

성형잔류응력에 의한 박판구조물의 변형에 대한 연구

김권희, 권희상
공업설계연구소

Study on the Deformation of a Sheet Metal Structure due to Stamping Residual Stresses

Kwon Hee Kim and Hee Sang Kwon
Industrial Design Laboratory

Abstract

Rectangular frames of thin sheet metals are press formed during their manufacture. The multistage process includes blanking, stamping, bending, and trimming. After stamping the sheet is subjected to warping and twisting due to residual stresses. The twist is not desirable since it affects the subsequent assembly processes. Study has been performed to predict the twist.

1. 서론

금속박판을 프레스 성형하여 제작되는 4 각 frame blanking, stamping, bending, trimming 등 여러 단계의 프레스 성형 공정을 거쳐서 제작된다. 이들 중에서 stamping 공정이 일단 완료되면 금속박판 전반에 걸쳐서 warping 이 일어나게 된다. 이후 bending 과 trimming 을 거쳐서 최종 형상을 갖추게 되면 warping 은 frame 의 길이 방향에 대한 twisting 으로 바뀌게 된다. 4 각 frame 의 생산 현장에서는 뒤틀림(twisting)을 경감시키기 위하여 여러 종류의 시도를 해오고 있다. 예컨대 두꺼운 판재를 사용하거나 blank holder 압력등 공정 변수의 조절 등이다. 두꺼운 판재를 사용하는 것은 근본적인 해결책이라고 볼 수 없으며 공정 변수의 조절은 그다지 만족할 만한 결과를 주지 못하고 있다. 이러한 warping 이나 뒤틀림은 stamping 이후의 탄성복원의 결과로 이해할 수 있다.

Stamping 공정 중 박판 금속에 발생하는 탄성복원(springback)은 제품의 치수 정밀도를 저해하는 주요인이므로 이에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 금속박판의 stamping 종료 후 탄성복원은 stamping 과정에서 발생하는 잔류응력에 기인한다는 것이 알려져 있다. 기존 연구의 대부분은 굽힘(bending) 또는 인장(stretch forming) 모드의 변형에 대한 탄성복원을 대상으로 하고 있으며[1-7] 주름발생(wrinkling)에 대한 연구결과도 많이 알려져 있다[8-10]. 그러나 잔류응력에 의하여 발생하는 판재의 비틀림에 대한 연구는 매우 드문 실정

이다. 본 연구에서는 탄성복원에 의한 판재의 비틀림을 체계적으로 이해하고 예측하는 것을 목적으로 하였다.

2. 해석

2.1 부분해석

본 연구에서는 그림 1에 보인 금속 4 각 frame 에 대하여 연구를 수행하였다. 그림 1 에 보인 4 각 frame 은 성형 후 비틀림이 없는 이상적인 경우이고 실제로는 그림 2 에 보인 것과 같이 길이 방향에 대하여 전체가 뒤틀리게 된다. 이러한 뒤틀림은 성형 과정에서 소재에 발생하는 잔류응력에 의한 것으로 생각된다. 뒤틀림의 원인을 분석하기 위하여 편의상 그림 1 에 보인 것처럼 4 각 frame 을 좌측멤버(left member), 상부멤버(upper member), 하부멤버(lower member), 우측멤버(right member) 의 4 부분으로 나누어 생각하기로 한다. 여기서 우측멤버를 제외하고는 나머지 3 부분은 형태상 유사함을 알 수 있다. 즉 각 멤버들은 길이 방향으로 bead 를 포함하고 있으며 길이 방향의 edge bending 부위를 가지고 있다. 4 각 frame 전체의 springback 을 이해하기 위하여는 좌측멤버, 상부멤버, 하부멤버의 bead stamping 과 edge bending 이 springback 에 어떤 영향을 미치는가를 알아보기로 한다.

그림 1. 금속박판 4 각 frame.

그림 2. 금속박판 4 각 frame 의 성형 후 뒤틀림.

그림 3 은 4 각 frame 상부멤버 부위의 잔류응력 상태를 도식적으로 나타내고 있다. Bead stamping 을 위한 punch stroke 과정에서 punch 밀면과 접촉하는 bead 내부의 소재는 bead 와 직각방향 (y-방향) 으로 신장 (늘어남, elongation, $\epsilon_y > 0$) 되고 bead 길이 방향 (x-방향) 으로 수축하고자 하는 경향을 갖게 된다. 그러나 bead 주변의 소재는 blank holder 와 금형에 의하여 구속되어 있고 stamping punch 의 영향권 밖에 있으므로 bead 부위의 x-방향 수축을 억제하게 된다. 이에 따라 bead 내부에는 x-방향으로 인장 잔류응력 ($\sigma_x > 0$) 이 발생하게

되고 bead 외부에는 같은 방향으로 압축 잔류응력 ($\sigma_x < 0$) 이 발생하게 된다. Bead 는 상부멤버의 중심에서 frame 내부 방향으로 치우쳐 있기 때문에 bead 부위의 x-방향 수축은 그림 4(a) 에 보인 것처럼 x-y 평면내에서의 휨(in-plane bending)을 유발한다. 판의 두께가 비교적 얇은 경우에는 in-plane bending 에 의하여 그림 4(b)에 보인 것처럼 판 두께 방향 (z-방향)의 평면이탈변형 (warping)이 발생하게 된다.

그림 3. 4 각 frame 상부멤버의 길이 방향 잔류 응력

그림 4. Edge bending 을 하지 않은 4 각 frame 상부멤버의 탄성복원(springback).

- (a) 평면내 굽힘(in-plane bending, 변위확대비율=20)
- (b) 평면이탈 변형(warping, 변위확대비율=10)

실제의 공정에서와 같이 bead stamping 이후에 edge bending 을 추가하고 trimming 을 거쳐 4 각 frame 을 성형한 이후에 springback 을 시키면 그림 5 에 보인 것과 같이 in-plane bending 과 warping 이 대폭 감소하게 된다.

그림 5. Edge bending 의 in-plane bending 과 warping 억제 효과(상부멤버의 경우)

- (a) 평면내 굽힘(in-plane bending, 변위확대비율=20)
- (b) 평면이탈 변형(warping, 변위확대비율=10)

Edge bending 이후에는 그림 4와 관련하여 설명한 평면이탈 굽힘(off-plane bending)에 대한 단면2차모멘트 $I_{zz} = \int z^2 dA$ 가 대폭 증가하기 때문에 edge bending 을 하지 않은 경우에 비하여 warping 이 크게 감소한다. 그림 4(a)와 그림 5(a)를 비교해 보면 edge bending 에 의한 I_{zz} 의 증가는 bead 수축에 의한 buckling 을 억제하여 평면내 굽힘(in-plane bending)도 감소시키는 효과가 있는 것을 알 수 있다.

