

급속응고 Al-Si 합금 분말의 항복과 압축거동

김형섭* · 장기태* · 조성석* · 천병선*

(1997년 2월 1일 접수)

Yield and Compaction Behavior of Rapidly Solidified Al-Si Alloy Powders

Hyoung Seop Kim, Ki-Tae Jang, Seong Seock Cho and Byung Sun Chun

Abstract

In order to obtain high quality products in powder metallurgy, it is important to control and understand the densification behavior of metal powders. The effect of the characters of powders on the compaction behavior was studied in this study by using three types of powders produced by the gas atomization, the centrifugal atomization and the twin roll-pulverization. The shape of the powders was a major factor in the apparent or tap density, and the deformation resistance of the matrix of the powders was a major factor in compactibility. Han's yield function (eq.2) for metal powders was simplified from the relationship based on the experimental results of copper powders. In spite of some assumptions, the calculated compaction curves using a new yield function was in accordance with the experimental results.

Key Words : Rapid Solidification Powder (급속응고분말), Al-Si alloy, (Al-Si 합금), Compaction (압분), Powder Plasticity (분말소성), Compactibility (압축성)

1. 서론

산업발전에 따라 연비절감과 환경문제가 대두되고 있는 시대에 차세대 자동차, 항공기 및 전자장비에는 기존의 재료보다 향상된 기계적 성질을 갖는 새로운 소재와 공정의 개발이 요구된다. 특히 내열고강도성과 내마모성이 요구되는 분야에서는 Al합금에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.

과공정 Al-Si합금은 내마모성이 우수할 뿐만 아니라 열

팽창계수와 밀도가 작으며, 주조성이 우수하고 가격이 싸다는 이점때문에 주조용 합금으로 주로 자동차의 엔진부품이나 에어컨용 공기압축기로 사용되어왔다. 이 합금의 기계적 성질을 향상시키기 위해서는 Si의 함량을 증가시켜야하는데, 일반주조법으로는 냉각속도가 느려 Al 기지 내의 초정 Si입자와 급속간화합물이 각각 조대한 판상과 침상으로 생성되어 강도, 연성 및 가공성을 급격히 저하시킨다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고자 여러 공정이 개발되었다. 이 중 급속응고법⁽¹⁾은 액상 및 고상에서의 빠른

* 충남대학교 금속공학과 및 급속응고신소재연구소

냉각속도와 고/액 계면에서의 빠른 성장속도에 의한 결정립미세화, 용질원자의 편석감소, 용질원자의 고용한도 증가, 비정질과 같은 준안정상의 생성 등의 특성으로 인하여 기존의 주조재에 비해 조직이 미세하고 균일하여 우수한 기계적 성질을 얻는다. 특히 Al-Si 합금에 Fe를 첨가한 급속응고재료는 미세하게 분산된 급속산화합물을 생성하여 강성, 고온강도, 내마모성을 증대시킨다. 또한 Cr을 첨가하여 Fe 첨가에 의한 연성의 감소를 보완하고 단조성을 향상시키려는 시도가 행해지고 있다.⁽²⁾

그러나 비록 제조된 급속응고용 합금의 성능이 우수하더라도 사용이 가능한 형태의 부품을 제작하기 위한 기존의 고형화 (consolidation) 공정인 압출시 복잡한 3차원 형태를 제조하는 데는 많은 문제점이 제기되었다. 최근 분말단조법에 의한 급속응고 과공정 Al-Si합금 분말의 성형 기술을 적용하려는 시도가 이루어지고 있다.^(3,4) 분말단조는 짧은 공정을 통하여 분말성형체의 치밀화와 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있을 뿐 아니라 기존의 압출-기계가 공 공정의 단축을 통한 정형 (near net shape) 생산이 가능하므로 경제성 면에서도 우수한 공정이다. 그러나 급속응고 분말의 표면에는 산화피막이 존재하고, 분말단조법은 압출에 비하여 소성유동이 매우 적으므로 분말의 결합이 문제가 된다. 따라서 초기의 단조단계 뿐 아니라 압축 단계도 매우 중요하고, 이 때에도 균일하고 충분한 압축이 이루어질수록 좋다.

