

# Charpy 충격시험편을 이용한 터빈 로터강의 인성 열화도 평가 Toughness Degradation Evaluation of Turbine Rotor Steel Using Charpy Specimen

남승훈\*, 김시천, 이해무 (한국표준과학연구원)  
S.H.Nahm\*, S.C.Kim and H.M.Lee (KRISS)

## ABSTRACT

Miniaturized specimen technology permits mechanical behavior to be determined using a minimum volume of material. because it is almost impossible to sample the conventional specimen for the fracture toughness test without damage to the rotor. In addition, it is difficult to collect a large amount of actual turbine rotor steels. Hence seven kinds of specimen with different degradation levels were prepared by isothermal aging heat treatment at 630°C. Test material was 1Cr-1Mo-0.25V steel which was widely used for turbine rotor material. The relation between fracture toughness and DBTT was investigated. The characteristics of miniaturized impact specimens technique was discussed. Finally, the estimating method of fracture toughness using a single impact specimen was introduced.

**Key Words** : Turbine Rotor Steel(터빈 로터강), Fracture Toughness(파괴인성), DBTT(연성취성전이온도), Single Impact Specimen(단일 충격시험편), Degradation(열화)

## 1. 서 론

소형 시험편 기술은 현재 사용되는 구조물이나 부재에서 작은 조각을 안전하게 떼어 낼 수 있는 경우에 그 재료의 물리적인 거동을 특성화하는데 매우 유용한 방법중의 하나이다. 이 기술은 최소량의 재료를 사용하여 물리적인 거동을 특성화 해주기 때문에 원자력 산업의 압력용기의 안전성 평가에 적용되어 왔다[1].

가장 간단한 파괴거동시험중의 하나인 샤르피 V-노치(Charpy V-notch; CVN) 충격시험을 통하여 시험온도의 함수로서 충격에너지, 횡팽창, 연성과파괴면적을 등과 같은 다양한 데이터를 만들어 낼 수 있다. 이 시험은 주로 취성에서 연성과파괴로의 전이가 발생하는 범위내의 전(全) 온도 범위에서 실행되는데, 이전의 연구는 연성·취성 전이온도(ductile brittle transition temperature; DBTT)에 영향을 주는 인자를 밝히는 것이었다[2-6]. Corwin 등[7]은 소형 시험편에 대한 연구를 포함한 CVN 시험이 경험적이거나 정성적인 데이터를 제공한다고 밝히고 있다.

시험편 크기가 감소하면 upper shelf energy(USE)와 DBTT가 모두 낮아진다. 소형 시험편에서는 표준 시험편에서 작용하는 평면 변형률 상태와 대조적인 평면 응력 상태가 커진다. 평면 변형률 상태는 취성과파괴를 증진시키는 반면에 평면 응력 상태는 연성과파괴를 증진시킨다.[8] 이러한 이유 때문에 표면상으로 DBTT가 감소하는 것으로 나타난다. 또한 소형 시험편에서 줄어드는 fracture volume은 USE를 감소시킨다. 구조물 설계에는 표준 충격시험편을 사용하기 때문에 소형 시험편을 이용하기 위해서는 소형 시험편으로부터 표준 시험편의 USE와 DBTT를 예측할 수 있는 향상된 평가방법의 개발이 필요하다.

현재의 연구는 소형 시험편을 이용하여 표준시험편을 사용해 얻은 것만큼 정확하고 정량적인 DBTT를 얻는 데 그 목적을 두고 있다. 다른 연구자들의 연구는 1/2, 1/3 또는 1/4크기의 소형 CVN 시험편에 역점을 두고 있으나[7], 본 연구결과중의 일부는 종래의 표준 시험편의 약 1/16정도인 소형 시험편에서 얻은 결과이다. 또한 단일 충격시험편을 이용하여 저 합금강의 DBTT를 추정하는 방법을 제안하였다.

## 2. 실 험

### 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 [9]에 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[10], 열처리시간은 참고문헌 [9]에 기술되어 있다.

현재 이용중인 절단기술의 한계와 발전산업설비에서의 시험편 채취에의 제약 때문에 소형 노치 시험편을 선택하였다. 표준 시험편과 소형 시험편의 형상 및 크기를 Fig. 1에 나타내었다. 소형 충격시험편은 두 동강난 샤프피 표준 충격시험편의 각각의 반쪽에서 최대 8개씩 만들었다.

