

소형 샤르피 충격시험편을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 천이온도 평가

남 승 훈 · 김 시 천 · 이 해 무
한국표준과학연구원 방재기술연구센터
(1998년 12월 21일 접수, 1999년 1월 5일 채택)

Transition Temperature Evaluation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel Using Miniaturized Charpy Impact Specimen

Seung Hoon Nahm, Si Cheon Kim and Hae Moo Lee

Failure Prevention Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science,
P.O.Box 102, Yusong, Taejeon, 305-102, Korea

(Received 21 December 1998; Accepted 5 January 1999)

요 약

소형 시험편 기술은 최소량의 재료를 사용하여 그 재료의 물리적인 거동을 특성화할 수 있기 때문에 산업설비로부터 많은 재료를 수집할 수 없는 경우에 유용한 방법이다. 본 연구에서 사용한 재료는 화력발전소 터빈로터 소재로 많이 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V강이었으며, 630 °C에서 등온열화처리하여 5종류의 가속 열화 모사재를 만들었다. 충격시험에는 표준 시험편과 소형 시험편이 사용되었으며, 일부 소형 시험편에 소성 구속을 증가시키기 위해 측면홈을 만들어 넣었다. 표준 시험편과 소형 시험편의 충격특성을 비교하였으며 크기효과를 고찰하였고, 소형 시험편의 연성취성천이온도와 표준 시험편의 연성취성천이온도와의 상관관계를 만들었다. 따라서 소형 시험편의 충격시험결과로부터 표준 시험편의 충격특성을 추정하는 것이 가능하게 되었다.

Abstract - Miniaturized specimen technology permits mechanical behavior to be determined using a minimum volume of material. The technology is useful in case of not collecting a large amount of materials from industrial equipments. Five kinds of accelerated degradation materials were prepared by isothermal aging heat treatment at 630 °C. Three kinds of specimens were prepared for impact testing. In order to increase plastic constraint of subsize specimen, side-groove was introduced. Results between subsize and full size impact testing were compared. Size effects correlations were developed for the impact properties of turbine rotor material. These correlations successfully predict the ductile brittle transition temperature (DBTT) of full size Charpy impact specimens based on subsize specimen data.

Key words : Miniaturized Specimen, 1Cr-1Mo-0.25V Steel Size Effect, Ductile Brittle Transition Temperature

1. 서 론

소형시험편을 이용한 충격시험에 관한 연구는

원자력산업의 발달과 함께 최근에 그 연구가 활발히 진행되어 오고 있다[1-4]. 현재 이용되고 있는 절단기술의 수준과 산업설비에서의 시료의

채취에 대한 제약성 때문에 원자력 산업을 비롯한 중·화학설비 분야에서 소형시험편의 선택이 불가피하게 되었다. 그러나 파괴전이 거동을 소형 시험편을 이용하여 특성화하기 위해서는 시험편의 형상 및 크기에 대한 영향이 고려되어야 한다.

소형 크기 시험편의 사용이 주어진 양에서 더 많은 양의 재료시험을 가능하게 한다 하더라도 시험결과가 샘플의 사용 크기에 영향을 받는다 면 데이터의 유용성에 영향을 끼치게 된다. 평면 변형을 상태에서의 파괴인성, K_{Ic} 는 재료의 미세조직만의 함수이지만 평면응력과 혼합한 형태의 파괴인성은 시험편의 형상 및 크기와 금속 조직이라는 두 가지 인자에 영향을 받는다. 충격시험에서는 시험편의 크기가 감소하면 상부 에너지(upper shelf energy; USE)와 연성취성천이온도(ductile brittle transition temperature; DBTT)가 모두 낮아진다. 더군다나 소형 크기 시험편에서는 표준 크기 시험편에서 작용하는 평면 변형률 상태와 대조적인 평면 응력 상태가 커진다. 평면 변형률 상태는 취성 파괴를 증진시키는 반면에 평면응력 상태는 연성 파괴를 증진시킨다. 시험편의 단면적을 줄이는 것은 평면 응력 상태에 가까운 시험편 단면적 비율을 증가시켜 연성파괴가 증진된다. 이러한 이유 때문에 표면상으로는 DBTT가 감소된다[3]. 또한 소형 크기 시험편에서는 줄어든 fracture volume 때문에 USE가 감소된다.

