

증기발생기 전열관 축방향 응력부식균열의  
구조 건전성 평가

Structural Integrity Assessment on Axial PWSCC  
of Steam Generator Tubes

김홍덕, 김기태, 정한섭

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

증기발생기 전열관 관판 상단의 축방향 응력부식균열에 대한 대체관막음기준 적용의 근거를 확보하기 위하여 구조 건전성 평가를 수행하였다. NRC의 새로운 규제방안이 제시하는 성능기준에 근거를 두고 각국에서 개발한 기존의 계산 algorithm과 데이터베이스, 그리고 발전소 고유의 재질, 설계, 균열성장거동 데이터를 활용하여 균열길이기반 대체관막음기준을 검증하였다. 발전소 고유 자료를 이용하여 도출한 관막음기준은 원래 권고기준보다 증가하였고, 현행 관막음기준 적용의 타당성을 입증할 수 있었다. 앞으로 비파괴 검사 자료에 대한 검증 작업이 수행된다면 관막음기준은 보다 상향 설정될 수 있을 것이다.

Abstract

Structural integrity assessment was performed to support the application of crack-length based repair criteria to the axial PWSCC at the top of tubesheet. The alternative tube repair criteria based on the length of crack was justified on the basis of the performance criteria proposed by NRC as a SG regulation methodology by utilizing a few calculation algorithms of different countries adapting length-based repair criteria, and industry data base, and plant specific data such as tube material properties, design parameter, and crack growth behavior. The plant-specific crack-length based repair criteria were higher than the generic repair criteria, and the validity of current criteria could be justified, and further it is expected that the tube plugging limits be increased if the current NDE data base is re-evaluated.

## 1. 서론

원전 증기발생기의 결함 전열관에 대한 관막음 기준은 결함의 유형에 관계없이 일괄적으로 40% 관두께 기준을 적용하여 왔다. 그러나 기존의 40% 관두께 보수기준은 매우 보수적인 측면이 있기 때문에 많은 발전소에서는 이러한 과도한 보수성을 피하기 위하여 결함 유형별 기준 (degradation specific criteria)을 적용하는 대체 관막음 기준 (ARC ; alternative repair criteria)을 적용하고 있거나 개발중이다.

울진 1,2호기 증기발생기 전열관 관판 상단 kiss roll 확장 부위에 축방향의 일차측 응력부식균열이 발생하여 성장하고 있다. 최종안전성분석보고서에 부식층의 두께가 관두께의 66% 이상이면 관막음하도록 규정되어 있으나, 임시 관막음 기준에 따라 프랑스에서 개발된 ARC를 적용하고 있다. 이는 균열 길이를 관막음 기준으로 활용함으로써 관통균열도 허용하며, 균열길이는 13 mm 이내로 제한한다. 균열길이기반 ARC는 가동중 누설을 허용하므로 누설허용운전에 대한 여론의 우려 가능성에 대비하여 보다 확실한 ARC 적용 근거를 자체적으로 확보해 둘 필요가 있다. 그리고 프랑스의 ARC는 명문화된 구체적인 규제 기준에 의한 것이 아니라 결함의 전파 양상과 비파괴 검사 기술의 진보 등 새로운 정보를 즉시 반영하고, 적용 대상 발전소의 균열 성장 거동과 비파괴검사 신뢰성 자료를 활용함으로써 발전소 고유의 상황을 반영하여 기준을 설정하고 있다. 국내의 모든 원전에서는 40% 관두께 기준이 원칙인 바, 울진 1,2호기에서만 길이기반 ARC를 적용하고 있다. 계통공급국가 규제방침을 준용하여 프랑스의 ARC를 적용하고 있으나, 국내에서 동일한 결함에 대해서 공급국가가 다르다는 이유만으로 서로 다른 기준을 적용한다는 것은 논리적으로 다소 미흡한 점이 있다.

