

## 드로우비드력 측정용 실험금형

문성준<sup>1</sup> · 이명규<sup>2</sup> · 김영탁<sup>#</sup>

# Experimental Drawbead Dies for Measuring Drawbead Forces

S. J. Moon, M. G. Lee, Y. T. Keum

(Received May 8, 2008)

### Abstract

A drawbead die for the experimental determination of drawbead forces was newly introduced in this paper. While the conventional Nine's drawbead die inevitably includes effects of a blank holding force on the measured drawbead forces, the new drawbead die excludes it by removing the blank holder contact in the dieface. Therefore, the new drawbead die can provide more realistic drawbead forces without considering somewhat arbitrary effect of blank holder with the computational procedure of forming process. The drawbead opening force and restraining force obtained by adopting the two experimental dies were compared for the validation of accuracy in the FEM simulation of automotive fender forming process. The compared section strains and draw-ins confirmed that the present drawbead die provides better drawbead forces for an accurate FEM simulation of sheet metal forming process.

**Key Words:** Drawbead, DBRF, DBOF, Circular Drawbead, Elliptical Drawbead, Square Drawbead, Step Drawbead, Drawbead Forces

### 1. 서 론

프레스 성형공정에서 블랭크 홀더면의 드로우비드는 스탬핑 공정 중 재료의 흐름을 제어하고 장력을 부여하여 성형 중 발생하는 주름, 파단, 스프링백 등의 결함을 방지한다. 그러나 일차적으로 설계된 드로우비드는 박판성형 공정 중 마찰, 블랭크 홀딩력, 금형의 형상 등의 공정변수와 강판의 재질, 두께 등의 재료적 변수에 의해 트라이아웃 과정에서 대부분 수정된다. 따라서 금형설계 단계에서 많은 시간을 소요하는 금형 트라이아웃 기간을 줄이기 위하여 드로우비드에 대한 설계자의 경험적 지식과 실험, 시뮬레이션을 통해 얻은 드로우비드 데이터베이스를 금형설계에 적용하여야 한다.

또한 다양한 형상과 치수를 가진 드로우비드 금형이 박판에 미치는 영향을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 드로우비드의 형상과 치수에 의한 굽힘, 되굽힘 효과 등을 세밀히 고려하여 드로우비드력을 구하여야 한다.

이러한 드로우비드에 관한 연구는 Nine에[1~2] 의해 드로우비드 실험이 시작된 후, Wang은[3] 원형비드의 수학적 모델을 제시하였고, Levy는[4] 저항력을 예측하기 위하여 가상일의 원리를 도입하였다. 또한, Triantafyllidis 등은[5~6] 2차원 셀 요소로 드로우비드 시뮬레이션을 하여 이를 실험과 비교하였고 Stoughton은[7] 드로우비드력을 계산하는 수학적 모델을 제시하고 Nine의 실험을 통해 검증하였다. Carleer 등은[8] 유한요소 해석을 위한 등가 드로우비드 모델을 제안하였으며, Keum 등은

1. 한양대학교 일반대학원, 자동차공학과

2. 한국기계연구원, 재료연구소

# 교신저자: 한양대학교 기계공학부, ytkeum@hanyang.ac.kr

[9] FEM 해석을 위한 드로우비드의 수학적 전문모델을 제안하였다.

본 연구에서는 블랭크 홀딩력을 배제하고 드로우비드의 형상과 크기로만 드로우비드력을 구할 수 있는 실험금형으로부터 드로우비드력을 측정하고, 이 측정치들을 자동차 펜더 성형해석에 적용하여 해석결과의 정확도를 보여줌으로써 새로운 실험금형의 우수성을 보이고자 한다.

