

# 열화된 1Cr-1Mo-0.25V 강의 DBTT 크기효과 보정에 관한 연구

남승훈<sup>†</sup> · 김엄기<sup>\*</sup> · 이대열<sup>\*\*</sup>  
(2001년 4월 25일 접수, 2001년 8월 23일 심사완료)

## Normalization of DBTT Size Effect for Aged 1Cr-1Mo-0.25V Steel

Seung Hoon Nahm, Am Kee Kim and Dae Yeol Lee

**Key Words :** Miniaturized Impact Specimen(소형충격시험편), Fracture Stress(파괴응력), DBTT(연성 취성전이온도), 1Cr-1Mo-0.25V Steel(1Cr-1Mo-0.25V 강), Size Effect(크기효과)

### Abstract

Miniaturized specimen technology is useful to characterize the mechanical behavior when it is difficult to sample the material enough for the test. In this study, two kinds of miniaturized Charpy impact specimens(i.e., miniaturized specimen with side groove and without side groove) of aged 1Cr-1Mo-0.25V steel were prepared and tested. The relationship between the extent of degradation in terms of ductile brittle transition temperature(DBTT) and the fracture stress of 1Cr-1Mo-0.25V steel was established. The fracture stress obtained from miniaturized specimen without side groove turned out to be linearly related with the DBTT of standard specimen. Therefore the fracture toughness of aged turbine rotor steel might be evaluated by the fracture stress. In addition, the correlation between DBTT of standard specimen and that of miniaturized specimen was investigated. As the results of normalizing DBTT by maximum elastic tensile stress, the normalized DBTT of miniaturized specimen without side groove allows one to estimate that of standard specimen.

### 1. 서론

소형 시험편 기술은 현재 사용되고 있는 구조물이나 부재에 결정적인 손상을 주지않고 시료를 채취할 수 있다는 장점때문에 재료의 물리적인 거동을 특성화 하는데 있어서 매우 유용한 방법으로 인식된다.<sup>(1)</sup> 특히 샤르피 V-노치 충격시험은 시험의 간편성과 편리성 때문에 소형 시험편 기술 중에서도 가장 널리 사용되고 있으며, 가장 적당한 방법중의 하나이다.

샤르피 V-노치 충격시험은 시험온도의 함수로서 충격에너지, 횡팽창, 연성파괴면적을 등과 같은 다양한 데이터를 얻을 수 있다. 이 시험은 취성에서

연성파괴로의 전이가 발생하는 온도 범위 내에서 실행되는데, 이전의 연구는 주로 연성·취성 전이온도(ductile brittle transition temperature; DBTT)에 영향을 주는 인자를 밝히는데 있었다.<sup>(2-4)</sup> 일반적으로 강의 상봉에너지(upper shelf energy; USE)와 연성·취성 전이온도를 얻기 위해서는 약 10 개의 표준 크기 시험편이 필요하다. 그러나 사용이력이 다른 여러 가지 종류의 샘플을 구하는 것이 어려울 뿐 아니라 시험편 제작에 필요한 많은 양의 소재를 확보하는 것이 곤란한 경우에는 적은 양의 소재만으로도 시험이 가능한 소형 크기 시험편의 사용이 불가피하다. 소형 시험편을 이용할 경우, 1 개의 표준 크기 시험편에 의해 점유되는 양으로도 충격에너지 곡선을 만드는 것이 가능하다.<sup>(5)</sup>

이러한 장점에도 불구하고 소형 시험편 기술은 여전히 시험편 크기 효과(size effect)로 인하여 사용에 제한을 받고 있다. 즉, 시험편 크기가 감소하면 USE 와 DBTT 가 모두 낮아진다. USE 의 감소는 시험편 파괴용적(fracture volume)의 감소에 기인

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원 산업측정표준부  
E-mail : shnahm@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5383 FAX : (042)868-5027

<sup>\*</sup> 회원, 공주대학교 기계공학부

<sup>\*\*</sup> 공주대학교 대학원 기계공학부

하고, DBTT 의 감소는 소형 시험편의 노치선단에 증진된 평면응력상태로 인한 연성파괴에 기인된다.<sup>(6,7)</sup> 따라서 소형 시험편을 이용하기 위해서는 소형 시험편으로부터 얻은 데이터와 표준 시험편으로부터 얻은 데이터 사이의 상관관계를 알거나, 또는 표준 시험편의 노치선단 파괴면의 변형을 구속과 동일하도록 특수하게 고안된 소형 시험편을 사용해야 한다.

