

원자력 배관용 스테인레스강의 파괴저항곡선 예측

장윤석 · 석창성 · 김영진
성균관대학교

요 약

본 연구의 목적은 원자력 배관용 스테인레스강의 J-R곡선을 예측하기 위한 2가지 방법을 제시하는 것이다. 첫번째 방법에서는 균열길이/시편폭 비를 변수로 한 탄소성 유한요소해석을 수행하여 파괴변형률에 근거한 P- δ 곡선을 얻고, 이 결과로부터 일반계적법을 응용하여 J-R곡선을 구하였다. 두번째 방법에서는 σ - ϵ 곡선과 J-R곡선의 상관관계를 통계처리하여 응력-변형률시험결과로부터 J-R곡선을 예측할 수 있는 실험식을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 방법들을 이용하여 구한 예측결과는 실험결과와 대체로 잘 일치하였다.

1. 서론

원자력발전소 배관계통의 파단전누설(Leak Before Break : LBB) 설계와 저인성 원자로 압력용기의 파괴거동 해석에는 J-적분에 근거한 탄소성파괴역학(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-R곡선을 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 최대흡수에너지(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 T에 근거하여 J/T 해석법등에서 사용되는 J-R곡선을 예측하고자 하는 시도[4]가 있었으나, 아직 명확한 해결방안은 확립되지 않은 상태이다.

저자들은 전보[5]에서 원자력발전소 주증기 배관계통에 사용되는 SA106 Gr.C 탄소강의 J-R곡선을 예측할 수 있는 2가지 방법을 제시한 바 있다. 본 논문에서는 이 방법을 사용하여 스테인레스강의 J-R곡선을 예측하고자 하며, 이 과정에서 원자력발전소 배관용 재료인 SA312 TP316 강의 재료물성치를 사용하였다.

2. 이론

2.1 파괴변형률과 J-R곡선의 관계

파괴변형률(fracture strain, ϵ_c)은 다음과 같이 응력-변형률시험 전후의 시편의 직경을 이용하여 간접적으로 결정할 수 있다.

$$\epsilon_c = 2 \ln(d_0/d) \quad (1)$$

한편, Rice에 의해 제안된 J-적분식 및 변형에너지밀도 W는 다음과 같다.

$$J = \int_r (W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (2)$$

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (3)$$

J-R곡선상의 J는 균열찢김(crack tearing)시의 J-적분을 의미하는데, 이 때의 변형에너지밀도는 변형에너지밀도의 한계치(W_c)가 된다. 따라서 W_c 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$W_c = \int_0^{\epsilon_c} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (4)$$

2.2 일반계적법

J-R곡선은 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 다음과 같다.

- 1 단계 : 시편의 초기균열길이를 변화시키면서 P- δ 곡선을 구한다.
- 2 단계 : 각각의 P- δ 곡선상의 특성점(characteristic point)을 연결한 궤적선을 그린다.
- 3 단계 : P- δ 곡선과 궤적선, 변위축으로 둘러싸인 면적을 이용하여 균열진전 저항력을 결정한다.

일반계적법의 특성점들은 주로 균열개시점 또는 최대하중점이 채택되는데, 이 점들은 실험을 통하여 구하게 된다. 본 연구에서는 탄소성 유한요소해석 및 ϵ_c 를 이용하여 특성점을 결정하는 형식을 취함으로써 일반계적법을 응용하고자 한다.

3. 실험

본 연구는 원자력발전소 안전정지(shutdown cooling) 배관계통에 사용되는 SA312 TP316 스테인레스강의 모재를 대상으로 하였으며, 재료의 화학적 성분은 Table 1에 제시되어 있다. 용력-변형률시험에는 시험부 직경이 12.7mm인 환봉(round bar) 시편을 사용하였으며, 파괴저항시험에는 1T-CT(Compact Tension) 시편을 사용하였다. 각각 12개의 용력-변형률시험 및 파괴저항시험 결과를 사용하였으며, 인장시편의 기계적 성질 및 식 (1)에서 구한 ϵ_c 값은 시편의 시험 전후 직경(d_0 , d), 채취방향, 시험온도등과 함께 Table 2에 나타내었다.

