

〈論 文〉

봉충격시험에 의한 동합금의 동적 항복응력 결정

이정민* · 민옥기**

(1994년 10월 28일 접수)

Determination of Dynamic Yield Stress of Copper Alloys Using Rod Impact Test

Jeong-Min Lee and Oak-Key Min

Key Words : Rod Impact Test (봉충격시험), Copper Alloys (동합금) Dynamic Yield Stress (동적 항복응력), Strain-Rate Sensitivity (변형률속도 민감도) Hydrocode (유체동역학 프로그램)

Abstract

The deformed shape of rod specimen of copper alloys was measured after the high-velocity impact against a rigid anvil and analyzed with one-dimensional theory to determine dynamic yield stress and strain-rate sensitivity which is defined as the ratio of dynamic yield stress to static flow stress. The effect of two-dimensional deformation on the determination of dynamic yield stress by the one-dimensional theory, was investigated through comparison with the analysis by hydrocode. It showed that the one-dimensional theory is relatively consistent with two-dimensional hydrocode in spite of its simplicity in analysis.

1. 서 론

고변형률속도 (high-strain-rate)에서 재료의 변형 거동을 분석하기 위하여 다양한 시험방법이 이용되고 있으며, 특히 재료의 압축특성을 분석하기 위한 시험방법으로 낙하충격시험 (drop weight test), 홉킨슨봉시험 (Hopkinson bar test), 반무한봉시험 (semi-infinite bar test), 봉충격시험 (rod impact test), 판충격시험 (plate impact test) 등이 이용되고 있다.^(1~3)

봉충격시험은 고변형률속도 범위의 시험방법 중에서 대변형을 얻을 수 있는 시험으로서 강체벽 (rigid anvil)에 평면끝단을 가진 봉형시험편 (flat-

ended cylindrical rod specimen)을 고속으로 충돌시킨 후 시험편의 변형형상을 측정하여 보존법칙 (conservation law)을 이용한 해석, 충격파전파 (shock wave propagation) 이론을 이용한 해석, 탄소성파전파 (elasto-plastic wave propagation) 이론을 이용한 해석, 유한차분 및 유한요소 수치해석 프로그램을 이용한 해석 등에 의하여 재료의 구성 방정식을 결정하는 시험방법이다.⁽⁴⁾

보존법칙을 이용한 해석은 재료를 속도비의존성 강완 전소성체 (rate-independent rigid-perfectly plastic material)로 가정하고 응력과 전파의 단순화에 근거한 일차원 해석이론이다. 주로 금속재료의 동적 항복응력 (dynamic yield stress)을 결정하기 위하여 이용되는 보존법칙을 이용한 해석에 있어서 Taylor⁽⁵⁾와 Hawkyard⁽⁶⁾는 각각 운동량보존 법칙과 에너지보존법칙을 이용하여 재료의 동적 항

*정회원, 국방과학연구소

**정회원, 연세대학교 기계설계학과

복응력과 봉충격시험편의 충돌완료 후의 변형형상을 봉충격시험편 충격단의 초기공칭 압축변형률 (initial nominal compressive strain)의 함수로 나타내었다. 이로부터 봉충격시험편의 변형형상간의 관계를 유도하였으며, 재료의 동적 항복응력을 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 한편 Gillis 등⁽⁷⁾은 Taylor에 의하여 제시된 운동량보존법칙을 수정 보완하여 봉충격시험편의 변형형상으로부터 재료의 동적 항복응력을 결정할 수 있는 방법을 제시하였으나, Taylor와 Hawkyard의 이론과는 달리 재료의 변형거동을 지배하는 변수간의 관계를 얻을 수 없으며 실험결과로부터 이론의 타당성을 분석할 수 없는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 민욱기 등⁽⁴⁾은 Gillis 등에 의하여 제시된 수정 운동량 보존법칙과 Hawkyard에 의하여 제시된 에너지보존법칙을 일반화한 수정 에너지보존법칙을 동시에 고려한 수정 운동량 및 에너지보존법칙에 근거한 이론(modified momentum and energy-based theory)을 제시하였다.

본 논문에서는 봉충격시험에 의하여 기계부품의 중요 소재로 이용되고 있는 동합금의 동적변형특성을 분석하고자 한다. 봉형시험편을 고속으로 강체에 충돌시킨 후 변형형상을 측정하고 민욱기 등에 의해 제시된 이론에 의하여 해석을 수행하여 동적 항복응력과 재료의 정적 유동응력에 대한 동적항복응력의 비인 변형률속도 민감도(strain-rate sensitivity)를 결정하였다. 또한 이차원 유체동역학 프로그램(hydrocode)에 의한 해석을 수행하여 일차원 해석이론과 비교함으로써, 일차원 해석에 의한 동적 항복응력의 결정에 있어서 이차원 변형현상이 미치는 영향을 분석하였다.

2. 일차원 해석이론

봉충격시험편을 고속으로 강체벽에 충돌시키면 시험편은 소성변형을 일으키며, 충돌후 임의의 시간에서 변형길이(deformed length), 미변형길이(undeformed length), 시험편 끝단 변위의 변화는 소성과의 전파속도와 미변형부분의 속도의 함수로 표시될 수 있다. 재료는 속도비의존성 강완전소성체이고, 봉충격시험편의 축 직각방향의 유동은 무시되고 응력은 봉의 단면 전체에 걸쳐 일정한 일차원 변형으로 간주하며, 충돌후 소성변형 부위는 정지한다는 가정조건하에서 변형부분과 미변형부분의

평형상태를 고려하면 연속방정식(continuity equation), 운동량방정식(momentum equation), 에너지방정식(energy equation)을 얻을 수 있다. 이로부터 봉충격시험편의 초기 운동에너지로 무차원화된 동적 항복응력 Y 는 식(1)과 같이 초기공칭 압축변형률(initial nominal compressive strain) e_0 의 함수로 표시된다.

