

배관용 재료의 설계시 안전성 평가에 관한 연구(Ⅲ)

A Study on the Safety Evaluation of Design for Piping Materials(Ⅲ)

김 복 기*
Bok-Key Kim

ABSTRACT

For the assessment of fracture behaviors of structural components, various fracture mechanics parameters have been applied to date. New approaches to analyze structural fracture performance under elastic-plastic condition have been proposed by the development of testing methods for characterization of material behavior which is defying to the analysis by conventional fracture parameters.

In this study, on the assumption that, initiation of crack propagation of a piping materials occurs when the crack tip strain field reaches "the local fracture strain", following two major issues are discussed;

1) The relationship between the critical value of J-integral(J_{IC}) and the local fracture strain (ϵ_c) in uniaxial tensile test in the region of maximum reduction area was described.

2) To proved the validity of above relations a series of tests were performed under various temperature and on the different piping materials.

1. 서 론

인장 시험으로부터 얻은 국부파괴변형률 값 (ϵ_c)을 이용하여 파괴를 해석하기 위한 기초적 연구로서 탄소성파괴인성치 J_{IC} 와 국부파괴변형률값 ϵ_c 와의 관계를 구해 보고자 한다. 제1보에서는 주증기 및 안전 정지 계통 배관용 소재인 SA312강의 모재에 대하여 인장시험 및 탄소성파괴인성시험을

하여 배관용 소재의 안전성을 평가하였다¹⁾. 제2보에서는 J_{IC} 와 ϵ_c 와의 이론적인 관계를 구하였으며, 원자력 발전소의 배관에 사용되는 SA 312 TP 316스테인레스강과 SA 106 Gr. C탄소강의 모재에 대하여 서로 다른 온도와 다른 방향에서 각각 인장 시험과 J_{IC} 시험을 하여, 국부파괴변형률(ϵ_c)과 J_{IC} 와의 관계를 시험결과로부터 검증한 바 있었다²⁾. 본 연구에서는 이들 배관 소재의 용접부시험편

* 명지전문대학 기계설계과

에 대하여 인장 시험과 탄소성파괴인성치 시험을 해서 실험 Data를 종합 고찰하고자 한다. J_{IC} 와 ϵ_c 와의 직접적인 관계를 구하기 위하여는 이론해석에 의한 방법, 탄소성유한요소해석에 의한 방법 등이 가능할 것이나 현실적으로 많은 어려움이 있다^{6,7)}. 이에 본 연구에서는 차선택으로 J_{IC} 시험 결과와 인장 시험 결과를 회귀분석하여 J_{IC} 와 ϵ_c 의 관계를 구하여 보고자 하며, 다음과 같은 절차로 연구를 수행하였다.

- 1) J_{IC} 를 무차원화하여 무차원 J_{IC} 와 ϵ_c 의 관계를 구할 수 있게 하고자 한다.
- 2) 인장 시험 결과로부터 국부파괴변형률값인 ϵ_c 를 구한다.
- 3) 실험 데이터의 회귀분석에 의하여 무차원 J_{IC} 와 ϵ_c 와의 관계를 구한다.
- 4) 무차원 J_{IC} 와 ϵ_c 와의 관계로부터 J_{IC} 와 ϵ_c 와의 관계를 구한다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험 장비

인장 시험과 J_{IC} 시험에서는 ASME SA312 TP316 강과, SA106 Gr.C 강의 모재와 용접부에 서 시편을 채취하였으며, ASTM⁽³⁻⁵⁾의 표준 시편으로 제작하여 실험을 하였다. Table 1은 본 연구의 실험에 사용한 소재와 그 용접부에 대하여, 재료, 실험 온도, 시편의 수를 나타낸 것이다.

Table 1 Numbers of test specimen

Material		Specimen	Temp (°C)	$\sigma - \epsilon$ Test	J_{IC} Test
Base Metal	SA312 TP316	SB1-SB4	49	4	4
		SB5-SB7	296	3	3
		SB8	327	1	1
	SA106	CB1-CB16	289	16	16
Weld Metal	SA312 TP316	SW1, SW2	49	2	2
		SW3, SW4	327	2	2
		SA106	CW1-CW4	289	4
total				32	32

SA312 TP316 stainless steel의 모재는 SB, SA312 TP316 stainless steel의 용접재는 SW, SA106 Gr.C carbon steel의 모재는 CB, SA106

Gr.C carbon steel의 용접재는 CW로 표기하고, 이 문자 뒤에 소재의 heat number에 따라 일련번호를 부여하였다. 인장 시편은 이 번호의 뒤에 시편의 방향에 따라 L 또는 C로 표기하고, J_{IC} 시편은 이 번호의 뒤에 시편의 방향에 따라 L-C 또는 C-L로 표기하였다.

