

온도와 하중비가 주증기 배관재 피로균열성장 거동에 미치는 영향

Effects of Temperature and Load Ratio on Fatigue Crack Growth Behavior of Main Steam Pipe Steel

김응선, 김민섭

한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요약

원자력발전소의 건전성 평가와 수명예측에 대한 기본 데이터를 획득하기 위하여 주증기 배관재의 피로균열성장 거동에 미치는 하중비의 영향을 조사하였다. 피로시험은 온도 24, 150 그리고 289°C와 하중비 0.1, 0.5 그리고 0.7에서 수행하였다. 온도와 하중비가 증가함에 따라 균열성장률은 증가하였으며 주로 낮은 ΔK 영역에서 관찰되었다. 하중비 0.5 이상의 경우, 온도에 관계없이 거의 동일한 피로균열성장 거동을 나타내었다. 하중비 0.1에서 온도가 24°C에서 150°C로 증가함에 따른 균열성장률의 증가는 전위의 열적 활성화와 가역성의 확대에 따른 거칠기유기 균열닫힘의 감소에 기인하였다. 150°C에서 289°C에서의 유사한 균열성장 거동은 온도 증가에 따른 거칠기유기 균열닫힘의 감소와 산화에 의한 산화물유기 균열닫힘의 증가의 상쇄로 해석된다.

Abstract

The fatigue crack growth behavior of main steam pipe steel was investigated to obtain basic data for integrity evaluation and life prediction in nuclear power plants. Fatigue tests were conducted at load ratios of 0.1, 0.5 and 0.7 and temperatures of 24, 150 and 289°C. As the temperature and load ratio increased, crack growth rates increased at low ΔK region. Above the load ratio of 0.5, the fatigue crack growth behaviors were nearly similar regardless of temperature. At the load ratio of 0.1, the increase of crack growth rate with increasing temperature from 24°C to 150°C was attributed to the decrease of crack closure due to the enhanced thermal activation and reversibility of dislocation. The similar crack growth behavior between 150°C and 289°C are explained by that the decrease of roughness-induced crack closure was offsetted by the increase of oxide-induced crack closure due to thermal oxidation.

1. 서론

배관 건전성의 상실은 중대사고의 원인이 될 수 있기 때문에 원자력발전소 전수명 동안 배관의

건전성은 반드시 확보되어야 한다. 이에 따라, 배관계통의 건전성 문제는 최근 원자력 산업에서 상당한 관심과 연구의 대상이 되어 왔다 [1]. 특히, 주증기 배관의 주요 손상기구는 고온, 고압 유체의 유동과 진동 등의 반복하중에 의한 피로로 알려져 있다. 원전기기의 수명은 재료의 파괴인성으로부터 계산되는 파단까지의 임계결함 크기를 바탕으로 하지만, 반복하중을 받는 구조재의 유효 수명은 미임계결함이 임계결함 크기까지의 피로균열성장률에 의존한다 [2]. 피로거동에 대한 파괴역학적 접근은 설계기준과 구조재 건전성 평가를 위한 매우 유용한 방법으로 구조재가 받는 하중, 재료의 성질, 파괴될 때의 결함의 크기와 균열첨단에서의 응력분포 및 크기와 관련된다 [3]. 일반적으로 피로균열성장률은 하중변수, 재료, 환경 등의 영향을 받으며 이러한 변수들은 상호 의존적이기 때문에 구조재의 피로균열성장 연구시 이들의 조합을 고려하여야 한다. 그러나, 현재 영광과 울진 원자력발전소의 주증기 배관재로 사용되고 있는 SA106 Gr.C에 대한 피로균열성장에 관한 연구는 부족한 현실이다.

따라서, 본 연구에서는 원전 가동에 따른 건전성 확보와 수명예측 등의 연구에 대한 기본 자료를 제공하기 위하여 주증기 배관재의 피로균열성장 거동에 미치는 온도와 하중비의 영향을 시험, 평가하였다.

