

링 압축시험에서 마찰인자 구간별 치수 변화의 민감도

임중연[#] · 노정훈¹ · 황병복²

Sensitivity of Dimensional Changes to Interfacial Friction over the Definite Range of Friction Factor in Ring Compression Test

J. Y. Lim, J. H. Noh, B. B. Hwang

(Received October 12, 2010 / Revised October 21, 2010/ Accepted October 26, 2010)

Abstract

The main objective of this study is to examine the sensitivity of calibration curves of FEA of ring compression test to frictional shear factor. Ring compression test has been investigated by measuring dimensional changes at different positions of ring specimen and they include the changes in internal diameter at the middle and top section of the specimen, outer diameter at the middle and top section, surface expansion at the top surface, respectively. Initial ring geometries employed in analysis maintain a fixed ratio of 6 : 3 : 2, i.e. outer diameter : inner diameter : thickness of the ring specimen, which is generally known as 'standard' specimen. A rigid plastic material for different work-hardening characteristics has been modeled for simulations using rigid-plastic finite element code. Analyses have been performed within a definite range of friction as well as over whole range of friction to show different sensitivities to the interfacial friction for different ranges of friction. The results of investigation in this study have been summarized in terms of a dimensionless gradient. It has been known from the results that the dimensional changes at different positions of ring specimen show different linearity and sensitivity to the frictional condition on the contact surface.

Key Words : Ring Compression Test, Dimensional Changes, Linearity, Frictional Shear Factor, Sensitivity

1. 서 론

대변형 공정에서 공구와 공작물 사이에 존재하는 마찰을 정량적으로 평가하기 위한 많은 방법들이 개발되었다. Nadai는 모든 공구와 공작물의 경계면에서 상대 미끄럼 속도에 비례하는 점성미끄럼마찰이 발생한다고 보았다[1]. 이러한 가정은 너무 복잡하기 때문에 마찰을 평가하는데 적용이 제한되어 왔다. Orowan과 Sims 그리고 Alexander는 모든 경계면에는 고착상태가 존재한다고 가정하여 비교적 무른 재료의 무윤활 냉간

및 열간 가공에서의 마찰모델로 사용하였다[2~4]. Bay와 Gerved는 경계면을 중앙부의 고착지역, 미끄럼지역 그리고 균일변형지역 등 세가지로 나누었으며, 이러한 제안은 일반적인 소성가공공정에 많이 적용되었다[5]. 가장 보편적인 가정은 공구와 공작물 사이의 모든 경계면에 대한 건조미끄럼마찰상태(dry slipping) 이론이다. 이러한 이론을 바탕으로 하여 마찰저항이 수직압력에 비례한다는 가정을 하였으며[6~8], 이를 바탕으로 쿨롱마찰법칙(Coulomb's friction law)과[9] 전단항복응력과 마찰저항을 연계한 일정전단마찰모델

1. 인하대학교 대학원 기계공학과

2. 인하대학교 기계공학부

교신저자: 동국대학교 기계로봇에너지공학과,

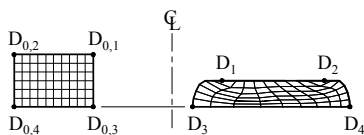
E-mail: jyylim@dongguk.edu

(constant shear friction model)이[10] 소개되었다.

본 논문에서는 $\tau = mk$ 로 표현되는 일정전단마찰 모델을 적용하여 링 시편의 여러 지점에서의 치수변화를 이용한 마찰보정선도를 저 마찰구간($m < 0.3$), 중 마찰구간($0.3 \leq m \leq 0.6$) 그리고 고 마찰구간($0.6 \leq m \leq 0.9$) 등 구간별로 민감도 측면에서 분석하였다. 여기서, τ 는 접촉면의 전단강도, m 은 전단마찰인자, k 는 두 접촉물체 중 연한 재료의 전단항복응력이다. 링 시편에서 치수변화를 측정할 기본적인 위치는 4 군데로 접촉경계면의 내경 및 외경 그리고 시편 중앙부의 내경 및 외경이다. 각각의 측정점에서의 치수변화(dimensional change)가 접촉경계면의 마찰인자의 변화에 따라 얼마나 민감하게 반응하는가를 분석하였다. 또한 마찰인자의 변화에 따른 접촉경계면의 표면적의 변화도 측정하여 민감도를 분석하였고 이를 토대로 표면확장이 마찰보정선도에 적용될 수 있음을 설명하였다. 또한 재료의 가공경화 특성이 마찰보정선도의 민감도에 미치는 영향도 분석하였다. 해석에서는 강소성이론[11]을 적용한 상용 유한요소해석 프로그램인 Deform-2D[12]가 사용되었다.

