

구조용강의 연성파괴에서 최대하중 예측

구 인 회

중앙대학교 기계공학과

요약

탄소성재료의 파괴에서 최대하중을 계산할수있는 방법이 제시되었다. 사용된 재료상수는 파괴개시인성, 항복강도, 진행된 균열선단에서 열림변위증분에 대한 균열성장의 비이고, 계산을 실험결과에 맞추어 재료상수를 결정한다. 이들 상수로 다른 시편의 최대하중을 계산하는 간단한 방법을 평면변형하의 A572 강(상온)과 A533(B)강(-10 C)에 적용하여 기존의 실험결과와 비교하였다. 또한 균열선단열림변위와 J-적분값에 기초한 다른 방법과 비교논의되었다.

1. 서론

탄소성재료의 파괴에 대한 재료의 저항을 시험하는 표준으로 주로 미국재료 시험학회 (ASTM) 의 여러 시험방법이 사용되고있다. 이중 탄성재료의 파괴인성값 K_{Ic} 에 해당되는 탄소성재료 파괴개시에서의 J-적분값 J_{Ic} 의 측정표준에 ASTM 표준 E813-89 가 사용되고, 파괴개시 이후의 안정된 균열성장에 대한 재료의 저항값을 J-적분값으로 표시한 J-R 곡선이 ASTM 표준 E1152-87에 의해 얻어진다. 이들은 J_{Ic} 값과 J-R 곡선을 재료의 고유성질로 간주하여 다른 임의 시편에대한 유한요소해석에서 J-적분값에 해당하는 하중을 계산하는 방법이다.

그러나 이들 표준의 제시에도 불구하고 재료의 파괴저항을 균열성장에 필요한 단위면적당 에너지인 J-적분값으로 표시하는데 대한 신뢰성이 여러면에서 의문시 되어 왔다 [1]. 먼저 J-적분값은 탄소성재료가 아닌 비선형 탄성재료 거동에 기초하여 있으므로 균열성장으로 인한 국부적인 응력감소가 동반된 문제에 적합한 변수가 아니다. 특히 이 제한성은 균열선단 부근에서 더욱더 확대되어 가공경화재료의 균열선단의 응력과 스트레인 분포를 J-적분값의 향으로 표시할 때 이것이 비선형 탄성재료에 관한 것임을 분별있게 판단해야한다. 또한 J-적분의 개념이 정지한 균열에 정당하므로 균열성장의 양이 작지않는 경우의 적용은 이론적으로 정당하지않다. 다시말해 같은 J-적분값에서, 초기의 진행하지않은 균열선단의 응력과 스트레

인 분포가 성장된 균열선단의 경우와 동일하다고 생각할 수 없다. 왜냐하면 균열성장
에 따른 국부적인 부하감소가 있기 때문이다. ASTM 표준 E1152-87에서 J-R 곡선의
정당한 범위는 균열성장이 시편의 균열방향의 연결면길이의 10% 이내로 제한하고있
다. 따라서 작은 시편의 시험으로 큰 구조물의 파단을 예측할수있는 방법으로는 이
용될수없다. 또한 부분적 하중제거시의 탄성기울기로 성장된 균열길이를 반복해서
측정하는 고도의 장비와 기술이 일관된 J-R 곡선을 얻기위해 필수적이다. 이에 관
련된 실험과 실험자료처리의 여러방법들이 제안되고 있으나 실험실간의 자료교환이
자료의 일관성 부족으로 일반화되지 못하고있다.

