설치된 모든 관 막개를 제거하고 검사 후 관 재생을 하거나 사용 조치하였으므로 '88. 05. 30 기준으로 하여 그 이후 자료를 활용함.
 · 계획 예방 정비 기간은 운전 조건이 아니므로 기간에서 제외함.
 · 관재생(Sleeving) 수량에 따른 관막음은 고려하지 않음.

와이블 분포의 분포함수는 $F(t) = 1 - \exp[-(t/a)^\beta]$ 이며 증기발생기에서 획득할 수 있는 고장 데이터의 형태는 <표 3>과 같이 일정 한 주기로 검사를 수행하여 고장이 발생한 관은 관막음하게 되므로 기간별 관막음 수량, 즉 기간별 고장 수량에 대한 데이터가 주어진다. 이와 같이 각 구간에서의 고장 개수가 주어진 자료일 때 우도함수 및 로그 우도함수는 아래와 같이 정의된다.

$$m = \text{기간 수}, n_i = i \text{기간의 고장 개수},$$

$$t_{si} = i \text{기간의 시작시점}, t_{Ei} = i \text{기간의 완료 시점}$$

라고 정의하면

$$L(\theta) = \prod_{i=0}^m \left[\frac{F(t_{Ei}) - F(t_{si})}{R(T)} \right]^{n_i}$$

$$\log L = \sum_{i=1}^m n_i [\log \{F(t_{Ei}) - F(t_{si})\} - \log R(T)]$$

$$= \sum_{i=0}^m \left[n_i \log \left\{ \exp - \left(\frac{t_{si}}{a} \right)^\beta \right\} - \exp \left\{ - \left(\frac{t_{Ei}}{a} \right)^\beta \right\} \right. \\ \left. - n_i \exp \left\{ - \left(\frac{T}{a} \right)^\beta \right\} \right]$$

위의 로그 우도함수 식은 α, β 에 대한 비선형 방정식이므로 이 식을 최대화 하는 α, β 의 최우 추정치(Maximum Likelihood Estimation)를 구하는 것이 문제가 된다. 추정치를 구하기 위해 다양한 근사적 알고리즘이 개발되어 있는데 본 논문에서는 quasi-Newton 방법을 이용하였다. <표 3>을 사용하여 증기발생기에 사용되는 각 세관의 수명에 대한 분포를 추정해 보면 척도모수($\hat{\alpha}$)가 12,932 이고 형상 모수(β)가 3.1133인 와이블 분포가 된다.

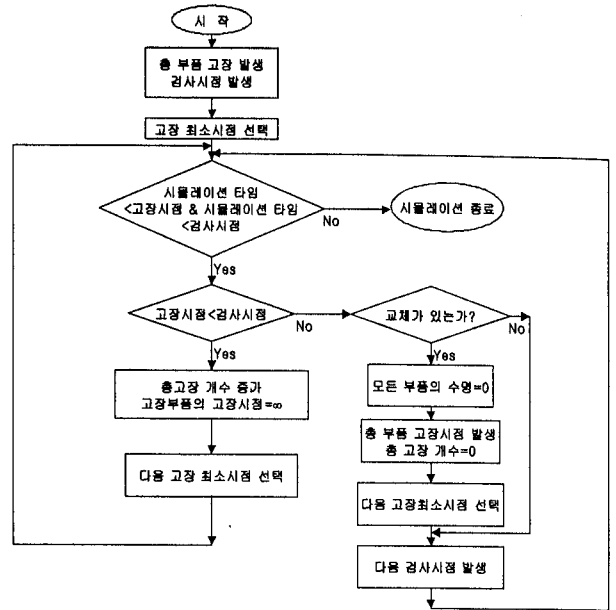


그림 4. 시뮬레이션 흐름도.

4. 시뮬레이션 분석

3절에서 증기발생기 최적교체주기를 결정하기 위해 고려되어야 하는 비용요소들과 고장분포 매개변수들을 추정하였다. 이를 이용하여 최적교체주기를 결정하여야 하는데 이 최적화 문제는 기존의 정비정책모형으로는 풀 수 없는 다 부품 최적 교체정책(유한시평)결정문제로서 수리모형으로 접근하기가 매우 어렵다. 그래서 본 논문에서는 시뮬레이션을 이용하여 다양한 교체주기에 대한 총비용을 추정해서 이를 기반으로 적절한 교체주기를 결정하고자 한다. 시뮬레이션의 흐름(<그림 4>)에서 보면 교체주기가 결정되면 각 작동하는 세관의 고장시점을 생성시켜 최소고장시간을 구하고 이 시점으로 시뮬레이션시간을 진행시키며 정비비용과 감발 손실을 변화시키고 다음 고장시점 혹은 교체시점으로 진행해 나간다.

