

## 박판성형 해석용 마찰모델 (1부 : 실험)

이봉현\*·김영탁\*\*

(2002년 4월 3일 접수)

### Friction Model for Sheet Metal Forming Analysis (Part1:Experiment)

B. H. Lee and Y. T. Keum

#### Abstract

In order to find the effect of lubricant viscosity, sheet surface roughness, tool geometry, and forming speed on the frictional characteristics in sheet metal forming, a sheet metal friction tester was designed and manufactured and friction test of various sheet were performed. Friction test results showed that as the lubricant viscosity becomes lower, the friction coefficient is higher. When surface roughness is extremely low or high, the friction coefficient is relatively high. The result also show that as the punch radius and punch speed becomes bigger, the friction coefficient is smaller. Using experimental results, the mathematical expression between friction coefficient and lubricant viscosity, surface roughness, punch corner radius, or punch speed is also described.

**Key Words** : Friction Coefficient, Lubricant Viscosity, Sheet Surface Roughness, Tool Corner Radius, Forming Speed, Sheet Metal Friction Test, Sheet Metal Forming

#### 1. 서 론

제품을 개발하고 생산하는 초기과정에서 들어가는 시간과 비용은 제품의 품질과 경쟁력에 직접 관련되기 때문에 생산현장에서 개발 및 생산의 초기단계에 시행착오를 컴퓨터 시뮬레이션으로 대체하는 노력이 상당히 진행되고 있다. 박판성형 분야에서도 이러한 컴퓨터 시뮬레

이션을 이용하여 효율적으로 금형을 설계하고 제품 성형성을 예측하기 위한 연구가 많이 시도되어졌다.<sup>(1~3)</sup>

컴퓨터 시뮬레이션으로 금형을 설계해석할 때 성형중에 소재와 공구사이에 발생하는 마찰을 잘 정의하는 것은 제품의 품질 및 성형의 성패를 예측하는 매우 중요한 기술들 중의 하나이다, 따라서 소재와 공구사이의 마찰현상에 대해 명확히 규명하는 것은 제품의 성형성을 보

\* 한양대학교 일반대학원

\*\* 한양대학교 기계공학부

장하고 해석의 정확성을 향상시키기 위해 필수불가결하기 때문에 박관성형 중 마찰에 영향을 미치는 인자들에 관한 철저한 분석이 필요하다.

Hisakado<sup>(4)</sup> 등은 4종의 금속판을 이용하여 마찰과 소재의 표면조도, 마멸 입자의 거동, 마멸정도와와의 관계를 관찰하였다. Alfred<sup>(5)</sup> 는 열역학적인 접근방법으로 마찰열의 구성방정식을 유도하기 위한 일반적인 방법을 제시하였다. Parker<sup>(6)</sup> 는 표면에 열에 민감하게 반응하는 물질을 코팅한 재료를 접촉 운동시키면서 열전대를 이용하여 표면온도를 측정하는 방법으로 접촉마찰열에 관하여 연구하였다. Teodorrescu<sup>(2)</sup> 등은 박관의 디프 드로잉 공정에서 화학조성, 점도, 작업조건등이 마찰 현상에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Sniekers<sup>(7)</sup> 등은 기존의 BBT(Bending Under Tension) 마찰실험장치를 응용하여 폴리전후의 힘을 측정하는 대신 마찰에 의한 폴리의 회전토크를 측정하여 마찰계수를 계산하였다. 또한 FEM해석에 적용하여 이러한 마찰계수 계산법의 유효성을 입증하였다. Jonasson<sup>(9)</sup> 등은 판재의 종류가 달라짐에 따라 판재 표면 위상과 마찰계수의 변화를 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 펀치와 접촉하기 전 상태의 판재 표면 위상과 펀치 접촉 후의 판재표면 위상을 각각 측정하여 고립된 오일 포켓의 평균 면적과 마찰계수 사이의 관계를 결정하고, 3차원 표면의 조도 파라미터들과 마찰계수는 서로 상관성이 없음을 관찰하였다. Bhone<sup>(9)</sup> 등은 BBT(Bending Under Tension) 실험장치를 이용하여 시편의 추출 각도와 펀치 모서리반경이 커질수록 마찰계수도 커진다는 것을 알았다. Lanson<sup>(10)</sup> 등은 박관의 표면 도금상태가 드로우비드 마찰실험 결과에는 크게 영향을 미치지만 평마찰실험은 적게 영향을 미치는 것으로 관찰하였다.

