

압축잔류응력이 판의 파괴 특성에 미치는 영향에 관한 실험적 평가

장창두* · 박용관** · 송하철*** · 김병일****

*서울대학교 조선해양공학과 교수 **현대중공업 선박해양연구소 연구원
서울대학교 해양시스템공학연구소 선임연구원 *목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수

An Experimental Assessment of the Effects of Residual Stresses on Fracture Behavior of the Plate

Chang-Doo Jang* · Yong-Kwan Park** · Ha-Cheol Song*** · Byung-Il Kim****

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

**Hyundai Heavy Industries, Ulsan, 682-792, Korea

***Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

****Division of Marine Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Chonnam, 530-729, Korea

요 약 : 잔류응력이 판의 파괴 특성에 미치는 영향의 정량적 평가를 위하여, 균열이 존재하는 CT (Compact Tension) 시편에 가스 토오치 (gas torch)를 이용한 국부 가열을 실시하여 인위적인 잔류응력을 생성시키고, 열탄소성 유한요소해석을 통하여 생성된 잔류응력장을 평가하였으며, 잔류응력이 존재하는 시편과 잔류응력이 존재하지 않는 시편에 대한 파괴인성 실험을 실시하여 이들의 결과를 파괴저항 선도 상에서 비교, 분석함으로써 압축 잔류응력이 파괴 특성에 미치는 영향을 정량화하였다.

핵심용어 : 압축잔류응력, 국부가열, 파괴인성, 파괴저항 선도, 열탄소성해석,

Abstract : The quantitative assessment of the effect of the residual stress on fracture behavior was executed by some experiment and numerical analysis. First of all, artificial residual stresses were imposed on CT (Compact Tension) specimens by local heating using gas torch, and an appropriate distribution of residual stresses was obtained by thermal elastic-plastic FE analysis. To certify the result of the FE analysis, an experimental measurement was performed in accordance with ASTM standard. Fracture toughness test was executed on the several types of specimens. The first type was the specimen without residual stresses, and the others had different peak value of compressive residual stress at crack front via controlling the heat flux. All the test results were presented on the J_R resistance (J_R) curves and discussed to verify the effect of compressive residual stresses on fracture behavior.

Key words : compressive residual stress, local heating, fracture toughness, J_R curve, thermal elastic-plastic analysis

1. 서 론

선박이나 해양구조물은 제조 공정상 용접과정을 필연적으로 거치게 되어 국부적인 열 사이클에 의한 잔류응력의 발생이 불가피하다. 일반적으로 잔류응력은 용접 구조물의 파괴 강도를 저하시키는 요인으로 알려져 있어, 이들이 파괴 특성에 미치는 영향 평가에 관한 연구가 국내외적으로 많이 수행되어 왔으나, 심한 비선형성을 갖는 잔류응력 해석 및 실험 기법상의 한계로 인하여 그간의 연구는 정성적 평가에 관한 연구가 주를 이루어 왔다. 이에 따라 본 연구에서는 잔류응력이 파괴 특성에 미치는 영향의 정량적 평가에 대한 연구를 수행하기 위하여, 잔류응력이 존재하지 않는 시편과 국부 가열에 의해 인위적인 잔류응력이 생성된 시편에 대하여 파괴 인성 실험을 실시하였다. 잔류응

력 평가는 천공법에 의한 계측 실험과 열탄소성 유한요소해석을 수행하여 결과의 정도를 제고하였으며, 이들 결과를 파괴인성 실험과 비교, 분석하였다.

2. J 적분

2.1 J 적분의 정의

Rice (1968)에 의해 제안된 J 적분은 고인성 재료 등의 파괴 해석에 적용할 수 있는 비선형 파괴역학의 주요 파라미터이다. 경로 독립적인 선적분 형태로 도입된 J 적분은 물리적으로 균열 면적에 대한 포텐셜 에너지의 변화율로써 식 (1)과 같이 정의된다(Anderson, 1995).

