

◎ 論 文

X선 잔류응력을 이용한 냉간압연강의 피로손상 모델링에 관한 연구

조 석 수* · 주 원 식**
(99년 6월 24일 접수)

A Study on Fatigue Damage Modelling in Cold Rolled Steel using X-ray Residual Stress

Seok-Swoo Cho* · Won-Sik Joo**

Key Words : X-ray Diffraction (X선 회절), Fatigue Load (피로하중), Compressive Residual Stress (압축잔류응력), Cycle Ratio (피로수명비), N_f Line (N_f 선), SPCC Steel (SPCC 강)

Abstract

Cold rolled steel has much plastic strain in the material surface produced by manufacturing process. The strain causes the variation of surface residual stress, in which influences the fatigue behavior under repeated loading. As experimental results, it was confirmed that the behavior of residual stress σ_r with cycle N consisted of three stages except stress amplitude near fatigue limit in SPCC steel. On the first stage compressive residual stress decreased rapidly, on the second stage gradually, and on the last stage slightly. The relation between σ_r and $\log N$ appeared linear behavior except the early part of cycle ratio N/N_f . The average gradient of σ_r with respect to $\log N$ seemed to take a constant value without initial cycle ratio. On the other hand, the N_f line was regressed by the first-order polynomial equation on σ_r - $\log N_f$ diagram. Therefore, this study showed that both the gradient of σ_r with respect to $\log N$ and the N_f line was useful in predicting the cycle ratio N/N_f .

1. 서 론

구조물에 대한 각종 이론 해석과 실험 방법이 발달함에 따라 모든 구조물의 안전율은 점차적으로 낮아지고 있으나 구조물의 대형화에 따른 대형

사고의 위험은 점점 증가하고 있어 재료강도에 대한 특별한 주의가 요구된다. 특히, 용접이나 압연 과정중에 발생하는 잔류응력은 재료의 피로강도에 큰 영향을 미치고 있다. 즉, 전자의 경우 잔류응력이 항복응력보다 높게 분포되면 용접부 주위

* 정회원, 삼척대학교 자동차공학과

** 정회원, 동아대학교 기계공학과

에서 발생하는 균열이나 결함으로 인하여 구조물의 파손 및 파괴가 발생하게 된다. 또한, 후자의 경우 압축잔류응력은 재료의 피로강도를 증가시키나 인장잔류응력은 피로강도를 감소시키게 된다.

피로는 반복수 의존형 파괴 현상으로 재료표면의 잔류응력과 밀접한 관계가 있고 이러한 잔류응력을 정확히 모니터링할 수 있다면 각종 부품의 안전성과 잔존 수명을 예측하는 데 상당히 도움을 줄 것이다. 현재까지 잔류응력을 측정하는 방법으로 대략 20여가지가 제안되고 있으며 그 중 대표적인 것으로 응력이완방법(Stress relaxation method), 응력에 민감한 성질을 이용하는 방법(Technique using stress sensitive properties), 균열 전파법(Crack propagation method), X선 회절법(X-ray diffraction method)등을 들 수 있다. 이러한 것 중 Mathar의 Hole-drilling법은 잔류응력을 비교적 정확하게 측정할 수 있으나 측정 조건에 따른 정량적 값의 변화가 유발될 뿐만 아니라 측정 재료가 손상되므로서 재료 열화에 따른 연속 측정이 곤란하다.^{1), 2)} 한편, X선 회절을 이용하여 잔류응력을 측정하는 방법은 스트레인 게이지의 표점거리를 대신하는 재료의 격자면 간격 d 에 그 기초를 두고 있다.³⁾ 즉, 재료에 외력이 작용하게 되면 격자면 간격 d 가 변화하게 된다. 이때 재료 표면에 조사되는 X선 회절각 2θ 의 위치도 동시에 변화하게 되므로 그 변화 거동으로부터 비파괴적으로 잔류응력을 측정할 수 있다. 또한, X선 침투깊이는 X선 회절실험에서 사용하는 타겟 종류에 따라 달라지나 일반적으로 $10\ \mu\text{m}$ 정도이므로 표면층의 잔류응력을 측정할 수 있을 수 있고 측정 대상물의 면적이 작을 때도 사용할 수 있다.⁴⁾ 따라서 X선 잔류응력은 반복수에 따른 재료의 표면층을 연속적으로 조사하여 측정할 수 있으며, 이러한 값을 피로수명에 따른 재료의 손상 파라미터와 비교한다면 피로손상에 따른 재료의 잔존수명을 예측하는 데 상당히 유용할 것이다.

