

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.4.383

다입자유한요소법을 이용한 Al분말 압축공정에서 입자의 거동과 변형에 관한 연구

이경훈* · 이정민** · 김병민***†

* 부산대학교 정밀가공시스템, ** 한국기계연구원 부설 재료연구소, *** 부산대학교 기계공학부

Particle Behavior and Deformation During Compaction of Al Powder Using MPFEM

Kyung Hun Lee*, Jung Min Lee** and Byung Min Kim***†

* Precision Manufacturing Systems Division, Pusan Nat'l Univ.,

** Korea Institute of Materials Science,

*** School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received December 24, 2008 ; Revised January 11, 2010 ; Accepted February 23, 2010)

Key Words: Cold Compaction(냉간압축), Aluminum Powder(알루미늄 분말), Particle Size(입도), Multi-Particle Finite Element Model(다입자유한요소모델)

초록: 본 논문에서는 알루미늄 분말의 치밀화 거동을 분석하기 위하여 다입자유한요소모델을 이용한 분말압축 해석방법을 제시하였다. 다입자유한요소모델을 이용하여 압축공정 동안 압축속도와 입자크기가 입자의 변형거동과 분말의 치밀화에 미치는 영향을 조사하였다. 유한요소해석결과는 평균입도 20, 3 μ m의 알루미늄 분말에 대한 일축압축시험을 통해 검증되었다. 압축시험은 만능재료시험기(MTS)를 이용하였으며 해석과 동일하게 5와 15, 30, 60mm/min 압축속도에 대해 수행되었다. 입자직경이 감소할수록 입자간 마찰이 증가하기 때문에 압축하중은 증가하였다. 압축속도가 감소할수록 증가된 입자의 회전모멘트는 입자간의 이동과 분말의 치밀화에 기여하여 최종 분말의 상대밀도를 증가시킨다.

Abstract: This paper describes multiparticle finite element model (MPFEM)-based powder compaction simulations performed to demonstrate the densification of compacted aluminum powders. A 2D MPFEM was used to explore the densification of a collection of aluminum particles with different average particle sizes under various ram speeds. Individual particles are discretized using a finite element mesh for a detailed description of contact mechanics. Porous aluminum powders with average particle sizes of 20 μ m and 3 μ m were compressed uniaxially at ram speeds of 5, 15, 30, and 60 mm/min by using an MTS servo-hydraulic tester. The slow ram speed was of great advantage to powder densification in low compaction force due to sufficient particle rearrangement. Owing to a decrease in the average particle size of aluminum, the compaction force increased.

1. 서론

전형적인 분말야금(powder metallurgy, PM)은 상온에서 분말을 임의의 형상으로 압축하는 압축공정(compaction)과 고온에서 분말 내부 잔류기공을 감소시켜 밀도를 치밀화하고 입자간 결합력을 증가시키는 소결공정(sintering)으로 나눌 수 있다. 소결동안 다량의 잔류기공은 분말제품의 수축과 뒤틀림을 증가(치수정도저하)시키고 불균일한 밀

도 분포를 초래하여 최종제품의 기계적 강도를 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 압축공정동안 분말 성형체의 잔류기공을 최소화하고 밀도분포를 균일하게 하는 것이 중요하다.^(1,2)

압축공정 동안 자유분말금속(loose powder metal)의 변형거동에 관한 연구는 주로 분말을 연속체로 간주하여 수행되어왔다. 그러나 이러한 연속체 모델을 이용하여 단일입자거동, 입자간의 상호작용 및 입자크기 변화에 따른 영향을 파악하기는 매우 어렵다. 최근 연속체 모델의 대안으로써 입자를 기반으로 하는 연구가 활발히 진행

† Corresponding Author, bmkim@pusan.ac.kr

되고 있다. Cundall 등은 최초로 입자를 회전 가능한 강체로 가정하는 이산요소모델(discrete numerical model)을 통해 입자간의 변형거동을 해석하였다.^(3,4) 이후 이러한 이산요소모델은 유한요소격자로 맵핑(mapping)된 변형체로 간주되어 입자의 기계적 특성이 반영되고 있다.⁽⁵⁾ 하지만 이산요소해석에서 입자의 회전 강성과 접촉 점 사이의 상호작용은 종종 무시될 뿐만 아니라^(6,7) 해석은 낮은 이론밀도를 가진 입자들로 제한된다.⁽⁸⁾

이러한 모델의 단점을 보완하기 위해 Procopio와 Zavaliangos는 유한요소로 이루어진 다입자유한요소모델(multi-particle finite element model, MPFEM)을 개발하였으며 이를 이용하여 입자들의 형상과 기계적 특성이 포함된 압축문제에 관해 연구하였다.⁽⁹⁾ 이러한 모델은 높은 상대밀도의 분말 성형체에 대한 압축공정해석이 가능하며 또한 접촉점에서 발생하는 대변형 문제에 보다 효율적이다.