$$J = - \frac{d\Pi}{d(\text{crack area})} \quad (1)$$

where, Π : potential energy

* cdjang@snu.ac.kr 02)-880-7328

** whatsapp@empal.com 052-230-5559

*** sncpr@hanmail.net 02)-880-7336

**** 정희원 bikim@mmu.ac.kr 061)-240-7077

2.2 파괴 저항 곡선 (J_R curve)

J_R 곡선은 균열 진전에 대한 재료의 파괴 저항을 나타내는 곡선으로 J_{IC} 의 결정이나 탄소성 파괴역학적인 건전성 평가에 사용하기 위하여 실험으로부터 구하게 되는데, 이는 재료의 파괴 거동에 대한 보다 상세한 정보를 제공한다. 연성 재료에 대한 대표적인 J_R 곡선은 Fig. 1과 같다. 초기 단계에서는 균열의 둔화 (blunting)에 의해 약간의 균열 진전을 나타내며, 점차 J 적분치가 증가하면서 균열 선단부가 부분적으로 파괴되어 균열이 진전되는데, 이러한 초기 균열 진전 상태에서는 일반적으로 J_R 곡선의 기울기가 급한 형태의 안정 균열성장을 하게 된다. 이후 균열이 더욱 진전됨에 따라 불안정한 균열성장의 경향이 나타나게 되는데, 이러한 균열 진전에 대한 J_R 곡선의 기울기는 균열 성장에 대한 상대적인 안정성을 나타낸다는 측면에서 중요하다고 할 수 있다.

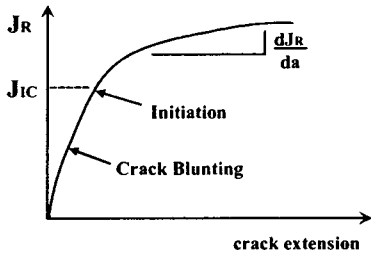


Fig. 1 Schematic J_R curve for a ductile material

3. 시편의 재질 및 종류

본 연구에 사용된 CT 시편은 일반 구조용 압연강 SS400을 사용하였으며, 시편의 형상은 Fig. 2와 같이 ASTM E 1737 규정 (1996), 'Compact Specimen Design Requirement'에 따라 제작하였다. 또한 재료의 기계적 성질을 파악하기 위하여 인장

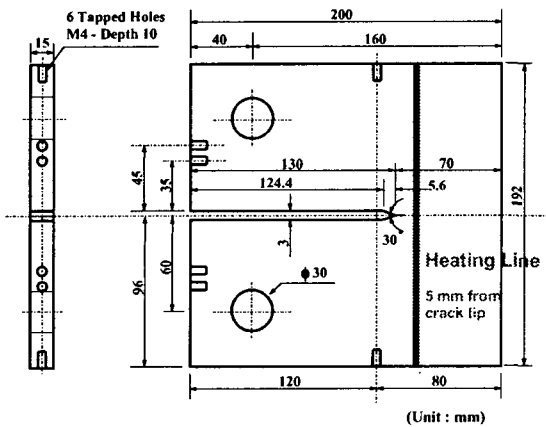


Fig. 2 CT specimen for toughness test

실험을 실시하였다. 인장 시편의 형상은 ASTM의 규정에 따

라 제작하였으며, CT 시편의 균열에 수직인 방향, 즉 Mode I (개구형) 하중이 인장 시편에 인장력으로 작용하도록 채취하였다. Fig. 3은 인장시편의 형상과 인장 실험 전·후의 인장시편을 보여주고 있으며 인장 실험에 따른 재료의 기계적 성질은 Table 1에 정리하였다.

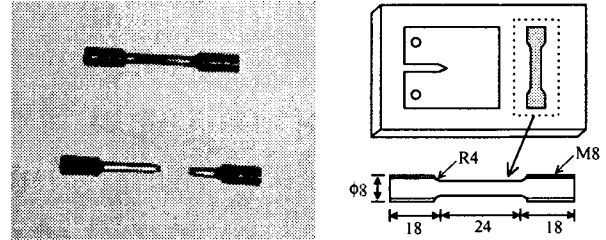


Fig. 3 Specimen for tension test

Table 1 Material properties

Yield stress	Tensile stress	Young's modulus	Percent elongation
250 MPa	435 MPa	210 GPa	38 %

