'2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

정비효율성 감시 수행을 위한 예상 비용 평가 및 편익 항목 조사

The Anticipated Costs Analysis and Benefit Items Survey against Performing the Maintenance Rule

황미정, 김길유, 양준언

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 발전소 성능 유지에 기여를 하는 것으로 알려진 정비효율성 감시 수행을 위해 예상되는 비용을 평가하고, 수행 결과 기대되는 편익 항목을 선정했다.

과거 국내에서는 국가 정책에 따라 단일 전력회사에서 국내의 모든 전력 공급을 담당해왔다. 그러나 최근 원자력 및 수력 발전과 화력 발전 분야로 전력 공급 회사가 분리되어, 가격 경쟁력이 없는 발전원은 전력 시장에서 도태할 수 밖에 없는 상황으로 변화하고 있다. 그러므로 원자력 발전의 우선 목표가 발전소의 안전 운전에 있다 하더라도, 안전성을 유지 또는 향상시키기 위해 너무 많은 비용이 소요된다면 발전 사업자의 입장에서는 원전 경제성의 저하로 인하여 원전의 운전 및 신규 도입에 어려움을 갖게 될 것이다.

그러므로 정비효율성 감시를 위해 발전사업자가 투자해야 할 비용을 분석하고, 예상되는 편익을 분석함으로써 정비효율성 감시의 타당성을 검토해 보고자 한다.

Abstract

In this paper, we surveyed the cost and benefit items and evaluated the costs against performing the Maintenance Rule.

In the past, only one electric power company had provided the electricity without free competition in Korea. In these days, however, the electric power company was divided into two parts by the sources: atomic & hydraulic generation and thermal-power generation. Therefore, the generation sources that don’t have competitiveness at

the price will be weeded out in the electric power market. Although the preferential goal is on the safe operation at the Nuclear power Plants (NPPs), if too much money is required to maintain or improve the safety of the NPP, the licensee could hesitate to adopt the program related to the safety even though it is a good one.

Since the Risk-Informed Applications (RIA) have been using for a plant operation in recent, the condition of a plant might be changed. Therefore, considering the affects of the RIA, a method to keep the capability through the monitoring the maintenance effectiveness has been proposed. However, to perform this, a number of works, continuous collecting data & monitoring the maintenance effectiveness and understanding the reason of degrading capability, should be preceded. Therefore, a lot of man-hour is needed to develop and to manage the application method, and the licensee should pay the costs. Therefore, in the domestic circumstance, it is necessary to evaluate the cost to monitor the maintenance effectiveness. Hence, we are going to examine the cost to perform the MR and its anticipated benefit lists.

1. 서 론

본 논문에서는 현재 미국에서 시행되어 발전소 성능 유지 및 향상에 기여를 하고 있는 것으로 파악된 정비효율성 감시 프로그램[1] 수행을 위해 예상되는 비용 평가와 프로그램 수행 결과 발생될 수 있는 편익 항목을 조사했다.

과거 국내 전력 시장은 자유 경쟁 체제가 아닌 국가 정책에 의해 전력 공급을 해 왔다. 그러나 최근의 전력시장 민영화 구도에 따라, 원자력 및 수력과 화력 분야로 분리가 이루어졌다. 이에 따라, 가격 경쟁력이 없는 발전원은 도태될 수 있는 상황에 이르렀다.

화석 연료 자원이 없는 국내 여건을 고려할 때, 원자력발전은 값싸고 안정적인 발전원으로 간주되어 우리나라의 기조 전력으로 사용되어 오고 있다. 그러나 핵폐기물 처리와 안전성 유지를 위한 비용이 과도하게 소요되는 단점을 가지고 있다. 그러므로 원자력발전의 우선 목표가 발전소의 안전 운전에 있다 하더라도, 안전성을 유지 또는 향상시키기 위해 너무 많은 비용이 소요된다면 발전 사업자의 입장에서는 안전성 유지를 위한 프로그램이라 할 지라도 도입을 망설이게 될 것이다. 그러므로 안전성을 향상시키기 위한 프로그램 도입 시 의사 결정에서 비용•편익 분석(Cost-Benefit Analysis)은 중요한 사안으로 부각된다.

근래에는 위험도 정보를 활용한 발전소 운영이 이루어짐에 따라, 발전소의 상태가 변경될 수 있다. 따라서, 이로 인한 발전소 성능의 변화도 발생할 수 있다. 이에 대한 대처 방안으로 미국에서는 지속적인 발전소의 정비효율성 감시를 통해 발전소의 성능을 유지하는 방안이 제시되었다. 그러나 이를 시행하기 위해서는 정비효율성 감시 체계 구축을 위한 일련의 작업들이 선행되어야 하고, 계속적인 발전소 정비 자료 수집 및 정비효율성 감시 및 성능 저하 원인 파악 그리고 정기적인 성능평가가 이루어져야 한다. 그러므로 적용 방법 개발 및 운영을 위해 많은 인력이 투입되어야 하고, 이에 따른 비용을 발전사업자가 부담해야 할 것이다.

