

합금화 용융 아연 도금강판의 온간 딥드로잉 성형성에 관한 연구

장성호* · 서대교**

(2002년 3월 14일 접수)

A Study on the Warm Deep Drawabilities of Galvannealed Steel Sheet

S. H. Chang and D. G. Seo

Abstract

The limiting drawing ratio (LDR) under uniform heating of blanks was measured at the various temperature ranges between 25 and 250°C by using two different blank shapes, square and circular blanks, and six different blank sizes with the drawing ratios(DR) of 2.4 to 2.9. The galvannealed steel sheet (SCP3CM 60/60) of 0.7mm thickness were used. The LDR at warm forming condition reached 1.2 times of that at room temperature, and the maximum drawing depth reached 1.9 times. The higher temperature was adopted, the more stable and uniform thickness strain distribution was observed. Some cases of the experimental results were compared with the analytical results using the commercial finite element method (FEM) code.

Key Words : Warm Deep Drawing, Limiting Drawing Ratio (LDR), Maximum Drawing Depth, Thickness Strain Distribution

1. 서론

차체를 구성하는 패널류의 각종 부품은 스탬핑을 포함한 프레스성형을 이용하여 제작한다. 이때 제품형상에 대하여 성형성이 부족하거나 성형난이도가 높은 경우가 발생하게 된다. 이러한 경우 공정수 파다로 인한 인건비,

설비비(고정비), 금형비가 많이 소요될 뿐 아니라 금형과의 접촉면에 스크래치 등의 표면품질 불량이나 크랙, 소착, 주름현상 등의 여러 불량현상이 발생하게 된다. 이러한 통상적인 상온에서의 성형특성에 의해 기인하는 불량현상들은 현장에서의 제조비용 상승의 원인이 된다. 이러한 애로사항을 극복하기 위해서는 가장 파단되기 쉬운

* 성균관대학교 대학원
** 성균관대학교 기계공학부

편치형상반경부근의 재료강도를 향상시키는 동시에 플랜지부의 플랜지저항과 다이 어깨반경부에서의 굽힘 저항, 금형과 소재간의 마찰저항으로 생기는 드로잉력을 줄이는 것이 중요하다. 금속박판의 프레스가공은 일반적으로 상온에서 행해지지만, 편치와 다이 및 다이홀더 사이에 온도구배를 줌에 따라 성형한계를 향상시키는 것이 가능하다. 그것은 편치형상 반경부를 냉각하여 그 부위에서의 파단저항을 높이면서 플랜지부를 가열함에 따라 블랭크의 변형저항을 저감하여 드로잉력을 줄일 수 있기 때문이다. 이러한 목적으로 개발된 성형 공정이 온간성형법이다.⁽¹⁾

이러한 온간성형법에 대한 연구가 여러 연구자들에 의해 행해졌으며 성형성에 미치는 성형인자와 성형조건들을 제시하고 있다.⁽²⁻⁹⁾

또한 강판의 내식성 향상을 위해 Zn, Sn, Cu, Al, Cr 등과 같은 방청성 금속을 도금하는 방법이 오래 전부터 개발되어져 왔다. 자동차용 표면처리강판에는 그 적용목적인 방청성과 더불어 프레스 성형성, 용접성, 도장성 등 여러 특성들이 요구되어진다. 그러한 이유로 각종 표면처리강판이 개발, 채용되어지고 있다. 그 중 수출용 차량에 주로 사용되어지고 있는 합금화용융(이하 GA)도금강판은 용융아연도금층을 응고직전 재가열 (500~550℃)하여 옅은 회백색의 Fe-Zn 합금 층을 생성시킨 판재로 도장성이 뛰어나고 기전력이 낮아 내식성이 우수하며 용접성이 우수하다.⁽¹⁰⁾

본 연구의 목적은 GA도금강판을 사용하여 사각 및 원형의 두 형상 블랭크에 온간성형법을 적용하여 그 성형성을 평가하고 강판의 최적 성형 온도 구간을 토의하며 기존 FEM code을 이용한 해석을 통해 온간성형법을 구현할 수 있는 방안을 제시하여 실험결과와 비교 검토하고자 한다.

