

## 3차원 박판성형 공정 유한요소해석용 드로우비드 모델

금영탁\* · 김준환\*\* · 차지혜\*\*

(2001년 12월 26일 접수)

### Drawbead Model for 3-Dimensional Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes

Y. T. Keum, J. H. Kim and J. H. Cha

#### Abstract

The drawbead model for a three-dimensional a finite element analysis of sheet metal forming processes is developed. The mathematical models of the basic drawbeads like circular drawbead, stepped drawbead, and squared drawbaed are first derived using the bending theory, belt-pulley equation, and Coulomb friction law. Next, the experiments for finding the drawing characteristics of the drawbead are performed. Based on mathematical models and drawing test results, expert models of basic drawbeads are then developed employing a linear multiple regression method. For the expert models of combined drawbeads such as the double circular drawbead, double stepped drawbead, circular-and-stepped drawbead, etc., those of the basic drawbeads are summed. Finally, in order to verify the expert models developed, the drawing characteristics calculated by the expert models of the double circular drawbead and circular-and-stepped drawbead are compared with those obtained from the experiments. The predictions by expert models agree well with the measurements by experiments.

**Key Words** : Drawbead Model, Sheet Metal Forming, Drawbead Restraining Force, Drawbead-exit Pre-strain, Linear Multiple Regression Method

#### 1. 서론

스탬핑 성형의 적부는 금형 형상, 재료 물성, 펀치속도, 윤활 등 다양한 공정변수의 영향을 받게 된다. 따라

서, 실제 현장에서는 성공적인 성형을 위해 많은 시간과 자금이 소요되는 시행착오법에 의존하고 있는 실정이다.

특히 재료의 유입량을 조절하는 드로우비드는 성형의 적부에 많은 영향을 미치므로 설계단계로부터 중요하게

\* 한양대학교 기계공학부  
\*\* 한양대학교 일반대학원

고려되어진다. 하지만, 일반적으로 드로우비드는 금형 설계자들의 경험들을 통해 설계되는 것이 보통이다. 따라서, 드로우비드 설계를 체계적으로 뒷받침할 수 있는 이론의 성립과 이에 대한 데이터베이스화가 시급한 실정이다.

지난 20년간 선행 연구자들은 다양한 방법으로 드로우비드 모델을 제안하고 이를 실제에 도입하고자 하였다. 1970년대와 1980년대에 Nine<sup>(1~2)</sup>는 드로우비드 저항력(Drawbead Restraining Force, DBRF)에 영향을 주는 인자들을 연구해 원형비드의 저항력과 비드 인출 전변형률을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. Wang<sup>(3)</sup>은 원형비드의 수학적 모델을 제안하여 굽힘, 미끄러짐, 뒤굽힘을 고려하여 드로우비드 저항력을 예측하는 연구를 수행했다. 한편, Levy<sup>(4)</sup>는 이방성과 박판의 변형률 요소를 드로우비드 저항력 예측에 도입하였다. Stoughton<sup>(5)</sup>은 재료의 굽힘 효과, 드로우비드 저항력, 블랭크 가압력 등을 마찰계수와 관련지어 연구하였으며, 드로우비드를 통해 인출하는데 필요한 일과 박판을 굽히고 마찰력을 극복하기 위해 필요한 일이 같다는 가정을 통해 이론적인 모델을 제시하였다. 1990년대에는 Wang과 Shah<sup>(6)</sup>는 드로우비드 지름과 마찰계수의 영향을 평가하는 연구를 수행하였다. Demeri<sup>(7)</sup>는 박판의 유입의 물성, 드로우비드 칩투력, 윤활 환경의 영향을 평가했다. Sunaga<sup>(8)</sup>은 드로우비드 저항력을 결정하기 위한 효과적인 방법을 제안하였고, 자동차 패널 성형 공정을 시뮬레이션 하기 위한 유한요소 코드를 개발하였다. You<sup>(9)</sup>는 드로우비드 저항력 예측을 위해 이동 경화 법칙과 Baushinger effect를 고려한 수치적 모델을 제안하였다. Meinders<sup>(10)</sup>는 딥드로잉 공정의 시뮬레이션을 위해 구속적 방법에 근거한 동등한 드로우비드 모델을 적용하였다.

본 연구에서는 박판성형공정에서 사용되는 드로우비드의 유한 요소 해석 모델을 개발하기 위하여 드로우비드의 드로잉 특성을 예측하는 수학적 모델을 제안하였다. 수학적 모델은 굽힘 이론, 벨트 폴리시, 컬럼 마찰이론, 재료의 이방성 등을 고려하였으며, 마찰 실험과 인출 실험을 통하여 보완된 후, 전문 모델로 발전하였다.

## 2. 수학적 모델링

드로우비드부는 경계조건이 되며, 성형해석에 필요한 정보는 드로우비드 저항력과 블랭크 홀더부를 빠져 나올 때의 변형률이다. 드로우비드 저항력과 비드 인출 시 변형률을 구할 수 있는 이론적인 모델을 제시하였으며, 재료가 드로우비드를 통과할 때 받는 저항력은 굽힘 변형

과 마찰에 기인하며 이들이 연성 되어진다고 가정하였다. 또한, 응력 및 변형률의 유도를 위해 평면응력상태( $\sigma_z=0$ )와 평면변형상태( $\epsilon_z=0$ )로 가정하였으며, 재료가 드로우비드를 통과하기 위해 필요한 드로우비드 저항력은 법선 방향 저항력( $DBRF_n$ )과 접선 방향 저항력( $DBRF_t$ )으로 나뉘어진다고 가정하고 이론을 전개하였다.

