

<논 문>

원자력 배관재료의 파괴저항곡선 예측 (2)

장윤석* · 석창성** · 김영진**

(1996년 8월 9일 접수)

Prediction of Fracture Resistance Curves for Nuclear Piping Materials (II)

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

Key Words : Leak Before Break (LBB : 파단전누설), J-R Curve (파괴저항곡선), Fracture Strain (파괴변형률), 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 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 modify two J-R curve prediction methods previously proposed by the authors and to propose an additional J-R curve prediction method for nuclear piping materials. In the first method which is based on the elastic-plastic finite element analyses, a blunting region handling procedure is added to the existing method. In the second method which is based on the empirical equation, a revised general equation is proposed to apply to both carbon steel and stainless steel. Finally, in the third method, both full stress-strain curve and finite element analysis results are used for J-R curve prediction. A good agreement between the predicted results based on the proposed methods and the experimental ones is obtained.

기 호 설 명

a : 균열길이
 a_o : 피로예비균열의 길이
 Δa : 균열진전량
 B : 시편두께
 b_o : 시편의 잔여길이
 C_1, C_2 : 파괴저항곡선의 상수
 ϵ_c : 파괴변형률
 ϵ_{FEM} : 유한요소법으로 구한 균열선단의 변형률
 $\epsilon_{c,FEM}$: ϵ_{FEM} 의 임계값
 J : J-적분값
 σ_f : 유통응력
 σ_y : 항복강도

σ_u : 인장강도
 W_c : 변형률에너지밀도의 임계값

1. 서 론

원자력발전소의 파단전누설(Leak Before Break : LBB) 설계는 배관파단에 따른 동적효과로부터 주변계통 및 기기를 보호하기 위한 배관파단 구속 장치(pipe whip restraint)나 유체방출 차단벽(jet-impingement shield)의 제거, 배관의 경량화, 운전중 검보수시 방사선 과피폭 방지, 설계비 및 공사비 절감, 공기 단축 등의 잇점이 있다.^(1~3) LBB 설계 및 적용을 위해서는 재료의 응력-변형률(σ - ϵ)곡선과 파괴저항(J-R)곡선의 확보가 필수적이지만 시험에 많은 비용과 시간이 요구되고, 또한

*회원, 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

**회원, 성균관대학교 기계공학부

운전중인 발전소의 경우 관련 자료의 미비로 인하여 기술적 어려움을 겪고 있다.

저자들은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전보⁽⁴⁾에서 원자력 배관재료로 사용되는 SA106 Gr. C 탄소강의 J-R곡선을 예측할 수 있는 2가지 방법을 제시한 바 있다. 본 논문에서는 전보에서 제시한 바 있는 2가지 J-R곡선 예측방법을 보완한 후, 탄소강 및 스테인레스강에 보편적으로 적용할 수 있도록 일반화하고자 한다. 이 과정에서 SA106 Gr. C 탄소강의 J-R곡선을 재예측하였으며, 스테인레스강의 경우 대표적인 원자력발전소 배관용 재료인 SA312 TP316 강 of 재료물성치를 사용하여 J-R곡선을 예측하였다.⁽⁵⁾ 또한 재료의 전체 σ - ϵ 곡선 및 유한요소해석 결과를 이용하여 J-R곡선을 예측할 수 있는 추가적인 방법을 제시하고자 한다.

2. 재료시험

본 연구에 사용된 시험재료는 원자력발전소 정지냉각(shutdown cooling) 배관계통에 사용되는 SA312 TP316 스테인레스강으로서, 재료의 화학적 성분은 Table 1에 제시되어 있다.

응력-변형률시험에는 시험부 직경이 12.7 mm인 환봉(round bar) 시편을 사용하였으며, 파괴저항

시험에는 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 는 전보⁽⁴⁾에서 제시한 바 있는 다음 식을 이용하여 결정하였다.

$$\epsilon_c = 2 \ln(d_0/d) \tag{1}$$

J-R곡선 예측을 위하여 12개의 σ - ϵ 시험 및 12개의 J-R시험 결과를 사용하였으며, 인장시편의 기계적 성질 및 식 (1)에서 구한 ϵ_c 값은 히트번호(heat number), 시편의 시험 전후의 직경(d_0 , d), 시편 채취방향, 시험온도 등과 함께 Table 2에 나타내었다.

3. 유한요소해석

본 해석에서는 대칭성을 이용하여 1T-CT 시편

Table 1 Chemical composition of SA312 TP316 stainless steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.08	0.75	2.00	0.04	0.03	16.0	2.00

Table 2 Tensile test data for SA312 TP316 stainless steel

Heat No.	Identification		σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	d_0 (mm)	d (mm)	ϵ_c	Temp. (°C)
	Specimen	Orient.						
S01	SS-A	L	221	510	12.6	5.85	1.54	49
	SS-B	L	248	540	12.6	6.52	1.32	49
	SS-C	C	248	540	12.6	6.52	1.32	49
S02	SS-D	L	269	572	12.7	6.27	1.41	49
	SS-E	C	276	559	12.7	6.44	1.36	49
S03	SS-F	L	152	386	12.6	7.30	1.09	296
	SS-G	C	172	448	12.7	6.84	1.24	296
S04	SS-H	L	179	462	12.7	7.75	0.99	296
	SS-I	L	179	462	12.7	7.75	0.99	296
	SS-J	L	166	448	12.7	7.35	1.09	296
S05	SS-K	L	152	476	12.6	6.80	1.23	327
	SS-L	C	159	462	12.7	6.90	1.22	327

