

원자로 냉각재 배관재의 피로 균열 전파 속도 시험 결과 및 피로 균열 전파 속도에 미치는 molybdenum의 영향 분석

송택호, 김상재, 정일석, 홍승열
전력연구원, 대전시 유성구 문지동 103-16

1. 서론

CF8M 주조 스텐리스강은 고리 1 호기 원자로 냉각재 배관에, CF8A 주조 스텐리스강은 고리 2 호기 냉각재 배관에 각각 사용되고 있다. 두 재료의 조성상의 가장 큰 차이점은 Mo(molybdenum)의 존재 유무이다. 주조 스텐리스강은 고온에서 장시간 사용될 경우 열취화 문제를 겪게 된다. 원전의 기동 및 정지 등으로 원전은 과도상태를 겪게 되고, 냉각재 배관재는 과도상태에 의한 응력을 받게 된다. 반복되는 이러한 하중에 의하여 배관재는 피로 현상을 겪게 된다. 피로 수명평가는 원자력 발전소 주요기기 정량적 수명 평가 내용 중의 하나이며, 매우 중요한 부분이다.

본 논문에서는 CF8M, CF8A 상온 공기중에서의 피로 균열 전파 속도, PWR 환경(300°C 15MPa 수용액)에서의 피로 균열 전파 속도, 건전재의 피로 균열 전파 속도, 경년 열화재의 피로균열전파속도를 실험을 통하여 측정하고 그 결과를 서로 비교하였으며, 피로균열 전파 속도에 미치는 Mo의 영향을 분석하였다.

2. 방법 및 결과

2.1. 시험편, 시험장치, 시험방법

원자로 냉각재 배관의 재료성적서에 근거하여 시험편 블록을 제작하였다. 본 연구에서는 CF8A, CF8M(ferrite 25wt.%), CF8M(ferrite 10wt.%)인 세가지 재료에 대해 실험하였으며, 본 논문에서는 CF8A, CF8MH, CF8ML로 통칭하였다. 시험편은 ASTM E 647-95⁽¹⁾에 근거하여 1TCT 시험편을 준비하였다.

원자로 냉각재 배관의 가동환경은 316°C, 15 MPa 정도이며, 이러한 환경에 적합한 부식 피로 시험 장비를 설계 제작하였다. 전체적인 구성은 하중장치, 부식환경모사를 위한 챔버, 용액순환을 위한 LOOP, 제거기 등으로 나눌 수 있다.

부식피로시험은 ASTM E 647-95 실험방법에 의거하여 실험을 수행하였다.

2.2 실험결과

2.2.1. 공기중 및 PWR 환경 피로 균열 전파 속도 비교

그림 1은 CF8A 상온 공기중에서의 피로 균열 전파 속도, PWR 환경(300°C 15MPa 수용액)에서의 피로 균열 전파 속도를 비교하기 위한 실험 결과이다.

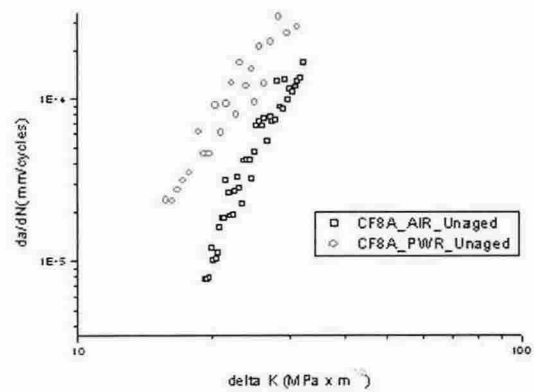


그림 1. PWR 환경효과(CF8A) 실험결과

응력세기인자가 클 경우에는 균열단합현상이 발생하여, 수화학 환경 조장에 의한 부식증가 효과에 비해 스텐리스강의 보호산화막(passive film) 생성에 의한 균열단합 효과가 보다 크게 작용하면서 균열성장속도 차이가 다소 둔화 되고 있는 것을 볼 수 있으나, 전체적으로 공기중보다 PWR 환경(300°C, 15MPa 수용액)에서의 피로 균열 전파 속도가 더 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 원자력발전소 경년열화 피로수명 평가시 환경인자를 고려해야 함을 실험으로 보여주고 있는 것이다. 지면 및 Graph 갯수 제한상 그래프의 제시는 할 수 없으나, CF8M의 경우에도 유사한 결과를 얻었다.

