

다단계 디프드로잉가공에서의 소재형상설계 및 성형성

박 민호*, 김 상진*, 서 대교**

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교

The blank design and the formability
for the multi-stage deep drawing process

Min Ho Park*, Sang Jin Kim*, Dae Gyo Seo**

* Graduate School of Sung Kyun Kwan Univ.

** Sung Kyun Kwan Univ.

Abstract

A method of determining an optimum blank shape for the non circular deep drawing process is more investigated and applied to the blank design for multi-stage deep drawn product. The forming procedure of two-stage deep drawing process is looked over and the method of determining a blank shape is proposed. In experimental research, a optimum blank and a optional rectangular blank were considered and we measured thickness strain distributions. We could predict a strain distribution and compare with a experimental strain distribution. Also, the strain distributions for the blank shapes, optimum and rectangular, were compared.

Key Words : optimum blank shape, blank design, multi-stage deep drawn product, thickness strain distribution, optional rectangular blank

1. 서 론

금속 판재 성형법은 자동차, 항공기, 가전제품, 산업기기 및 일반 소비재등의 제품생산에 광범위하게 이용되고 있는 중요한 금속가공 기술의 하나이다. 특히, 디프드로잉 가공법은 대변형 및 대량생산의 잇점으로 인해 산업현장에 널리 쓰이고 있다. 디프드로잉 가공에서 성형성에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나로 소재형상을 들 수 있는데 적절한 소재형상을 택함으로써 성형성을 높이고 아울러 시간과 재료 등의 손실을 줄일 수 있으므로 제품의 경쟁력을 높일 수 있다. 그러나 소재형상은 제품의 형상과 가공 조건에 따라 모두 달라지므로 적절한

소재형상을 결정하는 것은 대단히 어려운 일이다. 대부분 산업 현장에서는 경험적인 방법에 의존하므로 새로운 제품을 설계할 때 금형의 형태가 결정된 후 적절한 소재형상을 선택하기 위해 많은 시행착오를 겪게 된다. 뿐만 아니라 디프드로잉 공정 자체가 다단계 일 때는 이러한 소재형상의 결정이 더욱 어려워지게 된다.

디프드로잉 가공에서 소재형상 설계에 관한 대표적인 연구로는 미끄럼 선장법을 이용한 해석과 유한요소법을 이용한 해석^{(1),(2),(4),(5)}과 실험적인 시행착오법⁽⁶⁾을 이용한 해석등이 있다. 그중 T.Jimma등⁽³⁾은 미끄럼선장법을 이용하여 오일팬형상 다단계제품의 소재형상을 설계한 바 있다. 그러나 미끄럼선장법은 고전적인 방법으로 평면 변형률을 가정하여 해석하므로 실제 성형과는 차이가 있다. 또한 마찰, 소재 가압력, 재료 두께 등 여러 가지 가공 조건을 무시하는 단점이 있다. 최근에는 유한요소법을 이용한 연구⁽⁷⁾가 많이 발표되고 있는데 대부분이 성형성에 관한 것들이다. 유한요소법을 이용한 소재형상 설계에 관한 연구로는 시행착오법을 이용한 방법⁽⁸⁾, 성형과정을 역으로 추적하는 방법등이 있다. 다단계제품의 성형성에 관한 연구는 T.Jimma등⁽³⁾이 오일팬형상의 다단계제품에 대해 연구한 바 있다.

본 연구에서는 비원형 단면 디프드로잉 가공시 소재형상을 설계하는 기술⁽¹⁾을 바탕으로 이를 확장하여 다단계 디프드로잉 가공에서의 최적소재형상을 설계할 수 있는 방법을 제안한다. 실험으로는 설계된 최적소재형상의에도 사각소재형상을 이용하여 실험을 하고 두가지 소재형상에 대한 성형성을 비교해 본다.

