

박판성형 해석용 마찰 모델 (2부:수학적 모델)

금영탁*· 이봉현**

(2004년 4월 16일 접수)

Friction Model for Sheet Metal Forming Analysis (Part 2 :Mathematical Model)

Y. T. Keum and B. H. Lee

Abstract

Based on the experimental observation, the mathematical friction model, which is an essential information for analyzing the forming process of sheet metal, is developed considering lubricant viscosity, surface roughness and hardness, punch corner radius, and punch speed. By comparing the punch load found by FEM with a proposed friction model with experimental measurement when the coated and uncoated steel sheets are formed in 2-D geometry in dry and lubricant conditions, the validity and accuracy of the developed friction model are demonstrated.

Key Words : Sheet Metal Forming, Friction Coefficient, Surface Hardness, Mathematical Friction Model, FEM Analysis

1. 서론

박판 성형을 하는데 있어서 금형과 소재사이의 마찰은 박판 성형의 성패를 좌우하는 매우 중요한 인자 중의 하나이다. 마찰은 윤활유 점도, 공구 및 소재의 표면 조도와 경도, 금형 온도, 금형 속도, 표면 처리, 소재의 종류등 박판 성형 공정에 관련된 거의 모든 인자로부터 영향을 받기 때문에 이를 마찰계수로 정량화하는 것은 매우 어렵다. 따라서 마찰 현상을 규명하기 위한 지금까지의 마찰 연구는 비교적 간단한 실험을 통해 마찰을 정성적 특성을 비교하는 것이 대부분이었으며, 마찰 성능의 상대적 특성을 비교하는 것에 주안점을 두어왔다.

이러한 복잡하고도 다양한 마찰 현상을 설명하

기 위하여 1부에서는⁽¹⁾ 굽힘을 고려한 마찰 측정장치를 제작하고 윤활유 점도, 박판의 표면조도, 펀치 속도, 그리고 금형 모서리 반경이 박판 성형 중 소재와 공구사이에서 발생하는 마찰에 미치는 영향을 마찰실험을 통하여 평가하였다.

본 연구에서는 박판 성형 중에 야기되는 마찰 특성을 보다 정확하게 묘사하기 위해 마찰 영향 인자인 박판 표면 경도를 대상으로 마찰시험을 추가적으로 수행하고, 박판 표면 경도를 포함한 윤활유 점도, 박판의 표면 조도, 펀치 속도, 그리고 금형 모서리 반경을 변수로 하는 수학적 마찰 모델을 제안하였다. 또한 건조 및 윤활 상태에서 도금강판의 2차원 스트레칭 성형에 대하여 유한요소 해석으로 얻은 펀치력을 실험치와 비교하여 개발한 마찰모델의 타당성을 검증하였다.

* 한양대학교 CPRC 기계공학부

** 한양대학교 일반대학원

2. 실험 및 실험결과

박판성형 중 박판재 특성과 성형변수가 마찰에 미치는 영향을 평가하기 위하여 마찰 시험을 수행하였다. 마찰실험을 위하여 마찰실험 장치를 설계 및 제작하고, 6 종류의 도금/무도금 박판, 8 종류의 윤활재, 7 종류의 인출속도 그리고 7종류의 서로 다른 곡률을 갖는 롤러를 사용하였다. 먼저 윤활재 점도, 박판재 조도, 금형곡률, 그리고 성형속도가 마찰에 미치는 영향이 마찰실험을 통해 평가된 후,⁽¹⁾ 박판재 경도와 마찰계수와의 상관관계가 실험 평가되었다.

