

## 링압축실험에 의한 유동응력 및 마찰인자의 결정(II)

최영민, 김낙수  
홍익대학교 기계공학과

### Determination of Flow Stress and Friction Factor by the Ring Compression Test(II)

Young-Min Choi and Naksoo Kim  
Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

#### Abstract

The purpose of this paper is to pursue a general method to determine both the flow stress of a material and the friction factor by ring compression test. The materials are assumed to obey the expanded n-power hardening rule including the strain-rate effect. Ring compression is simulated by the rigid-plastic finite element method to obtain the database used in determining the flow stress and friction factor. The Simulation is conducted for various strain hardening exponent, strain-rate sensitivity, friction factor, and compressing speed, as variables. It is assumed that the friction factor is constant during the compression process. To evaluate the compatibility of the database, experiments are carried out at room and evaluated temperature using specimens of aluminum 6061-T6 under dry and grease lubrication condition. It is shown that the proposed test method is useful and easy to use in determining the flow stress and the friction factor.

Key Words : ring compression test(링압축실험), strength coefficient( $K$ :강도계수), strain hardening exponent( $n$ :변형률경화지수), strain-rate sensitivity exponent( $m$ :변형률속도민감지수), friction factor( $m_f$ :마찰인자), rigid-plastic finite element method(강-소성 유한요소법)

#### 1. 서론

단조, 압연, 압출 등의 많은 금속가공 공정은 압축하중을 소재에 가해 원하는 형상으로 가공한다. 따라서, 소성가공 공정에서 가공에 필요한 하중이나 압축시 재료의 거동에 관한 정보를 얻기 위하여 높은 변형률까지 원기동시편을 단축압축하는 실험이 행해진다. 압축실험은 원기동시편을 두개의 편평한 압축판(금형) 사이에 놓고 압축함으로써 소재의 응력-변형률 곡선에서 변형경화와 변형률속도의 영향을 평가하는 것이다. 그러나, 소재와 압축판사이의 마찰이 중요한 인자로 작용하여 원기동 단축압축실험에는 몇가지 문제가 있다.

시편의 양끝에 일어나는 마찰효과에 의한 소재의 불균일변형으로 중앙부가 볼록해지는 배럴링현상(barrelling)과 함께 시편 끝에 원뿔모양의 낮은 변형영역이 생기므로, 시편과 압축판사이에 윤활을 하여 마찰효과를 감소시켜야 한다. 압축실험에서 배럴링이 생기면 신빙성있는 실험결과를 얻기 힘들 뿐만 아니라 압축응력과 변형률사이의 관계를 정확히 파악하기 어렵기 때

문이다. 또한, 유동응력은 냉간가공일 때는 변형률속도의 영향이 중요하지 않지만 소재의 재결정온도 이상에서 가공하는 열간가공의 경우에는 변형률속도의 영향이 중요하다.

제품가공 공정중 마찰은 금속유동, 표면결합과 내부결합 형성, 금형에 미치는 응력등에 커다란 영향을 미치므로 마찰을 정확히 제어하기 위해서는 주요 공정변수와 윤활조건에 대한 정량적인 데이터가 필요하다. 따라서, 마찰현상을 정량적으로 수치화하는 것이 요구되며 정확한 마찰조건의 사용은 소성변형을 해석하는 수치적 접근 방법의 수렴성과 신뢰성에 영향을 미친다.[1-3]

보통 박판성형가공(sheet-metalforming)의 해석에는 마찰계수(friction coefficient)가 주로 쓰이며, 부피성형가공(bulk forming processes)의 해석에는 마찰인자(friction factor)가 사용된다. 마찰인자를 사용하는 경우에는 이를 측정하기 위해 링압축실험(ring compression test)이 사용된다. 링압축실험은 금속가공 공정중에 금형과 소재사이의 마찰조건을 정량화할 수 있는 가장 간단하면서 믿을 만한 실험으로 널리 행해지고 있다. 링실험은 일정한 기하학적 형상의 링시편을 두 개의 편평한 압축판 사이에 놓고 압축하며, 이 때 압축에 따른 내부직경 변화는 금형과 소재의 경계면에서 마찰에 매우 민감하다. 금형과 소재 표면사이의 마찰이 없을 때는 소재의 유동은 밖으로 향하는 유동만 존재하여 링의 내부직경은 압축이 진행됨에 따라 크기가 증가하나, 마찰이 클 때는 유동의 중립면(Neutral Surface)이 링 중심에서 밖으로 이동하여 높이 감소에 따라 내부 직경이 감소한다. 이에 대한 연구는 소성 해석 기법의 향상과 함께 많이 행해져 왔으며, 링압축 실험의 결과 일정한 크기 비율에 한하여 재료의 물성에 무관하게 작성된 높이 감소율과 최소내경변화율의 보정곡선(calibration curve)으로 마찰인자를 구한다.

소성가공 공정이 최종제품에 가까운 정형(near netshape)제품의 생산과 가공하기 어려운 특수 합금의 성형으로 발전함에 따라 실제 현상에 더 가까운 마찰인자의 결정이 소성가공 해석에 필요하게 되었다.[4][5] 따라서, 소재의 재료상수를 고려한 보정곡선을 사용하여 마찰인자를 결정해야 하며, 물성치를 무시할 때는 마찰인자의 정확한 평가에 문제가 될 수 있다. 동시에 링압축실험은 압축하중-변위로부터 소재의 유동응력을 구할 수도 있다.[6-9]

본 연구에서는 금속의 유동응력을 구하는데 원기동압축실험 대신 링압축실험을 하여, 변형경화지수(strain-hardening exponent,  $n$ ), 변형률속도민감지수(strain-rate sensitivity,  $m$ )와 마찰인자( $m_f$ )를 한번에 결정할 수 있는 방법을 제안한다. 이를 위해서 변형경화지수  $n$ , 변형률속도민감지수  $m$ , 마찰인자  $m_f$ 의 값을 변화시키 가며 유한요소해석을 수행하여 데이터베이스를 구축하고, 실험결과로부터 얻어진 하중-압축율, 링내경변화율, 속도변화에 따른 하중차 등을 해석결과와 비교함으로써 유동응력과 마찰인자의 적절한 값을 구해 나간다. 제안된 방법으로 구한 유동응력과 마찰인자는 UTM을 이용한 압축실험을 통하여 검증함으로써 구축된 데이터베이스의 타당성을 밝히고자 한다.