이와 같은 미흡한 점을 보완하여 현재 울진 1,2호기에 적용하고 있는 길이기반 ARC에 대해서 자체적으로 뚜렷한 근거와 논리를 확보하고자 한다. 그러나 자체적인 근거를 확보하기 위하여 필요한 ARC 적용에 대한 규제근거가 불확실한 실정이다. 최근 미국에서 논의되고 있는 NRC의 증기발생기 규제방안 개정안[1-3]은 전열관 건전성 평가를 위한 성능 기준 (performance based criteria) 적용을 요구하면서 ARC에 대한 뚜렷한 규제근거를 제시하고 있다.

따라서 본 논문에서는 NRC의 새로운 규제방안이 제안하는 성능기준을 규제근거로 활용하여 울진 1,2호기 전열관 축방향 응력부식균열에 대한 균열길이기반 ARC 적용의 타당성을 검증하고자 한다. 구조 건전성 평가에 대한 계산 algorithm은 프랑스, 벨기에, EPRI의 계산방법을 참조하였으며, 건전성 평가에 필요한 시험 데이터와 모델, 그리고 비파괴 검사의 신뢰성 검토 자료는 프랑스, 벨기에, 미국 등 해외에서 이미 개발한 기존의 데이터베이스를 활용하였다. 재질, 설계, 가동 변수는 울진 원전 고유의 데이터를 활용하고, 균열 성장 거동은 울진 1,2호기 비파괴 검사 데이터를 분석하여 활용하였다.

## 2. 구조 건전성 평가

증기발생기 전열관은 정상가동중 뿐만 아니라 MSLB나 FWLB와 같은 설계기준사고가 발생하더라도 전열관 파단이 일어나지 않고 구조적 건전성을 유지하여야

한다. 따라서 ARC를 적용하려면 결함 전열관이 가동과 설계기준사고시에 구조적으로 건전함을 입증할 수 있는 길이기준을 설정하여야 한다. 균열길기와 파열압력의 상관관계를 나타내는 파열식에 작용압력과 전열관의 강도 및 치수를 대입하여 기준균열길이를 구한 후 안전계수와 관판보강효과, 비파괴 측정 오차, 균열성장속도 등 제반 인자를 고려하여 전열관 파열이 일어나지 않는 최대허용 균열길이, 즉 대체 관막음 기준을 설정하여야 한다. 학관 천이 영역의 축방향 균열에 대한 길이기준 관막음기준 설정방법은 벨기에[4]와 프랑스[5-7], EPRI[8]에서 각각 개발되었으며, 파열식과 자료 선정 기준, 적용 순서 및 방법이 서로 다르다.

전열관의 구조 건전성 평가에 필요한 울진 1,2호기 고유의 설계, 전열관 치수, 강도, 비파괴 측정오차, 균열성장속도 자료를 정리 및 분석한 후에 각국의 평가절차에 따라 관막음기준을 설정하였다. 그리고 각국의 원래 기준과 비교하여 그 차이의 원인을 검토하였다.

## 가. 입력 자료 분석

### (1) 작용압력

정상가동압력  $\Delta P_{normal}$ 은 9.73 MPa이고, 주증기관과 급수관 파단압력은 각각 15.7 MPa, 17.2 MPa이므로 설계기준사고 최고압력  $\Delta P_{accident}$ 는 17.2 MPa이다

### (2) 전열관 치수

증기발생기 제조에 사용된 전열관은 7/8"로 공칭 두께와 외경은 각각 1.27 mm, 22.22 mm이고, 최소두께와 최대 평균반경은 가공허용오차  $\pm 0.12$  mm를 고려하여 결정하였다.

$$- t = 1.27 \text{ mm, 평균반경 } r = 10.475 \text{ mm}$$

$$- \min t = 1.15 \text{ mm, max } r = 10.595 \text{ mm}$$

### (3) 전열관 강도

모든 전열관 heat의 재료시험증명서(Certified Material Test Report, CMTR)의 강도자료를 통계 처리한 결과는 아래와 같다.