한편, 천이온도와 상부에너지에 대한 표준 시험편과 소형 시험편 사이의 상관관계에 관한 최근까지의 연구에 사용된 파라메타들은 너무 경험적이고 재료 물성과 시험편 형상 및 크기에 종속되는 결점이 있다. 따라서, 충격특성의 정량화를 위한 계장화 충격시험 데이터의 분석이 필요한 실정이다.<sup>(8)</sup>

본 연구는 종래의 표준 시험편 크기의 약 1/8 정도인 소형 시험편을 사용하여 열화된 터빈 로터강의 표준 시험편의 DBTT 를 평가하는데 목적을 두고 있다. 열화된 소재를 확보하기 위해 인공적으로 등은 열처리를 행한 후 시험하였다. 열화 시간에 따른 파괴응력과 연성취성천이온도의 변화 특성이 조사되었으며, 최대탄성인장응력을 이용하여 DBTT 크기효과를 보정하였다.

2. 실험

2.1 실험용 재료 및 시험편

시험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈로터에 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로 화학적 성분과 기계적 물성은 참고문헌 9 에 나타나 있다. 로터강의 경우 실제 발전소에서 사용된 열화재를 종류별로 입수하는 것은 어렵기 때문에 실제로 열화된 재료의 미세조직과 유사한 시료를 인위적으로 실제 사용온도(538℃)보다 높은 온도(630℃)에서 등은 열화 처리하여 확보하였다. 이 때 소요되는 열화시간은 Fe 의 자기확산(self diffusion) 이론에 근거하여 각 온도에서의 Fe 확산량이 같은 조건에서 결정하였으며,<sup>(10)</sup> 열처리시간에 관한 자세한 내용은 참고문헌 9 에 기술되어 있다.

표준 시험편과 소형 시험편의 형상 및 크기를 Fig. 1 에 나타내었다. 표준 시험편의 크기는 ASTM E-23<sup>(11)</sup>을 따랐고, 소형 시험편의 경우는 형상 및 크기에 관한 유용한 표준절차가 없으므로 본 연구에서는 다른 연구자<sup>(4)</sup>의 제안을 따랐다. 소형 시험편의 길이는 충격날(striker)이 앤빌을 지나가기에 충분할 정도의 너비를 가질 수 있도록 하였으며, 소형 시험편의 크기는 대략 표준 시험편 크기의 1/8 정도로 하였다. 즉, 두 동강난 샤르피 표준 충격시험편의 반쪽으로부터 소형 충격시험편

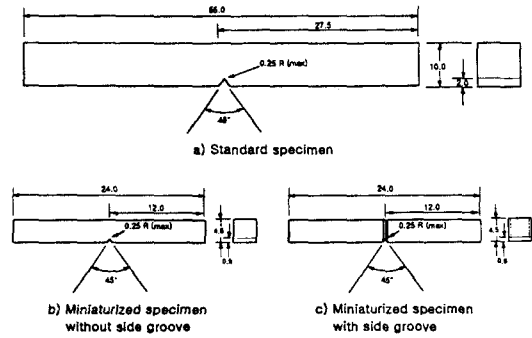


Fig. 1 Dimensions of standard and miniaturized Charpy specimens

을 4 개씩 모두 8 개를 만들었다. 모든 시험편은 T-L 방향성을 갖는 모재로부터 채취하였는데 시험편의 길이 방향이 압연 방향에 수직하며 결정립의 신장방향은 균열성장방향과 같다. 또한 소형 시험편의 경우에는 노치 방향으로 측면 홈(side groove)이 가공된 시험편에 대한 시험을 병행하였다.