## 2. 해석조건과 데이터베이스

### 2-1. 링압축 유한요소 해석조건

강소성 유한요소 프로그램을 이용하여 링(ring) 형상을 해석하기 위해서 가공경화지수  $n$ , 변형률속도민감지수  $m$  이 고려된 간단한 유동응력식인  $n$ 승 경화식( $n$ -power strain hardening)에 속도효과를 고려한 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \dot{\bar{\epsilon}}^m, \quad (1)$$

여기에서  $K$  는 강도계수(strength coefficient)이다.

금형접촉면에서의 마찰조건을 변수로 포함시키기 위해 마찰인자  $m_f$ 까지 고려하면, 일정 온도에서의 링압축실험을 통하여 4개의 상수( $K, n, m, m_f$ )를 결정할 수 있어야 한다. 해석에서는 고려해야 하는 상수의 수를 줄이기 위해 강도계수  $K$ 의 영향을 배제한 다음과 같은 표준화된 유동 응력식(즉,  $K=1$ 인 경우)을 사용했다.

$$\frac{\bar{\sigma}}{K} = \bar{\epsilon}^n \dot{\bar{\epsilon}}^m \quad (2)$$

Fig. 1과 같은 초기외경( $D_o=30\text{mm}$ ), 내경( $D_i=15\text{mm}$ ), 높이( $H=20\text{mm}$ )의 비가 6:3:4인 링형상을 유한요소해석하였다. 계산의 효율성과 정확성을 위해 전체의 1/4을 360개 요소와 400개 질점으로 구성하였다. 금형과 소재의 마찰효과를 자세히 관찰하기 위해 접촉부 근처의 요소망을 더 잘게 분할하였으며 최대 압축율 60%까지 계산하였다. 압축속도가 소재에 주는 영향을 보기 위해  $V_1=3\text{mm/min}$  와  $V_2=24\text{mm/min}$ 로 각각 해석하였다.

각 압축속도( $V_1, V_2$ )에 대하여  $n$  값과  $m$  값은 0.0에서 0.5까지 0.05간격으로 각각 11경우,  $m_f$ 는 0.1에서 0.9까지 0.1간격으로 9경우에 대하여 총 1089경우(=11X11X9)를 해석하였다.

### 2-2. 데이터베이스의 구성

해석 결과의 자료를 무차원으로 처리하기 위해서 다음과 같이 압축율(reduction in height)  $R$ , 최소내경변화율(inner radius changes)  $\varphi_i$ , 최대외경변화율(outer radius changes)  $\varphi_o$ , 속도효과에 따른 하중차(load difference due to velocity)  $L_v$ , 압축율에 따른 하중기울기(first derivative of load)  $L_t$ 를 정의하였다.

$$R = (H-h)/H \times 100 (\%), \quad (3)$$

$$\varphi_i = (D_i - (d_i)_{\min})/D_i \times 100 (\%), \quad (4)$$

$$\varphi_o = ((d_o)_{\max} - D_o)/D_o \times 100 (\%), \quad (5)$$

$$L_v = (P_1 - P_2)/P_1 \times 100 (\%), \quad (6)$$

$$L_t = (P_{i+1} - P_i)/(R_{i+1} - R_i) \times 100 (\%). \quad (7)$$

여기에서  $H, D_o, D_i$ 는 각각 변형전의 높이, 내경, 외경이고,  $h, d_i, d_o$ 는 변형후의 값이며,  $P_1, P_2$ 는 압축속도가 각각  $V_1, V_2$ 일 때의 하중의 값이고,  $i$ 는 압축율을 나타내는 첨자이다.

속도에 따라 가공경화지수, 변형률속도민감지수, 마찰인자를 변수로 하중  $P$ , 최소내경변화율  $\varphi_i$ , 최대외경변화율  $\varphi_o$ 을 압축율 5%에서 60%까지 12점에 대해 일정한 규칙성아래 (1) 속도에 따른 하중차, (2) 하중-압축율, (3) 최소내경변화율-압축율, (4) 최대외경변화율-압축율, (5) 압축율에 따른 링의 외곽선의 변화에 대한 자료를 저장하였고, 이를 이용하여 유동응력식의  $K, n, m$  값과 마찰인자  $m_f$ 를 결정할 수 있다.

### 3. 링압축실험

링압축실험은 50 ton용량의 유압 만능시험기 (Universal Testing Machine) 에서 일정한 두가지 압축속도로 (3mm/min과 24mm/min) 수행했다. 유동응력을 결정하는 강도계수  $K$ , 변형률경화지수  $n$ , 변형률속도민감지수  $m$ 를 온도의 함수로 보고 같은 재료를 여러 온도에 대해 상온 및 열간실험을 했다. 열간압축실험은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 전기로를 사용하여 고온에서 일정한 온도를 유지하며 이루어졌고 변위는 압축변위계(compression displacement meter)로 측정하였다.

압축에 사용된 시편은 외경:내경:높이의 비가 6:3:4로 초기 외경이 30 mm인 알루미늄

(Al6061-T6)으로 상온, 200, 400(°C)의 온도조건에서 실험을 하였다. 상온과 200°C의 온도조건에서는 금형과 소재의 마찰조건이 다르더라도 동일한 물성치가 구해짐을 확인하기위해 무운활, 몰리브덴그리스윤활의 두가지 마찰조건을 유지했다. 또한, 변형률속도민감지수의 영향을 파악하기 위해 일정한 변형률속도를 유지하는 대신 일정한 압축속도에서 그 차이를 8배로 하여 실험했다.

Table 1에 나타낸 것과 같이 세가지 종류의 압축실험을 하였으며, 그 결과 (1)하중-변위, (2)최소내부직경-변위, (3)최대의부직경-변위의 자료를 얻을 수 있었다.

