

피로과정에서 S45C강의 반가폭과 잔류응력의 변화양상

The Change of Full Width Half Maximum and Residual Stress during Fatigue Process in S45C Steel

부명환*·†, 박영철**, 김병수***, 이종문****

Myung-Hwan Boo*·†, Young-Chul Park**, Byeong-Soo Kim*** and Jong-Moon Lee****

초 록 기계구조물의 피로과정에 대한 손상정도를 평가하기 위하여 X선 회절을 이용하여 반가폭 및 하중방향과 수직방향에서의 2축에 대한 잔류응력의 변화를 측정하였다. 반가폭은 피로과정의 초기에는 큰 변화를 보이지만 피로수명비의 약10~20%이후에는 큰 변화를 보이지 않았다. 2축 방향에 대한 잔류응력은 피로수명비의 40% 전후에서 길이방향의 경우는 감소와 증가를, 폭방향의 경우는 증가와 감소를 하였으며, 응력진폭이 클수록 잔류응력의 절대 값은 커지는 증가하는 경향을 나타내었다.

주요용어 : 피로강도, X선 회절, 반가폭, 잔류응력

Abstract The purpose of this study is to examine the change of full width half maximum(FWHM) 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 FWHM, and residual stress of X-ray diffraction profiles during the fatigue processes has been investigated. The FWHM decreases in the early period of fatigue cycle. The change of FWHM is associated with cyclic work hardening. The change of the FWHM is not significant in 10~20% of ratio of fatigue life. The residual stress is changed with fatigue cycle increasing during the fatigue process.

Keywords: S45C, fatigue strength, X-ray diffraction, full width half maximum(FWHM), residual stress

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 재발방지과 건전성(품질)평가를 위해서는 기계 사용상황의 조사 및 엄밀한 응력해석에 의한 재검토를 행하고, 파손부재의 외형, 파면, 결함, 미시구조와 화학성

분을 충분히 조사하여야 한다. 또한 이들의 결과를 종합하여 정확한 사고원인의 추정을 하지 않으면 안 된다. 특히 구조용 재료의 경우, 피로강도의 평가는 필수적이며, 이와 같은 반복수 의존형 파괴는 변동하는 하중 즉 피로 사이클에 의존하므로 피로과정중의 기계 또는 구조물의 손상정도를 모니터링할 수 있다면 피로파괴의 방지와 잔존수명의 예측에 크게 기여할 것이다[1-3].

한편, X선 회절법[4,5]은 피로현상에서 일어나는 특유

의 슬립선의 발생과 전위의 이동에 의한 셀(cell)조직등과 같은 결정내부의 변형에 기인하는 국부적 현상에 민감하기 때문에, 이에 관한 연구가 많이 행해지고 있다[6-9]. 그러나 피로과정에 대한 경우, 반가폭에 의한 평가가 대부분[10-12]이며, 잔류응력에 의한 평가도 있지만 단축(하중)방향에 제한된 연구[6,13]로서 2축 또는 3축 응력상태에 관한 평가는 전무한 실정이다.

본 연구는 3축 상태에 대한 잔류응력의 평가를 최종 목표로 하고 있으며, 이에 앞서 기계구조물의 구조용강으로 사용되는 S45C를 이용하여 피로과정에 대한 반가폭과 2축 상태의 잔류응력을 먼저 측정하여 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 일반 구조용 재료인 S45C로 시험편의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1에 굽힘 피로시험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타내었다. 시험편은 판재에 대해 T-L (T : Transverse와 L : Longitudinal)방향으로 채취[14]하였으며, 피로균열이 압연방향(rolling direction, RD)으로 진전하도록 가공하였다. 시험편은 기계가공후 진공로를 이용하여 500°C에서 3hr동안 열처리를 하였으며, 전해연마로 표면을 50 μm정도 제거하였다. 앞의 온도에서는 압연에 의한 집합조직은 그대로 남게되지만 격자변형은 완전히 소멸한다.

