

가공유기변태 강판의 온간 디프드로잉 성형 특성

공경환* · 최치수** · 최이천** · 서대교***

Characteristics on the Warm Deep Drawability of Transformation-Induced Plasticity Steel Sheet

K. H. Kong, C. S. Choi, Y. C. Choi, and D. G. Seo

Abstract

The warm deep drawability in square cup drawing is investigated about a newly developed high-strength steel sheet with retained austenite which is transformed into martensite during forming. For this investigation, six steps of temperature ranges, from room temperature to 250°C, and five kinds of drawing ratio, from 2.2 to 2.6 were adopted. As a result, the maximum drawing force and the maximum drawing depth were affected by the elevated temperatures, and the more stable thickness strain distribution was observed to the elevated temperatures. But blue shortness happened over 200°C. The FEM analysis using the LS-DYNA code is adopted to compare the experimental results with the analytical results for thickness strain distribution.

Key Words : Warm deep drawing, High-strength steel sheet, Thickness strain distribution, Maximum drawing force, Maximum drawing depth, Limiting drawing ratio(LDR), Transformation-induced plasticity(TRIP), Blue shortness

1. 서론

최근 환경문제로 인해 자동차용 재료의 경량화, 박물화가 요구되어지고 있는 한편, 충돌안전에 관한 사회적 규제는 매년 강화되고 있으며 충돌 시를 상정한 자동차용 재료의 고속변형거동에 관한 연구의 필요성이 점점 강화되고 있다. 이러한 자동차 충돌안전성 규제강화에

따른 새로운 고장력강 개발이 활발히 이루어지고 있는 가운데 최근 충격 흡수능력이 우수하고 고강도인 TRIP 강판이 개발되어 차체의 Front side member, Side sill, Pillar등에 적용되고 있다. TRIP 강판은 변형유기변태 강판이라고도 하며 Martensite 변태온도 하향화 합금원소인 탄소, 규소, 망간 등이 주 원소로 구성된다. 주로 탄소 함량에 의해 열처리 후 잔류 오스테나이트 량이 조정

* 성균관대학교 대학원

** 기아자동차 (주)

*** 성균관대학교 기계공학부

되며 기타 합금원소로 인, 알루미늄, 몰리브덴 등이 첨가된다. 제조 특성을 보면 α, γ 이상의 영역에서 소둔 (annealing) 후 바이나이트 상온 변태를 실시한다. 조직 내에 적정량의 잔류 오스테나이트가 확보되면 소성변형 시 조직내의 Soft phase인 잔류 오스테나이트가 Hard phase인 마르텐사이트로 변태 되므로 높은 연신율을 나타내게 되고, 강도도 높아지게 된다. 또한 가공경화지수도 높아 충격 에너지의 흡수능력이 우수하다.

Table 1은 동급 고장력 강판과의 제품 특성을 비교한 결과이다. 동급 석출경화형 고장력강보다 항복강도가 낮고 연신율이 높아 상대적으로 우수한 성형성을 나타내고 있으나, 40kg급 고용강화형 고장력강에 비하여 연신율은

Table 1 Comparison of mechanical properties between TRIP steel sheet and another strengthened sheets

(YS, TS unit : kg_f/mm^2)

	Y.P.	T.S.	El(%)	KJ
60kg TRIP steel sheet	40~45	62	30~35	8.8
60kg Precipitation-Strengthened	55	62	21	6.8
40kg Solid Solution-Strengthened	33	42	34	5.7
SPC3	16	29	51	-

Table 2 Chemical composition of material

Composition (wt %)	C	Si	Mn	P
Material				
60kg TRIP steel sheet	0.084	0.97	1.52	0.078

Table 3 Various coefficients of material at elevated temperature

(Y.S., T.S., P.C. unit : kg_f/mm^2)

Temp.	T.S.	El.	P.C.	S.H.E	Y.P.
R.T.	63.82	27.13	113.09	0.228	44.35
50℃	64.41	28.93	120.11	0.261	43.98
100℃	59.01	25.77	102.04	0.215	41.09
150℃	58.73	22.73	98.95	0.198	41.32
200℃	61.52	22.03	106.37	0.213	41.81
250℃	58.94	19.53	105.4	0.224	38.25

대등하나 항복강도가 높아 프레스 성형 시 spring back 현상이 크게 나타나므로 고려해야할 점이다.

