

## 340MPa 급 초고성형성 고강도강판 개발에 관한 연구

김 용 희\*<sup>1)</sup> · 이 영 수<sup>2)</sup> · 이 오 연<sup>1)</sup>

전북대학교 신소재공학부, 신소재개발 연구센터<sup>1)</sup> · 현대하이스코 기술연구소<sup>2)</sup>

### Study on the Development of 340MPa Grade Super Formable High Strength Steel Sheets

Yonghee Kim\*<sup>1)</sup> · Youngsoo Lee<sup>2)</sup> · Ohyeon Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>School of Advanced Materials Engineering & RCAMD, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

<sup>2)</sup>Technical Research Center, Hyundai HYSKO, San 30-9 Seonwol-ri, Haeryong-myeon, Suncheon-si, Jeonnam 540-856, Korea

(Received 8 October 2008 / Accepted 10 February 2008)

**Abstract** : The demand for formable high-strength steel (HSS) sheets has recently increased to reduce the weight of automotive bodies. The 340MPa (Tensile Strength) grade steel sheets are widely used for body inner and outer panels. Especially, super formable 340MPa grade steel sheets with high r-value have an excellent deep drawability compared with the other 340MPa grade steel sheets. It is very available for a part such as rear floor, center floor and dash panels used conventional mild steels up to now. We developed a super formable HSS by optimization of chemical composition, texture control and heat treatment control. It has good mechanical properties with excellent formability (tensile strength: 343MPa, elongation: 41.1% and  $\bar{r}=2.1$ ).

**Key words** : Super formable HSS(초고성형성 고강도강), Formability(성형성), Mechanical property(기계적성질), Texture(집합조직), Heat treatment(열처리)

### 1. 서 론

자동차 산업에서 고성형성 강판에 대한 요구는 자동차 부품이 점차 대형화, 일체화 되어감에 따라 지속적으로 증가해 왔으며, 특히 탄소 함량이 50ppm 이하인 극저탄소강에 탄질화물 형성원소인 Ti, Nb, V 등을 첨가하여 강중에 고용되어 있는 C, S, N 등을 탄질화물로 석출시켜 성형성을 극대화 시킨 고청정강인 IF(Interstitial-Free)강의 개발에 의해 더욱 가속화 되었다.<sup>1,2)</sup> 최근 자동차 강재의 요구 동향은 차체 경량화, 생산비용 절감, 환경 친화성, 승객 안전성으로 크게 대별할 수 있다. 80년대 후반부터 세계적인 환경규제 강화를 배경으로 자동차의 경량

화에 대한 요구가 보다 늘어나면서 경량소재의 사용량 증가, 차체 및 프레임의 경량화, 고강도강의 채용 확대를 통한 차체 경량화가 추진되어 오고 있다.<sup>3)</sup> 이러한 요구에 부응하기 위해 Mn, P, Si 등의 원소를 적절히 첨가하여 강도를 확보한 340 ~ 440MPa 급의 IF 고강도강이 개발되어 차체 내·외판재로 적용되고 있다. 하지만 IF 강에 이들 고용강화 원소의 첨가량이 증가되면 강도는 향상되지만, 제조조건 제약 및 합금원소의 영향으로 연신율 및 성형성이 떨어지는 특성을 갖고 있어, 초고성형성을 요구하는 자동차의 부품에는 아직도 낮은 강도 수준의 심가공용 강판이 사용되고 있다.<sup>4,5)</sup>

따라서 본 연구에서는 기존의 340MPa급 IF 고강도강에서 성형성에 영향을 미치는 다양한 인자의

\*Corresponding author, E-mail: kyh@hysco.com

고찰을 통하여 340MPa급 합금화 용융아연도금 (Galvannealed, GA) IF 고강도강판의 기계적 물성 및 도금특성을 만족하면서  $\bar{r}$  값 2.0 이상, 연신율 40% 이상의 성형성이 매우 우수한 강판을 개발하여 자동차 부품 중 심가공 특성이 요구되는 고강도 부품에 적용하고자 하였다.

## 2. 실험방법

Table 1은 본 실험에 사용된 시편의 주요 성분계를 나타낸 것이다. 시편 A, B, C는 두께 3.5mm 까지 열간압연 하였으며, 권취온도는 각각 620°C, 640°C, 680°C로 변화시켰다. 여기서 얻어진 열연판재는 염산으로 산세처리 한 다음 70 ~ 82% 로 냉간압연하여 압하율의 영향에 대하여 조사하였다.