상온과 200°C에서는 종류1(type1), 종류3(type3)의 실험방법으로 무운활,윤활의 두가지 마찰조건에서 압축실험을 진행하였다. 하중조건종류1은한 시편으로 압축윤에 대해 여러단계 압축판의 하중을 제거한 후, 그 때의 높이, 외경, 내경, 하중을 제는 한시편다단압축이다. 각 단계마다 마찰조건을 일정하게 유지하기 위해 무운활일 경우는 하중 제거시 #2000의 사포로 압축판의 표면을 문질렀고, 몰리브덴그리스 윤활일 경우는 그리스 두께를 매 단계일정하게 하였다. 하중조건종류3은 한시편을 최종압축윤까지 일단압축하여 연속되는 하중-변위곡선과 최종단계에서 높이, 외경, 내경을 얻는다. 시편과 압축판사이의 마찰조건이 그리스 윤활일 때는, 하중조건종류3은 압축이 진행됨에 따라 윤활막이 깨져 최종 단계에서는 종류1에 비해 하중이 다소 증가하였다.

재결정 온도 이상의 고온에서(400°C) 압축하는 열간압축의 경우는 종류2(type2)와 종류3(type3)의 방법이 사용되었다. 고온에서는 한시편다단압축 실험방법은 적합하지 못하므로 한시편을 여러 종류의 압축윤에 대해 연속압축실험을 수행했다. 열간압축실험에서는 원하는 일정한 온도의 유지와 압축판이 시편에 주는 냉각효과를 피하기 위해 실험 전에 압축판을 노 안에서 2시간 정도 미리 예열한 후 실험을 했다. 또한, 알루미늄 시편의 온도분포가 균일해지도록 모든 열간실험에는 시편을 30분간 전기로에 넣은 후 압축하였다.

#### 4. 재료상수와 마찰인자의 결정

유한요소해석을 변형률경화지수  $n$ , 변형률속도민감지수  $m$ , 마찰인자  $m_f$ 에 대해 미리 계산한 후 데이터베이스를 구축한 자료와 링압축실험에서 구한 자료를 서로 일정한 규칙하에 비교함으로써 재료상수와 더불어 마찰인자까지 결정할 수 있다.

먼저 두가지 압축속도에 따른 하중차  $L_c$ 로부터 변형률속도민감지수  $m$ 을 결정하고, 결정된  $m$  값에 대하여 하중-압축윤 데이터  $L_c$ 에서 강도계수  $K$ 와 가공경화지수  $n$ 을 결정한다. 이와 같은 방법으로 재료상수가 결정되면 재료상수가 고려된 보정곡선을 사용하여 각 압축윤에 따라 마찰인자  $m_f$ 를 결정한다.

##### 4-1. 변형률속도민감지수의 결정

변형률속도민감지수를 측정하는데 주로 사용되는 방법으로는 여러 변형률속도에 대한 응력-변형률곡선을 구한 다음 주어진 변형률에서 응력의 크기를 구하여  $m$ 을 결정하는 방법이다. 그러나, 이 방법은 시편의 변형영역 전체에서 일정한 변형률속도를 유지하여야 하고 마찰이 개재된 경우에는 변형률속도를 일정하게 얻는 것이 불가능하다. 또한 일정한 변형률속도를 유지시키는 특수한 장비가 필요하다. 따라서 실험하기 곤란한 변형률속도의 변화 대신에 일정한 압축속도에 대한 하중의 차를 구하여 변형률속도민감지수  $m$ 을 결정한다.

속도에 의한 하중차  $L_c$ 는 다음과 같이  $m$  와  $n$  및  $m_f$ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$L_v = L_v(m, n, m_f) \quad (8)$$

이 과정에서  $m$ 을 유일하게 결정하기 위한 필요조건으로 하중차  $L_v$ 의  $n$  및  $m_f$ 에 대한 의존성의 정도를 살펴보았다. Fig. 3은 압축율에 따른 평균  $L_v$ 와  $m$ 의 관계를 나타내며,  $m$ 이 클수록  $L_v$ 도 커지지만,  $n$ 과  $m_f$ 의 영향은 별로 없음을 볼 수 있다. 따라서 하중차  $L_v$ 는 변형경화지수와 마찰인자의 영향을 무시한 다음의 식으로 근사표현할 수 있다.

$$L_v \approx L_v(m) \quad (9)$$

따라서, 식(9)에 의해 하중차의 평균을 이용해  $m$  값에 대한 초기치(initial guess)를 결정하는 것이 타당함을 알 수 있다. 보다 정확한  $m$  값을 결정하기 위해서는 후술하는 방법에 따라서 다른 상수들을( $n$ 과  $m_f$ ) 결정하고 나서 반복적으로  $m$  값을 추가 보정하면 된다.

#### 4-2. 가공경화지수와 강도계수의 결정

위에서 결정된 변형률속도민감지수  $m$ 을 가지고 하중-압축율 데이터에서 가공경화지수  $n$ 과 강도계수  $K$ 를 결정할 수 있다. Fig. 4는 하중곡선의 일차도함수와 압축율의 관계를 나타낸 것이며, 이로부터 일정한  $m$  값에 대하여 하중곡선의 일차도함수가  $n$ 의 영향을 크게 받는 것과 가공경화지수의 증가는 하중의 기울기를 증가시키는 것을 알 수 있다.

또한 동일한 재료상수일 경우 즉,  $n$ 과  $m$ 이 같을 때, 마찰에 따른 효과는 압축율이 적을 경우에는 그 차이가 크지 않으나 압축이 진행됨에 따라 그 차이가 벌어지는 양상을 보여 준다. 즉, 하중곡선의 기울기  $L_v$ 는 다음과 같이 가공경화지수, 변형률속도민감지수, 마찰인자의 함수로 나타낼 수 있다.

$$L_v = L_v(n, m, m_f) \quad (10)$$

우선은 마찰인자의 효과를 제외하고 링압축실험에서 구한 하중곡선의 기울기  $L_v$ 를 압축율 별로 해석결과와 비교하여  $n$  값을 구하고  $K$ 는 실제하중곡선과 데이터베이스화된 표준하중곡선의 배수로 결정한다.

좀더 정확한  $n$ 과  $m$  값은 마찰인자  $m_f$ 에 따라서 결정되어야 하므로,  $m_f$ 는 후술하는  $n, m$ 를 고려한 보정곡선으로 초기마찰인자  $m_f$ 를 결정한 후 반복법에 의해 추가적으로 보정한다.  $n$ 과  $m$ 이 일정한 값으로 수렴하면 물성치를 고려한 보정곡선상에서 내삽하여 최종마찰인자  $m_f$ 를 결정한다.

