

SPS 시험편을 이용한 모드 II하에서의 연성 파괴거동에 관한 연구

Ductile Fracture Behaviour under Mode II Loading Using the Single Punch Shear Specimen

오동준, 김영석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구의 목적은 A533B 압력용기강을 사용하여 모드 II하에서의 연성 파괴 특성을 규명하는 것이다. 순수 모드 II 하에서의 J - R curve를 구하기 위하여 Single Punch Shear (SPS) 실험을 행하였다. SEM을 이용한 미시적 관찰을 통하여 그 결과를 모드 I하에서의 결과와 비교 검토하였다. 이런 미시적 관찰은 모드 II에서의 크랙 진전을 위해 필요한 에너지가 모드 I에서의 에너지보다 작다는 사실을 밝혀냈다. 결론적으로 모드 II하에서의 파괴인성치는 모드 I하에서의 파괴인성치에 비해 상당히 작다는 것이다.

Abstract

The aim of this study is to investigate the ductile fracture behaviour under mode II loading using A533B pressure vessel steel. Single Punch Shear (SPS) Test was adopted to obtain the J - R curve under pure mode II loading. Fractographic observation using SEM was performed and these results were compared with those under mode I loading. The fractographic evidence supported this fact that the energy to advance the crack under mode I loading was even greater than that under mode II loading. In conclusion, J resistance under pure mode II loading is much lower than that of pure mode I loading.

1. 서 론

원자력 발전소와 같은 구조물들의 안전성을 고려하기 위하여, 연성재료의 크랙전단 부근에서의 실제 크랙 전파의 특성을 규명하는 연구는 의미있는 일이다. 모드 I (Tensile Opening Mode) 하에서의 파괴 특성의 중요성과 연구의 용이성으로 많은 연구들이 모드 I하에서의 파괴특성에 관한 연구에 집중되어왔다. 하지만, 실제 크랙의 진전시 받는 하중 조건이 세가지 하중조건 (모드 I, II, III)이 혼합된 상태인 것을 고려할 때, 이런 혼합 모드에 관한 연구는 필수불가결한 것이다. 하지만 순수 모드 II (In-Plane Shear Mode), 또는 순수 모드 III (Out-Plane Shear Mode) 그리고 이런 혼합 모드하에서의 파괴특성에 관한 연구는 아직도 미비한 실정이다. 현재까지도 세계적으로 표준화된 모드 II나 모드 III하에서의 실험 방법은 개발되지 않은 상태이다.

본 연구의 목적은 크랙 전파시 작용하는 가장 중요한 혼합 모드중에서 한 가지인 혼합 모드

(I/II)의 연구를 수행하기 이전에, 크랙의 초기 발생시에 크랙 생성의 중요한 요소가 된다고 믿어지는 순수 모드 II하에서의 연성 파괴 특성을 규명하고자 한다. 본 실험을 수행하기 위하여 이미 제안된 많은 실험 방법 중에서 실험 장비와 시험편이 간단하고, 실험 결과의 재현성이 높은 Single Punch Shear Test Method (SPS) [1]를 채택하였다. 이 실험 결과를 모드 I의 파괴인성 특성과 비교함으로써, 모드 II의 연성 파괴 특성을 규명하고자 한다.

2. 재 료

본 실험에 사용된 재료는 원자력 발전소의 압력용기 등에 많이 사용되는 A533B/C1 압력용기 강이다. 재료의 열처리 과정과 화학적 조성은 Table 1과 Table 2에 각각 나타나있다. 인장시험을 위해 3개의 시험편이 사용되었다. 인장 시험편은 실린더형 시험편으로 직경 18 mm, Gauge Length = 90 mm를 사용하였다 (Fig. 1).

사용된 실험기는 Schenck Machine (PM 250 KN)이며, 항복응력은 533.8 MPa, 인장응력은 660.1 MPa, 연율은 18.3 %, 단면수축율은 66.1 %, Young's modulus는 213.8 GPa, Poisson's ratio는 0.281을 각각 얻었다.