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

여기서, ρ 는 재료의 밀도이고 V 는 시험편의 초기 충돌속도이다. 또한 미변형길이 x 및 변형길이 h 는 식(2) 및 (3)과 같이 공칭 압축변형률 e 의 함수로 표시될 수 있으며, 변형완료 후 최종 미변형길이 X 및 최종 변형길이 H 는 초기공칭 압축변형률의 함수로 식(4) 및 (5)와 같이 나타내어 질수 있다.

$$\begin{aligned} \int_L^x \frac{dx}{x} &= \ln \frac{x}{L} \\ &= - \int_{e_0}^e \frac{e}{e(1-e) + 2(1-e)^2 \ln(1-e)} de \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{dh}{dx} = -1 + e \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \int_L^X \frac{dx}{x} &= \ln \frac{X}{L} \\ &= - \int_{e_0}^0 \frac{e}{e(1-e) + 2(1-e)^2 \ln(1-e)} de \end{aligned} \quad (4)$$

$$H = - \int_L^X (1-e) dx \quad (5)$$

변형형상의 기하학적 조건으로부터 최종 전체변형길이 L_f 는 식(6)과 같이 최종 변형길이 H 와 최종 미변형길이 X 의 합으로 표시될 수 있으므로 초기공칭 압축변형률의 함수가 된다.

$$L_f = H + X \quad (6)$$

이와 같이 동적 항복응력과 봉충격시험편의 충돌완료 후의 변형형상들이 초기공칭 압축변형률의 함수로 표시되었다. 이로부터 동적 항복응력 및 변형형상간의 관계가 유도될 수 있으며, 변형형상의 측정으로부터 동적 항복응력이 결정될 수 있다. 봉충격시험에 있어서 봉충격시험편은 충돌과정중 충돌속도가 변화하므로 변형률속도도 변화하게 되어 일

정 변형률속도를 얻을 수 없다. 그러나 보존법칙을 이용한 일차원적 해석에 있어서는 동적 항복응력이 변형률속도에 관계없이 일정하다고 가정되므로 이에 해당되는 평균 변형률속도를 구하는 것이 필요하다. 이를 위하여 Taylor는 운동량보존법칙을 이용한 해석에 있어서 소성파의 전파속도는 일정하고 충돌속도는 선형적으로 감소한다는 추가적인 가정 조건을 부여하여 식(7)와 같은 변형률속도 식을 제시하였으며, 본 논문에서도 이를 이용하였다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{2(L-X)} \quad (7)$$

3. 실험

3.1 시험편

봉충격시험에 사용된 시험편의 재료로는 기계부품에 중요한 소재로 이용되고 있는 동합금인 탈인산동(DLP ; phosphorized, low residual phosphorous ; UNS No. C12000), 70 Cu-30 Zn계열의 황동(Catridge Brass ; UNS No. C26000), 직경 11 mm 및 13 mm를 가진 원소재로부터 가공된 61.5 Cu-35.5 Zn-3 Pb계열의 두 종류의 패삭황동(free-cutting Brass ; UNS No. C36000)이 사용되었다. 사용재료의 기계적 정적물성을 Table 1에 정리하였다.

시험편의 형상은 평면끝단을 가진 봉형으로서 직경은 10 mm이고, 종횡비(aspect ratio ; L/D ; L은 시험편의 초기길이, D는 시험편의 초기직경)로 2와 3을 갖는 패삭황동을 제외하고 종횡비 3~5의 범위에 있으며, 탈인산동의 경우는 추가적으로 종횡비 2의 시험편도 사용되었다.

3.2 실험장치 및 방법

실험장치는 시험편을 가속하기 위한 추진력을 제

공하는 공압장치(compressed-air system), 공기방출장치(air-release system), 시험편장착기(specimen loader), 시험편의 가속이 이루어지는 가속관(accelerating tube), 시험편의 충돌속도를 측정하기 위한 속도측정장치(velocity measurement system), 시험편의 변형을 위한 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, 볼밸브(ball valve)와 시험편장착기 내부에 설치된 다이어프램(diaphragm)으로 구성된 공기방출기를 통하여 가속관에 순간적으로 방출된다. 방출된 공기는 팽창하면서 시험편장착기에 삽입되어 있는 시험편을 가속시킨다. 가속관의 재질은 중탄소강(SM45C)으로서 길이는 1000 mm, 내경은 10 mm이다.

한편 시험편의 충돌속도 측정은 가속관의 출구와 강체표면 사이에 설치된 광섬유(optical fiber ; Keyence FU-75)를 100 mm 간격의 두위치에 고정시키고 광센서(photoelectronic sensor ; Keyence FS2-65)에 연결시켜 시험편의 통과시간을 timer/counter(Racal Dana Model 9015/11A)에 의하여 측정하여 결정한다. 강체는 고속으로 충돌하는 시험편의 변형을 방지하기 위하여 브리넬경도 500의 고강도강판을 사용하였으며, 강판의 표면은 마찰효과를 감소시키기 위하여 정밀가공되었고, 시험편의 비정상충돌을 최소화하기 위하여 강판의 표면은 시험편의 운동방향에 수직이 되도록 설치하였다.

