

중수로형 원전 수명관리 대상 주요 기기 선정 방법론

Screening Criteria for Critical Structures and Components in Wolsong PLiM

*박준현, 정일석
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소 수명관리(PLiM, plant lifetime management) 연구 첫 단계는 설계수명 이후에 발전소를 계속운영¹⁾하는 것이 경제적 이득이 있는지를 검토하는 타당성 평가 단계이다. 타당성평가에서는 계속운영에 큰 영향을 미치는 주요 설비를 선정하고 이 설비들에 대해 노화상태 및 잔존 수명을 평가하고 여기에서 얻어진 결과를 계속운영 경제성 평가에 반영한다. 본 논문에서는 월성 1호기 수명관리 대상 주요 기기를 선정하기 위해 수명관리 관점에서 주요 기기의 개념을 정립하고 가동원전에 적용중인 주기적안전성평가(PSR, periodic safety review)의 경년열화평가 대상 설비 선정기준에 부합되도록 선정절차를 수립하였다. 수명관리 대상 주요설비 선정기준으로는 설비손상이 발전소 안전성에 미치는 영향, 대규모 교체 또는 손상 복구에 소요되는 비용, 대규모 교체 또는 손상 가능성 등의 평가 항목을 도출하였다. 설비의 상대적 우선순위 결정방법으로는 평가 항목별로 설비에 대한 적정 점수를 부여하고 총점을 비교하여 우선순위를 결정하는 다중속성평가법을 활용하였다.

Abstract

The first step of PLiM, plant lifetime management, is the feasibility study to evaluate economic gains of continued operation beyond its design life. This feasibility study includes the selection of critical structures and components that greatly effect to continued operation, lifetime evaluation such as aging effects for those major components, and economic assessment incorporating the results of lifetime evaluation. To select critical structures and components for PLiM of Wolsong unit 1, the concept of major structures and components important to PLiM was defined here and screening procedure was established to meet with the scope of aging management of PSR. As a selection criteria, impacts of component's failure to plant safety, expenses and efforts to recover failure or refurbish, and the possibility of failure or refurbishment were screened out. To determine relative priority of structures and components, the technique of multi-attribute utility measurement was utilized.

1. 서 론

원자력발전소는 다양한 고유기능을 가진 계통과 계통을 구성하는 수많은 구조물 및 기기로 이루어져 있다. 원자력발전소를 장기간 안전하고 효율적으로 운영하기 위해서는 안전성과 경제성 측면에서 중요도가 높은 설비에 대하여 적절한 유지, 관리가 선행되어야 한다. 발전소 설계수명기간 동안 주요설비에 대해 운전, 정비 및 노화관리가 적절히 이루어진다면 설비 신뢰도가 높아져 운전비용 절감이 가능하고 고장에 따른 전력생산 손실을 줄일 수 있다. 또한, 발전소 계속운영에

1) continued operation beyond its design life

대한 경제적 타당성을 평가할 때 주요 기기의 노화상태가 양호하고 신뢰도가 높아 설비투자비가 적게 소요된다면 계속운영의 경제성이 높아진다. 계속운영의 경제성을 높이기 위해서는 상대적 중요도가 높은 설비의 경년열화 영향을 평가하고 완화 대책을 수립하여 이행하는 등 수명관리 활동을 조기에 시행하는 것이 필요하다.

수명관리의 개념에는 발전소 설계수명 동안 안전하고 경제적으로 운영하기 위한 정비, 운전, 설비개선, 평가 등 제반 활동이 포함되어 있다. 계속운영을 계획중인 발전소는 계속운영 경제성 평가, 설비의 경년열화 평가, 노화관리계획 수립 및 이행 그리고 계속운영을 위한 설비 교체/정비 등을 수명관리 범위에 포함하여야 한다. 따라서 수명관리 대상 주요 기기는 해당 발전소가 계속운영을 계획하고 있는 발전소인지 또는 설계수명기간 동안만 운전하고 퇴역할 발전소인지에 따라 달라지게 된다. 예를 들어 설계수명이 30년인 발전소에서 증기발생기 상태가 양호하여 40년 동안 특별한 문제없이 운전할 것으로 예상되는 경우에는 증기발생기의 수명관리 우선순위가 낮아지지만, 50년 이상 운전을 계획하고 있는 발전소는 40년에 많은 비용을 투자하여 증기발생기를 교체해야하므로 증기발생기의 수명관리 우선순위가 상승하게 된다. 피동형 설비에서 수명관리 우선순위가 상승했다는 것은 노화기구에 대한 상세한 평가가 필요하고 이를 바탕으로 노화를 완화시키기 위한 진단, 감시, 정비 등의 제반 노화관리 활동이 강화되어야 함을 의미한다. 능동형 설비에서 수명관리 우선순위가 상승했다는 것은 기기의 성능 및 상태 감시, 진단, 정비 등 유지관리 활동이 강화되어야 함을 의미한다.

