

원자로 냉각재배관의 열취화 평가

장윤식, 조성빈, 진태은
한국전력기술주식회사

장창희, 정일석, 홍승열
한전전력연구원

요 약

주조 스테인레스강으로 제작된 원자로 냉각재배관은 고온에서 장기간 운전됨에 따라 열취화의 영향을 받을 수 있다. 장기간의 열취화는 재료의 연성 및 파괴인성을 저하시킬 수 있으며, 배관에 균열이 존재하는 경우 건전성을 위협할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 원전 수명연장을 위한 타당성 검토 측면에서 Chopra의 방법 등을 이용한 원자로 냉각재배관의 열취화 평가 및 민감도 분석을 수행하였다. 이를 통해 원자로 냉각재배관의 열취화 수준을 정량화하였고, 건전성 평가에 활용될 수 있는 J_{IC} 값을 예측하였으며, 열취화에 영향을 미치는 주요 인자를 도출하였다.

1. 서 론

고온에서 장기간 운전되는 기기 및 구조물에서 발생 가능한 열취화(Thermal Embrittlement) 현상은 항복강도와 인장강도에는 별다른 영향을 미치지 않으나 재료의 연성을 저하시키는 것으로 알려져 있다[1]. 연성-취성 전이온도(Ductile-Brittle Transition Temperature)의 상승을 수반하는 연성의 저하는 재료의 파괴인성 및 샤피 상부흡수에너지(Charpy Upper Shelf Energy)의 저하로 이어질 수 있으며, 이로 인해 운전 조건의 제한 및 구조적 건전성 문제가 대두될 수 있다.

1970년대 이후 수행된 재료의 열취화 관련 연구는 대부분 특정 재료의 실험 측면에서 이루어져 왔으며, 최근에는 이러한 결과를 토대로 재료의 손상 정도를 정량화하고 구조물의 건전성 평가 등에 활용하기 위한 연구가 수행되고 있다[2~4]. 그러나 현재까지도 원전 주요기기의 평가와 관련하여 열취화 현상을 정량화할 수 있는 구체적인 ASME 기술기준(Code & Standard) 및 해석 절차는 확립되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 원전 수명연장을 위한 타당성 검토 측면에서 CF8M 주조 스테인레스강 재료로 제작된 원자로 냉각재배관의 열취화 수준을 정량화하고, 탄소성 파괴역학을 이용한 건전성 평가에 활용 가능한 재료물성치 예측 결과를 제시하며, 입력변수로 사용된 화학조성과 열취화 온도 등에 대한 민감도 분석을 수행하여 주요 인자의 영향을 검토하고자 한다

2. 열취화 평가방법

열취화 평가방법으로는 페라이트 측정법, 가속열취화 시험법, 투과전자현미경 (Transmission Electron Microscopy : TEM) 측정법과 같이 실험 결과를 이용하는 방법과 화학조성법 등의 간편한 방법이 제안되고 있다. 본 연구에서는 이러한 방법 중 원전 수명 연장을 위한 타당성 검토 측면에서 화학조성법을 적용한 열취화 평가를 수행하였다.

2.1 상온 최소 샤프 충격에너지 결정

Chopra는 재료시험 결과를 토대로 CF8M 재료의 상온 최소 샤프 충격에너지(C_{vsat})를 예측할 수 있는 다음과 같은 2가지 식을 제시하였다[3, 4].

$$\begin{aligned} \log_{10} C_{vsat} &= 1.10 + 2.12 \exp(-0.041\phi) \quad \text{for } Ni < 10wt\% \\ \log_{10} C_{vsat} &= 1.10 + 2.64 \exp(-0.064\phi) \quad \text{for } Ni > 10wt\% \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \phi = \delta_c (C + 0.4N) (Ni + Si + Mn)^2 / 5$$

$$\begin{aligned} \log_{10} C_{vsat} &= 7.28 - 0.011\delta_c - 0.185Cr - 0.369Mo - 0.451Si - \\ &0.007Ni - 4.71(C + 0.4N) \end{aligned} \quad (2)$$