2. 소재형상설계

소재형상 설계의 목적은 한번의 공정으로 되도록 귀가 없고 높이가 균일한 이상적인 제품을 얻도록 하는 것이다. 본 연구에서는 높이가 균일한 이상적인 최종 제품을 가정하고 이러한 제품을 얻기 위한 재료가 거치게 되는 경로를 역으로 추적하여 최적 소재형상을 찾도록 하는 역추적 기법을 사용하였다. 이러한 소재의 원형 설계에 강소성 유한요소법을 이용하였으며 임의의 단면 형상에 대한 소재형상을 설계할 수 있는 프로그램 코드를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 최종 제품의 높이를 입력 값으로 하며 가공시에 영향을 미치는 마찰, 블랭크 가압력, 가공 여유 등을 모두 고려할 수 있도록 하였다.

2.1 디프드로잉 성형 모델

Fig. 1 은 디프드로잉 성형의 초기 단계를 도시한 것이다. 플랜지 부분의 재료는 평면응력 상태로 가정⁽⁹⁾할 수 있으며 펀치가 진행함에 따라 마찰에 의한 변형이 일어날 것이다. 재료가 다이 모서리를 지나면서 굽힘과 되돌림 굽힘을 받게 되며 유입된 후 벽면에서는 더 이상의 변형이 없이 펀치와 같은 속도로 진행하게 될 것이다. 따라서 소재형상은 주로 플랜지에서의 마찰에 의한 변형과 굽힘에 의한 변형에 의존한다고 볼 수 있다. 그림에서 A 영역은 성형의 초기에 펀치가 진행함에 따라 순수한 인장 변형만을 한다고 보았으며 이때 플랜지에서 재료의 유입은 없다고 본다. 그림의 B 영역은 펀치와 다이 사이의 가공 여유(clearance) 부분이며 성형 후 컵의 벽면에 위치하므로 소재형상 설계시 반드시 포함시켜야 할 부분이다. 실제로 변형이 생기는 플랜지 부분은 C 영역이 된다. 재료는 등방성을 간주하며 n승 경화 특성을 가진다고 가정하였다.

2.2 소재형상 설계법 (역추적 기법)

Fig. 2 는 원통 컵의 소재형상을 추적하는 모습을 나타낸 그림으로 그 1/4 만을 도시한 것이다. 컵의 바닥은 강체로 보았으므로 해석에서는 제외되었다. 먼저 (a) state 1 은 완성된 이상적인 제품 형상을 도시한 것이며 일정한 각격으로 요소 분할되어 있다. 빗금친 요소 A는

성형시 마지막으로 유입된 부분이며 유입되기 직전의 위치를 (b) state 2 에 나타내었다. (b) 에서 (a) 로 성형될 때 컵 벽면의 법선 방향을 따라 초기 속도 벡터가 작용한다고 가정하였는데 이것은 펀치의 진행 방향이 플랜지에 대해 수직 방향이기 때문이다. 또 이때 플랜지에서 굽힘과 되돌림 굽힘에 의한 저항력이 속도 벡터의 반대 방향으로 작용하며 소재 가압력에 의한 마찰 저항력도 작용한다고 본다. 따라서 이와 같은 재료의 유동 과정을 반대로 적용하면 (b) state 2 에서의 소재의 위치가 결정되어진다. (c) state 3 는 (b) 의 전(前) 단계로 요소 A 가 플랜지 내에서 이동하므로 속도 벡터는 알려져 있지 않고 절점력도 소재 가압력에 의한 마찰 저항력만이 작용한다. (d) state 4 는 위의 과정을 거쳐 얻은 초기 소재형상을 도시한 것이다.

2.3 이론적 계산

본 연구의 유한요소 프로그램은 컵의 높이를 입력 값으로 하여 입력된 높이의 등고형 컵을 얻기 위한 소재형상을 설계한다. 계산 수행시 고려된 입력 데이터로는 소재 가압력(BHF), 마찰계수, 소성계수, 가공경화지수, 다이 모서리 반경, 펀치 모서리 반경, 소재 두께, 가공 여유 등이 있으며 Table 1. 에 입력 데이터 값을 보였다. 이상적인 제품의 형상으로 높이가 일정한 등고형 컵을 가정하였다.

