

# 매우 취성인 재료의 동적 파괴인성치 결정법

## Determination of Dynamic Fracture Toughness for very Brittle Materials

이 익섭 (인하대학교 기계공학과), 한 유상\* (인하대학교 대학원)

O. S. Lee and Y. S. Han

### ABSTRACT

The instrumented Charpy impact test is generally used to evaluate the dynamic fracture toughnesses for varying engineering materials. However, the test is known to be difficult to evaluate the dynamic fracture toughness for very brittle materials because of the small crack initiation load. To evaluate the dynamic fracture toughness of very brittle materials, it is necessary to develop a load sensitive instrumented tup. In this study, a polymer tup, which has small Young's modulus, is used for the instrumented Charpy impact test, and a proper testing method is developed. The results show that the developed method can measure rapidly changing loads from the moment of contact between the tup and the specimen to dynamic crack initiation of the very brittle materials.

**Key Words** : Dynamic Fracture Toughness (동적 파괴인성치), Inertia Force (관성력), Instrumented Charpy Impact Test (계장화 샤피 충격시험), Maximum Load (최대하중), Polymer Tup (고분자 텡), Strain Gage (스트레인 게이지), Very Brittle Materials(매우 취성인 재료), Wheatstone Bridge (휘트스톤 브리지)

#### 1. 서론

동적인 하중을 받는 재료와 정적인 하중을 받는 재료의 기계적 특성들은 매우 상이한 경우가 많다. 이러한 재료들에서는 기계적 특성이 변형률 속도에 의존하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 특성들 중 파괴인성치는 기계 구조물을 파괴역학적으로 안전하게 설계한다든지, 운전되고 있는 기계 구조물의 안전성 관리 측면에서 매우 중요한 파라메타 중 하나이다.<sup>(1)</sup> 파괴인성치도 하중이 정적이냐 동적이냐에 따라서 정적 파괴인성치( $K_{Ic}$ )와 동적 파괴인성치( $K_{IId}$ )로 구분되고 이들의 측정 방법과 인성치 또한 매우 상이하다.

비교적 인성이 많은 재료의 정적 파괴인성치를 측정하는 방안은 ASTM E399에 규격화되어 있으며<sup>(2)</sup> ASTM STP 563에서는 샤피 충격시험기를 이용하여 간단하게 동적 파괴인성치를 추출하고자 하는 연구가 많이 시도되었다.

기존의 샤피 충격시험기에 사용하는 텡(Tup, Impact striker)은 강으로 제작되어 있으며 계장화시킬때는 텡에 스트레인게이지를 부착시켜 텡하중을 측정하여 동적 파괴인성치를 산정하는 하중값으로 사용한다. 시험편 재료의 인성이 클 경우에는 하중값을 쉽게 측정할 수 있으나 매

우 취성인 재료에 대해서는 매우 짧은 시간에 균열 전파가 이루어지고, 균열개시하중이 작기 때문에 측정하기가 어렵다.

균열개시하중과 동적 균열전파시간을 고려해 볼 때 취성재료의 균열개시하중을 측정하기 위해서는 매우 민감한 충격텡,<sup>(3)</sup> 다시 말해 탄성계수가 큰 금속 재료보다는 탄성계수가 작은 고분자 재료(Polymer)로 충격텡을 제작하는 것이 유리하다.

본 연구에서는 계장화 샤피 충격시험기의 텡(Tup of Instrumented Charpy Impact Tester)을 고분자 재료로 제작하여 충격텡이 시편에 접촉하는 순간으로부터 균열개시하중까지 빠르게 변화하는 하중을 정확히 측정·기록하여 매우 취성인 재료의 동적 파괴인성치를 측정하는 방법론을 제시하였다.