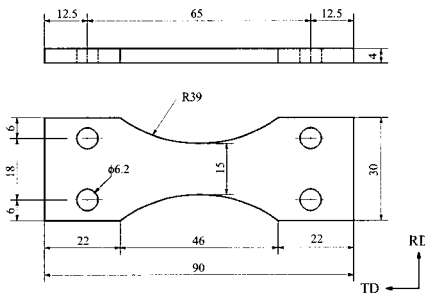


Fig. 1 Geometry and dimensions of test specimen(mm)

Table 1 Mechanical properties of S45C

Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	HV
343.35	568.98	16	168

2.2. 피로시험 및 X선 응력측정

피로시험에는 비틀림 및 굽힘 피로시험기(Scenk type twisting & Bending fatigue testing machine, Mori Testing Machine, Model611)를 사용하였다. 시험편의 한쪽 중앙부에는 스트레인지지를 부착하여 일정한 부하응력을 가해지도록 하였으며, 상온대기중에서 실험을 행하였다. 시험조건은 반복속도 1500rpm, 응력비 R= -1로 하였다. 반복응력은 각각 294MPa, 343MPa로 하였다.

잔류응력측정에는 평형법법을 채용한 X선 잔류응력측정장치(Rigaku MSF)를 이용하여 sin²ψ법으로 측정하였다. X선 응력측정법[4-9]에 따라 잔류응력 σ_R를 구하였으며, Table 2에 측정조건을 나타내었다. 특성 X선은 CrK_α 선을 이용하여 Fe 211회절에 대하여 측정하였다. X선 응력측정은 소정의 반복수에 대하여 피로시험을 중단하고 시험편을 피로시험기에서 분리하여 피로과정에 대한 반가폭(회절프로파일에서 피크높이의 50%위치에서의 회절 프로파일의 폭) 및 잔류응력을 측정하였다. 반가폭 및 잔류응력 측정시 측정 위치는 시험편의 중앙부를 유성펜으로 표시하여 항상 동일한 위치에서 측정할 수 있도록 주의하였다.

Table 2 X-ray stress measurement condition

Diffraction plane	(211)
Characteristic X-ray	CrK _α
Filter	V
Method	MSF
Tube voltage (kV)	30
Tube current (mA)	10
Irradiated area (mm)	∅2
Irradiated time (sec)	10

시험편의 피로과정에 대한 잔류응력의 변화를 Fig.2와 같이 시험편의 길이방향(TD, φ=0°)과 폭방향(RD, φ=90°)에 대하여 측정하였다. ψ의 범위는 0°에서 45°까지 6단계로 나누었다. 잔류응력의 값은 sin²ψ(또는 2θ-sin²ψ)선도의 기울기 M에 X선 응력계수 K (-30.33kg/mm²/ deg)[4,5]를 곱하여 다음의 식 (1)을 이용하여 구하였다. 또한 각각의 잔류응력값은 3회 측정하여 평균값을 나타내었다.

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

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

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

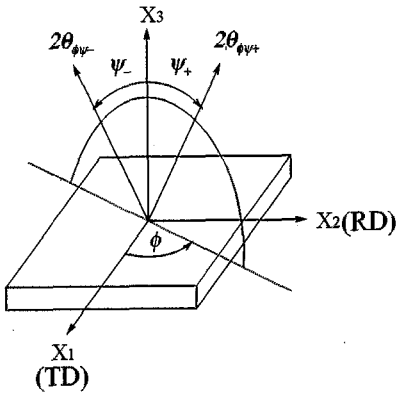


Fig. 2 Directions of stress and strain

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 피로강도

본 실험에 사용한 S45C의 피로실험결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 화살표는 파단되지 않은 결과를 나타낸다. 부하응력이 감소할수록 피로수명은 점진적으로 증가하여, 약 6×10^7 사이클에서 일정한 값을 나타냈으며, 이때의 피로강도는 약 215MPa로 나타났다. Fig. 3의 결과를 참고로 하여 각각 294MPa 및 343MPa의 부하응력으로 피로실험을 행하여 각 부하응력에 대한 X선 파라미터(반가폭, 잔류응력)의 변화를 관찰하였다.

