

X-선 회절을 이용한 피로균열진전거동과 응력확대계수 예측에 관한 연구

임만배* · 공유식* · 부명환** · 차귀준*** · 윤한기****

A study on prediction of stress intensity factor and fatigue crack growth behavior using the X-ray diffraction technique

Man-Bae Lim, Yu-Sik Kong, Myung-Hawn Boo, Gee-Jun Cha, Han-Ki Yoon

Key Words: X-ray Diffraction(x-선회절), Fatigue crack propagation rate(피로균열전파속도), Residual stress (잔류응력), Half-value breadth(반가폭), Stress intensity factor(응력확대계수), Fatigue fractured surface(피로파면)

Abstract

This study verified the relationship between fracture mechanics parameters(ΔK , ΔK_{eff} , K_{max}) and X-ray parameters (σ_r , B) for SG365 steel at elevated temperature up to 300°C. The fatigue crack propagation test were carried out and X-ray diffraction technique according to crack length direction was applied to fatigue fractured surface. The residual stress on the fracture surface was found to increase low ΔK region, reach to a maximum value at a certain value of K_{max} or ΔK and then decrease. Residual stress were independent on stress ratio by arrangement of ΔK and half value breadth were independent by the arrangement of K_{max} . The equation of $\sigma_r - \Delta K$ was established by the experimental data. Therefore, fracture mechanics parameters could be estimated by the measurement of X-ray parameters.

1. 서론

산업의 급속한 발달과 더불어 기계구조물과 가스배관 사용빈도가 급격히 증가하고 있으며 이에 따른 파손에 의한 사고도 증가하고 있다. 피로에 의한 파손은 기계적, 재료적, 환경적인 요인이 대부분이며 정확한 사고원인을 규명함으로써 사고를 미연에 예방하기 위한 파괴역학적인 해석이 필요하다. 파손된 구조물에는 파면이 존재하게 되며 손상된 파면에는 파괴원인과 파괴 메커니즘을 보여주는 특징적인 모양이 관찰되어진다. 이러한 파면은 재료에 부하된 하중조건 및 크기를 규명하여 파괴시 사용응력을 구하여 반복하중에 관련된 설계응력에 기여할 수 있다^(1~3). 기존의

파손사고 원인규명수단은 전자현미경을 이용하여 균열크기와 형상을 파면해석방법이 사용되고 있다. 전자현미경을 이용한 파면해석은 파면에 존재하는 요철을 관찰하여 파괴기구에 관한 정보를 얻기 때문에 고온상태가 되면 표면층이 산화 또는 부식에 의한 손상이 있는 경우 파면해석에 한계가 있으므로 X-선 회절법과 상호보완 할 수 있는 해석이 요구된다.

X-선 회절법에 의한 파면해석은 X-선 관찰에서 얻어지는 파라메타인 잔류응력, 반가폭등을 이용하여 파괴양식의 판별 및 파괴역학적인 조건과 균열전파 수명의 예측을 미시적으로 규명하기 때문에 파면근방의 격자변형상태에 관한 정보를 나타낸다. 또한 파면적하의 내부에 정량적인 측정이 가능하고 재료가 갖는 강도인자를 민감하게 측정할 수 있어 구조물의 안전성 확인 및 손상조사를 위한 유용한 해석방법으로 매우 가치를 가지고 있다. 이러한 파단면의 응력상태를 규명한 몇몇 연구자들은 실제부품 파손 파면의 파괴해

* 동의대학교 산업기술개발연구소

** 한국원자력연구소 중수로압력관재료

*** 동명대학 가스냉동과

**** 동의대학교 기계산업시스템공학부

석에 X-선 프랙토그래피를 적용하여 파괴원인 규명수단으로 유효함을 입증하고 있다.^(4~13) 그러나 연구 대부분이 실온에서 평가가 이루어졌으며, 고온피로실험에 의한 파면해석은 아주 미흡하다. 따라서 본 연구는 일정하중진폭 피로균열진전시험을 수행하여 고온분위기와 응력비 조건에 따른 파단면 생성시 X-선 회절시험을 통하여 파괴역학적인 파라메타와 X-선 파라메타인 잔류응력, 반가폭의 상관관계를 조사하여 X-선 파라메타로서 응력확대계수를 예측할 수 있는지를 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

