

# 계장화 샐피 충격시험에 의한 동적 파괴거동 해석

이 역 섭, \* 김 선 용, \*\* 홍 성 경\*\*\*

## Analysis of Dynamic Fracture Behavior by Using Instrumented Charpy Impact Test

O. S. Lee, \*S. Y. Kim, \*\* S. K. Hong\*\*\*

### ABSTRACT

This investigation evaluates dynamic fracture characteristics of two alloy steels (STD-11 and STS-3) and a gray cast iron (GC-30). The dynamic fracture toughness of crack initiation and some of the dynamic fracturing characteristics were evaluated by using the instrumented Charpy impact testing procedures. It was found from experimental results for three kinds of materials that inertia force is directly proportional to impact velocity. The duration time of inertia force was found to be constant regardless of impact velocities in steel specimens.

**Key Words** : Dynamic Fracture Initiation Toughness of Crack(동적 균열개시인성치), Instrumented Charpy Impact Test(계장화 샐피 충격시험), Strain Gage(스트레인 게이지), Wheatstone Bridge(휘트스톤 브리지), Static Calibration(정적보정), Inertia Force(관성력), Maximum Load(최대 하중)

### 1. 서 론

일반적으로 프레스 금형, 사출 금형용으로 쓰이는 재료들은 금형 작업시 동적 하중을 받으면서 파손되는 경우가 많다. 본 연구에서는 프레스 금형 재료로 사용되는 STD-11, STS-3와 사출 금형 재료인 GC-30에 대하여 동적 하중에 대한 기초적인 파괴 특성을 규명하고

자 한다. 기초적인 동적 파괴 특성을 규명하는 한 방법으로써 계장화 샐피 충격시험(Instrumented Charpy Impact Test)이 많이 이용되고 있고 이 방법으로 비교적 쉽게 동적 균열개시인성치( $K_{Id}$ )를 산정할 수 있다고 알려져 있다.<sup>(1, 2)</sup> 본 연구에서는 샐피 충격시험기의 텡(Impact Tup)에 스트레인 게이지를 붙여 변형을 측정 회로를 구성한 후, 충격텡으로 부터 얻어지는 스트

\* 인하대학교 기계공학과  
 \*\* 유한전문대학 금형설계과  
 \*\*\* 인하대학교 기계공학과

레인 신호를 정적 보정 프로세스를 이용하여 하중으로 환산하였다. 충격속도에 따른 관성력의 크기와 동적 균열개시인성치의 변화를 비교하기 위하여 충격덱의 충격속도를 달리하여 실험하였으며, 계장화 회로에서 계측되는 신호를 스트레인 증폭기로 증폭하고 저장용 오실로스코프에 기록한 다음 이를 분석하여 동적 균열개시인성치를 산출하고 동적 파괴 양상을 규명하려는 시도를 하였다.

## 2. 기본 이론

Fig. 1에 계장화 살피 충격시험으로 얻게 되는 두 가지의 전형적인 충격덱 하중-시간 곡선을 나타내었다. Fig. 1(a)의 결과를 보면 하중은 파괴가 개시되는 최대 하중에 도달할 때까지 하중이 선형적으로 증가하는데, 이와 같이 최대 하중에 도달할 때까지 항복이 일어나지 않으면 동적 균열개시인성치( $K_{Ia}$ )는 선형탄성 파괴역학을 이용하여 식(1)과 같이 결정할 수 있다.<sup>(1,2)</sup>

