

소형 샤르피 충격시험편에서의 파괴응력에 관한 연구

남승훈*, 김엄기**, 이대열***, 김시천****

A Study on the Fracture Stress in Miniaturized Charpy Impact Specimens

Seung Hoon Nahm*, Am Kee Kim**, Dae Yeol Lee *** and Si Cheon Kim****

Key Words : Miniaturized Impact Specimen(소형충격시험편), Fracture Stress(파괴응력), DBTT(연성취성전이온도), 1Cr-1Mo-0.25V Steel(1Cr-1Mo-0.25V 강)

Abstract

Miniaturized specimen technology is useful to characterize the mechanical behavior using a minimum volume of material, because it is almost impossible to sample the conventional specimen for the fracture toughness test without damage to equipment. Test material was 1Cr-1Mo-0.25V steel which was widely used for turbine rotor material. Two kinds of miniaturized impact specimens were prepared, i.e., miniaturized specimen with side groove and without side groove. The correlation between ductile brittle transition temperature(DBTT) of full size impact specimen and that of miniaturized impact specimen was made. The characteristics of miniaturized impact specimens technique as well as fracture stress were discussed. Finally, we concluded that the characteristics of fracture stress change on aging time were similar to that of DBTT.

1. 서 론

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

가장 간단한 파괴거동시험중의 하나인 샤르피 V-노치 충격시험을 통하여 시험온도의 함수로서 충격에너지, 횡팽창, 연성파괴면적을 등과 같은 다양한 데이터를 얻을 수 있다. 이 시험은 주로 취성에서 연성파괴로의 전이가 발생하는 범위내의 전(全) 온도의 범위에서 실행되는데, 이전의 연구는 연성·취성 전이온도(ductile brittle transition temperature; DBTT)에 영향을 주는 인자를 밝히는

것이였다.⁽²⁻⁴⁾ 일반적으로 강의 상봉에너지(upper shelf energy; USE)와 연성·취성 전이온도(ductile brittle transition temperature; DBTT)를 얻기 위해서는 약 10 개의 표준 크기 시험편이 필요하다. 사용이력이 다른 여러 가지 종류의 샘플을 구하는 것도 어렵거니와 많은 량의 열화된 소재를 확보한다는 것도 어렵기 때문에 적은 량의 소재를 필요로 하는 소형 크기 시험편의 사용이 불가피하다. 소형 시험편을 이용할 경우, 하나의 표준 크기 시험편에 의해 점유되는 양으로 한 개의 충격에너지에 대한 온도 곡선을 만드는 것이 가능하다.

이러한 장점에도 불구하고 소형 시험편 기술은 여전히 크기 효과 때문에 제한을 받고 있다. 즉, 시험편 크기가 감소하면 USE와 DBTT가 모두 낮아진다는 것이다. USE의 감소는 시험편 파괴용적의 감소로부터 기인하고, DBTT의 감소는 소형 시험편의 노치선단의 평면응력상태의 증가로 인한 연성파괴의 증진으로부터 기인한다.⁽⁵⁾ 따라서 소형 시험편을 이용하기 위해서는 소형 시험편으로부터 얻은 데이터와 표준 시험편으로부터 얻은 데이터 사이의 상관관계를 알아야 하며, 표준 충격시험편의 파괴면에서의 변형을 구속과 같은 상태를 만들기 위해 소형 시험편의 특별한 고안도 필요하다.

전이온도와 최대흡수에너지에 있어서 표준 시험

* 회원, 한국표준과학연구원 산업측정표준부

** 회원, 공주대학교 기계공학부

*** 공주대학교 대학원 기계공학부

**** 한국표준과학연구원 산업측정표준부

편과 소형 시험편 사이의 상관관계는 유용성이 크지만, 파라메타들이 너무 경험적이고 재료 물성과 시험편 형상 및 크기에 종속적이다. 따라서, 더 근본적으로 충격특성을 파악하기 위해서는 계장화된 데이터를 분석하는 접근법 등의 수행이 필요하다. 이를 위해서 계장화 데이터로부터 동적 항복강도와 벽개 파괴응력을 결정하는 방법에 대해서 일부 연구자들⁽⁶⁾이 연구를 수행한 적이 있다.