봉충격시험편은 강체벽에 고속으로 충돌후 변형형상이 측정되었다. 강체에 충돌시킨 시험편중에서 강체에 수직으로 충돌되지 않았거나 좌굴이 발생한

Table 1 Static mechanical properties of copper alloys

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Material density (g/cm ³)
DLP Copper	-	310.2	8.89
Catridge Brass	349.8	414.8	8.53
Free-cutting Brass(A)	372.0	455.1	8.50
Free-cutting Brass(B)	323.2	414.5	8.50

시험편은 해석대상에서 제외시켰으며 충돌표면에 미소균열이 발생한 시험편도 해석에서 제외시켰다.

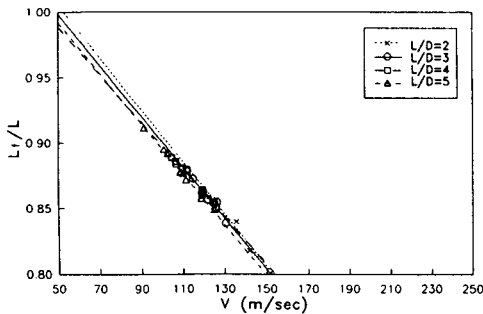
4. 결과 및 검토

4.1 변형 형상

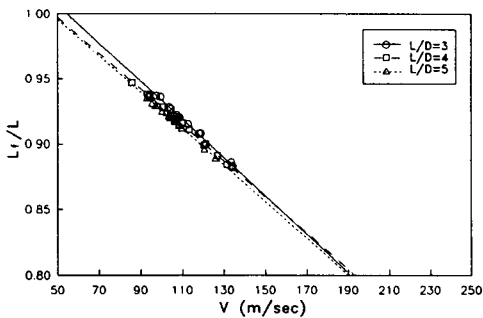
동합금의 봉충격시험편을 강체에 충돌시킨 후 변형형상을 측정하여, 시험편의 초기길이를 무차원화된 최종 전체변형길이 L_f/L 의 충돌속도 V 에 따른 변화를 각 재료에 대하여 도시하여 본 결과 Fig. 1과 같다. L_f/L 은 사용된 충돌속도범위에서

충돌속도의 증가와 함께 선형적으로 감소하고 있으며, 종횡비의 증가에 따라 동일 충돌속도에서 L_f/L 이 다소 작은 현상을 나타내고 있다. 이는 변형률속도가 식(7)에 의하면 충돌속도에 비례하고 시험편의 길이에 반비례하므로, 시험편길이가 증가할수록 변형률속도가 감소하는 것에 기인하며, 변형률속도가 클수록 변형저항이 증가하는 일반적인 실험결과와 일치하고 있다.

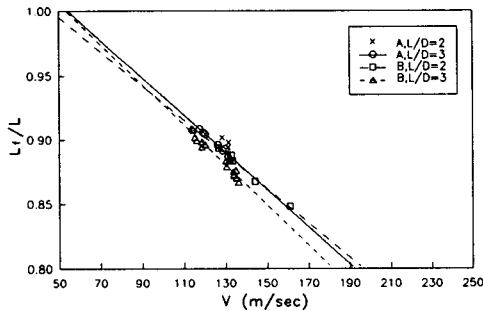
L_f/L 의 V 에 따른 변화를 종횡비 3의 경우에 대하여 Fig. 2에 도시하였다. 동일한 충돌속도에서 황동과 캐삭황동은 거의 유사한 L_f/L 을 나타내고 있으나 탈인산동은 다소 작은 값을 나타내고 있다. 여기서 Fig. 2에 도시된 바와 같이 재료별로 기울기의 차이를 보여 주고 있으며, 이는 재료의 동적 항복응력의 차이에 기인한다. 시험편의 초기길이를 무차원화된 최종 전체변형길이와 시험편의 운동에너지로 무차원화된 동적 항복응력의 관계로부터 L_f/L 의 감소율은 ρ/Y 에 비례하므로 동적 항복응력 Y 가 클수록, 그리고 재료의 밀도가 작을수록 L_f/L 의 감소율은 작아진다.⁽⁴⁾ 따라서 거의 유사한 재료밀도를 갖고 있는 동합금의 경우 동일한 충돌속도에서 유사한 L_f/L 을 갖는 즉, 동적 항복응력이 유사한 황동과 캐삭황동의 경우 감소율이 유사하며, L_f/L 이 작은 탈인산동의 경우는 감소율이



(a) DLP copper



(b) Cartridge brass



(c) Free-cutting brass A and B

Fig. 1 Variation of nondimensionalized final total deformed length L_f/L with impact velocity V

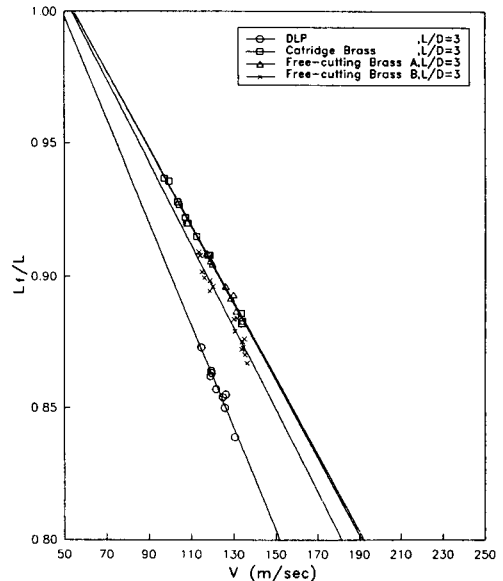


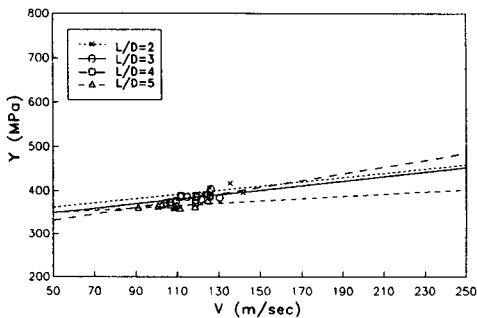
Fig. 2 Variation of nondimensionalized final total deformed length L_f/L with impact velocity V for copper alloys having $L/D=3$

크다.