의 1/2만 2차원으로 모델링하였다. 497개의 8-절점 평면변형률요소(CPE8R)와 1606개의 절점을 사용하였으며, 일반적으로 J-제어(J-controlled) 균열 성장이 일어난다고 알려져 있는 시편의 잔여길이 10%(0.1 b_0)까지의 영역을 10개의 요소로 세분하였다. 한편 균열선단은 1/4점요소(quarter point element)로 구성하였으며, 균열길이/시편폭 비(a/W)는 0.62~0.66까지 0.01씩 5단계로 변화시켰다. a/W 값을 전보⁽⁴⁾와 달리 0.62~0.66까지 설정한 이유는 J-R곡선을 구하는 본 실험에 앞서 피로하중을 작용시켜 생성한 스테인레스강 시편의 초기균열길이/시편폭 비(a_0/W)가 탄소강과 다르기 때문이며, 유한요소해석시 이를 고려하기 위한 것이다.

한편, 탄소성 유한요소해석은 12가지 경우의 1T-CT 시편에 대하여 재료의 진응력-변형률(truress-strain) 데이터에 바탕을 둔 증분소성이론(Incremental plasticity theory)을 이용하여 수행하였으며, 시편에 작용시킨 하중 및 경계조건은 전보⁽⁴⁾와 동일하다. 유한요소해석을 통하여 구한 하중선에서의 하중 및 변위, 균열선단 첫번째 요소의 1/4위치에서의 응력 및 변형률은 J-R곡선 예측을 위한 데이터로 사용된다.

4. 파괴저항곡선의 결정

4.1 유한요소법을 이용한 J-R곡선의 예측방법

탄소성 유한요소해석을 수행하여 J-R곡선을 예측하기 위한 기본적인 절차는 전보⁽⁴⁾와 동일하다. 다만 SA312 TP316 스테인레스강의 경우 전보에서 언급한 바 있는 SA106 Gr. C 탄소강과는 달리 재료의 연성거동으로 인하여 균열진전 개시점(crack initiation point) 이전에 상당한 크기의 균열둔화(crack blunting) 현상이 나타난다. 즉, SA106 Gr. C 탄소강의 경우 균열진전 개시점까지의 둔화구간이 약 0.5 mm인 반면 SA312 TP316 스테인레스강의 경우 약 3 mm 정도로 SA312 TP316 스테인레스강의 둔화구간이 SA106 Gr. C 탄소강에 비하여 5배 이상 크므로, 이를 J-R곡선 예측에 반영하기 위하여 다음과 같은 ASTM E813-91(Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness)의 둔화선(blunting line) 결정식을 사용하여 둔화구간을 처리하였다.

$$J = 2\sigma_f \Delta a \quad (2)$$

여기서, σ_f 는 유동응력, Δa 는 균열진전량이다.

이에 따라 유한요소해석을 통해 예측한 첫번째 데이터 이전 영역을 둔화구간으로 정의하고 균열진전량에 해당하는 x-축을 기준으로 등분하여 식 (2)에 따른 5개의 데이터를 생성하였으며, 그 이후의 데이터는 유한요소법을 이용한 J-R곡선 예측 절차에 따라 결정하였다.

4.2 실험식을 이용한 J-R곡선의 예측방법

저자들은 전보⁽⁴⁾에서 식 (1)로부터 간접적으로 구한 SA106 Gr. C 탄소강의 파괴변형률(ϵ_c)과 σ - ϵ 곡선의 함수인 변형률에너지밀도의 임계값(W_c)을 이용하여 J-적분을 매개변수로 한 J-R곡선을 결정할 바 있다. 본 논문에서도 이와 유사한 방법으로 SA106 Gr. C 탄소강 및 SA312 TP316 스테인레스강의 σ - ϵ 시험결과와 J-R곡선($J = C_1 \Delta a^{C_2}$)의 상수 C_1 , C_2 를 비교하였으며, 그 결과 연성재료에서 W_c 와 유사한 값을 갖는 $[(\sigma_f)(\epsilon_c)]$ 와 J-R곡선의 상수 C_1 사이의 특정한 함수관계를 확인하였다. Fig. 1은 SA106 Gr. C 탄소강 및 SA312 TP316 스테인레스강의 $[(\sigma_f)(\epsilon_c)]$ 와 실험으로 구한 J-R곡선의 상수 C_1 사이의 관계를 log-log좌표계에 도시한 것이다.

