

X선 회절을 이용한 배관용접부의 피로수명 평가

Assessment of Fatigue Life for Pipeline Welds Using X-ray Diffraction Method

이 상국*, 유근봉**, 김의현**, 최현선***

* 한전 전력연구원 원자력발전연구소

** 한전 전력연구원 수화력발전연구소

*** 충남대학교 대학원 기계설계공학과

ABSTRACT The objective of this study is to estimate the feasibility of X-ray diffraction method application for fatigue life assessment of the high-temperature pipeline steel such as main steam pipe, reheater pipe and header etc. in power plant. In this study, X-ray diffraction tests using various types of specimen simulated low cycle fatigue damage were performed in order to analyze fatigue properties when fatigue damage conditions become various stages such as 1/4, 1/2 and 3/4 of fatigue life, respectively. As a result of X-ray diffraction tests for specimens simulated fatigue damages, we conformed that the variation of the full width at half maximum intensity decreased in proportion to the increase of fatigue life ratio.

1. 서 론

발전설비 중 주증기관이나 재열증기관 등 고온 배관들은 주로 용접부에서 운전 중 저주기피로에 의한 파손이 많이 발생한다. 이러한 파손을 사전에 예측하여 정비 또는 교체 등을 통하여 방지할 수 있다면 파급사고나 큰 경제적 손실을 줄이는 것이 가능하다. 피로에 의한 손상상태나 수명을 예측하기 위해서는 기계적인 시험을 실시하여야 하나 실제 운용 중인 설비에서 시험편을 채취하기는 매우 어렵다. 따라서 설비를 손상시키지 않는 비파괴적 피로수명 평가법의 개발이 시급한 실정이나 이에 대한 연구는 미흡한 상태이며, 더욱이 정량적으로 피로수명을 평가하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 X선 회절법을 이용해 피로에 의한 손상정도와 X선 회절피크상의 반가폭(FWHM ; full width at half maximum intensity)과의 관계를 정립하고 고온 배관 용접부의 피로수명을 비파괴 및 정량적으로 평가하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편

배관 용접부의 피로수명 평가법을 개발하기 위하여 초초임계압 발전설비 고온배관재료로 선정

된 P92강에 대하여 실험을 실시하였다. 먼저 P92 강 모재, 용접부 및 열영향부에 대해 저사이클 피로시험을 실시하여 피로특성을 파악하고, 피로수명의 1/4, 1/2, 3/4 등 여러 단계의 사이클에서 중단시험을 실시하여 각각의 중단시험편에서 X선 회절법에 의한 회절피크 분석을 실시하였다.

Table 1 Chemical compositions of base metals

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	B	N
0.10	0.22	0.48	0.017	0.006	0.18	9.11	0.47	1.71	0.18	0.056	0.003	0.041

Table 2 Heat treatment condition and mechanical properties

Dimension(mm)	Heat treatment	Mechanical Properties			
		TS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)	E (GPa)
OD 304 x WT 62	N : 1050°C x 1hr, AC T : 760°C x 3hr, AC	674	506	23.6	192(300°K)

2.2 실험방법

2.2.1 저주기 피로시험

저주기피로시험은 최대용량이 4톤인 Instron 8500 모델의 장비를 이용하여 변형을 제어방식으로 상온에서 수행하였고, 장비사양과 조건은 다

음과 같다.

- 시편형상 및 치수 : 환봉형
(중앙부 지름 : 4φ, 평행부 길이:16mm)
- 변위측정기 : 12.5mm
- 변위 진폭 : ±0.4%
- 파형 : 삼각파
- 주기 : 1Hz
- 시험시작방향 : 인장
- 피로수명 : 20% 하중 감소시점 기준

2.2.1 X선 회절시험

각 Cycle별로 저주기피로시험을 중단하여 휴대용 X선 회절장비인 XSTRESS 3000(Finland)를 사용하였다. 5점 입사(ψ=0°, 20.7°, 30°, 37.8°, 45°)에 의하여 sin2ψ법으로 잔류응력을 측정하였고, 측정조건은 다음과 같다.