$$- \text{mean (YS+UTS)} = 946 \text{ MPa}$$

$$- \min (\text{YS+UTS}) = 849 \text{ MPa}$$

$$- \min \text{YS} + \min \text{UTS} = 821 \text{ MPa}$$

$$- 95\%/95\% \text{ LB (YS+UTS)} = 892 \text{ MPa}$$

### (4) 균열성장속도

지난 4주기동안 학관부위 균열길이 측정결과를 분석하여 구한 길이별 성장속도를 그림 1에 나타내었다. 길이 65 mm 미만 균열의 평균 성장속도는 0.5 mm/EPFY 이하이고, 길이가 길수록 성장속도는 감소한다. 이러한 성장속도는 동일한 kiss roll을 적용한 벨기에 발전소는 물론이고 표준 roll의 성장속도보다도 낮다. 관막음 기준 설정에 필요한 것은 길이가 긴 균열의 성장속도인데 이러한 전열관은 대부분 이미 관막음 또는

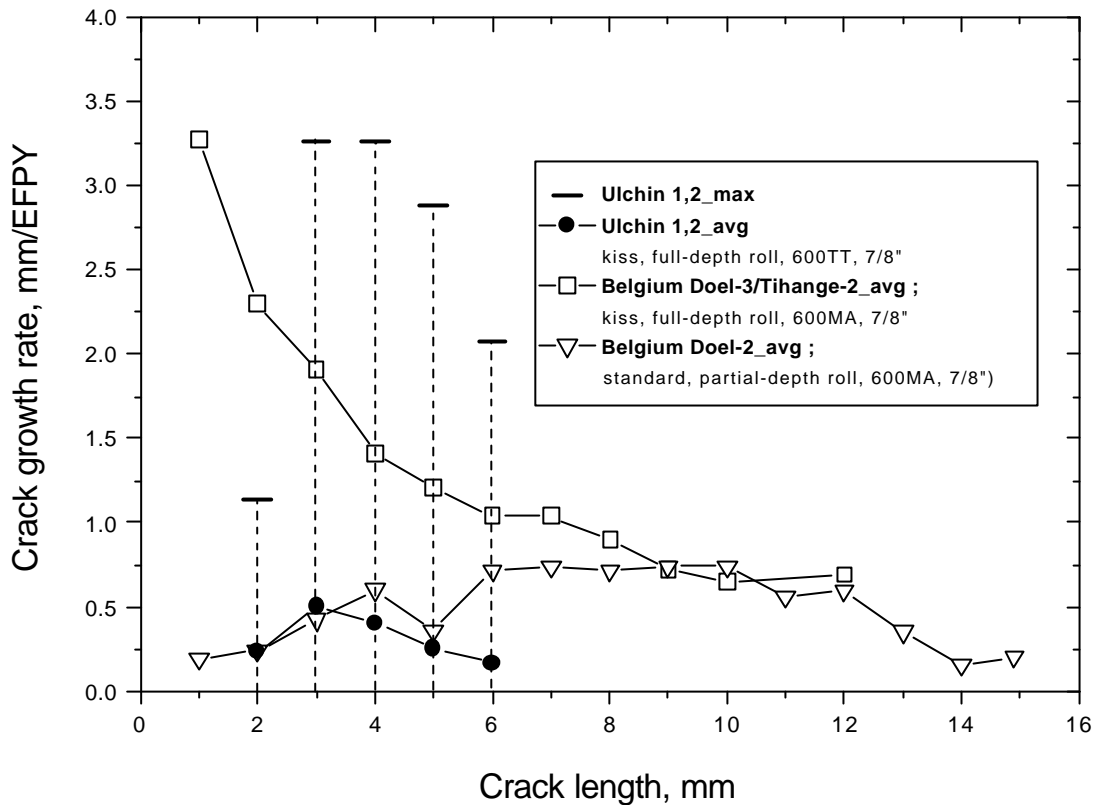


그림 1 균열 성장 속도

슬리브 정비를 하였기 때문에 성장 자료가 너무 적고, 그나마 대부분은 성장속도가 비정상적으로 큰 것뿐이다. 그래서 균열길이 5.5 mm 이상의 데이터 129개에 대하여 평균 균열성장속도를 구한 결과, 0.25 mm/EPFY였다. 그리고, 95%/95% upper bound 값인 1.46 mm/EPFY를 최대 균열성장속도로 선정하였다. 평균 및 최대 균열성장속도에 유효가동시간 (1.3 EPFY/cycle)을 고려하여 1주기 균열 성장량 acg를 계산하였다.