2. 변형형태

해석에 사용된 시편의 제원은 ‘표준’ 시편으로 알려진 외경 : 내경 : 높이의 비가 6 : 3 : 2로서 외경이 50.8mm, 내경이 25.4mm, 높이가 16.9mm 인 시편을 사용하였다. 대칭 형상으로 인하여 시편 단면의 1/4 만을 모델링에 적용하였으며, 약 2,000 개의 사각형 요소를 사용하였다. 상부의 평면 금형은 강체로 모델링하고 금형의 하강속도는 1.0 mm/sec. 로 하였다. 마찰인자는 무마찰 상태인 0에서부터 거의 고찰 상태인 0.9까지 0.05씩 증가시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 1에 해석에 적용된 FE 모델과 치수변화를 분석하기 위한 측정점들이 나타나 있다.



D_{0,1} (D₁): Initial(current) internal diameter at top section
 D_{0,2} (D₂): Initial(current) outer diameter at top section
 D_{0,3} (D₃): Initial(current) internal diameter at middle section
 D_{0,4} (D₄): Initial(current) outer diameter at middle section

Fig. 1 FE model of ring compression test

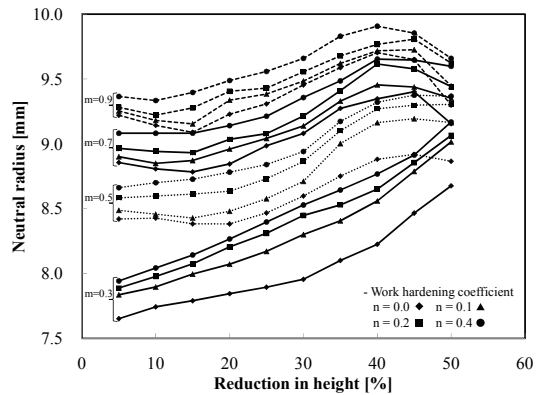


Fig. 2 Location of neutral position at top section as a function of reduction in height

2.1 중립점과 접힘현상

링 압축시험 과정에서 마찰의 크기에 따라 내경이 줄거나 늘어나는 현상이 발생하며, 이를 토대로 시뮬레이션을 통해 마찰보정선도를 작성한다. 이러한 마찰보정선도는 특정한 윤활제를 실험에 적용하여 얻은 결과를 가지고 윤활제의 마찰인자 값을 결정하는데 사용된다. 링 압축시험에서 소재의 유동은 중립점을 기준으로 안쪽 및 바깥쪽으로 양분되어 유동하기 때문에 중립점은 소재 유동에 있어 명확한 경계선이 된다.

두께감소율에 따른 접촉경계면의 중립점 위치가 Fig. 2에 나와있다. 그림에서 알 수 있듯이 링 시편의 두께가 줄어들면서 경계면에서의 중립점은 점차 반경방향으로 커지는 경향을 보인다. 또한 이러한 경향은 마찰인자 값이 작을수록 더욱 뚜렷해진다. 그림을 좀더 자세히 살펴보면 마찰인자 값이 0.3 이하에서는 시편의 두께가 감소하면서 접촉경계면의 중립점의 위치가 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 마찰인자가 0.5 이상에서는 공정 초기에는 중립점의 위치가 거의 변화가 없는 것을 보이며, 두께감소율이 20%을 넘어서면서 중립점 반경이 갑자기 늘어나는 것을 알 수 있다. 또한 공정이 마무리 될 시점 즉, 두께감소율이 40%가 지나면서 중립점 반경은 더 이상 변화가 없는 것으로 보인다. 심지어 마찰인자가 0.7 이상인 상태에서는 공정 후반에 중립점 반경이 오히려 줄어드는 경향을 보인다. 반면 마찰인자가 0.1 이하에서는 중립점의 위치가 접촉경계면에 나타나지 않는 것으로 예측되었다. 그림에서 가공경화지수 커질수록 접촉경계면에서의 중립점의 반경이 늘어나는 것을 알 수 있다.

