

본 연구는 인하대학교 교내 연구비(1996)로 수행된 결과입니다.

매우 취성인 재료의 동적 파괴인성치 결정법

이억섭*, 전현선**

Determination of Dynamic Fracture Toughnesses for very Brittle Materials

Ouk Sub Lee*, Hyun Sun Jun**

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 toughnesses for very brittle materials because of the small crack initiation load which may be engulfed by the inertia load of the instrumented tup. To evaluate the dynamic fracture toughnesses of very brittle materials, such as chalk or plaster, it is thus, necessary to develop a load sensitive instrumented tup. In this study, a polymer tup, which has very small Young's modulus comparing to one of the conventional steel tup, is used for the instrumented Charpy impact test, and a proper testing method to evaluate the dynamic fracture behavior of very brittle materials 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 샤프 충격시험), Maximum Load (최대하중), Polymer Tup (고분자 툽), Strain Gage (스트레인 게이지), Very Brittle Materials (매우 취성인 재료), Wheatstone Bridge (휘트 스톤 브리지)

1. 서론

하중속도에 민감하게 반응하는 재료들은 기계적 특성들이 하중속도에 따라서 매우 상이한 경우가 많다. 이러한 재료들은 기계적 특성이 변형률 속도에 의존하는 경향이

매우 크며, 이러한 기계적 특성들 중 파괴인성치는 기계 구조물을 파괴 역학적으로 안전하게 설계하는 경우뿐만 아니라, 운전되고 있는 기계 구조물의 안전성을 관리할 수 있다는 측면에서 매우 중요한 파라메타이다^(1,2). 이 파괴인성치도 작용하는 하중의 속도에 따라 정적 파괴인성

* 인하대학교 기계공학과
** 인하대학교 대학원

치 (K_{IC})와 동적 파괴인성치 (K_{ID})로 구분하고 이들의 측정 방법과 인성치의 크기 또한 매우 상이하다.

비교적 인성이 큰 재료의 정적 파괴인성치를 측정하는 방안은 ASTM E399에 규격화되어 있으며⁽³⁾ ASTM STP563에서는 샤피 충격시험기를 이용하여 간단하게 동적 파괴인성치를 추출하고자 하는 연구가 많이 시도되었다⁽⁴⁾.

기존의 샤피 충격시험기에 사용하는 텡 (tup, impact striker) 은 강으로 제작되어 있으며 계장화할때는 텡에 스트레인 게이지를 부착시켜 시험편이 파괴 개시할 시점의 텡하중을 측정하여 동적 파괴인성치를 산정하는 하중 값으로 사용한다. 이 경우 시험편 재료의 인성이 클 경우에는 텡과 시험편이 접촉 할 순간에 발생하는 관성하중보다 동적개시하중이 매우 크기 때문에 동적 파괴인성치를 산정하는 하중 값을 쉽게 결정할 수 있으나 매우 취성인 재료에 대해서는 매우 짧은 시간에 균열 전파가 이루어지고, 균열개시하중이 관성하중보다 매우 작고, 관성하중과 혼합되어 나타나기 때문에 분리시키기 가 매우 어렵다.

이상과 같은 매우 취성이 강한 재료의 균열개시하중의 복잡성과 매우 짧은 동적 균열전파시간을 고려해 볼 때 균열개시하중을 정밀하게 측정하기 위해서는 매우 민감한 충격텡⁽⁵⁾ 즉, 탄성계수가 작은 고분자 재료 (polymer) 로 충격텡을 제작하는 것이 유리한다.

본 연구에서는 계장화 샤피 충격시험기의 텡 (tup of instrumented Charpy impact tester)을 고분자 재료로 제작하여 충격텡이 시험편에 접촉하는 순간으로부터 균열개시하중까지 빠르게 변화하는 하중을 정확히 측정 기록하여 매우 취성인 재료의 동적 파괴인성치를 측정하는 방법론을 제시하였다.

2. 동적 파괴인성치 (K_{ID})

샤피충격시험편을 이용하여 최대 하중에 이르기 전에 항복이 일어나지 않는 매우 취성인 재료에 대한 동적 파괴인성치를 결정할 경우 선형탄성 파괴역학을 응용하여 유도된 식 (1)을 이용한다^(6,7).