2.2 인장시험

인장 시험은 ASTM E8-89b³⁾ (Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Material)와 E21-79⁴⁾ (Standard Recommended Practice for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials)에 따라 실시하였다.

인장 시험 결과로부터 국부파괴변형률값인 ϵ_c 값을 구하기 위하여, 인장 시험 후 시편 파단면의 직경(d)을 측정하였으며, 그로부터 단면 수축률(Ra)을 계산하였다. 파단면의 직경으로부터 다음 식²⁾에 의하여 국부파괴변형률(ϵ_c)을 계산하였다.

$$C = 2 \ln(d_0/d) = -\ln(1 - Ra) \dots\dots\dots (1)$$

여기에서

- d : 파단면의 직경
- d_0 : 시험 전의 직경
- ϵ_c : 국부 파괴 변형률
- Ra : 단면 수축률

SA312 TP316 stainless steel의 인장 시험 data를 Table 2에 SA106 Gr.C carbon steel의 인장 시험 data를 Table 3에 정리하였다.

Table 2 Tensile test results for SA312 TP316

Spec.	Or.	σ_Y	σ_U	d_0	d	Ra	ϵ_c
		(MPa)		(mm)	(mm)		
SB1-L	L	211	510	12.70	6.14	0.766	1.455
SB2-C	C	248	538	12.70	6.51	0.737	1.335
SB3-L	L	269	572	12.70	5.12	0.837	1.814
SB4-C	C	276	559	12.70	6.24	0.758	1.419
SB5-C	C	172	448	12.70	6.95	0.700	1.204
SB6-L	L	179	462	12.70	7.30	0.670	1.109
SB7-C	C	166	448	12.70	8.19	0.584	0.877
SB8-C	C	138	462	12.70	7.24	0.675	1.124
SW1-L	L	372	566	12.70	5.42	0.818	1.704
SW2-L	L	366	566	12.70	5.50	0.812	1.671
SW3-L	L	241	483	12.70	6.89	0.706	1.224
SW4-L	L	179	483	12.70	6.69	0.723	1.284

Table 3 Tensile test results for SA106 Gr. C

Spec.	Or.	σ_Y	σ_U	d_0	d	Ra	ϵ_c
		(MPa)	(MPa)	(mm)	(mm)		
CB-1	C	228	531	12.70	10.90	0.263	0.305
CB2-1	L	214	531	12.70	9.61	0.427	0.557
CB3-C	C	242	463	12.70	10.07	0.371	0.464
CB4-1	L	221	538	12.70	8.42	0.560	0.821
CB5-C	C	283	531	12.70	8.86	0.513	0.719
CB6-L	L	207	428	12.70	8.93	0.506	0.705
CB7-C	C	207	434	12.70	9.50	0.440	0.580
CB8-L	L	214	428	12.70	8.84	0.515	0.724
CB9-C	C	207	434	12.70	7.57	0.646	1.038
B10-L	L	214	441	12.70	8.06	0.597	0.909
B11-C	C	207	552	12.70	9.01	0.497	0.687
B12-L	L	234	524	12.70	9.45	0.446	0.591
B13-C	C	235	394	12.70	10.63	0.299	0.355
B14-L	L	242	587	12.70	9.78	0.407	0.522
B15-C	C	255	517	12.70	10.33	0.338	0.412
B16-L	L	262	476	12.70	9.62	0.426	0.555
CW1-L	L	421	552	12.70	8.98	0.500	0.693
CW2-L	L	297	497	12.70	8.24	0.579	0.865
CW3-L	L	241	490	12.70	8.17	0.586	0.881
CW4-L	L	297	490	12.70	7.91	0.612	0.947

2.3 J_{IC} 시험

J_{IC}시험은 ASTM E813-87⁵⁾(Standard Test Method for J_{IC}, A Measure of Fracture Toughness)에 따라 단일 시편법(single specimen method)으로 수행하였다. SA312 TP316 stainless steel의 J_{IC}시험 결과를 Table 4에, SA106 Gr. C carbon steel의 J_{IC} 시험 결과를 Table 5에 정리하였다.