본 연구에서는 TRIP 강판에 대한 온도별 인장실험과 온간 디프드로잉 실험을 수행하고 재료의 온간 성형성 효과와 성형변수 등을 고찰하여 재료의 성형성 향상을 평가하고자 한다. 또한 FEM 해석을 수행하여 실험결과와 비교해 보고자 한다.

2. 실험

2.1 인장실험

실험에 사용된 소재는 1.0mm의 TRIP 강판으로 화학적 조성은 Table 2와 같다.

TRIP 강판의 기계적 성질을 알기 위해 KS B 0801 13B호 시험편으로 온도별 인장실험을 수행하였다. 온도 범위는 상온에서 250℃까지 50℃간격으로 정하였고 압연 방향에 대해 0°, 45°, 90° 방향으로 세 번 측정한 후 평균값을 구하였다. Table 3에 주어진 결과를 보면 150℃까지는 인장강도(T.S.), 연신율(El.), 강도계수(P.C.), 가공경화지수(S.H.E.) 등은 감소하는 경향이 나타났다.

그러나 청열취성 현상이 발생하는 200℃부터 인장강도(T.S.), 강도계수(P.C.), 가공경화지수(S.H.E.) 등은 다시 증가했다.

Fig. 1은 상온에서 TRIP 강판과 SPC 3종의 인장선도를 비교해 놓은 것으로 TRIP 강판이 연강에 비해 강도가 2배이상 높고 연신율은 71% 정도로 작게 나타났다.

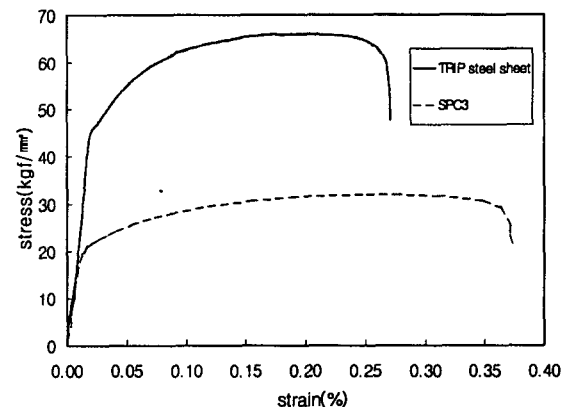


Fig. 1 Comparison of stress-strain curve between TRIP steel sheet and SPC3 sheet (25℃)

2.2 실험장치 및 실험방법

실험장치는 Fig. 2, Table 4, Table 5 에 주어진 기준에 만들어져 있는 펀치와 다이, 홀더 세트를 이용하였는데 펀치는 냉각수를 순환시킬 수 있도록 설계되었고 다이와 블랭크 홀더에는 1Kw의 가열 파이프를 설치하였다.

펀치, 다이 및 블랭크 홀더 표면은 크롬코팅(6가 경질 도금) 처리하였다. 블랭크는 사각형상의 1.0mm TRIP 강 판을 사용하였으며 크기는 상온에서 예비실험을 통해 성형깊이 28mm를 기준으로 한계 성형비 2.2를 구한 후 온도를 높여가며 2.3, 2.4, 2.5, 2.6등으로 하였다. 온도범위는 상온에서 250℃까지 50℃간격으로 실험하였고 냉각수 온도는 16℃로 유지하였다.

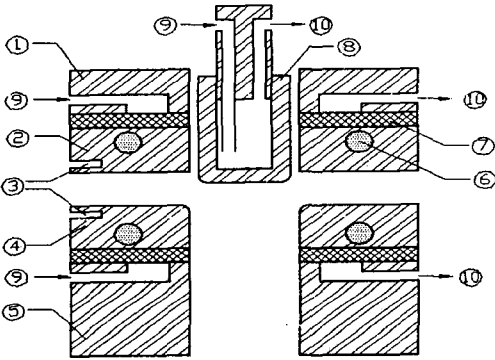


Fig. 2 Details of warm forming tester

Table 4 Name list for experimental apparatus

No.	Name	No.	Name
①	Holder cooling part	⑥	Heating pipe
②	Holder heating part	⑦	Insulation panel
③	Thermocouple	⑧	Punch
④	Die heating part	⑨	Cooling water inlet
⑤	Die cooling part	⑩	Cooling water outlet

Table 5 Size of punch, die, blank holder

Part	Material	Surface	Size(mm)	Rp	Rd	Rc
Punch	FC30	Cr-Coating	60×60	5	-	5
Die	FC30	Cr-Coating	66×66	-	7	8
Blank Holder	FC30	Cr-Coating	61×61	-	-	6

블랭크 홀더 압력은 6MPa, 프레스 속도는 35mm/min 로하였다. 각 온도에서 블랭크의 드로잉비를 높이면서 기준 깊이 28mm, 또는 최대로 성형될 때까지 드로잉을 수행하였다.

