

〈論 文〉

금속재료의 동적항복응력 결정을 위한 봉충격시험법

민옥기* · 이정민** · 남창훈** · 황재준**

(1992년 6월 23일 접수)

Rod Impact Test for the Determination of Dynamic Yield Stress of Metals

Oak-Key Min, Jeong-Min Lee, Chang-Hoon Nam and Jae Jun Hwang

Key Words : Rod Impact(봉충격시험), Dynamic Yield Stress(동적항복응력), High Strain Rate(고변형률속도), Free-Cutting Brass(괘삭황동)

Abstract

A new theory based on the modified momentum and energy conservation has been proposed in order to overcome the drawbacks included in previous theories which are used for the determination of dynamic yield stresses and the investigation of dynamic behavior of metals. Then the improvements suggested by the new theory have been manifested through the analysis of the error included in the measurement of deformed length and through the comparison between the new theory, existing theories, and experimental results performed by previous workers. Meanwhile rod impact test has been performed which uses a compressed-air system for the acceleration of flat-ended cylindrical free-cutting brass rods. From the geometrical measurements of deformed length, the dynamic yield stress of free-cutting brass has been determined.

1. 서 론

구조의 외부하중에 의한 변형거동을 해석하는 데 있어서 주로 정적인 하중에 대한 해석이 수행되어 왔으며, 이용되는 재료의 특성에 있어서도 정적특성이 연구되어 왔다. 그러나 산업기술이 발전함에 따라 극한하중이 고려되게 되었으며 특히 충격하중 하에서의 변형거동 해석이 필요하게 되었다.^(1~3) 이와 같이 충격하중 하에서 구조의 변형거동을 해석하기 위해서는 재료의 고변형률속도(high strain rate) 하에서의 특성 분석이 필요하며, 이를 위하여 변형률속도 범위에 따라 낙하충격시험(drop tower test), 홉킨슨봉시험(hopkinson bar test), 봉충격시험(rod impact test) 등이 이용되고 있다.^(4~6)

고변형률속도 범위의 시험방법 중에서 봉충격시험은 대변형을 얻을 수 있는 시험으로서, 광범위한 변형 범위에서 재료의 충격특성을 분석하기 위하여 많은 연구자들에 의하여 이용되어 왔다. 봉충격시험은 강제벽에 평면끝단을 가진 봉형(rod shape) 시험편을 고속으로 충돌시킨 후 시험편의 변형형상을 측정하여 보존법칙(conservation law)을 이용한 해석,^(7~11) 충격파이론(shock wave theory)을 이용한 해석,^(12~15) 탄소성과동전파이론(elasto-plastic wave propagation theory)을 이용한 해석,^(6~18) 수치해석 프로그램을 이용한 해석^(19~23) 등에 의하여 재료의 고변형률속도 하에서의 특성을 분석하는 시험방법이다.

주로 금속재료의 동적항복응력을 결정하기 위하여 이용되는 보존법칙을 이용한 해석에 있어서 Taylor⁽⁷⁾와 Hawkyard⁽⁸⁾는 각각 운동량보존법칙과 에너지보존법칙을 이용하여 재료의 동적항복응력

*정회원, 연세대학교 기계설계학과

**정회원, 연세대학교 기계공학과 대학원

(dynamic yield stress)과 봉충격시험편의 충돌 완료 후의 변형형상들을 봉충격시험편 충격단의 초기 압축공칭변형률(initial compressive engineering strain)의 함수로 나타내었다. 이로부터 재료의 동적항복응력을 결정하고, 봉충격시험편의 충돌 완료 후의 변형형상간의 관계를 유도하였다. 한편 Gillis 등⁽⁹⁾은 Taylor에 의하여 제시된 운동량보존법칙을 수정 보완하여 봉충격 시험편의 변형형상으로부터 재료의 동적항복응력을 결정할 수 있는 방법을 제시하였으나, 기하학적 변형형상간의 관계가 유도되지 않아 Taylor와 Hawkyard의 이론과는 달리 실험결과로부터 이론의 타당성을 분석할 수 없는 단점이 있다.

본 연구에서는 Gillis 이론의 이와같은 단점을 보완하기 위하여 Gillis에 의하여 제시된 수정운동량 보존법칙과 Hawkyard에 의하여 제시된 에너지보존법칙을 일반화한 수정에너지보존법칙을 동시에 고려하여 재료의 동적항복응력을 결정할 수 있으며, 봉충격시험편의 충돌완료 후의 변형형상간의

관계를 고려할 수 있는 이론을 제시하였다. 또한 기존의 실험결과로부터 제시된 이론의 타당성을 분석하였으며, 시험편의 변형형상의 측정오차가 동적항복응력의 결정에 미치는 영향을 분석하였다. 한편 압축공기를 이용한 시험편 가속정치에 의하여 봉충격시험을 수행하여 쾌삭황동(free-cutting brass)의 고변형률속도하에서의 변형특성과 동적항복응력을 결정하였다.

2. 이론해석

2.1 운동량 또는 에너지보존법칙을 이용한 해석

봉충격 시험편의 변형거동을 정확히 해석하기 위해서는 응력파동전파(stress wave propagation)를 고려한 해석이 요구되나, Taylor, Hawkyard, Gillis 등은 다음과 같은 가정 조건 하에서 단순화된 응력파동전파이론과 운동량보존법칙 또는 에너지보존법칙을 이용하여 재료의 동적항복응력을 결정할 수 있는 이론을 제시하였으며, 제시된 방정식을

