

가스배관재의 X-선 회절분석과 피로균열거동에 관한 연구

임만배*·윤한기**·박원조***

*한국원자력연구소 · **동의대학교 기계산업시스템공학부 · ***경상대학교 수송기계공학부

A Study on the X-ray Diffraction Analysis and the Fatigue Crack Growth Behavior for the Gas Piping Material

MAN-BAE LIM*, HAN-KI YOON** AND WON-JO PARK***

*Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

**School of Mechanical Engineering, Dongeui University, Busan, Korea

***School of Mechanical Engineering, Gyeongsang University, Tongyeong, Korea

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 investigates a relationship between fracture mechanics parameters (Stress Intensity Factor Range: ΔK , Maximum Stress Intensity Factor: K_{max}) and X-ray parameters (residual stress: σ_r , half-value breadth: 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 the direction of crack length was applied to fatigue fractured surface. The residual stress on the fracture surface was found to increase at low ΔK region, to reach a maximum value at a certain value of K_{max} or ΔK and then to decrease. Residual stress was independent of stress ratio by arrangement of ΔK and half value breadth were independent of 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. 서 론

에너지 다변화에 따라 천연가스를 이용한 빈도가 증가하고 있으며, 최근 광양의 LNG 복합발전소 및 광양의 LNG 인수기지가 건설되었다. 특히 해양구조물 및 가스에너지의 운송수단인 LNG선에서 가스배관손상은 가스누출이나 폭발이 일어날 경우 막대한 경제적손실과 사회적인 문제로 야기되며 치명적인 인적손실을 초래할 수 있다. 가스의 사용빈도가 증가하면 이에 따른 가스배관의 안전성 및 건전성확보는 매우 중요한 사항이다. 특히 외부하중이 반복적으로 배관에 작용하여 피로에 의한 파손이 발생하는 경우 기계적, 재료적, 환경적인 요인이 대부분으로 (이강용 등, 1984; 김정규 등, 1986, 2000; 김영식 등, 1998; 권제도 등, 1991) 이러한 배관의 안전성을 확보하기 위하여 사고원인을 규명함으로써 사고를 미연에 예방할 수 있다. 파손된 구조물에는 파면이 존재하게 되며 손상된 파손사고 원인규명 수단으로 파면상에 존재한 모든 정보로부터 배관의 건전성 확보와 결함평가에 대한 정량적인 해석이 이루어짐으로써 올바른 평가로부터 불필요한 보수를 억제하고 경제적인 부담을 줄일 수 있다. 환경적인 요인에 의해 파손이 일어날

경우 파단면 표면층이 산화 또는 부식에 의한 손상이 있어 파면해석을 통한 원인규명이 한계가 있으므로 X-선 회절법과 상호보완 할 수 있는 해석이 요구된다.

X-선 회절법에 의한 파면해석은 X-선 관찰에서 얻어지는 파라미터인 잔류응력, 반가폭등을 이용하여 파괴양식의 판별 및 파괴역학적인 조건과 균열전파 수명의 예측을 미시적으로 규명하기 때문에 파면근방의 격자변형상태에 관한 정보를 나타낸다. 또한 파면직하의 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 파괴해석에 X-선 프랙토그래피를 적용하여 파괴원인 규명수단으로 유효함을 입증하고 있다(Zenjiro Yajima et al, 1983; Yuji Sekitaet al, 1983; Kazuyuki Matsui et al, 1990; 부명환 등, 1999). 그러나 이들 연구 대부분이 실온에서 평가가 이루어졌으며, 고온포로실험에 의한 파면해석은 아주 미흡하다. 따라서 본 연구는 일정하중 진폭 피로균열진전시험을 수행하여 고온분위기와 응력비 조건에 따른 파단면 생성시 X-선 회절시험을 통하여 파괴역학적인 파라메타와 X-선 파라미터인 잔류응력, 반가폭의 상관관계를 조사하여 X-선 파라미터로서 응력확대계수를 예측할 수 있는 지를 검토하였다.