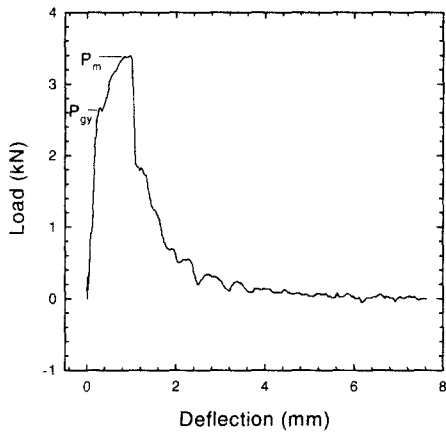
2.2 실험장치 및 실험방법

충격시험에는 앤빌(anvil)의 조절이 가능하며 해머의 무게가 4 단계로 조절이 가능한 SATEC 사에서 제작한 샤르피 충격시험기(최대용량 33.9 Joule)를 사용하였다. 소형 시험편 시험시에는 시험편 받침대 간격을 감소시킬 필요가 있다. 기본적인 실험 매개변수(parameter)를 Table 1 에서 비교하였다. 시험온도, 정렬 정확도(alignment accuracy)와 가공 허용오차(machining tolerances)에 관한 절차는 참고문헌 11 의 규정을 따랐다.

충격 중에 얻어지는 충격하중의 변화는 Dynatup 사에서 개발한 계장화 충격시험용 소프트웨어를 이용하여 측정되고 해석되었다. Fig. 2 는 소형 시험편을 이용하여 충격시험에서 얻은 충격하중이력의 한 예를 나타낸 것이다. Fig. 2 의 하중-변위 곡선 아래 면적은 시험편을 파괴시키는데 소요된 총 흡수 에너지를 나타내며, P<sub>m</sub> 과 P<sub>ey</sub> 는 충격 과정 중에 나타나는 최대하중과 전반항복하중(general yielding load)을 각각 나타낸다. 충격흡수에너지는 시험편이 파단된 후 해머의 초기 위치에너지의 손실로부터 측정되었다. 시험편의 시험온도 변화는 충격흡수에너지 변화의 한 요인이 되므로 충격시험을 할 때 항온을 유지하기 위해 항온조에서 각 시험편을 시험에 앞서 시험온도에서 적어도 10 분 이상 ±2 ℃ 오차 범위내에서 유지시킨 후 2집어내어 5 초 이내에 시험을 완료하였다.

**Table 1** Comparison of specimen dimensions and experimental parameters

	Standard Charpy specimen (mm)	Miniaturized Charpy specimen (mm)
<b>&lt;Specimen&gt;</b>		
Thickness, B	10.00	4.50
Depth, H	10.00	4.50
Length, L	55.00	24.00
Notch depth, a	2.00	0.90
Notch-root radius, r	0.25	0.25
<b>&lt;Experiment&gt;</b>		
Striker radius	8.00	8.00
Striker tip width	4.00	4.00
Anvil radius	1.00	1.00
Anvil span	40.00	19.96



**Fig. 2** A typical load history for 50000hour aged miniaturized specimen tested at 75°C.  $P_m$  and  $P_{gy}$  represent the maximum load and the general yield load

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 충격특성 평가

Fig. 3(a)는 표준 시험편, 측면 홈이 없는 소형 시험편과 측면 홈이 있는 소형 시험편을 이용하여 얻은 시험온도변화에 따른 충격흡수에너지 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 충격흡수에너지 변화를 식 (1)과 같은 hyperbolic tangent 곡선으로 fitting 하여 나타내었다.

$$\text{Impact energy}_{CVN} = E_1 + E_2 \tanh(T-T_0)/T \quad (1)$$

여기서  $E_1, E_2, T_0, T_1$ 은 fitting constant 이며,  $E_1, E_2$ 의 단위는 Joule,  $T_0, T_1$ 의 단위는 °C이다. 저온 쪽에서의 lower shelf energy(LSE)는 재료의 열화도에 따라 큰 차이를 보이지 않지만 고온 쪽에서의 upper shelf energy(USE)는 열화도에 따라 큰 차이를 보이고 있다.

표준 시험편의 시험결과와 비교하면 소형 시험편에서의 USE는 표준 시험편 USE의 약 10~15% 수준에 이르고 있음을 알 수 있다. 이것은 앞서 기술한 바와 같이 시험편의 크기 축소에 따른 파괴용적의 감소로 인한 현상이라 생각되며, 본 연구에서 사용한 소형 시험편의 용적이 표준 시험편 용적의 약 1/8 정도임에 비추어 어느 정도 예상할 수 있는 결과이다. 재료가 열화됨에 따라 천이영역은 증가하고, USE는 감소하는 경향이 있으나 서로 간의 상관관계를 파악하기에는 미흡하다.

