

CF8M 스테인리스강 저주기 환경피로 실험

*정일석, 김상재, 송택호, 홍승열
대전광역시 유성구 문지동 103-16 한전전력연구원 원전설비운영그룹
isjeong@kepri.ke.kr

1. 서론

원자로 1 차측 배관재로 사용되는 주조 스테인리스강의 환경피로 수명선도를 작성하기 위해 실제 원자로가동 환경을 모사한 저주기 피로실험장치를 개발하였다. 실험은 CF8M 재질의 봉상 표준시험편을 이용하여 변형률 속도 0.04%/s 의 조건으로 변형률 크기의 변화에 따른 피로수명을 측정하였다. 시험편의 표점거리와 변위 측정장치 위치에 의한 실제 측정거리의 차이로 인해 발생하는 변형률의 오차를 보정하기 위해 유한요소법을 이용하여 그 차이를 계산하고 피로실험 결과를 보정하였다. 보정된 실험결과와 해외 선행결과를 비교하고 그 경향이 동일한 추세를 보임을 확인하였다.

2. 방법 및 결과

2.1 저주기 환경피로실험장치 제작

원자력발전소의 1차측 고온고압 환경을 모사할 수 있는 피로실험장치를 제작하였다. DO, pH, H₂ 등의 수화학 변수를 제어할 수 있으며 피로실험시 하중장치는 변형률 제어(strain control)로 반복 하중(fully reversed load)을 가할 수 있다. 최대 하중의 크기 60kN, 하중 반복속도 1Hz, 최대 변위 50mm, 최대 운전온도 350℃, 압력은 170bar까지 실험할 수 있도록 설계되었다. 제작한 저주기 환경피로 실험장치는 Fig. 1와 같다.



Figure 1. 저주기 환경피로 실험 장치.

2.2 시험편

실험에 사용된 시험편은 ASTM E 606-92¹⁾에서 제시한 저주기 피로실험시험편 규격에 따라 제작하였다. 시험편의 재질은 현재 고리 1발전소의 1차계통 냉각재 배관의 재료로 사용되는

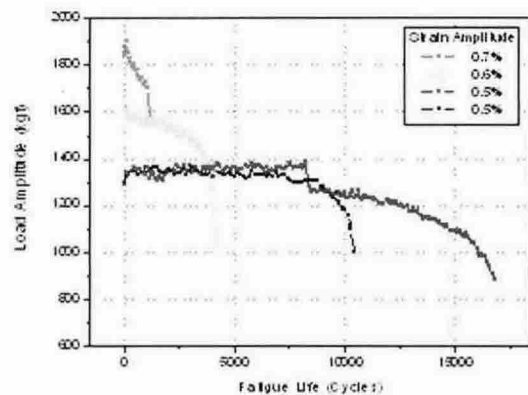
CF8MH(25wt% ferrite)를 선택하였다.

2.3 실험조건 및 방법

Autoclave내 실험용액의 최대 온도는 316℃, 최대 압력은 15MPa, DO(dissolved oxygen)는 5ppb로 설정하였다. 하중비는 R=-1 로 인장 및 압축이 반복되는 톱니형파이며 변형률 속도(strain rate)를 0.04%/s로 하여 최대 변형률(strain amplitude)값이 시편 표점거리의 0.5%, 0.6%, 0.7% 에 대하여 실험을 수행하였다. 실험은 변형률 제어(strain control)로 수행되었으며, 피로수명은 실험하중이 초기 인장 하중의 25%로 감소할 때의 사이클 수(N₂₅)에 의해 결정하였다²⁾.

2.4 저주기 환경피로 실험결과

Fig. 2은 저주기 피로실험 동안에 측정된 피로하중 최대치의 변화를 그린 선도이다. 초기 피로 주기횟수 구간에서 소성영역에서 발생하는 변형률 경화(strain hardening) 영향으로 일정 변형률에서 피로 하중 최대치가 증가하는 것을 볼 수 있다. 실험 조건인 변형률의 크기의 값이 0.7, 0.6, 0.5%로 감소할수록 동일 반복주기 횟수에서 경화현상이 감소함을 알 수 있다.



Fi

Figure 2. 최대 하중 변화 선도.

2.5 실험 결과값의 보정

실험시험편의 변위를 측정하는데 있어 시험편의 형상 및 고온 고수압의 조건으로 인해 표점거리로부터 직접 변형률을 측정할 수 없어 시험편의 곡률구간이 끝나는 지점(실제 측정부)에서 변형률을 간접적으로 측정하였다. Fig. 3에서와 같이 표점거리와 실제 측정거리가 다르기 때문에 본 실험에서처럼 표점거리의 변형률을 기준으로 제어(strain control)하는 경우에는 실제로 측정되는 변형률과 표점거리

변형량과의 상관관계를 구하여 보정해주어야 한다.