#### 2. 동적파괴인성치( $K_{IId}$ )

재료들이 최대 하중에 이르기 전에 항복이 일어나지 않는 경우를 가정한다면, 선형탄성 파괴역학에서 동적 파괴인성치는 방정식 (1)을 이용하여 결정할 수 있다.<sup>(4,5)</sup>

$$K_{Ia} = Y \frac{6P_m L}{4BW^2} \sqrt{a} \quad (1)$$

여기서,  $Y = 1.93 - 3.07(\frac{a}{W}) + 14.53(\frac{a}{W})^2 - 25.11(\frac{a}{W})^3 + 25.8(\frac{a}{W})^4$

그리고,  $M$  : 작용한 굽힘 모멘트,  $P_m$  : 최대하중,  $L$  : 하중 작용점 사이의 거리,  $B$  : 시편의 두께,  $a$  : 균열의 길이,  $W$  : 시편의 폭 이다.

### 3. 실험방법

본 연구에서는 고분자 재료를 사용하여 충격시험기의 텡을 제작하여 취성이 매우 높은 시편의 동적 파괴특성을 규명해 보고자 아래와 같은 실험을 수행하였다.

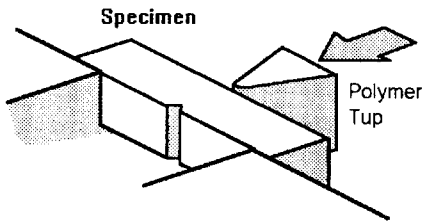


Fig. 1 An illustration of a Charpy impact test set-up.

#### 3-1. 텡의 재료

본 연구에서 사용한 텡의 재료는 상표명이 "Tivar 100"인 고분자 재료이며, 경도치는 5.95 HB이었다.

#### 3-2. 텡의 계장화

모든 실험은 최대 용량이 300 Joule인 샤피 충격시험기로 수행하였다. 350Ω인 스트레인 게이지 4개를 고분자 텡에 부착하여 휘트스톤 브리지(Wheatstone Bridge)회로를 Fig. 2와 같이 구성하여 제작하였다.<sup>(2)</sup>

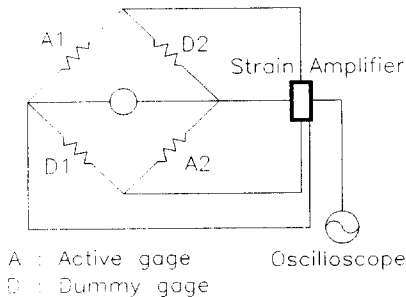


Fig. 2 Wheatstone bridge circuit.

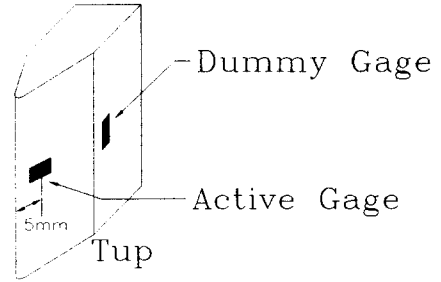


Fig. 3 Layout of instrumented Charpy impact tup.

Fig. 3에서 나타난 바와 같이 텡의 타격지점에 2개의 액티브게이지(Active Gage)를 부착하였고, 2개의 더미게이지(Dummy Gage)를 액티브게이지보다 뒤쪽에 직각이 되도록 부착하였다.<sup>(6)</sup>

스트레인 게이지를 부착할 때는 하중의 선형성을 유지하기 위하여 텡의 양쪽 면에 대칭이 되도록 주위를 기울여 부착하였다. 스트레인 게이지를 부착하고 각각의 게이지에 있는 터미널들을 얇은 에나멜선을 이용하여 휘트스톤 브리지 회로가 구성되도록 한 후, 외부의 습기와 열과 같은 환경으로부터 보호하기 위하여 코팅제로 코팅을 하였다. 휘트스톤 브리지 회로의 신호를 출력 신호 대역폭이 125kHz (Measurement Group 2311, 이하 [MG2311]로 표기)인 스트레인 증폭기로 증폭하여 저장용 오실로스코프(Nicolet 410)에서 신호를 저장하여 기록한 후 해석하였다. 실험에서 제작한 충격텡은 한국 공업규격에 따른 표준 샤피 시편의 형상에 맞추어 제작하였다. (KS B 0809, 금속재료 충격시험, 4호 시험편).<sup>(2)</sup>