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

여기서,

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

P_m = 최대하중, L = 샤피충격시험시험편의 하중 지지점 사이의 거리, B = 시험편의 두께, a = 균열의 길이, W = 시험편의 폭이다.

3. 실험방법

본 연구에서는 금속재료로 만든 충격텡보다 하중에 대한 민감도가 큰 고분자 재료로 충격텡을 제작하여 취성이 매우 높은 시험편의 특성을 규명해 보고자 Fig. 1에 보인바와 같은 충격 실험을 수행하였다.

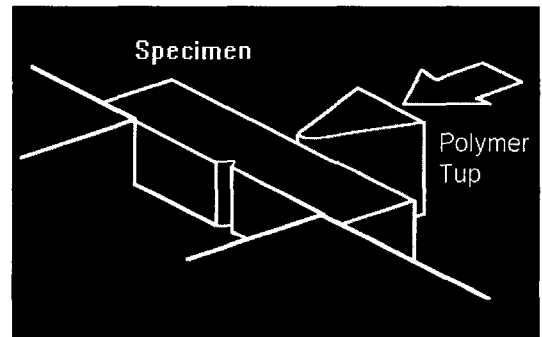


Fig. 1 An illustration of a Charpy impact test set-up.

3-1. 충격텡의 재료

본 연구에서 사용한 텡의 재료는 경도치가 HB5.95 인 상표명이 "Tivar 100"인 고분자 재료이다.

3-2. 충격텡의 계장화

모든 실험은 최대 용량이 300 Joule인 샤피 충격시험기로 수행하였다.

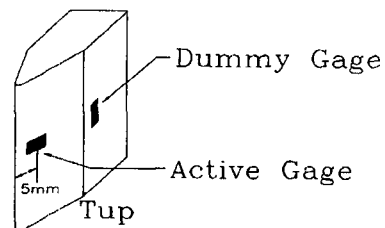


Fig. 2 Layout of strain gages on instrumented Charpy impact tup.

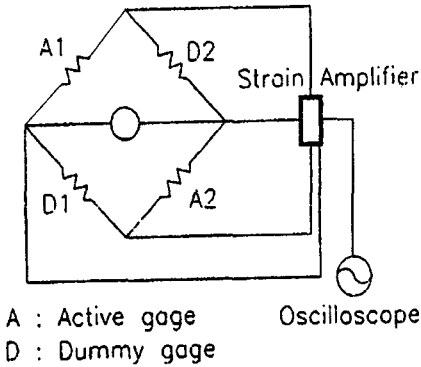


Fig. 3 Wheatstone bridge circuit for Charpy impact tup.

스트레인 게이지는 고분자 톱의 굽힘에 의한 오차를 보정하기 위하여 톱의 양쪽에 2개씩 Fig. 2에서 보인 바와 같이 부착하였다. 즉, 고분자 톱의 타격지점에서 5 mm 떨어진 부분에 2개의 액티브게이지 (active gage) 를 부착하였고, 2개의 더미게이지 (dummy gage) 를 액티브 게이지보다 뒤쪽에 직각이 되도록 부착하였다⁽⁸⁾. 스트레인 게이지를 부착할 때는 동적하중에 대한 선형성을 유지하기 위하여 톱의 양쪽 면에 대칭이 되도록 주위를 기울여 부착하였으며 부착된 각각의 게이지에 있는 터미널들을 얇은 에나멜선을 이용하여 Fig. 3과 같은 휘트스톤 브리지 회로가 구성되도록 한 후, 외부의 습기와 열과 같은 환경으로부터 보호하기 위하여 코팅제로 코팅을 하였다. 휘트스톤 브리지 회로의 신호를 출력 신호 대역폭이 125 kHz (Measurement Group2311, 이하 [MG2311]로 표기) 인 스트레인 증폭기로 증폭하여 저장용 오실로스코프 (Nicolet 410) 에서 신호를 저장하여 기록한 후 해석하였다.

본 연구에서 사용한 충격톱은 한국 공업규격에 따른 표준 샤피 시편의 형상에 맞추어 제작하였다⁽⁹⁾.

