

## 균열을 도입한 소형편치 시험을 이용한 국소 파괴인성 평가

### Evaluation of local fracture toughness by advanced small punch test using pre-cracked specimen

주장복, 이백우, 장재일, 권동일  
서울대학교 재료공학부

#### 1. 서론

재료가 고기능, 고성능의 요구로 인해 점차 복합화 되어감에 따라 국부적인 파괴인성을 평가하기 위한 방법의 개발이 요구되고 있다. 특히 membrane형 LNG 저장탱크에 사용되는 박판 또는 원자로용 압력용기나 화력발전소용 설비와 같이 장시간의 사용에 따른 재료의 경년열화가 문제시되는 경우와 같이 두께의 제한 및 시편채취의 어려움으로 인해서 기존의 방법을 적용하기 위한 시험편의 제작이 곤란한 경우의 파괴인성을 평가할 수 있는 방법의 개발이 필요한 실정이다. 이러한 목적을 위해 제안되어진 방법들 중에 소형편치 시험법이 있다. 소형편치 시험법은 원래 미국이나 일본에서 원자로용 압력용기의 입자선 조사손상 평가 및 노벽재료 개발을 위해 도입, 연구되어 왔다[1-4]. 이 방법은 실제 현장에서 쓰이고 있는 부품에 있어서 그 강도에 영향을 주지 않을 정도의 작은 영역에서도 시험편의 채취가 가능하여 비교적 비파괴적인 방법으로 재료의 기계적 물성을 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 용접부와 같이 위치에 따라 기계적 성질이 변하는 경우에 있어서도 소형편치 시험을 이용하여 국부적인 물성의 평가가 가능하다.

소형편치 시험법을 이용하여 파괴특성을 평가하는 기존의 연구를 살펴보면, Baik 등[1]은 소형편치 시험시의 하중-변위 곡선의 모양이 온도에 따라 달라지는 것을 이용하여 재료의 연성-취성 천이온도를 평가하고 있다. 즉, 하중-변위 곡선의 아래부분의 면적을 소형편치 에너지로 정의하고, 소형편치 에너지의 상한값과 하한값의 평균값에 해당하는 온도로서 소형편치 시험에 의한 연성-취성 천이 온도를 구할 수 있다. 또, Mao 등[3]은 소형편치 시험 시 시편 두께의 변화를 파괴변형률로 정의하고, 이를 파괴인성  $J_{IC}$ 와의 실험적인 관계로부터 재료의 파괴특성을 평가하고 있다. 두께의 변화는 변위와 소형편치 시험기의 기하학적인 형상으로부터 구해질 수 있으며, 기존의 파괴인성 값과 직선적인 관계에 있다고 한다. 그러나 기존의 연구의 경우에는 최대하중에서 파괴가 일어난다고 가정하고, 이론을 전개하고 있으나, 실제로는 최대하중 이전에 균열이 시작되게 된다. 파괴인성이라고 하면, 균열의 진전에 대한 저항성을 의미하는 값[5]이므로 이러한 의미에서 보면, 기존의 방법에 의한 파괴특성의 평가법은 파괴역학에 기초하고 있다고 보기는 힘들다.

본 연구에서는 보다 파괴역학에 기초한 파괴특성을 평가하기 위해서 시편에 균열을 도입하였다. 또한, 하중의 증가에 따른 균열 전파의 시작점을 찾아내기 위해서 소형편치 시험기에 acoustic emission detector를 설치하였다. 균열 전파의 시작점에서의 하중으로부터 관통형 균열을 가진 박판의 파괴인성을 평가하여 보았다.

#### 2. 실험방법

실험에 사용되는 재료로는 SUS 304, SM 50, TMCP 강을 이용하였다. 먼저 재료를 10mm × 10mm의 rod 모양으로 만든 이후에 wire cutting을 통하여 두께를 0.5mm로 하였다. 시편을 600 emery paper까지 polishing 한 후에 시편의 중앙부위에 방전가공을 이용하여 균열을 형성시켰다. 이렇게 제작한 시편을 1200 emery paper까지 polishing 한 이후에 초음파 세척기로 세척한 후에 광학현미경을 이용하여 균열의 모양과 크기를 측정하였다.

