한국금형공학회지, 제8권 제2호, 2014
J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.8 No.2, 2014 ISSN 2092-9692

원기둥 압축 공정에서 접촉 경계면의 변형 특성

민경호† · 고병두[1] · 이하성[1]
유한대학교 금형설계학과[1,†]

Deformation characteristics at the contact boundary in cylinder compression process

Kyung-Ho Min† · Byung-Du Ko[1] · Ha-Seong Lee[1]
Department of Tool & Mould Design, Yuhan University[1,†]
(Accepted November 00, 2014)

Abstract : In this study, surface deformation patterns have been investigated by the rigid-plastic finite element method for friction factor test in solid cylinder compression process. AA1100 and AA6063 aluminum alloys, which show different work hardening characteristics respectively, have been adopted as model materials used for analysis. The main objective of this study is to provide the deformation mechanics in detail in solid cylinder compression process, especially at the die/workpiece interface that is closely related with the frictional conditions. For this reason, solid cylinder compression process has been numerically analyzed. The surface flow patterns at the contact boundary have been analyzed in terms of surface expansion, surface expansion velocity, pressure distributions exerted on the die surface along the die surface. By defining bulge factor, barreling phenomenon also have been examined with calibration curves to verify their effects on the surface flow pattern that is important for evaluating the frictional condition at the interface.

Key Words : Cylinder Compression Test, Surface Expansion, Friction Shear Factor, Friction Calibration Curve

1. 서 론

대변형의 부피성형공정에서 소재의 유동특성은 가공경화특성 및 유동응력과 마찰조건이 매우 중요하며 성형특성에 많은 영향을 미친다. 지금까지 유동응력과 마찰조건을 결정하기 위해 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되었고 kunog[1] 등이 제안한 링 압축시험(ring compression test)이 널리 보편적으로 사용되어지고 있다. Osakada[2] 등과 Kim[3] 등은 강소성 유한요소법을 적용하여 원기둥 압축시험(cylinder compression test)과 링 압축시험을 수행하여 유동응력 및 마찰조건을 평가하였다. Altan[4-5] 등은 원기둥 압축시험으로 베럴의 최대, 최소의 차이를 이용하여 가공경화를 고려한 유동응력과 마찰조건을 결정하였으며 Sivaprasad[6] 등은 소재와 상부 다이의 접촉 경계면의 직경과 배럴링 되는 소재 직경의 비를 이용하여 마찰인자를 평가하였다. 최근에 마찰조건의 정밀한 평가를 위하여 원기둥 압축 시험에서 나타나는 배럴 형상에 대한 연구가 활발히 진행되었다. Kalpakjian[7] 등과 Schey[8] 등 마찰조건의 특성을 파악하기 위하여 배럴형상을 기하학적 모델로 표현하려는 연구를 진행하였고, Banerjee[9], Chen[10]과 Narayanasamy[11-13] 등은 경계면에서의 다양한 마찰조건에서 원기둥 압축시험을 수행하여 측정된 배럴과 기하학적 배럴 곡률반경을 이론 및 실험적으로 비교하여 그 유효성을 검토하였다.

본 논문에서 강소성 유한요소법을 적용한 원기둥 압축공정에서 마찰효과에 따른 표면변형 특성을 분석하였다. 시뮬레이션을 통하여 변형형태, 접촉 경계면에서의 표면확장분포, 표면확장속도분포, 압력

† 교신저자 : 유한대학교 금형설계학과
E-mail : khmin@yuhan.ac.kr

분포 등을 평가 변수로 하여 분석하였으며 또한 각각의 평가 변수에 대하여 평가 영역 내에서 최대 최소값을 분석함으로서 변형의 동질성을 분석하였다. 또한 이전에 제안된 링 압축시험[14]에 의한 마찰측정 방법과 비교하여 마찰인자의 전 영역에서 적용이 가능한 마찰 보정곡선(calibration curve)을 소개하였다.

