

## (2) 복합사이클 자동정지

모든 제어요소를 자동모드에 설정하고, “복합사이클 정지(Steam Cycle Stop)” CRT 버튼을 클릭하면 플랜트 전체가 최적으로 프로그램된 조건과 시간경과에 따라 Auto Sequence 로직에 의해 정지된다.

복합 사이클 발전소에서 전자동화 로직에 의한 자동 순서의 예는 다음과 같지만, 복합 플랜트 구성방식에 따라 약간의 차이가 있을 수 있다.

### ① 개스터빈 출력 감발

Auto Sequence는 Mark IV에 지령을 내려 배기 온도가 548°C 미만이 되도록 개스터빈 출력을 감발시킨다. 이것은 다음 단계에서 증기터빈 출력이 감발될 때 증기온도를 정격으로 유지하기 위한 것으로써, 이 온도가 너무 낮게되면 터빈급속온도가 저하되어 다음 기동시 급속온도 Mismatch로 인해 기동이 지연될 수 있다.

배기온도가 548°C 미만이 되면 다음 단계로 넘어간다.

### ② 증기터빈 자동정지 및 댐퍼 폐쇄

Auto Sequence는 DCM+에 지령을 내려 증기터빈

을 자동정지 시키며, DCS 내부 로직으로 연소개스 전환댐퍼를 완전히 닫는다.

DCM+는 자동정지 모드가 되면 부하 설정치를 급격히 감소하여 출력을 감발하고 발전기를 계통병해한다.

연소개스 전환댐퍼 Closed 신호가 들어오면 다음 단계로 진행된다.

### ③ 증기밸브 차단

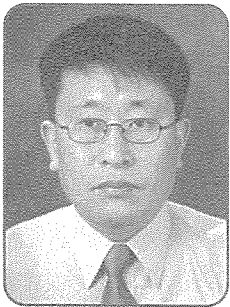
DCS 로직에 의해 HRSG의 고압, 중압, 저압증기 차단 전동밸브와 고압, 중압, 저압 드럼 연속 블로우다운 밸브를 완전히 닫는다.

앞 단계에서 이루어진 증기터빈 자동정지에 의하여 증기터빈 주증기 차단밸브(MSV) Closed 신호가 들어오면 다음 단계로 진행된다.

### ④ 개스터빈 자동정지

Auto Sequence는 Mark IV에 지령을 내려 개스터빈을 자동정지 시킨다. 자동정지 모드가 되면 Mark IV는 출력을 감발하고 무부하에서 발전기를 계통 병해한다.

# 발전소 터빈 케이싱 체결용 고온볼트재의 탄·소성 파괴인성



한전기공(주)  
G/H 정비센터 기술팀  
공학박사 김문영  
Tel : (032)580-8255

## 1. 서론

가스터빈, 화력 및 원자력에서 사용되는 터빈부품은 일반적으로 안전성을 고려하여 대부분 연성이 강

한 고인성 재료를 사용하고 있다. 특히 고온·고압상태에서의 두 요소의 체결력 유지를 위하여 사용되는 볼트는 더욱 그렇다. 따라서, 이러한 체결볼트는 소성화 경향이 강하게 나타나고, 고온에서는 항복강도가 상온에서 보다 저하되며, 장시간 사용에 의한 열화 및 손상을 받게 된다.

특히, 최근 발전설비의 수명연장이 대두되면서 각종 부품에 대한 손상평가 및 수명예측 진단기법의 개발에 대한 관심이 고조되어 있으며, 설비의 안전사용 및 경제적 운영의 필요에 따라 장기간 사용된 체결볼트의 손상 평가나 잔여 수명평가가 중요한 문제로 대두되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 체결 볼트가 받는 손상은 주로 크립과 피로손상으로 대별할 수 있고, 이들 손상의 해석