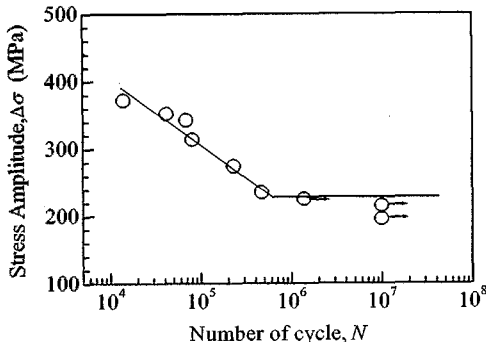


Fig. 3 Relationship between stress amplitude and number of cycles for S45C

3.2. 피로과정에서의 반가폭의 변화

Fig. 4에 응력진폭이 294MPa일때의 TD와 RD에 대한 상대피크강도분포를 나타내었다. $\sin^2\psi=0 \sim 0.1$ 근처에서 피크강도가 낮은 것을 알 수 있으며, TD보다 RD의 상대피크강도가 더 크게 나타났다. 금속재료에 집합조직이 존재한다는 것은 결정립이 특정한 방향으로 우선적으로 배향되어 있다는 것을 의미하며, Bragg의 회절법칙[15]에 의해 특정한 방향으로 X선이 회절되지 않거나 약하다는 것을 나타낸다. 따라서 이러한 결과는 시험편의 가공시 열처리와 전해연마를 하였지만, 압연의 영향을 완전히 제거하지 못한 것을 의미한다.

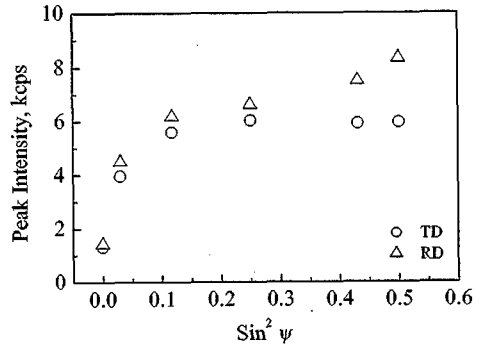


Fig. 4 Change of X-ray peak intensity with $\sin^2\psi$

각각의 응력진폭에 대하여 측정된 반가폭의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 반가폭은 $\psi=20^\circ$ 에 대해서 측정된 결과이다. 각각의 응력진폭에 대하여 피로수명비가 증가할수록 반가폭은 약 10%까지 증가하는 경향을 보이지만, 그 이상에 대해서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 또한 응력진폭에 관계없이 반가폭은 최대 1.7도 정도로 거의 일정하였다.

X선 회절은 피로현상과 같은 특유의 슬립선의 발생과 미시적인 균열의 발생 등이 결정변형에 기인하는 국부적인 현상에 민감하다. 특히 X선 회절에 의해 측정되는 반가폭은 결정격자의 불균일변형에 큰 영향을 받는다. 피로 초기과정의 금속재료는 국부적인 전위운동과 이 전위조직에 큰 영향을 받는다. 반복응력에 의해 결정립내에 발생하는 전위는 슬립선 또는 슬립면을 따라 이동하며, 결정립내의 부결정립(subgrain) 또는 슬립대로 발달하게 된다. 이 슬립대에 형성된 전위가 가공경화를 일으키며, 이러한 경화현상은 피로의 초기단계에 현저히 나타나면서

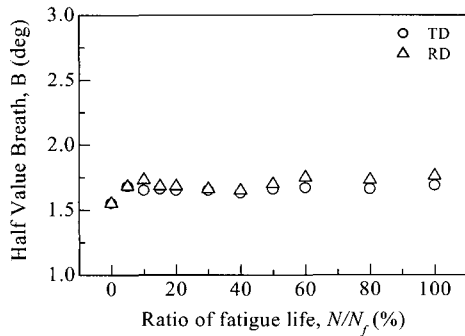
반가폭을 증가시키게 된다. 그러나 피로가 어느 정도 진행하게 되면 위와 같은 변화는 감소하게 되며 포화상태에 이르게 된다. 이후 고집슬립대(persistent slip band)에서 미소크랙의 발생과 전파가 시작되지만 반가폭의 변화는 거의 관찰할 수가 없다. X선 회절에서 얻어지는 정보는 국소적이지만 X선의 조사면적에 대한 평균적인 값이기도 하다. 피로에 대한 재료의 미시적 변화(슬립선의 발생, 부결정립의 형성, 내부변형률의 변화등)는 반가폭의 변화로 잘 나타나지만, 크랙의 발생이나 전파와 같은 국부적인 형상의 변화는 나타내기 어려운 것으로 생각한다.

