

# 합금화 용융 아연 도금강판의 온간 디프드로잉 성형성에 관한 연구

장성호\* · 최치수\*\* · 최이천\*\* · 서대교\*\*\*

## A Study on the Warm Deep Drawabilities of Galvannealed Steel Sheet

S. H. Chang, C. S. Choi, Y. C. Choi, 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 was 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.

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

### 1. 서 론

치체를 구성하는 패넬류의 각종 부품은 스탬핑을 포함한 프레스성형을 이용하여 제작한다. 이때 제품형상에 대하여 성형성이 부족하거나 성형난이도가 높은 경우가 발생하게 된다. 이러한 경우 공정수 과다로 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 불량

현상들은 현장에서의 제조비용 상승의 원인이 된다. 이러한 애로사항을 극복하기 위해서는 가장 파단되기 쉬운 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 블랭

\* 성균관대학교 대학원  
\*\* 기아자동차 (주)  
\*\*\* 성균관대학교 기계공학부

크의 변형저항을 저감하여 드로잉력을 줄일 수 있기 때문이다. 이러한 목적으로 개발된 성형 공정이 온간성형법이다.<sup>(1)</sup>

이러한 온간성형법에 대한 연구가 여러 연구자들에 의해 행해졌으며 성형성에 미치는 성형인자와 성형조건들을 제시하고 있다.<sup>(3)-(9)</sup>

또한 강판의 내식성 향상을 위해 Zn, Sn, Cu, Al, Cr 등과 같은 방청성 금속을 도금하는 방법이 오래 전부터 개발되어져 왔다. 자동차용 표면처리강판에는 그 적용 목적적인 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 얻은 회백색의 Fe-Zn 합금 층을 생성시킨 판재로 도장성이 뛰어나고 기전력이 낮아 내식성이 우수하며 용접성이 우수하다.<sup>(2)</sup>

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 사용하였고<sup>(11)</sup> 마찰특성을 파악하기 위한 온도별 마찰실험을 수행하였다.

마찰실험은 상온에서 300℃까지의 범위에서 총 7단계에 걸쳐 수행하였다. 마찰실험장치는 본실험장치와 같은 재료의 금형으로 제작되었고 1MPa, 1.5MPa과 2MPa의 3단계 홀딩 압력 하에서 수행하였다. Fig. 1은 인장실험 결과를 보여주며 여기에서 인장강도 (Tensile Strength), 연신률 (Elongation), 강도계수 (Plastic Coefficient) 모두 온도가 증가함에 따라 약간씩 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 또한 각 홀딩 압력별 온도에 따른 마찰계수 변화는 Fig. 2에서는 온도가 증가할수록 홀딩 압력이 높아질수록 마찰계수(Friction Coefficient)는 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 1.5 MPa 이상의 홀딩 압력 하에서는 150℃ 이후 소착현상이 나타나기 시작하여 소착에 의한 진동음이 점점 커짐에도 불구하고 드로잉되었다. 결국 2MPa, 300℃에서 파단되었다.

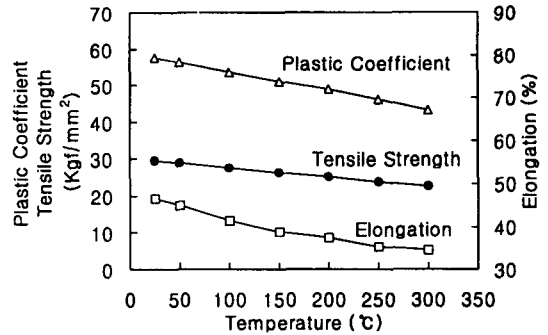


Fig. 1 Various coefficients of material at elevated temperature

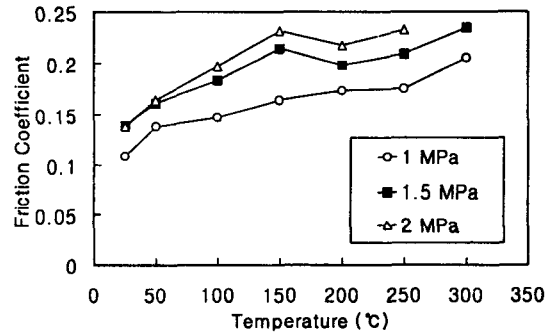


Fig. 2 Friction coefficient( $\mu$ ) at various pressure and elevated temperature