#### 3-3. 텡 하중의 보정

충격시험기 텡에서의 신호에 연관되는 실제 하중을 정확히 결정하기 위하여 다음과 같이 보정을 했다.<sup>(2)</sup> 먼저 계장화한 충격시험기의 텡을 Fig. 4와 같은 기구에 설치하

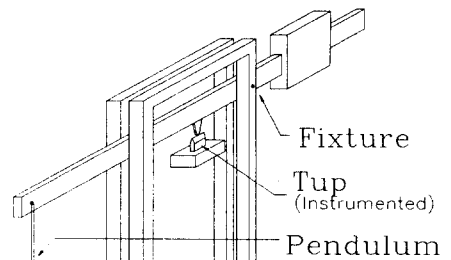


Fig. 4 Schematic setup for calibration.

었다. 추의 무게에 의해서 텡에 하중이 가해지도록 되어 있고 동시에 텡에서 나오는 신호를 MG2311을 거쳐 오실로스코프 (Nicolet 410)에서 측정하도록 하였다. 그림에서와 같이 지지대와 텡 그리고 지지대와 추결이 사이의 길이의 비가 1 : 4이므로 추 하중의 4배의 하중이 텡에 작용한다. 이러한 과정을 수행한 후에 보정 곡선을 구하여 1volt당 하중값을 측정해서 살피 충격실험 후에도 실제 하중을 계산하는데 사용하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 4-1. 텡 하중의 보정 결과

Fig. 5는 보정실험을 한 결과 추의 무게와 텡에서 나온 신호와의 관계를 나타낸 것이며, 이 결과를 이용하여 충격텡에서 나온 하중 신호를 실제 하중(N)으로 환산하였다.<sup>12)</sup>

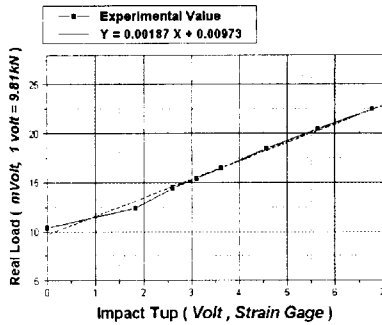


Fig. 5 Relationship between real-load and tup-signal traces for calibration.

##### 4-2. 실험 결과

본 연구에서 사용한 충격시험기의 최대용량은 300J로 충격부하속도가 32.1cm/s이며 충격시험기해머의 최대 각도는 151°이다.<sup>6)</sup>

관성하중을 감소시키기 위하여 충격 해머의 각도를 최대 30°로 하여 충격부하속도를 낮게 취하였다.

Fig. 6-1~6-5와 Table 1은 시편으로 분필을 사용한 예비 실험결과이며, 여러가지 충격텡의 속도와 하중-시간곡선에 따른 실제 최대 하중값을 나타내었다. 충격시험기 텡의 여러가지 각도에 대응하는 텡의 속도에 대한 하중변화 양상을 보면 충격부하속도가 커질수록 시편이 파괴되는 시간이 짧고 최대 하중이 큰 반면 충격부하속도가 작

아질수록 파괴되는 시간이 길어지는 경향을 관찰할 수 있었다.

여기서, 시편이 파괴되는 시간은 충격부하속도에 따라 뚜렷하게 구분어 되는 반면 최대 하중은 충격부하속도에 따라 뚜렷하게 구분 되지 않았다.

