

인장드로잉법에 의한 원통성형에 관한 실험적 연구

後藤學* · 金英洙* · 山下實* · 정태훈** · 임철록***

A Experimental Study of Cup forming by Stretch-Drawing Process

M. Gotoh, M.S. Kim, M. Yamashita, T.H. Chung and C.R. Lim

Abstract

Fundamental and informative data of axi-symmetric stretch-drawing of several sheetmetals with thicknesses of 0.7-1.0mm are presented both for single and double operations. Very small radius is applied to the die profile (or-shoulder) in all operations to induce wall-thinning by the effect of bending-under-tension, from which the name 'stretch-drawing' comes. It is clearly demonstrated that deeper cups could be formed by single and double stretch-drawings from smaller circular blanks due to such wall-thinning action than in the usual deep-drawing of larger blanks. From this fact, it is emphasized that the deep-drawability of a sheet metal is not evaluated simply by the conventional L.D.R (limiting drawing ratio), but the depth of the drawn cup should also be taken into account. Many experimental data about various metals and thicknesses given in this paper offer a valuable information in this process for more general use which recommends to replace the conventional deep-drawing process by the stretch-drawing process both for single and double operations. In the single stretch-drawing, it is also confirmed that a deeper cup can be produced by raising the blank-holding force at later stage of operation.

Key Words : Plasticity, Sheet Metal Forming, Single Operation, Double Operation

1. 서론

판재의 소성성형에서도 기본적인 원통 뒤틀드로잉성형에 관한 소재의 성형성 평가는 한계드로잉비로 하는 것이

상식이다. 즉 이것이 클수록 드로잉성이 높아진다. 본래 뒤틀드로잉은 바닥이 있는 용기를 성형하기 때문에 최초에 희망하는 컵 깊이가 있고, 깊이가 중요한 인자이다. 또한 재료의 절약의 관점에서 소정의 깊이의 컵을

* 日本岐阜大學 工學部

** 중부대학교 기술공학부

*** 대원강업(주) 기술연구소

연기 위해 가능한 적은 치수의 소재를 사용할 필요가 있다. 그러나 한계드로잉비는 성형 가능한 최대 컵 깊이라든가, 얼마의 깊이의 컵을 성형하는 것에 어느 정도 소재치수를 작게 할 수 있을까 라고 하는 중요한 관점이 빠져있다. 더욱이 한계드로잉비가 큰 판재일수록 이러한 요구가 크다고 하지만 이것의 검토는 아직까지 없었다. 판재에 있어서는 “인장굽힘에서의 판두께 감소 촉진”이라는 현상이 있다⁽¹⁾. 일반적인 판재의 프레스 성형에 있어서 전형적 불량현상으로서의 파단은 거의 예외 없이 인장굽힘을 받는 부위에서 생기지만 이것은 판두께 감소 촉진의 원인이다. 따라서 일반론으로서 판재성형에 있어서는 가능한 한 인장굽힘을 작게 하는 것이 일반적이다. 원통 뒤틀로잉 성형에서의 판재는 펀치와 다이의 모서리 부에서 인장굽힘을 받는다. 따라서 굽힘작용을 완화하기 위해서 펀치와 다이의 모서리 반경은 가능한 한 크게 하고 판두께의 6 - 10배로 하는 것이 상식화되어 있다.