2.2.2. 건전재 및 경년 열화재의 피로 균열 전파 속도 비교

그림 2에서 475°C에서 223 일 열노화 시킨 열화재 시험편과 열화시키지 않은 건전재 시험편의 피로균열 전파 특성을 비교하고 있다. 475°C에서 223 일 열노화 시킨 것은 아레니우스 방정식에 의하면 300°C에서 60년간 열노화 시킨 것과 동일한 열노화 효과를 갖는다.⁽³⁾

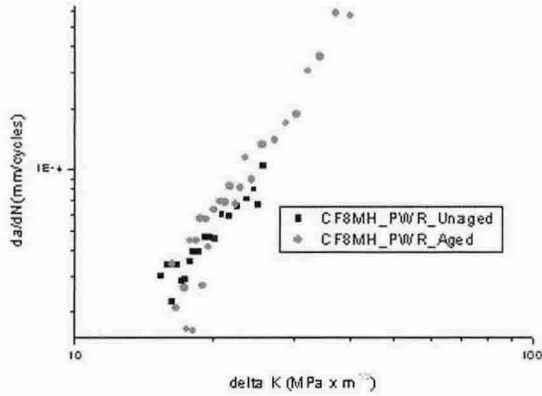


그림 2. 경년열화 효과 실험결과

그림 2 에서 열화재는 건전재에 비하여 피로균열 전파속도가 다소 크게 나타났다. 이것은 열화됨에 따라 파괴인성이 감소하기 때문인 것이며, 피로균열 진전에 대한 저항성이 약해진 것을 의미한다.

원전 배관재의 피로 수명 평가시 환경영향뿐만 아니라 열취화에 의한 복합영향을 고려해야 한다는 것을 입증하는 실험결과이다.

2.2.3. 피로균열 전파속도에 미치는 Mo 의 영향

그림 3 은 시험편 재질별 피로균열전파특성을 비교한 것이다..

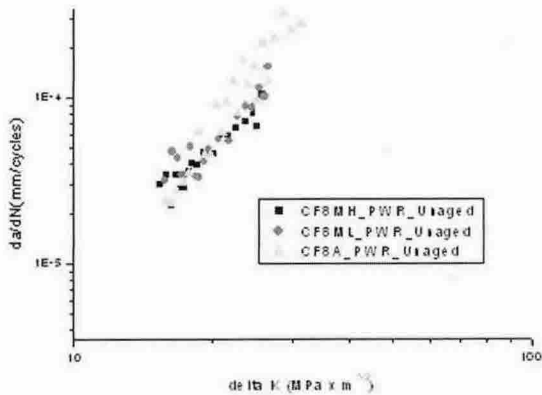


그림 3. 재료별 특성비교(Mo 영향) 실험결과

CF8A 는 Yield Strength 가 CF8M 보다 작고 반면에 Ultimate Tensile Strength 는 CF8M 보다 크고, Toughness 가 우수하다. 그럼에도 불구하고 피로 균열 전파 속도가 큰 것은 Mo 가 없기 때문인 것으로 판단된다. 즉, Mo 가 피로균열전파 억제역할을 하고 있는 것으로 추정된다. Mo 는 다른 원소와 반응하여

오스테나이트 기지에 약 15-25%의 ferrite 를 생성하면서 스테리스강 내부에 듀플렉스 상을 이루며, 이것은 산화 및 환원성 부식분위기에서의 내식성을 증가시키는 역할을 한다⁽²⁾. 본 연구에서 나타났듯이, Mo 에 의한 Duplex Phase 는 피로 균열 전파를 억제 하고 있는 것으로 분석된다.

3. 결론

본 연구에서 CF8M, CF8A 의 상온 공기중에서의 피로균열진전속도와 PWR 환경(300℃ 15MPa 수용액)에서의 피로균열진전속도를 비교한 결과 PWR 환경에서 전파속도가 다소 높은 것으로 나타났으며, 건전재의 피로균열속도, 경년 열화재의 피로균열속도를 실험을 통하여 측정한 결과 열화재의 피로균열속도가 다소 높게 나타났다. 따라서, 원전 배관재의 피로수명을 평가할 때 환경영향 및 열취화 영향을 모두 복합적으로 고려해야만 한다.

피로균열전파속도에 미치는 Mo 의 영향을 분석하기 위하여 재질별로 고온 고압에서 환경피로시험을 수행하였으며, 그 실험 결과를 비교한 결과, 고리 2 호기 RCS 배관에서 사용되는 CF8A 가 고리 1 호기 RCS 배관에 사용되는 CF8M 보다 피로균열전파속도가 다소 높은 것으로 나타났다. 이러한 원인은 CF 8M 에 존재하는 Mo 때문인 것으로 분석하였으며, Mo 가 피로균열전파를 억제하고 있는 것으로 분석하였다.

참고 문헌

- (1) D Peckner and I.M. Bernstein, "Handbook of Stainless Steels," McGraw-Hill Book, 1987
- (2) ASTM, "Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates," E 647-95, pp. 578~614
- (3) 전력연구원, "경년 열화 손상 관리 적용 기술 개발", 2004