이상의 해석 결과를 종합해보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 즉 4 각 frame 의 우측 멤버를 제외한 좌측멤버, 상부멤버, 하부멤버는 bead stamping 과정에서 발생하는 잔류응력의 영향으로 springback 에 의한 평면내 굽힘(in-plane bending)과 평면이탈 변형(warping)을 일으키게 된다. 4 각 frame 의 형태가 갖는 상하 대칭성을 고려하면 warping은 상부멤버와 하부멤버가 대칭성을 갖아야 하고 따라서 그림 2에 보인 것과 같은 상하 비대칭의 뒤틀림은 평면내 굽힘(in-plane bending)에 의한 것임을 알 수 있다. 즉 상부멤버, 좌측멤버, 하측멤버는 모두 frame 안쪽으로 휘고자하는 경향이 있으나 우측멤버가 이를 억제하므로 4개의 멤버 모두가 각자의 길이방향에 대한 비틀림 (twisting) 을 감수하며 평면을 이탈하게 된다. 4 각 frame 의 뒤틀림을 제거하기 위하여는 평면내 굽힘(in-plane bending) 을 억제하거나 최소화하는 방안을 찾아야 한다.

2.2 전체해석

앞에서 언급한 바와 같이 4 각 frame 의 뒤틀림을 없애기 위하여는 평면내 굽힘 (in-plane bending) 을 제거하는 것이 필요하다. 4 각 frame 의 in-plane bending 은 우측멤버를 제거하였을때 상부멤버와 하부멤버의 우측 자유단이 얼마나 서로 접근하는가를 가지고 그 정도를 비교할 수 있다(그림 6 참조).

그림 6. 우측멤버를 제거한 4 각 frame 의 in-plane bending.

그림 7 에 보인 해석모델은 금형(하형), 블랭크홀더, 펀치(stamping, bending)와 박판소재(블랭크) 로 구성되며 각 부분은 탄소성 shell element 로 구성된다. 표 1 은 본 연구에서 사용된 모델의 개요를 나타내고 있다.

그림 7. 4 각 frame 의 성형해석 모델

표 1. 전체해석 모델의 개요

해석 software	요소망 구성 및 전처리 알고리즘 : HYPERMESH, PAM_GENERIS 성형해석 알고리즘 : PAM_STAMP 탄성복원 해석알고리즘 : PAM_STAMP, NIKE3D 후처리 알고리즘 : PAM_VIEW
해석조건	블랭크홀더 압력 : 0.5 MPa(stamping), 1.0 MPa(edge bending) 펀치스피드 bead stamping punch : 1m/sec edge bending punch : 9m/sec
해석모델	요소 수 및 종류: 박판소재 : 4136, 4-node shell(type107) 금형 6488, bead 펀치 2700, edge bending 펀치 1140, 블랭크홀더 1594, 총 16,058 개의 4-node shell elements 재 질 : 박판소재 : SUS430, 0.3t, isotropic elasto-plastic material 금형, 펀치, 블랭크홀더 : rigid material

그림 8. 4 각 frame 소재의 응력-변형을 곡선(true stress - true strain)

박판의 소재는 SUS430 이며 인장시험결과 이방성은 매우 작은 것으로 밝혀졌다. 그림 8 은 박판소재의 응력-변형율(stress-strain) 곡선을 나타내고 있다. 그림 9 는 해석의 대상이 되는 4 각 frame 의 제품치수를 대략적으로 보이고 있다. 그림 10 은 stamping - edge bending - trimming - springback 각 단계별 해석결과를 나타내고 있다.

그림 9. 4 각 frame 의 제품 치수

In-plane bending 정도를 확인하기 위하여 그림 10(c) 에서는 우측멤버를 trimming 하여 제거하였다. 그림 10(d)는 springback 이후의 in-plane bending 과 warping을 보여주고 있다. 그림 10(d) 에보인 해석에서 상부멤버 오른쪽 끝과 하부멤버 오른쪽 끝의 근접변위($\delta_{predicted}$)가 약 0.57mm 로 예측된다. 실제의 제품이 갖는 우측멤버의 비틀림각(twisting angle) $\alpha_{observed}$ (그

림 2 참조)는 약 5° 정도로 측정되었다. 우측멤버의 유효길이(l)가 약 150 mm 이므로 좌측멤버에 대한 우측멤버의 비틀림에 의하여 상부멤버 오른쪽 끝과 하부멤버 오른쪽 끝의 근접변위 (δ)가 완전히 수용되려면 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\delta = l(1 - \cos \alpha) \quad (1)$$

윗식으로부터

$$\alpha = \cos^{-1}(1 - \delta/l) \quad (2)$$

윗식에 $l = 150\text{mm}$ 과 $\delta_{predicted} = 0.57\text{mm}$ 를 대입하면

$$\alpha_{predicted} = \cos^{-1}(1 - 0.57/150) = 5.0^\circ \quad (3)$$

따라서

$$\alpha_{predicted} \approx \alpha_{observed} \quad (4)$$

비틀림각에 대한 측정치와 예측치의 양호한 일치도는 유한요소 해석결과의 신뢰성을 간접적으로 보여주고 있다.

그림 10. 성형단계별 유한요소해석 결과

- (a) bead stamping (변위확대비율=1) (b) edge bending (변위확대비율=1)
 (c) trimming (변위확대비율=1) (d) springback (변위확대비율=10)

3. 해석 결과의 고찰

앞에서 논의한 것처럼 금속 frame 이 뒤틀리는 것은 bead stamping 공정에서 발생하는 잔류응력에 기인한다. Bead stamping 이후의 edge bending 은 in-plane bending 과 warping 의 정도를 경감시키는 효과가 있으나 4 각 frame 의 뒤틀림을 근본적으로 제거하는 데는 부족하다.

따라서 4 각 frame 의 뒤틀림을 없애기 위하여는 bead 의 길이방향 수축효과를 상쇄시키는 방안이 있어야 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 2가지의 공정개선 방안을 제안한다.

그림 11 은 기존의 4 각 frame 과 좌측멤버에 double bead 를 포함하는 4 각 frame 의 우측멤버를 제거하였을 때 얻어지는 in-plane bending 의 정도를 비교하여 나타내고 있다. 이미 언급한 바와 같이 bead 부위는 springback 과정에서 길이방향으로 수축하고자하는 경향이 있고 이 때문에 bead 를 포함하는 상부멤버, 하부멤버, 좌측멤버에는 in-plane bending이 일어나게 된다. 만약 이들 각 멤버의 in-plane bending 에 대한 중립면을 사이에 두고 기존 bead 의 반대방향에 또 하나의 bead 를 성형하면 2 개의 bead 는 각각 중립면의 반대측에서 수축하고자 하므로 in-plane bending 이 감소되게 된다. 4 각 frame 의 각 부위 중에서 상부멤버와 하부멤버는 폭이 좁으므로 double bead 를 수용하기 어렵다. 따라서 좌측멤버가 double bead 를 수용하도록 하는 것이 현실적인 방안이 된다. 그림 11 은 기존 제품과 좌측멤버에 double bead 가 형성된 제품에 대하여 in-plane bending 을 비교해 보이고 있다. 좌측멤버에 double bead 를 수용함으로써 frame 전체적인 in-plane bending 을 크게 감소할 수 있음을 보이고 있다. 그림 12 는 double bead 에 의하여 warping 도 크게 개선되는 것을 보이고 있다.