## 2. 드로우비드 실험금형

### 2.1 Nine 금형

Nine의[1~2] 드로우비드 실험금형에서 박판은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 1구역(Region1)의 좌측 블랭크 홀딩 면에서 일정한 홀딩력을 받으며 드로우비드 금형 내부로 드로인 되고, 2구역(Region2)의 하형 다이의 어깨반경과 상형 다이의 드로우비드 형상과 높이에 따라 굽힘력을 받고, 3구역(Region3)의 우측 블랭크 홀딩 면을 거쳐 인출된다. Stoughton은[7] Nine의 드로우비드 실험금형에서 박판이 인출될 때 박판의 굽힘 효과, 드로우비드에 의한 저항력, 블랭크 홀딩력 등을 고려하여 드로우비드력을 평가하였다. 드로우비드를 통과하여 인출되는데 필요한 일과 박판이 굽혀지고 마찰력을 극복하는데 필요한 일이 같다는 가정하에 상압력과 인출력을 계산하였다. 드로우비드 상압력은 시편이 금형을 들어올리는 힘으로 탄성복원력과 시편과 금형 사이에 작용하는 면 압력의 수직성분 힘의 합이다. 드로우비드 인출력은 시편이 성형을 위해 인출 되는 과정에 발생하는 마찰 저항력으로써 마찰력과 굽힘력, 되 굽힘력의 수평성분 힘의 합이다. 예로써, Fig. 1과 같은 원형 드로우비드에서 인출력(Drawbead restraining force: DBRF)과 상압력(Drawbead opening forces: DBOF)은 식(1) 및 식(2)와 같고, 이들은 Fig. 1의 각 구간에서 마찰력, 굽힘력, 되 굽힘력으로부터 계산된다. 식(1)과 식(2)에서  $\mu$ 는 마찰계수,  $F_h$ 는 블랭크 홀딩력(BHF),  $l_1$ 과  $l_2$ 는 블랭크 홀더 양쪽 면의 길이,  $G$ 는 굽힘에 의한 수직방향 변위,  $F_e$ 는 소재의 탄성 복원력이다.

$$DBRF = [ \{ (F_{c1} + F_1)e^{\mu\theta} + F_2 + \mu F_e + F_3 \} e^{2\mu\theta} + F_4 + \mu F_e + F_5 ] e^{\mu\theta} + F_6 + F_{c2} \quad (1)$$

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

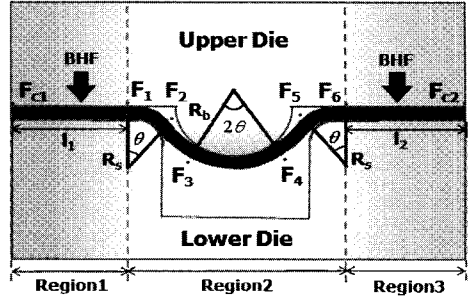


Fig. 1 Free body diagram in a Nine's circular drawbead die set for measuring drawbead forces

### 2.2 New 금형

박판 성형해석에서 일반적으로 사용되는 등가 드로우비드력은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 2구역(Region2)에서 박판이 드로우비드 실험금형 내부로 드로인 될 때 하형 다이의 어깨반경에 의해 굽힘력을 받기 시작하는 지점에서 상형다이의 드로우비드 형상과 높이에 따른 굽힘력을 받은 후 하형 다이의 드로우비드 어깨반경에 의해 마지막으로 굽힘력을 받는 지점까지 힘의 합이다. 그러나, 앞서 소개한 Nine 실험금형은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 블랭크 홀딩력의 영향을 받는 1구역(Region1)의 좌측 블랭크 홀더면에서 마찰력  $F_{c1}$ 과 3구역(Region3)의 우측 블랭크 홀더면에서 마찰력  $F_{c2}$ 가 드로우비드력에 포함되어 측정됨으로써 보정이 필요하다. 이때,  $F_{c1}$ 과  $F_{c2}$ 는 1구역과 3구역에서 박판의 표면과 상형, 하형 다이의 표면이 맞닿아 있어 발생하는 수직력에 대한 마찰저항력으로 맞닿는 표면적의 크기와 마찰계수의 변화는 Nine 실험금형의 보정을 위해 정확하게 규명되어야 한다. 그러나, Nine 실험금형에서  $F_{c1}$ 과  $F_{c2}$ 가 작용하는 1구역과 3구역의 표면적은 크기가 클수록 드로우비드력에 큰 영향 주는데 Nine 실험금형의 경우 드로우비드를 측정하는 전 구역에서 가장 큰 표면적을 가진다. 또한, 프레스 성형에서 마찰계수에 영향을 주는 마찰인자들 중 박판과 드로우비드 금형의 표면 거칠기는 측정하는 면과 측정 길이에 따라 다른 값을 가지므로 실험금형마다 일정한 값을 가질 수 없다. 결국, 1구역과 3구역에