파괴 저항의 비교 실험을 위한 시편은 잔류응력이 존재하지 않는 시편과 선상가열을 이용해 잔류응력을 생성시킨 시편 2종류로 하여, 총 3가지 종류의 시편을 준비하였다. 예균열 (precrack)은 피로 균열 진전을 시켜 노치로부터 6 mm를 발생시켰으며, 균열 선단부에 인위적인 잔류응력을 생성시키기 위하여 가스 토오치 (gas torch)를 이용하여 예균열 선단부로부터 5 mm 위치에 가열을 하였다. 이 때 시편의 양면에 동일한 조건의 가열을 하여 개구형 균열에 대한 파괴 실험에 적합하도록 시편의 변형을 최소화하였다. 가열 조건 및 시편의 종류는 각각 Table 2와 Table 3에 정리하였다.

Table 2 Line heating condition

Gas pressure	Oxygen 55.2 kPa Propane 51.7 kPa
Torch tip clearance	21 mm
Torch speed	15 mm/sec 5 mm/sec

Table 3 Types of specimens

Types	Remarks
A	Without residual stresses
B	Including residual stresses Heating speed: 15 mm/s
C	Including residual stresses Heating speed: 5 mm/s

4. 잔류응력의 평가

파괴 특성에 미치는 잔류응력의 정량적 평가를 위해서는 시편에 내재된 잔류응력 분포의 정확한 파악이 선행되어야 할 것이다. 잔류응력 계측 기법으로는 응력 이완법, X선 회절법, 균열 전파법, 자화식 응력 지시계법 등 많은 실험 기법이 연구되어 왔으나, 파괴 거동에 가장 큰 영향을 미치는 균열 선단부의 잔류응력 계측의 경우, 그 기하학적 불연속성 때문에 실험적 방법에 의한 잔류응력장의 평가에 많은 어려움이 있다.

이에 따라 본 논문에서는 열탄소성 유한요소해석을 통해 가열에 의해 발생하는 잔류응력장을 평가하고, 천공법 (hole drilling method)을 통해 측정 가능한 몇 개의 실험점에 대한 잔류응력을 계측하여 그 결과를 비교함으로써 열탄소성 해석 결과를 검증하였다.

4.1 천공법을 이용한 잔류응력 계측 실험

천공법은 변형률 게이지 (strain gage)를 이용하여 시편의 천공에 의해 이완되는 내부 잔류응력을 결정하는 방법으로써, 잔류응력을 계측하는 가장 보편적인 실험적 기법 중 하나이다 (ASTM, 1992; Measurement Group, 1993; Schajer, 1988).

ASTM 규정에 의한 잔류응력 계측 과정은, 먼저 잔류응력을 계측하고자 하는 부분에 변형률 게이지를 부착하고, 원하는 깊이까지 드릴링을 실시한 후, 이완된 변형도를 계측하여 이 결과로부터 잔류응력을 계산한다. 잔류응력 산정 과정은 상기한 참고 문헌 등에 매우 상세히 설명하고 있으므로 여기서는 생략하기로 한다. 실험에 사용한 스트레인 게이지는 3축 스트레인 게이지 (three element rosette)이며, 변형률 계측 장비로는 데이터 로거 (data logger)를 사용하였다.

4.2 열탄소성 해석에 의한 잔류응력 평가

열탄소성 해석에 사용된 solver는 범용 유한요소해석 코드인 ANSYS이며, 요소는 8절점 입체요소인 SOLID70이다. 가열 현상을 고려하기 위해서 토오치는 Fig. 4와 같이 가우스 정규분포 (Gaussian distribution)로 가정된 열속 (heat flux)이 이동하는 것으로 모델링되었고, 열속은 식 (2)와 같은 과정을 통해 구하였다 (Moshaiov and Vorus, 1987).