3.3. 피로과정에서의 잔류응력의 변화

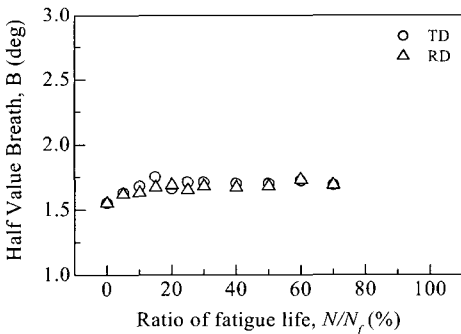
응력진폭이 294MPa일 때의 피로과정에 따른 $\sin^2\psi$ 선도를 Fig. 6에 나타내었다. 그림 중의 직선은 최소자승법으로 구한 회귀직선이다. 앞에서 설명한 것 같이 X선의 피크강도가 작으면 회절프로파일의 백그라운드가 상대적으로

로 크다는 것을 의미한다. 따라서 반가폭법[15]으로 회절 각 2θ 를 결정하는데 있어서 큰 오차가 발생하게 되며, 결과적으로 잔류응력에도 그 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 Fig. 6과 8에서와 같이 피크강도가 상대적으로 큰 값만을 취하여 잔류응력을 구하였다. 먼저 TD의 결과를 보면, 기울기는 피로사이클이 증가함에 따라 부(負)에서 정(正)으로 다시 부(負)로 변하는 것을 알 수 있으며, 잔류응력도 이에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 그러나 RD의 경우, 그 기울기는 정(正)으로 기울기만 조금씩 변하고 있다.

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

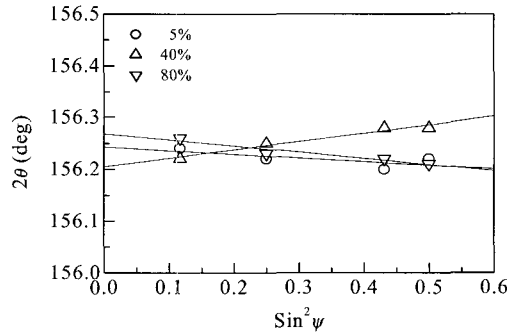


(a) $\Delta\sigma = 294\text{MPa}$

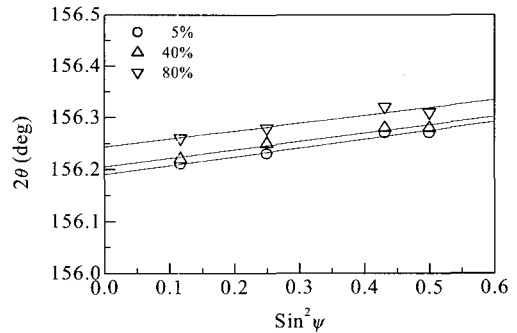


(b) $\Delta\sigma = 343\text{MPa}$

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



(a) TD



(b) RD

Fig. 6 Change of 2θ with number of cycles ($\Delta\sigma = 294\text{MPa}$)

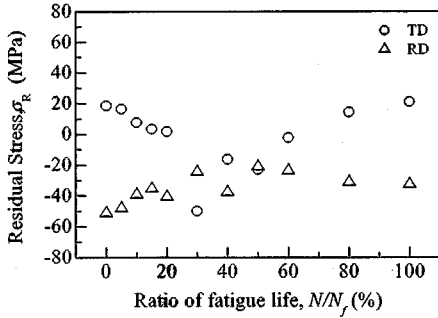


Fig. 7 Change of residual stress width with ratio of fatigue life ($\Delta\sigma = 294\text{MPa}$)

