

〈論 文〉

원자력 배관재료의 파괴저항곡선 예측

장운석* · 석창성** · 김영진***

(1994년 12월 20일 접수)

Prediction of Fracture Resistance Curves for Nuclear Piping Materials

Yoon-Suk Chang, Chang-Sung Seok and Young-Jin Kim

Key Words : Leak Before Break (LBB : 파단전누설), J-R Curve(파괴저항곡선), Fracture Strain (파괴변형률), Generalized Locus Method(일반궤적법), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

In order to perform leak-before-break design of nuclear piping systems and integrity evaluation of reactor vessels, full stress-strain(σ - ϵ) curves and fracture resistance(J-R) curves are required. However it is time-consuming and expensive to obtain J-R curves experimentally. The objective of this paper is to develop two methods for J-R curve prediction. In the first method, elastic-plastic finite element analyses for a series of crack length/specimen width ratio were performed. Accordingly the load versus load line displacement(P - δ) curve corresponding to the fracture strain is obtained and the J-R curve based on the generalized locus method is obtained. In the second method, the correlation between σ - ϵ curves and J-R curves was statistically analyzed and an empirical equation to predict the J-R curve from the σ - ϵ test result is proposed. A good correlation between the predicted results based on the proposed methods and the experimental ones is obtained.

————— 기 호 설 명 —————

a : 균열길이
 a_0 : 피로예비균열의 길이
 Δa : 균열진전량
 B : 시편두께
 b_0 : 시편의 잔여길이
 C_1, C_2 : 파괴저항곡선의 상수
 ϵ_c : 파괴변형률
 ϵ_{FEM} : 유한요소법으로 구한 균열선단의 변형률
 $\epsilon_{c, FEM}$: ϵ_{FEM} 의 임계값
 G : 균열진전 저항력

J : J-적분값
 S_f : 유동응력
 S_y : 항복강도
 S_u : 인장강도
 U : P - δ 곡선, 궤적선 및 변위축으로 둘러싸인 면적
 W : 변형에너지 밀도
 η : 시편형상에 따른 계수

1. 서 론

원자력 발전소 배관시스템의 파단전누설(leak before break : LBB) 설계와 파괴인성값이 낮은 원자로 압력용기의 파괴거동 해석에는 J-적분에 근거

*정회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

**정회원, 성균관대학교 기계공학과

***정회원, 성균관대학교 기계설계학과

한 탄소성 파괴역학(elastic plastic fracture mechanics: EPFM)이 널리 적용되고 있다. EPFM 해석에는 재료의 응력-변형률(σ - ϵ)곡선과 파괴저항(J - R)곡선이 필요하다. 그러나 실험을 통해 J - R 곡선을 얻는 과정에서 많은 시간과 비용이 요구된다. 또한 원자로 압력용기 감시시편이나 초창기에 설계되어 운전중인 원자력발전소의 경우는 시편의 채취 및 확보가 제한적이거나 불가능하여 EPFM 적용의 애로사항으로 대두되고 있다.

1960년대 후반부터 비교적 용이하게 구할 수 있는 재료의 인장특성으로부터 파괴저항 특성을 예측하기 위한 연구가 몇몇 연구자들에 의해 시도된 바 있다. Hahn과 Rosenfield⁽¹⁾는 응력-변형률시험 결과로부터 탄성 파괴인성치 K_{Ic} 를 예측할 수 있는 식을 제시하였고, Rolfe와 Novak⁽²⁾은 Charpy 충격시험의 최대 흡수 에너지(Charpy upper shelf energy: USE)를 이용하여 K_{Ic} 를 예측하는 실험식을 제시하였으며, Kussmaul과 Roos⁽³⁾는 원자로 압력용기 재료의 충격에너지(Charpy V-notch energy)로부터 탄소성 파괴인성치 J_{Ic} 를 예측하는 실험식을 제시하였다. 1980년대 중반 이후부터는 J -적분과 찢김계수 T 에 근거하여 J/T 해석법 등에서 사용되는 J - R 곡선을 예측하고자 하는 시도⁽⁴⁾가 이루어져 왔으며, 현재 미국원자력규제위원회(United States Nuclear Regulatory Commission: USNRC)에서 추진하고 있는 제2차 배관건전성 국제공동연구 프로그램⁽⁵⁾에서도 이 문제를 다루고 있지만, 아직 명확한 해결방안은 확립되지 않은 상태이다.

본 논문의 목적은 원자력 배관재료의 J - R 곡선을 예측할 수 있는 2가지 방법을 제시하는 것이다. 첫 번째 방법에서는 균열길이/시편폭 비(a/W)를 변수로 한 유한요소해석을 수행하여 하중-하중선변위(P - δ)곡선을 얻고, 이 결과로부터 일반계적법(generalized locus method)⁽⁶⁾을 응용한 J - R 곡선을 구하였다. 두 번째 방법에서는 σ - ϵ 곡선과 J - R 곡선의 상관관계를 통계처리하여 응력-변형률시험 결과로부터 J - R 곡선을 예측할 수 있는 실험식을 제시하였다. 이 과정에서 원자력발전소 배관용 재료인 SA106 Gr. C 탄소강의 재료물성치를 사용하였다.⁽⁷⁾