그림 11. 좌측멤버에 포함된 double bead 의 in-plane bending 억제효과

변위확대비율 = 10

(a) 기존 제품

(b) 좌측멤버에 double bead 가 형성된 제품

그림 12. 기존 4 각 frame 과 좌측멤버에 double bead 를 갖는 제품의 warping 비교

변위확대비율 = 10

(a) 기존 제품

(b) 좌측멤버에 double bead 가 형성된 제품

Frame 의 뒤틀림을 완화하기 위한 또 다른 방안은 좌측멤버의 굽힘부위 (bending edge) 에 곡률반경을 주어서 edge bending 시 in-plane bending 을 교정하는 방법이다. 그림 13 은 기

존의 4 각 frame 과 좌측멤버에 curved edge 를 갖는 4 각 frame 의 우측멤버를 제거하였을 때 얻어지는 in-plane bending 의 정도를 비교하여 나타내고 있다. 기존의 4 각 frame 의 경우 보다 in-plane bending 이 크게 감소되는 것을 볼 수 있다.

그림 14 는 curved edge 를 주었을때 기존 제품에 비하여 warping 역시 크게 개선되는 것을 보이고 있다.

그림 13. Curved edge 의 in-plane bending 억제효과

변위확대비율 = 10

(a) 기존 제품

(b) 좌측멤버에 curved edge 가 형성된 제품

그림 14. 기존 4 각 frame 과 좌측멤버에 curved edge 를 갖는 제품의 warping 비교

변위확대비율 = 10

(a) 기존 제품

(b) 좌측멤버에 curved edge 가 형성된 제품

4. 결 론

Stainless steel 박판으로 제작되는 금속박판 4 각 frame 은 프레스 성형 이후 springback 에 의하여 뒤틀리게 된다(그림 2 참조). 분석결과 뒤틀림은 bead 부위에 발생하는 잔류응력에 의한 것임이 밝혀졌다. Bead 부위의 잔류응력은 springback 과정에서 frame 의 상부멤버, 좌측멤버, 하부멤버에 in-plane bending 과 warping 을 발생시킨다. 뒤틀림의 직접적인 원인은 in-plane bending 에 있음이 확인되었다. Frame 의 뒤틀림을 방지하기 위하여 in-plane bending 과 warping 을 억제하는 2 가지 방안이 제안되었다. Double Bead 방안과 Curved Edge 방안이 제안되었고 각 방안의 유효성이 유한요소 해석을 통하여 입증되었다. 제안된 2 가지 방안은 현장에서의 적용성을 고려하여 선택적으로 채택될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. F. Pourboghraat and K. Chandorkar, "Springback calculation for plane strain sheet forming using finite element membrane solution", ASME Numerical Methods for Simulation of Industrial Metal Forming Processes, CED-Vol.5/AMD Vol. 156, 1992, pp.85-93
2. R. L. Rolf and E. P. Patrick, "Bending and springback of aluminum alloy sheet and plate", Formability Topics - Metallic Materials, ASTM STP 647, B. A. Niemeier, A. K. Schmieder and J. R. Newby, Eds., American Society for Testing and Materials, 1978, pp.65-85
3. C. Wang, G. L. Kinzel and T. Altan, "Process simulation and springback control in plane strain sheet bending", SAE Paper 930280
4. C. Wang, G. L. Kinzel and T. Altan, "Mathematical modeling of plane-strain bending of sheet and plate", J. Material Processing Technology, 39(1993), pp.279-304
5. W. Y. D. Yuen, "Springback in the stretch-bending of sheet metal with non-uniform deformation", J. Material Processing Technology, 22, 1990, pp.1-20
6. C.-C. Chu, "The effect of restraining force on springback", Int. J. Solids Structures, Vol. 27, No. 8, 1991, pp.1035-1046
7. Z. Tan, W. B. Li and B. Persson, "On analysis and measurement of residual stresses in the bending of sheet metals", Int. J. Mech. Sci., Vol. 36, No. 5, 1994, pp.483-491
8. A. M. Szacinski and P. F. Thomson, "The effect of mechanical properties on the wrinkling behavior of sheet materials in the Yoshida test", J. Mech. Working Technology, 10(1984), pp.87-102
9. H. Ameziane-Hassani and K. W. Neale, "On the analysis of sheet metal wrinkling", Int. J. Mech. Sci., 33(1991), pp.13-30
10. K. W. Neale and P. Tuggu, "A numerical analysis of wrinkling formation tendencies in sheet metals", Int. J. Num. Methods in Engineering, 30(1990), pp.1595-1608

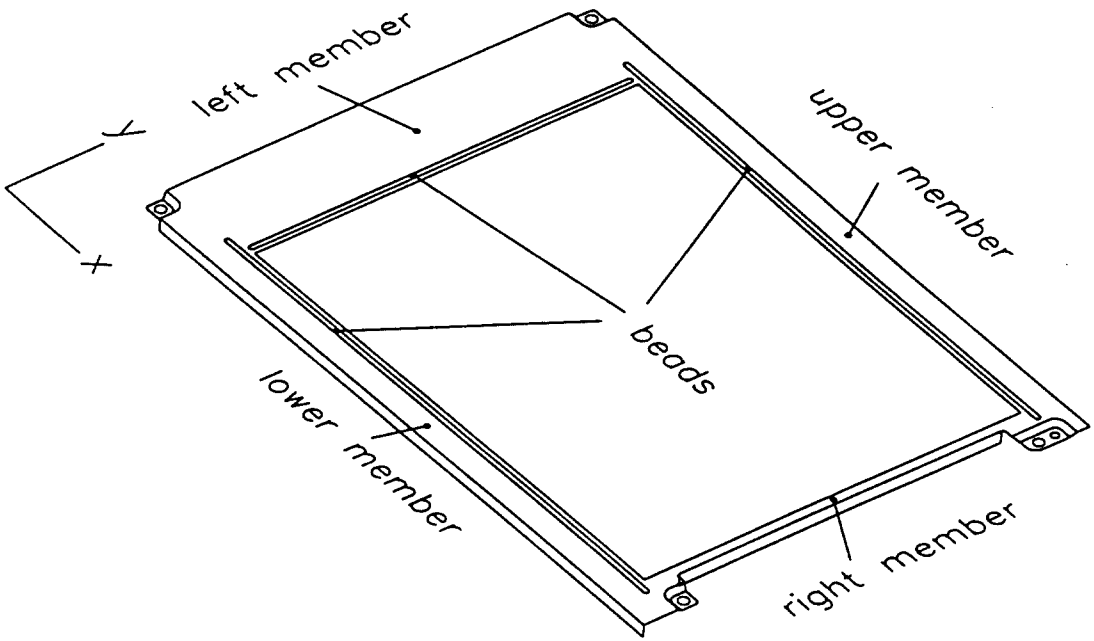


그림 1. 금속박판 4 각 frame.