그래서 재료의 파괴저항을 표시하기위한 새로운 변수의 필요성이 생기고
균열선단 열림변위(CTOD)가 제안되어 영국에서 처음 표준(BS-5762)이 나왔다. 이는
3점 굽힘시편으로 하중과 시편변위를 측정하여 임계하중에서의 시편변위로 부터 소
성인지를 이용한 균열선단 열림변위를 계산하는 방식이다. 미국 재료시험학회
(ASTM)에서는 CTOD의 시험표준을 제정하기위해 시안이 작성되어 세계의 여러 연구소
가 참여하여 이 시안에 기초한 실험을 수행하여 그결과를 ASTM 보고서[2]
RR-E-24-1013에 수록하였다. 실험은 구조용 등급의 A572 강과 A533B 강에 대해 수
행되었고 전자의 시험온도는 상온으로 천이온도 이상의 연성거동영역이고 후자의 시
험온도는 -10 C로 천이온도 영역에 해당된다. 미국과 유럽의 11개독립된 실험실이
참가한 이 계획에서 재료의 안전균열성장개시에서의 CTOD 와 불안정균열 개시에서의
CTOD 혹은 최대하중에서의 CTOD가 측정되어 비교되었다. 이에 기초한 ASTM 표준은
E1290-89 의 CTOD 파괴인성 측정의 표준시험법이 있다.

그러나 균열성장이 동반된 재료의 CTOD 와 여러 임의 시편의 부하응력 사
이의 이론 관계가 일반화되지 않았으므로 재료의 임계 CTOD 값에서 기계요소의 설계
응력을 얻을수 없다. 따라서 현재에는 유한요소법을 이용한 수치적해 혹은 경험적
관계식을 이용하거나 비선형 탄성재료에 대한 CTOD 수식을 이용하여 측정된 CTOD를
J-적분값으로 전환하여 사용하므로 CTOD 시험법의 도입이 재료의 파괴저항을 설명하
는 근본적인 발전은 될 수없다.

2. 실험 과 이론

구조용강이 천이온도 이상에서 하중을 받아 파괴에 도달하는 경우, 금속의
연성으로 인해 균열성장이 발생한다. 기계의 설계와 안전해석에 요구되는 지식은
허용 균열길이이고 이는 임의 길이의 균열에 대한 최대허용하중의 결정이 가능해
야 얻어질 수있다. 최대하중은 초기균열길이에 성장된 균열길이를 합한 길이에서
결정되고 균열성장이 시편의 종류와 크기에 따라 다르므로 균열성장의 계산이 필수
적이다.

Gu [3, 4]의 연구에서는 균열성장이 균열선단의 열림변위(CTOD) 증분에 직접 의존한다는 관점에서, CTOD 증분을 하중증가없이 균열진행으로 발생하는 부분과 하중증가로 인한 부분으로 나눈다. 이때 균열성장은 이 CTOD 증분에 비례하는 길이만큼 성장한다 가정하고 이 비례상수를 균열성장에 대한 재료의 저항상수로 제안하였다. 진행된 균열선단에서 열림변위가 증가하면 이에 비례하여 균열이 진행하고 이 진행으로 인해 또한 하중증가로 인해 열림변위가 증가하여 균열이 다시 진행하는 반복적 과정이 되풀이 된다. 이 과정의 마지막은 하중증가없이 균열이 진행할 수 있을 때와 전체하중이 균열진행 방향의 파괴되지 않은 단면에 대한 한계하중에 도달할 때의 두 경우이다.

본 연구에서는 알루미늄에 대해 적용된 Gu [3, 4]의 방법을 위에 언급된 두 종류의 강에 대한 ASTM의 방대한 시험 [2]에 적용하여 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 최대하중이 있는 모든 실험결과를 이용하였고 안정균열성장개시에서의 CTOD만을 측정하기 위해 최대하중 이전에 부하를 제거한 경우는 제외시켰다. 이로써 제안된 방법이 재료에 관계없이 적용될 수 있음을 보이고자한다.

균열길이 a , 시편두께 B , 시편폭 W 의 시편형상은 그림과 같다.

