<학술논문> **DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.10.1471** ISSN 1226-4873

링 압축시험과 유한요소해석을 이용한 미세성형 공정에서의 마찰특성에 관한 연구§

김 홍 석*†· 김 긍 록*
* 서울산업대학교 기계공학과

A Study of Friction in Microfoming Using Ring Compression Tests and Finite Element Analysis

Hong Seok Kim*† and Geung Rok Kim*
* Dept. of Mechanical Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Technology

(Received May 10, 2010 ; Revised May 19, 2010 ; Accepted May 20, 2010)

Key Words : Microforming(미세성형), Size Effect(크기효과), Ring Compression Test(링 압축실험), Finite Element Analysis (유한요소해석)

초록: 미세성형 공정은 마이크로 크기의 부품 생산에 있어 다양한 재료의 활용, 높은 생산성, 적은 재료의 손실, 고품질 생산을 실현할 수 있는 방법으로 최근 산업계와 학계의 많은 주목을 받고 있다. 하지만 매크로 성형에서 마찰거동을 묘사하기 위한 기존의 모델들은 미세성형에서 많은 오차를 유발하는 것으로 알려져 있다. 따라서 미세성형 공정의 성공적인 개발과 실용화를 위해서는 마찰거동의 크기효과에 대한 심도 있는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 다양한 크기의 알루미늄 및 황동 재료를 대상으로 링 압축시험을 실시하여 소재의 크기에 대한 마찰거동의 크기효과를 고찰하였다. 유한요소해석을 이용하여 링 압축 시 접촉면의 마찰력이 링 시편의 변형특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한 미끄럼선장 모델링과 상계해석을 응용한 마찰모델을 활용하여 미세성형에서의 마찰거동 특성을 이론적으로 설명하였다.

Abstract: Microforming processes have recently attracted considerable attention from industry and academia since they enable the production of microscale parts using various materials at a high production rate, minimize material loss, and provide parts with excellent mechanical properties. However, for successful development and applications of the microforming process it is critical to take the tribological size effect into consideration because previous studies have shown that traditional friction models for macroscale forming generate significantly erroneous results in the case of microforming. In this paper, we performed scaled ring compression experiments to investigate the tribological size effect of aluminum and brass materials in microforming. The sensitivity of the interfacial friction to the deformation characteristics of the ring was quantitatively analyzed by the finite element analysis. In addition, a friction model based on slip line field and upper boundary techniques was used to theoretically explain the friction mechanism in microforming.

1. 서 론

최근 제품의 소형화 추세와 함께 마이크로급 부품의 필요성이 크게 증대되고 있어, 관련 생산기술의 확보 및 실용화를 위해 전 세계적인 투자와 연구가 지속되고 있다. 특히 미세성형(microforming) 기술은 다양한 소재를 활용한 초소형 고정밀 생산이 가능하면서 높은 생산성과 적은 재료의 손실, 균질한 품질의 제품 생산 등을 실현할 수 있어 마이크로급 부품 생산에 매우 적합한 방법으로 고려되고 있다. 하지만 재료의 변형역역이 마이크로 단위로 감소함에 따라 나타나는 소위 크기효과(size effect)로 인해 매크로 영역에서 축적된 기존의 성형 기술과 노하우들을 그대로 미세성형에 적용할 수 없다. 특히 마찰(friction)은 성형 시 재료의 변형 특성과 금형의 마모, 제품의 품질에 미치는 영향이 매우 큰 중요한 인자로 인식되어 있으나, 마이크로 영역에서는 그 특성이 현저하게 변화하는 것으로 관찰[1]되고 있어 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

§ 이 논문은 2010 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임.
† Corresponding Author, hongseok@snut.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

성형 공정에서 마찰특성을 파악하는 방법으로는 일반적으로 링 압축실험(ring compression test)[2]이 폭넓게 활용되고 있다. 이는 링 시편의 압축 시 변형특성, 특히 내경의 변화가 접촉면의 마찰특성에 따라 민감하게 변화하는 현상을 이용한 것으로, 시편의 크기가 마이크로 영역으로 줄어들수록 마찰력이 증가하는 것이 확인되었다.[3] 이와 같은 마찰력의 크기효과는 원기둥 시편을 같은 모양의 펀치를 이용하여 상하에서 동시에 압출시키는 이중 컵 압출(double cup extrusion) 실험[4-6]을 통해서도 증명되었다. 이중 컵 압출 실험에서는 두 개의 펀치 중 하나는 정지해 있는 상태로, 나머지 하나는 움직이는 상태로 시편을 동시에 압출하기 때문에 마찰이 클 경우 움직이는 펀치에 의하여 압출된 컵의 높이가 상대적으로 크다. Engel 등[7]은 이를 이용하여 미세성형에서의 마찰력이 매크로 성형과 비교할 때 약 20 배 이상 증가하는 것을 확인하였으며, 열린윤활포켓(open lubricant pockets)과 닫힌윤활포켓(closed lubricant pockets)의 개념을 이용하여 그 크기효과를 정성적으로 설명하였다. 한편 Bay[8]와 Wahnheim 등[9]은 일찍이 미끄럼선장 모델링(slip line filed modeling)과 상계해석(upper boundary technique)을 이용하여 소재 접촉면의 수직하중(normal force)과 실제 접촉면적(real area of contact)의 마찰응력(friction stress)과의 관계를 이론적으로 해석하였으며, Nellemann 등[10]은 윤활제(lubricant)의 적용이 접촉면의 마찰특성에 미치는 영향을 연구하였다. 이와 같은 이론적 연구를 활용하여 미세성형에서 나타나는 마찰거동의 크기효과를 정량적으로 해석하기 위한 시도[7]가 이루어졌고, Jeon 등[11]과 Vollertsen 등[12]은 유한요소해석(finite element analysis)을 활용하여 미세성형에서의 마찰특성 및 공정변수의 영향을 고찰하였다.