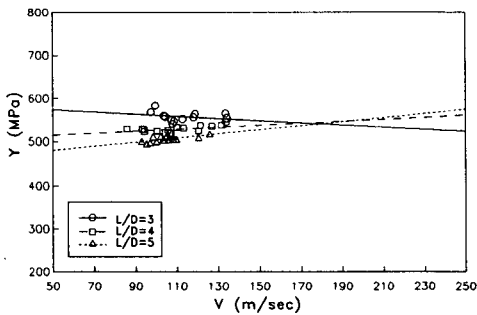
4.2 동적 항복응력 및 변형률속도

봉충격시험편의 최종 전체변형길이, 충돌속도, 그리고 재료밀도를 이용하여 제시된 해석이론에 의하여 결정된 동합금의 동적 항복응력의 충돌속도에 따른 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 동적 항복응력은 사용된 충돌속도 범위에서 충돌속도의 증가에 따라 다소 증가하며, 최종 전체변형길이의 시험편 길이에 대한 의존성 분석에서 예측된 바와 같이 중형비가 증가함에 따라 동적 항복응력이 감소하는

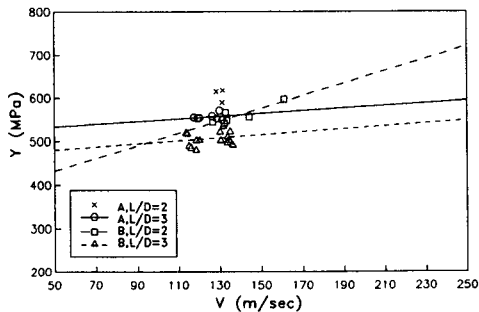
경향을 나타내고 있다. 이와 같은 동적 항복응력의 충돌속도 및 시험편길이 의존성은 변형률속도에 기인하는 것으로서 이의 분석을 위하여 식(7)에 의하여 중형비 별로 결정된 변형률속도의 충돌속도에 따른 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 식(7)에 있어서 변형률속도는 충돌속도에 비례하고 시험편의 초기 길이에 반비례하므로 변형률속도는 충돌속도의 증가에 따라 증가하며 중형비가 감소할 수록 증가한다. 한편 이와 같은 동적 항복응력 및 변형률속도와 충돌속도의 관계로부터 동적 항복응력과 변형률속도의 관계를 도출하여 본 결과 Fig. 5와 같으며,



(a) DLP copper

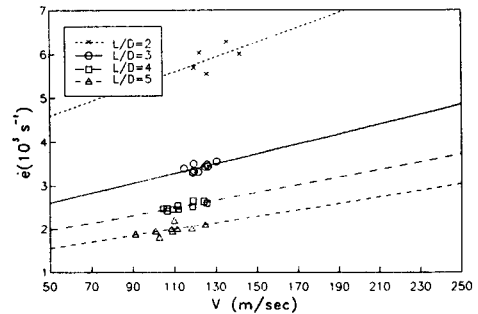


(b) Catridge brass

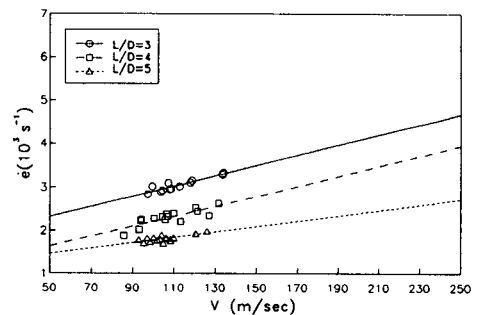


(c) Free-cutting brass A and B

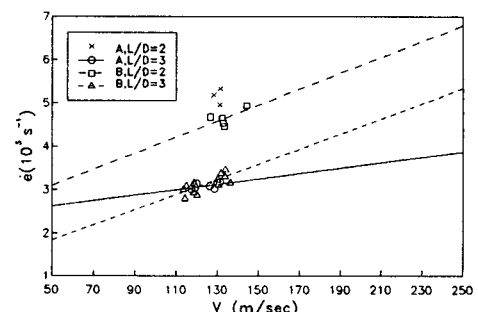
Fig. 3 Variation of dynamic yield stress Y with impact velocity V