충격흡수에너지를 파괴용적  $Bb^2$  과  $Bb^{3/2}$ 으로 보정(normalization)한 결과를 Fig. 3(b)와 3(c)에 각각 나타내었는데, B는 시험편 너비이고 b는 ligament(시험편 뒷면에서 notch root 까지의 거리)를 나타낸다. 보정은 표준 시험편(Charpy V-notch; CVN)과 소형 시험편(miniaturized Charpy V-notch; MCVN)에서 얻은 데이터를 함께 나타내는데 편리하기 때문에 주로 이용되고 있다. 다른 연구자들의 연구결과<sup>(12)</sup>에서 기술된 바와 같이, 체적과 면적에 의한 여러 가지 보정이 시도되었지만 아직까지 만족할만한 성과를 얻지 못하고 있는 실정이다. Fig. 3(b)에서,  $Bb^2$ 으로 보정된 MCVN 곡선은 CVN 곡선 위와 왼쪽에 놓여져 있다. 즉, MCVN 시험편의 경우, 보정된 USE는 표준 시험편의 경우에서보다 더 커지고 연성·취성 천이온도는 더 낮은 온도에서 발생하게 된다.

$Bb^{3/2}$ 으로 보정한 Fig. 3(c)의 경우, 시험된 세 종류의 시험편에서 보정된 USE의 값은 비슷한 값을 나타내었다. 또한 그림에서 표준 시험편과 소형 시험편의 시험결과를 비교해 보면 같은 온도에서 측면 홈을 갖지 않은 소형 시험편의 데이터가 표준 시험편의 데이터보다 위에 위치하고 있어서 DBTT가 저온쪽으로 이동했음을 알 수 있다. 한편, 열화도가 증가할수록 DBTT는 고온쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이로써 충격시험에서 얻은 데이터를 보정하는 데는 파괴용적으로  $Bb^2$ 보다는  $Bb^{3/2}$ 이 1Cr-1Mo-0.25V 강에서 더 적당하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 표준 시험편,  $DBTT_{stan}$ 과 소형 시험편,  $DBTT_{mini}$ 의 상관관계를 나타낸 것이다. 여기서 DBTT는 USE와 LSE의 평균값에 상당하는 온도로 결정되었다. 측면 홈을 갖지 않은 소형 시험편의  $DBTT_{mini}$ 는 표준 시험편의  $DBTT_{stan}$ 에 비해 저온측으로 이동하였지만 측면 홈을 가진 소형 시험편의  $DBTT_{mini-SG}$ 는 표준 시험편의  $DBTT_{stan}$ 에 근접하여 나타났다.

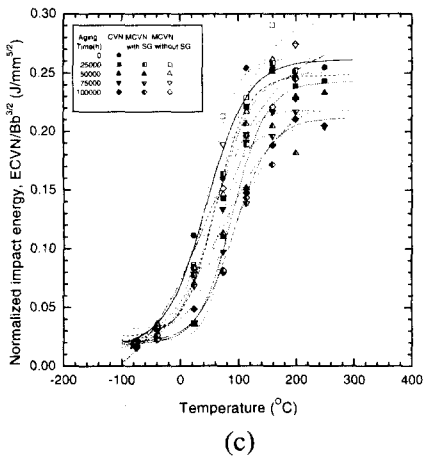
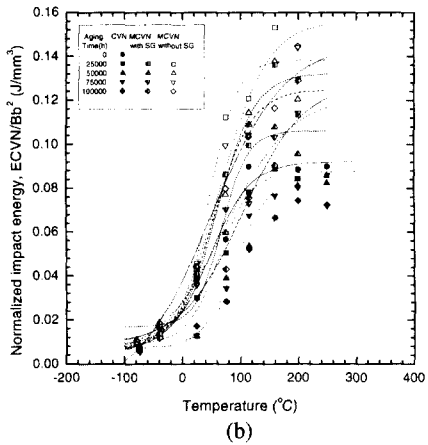
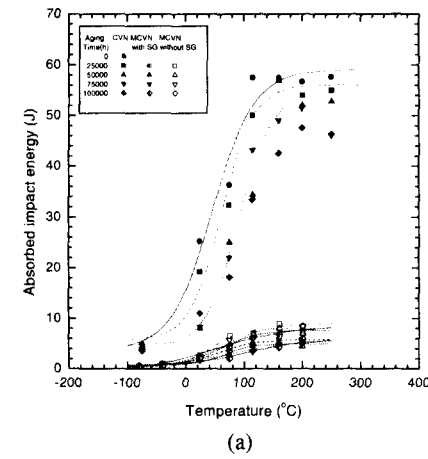