제1저자 임만배 연락처: 대전시 유성구 덕진동 150
042-868-2367 mblimm@hanmail.net

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시험편

실험에 사용된 재료는 두께 16mm의 가스배관용 저탄소강(SG365)이며 이의 화학적성분과 실험온도에 따른 기계적 특성은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 피로균열진전 시험편은 가스배관용 강판에서 채취하여 두께 12mm로 가공한 후 ASTM E647(1997) 표준 시험편 규정에 따라 제작하였다. 채취 방향은 L-T 방향으로 하였으며 가공된 CT 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of SG365(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 피로균열진전시험

피로균열진전시험에 사용된 시험기는 전기유압서보식 만능 피로시험기(MTS810)이며 일정진폭 하중제어방식으로 반복인장하중을 가하였다. 균열길이 측정은 시험편에 고온변위계이지(extensometer)를 장착한 후 컴플라이언스법으로 산출하였다.

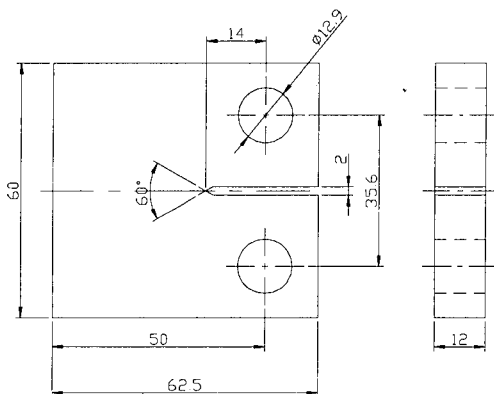


Fig. 1 Geometry and configuration of compact tension specimen

2.3 X-선 회절시험

X-선 파라미터인 잔류응력(σ_r) 과 반가폭(B) 측정은 평행빔을 가진 X-선 잔류응력장치(Rigagu MSF)를 이용하여 X-선 응력측정법 표준에 따라 $\sin^2\psi$ 법으로 측정하였다. Table 3은 X-선 파라미터를 측정하기 위한 회절조건을 나타내었으며 특성 X-선은 Cr-K α 선을 이용하여 Fe 211회절에 대하여 측정하였다.

잔류응력 값은 $\sin^2\psi$ 선도의 기울기 M에 X선 응력정수 K(-30.33kg/mm²/deg)를 곱하여 식(1)을 이용하여 구하고 각각의 잔류응력은 1점에 대하여 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 : Slope

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)	ϕ 2
Irradiated time(sec)	10
Soller slit(°)	1

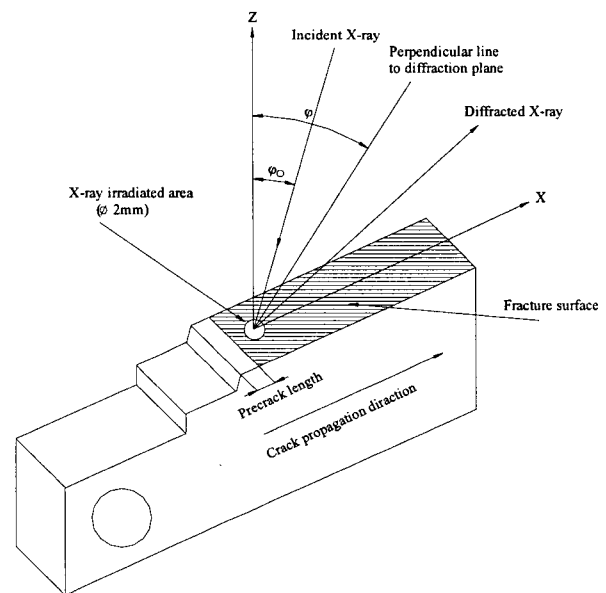


Fig. 2 Schematic illustration of X-ray irradiated area on fatigue fracture surface

2.4 피로파면에서 X-선 파라미터 측정

Fig. 2는 피로균열진전시험 후 X-선 파라미터를 측정하기 위한 피로파면 단면 모식도를 나타내었다. X-선 조사면적은 피로 파면의 두께 중앙부에 ϕ 2mm의 원형으로 하였다. 파면상의 X-선 파라미터 측정은 두께 방향의 파면 중앙부에 X-선을 조사

하여 균열진전방향으로 파면상의 잔류응력 및 반가폭을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열진전거동

Fig. 3은 실험온도 상온에서 응력비(R) 0.1과 0.5를 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.