본 연구는 종래의 표준 시험편의 약 1/8 정도인 소형 시험편을 사용하여 터빈 로터강의 표준 시험편의 DBTT 열화정도를 평가하는데 그 목적을 두고 있다. 소재의 인공적인 열화를 위해 등은 열처리를 행하였으며, 열화에 따른 파괴응력과 연성취성전이온도의 변화 특성을 연구하였다.

2. 실험

2.1 실험용 재료 및 시험편

시험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈로터에 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로서 이 소재의 화학적 성분과 기계적 물성은 참고문헌 7에 나타나 있다. 로터강의 경우 실제 발전소에서 사용된 열화재를 종류별로 입수하는 것은 매우 어렵기 때문에 실제로 열화된 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 인위적으로 실제 사용온도(538℃)보다 높은 온도(630℃)에서 등은 열화 처리하였다. 이 때 소요되는 열화시간은 Fe의 자기확산(self diffusion) 이론에 근거하여 각 온도에서의 Fe 확산량이 같은 조건에서 결정하였으며⁽⁸⁾, 열처리시간은 참고문헌 7에 기술되어 있다.

표준 시험편과 소형 시험편의 형상 및 크기를 Fig. 1에 나타내었다. 표준 크기 시험편의 크기는 ASTM E-23⁽⁹⁾을 따랐으나, 소형 시험편에는 유용한 표준절차가 없으므로 본 연구에서 사용된 소형 시험편의 크기는 다른 연구자⁽⁴⁾의 제안을 따랐다. 소형 시험편의 길이는 striker가 앤빌을 지나가기에 충분할 정도의 너비를 가질 수 있도록 하였으며, 소형 시험편의 크기는 대략 표준 시험편 크기의 1/8 정도이다. 즉, 두 동강난 샤프피 표준 충격시험편의 각각의 반쪽으로부터 소형 충격시험편을 4개씩 모두 8개를 만들었다. 모든 시험편은 T-L 방향성을 갖는 모재로부터 채취하였는데 시험편의 길이 방향이 압연 방향에 수직인 방향이며 결정립의 신장방향은 균열성장방향과 같은 방향으로 하였다.

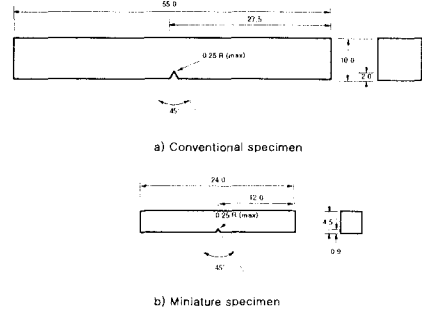


Fig. 1. Dimensions of conventional and miniature Charpy specimens.

2.2 실험장치 및 실험방법

충격시험에는 앤빌(anvil)의 조절이 가능하며 해머의 무게 또한 4 단계로 조절이 가능한 SATEC사에서 제작한 샤프피 충격시험기(최대용량 33.9 Joule)를 사용하였다. 소형 시험편에 관해서는 시험편 받침대 간격과 충격날 두께의 감소가 필요하며, 기본적인 실험 매개변수(parameter)를 Table 1에서 비교하였다. 시험온도, 정렬 정확도(alignment accuracy)와 가공 허용오차(machining tolerances)에 관한 절차는 참고문헌⁽⁹⁾의 규정을 따랐다.

시험 데이터는 Dynatup사에서 개발한 충격시험용 소프트웨어를 이용하여 저장과 분석을 위해 개인용 컴퓨터로 옮겨졌다. Fig. 2는 소형 시험편을 이용하여 충격시험에서 얻은 전형적인 충격하중이력을 나타내고 있다. Fig. 2의 하중-변위 곡선 아래에 있는 면적은 시험 온도의 함수로서의 총 흡수 에너지를 나타내며, P_m 과 P_{gy} 는 충격시험동안 얻어지는 최대하중과 전반항복하중을 각각 나타낸다. 충격흡수에너지는 시험편 파단후 해머의 초기 위치에너지의 손실로부터 측정된다. 시험편의 시험 온도변화는 충격흡수에너지 변화의 한 요인이 되므로 충격시험을 할 때 항온을 유지하기 위해 각각의 시험편을 시험에 앞서 시험온도에서 적어도 10분 이상 2℃이내의 온도에서 유지시킨 후 항온 조로부터 끄집어내어 5초 이내에 충격시험을 완료하였다.

Table 1. Comparison of experimental parameters.