한편, 무차원 상수 σ_u' , C_1' 는 다음과 같이 정의할 바 있다.⁽⁴⁾

$$\sigma_u' = \frac{\sigma_f}{E} \quad (3)$$

$$C_1' = \frac{C_1}{E} \quad (4)$$

여기서, E 는 재료의 탄성계수로서, Oldfield 등⁽⁶⁾

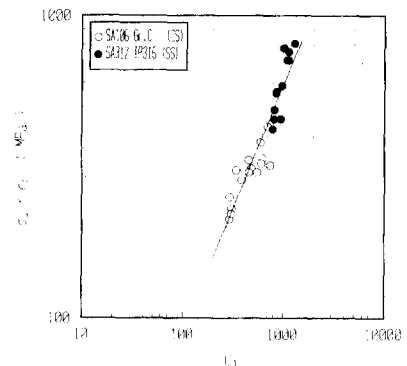


Fig. 1 Relationship between $[(\sigma_f)(\epsilon_c)]$ and C_1

이 제안한 다음의 실험식으로부터 구하였다.

$$E(\text{Temp.}) = 207200 - 57.1 \times \text{Temp.} (\text{°C}, \text{MPa}) \quad (5)$$

식 (3)~식 (5)를 이용하여 무차원화시킨 후 파괴변형률 등과 연관시킨 결과를 Fig. 2에 나타내었으며, 이를 curve fitting하여 수식화하면 다음과 같다.

$$C_1' = 7.073 [(\sigma_v' \times \epsilon_c)]^{1.245} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (4)에 대입하여 다음과 같이 C_1 을 구할 수 있다.

$$C_1 = 7.073 E [(\sigma_v' \times \epsilon_c)]^{1.245} \quad (7)$$

한편, SA312 TP316 스테인레스강의 σ - ϵ 시험결과와 실험으로 구한 J-R곡선의 상수 C_2 도 비교하였으며, 그 중 가장 대표적인 예를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 C_2 는 σ - ϵ 시험결과와 특정한 함수관계를 갖지는 않지만 대부분 0.56~0.70 사이의 값을 보이고 있다. Fig. 4는 상

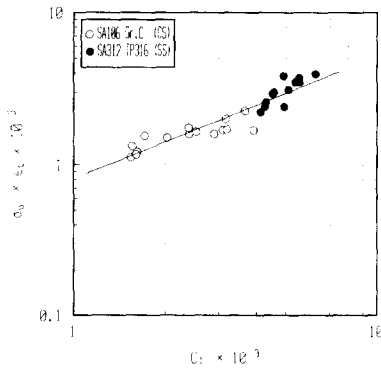


Fig. 2 Relationship between $[(\sigma_v') (\epsilon_c) (10^3)]$ and $[(C_1') (10^3)]$

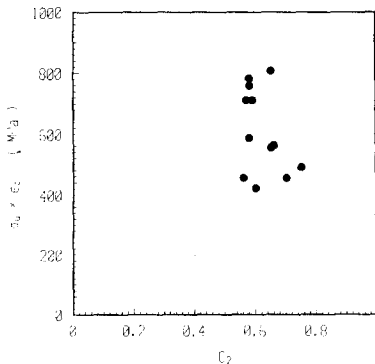


Fig. 3 Relationship between $[(\sigma_v') (\epsilon_c)]$ and C_2 for SA312 TP316 stainless steel

수 C_2 를 평균값인 0.61로 고정시키고 상수 C_1 의 차이에 따른 J-R곡선의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 5는 C_1 을 평균값인 700으로 고정시키고 상수 C_2 의 차이에 따른 J-R곡선의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 C_2 의 차이가 J-R곡선에 미치는 영향이 C_1 의 차이에 비하여 그다지 크지 않으므로, J-R곡선의 결정을 위하여 스테인레스강의 상수 C_2 는 전보⁽⁴⁾와 유사하게 평균값인 0.61로 고정하였다.

4.3 응력-변형률곡선을 이용한 J-R곡선의 예측 방법

유한요소법을 이용한 J-R곡선 예측방법의 경우 정확성 및 비교적 타당한 이론적 근거를 보유한 장점이 있으나 일정 수준이상의 전문성과 상당한 시간 및 비용이 요구되는 단점이 있다. 이러한 점을

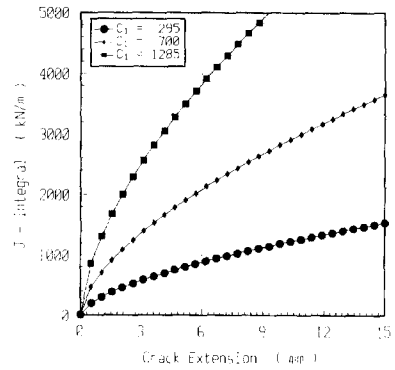


Fig. 4 Comparison of J-R curves for various C_1 values at mean C_2 value for SA312 TP316 stainless steel

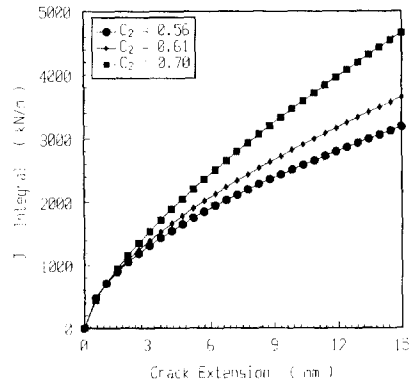


Fig. 5 Comparison of J-R curves for various C_2 values at mean C_1 value for SA312 TP316 stainless steel

고려하여 유한요소해석 결과와 σ - ϵ 곡선 및 J-R곡선의 상관관계를 이용하여 J-R곡선을 예측하고자 한다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 실험으로 구한 SA106 Gr. C 탄소강의 σ - ϵ 곡선 및 J-R곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 시편CS-J, 시편CS-K, 시편CS-O와 같이 어느 정도 예외적인 경우를 제외하면 σ - ϵ 곡선이 높은 시편CS-A, 시편CS-D의 경우 J-R곡선이 낮게 나타났으며, σ - ϵ 곡선이 낮은 시편CS-F, 시편CS-G의 경우 J-R곡선이 높게 나타났다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 실험으로 구한 SA312 TP316 스테인레스강의 σ - ϵ 곡선 및 J-R곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 시편SS-J의 예외적인 경우를 제외하면 σ - ϵ 곡선이 높은 시편SS-D, 시편SS-E의 경우 J-R곡선도 높게 나타났으며, σ - ϵ 곡선이 낮은 시편SS-F, 시편SS-I의 경우 J-R곡선도 낮게 나타났다.