본 연구에서는 X선 회절법으로 냉간압연강판인 SPCC강의 피로수명을 평가하기 위하여 평면굽힘 피로실험을 실시하고 시험편 표면에서의 X선 잔류응력을 연속적으로 측정하여 X선 조사영역내의 손

상정도와 X선 잔류응력의 관계를 명확히 했으며, 초기 피로수명 영역을 무시하고 만든 σ_r-N 선도의 각 응력진폭에 대한 평균 기울기와 피로 파단될 때의 잔류응력 σ_r 을 이용하여 만든 N_f 선도로부터 피로수명비 N/N_f 을 예측하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 재료와 시험편

본 실험에 사용한 재료는 냉간압연용 SPCC 강으로써 Table 1은 시험편의 화학적 성분을, Table 2는 기계적 성질을 각각 나타내고 있다.

Fig. 1은 평면굽힘 피로시험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타내고 있으며, 이때 시험편의 방향은 L-T방향으로 하여 가공하였다. 또한, 밀링 가공된 시험편을 샌드 페이퍼와 Al_2O_3 분말 입자로 경면 연마한 후 기계가공에서 발생된 잔류응력을 제거하기 위하여 표면층을 $50\ \mu\text{m}$ 정도 전해 연마하여 제거하였다.

Table 1 Chemical compositions of SPCC steel (wt.%)

C	Mn	P	S	Fe
0.08	0.31	0.011	0.021	Bal.

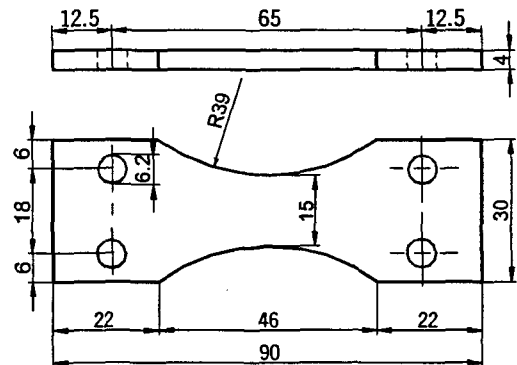


Fig. 1 Geometry and dimensions of fatigue test specimen (unit : mm)

Table 2 Mechanical properties of SPCC steel

Yield strength σ_y (MPa)	Tensile strength σ_u (MPa)	Elongation ϵ_1 (%)	Hardness H_v	Young's modulus E (GPa)
240	372	52	140	209

2.2 피로와 X선 회절실험

본 실험에 사용한 시험기는 쉐크형(Schenck type) 평면굽힘 피로시험기(Mori testing machine co. mode 15171)로써 반복속도 1500 rpm, 응력비 0.1, 하중조건은 편진평면굽힘이다. 균열길이는 일정한 피로하중하에서 일정한 반복수마다 피로시험기를 정지시키고 시험편을 시험기에 고정된 상태로 이동식 망원 현미경(x100)으로 측정하였다. 또한 반복수에 따른 피로손상 과정을 관찰하기 위하여 피로실험 도중 시험기를 정지시켜 시험편 표면에 X선을 조사하여 X선 잔류응력 σ_r 을 측정하였다. 잔류응력을 측정하기 위한 장비는 X선 회절장치(X-ray diffractometer)이며, 표준 X선 응력 측정법⁶⁾에 따라 회절각 2θ 를 반가폭 방법(Half-value breadth method)으로 결정하고 병경법의 광학계로 4점 입사($\psi_0 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)에 의하여 $\sin^2\psi$ 법으로 잔류응력을 산출하였다.

Table 3은 잔류응력을 측정하기 위한 X선 시험조건을 나타내고 있으며, 이때 특성 X선은 Cr-K α 의 타겟을 사용하여 고각도 회절면 (211)으로부터 입사각의 변화에 따른 회절각 2θ 를 구하였다.