$$K_{Ia} = Y \frac{6M}{tw^2} \sqrt{a} \quad (1)$$

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

여기서, M은 작용한 굽힘 모멘트 ( $P_m L/4$ ),  $P_m$ 은 최대 하중, w는 시편의 폭, t는 시편의 두께, a는 균열 길이이고, L은 스패(Span)의 거리이다 (Fig. 3 참조). Fig. 1(b)는 파괴가 개시되는 최대 하중에 도달하기 전에 소성 변형이 발생되는 양상이며 이 상태에서는 선형탄성 파괴역학을 적용한 식(1)을 사용하여 동적 균열개시인성치를 구할 수 없다. 이 경우에는 Witt에 의해 개발된 등가 에너지 방법을 이용하여 구한 하중  $P^*$ 를  $P_m$ 에 대입하여  $K_{Ia}$  값을 결정한다.<sup>(3)</sup> 이 등가 에너지는 파괴개시 전에 발생하는 항복을 피할 수 있을 정도로 충분히 두꺼운 시편을 가정하여(평면 변형률 조건) 이 시편이 최대 하중에 도달하기에 필요한 에너지의 상당량을 의미한다. 즉 등가 에너지 방법을 이용하여 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 동적 하중-시간 곡선의 직선 부분을 연장하여  $P_m$ 까지의 에너지와 일치하는 직선 부분 연장 끝 점의 하중  $P^*$ 를 결정한다. 여기서 구한  $P^*$ 를 식(1)의  $P_m$ 에 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정하며, 일반적으로 등가 에너지 개념을 가지

고 결정한  $K_{Ia}$ 값은 상한값(Upper Boundary Value)을 가진다.

동적 균열개시인성치와 충격시험기의 흡수에너지 사이에는 저속 굽힘 에너지와 저 변형률 속도 인성 측정 방법을 사용하여 Ronald 등에 의해 밝혀진 식(2)와 같은 관계가 있다.<sup>(4,6)</sup>

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

위 식은 파면이 전단 면적이 거의 없는 평면 파괴(Flat Fracture) 현상을 나타낼때 적용할 수 있으며, 여기서 E는 탄성계수,  $\nu$ 는 포와송 비,  $(W/A)_d$ 는 시편의 흡수에너지를 나타낸다.

식 (2)를 이용하면 계장화된 충격시험의 결과를 이용하지 않고 동적 균열개시인성치를 결정할 수 있으나 시편의 파면 형상에 극도의 전단립(Shear Lip)이 나타날 경우, 정확한  $K_{Ia}$  값을 구하기 위해서는 계장화된 충격시험을 이용하여 얻은 덱하중-시간 곡선 결과를 이용해야 한다.

## 3. 실험 방법

본 연구에서는 합금공구강인 STD-11, STS-3와 회주철인 GC-30을 사용하여 이들 재료의 동적 파괴 특성을 규명하는 실험을 수행하였다. 이들 재료의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 용량이 300 Joule인 계장화된 Charpy 충격시험기로 시편에 충격하중을 가하면 시편과 덱의 접촉 순간의 하중으로부터 파단 하중

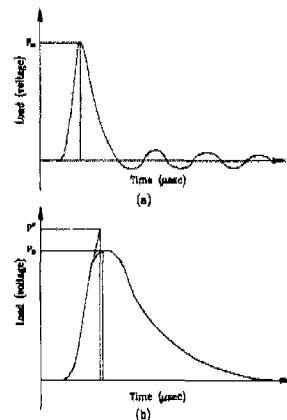


Fig. 1 Typical tup load time history for instrumented Charpy impact test.

Table 1 Mechanical properties of STD-11, STS-3 and GC-30.

Materials	Young's Modulus E(Gpa)	Poisson's Ratio $\nu$
STD-11	192	0.27
STS-3	190	0.28
GC-30	97	0.25

까지 빠르게 변화하는 하중을 정확히 측정할 수 있다.

계장화 샐피 충격시험기는 충격시험기의 턱에 휘트스톤 브리지(Wheatstone Bridge) 회로를 구성하여 제작하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 턱부분에 두 개의 액티브 게이지를 부착하였고, 두 개의 더미 게이지(Dummy Gage)는 액티브 게이지와 직각이 되도록 부착하였다. 계장화 충격팁으로부터 나오는 신호를 스트레인 증폭기(Measurement Group, 2311)로 증폭하여 저장용 오실로스코프(Nicolet 410)에 기록하였다. Fig. 3에 본 연구에서 사용한 표준 샐피 충격시험편의 형상을 나타내었으며, 실험에 사용한 샐피 충격시험편의 V-노치는 와이어 방전 가공(Wire E.D.M.)을 하였으며, 노치 끝 반경은 0.0835mm 이었다.