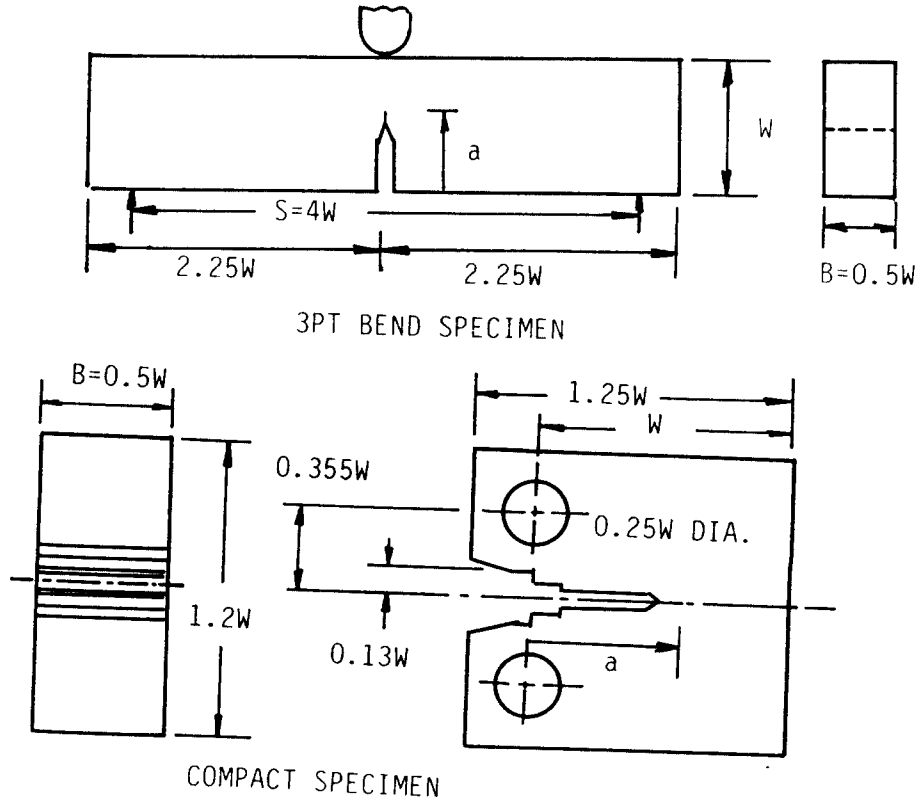


Fig. 1 Specimen configurations.

실험에 이용된 구조용등급 강의 기계적 성질은 다음과 같다.

표 1.

재 료	A572 (55)	A533(B)
항복응력(MPa)	400	400
인장강도(MPa)	616	572
탄성계수(GPa)	210	
포아손비	0.3	

Gu [3, 4] 의 이론에서 재료의 균열성장저항상수 I_c 는 위에서 언급된 CTOD V_t 증분에 대한 균열성장의 비로서 다음식으로 표시된다.

$$I_c = dV_t/da \quad (1)$$

CTOD 증분과 J-적분값 증분이 비례할 경우 위의 조건은 Paris et al [5] 의 $T=(dJ/da)(E/\sigma_o^2)$ =일정 의 조건과 유사하다. 여기서 탄성계수는 E 항복강도는 σ_o 로 표시한다. 이 유사성은 정지하거나 미소진행의 균열선단에 대해 비례관계가 밝혀져 있으므로 정당하다 [6]. 그러나 위 조건의 CTOD 가 임의의 진행하는 균열선단에 대해 정의되어있고 현재 진행하는 균열선단의 CTOD 와 J-적분값 증분이 비례한다는 증명이 없으므로 두 조건은 유사하지않다. 하중 P를 받는 시편의 응력확대계수가 $K=Pf(a)$ 로 표시되는 시편에서 균열성장과 하중증가는 다음의 증분식으로 표시된다.

$$dP = \frac{1}{2Pf(a)^2} [E\sigma_o I_c - 2P^2 f(a) \frac{df}{da}] da \quad (2)$$

이 식에서 균열길이 a 는 균열선단에서 재료의 소성변형 영향이 포함된 유효균열길이이므로 실제의 측정가능한 균열길이는 아니다. 처음의 균열길이 a_o 에 대한 파괴 개시 인성값 K_i 에 해당하는 하중 P_i 에서 시작되어 하중과 균열길이의 적분으로 계산된다. 이때 균열선단의 둔화로 인한 유효균열길이의 변화[7]는 무시한다.

$$\begin{aligned} P &\rightarrow P + dP \\ a &\rightarrow a + da \end{aligned} \quad (3)$$