원자력발전소의 수명관리연구를 진행함에 있어 첫 단계는 설계수명 이후에 발전소를 계속운영하는 것이 경제적인 이득이 있는지를 검토하는 타당성 평가이다. 타당성 평가를 위해서는 계속운영에 큰 영향을 미치는 주요 설비에 대해 수명평가를 수행하고 여기에서 얻어진 기술적 자료들이 계속운영의 경제성 평가에 반영되어야 한다. 이 논문에서는 월성 1호기가 설계수명 이후에도 계속운영한다는 가정 하에 수명관리를 해야할 주요 설비의 우선순위를 정하기 위한 방법론을 기술하였다. 고리 1호기 수명관리연구에서 개발한 방법론과 AECL에서 개발한 방법론을 비교하고 최근의 수명관리연구 경험을 반영하여 중수로형 원전에 바람직한 선정기준을 수립하고자 하였다.

2. 수명관리 대상 주요 기기의 개념 및 선정 절차

본 고에서 수명관리 대상 설비라 함은 설계수명기간 동안은 물론 계속운영기간 동안에도 발전소를 안전하고 경제적으로 운전하기 위해 정비, 운전, 수명평가, 노화관리 등의 관점에서 우선적으로 관심을 두고 관리해야 하는 설비를 말한다. 현재까지 수행된 수명관리연구에 따르면 계속운영을 결정하는데 가장 중요한 요소는 경제성이다. 원자력발전소를 설계수명 이후에도 계속운영하는데 있어 현재까지 기술적으로 해결이 곤란한 문제는 극히 제한적이며 이러한 문제 해결 방안은 경제성과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 예를 들어, 계속운영기간 동안 특정 설비의 안전성이 우려되는 경우에는 많은 비용을 투자하여 정비를 하거나 새로운 설비로 교체하면 안전성 문제는 해결이 가능하다. 그러나 안전성을 향상시키기 위해 경제성을 희생시키면 계속운영에 대한 이득이 감소되므로 사업자가 계속운영을 포기하는 결과를 가져오게 된다.

계속운영을 판단하는 요소 중에서 경제성이 가장 중요한 요소이나 설비 손상 가능성, 손상이 안전에 미치는 영향 등과 같은 요소도 중요하게 취급되어야 한다. 따라서 기기 선정 방법론에는 화폐단위로 표현이 가능한 요소와 화폐단위로 표현이 곤란한 요소들을 각각 계량화하여 판단 요소별로 가중치를 부여하고 상대적 우선순위를 부여하는 다중속성평가(MAUM, multi-attribute utility measurement) 방법을 사용하게 된다.

수명관리 대상 설비의 우선순위를 결정하는데 있어 고려해야 할 요소는 그림 1과 같이 설계수명기간 동안과 계속운영기간 동안, 2단계로 나누어 생각할 수 있다. 설계수명기간 동안에는 예측하지 못한 손상, 손상을 예방하기 위한 교체/정비, 계속운영을 위한 설비 교체/정비 비용 및 관련 영향이 주요 판단 요소이고 계속운영기간 동안에는 예측하지 못한 손상, 손상을 예방하기 위한 교체/정비 비용 및 관련 영향이 주요 판단 항목이다.

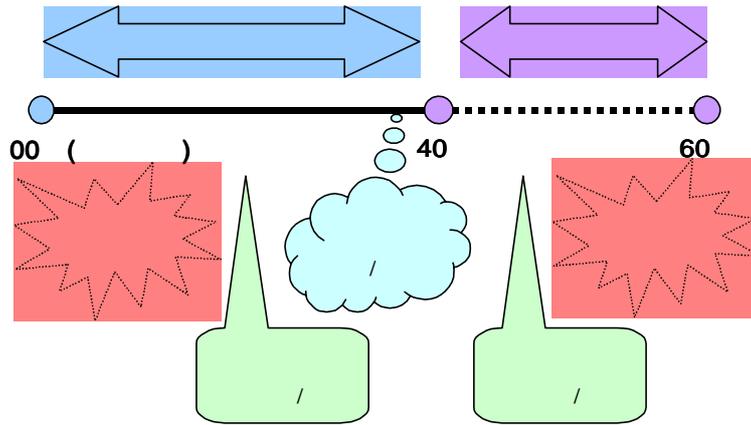


그림 1 우선순위 선정시 주요 고려 요소

원전의 수많은 설비들에 대해서 평가항목별 점수를 부여하고 이를 종합하여 우선순위를 결정하는 것은 많은 노력이 소요되므로 수명관리에 크게 영향을 미치는 설비를 골라내어 이를 대상으로 우선순위를 결정하는 것이 효율적이다. 미국의 인허가갱신규정(10CFR54)에서는 장수명 피동형 설비(long-lived passive components)를 경년열화 평가 대상으로 정하고 있으며 정비규정(10CFR50.65)에서는 능동형 설비(active components)를 정비 유효성 평가 대상으로 정하고 있다. 원전 수명관리연구(I, II)에서는 미국의 인허가갱신규정에 준하여 고리 1호기 수명관리 대상 설비를 선정하였다. 그 당시에는 수명관리에 관련된 국내 법령이 제정되지 않아 미국의 기준을 적용하였으나 2000년부터는 국내 가동원전에 주기적안전성평가가 적용 중이고 수명관리연구 결과가 PSR의 경년열화평가에 대부분 반영되고 있는 실정이므로, 월성 1호기 수명관리 대상 범위를 PSR의 경년열화평가 대상범위로 국한하는 것이 바람직하다.

