

## 알루미늄 합금박판 비등온 성형공정의 유한요소해석 및 실험적 연구 (제1부. 실험)

류호연\* · 김영은\*\* · 김종호\*\*\* · 구본영\*\*\*\* · 금영탁\*\*\*\*

(1998년 11월 9일 접수)

# Finite Element Analysis and Experimental Investigation of Non-isothermal Forming Processes for Aluminum-Alloy Sheet Metals (Part 1. Experiment)

H.Y.Ryu, Y.E.Kim, J.H.Kim, B.Y.Goo and Y.T.Keum

### Abstract

This study is to investigate the effects of warm deep drawing with aluminum sheets of A1050-H16 and A5052-H32 for improving deep drawability. Experiments for producing circular cups and square cups were carried out for various working conditions, such as forming temperature and blank shapes. The limit drawing ratio(LDR) of 2.63 in warm deep drawing of circular cups in case of A5052-H32 sheet, whereas LDR of 2.25 in case of A1050-H16, could be obtained and the former was 1.4 times higher than the value at room temperature. The maximum relative drawing depth for square cups of A5052-H32 material was also about 1.92 times deeper than the depth drawn at room temperature. The effects of blank shape and forming temperature on drawability as well as thickness distribution of drawn cups were examined and discussed.

**Key Words** : Warm Deep Drawing, Relative Drawing Depth, Deep Drawability, Forming Temperature, Limit Drawing Ratio(LDR), Thickness Distribution

## 1. 서론

최근에는 자동차 문화가 생활화 되면서 자동차 배기가스에 의한 공해가 사회의 커다란 환경문제로 거론되면서 연비절감과 함께 차체 경량화 대상으로 알루미늄 소재의 성형가공 기술에 대한 많은 연구<sup>(1)</sup>가 수행되고 있다. 알루미늄의 비중은 철에 비해 1/3정도이고 비강성(탄성계수/

밀도)은 철과 거의 동등하며, 비강도(강도/밀도)는 철의 2배 이상으로 자동차의 경량화를 위한 성형가공 기술의 연구는 중요하다.

Nishimura<sup>(2)</sup> 등은 알루미늄합금판 A5182-O재에 비드의 종류를 바꾸면서 성형을 하였을 때, 비드의 형태에 따른 마찰계수등을 실험연구 분석하였고, Kuwabara<sup>(3)</sup>는 알루미늄 합금판인 A5182-O재와 A6061-T4재의 정사

\* 단국대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 단국대학교 기계공학과  
\*\*\* 서울산업대학교 금형설계학과  
\*\*\*\* 한양대학교 정밀기계공학과

각형 용기의 성형특성을, 용기 형상과 블랭크치수에 따라서 성형한계에 미치는 영향을 실험적으로 증명하였으며, Takuda<sup>(4)</sup> 등은 알루미늄합금의 열간변형저항의 범용 수치적모델을 만들어 응력-변형률 곡선의 측정결과가 온도에 상당히 의존되고 있음을 밝혔다.

戶澤<sup>(5)</sup>는 알루미늄소재의 드로잉 작업이 상온에서는 소성이방성비가 작아 재료의 유입이 잘 되지 않고 성형가공이 쉽게 이루어지지 않으므로 소재를 풀림처리하여 사용하거나 온간드로잉 성형하는 가공방법을 소개하고 있다.

온간가공방법은 금형에 의한 성형기술을 개선시키는 것으로 펀치부위를 냉각시키고, 다이와 블랭크홀더 부위는 가열하여 펀치가 소재를 다이속으로 끌고 들어 갈 때 파단이 일어나기 쉬운 곳의 온도차이를 응용함으로써 펀치코너부에서의 소재 파단강도를 높임과 동시에 플랜지부에서의 소재는 변형저항을 감소시키어, 국부적으로 열을 받은 소재가 다이속으로 쉽게 유입 되도록 하여 드로잉 성형성을 좋게 하는 가공방법<sup>(6)</sup>이다.