2. 실험

2.1 기초실험

GA도금강판의 모재인 SCP3C에 대한 온도별 인장실험 데이터를 참고⁽¹¹⁾하였고 온도별 마찰계수를 파악하기 위한 온도별 마찰실험을 수행하였다.

마찰실험은 상온에서 300℃까지의 범위에서 총 7단계에 걸쳐 수행하였다. 마찰실험장치는 본 실험장치와 같은 재료의 금형으로 제작되었고 1MPa, 1.5MPa과 2MPa의 3 단계 홀딩 압력 하에서 수행하였다.

Fig. 1은 인장실험 결과를 나타낸다. 인장강도(tensile strength), 연신률(elongation), 강도계수(plastic coefficient)

모두 온도가 증가함에 따라 약간씩 감소하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 각 홀딩 압력별 온도에 따른 마찰계수 변화는 Fig. 2에서와 같이 온도가 증가할수록 홀딩 압력이 높아질수록 마찰계수(friction coefficient)는 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 1.5MPa 이상의 홀딩 압력 하에서는 150℃이후 소착 현상이 뚜렷하게 나타나 그로 인해 마찰계수가 다소 감소하다 그 이후에는 실험 중 소음이 점점 커지면서 결국 2MPa 300℃에서 파단(fracture)이 발생하였다.

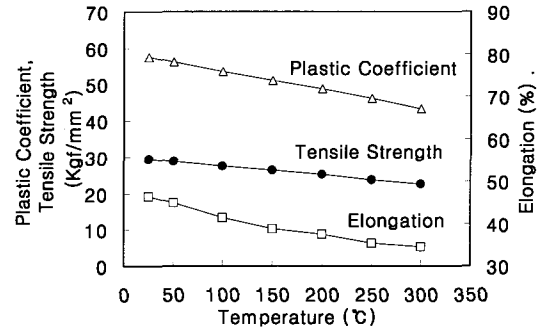


Fig. 1 Various coefficients of material at elevated temperature

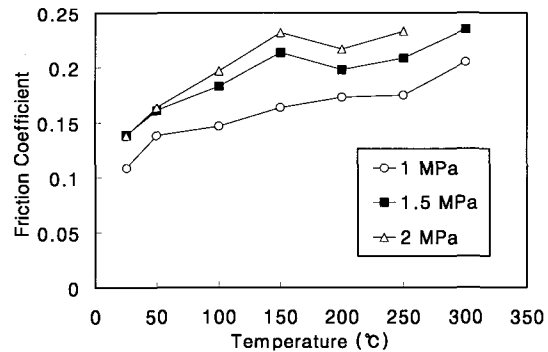


Fig. 2 Friction coefficient(μ) at various pressure and elevated temperature

2.2 딥드로잉 실험장치 및 실험방법

본 실험을 위한 장치는 Table 1과 Fig. 3에서와 같이 30ton 용량의 U.T.M.(universal testing machine)에 온간 딥드로잉 실험장치를 설치하고, 온도제어장치, 수냉 펌프, 냉각기, 유압실린더 및 유압펌프 등의 주변장치들로 구성되었다. 이 때, 금형 온도는 온도제어장치 (autonics TZAST-14R)로 일정하게 유지할 수 있도록 하였고 편치를 통해 순환하는 냉각수의 온도는 10℃로 유지시켰다.

Table 1 Name list for experimental apparatus

No.	Name	No.	Name
①	Punch	⑥	Temperature control box
②	Warm forming device	⑦	Cooling pump
③	Die set	⑧	Refrigerator
④	Hydraulic cylinder	⑨	Hydraulic pump
⑤	U. T. M.	⑩	Load gauge

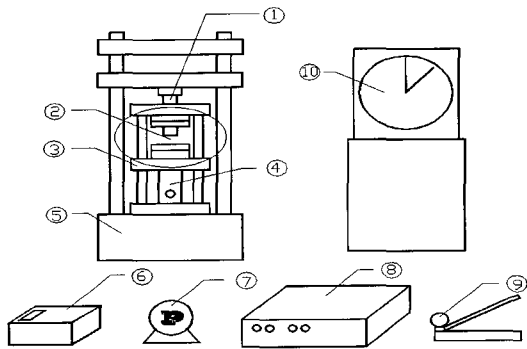


Fig. 3 Experimental apparatus for warm forming test



(a) Square blank

(b) Circular blank

Fig. 4 Deformed specimens up to the maximum drawing depth

가열온도는 R.T.(25℃), 50℃, 100℃, 150℃, 200℃, 250℃ 등으로 하여 각 온도별로 딥드로잉 실험을 수행하였다.

