

# 오스테나이트계 AISI304 스테인레스강판의 프레스 성형특성

남재복\*, 류도열\*\*, 김영석\*

\* 산업과학기술연구소 가공연구실

\*\* 산업과학기술연구소 스테인레스연구실

## Press Formability of Austenitic AISI304 Stainless Steel

J. B. Nam\*, D. Y. Ryoo\*\*, Y. S. Kim\*

\* RIST, Metal Forming Research Lab.

\*\* RIST, Stainless Steels Research Lab.

### ABSTRACT

Fundamental deformation mechanism and plastic behavior of AISI304 austenitic stainless steel were investigated to evaluate press formability. Local and uniform deformation capacity of AISI304 steel were compared to those of ferritic AISI430 steel and Al killed low carbon steel. Nine kinds of austenitic stainless steels having different austenite stabilities were made in laboratory scale to examine the transformation behavior in various deformation mode and variation of mechanical properties. Deformation path and strain distributions along edge corner of commercial sink die were illustrated and effect of austenite stability on press forming of sink die was clarified with experiments using square cup drawing tools.

### 1. 서 론

스테인레스강판은 내식성이 우수하며 프레스 성형성도 양호해 주방용기, 화학산업 분야, 의료기구 및 자동차용 등 광범위한 용도로 이용되고 있다. 국내에서의 스테인레스강의 수요는 국민들의 생활수준 향상에 따라 그 소요량이 증가하고 있으며 특히 주방용품의 고급화 추세에 따라 우수한 성형성을 지니는 오스테나이트계 AISI304강(Cr 18%, Ni 8%)이 각종 용도 및 형상으로 성형되어 널리 보급된 단계에 이르렀다. 스테인레스강판은 Ni, Cr을 포함하는 화학조성의 차이에 따라 강종간에 현저한 특성의 차이가 있고 프레스성형시에 강종별, 대상

용도별 고유의 문제점이 발생할 수 있으므로 스테인레스강의 기본특성 파악 및 성형목적에 부응하는 강종과 프레스 가공법의 적절한 선택이 필요하다.

스테인레스강은 고장력강의 일종으로 연강이나 알루미늄 등에 비하면 성형후의 경도향상이 크며 가공에 소요되는 성형력이나 블랭크 지지력(blank holding force)이 상당히 높아 독특한 성형특성을 보인다. 특히 AISI304로 대표되는 준안정 오스테나이트계 스테인레스강은 변형에 따른 오스테나이트 모상의 가공경화 뿐 아니라 모상의 변태(transformation)에 의해  $\alpha'$  마르텐사이트상이 출현하므로 가공경화성이 높다. 높은 가공경화성은 강판성형시에 전체 펀치접촉부에 변형이 골고루 분포되도록 하여 극부영역에 변형이 집중되는 것을 방지하는 역할을 한다. 이와 같은 변태유기소성(transformation induced plasticity, TRIP)현상에 의해 연강, 웨라이트계 스테인레스강과는 아주 다른 소성거동을 나타내고 있다[1~5].

이와 같은 TRIP현상에는 화학조성이나 결정립 크기로 계산되는 오스테나이트 안정도(austenite stability), 변형온도 및 속도등이 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 원하는 형상을 성형하고자 할 때는 강종의 기본성형특성 파악을 통한 최적의 강종선택 및 프레스 가공조건을 충분히 검토해야 한다.

본 연구에서는 프레스 성형용으로 많이 쓰이는 오스테나이트계 AISI304 스테인레스강의 성형특성을 파악하기 위하여 심가공용 Al-killed 냉연강판(이하 AK 강판이라 한다) 및 웨라이트계 AISI430강판을 비교재로 하여 펀치 스트레칭시험에서의 극부 및 균일연신능력을 비교하였고 성형특성의 온도 및 속도의존성을 검토하였다. 그리고 TRIP현상과 직접적인 관련이 있는 강판 모상의 오스테나이트 안정도가 변태특성 및 기계적특성에 미치는 영향을 보기 위해 안정도가 서로 다른 강종을 실험실적으로 제조, 각종 성형모사시험을 수행하였다. 또한 실물 프레스성형성을 파악하기 위해 대표적인 주방용기인 싱크대의 파단위험부위를 선정, 실험실 규모로 제작된 사각통용기 성형용 금형을 이용하여 오스테나이트 안정도별 위험부위에서의 성형능력을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 소재 및 인장시험

본 실험에 사용된 시험편은 실험실적 진공용해압연재(이하 실험압연재라고 한다)와 시중 입수재로 나눌 수 있다. 실험압연재는 AISI304를 기본조성으로 하여 Ni함량을 7.16 ~ 9.76%로 변화, 오스테나이트 안정도를 다르게 한 9 강종들로 진공유도 용해 및 열간, 냉간압연을 거쳐 제조되었으며, 시중입수재는 현재 주방용기 성형용으로 유통되고 있는 강종들이다. 오스테나이트 안정도는 Angel[6]에 의해 제안되고 Nohara[7]에 의해 수정된 다음 식으로 주어지는 Md30온도로 평가하였다.

$$\begin{aligned} \text{Md30}(^{\circ}\text{C}) = & 551 - 462(\text{C}+\text{N}) - 9.2\text{Si} - 8.1\text{Mn} - 29.0(\text{Ni}+\text{Cu}) \\ & - 13.7\text{Cr} - 18.5\text{Mo} - 68.0\text{Nb} - 1.42(\text{ASTM GS} - 8.0) \end{aligned} \quad (1)$$

위식의 Md30온도는 스테인레스강판이 30% 연신되었을때 소재내부의 오스테나이트 모상의 50%가 마르텐사이트로 변태하는 온도를 의미하며 이 온도가 높을수록 실온에서 오스테나이트상이 불안정하여 동일 크기의 변형량에 대해서도 마르텐사이트 변태량이 많이 생긴다.

AISI304강판과의 성형특성 및 변형률분포특성을 비교하기 위해 웨라이트계 AISI430강판과 자동차의 외판성형용으로 사용되는 AK 강판(DDQ grade)을 입수, 시험에 이용하였다. 소재의

인장시험은 압연방향에 대해 각각 0o, 45o, 90o 방향으로 ASTM E-8시험편을 제작하여 10mm/min의 cross-head속도로 실시하였다. Table 1에 시증입수재인 AISI304강판 및 비교재의 기계적 특성치를 나타내었고 실험압연재의 기계적특성치는 3절의 결과에 도식화하였다.