상술한 바와 같이 비록 제한적인 실험결과에 근거한 것이기는 하지만 대표적인 원자력 배관계료인

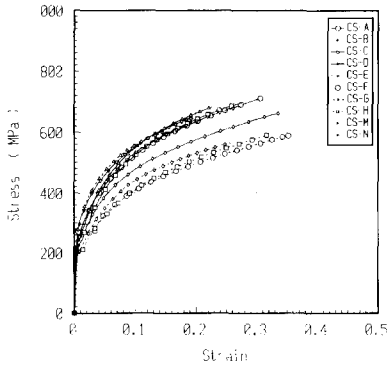


Fig. 6 Comparison of σ ϵ curves for SA106 Gr. C carbon steel

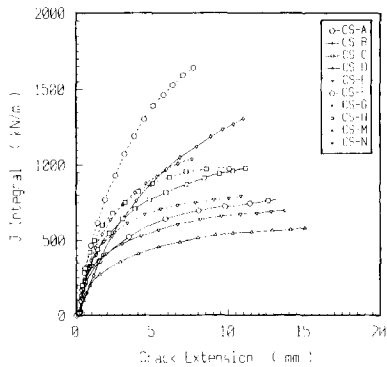


Fig. 7 Comparison of J-R curves for SA106 Gr. C carbon steel

SA106 Gr. C 탄소강의 경우 재료의 σ - ϵ 곡선이 높아질수록 J-R곡선은 낮아지는 반면, SA312 TP316 스테인레스강의 경우 σ - ϵ 곡선이 높아질수록 J-R곡선도 함께 높아지는 것을 알 수 있다. 따라서 σ - ϵ 곡선과 J-R곡선을 유형별로 구분하여 상관관계를 정량화할 수 있다면, 이를 토대로 J-R곡선을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

σ - ϵ 곡선을 이용한 J-R곡선 예측방법을 요약하면 다음과 같다.

1단계 : SA106 Gr. C 탄소강의 σ - ϵ 곡선 및 J-R곡선을 각각 시편CS-B 및 시편CS-H를 기준으로 4개의 기준구간 및 5개의 기준곡선으로 분류하고, SA312 TP316 스테인레스강의 σ - ϵ 곡선 및 J-R곡선은 시편SS-A를 기준으로 각각 4개의 기준구간 및 5개의 기준곡선으로 분류한다.

2단계 : 임의의 σ - ϵ 곡선이 주어졌을 경우 각 재료별로 이와 가장 유사한 형태의 2개의 기준시편을 선정한다. 선정된 기준시편의 σ - ϵ 곡선과 임의의 σ - ϵ 곡선의 관계를 등간격으로 설정한 30개 위치에서 내삽 또는 외삽하여 비례관계를 결정한다.

3단계 : 2단계에서 결정한 비례관계를 이용하여 2개의 기준시편의 a/W값 변화에 따른 유한요소해석 결과를 등간격으로 설정한 30개 위치에서 내삽 또는 외삽하여, 임의의 σ - ϵ 곡선에 해당하는 유한요소해석 결과를 결정한다.

4단계 : 3단계에서 결정한 관계를 토대로 유한요소법을 이용한 J-R곡선 예측방법에 따라 등간격으로 설정한 10개의 위치에서의 J-적분값을 계산한다.

5단계 : 3단계에서 설정한 균열길이와 4단계에서 구한 J-적분값을 이용하여 J-R곡선을 작성한다.

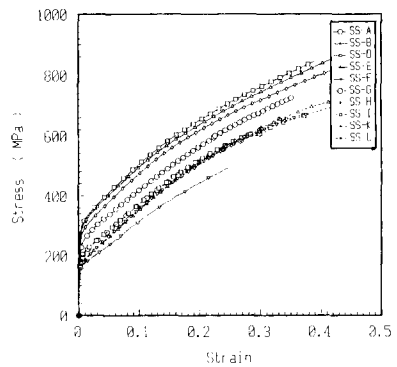


Fig. 8 Comparison of σ - ϵ curves for SA312 TP316 stainless steel

응력-변형률곡선을 이용한 J-R곡선 예측방법은 특정 재료의 한정된 실험결과에 근거한 것으로서 이론적 타당성을 명확히 입증할 수 없는 단점이 있으며, 상이한 형태의 σ - ϵ 곡선 및 J-R곡선을 나타내는 재료에 대한 적절한 적용성 여부에 대한 문제점도 제기될 수 있다. 그러나 원자력 배관계통에 사용되는 재료는 한정되어 있으며, 이들의 재료물성치는 일반적으로 Fig. 6~Fig. 9에 도시한 것과 유사한 형태로 나타나고 있다. 따라서 제시한 방법은 제한적인 범위 내에서 J-R곡선 예측에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 예측결과 및 토의

