

박강판의 온도변화에 따른 인장특성

이항수* · 오영근**

(1999년 12월 16일 접수)

The Tensile Characteristics of Steel Sheets at Various Temperature Conditions

H. S. Lee and Y. K. Oh

Abstract

The thermal problem of press work is classified into two cases. First, the temperature of forming die passively rises due to the heating effect of plastic deformation. The warm forming is the second case in which the external heating is applied to the die and blank holder. So, the purpose of this study is to provide database for the forming characteristics at various temperature conditions. In this study, the tensile test was carried out for the commercial steel sheets such as SCP1 and SCP3C with the thickness of 0.7mm and 1.4mm respectively. The tensile strength, total elongation, Lankford value and the flow curve have been obtained at the temperature of 25°C, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C and 300°C, respectively. From the results, we can see that both the tensile strength and total elongation decrease as the temperature increases. In the light of anisotropy, the effect of thickness is dominant than the material specs. For the temperature dependency of flow curves, there are only small differences for the work-hardening exponent, and the strength intensity decreases monotonically as temperature increases. The present results are useful as input data for the analysis of sheet metal forming processes with the various temperature conditions.

Key Words : Tensile Test, Various Temperature Condition, Warm Forming, Steel Sheet, Tensile Strength, Elongation, R-value, Flow Curve

1. 서 론

프레스성형의 성과는 주로 피가공재의 재질적 특성이거나 금형의 형상 및 가공조건에 기인하며 상온가공이 많으므로 대부분은 상온에서의 역학적 현상에 의해 영향을 받는다. 그런데 근래에 들어 제품의 고품질화 및 고기능

화가 요구됨에 따라 프레스가공 제품이 복잡해지고 있으며, 또한 성형성을 향상시킬 수 있는 공정을 적용하는 사례가 늘고 있다. 이에 따라 성형도중의 온도의 변화가 성형의 성과에 영향을 미치는 경우가 많이 있다. 여기서 온도의 변화란 강제적 변화와 피동적 변화를 모두 포함하는 것이며, 강제적 변화에 해당하는 것에는 온간성형

* 한과대학교 기계공학부
** 기아자동차(주) 생기개발팀

법이 있다.

온간성형법은 제품의 복잡화 및 고품질화에 따라 고 난이도의 프레스 성형이 요구되어 따라 적용하는 것으로서 금형의 온도를 조절해야 하는 특징을 가지고 있으나, 보통의 디프드로잉과 금형의 구조가 유사하고 상용의 프레스에서 쉽게 적용이 가능하여 적용하기가 비교적 용이한 것으로 알려져 있다. 그런데, 온간성형법을 효과적으로 적용하기 위해서는 상온가공에서 나타나지 않는 재료의 온간특성을 고려하는 것이 필요하다.

보통의 디프드로잉 공정에서도 온도의 변화가 영향을 미치는 경우가 있다. 피동적인 온도변화의 예로서, 대형 패널을 깊게 드로잉하는 경우에는 성형가공에 의해 발생하는 열이 금형 내에 축적되는데, 성형속도가 빠른 경우에는 금형 표면의 온도가 수백도까지 상승하는 경우가 있다.⁽⁴⁾ 따라서 온도가 높은 금형에 접촉하는 소재판의 성형특성은 다른 부분과 달라지게 되며, 이로 인하여 제품성형이 곤란한 경우도 발생한다.

한편, 근래에는 성형해석법이 도입되어 활용되는 경우가 많이 있다. 실제의 금형을 개발하기 이전에 성형해석을 통하여 성형과정에서의 문제점을 도출하고, 이를 해결하는 방법으로 응용되고 있다. 그런데, 성형해석 과정에는 사용소재의 특성을 정확하게 입력해야만 해석결과를 보증할 수 있으므로 소재판의 온도변화에 따른 성형 특성을 미리 검토하는 것이 필요하다.

강판재료의 온도변화에 따른 성형특성 및 박판의 온간성형에 대해서는 다음과 같은 연구사례가 있다.

Ayres⁽⁵⁾는 알루미늄 퀄드강에 대하여 100°C 이하의 비교적 저온에서 등온 및 비등온 조건으로 인장시험을 하여 재료의 변형에 기인한 온도상승이 연신율에 미치는 영향을 조사하였다. Kim과 Wagoner⁽⁶⁾는 인장시험 중의 온도변화 효과를 분석하기 위하여 열전달을 포함한 2-D FEM 해석법을 제안하였다. 그들은 또한 IF강을 대상으로 비교적 저온 조건에서 등온 및 비등온 조건에 따른 연신율의 온도 및 변형률속도 의존성을 조사하였다. Ohwue 등^(7~8)은 (C+N)의 고용량에 변화를 준 여러 가지 강판재에 대하여 인장강도와 연신율의 온도의존성을 조사하여 보고하였다. 이들은 (C+N)의 고용량이 클수록 청열취성이 크게 나타나며 청열취성이 발생하는 온도구간이 낮아짐을 보고하였다. 또한 그들은 일반적인 탄소강에 대한 청열강화 현상을 조사하면서 탄소량이 극히 적은 IF강에서는 인장강도가 단조감소하고 있음을 보고하였다. 渡部⁽⁹⁾는 온간성형을 위한 국부가열 및 냉각장치를 고안하여 제안하였으며 스테인리스재의 적정 온도구간에 대하여 조사하였다. 武智와 大上⁽¹⁰⁾은 자동차용 폐