- 평균 균열 성장량 acg = 0.33 mm/cycle
- 최대 균열 성장량 acg = 1.90 mm/cycle

#### (5) 비파괴 검사 오차

Framatome이 1994년에 울진 1,2호기 결함 전열관 2개를 인출 검사한 결과[9]에 따르면 비파괴 검사에서 7.0, 7.1 mm로 측정되었던 균열의 실제길이는 각각 6.86, 5.88 mm로 비파괴 검사시 0.14, 1.22 mm씩 과대 평가되었다. 관막음 기준 설정시 비파괴 측정오차를 고려하는 것은 실제길이보다 작게 측정되어, 즉 과소 평가되어 관막음 기준보다 긴 균열이 보수되지 않고 잔류하여 가동중 구조 건전성을 해치는 경우를 방지하기 위함이다. 그러나 위와 같은 과대평가는 동일한 관막음기준을 적용할 때 관막음 수량을 증가시키고, 결과적으로 보수적인 관막음기준 적용을 초래할 수 있다. 그리고 이러한 과대평가는 관막음 기준을 상향 설정하는 효과가 있기 때문에 관막음

기준은 과소 평가량만을 고려하여 보수적으로 설정하여야 한다.

벨기에와 프랑스의 구조건전성 평가에서 비파괴검사에 의한 최대 균열길이 측정오차를 각각 1.5, 1.0 mm로 설정하였다. 한편, 울진 1,2호기에서 바로 전번 ISI에서는 균열이 관찰되지 않은 전열관에서 새로운 균열이 발견된 경우에 균열 길이는 대부분 2 mm 이상이였다[10]. 새로운 균열이 생성된 후 성장한다는 것을 고려할 때 균열길이 과소 평가량을 2.0 mm로 설정하면 충분히 보수적인 값으로 판단된다.

- 평균 비파괴 측정 오차  $\text{anDE} = 0.0 \text{ mm}$
- 최대 비파괴 측정 오차  $\text{anDE} = 2.0 \text{ mm}$

## 나. 벨기에 방법에 따른 구조 건전성 평가

벨기에에서 개발한 구조 건전성 평가는 안전계수 고려 유무에 따라 ① 안전계수를 고려하는 최적 평가 (best estimate with safety factor)와 ② 안전계수를 고려하지 않는 보수적 평가 (conservative estimate without safety factor)로 구분되며, 대입하는 자료가 서로 다르다.

### (1) 파열식과 기준 균열길이 계산

직관 (free span) 부위에 대한 파열식에 작용압력과 전열관 두께, 재료강도를 대입하면 파열이 발생하는 기준 균열길이 (reference crack length)  $a_R$ 를 계산할 수 있다.

$$P_N = \frac{0.513}{0.614 + 0.386 \exp(-1.125\lambda) + 0.433\lambda} \quad (1)$$

$$P_N = \frac{Pr}{(YS+UTS)t}$$

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{rt}}$$

a : 축방향 관통균열의 길이

### ① 최적 평가

전열관에 작용하는 압력 P는 정상가동중 일차측과 이차측의 압력차  $\Delta P_{\text{normal}}$ 과, 설계기준사고 MSLB와 FWLB 중 최대압력차  $\Delta P_{\text{accident}}$  두 경우를 고려하고, 전열관의 평균반경 r과 두께 t는 공칭치수를 이용하였다. 그리고 항복강도와 인장강도는 설계가동온도에서 전열관 제조에 사용한 모든 heat의 평균값을 선택하였다.