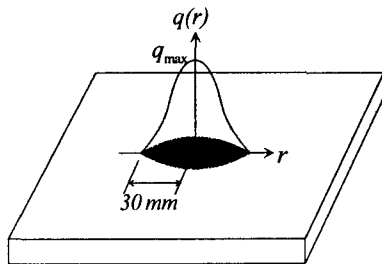


Fig. 4 Heat source moving on the plate surface

$$q(r) = q_{max} e^{-\gamma r^2}$$

$$q_{eff} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} q(r) r d\theta dr \tag{2}$$

$$q_{max} = \frac{\gamma}{\pi} q_{eff}$$

where, $q(r)$: heat flux (cal/mm²sec)

q_{eff} : effective heat input rate (cal/sec)

q_{max} : maximum heat flux (cal/mm²sec)

γ : concentration coefficient (mm⁻²)

r : distance from the center of heat source (mm)

4.3 실험 결과와 해석 결과의 비교

가열시 생성된 잔류응력장에 대한 B 시편의 열탄소성 해석 결과에 따르면, 최대 인장 잔류응력 부위가 토오치 가열 중심부에서 균열 진전 방향으로 약 5 mm (예균열 선단으로부터 11 mm) 정도 벗어나 있고, 균열 선단부에서는 Mode I 하중 방향에 대하여 약 100 MPa 정도의 압축 잔류응력이 생성되어 있음을 알 수 있다 (Fig. 5). 아울러 해석 결과의 검증에 위해 천공법에 의한 잔류응력 수준을 Fig. 5에 비교한 결과, 적절한 열탄소성 해석 모델링이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

Fig. 6는 토오치의 가열 속도를 조절하여 B 시편에 비하여 3배의 열속을 투입한 C 시편의 열탄소성해석 결과를 보여주고 있다. 잔류응력 분포 형태는 B 시편의 결과와 매우 유사한 결과를 주고 있으며, 균열 선단부에 생성된 압축 잔류응력의 크기는 약 150 MPa 로 더 높은 수준의 잔류응력장이 형성되었음을 알 수 있다. 응력 평형을 이루는 잔류응력의 특성상, 가열선에 대하여 비대칭인 CT 시편의 잔류응력 분포는 가열선에 대해 비대칭으로 분포하는 것이 적절한 해석 결과로 판단된다.

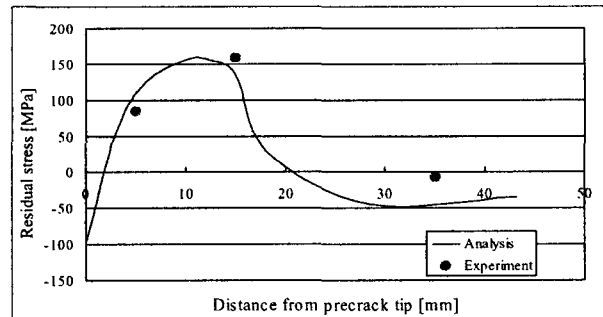


Fig. 5 Residual stress distribution of type B (analysis vs. experiment)

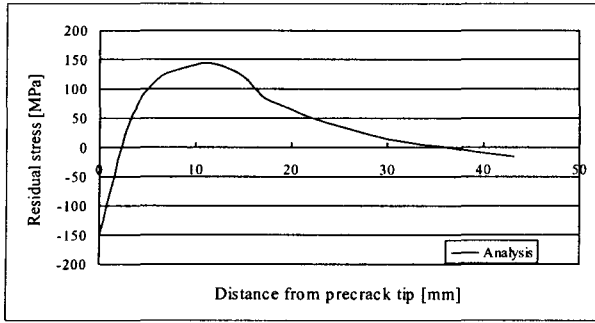


Fig. 6 Residual stress distribution of type C (analysis)

5. 파괴인성 실험

5.1 실험 개요

상기한 3 종류의 시편의 파괴 저항 특성을 비교하기 위하여 파괴 인성 실험을 실시하였으며, 이 실험은 ASTM E 1737에 규정되어 있는 단일 시편법 (single specimen method)에 따라 수행하였다. 실험 하중은 부하 속도 0.18 mm/min.의 변위 제어 방식으로 부과하였으며, 균열 개구변위(CMOD)는 25 mm 계측 범위의 extensometer를 이용하여 계측하였다. 균열의 진전을 계측하는 방법으로는 직류 전위차에 의한 균열 길이 계측법 (DCPD, Direct Current Potential Drop method)을 이용하였다. 하중 장치는 INSTRON 5582 시험기이며, Fig. 7은 실험 장치의 구성을 보여주고 있다.