구조물 설계에 표준 크기 충격시험편을 사용하였기 때문에 시험편 크기의 감소에서 기인한 USE와 DBTT의 감소를 추정하기 위하여 소형 크기 시험편에서 표준 크기 시험편의 USE와 DBTT를 예측할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 소형 크기 시험편 자료에 기초하여 표준 크기 시험편의 DBTT의 천이를 예측하는 상관관계에 대한 방법을 기술한 연구도 있으나 현재까지 개발된 어떤 상관관계도 아주 성공적이지는 못한 것 같다. 그 중에서 Kumar[2]가 개발한 DBTT 예측법이 주목을 끈다. Kumar는 노치선단에서의 최대탄성인장응력, σ' 를 도입하여 이것을 이용하여 DBTT를 표준화시킴으로서 소형 시험편으로부터 표준시험편의 DBTT를 예측할 수 있는 경험적인 실험식을 개발하였다.

파괴 시험편의 소형화는 파괴역학의 크기효과 때문에 발생하는 노치 근처의 소성구속의 상실을 초래한다. 그러나 소형 시험편에 측면 홈을 만들어 넣음으로서 이러한 영향을 감소시킬 수 있다고 보고되고 있다[1]. 따라서 소형 시험편에 노치는 물론이고 부가적으로 측면 홈을 가공해 넣음으로서 소성 구속을 증가시킬 수 있다. 일반적으로 볼 때 측면 홈은 파괴면(fracture

plane)을 억제하고 파괴인성시험에서 더욱 일정한 균열면을 얻기 위해 이용되어 왔다. Manahan[5]은 측면 홈이 있는 소형시험편에서는 노치를 따라 평면 변형을 변형 영역이 표준 시험편에서 생겼던 것의 80% 정도의 크기에 달한다고 보고하고 있다.

본 연구는 소형 CVN의 이론을 전개하여 표준시험편을 사용해 얻은 것만큼 정확하고 정량적인 DBTT 데이터를 얻는 데 그 목적을 두고 있다. 본 연구의 결과는 종래의 표준시험편 양의 약 1/8정도의 작은 시험편에서 얻은 결과이며, 노치만 가진 소형시험편과 측면홈까지 가진 소형시험편을 이용하여 표준시험편에서 얻을 수 있는 연성취성천이온도를 추정해 보았다.

2. 실험

2.1. 실험용 재료 및 시험편

시험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈로터에 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강이다. 로터강의 경우 실제 발전소에서 사용된 열화재를 종류별로 입수하는 것은 매우 어렵기 때문에 실제로 열화된 재료의 미세조직과 유사한 미세조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 인위적으로 실제 사용 온도(538℃)보다 높은 온도(630℃)에서 등온 열화 처리하였으며, 열처리시간은 이전의 연구[6]에 기술되어 있다.

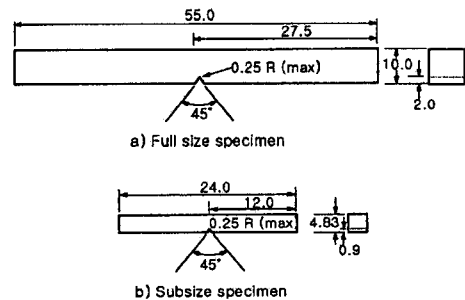


Fig. 1. Geometry of full size and subsize Charpy impact specimen

표준 시험편과 소형 시험편의 형상 및 크기를 Fig. 1에 나타내었다. 표준 크기 시험편의 크기는 ASTM E-23[7]을 따랐으나, 소형시험편에는 유용한 표준절차가 없으므로 본 연구에서 사용된 소형시험편의 크기는 다른 연구자[1]의 제안을 따랐다. 모든 시험편은 T-L 방향성을 갖는 모재로부터 채취하였으며, 소형시험편의 길이는 스트라이커(striker)가 엔빌을 지나가기에 충분

할 정도의 너비를 가질 수 있도록 하였다. 소형 충격시험편은 두 동강난 샤르피(Charpy) 표준 충격시험편의 각각의 반쪽에서 4개씩 만들었다.