2. 공정변수 및 해석조건

Fig. 1은 본 논문에서 수행하게 되는 원기둥 압축공정의 모의실험에 대한 계략도를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 사각문자와 원문자는 각각 펀치와 소재의 표면에 대한 초기 위치와 변형 후 위치를 나타내기 위하여 도입한 것으로 각각 초기 접촉 경계면을 등 간격으로 분할하여 나타내었다. Table 1에 원기둥 압축공정의 모의실험에 사용된 설계 변수들을 나타내었다.

원기둥 압축공정은 소성변형이 탄성변형에 비하여 상당히 크기 때문에 해석의 효율성을 위하여 탄성변형을 무시한 강소성 유한요소법을 적용하였다. 본 논문에서 모의실험은 강소성 유한요소 해석 방법을 적용한 상업용 소프트웨어인 DEFORM-2D^{TM}을 사용하여 수행하였다.

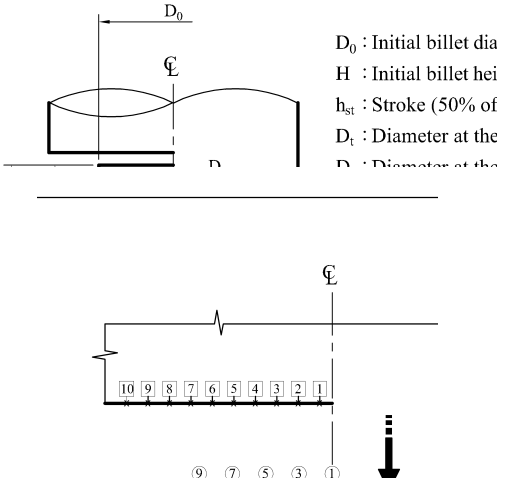


Fig. 1 Schematic configuration used in analysis

Table 1 Parameters used in simulation of upsetting test

Parameters		Values
Materials	AA1100	$\bar{\sigma} = 173.63\ \bar{\epsilon}^{0.304}$ (MPa)
	AA6063	$\bar{\sigma} = 138.00\ \bar{\epsilon}^{0.145}$ (MPa)
Initial billet diameter (D_0)		9 mm
Initial billet height (H)		13.5 mm
Punch stroke (hst)		6.75 mm
Friction factor (m)		0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0

3. 해석결과

3.1 단계별 분석(sequential analysis)

원기둥 압축공정의 모의실험에서 다양한 마찰인자의 영향 및 가공경화특성이 상이한 두 재료에 대한 개략적인 변형특성을 알아보기 위하여 높이 감소율이 10%, 30% 그리고 50% 에서의 성형형태, 접촉 압력 분포와 최대 압력, 표면확장, 표면확장속도를 성형 단계별로 나타내어 분석하였다.

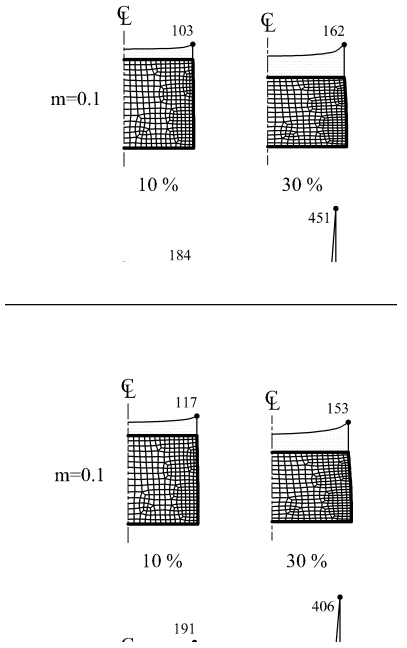


Fig. 2 Deformation patterns and maximum pressure for various friction factor at the reduction in height 10%, 30% and 50% for AA1100(up) and AA6063(down)

Fig. 2는 두 가지 재료에 대하여 각각의 성형 단계별로 윤활상태가 양호한 경우와 그렇지 못한 경우를 비교하기 위하여 마찰인자의 크기를 0.1, 0.9로 구분하여 접촉 경계면에서의 압력분포와 함께 최대 압력을 그래프로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 두 재료 모두 각각의 마찰인자에 대하여 높이 감소율이 증가함에 따라 최대 압력이 증가됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 마찰인자가 큰 경우 더욱 두드러지게 나타난다. 마찰인자가 0.9인 경우 소재의 상부 우측 끝단에서 최대 압력이 급격하게 증가하는 것으로 나타나는데, 이것은 소재와 금형 사이의 마찰조건이 소재의 원주방향으로 유동에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 전체적인 변형형태는 마찰인자가 클 때 접촉 경계면에서의 원주방향의 소재 유동의 구속이 상대적으로 더 심하기 때문에 배럴링 현상이 두드러지게 나타났다. 하지만 서로 다른 가공경화 특성에 의한 변형형태의 변화는 그리 크지 않은 것으로 보인다.