2000. 5월 과기부에서 발행된 주기적안전성평가 지침에서는 경년열화평가 대상범위를 항목 217 ~ 219와 같이 정하고 있다. 이 규정이 따르면 PSR의 경년열화평가 대상설비는 안전성 관련설비와 안전에 영향을 미치는 비안전성관련 설비이다. 이 범위에는 능동형 설비와 피동형 설비를 모두 포함한다.

- | |
|---|
| <p>217. 원자로의 안전정지와 안전정지조건의 유지능력, 원자로 압력경계의 건전성 확보, 잠재적인 방사선 소외누출을 유발할 수 있는 사고의 방지 및 완화 등 원전의 안전기능을 보장하기 위한 계통, 기기, 구조물이 평가대상에 포함되어야 한다.</p> <p>218. 원전의 안전기능에 영향을 미치는 비안전 관련 계통, 기기, 구조물이 평가대상에 포함되어야 한다.</p> <p>219. 해당원전에 대해 규제기관이 특별히 요구한 사항과 관련된 계통, 기기, 구조물이 평가대상에 포함되어야 한다.</p> |
|---|

그림 2는 수명관리연구와 PSR의 경년열화평가 범위와 기술적 깊이의 개념적 차이를 나타내고 있다. 수명관리연구에서는 주로 장수명 피동형 설비에 대해 향후 20년 계속운영 기간동안에 예측되는 노화현상에 대한 평가를 수행하는 반면, PSR의 경년열화평가는 장수명 피동형 설비를 포함한 보다 넓은 범위를 대상으로 하고 있으며 향후 10년 동안에 예측되는 노화현상에 대한 평가를 수행한다. 범위 측면에서는 PSR의 경년열화평가가 넓고 기술적 깊이 측면에서는 수명관리연구의 노화평가분야가 깊다고 할 수 있다.

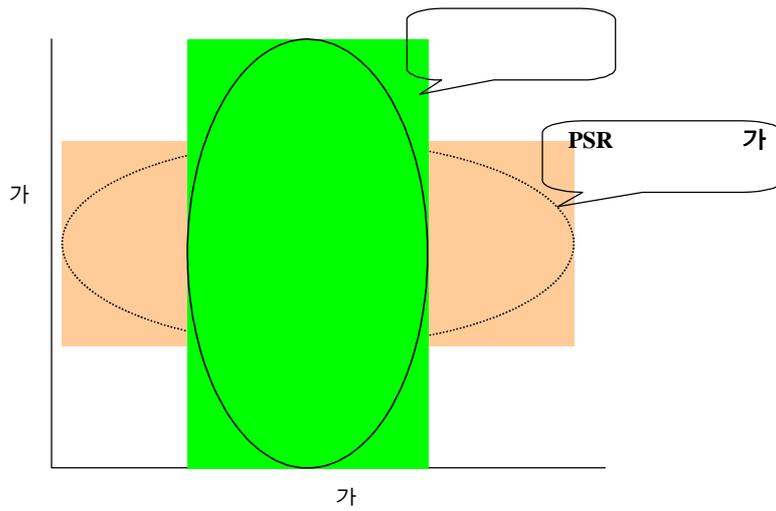


그림 2 수명관리와 PSR 경년열화평가의 범위와 기술적 깊이

수명관리연구에서는 PSR 경년열화평가 대상 설비 모두에 대해 수명평가를 수행하기가 곤란하므로 우선적으로 수명을 평가하고 노화관리를 수행하는 주요 기기를 선정해야 한다. 그림 3은 월성 1호기 수명관리 대상 설비 선정절차를 보여주고 있다. 장수명 피동형 설비와 능동형 설비 중에서 손상 시에 발전소 안전성과 이용률에 미치는 영향이 작고 비교적 정비/교체가 용이한 소형 설비들은 수명관리 우선순위 검토대상에서 제외시킨다. 제외 대상 설비로는 소형 펌프, 밸브, 공기조화설비, 소형 열교환기, 필터류, 소형 탱크류, 소구경 배관, 계측제어설비, 소형 전기설비 등이다. 소형설비를 제외한 장수명 설비에 대해서는 안전성 관련 여부를 판단하여 수명관리 대상설비로 선정한다. 선별된 수명관리 대상설비들은 아래의 “5. 주요 설비 평가 세부 기준”에 따라 가중치를 부여하여 우선순위를 결정한다.

