

표준 Charpy 시편과 pre-cracked Charpy 시편을 이용한
SA508 강의 충격 거동 해석

Analysis of Impact behavior of SA508 steel
using Standard and pre-cracked Charpy Specimens

박순동, 이호진, 이봉상
한국원자력 연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력 압력용기 강 재료의 인성 평가에 많이 사용되는 표준 Charpy 시편과 pre-cracked Charpy 시편을 계장화 된 충격시험기를 사용하여 시험한 후 각 시편에 대한 균열 파괴 거동을 비교하였다. Pre-cracked 시편의 경우 표준시편에 비해 DBTT 가 약 20 °C 정도 높은 것으로 관찰되었다. 피로 균열을 갖는 pre-crack Charpy 시편에 비해 표준 Charpy 시편의 경우 파괴된 시편 양 옆의 표면에서 연성 파괴 현상이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 균열이 plain stress 조건을 만족하면서 전파되기 때문에 DBTT 가 pre-cracked 시편에 비해 떨어지는 것으로 예상된다.

Abstract

The Impact behaviors of pre-cracked Charpy specimens and standard Charpy specimens, which were used for assessing the toughness of materials for pressure reactor vessel, were compared by using the instrumented impact tests. The DBTT of pre-cracked specimen is measured higher than that of standard specimen by about 20 °C. The ductile fracture was remarkably measured on the side-surface of the fractured standard Charpy specimen tested in the transition temperature range. It is expected that the crack in the standard specimen is propagated in the condition of plain stress condition compared with that of pre-cracked specimen.

1. 서론

ASME SA508-3 등의 페라이트 계의 저 합금강으로 제조되는 원자력 압력용기는 중성자 조사에 의해 재료가 취약해져 안정성에 영향을 주므로 초기 재료의 인성 (toughness) 은 물론 운전 중 재료의 인성을 계속 감시하여 갑작스런 취성 파괴가 발생하지 않도록 해야한다. 재료의 인성을 정량적으로 측정하는 방법으로는 Charpy 충격시험, 정적파괴인성 시험을 사용하고 있다. Charpy 충격시험의 경우 충격에 대한 재료의 인성을 흡수에너지와 천이온도로 표시하며, 정적 파괴시험의 경우 평면변형 파괴인성 (plane strain fracture toughness : K_{Ic}) 와 J 적분 (J integral J_{Ic}) 값을 사용하여 표현한다[1,2].

파괴인성을 나타내는 K_{Ic} 의 경우 완전 취성 파괴가 발생하는 영역 혹은 재료에 대하여 파괴 인성 치를 나타내며, J_{Ic} 의 경우는 연성 안전 균열 성장이 진행되는 영역에서의 연성 균열 시작 저항성을 나타낸다. 이와 같은 정적 시험 방법은 재료의 파괴 거동을 정량적으로 잘 나타낼 수 있으나 시험 조건 및 시편의 준비 조건이 까다롭다. 이에 비해 Charpy 충격시험은 시편이 작고 간단하며, 정성적이기는 하나 연성-취성 거동을 잘 나타내므로 매우 유용한 인성 측정 방법이다.

원자력 재료의 중성자 조사에 따른 인성 변화를 확인하는 경우 방사선의 저감화 그리고 조사 캡슐의 크기를 고려하는 경우 시편의 크기가 작아야 한다. 시편의 크기가 큰 경우 재료의 양, 장비 그리고 비용이 크게되므로 불리하다. 다른 인성 시험에 비해 작고 시험이 간단하므로 Charpy 충격시험이 압력용기 재료의 인성 평가 방법으로 현장에서 많이 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 기계 가공된 무딘 노치와 매우 큰 하중속도를 사용하기 때문에 파괴 역학적인 면에서 재료의 인성을 정확히 평가하기는 어려운 단점을 갖는다 [2].

본 논문에서는 표준화된 Charpy 시편과 pre-cracked Charpy 시편을 계장화된 (instrumented) 충격시험기를 사용하여 시험한 후 두 시편의 충격 거동을 비교함으로써 표준화된 시편의 균열 발생 및 전파 양상을 확인하고자 하였으며, 이 후 고려되는 소규모 시험편을 포함하는 여러 가지 시편 대한 충격시험의 자료로 사용하고자 하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 재료는 원자력 압력용기로 사용되는 Mn-Mo-Ni 계 저합금강인 ASME SA508 Cl.3 로서 Si+Al 탈산 소재로서 중성자 조사를 받지 않은 재료를 사용하였으며 화학조성은 표 1 과 같다[2]. 시편은 표준 시편 크기인 10mm x 10mm x 55 mm 로 가공한 후 V 노치를 가공하였다. 표준 시편은 V 노치 그대로 사용하였으며, pre-cracked 시편의 경우는 시편 폭의 약 50 % 정도가 되도록 피로 균열을 가공하였다.

