

가공경화지수 및 변형율속도 경화지수의 변화가 마찰상수 결정에 미치는 영향

박치용* · 양동열*

Effects of Work-Hardening Exponent and Strain-Rate Hardening Exponent on the Determination of Friction Factor

C. Y. Park*, D. Y. Yang*

ABSTRACT

The ring compression test has been widely employed as an experimental means to determine the friction factor. The calibration curves are obtained by the rigid-plastic finite element analysis for various work-hardening exponent and strain-rate hardening exponent. The effects of work-hardening exponent and strain-rate hardening exponent are thoroughly studied and discussed from the finite element computation. The change of friction factor during height reduction in ring compression is also discussed. Then, the method to estimate the change of friction factor during ring compression is proposed.

Key Words : friction factor, work hardening exponent, strain-rate hardening exponent, rigid-plastic finite element method, calibration curve.

기호설명

- D_i : 변형전의 내부직경
- D_o : 변형전의 외부직경
- $(d_i)_{min}$: 변형후의 최소내부직경
- $(d_o)_{max}$: 변형후의 최대외부직경
- f : 마찰력
- H : 변형전의 소재높이
- h : 변형후의 소재높이
- k : 전단항복응력
- m : 변형율속도경화지수
(strain-rate hardening exponent)
- m_f : 마찰상수(friction factor)
- n : 가공경화지수
(work hardening exponent)
- v_{sw} : 다이와 소재의 상대속도
- Ψ_i : 최소내부반경의 변화율
- Ψ_o : 최대외부직경의 증가율

1. 서 론

금속성형을 하는데 있어서 금형과 변형소재 사이에서 발생하는 마찰력은 변형하중을 증가시키며 제품의 내부구조 및 표면특성에 영향을 미치고 제품의 치수변화를 가져올 뿐만 아니라 금형의 마모로 인하여 금형수명을 단축시킨다. 따라서 마찰은 금속가공 공정에서 가장 중요한 변수들 중의 하나이다. 원하는 형상의 성질을 갖는 제품을 얻기 위해서는 공정중에 마찰을 잘 제어하여야 한다. 마찰의 적절한 제어를 위해서는 온도, 가공속도 및 압력등의 공정변수와 운할의 효과에 대한 정량적인 데이터가 필수적이다. 또한 마찰현상에 대한 정량적인 수치화가 필요한데 이는 주로 마찰계수(μ)와 마찰상수(m_f)를 사용한다. 이러한 마찰에 대한 정량적

* 한국과학기술원 정밀공학과

인 값은 소성변형을 해석하는 수치해석방법에서도 수렴성 및 비선형에 영향을 미친다. 따라서 실제 현상에 근접하는 마찰상수(friction factor : m_f) 또는 마찰계수(friction coefficient : μ)를 알아야 하며 이를 결정하기 위해서는 박판 성형의 해석에서는 후자를 측정하여 쓰이고, 벌크성형(bulk forming)의 해석에서는 전자로 표현되어지는 식을 이용하기 위해 주로 링 압축시험(ring compression test)이 행해지고 있다. 이는 압축된 링의 내부직경 변화가 다이와 소재의 경계면에서의 마찰에 대해 매우 민감하고, 실험이 간단하게 행해질 수 있기 때문에 주로 사용되어져 오고 있다. 이에 대한 연구는 소성해석 기법의 향상과 함께 많이 행하여져 왔다^[1-5]. 링 압축시험은 일정한 크기비율에 한해서 시편의 크기, 재료의 구성관계식 등에 무관하게 작성된 보정곡선(calibration curve)에 실험의 결과와 비교하여 마찰상수를 구한다. 소성가공이 최종제품에 가까운 정형(near net-shape) 제품을 만들기 위한 방향으로 나아가고, 특수합금의 성형으로 발전함에 따라 실제현상에 더 가까운 마찰상수의 결정이 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 구성방정식의 주요 요소인 가공경화지수 및 온도에 따라 변하는 변형율속도 경화지수가 마찰상수에 미치는 영향을 알아보고, 링 압축시험에 의한 데이터로써, 수정된 보정곡선에 의하여 정확한 마찰상수를 결정하도록 하는데 있다. 또한 링 압축시험으로써 마찰상수의 변화를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 계산조건 및 방법

가공 경화의 효과 및 마찰특성을 고려한 강점소성 유한요소 프로그램^[6]을 이용하여 Fig. 1(a)과 같이 외부직경(D_o), 내부직경(D_i), 및 높이(H)의 비율이 6:3:2인 링(ring)을 해석하였다. 또한 링의 크기효과를 검증하기 위해서 ($D_o:D_i:H$)의 비율은 같으나, 크기가 다른 두가지 경우에 한하여 계산을 수행하여 보았으나 시

편크기에 따른 영향은 없는 것으로 나타났다. 계산의 효율성을 위해 전체의 1/4을 Fig. 1(b)와 같이 격자를 구성하였다. 구성격자의 수가 계산결과에 미치는 영향을 조사하기 위하여 요소(element)의 수를 4배로 증가시켜 비교해 보았으나 큰 차이를 나타내지 않았기 때문에 Fig. 1(b)와 같은 격자의 구조를 전체계산에 사용하였다.

