

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

류호연^{*}, 배원택^{*}, 김종호^{*}, 김성민^{**}, 구본영^{**}, 김영탁^{**}
^{*} 서울산업대학교 금형설계학과, ^{**} 한양대학교 정밀기계공학과.

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

H.Y.Ryu^{*}, W.T.Bae^{*}, J.H.Kim^{*}, S.M.Kim^{**}, B.Y.Goo^{**}, Y.T.Keum^{**}.
^{*} Dept. of die and mould design, Seoul National Polytechnic University.
^{**} Dept. of precision mechanical engineering, Han Yang University.

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 shape. The limit drawing ratio(LDR) of 2.63 in warm deep drawing of circular cups in case of A5052-H32 sheet, whereas LDR of A1050-H16 is 2.25, could be obtained and the former was 8 times higher than the value at room temperature. The maximum relative drawing depth for square cups of A5052-H32 material was also about 2 times deeper than the depth drawn at room temperature. The effects of blank shape, and temperature on drawability of aluminum materials as well as thickness distribution of drawn cups were examined and discussed.

Key Words : warm deep drawing(온간 디프 드로잉), relative drawing depth(상대 드로잉 깊이), deep drawability(디프 드로잉성), forming temperature(성형온도), limit drawing ratio(LDR, 한계 드로잉비), thickness distribution(두께분포)

1. 서 론

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⁽¹⁾가 되어 오고 있으며, 철에 비해 알루미늄의 비중은 1/3정도이며 비강성(탄성계수/밀도)은 철과 거의 동등하고, 비강도(강도/밀도)는 2배 이상이므로 자동차의 경량화를 위해 성형가공 기술의 중요성을

찾는다.

Hisahi⁽²⁾등은 알루미늄합금판의 A5182-O재에 비드의 종류를 바꾸면서 성형을 하였을 때, 비드의 형태에 따른 마찰계수등을 실험연구 분석하였고, Toshihiko⁽³⁾는 알루미늄 합금판인 A5182-O재와 A6061-T4에 정사각형 용기의 성형특성을 용기의 형상과 블랭크치수가 성형한계에 미치는 영향을 실험적으로 증명하였으며, Hirohiko⁽⁴⁾등은 알루미늄합금의 열간변형저항의 범용 수치적모델을 만들어 응력-변형을 곡선의 측정결과가 온도에 상당히 의존

되고 있음을 밝혔다.

戶澤⁽⁵⁾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⁽⁶⁾이다.

Kim^(7,8) 등은 STS304 스테인리스 강판을 이용하여 원형칩과 정사각칩의 드로잉성형을 온간과 상온에서 한계드로잉비(LDR)를 비교분석하여 스테인리스 제품 성형에서의 최적 성형조건을 조사하였다. 山崎⁽⁹⁾는 알루미늄 합금판재를 가지고 인장시험편을 만들어 온간영역, 즉 상온에서 400℃까지 인장시험을 하여 온도가 상승함에 따라 인장강도 및 내력은 감소되었으나 연신율은 크게 증가함을 보였으며, 또한 조직의 변화도 다르게 나타나는 것을 보여 주고 있다.

본 연구에서는 알루미늄 합금소재의 온도 의존성을 이용하여 상온에서의 낮은 드로잉성을 온간성형법에 의해 향상시키기 위한 방안을 실험적으로 먼저 연구하고자 한다. 실험은 순수 알루미늄계인 A1050 판재와 마그네슘 합금계열인 A5052 판재에 대해 인장강도와 연신율의 온도의존성을 검토한 후

드로잉 성형성을 조사한다. 원형칩과 정사각칩에 대한 온간성형 특성을 시편 형상과 작업온도를 변화시키면서 제품의 성형성 및 최적의 작업온도조건을 조사하고, 두께분포동을 비교 검토하여 자동차용 판재의 온간 디프 드로잉 공정의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험재료 및 인장시험

실험재료는 알코아(Alcoa)회사의 0.8mm 두께 A1050-H16(이하 A1050으로 기술)과 A5052-H32(이하 A5052으로 기술) 재료를 드로잉소재로 사용하였다. 표 1은 이들 재료의 화학적 조성을, 그리고 표 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 그림 1에 나타내고 있다. 일반적으로 온도가 상승함에 따라 인장강도와 항복강도는 감소하는 경향이거나 연신율은 점차 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 300℃이상에서의 연신율은 갑자기 크게 증가함을 알 수 있다.

