

## 박판성형공정의 유한요소해석을 위한 드로우비드 전문모델 개발 (2부: 모델링)

금영탁\*, 이재우\*\*, 구본영\*\*\*

\* 한양대학교, \*\* 삼성중공업, \*\*\* 한양대학교 대학원

### Development of Drawbead Expert Models for Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes (Part2: Modeling)

Y.T. Keum\*, J.W. Lee\*\*, B.Y. Ghoo\*\*\*

\* Han-Yang University,

\*\* Samsung Heavy Industries Co., Ltd.,

\*\*\* Graduate School, Han-Yang University

#### Abstract

An expert drawbead model is developed to model a cranky drawbead in the finite element analysis of stamping processes. The expert model calculates the drawbead restraining forces (DBRF's) and bead-exit thinning, which are boundary conditions.

DBRF's are calculated by considering bending force, unbending force, and friction force in order. Bead-exit thinning are due to the bending and tension during the deformation. The DBRF's and thinning computed from the mathematical model for the basic beads are compared with measurements and correction factors compensating for the differences are found using the multiple linear regression method. The composition beads are assumed to be a combination of basic beads so that the DBRF's and bead-exit thinning are computed to the sum of those of basic beads.

**Key Words** : Expert Model, Drawbead Model, Sheet Metal Forming Analysis, Virtual Process

#### 1. 서론

본 연구에서는 드로우비드 인출특성이 성형공정해석에 알맞게 정의되는 드로우비드 전문모델을 개발하였다. 이를 위해 먼저, 비드 조합의 기본형이 되는 원형비드와 계단형비드에 대하여 드로우비드 저항력과 비드 인출시 변형률을 구하는 이론식을 제안하고, 실험결과를 바탕으로 한 다중 회귀분석을 통해 이론식을 보정하고, 원형비드와 계단형비드의 조합으로 이루어지는 조합형 비드의 드로우비드 저항력과 변형률을 기본형비드의 이론식에서 얻은 드로우비드 저항력과 변형률의 합으로 구하였다. 본 연구의 타당성과 유효성을 검증하기 위하여 이중 원형 비드와 원형-계단형 비드에 대하여 이론 예측치와 실험 결과를 비교하고, 개발된 전문모델을 유한요소 프로그램에 도입하고 자동차 플로어 패널, 후드 내부 패널의 단면을 시뮬레이션하여 측정치와 비교하였다.

#### 2. 수학적 모델링

본 연구에서 재료의 변형률은 굽힘의 영향이 지배적이고 인장에 의한 영향은 비드부를 빠져나올 때

드로우비드 저항력만큼 인장력을 받는 것으로 가정한다. 재료는 Hollomon의 가공경화법칙을 따르며 평면변형 상태로 가정하였다. 굽힘에 의한 인출방향 변형률은 굽힘의 정도에 비례하고 굽힘의 정도는 재료 바깥 부분의 유효 변형률  $\epsilon_m$ 으로 표시될 수 있으므로,  $i$ 번째 굽힘 후의 변형률과 두께는 다음과 같이 가정한다.

$$\epsilon_{i+1} = \epsilon_i + \gamma \epsilon_m, \quad t_{i+1} = t_i e^{-\gamma \epsilon_m} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_i$ ,  $t_i$ 는  $i$ 번째 굽힘이 일어나기 전의 변형률과 두께이며,  $\gamma$ 는 가공경화 축척 상수이다. Laukonis의 연구에 의하면 가공경화 축척 상수  $\gamma$ 는 굽힘, 되굽힘이 너무 과도하지 않은 범위에서는 0.25의 값이 적당한 것으로 알려졌다<sup>(1)</sup>.

## 2.1 기본형 비드

원형 비드와 계단형 비드는 드로우비드 전문모델의 기본형비드가 된다. 원형 비드와 계단형 비드의 일반적인 형상과 성형된 소재의 모양이 Fig.1과 Fig.2에 나타나 있다. 곡률 부분에서의 소재의 거동은 접촉이 시작되는 점에서 유효곡률만큼 굽혀지고, 그 곡률을 유지하며 접촉각만큼 미끄러진 다음, 접촉이 끝나는 점에서 되굽힘에 의해 편평한 모양을 회복한다고 가정한다.