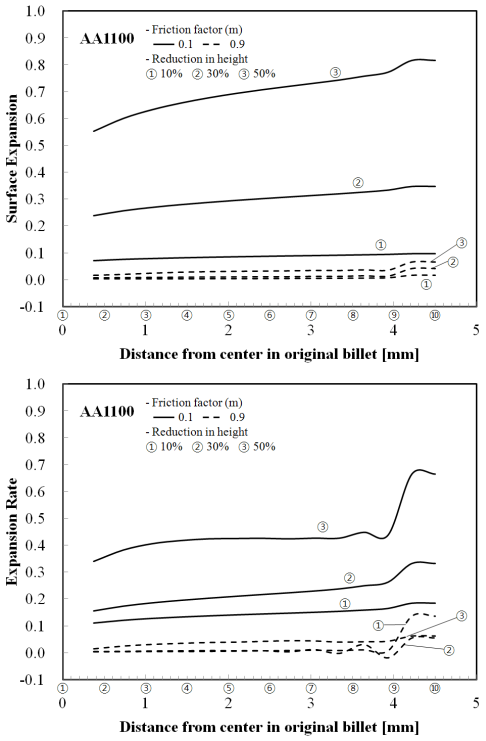


Fig. 3 Surface expansion(up) and expansion rate(down) for various friction factor at the punch stroke

Fig. 3은 각각의 성형 단계에서 접촉 경계면의 표면확장과 표면확장률을 나타낸 것으로, 두 재료가 거의 유사한 경향이 나타나 AA6063은 생략하고 AA1100에 대해서만 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 높이 감소율이 증가함에 따라 소재의 원주 부근(⑨~⑩ 구간)의 접촉 경계면에서 마찰인자가 작은 경우 표면확장과 표면확장률이 높은 경향을 보인다. 상대적으로 마찰인자가 0.9 인 경우 큰 차이를 보이지 않으며 전체 경계면에서 매우 고른 분포를 보이고 있다.

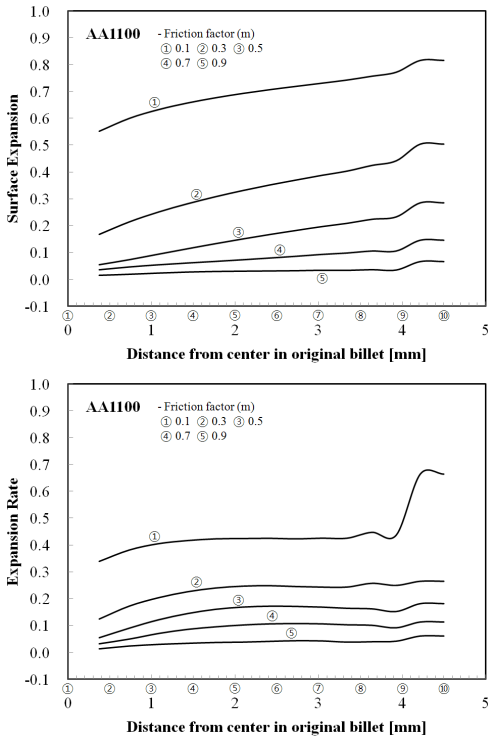
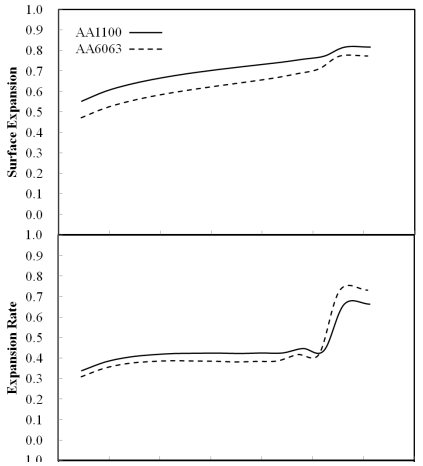