4. 유한요소해석

본 해석에서는 대칭성을 이용하여 1T-CT 시편의 1/2만 2차원으로 모델링하였다. 497개의 8-절점 평면변형률요소(CPE8R)와 1606개의 절점을 사용하였으며, 일반적으로 J-제어(J-controlled) 균열성장이 일어난다고 알려져 있는 0.1 x 시편의 잔여길이(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. 유한요소해석을 통해 구한 하중선에서의 하중 및 변위, 균열선단에서의 용력 및 변형률은 J-R곡선 예측을 위한 데이터로 사용된다.

5. 파괴저항곡선의 결정

5.1 유한요소법을 이용한 J-R곡선의 예측방법

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

- 1 단계 : a/W 를 변수로 한 유한요소해석을 수행하여 하중선에서의 P , δ 와 균열선단에서의 용력 및 변형률(ϵ_{FEM})을 계산한다.
- 2 단계 : 5가지 경우의 a/W 에 대한 각각의 P - δ 곡선을 구한다.
- 3 단계 : 2단계에서 구한 P - δ 곡선과 실험으로 구한 P - δ 곡선의 교점에 해당하는 균열선단에서의 임계변형률($\epsilon_{c,FEM}$)을 이용하여, 다음과 같이 수정계수 f 를 구한다.

$$f = \epsilon_{c,FEM} / \epsilon_c \quad (5)$$

- 4 단계 : 12종류 시편의 5가지 경우의 a/W 에 대한 f 를 평균하여 각각의 a/W 에 대한 f_{mean} 값을 결정한다.
- 5 단계 : 각각의 P - δ 곡선상에서 $\epsilon_c \times f_{mean}$ 에 해당하는 P 와 δ 를 구하고, 이를 이용한 면적(A_{pl})을 계산한다.
- 6 단계 : J-적분값은 일반계적법을 응용하여 구한 A_{pl} 과 ASTM E813 및 E1152의 절차를 따라 다음과 같이 계산한다.

$$J = A_{pl} \cdot \eta / B \cdot b_i \quad (6)$$

- 7 단계 : 1단계에서 설정한 균열길기와 6단계에서 구한 J-적분값을 이용하여 J-R곡선

을 작성한다.

5.2 용력-변형률시험 결과를 이용한 J-R곡선의 예측방법

J-적분을 매개변수로 한 J-R곡선은 ϵ_c 와 $\sigma-\epsilon$ 곡선의 함수, 즉 변형에너지밀도의 한계치인 W_c 의 함수가 된다. 이를 바탕으로 여러 형태의 용력-변형률시험결과와 J-R곡선 ($J = C_1 \Delta a^{C_2}$)의 상수 C_1, C_2 를 무차원화하여 비교한 결과 $S_u' \times \sqrt{\epsilon_c}$ 와 C_1 사이에 특정한 함수관계가 성립하였으며, 이때 무차원 상수 S_u', C_1' 는 각각 $S_u' = S_u/E, C_1' = C_1/Ek$ 로 정의하였다.

Fig.1은 무차원화하여 파괴변형률(ϵ_c)등과 연관시킨 결과를 나타낸 것이며, 결국 C_1 은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$C_1 = 7618 Ek (S_u' \times \sqrt{\epsilon_c})^{2.44} \quad (7)$$

한편, Fig.2에 나타낸 바와 같이 C_2 는 용력-변형률시험결과와 무관하게 0.56~0.75 정도의 값을 보이고 있으며 C_2 의 차이가 J-R곡선에 미치는 영향이 C_1 의 차이에 비하여 그다지 크지 않으므로, J-R곡선의 결정을 위하여 평균값인 0.61로 고정하였다.

6. 예측결과 및 토의

6.1 유한요소법을 이용한 J-R곡선의 예측결과

Fig.3은 시편SS-B의 균열길이/시편폭 비(a/W)를 변화시키면서 탄소성 유한요소해석을 수행하여 구한 $P-\delta$ 곡선과 단일시편법(single specimen technique)으로 구한 실험결과를 함께 도시한 것이다. 피로하중을 작용시켜 생성한 시편SS-B의 초기균열길이/시편폭 비(a_0/W)는 0.62로서 ASTM E1152에서 규정한 $0.5 \leq a_0/W \leq 0.75$ 의 시험조건을 만족하였다. 또한 실험으로 구한 $P-\delta$ 곡선은 a/W 값이 0.62일 경우 유한요소해석으로 구한 $P-\delta$ 곡선과 최대하중점 부근까지 서로 일치한다.