본 실험에 사용한 알루미늄 소재의 조질처리에 따라 상온에서의 재료 연성이 A1050은 2.8%, A5052는 7.3%로 낮은 값을 보여주고 있지만 온도를 증가하면, 예를 들어 300℃가 되면 연성은 7.6배, 13.5배로 각각 크게 증가하고 인장강도는 3.3배, 2.7배로 각각 감소하기 때문에 온간 성형성을 향상시킬 것으로 기대 된다.

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 (MPa)	Yield stress (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	\bar{R}	ΔR
A1050-H16	141.08	105	8	41.73	0.5247	0.0143
A5052-H32	242.13	195	12	82.6	0.6544	-0.0595

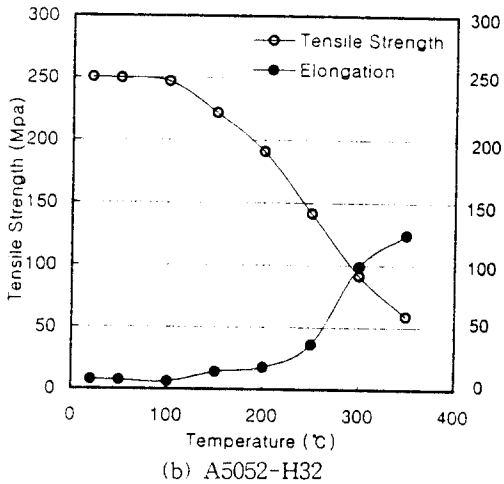
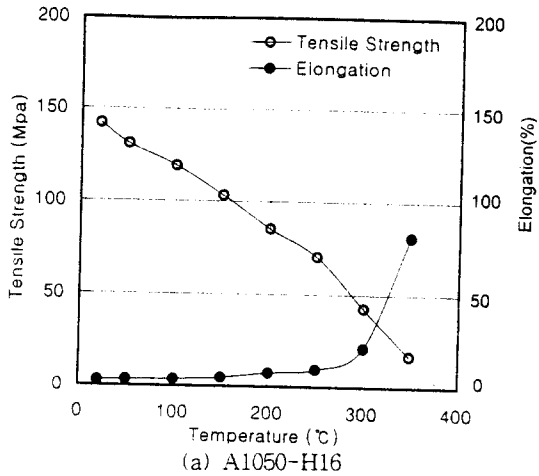


Fig. 1 Influence of temperature on mechanical properties of A1050-H16 and A5052-H32 aluminum materials

2.2 드로잉 금형 및 주변장치

펀치 형상은 원형(∅40mm)과 정사각형(40x40mm) 단면을 갖는 온간금형을 설계, 제작하였으며, 다이와 블랭크홀더에는 용량 400W의 카트리지 히터를 8개, 한편 온도조절을 위한 열전대를 각각 1개씩 부품내에 장입하고 TPR(Thyristor power regulator) 방식에 의한 전력제어 방법으로 온도조절을 하도록 하였으며, 다이 표면의 온도편차는 금형부품이 크지 않은 관계로 10°C 미만으로 나타나 이 상태에서 실험을 진행하였다. 펀치냉각을 위하여 펀치내부를 인

서트방식의 순환로를 설계하였으며 냉각 장치 출구에서의 온도가 -5°C인 냉각수가 원활히 순환되도록 하였다. 그림 2는 본 연구에 사용되어진 온간드로잉 금형의 전체적인 조립도를 보여주고 있다.