상온 최소 샤프 충격에너지는 식 (1)과 식 (2)에 의해 계산된 값 중 보수적인 관점에서 작은 값으로 선정하며, 이 때 페라이트 함량(δ_c)은 Hull의 등가계수인 Cr_{eq} 과 Ni_{eq} 을 이용하여 결정한다.

$$\begin{aligned} \delta_c &= 100.3 (Cr_{eq}/Ni_{eq})^2 - 170.72 (Cr_{eq}/Ni_{eq}) + 74.22 \\ \text{여기서, } Cr_{eq} &= Cr + 1.21(Mo) + 0.48(Si) - 4.99 \\ Ni_{eq} &= Ni + 0.11(Mn) - 0.0086(Mn)^2 + \\ &18.4(N) + 24.5(C) + 2.77 \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 샤프 충격에너지 결정

Chopra는 CF8M 재료의 상온 최소 샤프 충격에너지 뿐만 아니라 운전온도 및 특정 시간에서의 샤프 충격에너지(C_v)를 예측할 수 있는 다음과 같은 실험식도 제시하였다[3, 4].

$$\begin{aligned} \log_{10} C_v &= \log_{10} C_{vsat} + \beta \{1 - \tanh[(P - \theta) / \alpha]\} \\ \text{여기서, } \beta &= (\log_{10} C_{vint} - \log_{10} C_{vsat}) / 2 \\ P &= \log_{10} (t) - \frac{1000Q}{19.143} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{673} \right) \\ \alpha &= -0.585 + 0.795 \log_{10} C_{vsat} \\ Q &= 10[74.52 - 7.20\theta - 3.46Si - 1.78Cr - 4.35Mn + 23N] \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 C_{vint} 는 초기 샤피 충격에너지, θ 는 400°C에서 샤피 충격에너지가 β 까지 감소되는 시간의 로그 값, t 는 열취화 시간(hr), T 는 운전온도(°K), Q (KJ/mole)는 활성화에너지를 의미한다. 이 때 활성화에너지는 290~400°C의 온도범위에서 50,000시간까지 열취화된 재료의 약 50개 히트번호(Heat Number)에 대한 샤피 충격시험 결과에서 도출한 것이다.

3. 열취화 평가결과

3.1 화학조성 및 페라이트 함량 결정

Chopra의 방법을 이용한 원자로 냉각재배관 재료의 열취화 평가를 위해 먼저 각 해석부위의 화학조성과 페라이트 함량을 결정하였다. 표 1은 재료시험보고서[5]에 제시된 화학조성 및 페라이트 함량을 정리하여 나타낸 것으로서, 페라이트 함량이 제시되어 있지 않은 경우에는 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

