

## 수명관리를 위한 중수로형 원전 2차측 배관 수명평가

### Lifetime Evaluation for Secondary Side Piping of a CANDU NPP for PLiM

황경모, 진태은

한국전력기술주식회사  
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

이경수, 정일석

한전전력연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

국내 최초의 중수로형 원전이 설계수명 종료시점에 임박함에 따라 설계수명 이상 기간동안 계속운영하기 위한 수명관리연구를 수행하고 있다. 계속운영 타당성 여부를 경제적, 기술적으로 결정하고자 하는 수명관리연구의 일환으로 2차계통 배관에 대한 수명관리연구를 수행하였다. 본 고에서는 효율적인 수명관리를 위하여 배관 평가에 앞서 평가대상 배관라인과 경년열화기구를 선정하는 방법과 결과를 제시하였다. 평가가 필요한 배관계통은 주급수 및 주증기계통으로 결정되었으며, 배관을 손상시킬 가능성이 큰 경년열화기구는 침부식과 열피로인 것으로 확인되었다. 평가결과 해당 원전의 2차계통 배관은 침부식 및 허용응력 관점에서 50년 계속운전 시에도 기술적인 건전성에는 문제가 없는 것으로 확인되었다.

#### ABSTRACT

As approaching the time of design life expiration for a domestic CANDU nuclear power plant, Plant Lifetime Management (PLiM) study has performed to ensure its extended operation. As part of the PLiM for determining the feasibility of extended operation, economically and technically, lifetime evaluation for secondary side piping of the plant has performed. This paper describes the selection methodologies and results for piping and aging mechanisms to be needed for the lifetime evaluation. It was determined that the erosion/corrosion and allowable stress for piping of main feedwater and main steam system should be evaluated. As results of the evaluations for the erosion/corrosion and allowable stress, it was identified that the integrity of secondary side piping might be maintained until the duration for extended operation, 50 years.

#### 1. 서 론

원전수명관리(PLiM)는 가동중인 원전을 설계수명 기간을 포함하여 최적 경제수명까지 운전하기 위한 종합기술이다. 원전을 설계수명 이상 계속운전하기 위해서는 경제적인 이득뿐만 아니라 기술적인 측면에서도 원전을 구성하고 있는 주요 계통, 구조물 및 기기의 안전성과 건전성이 입증되어야 한다. 이에 따라 국내 최초의 상업용 원전인 가압경수로(PWR)형 원전을 대상으로 계속운영 타당성 평가를 수행한 결과 계속운영이 기술적, 경제적으로 타당한 것으로 결정되어 수명관리연구(II)에서 상세평가를 수행한 바 있다. 국내 최초의 중수로(CANDU)형 원전 역시 설계수명 종료시점이 임박함에 따라 계속운영 또는 폐로여부를 결정해야 할 필요성이 있다. 본 고에서 제시하는 2차계통 배관 수명평가는 상기 과제의 일환

으로 수행하고 있으며, 원전 안전과 밀접한 연관성이 있는 2차계통 배관을 선정하여 기술적인 측면에서 건전성을 평가하고 계속운전 기간 동안에도 안전성과 건전성에 문제가 없는 지를 결정하는데 주안점을 두고 있다.

2차계통 배관의 수명관리를 위해서는 원전 안전과 밀접한 연관성이 있는 배관계통 및 라인을 가장 우선적으로 선정해야 한다. 평가를 필요로 하는 배관라인이 결정되면 다음 단계로 해당 배관라인을 손상시킬 수 있는 경년열화기구를 선정한다. 수명평가는 해당 배관라인에서 발생 가능한 경년열화기구별로 수행하며 계속운영 기간동안의 건전성 유지 여부와 잔여수명 등을 결정해야 한다. 이의 일환으로 본 고에서는 중수로형 원전 2차측의 전체 배관계통에서 원전 안전성과 관련된 배관계통 및 라인을 선정하고 배관라인별로 평가가 필요한 경년열화기구 및 가장 가혹한 환경에서 운전되고 있는 대표적인 배관라인에 대하여 침부식과 허용응력 평가를 수행한 결과를 소개한다.