뒤틀로잉성 평가 인자로서의 L.D.R은 이러한 상식화에 관용되고 있다. 다이모서리 반경에 상한을 설정 할 수 있는 것은 크게 벗어나면 파단과는 별종의 불량현상인 몸통주름을 가져오기 때문이다⁽²⁾. 그러므로 비교적 최근의 今津가 다이모서리 반경을 판두께 보다 더욱 큰 정도로 하여 뒤틀로잉 성형을 검토하여 첫단계에 남은 드로잉한 컵을 소재로하여 다이모서리에서의 인장을 증가시키는 방법으로 통상의 뒤틀로잉 성형보다 깊은 컵을 만드는 기술을 개발했다^{(3),(4)}. 이것은 인장 굽힘에서 판두께 감소가 촉진되면 결과로서 컵이 그 만큼 깊게 되는 것을 목표로 한 것이다. 즉 뒤틀로잉 성형에 있어서 다이모서리 반경은 판두께까지 작게 해도 좋은 것이 명확화 되었고 더욱이 이것에 의해 컵 깊이를 증대시킬 수가 있는 것을 알았다. 그러나 今津의 기술개발은 오직 음료수용 스틸캔의 제법에 한정되어 판두께 0.2mm 정도의 얇은 경질강판에서의 캔 성형 기술이다. 이 기술이 뒤틀로잉법에 의해 원통성형 전반에 있어서 어느 정도 발휘하는가 즉, 보다 일반적인 1mm 정도의 판두께에서 각종 재질과 각종 조질도(각종 경질도 혹은 연질도)의 판재에의 적용성은 어떤가와 인장드로잉성형성과 판재의 성형성이 정 가능한가 또한 이 지배인자는 무엇인가 등에 관해서는 아무것도 알 수가 없다. 그러므로 인장드로잉 성형법의 성공은 저자들에게 뒤틀로잉성 평가법의 불완전성을 강하게 인식시켰다. 즉 컵 깊이도 평가의 척도로서 이용하고 이것을 보다 중요시하는 것이 필요하다. 또한 종래의 뒤틀로잉법에 구애받지 않고 이것이 실제 유효한가 아닌가를 명확히 할 필요가 있다.

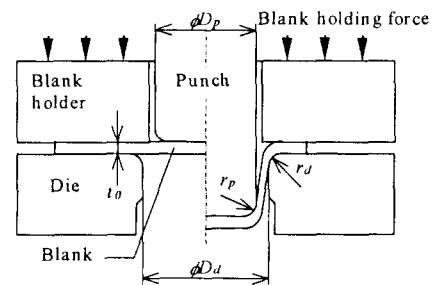
이러한 배경으로 본 연구에서는 원통성형에 많이 사용되

는 각종재질, 조질도 및 판두께(0.7-1.0mm)의 판재를 시험재로 하고 다이모서리반경은 0.5-3.0mm까지 여러가지로 바꾸고 단일단 또는 2단 인장드로잉 성형을 행하였다. 그리고 특히 컵 깊이 자체와 소정의 깊이의 컵을 성형하기 위해 필요한 블랭킹 치수 등에 대하여 고찰하였다. 비교를 위하여 다이모서리 반경을 8mm로 한 통상의 뒤틀로잉 성형도 행하였다.

2. 실험

2.1 공구, 가공조건

Table1은 본 연구에서 사용한 공구의 치수 및 가공조건을 나타냈다. 또한 Fig.1과 Fig. 2에 각각 단일단 및 2단의 인장드로잉 성형의 공정도를 나타냈다. 단일단 성형에서는 펀치직경 40mm를 이용했다. 2단성형에서는 1단에서 내경 40mm로 드로잉한 컵을 내경 30mm의 컵으로 재드로잉성형을 한다. 또한 다이모서리 반경 8mm의 다이는 종래의 뒤틀로잉 성형용이고, 인장드로잉성형과의 비교를 행하기 위한 것이다. 또한 윤활제로서는 몰리브덴 그리스를 사용하고, 1단계의 인장드로잉은 다이와 블랭크 홀더의 표면에, 2단계는 재료에 접촉하는 가이드링과 다이, 블랭크 홀더의 표면에 도포하였다.



