

< 논문 >

소형펀치 시편을 이용한 원자력 재료의 파괴저항곡선 예측

장윤석* · 김종민* · 최재봉* · 김영진† · 김민철** · 이봉상**

(2006년 7월 12일 접수, 2006년 11월 15일 심사완료)

Estimation of Fracture Resistance Curves of Nuclear Materials Using Small Punch Specimen

Yoon-Suk Chang, Jong-Min Kim, Jae-Boong Choi, Young-Jin Kim, Min-Chul Kim and Bong-Sang Lee

Key Words : Damage Model(손상모델), Ductile Fracture(연성파괴), Fracture Resistance Curve(파괴저항곡선), Small Punch Specimen(소형펀치 시편)

Abstract

Elastic-plastic fracture mechanics is popularly used for integrity evaluation of major components, however, it is not easy to extract standard specimens from operating facility. This paper examines how ductile fracture toughness is characterized by a small punch testing technique in conjunction with finite element analyses incorporating a damage model. At first, micro-mechanical parameters constituting Rousselier model are calibrated for typical nuclear materials using both estimated and experimental load-displacement ($P-\delta$) curves of miniaturized specimens. Then, fracture resistance ($J-R$) curves of relatively larger standard CT specimens are predicted by finite element analyses employing the calibrated parameters and compared with corresponding experimental ones. It was proven that estimated results by the proposed method using small punch specimen is promising and might be used as a useful tool for ductile crack growth evaluation.

1. 서 론

국내의 원자력발전소는 가동년수 증가에 따라 점차 노후화되고 있으므로 방사성물질 차폐경계인 고에너지 배관, 원자로 압력용기, 가압기, 증기발생기와 같은 주요 기계설비의 지속적인 건전성 확보에 필요한 다양한 공학적 분석이 요구된다.⁽¹⁾ 대표적인 예로 균열의 발생 및 성장과 관련하여 재료의 파괴저항 특성에 근거한 일련의 평가를 들 수 있다.⁽²⁾ 그러나 운전중인 설비에서 충분한 크기의 표준시편을 채취하는 것은 현실적으로 거의 불가능하거나 극히 제한적일 수 밖에 없기 때문에, 소형시편을 이용한 효율적인 시험법의 개발 필요성이 부각되었다.

소형펀치(small punch) 시험은 조사취화(irradiation embrittlement) 등에 기인한 물성치 변화를 평가하기 위해 고안되었으며, 운전설비의 강도에 영향을 미치지 않는 작은 영역에서도 시편의 채취가 가능하므로 여러 분야에 활용될 수 있다. Baik 등⁽³⁾과 Kameda 등^(4,5)은 소형펀치 시험을 통해 온도별 하중-변위 곡선으로부터 에너지를 구하고, 이를 연성-취성 전이온도 평가에 이용하였고 Mao 등^(6,7)은 소형펀치 시편의 등가변형률과 파괴인성(J_{IC}) 사이의 실험적 관계식을 결정하였다. 또한, 나노결정립 재료의 강도특성 및 크립특성 평가도 일부 수행된 바 있다.^(8,9) 이러한 선행연구들은 주로 장치기술의 개발과 벽개파괴(cleavage fracture) 매개변수와의 상관관계 도출 또는 파손형태 규명을 위한 미시적 분석에 주안점을 둔 것으로써, 안정균열성장(stable crack growth) 평가와 관련된 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구의 목적은 소형펀치 시편을 사용하여 재료의 파괴저항 특성을 예측하기 위한 것이다. 이를 위해 먼저 4가지 원자력 소재에 대한 소형펀치 실험

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail: yjkim50@skku.edu
TEL: (031)290-5274 FAX: (031)290-5276

* 성균관대학교 기계공학부
** 한국원자력연구소 원자력재료기술개발부

Table 1 Chemical composition of nuclear materials (wt%)

Material	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Al
Low alloy steel (Y5)	0.210	1.360	0.007	0.002	0.240	0.920	0.210	0.490	0.030	.	0.005
High Cr steel (G91)	0.091	0.395	0.019	0.0003	0.314	0.093	8.916	0.915	0.093	0.035	0.026
Stainless steel (316L)	0.020	1.050	0.024	0.005	0.570	10.38	16.96	2.110	0.190	0.033	.
Stainless steel (321)	0.049	1.390	0.026	0.001	0.610	9.200	17.19	0.110	0.170	0.008	.