## 2. 평가대상 배관 선정

원전 2차측의 유로제공 및 압력경계 역할을 하고 있는 배관은 수 십 종류의 주계통과 연관계통으로 구성되어 있기 때문에 체계적인 방법과 절차에 따라 평가대상 배관계통 및 라인을 선정해야 한다. 발전소 계속운전시 안전과 밀접한 연관성이 있는 주요 배관라인을 선정하여 기술적인 측면에서 건전성을 평가하기 위한 2차계통 배관 수명관리 연구의 목적에 따라 본 고에서는 두 가지 단계를 거쳐 평가대상 배관계통 및 라인을 선정하였다. 여기서 배관라인이란 펌프, 열교환기, 압력용기 등과 같은 기기 사이를 연결하는 전체 배관을 말한다. 먼저 원전 안전성 관련 여부와 품질등급[1] 정도에 따라 평가대상 배관계통을 선정하고 유사한 설계 및 운전환경에 따라 배관계통을 그룹화 하였다. 여기서 품질등급은 최종안전성분석보고서, 캐나다 표준협회(CSA) 코드 및 캐나다 원자력공사(AECL) 안전설계기준에 따라 안전성, 안전성영향 품목 등으로 분류하였기 때문에 안전관련 기기를 평가해야 하는 본 보고서의 기기선정 분류기준에 정확히 부합한다. 상기 기준에 근거한 평가대상 2차계통 배관 선정은 상(Phase)의 형태에 따라 그룹화 한 후 중요도에 따라 대표기기를 선정하고 이를 평가하는 방식을 채택하였다. 여기서 배관재료는 2차측의 모든 배관이 탄소강이므로 그룹화 기준에서 제외하였다. 또한 건증기와 오일이 흐르는 배관이 일부 있으나 비안전관련이며 중요도가 낮기 때문에 독립 그룹으로 분류하지 않고 단상 그룹에 포함하였다. 각 그룹 중 수명평가를 위한 대표기기 결정은 안전관련이며 품질보증 절차서에서 Q 등급(Class)으로 분류되어 있고 가장 가혹한 환경에서 운전되고 있는 배관을 대표기기로 하였다. 표 1은 평가대상 배관계통 그룹화 및 대표계통 선정결과를 보여준다. 결과적으로 수명평가가 필요한 대표배관은 주급수 및 주증기계통의 배관으로 결정되었다.

평가대상 배관계통을 선정한 후에는 실질적인 수명평가를 위한 대상 배관라인이 결정되어야 한다. 이는 한 개의 계통에 포함된 배관이라 할 지라도 수 백 개의 직배관과 피팅류(엘보우, 티, 리듀서 등) 및 부속 배관라인으로 구성되어 있으며 모두 동일한 조건에서 운전되지 않기 때문이다. 대표기기로 선정된 배관계통 중에서 실질적인 수명평가를 위한 배관라인은 설계 및 운전조건이 반영된 배관 시방서와 손상 가능성을 고려한 공학적판단에 따라 선정하였다. 2차계통 배관 시방서에서는 배관라인의 설계압력 및 설계온도에 따라 7개 등급(A1, A2, A3, B1, B2, C1, C2)으로 구분하였다. 이 중 A 등급에 포함된 배관라인을 평가대상으로 결정하였다. 선정된 배관라인은 다음과 같다.

- 주급수계통 : 고압 급수가열기 #6 출구에서 증기발생기까지의 모든 배관 부속기기
- 주증기계통 : 증기발생기에서 주증기헤더까지의 모든 배관 부속기기

## 3. 평가대상 경년열화기구 선정

수명평가가 필요한 것으로 결정된 계통 및 배관라인에 대해서는 배관이 접하고 있는 환경에 따라 발생 가능한 경년열화기구를 확인하고 평가가 수행되어야 한다. 본 연구에서 평가대상 경년열화기구는 ASME Sec.III App. W[2]를 기초로 하고 GALL(Generic Aging Lessons Learned) 보고서[3]와 해외 인허가갱신 신청 보고서를 참조하여 1차적인 경년열화기구를 도출하였다.