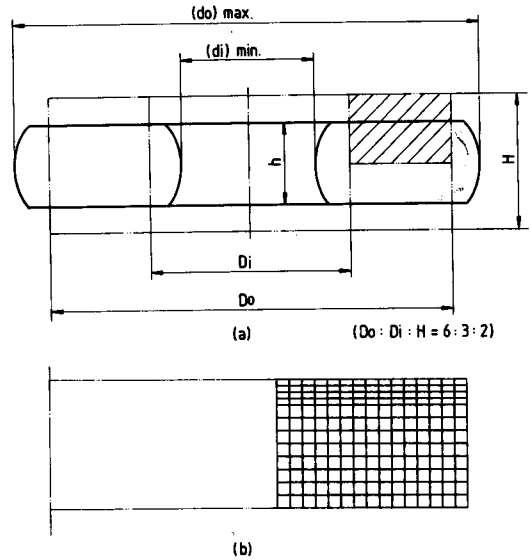


Fig. 1. Ring compression: (a) geometric definition (b) mesh system.

높이 감소율(R), 최소내부반경의 변화율(Ψ_i) 및 외부최대직경의 증가율(Ψ_o)을 다음과 같이 두고서 가공경화지수 또는 변형율속도경화지수에 다른 변화를 관찰하였다.

$$R = ((H-h) / H) \times 100(\%) \quad \dots (1)$$

$$\Psi_i = ((D_i - (d_i)_{min}) / D_i) \times 100(\%) \quad \dots (2)$$

$$\Psi_o = (((d_o)_{max} - D_o) / D_o) \times 100(\%) \quad \dots (3)$$

여기서 H , D_i , D_o 는 변형전의 높이 및 내부 직경이고 h , d_i , d_o 는 변형후 각각의 값이다. 계산에 사용되어진 단순인장에서의 응력-변형율(속도)관계식은 Table 1에 표시한 바와 같다. 가공경화지수가 마찰상수(m_f)에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가공경화지수(n)를 0.02,

Table 1. Computational Conditions

stress-strain (rate) relations (N/mm ²)	work-hardening exponents or strain-rate hardening exponents (n, m)	friction factor m_f	etc.
$\bar{\sigma}=400$ $(\dot{\epsilon}/0.002)^n$	n=0.02 0.15 0.25 0.40	0.1	[ref.8]
		0.2	
		0.3	
		0.5	
		0.7	
$\bar{\sigma}=404.443(\dot{\epsilon})^m$ at 800°C $\bar{\sigma}=308.672(\dot{\epsilon})^m$ at 900°C $\bar{\sigma}=35.139(\dot{\epsilon})^m$ at 1000°C	m=0.040 0.082 0.294	0.1	Ti-tanium alloy [ref.7]
		0.2	
		0.3	
		0.5	
		0.7	

0.15, 0.25, 0.4 로 변화시켰으며, 각 경우에 대해서 마찰상수(m_f)의 값을 대부분의 실제현상을 나타낼 수 있는 0.1에서 0.7까지로 변화시켜 가면서 계산을 수행하였다. 변형율속도 경화지수(m)의 영향을 조사하기 위해서는 변형율속도의 효과가 큰 재료중의 하나인 티타늄합금(Titanium alloys : Ti-51Al-2.5Sn)을 선택하여 800°C, 900°C, 1000°C 일때의 구성관계식을 사용하였다^[7]. 이때 변형율속도 경화지수는 0.040, 0.082, 0.294이며 이때에도 마찰상수는 0.1에서 0.7로 변화시켰다. 마찰관계식은 벌크 성형계산에서 주로 사용되어지는 식인 $f = m_f k$ 를 중립점의 처리를 위하여 다음과 같이 수정되어진 식^[5]을 이용하였다.

$$f = -\frac{2}{\pi} m_f k \tan^{-1} \frac{|v_{dw}|}{a} \dots (4)$$

이때 k 는 전단항복응력(current shear flow stress)이며 $|v_{dw}|$ 는 다이와 소재의 상대속도이고 a 는 매우 작은 양의 수이다.

3. 가공경화지수의 효과

6:3:2의 비를 가지는 링의 압축에 대한 내부

반경의 변화를 나타내는 보정곡선을 가로축에는 높이의 감소율(R)로 하고 세로축을 최소내부 반경의 변화율(ψ_f)로 하여 나타낸 그래프가 Fig. 2에 나타나 있다. 마찰상수 m_f 가 0.1 또는 0.2의 경우에는 n 에 대해 큰 변화를 나타내고 있지 않으나 0.3 이상에서는 가공경화지수에 따

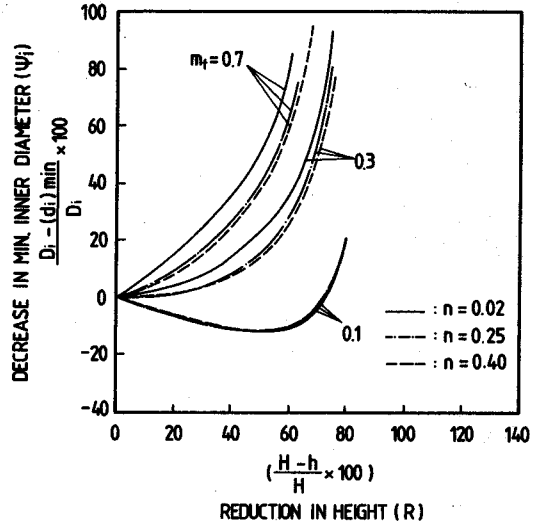


Fig. 2. Effect of work-hardening exponent n on the calibration curve for various friction factors(m_f), (a) $m_f=0.1, 0.3, 0.7$.