Wang<sup>(11)</sup> 등은 성형의 진행되는 동안의 마찰거동과 박관 및 공구의 경도가 마찰계수에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 하였다. 실험결과, 성형이 진행됨에 따라 마찰계수는 점점 감소하는 경향을 보였고 박관과 공구 모두 표면 경도가 증가할수록 마찰계수가 감소한다는 것을 관찰하였다.

국내에서는 김영석<sup>(13-14)</sup> 등이 다양한 판재표면처리에 따른 마찰현상을 드로우비드 실험기로 관찰하였고, 서대교<sup>(16)</sup> 등은 금형의 온도와 금형의 표면처리에 상태에 따른 판재의 마찰특성을 연구하였다. 또한 금형 도형이 박관과 금형면 사이에 존재하는 마찰계수에 어떤 영향을 끼치는지를 김인수<sup>(17)</sup> 등과 한수식<sup>(18)</sup> 이 연구하였다.

본 연구에서는 윤활유 점도, 소재 표면조도, 펀치 속도, 그리고 공구 모서리 반경이 박관 성형 중 소재와 공구사이에서 발생하는 마찰에 미치는 영향을 실험을 통하

여 종합적으로 평가하였다.

## 2. 실험

박관성형 중 성형 변수가 마찰에 미치는 영향을 평가하기 위하여 먼저 실험에서 사용한 박관시편의 표면조도 측정실험을 수행하였다. 그리고 마찰 실험 장치를 설계 및 제작하고 8종류의 도금/무도금 박관, 11종류의 드로우잉용 윤활유, 7종류의 인출속도, 그리고 7종류의 서로 다른 곡률을 갖는 롤러를 사용하여 마찰측정실험을 실시하였다.

### 2.1 표면조도 측정실험

표면조도와 마찰계수의 상관관계 분석을 위하여 마찰 실험에서 사용될 모든 강관에 대하여 표면조도를 측정하였다. 시편은 폭 40mm에 길이 300mm의 크기로 절단되었으며 저독성 솔벤트로 세척되었고, 완전히 건조된 후에 조도 측정실험에 사용되었다. 측정은 탁상용 조도 측정장비인 Taylor Hobson사의 Talysurf series II를 사용하여 ISO 규격에 따라 휘거나 굽힘이 없는 측정길이 5.6mm 부분의 시편 표면에 대해서 수행되었다. 마찰실험에서 사용된 시편들의 표면조도치는 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Surface roughness of friction testing specimen

| Specimens | Ra(μm) | Rmax(μm) |
|-----------|--------|----------|
| SPCC      | 0.3780 | 3.3679   |
| AL5052    | 0.1250 | 3.2154   |
| AL1050    | 0.1312 | 2.5196   |
| GADQ      | 0.7480 | 9.8518   |
| GACQ      | 0.5030 | 8.3631   |
| ALCQ      | 1.1850 | 10.9489  |
| Zn-Ni     | 1.3150 | 12.0154  |
| Zn-Fe     | 1.4120 | 9.8513   |

### 2.2 마찰 측정실험

도금 및 무도금 강관의 마찰 특성 규명을 위하여 Fig. 1과 같은 마찰 실험장치를 제작하여 재료와 공구사이의 마찰계수를 측정하였다. 마찰 실험장치는 시편에 면압을 가해주는 부분, 곡률을 만드는 부분, 그리고 시편을 다양한 속도로 당겨 다양한 펀치속도를 묘사하는 부분으로 되어있다. 실험을 위한 시편은 폭 20mm에 길이 600mm

의 크기로 전단하였으며 전단에 의하여 발생한 시편 가장자리의 버는 완전히 제거되었고 취거나 굽힌 자국이 있는 시편은 사용하지 않았다. 또한 모든 시편은 양면이 동일한 도금 조건을 갖고 있으며 저독성의 솔벤트 세척제로 완전히 세척된 후 사용되었다. 마찰계수 측정실험은 8종류의 박판, 11종류의 윤활유, 7종류의 인출속도 그리고 7종류의 곡률에 대하여 가능한 모든 경우의 실험을 수행하였다.