Kim<sup>(7,8)</sup> 등은 STS304 스테인리스 강판을 이용하여 원형컵과 정사각용기의 드로잉성형을 온간과 상온에서 한계드로잉비(LDR)를 비교분석하여 스테인리스 제품 성형에서의 최적 성형조건을 조사하였다.

山崎<sup>(9)</sup>는 알루미늄 합금판재를 가지고 인장시험편을 만들어 온간영역, 즉 상온에서 400℃까지 인장시험을 하여, 온도가 상승함에 따라 인장강도 및 내력은 저하되었으나 연신율은 크게 증가함을 보였으며, 성형속도, 성형온도, 윤활유에 따른 온간 드로잉성을 조사 비교하였다.

본 연구에서는 알루미늄 합금 소재의 온도 의존성을 이용하여 상온에서의 낮은 드로잉성을 온간 성형법에 의해 향상시키기 위한 방안을 실험적으로 연구하고자 한다. 실험은 순수알루미늄계인 A1050-H16 소재와 마그네슘 합금계열인 A5052-H32 소재에 대해 인장강도와 연신율의 온도 의존성을 검토한 후 드로잉 성형성을 조사한다. 원형컵과 정사각컵에 대한 온간성형 특성을 시편 형상과 작업온도를 변화시키면서 제품의 성형성 및 최적의 작업온도조건을 조사하고, 두께분포등을 비교 검토하여 자동차용 판재의 온간 디프 드로잉 공정의 유효성을 검증하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료 및 인장시험

실험재료는 두께 0.8 mm의 A1050-H16과 A5052-H32 재료를 드로잉 소재로 사용하였다. Table 1은 이들 재료의 화학성분을, 그리고 Table 2는 상온에서의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

실험용 소재는 풀림처리를 하지 않고, 압연방향에 따라 0°, 45°, 90° 방향으로 각각 인장시편을 준비하여 상온에서 350℃까지 변화시키면서 인장시험을 하여 평균치를 구하였으며 이들에 대한 결과를 Fig. 1에 나타내고 있다. 일반적으로 온도가 상승함에 따라 인장강도와 항복강도는 감소하는 경향이거나 연신율은 점차 증가하는 경향을 보여 주고 있으며, 300℃이상에서의 연신율은 갑자기 크게 증

Table 1 Chemical composition of test materials

Materials	Chemical composition (wt%)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
A1050-H16	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	-	0.05	0.02
A5052-H32	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	0.10	-

Table 2 Mechanical properties of test materials

Materials	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness(MPa) (Hv)	$\bar{R}$	$\Delta R$
A1050-H16	141.08	105	8	41.73	0.5247	0.0143
A5052-H32	242.13	195	12	82.6	0.6544	-0.0595

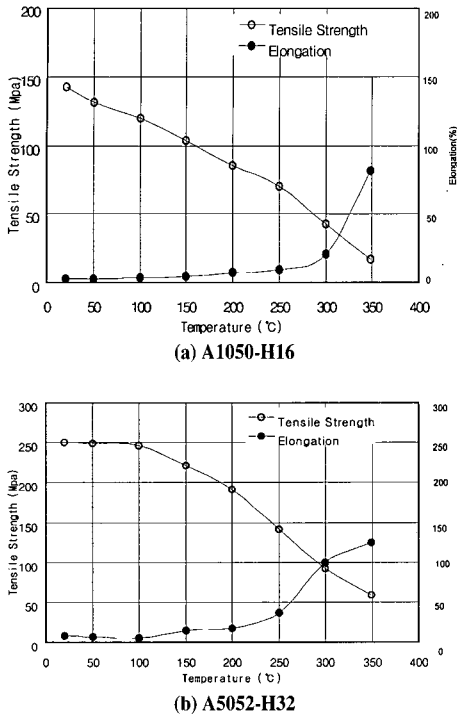
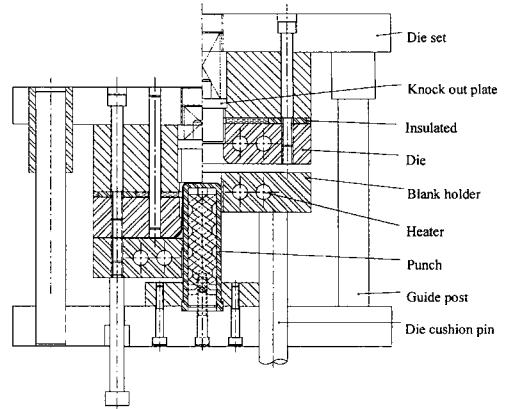