	Standard Charpy specimen	Miniaturized Charpy specimen
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

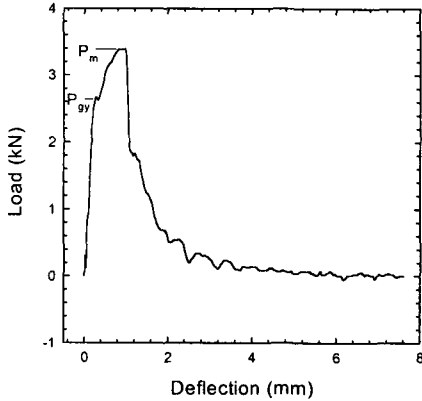


Fig. 2. A typical load history for 50000hour aged miniaturized specimen tested at 75°C. P_m and P_{gv} represent the maximum load and the general yield load.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격특성 평가

Fig. 3(a)는 표준 시험편과 소형 시험편을 이용하여 얻은 시험온도변화에 따른 충격흡수에너지 변화를 나타낸 것이다. 충격흡수에너지 변화는 hyperbolic tangent 곡선으로 나타내었으며, 식(1)과 같다. 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.

$$\text{Impact energy}_{CVN} = E_1 + E_2 \tanh\{(T-T_0)/T_1\} \quad (1)$$

Fig. 3(a)에는 시험온도의 함수로서 측면 흡을 갖지 않은 것과 측면 흡을 가진 소형 시험편의 충격흡수에너지도 함께 나타내고 있다. 표준 시험편의 시험결과와 비교하여 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 발생한 현상이다. 본 연구에서 사용한 측면 흡이 없는 소형 시험편의 용적은 표준 시험편 용적의 약 1/8 정도이므로 어느 정도 예상할 수 있는 결과이다. 또한 Fig. 3(a)에서, 재료가 열화됨에 따라 천이영역온도는 약간 증가하고, USE는 감소하는 경향이 있으나 일정한 상관관계를 보여주지 못하고 있다.

충격흡수에너지를 Bb^2 과 $Bb^{3/2}$ 으로 표준화(normalization)한 결과를 Fig. 3(b)와 3(c)에 각각 나

타내었는데, B는 시험편 너비이고 b는 시험편 뒷면에서 notch root까지의 거리를 나타낸다. 표준화는 표준크기 시험편(Charpy V-notch; CVN)과 소형 크기 시험편(miniaturized Charpy V-notch; MCVN)에서 얻은 데이터를 함께 나타내는데 편리하기 때문에 주로 이용되고 있다. 다른 연구자들의 연구결과⁽¹⁰⁾에 기술된 바와 같이, 체적과 면적에 대한 여러 가지 조합으로 표준화를 시도하였지만 두 데이터를 일치시키는 데는 아직까지 만족할만한 성과를 얻지 못하고 있는 실정이다. Fig. 3(b)에서, 정상적으로 볼 때 MCVN 곡선은 CVN 곡선과 유사하지만, 사실 MCVN 곡선은 CVN 곡선 위와 왼쪽에 놓여져 있다. 즉, MCVN 시험편의 경우, 표준화된 USE는 표준 시험편의 경우에서보다 더 커지고 연성과 취성 파괴 사이의 천이영역은 더 낮은 온도에서 발생한다는 것이다.

Fig. 3(c)의 경우, 표준화된 USE의 값으로 3 종류의 시험편에서 비슷한 값을 얻었다. 또한 그림에서 표준 시험편과 소형 시험편의 시험결과를 비교해 보면 같은 온도에서 측면 흡을 갖지 않은 소형 시험편의 데이터가 표준 시험편의 데이터보다 위에 위치하고 있어서 DBTT가 저온쪽으로 약간 이동했음을 알 수 있다. 그리고 열화도가 증가할수록 DBTT는 정상적으로 볼 때 고온쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이로서 충격시험에서 얻은 데이터를 표준화하는데 파괴용적으로 Bb^2 보다는 $Bb^{3/2}$ 이 1Cr-1Mo-0.25V 강에서 더 유용하다는 것을 알 수 있다.

