

S45C강의 피로과정에 대한 반가폭 및 잔류응력의 변화

부 명환* · 구 후택** · 정 종현** · 박 영철*** · 김병수**** · 김 영석*

The Change of Half Value Breadth and Residual Stress during Fatigue Process in S45C Steel

Myung-Hwan Boo, Hoo-Taek Koo, Jong-Hyun Jeong
Young-Chul Park, Byeong-Soo Kim, Young-Suk Kim

Key Words: S45C, Fatigue Strength(피로강도), X-Ray Diffraction(X선 회절), Half Value Breadth(반가폭), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

The purpose of this study is to examine the change of half value breadth and residual stress during Fatigue Process in S45C Steel by X-ray diffraction. For S45C Steel, the relationship between the change in fatigue damage of the specimen and the half value breadth, and residual stress of X-ray diffraction profiles during the fatigue processes has been investigated. The half value breadth(HVB) decreases in the early period of fatigue cycle. The change of HVB is relation to cyclic work hardening. In 10~20% of ratio of fatigue life, the change in the half value breadth is not marked. During fatigue process, the residual stress is changed with fatigue cycle increasing.

1. 서 론

산업고도화에 따라 각종 재료가 가혹한 환경 속에서 사용되고 있으며, 부존자원의 절감을 위하여 극한 설계가 이용되고 있다. 실용 기계 및 구조물이 파손된 경우, 파괴사고의 재발방지와 건전성(품질)평가를 위해서는 기계사용상황의 조사 및 엄밀한 응력해석에 의한 재검토를 행하고, 파손부재의 외형, 파면, 결함, 미시구조와 화학성분을 충분히 조사하여야 한다. 또한 이들의 결과를 종합하여 정확한 사고원인의 추정을 하지 않으면 안 된다. 특히 구조용 재료의 경우, 피로강

도의 평가는 불가결하며 이와 같은 반복수 의존형 파괴는 변동하는 하중 즉 사이클에 의존하므로 피로과정중의 기계 또는 구조물의 손상정도를 모니터링할 수 있다면 피로파괴의 방지와 잔존수명의 예측에 크게 기여할 것이다^(1~3).

한편, X선 회절법⁽⁴⁾은 피로현상에서 일어나는 특유의 슬립선의 발생과 전위의 이동에 의한 셀(cell)조직등과 같은 결정배부의 변형에 기인하는 국부적 현상에 민감하기 때문에 이에 관한 연구가 많이 행해지고 있다^(5~8). 그러나 피로과정에 대한 경우, 반가폭에 의한 평가가 대부분^(9~11)이며 잔류응력에 의한 평가도 있지만 단축(하중)방향에 연구^(5,12)이며 2축 또는 3축 응력상태에 관한 평가는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 일반적인 구조용강으로 사용되는 S45C를 이용하여 피로과정에 대한 반가폭과 2축 상태의 잔류응력을 평가하여 피로과정에 대한 재료의 손상정도와 X선 반가폭 및 잔류응

* 한국원자력연구소 중수로압력관
** 동아대학교 기계공학과
*** 동아대학교 기계공학과 대학원
**** 인제대학교 기계자동차공학부

력과 관계를 명확히 하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 일반구조용재료인 S45C로 시험편의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of S45C

Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	elongation (%)
343.35	568.98	20

Fig.1에 평면굽힘피로시험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타냈으며 시험편은 L-T방향으로 가공하였다. 기계가공후 진공로에서 열처리(500°C, 3hr)하였으며 다시 전해연마로 표면을 50 μm정도 제거하였다.