은 고온부품은 탄·소성거동의 정확한 적용이 중요하다. 이러한 손상은 기계적 성질의 저하와 함께 균열 선단에서의 소성역이 커지므로 균열에 의한 손상을 탄·소성 파괴역학적으로 표시할 수 있는 인자의 적용이 필요하다. 스테드 볼트와 같은 고온·고압 부재의 탄소성 파괴역학 인자로서는 선형탄성 파괴역학에서 사용되는 응력세기계수 K의 적용은 이미 그 의미를 상실하고, 이러한 경우에는 탄·소성 파괴역학의 개념에서 J적분의 적용에 의한 평가가 요망된다.<sup>(3~5)</sup> 발전설비용 고온부재에 대한 고 신뢰성의 손상평가, 수명예측 및 잔여수명을 평가하기 위해서는 무엇보다 탄·소성 파괴역학에 근거한 J적분의 정밀도 높은 수치해석과 이들 해석결과의 실험 검증을 통하여 가스터빈 고온부재는 정밀도를 검증하였으나,<sup>(6)</sup> 현재까지는 원자력 부품에 대해서는 거의 탄·소성 파괴인성치를 고려하여 평가하고 있지 않은 상태이다.

따라서, 본 논문에서는 고인성 재료로서 원자력 발전설비용 터빈 케이싱 스테드 볼트(stud bolt) 재료를 채취하여 CT(compact tension) 시험편<sup>(7)</sup>을 제작하여 정적인 상태의 인장시험을 수행한 후 탄·소성 J적분에 의한 파괴인성치를 J-R 곡선에 의하여 구하였고, 파괴인성 평가의 특성을 검토하였다.

## 2. 탄·소성 J 적분

### 2.1 J 적분의 식

탄·소성 변형재료에 대한 파괴역학인자는 Rice가 제안한 J적분이 널리 이용된다.<sup>(8)</sup> 비선형 또는 소성변형 이론에 의해 특성 지워지는 재료의 2차원 문제에 대한 경로적분 J는 다음 식과 같이 정의된다.

$$J = \int_{\Gamma} (Wdy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (1)$$

여기서 W는 변형률 에너지 밀도(strain energy density)로서 다음 식과 같이 된다.

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (2)$$

Fig. 1에서와 같이 T는 적분경로  $\Gamma$ 에 대한 표면력 벡터 ( $T = \sigma_{ij} n_j$ ), u는 변위 벡터,  $\Gamma$ 는 균열의 아랫면으로부터 윗면에 이르는 임의의 적분경로, n은 외향 법선 단위벡터이고, ds는  $\Gamma$ 의 미소길이 이다.

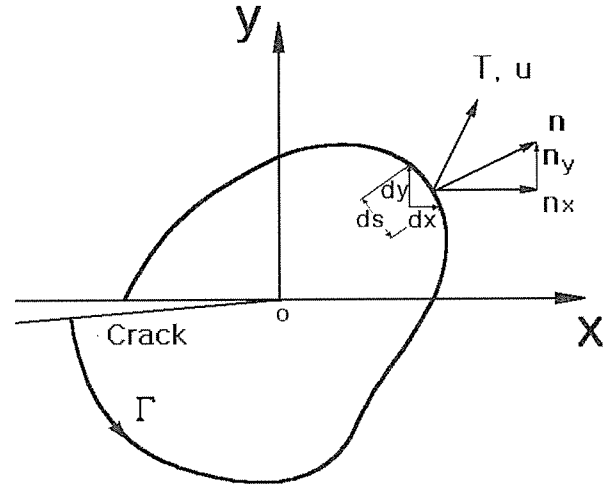


Fig. 1 Crack-tip coordinate system and typical line integral contour

또한 균열면이 x축에 평행이고, 균열면에서 표면력  $T=0$ 인 경우에 이 적분은 균열면의 J도 포함한 폐곡선  $\Gamma$ 의 선택방법에 관계없이 일정한 값으로 되는 경로독립(path-independent)으로 된다.

### 2.2 탄·소성 파괴역학 인자

단위 균열진전에 대한 에너지의 변화를 특성지우는 선형탄성 파괴역학인자로 제안된 J적분은 탄·소성 파괴거동의 해석에 매우 유용한 인자이다. Fig. 2와 같이 균열길이가 a이고, 두께가 B인 시험편에 하중을 가하면 하중-하중선 변위선도가 그려진 후 균열이 da만큼 진전하면 하중은 감소한다. 이때 그림에서 빗금친 부분의 면적이 포텐셜에너지(potential energy)의 증분 dU를 의미한다. 따라서 균열이 진전하기 위한 단위 면적에 대한 포텐셜 에너지 소비율을 나타내는 J는 다음과 같다.