시뮬레이션을 진행하면서 계속하여 고장시점을 생성하여야 하는데 이 경우 각 세관의 사용기간에 따라 잔여수명을 발생시켜야 하므로 와이블 분포에서 잔여수명의 발생방법은 다음의 식을 이용하였다(Park, 1989).

$$\text{Fail Time} = \text{Now Time} + a \left[\left(\frac{\text{Age}}{a} \right)^\beta - \log(U)^{1/\beta} \right] - \text{Age}$$

Now Time = 시뮬레이션 시작시점에서는 0,

Age = 교체 후에는 0

본 논문에서 증기발생기 교체시기 결정을 위하여 크게 3가지 형태의 수명 기간을 설정하여 시뮬레이션을 실시한다. 첫째는 초기 설계 수명 기간인 30년 동안(1978~2008) 원자력발전소가 운영된다고 가정하고 1998년 증기발생기 교체 이후로 잔여 기간인 10년[3년경과 + 잔여 기간 7년] 동안에 대한 분석

표 4. 설계수명기간의 비용

단위: 억(원)

주 기	총비용	표준편차	교체비용	표준편차	고장 정비비용	표준편차	전력 감발 비용	표준편차
무교체	34.86	0.45	0	0	34.86	0.45	0	0
1	1024.88	0.13	1000	0	24.88	0.13	0	0
2	1024.58	0.07	1000	0	24.58	0.07	0	0
3	1024.80	0.09	1000	0	24.80	0.09	0	0
4	1025.35	0.20	1000	0	25.35	0.20	0	0
5	1026.70	0.33	1000	0	26.70	0.33	0	0

을 수행했다. 그리고 원전에 대한 수명연장에 대비하여 그 기간을 10년 연장할 경우인 20년 [3년경과+ 잔여 기간 7년+ 수명 연장 10년]과 20년 연장할 경우인 30년[3년경과 + 잔여 기간 7년+ 수명 연장 20년]에 대한 분석을 한다.

4.1 설계수명 기간에 대한 분석

고리 1호기 증기발생기는 설계 기준 수명 기간의 3분의 2지점에서 교체 작업이 이루어졌다. 따라서 여기서의 설계 수명 기간이란 잔여 수명기간인 후반 3분의 1 기간으로 그 기간이 10년을 의미한다. 설계 수명 기간의 비용은 <표 4>와 같다. 설계 수명 동안은 분석기간이 길지 않다. 증기발생기를 교체하지 않을 경우에 세관 관막음으로 인한 정비 비용은 34.86억 원이 소요되며 출력 감발은 발생되지 않는다. 반면에 증기발생기를 교체하는 경우에는 1,024억 원이 소요되며 전체 비용의 98%가 증기발생기 교체 비용이다. 또한 대상 기간이 짧으므로 추가적인 정비 비용 발생이 적어 총비용은 거의 일정하다. 총비용의 대부분이 증기발생기 교체에 해당하는 비용으로 설계 수명 기간 중에 증기발생기의 교체는 요구되지 않는다. 이러한 결과로 미루어 보아 설계 수명 동안의 운영만을 고려한다면 '98년 이전에 증기발생기를 교체했다라면 훨씬 경제성이 높을 것으로 판단된다.

4.2 수명연장 I(+10년)에 대한 분석(<표 5>)

설계 기준 수명 기간에 수명 연장으로 10년이 연장된다고 가정하면 [잔여 설계 수명 기간+10년]이 분석 대상기간이 된다. 증기발생기를 교체하지 않을 경우에는 세관 관막음으로 인한 전력 손해 비용이 87.32억 원 소요된다. 반면에 증기발생기를 교체할 경우에는 첫 주기에 1,114.74억 원이 소요되며 전체 비용의 90%가 증기발생기 교체 비용이다. 정비 비용은 교체시점 6주에서 가장 좋은 값을 가지며 총비용도 가장 낮은 상태이다. 증기발생기의 교체는 요구되지 않는다.