2. 이 론

2.1 파괴변형률과 J - R 곡선의 관계

파괴변형률(fracture strain, ϵ_c)은 재료의 응력-변

형률시험시 단면수축(necking) 후 파단될 때, 파단되기 직전의 변형률로 정의될 수 있다. 그러나 ϵ_c 의 직접적인 측정이 어렵기 때문에 다음과 같이 응력-변형률시험 전후의 시편의 직경을 이용하여 간접적으로 ϵ_c 를 결정할 수 있다.

$$\epsilon_c = 2 \ln(d_o/d) \quad (1)$$

한편, Rice⁽⁸⁾에 의해 제안된 J -적분식은 다음과 같다.

$$J = \int_{\Gamma} (Wdy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (2)$$

여기서, Γ 는 2차원 변위장내의 임의의 적분경로로서 반시계방향으로 설정되며, T 는 Γ 상에서의 외향 법선응력벡터, u 는 변위벡터, ds 는 적분경로상의 미소길이, W 는 변형에너지 밀도(strain energy density)이다. 균열이 둔화되어 둥글게 된 균열선단으로 적분경로(Γ_i)를 잡으면 $T=0$ 가 되므로

$$J = \int_{\Gamma_i} Wdy \quad (3)$$

가 되고, 이 때 변형에너지 밀도 W 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (4)$$

J - R 곡선상의 J 는 균열찢김(crack tearing)시의 J -적분을 의미하는데, 이 때의 변형에너지 밀도는 변형에너지 밀도의 한계치(W_c)가 된다. 따라서 W_c 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$W_c = \int_0^{\epsilon_c} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (5)$$

W_c 가 ϵ_c 와 σ - ϵ 곡선의 함수이므로 J - R 곡선상의 J -적분값(J_R)도 ϵ_c 와 σ - ϵ 곡선의 함수가 된다. 즉,

$$J_R = f(\epsilon_c, \sigma-\epsilon \text{ curve})$$

이다.

따라서, ϵ_c 와 σ - ϵ 곡선을 이용하면 J - R 곡선을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

2.2 일반계적법

J - R 곡선은 일반적으로 컴플라이언스(compliance)법에 의해 결정되지만, 일반계적법(generalized locus method)을 사용한 방법도 제시되고 있다. 일반계적법은 에너지해방률(energy release rate)에 기초하고 있는데, 이 방법을 요약하면 다

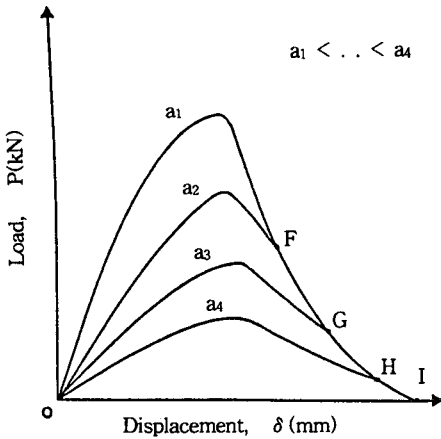


Fig. 1 Load-displacement curves with different initial crack length

음과 같다.

1단계 : Fig. 1과 같이 시편의 초기균열길이를 a_1, a_2, a_3, a_4 로 변화시키면서 $P-\delta$ 곡선을 구한다.

2단계 : 각각의 $P-\delta$ 곡선상의 특성점(characteristic point) F, G, H, I 를 연결한 궤적선을 그린다.

3단계 : $P-\delta$ 곡선과 궤적선, 변위축으로 둘러싸인 면적을 이용하여 균열진전 저항력을 다음과 같이 결정한다.

$$G = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (6)$$

여기서,

G : 균열진전 저항력

U : $P-\delta$ 곡선, 궤적선 및 변위축으로 둘러싸인 면적

B : 시편두께

일반궤적법의 특성점들은 주로 균열개시점 또는 최대 하중점이 채택되는데, 이 점들은 실험을 통하여 구하게 된다. 본 연구에서는 탄소성 유한요소해석 및 ϵ_c 를 이용하여 특성점을 결정하는 형식을 취함으로써 일반궤적법을 응용하고자 한다.

3. 실험

3.1 시험재료, 시편 및 시험방법

본 연구에 사용된 시험재료는 원자력발전소 주증기(main steam) 배관계통에 사용되는 SA106 Gr. C 탄소강으로서, 재료의 화학적 성분은 Table 1에 제시되어 있다. 응력-변형률시험에는 시험부 직경

Table 1 Chemical composition of SA106 Gr. C carbon steel

C	Si	Mn	P	S
0.30	0.10	0.39-1.06	0.048	0.058

이 12.7 mm인 환봉(round bar) 시편을 사용하였으며, 파괴저항시험에는 1T-CT(compact tension) 시편을 사용하였다. 응력-변형률시험의 경우 배관의 L 및 C 방향, 파괴저항시험의 경우 $L-C$ 및 $C-L$ 방향에서 채취한 모재의 데이터를 사용하였으며, ϵ_c 를 결정하기 위하여 응력-변형률시험 전후의 시편의 직경을 측정하였다.

3.2 시험결과

각각 15개의 응력-변형률시험 및 파괴저항시험 결과를 사용하였으며, 인장시편의 기계적 성질 및 식(1)에서 구한 ϵ_c 값은 시편의 시험 전후 직경(d_o, d), 채취방향, 시험온도등과 함께 Table 2에 나타내었다.