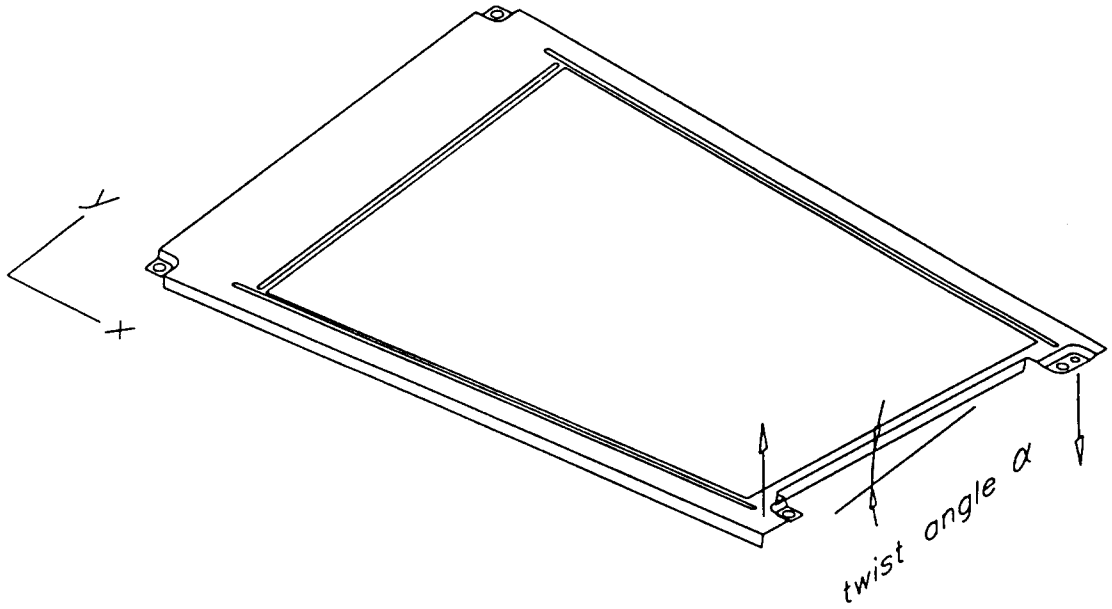


그림 2. 금속박판 4 각 frame 의 성형 후 뒤틀림.

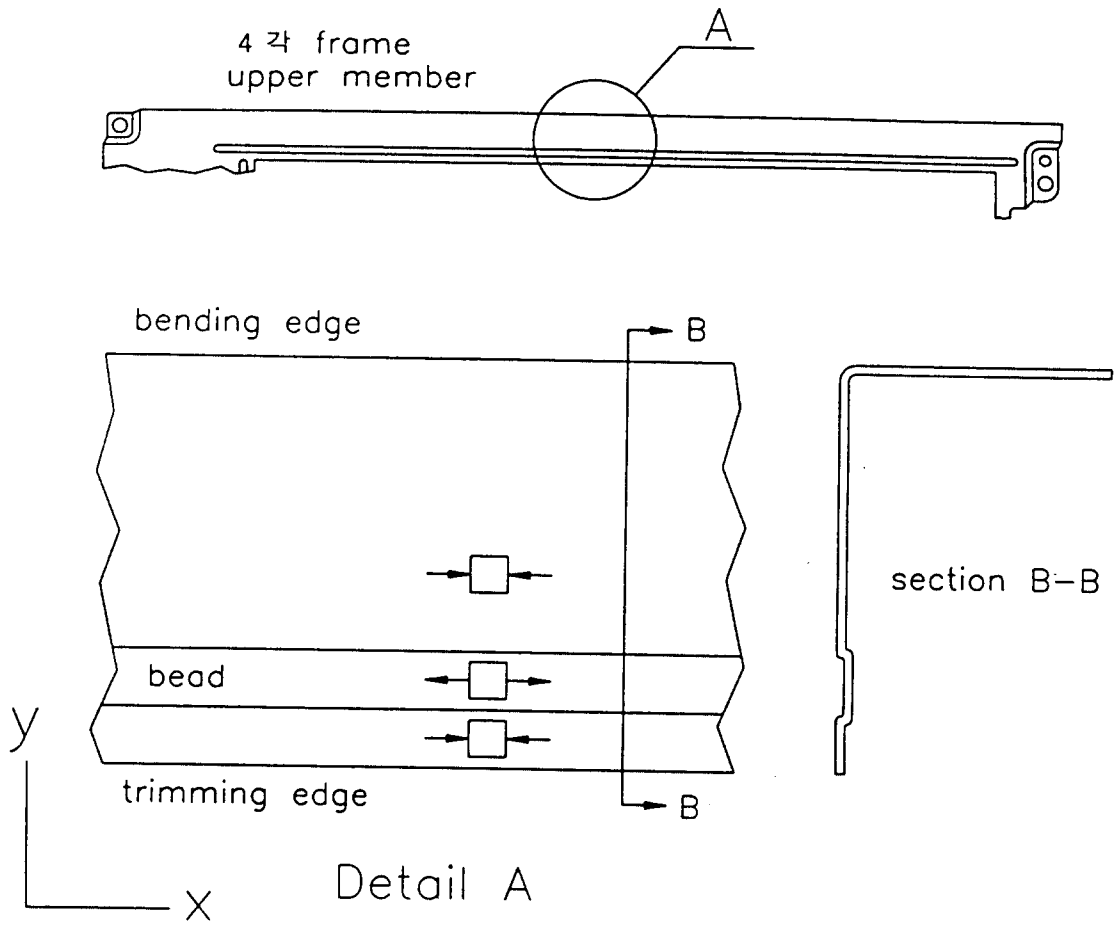
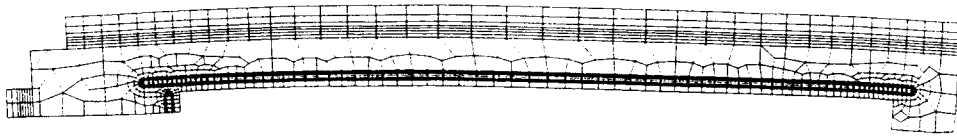


그림 3. 4 각 frame 상부멤버의 길이 방향 잔류 응력

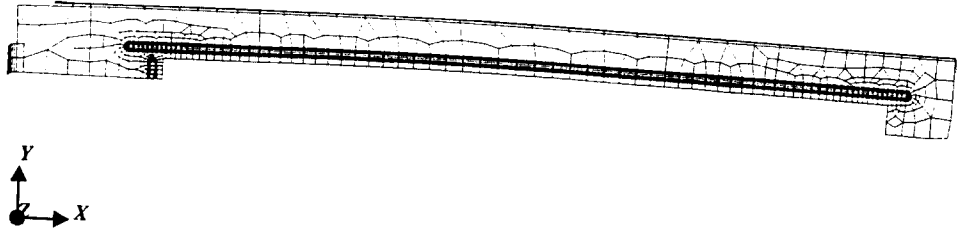


(a) 평면내 굽힘(in-plane bending, 변위확대비율=20)

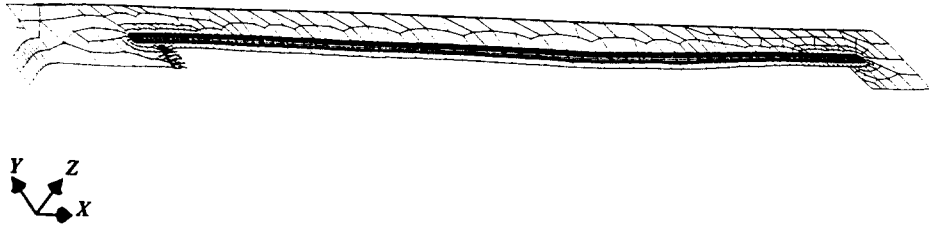


(b) 평면이탈 변형(warping, 변위확대비율=10)

그림 4. Edge bending 을 하지 않은 4 각 frame 상부멤버의 탄성복원(springback).