이들 적분의 한계인 최대하중은 윗식에서 하중증분이 $dP=0$ 에 도달하는 경우와 전체 하중 P 가 한계하중 P_L 에 도달하는 경우의 두 가지가 있을수있다. 여기서는 실험의 하중-변형곡선이 최대하중에서 완만하므로 한계하중에 의한 최대하중을 가정하였다. 이식의 적분을 위해 3개의 상수가 필요하다. 이미 언급된 파괴개시인성값 K_i 이외에 균열성장 저항상수 I_c 와 재료의 항복강도 σ_o 이다. 항복강도 σ_o 의 결정은 시편의 한계하중이 비경화성 재료에 대한 개념이므로 실제의 경화성 재료의 한계하중은 0.2% 영구스트레인이 생기는 항복응력과 인장강도 사이의 값으로 나타낼 수있다. 결국 이들 3상수는 확정적인 결정방식보다 시행착오법을 통해 계산된 최대하중이 실험값에 근접하도록 하면서 결정되는 것이 바람직하다. 이때 될수록 긴균열과 짧은 균열, 인장하중과 굽힘하중, 큰 시편과 작은 시편등 시편분포의 양단이 선택되도록 한다. 결정된 상수는 표 2에 나타나있고 상수결정에 이용된 데이터는 각 재료와 각 시편에서 한개씩 선택하였다. 시행착오에 의한 상수결정이므로 표 2의 값 근방에서 상수를 다르게 선택하더라도 결과에는 큰 영향을 주지않는다. 또한 파괴개시인성값 K_i 은 ASTM 표준 E399-83의 K_{Ic} 값과 결정방법이 다르므로 차이가 있을 수있다. 각 시편의 한계하중 P_L 과 하중 P 를 받는 시편의 응력확대계수 $K_I=Pf(a)$ 는 균열길이 $a = \lambda W$ 와 항복강도 σ_o 의 항으로 다음과 같다.

컴팩트 시편의 경우,

$$P_L = \frac{1.26\sigma_o WB(1 - \lambda)^2}{(2 + \lambda)} \quad (3)$$

$$K_I = \frac{P}{BW^{1/2}} \frac{(2 + \lambda)}{(1 - \lambda)^{3/2}} (0.886 + 4.64\lambda - 13.32\lambda^2 + 14.72\lambda^3 - 5.6\lambda^4) \quad (4)$$

굽힘시편의 경우,

$$P_L = 1.456\sigma_o B(W-a)^2/S \quad (5)$$

$$K_I = \frac{3PS}{2BW^{3/2}} \frac{\sqrt{\lambda} [1.99 - \lambda(1 - \lambda)(2.15 - 3.93\lambda + 2.7\lambda^2)]}{(1 + 2\lambda)(1 - \lambda)^{3/2}} \quad (6)$$

표 2.

	I_c	K_i (MPaym)	σ_o (MPa)	오차의 절대값 평균	
				C(T)	SE(B)
A572(55)	0.035	50.07	470	2.74%	3.89%
A533(B)	0.047	53.25	490	3.34%	3.93%