3. 해석

본 연구에서는 Explicit 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 유한요소해석을 수행하였고 이때 탄성부분을 무시한 강소성 유한 요소법으로 해석하였다.

LS-DYNA 입력카드(input card)의 구성에서 소재의 물성치와 관련된 부분으로 인장 데이터의 경우 진용력-진변형률 선도를 직접 입력하는 방법을 택하였다. 온도에 따른 입력 값으로는 탄성계수(E), 포아송비(ν), 항복응력(σ_0), 가공경화지수(n) 등이 있고 이 밖에도 밀도(ρ), 판재 두께(t)등으로 온도에 따른 재료 물성치를 구성하였다. 블랭크를 가열, 중간, 냉각영역 세 부분으로 설정하여 해석시간동안 블랭크의 온도를 점진적으로 증가하도록 하였다. 전체 모델의 Element의 개수는 6368개, Node의 개수는 6606개이다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 온도에 따른 성형성 고찰

온간 디프드로잉 실험을 한 결과가 Table 6에 나타나 있다. 성형 깊이 28mm를 기준으로 했을 때 온도가 증가하여도 성형 가능한 드로잉비는 Fig. 3에서처럼 2.3으로 일정하였다. Fig. 4와 Fig. 5에서는 온도에 따른 최대 성형깊이를 보여주고 있다. 드로잉비 2.3에서는 온도가 증

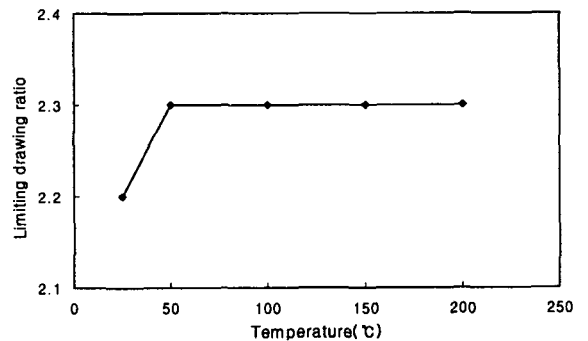


Fig. 3 Change of limiting drawing ratio for temperature

Table 6 Experimental results(Drawing depth=28mm)

Temp.	DR	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
	No.	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1
25°C	F(Kgf)	11300	12500	13550	14600	15100
	H(mm)	28	26	25	22	19
	formable	○	×	×	×	×
	No.	2-2	3-2	4-2	5-2	6-2
50°C	F(Kgf)	10850	12000	13200	14100	14900
	H(mm)	28	28	26.5	22	21.5
	formable	○	○	×	×	×
	No.	2-3	3-3	4-3	5-3	6-3
100°C	F(Kgf)	10300	11350	12600	13450	14200
	H(mm)	28	28	27	27	25
	formable	○	○	×	×	×
	No.	2-4	3-4	4-4	5-4	6-4
150°C	F(Kgf)	10000	11050	12300	13200	14150
	H(mm)	28	29.5	28	28	23
	formable	○	○	×	×	×
	No.	2-5	3-5	4-5	5-5	6-5
200°C	F(Kgf)	10350	11300	12950	13400	14000
	H(mm)	28	30	25	22.5	20.5
	formable	○	○	×	×	×
	No.	2-6	3-6	4-6	5-6	6-6
250°C	F(Kgf)	11000	12050	13000	13700	14200
	H(mm)	23	22.5	22	19	18
	formable	×	×	×	×	×
	No.					

가함에 따라 드로잉 깊이가 점차 증가하였다.

드로잉비 2.4, 2.5 및 2.6의 경우 성형깊이는 증가하였지만 성형 기준 깊이 28mm에는 못 미치거나 기준깊이에 도달하였지만 파단되었다. 그리고 250°C에서는 성형깊이가 급격히 감소함을 볼 수 있었다.