Table 1 Heat treatment of A533B/C1

Heat Treatment	Temperature(°C)	Period	Cooling
Austenise	870-908	4 hr. 17 min.	Water Quenched
Temper	650-660	6 hr. 40 min.	Air Cooled

Table 2 Chemical composition (wt. %) of A533B/C1

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	V	Cu
0.21	0.26	1.40	0.018	0.006	0.10	0.50	0.66	0.003	0.04

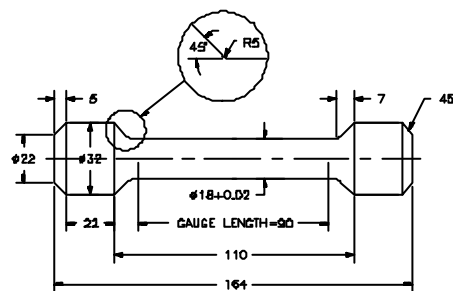


Fig. 1 Tensile Specimen Geometry

3 Single Punch Shear Test (SPS)

3-1 시험편

본 연구에서는, 연성재료의 모드 II하에서의 파괴인성을 구하기 위하여 Single Punch Shear (SPS) 시험편이 채택되었다. SPS 시험편은 모드 II하에서의 파괴인성실험인 Double Punch

Shear (DPS) 시험편 [2]의 문제점을 보완하기 위하여 Miles et al. [1]에 의해 개발된 시험편이다. 초기에 CEGB에 의해 개발된 DPS 시험편은 두 개의 크랙선단으로 인하여 부정확한 결과를 초래하는 단점이 있었다. CEGB는 이런 단점을 보완하기 위하여 SPS 시험편을 고안하였으며, 이 시험편이 순수 모드 II의 파괴인성 실험에 적합하다는 것을 입증하였다.

Fig. 2는 SPS 시험편을 나타내고 있다. 노치는 0.2 mm와 0.1 mm의 두 종류의 와이어를 사용하여 Electro-Discharging Machining (EDM)에 의해 가공되었다. 먼저, 0.2 mm의 와이어가 4 mm 깊이의 노치를 만드는데 사용되었다. 그 후에 처음 노치의 중심에 0.1 mm의 와이어를 사용하여 1 mm 깊이의 노치를 다시 만들었다. 이런 과정을 통하여 노치반경 0.05 mm, 깊이 5 mm의 노치를 성공적으로 만들었다. 마지막으로 SPS 시험편의 양쪽면에서 깊이 2 mm인 Side-grooving을 직경 0.2 mm의 와이어를 사용하여 가공하였다. 순수 모드 II의 파괴인성을 측정하기 위하여 9개의 시험편이 준비되었다. SPS 시험편은 Mode I의 표준 실험방법에 의한 Fatigue Pre-Crack을 미리 만들지 않았다. CEGB에서는 DPS 시험편과 SPS 시험편을 사용하여 Fatigue Pre-Crack이 있는 경우와 여러 다른 크기의 노치가 있는 경우에 각각 실험을 행하였다. 그 결과, Fatigue Pre-Crack이 있는 경우와 노치의 크기가 노치반경이 0.05 mm 이하인 경우의 결과는 매우 유사하였으므로, 노치반경이 어느 크기 이하일 경우에는 파괴인성 실험 결과치에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 밝혀냈다. 따라서 본 연구에서는 Fatigue Pre-Crack을 만들지 않더라도 충분히 정확한 파괴인성치를 얻을 수 있는 노치 반경 0.05 mm인 시험편을 사용하게 되었다.

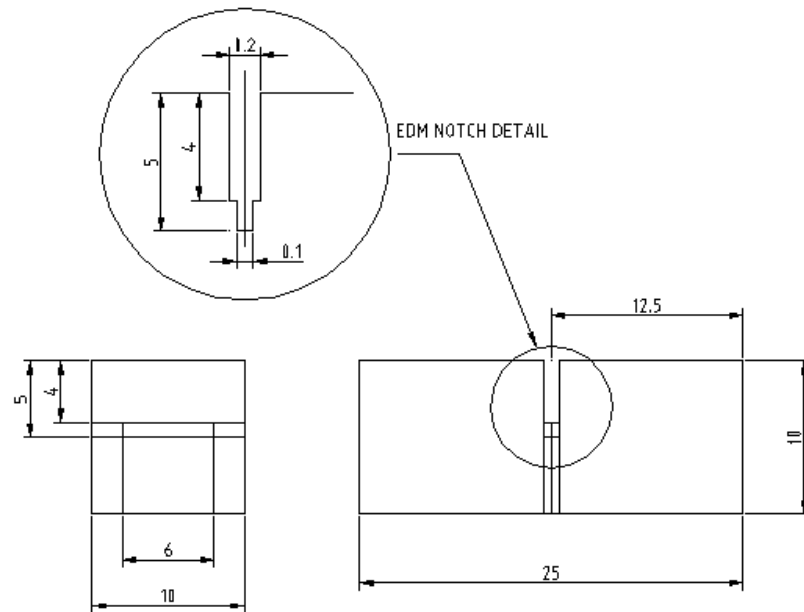


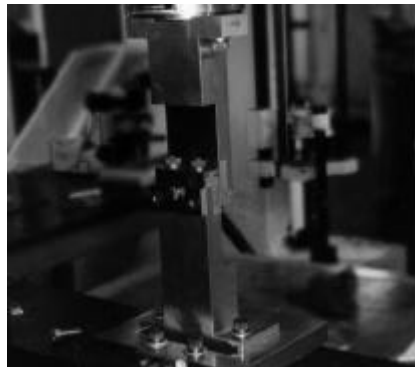
Fig. 2 Single Punch Shear Specimen Geometry for Mode II Loading