현재, 위험도 정보를 활용한 발전소 운영 및 성능기반 규제가 활발히 수행되고 있는 미국의 경험을 비추어 보면, 위험도 정보를 활용한 발전소 운전을 허용하고 성능기반 규제 체제로 전환하기 위해 정비규정(10CFR 50.65, Maintenance Rule)[1]을 꼭 필요한 기반으로 판단하고 있다. 그러나 이를 수행하기 위해서 많은 시행 착오를 거쳐 왔고, 시행 기반을 다지기 위한 비용 또한 적지 않게 투입된 것으로 알려지고 있다. 그러나 정비규정 도입 초기에 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 비용•편익 분석을 수행했을 뿐이고[2], 발전사업자가 투자한 정확한 비용에 대한 실제적인 평가는 수행되지 않았다.

그러므로 국내에 정비규정을 도입하기 이전에 정비효율성 감시를 수행하기 위한 비용이 어느 정도 소요될 것인지를 평가해 볼 필요성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 정비효율성 감시 프로그램 수행을 위해 사업자가 투자해야 할 비용을 분석하고, 예상되는 편익항목을 분석함으로써 정비효율성 감시의 타당성을 조사했다.

2. 국내 정비효율성 감시를 위한 비용 분석

2.1 비용 항목 및 국내 원전 분류

본 논문에서는 여건상 정비효율성 감시를 위한 비용만을 분석하고, 편익에 대해서는 항목만을 선정하였다.

정비효율성 감시를 수행하는데 필요한 비용은 기기의 성능, 품질, 자료의 수집 정도 그리고 적용방법과 같은 여러 인자에 의해 좌우된다.

정비규정에서는 발전소의 설계나 구조의 변경을 필요로 하지는 않는다. 뿐만 아니라 발전소 변경을 위한 계획 수립, 설계와 설치를 수반하는 조치도 수행하지 않는다. 그러므로 정비규정 시행으로 인한 설치에 따른 발전소 정지에 의한 비용 또는 건설 비용은 고려하지 않아도 된다. 즉, 특별한 경우를 제외하고는 하드웨어적인 면에 있어서의 비용은 고려할 필요가 없다.

그러므로 정비규정 수행을 위한 비용 평가에서 고려할 사항은 소프트웨어적인 것이다. 발전소 운영 사업자가 어떤 SSCs(Structures, Systems, Components)의 성능이나 상태에 대한 목표를 설정하고 이들 SSC를 감시하고 설정된 목표를 만족시키지 못할 경우, 조치를 취하기 위한 비용만을 고려하면 된다. 이들 비용은 정비규정 적용을 위한 초기 비용과 매년 반복적으로 성능감시를 하고 이에 따른 조치를 위한 반복 비용으로 구분할 수 있다.

비용 평가를 위해서 기존에 수행되고 있는 성능감시 관련 프로그램의 활용 가능 정도를 고려하여 정비규정 수행 비용을 분석한다.

비용 항목은 적용 방법 개발, 적용 범위 설정, 성능기준 설정 등 정비규정 적용 초기에 한번만 수행하면 되는 초기 비용과 매년 정비 효율성 감시를 위해 반복적으로 수행되는 업무에 대한 반복 비용으로 분류한다[3][4].

초기 비용 평가를 위해 예상되는 항목은 다음과 같이 선정했다 :

- 정비규정 적용 방법 및 절차서 개발 비용
- 초기 교육 비용
- 전자시스템 개발 및 구축 비용
- 초기 적용 범위 설정 및 검토 비용
- PSA 모델 보완 및 검토 비용
- 위험성 정도 결정과 성능기준 설정
- 검토(V&V) 비용

반복 비용 평가를 위해 예상되는 항목은 다음과 같이 선정했다 :

- 발전소 변화에 따른 범위 재설정
- 성능감시
- 고장원인 분석 및 조치
- 주기적인 평가
- 보고서 작성

2001년 현재 상업운전 중인 국내 원자력발전소의 수는 16기이다. 이들 발전소의 유형은 크게 가압경수로와 가압중수로로 분류할 수 있지만, 원자로 공급자와 터빈발전기의 공급자가 다양하고 용량 또한 다양하다. 그러므로 비슷한 유형의 발전소를 분류하고 그룹별로 정비효율성 감시 계획을 수립하면 비용을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

