

〈論 文〉

계장화 살피충격시험을 이용한 WC-Co 초경합금의 동적 균열개시인성치 결정

이억섭* · 박원구** · 황선근** · 홍성경*** · 윤경수***

(1994년 8월 9일 접수)

Determination of Dynamic Crack Initiation Toughness Using Instrumented Charpy Impact Test in WC-Co Alloy

O. S. Lee, W. K. Park, S. K. Hwang, S. K. Hong and K. S. Yoon

Key Words : Dynamic Crack Initiation Toughness(동적 균열개시인성치), Instrumented Charpy Impact Test(계장화 살피충격시험), Strain Gage(스트레인게이지), Wheatstone Bridge(휘트스톤브리지), Static Calibration(정적보정), Compliance(컴플라이언스)

Abstract

Cemented carbides, best known for their superior mechanical properties such as high strength, high hardness and high wear resistance, have a wide range of industrial applications including metal working tools, mining tools, and wear resistance components. The cobalt has been used as a binder in the WC-based hard composites due to its outstanding wetting and adhesion characteristics even though its expensiveness. Therefore many studies attempted to find a better substitute for cobalt as binder to decrease production costs. This investigation is a pre-step to study dynamic fracture characteristic evaluation of a WC-Ni hardmetal in which Nickel was used as a binder. In this study, the dynamic crack initiation toughness and some of the dynamic fracturing characteristics of commercially used WC-Co hardmetal were evaluated by using the instrumented Charpy impact testing procedures. It was found that the dynamic characteristics of used strain amplifier were very important experimental factors to extract valid dynamic fracturing data in WC-Co specimens. It was suggested by showing some experimental examples that when we wished to evaluate dynamic fracture toughness for cemented carbide composites by using the instrumented Charpy impact testing procedure, a careful attention must be given to obtain valid results.

1. 서 론

여러가지 공학 재료들의 기계적·물리적인 특성

은 하중·온도 등의 재료들이 사용되는 여러가지 조건에 적합하게 대응되도록 결정되어야 한다. 탄화텅스텐(WC)계의 초경합금은 내충격성, 내마모성, 내식성, 고풍질력 등 공구에 필요한 여러가지 요구사항을 만족시키기 때문에 공구용으로 많이 사용되어 왔다.^(1~3) 일반적으로 공구용으로 쓰이는 재료들은 동적하중을 받으면서 파손되는 경우가 많

*정회원, 인하대학교 기계공학과

**인하대학교 대학원 금속공학과

***인하대학교 대학원 기계공학과

으므로 동적하중에 대한 기초적인 파괴특성이 규명되어야 한다. 기초적인 동적 파괴특성을 규명하는 한 방법으로써 스트레인게이지를 붙여서 회로를 구성하는 계장화 샤피충격시험 (instrumented Charpy impact test)이 많이 이용되고 있고, 이 방법으로 비교적 쉽게 동적 균열개시인성치(K_{Ia})를 산정할 수 있다고 알려져 있다.^(4,5) 계장화 샤피충격시험을 이용하여 동적 균열개시인성치를 평가하는데 있어서 이론적인 문제보다는 실험적인 문제 때문에 그 값이 잘못 평가되는 수가 많은데 이는 이 실험방법의 신뢰성을 보증해 주기 위한 기준이 체계적으로 정립되어 있지 않기 때문이다.

본 연구에서는 샤피충격시험기의 팁에 스트레인 게이지를 붙여 변형률 측정회로를 구성한 후, 충격 팁으로부터 얻은 하중신호를 정적 보정 프로세스를 이용하여 파괴하중으로 환산하는 방법을 체계화하였으며 이 방법으로 산정한 동적 균열개시인성치를 기존의 결과치와 비교·검토하였다.

정확한 동적 균열개시 하중을 결정하기 위하여 시편의 동적 변위를 측정하여 구한 동적 하중-변위 곡선을 이용하여 시편의 동적 컴플라이언스가 급격하게 변화하는 시간에 대응하는 하중을 동적 균열개시 하중점으로 취하여 동적 균열개시 하중 오차를 최소화시켰다.