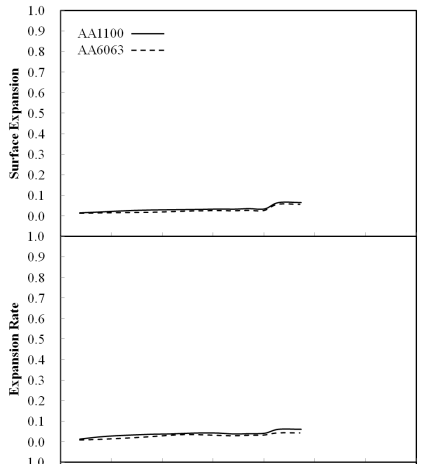
Fig. 4 Surface expansion(up) and expansion rate(down) for various friction factor

3.2 마찰조건(friction condition)

Fig. 4는 AA1100에 대하여 다양한 마찰인자와 공정이 종료된, 즉 높이 감소율이 50%에서 표면확장과 표면확장률의 분포를 그래프로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 마찰인자가 클수록 전체 구간에서 일정한 경향을 보이지만 마찰인자가 작아질수록 원주방향에서 더 큰 경향을 보인다. 모든 마찰조건에서 가장 바깥 부분인 ⑨~⑩ 구간에서 상대적으로 큰 표면확장과 표면확장률이 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) m=0.1



(a) m=0.9

Fig. 5 Totality comparison

Fig. 5는 가공경화지수가 상이한 두 재료에 대하여 대표적인 마찰조건으로 마찰인자 0.1과 0.9를 선택하여 표면확장, 표면확장속도를 그래프로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 두 재료에 대하여 전체적으로 비슷한 경향으로 변화하는 것을 알 수 있지만, 마찰인자 0.1인 경우 표면확장, 표면확장속도에서 약간의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이 차이는 가공경화지수가 높은 AA1100이 AA6063과 비교하여 높은 경향을 보이며, 마찰인자가 0.9인 경우는 거의 차이를 보이지 않는다. 전체적으로 보아 제반 평가 변수들이 마찰인자가 작을 때 더 큰 편차의 분포를 보이고 있으며 마찰인자가 클 때는 거의 편차가 없는 분포를 보이고 있다. 다시 말하여 표면확장과 표면확장률은 마찰인자가 작은 경우 민감도가 큰 것을 알 수 있다.

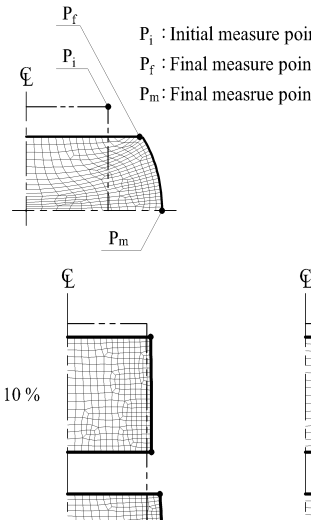


Fig. 6 Mesh deformations under different friction factor at reduction in height of 10%, 30%, and 50% for AA1100

3.3 마찰측정(friction measurement)

Fig. 6은 Sivaprasad[6] 등이 제안한 방법의 측정점과 두 가지의 대표적인 윤활상태에 따른 소재의 변형형태를 나타내고 있다. 높이 감소율이 50%인 소재의 최종 변형단계에서 소재와 상부 다이의 접촉면이 이루는 소재의 직경과 압축 공정에서 나타나게 되는 최대 배럴링 직경을 측정점으로 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 높이 감소율이 증가함에 따라 마찰인자가 큰 경우에 배럴링 현상이 명확하게 나타난다. 또한 마찰인자가 높은 경우 접촉 경계면의 소재의 유동이 매우 큰 구속을 받는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 소재와 직접 접촉하지 않는 측정점을 제외하고 소재와 직접 접촉하는 측정점만을 이용하여 마찰인자를 측정하였다.