Fig.4는 시편SS-B의 실험 및 예측으로 구한 J-R곡선을 함께 도시한 것이다. 여기서 검은 원은 Fig.3의 탄소성 유한요소해석결과를 이용하여 5.1절의 예측절차에 따라 구한 데이터이며, 흰 원은 균열진전 개시점 이전의 구간에서 둔화선(blunting line)을 따라 등분하여 생성한 데이터이다. Fig.4에 나타낸 바와 같이 유한요소해석을 통해 예측한 J-R곡선은 실험으로 구한 J-R곡선과 잘 일치한다.

6.2 용력-변형률시험 결과를 이용한 J-R곡선의 예측결과

Fig.5는 시편SS-C 및 시편SS-H에 대하여 식 (7)로부터 예측한 J-R곡선과 실험으로 구한 J-R곡선을 함께 도시한 것이다. 예측결과는 실험결과를 기준으로 할 때 균열진전량 5mm인 경우 최대 7%, 균열진전량 10mm인 경우 최대 8% 정도의 차이를 보이기는

하였으나 대체로 실험결과와 잘 일치하였다. 또한 나머지 시편들의 경우도 Fig.5와 유사한 경향을 보였다.

한편, Fig.6은 예측한 J-R곡선과 실험으로 구한 J-R곡선이 최대 오차를 보이는 시편 SS-K와 시편SS-L의 경우를 나타낸 것이다. 예측결과는 균열진전량 5mm를 기준으로 하였을 때 최대 60% 정도의 오차를 보였는데, 이러한 결과는 $\sigma - \epsilon$ 곡선과 J-R곡선의 상관관계를 통계처리하여 응력-변형률시험 결과로부터 J-R곡선을 예측하는 과정에서 J-R곡선의 크기에 큰 영향을 미치는 C_1 값이 과소평가되었기 때문이라고 생각된다.

Table 3은 파괴저항시험 결과로부터 구한 J-R곡선의 상수와 응력-변형률시험 결과로부터 구한 값을 비교하여 나타낸 것이다.

7. 결론

원자력 배관용 스테인레스강의 인장특성으로부터 J-R곡선을 예측하는 2가지 방법을 제시하였다. 유한요소법을 이용하여 J-R곡선을 예측하는 방법은 이론적인 타당성을 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-R곡선을 예측하는 방법보다 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 본 연구에서 제시한 방법들을 이용하여 구한 예측결과는 실험결과와 대체로 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- [1] G.T.Hahn and A.R.Rosenfield, 1968, "Sources of Fracture Toughness : The Relation between K_{IC} and Ordinary Tensile Properties of Metals," ASTM STP 432, pp. 5~32.
- [2] S.T.Rolfe and S.R.Novak, 1970, "Slow-Bend K_{IC} Testing of Medium-Strength High - Toughness Steels," ASTM STP 463, pp. 124~159.
- [3] K.Kusssmaul and E.Roos, 1985, "Statistical Evaluation of Post-Yield Fracture mechanics Properties on the Base of the Notched Bar Impact Test," Nuclear Engineering and Design, Vol.87, pp. 123~137.
- [4] D.Z.Sun, B.Voss and W.Schmitt, 1991, "Numerical Prediction of Ductile Fracture Resistance Behavior based on Micromechanical Models," Deffect Assessment in Components, pp. 447~458.
- [5] 장윤석, 석창성, 김영진, 1995, "원자력 배관재료의 파괴저항곡선 예측," 대한기계학회 논문집, 제19권 제4호, pp. 1051~1061.

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 Tension test data

Identification		S _y (MPa)	S _u (MPa)	d ₀ (mm)	d (mm)	ε _c	Temp. (°C)
Specimen	Orient.						
SS-A	L	221	510	12.6	5.85	1.535	49
SS-B	L	248	540	12.6	6.52	1.318	49
SS-C	C	248	540	12.6	6.52	1.318	49
SS-D	L	269	572	12.7	6.27	1.412	49
SS-E	C	276	559	12.7	6.44	1.358	49
SS-F	L	152	386	12.6	7.30	1.092	296
SS-G	C	172	448	12.7	6.84	1.238	296
SS-H	L	179	462	12.7	7.75	0.988	296
SS-I	L	179	462	12.7	7.75	0.988	296
SS-J	L	166	448	12.7	7.35	1.094	296
SS-K	L	152	476	12.6	6.80	1.234	327
SS-L	C	159	462	12.7	6.90	1.220	327