모든 시험편은 T-L 방향성을 갖는 모재로부터 채취하였는데 시험편의 길이 방향이 압연 방향에 수직인 방향이며 grain의 신장방향은 균열성장방향과 같은 방향으로 하였다. 이 방향에서 시험편은 파괴되기 위한 최소한의 저항을 가지기 때문이다.

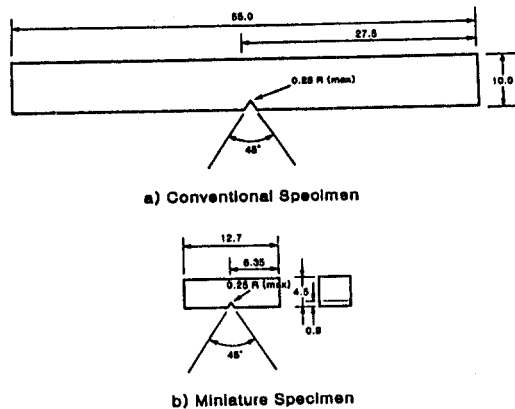


Fig. 1. Dimensions of conventional and miniature Charpy specimens.

### 2. 2 실험장치 및 실험방법

충격시험에는 미국의 Tinius Olsen 사에서 제작한 Charpy 충격시험기(최대용량 36.5 kgf·m)를 사용하였다. 시험편 받침대는 참고문헌 [1]과 관련해 제작하였다. 소형 시험편에 관해서는 시험편 받침대 간격과 충격날 두께의 감소가 필요하며, 기본적인 실험 parameter를 Table 1에서 비교하였다. 만약 시험편 받침대의 조절이 가능하다면 다른 크기의 시험편으로도 충격시험이 가능하다. 시험온도, 정렬 정확도(alignment accuracy)와 가공 허용오차(machining tolerances)에 관한 절차는 참고문헌 [11]의 규정을 따랐다.

시험편의 온도변화는 충격흡수에너지 변화의 한 요인이 되므로 충격시험을 할 때 항온을 유지하는 것이 바람직하다. 각각의 시험편은 시험에 앞서 시험온도에서 적어도 10분 이상 2℃이내의 온도에서 유지시킨 후 시험편을 항온조에서 끄집어내어 5초 이내에 충격시험을 완료하였다. 이 때 시험편의 온도조절은 항온조에서 하였는데 높은 온도에서는 실리콘 오일을 사용하였으며 낮은 온도에서는 액체질소와 알코올을 사용하였다.

시험편의 치수는 마이크로미터를 이용하여 측정하였으며, 노치의 형상 및 크기는 이동현미경을 이용하여 측정하였다. 측정오차를 줄이기 위하여 10회씩 측정하여 상대오차를 0.1% 이하로 하였다.

Table 1 Comparison of specimen dimensions and experimental parameters

	Conventional Charpy specimen	Miniature Charpy specimen
<Specimen>		
Thickness, B	10.00	4.50
Depth, H	10.00	4.50
Length, L	55.00	12.70
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	11.40

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3. 1 소형 시험편의 충격시험 결과

본 연구에서 사용한 소형 시험편은 표준 시험편의 약 1/16정도이다. 소형 시험편에 대한 표준시험절차가 아직 제정되어 있지 않기 때문에 Manahan[1]의 제안을 따랐다. 시험편은 받침대 사이에 겨우 지지할 수 있을 정도의 길이이지만 상온에서의 시험결과, 받침대와 접촉하는 부위에서 심한 소성변형을 일으켰으며 jamming 현상도 나타났다. 이러한 이유로 표준 시험편에서 얻은 충격흡수 에너지보다 10배 가량 높았다. 따라서 시험편 치구의 개선 없이는 소형 시험편을 이용한 충격특성 평가가 어렵다고 사료된다.