Table 1 Conditions and equations used in momentum-based or energy-based theories

Theory	Momentum-based theory (Taylor's theory)	Energy-based theory (Hawkyard's theory)	Modified momentum-based theory (Gillis et al.'s theory)
Condition			
Kinematic conditions	$dh/dt=v$ $dx/dt=-(u+v)$ $ds/dt=u$	$dh/dt=v$ $dx/dt=-(u+v)$ $ds/dt=u$	$dh/dt=v=constant$ $dx/dt=-(u+v)$ $ds/dt=u$
Momentum equation of rigid body(undeformed part)	$Y = -\rho x (du/dt)$	$Y = -\rho x (du/dt)$	$Y = -\rho [d(xu)/dt]$
Interface conditions between deformed part and undeformed part:			
(a) continuity equation(mass conservation)	$A_o(u+v)=Av$	$A_o(u+v)=Av$	$A_o(u+v)=Av$
(b) momentum conservation	$Y(A - A_o) = \rho \cdot A_o(u+v)u$	(none)	considered in momentum equation of rigid body
(c) energy conservation	(none)	$A_o(u+v)Y \cdot \ln(A/A_o) = A_o(u+v)\rho u^2/2 + YA_o u$	(none)
Longitudinal compressive engineering strain	$e=1 - (A_o/A)$	$e=1 - (A_o/A)$	$e=1 - (A_o/A)$
Natation	h: deformed length x: undeformed length s: displacement of undeformed part t: time v: velocity of plastic front e: compressive engineering strain(compression is considered as positive)	u: velocity of undeformed part Y: dynamic yield stress ρ : density of material A_o : original area of rod A: deformed area of rod	

Table 1에 정리하였다.

○ 재료는 강완전소성체 (rigid-perfectly plastic material)이며 변형률속도에 관계없이 일정하다.

○ 봉충격시험편의 반경방향의 유동은 무시되고, 응력은 봉의 단면전체에 걸쳐 일정하다.

○ 충돌후 소성변형 부분은 정지한다.

이론의 전개에 있어서 Taylor와 Hawkyard는 동일한 운동조건 (kinematic condition), 강체운동방정식 (momentum equation of rigid body), 압축공칭변형률 (compressive engineering strain) 식을 사용하였으나, 계면조건 (interface condition)에 있어서는 상이한 방정식을 이용하였다. 즉 Taylor는

변형부분과 미변형부분 사이의 관계에 운동량보존 법칙을 적용하였고, Hawkyard는 에너지보존법칙을 적용하였다. 에너지보존법칙을 적용함에 있어 Hawkyard는 시험편의 운동에너지가 손실없이 소성일 (plastic work)로 전환된다고 가정하였다. 한편 Gillis 등은 Taylor 이론에서 적용한 봉충격 시험편의 미변형부분의 운동방정식과 변형부분과 미변형부분 사이의 운동량보존법칙을 동시에 고려한 시험편 전체의 운동방정식을 제시하였으며, 여기서 추가적인 가정조건으로서 변형길이의 증가량이 일정함을 고려하였다.

이와같은 조건 및 기본방정식으로부터 Table 2

Table 2 Relation between dynamic yield stress and geometrical features of deformed rod

Theory	Momentum-based theory (Taylor's theory)	Energy-based theory (Hawkyard's theory)	Modified momentum-based theory (Gillis et al.'s theory)
Relation between			
dynamic yield stress and compressive engineering strain	$\rho u^2/Y = e^2/(1-e)$ $\rho U^2/Y = e_o^2/(1-e_o)$	$\rho u^2/(2Y) = -\ln(1-e) - e$ $\rho U^2/(2Y) = \ln(1-e_o) - e_o$	(none)
undeformed length and compressive engineering strain	$\ln(x/L)^2 = 1/(1-e) - \ln(1-e) - 1/(1-e_o) + \ln(1-e_o)$ $\ln(X/L)^2 = 1 - 1/(1-e_o) + \ln(1-e_o)$	$x/L = (1-e_o)/(1-e)$ $X/L = (1-e_o)$	(none)
deformed length and compressive engineering strain	$h = -\int_0^x (1-e) dx$ $h = -\int_0^X (1-e) dx$	$h/L = (1-e_o) \ln[(1-e)/(1-e_o)]$ $H/L = (1-e_o) \ln[1/(1-e_o)]$	(none)
final total deformed length and final deformed/undeformed length	$L_r = H + X$	$L_r = H + X$	$L_r = H + X$
plastic wave velocity and compressive engineering strain	$v/(Y/\rho)^{1/2} = (1-e)^{1/2}$	$v/(Y/\rho)^{1/2} = [2^{1/2}(1-e)/e] [-\ln(1-e) - e]^{1/2}$	(none)
dynamic yield stress and geometrical features of deformed rod	(considered in above relation)	(considered in above relation)	$X/L = 1 - (v/U) (\rho U^2/Y)$ $= 1 - \alpha\beta$ $H/L = [\beta(1-X/L)^2] / [1 + \beta(1-X/L)] - \{[\beta(X/L)(1-X/L)] / [1 + \beta(1-X/L)^2]\}$ $\ln[\beta(X/L)/(1+\beta)]$
Notation	u: velocity of undeformed part of length U: initial impact velocity of rod x: undeformed length X: final undeformed length e: compressive engineering strain e _o : initial compressive engineering strain h: deformed length H: final deformed length L: initial length of rod L _r : final total deformed length v: plastic wave velocity ρ: density of material α: ρU ² /Y β: v/U		

와 같이 Taylor와 Hawkyard는 동적항복응력, 최종전체변형길이 (L_f , final total deformed length), 최종변형길이 (H , final deformed length), 최종미변형길이 (X , final undeformed length)를 초기압축공칭변형률 (initial compressive engineering strain)의 함수로 표시하였다. 이러한 관계식으로부터 봉충격시험편의 충격후의 변형형상간의 관계가 얻어지며, 봉충격시험후 시험편의 변형형상 측정으로부터 재료의 동적항복응력이 결정된다. 그러나 Gillis 등에 의한 이론에 있어서는 동적항복응력, 봉충격시험편의 변형형상이 초기압축공칭변형률의 함수로 표시될 수 없으므로 봉충격시험편의 충격 후의 변형형상간의 관계가 유도될 수 없으며 실험결과로부터 이론의 타당성을 분석할 수 없는 단점이 있다.