2. 이 론

Fig. 1에 계장화 샤피충격시험으로 얻게 되는 두 가지의 전형적인 충격 팁(tup) 하중-시간 곡선을 나타내었다. Fig. 1(a)의 결과를 보면 하중은 파괴가 개시되는 최대하중에 도달할 때까지 선형적으로 증가하는데, 이 경우와 같이 최대하중에 도달할 때까지 항복이 일어나지 않으면 동적 균열개시인성치(K_{Ia})는 선형 파괴역학을 이용하여 식(1)과 같이 결정할 수 있다.^(4,5)

$$K_{Ia} = \frac{6YP_mL}{4tW^2} \sqrt{a}$$

$$Y = 1.93 - 3.07\left(\frac{a}{W}\right) + 14.53\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25.8\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (1)$$

여기서, W 는 시편의 폭, t 는 시편의 두께, a 는 균열길이이고, P_m 은 최대하중, L 은 하중 작용점 사이의 거리이다. (Fig. 3 참조) Fig. 1(b)를 보면

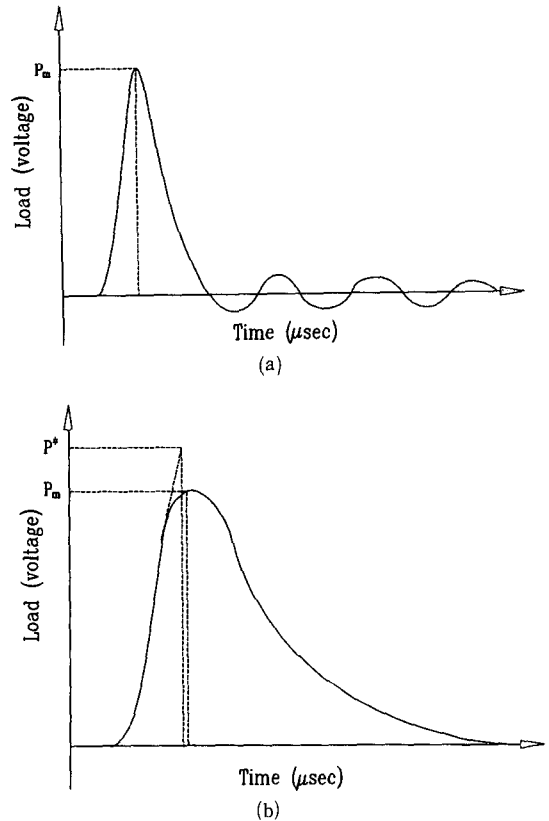


Fig. 1 Typical tup load-time history for instrumented Charpy impact testing

파괴가 개시되는 최대하중에 도달하기 전에 소성변형이 발생되어 이 상태에서는 선형 탄성파괴역학을 적용한 식(1)을 사용하여 동적 균열개시인성치를 구할 수 없다. 이 경우에는 Witt에 의해 개발된 상당에너지 방법으로 구한 하중 P^* 를 대입하여 K_{Ia} 값을 결정한다.⁽⁶⁾ 이 상당에너지는 파괴 개시 전에 발생하는 항복을 피할 수 있을 정도로 충분히 두꺼운 시편을 가정하여 (평균 변형률조건), 이 시편이 최대하중에 도달하기에 필요한 에너지의 상당량을 의미한다. 즉, 상당에너지 방법을 이용하여 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 하중-시간 곡선의 직선부분을 연장하여 P_m 까지의 에너지와 일치하는 직선부분 연장 끝 점의 하중 P^* 를 결정한다. 여기서 구한 P^* 를 식(1)의 P_m 에 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정하며, 일반적으로 상당에너지 개념을 가지고 결정한 K_{Ia} 값은 상한값을 가진다.

동적 균열개시인성치와 충격시험기의 흡수에너지 사이에는 저속 굽힘에너지와 저 변형률속도 인성

측정방법을 사용하여 Ronald 등에 의해 밝혀진 식 (2)와 같은 관계가 있다.⁽⁶⁾

$$K_{Ia} = \sqrt{\frac{E}{2(1-\nu^2)}} (W/A)_d \quad (2)$$

윗 식은 전단 면적이 거의 없는 평면 파괴현상을 나타낼때 적용 가능하며, 여기서, E 는 탄성계수, ν 는 푸아송비, $(W/A)_d$ 는 충격시험기의 흡수에너지를 나타낸다.