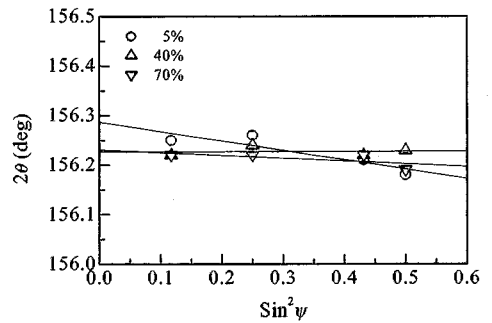
응력진폭이 343MPa일 때의 피로과정에 따른 $\sin^2\psi$ 선도를 Fig. 8에 나타냈으며, 그림중의 직선은 최소자승법으로 구한 회귀직선이다. TD의 경우, 기울기는 전체적으로 부(負)를 나타내며 피로사이클이 증가함에 따라 감소하다 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. RD의 경우, TD와는 반대로 전체적으로 기울기가 정(正)이며 피로사이클의 증가에 따라 감소하다 다시 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8을 기초로 하여 구한 잔류응력과 피로사이클과의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 결과도 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 최대값을 나타내었다. 그 후 다시 증가 및 감소하는 경향을 나타냈으며, 응력진폭이 343MPa인 경우 피로수명의 80%에서 파단이 되었기 때문에 그 이후의 경향은 알 수 없지만, 응력진폭이 294MPa와 같은 경향을 나타낼 것으로 생각한다. 또한 Fig. 7과 Fig. 9를 비교해 보면, 시험편에 부하되는 응력진폭이 클수록 잔류응력의 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

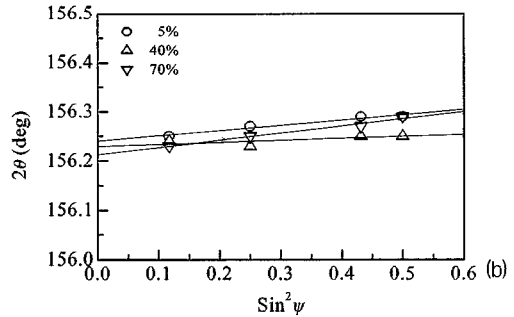
Fig. 7과 Fig. 9에서 피로하중을 가하기전, 즉 피로수명이 0%의 경우 TD와 RD에 대해 각각 약 20MPa 및 -40MPa의 잔류응력이 존재하는 것을 알 수 있다. 판재의 제조공정상 냉간 또는 열간압연을 행하게 되며, 이로 인해 결정립은 압연방향(RD)으로 배향하는 것과 동시에 늘어나게 된다. 압연의 수직방향(TD)에 대해서도 결정립이 상대적으로 수축하게 되며, 이 영향으로 판재의 표면에는 각각 인장 및 압축의 잔류응력이 존재하게 되는 것으로 판단된다. 또한 피로과정중 잔류응력은 증가 및 감소하여 각각 최대 및 최소값을 나타내는데, 이는 피로균열의 발생으로 인한 응력의 완화와 관계가 있는 것으로 생각하

지만 본 논문에서는 피로과정에 대한 잔류응력의 변화관찰을 주 목적으로 하였기 때문에 피로균열을 관찰하지는 않았다. 이 문제는 추후 피로과정에 대한 3축 잔류응력의 평가에서 다루기로 한다.

위 결과로부터 본 재료의 피로에 대한 잔류응력은 TD와 RD에 대해 피로균열의 전반에 걸쳐 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 반가폭의 경우는 피로의 초기과정을



(a) TD



(b) RD

Fig. 8 Change of 2θ with number of cycles ($\Delta\sigma = 343\text{MPa}$)

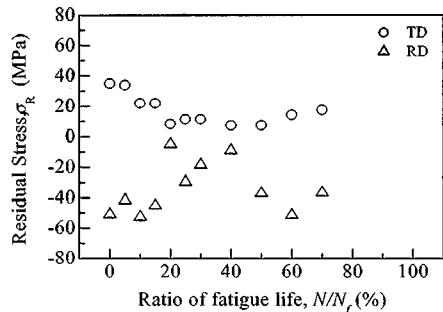


Fig. 9 Change of residual stress width with ratio of fatigue life ($\Delta\sigma = 343\text{MPa}$)

모니터링할 수 있는데 반하여, 잔류응력은 피로의 전과정에 대하여 모니터링할 수 있으며, TD와 RD에 대해 잔류응력을 평가하면 피로과정에서의 응력의 변화를 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 생각한다.