$$J = -\frac{dU}{dA} = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} = \int_{\Gamma} (Wdy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (3)$$

여기서 U는 포텐셜 에너지로서 다음 식으로 표시된다.

$$U = U_e + U_p \quad (4)$$

$U_e$ 는 포텐셜 에너지의 탄성성분이고,  $U_p$ 는 소성성분이다. 서로 다른 da에 대한 각 실험으로부터 얻어지는 J는 다음 식으로 구해진다.

$$J = \frac{A}{B \cdot b} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (5)$$

여기서,  $W$ 는 시험편의 폭이고,  $b$ 는 리거먼트 (ligament) 길이로써  $b=W-a$ 이다. 또한  $A$ 는 하중-변위 선도에서 균열이 발생하기까지 시험편에 축적된 에너지로 선도에서 그려진 면적을 의미한다.

$$A = \int_0^{u_i} P_i du_i = A_e + A_p \quad (6)$$

식(6)에서  $P_i$ ,  $u_i$ 는 하중-변위 선도에서 각각 균열이 발생하기 시작하는 하중과 변위를 나타내고,  $A_e$ 는 탄성변형에 의한 면적이고,  $A_p$ 는 소성변형에 의한 면적이다.

식(5)에서 CT 시험편에 대하여  $f(a/W) \approx 2.2$ 이다. 따라서, 본 연구에서와 같이 CT 시험편을 사용한 경우  $J$ 의 값은 평면변형률 상태에서 다음 식으로 표시된다.

$$J = J_e + J_p = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{2.2A_p}{B(W-a)} \quad (7)$$

또한, 탄·소성거동을 하는 모드 I 균열재의 파괴기준은 다음 식과 같이 된다.

$$J_I \geq J_{IC} \quad (8)$$

위 식에서와 같이 작용하중에 의한 탄·소성  $J$ 값이 탄·소성재의 임계값  $J_{IC}$ 이상이 되었을 때 탄·소성재에 대한 균열은 진전하게 된다.

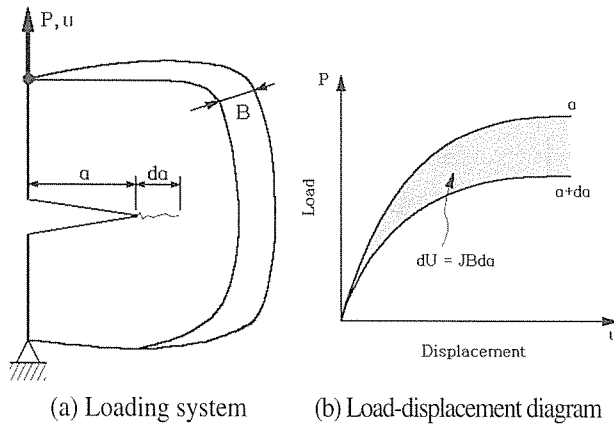


Fig. 2 Interpretation of J-integral

### 3. 실험

#### 3.1 시험편의 재질

본 실험에서 사용된 시험편의 재질은 원자력 스팀터빈 케이싱 체결용으로 사용되고 있는 1.25Cr-0.7Mo의 합금강 스팀터빈 볼트로써 화학조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of specimen material

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.40	0.225	0.55	~0.04	~0.04	1.25	0.70

Table 2는 인장시험편의 실험에 의하여 실험 측정된 값으로 재료의 물성치를 나타내고 있다. 이 재질은 원자력 발전소의 터빈 케이싱 스팀터빈 볼트로써 터빈 케이싱내에 260°C 온도와 67-70kg/cm<sup>2</sup>의 압력범위에 있는 증기의 긴밀을 유지하여 터빈 회전을 원활하게 할 수 있도록 체결력을 유지해주는 역할을 한다.