Fig. 3 Dependence of fracture energy on temperature; non-normalized impact energy (b) impact energy normalized by  $Bb^2$  (c) impact energy normalized by  $Bb^{3/2}$

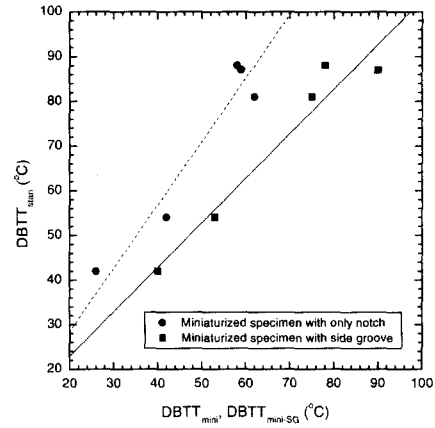


Fig. 4 Relation between DBTTs of miniaturized impact specimen and  $DBTT_{stan}$  of standard impact specimen

Table 2 Comparison between  $DBTT_{stan}$  by standard specimens and  $DBTT_{mini-SG}$  and  $DBTT_{mini}$  by miniaturized specimens

Specimen	$DBTT_{stan}$ by standard specimen (°C)	$DBTT_{mini-SG}$ by miniaturized specimen with side groove (°C)	$DBTT_{mini}$ by miniaturized specimen without side groove (°C)
Aging time (hr)			
0	42	40	26
25000	54	53	42
50000	88	78	58
75000	81	75	62
100000	87	90	59

Table 2 에 측면 홈을 갖지 않은 소형 시험편의  $DBTT_{mini}$ , 측면 홈을 가진 소형 시험편의  $DBTT_{mini-SG}$  와 표준 시험편의  $DBTT_{stan}$  를 나타내었다. 특히 측면 홈을 가진 소형 시험편의  $DBTT_{mini-SG}$  가 표준 시험편의  $DBTT_{stan}$  와 근접한 값을 나타내는 점에 비추어 보면 측면 홈을 가진 소형 시험편의 파괴면에서의 변형을 구속이 표준 시험편에서와 거의 동일한 것으로 판단된다.

3.2 DBTT 크기효과 보정

Kumar 등<sup>(6)</sup>은 서로 다른 크기의 시험편에서 얻은  $DBTT$  를 노치선단에서의 최대 탄성인장응력  $\sigma'$ 로 보정(normalization)하여 그 크기 효과를 예측하는 방법을 제안하였다. 균열선단에서의 응력은 임계값(또는 파괴응력)이라 불리는  $\sigma'_r$ 에 도달했을 때 균열이 진전한다고 가정하였다. 최대탄성인장응력  $\sigma'$ 은 식 (2)로 계산된다.