3-2 실험 장치 및 실험방법

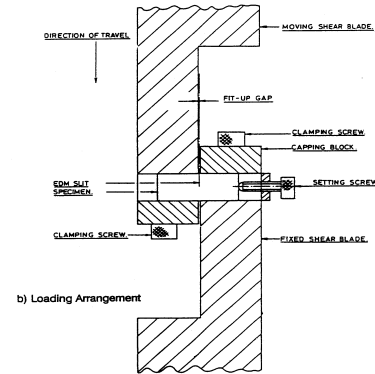
Fig. 3은 SPS 시험편이 장착된 실험장치를 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 본 실험을 위하여 자체 제작한 모드 II의 SPS 실험을 위한 고정장치가 Mayse Machine에 장착된 것을 찍은 사진이며, Fig. 3(b)는 이것을 도식화한 것이다. 실험은 0.5 mm/min의 속도로 변위 조절 방식에 의해 이루어졌으며, 하중과 하중 변위점 곡선이 기록되었다. 실험의 실행순서는 우선 SPS 시험편의 1/2 을 조심스럽게 시험편 고정장치의 움직이지 않는 상단부에 놓는다(Fig. 3(b)). 그때, 시험편

의 0.1mm 노치면과 고정장치 사이를 0.05 mm Feeler Gauge를 사용하여 크랙선단과 전단축을 일직선상에 위치하게 조절한다. 그후 시편의 남은 부분을 고정시킨다. 이런과정 동안에 어떤 하중도 시험편에 가해지지 않도록 세심한 주의를 요한다. 다시 한번 시험편과 고정 장치와의 간격이 0.05 mm인가를 확인한다.

실험이 시작되기 전에 고정장치의 잉여 탄성 변위를 노치가 없는 시험편을 사용하여 측정한다. 파괴인성치는 Multiple specimen method에 의해 구한다. 여러개의 시험편은 각각 다른 정도의 하중을 받고 다른 양의 변형을 일으킨 후에 갑자기 하중을 제거하는 Interrupted Method에 의해 실험을 중지한다. 그 후에 300° C에서 약 20분간 Heat-Tinting 하며, -196° C의 액화질소에서 시험편을 파단시킨다. 시험편의 파단면에서 9점 평균치 방법에 의해 크랙의 길이를 측정한다.



(a)



(b)

Fig. 3 Single Punch Shear Test Fixture for Mode II Loading [1]

3-3 순수 모드 II의 파괴인성치

순수모드 II의 파괴인성치, J ,는 Sumpter et al. [3] 의 식(1)을 이용하여 구하였다.

$$J = \frac{\eta_e U_e}{B(W-a)} + \frac{\eta_p U_p}{B(W-a)} \quad (1)$$

여기서 W 는 시험편의 폭, B 는 시험편 두께, a 는 크랙 길이, U_e 는 elastic potential energy, U_p 는 plastic potential energy, η_e 와 η_p 는 형상의존계수이다. η_e 는 식(2)의 Linear elastic compliance, Y ,와의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\eta_e = Y^2(1-a/W) / \int Y^2 d(d/W) \quad (2)$$

η_p 도 식(3)의 관계로부터 계산할 수 있다.

$$\eta_p = \frac{(W-a) q_p}{U_p} \frac{dQ_L}{da} \quad (3)$$

여기서 q_p 는 소성변위, Q_L 은 limit load이다. Landes et al.의 방법 [4]을 이용하여, Miles et al.

등은 다른 크랙 길이의 시험편들을 사용하여 실험을 행하여 하중과 변위 곡선들을 분석하였다. 하중과 변위 곡선에서의 곡선 이하의 면적, U ,가 a/W 의 함수로 측정되었으며, dU/da 와 $U(W-a)$ 의 계산은 η_p 의 계산을 가능하게 만들었다. 그 결과 SPS 실험에서의 η_p 는 0.97 이었으며, η_e 는 1.6 이었다. 결론적으로 순수모드 II하에서의 SPS 실험의 파괴인성치는 식(4)에 의해 계산할 수 있다.

$$J = \frac{1.6U_e}{B(W-a)} + \frac{0.97U_p}{B(W-a_0)} \quad (4)$$

여기서 B 는 시험편의 두께이며, a_0 는 초기 크랙 길이이다.