Table 3 X-ray diffraction conditions for stress measurement

Test condition	Parallel-beam method
Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	(211)
Filter	V
Tube voltage	30kV
Tube current	10mA
Irradiated area	2×4 mm ²
Soller slit	1 deg.
Scanning speed	2 °/min
Chart speed	20 mm/min
Time constant	5 sec

Fig. 2는 Table 3에서 설정한 조건으로 X선 회절장치의 X-Y레코드에 그려지는 대표적인 X선 회절강도곡선을 나타낸 것으로써 냉간압연강인 SPCC 강 of the 경우 이중선 분리가 나타나지 않고 있다. 또한, X선 회절 위치와 강도는 Rigaku 전기(주)에서 공급하는 Si 분말입자를 이용하여 보정한 결과 $\pm 0.02^\circ$ 의 정확성을 가지고 있으며 본 재료의 회절각 $2\theta_0$ 는 156.04° 이고, 반가폭 B_0 는 2.01° 를 나타내었다. 여기서 회절각 2θ 및 반가폭 B 는 회절강도 곡선의 백그라운드 (Background)에 평행한 기준선을 긋고, 최고 회절강도와 거리가 1/2인 지점에서 기준선과 평행선을 그었을 때, 그 중심위치에서의 각도를 2θ 라 하고, 그 폭을 반가폭 B 로써 정의하였다.

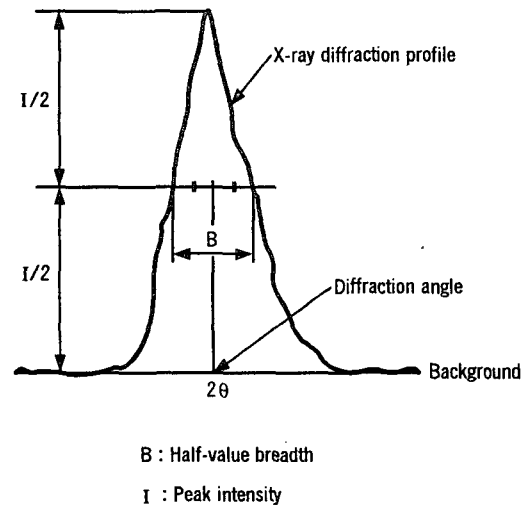


Fig. 2 Schematic illustration of X-ray diffraction profile

Fig. 3은 평면굽힘 시험편의 중앙부에 X선 조사상태를 나타낸 것으로써 X선 조사면적의 크기는 $2 \times 4 \text{ mm}^2$ 이다. 이때 압연강의 경우 결정조직에 우선방위가 존재하여 기존의 $2\theta - \sin^2\psi$ 선도에서 강한 비선형성을 나타내게 되므로 이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 시험편 아랫면에 60 Hz의 진동장치를 부착하여 회절에 기여할 수 있는 조사면적의 크기를 증가시켰다.

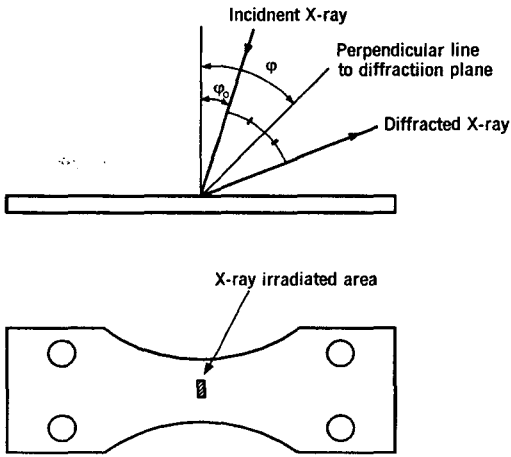


Fig. 3 Schematic illustration of X-ray irradiated area on fatigue test specimen

3. 실험결과와 고찰

3.1 피로실험

Fig. 4는 SPCC강의 $\Delta\sigma$ -N곡선을 나타낸 것으로 피로한도는 대략 130 MPa이다. 초기피로수명 영역에서는 시험편 표면에 다수의 미소 균열이 발생 및 성장하고 있으며 그 발생 시기를 최대 균열길이 결정립 크기의 1~2배 정도에 해당되는 80 μm 정도 일 때로 정의하여 ■로 표시한 결과 SPCC강의 균열발생시기는 대략 전체피로수명의 10~20% 사이에 존재하고 있다. 이러한 결과는 西谷⁷⁾ 등의 S25C강의 실험결과와 잘 일치하고 있다.