2.2 수정운동량과 수정에너지보존법칙을 이용한 해석

수정운동량보존법칙을 이용한 Gillis 이론의 단점을 보완하기 위하여 Gillis에 의하여 제시된 수정운동량보존법칙과 Hawkyard에 의하여 제시된 에너지보존법칙을 일반화한 수정에너지보존법칙을 동시에 고려한 수정운동량/에너지보존에 근거한 이론 (modified momentum/energy-based theory)을 제시하였다.

길이 L , 단면적 A_0 를 가지는 봉형시험편을 속도 U 로 Fig. 1(a)와 같이 강체벽 (rigid anvil)에 충돌시키면 시험편은 소성변형을 일으킨다. 충돌 후 시간 t 에서 시험편은 Fig. 1(b)와 같이 변형되며, 여기서 h 는 변형길이 (deformed length), x 는 미변형길이 (undeformed length), s 는 시험편 끝단의 변위, v 는 소성파의 전파속도, 그리고 u 는 미변형부분의 속도이다. 한편 충돌 후 $t+dt$ 에서 각 요소

의 증분은 Fig. 1(c)와 같다.

봉충격시험편을 강체벽에 충돌시킨 후 시간 t 의 미소증분 dt 에서 변형길이 h , 미변형길이 x , 시험편 끝단의 변위 s 의 증분은 식(1-3)과 같이 소성파의 전파속도 v 와 미변형부분의 속도 u 의 함수로 표시된다.

$$\frac{dh}{dt} = v \tag{1}$$

$$\frac{ds}{dt} = u \tag{2}$$

$$\frac{dx}{dt} = -(u+v) \tag{3}$$

기존이론에서 동일한 가정조건하에서 충돌시간 t 와 $t+dt$ 에서의 평형상태를 고려하면 Fig. 2와 같으며, 이로부터 변형 전 후의 질량보존으로부터 식(4)와 같은 연속방정식 (continuity equation)을 구할 수 있으며, 시험편의 운동량보존으로부터 식(5)와 같은 운동량방정식 (momentum equation)을 얻을 수 있다. 여기서 A 는 변형된 시험편의 단면적이며, ρ 는 시험편 재료의 밀도로서 일정한 것으로 가정하였다.

$$A_0(u+v) = Av \tag{4}$$

$$YA = -\rho A_0 \frac{d(xu)}{dt} \tag{5}$$

한편 미변형부분의 시간 t 와 $t+dt$ 에서의 운동에너지를 고려하면 운동에너지의 손실율 (loss rate of kinetic energy) E_L 은 식(6)과 같이 되며, 이와 같은 에너지손실이 균일압축의 소성일 (plastic work of homogeneous compression)로 전부 전환된다고 가정하고 식(3)을 이용하면 식(7)과 같은 에너지방정식 (energy equation)을 얻을 수 있다.

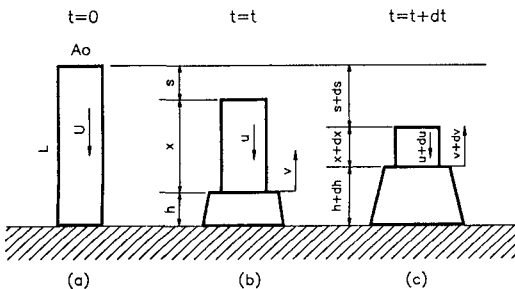


Fig. 1 Deformation process of a rod impinging on a rigid anvil

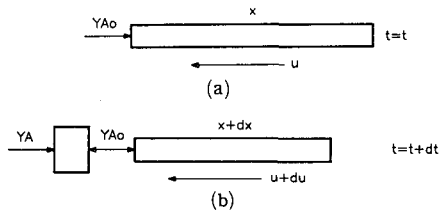


Fig. 2 Schematic illustration of the rear portion of the rod. The undeformed section shown in (a) has transferred some mass to the deformed section after a time interval (dt), as indicated in (b)

$$E_L = -\frac{1}{2}\rho \cdot A_0 \left[2x \cdot u \frac{du}{dt} + u^2 \frac{dx}{dt} \right] \quad (6)$$

$$A_0(u+v) \cdot Y \cdot \ln \frac{A}{A_0} = -\rho \cdot A_0 \cdot x \cdot u \frac{du}{dt} + \frac{1}{2}\rho \cdot A_0 \cdot u^2(u+v) \quad (7)$$

압축공칭변형률은 식(8)과 같이 정의되므로 운동량방정식 식(5)는 식(10)으로 표시될 수 있으며, 식(3), (4), (8)로부터 식(9)가 유도되므로 에너지 방정식 식(7)은 식(11)로 표시될 수 있다. 식(9)와 식(11)을 식(10)에 대입하면 식(12)가 유도되며 초기조건을 적용하면 식(13)과 같이 동적항복응력은 초기압축공칭변형률 e_0 의 함수로 표시된다. 여기서 이용되는 초기 조건은 시험편의 최초길이 L , 시험편의 최초 충돌속도 U , 초기압축공칭변형률 e_0 이다.

$$e = 1 - \frac{A_0}{A} \quad (8)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{u}{e} \quad (9)$$

$$-\frac{Y}{\rho(1-e)} = x \frac{du}{dt} + u \frac{dx}{dt} \quad (10)$$

$$x \frac{du}{dt} = \frac{1}{2} \frac{u^2}{e} - \frac{Y}{\rho \cdot e} \ln \frac{1}{1-e} \quad (11)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\rho u^2}{Y} = \frac{e}{1-e} - \ln \frac{1}{1-e} \quad (12)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\rho U^2}{Y} = \frac{e_0}{1-e_0} - \ln \frac{1}{1-e_0} \quad (13)$$