4. 유한요소해석

본 해석에서는 대칭성을 이용하여 1T-CT 시편의 1/2만 2차원으로 모델링하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 모델로서 497개의 8-절점 평면변형률요소(CPE8R)와 1606개의 절점을 사용하였으며, 일반적으로 J-제어(J-controlled) 균열성장이 일어난다고 알려져 있는 $0.1 \times$ 시편의 잔여길이($0.1 b_o$)까지의 영역을 10개의 요소로 세분하였다. 한편 균열선단은 1/4점요소(quarter point element)로 구성하였으며, 균열길이/시편폭 비(a/W)는 $0.54 \sim 0.66$ 까지 0.02씩 7단계로 변화시켰다.

탄소성 유한요소해석은 15가지 경우의 시편에 대하여 재료의 진응력-변형률(true stress-strain) 데이터에 바탕을 둔 증분소성이론(incremental plasticity theory)을 이용하여 수행하였다. 시편의 중심부를 y -방향으로 구속한 후 핀 홀(pin hole)에 하중 P_L (응력집중이 없을 때 항복을 일으킬 수 있는 하중)을 작용시켰다. 유한요소해석을 통해 구한 하중선에서의 하중 및 변위, 균열선단에서의 응력 및 변형률은 $J-R$ 곡선 예측을 위한 데이터로 사용된다.

Table 2 Tension test data

Identification		S_y (MPa)	S_u (MPa)	d_0 (mm)	d (mm)	ϵ_c	Temp. (°C)
Specimen	Orient.						
A	L	248	524	12.7	10.21	0.44	289
B	L	297	476	12.7	9.18	0.65	121
C	L	214	531	12.7	9.46	0.59	289
D	C	241	462	12.7	10.09	0.46	289
E	C	283	531	12.7	9.69	0.54	289
F	L	269	414	12.7	8.43	0.82	121
G	C	207	434	12.7	8.95	0.70	289
H	L	214	428	12.7	8.69	0.76	289
I	C	207	434	12.7	8.77	0.74	289
J	C	207	552	12.7	8.60	0.78	289
K	L	234	524	12.7	8.82	0.73	289
L	C	234	552	12.7	9.65	0.55	289
M	L	262	476	12.7	9.73	0.53	289
N	L	241	586	12.7	9.57	0.57	289
O	C	255	517	12.7	10.22	0.43	289

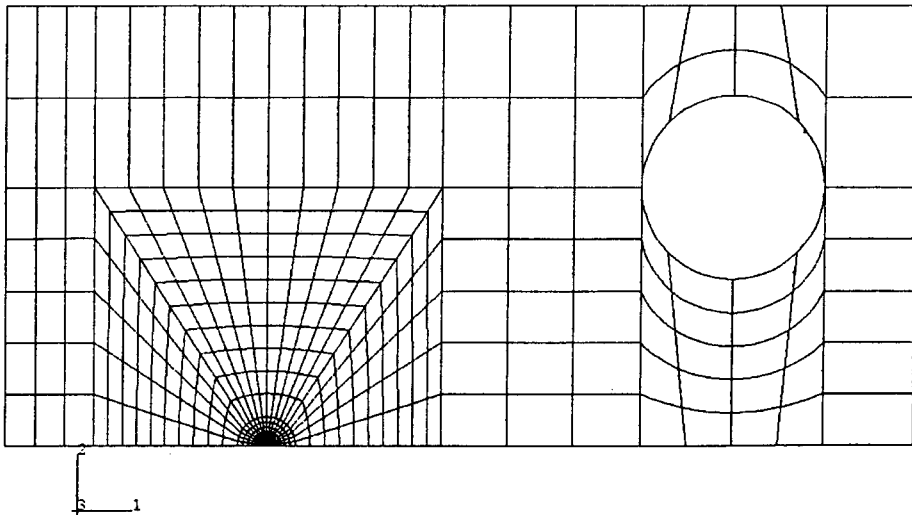


Fig. 2 FE model for 1T-CT specimen

5. 파괴저항곡선의 결정

5.1 유한요소법을 이용한 J-R곡선의 예측방법

탄소성 유한요소해석을 수행하여 J-R곡선을 예측하기 위한 절차는 다음과 같다.

1단계: 균열길이/시편폭 비(a/W)를 변화시키면서 유한요소해석을 수행하여 하중선에서의 하중(P) 및 변위(δ)와 균열선단에서의 응력 및 변형률(ϵ_{FEM})을 계산한다.

2단계: 7가지 경우의 a/W 에 대한 각각의 $P-\delta$ 곡선을 구한다.

3단계: 2단계에서 구한 $P-\delta$ 곡선과 실험으로 구한 $P-\delta$ 곡선의 교점에 해당하는 균열선단에서의 임계변형률($\epsilon_{c,FEM}$)을 이용하여, 다음과 같이 수정계수 f 를 구한다.

$$f = \epsilon_{c,FEM} / \epsilon_c \quad (7)$$

4단계: 15종류 시편의 7가지 경우의 a/W 에 대한 f 를 평균하여 각각의 a/W 에 대한 f_{mean} 값을 결정한다.

5단계: 각각의 $P-\delta$ 곡선상에서 $\epsilon_c \times f_{mean}$ 에 해당하는 P 와 δ 를 구하고, 이를 이용한 면적(A_{pl})을 계산한다.

6단계: J-적분값은 일반적제법을 응용하여 구한 A_{pl} 과 ASTM E813 및 E1152의 절차를 따라 다음과 같이 계산한다.

$$J = A_{pl} \eta / Bnb_i \quad (8)$$

여기서,

$$\eta = 2 + 0.522b_i / W$$

이다.

