

〈논 문〉

살피 충격시험에 있어서 시험편 크기의 영향

김 훈* · 김주학** · 지세환** · 홍준화**

(1996년 3월 6일 접수)

The Effect of Specimen Size in Charpy Impact Testing

Hoon Kim, Joo-Hark Kim, Se-Hwan Chi and Jun-Hwa Hong

Key Words : Sub-Size Charpy Impact Specimen(미소 살피 충격시험편), Size Effect(크기 영향), Normalization Factor(보정계수), Upper Shelf Energy(USE, 최대 흡수에너지), Ductile-Brittle Transition Temperature(DBTT, 연성취성 천이온도), Lateral Expansion(LE, 횡팽창량), Displacement(변위)

Abstract

Charpy V-notch impact tests were performed on the full-, half- and third-size specimens from two ferritic SA 508 Cl. 3 steels for nuclear pressure vessel. New normalization factors were proposed to predict the upper shelf energy(USE) and the ductile-brittle transition temperature (DBTT) of full-size specimens from the measured data on sub-size specimens. The factors for the USE and the DBTT are (Bb^2/Kt) and $(Bb/R)^{1/2}$, respectively, where B the width, b the ligament size, K_t the elastic stress concentration factor, and R the notch root radius. These correlations successfully estimated the USE and DBTT of the full-size specimens based on sub-size specimen data. In addition, the size effects were studied to develop the correlations among absorbed energy, lateral expansion(LE) and displacement. It was also found that the LE was able to be estimated from the displacement obtained by the instrumented impact test, and that the displacement would be used as a criterion for the toughness of the steels corresponding to change in their yield strength.

1. 서 론

1906년 프랑스의 Charpy에 의하여 창안된 충격 시험은 경제적이고 신속하게 이루어지며, 재료의 파괴인성치를 비교적 정확하게 상대평가할 수 있는 이점때문에, 웨라이트계 철강재료를 사용하는 구조물의 재료평가에서 필수적인 시험항목이다. 특히, 원자력발전의 핵심부인 원자로압력용기의 설계, 제조 및 가동중의 감시시험에 있어서 살피 충격

시험은 필수적인 시험항목중 하나이다.

지금까지 살피 충격시험에서는 ASTM E 23-94a⁽¹⁾에 규정되어 있는 $10 \times 10 \times 55$ (mm) 크기의 사각형 봉에 V-노치(notch)을 가공한 표준시험편이 주로 사용되어 왔다. 그러나 시험용 원자료를 이용하여 고밀도의 중성자가 조사되는 조사 시험편을 만드는 데 있어서, 제한된 시험용 캡슐(capsule) 용적과 조사하는 동안 플럭스(flux)와 온도분포의 불균일에 의하여 조사효과가 불확실하며, 한정된 조사시험 재료를 효율적으로 이용하고, 시험이 완료된 시험편을 재활용하기 위해서 시험편의 크기를 가능한 줄여야 할 필요성이 크게 대두되어 왔다. 이에 부

*회원, 한국원자력연구소, 현재 전북대학교

**회원, 한국원자력연구소 구조용강개발분야

응하여, 최근 미소시험편에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.^(2~11) 이들 연구자중 Corwin^(2,3) 등과 Louden 등⁽⁴⁾은 단면의 한 변의 크기를 표준시험편보다 1/2과 1/3로 줄인 미소시험편(각각 1/2과 1/3 크기 시험편)에 대하여 평가를 실시하였고, Kayano 등⁽⁵⁾은 1×1 및 1.5×1.5(mm) 단면을 갖는 미소시험편에 대하여 평가하였다. 이들은 모두 노치 선단의 파괴용적(fracture volume) 및 응력집중계수(stress intensity factor, K_I)를 이용하여 최대 흡수에너지(upper shelf energy, USE)를 보정하는 방법으로 미소시험편과 표준시험편의 관계를 설명하였으며, Corwin 등의 경우는 표준시험편의 USE가 150J 이상의 연성재료에 대하여, Louden 등의 경우는 표준시험편의 USE가 100J 이하의 취성재료에 대하여 대체로 양호한 결과를 얻었다. 그러나, 이들 보정계수의 적용범위가 제한적으로 시험대상 재료에 따라 다른 보정계수를 사용해야함을 시사하고 있다.

본 연구에서는 원자로압력용기 강재를 대상으로 미소시험편 및 표준시험편의 충격시험을 실시하였고, 미소시험편의 결과로부터 표준시험편의 연성취성 전이온도(ductile brittle transition temperature, DBTT)와 최대 흡수에너지(USE)를 예측할 수 있는 보정계수를 제시하고, 그에 대한 평가를 실시하였다. 또한, 각 시험편의 횡팽창량(lateral expansion, LE)과 흡수에너지의 관계에 대한 시험편 크기의 영향을 고찰하였고, 계장화(instrumented) 충격시험 결과에서 얻은 변위(displacement)와 흡수에너지의 관계에 대한 시험편 크기의 영향을 검토하였으며, 변위가 재료의 파괴인성을 평가하는 인자로 사용될 수 있는지에 대한 타당성을 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 원자로압력용기 강재인 SA508 Cl. 3 단조 강이며, 화학성분 및 상온에서의 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2에서와 같다. #2 재료의 항복강도와 최대응력의 기계적 성질은 #1 재료보다 크다. #1 재료는 L-T방향과 T-L방향으로 재료의 가공 방향성을 고려하여 시험편을 채취하였고, #2 재료는 T-L방향으로 시험편을 채취하였다.