Table 1 Chemical composition of materials used(unit: ppm)

	C	Si	Mn	P	Ti	Nb	B
A	10	-	3500	460	340	50	-
B	13	100	4500	560	190	200	10
C	10	100	4200	560	200	200	10

냉연판재의 열처리에는 가열 및 냉각의 정밀제어가 가능한 Fig. 1의 고속열처리 모사시험장치(ULVAC 사)를 통하여 Fig. 2와 같이 합금화 용융아연도금 강판의 제조시 열처리 사이클과 동일한 조건으로 재현하였으며, 이때 열처리 온도는 810 ~ 850°C 범위에서 변화시키면서 소둔온도의 영향을 고찰하였다. 열처리된 시편은 JIS5호 규격의 인장시험편을 채취하여 만능인장시험기(ZWICK)로 인장강도, 항복강

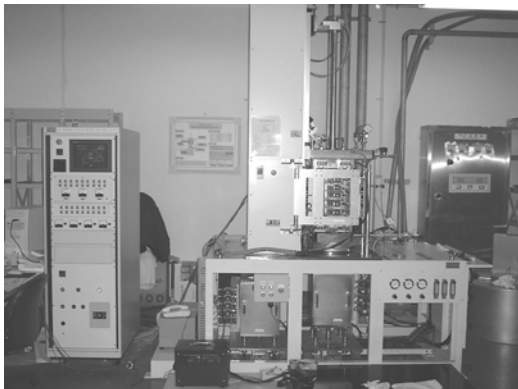


Fig. 1 Photograph of heat treatment equipment (ULVAC)

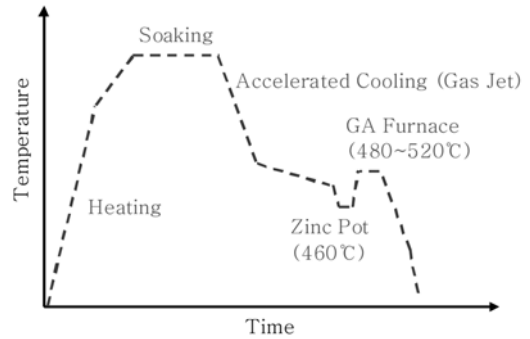


Fig. 2 Heat treatment cycle of annealing and galvannealed process

도, 연신율, 소성이방성계수 등을 측정하였다.

시편의 미세조직 관찰을 위하여 열연 및 냉연강판은 연마 후 광학현미경으로 관찰하였으며, 석출물은 replica법으로 TEM(Transmission Electron Microscope)을 이용하여 관찰하였다. 또한 제조조건에 따른 집합조직의 변화를 고찰하기 위하여 EBSD (Electron Back-Scattered Diffraction)장비를 이용하여 분석하였다.

시생산 제품의 품질평가는 실험실 규모의 모사실험을 통하여 얻어진 최적 조건을 활용하여 실제 합금화 용융아연도금 강판 제조라인에서 생산된 강판에 대한 재질특성 평가 및 자동차 부품의 성형성 평가를 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 제조조건 및 성분계의 영향

Fig. 3은 340MPa급 초고성형성 고강도강판의 성분 설계를 위하여 현재 생산되고 있는 고성형성 340MPa 급 0.001C-0.35Mn-0.046P-0.034Ti 성분계의 고강도강을 용융아연도금 강판 생산라인과 동일한 열처리 패턴으로 가열 및 냉각이 가능한 열처리 시험 장비를 사용하여 냉간압연 압하율 및 소둔온도에 따른  $\bar{r}$  값의 변화를 관찰하였다.  $\bar{r}$  값의 계산은 소재의 압연방향과 0°, 45°, 90° 방향의 시편으로부터 각각의 r값을 구한다음 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (1)$$