순수모드 II 의 J - R curve는 Fig. 4 에 나타나 있다. 본 실험에서 구한 SPS의 파괴인성치는 매우 작은 값을 나타내고 있다. 이런 것은 기존의 다른 연구 결과와는 상반된 결과를 보여주고 있다. 다른 연구에서는 연성재료에서 전단 하중 요소가 모드 I에서의 파괴인성치보다도 더 큰 파괴인성치를 나타내거나 비슷하다고 보고한 것도 있다. 이 점에 대해서는 5 장에서 모드 I의 파괴인성치와 비교하면서 다시 논의할 것이다.

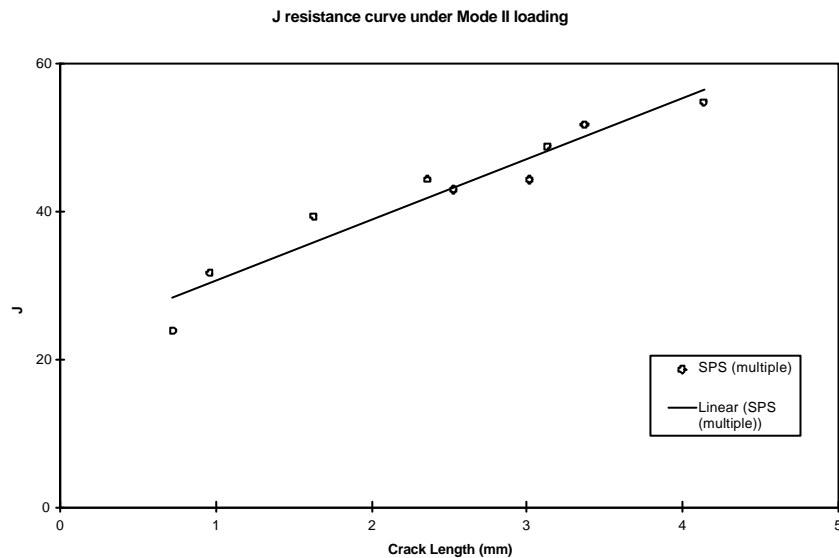


Fig. 4 J resistance Curve for Mode II (SPS) Loading

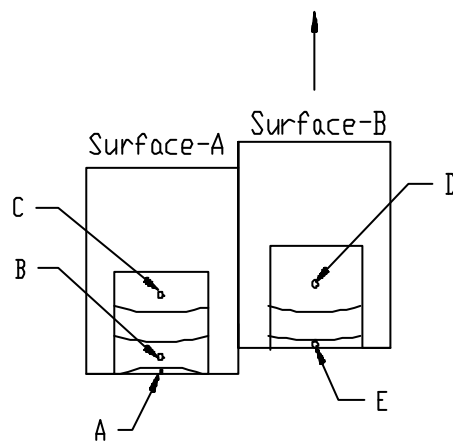


Fig. 5 Fractographic Observation Location

4. Fractography

Fig. 5는 SPS 시험편의 파단면에서 SEM 관찰을 행한 위치를 도식적으로 표시한 그림이다. Surface-A는 고정된 시험편의 파단면을 나타내고 있으며, Surface-B는 순수전단 하중이 작용해서 변위 이동한 쪽의 파단면을 나타내고 있다. 접촉에 의한 마찰 영향이 없는 순수 전단 하중이 작용한 A 지점은 매우 밝고 매끄러운 경면을 관찰할 수 있다 (Fig. 6-a). B와 C 지점은 각각 E와 D 지점과 대응하는 지점이다 (Fig. 6-b~e). Fig. 6으로부터 A 지점을 제외한 모든 곳에서 Shear dimple이 관찰되었다. Shear 덤플은 포물선의 모양을 나타내고 있으며, 미소 결함에 작용하는 전단응력에 의해 생성된다. B와 C 지점의 Shear Dimple과 D와 E 지점의 Shear Dimple은 각각 작용한 응력과 같은 방향성을 갖는다 [5]. 따라서 B와 C 지점과 D와 E 지점은 서로 반대의 방향성을 보여주고 있다.