Fig. 1 Influence of temperature on mechanical properties of A1050-H16 and A5052-H32 aluminum materials

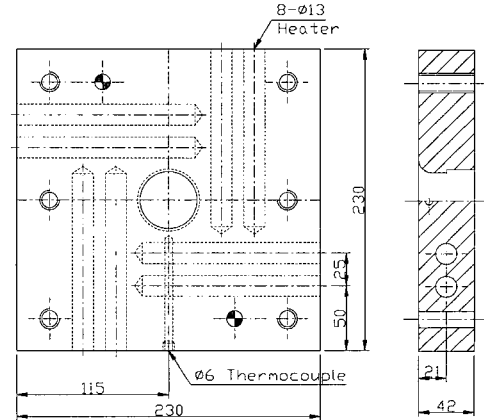
가함을 알 수 있다. 본 실험에 사용한 알루미늄 소재는 조질처리에 따라 상온에서의 재료 연성이 A1050-H16은 2.8%, A5052-H32는 7.3%로 낮은 값을 보여주고 있지만 온도를 증가하면, 예를 들어 300°C가 되면 연성은 7.6배, 13.5배로 각각 크게 증가하고 인장강도는 3.3배, 2.7배로 각각 감소하기 때문에 온간 성형성을 향상시킬 것으로 기대 된다.

### 2.2 드로잉 금형 및 주변장치

펀치 형상이 원형(Ø 40 mm)과 정사각형(40x40 mm) 단면을 갖는 Fig. 2(a)의 온간금형을 설계, 제작하였으며, 다이와 블랭크홀더에는 용량 400W의 카트리지 히터를 8개, 그리고 온도조절을 위한 열전대를 각각 1개씩 부품내에 장입하고 TPR(Thyristor power regulator)방식에 의한 전력제어 방법으로 온도조절을 하도록 하였으며, 이에 대한 원형칩 금형부품의 다이 도면이 Fig. 2(b)에 주어져 있고 사각칩의 경우도 마찬가지로 설계하였다. 다이와 블랭크홀더에 열전대(클로멜-알루미늄의 K타입)를 삽입하여 다이와 블랭크 홀더의 온도를 측정하였



(a) Cross-section view of warm drawing die



(b) Plan view of die component

Fig. 2 Schematic view of warm drawing die

고, 다이 표면의 온도편차는 금형부품이 크지 않은 관계로 10°C미만으로 나타나, 이 상태에서 실험을 진행하였다. 펀치냉각을 위하여 펀치 내부를 인서트방식으로 하여 냉각수로를 설계하였으며, 냉각장치 출구에서의 온도가 -5°C인 냉각수가 배출되도록 하였다.

### 2.3 실험

실험은 램의 하강속도가 11.2 mm/sec인 200톤 유압 프레스에 금형을 장착하고 틈새, 펀치 및 다이 코너 반경, 블랭크 홀딩력, 드로잉 속도 등은 일정하게 유지하고 펀치의 냉각유무, 다이와 블랭크홀더의 온도, 시편치수와 형상등을 변화시키면서 원형은 65 mm, 정사각형은 65×65 mm를 기준으로 5 mm씩 점진적으로 증가시키면서 드로잉 실험을 하였다. 원형칩일 경우에는 한계드로잉비(LDR)

**Table 3 Size of die components in warm deep drawing**

Parts		Material	Size(mm)	Rp(mm)	Rd(mm)	Rc(mm)	Clearance (mm)
Punch	Circular	STD 11	∅ 40	5.0	-	-	
	Square	STD 11	40 × 40	5.0	-	5.0	
Die	Circular	STD 61	∅ 43.2	-	10		
	Square	STD 61	43.2×43.2	-	10	7.2	