2. 해석 및 실험조건

2.1 다입자유한요소해석 조건

Fig. 1은 해석에 사용된 입자의 유한요소격자와 입자직경 1mm와 0.5mm에 대한 압축공정의 해석모델을 나타낸 것이다. 분말압축 시 분말은 실제 3축응력 하에서 치밀화 거동을 하게 되지만 3차원 요소의 사용은 모델링이나 해석상에서 2차원 요소에 비해 매우 복잡하여 특히 소요 기억용량이나 계산 시간 면에서 상당한 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 2차원 평면변형으로 해석모델을 가정하여 개개의 입자들은 수평, 수직, 그리고 회전에 대한 자유도를 가진다. 이에 실제 실험결과와 정성적인 평가를 통해 비교되었다. 입자직경 1mm와 0.5mm에 대한 총입자면적(A_{TP})과 컨테이너면적($A_C=85mm^2$)의 비(A_{TP}/A_C)는 각각 0.508과 0.510으로 하였다. 이러한 약간의 면적비 차이는 Fig. 1에서와 같이 컨테이너 내 입자의 배열을 규칙적으로 하기 위해서이다. 따라서 입자개수는 입자직경 1mm에 대해 56개와 0.5mm에 대해 221개이며 해석에서 입자 사이 간격은 각각 0.2mm와 0.1mm로 하였다.

컨테이너 크기는 $\phi 5.0 \times 17.0mm$ 이며, 상부펀치만 움직이는 일방향 압축상태이다. 컨테이너와 입자 또는 각 입자들 사이 마찰계수는 모든 해석에 대해 0.192로 일정하게 하였다.⁽⁹⁾ 사용된 입자의 재료는

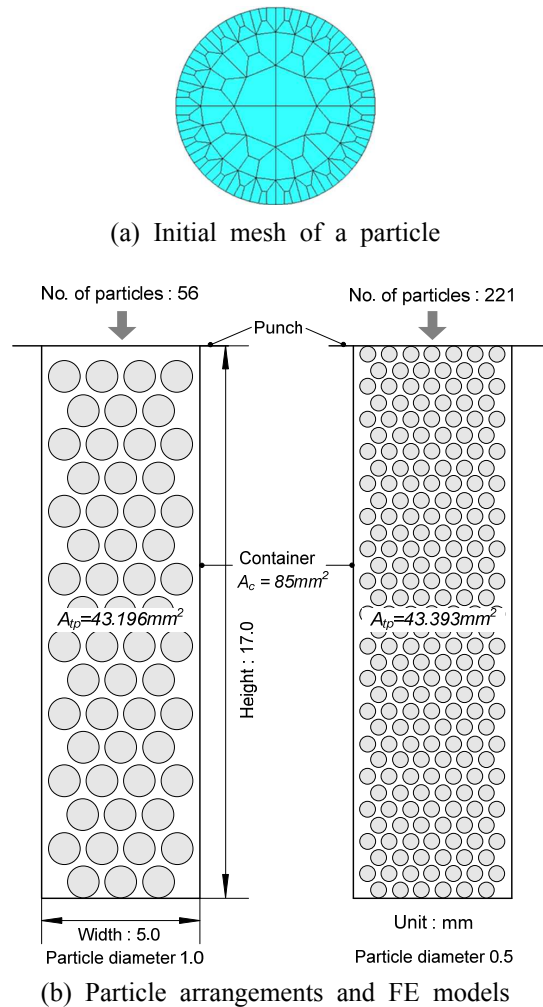


Fig. 1 FE models of compaction processes for two particle sizes using MPFEM

Al 1100이며 그것의 기계적 특성은 Table 1에 나타내었다. 압축공정해석은 ABAQUS 6.3 Explicit를 이용하였으며 5와 15, 30, 60mm/min의 압축속도에 대해 수행하였다.

2.2 압축시험 조건

Fig. 2는 Al 1100분말의 압축시험에 사용된 압축금형(AISI D2)의 형상을 나타낸 것이다. 분말의 투입중량은 0.45g이며 분말 성형체는 직경 5.0mm, 높이 10mm크기의 실린더 형상으로 제조되었다. 압축시험은 만능재료시험기(MTS)를 이용하였으며 해석과 동일하게 5와 15, 30, 60mm/min 압축속도에 대해 수행되었다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 평균 입자직경 20, $3\mu m$ 알루미늄 분말의 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 압축시험 후 분말 성형체의 이론밀도는 비중법을 이용하여 측정되

었으며 압축시험 후 압축속도와 입자크기에 따른 입자의 변형거동은 분말 성형체 단면의 SEM 관찰을 통해 평가되었다.