분말의 성형공정을 정밀하게 조절하기 위하여 소성역학과 수치적인 방법을 이용한 접근법이 많이 이용되고 있다.^(5,6) 그러나 이들은 주로 다공질 재료의 모델로서 급속분말의 변형거동은 다공질 소결금속과는 다른 점이 많다. 급속분말의 압축공정에서는 초기밀도가 소결금속에 비해 매우 낮고, 변형초기에 입자간의 미끄럼이 나타난다. 또한 급속분말 입자는 산화막으로 둘러싸여 있을 가능성이 높다. 따라서 다공질 금속과는 다른 항복식이 요구되는데, 한홍남은 Lee-Kim의 다공질 금속의 항복식⁽⁷⁾을 변형시킨 급속분말의 항복식을 제안하였다.⁽⁸⁾

이 연구에서는 급속응고법 중에서 많이 사용되고 있는 기체분사법, 원심분무법, 쌍롤법으로 제조된 급속응고 Al-Si합금 분말의 압분시험을 통하여 각 분말의 특성에 따른 압분 및 분말의 소성항복 거동을 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 분말제조

상용의 Al, Si, Fe, Cr 주괴로부터 고주파유도로를 이용하여 무게비 Al-20Si-5Fe-2Cr의 주괴를 제조하였다. 이 주괴로부터 기체분무법, 원심분무법을 이용하여 분말을 제조하고 쌍롤을 이용하여 판상형 재료를 제조하였다. 분사기체는 분말 표면의 산화피막을 줄이기 위해 액체 질소를 기화시켜 사용하였으며 분사압력은 7~10 기압, 분사량은 3 m³/min으로 하였고 내경 3 mm의 알루미늄으로 제조된 수렴형태 노즐을 사용하였다. 용탕온도는 용탕의 유동성을 고려하여 용점보다 100~200℃ 높은 900℃로 하였다. 원심분무 분말 제조 장치에서 분위기는 대기 중이고, 노즐은 기체분무법에서와 동일한 것을 사용하였고 회전자는 Si₃N₄ 소결제품을 사용하였다. 회전자의 직경은 39 mm이고 회전속도는 34000 rpm, 용탕온도는 900℃로 하였다. 판상제조를 위한 쌍롤에서 노즐과 용탕온도는 위의 두 경우와 동일하고 구리 롤의 지름은 360 mm, 회전속도는 44 km/hr로 하였다. 쌍롤에서 제조한 판은 분쇄기에서 10분간 분쇄하였다. 제조한 분말은 입도분석을 위해 체를 이용한 기계적 분급을 하였다. 사용한 체는 325 메쉬부터 50 메쉬이고 분급된 합금분말은 74~125 μm, 125~177 μm, 177 μm 이상의 입도로 분류하여 주사전자현미경 (Akashi WB-6)으로 입형을 관찰하였다. 분급된 분말을 마운팅하여 미소비커스경도계에서 10 g의 하중으로 10회 이상 실험하여 경도를 측정하였다.

2.2 성형시험

분말을 단조 단계에서 취급하기 쉽도록, 적당한 형태와 밀도를 부여하는 압축성형을 실시한다. 본 실험에서는 일축다이압축 성형을 실시하였다. 기체분무법, 원심분무법, 쌍롤-분쇄법으로 제조한 후 분급한 분말을 300 ton 유압식 프레스로 성형하여 직경 20 mm의 원통형 압분체로 제작하였다. 압분압력을 변화시켜가며 압분체의 밀도를 측정하였다. 압분체의 밀도는 아르키메데스의 원리를 이용한 밀도계 (densimeter)로 측정하였고, 원통형 시편의 무게와 크기 (직경, 높이)를 측정하여 확인한 결과 오차가 거의 없는 결과를 얻었다.

3. 급속분말의 항복식과 치밀화

Lee와 Kim은 다공질 금속의 변형거동을 해석하기 위하여 다음의 압력에 의존하는 항복식을 제안하였다.⁽⁷⁾

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

여기서 J_1 과 J_2 는 각각 1차응력불변량과 2차편차응력 불변량, Y_R 는 분말의 겉보기 항복응력, Y_0 는 기지금속의 항복응력, R 은 상대밀도, R_C 는 다공질 금속의 초기항복응력이 0이 되는 순간의 상대밀도이다.