본 연구에서 가정한 제품은 단면 형상이 1단과 2단 모두 정사각형인 경우로 그 기하학적 형상을 Fig. 3 에 나타내었다. h_2 를 30mm, 20mm, h_1 을 15mm, 20mm, 25mm로 바꾸어 가며 설계해 보았으며, 성형되는 최대 h_1 의 높이에 해당하는 소재형상도 설계해 보았다.

다단계 디프드로잉 가공에서 소재형상을 구하기 위해서는 먼저 마지막으로 성형된 2단 부분의 성형시 이상적인 제품 형태를 얻기 위한 소재형상을 계산한다. 이 과정을 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 4 의 (a) 는 가정된 이상적인 최종 제품 형태이며 (b) 와 (c) 는 2단 부분의 형상결정 중간 과정을 보여주고 있다. (d) 는 계산 결과 얻어진 2단 부분의 소재형상이다.

2단 부분의 소재형상이 계산되면 그로부터 1단 부분의 제품을 얻기 위한 소재형상을 계산하게 된다. 이때 2단 부분의 소재형상은 1단 부분의 플랜지의 형상이 된다. (e) 는 (d) 와 같은 형상이나 계산을 위해 요소를 재구성한 형태이다. 중간 과정을 (f), (g) 에 나타내었으며 최종적으로 구해진 소재형상을 (h) 에 도시하였다.

설계된 최적소재형상을 Fig. 5 에 도시하였다. Fig. 5는 높이가 $h_1=15\text{mm}$, $h_2=30\text{mm}$ 인 제품의 소재형상을 예로 제시하였다.

3. 실험

본 연구에서 제안한 소재형상을 실험을 통해 검증하고 변형률분포를 고찰하였다. 재료는 자동차 차체 성형용으로 많이 쓰이는 아연도금 유기피막 강판을 사용하였다. 디프드로잉장치는 직접 고안하였으며, 윤활은 무윤활로 실험하였다.

3.1 블랭크의 형상

블랭크는 재료를 앞에서 설계한 소재형상과 같은 모양으로 절단기와 연삭기를 이용하여 절취하였으며 설계한 소재형상의에도 산업현장에서 흔히 쓰이는 사각형 블랭크를 이용하여 실험하였다. Fig.6 에서 나타내는 바와 같이 설계된 소재형상의 끝부분이 사각형의 단면과 만나도록 하여 그 크기를 결정하였다.

3.2 성형과정

다단계 디프드로잉 가공은 먼저 작은 크기의 단면을 가지는 펀치로 1단 성형을 한 후 그

플랜지를 소재형상으로 하여 더 큰 단면을 가지는 펀치로 2단 성형을 하는 과정을 가진다.

Fig. 7 은 다단계 디프드로잉 가공의 성형 과정을 나타낸 것이다. (a) 는 1단 성형을 위한 펀치와 다이틀 보여주고 있다. 초기 소재가 가압력을 받고 있으며 펀치가 진행하여 1단 성형을 한 후의 모습을 (b) 에 나타내었다. (c) 는 (b) 에서 성형한 소재를 2단 성형을 위한 펀치와 다이에 설치한 모습을 보여주고 있다. 1단 성형한 재료의 플랜지 부분이 2단 성형을 위한 소재형상이 되며 앞서 성형한 1단 부분은 펀치 바닥에 위치하므로 강체와 같이 진행한다. (d) 는 2단 펀치가 진행하여 성형이 끝난 후의 모습을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 제품은 두 개의 층으로 구성된 2단 디프드로잉 가공 제품이 된다.