소형편치 시험기를 그림 1과 같이 제작하였다. 그림 1을 살펴보면, 시편에 하중을 가하는 부분, puncher, 상부다이, 하부다리로 구성되어 있으며, alignment를 위해서 puncher 위 부

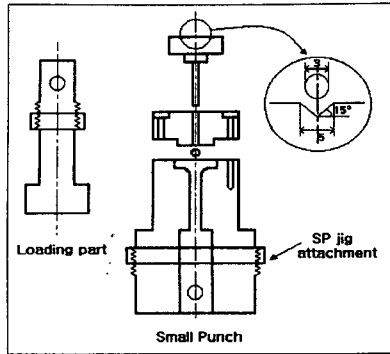


Figure 1. A schematic diagram of small punch testing jig.

sensor는 소형펀치 시편의 크기가 매우 작아서 직접 부착하지 못하기 때문에 시험기의 하부다이에 부착하도록 하였다. Acoustic emission 신호는 시간에 따라서 energy, count, event, amplitude 등을 얻을 수 있었으며, 하중-변위 곡선과의 중첩을 통하여 균열 전파의 시작점을 찾도록 하였다.

### 3. 본론 및 결과

균열첨단에서의 응력의 singularity의 강도를 결정하는 응력확대계수는 균열을 포함하고 있는 재료의 파괴특성을 결정짓는 요소로서 매우 유용하게 사용되어져 왔다. 많은 연구자들에 의해서 여러 형상의 균열을 갖는 경우에 있어서의 응력확대계수에 대한 연구가 이루어져 왔으며, 특히 박판의 경우에 있어서 단순인장응력이나 굽힘 응력을 받고 있는 경우에 있어서의 응력확대계수에 대해서는 많은 연구[6]가 이루어져 있다. 끝이 고정된 박판에 균일한 하중이 가해지고 있는 경우에 있어서의 응력분포[7]로부터 관통형 균열을 가지고 있는 박판의 응력확대계수는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$K_I = \frac{3}{2} \frac{P(1+\nu)}{\pi t} \left( \ln \frac{b}{c} + \frac{c^2}{4b^2} \right) \sqrt{a}$$

여기에서 P는 가해주는 하중,  $\nu$ 는 시편의 Poisson's ratio, t는 시편의 두께, b는 접촉반경, c는 소형펀치 시험기의 하부다이의 반지름, a는 균열 길이의 절반을 의미하는 값이다. Acoustic emission 신호를 이용하여 결정할 수 있는 균열이 전파되기 시작되는 하중을 윗식에 대입함으로써 관통형 균열을 가지는 박판의 파괴인성을 평가할 수 있다.

소형펀치 시험에 의해서 얻은 결과를 그림 2(a)에 나타내었다. 곡선의 모양을 살펴보면, 시험 재료에 따라 각각 다른 형태의 하중-변위 곡선을 얻을 수 있었으며, 곡선의 형태는 탄성 굽힘 영역, 소성 굽힘 영역, 소성막 신장 영역 등의 4단계의 탄소성 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 연구에 의한 결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다[8]. 또한, 재현성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 미리 균열을 형성시킨 시편의 경우, 최대하중과 최대하중까지의 변위가 균열이 없는 경우에 비해 작게 나온 것을 확인할 수 있었다. 이것은 균열의 존재로 인한 당연한 결과로 사료되어 진다.

파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하기 위해서는 균열의 시작점을 결정하는 것이 매우 중요하게 된다. 그러나 균열의 시작점의 경우 하중-변위 곡선의 변화로부터는 관찰할 수 없었다. 이는 균열의 성장이 연성재료의 경우에 있어서 느리게 진행되기 때문인 것으로 보인다.

분을 ball을 이용하여 누르도록 설계하였다. 소형펀치 시험에 사용되는 볼은 2.4mm의 steel 볼이 사용되었으며, 소형펀치 시험기는 steel로 제조하였다. 이렇게 제작된 소형펀치 시험기를 Instron 5565에 설치하였다. 사용된 strain rate는 0.5mm/min, 최대하중을 3kN으로 하여 소형펀치 시험을 행하였다. 시험은 미리 균열을 형성시킨 시편과 균열이 없는 시편으로 나누어 행하였으며, 일부 시편은 접촉반경 및 균열의 진전을 확인하기 위해서 정해진 지점에서 unloading 한 후에 SEM을 이용하여 관찰하였다.