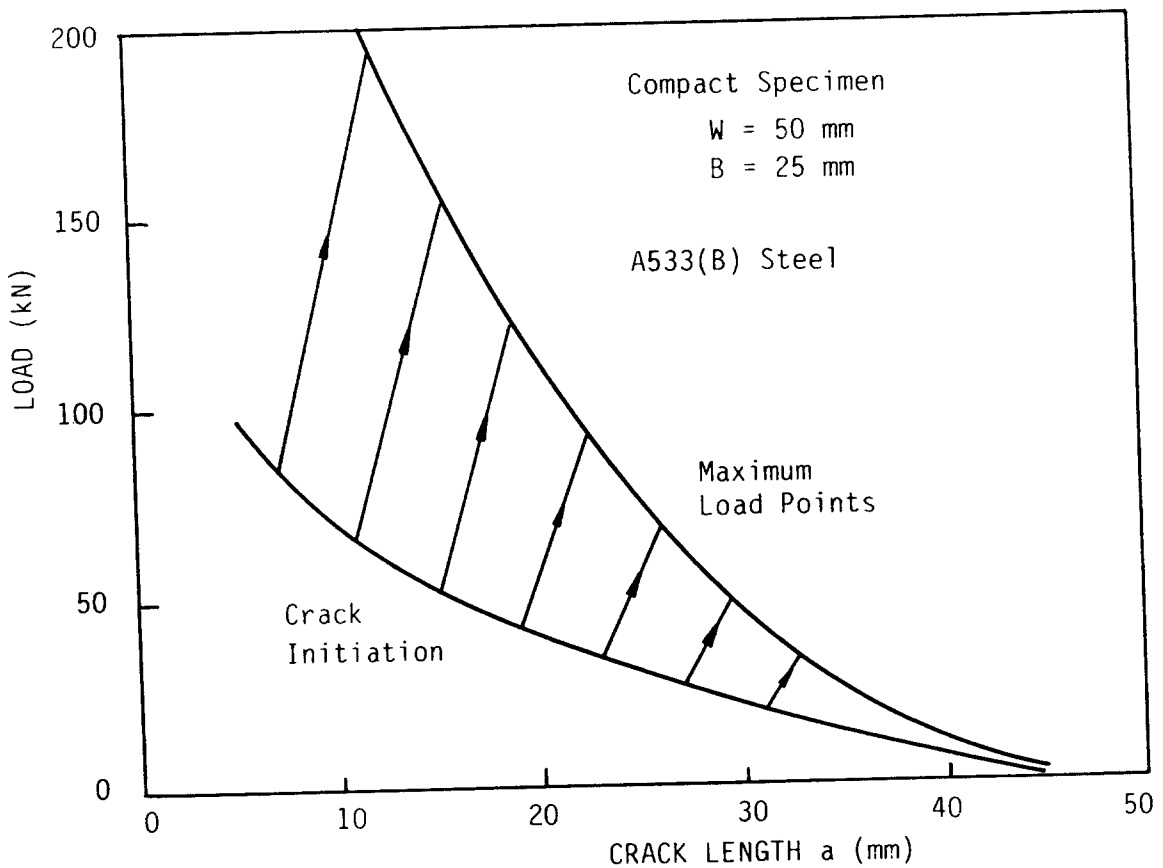


Fig. 2. Fracture initiation, crack growth, and maximum load for compact specimens of A533(B) steel.

표 2의 상수로 계산된 최대하중과 실험에서의 최대하중이 표 3에 비교되어있고 여기서 각재료 약 40개의 시편의 최대하중에 대한 평균오차는 4% 이하이고 시편별 재료별 오차가 표 2에 주어져있다. 표 3에서 A572 강의 최대 오차는 12% 이고 A533(B) 강의 최대오차는 8.5%이다. A533(B) 강의 한 컴팩트 시편에 대한 파괴개시하중과 최대하중의 비교가 Fig. 2에 주어져있다. 파괴개시하중은 파괴개시인성으로 결정되고 이 인성값을 크게하여 최대하중을 계산할수 없음을 그림에서 알 수있다. 결국 각 재료에대해 결정된 3개의 상수로 모든 실험 최대하중을 계산할수있었다. ASTM 표준 E1290-89에 의한 CTOD 상수와 비교하면 재료상수의 일관성면에서 또한 이용의 편의성면에서 본 연구의 방법이 더 나은 방법임을 알수있다. 보고서 RR-E-24-1013에서 측정된 임계 CTOD값은 실험실에 따라 많은 차이를 나타내고 있다. 예를들면 A572 (Grade 55)강의 최대하중에서의 CTOD 평균은 0.48mm (0.019in) 이고 표준편차는 0.14mm (0.0054in) 이며 A533(B)의 불안정 성장개시에서 CTOD 평균값은 0.23mm (0.0089in) 이고 표준편차는 0.08mm (0.0032in) 로서 두 경우 표준편차가 평균값의 약 30%에 이른다. 따라서 임계 CTOD값의 정당성은 아직 실용적인 수준에 이르지않았다고 할수있다. 참고로 실험 데이터가 얻어진 11개 실험실기관, 실험책임자, 국명이 표 4에 별도로 표시되어있다.

