

박판 성형공정에서의 등가 경계조건 계산을 위한 드로우비드 성형의 탄소성 유한요소 해석 - Part II : 프런트 도어 판넬 성형공정에의 적용

박종세* · 김승호* · 허 훈*

(2002년 7월 23일 접수)

Elastic-plastic Finite Element Analysis of Drawbead Forming for Evaluation of Equivalent Boundary Conditions in Sheet Metal Forming - Part II : Application to the Front Door Panel Forming Process

J. S. Park, S. H. Kim and H. Huh

Abstract

The equivalent boundary conditions have been applied to the front door panel forming process, in order to demonstrate its reliability and validity. The elongation in the bead forming process is applied to the binder wrap process as the equivalent displacement boundary condition and the restraining force in the drawing process is applied to stamping process as the equivalent force boundary condition. The result calculated with the equivalent boundary conditions shows closer coincidence with the experimental result than simulation with different boundary conditions. The numerical result fully demonstrates that drawbead forming simulation for calculation of equivalent boundary conditions is necessary and effective.

Key Words : Drawbead, Equivalent Boundary Condition, Sheet Metal Forming, Finite Element Method

1. 서론

차체용 외판의 성형에 일반적으로 사용되는 박판 성형 공정은 크게 두 가지 단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 블랭크 홀더에 홀딩력을 가해 성형전에 블랭크를

잡아주는 바인더랩 공정이고 두 번째 단계는 펀치를 내려 실제적인 성형을 하는 드로잉 또는 스탬핑 공정이다. 이와 같은 박판 성형공정에서 박판의 과단과 주름을 방지하기 위하여 판재의 유입량을 조절할 때 드로우비드를 주로 사용하고 있다. 유한요소법을 이용하여 박판 금속

* 한국과학기술원 기계공학과

성형을 해석할 때에는 비드를 실제 모델링에 포함시키지 않게 되는데, 이는 실제 성형공정에 있어 전체 모델에 비드를 같이 모델링 하게 되면 요소의 수가 매우 증가해서 모델링하기 어려울 뿐만 아니라 해석하는데도 많은 계산 시간이 소요되기 때문이다. 이러한 단점을 극복하며 비드의 영향을 박판금속 성형에 포함시키기 위하여 실제 성형공정 해석에서는 등가 비드의 개념을 사용하게 된다. 등가 비드는 실제로 비드를 모델링하지 않고 비드가 있는 자리에 판재가 빨려 들어가는 반대 방향으로 구속력을 경계조건으로 주는 방법을 주로 사용하였다.

많은 연구자들에 의해 등가 비드를 이용한 유한요소해석이 수행되었는데, Makinouchi⁽¹⁾ 등은 비드의 형상, 금형과 판재사이의 간극, 그리고 드로잉 방향 등을 고려하여 구속력 경계조건을 적용하였다. Huetink⁽²⁻⁵⁾ 등은 성형공정에서의 경계조건을 구속력 뿐만 아니라 비드에 의한 양력(lifting force)과 두께 방향 변형률을 경계조건으로 부가하여 해석하였다. 이와 같은 연구들은 성형 공정에서의 비드의 영향을 정확히 고려하기 위하여 많은 방법들을 제안하고 있지만 바인더랩 상태에서의 비드 영향은 무시하고 있다. 블랭크 홀더가 내려갔을 때 이미 비드에 의해 판재는 전체적으로 인장이 작용하고 있는 상태이기 때문에 이러한 전 변형(pre-strain) 상태를 고려해 준다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

본 논문에서는 Part I에서 구한 등가 경계 조건들의 유효성과 신뢰성을 파악하기 위해 NUMISHEET'99 benchmark 예제⁽⁶⁾인 프론트 도어 판넬 성형공정을 해석하였다. 등가경계조건을 가하여 해석한 결과를 NUMISHEET'99에서 주어진 실험결과와 비교해 보았다. 첫 번째 공정인 바인더랩 공정에서는 2차원 비드 성형공정으로부터 구한 B점에서의 변위를 비드선의 직각 방향으로 가하여 바인더랩 공정의 전변형 상태를 고려해 주었고 두 번째 공정인 스텝핑 공정에서는 비드선의 직각 방향으로 구속력을 가하여 비드의 영향을 고려해 주었다.