준비된 시험편은 표준시험편과 1/2 및 1/3 크기의 미소시험편이며, 각 시험편의 크기 및 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 표준시험편은 ASTM 규격⁽¹⁾에 의하여 제작하였고, 1/2 및 1/3 크기의 미소시험편은 표준시험편의 단면의 한 변에 대하여 각각 1/2 및 1/3 크기인 5×5 및 3.33×3.33(mm)이고, 길이는 23.6 mm로 하였다.

Table 1 Chemical composition of SA 508-3 steels (wt %)

Steel	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Sb
#1	0.17	1.39	0.007	0.003	0.08	0.77	0.04	0.49	0.005	0.05	-
#2	0.21	1.36	0.007	0.002	0.27	0.92	0.21	0.49	0.005	0.03	0.0007
Steel	Al	As	Sn	N	Ti	Nb	Co	B	W	Zr	
#1	0.004	0.0035	0.0031	0.0038	0.003	0.003	0.01	0.0001	0.005	0.002	
#2	0.022	0.0034	0.0025	-	0.003	0.002	0.006	0.0002	0.002	0.002	

Table 2 Room temperature mechanical properties

Steel	Orient.	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
#1	L-T	410.4	548.7	23.7	74.0
	T-L	413.1	553.3	24.0	73.7
#2	T-L	456.8	601.5	29.0	74.0

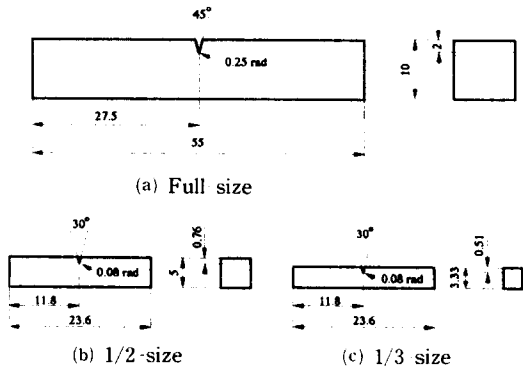


Fig. 1 Specimen configuration

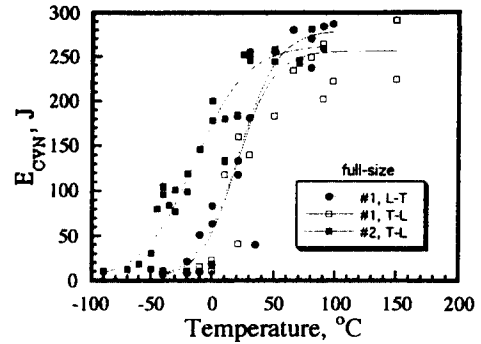
충격시험기의 계장화 장치는 로드셀(load cell)이 내장된 충격 팁(tup) 및 변위측정용 나이프에지(knife edge)와 광센서로 구성되어 있다(Dynatup Co.). 충격하중은 팁의 로드셀에 의해서 계측되고, 충격 순간부터의 변위는 햄머에 부착된 라이프에지가 광센서를 통과하므로 계측된다. 이들 계측데이터는 컴퓨터 프로그램(Dynatup Co. model 830-I system)으로 이동되어 처리 및 저장된다. 미소시험편용 앤빌(anvil)은 각 시험편이 앤빌에 놓여진 상태에서 타격점의 위치가 시험편의 타격선상의 중심과 팁의 충격중심 위치가 일치하도록 ASTM 규격⁽¹⁾에 준하여 제작하였다. 미소시험편에 대한 앤빌의 지지점 간격은 20 mm이고, 팁의 충격면의 폭은 2 mm이다. 충격시험은 시험기의 햄머무게를 조절하여 81.35, 162.7, 400.6 (J)의 3가지 용량에서 실시하였으며, 타격속도는 5.18 m/sec이다.

시험온도를 조절하기 위해 사용된 항온조(bath)는 고온용과 저온용으로 구분하여 사용하였다. 고온용 항온조는 내장된 전열체를 이용하여 시험온도를 조절하였고, 저온용 항온조는 액체질소를 주입하여 일정한 시험온도를 조절하였다. 항온조에 넣은 열 유지매체로서 상온 이상에서는 물(상온에서 98°C 까지) 또는 실리콘 오일(98°C 이상)을 사용하였고, 상온 이하에서는 알코올(상온에서 -60°C 까지) 또는 아이소펜탄(-60에서 -160°C 이하)을 사용하였다. 시험은 ASTM 규격⁽²⁾에 준하여, 일정 시험온도에서 5분 이상 유지시키고, 항온조에서 꺼내어 충격완료까지 5초 이내에 실시하였다. 시험편의 횡팽창량은 규격에 의해 자체 제작한 측정기를 이용하여 측정하였다.

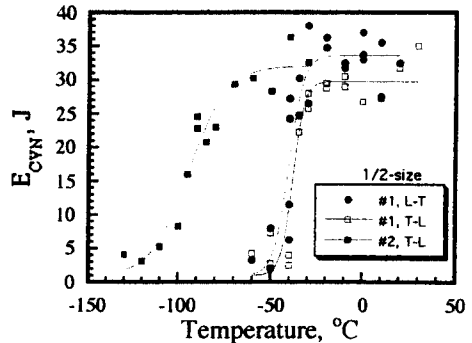
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 시험편 크기에 따른 충격시험 결과

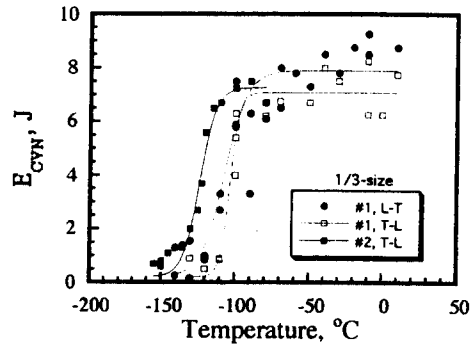
표준시험편 및 미소시험편의 충격시험에서 얻어진 흡수에너지를 시험온도에 대하여 Fig. 2에 정리하였다. 흡수에너지는 시험편의 크기에 따라 매우