7단계: 1단계에서 설정한 균열길이와 6단계에서 구한 J-적분값을 이용하여 J-R곡선을 작성한다.

5.2 응력-변형률시험 결과를 이용한 J-R곡선의 예측방법

5.2.1 응력-변형률시험 및 파괴저항시험 결과의 상관관계

J-적분을 매개변수로 한 J-R곡선은 2.1절에 나타난 바와 같이 ϵ_c 와 $\sigma-\epsilon$ 곡선의 함수, 즉 변형에너지 밀도의 한계치인 W_c 의 함수가 된다. 이에 근거하여 연성재료에서 변형에너지 밀도와 유사한 값을

갖는 $S_u \times \epsilon_c$ 와 J-R곡선을 비교하였으며, 그 결과 이들이 함수관계를 가진다는 사실을 확인하였다. 그러나 ϵ_c 가 0.43~0.82 사이의 값으로서 2배 정도의 편차를 보이기 때문에, 이를 직접 수식화할 경우 ϵ_c 는 지나치게 지배적인 인자로 작용하게 된다. 이러한 경향을 최소화하기 위하여 S_u 와 ϵ_c 를 포함하는 여러 형태의 함수와 J-R곡선을 비교한 결과 $S_u \times \sqrt{\epsilon_c}$ 가 가장 적합한 관계가 있었으며, 특히 $S_u \times \sqrt{\epsilon_c}$ 와 C_1 사이에 특정한 함수관계가 성립하였다. 이를 log-log좌표계에 도시하면 Fig. 3과 같다.

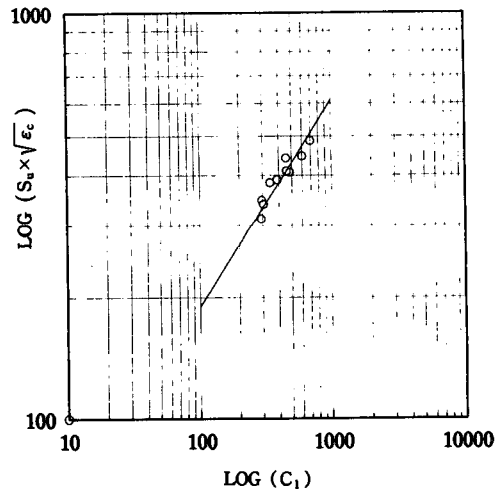


Fig. 3 Relationship between $\text{LOG}(S_u \times \sqrt{\epsilon_c})$ and $\text{LOG}(C_1)$

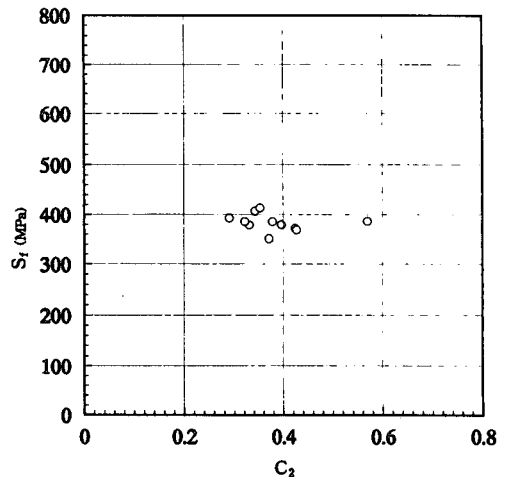


Fig. 4 Relationship between S_1 and C_2

한편, 응력-변형률시험 결과와 실험으로 구한 J-R곡선의 상수 C_2 도 비교하였으며, 그 중에서 유동 응력과 C_2 와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 그림

에서 볼 수 있듯이 C_2 는 응력-변형률시험 결과와 일정한 관계를 갖지는 않지만 대부분 0.29~0.48 사이의 값을 갖는다.

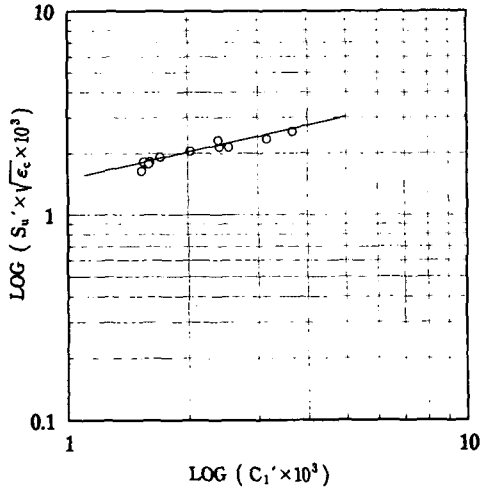


Fig. 5 Relationship between $\text{LOG} (S_u' \times \sqrt{\epsilon_c} \times 10^3)$ and $\text{LOG} (C_1' \times 10^3)$