Table 1 Mechanical properties of Al1100

Items	Value
Elastic modulus(GPa), E	69
Stiffness coefficient(MPa), K	109.219
Strain hardening exponent, n	0.1668
Poisson's ratio, ν	0.33

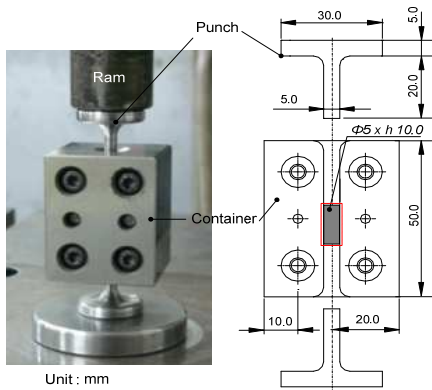
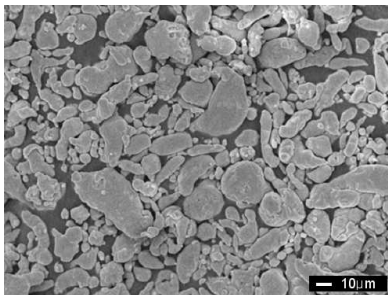
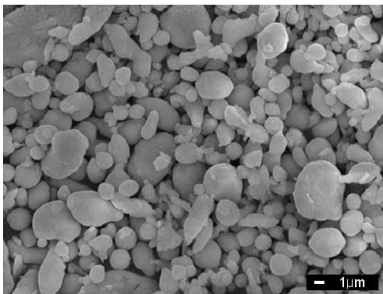


Fig. 2 Configuration and dimensions of tool for compaction tests of Al 1100 powders



(a) Average particle size of 20 μm



(b) Average particle size of 3 μm

Fig. 3 SEM images of Al 1100 powders with average particle size of 20 and 3 μm

3. 해석 및 압축시험 결과

3.1 다입자유한요소해석 결과

Fig. 4는 입자직경 1mm에 대해 압축속도 변화에 따른 압축하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 입자직경 1mm에 대해 압축속도가 증가할수록 일정한 편치변위에서 압축하중은 증가하였고 특정한 하중 값에 도달하는 편치변위는 감소하였다. 최대 하중 값은 하중-변위곡선의 기울기가 거의 무한대인 지점에서 정의되었고 그것은 압축속도에 상관없이 거의 일정하게 나타났다. 이러한 경향은 입자직경 0.5mm에 대해서도 동일하게 나타났다.

하중-변위곡선에는 크게 입자의 재배열을 의한 입자간 마찰력과 입자의 소성변형력이 포함되어 있다. 초기 변위에서 하중의 증가는 입자의 국부적 소성변형 또는 탄성변형력에 의한 마찰력에 의존하며 입자의 소성변형량이 증가할수록 하중-변위 곡선의 기울기는 서서히 증가한다. 이후 입자의 슬라이딩이나 회전이 존재하지 않고 오직 소성변형만 존재하는 영역에서는 하중-변위 곡선의 기울기는 급격하게 증가한다. Fig. 4에서 (A) 구간은 압축속도 5mm/min에 대해 입자간 마찰력과 소성변형력이 공존하는 구간으로 볼 수 있다.

Fig. 5는 압축속도 5와 60mm/min에 대해 Fig. 4의 (A)구간에서 편치 변위에 따른 입자의 변형거동을 유효응력분포로써 나타낸 것이다. 속도 5mm/min의 경우 변위 증가와 함께 입자의 재배열(탄성변형 또는 국부적인 소성변형)과 소성변형을 통해 분말은 점진적으로 치밀화되었다. 이에 반해 60mm/min의 경우 상대적으로 입자들이 치밀화

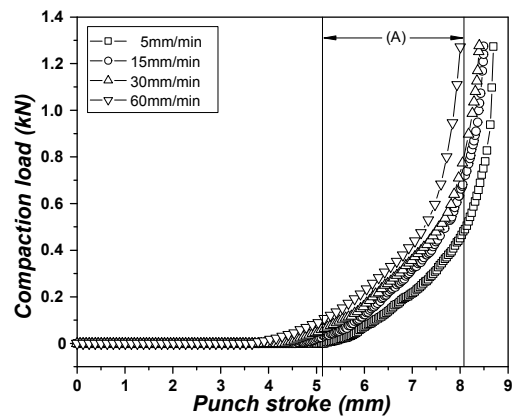


Fig. 4 Compaction load-stroke curves of powders with particle diameter of 1mm for different punch speeds