**Table 4 Experimental condition for circular and square cup drawing**

Shape of product	Temp.(℃) (B.H & Die)	Cooling of punch	Diameter of Blank(mm)	
			Circular	Square
Circular cup	R.T.	Cooled	∅ 65	65 × 65
			∅ 70	70 × 70
			∅ 75	75 × 75
			∅ 80	80 × 80
			∅ 85	85 × 80
			∅ 90	90 × 90
Square cup	350	No cooled	∅ 95	95 × 95
			∅ 100	100 × 100
			∅ 105	105 × 105
			∅ 110	110 × 110
			∅ 115	115 × 115
			∅ 120	120 × 120

를 상대 비교하고, 정사각컵의 경우에는 시편의 형상을 원형과 정사각형에 대해 최대 성형깊이와 성형품의 두께 변화를 비교 조사하였다. 온간작업에서의 윤활제로는 내열성과 윤활성이 양호한 테프론(Teflon) 필름을 사용하였다. 본 실험을 위한 금형부품의 설계치수가 Table 3에, 그리고 각각의 실험 조건이 Table 4에 주어졌다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 가공온도와 성형성

본 실험에 사용한 온간 금형의 다이와 블랭크 홀더는 히터에 의해서 가열되면서 온도 조절되는데, 금형이 가열되

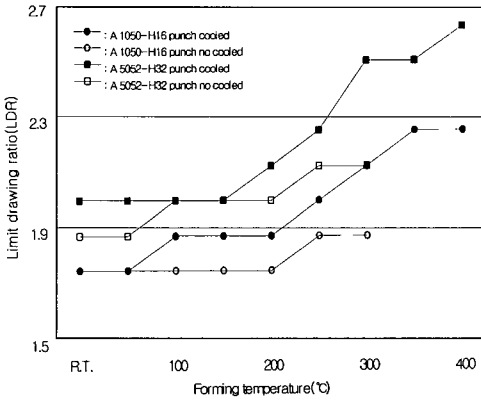
면서 다이와 블랭크 홀더로부터 펀치와 다이 세트로의 과도한 열 전달을 예방하기 위해 금형 상·하에 단열재를 설치하고 펀치는 냉각수에 의해 냉각되도록 하였다.

Table 5는 가열 온도에 따른 펀치 표면의 온도를 펀치 냉각 유무에 따라 측정된 것으로 펀치 비냉각일 경우엔 온도가 높아지는 것을 알 수 있고, 펀치를 냉각하였다더라도 다이가 400℃일 때 펀치 표면은 약 68℃가 되는 것으로 나타났으며 본 연구에서는 이와 같은 온도 조건하에서 실험하였다.

알루미늄 소재의 온간 성형작업시 성형온도 및 펀치의 냉각 유무에 따른 원형컵 용기의 성형한계를 Fig. 3에 나타내었는데 성형 온도가 높을수록, 펀치의 온도가 낮을수록 한계드로잉비가 높게 나타남을 알 수 있다.

**Table 5** Temperature of punch surface measured for given forming temperature (unit : °C)

Temp. of die & blankholder		R.T.	50	100	150	200	250	300	350	400
Punch	Cooled	12	18.6	22.7	29.9	37.3	41.7	56.4	59.8	67.6
	No Cooled	R.T.	25.7	62.8	95	125	165	198	-	-



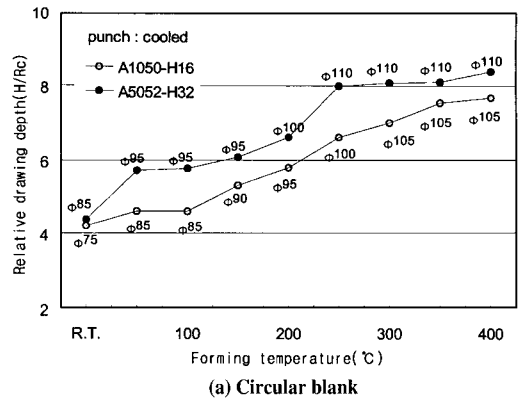
**Fig. 3** Relative drawing depth of square cups for several working conditions

원형컵 드로잉 실험에서는 펀치 직경 40 mm를 기준으로 시편 직경을 5 mm단위(드로잉비 0.125)로 증가시키면서 실험한 관계로 일부결과에 오차가 있을 수 있지만 시편 직경을 더 세분화하면 정밀한 결과를 얻을 수 있다.