### ② 보수적 평가

압력 P는 설계기준사고 최대압력차  $\Delta P_{\text{accident}}$ 를 선택하고, 축방향 균열에 작용하는 원주방향응력이 최대가 되도록 전열관 평균반경 r은 최대값, 두께 t는 최소값을 선택하였다. 그리고 재료강도는 각 heat의 항복강도와 인장강도 합 중에서 최소값을 취하였다.

## (2) 관판 보강효과 보정

전열관을 관판에 고정하는 확관작업시 전열관 두께가 감소하고, 직경이 증가하여 파열이 촉진되는 요인도 있으나, 관판이 결함 전열관의 소성변형을 억제하는 효과와 확관시 가공경화에 의한 강도증가 효과가 더 크기 때문에 확관 천이 영역에서 파열압력은 직관 부위에 비하여 더 크다. 이러한 관판 보강 효과로 인하여 전열관 파열이 억제되는 정도를 나타내는 기준 균열길이 증가량  $a_{TS}$ 는 벨기에의 파열시험 결과로부터 구하였다.

## (3) 균열길이에 안전계수 적용

US NRC Regulatory Guide 1.121에서 두께기준 관막음기준 설정시에 안전계수는 전열관에 작용하는 하중에 적용하도록 규정되어 있다. 즉 정상가동압력에는 안전계수 3을 그리고 설계기준사고압력에는  $\sqrt{2}$ 를 적용해야 한다. 그러나 균열길이기준 관막음기준 설정에서 안전계수를 압력에 적용하는 것보다 균열길이에 적용하는 것이 파열시험 결과와 더 잘 일치하고, 압력보다는 균열길이에 불확실성이 더 크기 때문에 벨기에 구조건전성 평가법에서는 안전계수를 균열길이에 적용하였다. 즉 앞의 (1)항목에서 구한 기준균열길이에 (2)항목에서 구한 관판보강효과를 더한 균열길이 ( $a_R + a_{TS}$ )를 안전계수 (safety factor, SF)로 나누어 준 값이 허용균열길이 (allowable crack length)  $a_A$ 가 되고, 이 때 안전계수는 다음과 같이 평가방법과 작용압력에 따라 달라진다.

### ① 최적 평가 :

$$\Delta P_{\text{normal}} \text{을 고려하는 경우 안전계수는 } 3 \quad ; \quad a_A = \frac{a_R + a_{TS}}{3} \quad (2-A)$$

$$\Delta P_{\text{accident}} \text{를 고려하는 경우 안전계수는 } \sqrt{2} \quad ; \quad a_A = \frac{a_R + a_{TS}}{\sqrt{2}} \quad (2-B)$$

### ② 보수적 평가 :

$$\Delta P_{\text{accident}} \text{를 고려하는 경우 안전계수는 } 1 \quad ; \quad a_A = \frac{a_R + a_{TS}}{1} \quad (2-C)$$

## (4) 비파괴 검사 오차 고려

비파괴 검사로 측정된 결함길이가 실제 결함길이보다 작은 경우에 관막음기준보다 더 긴 균열이 보수되지 않고 잔류하여 구조건전성을 확보하지 못할 수도 있으므로 이러한 측정오차를 배제하여야 한다. 최적 평가에서는 평균값을, 그리고 보수적 평가에서는 최대값을 사용하여 비파괴 측정오차를 고려하였다.

## (5) 균열성장속도 고려

다음 주기 가동중에 균열 성장이 진행되어도 주기 말까지 전열관 파열이 발생하지 않도록 구조 건전성을 확보하여야 한다. 따라서 관막음 기준은 가동시간과 균열성장속도를 고려한 1 주기동안 균열성장량  $a_{CG}$  만큼 짧게 설정되어야 한다. 균열 자료를 분석하여 구한 평균 및 최대 균열 성장 속도를 최적 평가와 보수적 평가에 각각 활용하였다.