표면 경도와 마찰계수의 상관관계를 분석하기 위하여 마찰실험에서 사용하는 6개의 도금 및 무도금 강판에 대하여 표면 경도를 측정하였다. 시편은 폭 10mm에 길이 10mm의 크기로 전단되었으며, 정확한 표면 경도 측정을 위하여 표면을 마운팅하고 폴리싱 작업을 하였다. 마운팅은 지름 30mm의 원통형에 시편을 두개씩 넣어 모두 3개를 하였고, 폴리싱 작업은 습식 폴리싱 패드를 사용하여 연마용 연마제로 다이아몬드 컴파운드를 희석한 용액을 사용하였다. 표면 경도 측정은 비커스 경도 측정기로 굽힘이 없고 표면이 깨끗한 부분의 시편 표면에 대해서 피라미드 형상의 다이아몬드 압입자를 1kg의 하중으로 압입하여 수행되었다. 또한 측정 시 실험 편차를 줄이기 위하여 동일한 시편에 대해서 고른 분포로 6회씩 반복 측정한 값의 평균값을 대표값으로 사용하였다. 박판재 표면경도 HV는 식 (1)과 같이 계산되었으며 측정 결과를 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Surface hardness of friction test specimens

Specimens	AL1050	SPCC	GADQ	AL5052	GACQ	Zn-Ni
Vicker's Hardness	85.8	94.9	103.1	115.5	118.7	130

$$HV = \frac{1.854}{L^2} P \quad (1)$$

여기서 P 는 압입자의 하중을, L 은 정사각형 자극의 대각선 길이이다.

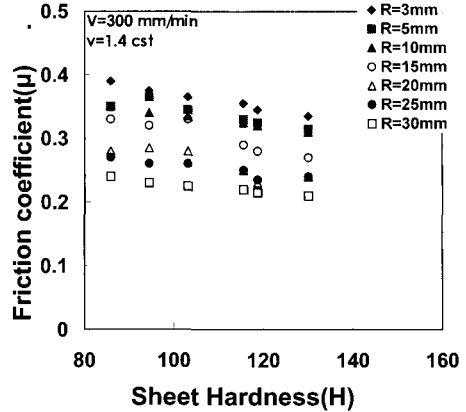


Fig. 1 Friction coefficient associated with sheet surface hardness in various punch corner radii

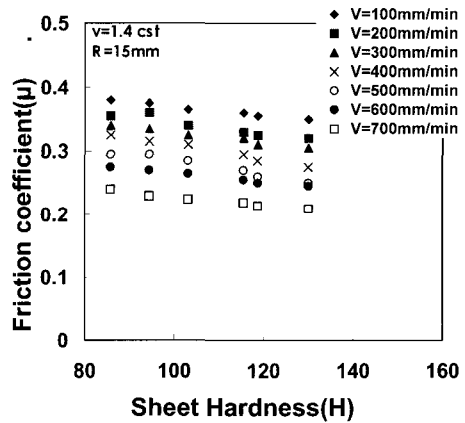


Fig. 2 Friction coefficient associated with sheet surface hardness in various punch speed

Fig. 1과 Fig. 2는 시편들의 표면 경도와 마찰 계수와의 관계를 보여 주고 있다. 표면 경도가 증가함에 따라 마찰계수가 미소하게 감소하는 경향을 알 수 있다. 경도가 낮은 경우, 마찰계수가 크게 나타나는 것은 마찰이 발생할 때 표면 탈락이나 굽힘 등의 현상에 의해 저항력이 증가하기 때문이다. 반면에, 경도가 커질수록 굽힘 등에 의한 표면 저항의 영향이 감소하므로 마찰계수는 감소한다. 그러나 표면경도가 커짐에 따라 마찰계수의 변화는 미소하게 감소하므로 표면 경도는 마찰계수에 적은 영향을 미치는 것으로 추정된다.

표면 경도 H 와 마찰계수 μ 의 관계는 식 (2)와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\mu = e_0 H + e_1 \quad (2)$$

여기서 e_0 와 e_1 은 실험치로 결정되는 상수들이다.

3. 마찰 모델

마찰실험을 통해 구축된 데이터베이스를 바탕으로 윤활유 점도, 박판 표면의 조도 및 경도, 금형 모서리 반경, 그리고 펀치속도를 변수로 하는 마찰계수의 수학적 모델을 제시한다.