3.3 실험결과

제품의 높이와 소재형상을 변화시켜 가며 실험하였는데, 그에대한 성형여부를 Table 2.에 나타내었다. $h_2=20\text{mm}$ 일 때에는 설계된 소재형상은 $h_1=21\text{mm}$ 까지 성형되었고, 사각형상은 $h_1=19\text{mm}$ 까지 성형되었다. 사각형상이 실험시 마지막까지 플랜지 부분이 남아 있어 최적소재형상보다 일찍 파단되었다. $h_2=30\text{mm}$ 일 때에는 설계된 소재형상은 $h_1=19\text{mm}$ 까지 성형되었고, 사각형상은 $h_1=15\text{mm}$ 까지 성형되었다. $h_2=30\text{mm}$ 이기 때문에 1단계 성형시 플랜지로 남는 부분이 $h_2=20\text{mm}$ 일때 보다 많아 일찍 파단되었다.

Fig. 8 에서는 $h_1=15\text{mm}$, $h_2=30\text{mm}$ 에 해당하는 성형된 제품을 보여주고 있다. 제안된 소재형상에 의한 제품은 비교적 높이가 고르게 나왔다.

4. 결과 비교 및 결론

본 연구에서는 모든 제품들의 변형률분포를 측정하였으며, 블랭크모양, 제품의 높이가 달라질 때의 변화를 비교하였다. 변형률분포는 그림에서 보듯이 각 제품마다 단면 방향(a-line)과 모서리 방향(B-line)을 측정하였다.

4.1 결과 비교

Fig. 9 는 최적소재형상과 사각소재형상으로 성형한 제품의 변형률분포, 그리고 계산으로 예측된 변형률분포의 비교이다. 단면방향(a-line)을 따라 비교한 것이며, 제품의 높이는 $h_1=15\text{mm}$, $h_2=30\text{mm}$ 이다. 다단계제품은 단이 있으므로 볼록나온 모서리와 오목들어진 모서리가 존재하는데, Fig. 9에서 보듯이 변형률이 취약해지는 부분이 모두 모서리 부분이다. 사각소재형상으로 성형한것이 최적소재형상으로 성형한 것 보다 전반적으로 취약했다. 계산으로 최적소재형상에 해당하는 변형률분포도 예측해 보았는데 실제와는 많은 차이가 있었다. Fig. 10은 역시 최적소재형상과 사각소재형상으로 성형한 제품의 변형률분포, 그리고 계산으로 예측된 변형률분포의 비교이며, 모서리방향(b-line)을 따라 비교한 것이다. 제품의 높이는 Fig. 9와 같다. Fig. 9와는 양상이 많이 다르며, 역시 사각소재형상으로 성형한 것이 최적소재형상으로 성형한 것보다 전반적으로 취약했다. 예측된 변형률분포는 대체로 실험치와 양호하게 일치하였으며, 약간 과대 평가되었다.

Fig. 11 은 $h_1=15\text{mm}$, $h_2=20\text{mm}$ 일 때 최적소재형상으로 성형된 제품의 변형률분포이다. a-line과 b-line을 비교한 것이며, 모서리 부분인 b-line이 더욱 취약하다. Fig. 12 는 앞서 말한 $h_1=15\text{mm}$, $h_2=20\text{mm}$ 일 때 사각소재형상으로 성형된 제품의 변형률분포이다. 역시 b-line이 a-line보다 취약하다.

Fig. 13 은 최적소재형상으로 성형한 제품의 b-line을 따라 측정한 변형률분포를 보여주고 있다. 높이를 변화시켜 가며 비교하였는데, h_2 는 20mm로 고정시키고 h_1 을 15mm, 20mm, 21mm로 변화시켰다. 1단의 높이가 높아질수록 취약해졌다.

4.2 결 론

본 연구에서는 강소성 유한요소법을 이용하여 초기소재형상을 설계하였으며, 설계된 형상과 사각 형상을 이용하여 실험을 하고 측정된 두께변형률분포를 비교한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 유한요소법을 이용하여 설계한 최적 소재형상이 타당함을 알수있었다.
2. 사각형상과 최적형상으로 얻은 제품의 변형률분포를 측정함으로써 최적형상이 두께분포와 높이에서 양호한 결과를 얻었다.
3. 성형된 단단 제품은 각 단 마다 두께변형률이 취약했으며, 사각형상을 이용한 제품에서 더욱 취약하였다.
4. 수치해석으로 예상된 두께분포는 모서리방향(b-line)에서는 실험과 유사했지만, 단면방향(a-line)에서는 차이를 보였다. 전체적으로 세밀한 부분까지 예측은 불가능하였다.