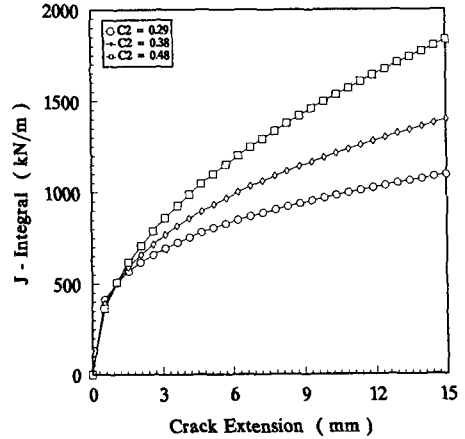


Fig. 6 Comparison of J-R curves for various C_2 values at $C_1=500$

Table 3 Fracture toughness test data

Identification		Experiment		Prediction		a_0/W	Temp. (°C)
Specimen	Orient.	C_1	C_2	$C_1' (\times 10^{-3})$	C_1		
A	L-C	307	0.378	1.556	297	0.57	289
B	L-C	342	0.570	1.752	351	0.58	121
C	L-C	482	0.424	2.252	429	0.54	289
D	C-L	293	0.371	1.227	234	0.57	289
E	C-L	387	0.343	2.032	388	0.57	289
F	L-C	620	0.475	1.660	332	0.58	121
G	C-L	552	0.413	1.725	329	0.56	289
H	L-C	607	0.326	1.835	350	0.53	289
I	C-L	745	0.289	1.835	350	0.57	289
J	C-L	698	0.396	3.380	645	0.56	289
K	L-C	602	0.331	2.777	530	0.58	289
L	C-L	457	0.291	2.279	435	0.58	289
M	L-C	296	0.427	1.556	297	0.58	289
N	L-C	454	0.353	2.707	516	0.59	289
O	C-L	305	0.322	1.475	281	0.58	289

5.2.2 무차원상수 및 C_1 , C_2 의 결정

Table 2에 나타난 바와 같이 재료의 시험온도가 상이하고 C_1 이 특정 단위로 표현되기 때문에, Fig. 3으로부터 응력-변형률시험 결과와 J - R 곡선의 상수 C_1 과의 관계를 직접 도출해 내는 것은 적절하지 못하다. 따라서 응력-변형률시험 결과 및 C_1 을 단위의 영향을 받지 않도록 무차원화하는 것이 바람직하다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같으며, 이때 탄성계수는 Oldfield 등⁽⁹⁾이 제안한 실험식을 이용하여 구하였다.

$$S_u' = \frac{S_u}{E} \quad (9)$$

$$C_1' = \frac{C_1}{Ek} \quad (10)$$

여기서,

$$E(\text{Temp}) = 207200 - 57.1 \text{ Temp.} (\text{°C}, \text{MPa})$$

$$k = 1 \text{ mm 또는 } 0.0394 \text{ inch}$$

식(9), (10)을 이용하여 무차원화시킨 후 파괴변형률(ϵ_c) 등과 연관시킨 결과를 Fig. 5에 나타내었으며, 이를 curve fitting하여 수식화하면 다음과 같다.

$$C_1' = 2927 \times (S_u' \times \sqrt{\epsilon_c})^{2.29} \quad (11)$$

식(11)을 식(10)에 대입하여 다음과 같이 C_1 을 구할 수 있다.

$$C_1 = 2927 Ek (S_u' \times \sqrt{\epsilon_c})^{2.29} \quad (12)$$

한편, C_2 는 응력-변형률시험결과와 무관하게 0.29~0.48 정도의 값을 보이고 있으며 C_2 의 차이가 J - R 곡선에 미치는 영향이 C_1 의 차이에 비하여 그다지 크지 않으므로, J - R 곡선의 결정을 위하여 0.38로 고정하였다. 상수 C_2 의 차이에 따른 J - R 곡선의 변화는 Fig. 6에 나타내었다.

5.2.3 J-R곡선의 결정

인장시편의 시험 전후의 직경(d_o , d)을 측정하여 식(1)에 의한 ϵ_c 값을 구한다. 이 ϵ_c 값과 인장강도 등을 포함한 식(12)로부터 C_1 을 결정하고, C_2 는 0.38로 한다. 결국 여기서 구한 C_1 , C_2 를 이용하면 $J = C_1(\Delta a)^{C_2}$ 의 J - R 곡선을 결정할 수 있다. Table 3은 파괴저항시험 결과로부터 구한 J - R 곡선의 상수와 응력-변형률시험 결과로부터 구한 값을 비교하여 나타낸 것이다.

6. 예측결과 및 토의

6.1 유한요소법을 이용한 J - R 곡선의 예측결과

Fig. 7은 시편A의 균열길이/시편폭 비(a/W)를 변화시키면서 탄소성 유한요소해석을 수행하여 구한 P - δ 곡선과 단일시편법(single specimen technique)으로 구한 실험결과를 함께 도시한 것이다. J - R 곡선을 구하는 본 실험에 앞서 피로하중을 작용시켜 생성한 시편A의 초기균열길이/시편폭 비