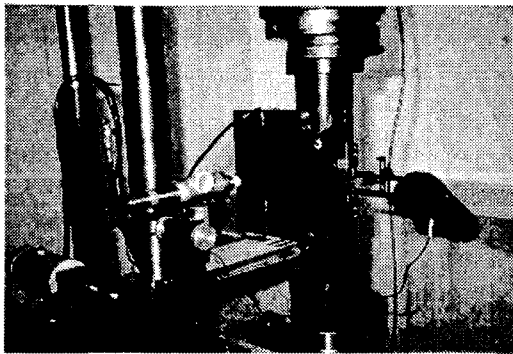


Fig. 7 Toughness test setting

5.2 실험 결과

균열 개구 변위에 따른 하중 및 전위차 계측치에 대한 파괴 인성 실험 결과 비교는 다음 Fig. 8과 같다. Fig. 9부터 Fig. 11까지는 각각의 시편에 대한 J_R 곡선을 나타내고 있다. 이 때 J 적분값은 다음 식 (3)와 같이 탄성성분(J_{el})과 소성성분(J_{pl})으로 구분해 각각 구할 수 있다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (3)$$

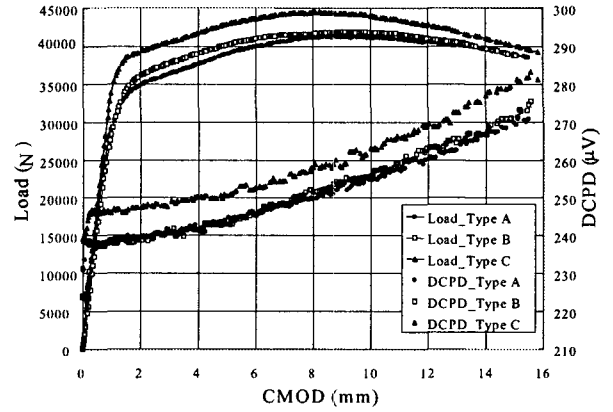


Fig. 8 Test results of CMOD according to load and DCPD

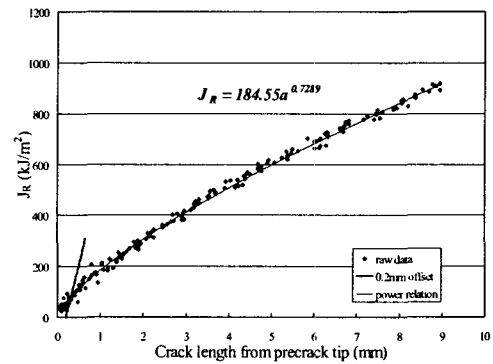


Fig. 9 J_R curve of type A

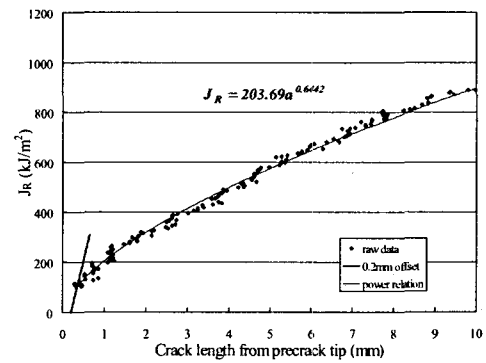


Fig. 10 J_R curve of type B

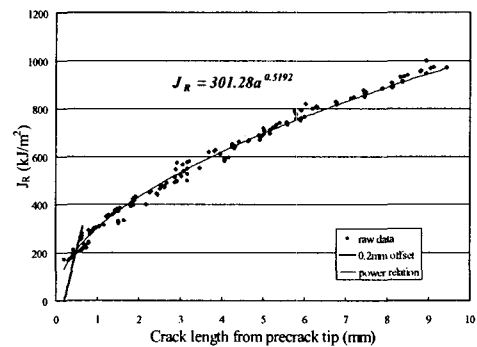


Fig. 11 J_R curve of type C

6. 평가 결과

Table 4과 Table 5는 3가지 종류의 시편에 대한 J_{IC} 값 및 곡선의 회귀식을 비교하고 있다. 주지하는 바와 같이, 파괴 인성으로서의 J_{IC} 는 균열에 대한 저항 (crack resistance)을 나타내는 척도로서 재료 특성을 나타내는 인자이다.