Table 2. Material properties

Young's modulus, E [GPa]	178
Poisson's ratio, $\nu$	0.28
Yield stress, $\sigma_Y$ [MPa]	651
Tensile strength, $\sigma_u$ [MPa]	911
Elongation [%]	14~
Brinell Hardness	248-302

#### 3.2 시험편의 제작

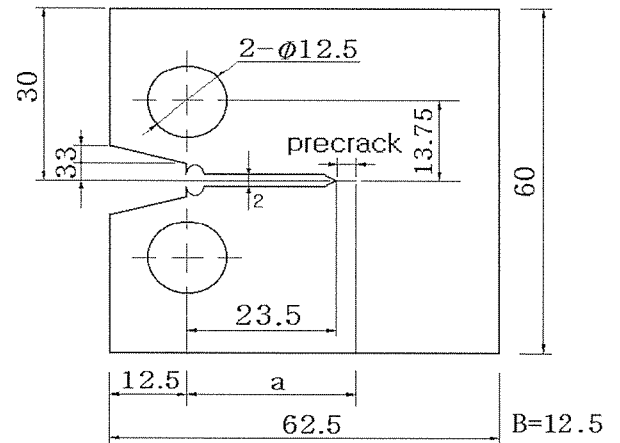


Fig. 3 Dimension of CT specimen

CT 시험편은 3인치의 볼트재질을 길이 방향으로 절단하여 제작하였다. 이 재질은 시험편의 형상 및 치수는 ASTM E318-89의 규정<sup>(7)</sup>에 따라 Fig. 3과 같이 하였다. 시험편 소재의 양면을 밀링 가공하고 균열부분은 와이어 컷 방전기로 가공하였다.

균열진전을 명확하게 관찰하기 위하여 시험편 표면을 #80과 #1000의 샌드페이퍼로 연마하였다. 또한 ASTM 규정에 의한 피로 예비균열을 삽입하고, 하중선 변위를 측정하기 위하여 클립 게이지를 고정할 수

있도록 시험편을 가공하였다.

### 3.3 실험방법

본 실험에 사용된 시험기는 만능 재료시험기 (Instron 4206)를 사용하였다. ASTM E8-89의 규정<sup>(8)</sup>에 의한 물성치 실험과 ASTM E813-89에 따른 CT시험편을 사용한 탄·소성 파괴인성 시험을 수행하였다.<sup>(7)</sup> 인장시험에서 변위의 속도를 0.2mm/min 하여 하중과 변형률을 측정하여 실험 데이터는 X-Y 레코더를 이용하여 기록하였으며, 이때, 균열 길이의 측정 은 이동식 현미경을 사용하여 측정하였다.

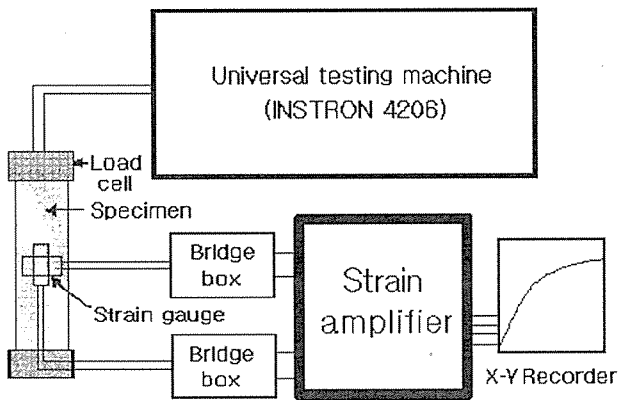


Fig. 4 Diagram of strain testing equipment

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 응력-변형률 선도

Fig. 5는 1.25Cr-0.7Mo 합금강의 인장시험에 사용된 시험편의 형상과 치수의 모양이다.<sup>(8)</sup> 인장시험을 위하여 스트레인게이지의 원활한 부착을 위하여 220번 사포를 사용하여 표면을 변위 게이지(strain gauge) 부착에 적합하게 하였으며, 높이 측정게이지(height gauge)를 이용하여 가로, 세로 및 중심의 표점거리를 지정하여 스트레인 게이지를 양측에 가로 세로로 부착하여 시험하였다.