Fig. 7은 소재의 배럴링 현상과 폴딩현상을 설명하기 위해 높이 감소율의 증가에 따라 두 가지 윤활상태에서 금형과 소재의 상대속도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 낮은 마찰조건에서는 소재와 금형의 접촉부분과 중간부분의 속도분포가 비슷하게 나타나지만, 높은 마찰조건에서는 소재와 금형의 접촉 부분과 비교하여 소재의 중간부분

에서 상대적으로 크고 밀집된 속도 분포가 나타난다. 배럴링 현상은 이러한 속도 분포에 의한 것으로 금형에 가까운 부분에 비하여 중간부분의 속도가 크기 때문에 중간부위가 불러오는 배럴링 현상을 보이게 된다. 또한 마찰조건이 높은 경우 바깥쪽 원주의 자유표면에서, 즉 소재와 금형의 접촉부분의 자유표면에서 금형 표면을 향한 속도분포의 크기가 상대적으로 커짐에 따라 자유표면이 금형과 맞닿게 되는 폴딩 현상을 일어나게 한다. 이러한 폴딩 현상은 재료의 원주방향으로 유동이 구속 된다.

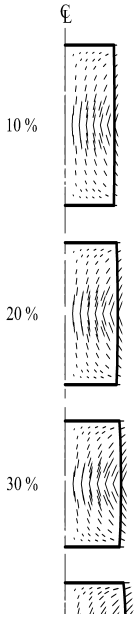


Fig. 7 Relative velocity distributions between die and workpiece under different friction factor at reductions in height of 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% for AA1100

Fig. 8은 AA1100 알루미늄 합금의 다양한 마찰인자에 대하여 높이 감소율의 증가와 상부 외경 측정점의 치수 변화를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 윤활상태가 가장 좋은 무마찰조건(m=0.0)에서 측정점의 직경의 변화가 가장 크고, 소재와 금형 사이에 높은 마찰조건이 주어질 경우 접촉면 직경의 변화도 작아진다. 또한 마찰인자의 일정한 변화량에 따라 접촉면 직경의 변화량도 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 링 압축실험에서의 결과와는 약간의 차이를 보이고 있다. 링 압축시험[14]에서는 마찰인자 작을 때 측정점의 변화가 그리 크지 않았다.

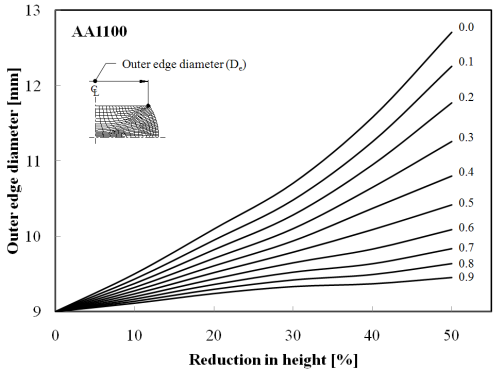


Fig. 8 Friction calibration curves for change in outer edge diameter

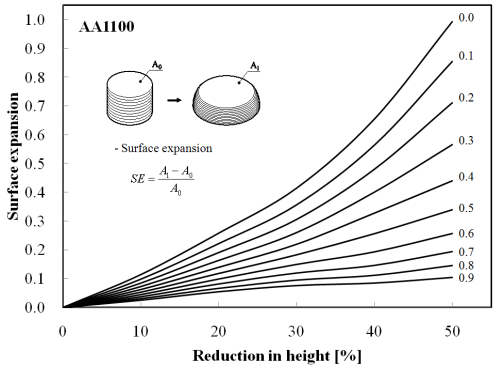


Fig. 9 Friction calibration curves for surface expansion

Fig. 9는 AA1100 소재의 접촉면의 표면확장과 높이 감소율의 관계를 다양한 마찰인자에 대하여 그래프로 나타내었다. 표면확장은 면적 변화량과 초기 면적의 비를 나타내는 것으로 접촉면의 직경 변화와 관련되어 있기 때문에 Fig. 8의 상부 외경 측정점의 직경 변화와 비슷한 경향을 보였다. 하지만 마찰인자가 0.7 이하에서는 표면확장에 의한 변화량이 보다 더 일정함을 알 수 있다. 다양한 마찰인자에 대하여 높이 감소율에 따른 표면확장은 마찰조건이 낮을수록 크게 나타났고 마찰조건이 높을수록 작게 나타났다. 접촉면 바깥쪽 직경 변화량과 같이 일정한 마찰인자의 변화량에 대해서 일정한 표면확장의 변화량이 나타났다.