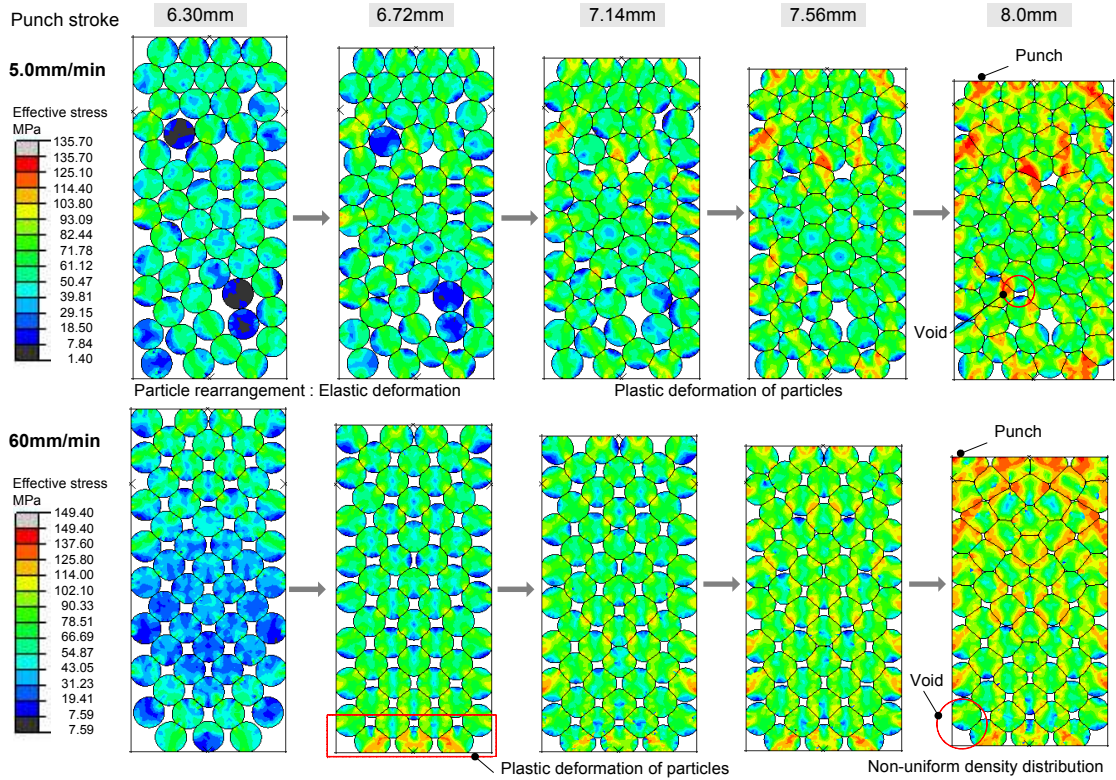


Fig. 5 Behaviors and effective stress distributions of powders at punch speeds of 5 and 60mm/min

되지 못하고 입자의 소성변형은 5mm/min 보다 더 짧은 변위에서 발생되었다. 결과적으로 압축속도가 증가할수록 입자의 이동이 쉽게 구속되어 입자의 재배열 시간이 짧아졌다.

전체적으로 펀치와 인접한 입자들이 높은 소성 변형량과 응력분포를 가지는 것으로 나타났다. 또한 5mm/min의 경우 대부분의 기공들은 입자 사이에 존재하는 반면 60mm/min는 컨테이너 바닥부에 분포하였다. 본 연구서 입자들은 비압축성이므로 같은 변위에서 분말의 이론밀도는 서로 같다. 따라서 컨테이너 내부 분말의 상대밀도분포는 60mm/min에 비해 5mm/min가 더욱 균일하였다.

Fig. 6은 압축하중 약 1.2kN에서 압축속도 변화에 따른 분말의 유효응력과 변형을 분포를 나타낸 것이다. 압축속도가 증가할수록 최대유효응력과 변형률값은 증가하였다. 특히 압축속도 60mm/min의 변형률 분포에서 변형을 체인(strain chain)은 펀치 이송방향과 평행하게 거의 직선으로 컨테이너 바닥과 맞닿아 있다. 이에 반해 30mm/min의 경우 펀치 중앙에서 컨테이너 벽면과 내부를 45°방향으로 연결하는 마름모 형태로 나타났으며 15와 5mm/min에서 이러한 경향은 조금씩 완화되

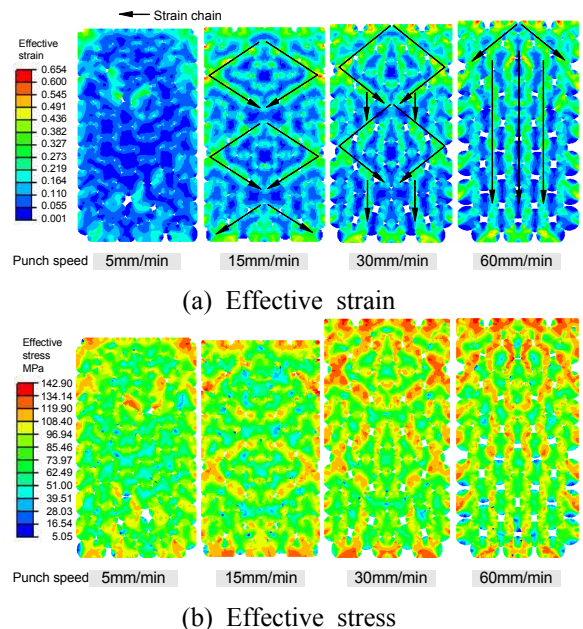


Fig. 6 Effective strain and stress distribution of powder for different punch speeds at a compaction load of about 1.2kN

었다. 이러한 변형을 체인은 펀치 이송에 따른 입자간 하중전달방향과 입자의 치밀화 경향을 의미한다.

60mm/min에서 하중은 수직으로 급격하게 컨테이너 바닥에 위치한 입자에 전달되기 때문에 입자는 작은 편치 변위에서 쉽게 구속되었다. 그러나 30과 15mm/min경우 하중전달속도가 느리기 때문에 상대적으로 입자의 이동과 재배열이 자유로워 입자의 치밀화는 마름모 형태로 나타났다. 결과적으로 이러한 하중전달방향(속도)과 입자 유동양상은 같은 을 가진 분말에 대해 압축속도가 감소할수록 상대밀도는 증가하고 분포는 더욱 균일해지게 만드는 원인으로 판단된다.