Fig. 6은 시험재료의 응력-변형률 관계를 보여주고 있으며 각각 샘플 시험편의 가로 변형률과 세로 변형률을 보여주고 있으며, 볼트의 평가는 균열선단에서 소성역이 커지므로 탄·소성적으로 평가되어야 하며<sup>(10)</sup>, 아래 응력 변형률 그래프의 형상을 통하여 이 재료는 전형적인 탄·소성재임을 확인할 수 있다.<sup>(11)</sup>

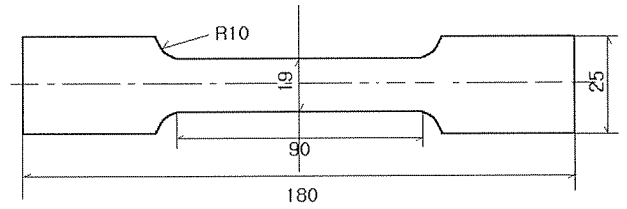


Fig. 5 The shape and demension of tension test specimen(t=1 mm)

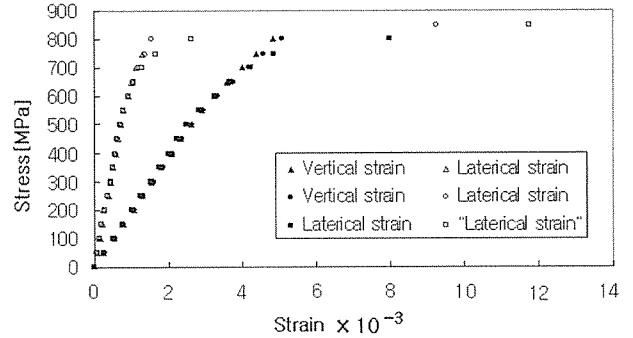


Fig. 6 Stress-strain diagram of specimen material

### 4.2 제하 컴프라이언스 하중-변위선도

Fig. 7은 피로시험기(universal test machine)을 사용하여 CT 시험편에 기준레벨 450kg에서 진폭 300kg, 5KHz의 진폭으로 1.25(0.1B)mm 두께의 예비크랙을 삽입한 후 만능재료 시험기로 제하 컴플라이언스법을 시험한 하중-하중선 변위선도를 나타낸다. 이 결과를 식<sup>(7)</sup>에 적용하여 탄성 파괴인성치  $J_e$ 와 소성 파괴인성치  $J_p$ 를 합하여 탄·소성 파괴인성치  $J_{Ic}$ 를 구하였다.

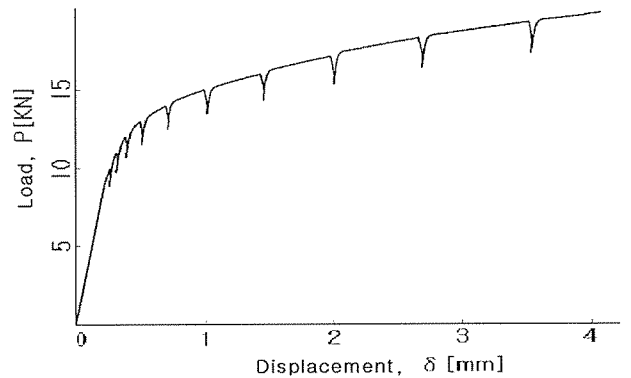


Fig. 7 Load-displacement of load line

### 4.3 탄·소성 $J_{Ic}$ 평가

ASTM E318-89에 따라 균열선단의 피로 예비 균열을 피로시험기로 삽입한 후, 상온에서 파괴인성시험을 수행하였다. 인장시험 동안의 하중선 변위는 클립 게이지를 사용하여 X-Y 레코더에 기록하여 측정하였다.

탄·소성 파괴인성치  $J_{Ic}$ 를 계산하기 위하여 소성범위에서 1kN 단위로 하중을 작용시킨 후 그 작용하중의 약 10%씩 하강시켜 하중-하중선 변위 선도를 구하였다. 시험시 작용하중 속도는 1mm/min로 하였다.

시험에 의한  $J-\Delta a$ 를 가지고 ASTM E318-89에 따라 Fig. 8과 같은 J-R곡선을 그린다. 여기서,  $J-\Delta a$ 의 관계를 곡선으로 커브 피팅한 그래프와 블런팅 라인(blunting line)과  $0.2\Delta a$ 의 오프셋 선(offset line)과의 교점을 사용하여 탄·소성파괴인성  $J_{Ic}$ 를 구하였다.<sup>(79)</sup> 이러한 방법으로 구한 탄·소성 파괴인성치를 구하였다.