Fig. 6과 Fig. 7에서는 드로잉비에 따른 최대 성형깊이의 변화를 보여주고 있다. 연강에서처럼 한계드로잉비를 지나면서 성형깊이가 급격히 감소하는 현상은 보이지 않았지만 드로잉비 2.3까지 성형깊이가 증가하다가 점차 감소함을 알 수 있다. 최대성형 하중은 Fig. 8에 나타난 것처럼 온도가 증가함에 따라 감소하다가 청열취성이 발생하는 200°C부터 다시 증가하기 시작했다. 150°C에서 D.R. 2.2의 경우 상온보다 12% 감소하였다.

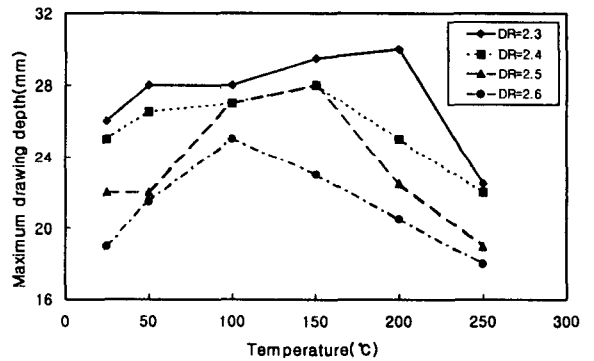


Fig. 5 Change of maximum drawing depth for temperature

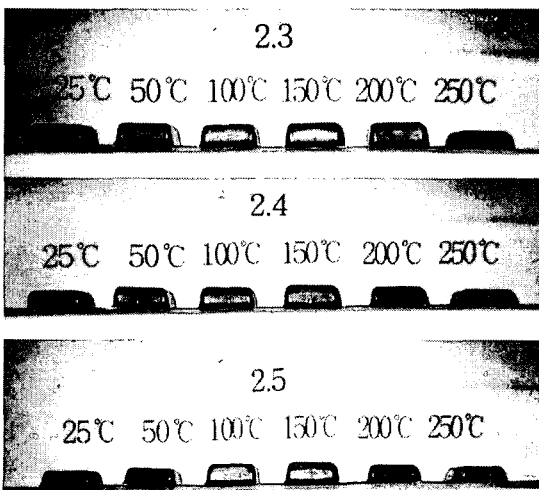


Fig. 4 Experimental specimens for temperature

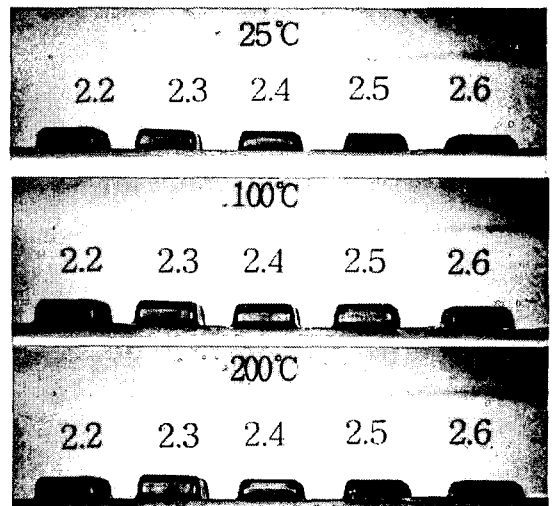


Fig. 6 Experimental specimens for drawing ratio

4.2 온도에 따른 두께 변형률 분포 고찰

온도에 따른 두께 변형률 분포는 각 온도에서 D.R. 2.2의 블랭크를 28mm 성형한 사각 컵의 중심방향과 대각선 방향으로 측정하였다.

Fig. 9의 (a)와 (b)를 보면 중심방향은 별 차이를 나타내지 않았지만 대각선 방향은 온도가 증가할수록 두께 변형률의 분포가 전반적으로 고르게 나타나고 있고, 최대값과 최소값의 차이가 감소함을 알 수 있다. 그리고 플랜지부의 두께 변형률도 감소함을 볼 수 있는데 이는 온도가 높아질수록 플랜지부의 두께 편차가 작고 따라서 소재의 유입이 용이하다고 판단된다.