분리가 가능하도록 제작된 충격팁을 계장화하여 만능 재료시험기로 압축 하중을 가하면서 얻은 결과를 이용하여 정적 보정을 하였다. 동적 하중 측정시 가장 중요한 사항의 하나인 스트레인 증폭기는 출력신호 대역폭(Output Bandwidth)이 125kHz의 출력 특성을 갖는 증폭기를 사용하였다. 보정 결과, 시험에 가해지는 압축하중이 증가함에 따라 충격팁에서 나오는 신호는 정해진 하중 영역에서 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었으며, Fig. 4에 나타낸 정적 보정 결과를 이용하여 팁에서 나온 하중 신호(Volt)를 실제 하중 (KN)으로 환산하였다.

계장화 샐피 충격시험 장치를 사용하여 STD-11, STS-3, GC-30의 재료에 대하여 해머 충격속도를 5.422 m/s, 3.96 m/s, 2.8 m/s, 1.449 m/s 로 각각 변화시켜 가면서 하중-시간 곡선을 기록하여 균열개시 하중을 구한 다음, 균열개시 하중을 식 (1)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정하였다. 동적 하중-시간 곡선을 시간에 대하여 적분하여 에너지-시간 곡선을 얻었으며, 이때의 흡수에너지를 식 (2)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 결정하여 식(1)로 구한 동적 균

열개시인성치 결과와 비교하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

STD-11에 대하여 계장화 샐피 충격시험기를 사용하여 충격속도를 4단계로 변화시켜 구한 충격 시험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에는 충격속도  $v=5.422\text{ m/s}$  일 때 시간에 따른 턱하중 (kN)의 변화 양상과 시험편에 스트레인 게이지를 부착하여 얻은 스트레인 신호(volt)의 변화 양상을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 시험편에 스트레인 게이지를 부착하여 얻은 시험편의 파단점과 계장화한 충격팁의 균열개시 하중점이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)에는 충격속도  $v=5.422\text{ m/s}$ ,  $v=3.96\text{ m/s}$ ,  $v=2.8\text{ m/s}$ ,

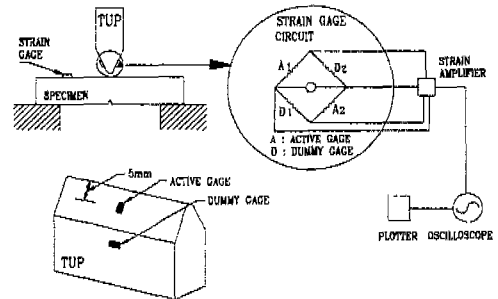


Fig. 2 Layout of instrumented Charpy impact test system including full bridge circuit.

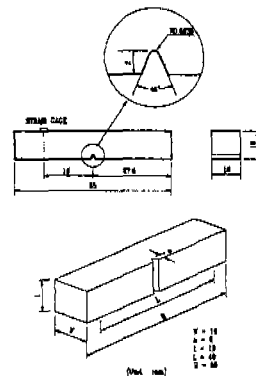


Fig. 3 Configuration of Charpy specimen and location of strain gage.

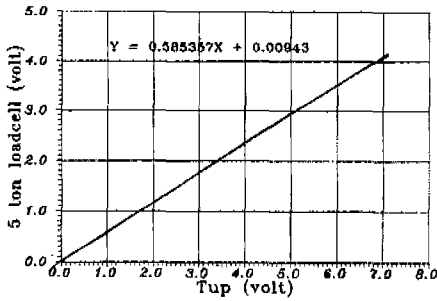


Fig. 4 Relationship between loadcell (volt) and tup (volt) traces for static calibration.