또한 운동량방정식 식(10)에 식(9)와 식(12)를 대입하고 적분하면 식(14)와 같이 미변형길이와 압축공칭변형률의 관계가 얻어지며, 충격완료시 식(15)와 같이 최종미변형길이 X 는 초기압축공칭변형률의 함수로 표시된다. 한편 식(1)과 식(3)으로부터 식(16)이 성립하고 미변형길이는 압축공칭변형률의 함수이므로 충격완료시 식(17)과 같이 최종 변형길이 H 는 초기압축공칭변형률의 함수로 표시되며, 최종전체변형길이 L_f 는 식(18)과 같다.

$$\int_L^X \frac{dx}{x} = \ln \frac{x}{L} = -\int_{e_0}^e \frac{e}{e(1-e) + 2(1-e)^2 \ln(1-e)} de \quad (14)$$

$$\int_L^X \frac{dx}{x} = \ln \frac{X}{L} = -\int_{e_0}^e \frac{e}{e(1-e) + 2(1-e)^2 \ln(1-e)} de \quad (15)$$

$$\frac{dh}{dx} = -1 + e \quad (16)$$

$$H = -\int_L^X (1-e) dx \quad (17)$$

$$L_f = H + X \quad (18)$$

식(13), (15), (17) 및 (18)과 같이 동적항복응력과 봉충격시험편의 충격완료 후의 변형형상들이 초기공칭압축변형률의 함수로 표시되었다. 이로부터 형상간의 관계가 유도되어 봉충격실험 결과로부터 이론의 타당성이 분석될 수 있으며, 변형형상의 측정으로부터 동적항복응력이 결정될 수 있다.

이와같은 봉충격시험에 있어서 봉충격시험편은 충돌과정중 충돌속도가 변화하므로 변형률속도(strain rate)도 변화하게 되어 일정 변형률속도를 얻을 수 없다. 그러나 보존법칙을 이용한 일차원적 해석에 있어서는 동적항복응력이 변형률속도에 관계없이 일정하다고 가정되므로 이에 해당되는 평균 변형률속도를 구하는 것이 필요하다. 이를 위하여 Taylor는 운동량보존법칙을 이용한 해석에 있어서 소성과동전파속도는 일정하고 충돌속도는 선형적으

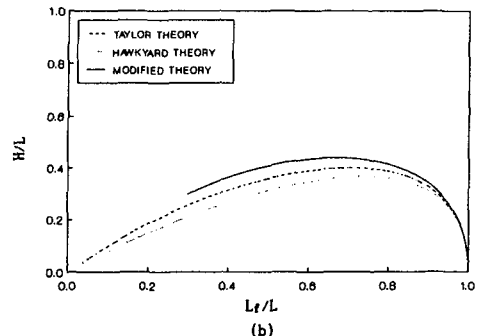
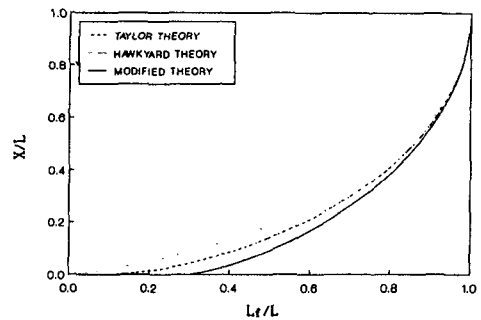


Fig. 3 Relation between nondimensionalized (a) final total deformed length L_f/L and final undeformed length X/L , (b) final total deformed length L_f/L and final deformed length H/L

로 변화한다는 추가적인 가정조건을 부여하여 식 (19)와 같은 변형률속도식을 제시하였으며 본 연구에서도 이를 이용하였다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{U}{2(L-X)} \quad (19)$$

2.3 이론의 비교

금속재료의 동적항복응력을 결정하기 위한 봉충격시험의 운동량보존법칙을 이용한 해석, 에너지보존법칙을 이용한 해석, 수정운동량과 수정에너지보존법칙을 이용한 해석에 있어서 봉충격시험편의 충격완료 후의 변형형상간의 관계가 유도될 수 있으므로 각 이론의 변형형상간의 관계를 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3(a)는 시험편의 변형 전의 길이 L 로 무차원화된 최종전체변형길이 L_f 와 최종미변형길이 X 의 관계로서, 동일한 최종전체변형길이에 대하여 수정이론은 기존이론에 비하여 작은 최종미변형길이를 나타내고 있다. 한편 X 가 0에 접근함에 따라 기존이론의 경우 L_f 도 0에 접근하는 반면 수정이론의 경우 L_f 은 유한한 값을 가지며, 과도한 변형하에서 미변형부분이 거의 잔류하지 않는 일반적인 실험결과와 비교하여 보면 수정이론이 실험결과와 보다 일치되는 것으로 판단된다. Fig. 3(b)는 무차원화된 최종전체변형길이 L_f 과 최종변형길이 H 의 관계로서 이론 전체에 걸쳐 L_f 이 감소함에 따라 H 는 증가 후 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 동일한 L_f 에 대하여 수정이론은 기존이론에 비하여 큰 최종변형길이를 나타내고 있다. 여기서 Fig. 3(a)와 3(b)에 있어서 미소 변형의 경우 각 이론은 근접한 결과를 보여 주고 있다.

각 이론에 있어서 동적항복응력은 봉충격시험편의 충격완료 후의 변형형상의 함수이므로 Fig. 4에 무차원화된 동적항복응력 Y 와 L_f 및 X 의 관계를 도시하였다. 동일한 시험편 재료와 충돌속도하에서 L_f 및 X 에 대하여 수정이론은 기존이론에 비하여

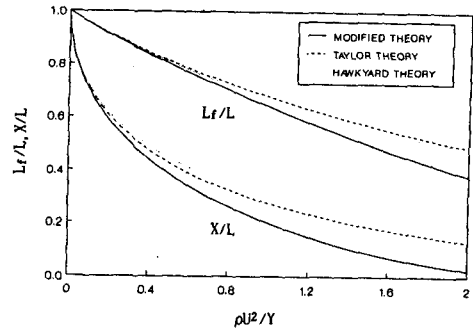


Fig. 4 Relation between nondimensionalized dynamic yield stress Y and final total deformed length L_f/L & final undeformed length X/L

큰 동적항복응력을 나타낸다. 여기서 변형형상간의 관계에서와 마찬가지로 미소 변형의 경우 각 이론은 근접한 결과를 보여 주고 있다.