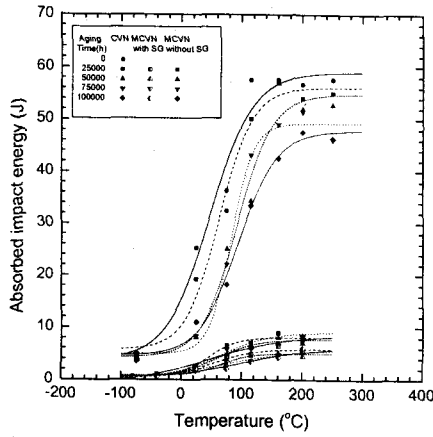
Fig. 4는 표준 시험편과 소형 시험편에서 얻은 DBTT의 상관관계를 나타낸 것이다. 소형 노치 시험편의 DBTT는 표준 노치 시험편의 DBTT에 비해 평균 약 20°C정도 저온측으로 이동하였지만 측면 흡을 가진 소형 노치 시험편의 DBTT는 표준 노치 시험편의 DBTT와 비슷하게 나타났다. 이것은 측면 흡을 가진 소형 시험편의 파괴면에서의 변형을 구속이 표준 시험편에서와 유사하다는 것을 뜻한다. 따라서 측면 흡을 가진 소형 노치 시험편을 가지고 행한 충격시험으로부터 표준 노치 시험편에서 얻을 수 있는 충격특성을 추정할 수 있으며, 둘 사이의 상관관계는 다음과 같다.

$$(\text{DBTT})_{\text{full-size}} = (\text{DBTT})_{\text{subsize with side groove}} \quad (2)$$

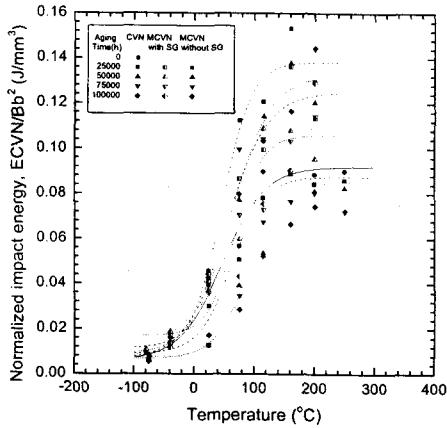
3.2 열화도에 따른 파괴응력의 평가

본 절에서는 계장화 충격시험에서 얻은 데이터로부터 벽개 파괴응력을 결정하는 방법에 대해서 술하고자 한다.

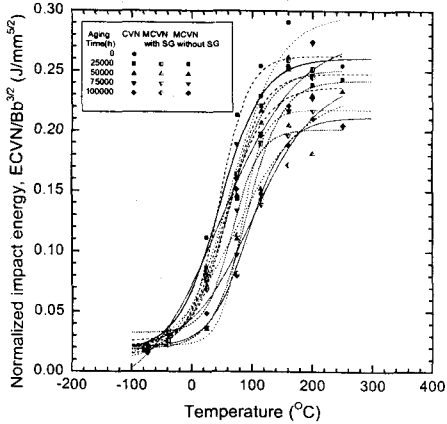
Kumar 등⁽⁹⁾은 서로 다른 크기의 시험편에서 얻은 DBTT를 노치선단에서의 최대 탄성인장응력 σ' 로 normalization하여 그 크기 효과를 예측하는



(a)



(b)



(c)

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

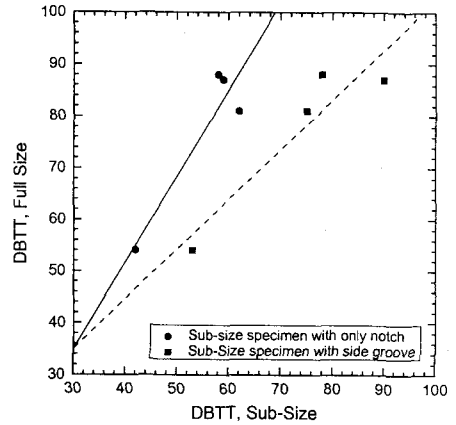


Fig. 4. Relation between DBTT of subsize impact specimen and DBTT of full size impact specimen.

방법을 제안하였다. 파괴는 균열 선단 앞쪽에서 최대 탄성 인장 응력, σ' 에 의해 조절된다고 가정하였으며, 균열선단에서의 응력이 임계값 또는 파괴응력이라 불리는 σ'_r 에 다다를 때 균열이 진전한다. 최대 탄성인장 응력은 식(3)로 나타낼 수 있다. 식(3)의 P_m^* 는 Fig. 5에서 나타내는 바와 같이 전반향복이 일어나고 벽개균열이 시작되어 시험편이 파괴되는 온도에서의 최대하중을 뜻한다. Fig. 5는 본 연구에서 결정한 P_m^* 을 보여주고 있는데 1Cr-1Mo-0.25V 강 4 종류의 열화재 MCVN 시험편에서 얻은 결과이다.