2. 유한요소 모델

Part I에서 살펴본 여러 파라미터에 대한 영향을 바탕으로 비드를 포함하고 있는 실제 예제에 등가 경계조건을 적용하여 보았다. 해석을 위하여 외연적 유한 요소법을 사용하고 있는 LS-DYNA3D를 이용하였고, 사용한 예제는 NUMISHEET '99 Benchmark 예제였던 Audi 프론트 도어 판넬의 성형해석이다. 해석에 사용한 금형, 블랭크홀더, 펀치의 초기 위치는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2는 블랭크 홀더의 일부분인 드로우비드의 위치를 도시

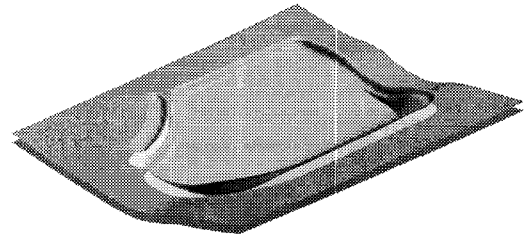


Fig. 1 Initial setting of the die, blank holder and punch

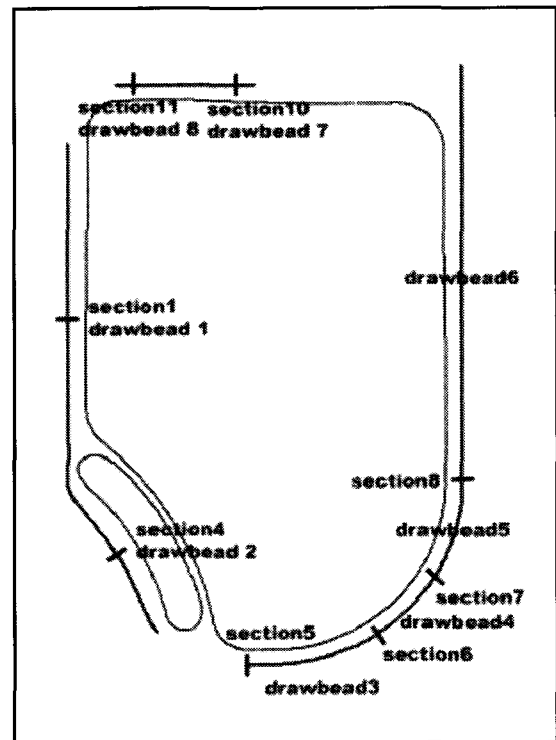


Fig. 2 Locations of the drawbeads

Table 1 Mechanical properties of the mild steel of DDQ grade

Material	Mild Steel DDQ
Initial blank thickness	1.0mm
Young's modulus	$E = 200GPa$
Yield stress	$\sigma_Y = 180.5MPa$
Poisson's ratio	$\nu = 0.3$
Stress-strain relation	$\sigma = 525.6(0.00434 + \epsilon)^{0.1968} MPa$
Lankford value(r)	1.55

Table 2 Bead geometry and restraining force for the simulation of front door panel forming

Bead Section	Bead Punch		Die Angle	Present work
	Radius	Depth		
1	7.70	7.93	11.52	174
4	6.40	7.78	8.19	151
5	6.53	7.43	0.63	120
6	10.87	6.12	5.13	88
7	10.45	5.20	7.52	68
8	8.40	7.90	9.08	137
10	7.40	8.11	2.08	152
11	14.24	7.84	5.89	147

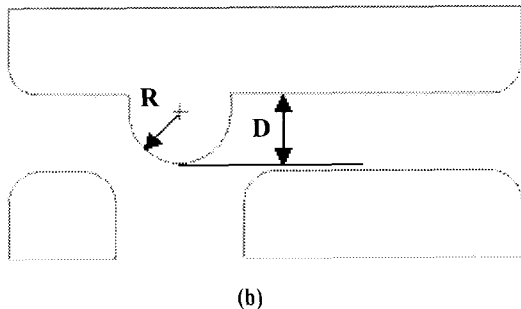
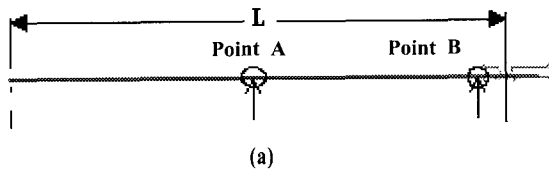


Fig. 3 Geometric dimension of drawbead and dies: (a) Definition of L, Point A and point B; (b) Definition of the bead radius and depth