- Characteristic X-ray : Cr-Kα
- Diffraction plane : (211)
- Tube voltage : 30kV
- Tube current : 10mA
- Scanning speed : 2deg./min
- Time constant : 3sec

3. 실험결과 및 고찰

X-선 회절 실험에서 얻어지는 파라메타는 두 가지이며, 하나는 x-선 회절되는 위치에 의존하는 잔류응력이고, 하나는 x-선 회절선의 1/2 위치의 폭인 반가폭이다. 이 파라메타들은 물리적인 의미를 갖는다. 전자인 x-선 회절에 의한 잔류응력은 재료를 구성하고 있는 원자간의 간격의 좁고 넓은 것에 따라 회절선의 위치는 변화된다. 따라서 재료구조의 원자간의 간격은 재료가 지니고 있는 응력, 즉 잔류응력에 비례한다. 후자의 반가폭은 재료가 외력에 의해 일어나는 탄성적 범위를 넘어서 원자구조의 흐트러짐, 즉 구조원자의 전위 분포량인 전위밀도의 정도를 나타낸다.

3.1 모재부 실험결과

모재부 시험편에 대한 피로수명비와 반가폭의 측정 결과는 Fig. 2와 같다. 피로에 따른 반가폭

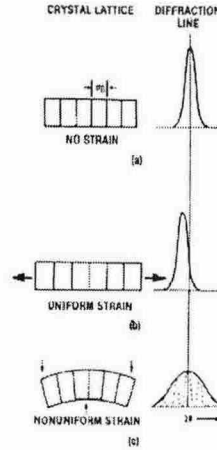


Fig. 1 Variation of diffraction line and FWHM according to deformation

의 변화양상으로 결정구조의 변형량에 관한 정확한 변형기구를 파악할 수는 없지만, Fig. 2에서와 같이 수명비를 대수적으로 표현하면 직선적으로 감소됨을 알 수 있다. 이러한 반가폭비와 수명비의 선형성을 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$Bf = k \cdot \ln x + C \tag{1}$$

여기서 Bf는 반가폭비(B/Bo), Bo는 피로를 받지 않은 변형전의 반가폭이고, k는 반가폭비의 기울기, x는 수명소비율(N/Nf), 그리고 C는 재료상수이다.

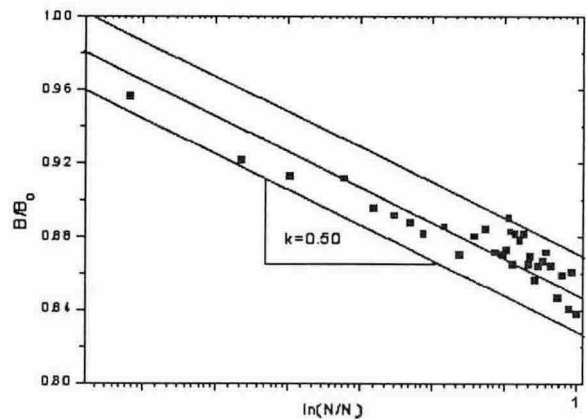


Fig. 2 FWHM versus life consumption rate for base metal

식 (1)에서 반가폭비의 기울기 k는 0.50이고, 재료상수 C는 대략 0.85이다. 재료상수 C는 재료가 수명을 다 한 시점에서의 반가폭비이다. 식 (1)을 이용하여 피로로 인한 변형 전 재료의 반가폭을

알고, 피로를 경험한 현재의 반가폭을 측정하면 곧바로 수명소비율 x 를 예측할 수 있다.

또한, 정밀한 측정을 통하여 반가폭 기울기의 산란폭을 감소시킬 수 있다면 수명소비율의 유효 범위를 줄임으로서 반가폭을 이용한 피로수명에 측의 신뢰성을 높이는 것이 가능하다.