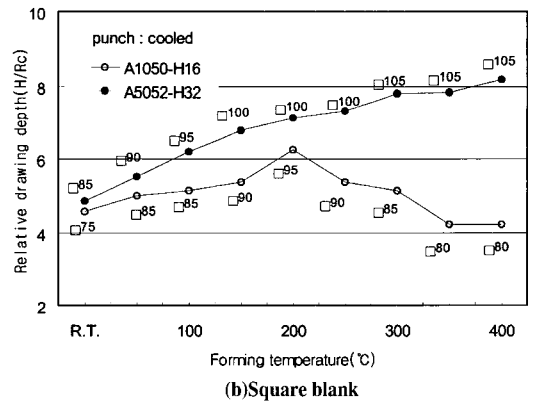
온간 드로잉일지라도 펀치냉각의 유무에 따라 성형성은 틀려지는데 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 펀치 냉각의 경우엔 다이, 블랭크 홀더의 온도가 300°C 이상이 되면 열 전달에 의해 펀치온도가 198°C 이상으로 올라가 75 mm 소재의 조기 파단으로 성형이 불가능하였으며, 이러한 이유로 인해 드로잉 성형성도 펀치 냉각의 경우보다 나쁜 것으로 나타났다.

A1050-H16의 순수 알루미늄 소재는 온도가 200°C가 되면 인장강도가 85MPa로 아주 낮은 강도를 나타내고 있어 드로잉 작업시 테프론 테이프의 형상 자국, 국부네킹, 흠집 등이 제품 표면에 선명하게 나타나, 이 온도 이상에서의 온간 가공은 불가능한 것으로 판단되었으며, A5052-H32의 경우엔 400°C에서 성형하더라도 순수 알루미늄과 같은 문제는 발생하지 않았다.

온간 성형이 가능한 작업 범위에서의 온간 성형성(드로잉비 기준)을 판단할 때 A5052-H32 합금의 경우에는 상



(a) Circular blank



(b) Square blank

**Fig. 4** Limit drawing ratio of circular cups

온의 1.4배, 그리고 A1050-H16 순수 알루미늄의 경우에는 상온의 1.29배로 나타나 A5052-H32 소재가 온간 성형에 적합함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 제품의 단면이 사각형인 경우에서도 비슷한 결과가 Fig. 4에서 처럼 나타나고 있다.

사각컵 드로잉은 코너부의 원형컵 드로잉과 직선부의 평면 드로잉으로 구성되어 있기 때문에 플랜지면에서의 금속 유동은 순수 원형컵 드로잉보다 좋아져서 제품 높이도 더 깊게 성형되고 있다.

사각 드로잉에서의 성형성은 사각 단면 코너반경(Rc)에 대한 성형깊이(H)의 비율인 상대 드로잉 깊이로 나타낼 수 있는데 Fig. 4에서 보는 바와 같이 시편의 형상에 관계없이 상온가공에서는 H/Rc의 값이 A1050-H16은 4.2, A5052-H32는 4.38인 것에 비해 온간영역에서는 A1050-H16은 7.68(상온의 1.83배), A5052-H32는 8.4(상온의 1.92배)로 온간 성형효과가 크게 나타나고 있다.