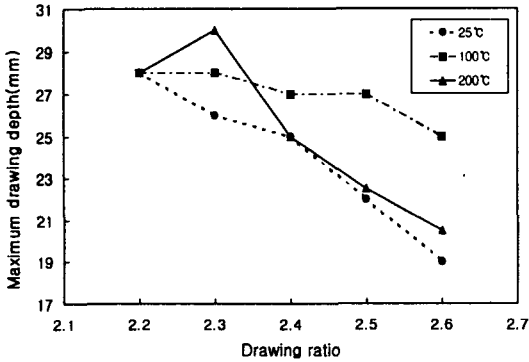


Fig. 7 Change of maximum drawing depth for drawing ratio

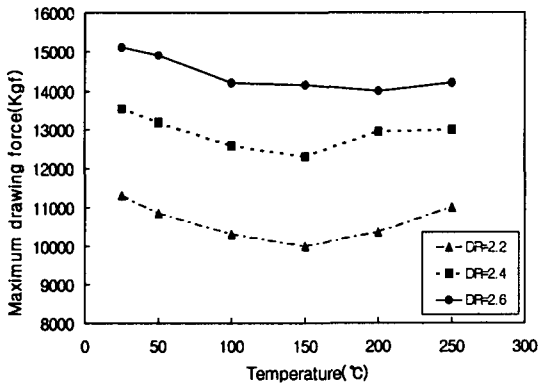


Fig. 8 Change of maximum drawing force for temperature

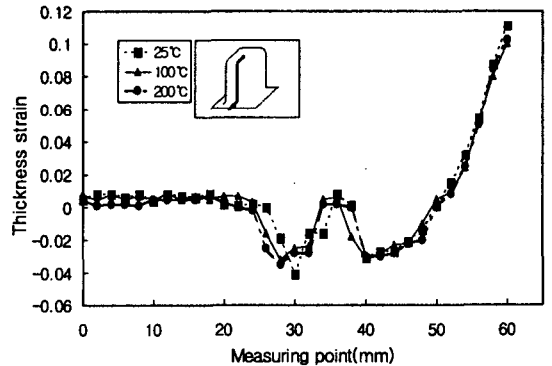
4.3 해석결과 및 실험치와 비교

Fig. 10과 Fig. 11에 100°C와 200°C에서의 두께 변형률에 대한 해석결과와 실험결과를 비교하고 있다. 두께 변형률 값과 플랜지 부분에서의 경향이 차이가 조금 나지만 전체적으로 경향이 잘 일치하고 있다.

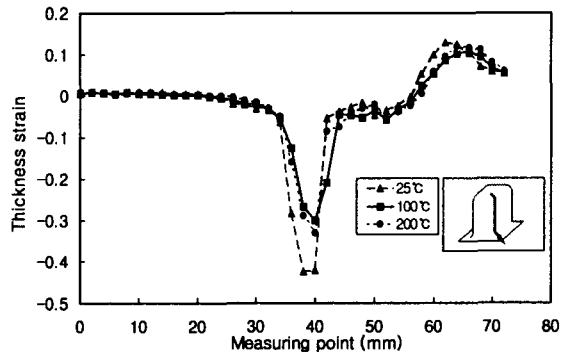
5. 결론

가공변태유기강관의 성형성 향상을 위해 온간 성형법을 적용하여 여러 성형 인자들을 고려하고 두께 변형률, 최대성형 하중 등을 측정, 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 온간 성형법을 적용하여 실험한 결과 SPC 1종이나 3종과 같은 연강처럼 뚜렷한 성형효과를 얻지는 못했지만 한계드로잉비, 최대성형 깊이 등이 약간 증가하였고 최대성형 하중은 감소하였다.



(a) Along center line



(b) Along diagonal line

Fig. 9 Thickness strain distribution (DR=2.2)