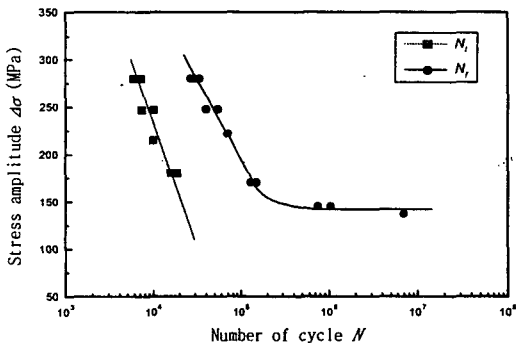


Fig. 4 $\Delta\sigma$ -N curve for SPCC steel

3.2 반복수 변화에 따른 잔류응력의 변화

Fig. 5는 각 응력진폭하에서 반복수에 따른 잔류응력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 초기 피로수명 영역의 잔류응력은 약 -270 MPa 정도의 압축응력이고 초기의 반복수 동안 잔류응력은 급격히 감소하고 그 후의 반복수에서는 완만하게 감소하고 있으며 또한, 잔류응력의 기울기는 응력진폭이 클수록 크게 감소되고 있다. 또한 피로한도보다 높은 응력진폭에서는 초기 반복수에서 잔류응력이 크게 감소하고 있으나 피로한도 부근의 응력진폭 $\Delta\sigma = 140$ MPa에서는 잔류응력이 상대적으로 작게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 평면굽힘 피로실험에서 나타나는 압축하중으로 인한 항복에 의해서 결정립이 재편성되는 것과 응력 진폭의 영향이 동시에 작용하기 때문이라 생각된다. 또한, 초기 반복수 영역을 지난 후 잔류응력이 완만히 감소하는 것은 반복 응력에 의한 변형의 축적(Accumulated deformation)과 미소균열의 형성에 기인하는 것으로 생각된다.⁸⁾ 소성 변형량이 적은 상태에서 피로 파괴되는 $H_v=400$ 이상의 고경도 재료의 경우 잔류응력이 거의 변화되지 않는 상태에서 파괴되나⁹⁾ 본 연구에서 사용한 SPCC강은 비커스 경도 H_v 가 140으로 압축잔류응력이 완만히 감소되면서 파괴되므로 잔류응력의 감소량이 반복수에 따른 소성 변형량에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. 또한, 재료가 파단될 때의 잔류응력은 응력진폭에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, 응력진폭이 큰 $\Delta\sigma = 270$ MPa에서는 잔류응력이 거의 0에 가까웠으나 피로한도부근의 응력진폭인 $\Delta\sigma = 140$ MPa에서는 잔류응력이 약 -120 MPa 정도 남아 있다. 이상의 실험결과에서 반복수가 증가함에 따른 SPCC강의 잔류응력은 3단계의 거동으로 구별할 수 있다. 즉, 압축잔류응력은 제1단계에서 초기의 몇 반복수동안 재료의 소성변형에 의하여 급격히 감소한 후, 제2단계에서 반복 응력에 의하여 축적된 미소 변형으로 인하여 완만히 감소되며, 제3단계에서 미소 균열의 성장으로 인하여 잔류응력의 감소가 뚜렷하게 나타나지 않고 있다.