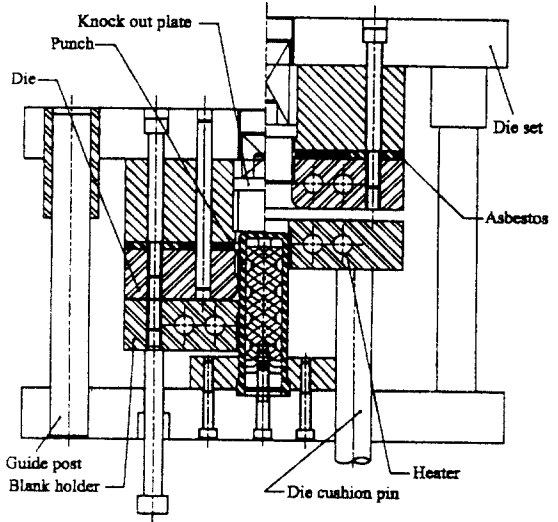


Fig. 2 Schematic view of warm drawing die

2.3 실험

실험은 램의 하강속도가 11.2mm/sec인 200톤 유압프레스에 금형을 장착하고 틈새, 펀치 및 다이 코너반경, 블랭크홀딩력, 드로잉속도등은 일정하게 유지하고 펀치의 냉각유무, 다이와 블랭크홀더의 온도, 시편치수와 형상등을 변화시키면서 원형은 ∅65mm, 정사각형은 65×65mm를 기준으로 5mm씩 점진적으로 증가시키면서 드로잉 실험을 하였다. 원형점일 경우에는 한계드로잉비(LDR)를 상대 비교하고, 정사각점의 경우에는 시편의 형상을 원형과 정사각형에 대해 최대 성형깊이와 성형품의 두께변화를 비교 조사하였다. 온간작업에서의 윤활제로는 내열성과 윤활성이 양호한 테프론(Teflon)필름을 사용하였다. 본 실험을 위한 금형부품의 설계치수가 표 3에, 그리고 각각의 실험 조건이 표 4에 주어졌다.

Table 3. Size of components in warm deep drawing

(unit : mm)

Part	Material	Size	Rp	Rd	Rc	Clearance
Punch	Circular	STD 11	∅40	5.0	-	-
	Square	STD 11	40x40	5.0	-	5.0
Die	Circular	STD 61	∅43.2	-	10	-
	Square	STD 61	43.2x43.2	-	10	7.2

Table 4. Experimental condition for circular and square cup drawing

Shape of product	Temp.(°C) (B.H. & Die)	Cooling of punch	Diameter of Blank(mm)	
			Circular	Square
Circular cup	R.T.	Cooled	∅65	65 × 65
	50		∅70	70 × 70
	100		∅75	75 × 75
	150		∅80	80 × 80
	200		∅85	85 × 80
Square cup	250	No cooled	∅90	90 × 90
	300		∅95	95 × 95
	350		∅100	100 × 100
			∅105	105 × 105
			∅110	110 × 110
		∅115	115 × 115	
		∅120	120 × 120	

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 성형온도와 한계드로잉비

본 실험에 사용한 온간 드로잉 금형 장치의 다이와 블랭크 홀더는 히터에 의해서 가열되면서 온도 조절되는데 금형이 가열되면서 다이와 블랭크 홀더로부터 펀치와 다이 세트의 과도한 열전달을 예방하기 위해 금형 상·하에 단열재를 설치하고 펀치는 냉각수에 의해 냉각되도록 하였다.

표 5은 가열온도와 펀치온도에 따른 펀치 표면의 온도를 냉각 유·무에 따라 측정된 것으로 펀치가 비냉각일 경우엔 온도가 높아지는 것을 알 수 있고, 펀치를 냉각하였다라도 다이가 400℃일 때 펀치 표면은 약 68℃가 되는 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 이와 같은 온도조건하에서 실험하였다

Table 5. Temperature of punch surface measured for given forming temperatures

(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	-	-

알루미늄 소재의 온간 성형작업시 성형온도 및 편치의 냉각 유·무에 따른 원형컵용기의 성형한계를 그림 3에서 보면 성형가공 온도는 높을수록 편치의 온도는 낮을수록 성형효과가 좋게 나타남을 알 수 있다. 즉 A1050과 A5052 소재는 재질에 관계없이 상온보다는 온간(약 400℃)에서 작업하면 더 높은 드로잉비인 2.25와 2.63을 얻을 수 있고 이를 상온에서의 값과 비교할 때 각각 1.29배, 1.4배 증가하고 있다.

원형컵 드로잉 실험에서는 편치직경 40mm를 기준으로 시편의 직경을 5mm 단위(드로잉비 0.125)로 증가시키면서 실험하였기 때문에 실험결과 오차가 일부 있을 수 있지만 시편직경을 세분화하면 보다 정밀한 데이터를 얻을 수 있다.

온간 드로잉일지라도 편치냉각의 유·무에 따라 성형성은 틀려지는데 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 편치냉각의 경우엔 다이, 블랭크 홀더의 온도가 300℃ 이상이 되면 열전달에 의해 편치온도가 198℃ 이상으로 올라가 $\phi 75\text{mm}$ 소재의 조기파단으로 성형 불가능하였으며, 이러한 이유로 인해 드로잉 성형성도 편치냉각의 경우보다 나쁜 것으로 나타났다.