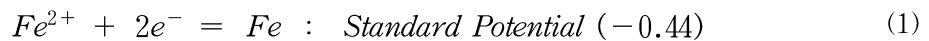
표 1. 배관계통 그룹화 및 대표계통 선정결과

| 그룹   | 상     | BSI            | 계통명                              | 주요기능  | 안전관련 | 품질등급 | 선정여부 | 대표계통    |
|------|-------|----------------|----------------------------------|---|------|------|------|---------|
| 그룹 1 | 1     | 36110          | 주급수계통                            | 격납건물 내에 위치한 급수 및 주증기계통의 일부  | ○    | Q    | 선정   | 주급수계통배관 |
|      | 1     | 36310          | 증기발생기 취출수계통                      | 증기발생기에 누적되는 불순물 제거  | -    | Q, R | 선정   |         |
|      | 1     | 36600          | 급수 시료채취계통                        | 2차측 수질관리를 위한 시료채취   | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1/2   | 41110          | 터빈계통 <sup>1)</sup>               | 고압터빈 및 저압터빈 주변계통  | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 41230          | 발전기 수소냉각계통                       | 발전기에서 발생하는 수소를 냉각   | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 41240          | 고정자 수냉계통                         | 발전기 고정자권선, 정류기, 터미널 플랜지 냉각  | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 41300          | 오일계통 <sup>2)</sup>               | 터빈 및 발전기와 연계된 각종 오일계통으로서 오일정화, 밀봉, 윤활 등의 계통을 포함                   | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 41600          | 오일 화재방호계통                        | 오일관련 화재방호를 위한   | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1/2   | 42100          | 주복수기계통 <sup>3)</sup>             | 복수기 관련 각종 부가계통(배기, 세정 등)  | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 43120          | 급수가열계통                           | 열효율 증가 및 열충격 완화를 위한 급수가열  | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 43130          | 급수가열 배수계통                        | 고압 및 저압 급수가열기에서 복수기로 배수   | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 43210          | 복수계통                             | 복수기 집수정의 응축수를 복수펌프로 탈기기까지 보내는 계통                                  | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 43220          | 복수보충 및 제거계통                      | 복수계통으로 물을 보충하거나 제거  | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 43230          | 급수계통(격납건물 외부)                    | 탈기저장탱크에서 급수를 공급받아 증기발생기로 공급                                       | ○    | R    | 선정   |         |
|      | 1     | 43240          | 복수정화계통                           | 2차계통의 수질개선  | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 1     | 43250          | 보조급수계통 <sup>4)</sup>             | 주급수계통 고장 또는 비상운전시 증기발생기 냉각  | ○    | -    | 선정   |         |
| 1    | 45100 | 2차측 시료채취계통     | 시료채취                             | -   | -    | 미선정  |      |         |
| 1    | 45400 | 화학약품 조절계통      | 아민, 하이드라진 등의 화학약품을 2차계통 주요부위로 공급 | -   | -    | 미선정  |      |         |
| 1    | 45600 | 급수펌프 밀봉계통      | 복수기의 물을 이용하여 급수펌프 밀봉             | -   | -    | 미선정  |      |         |
| 그룹 2 | 2     | 36110          | 주증기계통                            | 증기발생기의 증기를 터빈으로 이송  | ○    | Q    | 선정   | 주증기계통배관 |
|      | 2     | 36500          | 증기덤프계통                           | 주증기계통의 증기를 복수기로 배출 원자료를 정지시키지 않고 출력을 감발할 수도 있음                    | -    | -    | 미선정  |         |
|      | 2     | 41120          | 습분분리 배수계통                        | 습분분리기에서 발생된 물을 습분분리탱크를 거쳐 급수가열기로 전송                               | -    | -    | 미선정  |         |
|      | 2     | 41130          | 재열증기 배수 및 배기계통                   | 습분분리재열기에서 발생된 물을 증기발생기로 보내고 공기를 제거하는 역할                           | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 2     | 41150          | 밀봉증기계통                           | 증기밸브 밀봉부와 터빈 실린더에서 증기의 누출과 공기유입 방지                                | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 2     | 43110          | 추기증기계통                           | 발전소 열효율 증가를 위하여 고압 및 저압터빈에서 증기를 추출하여 급수가열기로 이송                    | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 2     | 43140          | 급수가열기 배기계통                       | 급수가열기에서 발생되는 공기를 복수기로 배출  | -    | R    | 미선정  |         |
|      | 2     | 43300          | 보조증기계통                           | 발전소 가열과 프로세스계통에서 요구되는 증기를 공급하는 역할<br>급수가열기, 터빈축밀봉, 습분분리재열기 등으로 공급 | -    | -    | 미선정  |         |
| 2    | 45200 | 추기 및 터빈증기 배수계통 | 터빈 추기증기를 복수기로 이송                 | -   | R    | 미선정  |      |         |

[주] 1) 단상 배관라인은 건증기 배관임  
 2) 오일계통은 비안전관련이며 중요도 및 손상 가능성이 적기 때문에 따로 분류하지 않음  
 3) 단상 및 2상유체가 흐르는 배관 혼재  
 4) 보조급수계통 운전시 주급수라인을 이용

여기서 ASME Sec.III App. W에는 수명관리를 위하여 고려해야 하는 경년열화기구가 제시되어 있으며, GALL 보고서에는 미국 원전의 인허가신청 신청을 위한 SRP(Standard Review Plan) 기술적 기준이 제시되어 있다. 1차적으로 선정된 경년열화기구는 주급수 및 주증기계통 모두 틈부식, 일반부식, 공식, 침부식, 열응력이다. 이들 경년열화기구에 대해서는 해당 원전의 운전특성 및 운전이력을 반영하여 정량적 수명평가가 필요한지의 여부를 결정하였다. 주급수계통 배관에서 발생 가능한 경년열화기구의 손상 가능성을 평가한 결과는 아래에 요약하였다.

- 일반부식 : 2차 주급수계통 배관은 탄소강으로 제작되고 부식환경을 형성하는 전해질이 통과하므로 평가 필요. 그러나 내부로는 부식과 침식의 영향이 복합적으로 작용하는 침부식의 영향이 더 크기 때문에 일반부식을 침부식 손상에 포함시킴. 갈바니부식 관점에서 주급수계통 대상라인의 부속기기별 사용재료가 직배관 A106 Gr.B, 밸브 A216 WCB, 피팅류(엘보우, 티, 리듀서, 익스팬더 등) A234 WPB, 증기발생기 입구노즐 SA541 Cl.2로서 모두 탄소강 계열의 재료이기 때문에 갈바니부식 전위차가 없음. 따라서 갈바니부식 발생 가능성은 없음. 탄소강에 포함된 철의 표준전위는 아래와 같음