표 1 CF8M 원자로 냉각재배관 재료의 화학조성 및 페라이트 함량

| 해석부위 | | 화학조성 (wt%) | | | | | | | | | 페라이트함량 (wt%) |
|----------------------|-------|------------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|--------------|
| | | C | Mn | Si | Cr | Ni | Mo | S | P | Co | |
| 저온관 (직선관) | #1 | 0.05 | 1.03 | 0.66 | 20.00 | 9.71 | 2.40 | 0.02 | 0.030 | 0.05 | 17.81* |
| | #2 | 0.06 | 1.09 | 0.73 | 19.84 | 9.19 | 2.42 | 0.02 | 0.040 | 0.05 | 19.71* |
| 고온관 (직선관) | #1 | 0.06 | 0.88 | 0.47 | 19.10 | 9.68 | 2.56 | 0.02 | 0.020 | 0.06 | 12.58* |
| | #2 | 0.05 | 0.99 | 0.71 | 19.71 | 9.38 | 2.73 | 0.02 | 0.020 | 0.06 | 21.09* |
| 중간냉각재관 (직선관) | #1 | 0.06 | 0.81 | 0.50 | 19.43 | 9.63 | 2.50 | 0.02 | 0.020 | 0.04 | 14.16* |
| | #2 | 0.05 | 0.80 | 0.64 | 19.59 | 9.53 | 2.48 | 0.02 | 0.020 | 0.06 | 17.42* |
| 90° 엘보우 | #1,#2 | 0.06 | 0.51 | 1.15 | 19.40 | 9.75 | 2.15 | 0.01 | 0.038 | 0.14 | 12.99* |
| | | 0.06 | 0.54 | 1.32 | 19.15 | 9.45 | 2.20 | 0.01 | 0.040 | 0.16 | 13.00** |
| | #1,#2 | 0.06 | 0.54 | 1.32 | 19.15 | 9.45 | 2.20 | 0.01 | 0.040 | 0.16 | 14.16* |
| 90° 엘보우(½) | #1,#2 | 0.06 | 0.62 | 1.12 | 19.00 | 9.45 | 2.52 | 0.01 | 0.040 | 0.15 | 14.81* |
| | | 0.06 | 0.62 | 1.12 | 19.00 | 9.45 | 2.52 | 0.01 | 0.040 | 0.15 | 13.90** |
| 90° 엘보우 스플리터(½) | #1,#2 | 0.05 | 0.50 | 1.12 | 19.55 | 9.55 | 2.15 | 0.01 | 0.039 | 0.16 | 16.34* |
| | | 0.05 | 0.50 | 1.12 | 19.55 | 9.55 | 2.15 | 0.01 | 0.039 | 0.16 | 15.60** |
| 40°, 50° 맞대기 용접피팅 | #1,#2 | 0.05 | 0.44 | 1.00 | 19.20 | 9.55 | 2.20 | 0.01 | 0.039 | 0.12 | 14.58* |
| | | 0.05 | 0.44 | 1.00 | 19.20 | 9.55 | 2.20 | 0.01 | 0.039 | 0.12 | 17.40** |
| 35° 엘보우 | #1 | 0.05 | 0.51 | 1.10 | 19.05 | 9.65 | 2.15 | 0.01 | 0.038 | 0.16 | 13.15* |
| | | 0.05 | 0.51 | 1.10 | 19.05 | 9.65 | 2.15 | 0.01 | 0.038 | 0.16 | 13.00** |
| | #2 | 0.06 | 0.51 | 1.35 | 19.35 | 9.42 | 2.40 | 0.01 | 0.038 | 0.15 | 16.72* |
| | | | | | | | | | | | 16.00** |

[주] * : 식 (3)에 의한 계산값
 ** : 재료시험보고서[5] 제시값

한편 배관의 건전성 확보 측면에서 중요하나 재료시험보고서상에 화학조성 및 페라이트 함량이 제시되어 있지 않은 용접부 및 열영향부에 대해서는 향후 실제 페라이트 함량의 측정을 통한 열취화 평가를 수행할 예정이다.

3.2 샤피 충격에너지 결정

표 1에 제시된 화학조성 및 페라이트 함량을 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 상온 최소 샤피

피 충격에너지를 계산하였으며, 식 (4)에 대입하여 운전온도 및 특정 시간의 샤피 충격에너지를 계산하였다. 이 때 C_{vsat} 는 CF8M 재료의 대표적인 값으로 제시되고 있는 200J[4]에 불확실성을 고려하여 150J로 가정하였으며, θ 는 280~330°C 사이에서 큰 차이가 없으므로 평균값인 2.9로 가정하였다[6]. 표 2는 상온에서의 최소 샤피 충격에너지와 300°C에서 17년(약 150,000 시간) 및 34년(약 300,000 시간) 동안 운전하였을 경우의 원자로 냉각재배관 샤피 충격에너지 예측 결과를 다음에 기술하는 여유도와 함께 정리하여 나타낸 것이다.