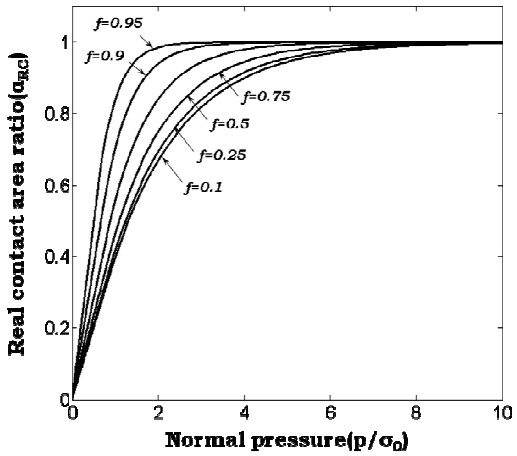
현재까지의 많은 노력에도 불구하고 미세성형에서 마찰거동의 크기효과를 정확하게 묘사하는 모델은 아직 개발되지 못하였기 때문에, 이에 대한 보다 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 미끄럼선장 모델링과 상계해석에 근거한 기존의 마찰모델과 Engel 등[7]의 윤활포켓 이론을 활용하여 매크로 및 마이크로 영역에서의 마찰거동을 이론적으로 고찰하였다. 또한 황동 및 알루미늄 소재를 대상으로 링 압축실험을 실시하여 이론적 모델의 유효성을 확인하였고, 소재의 크기에 대한 마찰거동의 변화특성을 고찰하였다. 또한 마찰력의 크기가 링 시편의 변형특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 유한요소해석을 활용하였다.

2. 이론적 모델링

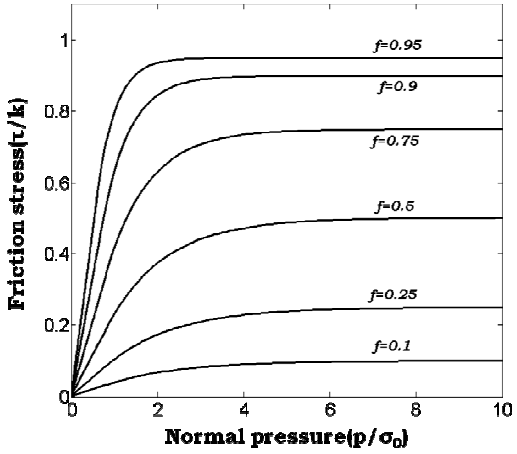
성형 공정에서 마찰특성을 설명하기 위하여 쿨롱 마찰모델(coulomb friction model)과 일정전단 마찰모델(the constant friction model), 일반마찰모델(the general friction model) 등이 활용되고 있다. 이 중 식 (1)에 나타난 일반마찰모델이 성형공정 해석에 보다 적합한 것으로 알려져 있다.[13]

$$\tau = f\alpha_{RC}k \tag{1}$$

여기서 τ 는 마찰응력, f 는 마찰인자(friction factor), α_{RC} 는 외관상 접촉면적에 대한 실제 접촉면적의 상대적인 비율, k 는 전단유동응력(shear flow stress) 을 나타낸다.

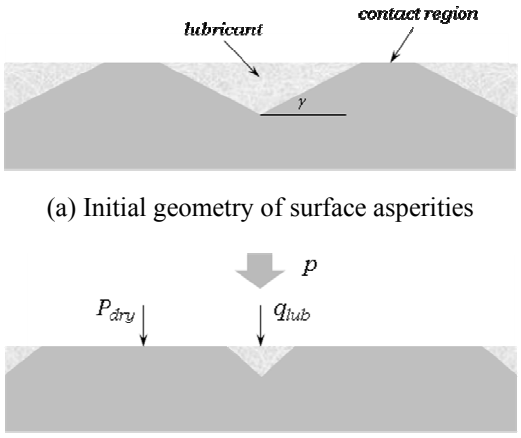


(a) Real contact area vs. normal pressure



(a) Friction stress vs. normal pressure

Fig. 1 Real contact area and friction stress as a function of normal stress at dry interface condition[8]



