

윤활과 표면조도를 고려한 박판 성형 마찰 모델

이봉현* · 김영탁**

(2001년 7월 31일 접수)

Friction Model of Sheet Metal Forming Considering Lubricant and Surface Roughness

B.H. Lee and Y.T. Keum

Abstract

In order to find the effect of material property and lubricant viscosity on the frictional characteristics a sheet metal friction tester was designed and tensile test, surface roughness test, and friction test were performed with several kinds of drawing oils. Test results show that as the lubricant viscosity becomes lower, the friction coefficient is higher. When surface roughness is extremely low or high, friction coefficient is also high. Using these test results, the friction model considering lubricant viscosity and surface roughness is developed. The validity and accuracy of the friction model are shown by comparing the punch loads among FEM analysis results employing current friction model and conventional friction model respectively and experimental measurement.

Key Words : Friction Coefficient, Lubricant Viscosity, Surface Roughness, Friction Model, FEM Analysis

1. 서론

박판성형을 하는데 있어서 성형중에 판재와 공구사이에 발생하는 마찰은 성형 성패의 결정 및 제품의 품질에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. 따라서 소재와 공구 사이의 마찰현상에 대해 명확히 규명하는 것은 제품의 성형성을 향상시키기 위한 필수불가결한 요소이다. 따라서

이와 관련한 많은 연구가 진행되어져 오고 있는데 Ghosh는⁽¹⁾ 둥형 펀치 스트레치 실험에서 펀치와 판재의 마찰계수를 구하는 실험적인 연구를 최초로 시도하였다. 펀치 소요력을 펀치 진행거리의 함수로 나타내고 이를 수직 압력으로 계산한 후 다양한 윤활유에 대한 판재의 마찰계수를 계산하였다. Wagoner등은⁽²⁾ 성형성과 마찰을 신속하고 편리하게 평가할 수 있는 새로운 실험장치를 개발하였다.

* 한양대학교 대학원

** 한양대학교 기계공학부

이 장치는 펀치속도, 금형 곡률, 윤활유 변화에 따른 마찰계수의 변화를 효과적으로 측정할 수 있다. Han은⁽³⁾ 펀치 및 다이 반경을 다양하게 변화시키며 스트립 드로우잉 마찰실험(Strip drawing friction test)과 벤딩-드로우잉 마찰실험(Stretching under bending friction test)을 수행하고, 다이 반경이 마찰에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. Teodorrescu 등은⁽⁴⁾ 박판의 디프 드로우잉 공정에서 화학 조성, 점도, 작업조건 등이 마찰 현상에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 이러한 연구들을 종합하여 볼 때 박판성형 시 발생하는 마찰에 영향을 미치는 인자들 중 소재 내적인 요인으로는 표면조도 및 경도를 포함한 여러 물성치들을 들 수 있겠고 펀치속도, 블랭크 홀딩력, 공구의 기하학적 형상, 윤활상태 등을 외적인 요인으로 들 수 있겠다. 마찰거동은 이러한 여러 내외적 요인들의 복합적 영향의 결과이므로 그 현상 역시 매우 복잡하고 다양하게 나타난다. 따라서 박판성형중에 마찰에 영향을 미치는 모든 인자들을 마찰계수로 정량화 하는 것은 매우 어렵고 이러한 어려움으로 인해 지금까지의 마찰 연구는 비교적 간단한 실험을 통한 정성적 특성 비교에 주안점을 두어 왔으나 이러한 것으로 복잡 다양한 마찰현상을 설명하기에는 많은 문제점들이 있다. 특히 최근의 자동차 산업이 발달함에 따라 철강업계와 자동차 회사에서는 종전에 많이 사용하던 냉연 무도금강판 대신 부식에 저항력이 강한 다양한 표면처리된 재료들을 개발하여 사용하게 되었고 이러한 과정에서 냉연강판의 가공시에 야기되지 않았던 많은 문제점들이 나타나게 되었다.⁽⁵⁾ 이렇게 소재와 가공법의 발달과 더불어 점점 복잡해져가는 마찰현상은 FEM 적용의 어려움을 가중시키는 등 다양한 형태로의 많은 부정적 영향을 미치고 있다. 따라서 이러한 문제점들을 개선시키기 위하여 성형중에 존재하는 마찰의 주요 영향 인자들을 정량화 하는 것이 필요하며, 이를 위해서 인자들과 마찰계수와의 상관관계를 나타낼 수 있는 수학적 모델링의 연구가 요구된다.