$v=1.449\text{ m/s}$ 로 각각 변화시켰을 때의 텡하중 (kN)-시간 곡선 결과를 나타내었다. 이 그림에서 처음으로 나타나는 신호는 정지되어 있는 시편과 고속으로 이동하는 충격텡 사이에서 발생하는 관성력(Inertia Force)으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 여기서, 관성력의 작용 시간은 충격속도가 변화하여도  $30\mu\text{sec}$ 로 일정하고, 관성력의 크기는 충격속도에 비례하여 증가함을 알 수 있다 (Fig. 8 참조). 그리고 관성력의 크기가 균열개시 하중 ( $P_m$ )에 근접한 충격속도  $v=5.422\text{ m/s}$ 인 경우 관성력의 영향으로 균열개시 하중이 다른 것에 비해 약간 상승하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)에는 충격속도를 4 단계로 변화시켰을 때 하중-시간 곡선을 적분하여 구한 에너지-시간 곡선을 나타내었다. 여기서 충격속도의 크기에 따라 시편에 흡수된 에너지가 비례하는 것을 알 수 있다. 그리고 에너지-시간 곡선에서 관성력에 의한 에너지를 빼면 순수하게 시편에 흡수된 에너지를 구할 수 있고, 이 값은 충격속도에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 텡하중 (kN)-시간 곡선에서 균열개시 하중값을 식 (1)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정하였고, Fig. 5(c)의 에너지 (J)-시간 곡선에서 충격 흡수에너지 값을 식 (2)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 결정하여 그 두 가지 결과를 Table 2에 나타내었다. 이 결과를 고찰하면 취성파괴 양상을 보이는 STD-11 재료에서는, 균열개시 하중을 식 (1)에 대입하여 구한 동적 균열개시인성치와 충격 흡수에너지를 식 (2)에 대입하여 구한 동적 균열개시인성치는 14% 이내의 차이로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

STS-3에 대하여 계장화 살피 충격시험기를 사용하여 충격속도를 3단계로 변화시켜 구한 충격 시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에는 충격속도  $v=5.422\text{ m/s}$ 일 때 텡하중 (kN)의 변화 양상과 시편에 부착한 스트레인 게이지 신호 (volt)의 변화 양상을 나타내었다. Fig. 6(b)에는 충격속도  $v=5.422\text{ m/s}$ ,  $v=3.96\text{ m/s}$ ,  $v=2.8\text{ m/s}$ 로 각각 변화시켰을 때의 하중 (kN)-시간 곡선 결과를 나타내었다. 여기서, 관성력의 작용 시간은 충격속도가 변화하여도  $30\mu\text{sec}$ 로 일정하고, 관성력의 크기는 충격속도에 따라 비례함을 알 수 있다 (Fig. 8 참조). 그리고 관성력의 크기가 균열개시 하중 ( $P_m$ )보다 작으므로 균열개시 하중은 관성력

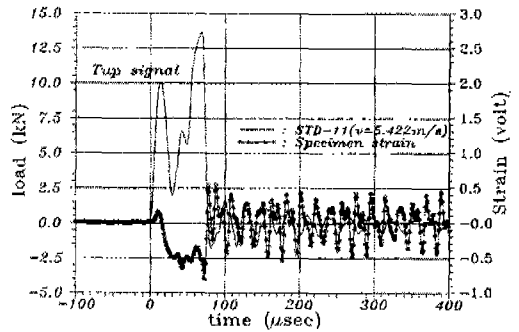


Fig. 5 (a) Tup load (kN) vs. time and specimen strain (volt) vs. time traces for STD-11 (impact velocity  $v=5.422\text{ m/s}$ ).