1부:실험⁽¹⁾에서 제시한 식들, 식 (2), 식 (3), 식 (6), 그리고 식 (7)과 본 논문의 식 (2)을 다음과 같은 다항식으로 표현 할 수 있다.

$$\mu = \frac{a_0}{v^{a_1}} + a_2 \lambda + a_3 \lambda^2 + a_4 R + a_5 V + a_6 H + a_7 \quad (3)$$

식 (3)에 의한 최소자승오차는 다음과 같고

$$S_r = \sum_{i=1}^n (\mu - \frac{a_0}{v_i^{a_1}} - a_2 \lambda_i - a_3 \lambda_i^2 - a_4 R_i - a_5 V_i - a_6 H_i - a_7)^2 \quad (4)$$

최소자승오차 S_r 이 최소가 되는 a_i 를 구하기 위하여 각 계수에 대한 S_r 의 편미분들을 0으로 놓는다. 이렇게 구한 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ 를 식 (3)에 대입하면 다음과 같이 실험치를 최적으로 근사시키는 적합곡선을 얻을 수 있다.

$$\mu = \frac{0.2915}{v^{0.3347}} + 0.1968(\lambda - 0.738)^2 - 0.0037R - 0.00015V - 0.0001H + 0.07 \quad (5)$$

여기서 μ, v, λ, R, V, H 는 각각 마찰계수, 윤활유 점도, 박판 표면 조도, 금형 모서리 반경, 펀치 속도, 박판 표면 경도이다.

4. 모델 검증

개발된 마찰 모델의 타당성과 정확성을 입증하기 위해 2차원 스트레칭 성형에 대하여 개발된 마찰모델을 사용한 FEM 해석 결과를 실험치와 비교하였다. FEM 해석에서는 본 연구에서 개발한 마찰모델과 드로우비드 마찰모델이 사용되었다. 드로우비드 마찰모델은 드로우비드 마찰실험

장치를 이용하여 구한 마찰모델로 다음 식과 같이 마찰계수 μ 가 계산된다.⁽²⁾

$$\mu = \frac{D_{f+d} - D_d}{\pi C_{f+d}} \quad (6)$$

여기서 D_{f+d}, D_d, C_{f+d} 는 각각 드로우비드 마찰 시험기에서 측정되는 고정 비드의 인출력, 롤러 비드의 인출력, 고정 비드의 블랭크 가압력이다.

해석에서 사용된 2-D 스트레칭의 성형공정도는 Fig. 3과 같고, 펀치를 진행시켜 길이 300mm, 폭 20mm, 두께 0.8mm의 시편이 10mm/min의 속도로 파단될 때까지 스트레칭된다. 해석에 앞서 실시한 마찰 실험 결과(Table 2 참조), 전체적으로 변형이 많은 드로우비드 마찰모델의 마찰계수가 본 연구의 마찰모델에 비하여 비교적 높게 나오는 것을 알 수 있다.

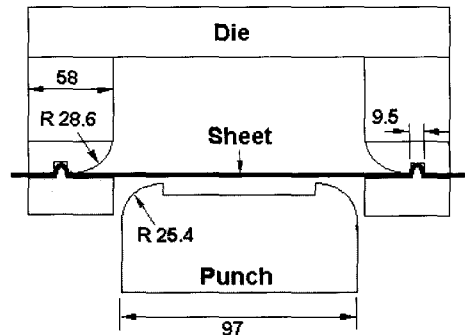


Fig. 3 Tooling geometry of 2-D stretching process

Table 2 Friction coefficients associated with friction models

specimen / lubrication condition	model type	current friction model	drawbead friction model
ALDQ / dry		0.2608	0.3294
ALDQ / lubricated		0.0860	0.1162
GICQ / dry		0.2216	0.2810
GICQ / lubricated		0.0730	0.0840