및 손상모델(damage model)과 연계한 탄소성 유한요소 해석을 수행하고, 두 결과를 비교하여 재료별 손상역학 매개변수를 결정한다. 다음 단계에서는 결정된 매개변수를 반영하여 파괴역학 평가에 필요한 표준 CT(compact tension) 시편의 *J-R* 곡선(fracture resistance curve) 예측 방법과 결과를 제시한다. 끝으로 표준 CT 시편에 대한 실제 파괴저항 실험 데이터와의 비교를 통해 본 연구에서 채택한 방법론과 예측결과의 타당성을 확인하고자 한다.

Table 2 Mechanical properties of nuclear materials

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Low alloy steel (Y5)	400	596
High Cr steel (G91)	480	687
Stainless steel (316L)	255	608
Stainless steel (321)	100	600

2. 소형펀치 실험

2.1 재료 및 시편

원전 주요기기 제작용 소재로 널리 사용되고 있는 저합금강(Y5), 고크롬강(G91), 2종의 스테인리스강(316L, 321)을 대상으로 연구를 수행하였다. 재료별로 10×10×0.5 mm 크기의 소형펀치 시편을 2개씩 제작하였으며, 이때 두께 허용오차는 ±0.01 mm로 하였다. Table 1은 4가지 재료의 화학조성을 나타낸 것이며, Table 2는 본 연구에서 실제 인장실험을 통해 구한 항복강도(σ_{ys}) 및 인장강도(σ_t)를 정리한 것이다.

2.2 시험장치 및 실험방법

Fig. 1은 소형펀치 시험장치의 개략도를 나타낸 것으로, 시편의 고정장치(holder)는 상/하부 다이(die)와 4개의 나사로 구성하였다. 시편을 고정장치 중앙부에 위치시킨 후 축 일치를 위해 펀처(puncher)가 상부다이의 홈을 통하여 선단의 볼(ball)을 누름으로써 시편에 하중을 가하도록 하였다. 볼은 HRC 62~67의 경도를 갖는 지름 2.4 mm의 강구를 사용하였으며, 하부다이 구멍의 직경은 시편이 홈 안쪽 벽에 접촉되어 생기는 마찰력을 받지 않고 변형이 일어날 수 있도록 설계하였다. 변위는 고정장치에 접촉된 LVDT(linear variable displacement transducer) 센서로 측정하였고, 변형속도는 1 mm/min로 설정하였다. 시험은 최대하중으로부터 약 30%의 하중감소가 발생하는 시점에서 종료하였으며, 이때까지의 데이터로부터 하중-변위(*P-δ*) 곡선을 구하였다.

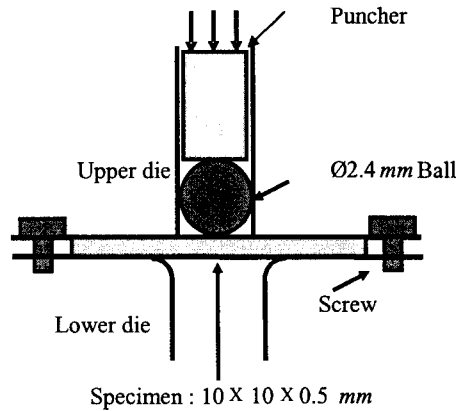
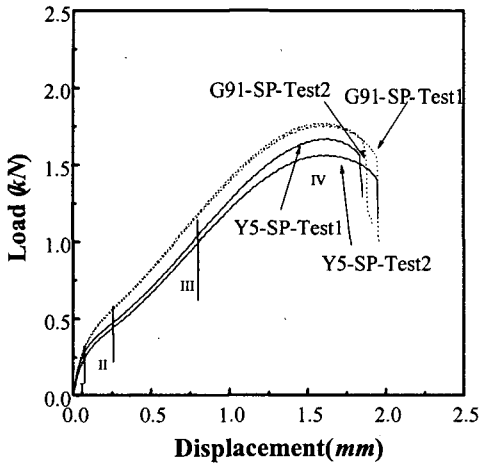