$$\sigma' = (K_t)(3P_m^*L)/(2Bb^2) \quad (2)$$

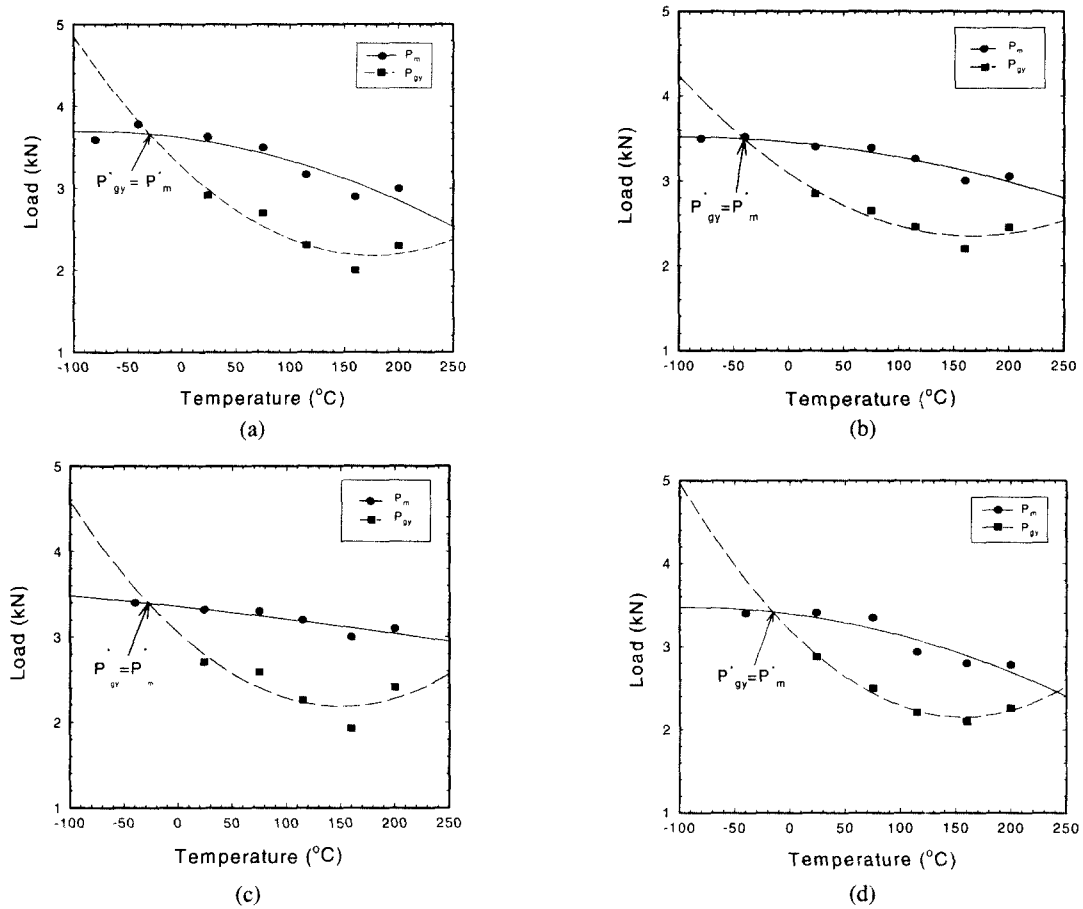


Fig. 5 Maximum load and general yield load vs. temperature diagram for (a)25000 hour (b)50000 hour (c)75000 hour (d)100000 hour

식 (2)의  $P_m^*$  는 전반항복과 동시에 벽개균열이 시작되는 온도에서의 최대하중을 의미한다. Fig. 5 는 본 연구에서 사용한 1Cr-1Mo-0.25V 강 열화재 측면 흠을 갖지 않은 소형 시험편의 실험결과로부터  $P_m^*$  을 결정하는 방법을 도시하여 나타낸 것이다. 식 (2)의  $K_t$  는 응력집중계수,  $L$  은 앤빌의 간격,  $B$  는 시험편 너비를 나타내고,  $b$  는 ligament 크기를 나타낸다. 응력집중계수  $K_t$  는 식 (3)으로 계산할 수 있다.<sup>(13)</sup>

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

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

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

여기서  $R$  은 notch root 의 반지름으로 본 연구에서

사용된 표준 시험편과 소형 시험편의  $K_t$  값은 각각 4.81, 3.46 이다.

Lucas 등<sup>(14)</sup>의 연구에 의하면, 식 (2)에 포함된 최대하중  $P_m^*$  는 식 (4)에 의하여 파괴응력  $\sigma_f^*$  로부터 계산 가능하다.

$$P_m^* = \sigma_f^* Bb/6.52 \quad (4)$$

파괴응력  $\sigma_f^*$  는 시험편 크기와는 무관한 재료상수로서 본 연구에서는 Fig. 5에서와 같이  $P_m^*$  를 구한 다음 식 (5)에  $P_m^*$  를 대입하여 구하였다.

$$\sigma_f^* = 6.52P_m^*/Bb \quad (5)$$

Fig. 6 은 1Cr-1Mo-0.25V 강의 열화시간에 따른 측면 흠을 갖지 않은 소형 시험편에서 얻은  $\sigma_f^*$  와 표준 시험편에서 구한  $DBTT_{stan}$  의 변화를 함께 나타낸 것이다.  $DBTT_{stan}$  는 50000 시간까지 급격히 증가하고 파괴응력은 급격히 감소한다. 그러나 둘 다 50000 시간 이후에는 변화가 거의 관찰되지 않