외부 하중에 의해 시편에 생성되는 균열 선단부 응력장을 균열에 대한 구동력 (crack driving force)이라 하면, 파괴 인성에는 상응하는 균열에 대한 저항 (crack resistance), 즉 파괴 저항이라 할 수 있다. 그러나 본 연구에서와 같이 균열 선단 인근에 인위적인 압축 잔류응력장이 생성되어 있는 경우, 이러한 압축 잔류응력이 외부 하중에 의해 생성되는 응력장과 중첩되어 균열에 대한 실질적인 구동력을 낮추어 주게 되며, 그 결과로 균열에 대한 재료의 파괴 저항을 높여주는 것과 같은 효과를 수반하게 된다.

용접 구조물의 피로 파괴 문제의 경우, 이러한 잔류응력장이 피로 파괴 특성에 미치는 영향을 유효응력확대계수 (effective stress intensity factor) 개념의 도입을 통해 해결하고 있으나, 준 정적인 파괴 문제의 경우 이에 대한 일반적인 용어 정립이 이루어져 있지 않은 관계로, 후술되는 잔류응력 내재 시편의 실험 결과에 있어서의 용어는, 비교의 편의상 일반 시편의 기호와 용어를 동일하게 사용하기로 한다.

따라서 Table 4 이하의 결과에 나타난 파괴 인성 및 파괴 저항은 ASTM에서 규정한 실험 및 계측 방법을 3가지 시편에 동일하게 적용하여 산출된 것으로, A 시편을 제외한 B와 C 시편의 경우 잔류응력의 파괴 특성에 미치는 효과가 포함된 정량적 비교로 이해되어야 할 것이다. 아울러 이 결과에는 국부가열에 의한 시편 조직의 변화에 의한 효과도 포함되어 있으나, 주지하는 바와 같이, 상변태가 미치는 영향을 유한 요소 해석을 통해 정량화하는 문제는 해석 기법이 정립되어 있지 않은 관계로, 본 연구에서 수행한 유한 요소 해석에서도 상변태 해석이 수행되지 못하였음을 밝혀둔다.

이에 따라 파괴 인성 실험 결과는 균열 선단의 잔류응력 크기만으로 상대 비교되었다.

Table 4의 결과를 검토하면, 균열 선단 부분에 압축 잔류응력이 생성된 B 시편의 균열 전파 개시 시점까지의 파괴 저항이 압축 잔류응력이 생성되지 않은 A 시편에 비해 매우 크게 나타난 것을 볼 수 있으며, 압축 잔류응력의 크기가 더 큰 C 시편의 경우 가장 큰 파괴 저항 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 아울러 시편의 균열이 전파되면서 균열 선단부에 걸리는 잔류응력이 압축 응력에서 인장 응력으로 천이됨에 따라, 균열 성장에 따른 파괴 저항이 점차 감소하게 되어 일반 시편보다 불안정 성장의 경향이 커지게 됨을 확인할 수 있다. Fig. 13과 Table 6은 J_R 곡선의 기울기를 비교하고 있으며, 이는 균열 진전에 따른 균열 성장의 상대적 안정성을 정량화할 수 있는 기초 자료를 제공한다.