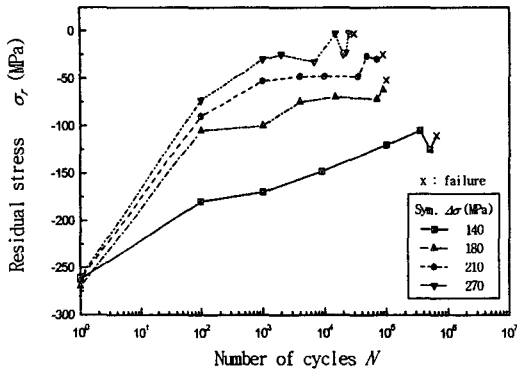


Fig. 5 Change of residual stress σ_r during fatigue process

3.3 잔류응력 σ_r 에 의한 피로수명비 N/N_f 의 예측

3.3.1 σ_r - $\log N/N_f$ 식을 이용하는 방법

Fig. 6은 잔류응력이 급격하게 감소하는 초기 피로수명 영역을 제외한 나머지 데이터를 반복수비로써 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 각각의 응력진폭으로부터 최소자승법으로 회귀시킨 실험식을 나타내며, 이때 실험식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_r = 26.5 \times \log \left(-\frac{N}{N_f} \right) - 34.6 \quad (1)$$

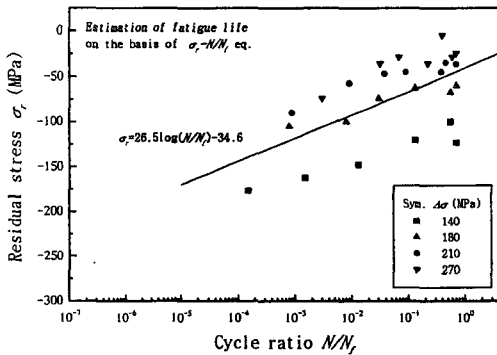


Fig. 6 Relation between residual stress σ_r and cycle ratio N/N_f

그림에서 피로한도보다 비교적 큰 응력진폭의 데이터들은 밀집되어 있지만 피로한도 부근의 응력진폭인 $\Delta\sigma=140$ MPa 데이터는 그것들과 떨어져

있는 것을 알 수 있다. 즉, $\Delta\sigma=140$ MPa 데이터로 인하여 σ_r - $\log N/N_f$ 의 회귀식은 큰 표준편차를 가지게 되므로 $\Delta\sigma=140$ MPa 데이터를 제외해야만 회귀식의 표준편차가 감소하게 될 것이다. 따라서 σ_r 과 $\log N/N_f$ 을 그대로 사용하는 상술의 방법은 피로한도 부근의 응력진폭 데이터로 인하여 피로수명을 예측하는 데 상당한 오차를 초래할 것으로 생각된다. 또한 비교적 큰 응력진폭의 경우, 피로수명 후기영역에서는 파괴 직전과 직후의 잔류응력이 거의 비슷한 수준을 유지하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 결과는 시험편이 평면응력상태에 있기 때문에 표면 미소균열의 성장과 합체과정에서 잔류응력을 거의 해방시켰기 때문이라 생각된다.

3.3.2 잔류응력 σ_r 의 기울기와 N_f 선도를 이용하는 방법

Fig. 7은 반복수 N의 대수에 대한 잔류응력 σ_r 을 나타낸 것으로, 이때 각 응력진폭에 대한 직선은 초기 피로수명 영역의 몇 반복수를 제외한 데이터를 이용하여 각 응력진폭에 해당하는 데이터를 직선 회귀시켜 구한 기울기를 평균화한 평균 기울기를 가지도록 회귀시킨 실험식을 표시하고 있다. 즉, 각 응력진폭에 대한 기울기는 16.849와 22.388 사이에 있고 그 평균 기울기는 19.378이다. 그림에서 반복수에 따른 잔류응력은 반복수의 편대수 선도상에서 응력진폭에 의존하지 않는 일정한 기울기 19.378을 가진 직선으로 표시할 수 있음을 알 수 있다.

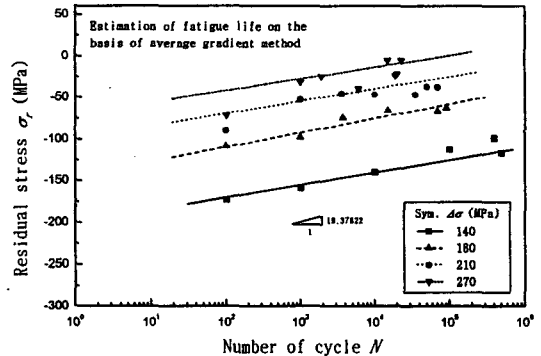


Fig. 7 Change of residual stress σ_r during fatigue process (on the basis of average gradient method)

Fig. 8은 반복수 N 의 대수에 대한 잔류응력 σ_r 을 나타낸 것으로 초기 피로수명영역의 데이터를 생략하고 그 나머지 데이터로 정리한 것이다. 그림에서 직선은 각 응력 진폭에 대한 데이터를 최소자승법으로 직선 회귀시켜 구한 것으로 각 직선은 각 응력 진폭에 따른 개별 기울기를 가지고 있으므로 일정한 경향을 보이지 않음을 알 수 있다.