또한 식(2)는 계장화된 충격시험기를 이용하지 않고 동적 균열개시인성치를 결정할 수 있으며 시편의 파면형상에 극도의 전단 립(shear lip)이 나타날 경우 정확한 K_{Ia} 값을 구하기 위해서는 계장화된 충격시험의 텡하중-시간곡선 결과를 이용해야 한다. 동적 균열개시인성치는 계장화된 충격시험으로 얻은 최대하중 P_m 을 식(1)에 대입하여 구할 수 있으며, 충격시험 결과로 얻은 하중-시간 곡선에서 최대하중에 도달하는 에너지 $(W/A)_m$ 을 식(3)의 관계에 대입하여 구할 수 있다고 알려져 있다.⁽⁶⁾

$$K_{Ia} = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)}} (W/A)_m \quad (3)$$

3. 실험방법

본 연구에서는 합금공구강인 STD-11과 공구용 초경합금인 탄화텡스텐(WC-6wt%Co)을 사용하여 이들 재료의 동적 파괴특성을 규명하는 기초적인 실험을 수행하였다. 용량이 300 Joule인 계장화된 샤피 충격시험기로 시편에 충격하중을 가하면 시편과 텡의 접촉순간 하중으로부터 최고하중까지 빠르게 변화하는 하중을 정확히 측정할 수 있다.

계장화 샤피 충격시험기는 충격시험기의 텡(tup, impact striker)에 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge, gage length=2 mm) 회로를 구성하여 제작하였다. 하중신호의 선형성을 유지하기 위하여 텡의 양쪽면에 대칭으로 스트레인게이지가 위치하도록 세심한 주의를 기울여 게이지를 부착하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 텡 부분에 두 개의 액티브게이지(active gage)를 부착하였고, 두 개의 더미게이지(dummy gage)는 텡의 적당한 위치에 액티브게이지와 직각이 되도록 부착하였다. 스트레인게이지를 부착하여 회로를 구성하고 텡에 선을 연결한 후 외부 환경으로부터 회로를 보호하기 위해서 코팅제를 도포하였다. 계장화 회로에서 나

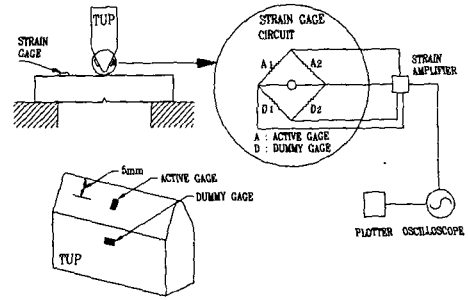


Fig. 2 Layout of instrumented Charpy impact test system including full bridge circuit

오는 신호를 스트레인 증폭기로 증폭하여 저장용 오실로스코프(Nicolet 410)에 기록하여 해석하였다. Fig. 3에 본 연구에서 사용한 표준 샤피 충격시험의 형상을 나타내었으며, 실험에 사용한 샤피 충격시험 V-노치끝의 균열전단 반경은 STD-11 시편의 경우 0.085 mm, WC-6wt%Co 시편의 경우 0.127 mm이었다.

샤피 충격시험을 스트레인 측정회로를 구성한 충격텡에 접촉시키고, 재료시험기로 압축하중을 가하면서 다음과 같이 정적보정을 수행하였다. 재료시험기(용량: 10 ton)로 정적인 압축하중을 가하면서 압축 로드셀의 하중신호를 오실로스코프에 저장하였고, 동시에 계장화된 충격텡에서 나오는 출력신호를 스트레인 증폭기로 증폭하여 오실로스코프에 저장하여 보정곡선을 얻었다.

동적하중을 측정할 때 중요한 사항인 스트레인 증폭기의 출력 특성을 비교하기 위하여 두 종류의 동적 신호처리용 스트레인 증폭기를 사용하여 실험하였다. 본 연구에서는 스트레인 증폭기의 출력 신호대역 폭이 2.5 kHz인 증폭기(Kyowa, DPM310, 이하 Amp A로 표기)와 125 kHz(measurements group 2311, 이하 Amp B로 표기)인 증폭기를 사용하였다.

보정결과 충격텡에서 나오는 신호는 시편에 가해지는 압축하중이 증가함에 따라 정해진 하중영역에서 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었으며, 이 결과를 이용하여 텡에서 나온 하중신호를 실제 하중(kN)으로 환산하였다.

정확한 균열개시점을 찾기 위하여 동적 하중-변위 곡선을 기록하고, 이 곡선에서 구해지는 콤프라이언스의 변화양상을 관찰하여 동적 균열개시 하중을 결정하였다. 동적 하중-변위 곡선은 충격시험에 스트레인게이지를 부착하여 시편의 처짐과 스트레