#### 3. 2 열화에 의한 충격특성의 저하

Fig. 2는 표준 시험편을 이용하여 여러 가지 온도 조건에서 얻은 충격시험결과이다. Fig. 2로부터 각 시험온도에서 열화도에 따라 충격흡수에너지가 달라진다는 것을 알 수 있으며 시험온도가 높아질수록 열화도에 따른 충격흡수에너지의 차이도 커진다는 것을 알 수 있다. 저온에서의 lower shelf 충격흡수에너지는 열화도에 따라 큰 차이를 보이지 않지만 고온에서의 upper shelf 충격흡수에너지는 열화도에 따라 큰 차이를 보이고 있다.

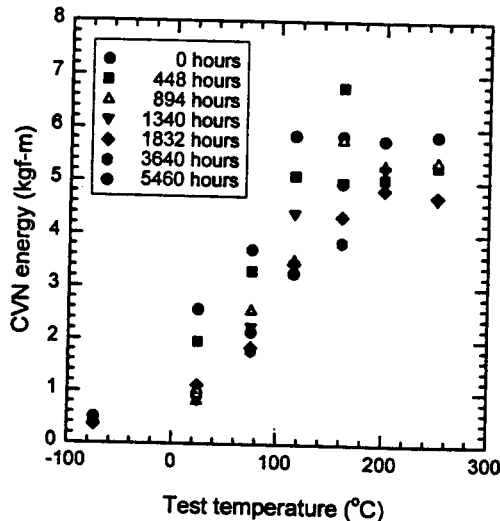


Fig. 2. CVN energy transition behavior as a function of test temperatures.

Fig. 3은 열처리시간에 따른 DBTT의 변화를 나타낸다. 온도변화에 따른 충격흡수에너지의 변화로부터 얻은 DBTT값은 열처리시간에 따라 변하고 있다. 일부 연구자들의 연구결과에 의하면 터빈 로터강의 경우 열화도는 40,000시간일 때가 최대이며, 그 이후부터는 사용시간이 증가해도 재질의 열화에 미치는 영향이 적다고 보고되고 있다[12]. 그러나 본 연구에서는 50,000 시간 사용재에 상당하는 894 시간 가속 열처리재에서 DBTT의 값이 거의 최대에 수렴하였으므로 측정오차를 고려한다면 더 이상의 증가는 없다고 추정된다. 따라서 터빈로터강의 경우 인성 열화도는 40,000 시간일 때가 최대이며, 그 이후부터는 사용시간이 증가해도 재질의 인성열화에 미치는 영향이 적다는 일부 연구자들의 연구결과[12]와 거의 일치하고 있다.

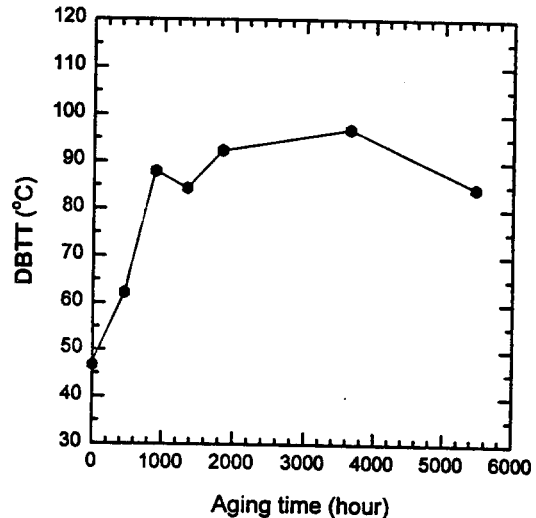


Fig. 3. Dependence of DBTT on aging time.

#### 3. 2 단일 충격시험편에 의한 DBTT의 추정

Fig. 4는 표준 시험편의 시험결과를 초과온도(시험 온도-DBTT)와 충격흡수에너지와의 상관관계로 나타낸 것이다. 초과온도는 충격시험에서 얻은 DBTT를 이용하여 얻어진다. Upper shelf 영역에서 데이터가 분산되고 있기는 하지만 전체적으로 볼 때 시험 데이터가 좁은 범위 내에 모여 있으므로 하나의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 Fig. 4에서 얻은 함수를 이용한다면 단일 시험편의 충격시험으로부터 DBTT의 예측이 가능하다.