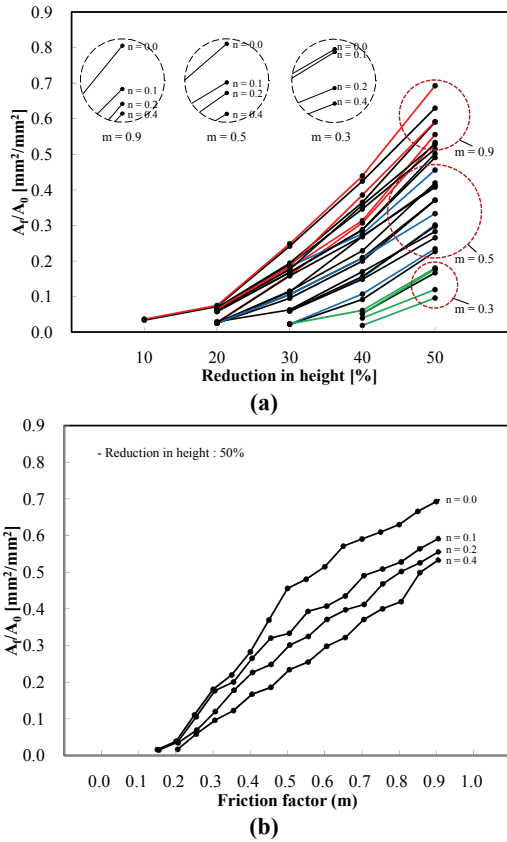


Fig. 3 (a) Folded area vs. reduction in height for various work-hardening exponents and friction factors, and (b) folded area vs. friction factor for various work-hardening exponents

Fig. 3에 다양한 가공경화 특성에 대하여 두께감소율에 따른 접힘 면적(위)과 50% 두께감소율에서 각각의 마찰인자에 대한 접힘 면적(아래)을 각각 나타내었다. 그림에서 마찰인자가 0.2 일 때 두께감소율이 50%에서 접힘 현상이 시작되는 것을 알 수 있다. 접힘 면적은 두께감소율이 커질수록 증가하며 이러한 현상은 마찰인자가 클수록 더욱 뚜렷하게 나타난다. 마찰인자가 0.5 이상에서는 공정 초기부터 접힘 현상이 발생하여 공정이 진행되면서 접힘 면적이 점차 늘어난다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 접힘에 의해 생성되는 접촉면은 가공경화지수가 낮을수록 더욱 증가한다. 이러한 접힘 현상으로 인하여 경계면에서 추가적인 마찰저항이 발생함으로써 마찰보정선도에서 매우 중요한 링 시편의 치수변화의 민감도가 어떤 형태로든지 영향을 받게 된다. 그림에서 공

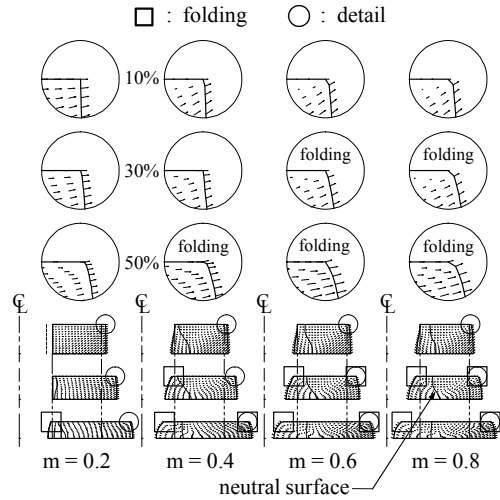


Fig. 4 Relative nodal velocity distributions and neutral line between die and specimen for reductions of height at 10%, 30%, 50% and friction factors $m=0.2, m=0.4, m=0.6, m=0.8$

정이 마무리 될 시점에서 접힘 면적은 마찰인자가 작을 때 더 심하게 증가함을 알 수 있다.

완전소성재료($n=0$)에 대한 링 압축시험에서의 대표적인 변형형태로서 메쉬의 변형(위) 및 금형과 절점의 상대속도(아래)를 Fig. 4에 나타냈다. 앞에서 설명한 바와 같이 그림에서 접힘현상은 마찰인자가 커질수록 보다 더 쉽게 발생함을 알 수 있다. 마찰인자가 작을 때는 내측에서만 접힘현상이 발생하지만, 마찰인자가 클 때는 내/외 측면 모두에서 접힘현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 앞서의 그림에서 설명한 바와 같이 마찰인자가 0.2 이상이 되면 내경 접촉부부터 접힘현상이 발생하며, 마찰인자가 커질수록 접힘현상이 심해진다.