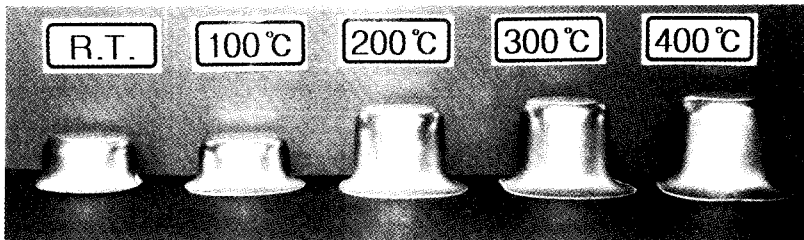
Fig. 4의 (a), (b)는 블랭크 형상을 원형과 사각형으로 실험한 결과이고, 그림내의 숫자는 해당 작업온도에서의 최대 시편형상과 치수를 보여주고 있다. 똑같은 시편일지라도 작업온도를 증가시키면 온간 성형효과로 성형깊이를 더 깊게 드로잉 할 수 있게 되고, 시편형상은 사각형보다는 원형이 재료유동을 더 원활히 해주기 때문에 좀 더 높

은 성형성을 나타내었다. 또한 A1050-H16 순수 알루미늄은 앞에서 언급한 바와 같이 온도가 증가할수록 소재의 변형이 어려워져 Fig. 4 (b)에서 보는 바와 같이 200℃ 넘는 온도에서 95×95 mm의 사각 블랭크로도 성형되지 않고 파단이 일어났으며, 온도가 상승할수록 상대성형깊이가 점차 낮아지는 것을 나타내고 있다.

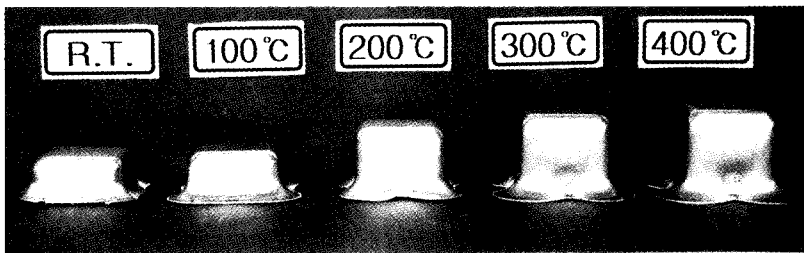
Fig. 5는 원형컵과 사각컵에 대한 작업 온도별 성형품의 사진을 보여주고 있는 것으로 제품 형상에 관계없이 온간 드로잉에서의 성형성이 우수한 것으로 나타나 있다.

### 3.2 성형품의 두께분포

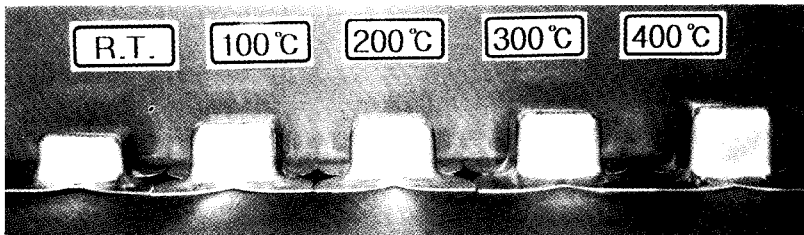
A5052-H32 원형컵 제품에 대한 두께 분포의 작업조건 변화에 따른 비교를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 (a)



(a) Circular cups with circular blanks



(b) Square cups with circular blanks



(c) Square cups with square blanks

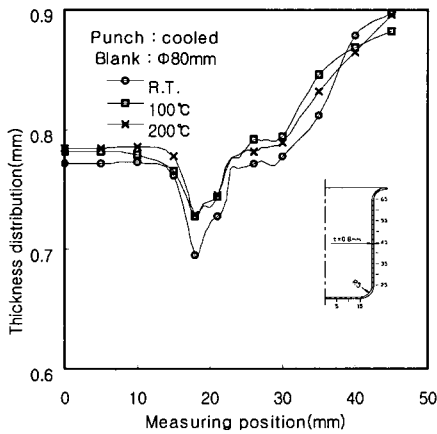
Fig. 5 Warm drawn cups of A5052-H32 material various forming temperature

는 시편 직경( $\phi 80$  mm)을 일정하게 한 상태에서 작업 온도를 증가시켰을 때의 두께 분포로 대표적인 원형컵 단면의 두께 분포곡선을 보여주고 있다. 일반적으로 온도 증가에 따라 컵 밑면과 측벽부의 두께가 상온가공일 때 보다 더 균일하게 되고 또한 파단이 일어나기 쉬운 편치 코너반경 부분의 두께 감소도 온간 성형에 의해 많이 억제되고 있음을 알 수 있다.