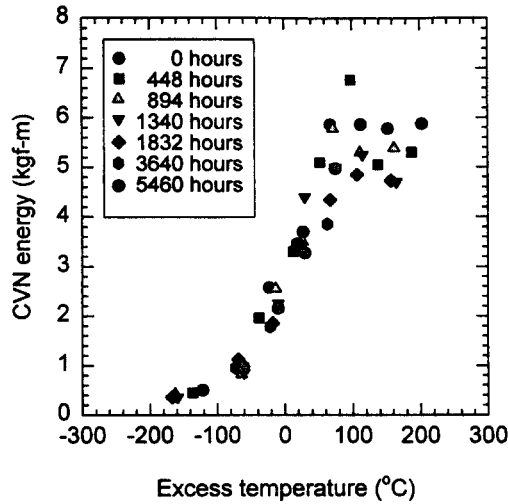


Fig. 4. Relation between excess temperature and Charpy impact energy.

### 3. 3 DBTT를 이용한 파괴인성 평가

기존에 보고되어 있는 DBTT와 파괴인성값  $K_{IC}$ 와의 상관관계[13-15]를 이용한다면 충격시험 결과로부터 파괴인성값  $K_{IC}$ 를 환산할 수 있다.

본 연구에서는 Jones[15]이 제안한 식을 이용하여 파괴인성값을 구하였다.

$$K_{IC} = 10800/[108 - (T - DBTT)] \quad (1)$$

여기서  $K_{IC}$ 의 단위는  $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ , T 및 DBTT의 단위는 °F이다. Fig. 5는 초과온도에 대한  $K_{IC}$ 의 변화를 나타낸 것으로서 참고문헌 [13]에서 인용한 데이터의 분산범위와 본 실험에서 얻은 데이터를 도시한 것이다. 본 실험에서 얻은 결과가 다른 연구자가 얻은 데이터의 분산폭 내에 위치하고 있으므로, 본 실험결과가 인성평가에 사용될 수 있으리라고 사료된다.

### 4. 결 론

미소 충격 시험편을 이용하여 터빈 로터강의 파괴인성을 평가하는 방법을 연구하였다. 아직 데이터가 부족하기는 하지만 미소 충격시험편을 이용하여 재료인성을 평가할 수 있다는 가능성을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

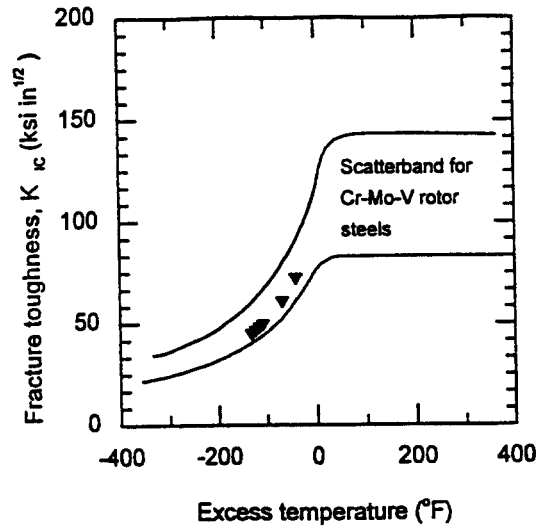


Fig. 5. Relation between excess temperature and Charpy impact energy.

1. 열화시간이 증가함에 따라 DBTT는 초기엔 증가하였으나 약 50,000 시간 이상의 모사 열화재에서 DBTT는 더 이상 증가하지 않았다.
2. 단일 시험편으로 행한 충격 시험결과로부터 DBTT의 추정이 가능하며 이것을 이용하여 재료의 인성을 평가할 수 있다.
3. 소형 시험편을 이용한 충격특성 평가에 실패했다. 따라서 시험편 치구의 개선이 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. M.P.Manahan, J. of Mat. Sci., Vol. 25, pp. 3429-3438, 1990.
2. N.Davidenkov et. al., Trans. ASME 69, p. 63, 1947.
3. J.E.Degraaf et. al., J. Iron steel Inst., p. 19, January 1953.
4. M.Grounes, ASTM STP 426, p. 224, 1967.
5. S.T.Rolfe et. al., "Fracture and Fatigue Control in Structures," Prentice Hall, New Jersey, 1971.
6. D.Firrao et. al., Metall. Trans. 13A, p. 1003, 1982.
7. W.R.Corwin et. al., ASTM STP 888, p. 337, 1986.

<지면 관계상 이하 참고문헌 생략>