#### 4-3. 마찰인자의 결정

앞에서 결정된 금속의 재료상수를 가지고 일정한 크기비율(6:3:4)의 링형상으로 해석한 최소내경변화률-압축율 선도상의 보정곡선을 사용하여 마찰인자를 결정할 수 있다. 보통 마찰인자의 결정에 사용되는 링은 6:3:2의 비를 많이 사용하는데 그 이유는 높이가 낮을수록 금형과 소재의 표면에 존재하는 마찰을 더 잘 정량화할 수 있기 때문이다. 여기서는 UTM의 50 ton 하중용량을 고려해 6:3:4의 링으로 해석과 실험을 수행하여 보정곡선을 작성하였다. 마찰을 정량화하는 능력은 압축율이 작을 때는 6:3:2 링에 비해 다소 떨어지지만 약 30%이상의 압축율에서는 용이하게 마찰인자를 정할 수 있다.

마찰인자를 결정하는 보정곡선은 보통 재료상수에 무관하다고 생각하고 사용되어 왔으나, 재료상수를 변화시켜 가면서 시뮬레이션한 결과, 보정곡선은 재료상수의 영향을 받음을 알 수 있었다. Fig. 5은 일정한 재료상수일 때 마찰인자의 변화에 따른 내경과 외경의 외곽선의 변화모습이다. 마찰인자는 각 압축율에서 실제 내경변화률과 보정곡선을 내삽함으로써 구해진다.

변형률속도민감지수  $m$ 에 의한 영향은 Fig. 6의 보정곡선에서 보여지듯이 마찰이 작은 때는 차이가 없지만 마찰인자가 0.3 이상이면 보정곡선에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 동일한 마찰조건일 경우 변형률민감지수가 클수록 내부직경이 증가하는 모습을 보여준다. 이는 같은 마찰인자 값에 대하여  $m$ 이 작아짐에 따라 유동의 중립면이 내부로 이동함을 알 수 있다. 그러므로  $m$ 의 고려는 정확한 마찰인자 결정에 중요한 역할을 한다.

가공경화지수  $n$ 에 의한 영향은 Fig. 8에서처럼 마찰이 커짐에 따라 그 차이가 커지며  $n$ 이 작아짐에 따라 유동의 중립면이 내부로 이동하는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 9에 나타난 것처럼 가공경화가 작을 때는 마찰인자가 과대평가될 수 있으며 클 때는 과소평가될 수 있다.

Fig. 10과 같이 유동응력과 마찰인자를 결정하는 흐름도는 유한요소해석으로 데이터베이스를 구축한 후 간단한 압축실험을 통해 다음의 방법으로 유동응력을 구한다. (1) 변형률속도의 차이에 의한 응력변화로  $m$  값을 구하는 대신 압축속도에 따른 하중의 변화로 결정한다. (2)  $m$ 이 결정되면, 하중곡선의 기울기로부터  $n$  값을 결정하고 실제하중곡선과 계산에 사용된 표준화된 하중곡선의 배수로부터 강도계수를 결정한다. (3) 재료상수를 고려한 보정곡선을 사용하여 마찰인자를 결정한다. (1), (2), (3)의 과정을 일정한  $K, m, n, m$  값으로 수렴할 때까지 반복 수행한다.

## 5. 링압축실험을 통한 데이터베이스 검증

구축된 데이터베이스의 타당성을 검토하기 위해 상온에서 무윤활과 그리스 윤활의 두가지 마찰조건으로 링압축실험을 하였으며, 금형과 소재 사이의 마찰인자가 다르더라도 재료상수인 강도계수, 변형률경화지수, 변형률속도민감지수는 동일한 값이 나와야 한다. Fig. 11은 상온에서 서로 다른 마찰상황하에 3, 24의 두가지 속도로 실험하여 얻은 하중-압축율곡선이다. 무윤활의 경우는 속도에 따른 하중차  $L_v$ 가 -0.09% 이고 윤활시는 -0.07%로 상온에서는 압축속도에 의한 영향은 거의 없다. 하중의 기울기  $L_v$ 로 가공경화지수  $n$ 을 결정할 경우, 마찰조건에 따라 하중곡선의 기울기 차이가 생기지만 마찰인자를 고려해 재료상수를 보정하면 그 차이는 거의 없다. 따라서, 소재의 재료상수는 일정한 온도에서 마찰조건이 다르더라도 동일한  $K, n, m$ 을 쓸 수 있다.

Fig. 12는 물성치를 고려한 보정곡선으로 두 마찰조건의 마찰인자를 구한 것이다. 마찰인자는 압축율에 따라 다소 차이가 있으나, 압축중에 그 값이 변하지 않는다고 가정하였으므로 압축율에 대한 평균 마찰인자를 구하면 무윤활일 경우는 0.5이고 그리스 윤활은 0.12이다.

온도에 따라 압축속도가 재료상수에 미치는 영향을 알기 위해 200°C와 400°C의 두 온도조건에서 실험한 하중곡선을 Fig. 13에 나타내었으며 속도에 의한 하중차  $L_v$ 를 온도별로 Fig. 14에 도시하였다. 온도가 증가함에 따라 속도에 의한 하중차는 증가하며, 상온에서는 압축율에 대한 평균값을 사용하면 -0.09% 이고 200°C의 경우는 2.03%, 400°C는 24.99%이다. 이는 온도가 올라감에 따라 재료상수에서 변형률속도민감지수의 중요성이 커짐을 알 수 있다.

Table 2에 Al6061-T6의 세가지 온도조건과 두가지 윤활 마찰조건에서의 재료상수  $K, n, m$  값이다.  $K, n, m$ 은 온도의 함수로 마찰조건에 무관하게 재료의 소성변형성질을 대표하는 유동응력의 형태로 나타낼 수 있으며, 이를 가지고 실제 상황에 가까운 유한요소해석을 수행할 수 있다.