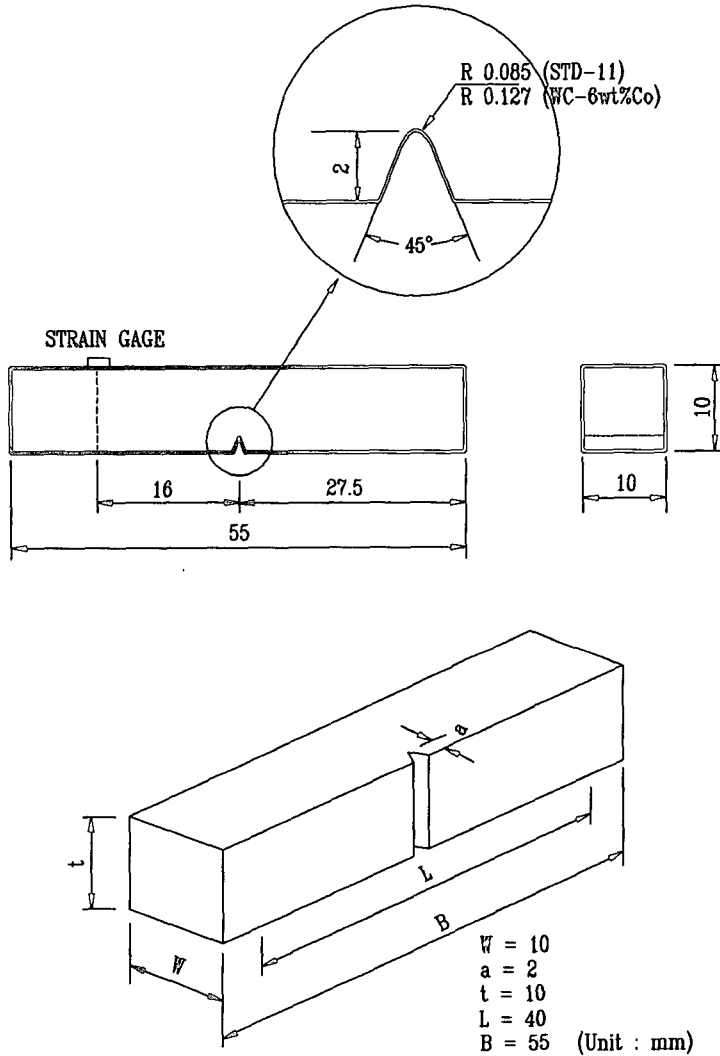


Fig. 3 Charpy specimen and strain gage location for obtaining dynamic load-displacement diagram

인계이지 신호와의 관계를 정적으로 구한 다음, 충격시험을 수행하여 결정하였다. Fig. 3에 시편에 부착한 스트레인게이지의 위치를 표시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4에 STD-11 시편에 대하여 용량 300 Joule 인 샤피 충격시험기로 실험한 시간에 대한 충격탑 하중의 변화양상을 나타내었다. Fig. 4(a)에는 Amp A를 사용하여 얻은 탑하중의 변화양상을 나타내었다. Fig. 4(b)에는 Amp B를 사용하여 얻은 탑하중의 변화양상과 시편에 스트레인게이지를 부

착하여 기록한 동적 스트레인의 변화양상을 동시에 나타내었다. Amp B의 결과를 보면 시간에 따르는 하중의 변화양상이 잘 나타나 있음을 알 수 있으며, Amp A를 사용한 결과는 하중-시간 곡선이 부드러운 곡선으로 처리되어 나타나 있다. Amp A, B 모두 여과(filtering) 기능을 사용하지 않았고 저장용 오실로스코프의 데이터 획득속도를 $1 \mu\text{sec}$ 로 했음을 감안하면 하중 출력형상의 차이는 증폭기의 출력특성에 크게 영향을 받는다는 사실을 알 수 있으며, Amp A와 같은 출력특성을 가진 증폭기를 사용하면 짧은 시간동안 변화하는 미세한 신호가 곡선 처리되이기 때문에 정확한 결과를 보장하기

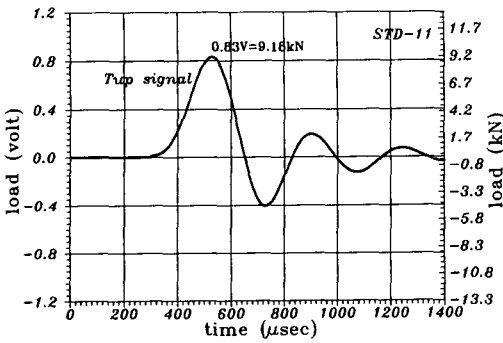


Fig. 4 (a) Load (volt, kN)-time trace for STD-11 specimen (Amp A)