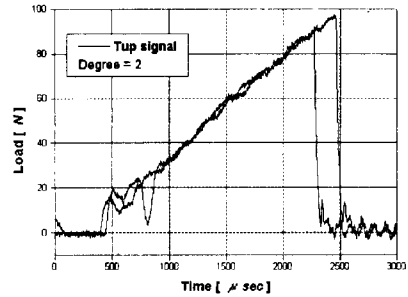


Fig. 6-1 Tup load vs. time for chalk specimen ( degree = 2° , v = 0.97 cm/s )

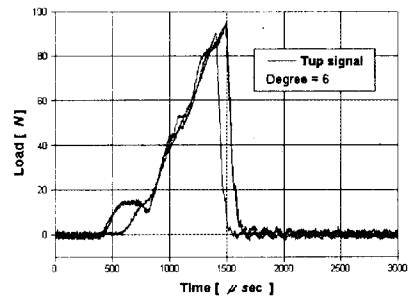


Fig. 6-2 Tup load vs. time for chalk specimen ( degree = 6° , v = 2.91 cm/s )

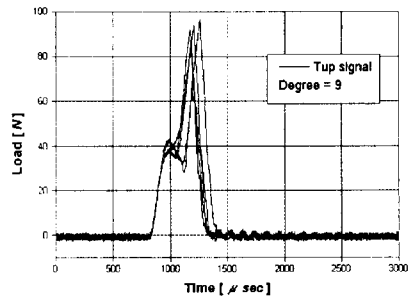


Fig. 6-3 Tup load vs. time for chalk specimen (degree = 9° v = 4.35 cm/s )

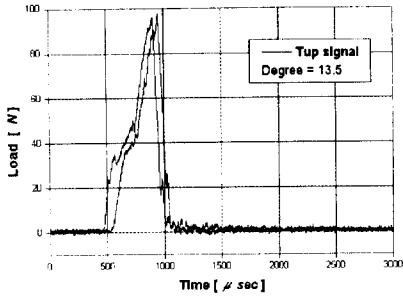


Fig. 6-4 Tup load vs. time for chalk specimen (degree = 13.5° v = 6.53 cm/s)

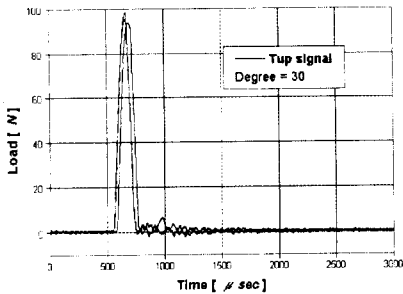


Fig. 6-5 Tup load vs. time for chalk specimen (degree = 30° v = 14.38 cm/s)

Table 1 Tup-signal and maximum load by Charpy impact test for chalk specimen

각도 \ 하중	Max. volt (mV)	Max. load (N)
2° (0.97 cm/s)	32.4	96.0
	35.2	96.1
6° (2.91 cm/s)	34.7	96.1
	41.2	96.2
9° (4.36 cm/s)	27.0	95.9
	46.1	96.3
13.5° (6.53 cm/s)	32.0	96.1
	38.3	96.6
30° (14.38 cm/s)	64.9	96.6
	70.5	96.7

본 실험에서 사용한 시편의 재료는 석고로서 표준 살피 충격시편과 같은 형상으로 제작하였다.

예비실험에서와 마찬가지로 Fig. 7과 같은 하중-시간 곡선을 얻었으며 여러가지 충격탐의 속도에 대한 하중변화 양상을 보면 충격부하속도가 커질수록 시편이 파괴되는 시간이 짧고 최대 하중이 큰 반면 충격부하속도가 적아질수록 파괴되는 시간이 길어지는 경향을 관찰할 수 있었

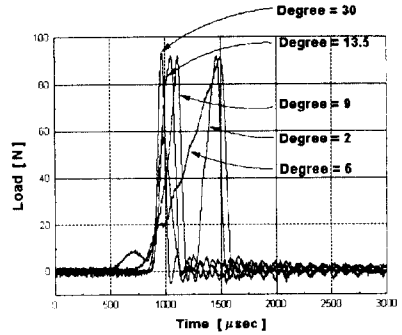


Fig. 7 Tup load vs. time for plaster specimen.

Table 2 Dynamic fracture toughness of crack initiation by instrumented Charpy test for plaster specimen.