(a) Full-size



(b) 1/2-size



(c) 1/3-size

Fig. 2 Dependence of absorbed energy on temperature for the full-, half- and third-size specimens

큰 차이를 나타내므로, 각 좌표의 scale을 다르게 하여 시험편 크기별로 나타내었다. 여기서, 실선은, 오차가 있는 시험결과와 해석을 간단하게 하고 인위적인 오차를 줄이기 위하여, 흡수에너지와 시험온도와의 천이곡선(transition curve)을 결정하는데 일반적으로 많이 사용하는 hyperbolic tangent (tanh) curve fitting 방법을 이용하여 그린 것이다. tanh 식은 다음과 같다.⁽¹²⁾

$$E_{CVN} = A + B \tanh[(T - T_0)/C] \quad (1)$$

여기서, E_{CVN} 은 흡수에너지, T 는 시험온도, A , B , C , T_0 는 회귀분석(regression analysis)에 의하여 결정되는 상수이다. 이들 상수는 다음과 같은 물리적 의미를 갖는다.

- $A - B$: 최소 흡수에너지(lower shelf energy, LSE)
- $A + B$: 최대 흡수에너지(upper shelf energy, USE)
- T_0 : 연성취성 천이온도(ductile-brittle transition temperature, DBTT)
- B/C : T_0 에서 기울기

그림에서 알 수 있듯이, 1/2 및 1/3 크기의 미소 시험편에 대한 천이곡선은 표준시험편과 유사한 곡선 형상을 보이고 있다. 그러나 USE가 현저히 감소하고, DBTT가 저온측으로 이동하는 등의 시험편 크기에 대한 영향을 나타내고 있다. #1 재료에

있어서, L-T방향은 T-L방향보다 USE가 증가하고, DBTT가 약간 낮게 측정되어 다소 방향성이 존재하고 있음을 보여주고 있다. 또한 #2 재료는 각 시험편 크기에 있어서 USE가 #1 재료의 L-T방향보다 다소 감소하지만 DBTT가 현저히 낮게 측정되고 있어 파괴인성이 상대적으로 향상되었음을 알 수 있다.

각 시험편의 충격곡선으로부터 구한 USE와 DBTT를 시험편 치수 및 응력집중계수(stress concentration factor, K_t)와 함께 Table 3에 나타내었다. 각 재료에 있어서 미소시험편은 표준시험편보다 USE가 현저히 감소되고, DBTT가 저온으로 감소되고 있다. 여기서, USE와 DBTT는 재질에 의한 변화뿐만이 아니고 시험편 크기에 의해서도 영향이 있음을 알 수 있다. 응력집중계수(K_t)⁽¹³⁾는 다음 식에서 구하였다.

$$K_t = \frac{2(b/R+1) - f(b/R+1)^{1/2}}{4(b/R+1)/g - 3f} \quad (2)$$

$$f = \frac{2(b/R+1)(b/R)^{1/2}}{(b/R+1)\arctan((b/R)^{1/2}) + (b/R)^{1/2}} \quad (3)$$

$$g = 3 \left[\frac{4(b/R)^{3/2}}{(b/R)^{1/2} + (b/R-1)\arctan((b/R)^{1/2})} \right] \quad (4)$$

여기서, b 는 노치 선단의 두께(ligament size)이

Table 3 Specimen geometry and measured Charpy values

Steel	Specimen size	Width B(mm)	Ligament size b(mm)	Notch root radius R (mm)	Span L(mm)	Stress concentration factor, K_t	Measured	
							USE* (J)	DBTT** (°C)
#1 L-T	full size	10	8	0.25	40	4.18	278	22
	1/2 size	5	4.24	0.1	20	5.48	33	-40
	1/3 size	3.33	2.78	0.1	20	4.51	8.3	-107
#1 T-L	full size	10	8	0.25	40	4.18	256	20
	1/2 size	5	4.19	0.1	20	5.45	30	-38
	1/3 size	3.33	2.68	0.1	20	4.43	7	-103
#2 T-L	full size	10	8	0.25	40	4.81	265	-14
	1/2 size	5	4.2	0.1	20	5.45	31	-94
	1/3 size	3.33	2.78	0.08	20	4.99	7.1	-124

*USE : Upper Shelf Energy

**DBTT : Ductile-Brittle Transition Temperature

고, R 은 노치선단의 반경이다. 이식은 b 와 R 의 함수이며, 단위는 무차원이다.

3.2 최대 흡수에너지(USE)의 예측

미소시험편의 결과로부터 표준시험편의 USE를 예측하기 위하여, 최근 많은 연구자들⁽²⁻¹¹⁾은 노치선단의 파괴용적(fracture volume) 및 노치의 기하학적 형상을 고려한 보정계수를 제안하였다. Corwin^(2,3) 등은 파괴시 노치선단에 생기는 소성변형의 확산과 관련된 보정계수(Bb)^{3/2}를 제시하였고, Lucas 등⁽⁶⁾은 Corwin 등과 다른 보정계수(Bb²)를 제시하였다. 여기서, B는 시험편의 폭이다. 이들 보정계수는 노치선단의 파괴용적만을 고려하였으며, USE가 150 J 이상의 연성재료에 대하여 잘 일치하는 결과를 보였다. Louden 등⁽⁴⁾은 파괴용적, 지지 점의 간격(span, L) 및 노치의 기하학적 형상을 고려한 보정계수(Bb²/LK_t)를 제시하여 USE가 100 J 이하의 취성재료에 대하여 10% 이내의 오차로 예측하였다. Kumar 등⁽⁷⁾은 Lucas 등과 동일한 보정계수(Bb²)를 사용하였으나, USE를 균열개시와 균열전파로 구분하였고, 균열개시에 의한 흡수에너지(Δ USE)만을 보정대상으로 한 것이 특징이다. Kayano 등⁽⁵⁾은 Corwin 등이 제안한 보정계수((Bb)^{3/2})를 응력집중계수(K'_t)로 나눈 보정계