본 연구에서는 박판성형중 마찰에 주로 영향을 미치는 인자들과 마찰계수와의 상관관계를 데이터베이스로 구축하고 FEM해석이나 실제 성형시 마찰조건에 부합된 마찰계수를 제시하고자 한다. 이를 위하여 선행 연구^(6,7)에서 제시한 주요 마찰 영향인자, 즉 윤활유 점도와 소재 표면조도의 영향을 평가하였고, 이들을 바탕으로 효율적인 마찰계수를 평가하기 위한 수학적 모델링을 제시하였다.

2. 실험 방법

2.1 표면 조도 측정 실험

표면 조도와 마찰계수의 상관관계분석을 위하여 마찰 실험에 사용되어질 모든 종류의 강판에 대하여 표면 조도를 측정하였다. 시편은 마찰 측정용 시편과 동일한 크기인 폭 40mm에 길이 300mm의 크기로 전단하였으며, 저독성 솔벤트 세척제를 이용하여 세척한 후 완전히 건조시킨 다음 측정하였다. 측정은 Taylor Hobson사의 탁상용 조도 측정장비인 Talysurf series II를 이용하여 휘거나 굽힘이 없는 부분의 시편 표면에 대해서 ISO 규격에 따라 측정길이 5.6mm를 측정하였다. 또한 측정시 실험 편차를 줄이기 위하여 동일한 시편에 대해서 앞부분과 중간부분 그리고 뒷부분에 대해 각각 1 회씩 총 3회 반복 측정한 값의 평균값을 대푯값으로 사용하였다. Fig. 1은 표면 조도 측정장비의 개략도이다. 이 그림에서처럼 측침을 통해 입력된 모든 데이터는 컴퓨터를 통하여 자동으로 분석되었으며 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

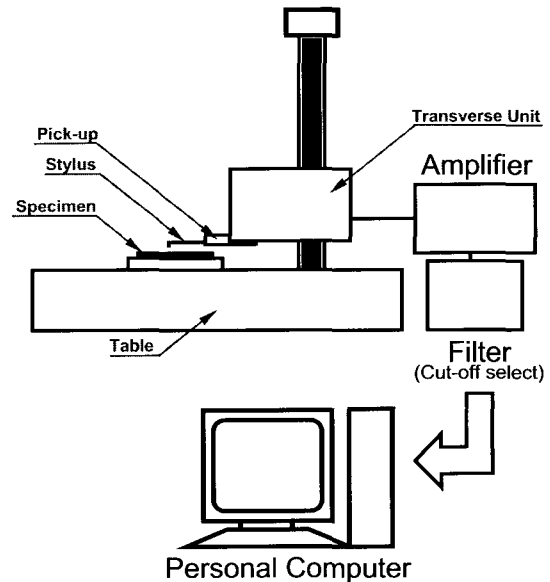


Fig. 1 Schematic view of surface roughness measurement system

Table 1 Surface roughness of various specimens

coating condition	Specimens	Ra(μm)	Rmax(μm)
uncoated	AL1050	0.1312	2.5196
Zinc coated	GACQ	0.5312	8.3631
	GADQ	0.4256	9.8518
	ALCQ	1.185	10.9489
	ALDQ	1.243	7.8756
aluminum coated	Zn-Ni	1.315	12.0154
	Zn-Fe	1.412	9.8513

2.2 평 마찰 실험

각 강관에 대한 마찰실험을 하기 위하여 Fig. 2에서와 같은 평면 마찰실험에 필요한 실험장치를 제작하여 재료와 다이의 마찰계수를 측정하였다.