D_d : Diameter of die hole r_d : Die profile radius
 D_p : Diameter of punch r_p : Punch profile radius
 t_0 : Sheet thickness

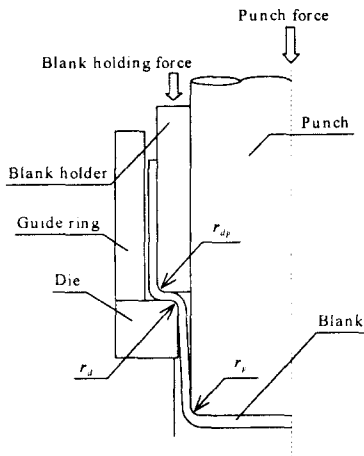
Fig. 1 Illustration of 1st or single stretch-drawing process

인장드로잉 성형에서는 인장하의 굽힘작용 때문에 다이모서리부에 있어서 면압이 크고, 상당히 큰 반경방향의 마찰저항이 발생한다. 이것은 블랭크 홀더력에 의존한다. 1단계의 성형에서의 블랭크 홀더력은 원통성형일때에 통상 이용할수 있는 Siebel의 반이론식⁽⁵⁾의 2배를 이용하였다. 2단계의 성형에서의 블랭크 홀더력은 1단에서

성형된 각 컵에 성형 가능한 범위내에서의 가장 엄격한 다이모서리 반경을 이용한 때에 성형 가능한 최대의 블랭크 홀더력을 주었고 이때의 다이모서리 반경일 때에도 일률적으로 적용하였다. 또한 인장드로잉성형의 후반에서 컵 입구부가 두껍게 되는 현상을 억제하고 더욱이 컵 높이를 증대 할 수 있는가를 조사하기 위해 단일단성형에 대하여 성형도중에 블랭크 홀더력을 3배로 증가시키는 실험도 행하였다.

다이모서리 반경은 Table1에 나타난 6종류를 이용하였다. 각각의 다이모서리 반경에서 성형을 행했을 때의 측벽부의 판두께 감소율 및 컵 높이를 측정하였다.

또한 펀치-다이간의 클리어런스를 1.2mm로 하고 다이구멍 직경을 42.4mm로 설정하였다. 성형은 약 1mm/s로 하는 극저속으로 행했다. 실험은 모두 $20 \pm 1^\circ$ 의 향온실에서 행하였다.



r_p : Radius of punch r_{dp} : Blank holder profile radius
 r_d : Die profile radius

Fig. 2 Illustration of 2nd or double stretch-drawing process

2. 2 실험재료 및 방법

실험재료의 종류, 판두께 및 기계적 특성의 면내 평균치를 Table2에 나타냈다.

단일 인장드로잉 성형에서는 각 재료에 대하여 전술의 각종 다이모서리 반경을 이용하였고 각각에 대하여 한계드로잉비를 구했다. 성형컵의 측벽두께 분포는 성형품의 원주방향 45° 씩 선을 긋고 컵 밑면에서 10mm의 위치부터 높이 방향으로 5mm간격으로 마이크로다이알 게이지를 이용하여 측정했다. 컵 깊이에 관하여는 귀와 귀사이의 곡부에서 디지털비어캘리러스를 이용하여 4

점 측정하여 그 평균치로서 평가했다.

Table 1 Dimension of tools

		First stage	Second stage
Die (mm)	Diameter D_d	42.4	32.0
	Profile r_d	0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 3.0, 8.0	
Punch (mm)	Diameter D_p	40.0	30.0
	Profile r_p	8.0	6.0
Clearance (mm)		1.2	1.0
Velocity (mm/s)		0.941	
Lubricant		Molybdenum grease	

Table 2 Tensile properties of materials tested

Materials (Thickness)	K (MPa)	n Value	r Value	U.T.S. (MPa)	T.E. (%)
Al-H(1.0mm)	164.3	0.035	(1.051)	136.7	0.971
Al-H*(1.0mm)	147.1	0.022	(1.073)	131.1	1.584
Al-O(1.0mm)	147.9	0.247	0.860	82.42	43.80
Br-1/4H(1.0mm)	724.3	0.320	0.988	391.4	41.70
Br-O(1.0mm)	717.2	0.370	0.937	371.9	51.41
SPCE(0.7mm)	571.6	0.185	1.149	347.7	36.54
SUS304(0.8mm)	901.4	0.445	1.050	644.5	60.50
SUS304*(0.8mm)	722.3	0.184	1.228	704.0	64.74
SUS304L(1.0mm)	718.4	0.153	0.956	627.4	54.80