마찰인자가 비교적 작을 때는 ‘머쉬룸현상(mushrooming)’ 즉 시편 중앙부에서 내경이 경계면에서의 내경 보다 더 커지는 현상이 더욱 뚜렷하게 발생한다. 마찰인자가 0.2일 때 시편의 경계면과 중앙부의 내경은 공정이 진행되어도 거의 변화가 없이 초기 상태와 비슷하다. 하지만, 경계면의 내경보다 중앙부의 내경이 더 줄어드는 현상인 ‘배부름현상(barreling)’은 마찰인자가 0.2 이상일 때 나타난다. 머쉬룸현상은 마찰인자가 작을수록 그리고 배부름현상은 마찰인자가 클수록 더욱 뚜렷해진다. 그림에서 볼 수 있듯이 시편의 내/외 측면에서 접힘현상을 일으키는 금형과 시편 사이

의 수직방향의 상대 속도는 마찰인자가 커질수록 더욱 심해진다. 수직방향의 상대속도가 클수록 접힘이나 배부름현상이 더 심하게 발생한다. 링 압축시험에서 뚜렷한 경계가 되는 마찰인자의 값은 0.2로서 마찰인자가 0.2 보다 작을 때는 경계면에 중립점이 나타나지 않으며 머쉬룸현상이 발생한다. 접촉경계면에서의 중립면의 위치는 마찰인자가 0.4 이상에서는 공정이 진행되어도 큰 변화가 없는 것으로 보인다. 하지만, 시편 중앙부의 중립면의 위치는 공정이 마무리되면서 중심축 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 마찰인자가 0.2에서 시편 중앙부의 중립면의 위치는 공정의 진행과 함께 점차 중심축에서 멀어진다.

2.2 시편 중앙부 및 경계면의 치수변화

본 절에서는 업세팅 공정에서 발생하는 배부름 현상이 마찰보정선도에 미치는 영향을 알아보고자 한다. 전통적으로 링 압축시험에서 측정하는

시편의 중앙부 내경의 치수변화뿐 아니라 경계면을 포함하여 중앙부에서의 모든 내경 및 외경의 치수변화를 분석하여 이들 측정점들이 마찰보정선도에 적용될 수 있는지를 알아보하고자 한다. 시편 단면의 네 꼭지점들의 치수변화를 분석하여 이들 측정점들이 경계면에서의 마찰조건에 얼마나 민감하게 변화하는가를 분석하였다.

시뮬레이션에서 접촉경계면(위)과 시편의 중앙부(아래)의 내경 및 외경을 포함하는 네 개의 서로 다른 측정점에 대하여 높이감소율에 따른 치수변화를 Fig. 5에 기록하였다. 접촉경계면의 내경은 중립점이 접촉경계면에 존재하면서 배부름 현상이 나타날 때인 마찰인자가 0.2 이상에서는 즉, 중립점이 접촉경계면에 존재하면서 배부름 현상이 나타날 때는 공정이 진행되어도 치수변화가 거의 없다. 또한, 경계면의 마찰조건의 변화에 대하여 매우 둔감한 반응을 하는 것으로 보인다. 시편 중앙부의 외경도 마찬가지로 마찰조건의 변