Fig. 7은 압축속도 5mm/min에서 입자직경 변화에 따른 압축하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 입자직경 0.5mm의 최대압축하중은 입자직경 1mm보다 약 2배정도 높게 나타났으며 하중-변위곡선의 기울기는 대략 8mm지점에 급격히 증가하였다.

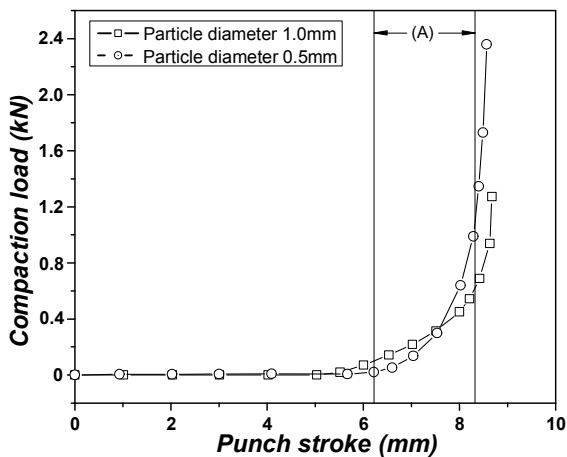


Fig. 7 Comaction load-stroke curves of powders with particle diameter of 1 and 0.5mm at punch speed of 5mm/min

Fig. 8은 입자직경 0.5mm에 대해 편치 변위에 따른 입자의 변형거동을 유효응력분포로써 나타낸 것이다. 입자가 작기 때문에 상대적으로 입자의 치밀화는 대부분 입자의 재배열에 의해 이루어졌다. 재배열 이후 입자 표면적 증가에 의한 마찰면적이 증가하기 때문에 압축하중은 급격하게 증가한다. 결과적으로 입자직경이 작을 경우 입자 재배열 시간이 길어지며 입자의 마찰력과 소성변형력이 공존하는 구간(Fig. 7 (A))은 상대적으로 짧아진다. 전체적인 유효응력분포는 또한 입자직경 1mm(Fig. 5)에 비해 감소하였다. 변형율체인과 응력분포 양상은 입자직경 1mm와 유사하였다.

3.2 분말 압축시험 결과

Fig. 9는 평균입도 20 μ m에 대해 압축속도 변화에 따른 압축하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 전체적인 하중-변위곡선의 양상은 앞선 해석결과와 동일하였다. 앞서 설명하였듯이 이러한 경향은 압축속도가 감소할수록 입자의 재배열이 원활해지기 때문이다. 평균입도 3 μ m의 압축시험에서도 동일한 결과가 나타났다. 앞선 해석과는 다르게 압축시험은 양방향 압축방식(double action pressing)을 채택하였다. 이로 인해 실험에서 분말이 치밀화가 발생하는 변위구간은 일방향 압축 해석에서의 치밀화 변위구간 보다 2배 이상 빨리 일어났다. 따라서 압축시험에서 하중은 초기 변위에서부터 서서히 증가하였다.

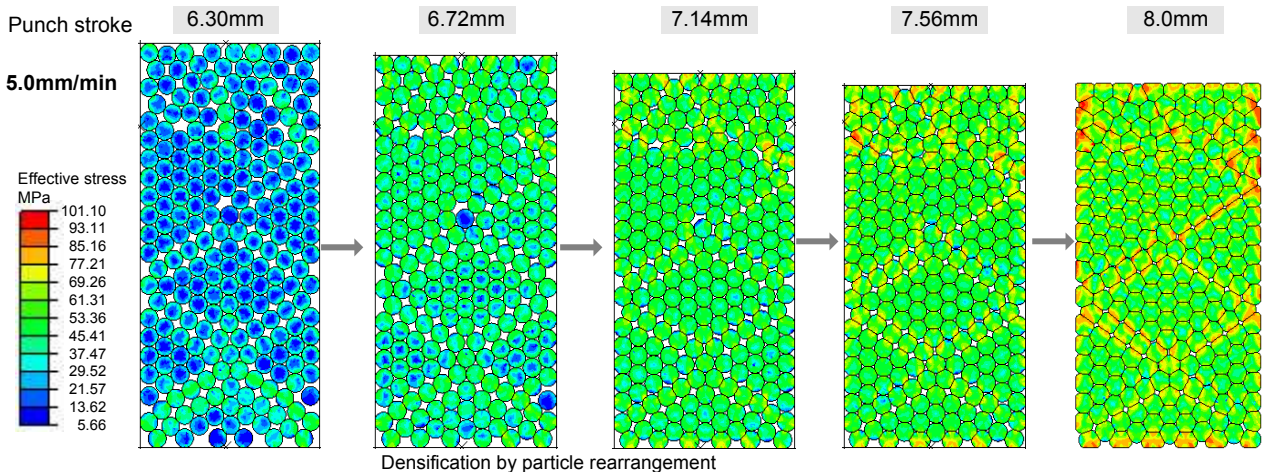


Fig. 8 Behaviors and effective stress distributions of powder with particle diameter of 0.5mm