AISI304강판의 인장특성에 미치는 온도 및 속도의 영향을 조사하기 위해 밀링가공에 의해 고온인장시험편을 제작, 고온 인장시험을 실시하였다. 전기로에 의해 조절한 인장분위기 온도는 실온(약 22oC)에서 160oC까지 20oC 간격으로 변화시켰고 cross-head의 인장속도는 1, 5, 10, 50, 100 및 500mm/min로 변화시켰다. 전기로 내부에 신장계(extensometer)의 설치가 불가능하여 하중-변위선도로부터 다음의 방법으로  $\sigma$ - $\epsilon$ 의 관계를 산출하였다.

Cross-head가 임의거리 X만큼 이동하였을때 공학변형률  $\epsilon_x$ 는 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{X (1 - 10 - 12)}{11 \quad 10} \tag{2}$$

- 여기서, 10 : 인장시험편의 변형전 초기표점거리
- 11 : 최대하중점까지의 cross-head의 이동거리
- 12 : 최대하중점부터 파단까지의 cross-head의 이동거리
- l: 파단된 시험편의 표점간거리

이다.

따라서, 진변형률 및 진응력을  $\epsilon_x = \ln(1 + \epsilon_x)$ ,  $\sigma = P/A_o \exp(\epsilon_x)$ 로 부터 구하였고  $\log \epsilon - \log \sigma$ 의 그래프를 도출하여 인장은도변화에 따른 경화특성을 비교하였다.

### 2.2 성형특성 평가시험

AISI304 및 430 스테인레스강판과 AK강판의 국부연신 및 균일연신능력을 비교하기 위해 박판성형시험기를 이용, Hecker[8]가 제안한 직경 100mm의 강제펀치 스트레칭시험을 실시하였다. 국부연신능력은 시험편의 폭 W를 변화(200mm x W, W=25, 50, 75, 100, 125, 150, 200mm)시켜 드로잉, 평면변형 및 스트레칭성형모드에서의 한계성형능력을 평가하는 성형한계

곡선(Forming Limit Curve, FLC)으로 나타내었고 균일연신능력을 평가하기 위해 FLC시험에서 얻어진 시험편 표면의 변형률 분포를 측정, 비교하였다. 변형률 측정을 위해 시험전 소재표면에 직경 2.5mm의 원형그리드를 전기화학적 부식 법으로 에칭하였고 스트레칭시험에 의한 파단 발생후의 면내변형률을 OGA(Optical Grid Analyzer)로 측정, 원형그리드의 장, 단축 변형량을 도시하였다. 또한 오스테나이트 안정도가 서로 다른 실험 압연재의 성형특성비교를 위해 펀치

Table 1 Tensile properties of tested steels

Steel	YP (kg/mm <sup>2</sup> )	TS (kg/mm <sup>2</sup> )	EI(%)	n (10-20%)
AISI304	24.3	57.7	56.6	0.41
AISI430	36.2	51.9	29.0	0.19
AK-steel	15.9	30.1	44.0	0.23

직경을 50mm로 고정하고 블랭크직경을 2mm간격으로 변화시켜 펀치직경에 대한 파단발생전까지의 최대 블랭크직경비를 의미하는 한계드로잉비(Limiting Drawing Ratio, LDR)도출시험을

실시하였고 ASTM E-643에 의한 Erichsen시험도 실시하였다.

### 2.3 등가변형률의 계산 및 마르텐사이트 변태량 측정

실험압연재중에서 안정도가 서로 다른 3가지의 강종을 선정해 스트레칭 및 드로잉의 두가지 변형모드하에서 모상이 어떠한 변태특성을 지니는 지를 조사하였다. 시험편의 폭을 변화시켜 각 변형모드에서의 소재의 한계능력을 나타내는 FLC시험에서 스트레칭모드의 변형을 나타내는 시험편(W=150, 200mm) 및 드로잉모드의 변형을 나타내는 시험편(W=25, 50mm)의 전체 표면의 공학변형률을 OGA로 측정하여 아래 식과 같이 등가변형률(equivalent strain)  $\epsilon$ 로 환산하였고 체적일정법칙에 의해 그 지점에서의 변형후 두께를 계산하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \ln(1+e_1), \quad \epsilon_2 = \ln(1+e_2) \\ \epsilon_3 &= \ln(t/t_0) = -(\epsilon_1 + \epsilon_2) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\epsilon = (2)^{1/2} / 3 [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{1/2} \tag{4}$$

여기서  $e_1, e_2$  및  $\epsilon_1, \epsilon_2$ 는 각각 위의 시험편 표면에서 측정된 장, 단축방향의 공학변형률과 진변형률을 나타내며  $\epsilon_3$ 는 초기두께  $t_0$ 에서  $t$ 로 변형했을 때의 두께방향 진변형률을 의미한다.

변형률 측정지점에서의 마르텐사이트 변태량( $\alpha'$ 량)을 Ferrite scope로 측정하여 두께  $t$ 의 영향을 도입하기 위해 Tanaka[9]의 식을 이용하였으나 실제 측정결과가 표준 시료와 잘 일치하지 않았다. 따라서 다음과 같이 수정된 보정계수를 곱하여  $\alpha'$ 량으로 결정하였다.

$$\begin{aligned} \text{보정계수} &= -0.00041 \times t^4 - 0.518 \times t^3 + 2.37 \times t^2 \\ &\quad - 3.549 \times t + 2.377 \end{aligned} \tag{5}$$

### 2.4 사각통 용기의 프레스성형실험

주방용기 성형용으로 주로 쓰이는 오스테나이트계 스테인레스강판의 실물 프레스 성형특성을 조사하기 위하여 국내 H사에서 생산되고 있는 주방용 씽크대의 변형률분포를 파악하였다. 변형률분포는 씽크성형용으로 공급되는 강판표면에 원형그리드(직경 2.5mm)를 에칭한 후 상업생산과 동일한 조건으로 성형한 후 부위별 변형률을 측정하였다. 이 변형률 측정결과를 성형한계곡선과 비교, 부위별 변형모드, 변형 경로 및 파단위험부위를 파악하였다. 또한 실험실적인 모사실험을 위해 씽크대의 약 1/4의 축소형상인 사각통 용기성형용 금형을 제작하였다. Fig.1은 사각통 용기성형용 금형의 조립도를 나타낸다. 금형은 크게 상부다이, 하부다이, 드로잉 펀치, 씽크대의 물받이부를 모사성형하기 위한 보조 펀치 및 성형깊이 조절장치로 구성되어 있고 상, 하부 다이에는 소재의 유입을 조절하기 위한 드로오 비드(draw bead)가 설정되어 있다.