Fig. 10은 Sivaprasad[6] 등이 제안한 방법에 의한 마찰인자 측정을 위한 보정 곡선이다. 소재와 금형

이 접촉하는 윗면의 직경과 배럴링이 일어나는 중간부분의 직경의 비를 부풀림 인자(bulge factor)로 계산하여 나타내었다. 가공경화지수가 상이한 두 재료에 대하여 가공경화지수가 낮은 경우, 높은 경우와 비교하여 부풀림 인자가 낮게 나타났다. 이 두 곡선의 평균 곡선을 이용하여 가공경화지수의 영향을 받지 않는 즉, 모든 재료의 소재에서 마찰인자를 측정할 수 있는 보정 곡선을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 낮은 마찰조건에서는 부풀림 인자가 높게 나타났고 높은 마찰조건에서는 부풀림 인자가 낮게 나타났다.

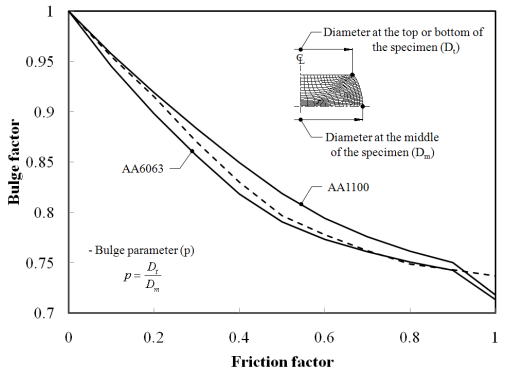


Fig. 10 Calibration curve for the bulge factor as a function of friction factor for initial height to-diameter ratio of 1.5

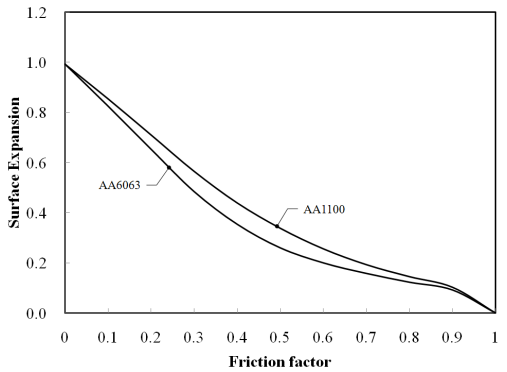


Fig. 11 Linear relationship between the friction factor and surface expansion

Fig. 11은 본 연구에서 제안하는 표면확장에 의한 마찰인자의 측정 보정 곡선을 나타낸 것이다. 또한 다양한 마찰인자에 대하여 가공경화지수가 상이한 두 재료의 표면확장을 나타내었다. 부풀림 인자를 이용한 보정곡선과 마찬가지로 가공경화지수가 낮은 재료의 표면확장이 더 낮은 것으로 나타났다. 부풀림 인자를 이용한 보정 곡선과 같이 낮은 마찰조건에서는 표면확장도 크게 나타났고, 높은 마찰조건에서는 표면확장도 작게 나타났다. 가공경화 특성을 포함한 전체적인 경향은 부풀림 인자를 사용한 보정곡선과 매우 유사하게 나타났다.

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 강소성 유한요소 해석을 이용하여 원기둥 압축공정의 모의실험을 수행하여 접촉 경계면에서의 변형특성을 표면확장, 표면확장속도, 접촉압력에 대하여 각각 미치는 영향을 분석하였고 마찰 측정을 위한 방법으로 마찰 보정곡선(calibration curve)을 소개하였다.
모의실험 분석 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 성형 단계별로 최대 압력의 위치는 변형 후 소재의 원주방향으로 소재유동에 의한 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 특히 마찰인자가 클수록 폴딩현상에 의하여 압력이 급격하게 증가하는 부분이 소재의 원주방향 뿐만 아니라 소재 중간쪽에서도 나타났다. 또한 표면확장과 표면확장속도는 높이 감소율이 증가함에 따라 비교적 평이한 변화를 보이다가 높이 감소율이 50%인 경우 특정 구간에서 급격히 커지는 경향을 보인다.