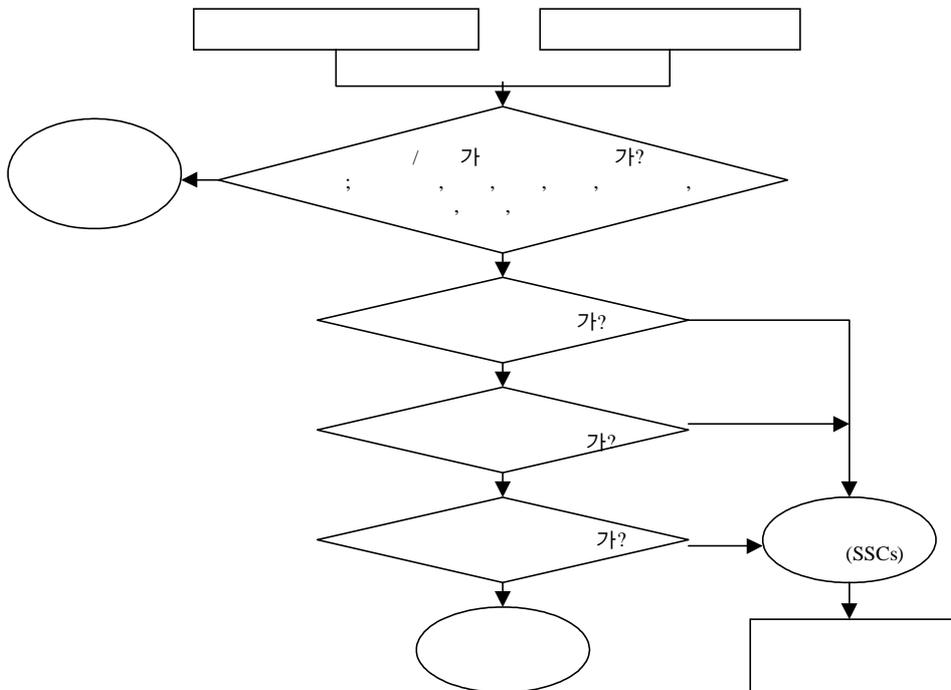


그림 3 수명관리 대상 기기 선정 절차

3. 주요 설비 평가 항목 선정

월성 1호기는 설계수명 이후에도 계속운영할 계획이라는 가정 하에 수명관리 대상설비의 우선순위를 선정하는 것이므로 설계수명기간 및 계속운영기간 동안 발생하는 모든 요소를 고려해야 한다. 그림 1에서 “계획운전을 위한 설비 교체/정비”와 “손상을 예방하기 위한 설비 교체/정비”는 유사 항목이므로 “계획된 대규모 설비 교체/정비”로 통합하여 나타낼 수 있다. “설비 손상”과 “계획된 대규모 설비 교체/정비”는 발전소 운영기간 중에 항상 발생할 수 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

**[발전소 운영기간 동안 수명관리 우선순위 선정에 필요한 주요 요소 =
 예측치 못한 손상이 발전소에 미치는 영향 +
 계획된 대규모 설비 교체/정비가 발전소에 미치는 영향]**

위의 개념에서 “예측하지 못한 설비 손상”으로 인해 발전소가 받는 영향은 그림 4로 표현이 가능하다. 그림 4에서 “설비손상이 미치는 영향”과 “손상 정비/복구에 드는 비용/노력”은 설비의 손상 가능성에 직접적인 영향을 받으므로 식 1로 나타내어진다.

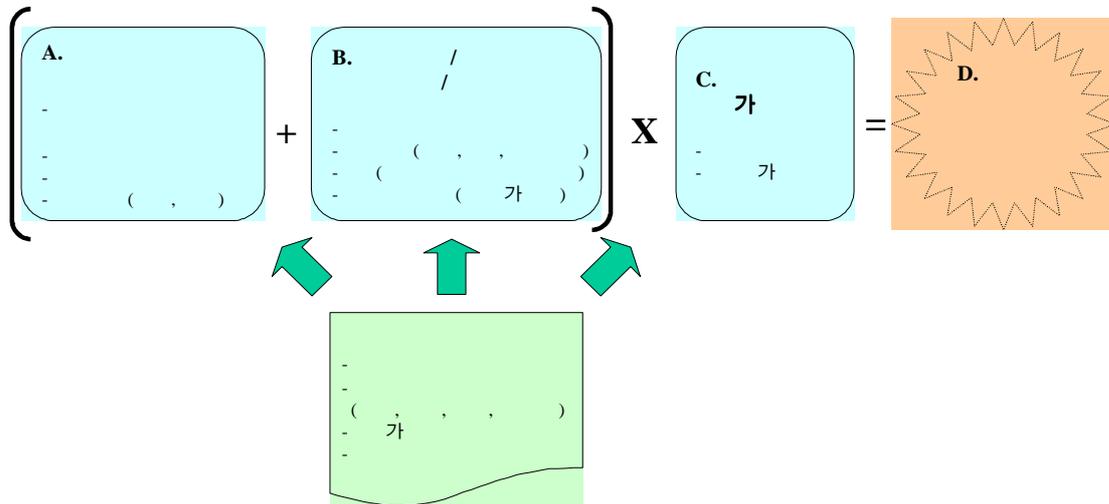


그림 4 예측치 못한 설비 손상이 발전소에 미치는 영향

$$D = (A_1 + \dots + A_n + B_1 + \dots + B_n) * C \quad \text{[식 1]}$$

식 1과 같이 계산하면 설비의 상대적 중요도를 계산하는데 가장 핵심적인 요소는 설비의 손상 가능성 C가 된다. 수명관리연구 초기에는 설비의 경년열화평가가 이루어지지 않았기 때문에 설비 손상 가능성에 대한 신뢰도 높은 자료가 부족한 상태이다. 따라서 불확실성이 많이 내포된 손상 가능성 C에 의해 수명관리 우선순위가 결정적으로 좌우되는 것은 적절하지 않다. 그림 4에 대한 수학적 표현은 식 1이 적합하지만 수명관리 대상설비 선정은 설비의 절대적인 값을 구하는 것이 아니라 상대적 중요도를 결정하는 것이므로 식 1은 식 2와 같이 변형하여 우선순위를 결정하는데 손상가능성이 차지하는 비중을 낮추어 사용하는 것이 바람직하다.