(a) Initial geometry of surface asperities

(b) Surface asperities under pressure

Fig. 2 Deformation of surface asperities in microscopic view

Bay[8] 와 Wahnheim 등[9]은 Fig. 1 에 나타난 것처럼 일반마찰모델과 미끄럼선장 모델링, 상계해석을 활용하여 건조마찰 상태에서 접촉면의 수직응력이 실제 접촉면의 비율 α_{RC} 과 마찰응력 τ 에 미치는 영향을 이론적으로 고찰하였다. Fig. 1 에서 p/σ_0 과 τ/k 는 각각 유동응력에 대한 접촉면의 압력과 전단유동응력에 대한 마찰응력을 나타내는 것으로, 접촉면의 압력이 증가할수록 실제 접촉면적이 증가하여 마찰응력도 증가하게 되는 것을 알 수 있다.

한편 Nellemann 등[10]은 윤활제의 적용이 접촉면의 마찰특성에 미치는 영향을 분석하였는데, Fig. 2 에 나타난 것처럼 접촉면에 압력 p 가 작용하게 되면 그 일부(q_{lub})는 소재 표면의 골짜기(valley) 부분에 차 있는 윤활제에 작용하기 때문에, 접촉면에서 마찰응력에 영향을 미치는 p_{dry} 의 크기는 상대적으로 감소하게 된다. 즉 α_C 를 외관상 접촉면적에 대한 윤활제의 상대적인 접촉면적이라 정의하면 p_{dry} 는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 또한 Fig. 1 을 참고하면 윤활상태에서는 α_{RC} 가 줄어들게 되어 결국 마찰력이 감소하게 되는 것을 알 수 있다.

$$p_{dry} = p - \alpha_C q_{\text{lub}} \tag{2}$$

여기서 윤활제에 가해지는 압력 q_{lub} 는 윤활제의 특성을 나타내는 재료계수 K_1, K_2 와 재료 표면의 요철 경사각(asperity slope angle) γ, 그리고 α_{RC} 의 함수로 식 (3) 과 같이 표현할 수 있다.[10]

$$q_{\text{lub}} = K_1 f(\alpha_{RC}, \gamma, K_2) \tag{3}$$

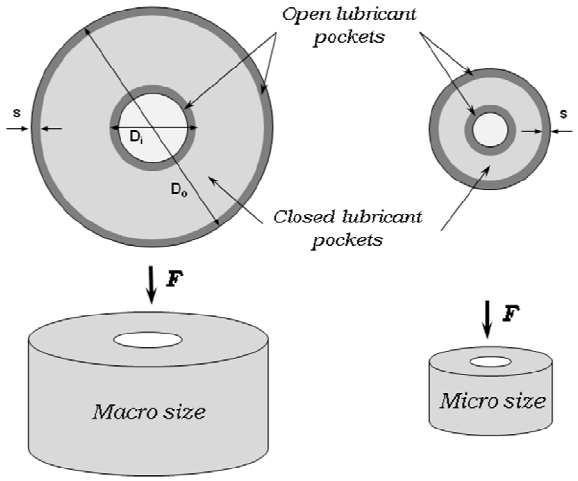


Fig. 3 Increasing ratio of open lubricant pockets with decreasing specimen size

상기의 연구결과와 미세성형에서의 윤활포켓 이론[7]을 활용하면 마이크로 영역에서 마찰거동의 크기효과를 이론적으로 설명할 수 있다. Fig. 3 에 나타난 것처럼 변형 힘 F 가 소재에 가하지면 접촉표면에 소성변형이 일어나고 소재 내부에 위치하는 표면의 골짜기에는 윤활제가 갇히게 되는 닫힌윤활포켓이 생성된다. 하지만 소재의 가장자리 부분에는 그 기하학적 특성상 윤활제가 쉽게 빠져나가는 열린윤활포켓이 생성되어, 윤활제에 작용하는 압력 q_{lub} 를 감소시키게 된다. 미세성형의 경우에는 가공 소재의 크기는 줄어들지만 표면의 기하학적 특성에는 큰 변화가 없기 때문에 Fig. 3 에 도시된 열린윤활포켓의 폭 s 는 매크로 성형과 비교할 때 큰 차이가 없다고 가정할 수 있다. 즉 시편의 크기가 작아질수록 열린윤활포켓의 상대적 면적이 증가하여 닫힌윤활포켓의 비율이 감소하게 되고, 이는 식 (2)에서 설명한 것처럼 실제 접촉면의 압력 p_{dry} 와 마찰응력 τ 을 증가시키는 역할을 하게 된다.