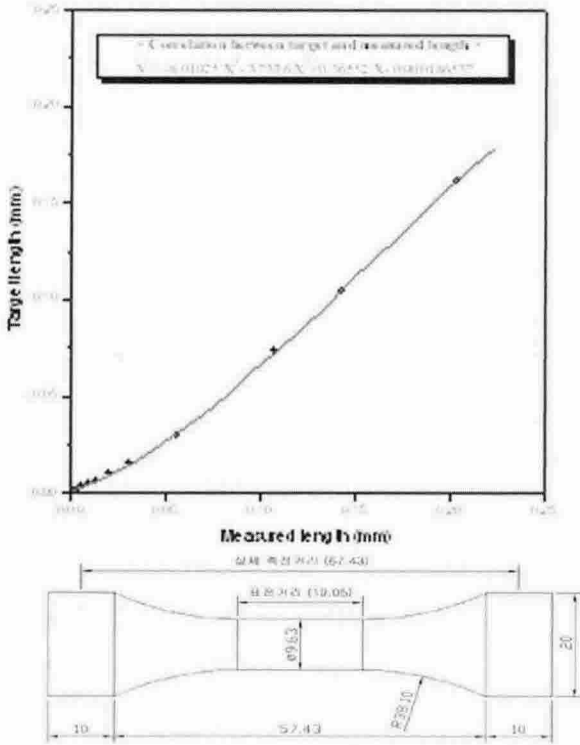


Figure 3. 표점거리와 측정부 변위와의 상관관계.

유한요소 해석(FEM, finite element method) 방법으로 표점거리와 측정구간 사이에서의 변형량 차이를 계산하고 해석 결과를 바탕으로 표점거리의 변위와 측정부의 변위와의 상관관계를 Fig. 3와 같이 구하였다. 여기서 x는 실측정부 변위, y는 표점거리에서의 변위량이다. 보정된 strain amplitude를 고려하여 PWR 환경에서 strain control 된 $\epsilon-N$ 시험결과를 재정리하고, ASME data와 함께 나타낸 결과는 Fig. 4과 같다.

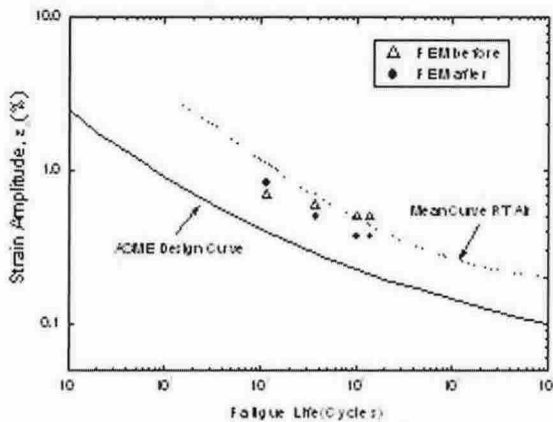


Figure 4. 표점거리 변형량 보정 저주기 피로 선도 비교.

2.6 실험결과 고찰

Fig. 5는 상기 실험결과로 구한 CF8M 재료의 피로수명 데이터와 일본에서 실험한 스테인리스강의 환경피로 실험결과들을 비교한 선도이다. 본 연구에서와 같은 실험조건인 비열화재 CF8M 변형률 속도 0.04%/s 데이터인 ▲와 근접하고 변형률 크기 감소에 따른 피로 수명 증가 추세가 다른 스테인리스강 환경피로 데이터들과 전반적으로 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 국내에서 처음으로 본 연구에서 시작품으로 제작한 저주기 환경피로 실험장치의 신뢰도를 가늠할 수 있는 기술적 근거가 된다. 하지만 본 실험에서는 피로주기의 증가에 따른 재료의 변형률 경화(strain hardening) 현상을 고려하지 않았으므로 차후 실험 및 연구를 통하여 보완되어야 할 것이다.

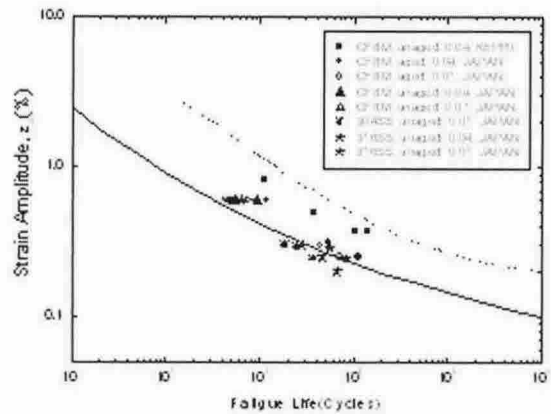


Figure 5. 선행 연구결과와의 비교.

3. 결론

본 연구에서는 원자력 발전소의 고온 고수압 환경을 모사한 저주기 피로실험장치를 개발하고, 현재 고리 1 호기의 1 차 계통 배관재로 사용되고 있는 CF8M 에 대하여 피로 실험을 수행하였다. 실험결과를 유한요소 해석을 통해 보정하고, 보정된 실험결과와 비교하여 추세를 확인하였다. 이 결과는 개발된 실험장치의 신뢰도를 확인할 수 있는 근거로 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] 1993, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing", ASTM E 606-92, pp. 523-537
- [2] O. K. Chopra and W. J. Shack, 2003, "Review of the Margins for ASME Code Fatigue Design Curve-Effects of Surface Roughness and Material Variability", NUREG/CR-ANL-02/39