- 공식 : 화학적 활성이 큰 부위에서 집중적으로 발생하는 국부부식 현상으로서 스테인리스강이나 알루미늄 합금 재료이고 유체(해수, 강수 등)가 정체되는 부위에서 발생 가능. 2차 주급수계통의 일부 대기상태(Standby)인 배관은 유동이 정체되어 있으나 본 연구의 대상이 되는 주급수계통 배관은 정상적으로 유체가 흐르고 재료 역시 공식 저항성이 큰 탄소강으로 제작되었기 때문에 공식 발생 가능성은 무시할 수 있음
- 틈부식 : 2차 주급수계통 배관 내부는 부식발생 환경임. 배관과 피팅류는 일반적으로 용접연결되어 틈새가 존재하지 않지만 플랜지의 경우에는 틈새가 존재함. 4개의 증기발생기 입구측 주급수 라인에는 각 2개씩의 플랜지가 설치되어 있음. 스테인리스강으로 제작된 기기가 틈부식에 민감하며 탄소강은 민감하지 않음. 틈부식은 틈내부의 양극반응( $M \rightarrow M^{+} + e^{-}$ )과 음극반응( $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$ )으로 인한 산소고갈과 직접 연관됨. 이는 틈새에서 유동이 정체되는 경우에 발생함. 평가대상 주급수계통 배관은 틈부식 저항성이 비교적 큰 탄소강으로 제작되고 고속유체가 흐르므로 유동이 정체될 가능성은 거의 없음. 또한 부식방지를 위한 엄격한 수질관리를 하고 있기 때문에 틈부식은 2차계통 배관의 수명제한 요인이 되지 못함
- 침부식 : 주급수계통 배관은 탄소강으로 제작되고 부식환경의 액상유체가 고속으로 통과하기 때문에 정량적평가 필요. 2차계통 배관의 손상은 침부식으로 인한 사례가 대부분을 차지함
- 열응력 : 주급수계통 배관은 중력하중, 열팽창/수축에 따른 하중, 동하중 등의 영향을 받고 있으므로 정량적평가 필요. 주급수계통 배관이 영향받을 수 있는 운전 과도상태는 Heat-up and Cool-down, Reactor Start-up and Shut-down, Power Manoeuvring 등 15종류 임

다음은 주증기계통 배관에서 발생 가능한 경년열화기구의 손상 가능성을 평가한 결과를 요약한 것이다.

- 일반부식 : 주증기계통 배관으로는 0.25% 정도의 습분이 함유된 기체가 통과함. 순수 일반부식의 발생 가능성은 무시할 수 있지만 일반부식과 침식이 동시에 작용하는 침부식의 영향은 상대적으로 크기 때문에 일반부식을 침부식 손상에 포함시켜 평가함
- 공식 : 주증기계통의 배관은 탄소강으로 제작되고 천연수가 통과하지 않으며, 0.25% 정도의 습분이 응축되어 공식을 유발할 가능성도 거의 없음(운전온도 약 500°F)
- 틈부식 : 주증기계통 배관으로는 건도가 99.75% 정도인 증기가 통과하고 배관과 피팅류는 모두 용접으로 연결되어 있으며, 틈새가 존재할 수 있는 플랜지도 설치되어 있지 않으므로 평가 불필요
- 침부식 : 탄소강으로 제작되고 미량의 습분을 포함한 2상유체가 흐르기 때문에 평가 필요. 일반적으로 침부식 현상은 단상 보다 2상유체가 통과하는 부위에서 심하게 발생하

는 것으로 알려져 있음

- 열응력 : 주증기계통 배관은 중력하중, 열팽창/수축에 따른 하중, 동하중 등의 영향을 받고 있으므로 평가 필요. 주증기계통 배관이 영향받을 수 있는 운전 과도상태는 Heat-up and Cool-down, Power Manoeuvring, Total Loss of Feedwater from 100% Power 등으로서 주급수계통과 동일

#### 4. 수명평가

##### (1) 침부식 평가

침부식 평가는 주급수 및 주증기계통 모두를 대상으로 평가대상 배관라인에 포함된 580여 개의 부속기기 중 침부식 손상에 영향을 심하게 받을 것으로 예상되는 28개 부속기기를 선정하여 평가하였다. 수명평가는 CHECWORKS 코드를 이용한 이론적 평가[4]와 실측에 의한 평가를 혼용하였다. 실측에 따른 평가는 현장에서 장기간에 걸쳐 측정된 데이터를 이용하여 배관두께 감소 추세에 따른 배관 감육률 및 잔여수명을 계산하였다. 측정에 의한 침부식률 계산에는 제작공차에 따른 초기두께 부정확, UT 측정오류 등 많은 불확실성이 존재하고 있기 때문에 추이분석 방법을 채택하였다. 그림 1과 2는 추이분석법에 의하여 침부식률을 계산한 예를 보여준다.

