

홉킨슨바 장치를 이용한 분말금속의 동적 특성에 관한 수치해석적 연구

황두순* · 이승우** · 홍성인***
(2000년 1월 17일 접수)

A Numerical Study on the Dynamic Characteristics of Powder Metal using Split Hopkinson Pressure Bar

Doo Soon Hwang, Seung Woo Lee and Sung In Hong

Key Words: Powder Metal(분말금속), Relative Density(상대밀도), SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar), Explicit Finite Element Method(익스플리시드 유한요소법), Dynamic Material Characteristic(동적 재료 특성)

Abstract

Dynamic characteristics of powder metal is very important to mechanical structures requiring high strength or endurance for impact loading. But, owing to distinctive property of powder metal, that is relative density, it has been investigated restrictively compared to static characteristics. The objectives of this study is to investigate dynamic characteristics of powder metal and compare it to a fully density material. To find the characteristics, an explicit finite element method is used for simulation of Split Hopkinson Pressure Bar experiment based on the stress wave propagation theory. We obtained a dynamic stress-strain relationship and dynamic behavior of powder metal, as well as the variation of material properties during dynamic deformation.

기호설명

- R : 상대밀도 (Relative Density)
- J_1 : 1차 불변량 (First Invariant)
- J_2 : 2차 불변량 (Second Invariant)
- C_0 : 탄성 응력과 속도
(Elastic stress wave speed)

1. 서론

분말금속(Powder Metal)은 자원절약 및 증량감소를 통한 에너지 절약 측면에서 경제성이 높을

뿐만 아니라 고강도, 고충격에 대해 우수한 동적 기계적 성질을 나타내는 금속이다. 최근 분말야금기술의 발달에 따라 분말금속의 응용범위가 다양한 분야에서 폭넓게 적용되고 있으며, 주요 생산품의 재료로서 부각되고 있다.

분말금속은 커다란 소성변형을 받는 연성재료로서 내부에는 기공(氣孔)이 존재하고, 변형과정 중에 일반금속(full dense material)과는 달리 체적변화를 수반하는 특징을 가지기 때문에 항복함수(yield function)를 편차응력(deviatoric stress) 성분으로 표현하는 종래의 소성법칙을 직접 이용하기 곤란하다. 따라서, 응력의 제1불변량과 제2불변량을 고려하여 분말금속에 대한 항복함수를 설정하는 것이 중요하다. 분말재료의 항복함수에 관한 연구는 Drucker와 Prager,⁽¹⁾ Suh⁽²⁾ 등에 의해 von Mises나 Coulomb의 항복함수에 정수압(hydrostatic pressure)을 더한 형태로 제안되었다. 이러한 항복함수의 주요 변수로서 상대밀도

* 회원, 충남대학교 대학원 기계공학과
E-mail : galaxy26@hanmail.net
TEL : (042)821-7614 FAX : (042)825-7673

** 회원, 국방과학연구소
*** 회원, 충남대학교 기계공학과

(relative density)가 사용되며, 상대밀도를 통한 푸아송비(Poisson's ratio) 등의 수정을 통한 항복조건이 Kuhn과Downey,⁽³⁾ Gurson,⁽⁴⁾ Shima와 Oyane,⁽⁵⁾ Corapcioglu와 Uz,⁽⁶⁾ Doraivelu⁽⁷⁾ 등에 의해 제시되었다. 이와 함께, 최근 상용 Package ABAQUS 나 LS-DYNA3D 등을 이용한 유한요소 해석이 분말금속의 소성변형에 대해 연구되었다.^(15,16)

그러나, 분말금속의 소성변형 거동과 항복조건 등에 대한 연구는 정적 특성(static characteristics)에 대한 것이 주를 이루어 왔으며,⁽³⁻⁸⁾ 동적 특성에 대한 연구도 자체코드보다는 상용 프로그램을 이용한 해석에 국한되어왔다.^(15,16) 따라서, 실제 구조물의 재료로서 분말금속이 사용되기 위해 동적 거동(dynamic characteristics)에 대한 체계적인 연구가 필요하게 되었다. 현재, 이러한 동적 거동에 대한 연구는 Kumar 등에 의해 재료학적 관점에서 금속 조직과 관련하여 연구되어진 바 있으며,⁽⁹⁾ 저자에 의해 유한요소법을 이용한 연구가 시도되고 있다.⁽¹⁰⁾