미세성형에서 마찰거동의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 열린윤활포켓과 닫힌윤활포켓의 상대적 면적비율을 각각 α_O 와 α_C 라 정의하면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\alpha_O + \alpha_C + \alpha_{RC} = 1 \tag{4}$$

마찰거동의 크기효과는 Fig. 3 에서 설명한 것처럼 소재의 크기감소에 따라 변형영역 가장자리 부분의 면적(A_{out}) 비율이 증가하는 것에서 그 원인을 찾을 수 있다. 따라서 미세성형의 크기인자

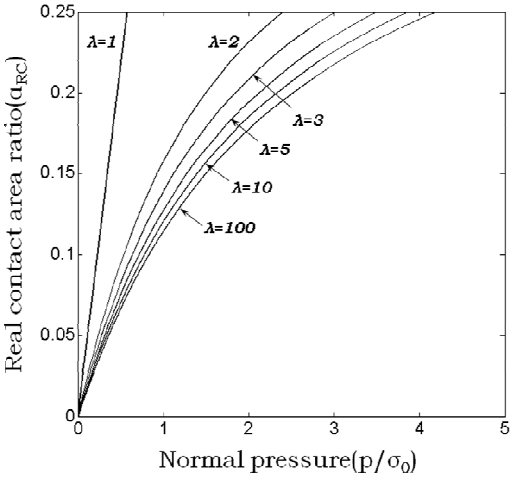


Fig. 4 Normal pressure vs. real contact area ratio with different size factors

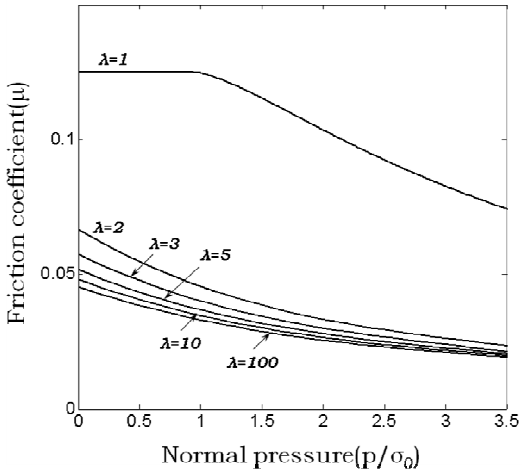


Fig. 5 Normal pressure vs. friction coefficient with different size factors

(size factor) λ 를 변형영역의 전체면적 A 에 대한 A_{out}의 상대적인 비율로 다음과 같이 정의한다.

$$\frac{1}{\lambda}=\frac{A_{out}}{A} \tag{5}$$

즉 λ 가 1 인 경우에는 A_{out}이 전체면적과 같아져 닫힌윤활포켓이 존재하지 않게 되며, 소재의 크기가 증가할 수록 λ 도 증가하여 일반적인 매크로 성형의 경우에는(λ=∞) 열린윤활포켓의 상대적인 비율을 무시할 수 있게 된다. 시편의 가장자리 면적 A_{out}은 Fig. 3 을 참고하여 식 (6)과 같이 계산할 수 있으며, 식 (2)와 식 (4), 식 (5)를 활용하면 윤활상태에서 실제 접촉면에 가해지는 압력 p_{dry}를 식 (7)과 같이 유도할 수 있다.

$$A_{out}=A\cdot\alpha_O+A_{out}\cdot\alpha_{RC} \tag{6}$$

$$p_{dry}=p-(1-\alpha_{RC})\left(1-\frac{1}{\lambda}\right)q_{\text{lub}} \tag{7}$$

식 (3), 식 (7), Fig. 1 을 이용하면 크기인자 λ 가 접촉면 압력 p 와 실제 접촉면적 α_{RC} 의 관계에 미치는 영향을 Fig. 4 와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 윤활제의 재료계수는 K_1=200MPa, K_2=10,[10] 표면요철의 경사각은 γ=10°, 마찰인자는 f=0.5, 유동응력은 σ_0=400Mpa, k=230MPa 의 일정한 값을 가지는 것으로 가정하였다. Fig. 4 에 나타난 것처럼 동일한 접촉면 압력에 대하여 크기인자 λ 가 작아질수록 실제 접촉면의 비율 α_{RC} 가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 이미 설명한 것처럼 시편의 크기가 작아짐에 따라 윤활제가 유효하게 작용하는 닫힌윤활포켓의 면적이 감소하는 것에서 그 원인을 찾을 수 있다.

식 (1)에 나타난 일반마찰모델의 관계식을 널리 알려진 쿨롱 마찰모델과 결합하면 쿨롱 마찰계수(friction coefficient) μ를 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$\mu=\frac{f\alpha_{RC}k}{p} \tag{8}$$

식 (8)과 Fig. 4 의 결과를 이용하면 접촉면의 압력과 쿨롱 마찰계수와의 관계를 Fig. 5 와 같이 나타낼 수 있다. 마찰계수 μ는 크기인자 λ 가 작아질수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 λ 가 1 인 경우에는 윤활제가 적용되는 닫힌윤활포켓이 존재하지 않기 때문에 마찰계수가 급격하게 증가하는 현상을 보였다. 또한, 접촉면의 압력이 증가할수록 마찰계수가 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 1 에서 설명한 것처럼, 일정 값 이상의 접촉면 압력에 대해서는 압력의 증가에 따른 실제 접촉면적 비율(α_{RC})과 마찰응력(τ)의 증가가 둔화되기 때문인 것으로 판단된다. 한편 크기인자 λ 가 10 이상이면 크기인자에 따른 마찰계수의 변화가 미미한 것으로 관찰되어 마찰거동의 크기효과가 거의 소멸하는 것으로 판단된다.