블랭크에 가해지는 압력은 사각블랭크의 경우 2MPa를, 원형블랭크의 경우에는 2.8MPa로 하였는데, 이는 두 형상의 블랭크가 모든 드로잉비 조건에서 주름현상이 발생되지 않은 최소의 블랭크 가압력이었다. 원형블랭크의 경우가 좀 더 큰 블랭크 가압력이 요구되어짐을 알 수 있다.

프레스 성형속도는 50mm/min으로 하였다. 실험은 각

온도별로 블랭크의 드로잉 비를 높이면서 최대 성형깊이 까지 수행하였다. 온간 실험장치들의 세부치수를 Table 2에 나타내었다. 다이와 펀치와의 틈새(clearance)는 3mm이다.

Table 2 Size of punch, die, blank holder and blank (Rp : punch profile radius, Rd : die profile radius, Rc : corner radius)

Part	Material	Surface	Size (mm)	Rp (mm)	Rd (mm)	Rc (mm)
Punch	FC30	Cr-coating	(60×60)	5	-	5
Die	FC30	Cr-coating	(66×66)	-	7	8
Blank holder	FC30	Cr-coating	(61×61)	-	-	6
Blank	GA	-	Square (60×DR) × (60×DR)	-	-	-
	60/60 thickness = 0.7mm	-	Circular Dia. (60×DR)	-	-	-

3. 실험결과 및 고찰

3.1 온간 성형성

성형실험에 사용한 사각펀치는 한 변이 60mm인 정사각형 펀치이고 블랭크의 크기를 점차 크게 하면서 딥드로잉 실험을 수행하였다. 성형깊이 40mm를 기준으로 하여 파단과 주름 없이 기준 성형깊이(40mm) 이상으로 성형 가능한 최대 블랭크의 크기를 구하고, 이 때의 드로잉비를 최대 드로잉 비라고 하였다. 또한, 각 드로잉비에 따른 최대성형깊이는 블랭크의 끝단이 다이 어깨반경부에 닿을 때까지 파단 되지 않고 성형된 컵의 깊이를 의미한다. Fig. 4에서 최대성형깊이까지 성형된 컵의 그림을 보여주고 있다.

따라서, 각 드로잉비의 블랭크에서 최대성형깊이까지 파단과 주름 없이 성형 가능한 최대의 블랭크의 지름(원형인 경우) 혹은 한 변의 길이(정사각형인 경우)를 구할 수 있다. 이 때의 드로잉 비를 최대 드로잉비라고 한다. 상온에서의 드로잉 실험을 한 결과, 본 연구에서 사용한 GA강판은 상온에서의 최대 드로잉 비가 사각블랭크의 경우 2.4, 원형블랭크의 경우 2.5임을 알 수 있었다. 블랭크의 형상에 따른 성형성 비교를 위하여 사각과 원형의 블랭크 형상을 비교하여 실험하였고, 펀치의 크기가 일정하므로, 사각 블랭크의 한 변의 길이(L₀)와 원형 블랭크의 지름(D₀)이 같은 경우(L₀=D₀)에 두 형상의 블랭크

의 드로잉비는 서로 같다고 설정하였다.

성형실험 결과, Fig. 5에서의 같이 플랜지부 가열온도를 증가시킬수록 두 형상 모두 성형 가능한 최대드로잉비가 점진적으로 증가하였는데 원형의 경우가 좀 더 큰 드로잉비까지 성형 가능함을 알 수 있었다.