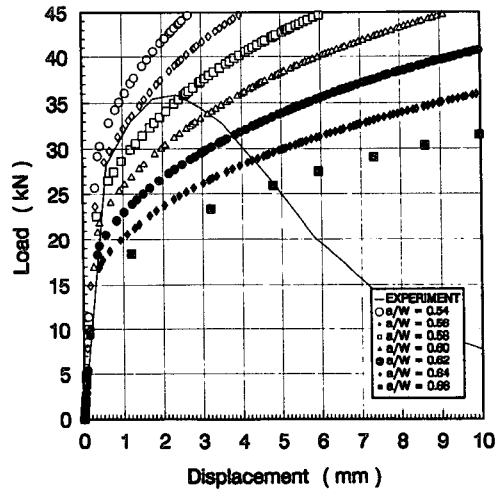


Fig. 7 P - δ curves obtained by FEM and experiment for specimen A

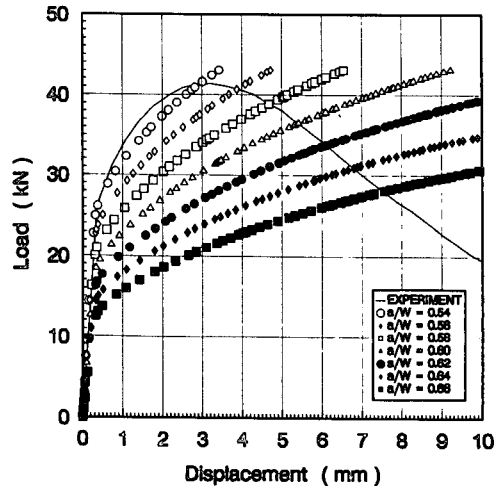


Fig. 8 P - δ curves obtained by FEM and experiment for specimen C

(a_0/W)는 0.565로서 ASTM E1152에서 규정한 $0.5 \leq a_0/W \leq 0.75$ 의 시험조건을 만족하였다. 또한 실험으로 구한 $P-\delta$ 곡선은 a/W 값이 0.56, 0.58일 경우 유한요소해석으로 구한 $P-\delta$ 곡선 사이에 위치하며, 이를 실험조건과 동일하게 선형적으로 보간할 경우 실험 및 유한요소해석으로 구한 두 곡선은 최대하중점부근까지 서로 일치한다. 한편 실험조건과 동일한 값을 변수로 하여 별도의 유한요소해석을 수행하지 않은 이유는 a_0/W 값이 각 시편마다 약간의 차이를 보이고 있으며, 이를 고려하기 위해서는 보다 많은 유한요소해석이 요구되기 때문이다. Fig. 8은 a_0/W 값이 0.535인 시편C, Fig. 9는 a_0/W 가 0.59인 시편N에 대하여 유한요소해석 및 실험으로 구한 $P-\delta$ 곡선을 함께 도시한 것이다.

연구의 초기단계에는 $\epsilon_{c,FEM}$ 값이 ϵ_c 값과 일치할 때 균열진전이 발생할 것으로 예상하여 이 점을 특성점으로 채택할 생각이었다. 이를 토대로 성장균열모델(grown crack model)을 사용하여 a/W 값의 변화에 따른 탄소성 유한요소해석을 수행하고, 15가지 경우의 시편에 대한 하중선에서의 하중 및 변위와 균열선단에서의 응력 및 변형률을 계산하여 각각의 $P-\delta$ 곡선을 작성하였다. 그러나 균열진전시의 $\epsilon_{c,FEM}$ 값과 ϵ_c 값이 일치하지 않아 수정계수를 도입하게 되었으며, 이를 고려한 P, δ 값을 사용하여 5.1절의 예측절차에 따라 $J-R$ 곡선을 결정하였다. 이와 같은 방법을 이용하는 경우 균열선단의 요소 크기에 의해 응력 및 변형률값이 좌우될 수 있으며

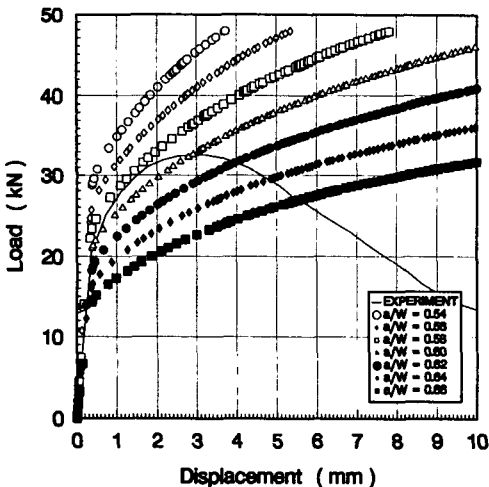


Fig. 9 $P-\delta$ curves obtained by FEM and experiment for specimen N

로, 시편의 잔여길이(uncracked ligament)의 1/10에 해당하는 영역에 10개의 요소를 배치하는 미세요소망(fine mesh)을 구성함으로써 이를 보완하였다.

Fig. 10은 시편A의 실험 및 예측으로 구한 $J-R$ 곡선을 함께 도시한 것이다. 이 때 예측결과는 Fig. 7의 a/W 값을 변수로 하여 탄소성 유한요소해석을 통해 작성한 $P-\delta$ 곡선상에서 $\epsilon_c \times f_{mean}$ 에 해당하는 P 와 δ 를 구한 후, 일반계적법 및 ASTM의 J-계산식을 응용하여 얻은 것이다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 시편C 및 시편N에 대한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 10~Fig. 12에 나타낸 바와 같이 유한요소해석을 통해 예측한 $J-R$ 곡선은 실험

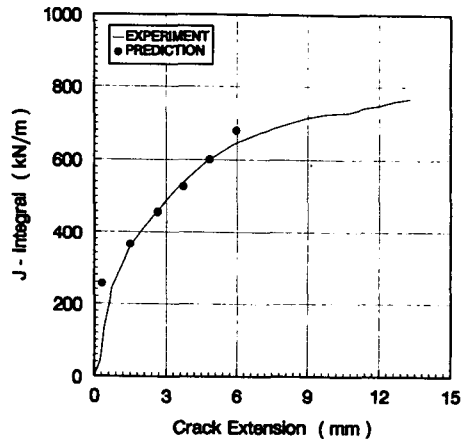


Fig. 10 Comparison between experimental results and predicted ones by FEM for specimen A