마찰계수의 측정은 다이에 600N의 하중을 가한 상태에서 실시하였으며, 동마찰 구간인 출발점에서 20mm~30mm지점에서부터 측정하였고, 측정데이터를 식(1)에 대입하여 마찰계수를 구하였다.

$$\mu_{kave} = \frac{\sum_{n=0}^K \frac{1}{\beta} \ln \frac{P_1 - (P_b + P_e)}{P_2}}{K} \quad (1)$$

여기서,  $\mu_{kave}$ 는 평균 동마찰계수이고  $P_1$ 은 전방인장력,  $P_2$ 는 후방 인장력,  $P_b$ 는 굽힘력,  $P_e$ 는 베어링에서 발생하는 오차를 각각 나타내며 K는 측정된 전체 인출력의 수를 나타낸다.

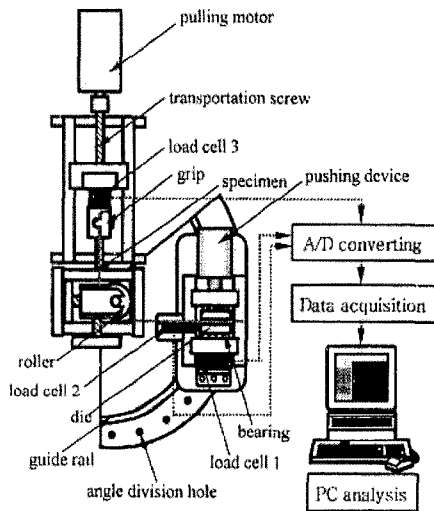


Fig. 1 Schematic diagram of sheet metal friction tester

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 윤활유점도와 마찰계수와의 관계

Fig. 2는 평균 표면조도  $\lambda(R_a)$ 가 다른 여러 가지 시편을 이용하여 윤활유 점도 변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 한 예이다. 전체적으로 윤활유의 점도가 증가할수록 마찰계수가 감소하는 경향을 보였다. 이런 현상은 저점도유가 고점도유보다 쉽게 유체윤활 상태가 파괴되어 마찰계수가 높게 나오고, 고점도유가 저점도유에 비해 오랫동안 마찰표면에 머물면서 윤활 작용을 하기 때문에 마찰계수가 낮게 나오는 것으로 설명된다.

따라서 윤활유 점도  $\nu$ 와 마찰계수  $\mu$ 와의 관계는 식(2)와 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$\mu = \frac{a_0}{a_1 + \nu^{a_2}} \quad (2)$$

여기서  $a_0, a_1, a_2$ 는 실험치들을 최소자승법으로 보간하여 구해질 수 있는 상수들이다.

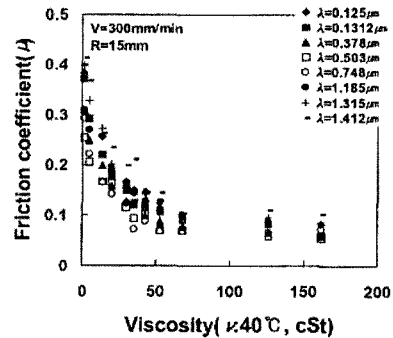


Fig. 2 Friction coefficients associated with lubricant viscosity in various sheet roughness

#### 3.2 표면조도와 마찰계수와의 관계

표면조도와 마찰계수와의 상관관계는 Fig. 3과 같이 전체적으로 U자 형상을 갖는 것을 알 수 있다. 표면조도가 지나치게 낮아질 경우 윤활유를 보관할 수 있는 오일 포켓의 체적이 줄어들어 윤활효과가 떨어지는 반면 표면조도가 지나치게 높아지면 보다 많은 소성변형으로 인해 마찰저항이 증가하게 되며 동일한 양의 윤활유 도포시 쉽게 유체 윤활 상태가 파괴되기 때문이다.