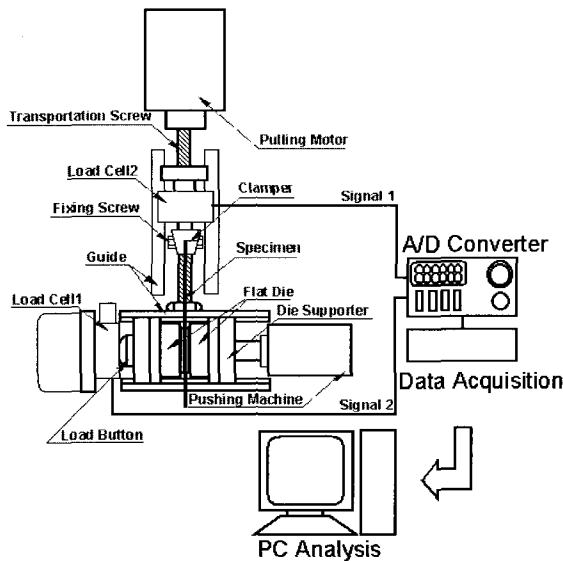


Fig. 2 Schematic view of friction test system

제작된 실험장치는 크게 평마찰다이와 평마찰다이를 일정한 힘으로 밀어 시편에 면압력을 형성해주는 부분, 그리고 시편의 고정장치와 모터를 이용하여 시편을 당겨주는

부분 및 그밖에 면압력과 인출력을 측정할 수 있는 로드셀로 구성되어 있다. 실험은 시편고정장치를 평마찰다이쪽으로 이동시킨 다음 시편을 고정장치에 장착한 후 일정한 압력으로 평마찰다이를 밀어준다. 이런 과정을 거쳐 면압력을 받고있는 시편을 모터를 이용하여 일정한 속도로 당겨주며 지지대와 평마찰다이 사이에 위치한 1번 로드셀에 의해서 가압하중을 측정하고 시편 고정장치에 장착되어있는 2번 로드셀에 의해서 인출하중을 측정하였다. 시편과 직접접촉을 하는 다이의 재료는 공구강재인 SKD 11재료를 사용하여 가공후 열처리하였고, 다이의 표면 거칠기는 시편의 인출방향으로 평균 조도 Ra=0.15μm이다. 마찰계수의 측정은 Table 2에 기록한 조건하에서 실시하였으며, 동마찰 구간인 출발점에서 20mm~30mm지점에서부터 100mm지점 사이에서 측정하였고 측정 데이터를 식(1)에 대입하여 마찰계수를 구하였다.

$$\mu_{kave} = \frac{\sum_{n=1}^K \frac{P}{2 \times N}}{K} \tag{1}$$

여기서, μ_{kave} 는 평균 동마찰계수이고 N은 수직력, P는 인출력을 각각 나타내며, K는 측정된 전체 인출력의 수를 나타낸다. 또한 모든 마찰계수는 압연방향을 기준으로 0°, 45°, 90°방향에서 각각 추출한 시편으로부터 측정된 마찰계수를 다음의 식(2)에 대입한 후 구한 평균값이다.

$$\mu_{kave} = \frac{X_{0^\circ} + 2 X_{45^\circ} + X_{90^\circ}}{4} \tag{2}$$

여기서 X_{0° 는 0°방향에서의 마찰계수이며, X_{45° 는 45°방향에서의 마찰계수이고, X_{90° 는 90°방향에서의 마찰계수이다. X_{0° , X_{45° , X_{90° 는 실험 편차를 줄이기 위하여 각각 3회 반복 실험하여 그 평균값을 대표값으로 사용하였다. 실험을 위한 시편은 폭 40mm에 길이 300mm의 크기로 전단하여 한쪽 끝 20mm지점에 직경 10mm크기의 체결용 구멍을 뚫었다. 전단에 의하여 발생한 시편 가장자리의 비는 완전히 제거되었고 휘거나 굽힌 자국이 있는 시편은 사용하지 않았다. 또한 실험에 사용된 모든 시편은 양면이 동일한 도금 조건을 갖고 있으며 저독성의 솔벤트 세척제로 완전히 세척된 후 사용되

었다.

또한 윤활유 점도와 마찰계수와의 상관관계 분석을 위하여 실제 드로잉 공정에서 사용되어지고 있는 방청유와 일반 드로잉유를 이용해 8가지의 윤활조건에서 마찰 실험이 이루어졌으며 윤활유 점도는 점도-온도 도표에 의해 보정하여 사용하였다. Table3은 사용된 윤활유의 물성을 나타낸다.