(a) 평면내 굽힘(in-plane bending, 변위확대비율=20)



(b) 평면이탈 변형(warping, 변위확대비율=10)

그림 5. Edge bending 의 in-plane bending 과 warping 억제 효과(상부멤버의 경우)

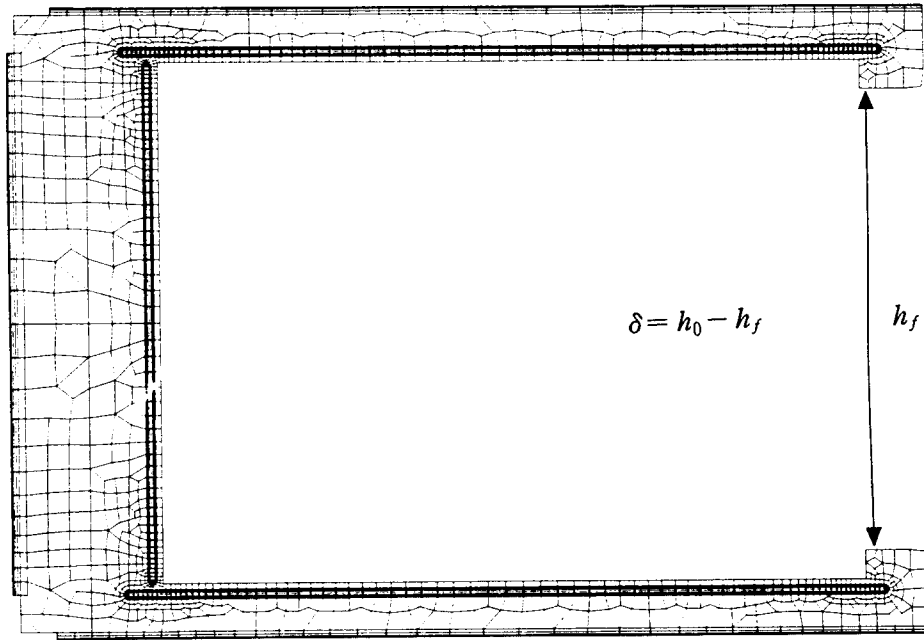


그림 6. 우측멤버를 제거한 4 각 frame 의 in-plane bending.