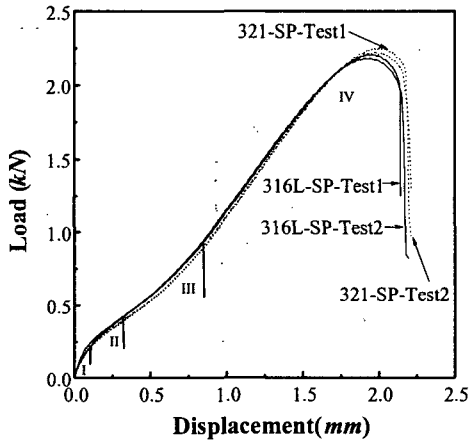
Fig. 1 Schematic drawing of small punch test facilities

2.3 시험결과 분석

Fig. 2는 소형펀치 시험으로 구한 *P-δ* 곡선을 나타낸 것이다. 재료별로 다소의 차이는 있으나 기존 연구결과^(3,6)와 유사하게 탄성굽힘 영역(elastic bending region, I), 소성굽힘 영역(plastic bending region, II), 소성막신장 영역(plastic membrane stretching region, III), 소성불안정 영역(plastic instability region, IV) 등 전형적인 4가지 영역을 확인할 수 있었다. 먼저 탄성굽힘 영역에서는 선형적인 초기 탄성변형이 발생하게 되고, 소성굽힘 영역에서는 하중증가에 따라 항복되는 부분이 계속적으로 확대되어 선형성을 상실하게 된다. 이후 소성굽힘 영역을 지나면 시편과 볼의 접촉면적이 증가하여 하중 지지능력이 커지게 되는 소성막신장 영역이 나타나고, 변형모드가 굽힘변형(bending deformation)에서 늘임변형(stretching deformation)으



(a) Low alloy and high Cr steels



(b) 316L and 321 stainless steels

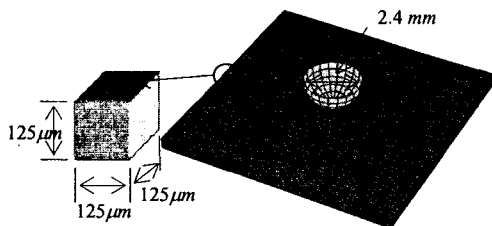
Fig. 2 Experimental P - δ curves of small punch specimens

Fig. 3 FE mesh of small punch specimen

로 전이된다. 마지막으로 시편의 두께가 국부적으로 감소되고 하중이 저하되는 소성불안정 영역이 나타남을 볼 수 있는데, 이는 미세균열이 발생하여 원주방향으로 전파되기 때문인 것으로 판단된다.

3. 소형펀치 해석

3.1 수치해석 모델 및 방법

마이크로 역학적인 관점에서 볼 때, 재료의 개재물 주변에 공극이 생성되고 성장과 합체를 거쳐 균열이 진전하게 된다.⁽¹⁰⁾ 이러한 현상을 모의하기 위해 임계 변형률이나 임계 공극체적비율(void volume fraction)과 같은 국부 파손기준을 포함하는 다수의 손상모델⁽¹¹⁻¹³⁾이 제시되어 왔으며, 대부분의 경우 매개변수의 결정을 위해 실험과 수치해석을 병행하는 방법이 사용된다.⁽¹⁴⁾

본 절에서는 소형펀치 시편에 대해 손상모델과 연계한 탄소성 유한요소해석을 수행하고, 여기서 얻은 수치해석 결과를 상응하는 실험 데이터와 비교하여 재료별 매개변수를 결정하였다. 해석도구로는 ABAQUS⁽¹⁵⁾를 사용하였으며, 손상모델의 경우 다음과 같은 항복 포텐셜(yield potential, Φ)로 표현되는 Rousselier 모델⁽¹⁶⁾을 채택하였다.

$$\Phi = \frac{\sigma_{eq}}{\rho} + D \cdot \sigma_1 \cdot f \cdot \exp\left(\frac{\sigma_m}{\rho \sigma_1}\right) - R(\varepsilon_{eq}^p) = 0 \quad (1)$$

여기서, f 는 공극체적비율, σ_1 과 D 는 마이크로 역학적 매개변수, σ_{eq} 는 등가 von Mises 응력, σ_m 은 정수압 응력, ρ 는 재료의 밀도, $R(\varepsilon_{eq}^p)$ 는 재료의 가공경화(work-hardening)를 나타낸다. 공극의 성장과 합체는 우변 두 번째 항으로 표현되고 있으며, 하중 지지능력이 상실되는 손상 영역의 크기로부터 균열 진전량을 결정할 수 있다. 손상모델을 구성하는 매개변수의 특징 등은 저자의 선행연구⁽¹⁷⁻¹⁹⁾에 제시되어 있으므로 생략하였다.