### 2.2 실험장치 및 실험방법

본 실험을 위한 디프드로잉 실험장치는 Table 1과 Fig. 3과 같이 30 ton 용량의 U.T.M(Universal Testing Machine)에 온간 디프드로잉 실험장치와 온도제어장치, 수냉펌프, 냉각기, 유압실린더 및 유압펌프 등으로 구성되었다. 이 때 온도제어장치(autonics TZAST-14R)로 일정한 온도를 유지할 수 있도록 하였고 펀치를 통해 순환하는 냉각수의 온도는 10℃를 유지시켰다.

블랭크 형상은 사각과 원형으로 크기는 드로잉비(DR) 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 (원형블랭크는 2.4 제외) 등으로 하였다. 이 때 사각과 원형의 비교기준을 정하기 위해 사각의 한 변 길이와 원의 지름을 같게 하여 DR을 정하였다. 여기서 드로잉비는 펀치형상의 한 변의 길이에 대한 블랭크의 한 변의 길이 비를 의미한다. 사용온도는 R.T.(25℃), 50℃, 100℃, 150℃, 200℃, 250℃ 등으로 하여 각 온도별로 디프드로잉 실험을 수행하였다. 블랭크 홀더의 압력은 사각블랭크의 경우 2MPa를 원형블

랭크의 경우에는 같은 DR의 사각블랭크에 가한 홀딩력과 같게 하여 가압하고, 프레스 속도는 50mm/min으로 하였다. 실험은 각 온도별로 블랭크의 드로잉비를 증가시키면서 최대로 성형될 때까지 수행하였다. 온간 실험 장치들의 세부치수를 Table 2에서 보여주고 있다. 다이와 펀치와의 틈새(clearance)는 3mm이다.

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              |

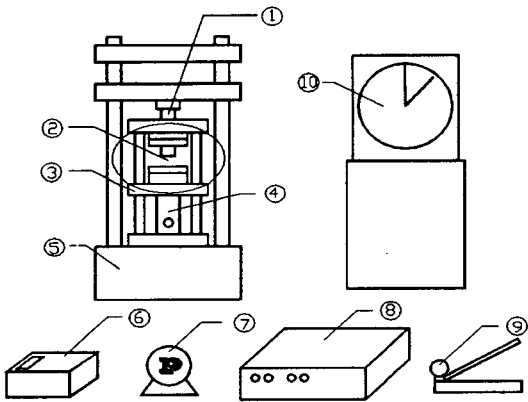


Fig. 3 Experimental apparatus for warm forming test

### 3. 해석

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

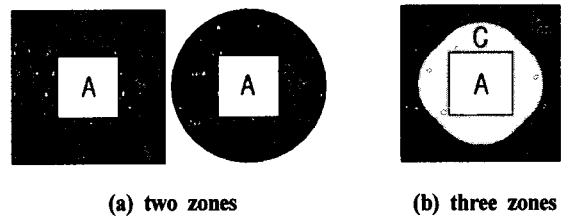
이때, 해석시 가장 유의해야 할 점은 소재의 열전달 문제이다. 펀치 접촉부의 저온과 플랜지부의 고온으로 인한 열전달 문제가 정확하게 규명되지 않은 관계로 이를 근사화 시키는 것이 가장 큰 관심이다. 이를 위해 성

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)    |         |         |         |