한홍남은 급속분말의 압축변형을 해석하기 위하여 다음의 항복식을 제안하였다.⁽⁸⁾

$$(2 + R^2)J_2' + \frac{1 - R^2}{3}J_1^2 = \left(\frac{R - R_T}{1 - R_T}\right)^m Y_0^2 \quad (2)$$

여기서 R_T 는 분말의 두드림상대밀도, m 은 분말의 항복응력의 밀도의존성을 나타내는 지수이다. 한홍남은 수분사동과 전해동을 이용하여 CIP 실험을 실시하고 이로부터 각 분말의 크기, 형태에 따른 R_T 와 m 을 구하였다.

그러나 분말의 두드림밀도와 치밀화속도 (즉, 항복응력의 밀도의존성)는 서로 독립적일 수 없다. 즉 형상이 불규칙하여 초기 두드림밀도가 낮은 분말은 적은 압력으로도 분말의 재배열 및 모서리의 파쇄가 일어나 쉽게 치밀화가 된다. 이 사실은 또한 한홍남의 실험결과를 자세히 들여다 보면, R_T 와 m 이 서로 독립적이지 않음으로부터 알 수 있다. 아래의 Table 1은 한홍남의 CIP 실험 결과이고 마지막에 R_T 와 m 의 곱을 보였는데 이 값이 평균 0.85 정도로 큰 차이가 없다. 이 관계 $R_T \times m = 0.85$ 는 분말의 기지금속의 기계적 특성이 포함되어 있지 않으므로 구리 이외의 분말에도 사용될 수 있는 관계식이다. 따라서 이 연구에서는 다음의 수정된 항복식을 제안하여 치밀화 거동을 해석하였다.

$$(2 + R^2)J_2' + \frac{1 - R^2}{3}J_1^2 = Y_R^2 = \left(\frac{R - R_T}{1 - R_T}\right)^{0.85/R_T} Y_0^2 \quad (3)$$

이 항복식 (3)은 분말의 압축거동을 해석할 때에 분말의 특성으로는 초기밀도인 두드림밀도만 알면 되므로 간편하게 이용할 수 있다.

Fig. 1은 원통형 압분공정의 개략과 응력 및 변형률 상

태를 나타낸 것이다. 압축압력 σ_z 는 유효변형률 $d\bar{\epsilon}$ 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다. 식 (5)는 압축공정에서 중요한 압력과 밀도와의 관계를 구할 때 사용된다.

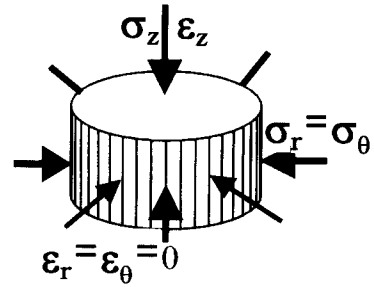


Fig. 1 Illustration of stresses acting during cylindrical die compaction

$$d\bar{\epsilon} = d\epsilon_z [1 + \nu(1 - 2\nu)(2 - \nu)]^{1/2} / (1 + \nu) \quad (4)$$

$$\sigma_z = Y_R(\bar{\epsilon}, R)[(1 - \nu)/(1 - 2\nu)(1 + \nu)] \quad (5)$$

여기서 ν 는 분말의 소성Poisson비이고, Kuhn은 실험에서 아래의 관계식을 구하였다.⁽⁹⁾

$$\nu = 0.5R^2 \quad (6)$$

$Y_R(\bar{\epsilon}, R)$ 을 구하기 위해서는 식 (3)의 우변항 식을 사용해야한다. 분말의 겉보기 항복응력 $Y_R(\bar{\epsilon}, R)$ 은 밀도의 증가로부터 발생하는 기하학적 경화항 $\left(\frac{R - R_T}{1 - R_T}\right)^{0.85/R_T}$ 과 기지금속의 가공경화항 $Y_0^2(\bar{\epsilon})$ 이 있는데, 본 실험에서 사용한 분말 자체의 유통곡선을 얻기는 어려우므로 분말의 경도값으로부터 항복응력을 유추하고 분말의 가공경화는 무시하였다. 이는 폐금형 (closed die)에서의 압축공정은 그 특성상 유통과 소성변형이 크지