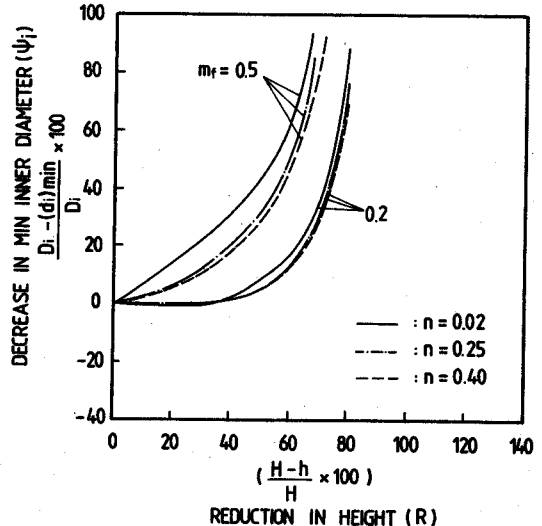


Fig. 2. Effect of work-hardening exponent n on the calibration curve for various friction factors(m_f), (b) $m_f=0.2, 0.5$.

라 큰 차이를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 내부반경의 변화율은 동일한 마찰상수 값에 대해서 가공경화지수가 적을수록 더 커짐을 관찰할 수 있다. 특히 마찰상수가 0.5 또는 0.7인 경우에 있어서는 변형후 최소내부직경의 차이가 가공경화지수의 변화에 따라서 최대 10%이상의 오차를 나타내었다. 이의 관찰에서 알 수 있듯이 링 압축시험의 결과를 곡선맞춤할 보정곡선 자체가 n 에 관계없이 구해진 곡선이라면, 가공경화가 거의없는, n 값이 작은 경우에는 보정곡선에 의해 결정되어지는 마찰상수의 값이 과대평가되어 질 수 있다. 또한 가공경화가 심한 302 또는 304 스테인레스강($n=0.6$)이나 구리($n=0.3-0.4$)와 같은 경우에는 마찰상수의 값이 과소 평가되어 질 수가 있다. 따라서 소재의 실제가공경화지수에 근접하거나 맞는 맞춤곡선이 필요하게 된다. Fig. 3는 가공경화지수가 0.02, 0.25일때 마찰상수의 변화에 따른 링 내부 및 외부의 형상변화를 비교한 그림이다. 외부반경의 형상은 n 의 변화에 따라 큰 차이를 나타내고 있지 않으나 내부형상에는 변형형태가 다름을 알 수 있다. 가공경화지수가 0.25일때 마찰상수가 0.1 또는 0.2인 경우 상하의 중심부가 다이의 접촉면보다 내부로 들어가는 현상이 더 크게 나타난다. 마찰상수가 0.3 또는 0.7인 경우에도 상

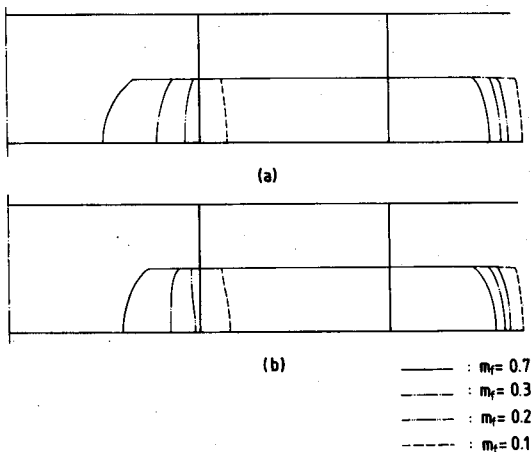


Fig. 3. Comparison of deformed boundary shape between various friction factors(m_f): (a) $n=0.02$, (b) $n=0.25$.

하중심부의 벌짐(bulging)되는 양이 가공경화지수가 0.25일때 더 적은 것을 알 수 있는데 이는 변형량이 많은 상하 중심부가 가공경화정도에 따라서 재료유동이 다르기 때문이다. Fig. 4는 외부최대직경의 증가율(Ψ_o)과 내부최소직경의 감소율(Ψ_i)의 관계를 $n=0.02$, 0.25일대를 비교한 그림으로 가공경화지수가 0.25일때 Ψ_i 의 값이 작으며, 마찰상수가 커짐에 따라서 가공경화지수에 따르는 편차가 더 커짐을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3에서 보인 바와 같이 내부반경의 감소가 마찰상수에 따라 달라지기 때문에 일어난다. Fig. 5은 동일한 마찰상수 $m_f=0.5$ 에 대해서 가공경화지수(n)의 변화에 따른 변형 형상을 비교해 보이고 있다. Fig. 3에서 보인 동일한 가공경화지수에 따른 마찰상수(m_f) 값의 변화 만큼이나 내부직경의 변화는 민감하지 않으나 가공경화지수에 의해서도 내부직경의 변화가 나타남을 확인할 수 있다. 가공경화의 정도가 작은 재료일수록 높이방향의 중심에서 내부로의 벌짐현상이 크게 나타난다. 이로부터 동일한 마찰상수 값에 대해서 가공경화지수가 작아짐에 따라 유동의 중립점이 내부로 이동함을 알 수 있다. 또한 링 압축시험으로 마찰상수를 얻기 위한 보정곡선을 구할 때 가공경화지수를 고려해야 한다.