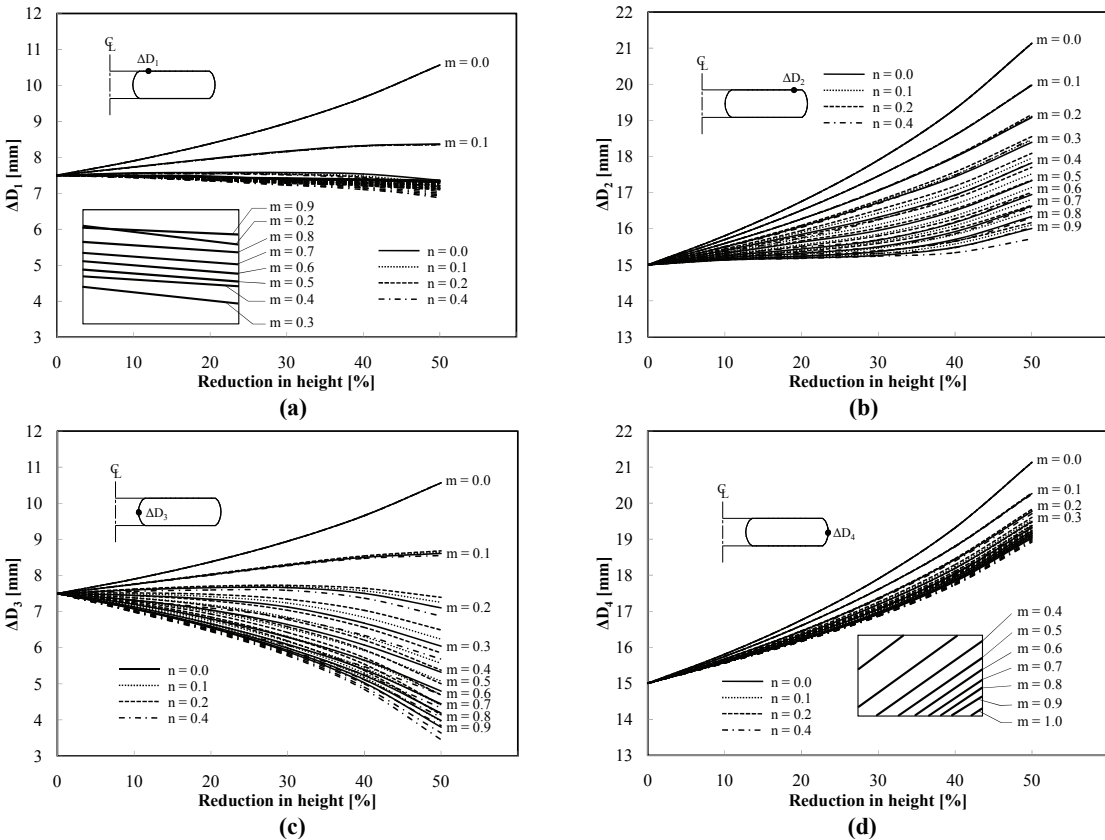


Fig. 5 Dimensional changes vs. reduction in height at different positions of the ring specimen; internal diameter at top section (a), internal diameter at middle (b), outer diameter at top (c), and outer diameter at middle (d)

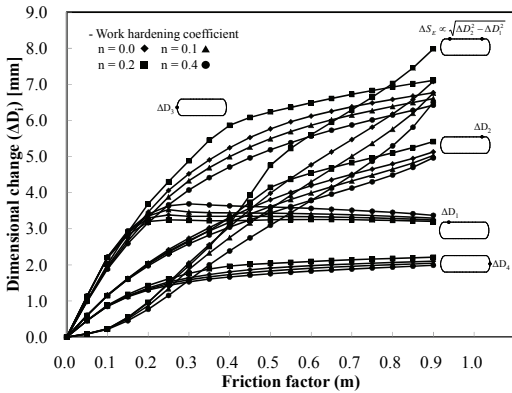


Fig. 6 Different positions of ring specimen measured for dimensional changes during compression

화에 따른 치수변화가 매우 둔감한 반응을 보이며 전반적으로 모든 마찰조건에 대하여 외경이 증가하는 경향을 보인다. 하지만 경계면의 외경과 중앙부의 내경은 전체 마찰구간에 대하여 마찰조건의 변화에 따른 치수변화가 비교적 민감한 편이다. 시편 중앙부의 치수변화는 마찰인자가 커질수록 특히 높게 감소율이 작을 때 마찰조건의 변화에 따른 반경의 변화가 줄어드는 것을 볼 수 있지만, 경계면에서의 외경은 전체 마찰구간에 대하여 비교적 일정한 변화 즉 민감도를 보이는 것을 알 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 경계면의 내경과 시편 중앙부의 외경은 마찰조건의 변화에 따른 반경의 차이가 크기 않기 때문에 마찰보정 선도에 적용하여 마찰조건을 평가하기에는 적당하지 않은 것으로 판단된다. 또한 재료의 가공경화특성에 따른 제 측정점들의 치수변화는 무시할 정도로 미미한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 마찰인자가 작을수록 더욱 뚜렷하게 보인다.