실물 씽크대의 전체 변형분포를 재현할 수 있는 사각통 용기성형용 금형의 드로잉 깊이를 결정하기 위해 수차례의 반복시험을 실시한 결과, 블랭크 사이즈 163 x 158 mm(모따기 45 x 45 mm), 1차 드로잉 깊이 36mm 및 형상동결(shape fixation)과 물받이부 성형을 위한 2차 리스트라이킹 깊이를 2mm로 결정하였다. 씽크 축소금형을 이용한 성형시험에서는 안정도가 다른 강종별 씽크성형특성, 두께 분포등을 조사하였고 성형위험부위에서의 실험압연재의 성형가능여부를 조사하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 기본 성형특성

Fig. 2는 시중입수재인 AISI304, 430 및 AK 강판의 성형한계곡선을 비교한 것이다. 오스테나이트계 304강판 및 AK 냉간압연강판은 화이트계 430강판에 비해 전체 변형모드에 걸쳐 우수한 성형능력을 지니고 있음을 알 수 있다. AISI304강판은 Table 1에 나타난 바와 같이 가공경화지수 및 연신율이 AK 강판에 비해 높음에도 불구하고 평면변형 모드(부변형률이 0 근방의 구간)를 제외한 다른 구간에서의 뚜렷한 성형능력의 우세는 보이지 않는다. 그러나 실제 프레스성형시에는 파단의 대부분이 평면변형모드에서 발생하기 때문에 스테인레스 강판의 프레스 성형능력이 저탄소강판에 비해 우수하리라는 것을 예측할 수 있다. 일반적으로 성형한계곡선은 소재의 극부적인 성형능력을 평가하는 수단으로 주로 활용되는데 상기 소재들의 전체적인 균일연신능력을 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 3은 AISI304, AISI430 및 AK 강판의 드로잉 모드에서의 주변형률 분포를 나타낸 그림이다. 폭 25mm의 강판을 직경 100mm인 반구형 펀치로 성형할 때 강판의 길이방향으로 신장되고 폭방향으로 수축되는 드로잉 모드의 변형률 상태가 된다. 이 그림에서는 크랙발생 인접부에서의 AK 강판의 주 변형률이 가장 높은 것을 제외하고는 AISI304 강판이 시험편 전체 표면에 걸쳐 균일하게 변형이 되어 있는 것을 보여 준다. 또한 AISI430강판이나 AK 강판은 크랙 발생부에서 떨어진 곳에 위치한 극점(pole)부분에서는 변형이 10%정도로 변형률의 구배가 거의 없으나 AISI304강종의 경우는 크랙발생부로부터 극점까지 거의 균일한 변형률 구배를 가져 균일연신능력이 우수함을 알 수 있다.

Fig. 4는 소재가 이축으로 인장을 받는 스트레칭 변형모드에서의 주변형률 분포를 비교한 것으로 AISI304강종의 주 변형률이 크랙발생부인 극점주위를 제외하고는 아주 높은 값을 가지며 균일한 변형이 얻어지고 있음을 보여 준다. 특히 AISI430강종에 비해서는 극점 주위뿐 아니라 전체 표면에 걸쳐 월등하게 높은 변형이 얻어져 스트레칭성형성이 뛰어 나다는 것을 알 수 있다. 즉 오스테나이트계인 AISI304 강종의 경우 가공에 의해 동반되는 모상의  $\alpha'$  마르텐사이트 변태로 인해 가공경화 능력이 뛰어나 극부적인 응력의 집중을 방지하며 강판의 전체 표면에 변형을 분산시키는 능력이 우수하다는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 성형온도 및 변형속도 의존성

오스테나이트계 AISI304강종의 우수한 변형능력이 변태유기소성에 기인한다는 사실로부터 변형속도 및 성형온도가 AISI304강종의  $\alpha'$  변태 및 성형특성에 어떠한 영향을 미치는지를 인장시험을 통해 조사하였다.

Fig. 5에 인장 분위기온도의 변화에 따른 연신율, 인장강도 및  $\alpha'$  변태량의 변화를 나타내었는데 AISI304강종이 온도의 영향을 강하게 받는다는 것을 알 수 있다. 인장강도 및  $\alpha'$  변태량은 온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이는 반면 연신율은 일정 온도에서 최대치를 보인다. 따라서 높은 연신율을 얻기 위해서는  $\alpha'$  생성량이 너무 크거나 작아도 안되며 고온에서는  $\alpha'$  변태가 거의 일어나지 않아 변태유기소성에 의한 오스테나이트강의 높은 경화특성의 장점을 얻을 수 없다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 실온 인장시험에서 인장속도를 변화시켰을 때의 기계적 특성치 및 변태특성의 변화를 나타낸 그림이다. 인장속도의 증가에 따라 연신율, 인장강도 및 변태량이 모두 감소하는 경향을 보이며, 인장속도가 빨라질수록  $\alpha'$  변태량의 감소가 두드러지고 있다. 이와 같은

변태량의 감소가 변태유기소성에 의한 가공경화능력을 떨어뜨려 연신율 및 강도를 저하시키는 것으로 생각된다.

이상의 그림으로부터 준안정 오스테나이트 스테인레스강은 변형속도 및 온도의존성이 매우 강하며 특정 온도 및 속도에서 그 강종의 최대 성형능력을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 2.1절에서 기술한 방법으로 구한 온도변화에 따른 소성곡선을 log-log 좌표로 나타내어 그 기술기인 가공경화지수의 변화를 나타낸 그림이다. 인장 분위기온도가 낮은 경우에는 저변형구간과 고변형구간에서의 가공경화지수가 다른 값을 나타내고 있으나 고온에서 인장될 때는 거의 직선적인 응력-변형을 관계를 나타내어 하나의  $n$ 승 경화법칙 즉,  $\sigma = K\epsilon^n$ 으로 표시할 수 있음을 알 수 있다. 이것은 앞의 결과에서도 언급된 바와 마찬가지로 AISI304강판은 실온에서 변형될 때 오스테나이트 모상의 가공경화 뿐 아니라 변형이 진전됨에 따라  $\alpha'$ 변태에 의한 TRIP현상에 의해 고변형구간에서 가공경화능력이 더 향상된다. 그러나 변형온도가 고온으로 갈수록  $\alpha'$ 의 생성이 둔화되어 오스테나이트 모상만의 가공경화특성이 나타나므로 가공경화지수를 거의 일의적으로 결정할 수 있다.