수((Bb)^{3/2}/K'_t)를 사용하여 미소시험편(단면 1×1, 1.5×1.5(mm))의 결과에서 표준시험편의 USE를 예측하였다. 여기서, K'_t는 소성구속(plastic constraint, Q)을 고려한 응력집중계수이다.⁽⁵⁾ 이들 연구자들이 제안한 보정계수는 노치선단의 파괴용적을 공통적으로 고려하였으나, 시험대상 재료에 따라 적용범위가 제한적임을 시사하고 있다.

지금까지 제안된 보정계수를 약 250 J 이상의 USE를 갖는 3가지 종류의 재료에 대하여 적용하고, 그 결과를 표준시험편에 대한 미소시험편의 비([USE_{sub-size}]_N/[USE_{full-size}]_N)로 Table 4에 나타내었다. Corwin 등과 Lucas 등의 보정계수에 의한 결과는 본 연구의 대상재료가 150 J 이상의 USE를 갖는 연성재료임에도 불구하고 13~30% 정도의 오차가 있고, 1/3 크기의 시험편에 대한 오차는 더 크다. Louden 등의 보정계수에 의한 결과는 50~65% 정도의 오차를 보이고 있다. Kayano 등의 보정계수에 의한 경우, 1/2크기 시험편에 의한 표준시험편의 결과는 거의 정확하게 예측될 수 있으나, 1/3 크기 시험편에 의한 표준시험편의 결과는 30% 정도의 오차를 보이고 있다. 이상의 각 연구자들의 보정계수에 의한 본 연구결과는 이들의 연구결과에서 제시한 오차의 한계를 초과하는 재료의 의존성을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 미

Table 4 Comparison of currently available normalization factors for USE

Researcher	Corwin et al. ^(2,3)			Lucas at al. ⁽⁶⁾			Louden et al. ⁽⁴⁾			Kumar et al. ⁽⁷⁾	Kayano et al. ⁽⁵⁾		
Normalization factor	(Bb) ^{3/2}			Bb ²			Bb ² /LK _t			Bb ²	(Bb) ^{3/2} /K' _t ***		
Remark	Ductile material (USE > 150J)			Ductile material (USE > 150J)			Brittle material (USE < 100J)			The micro-crack initiation energy (Δ USE**)	Sub-size specimen****		
Specimen	#1 L-T	#1 T-L	#2 T-L	#1 L-T	#1 T-L	#2 T-L	#1 L-T	#1 T-L	#2 T-L		#1 L-T	#1 T-L	#2 T-L
$\frac{[USE]_{1/2-size}_N}{[USE]_{full-size}_N}$ *	0.87	0.88	0.87	0.85	0.85	0.85	0.45	0.48	0.48	—	0.99	0.99	0.99
$\frac{[USE]_{1/3-size}_N}{[USE]_{full-size}_N}$	0.76	0.74	0.68	0.72	0.73	0.67	0.35	0.34	0.35		0.71	0.68	0.7

*[USE]_N=USE/Normalization factor

** Δ USE=USE_{notch}-USE_{precrack}

***K'_t=K_t(Q_{sub}/Q_{full}), Q : Plastic constraint (1- θ /2+ π /2), θ : Notch angle

****1×1 and 1.5×1.5(mm)

소시험편의 결과에서 표준시험편의 USE를 예측하기 위하여 노치선단의 파괴용적(Bb^2)과 응력집중계수(K_t)로 구성된 새로운 보정계수(Bb^2/K_t)를 제시하고 검토하였다.

Table 5는 본 연구에서 제시한 보정계수(Bb^2/K_t)로 나눈 각 시험편의 USE($[USE]_N$) 및 표준시험편에 대한 미소시험편의 비($[USE_{sub-size}]_N/[USE_{full-size}]_N$)를 나타내었다. 표준시험편에 대한 1/2 크기 및 1/3 크기 시험편의 비는 각각 0.96과 0.69의 일정한 값으로 재료에 대한 의존성이 없음을 알 수 있다. Fig. 3은 표준시험편의 보정치($[USE_{full-size}]_N$)에 대한 미소시험편의 보정치($[USE_{sub-size}]_N$)의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 미소시험편의 보정치는 표준시험편의 보정치에 대하여 직선으로 나타나며, 두 직선은 일정한 기울기로 평행을 이루고 있다. 이 직선 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[USE_{sub-size}]_N = \alpha [USE_{full-size}]_N + C \quad (5)$$

여기서 $[USE_{full-size}]_N$: 표준시험편의 USE 보정치
 $[USE_{sub-size}]_N$: 미소시험편의 USE 보정치
 α : 기울기이며 실험에 의해 결정되는 상수
 C : 실험에 의해서 결정되는 상수

이 식에서 기울기 α 는 시험편의 재질과 크기에 대하여 일정하고, 상수 C 는 시험편의 크기에 따라 결정된다. 따라서, 시험 대상 재료의 재질과 시험편의 크기에 따라 기울기 α 와 상수 C 가 결정되면, 이 식에 의하여 미소시험편의 결과로부터 표준시험편의 USE를 예측할 수 있다. 또한, 이 식에서 시험편 크기의 영향을 제거하면, 재료의 재질변화에 따른 표준시험편의 USE 변화량은 미소시험편의 USE 변화량으로부터 예측할 수 있다. 이상으로부터 보정계수 (Bb^2/K_t)는 약 250 J 이상의 USE를

갖는 재료의 시험편 크기에 대한 USE를 예측하는 적절한 계수임을 알았다.