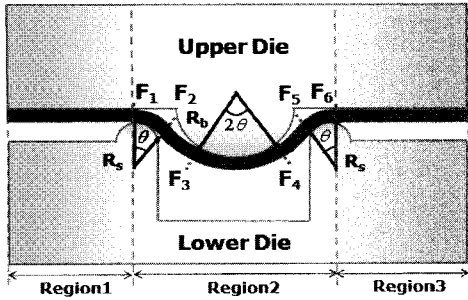
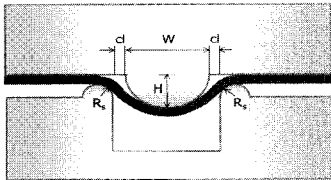
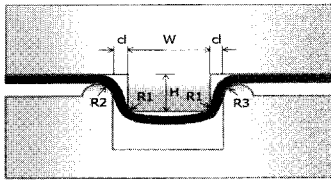


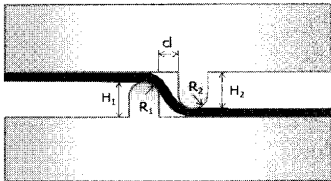
Fig. 2 Free body diagram in a new circular drawbead die set for measuring drawbead forces



(a) Circular / Elliptical Drawbead



(b) Square Drawbead



(c) Step Drawbead

Fig. 3 New experimental drawbead die sets for measuring drawbead forces

$$DBOF = \{F_c \cos \theta + (F_1 e^{\mu\theta} + \mu F_c + F_2 + F_3)G(\mu, \theta)\} \quad (3)$$

$$DBRF = \{(F_1 e^{\mu\theta} + F_2 + \mu F_c + F_3) e^{2\mu\theta} + F_4 + \mu F_c + F_5\} e^{\mu\theta} + F_6 \quad (4)$$

서 박판과 금형이 맞닿는 표면적의 크기와 표면 거칠기에 따른 마찰계수의 변화로 인해 Nine 실험금형을 정확하게 보정하기는 어렵다. 따라서, New 실험금형은 Fig. 2와 같이 기존 Nine 실험금형의 1

구역과 3구역에서 박판이 하형 다이와 닿지 않도록 마찰 면을 배제하였다. 이로써 2구역에서  $F_1$ 에서  $F_6$ 까지의 힘의 합을 통해 드로우비드력을 구하였다. 예로써, Fig. 2와 같은 원형 드로우비드에서 사용된 New 실험금형의 상압력과 인출력은 식(3) 및 식(4)와 같다.

본 연구에서 드로우비드 실험을 위해 제안하는 원/타원, 사각, 계단 드로우비드의 New 실험금형은 Fig. 3과 같다.

### 2.3 Nine 실험과 New 실험의 비교

Nine 실험금형에서 원형 드로우비드의 경우 블랭크 홀딩력에 의해 가중되는 드로우비드 상압력과 인출력은 식(5), (6)과 같다. 여기서 Nine 실험금형의 원형 드로우비드(Fig. 4 참조) 상압력과 인출력에 식(5)과 식(6)을 통해 계산된 블랭크 홀딩력에 의해 가중되는 드로우비드 상압력과 인출력을 빼주어 계산하면 New 실험금형의 드로우비드력과 직접 비교할 수 있다. 원형 드로우비드의 경우, Nine 실험금형과 본 연구에서 제안하는 실험금형의 드로우비드력은 상압력은 16N/mm, 인출력은 60N/mm 이상의 차이를 보였다(Table 1 참조).

$$DBOF_{BHF} = \{2\mu G(\mu, \theta) F_h e^{\mu\theta} (l_1 / l_1 + l_2)\} / \{1 + 2\mu G(\mu, \theta) e^{\mu\theta} (l_1 / l_2 + l_2)\} \quad (5)$$

$$DBRF_{BHF} = [\{2\mu(F_h - F_R)(l_1 / l_1 + l_2)\} e^{\mu\theta} / e^{\mu\theta} + 2\mu(BHF - F_R)(l_2 / l_1 + l_2)] \quad (6)$$