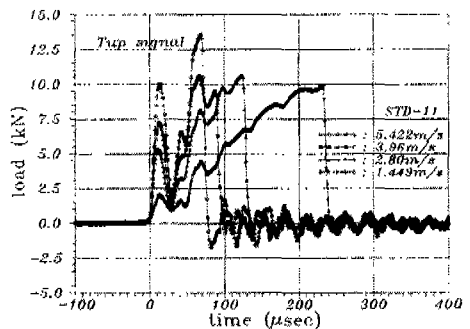


Fig. 5 (b) Tup load (kN) vs. time traces under different impact velocity for STD-11 (impact velocity  $v=5.422, 3.96, 2.8, 1.449\text{ m/s}$  )

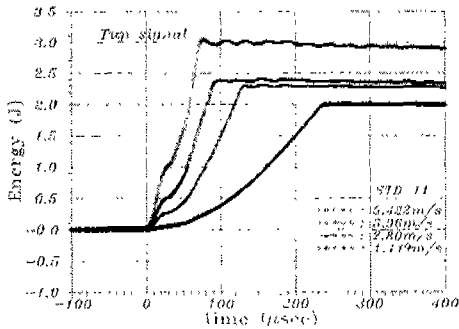


Fig. 5 (c) Integrated energy (J) vs. time traces under different impact velocity for STD-11 (impact velocity  $v=5.422, 3.96, 2.8, 1.449 \text{ m/s}$ ).

Table 2 Dynamic fracture toughness of crack initiation by instrumented Charpy impact test for STD-11.

Capacity (Impact Velocity)	Crack Initiation Load (kN)	$K_{I0.2}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) [eq'n(1)]	Impact Energy(J)	$K_{I0.2}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) [eq'n(2)]
100% ( $v=5.422 \text{ m/s}$ )	13.61	58.95	2.02	50.42
52.7% ( $v=3.96 \text{ m/s}$ )	9.59	41.73	1.87	48.17
26.3% ( $v=2.80 \text{ m/s}$ )	10.67	45.52	2.02	50.24
7.1% ( $v=1.449 \text{ m/s}$ )	9.91	42.58	1.95	49.43

의 영향을 받지 않게 되어 충격속도가 변화하여도 거의 일정함을 알 수 있다. Fig. 6(c)에는 충격속도를 3단계로 변화시켰을 때 에너지-시간 곡선을 나타내었다. 여기서 충격속도의 크기에 따라 시편에 흡수된 에너지가 비례하는 것을 알 수 있다. STD-11 재료의 결과와 마찬가지로 시편에 흡수된 에너지는 충격속도에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다. Fig. 6(b)의 텡하중 (kN)-시간 곡선에서 균열개시 하중값을 식(1)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정하였고, Fig. 6(c)의 에너지 (J)-시간 곡선에서 충격 흡수에너지 값을 식(2)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 결정하여 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 이 결과를 고찰하면 충격속도가 변화하여도 모든 경우의 동적 균열개시인성치가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 상대적으로 균열개시 하중보다 관성력이 작아서 균열개시 하중에 영향을 끼치지 못한 것으로 사료된다. 계산 결과 연성파

괴 양상을 보이는 STS-3 재료에서 충격 흡수에너지를 식(2)에 대입하여 구한 동적 균열개시인성치는 균열개시 하중을 식(1)에 대입하여 구한 값에 비해 약 100% 차이가 나고 있는데, 이것은 파괴 개시점까지의 시간이 200 $\mu\text{sec}$  이상으로 시간이 너무 지연되기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7에 GC-30에 대하여 충격속도를 4단계로 각각 변화시켜 구한 충격 시험 결과를 나타내었다. Fig. 7(a)에는 충격속도  $v=5.422 \text{ m/s}$  일 때 텡하중 (kN)의 변화양상과 시편에 부착한 스트레인 게이지 신호 (volt)의 변화 양상을 나타내었다. Fig. 7(b)에는 충격속도  $v=5.422 \text{ m/s}, v=3.96 \text{ m/s}, v=2.8 \text{ m/s}$ ,

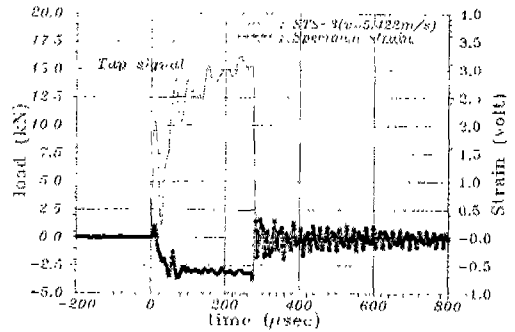


Fig. 6 (a) Top load (kN) vs. time and specimen strain (volt) vs. time traces for STS-3 (impact velocity  $v=5.422 \text{ m/s}$ ).