5.1 유한요소법을 이용한 J-R곡선의 예측결과

Fig. 10은 시편SS-B의 a/W값을 변화시키면서 탄소성 유한요소해석을 수행하여 구한 P- δ 곡선과 단일시편법으로 구한 실험결과를 함께 도시한 것이다. J-R곡선을 구하는 본 실험에 앞서 피로하중을 작용시켜 생성한 시편SS-B의 a_0/W 는 0.62로서 ASTM E1152에서 규정한 $0.5 \leq a_0/W \leq 0.75$ 의 시험조건을 만족하였다. 또한 실험으로 구한 P- δ 곡선은 a/W값이 0.62인 경우 유한요소해석으로 구한 P- δ 곡선과 최대하중점 부근까지 서로 일치한다. Fig. 11은 a_0/W 값이 0.59인 시편SS-G에 대하여 유한요소해석 및 실험으로 구한 P- δ 곡선을 함께 도시한 것으로서, a/W값이 0.60일 경우 유한요소해석으로 구한 P- δ 곡선을 실험조건과 동일하게 선형적으로 외삽할 경우 Fig. 10과 마찬가지로 유한요소해석 및 실험으로 구한 두 곡선은 최대하중점 부근까지 서로 일치한다.

탄소성 유한요소해석은 성장균열 모델(grown crack model)을 사용하여 a/W값을 변수로 수행하고, 12가지 경우의 시편에 대한 하중선에서의 하중 및 변위를 균열선단 첫번째 요소의 1/4위치에서의 응력 및 변형률을 계산하여 각각의 P- δ 곡선을 작성하였다. 그러나 균열선단의 요소크기에 의해 응력 및 변형률값이 좌우될 수 있으므로, 시편의 잔여길이(uncracked ligament length)의 10%에 해당하는 영역에 10개의 요소를 배치하는 미세요소망을 구성함으로써 이를 보완하였다. 또한 균열선단에 의한 직접적인 영향을 배제하기 위하여 균열선단이 아닌 균열선단 첫번째 요소의 1/4위치에서의 응력 및 변형률 값을 사용하였다.

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 시편SS-B와 시편SS-G의 예측 및 실험으로 구한 J-R곡선을 함께 도시한 것이다. 이 때 예측결과는 전보(4)에서 제시한 바와 같이 Fig. 10과 Fig. 11의 a/W값을 변수로 하여 탄소성 유한요소해석을 통해 작성한 P- δ 곡선상에서

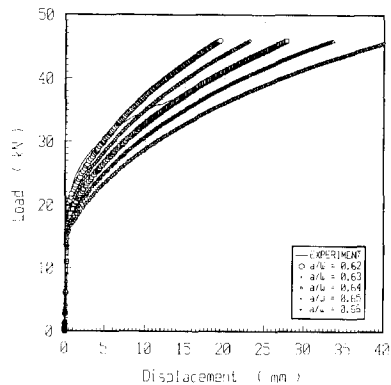


Fig. 10 FEM predicted P- δ curves for SA312 TP316 stainless steel : Specimen SS-B

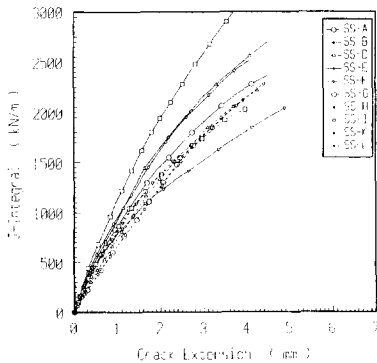


Fig. 9 Comparison of J-R curves for SA312 TP316 stainless steel

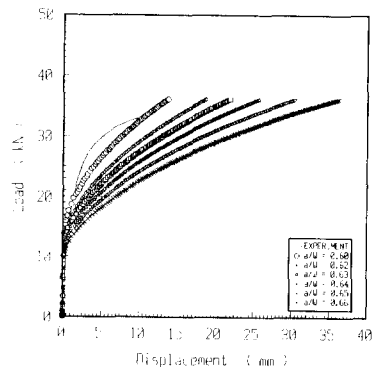


Fig. 11 FEM predicted P- δ curves for SA312 TP316 stainless steel : Specimen SS-G

$[(\epsilon_c)(f_{mean})]$ 에 해당하는 P 와 δ 를 구한 후, 일반 레적법 및 ASTM의 J-계산식을 응용하여 얻은 것이다. 예측결과는 균열진전량 5 mm인 경우 실험 결과를 기준으로 하였을 때 평균 4% 정도의 차이를 보여주고 있다. 나머지 시편들의 경우 평균 16% 정도의 차이로서 Fig. 12 및 Fig. 13의 경우보다 큰 차이를 나타내고 있으나, 시편 SS-A와 같이 예외적인 경우를 제외하면 대체로 유효요소해석을 통해 예측한 J-R곡선은 실험으로 구한 J-R곡선과 잘 일치하였다.

5.2 실험식을 이용한 J-R곡선의 예측결과

Fig. 14는 시편SS-B 및 시편SS-D, Fig. 15는 시편SS-C 및 시편SS-H에 대하여 식 (7)로부터 예측한 J-R곡선과 실험으로 구한 J-R곡선을 함께 도시한 것이다. 예측결과는 균열진전량 5 mm인 경우 실험결과를 기준으로 하였을 때 평균 16% 정도의 차이를 보이기는 하였으나 대체로 실험결과와 잘

일치하였다. 또한 나머지 시편들의 경우도 균열진전량 5 mm를 기준으로 하였을 때 평균 17% 정도의 차이로서, Fig. 14 및 Fig. 15와 유사한 경향을 보였다.