3.2 손상모델의 매개변수 결정

손상모델을 구성하는 매개변수의 결정은 상당히 중요하며, 본 연구에서는 실험과 2차원 또는 3차원 수치해석을 병행하는 방법을 채택하였다. Fig. 3은 소형펀치 시편의 3차원 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 8절점 등계수 사각주 요소(C3D8 in ABAQUS element library)를 사용하였으며, 균열선단의 요소망은 특이요소(singular element) 대신 균열면 수직방향으로 125 μ m 길이의 조밀한 사각형 요소로 구성하였다. 해석시 진응력-변형률 데이터에 기반을 둔 증분소성이론(incremental plasticity theory)과 대규모 변형률 해석(large strain analysis) 조건을 적용하였다. 볼과 시편 사이의 상호작용 및 상대운동을 고려하였으며(finite sliding option in

Table 3 Calibrated parameters of Rousselier model

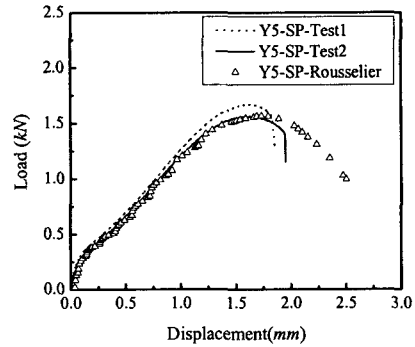
Material	σ_1	D	f_0	f_f
Low alloy steel (Y5)	430	1.0	0.0003	0.2
High Cr steel (G91)	1000	3.0	0.0003	0.2
Stainless steel (316L)	800	2.7	0.0001	0.15
Stainless steel (321)	1500	4.3	0.0004	0.15

ABAQUS), 접선방향의 고착-미끄럼 마찰거동 모사의 경우 벌칙마찰형식화(penalty friction formulation) 기법을 사용하여 접촉여부를 판단하였다. 시편보다 볼의 강성이 크기 때문에 볼의 접촉면을 지배 표면(master surface)으로, 시편의 접촉면을 종속표면(slave surface)으로 설정하였다. 또한 종속이 되는 시편의 요소망이 매우 조밀하게 구성되어 있으므로, 지배표면이 종속표면을 관통하는 등의 문제를 최소화할 수 있었다. 유한요소해석에 필요한 볼과 시편 사이의 마찰계수로는 실험값인 0.25를 사용하였으며, Rousselier 모델의 매개변수는 해석으로 구한 $P-\delta$ 곡선이 실험결과와 일치할 때까지 반복적 계산을 수행하는 시행착오법으로 결정하였다. Fig. 4는 4가지 소재에 대해 유한요소해석 및 실험으로 구한 $P-\delta$ 곡선을 비교한 것이며, $J-R$ 곡선 예측에 필요한 매개변수 값은 Table 3에 제시하였다. Table 3에서 f_0 는 초기공극체적비율(initial void volume fraction)이며 f_f 는 파단공극체적비율(fracture void volume fraction)이다.

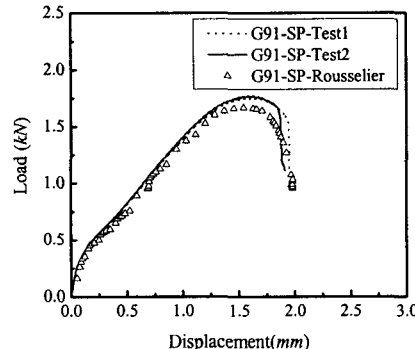
3.3 유한요소 해석결과 고찰

피로 예비균열 생성(fatigue pre-cracking) 후 측면홈(side-grooves)을 가공한 파괴역학 표준시편에 손상역학을 적용할 경우 2차원 평면변형률(plane strain) 해석 결과에 비해 3차원 유한요소해석 결과가 실험 데이터와 보다 잘 일치하는 것으로 보고된 바 있으며⁽²⁰⁾, 저자들에 의해서도 직접 확인된 사항이다. 이에 따라 2차원 축대칭 요소(CAX4 in ABAQUS element library)를 사용하여 구한 해석결과를 3차원 해석결과와 비교하였으나, 소형펀치 시편의 경우 유한요소 모델 변화에 따른 $P-\delta$ 곡선의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