형재료인 블랭크의 모델링 작업시 Fig. 4 (a)와 같이 A와 B의 두 영역으로 구분한 방법과 Fig. 4 (b)에서와 같이 Fig. 4 (a)의 B영역을 좀 더 세분화하여 최종형상인 사각 컵의 벽면을 형성하는 영역과 플랜지부를 이루는 영역의 세 영역으로 구분한 방법을 사용하여 영역별 온도구배를 주어 해석하였다. A영역은 냉각펀치에 의해 냉각되면서 성형되어지는 영역이고, B영역은 다이와 블랭크홀더에 의해 가열되어 성형이 되어지는 영역이며 C영역은 초기 가열되었다가 벽면을 형성하는 영역이므로 가열온도와 냉각온도의 중간온도로 유지된다고 가정하였다. 이 때 C영역을 예측하기 위해 최종형상으로부터 역추적 기법을 이용한 소재형상 설계를 하였다.<sup>(10)</sup> Fig. 5는 그 과정을 보여주고 있다. 최종형상인 Fig. 5 (d)를 이용하여 3영역으로 구분시 C영역을 정할 수 있었다. 그림에서 외곽의 점선 사각형은 실제 적용한 DR 2.5의 블랭크 크기이다. 모서리 부분에서 다소 차이를 보이고 있다.

온도에 따른 재료의 물성치는 앞선 기초실험의 데이터를 사용하였다.



(a) two zones

(b) three zones

Fig. 4 Meshing zones of blanks for analysis

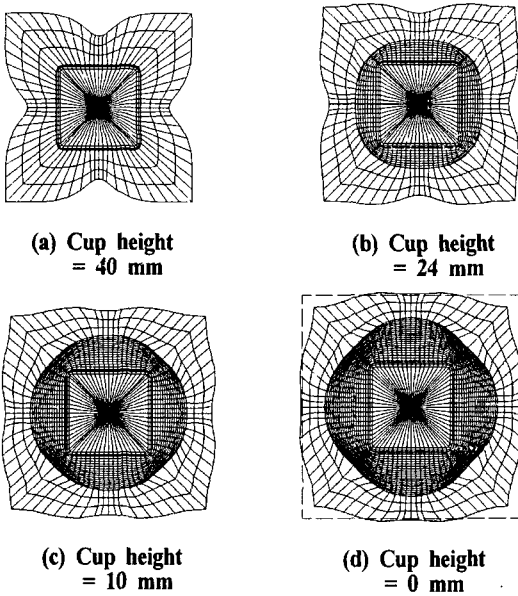


Fig. 5 Calculated blank shape for the deep drawing process (DR=2.5, square)

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 온간 성형성

각 온도에서 드로잉비를 증가시키면서 성형한 결과는 성형깊이 40mm를 기준으로 검토한 결과 온도가 증가할수록 한계드로잉비(이하 LDR)도 점차 증가하였다. Fig. 6에서와 같이 플랜지부 가열온도를 증가시킬수록 두 형상 모두 점진적으로 증가하였는데 원형의 경우가 좀 더 높은 LDR을 가짐을 알 수 있다.

온도에 따른 최대성형깊이는 Fig. 7에서 보여주고 있다. 원형 블랭크의 경우로써 온도가 증가할수록 최대성형깊이가 점차적으로 증가하다 드로잉비마다 최대성형깊이로 성형되어지는 온도영역이 존재하여 그 온도 이후에는 온도를 높여도 성형되는 최대깊이는 증감이 없이 일정하게 나타났다. 특히 DR 2.7인 경우에 성형깊이는 250°C에서 상온에서보다 1.9배 증가하였다.

사각블랭크의 경우도 같은 경향을 나타내었고 원형블랭크의 경우가 Fig. 8과 같이 약간씩 더 깊은 컵이 성형되었다.

Fig. 9는 드로잉비에 따른 최대성형깊이의 변화를 나타내고 있다. 드로잉비가 증가할수록 성형깊이도 점진적으로 증가하다가 한계드로잉비를 지나면 성형깊이가 급격하게 감소하는 현상을 보이고 있다.