## 6. 결론

링압축 유한요소해석으로 변형경화지수  $n$ 와 변형률속도민감지수  $m$ , 소재-금형간 마찰인자  $m_p$ , 압축속도  $V$ 에 따른 데이터베이스를 구축하였고, 링압축 UTM실험을 통하여 소재의 유동응력과 마찰인자를 동시에 구할 수 있는 일반적인 방법을 모색하였다. 그리고, 실험을 통해 데이터베이스에서 구한 재료상수와 마찰인자를 마찰, 온도등의 변수에 대해서 타당성을 검토하였다. 또한 알루미늄을 마찰조건이 다르게 압축실험하여, 그 결과를 데이터베이스와 비교하여 동일한 유동응력이 구해짐을 검증하였으며 온도에 따른 유동응력  $K, n, m$ 의 값을 결정해 보았다.

이상의 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. (1) 링압축실험을 통하여 마찰인자뿐만 아니라 유동응력도 결정할 수 있는 방법을 제안하였으며, 제안된 방법에 따라 마찰조건이 다른 실험을 통하여 그 타당성을 보였다. (2) 링의 압축시 내경 및 외경의 변화는 마찰조건외에도 소재의 유동응력의 영향을 받으며, 특히 링 단면의 형상변화는 변형경화지수, 변형률속도민감지수, 마찰인자 모두의 영향을 받는다. (3) 일반 압축시험기에서는 변형률속도를 일정하게 조절할 수 없으므로 유동응력의 결정이 쉽지 않으나, 본 보고서에서 제시된 방법에 의하면 소재의 유동응력 결정이 쉽게 이루어질 수 있다.

후기 : 본 연구의 일부는 G7(경량합금을 이용한 차체설계 및 가공기술)과제와 홍익대학교 교내 연구비의 지원에 의하여 이루어 졌습니다.

## 참고문헌

- [1] C.H. Lee and T. Altan, "Influence of Flow Stress and Friction Upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders", Trans. ASME, J. Engr. Industry, Vol 94, No.3, Aug 1972, p775.
- [2] T. Altan, S.-I. Oh, and H. L. Gegel, "Metal Forming : Fundamentals and Applications", ASM, 1983, p48.
- [3] P. R. Butte, S.L.Semiatin, and T. Altan, "Measurement and Analysis of Heat Transfer and Friction During Forging", Report No. ERC/NSM-B-89-20, June 1989.
- [4] S.I. Hong, "Effect of Surface Generation Upon Local Values of Friction In Cold Forging", 한국소성가공학회 추계학술대회 및 심포지움 논문집 '92, p29-34.
- [5] C.Y. Park and D.Y. Yang, "Effects of Work-Hardening Exponent and Strain-Rate Hardening Exponent on the Determination of Friction Factor", Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity Vol.1, No. 1, 1992.
- [6] Y.M. Choi and N.S. Kim, "Determination of Flow Stress and Friction Factor by the Ring Compression Test(I)", 한국소성가공학회 추계학술대회논문집 '93, p12-22.
- [7] A. Bugini et al, "The Evaluation of Flow Stress and Friction in Upsetting of Rings and Cylinders", Annals of CIRP Vol. 42/1/1993.
- [8] K.P. Rao and K. Sivaram, "A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves", Journal of Materials Processing Technology, Vol.37, 1993, p295-318.
- [9] Yhu-Jen, Chwan-Tzong Hsu and Fengyin Wang, "Measurement of friction and the flow stress of steels at room and elevated temperatures by ring-compression tests.", Journal of Materials Processing Technology, Vol.37, 1993, p319-335.

Table 1 Three different experimental loading type of 6:3:4 ring compression

loading type	No. of specimen	No. of steps	data obtained
type1 : a single specimen in multi steps	1	5	load-displacement(per step) inner radius(per step) outer radius(per step)
type2 : a number of specimens in different reduction single step	5	5	continuous load-displacement inner radius outer radius
type3 : a single specimen in total reduction(60%) single step	1	1	continuous load-displacement final inner radius final outer radius

Table 2 Flow stress of Al6061-T6 obtained under various temperature

Temperature(°C)	friction condition	$K(\text{kgf/mm}^2)$	$n$	$m$
20	dry	44.49	0.093	-0.001
	lubricant	45.73	0.102	-0.001
200	dry	34.64	0.069	0.009
	lubricant	34.24	0.065	0.014
400	dry	24.25	-0.019	0.136



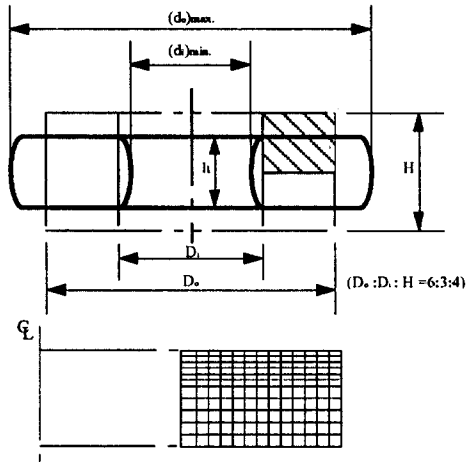


Fig. 1 Geometric definition and mesh system of ring compression specimen used in the rigid-plastic finite element analysis.

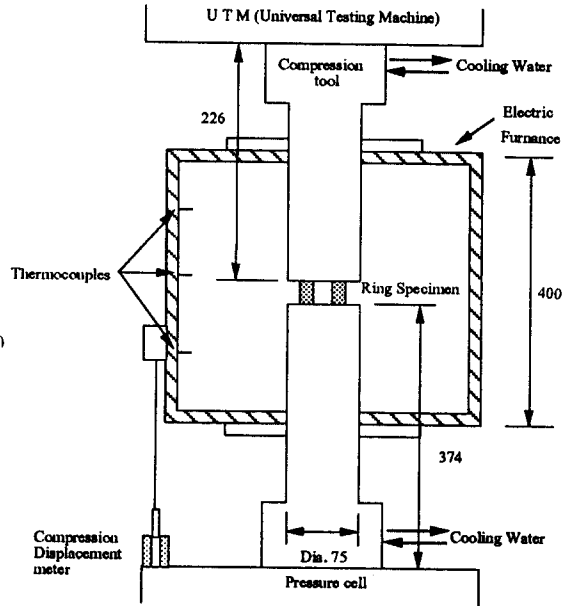


Fig. 2 Experiment set-up for high-temperature compression test(all units : mm ).