### 2.1 원형 드로우비드

Fig. 1은 박판의 진행방향과 임의의 각도를 이루고 있는 단일원형 드로우비드의 저항력 및 저항력을 이루고 있는 법선 및 접선 방향 요소들을 보여준다.

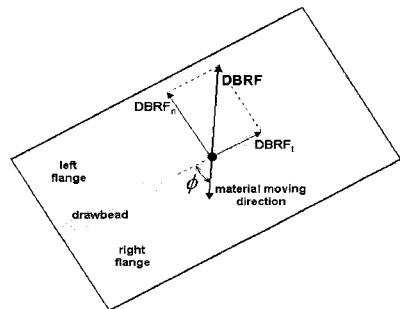


Fig. 1 Drawbead restraining force(DBRF) in the drawbead located with an arbitrary angle( $\phi$ ) to the material moving direction

Fig. 2는 원형 비드의 단면과 이를 통해 성형된 박판의 형상을 타나내고 있다.

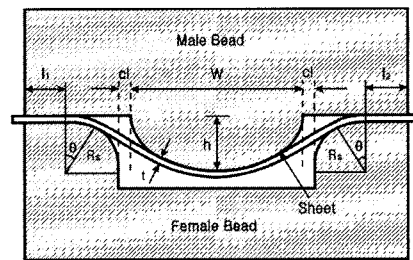


Fig. 2 Section view of a single circular drawbead and a formed sheet

먼저, 재료가 곡률부를 지나면서 받게 되는 변형은 굽힘, 미끄러짐, 뒤굽힘의 과정에 의해 기인된다고 가정하였으며, 이를 등가일의 원리와 벨트 폴리시 등을 이용하여 표현된다.<sup>(5)</sup> 탄성변형은 드로우비드가 단혔을 때, 양

쪽이 고정된 빔의 중간에 집중력이 가해지는 것으로 가정하여 탄성력  $F_e$ 와 변위  $\delta$ 는 식(1), 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_e = \frac{16Ew\delta l^3}{(2R_s + 2cl)^3} \quad (1)$$

$$\delta = \min\left(h, 2(2R+t) \frac{RY_P}{tE}\right) \quad (2)$$

여기서,  $E$ ,  $Y_p$ ,  $t$ ,  $R_s$  등은 각각 탄성계수, 항복응력, 시편 두께, 하부 비드의 반지름 등을 각각 나타내고 있다.

한편, 재료와 박판에 작용하는 마찰력은 블랭크 홀딩력과 상압력에 의해 영향을 받는다고 가정할 수 있으며, 이 두 힘의 차를 이용하여 고려할 수 있다. Fig. 4에서  $l_1$ 과  $l_2$ 를 각각 좌단과 우단의 플랜지 길이라고 하면, 재료 전체에 발생하는 블랭크 홀딩력 상압력과 플랜지부에 발생하는 블랭크 홀딩력 상압력간의 비례관계는 이 두 압력이 작용하는 면적에 의한 비례관계와 같음을 알 수 있으며, 이를 이용해 마찰력  $F_{cl}$ ,  $F_{c2}$ 는 식(3)과 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{cl} = 2\mu \left[ \frac{l_1}{l_1+l_2} BHF \right] - 2\mu \left[ \frac{l_1}{l_1+l_2+W+2R_s} F_R \right] \quad (3)$$

$$F_{c2} = 2\mu \left[ \frac{l_2}{l_1+l_2} BHF \right] - 2\mu \left[ \frac{l_2}{l_1+l_2+W+2R_s} F_R \right] \quad (4)$$

여기서,  $\mu$ ,  $BHF$ ,  $F_R$  은 각각 마찰계수, 블랭크 홀딩력, 상압력 등을 나타내고 있다.

Fig. 3은 원형 비드에 의해 성형된 시편의 형상을 나타내고 있는 그림이다.

점 1에서는 두께 변형이 없고 성형되는 방향으로 변형률이 0이므로 굽힘력이 작용하고, 점 1과 점 2사이에서는 벨트 폴리식에 의해 굽힘 전 발생된 힘에  $e^{\mu\theta}$ 가 곱해진 힘이 작용한다. 점 2에서는 연속적인 되굽힘력과 마찰력이 작용하며, 점 3에서는 마찰력과 탄성에 의한 굽힘력이 작용한다. 점 3과 점 4 사이에는 점 1과 점 2사이와 마찬가지로 굽힘 전의 힘에  $e^{\mu\theta}$ 가 곱해진 힘이 발생된다. 점 4는 되굽힘력, 점 4와 점 5사이에는 마찰력, 점 5는 굽힘력, 점 5와 점 6사이에는 마찰력, 점 6은 되굽힘력이

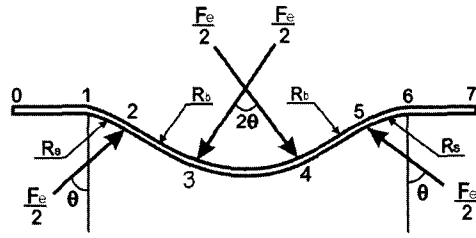


Fig. 3 Detail description of the sheet formed by a single circular drawbead

각각 작용한다.

오른쪽 플랜지부에 존재하는 마찰력  $F_{c2}$ 는 박판에 연속적으로 작용하므로  $DBRF_n$ 은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$DBRF_n = [ \{ (F_{cl} + F_1)e^{\mu\theta} + F_2 + \mu F_e + F_3 \} e^{2\mu\theta} + F_4 + \mu F_e + F_5 ] e^{\mu\theta} + F_6 + F_{c2} \quad (5)$$

Fig. 4는 원형비드 상부의 자유물체도를 나타내고 있다.