이상의 인장시험결과로부터 실제의 스트레칭 및 킵 드로잉시험에서의 상기 인자의 영향이 어떠한 지를 알아 보기 위해 박판성형시험기를 이용한 속도변화시험을 실시하였다.

Fig. 8에서는 펀치속도를 변화시켰을 때 스트레칭시험에서의 파단시까지 두 높이를 측정하여 스트레칭성형능력의 변화를 관찰하였다. 인장속도의 증가에 따라 연신율 및 변태량이 감소하는 경향을 보여준 앞의 결과에서와 같이 드로잉 모드(시편 폭 25mm) 및 스트레칭 모드(폭 200mm)의 전체 변형모드에서의 펀치속도증가에 따른 두 높이의 감소 즉, 스트레칭 성형능력이 떨어지는 경향이 보인다.

Fig. 9는 컵핑시험에서의 속도영향을 나타낸다. AISI304강 및 비교재로 사용된 AK강, AISI430 강 의 최적 블랭크 지지력의 범위가 서로 달라 최적 조건에서의 상호비교는 곤란하지만 실제 수요가의 드로잉작업시 흔히 발생하는 펀치 곡률부에서의 파단을 재현하기 위해 BHF를 이들 강종의 최적 값보다 약간 높은 4Ton으로 설정하였다. 따라서 컵핑시험시에 플랜지부의 드로잉변형을 기본으로 하여 펀치 두부(head)에서의 스트레칭변형이 어느 정도 발생하는 복합성형모드로 볼 수 있다. 각 속도조건에서 파단이 일어나기까지의 한계 드로잉 깊이는 강종마다 다른 경향을 보이고 있는데 비교재의 경우 본 시험기 최대속도 범위(약 400mm/min) 내에서의 속도증가에 따른 정적마찰저항력의 감소로 인해 한계 드로잉 깊이가 증가하는 반면 AISI304강판의 한계 드로잉 깊이는 Fig. 6에 나타난 성형속도의 영향에 의해 감소하고 있다.

### 3.3 오스테나이트 안정도변화에 따른 성형특성

타원소의 함량은 일정하게 하고 Ni 함량만을 변화시켜 오스테나이트 안정도를 다르게 제조한 실험압연재의 상온 인장시험결과를 Fig. 10에 나타내었다. Md30온도가 높아짐에 따라 항복강도는 약간씩 증가하는 경향을 보이지만 인장강도는 급격히 증가하고 있다. 또한 연신율은 단순 증가 또는 감소의 경향을 보이지 않고 그 값이 최대가 되는 구간이 존재하고 있어 준안정 오스테나이트계 스테인레스강의 인장시 얻어지는 최대 연신율은 Md30온도가 너무 낮아 가공유기변태의 효과를 얻지 못하는 구간과 Md30온도가 너무 높아 심한 가공유기변태에 의한 재료취화가 발생하는 구간의 중간 온도에서 얻을 수 있다고 생각된다.

Fig. 11은 실험압연재의 인장시험시 Md30온도변화에 따른 저변형영역(10%~20% 연신구간)과 고변형영역(30%~40% 연신구간)에서 구한 가공경화지수  $n$ 값을 나타낸 것으로 저변형영역에서는 Md30온도가 높아지면  $n$ 값은 증가하지만 고변형영역에서는 Md30온도가 높아짐에 따라  $n$ 값이 증가하다가 급격히 떨어지고 있다. 이러한 원인을 조사하기 위해 30% 및 40% 연신

후 인장시편 중심부의 마르텐사이트 변태량을 측정된 결과가 Fig.12이다. 이 그림으로부터 Md30온도가 높을수록 변태량은 증가하지만 비교적 고변형구간인 40%연신 시험편에서는 Md30온도가 약 300C이상에서 그 증가경향이 둔화되고 있음을 알 수 있다. 즉, Md30온도가 높아 실온에서 매우 불안정한 강은 저변형영역에서 변태량이 급격히 생성되지만 고변형영역에서는 이미 저변형영역에서 많은  $\alpha'$ 가 생성되었기 때문에 더 이상의 변태가 일어나기 어렵게 되어 고변형구간에서의 n값은 저하된다고 생각된다.

이상의 오스테나이트 안정도변화에 따른 기계적 특성치의 변화로부터 오스테나이트 안정도가 성형특성에는 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위해 성형특성 평가시험을 실시하였다. Fig.13은 LDR값 및 Erichsen값의 변화를 나타낸 결과로 Md30온도가 -400C에서 00C까지는 LDR의 변화가 없지만 그 이상의 Md30온도값을 가지는 소재일수록 LDR값은 증가하는 경향을 보인다. 일반적으로 어떤 소재가 그 소재 고유의 LDR을 넘어 서는 심한 뒹 드로잉가공을 받으면 펀치어깨반경(punch shoulder radius)부분과 접촉하고 있는 소재영역에서 파단이 발생하는데 앞의 Fig.10의 결과로부터 Md30온도가 높은 소재일수록 그 소재가 지니는 높은 인장강도값에 의해 펀치어깨반경부에서의 파단이 방지되어 LDR이 증가하는 것으로 생각된다. Md30온도변화에 따른 Er값의 변화에서는 LDR시험결과와는 달리 최대 Er값을 나타내는 온도구간이 존재함을 보여 준다. 이축인장능력을 나타내는 Er값은 소재의 연신율 및 가공경화능력에 의해 지배되는데 Fig.10의 연신률 및 Fig.11의 고변형구간에서의 가공경화지수의 경향과 거의 유사함을 알 수 있다.