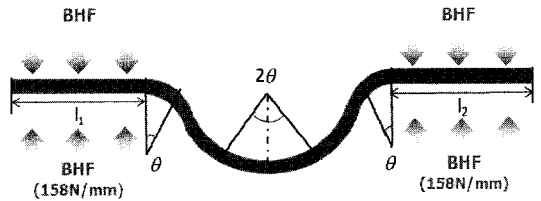


Fig. 4 Blank holding force(BHF) in Nine's experimental drawbead die

Table 1 Comparison of drawbead forces between Nine's and new experimental dies

Experimental Model	DBOF (N/mm)	DBRF (N/mm)
Nine	89.1	134.3
New	73.8	72.1

### 3. 검증

#### 3.1 펜더 성형해석

New 실험금형의 타당성을 검증하기 위하여 상용 프로그램인 Pam-Stamp를 통해 자동차 펜더 패

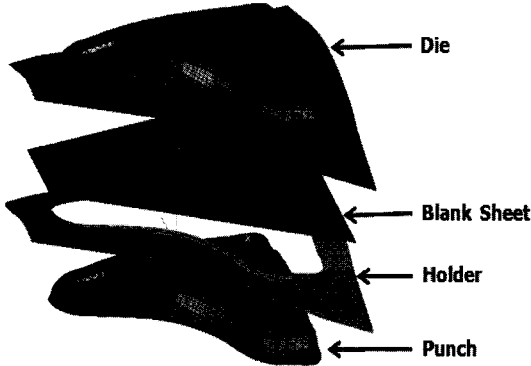


Fig. 5 Modeling of tools for FEM analysis of fender draw forming process

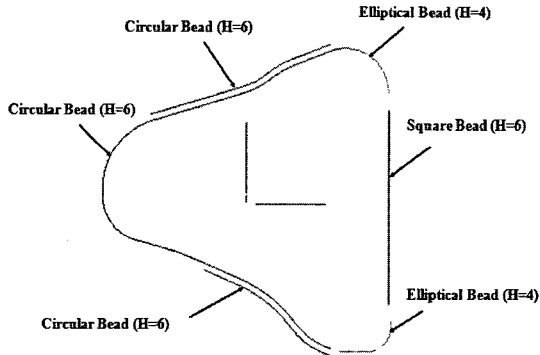
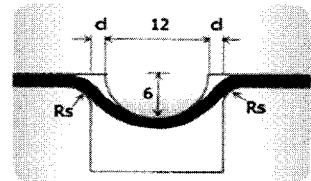


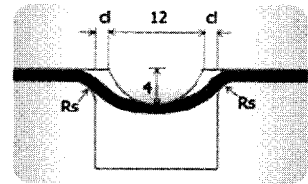
Fig. 6 Layout of dawbeads in a fender draw die (H=Bead Height)

널의(Fig. 5 참조) 성형해석을 수행하였다. 블랭크는 초기 크기 2mm×2mm의 두께 방향 적분점 5개를 갖는 4절점 쉘 요소를 사용하였으며 remesh 기법을 적용하였고, 드로우비드 부에서 자동으로 사이즈가 최적화 될 수 있게 하였다. 한편, 다이, 홀더 및 펀치는 3, 4 절점의 rigid body 요소를 사용하였다. 사용된 블랭크 홀딩력은 75 ton이고, 펀치 속도와 홀더 속도는 각각 5m/s, 2m/s를 적용하였고 금형과 블랭크 사이의 마찰은 Coulomb 마찰 법칙을 적용하여 구한 마찰계수로 실험을 통해 구한 0.109를 적용하였다. 또한, 블랭크의 구성방정식으로는 등방성 항복함수인 Von Mises 항복식

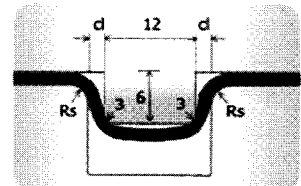
과 등방 경화 거동을 사용하였다. 이때 Nine 실험금형과 New 실험금형의 드로우비드력을 각각 펜더 드로우 금형의(Fig. 6 참조) 드로우비드인 원형비드와 타원형비드 그리고 사각비드의(Fig. 7 참조) 드로우비드에 적용하였다. 상압력과 인출력은