Fig. 6에서는 온도를 증가시킴에 따른 각 드로잉비별 성형된 깊이를 나타내고 있다. 원형 블랭크의 경우로서 온도가 증가할수록 최대성형깊이가 점차적으로 증가하다가 드로잉비마다 최대성형깊이로 성형되어지는 온도영역이 존재하여 그 온도 이후에는 온도를 증가시켜도 성형되는 깊이는 증가하지 않고 일정한 깊이로 성형되었다.

드로잉비 2.7인 경우에 최대성형깊이는 가열온도 150°C 이상에서 상온에서의 성형깊이보다 약 1.9배이상 성형 가능하였다. 이는 온도 증가로 인해 성형성 향상 가능성을 나타내는 것이다. 드로잉비 2.9의 경우에는 온도가 증가함에 따라 큰 효과는 나타나지 않지만 성형깊이가 약간 증가하였다. 사각블랭크의 경우도 같은 경향을 나타내었다. 사각과 원형 블랭크의 비교를 위해, 드로잉비 2.8의 경우에 대해서 Fig. 7에 나타내었다. 이 경우는 앞선 Fig. 6에서의 2.7의 경우처럼 실험온도 구간에서 최대성형깊이까지 성형되지는 않았지만 온도가 증가함에 따라 성형깊이도 증가하는 것을 나타내고 있다. 더욱이, 원형 블랭크의 경우가 사각블랭크 경우보다 조금씩 더 깊은 값을 성형할 수 있었다.

Fig. 6에서 최대 성형깊이를 나타내었던 가열온도 150°C의 경우에, 사각과 원형블랭크의 드로잉비 증가에 따른 성형깊이의 변화를 Fig. 8에서 나타내고 있다. 여기에서 원형 블랭크의 경우에 드로잉비 2.7, 사각 블랭크의 경우에 드로잉비 2.6에서 최대성형깊이를 나타냈다. 또한 최대성형깊이를 나타내는 드로잉비 이후에 급격하게 성형

깊이가 감소하였다. 이는 블랭크의 크기가 커지면서 가압되는 면적이 넓어져 그에 따른 성형저항이 커지면서 성형 깊이가 감소하는 것으로 판단된다.