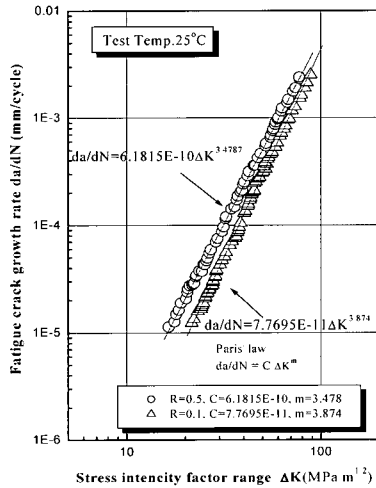


Fig. 3 Relation between stress intensity factor range and fatigue crack growth rate at 25°C

또한 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 낮게 되면 프레팅에 의한 균열단층이 야기되어 피로균열진전속도를 감소시키고 균열선단에 발생하는 소성역내의 잔류응력이 작용하여 압축하중이 피로균열진전의 구속력으로 작용하여 진전속도에 영향을 준 것으로 생각된다.

Fig. 4는 실험온도 300°C에서 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 피로균열진전속도를 평가할 수 없었다.

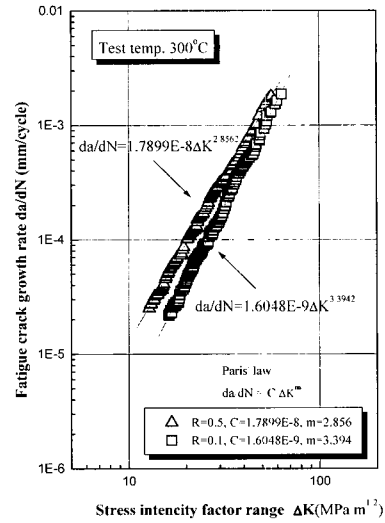


Fig. 4 Relation between stress intensity factor range and fatigue crack growth rate at 300°C

3.2 피로파면상의 잔류응력 분포

ΔP 일정 피로시험을 수행하여 얻은 피로균열진전방향 파면에 X선 회절법에 의하여 측정된 잔류응력 결과를 최대응력확대계수 K_{max}로 정리하여 Fig. 5에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 파면상의 잔류응력은 모두 인장이며 응력비가 큰 쪽이 잔류응력이 크게 됨을 알 수 있으며 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 ΔK의 값이 작기 때문에 잔류응력이 완만히 감소되는 경향을 갖는 것으로 사료된다.

동일한 응력비에서 실온과 고온 분위기의 피로파면상 잔류응력을 비교하면 고온에서 실온과 동일한 인장잔류응력이 발생하고 있으며 정량적인 잔류응력 분포는 실온에 비하여 낮게 됨을 알 수 있다. 고온 및 실온하의 잔류응력은 낮은 K_{max} 영역에서는 응력비에 의존하지 않지만 K_{max}와 함께 증가됨을 알

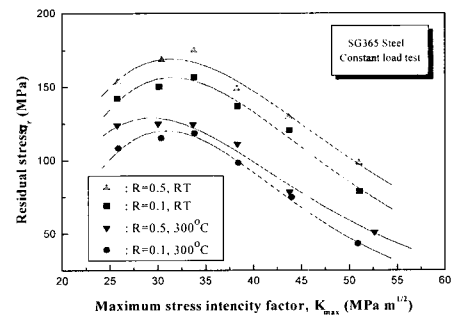


Fig. 5 Relation between the residual stress on fracture surface and maximum stress intensity factor

수 있으며 K_{max} 가 약 $35\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 부근에서는 최대값을 가진 후 단조감소하고 있다. 그리고 높은 K_{max} 영역에서는 현저한 응력비 의존을 가지고 있다. 이와 같이 잔류응력과 최대응력확대계수 관계를 고찰하여 보면 고온 분위기의 잔류응력분포가 낮게 되는 이유는 온도의 증가와 함께 항복강도가 저하됨으로써 실제 파면상에 내부응력의 감소로 이어져 잔류응력 저하에 직접적인 원인으로 사료된다(Nagai et al., 1984).