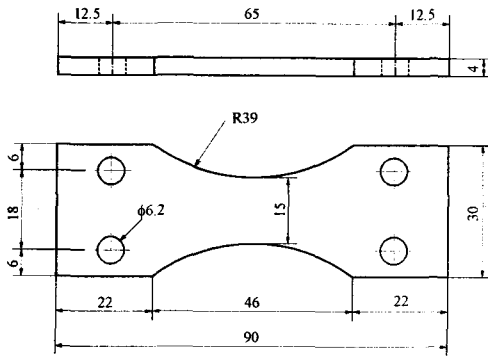


Fig. 1 Geometry and dimensions of test specimen (mm)

2.2 피로시험 및 X선 응력측정

피로시험에는 쉐크형(Schenck type) 평면굽힘 피로시험기를 사용하여 상온대기중에서 행하였다. 시험조건은 반복속도 1500rpm, 응력비 R=-1로 하였다. 반복응력은 각각 294MPa, 343MPa로 하였다.

잔류응력측정에는 평형법을 채용한 X선 잔류응력측정장치(理學電機 MSF)를 이용하여 $\sin^2\psi$ 방법으로 측정하였다. X선 응력표준법⁽⁹⁾에 따라 잔류응력 σ_R 을 구하였으며 Table 2에 측정조건을

Table 2 X-ray stress measurement condition

Diffraction plane		(112)
Characteristic X-ray		CrK _α
Filter		V
Method		MSF
Tube voltage	(kV)	30
Tube current	(mA)	10
Irradiated area	(mm)	φ2
Irradiated time	(sec)	10
X-ray Young's modulus (GPa)		696
X-ray Poisson ratio	ν	0.225

나타내었다. 특성X선은 CrK_α 선을 이용하여 Fe 211회절에 대하여 측정하였다. X선 응력측정은 소정의 반복수에 대하여 피로시험을 중단하고 시험편을 피로시험기에서 떼어내어 피로과정에 대한 반가폭(회절프로파일에서 피크높이의 50%위치에서의 회절프로파일의 폭) 및 잔류응력을 측정하였다. 반가폭 및 잔류응력을 측정의 위치는 시험편의 중앙부에 유성매직으로 표시하여 항상 동일한 위치에서 측정할 수 있도록 주의하였다.

시험편의 피로과정에 대한 잔류응력의 변화를 Fig.2와 같이 시험편의 길이방향(L direction, $\phi=0^\circ$)과 폭방향(T direction, $\phi=90^\circ$)에 대하여 측정하였다. ψ 의 범위는 0° 에서 45° 까지 6단계로 나누었으며, 피크강도가 5000cps이하의 값은 제외하였다. 잔류응력의 값은 $\sin^2\psi$ (또는 $2\theta - \sin^2\psi$) 선도의 기울기 M에 X선 응력정수 K ($-30.33\text{kg/mm}^2/\text{deg}$)⁽⁹⁾를 곱하여 식(1)을 이용하여 구하였다. 또한 각각의 잔류응력값은 3회 측정하여 평균값을 나타내었다.

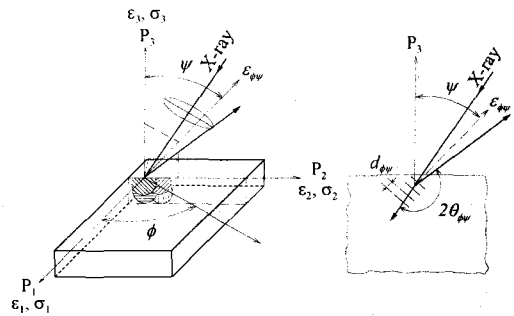


Fig.2 Directions of stress and strain.

$$\sigma_R = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \cot \theta_0 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\Delta(2\theta)}{\Delta(\sin^2 \psi)}$$

$$= K \cdot M \quad \dots\dots\dots (1)$$

σ_R : Residual stress, E : Young's modulus
 ν : Poisson's ratio, θ_0 : Standard Bragg's angle
 K : Stress constant, M : Slope

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로강도

본 실험에 사용한 S45C의 피로실험결과를 Fig.3에 나타내었다. 약 7×10^7 사이클에서 일정한 값을 나타냈으며 피로강도는 215MPa로 나타났다. Fig.3의 결과를 참고로하여 반복응력을 각각 294MPa 및 343MPa로 나누어 각 응력에 대한 X선 파라미터(반가폭, 잔류응력)의 변화를 관찰하였다.