2.2. 실험장치 및 실험방법

충격시험에는 SATEC사에서 제작한 샤르피 충격시험기(최대용량 33.9 Joule)를 사용하였다. 이 시험기는 앤빌(anvil)의 조절이 가능하며 해머의 무게 또한 4단계로 조절이 가능하여 크기가 다른 여러 종류의 시험편에 대한 충격시험에 유용하다. 시험편 받침대는 참고문헌 [1]과 관련해 제작하였으며, 기본적인 실험 매개변수(parameter)를 Table 1에서 비교하였다. 시험은 도, 정렬 정확도(alignment accuracy)와 가공 허용오차(machining tolerances)에 관한 절차는 참고문헌[7]을 따랐다.

해머의 충격속도는 해머의 적당한 위치에 플래그(flag)를 부착하여 교정하였다. 충격속도는 10회 측정하여 그 평균값으로 정하였다. 시험편의 치수, 노치의 형상 및 크기는 10회씩 측정하여 상대오차를 0.1% 이하로 하였다. 시험편의 온도변화는 충격흡수에너지 변화의 한 요인이 되므로 시험에 앞서 시험온도에서 적어도 10분 이상 2°C 이내의 온도에서 유지시킨 후 시험편을 항온조에서 끄집어내어 5초 이내에 충격시험을 완료하였다. 각각의 시험 데이터는 Dynatup사에서 개발한 충격시험용 소프트웨어를 이용하여 저장과 분석을 위해 개인용 컴퓨터로 옮겨졌다.

Table 1. Comparison of impact specimen dimensions and experimental parameters

	Conventional Charpy specimen	Miniature Charpy specimen
<Specimen>		
Thickness, B	10.00	4.83
Depth, H	10.00	4.83
Length, L	55.00	24.00
Notch depth, a	2.00	0.90
Notch-root radius, r	0.25	0.25
<Experimental>		
Punch radius	8.00	8.00
Punch tip width	4.00	4.00
Anvil radius	1.00	1.00
Anvil spacing	40.00	19.96

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 소형 시험편의 충격특성

Fig. 2와 3은 시험온도의 함수로서 표준시험편과 소형시험편의 파괴에너지를 각각 나타낸 것이다. 소형 노치시험편에서의 충격흡수에너지

는 표준 노치시험편에서의 충격흡수에너지에 비해 대체적으로 15% 수준이었으며 측면홈을 가진 소형 노치시험편에서는 대략 10% 수준이었다. 그리고 측면홈을 가진 소형 노치시험편의 충격흡수에너지는 소형 노치시험편의 충격흡수에너지의 2/3 수준이었다. 이것은 시험편의 크기 축소에 따라 줄어든 fracture volume이 USE를 감소시킨 것이라고 판단된다.

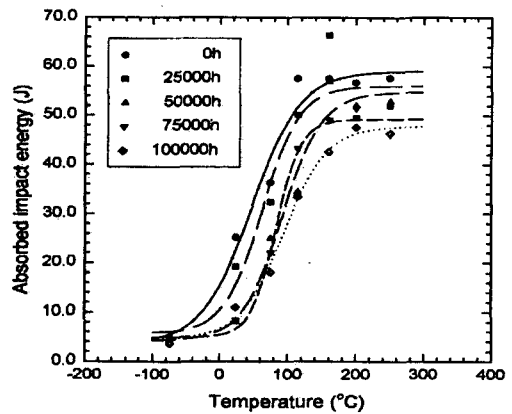


Fig. 2. Dependence of fracture energy on temperature for full size impact specimen

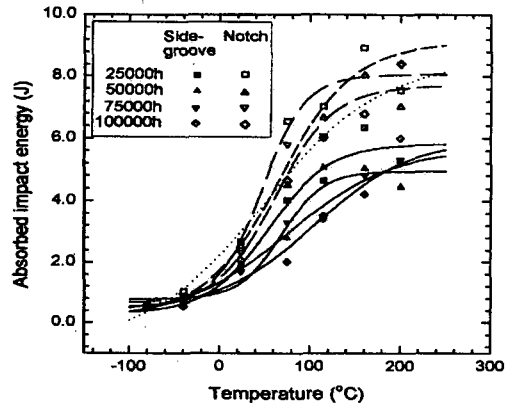


Fig. 3. Dependence of fracture energy on temperature for subsize impact specimen

Fig. 4는 표준시험편과 소형시험편에서 얻은 DBTT의 상관관계를 나타낸 것이다. 소형 노치 시험편의 DBTT는 표준 노치시험편의 DBTT에

비해 평균 약 20℃정도 저온측으로 이동하였지만 측면홈을 가진 소형 노치시험편의 DBTT는 표준 노치시험편의 DBTT와 비슷하게 나타났다.