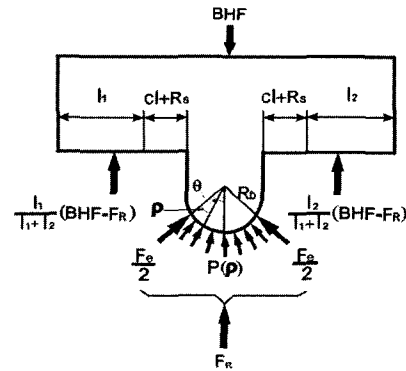


Fig. 4 Free body diagram of a male bead in a single circular drawbead

원형비드 상압력은 탄성력과 마찰력의 수직성분의 합으로 표현할 수 있으며, 수직력  $B$ 는 압력분포  $P(\rho)$ 와 관련하여 다음과 같이 표현된다.

$$B = \int F_0 e^{\mu\theta} \cos(\theta - \rho) d\rho = F_0 G(\mu, \theta) \quad (6)$$

여기서,  $\rho$ 는  $P(\rho)$ 의 부하각도,  $F_0$ 는  $\rho=0$ 일 때의 힘,  $\theta$ 는 박판과 비드 사이의 접촉 각을 각각 나타내고 있다. 따라서 원형비드의 상부 압력  $F_R$ 은 식(1)과 식(6)을 이용하여 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_R = F_0 G(\mu, \theta) + F_e \cos \theta \quad (7)$$

여기서,  $F_0$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_0 = [(F_{c1} + F_1)e^{\mu\theta} + \mu F_e + F_2 + F_3] \quad (8)$$

$F_R$ 은 식(7)과 식(3), 식(6), 식(8)을 이용하여 식(9)와 같이 유도된다.

$$F_R = \frac{F_e \cos \theta}{1 + 2\mu G(\mu, \theta) e^{\mu\theta l_1} / (l_1 + l_2)} + \frac{(F_1 e^{\mu\theta} + 2\mu BHF e^{\mu\theta} l_1 / (l_1 + l_2))}{1 + 2\mu G(\mu, \theta) e^{\mu\theta l_1} / (l_1 + l_2)} + \frac{\mu F_e + F_2 + F_3}{1 + 2\mu G(\mu, \theta) e^{\mu\theta l_1} / (l_1 + l_2)} \quad (9)$$

한편, 굽힘력 및 되굽힘력은 외부일이 재료를 변형시키는데 필요한 에너지와 같다고 가정하여 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_i = w \int_{t_n}^{t_i} dy \int_{\epsilon_i}^{\epsilon(y)} \sigma d\epsilon + w \int_{t_n}^{2t_n} dy \int_{\epsilon_i}^{\epsilon(y)} \sigma d\epsilon \quad (10)$$

여기서,  $w$ ,  $t_i$ ,  $t_n$ ,  $y$ 는 시편 폭, 굽힘 전의 박판 두께, 박판 밑면에서 중립면까지 거리, 박판 밑면에서 임의의 점까지의 거리를 각각 나타내고 있다. 식(10)에서  $\epsilon(y)$ 와  $\dot{\epsilon}(y)$ 는 각각 식(11)과 식(12)로 구할 수 있다.

$$\epsilon(y) = \epsilon_i + \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \ln \left( \frac{R_{eff} + y}{R_{eff} + t_n} \right) \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon}(y) = \epsilon(y) \frac{v}{t_i} \ln \left( \frac{R_{eff} + y}{R_{eff} + t_n} \right) \quad (12)$$

여기서,  $\epsilon_i$ ,  $R_{eff}$ ,  $v$ 는 각각 굽힘 전 변형률, 유효곡률 반경, 성형속도를 각각 나타내고 있다. 변형률 속도의 영향을 무시하고, 식(10), 식(11), 식(12)를 이용하면 굽힘력  $F_i$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_i = \frac{wK(R_{eff} + t_n)}{n+1} f \left( \epsilon_m \frac{v}{t_i} \frac{R_{eff} + t_i}{R_{eff} + t_n}, \epsilon_0, m \right) \cdot \left[ \int_0^{\frac{\sqrt{(1+2r)} \epsilon_m}{1+r}} \left\{ \left[ \epsilon_i + \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \zeta \right]^{1+n} - \epsilon_i^{1+n} \right\} e^\zeta d\zeta + \int_0^{\ln \frac{R_{eff} + 2t_n}{R_{eff} + t_n}} \left\{ \left[ \epsilon_i + \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \zeta \right]^{1+n} - \epsilon_i^{1+n} \right\} e^\zeta d\zeta \right] \quad (13)$$

여기서  $K$ ,  $m$ ,  $n$ 은 강도계수, 변형률 민감 지수, 변형률 경화지수를 각각 나타내고 있다. 한편,  $\zeta$ 와  $\epsilon_m$ 은 매개변수와 바깥면의 변형률을 각각 나타내고 있으며, 식(14)와 식(15)를 이용해 구할 수 있다.

$$\zeta = \ln \frac{R_{eff} + y}{R_{eff} + t_n} \quad (14)$$

$$\epsilon_m = \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \ln \left( \frac{1 + t_i/R_{eff}}{1 + t_n/R_{eff}} \right) \quad (15)$$

한편, 박판의 이동방향과 임의의 각을 이루고 있는 드로우비드의 접선 방향 저항력,  $DBRF_i$ 는 마찰력을 고려하여 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$DBRF_i = (F_{c1} + F_{c2} + \mu F_e + \mu F_R \frac{W}{l_1 + l_2 + W + 2R_s} + \mu F_e) \cos(\phi) \quad (16)$$