한 것으로, 각 절단면에 대한 비드의 형상은 IGES 형식으로 제공받았다. 한 종류의 절단면으로 정의되어 있는 비드 영역은 한 종류의 비드형상으로 균일하고 두 종류의 절단면으로 정의되어 있는 비드 영역은 두 종류의 비드형상이 연속적으로 변화하는 모양이다. 블랭크의 초기 두께는 1mm 이고 요소의 개수는 9712 개로 BWC (Belytchko-Wong-Chiang) Shell을 사용하였으며, 블랭크 절집의 개수는 9901개이다. 사용한 물성치는 DDQ Mild Steel이고, 해석에 사용한 물성치를 Table 1에 나타내었다. 블랭크와 금형 사이의 마찰계수는 0.15이고 블랭크 홀딩력은 700kN으로 부가하였다.

실제 성형해석에서 등가 경계조건을 주었을 때의 비드



Fig. 4 Displacement boundary condition of bead forming process

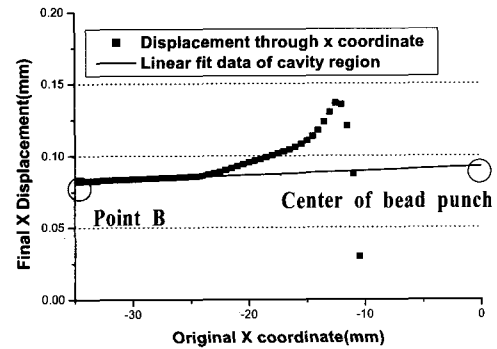


Fig. 5 Final extension of nodes through the axial coordinate in the die region

의 영향을 살펴보기 위하여 먼저 비드의 유한요소해석을 수행하여 구속력과 변위경계조건을 구하였다. 구해진 경계조건을 프론트 도어 판넬의 성형해석에 적용하였다. 바인더랩 공정에서의 변위 경계조건과 성형공정에서의 구속력을 경계조건으로 부가하여 해석을 수행한 결과와 NUMISHEET'99의 다른 경계조건을 부가하여 해석한 결과, 그리고 NUMISHEET'99에서 주어진 실험결과를 비교하였다. 등가 경계조건을 부가할 때 판재는 항상 비드에 대하여 수직인 방향으로 움직인다고 가정하였다.

3. 비드성형공정 및 드로잉공정의 해석

등가 경계조건을 부가하기 위하여 2차원 드로우비드 모델의 해석이 선행되어야 한다. 비드 성형공정의 해석을 통하여 바인더랩 공정의 등가 변위 경계조건을 얻고, 드로잉 공정의 해석을 통해 스탬핑 공정의 힘 경계조건을 얻었다. Audi 프론트 도어 판넬의 성형을 위해 IGES 형식으로 주어진 각 비드의 단면을 Table 2에 나타내었다. 또한 금형과 비드 형상에 대한 정의는 Fig. 3에 나타내었다. Table 2에 주어진 8가지의 비드 단면 형상 중에서 비드 단면 1에 대한 해석결과를 통하여 등가 경계조건을 구하는 절차를 나타내었다.