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

여기서 L 은 엔벨의 간격, B 는 시험편 너비를 나타내고 b 는 ligament 크기이다.

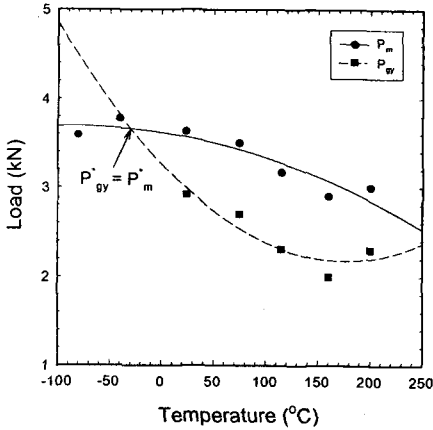
응력집중계수 K_t 는 식(4)로 나타낼 수 있다.⁽¹¹⁾

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

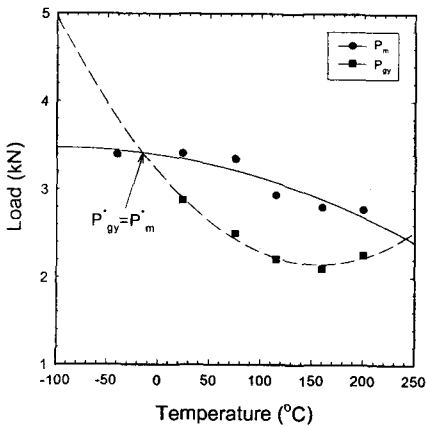
$$f = \frac{2(b/R+1)(b/R)^{1/2}}{(b/R+1)\arctan(b/R)^{1/2} + (b/R)^{1/2}}$$

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

여기서 R 은 notch root의 반지름이다. 표준 시험편과 소형 시험편에서 측정된 K_t 의 값은 각각 4.81, 3.46이다.



(a)



(b)

Fig. 5. Maximum load and general yield load vs. temperature diagrams for (a) 25000 hour (b) 100000 hour.

Lucas 등⁽¹²⁾의 연구에 따르면, 식(2)의 최대하중 P_m^* 는 파괴응력 σ_f^* 를 포함하고 있는 식(5)에 의해서도 평가가 가능하다.

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

여기서 σ_f^* 는 시험편 크기와는 무관한 재료상수이다. σ_f^* 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_f^* = 6.52P_m^* / Bb \quad (6)$$

Fig. 6은 열화시간에 따른 σ_f^* 의 변화를 나타내고 있다. DBTT의 특성처럼 50,000 시간 열화재까지는 급격한 변화를 나타내지만 그 이후의 열화시간에서는 파괴응력의 변화가 나타나지 않고 있다.

파괴응력의 변화 특성은 Fig. 4에서 보여주는 DBTT의 변화 특성과 유사한 양상을 보이고 있다. DBTT는 50,000 시간까지 급격히 증가하지만 파괴응력은 급격히 감소한다. 그러나 둘 다 50,000 시간 이후에는 변화가 거의 관찰되지 않는다는 특성을 보이고 있다. 따라서 파괴응력과 DBTT는 밀접한 상관관계가 있다는 것을 알 수 있다. 여하튼 식(5)를 식(3)에 대입하여 정리하면 최대 탄성인장응력은 다음과 같다.

$$\sigma_f^* = 0.23K_f L \sigma_f^* / b \quad (7)$$

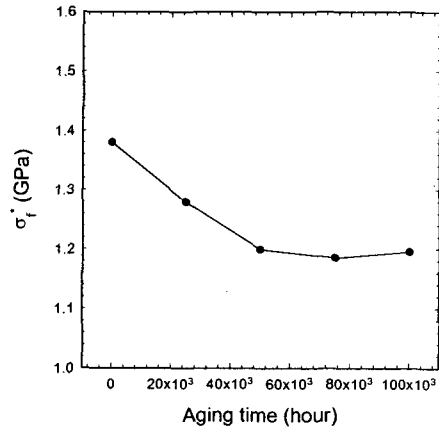


Fig. 6. Variation of the fracture stress, σ_f^* , with the aging time.