성형 후 유효 응력,  $\bar{\sigma}$ 와 유효변형률,  $\bar{\epsilon}$ 은 각각 Hill의 1948년 이론을 이용하여 식(17)과 식(18)로 유도되어 진다.

$$\bar{\sigma} = \left[ \frac{(1+2r)(\sigma_n - \sigma_t)^2 + (\sigma_n + \sigma_t)^2}{2(1+r)} \right]^{1/2} \quad (17)$$

$$\bar{\epsilon} = \left[ \frac{\bar{\sigma}}{K} \right]^{1/n} \quad (18)$$

여기서  $\sigma_n$ 과  $\sigma_t$ 는  $DBRF$ 의 법선 방향 응력과 접선 방향 응력을 각각 나타낸다. 법선 방향의 변형은 변형률 효과를 무시할 수 있다는 가정아래 식(19)와 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_n = \epsilon_b + \{ (1+r)\sigma_n - r\sigma_t \} \left[ \frac{\bar{\sigma}^{-(1-n)/n}}{K^{1/n}(1+r)} \right] \quad (19)$$

여기서  $\epsilon_b$ 는 굽힘과 되굽힘에 의한 변형이다.

접선 방향 변형률은 드로우비드가 접선 방향으로 곡률의 변화가 없고, 또한 재료가 미끄러지면서 비드를 통과한다고 가정할 수 있으므로, 다음의 식(20)과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_t = \{-r\sigma_n + (1+r)\sigma_d\} \left[ \frac{\bar{\sigma}^{-(1-n)/n}}{K^{1/n}(1+r)} \right] \quad (20)$$

### 2.2. 계단형 드로우비드

Fig. 5는 계단형 비드와 이를 통해 성형된 박판의 단면을 보여주고 있다.

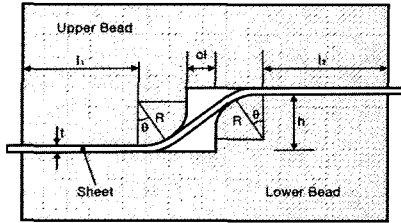


Fig. 5 Sectional view of a stepped drawbead and a formed sheet

계단형 비드의 저항력과 인출 변형률은 원형 비드와 유사한 방법을 통해 유도되어 질 수 있다. 먼저, 탄성력은 고정보 이론에 의해 식(21)과 같이 유도된다.

$$F_e = \frac{16Ew\delta t^3}{(4R+2cl)^3} \quad (21)$$

여기서,  $R$ 은 상부 비드의 반지름이고,  $\delta$ 는 식(2)를 통해 구할 수 있다.

Fig. 6은 계단형 비드에 의해 성형된 박판 형상을 보여주고 있다. 접촉면에서 마찰력은 원형 비드와 마찬가지로 블랭크 홀딩력과 상압력사이의 차에 의해 발생한다고 가정한다.

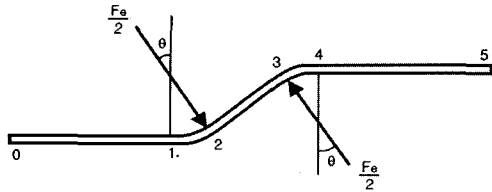


Fig. 6 Detail description of the sheet formed by a stepped drawbead

만약  $l_1$ 과  $l_2$ 가 각각 좌단과 우단의 플랜지 길이라고 한다면, 좌단과 우단의 플랜지에서 마찰력  $F_{c1}$ 과  $F_{c2}$ 은 식(22)와 식(23)과 같이 표현되며, 원형 비드와 유사한 방법으로 계단형 비드 저항력의 법선 방향요소  $DBRF_n$ 은 식(24)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_{c1} = 2\mu (BHF - F_R) \left[ \frac{l_1}{l_1 + l_2 + 2R} \right] \quad (22)$$

$$F_{c2} = 2\mu (BHF - F_R) \left[ \frac{l_2}{l_1 + l_2 + 2R} \right] \quad (23)$$

$$DBRF_n = [ \{ (F_{c1} + F_1)e^{\mu\theta} + F_2 + \mu F_e + F_3 \} e^{2\mu\theta} + F_4 + F_{c2} ] \quad (24)$$

Fig. 7은 계단형 비드의 상부 비드 자유물체도이며, 상압력  $F_R$ 은 식(25)로 표현된다.

$$F_R = B + (F_e/2) \cos \theta \quad (25)$$

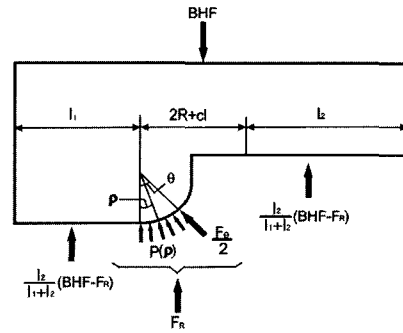


Fig. 7 Free body diagram of a male bead in a stepped drawbead

한편, 수직력  $B$ 는 식(26)으로 구할 수 있다.

$$B = \int_0^\theta F_0 e^{\mu\rho} \cos \rho d\rho = F_0 H(\mu, \theta) \quad (26)$$

여기서,  $F_0 = F_{c1} + F_1$ 을 의미하며, 이를 이용해 상부 압력  $F_R$ 은 식(27)과 같이 유도할 수 있다.

$$F_R = \frac{F_e/2 \cos \theta}{1 + 2\mu H(\mu, \theta) l_1 / (l_1 + l_2)} + \frac{[F_1 e^{\mu\theta} + 2\mu BHF l_1 / (l_1 + l_2)] H(\mu, \theta)}{1 + 2\mu H(\mu, \theta) l_1 / (l_1 + l_2)} \quad (27)$$

원형 비드와 마찬가지로 박판의 이동 방향과 임의의 각을 이루는 계단형 비드의 접선 방향 저항력 요소  $DBRF_t$  는 식(28)로 정의된다.

$$DBRF_t = \{F_{d1} + F_{d2} + \mu F_d\} \cos(\phi) \quad (28)$$

변형률 속도의 영향을 무시하면  $\epsilon_n$ 과  $\epsilon_t$ 는 원형 비드와 마찬가지로 식(19), 식(20)을 통해 구할 수 있다.