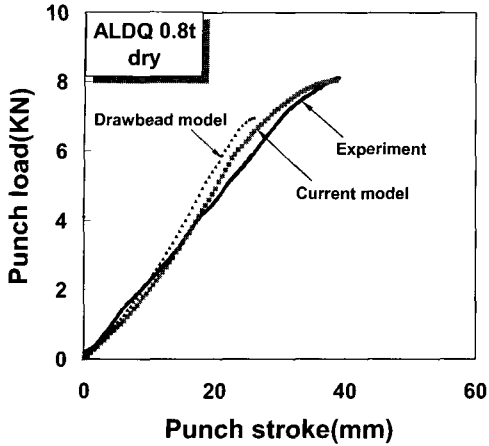


Fig. 4 Comparison of punch forming loads of ALDQ sheet in dry condition found by FEM using current friction model and drawbead friction model with that obtained from experimental measurement

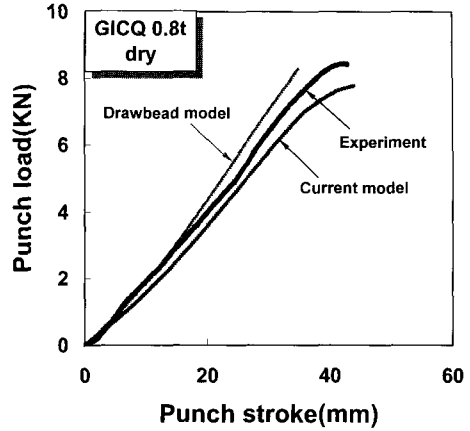


Fig. 6 Comparison of punch forming loads of GICQ sheet in dry condition found by FEM using current friction model and drawbead friction model with that obtained from experimental

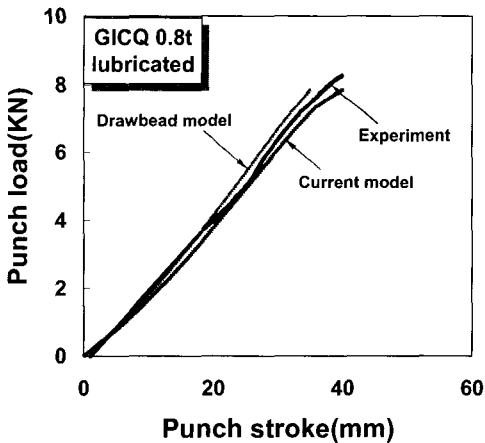


Fig. 5 Comparison of punch forming loads of ALDQ sheet in lubrication condition found by FEM using current friction model and drawbead friction model with that of experimental measurement

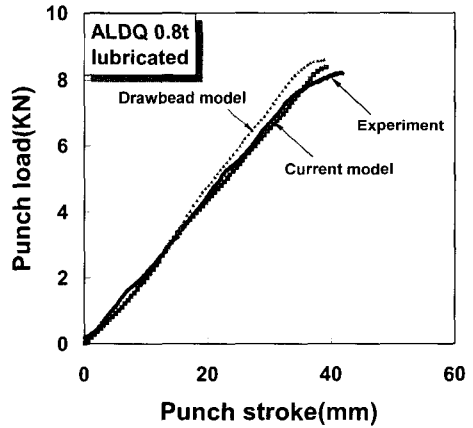


Fig. 7 Comparison of punch forming loads of GICQ sheet in lubrication condition found by FEM using current friction model and drawbead friction model with that of experimental measurement

평면변형을 상태의 성형공정을 해석하기 위해 개발된 단면 성형해석 FEM프로그램⁽³⁾을 사용하여 FEM 해석이 수행되었으며 마찰모델에 따른 해석 결과와 실험 측정치를 비교하였다. 본 연구의 마찰모델로 구한 변형률 분포와 드로우비드 마찰계수로 구한 변형률 분포는 그래프로 식별이

불가하여 편치력을 본 연구에서는 비교 하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 ALDQ 강판에 대하여 윤활 및 무윤활 상태에서 각각 FEM해석으로 얻은 편치력을 실험치와 비교한 것이다. 건조상태에서 드로우비드 마찰모델을 적용한 경우는 수렴에 문제가 있어 비교에 어려움이 있었지만, 본 연구에서 개발된 모델을 적용한 해석결과가 실험 측정치에