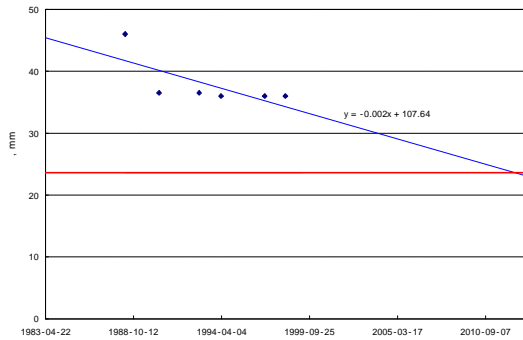


그림 1. 두께변화 추이(TL0162TA)

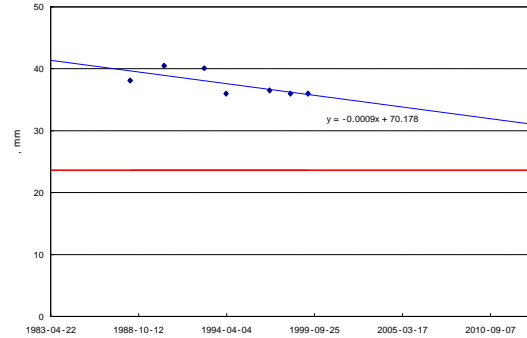


그림 2. 두께변화 추이(TL0165TA)

침부식 평가는 배관 용접부위에 따라 개별 부속기기 단위로 평가하였기 때문에 Iso-drawing과 현장 설치부위를 기초로 하여 부속기기별로 고유명을 부여하였다. 부속기기명 부여방식은 아래와 같다.

- 첫 번째 영문자 : 배관설치 건물(T : 터빈건물, S : 격납건물)
  - 두 번째 영문자 : 계통(L : 주급수계통, A : 주증기계통)
  - 가운데 숫자 : Iso-drawing 명
  - 일곱 및 여덟 번째 영문자 : 부속기기 종류, 동종 부속기기인 경우의 차례
- 예) TL0162TA : 터빈건물, 주급수계통, Iso-drawing(4323-016-24-02), 첫 번째 터

이론에 의한 침부식률 평가는 미국 EPRI에서 개발한 CHECWORKS 코드를 활용하여 평가하였다. CHECWORKS 코드는 설계 및 운전 데이터에 근거한 데이터베이스 구축, 수화학 해석, 네트워크 해석 및 감육률 해석의 네 가지 단계로 구분할 수 있으며, Chexal-Horowitz 이론을 근간으로 하고 있다. 본 고에서는 CHECWORKS 코드를 이용한 평가방법은 더 이상 언급하지 않고 평가결과만을 제시한다. 표 2는 주급수 및 주증기계통의 주요 부속기기를 대상으로 침부식 평가를 수행한 결과이다. CHECWORKS 코드 계산결과 급수가열기 6번 출구의 티(TL0165TA)와 SG 2 및 4의 입구측 엘보우(SL0205EA 및 SL0184EA)의 잔여수명이 8~9년으로 계산되었으나 실측에 의한 추이를 분석한 결과 크게 감육이 되지 않은 것으로 확인되었다. 주급수계통을 대상으로 한 실측 결과, 급수가열기 6번 출구의 티(TL0162TA)의 잔여수명이 약 16년으로 가장 작게 계산되었다. 주증기계통의 대상 부속기기에 대해서는 실측 결과가 없어 CHECWORKS 코드의

결과에 근거하였으며 코드해석 결과 대부분 문제가 없는 것으로 계산되었다. 결과적으로 배관두께는 주기적으로 검사되고 있으며 문제 발생시 즉시 교체를 하기 때문에 TL0162TA만 적절한 시기에 교체가 된다면 침부식 관점에서 2차계통 배관은 전반적으로 문제가 없는 것으로 확인되었다.