이와 같은 실험 데이터는 이미 전 논문에서 유한요소해석법에 의한 J-R곡선의 탄·소성 파괴인성값과 유효성을 비교 검증하였으며,<sup>(6)</sup> 본 연구과제에서는 실험에 의한 방법만으로 원자력에서 사용된 스테드 볼트 소재에 대한 파괴인성치를 구하였다. 그 값은  $J_{Ic}=236 \text{ kN/m}$ 로서 사용부재의 작용하중이 임계 파괴인성치 이상일 경우 사용할 수 없다. 또한 사용재에 대한 임계파괴인성치의 평가는 차후에 연구하여 비교 발표할 계획이다.

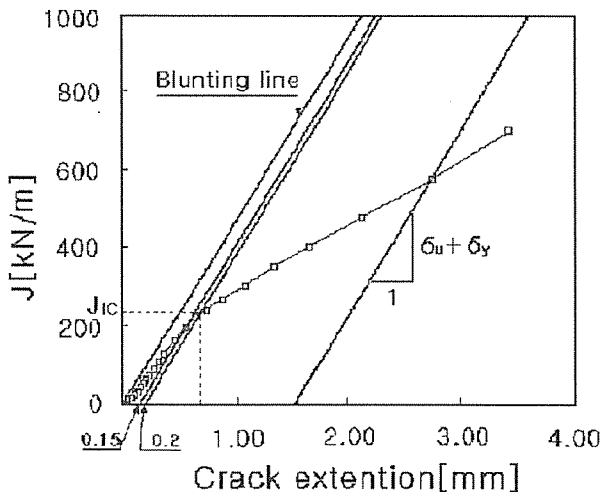


Fig. 8 Determination of  $J_{Ic}$  from J-R curve

## 5. 결론

원자력 발전설비 케이싱 체결용 고온볼트의 탄·소성 J적분의 해석 및 파괴인성시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 하중-변형률 선도상에서  $\delta = 0.5\text{mm}$  이내에서는 급격한 하중변화에도 변화량  $\delta$ 는 작지만 그 이상되면 전형적인 탄·소성재에서 나타내는

그래프 형상을 나타내고 있다.

- (2) 위 응력-변형률 실험결과를 통하여 볼 때 발전설비의 고온·고압 스테드 볼트는 탄·소성재로서 해석이 고려되어야 한다.
- (3) 원자력 스테드 볼트재의 탄·소성 파괴 인성치  $J_{Ic}$ 를 실험적으로 구하였고, 그 결과  $J_{Ic} = 236\text{kN/M}$ 이다.
- (4) 본 연구에서 실험한 파괴모드의 균열의 경우, 작용하중의 J-적분치가 임계 파괴인성치가 실험에서 구한  $J_{Ic}$ 값 이상이 되면 파괴가 된다.

## 참고문헌

- (1) "Analysis of Bolted Joints," ASTM, 1998, pp. 1-133.
- (2) Analysis of Bolted Joints," ASTM, 1999, pp. 1-169.
- (3) F. Ma, & Z. B. Kuang, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Finite Bodies- I", Engineering Fracture Mechanics, Vol.48, No.5, 1994, pp.727-737.
- (4) F. Ma, & Z. B. Kuang, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Finite Bodies- II", Engineering Fracture Mechanics, Vol.48, No.5, 1994, pp.729-748.
- (5) J. R. Rice, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", Trans. ASME, J. Appl. Mech., Vol. 35, 1968, pp. 379-386.
- (6) 정남용, 김문영, 김종우, "발전용 가스터빈 고온부재의 탄·소성 J 적분의 파괴인성 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제23권 10호, 1999, pp. 1837-1844.
- (7) Standard Test Method for  $J_{Ic}$ , A Measure of Fracture Toughness", ASTM Standard E318-89.
- (8) Standard Test Method of Tension Testing of Metallic Material", ASTM Standard E8-89.
- (10) 윤석호, 윤기봉, 김승태, 서창민, "열화된 Cr-Mo-V재의 파괴인성값,  $J_{Ic}$ 의 평가", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 1992, pp. 244-249.
- (11) T. L. Anderson, "Fracture Mechanics", Fundamentals and Applications Second Edition, 1996, pp. 123-124.