$$D = A_1 + \dots + A_n + B_1 + \dots + B_n + C \quad \text{[식 2]}$$

발전소 운영기간 동안 대규모 교체/정비가 필요한 경우에 설비 교체/정비에 의한 발전소 영향은 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 그림 5에서 “대규모 설비 교체/정비 가능성”은 “설비 손상 가능

성”과 마찬가지로 불확실성이 큰 값이다. 식 1 → 식 2로 변화된 것과 동일한 사유로 그림 5는 식 3으로 나타낼 수 있다.

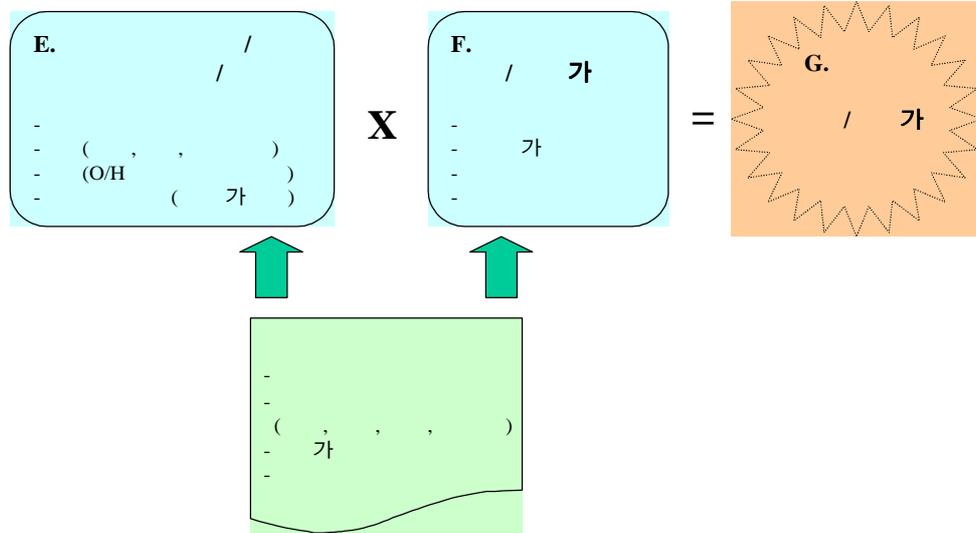


그림 5 계획된 대규모 설비 교체/정비가 발전소에 미치는 영향

$$G = E_1 + \dots + E_n + F \quad [\text{식 3}]$$

수명관리 측면에서 설비의 상대적 중요도를 결정하는 요소는 “설비 손상에 의한 발전소 영향”과 “계획된 대규모 설비 교체/정비에 의한 발전소 영향”을 합한 값이므로 식 2와 3을 합하여 식 4로 나타낼 수 있다. 그림 4와 5에서 B(손상 정비/복구에 드는 비용/노력)와 E(계획된 설비 교체/정비에 든 비용/노력), C(설비 손상 가능성)와 F(대규모 설비 교체/정비 가능성)은 서로 유사한 항목이므로 통합하여 표현이 가능하다.

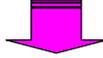
$$D + G = (A_1 + \dots + A_n + B_1 + \dots + B_n + C) + (E_1 + \dots + E_n + F) \quad [\text{식 4}]$$

그림 4와 5에서 설비 우선순위 선정에 필요한 요소를 발췌하여 유사한 항목별로 그룹화하여 정리하면 그림 6과 같다. 식 4와 그림 6에서 B와 E는 유사 항목이므로 “B+E”로 그룹화가 가능하며 C와 F는 확률로 나타내는 변수이므로 “C+F”로 그룹화하여도 무방하다.

그림 6의 수명관리 대상 우선순위를 판단하는 항목은 표 1로 정리가 가능하다. 그림 6의 “C+F”에서 손상경험, 수명평가 결과, 신규 규제지침의 대두 등은 설비손상 가능성(대규모 계획 교체/정비 필요성)을 판단하는데 필요한 요소이므로 별도 항목으로 취급하지 않고 표 1의 C(설비 손상 가능성/대규모 계획 교체/정비 가능성) 항목으로 나타낼 수 있다. 그림 6의 B, E는 유사항목이므로 “B+E”로 통합하여 표현이 가능하다. 그림 6의 A에서 “전력생산에 미치는 영향”과 “공공안전에 미치는 영향”은 표 2에서 유사항목인 B3, B2로 병합이 가능하다. 이러한 방식으로 유사항목을 통합하여 9개 평가 항목을 표 1에 나타내었다. 표 1의 변수를 식 4에 대입하여 다시 쓰면 식 5와 같다

$$D + G = C + A_1 + A_2 + B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 \quad [\text{식 5}]$$