Table 4 Results of fracture resistance near notch

Types	J_{IC} (kJ/m ²)	Positions of crack from precrack tip (mm)
A	79.8	0.31
B	103.9	0.35
C	212.4	0.51

Table 5 Regression equations of J_R curves

$$J = C1 (\Delta A)^{C2} \text{ (kJ/m}^2\text{)}$$

Types	C1	C2	Remarks
A	184.55	0.7289	---
B	203.69	0.6442	heating speed 15 mm/s
C	301.28	0.5192	heating speed 5 mm/s

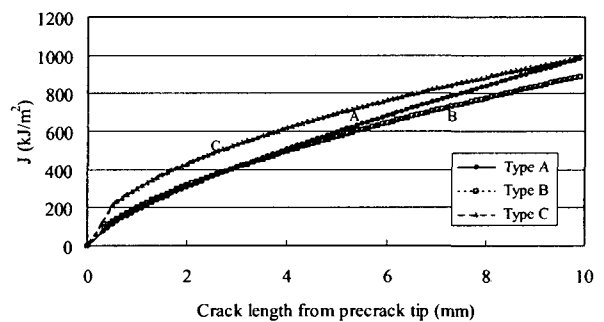


Fig. 12 J_R curves for three types of specimens

Table 6 Slopes of J_R curves

Types	Slope of J_R curves according to the positions from precrack tip (10 ³ kJ/m ³)	
	0.51 mm (initial crack)	7 mm
A	161	79
B	166	65
C	216	61

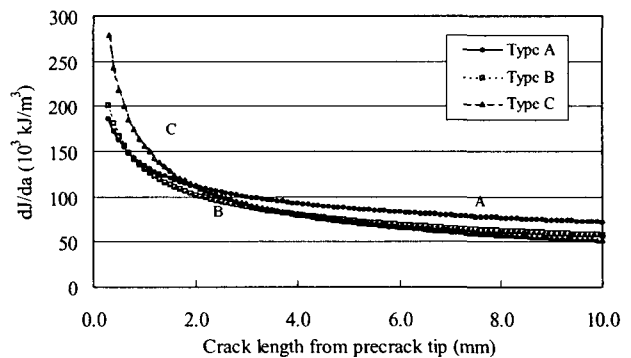


Fig. 13 Slope of J_R curves

이상의 결과를 종합해 볼 때, 압축 잔류응력이 파괴 강도 향상에 미치는 영향이 본 논문에서 제시한 일련의 실험법과 해석을 통하여 정량적으로 평가되었고, 균열이 존재하는 구조물의 균열 선단 부근에 국부적인 가열을 하여 인위적인 압축 잔류응력을 균열 선단부에 생성시키는 기법이 파괴 강도 향상에 매우 유용함을 확인하였다.

7. 결론

본 연구에서는 균열 선단부에 인위적인 압축 잔류응력을 생성하여 압축 잔류응력이 판의 파괴 특성에 미치는 영향의 정량적 평가에 대한 기초 연구를 수행하였으며, 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- 균열 선단부에 국부적인 가열을 통해 CT 시편에 잔류응력을 구현하고, 열탄소성 해석과 천공법에 의한 실험 결과를 비교, 검증하여 가열에 의해 생성된 잔류응력장을 평가하였다.
- 균열 선단부에 생성된 인위적인 압축 잔류응력이 파괴 저항 향상 효과를 가지게 되는 현상을 확인하고, 이를 파괴 저항 곡선의 분석을 통해 정량화하였다.
- 균열 선단부 인근에 국부적인 가열을 실시하는 기법이 균열 인근의 인위적인 압축 잔류응력장 생성에 매우 유용함을 입증하였다. 이는 균열이 존재하는 실 구조물의 파괴 강도 향상에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 1998년도 서울대학교 해양시스템공학연구소 연구

과제(연구관리번호 '98-10)의 일부로써 서울대학교 발전기금의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Anderson, T. L. (1995), "Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications", CRC Press.
- [2] ASTM Standard E 1737, (1996), "Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness".
- [3] ASTM Standard E 837, (1992), "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method".
- [4] Measurements Group, (1993), "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method", TN-503-4.
- [5] Moshaiiov, A. and Vorus, W. S. (1987), "The Mechanics of the Flame Bending Process : Theory and Applications", J. of Ship Research, Vol. 31, No. 4, pp. 261-281.
- [6] Rice, J. R. (1968), "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", J. Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 379-386.
- [7] Schajer, G. S. (1988), "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method", J. of Eng. Materials and Technology, Vol. 110, No. 4, pp.338-349.

원고접수일 : 2002년 8월 25일

원고채택일 : 2002년 10월 1일