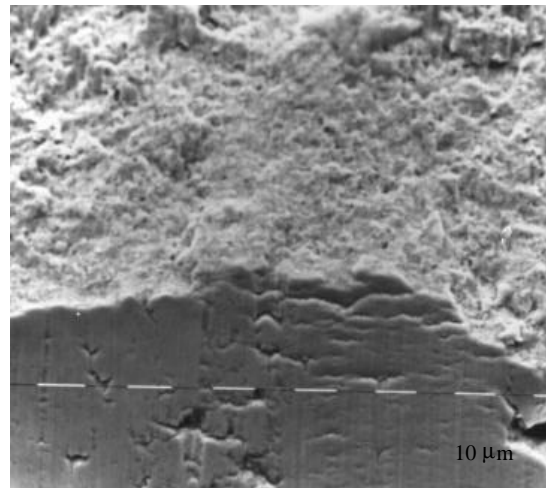
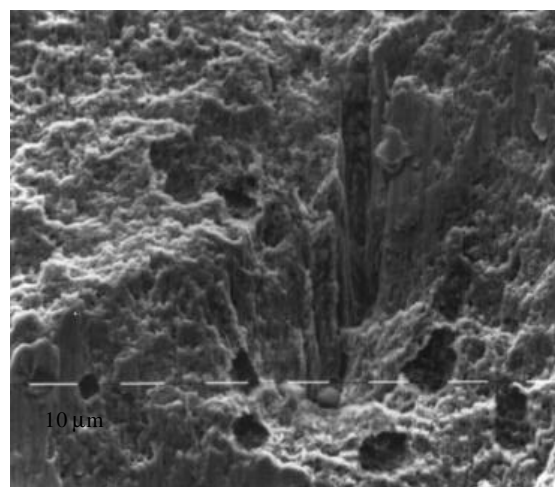
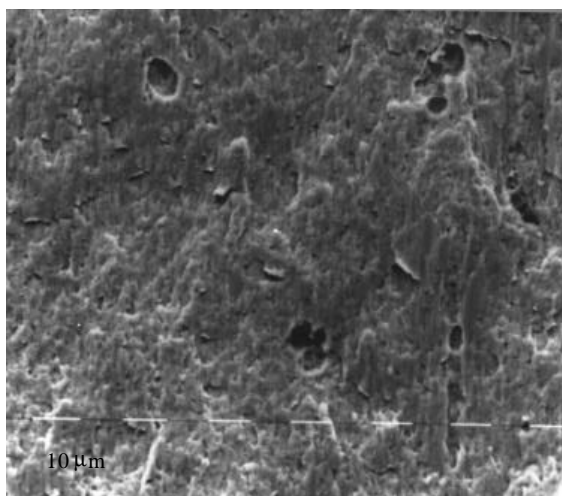