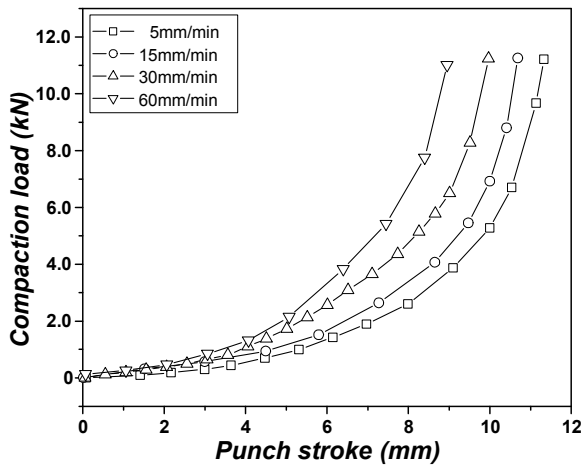


Fig. 9 Load-stroke curves of Al 1100 powders with particle diameter of 20µm for different punch speeds obtained from compaction tests

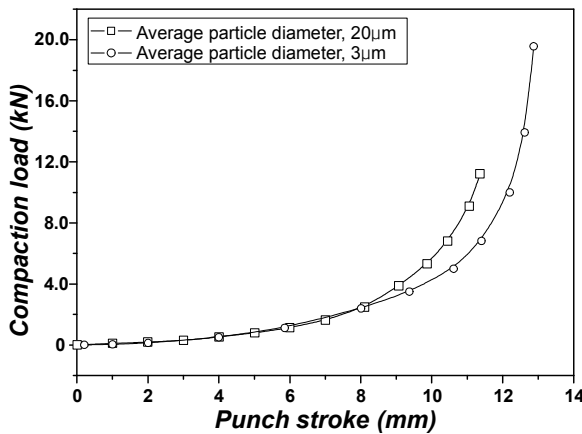


Fig. 10 Load-stroke curves of Al 1100 powders with particle diameter of 20 and 3µm at punch speed of 5mm/min obtained from compaction tests

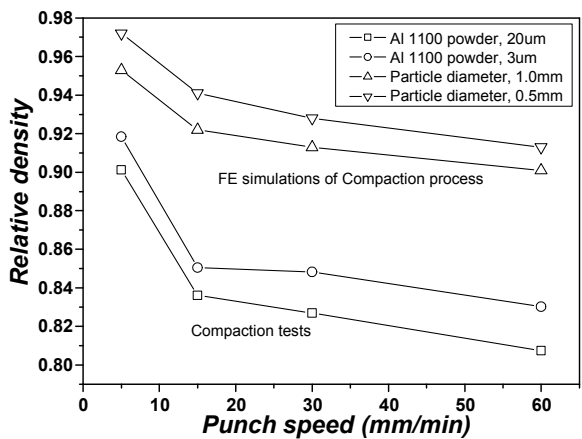
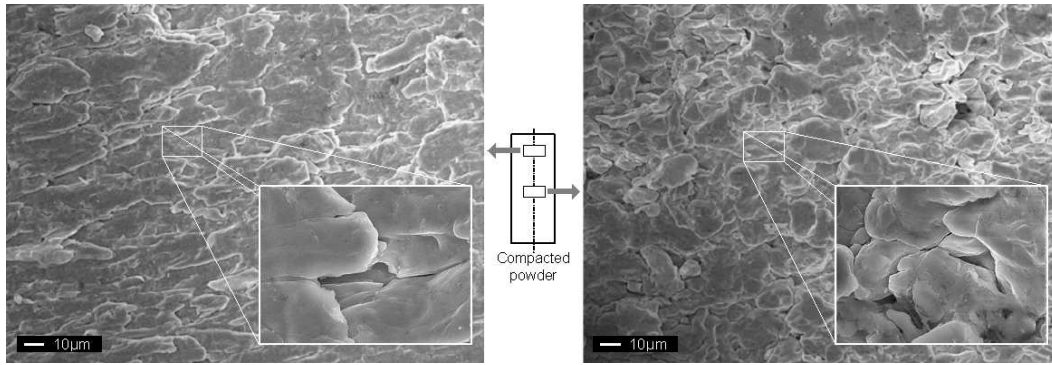


Fig. 11 Relative density of each powder obtained from compaction simulations and tests