3.2 피로과정에서의 반가폭의 변화

Fig.4에 응력진폭이 294MPa일때의 L방향과 T방향에 대한 상대피크강도분포를 나타내었다. $\sin^2 \psi = 0 \sim 0.1$ 근처에서 피크강도가 낮은 것을 알 수 있으며, L방향보다 T방향의 상대강도가 더 크게 나타났다. 이것은 시험편에 집합조직이 존재한다는 것을 나타내며 시험편의 가공시 열처리와 전해연마를 하였지만 압연의 영향을 완전히 제거하지 못한 것을 의미한다. 따라서 상대적으로 낮은 피크강도는 잔류응력측정에 큰 영향을 미치므로 앞에서 설명한 것 같이 피크

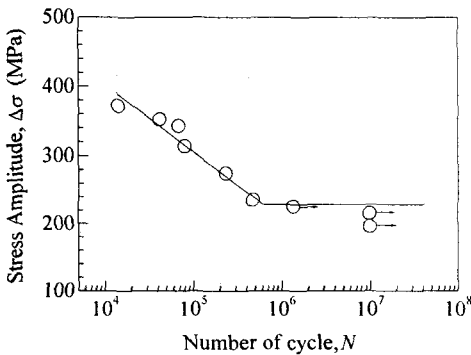


Fig.3 Relation between stress amplitude and number of cycles for S45C

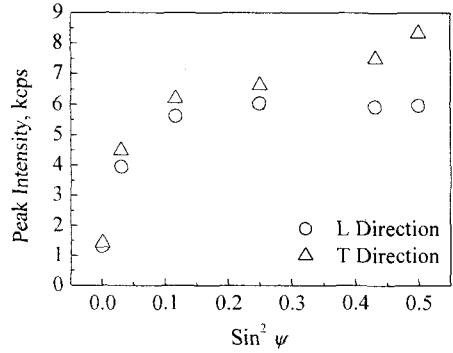


Fig.4 Changes of X-ray peak intensity with $\sin^2 \psi$

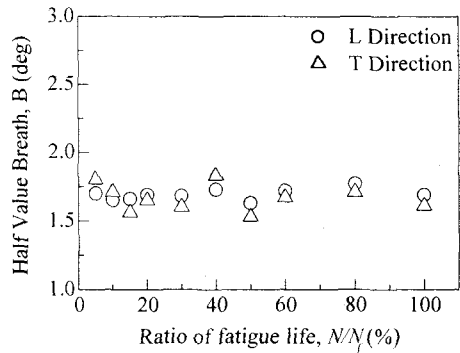


Fig.5 Changes of half value width with number of cycles.

의 강도가 5000cps이하의 값은 무시하였다.

3.3 피로과정에서의 반가폭의 변화

응력진폭이 294MPa인 시험편에서 측정된 반가폭을 Fig.5에 나타내었다. 여기서 반가폭은 $\psi = 20^\circ$ 에 대해서 측정된 결과이다. 피로수명비에 대한 반가폭의 변화는 약 10~20%까지 감소하는 경향을 보이지만 그 이상에 대해서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 또한 응력진폭이 343MPa의 경우에도 비슷한 경향을 나타내었다.