Table 2 Friction test conditions

pulling velocity	600mm/min
holding force	200N
pulling length	100mm
specimen size	40mm×300mm
die dimension	60mm×60mm
die material	SKD 11
die roughness	0.15 μ m

Table 3 Material properties of various lubricants

Property Lubricant	Viscosity (40°CcSt)	Fire Point(°C)	Specific Gravity (15°C/4°C)
rust preventive oil	4.86	128	0.84
drawing oil 1	14	170	0.9
drawing oil 2	30	172	1
drawing oil 3	43	210	0.92
drawing oil 4	58	174	0.95
drawing oil 5	69	218	0.93
drawing oil 6	126	238	0.97

3. 결과 및 고찰

윤활유의 점도와 마찰계수와의 관계를 나타낸 Fig. 3을 통하여 윤활유의 점도가 증가할수록 마찰계수가 전반적으로 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 시편에 동일한 양의 윤활유를 도포하고 마찰실험을 할 때 상대적으로 응집력이 약한 저점도유의 경우 동일한 면

에 대하여 응집력이 강한 고점도유보다 쉽게 유체윤활 상태가 파괴되어 경계윤활상태로 변하게 되므로 마찰계수가 높게나오고 또한 고점도유의 경우 저점도유에 비하여 보다 긴 시간동안 제자리에 머물면서 윤활작용을 할 수 있기 때문에 마찰계수가 낮게 나오는 것이라 생각된다. 이 그림에서 실험에 사용된 모든 시편에 대하여 공통적으로 윤활유 점도가 약 60cSt이하에서는 점도가 증가함에 따라 마찰계수가 급격하게 감소하다가 이후 점도가 60cSt이상으로 증가할수록 마찰계수 감소의 폭이 줄어들게 되는 것을 알 수 있다. 이것은 고점도유보다 상대적으로 낮은 면압에서 유체 윤활막이 파괴되는 저점도유가 동일하게 가해지는 접촉 면압에 대하여 보다 민감하게 작용하기 때문인 것으로 생각되어진다.

식(3)은 경계 윤활상태에서의 마찰계수를 나타내 주는 식이다.⁽⁸⁾

$$\mu = (1 - \alpha) \mu_0 + \alpha \mu_m \quad (3)$$

여기서 α 는 도금표면과 다이간의 결보기 접촉면적에 대한 직접 접촉면적의 비이고, μ_0 는 윤활유와 다이사이의 마찰계수를 나타내며 μ_m 은 도금표면과 다이사이의 마찰계수를 나타낸다. 접촉 면압에 대하여 민감하게 반응하는 저점도역에서는 점도가 증가함에 따라 직접접촉면적이 증가하게되고 결국 α 가 감소하게 된다. 이것은 상대적으로 작은값을 갖는 μ_0 항의 증가에 비하여 보다 큰 값을 갖는 μ_m 항의 감소가 더 큰 영향을 미쳐 전체적인 마찰계수의 값이 비교적 큰 폭으로 감소한다. 반면 상대적으로 면압에 대하여 덜 민감한 고점도역에서는 보다 효과적으로 유체윤활상태를 유지할 수 있으므로 점도 증가에 따른 α 의 감소가 크지 않을 것이다. 이러한 이유로 고점도역에서는 저점도역에 비하여 점도 증가에 따른 마찰계수의 변화가 작을 것으로 예측된다. 표면 조도와 마찰계수와의 상관관계는 Fig. 4에서와 같은 규칙적인 형태를 갖는 것을 알 수 있으며 표면 조도가 약 0.5 μ m~1.2 μ m 사이에서 모든 윤활조건에 대해 마찰계수가 낮게 나오는 것을 알 수 있다. Wahlborg등의⁽⁹⁾ 연구에서도 이와 유사한 결과를 볼 수 있다. 이는 표면 조도가 낮을 경우 윤활유를 보관할 수 있는 오일포켓의 체적이 줄어들어 전반적으로 윤활효과가 떨어지는 반면 표면 조도가 지나치게 높아지면 보다 많은 소성변형으로 인해 마찰저항이 증가하게 되며 동일한 양의 윤활유 도포시 쉽게 유체윤활상태가 파괴되기 때문인 것으로 생각된다.