3. 유한요소해석

링 압축실험에서 마찰력의 크기가 링 시편의 변

형에 미치는 영향을 분석하기 위하여 유한요소해석 모델을 수립하였다. Fig. 6 에 나타난 것처럼 펀치와 다이, 링 시편을 이차원 축대칭(axisymmetric)으로 모델링 하였고, 펀치와 다이는 강체(rigid body)를 가정하여 모든 변형 자유도를 구속하였다. 접촉면은 이상적인 평면으로 가정하였고, 링 시편 크기는 일반적으로 사용되는 크기비율[11]을 참고하여 외경(D_o) : 내경(D_i) : 높이(h) = 6mm : 3mm : 2mm 로 결정하였다. 해석은 상용 소프트웨어인 ABAQUS /Standard 를 활용하였고 알루미늄과 황동을 대상으로 해석을 실시하였다. 해당 재료의 물성은 Fig. 7 에 나타나 바와 같이 인장시험을 통하여 획득하였다.

각 소재에 대하여 접촉면의 쿨롱 마찰계수를 변화시키면서 링 시편의 압축량(reduction in height)에 따른 변형특성을 관찰하였다. Fig. 8 에 도시한 바와 같이, 접촉면의 마찰력이 클수록 링시편의 내경감소율이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 링 시편의 압축량이 약 45% 일 때 쿨롱 마찰계수가 μ=0.3 인 경우에는 약 36% 의 내경 감소가 관찰되었으나, 마찰계수가 μ=0.05 로 감소할 때는 오히려 26.4% 만큼 내경이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 마찰이 큰 경우에는 링 시편에 베럴링(barreling) 효과가 현저하게 나타나는 것도 관찰할 수 있었다.

알루미늄과 황동재료에 대한 해석결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 이미 언급한 것처럼 링 시편 압축시 내경의 변화는 마찰력의 크기에 매우 민감하게 영향을 받는 것을 정량적으로 확인할 수 있었다.

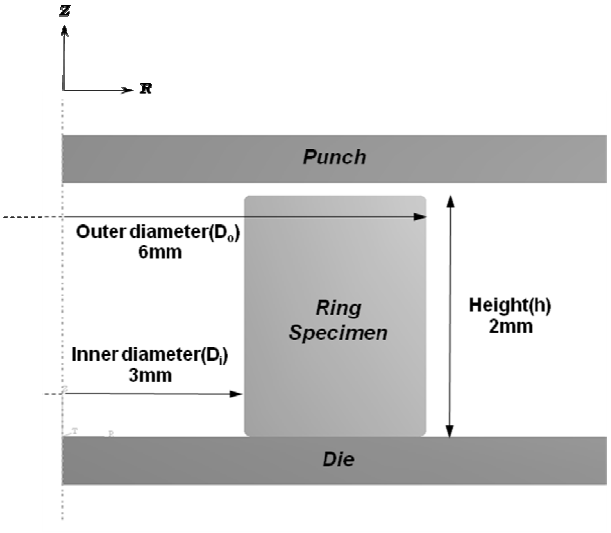


Fig. 6 Sketch of the finite element model for ring compression tests

또한 알루미늄과 황동은 Fig. 7 에 나타난 것처럼 유동응력의 크기에 절대적인 크기에 차이가 있음에도 불구하고 압축량에 대한 내경감소율의 관계는 유사한 특성을 보였다. 특히 마찰계수 μ가 0.1 이하인 경우에 두 재료의 변형특성이 거의 일치하였고, 마찰계수가 0.1 보다 큰 경우에도 내경 감소