Fig. 6 Displacement boundary condition of the drawing process

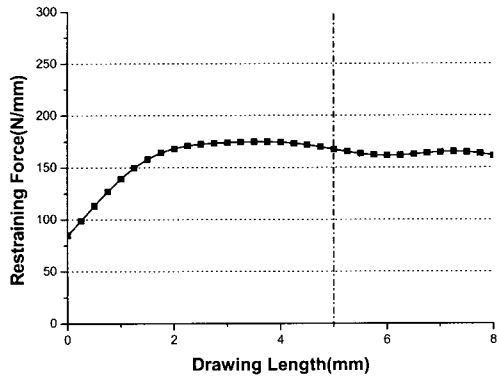


Fig. 7 Restraining force with respect to the drawing length

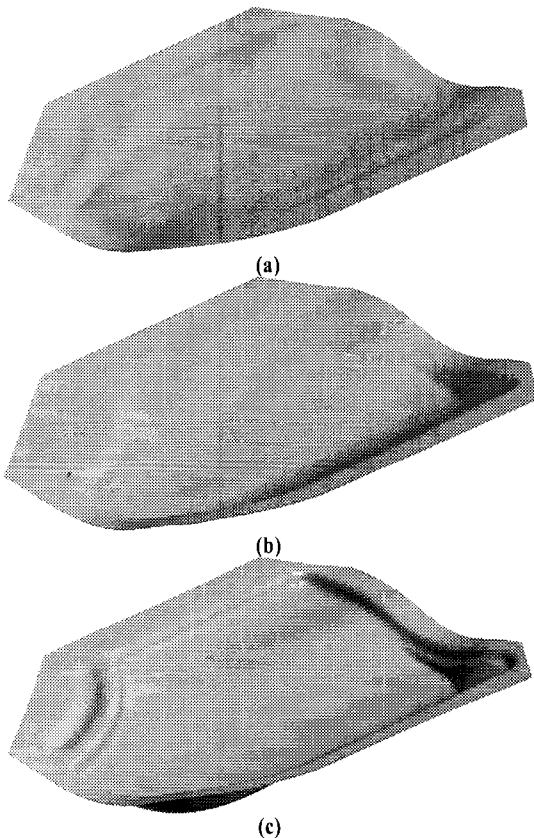


Fig. 8 Deformed shape of blank: (a) binder wrap state; (b) half punch stroke; (c) final punch stroke

3.1 비드 성형공정

비드 단면 1의 비드 성형공정 개략도 및 경계조건을 Fig. 4에 나타내었다. 비드의 반경(R)은 7.7mm이고 비드의 깊이(D)는 7.93mm이기 때문에 비드 펀치가 7.93mm 내려 올 때까지 해석을 하였다. 바인더랩 공정에서 고려하고자 하는 전변형(pre-strain)은 B점에서의 변위에 의한 A점 영역에서의 축 방향 응력이다. Fig. 5는 대칭중심으로부터 선형으로 변형이 일어나는 부분을 비드 펀치 중심까지 확장하였다. 이 확장해서 얻어진 변위를 실제로 성형공정 비드선에 적용하여 해석을 수행하였다.

3.2 드로잉 공정

Bead Section 1의 드로잉 공정 개략도 및 경계조건을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6과 같이 대칭선에 존재하는 절점들을 왼쪽 방향으로 10mm까지 당기면서 구속력을 계산하였다. 계산된 구속력은 Fig. 7에 나타내었다. 구속력은 드로잉 길이가 일정량 이상 커지면 정상 상태에 도달하게 되는데 드로잉 길이가 5mm 일 때의 구속력을 정상 상태의 구속력이라 가정하고 이 점에서의 구속력을 스탬핑 공정에서의 힘 경계조건으로 사용하였다.

4. 해석 결과

Fig. 8은 바인더랩 공정에서의 변위 등가 경계조건과 스탬핑 공정에서의 힘 경계조건을 동시에 부가한 모델의 블랭크 변형형상을 펀치 행정에 따라 도시한 것이다. Fig. 8의 (a)는 블랭크 홀더가 완전히 내려와서 블랭크를 잡고 있을 때의 형상이다. 블랭크 홀더와 급형이 잡고 있는 플랜지 부분은 평평하나 블랭크의 중심 부분은 중력에 의해 밑으로 약간 처진 듯한 형상을 보이고 있다.

Fig. 8의 (b)는 펀치 행정이 끝나기 중간 정도에서의 변형 형상이며, Fig. 8의 (c)는 펀치 행정이 끝났을 때의 변형 형상이다. Fig. 9은 성형해석 후의 외각선을 비교한 그림인데, 대체적으로 성형 전의 형상이 가장 바깥에 나타나고 실험 결과가 가장 안쪽에 그리고 등가 경계조건을 주고 해석했을 때가 그 중간에 위치하는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서의 결과를 실험치와 비교하였을 때 그림에서 위쪽 부분과 좌우는 대체적으로 일치하고 있으나 아래 부분에서 약간 차이를 보이고 있다. Fig. 10은 펀치 행정에 따른 펀치력을 나타낸 그림이다. AS-06은 내연적 적분 방법을 사용한 결과[Yang *et al.*], AS-07은 실제 비드를 모델링 하여 LS-DYNA3D로 해석한 결과이고[Shi *et al.*], AS-08은 외연적 적분 방법을 사용한 결

5. 결과 및 토의

본 논문에서는 Part I에서 비드의 유한요소 해석 결과를 통하여 얻은 등가 경계조건을 실제의 성형공정에 적용하였다. 바인더랩 공정에서의 변위 경계조건과 성형공정에서의 구속력으로 등가경계조건을 가한 결과와 다른 경계조건을 부가하여 해석한 결과 그리고 실험결과를 비교하였다. 등가 경계조건을 부가했을 때 실험결과와 매우 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 예제를 선정하여 비드 성형공정의 변위와 드로잉 공정의 구속력을 등가 경계조건으로 적용함이 타당함을 보였다.