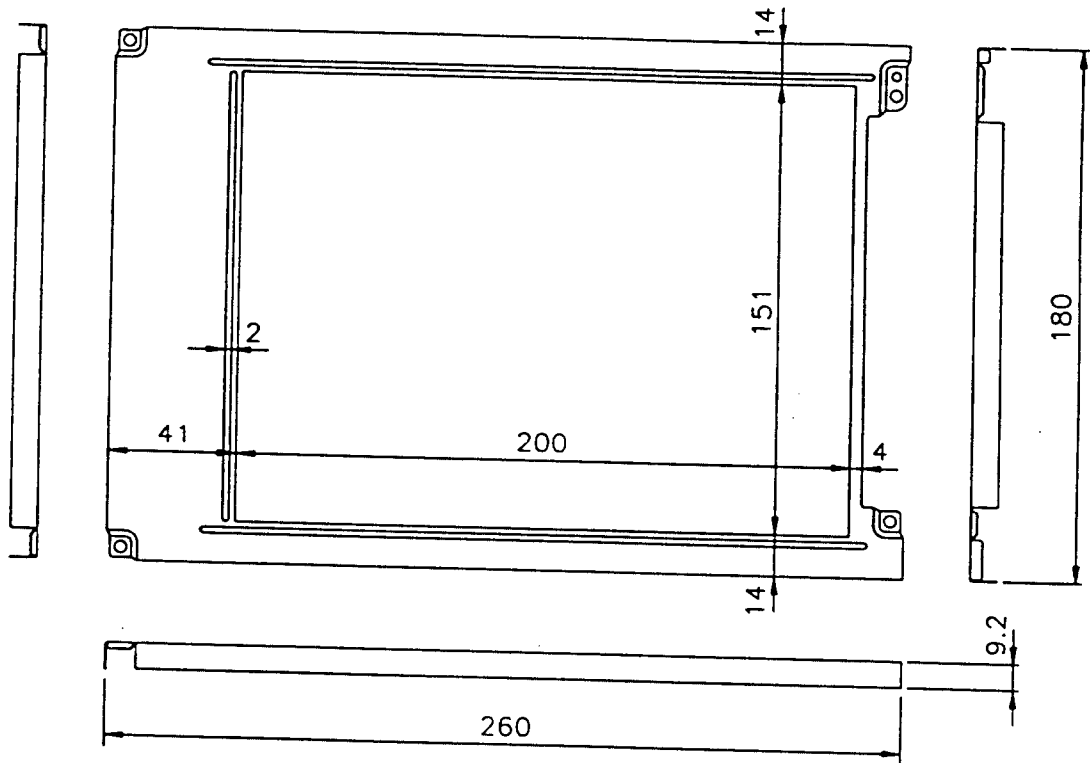


그림 9. 4 각 frame 의 제품 치수

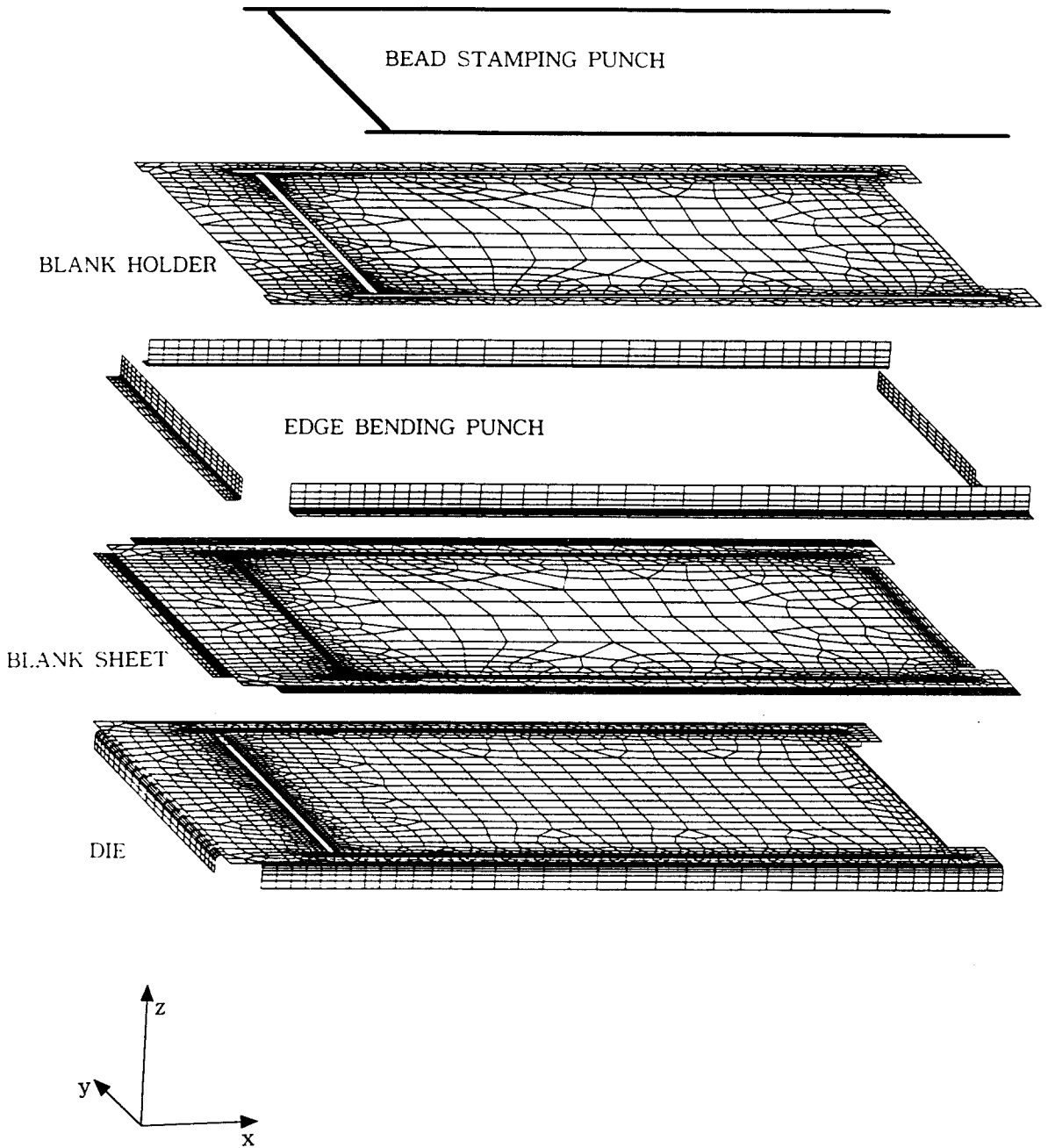


그림 7. 4 각 frame 의 성형해석 모델

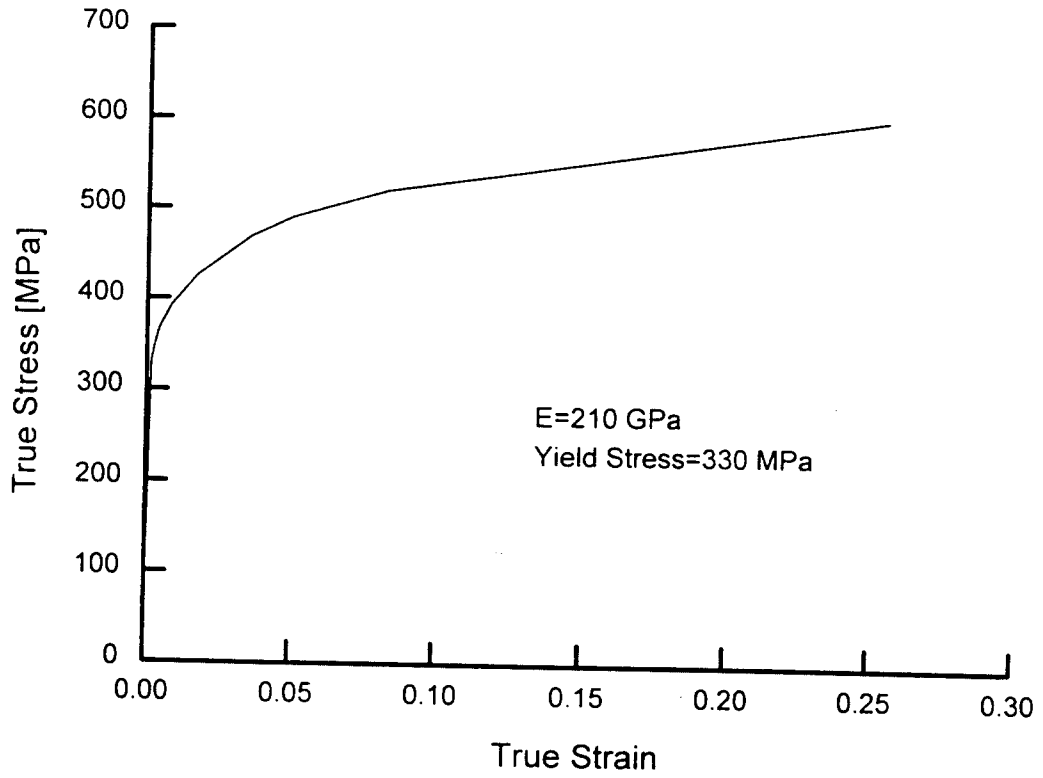
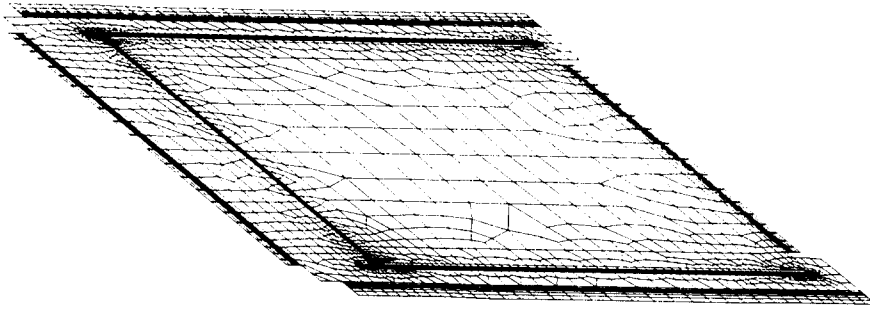
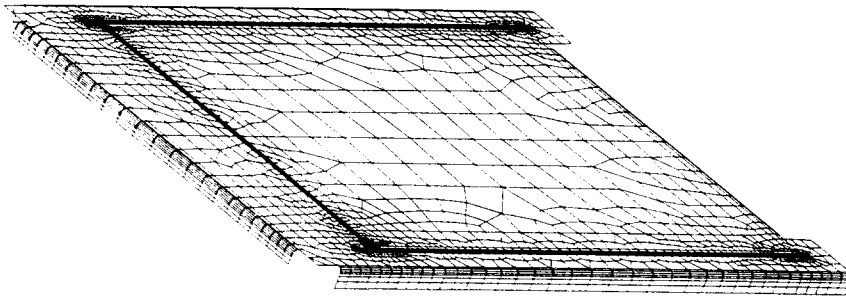