한편 제시된 수정이론의 타당성을 실험결과로부터 분석하기 위하여 광범위한 시험조건하에서 봉충격시험을 수행한 House⁽²⁴⁾의 실험결과를 이용하였다. House는 폭약을 이용한 시험편 가속장치에 의하여 시험편 종횡비 (aspect ratio; L/D , 여기서 L 은 시험편의 길이, D 는 시험편의 직경) 1에서 10의 OFHC(oxygen free high conductivity) copper, DPTE(phosphorous deoxidized tellurium) copper, 2024-T4 Aluminum, 6061-T6 Aluinium 봉형시험편을 강체벽에 충돌시킨 후 변형형상을 측정하고, 수정운동량보존법칙을 이용한 Gillis의 이론에 의하여 동적항복응력을 결정하였으며, 사용된 재료의 정적기계적물성은 Table 3과 같다.

봉충격시험 완료 후 각 재료의 변형된 시험편으로부터 측정된 L_f/L 과 X/L 을 수정이론과 비교하여 보면 Fig. 5와 같이 실험결과와 수정이론은 비교적 일치하나, 2024-T4 Aluminum의 경우 L_f/L 에 대하여 X/L 이 비교적 작은 값을 나타내고 있다. 이와같은 변형범위의 증가는 Hawkward에

Table 3 Static mechanical properties of materials used in House's rod impact test⁽²⁴⁾

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
OFHC Copper	—	350	17.6	33.5
DPTE Copper	—	300	12.2	32.0
2024-T4 Aluminum	400	500	23.0	75.5
6061-T6 Aluminum	315	340	18.1	45.7

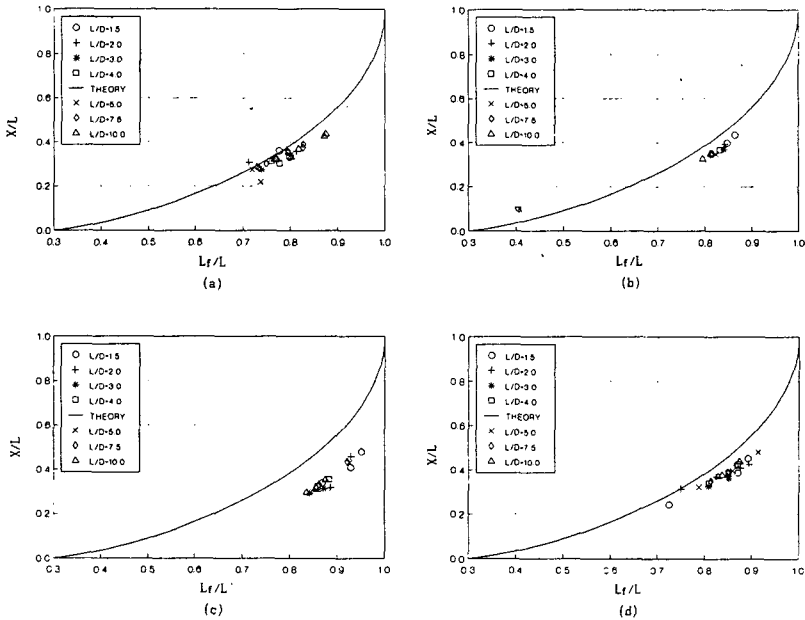


Fig. 5 Comparison between modified theory and test results by House (a) OFHC Copper, (b) DPTE Copper, (c) 2024-T4 Aluminum, and (d) 6061-T6 Aluminum

의하면 변형률경화(strain-hardening)현상에 의한 것으로 판단되며, Hawkyard는 변형률경화현상을 단순화한 모델을 이용하여 변형률경화현상에 의하여 최종전체변형길이 L_r 은 거의 변화하지 않으나, 미소한 변형률경화현상에 의해서도 시험편 충돌면의 직경과 최종미변형길이 X 는 상당한 영향을 받는다는 것을 이론적으로 예측하였다. 따라서 변형률경화를 나타내는 재료에 있어서 동적항복응력을

결정하기 위해서는 변형률경화를 고려한 해석이 필요하나, 최종전체변형길이를 이용하면 비교적 근사적인 동적항복응력을 결정할 수 있다.

최종전체변형길이를 이용하여 운동량보존법칙, 에너지보존법칙, 수정운동량과 수정에너지보존법칙에 의한 각 재료의 동적항복응력과 최종전체변형길이와 최종미변형길이를 동시에 고려하여 수정운동에너지보존법칙에 의한 결과를 Table 4에 나타내

Table 4 Dynamic yield stress of materials used in House's rod impact test

Theory	OFHC Copper	DPTE Copper	2024-T4 Aluminum	6061-T6 Aluminum
Momentum-based theory (MPa)	441.8	416.6	610.3	426.0
Energy-based theory (MPa)	455.0	425.6	618.6	434.5
Modified momentum-based theory (MPa)	522.6	498.9	817.5	540.5
Modified momentum/energy theory (MPa)	478.0	441.7	633.8	449.7
Strain-rate(/sec)	4.036×10^3	5.708×10^3	8.181×10^3	8.587×10^3

었다. 수정이론은 Taylor와 Hawkyard에 비하여 약간 큰 값을 나타내고 있으나, Gillis의 결과는 기타 이론에 비하여 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이는 Gillis 이론의 경우 최종미변형길이를 이용하고 있기 때문이며, 2024-T4 Aluminium의 경우 상당한 차이를 나타내고 있다. 한편 식(19)를 이용하여 결정된 변형률속도는 Table 4에 정리되어 있으며 약 $10^3 \sim 10^4$ /sec의 범위에 있다.