Table 4 Relation ϵ_c and J_{IC} for SA312 TP316

Specimen	J _{IC}	F	J _{IC} (ϵ_c)	Er.	
	(KJ/m ²)		(KJ/m ²)	(%)	
SB1-1	SB1-L-C	1768	24.51	1588	11
SB2-C	SB2-C-L	1646	20.94	1646	0
SB3-L	SB3-L-C	1948	23.16	2127	8
SB4-C	SB4-C-L	1945	23.29	1815	7
SB5-C	SB5-C-L	1063	17.15	1175	10
SB6-L	SB6-L-C	1340	20.90	1106	21
SB7-C	SB7-C-L	696	11.35	731	5
SB8-C	SB8-C-L	1116	18.60	1053	6
SW1-L	SW1-L-C	5456	22.67	2224	4
SW2-L	SW2-L-C	2034	21.82	2183	7
SW3-L	SW3-L-C	948	13.08	1400	32
SW4-L	SW4-L-C	1628	24.59	1339	22

Table 5 Relation ϵ_c and J_{IC} for SA106 Gr. C

Specimen	J _{IC}	F	J _{IC} (ϵ_c)	Er.	
	(KJ/m ²)		(KJ/m ²)	(%)	
CB1-C	CB1-C-L	81	1.07	139	42
CB2-L	CB2-L-C	491	6.59	364	35
CB3-C	CB3-C-L	293	4.16	243	21
CB4-L	CB4-L-C	1053	13.86	802	31
CB5-C	CB5-C-L	440	5.42	664	33
CB6-L	CB6-L-C	550	8.66	498	10
CB7-C	CB7-C-L	340	5.30	340	0
CB8-L	CB8-L-C	740	11.53	531	40
CB9-C	CB9-C-L	840	13.11	1010	17
CB10-L	CB10-L-C	661	10.10	833	21
CB11-C	CB11-C-L	703	9.26	566	24
CB12-L	CB12-L-C	466	6.29	416	15
CB13-C	CB13-C-L	121	1.93	140	14
CB14-L	CB14-L-C	279	3.37	356	22
CB15-C	CB15-C-L	246	3.19	217	14
CB16-L	CB16-L-C	359	4.86	358	0
CW1-L	CW1-L-C	32	3.52	738	54
CW2-L	CW2-L-C	672	8.46	923	27
CW3-L	CW3-L-C	1005	13.74	879	14
CW4-L	CW4-L-C	1210	15.37	1072	13

3. J_{IC}- ϵ_c 의 관계

3.1 무차원 J_{IC}와 ϵ_c 관계의 회귀분석

J_{IC}를 무차원으로 표시하면 J_{IC}와의 관계를 구하는데 편리할 것이다. J_{IC}의 차원은 [FL⁻¹]이므로 응력의 차원 [FL⁻²]에 길이의 차원 [L]을 곱한 것과 같다. 따라서 무차원 J_{IC}를 F라 하면, F를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = J_{IC} / (\sigma_{fs} \lambda) \dots\dots\dots (2)$$

여기에서

F : 무차원화된 J_{IC}

σ_{fs} : (인장 강도 + 항복 강도)/2

λ : 균열진전량으로 0.2mm 또는 $2 \times 10^{-4}m$

2.3절의 J_{IC}시험 결과와 인장 시험 결과를 식 (2)를 이용하여 무차원 J_{IC}인 F로 나타내었으며, 그 결과를 정리하면 Table 4, Table 5와 같다. Table 2, 3의 ϵ_c 와 Table 4, 5의 F값과의 관계를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 재질의 변화나 용접부와 모재의 차이에 관계없이 ϵ_c 와 F사이에는 함수 관계가 있음을 알 수 있다. 실험 데이터의 분산이 커서 정확한

관계를 구하기는 어려우나 대략적인 관계를 구하면 Fig. 1의 실선과 같으며 그 관계식은 다음과 같다.

$$F(\epsilon_c) = 16.04 \epsilon_c^5 - 69.54 \epsilon_c^4 + 94.52 \epsilon_c^3 - 36.28 \epsilon_c^2 + 10.12 \epsilon_c \dots \dots \dots (3)$$

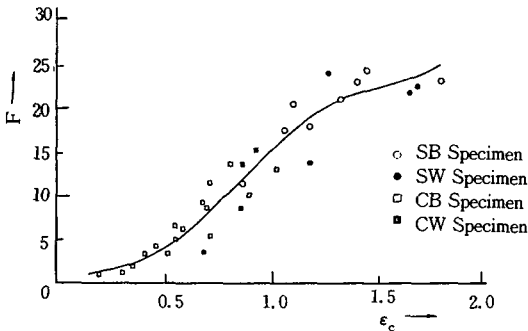


Fig. 1 F-ε_c relations for SB, SW, CB and CW specimens

3.2 J_{IC}-ε_c의 관계

식 (2)와 식 (3)을 이용하면 ε_c와 J_{IC}의 관계를 구할 수 있으며 그 관계식은 다음과 같다.