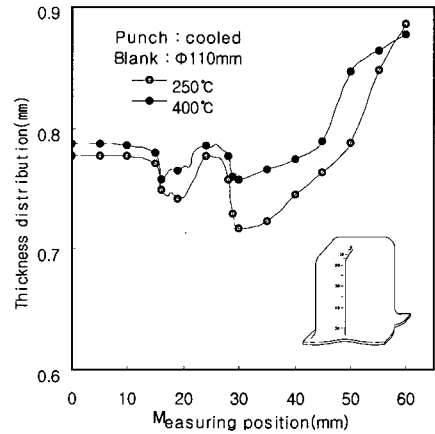
Fig. 6의 (b)는 다이, 블랭크 홀더의 온도를  $300^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 하고 시편직경을  $85$  mm에서  $100$  mm로 증가시켰을 때의 두께 분포이다. 시편이 커질수록 플랜지부의 면적이 넓어 소재의 유입 저항이 커지기 때문에 제품의 측벽부가 심하게 얇아짐을 알 수 있고, 최후에는 편치코너

부위가 아닌 측벽 하단부에서 파단이 발생할 수 있음을 알 수 있다. STS304 스테인리스 박판의 온간 드로잉<sup>(9)</sup>에서는 재료의 높은 가공경화 특성으로 측벽의 파단 발생이 일어나지 않았지만, 본 연구의 알루미늄 소재에서는 1차 편치 코너반경부위에서 드로잉 시작과 함께 재료 연신에 의해 얇아지는 현상이 발생하고, 그 후 드로잉이 진행되면서 플랜지부에서의 드로잉 저항 증가로 측벽이 2차로 얇아지게 되는데 이러한 현상은 시편이 커질수록 더 심하게 나타난다.

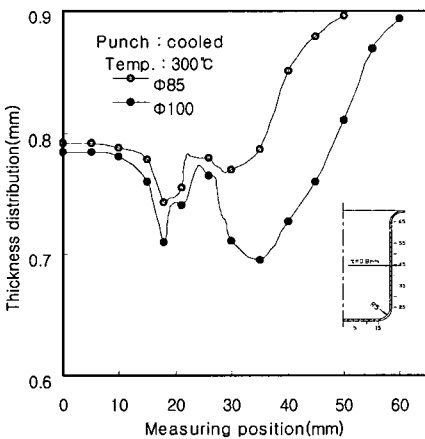
Fig. 7은 사각컵에 대한 두께 분포를 나타내는 것으로 Fig. 7의 (a)는 작업온도 효과를 표시하는 것으로 사각컵의 직선부 두께 변화는 원형컵의 두께 분포와 비슷한 경향



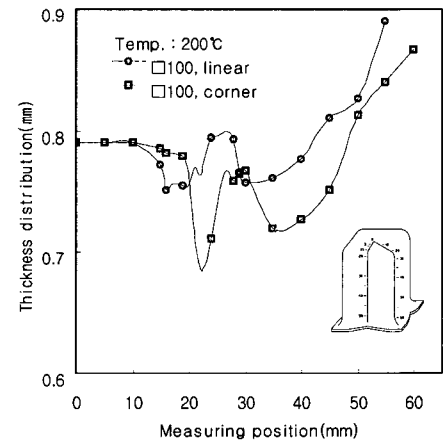
(a) Effort of forming temperature



(a) Effort of forming temperature



(b) Effort of blank size



(b) Two sections of a square cup

Fig. 6 Thickness distribution of circular cups of A5052-H32 material

Fig. 7 Thickness distribution of cup of A5052-H32 material

을 나타내고 있는 것으로 작업온도가 높아질수록 두께 분포가 균일해지는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 (b)는 100×100mm의 사각형 시편을 200℃에서 성형했을 때의 직선부와 코너부에서의 두께 분포를 나타내는 것으로 직선부보다는 코너부에서 훨씬 얇아지고 있다.