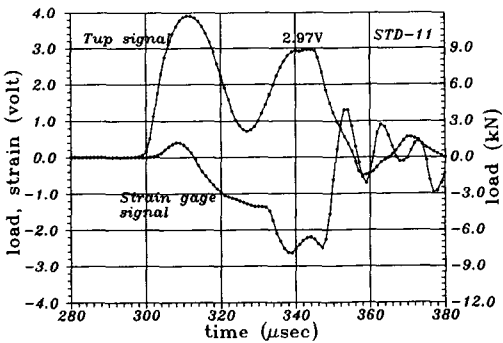


Fig. 4 (b) Load (volt, kN)-time and strain(volt)-time traces for STD-11 specimen (Amp B)

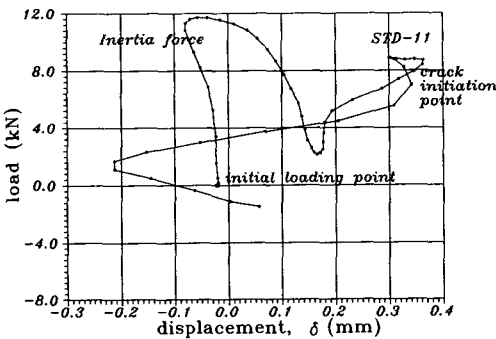


Fig. 4 (c) Dynamic load-displacement trace for STD-11 specimen (Amp B)

어렵다는 사실을 확인할 수 있었다.

정적 보정결과를 이용하여 환산한 텡하중-시간 그래프에서 최대점의 하중을 식(1)에 대입하여, 동적 균열개시인성치를 산정하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 여기서, 샅피충격시험에서 구한 텡의 균열개시 하중값은 정적 보정에서 선형성을 유지했던 구간내에 있음을 확인하였다. Fig.

Table 1 Maximum load and K_{Ia} calculated by the output from two different amplifier

Material	Max. Load(kN)		$K_{Ia}(MPa\sqrt{m})$	
	Amp A	Amp B	Amp A	Amp B
STD-11	9.18	8.46	44.94	39.45
WC-6wt%Co	3.44	3.60	16.84	16.79

4(b)의 결과를 식(1)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정할 경우 균열개시 하중값은 두 번째 정점의 하중값을 이용하였는데 (2.97 V=8.46 kN), 여기서, 첫번째 나타나는 최고정점은 관성에 의한 텡하중으로 시편의 파괴에는 상관이 없는 하중으로 추정된다. Fig. 4(c)에 시편에 부착한 스트레인게이지 신호로 결정한 동적 하중-변위의 관계를 나타내었다. Fig. 4(c)의 결과에서 초기하중 점에서 음(-)의 방향의 변위(아래 방향으로의 변위)가 나타나면서 최대하중으로 나타나는 것은 관성력으로 볼 수 있다. 왜냐하면 관성력은 변형에 대한 저항으로 그 방향이 반대가 되기 때문이다. 또한 동적 하중-변위 곡선에서 급격하게 기울기가 변하는 점(컴플라이언스변화가 급격한 점)이 균열개시점으로 판단되며, 이 점에 대응하는 하중을 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정하였다.

Fig. 5에 충격시험기의 용량을 100% 사용하여 구한 (300 Joule, $\alpha=151^\circ$, 여기서 α 는 충격시험기 해머의 각도)WC-6wt%Co 초경합금 재료의 샅피충격시험 결과를 나타내었다. Fig. 5(a)에는 Amp A를 사용하여 얻은 하중-시간 곡선을 나타내었다. Fig. 5(b)에는 Amp B를 사용하여 얻은 하중-시간 곡선을 나타내었는데, 이 결과에서는 관성력과 최고하중 신호의 분리가 되지 않아 균열개시 하중값을 정확하게 추정할 수 없으므로 이 결과로는 동적 균열개시인성치를 결정할 수 없었다.

Fig. 6에 충격시험기 용량의 35%를 사용하여 구한 (300×0.35 Joule, $\alpha=70^\circ$)WC-6wt%Co 초경합금재료의 샅피충격시험 결과를 나타내었다. Fig. 6(a)에는 Amp B를 사용하여 얻은 하중-시간 곡선 결과와 스트레인게이지를 시편에 부착하여 얻은 스트레인-시간 곡선을 동시에 나타내었다. Fig. 6(b)에는 시편에 스트레인게이지를 부착하여 얻은 스트레인 값으로 환산한 시편의 처짐을 이용하여 동적 하중-변위 곡선을 나타내었다. 이 결과로는 관성력