(6) 관막음 기준

정상가동압력과 설계기준사고압력을 각각 고려하는 최적 평가와 안전계수를 고려하지 않는 보수적 평가, 이 세 경우에 대하여 다음과 같이 임계균열길이(critical crack length)  $a_c$ 를 각각 구한 후, 이중 최소값 15.0 mm를 관막음 기준으로 설정하였다.

$$a_c = \left( \frac{a_R + a_{TS}}{SF} \right) - a_{CG} - a_{NDE} = 15.0 \quad (3)$$

다. 프랑스 방법에 따른 구조 건전성 평가

(1) 파열식과 기준 균열길이 계산

프랑스에서 제안한 파열식에 하중과 전열관 치수, 강도를 대입하여 기준균열길이  $a_R$ 를 구하였다.

$$P_N = \frac{0.54}{\sqrt{1+0.4\lambda^2}} \quad (4)$$

이 때 가상사고 최대압력차  $\Delta P_{\text{accident}}$ 가 전열관에 작용하는 경우에 전열관 제작시 최대가공허용오차인  $\pm 0.12$  mm를 적용한 최대직경과 최소두께를 선택하여 파열에 가장 취약한 치수를 가정하였다. 전열관 강도는 설계기준사고온도인 343°C에서 측정된 항복강도와 인장강도 중에서 각각 최소값을 취하였다.

(2) 안전계수 고려

프랑스의 구조건전성 평가법은 관막음기준 설정과정에 안전계수를 별도로 고려하지 않았다. 그 이유는 전열관에 걸리는 압력을 계산할 때 최대 가공허용오차를 고려한 최대직경과 최소두께를 선택하였으므로 보수성을 충분히 확보하였기 때문이다.

(3) 관관 보강효과 보정

직관부위와 확관부위에 대한 벌징(bulging) 계수를 비교하여 관관 보강으로 인한 기준균열길이 증가량  $a_{TS}$ 를 기준균열길이의 함수로 유도하여 관관 보강효과를 보정하였다.

$$a_{TS} = a_R \left( \sqrt{\frac{a_R + 5\sqrt{rt}}{a_R + 2.5\sqrt{rt}}} - 1 \right) \quad (5)$$

(4) 균열성장속도와 비파괴 검사 오차 고려

균열성장속도와 비파괴 측정오차는 최대값을 선택하였다.

(5) 관막음 기준

파열식에 설계사고압력과 전열관 최대직경, 최소두께, 최소 강도를 대입하여 얻은 기준 균열 길이에 관판구속효과와 균열성장속도, 비파괴 측정 오차를 고려하여 관막음 기준 142 mm를 구하였다.

$$a_c = (a_R + a_{TS}) - a_{CG} - a_{NDE} = 14.2 \tag{6}$$

**라. EPRI 방법에 따른 구조 건전성 평가**

(1) 파열식과 기준 균열길이 계산

EPRI에서 제안한 파열식에 작용압력과 안전계수, 전열관 치수, 재료강도를 대입하여 기준 균열길이  $a_R$ 를 계산하였다.

$$P_N = 0.44628 - 0.41881 \log_{10} \lambda \tag{7}$$

여기서 압력 P는 정상가동 압력차  $\Delta P_{normal}$ 과 설계사고 최고압력차  $\Delta P_{accident}$ 에 안전계수 3과  $\sqrt{2}$ 를 각각 적용한  $3\Delta P_{normal}$ 과  $\sqrt{2}\Delta P_{accident}$  중 큰 값을 사용하고, 전열관의 평균반경 r과 두께 t에는 공칭치수를 대입하였다. 전열관의 파열거동을 지배하는 항복강도와 인장강도는 95%/95% lower bound 값을 활용하였다.

(2) 관판 보강효과 보정

관판의 존재로 인한 기준 균열길이 증가량  $a_{TS}$ 는 관판 구속 (tubesheet constraint) 효과에 대한 벨기에의 파열시험결과를 EPRI가 보수적으로 평가한 다음 식을 이용하였다.

$$\text{if } 0 < a_R \leq 8.5\text{mm} \quad ; \quad a_{TS} = 4.5\text{mm} \tag{8-A}$$

$$\text{if } 8.5\text{mm} < a_R \leq 22\text{mm} \quad ; \quad a_{TS} = 7.33 - \frac{a_R}{3} \text{ mm} \tag{8-B}$$

$$\text{or if } 22\text{mm} < a_R \quad ; \quad a_{TS} = 0 \tag{8-C}$$

(3) 균열성장속도 고려

평균 균열성장속도와 유효가동시간을 고려하여 균열길이  $(a_R + a_{TS})$ 의 1주기 성장량  $a_{CG}$ 를 결정하였다.