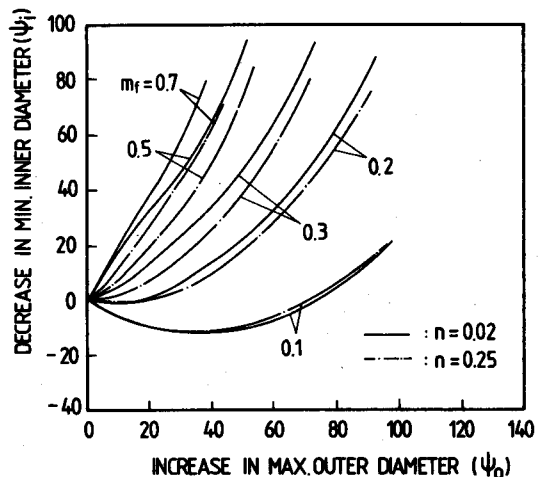


Fig.4. Effect of work-hardening exponent values on the Ψ_i vs Ψ_o curve for various friction factors.

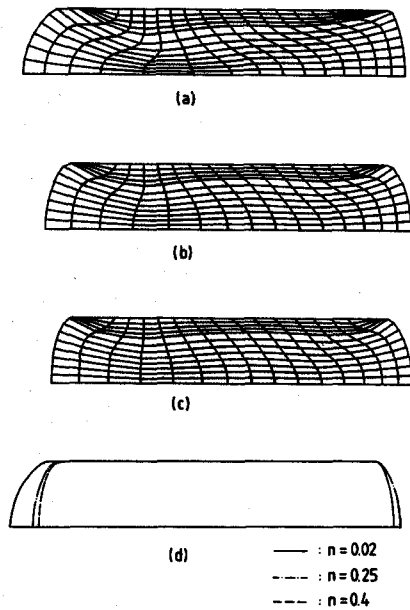


Fig. 5. Grid distortions at 50% reduction in height for various work-hardening exponent values for the given friction factor $m_f=0.5$, (a) $n=0.02$, (b) $n=0.25$, (c) $n=0.40$, (d) comparison for deformed boundary shapes.

4. 변형율속도 경화지수의 효과

냉간 소성가공에서는 소재가 변형율속도에 영향을 받지 않고, 마찰 조건도 변형율속도에 따라서 크게 변하지 않는다. 그러나, 열간가공의 범위에서 대부분의 재료가 변형율속도에 따라 변하며 마찰조건도 온도변화에 따라 급격히 변하기 때문에 열간 소성가공에서는 사용 프레스의 특성이 금속유동이나 변형과정에서 영향을 미치게 된다. 열간 소성가공에서 다이의 냉각은 마찰을 증가시키는 작용을 하며 금속유동에 중요하게 영향을 미치고 있다^[4]. 또한 다이의 냉각에 의해 다이 접촉부 주위의 소재에서 온도가 저하됨으로 인해 변형율속도 경화지수가 감소

된 구성관계식을 따르는 유동을 나타낸다. 변형율속도 경화지수가 작아짐에 따라서, 다이의 속도가 느린 경우 특히 변형율속도가 1(/sec)보다 작은 경우에는 유동응력이 증가하므로 유동의 특성에 변화가 있다. 따라서 변형율속도 경화지수에 따른 링 압축시험에서 내부반경의 변화를 예측할 수 있다.

변형율속도 경화지수의 변화에 따른 보정곡선의 변화 및 내부반경의 변화를 관찰하기 위해 m 값이 온도에 민감한 티타늄합금(Titanium alloy)을 선택하여 $m=0.04, 0.082, 0.294$ 인 경우를 비교한 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 $m=0.04, 0.082$ 인 경우 마찰상수(m_f)에 따른 보정곡선을 나타낸 것으로 변형율속도 경화지수의 작은 변화에 대해서는 큰 차이를 나타내고 있지 않음을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 6(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 $m=0.082, 0.294$ 의 경우에는 큰 차이를 나타내고 있다. m 이 작아짐에 따라 즉 온도가 내려감에 따라서 최소내부직경의 감소율(ψ_i)이 증가하는 경향을 보이고 있다. 온도가 감소함에 따라서 ψ_i 가 증가하기 때문에, 온도가 높은 상태(m 이 큰 상태)에

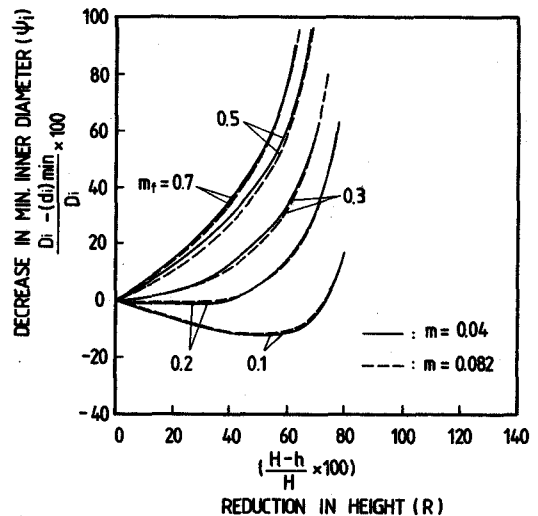


Fig. 6. Effect of strain-rate hardening exponent m on the calibration curve for various friction factors (m_f): (a) $m=0.04$, and 0.082.