### 2.3 사각 드로우비드

일반적으로 금형 기술자들은 박판이 금형안으로 들어가 성형되지 않고 고정되는 스트레칭 상태를 원할 때 사각 비드를 사용한다. 따라서 본 연구에서는 사각 비드에 의해 고정된 박판은 매우 큰  $DBRF$ 를 가지고, 비드 인출 변형률은 없다고 가정한다.

## 3. 실험

본 연구에서는 유도된 수식을 검증하기 위해 단순인장 시험과 드로우비드 인출실험을 실시하였다. 먼저, 재료의 물성치를 구하기 위해 단순인장시험을 실시하였다.

$DBRF$ 와 비드 인출 변형률을 예측하기 위해서는 박판의 물성치와 마찰계수를 알아야한다. 이를 위하여 본 연구에서 드로우비드 마찰 실험을 통하여 필요한 마찰계수를 구하였으며, 원형 드로우비드와 계단형 드로우비드의 인출 실험을 통하여  $DBRF$ 과 드로우비드 인출 전변형률에 대한 데이터를 얻었다.

드로우비드의 정확한 드로잉특성을 얻기 위해 Nine(1978)이 고안한 고정드로우비드와 롤러 드로우비드로 마찰 시험을 수행하였고, 마찰계수는 쿨롬 마찰법칙을 사용하여 구하였다.

마찰력은 고정 드로우비드와 롤러 드로우비드 드로잉 실험에서 각각 얻은  $DBRF$ 의 오차이며 식(29)로 표현된다.

$$\mu = \frac{F_f}{N} = \frac{D_{f+d} - D_d}{\pi C_{f+d}} \quad (29)$$

$F_f$ ,  $N$ ,  $D_{f+d}$ ,  $C_{f+d}$ ,  $D_d$ 는 마찰력, 법선 방향 힘, 고정 드로우비드 드로잉 실험에서 측정된  $DBRF$ 와  $BHF$ , 롤러 드로우비드 드로잉 실험에서 얻은  $DBRF$ 이다. 식(29)와 실험으로부터 얻은 다양한 박판과 윤활에 따른 마찰계수들을 Table 1에 정리 했다.

**Table 1 Friction coefficients for various sheets and lubricants**

Sheet	Thickness (mm)	Lubricant	Friction Coefficient
SPC1	0.6	BWD-610	0.13
		P-340N	0.19
		DRY	0.17
	0.8	P-340N	0.18
		DRY	0.16
SPC3	0.8	P-340N	0.19
		DRY	0.16
SKY-AL TG25	1.0	P-340N	0.20
		DRY	Failure
SPCC	0.6	P-340N	0.153
		DRY	0.140
	0.8	P-340N	0.159
		DRY	0.146

재료 진행방향과 임의의 각도를 갖는 경사 드로우비드의 인출 특성을 파악하고, 수학적 모델의 타당성을 검증하기 위해 금속 이동방향과 60°, 75°, 90° 의 경사각을 가지는 여러 가지 드로우비드 금형 세트를 마찰 시험기에서 고정 비드가 설치되는 부분에 설치하여 드로우비드 인출실험을 시행하였다. 인출시험을 위해 제작되어진 여러 드로우비드 금형 세트의 차원을 Table 2에 정리했다.

**Table 2 Dimensions of drawbead die set for drawbead drawing tests**

BHF (N/mm)	Sheet Thickness (mm)	Lubricant	Draw-bead Angle, $\phi$ (deg)	DBRF (N/mm)	Pre-strain (%)
110	0.6	DRY	90	60.94	5.08
			75	61.72	3.78
			60	58.61	3.78
	0.8	DRY	90	69.74	6.12
			75	72.37	3.82
			60	67.32	4.47
165	0.6	P-340N	90	80.38	7.72
			75	84.49	5.08
			60	78.14	2.93
		DRY	90	79.21	6.84
			75	79.77	4.65
			60	80.91	4.65
	0.8	P-340N	90	90.55	8.13
			75	97.29	6.78
			60	89.83	5.78
		DRY	90	86.46	7.79
			75	91.91	6.45
			60	88.39	6.12

시편의 너비와 길이는 각각 45mm, 300mm 이다. 시편의 가장자리가 밀려 나올때 인출하중과 변위를 측정하였으며, 정상상태에 도달했을때의 인출하중을 *DBRF*로 가정한다. 다양한 성형조건과 금형 차원에 따른 원형 드로우비드의 *DBRF*와 비드 인출 전변형률을 Table 3에 정리하였다.

#### 4. 전문 모델

드로우비드의 수학적 모델은 금속의 특성, 성형 조건 등의 이유로 실제와는 다른 결과를 가져올 수도 있다. 수학적 모델에 의한 예측과 실험에 의한 결과 사이의 오류를 줄이기 위해 다중선형회귀법을 이용하였다. 다중선형회귀법으로 수정된 변수를 이용하여 더 정확한 드로잉 특성을 구하였다. 수정된 변수를 사용한 수학적 모델로 다양한 드로우비드 형상, 물성, 공정변수를 고려한 더욱 정밀한 성형을 예측하였다. 본 연구에서 다중선형회귀법에 의해 정정된 수학적 모델을 전문 모델이라고 한다.