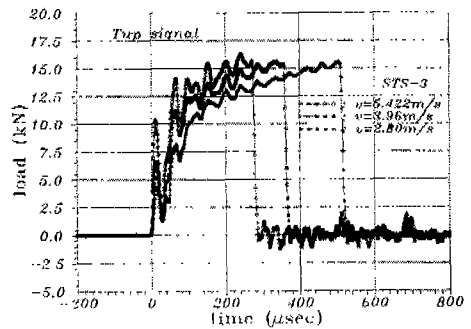


Fig. 6 (b) Top load (kN) vs. time traces under different impact velocity for STS-3 (impact velocity  $v=5.422, 3.96, 2.8, 1.449 \text{ m/s}$ ).

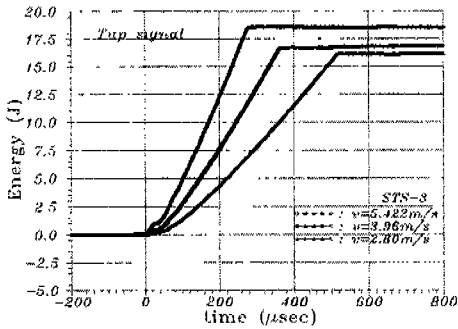


Fig. 6 (c) Integrated energy (J) vs. time traces under different impact velocity for STS-3 (impact velocity  $v=5.422, 3.96, 1.449 \text{ m/s}$ ).

Table 3 Dynamic fracture toughness of crack initiation by instrumented Charpy impact test for STS-3.

Capacity (Impact Velocity)	Crack Initiation Load (kN)	$K_{I0.05}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) [eq'n(1)]	Impact Energy (J)	$K_{I0.05}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) [eq'n(2)]
100% ( $v=5.422 \text{ m/s}$ )	15.66	67.39	17.59	148.22
52.7% ( $v=3.96 \text{ m/s}$ )	15.64	67.60	16.24	142.56
26.3% ( $v=2.80 \text{ m/s}$ )	15.57	66.52	15.92	140.69

$v=1.449 \text{ m/s}$ 로 변화시켰을 때 팁하중 (kN)-시간 곡선 결과를 나타내었다. 여기서, 판성력의 작용시간은 충격속도가 변화하여도 30μsec로 일정하고, 판성력은 충격속도에 따라 비례하여 증가함을 알 수 있다 (Fig. 8 참조). 그리고 판성력의 크기가 충격속도  $v=1.449 \text{ m/s}$  일 경우를 제외하고는 모두 균열개시 하중 ( $P_m$ ) 보다 커서 판성력이 균열개시 하중에 영향을 미치므로  $v=5.422 \text{ m/s}$ ,  $v=3.96 \text{ m/s}$ ,  $v=2.8 \text{ m/s}$ 에서는 균열개시 하중이 일치한다. 그러나 충격속도  $v=1.449 \text{ m/s}$  일 경우 판성력이 균열개시 하중보다 작으므로 균열개시 하중이 위의 3가지 경우보다 낮아지는 것을 알 수 있다. Fig. 7(c)에는 충격속도를 4단계로 변화시켰을 때 에너지-시간 곡선을 나타내었다. 여기서 충격속도의 크기에 따라 시편에 흡수된 에너지가 비례하는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)의 팁하중 (kN)-시간 곡선에서 균열개시 하중값을 식(1)에 대입하여 동적 균열개시인성