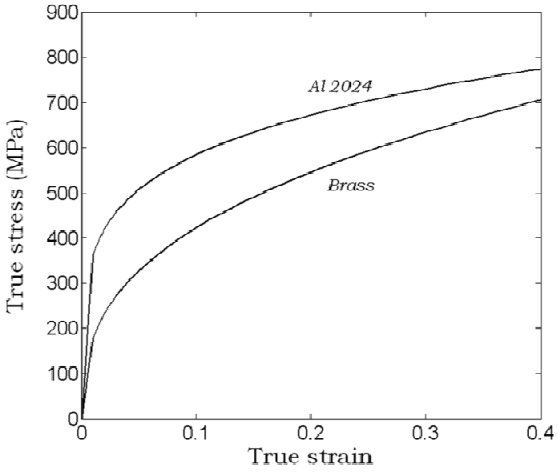
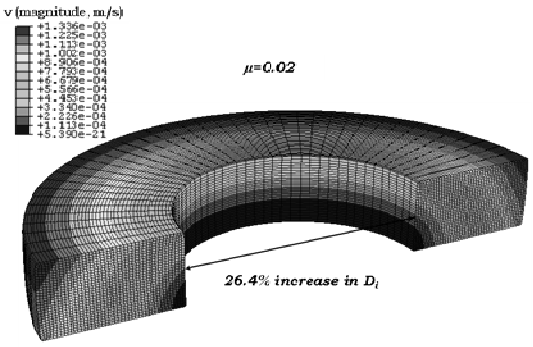
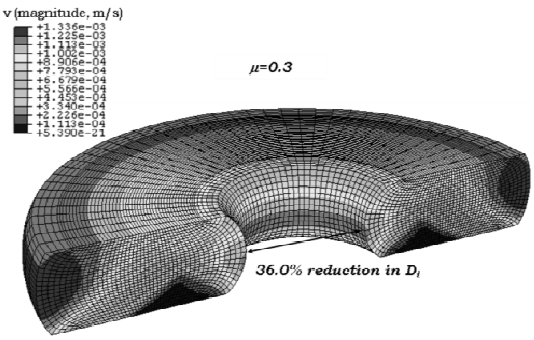


Fig. 7 True strain-stress curves for Al 2024 and brass materials



(a) μ=0.02



(b) μ=0.3

Fig. 8 Ring specimen after 45% compression in height at different friction conditions (Al 2024)

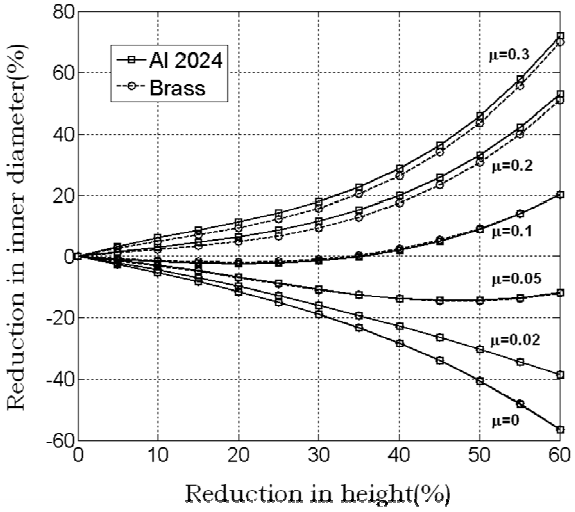


Fig. 9 FEA results for ring compression tests for various friction coefficients

율의 차이가 약 5% 미만이었다. 이는 링 시편의 압축 시 발생하는 내경의 변화가 소재의 현재 응력상태와 마찰력의 상대적인 크기에 따라 결정되기 때문인 것으로 판단된다. 즉 마찰계수 μ는 접촉면에 작용하는 수직응력에 대한 마찰응력의 상대적인 크기를 나타내는 인자이기 때문에, 마찰계수가 같은 조건에서는 수직응력과 마찰응력의 상대적인 분포가 비슷한 상태가 된다. 특히 황동과 알루미늄은 변형경화 특성이 유사하기 때문에 압축시 링 시편에 발생하는 상대적인 유동응력 분포가 유사할 것으로 예상되고, 마찰계수가 같은 상태에서는 마찰력의 상대적인 크기도 비슷하게 되어 재료의 절대적인 강도가 소재의 변형특성에 미치는 영향은 감소하게 되는 것으로 판단된다. 하지만 경화 특성이 현저히 다른 재료에 대해서는 변형시 소재의 응력분포가 달라지기 때문에, 마찰계수가 같은 조건에서도 변형특성이 달라질 것으로 예상되며 추가적인 해석을 통해 이를 고찰할 필요가 있다.

4. 실험적 고찰

알루미늄과 황동 재료에 대한 유한요소해석 결과를 활용하여 마찰거동의 크기효과를 실험적으로 고찰하였고 이론적 모델링의 유효성을 확인하였다.

4.1 실험 방법

소재의 크기가 마찰거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 10 에 나타난 것처럼 다양한 크기(h=670μm, 1mm, 670μm)의 링 시편을 절삭 가공