실험에 사용된 재료는 두께 16mm의 가스배관용 저탄소강(SG365)이며 이의 화학적성분과 실험온도에 따른 기계적 특성은 Table1 과 Table2에 나타내었다. 피로균열진전 시험편은 강판에서 채취하여 두께 12.5mm로 가공한 ASTM E647⁽¹⁴⁾ 표준 시험편이며 채취방향은 L-T 방향으로 하였으며 CT 시험편의 형상과 치수를 Fig.1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of SG 365(wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.14	0.43	1.32	0.001	0.001

Table 2 Mechanical properties of material

Temp. (°C)	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (GPa)
25	386	560	36	196
300	367	577	37	205

2.2 인장시험

인장시험은 ASTM E8⁽¹⁵⁾규정에 따라 수행하였으며 시험에서 얻은 항복강도, 인장강도, 연신율, 영계수등을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

2.3 피로균열진전시험

피로균열진전시험에 사용된 시험기는 전기유압 서보식 만능피로시험기(MTS810)이며 일정진폭

하중제어방식으로 반복인장하중을 가하였다. 시험조건은 주파수 10Hz, 정현파, 응력비는 0.1 및 0.5로 실온과 300°C에서 실험하였으며 하중폭 Δp는 5673N으로 실험하였다. 균열길이 측정은 시험편에 고온변위계이지 (Extensometer)를 장착한 후 컴플라이언스법으로 산출하였다.

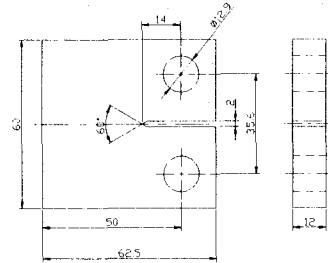


Fig. 1 Geometry and configuration of compact tension specimen

2.4 X-선 회절시험

X-선 파라메타인 잔류응력(σ_r) 과 반가폭(B) 측정은 평행빔을 가진 X-선 잔류응력장치(Rigaku MSF)를 이용하여 X-선 응력측정법 표준에 따라 sin2ψ 법으로 측정하였다.

Table 3은 X-선 파라미터를 측정하기 위한 회절조건을 나타내었으며 특성 X-선은 Cr-Kα 선을 이용하여 Fe 211회절에 대하여 측정하였다.

잔류응력 값은 sin2ψ 선도의 기울기 M에 X선 응력정수 K(-30.33kg/mm²/deg)를 곱하여 식(1)을 이용하여 구하고 각각의 잔류응력 값은 3회 측정하여 평균하여 나타내었다.

$$\sigma_R = E/2(1+\nu) \cdot \cot\theta \cdot \pi / 180 \cdot \Delta (2\theta) / \Delta (\sin^2\psi) = K \cdot M \quad (1)$$

σ_R : Residual stress , E : Young 's modulus

ν : Poisson 's ratio , K : Stress constant

θ : Standard Bragg 's angle , M : Slop

2.5 피로파면에서 X-선 파라미터 측정

Fig.2는 피로균열진전시험 후 X-선 파라미터를 측정하기 위한 피로 파단면의 모식도를 나타내었다. X-선 조사면적은 피로 파단면의 두께 중앙부에 φ 2mm의 원형으로 하였다. 파면상의 X-선 파라미터측정은 두께 방향의 파면 중앙부에 X-선을 조사하여 균열진전방향으로 파면상의 잔류응력 및 반가폭을 측정하였다.

Table 3 X-ray diffraction condition

Test condition	Parallel -beam method
Diffraction angle(°)	156.40
Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	(211)
Filter	V
Tube voltage(kV)	30
Tube current(mA)	8
Irradiated area(mm)	φ2
Irradiated time(sec)	10
Soller slit(°)	1

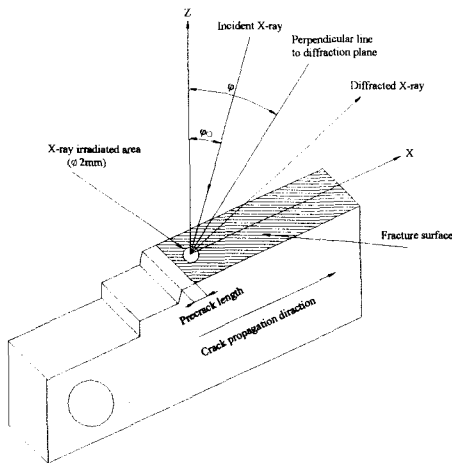


Fig.2 Schematic illustration of X-ray irradiated area on fatigue fracture surface