치를 산정하였고, Fig. 7(c)의 에너지 (J)-시간 곡선에서 충격 흡수에너지 값을 식(2)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 결정하여 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 이 결과를 고찰하면 충격속도  $v=1.449 \text{ m/s}$  일 경우를 제외하고는 충격속도가 변화하여도 동적 균열개시인성치가 거의 일치하는 것을 알 수 있고, 충격속도  $v=1.449 \text{ m/s}$  일 경우 동적 균열개시인성치가 나머지 충격속도에 비해 약간 낮아지는 것은 충격속도  $v=1.449 \text{ m/s}$  일 경우 판성력이 균열개시 하중보다 작아서 균열개시 하중에 영향을 끼치지 못한 것으로 사료된다. 균열개시 하중을 식(1)에 대입하여 구한 동적 균열개시인성치와 충격 흡수에너지를 식(2)에 대입하여 구한 동적 균열개시인성치는 충격속도  $v=1.449 \text{ m/s}$  일

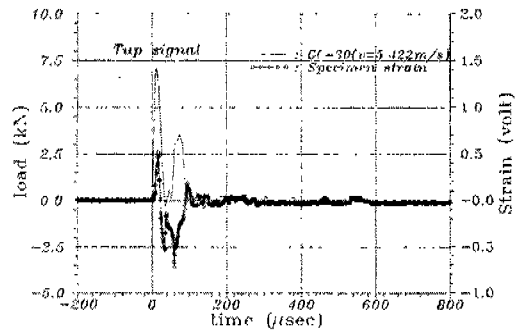


Fig. 7 (a) Tup load (kN) vs. time and specimen strain (volt) vs. time traces for GC-30 (impact velocity  $v = 5.422 \text{ m/s}$ ).

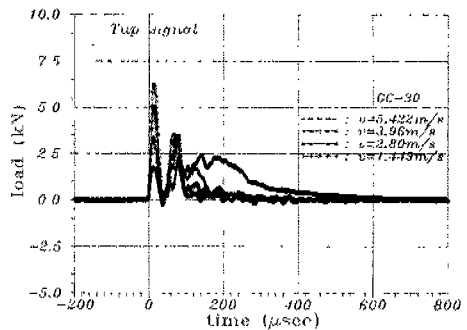


Fig. 7 (b) Tup load (kN) vs. time traces under different impact velocity for GC-30 (impact velocity  $v = 5.422, 3.96, 2.8, 1.449 \text{ m/s}$ ).

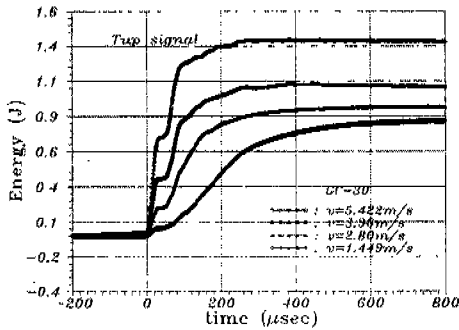


Fig. 7 (c) Integrated energy (J) vs. time traces under different impact velocity for GC-30(impact velocity  $v=5.422, 3.96, 2.8, 1.449 \text{ m/s}$ ).

Table 4 Dynamic fracture toughness of crack initiation by instrumented Charpy impact test for GC-30.

Capacity (Impact Velocity)	Crack Initiation Load (kN)	$K_{Id(99)}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) [eq'n(1)]	Impact Energy(J)	$K_{Id(99)}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) [eq'n(2)]
100% ( $v=5.422 \text{ m/s}$ )	3.54	15.72	0.69	21.14
52.7% ( $v=3.96 \text{ m/s}$ )	3.52	15.70	0.64	20.41
26.3% ( $v=2.80 \text{ m/s}$ )	3.24	14.55	0.71	21.48
7.1% ( $v=1.449 \text{ m/s}$ )	2.44	10.88	0.75	22.24