실험결과  $\bar{r}$  값은 소둔온도 및 냉연 압하율이 증가

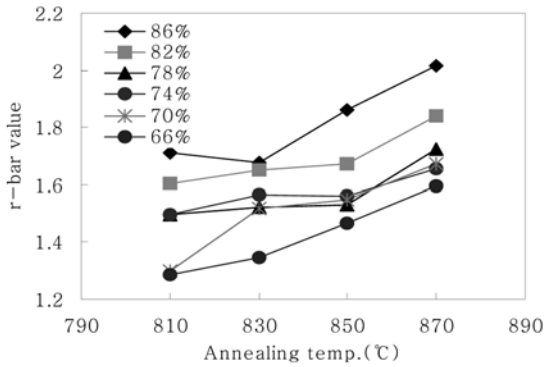


Fig. 3 Effect of cold rolling reduction and annealing temperature on the r value in the specimen A

할수록 증가하는 경향을 보였다. 그러나 기존의 고성형성 340MPa급 소재는 본 연구에서 요구하는 물성인  $\bar{r}$  값 2.0 이상을 만족하기 위해서는 압하율 86%, 소둔온도 870°C의 조건일 때 가능한 것으로 나타났다. 이와 같은 조건은 소둔온도 및 압하율이 매우 높아 실험실적으로는 가능하지만 실제 생산라인에 적용하기는 매우 어렵다.

Fig. 4는 냉연강판 생산라인에서 안정적으로 생산이 가능한 조건인 압하율 78%, 소둔온도 850°C인 조건에서 열처리된 A, B, C 시편의 기계적 성질을 나타낸 것인데, 시편 A의 경우 850°C의 소둔온도에서 항복강도(YP)가 200MPa 이하로 낮고 또한, 인장강도(TS)가 목표강도인 340MPa 이하로 나타났다. 이 결과로부터 340MPa급 초고성형성 고강도강의 개발을 위해서는 강도를 높이고  $\bar{r}$  값을 상승시킬 수 있는 성분계의 재설계가 필요한 것임을 확인 할 수 있었다. 따라서 인장강도의 상승을 위하여 IF강의 대표적인 고용강화 원소인 Mn, P, Si 성분의 함량을 증가시키고,  $\bar{r}$  값의 향상을 위하여 Ti, Nb 등의 탄질 화물 형성원소를 적절히 제어<sup>6)</sup>하여 B 및 C 시편과 같은 성분계로 설계하였다. 또한 B와 C 시편은 A 시편보다 P 첨가량이 높고 고온권취 됨에 따라 IF강의 가장 취약점중 하나인 2차가공취성 개선을 위해 10ppmB를 첨가하여 2차가공취성을 개선하고자 하였다.<sup>7)</sup> A 시편의 성분계를 기초로 하여 새롭게 설계된 성분계 B와 C 시편의 열처리 시험결과 항복강도 상승과 함께, 인장강도가 340MPa 이상으로 상승하였다. Mn 함유량이 0.47wt% 이고, 640°C에서 권취를

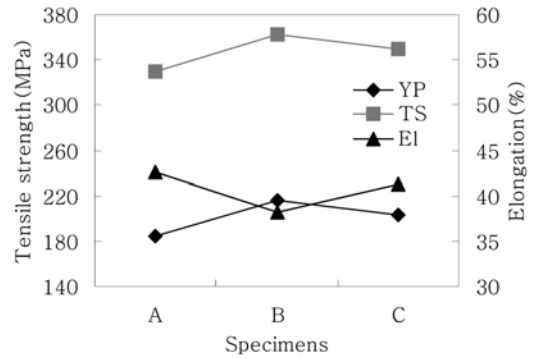


Fig. 4 Mechanical properties of specimen A, B and C at cold rolling reduction, 78% and annealing temperature, 850°C

한 B 시편의 경우 363MPa 까지 상승하였으나, 연신율은 38.2%로 감소하였다. 고온권취제인 C 시편의 경우 인장강도가 349MPa이고 연신율이 41.2%로써 초고성형성 강판의 목표값인 인장강도 340MPa 이상, 연신율 40% 이상의 조건을 만족하였다. 따라서 성분계 조정을 통하여 고온 소둔시에도 기본적인 기계적 물성의 확보가 가능한 사실을 확인하였다.