**Table 3 Drawbead restraining force (DBRF) and bead-exit pre-strain of a circular drawbead for various forming conditions and die dimensions (material :SPCC, bead height:3mm, bead radius:3.8mm)**

Drawbead	Radius of Shoulder (mm)	Height (mm)	Drawbead Angle (deg)		
Circular Drawbead	3.8	6	90		
		4.5	75		
	4.5	3	60		
		2	60		
Stepped Drawbead	Radius(mm)	Height (mm)	Drawbead Angle (deg)		
	3	6	90		
	4		75		
60					
Double Circular Drawbead	Radius of Shoulder(mm)	Height (mm)	Drawbead Angle (deg)		
	3.8	6	90		
		4.5			
	4.5	3			
2					
Circular and-Stepped Drawbead	Circular Drawbead		Stepped Drawbead		Drawbead Angle (deg)
	Radius of Shoulder (mm)	Height (mm)	Radius (mm)	Height (mm)	
	4.5	3	3	6	
		6	4		
90					

#### 4.1 원형 드로우비드

수학적 예측과 실험에 의한 결과에서 드로우비드 형상과 공정변수의 영향을 연구하기 위해 다중선형회귀법을 이용하였다. 예측과 실험간의 *DBRF* 오차는 마찰이 주 원인 이기때문에, 전문 모델에서 사용될 수정 마찰계수는 수정계수 *a*를 도입하여 식(30)으로 나타낸다.

$$\mu' = a\mu \tag{30}$$

여기서 수정계수 *a*는 공정변수와 드로우비드 차원의 함수로 식(31)과 같이 표현된다.

$$a = \alpha + \beta \mu + \gamma k + \zeta R_s + \eta t + kBHF + \phi \Phi \tag{31}$$

식(31)에서 *R<sub>s</sub>*, *t*, *BHF*는 각각 하부비드의 반지름, 박판의 두께, 블랭크 홀딩력을 나타낸다. 식(31)에서  $\alpha, \beta, \gamma, \zeta, \eta, k, \phi$ 는 실험 결과에 의해 결정된 상수들이며, 각각 1.472, -1.951, -0.007, 0.012, -0.004, 0.096, -0.001이다.

#### 4.2 계단형 드로우비드

원형 드로우비드와 같은 방법으로 마찰계수  $\mu$ 는 식(32)로 수정된다.

$$\mu' = b\mu \tag{32}$$

수정계수 *b*는 다중회귀법에 의해 얻어졌으며 식(33)으로 나타낸다.

$$b = \alpha + \beta \mu + \zeta R + \eta t + kBHF + \phi \Phi \tag{33}$$

여기서 *R*은 드로우비드의 어깨 반지름이고,  $\alpha, \beta, \gamma, \zeta, \eta, k, \phi$ 는 실험치로부터 결정된 상수이며 각각 0.959, -1.136, -0.243, 0.079, -0.0002, -0.0001이다.

#### 4.3 조합형 드로우비드

이중 원형 드로우비드, 원형-계단형 드로우비드, 이중 계단형 드로우비드 등과 같은 조합형 드로우비드의 *DBRF*는 조합형 드로우비드를 구성하고있는 기본 드로우비드들의 *DBRF*를 합하여 표현할 수 있다고 가정한다. 조합형 드로우비드 C의 법선 저항력은 *DBRF<sub>Cn</sub>*, 접선 저항력은 *DBRF<sub>Ct</sub>* 라고 하면, 기본 드로우비드 A와 B의 합

으로 구성되고 식(34), 식(35)로 주어진다.

$$DBRF_{Cn} = DBRF_{An} + DBRF_{Bn} \quad (34)$$

$$DBRF_{Ct} = DBRF_{At} + DBRF_{Bt} \quad (35)$$

여기서  $DBRF_{An}$ ,  $DBRF_{At}$ ,  $DBRF_{Bn}$ ,  $DBRF_{Bt}$ 는 각각 드로우비드 A와 B의 법선과 접선 방향의 드로우비드 저항력이다.

또한, 조합형 드로우비드 C의 굽힘에 의한 변형률  $\epsilon_{Cb}$ 는 기본 드로우비드 A와 B의 변형률의 합으로 표현된다고 가정하면 식(36)으로 나타난다.

$$\epsilon_{Cb} = \epsilon_{Ab} + \epsilon_{Bb} \quad (36)$$

여기서  $\epsilon_{Ab}$ 와  $\epsilon_{Bb}$ 는 각각 기본 드로우비드 A와 B의 굽힘에 의한 변형률이다. 박관이 성형될 때 조합형 드로우비드 C의 법선 방향 변형률  $\epsilon_{Cn}$ 과 접선 방향 변형률  $\epsilon_{Ct}$ 는 식(37), 식(38)로 나타낸다.

$$\epsilon_{Cn} = \epsilon_{Cb} + \left\{ (1+r)\sigma_{Cn} - r\sigma_{Ct} \right\} \left[ \frac{\bar{\sigma}^{(1-n)/n}}{K^{1/n}(1+r)} \right] \quad (37)$$

$$\epsilon_{Ct} = \left\{ -r\sigma_{Cn} + (1+r)\sigma_{Ct} \right\} \left[ \frac{\bar{\sigma}^{(1-n)/n}}{K^{1/n}(1+r)} \right] \quad (38)$$

식(37)과 식(38)에서  $\sigma_{Cn}$ 과  $\sigma_{Ct}$ 은 각각 조합형 드로우비드의 법선과 접선 방향의  $DBRF$ 로부터 기인되는 응력들이다. Fig. 8은 조합형 드로우비드의 한 예를 보여 준다. 원형-계단형 드로우비드는 단일원형 드로우비드와 계단형 드로우비드로 나누어진다.