X선 회절은 피로현상과 같은 특유의 슬립선의 발생과 미세적인 균열의 발생 등이 결정변형에 기인하는 국부적인 현상에 민감하다. 특히 X선 회절에 의해 측정되는 반가폭은 결정격자의 불균일변형에 큰 영향을 받는다. 피로초기과정을 보면 금속재료는 국부적인 전위운동과 이 전위조직에 큰 영향을 받으며 반복응력에 의해 결정립내에 발생하는 전위는 슬립선 또는 슬립면을 따라

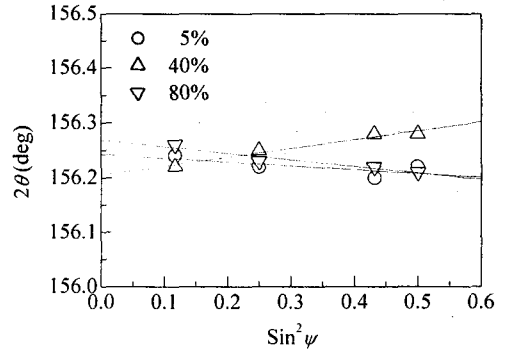
이동하며 결정립내의 부결정립(sub grain) 또는 슬립대로 발달하게 된다. 이 슬립대에 형성된 전위가 가공경화를 일으키며 이러한 경화현상은 피로의 초기단계에 현저히 나타나면 반가폭의 변화는 이에 대응하고 있다. 그러나 피로가 어느 정도 진행하게 되면 위와 같은 변화는 감소하게 되며 포화상태에 이르게 된다. 이후 고집슬립대(persistent slip band)에서 미소크랙의 발생과 전파가 시작되지만 반가폭의 변화는 거의 관찰할 수가 없다. X선 회절에서 얻어지는 정보는 국소적이기는 재료의 조사면적에 대한 평균적인 값이기도 하다. 피로에 대한 재료의 미시적 변화(슬립선의 발생, 부결정립의 형성, 내부변형률의 변화 등)는 반가폭의 변화로 잘 나타나지만 크랙의 발생이나 전파와 같은 국부적인 형상의 변화는 나타내기 어려운 것으로 생각한다.

3.3 피로과정에서의 잔류응력의 변화

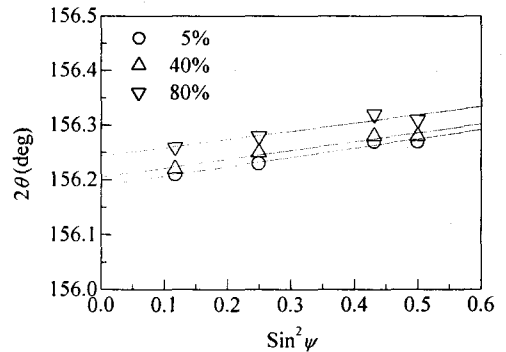
응력진폭이 294MPa일 때의 피로과정에 따른 $\sin^2\psi$ 선도를 Fig.6에 나타내었다. 그림중의 직선은 최소좌승법으로 구한 회귀직선이다. 앞에서 설명한 것 같이 X선의 피크강도가 작으면 회절각 2θ 를 결정하는데 있어서 큰 오차가 발생하게 되며 결과적으로 잔류응력에도 그 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig.6과 같이 피크강도가 상대적으로 큰 값만을 취하여 잔류응력을 구하였다. L방향의 결과를 보면 기울기는 피로사이클이 증가함에 따라 負에서 正으로 다시 負로 변하는 것을 알 수 있으며 잔류응력도 이에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 그러나 T방향의 경우, 기울기는 正으로 기울기만 조금씩 변하고 있다.

Fig.6의 결과를 기초로 하여 구한 잔류응력과 피로사이클과의 관계를 Fig.7에 나타내었다. L방향의 경우, 피로초기에는 인장의 잔류응력상태를 나타냈다. 잔류응력은 피로사이클이 증가함에 따라 점점 감소하여 피로수명비의 약 40%정도에서 최소가 되며 그 후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. T방향의 경우는 이와 반대의 경향을 나타내었다.

응력진폭이 343MPa일 때의 피로과정에 따른 $\sin^2\psi$ 선도를 Fig.8에 나타냈으며, 그림중의 직선은 최소좌승법으로 구한 회귀직선이다. L방향의 경우, 기울기는 전체적으로 부를 나타내



(a) L direction



(b) T direction

Fig.6 Changes of 2θ with number of cycles (294MPa).