Fig. 16은 예측 및 실험으로 구한 J-R곡선이 가장 큰 차이를 보이는 시편SS-A와 시편SS-E의 경우를 나타낸 것으로서, 균열진전량 5 mm인 경우 실험결과를 기준으로 하였을 때 평균 37% 정도의 차이를 보였다. 이러한 결과는 σ - ϵ 곡선과 J-R곡선의 상관관계를 통계처리하여 σ - ϵ 시험결과로부터 J-R곡선을 예측하는 과정에서, J-R곡선의 크기에 큰 영향을 미치는 상수 C_1 값이 과소평가되었기 때문인 것으로 생각된다.

한편, 수정된 식 (7)을 이용하여 전보⁽⁴⁾의 SA106 Gr. C 탄소강을 재해석하였다. Fig. 17은 시편CS-A와 시편CS-E, Fig. 18은 시편CS-M과 시편CS-O의

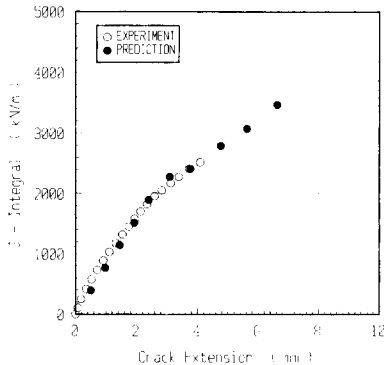


Fig. 12 J-R curve prediction by FEM for SA312 TP316 stainless steel : Specimen SS-B

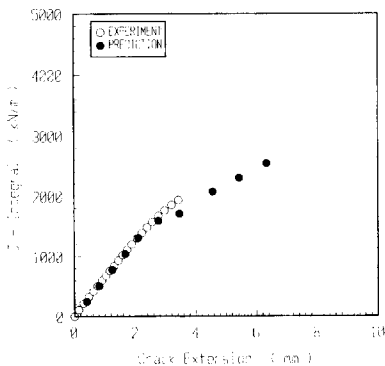


Fig. 13 J-R curve prediction by FEM for SA312 TP316 stainless steel : Specimen SS-G

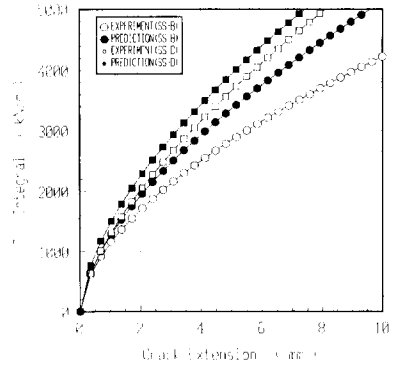


Fig. 14 J-R curve prediction by empirical equation for SA312 TP316 stainless steel : Specimen SS-B and specimen SS-D

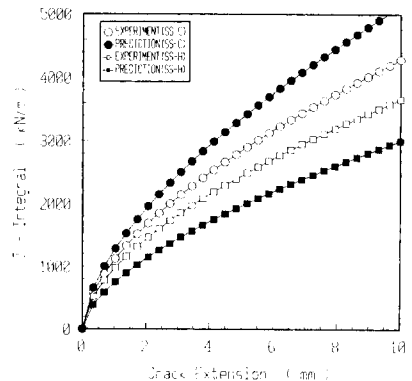


Fig. 15 J-R curve prediction by empirical equation for SA312 TP316 stainless steel : Specimen SS-C and specimen SS-H

J-R곡선 예측결과를 실험결과와 함께 도시한 것이다. 예측결과는 균열진전량 5 mm인 경우 실험결과를 기준으로 하였을 때 평균 9%, 균열진전량 10 mm인 경우 평균 13% 정도의 차이를 보이기는 하였으나 대체로 실험결과와 잘 일치하였다. 또한 나머지 시편들의 경우도 균열진전량 5 mm를 기준으로 하였을 때 평균 14% 정도의 차이로서, Fig. 17 및 Fig. 18에 나타난 것과 유사한 경향을 보였다.

5.3 응력-변형률곡선을 이용한 J-R곡선의 예측 결과

Fig. 19는 SA106 Gr. C 탄소강으로 제작한 시편 CS-G, Fig. 20은 시편CS-L의 예측 및 실험으로 구한 J-R곡선을 함께 도시한 것이다. 시편CS-G와 시편CS-L은 균열진전량 5 mm인 경우 실험결과를

기준으로 하였을 때 평균 15% 정도의 차이를 보이고 있다. Fig. 21은 SA312 TP316 스테인레스강으

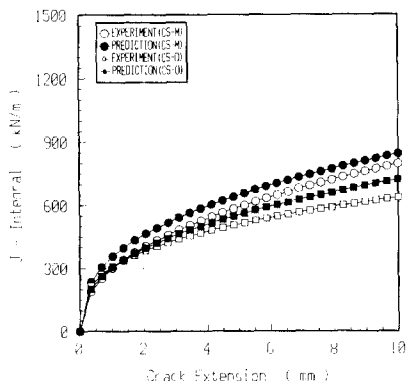


Fig. 18 J-R curve re-prediction by empirical equation for SA106 Gr. C carbon steel : Specimen CS-M and specimen CS-O