3. 결론

탄소성재료의 파괴에서 균열성장이 있는 시편의 최대하중을 계산하는 방법이 제시되어 구조용 등급의 A572강과 A533(B)강에 각각 적용하여 기존의 실험과 비교하였다. 컴팩트시편과 굽힘시편에대해 11개의 독립된 실험실에서 얻은 약 40개 시편의 최대하중이 모두 3개의 재료상수로 작은 오차범위내에서 계산될 수 있었다. 이 방법은 소수의 시편에대한 최대하중만으로 재료상수를 결정할수있고, 재료성질의 결정과 시편 최대하중계산이 동일한 방식을 통해 이루어지므로 이들이 분리된 기존의 J-R 곡선에의한 방법에 비해 장비나 절차면에서 간편하다.

참고문헌

- [1] Broek, D., *The Practical Use of Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Pub., The Netherlands, p.116, 1988.
- [2] ASTM Research Report RR-E-24-1013, "Interlaboratory Test Study on Proposed CTOD Test Method", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988.
- [3] Gu, I., "An Engineering Approach for Crack-Growth Analysis of 2024-T351

- Aluminum Alloy", *ASTM STP 1131-II*, American Society for Testing and Materials, pp.246-256, 1992.
- [4] 구인회, "연성균열성장의 해석," 대한기계학회 논문집, 제 14권 제 1호 pp. 103-111, 1990.
- [5] Paris, P. C., Tada, H., Zahoor, A., Ernst, H., "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth," *Elastic-Plastic Fracture, ASTM STP 668*, American Society for Testing and Materials, pp. 5-36, 1979.
- [6] Shih, C. F., "Relationships between the J-integral and the Crack Opening Displacement for Stationary and Extnding Cracks," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 29, No. 4, pp.305-326, 1981
- [7] Gu, I., "Crack-Tip-Acuity Effect on Crack Growth Initiation," *ASME Transaction, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.109, pp. 216-220,1987

표 3(A) A572 강 (시험온도-상온)의 최대하중의 실험과 계산비교.

W (mm)	B (mm)	a ₀ (mm)	S (mm)	P _{max} (실험) (kN)	P _{max} (계산) (kN)	실험실
compact specimens						
51.32	18.90	26.24		40.8	40.55	A
50.8	19.03	26.21		39.43	39.66	E
50.8	19.03	26.31		39.25	39.33	E
50.8	19.03	26.54		38.96	38.59	E
38.09	18.97	20.4		29.58	27.85	F
38.09	18.97	20.3		30.56	28.18	F
38.13	19.02	19.98		31.80	29.37	G
38.10	19.02	20.45		31.63	27.79	G
49.94	19.0	27.20		33.97	34.41	J
49.94	19.0	26.24		36.78	37.43	J
49.96	19.0	25.60		39.40	39.57	J
50.8	19.06	25.83		41.42	40.99	K
50.8	19.06	26.25		40.25	39.59	K
50.8	19.56	25.55		42.75	43.03	M
50.8	19.56	25.58		43.28	42.91	M
50.8	19.56	25.37		43.82	43.65	M

bend specimens						
38.07	19.1	20.01	151.9	26.1	25.37	A
38.13	19.1	19.65	151.9	26.4	26.52	A
38.13	19.1	20.91	151.9	22.8	23.13	A
38.1	19.0	20.1	151.9	22.9	25.1	C
38.2	19.05	22.6	151.9	19.9	19.06	C
38.15	19.0	19.2	151.9	25.75	27.76	C
38.1	19.1	18.8	151.9	27.76	28.88	C
38.15	19.1	19.3	151.9	26.60	27.59	C
38.13	19.1	19.4	151.9	29.71	27.24	C
38.13	19.1	19.2	151.9	29.18	27.78	C
38.12	19.06	20.7	152.4	23.53	23.49	F
38.1	19.05	19.30	152.4	29.40	27.24	G
38.1	19.05	19.56	152.4	27.84	26.58	G
37.97	18.97	20.17	152.0	24.47	24.47	J
37.97	18.97	19.89	152.0	24.41	25.22	J
37.97	18.97	19.69	152.0	25.36	25.81	J
37.97	18.97	19.94	152.0	24.66	25.11	J
37.39	18.69	17.58	151.9	28.65	29.63	N
37.39	18.69	18.75	151.9	25.80	26.32	N
37.39	18.69	18.42	151.9	25.69	27.21	N
37.39	18.69	18.49	151.9	26.87	27.06	N
37.39	18.69	18.49	151.9	26.02	27.06	N
38.15	19.1	22.43	152.4	21.88	19.34	L
38.20	19.05	22.79	152.4	18.60	18.54	L
38.25	19.05	22.10	152.4	19.68	20.31	L