A1050의 순수 알루미늄 소재는 온도가 200℃가 되면 인장강도가 85Mpa로 아주 낮은 강도를 나타내고 있어 드로잉 작업시 테프론 테이프의 형상 자국, 국부네킹, 흠집등이 아주 선명하게 나타나 이 온도 이상에서의 온간가공은 제품 외관상 불가능한 것으로 판단되었으며, A5052의 경우엔 400℃에서 작업하더라도 순수 알루미늄과 같은 문제는 발생하지 않았다.

온간작업이 가능한 작업 범위에서의 온간 성형성을 판단할 때 A5052 합금의 경우에는 1.4배, 그리고 A1050 순수 알루미늄의 경우에는 1.07배로 나타나 A5052 소재가 온간성형에 적합함을 알 수 있었다.

이와 같은 현상은 제품단면이 사각형인 정사각컵의 경우에서도 비슷한 결과가 그림 4에서처럼 나타나고 있다. 사각컵 드로잉은 코너부의 원형컵 드로잉과 직선부의 평면드로잉으로 구성되어 있기 때문에 플랜지면에서의 금속유동은 순수 원형컵 드로잉보다 좋아져서 제품 높이도 더 깊게 성형되고 있다.

사각 드로잉에서의 성형성은 사각 단면 코너 반경(Rc)에 대한 성형 깊이(H)의 비율인 상대드로잉 깊이로 나타낼 수 있는데 그림 4에서 보는 바와 같이 시편의 형상에 관계 없이 상온가공에서는 $H/Rc=4.2\sim 4.86$ 인데 반해 온간영역에서는 $H/Rc=8.2\sim 8.4$ 로 온간 성형효과가 크게 나타나고 있다.

그림의 (a),(b)는 블랭크 형상을 원형과 사각형으로 실험한 결과이고, 그림내의 숫자는 해당 작업온

도에서의 최대 시편형상과 치수를 보여주고 있다. 똑같은 시편일지라도 작업온도를 증가시키면 온간 성형효과로 성형깊이를 더 깊게 드로잉 가능하게 하고, 시편형상은 사각형보다는 원형이 재료유동을 더 원활히 해주기 때문에 좀 더 높은 성형성을 얻었다. 또한 A1050 순수알루미늄은 앞에서 언급한 바와 같이 온도가 증가할수록 소재의 변형이 어려워져 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 200℃ 넘는 온도에서 95×95mm의 사각블랭크로도 성형되지 않고 파단이 일어나고 있음을 나타내고 있다.

3.2 성형제품의 두께분포

A5052 원형컵 제품에 대한 두께분포의 작업조건 변화에 따른 비교를 그림 5에 나타내었다. 그림의 (a)는 시편직경($\phi 80\text{mm}$)을 일정하게 한 상태에서 작업온도를 증가시켰을 때의 두께분포로 대표적인 원형컵 단면의 두께분포 곡선을 보여주고 있다. 일반적으로 온도증가에 따라 컵 밑면과 측벽부의 두께가 상온가공일 때 보다 더 균일하게 되고 또한 파단이 일어나기 쉬운 편치 코너반경 부분의 두께감소도 온간성형에 의해 많이 억제되고 있음을 알 수 있다.

그림의 (b)는 다이, 블랭크 홀더의 온도를 300℃로 일정하게 하고 시편직경을 85mm에서 100mm로 증가시켰을 때의 두께분포이다. 시편이 커질수록 플랜지부의 면적이 넓어 소재의 유입저항이 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⁽⁸⁾에서는 재료의 높은 가공경화 특성으로 측벽의 파단 발생이 일어나지 않았지만, 본 연구의 알루미늄 소재에서는 1차 편치 코너반경부위에서 드로잉의 시작과 함께 재료연신에 의해 얇아지는 현상이 발생하고, 그 후 드로잉이 진행되면서 플랜지부에서의 드로잉 저항증가로 측벽이 2차로 얇아지게 되는데 이러한 현상은 시편이 커질수록 더 심하게 나타났다.

그림 6은 사각컵에 대한 두께분포를 나타내는 것으로 그림 (a)는 작업온도 효과를 보여주는 것으로 사각컵의 직선부 두께변화는 원형컵의 두께분포와 비슷한 경향을 나타내고 있는 것으로 작업온도가 높을수록 두께분포가 균일해지는 것을 알 수 있다.

그림 (b)는 100×100mm의 사각형 시편을 200℃에서 성형했을 때의 직선부와 코너부에서의 두께분포를 나타낸 것으로 직선부에서보다는 코너부에서 훨씬 많이 얇아지고 있다.