Fig. 7은 측면 홈을 갖지 않은 소형 시험편의 DBTT의 보정값, $DBTT_{mini} / \sigma_{mini}^*$ 와 표준 시험편의 DBTT의 보정값, $DBTT_{stan} / \sigma_{stan}^*$ 과의 상관관계를 나타낸다. 소형 시험편 데이터와 표준 시험편 데이터는 대략 1 정도의 기울기를 가진 선에 모여 있다. 이것은 σ_f^* 에 의한 normalization이 본 연구의 결과에 적용되고 있다는 것을 의미한다. 열화된 터빈 로터강의 $DBTT_{stan} / \sigma_{stan}^*$ 과 $DBTT_{mini} / \sigma_{mini}^*$ 와의 상관관계는 식(8)로 나타낼 수 있다. 따라서 식(8)을 이용하면 열화정도에 관계없이 소형 시험편에서 얻은 $DBTT_{mini}$ 로부터 $DBTT_{stan}$ 을 추정하는 것이 가능하다.

$$DBTT_{stan} / \sigma_{stan}^* = DBTT_{mini} / \sigma_{mini}^* + A \quad (8)$$

여기서 터빈로터강에 대한 상수 A는 0.5 °C/GPa이다.

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

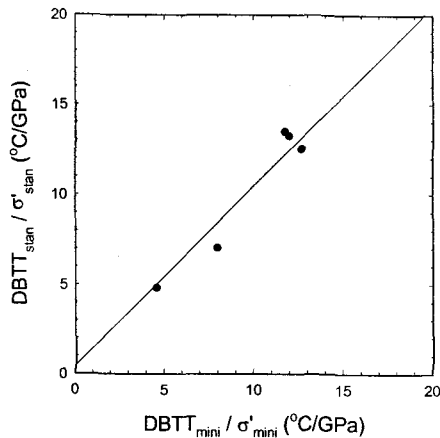


Fig. 7. Correlation between normalized DBTT_{stan} and DBTT_{mini}.

4 장 결 론

측면 홈을 가진 것과 갖지 않은 소형 Charpy 충격시험편을 이용하여 1Cr-1Mo-0.25V 강의 DBTT 열화 평가를 시도하였으며 연구결과는 다음과 같다.

(1) 열화된 터빈 로터강 표준 시험편의 DBTT_{stan}은 1/8 크기의 측면 홈을 가진 소형 시험편의 시험결과로부터 직접 얻을 수 있다.

(2) 측면 홈을 갖지 않은 소형 시험편의 DBTT_{mini}와 표준 시험편의 DBTT_{stan}의 상관관계는 노치 선단에서의 최대 탄성응력 σ' 에 의해 normalization 된 식(8)로부터 얻을 수 있다.

(3) 파괴응력은 50,000 시간 열화재까지는 감소하는 경향을 보였으나 그 이상의 열화시간에서는 변하지 않았다. 따라서 파괴응력은 DBTT_{stan}의 변화 특성과 유사한 양상을 보였다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 안전계측센터사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(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*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 337.
- (5) 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*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 47~61.
- (6) Lucas, G. E., Odette, G. R. and Shekherd, J. W., 1986, "Recent Progress in Subsize Charpy Impact Specimen Testing for Fusion Reactor Materials Development," *Fusion Technology*, Vol. 10, pp. 728~733.
- (7) 남승훈, 김업기, 유광민, 1998, "전기비저항을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V 강의 인성열화의비파괴적 평가," *대한기계학회논문집(A)*, 제 22 권, 제 5 호, pp. 814~820.
- (8) Abdel-Latif, A. M., Corbett, J. M., Sidey, D. and Taplin, D. M. R., 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.
- (9) ASTM Standard E23, 1997, "Notched Bar Impact Testing of metallic Materials," ASTM Philadelphia.
- (10) 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*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 405~416.
- (11) Neuber, H., 1958, *Theory of Notch Stresses*, 2nd ed., Springer Publishers, Berlin, p. 71.
- (12) Lucas, G. E., Odette, G. R., Shekherd, J. W., McConnell, P. and Perrin, J., 1986, "Subsize Bend and Charpy V-Notch Specimens for Irradiated Testing," *ASTM STP 888*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 305~324.