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열진전거동

Fig.3는 실험온도 상온에서 응력비(R)0.1과0.5를 채택하여 ΔP 일정 피로시험을 수행하여 피로균열진전속도 da/dN과 응력확대계수범위 ΔK를 파라미터로 정리한 결과이다. 일반적으로 ΔP 일정 피로시험은 ΔK로 잘 정리될 수 있지만 본 연구에서는 하중이력영향으로 균열폐구 현상이 현저하게 일어나기 때문에 반대의 경향이 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 ΔK의 증가와 함께 da/dN은 직선적으로 증가하고 있으며 응력비에 의존되고 있음을 알 수 있다. 또

한 응력비가 높은 0.5가 0.1보다 균열진전속도가 빠르게 진전됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 응력비가 높을수록 최대하중의 증가로 인하여 균열진전속도가 빠르게 진행됨을 알 수 있으며 부하과정에 발생하는 인장소성역내에 발생하는 압축잔류응력이 낮아지기 때문에 응력비가 높을수록 진전속도가 빠르게 나타났다. 응력비가 낮게되면 프래팅에 의한 균열단합이 야기되어 피로균열진전속도를 감소시키고 균열선단에 발생하는 소성역내의 잔류응력이 작용하여 압축하중이 피로균열진전의 구속력으로 작용하여 진전속도에 영향을 준 것으로 생각된다.

Fig.4는 실험온도 300℃에서 하중제어방식에 따른 동일 응력비에서 피로균열진전속도와 응력확대계수를 나타내었다. ΔK의 증가에 따라 da/dN은 상온과 비슷하게 응력비에 의존됨을 알 수 있으며 피로균열진전이 직선성을 가지고 있으며 응력비가 높은 경우가 피로균열진전속도가 빠르게 진행되었다. 이와 같이 ΔK로는 응력비에 의존하지 않는 하나의 밴드를 구성하지 못하였다. 이러한 원인은 고온 분위기의 피로파괴에서는 파면상의 Fe₂O₃와 Fe₃O₄ 때문에 산화피막이 형성되고 이 피막에 의한 균열폐구가 상온보다 현저하게 나타났다.

Fig.5는 균열폐구비를 측정하여 산출된 유효응력확대계수폭 ΔK_{eff}로 정리하여 하중이력에 대한 영향을 규명하기 위하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 응력비에 의존하지 않는 하나의 밴드로 정리 할 수 있었으며 온도의존성은 명확하지 않았다.

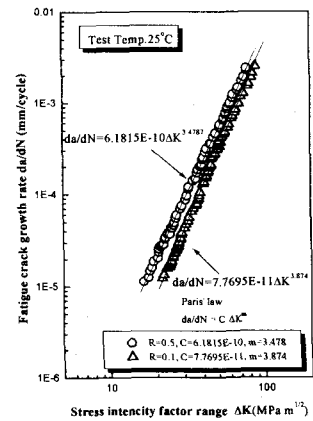


Fig.3 Relation between stress intensity factor range and fatigue crack growth rate at 25℃

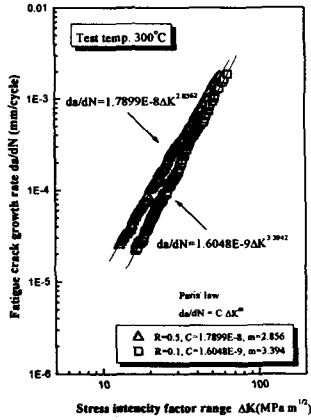


Fig.4 Relation between stress intensity factor range and fatigue crack growth rate at 300°C

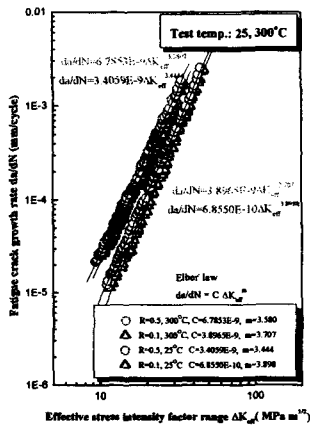


Fig.5 Relation between effective stress intensity factor range and fatigue crack growth rate at 25, 300°C

3.2 피로파면상의 잔류응력 분포

Δ P 일정 피로시험을 수행하여 얻은 피로균열 전진방향 파면에 X선 회절법에 의하여 측정된 잔류응력결과를 최대응력확대계수 K_{max} 로 정리하여 Fig.6에 나타내었다.