2. 시험 절차

본 연구에 사용된 재료는 외경 669mm, 두께 28.6mm의 영광 3/4호기용 주증기 배관재 ASME SA106 Gr.C이며 한국중공업으로부터 공급받았다. 원주방향의 균열을 가정하여 인장시편은 배관재 축방향 그리고 피로시편의 노치는 원주방향으로 가공하였다. 인장시편은 외경 6mm, 표점거리 40mm 그리고 피로시편은 폭 50.8mm, 두께 12.4mm의 표준 CT(Compact tension)로 제작하였다.

피로균열성장 시험은 10톤 용량의 Instron 모델 8501 폐쇄루프 서보유압(servo-hydraulic) 장비와 Instron 2490 series 응용프로그램을 이용하였다. 피로시험은 24, 150 그리고 289℃ 각각에 대하여 하중비(P_{min}/P_{max}) 0.1, 0.5 그리고 0.7과 10Hz의 하중조건을 적용하여 수행하였다. 고온시험을 위하여 시편에 부착된 열전대와 3영역 스플릿로를 이용하여 시험중의 온도편차를 $\pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 피로균열성장 시험 전에 ASTM E647 [4]에 준하여 3mm의 예비 피로균열을 생성하였다. 균열길이와 균열달힘 하중은 컴플라이언스 방법을 사용하였다. 이때 시편의 변위는 로의 밖에서 측정할 수 있도록 하는 부가 장치를 시편에 부착하여 COD(crack opening displacement) 게이지로 측정하였다. 균열달힘 하중은 하중 대 COD 곡선을 5% 구간으로 나누어 각 구간 기울기가 상단 기울기로부터 2% 편향하는 지점의 하중으로 정의하였다 [5]. 피로균열성장 시험 후 시편을 액체 질소에서 파단하여 표면을 초음파 세척기로 세척하고 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 파면을 관찰하였다.

3. 시험 결과

식(3.1)을 이용하여 계산한 주증기 배관재의 Paris 물질상수 C와 m을 항복강도와 함께 표 1에 정리하였다.

$$(3.1) \quad \frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$$

온도와 하중비가 증가함에 따라 m값은 감소하고 C값은 증가하였다. C와 m값은 각각 0.5와 0.7의

하중비 조건 그리고 150°C와 289°C 온도 조건에서 유사하게 나타났다. 균열성장률에 미치는 온도의 영향을 각 하중비에 대하여 그림 1에 나타내었다. 하중비 0.1 조건의 경우, 온도의 영향은 주로 낮은 $\Delta K(=K_{max}-K_{min})$ 영역에서 관찰되었으며, ΔK 가 증가함에 따라 온도의 영향은 사라졌다. 온도가 24°C에서 150°C로 증가함에 따라 균열성장률은 증가하였으나, 150°C 이상의 온도에서 균열성장률은 거의 변화가 없었다. 또한 하중비 0.5 이상의 조건에서 온도의 영향은 거의 나타나지 않았다. 균열성장률에 미치는 하중비의 영향은 그림 2에 나타낸 바와 같이 주로 낮은 ΔK 영역에서 관찰되었으며 온도가 증가할수록 하중비의 영향은 감소하였다. 또한 하중비 0.5와 0.7에서의 균열성장 거동은 온도에 관계없이 거의 동일하였다.

피로균열성장 거동에 미치는 온도와 하중비의 영향을 분석하기 위하여 균열달힘 거동(P_d/P_{max})을 유효 응력확대계수 $\Delta K_{eff}(= \Delta K_{max} - \Delta K_d)$ 의 함수로 그림 3에 나타내었다. 하중비 0.1 조건에서 온도가 24°C에서 150°C로 증가함에 따라 균열달힘 하중(P_d)은 약 $18\text{MPam}^{1/2}$ 보다 낮은 ΔK_{eff} 영역에서는 감소였고 $18\text{MPam}^{1/2}$ 이상에서는 반대로 약간 증가하였다. 그러나 하중비 0.5 조건에서 균열달힘 현상은 관찰되지 않았다. 균열달힘을 배제한 결과 피로균열성장률은 온도와 하중비에 관계없이 유사한 피로균열성장 거동을 나타내었으며 이를 통하여 피로균열성장률에 미치는 온도와 하중비의 영향은 균열달힘 현상에 기인하였음을 확인할 수 있었다.