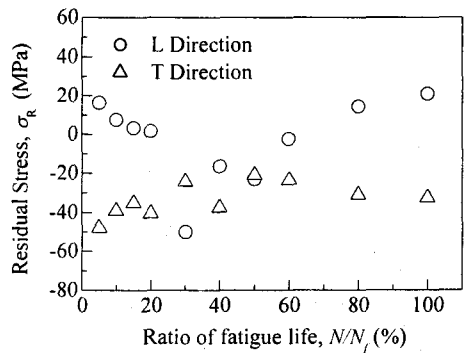
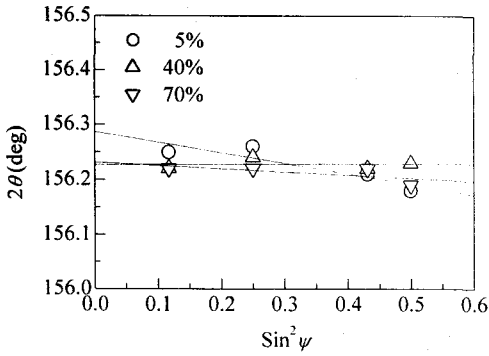
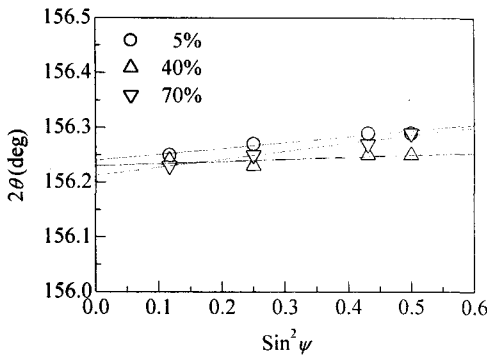


Fig.7 Changes of residual stress width with ratio of fatigue life (294MPa).

며 피로사이클이 증가함에 따라 감소하다 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. T방향의 경우, L방향과는 반대로 전체적으로 기울기가 正



(a) L direction



(b) T direction

Fig.8 Changes of 2θ with number of cycles (343MPa).

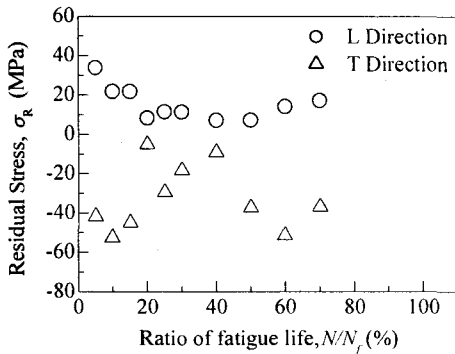


Fig.9 Changes of residual stress width with ratio of fatigue life (343MPa).

이며 피로사이클의 증가에 따라 감소하다 다시 증가함을 알 수 있다.

Fig.8을 기초로 하여 구한 잔류응력과 피로사이클과의 관계를 Fig.9에 나타내었다. Fig.9의 결

과도 Fig.7과 마찬가지로 양방향 모두 실험초기에는 각각 인장 및 압축의 잔류응력상태를 나타냈으며 피로사이클이 증가함에 따라 점점 감소 또는 증가하여 피로수명의 약 40%정도에서 최소 또는 최대 값을 나타내었다. 그 후 다시 증가 및 감소하는 경향을 나타냈으며 응력진폭이 343MPa인 경우 피로수명의 80%에서 과단이 되었기 때문에 그 이후의 경향은 알 수 없지만 응력진폭이 294MPa와 같은 경향을 나타낼 것으로 생각한다. 또한 Fig.7과 Fig.9를 비교해 보면 시험편에 가하는 응력진폭이 클수록 잔류응력의 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

Fig.7과 Fig.9의 결과로부터 본 재료의 피로에 대한 잔류응력은 L과 T방향에 대해 피로균열의 전반에 걸쳐 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 반가쪽의 경우는 피로의 초기과정을 모니터링할 수 있는데 반하여 잔류응력은 피로의 전과정에 대하여 모니터링할 수 있으며 L과 T방향에 대해 잔류응력을 평가하면 보다 정확한 정보를 알 수 있을 것이다.