표 2. 침부식 평가결과

| 계통 | 대상부위                   | 부속기기명    | 배관두께, mm | 최소요구두께, mm | CHECWORKS  |           | 실측        |           |
|----|------------------------|----------|----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|    |                        |          |          |            | WR*, mm/yr | RL*, yr   | WR, mm/yr | RL, yr    |
| MF | HP HTR 6A/B OUT HDR    | TL0162TA | 24.00    | 0.93       | 0.154      | 33.320    | 0.730     | 15.693    |
|    | HP HTR 6A/B OUT HDR    | TL0165TA | 24.00    | 0.93       | 0.304      | 8.922     | 0.329     | 156.363   |
|    | SG 1 INLET FR HDR      | TL0332TB | 12.75    | 0.494      | 0.190      | 10.805    | 0.037     | 2,505.871 |
|    | SG 4 INLET FR HDR      | TL0362TB | 12.75    | 0.494      | 0.190      | 10.805    | 0.475     | 101.005   |
|    | SG 1 INLET MFCV1       | TL0211EA | 12.75    | 0.494      | 0.211      | 15.098    | 0.033     | 2,795.346 |
|    | SG 1 INLET MFCV1       | TL0371PC | 12.75    | 0.494      | 0.134      | 89.849    | 0.110     | 769.024   |
|    | SG 1 INLET MFCV1       | TL0371EA | 12.75    | 0.494      | 0.226      | 49.733    | 0.037     | 2,505.871 |
|    | SG 1 INLET MFCV2       | TL0332EC | 12.75    | 0.494      | 0.211      | 15.098    | 0.029     | 3,157.189 |
|    | SG 1 INLET MFCV2       | TL0381PC | 12.75    | 0.494      | 0.134      | 89.849    | 0.183     | 421.654   |
|    | SG 1 INLET MFCV2       | TL0381EA | 12.75    | 0.494      | 0.226      | 49.733    | 0.029     | 3,157.189 |
|    | SG 4 INLET MFCV1       | TL0271EA | 12.75    | 0.494      | 0.211      | 15.098    | 0.073     | 1,203.236 |
|    | SG 4 INLET MFCV1       | TL0431PC | 12.75    | 0.494      | 0.134      | 89.849    | 0.073     | 1,203.236 |
|    | SG 4 INLET MFCV1       | TL0431EA | 12.75    | 0.494      | 0.226      | 49.733    | 0.110     | 769.024   |
|    | SG 4 INLET MFCV2       | TL0362EC | 12.75    | 0.494      | 0.211      | 15.098    | 0.037     | 2,505.871 |
|    | SG 4 INLET MFCV2       | TL0441PC | 12.75    | 0.494      | 0.134      | 89.849    | 0.146     | 551.918   |
|    | SG 4 INLET MFCV2       | TL0441EA | 12.75    | 0.494      | 0.226      | 49.733    | 0.110     | 769.024   |
|    | SG 2 FW INLET          | SL0205EA | 12.75    | 0.494      | 0.211      | 8.135     | 0.033     | 2,795.346 |
|    | SG 4 FW INLET          | SL0184EA | 12.75    | 0.494      | 0.211      | 8.135     | 0.022     | 4,242.719 |
|    | SG 1 LOW POWER FW LINE | TL0221PD | 4.50     | 0.125      | -          | -         | 0.146     | 616.114   |
|    | SG 3 LOW POWER FW LINE | TL0261PD | 4.50     | 0.125      | -          | -         | 0.219     | 377.609   |
| MS | MAIN STM FROM SG 1     | TA0120PA | 26.00    | 0.548      | 0.004      | 996.527   | -         | -         |
|    | MAIN STM FROM SG 1     | TA0130EA | 26.00    | 0.637      | 0.004      | 2,438.319 | -         | -         |
|    | MAIN STM FROM SG 2     | TA2002PA | 26.00    | 0.548      | 0.003      | 1,028.638 | -         | -         |
|    | MAIN STM FROM SG 2     | TA2003EA | 26.00    | 0.637      | 0.004      | 2,499.946 | -         | -         |
|    | MAIN STM FROM SG 3     | TA3207EA | 26.00    | 0.637      | 0.003      | 2,803.999 | -         | -         |
|    | MAIN STM FROM SG 3     | TA3002PA | 26.00    | 0.548      | 0.004      | 975.284   | -         | -         |
|    | MAIN STM FROM SG 4     | TA4001PE | 26.00    | 0.548      | 0.003      | 1,384.311 | -         | -         |
|    | MAIN STM FROM SG 4     | TA4002PA | 26.00    | 0.548      | 0.004      | 1,016.557 | -         | -         |

\* WR : Wear Rate, RL : Residual Lifetime

(나) 허용응력 평가

국내 중수로형 원전에는 4개의 증기발생기가 설치되어 있기 때문에 피로평가를 위한 배관라인은 주증기계통의 4개 그룹(각 증기발생기 출구노즐에서 격납건물 관통부 전까지의 배관라인)과 주급수계통의 4개 그룹(격납건물 관통부에서 증기발생기 입구노즐까지의 배관라인)으로 구분하였다. 평가는 두 가지 방식을 통하여 피로관점에서의 건전성 평가를 수행하였다. 첫 번째 방식은 설계시 고려한 과도상태 횡수를 운전 중에 실제 발생한 과도상태 횡수와 비교하는 것이고 두 번째 방식은  $S_E$ (열팽창에 의한 응력, psi)와  $S_{TE}$ (압력, 무게, 기타 지지하중 및 열팽창에 의한 응력, psi)를 허용기준인  $S_A$ (팽창력에 의한 허용응력 범위, psi) 및  $S_h + S_A$ (최대온도에서의 재료 허용응력, psi)와 비교하는 것이다[5]. 즉 두 번째 방식에서는 아래 식 (2) 또는 (3) 중 하나만 만족하면 건전성에 문제가 없는 것으로 결정할 수 있다.