표 3(B) A533(B)(실험온도 -10 C)강의 최대하중의 실험과 계산비교

W (mm)	B (mm)	a ₀ (mm)	S (mm)	P _{max} (실험) (kN)	P _{max} (계산) (kN)	실험실
compact specimens						
50.0	25.0	24.93		58.7	61.10	B
50.0	25.0	23.54		70.0	68.27	B
50.0	25.0	24.27		63.0	64.46	B
50.8	24.89	24.99		64.33	63.46	E

50.8	24.90	25.21		59.57	62.33	E
50.78	25.29	26.5		53.55	58.05	F
50.84	25.40	25.57		63.25	61.90	F
50.85	25.35	25.91		60.31	60.11	F
50.83	24.93	25.99		56.04	58.68	F
50.85	25.35	25.23		69.48	63.58	F
50.67	25.4	28.96		44.92	45.46	G
50.65	25.4	27.17		54.93	53.44	G
50.67	25.4	26.42		56.71	57.07	G
49.96	24.79	25.15		56.83	59.35	J
49.94	24.79	24.41		64.38	62.98	J
50.8	24.9	24.74		61.7	64.71	M
50.8	24.9	25.25		57.4	62.17	M
50.8	24.9	25.95		58.8	58.69	M
50.8	24.9	25.57		59.8	60.57	M
bend specimens						
50.85	25.48	27.28	202.95	43.6	45.13	A
50.39	25.45	29.05	202.95	37.6	37.12	A
50.85	25.48	28.31	202.95	38.8	41.27	A
50.06	25.0	24.7	202.44	49.6	51.34	C
50.11	25.0	24.8	202.44	54.3	51.03	C
50.14	24.9	25.55	202.44	50.71	48.06	C
50.09	25.0	24.4	202.44	50.48	52.66	C
50.09	24.9	25.2	202.44	49.6	49.25	C
50.79	24.93	27.2	203.2	44.12	44.16	F
50.81	24.95	25.9	203.2	47.59	49.18	F
50.80	24.92	26.1	203.2	47.77	48.35	F
50.82	24.94	25.8	203.2	48.03	49.63	F
50.8	24.54	23.6	203.2	56.04	57.61	G
50.8	24.54	22.6	203.2	58.71	61.93	G
50.8	24.54	22.4	203.2	58.71	62.71	G
50.8	25.4	24.4	203.2	52.26	56.16	N
50.8	25.4	23.4	203.4	55.82	60.48	N
50.8	25.4	24.6	203.2	54.58	55.35	N
50.8	25.4	23.9	203.2	58.71	58.29	N
50.8	25.4	25.76	203.2	47.48	50.61	N

표 4. ASTM 보고서 RR-E-24-1013 에 참여한 실험실

실험실	실험기관	책임자	국적
A	The Welding Institute	M. G. Dawes	U. K.
B	Fraunhofer Institute	J. G. Blauel	Germany
C	University of Kansas	S. T. Rolfe	U. S.
E	Materials Engineering Asso.	B. Menke	U. S.
F	Bethlehem Steel Corp.	M. S. Reemsnyder	U. S.
G	Battelle-Columbus Lab.	G. Wilkoaski	U. S.
J	GKSS	K. H. Schwalbe	Germany
K	Atomic Energy of Canada	L. A. Simpson	Canada
L	Ciudad Universitaria	M. Elices	Spain
M	CISE	G. Angelino	Italy
N	Exxon Research Co.	C. P. Royer	U. S.