### 3.2 집합조직 및 석출물의 영향

Fig. 5는 열처리 시험결과 기계적 물성이 우수한 C 시편의 제조조건에 따른  $\bar{r}$  값의 변화와 최적 제조 조건을 확보하기 위한 열처리 시험결과이다. Fig. 3의 340MPa급 고성형성 강판의 실험결과와 유사하게 냉연 압하율과 소둔온도가 증가할수록  $\bar{r}$  값이 향상되는 경향을 보였다. 이것은 압하율이 증가할수

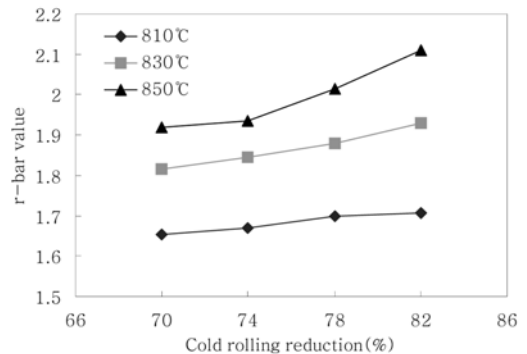


Fig. 5 Effect of cold rolling reduction and annealing temperature on the r value in the specimen C

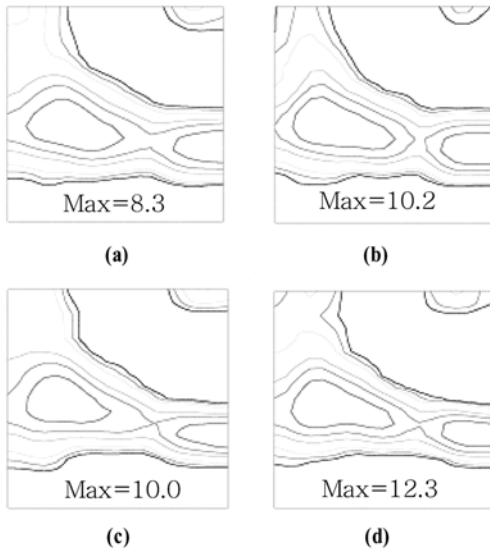


Fig. 6  $\phi 2=45^\circ$  section of ODFs for specimen B and C  
 (a) Specimen B at annealing temperature 810°C,  
 (b) Specimen B at annealing temperature 850°C,  
 (c) Specimen C at annealing temperature 810°C,  
 (d) Specimen C at annealing temperature 850°C

록 재결정을 위한 핵생성 장소가 증가하게 되어 성형성에 유리한 {111} 재결정 집합조직이 발달하게 되기 때문이다. 또한 Hashimoto<sup>8)</sup> 등이 제시한  $\alpha+\gamma$ 의 2상영역에서 고온소둔하면 가공성에 유리한 {111} 방위의 결정립이 미면태된 잔류  $\gamma$ 상내에서 우선성장 발달하여 성형성이 향상된다는 이론과, Sakata<sup>9)</sup> 등이 제시한 소둔온도의 증가에 따른 2상영역에서의 열처리된  $\gamma$ 상에서  $\alpha$ 상으로 변태시 가공성에 불리한 {100} 방위들이 선택적으로 우선 소멸됨으로써 {111} 방위의 부피분율이 상대적으로 증가하여 성형성이 증가하게 된다는 이론과 잘 일치하고 있다. Fig. 3에서 시편 A의 경우  $\bar{r}$  값 2.0 이상의 초고성형성을 확보하기 위해서는 소둔온도 870°C, 압하율 86%의 조건이 필요 하였지만, 시편 C의 경우는 소둔온도 850°C, 압하율 78%의 비교적 낮은 조건에서도 본 연구에서 요구하는 물성수준을 만족하였다.

Fig. 6은 압하율 78%(0.7mm 두께)로 압연된 B와 C 시편을 소둔온도 810°C, 850°C로 합금화 용융아연 도금 조건으로 열처리한 후 EBSD 장비를 이용하여 3차원적인 방위분포함수(ODF, Orientation Distribu-