### 2.1.1 드로우비드 저항력

원형 비드에 의해 소재가 변형된 모양은 Fig.3과 같고, 이 때 드로우비드 저항력, DBRF는 다음과 같이 표현된다.

$$DBRF = [ \{ (F_{c1} + F_1)e^{\mu\theta} + F_2 + \mu F_e + F_3 \} e^{2\mu\theta} + F_4 + \mu F_e + F_5 ] e^{\mu\theta} + F_6 + F_{c2} \quad (2)$$

계단형 비드에 의해 소재가 변형된 모양은 Fig.4와 같고, 계단형 비드의 드로우비드 저항력, DBRF는 원형 비드와 마찬가지로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$DBRF = [ (F_{c1} + F_1)e^{\mu\theta} + F_2 + \mu F_e + F_3 ] e^{\mu\theta} + F_4 + F_{c2} \quad (3)$$

여기서  $F_i$ 는  $i$ 지점에서의 굽힘력 혹은 되굽힘력이며,  $F_e$ 는 탄성복원력을 나타낸다.

### 2.1.2 변형률

변형률 속도의 영향을 무시하면 원형비드와 계단형 비드의 드로우비드 인출시 인출방향의 변형률,  $\epsilon$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$\epsilon = \epsilon_b + \left[ \frac{\sigma_p}{K(2/\sqrt{3})^{n+1}} \right]^{1/n} \quad (4)$$

여기서  $\sigma_p$ 는 드로우비드 인출시 소재가 받는 응력이며,  $\epsilon_b$ 는 비드부에서의 굽힘, 되굽힘에 의한 변형률이다.

### 2.1.3 이론치 보정

실험측정치와 이론치의 오차를 입력 변수들에 대하여 다중선형회귀분석하면 실험치와 이론치의 오차는 마찰계수에 가장 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 따라서 원형 비드에서 마찰계수의 영향을 적절히 고려하기 위한 보정계수  $a$ 를 다음과 같이 도입하였다.

$$\mu' = a \mu \quad (5)$$

여기서 드로우비드 저항력을 실험치와 비교하여 구한 보정계수  $a$ 는 다음과 같다.

$$a = \alpha - \beta \mu - \gamma h - \kappa R_s + \lambda t - \chi BHF \quad (6)$$

여기서  $\mu$ 는 마찰계수,  $h$ 는 비드의 높이,  $R_s$ 는 비드홈견부의 곡률반경,  $t$ 는 소재의 두께, BHF는 블랭크 가압력이다. 그리고  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\kappa$ ,  $\lambda$ ,  $\chi$ 는 상수이다.

계단형 비드에서도 원형 비드에서와 마찬가지로 마찰계수의 영향을 적절히 고려하기 위한 보정계수  $b$ 를 도입하면

$$\mu' = b \mu \quad (7)$$

이고, 드로우비드 저항력을 실험치와 비교하여 구하여진 보정계수  $b$ 는 다음과 같다.

$$b = a - \beta \mu - \gamma BHF - \kappa t + \lambda R \quad (8)$$

여기서 R은 비드 곡률부의 반경이다.

## 2.2 조합형 비드

조합형비드 C가 기본형 비드 A와 B로 구성되어 있다면 조합형 비드 C의 드로우비드 저항력  $DBRF_C$ 와 굽힘에 의한 변형률  $\epsilon_C$ 는 다음과 같다.

$$DBRF_C = DBRF_A + DBRF_B \quad (9)$$

$$\epsilon_C = \epsilon_A + \epsilon_B \quad (10)$$

여기서  $DBRF_A$ ,  $\epsilon_A$ 는 기본형 비드 A의 드로우비드 저항력과 굽힘에 의한 변형률이고  $DBRF_B$ ,  $\epsilon_B$ 는 기본형 비드 B의 드로우비드 저항력과 굽힘에 의한 변형률이다.

이중 원형 비드를 두 개의 원형 비드로 나눈 그림이 Fig.5에 나타나 있다. 좌, 우측 원형 비드에 가해지는 블랭크 가압력 BHF1, BHF2는 이중 원형 비드에 가해지는 블랭크 가압력 BHF를 길이 비로 나눈 값으로 가정하였다. SPC1(0.6t)에 P-340N을 도포한 후 하형비드 홈 견부반경 3.8mm, 블랭크 가압력 156.8N/mm일 때 이중 원형 비드에서 인출실험한 결과와 예측치를 Table 1에 정리하였다.

원형-계단형 조합 비드를 원형 비드와 계단형 비드로 나눈 그림이 Fig.6에 나타나 있다. 원형 비드에 가해지는 블랭크 가압력 BHF1과 계단형 비드에 가해지는 블랭크 가압력 BHF2는 이중원형비드에서와 같이 전체의 블랭크 가압력 BHF를 각 비드의 길이 비로 나눈 값으로 가정하였다. SPC1(0.6t)에 원형 비드의 높이 6mm, 블랭크 가압력 230.2N/mm인 조건에서 윤활제를 달리 도포하고 인출한 경우에 드로우비드 저항력과 비드인출시 변형률을 실험결과와 예측치를 비교하여 Table 2에 정리하였다.