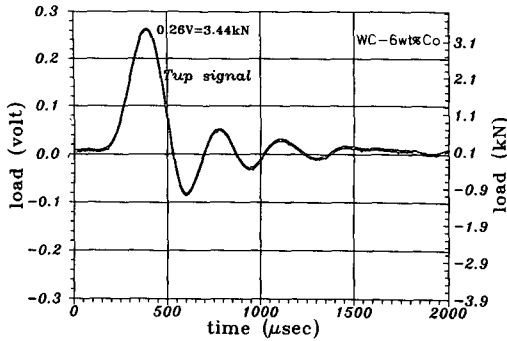


Fig. 5 (a) Load (volt, kN)-time trace for WC-6wt% Co specimen (Amp A, used 100% capacity of Charpy impact tester)

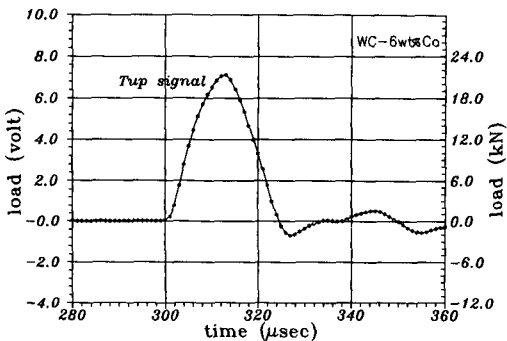


Fig. 5 (b) Load (volt, kN)-time trace for WC-6wt% Co specimen (Amp B, used 100% capacity of Charpy impact tester)

과 균열개시 하중신호의 분리가 되지 않으므로 동적 균열개시인성치를 결정할 수 없었다. 관성력의 최고값은 충격시험기 용량의 100%를 사용할 때 약 20 kN에서, 35% 사용시 10 kN으로 줄어드는 사실을 하중-시간 곡선에서 관찰할 수 있었다. Fig. 6(b)의 하중-변위 곡선에서 컴플라이언스가 급격히 변화하는 점을 균열개시점으로 생각할 수도 있으나, 하중-시간 곡선에서는 관성력과 균열개시 하중신호의 분리가 일어나지 않으므로 균열개시점을 결정하기가 불가능하였다.

Fig. 7에 충격시험기 용량의 약 10%를 사용하여 ($300 \times 0.096 \text{ Joule}$, $\alpha=35^\circ$) WC-6wt%Co 초경합금 재료에 대한 살피충격시험 결과를 나타내었다. Fig. 7(a)에는 Amp B를 사용하여 얻은 동적 하중-시간 곡선과 시편에 스트레인게이지를 부착하여 얻은 동적 스트레인-시간 곡선을 동시에 나타내었다. Fig. 7(b)에는 시편에 스트레인 게이지를 부착

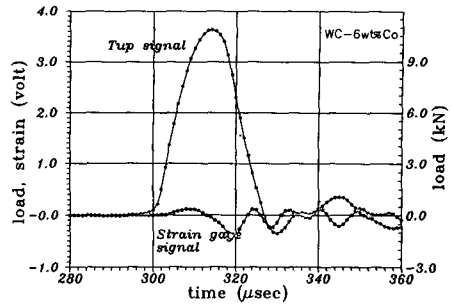


Fig. 6 (a) Load (volt, kN)-time and strain(volt)-time traces for WC-6wt%Co specimen (Amp B, used 35% capacity of Charpy impact tester)

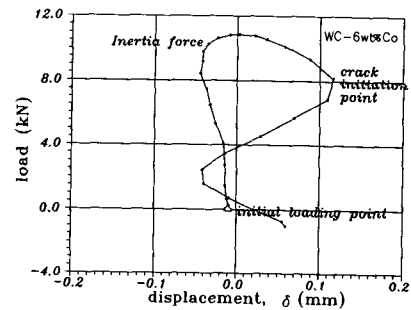


Fig. 6 (b) Dynamic load-displacement trace for WC-6wt%Co specimen (Amp B, used 35% capacity of Charpy impact tester)

하여 얻은 시편의 처짐을 이용하여 동적 하중(kN)-변위 곡선의 결과를 나타내었다.

본 연구에서 충격시험기 용량의 10%를 사용한 이 경우에는 튼의 관성하중과 균열개시 하중이 분명히 분리되는 현상을 볼 수 있어서 명확한 균열개시점을 결정할 수 있었으므로 이 하중값을 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정할 수 있었다. 관성력의 최고값은 100% 용량 사용시 약 20 kN에서 10% 사용시 5 kN으로 줄어드는 것을 하중-시간 곡선에서 관찰할 수 있었고, Fig. 7(a)의 스트레인 게이지 신호에서도 관성력이 상당히 감소되는 것을 관찰할 수 있어서 위 해석의 타당성을 보증해 주고 있다.