K, n : Work hardening property ($\sigma = k\epsilon^n$),

U.T.S.: Ultimate tensile strength, T.E.: Total elongation,

() : Reference value ; All values are in-plane averages.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일 인장드로잉

Fig.3은 인장드로잉 성형성의 평가를 컵 깊이에 주목하여 인장드로잉 성형의 우수성을 동일 소재 직경에 대하여 컵 깊이 비의 관점에서 평가하기 위하여 횡축에 다이모서리 반경 r_d 를 구하고 각 r_d 에 대하여 최대의 컵 깊이 이득비($H_s - H_d$)/ $H_0 \times 100(\%)$ 를 종축에 나타내었다. 여기서 H_0 는 통상의 드로잉성형에 의한 컵 깊이, H_s 는 인장드로잉에 의한 컵 깊이이다. 여기서 대략 아래의 3가지 경향으로 분류 할 수 있다.

(1) 다이모서리 반경이 크게 될수록 인장드로잉 성형의

우위성(깊이 이득비)이 적게되고, 통상의 뒹드로잉의 결과로 접근하는 것(Al계)

(2) $r_d=0.5$ 에서 깊이 이득비가 최대로서 r_d 의 증대와 함께 일단 저하하고 다시 상승한 후 저하하는 것(강판계)

(3) 깊이 이득비가 어떤 특정의 블랭크 직경 부근에서 현저하게 되는 것, 즉 인장드로잉성형에 있어 최적 블랭크 직경이 존재하는 것(황동계)

이상과 같은 경향에 관하여 재질종류에 따라 분류되는 것은 흥미롭다. 전반적으로 볼 때 깊이 이득비의 최대치는 36% 강(SUS304* $r_d=0.5$)이고 30% 전후는 몇 개의 프롯트점이 존재한다. $r_d=3$ 에서의 이득비는 전체적으로 낮지만 Al-0를 제외하면 전부 10%이하도 있고 Br-1/4H는 24% 강하다고 하는 높은 값을 나타내고 있다. $r_d=3$ 에서는 드로잉비도 크고 절대적인 컵 깊이도 $r_d=0.5$ 에 비하여 상당히 큰 것도 고려할 필요가 있다. 전반적으로 Fig.3은 인장드로잉 성형 효과가 큰 것을 명료하게 보여 주고 있다. 인장드로잉성을 r_d 가 적은것(여기서는 $r_d=0.5$)에서의 깊이 이득비의 대소로서 평가하면 Fig.3에 의해 스텐레스를 포함한 강판계와 Al-0가 좋다. 또한 r_d 가 크게 되어도(단 ≤ 3) 인장드로잉 효과가 지속하는 것을 가지고 인장드로잉성이 좋다고 평가하면 황동계나 SUS304*가 우위에 있다.

이상의 전반적인 것을 통하여 컵 깊이에 한정된 평가로부터 본 실험의 시험재에서는 경질의 Al이외는 인장드로잉성이 크다고 평가 할 수 있다.

다음에 동일 깊이의 컵을 얻기 위해 인장드로잉 성형과 통상의 뒹드로잉 성형에서 사용하는 블랭크의 면적의 차에 주목하여 각 다이모서리 반경에 대하여 인장드로잉에 의한 최대면적저감율(A_d-A_s)/ $A_d \times 100(\%)$ 을 계산하여 Fig.4에 나타냈다. 여기서 동일 컵 깊이에 대한 A_d 는 통상 드로잉에서의 블랭크 면적, A_s 는 인장드로잉에서의 블랭크면적이다. 이것은 재료 절감의 관점에서 중요한 의의를 가진다. 이 경우 인장드로잉 성형에서 얻은 최대 깊이가 통상의 한계드로잉비에서의 최대 깊이 보다 높은 경우에 대하여는 비교할 수 없기 때문에 나타내지 않았다.

3.2 블랭크 홀더력 증가의 효과

단일단 인장드로잉에서의 판두께 분포의 예를 Al-0에 관하여 Fig.5에 나타냈다.