보다 근접함을 알 수 있었다. 윤회상태 에서도 본 연구에서 개발된 모델을 적용한 해석 결과가 드로우비드 마찰모델을 적용한 해석결과 보다 3% 가량 오차가 적은 결과를 나타냈다. Fig. 6과 Fig. 7은 GICQ 강판에 대하여 역시 윤회 및 무윤회 상태에서 각각 유한요소해석으로 얻은 편치력을 실험치와 비교한 것이다. 건조상태에서는 개발된 마찰모델을 적용한 해석 결과가 드로우비드 마찰 모델을 적용한 해석결과 보다 평균 4% 가량 오차가 크게 나타났다. 윤회 상태에서는 개발된 마찰 모델을 적용한 해석결과 가 드로우비드 마찰모델을 적용한 해석결과보다 약 3%가량 오차가 작은 결과를 나타내었다. 이상의 검증 결과를 통하여 개발된 마찰모델이 냉연강판보다 상대적으로 까다로운 성형조건을 갖는 도금 강판에 대해서 효율적으로 그리고 정확히 마찰특성을 묘사하고 있음을 알 수 있으며, 특히 건조상태보다는 윤회상태에서 보다 효과적임을 알 수 있었다

5. 결론

본 연구에서는 박판성형 중 윤회유 점도, 박판 재 조도와 경도, 금형형상에 따른 금형 모서리 반경, 편치속도에 따른 성형속도, 그리고 소재의 표면경도가 마찰계수에 미치는 영향을 평가한 마찰실험에서 얻은 데이터 베이스로부터 수학적 마찰모델을 개발하고 이를 제안하였다.

이러한 일련의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 표면경도를 측정하였으며, 표면경도에 따른 마찰실험을 수행한 결과 표면경도가 높아질 수록 마찰계수는 감소하는 경향을 보였다.

(2) 윤회유 점도, 박판 표면조도, 박판 표면 경도, 금형 반경, 그리고 편치 속도에 따른 마찰 특성을 모델링하고 이 마찰 모델을 FEM 성형해석

에 적용하여 얻은 편치력은 실험 결과와 잘 일치한다.

(3) 윤회유 점도, 소재 표면조도, 표면 경도, 공구 모서리 반경 그리고 편치 속도를 알면 박판 성형 중에 마찰계수의 계산이 가능하고 이 값을 유한요소해석에 적용함으로써 보다 실제적인 성형 해석이 가능하다.

참고 문헌

- (1) 이봉현, 금영탁., 2002, “박판 성형 해석용 마찰 모델(1부 :실험)”, 한국소성가공학회지 제11권 제4호, pp. 349~354.
- (2) 김영석, 장래웅, 최원집., 1992, “드로우비드 마찰구속에 관한 실험적 연구” 대한기계학회 논문집 제16권 제4호, pp. 658~666.
- (3) 김준보, 금영탁., 1994, “굽힘 효과를 고려한 자동차 패널 성형 공정의 2차원 유한요소 해석”. 한국자동차공학회, 95년도 춘계학술대회 논문집 1권 pp. 124~129.
- (4) 금영탁, 김종필., 1994, “스탬핑 금형의 성형성 평가를 위한 2차원 유한요소 프로그램” , 한양대 산업과학논문집, 제39권, pp. 229~239.
- (5) 김영석, 남재복, 최원집., 1990, “자동차용 표면처리 강판의 마찰 특성에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집 A권, 제14권 제6호 pp. 1474~1486.
- (6) A. Wihlborg and L. Gunnarsson., 2000, "A frictional study of uncoated EBT steel sheets in a bending under tension friction test" Wear 237, pp. 129~136.
- (7) J. M. Lanzon, M. J. Cardew-Hall and P. D. Hodgson., 1998, "Characterising frictional behaviour in sheet metal forming", Journal of Materials Processing Technology 80-81, pp. 251~256.