3.3 연성취성 천이온도(DBTT)의 예측

DBTT는 시험편 크기의 감소에 따라 저온 측으로 감소하는 시험편 크기의 영향을 보이고 있다 (Table 3). 미소시험편의 결과로부터 표준시험편의 DBTT를 예측하기 위하여, 본 연구에서는 시험편의 단면과 노치선단의 직경으로 구성된 보정계수(Bb/R)^{1/2}를 이용하여 고찰하였다. Table 6은 각 시험편의 DBTT를 보정한 값 $[DBTT]_N$ 과 각 시험편의 보정치를 평균한 값 $[DBTT_{ave}]_N$, 평균 보정치로 나눈 값 $[DBTT]_N/[DBTT_{ave}]_N$ 을 나타낸 것이다. Fig. 4는 각 재료의 $[DBTT]_N/[DBTT_{ave}]_N$ 을 표준시험편의 DBTT에 대하여 정리한 것이다. 여기서 보정계수 (Bb/R)^{1/2}가 유효하다면, 각 시험편의 $[DBTT]_N/[DBTT_{ave}]_N$ 은 1이 된다. 그림에서 각 시험편의 보정된 DBTT($[DBTT]_N/[DBTT_{ave}]_N$)는 시험편의 재료와 크기에 관계없이

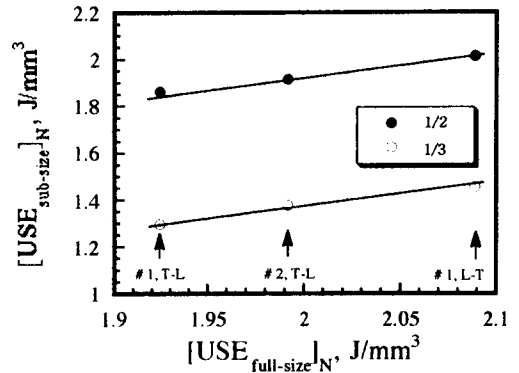


Fig. 3 Comparison of normalized USEs for the full and sub-size specimens $[USE]_N = USE / (Bb^2 / K_t)$

Table 5 Evaluation of the USE by the proposed normalization factor (Bb^2/K_t) for this study

Specimen	#1, L-T			#1, T-L			#2, T-L		
	Full	1/2	1/3	Full	1/2	1/3	Full	1/2	1/3
USE(J)	278	33	8.3	256	30	7	265	31	7.1
$[USE]_N^* (J/mm^3)$	2.09	2.01	1.45	1.92	1.86	1.3	1.99	1.92	1.38
$\frac{[USE_{sub-size}]_N}{[USE_{full-size}]_N}$	-	0.96	0.69	-	0.97	0.68	-	0.96	0.69

* $[USE]_N = USE / (Bb^2 / K_t)$

±10% 이내의 정확도로 1에 수렴되고 있다. 이상의 관계에서 미소시험편의 결과로부터 표준시험편의 DBTT를 예측할 수 있으며, $(Bb/R)^{1/2}$ 는 시험편 크기에 따른 DBTT를 예측하는 보정계수로 적절함을 알았다.

3.4 횡팽창량과 흡수에너지 관계에 대한 시험편 크기의 영향

횡팽창량(lateral expansion, LE)은 흡수에너지와 더불어 재질의 인성을 평가하는 기준으로 ASME Code Section III에 채택되었고, 이에 대한 적용방법은 WRC Bulletin No. 175⁽¹⁴⁾에 상세히 기

술되어 있다. 따라서 본 연구에서는 LE와 흡수에너지의 관계에 대한 시험편 크기의 영향을 고찰하였다.

Fig. 5는 각 시험편의 파면에서 측정된 LE와 흡수에너지의 관계를 시험편의 크기에 따라 각각 나타낸 것이다. 여기서, 최소 USE(minimum USE)는 각 시험재의 USE중 가장 작은 값을 나타낸다. 표준시험편과 1/2 크기 시험편은 USE보다 낮은 철이온도의 상부에 상당하는 흡수에너지까지 일정한 기울기를 갖는 직선관계를 이루고, 그 이상에서는 포화하는 경향을 보이고 있으나, 1/3 크기 시험편은 USE까지 거의 직선관계를 보이고 있다. 또한 #1 재료의 L-T와 T-L방향 시험편의 직선은 일치하며, #2 재료는 #1 재료보다 직선의 기울기가 약간 감소하고 있다. 이런 경향은 각 시험편 크기에 있어서 공히 나타나는 것으로 재료의 항복강도의 차에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 6은 Fig. 5의 각 시험편의 직선부분에 대하여 (Bb^2) 로 보정한 흡수에너지와 b 로 무차원화한 LE의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 표준시험편과 1/2 크기 시험편은 각 재료에 대하여 하나의 직선으로 일치되지만, 1/3 크기 시험편의 직선은 약간 감소하고 있다. 이와 같은 현상은, 충격적 노치 선단에 생기는 응력상태가 표준시험편과 1/2 크기 시험편의 경우 거의 동일하며, 1/3 크기 시험편은 두 시험편과 다르게 생기기 때문으로 판단된다. 따