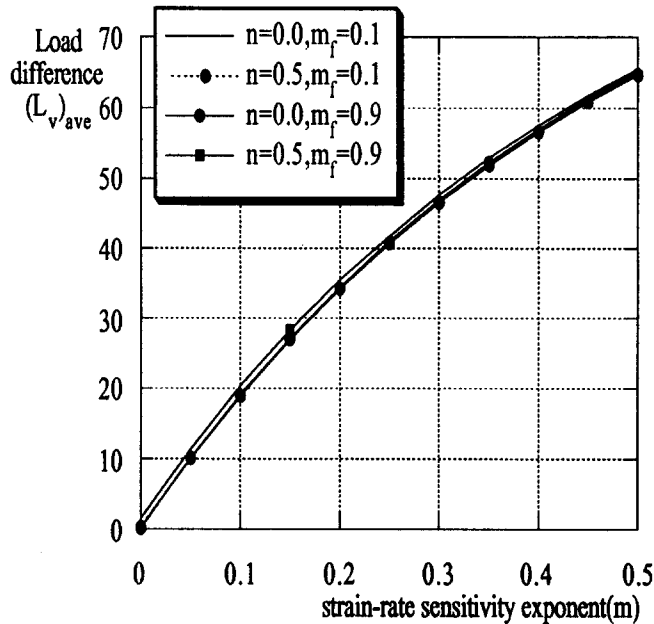


Fig. 3 Dependence of load difference( $L_v$ ) on strain-rate sensitivity exponent( $m$ ).

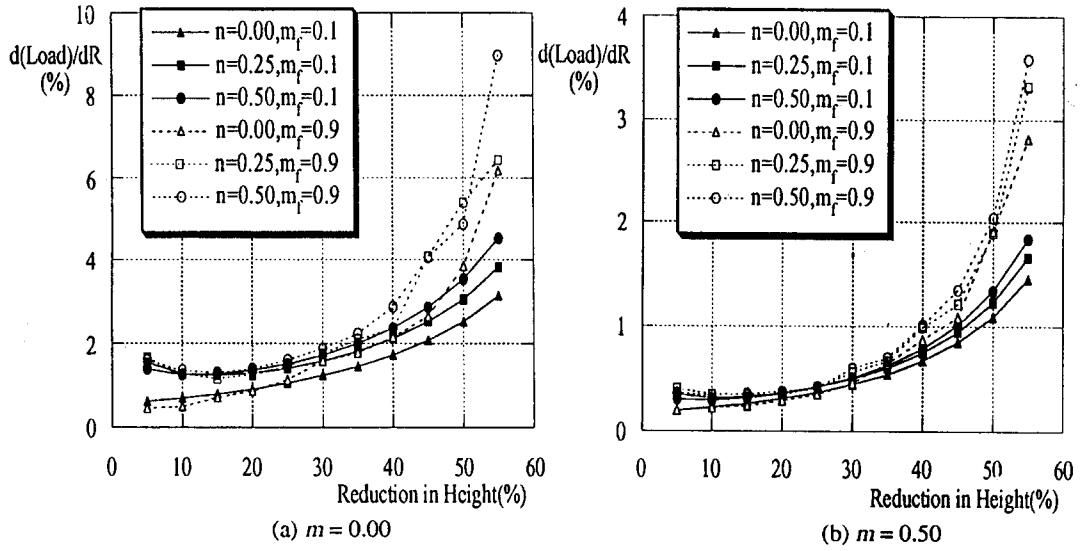
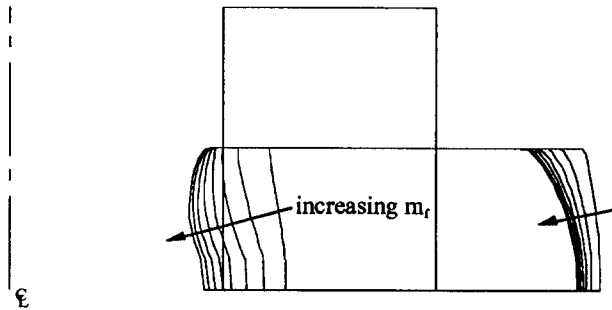
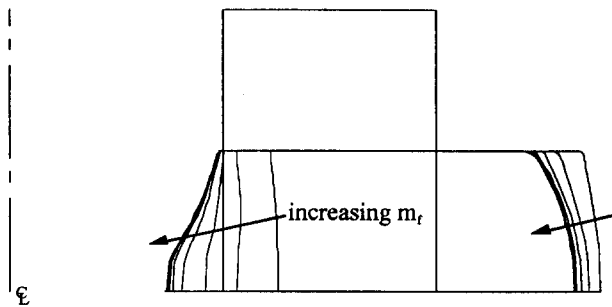


Fig. 4 First derivative of load curves (a) $m=0.00$ , (b) $m=0.50$ .



(a)  $n=0.25, m=0.00$ , from  $m_f=0.10$  to  $m_f=0.90$ .



(b)  $n=0.00, m=0.00$ , from  $m_f=0.10$  to  $m_f=0.90$ .

Fig. 5 Comparison of deformed shapes with various friction factor( $m_f$ ).