4.3 20년 수명연장에 대한 분석 I(<표 6>)

설계 수명 기간에 수명 연장으로 20년이 연장된다고 가정하면 [잔여 설계 수명 기간+20년]이 분석 대상기간이 되어 사용기간이 길어지므로 증기발생기의 교체가 요구될 가능성이 크므로 이 수명 연장기간에 대해서는 앞의 경우와 같은 단순 분석과 이자율을 적용한 분석을 통해 충분한 검토를 하고자 하는데 이자율 미 적용시 비용은 <표 6>과 같다. 증기발생기를 교체하지 않을 경우에는 3996.39억 원이라는 막대한 비용이 소요되며 이중의 대부분(83%)은 장기간 운전으로 증가하게 되는 관막음률에 의한 전력 감발 손해 비용이다. 총비용의 경향은

표 5. 수명연장 I(+10년) 기간의 비용

단위: 억(원)

주 기	총비용	표준편차	교체비용	표준편차	고장 수리비용	표준편차	전력 감발비용	표준편차
무교체	271.03	16.06	0	0	183.71	3.42	87.32	13.34
1	1114.75	1.64	1000	0	114.75	1.64	0	0
2	1102.65	1.71	1000	0	102.65	1.71	0	0
3	1093.26	1.44	1000	0	93.26	1.44	0	0
4	1087.02	0.97	1000	0	87.02	0.97	0	0
5	1083.41	0.74	1000	0	83.41	0.74	0	0
6	1082.34	0.88	1000	0	82.34	0.88	0	0
7	1083.46	0.73	1000	0	83.46	0.73	0	0
8	1087.34	1.09	1000	0	87.35	1.09	0	0
9	1093.92	0.99	1000	0	93.92	0.99	0	0
10	1103.03	1.51	1000	0	103.03	1.51	0	0
11	1116.38	1.47	1000	0	116.38	1.47	0	0
12	1132.90	2.48	1000	0	132.90	2.48	0	0
13	1170.66	8.09	1000	0	152.65	3.02	18.01	5.68

표 6. 수명연장 II(+20년) 기간의 비용

단위: 억(원)

주기	총비용	표준편차	교체비용	표준편차	고장 수리비용	표준편차	전력 감발비용	표준편차
무교체	3996.39	77.2	0	0	679	7.92	3316.90	69.64
1	2874.04	62.2	1000	0	444.80	6.80	1429.24	55.77
2	2373.62	45.72	1000	0	384.00	5.77	989.62	40.50
3	1991.85	45.06	1000	0	335.31	5.80	656.54	39.75
4	1695.73	35.64	1000	0	293.37	5.14	402.37	30.89
5	1466.96	27.22	1000	0	257.95	4.92	209.01	22.63
6	1311.50	15.65	1000	0	229.07	3.21	82.43	12.81
7	1227.49	11.92	1000	0	208.43	3.74	19.06	8.57
8	1193.55	2.80	1000	0	193.55	2.80	0	0
9	1184.83	2.38	1000	0	184.83	2.38	0	0
10	1181.20	2.43	1000	0	181.20	2.43	0	0
11	1184.97	2.23	1000	0	184.98	2.22	0	0
12	1193.70	2.76	1000	0	193.70	2.76	0	0
13	1229.61	9.03	1000	0	210.23	2.67	19.38	6.88
14	1328.39	17.09	1000	0	232.84	3.75	95.55	13.93
15	1484.46	24.72	1000	0	261.34	4.32	223.13	21.14
16	1725.76	35.92	1000	0	297.88	5.30	427.87	30.82
17	2032.90	43.36	1000	0	339.21	5.69	693.69	38.08
18	2446.18	67.01	1000	0	391.10	7.17	1055.08	60.25
19	2912.12	61.73	1000	0	447.20	6.79	1464.92	55.23
20	3538.77	66.11	1000	0	516.93	7.38	2021.83	59.08
21	4190.16	87.29	1000	0	588.36	9.18	2601.80	78.55

전체적으로 아래로 오목한 곡선 모양을 가진다. 총비용이 가장 낮은 시점으로 증기발생기 교체를 위한 최적 교체시기는 「교체시점 10」(운전 주기 15개월을 고려하면 2013년 중반)에서 발생되었다. 관막음을 증가로 인한 전력 감발비용은 양극화 현상을 보인다. 이것은 수명 연장(+20년)에 따라 증기발생기의 최적 교체시기 결정에 대한 정비 정책이 얼마나 중요한지를 보여주는 하나의 좋은 예라고 할 수 있다. 특히 관막음을 증가로 인한 전력 감발 비용은 전력회사의 분사(分社)와 아시아 주변 국가보다 저렴한 전기를 사용하고 있다는 점을 감안하면 전기 요금의 증가 가능성도 배제할 수 없으며 미래에는 상대적으로 큰 결정 변수가 될 것으로 판단된다. 세관 정비 비용도 주기에 따라 크게 변화함을 보여준다.