재료의 동적특성은 고체내의 응력과 전파 및 물리적 특성으로 인하여 정적특성과는 크게 다른 양상을 나타낸다. 또한, 재료의 동적 변형거동은 변형률속도에 중요한 영향을 받는 것으로 알려져 있기 때문에 동적하중 또는 충격하중을 받는 구조물의 해석에 있어서 선결되어야 하는 중요한 요소이다. 이러한 재료의 동적특성은 재료의 성질에 따라 크게 다른 경향을 보인다.

본 연구에서는 이러한 분말금속의 특성을 고려하여 동적특성을 보다 일반적으로 조사하기 위해 홉킨슨 압축봉 장치를 모델로 하여 연구하였다. 그리고, 응력과 전파이론에 근거하여 익스플리시트 유한요소법을 적용시켜 동적하중하에서의 분말금속의 변형 거동과 응력-변형을 관계를 얻었으며 이를 일반 금속과 비교하였다. 이를 통해 동적하중을 받는 분말금속에 대한 가공과 사용되는 구조물의 해석에 있어서 기준을 제시하고자 한다.

2. 기본이론

2.1 분말금속의 항복함수

일반적으로 소결된 금속분말의 항복함수는 정수압 응력을 고려하여 다음과 같이 표현될 수 있

다.

$$f = AJ_2' + BJ_1^2 = Y_R^2 = \eta Y_0^2 \quad (1)$$

여기서, f : 항복함수(Yield Function)이며, A, B, η : 상대밀도(R)의 함수로 표현되고, Y_0 는 원 재료의 초기항복응력이다. 이러한 항복조건을 푸아송비(ν)로 표현하면, 다음과 같다.

$$2(1 + \nu)J_2' + \frac{1 - 2\nu}{3} J_1^2 = Y_R^2 \quad (2)$$

이것은 비압축성 금속(fully density material)에 적용시키면,

$$\eta = 1, \nu = 1/2, A = 3, B = 0 \text{ 이므로,}$$

$3J_2' = Y_0^2$ 으로 von-Mises의 조건을 만족한다.⁽⁸⁾ 이러한 관계를 다시 Zhdanovich⁽¹¹⁾에 의해 제안된 방법을 통해 상대밀도로 표현하면, 다음과 같다.

$$(2 + R^n)J_2' + \frac{1 - R^n}{3} J_1^2 = \eta Y_0^2 = Y_R^2 \quad (3)$$

본 연구에서는 식 (3)과 같이 표현될 수 있는 항복함수 중 실험적으로 이러한 관계를 조사한 Doraivelu⁽⁷⁾에 의해 제안된 다음과 같은 관계를 이용하였다.

$$A = (2 + R^2) \quad (4)$$

$$\eta = (2R^2 - 1)$$

분말재료의 응력-변형률 관계(constitutive equation)는 수정된 항복함수의 적용을 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$\sigma_{ij} = \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon_R} \left[\frac{2}{A} \epsilon_{ij}' + \frac{\delta_{ij}}{3(3-A)} \epsilon_{kk}' \right] \quad (5)$$

상대밀도는 변형이 진행되는 동안 변하게 되는데 이는 초기 상대밀도와 체적 변형률에 의하여 다음과 같이 구하여 진다.

$$R = R_0 \exp\left(-\int_0^t \epsilon_V' dt\right) \quad (6)$$

여기서, R_0 : initial relative density

ϵ_V' : volumetric strain

본 연구에서 사용되는 변형과 관련된 변수들은 상대밀도의 변화에 의존적이므로, 변형의 진행에 따라 보정하였다.

2.2 홉킨슨 압축봉 장치와 충격이론

이 장치는 Fig. 1에 도식된 것처럼 충격봉 (Impact Bar), 입력봉(Incident Bar), 출력봉(out Bar) 등으로 구성되어 있으며 입력봉과 출력봉 사이에 시편을 부착한 후 충격봉으로 입력봉에 정하여진 속도로 충돌시켜 이때 발생한 압력파가 입력봉내에 전달되고 시편에 도달된다. 초기 압력과 중 일부는 다시 반사되어 반대방향으로 진행하고 나머지는 시편을 변형시키며 출력봉 내부로 전파되어 진행한다.