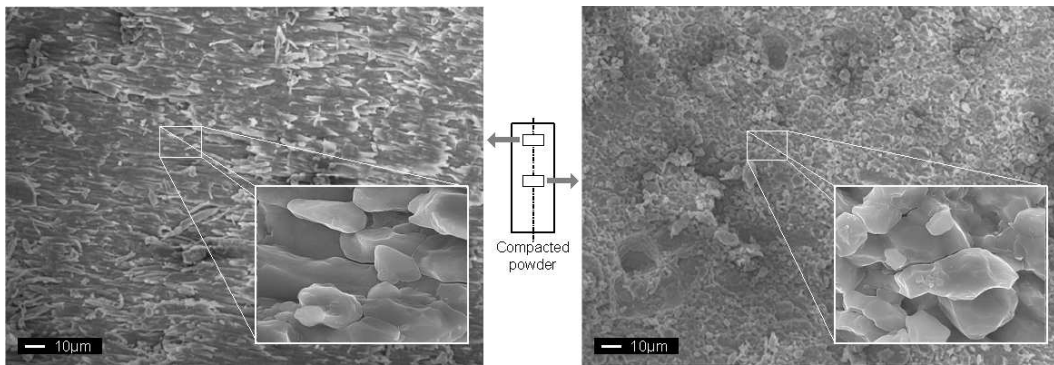
Fig. 10은 압축속도 5mm/min에서 평균입도 20과 3µm의 압축하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 전체적인 결과는 앞선 입자직경의 변화에 대한 해석결과와 동일하게 분말 입자크기가 감소할수록 최대압축하중은 증가하였다. 일반적으로 입자크기가 감소할 경우, 치밀화 과정에서 전체적인 입자의 표면적의 증가로 인해 분말 입자간 마찰력이 증가하여 압축하중을 증가시킨다. 하지만 시험에서는 해석결과와는 다르게 평균입도 3µm 분말이 20 µm에 비해 더 큰 변위에서 최대압축하중을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 컨테이너 내 투입된 분말의 중량은 서로 같지만 초기 분말이 장입된 높이가 3µm 분말을 사용할 경우 더 크기 때문이다. Fig. 11은 해석과 시험으로부터 얻은 압축속도와 입자직경에 따른 각 분말의 상대밀도를 나타낸 것이다. 해석에서 상대밀도는 입자의 면적과 최대 하중점에서 컨테이너 면적비로 계산되었다. 입자직경이 감소하고 압축속도가 감소할수록 상대밀도는 증가하였다. 이것은 앞서 설명하였듯이 입자 재배열에 의한 분말의 치밀화가 더 활발하게 일어나기 때문이다.

앞선 Fig. 10에서 평균입도가 작을 경우 입자간 마찰은 증가하였다. 물론 일반적으로 입자 재배열 또는 유동성은 입자간 마찰에 크게 의존한다. 그러나 본 연구에서 입자간 마찰의 증가는 입자 재배열 또는 유동성의 저하를 의미하는 것이 아니라 입자 재배열에 상대적으로 높은 압축하중이 요구되는 것을 의미한다. 나노사이즈 입자에 경우 표면적이 극단적으로 넓기 때문에 입자간 마찰력만으로 입자이동을 완전히 구속시킬 수도 있다. 이 경우 아무리 압축하중을 증가시켜도 나노입자 분말의 상대밀도는 오히려 마이크로 사이즈 분말보다 낮게 나타날 수도 있다.

Fig. 12는 압축시험 (압축속도5mm/min) 후 각 분말 성형체의 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 분말 성형체의 미세조직은 시편 내 편치와 인접한 부분과 중앙부에 대해 관찰되었다. 평균입도 20과 3 µm 분말 모두 해석결과와 동일하게 편치와 인접한 부분의 입자는 대부분 소성변형되어 압축방향과 수직으로 배열되어 있는 반면에 중앙부분의 입자는 비교적 초기 형상을 유지하면서 밀집되어 있다. 전반적으로 해석결과는 시험결과와 잘 일치하였으며 따라서 해석은 상당한 신뢰성을 가지는 것으로 판단된다.



(a) Average particle size of 20 μm



(b) Average particle size of 3 μm

Fig. 12 SEM images of compacted powders with average particle size of 20 and 3 μm after compaction tests

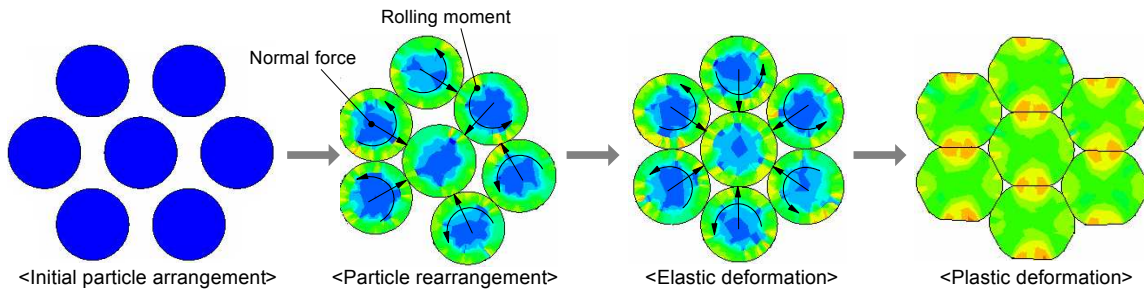


Fig. 13 Typical patterns of particle densification in powder compaction

4. 고찰

Fig. 13은 분말의 압축에서 전형적인 입자의 치밀화 과정을 나타낸 것이다. 알루미늄과 같은 연성의 분말은 초기 입자의 재배열에 의한 입자간 접촉, 이후 입자의 탄성변형과 소성변형으로 치밀화된다. 입자간 접촉 후 입자에 작용하는 힘은 크게 접촉점에 대한 수직력(normal force)과 법선력에 의해 생성되는 회전모멘트(rolling moment)로 나눌 수 있다. 여기서 수직력은 주로 입자의 탄소성변형에 관여하며 회전모멘트는 입자 재배열에

기여한다. 따라서 회전모멘트가 클수록 입자 재배열이 활발해지고 그로 인해 치밀화는 증가한다.