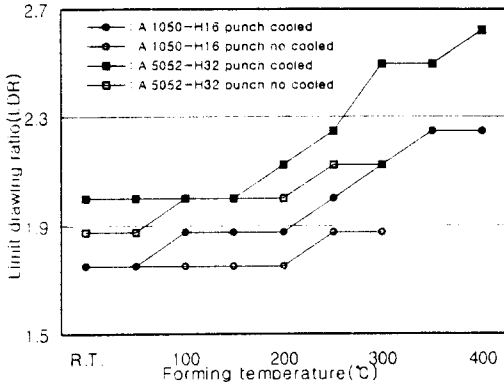
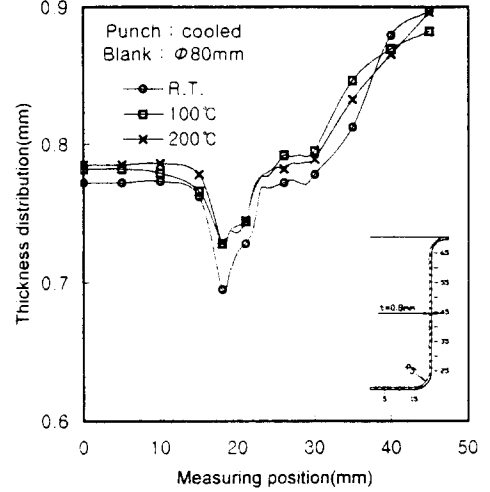
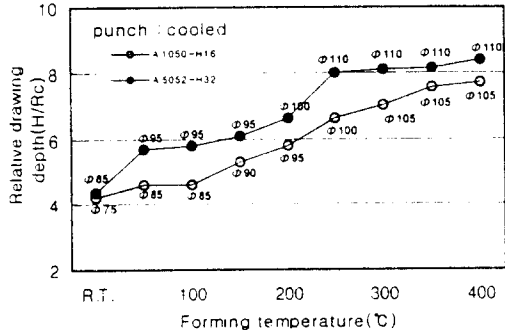


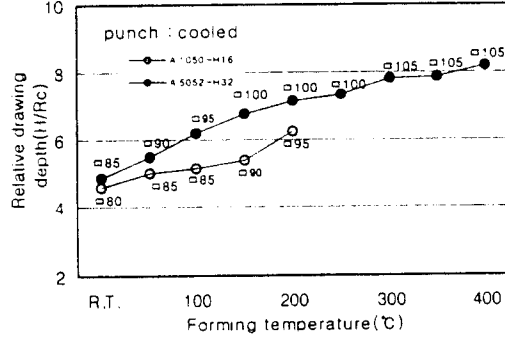
Fig. 3 Limit drawing ratio of circular cups