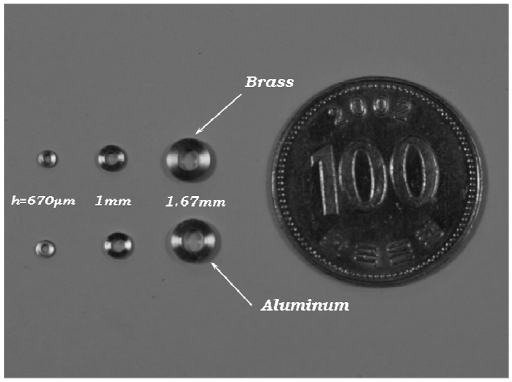


Fig. 10 Ring compression specimens of various sizes

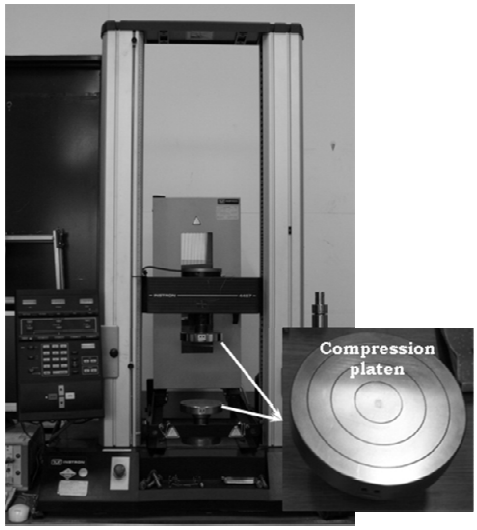
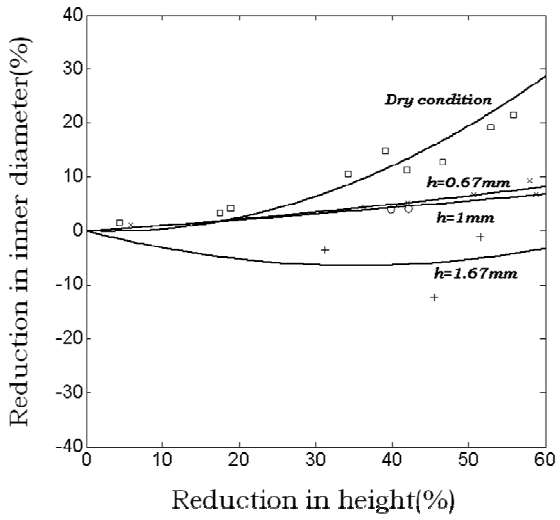


Fig. 11 Ring compression test machine (Instron 4467)

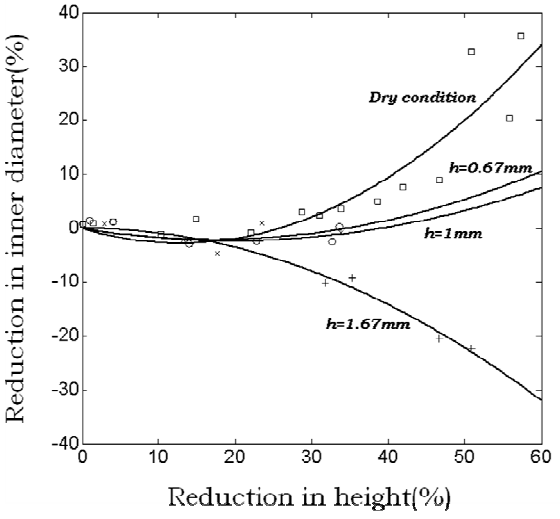
하였다. 시편의 상대적인 크기는 외경 : 내경 : 높이 = 6 : 3 : 2 를 유지하였으며, 건조마찰 상태 혹은 윤활제(Tellus 46, Shell)를 적용한 윤활 조건 하에서 만능시험기(Fig. 11)를 사용하여 링 시편을 압축하였다. 압축된 시편의 높이와 내경 변화는 버니어 캘리퍼스와 현미경(microscope)를 이용하여 측정하였다.

4.2 실험결과

알루미늄과 황동 링 시편에 대한 압축실험 결과를 Fig. 12 에 도시하였다. 윤활제가 적용되지 않은 건조 상태에서는 두 재료가 유사한 변형특성을 보였다. 압축량이 50% 일 때 약 20% 의 내경 감소가 관찰되었고, 유한요소해석 결과를 참고하면 접촉면의 쿨롱 마찰계수가 약 μ=0.15 로 판단된다. 윤활 조건에서는 이론적 모델에서 예측한 것처럼 시편의 크기가 작아질수록 마찰력의 크기는 증가



(a) Al 2024



(b) Brass

Fig. 12 Reduction in inner diameter as a function of the reduction in height for various specimen sizes

하였다. 시편의 크기가 h=1.67mm, 1mm, 0.67mm 일 때 알루미늄 재료는 마찰계수가 각각 μ=0.060, 0.075, 0.080 으로 측정되었고, 황동의 경우에는 μ=0.035, 0.080, 0.085 인 것으로 관찰되었다. 두 재료 모두 시편의 크기가 h=1mm 와 h=0.67mm 인 경우에는 마찰계수의 차이가 크지 않았다.

이미 이론적 모델에서 소재의 크기에 따른 마찰거동의 크기효과를 예측하였으며, 본 실험결과를 통해 이론적 모델링의 유효성을 정성적으로 증명할 수 있었다. 하지만 향후 링 시편의 크기를 더욱 축소시켜 마이크로 영역에서 많은 수의 유효데이터를 확보하는 것이 필요하며, 이론적 모델을 활용하여 윤활포켓의 상대적인 면적비율의 결정이나 변형중 마찰계수의 변화 등에 대해서도 추가적인 연구가 필요하다. 또한 표면거칠기(surface roughness), 이방성(anisotropy), 변형률 속도(strain rate) 등의 재료 물성과 공정변수들도 마찰거동에 미치는 영향이 현저할 것으로 판단되므로 이에 대한 추가적인 연구를 실시할 계획이다.