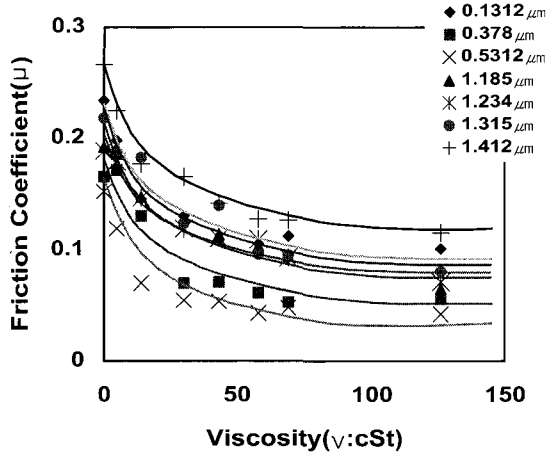


Fig. 3 Friction coefficients associated with viscosity in various roughness conditions

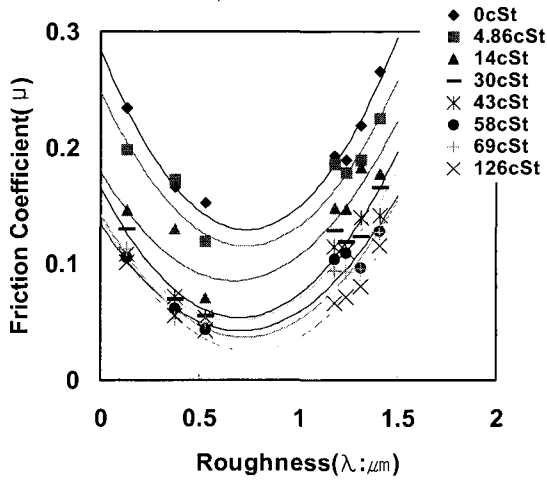


Fig. 4 Friction coefficients associated with roughness in various lubrication conditions

전반적으로는 전기도금강관에 비하여 상대적으로 용융도금강관의 마찰계수가 작게 나타났다. 이는 용융도금 강관의 경우 조절 압연에 의해 표면을 균일하게 압하시킨 것인데 이런 조절 압연은 합금화 용융도금 후 아연 결정립 성장에 의해 거칠어진 표면을 균일하게 압하여 매끈한 표면을 형성시키기 때문에 도금 결정립의 성장제어가 어려운 전기 도금강관보다 마찰특성에 유리한 균일한 표면 거칠기를 얻기 쉽기 때문이다.⁽¹⁰⁾

4. 마찰 모델

본 절에서는 앞의 마찰 실험 결과를 토대로 마찰계수의 정량화를 위한 수학적 모델을 제시하고자 한다. Fig. 3에서의 윤활유 점도와 마찰계수와의 관계는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\mu = \frac{a_0}{a_1 + \nu^{a_2}} \quad (4)$$

여기서 ν 는 사용 윤활유의 동점성계수이고, a_0 , a_1 그리고 a_2 는 상수이다. 또한 시편의 표면 조도와 마찰계수와의 상관관계는 Fig. 4로부터 식(5)와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\mu = b_0 (\lambda + b_1)^2 + b_2 \quad (5)$$

여기서 λ 는 사용된 시편 표면의 평균 조도($Ra(\mu m)$)이고, b_0 , b_1 그리고 b_2 는 상수이다. 위에서 a_0 , a_1 , a_2 그리고 b_0 , b_1 , b_2 는 수치해석 방법의 일종인 최소자승법을 이용하여 구하여 줄 수 있으며 식(4)과 식(5)는 각각 식(6)과 식(7)의 형태로 제안할 수 있다.⁽¹¹⁾ 이때 식(4)는 비선형 함수이기 때문에 데이터/파라미터 가공에 의해 선형화작업을 거친 후 최소자승법에 적용하였다.

$$\mu = \frac{23}{104 + \nu} \quad (6)$$

$$\mu = 0.24 \lambda^2 - 0.346 \lambda + 0.252 \quad (7)$$

각 인자들의 개별적 영향관계는 위의 두 식으로 나타낼 수 있지만 두 식을 하나의 식으로 조합하기 위해서는 상호 복합적 영향관계를 고려해야만 한다. 윤활유 점도와 표면 조도를 고려한 마찰계수식은 식(6)과 식(7)의 합의 형태로 표현된다고 가정하면 식(8)과 같이 나타낼 수 있다

$$\mu = \frac{23}{104 + \nu} - 5 \times 10^{-6} (\nu - 56)^2 + 0.2 (\lambda - 0.76)^2 - 0.11 \quad (8)$$

5. 모델 검증

마찰 모델의 타당성과 유용성을 입증하기 위하여 무도금 강판 및 도금강판에 개발된 마찰모델을 적용하여 FEM 해석을 실시하였다. 해석된 결과를 실험치와 비교함으로써 정확도를 검증하였는데 Fig. 5는 해석 및 실험에 사용되어진 공구의 기하학적 형상을 나타낸 것이다