Fig. 3에서 보여주는 마찰계수  $\mu$ 는 표면조도를 변수로 하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = b_0 (\lambda + b_1)^2 + b_2 \quad (3)$$

여기서  $\lambda$ 는 소재의 평균조도  $R_a$ 이고,  $b_0, b_1, b_2$ 는 실험치들로부터 구해지는 상수들이다.

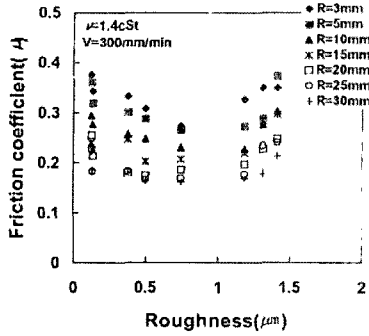


Fig. 3 Friction coefficients associated with sheet surface roughness in various punch corner radii

### 3.3 공구 모서리 반경과 마찰계수와의 관계

공구의 모서리반경과 마찰계수와의 상관관계는 Fig. 4와 같이 서로 반비례함을 알 수 있다, 이러한 관계는 원통컵 성형(Fig. 5참조)의 힘평형 식으로부터 유도할 수 있다. 여기서  $P_b$ 를 펀치력,  $P_w$ 를 굽힘력, 그리고  $\sigma_w$ 를 시편 벽부분의 응력이라고 하면,

$$P_1 = \pi D t \sigma_w = \frac{P_b}{\cos \beta} \quad (4)$$

이고, 마찰계수  $\mu$ 는 벨트-폴리식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\frac{P_b}{\cos \beta} - P_b}{P_2} \quad (5)$$

따라서 식(5)로부터 마찰계수와 펀치력은 비례관계가 있음을 알 수 있고, 펀치력은 펀치모서리 반경과 반비례의 관계가 있기 때문에(21) 마찰계수와 펀치 모서리반경 사이에는 반비례관계가 있다. 즉, 마찰계수  $\mu$ 는 펀치모서리 반경  $R$ 의 항으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mu = c_0 R + c_1 \quad (6)$$

여기서  $c_0$ 과  $c_1$ 는 실험치로부터 결정되는 상수들이다.

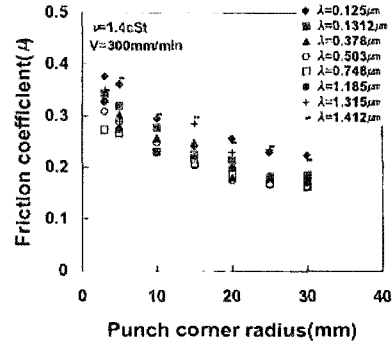


Fig. 4 Friction coefficients associated with punch corner radii in various sheet surface roughness

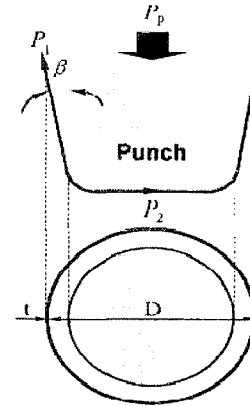


Fig. 5 Free body diagram of cylinder cup draw test

### 3.4 펀치속도와 마찰계수와의 관계

펀치속도가 빠르면 빠를수록 박판의 성형속도 즉 금형과의 상대속도가 빨라진다. 따라서 박판의 인출속도는 펀치속도와 비례적인 관계가 있기 때문에 본 연구에서는 박판의 인출속도를 펀치속도와 동일하게 취급하였다. 본 실험에 의하면 펀치 속도와 마찰계수는 일반적으로 Fig. 6처럼 펀치속도가 증가하면 마찰계수가 감소하는 반비례 관계가 있다. 이는 건조마찰과 윤활마찰 상태에서 각각 다음과 같이 설명된다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 건조상태에서 공구와 재료가 반대방향으로 접촉 상대운동속도가 낮은 (a)의 경우 두 물체의 접촉마찰열이 적게 발생하게 되고,<sup>(22)</sup> 계면의 취성이 강해 상대적으로 높은 전단력으로 인해 큰 마찰력이 발생하게 된다. 반면 상대적으로 속도가 높은 (b)의 경우 높아진 접촉마찰열로 인해 계면의 온도가 상승하게 되고 취성보다는 연성이 강해지게 된다. 따라서 계면에서는 속도가 느릴때 보다