그림 8. 4 각 frame 소재의 응력-변형률 곡선(true stress - true strain)



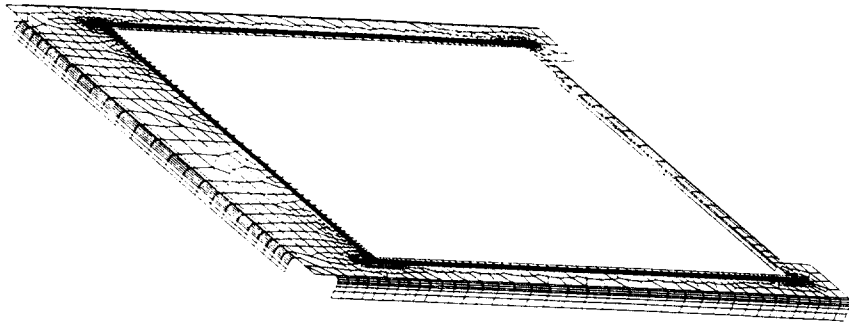
(a) bead stamping



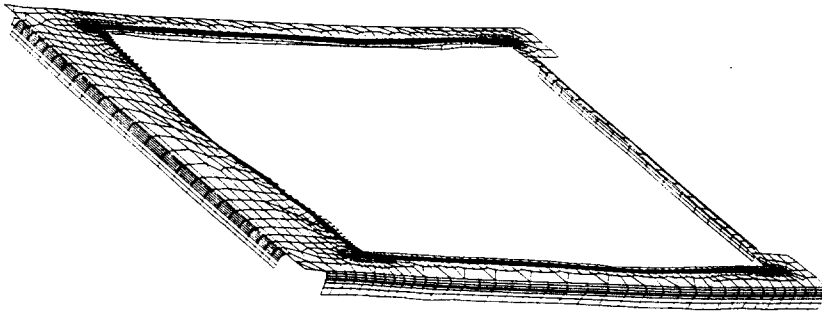
(b) edge bending

그림 10. 성형단계별 유한요소해석 결과(변위확대비율=1)

- | | |
|-------------------|------------------|
| (a) bead stamping | (b) edge bending |
| (c) trimming | (d) springback |



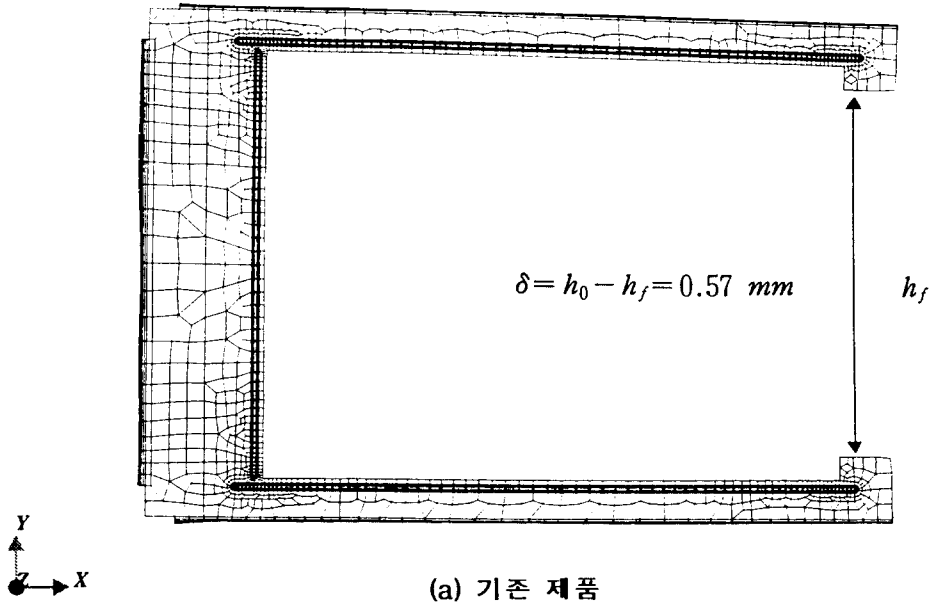
(c) trimming (변위 확대비율=1)



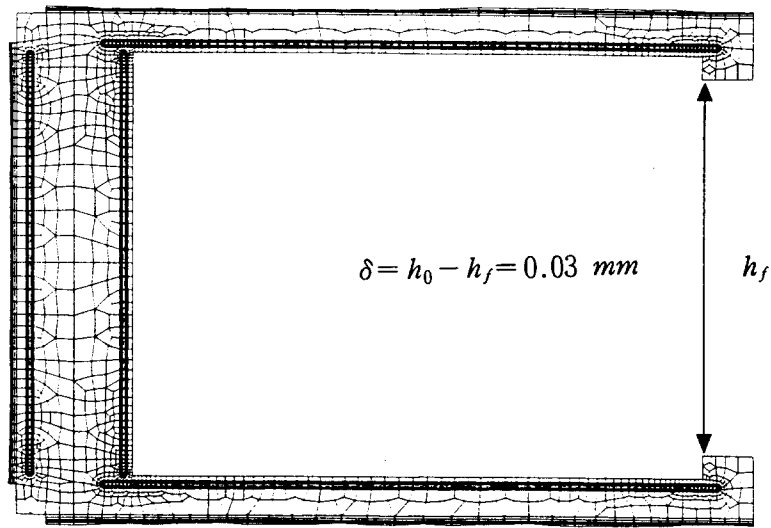
(d) springback (변위 확대비율=10)

그림 10. 성형단계별 유한요소해석 결과 (계속)

- | | |
|-------------------|------------------|
| (a) bead stamping | (b) edge bending |
| (c) trimming | (d) springback |