앞서의 그림에서 알 수 있듯이 모든 측정점에서 높이감소율이 50%일 때, 즉 공정이 마무리 되었을 때 치수변화가 가장 크게 나타난다. 따라서 Fig. 6에서와 같이 높이감소율이 50%에서 마찰인자와 각각의 측정점들의 치수변화의 관계를 나타내었다. 그림에서 다시 볼 수 있듯이 경계면의 외경과 중앙부의 내경이 마찰조건에 따라 비교적 민감한 치수변화를 보이는 것을 다시 알 수 있다. 하지만, 경계면의 외경만이 배부름현상에 대하여 비교적 둔감한 반응을 보이며, 다른 세 개의 측정점은 배부름현상이 발생하면서 치수변화의 경향이 급격히 바뀌는 것을 알 수 있다. 마찰조건의 변화에 따른 접촉면의 면적의 변화를 조합변수

의 하나로 그림에 나타났다. 접촉면적의 변화는 외경의 제곱과 내경 제곱의 차이의 평방근에 즉, $\Delta SE \propto \sqrt{\Delta D_2^2 - \Delta D_1^2}$, 비례한다. 이렇게 했을 때 다른 제 측정점들의 치수변화와 직접적으로 비교할 수 있는 길이 단위로 접촉면적의 변화가 얻어진다. 그림에서 쉽게 볼 수 있듯이 접촉면의 표면확장에 대한 반응변수(response variable)가 전체 구간의 마찰조건에 대하여 보다 민감한 변화를 보이면서 선형적인 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림에서 가공경화지수의 변화가 접촉면 내경 및 시편 중앙부 외경의 치수변화에는 거의 영향이 없는 것으로 보인다. 하지만 시편 중앙부 내경 및 표면확장에 대해서는 치수변화에 커다란 영향을 주며, 이러한 경향은 마찰인자가 커질수록 더욱 심해진다. 제반 반응변수들에 대한 민감도는 이어지는 절에서 심도 있게 분석한다.

3. 민감도

본 절에서는 본 연구에서 적용한 마찰구간을 전체 및 세 구간으로 나누어 민감도(sensitivity) 및 선형도(linearity)에 대한 분석을 한다. 분석구간은 일반적으로 저 마찰인자 범위인 $0.0 \leq m \leq 0.3$, 중 마찰인자 범위인 $0.3 \leq m \leq 0.6$, 그리고 고 마찰인자 범위로 아주 열악한 마찰상태인 $0.6 \leq m \leq 0.9$, 그리고 $0.0 \leq m \leq 0.9$ 의 거의 전체 구간에 대하여 분석하였다. 본 연구에서는 현실적으로 거의 불가능한 상태인 마찰인자가 0.9 이상, 즉 거의 고착마찰에 가까운 상태는 분석에서 제외하였다. 입력변수의 할당은 마찰인자를 0.0에서부터 0.05 씩 증가시키면서 0.9 까지 시뮬레이션을 수행하였다. 표면확장을 포함한 모두 5가지의 반응변수에 대하여 치수변화 분포의 민감도는 유한차수법(FDM)을 이용하여 특정한 마찰인자에 대한 기울기로 계산하였다. 민감도 분석을 위하여 치수변화를 일반적인 방법으로 정규화(normalizing) 하였다. 정규화 과정에서 변수의 특정한 수치는 분포된 변수의 중앙값을 빼준다. 이렇게 얻어진 선도에서 최대값과 최소값의 차이가 입력변수의 영역에서 각각의 반응변수의 평균값으로 나타난 민감도가 된다. 각 부분의 민감도 크기를 계산하기 위하여 해당되는 부분의 반응변수의 치수변화를 마찰인자의 증분 Δm 으로 나누어 줌으로써 마찰인자의 방향으로 기울기를 구할 수 있으며 이것이 특정한 마찰인자에