#### 3.4 오스테나이트 안정도변화에 따른 변태특성

Fig.14는 안정도가 각각 다른 실험압연재의 변형모드별 등가변형률로 환산된 변형량에 따른 마르텐사이트 변태량을 측정된 결과이다. 모든 강종이 공통적으로 변형량이 많아질수록 또한 오스테나이트 모상이 상온에서 불안정할수록 즉, Md30온도가 높을수록 변태량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 동일 등가변형률에서도 드로잉모드에서보다 스트레칭모드에서의  $\alpha'$  변태량이 많아 오스테나이트계 스테인레스강판의 우수한 스트레칭성을 예측할 수 있다.

Olsen과 Cohen[10]은 가공유기변태에 관한 모델링을 수행해 변형량의 함수로 표시되는 마르텐사이트 변태량의 곡선이 S자 형상(sigmoidal)을 이룬다고 예측하였는데 본 실험결과에서도 변형모드별로는 강종간에 차이가 있으나 그와 같은 경향을 보이고 있어 변형률이 어느 정도에 달하면 변태량의 뚜렷한 증가가 보이지 않고 포화상태를 이룬다는 것을 알 수 있다.

#### 3.5 사각통 용기의 프레스성형특성 시험

Fig.15는 국내 H사에서 생산되고 있는 가정용 씽크대의 모서리 대각선을 따르는 부위별 변형률분포를 성형한계곡선(FLC)과 비교한 그림이다. FLC를 아래쪽으로 10%이동한 성형여유역(marginal band)과의 비교시 변형분포가 성형여유역 아래에 위치해 대개의 경우 안전하게 성형이 되나 씽크대 코너 모서리부의 곡률이 끝나는 지점(그림의 14번 부위)에 변형이 집중되어 있어 강종에 따라서는 파단을 유발할 수 있는 위험부위임을 알 수 있다.

상기와 같은 파단예상부위에서의 오스테나이트 안정도가 다른 강종별 변형정도를 보기 위해 축소소형용을 이용한 실험실적 씽크성형 모사시험을 실시하였다. 윤활은 실제 가공조건에 따라 하부면(펀치 접촉면)에 비닐+식물성 저점도유, 상부면에 식물성 저점도유를 도포하였다.

Fig.16은 상기의 조건으로 실험하여 위험부위의 주변형량을 측정, 비교한 결과이다. 모든 조건에서의 주변형량은 실물 씽크에서와 마찬가지로 -5%에서 0% 사이에 존재하는 것으로 측정되어 주변형량의 차이는 무시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 Md30 온도가 약 -100C 미

만인 강종은 STS304강종의 성형한계를 넘어 위험부위에서 파단이 발생하였고 그 이상의 온도에서는 높은 가공경화능력에 의한 변형국부화 방지효과에 의해 파단없이 성형되어, 안정도가 다른 강종별 위험부위에서의 씹크성형특성이 명확히 구분됨을 보여 준다.

Fig. 17은 안정도가 다른 두 강종의 사각통 드로잉시의 용기바닥부에서 모서리를 따르는 부위의 두께변화를 비교한 것으로 Md30온도가 높은 소재가 Md30온도가 낮은 소재보다 두께변화가 크지 않고 특히 위험부위(10번 부위)에서의 두께변화가 심하지 않아 파단까지의 성형여유가 많고 안전하게 성형될 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

준안정 오스테나이트계 AISI304 스테인레스강판의 소성거동 및 프레스 성형특성에 관한 실험적 연구를 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

1. AISI304 스테인레스강판은 국부적인 응력집중을 방지하는 가공경화능력이 뛰어나 자동차 외판성형용 딥 드로잉강에 비해 균일연신능력이 우수하였다.
2. AISI304강판의 가공경화능력을 지배하는 변태유기소성은 성형속도 및 분위기 온도의 영향을 강하게 받아 온도 및 속도의 증가에 따라 강도 및 변태량은 감소하는 경향을 나타내며 연신율이 최대가 되는 성형온도범위가 존재하였고 일정 온도이상에서는 변태유기소성의 특성이 보이지 않았다.
3. Md30온도로 표시되는 오스테나이트 안정도는 소재의 기계적 특성치 및 성형 특성치에 영향을 미쳐 소재의 Md30온도가 높을수록 인장강도 및 한계드로잉비는 상승하는 경향을 보였고 연신율 및 Er값이 최대가 되는 Md30온도범위가 존재하였다.
4. Md30온도 및 변태량의 증가에 따라 마르텐사이트변태량은 증가하는 경향을 보였으나 고변형역 구간에서는 소성변태량-변태량곡선이 S자 형상의 포화곡선을 이루어 더 이상의 변태량증가 현상은 보이지 않았다.
5. 씹크대를 이용한 실물프레스 시험 및 실험실적 사각통 드로잉시험을 통해 성형위험 부위를 파악하였으며 파단방지를 위한 Md30온도영향을 규명하였다.

#### 5. 참 고 문 헌

1. F.B.Pickering, "Physical metallurgical development of stainless steels", Stainless steels '84 conference(1984)
2. L.E.Murr, K.P.Staudhammer and S.S.Hecker, Metal. Trans. A, Vol.13A, April(1982), p619
3. S.S.Hecker, M.G.Stout, K.P.Staudhammer and J.L.Smith, Metal. Trans.A, Vol.13A, April(1982), p627
4. 大橋 延夫 外 2, 鐵と鋼, 第63年 5號(1977), p252
5. 野原 清彦, 小野 寛, 川崎製鐵技報, Vol.17, No.3(1985), p315
6. T.Angel, JISI, 177(1954), p165
7. 野原 清彦, 小野 寛, 大橋 延夫, 鐵と鋼, 第63年 5號(1977), p212
8. S.S.Hecker, Sheet Metal Ind., Nov(1975), p671
9. 田中 照夫, 星野 和夫, 日新製鋼技報, 第52號(1985), p36
10. G.B.Olsen and M.Cohen, Metal. Trans. A, Vol.6A(1975), p791