이 봉들은 탄성한계 내에 있지만 두 봉 사이에 위치한 시편은 임피던스 차에 의하여 소성변형을 하게 된다. 입력봉과 출력봉 중간에 위치한(S1, S2) 스트레인게이지에 의하여 반사파와 투과파를 측정하고 이 데이터로부터 시편의 응력-변형률 곡선을 구하게 된다.

충격봉이 입력봉의 A에 주어진 속도로 충격을 가하면 입력봉 내에 변형률 $\epsilon_I(t)$ 를 갖는 압축파가 발생한다. 이 압축파가 입력봉의 다른 끝인 B에 도달하면 임피던스 차이에 의하여 압축파의 일부는 $\epsilon_R(t)$ 를 갖는 인장파로 반사되고, 압축파의 다른 일부분은 시편을 소성변형 시키고 출력봉으로 $\epsilon_T(t)$ 를 갖는 압축파로 전파된다.

시편이 균일하게 변형될 때 시편내의 변형률 속도($\dot{\epsilon}$)는 반사파 $\epsilon_R(t)$ 에 비례하고 또한 시편 내부의 응력크기(σ)는 투과파 $\epsilon_T(t)$ 에 비례한다. 이러한 결과는 다음에서 주어지는 설명에 의하여 이해될 수 있다.

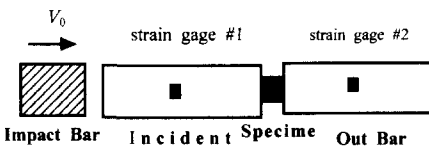


Fig. 1 Schematic drawing of SHPB

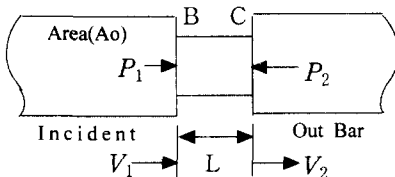


Fig. 2 Detail of specimen part

즉, 특성선(characteristic line)의 관계식 (7) 과 접촉경계면의 응력연속조건을 사용하고 시편 내부의 응력상태가 일정하다(또는 변형이 균일하다)고 가정하면 시편 내부의 응력식 (8)과 시편의 변형률속도 식 (9)를 얻을 수 있다.⁽¹²⁾

$$C_0 \epsilon \pm V = const. \quad \text{along } \frac{dx}{dt} = \mp C_0 \quad (7)$$

여기서, $C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$: 입력봉, 출력봉 내의 음속

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{A} \epsilon_T(t) \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -2 \frac{C_0}{L} \epsilon_R(t) \quad (9)$$

또한, 식 (9)을 적분하면 식 (10)의 시편의 변형률을 얻을 수 있다.

$$\epsilon(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) d\tau = -2 \frac{C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R(\tau) d\tau \quad (10)$$

즉, 시편의 응력-변형률 곡선을 입력봉과 출력봉의 $\epsilon_R(t)$ 와 $\epsilon_T(t)$ 의 값을 구하여 얻을 수 있다.

3. 모델링 및 수치해석

3.1 모델링

모델링은 실제 실험과 같은 충격봉, 입력봉, 출력봉의 규격 및 재료를 사용하였으며, 시편은 구리를 재료로 하여 일반적인 초기 상대밀도값인 0.8의 분말금속으로 사용하였다.^(14,8) 충격봉, 입력봉 및 출력봉은 탄성 범위내에 있어야 하므로 탄성계수들만 사용하였으며, 시편은 분말재료이므로 상대밀도를 함수로 하여 탄성계수(Young's Modulus)를 다음과 같이 보정하여 사용하였다. 우선 분말금속을 기공과 일반적인 재료가 섞인 복합재료라고 가정하면, Rule of Mixture를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E = E_a \frac{V_a}{V_t} + E_m \frac{V_m}{V_t} \quad (11)$$

여기서, E_a : 기공의 탄성계수(0.14Mpa)

V_a : 공기의 체적

V_t : 전체 분말금속의 체적

E_m : 금속의 탄성계수(124Gpa)