Table 1 Summary of linear regression analyses over definite ranges of friction factor

friction factor	Dim. chang.	Gradient (Sensitivity)				Coefficient of Determination (Linearity)			
		n = 0.0	n = 0.1	n = 0.2	n = 0.4	n = 0.0	n = 0.1	n = 0.2	n = 0.4
Friction factor ($0.0 \leq m \leq 0.3$)	ΔD_1	-2.188	-2.286	-2.388	-2.523	0.838	0.850	0.867	0.895
	ΔD_2	-1.803	-1.866	-1.821	-1.752	0.983	0.987	0.985	0.981
	ΔD_3	-3.350*	-3.100	-2.948	-2.759	0.988	0.984	0.982	0.975
	ΔD_4	-1.190	-1.104	-1.066	-1.024	0.960	0.947	0.940	0.931
	ΔS_E	-1.379	-1.420	-1.281	-1.085	0.938	0.930	0.933	0.944
Friction factor ($0.3 \leq m \leq 0.6$)	ΔD_1	-0.030	0.010	0.040	0.112	0.697	0.762	0.930	0.985
	ΔD_2	-1.841	-1.339	-1.204	-1.099	0.985	0.993	0.996	0.996
	ΔD_3	-1.380	-1.461	-1.396	-1.355	0.902	0.978	0.984	0.986
	ΔD_4	-0.281	-0.304	-0.288	-0.265	0.900	0.962	0.978	0.980
	ΔS_E	-3.532*	-2.507	-2.216	-2.009	0.989	0.997	0.998	0.998
Friction factor ($0.6 \leq m \leq 0.9$)	ΔD_1	0.066	0.110	0.147	0.231	0.925	0.969	0.979	0.987
	ΔD_2	-1.055	-1.127	-1.251	-1.413	0.999	0.999	0.998	0.993
	ΔD_3	-0.756	-0.784	-0.896	-1.042	0.997	0.994	0.996	0.998
	ΔD_4	-0.141	-0.151	-0.168	-0.197	0.993	0.996	0.995	0.999
	ΔS_E	-2.859	-2.769	-2.954	-3.243*	0.993	0.995	0.992	0.984

대한 각각의 반응변수의 상대적인 민감도의 크기가 된다. 민감도와 함께 치수변화 분포의 선형성을 알아보기 위하여 회귀분석(regression analysis)을 수행하였다. 두 개의 회귀계수(regression coefficients)를 계산하여 입력변수에 대한 반응변수의 회귀분석을 함으로써 선형응답의 정도를 분석하였다. 본 논문에서는 결정계수(coefficient of determination)가 0.9 보다 큰 경우를 선형적인 것으로 판단하였다.

마찰인자 구간 $0.0 \leq m \leq 0.3$, $0.3 \leq m \leq 0.6$, $0.6 \leq m \leq 0.9$ 에 대하여 일반적인 정규화 방법(normalizing technique)을 사용하여 Table 1에 선형도를 나타내는 결정계수를 포함하여 모든 반응변수의 민감도를 정리하여 나타내었다. 마찰인자가 0.3 이하일 때는 전통적으로 마찰보정선도에 사용하는 치수변화의 측정점인 시편 중앙부 내경의 치수민감도가 재료의 가공경화 특성에 관계없이 가장 큰 것으로 나타났으며, 완전소성재료일($n=0$) 때 민감도가 가장 크게 나타난다. 접촉경계면의 내경에 대한 치수변화를 제외하고는 모든 부분에서 선형도가 0.9 이상인 것으로 예측되었다.

Table 1에서 마찰인자 구간 $0.3 \leq m \leq 0.6$ 과 $0.6 \leq m \leq 0.9$ 에서는 전통적으로 사용되는 시편 중앙부 내경의 마찰인자의 변화에 따른 치수변화의 민감도는 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 대신 마찰인자에 따른 표면확장에 대한 치수변화의 민감도가 반응변수 들 중 가장 큰 것을 알 수 있다. 이 구간에서 표면확장 변화의 민감도는 시편 중앙부 내경 변화의 민감도 보다 약 3배가 큰 것으로 나타났다. 또한 거의 모든 경우에 치수변화의 선형도는 0.9 이상으로 나타나 매우 높은 선형성을 보여주고 있다.

본 논문에서의 전체 분석 구간인 $0.0 \leq m \leq 0.9$ 에서의 제반 응답변수들의 치수변화 및 선형도에 대한 분석 결과를 Table 2에 정리하여 나타냈다. 마찰인자의 거의 전 구간에 대한 민감도 및 선형도는 표면확장을 사용한 응답변수가 가장 크게 나타났으며, 전통적인 측정점인 시편중앙부 내경의 민감도는 표면확장에 비해 약 30% 이상 작은 것으로 예측되었다. 더욱이 전 구간을 대상으로 하였을 때는 시편 중앙부 내경의 선형도가 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다.