Fig. 6은 파면상의 잔류응력을 응력확대계수범위 ΔK 로 정리한 결과를 나타내고 있다. 두 온도에서 응력비의 영향을 알 수 있었으며 파면상의 잔류응력은 응력비 감소와 ΔK 의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 파면상의 잔류응력이 감소하는 원인은 ΔK 의 증가와 함께 표면거칠기의 증대와 ΔK 의 증가에 대응해서 생기는 파면균방에 역방향 소성변형증대에 의한 것이라고 생각된다. 또한 고온에서 장시간 유지되면서 변형효과에 의한 잔류응력이 해방되기 때문으로 사료된다. 두 온도 모두 저 ΔK 영역에서는 역 항복치수와 표면거칠기가 작기 때문에 파면상의 잔류응력값에 크게 영향을 미치지 않는다고 생각되며 ΔK 가 증가함에 따라 응력반전에 의한 역항복력으로 인한 압축잔류응력이 생겨 인장잔류응력과 압축잔류응력이 중첩되어 인장응력이 상쇄되기 때문이다(Nagai et al., 1984; Ogura et al., 1984).

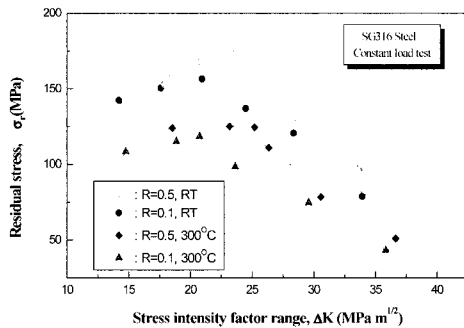


Fig. 6 Relation between the residual stress on fracture surface and stress intensity factor range

3.3 X-선 파라미터에 의한 ΔK 및 K_{max} 추정

Fig. 7은 상온과 300°C 실험분위기에서 일정하중제어 피로시험에 의한 파면에 대하여 측정된 반가폭 B와 ΔK 관계를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 응력확대계수폭 ΔK 가 증가함에 따라 잔류응력은 약간의 산포를 가지지만 감소하는 경향이 보이고 있다. 두 온도 영역에서 온도 의존성이 없었으며 온도가 높은 쪽이 잔류응력이 낮게 나타나고 있다. 이것은 고온의 경우 불안전파괴기준인 파괴인성이 저하되기 때문이다. (임만배와 윤한기, 2001)

Fig. 8은 반가폭을 K_{max} 로 정리하여 나타낸 것이며 양 온도 영역에서 응력비 의존성이 약간 보여지고 있으며 두 온도 조건에서 온도의존성은 명확하게 형성하고 있음을 알 수 있다.

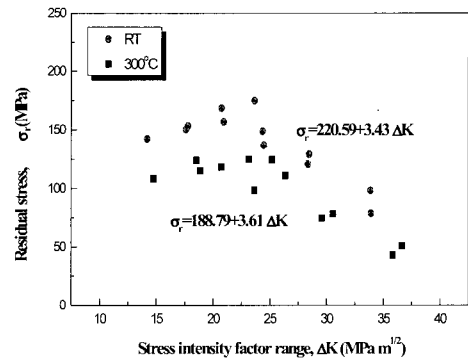


Fig. 7 Linear curve fitting of residual stress on fracture surface and stress intensity factor range

이것은 파면상의 반가폭이 반복부하하중보다 단순부하하중에 크게 의존된다고 생각된다. 즉 반가폭은 재료에 따라 특징적 형태를 가진다고 생각되며 재료의 가공경화 및 가공연화와 밀접한 관계를 가진다고 생각된다. 가공경화를 동반한 재료에서는 통상 응력확대계수의 증가와 함께 반가폭이 증가한다는 경향과 유사한 결과를 가진다. 응력확대계수폭과 잔류응력을 최소자승법으로 정리한 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 각 온도에 따라 잔류응력의 분포를 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. 그리고 최대응력확대계수와 반가폭을 정리하여 Fig. 8에 나타냈으며 잔류응력으로 정리한 것 보다 상대적으로 응력비에 의존하지 않았다. 이와 같이 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.