V_m : 금속의 체적

체적과 상대밀도(R)와의 관계로부터,

$$E = E_a \frac{(1-R)V_t}{V_t} + E_m \frac{R V_t}{V_t} \quad (12)$$

$$E = (1-R)E_a + RE_m \quad (13)$$

그리고, 항복함수는 기본이론으로부터 상대밀도의 함수로 다음과 같이 표현하였다.

$$Y = \sqrt{(2R^2 - 1)} Y_0 \quad (14)$$

각 봉에 대한 모델링 및 형상은 실린더(cylinder)형을 사용하였으며, 유한요소 생성시 각 절점(node) 간격은 Table 2와 같이 충격봉, 입력봉, 출력봉은 모두 1mm로 사용하고, 시편에서의 절점 간격은 0.33mm로 하였다. 이 때 입력봉, 시편, 출력봉 간의 완전히 접촉되어 있고, 충격봉과 입력봉 간의 간격은 0.5mm로 두었다.

Table 1 Used material Properties.⁽⁸⁾

구분	재질	밀도 (g/cm ³)	탄성계수 (GPa)	응력-변형률관계
충격봉 입력봉 출력봉	Steel	7.8	200	$\sigma = E \epsilon$ (탄성영역이내)
시편	구리 분말	7.168	99.2	$\sigma = 0.039 + 0.66 \epsilon_p^{0.57}$

Table 2 Dimensions and FEM data of SHPB

구분	길이 (mm)	직경 (mm)	Node수	Element수
충격봉	254	18.75	255	254
입력봉	1500	18.75	1501	1500
출력봉	1500	18.75	1501	1500
시편	3.3	8.65	11	10

3.2 수치해석

수치해석시 운동방정식의 시간적분은 수정된 중앙차분(modified central difference) 방식을 사용하였으며, 즉 속도는 전방 차분(forward difference) 방식으로 적분하고 변형은 후방차분(backward difference) 방식으로 적분하였다. 따라서, 절점에서의 적분방식은 다음과 같다.

$$a_t = \frac{F}{m} \quad (15)$$

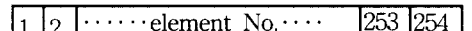
$$V_{t+\Delta t} = V_t + a_t \Delta t \quad (\text{전방차분}) \quad (16)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + V_{t+\Delta t} \Delta t \quad (\text{후방차분}) \quad (17)$$

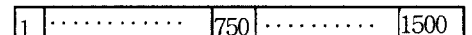
여기서 F 는 절점력이고 m 은 집중질량(lumped mass)이며 Δt 는 시간증분이다. 중앙차분 연산자(central difference operator)는 조건에 따라 안정하고 연산자의 안정조건은 아래식과 같으므로 본 논문에서는 $\alpha=2/3$ 를 사용하였다.

$$\Delta t = \alpha \frac{L_{\min}}{C_0} \quad (0 < \alpha \leq 1) \quad (18)$$

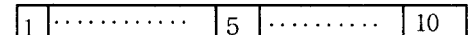
여기서 C_0 는 탄성응력과 속도, L_{\min} 은 요소의 최소길이, α 는 시간증분계수(time step scale factor)이다. 탄소성 구성방정식의 응력증분에 따른 수치적분은 Modified Radial Return Method 를 사용하였다.



1 2 3node No. .. 253 254 255
Impact bar



1 2 750 751 1500 1501
Incident bar and out bar



1 2 5 6 10 11
Specimen

Fig. 3 Nodes and elements numbering of each bar

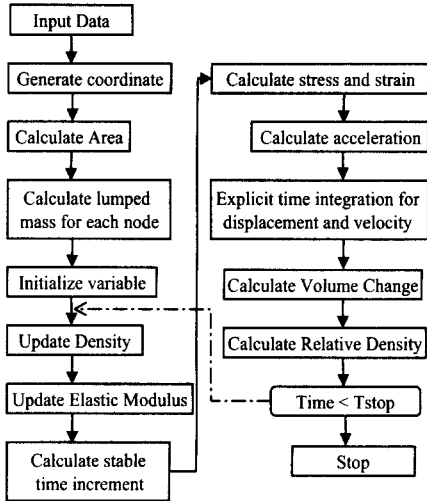


Fig. 4 Analysis procedure (flow chart)