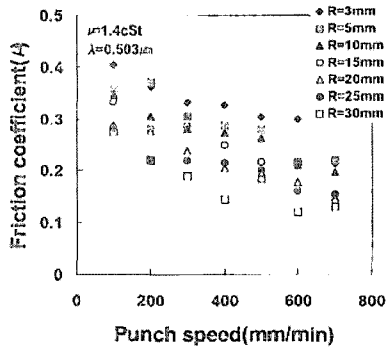


Fig. 6 Friction coefficients vs punch speed in various punch corner radii

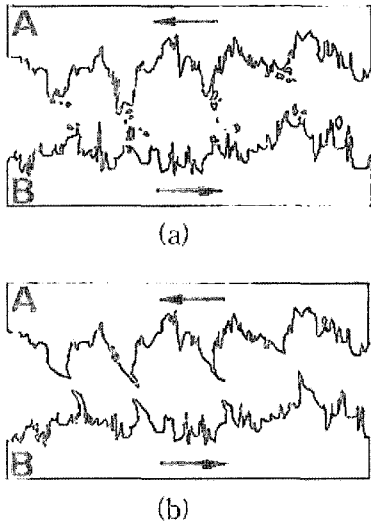


Fig. 7 Two materials sliding with (a) low speed and (b) high speed in a dry condition

상대적으로 낮은 전단력이 발생하게 되므로 마찰력이 작게 발생하게 된다. 한편, 윤활유가 도포된 상태에서는 (Fig. 8참조) 상대운동속도가 빠른(b)에 비하여 상대운동속도가 느린 (a)의 경우, 계면의 골계 형성된 오일포켓이 파괴됨에 따라 윤활유가 손실될 수 있는 시간적 여유가 상대적으로 많아지게 된다. 따라서 공정이 진행되는 동안 초기에 도포된 윤활유 중 비교적 많은 양이 손실되게 되고 경계윤활이 증가하게 되어 마찰력이 크게 발생하게 된다. 반면 상대운동속도가 빠른 (b)의 경우 동일한 현상에 대하여 윤활유가 손실될 수 있는 시간적 여유가 작아지게 되므로 공정중에 윤활유의 손실이 적어지게 되고 마찰력이 작아지는 것이다.

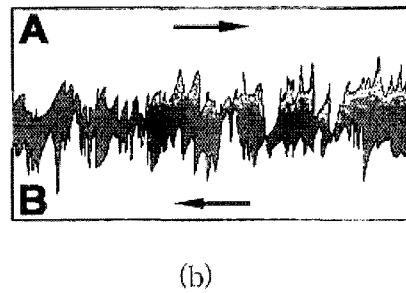
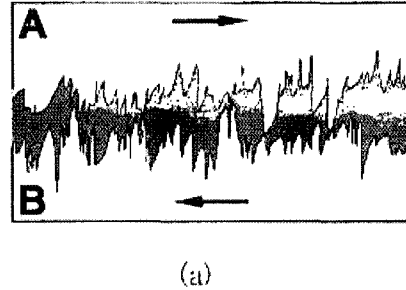


Fig. 8 Two materials sliding with (a) low speed and (b) high speed in a lubricated condition

본 실험에서 얻은 마찰계수  $\mu$ 와 펀치속도  $V$ 와의 관계를 실험치들로부터 결정되는 상수  $d_0, d_1$ 를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\mu = d_0 V + d_1 \quad (7)$$

#### 4. 결론

본 연구에서는 박판성형 중 윤활유 종류에 따른 점도 변화, 소재의 표면처리에 따른 조도 변화, 공구형상에 따른 모서리 반경 변화 그리고 공정속도에 따른 펀치속도 변화가 마찰계수에 미치는 영향을 종합적으로 평가하기 위한 실험을 하고 데이터베이스를 구축하였다. 이러한 일련의 실험연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 마찰계수는 윤활유의 점도가 증가할수록 감소하고 표면조도와는 U자형상의 상관관계를 갖는다.
- (2) 공구 모서리 반경이 증가하고 펀치 속도가 증가할수록 마찰계수는 감소한다.
- (3) 윤활유 점도, 표면조도, 공구 형상, 그리고 펀치 속도에 따라 마찰특성을 각각 수학적으로 표현하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형및금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것임.