Table 2 Summary of linear regression analyses over the whole range of friction factors

friction factor	Dim. chang.	Gradient (Sensitivity)				Coefficient of Determination (Linearity)			
		n = 0.0	n = 0.1	n = 0.2	n = 0.4	n = 0.0	n = 0.1	n = 0.2	n = 0.4
Friction factor ($0.0 \leq m \leq 0.9$)	ΔD_1	-0.203	-0.203	-0.206	-0.214	0.375	0.351	0.340	0.330
	ΔD_2	-0.651	-0.595	-0.577	-0.563	0.953	0.948	0.954	0.961
	ΔD_3	-0.767	-0.734	-0.716	-0.694	0.824	0.852	0.868	0.886
	ΔD_4	-0.210	-0.198	-0.192	-0.184	0.725	0.743	0.750	0.754
	ΔS_E	-1.123*	-0.973	-0.920	-0.875	0.988	0.994	0.993	0.981

4. 결론

본 논문에서는 링 압축시험에서 마찰보정선도에 사용되어온 측정점과 새로 제시된 링 시편의 측정 위치 등 제반 응답변수들에 대하여 마찰상태의 변화에 따른 민감도를 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 전체 해석 구간인 $0.0 \leq m \leq 0.9$ 에서 마찰인자의 변화에 따른 치수변화가 가장 큰 즉, 민감도가 가장 큰 응답변수는 표면확장으로 기존에 사용되어온 시편중앙부의 내경 변화 보다 매우 높은 민감도 및 선형도를 보인다.

(2) 기존에 마찰보정선도에 사용되어온 응답변수는 저 마찰구간인 마찰인자가 0.3 이하에서는 비교적 높은 민감도를 보이나, 마찰인자가 커짐에 따라 민감도가 급격히 하락하여 마찰변화에 상대적으로 둔감하게 된다.

(3) 마찰인자가 0.3 이하에서는 시편 중앙부 내경의 치수변화를 사용한 마찰보정선도를 사용하는 것이 바람직하고, 마찰인자가 0.3 이상에서는 마찰보정선도에 본 논문에서 제시한 표면확장의 변화를 이용하는 것이 보다 합리적이다.

(4) 재료의 가공경화특성은 마찰인자가 작을 때는 제반 응답변수의 치수변화에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0022439).

참 고 문 헌

- [1] A. Nadai, 1939, The force required for rolling steel strip under tension, J. Appl. Mech., Vol. 6, pp. A54~A69.
- [2] E. Orowan, K. J. Pascoe, 1946, A simple method of calculating roll pressure and power consumption in flat hot rolling, J. Iron and Steel Inst., Vol. 34, pp. 124~126.
- [3] R. B. Sims, 1954, The calculation of roll force and torque in hot rolling mills, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 168, pp. 191~200.
- [4] J. M. Alexander, 1955, A slip line field for the hot rolling process, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 169, pp. 1021~1030.
- [5] N. Bay, G. Gerved, 1984, Friction and pressure distribution in disk forging, Presented at : Proc. 17th Int. Cold Forging Group Plenary Meeting, Nagoya, Japan, pp. 1~16.
- [6] Th. V. Karman, 1925, On the theory of rolling, J. Appl. Mathe. Mech., Vol. 5, pp. 139~141.
- [7] M. Kunogi, 1954, On plastic deformation of hollow cylinders under axial compression loading, J. Sci. Res. Inst., Vol. 2, No. 30, pp. 63~92.
- [8] H. Kudo, 1960, Some analytical and experimental studies of axisymmetric colding forging and extrusion - 1, Int. J. Mech. Sci., Vol. 2, pp. 120~127.
- [9] The MSC Institute of Technology, 2000, MSC. Marc Advanced Course, MSC. Software Corporation, Los Angeles.
- [10] C. C. Chen, S. Kobayashi, 1978, Rigid plastic finite

- element analysis of ring compression, Appl. Numer. Methods to Form. process (ASME AMD), Vol. 28, pp. 163~174.
- [11] C. H. Lee, S. Kobayashi, 1973, New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method, Trans. ASME Ser. B, Vol. 95, pp. 865~873.
- [12] SFTC, 2004, Deform 2DTM Ver 8.0 User Manuals, Scientific Forming Technologies Corporations Inc., Columbus.