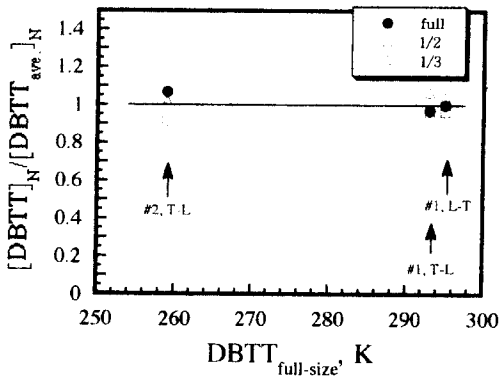


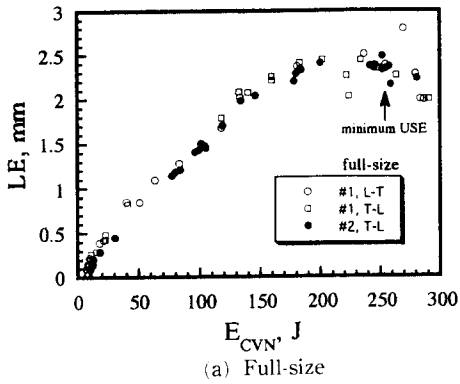
Fig. 4 Comparison between $[DBTT]_N/[DBTT_{ave.}]_N$ and DBTT of full-size specimen $[DBTT]_N = DBTT(K)/(Bb/R)^{1/2}$

Table 6 Evaluation of the DBTT by the proposed normalization factor $(Bb/R)^{1/2}$ for this study

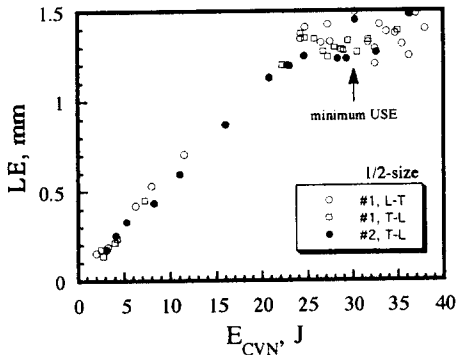
Specimen		DBTT		$[DBTT]_N^*$	$[DBTT_{ave.}]_N$	$\frac{[DBTT]_N}{[DBTT_{ave.}]_N}$
		°C	°K			
#1 L-T	Full size	22	295	16.49	16.57	0.995
	1/2 size	-40	233	15.96		0.963
	1/3 size	-107	166	17.26		1.042
#1 T-L	Full size	20	293	16.38	16.87	0.971
	1/2 size	-38	235	16.22		0.962
	1/3 size	-103	170	18		1.067
#2 T-L	Full size	-14	259	14.48	13.56	1.068
	1/2 size	-94	179	12.35		0.911
	1/3 size	-124	149	13.85		1.021

* $[DBTT]_N = DBTT(°K)/(Bb/R)^{1/2}$

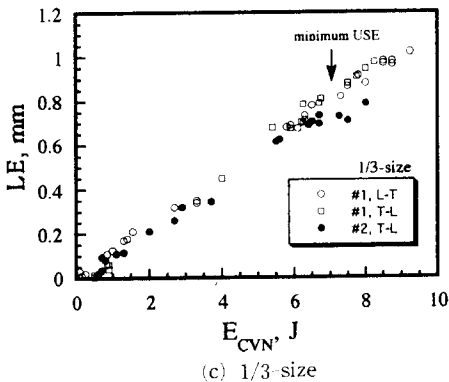
라서, 파괴시 응력상태가 시험편 크기에 따라 동일하다고 가정할 때, 보정계수(Bb^2)를 이용한 LE와 흡수에너지의 관계는 시험편 크기의 영향을 고려하지 않아도 되며, LE를 이용한 재료의 인성은 미소 시험편의 결과를 이용하여 평가될 수 있다.



(a) Full-size



(b) 1/2 size



(c) 1/3-size

Fig. 5 Lateral expansion(LE) vs. absorbed energy (E_{CVN}) for each size specimen. The minimum USE means the lowest value among the three material of each size specimen

3.5 변위와 흡수에너지 관계 및 시험편 크기의 영향

계장화 충격시험 결과에서 측정된 변위(displacement)를 인성의 평가인자로서의 가능성을 검토하기 위하여, 변위와 LE의 관계 및 변위와 흡수에너지의 관계를 고찰하였다.

Fig. 7은 각 시험편에 있어서 계장화 샤프트 충격시험기를 이용하여 얻은 하중-변위선도의 대표적인 예를 계략적으로 나타낸 그림이다. 그림에서 a)는 취성파괴를 나타내는 최소 흡수에너지(LSE)영역에 대한 것이고, (b)와 (c)는 연성과 취성파면이 동시에 존재하는 전이영역(transition region)에 대한 것이며, (d)는 연성파괴를 나타내는 최대 흡수에너지(USE)영역에 대한 것이다. 여기서, P_{gy} 는 충

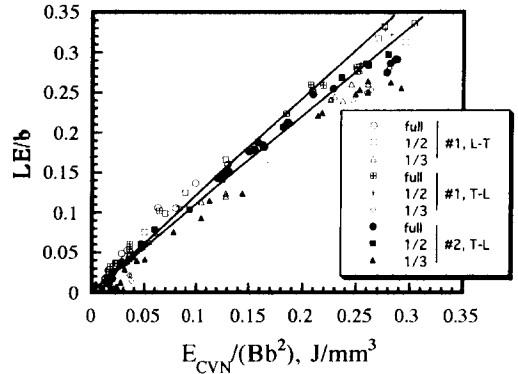


Fig. 6 Lateral expansion(LE) divided by ligament size (b) vs. absorbed energy (E_{CVN}) normalized by (Bb^2) for each size specimen