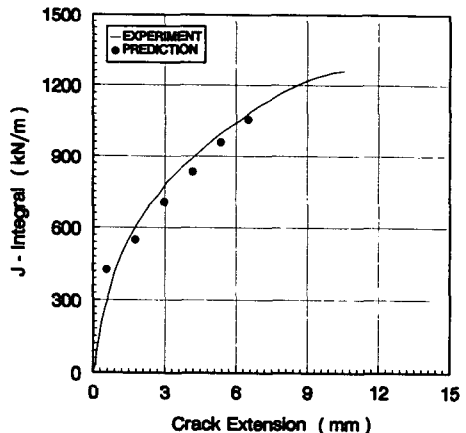


Fig. 11 Comparison between experimental results and predicted ones by FEM for specimen C

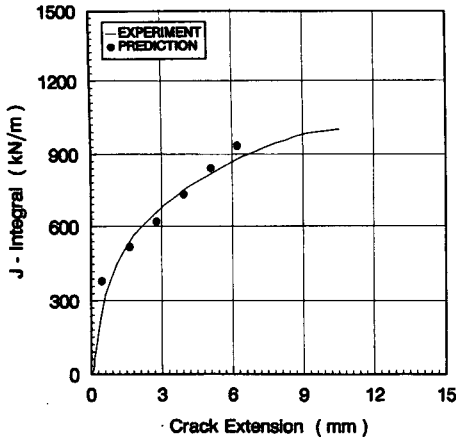


Fig. 12 Comparison between experimental results and predicted ones by FEM for specimen N

으로 구한 J - R 곡선과 잘 일치함을 알 수 있다. 다만 예측으로 구한 J - R 곡선의 첫번째 값이 실험결과와 어느 정도 차이를 보이는 것은 앞서 언급한 바와 같이 실험시의 a_0/W 값이 다양하여, 이를 변수로 한 상세한 유한요소해석을 수행하지 않았기 때문이다. 따라서 실험결과와 동일한 a_0/W 값에 대한 유한요소해석을 수행하면 좀 더 정확한 예측 결과를 얻을 수 있다.

6.2 응력-변형률시험 결과를 이용한 J - R 곡선의 예측결과

Fig. 13은 시편A 및 시편O, Fig. 14는 시편K 및 시편M에 대하여, 식(12)로부터 예측한 J - R 곡선과 실험으로 구한 J - R 곡선을 함께 도시한 것이다. 예측결과는 균열진전량 5 mm를 기준으로 하였을 때 최대 13%, 균열진전량 10 mm를 기준으로 하였을 때 최대 11% 정도의 차이를 보이기는 하였으나 대체로 실험결과와 잘 일치하였다. 또한 나머지 시편들의 경우도 Fig. 13 및 Fig. 14와 유사한 경향을 보였다.

그러나 Fig. 15에 도시한 시편G와 시편I의 경우 예측결과는 균열진전량 5 mm를 기준으로 하였을 때 최대 87% 정도의 큰 오차를 보였다. 이러한 결과는 σ - ϵ 곡선과 J - R 곡선의 상관관계를 통계처리하여 응력-변형률시험 결과로부터 J - R 곡선을 예측하는 과정에서, J - R 곡선의 크기에 큰 영향을 미치는 C_1 값이 과소평가되었기 때문이다.

응력-변형률시험 결과로부터 구한 실험식은 세밀한 이론적 근거를 제시하지 못하는 단점이 있지만,

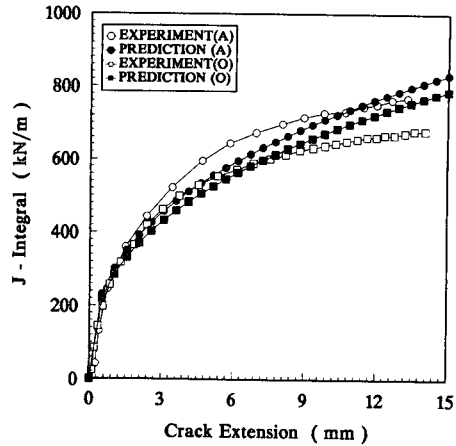


Fig. 13 Comparison between experimental results and predicted ones by empirical equation for specimen A and specimen O

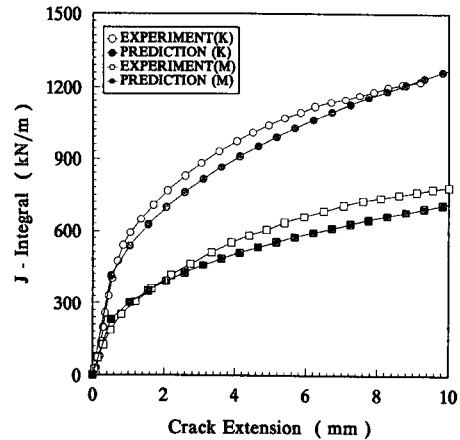


Fig. 14 Comparison between experimental results and predicted ones by empirical equation for specimen K and specimen M

CTOA(crack tip opening angle)와 같은 파라미터들을 이용한 방법⁽¹⁰⁾보다 훨씬 간편하게 J - R 곡선을 예측할 수 있다.