4. 고찰

균열달힘 현상이란 변동하중이 최소하중에 도달하기 전에 균열후면의 접촉에 의하여 균열이 닫히는 현상으로 인가된 $\Delta K(=K_{max}-K_{min})$ 가 $\Delta K_{eff}(=K_{max}-K_d)$ 로 감소하여 균열성장률을 감소시킨다. 이러한 균열달힘은 주로 균열후면의 인장 잔류변형 [6], 파면의 거칠기 [7]와 산화물 [8]에 기인한다. 소성유기 균열달힘은 인장 잔류변형과 CTOD(crack tip opening displacement)가 유사한 ΔK 의존도를 갖기 때문에 일정한 수준을 유지하며 항복강도와 Youngs' 모듈러스가 감소함에 따라 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 그림 3에서 관찰한 것과 같이 $18\text{MPam}^{1/2}$ 이상의 ΔK_{eff} 영역에서 150°C의 균열달힘은 Youngs' 모듈러스와 항복강도의 감소로 24°C에 비하여 다소 증가한 것으로 사료된다. 그러나 ΔK 가 감소함에 따라 150°C에서의 균열달힘은 24°C에 비하여 현저히 감소하였는데 이러한 균열달힘 거동의 반전은 주요한 균열달힘 기구의 전환 때문이다. 일반적으로 낮은 ΔK 영역에서 CTOD가 감소하여 파면 거칠기 혹은 산화막 두께 정도의 크기가 되기 때문에 균열달힘은 소성유기 보다는 거칠기 혹은 산화물유기에 의하여 지배된다. 하중비 0.1 조건에서 24°C에서 150°C로의 온도 증가에 따라 낮은 ΔK 영역에서 균열달힘이 감소한 것은 산화물 생성에 의한 균열달힘의 증가보다는 온도 증가에 따른 전위의 활성화와 전위 가역성의 증가에 의한 파면의 거칠기의 감소에 기인한 것으로 추정할 수 있다. 그림 4의 주사전자현미경 사진에 나타난 바와 같이 하중비 0.1의 조건의 경우, 24°C와 150°C에서 모두 입내파괴 거동을 보이고 있지만 24°C의 경우 150°C에 비하여 다소 파면이 거칠 것을 관찰할 수 있다. Liaw et.는 CrMoV강의 경우 24°C에서 149°C로 온도 증가에 따른 파면 거칠기의 감소를 보고한 바가 있다 [9]. 따라서 거칠기유기와 산화물유기 균열달힘이 지배적인 낮은 ΔK 영역에서 온도가 24°C에서 150°C로 증가함에 따라 항복응력의 감소에 의하여 CTOD는 상대적으로 증가하고 파면의 거칠기는 감소하기 때문에 그림 3에서 나타난 것과 같이 균열달힘이 감소한 것으로 생각된다. 그러나 온도가 150°C에서 289°C로 증가함에 따라 고온 산화에 의한 산화물유기 균열달힘이 상대적으로 확대되어 온도 증가에 따른 거칠기유기 균열달힘의 감소를 상쇄하여 150°C와 289°C에서 균열성장 거동이 유사하게 나타난 것으로 추정된다. 그러나 하중비가 0.5 이상인 경우, CTOD가 균열달힘 변위보다 충분히 크기 때문에 온도와 관계없이 유사한 피로균열성장 거동을 나타내었다.

5. 결론

대기 분위기에서 온도와 하중비가 주증기 배관재의 피로균열 성장률에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론에 이르렀다.

(1) 하중비와 온도가 증가할수록 피로균열성장률은 증가하였다. 피로균열성장 거동에 미치는 하중비와 온도의 영향은 ΔK 가 감소함에 따라 증가하였다. 하중비 0.5 이상의 경우, 하중비와 온도에 관계없이 유사한 피로균열성장 거동을 나타내었다.

(2) 하중비 0.1의 조건에서 온도가 24°C에서 150°C로 증가함에 따른 균열성장률의 증가는 전위의 열적 활성화와 가역성의 증가에 따른 거칠기유기 균열달힘의 감소에 기인하였다. 150°C에서 289°C에서의 유사한 균열성장 거동은 온도 증가에 따른 거칠기유기 균열달힘의 감소와 고온 산화에 의한 산화물유기 균열달힘의 증가가 상쇄되었기 때문으로 사료된다.