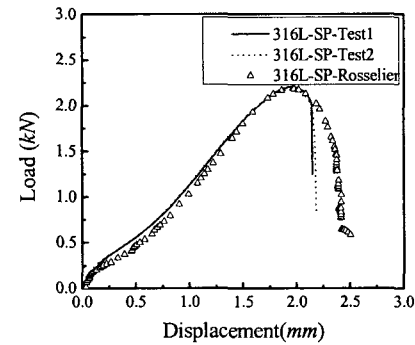
한편 Fig. 5는 2차원 해석 후 변형된 소형펀치 시편의 형상을 나타낸 것이다. 볼의 중심부에서 일정 거리 떨어진 위치에서 변형이 가장 심하게 발생함을 알 수 있으며, 이는 실험 후 표면관찰을 통해 확인한 미세균열 개시점과 대부분 일치하였다. 다만, 일부 해석으로 구한 $P-\delta$ 곡선이 최대하중점 이후 실험결과와 차이를 보이는 이유는 상이한 크기의 복수균열 진전 등에 기인한 것으로 생각된다.



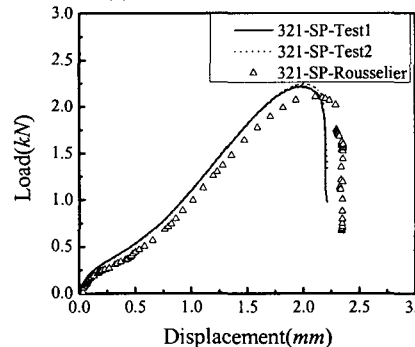
(a) Low Alloy steel



(b) High Cr steel



(c) 316L stainless steel



(d) 321 stainless steel

Fig. 4 Comparison of $P-\delta$ curves of small punch specimens

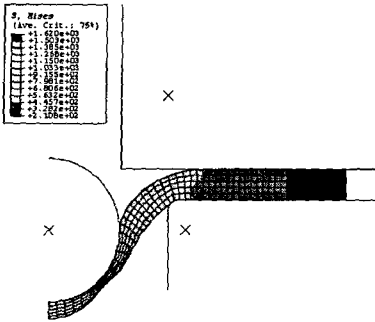
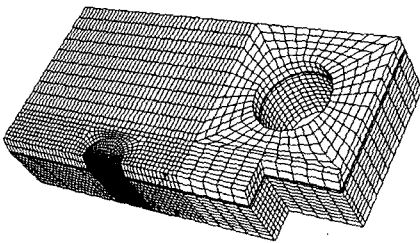
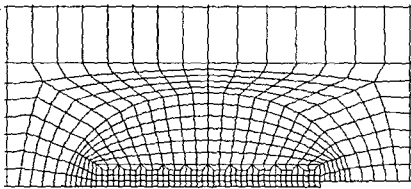


Fig. 5 Typical FE analysis results of small punch Specimen



(a) Quarter model considering symmetric condition



(b) Enlarged cell mesh in front of crack tip

Fig. 6 FE mesh of standard CT specimen

Table 4 Comparison of power law fitting constants of experimental *J-R* curves

Material	<i>J-R</i> _Test1		<i>J-R</i> _Test 2	
	C_1	C_2	C_1	C_2
Low alloy steel (Y5)	850	0.65	800	0.65
High Cr steel (G91)	800	0.65	840	0.68
Stainless steel (316L)	1250	0.65	1280	0.65
Stainless steel (321)	910	0.65	950	0.65

4. 파괴저항곡선 예측

4.1 파괴저항곡선 예측 방법

Fig. 6은 표준 CT 시편의 *J-R* 곡선 예측에 사용된 3차원 유한요소 모델을 도시한 것이다. 대칭성을 고려하여 전체 형상의 1/4만 모델링 하였으며, 요소