* 후기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의하여 수행중에 있습니다. 지원해주신 데 대하여 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 김상도, 박민호, 서대교, 유한요소법을 이용한 비원형 단면 디프드로잉 가공에서의 소재형상 설계, 대한기계학회 '94년도 춘계학술대회논문집(I), pp. 353-357 (1994)
- [2] H.Gloeckl, K.Lange, Computer aided design of blanks for deep drawn irregular shaped components, Proc. 11th NAMRC. 243 (1983)
- [3] T.Jimma, T.Kuwabara, Deep drawing of shells with bi-level bottoms, Advanced Technology of Plasticity, Vol 11., pp.1159-1164 (1986)
- [4] N.Kim, S.Kobayashi, Blank design in rectangular cup drawing by an approximate method, J.Mach.Tool Des.Res. 26-2, 125 (1986)
- [5] 이충호, 허훈, 박관금속성형공정에서의 블랭크 설계 및 변형률예측, 춘계학술대회 논문집(I), pp.451-456 (1995)
- [6] 정병철, 최정호, 한영호, 밀면에 단이 있는 사각형 용기의 디프드로잉에 대한 실험적 연구, 춘계학술대회논문집(I), pp.761-765 (1994)
- [7] Toshihiko Kuwabara, Hiroyuki Ichikawa, A method for determining optimum blank shapes for convex polygonal cups by the combined use of slip-line field theory and rigid-plastic finite element method, Advanced Tech. of Plasticity 1993, pp. 1679-1684 (1993)
- [8] Li Shunping, Li Shuoben, A study on the determination of blank shapes for deep-drawn parts, Advanced Tech. of Plasticity 1993, pp. 1567-1572 (1993)
- [9] 김동원, 소성학, 청문각, pp. 163-167

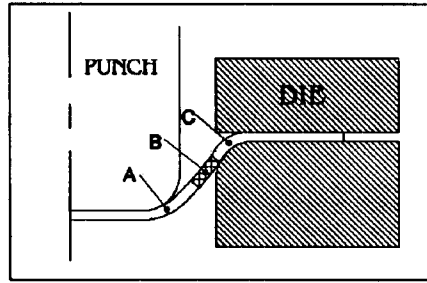


Fig. 1 Illustration of deep drawing process

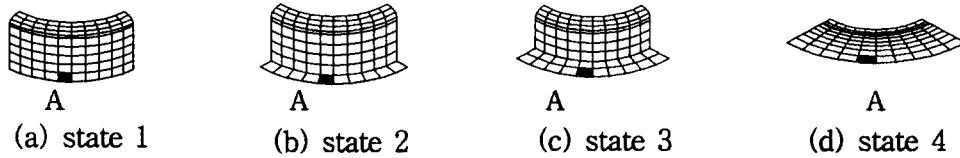


Fig. 2 Movement of marked element

Table 1. Input data

BHF (kgf)	frictional coefficient	plastic coefficient (kgf/mm ²)	strain hardening exponent	die profile radius	thickness of sheet
500	0.1	47.765	0.25	5mm	0.7mm