3. 실험

3.1 시험편

봉충격시험의 시험편은 평면끝단을 가진 원통형 봉(flat-ended cylindrical rod)으로서 사용재료는 61.5Cu-35.5Zn-3Pb 계열의 쾌삭황동(free-cutting brass; UNS No. C36000)이며, 직경 11 mm와 13 mm를 가진 원소재료부터 중형비가 2.0 및 3.0이 되도록 직경 10 mm, 길이 20 mm 및 30 mm로 가공되었다. 사용재료의 화학적성분 및 기계적물성은 각각 Table 5와 Table 6과 같으며, 시험편의 구별을 위하여 원소재 직경 11 mm의 재료는 번호 A, 직경 13 mm의 재료는 번호 B로 표시하였다.

3.2 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 6과 같이 시험편을 가속하기 위한 추진력을 제공하는 공기압장치(compressed-air system), 공기방출장치(air-release system), 시험편의 가속이 이루어지는 가속관(accelerating system), 시험편의 충돌속도를 측정하기 위한 속도측정장치(velocity measurement system), 시험편의 변형을 위한

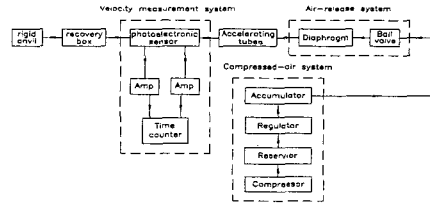


Fig. 6 Experimental setup for rod impact test

강체(rigid anvil), 그리고 충돌완료 후 변형된 시험편의 회수를 위한 회수함(recovery box)으로 구성되어 있다.

공기는 압축기(compressor)에 의하여 최대 15 MPa로 압축되어 대용량의 용기(reservoir)에 저장된 후 압력조정기(regulator)를 통하여 보조용기(accumulator)로 보내어지며 공기방출기를 통하여 가속관에 순간적으로 방출된다. 방출된 공기는 팽창하면서 가속관 입구에 삽입되어 있는 시험편을 가속시킨다. 가속관의 재질은 SM45C로서 길이는 1000 mm, 내경은 10 mm이다. 한편 시험편의 충돌 속도측정은 광섬유(optical fiber; Keyence FU-75)를 100 mm 간격의 두 위치에 고정시키고 광센서(photoelectronic sensor; Keyence FS2-65)에 연결시켜 시험편의 통과시간을, Time/Counter(Racal Dana Model 9015/11A)에 의하여 측정하여 결정한다. 강체는 고속으로 충돌하는 시험편의 변형을 위한 부분으로서 시험편의 충돌시 강체의 변형을 방지하기 위하여 HRB 500의 고경도 강판을 사용하였으며, 강판의 표면은 마찰효과를 감소시키기 위하여 정밀 가공되었고, 시험편의 비정상 충돌을 최

Table 5 Chemical composition of free-cutting brass

Material No.	Rod diameter before machining(mm)	Cu	Fe	Pb	Zn
A	φ11	60.89	0.006	2.57	Remainder
B	φ13	60.26	0.190	2.72	Remainder

Table 6 Static mechanical properties of free-cutting brass

Material No.	Tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation (%)
A	455	372	21.25
B	414	323	28.25

소화하기 위하여 강판의 표면은 시험편의 운동 방향에 수직이 되도록 설치하였다.

이와같이 고속충돌하에서 변형된 시험편은 확대투영기(profile projector)에 의하여 10배 확대되어 시험편의 동적항복응력 결정을 위하여 최종전체변형길이, 최종미변형길이, 최종변형길이, 충돌면의 변형직경 등의 변형형상이 측정되었다.

3.3 측정오차분석

봉충격시험에 있어서 재료의 동적항복응력의 결정은 봉충격시험 완료 후 시험편의 변형형상에 의하여 좌우되므로 변형형상의 측정오차가 동적항복응력의 결정에 미치는 영향을 분석해야 한다. 동적항복응력의 결정에 있어서 최종미변형길이의 측정은 최종전체변형길이에 비하여 측정상 어려움이 있으며, 이론에 있어서 강-완전소성체로 재료의 특성을 간주하였으나 변형률경화를 나타내는 재료의 동적항복응력을 결정하기 위해서도 최종전체변형길이를 이용하는 것이 필요하다.

동적항복응력은 식(13)과 같이 초기압축공칭변형률의 함수로 표시되며, 최종전체변형길이는 식(18)과 같이 초기압축공칭변형률의 함수이므로 최종전체변형길이의 측정오차를 식(20)과 같이 정의하면 동적항복응력의 오차는 식(21)과 같이 표시된다. 여기서 f 는 오차량이고, L_f 과 Y 는 실 최종전체변형길이 및 동적항복응력, L_f' 및 Y' 은 측정 최종전체변형길이 및 동적항복응력, 함수 g 는 L_f 및 f 의 함수이다.

$$L_f' = (1+f)L_f \tag{20}$$

$$(Y' - Y)/Y = g(L_f, f) \tag{21}$$

수정이론에서와 동일한 방법을 기존이론에 적용

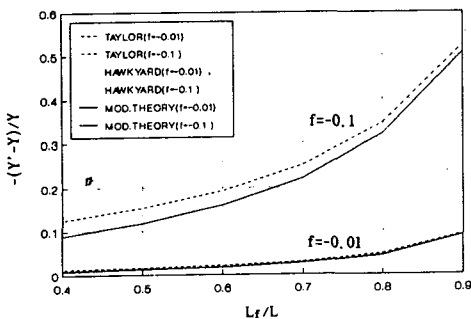


Fig. 7 Error analysis

하여 각 이론에 있어서 $f = -0.01$ 과 $f = -0.1$ 의 경우를 비교하여 보면 Fig. 7과 같다. 측정오차가 미소한 $f = -0.01$ 의 경우 각 이론은 거의 근접한 결과를 나타내며 동적항복응력의 오차는 약 10%내에 있다. 그러나 측정오차가 비교적 큰 $f = -0.1$ 인 경우 수정이론은 기존이론에 비하여 측정오차의 영향이 비교적 적으며, $f = -0.01$ 에 비하여 측정오차의 영향이 상당히 크다. 따라서 봉충격시험에 있어서 주 변형범위인 0.7~0.9에서 L_f 의 정밀한 측정이 요구된다.