#### 4. 결 론

판재 성형에서의 가장 큰 관심은 소재의 파단이나 결함이 없이 원하는 형상을 얻는 것으로 본 실험에서는 A1050-H16 소재와 A5052-H32 소재의 디프 드로잉 성형성을 향상하기 위하여 원형컵 및 사각컵에 대한 온간 드로잉의 실험 연구를 하였으며 이들의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 인장시험 온도를 300℃ 정도로 가열하여 시험을 하였을 때 연신율의 경우 A1050-H16은 7.6배, A5052-H32는 13.5배로 크게 증가하였고, 인장강도는 3.3배, 2.7배로 각각 감소하여 온도에 따른 시험 효과가 큰 것으로 나타났다.

(2) 원형컵 온간성형에 있어서 드로잉비를 비교할 때 A5052-H32 소재는 상온의 1.4배, A1050-H16 소재는 상온의 1.29배 각각 향상되었으며, 사각컵의 상대드로잉 깊이를 비교해 보면 A1050-H16 소재는 상온의 1.83배, A5052-H32 소재는 상온의 1.92배로 증가되어 전체적으로 컵형상에 관계없이 온간드로잉이 향상되었다.

(3) A1050-H16 재료는 200℃ 범위에서, 그리고 A5052-H32 판재는 400℃까지 온간성형 효과가 있는 것으로 나타났으며, 그 이상의 온도에서는 제품 표면의 산화 현상이 나타나 일부에 변색이 발생하였다. 또한 시편이 커질수록 파단의 위치가 펀치 코너가 아닌 측벽부에서 발생하는 것을 알 수 있다.

(4) 알루미늄 박판의 디프 드로잉성은 상온에서 보다 온간 가공에서 효과가 크게 나타났으며, 또한 두께 분포가 균일해지는 것을 알 수 있어, 온간 드로잉 가공법을 이용하게 되면 생산과 품질의 향상을 기대할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97-E-40)에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 김영석, 1992, "알루미늄 판재 성형기술의 현황과 과제", 자동차 공학회지, 제14권 제1호, pp. 3~12.
- (2) Hisahi Nishimura, Toshihiko Kuwabara and Masayuki Shuuno. 1995, "Drawbead Performance and Model of Drawbead Forces for Sheet A5182-O", JSTP. vol. 36, no. 413, pp. 653~658.
- (3) Toshihiko Kuwabara, 1994, "Deep drawing Characteristics for Square Cups of Sheet Aluminum alloys A5182-O and A6061-T4", JSTP. vol. 35, no. 399, pp. 373~378.
- (4) Hirohiko Takuda, Shiomi Kikuchi and Natsuo Hatta, 1993, "Modeling of Comprehensive Formula for Flow Curves of Aluminum alloys at Elevated Temperatures", JSTP. vol. 34, no. 385, pp.165~170.
- (5) 戶澤康壽, 1992, "アルミニウム薄板の成形性から見た材料特性", 塑性と加工, 第33卷 第378號, pp.782~789.
- (6) 町田輝史, 1990, "局部加熱による 薄板 加工の 高附加價值", 月刊 PRESS技術, 技術情報株式會社, 第3卷 第1號, pp. 26~35.
- (7) J.H.Kim, C.S.Choi, B.Y.Jeong and G.H.Lee, 1993, "Deep drawing of stainless steel in warm working condition using a single crank press", Proc. 4th Int. Con. on technology of Plasticity, Beijing, China, pp. 1691~1694.
- (8) 김종호, 최치수, 나경환, 1995, "크랭크 프레스와 유압 프레스에서 스테인리스 강판의 온간 드로잉성비교", 한국소성가공학회지, 제4권 제4호, pp. 345~352.
- (9) 山崎 淳, 1992, "アルミニウム板材の温間成形法", 塑性と加工, 第33卷 第375號, pp. 404~410.