표 2 CF8M 원자로 냉각재배관 재료의 샤피 충격에너지

| 해석부위 | | C_{vsat} (J) | C_v (J) | | 여유도 (%) | |
|----------------------|-------|----------------|-----------|--------|---------|--------|
| | | | 17년 운전 | 34년 운전 | 17년 운전 | 34년 운전 |
| 저온관 (직선관) | #1 | 50.78 | 60.75 | 55.57 | 19.63 | 9.43 |
| | #2 | 39.64 | 47.09 | 42.83 | 18.79 | 8.05 |
| 고온관 (직선관) | #1 | 82.62 | 103.64 | 95.57 | 25.44 | 15.67 |
| | #2 | 41.88 | 52.14 | 46.44 | 24.50 | 10.89 |
| 중간냉각재관 (직선관) | #1 | 68.75 | 89.94 | 80.92 | 30.82 | 17.70 |
| | #2 | 60.50 | 78.44 | 70.13 | 29.65 | 15.92 |
| 90° 엘보우 | #1,#2 | 64.56 | 81.77 | 73.97 | 26.66 | 14.58 |
| | #1,#2 | 56.27 | 72.01 | 64.39 | 27.97 | 14.43 |
| 90° 엘보우(½) | #1,#2 | 55.33 | 73.95 | 65.03 | 33.65 | 17.53 |
| 90° 엘보우 스플리터(½) | #1,#2 | 63.55 | 80.24 | 72.60 | 26.26 | 14.24 |
| 40°, 50° 맞대기 용접피팅 | #1,#2 | 82.72 | 103.30 | 95.37 | 24.88 | 15.29 |
| 35° 엘보우 | #1 | 87.74 | 105.90 | 98.95 | 20.70 | 12.78 |
| | #2 | 39.63 | 51.43 | 44.78 | 29.78 | 13.00 |

3.3 열취화 수준 정량화

상온 최소 샤피 충격에너지와 운전온도 및 특정 시간에서의 샤피 충격에너지의 비로 여유도를 정의한 후, 표 2에 제시된 데이터를 이용하여 열취화 수준을 정량화하였다.

$$\text{여유도} = \frac{C_v - C_{vsat}}{C_{vsat}} \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

식 (5)를 이용한 여유도 계산 결과는 표 2에 나타낸 바와 같이 저온관(#1, #2)에서 가장 심각한 것으로 예측되었다. 특히 저온관(#2)의 여유도는 17년간 운전하였을 경우 약 19% 수준으로 감소하였으며, 34년간 운전하였을 경우 약 8% 수준으로 감소하였다. 한편 다른 부위에서의 여유도는 17년간 운전하였을 경우 21~34% 정도, 34년간 운전하였을 경우 11~18% 정도 수준으로 감소하였다.

3.4 열취화 평가결과 활용방안

여유도는 단지 열취화 수준을 정량화하기 위해 제시한 것으로서, 구조물의 건전성 평가를 위해서는 이를 다른 범용적인 매개변수와 연관시킬 필요가 있다.

Chung[2]은 열취화 재료에 대한 실험 결과를 토대로 다음과 같이 탄소성 파괴역학 해석

에 사용될 수 있는 J-R곡선 예측방법을 제안하였다.

$$J = A (C_v)^n (a)^m \quad (6)$$

여기서, C_v 는 샤피 충격에너지이고, a 는 균열진전(Crack Extension)량을 나타내며, 상온 및 운전온도(290~320℃)에서의 상수 A , n , m 은 표 3과 같다.

표 3 CF8M 원자로 냉각재배관 재료의 J-R곡선 상수[2]

| A | | n | | m | |
|-----|------|------|------|------|------|
| 상온 | 운전온도 | 상온 | 운전온도 | 상온 | 운전온도 |
| 8.2 | 34.3 | 0.85 | 0.52 | 0.50 | 0.45 |

식 (6)과 표 3에 제시된 상수 A , n , m 을 이용하면 상온 및 운전온도에서의 J-R곡선을 예측할 수 있으며, 이는 열취화를 고려한 원자로 냉각재배관의 건전성 평가시 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 한편 예측 결과의 타당성을 검증하기 위해 균열진전량을 0.2mm로 가정하고 표 2에 제시된 샤피 충격에너지를 이용하여 보수적인 형태의 J_{IC} 값[2]을 구하였다. 계산 결과 일부 예외적인 경우를 제외하고는 대부분 110~140 KJ/m² 범위에 포함되는 것으로 나타났으며, 이는 기존의 연구 결과[7]에 제시된 값인 131.35 KJ/m²과 유사하다.