Fig. 6 (a) Mirror Fracture Surface at Location A



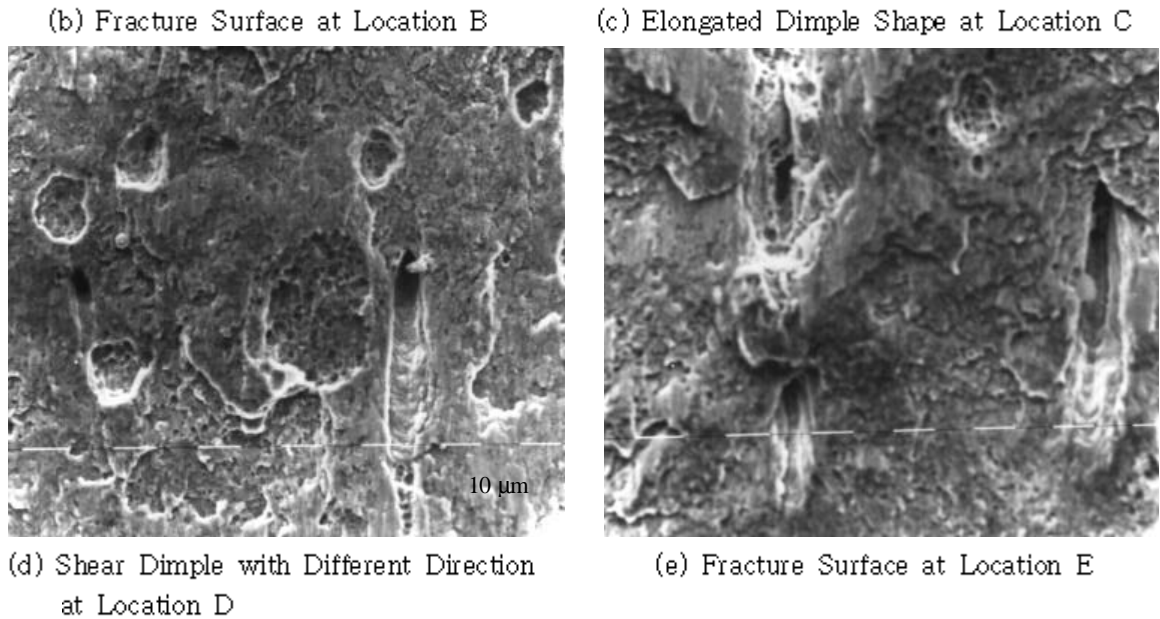


Fig. 6 Fracture Surface Fractographs of SPS Specimen under Mode II Loading

5. 논 의

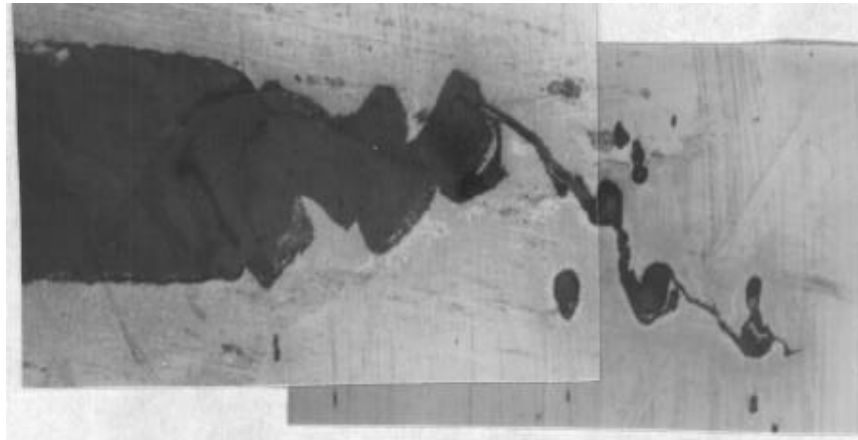
연성재료의 파괴 기구 (Fracture Mechanism)는 아직도 철저히 규명되지는 않고 있다. 파단면으로부터 얻은 미시학적 정보들은 파괴의 기본 메카니즘을 이해하는데 많은 도움을 준다. SEM에 의한 Fractograph들은 파괴의 기본 메카니즘과 원인의 규명을 가능하게 하여준다. 본 연구에서는 모드 I에서의 특성과 비교 검토함으로써, 모드 II하에서의 파괴 기구를 이해하며, 순수 모드 II의 연성파괴 특성을 더 잘 이해하고자 한다.

5-1 모드 I과 모드 II 하에서의 미시학적 비교

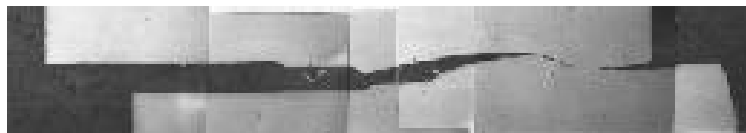
Fig. 7 (a)는 연성재료가 모드 I하에서 미소결합의 생성과 결합에 의해서 크랙이 진전하는 것을 보여주는 크랙 프로파일이다. A533B 압력용기강 같은 연성재료는 MnS와 같은 제2상에서의 국부적인 높은 응력 집중이 발생하는 부분으로부터 미소결합이 생성한다. 인장 응력이 증가함에 따라 미소결합의 생성과 성장, 그리고 결합에 의해서 결국에는 연속적인 파단면인 크랙을 형성한다. Fig. 7 (b)는 모드 II하에서의 크랙 진전을 보여주는 크랙 프로파일이다. 모드 II의 경우에도 미소결합에서의 전단응력에 의한 응력집중으로 인해 미소결합의 cleavage를 유발한다. 하지만 모드 I하에서의 크랙 전파 전제 조건인 blunting 대신에 모드 II하에서는 크랙 선단이 예리해지면서 Microvoid Sheeting Mechanism에 의해 급작스러운 파단이 발생한다. 이것은 모드 I하에서는 크랙 진전을 위해 많은 에너지를 요하지만, 모드 II하에서는 어느정도의 에너지를 사용하여 일단 크랙이 발생하면 빠른 파괴가 일어나는 취성파괴와 유사한 특성을 나타낸다. 그러나 이것은 취성재료의 취성 파괴와는 다른 연성재료의 미소결합의 생성과 성장 및 결합에 의한 미시적 파괴 기구의 특성으로 해석될 수 있다.