(a) DLP copper



(b) Catridge brass



(c) Free-cutting brass A and B

Fig. 4 Variation of strain-rate $\dot{\epsilon}$ with impact velocity V

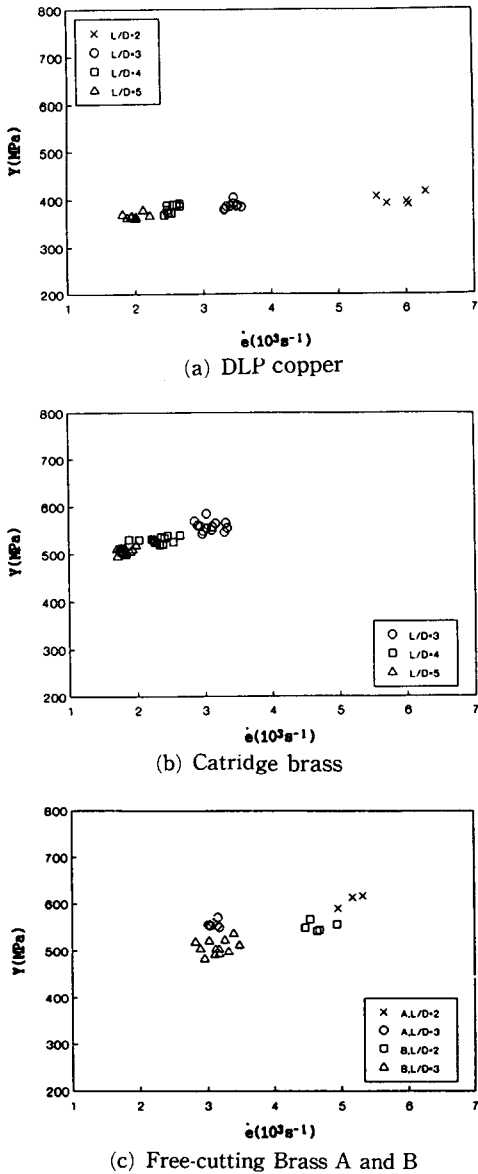


Fig. 5 Variation of dynamic yield stress Y with strain-rate $\dot{\epsilon}$ for

동적 항복응력은 변형률속도의 증가에 따라 증가하고 있음을 보여 주고 있다.

4.3 변형률속도 민감도

봉충격시험에 의하여 결정된 동적 항복응력으로부터 사용된 재료의 변형률속도에 대한 의존성을 분석할 수 있으며 이를 위하여 동적 항복응력의 정적 항복응력에 대한 비인 변형률속도 민감도

(strain-rate sensitivity)를 분석하였다. 봉충격시험에 있어서 시험편은 변형과정중 충돌시간과 봉내부 위치에 따라 상이한 변형률속도를 갖기 때문에 재료의 변형특성은 속도의존성 구성방정식에 의하여 표시되어야 하나, 보존법칙을 이용한 해석이론에 있어서는 재료의 변형특성이 속도비의존성 구성방정식인 일정 동적 항복응력으로 가정되었으므로 결정된 동적 항복응력은 평균 변형률속도에서의 평균 유동응력(average flow stress)이다. 따라서 정적 항복강도와 정적 인장강도의 평균을 공칭 정적 항복응력(nominal static yield stress) σ_s 로 설정하였으며, 봉충격시험에 의하여 결정된 동적 항복응력은 진압축응력(true compressive stress)이므로 공칭정적 항복응력과 비교하기 위하여 식(8)과 같이 정의되는 영구 소성변형률(permanent plastic strain)과 진응력(true stress)과 공칭응력(nominal stress)의 관계로부터 공칭동적 항복응력(nominal dynamic yield stress) σ_d 로 환산되었다. 이와 같이 정의된 σ_s 와 σ_d 로부터 변형률속도 민감도는 σ_d/σ_s 로 표시될 수 있으며, 본 논문에서 사용된 재료의 변형률속도 민감도를 Fig. 6에 변형률속도의 변화에 따라 도시하였다.

$$e_p = [1 - L_f/L] [1 - X/L] \tag{8}$$

일차원 해석에 의하여 결정된 변형률속도 민감도의 타당성을 분석하기 위하여 Johnson과 Cook⁽⁸⁾에 의하여 제시된 구성방정식에 의한 변형률속도 민감도와 비교분석하였다. Johnson과 Cook은 이차원 유한요소 기초한 유체동역학 프로그램(hydrocode)용 구성방정식으로서 식(9)와 같이 등가유동응력(equivalent flow stress) σ_f 가 등가소성 변형률(equivalent plastic strain) ϵ , 무차원 등가소성 변형률속도(dimensionless equivalent plastic strain-rate) $\dot{\epsilon}^*$, 그리고 등가온도(homologous temperature) T^* 의 함수인 열연화현상을 고려한 속도의존성 구성방정식을 이용하였으며, 이 구성방정식을 이용하여 봉충격시험편의 변형형상과 비교 분석하였다.

$$\sigma_f = [A + B\epsilon^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}] \tag{9}$$

여기서, $\dot{\epsilon}^*$ 와 T^* 는 각각 식(10) 및 (11)과 같이 정의되며, $\dot{\epsilon}$ 와 $\dot{\epsilon}_0$ 는 각각 등가소성 변형률속도와 변형률속도 1.0/sec 이고, T 는 현재 재료의 온도, T_f 은 실험실 온도, T_m 은 재료의 용융온도이다.