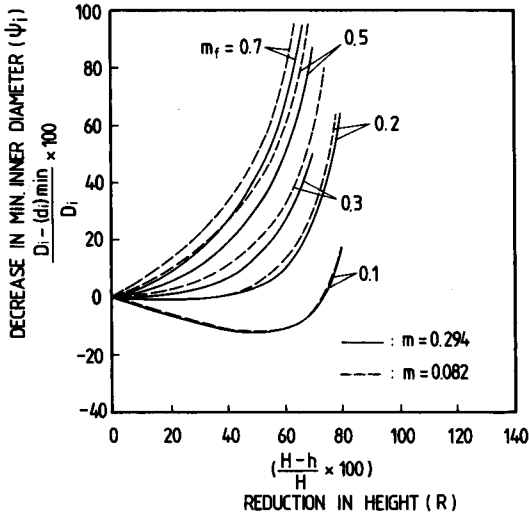


Fig. 6. Effect of strain-rate hardening exponent m on the calibration curve for various friction factors (m_f): (b) $m=0.082$ and 0.294 .

서 만든 보정곡선을 기준으로 링 압축시험의 결과를 평가할 때 마찰상수(m_f)의 값이 크게 평가되어 진다. 따라서 m 의 감소 즉 온도의 감소에 의해 마찰이 떨어지는 경향을 충분히 고려하고 있지 못하기 때문에 m 의 변화가 큰 재료나 또는 온도의 변화가 심한 가공에 대해서는 그 값에 맞는 보정곡선을 기준으로 하여 링 압축시험의 결과를 맞춤(fitting)해야 할 필요성이 있다. Fig. 7은 마찰상수가 0.3, 0.5의 경우에 있어서 변형율속도 경화지수가 0.04, 0.082, 0.294로 변할 때의 내부 및 외부 경계 형상변화를 비교해 보이고 있다. 변형율속도 경화지수(m)가 작을수록 내부직경이 크게 줄어드는 현상과 같이 m 값의 변화에 따라라도 가공경화지수(n)를 변화시킬 때와 마찬가지로 내부직경의 변화를 알 수 있다. 따라서 실가공소재의 조건에 맞는 m 값을 기준으로 만든 보정곡선을 사용해야 함을 알 수 있다.

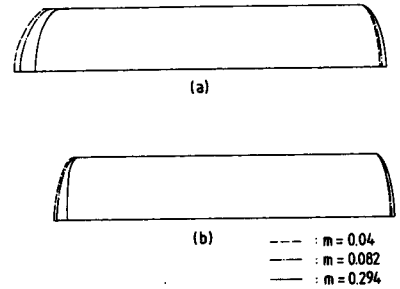


Fig. 7. Comparison of deformed boundary shape between various strain-rate hardening exponents m : (a) $m_f=0.3$, (b) $m_f=0.5$.

5. 마찰상수의 결정

마찰이 큰 경우에 대해서 가공경화지수 또는 변형율속도 경화지수의 변화에 따라서 보정곡선의 변화가 크게 나타나는 것을 앞에서 관찰했다. 링 압축시험에 의한 데이터를, 재료의 물성을 고려하지 않고 작성된 보정곡선을 사용함으로써 인해서 오차가 일어날 수 있으며, n 이 다른 재료가 주어지거나 또는 온도에 의해 m 값이 크게 변하는 재료가 주어 졌을 때 실험시마다 그에 맞는 보정곡선을 먼저 설정한 다음 링 압축시험의 결과를 맞춤해야하는 번거로움이 있다. 이러한 번거로움을 피하고 오차를 줄이기 위하여, n 또는 m 에 따라 변하는 마찰상수의 결정이 필요하게 된다.

가공경화지수(n)와 변형율속도 경화지수(m)에 따른 마찰상수(m_f)를 결정하기 위해서 n, m 의 각각에 대해서 m_f 를 변화시키면서 구한 보정곡선을 5차의 다항식(polynomial) 함수로 하여 각각의 계수를 데이터 베이스(data base)로 저장하고, 이를 이용하여 재료의 압축시험 등으로 얻어진 물성치를 나타내는 값중에서 n, m 에 따른 보정곡선을 내삽(interpolation)하여 구하였다. 이 곡선에 링 압축시험의 값을 맞춤하여 m_f 를 구할 수 있다. 또한 새로이 작성된 곡선을 기준으로하여 링 압축시험에서 얻어진

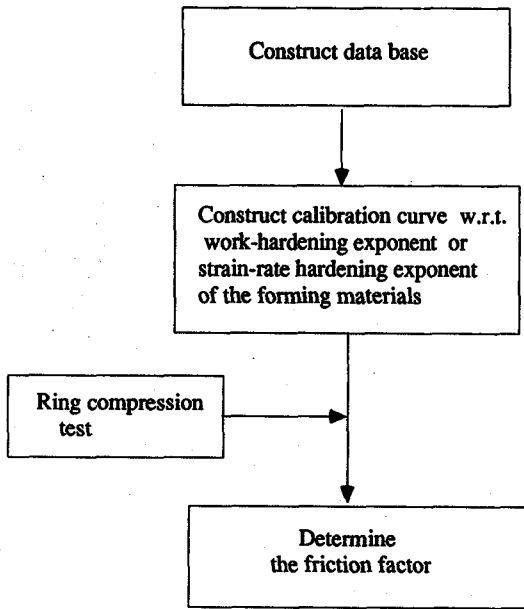


Fig.8. Flow chart for automatic determination of the friction factor with respect to work-hardening exponent n or strain-rate hardening exponent m .

높이 감소율에 대한 최소내부 반경 변화의 값을 입력으로 하여 프로그램 내부에서 새로운 마찰상수를 결정할 수 있도록 하였다. 이에 대한 유통도(flow chart)가 Fig. 8에 나타나 있다.