4. 결론

피로과정에 대한 재료의 손상을 평가하기 위하여 X선 회절을 이용하여 반가쪽과 잔류응력을 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피로과정에 대한 반가쪽의 변화는 피로수명비의 약 10~20%까지 변화하지만 그 이상에 대해서는 거의 일정한 값을 나타내었다.

2. 피로과정에 대한 잔류응력의 변화는 피로초기에는 L과 T방향에 대하여 각각 인장 및 압축의 잔류응력상태를 나타냈으며 피로사이클이 증가함에 따라 점점 감소 또는 증가하여 피로수명의 약 40%정도에서 최소 또는 최대 값을 나타내었다. 그 후 다시 증가 및 감소하는 경향을 나타내었다.

3. 본 재료의 피로과정에 대한 수명을 예측할 경우 피로초기에는 반가쪽으로 예측이 가능하지만 피로전반에 대한 과정을 모니터링하기 위해서는 잔류응력으로 평가하는 것이 보다 정확한 정보를 얻을 수 있다.

후 기

X선 잔류응력은 부산·울산지방중소기업청 시험검사팀의 이종훈씨의 호의에 의해 측정하였으며 이에 감사 드립니다.

을 이용한 Al 2024-T3 합금의 피로수명예측에 관한 연구”, 제17권, 제1호, pp.145-152.

(12) 조석수, 주원식, 장득열, 1999, “X-선 회절을 이용한 피로하중을 받는 일반구조용강의 잔류응력에 관한 연구”, 한국자동차공학회논문집, 제7권, 제8호, pp.248~261.

참고문헌

- (1) 하재선, 송지호, 이시중, 1988, “변동하중하의 피로수명예측- 제1보 : 피로균열 발생까지의 수명”, 대한기계학회논문집(A), 제12권, 제4호, pp760~780.
- (2) 권재도, 광상국, 최선호, 황재석, 진영준, 1991, “신뢰성 공학적 피로 균열의 발생, 진전 수명 평가 및 예측에 관한 연구 (II)”, 대한기계학회논문집(A), 제15권, 제3호, pp907~915.
- (3) 남기우, 김선진, 1999, “피로균열의 지연거동에 따른 수명예측 및 비파괴평가”, 한국해양공학회지, 제13권, 제3(I)호, pp36~48.
- (4) 日本材料學會編, 1981, 改著X線應力測定法, 養賢堂.
- (5) 박수영, 김득진, 부명환, 오세욱, 1993, “X-선 회절을 이용한 Al7075-T651합금의 파손해석”, 한국해양공학회논문집, 제7권, 제2호, pp.281~291.
- (6) 부명환, 박영철, 廣瀬幸雄, 1999, “X선 응력측정에 의한 복합재료의 3축응력해석”, 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제7호, pp.1173~1181.
- (7) 부명환, 박영철, 廣瀬幸雄, 1998, “WC-Co초경합금의 피로균열진전특성에 미치는 미시조직의 영향”, 대한기계학회논문집(A), 제22권, 제8호, pp.1409~1417.
- (8) 부명환, 박영철, 廣瀬幸雄, 1999, “WC-Co초경합금의 X-선 프랙토그래피법에 의한 파괴역학 파라미터의 평가”, 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제10호, pp.1709~1716.
- (9) Shuji Taira, Kazuo Honda, 1961, “X-Ray Investigation on the Prediction of Fatigue Life”, Vol.28, No.188, pp.452~459.
- (10) Shuji Taira, Kazuo Honda, Kenji Matuki, 1962, “X-Ray Investigation on the Prediction of Fatigue Life”, Vol.29, No.197, pp.6~11.
- (11) 김순호, 조석수, 주원식, 2000, “X선 반가폭