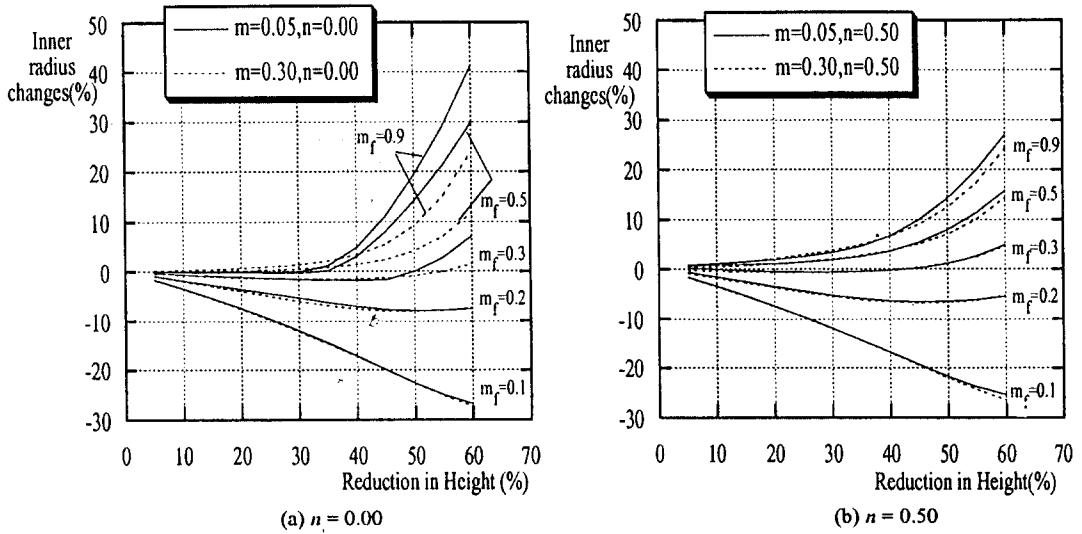
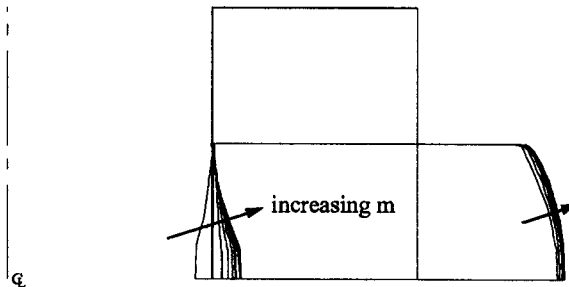
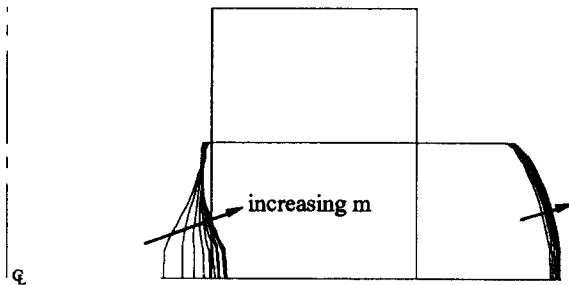


Fig. 6 Dependence of inner radius changes on strain-rate sensitivity exponent( $m$ ) of 6:3:4 rings:(a) $n=0.00$ , (b) $n=0.50$ .

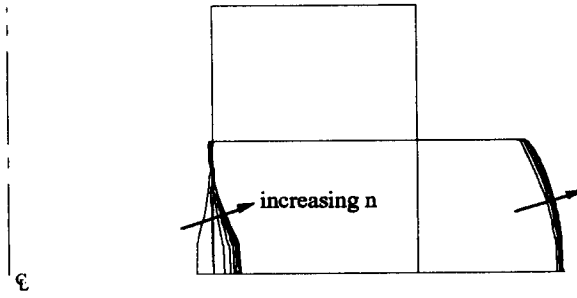


(a)  $n=0.00$ ,  $m_r=0.30$ , from  $m=0.00$  to  $m=0.50$ .

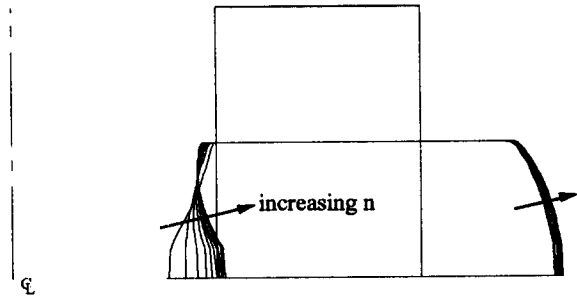


(b)  $n=0.00$ ,  $m_r=0.50$ , from  $m=0.00$  to  $m=0.50$ .

Fig. 7 Comparison of deformed shapes with various strain-rate sensitivity exponent( $m$ ).



(a)  $m=0.00$ ,  $m_r=0.30$ , from  $n=0.00$  to  $n=0.50$ .



(b)  $m=0.00$ ,  $m_r=0.50$ , from  $n=0.00$  to  $n=0.50$ .

Fig. 8 Comparison of deformed shapes with various strain hardening exponent( $n$ ).

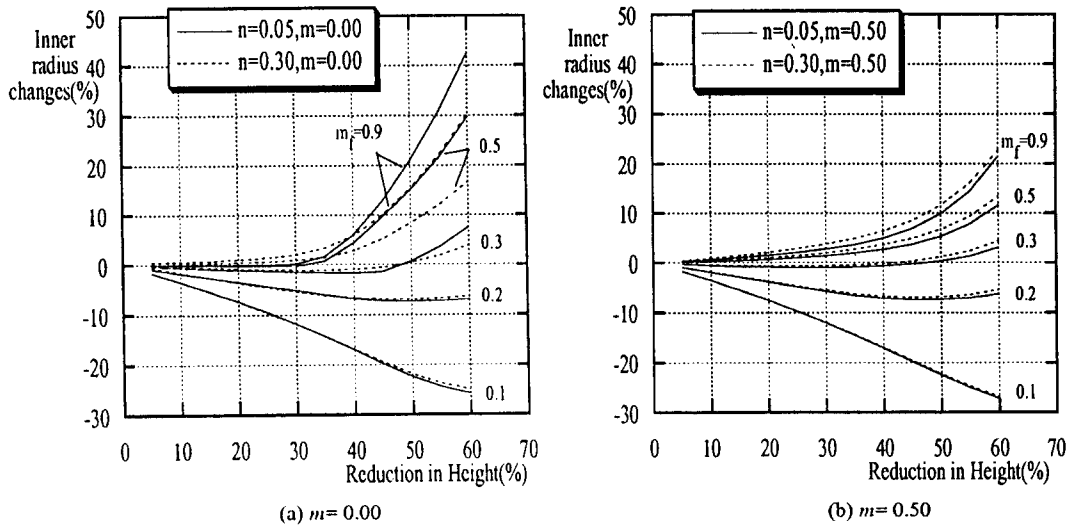


Fig. 9 Dependence of inner radius changes on strain hardening exponent( $n$ ) of 6:3:4 rings:(a) $m=0.00$ , (b) $m=0.50$ .