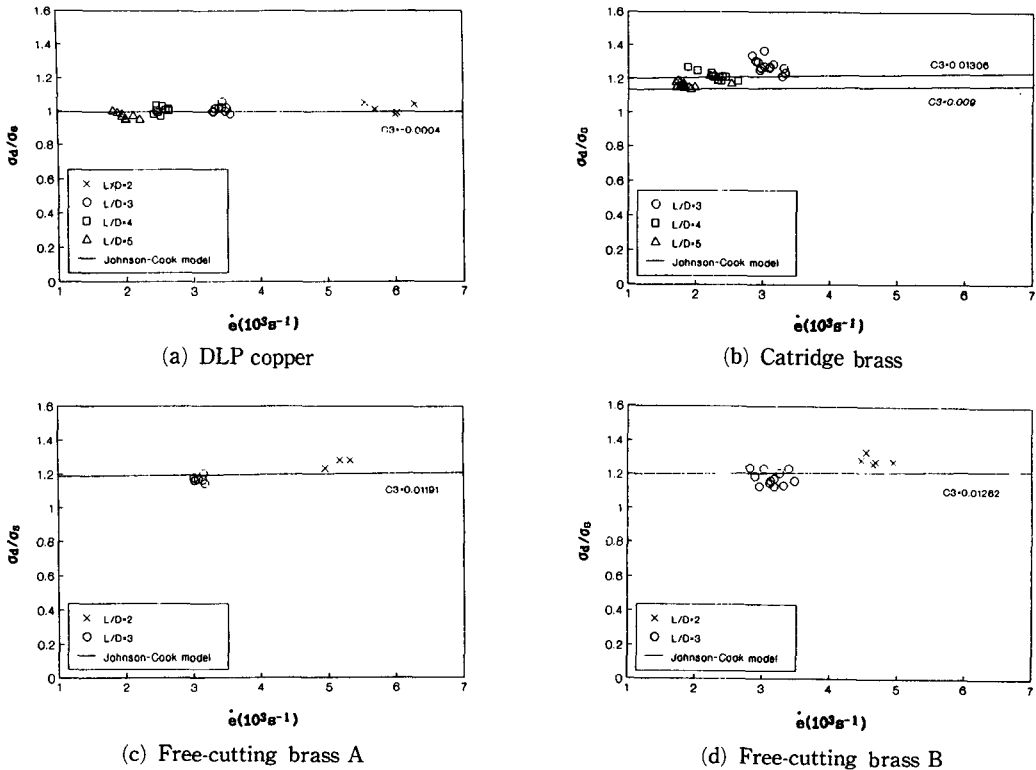


Fig. 6 Variation of strain-rate sensitivity σ_d/σ_s with strain-rate $\dot{\epsilon}$

Table 2 Constants for catridge brass in Johnson-Cook strength model

Material	A(MPa)	B(MPa)	C	n	m	Remarks
Catridge Brass	111.69	504.69	0.009	0.42	1.68	1000°F Annealed/60 min

$$\epsilon^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0 \quad (10)$$

$$T^* = [T - T_r] / [T_m - T_r] \quad (11)$$

한편 A, B, C, m, n은 실험에 의하여 결정되는 파라미터로써 일부 금속재료에 대한 값이 정리되어 있으며⁽⁸⁾, 본 논문에서 사용된 황동과 유사한 재료특성을 갖는 재료의 파라미터 값을 Table 2에 정리하였다.

본 논문에서 재료의 정적물성을 결정하기 위한 실험에서 사용된 변형률속도인 $10^{-3}/\text{sec}$ 를 정적 등가소성 변형률속도 $\dot{\epsilon}_0$ 로 하여 식(9)의 변형률속도 항을 이용하여 변형률속도 민감도를 식(12)와 같이 정의하였다.

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = \frac{1 + C \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)}{1 + C \ln(\dot{\epsilon}_s / \dot{\epsilon}_0)} \quad (12)$$

식(12)와 Johnson-Cook 모델에서 고려된 황동에

대한 파라미터 C값을 이용하여 변형률속도의 변화에 따른 황동의 변형률속도 민감도를 결정된 후 봉충격시험에 의한 변형률속도 민감도와 비교하여 Fig. 6(b)에 나타내었다. Johnson-Cook 모델은 평균 1.15의 변형률속도 민감도를 나타내어 봉충격시험에 의한 평균값 1.2보다 다소 작으며, 봉충격시험에 의한 변형률속도 민감도는 변형률속도의 증가에 따라 다소 증가하는 반면 Johnson-Cook 모델은 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 그러나 보존법칙을 이용한 일차원 해석이론에 의하여 평균 변형률속도하에서 평균 유동응력인 동적 항복응력을 결정하는 봉충격시험의 단순성을 고려할 때, 봉충격시험과 속도의존성 구성방정식인 Johnson-Cook 모델에 의한 변형률속도 민감도의 이와 같은 일치성은 본 논문에서 제시한 해석이론의 타당성을 나타내고 있다. 봉충격시험에 의하여 결정된 동합금의 변형

Table 3 Strain-rate sensitivity σ_d/σ_s and parameter C for copper alloys

Material	σ_d/σ_s	C
DLP Copper	0.99467	-0.00040
Catridge Brass	1.21187	0.01306
Free-cutting Brass (A)	1.19738	0.01191
Free-cutting Brass (B)	1.21046	0.01262

률속도민감도 σ_d/σ_s 와 변형률속도의 관계와 식(12)를 비교하여 Johnson-Cook 구성방정식의 변형률속도 파라미터 C를 결정하고, 사용된 변형률속도 범위에서의 평균 변형률속도 파라미터와 이를 이용한 변형률 민감도 식(12)에 의한 결과를 Fig. 6에 도시하였으며, 변형률속도 민감도와 평균 변형률속도 파라미터 C의 값을 Table 3에 정리하였다. 탈인산동은 변형률속도에 거의 무관한 속도비의존성 특성을 나타내고 있으며, 황동과 쾌삭황동은 약 1.2의 변형률 민감도를 나타내고 있다.

5. 이차원 수치해석

봉충격시험에 의한 시험편의 변형거동을 해석하기 위하여 제시된 이론은 봉충격시험편의 축 직각 방향의 유동은 무시되고 응력은 봉의 단면 전체에 걸쳐 일정하다는 가정조건을 이용한 일차원 해석에 기초하고 있으므로 축 직각방향의 유동이 미치는 영향이 고려되지 않으며, 이론의 설정에 있어서 응력파전파의 단순화에 기초하고 있다. 이와 같은 이차원 효과를 고려한 해석을 수행하기 위하여 고속충격하중하에서 재료 및 구조물의 변형거동을 해석하기 위하여 개발된 유체동역학 프로그램(hydrocode)에 의한 봉충격시험의 해석이 수행되어 왔다.