의 종류와 균열선단의 요소망 등은 소형편치 시편과 동일하게 설정하였다. *J*-적분은 일반적으로 경로적분(path integral) 또는 *P-δ* 선도의 아래 면적을 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 전자의 방법과 앞서 결정된 매개변수 값을 채택하여 하중 증가에 따른 *J*-적분값을 계산하였고 소성붕괴(plastic collapse)에 의한 영향을 배제하기 위해 시편 초기 리가먼트의 약 10% (2~3mm)정도까지 균열을 성장 시키고자 하였다.⁽²⁰⁾ 본 연구에서는 균열 선단부 요소의 공극체적비율(f_v)이 공극의 성장으로 인해 f_v 값에 도달할 때 요소의 강성을 0으로 변화시켜 균열 전진량을 모사하였으며, 잔여 응력들은 다음 스텝(step)에 증가의 힘으로 분산하였다. 이때 셀이 과단 공극체적비율에 도달한 이후 절점의 잔여 힘은 요소의 크기에 대한 선형적인 비율을 고려하여 균열면에 적용시키고, 이후 강성이 0에 도달하도록 하여 소성변형을 재분포를 고려하였다.^(21,22)

4.2 파괴저항곡선 측정 및 비교

소형편치 시편에 대한 실험 및 해석 결과를 기반으로 예측한 *J-R* 곡선의 타당성 확인을 위하여 표준 CT 시편에 대한 실험을 수행하였다. 시편의 치수는 25.4 mm(1 in)의 두께(*B*)와 50.8 mm(2 in)의 폭(*W*)을 비롯하여 모두 ASTM E1820⁽²³⁾에 따랐다. 또한 날카로운 균열 선단을 생성하기 위해 시편편의 무차원 균열길이(a_0/W)는 0.55가 되도록 피로 예비균열을 삽입하였으며, 두께의 20%에 해당하는 측면홈을 가공하여 균열의 직진성을 도모하였다. 파괴저항 시험시 단일시편을 이용한 제하 컴플라이언스법(unloading compliance technique)으로 *J-R* 곡선을 결정하였으며, 다음 식으로 곡선적합하여 매개변수 C_1 과 C_2 를 구하였다.

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln \left(\frac{\Delta a}{k} \right) \quad (2)$$

여기서, Δa 는 균열전진량 (mm 또는 in)이고 k 는 단위환산계수이다. 즉, 단위계에 따라 $k=0.1mm$ 또는 $0.0394in$ 의 값을 채택한다.

Table 4는 실험으로 구한 *J-R* 곡선의 매개변수를 정리한 것이며, Fig. 7은 예측한 *J-R*곡선과 실험으로 구한 *J-R*곡선을 비교한 것이다. 고크롬강과 316L 및 321 스테인리스강의 경우는 전 영역에 걸쳐 비교적 잘 일치하는 결과를 보이나 저합금강의 경우 *J-R*곡선의 초기부분에서 차이를 보였다. 이는 실험 데이터에 내재된 불확실성 또는 예측성의 오차에 기인한 것으로 생각할 수 있으나, 현재 각 재료별로 2개의 실험만을 수행하였기 때문에 향후 연구를 통해 보다 명확히 규명할 예정이다.