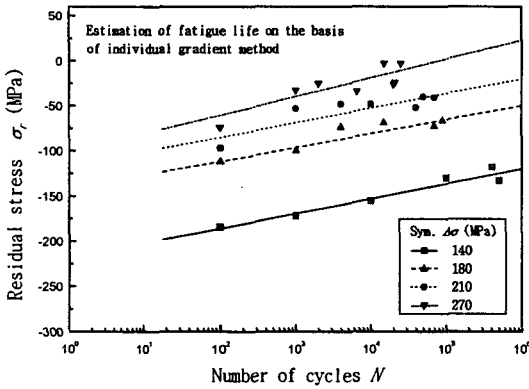


Fig. 8 Change of residual stress σ_r during fatigue process (on the basis of individual gradient method)

Fig. 9는 파단 반복수 N_f 의 대수에 대한 잔류응력 σ_r 을 나타낸 것으로서 그림 중에 표시한 직선을 N_f 선이라 정의한다. 그림에서 응력 진폭이 클수록 N_f 에 대한 잔류응력 σ_r 이 크게 변하고 있다. 이상의 Fig. 7의 평균 기울기 및 Fig. 8의 개별 기울

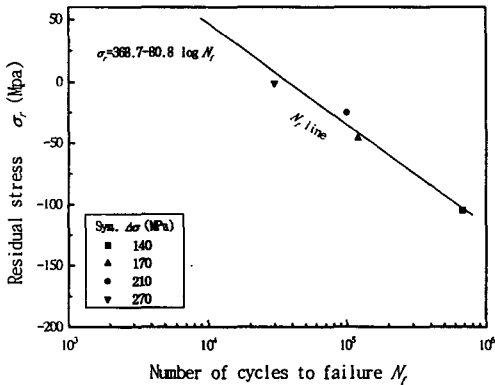


Fig. 9 Relation between σ_r and N_f at unstable fracture region

기와 Fig. 9의 N_f 선을 이용한다면 임의의 반복수 N 과 잔류응력 σ_r 로 피로수명비 N/N_f 를 예측할 수 있다고 생각된다. 본 연구에서는 이러한 피로수명 평가법을 각각 평균 기울기 피로수명 평가법 및 개별 기울기 피로수명 평가법이라 정의한다.

Fig. 10은 상술의 평균과 개별 기울기 피로수명 평가법에 의하여 피로수명비 N/N_f 를 평가하는 방법을 설명한 것이다.

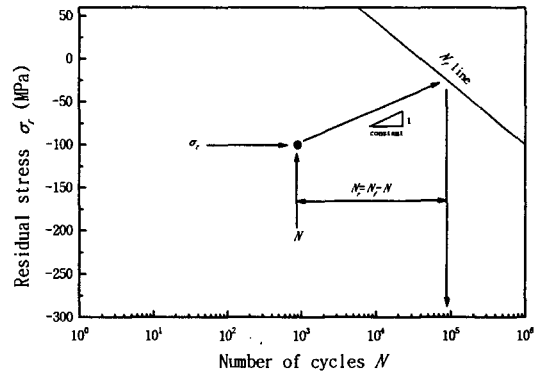
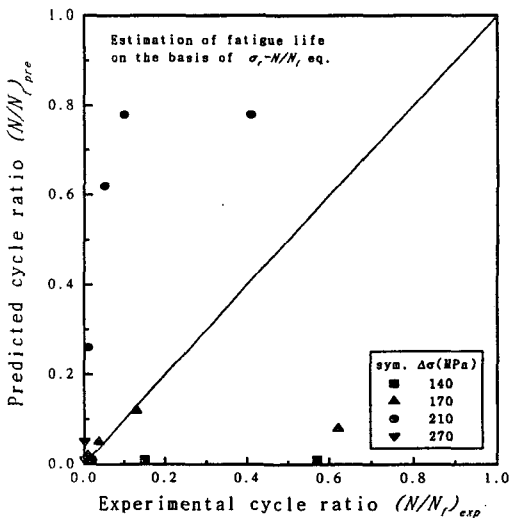