Wilkins와 Guinan⁽⁹⁾은 구성방정식으로서 일정부동응력 및 소성경화모델을 이용하여 유한차분 유체

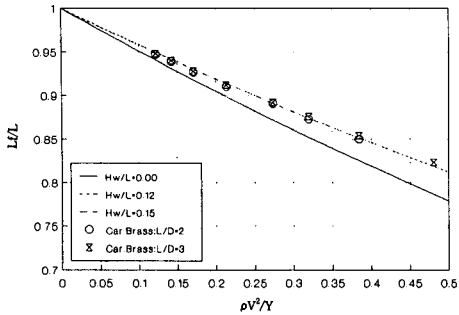
동역학 프로그램인 HEMP에 의한 해석결과를 봉충격시험 완료후 측정된 변형형상과 비교하여 각종 금속재료의 동적 항복응력을 결정하였다. Johnson과 Cook⁽⁸⁾ 및 Zerilli와 Armstrong⁽¹¹⁾은 재료의 변형률경화(strain hardening), 변형률속도 경화(strain-rate hardening), 열연화(thermal softening)를 고려하여 각각 실험적 구성방정식과 전위론에 기초한 구성방정식을 개발하였다. 다양한 실험방법에 의하여 구성방정식의 파라미터 값을 결정하였으며, 봉충격시험 결과와 유한요소 hydrocode인 EPIC에 의한 해석결과를 비교하여 구성방정식의 타당성을 분석하였다. 한편 Johnson과 Holmquist⁽¹⁰⁾는 구성방정식에 이용되는 파라미터 값을 봉충격시험으로부터 직접 결정할 수 있는 방법론을 제시하였다.

일차원 해석에 의하여 동합금의 동적 항복응력의 결정에 있어서 이차원 변형현상이 미치는 영향을 분석하기 위하여 Autodyn-2D^(12,13)에 의하여 해석을 수행하였다. Autodyn-2D는 유한차분법에 기초한 유체동역학 프로그램으로서 재료의 변형현상을 시뮬레이션하기 위하여 다양한 종류의 구성방정식과 상태방정식(equation of state)이 이용되고 있다. 본 수치해석에 사용된 구성방정식은 탄성·완전소성식이며, 상태방정식으로는 선형 상태방정식(linear E. O. S.)이 사용되었다. 재료상수로는 푸아송비 ν , 전단계수(shear modulus) G , 체적계수(bulk modulus) k , 재료밀도 ρ 가 이용되며 해석에서 고려한 동합금의 재료상수를 Table 4에 나타내었다.

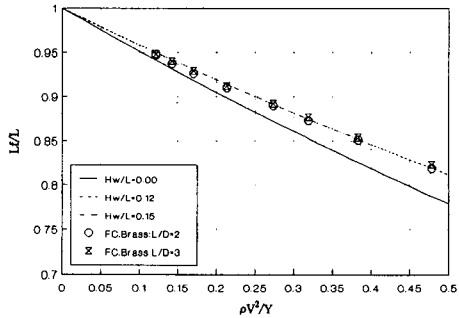
실험에서 고려된 동합금의 시험편 변형형상을 이용하고 동적 항복응력과 충돌속도를 변화시키면서 해석을 수행하였다. 이로부터 무차원화된 동적 항복응력 $\rho V^2/Y$ 와 시험편의 초기길이를 무차원화된 최종 전체변형길이 L_f/L 의 관계를 재료별로 Fig. 7에 나타내었다. $\rho V^2/Y$ 의 범위 0.0-0.5에서 L_f/L 은 $\rho V^2/Y$ 의 증가에 따라 거의 선형적으로 감소하고 있으며 재료의 종류에 관계없이 $\rho V^2/Y$ 와

Table 4 Material constants of copper alloys used in the simulation by autodyn-2D

Material	ν	G (Mbar)	K (Mbar)	ρ (g/cm ³)
Catridge Brass	0.375	0.3948	1.4475	8.53
Free-cutting Brass	0.311	0.3652	0.8442	8.50



(a) Catridge brass



(b) Free-cutting brass

Fig. 7 Variation of L_f/L with nondimensionalized dynamic yield stress $\rho V^2/Y$ simulated by Autodyn-2D

L_f/L 은 일정한 관계를 나타내고 있다. 이와같은 해석결과는 Wilkins와 Guinan⁽⁹⁾에 의한 연구결과에서도 관찰된 것으로서, 소성파두(plastic wave front)가 변형초기에 봉내부의 일정위치에 형성되어 시험편의 속도가 감소된다는 가정조건하에서 L_f/L 과 $\rho V^2/Y$ 의 관계를 식(13)과 같이 유도하였다.

$$\frac{L_f}{L} = \left[1 - \frac{H_w}{L}\right] \exp\left[\frac{-\rho V^2}{2Y}\right] + \frac{H_w}{L} \quad (13)$$

여기서, H_w 는 Wilkins와 Guinan에 의하여 설정된 충돌면으로부터 소성파두까지의 거리로서 Wilkins와 Guinan은 실험결과와 수치해석결과의 비교로부터 H_w/L 을 0.12로 하였다. 동합금에 대한 Autodyn-2D에 의한 결과와 Wilkins와 Guinan에 의한 식(13)에 의한 결과를 비교하여 보면 $\rho V^2/Y$ 의 값이 작은 범위에서는 두 결과는 거의 차이를 보여주지 않으나 $\rho V^2/Y$ 의 값이 증가함에 따라 Autodyn-2D는 다소 큰 L_f/L 를 나타내고 있으며, 이 경우 식(13)을 이용하면 H_w/L 은 약 0.15에 해