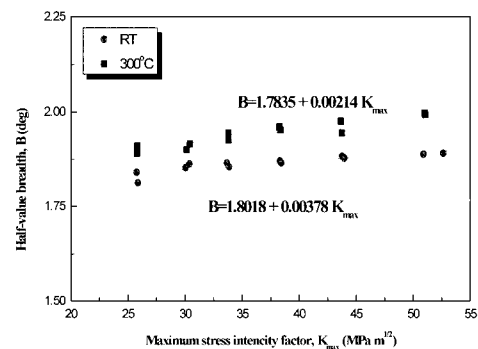


Fig. 8 Linear curve fitting of half-value breadth on fracture surface and stress intensity factor range

4. 결 론

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) 고온의 경우 저 ΔK 영역에서 피로균열진전속도는 상온에 비하여 높지만, 고 ΔK 영역으로 진전됨에 따라 피로균열진전속도 차이가 줄어들었다.

(3) 파면상의 잔류응력은 모두 인장이며 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 알게 되면 ΔK 및 K_{max} 추정가능하다.

참 고 문 헌

김정규, 김철수, 김도식, 윤인수 (2000). "저온하에서 LNG저장 탱크용 멤브레인재 (STS304강)의 피로균열진전거동", 한국해양공학회지, Vol 14, No 1, pp 23-28.

김정규, 황돈영, 박영조 (1986). "미시조직에 민감한 피로균열진전거동", 대한기계학회논문집, Vol 10, No 3, pp 316-325.

김영식, 조상명, 김종호 (1998). "LNG 탱크용 알루미늄합금 A5083-0의 관통균열 전파거동 예측모델", 한국해양공학회지, Vol 12, No 1, pp 50-57.

권재도, 박상국, 최선호, 황재석, 진영준 (1991). "신뢰성 공학적

피로균열의 발생진전수명 평가 및 예측에 관한 연구(II)", 대한기계학회논문집(A), Vol 15, No 3, pp 907-915.

부명환, 박영철 (1999). "WC-Co초경합금의 X-선 프랙토그래피법에 의한 파괴역학 파라미터의 평가", 대한기계학회논문집(A), Vol 23, No 10, pp 1709-1716.

이강용, 강종묵 (1984). "링 압인으로 인한 잔류압축응력이 피로균열 성장률에 미치는 영향", 대한기계학회논문집, Vol 8, No 4, pp 313-320.

임만배, 윤한기 (2001). "SG365강의 파괴저항특성과 찢어짐계수에 관한 연구" 한국해양공학회지, Vol 15, No 3, pp 75-80.

ASTM Standard E647-97 (1997). "Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates", pp 1-6.

ASTM E8 (1997). "Standard test method of Tension Testing of Metallic Materials", pp 56-76.

Matsui, K., Hirose, Y., Chadani, A. and Tanaka, K. (1990). "Application of X-ray fractographic technique to actual failure analysis", JSFM, Vol 24, No 4, pp 117-128.

Nagai, K., Kitagawa, M. and Ohtomo, A. (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.

Ogura, K., Miyoshi, Y., Kayama, M. and Shoji, Y. (1984). "X-Ray study on fracture surface of SM50A and HT80 steels", JSMS, Vol 33, No 367, pp 398-404.

Sekita, Y., Kodama, S. and Misawa, H. (1983). "X-ray fractography on fatigue fracture surface", JSMS, Vol 32, No 354, pp 258-263.

Yajima, Z., Hirose, Y. and Tanaka, K. (1983). "X-ray diffraction observation of fracture surface of ductile cast iron", Adv. X-ray Anal 26, pp 291-298.

2002년 1월 31일 원고 접수

2002년 5월 10일 최종 수정본 채택