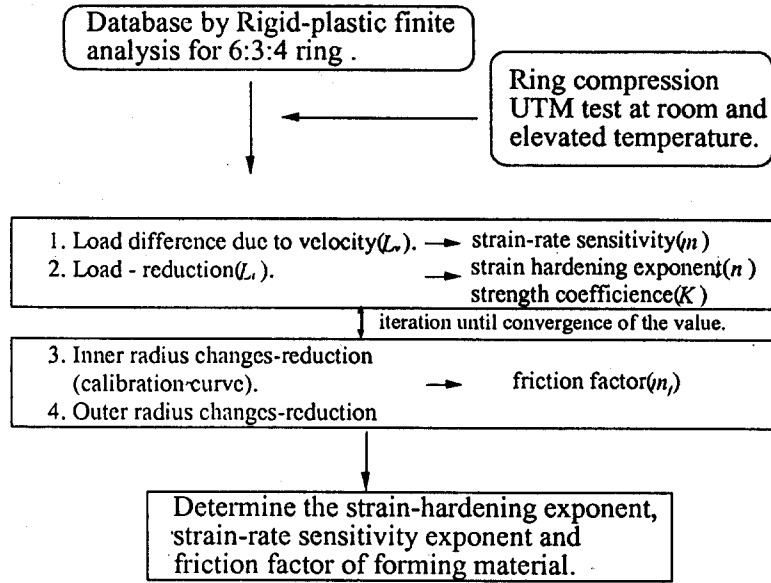


Fig. 10 Flow chart for determination of the strain hardening exponent( $n$ ), the strain-rate sensitivity exponent( $m$ ) and the friction factor( $m_f$ ) with the ring compression data.

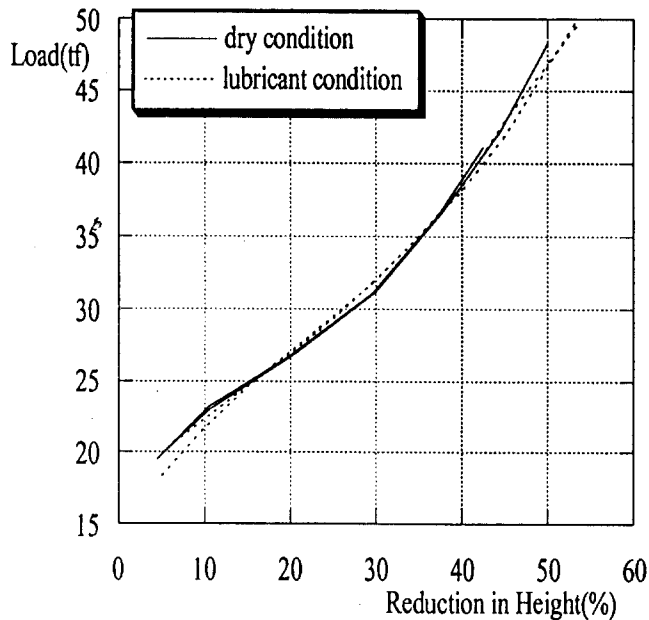


Fig. 11 Load-reduction curve on dry and grease lubricant condition at room temperature (the compressing velocity 3 and 24 mm/min).

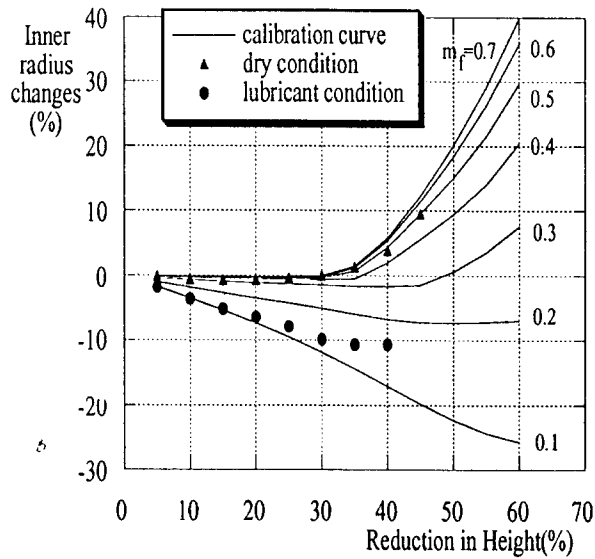


Fig. 12 Experimental inner radius changes-reduction at room temperature(velocity: 24mm/min,  $m=0.00$ ,  $n=0.10$ ).

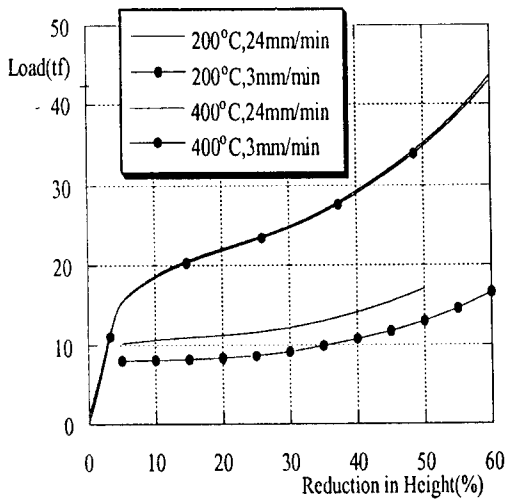


Fig. 13 Load-reduction experimental curves of 6:3:4ring compression test under dry condition).

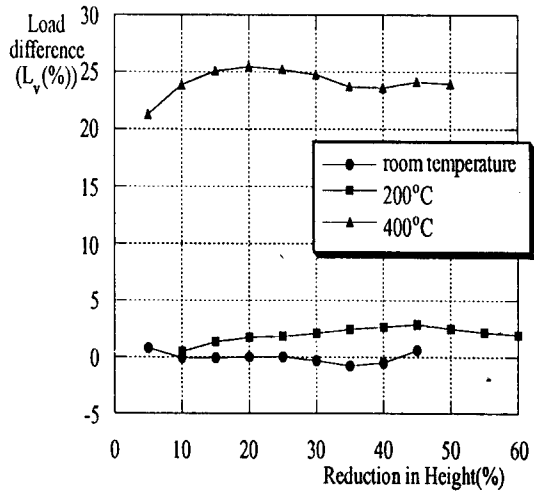


Fig. 14 Experimental load differences( $L_v$ ) under dry condition.