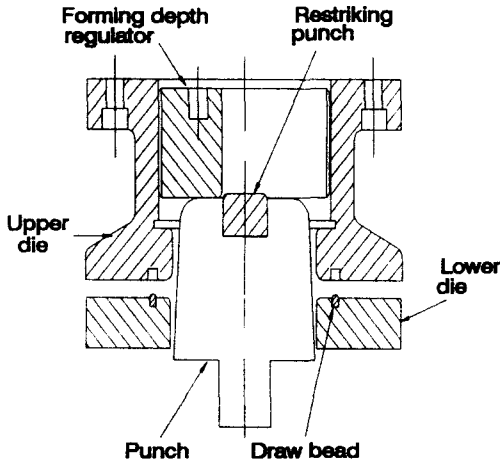


Fig.1 Schematic view of square cup drawing tool

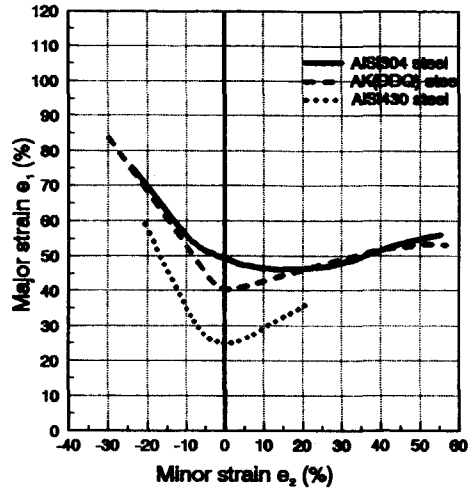


Fig.2 Comparison of Forming Limit Curves of AISI304, 430 and AK(DDQ) steel

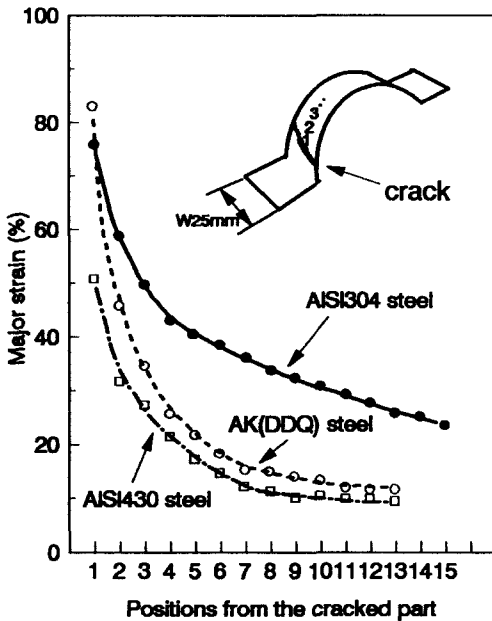


Fig.3 Distributions of major strains of sheet surface along the positions from the cracked part stretched with hemi-spherical punch

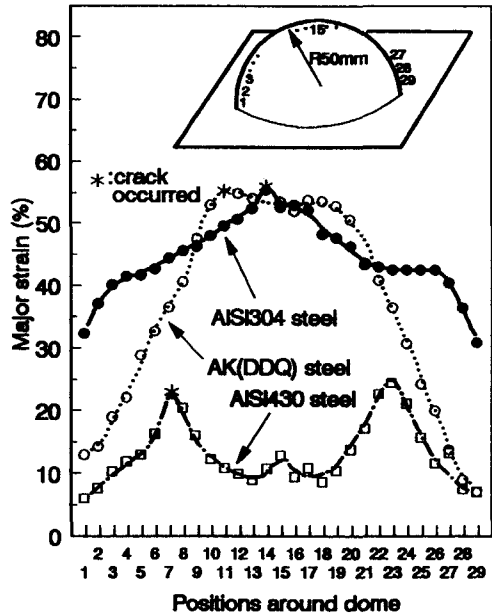


Fig.4 Distributions of major strains of sheet surface along the positions around dome stretched with hemi-spherical punch

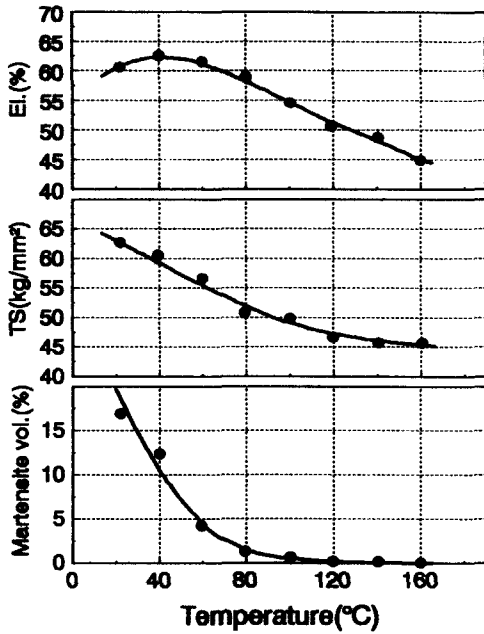


Fig.5 Temperature dependences of mechanical properties of AISI304 steel sheet in tesile testing (Tensile speed 50mm/min)

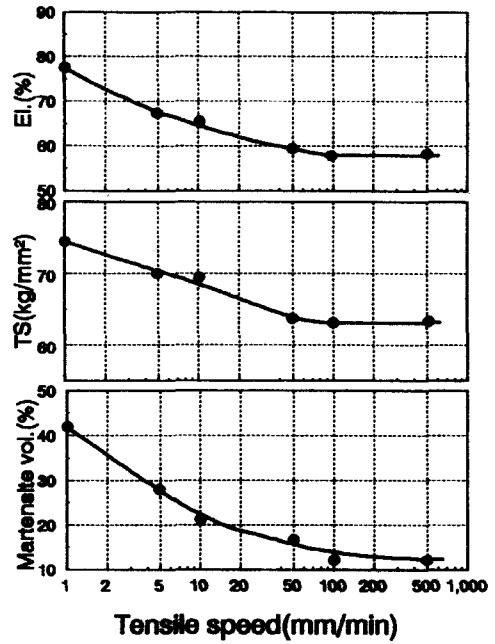


Fig.6 Tensile speed dependences of mechanical properties of AISI304 steel sheet in tensile testing (at room temperature)