(a) Circular Drawbead



(b) Elliptical Drawbead



(c) Square Drawbead

Fig. 7 Schematic view of drawbeads shown in Fig. 6

Table 2 DBOF and DBRF determined by Nine's experimental dies when BHF=158N/mm

Drawbead Forces	Circular Drawbead (N/mm)	Elliptical Drawbead (N/mm)	Square Drawbead (N/mm)
DBOF	127.6	110.1	140.9
DBRF	147.0	120.5	193.5

Table 3 DBOF and DBRF measured from new experimental dies

Drawbead Forces	Circular Drawbead (N/mm)	Elliptical Drawbead (N/mm)	Square Drawbead (N/mm)
DBOF	73.8	60.7	94.0
DBRF	72.1	53.3	107.5

Nine 실험금형의 경우 BHF가 158N/mm일 때 Table 2와 같고, New 실험금형에서 각 비드의 상압력과 인출력은 실험을 통해 측정하여 Table 3에 수록하였다. 한편, 펜더 패널의 시편은 SPCEN 0.65t로써 사각비드의 상압력과 인출력은 실험 중 인출되기 전에 판단되어 이론식으로부터 구하였다.

### 3.2 해석결과

2가지 드로우비드 실험금형의 드로우비드력들을 적용하여 펜더의 성형해석을 수행한 후 변형률 분포와 드로인 양을 측정하여 실측치와 비교하였다. Fig. 8은 각 실험금형에 의한 해석 결과이다.

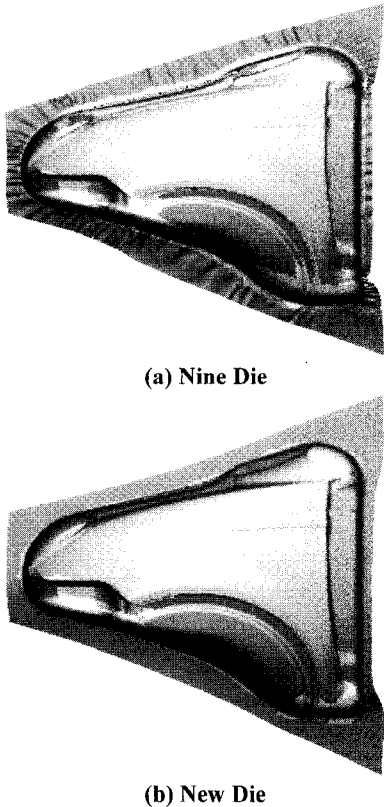


Fig. 8 Formed shapes of fender obtained from FEM forming analysis

이때, 펜더 패널에서 변형이 가장 큰 Section1-1', Section2-2', Section3-3', Section4-4' 로 나누어(Fig. 9 참조) 성형 해석하여 얻은 변형률 분포와 실측치의 변형률 분포가 비교되었다. 한편, Table 4는 각 실험금형으로부터 구한 드로우비드력들을 사용하여 성형해석에서 얻은 변형률과 실측치와의 RMS(root

mean square) 에러들을 보여 준다. 한편, 드로우인 양을 비교하기 위하여 펜더 금형의 드로우비드 위치를 고려하여 홀딩 후 시편과 스템핑 후 시편의 끝부분을 11개 지점으로 나누어 이동거리를 측정하였다(Fig. 10 참조). Table 5는 실측치와 2실험금형에서 얻은 드로우비드력을 각각 적용한 해석결과와의 상대오차(relative error)를 보여 준다.