등가 경계조건을 부가하지 않은 해석결과와 실험치를 비교하였을 때의 차이에 대한 원인은 다음과 같다. 첫째로 2차원으로 구한 경계 조건들을 3차원 실제 문제에 적용하였기 때문에 항상 판재는 비드가 존재하는 선에 대

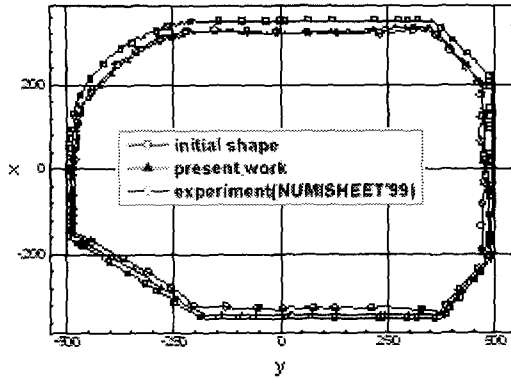


Fig. 9 Part outline in the plane XY after forming simulation

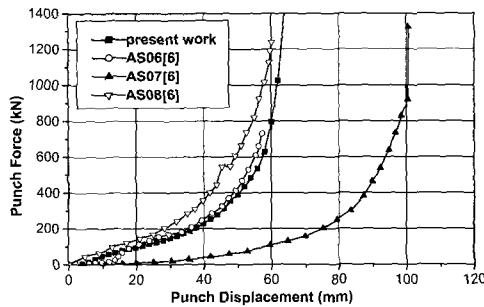


Fig. 10 Punch force with respect to punch displacement during the forming simulation(ref.[6])

과이다. 본 논문의 결과는 AS-06과 가장 비슷한 경향을 보인다. 해석결과를 정량적으로 살펴보기 위해서 Table 3과 같이 절단면을 정의해 그 절단면을 따라가며 두께 분포를 살펴보았다. Fig. 11은 정의된 4개의 절단면을 나타낸 그림이다. Fig. 12의 (a)는 절단면 1에서의 두께 분포를 나타낸 것으로 상대적으로 다른 해석 결과보다 실험결과와 유사한 분포를 나타내고 있다. Fig. 12의 (b)는 절단면 2의 두께 분포를 나타내고 있는데 절단면 1의 결과와 같이 등가 경계조건을 가한 해석결과가 다른 해석 결과에 비해 두께가 더 얇아지는 경향을 보이고 있고 실험결과에 더욱 근접함을 알 수 있다. 플랜지 부분에서 해석결과는 두께가 계속 감소하고 있지만 실험결과는 일정한 두께를 유지하고 있음을 알 수 있다. Fig. 12의 (c)와 (d)는 각각 절단면 3과 4의 두께 분포인데 역시 앞의 결과와 같은 경향을 보이고 있고 등가 경계조건을 가한 해석 결과가 실험의 결과와 매우 유사한 두께 분포를 나타내고 있다. 이상의 두께 분포를 살펴본 결과 변위 경계조건과 구속력을 경계조건으로 부가한 해석 결과가 실험치와 매우 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

Table 3 Section definition for the comparison of analysis result

Section	Equation
Section 1	$x=-15.0$ Cutting the part in area
Section 2	$y=356.0$ Cutting the part in area $x<130.0$
Section 3	$0.707107x-0.707107y=0.0$ Cutting the part in area $y<0.0$
Section 4	$0.707107x+0.707107y=-100.0$

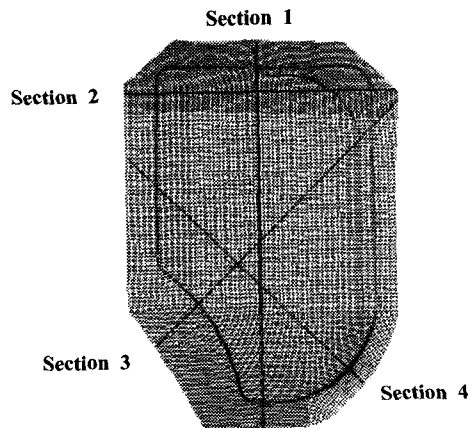
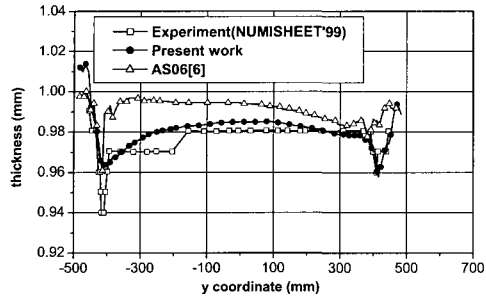
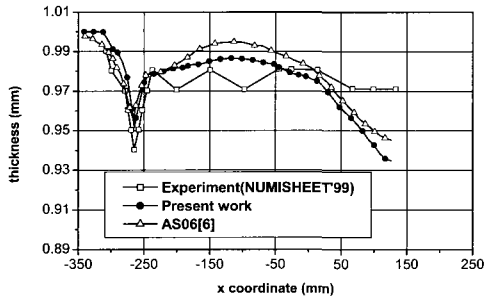