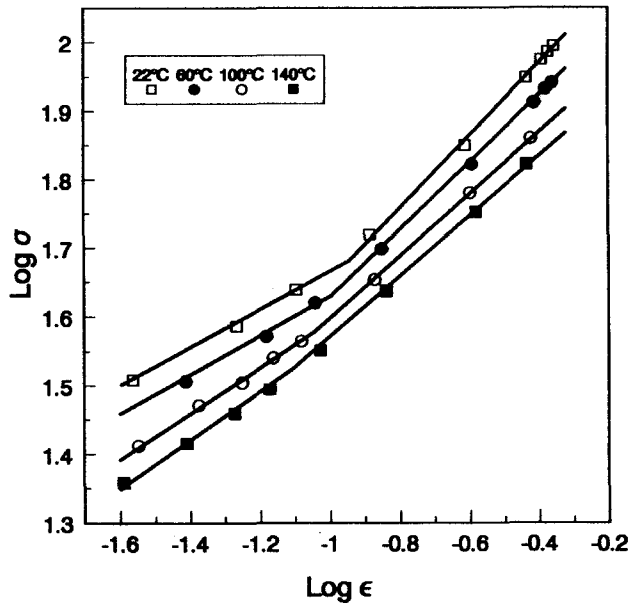


Fig.7 Temperature dependences of work-hardening of AISI304 steel sheet in log-log scale

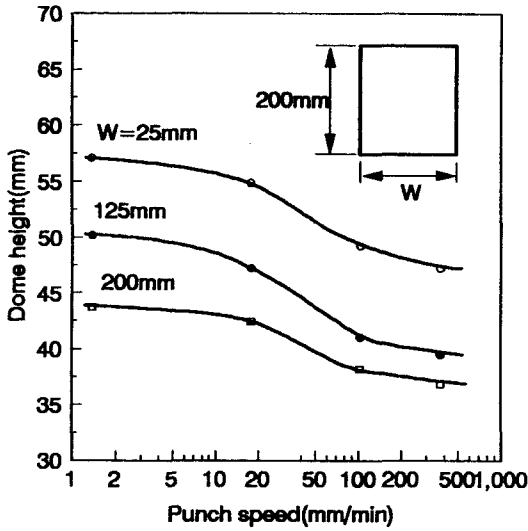


Fig.8 Effect of punch speed on dome height of AISI304 steel sheet in punch stretching test (punch dia.=100mm)

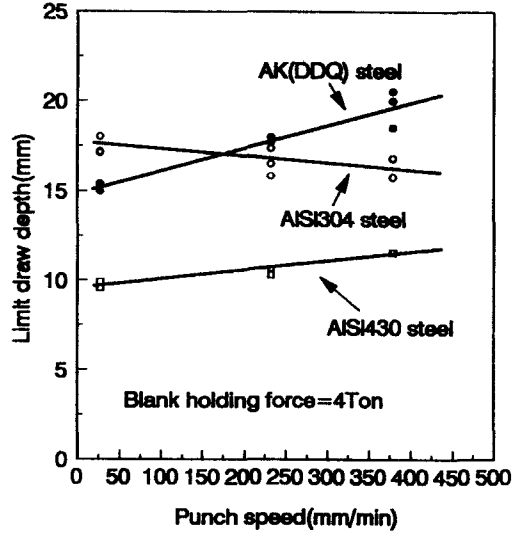


Fig.9 Effect of punch speed on limit draw depth in cupping test (blank dia.=95mm, punch dia.=50mm)

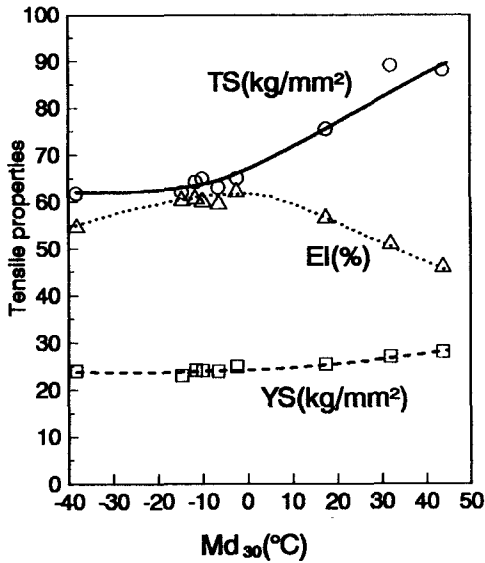


Fig.10 Effect of austenite stability on the tensile properties of AISI304 steel

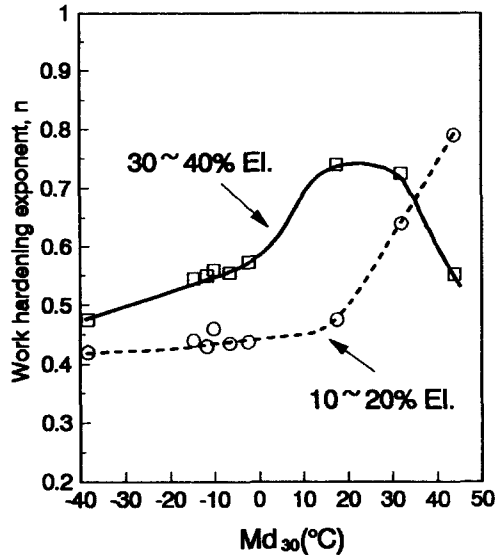


Fig.11 Relations between austenite stability and work hardening

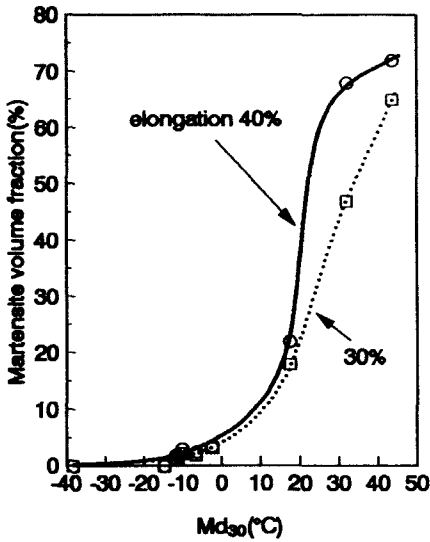


Fig.12 Austenite stability and martensite volume fraction of AISI304 steel after 30, 40% elongation in tensile testing