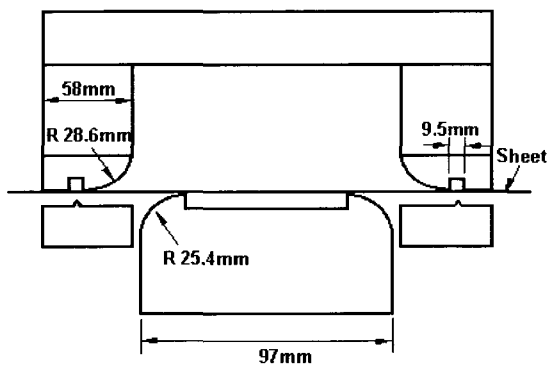


Fig. 5 Schematic diagram of the tooling used in 2-D stretching simulation

해석은 개발된 FEM 프로그램을 이용하여 수행되었으며 (12) 해석 및 실험 모두 길이 250mm, 폭 20mm, 두께 0.8mm의 시편에 대해 스트레칭 상태에서 10mm/min의 속도로 시편이 과단될 때까지 펀치를 진행시켰다. 사용된 무도금강판 및 도금강판의 기계적 물성치는 인장실험을 통하여 구했으며 그 값을 Table 4와 Table 5에 각각 정리하였다. Fig. 6은 무도금강판에 대해 유한요소해석으로 얻은 펀치력을 실험치와 비교한 것이다. 기존 마찰모델을 적용하고 해석한 결과는 실험치와 평균 7.46%의 오차를 나타낸 반면 개발된 모델을 적용하고 해석한 결과는 실험치와 평균 2.5%의 오차를 나타내고 있다. Fig. 7은 도금 강판에 대해 역시 유한요소해석으로 얻은 펀치력을 실험치와 비교한 것이다. 개발된 마찰모델을 적용하고 해석한 결과가 기존 마찰모델을 적용하고 해석한 결과보다 실험치를 기준으로 평균 10.12%가량 낮은 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 이로써 개발된 마찰모델이 도금 및 무도금 강판의 성형중 발생하는 마찰특성을 효율적으로 묘사하고 있음을 알 수 있으며, 사용된 윤활유의 점도와 시편의 표면 조도를 알고 있으면 평 마찰실험을

지 않아도 효율적으로 마찰계수를 구할 수 있음을 알 수 있다.

Table 4 Material properties of uncoated metal used in experiment and FEM simulation

Properties	Values
Plastic anisotropy parameter	$r = 1.68$
Hill's yield function parameter	$M = 2.0$
Stress-strain relation (MPa)	$\bar{\sigma} = 553.1(\bar{\epsilon} + 0.00329)^{0.27}$
Yield stress (MPa)	$\sigma_y = 165.8$
Sheet thickness (mm)	$t = 0.79$

Table 5 Material properties of coated metal used in experiment and FEM simulation

Properties	Values
Plastic anisotropy parameter	$r = 1.016$
Hill's yield function parameter	$M = 2.0$
Stress-strain relation (MPa)	$\bar{\sigma} = 546(\bar{\epsilon} + 0.00318)^{0.17}$
Yield stress (MPa)	$\sigma_y = 303.7$
Sheet thickness (mm)	$t = 0.81$

5. 결론

본 연구에서는 박판성형중 윤활유 변화에 따른 점도 변화와 소재의 표면처리에 따른 조도 변화가 마찰계수에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험을 하고 데이터베이스를 구축하여 마찰모델을 제안하였다. 이러한 일련의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

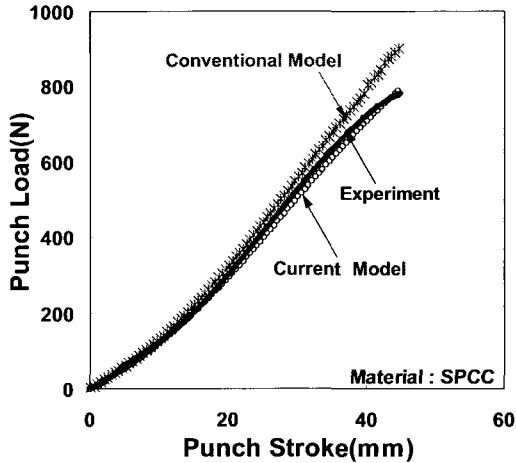


Fig. 6 Comparison of punch load of SPCC in stretching process among current friction model, conventional friction model and measurement