그림에서 인장드로잉 성형에 의한 컵은 통상의 뒹드로잉

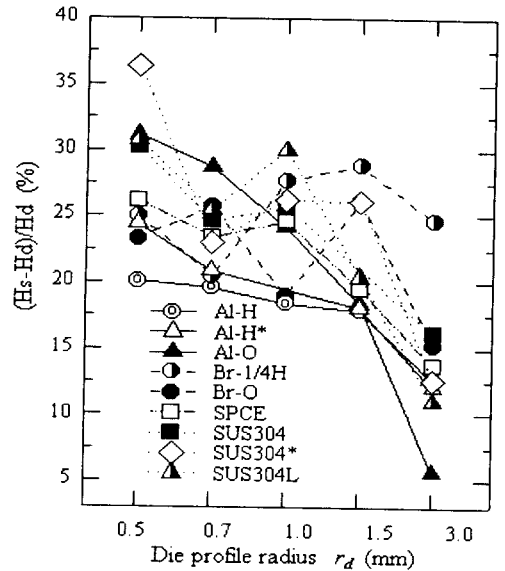


Fig. 3 Maximum gain in cup depth by stretch-drawing relative to cup depth by usual deep-drawing, defined by $(H_s-H_d)/H_d$, for various die profile radii

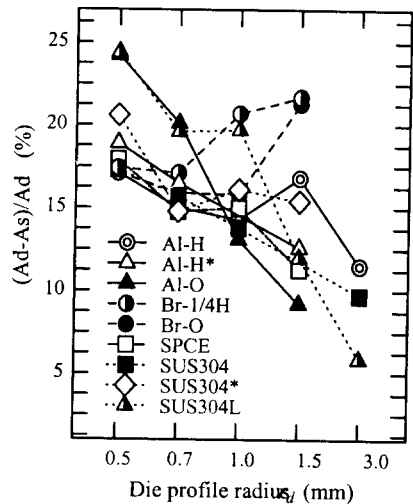


Fig. 4 Maximum gain in blank area by stretch-drawing relative to blank area required in usual deep-drawing, defined by $(A_d-A_s)/A_d$, for various die profile radii

성형에 의한 컵에 비해서 벽두께는 확실히 얇다. 그러나 컵의 성형후반(컵 입구부)에서는 두꺼워지는 경향을 볼 수 있다⁽⁶⁾. 이러한 경향을 억제하고 더욱 깊은 컵을 성형할 수 있는 가능성을 조사하기 위해 성형의 후반에 블랭

크 홀더력을 3배로 증가시켜 인장력을 수동으로 증대시키는 실험을 행하였다. 그 결과를 Fig.6에 나타냈다. 실선으로 나타낸 점을 연결한 것이 성형후반에서 블랭크 홀더력을 증가시킨 경우이다. 컵 깊이는 점점 크게 되다가 멈췄지만 블랭크 홀더력 제어를 자동화하는 것에 의해 컵 깊이 증가는 가능하다고 판단된다.

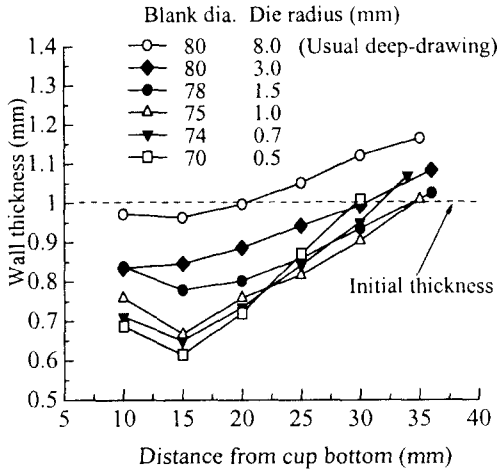


Fig. 5 Distribution of wall thickness along the wall after single operations (Al-O ; 1mm thick)