동적 균열개시인성치는 Table 1에서 보는 바와 같이 STD-11에서 Amp A를 이용한 결과는 $44.94 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, Amp B를 이용한 결과는 $39.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이다. 또한 WC-6wt%Co 초경합금 재료에서 Amp A를 이용한 결과는 $16.84 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, Amp B를 이용한 결과는 $16.79 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이다.

STD-11에 대해서 Amp A와 Amp B를 사용하여 산정한 결과를 비교해 보면 Amp A를 이용한 결과가 약간 큰 값을 나타내는데(14%), 그 이유는 Amp A의 출력특성이 부족하여 Amp B에서 나타나는 첫번째와 두 번째 신호가 중첩되어 출력된 때문이라고 생각되며, 따라서 이 하중값으로 계산된 동적 균열개시인성치는 실제값보다 큰 값을 나타내게 된다. WC-6wt%Co 초경합금 재료에서는 Amp A, Amp B의 결과가 유사한 값을 나타내었다.

실험에 사용한 탄화텅스텐 초경합금재료는 로얄 초경에서 제작한 WC-6wt%Co이며, 본 실험결과와 비교하기 위해 WC-16wt%Co를 사용하여 구한 Rueth의 결과를 Table 2에 나타내었다.⁽⁵⁾

Table 2에서 정적 보정결과를 이용하는 식(1)과 흡수에너지를 이용하는 식(2)로 산출한 동적 균열개시인성치를 비교해 보면, 식(2)로 구한 WC-16wt%Co 재료의 K_{Ic} 값은 83.59, 102.64 $MPa\sqrt{m}$ (각각 WC-6wt%Co와 WC-16wt%Co의 결과)로 식(1)로 구한 WC-6wt%Co 재료의 값 (16.79 $MPa\sqrt{m}$)과 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 식(2)는 흡수에너지(충격시험기의 다이올에너지)를 사용하여 동적 균열개시인성치를 산출하는 방법으로 상

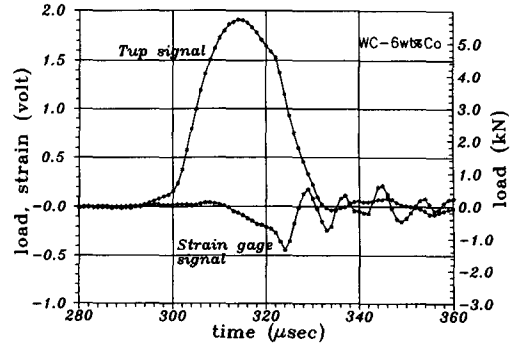


Fig. 7 (a) Load (volt, kN)-time and strain(volt)-time traces for WC-6wt%Co specimen (Amp B, used 10% capacity of Charpy impact tester)

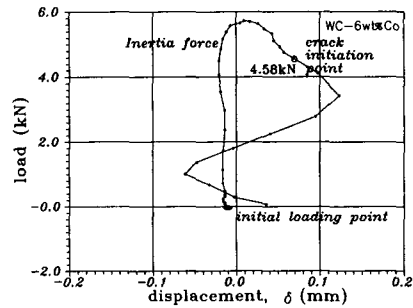


Fig. 7 (b) Dynamic load-displacement trace for WC-6wt%Co specimen (Amp B, used 10% capacity of Charpy impact tester)

Table 2 Material properties comparison between this study and reference (5)

	This study	This study	Reference (5)
Producer	Sammi Steel Co. (Korea)	Royal tungsten carbide (Korea)	Carboloy systems department of GE (U. S. A)
Composition	STD-11	WC-6wt%Co	WC-16wt%Co (Carboloy grade 55B)
Hardness(HRA)	/	92.1	89
Elastic modulus, E (GPa)	203	524	524
Density	/	14.95	13.9
Transverse rupture strength(MPa)	/	2453-2943	3380
Dial energy(J)	2	4	3.04
Dynamic crack initiation toughness, K_{Ic} ($MPa\sqrt{m}$)	39.45 (Using Eq.(1)) 37.34 (Using Eq.(2))	16.79 (Using Eq.(1)) 83.59 (Using Eq.(2))	102.64 (Using Eq.(2))

당히 큰 값을 나타내므로, 취성이 강한 초경합금 재료에 대해서는 사용할 수 없다는 사실을 알 수 있었다. 반면에 초경합금보다 취성이 작은 STD-11 시편에서는 식(1)과 식(2)의 결과가 큰 차이를 보이지 않으므로(각각 39.45, 37.34 MPa \sqrt{m}) 식(1), (2)를 병행해서 사용해도 무방하다고 생각된다.