가공경화지수(n) 또는 변형율 속도경화지수(m)를 고려하지 않고 작성된 보정곡선을 이용하면 마찰상수값의 평가가 잘못되어질 수 있다는 것을 앞에서 보았다. 이를 확인하기 위해서 기존의 연구^[9,10]에서 얻어진 링압축실험의 결과를 이용하였다. Table 2는 알루미늄(Al 1100)과 구리(OFHC copper)의 경우에 있어서 무윤활일때의 실험 결과값들이다. 개발된 프로그램에서 이 실험치들을 입력으로 하여 가공경화지수(n)가 각각 다른 경우의 보정곡선을 사용했을 때 얻을 수 있는 마찰상수의 값들을 Fig. 9에 비교하였다. 구리의 경우에 있어서는 최대 마찰상수의 평가를 0.2(약 30%)의 오차까지도 일으킬 수 있음을 볼 수 있으며 알루미늄의 경우에 있어서는 0.05(약 25%)까지의 오차가 나

Table 2. Results of Ring Compression Test [Ref.9,10]

	R	8.5	16.5	24.0	29.5	38.5	46.32
Al 1100	Ψ_i	-1.0	-2.0	-1.8	-0.45	1.3	4.6
OFHC copper	R	25.2	41.0	48.3	57.0	59.0	
copper	Ψ_i	14.6	26.3	35.2	51.0	57.8	

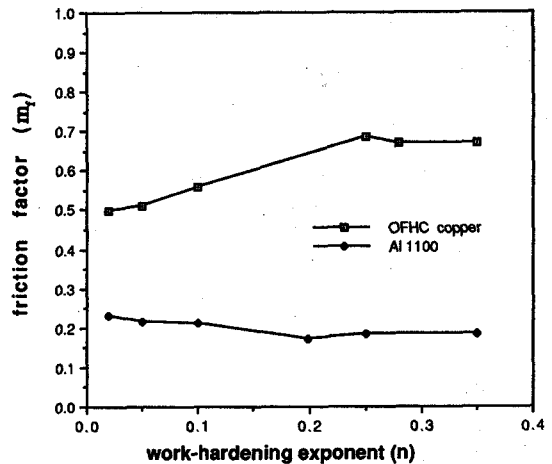


Fig. 9. Variation of friction factor with respect to work-hardening exponent.

타남을 알 수 있다. 따라서 실제 가공재료의 가공경화지수에 맞거나, 근접하는 가공경화지수를 고려한 보정곡선의 사용이 필수적임을 알 수 있다. 또한 가공경화지수가 큰 경우(구리)에 있어서는 가공경화지수가 작을 때 구한 마찰 보정곡선을 사용하면 마찰상수의 값을 과소평가할 수 있고, 그 반대로 가공경화지수가 작은 경우(알루미늄)에 있어서는 과대평가되어 질 수 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 2에서 예측한 결과와 일치한다. 기존연구^[9,10]에서의 마찰상수 평가와 가공경화지수를 고려한 본 연구의 마찰상수 평가의 비교가 Table 3에 나타나 있는데 알루미늄은 약 0.03정도, 구리는 0.033정도로 오차가 나타남을 알 수 있다. 여기서도 Fig. 9의 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3. Comparison of the Newly Estimated Friction Factor and Reported Friction Factor in the Reference.

	n	reported mf	new mf	비 고
Al 1100	0.198	0.2[ref.9]	0.173	과대평가
OFHC copper	0.28	0.6[ref.10]	0.671	과소평가
Al 1100 [ref.9]		$\bar{\sigma} = 6.662 \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.01}\right)^{0.198}$ (kgf/mm ²)		
OFHC Copper [ref.10]		$\bar{\sigma} = 28.956 \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.3518}\right)^{0.28}$ (MN/m ²)		

6. 마찰상수의 변화

앞절에서 설명된 방법으로 결정한 마찰상수의 값은 다이와 소재의 마찰면이 윤회되어진 경우 즉 마찰면이 깨어지지 않은 정상적인 가공상태에 한해서 보정곡선에 맞추던 실험치들이 적합성을 인정받을 수 있다. 그러나 실제가공에서는 가공 도중에 마찰의 변화를 초래한다. Fig. 10 은 Al 1100의 링압축 실험측정치 각각의 값을 보정곡선에 맞추었을때 마찰상수가 증가하고 있다는 현상을 보이는 것이다. 압하량이 증가되어짐에 따라서 금형과 소재사이의 윤회이 깨어지거나 또는 압력의 증가 및 겹침(folding)

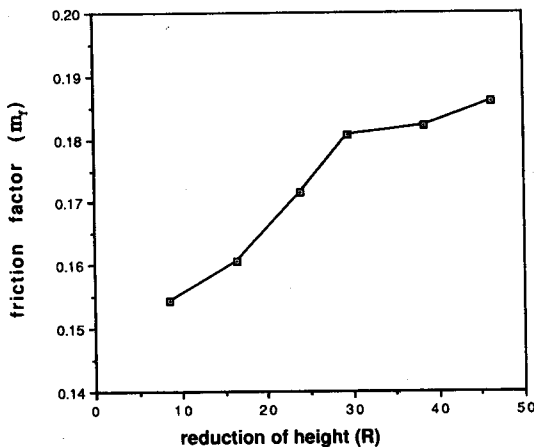


Fig. 10. Variation of friction factor with respect to reduction of height(Al 1100).