4. 결과 및 검토

유사한 화학성분 및 기계적물성을 갖고 있는 두 종류의 쾌삭황동을 중핑비 2와 3의 봉형시험편으로 제작하여 충돌속도 100~150 m/s의 범위에서 실험한 결과 최종전체변형길이 L_f 과 충돌속도 U 의 관계는 Fig. 8과 같다. 최종전체변형길이는 사용된

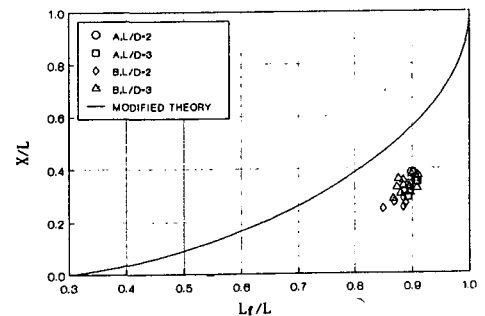
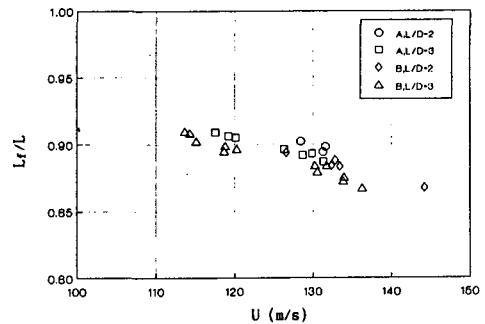


Fig. 9 Variation of nondimensionalized final undeformed length X/L with final total deformed length L_f/L for free-cutting brass

충돌속도 범위에서 거의 선형적으로 감소하고 있으며, 중횡비 2의 경우 중횡비 3에 비하여 동일 충돌속도에서 변형이 다소 작은 중횡비효과를 나타내고 있다.

한편 봉충격시험 완료 후 측정된 최종전체변형길이 L_f 과 최종미변형길이 X 의 관계를 수정이론과 비교하여 본 결과 Fig. 9와 같으며 House에 의하여 사용된 2024-T4 Aluminum과 마찬가지로 동일한 최종전체변형길이에 대하여 최종미변형길이의 실험결과와는 수정이론에 비하여 작은 현상을 나타내고 있다. 이와같은 변형범위의 증가는 변형률경화 현상에 의한 것으로 판단되며 동적항복응력을 결정하기 위해서는 변형률경화를 고려한 해석이 요구되나, 미소한 변형률경화현상에 의해서도 시험편 충돌면의 직경과 최종미변형길이는 상당한 영향을 받으나 최종전체변형길이는 거의 변하지 않는다는 Hawkyard의 이론적 예측에 의거 최종전체변형길이를 이용하여 쾌삭황동의 동적항복응력을 결정하

Table 7 Dynamic yield stress of free-cutting brass

Material No.	L/D	Dynamic yield stress (MPa)	Strain-rate (/sec)
A	2.0	604.75	5.149×10^3
	3.0	554.37	3.073×10^3
B	2.0	551.62	4.648×10^3
	3.0	507.44	3.142×10^3

였다.

동적항복응력 Y 와 충돌속도 V 의 관계는 Fig. 10과 같으며, 사용된 충돌속도 범위에서 동적항복응력은 거의 일정한 경향을 나타내고 있다. 동일한 중횡비에 있어서 재료A는 재료B에 비하여 다소 큰 동적항복응력을 나타내고 있으며, 동일한 재료에 있어서 중횡비 2는 중횡비 3에 비하여 동적항복응력이 다소 큰 중횡비효과를 나타내고 있다. 한편 식(19)에 의하여 계산된 변형률속도와 충돌속도의 관계는 Fig. 11과 같으며, 충돌속도 범위에서의 평균 변형률속도에서 동적항복응력을 Table 7과 같이 정리하였다. 변형률속도 범위 $10^3 \sim 6 \times 10^3$ /sec에서 쾌삭황동의 동적항복응력은 재료A의 경우 정적항복응력의 1.49~1.63배, 재료B의 경우는 1.57~1.71배로서 평균 1.6배 큰 값을 나타내고 있다.

5. 결 론

재료의 고변형률속도하에서의 변형특성을 분석하기 위하여 사용되고 있는 봉충격시험에 있어서 보 존법칙을 이용한 기존의 해석이론의 단점을 보완하기 위하여 새로운 이론을 제시하였다. 또한 기존의 실험결과로부터 제시된 이론의 타당성을 분석하였으며 시험편의 변형형상의 측정오차가 동적항복응력의 결정에 미치는 영향을 분석하였다. 한편 압축공기를 이용한 시험편 가속장치에 의하여 쾌삭황동의 고변형률속도하에서의 변형특성과 동적항복응력을 결정하였다.

(1) 수정운동량보존법칙과 수정에너지보존법칙을 동시에 고려한 이론을 제시하였으며, 수정이론은 기존이론에 비하여 실험결과와 비교적 일치한다.