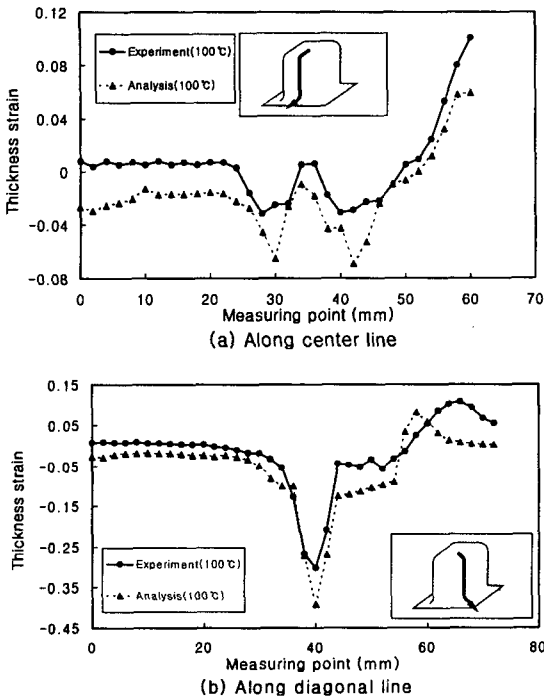


Fig. 10 Comparison of thickness strain distribution between experiment and analysis(D.R.=2.2, Temp.=100°C)

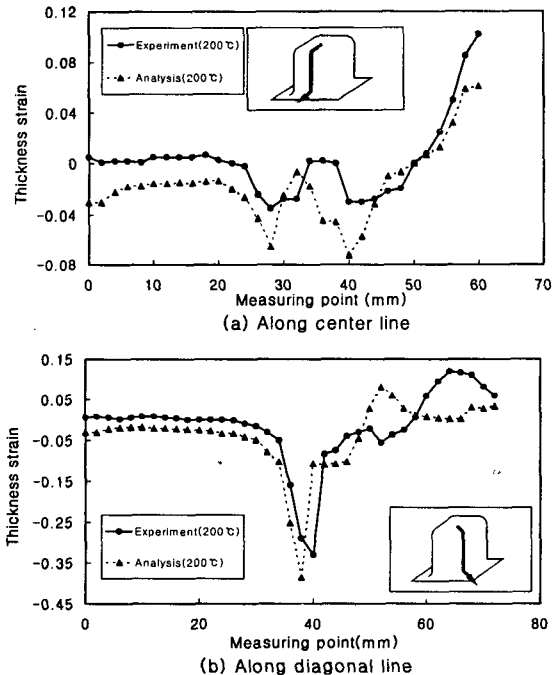


Fig. 11 Comparison of thickness strain distribution between experiment and analysis(D.R.=2.2, Temp.=200°C)

(2) 두께변형을 분포의 경우 온간 성형의 경우가 상온에서보다 안정적이고 균일하였다.

(3) 온도 200°C 이상에서 상온에서보다 경도가 높아지고 재료의 성질이 취성으로 변하는 청열취성 현상이 발생하였다. 이로 인해 최대성형 하중이 증가하고 성형깊이는 감소하였다.

(4) 인장실험 결과에서 온도가 증가할수록 연신률이 감소하였음에도 불구하고 디프드로잉 성형 시 성형깊이가 향상된 것은 온간 성형 효과 즉 소재의 강도 조절 효과 때문이라 판단된다.

(5) 여러 성형인자들을 비교해 본 결과 온간 성형법을 적용할 경우 청열취성 현상이 발생하지 않는 온도범위(100°C~150°C)에서 성형성 향상이 가능하다는 것을 확인하였다.

후기

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

참고 문헌

- (1) Yasuharu S., Noritoshi K., 1995, "Next-Generation High-Strength sheet steel Utilizing TRIP effect", Nippon Steel Technical Report No. 64 pp.20~24.
- (2) Manabu T., Akihiro U., 1997, "Properties of High Strength TRIP Steel Sheets", Automotive Body Materials IBEC '97, pp.26~31.
- (3) Shunji H., Manabu T., 1993, "Effect of Deformation-Induced Transformation on Deep Drawability", Journal of the JSTP, Vol. 35, No. 404 pp.1109~1114.
- (4) 김종호, 최치수, 심경섭, 김승수, 1994, "STS 304 스테인리스 정사각 용기의 온간 딥드로잉에 관한 연구", 서울산업대학교 논문집 제 40 권, pp.145~153.
- (5) Tetsuro O., Hiroshi T., 1987, "Temperature Dependence of Tensile Properties Drawability of Steel Sheets in Warm Working Condition", Journal of the JSTP, Vol. 28, No. 314, pp.225~231.
- (6) 이재동, 최치수, 최이천, 김원형, 서대교, 2000, "크롬 코팅 처리된 금형에서 박판의 온간 딥드로잉 성형성에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제 9권, 제 2호 pp. 186~192.