현상등으로 인하여 마찰이 증가하는 현상이 나타난다.

일반적인 가공에서 일어나는 마찰이 변하는 경우에도 잘 적응하는, 속도장에 근거한 새로운 보정곡선이 제안되기도 한다^[11]. 이 방법은 압축하는 동안 시편외부반경의 변화를 칩 게이지(chip gauge)로써 연속적으로 측정해야 하므로 새로운 측정 시스템을 구성해야 하나 일반적인 링 압축시험의 측정을 행하면 간편하고 쉽게 할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

이러한 장점을 유지하는 반면, 링 해석에서 얻은 기존 보정곡선을 확장적용시키는 것에 대한 타당성 여부를 확인하기 위하여, 즉 마찰이 변하는 경우에 있어서도 이 보정곡선을 사용하여 마찰상수를 구할 수 있는지의 여부를 알기 위하여 다음과 같은 계산을 행하였다. 마찰상수가 높이 감소율 40%까지 0.1 이다가 45%에서 0.3으로 증가하는 경우를 가정하였다. 마찰상수가 변하는 경우의 최소내부반경의 감소율을 보정곡선에서, 또한 Ψ_i 와 Ψ_o 의 관계를 나타내는 곡선에서 비교하고 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11의 (a)(b)에서 보는 바와 같이 마찰상수가 변하는 곡선이 두 곡선상에서 적절하게 추적하고 있지 못함을 알 수 있다. 즉 Fig.11에서 알 수 있듯이 높이감소율 50%에서 실제의 마찰상수는 0.3인데도 그림에서는 0.14로 판단되는 오류가 발생하는 것이다. 그러나 Fig.11(b)에서 곡선의 기울기를 비교하여 보면 마찰상수의 변화를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 곡선의 기울기 $\Delta\Psi_{io}$ 를 다음과 같이 정의하고 각각의 곡선상에서 $\Delta\Psi_{io}$ 를 구한 뒤에 마찰상수가 변하는 곡선의 $\Delta\Psi_{io}$ 로서 마찰상수의 값을 결정하였다.

$$\Delta\Psi_{io} = \frac{\Delta\Psi_i}{\Delta\Psi_o} \quad \dots (5)$$

여기서, $\Delta\Psi_i$, $\Delta\Psi_o$ 는 한 단계(step) 증분에서 최소내부직경 또는 최대외부직경의 증가량이다.

Ψ_i 와 Ψ_o 의 곡선에서 결정되어진 마찰상수와 0.1에서 0.3으로 갑자기 증가한다고 가정된 마찰상수와의 비교가 Fig. 12에 나타나 있는데 상

당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 링 압축시험에서 윤활막이 파괴됨으로 인해 일어나는, 높이 감소율에 따른 마찰상수의 변화를 예측할 수 있다. 또한 이 방법은 마찰상수를 결정하기 위한 링 압축실험에서 기존에 최소내부 직경, 시편의 높이를 측정하는 것에 덧붙여 최대외부직경만을 추가해서 측정함으로써 마찰상수의 변화를 예측할 수 있다. Fig. 13은 마찰상

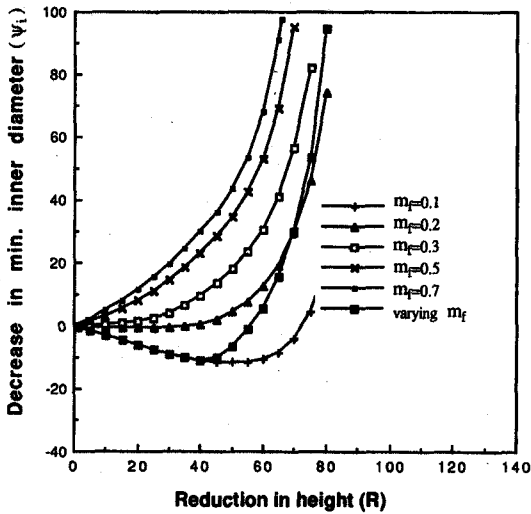


Fig. 11(a). Change of friction factor during ring compression on the calibration curve.

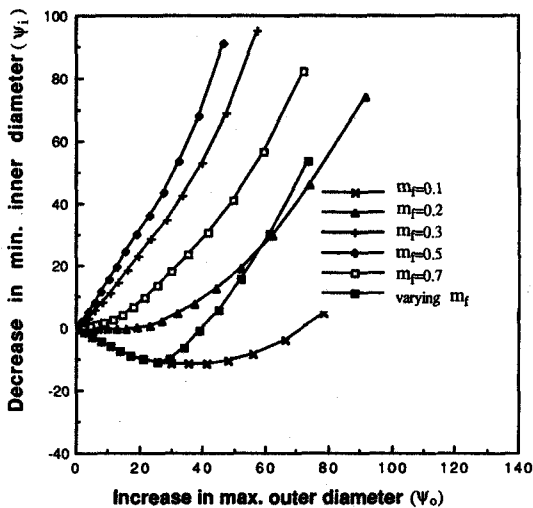


Fig. 11(b). Change of friction factor on ψ_i vs ψ_o curve.