5. 결 론

본 연구에서는 미세성형 공정에서 마찰거동의 크기효과를 이론적 모델과 유한요소해석, 링 압축실험을 통하여 고찰하였다.

(1) 미끄럼선장 모델링과 상계해석, 윤활포켓이론을 활용하여 미세성형에서 마찰거동의 크기효과를 이론적으로 고찰하였다. 소재의 크기가 감소할 수록 닫힌윤활포켓의 면적 비율이 감소하고 실제 접촉면적이 증가하기 때문에 미세성형에서 마찰력이 증가하게 된다. 이러한 마찰거동의 크기효과는 열린윤활포켓이 존재하는 소재의 가장자리 면적비율이 전체 면적의 10% 이상 되는 경우에 현저하게 나타난다.

(2) 링 시편의 압축에 대한 유한요소해석을 실시하여 접촉면의 마찰특성과 재료의 물성이 시편의 변형특성에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하였다. 접촉면의 마찰이 증가할수록 내경 감소율이 증가하였고, 소재에 발생하는 배럴링 효과도 현저하였다. 변형경화 특성이 비슷한 재료의 경우에는 유동응력의 절대적인 크기 차이에도 불구하고 마찰거동 특성이 매우 유사한 것으로 관찰되었다. 하지만 경화특성이 현저히 다른 소재에 대해서는 마찰계수가 동일한 경우에도 재료의 변형특성이 달라질 것으로 예상되므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

(3) 황동과 알루미늄 재료를 대상으로 링 압축실험을 실시하여 소재의 크기에 따른 링 시편의 변형특성을 관찰하였다. 유한요소해석 결과를 활용하여 시편의 크기에 따른 마찰계수의 변화를 정량적으로 확인할 수 있었다. 시편의 크기가 마찰력에 미치는 영향이 현저하기 때문에 미세성형의 공정 및 장비 설계나 최적화 과정에 마찰거동의 크기효과가 반드시 반영되어야 한다.

(4) 미세성형의 실용화를 위해서는 향후 윤활포켓의 상대적인 면적비율의 결정, 변형중 마찰계수의 변화, 표면거칠기, 이방성, 변형률 속도 등이 마찰거동에 미치는 영향 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 기초연구사업 (No. 2009-0068593)의 일환으로 수행 되었습니다. 또한 서울산업대학교 신임교수 연구정착비 지원사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N. and Engel, U., 2001, "Microforming," *CIRP Ann.*, Vol. 50, pp. 445~462.

(2) Male, A. T. and Cockroft, M. G., 1965, "A method for the Determination of the Coefficients of Friction of Metal Under Bulk Plastic Deformation," *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 93, pp 38~46.

(3) Engel, U., Messner, A. and Tiesler, N., 1998, "Cold Forging of Microparts-Effect of Miniaturization on Friction," *Proceedings of the 1st ESAFORM Conference on Materials Forming*, Sohpia Antipolis, France, pp. 77~80.

(4) Buschhausen, A., Weinmann, K., Lee, J. Y. and Altan, T. T., 1992, "Evaluation of Lubrication and Friction in Cold Forging Using a Double Backward-Extrusion Process," *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 33, pp. 95~108.

(5) Tiesler, N., 2002, "Microforming-Size Effects in Friction and Their Influence on Extrusion Processes," *Wire*, Vol. 52, pp. 34~38.

(6) Tiesler, N., Engel, U. and Geiger, M., 1999, "Forming of Microparts-Effect of Miniaturization on Friction," *Proceedings of the 6th ICTP*, Vol. 2, pp. 889~894.

(7) Engel, U., 2006, "Tribology in Microforming," *Wear*, Vol. 260, pp. 265~273.

(8) Bay, N., 1987, "Friction Stress and Normal Stress in Bulk Metal Forming Processes," *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 14, pp. 203~223.

(9) Wanheim, T., Bay, N. and Petersen, A. S., 1974, "A Theoretically Determined Model for Friction in Metal Working Processes," *Wear*, Vol. 28, pp. 251~288.

(10) Nellemann, T., Bay, N. and Wanheim, T., 1977, "Real Area of Contact and Friction Stress-the Role of Trapped Lubricant," *Wear*, Vol. 43, pp. 45~53.

(11) Jeon, H. J. and Bramley, A. N., 2007, "A Friction Model for Microforming," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, pp. 125~129.

(12) Vollertsen, F. and Hu, Z., 2006, "Tribological Size Effects in Sheet Metal Forming Measured by a Strip Drawing Test," CIRP Ann., Vol. 55, pp. 291~294.

(13) Tan, X., 2002, "Comparison of Friction Models in Bulk Metal Forming," *Tribology International*, Vol. 35, pp. 385~393.