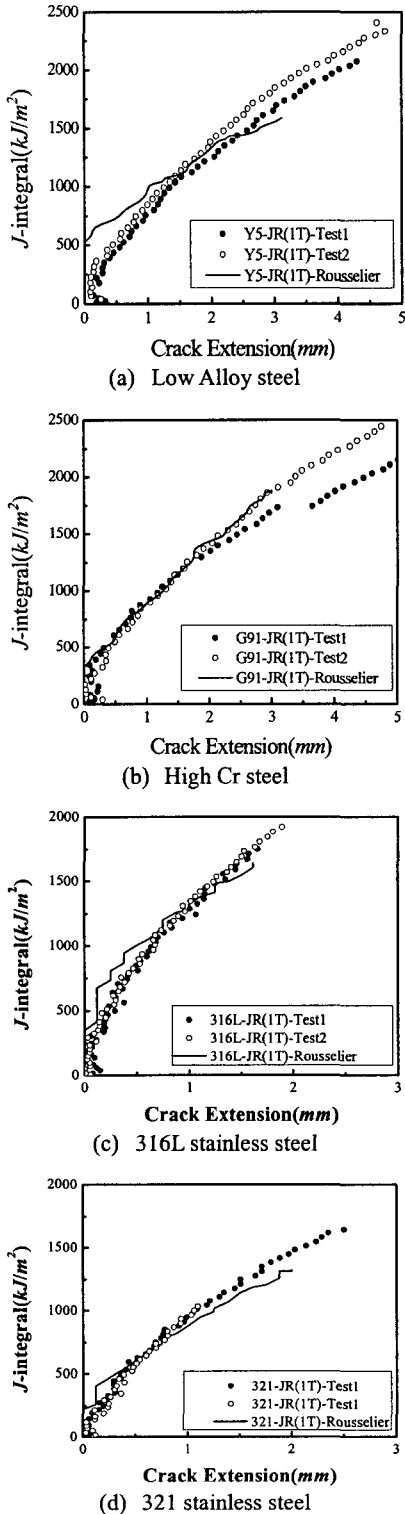


Fig. 7 Comparison of experimental and estimated $J-R$ curves of 1T-CT specimens

4.3 토의

저자들은 선행연구⁽¹⁷⁻¹⁹⁾에서 노치인장(notched bar tensile) 시편 또는 표준 CT 시편의 $P-\delta$ 곡선을 이용하여 손상모델의 매개변수를 결정하고, 이를 탄소강으로 제작된 다양한 형상의 시편에 적용하여 국부접근법의 효용성을 입증한 바 있다. 본 연구에서는 이전과는 달리 $10 \times 10 \times 0.5$ mm 소형편치 시편의 $P-\delta$ 곡선을 활용하였고, 국내 원전 주요기기 제작용 소재로 널리 사용되고 있는 저합금강, 고크롬강, 스테인리스강 등으로 대상을 확대하였다. 이로부터 안정균열성장 평가에 필요한 $J-R$ 곡선을 효과적으로 예측할 수 있었으며, 그 타당성은 Fig. 7에서 입증되고 있다.