그림에서 보는바와 같이 파면상의 잔류응력은 모두인장이며 응력비가 큰 쪽이 잔류응력이 크게

됨을 알 수 있으며 Δ p 일정실험 잔류응력은 K_{max} 가 낮은 영역에서는 K_{max} 와 함께 증가하고 있다. 측정된 파면상의 잔류응력은 최대응력확대계수 K_{max} 로 정리하였을 때 응력비의 의존성이 나타났다.

본 연구에서 응력비에 따른 잔류응력 분포는 응력비 0.1과 0.5에서 초기에는 증가한 후 감소되는 경향을 보이고 있었으며 응력비 0.5 경우 0.1에 비하여 전체적으로 잔류응력이 완만하게 감소하였다. 이러한 원인은 응력비가 높으면 동일 K_{max} 에서 Δ K의 값이 작기 때문에 잔류응력이 완만히 감소되는 경향을 갖는 것으로 사료된다.

동일한 응력비에서 실온과 고온 분위기의 피로 파면상 잔류응력을 비교하면 고온에서 실온과 동일한 인장잔류응력이 발생하고 있으며 정량적인 잔류응력 분포는 실온에 비하여 낮게됨을 알 수 있다. 고온 및 실온하의 잔류응력은 낮은 K_{max} 영역에서는 응력비에 의존하지 않지만 K_{max} 와 함께 증가됨을 알 수 있으며 K_{max} 가 약 35MPa/m 부근에서는 최대값을 가진 후 단조감소하고 있다. 그리고 높은 K_{max} 영역에서는 현저한 응력비의존을 가지고 있다. 이와 같이 잔류응력과 최대응력확대계수 관계를 고찰하여 보면 고온 분위기의 잔류응력분포가 낮게되는 이유는 온도의 증가와 함께 항복강도가 저하됨으로서 실제 파면상에 내부응력의 감소로 이어져 잔류응력 저하에 직접적인 원인으로 사료된다.

Fig.7은 파면상의 잔류응력을 응력확대계수범위 Δ K로 정리한 결과를 나타내고 있다. 두 온도에서 응력비의 영향을 알 수 있었으며 파면상의 잔류응력은 응력비 감소와 Δ K의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 파면상의 잔류응력이 감소하는 원인은 Δ K의 증가와 함께 표면거칠기의 증대와 Δ K의 증가에 대응해서 생기는 파면근방에 역방향 소성변형증대에 의한 것이라고 생각된다. 또한 고온에서 장시간 유지되면서 변형효과에 의한 잔류응력이 해방되기 때문으로 사료된다. 두 온도 모두 저 Δ K 영역에서는 역항복치수와 표면거칠기가 작기 때문에 파면상의 잔류응력값에 크게 영향을 미치지 않는다고 생각되며 Δ K가 증가함에 따라 응력반전에 의한 역항복력으로 인한 압축잔류응력이 생겨 인장잔류응력과 압축잔류응력이 중첩되어 인장응력이 상쇄되기 때문이다.

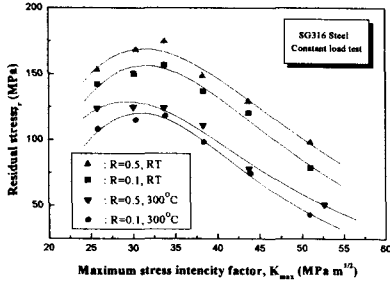


Fig.6 Relation between the residual stress on fracture surface and maximum stress intensity factor

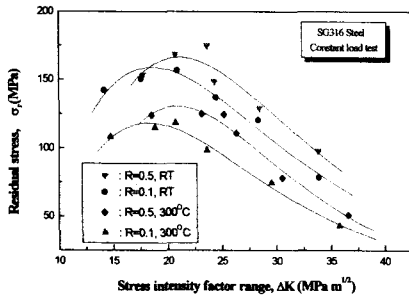


Fig.7 Relation between the residual stress on fracture surface and stress intensity factor range

3.3 피로파면상의 반가폭 분포

Fig.8은 상온과 300°C 실험분위기에서 일정하중 제어 피로시험에 의한 파면에 대하여 측정된 반가폭 B와 ΔK 관계를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 응력확대계수폭 ΔK 가 증가함에 따라 반가폭은 약간의 산포를 가지지만 증가하는 경향이 보이고 있다. 두 온도 영역에서 응력비 의존성이 없었으며 응력비가 높은 쪽이 반가폭이 크게 되고 있다. 이러한 경향은 小倉⁽⁸⁾ 등 SNCM439재와 유사한 경향을 보여주고 있다.