Fig. 8은 모드 I 하에서의 덤플과 모드 II하에서의 덤플의 특성을 비교하였다. Fig. 8(a)의 모드 I의 덤플 모양은 원형에 가까우며, Fig. 8(b)의 모드 II의 덤플 모양은 타원형으로 길게 늘어난 모양의 Shear dimple의 특성을 보여주고 있다. 모드 I의 덤플의 크기가 모드 II의 덤플의 크기보다 큰 것을 알 수 있으며, 이것은 모드 I하에서의 연성파괴시 모드 II하에서의 연성파괴보다

더 많은 에너지를 필요로 한다는 것을 설명해 주고 있다.

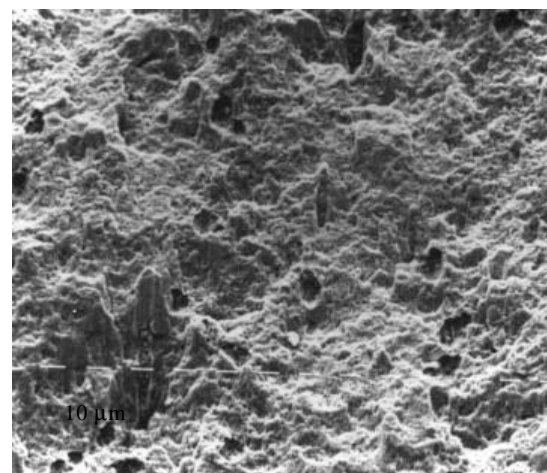
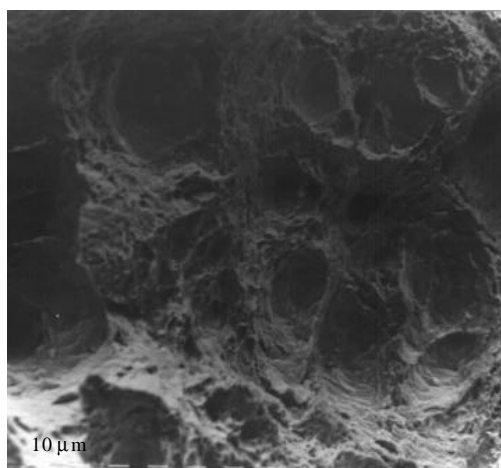


(a) Microvoid nucleations and coalescences under Mode I Loading



(b) Microvoid Sheetting Mechanism under Mode II Loading

Fig. 7 Comparison of Crack Profile between Mode I and Mode II Loading



(a) Circular Dimple under Mode I Loading (b) Elongated Dimple under Mode II Loading

Fig. 8 Comparison of Dimple Shape between Mode I and Mode II Loading

5-2 모드 II하에서의 크랙 길이

모드 I하에서는 한 개의 파단면이 만들어지지만, 모드 II하에서는 두 개의 파단면이 동시에 생성된다 (Fig. 9). 따라서 파괴인성치의 계산시에 모드 I에서는 지금까지 사용하였던 한 개의 크랙 길이를 고려하면 되었지만, 모드 II하에서는 양쪽의 크랙 전파를 고려하여 모드 II의 진정한 크랙 길이는 $a+b$ 가 되는 것이 합리적이다(Fig. 9(b)). 이 새로운 정의의 크랙 길이를 사용하면, 전에 구하였던 모드 II하에서의 파괴인성치는 더욱 작아진다.

Fig. 10은 모드 I하에서의 J - R curve와 모드 II하에서의 J - R curve를 비교한 것이다. \circ 는 SPS 시험에 의한 모드 II의 파괴인성치이며, \blacklozenge (SECB-25:Single), \blacksquare (SECB-50:Single), \triangle (V-Notch:Multi), \blacktriangle (SEBN:Multi) 등은 같은 재료의 모드 I하에서의 파괴인성치를 나타내고 있다 [6]. 모드 II하에서의 J - R curve는 모드 I의 것에 비해 매우 작은 값을 보여주고 있다. 하지만 이런 경향은 SEM에 의한 덤플의 미시적 관찰의 결과와 같은 경향을 나타내고 있다. 여기서 구한 모드 II의 파괴인성치는 위에서 언급한 새로운 크랙의 정의에 의해서 구한 것이다.