$$J_{IC}(\epsilon_c) = \sigma_{fs} \lambda (16.04 \epsilon_c^5 - 69.54 \epsilon_c^4 + 94.52 \epsilon_c^3 - 36.28 \epsilon_c^2 + 10.12 \epsilon_c) \dots \dots \dots (4)$$

여기에서

- J_{IC}(ε_c) : ε_c로부터 계산된 J_{IC}
- σ_{fs} : (인장 강도+항복 강도)/2
- λ : 균열전진량으로 0.2mm
또는 2×10⁻⁴m

식 (4)는 인장 실험 후에 측정된 파단면의 지름으로부터 구한 ε_c이며, 인장 강도와 항복 강도를 이용하여 J_{IC}를 구할 수 있음을 나타낸다.

4. J_{IC}와 ε_c 관계의 고찰

4.1 J_{IC}-ε_c 관계의 고찰

3.2절에서 J_{IC}를 무차원 J_{IC}인 F로 나타내고 F와 ε_c와의 관계를 구하였다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 시편의 차이에 따른 분산이 커져 정확한 관계를 구하기는 어려우나, F와 사이의 함수 관계를 확인할 수 있었다. 따라서 ε_c와 J_{IC}사이에는 함

수관계가 있으며, 연성 재료에서는 ε_c로부터 J_{IC}를 구할 수 있으리라고 본다. 보다 체계적이고 많은 연구를 통하여 J_{IC}와 ε_c와의 관계가 명확히 밝혀지고, 구조물의 균열선단부의 국부파괴변형을 해석이 가능해진다면, ε_c를 연성 재료의 파괴 해석 인자로 사용할 수 있으리라고 본다.

4.2 ε_c로부터 구한 J_{IC}의 오차

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 회귀 분석으로 얻은 실선과 실험 데이터와는 다소의 차이가 있으며, 이로부터 얻은 J_{IC}와 ε_c와의 관계식의 오차도 있을 것이다. 이에, 회귀 분석의 결과로부터 얻은 J_{IC}와 실험으로 구한 J_{IC}와의 오차를 검토해 보았으며, 그 결과는 Table 4, Table 5와 같다.

Table 4와 Table 5에서 SA312 TP316 stainless steel의 최대 오차는 32%였으며, SA106 Gr.C강의 최대 오차는 54%였다. 이 결과에서 보는 바와 같이 오차의 폭이 비교적 크므로, 식 (4)가 J_{IC}결정에 직접 사용되기보다는 J_{IC}와 ε_c사이의 함수 관계가 있음이 중요하며, 보다 정확한 관계는 계속 연구하여 밝혀야 할 것이다.

5. 결 론

J_{IC}시험 결과와 인장 시험 결과를 회귀분석하여 J_{IC}와 ε_c사이의 관계를 구하여 보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) J_{IC}와 ε_c사이의 관계는, 그 분산은 크지만 함수 관계가 있음이 확인되었다.
- 2) J_{IC}를 ε_c와 σ_{fs}의 함수로 나타낼 수 있었으며, 그 오차는 모재나 용접재의 시험편 채취 방향이나 시험 온도에 따른 변화조건에서도 그 표준편차는 9.2~13.8%이었으며, 비교적 편차의 폭이 좁았다.
- 3) J_{IC}와 ε_c와의 함수 관계가 확인되었으므로, ε_c를 배관용 재료의 설계시 건전성 평가자료로 사용할 수도 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 金福起, 배관용 재료의 설계시 안전성 평가에 관한 연구(I), 한국산업안전학회지, Vol.

- 10, No. 2, pp. 3~9, 1995.
- 2) 金福起, 배관용 재료의 설계시 안전성 평가에 관한 연구(Ⅱ), 한국산업안전학회지, Vol. 10, No. 3, 1995.
 - 3) Standard Test Method of Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, ASTM E8-85, 1987.
 - 4) Standard Recommended Practice for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, ASTM E21-79, 1987.
 - 5) Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, ASTM E813-87, 1987.
 - 6) Schindler, H.J., On the Relationship Between J-integral and Crack Opening Displacement, Engng. Fracture Mechanics, Vol. 20, No. 2, pp. 281~287, 1984.
 - 7) Gillemot, L.F., Criterion of Crack Initiation and Spreading, Engng. Fracture Mechanics, Vol. 8, pp. 239~253, 1976.
-