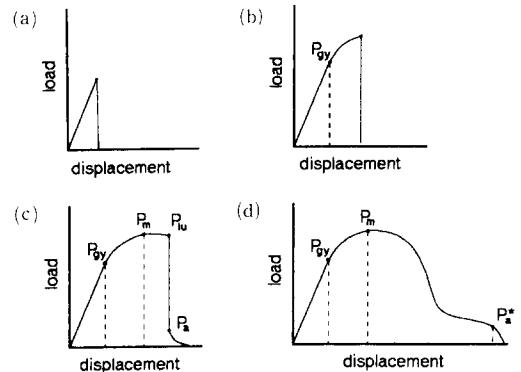


Fig. 7 Schematic of load-displacement curve obtained from instrumented Charpy impact test (a) : LSE region, (b) and (c) : transition region, (d) : USE region)

격시 항복하중으로 변위에 대해 선형적으로 증가한다. P_m 은 최고하중이고, P_{10} 는 불안정 균열진전이 시작하는 점의 하중이며, P_a 는 하중이 급격히 감소하여 불안정 균열진전이 완료하는 점의 하중이다. (d)에서 P_a^* 는 연성파면의 균열진전이 완전히 끝났다고 생각되는 점의 하중이다. 본 연구에서 변위는 충격시 햄머(hammer)의 운동에너지에 의한 시험편의 처짐이며, 평가를 위하여 취해진 변위는 균열진전이 완료되는데 까지의 값으로 하중-변위선도(Fig. 7)에 따라 다르게 취하였다. 즉, (a)와 (b)에서는 시험편이 파단되는 점의 변위를 취하였고, (c)에서는 불안정 균열진전이 끝나는 점(P_a)의 변위를 취하였으며, (d)에서는 P_a^* 점의 변위를 취하였다.

Fig. 8은 #1과 #2 재료에 대하여 각 시험편의 계장화 충격시험에서 얻은 변위와 시험편에서 측정된 LE를 각각 b 로 무차원화하고 서로의 관계를 나타낸 것이다. 항복강도가 다른, #1과 #2 재료 공히 표준시험편과 1/2 크기 시험편은 LE가 포화하는 점까지 일정한 기울기를 갖는 직선으로 서로 일치하고 있으며, 1/3 크기 시험편은 위의 두 시험편과 기울기가 다른 직선으로 나타나고 있다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 파괴시 노치선단에 생기는 응력 상태의 차이에서 오는 결과라고 생각된다. 이상의 결과는 시험편의 LE를 직접 측정하지 않고도 계장화 충격시험에서 얻은 변위를 이용하여 예측할 수 있음을 보이며, 또한 변위와 LE의 관계에 있어서 시험편 크기의 영향은 노치선단의 두께 b 와 밀접하게 관계하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 #1과 #2 재료의 표준시험편과 1/2 크기

시험편의 변위와 흡수에너지의 관계를 나타낸 것이다. 변위는 노치선단의 두께 b 로 무차원화하였고, 흡수에너지는 노치선단의 파괴용적(Bb^2)으로 보정하였다. 변위는 USE 영역을 제외하고 직선관계를 보이고 있다. 이 직선은 동일 재료에 있어서 시험편의 크기에 관계없이 일치하며, 항복강도가 큰 #2 재료의 직선기울기는 #1 재료보다 감소하고 있다. 이 직선관계는 Fig. 6의 LE와 흡수에너지의 관계에서와 같은 경향을 보이지만, 변위는 측정에 따른 오차가 적고 보다 큰 흡수에너지까지 직선관계를 이루고 있다. 따라서, 재료의 파괴인성 평가에 관한 ASME Code Section III 측면에서, 측정에 따른 오차와 조사재료의 시험편에 대한 측정상의 어려움이 대두되고 있는 LE보다, 변위는 보다 신속하고 정확하게 재료의 인성을 평가하는 인자로 사용할 수 있다.

그림에서 직선은 다음과 같이 원점을 지나는 식으로 나타낼 수 있다.

$$D = G \frac{E_{CVN}}{Bb} \tag{7}$$

여기서, D : 변위, G : 기울기이며 실험에 의해 결정되는 상수, E_{CVN} : 흡수에너지, B : 시험편 폭, b : 노치선단의 두께(ligament size)이다.

이 직선의 기울기는 재료의 항복강도에 따라 변화하므로, 항복강도와와의 관계를 유도할 수 있다. 방사선 조사나 경년열화에 의한 재료의 변화는 항복강도의 변화를 동반하기 때문에, 항복강도와 직선 기울기의 관계는 재료의 사용이력에 의한 변화를 평가하는데 활용될 수 있다.