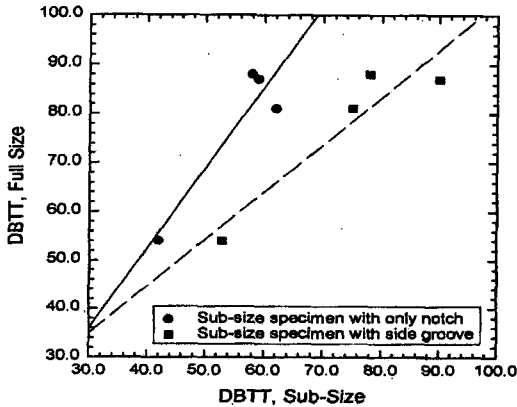


Fig. 4. Relation between DBTT of subsize impact specimen and DBTT of full size impact specimen

3.2. 측면홈을 가진 소형 노치시험편의 DBTT와 표준 노치시험편의 DBTT의 상관관계

파괴 시험편의 소형화는 파괴역학의 크기효과 때문에 노치 근처에서의 소성구속의 상실을 초래한다. 이러한 이유로 Fig. 3에 나타나는 바와 같이 소형 노치시험편의 에너지-온도 곡선은 저온측으로 이동하게 된다. 그러나 소형시험편에 충분한 소성구속을 만들어 주면 소형시험편을 이용하여 표준시험편의 충격특성을 측정할 수 있다. 이를 위해 소형시험편에 측면홈을 만들어 넣었다. 측면홈을 가진 소형시험편에서는 노치를 따라 표준 시험편에서 생겼던 것의 80% 정도의 평면변형률영역이 만들어지기 때문에 표준 시험편의 충격특성과 유사하게 나타났다. 측면홈이 있는 소형시험편에서 얻은 DBTT는 표준 시험편에서 얻은 DBTT와 비슷하므로 특별한 보정없이 DBTT의 평가가 가능하다. 이것은 소형시험편에 측면 홈을 만들어 넣음으로서 이러한 영향을 감소시킬 수 있다는 보고[5]와 일치하고 있다.

Fig. 4에는 측면홈을 가진 소형 노치시험편의 DBTT와 표준 노치시험편의 DBTT와의 상관관계가 나타나있다. 측면홈을 가진 소형 노치시험편 데이터와 표준 노치시험편 데이터는 대략 1정도의 기울기를 가진 선에 모여 있다. 따라서 측면홈을 가진 소형 노치시험편을 가지고 행한

충격시험으로부터 표준 노치시험편에서 얻을 수 있는 충격특성을 추정할 수 있으며, 둘 사이의 상관관계는 다음과 같다.

$$(DBTT)_{full-size} = (DBTT)_{subsize \text{ with side groove}} \quad (3)$$

3.3. 소형 노치시험편의 DBTT와 표준 노치 시험편의 DBTT와의 상관관계

표준 노치시험편과 소형 노치시험편에서의 DBTT의 상관관계를 만들기 위해 파괴는 균열 선단앞쪽에서 최대 탄성 인장 응력, σ' 에 의해 조절된다고 가정하였다.[2] 최대 인장응력은 균열선단의 소성영역에서의 변형경화(strain hardening)에 의해 균열 성장을 위한 임계응력, σ_f' 까지 올라갈 수 있으며, 균열선단에서 응력이 임계값 또는 파괴응력이라 불리는 σ_f' 에 다다를 때 균열은 진전한다. Lucas 등[8]은 이러한 파괴 응력이 재료의 특성이고 시험편크기와는 관계없음을 보여주었다.

Kumar 등[2]은 DBTT와 σ' 의 측정값과의 비를 DBTT의 보정값으로 제안하였는데 σ' 를 계산하기 위해서는 시험편의 크기와 notch root에서의 응력집중계수 K_t , 샤르피 충격시험에서 얻을 수 있는 최대하중 P_m 을 알아야 한다. σ' 는 다음 식과 같다.

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

여기서 B는 시험편 너비를 나타내고 b는 ligament 크기이다.