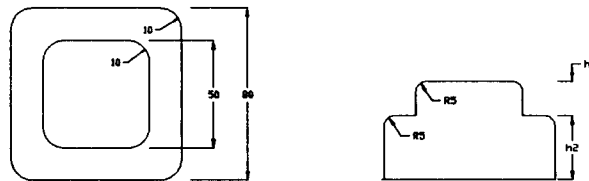
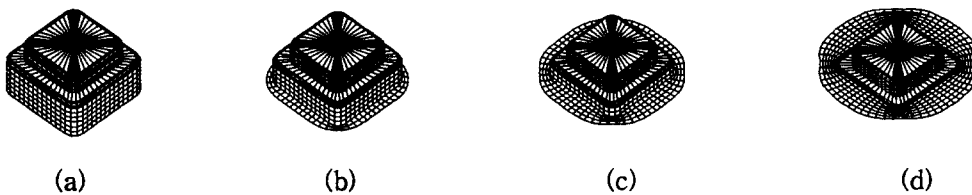


Fig. 3 Geometry of deep drawn product. (mm)



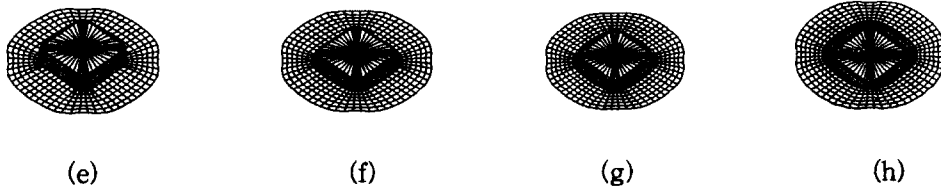


Fig. 4 Calculation of blank shape

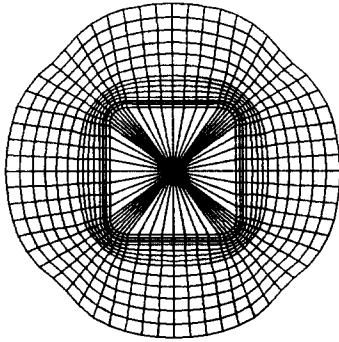


Fig. 5 Calculated optimum blank shape

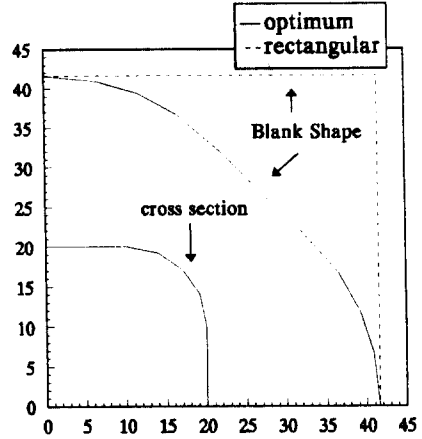


Fig. 6 Comparison of optimum and rectangular blank shape

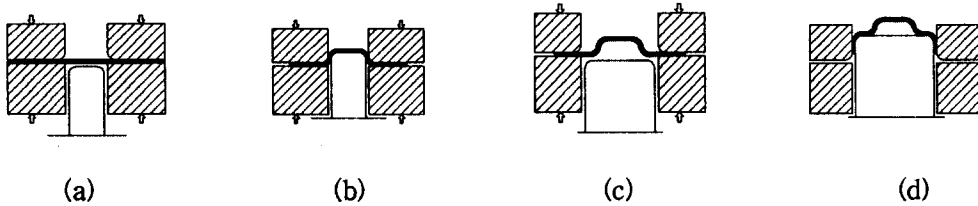


Fig. 7 Geometry of multi-stage deep drawing process

Table 2. Height of each blank shape

(UNIT: mm)

Blank shape	h2 = 20					h2 = 30			
	h1=15	h1=19	h1=20	h1=21	h1=25	h1=15	h1=17	h1=19	h1=20
Optimum	○	○	○	○	×	○	○	○	×
Rectangular	○	○	×			○	×		



Fig.8 Experimental result from optimum blank shape and rectangular blank shape. (h1=15mm, h2=30mm)