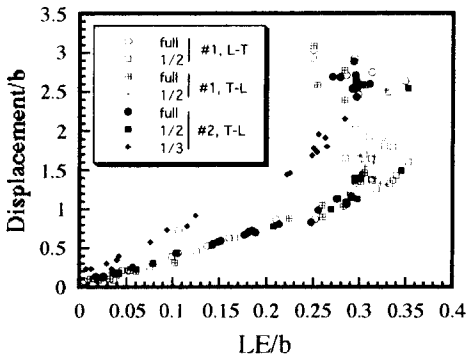


Fig. 8 Lateral expansion(LE) vs. displacement obtained by the instrumented Charpy impact test

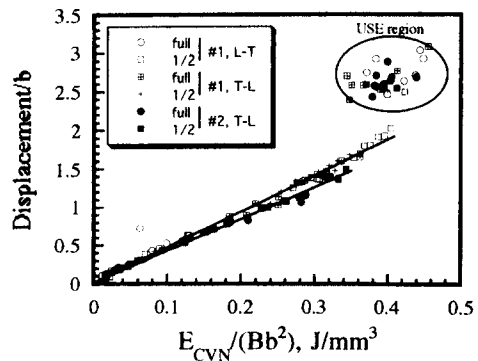


Fig. 9 Displacement vs. absorbed energy (E_{CVN}) for full- and half-size specimens

4. 결 론

매우 큰 인성을 갖는 원자로 압력용기 강재를 대상으로 표준시험편과 1/2, 1/3 크기의 미소시험편의 충격시험을 실시하고, 그 결과에 대한 시험편 크기의 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미소시험편의 결과로부터 표준시험편의 USE 및 DBTT를 예측하는 새로운 보정계수로 (Bb^2/K_i) 및 $(Bb/R)^{1/2}$ 를 각각 제안하였다. 표준시험편과 미소시험편에 대한 USE는 일정 기울기를 갖는 직선적

$$[USE_{sub-size}]_N = \alpha [USE_{full-size}]_N + C$$

으로 나타내며, DBTT는 $\pm 10\%$ 이내의 정확도로 예측하였다.

(2) LE와 흡수에너지의 관계는 항복강도에 따라 기울기가 변화하는 직선관계를 보이며, 시험편 크기에 대한 직선관계는 LE와 흡수에너지를 각각 b 와 (Bb^2) 로 보정하였을 때 서로 일치한다.

(3) LE는 파단 시험편을 직접 측정하지 않고 계장화 충격시험에서 얻은 변위로부터 예측할 수 있고, LE와 변위의 관계에 대한 시험편 크기의 영향은 노치선단의 두께 b 와 관계한다.

(4) b 와 (Bb^2) 로 보정한 변위와 흡수에너지의 관계는 시험편의 크기에 관계없이 하나의 직선에 일치하며, 직선의 기울기는 항복강도에 따라 변화한다. 따라서 변위는 LE 대신에 보다 신속하고 정확한 재료의 인성을 평가하는 연자로 사용할 수 있다.

참고문헌

- (1) *Annual Book of ASTM standards*, 1994, p. 140
- (2) Corwin, W. R., Klueh, R. L. and Vitek, J. M., 1984. "Effect of Specimen Size and Nickel Content on the Impact Properties of 12Cr-1Mo-V-W Ferritic Steel," *J. Nucl. Mater.* 122 & 123 pp. 343~348
- (3) Corwin, W. R. and Hougland, A. M., 1986. "Effect of Specimen Size and Material Condition on the Charpy Impact Properties of 9Cr-1Mo-V-Nb Steel," *The Use of Small-Scale Specimens*

- for Testing Irradiated Materials, ASTM STP 888, Eds. W. R. Corwin and G. E. Lucas pp. 325~338
- (4) Loudon, B. S., Kumar, A. S., Garner, F. A., Hamilton, M. L. and Hu, W. A., 1988. "The Influence of Specimen Size on Charpy Impact Testing of Unirradiated HT 9," *J. Nucl. Mater.* 155-157, pp. 662~667
- (5) Kayano, H., Kurishita, H., Kimura, A. S., Narui, M., Yamazaki, M. and Suzuki, Y., 1991. "Charpy Impact Testing Using Miniature Specimens and Its Application to the Study of irradiation Behavior of Low-activation Ferritic Steels," *J. Nucl. Mater.* 179-181, pp. 425~428
- (6) Lucas, G. E., Odette, G. R., Shekherd, J. W., McConnell, P. and Perrin, J., 1986. "Subsized Bend and Charpy V Notch Specimens for Irradiated Testing," *The Use of Small Scale Specimens for Testing Irradiated Materials*, ASTM STP 888, Eds. Corwin, W. R. and Lucas, G. E., pp. 305~324
- (7) Kumar, A. S., Garner, F. A. and Hamilton, M. L., 1990. "Recent Improvements in Size Effects Correlations for DBTT and USE of Ferritic Steel," *Effects of Radiation on Materials*, ASTM STP 1046, Eds. N. H. Packan, R. E. Stoller and A. S. Kumar, pp. 487~495
- (8) Alexander, D. J. and Klueh, R. L., 1990. "Specimen Size Effects in Charpy Impact Testing," *Charpy Impact Test: Factors and Variable*, ASTM STP 1072, Eds. Holt, J. M., pp. 179~191
- (9) Hu, W. L., 1983, *HEDL SA-2947-FP*
- (10) Abe, F., Noda, T., Arai, H., Okada, M., Narui, M. and Kayano, H., 1987. "Effect of Specimen size on the Ductile-Brittle Transition Behavior and the Fracture Sequence of 9Cr-W Steel," *J. Nucl. Mater.* 150 pp. 292~301
- (11) Odette, G. and Lucas, G. L., 1983. "Analysis of Cleavage Fracture Potential of Martensitic Stainless Steel Fusion Structures: Part II. Fracture Analysis Procedures for Flawed Fusion Structures," *J. Nucl. Mater.* 117, p. 276
- (12) Oldfield, W., J. 1979, *Test and Evaluation*, Vol. 7, No. 6, pp. 326~333

- (13) Neuber, H., 1983, *Theory of Notch Stress*, Springer, Berlin, p. 305
- (14) The PVRC Ad Hoc Task Group on Toughness Requirements, 1972, "PVRC Recommendations on Toughness Requirements for Ferritic Materials," *WRC Bulletin No. 175*