참고문헌

- [1] A. Hopper et al, The Second International Piping Integrity Research Group Program-Final Report, NUREG/CR-6452, July 1996
- [2] W.H. Bamford and D.P. Jones, ASTM STP 738(1981)282
- [3] Standard Review Plan 3.6.3, Federal Register Vol.52, No.167, August, 1987
- [4] Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM E647, 1993
- [5] J.K. Donald, ASTM STP 982(1988)222
- [6] W. Elber, Eng. Fract. Mech, 2(1971)37
- [7] N. Walker and C.J. Beervers, Fat. Eng. Mat. & Struc, 1(1979)135
- [8] P.K. Liaw, T.R. Leax and W.A. Logsdon, Acta Metall, 31(1983)1581
- [9] P.K. Liaw Acta Metall, 33(1985)1489

표 1 Paris parameters and yield stress over a range of temperature

Temp(°C)	σ_{ys}	R ratio	C	m
24	331	0.1	7.20×10^{-10}	3.68
		0.5	5.12×10^{-9}	3.11
		0.7	8.03×10^{-8}	2.94
150	272	0.1	2.75×10^{-9}	3.26
		0.5	8.92×10^{-9}	2.88
		0.7	1.30×10^{-8}	2.78
240	245	0.1	2.81×10^{-9}	3.25
		0.5	1.29×10^{-8}	2.76
		0.7	7.91×10^{-9}	2.86