Table 1 Characteristic of copper powders⁽⁸⁾

	Water atomized Cu powder, coarse	Water atomized Cu powder, fine	Electrolytic Cu powder, coarse	Electrolytic Cu powder, fine
Tap density, R_T	0.453	0.446	0.239	0.161
m	1.97	1.90	3.61	3.40
$R_T \times m$	0.892	0.847	0.863	0.816

Table 2 Powder size distributions of Al-Si alloys.

	-74 μm	74~125 μm	125~177 μm	+177 μm	Mean Size
Gas Atomization	42 %	20 %	15 %	bal.	90 μm
Centrifugal Atomization	4 %	6 %	8 %	bal.	300 μm
Twin Roll & Pulverization	5 %	8 %	10 %	bal.	600 μm

않으므로 가정하였다. 또한 분말과 금형면 사이의 마찰은 고려하지 않았는데, 이는 재료와 금형면과의 상대적인 이동이 크지 않은 것과 한홍남의 계산결과⁽⁸⁾로부터도 알 수 있다. 그러나 결과에서도 보듯이 이들은 실험과 차이가 나는 요인이 된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 분말의 형상

Table 2는 서로 다른 급속응고법에 의해 제조된 Al-20Si-5Fe-2Cr 합금분말의 입도분포이다. 평균입도는 기

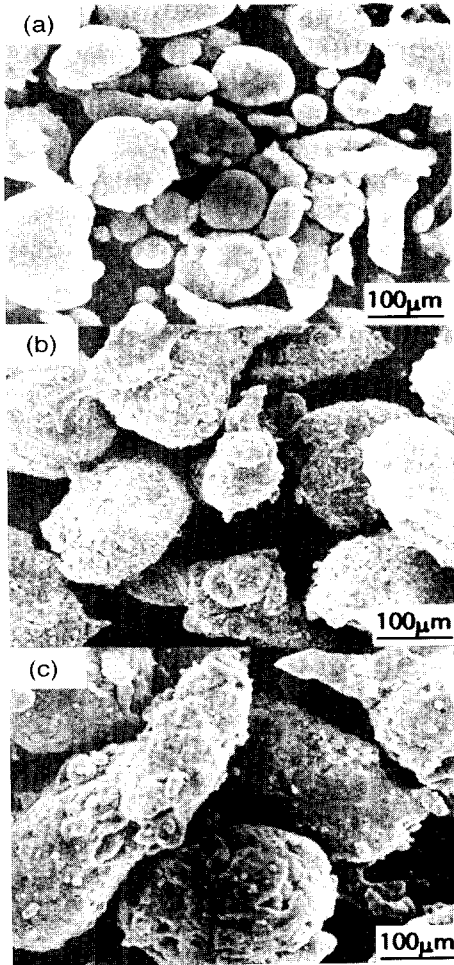


Fig. 2 Scanning electron micrographs of Al-Si alloy powders produced by the gas atomization method