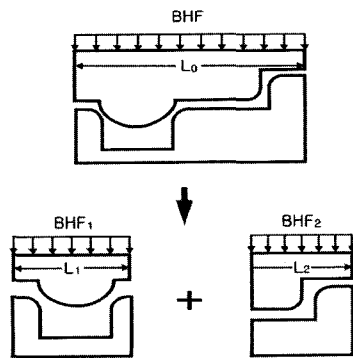


Fig. 8 Partition of a combined drawbead into basic drawbeads

기본 드로우비드 양방향에서  $BHF$ 를 각각  $BHF_1$ ,  $BHF_2$  라면, 이들은 기본 드로우비드 길이비와  $BHF$ 로부터 식(39), 식(40)과 같이 나타낼 수 있다.

$$BHF_1 = BHF \frac{L_1}{L_0} \quad (39)$$

$$BHF_2 = BHF \frac{L_2}{L_0} \quad (40)$$

여기서  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ 는 각각 조합형 드로우비드, 원형 드로우비드, 계단형 드로우비드의 길이이다.

## 5. 검증

개발한 드로우비드 전문모델의 신뢰성을 입증하기 위해 전문모델에서 예측한 드로우비드 저항력과 비드 인출 전변형률을 실험치와 비교하였다.

### 5.1 이중 원형 드로우비드

Fig. 9는 이중 원형 드로우비드의 단면이다.

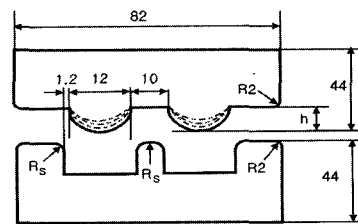


Fig. 9 Sectional view of a double circular drawbead die set

서로 다른 높이( $h=2, 3, 4, 5, 6\text{mm}$ )의 이중 사각 드로우비드의 4세트가 제작되었고, 다른 윤활제(P-340N, BWD-610)가 사용되었으며, 드로우비드 어깨부 반지름과 블랭크 홀딩력은 각각  $R_s = 3.8\text{mm}$ ,  $BHF = 156.8\text{N}$ 이었다. Fig. 10에서 여러 윤활 조건과 드로우비드 높이에 따른  $DBRF$ 는 전문모델의 예측치와 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다.

P-340N으로 윤활된 시편은 BWD-610으로 윤활된 시편보다  $DBRF$ 가 더 크다. 드로우비드 높이와  $DBRF$ 는 거의 선형적으로 비례한다는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 다른 윤활 조건과 드로우비드의 높이에서 전변형의 전문모델의 예측과 실험결과를 비교한 것이다. 인출시 전변



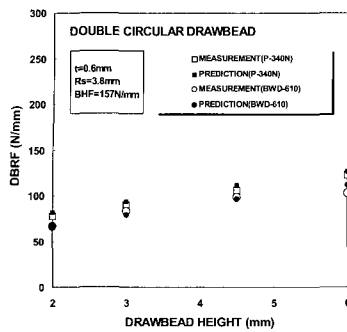


Fig. 10 Comparison of drawbead restraining forces for various lubricants and drawbead heights between prediction and measurement in a double circular drawbead

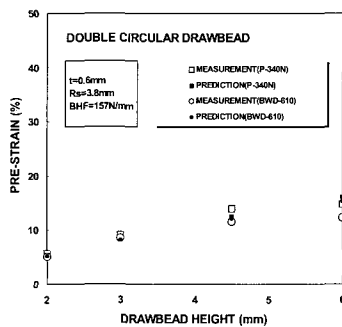


Fig. 11 Comparison of pre-strains for various lubricants and drawbead heights between prediction and measurement in a double circular drawbead

형률은 DBRF처럼 선형적으로 증가하지는 않지만 점진적으로 증가한다는 것을 알 수 있다

5.2 원형 계단형 드로우비드

Fig. 12는 원형 계단형 드로우비드 금형 세트의 단면이다.

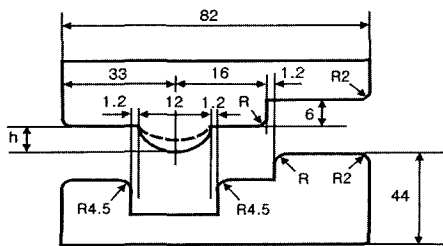


Fig. 12 Sectional view of a circular-and-stepped drawbead die set

원형 계단형 드로우비드의 차원과 공정 변수들은 다음과 같다.

드로우비드 높이( $h$ ) : 3mm, 6mm  
 계단형 드로우비드 어깨 반지름( $R$ ) : 3mm, 4mm  
 블랭크 홀딩력 : 230N/mm, 344N/mm  
 윤활제 : P-340N, BWD-610

Fig. 13은 윤활과 계단형 드로우비드 어깨의 반지름을 고려한 DBRF의 전문모델 예측치와 실험치를 비교한 것이다. 전문모델에 의한 예측은 실험결과와 잘 일치하며, P-340N으로 윤활된 시편의 DBRF는 BWD-610으로 윤활된 시편보다 조금 높다는 것을 알 수 있다.