상업운전 중인 16개 원전의 현황을 원자로형 및 원자로와 터빈 발전기의 공급자에 따라 정리하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 상업운전 중인 국내 원전 현황

호기	원자로형	공급자	
		원자로	터빈 발전기
고리 1	가압경수로	웨스팅하우스	GE
고리 2	〃	〃	〃
고리 3	〃	〃	〃
고리 4	〃	〃	〃
월성 1	가압중수로	AECL	Parson
월성 2	〃	한중㈜/AECL	한중㈜(GE)
월성 3	〃	〃	〃
월성 4	〃	〃	〃
영광 1	가압경수로	웨스팅하우스	웨스팅하우스
영광 2	〃	〃	〃
영광 3	〃	한중㈜/원연(GE)	한중㈜(GE)
영광 4	〃	〃	〃
울진 1	〃	프라마톰	알스톰
울진 2	〃	〃	〃
울진 3	〃	한중㈜/원연(ABB CE)	한중㈜(GE)
울진 4	〃	〃	〃

앞서 언급한 바와 같이, 우리나라는 원전 발전사업자가 하나로 단일화되어 있으므로 비슷한 유형의 발전소끼리 그룹화하여 정비효율성 감시 수행을 위한 작업을 수행하면, 중복 업무에 대한 투입 인력을 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 그러므로 비용 평가를 위해 16개의 운전 중인 발전소를 원자로형과 공급자에 따라 비슷한 유형으로 그룹화하였다.

비슷한 유형의 발전소는 초기비용 계산을 위한 업무 수행에서 상호간에 자료를 참고할 수 있으므로, 인력 투여면에서 이득이 있을 것이다. 표 2에서 보는 바와 같이 초기 비용 평가를 위해서는 5개의 그룹으로 분류하였고, 반복비용 평가를 위해서는 7개의 그룹으로 분류하였다. 그리고 정비효율성 감시 수행 시 참고 자료로 활용될 수 있는 현재 각 발전소에서 운영 중인 성능 감시 프로그램을 조사하였다. 초기 비용 평가를 위해 분류된 5개의 그룹은 원자로형과 원자로 공급자를 고려하여 분류하였고, 반복비용 평가를 위한 7개의 그룹은 발전소 운전 중심으로 분류하였다.

표 2. 유형별 발전소 분류와 운영 중인 프로그램

호기	그룹		운영 중인 프로그램		
	반복비용 평가용	초기비용 평가용	Risk Monitor	Reliability Centered Maintenance	Periodic Safety Review
고리 1,2	1	I	O (준비 중)		O
고리 3,4	2	II			
영광 1,2	3			O	
영광 3,4	4	III		O (EDG)	
울진 3,4	5		O(준비 중)		
월성 1	6	IV			O
월성 2,3,4	7	V			

2.2 비용 평가

비용·편익 분석에서의 의사결정 기본 원칙은 가장 큰 순편익을 제공해 주는 대안을 선택하라는 것이다. 일반적인 경제성 평가에 사용되는 대안 비교 기준으로는 순현재가치 (Net Present Value ; NPV), 내부수익률 (Internal Rate of Return), 순평균수익률 (Net Average Rate of Return), 비용·편익비율 (Cost – Benefit Ratio), 비용변제기간 (Payback Period) 등이 있다. 이 가운데 비용·편익 분석에서는 순현재가치와 비용·편익비율이 많이 사용되고 있다. 이들 두 가지 기준 중 어느 것을 사용하여도 대안의 평가 순위는 동일하다. 따라서, 어느 기준을 사용하여도 그 결과에 변화가 있는 것은 아니다. 단지, 사용되는 기준이 다를 뿐이다. 그러나 본 분석의 목적은 대안 평가가 아니고 어떤 프로그램의 수행을 위해 필요한 비용만을 평가하는 것이므로, 순현재가치를 계산하는 식을 사용하여 정비효율성 감시를 위한 비용을 평가하고자 한다.

어떤 사업 수행에 대한 편익과 비용은 일시에 발생하는 것이 아니라 수년에 걸쳐 발생하는데, 이에 대한 타당성 여부는 현재의 시점에서 평가되어야 한다. 그러므로 미래에 발생하는 편익과 비용을 모두 현재가치로 환산해서 비교해야 한다. 이는 금전이 시간적으로 다른 가치를 갖기 때문이다. 즉, 오늘 갖고 있는 만원은 그것으로 투자를 해서 수익을 올릴 수 있고, 또한 인플레이션으로 인해 구매력이 변하기 때문에 1년 후에 갖고 있을 만원과는 가치가 다르다. 미래의 모든 편익과 비용을 현재가치로 환산한다는 것은 일정한 비율만큼 그 가치를 차감한다는 뜻으로 이를 현재가치로 할인한다고 표현하며, 이때 적용되는 비율을 할인율 (Discount Rate)이라고 한다[5][6].