Fig.9는 반가폭을 K_{max} 로 정리하여 나타낸 것이며 양 온도영역에서 응력비 의존성이 약간 보여지고 있으며 두 온도 조건에서 온도의존성은 명확하게 형성하고 있음을 알 수 있다. 이것은 파면상의 반가폭이 반복부하하중보다 단순부하하중에 크게 의존된다고 생각된다. 즉 반가폭은 재료에 따라 특징적 형태를 가진다고 생각되며 재

료의 가공경화 및 가공연화와 밀접한 관계를 가진다고 생각된다. 吉岡⁽⁹⁾등에 의하면 가공경화를 동반한 재료에서는 통상 응력확대계수의 증가와 함께 반가폭이 증가한다는 경향과 유사한 결과를 가진다. 이러한 파면상에서 반가폭의 거동을 관찰함으로써 피로과정에서 재료의 거동을 알 수 있었다.

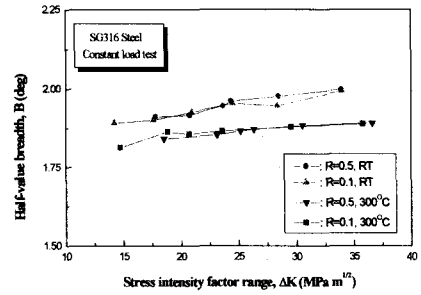


Fig.8 Relation between the half-value breadth on fracture surface and stress intensity factor range

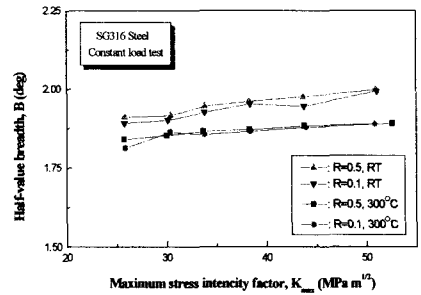


Fig.9 Relation between the half-value breadth on fracture surface and maximum stress intensity factor

3.4 X-선 파라미터에 의한 ΔK 및 K_{max} 추정

피로파면은 균열진전속도와 응력확대계수폭 및 최대응력확대계수와 관계는 상호 밀접하며 파면 형성시 부재의 파손해석에 대단히 중요한 파라미터이다.

Fig.10은 응력확대계수폭과 잔류응력을 최소화 승법으로 나타내어 정리한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 온도에 따라 잔류응력의 분포

를 간단한 수식화로 표현되어짐을 알 수 있다. 파면상의 잔류응력은 응력비에 의존하지 않고 실험조건에 따른 고유한 물성치를 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 각 부재에 작용된 잔류응력을 알게 되면 부하된 응력확대계수범위를 추정함으로써 최적설계의 기준인 부하응력을 산출할 수 있다.

Fig.11은 최대응력확대계수와 반가폭을 정리하여 나타냈으며 잔류응력으로 정리한 것과 보다 상대적으로 응력비에 의존하지 않았다. 이와같이 X-선 회절에 의한 파라미터로 응력확대계수폭과 최대응력확대계수를 추정함으로써 구조물 해석에 중요한 역학적인 인자로 사료된다. 따라서 피로 파면상의 임의의 위치에서 X-선을 조사하여 X-선 파라미터인 잔류응력과 반가폭을 알게되면 ΔK 및 K_{max} 의 추정이 가능하고 재료를 비파괴적인 방법을 통하여 설계수명을 예측할 수 있다.

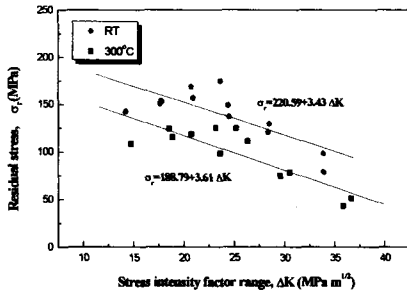


Fig.10 Linear curve fitting of residual stress on fracture surface and stress intensity factor range

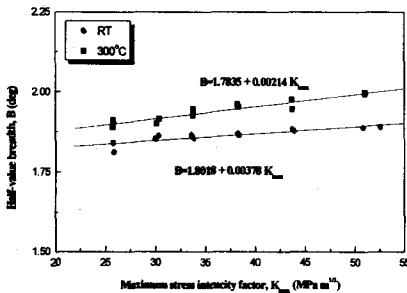


Fig.11 Linear curve fitting of half-value breadth on fracture surface and stress intensity factor range

4. 결론

본 연구에서는 가스배관재에 고온피로균열진전시험을 실시하고 시험 후 파단면에 X-선을 조사하여 피로균열진전방향에 따른 X-선 잔류응력과 반가폭을 측정하여 파괴역학적 파라미터 예측을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 하중부하과정시 인장소성역내에 발생하는 압축잔류응력이 낮아지기 때문에 응력비가 높을수록 진전속도가 빠르게 나타났다.