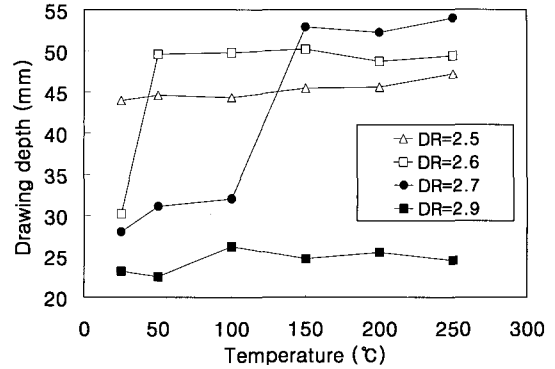


Fig. 6 Variation of the drawing depth for temperature of circular blanks

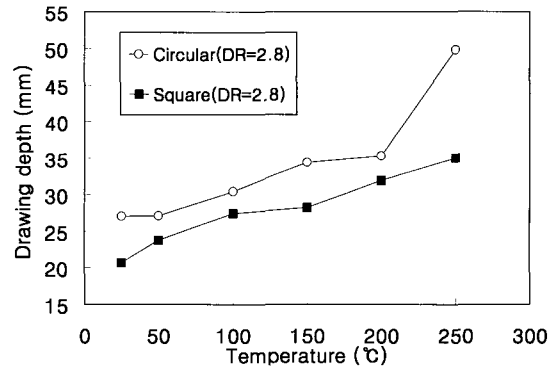


Fig. 7 Variation of the drawing depth for temperature

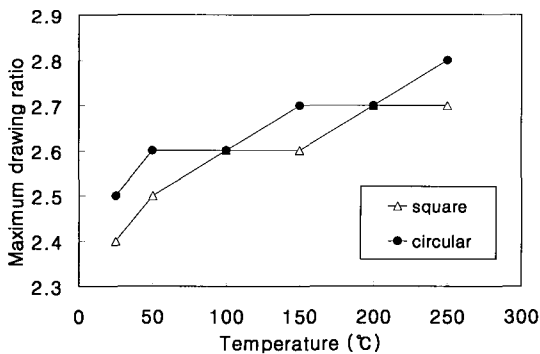


Fig. 5 Variation of the maximum drawing ratio for temperature

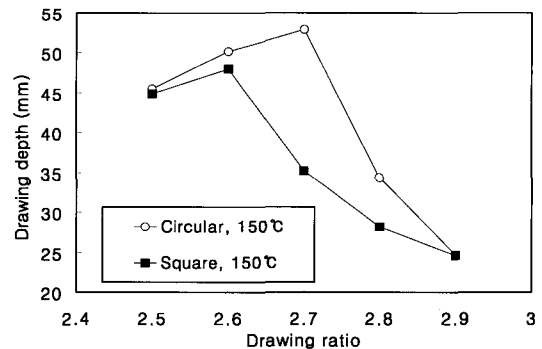


Fig. 8 Variation of the drawing depth for drawing ratio

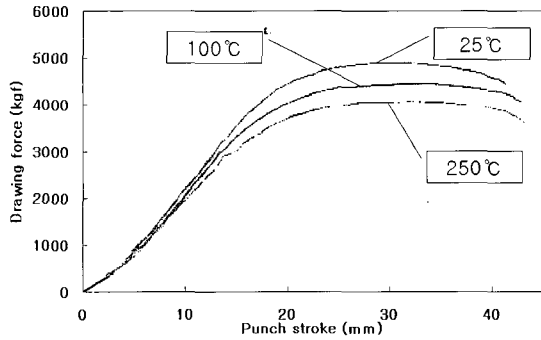


Fig. 9 Drawing forces versus the punch stroke (DR=2.4)

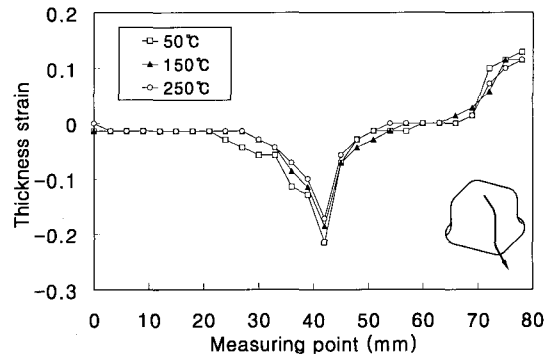


Fig. 12 Thickness strain distribution of circular blank along diagonal line (DR=2.5, Experiment)

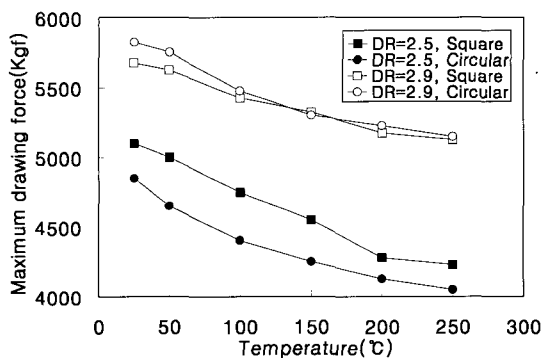


Fig. 10 Variation of the maximum drawing force for temperature

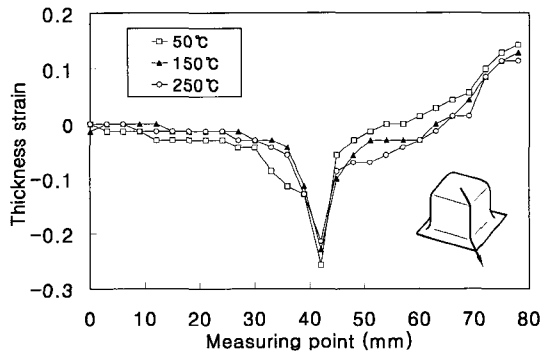


Fig. 11 Thickness strain distribution of square blank along diagonal line (DR=2.5, Experiment)

Fig. 9에서는 펀치 스트로크에 따른 성형하중의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 성형하중은 온도가 증가할수록 약간씩 감소한다.