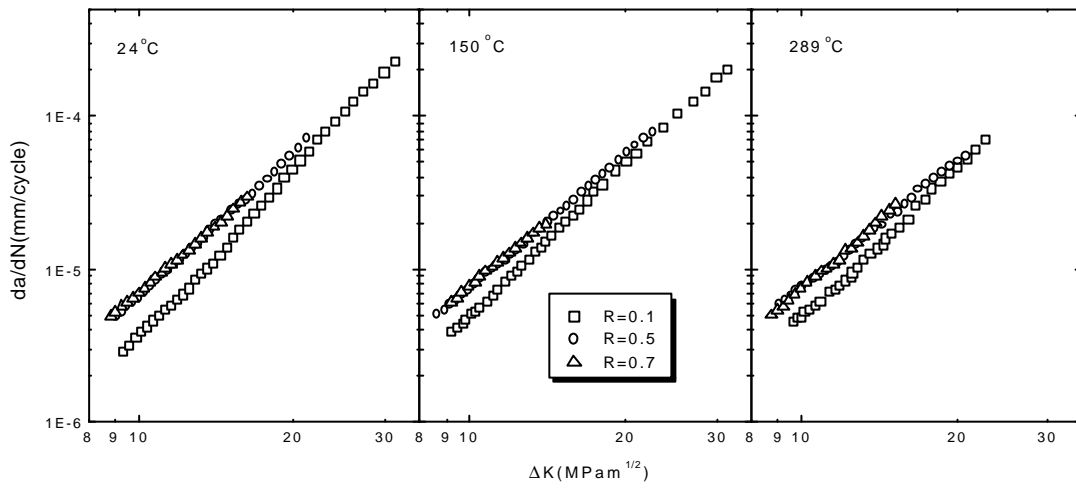


그림 1 Effect of temperature on fatigue crack growth rates

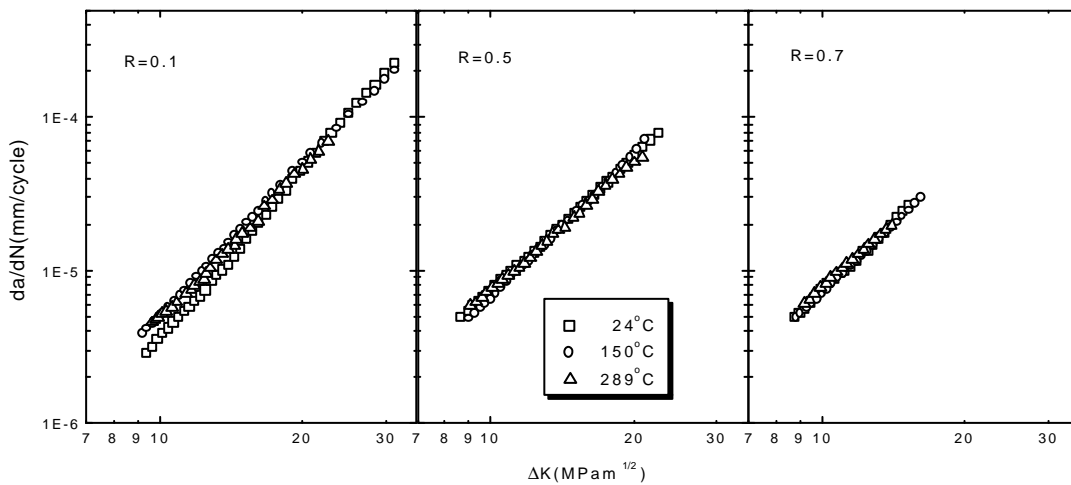


그림 2 Effect of load ratio on fatigue crack growth rates

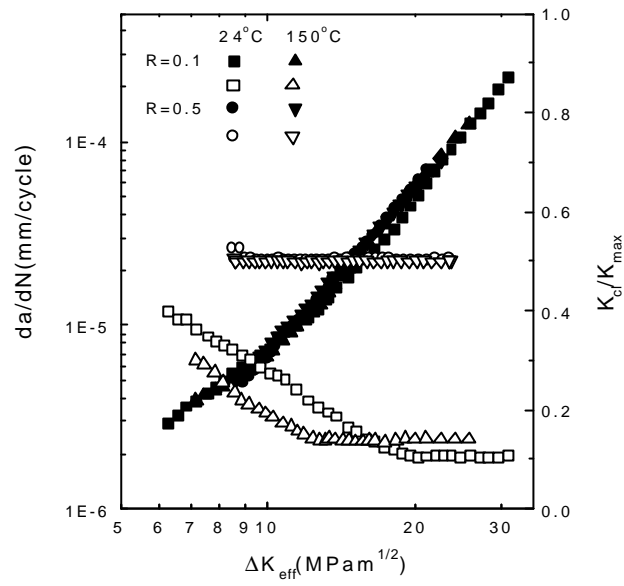
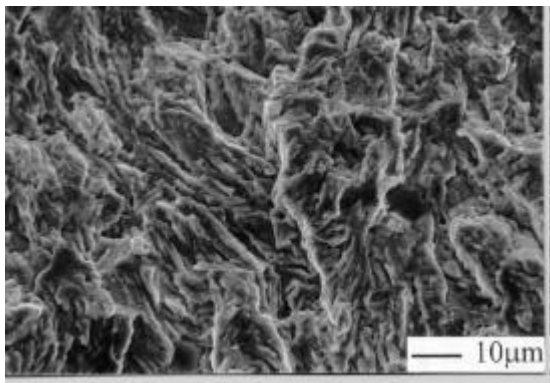
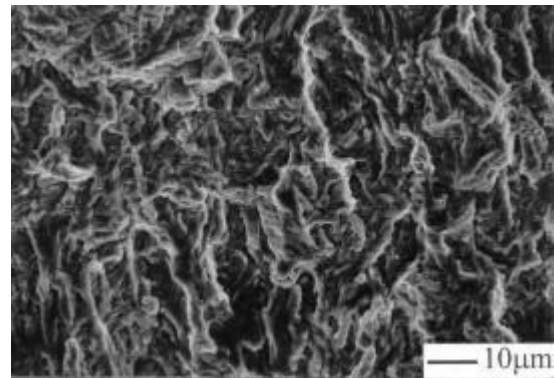


그림 3 Fatigue crack growth rates and normalized crack closure levels at 24°C and 150°C



(a) 24°C



(b) 150°C

그림 4 Fractographs of fatigue surfaces produced at $\Delta K=10\text{MPam}^{1/2}$ (a) 24°C and (b) 150°C