Fig. 14은 압축속도에 따른 입자간 회전모멘트를 나타낸 것이다. 회전모멘트는 컨테이너 바닥에 위치한 입자에 하중이 전달되는 순간 컨테이너 중심부에 위치한 7개의 입자에 작용하는 법선력의 평균값을 입자반경으로 나누어 계산되었다. 회전모멘트는 압축속도가 증가할수록 감소하였다. 이것의 본 논문의 결과로부터 명확히 설명되기 어렵다. 일반적으로 입자의 회전모멘트는 입자간 접촉면적(입자의 소성변형)이 증가할수록 감소할 것으로 예측된다.

앞서 설명하였듯이 압축속도가 증가함에 따라 입자에 하중이 전달되는 속도가 빠르고 변형을 체인이 수직으로 형성된다. 이러한 경향은 입자간 작은 접촉면적 하에서도 높은 수직력을 발생시키거나 입자가 회전하기 전에 입자간 접촉 수를 증가시켜 결국, 입자의 회전모멘트를 방해하는 것으로 판단된다. 이러한 문제는 추후 연구에서 상세히 논의될 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 압축속도와 입자반경에 따른 입자의 변형거동과 상대밀도를 평가하기 위해 다입자유한요소해석을 이용하여 AI 분말의 압축시뮬레이션을 수행하였다. 또한 해석의 신뢰성을 검증하기 위해 다양한 압축속도와 입자직경에 대한 압축시험을 수행하였다. 이상의 결과는 다음과 같다.

(1) 압축속도가 증가할수록 같은 편치변위에 대한 압축하중은 증가하였고 특정한 하중값에 도달하는 편치변위는 감소하였다. 이것은 높은 압축속도에 대해 입자 내 하중전달속도가 빠르고 분말의 치밀화가 수직으로 형성되기 때문에 짧은 편치변위에서 입자는 구속되어 소성변형되기 때문이다.

(2) 압축속도가 증가할수록 입자의 재배열 시간은 감소하며 따라서 최종 분말 성형체의 상대밀도는 감소하였다. 반대로 낮은 압축속도에 대해 입자의 이동이 원활하며 상대적으로 긴 입자의 재배열시간과 높은 분말의 상대밀도를 가졌다.

(3) 입자직경이 감소할수록 입자간 마찰이 증가하기 때문에 압축하중은 증가하였다. 또한 작은 입자 직경은 입자의 재배열시간이 길고 이에 따라 입자의 소성변형이 상대적으로 큰 입자직경에 비해 늦춰지기 때문에 최종 분말의 상대밀도는 증가하였다.

(4) 압축속도가 감소할수록 입자의 회전모멘트는 증가하였다. 증가된 회전모멘트는 입자간의 이동과 분말의 치밀화에 기여한다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2010-0008-277)과 한국연구재단(NRF-2009-K20601000004-09E0100-00410)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Lewis R.W, Jinka A.G.K, Gethin D.T, 1993, "Computer-Aided Simulation of Metal Powder Die Compaction Processes," *Int. J. Powder Metall.*, Vol. 25, No. 6, pp. 287~293.
- (2) Gethin D.T, Tran V.D, Lewis R.W, Ariffin A.K, 1994, "An Investigation of Powder Compaction Processes," *Int. J. Powder Metall.*, Vol. 30, No. 4, pp.385~398.
- (3) Cundall PA, Strack ODL, 1979, "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies," *Geotechnique*, Vol. 20, pp.47~65.
- (4) Cambou, B, 1998, "Behavior of Granular Systems," Springer, CISM Courses and Lectures No. 385.
- (5) Munjiza A, Owen DRJ, Bicanic N, 1995, "A Combined Finite-Discrete Element Method in Transient Dynamics of Fracturing Solids," *Eng. Comput.*, Vol. 12, pp.145~174.
- (6) Heyliger P.R, McMeeking R.M, 2001, "Cold Plastic Compaction of Powders by a Network Model," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 49, No. 9, pp.2031~2054.
- (7) Martin C. L, Bouvard D, Shima S, 2003, "Study of Particle Rearrangement During Powder Compaction by the Discrete Element Method," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 51, No. 4, pp.667~693.
- (8) Redanz P, Fleck N. A, 2001, "The Compaction of a Random Distribution of Metal Cylinders by the Discrete Element Method," *Acta Material*, Vol. 49, p.4325.
- (9) Adam T. Procopio, Antonios Zavaliangos, 2005, "Simulation of Multi-Axial Compaction of Granular Media from Loose High Relative Densities," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 53, pp.1523~1551.