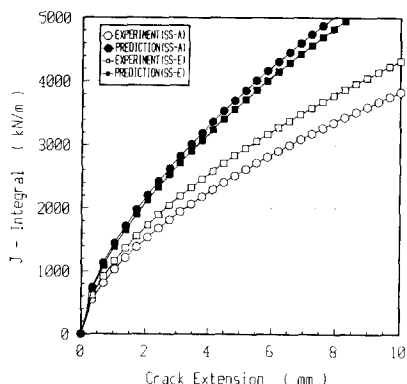


Fig. 16 J-R curve prediction by empirical equation for SA312 TP316 stainless steel: Specimen SS-A and specimen SS-E

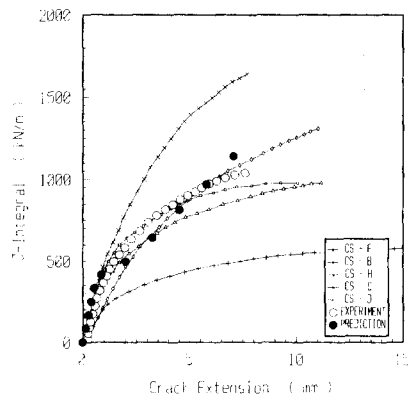


Fig. 19 J-R curve prediction by σ - ϵ curve for SA106 Gr. C carbon steel : Specimen CS-G

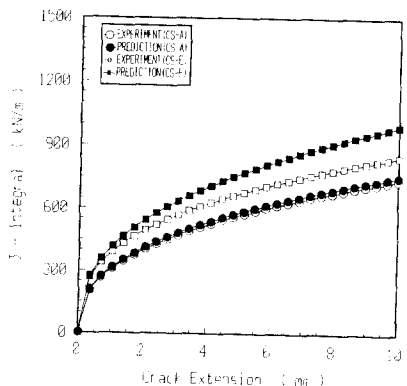


Fig. 17 J-R curve re-prediction by empirical equation for SA106 Gr. C carbon steel : Specimen CS-A and specimen CS-E

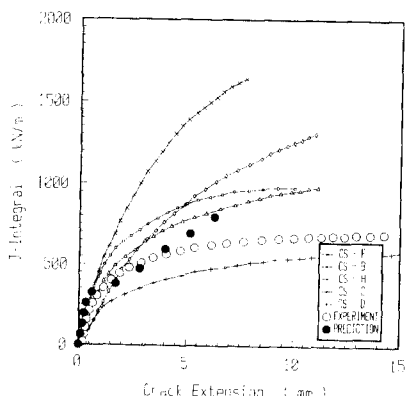


Fig. 20 J-R curve prediction by σ - ϵ curve for SA106 Gr. C carbon steel : Specimen CS-L

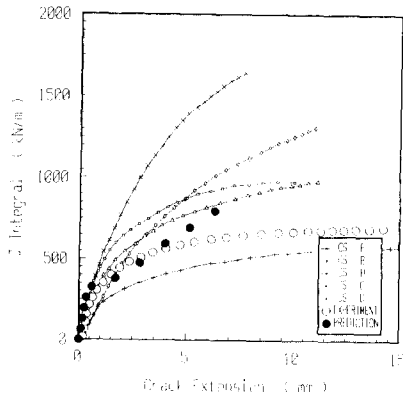


Fig. 21 J-R curve prediction by σ - ϵ curve for SA312 TP316 stainless steel: Specimen SS-C

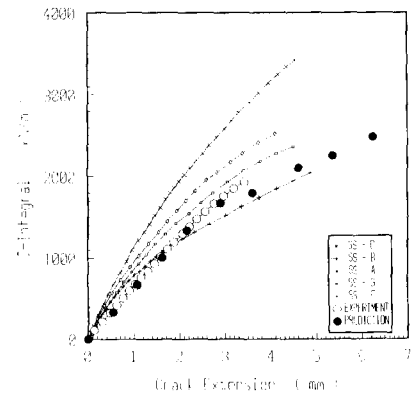


Fig. 22 J-R curve prediction by σ - ϵ curve for SA312 TP316 stainless steel: Specimen SS-G

Table 3 J-R curve prediction results by σ - ϵ curve for SA312 TP316 stainless steel

Heat No.	Identification		a_0/W	Temp. (°C)	Experiment		Prediction		Difference at $\Delta a = 5\text{mm}$ (%)
	Specimen	Orient.			C_1	C_2	C_1	C_2	
S01	SS-A	L-C	0.60	49	1008	0.58	948	0.63	1.9
	SS-B	L-C	0.62	49	1136	0.57	1049	0.70	13.8
	SS-C	C-L	0.61	49	1101	0.59	1049	0.70	13.7
S02	SS-D	L-C	0.60	49	1283	0.65	1183	0.71	1.6
	SS-E	C-L	0.60	49	1136	0.58	1130	0.70	20.7
S03	SS-F	L-C	0.58	296	785	0.60	710	0.53	-19.2
	SS-G	C-L	0.59	296	862	0.65	893	0.63	0.3
S04	SS-H	L-C	0.62	296	813	0.70	820	0.74	7.6
	SS-I	L-C	0.62	296	943	0.56	662	0.50	-36.3
	SS-J	L-C	0.60	296	819	0.75	823	0.71	-5.8
S05	SS-K	L-C	0.61	327	962	0.58	886	0.63	-0.2
	SS-L	C-L	0.59	327	861	0.66	897	0.63	-0.7