A.	B. / /	E. / /	C. 가	F. / 가
(,)) (, ,) ((가) (PA,)	(, ,) (O/H) (가) (PA,)	가	가



A.	B+E. (/ /)	C+F. 가 (/)
(,)	(, ,) (가) (PA,)	가

그림 6 설비 손상과 대규모 교체/정비가 발전소에 미치는 영향

표 1 월성 1호기 설비 우선순위 평가 항목 및 고려 요소

번호	월성1 수명관리 우선순위 판단 항목	항목별 고려사항	형태
설비 손상이 발전소에 미치는 영향			
A1	발전소 안전성에 미치는 영향	안전계통에 미치는 영향	상대비교
A2	손상 형태	급속한 손상, 완만한 손상	상대비교
-	전력생산에 미치는 영향	이용률에 미치는 영향이므로 B3으로 통합	
-	공공안전에 미치는 영향	방사선 방출의 심각성	상대비교
손상 복구/대규모 계획 교체/정비에 드는 비용, 노력			
B1	작업자의 방사선 피폭량	손상 또는 복구시 방사선 피폭량	피폭단위
B2	비용(준비, 이행, 후속처리)	손상 복구/교체/정비 비용	화폐단위
B3	손상/교체/정비가 전력생산에 미치는 영향	불시정지 유발, 정상 O/H에 가능 여부	기간
B4	복구/교체/정비의 용이성(성공 가능성)	타발전소 손상복구/교체/정비 경험	상대비교
B5	복구/교체/정비관련 규제측면의 난이도	공청회, PA, 복잡한 행정 절차 여부	상대비교
설비 손상/대규모 계획 교체/정비 가능성			
C	설비 손상 가능성/대규모 계획 교체/정비 가능성	손상/교체/정비 경험, 경년열화평가(수명평가) 결과, 새로운 규제지침 대두, 기존 기술의 낙후	상대비교

4. 주요 설비 평가 항목 비교

표 2는 고리 1호기 수명관리 대상설비를 선정할 때 사용하였던 평가항목과 가중치를 나타내

고 있다. 각 항목별 상대 가중치는 0.05 ~ 0.14로 최대 250% 차이를 가지고 있다.

표 2 고리 1호기 대상기기 선정 평가 항목

번호	평가 항목	최대값	절대 가중치	최대 가중치	상대 가중치
K1	정비, 교체 비용	10	9	90	0.12
K2	정비, 교체에 따른 이용률 영향	10	9	90	0.12
K3	정비, 교체에 따른 방사선 피폭량	10	5	50	0.07
K4	규제관점의 중요도	10	9	90	0.12
K5	수명관리측면의 설비 개선 필요성	10	7	70	0.10
K6	정비, 교체 경험	10	4	40	0.05
K7	일반적인 적용성	10	4	40	0.05
K8	기기 손상 형태	10	5	50	0.07
K9	안전에 미치는 영향	10	10	100	0.14
K10	운전에 미치는 영향	10	8	80	0.11
	합 계	-	70	700	1.00

표 3은 AECL에서 사용중인 평가항목으로 항목별 상대 가중치는 0.15 ~ 0.32로 최대 210% 차이를 가지고 있다. AECL에서는 항목 W1부터 W5까지 가중치 합계에다 손상 가능성을 곱하도록 되어 있어 $\{(W1+\dots+W5)*W6\}$ 손상 가능성에 의해 최대 300% 차이를 나타내는 단점이 있다.

표 3 AECL 대상기기 선정 평가 항목

번호	평가 항목	최대값	절대가중치	최대가중치	상대가중치
W1	손상이 공공의 안전목표에 미치는 영향	3	10	30	0.16
W2	손상이 환경 목표에 미치는 영향	4	8	32	0.17
W3	손상이 전력생산 능력에 미치는 영향	6	10	60	0.32
W4	손상 또는 정비시 방사선 피폭정도	4	7	28	0.15
W5	교체, 정비시 소요비용	5	7	35	0.19
W6	손상 가능성	3	-	-	-
	합 계	25	-	-	-

표 4에는 고리 1호기, AECL 및 월성 1호기의 평가 항목이 어느 범위까지 고려하고 있는지를 보여주고 있다. 월성 1호기 평가항목은 총 9개이지만 고리 1호기나 AECL의 평가항목보다 더 넓은 범위를 고려하고 있다.