또한, 위의 결과를 기초로 하여 기계구조물의 피로과정에 대한 3축 잔류응력의 평가[7]가 가능할 것으로 판단되며, 이에 대한 결과는 추후 발표할 예정이다.

4. 결 론

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

- (1) 피로과정에 대한 반가폭의 변화는 피로수명비의 약 10%까지 증가하지만, 그 이상에 대해서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 이러한 반가폭의 변화는 피로과정에 대한 불균일변형과 관계가 있다.
- (2) 피로과정에 대한 잔류응력의 변화는 피로초기에는 TD와 LD에 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 반가폭으로 예측이 가능하지만 피로전반에 대한 과정을 모니터링하기 위해서는 잔류응력으로 평가하는 것이 보다 정확한 정보를 얻을 수 있다.

후 기

X선 잔류응력은 부산·울산지방중소기업청 시험검사팀의 협조에 의해 측정하였으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 하재선, 송지호, 이시중, "변동하중하의 피로수명예측 - 제1보 : 피로균열 발생까지의 수명", 대한기계학회 논문집(A), 제12권, 제4호, pp. 760-780, (1988)
- [2] 권재도, 박상국, 최선호, 황재석, 진영준, "신뢰성 공학적 피로 균열의 발생, 진전 수명 평가 및 예측에 관한 연구 (II)", 대한기계학회논문집(A), 제15권, 제3호, pp. 907-915, (1991)
- [3] 남기우, 김선진, "피로균열의 지연거동에 따른 수명 예측 및 비파괴평가", 한국해양공학회지, 제13권, 제3(1)호, pp. 36-48, (1999)
- [4] 日本材料學會編, "改著X線應力測定法", 養賢堂, 東京, (1981)
- [5] I. C. Noyan & J. B. Cohen, "Residual Stress - Measurement by Diffraction and Interpretation," Springer-Verlag New York Inc., (1987)
- [6] 박수영, 김득진, 부명환, 오세욱, "X-선 회절을 이용한 Al7075-T651 합금의 파손해석", 한국해양공학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 281-291, (1993)
- [7] 부명환, 박영철, 廣瀨幸雄, "X선 응력측정에 의한 복합재료의 3축응력해석", 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제7호, pp. 1173-1181, (1999)
- [8] 부명환, 박영철, 廣瀨幸雄, "WC-Co초경합금의 피로균열진전특성에 미치는 미시조직의 영향", 대한기계학회논문집(A), 제22권, 제8호, pp. 1409-1417, (1998)
- [9] 부명환, 박영철, 廣瀨幸雄, "WC-Co초경합금의 X-선 프랙토그래피법에 의한 파괴역학 파라미터의 평가", 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제10호, pp. 1709-1716, (1999)
- [10] Shuji Taira, Kazuo Honda, "X-Ray Investigation on the Prediction of Fatigue Life," Vol. 28, No. 188, pp. 452-459, (1961)
- [11] Shuji Taira, Kazuo Honda, Kenji Matuki, "X-Ray Investigation on the Prediction of Fatigue Life," Vol. 29, No. 197, pp. 6-11, (1962)
- [12] 김순호, 조석수, 주원식, "X선 반가폭을 이용한 Al 2024-T3 합금의 피로수명예측에 관한 연구", 한국정밀공학회는논문집, 제17권, 제1호, pp.145-152, (2000)
- [13] 조석수, 주원식, 장득열, "X-선 회절을 이용한 피로하중을 받는 일반구조용강의 잔류응력에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제7권, 제8호, pp.248-261, (1999)
- [14] Annual Book Of ASTM Standards, Sec. 3, Vol. 03.01, Metals-Mechanical Testing, pp. 631, ASTM, (1991)
- [15] 한봉희, "X선 회절", 반도출판사, pp. 100-108, 서울, (1990)