사업 투자에 대한 비용, 편익, 할인율이 결정되면 사업의 순현재가치는 일반적으로 식(1)과 같이 정의된다[5][6].

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}, \quad t = 0,1,....,n \quad \text{..... (1)}$$

B_t : t 기간에 발생한 편익

C_t : t 기간에 발생한 비용

r : 할인율

n : 수명기간 (년)

본 논문에서는 비용만을 평가 하였으므로 위의 (1)식에서와 같은 순 현재가치 계산식을 따르지 않고 각 그룹에 대한 비용 항목별 예상 수행 비용을 평가하여 총 비용을 계산하였다.

본 연구에서는 현재 상업 운전 중인 16개 발전소만을 대상으로 비용 분석을 수행했다. 정비효율성 감시를 위해 필요한 초기 비용과 반복 비용 평가를 위해, 요구되는 항목을 수행하는데 예상되는 투입 인력(days)을 추정하여 비용을 평가하였다. 평가 결과는 다음 표 3, 4와 같다.

표 3. 초기 비용 계산을 위한 투입인력 평가

비용 항목	투입인력 (days)					
	I	II	III	IV	V	합
정비규정 적용 방법 및 절차서 개발 비용	400					400
초기 교육 비용	90	180	180	90	90	630
전자시스템 개발 및 구축 비용	500					500
초기 적용 범위 설정 및 검토 비용	250	400	450	200	250	1550
PSA모델 보완 및 검토 비용	70	120	100	80	100	470
위험성 정도 결정과 성능기준 설정	80	100	100	50	80	410
V&V 비용	15	20	20	15	15	85
합	4045					

표 4. 반복 비용 계산을 위한 투입인력 평가

비용 항목	투입인력 (days/cycle)						
	1	2	3	4	5	6	7
발전소 변화에 따른 범위 재설정	30	30	30	30	30	20	50
성능감시	200	200	200	200	200	100	300
고장원인 분석	300	300	300	300	300	200	450
주기적인 평가	60	60	60	60	60	30	80
보고서 작성	25	25	25	25	25	20	30
합	4355						

위의 표 3,4와 같이 산정된 소요 인력을 이용하여 정비효율성 감시를 위한 비용 평가를 위한 가정 사항들은 다음과 같다 :

- 숙련된 엔지니어 (10년 이상 경력자) 평균 임금 : 5,500만원/년 (2001년 기준)
- 근무 시간 : 8시간/일
- 주 5일 근무, 52주/년
- 연간 근무일 수 : 234일/년 [국경일, 휴가일수 (26일) 제외]
- 인건비 이외의 기타 부대 비용은 고려하지 않았다.

정비 효율성 감시 수행을 위해 필요한 인력을 연인원으로 환산하여 평균 임금을 곱하는 방식으로 총 비용을 평가하였다. 본 평가에서는 인플레이션이나 할인율과 같은 간접 비용은 고려하지 않았다.

정비효율성 감시를 위한 초기비용과 한 주기적인 반복 비용을 계산 결과는 다음과 같다.

- 초기 비용

17.3 (인/yr) * 5,500 (만원/인/yr) = 95,150 (만원)

- 반복 비용

18.61 (인/yr) * 5,500(만원/인/yr) = 102,355 (만원)

즉, 16기의 상업운전 중인 원전에 대한 정비효율성 감시 수행을 위한 비용은 초기비용과 1주기 반복비용을 합하여 약 20억원이 소요될 것으로 추정되었다. 그러나 이 계산 결과는 정비효율성 감시를 위한 초기 투자 비용과 한 주기 동안 소요될 운영 비용만을 평가한 것이므로, 매년 정비효율성 감시를 위해 필요한 비용이 발전소의 잔존 수명 기간 동안 계속 소요될 것임을 감안해야 한다. 정비효율성 감시 수행을 위한 비용 추정 결과 1호기당 평균 비용은 1억원을 약간 상회하는 것으로 계산되었지만, 이는 단지 평균 비용일 뿐 전체 호기를 대상으로 하지 않고 시범 호기를 선정하여 먼저 정비규정을 적용할 경우 초기 비용이 더 많이 소요될 것이므로 계산된 평균 비용보다는 더 많은 비용이 소요될 것이다.