실험에 사용된 충격시험 장치는 시편에 충격 tup 이 충돌하는 순간 충격하중과 시간을 측정하여 하중-시간 관계도를 얻을 수 있도록 준비하였다. 충격하중은 tup 에 부착된 load cell을 사용하여 측정하였으며, 충격 시간은 시편 근처에 부착된 광 센서를 통해

hammer 의 속도를 측정하였다. 이 결과들은 PC 와 연결되어 처리하도록 준비되었다. 표준시편과 pre-cracked 시편의 경우 충격 흡수에너지의 차이가 너무 크므로 동일한 충격 시험기를 사용하지 못하고 각 시편 종류에 따라 대형, 소형 충격시험기를 각각 사용하였다. 표준시편의 경우 hammer 무게가 22.68 Kg, pre-cracked 시편의 경우 hammer 무게가 12.08 Kg 인 장치를 사용하였다. 충격 직전에 측정된 hammer 속도는 대형의 경우 5.36 m/sec, 소형의 경우 5.18 m/sec 였다.

Table 1. Chemical composition of the test material

Elemnt	Fe	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al
wt%	Bal	0.21	1.24	0.007	0.002	0.24	0.92	0.21	0.49	0.005	0.03	0.022

온도에 따른 시편의 흡수에너지를 얻기 위해 시편을 냉각시킨 후 충격시험을 수행하였다. 시편의 온도는 시편을 에칠 알콜에 담근 후 액체질소를 용기외부에 흘리면서 온도를 조절하여 결정하였다.

3. 계장화 충격시험

계장화 충격시험을 통해 얻을 수 있는 변수는 그림 1에서 보듯이 흡수에너지, 항복하중, 최고하중, 불균일 전파하중 그리고 균열 정지하중 등이 있다[2,3].

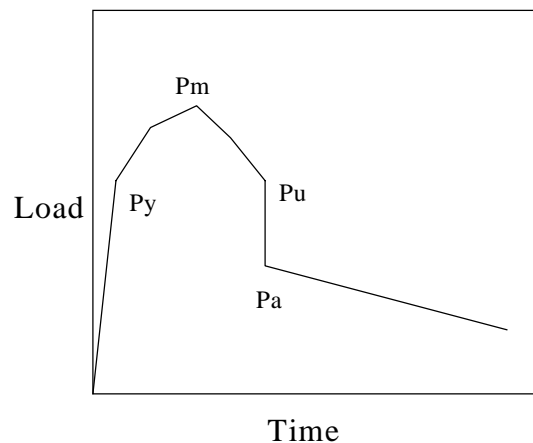


Fig. 1. Schematic diagram of Charpy impact loading vs. time

그림 1 은 충격시험에서 얻을 수 있는 일반적인 하중 및 시간의 관계도이다. 시편에 충

격이 가해지는 초기에 재료 및 장치의 compliance 에 의해 하중이 증가하고, Py 부분에서 재료의 균열 부분에서 항복이 발생한다. 최고 하중 부분에서 균열의 전파가 시작되고 Pu 부분에서 급격한 재료의 취성 파괴가 발생하며, Pa 부분에서 이 취성 균열이 저지 (arrest) 되는 것을 예상할 수 있다. 이 단계는 모든 재료 및 시편에서 모두 발생하는 것이 아니라 재료 및 시험조건에 의해 균열 양상이 다르므로 발생하지 않기도 한다.

4. 표준시편 과 pre-cracked 시편의 충격 거동

충격 시험 후 파괴된 재료의 표면을 그림 2 에 비교하였다. 그림에서 보듯이 두 종류 시편 모두 온도가 낮아짐에 따라 연성 파괴에서 취성 파괴로 파괴 양상이 변하고 있다. pre-cracked 시편의 경우 표준시편에 비해 균열 발생 초기의 연성 영역을 거의 보기 어려우며, 취성 파괴가 발생하는 부분에서의 파단 면이 매우 고르고, lateral expansion 량이 적다. 또한 pre-crack 시편에서 취성 파괴가 일어나는 온도가 표준 시편에 비해 높은 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 표준 Charpy 시편과 pre-crack 시편에서의 파괴 거동이 서로 다르다는 것을 의미한다.