## 3. 적용 사례

개발된 전문모델의 유용성과 타당성을 검증하기 위하여 원형-계단형 조합비드를 가진 자동차 후드 내부 패널의 성형공정을 시뮬레이션 하였다. Fig.7과 Fig.8은 각각 원형-계단형 비드를 가진 자동차 후드 내부 패널의 단면 형상과 금형 형상 데이터를 나타낸다. 원형-계단형 조합비드의 형상은 원형 비드부에서 비드높이 5mm, 하형비드견부반경 8mm, 계단형 비드부에서 비드높이 4mm, 상형비드견부반경 7.5mm, 하형비드견부반경 5mm 이다. 전문모델로 계산된 드로우비드 저항력은 67.7N/mm이며 비드 인출 전변형률은 10.7% 이다. 최종 편치진행거리는 43.7mm이며 사용된 박판의 기계적 물성치는 Table 3에 나타내었다.

Fig.9는 두께변형률 분포를 나타내며 점 A는 드로우비드 위치이다. 드로우인량은 각각 좌측에서 23.3mm, 우측에서 0.99mm가 발생하였다. 전문모델을 적용한 경우에 비드를 통과한 박판의 두께변형률은 10.9%, 시행착오 방법으로 비드인출 전변형률을 고려하지 않은 경우에 1.4%로서 큰 차이를 보이고 있으며, 실제 측정 결과는 10.5%로써 본 연구에서 개발한 드로우비드 전문모델을 도입한 유효요소 해석 결과가 블랭크 홀더부근의 변형을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 결론

- (1) 원형 비드와 계단형 비드의 이론식의 오차는 마찰계수에 크게 영향을 받는다. 따라서 마찰계수의 영향을 실제적으로 평가할 수 있는 보정계수를 도입함으로써 보다 정확한 드로우비드 저항력과 비드 인출 변형률을 구할 수 있었다.
- (2) 원형 비드의 드로우비드 저항력과 변형률의 합을 이용하여 이중 원형 비드의 드로우비드 저항력과 변형률을 구할 경우 드로우비드 저항력은 실험치와 잘 일치하나 변형률은 그 경향이 다소 달라 새로운 보정이 필요하다.
- (3) 원형 비드와 계단형 비드의 드로우비드 저항력과 변형률의 합을 이용하여 원형-계단형 조합 비드의 드로우비드 저항력과 변형률을 구할 경우 실험치와 잘 일치한다.

(4) 유한요소 프로그램에 적용된 전문모델은 드로우비드 저항력과 비드 인출 전변형률을 수치적으로 잘 묘사하여 해석에 적절한 경계조건을 제공하며, 시행착오 방법으로 드로우비드 저항력만을 지정하여 경계조건을 결정하는 것보다 정확성과 효율성에서 더 효과적이었다.

## 후 기

본 논문은 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME96-E-36)에 의하여 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] T. B. Stoughton, 1988, "Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", 15th IDDRG, pp. 205~215.
- [2] T. Frubayashi, S. Ujihara and T. Sakamoto, 1988, "Simulation of Forming Severity on Autobody Panels Using a CAD system - Analysis of Drawbead and its Control ", 15th IDDRG, pp. 243~250.
- [3] 박원배, 김창만, 전기찬, 김낙수, 서대교, 1995, "계단형 드로우비드의 인출특성에 관한 유한요소해석 및 실험", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp.128~135.
- [4] 최태훈, 허훈, 이장희, 박춘달, 1995, "탄소성유한요소법에 의한 드로우비드 성형해석", 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp.196~202.
- [5] H. D. Nine, 1978, "Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", Mechanics of Sheet Metal Forming, pp. 179~211.