반복 비용은 발전소의 잔존 수명 기간 동안 계속 필요한 비용이다. 현재 운전 중인 국내 발전소의 잔여 평균 수명을 약 30년 (수명 연장을 고려하지 않음)이라고 가정하면, 반복비용은 30년 동안 계속 투자되어야 할 비용이다.

2.3 편익 항목

정비효율성 감시를 수행하기 위해 많은 비용이 소요될 것으로 예상되므로 기대되는 효과를 파악하여 의사 결정을 위한 자료로 제공하고자 한다. 그러나 이런 안전 투자의 경우에 있어, 예상되는 편익은 대부분 상품 생산과 같은 유형적인 직접 비용으로 나타나지 않고 안전성의 향상 결과 발생되는

무형적인 간접 비용으로 나타나는 것이 일반적이다. 그러므로 편익 항목에 대한 금전적 가치 계산은 비용 계산보다 가정 사항이 많이 포함된다. 본 연구에서는 정비효율성 감시 결과 발생될 편익 항목만을 선정하고 금전적인 가치는 평가하지 않았다.

정비규정 시행 결과 예상되는 발전 사업자 측면에서의 편익 항목을 정리하면 다음과 같다 :

- 불시정지 감소로 인한 발전량 증가
- 불시정지 시 대체 에너지 비용
- 성능 유지로 인한 검사 항목 감소에 다른 이득 (PBR 시행 시)
- 성능기반 규제를 위한 이중 비용 감소에 따른 이득
- 위험도 정보 이용 발전소 운영에 따른 이득
- Onsite cleanup

3. 결 론

본 논문에서는 원자력 발전소의 안전 성능 유지 및 감시에 필요한 정비효율성 감시 프로그램 수행을 위해 예상되는 비용 평가를 통해, 국내 원전에 대한 프로그램 적용의 타당성 결정에 참고 자료를 제공하고자 했다.

국내 상업 운전 중인 16기의 원전에 정비효율성 감시 체제를 수립하고 이를 운영하기 위한 비용 평가 결과, 초기비용으로 약 9.5억원이 소요되고, 매년 약 10.2억원의 비용이 소요될 것으로 추정되었다. 이와 같이 정비규정 적용을 위한 투자 비용이 적지는 않을지라도, 현재 위험도 정보를 활용한 발전소 운전과 이에 대한 규제 차원에서의 성능기반 규제가 도입되고 있는 상황을 감안하면 정비효율성 감시 프로그램은 이들 발전소 운영 및 규제의 기반이 되는 프로그램이라 할 수 있다. 그러므로 금전적인 비용으로 그 편익이 직접 나타나지 않더라도 간접적인 편익이 많이 발생될 것으로 예상된다. 실제 정비규정을 먼저 시행한 미국의 경우를 살펴 보면, 이와 같은 결과를 보여주고 있다. 뿐만 아니라 정비효율성 감시는 RIA(Risk-Informed Applications)및 PBR(Performance-Based Regulation)을 도입하기 위해서는 먼저 시행되어야 할 프로그램임을 입증하고 있다.

국내의 경우, 비용 분석 결과를 살펴보면 미국에서 예상했던 비용보다는 현저히 적은 것으로 평가되었다. 이는 대부분의 투자 비용이 인건비인 것을 감안할 때 , 현재, 우리나라의 인건비가 미국의 90년대 초반 수준보다 낮을 뿐 아니라 미국에서 개발된 프로그램을 참고할 수 있으므로 프로그램 적용 방법 개발에 있어서 비용이 적게 소요될 것이고, 발전 사업자가 단일화되어 있으므로 적용 방법 개발 등에 있어 플랜트별로 따로 수행할 필요가 없으므로 이중으로 소요되는 비용을 줄일 수 있을 것으로 예상되기 때문이다. 그러므로 정비 효율성 감시 프로그램을 수행할 경우, 전 원전을 대상으로 동시에 시행하는 것이 개별적으로 시행하는 것보다 금전적인 면에서 효율적일 것으로 판단된다.

Acknowledgment

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

4. 참고 문헌

1. U.S. NRC, “Requirements for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants”, 10CFR50.65, July 1991
2. U.S. NRC, “Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants“, Draft Regulatory Guide DG-1020, Nov. 1990
3. IAEA , “Handbook on Safety Related Maintenance”, Vienna, 1993. 10
4. 황미정 외, “정비규정 적용방법 조사 및 적용 연구”, Rev. 1, KAERI/TR-1788/2001, 2001. 3
5. 김동건, “비용/편익 분석”, 박영사, 1997

6. **김홍배**, “**비용/편익 분석론**”, **홍문각**, 2000