6.3 J - R 곡선 예측방법의 비교

유한요소법을 이용하여 J - R 곡선을 예측하는 방법은 일반적 방법 및 ASTM의 J -적분식을 응용하기 때문에 이론적 타당성을 갖추고 있으며, 비교적 실험결과와 잘 일치하는 장점도 지니고 있다. 그러나 탄소성 유한요소해석을 수행하여야 하기 때문에 전문성이 요구되는 단점이 있다. 반면에, 응력-변형률시험결과를 이용하여 J - R 곡선을 예측하는 방

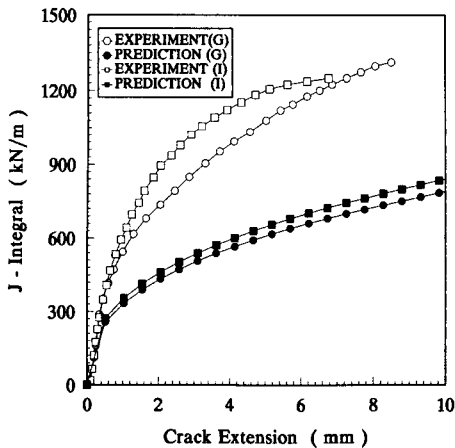


Fig. 15 Comparison between experimental results and predicted ones by empirical equation for specimen G and specimen I

법은 σ - ϵ 곡선과 J - R 곡선의 상관관계를 통계처리하여 구한 실험식을 사용하기 때문에, 간단하게 J - R 곡선을 예측할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그러나 이 방법은 경험적인 요소가 지배적으로 작용하여 예측결과에 오차를 포함할 수 있으므로, 유한요소법을 이용하여 J - R 곡선을 예측하는 방법보다 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 J - R 곡선 예측시 두 방법의 장단점을 고려하여 적절한 방법을 채택한다면, 응력-변형률시험 결과만을 보유하고 있거나 또는 이에 준하는 시험결과만을 보유하고 있는 경우에 유용한 기준 J - R 곡선을 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서 제시한 방법의 적용은 현재로는 SA106 Gr. C 탄소강에 한정되어 있으나, 앞으로 좀 더 많은 데이터를 확보하여 예측방법의 일반화를 시도할 예정이다.

7. 결 론

원자력 배관재료의 인장특성으로부터 J - R 곡선을 예측할 수 있는 2가지 방법을 제시하였다. 첫번째 방법은 파괴변형률 및 균열길이/시편폭 비를 변수로 한 탄소성 유한요소해석을 수행한 후 일반체적법을 응용하여 J - R 곡선을 예측하는 것이며, 두번째 방법은 SA106 Gr. C 탄소강의 σ - ϵ 곡선과 J - R 곡선의 상관관계를 통계처리하여 구한 실험식을 이용하여 J - R 곡선을 예측하는 것이다. 유한요소법을 이용하여 J - R 곡선을 예측하는 방법은 이론적인 타

당성을 지니며 비교적 실험결과와 잘 일치하는 장점을 지니고 있으나 전문성이 요구되는 단점이 있다. 반면에, 응력-변형률시험 결과를 이용하는 방법은 경험적인 요소가 크게 작용하여 예측결과에 오차를 포함할 수 있으므로, 유한요소법을 이용하여 J - R 곡선을 예측하는 방법보다 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 2가지 방법을 경우에 따라 적절히 이용하면 탄소성 파괴역학 해석에 필요한 기준 J - R 곡선을 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 1993년도 교육부 학술연구조성비 (ME93-C-05)에 의하여 수행되었으며, 이에 교육부 관계자들에게 감사사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Hahn, G. T. and Rosenfield, A. R., 1968, "Sources of Fracture Toughness: The Relation Between K_{IC} and Ordinary Tensile Properties of Metals," *ASTM STP* 432, pp. 5~32.
- (2) Rolfe, S. T. and Novak, S. R., 1970, "Slow-Bend K_{IC} Testing of Medium-Strength High-Toughness Steels," *ASTM STP* 463, pp. 124~159.
- (3) Kussmaul K. and Roos, E., 1985, "Statistical Evaluation of Post-Yield Fracture mechanics Properties on the Base of the Notched Bar Impact Test," *Journal of Nuclear Engineering and Design*, Vol. 87, pp. 123~137.
- (4) Sun, D. Z., Voss, B. and Schmitt, W., 1991, "Numerical Prediction of Ductile Fracture Resistance Behavior based on Micromechanical Models," *Defect Assessment in Components*, pp. 447~458.
- (5) Battelle, 1993, "Predict J-R curve and Tensile Properties Using Mill Data," *IPIRG-2 First Round-Robin Workshop*.
- (6) Kim, B. H. and Joe, C. R., 1989, "On the Resistance to Crack Initiation and Growth," *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 34, No. 1, pp. 221~231.

- (7) Kim, Y. J., et al., 1993, "Fracture Properties Evaluation of BOP Piping Systems for the Yonggwang 3&4 Nuclear Generating Station," *Trans. of the 12th SMIRT Conference*, Vol. G, pp. 435~440.
- (8) Rice, J. R., 1968, "A Path Independent Integral and Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 379~386.
- (9) Oldfield, W., et al., 1984, "Fracture Toughness Prediction for Pressure Vessel Steels," *ASME MPC-24*, pp. 9~26.
- (10) Kanninen, M. F., et al., 1981, "A Critical Survey on the Application of Plastic Fracture Mechanics to Nuclear Pressure Vessels and Piping," *NUREG/CR-2110*.