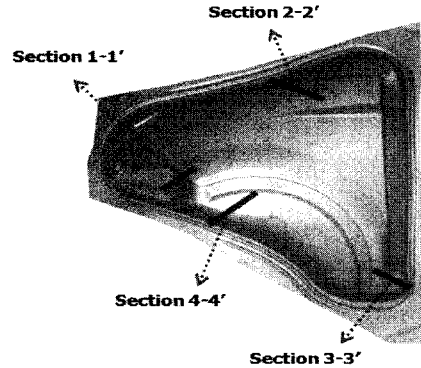


Fig. 9 Sections in fender draw panel for measuring strain distributions

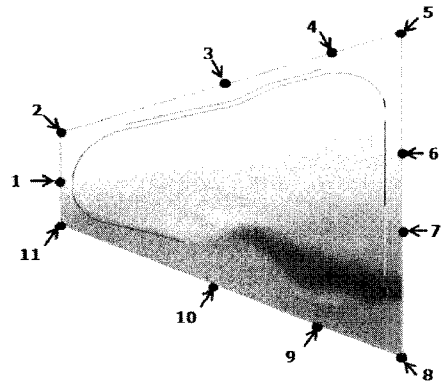


Fig.10 Points in fender draw panel for measuring draw-in amounts

Table 4 Comparison of RMS errors of strains between Nine's and new experimental dies

	Experimental Model	RMS Error (%)			
		1-1'	2-2'	3-3'	4-4'
Major Strain	Nine	7.4	48.2	11.9	28.0
	New	4.6	2.3	9.8	2.4
Minor Strain	Nine	4.5	1.6	5.9	2.1
	New	3.5	1.8	5.7	2.8
Thickness Strain	Nine	10.1	48.3	10.9	27.1
	New	4.4	3.0	9.6	3.8

**Table 5 Comparison of relative errors of draw-in between Nine's and new experimental dies**

Experimental Dies	Relative Error (%)					
	1	2	3	4	5	6
Nine	240	110	-67.9	10.5	14.8	12.1
New	120	130	53.6	5.3	3.7	18.2

Experimental Dies	Relative Error (%)					
	7	8	9	10	11	
Nine	21.9	13.8	-20.0	-63.9	72.7	
New	25.0	6.9	10.0	19.4	9.1	

#### 4. 결 론

기존의 Nine 실험금형을 보완한 New 실험금형으로 블랭크 홀딩력을 배제하고 드로우비드의 형상과 크기로만 구한 드로우비드력과 Nine 실험금형으로부터 구한 드로우비드력을 자동차 펜더 드로우 공정해석에 각각 적용시킨 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 드로우비드력을 구하기 위한 드로우비드 실험 금형은 BHF의 영향을 받는 다이페이스 부분이 제거되어야 한다.

(2) 유한요소 해석에서 사용되는 등가 드로우비드의 드로우비드력은 블랭크 홀딩력의 영향을 배제한 드로우비드력을 사용하여야 한다.

(3) 펜더 성형해석에서 New 실험금형의 드로우비드력을 적용한 해석결과는 Nine 실험금형의 드로우비드력을 적용한 해석결과보다 변형률 오차를 40% 이상, 드로인 오차를 8~110% 감소시켰다.

#### 후 기

본 연구결과를 위해 협조해 주신 지엠대우 자동차 기술 주식회사 공기팀(GMDAT) 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. D. Nine, 1978, Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, pp. 179~211.
- [2] H. D. Nine, 1982, New Drawbead Concepts for sheet Metal Forming, *American Society for Metals*, Vol. 2, pp. 185~192.
- [3] N. M. Wang, 1982, A Mathematical Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, *J. of Applied Metal Working*, Vol. 2, pp. 193~199.
- [4] B. S. Levy, 1983, Development of a Predictive Model for Draw Bead Restraining Force Utilizing Work of Nine and Wang, *J. Applied Metal Working*, Vol. 3, pp. 38~44.
- [5] N. Triantafyllidis, B. Maker, S. K. Samanta, 1986, An Analysis of Drawbead in Sheet Metal Forming: Part 1 - Problem Formulation, *J. Eng. Mater. Tech.*, Vol. 108, pp. 321~327.
- [6] N. Triantafyllidis, G. Grab, B. Maker, S. K. Samanta, 1987, An Analysis of Drawbead in Sheet Metal Forming: Part11- Experimental Verification, *J. Eng. Mater. Tech.*, Vol. 109, pp. 164~170.
- [7] T. B. Stoughton, 1988, Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, *15th IDDRG*, pp. 205~215.
- [8] B. D. Carleer, T. Meingers, H. Huetink, 1996, Equivalent Drawbead Model in Finite Element Simulations, *NUMISHEET '96*, pp. 186~190.
- [9] Y. T. Keum, J. H. Kim, B. Y. Ghoo, 2001, Expert Drawbead Models for Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 5335~5353.