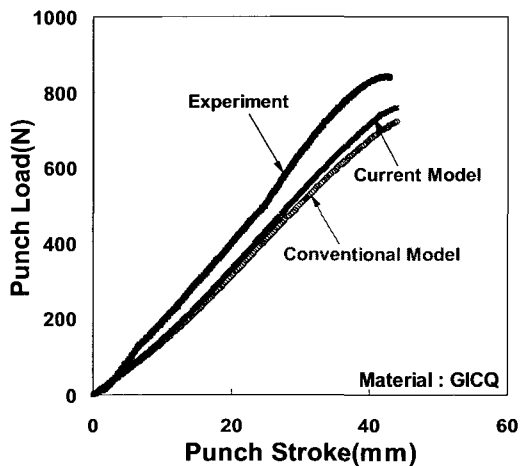


Fig. 7 Comparison of punch load of GICQ in stretching process among current friction model, conventional friction model and measurement

- (1) $0.5\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$ 의 박판 표면 조도에서 마찰계수가 가장 낮고 U자 곡선형을 갖는다.
- (2) 마찰계수와 윤활유 점도는 반비례관계에 있다.
- (3) 윤활유 점도와 표면 조도에 따른 마찰특성을 모델 하였고 이 마찰 모델을 도금 및 무도금강판에 적용한 FEM 성형해석결과가 실험치와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.
- (4) 윤활유의 점도와 시편의 표면 조도만으로 평 마찰계수의 계산이 가능해졌고 이 값을 유한요소해석에 적용함으로써 보다 실제적인 성형해석이 가능해졌다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터 를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입 니다. 또한 본 연구를 위해 도움을 주신 R.H. Wagoner 교 수와 R. Boger에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) A.K. Ghosh, 1977, "A Method for Determining the Coefficient of Friction in Punch Stretching of Sheet Metals", Int. J. Mech. Sci., Vol.19, pp.457~470.
- (2) Y.Kong, Y.Sun, X.Wang and R.H.Wagoner, 1996, "A study on friction characteristics of coated and non-coated steel sheets in sheet forming" NUMISHEET'96, pp.61~64.
- (3) S.S. Han, 1997, "The Influence of Tool Geometry on Friction Behavior in Sheet Metal Forming", Journal of Material Processing Technology, Vol.63, pp.129~133.
- (4) M.Teodorrescu, G.Frumusanu and L.Teodorescu, 1996, "Study About the Nature of the Friction-Lubrication Process during the Deep Drawing of Thin Sheets", 19th IDDRG Biennial Congress, pp.541~546.
- (5) 권재욱, 김인수, 이동녕, 1992, "각종 도금강판의 신장 성형시 마찰계수측정", 한국소성가공학회지, 제1권, 제 1호, pp.75~86.
- (6) Wen-Ruey Chang, 2000, "The effect of surface roughness and contaminant on the dynamic friction of porcelain tile", Applied Ergonomics 32 pp.173~184.
- (7) Zhi Liang Zhang and Li Chen, 1997, "Study of the friction characteristics of lubricants and their affecting factors during drawing", Journal of Materials Processing Technology 63, pp.144~147.
- (8) Meuleman, D. J., Denner, S. G and Cheng, F.L. 19 84, "The Effect of Zinc Coating on the Formability of Automotive Steel", SAE paper No 84370.
- (9) A. Wihlborg and L. Gunnarsson, 2000, "A frictional study of uncoated EBT steel sheets in abending under tension friction test" Wear237, pp.129~136.
- (10) 김영석, 남재복, 최원집, 1990, "자동차용 표면 처리강

- 판의 마찰특성에 관한 연구”, 대한기계 학회 논문집 제14권 6호, pp.1474~1486.
- (11) Steven C. C and Raymond P C.,1990,"NUMERICAL METHODS for ENGINEERS",McGraw-Hill, Inc.
- (12) 김준보, 금영탁, 1994, “굽힘효과를 고려한 자동차 패널 성형공정의 2차원 유한 요소 해석”, 한국자동차공학회, 95년도 춘계학술대회 논문집 1권, pp.124~129.