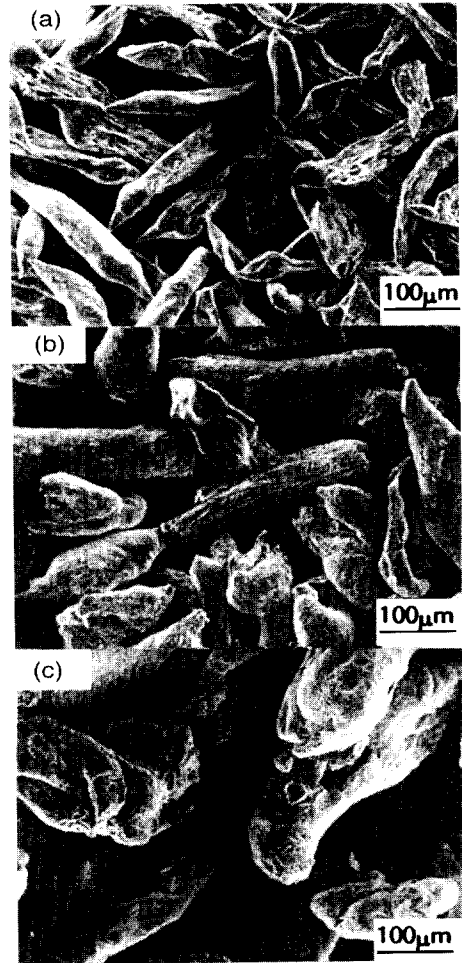


Fig. 3 Scanning electron micrographs of Al-Si alloy powders produced by the centrifugal atomization method

체분무법 < 원심분무법 < 쌍롤, 분쇄법 순이다. Fig. 2는 기체분무법으로 제조한 분말의 주사전자현미경 사진으로 구형에 가까움을 알 수 있다. 분말의 크기가 작을수록 구형의 분말이 많아지고 표면이 매끈한데, 이는 작은 입자일수록 단위부피당 표면적이 크므로 표면에너지를 줄이려는 구동력이 커져 구형이 되기 용이하기 때문이다. 또한 큰 입자는 응고시간이 길어 두꺼워진 표면의 산화막으로 인하여 구형으로의 복원이 어려워지고 거친 표면을 나타내게된다.

Fig. 3은 원심분무법으로 제조한 분말의 주사전자현미경 사진으로서 미세한 분말은 침상이나 조대해질수록 눈물방울형, 인대형 (ligament)이 많이 나타난다. 이태행⁽¹⁰⁾에 의하면 대기상태에서 분말을 제조하면 분말표면의 산화층으로 인하여 분말이 구형화되지 못하고 침상형, 눈물방울형, 인대

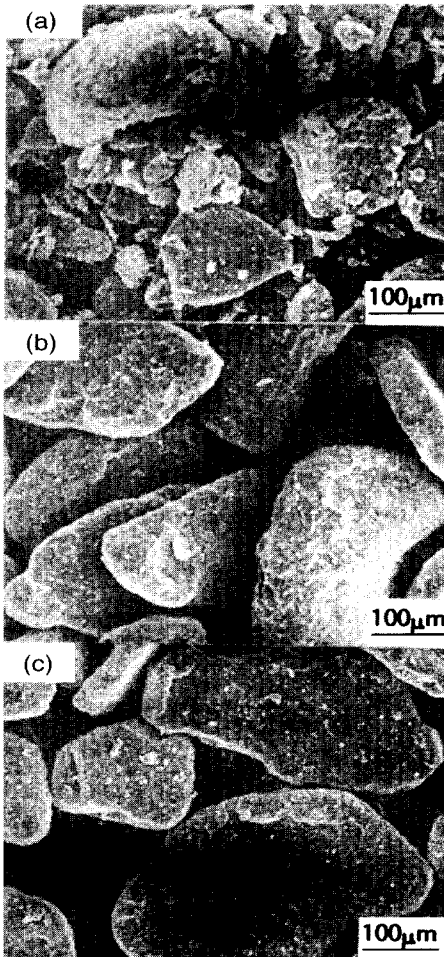


Fig. 4 Scanning electron micrographs of Al-Si alloy powders produced by the twin roll and pulverization method

형이 된다. Fig. 4는 쌍롤법으로 제조한 판을 분쇄한 분말의 주사전자현미경 사진이다. 전체적으로 판상이지만 미세한 분말은 분말간의 마찰로 인하여 구형화된 것이 나타난다.