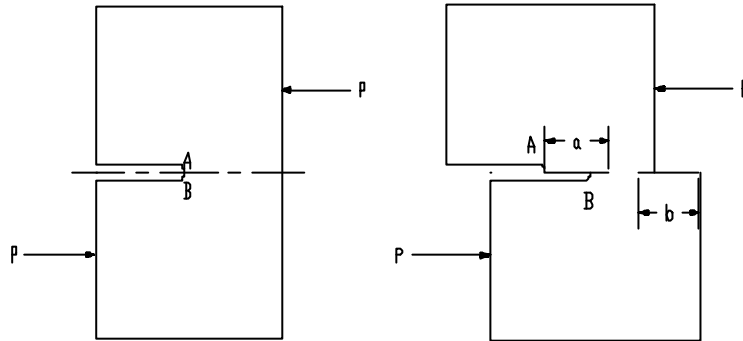


Fig. 9 Definition of Crack Length for SPS Specimen under Mode II Loading

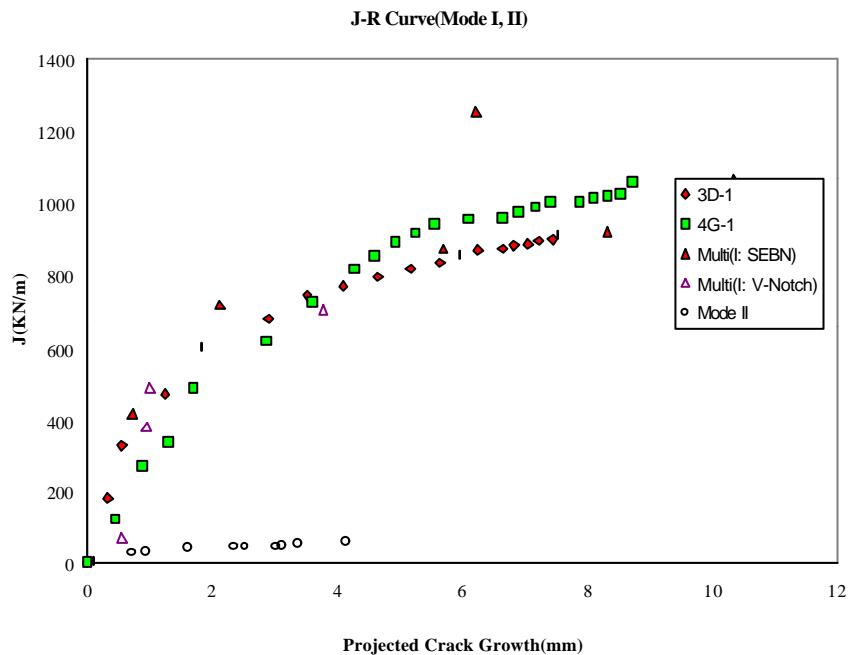


Fig. 10 Comparison of J - R Curves between Mode I and Mode II Loading

6. 결 론

A533B 압력용기강을 사용하여 순수모드 II하에서의 연성파괴 특성을 조사하기 위하여 Single Punch Shear Test와 Fractography를 이용한 미시적 관찰을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모드 II하에서의 연성재료의 파괴인성치는 모드 I하에서의 파괴인성치보다 훨씬 낮았다. 이것은 SEM의 관찰에 의해 모드 I하에서의 덩플의 크기가 모드 II하에서의 덩플의 크기보다 크다는 사실과 일치하는 경향을 나타내었다.

(2) Fractography를 이용하여 모드 II에서의 연성파괴 기구가 미소결함의 생성과 결합에 의한 Microvoid Sheeting Mechanism인 것을 확인할 수 있었다. 덩플의 모양은 포물선과 같이 늘어난 Shear dimple이었으며, 전단 하중이 작용한 것과 같은 방향성이 있는 것으로 관찰되었다.

참고 문헌

- [1] L. Miles and D.N. Gladwin, (1991) "Evaluation of Mode II Fracture Toughness Using Single Punch Specimen" *Memorandum (TD/SIP/MEM/1216/91)* Nuclear Electric, UK
- [2] G. Green and L. Miles, (1983) "Use of J -Integral Estimation Techniques to Determine Critical Fracture toughness in Ductile Steels" in *Elastic-Plastic Fracture*, ASTM STP 803, pp. 1458-1479
- [3] J.D.G. Sumptner and C.E. Turner, (1976) "Method for Laboratory Determination of J_c " in *Crack and Fracture*, ASTM STP 601, pp. 3-18
- [4] J.D. Landes and J.A. Begley (1972) "The J Integral as a Fracture Criterion" ASTM STP 514, pp. 1-20
- [5] E.E. Underwood et al. "Quantitative Fractography," *ASM Metals Handbook 12 Fractography (9th Ed.)* pp. 193-210
- [6] D.J. Oh, (1999) "Ductile Fracture Behaviour under Mixed Mode Loading (I/II)," in *PhD thesis, University of Sheffield*