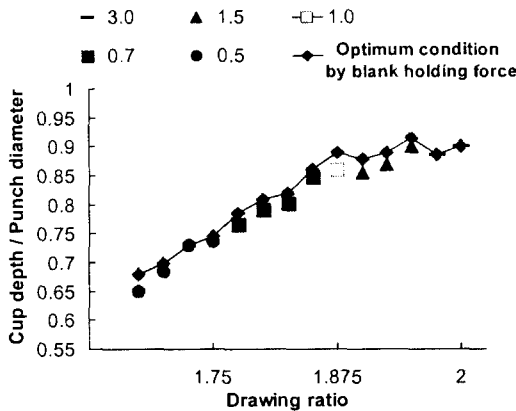


Fig. 6 Relationship between cup-depth and drawing ratio in single stretch-drawing with a raise in blank-holding-force at later stage of operation (Al-O; 1 mm thick)

3.3 2단 인장드로잉

2단 인장드로잉 성형은 Al-H*, SPCE, SUS304L에 관하여 검토를 행하였다. Fig.7의(a), (b)에는 SPCE와



Fig. 7 A few examples of formed cups by the single and double stretch-drawings.(a)SPCE, blank dia. 73, rd = 1.0(for both operation s), (b)Al-H, blank dia. 77, rd =3.0(for both operations). (rd :die-profile radius (dimensions in mm))

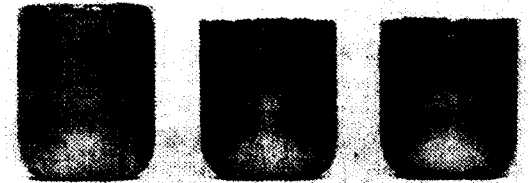


Fig. 8 Examples of earless cups formed by double stretch-drawing operations.(SUS304L) Right: blank dia. 63, rd =0.5 & 3.0(single & double); Center: 63, 0.7 & 3.0; Left: 66, 1.0 & 3.0 (in mm)

Al-H의 성형품의 예를 나타냈다. 각각 1단에서는 다이 모서리 반경 0.7, 3.0mm, 2단계는 1.0, 3.0mm를 사용했다. 그림에 나타난 것처럼 2단 인장드로잉 성형에 있어서도 성형품에 4개의 귀가 생겼다. 한편 Fig.8에 2단 인장드로잉에서 얻어진 SUS304L의 성형품을 나타냈지만 이 성형품에서는 거의 귀가 생기지 않는다.

Fig.9는 2단 성형에서의 깊이비의 관점에서 평가하기 위해 각 재료에 관하여 깊이이득비(H_s'/H_d')/ $H_d' \times 100(\%)$)를 나타냈다. 여기서 H_d' =통상의 재드로잉성형에 의한 컵 깊이, H_s' =2단 인장드로잉에 의한 컵 깊이이다. Fig.3과 Fig.9에서 단일단 성형의 깊이이득비와 2단의 깊이이득비를 비교하면 SPCE는 2단 성형에서는 최대 29%강(단일단 성형에서는 26%), Al-H*는 26%(단일단 성형에서는 24%), SUS304L은 33%(단일단 성형에서는 31%)로 있지만 사용한 블랭크직경 전체를 통하여 보면 SPCE가 2단 인장드로잉성에 있어서 우수하다고 말할 수 있다.

Fig.10은 2단 성형에 있어서 면적비의 관점에서 면적저감율($A_d'-A_s'/A_d' \times 100(\%)$)를 나타냈다. 여기서 동일 깊이의 컵을 얻는 것으로서 A_d' =통상의 재드로잉 성형에

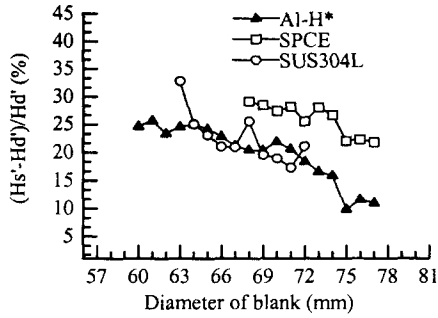


Fig. 9 Gain in cup depth by double stretch-drawing relative to cup depth by usual double deep-drawing