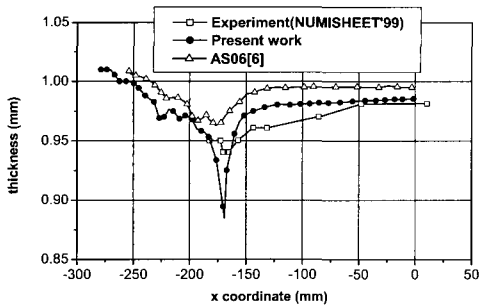
Fig. 11 Section definition for the comparison of analysis result



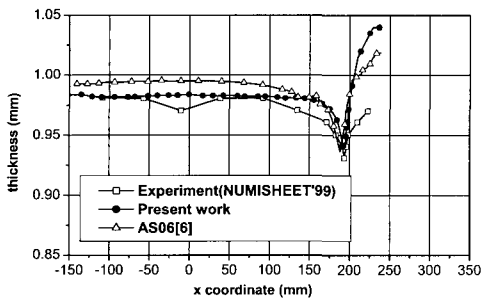
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 12 Thickness distribution after forming simulation : (a) section 1; (b) section 2; (c) section 3; (d) section 4

해 항상 수직으로 움직인다는 가정이 포함되게 된다. 실제로 판재는 비드선에 수직이 아니라 일정한 각도를 가지고 움직이기 때문에 오차가 발생할 수 있게 된다. 둘째로, 실제 드로잉 공정에서 판재는 금형과 수평인 채로 움직이지 않고 펀치 행정에 따라 금형과 일정한 각도를 이루면서 빨리 들어가게 되는데 이러한 영향을 고려하지 않았다. 하지만 이러한 차이는 드로우비드의 영향을 고려하지 않았을 때에 비하여 매우 미미하다. 결과적으로 드로우비드 해석을 통해 등가 경계조건을 계산하고 실제 성형문제에 적용한 해석 결과가 실제 비드의 영향을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

- (1) H. Sunaga, M. Kawa and A. Makinouchi, "Drawbeads-Simulation Models and experimental Verification in Sheet Metal Forming Process", Proc. NUMIFORM'98, pp. 917~923, 1998.
- (2) B. D. Carleer, T. Meinders and H. Huetink, "Equivalent Drawbead Model in Finite Element Simulations", Proc. NUMISHEET'96, pp. 25~31, 1996.
- (3) T. Meinder, H. J. M. Geijselaers and J. Huetink, "Implementation of Plastic Thickness Strain in an equivalent Drawbead Model based on a penalty constraint Method", Proc. NUMIFORM'98, pp. 911~916, 1998.
- (4) T. Meinders, H. J. M. Geijselaers and J. Huetink, "Equivalent Drawbead Performance in deep drawing Simulations", Proc. NUMISHEET'99, pp. 243~248, 1999.
- (5) B. D. Carleer, M. F. M. Louwes, J. Huetink and P. T. Vreede, "Modeling drawbeads in 3D Finite Element Simulation of the deep drawing Process", Proc. NUMIFORM'95, pp. 681~685, 1995.
- (6) NUMISHEET'99 Benchmark Specifications Proceedings of NUMISHEET'99, 1999, edited by J. C. Gelin, O. Picart, Besancon, France, vol. 2
- (7) Z. Lin, Y. Bao, G. L. Chen and G. Liu, "Study on the Drawbead Setting of the large Deformation and bending Area in a Cover Panel", Proc. NUMISHEET'99, pp. 261~266, 1999.
- (8) J. Rojek, E. B. L. Casas, A. Lima e Silva, R.N.Borges and E. Onate, "Equivalent Drawbeads : Computer Modeling Experiments", Proc. NUMISHEET '99, pp. 249~254, 1999.