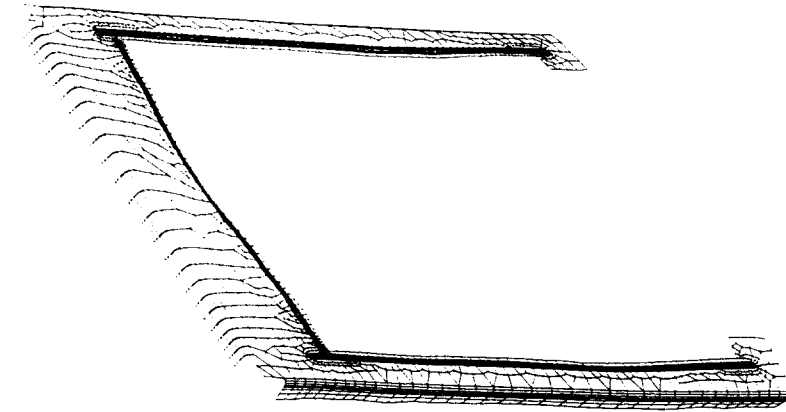


(a) 기존 제품

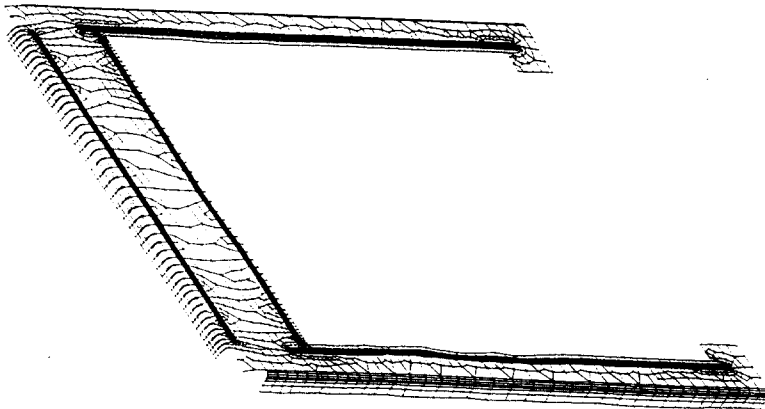


(b) 좌측멤버에 double bead 가 형성된 제품

그림 11. 좌측멤버에 포함된 double bead 의 in-plane bending 억제 효과
변위확대비율 = 10

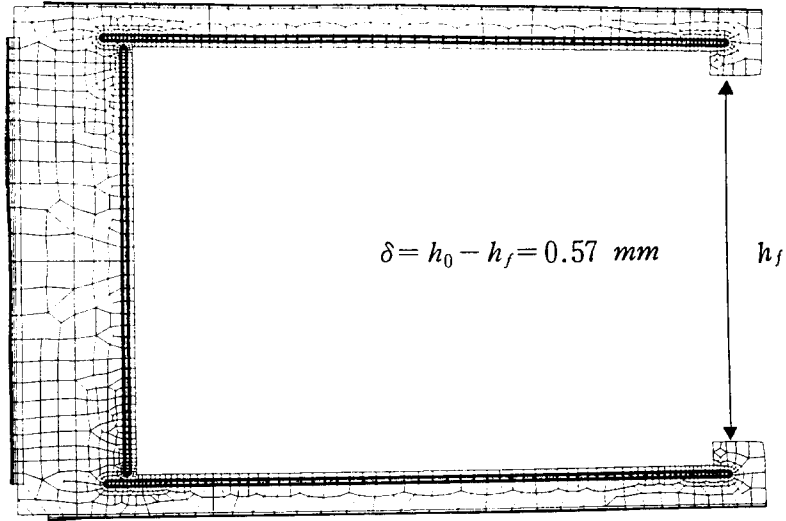


(a) 기존 제품

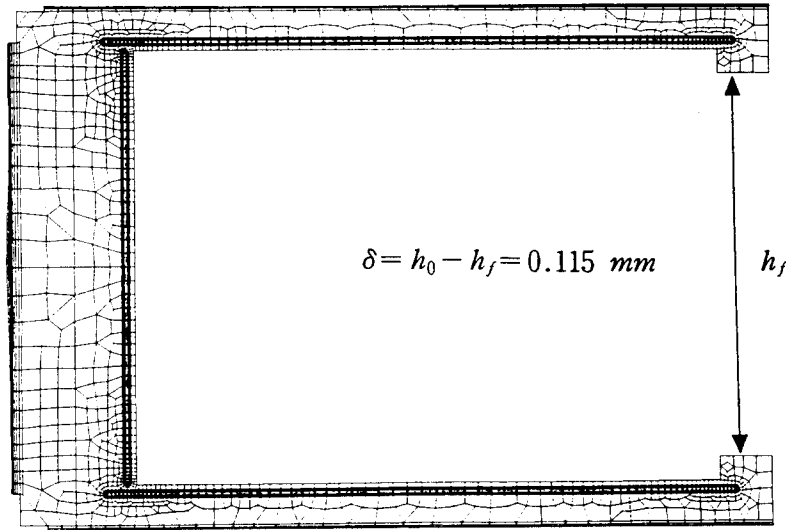


(b) 좌측멤버에 double bead 가 형성된 제품

그림 12. 기존 4 각 frame 과 좌측멤버에 double bead 를 갖는 제품의 warping 비교
변위확대비율 = 10

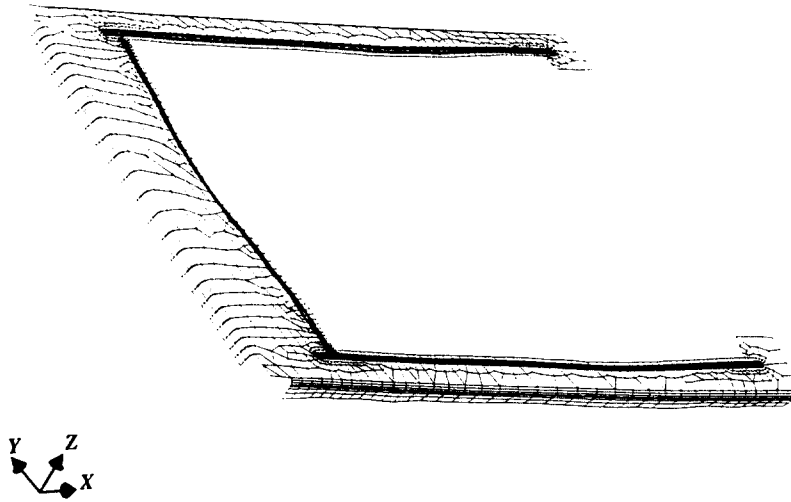


(a) 기존 제품

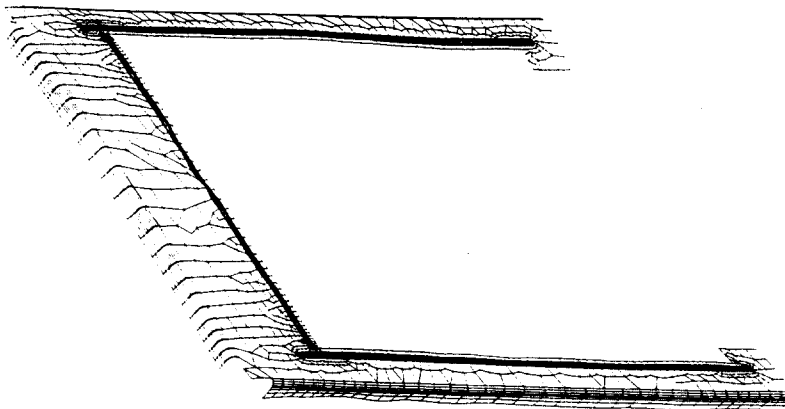


(b) 좌측멤버에 curved edge 가 형성된 제품

그림 13. Curved edge 의 in-plane bending 억제 효과
변위확대비율 = 10



(a) 기존 제품



(b) 좌측멤버에 curved edge 가 형성된 제품

그림 14. 기존 4 각 frame 과 좌측멤버에 curved edge 를 갖는 제품의 warping 비교
변위확대비율 = 10