(a) Effect of forming temperature

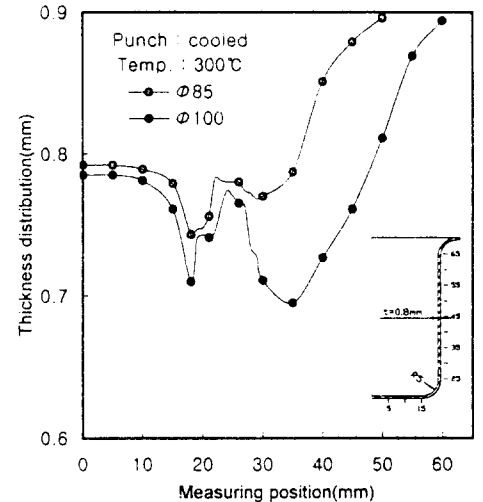


(a) Circular blank



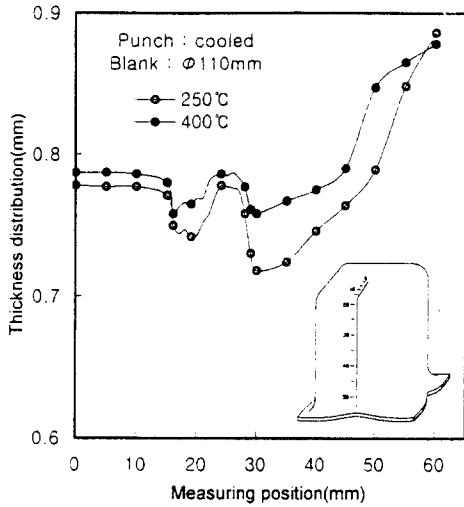
(b) Square blank

Fig. 4 Relative drawing depth of square cups for several working conditions

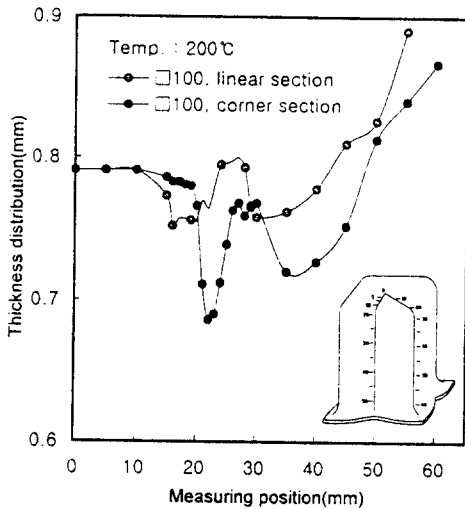


(b) Effect of blank size

Fig. 5 Thickness distribution of circular cups of A5052 material



(a) Effect of forming temperature



(b) Two sections of a square cup

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

4. 결론

판재성형에서의 가장 큰 관점은 소재의 과단이나 결함이 없이 원하는 형상을 얻는 것으로 본 실험에서는 A1050재와 A5052 소재의 디프드로잉 성형성을 개선하기 위하여 원형컵 및 사각컵의 성형으로 실험적 연구를 하였으며 이들의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 인장실험결과 온도를 300°C 정도로 온간실험을 하였을 때 A1050은 7.6배, A5052는 13.5배로 크게 증가하였고 인장강도는 3.3배, 2.7배로 각각 감소하여 온도효과가 큰 것으로 나타났다.
- (2) 원형컵 온간드로잉에 있어서 A5052의 경우엔 상온의 1.4배, A1050의 경우에는 1.07배, 그리고 A5052 사각컵 드로잉에 있어서는 블랭크 형상에 관계없이 드로잉 깊이가 상온의 1.83배가 향상되는 것으로 나타났다.
- (3) A1050판재는 200°C 범위에서, 그리고 A5052판재는 400°C까지 온간성형 효과가 있는 것으로 나타났으며, 그 이상의 온도에서는 제품표면의 산화현상이 일부 나타나 변색되기 시작하였다. 또한 시편이 커질수록 과단의 위치가 편치코너가 아닌 측벽부에서 발생하는 것을 알 수 있다.
- (4) 알루미늄 박판의 디프 드로잉성은 상온에서 보다 온간가공에서 효과가 크게 나타났으며, 또한 두께분포가 균일해지는 것을 알 수 있어, 온간드로잉 가공법을 이용하게 되면 생산과 품질의 향상을 기대할 수 있을 것으로 사료 되어진다

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97-E-40)에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김영석, : 알루미늄 판재 성형기술의 현황과 과제, 자동차 공학회지, 제14권, 제1호, (1992), pp. 3-12
2. Hisahi Nishimura, Toshihiko Kuwabara and Masayuki Shuuno. : Draw bead Performance and Model of Draw bead Force for sheet A 5182-0, Journal of the JSTP vol.36, no. 413, (June.1995)
3. Toshihiko Kuwabara, : Deep drawing Characteristics for Square Cups of Aluminum alloys A 5182-O and A6061-T4, Journal of the JSTP vol. 35, no. 399, (Apr. 1994), pp. 373-378
4. Hirohiko Takuda, Shiomi Kikuchi and Natsuo Hatta, : Modeling of Comprehensive Formula for Flow Curves of Aluminum alloys at Elevated Temperatures, Journal of the JSTP vol.34, no. 385, (Feb. 1993), pp. 165-170
5. 戸澤康壽, : 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巻, 第378號, (1992), pp. 782-789
6. 町田輝史, : 局部加熱による 薄板 加工の 高附加値. 月刊 PRESS技術, 技術情報株式會社, 第3巻, 第1號, (1990), pp. 26-35
7. J. H. Kim, C. S. Choi, B. Y. Jeong and G. H. Lee., : Deep drawing of stainless steel in warm working condition using a single crank press, Proceed. 4th Int. Con. on Technology of Plasticity, Beijing, China, (1993), pp. 1691-1694
8. 김종호, 최치수, 나경환. : 크랭크 프레스와 유압 프레스에서 스테인리스 강판의 온간 드로잉성 비교, 한국소성가공학회지, 제4권, 제4호, (1995), pp. 345-352
9. 山崎 淳, : アルミニウム板材の温間成形法, 塑性と加工, 第33巻, 第375號, (1992), pp. 404-410