표 4 방법론별 평가항목 고려 범위

수명관리 우선순위 판단 항목	월성 1	고리 1	AECL
손상이 공공의 안전목표에 미치는 영향	●	▲	●
손상이 환경 목표에 미치는 영향	●	▲	●
손상이 전력생산 능력에 미치는 영향	●	▲	●
손상 또는 정비시 방사선 피폭정도	●	▲	●
교체, 정비시 소요비용	●	●	●
손상 가능성	●	×	●
규제관점의 중요도	●	●	×
수명관리측면의 기기 개선 필요도	●	●	×
정비, 교체 경험	▲	●	▲
일반적인 적용성	×	●	×
기기 손상 형태	●	●	×

주 : ● 동일 항목 포함, ▲ 부분적으로 포함, × 포함하지 않음

5. 주요 설비 평가 세부 기준

표 5는 표 1의 월성 1호기 설비 우선순위 평가 항목별로 가중치를 부여하여 비교한 것이다. 설비 손상 가능성/대규모 계획 교체/정비 가능성은 다른 항목에도 영향을 주게 되므로 최고점인 15점을, 손상이 안전성에 미치는 영향, 복구(교체/정비) 비용 및 전력생산에 미치는 영향도 수명관리 측면에서 중요한 항목이므로 높은 가중치를 부여하였다.

표 5 상대적 우선순위 평가 항목 및 고려 요소

항목 번호	월성1 수명관리 우선순위 판단 항목	최대값	절대 가중치	최대 가중치	상대 가중치
A1	손상이 발전소 안전성에 미치는 영향	10	10	100	0.14
A2	손상 형태	10	5	50	0.07
A3	손상이 환경 목표에 미치는 영향	10	8	80	0.11
B1	손상 복구(교체/정비)시 작업자의 방사선 피폭량	10	5	50	0.07
B2	손상 복구(교체/정비) 비용	10	9	90	0.12
B3	손상(교체/정비)이 전력생산에 미치는 영향	10	10	100	0.14
B4	손상 복구(교체/정비)의 용이성	10	4	40	0.05
B5	손상 복구(교체/정비)관련 규제측면의 난이도	10	5	50	0.07
C	설비 손상 가능성/대규모 계획 교체/정비 가능성	10	15	150	0.21
	합 계	-	71	710	1.00

아래 항목은 항목별로 최저 0점부터 최대 10점까지 정수 단위로 점수를 부여하며 이 절대값에 절대 가중치를 곱하고 여기에서 얻어진 값을 더하여 설비의 상대적인 우선 순위를 정한다. 각 항목에서는 점수별 기준을 나타내고 있으며(예; 10점 : 안전계통 운전 불가, A 형태의 주요 공정계통 손상) 설비 손상 상태 및 영향이 기준 점수와 일치하지 않을 때는 적절한 중간 점수를 부여한다.

- 손상이 안전성에 미치는 영향(가중치 10점)
발전소 운전 중에 예측하지 못한 손상이 발생하였을 때는 안전계통의 손상을 유발하여 안전

성에 위해를 가져올 수 있으며 이러한 상황은 수명관리 관점에서 중요한 요소로 고려해야 한다. 설비 손상이 안전성에 미치는 영향은 다음과 같이 점수를 부여한다.

- 10점 : 안전계통 운전 불가, A 형태의 주요 공정계통 손상
- 7점 : 안전관련계통 운전 불가, B 또는 C 형태의 공정 손상
- 4점 : 안전관련계통의 다중성 상실 또는 안전기능 시험 불가
- 1점 : 안전에 미치는 영향 없음

- 설비의 손상 형태(가중치 5점)

사전 경고 없는 급격한 손상, 부분적으로 인지가 가능하며 심각한 영향을 초래하지 않는 손상 등과 같이 설비 손상의 긴급도에 따라 발전소에 미치는 영향이 달라지게 되므로 이를 고려한다.

- 손상이 환경 목표에 미치는 영향(가중치 8점)

설비 손상으로 인한 방사성 물질 누출이 환경에 미치는 영향을 나타내며 방사성 물질 누출량에 따라 배점을 달리한다.

- 손상 복구(교체/정비)시 작업자의 방사선 피폭량(가중치 5점)

예측하지 못한 손상을 복구하는데 필요한 피폭량과 계획된 대규모 교체/정비 작업을 수행하는데 필요한 피폭량을 고려한다. 고리 1호기 증기발생기 교체 시에 방사선 피폭량은 대략 500 Man-Rem 이하이므로 최대 피폭량을 500 Man-Rem으로 하여 배점한다.

- 손상 복구(교체/정비) 비용(가중치 9점)

가압경수로형에서 수명관리를 위해 최대 비용이 발생한 설비는 증기발생기이며 고리 1호기에서는 약 800억원 정도가 소요되었다. 중수로형에서 최대 비용이 발생할 수 있는 설비는 칼란드리 아이며 압력관, 자관 및 핵연료관을 교체할 경우에 1000억원 이상이 소요될 것으로 예상된다. 대규모 교체/정비보다 손상 복구비용이 더 많이 소요될 것으로 예상되면 손상복구비를 고려하여 계산한다.