-tion Function)를 측정된 결과이다. 압하율이 78%이고, 소둔온도가 810°C인 B시편의 (a)에서는 전형적인 재결정집합조직인 {111}//ND인  $\gamma$ -fiber와 함께  $\alpha$ -fiber도 공존하고 있었으나, 850°C에서 소둔한 (b)에서는 소둔 온도가 상승함에 따라 냉연집합조직인  $\alpha$ -fiber의 강도가 약해지고, 성형성에 유리하다고 잘 알려진  $\gamma$ -fiber의 강도가 더욱 강하게 발달하였다. C 시편에서도 B 시편과 유사하게 소둔온도가 증가할수록  $\gamma$ -fiber의 강도가 발달하였다. 즉, 소둔온도가 증가할수록  $\gamma$ -fiber의 {111}//ND 방위가 선택적으로 우선성장 한다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 시편 B와 C를 850°C에서 소둔한 시편의 광학현미경 조직이다. 시편 C의 결정립 크기가 시편 B보다 큰 것을 확인할 수 있는데, 이것은 Fig. 6의 B 시편보다 C 시편이 {111}//ND의  $\gamma$ -fiber 집적도가 높은 것과 관련이 있다. Fig. 8은 시편 B와 C의 TEM을 통한 석출물 분석 결과인데, 시편 B와 C 모두에서 Ti-Nb 복합첨가강에서 관찰할 수 있는 고온 조대 석출물인 TiN과 미세 석출물인 (Ti, Nb)C 형태의 석출물이 관찰되고 있으나, B시편에서는 구형의 미세한 (Ti, Nb)C 석출물이 전체적으로 많이 분포하고 있으며, C 시편에서는 고온권취에 의해 다각형 형태의 비교적 조대한 (Ti, Nb)C의 석출물이 분포하고 있었다. 즉, 권취온도의 상승(640 → 680°C)에 의해 미세한 (Ti, Nb)C의 석출물들이 성장을 한 것으로 판단된다. 재결정 열처리시 석출물이 성장하게 되면 결정립성장 억제효과가 낮아지기 때문에 저온권취체보다 고온권취체의 재결정립 크기가 현저하게 성장한 것으로 판단된다. 시편 B에서는 그 외의 소량의 석출물로 TiN과 결합된 MnS의 석출물과 FeTiP 형태의 석출물이 극미량 관찰되었다. Miyoshi<sup>10)</sup> 등에 의하면 일반적으로 고온에서는 TiN의 석출물이 형성되고 이후 MnS의 석출물이 형성되는데 Mn 함량이 증가할수록 MnS의 석출 경향이 높아진다고 하였다. 본 연구에 사용된 소재는 Mn 첨가량이 비교적 높지 않아(B 시편의 경우 0.45wt% Mn) MnS의 석출물이 거의 형성되지 않은 것으로 판단되며, 또한 Ti 첨가에 의한 석출물 거동은 조대 석출물인 TiN이 고온영역에서 우선 석출되고 남은 잉여 Ti는 TiC 또는 FeTiP로 형성되는데<sup>11)</sup> Ti함량 또한 낮아(0.02wt% Ti) FeTiP는 거의 석출되지 않는 것으로 판단된다.

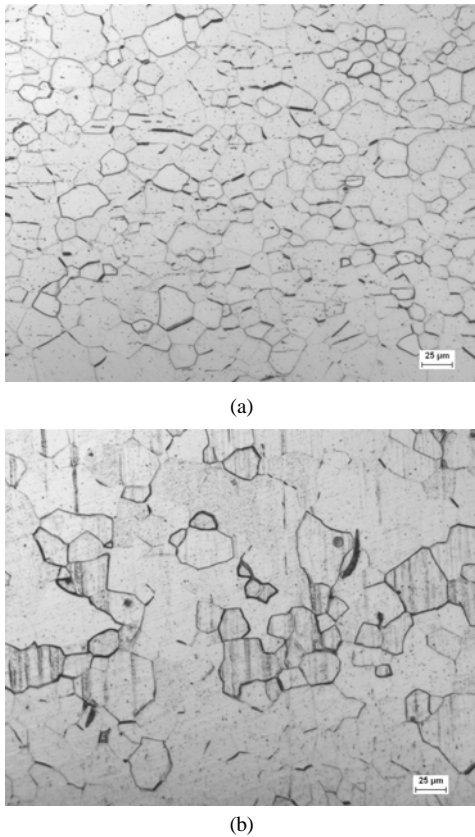


Fig. 7 Optical micrographs of annealed specimen B and C at 850°C. (a) Specimen B and (b) Specimen C