4.4 20년 수명연장에 대한 분석 2(이자율 5% 적용한 <표 7>)

20년 수명 연장의 이자율 5% 적용시 이자율을 고려하므로 출력 감발비용은 이자율 미 적용시 보다 약 1/3 정도 감소했으며 정비 비용은 전체적으로 이자율 미 적용시와 동일한 모양으로 변화하며 1/3 정도의 비용 감소를 보여준다. 총비용은 상대적으로 큰 변화를 보이기 시작하며 「교체시점 13」(운전 주기 15개월을 고려하면 2017년 중반)에서 발생되었다. 이것은 증기발생기 교체 비용이 다른 비용에 비해 상대적으로 크며, 이자율 적용에 따라 교체시점 뒤쪽으로 갈수록 비용이 경감되기 때문이다.

4.5 20년 수명연장에 대한 분석 3(이자율 10% 적용 <표 8>)

이자율 10% 적용시 증기발생기 세관 손상에 따른 출력 감발 비용은 이자율 5% 적용시에 비해 약 1/3 정도 감소했으며 정비 비용 경향은 이자율 5% 적용시와 유사하며 비용도 감소했으며 정비 비용 최저 시점은 「교체시점 7」에서 발생되었다. 이자율이 10%로 커짐에 따라 총비용은 증기발생기 교체 여부에 따라 상당히 큰 차이를 보여 주는데 이러한 비용 차이는 증기발생기 교체 비용이 정비 비용이나 출력 감발 비용보다 상대적으로 크기 때문이다. 총비용의 최저 시점은 「교체시점 14」(2018년 중반)에서 발생되었으며 이것은 상대적으로 큰 증기발생기 교체 비용을 이자율 10%로 적용함에 따라 크게 경감되었기 때문이다.

5. 결론

전력산업의 구조 개편으로 전력산업 역시 경쟁체제가 불가피하게 되었으며 이는 원가관리에 의한 생산성 평가의 중요성이 크게 부각됨을 의미한다. 한국 원전은 운영면에서 이제 성년이 되었으며 이제 설비의 노후화로 최적 교체시기를 검토하여 경제적인 운영관리가 필요한 시점이다. 본 논문은 설비의 노후화 부분이 가장 민감한 증기발생기에 대한 비용을 고려한 최적 교체시기를 설계 수명 기간 내의 운영과 수명 연장 기간

표 7. 수명연장 II(+20년) 기간의 비용(i=5)

단위: 억(원)

주기	총비용	표준편차	교체비용	표준편차	고장 수리비용	표준편차	전력 감발비용	표준편차
무교체	1354.69	37.01	0	0	273.39	4.06	1081.29	33.16
1	1556.33	21.09	940.86	0	177.28	2.31	438.18	18.97
2	1346.36	18.92	885.22	0	156.39	2.45	304.74	16.70
3	1167.17	14.28	832.88	0	138.11	2.34	196.17	12.20
4	1022.33	8.89	783.63	0	123.26	1.51	115.43	7.60
5	910.61	6.34	737.29	0	111.89	1.16	61.42	5.52
6	821.22	5.48	693.69	0	103.23	1.41	24.29	4.31
7	755.57	3.59	652.67	0	97.26	1.33	5.63	2.44
8	708.22	1.06	614.07	0	94.15	1.06	0	0
9	671.11	0.95	577.76	0	93.34	0.95	0	0
10	638.54	1.13	543.59	0	94.94	1.13	0	0
11	611.02	1.09	511.45	0	99.56	1.09	0	0
12	587.13	1.52	481.21	0	105.92	1.52	0	0
13	575.46	4.04	452.75	0	114.04	1.69	8.66	2.73
14	595.08	7.75	425.98	0	125.22	1.94	43.88	6.09
15	639.39	12.28	400.79	0	138.26	2.34	100.34	10.34
16	706.76	15.87	377.09	0	152.00	2.63	177.66	13.52
17	802.02	16.09	354.79	0	168.10	2.51	279.12	13.82
18	933.02	22.53	333.81	0	187.76	2.97	411.44	19.92
19	1073.27	23.40	314.07	0	206.11	3.27	553.08	20.44
20	1235.65	26.94	295.50	0	227.64	3.37	712.50	23.74
21	1423.36	32.71	278.02	0	249.74	3.82	895.59	29.20