각도 \ 하중	Max. Load (N)	$K_{Id}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
2° (0.97cm/s)	96.4	0.449
6° (2.91 cm/s)	96.0	0.448
9° (4.36 cm/s)	96.3	0.449
13.5° (6.53 cm/s)	96.6	0.450
30° (14.38 cm/s)	97.3	0.454

다. 표준 살피충격시편과 같은 형상으로 제작했으므로 식 (1)을 사용하여 구한 동적 파괴인성치를 Table 2에 나타내었다.

### 5. 결론

지금까지 일반적인 살피 충격시험기의 탐 재료로는 매우 취성인 재료의 동적 균열개시하중을 측정하기 어려웠다. 본 연구에서는 살피 충격시험기의 탐 재료를 하중에 민감하게 변화하는 고분자 재료로 가공하여 균열전파 시간이 짧고 균열개시 하중이 작은 매우 취성인 재료 시편의 동적 파괴인성치를 결정하는 방법론을 제시하였다.

본 연구에서는 매우 취성 재료인 석고로 시편을 가공하여 충격부하속도에 따른 탐 하중의 시간에 대한 신호 양상을 관찰하고 각 속도에 대한 균열개시하중을 결정하여 동적 파괴인성치를 산출하였다. 본 연구에서 수행한 실험 결과에 따른 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 계장화된 살피 충격시험장치는 비교적 제작이 간단하여 동적 파괴인성치를 규명하는데 용이하나, 사용

기기의 특성상 매우 취성인 재료의 동적 파괴인성치는 텡의 재료를 고분자 재료와 같은 하중의 변화에 민감한 재료를 사용하면 측정이 가능하다.

Using Instrumented Charpy Impact Test”, *준계 학술대회논문집*, pp.130- 133.,1995.

2. 취성이 큰 재료는 충격 텡의 각도 변화(충격속도의 변화)에 대하여 최대 하중의 변화가 매우 적음을 알 수 있었다.

(7) Saxton H. J., Ireland D . R., and Server W. L. “Analysis and Control of Inertial Effects During Instrumented Impact Testing”, *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing*, pp.50-73, 1974,

3. 일반적인 철강재료 시편에서 나타나는 것과 마찬가지로 충격 부하속도가 빠를수록 균열전파시간은 짧아지는 양상을 규명하였으며, 충격부하속도가 낮을수록 균열전파시간은 길어짐을 확인 하였다.<sup>(7)</sup> 파괴 에너지의 양은 충격부하속도가 달라지더라도 일정해야 하므로 최대하중은 충격부하속도가 낮아짐에 따라 작아져야 하는데, 최대 하중이 충격부하속도가 작은데도 불구하고 미소한 차이지만 다시 커지는 불규칙한 경향이 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.

## 6. 참고문헌

- (1) 이 역섭, 한 정우, 황 시원, 한 문식, “Dynamic Fracture Behavior of Some Polymeric Materials”, *대한기계학회지*, 제19호, 제7호, pp.1630-1641, 1995.
- (2) 이 역섭, 김 선용, 홍 성경, “Analysis of Dynamic Fracture Behavior by Using Instrumented Charpy Impact Test”, *한국정밀학회지*, 제12권, 제12호, pp.64-71, 1995.
- (3) Weisheng Lei., Xiangqiao Yan. and Mei Yao., “Ductile/Brittle Transition Condition in Charpy V-Notch Impact Test in Structural Steel”, *Engineering Fracture Mechanics Vol.46, No.4*, pp601-605, 1993.
- (4) Koppenaar T.J., “Dynamic Fracture Toughness Measurement of High-Strength Steel Using Pre-cracked Charpy Specimen”, *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing* , pp.92-117. 1974.
- (5) Ewing A. and Raymond L., “Instrumented Impact Testing of Titanium Alloys”, *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing*, pp.180-202, 1974.
- (6) 이 역섭, 이 기영, “Characteristic of Dynamic Fracture of Steel and Aluminum Thin Plates by