참 고 문 헌

- (1) J.K. Kim and P.F. Thomson, 1990, "Friction and Stress Distribution in Coated Sheet During Forming", *Journal of Material Processing Technology*, Vol 21, pp. 29~41.
- (2) M. Teodorrescu, G. Frumusanu, and Bassani, J. L., 1977, "Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic properties", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 19, pp. 651~156.
- (3) Gotoh, M., 1977, "A theory of plasticity anisotropy based on a yield function of fourth order(plane stress state)-I", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 19, p. 505.
- (4) Terumasa Hisakado, Kentarou Miyazaki, Akiyoshi Kameta, and Satoru Neigishi, 2000, "Effects of surface roughness of roll metal pins on their friction and wear characteristics", *Wear* 239.
- (5) ALRFRED ZMITROWICZ, 1995, "Constitutive models for anisotropic frictional heat", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 563~574.
- (6) R.C. Parker, and P.R. Marshall, 1948, "The measurement of the temperature of sliding surfaces, with particular reference to railway brake blokes", *Proc. Inst. Mech. Engrs* 158.
- (7) R.J.J.M. Sniekres, and H.A.A. Smits, 1997, "Experimental set-up and data processing of the radial strip-drawing friction test", *Journal of Materials Processing Technology* 66, pp. 216~223.
- (8) M. Jonasson, A. Whilborg, and L. Gunnarsson, 1998, "Analysis of Surface Topography Changes in Steel Sheet Strips during Bending under Tension Friction Test", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 38, No.5-6, pp. 459~467.
- (9) S.R. Bhonle, and K.J. Weinmann, 1990, "The Significance of the Workpiece Sample in the Strip-Tension Friction Test", *Transactions of NAMRI/SME*, pp. 46~51.
- (10) J.M. Lanzon, M.J.Cardew-Hall, and P.D.Hodson, 1998, "Characterising frictional behavior in sheet metal forming", *Journal of Materials Processing Technology* pp. 80~81.
- (11) X.J. Wang, J.L. Duncan, and M.L. Devenpeck, 1983, "Punch Friction Tests for Sheet Metal Forming", *AMERICAN SOCIETY FOR METALS*, Vol.3, No.1, pp. 3~11.
- (12) M.M Moshksar, and A. Zamanian, 1997, "Optimization of the tool geometry in deep drawing of aluminum", *Journal of Materials Processing Technology* 72, pp. 363~370.
- (13) 김영석, 박기철, 1991, "Zn-Ni계 합금도금강판의 마찰특성에 관한 연구", *대한기계학회논문집*, 15권 6호 pp. 1807~1818.
- (14) 김영석, 남재복, 최원집, 1990, "자동차용 표면처리 강판의 마찰특성에 관한 연구", *대한기계학회논문집*, 14권6호, pp. 1474~1486.
- (15) Y.S. Kim, H.S. Kim, Y.T. Keum, 2000, "Evaluation of Frictional Characteristics for Zinc-Coated Steel Sheet", *Metal and Materials*, Vol.6, No.4, pp. 323~329.
- (16) 서대교, 이재동, 송광현, 최이천, 1999, "금형의 온도와 처리상태에 따른 판재의 마찰특성", *한국소성가공학회지*, 8권3호. pp. 245~251.
- (17) 권재욱, 김인수, 1992, "각종 도금강판의 신장성형시 마찰계수측정", *한국소성가공학회지*, 1권1호. pp. 75~86.
- (18) 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.
- (19) R. Komanduri, and Z.B. Hou, 2001, "Analysis of heat partition and temperature distribution in sliding systems", *Wear* 251, pp. 925~938.
- (20) A. Whiborg, and L. Gunnarsson, 2000, "A frictional study of uncoated EBT steel sheets in a bending under tension friction test", *WEAR* 237, pp. 129~136.
- (21) 이봉현, 2002, "박관성형 유한요소해석을 위한 마찰 모델에 관한 연구", pp. 15~20.