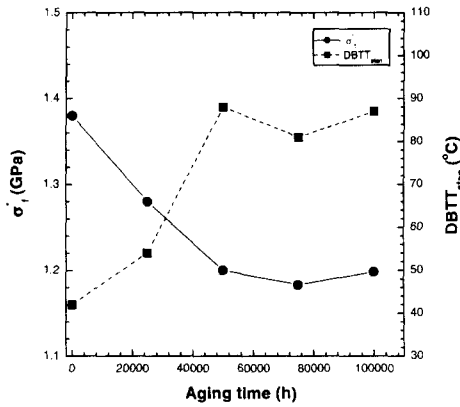


Fig. 6 Variation of  $\sigma_f^*$  and  $DBTT_{stan}$  with the aging time

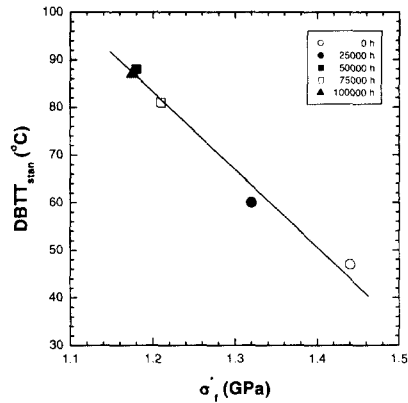


Fig. 7 Correlation between  $\sigma_f^*$  and  $DBTT_{stan}$

는 특성을 보이고 있다. 따라서 파괴응력과  $DBTT_{stan}$  사이에 밀접한 상관관계가 예상된다.

Fig. 7은 표준 시험편에서 구한  $DBTT_{stan}$ 와 측면 홈을 갖지 않은 소형 시험편에서 얻은 파괴응력  $\sigma_f^*$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서,  $DBTT_{stan}$ 와 파괴응력  $\sigma_f^*$ 는 서로 선형적인 관계가 유지되고 있음을 알 수 있다. 이는  $\sigma_f^*$ 에 의한 파괴인성 평가가 가능하다는 것을 의미한다.

한편, 식 (4)를 식 (2)에 대입한 식 (6)을 사용하면 보정을 위한 최대탄성인장응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma' = 0.23K_L \sigma_f^* / b \quad (6)$$

Fig. 8은 측면 홈을 갖지 않은 소형 시험편의 보정된  $DBTT_{mini} / \sigma'_{mini}$ 와 표준 시험편의 보정된  $DBTT_{stan} / \sigma'_{stan}$ 과의 상관관계를 나타낸 것이다. 소형 시험편 데이터와 표준 시험편 데이터는 기울기가 1인 선에 모여 나타나고 있다. 이것은  $\sigma'$ 에 의한 보정(normalization)이 본 연구의 결과에 잘 적용되고 있다는 것을 의미하며, 열화된 터빈 로터강의  $DBTT_{stan} / \sigma'_{stan}$ 과  $DBTT_{mini} / \sigma'_{mini}$ 와의 상관관계는 식 (7)로 나타낼 수 있다. 식 (7)을 이용하면 열화정도에 관계없이 소형 시험편에서 얻은  $DBTT_{mini}$ 로부터  $DBTT_{stan}$ 을 추정하는 것이 가능하다.

$$DBTT_{stan} / \sigma'_{stan} = DBTT_{mini} / \sigma'_{mini} + B \quad (7)$$

여기서 터빈로터강에 대한 상수 B는 0.5 °C /GPa이다.

따라서 표준 시험편을 채취할 수 없을 만큼 소재가 제한적인 경우, 소형 시험편 기술이 파괴인성 평가의 대안으로써 유용하게 사용될 수 있다는 것이 확인되었다.