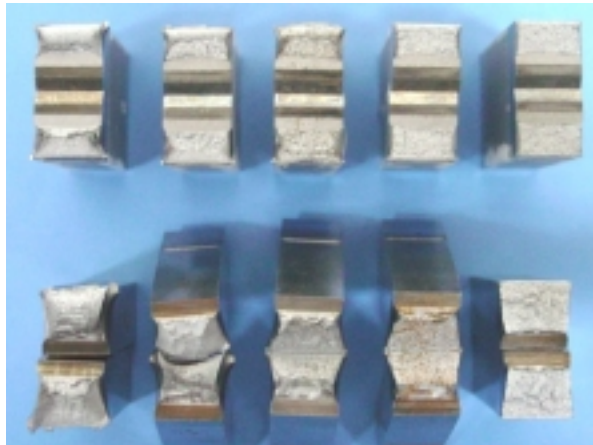


Fig. 2. Fractured surface. Upper line : pre-cracked specimens,
Lower line : standard specimens. Temperature condition
(from left side 25°C, 0°C, -10°C, -30°C, -50°C)

그림 3 에 충격 시험 중 시험 온도에 대하여 얻은 흡수에너지의 변화를 비교하였다. 그림에서 보듯이 표준시편의 경우 pre-cracked 시편에 비해 높은 흡수에너지를 갖는다. 그림 2 에서 보듯이 표준 시편의 경우 pre-crack 시편에 비해 노치의 길이가 짧고, 노치로부터 초기 균열 발생을 위한 에너지가 크기 때문으로 예상된다. 또한 큰 파단 면적과 불

균일한 방향으로의 균열 전파도 에너지 증가에 영향을 준 것으로 생각된다.

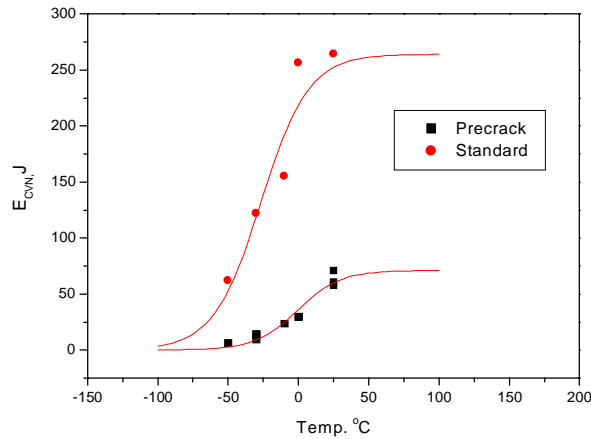


Fig. 3. Charpy transition curves for the standard and pre-cracked specimens

그림 3의 실선은 측정된 자료를 가지고 식 1과 같은 hyperbolic tangent curve fitting 방법으로 얻은 그래프이다. 그림의 실선에서 보듯이 pre-crack 시편의 경우 표준시편에 비해 DBTT (Ductile-brittle transition temperature : 연성-취성 천이온도)가 약 20 °C 정도 높은 것으로 관찰되었다[1]. 이것은 pre-crack 재료가 높은 온도에서 취성 파괴를 일으킬 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 현상은 표준시편의 파괴된 시편 표면의 노치 끝단에서 볼 수 있는 연성 균열의 발생과 파단 면에서의 균열의 발생 및 전파 양상이 서로 다르기 때문으로 예상된다. 표준시편에서 발생하는 초기 균열은 폭 방향으로 일정한 피로 균열을 갖는 pre-crack 시편에 비해 균열 발생 위치가 일정하지 못하고, 시편 양 옆의 표면에서 연성 파괴 현상을 보이는 것을 볼 때, 그만큼 균열이 plain stress 조건을 만족하면서 전파되기 때문으로 생각된다.

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

여기서 E_{cvt} 은 흡수에너지, T 는 시험 온도, A , B , C 는 regression 해석에서 결정되는 상수이다.

그림 4는 표준시편 충격시험 중 시험 계장장치에 의해 얻어진 몇 개의 시편에 대한 충격하중과 시간의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 취성 초기 영역으로 보여지는 -30 °C에서의 즉 그림 4(c)에서 취성 균열의 발생을 볼 수 있다. 이 경우 충격 초기에 발생하는 항복 현상과 및 초기 균열로 생각되는 연성 균열의 발생을 예상 할 수 있다[2].

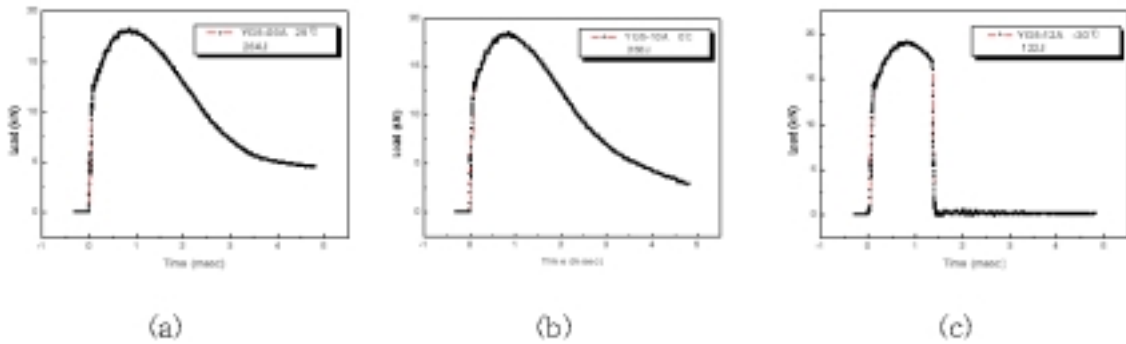


Fig. 4. Load vs. time diagrams for standard Charpy specimens.
 (a) 25°C, (b) 0°C, (c) -30 °C