(2) 봉충격시험 완료 후 변형형상의 측정오차가

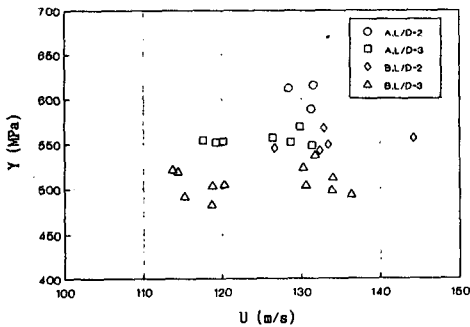


Fig. 10 Variation of dynamic yield stress Y with impact velocity U for free-cutting brass

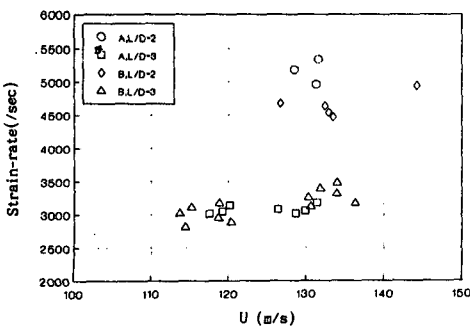


Fig. 11 Variation of strain-rate with impact velocity U for free-cutting brass

동적항복응력에 미치는 영향은 수정이론이 기존이론에 비하여 작은 경향을 나타낸다.

(3) 변형률속도 범위 $10^3 \sim 6 \times 10^3/\text{sec}$ 에서 쾌삭황동의 동적항복응력은 정적항복응력의 1.6배 큰 값을 나타낸다.

(4) 변형률경화를 나타내는 재료의 동적항복응력을 결정하기 위해서는 변형률경화를 고려한 해석이 필요하나, 수정이론에 의하여 근사적인 동적항복응력을 결정할 수 있다.

후 기

이 논문은 1992년도 연세대학교 학술연구비에 의하여 연구된 것입니다.

6. 참고문헌

- (1) Zukas, J.A., et al., 1982, "Impact Dynamics," John Wiley & Sons, New York.
- (2) Jonès, N., 1989, "Structural Impact," Cambridge University Press.
- (3) Zukas, J.A., et al., 1990, "High Velocity Impact Dynamics," John Wiley & Sons, New York.
- (4) Bitans, K. and Whitton, P.W., 1972, "High-Strain-Rate Investigations, with Particular Reference to Stress/Strain Characteristics," Int. Metal. Rev., Vol. 17, pp. 66~78.
- (5) Holzer, A.J., 1979, "A Tabular Summary of Some Experiments in Dynamic Plasticity," J. Eng. Mat. Tech, Trans. ASME, Vol. 101, pp. 231~237.
- (6) Staker, M.R., et al. 1985, "High Strain Rate Testing," in Metals Handbook Ninth Edition, Vol. 8, American Society for Metals.
- (7) Taylor, G.I., 1948, "The Use of Flat-ended Projectiles for Determining Dynamic Yield Stress," Proc. R. Soc., A194, pp. 289~299.
- (8) Hawkyard, J.B., 1969, "A Theory for the Mushrooming of Flat-ended Projectiles Impinging on a Flat Rigid Anvil, Using Energy Considerations," Int. J. Mech. Sci., Vol. 11, pp. 313~333.
- (9) Jones, S.E. and Gillis, P.P., 1987, "On the Equation of Motion, of the Undeformed Section of a Taylor Impact Specimen," J. Appl. Phys., Vol. 61, No. 2, pp. 499~502.
- (10) Gillis, P.P., et al., 1987, "Some Further Results on the Taylor Impact Test," Mechanics of Materials, Vol. 6, pp. 293~301.
- (11) Gillis, P.P. and Jones, S.E., 1989, "A Direct Correlation of Strength with Impact Velocity in the Taylor Test," J. Eng. Mat. Tech., pp. 327~330.
- (12) Lee, E.H. and Tupper, S.J., 1954, "Analysis of Plastic Deformation in a Steel Cylinder Striking a Rigid Target," J. Appl. Mech., Vol. 21, pp. 63~70.
- (13) Hutchings, I.M., 1979, "Estimation of Yield Stress in Polymers at High Strain-Rates using G. I. Taylor's Impact Techniques," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 26, pp. 289~301.
- (14) Hutchings, I.M. and O'Brien, T.J., 1981, "Normal Impact of Metal Projectiles against a Rigid Target at Low Velocities," Int. J. Mech. Sci., Vol. 23, pp. 255~261.
- (15) 伊達秀文, 1984, "一端衝擊法による高ひずみ速度下でのポリ塩化ビニルの降伏應力の評價," 材料, 第33卷, 第375號, pp. 1482~1487.
- (16) 伊達秀文, 1982, "塑性仕事による温度上昇を考慮した有限長棒内の弾塑性の傳について," 材料, 第31卷, 第350號, pp. 1073~1079.
- (17) 伊達秀文, 1990, "高ひずみ速度下における廣いひずみ域に適用できる構成式の形式について," 材料, 第39卷, 第447號, pp. 1657~1661.
- (18) 伊達秀文, 1992, "高ひずみ速度下における廣いひずみ域に適用できる構成式の時間特性形," 材料, 第41卷, 第460號, pp. 23~27.
- (19) Wilkins, M.L. and Guinan, M.W., 1973, "Impact of Cylinders on a Rigid Boundary," J. Appl. Phys., Vol. 44, No 3, pp. 1200~1206.
- (20) Gust, W.H., 1982, "High Impact Deformation of Metal Cylinders at Evaluated Temperatures," J. Appl. Phys., Vol. 53, No. 5, pp. 3566~3575.
- (21) Johnson, G.R. and Cook, W.H., 1983, "A Constitutive Model and Adta for Metals Subjected to Large Strains High Strain Rates and High Temperatures," Proceedings of Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983.

- (22) Johnson, G.R. and Holmquist, T.J., 1988, "Evaluation of Cylinder-Impact Test Data for Constitutive Model Constants," J. Appl. Phys., Vol. 64, No. 5, pp. 3901~3910.
- (23) Zerilli, F.J. and Armstrong, R.W., 1987, "Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations," J. Appl. Phys., Vol, No. 5, pp. 1816~1825.
- (24) House, J.W., 1989, "Taylor impact testing," AFATL-TR-89-41.