4.2 분말의 경도

각 분말들의 입도에 따른 경도를 Fig. 5에 나타내었다. 쌍롤-분쇄 분말은 입도에 따라 경도의 변화가 거의 없고 기체분무법과 원심분무법의 분말은 입도가 작아질수록 경도가 증가한다. 일반적으로 기체분무법의 냉각속도는 $10^2 \sim 10^5$ K/s, 원심분무법의 냉각속도는 $10^2 \sim 10^4$ K/s, 쌍롤법의 냉각속도는 $10^4 \sim 10^5$ K/s 이므로⁽¹¹⁾ 냉각속도가 가장 큰 쌍롤법의 분말이 미세한 조직을 가지고 있고 경도 값도 크다고 생각된다. 이는 쌍롤의 분말은 파쇄 전에는 모두 같은 상태이므로 입도에 무관하게 같은 경도를 보이고 기체분무법과 원심분무법의 분말은 미세한 분말이 냉각속도가 더 빠르므로 더 큰 경도가 얻어진 것과는 잘 일치한다.

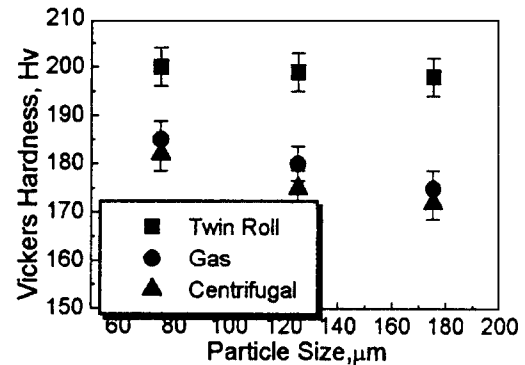


Fig. 5 Microvickers hardness as a function of particle size

4.3 압분성

분말의 압분성 (compactibility)은 금속 분말을 압축하여 일정한 형태와 강도를 갖게 하고 치밀화가 잘 되게 하

Table 3 Tab densities (relative density) of Al-Si alloy powders

	74~125	125~177	+177
Gas Atomization	0.438	0.479	0.501
Centrifugal Atomization	0.351	0.369	0.420
Twin Roll & Pulverization	0.351	0.332	0.300

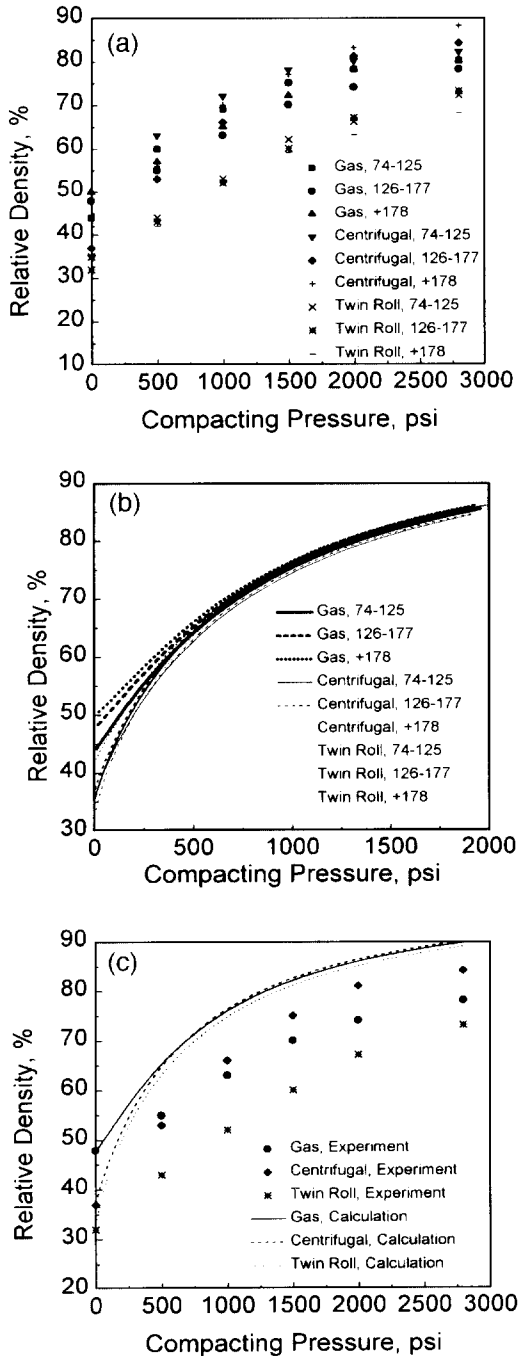


Fig. 6 Compactibility curves of Al-Si powders of gas atomization, centrifugal atomization and twin roll methods with various sizes. Dots are measured values and curves are calculated ones. (a) Experimental results, (b) Calculated ones using eq.(5), (c) Comparison of experimental and calculated values of alloy powders with grain size of 126~177 μm