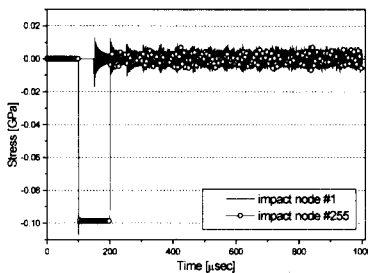


Fig. 5 Variation of stress with time in impact bar

Fig. 4은 분말금속의 동적특성을 조사하기 위해 개발된 프로그램의 flow chart이다. 계산과정에서 상대밀도, 탄성계수, 체적변화가 시간의 증분에 따른 단계 진행시 마다 보정(update)되도록 구성하였다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

4.1 분말금속의 동적변화

Fig. 5에서 충격봉의 응력변화를 살펴보면, 충격봉이 5m/sec의 속도로 입력봉에 충돌하는 경우 0이었던 응력이 충돌후 충격봉과 입력봉의 전단에서 압축응력이 동시에 발생하여 0.1GPa의 응력을 받는다. 이 응력파가 충격봉의 전단(impact node #1)에 도달하여 다시 인장파로 바뀌어 충격봉의 끝단(impact node #255)으로 되돌아오면서, 충격봉의 응력이 해제되어 충격봉의 응력이 영점

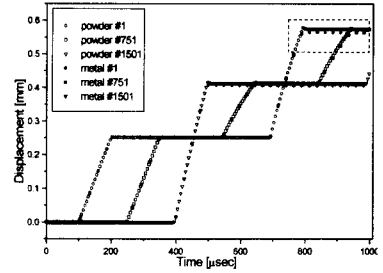


Fig. 6 Variation of displacement with time in incident bar

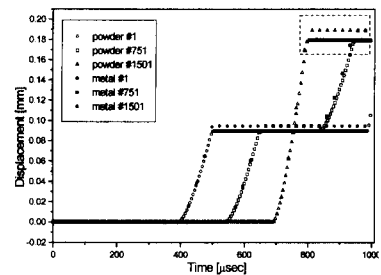


Fig. 7 Variation of displacement with time in out bar

부근에서 탄성 성질로 인해 계속 진동함을 알 수 있다. 이와 함께, 속도도 같은 양상을 보인다.

Fig. 6, Fig. 7에서는 충격봉이 5m/sec로 입력봉을 때렸을 때, 입력봉과 출력봉에서의 변위 변화를 조사하기 위해, 입력봉 및 출력봉의 양 끝단과 실제 흠킨슨 압축봉 실험시 스트레인 게이지가 부착되는 위치인 각 봉의 중심부 절점의 변위 변화를 나타낸 것이다.

그림에서는 일반 금속(fully density material:구리)과 분말금속(powder metal:구리분말)을 비교하였는데, Fig. 6에 보여진 바와 같이 분말금속이 일반금속에 비해, 초기에는 같은 크기와 조건이므로, 같은 변위량을 가지며 거동하나, 시간의 흐름에 따라 변위가 상대적으로 더욱 커짐을 확인할 수 있다. 특히, 끝단 절점인 #1501 위치보다 초기 절점 #1의 변위가 더욱 커짐을 알 수 있다. 반면, Fig. 6에 나타난 것처럼, 출력봉에서는 반대되는 경향을 나타내는 데, 이것은 분말금속이 일반금속에 비해 수축율이 상대적으로 크기 때문에 쉽게 변형되는 것이라고 생각할 수 있다.