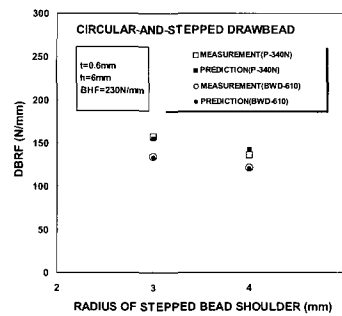


Fig. 13 Comparison of drawbead restraining forces for various lubricants and radii of stepped drawbead shoulder between prediction and measurement in a circular-and-stepped drawbead

Fig. 14는 윤활과 계단형 드로우비드 어깨의 반지름을 고려한 전변형률의 전문 모델 예측치와 실험치를 비교한 것이다. P-340N으로 윤활된 시편의 마찰계수는 BWD-610으로 윤활된 시편보다 훨씬 크고, P-340으로 윤활된 시편의 전변형률은 BWD-610으로 윤활된 시편보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

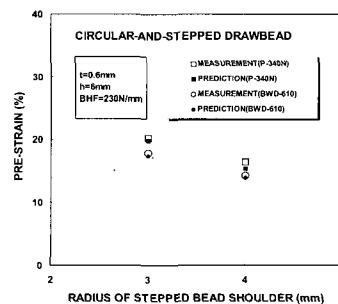


Fig. 14 Comparison of pre-strain for various lubricants and radii of stepped drawbead shoulder between prediction and measurement in a circular-and-stepped drawbead

## 6. 결 론

본 연구에서는 박판이 재료의 이동방향과 임의의 각도를 이루는 드로우비드를 통과할 때 필요한 드로우비드 저항력과 비드 인출 전변형률을 예측할 수 있는 드로우비드 모델을 제안하였다. 이 드로우비드 모델의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

(1) 금속의 이동방향과 임의의 각도를 가진 기본 드로우비드의 드로우비드 저항력과 비드 인출전변형률을 예측할 수 있는 드로우비드 모델을 연구하였다.

(2) 조합형 드로우비드 모델의 드로우비드 저항력은 기본 드로우비드의 드로우비드 저항력을 합하여 표현할 수 있다.

(3) 드로우비드의 수학적 모델과 실험치로부터 각각 얻은 드로우비드 저항력의 오차는 마찰이 주원인이며, 다중선형회귀법으로 수정된 마찰계수는 더욱 정확한 예측을 위해 전문 모델에 사용되었다.

## 후 기

이 논문은 2001년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Nine, H.D., 1978. Drawbead forces in sheet metal forming .Mechanics of Sheet Metal Forming. pp. 179~211.
- (2) Nine, H.D., 1982. New drawbead concepts for sheet metal forming. J. Appl. Metal Working 2 (3), pp. 185~192.
- (3) Wang, N.M., 1982. A mathematical model of drawbead forces in sheet metal forming. J. Appl. Metal Working 2 (3), pp. 193~199.
- (4) Levy, B.S., 1983. Development of a predictive model for drawbead restraining force utilizing work of Nine and Wang. J. Appl. Metal Working 3 (1), pp. 38~44.
- (5) Stoughton, T.B., 1988. Model of drawbead forces in sheet metal forming. Proceedings of the 15th IDDRG, Dearborn, USA and Toronto, Canada. pp. 205~215.
- (6) Wang, N.M, Shah, V.C., 1991. Drawbead design and performance. J. Mater. Shaping Tech. 9 (1), pp. 21~26.
- (7) Demeri, M.Y., 1993. Drawbeads in sheet metal forming. J. Mater. Engng. Perf. 2 (6), pp. 863~866.
- (8) Sunaga, H., Yoneda, K., Makinouchi, A., 1996. Finite element modeling of drawbead in sheet metal forming. Numerical Simulations of 3-D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET'96). Michigan, USA, pp. 186~190.
- (9) You, Y., Hong, P.Y., Yu, R.X., 1998. Calculation of drawbead restraining forces associated with kinematics hardening rule. Simulation of Material Processing : Theory, Methods and Applications (NUMIFORM'98), Enchede, Netherland, pp. 905~910.
- (10) Meinders, M., Geijselaers, H.J.M., Hu tick, J., 1998. Implementation of plastic thickness strain in an equivalent drawbead model based on a penalty constraint method. Simulation of Material Processing : Theory, Methods and Applications (NUMIFORM'98). Enchede, Netherland. pp. 911~916.
- (11) Weinmann, K.J., Sanchez, L.R., 1988. A general computer model for plane strain sheet flow and its application to flow between circular drawbeads. Proc. 15th IDDRG, Dearborn, USA and Toronto, Canada, pp. 217~226.
- (12) Kim, Y.S., Kim, K.S., 1991. A study on friction-constraint of drawbead ( I ). Proc. Korean Soc. Mech. Engng. Korea, pp. 120~124.
- (13) Cao, J., Boyce, M.C., 1993. Drawbead penetration as a control element of material flow. SAE930517. Sheet-Metal and Stamping Symposium, Detroit.
- (14) Kojima, M., 1993. Effect of drawbead on press-load property in deep drawing of cylindrical shell. J. Jpn. Soc. Technol. Plast. 34, pp. 1009~1018
- (15) Carleer, B.D., Meinders, T., Hu tick, H., 1996. Equivalent drawbead model in finite element simulations. Numerical Simulations of 3-D Sheet Metal forming Process (NUMISHEET'96), Michigan, USA, pp. 25~31.

- (16) Ujohara, S., Frubayashi, T., Sakamoto, T., 1998. Simulation of forming severity on autobody panels using a CAD system-analysis of draw bead and its control. Proceedings of the 15th IDDRG. Dearborn, USA and Toronto, Canada, pp. 243~250.