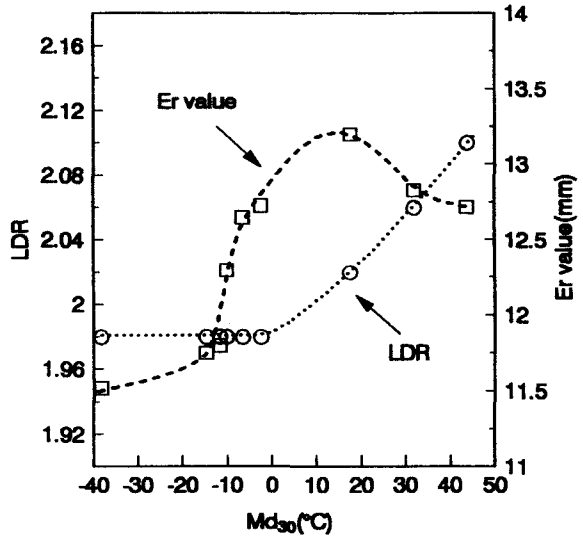


Fig.13 Variation of LDR and Er value of AISI304 steel according to austenite stability

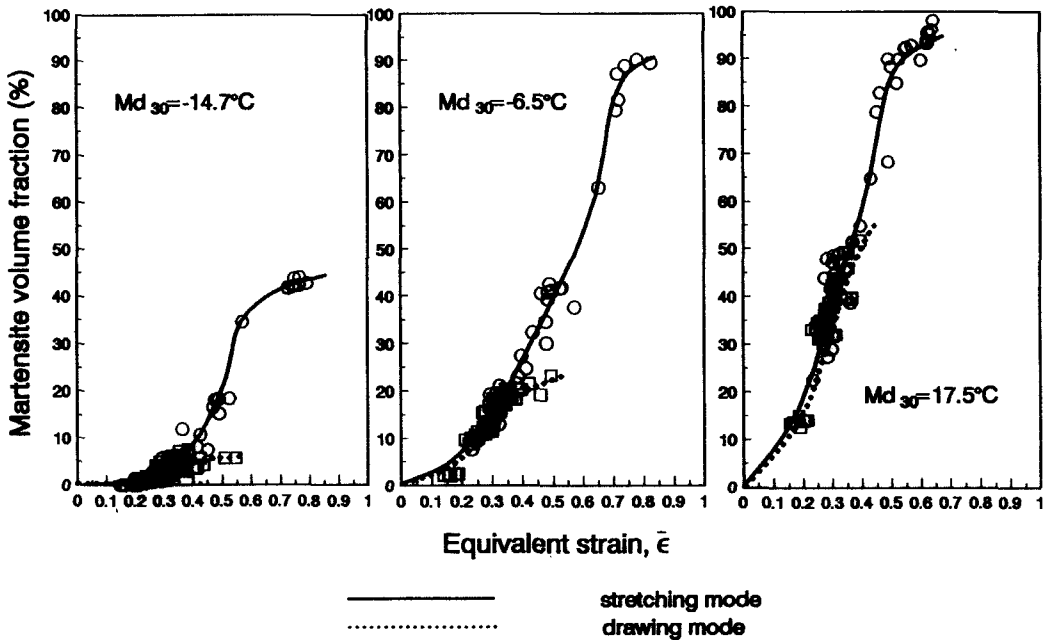


Fig.14 Comparison of martensite volume fraction and equivalent strain according to the deformation mode and austenite stability

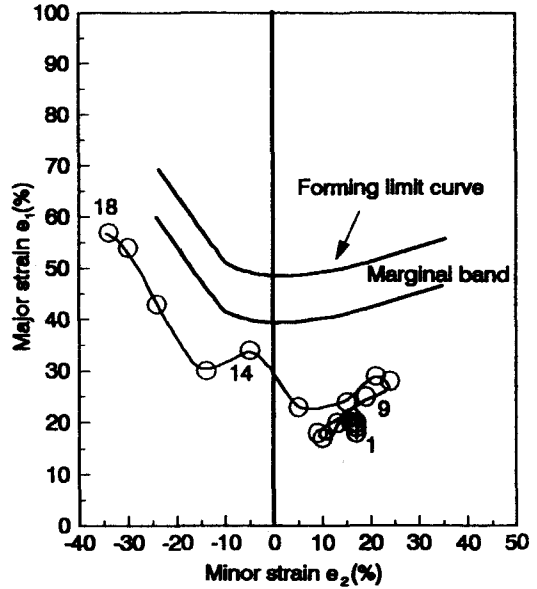
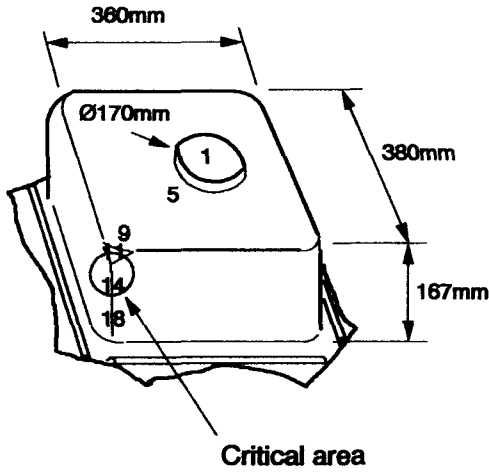


Fig.15 Critical area of sink die deep drawn in commercial line and major strain distribution along edge corner part

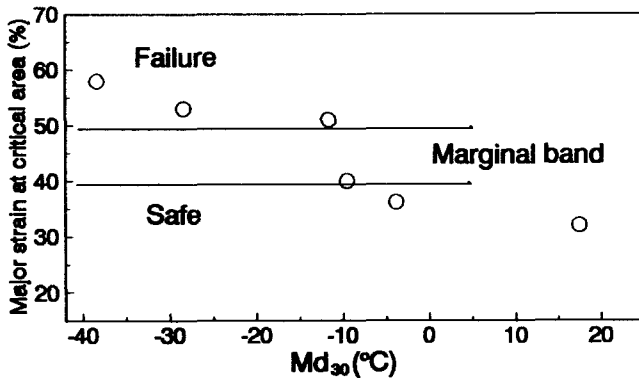


Fig.16 Major strains of critical area of edge corner part of square cup, showing influence of austenite stability on successful forming (Minor strains of all the tested products are within the range of  $-5 \leq e_2 \leq 0$ )

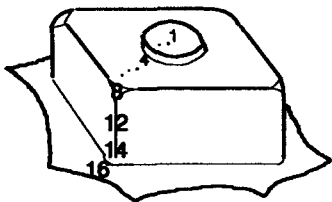


Fig.17 Distributions of thickness strains along the edge corner of square cup