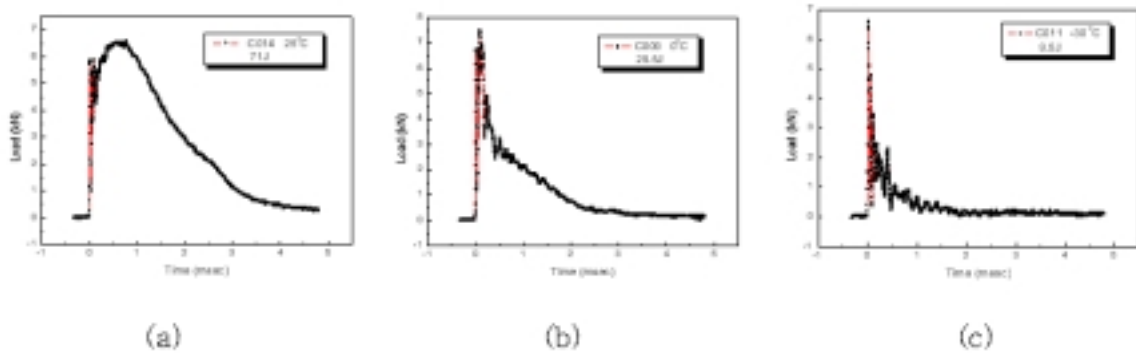


Fig. 5. Load vs. time diagrams for pre-cracked Charpy specimens.
 (a) 25°C, (b) 0°C, (c) -30 °C

그림 5 는 몇 개의 pre-crack 시편에 대하여 충격하중과 시간과의 관계를 나타내고 있다. 그림 5 (a)에서 보듯이 pre-crack 시편에서도 표준시편과 같이 초기의 항복 발생 및 연성 균열 발생을 볼 수 있다. 그러나 그림 5 (a), (b) 의 경우 항복이나 초기의 연성 균열의 발생 없이 취성 파괴가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 5 (b) 의 경우 뚜렷하지는 않으나 균열이 arrest 되는 현상을 볼 수 있다.

5. 결론

원자력 압력용기 강 재료의 인성 평가에 많이 사용되는 표준 Charpy 시편과 pre-cracked Charpy 시편을 계장화 된 충격시험기를 사용하여 시험한 후 각 시편에 대한 균열 거동을 비교하였다. 표준 시편의 경우 pre-cracked 시편에 비해 노치의 길이가 짧고, 노치로부터 초기 연성 균열 발생 에너지가 크며, 시편 횡 방향의 큰 변형에 의해 큰

충격 흡수 에너지를 갖는다. Pre-cracked 시편의 경우 표준시편에 비해 DBTT 가 약 20 °C 정도 높은 것으로 관찰되었다. 표준시편은 폭 방향으로 일정한 피로 균열을 갖는 pre-crack 시편에 비해 초기 균열 발생 위치가 일정하지 못하고, 파괴된 시편 양 옆의 표면에서 연성 파괴 현상을 보이는 것을 보이므로 균열이 plain stress 조건을 만족하면서 전파되기 때문에 DBTT 가 떨어지는 것으로 생각된다. 계장화된 충격시험 결과를 이용하여 표준 및 pre-cracked Charpy 시편의 충격거동을 파단 표면의 양상과 잘 일치시켜 설명할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 원자력 연구개발 중장기 사업과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김주학 외, “ 미소시험편 및 계장화 Charpy 시험을 통한 인성 평가”, 제3회 원전기기의 건전성 평가기술 Workshop, May, 1996, 대전, 1~1-1~14
2. 홍준화 외, 원자력 재료기술 개발, KAERI/RR-2225/2001
3. T. Kobayashi, “ Analysis of Impact Properties of A533 Steel for Nuclear Reactor Pressure Vessel by Instrumented Charpy Test”, Engineering Fracture Mechanics Vol. 19, No 1, 1984, pp49-65
4. H.W. Viehrig et al., “ Use of Instrumented Charpy Impact Tests for the Determination of Fracture Toughness Values”, Charpy to Present Testing, Elsevier Science Ltd., 2002, pp245-252