한편 제시한 방법은 표준시편의 채취가 어려운 운전설비의 건전성 평가에 적합하다. 대표적인 예로, 중화학산업에 있어 필수설비인 고에너지 배관의 파단전누설(leak-before-break) 평가를 들 수 있으며, 확보가 극히 제한적일 수 밖에 없는 원자로 용기 감시시편(reactor vessel surveillance coupon)의 경우 특히 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 건전제의 상온 $J-R$ 곡선 예측이라는 가장 단순한 내용만을 다루었으나, 고온 및 방사선조사 등 실제 가동이력을 동일한 실험 및 예측 절차에 무리 없이 반영할 수 있으므로 향후 현장적용도 충분히 가능할 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 저합금강(Y5), 고크롬강(G91), 2종의 스테인리스강(316L, 321) 등 원자력 소재를 대상으로 $J-R$ 곡선을 예측하였으며, 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 소형편치 시편에 대한 실험 및 해석 결과를 기반으로 Rousselier 모델을 구성하는 매개변수를 결정하였으며, 이때 2차원 또는 3차원 모델 채택에 따른 영향은 거의 없었다.
- (2) 소형편치 시편에서 결정된 매개변수를 표준 CT 시편에 적용하여 구한 $J-R$ 곡선은 실험결과와 비교적 잘 일치하였다.
- (3) 소형편치 시편을 이용한 본 연구방법은 향후 시편 채취에 제약이 있는 운전설비 주요기기의 파괴역학 평가에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 한국원자력연구소 및 성균관대학교의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, J.S., Chang, Y.S., Jin, T.E. and Jeong, I.S., 2000, "Development Process of Aging Management Programs for Major SSCs of a PWR Plant," *12th Int. Conference on Pacific Basin Nuclear Conference*, pp. 1301~1308.
- (2) Chang, Y.S. and Jin, T.E., 2002, "Fracture Mechanics Evaluation Considering Thermal Aging Embrittlement," *JSME/ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Vol. 443-2, pp. 119~124.
- (3) Baik, J.M., Kameda, J. and Buck, O., 1983, "Small Punch Test Evaluation of Intergranular Embrittlement of an Alloy Steel," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 17, pp. 1443~1447.
- (4) Kameda, J. and Mao, X., 1992, "Small-Punch and TEM-Disc Testing Techniques and Their Application to Characterization of Radiation Damage," *Journal of Materials Science*, Vol. 27, No. 4, pp. 983~989.
- (5) Kameda, J., Bloomer, T.E., Sugita, Y., Ito, A. and Sakurai, S., 1997, "High Temperature Environmental Attack and Mechanical Degradation of Coatings in Gas Turbine Blades," *Materials Science and Engineering*, Vol. A229, No.1, pp. 42~54.
- (6) Mao, X., Shoji, T. and Takahashi, H., 1991, "Small Punch Test to Predict Ductile Fracture Toughness J_{IC} and Brittle Fracture Toughness K_{IC} ," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 25, No. 11, pp. 2481~2485.
- (7) Mao, X., Takahashi, H. and Kodaira, T., 1991, "Estimation of Mechanical Properties of Irradiated Nuclear Pressure Vessel Steel by Use of Sub-sized CT Specimen and Small Punch Specimen," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 25, No. 11, pp. 2487~2490.
- (8) Ma, Y.W, Choi, J.W. and Yoon, K.B., 2005, "Assessment of Strength Characteristics of Al2024 Nanocrystalline ECAP Metal by Small Punch Testing," *KSME Spring Annual Meeting*, pp. 344~350.
- (9) Ule, B. Sustar, T., Dobes, F., Milicka, K., Bicego, V., Tettamanti, S., Maile, K., Schwarzkopf, C., Whelan, M.P., Kozlowski, R.H. and Klaput, J., 1999, "Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components: Outcomes from an Interlaboratory Exercise," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 192, No. 1, pp. 1~11.
- (10) Wilsdorf, H.G.F., 1983, "The Ductile Fracture of Metals: a Microstructural Viewpoint," *Materials Science and Engineering*, Vol. 59, pp. 1~19.
- (11) Gurson, A.L., 1977, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part 1 – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *Journal of Engineering Material and Technology*, Vol. 99, pp. 2~15.
- (12) Tvergaard, V., 1982, "On Localization in Ductile Materials Containing Spherical Voids," *International Journal of Fracture*, Vol. 18, No. 4, pp. 237~251.
- (13) Bernauer, G. and Brocks, W., 2002, "Micro-Mechanical Modeling of Ductile Damage and Tearing – Results of a European Numerical Round Robin," *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 363~384.
- (14) Needleman, A. and Tvergaard, V., 1984, "An Analysis of Ductile Rupture in Notched Bars," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 32, No. 6, pp. 461~490.
- (15) ABAQUS Ver. 6.4, 2004, "User's Manual," Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.
- (16) Rousselier, G., 1987, "Ductile Fracture Models and Their Potential in Local Approach of Fracture," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 105(1), pp. 97~111.
- (17) Chang, Y.S., Lee, T.R., Choi, J.B. and Kim, Y.J., 2004, "Assessment of Geometry Independent Fracture Resistance Characteristics Based on Local Approach," *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300, pp. 2403~2409.
- (18) Chang, Y.S. Lee, T.R., Choi, J.B., Seok, C.S. and Kim, Y.J., 2006, "Assessment of in-Plane Size Effect of Nuclear Materials Based on Damage Mechanics," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 30, No. 4, pp. 393~401.
- (19) Chang, Y.S. Lee, T.R., Choi, J.B., Seok, C.S. and Kim, Y.J., 2006, "Evaluation of Crack Length and Thickness Effects of Fracture Specimen Using Damage mechanics," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 116~123.
- (20) Gao, X., Faleskog, J., Shih, C.F. and Dodds, R.H., 1998, "Ductile Tearing in Part-Through Cracks : Experiments and Cell-Model Predictions," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 59, No. 6, pp.761~777
- (21) Gullerud, A.S., Gao, X., Dodds, R.H. and Haj-Ali, R., 2000, "Simulation of Ductile Crack Growth Using Computational Cells: Numerical Aspects," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 66, pp. 65~92.
- (22) Tvergaard, V., 1982, "Influence of Void Nucleation on Ductile Shear Fracture at a Free Surface," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 30, pp.399~425.
- (23) ASTM E1820, 2001, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," Annual book of ASTM standards.