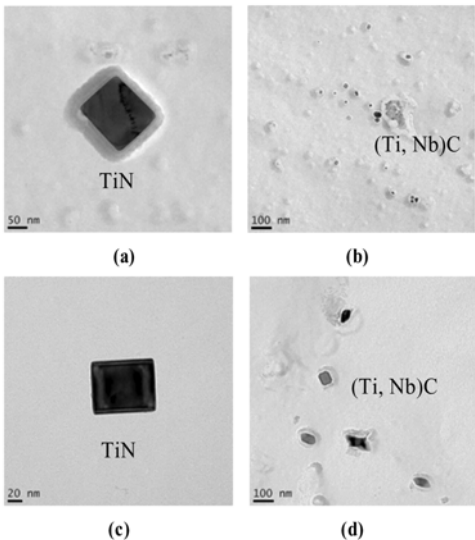


Fig. 8 TEM micrographs of precipitates in annealed specimen B and C at 850°C (a), (b) Specimen B and (c), (d) Specimen C

### 3.3 시생산 및 성형성 평가

이상과 같은 시험을 통하여 초고성형 고강도강판 제조를 위해서는 기존의 IF 고강도 강판인 340MPa 급 소재에 적정수준의 고용강화원소의 첨가와 함께 성형성 확보를 위해 권취온도와 소둔처리에 의한 석출물 및 집합조직 제어, 고온 재결정, 높은 압하율 등이 필요하다는 것을 확인하였다. Table 2는 이와 같은 최적 실험조건을 실제 생산라인에 적용하여 합금화 용융아연도금 강판(GA)으로 생산한 시편의 기계적 물성을 나타낸 것이다.

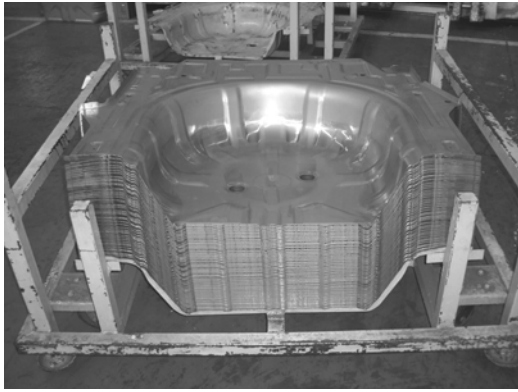
시생산 결과 성형성 향상을 위하여 고온소둔한 결과 A 시편은 소성이방성계수인  $\bar{r}$  값의 증가와 함께 항복강도 및 인장강도가 감소하였으며, B 시편은 860°C의 소둔온도에서 인장강도는 목표강도를 만족하고 있지만 저온권취에 의해 재결정립의 성장이 충분치 않아 낮은  $\bar{r}$  값( $\bar{r}=1.89$ )을 보였다. 한편 C 시편은 고온소둔에 의해 초고성형 고강도강판의 기본물성인  $\bar{r}$  값( $\bar{r}=2.10$ )이 매우 높고, 인장강도와 연신율이 각각 343MPa, 41.1%로써 만족할만한 수준의 고성형성 고강도강판 제조가 가능하였다.

Fig. 9는 자동차 리어플로어 및 도어이너 부품에 적용하여 프레스 시험한 결과이다. 이 부품들은 대표적인 딥드로잉 부품으로  $\bar{r}$  값이 우수한 본 개발소재를 적용한 결과 매우 우수한 성형특성을 보였다.

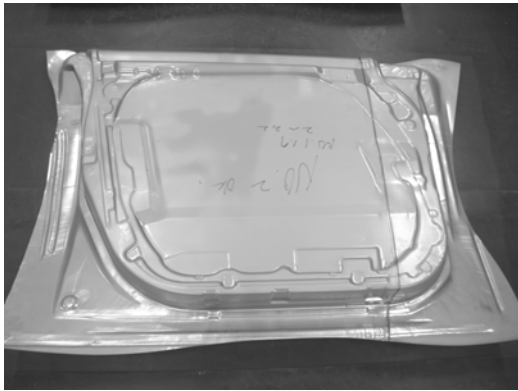
일반적으로 소재의 강도가 높아지거나 용융아연도금을 하게 되면 소재의 성형성이 낮아지게 되는데, 본 연구에서 개발된 강판은 합금화용융아연도금강판임에도 심가공 특성을 나타내는  $\bar{r}$  값이 기존 EDDQ(Extra deep drawing quality)급 정도로 매우 높고 고강도를 유지하고 있어 자동차의 경량화가 필요한 많은 고강도 딥드로잉 특성을 요하는 부품에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2 Results of mechanical properties for mill trial test

Spec.	Reduction (%)	Anneal. temp.(°C)	YP (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	$\bar{r}$
A	78	850	188	338	42.4	2.08
B	77	860	211	351	41.8	1.89
C	78	863	202	343	41.1	2.10