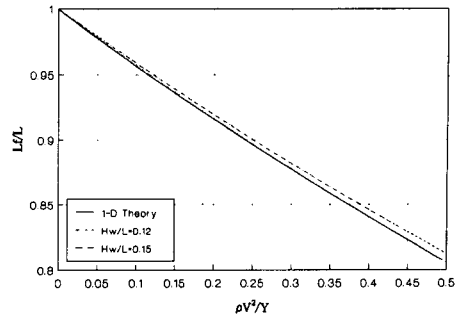


Fig. 8 Comparison between one-dimensional theory and two-dimensional hydrocode for the relation of L_f/L with $\rho V^2/Y$

당된다. 이는 동일한 최종 전체변형길이에 대하여 Autodyn-2D는 다소 작은 동적 항복응력을 보여주고 있음을 의미하나 그 차이는 미소하다.

일차원 해석이론과 이차원 수치해석에 의한 결과를 비교하여 보면 Fig. 8과 같이 일차원 해석이론은 Wilkins와 Guinan에 의하여 제시된 식과 일치하고 있으나 Autodyn-2D와는 다소 차이를 보여주고 있다. Wilkins와 Guinan에 의하여 사용된 HEMP와 본 연구에서 사용된 Autodyn-2D의 차이가 수치해석상의 알고리즘에 기인한 것으로 판단되므로, 일차원 해석이론의 경우 축 직각방향의 유동을 무시하고 이론의 설정에 있어서 응력과전파의 단순화에 기초하고 있음에도 불구하고 이차원 수치해석결과와 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다.

6. 결 론

동합금의 봉형시험편을 고속으로 강체에 충돌시킨 후 변형형상을 측정하고, 일차원 해석이론에 의하여 해석을 수행하여 동적 항복응력과 재료의 정적 유동응력에 대한 동적 항복응력의 비인 변형률 속도 민감도를 결정하였다. 또한 이차원 유체동역학 프로그램에 의한 해석을 수행하여 일차원 해석이론과 비교함으로써, 일차원 해석에 의한 동적 항복응력의 결정에 있어서 이차원 변형현상이 미치는 영향을 분석하였다.

(1) 동적 항복응력은 충돌속도의 증가와 종횡비의 감소에 의한 변형률속도의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있다.

(2) 동적 항복응력의 정적 항복응력에 대한 비인 변형률속도 민감도에 있어서 일차원 해석이론에 의

한 변형률 민감도는 Johnson과 Cook에 의하여 제시된 속도의존성 구성방정식을 이용한 변형률 민감도와 유사한 특성을 나타내고 있다. 동합금인 황동과 쾌삭황동은 약 1.2의 변형률 민감도 값을 가지며, 순동인 탈인산동은 변형률속도에 거의 무관함을 나타내고 있다.

(3) 일차원 해석이론에 의한 결과 Wilkins와 Guinan에 의하여 제시된 식과 일치하고 있으나 Autodyn-2D와는 다소 차이를 보여주고 있다. 이는 Wilkins 와 Guinan에 의하여 사용된 HEMP와 본 논문에서 사용된 Autodyn-2D의 수치해석상의 알고리즘 차이에 기인한 것으로 판단되며, 일차원 해석이론의 경우 축 직각방향의 유동을 무시하고 이론의 설정에 있어서 응력파전파의 단순화에 기초하고 있음에도 불구하고 이차원 수치해석결과와 잘 일치하고 있다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Holzer, A. J., 1979, "A Tabular Summary of Some Experiments in Dynamic Plasticity," *J. Eng. Mat. Tech., Trans. ASME*, Vol. 101, pp. 231~237.
- (3) Staker, M. R. et al., 1985, "High Strain Rate Testing," in *Metals Handbook Ninth Edition*, American Society for Metals, Vol. 8.
- (4) 민옥기, 이정민, 남창훈, 황재준, 1993, "금속 재료의 동적 항복응력 결정을 위한 봉충격시험법," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제1호, pp. 78~89.
- (5) Taylor, G. I., 1948, "The Use of Flat-ended Projectiles for Determining Dynamic Yield Stress," *Proc. R. Soc.*, A194, pp. 289~299.
- (6) 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.
- (7) Gillis, P. P., Jones, S. E. and Foster, J. C., 1987, "On the Equation of Motion of the Undeformed Section of a Taylor Impact Specimen," *J. Appl. Phys.*, Vol. 51, pp. 499~502.
- (8) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1983, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," *Proc. 7th Int. Sym. on Ballistics*, The Hague, The Netherlands, pp. 541~547.
- (9) Wilkins, M. L. and Guinan, M. W., 1973, "Impact of Cylinders on a Rigid Boundary," *J. Appl. Phys.*, Vol. 44, pp. 1200~1206.
- (10) Johnson, G. R. and Holmquist, T. J., 1988, "Evaluation of Cylinder-impact Test Data for Constitutive Model Constants," *J. Appl. Phys.*, Vol. 64, pp. 3901~3910.
- (11) Zerilli, F. J. and Armstrong, R. W., 1987, "Dislocation-mechanics-based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations," *J. Appl. Phys.*, Vol. 51, pp. 1816~1825.
- (12) Birnbaum, N. K., Cowler, M.S., Itoh, M., Katayama, M. and Obata, H., 1987, "AUTODYN - an Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Program for Microcomputers Through Supercomputers," *Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology*, Lausanne, Switzerland.
- (13) Zukas, J. A., 1990, *High Velocity Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, Inc.