Fig. 10 Estimation of cycle ratio on the basis of average gradient method

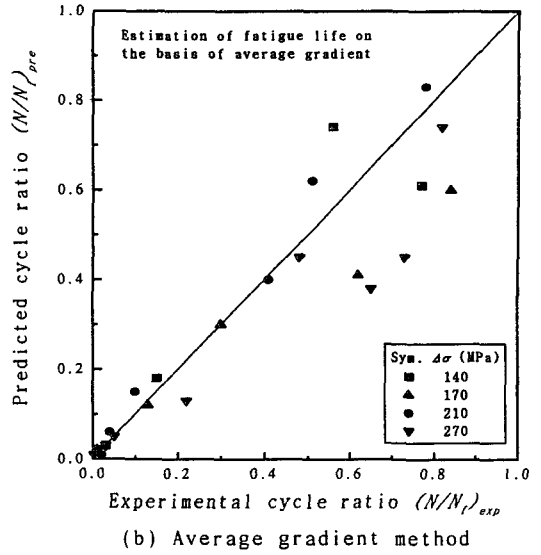
첫째, 피로수명을 평가하는 임의의 반복수 N 에 대한 잔류응력 σ_r 을 표시한다. 둘째, 그 이후의 반복수 증가에 대한 잔류응력 σ_r 의 변화량이 Fig. 7, 8의 회귀식의 기울기 $\frac{d\sigma_r}{dN}$ 가 응력진폭에 관계없이 거의 일정하다는 사실을 기초로 그 기울기를 구한다. 셋째, 최초로 표시된 점으로부터 $\frac{d\sigma_r}{dN}$ 의 기울기를 가지는 직선을 긋는다. 이러한 직선이 N_f 선과 만나는 점을 파단 반복수 N_f 로 설정한 뒤 예측된 피로수명비 $(N/N_f)_{pre}$ 를 구하므로써 부재의 피로수명을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 파단 반복수 N_f 에서 현재의 반복수 N 을 뺀 반복수 $N_f - N$ 을 구하여 잔존 피로수명비 N_f/N_f 도 구할 수 있다. 이상의 논의에 대한 타당성을 조사하기 위해 $\sigma_r - \log N/N_f$ 식에 의한 방법과 평균 기울기 피로수명 평가법 (Estimation of fatigue life on the basis of average gradient) 및 개별 기울기 피로수명 평가법 (Estimation of fatigue life on the basis of individual gradient)¹⁰⁾에 의해 예측된 피로수명비

와 실험적으로 구한 실험적 피로수명비를 비교해 볼 필요가 있다.

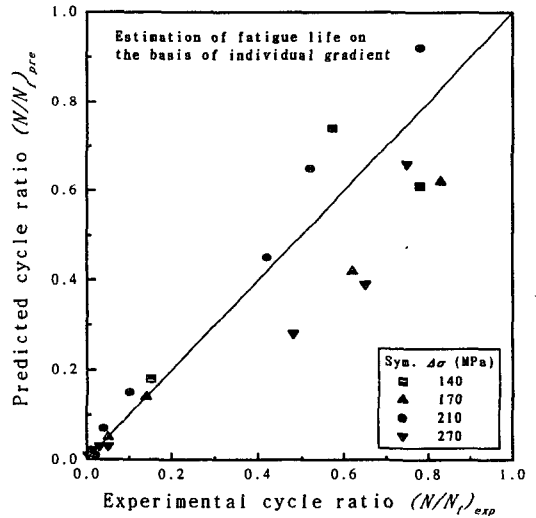
Fig. 11은 상술의 방법에 따른 예측된 피로수명비와 실험적 피로수명비를 서로 비교한 것으로 실선은 예측된 피로수명비가 실험적 피로수명비와 일치될 때를 나타낸 것이다. 실선에 대한 각 데이터의 수렴범위를 실선에 대하여 허용오차를 $\pm 20\%$ 로 고려하는 경우 Fig. 11의 σ_r - $\log N/N_f$ 식에 의한 방법은 실험적 피로수명비와 예측된 피로수명비 사이에 큰 오차를 나타내고 있으나, 평균 기울기 피로수명 평가법과 개별 기울기 피로수명 평가법은 어느 것의 방법도 예측된 피로수명비가 실험적 피로수명비와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히, 중기 피로수명영역 이후의 경우 평균 기울기 피로수명 평가법이 개별 기울기 피로수명 평가법보다 수명 예측을 조금 더 정확하게 수행할 수 있다. 또한 개별 기울기 피로수명 평가법은 각 응력진폭에 대한 기울기를 개별적으로 알아야 하지만, 평균 기울기 피로수명 평가법은 각 응력진폭에 대한 공통된 기울기를 사용함으로써 피로수명을 간단하게 예측할 수 있다. 따라서 평균 기울기 피로수명 평가법이 피로수명 평가의 정확성과 간편성으로 인하여 σ_r - $\log N/N_f$ 관계에 의한 방법이나 개별 기울기 피로수명 평가법 보다 훨씬 더 유용성을 가지고 있음을 알 수 있다.