따라서 동적 균열개시인성치를 산출할 때, 취성이 강한 재료에서는 계장화 샤피충격시험을 이용하는 식(1)을 사용하고, 상대적으로 취성이 작은 재료에서는 식(1), (2)를 병행, 사용하여 정확한 동적 균열개시인성치를 구할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 계장화된 샤피충격시험을 이용하여 합금공구강인 STD-11과 WC-6wt%Co 초경합금 재료에 작용되는 정확한 하중을 구하여 동적 균열개시인성치를 구하였다. 한정된 실험결과에서 얻어진 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 계장화 샤피충격시험 장치는 제작이 비교적 간단하고 일반 충격시험보다 정확한 실험결과를 얻을 수 있으므로 동적 균열개시인성치를 결정하는 등, 동적 파괴현상을 규명하는데 이용할 수 있으나 재료의 동적거동의 응답에 미치는 스트레인 증폭기의 동적 특성을 명확히 규명해야만 한다.

(2) 계장화 샤피충격시험 결과 STD-11 강을 포함한 취성이 작은 재료에서는 충격시험기의 전 용량 (300 Joule)을 사용하여도 관성력 신호와 최고 하중 신호가 분명히 분리되어 동적 균열개시인성치를 구하는데 문제가 없었으나, WC-6wt%Co 초경합금 재료에서는 충격시험기의 전 용량을 사용할 때나 35%를 사용할 때 모두 두 신호의 분리가 되지 않았고, 용량의 10%를 사용할 때 두 신호의 분리가 이루어져 동적 균열개시인성치를 구할 수 있었다.

(3) 계장화 샤피충격시험 장치와는 별도로 충격시험기의 동적 처짐현상을 규명하기 위해 스트레인 게이지를 이용하였는데, 그 결과로 얻은 하중-변위 곡선으로부터 동적인 시편의 처짐 뿐만 아니라 컴플라이언스 변화 양상을 관찰할 수 있게 되어 균열개시 하중을 정확하게 결정할 수 있게 하였다.

(4) 충격시험기의 흡수에너지를 식(2)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 구하는 방법은 공구강을 포함한 취성이 작은 재료에서는 계장화된 충격시험

기의 결과를 이용하는 식(1)과 병행하여 사용하여도 큰 차이가 없으나, 취성이 극도로 큰 초경재료에서는 식(2)를 사용하여 구할 수 없고 계장화된 충격시험기의 결과를 식(1)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 산출하여야 함을 규명하였다.

후 기

본 연구는 92년도 한국교육재단 특정기초 연구과제(과제번호: 92-23-00-13) 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Scussel, H. J., Valenite GTE, 1990, "Friction and Wear of Cemented Carbides," *Materials for Friction and Wear Applications*, pp. 795~800.
- (2) Mari, D., Marti, U. and Silva, P. C., 1992, "A New Photolithographic Technic to Detect the Local Deformation of Materials: Application to WC-Co Composite," *Materials Science and Engineering*, A158, pp. 203~206.
- (3) Kobayashi, T., 1984, "Analysis of Impact Properties A533 Steel for Nuclear Reactor Pressure Vessel by Instrumented Charpy Test," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, No. 1, pp. 49~65.
- (4) Ewing, A. and Raymond, L., 1974, "Instrumented Impact Testing of Titanium Alloys," *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing, American Society for Testing and Materials*, pp. 180~202.
- (5) Lueth, R. C., 1974, "An Analysis of Charpy Impact Testing as Applied to Cemented Carbide," *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing, American Society for Testing and Materials*, pp. 166~179.
- (6) Koppenaal, T. J., 1974, "Dynamic Fracture Toughness Measurement of High-Strength Steels Using Precracked Charpy Specimen," *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing, American Society for Testing and Materials*, pp. 92~117.
- (7) Lawn, B. R. and Wilshaw, T. R., 1975, "Frac

- ture of Brittle Solids," Cambridge University Press, London.
- (8) Ireland, D. R., 1974, "Procedures and Problems Associated with Reliable Control of the Instrumented Impact Test," *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing, American Society for Testing and Materials*, pp. 3~29.
- (9) Raymond, L., 1974, "Instrumented Impact Testing of Titanium Alloys," *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing, American Society for Testing and Materials*, pp. 180~202.
- (10) Saxton, H. J., Jones, A. T., West, A. J. and Mamaros, T. C., 1974, "Load-Point Compliance of the Charpy Impact Specimen," *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing, American Society for Testing and Materials*, pp. 30~49.