3-3. 톱 하중의 보정

충격시험기 톱에서의 신호에 연관되는 실제 하중을 정확히 결정하기 위하여 다음과 같은 하중 보정실험 수행하였다⁽²⁾. 먼저 계장화한 충격시험기의 톱을 Fig. 4와 같은 기구에 설치하고, 추의 무게에 의해서 톱에 하중이 가해지도록 하였으며 이때 톱에서 발생하는 신호를 MG2311 을 거쳐 오실로스코프 (Nicolet 410) 에서 기록되도록 하였다. Fig. 4에서와 같이 지지대와 톱 그리고 지지대와 추걸이 (pendulum) 사이의 길이의 비가 1 : 4 이므로

추 하중의 4배의 하중이 톱에 작용한다. 이러한 과정을 수행한 후에 보정 곡선을 구하여 1 volt당 하중 값을 측정해서 샤피 충격실험에 대한 실제 하중을 산정하는데 사용하였다.

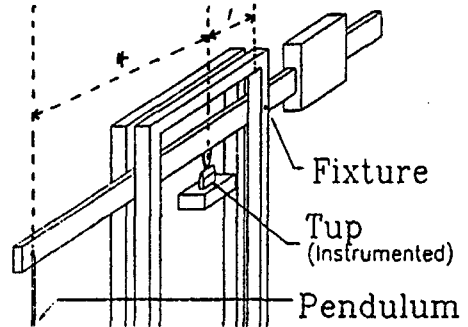


Fig. 4 Schematic setup for load calibration.

4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 톱 하중의 보정결과

Fig. 5는 보정실험을 한 결과 추의 무게와 톱에의 신호로 산정한 하중과의 관계를 나타낸 것이며, 이 결과를 이용하여 충격톱에서 발생된 하중 신호를 실제 하중 (N) 으로 환산하였다.

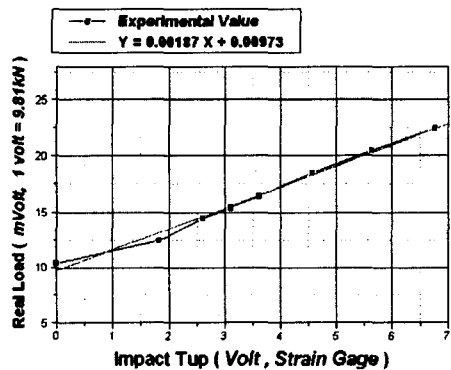


Fig. 5 Relationship between real-load and tup-signal traces for load calibration.

4-2. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 충격시험기의 최대용량은 300 J이고 최대 충격부하속도가 32.1 cm/s이며 충격시험기해머의 최대 각도는 151°이다⁽⁸⁾. 이와 같은 기존의 충격시험

기에서의 관성하중을 감소시키기 위하여 충격 해머의 초기 각도를 최대 30°로 하였으며 최소 2°까지 순차적으로 감소시켜가면서 충격부하속도가 낮은 충격시험을 수행하고 충격하중과 시간관계 곡선을 면밀히 해석하였다 (단, 충격부하속도는 텡이 자유낙하한다는 사실에 기인하여 자유낙하높이 h인 경우 $\sqrt{2gh}$ 로 계산된다 (여기서 g = 중력가속도)).

Figs. 6-1~6-5와 Table 1은 길이 8cm, 직경 1cm인 분필을 시편으로 사용하여 얻은 실험결과이며, 여러 가지 충격텡의 여러 가지 충격속도와 하중-시간곡선에 따른 실제 최대 하중 값을 나타내고 있다. 충격시험텡의 여러 가지 각도에 대응하는 텡의 속도에 대한 하중변화 양상을 관찰해 보면 충격부하속도가 커질수록 시편이 파괴되는 시간이 짧고 최대 하중이 큰 반면 충격부하속도가 작아질수록 파괴되는 시간이 길어지는 경향을 규명할 수 있었다. 여기서, 시편이 파괴되는 시간은 충격부하속도에 따라

뚜렷하게 구분이 되는 반면 최대 하중은 14.4cm/s~1cm/s의 충격 부하속도 범위내에서는 뚜렷하게 구분되지 않음을 알았으며 파괴까지 걸리는 시간을 정밀하게 측정

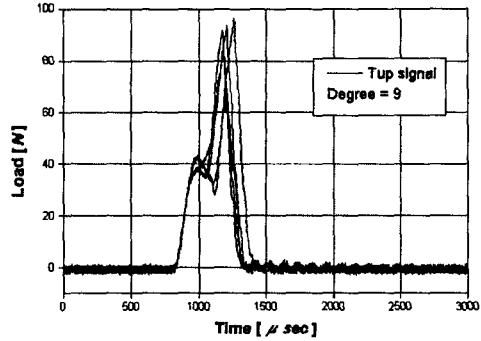


Fig. 6-3 Tup load vs. time after impact for chalk specimen (impact angle = 9°, impact velocity = 4.35 cm/s).