는 성질로서 균일하고 높은 밀도의 성형체를 만들 수 있는 성질을 의미한다.⁽¹²⁾ 이러한 압분성에 미치는 인자는 금속 분말의 미세조직, 분말의 입형, 입도, 입도분포 등이 있다. Al-20Si-5Fe-2Cr 합금의 이론밀도는 2.737 g/cm³이다. Table 3에 각 분말들의 두드림밀도를 나타내었다.

Fig. 6 (a)는 분말의 제조법과 입도에 따른 압축곡선의 결과이다. 가압을 하지 않은 경우, 즉 두드림밀도는 분말간의 마찰이 적은 구형입자인 기체분무 분말의 경우가 가장 높고 불규칙한 모양의 쌍롤-분쇄 분말의 경우가 가장 낮다. 그러므로 하중을 가하지 않은 상태에서의 밀도는 기체금속의 기계적 특성이 아닌 분말의 형태가 가장 큰 요인임을 알 수 있다. 그러나 하중을 가했을 경우에는 원심분무 분말이 가장 높은 치밀화에 도달하고 쌍롤법 순으로 치밀화가 낮다. 이 결과는 분말의 형태가 치밀화에 미치는 결정적인 요인은 아니라는 것을 의미한다. 즉 입형의 각진 정도는 기체분무 < 원심분무 < 쌍롤의 순이고 입자의 종횡비는 기체분무 (구형) < 쌍롤 (판상) < 원심분무 (봉상)이지만 치밀화 정도는 쌍롤 < 기체분무 < 원심분무의 순이다. 치밀화를 결정하는 가능한 요소로는 분말의 기계적 성질이 있다. 분말은 압축시 큰 소성변형을 받으면서 기공이 감소하고 치밀화가 이루어진다. 따라서 냉각속도가 커서 높은 강도를 가지고 변형저항이 큰 재료의 치밀화가 적을 것이다.

이 변형저항을 고려하면 냉각속도가 느릴수록 치밀화가 잘 될 것이고 이는 실험의 치밀화 순서와도 일치한다. 즉 분말의 결보기밀도는 입형이 구형일수록 유동성이 좋아 높지만, 압축성은 낮은 강도의 분말인 원심분무 분말이 높다. 그러나 같은 형태의 분말에서 압축성의 입도별 특별한 경향은 찾아보기 어렵다. 입도보다는 오히려 입도의 분포가 압축성에 영향을 미친다고 보여진다.

4.4 소성변형

Fig. 5의 경도치 H로부터 다음의 식 (7)⁽¹³⁾을 이용하여 각 분말들의 항복응력 Y_0 를 구하였다.

$$H = 3Y_0 \quad (7)$$

Fig. 6 (b)에 압축곡선의 계산결과를 보였다. 쌍롤 분말은 초기밀도가 낮고 치밀화가 느리다. 기체분무 분말은 초기 밀도가 높으나 초기밀도가 낮은 원심분무 분말보다도 치밀화가 느려져, 1000 psi 이상의 압력에서는 원심분무 분말의 압분체의 밀도가 높다. 이는 (a)의 실험 결과의 경향과도 잘 일치하는 것이다. 초기밀도와 치밀화가 이렇게