Fig. 10에서와 같이 최대성형하중은 온도가 증가함에

따라 감소하는 경향을 보였는데 10%에서 크기는 20%까지 감소하였다. 이는 온도 상승에 따른 소성유동이 원활해져 마찰력을 극복하는데 필요한 하중이 증가함에도 불구하고 이보다 성형에 필요한 하중이 급격히 감소하는 것에 기인한다고 판단되어진다. 여기서 원형과 사각블랭크를 비교해 보면 같은 DR일 경우 원형이 다소 작은 성형하중이 요구되어진다. 그 차는 DR이 커지면서 줄어들며 DR 2.9에서는 거의 비슷해진다.

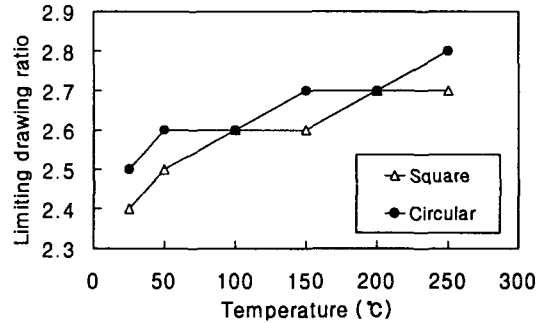


Fig. 6 Variation of the limiting drawing ratio for temperature

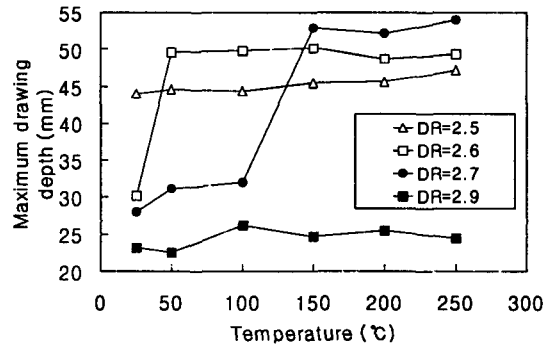


Fig. 7 Variation of the maximum drawing depth for temperature (circular blank)