$$S_E = \frac{i M_c}{Z} \leq S_A \quad (2)$$

$$S_{TE} = \frac{P D_o}{4t_n} + 0.75i \left( \frac{M_A}{Z} \right) + i \left( \frac{M_c}{Z} \right) \leq (S_h + S_A) \quad (3)$$

$$N = N_E + r_1^5 N_1 + r_2^5 N_2 + \dots + r_n^5 N_n \quad (4)$$

$$S_A = f (1.25 S_c + 0.25 S_h) \quad (5)$$

여기서, f는 전체 운전년수 동안 모든 과도상태 횟수 N 사이클 조건에 대한 응력범위 감소 인자로서 N이 7,000 미만이면 f는 1.0이다. 나머지 변수에 대해서는 참고문헌 [5]에서 확인할 수 있다. 표 3은 주증기 및 주급수계통에 대하여 설계 과도상태 횟수에 대한 실제 발생 운전 과도상태 횟수를 18년과 50년 운전시에 대하여 비교한 것이다. 표 4는 주증기계통에 대한 응력평가 결과로서 해석대상 배관계통 중에서 최대응력만을 나타낸 것이다. 응력평가는 설계당시에 등가사이클 7,000회를 기준으로 한 결과이다.

주증기계통에 대한 평가결과, 50년까지 실제 발생할 각각의 과도상태 횟수는 설계시 고려된 과도상태 횟수보다 적으며, 18년 및 50년 운전시점에서 설계 과도상태 대비 전체 과도상태의 여유도는 88.6% 및 68.2%로 계산되었다. 그리고 등가사이클은 30년 및 50년 계속운전 고려시 각각 1,006회 및 1,677회로서 설계시 고려한 7,000회 미만이다. 또한 표 4에서 볼 수 있듯이 주증기계통 설계응력보고서에서 계산된  $S_E$ 는  $S_A$  보다 작아야 한다는 기준에는 세 개(그룹 1, 2, 3) 라인이 만족을 못하지만  $S_{TE}$ 는  $S_A+S_h$  보다 작아야 한다는 기준을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 피로관점에서 주증기계통 배관은 50년까지 계속운전이 가능한 것으로 판단된다.

주급수계통 배관에 대해서는 설계시 고려한 과도상태 종류 및 횟수가 주증기계통 배관과 동일하기 때문에 피로평가 결과 역시 주증기계통과 동일하게 적용할 수 있다. 그렇지만 주급수계통 배관에 대한 응력평가 결과는 현재 결과가 존재하지 않는 것으로 확인됨에 따라 설계응력보고서에 근거한 허용응력 평가는 수행할 수 없었다. 결과적으로 18년 및 50년 운전시점의 설계 과도상태 대비 여유도는 주증기계통 배관과 동일한 88.6% 및 68.2%를 적용할 수 있다. 등가사이클 또한 50년 계속운전 고려시 1,677회로서 설계시 고려한 7,000회 미만이다. 따라서 주급수계통 배관 역시 피로관점에서는 50년까지 계속운전이 가능한 것으로 판단된다.

표 3. 주증기 및 주급수계통 과도상태 횟수 산정

| 번호       | Transients                                 | Type      | 온도 변화, °F              | 과도상태 횟수  |         |         |       |       |
|----------|--|-----------|------------------------|----------|---------|---------|-------|-------|
|          |  |           |                        | (30년 설계) | (18년기준) | (50년기준) |       |       |
|          |  |           | $\Delta T_E, ^\circ F$ | 400      | 500     |         |       |       |
| 1        | Heat-up and Cool-down                      | Normal    | $\Delta T_1$           | 400      | 500     | 45      | 125   |       |
| 2        | Reactor Start-up and Shut-down             | Normal    | $\Delta T_2$           | 88       | 1,000   | 353     | 981   |       |
| 3        | Power Manoeuvring                          | Normal    | $\Delta T_3$           | 28       | 10,000  | 832     | 2,311 |       |
| 4        | Total Loss of Feedwater from 100% Power    | Upset     | $\Delta T_4$           | 105      | 100     | 10      | 28    |       |
| 5        | Reactor Trip from 100% Power               | Upset     | $\Delta T_5$           | 118      | 500     | 35      | 97    |       |
| 6        | Loss of Class IV Power from 100% Power     | Upset     | $\Delta T_6$           | 108      | 50      | 2       | 6     |       |
| 7        | Loss of Regulation                         | Upset     | $\Delta T_7$           | 122      | 200     | 84      | 233   |       |
| 8        | Turbine Trip                               | Upset     | $\Delta T_8$           | 40       | 100     | 42      | 117   |       |
| 9        | Low Feedwater Temperature                  | Upset     | $\Delta T_9$           | 118      | 10      | 4       | 12    |       |
| 10       | Stepback                                   | Upset     | $\Delta T_{10}$        | 48       | 500     | 70      | 194   |       |
| 11       | Crash Cooldown                             | Upset     | $\Delta T_{11}$        | 288      | 15      | 6       | 18    |       |
| 12       | Emergency Over-pressurization              | Emergency | $\Delta T_{12}$        | 70       | 1       | 0       | 1     |       |
| 13       | Loss of Main and Auxiliary Feedwater Pumps | Emergency | $\Delta T_{13}$        | 338      | 4       | 2       | 5     |       |
| 14       | Loss of Coolant                            | Faulted   | $\Delta T_{14}$        | 318      | 1       | 0       | 1     |       |
| 15       | Steam Line Break                           | Faulted   | $\Delta T_{15}$        | 318      | 1       | 0       | 1     |       |
| Total    |  |           |                        | -        | -       | 12,982  | 1,485 | 4,125 |
| N(등가사이클) |  |           |                        | -        | -       | 7,000*  | -     | -     |