(2) 고온피로실험은 Fe_2O_3 와 Fe_3O_4 때문에 산화 피막이 형성되고 이 피막에 의한 균열폐구가 상온보다 현저하게 나타났다.

(3) 파면상의 잔류응력은 모두인장이며 응력비가 높으면 잔류응력 및 반가폭이 크게 나타났으며 측정된 파면상의 반가폭은 최대응력확대계수 K_{max} 로 정리하였을 때 응력비에 의존하지 않았다.

(4) 피로파면상의 임의의 위치에서 X-선을 조사하여 X-선 파라미터인 잔류응력과 반가폭을 알게되면 ΔK 및 K_{max} 의 추정이 가능하다.

참고문헌

- (1) 김정규, 황돈영, 박영조, 1986, “미시조직에 민감한 피로균열진전거동” 대한기계학회논문집, 제10권, 제3호, pp.316~325.
- (2) 이강용, 강종목, 1984, “링 압인으로 인한 잔류압축응력이 피로균열 성장률에 미치는 영향” 대한기계학회논문집, 제8권, 제4호, pp.313~320
- (3) 권재도, 박상국, 최선호, 황재석, 진영준, 1991, “신뢰성 공학적 피로균열의 발생진전수명 평가 및 예측에 관한 연구(II)”, 대한기계학회논문집(A), 제 15권, 제3호, pp.907~915.
- (4) 부명환, 박영철, 廣瀬幸雄, 1999, “X선 응력측정에 의한 복합재료의 3축응력해석”, 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제7호, pp.1173~1181.
- (5) 부명환, 박영철, 廣瀬幸雄, 1998, “WC-Co 초경합금의 피로균열진전특성에 미치는 미시조

- 직의 영향” , 대한기계학회논문집(A), 제22권, 제8호, PP.1409~1417.
- (6) 부명환, 박영철, 廣瀬幸雄, 1999, “ WC-Co초경 합금의 X-선 프랙토그래피법에 의한 파괴역학 파라미터의 평가” , 대한기계학회논문집(A), 제23권, 제10호, PP.1709~1716.
- (7) Kazuyuki Matsui, Yukio Hirose, Akiyoshi Chadani, Keisuke Tanaka, 1990, “ Application of X-ray Fractographic Technique to Actual Failure Analysis” , JSFM, Vol. 24, No.4, PP. 117~128.
- (8) 小倉敬二, 三好良夫, 川口眞廣, “ 高温疲労破面のフラクトグラフィ” , 材料, 제35卷, 제394號, pp.719~724.
- (9) 吉岡晴夫, Bertrand Guimard, 1986, “ 스텐레스강의疲労破면의X線による解析” ,非破壊検査, 第35卷, 第8號, pp. 524~531.
- (10) Zenjiro Yajima, Yukio Hirose and Keisuke Tanaka, 1983 “ X-ray diffraction observation of fracture surface of ductile cast iron” , Adv. X-ray Anal. 26, pp.291~298.
- (11) Yuji Sekita, Shotaro Kodama, Hiroshi Misawa, 1983, “ X-ray Fractography on Fatigue Fracture Surface ” , JSMS, Vol. 32, No. 354, PP. 258~263.
- (12) Katsu Nagai, Masaki Kitagawa, Akira Ohtomo, 1984, “ Residual Stress and Half-Value Breadth of Fatigue Fractured Surface of Various Structural Steels Measured by X-ray Diffraction” , JSMS, Vol. 33, No. 365, PP. 204~208.
- (13) Keiji Ogura, Yoshio Miyoshi, Masahiro Kayama, Yoichi Shoji, 1984, “ X-Ray Study on Fracture Surface of SM 50A and HT80 Steels” , JSMS, Vol. 33, No. 367, PP. 398~404.
- (14) ASTM Standard E647-97, 1997, “ Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates” , pp. 1~6.
- (15) ASTM E8, 1997, “ Standard test method of Tension Testing of Metallic Materials” , pp.56~76.