(a) σ_r - N/N_f equation



(b) Average gradient method



(c) Individual gradient method

Fig. 11 Relation between experimental cycle ratio and predicted cycle ratio.

4. 결론

냉간압연강인 SPCC강에 대한 평균균형 피로실험을 실시하고 반복수 증가에 따른 X선 잔류응력을 연속적으로 측정하여 조사영역내의 피로손상을 X선 잔류응력으로 규명한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 냉간압연공정으로 발생된 SPCC강의 잔류응력은 압축응력상태로써, 최대잔류응력은 -270 MPa를 나타내었다.
- 2) 반복수의 증가에 따른 잔류응력은 피로한도 부근의 응력을 제외하면 초기에 급격한 감소, 중기에 완만한 감소, 그리고 말기에 거의 감소하지 않는 상태의 3단계 과정을 나타내었다.
- 3) 잔류응력 σ_r 은 피로수명의 초기를 제외하면 응력진폭에 관계없이 반복수 N 의 대수에 대하여 각 응력진폭의 평균기울기로 표시할 수 있었다.
- 4) 피로수명비 N/N_f 는 임의의 반복수 N 에 대해서 잔류응력 σ_r 를 σ_r - $\log N$ 선도상에 표시하고 σ_r - N 관계에서 구한 평균 기울기를 구하여 파단 수명선 N_f 선과 만나는 점인 파단 반복수 N_f 를 구하므로써 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 양광호, 김득진, 조석수, 주원식, 장득렬, "자동차 압연강의 X선 잔류응력과 피로수명비의 관계," 98년도 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A, pp. 253~258, 1998
- 2) 이용복, 정진성, "용접재의 잔류응력 재분포와 피로거동," 대한용접학회지, pp. 20~28, 1997
- 3) 韓鳳熙 譯, "X線回折," 반도출판사, p. 563, 1990
- 4) 日本材料學會 X線材料強度部門委員會, "X線應力測定法標準," p. 14, 1982
- 5) 日本材料學會, "機械材料および機械的性質と試験法," pp. 7~8, 1980
- 6) 日本材料學會 X線材料強度部門委員會, "X線應力測定法標準," pp. 24~27, 1982
- 7) 西谷弘信, 藤村顯世, 福田幸雄, 福田孝之, "炭素鋼の疲勞過程における疲勞被害とX線半價幅の關係," 日本機械學會論文集, 第55卷, 第510號, pp. 192~197, 1989
- 8) 平修二, 本田和男, "X線による金属材料疲勞破壊子知法に關する研究," 日本機械學會論文集, 第28卷, 第188號, pp. 452~459, 1961
- 9) 日本材料學會編, "X線應力測定法," 養賢堂, p. 180, 1981
- 10) 주원식, 박승용, 조석수, 장득렬, "평균기울기법에 의한 Al 2024-T3 합금의 X선 반가폭과 피로수명비의 관계," 98년도 한국정밀공학회 추계학술대회논문집(II), pp. 881~886, 1998