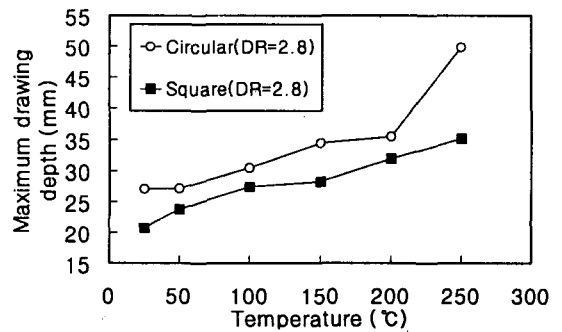


Fig. 8 Variation of the maximum drawing depth for temperature

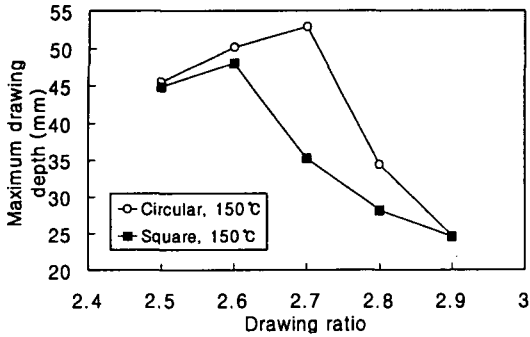


Fig. 9 Variation of the maximum drawing depth for drawing ratio

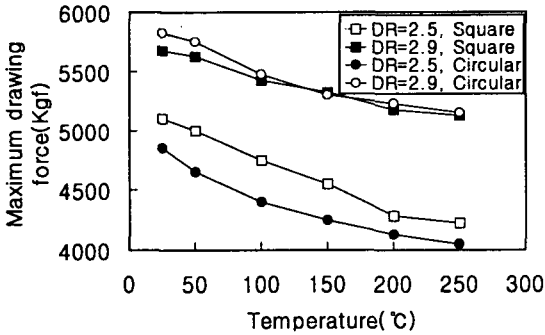


Fig. 10 Variation of the maximum drawing force for temperature

#### 4.2 온도에 따른 두께변형률분포

두께변형률분포는 각 온도에서 DR 2.5의 사각과 원형 블랭크를 40mm 성형 후 대각선방향으로 측정하였다.

Fig. 11과 Fig. 12에서와 같이 온도가 증가할수록 두께편차가 줄어들고 있다. 또한 원형블랭크의 경우가 더 일정한 두께편차를 나타내었다.

### 5. 해석결과 및 비교

두 영역으로 블랭크를 나누어서 해석한 결과를 실험결과와 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 두 결과를 비교해 볼 때 그 선도의 경향은 아주 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만 파단발생 부위인 사각캡 모서리 부분의 두께변형률의 차가 많이 발생하였다. 이는 여러 요인이 있겠지만 가장 큰 요인이 열전달 고려 문제라 판단된다.

Fig. 14는 그러한 문제를 해결하고자 블랭크영역을 3영역으로 나누어 해석한 결과를 실험결과와 2영역의

로 나누어 해석한 결과와 비교한 선도이다. 그림에서와 같이 3영역으로 나누어 해석한 결과가 좀 더 실험결과와 근사함을 알 수 있다.

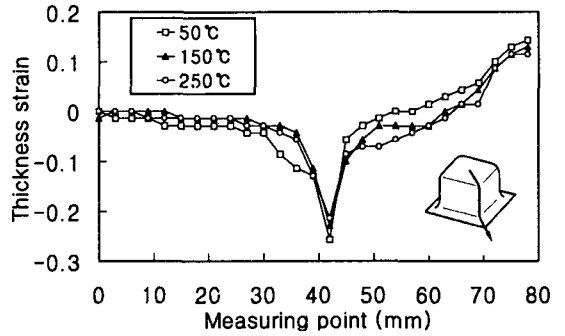


Fig. 11 Thickness strain distribution of square blank along diagonal line (DR=2.5, Experiment)

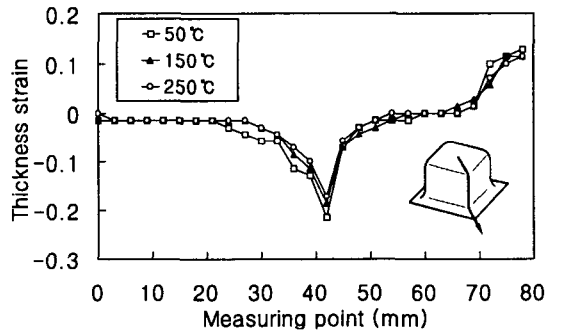


Fig. 12 Thickness strain distribution of circular blank along diagonal line (DR=2.5, Experiment)

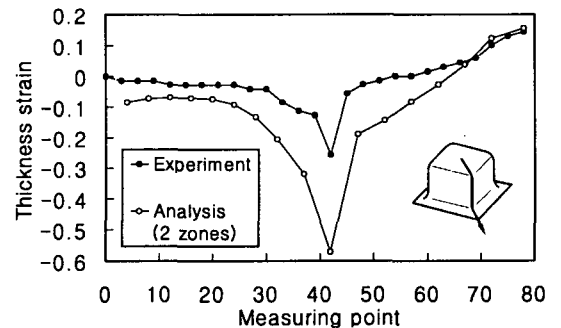


Fig. 13 Comparison of thickness strain distribution of circular blank between experiment and 2 zones analysis (DR=2.5, Temp.=50 °C)