Table 1 Experimental results for double bead (SPC1, 0.6t, h=6, BHF=156.8N/mm)

Bead height (mm)	DBRF (N/mm)		Thinning (%)	
	Measurement	Prediction	Measurement	Prediction
2	77.24	81.67	5.64	5.28
3	89.89	93.56	9.06	8.29
4.5	105.46	111.54	13.93	12.54
6	122.46	126.42	14.79	16.03

Table 2 Experimental results for circular-step bead (SPC1, 0.6t, h=6, BHF=230.2N/mm)

Lubricant	Bead radius (mm)	DBRF (N/mm)		Thinning (%)	
		Measurement	Prediction	Measurement	Prediction
P-340N	3	157.60	155.56	20.18	19.77
	4	136.71	143.02	16.36	15.34
BWD-610	3	134.58	133.60	17.86	17.36
	4	121.85	120.74	14.18	13.82

Table 3 Material properties of sheet

Properties	Values
Plastic anisotropy parameter	1.72
Hill's yield function parameter	2.0
Strength coefficient (MPa)	489
Work-hardening exponent	0.228
Yield stress (MPa)	169
Young's Modules (GPa)	1.39
Sheet thickness (mm)	0.79
Coulomb friction coefficient	0.12

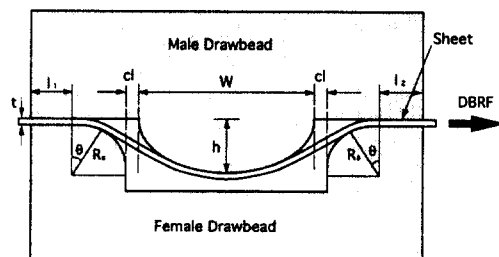


Fig.1 Sectional view of the blank sheet formed by a single bead.

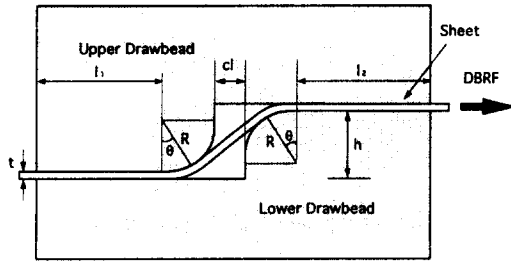


Fig.2 Sectional view of the blank sheet formed by a step bead.

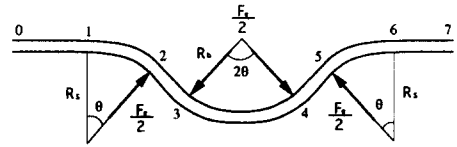


Fig.3 Detail description of the sheet formed by a single circular bead.

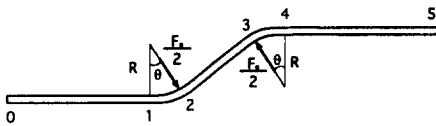


Fig.4 Detail description of the sheet formed by a step bead.

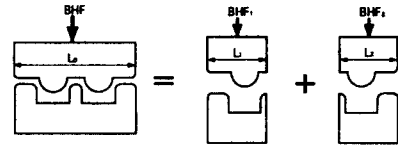


Fig.5 Partition of a double circular bead into two single circular beads.

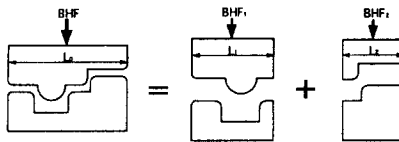


Fig.6 Partition of a circular-step bead into a single circular bead and a step bead.

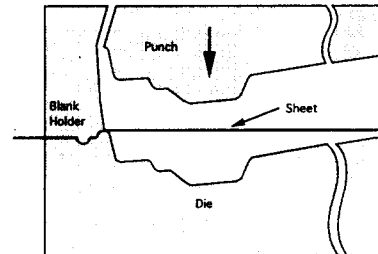


Fig.7 Sectional view of an inner hood panel.

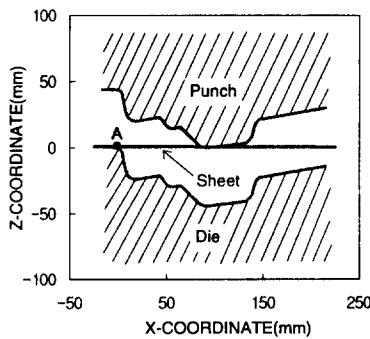


Fig.8 Tooling geometry of an inner hood panel.

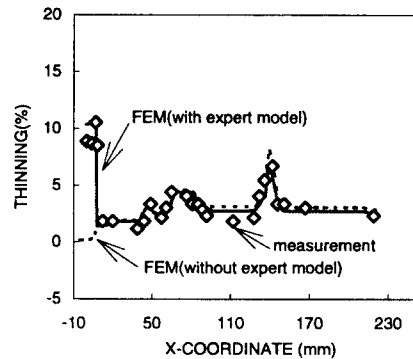


Fig.9 Comparison of strain distribution among FEM simulation and measurement.