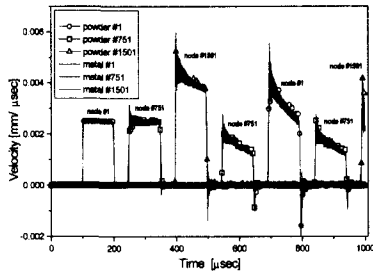


Fig. 8 Variation of velocity with time in incident bar

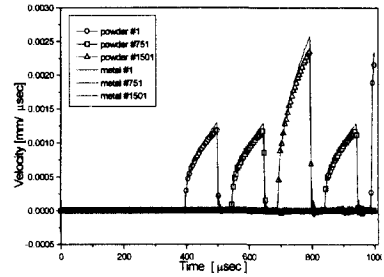


Fig. 10 Variation of velocity with time in out bar

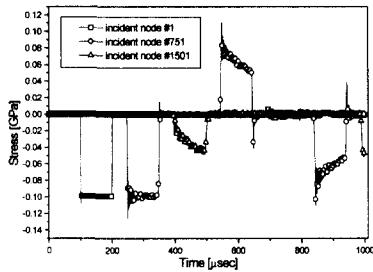


Fig. 9 Variation of stress with time in incident bar

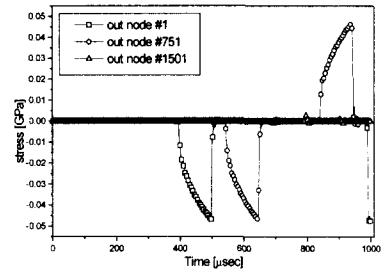


Fig. 11 Variation of stress with time in out bar

Fig. 8에서 입력봉의 속도변화를 살펴보면, 충격봉의 초기속도 5m/sec의 반인 2.5m/sec로 유지되다가, 시편과의 절점에서 반사파와 투과파로 나누면서 반사파의 영역으로 속도는 두 배로 증가함을 알 수 있다. 재료에 따른 차이를 보면, 일반금속에 비해 분말금속이 더 크게 영향을 받아 전체적으로 보다 높은 속도 경향을 보인다. 이것은 분말금속내에 존재하는 기공(pore) 때문에 일반금속과의 임피던스(Impedance)차가 발생하며, 이로 인해 파의 투과량이 적어 반사파가 커지므로 인해 입력봉내의 속도가 증가하는 것이다.

Fig. 9에서의 입력봉 내의 응력변화는 재료의 임피던스(impedance)차에 의해 압축파의 응력이 인장파로 변화하는 과정을 나타내는 것으로서, 분말금속이 일반금속에 비해 압축응력은 보다 적은 반면 인장응력은 큰 경향을 나타낸다. 즉, 분말금속은 많은 변형률을 수반하기 때문에 입력봉에 있어서는 인장파가 보다 지배적이라는 것을 알 수 있으며, 이로부터 충격후 충격을 가하는 물체가 인장응력의 성격을 띠며, 충격물의 충격 에너지를 흡수하기 때문에 일반금속에 비해 압축보다 인장이 상대적으로 더 크게 작용한다.

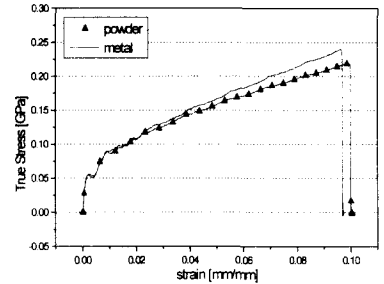


Fig. 12 Comparison of stress-strain relation with powder and full dense metal

출력봉에서의 속도, 응력변화는 시편의 소성변형에 의한 소성파의 영향으로 비선형적으로 변화하며, 최종 끝단은 자유단이므로 속도는 두 배로 증가함을 알 수 있고, Fig. 10과 Fig. 11에 보여진 바와 같이 분말금속이 보다 적은 속도와 응력 변화를 나타냄을 알 수 있다. 이것은 입력봉에서의 분말금속이 일반금속에 비해 보다 큰 변위를 가지는 것과 대조적이다. 이로부터, 일반적으로 변형이 크고 충격흡수를 하는 분말금속의 정적특성에 비추어 볼 때 본 결과가 타당한 동적특성을 보여준다고 생각할 수 있다.

4.2 분말금속의 재료 성질 변화

분말금속이 일반금속에 비해 변형률에 대한 응력변화가 보다 완만한 경향을 나타내는 데, 이것은 분말금속이 가지고 있는 상대밀도에 따른 압축성의 특징에 기인한다고 볼 수 있다. [Fig. 12] 즉, 같은 재료에 대해 보다 적은 응력을 가지고 많은 변형을 얻을 수 있으며, 응력파에 보다 민감한 반응을 나타낸다.