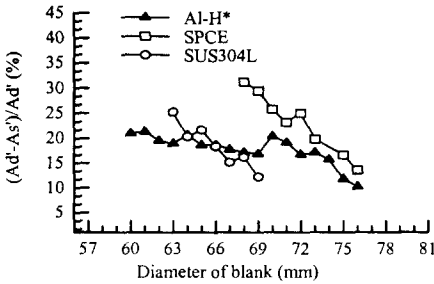


Fig. 10 Gain in cup depth by double stretch-drawing relative to cup depth by usual double deep-drawing

의한 블랭크 면적, A_s' =2단 인장드로잉에 의한 블랭크 면적이다. Fig10의 면적저감율에 의해 SPCE는 2단 성형에서는 최대 31% 강(단일단 성형에서는 18%), Al-H*는 21% 강(단일단 성형에서는 19%), SUS304L은 25% 강(단일단 성형에서는 24%강)이고, SPCE에 관해서는 높 이이득비와 같다고 말 할 수 있다. 이러한 결과로부터 전체적으로 2단 성형한 경우도 큰 블랭크 절감이 가능하 다.

Fig11에 Al-H를 2단 인장드로잉 성형한 때의 벽두께 분포를 나타냈다. 이 그림에 있어서는 횡축에 컵 밑바닥 부터의 거리, 종축에서는 측벽주 방향의 평균판두께를 채택하였다. 이 그림에서 다이모서리 반경이 적게 되면 될수록 특히 컵 밑바닥의 약20mm의 부분에서 판두께가 감소하는 것이 확실히 관찰된다. 모든 재료에 있어서 성형후반에 컵입구부의 판두께가 두꺼워지는 경향이 나타

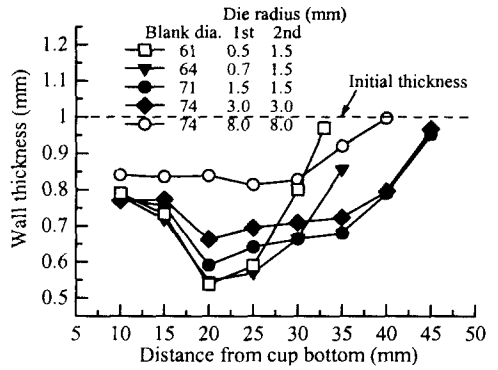


Fig. 11 Distribution of wall thickness along the wall after double operations (Al-H ; 1mm thick)

나는데 이것을 개선하면 더욱 깊은 컵의 성형을 기대할 수 있다.

4. 결론

인장드로잉성형이 재료절약에 어느 정도 유효한가를 명확히 하기 위한 것과 통상의 덮드로잉과 재드로잉을 대체할 수 있는가를 검토하기 위해 판두께 1mm정도의 여러 재질과 판재에 대하여 단일단과 2단 인장드로잉성형을 행하였다. 다이 모서리반경 r_d 는 0.5에서 3mm까지 5종류로 하고 비교를 위해 통상의 덮드로잉으로서 $r_d=8mm$ 를 한 것도 실험을 하였다. 단일단 과 2단 인장드로잉에 의해 통상의 덮드로잉과 재드로잉에서는 얻을 수 없는 깊이의 컵을 보다 작은 블랭크에서도 얻을 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) 後藤學, 1982, 塑性學, コロナ社, p.95.
- (2) 後藤學, 林哲録, 荒浪勝, 1996, 日本機械學會論文集, 62-595, p.1147.
- (3) 今津勝宏, 小林 亮, 小林 具實, 1993, 塑性加工春季講演會, 215, p.581.
- (4) 今津 勝宏, 1996, 日本機械學會論文集, 62-600, p.3320.
- (5) 河合 望, 1982, 塑性加工學, 朝倉書店, p.191.
- (6) Gotoh, M., Katoh, M. Yamasita, M. 1997, J. Mat. Pross. Tech, 63-1-3, p.123.