로 제작한 시편SS-C, Fig. 22는 시편SS-G의 예측 및 실험으로 구한 J-R곡선을 함께 도시한 것이다. 시편SS-C와 시편SS-G는 균열전진량 5 mm인 경우 실험결과를 기준으로 하였을 때 평균 7% 정도의 차이를 보이고 있다. 한편 나머지 시편들의 경우 SA106 Gr. C 탄소강은 평균 16%, SA312 TP316 스테인레스강은 평균 11% 정도의 차이로서 시편 SS-C와 같이 예외적인 경우를 제외하면 예측결과는 대체적으로 실험결과와 잘 일치하였다.

Table 3은 SA312 TP316 스테인레스강을 대상으

로 σ - ϵ 곡선을 이용하여 예측한 J-R곡선의 상수 C_1 , C_2 와 J-R시험결과로부터 구한 값을 비교하여 나타낸 것이다. 균열전진량 5 mm에서 예측 및 실험으로 구한 J-적분값의 차이를 정량화한 결과는 J-R곡선 예측결과의 타당성을 보여주고 있으며, SA106 Gr. C 탄소강의 경우와 유사한 경향을 나타내었다.

5.4 토의

원자력발전소의 건설에 사용된 배관재료는 고가

일 뿐만 아니라 추가적인 재료 확보가 어려운 경우가 있으며, 추후 건설 예정인 원자력발전소에도 유사한 재료가 사용된다는 점에서 시험결과와의 적절한 활용여부는 그 의미를 지니게 된다. 이러한 점에 착안하여 원자력발전소 배관계통 제작에 사용된 실제 재료를 대상으로 기본적인 σ - ϵ 시험 데이터로부터 J-R곡선을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 전보⁽⁴⁾에서의 SA106 Gr. C 탄소강에 대한 J-R곡선 예측에 이어 본 논문에서의 SA312 TP316 스테인레스강에 대한 J-R곡선을 예측을 수행함으로써 J-R곡선 예측방법의 타당성을 보완, 입증하였다.

제시한 3가지 J-R곡선 예측방법은 원자력발전소의 LBB 설계 및 적용 또는 진전성평가에 필요한 기준 자료를 확보할 수 있다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다. 그러나 전보에서 언급한 바와 같이 효율성 및 정확성 측면에서 서로 상반되는 장단점을 지니고 있으며, 특정한 원자력 배관재료의 모재로 제작된 1T-CT 시편을 대상으로 하여 얻어진 것이기 때문에 보다 다양한 재료 및 용접의 영향 등에 대한 평가도 아울러 요구된다. 특히 응력-변형률곡선을 이용한 J-R곡선 예측방법의 경우 이론적 타당성의 입증 또는 일반적인 적용성 여부에 대한 근거의 확립이 필요하다.

6. 결 론

원자력 배관재료의 파괴저항곡선을 예측하기 위한 연구를 수행하여, 전보⁽⁴⁾에서 제시한 2가지 방법을 보완하고 추가적인 방법을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소법을 이용하여 J-R곡선을 예측하는 첫번째 방법의 경우 스테인레스강에서 두드러지게 나타나는 균열분화현상 처리과정을 추가하였으며, 실험식을 이용하여 J-R곡선을 예측하는 두번째 방법의 경우 탄소강 및 스테인레스강에 보편적으로 적용할 수 있도록 식을 수정하여 일반화하였다.

(2) 전체 σ - ϵ 곡선과 유한요소해석 결과를 이용

한 추가적인 J-R곡선 예측방법을 제시하였으며, 이는 제한적인 범위 내에서 사용 가능한 것으로 판단된다.

(3) 제시한 3가지 예측방법을 토대로 대표적인 원자력 배관용 재료인 SA312 TP316 스테인레스강의 J-R곡선을 예측하였으며, 전보에서 언급한 바 있는 SA106 Gr. C 탄소강의 경우 J-R곡선을 재예측하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 산업설비 안전성평가가 연구센터의 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Swamy, S. A., et al., 1986, "Application of Leak-Before-Break Analysis to Westinghouse PWR Piping," *EPRI/NP-4971*.
- (2) Ayres, D. J., et al., 1987, "Application of Leak-Before-Break Analysis to PWR Piping Designed by Combustion Engineering," *EPRI/NP-5010*.
- (3) 윤영길, 이영환, 정정섭, 이정배, 최영환, 1990, "파단전누설 개념 적용 평가기술 개발," 한국원자력안전기술원 보고서, *KINS/AR-057*.
- (4) 장윤석, 석창성, 김영진, 1995, "원자력 배관재료의 파괴저항곡선 예측 (1)," 대한기계학회논문집, 제19권, 제4호, pp. 1051~1061.
- (5) Kim, Y. J., Seok, C. S., Chang, Y. S., Kim, J. O. and Ra, I. S., 1995, "Fracture Properties Evaluation of Carbon Steel Piping for Main Steam Line," *Int. J. of Nuclear Engineering and Design*, Vol. 158, pp. 241~251.
- (6) Oldfield, W., et al., 1984, "Fracture Toughness Prediction for Pressure Vessel Steels," *ASME MPC-24*, pp. 9~26.