4. 민감도 분석

최대 열취화가 예상되는 부위의 하나인 저온관(#2) 해석에 사용된 각 입력 변수(화학 조성, 열취화 온도 등)에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 그림 1은 입력 변수를 70~130%로 변화시키면서 17년간 운전하였을 경우의 저온관(#2)을 대상으로 샤피 충격에너지 값의 변화를 분석한 것이다.

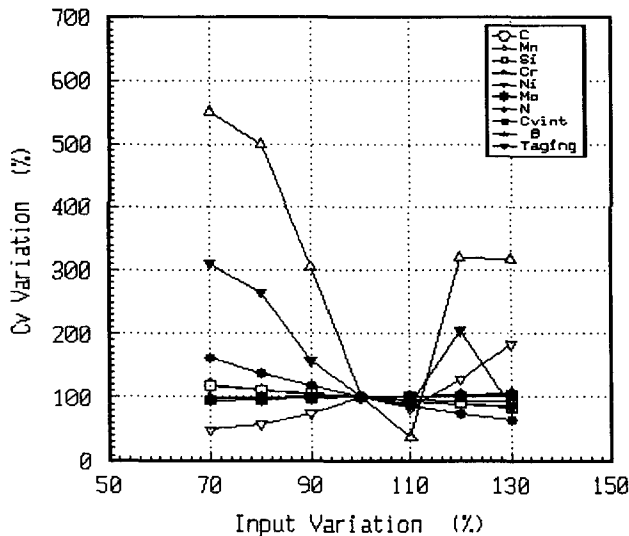


그림 1 17년간 운전된 저온관(#2)을 대상으로 수행한 민감도 분석 결과

그림 1에 나타낸 바와 같이 샤프 충격에너지 값 변화에 영향을 미치는 주요 인자는 니켈 및 크롬 함량과 열취화 온도인 것으로 파악되었으며, 이외의 다른 인자들의 영향은 미미하였다.

5. 결 론

연장운전의 타당성 검토 측면에서 CF8M 주조 스테인레스강으로 제작된 원자로 냉각재 배관의 열취화 평가 및 민감도 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 화학조성 및 페라이트 함량을 토대로 운전온도 및 특정시간에서의 열취화 수준을 정량화하였다.
2. 건전성 평가 목적으로 재료의 열취화를 고려하여 예측한 J_{IC} 값은 기존에 제시된 값과 유사하게 나타났다.
3. 민감도 분석 결과 열취화에 영향을 미치는 주요 인자는 니켈 및 크롬 함량과 열취화 온도인 것으로 나타났다.

한편 수명연장을 위한 정밀 평가를 위해서는 상기의 기본적인 검토 결과를 토대로 향후 CF8M 재료의 모재, 용접부, 열영향부에 대한 금속 조직검사 및 상세 건전성 평가의 수행이 요구된다.

참 고 문 헌

1. R. Viswanathan, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," ASM International (1989)
2. H. M. Chung, "Aging and Life Prediction of Cast Duplex Stainless Steel Components," Int. J. of Pressure Vessel & Piping, Vol.50, pp. 179~213 (1992)
3. O. K. Chopra, "Estimation of Mechanical Properties of Cast Stainless Steel During Thermal Aging in LWR Systems," NUREG/CP-0119, Vol.1, pp. 151~178 (1992)
4. O. K. Chopra, "Thermal Aging of Cast Stainless Steels in LWR systems Estimation of Mechanical Properties," ASME PVP Conference, Vol.228, pp.79~92 (1992)
5. Westinghouse, "Westinghouse Electric Corporation PWR-SD Quality Assurance," CMTR (1969)
6. O. K. Chopra and A. Sather, "Initial Assessment of the Mechanisms and Significance of Low-Temperature Embrittlement of Cast Stainless Steels in LWR Systems," NUREG/CR-5385 (1990)
7. Westinghouse, "Technical Justification for Eliminating Large Primary Loop Pipe Rupture as the Structural Design Basis for the Kori Unit 1 Nuclear Power Plant" (1996)