Fig. 13에서는 시간에 따른 상대밀도의 변화를 보여주는 것으로, 충격봉이 입력봉에 충돌한 후 약 396 μ sec 후 시편이 변형하기 시작하여 상대밀도(relative density)는 변형이 진행됨에 따라 증가되는데, 분말금속이 압축됨에 따라 기공이 차지하는 부피가 줄어 금속부분이 차지하는 밀도가 높아짐을 나타내는 것이다.

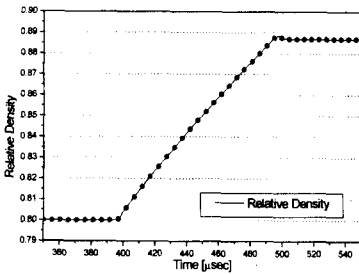


Fig. 13 Variation of relative density with time

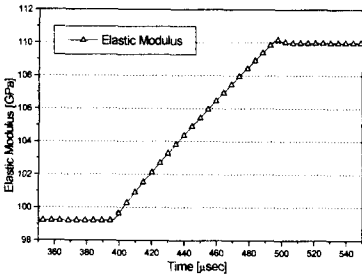


Fig. 14 Variation of elastic modulus with time

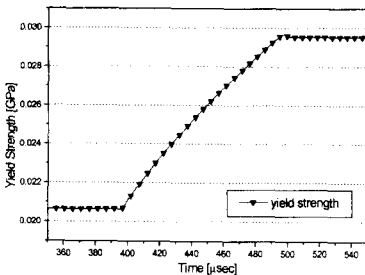


Fig. 15 Variation of yield stress with time

시편이 변형됨에 따라 분말금속이 압축하여 상대밀도가 증가하게 되는데, Fig. 14에서 볼 수 있듯이 탄성계수(elastic modulus)는 상대밀도에 매우 의존적으로 이것의 증가에 따라 함께 커지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 응력-변형률 관계에서 분말금속에 대해 상대밀도가 매우 중요한 인자이며, 변형이 진행되는 동안 재료의 물성치가 변한다는 것을 알 수 있다. 항복응력(yield strength) 또한 식에 의해 상대밀도의 함수로서, Fig. 15와 같이 증가되는 경향을 나타낸다.

Fig. 16은 여러 가지 변형률속도에서 동적 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로 변형률 속도가 증가함에 따라 소성변형률의 증가로 인하여 펄림 현상이 훨씬 커짐을 보여준다. Fig. 17은 시간변화에 따른 시편형상 변화를 매 iteration마다 계산되는 각 요소에서의 면적을 이용하여 표현한 것으로 대칭임을 고려하여 1/2만 나타낸 것이다.

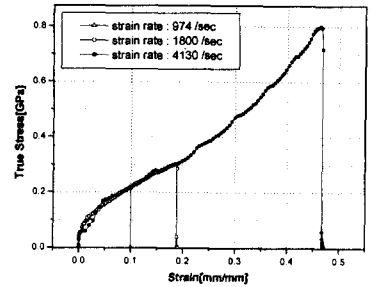


Fig. 16 Stress-strain curves at various strain rates

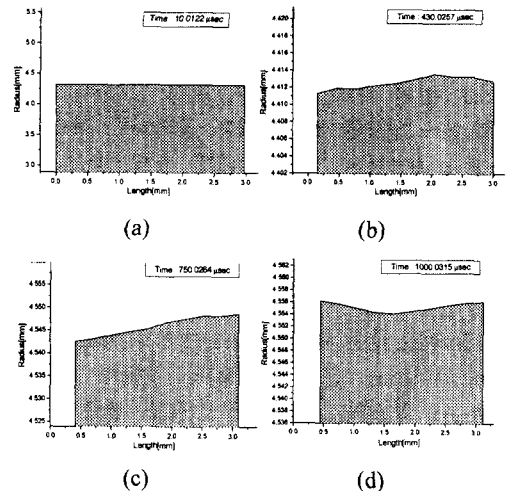


Fig. 17 Variation of specimen shape for time

시간변화에 따라 시편의 길이는 줄어들고 반경은 증가되며, 초기에는 시편 중간이 커지나 응력이 전파되어 반사함으로 인해 최종적으로 시편 끝단보다 중간부분의 반경이 작은 형상을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 분말금속의 동적특성을 알기 위해 흡킨슨 압축장치를 익스플리시트 유한요소법을 이용하여 수치적으로 모델링하여 적용함으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 분말금속의 상대밀도와 체적변화 등의 특성을 조사하기 위하여, 물성치 변화가 고려된 유한요소 프로그램을 개발하였다.