(4) 비파괴 검사 오차 고려

EPRI가 프랑스와 벨기에, 스웨덴, 스페인의 핵관부위에 대한 비파괴 검사 검증결과를 통계 처리하여 제안한 식을 이용하여 균열길이 감소량  $a_{NDE}$ 를 구하였다.



$$a_{NDE} = (x - y) + (y - y_{LB}) = (x - y_{LB}) \quad (9)$$

여기서  $x = a_R + a_{TS} - a_{CG}$  : 실제균열길이 (기준균열길이),  
 $y = NDE$  균열길이,  
 $y_{LB}$  : lower bound NDE 균열길이,  
 $(y - y_{LB}) = 1.645 S$ ,  $S = 1.46$  mm : 표준편차

#### (5) 관막음 기준

파열식에 압력과 안전계수, 전열관 치수, 강도를 대입하여 얻은 기준 균열 길이에 관판구속효과와 균열성장속도, 비파괴 측정 오차를 고려하여 얻은 임계균열길이 10.8 mm가 관막음 기준이 된다.

$$a_C = (a_R + a_{TS}) - a_{CG} - a_{NDE} = 10.8 \quad (10)$$

#### 마. 평가 결과 검토

벨기에와 프랑스, EPRI에서 개발된 전열관 구조 건전성 평가법에 따라 울진 1,2호기 원전 고유의 자료를 활용하여 전열관 관판 상단 축방향 응력부식균열의 관막음 길이 기준을 설정한 결과를, 각 ARC에서 권고하는 원래 관막음기준과 함께 표 1에 정리하였다. 도출된 길이기준 관막음 기준은 평가방법에 무관하게 원래 권고기준보다 증가하였으며, 이는 현행 길이기준 ARC 적용의 타당성을 입증할 수 있음을 의미한다.

각국의 원래 관막음 기준과 울진 1,2호기에 적용하여 구한 기준을 비교하고, 그 차이를 검토하고자 한다. 벨기에와 프랑스 평가법에서는 파열거동과 잘 일치하는 파열식과, 울진 원전 고유의 전열관 강도 및 균열성장 자료를 사용하였기 때문에 관막음 기준은 원

표 1. 각 구조 건전성 평가법을 울진 1,2호기에 적용한 결과

	벨기에 ARC*		프랑스 ARC		EPRI ARC	
	울진 기준**	원래 기준***	울진 기준	원래 기준	울진 기준	원래 기준
허용균열길이 (mm)	15.3	12.9	18.2	16.5	13.7	13.2
균열성장속도 (mm/cycle)	0.3	0.7	1.9	2.5	0.3	0.6
비파괴측정 오차 (mm)	0.0	0.0	2.0	1.0	2.6	2.5
관막음 기준 (mm)	15.0	12.2	14.3	13.0	10.8	10.1

\* 최적 평가

\*\* 울진 1,2호기 고유 데이터를 적용하여 계산한 기준

\*\*\* ARC 개발시 일반적인 데이터를 적용하여 설정된 원래 기준

래 권고기준보다 각각 28 mm, 13 mm 증가하였다. EPRI 평가법은 가장 보수적인 파열식을 적용하므로 세 방법 중에서 가장 관막음기준이 가장 짧으며, 입력자료로 평균, 공칭 또는 통계 처리한 값을 대입하기 때문에 올진 1,2호기 고유 데이터를 적용한 경우의 관막음기준은 일반적인 데이터를 사용한 원래 권고기준에 비하여 약간 증가하였다.