Fig. 10에 각 드로잉비별 온도에 따른 최대성형하중의 변화를 나타내었다. 각 온도에서 최대 성형깊이까지 성형을 한 결과, 같은 드로잉비일 경우에 온도를 증가시킬수록 최대성형하중이 10%에서 크게는 20%까지 감소하였다. 이는 온도 상승에 따른 소성유동이 원활해져 마찰력을 극복하는데 필요한 하중이 증가함에도 불구하고 이보다 성형에 필요한 하중이 급격히 감소하는 것에 기인한다고 할 수 있다. 여기서 원형과 사각블랭크를 비교해보면 같은 드로잉비일 경우 원형블랭크가 사각블랭크보다 성형하중이 작았다. 그 차이는 드로잉비가 커질수록 줄어들며 드로잉비 2.9에서는 거의 비슷한 성형하중을 나타내었다.

3.2 온도에 따른 두께변형률분포

두께변형률분포는 각 온도에서 드로잉비 2.5의 사각과 원형블랭크를 40mm까지 성형한 후 컵의 바닥 중심에서부터 대각선방향으로 3mm간격으로 측정하였다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 측정결과를 나타내고 있다. 온도가 증가할수록 두께편차가 줄어들고 있다 또한 원형블랭크의 경우가 사각블랭크의 경우보다 더 적은 두께편차를 나타내었다.

4. 해석결과 및 비교

본 연구에서 수행된 온간 딥드로잉 가공을 완벽하게 구현해 주는 FEM 프로그램은 아직 상용화 된 것이 없어 기존의 FEM Code (LS-DYNA)를 사용하여 사각 컵의 온간 딥드로잉 가공에 대한 해석을 시도하였다.

해석할 때 가장 유의해야 할 점은 소재의 열전달 문제이다. 펀치 접촉부의 저온과 플랜지부의 고온으로 인한 열

전달 문제가 정확하게 규명되지 않은 관계로 이를 근사화시키는 것이 가장 큰 관심이다. 이를 위해 성형재료인 블랭크의 모델링 작업시 Fig. 13 (a)와 같이 A와 B의 두 영역으로 구분한 방법과 Fig. 13 (b)에서와 같이 Fig. 13 (a)의 B영역을 좀 더 세분화하여 최종형상인 사각 컵의 벽면을 형성하는 영역과 플랜지부를 이루는 영역의 세 영역으로 구분한 방법을 사용하여 영역별 온도 구배를 주어 해석하였다. A영역은 냉각핀치에 의해 냉각되면서 성형되어지는 영역이고, B영역은 다이와 블랭크홀더에 의해 계속 가열되어 성형이 되어지는 영역이며 C영역은 초기 다이-홀더사이에서 가열되었다가 성형되면서 컵의 벽면을 형성하는 영역으로 가열온도와 냉각온도의 중간온도로 유지된다고 가정하였다. 이 때 C영역을 예측하기 위해 최종형상으로부터 역추적 기법을 이용한 소재형상 설계를 하였다.⁽¹²⁾ Fig. 14는 그 과정을 보여주고 있다. 최종형상인 Fig. 14 (d)를 이용하여 3영역으로 구분시 C영역을 정할 수 있었다. 온도에 따른 재료의 물성치는 앞선 기초실험의 데이터를 사용하였다.

두 영역으로 블랭크를 나누어서 해석한 결과를 실험결과와 비교하여 Fig. 15에 나타내었다. 두 결과를 비교해 볼 때 그 선도의 경향은 아주 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만 파단 발생 부위인 사각컵 모서리 부분의 두께변형률의 차가 많이 발생하였다. 이는 여러 요인이 있겠지만 가장 큰 요인이 공구와 소재사이에 열전달 문제와 다이-블랭크 홀더에서 가열된 소재가 유입되는 성형 과정중의 소재온도 변화를 충분히 고려하지 못했기 때문이라고 판단된다.