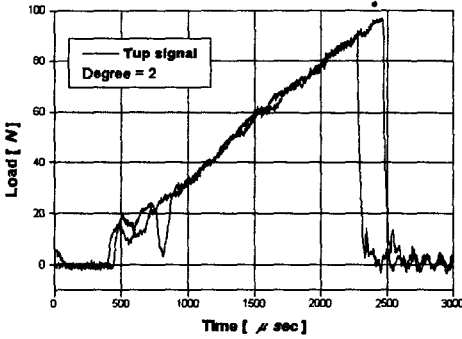


Fig. 6-1 Tup Load vs. time after impact for chalk specimen (impact angle = 2°, impact velocity = 0.97 cm/s).

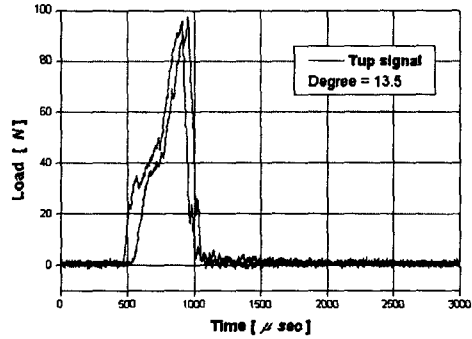


Fig. 6-4 Tup load vs. time after impact for chalk specimen (impact angle = 13.5°, impact velocity = 6.53 cm/s).

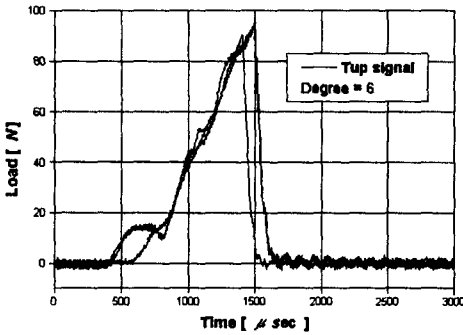


Fig. 6-2 Tup load vs. time after impact for chalk specimen (impact angle = 6°, impact velocity = 2.91 cm/s).

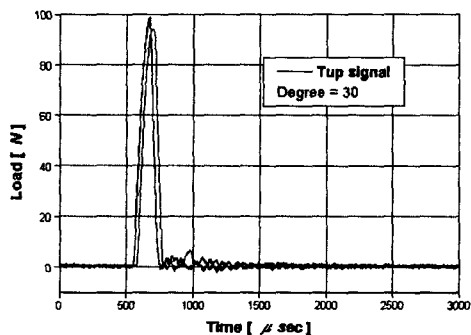


Fig. 6-5 Tup load vs. time after impact for chalk specimen (impact angle = 30°, impact velocity = 14.38 cm/s).

할 수 있으면 더욱 상세한 정량적인 해석을 할 수 있겠으나, 본 연구에는 여러 가지 실험적인 제약조건 때문에 파괴까지 걸리는 시간을 측정하려는 시도는 하지 못하였다.

Table 1. Tup-signal and maximum load by instrumented Charpy impact test for chalk specimens.

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	
	46.1	95.9
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	

Fig. 7은 석고로 만든 표준 살피 충격시편에 여러 가지 충격각도로 충격시험을 수행하여 얻은 대한 계장화 살피 충격시험결과이다

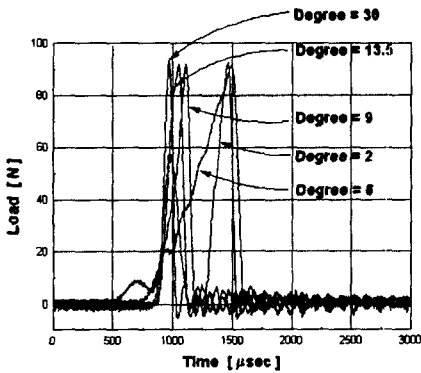


Fig. 7 Impact tup load vs. time after impact for plaster specimens.