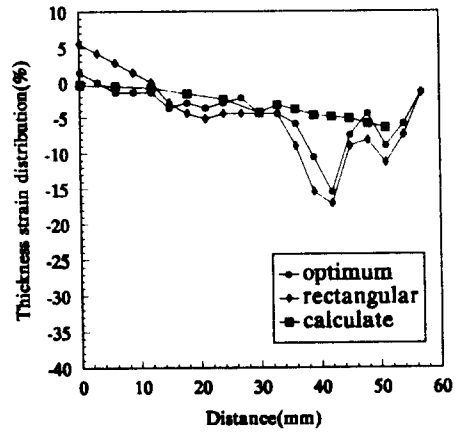
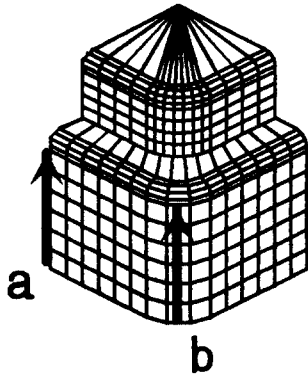


Fig.9 Thickness strain distribution (h1=15mm, h2=30mm, a-line)

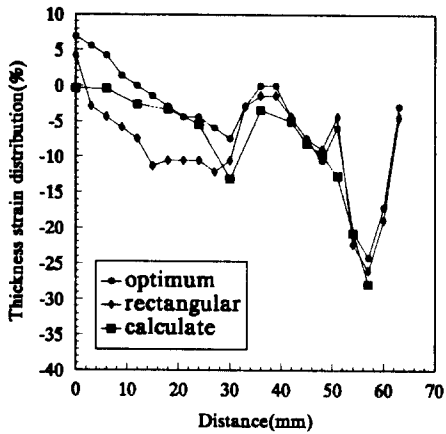


Fig.10 Thickness strain distribution (h1=15mm, h2=30mm, b-line)

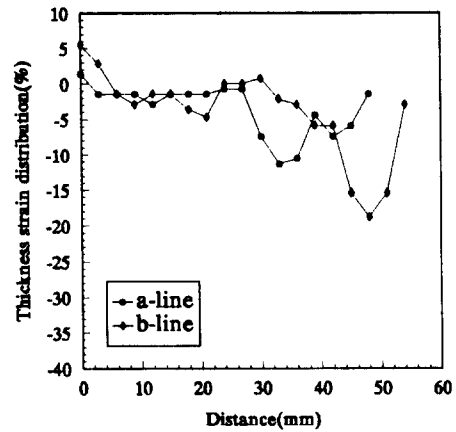


Fig.11 Experimental thickness strain distribution (optimum blank, h1=15mm, h2=20mm)

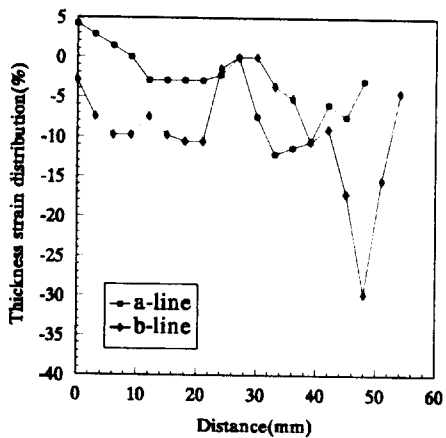


Fig.12 Experimental thickness strain distribution (rectangular blank, h1=15mm, h2=20mm)

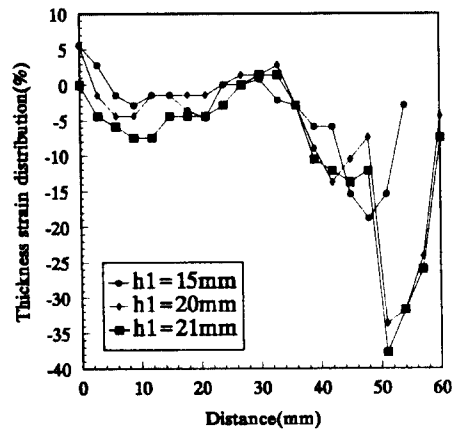


Fig.13 Experimental thickness strain distribution of each height (optimum blank, b-line, h2=20mm)