표 8. 수명연장 II(+20년) 기간의 비용(i=10)

단위: 억(원)

주기	총비용	표준편차	교체비용	표준편차	고장 수리비용	표준편차	전력 감발비용	표준편차
무교체	513.16	11.00	0	0	128.45	1.58	384.71	9.65
1	1116.11	7.43	887.74	0	82.98	1.10	145.39	6.47
2	958.37	5.20	788.08	0	73.98	0.99	96.29	4.38
3	828.59	4.87	699.62	0	67.39	0.85	61.57	4.14
4	719.53	3.63	621.08	0	62.19	0.74	36.26	3.00
5	627.89	2.77	551.36	0	58.36	0.75	18.16	2.09
6	552.28	1.51	489.46	0	55.90	0.51	6.90	1.11
7	491.01	1.19	434.52	0	54.92	0.60	1.56	0.70
8	440.72	0.72	385.74	0	54.97	0.72	0	0
9	398.57	0.68	342.44	0	56.13	0.68	0	0
10	362.10	0.82	304.00	0	58.10	0.82	0	0
11	331.35	0.86	269.87	0	61.48	0.86	0	0
12	304.55	0.97	239.57	0	64.97	0.97	0	0
13	287.20	2.38	212.68	0	69.87	0.96	4.64	1.64
14	284.95	4.13	188.80	0	75.25	1.21	20.88	3.13
15	293.44	5.55	167.61	0	81.03	1.38	44.79	4.48
16	315.54	7.54	148.79	0	87.44	1.55	79.30	6.10
17	344.16	8.54	132.09	0	93.50	1.59	118.56	7.16
18	384.78	12.08	117.26	0	100.62	1.70	166.88	10.63
19	425.31	10.67	104.10	0	107.12	1.53	214.08	9.30
20	480.54	11.09	92.41	0	114.55	1.71	273.57	9.61
21	528.22	13.41	82.04	0	120.84	1.94	325.34	11.74

까지의 운용으로 나누어 고찰하였다. 분석을 위해 비용요소와 고장분포를 현장자료로부터 추정하였으며 이를 바탕으로 고리 1호기의 증기발생기에 대한 최적교체주기결정을 시뮬레이션을 통해 분석한 결과 첫째, 설계 수명기간 내의 운용은 증기발생기를 교체하지 않을 경우에 세관 관막음으로 인한 정비비용은 34.86억 원이 소요되며 출력 감발은 발생되지 않는다. 반면에 증기발생기를 교체하는 경우에는 1,024억 원이 소요되며 전체 비용의 98%가 증기발생기 교체 비용으로 설계 수명기간 중에 증기발생기의 교체는 요구되지 않는다. 이러한 결과로 미루어 보아 설계 수명 기간 동안의 운용만을 고려한다면 1998년 이전에 증기발생기를 조기 교체했다더라면 훨씬 경제성이 높을 것으로 판단된다. 수명 연장기간 I(+10년)의 경우는 총비용 부분이 설계 수명운전과 거의 유사하나 총비용과 교체 비용의 간격 부분은 설계 수명운전시보다 확연하다. 이러한 간격 부분이 다소 커진 것은 정비 비용이 설계 수명운전의 경우보다 증가했기 때문이다. 증기발생기의 교체는 요구되지 않는다. 셋째, 수명 연장기간 II(+20년)의 경우는 단순 비용 분석과 이자율 적용 분석을 같이 하였다. 단순 비용 분석에서 관막음을 증가로 인한 출력 감발 비용은 뚜렷한 양극화 현상을 보인다. 이것은 수명 연장(+20년)에 따라 증기발생기의 최적 교체시기 결정에 대한 정비 정책이 얼마나 중요한지를 보여주는 하나의 좋은 예이다. 단순 비용 분석에서 이자율을 5%, 10%로 증가시켜 적용할수록 증기발생기 교체 여부에 따른 총비용은 상당히 큰 차이를 보여주고 있다. 이러한 비용의 큰 차이는 증기발생기 교체 비용이 정비 비용이나 출력 감발 비용보다 상대적으로 크기 때문이며 이자율을 5%에서 10%로 적용해 감에 따라 더 큰 영향 요소로 작용하여 총비용의 최저 시점을 뒤쪽으로 이동하게 한다.

