

자유분말체의 소성변형에 대한 구성방정식 (Constitutive Equations for Plastic Deformation of Loose Metal Powder)

홍익대학교 박종진*, 김진영

1. 서론

본 연구에서는 자유분말금속(loose powder metal)의 소성변형을 이해하기 위해서 구리분말에 대한 정수압압축과 일축변형률압축 실험을 수행하고 이를 이용하여 항복조건을 유도하고 응력과 소성변형률중분의 관계를 나타내는 구성방정식을 유도하였다. 본 연구에서는 항복함수형태를 식(1)과 같이 제안하였다. 이 식은 그림 1에 도시되어 있듯이 정수압축의 음의 방향(또는 압축방향)으로 이동된 타원으로 나타난다.

$$F = AJ_2' + B(J_1 - s)^2 = \bar{\sigma}_R^2 = \delta \bar{\sigma}_b^2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

여기서 계수 A, B, δ 는 정수압압축과 일축변형률압축 실험을 통하여 상대밀도의 함수로 표현되며, J_2' 과 J_1 은 각각 편차응력의 이차불변량, 응력의 일차불변량이다. 그리고 $\bar{\sigma}_b$ 와 $\bar{\sigma}_R$ 는 각각 지지금속 일축응력압축에서의 항복강도와 분말체 일축변형률압축에서의 항복강도이다. 일반적으로 자유분말의 인장강도는 0에 가까운 값을 나타내고 상대밀도에 거의 무관하므로 본 연구에서는 인장강도를 항상 0으로써 상대밀도에 무관하다고 가정하였다. 따라서 변위량 s는 타원 장축길이의 반이 되므로 $s = -\frac{\bar{\sigma}_R}{\sqrt{B}}$ 의 관계가 성립한다. 변형중 입자간의 미끄럼 발생이 무시할 정도로 작아지는 상대밀도를 임계상대밀도라고 정의하고, 두드림밀도와 동일하다고 가정하였다. 본 연구에서는 지지금속 항복강도를 지지금속 변형률의 함수로 나타내어 가공경화효과를 나타낼 수 있도록 하였다.

2. 항복조건과 구성방정식

식(1)로 표현되는 항복함수는 이차 균일함수(second order homogeneous function)로써 오일러 정리에 의해 $\sigma_{ij}(\partial F / \partial \sigma_{ij}) = 2F(\sigma_{ij})$ 이 성립한다. 식(1)에 수직법칙을 적용하여 응력과 변형률속도의 관계를 구하면 식(2)와 같다.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{A\lambda} \dot{\epsilon}_{ij} + \frac{1}{\lambda} \left[\frac{1}{18B} - \frac{1}{3A} \right] \dot{\epsilon}_v \delta_{ij} - \frac{s}{3} \delta_{ij} \quad \dots \dots \dots (2)$$

식(1)의 계수 A, B, δ 를 상대밀도의 함수로 나타내기 위하여 구리분말에 대한 일축변형과 정수압 실험을 수행하였다. 식(1)로부터 다음과 같은 관계를 알 수 있다.

$$\bar{\sigma}_R^2 = \delta \bar{\sigma}_b^2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

δ 는 다음의 두 가지 조건을 만족하여야 한다. 첫째, $\bar{\sigma}_R$ 은 일축변형률압축에서의 항복강도이므로 상대밀도가 1에 근접할수록 는 무한대가 되어야 한다. 둘째, 임계상대밀도 이전까지는 δ 가 0이라는 것이다. 즉, 임계상대밀도는 자중 또는 진동에 의하여 충전된 상대밀도으로써 이 때의 압축강도를 0으로 기준한다. 따라서 δ 는 임계상대밀도와 상대밀도 1의 구간에서 0에서 무한대로 단순증가하는 함수이어야 한다. 실험결과로부터 구한 δ 는 식(4)와 같이 나타났다.

$$\delta = \frac{\bar{\sigma}_R^2}{\bar{\sigma}_b^2} = \frac{2.5(R - R_T)^{1.8}}{1 - R^5} \quad \dots \dots \dots (4)$$

이로부터 구한 B는 그림 2에 도시되어 있듯이 상대밀도의 이차함수인 포물선 모양이며 0.6과 0.7사이에서 최대값을 가지며 이 후에 급격히 감소한다. A는 그림 3에 도시되어 있듯이 상대밀도 0.6과 0.7사이에서 최소값을 보이고 있으며 이 후 급격히 증가하고 있다. 이로써 자유분말금

속의 항복조건을 구리분말실험결과를 기준으로 완성하였다.

3. 결론

본 연구에서는 분말체의 강도를 상대밀도와 기지금속 유동응력에만 의존하는 것으로 가정하였다. 하지만 강도는 금속분말의 형태와 크기에 의존하므로 추후 이에 대한 실험을 수행하여 이들의 영향을 정량적으로 표현할 수 있는 항복조건을 구하여야 할 것이다. 또한 제안된 항복조건과 구성방정식을 유한요소법에 적용하는 기술과 이를 분말성형공정에 응용하는 해석기술의 개발을 추구하여야 할 것이다.

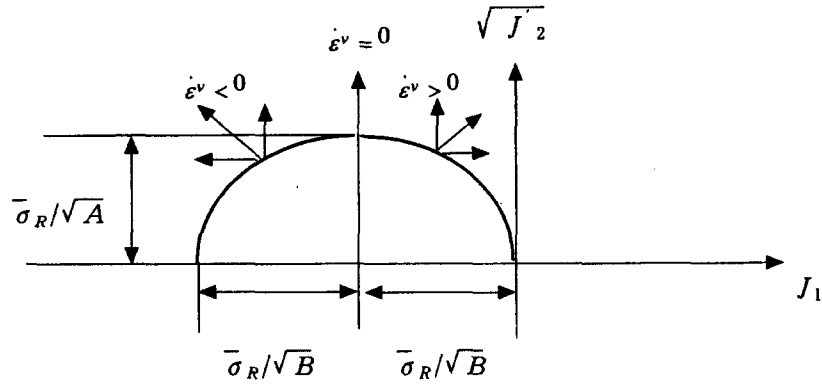


Figure 1. Proposed yield locus of loose metal powder

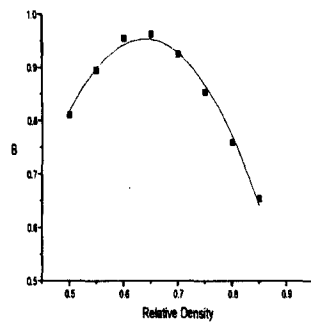


Figure 2. Variation of constant B for relative density

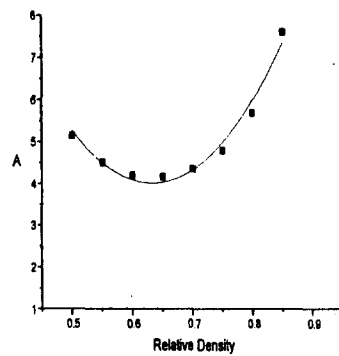


Figure 3. Variation of constant A for relative density