\* 설계시 사용된 등가사이클

표 4. 주증기계통 응력평가 결과

|   | N(30년)   | N(50년)   | $S_E$  | $S_{TE}$ | $S_A$  | $S_h$  | $S_A+S_h$ |
|---|----------|----------|--------|----------|--------|--------|-----------|
| 그룹 1(SG1)   | 1,005.92 | 1,676.54 | 27,566 | 33,592   | 22,500 | 15,000 | 37,500    |
| 그룹 2(SG2)   | 1,005.92 | 1,676.54 | 24,254 | 30,370   | 22,500 | 15,000 | 37,500    |
| 그룹 3(SG3)   | 1,005.92 | 1,676.54 | 29,813 | 36,515   | 22,500 | 15,000 | 37,500    |
| 그룹 4(SG4)   | 1,005.92 | 1,676.54 | 19,954 | 26,775   | 22,500 | 15,000 | 37,500    |
| [주] $N(30) < 7,000$ , $N(50) < 7,000$<br>$S_{TE} < S_A+S_h$ |          |          |        |          |        |        |           |

## 5. 결론

국내의 노후화 된 중수로형 원전을 대상으로 계속운영 타당성 여부를 기술적으로 결정하고자 하는 수명관리연구의 일환으로 2차계통 배관에 대한 수명평가를 수행하였다. 평가에서 목표로 설정한 계속운영 기간은 50년이다. 평가방법은 원전 안전과 밀접한 연관성이 있어 배관 손상시 원전 계속운영에 지대한 영향을 미칠 수 있는 배관을 선정하고, 이를 효율적으로 평가하기 위하여 적절하게 그룹화 한 후 그룹을 대표할 수 있는 배관에서 발생 가능한 경년열화기구에 대하여 개별적으로 평가하는 방식을 택하였다. 이러한 방식에 따라 선정된 대표 배관라인은 주급수계통의 고압 급수가열기 #6 출구에서 증기발생기 입구노즐까지의 배관라인과 주증기계통의 증기발생기 출구노즐부터 주증기헤더까지의 배관라인으로 결정되었다. 선정된 배관라인별로 검토할 필요성이 있는 경년열화기구는 주급수 및 주증기계통 모두 일반부식, 공식, 틈부식, 침부식, 열응력의 5개 경년열화기구로 확인되었으나 실제 설계 및 운전환경을 적용하여 비교/분석해 본 결과 침부식과 열응력에 대해서만 수명평가가 필요한 것으로 결정되었다.

침부식 평가는 CHECWORKS 코드에 의한 이론적 평가와 장기간의 실측 데이터에 근거한 추이분석법에 의한 평가를 동시에 수행하여 결과의 신뢰성을 확보하였다. 평가결과 대부분의 배관에서는 50년까지 계속운영 시에도 문제가 없는 것으로 확인되었지만 급수가열기 #6 출구의 T형 배관은 잔여수명이 16년으로 결정되어 적절한 시점에 교체가 필요한 것으로 확인되었다. 그리고 허용응력 평가는 설계시 고려한 과도상태 횡수를 운전 중에 실제 발생한 과도상태 횡수와 비교하는 방식과 설계응력보고서에 근거한 허용응력을 비교하는 방식을 혼용하였다. 과도상태 횡수를 비교한 결과 18년 및 50년 운전시점의 설계 과도상태 대비 전체 과도상태의 여유도는 88.6% 및 68.2%로 계산되었다. 설계시 고려한 등가사이클 역시 50년 계속운전 고려시 1,677회로서 설계시 고려한 7,000회 미만이다. 그리고 주증기계통 설계응력보고서에서 계산된  $S_E$ 는  $S_A$  보다 작아야 한다는 기준도 50년 계속운전 고려시 모두 만족함을 확인하였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 허용응력 관점에서 주급수 및 주증기계통 배관은 모두 50년까지 계속운전이 가능한 것으로 평가되었다.

## 참고문헌

1. 한수원(주), 품질보증절차서, 월성-품질-7-1, Rev.1, 2000.
2. ASME, Environmental Effects on Components, ASEM Sec.III Appendix W, 1999.
3. NRC, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, Office of Nuclear Reactor Regulation, 2000.
4. KEPRI, 국내 CANDU 원전 2차계통 배관 데이터베이스 구축 및 감육해석, 2000.
5. ASME, American Society of Mechanical Engineering, Sec.III NC-3600.