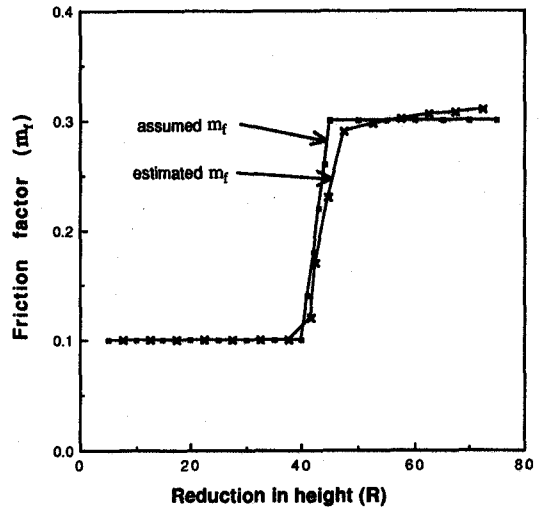


Fig. 12. Comparison between the assumed m_f values and the estimated m_f values.

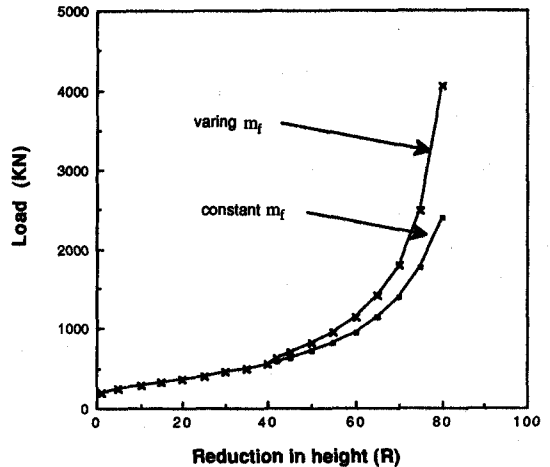


Fig. 13. Comparison of load between the varying friction factor and the constant friction factor.

수가 0.1로 일정할 때와 0.1에서 0.3으로 갑자기 증가한다고 가정했을 때의 하중비교를 나타내었는데 마찰상수가 증가되어진 경우가 더 많은 하중이 걸리는 것을 알 수 있다.

7. 결 론

재료의 응력-변형율(속도)에 대한 관계가 주어지는 경우에 가공경화지수 및 변형율속도 경화지수가 마찰상수에 미치는 효과를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 마찰상수(m_f)의 값이 작지 않을 때 가공경화지수의 증가 및 변형율 속도 경화지수의 감소에 따라서 최소내부반경의 감소율이 작아지기 때문에 실험에 의해서 맞춤된 보정곡선에서의 마찰상수의 값이 과소평가 되어질 우려가 있으므로 주어진 재료의 가공경화지수 또는 변형율속도 경화지수에 맞는 보정곡선으로 보정해야 한다.

2. 가공경화지수 또는 변형율속도 경화지수에 맞는 보정된 보정곡선을 구하고 마찰상수를 찾을 수 있게 하였다.

3. 보정곡선이나 Ψ_1 와 Ψ_0 곡선장에서 마찰상수의 변화에 대해 잘 적응하지 못하나, Ψ_1 와 Ψ_0 곡선의 변화율이 잘 적응하는 것을 관찰할 수 있었다. 이로부터 가공중에 일어나는 마찰상수의 변화를 예측할 수 있다.

8. 참고문헌

- Hawkyard, J.B. and Johnson, W. An Analysis of the Changes in Geometry of a Short Hollow Cylinder during Axial Compression, Int. J. Mech. Sci., Vol.9, 1967, pp.163-182.
- Male, A.T. and Depierre, V. The Validity of Mathematical Solutions for Determining Friction from the Ring Compression Test, Lubrication Technology, July 1970, pp.389-397(also AFME Technical Report AFML-TR-69-28).
- Lie, J. Y. An Analysis of Deformation Characteristics and Internal Friction Condition in Simple Upsetting of Rings, J. Engr. for Industry, Trans, ASME, Vol.94, 1972, pp.1149-1156.
- Lee, C. H. and Altan, T. Influence of Flow Stress and Friction upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders, J. Engr. for Industry, Trans. ASME, Vol. 94, 1972, pp.775-782.
- Chen, C.C. and Shiro Kobayashi, Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression, Application of Numerical Methods to Forming Process, ASME, AMD, 28, 1978, pp.163-174.
- Yoon, J.H. and Yang, D. Y. Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Three Dimensional Forging by Considering Friction on Continuous Curved Dies with Initial Guess Generation, Int. J. Mech. Sci., Vol.30, 1988, pp.887-898.
- Altan, T. and Boulger, F.W., Flow Stress of Metals and Application in Metal Forming Analyses, J. Engr. for Industry, Trans. ASME, Vol.95, 1973, pp.1009-1019.
- Takashi Jimma etc. Benchmark Tests for the Improvement of Accuracy in the Numerical Analyses of Metal-Forming Processes, Tokyo Institute of Technology, 1990, p.188.
- 양동열, 박용복, 윤정호, 곡면형상을 가진 금형에 의한 축대칭 냉간단조의 유한요소해석, 대한기계학회 논문집, 제1권 제4호, 1987, pp.668~680.
- Depierre, V., Gurney, F. and Male, A. T., "Mathematical Calibration of the Ring Test with Bulge Formation", Technical Report, AFML-TR-72-37. 1972.
- Hiroyuki Saiki, Yong Gang Meng and Hidetoshi Sakumoto, Prediction of Transient Friction in Upset Forging of Rings with New Calibration Curves Based on the Velocity Field, Advanced Tech. of Plasticity, Vol.1, 1990, pp.77-82