2) 가공경화특성이 상이한 두 가지 재료에 대하여 표면확장, 표면확장속도, 접촉압력에 대하여 비교하여 분석한 결과 재료의 가공경화 특성은 소재 접촉 경계면의 변형특성에 미치는 영향이 미비한 것으로 나타났다. 특히 마찰인자가 커질수록 그 영향은 작아 져서 마찰인자 0.9인 경우 거의 차이를 보이지 않게 됨을 알 수 있다.

3) 마찰인자가 작은 경우, 즉 m=0.1인 경우, 표면확장, 표면확장 속도는 일정하면서 그 변화율이 크게 나타났다.

4) 원기둥 압축공정의 모의실험을 통하여 마찰측정을 위한 측정점과 표면확장에 대한 마찰 측정 보정곡선을 비교하여 분석하였으며 이전에 제안된 마찰측정 방법과 비교하여 마찰인자의 전 영역에서 적용이 가능한 마찰 보정곡선을 소개하였다.

참고문헌

1) Kunogi, M., Rep. Sci. Res. Inst. Tokyo 30, p. 63, 1954.
2) Osakada, K., Kawasaki, T., Mori, K., and Taniguchi, N., “method of Determining Flow Stress under Forming Conditions”, Annanls of the CIRP., Vol. 30, No. 1, pp. 135~138, 1954.
3) Choi, Y. M. and Kim, N. S. “Determination of Flow Stress and Friction Factors by the Ring Compression Test(Ⅱ)”, Journal of KSTP, Vol 22, No. 3, pp. 483~429, 1994.
4) Altan, T., Ngaile, G. and Shen, G., “Cold and Hot Forging, Fundamentals and Application”, ASM. International, pp. 25~49, 67~89, 2005.
5) Altan, T., “Material Properties and Cold Forging Lubricants”, Prepared for2nd Cold and Warm Precision Forging Workshop, 2004.
6) Sivaprasad, P. V. and Davies, C. H. J., “An assessment of the interface friction factor using the geometry of upset specimens”, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 13, pp. 355~ 360, 2005.
7) Kulkarni, K. M. and Kalpakjian, S. “A Study of Barreling as an Xxample of Free Deformation in Plastic Working”, Journal of Engineering for Industry, pp. 743~754, 1969.
8) Schey, J. A., Venner, T. R. and Takomana, S. L., “Shape changes in the Upsetting of Slender Cylinders”, Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, pp, 79~83. 1982.
9) Banerjee, J. K, “Barreling of solid Cylinders under Axial Compression”, Transactions of the ASME, Vol. 107, pp. 138~144, 1985.
10) Chen, F. K. and Chen, C. J., “On the Nonuniform Deformation of the Cylinder Compression Test”, Transactions of the ASME, Vol. 122, pp, 192~197, 2000.
11) Narayanasamy, R., Murthy, R. S. N, Viswanatham, K. and Chary, G. R., “Prediction of the Barreling of solid Cylinders under Uniaxial Compressive Load”, Journal of mechanical Working Technology, Vol. 16, pp. 21~30, 1998.
12) Narayanasamy, R. and Pandey, K. S., “Phenomenon of Barreling in Aluminium Solid Cylinders during Cold Upset Forming”, J. Mater, Process. Technol, Vol. 70, pp. 17~21, 1997.
13) Malayappan, S. and Narayanasamy, R., “An Experimental Analysis of Upset Forming of Aluminium Cylindrical Billets Considering the Dissimilar Frictioal Conditions at Flat Die surfaces”, Int, J. Adv, Manuf. Technol, Vol. 23, pp. 636~643, 2004.
14) J.H. Noh, K.H. Min, B.B. Hwang, “Deformation characteristics at contact interface in ring compression”, J. Tribology international, Vol. 44, pp. 947~955, 2011.