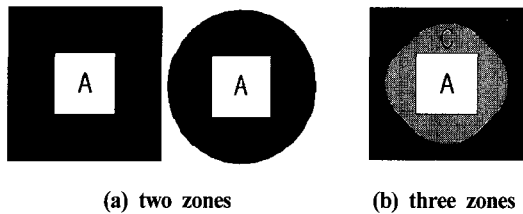


Fig. 13 Meshing zones for blanks

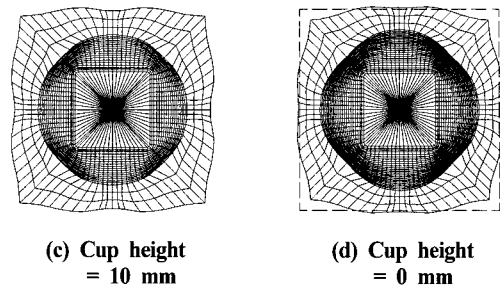
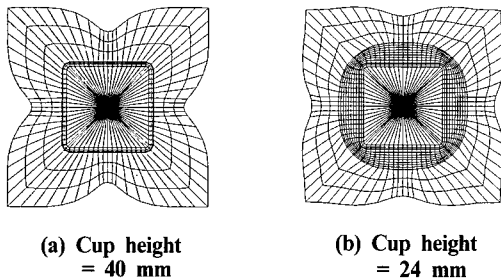


Fig. 14 Calculated blank shape for square cross section (DR=2.5, square)

Fig. 16은 그러한 문제를 해결하고자 블랭크영역을 3영역으로 나누어 해석한 결과를 실험결과와 2영역으로 나누어 해석한 결과와 비교한 선도이다. 그림에서와 같이 3영역으로 나누어 해석한 결과가 좀 더 실험결과와 근사함을 알 수 있다.

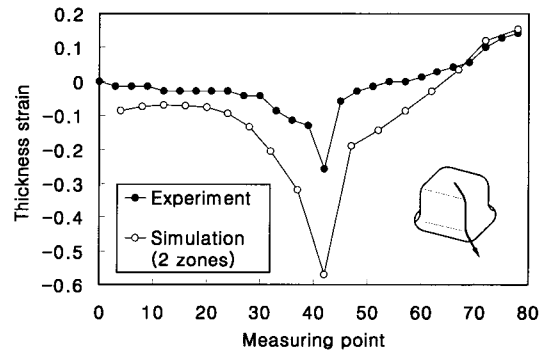


Fig. 15 Comparison of thickness strain distribution of circular blank between experimental and 2 zones numerical results (DR=2.5, Temp.=50°C)

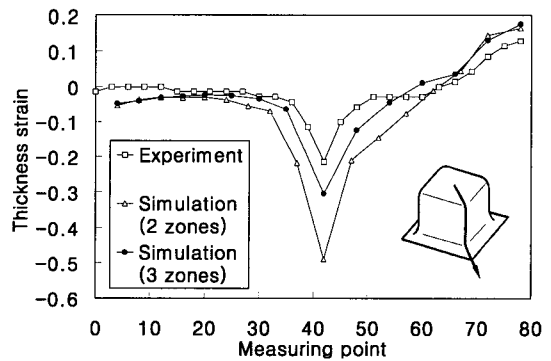


Fig. 16 Comparison of thickness strain distribution of square blank among experimental, 2 and 3 zones numerical results (DR=2.5, Temp.=150°C)

5. 결 론

본 연구에서는 GA 강판에 대한 온간 성형 특성을 평가하기 위해 상온에서의 한계드로잉비 이상의 블랭크 크기를 대상으로 상온에서부터 250℃까지 다이와 블랭크홀더의 온도를 변화시키면서 펀치는 일정하게 냉각하여 온간 딥드로잉 성형 실험 및 해석을 수행하였다. 고찰한 내용은 다음과 같다.