3.2 용접부 실험결과

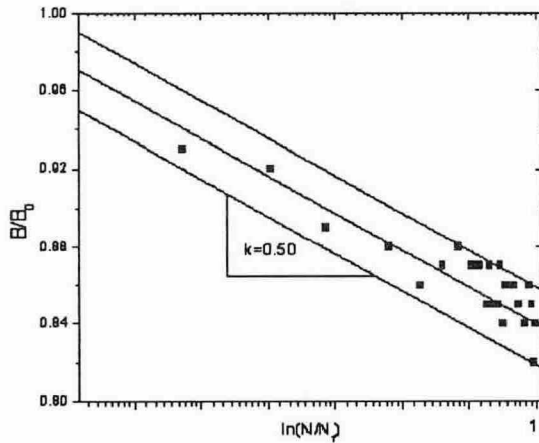


Fig. 3 FWHM versus life consumption rate for welds

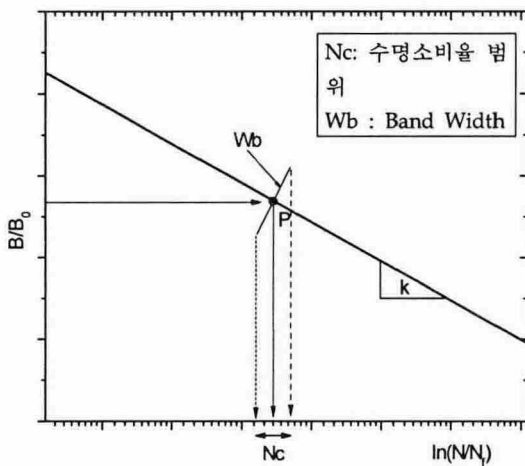


Fig. 4 Calculation of fatigue life consumption rate

용접부 시험편에 대한 피로수명비와 반가폭의 측정 결과는 Fig. 3과 같다. 모재부와 마찬가지로 Fig. 3에서와 같이 수명비를 대수적으로 표현하면 직선적으로 감소되고 반가폭비와 수명비의 선형성도 같은 식으로 표현할 수 있다. 반가폭비

(B/B_0)의 기울기 k 는 0.50이고, 재료상수 C 는 약 0.85이다.

3.3 수명소비율 계산

피로수명 소비율은 식 (1)을 이용하여 간단하게 계산할 수 있다. 즉, Fig. 4에서와 같이 피로 하중을 받은 재료의 반가폭(B)를 측정하여 반가폭비(B/B_0)를 알면 수명소비율 범위(N_c)의 예측이 직접적으로 가능하다.

4. 결 론

P92강의 모재부와 용접부에 대해 피로 사이클에 따른 피로수명 특성과 반가폭을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 반가폭의 변화는 피로수명비가 약 20%까지 급격히 감소하다가 그 이후에는 모재부에서는 완만하게 감소하고, 용접부에서는 약 90%까지 일정함을 보이다가 피로수명 말기에 급격히 감소하였다.

2) 피로에 따른 반가폭비는 대수적 피로수명비와 선형적인 관계가 있고, 이 관계식을 이용하여 수명소비율의 직접적인 예측이 가능하다.

참고문헌

1. Paul S. Prevery : X-Ray Diffraction Residual Stress Techniques, Metals Handbook vol. 10, Lambda, Inc.
2. 유근봉 : X선 회절을 이용한 잔류응력 측정 절차서, TM.00GE08.P2004.343, KEPRI, 2004
3. 박만진 외 : 중성자 회절을 이용한 용접부위의 잔류응력 측정, Journal of KWS. vol. 20. No. 2, 2002
4. Sam Y. ZAMRIK 외 : Fatigue Damage Assessment using X-ray Diffraction and Life Prediction Methodology, Nuclear Engineering and Design 116, 1989, 407-413
5. Toru Goto : Material Strength Evaluation and Damage Detection by X-ray Diffraction, Advances in X-Ray Analysis, vol 35, 1992
6. 최성대 외 : X-선 회절에 의한 사고파면의 정량적 해석에 관한 연구, 한국정밀공학회지 제19권 제4호, 2002