총비용 분포는 전체적으로 아래로 오목한 곡선 모양을 가지며 가장 아래 쪽 부분은 총비용이 가장 낮은 시점으로 증기발생기 교체를 위한 최적 교체시기임을 의미한다. 단순 비용 분석과 이자율의 적용에 따른 증기발생기 최적 교체는 「교체시점 10~14」에서 예상되며 원자력발전소의 운전 주기(Operation Cycle) 15개월을 고려하면 그 시기는 2013년에서 2018년이 될 것으로 평가된다. 특히, 전력회사의 분사와 아시아 주변 국가에 비해 저렴한 전기를 사용하고 있다는 점을 감안하면 전기 요금의 인상 가능성을 배제할 수 없으며 따라서 미래의 교체시기 결정에는 출력 감발 비용이 상대적으로 큰 결정 변수가 될 것으로 판단된다.

향후에는 증기발생기의 모든 세관 결함을 분석 대상으로 하

는 다각적인 연구가 필요하며, 기기 성능의 주요 운전 및 성능 변수값을 정확히 기록 관리하는 것이 의사 결정의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- Beichelt, F.(1993), A Unifying Treatment of Replacement Policies with Minimal Repair, *Naval Research Logistics*, 40, 51-67.
- Choi, C. H.(2001), *System Maintenance & Assurance Policy Under Uncertain Life Period*, Pusan National University Ph. D. Thesis.
- Dekker, R.(1996), Applications of Maintenance Optimization Models: A Review and Analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, 51, 229-240.
- Gertsbakh, I. E.(1977), *Models of Preventive Maintenance*, North-Holland Publishing Company.
- Jack, N.(1991), Repair and Replacement Modelling over Finite Time Horizons, *Journal of the Operational Research Society*, 42, 759-766.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(1995), *Life Cycle Management of Nuclear Power Plant*, Ye-Mun Sa, 9-29.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(1998), *Steam Generator Review Report (II) in '97*, KEPCO Power Generation Division.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(1999a), *The 6th Report of Steam Generator Task Force*, KEPCO Power Generation Division.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(1999b), *Experience Paper of KO-RI Unit 1 Steam Generator Replacement*, Cheong-San Mun Wha Sa.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(2000a), *Fundamental of Nuclear Power System*, Ye-Mun Sa, 11-14.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(2000b), Development of Economic Evaluation on Nuclear Power Plant, *Journal of World Electric Power Information*.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(2000c), *Steam Generator*, Ye-Mun Sa, 18-27.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(2000d), *Steam Generator Facility*, Ye-Mun Sa, 3-5.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(2001a), "Think 30" Program & Life Extension of Calvert Cliffs Nuclear Power Plant, *Journal of World Electric Power Information*.
- Korea Electric Power Corporation(KEPC)(2001b), *Statistics of Electric Power in Korea*, Sam-Bo Art, 16-17.
- Korea Power Plant Engineering Corporation(KPPEC)(1995), *Propriety Report of KO-RI Unit 1 Steam Generator Replacement*, Korea Electric Power Corporation.
- Nelson, W.(1982), *Applied Life Data Analysis*, John Wiley & Sons.
- Park, K. S.(1989), *Reliability Engineering & Maintenance Theory*, Sun Jung Dang, 192-203.
- Sarf, P. A.(1999), On the Application of Mathematical Models in Maintenance, *European J. of Operational Research*, 99, 493-506.
- Valdez-Flores, C. and Feldman, R. M.(1989), A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit Systems, *Naval Research Logistics Quarterly*, 36, 419-446.



윤원영

서울대학교 산업공학과 학사
한국과학기술원 산업공학과 석사
한국과학기술원 산업공학과 박사
현재: 부산대학교 산업공학과 교수
관심분야: 신뢰성공학, 시뮬레이션



허정훈

부산공업대학교 기계공학과 학사
부산대학교 산업대학원 산업공학 석사
현재: 한국수력원자력(주) 원자력교육원
관심분야: 원전의 신뢰도와 수명관리, 원전의
폐로관리, 방사선계측기의 불확도 및 검출
효율, 원전의 방사선방호와 특수 작업관리