(1) 성형성 평가 인자들을 고찰해 본 결과, 가열온도를 증가시킬수록 최대드로잉비가 원형 블랭크의 경우, 상온에서 드로잉비 2.5였던 최대드로잉비가 250℃에서는 2.8까지 기준 성형 깊이(40mm)이상으로 성형 가능하였다. 두형상 블랭크 모두, 같은 깊이를 성형한 경우 성형하중은 250℃에서 상온에서보다 약 20% 감소하였다. 전체적으로, 원형 블랭크의 경우가 사각 블랭크의 경우보다 10%정도의 성형성이 우수함을 보였다. 또한, 두께변형률분포는 미소한 차이를 보였지만, 최대 값과 최소 값의 차이가 온도가 증가함에 따라 줄어들어 보다 일정한 두께의 겹이 성형되었음을 알 수 있었고, 원형 블랭크의 경우가 사각 블랭크보다 좀 더 균일한 두께의 겹이 성형되고 있음을 알 수 있었다.

(2) 온간 딥드로잉 가공 해석 시 소재의 열전달 문제 해결이 가장 중요하다고 판단되어진다. 이를 위해 블랭크의 가열온도 영역을 좀 더 세분하여 온도차이에 의한 영향을 구현하고자 하였으며, 그 결과 앞선 연구자들의 해석방법보다 오차가 현저하게 줄어들었다. 앞으로, 실제 성형을 예측하기 위한 온간 성형 해석을 할 때, 가열 영역을 보다 세밀하게 온도 영역을 구분하는 방법을 활용한다면 근사 예측을 할 수 있을 것이라 판단된다.

(3) GA 강판은 사용목적, 즉 방청성을 고려하면, 가열온도가 증가할수록 그 성형성은 월등하게 향상되지만, 150℃ 이상의 온도에서는 소착으로 인한 stick slip 현상으로 표면 층의 손상이 우려된다. 따라서, GA 강판에 온간성형법을 적용시킬 경우 고온에 의한 표면 층의 박리와 같은 손상 문제를 좀 더 심도 있게 연구, 고찰해야 할 것이다.

참 고 문 헌

(1) Nakamura, K. and Watanabe, Y., 1997, "對向液壓深絞り法と溫間深絞り法", 塑性と加工, 第38卷, 第437号, pp. 508~513.
 (2) Ohwue, T., Takechi, H. and Furuno, Y., 1987,

"Temperature Dependence of Tensile Properties and Drawability of Steel Sheets in Warm Working Condition", Journal of the JSTP, Vol. 28 No. 314, pp. 225~231.
 (3) Leighton, D. E. and Lee, D., 1994, "The Effect of Tooling Temperature on the Formability of Sheets Steel", Journal of Material Processing Technology 45, pp. 577~582.
 (4) Hillery, M. T. and McCabe, V. J., 1995, "Wire drawing at elevated temperature using different die materials and lubricant", Journal of Material Processing Technology 55, pp. 53~57.
 (5) 김종호, 최치수, 나경환, 1995, "크랭크 프레스와 유압 프레스에서 스테인리스 강판의 온간 드로잉성 비교", 한국소성가공학회지, 제4권, 제4호, pp. 345~352.
 (6) Zeng, X. M. and Mahdavian, S. M., 1998, "Critical condition of wrinkling in deep drawing at elevated temperature", Journal of Material Processing Technology 84, pp. 38~46.
 (7) 송광현, 이재동, 이정우, 서대교, 1999, "금형의 온도와 처리 상태에 따른 판재의 마찰특성", 한국소성가공학회지, 제8권, 제3호, pp. 245~251.
 (8) 이재동, 최치수, 최이천, 김현영, 서대교, 2000, "크롬 코팅 처리된 금형에서 박판의 온간 딥드로잉 성형성에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제9권, 제2호, pp. 186~192.
 (9) Naka, T. and Yoshida, F., 1998, "Effect of Temperature and Forming Speed on Deep Drawability of 5083 Aluminium Alloy Sheet", Metals and Materials Int. Vol. 4 No. 3, pp. 464~466.
 (10) Kato, T., 1997, "表面處理鋼板のプレス成形性", Journal of the JSTP, Vol. 38, No. 432, pp. 35~39.
 (11) 조남돈 외 11명, 1999, "박판의 딥드로잉 성형성 향상기술 개발 (1차년도 중간보고서)", 산업자원부.
 (12) Kim, S., Park, M., Kim, S. and Seo, D., 1998, "Blank design and formability for non-circular deep drawing processes by the finite element method", Journal of Materials Processing Technology 75, pp. 94~99.