(a)



(b)

Fig. 9 Results of press test for automotive parts (a) Rear floor and (b) Door inner

#### 4. 결론

합금화 용융아연도금(GA) IF 고성형성 고강도강의 성분계, 열연공정, 냉연 및 소둔공정 제어를 통하여 성형성이 매우 우수한 강판을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 소재의 냉연 압하율과 소둔온도의 증가에 따라 재결정후 {111}//ND인  $\gamma$ -fiber의 집합조직이 발달하여  $\bar{r}$  값이 향상되었다.
- 2) 340MPa급 초고성형성 고강도강판 제조를 위해서는 고온소둔시 강도 확보를 위한 고용강화 원소의 첨가와 성형성 확보를 위한 석출물 및 집합조직 제어가 필요하다.
- 3) 석출물 분석결과 고온석출물인 조대한 TiN과 미세한 (Ti, Nb)C 형태의 석출물이 관찰되었으며, 권취온도의 증가에 따라 (Ti, Nb)C 석출물의 크

기가 조대해져 재결정시 결정립성장에 유리하게 작용하였다.

- 4) 실제 양산라인에서 시생산한 제품의 기계적성질 분석결과 인장강도 340MPa이상,  $\bar{r}$  값 2.0이상의 초고성형성 고강도강의 제조가 가능하였으며, 자동차의 딥드로잉 특성을 요하는 리어플로어, 도어이너의 부품에 프레스 성형성 평가결과 우수한 특성을 확인하였다.

#### References

- 1) N. Fukuda and M. Shimizu, "The Production of Cold Rolled Steel Sheet of Extra Deep Drawing Quality by Continuous Annealing Process," ISIJ, Vol.61, No.6, pp.43-53, 1975.
- 2) B. Y. Lee, S. H. Lee, H. K. Ahn and O. Y. Lee, "Effect of Phosphorus Addition on the Formation of Texture of Ti(Nb) Stabilized IF Steel," J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., Vol.32, No.7, pp.802-809, 1994.
- 3) W. C. Jeong, "Manufacturing Technology of Ultra Light Steel Auto Body," Journal of Korea Society of Automotive Engineers, Vol.23, No.4, pp.15-22, 2001.
- 4) W. C. Jeong and K. M. Cho, "Effect of Mn on the Microstructure and Mechanical Properties of High Strength IF Steels for Automotive Body Panel," J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol.37, No.6, pp.672-679, 1999.
- 5) H. Katoh, H. Takechi, N. Takahashi and M. Abe, Technology of Continuously Annealed Cold Rolled Sheet Steel, TMS-AIME, Warrendale, PA, pp.37-58, 2001.
- 6) S. Y. Kim, J. H. Kwak, J. H. Chung and K. M. Cho, "Effects of Ti on the Formability of Ti-IF Steels," Metals and Materials International, Vol.8, No.2, pp.155-161, 2002.
- 7) B. Y. Lee, O. Y. Lee and S. H. Lee, "Effect of Phosphorus and Boron Addition on the Deep Drawing and High Strength of Ti-Stabilized Low Carbon Steel Sheet," J. of the Korean Inst. of Met & Mater., Vol.31, No.2, pp.185-192, 1993.
- 8) O. Hashimoto, S. Satoh and T. Tanaka, "Deve-

- lopment of {111} Texture in Intercritical Annealing of Low Carbon Steels,” Transactions ISIJ, Vol.27, pp.746-754, 1987.
- 9) K. Sakata, S. Satoh, T. Kato and O. Hashimoto, “Metallurgical Principles and Their Applications for Producing Extra-Low Carbon IF Steels with Deep Drawability and Bake Hardenability,” Physical Metallurgy of IF Steels, May10-11, pp.279-288, 1994.
- 10) T. Miyoshi and O. Hashimoto, “Effects of Ti and Mn Contents on Precipitation Behavior of Sulfides During Hot Rolling in IF Steel,” CAMP-ISIJ, Vol.5, No.3, pp.862-870, 1992.
- 11) A. Okamoto and N. Mizui, “Texture Formation in Ultra-Low Carbon Ti-added Cold Rolled Sheet Steels,” Metallurgy of Vacuum-Degassed Steel Products, TMS-AIME, pp.161-180, 1989.