균열의 전파를 확인하기 위해서 acoustic emission을 이용하였다. Acoustic emission

그러므로 본 연구에서는 소형편치 시험 중의 시편에 대한 정보를 얻기 위해서 acoustic emission sensor를 소형편치 시험기에 부착하였다. Acoustic emission이라고 하면 재료의 소성변형과 파괴에 따라 발생하는 탄성파를 이용하는 방법이다[9]. 그러므로 이러한 신호를 분석하여 균열의 시작점을 확인하여 보고자 하였다. 그림 2(b)에는 이러한 acoustic emission 신호와 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. 이 때, 하중-변위 곡선의 소성굽힘 영역에서의 신호를 균열의 전파로 인한 신호로 결정할 수 있고, 이러한 신호들의 시작 부분을 균열의 전파의 시작점으로 결정하였다. 그러므로 이 때의 하중을 이용하여 박판의 파괴인성값을 평가할 수 있었다.

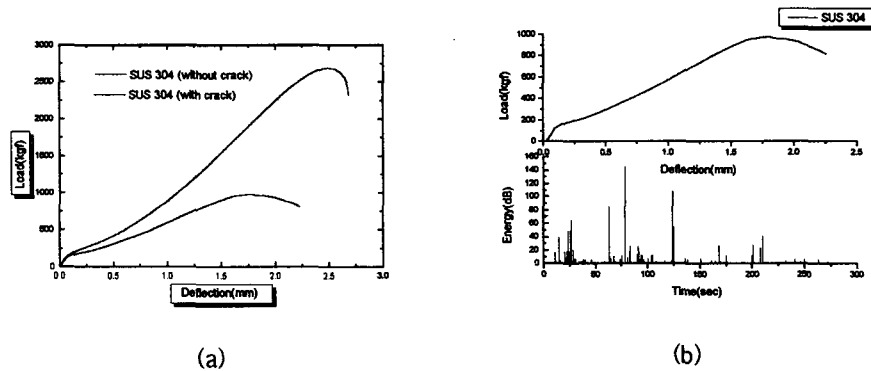


Figure 2. Load-deflection curves: (a) curves with and without crack and (b) curve with acoustic emission signals.

본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 소형편치 시편에 미리 균열을 형성시키고, 하중의 증가에 따른 균열 전파의 시작점을 관찰하기 위해서 acoustic emission을 이용함으로써 보다 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하여 보았다. 이러한 연구를 통해 얻은 파괴인성값은 시간에 따라 경년열화가 일어나는 재료나 용접부와 같이 국부적으로 기계적 성질이 변하는 경우에 있어서 적용이 가능하며, 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료되어 진다.

## References

1. J.M. Baik, J. Kameda, and O. Buck, *Scripta Metallurgica*, **17**, 1443(1983).
2. J. Foulds and R. Viswanathan, *Trans. ASME*, **116**, 457(1994).
3. X. Mao, T. Shoji, and H. Takahashi, *J. Test. Eval.*, **15**, 30(1987).
4. Y.-H. Joo, I. Hashida, H. Takahashi, and K. Shimomura, *J. Test. Eval.*, **20**(5), 336(1992).
5. T.L. Anderson, in *Fracture Mechanics*, 2nd ed., p. 265, CRC Press, Boca Raton, Florida (1995).
6. G.C. Sih, P.C. Paris, and F. Erdogan, *Trans. ASME*, **306**(1962).
7. S. Timoshenko, in *Strength of Materials, Text, Part II: Advanced Theory and Problems*, 3rd ed., p. 109, Van Nostrand, Princeton, NJ (1956).
8. X. Mao, H. Takahashi, and T. Korida, *Mat. Sci. Engng.*, **A150**, 231(1992).
9. A. Trochidis and B. Polyzos, *J. Appl. Phys.*, **78**(1), 170(1995).