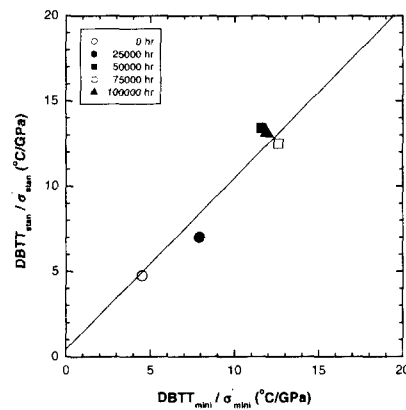


Fig. 8 Correlation between normalized  $DBTT_{stan}$  and normalized  $DBTT_{mini}$

#### 4. 결론

측면 홈을 가진 것과 갖지 않은 1/8 크기 소형 Charpy 충격시험편을 이용하여 1Cr-1Mo-0.25V 강의 표준 시험편의 DBTT 열화 평가를 시도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표준 시험편의  $DBTT_{stan}$ 은 측면 홈을 가진 소형 시험편의  $DBTT_{mini-SG}$  시험결과로부터 직접 얻을 수 있었다.
- (2) 파괴응력,  $\sigma_f^*$ 과  $DBTT_{stan}$  사이에 선형관계가 성립되었다. 이에 비추어  $\sigma_f^*$ 를 재료의 파괴인성을 나타내는 파라미터로 활용하는 방안을 고려할 수 있다.
- (3) 표준 시험편의  $DBTT_{stan}$ 은 측면 홈이 없는 소형시험편의  $DBTT_{mini}$  결과로부터 식 (7)을 통하여 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Manahan, M. P., 1990, "Determination of Charpy Transition Temperature of Ferritic Steels Using Miniaturized Specimens," *Journal of Materials Science*, Vol. 25, pp. 3429~3438.
- (2) Rolfe, S. T. and Barsom, J. M., 1977, *Fracture and Fatigue Control in Structures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- (3) Firrao, D., Begley, J. A., Silva, G., Roberti, R. and De Benedetti, B., 1982, "The Influence of Notch Root Radius and Austenitizing Temperature on Fracture Appearance of As-Quenched Charpy-V Type AISI 4340 Steel Specimens," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 13A, pp. 1003~1013.
- (4) Corwin, W. R. and Houghland, A. M., 1986, "Effect of Specimen Size and Material Condition on the Charpy Impact Properties of 9Cr-1Mo-V-Nb Steel," *ASTM STP 888*, pp. 325~338.
- (5) 남승훈, 박종화, 김업기, 1999, "소형 샤르피 충격시험편을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V 강의 인성 열화도 평가," *대한기계학회논문집(A)*, 제 23 권, 제 12 호, pp. 2303~2308.
- (6) Kumar, A. S., Loudon, B. S., Garner, F. A. and Hamilton, M. L., 1993, "Recent Improvements in Size Effects Correlations for DBTT and Upper Shelf Energy of Ferritic Steels," *ASTM STP 1204*, pp. 47~61.
- (7) 김훈, 김주학, 지세환, 홍준화, 1997, "샬피 충격 시험에 있어서 시험편 크기의 영향," *대한기계학회논문집(A)*, 제 21 권, 제 1 호, pp. 93~103.
- (8) Lucas, G. E., Odette, G. R. and Sheckherd, J. W., 1986, "Recent Progress in Subsize Charpy Impact Specimen Testing for Fusion Reactor Materials Development," *Fusion Technology*, Vol. 10, pp. 728~733.
- (9) 남승훈, 김업기, 유광민, 1998, "전기비저항을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V 강의 인성열화의비파괴적 평가," *대한기계학회논문집(A)*, 제 22 권, 제 5 호, pp. 814~820.
- (10) Abdel-Latif, A. M., Corbett, J. M., Sidey, D. and Taplin, D. M., 1981, "Effects of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2.25Cr-1Mo Steel," *Proceedings of 5th International Conference on Fracture(ICF5)*, Cannes, France, Vol. 4, pp. 1613~1620.
- (11) ASTM Standard E23, 1997, "Notched Bar Impact Testing of metallic Materials," ASTM Philadelphia.
- (12) Ronsinski, S. T., Kumar, A. S., Cannon, N. S. and Hamilton, M. L., 1993, "Application of Subsize Specimens in Nuclear Plant Life Extension," *ASTM STP 1204*, pp. 405~416.
- (13) Neuber, H., 1958, *Theory of Notch Stresses*, 2nd ed., Springer Publishers, Berlin, p. 71.
- (14) Lucas, G. E., Odette, G. R., Sheckherd, J. W., McConnell, P. and Perrin, J., 1986, "Subsize Bend and Charpy V-Notch Specimens for Irradiated Testing," *ASTM STP 888*, pp. 305~324.