Table 3 Fracture toughness test data

Identification		Experiment		Prediction		a ₀ /W	Temp. (°C)
Specimen	Orient.	C ₁	C ₂	C ₁ ' (× 10 ⁻³)	C ₁		
SS-A	L-C	1008	0.58	5.736	1172	0.60	49
SS-B	L-C	1136	0.57	5.489	1122	0.62	49
SS-C	C-L	1101	0.59	5.489	1122	0.61	49
SS-D	L-C	1283	0.65	6.863	1403	0.60	49
SS-E	C-L	1136	0.58	6.229	1273	0.60	49
SS-F	L-C	785	0.60	2.252	429	0.58	296
SS-G	C-L	862	0.65	3.099	590	0.59	296
SS-H	L-C	813	0.70	4.508	850	0.62	296
SS-I	L-C	943	0.56	4.100	773	0.62	296
SS-J	L-C	819	0.75	3.799	723	0.60	296
SS-K	L-C	962	0.58	3.099	590	0.61	327
SS-L	C-L	861	0.66	3.317	631	0.59	327

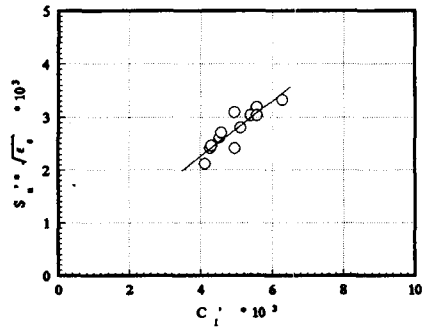


Fig.1 Correlation between C_1' and tensile property

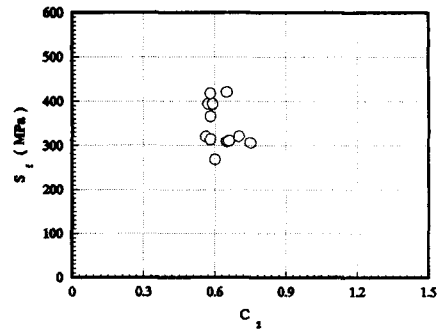


Fig.2 Correlation between C_2 and tensile property

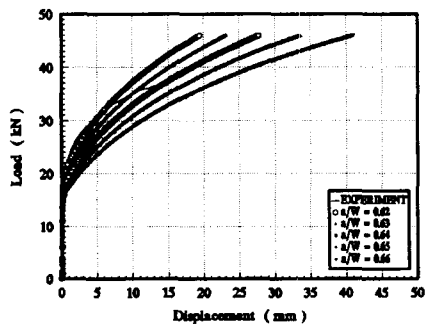


Fig.3 $P-\delta$ curves obtained by FEM and experiment for specimen SS-B

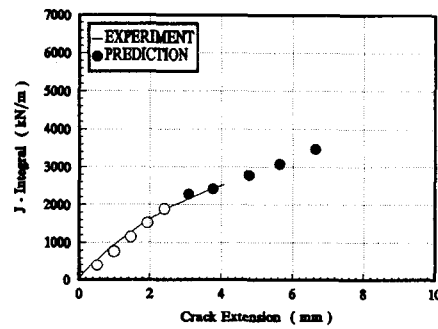


Fig.4 Comparison between experimental result and predicted one by FEM for specimen SS-B

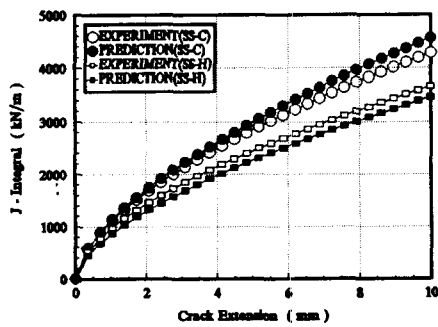


Fig.5 Comparison between experimental results and predicted ones by empirical equation for specimen SS-C and specimen SS-H

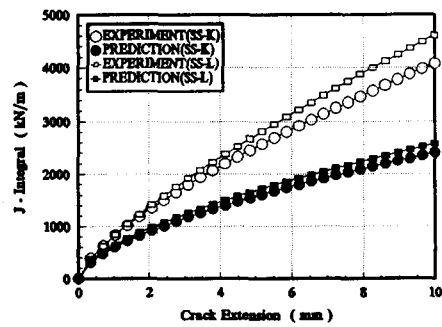


Fig.6 Comparison between experimental results and predicted ones by empirical equation for specimen SS-K and specimen SS-L