## 참고 문헌

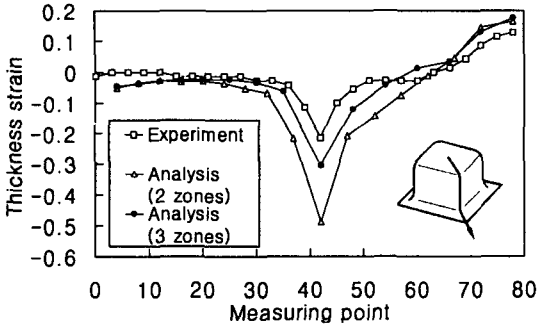


Fig. 14 Comparison of thickness strain distribution of square blank among experiment and 2,3 zones analysis (DR=2.5, Temp.=150°C)

## 6. 결론

본 연구에서는 현재까지 GA도금강판에 대한 온간 성형성 평가를 위해 상온에서의 한계드로잉비 이상의 블랭크형상을 가지고 상온에서부터 250°C까지 다이의 가열온도를 변화시키고 편치는 일정하게 냉각하여 실험과 해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

(1) 상온에서보다 가열온도가 증가할수록 한계드로잉비, 최대성형깊이 등은 증가하였고 최대성형하중은 감소하였다. 결과를 비교하면, 사각블랭크보다는 원형블랭크가 더 좋은 성형성을 보여주었다.

(2) 두께변형을 분포를 보면 온도가 증가할수록 두께 편차가 줄어들었다. 이로써 온간성형법 적용시 보다 안정적이며 균일한 제품생산을 예측할 수 있었다.

(3) 해석 결과는 실험결과와 그 경향은 비슷하게 나타났다지만 많은 오차가 생김을 알 수 있었다. 온간 디프트로잉 가공 해석시 소재 열전달 문제 해결이 가장 중요하다고 판단되어지며 이는 블랭크의 온도영역구분을 좀 더 세분화하면 근사화 시킬 수 있으리라 판단된다.

(4) GA도금강판은 그 판재사용목적에 고려할 때 소착으로 인한 표면손상이 발생하지 않는 온도영역 (100~150°C)에서 성형하는 것이 성형성 및 품질 향상과 기능성을 유지시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 기아자동차(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

- (1) K. Nakamura, Y. Watanabe, 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) T. Kato, 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.
- (3) Tetsuro Ohwue, Hiroshi Takechi and Yoshikuni Furuno, 1997, "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.
- (4) D. E. Leighton, D. Lee, 1994, "The Effect of Tooling Temperature on the Formability of Sheets Steel", Journal of Material Processing Technology 45, pp. 577~582.
- (5) Michael T. Hillery, Vincent J. McCabe, 1995, "Wire drawing at elevated temperature using different die materials and lubricant", Journal of Material Processing Technology 55, pp. 53~57.
- (6) 김종호, 최치수, 나경환, 1995, "크랭크 프레스와 유압 프레스에서 스테인리스 강판의 온간 드로잉성 비교", 한국소성가공학회지, 제4권, 제4호, pp. 345~352.
- (7) X. M. Zeng, S. M. Mahdavian, 1998, "Critical condition of wrinkling in deep drawing at elevated temperature", Journal of Material Processing Technology 84, pp. 38~46.
- (8) 송광현, 이재동, 이정우, 서대교, "금형의 온도와 처리 상태에 따른 판재의 마찰특성", 한국소성가공학회지, 제8권, 제3호, pp. 245~251, 1999.
- (9) 이재동, 최치수, 최이천, 김현영, 서대교, 2000, "크롬 코팅 처리된 금형에서 박판의 온간 딥드로잉 성형성에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제9권, 제2호, pp. 186~192.
- (10) Sangdo Kim, Minho Park, Sangjin Kim, Daegyo Seo, 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.
- (11) 조남돈 외 11명, 1998, "박판의 딥드로잉 성형성 향상기술 개발 (1차년도 중간보고서)", 산업자원부.