응력집중계수 K_t 는 다음 식과 같다[9].

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

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

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

여기서 R은 notch root의 반지름이다. 표준 노치 시험편과 소형 노치시험편에서 측정된 K_t 의 값은 각각 4.81, 3.46이다. 또한 표준 노치시험편과 소형 노치시험편의 충격시험에서 얻은 σ' 의 값은 식(1)로 계산해 보면 각각 7.72와 5.05 GPa이다.

Fig. 5는 소형 노치시험편의 DBTT의 보정값과 표준 노치시험편의 DBTT의 보정값과의 상

관관계를 나타낸다. 소형 노치시험편 데이터와 표준 노치시험편 데이터는 대략 1정도의 기울기를 가진 선에 모여 있다. 따라서 소형 노치시험편을 가지고 행한 충격시험으로부터 표준 노치시험편에서 얻을 수 있는 충격특성을 추정할 수 있으며, 표준 노치시험편과 소형 노치시험편에서 열화처리로 인한 DBTT의 변동으로부터 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있다.

$$(DBTT_n)_{full-size} = (DBTT_n)_{subsize \text{ without side groove}} \quad (4)$$

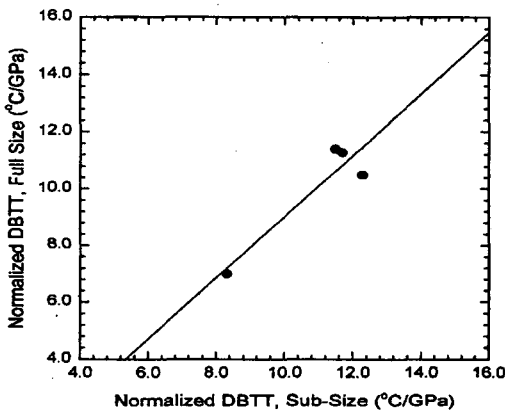


Fig. 5. Relation between normalized DBTT of subsize impact specimen without side groove and normalized DBTT of full size impact specimen.

4. 결 론

소형 샤르피 충격시험편을 이용하여 1Cr-1Mo-0.25V강의 천이온도를 평가하는 방법을 연구하였으며, 그 가능성을 확인하였다. 열화처리에 따른 측면홈을 가진 소형 노치시험편에서의 DBTT의 이동은 표준 노치시험편 크기에서의 DBTT의 이동과 유사하였으며, 소형 노치시험편에서의 DBTT의 보정값의 이동은 표준 노치시험편 크기에서의 DBTT의 보정값의 이동과 유사하였다. 따라서 소형 노치시험편이나 측면홈을 가진 소형 노치시험편에 대한 DBTT의 이동 실험값을 알 수 있다면 표준 노치시험편에 대해 환경적인 노출이나 thermomechanical treatment에 따른 DBTT에서의 이동을 다음 식을 사용하여 결정할 수 있다.

1) 소형 노치시험편의 경우:

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

2) 측면홈을 가진 소형 노치시험편의 경우:

$$(DBTT_n)_{full-size} = (DBTT_n)_{subsize \text{ without side groove}}$$

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 방재기술연구센터의 방재기술사업의 일환으로 수행되었습니다. 그리고 충격시험기를 사용할 수 있도록 도와주신 원자력연구소의 홍준화 박사님과 김주학님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Manahan, M. P. : J. of Mat. Sci., 25, 3429(1990).
2. Kumar, A. S., Loudon, B. S., Garner, F. A. and Hamilton, M. L. : ASTM STP 1204, 47(1993).
3. Rosinski, S. T., Kumar, A. S., Cannon, N. S. and Hamilton, M. L. : ASTM STP 1204, 405(1993).
4. 김훈, 김주학, 지세환, 홍준화 : 대한기계학회 논문집(A), 21(1), 93(1997).
5. Manahan, M. P. : ASTM Standardization News, 23(1996).
6. 남승훈, 김엄기, 유광민 : 대한기계학회논문집 (A), 22(5), 814(1998).
7. ASTM Standard E23, (1997).
8. Lucas, G. E., Odette, G. R., Shekherd, J. W., McConnell, P., and Perrin, J. : ASTM STP 888, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 305(1986).
9. Neuber, H. ; "Theory of Notch Stresses", 2nd ed., Springer Publishers, Berlin, 71(1958).