각국에서 축방향 균열에 대한 관막음 기준을 개발할 때, 1주기 가동기간을 0.8 EPPY로 가정한 반면에, 본 논문에서는 올진 1,2호기의 핵연료주기를 고려하여 1주기 가동기간은 1.3 EPPY로 대입하여 1주기 균열성장량을 계산하였다. 그리고 비파괴 측정 오차는 프랑스나 벨기에에 비하여 큰 값인 20 mm를 사용하였다. 이와 같이 훨씬 보수적인 1주기 가동기간과 비파괴측정오차를 선택하였음에도 불구하고 원래 권고기준보다 큰 평가결과가 나온 것은 올진 1,2호기의 실제 전열관 강도와 균열성장 자료를 활용하였기 때문이다.

그림 1에서 올진 1,2호기의 평균 및 최대 균열성장속도, 표준편차는 벨기에의 kiss roll 적용 발전소보다 매우 작다. 이는 응력부식균열에 대한 저항성이 우수한 Alloy 600TT를 사용하였기 때문이다. 그러나 관막음 기준 설정에 필요한 긴 균열에 대한 데이터 수가 매우 부족하고, 일부 데이터가 비정상적으로 높은 성장속도를 나타내는 경향을 보이고 있다. 균열성장속도가 빠른 결함 전열관에 대한 비파괴 검사 결과 재판독을 요청한 바 있는데, 비파괴 검사 결과에 대한 확인 또는 검증작업이 수행된다면 관막음기준은 보다 상향 설정될 수 있으며, 결과적으로 구조 건전성 확보와 대체 관막음기준 적용의 타당성은 보다 증진될 것으로 기대된다.

### 3. 결 론

올진 1,2호기 증기발생기 전열관 축방향 응력부식균열에 적용하고 있는 프랑스 대체 관막음 기준의 자체적인 근거를 확보하기 위하여 구조 건전성 평가를 수행하였다. 프랑스의 기준설정 절차에 따라서 올진 1,2호기 고유의 자료를 이용하여 도출된 길이기준 관막음 기준은 프랑스의 원래 권고기준보다 증가되었으며, 현행 대체 관막음 적용의 타당성을 입증할 수 있었다. 앞으로 비파괴 검사 자료에 대한 검증 작업이 수행된다면 관막음 기준은 보다 상향 설정될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] NEI 97-06, Draft "Steam Generator Program Guidelines", Aug. 1997
- [2] NRC Generic Letter 97-XX, Draft "Steam Generator Tube Integrity", Aug. 1997  
NRC Draft Reg. Guide, DG-1074 "Steam Generator Tube Integrity", Sep. 1997
- [3] 정한섭, 김홍덕, "최근 원전 증기발생기 규제방안에 대한 검토결과 보고서", KERPI TM.C05.E19971182, 1997
- [4] EPRI NP-6626-SD, "Belgian Approach to Steam Generator Tube Plugging for Primary Water Stress Corrosion Cracking", 1990
- [5] EPRI NP-6665-L Volume 1, "Steam Generator Tube Integrity Volume 1: Burst

- Test Results and Validation of Rupture Criteria (Framatome Data)", 1991
- [6] EPRI NP-6865-L Volume 2, "Steam Generator Tube Integrity Volume 2 : Leak-Before-Break Analysis for Primary Water Stress Corrosion Cracking Near the Tubesheet (Framatome Data)", 1991
- [7] NUREG/CP-0154, "French Regulatory Practice and Experience Feedback on Steam Generator Tube Integrity", Proc. of the CNRA/CSNI Workshop on Steam Generator Tube Integrity in Nuclear Power Plants, Paper No. 34, 1995
- [8] EPRI NP-6864-L Revision 1, "PWR Steam Generator Tube Repair Limits: Technical Support Document for Expansion Zone PWSCC in Roll Transitions (Revision 1)", C. L. Williams, 1991
- [9] P.M. Scott, B Cochet, "Ulchin 1 Steam Generators : Presentation of the Framatome Study", Framatome, 1995
- [10] 정한섭, 김기태, 김홍덕, 이희종, 남민우 "증기발생기 권열관 건전성 평가기준 개발", KERPI TM, 96NJ14M1998, 781, 1998