다른 이유는 앞 절의 실험 결과의 설명과 같이, 입형의 불규칙으로 인하여 초기밀도가 낮은 쌍롤 분말은 높은 냉각 속도로 인한 큰 변형저항 때문에 치밀화의 속도가 느린 것이고 구형으로 인하여 초기밀도가 높은 기체분무 분말은 원심분무보다는 냉각속도가 빨라 변형저항이 원심분무 분말보다 높고 치밀화가 느린 것이다. 같은 공정의 분말사이에서는 입도별로 큰 차이가 나타나지는 않는다. 따라서 실험과 계산의 결과를 비교하기 위하여 (c)에 126~177 μm 입도의 분말의 경우를 보였다. 실험과 계산의 결과가 경향은 같지만, 계산 결과의 치밀화가 더 크다. 이는 계산에서는 금형과 분말과의 마찰을 고려하지 않았고 분말기지의 가공경화를 고려하지 않았기 때문에 같은 압력으로 더 많은 치밀화가 발생한 것으로 생각되고 분말의 항복응력을 경도로부터 환산한 오차도 포함되어 있다. 비록 마찰 및 재료의 가공경화를 무시해서 생긴 물성의 오차는 있지만, 두드림밀도만 알면 이용할 수 있는 분말의 항복식 (3)과 소성이론은 분말의 형태 및 기계적 성질을 고려하여 복잡한 형태의 분말 성형에도 적용할 수 있는 유용한 도구가 된다.

4. 결 론

기체분사법, 원심분무법, 쌍롤법으로 제조한 금속응고 Al-Si 합금분말의 압축성형 시험을 통하여, 분말의 입형, 입도, 기지금속의 물성에 따른 압축성을 고찰하였다. 실험 결과, 분말의 입형은 하중을 가하지 않은 초기밀도인 겉보기밀도와 두드림밀도의 주요 인자가 되지만 하중을 가하기 시작하면 그 효과보다는 기지금속의 변형저항이 압축성의 주요한 인자로 작용함을 알 수 있었다. 즉, 불규칙한 형태의 분말은 두드림밀도가 낮고 빠른 냉각속도의 분말은 큰 변형저항으로 인하여 압축성이 나쁘다. 한홍남에 의해 제안된 분말의 항복식과 구리분말의 실험에서 얻은 $R_f \times m = 0.85$ 의 관계로부터 항복식을 수정하였으며, 이 식은 분말의 특성으로서 두드림밀도만 필요로 하고, 분말의 압축거동을 잘 표현하였다.

참고문헌

(1) E. J. Lavernia, J. D. Ayers and T. S. Srivatsan,

1992, "Rapid solidification processing with specific application to aluminium alloys", *Int. Mat. Rev.*, Vol. 137, pp.1~44.

(2) 홍순직, 1995, "금속응고 Al 합금의 고온강도내마모성에 관한 연구", 충남대학교 석사학위논문.

(3) M. Otsuki, S. Kakehashi and T. Kohno, 1990, "Powder forging of rapidly solidified aluminum alloy powders and mechanical properties of their forged parts", *Advance in Powder Metall. Proc.*, Metall Powder Industries Federation, pp.345~349.

(4) T. Hayashi, T. Kaji, Y. Takeda, Y. Odani and K. Akechi, 1992, "Powder forging of rapidly solidified aluminum alloys", *Sumitomo Elec. Tech. Rev.*, Vol. 34, pp.107~110.

(5) H. N. Han, H. S. Kim and D. N. Lee, 1994, "Elastoplastic finite element analysis for porous metals", *Powder Metall.*, Vol. 37, pp.140~146.

(6) H. N. Han, D. N. Lee and H. S. Kim, 1994, "Analysis of coefficient of friction in compression of porous metal rings", *Powder Metall.*, Vol. 37, pp. 259~264.

(7) D. N. Lee and H. S. Kim, 1992, "Plastic yield behavior of porous metals", *Powder Metall.*, Vol. 35, pp. 275~279.

(8) 한홍남, 1995, "다공성 소결금속의 변형과 금속분말의 성형해석", 서울대학교 박사학위논문.

(9) H. A. Kuhn and B. L. Ferguson, 1990 : *Powder Forging*, Metal Powder Federation, Princeton p. 83.

(10) 이태행, 1990, 충남대학교 박사학위논문

(11) A. Lawley, 1981, "Fundamentals of particulate metallurgy", *Advances in Powder Metallurgy*, Plenum Press, pp.91~109.

(12) 대한금속학회, 1992, "분말야금학", 탐출판사, 서울, p.44.

(13) 이동녕, 1985, "소성가공학", 문운당, 서울, p.109.