여러 가지 충격팁의 속도에 대한 석고시편의 하중변화 양상을 면밀히 관찰하여 보면 충격부하속도가 커질수록 시편이 파괴되는 시간이 짧고 최대 하중이 큰 반면 충격 부하속도가 작아질수록 파괴되는 시간이 길어지는 경향을 규명할 수 있었다. 표준 살피충격시편과 같은 형상으로 시편을 제작했으므로 식 (1)을 사용하여 각각의 충격 각도에 대하여 산정한 동적 파괴인성치를 Table 2에 나

Table 2. Dynamic fracture initiation toughness by instrumented Charpy test for plaster specimens.

각도 \ 하중	Max. load(N)	K _{ID} (Mpa \sqrt{m})
2° (0.97 cm/s)	96.4	0.449
6° (2.91 cm/s)		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)		0.454

타내었으며 동적 파괴인성치는 충격각도 (2° ~ 30°) 에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

5. 결 론

지금까지 전통적으로 사용되고 오고 있는 살피 충격시험기의 텡 재료로는 매우 취성인 재료의 동적 균열개시 하중을 측정하기 어렵다. 본 연구에서는 살피 충격시험기의 텡 재료를 하중에 민감하게 변화하는 고분자 재료로 제작하여 균열전파 시간이 짧고 균열개시 하중이 작은 매우 취성인 재료의 동적 파괴인성치를 결정하는 방법론을 제시하였다.

매우 취성인 석고로 충격시편을 가공하여 충격 부하속도에 따른 텡 하중의 시간에 대한 신호 양상을 관찰하고 각 속도에 대한 균열개시 하중을 결정하여 동적 파괴인성치를 산출하였다. 본 연구에서 수행한 실험결과에 따른 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 계장화된 살피 충격시험은 비교적 간단하여 동적 파괴인성치를 규명하는데 용이하나, 사용기기의 특성상 매우 취성인 재료의 동적 파괴인성치를 결정하는데는 적합치 않다. 이경우에는 텡의 재료를 고분자재료와 같은 하중의 변화에 민감한 재료를 사용하면 정밀한 동적파괴인성치를 측정할 수 있음을 밝혔다.

2. 취성이 큰 재료에 대해서는 충격속도가 최대 하중의 변화에 미치는 영향이 매우 적음을 알 수 있었다. 따라서 매우 취성인 재료는 여러 충격각도 2° ~ 30°에서도 비교적 일정한 동적 파괴인성치를 산출할 수 있음을 밝혔다.

3. 일반적인 철강재료 시편에서 나타나는 것과 마찬가지로

지로 취성재료에 대해서도 충격 부하속도가 빠를수록 균열전파속도는 짧아지는 양상이 규명되었으며, 충격 부하속도가 늦을수록 균열전파시간은 길어지는 현상이 확인되었다⁽¹⁰⁾. 파괴에너지의 양은 충격부하속도가 달라지더라도 일정해야 하므로 최대하중은 충격부하속도가 낮아짐에 따라 작아져야 하는데, 최대 하중은 충격부하속도가 작은데도 불구하고 미소한 차이만 나타내는 양상이 밝혀졌다.

참 고 문 헌

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", 한국정밀공학회지, 제12권, 제12호, pp. 64-71, 1995.
3. American Society for Testing and Materials, E399-83, 1983.
4. American Society for Testing and Materials, ASTM STP 563, 1974.
5. Lei W., Yan X., and Yao M., "Ductile/Brittle Transition Condition in Charpy V-Notch Impact Test in Structural in Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 46, No. 4, pp. 601-605, 1993.
6. 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.
7. Ewing A. and Raymond L., "Instrumented Impact Testing of Titanium Alloys", ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing, pp. 180-202, 1974.
8. 이 역섭, 이 기영, "Characteristic of Dynamic Fracture of Steel and Aluminum Thin Plates by Using Instrumented Charpy Impact Test", 한국정밀공학회 춘계 학술대회논문집, pp. 130-134, 1995.
9. KSB 0809. 금속재료 충격시험, 4호시험편.
10. 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.