- 손상 복구(교체/정비)가 발전소 이용률에 미치는 영향(가중치 10점)

중수로형 원전에서 원자로 압력관의 교체가 수명관리의 가장 중요한 요소로 알려져 있다. 캐나다 Pickering 원전에서는 압력관 교체에 56개월이 소요되어 AECL에서는 최대 3년으로 설정하였으나 현재의 기술수준을 고려하면 18개월을 적용하는 것이 바람직하다. 고리 1호기에서는 설비 손상으로 인한 불시정지 또는 과도상태 유발 유무를 별도 항목으로 고려하였으나 전력생산 측면에서 보면 발전정지 기간이 더욱 중요하므로 본 방법론에서는 과도상태 유발 여부는 무시한다. 손상 복구(교체/정비)가 이용률에 미치는 영향에는 계획예방정비 기간은 고려하지 않고 순수하게 설비 복구(교체/정비)에 드는 기간만을 고려한다. 예를 들어 2005년 계획예방정비 기간이 60일이고 그 기간에 증기발생기를 교체한다고 가정할 경우에(증기발생기 교체에 순수하게 40일 소요), 계산의 편의를 위해서 증기발생기 교체가 이용률에 미치는 영향은 40일 발전정지를 유발한다고 계산한다.

- 손상 복구(교체/정비)의 용이성(가중치 4점)

유사 발전소나 해당 발전소에서 손상을 복구하거나 교체/정비한 경험이 있다면 손상복구(교체/정비) 성공 가능성이 높으므로 낮은 점수를 주고 성공하기 위해 대단히 많은 노력이 소요된다면 높은 점수를 부여한다.

- 손상 복구(교체/정비)관련 규제측면의 난이도(가중치 5점)

캐나다는 미국과 같은 소급적용이나 수명연장 인허가 규정이 없다. 국내에서도 계속운영에 대한 법적 규정이 없으나 국내 규제기관은 미국 규제지침을 선호하는 경향이 있어 이를 배제할 수 없으므로 계속운영과 관련된 규제요건의 난이도를 적용하는 것이 바람직하다.

- 설비의 손상 가능성/ 대규모로 계획된 교체/정비 가능성(가중치 15점)

설비 손상 형태에는 다양한 유형이 있다. 계산의 편이를 위해 해당설비에서 발생 가능한 최대 사고를 가정하여 수명관리에 미치는 영향을 평가한다. 예를 들어 증기발생기는 미세한 튜브 누설에서부터 운전제한치를 초과하는 튜브누설, 튜브파열까지 여러 형태의 손상이 있으나 본 항목에서는 발생 가능한 최대 사고인 증기발생기 튜브 파열사고를 고려한다. 최대 손상가능성이 무엇이나에 따라 후속 항목(안전에 미치는 영향, 이용률, 방사선 피폭량 등)들의 판정 값이 달라지므로 주의가 필요하다. “손상 가능성”은 “대규모 교체/정비 가능성”과 밀접한 관계가 있다. 어떤 설비의 손상 가능성이 높다면 운영기간 동안 그 설비에 대해 대규모 교체/정비를 해야할 필요성이 높아진다는 것을 의미하기도 한다. 그러므로 “손상 가능성”과 “대규모 교체/정비 가능성” 중에 수명관리 측면에서 더 큰 영향을 미치는 항목의 값을 적용해야 한다.

6. 결론

월성 1호기 수명관리 대상설비의 우선순위를 결정하기 위하여 주요 기기의 개념을 정립하고 주요 기기 선정 절차를 수립하였으며 고리 1호기 수명관리연구에서 사용하였던 방법론과 AECL 방법론을 비교하였다. 고리 1호기 방법론에는 설비 손상 가능성을 고려하지 않았다는 단점이 있으며 “일반적인 적용성”과 같은 불필요한 항목이 포함되어 있다. AECL 방법은 모든 평가 항목이 설비손상과 관련되어 있으며 우선순위가 “손상 가능성”에 크게 좌우된다는 단점이 있다. 월성 1호기 수명관리 대상설비 선정 방법론은 고리 1호기 방법론을 기준으로 하여 불필요한 항목을 삭제하고 유사한 항목을 통합하였으며 AECL 방법의 장점을 반영하여 총 9개 평가 항목을 선정하였다. 각 항목의 세부 판단기준은 운전/정비, 수명관리 연구 경험을 반영하여 현실성 있고 합리적인 값으로 보완하였다. 향후에는 이 방법론으로 선정한 우선순위가 AECL 선정 결과와는 어떤 차이를 나타내는지를 비교 분석하고 도출된 문제점에 대해서는 이를 보완하는 작업이 필요하다. 또한 수명관리연구 초기 단계에는 주요 기기에 대한 수명평가(경년열화평가)가 이루어지지 않은 상태이므로 “손상 가능성”, “대규모 교체/정비 가능성”에 대한 불확실성이 매우 높다. 주요 설비의 수명평가가 완료되면 신뢰성 있는 “손상 가능성”, “대규모 교체/정비 가능성” 데이터가 생산되므로 이 자료를 반영하여 우선순위를 다시 결정하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. PLiM Team, Identification of Kori 1 critical components, Plant Lifetime Management Program Phase 1, 한전 전력연구원, 1994
2. TR.92NJ10.96.01, 원전수명관리연구(I), 한전 전력연구원, 1996
3. PE-755.2, Screening methodology for critical systems, structure and components, AECL, 1999
4. NEI 95-10, Rev.3, Industry guideline for implementing the requirements of 10CFR54, 2001
5. Reg. Guide 1.188, Standard format and content for applications to review nuclear power plant operating licenses, 2001
6. 주기적안전성평가 시행 지침, 과기부, 2000