(2) 분말금속이 일반금속에 비해 압축성이라는 특징을 가짐으로서, 동적특성에 있어서도 보다 많은 변형량을 가진다고 생각할 수 있다.

(3) 속도와 응력의 투과가 일반금속에 비해 응력을 흡수하는 성질을 갖기 때문에, 투과력이 적은 경향을 볼 수 있었다.

향후 분말금속에 대한 동적특성에 관한 실험을 통해 본 연구에서 시행된 수치적 결과를 확인하고 비교하는 것이 필요하다.

참고문헌

(1) Drucker, D.C., and Prager, W., 1952, "Soil Mechanics and Plastic Analysis on Limit Design," *Q. Appl. Math.*, Vol. 10, p. 157.
 (2) Suh, N.P., 1969, "A Yield Criterion for Plastic, Frictional, Work Hardening Granular Materials," *Int. J. Powder Metall.*, Vol. 5, No. 1, p. 69.
 (3) Kuhn, H.A. and Downey, C.L., 1971, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials," *Int. J. Power Metall.*, Vol. 7, p. 15.
 (4) Gurson, A.L., 1975, "Plastic Flow and Fracture Behavior of Ductile Materials Incorporating Nucleation, Growth and Interaction," Ph.D. Thesis, Brown University, Providence, RI.
 (5) Shima, S. and Oynane, 1976, "Plasticity Theory of Porous Metals," *Int. J. Mechanical Science*, Vol. 8, pp. 285~291.

(6) Corapcioglu, Y. and Uz, T., 1978, "Constitutive Equation for Plastic Deformation of Porous Materials," *J. Powder Technology*, Vol. 21, p. 269.
 (7) Doravelu, S.M., Gegel, H.L., Gunasekera, J.S., Malas, J.C., Morga, J.T., 1984, "A New Yield Function for Compressible P/M Materials," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 26, NO. 9/10, pp. 527~535.
 (8) 이승우, 1983, "3차원 유한요소법을 이용한 분말금속 성형과정의 해석에 관한 연구," 충남대학교, 석사학위논문.
 (9) Kumar, D. Roshan, Kumar, R. Krishna, and Philip, P.K., 1999, "Simulation of Dynamic Compaction of Metal Powders," *J. Applied Physics*, Vol. 85 No. 2, pp. 767~775.
 (10) 황두순, 남경오, 이승우, 홍성인, 1999, "익스플리시트 유한요소법을 이용한 분말금속의 동적 특성에 관한 연구," 대한기계학회 충청지부 추계 학술대회 논문집, pp. 102~107.
 (11) Zhdanovich, G.M., Translated from Teorize Pressovaniva Metzllichaskikli Poroshkov, pp1-262(1969) by the Foreign Technology Division, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, U.S.A. (29 June 1971).
 (12) 이승우, 홍성인, 1998, "흡킨슨 압축봉에서의 동적 재료특성에 관한 수치해석적 연구," 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제6호, 논문집, pp. 129~132.
 (13) Follansbee, P.S. and Frantz, 1983, "Wave Propagation in the Split Hopkinson Pressure Bar," *ASME J. Eng. Material. Technology*, Vol. 105, pp. 61~66.
 (14) 황인평, 1995, "흡킨슨 바 장치를 이용한 고순도 전기동의 거동에 관한 연구," 충남대학교 석사학위 논문.
 (15) Valle, G.E. and Shukla, A., 1996, "A Study of the Dynamic Behavior of Elastomeric Materials Using Finite Elements," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 118, Oct., pp. 503~508.
 (16) 조상순, 강우종, 허훈, 정동택, 1997, "새로운 Tension Split Hopkinson Bar를 이용한 박판의 고속인장시험," 대한기계학회논문집A, Vol. 21, No. 12(ISSN 1226-4873), pp. 2209~2219.