경우를 제외하고는 30% 이내로 큰 차이가 없는 것을 알 수 있고, 이 원인은 주철이 STD-11, STS-3와 같은 합금공구강에 비해 재질이 균질하지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 9에는 전단립이 발생하지 않고 평면 파괴의 파면형상을 보이는 STD-11, STS-3, GC-30 재료의 동적 균열개시인성치와 흡수에너지와의 관계를 나타내었으며 선형성을 보임을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 계장화된 샐피 충격시험을 이용하여 합금공구강인 STD-11, STS-3와 회주철인 GC-30 재료에 대하여, 충격속도를 변화시켜 가면서 동적 하중-시간 곡선을 구하고 충격 시편의 균열개시 하중을 결정하여 동적 균열개시인성치를 산정하였다. 본 연구에서

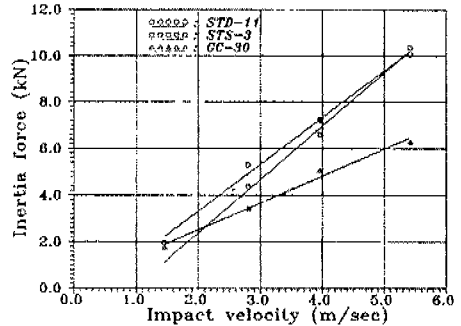


Fig. 8 Relationship between inertia force and impact velocity.

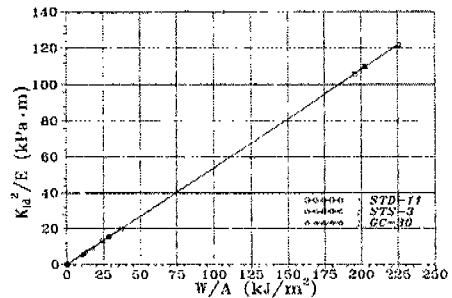


Fig. 9  $K_{Id}^2/E$  vs.  $W/A$  for STD-11, STS-3 and GC-30.

얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 계장화 샐피 충격시험시 발생하는 관성력의 작용 시간은 재질과 충격속도에 관계없이 일정하고, 관성력의 크기는 충격속도에 비례한다.

2. 재질이 균질하고 취성파괴 양상을 나타내는 STD-11 재료의 경우, 계장화 샐피 충격시험에서 균열개시 하중을 대입하여 산정한 동적 균열개시인성치와 충격 흡수에너지를 대입하여 산정한 동적 균열개시인성치는 14%정도의 오차 내에 있다.

3. 시간지연 현상이 나타나고 연성파괴 양상을 보이는 STS-3 재료의 동적 균열개시인성치를 구할 경우, 균열개시 하중을 대입하여 결정한 값과 충격 흡수에너지

지를 대입하여 구한 값은 100%의 오차를 보이므로, 균열개시 하중을 이용하여 동적 균열개시인성치를 구하는 것이 타당함을 알 수 있다.

4. 계장화 살피 충격시험에서 균열개시 하중을 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정할 경우, 신뢰성있는 결과를 얻기 위해서는 충격시험기의 용량을 조절하여 관성력을 균열개시 하중보다 작게 하고 파괴개시까지의 지연시간을 200 $\mu$ sec 정도 이내로 제한하여 실험해야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. A. Ewing and L. Raymond, "Instrumented Impact Testing of Titanium Alloys", ASTM STP 563, pp. 180-202, 1974.
2. R. C. Lueth, "An Analysis of Charpy Impact Testing as Applied to Cemented Carbide", ASTM STP 563, pp. 166-179, 1974.
3. T. J. Koppelaar, "Dynamic Fracture Toughness Measurement of High-Strength Steels Using Pre-cracked Charpy Specimen", ASTM STP 563, pp. 92-117, 1974.
4. B. R. Lawn and T. R. Wilshaw, "Fracture of Brittle Solids", Cambridge Univ. Press, 1975.
5. D. R. Ireland, "Procedures and Problems Associated with Reliable Control of the Instrumented Impact Test", ASTM STP 563, pp. 3-29, 1974.
6. L. Raymond, "Instrumented Impact Testing of Titanium Alloys", ASTM STP 563, pp. 180-202, 1974.