널에 많이 이용되는 연강판에 대하여 온간 기계적 특성을 조사하고, 온간성형에서의 한계드로잉비에 대하여도 조사하였다. 또한 그들은 사각형 용기에 대해 온간성형 조건에서의 드로잉성에 대해서도 조사하였으며⁽¹¹⁾, 고장력 강판의 온간성형성에 대해서도 조사하여 보고하였다.⁽¹²⁾ Kumpulainen 등⁽¹³⁾은 스테인리스 강판, 활동판, 강판, 알루미늄 판 등 여러 가지의 재료에 대하여 디프드로잉에 미치는 온도의 영향을 조사한 바 있다. Kim 등^(14~15)은 프레스 방식에 따른 스테인리스재의 온간성형성을 비교하여 보고한 바 있으며, Livitsanos와 Thomson⁽¹⁶⁾은 오스테나이트 스테인리스 강판의 온간성형에 있어 최적의 온도구간을 조사하여 보고하였고, 山崎⁽¹⁷⁾는 알루미늄 판재의 온간성형법에 대하여 발표하였다.

이들 연구결과들을 종합하면 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째는 온간성형 공법의 적용성을 고찰한 내용이다. 재료별로 온간성형성 및 최적 온도를 조사하였거나 온간성형법을 적용하기 위한 금형장치의 고안에 대한 내용이다. 둘째로는 재료의 변형에 따른 기계적 성질의 변화에 대한 조사이다. 재료가 변형하는 동안 비교적 저온 영역에서 온도변화를 조사하였으며, 이때 발생하는 연신율 감소에 대한 조사내용이다. 세째, 온도의 변화에 따른 기초적인 기계적 성질의 변화에 대한 조사이다. 일반적인 강판의 온간성형 영역에서의 인장강도 및 연신율의 온도의존성에 대한 내용이다.

일반적으로 박판의 소성가공에서 중요한 변수로 생각되는 것에는 인장강도, 연신율 외에도 이방성계수 및 소성유동곡선이 있다. 인장강도 및 연신율은 변형의 한계를 결정짓는 요소가 되지만 이방성 및 가공경화를 나타내는 소성유동곡선은 재료의 변형거동을 예측할 수 있는 중요한 요소이다. 즉, 성형과정에서 쟁어짐 등의 불량현상을 분석할 수 있는 중요한 요소이며, 최근에 많이 이용되는 성형해석에서는 가장 기본적인 물성자료로 활용되고 있다. 그러나 지금까지의 연구에서는 온간영역에 대한 소성유동곡선의 자료는 거의 보고되지 않았다. 그러므로 온도변화가 수반되거나 강제적인 온도변화를 유도하는 프레스성형에 대해서는 소재판의 온도변화에 따른 물성변화에 대하여 충분한 고찰이 이루어져야 한다.

이러한 관점에서 본 연구의 목적은 소성유동곡선을 중심으로 소재의 온도변화에 따른 재료특성을 조사하고 이를 제공하므로써 온간성형법 및 기타 프레스성형에 대한 성형해석시 소재의 온도변화에 따른 변형과정의 분석을 용이하게 하는 것이다. 특히, 프레스성형법이 많이 적용되는 자동차 부품에 대하여 가장 많이 사용되는 냉연강판을 소재로 하여 온도별로 여러 가지 소성가공 관련

물성치를 제시하고자 한다. 온도범위는 상온~300°C로 설정하였으며, 소성유동곡선을 나타내는데 필요한 강도계수 및 가공경화지수를 중심으로 하여 이방성계수, 연신율, 인장강도에 대하여도 자료를 제시하고자 한다.

2. 시험방법

2.1 인장시험편

본 시험에서 사용한 시험재의 화학성분을 Table 1에 나타내었으며 Fig. 1에 본 연구에서 사용한 인장시험편을 KS 13B호(KS B 0801) 및 ASTM 표준 박판재 인장시험편(E8-54T)과 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 사용한 인장시험편은 KS 13B호(KS B 0801) 및 ASTM 표준 박판재 인장시험편(E8-54T)과 유사한 규격으로 제작하였으며 시험편 치수의 정확성을 기하고 불완전가공을 피하기 위하여 밀링머시인으로 절삭가공하였다.

Table 1 Chemical composition of specimens

Material	Chemical composition(%)					
	C	Si	Mn	P	S	Al
SCP1(t=1.4mm)	0.0030	TR	0.08	0.013	0.008	0.026
SCP1(t=0.7mm)	0.0030	0	0.05	0.009	0.008	0.035
SCP3C(t=1.4mm)	0.0020	TR	0.05	0.009	0.011	0.036
SCP3C(t=0.7mm)	Not given					

2.2 시험방법

온간시험에서는 시험편을 어느 온도로 가열하여 일정하게 유지해야 하는데, 본 연구에서는 이를 위하여 튜브형의 가열로를 제작하여 내부의 온도를 일정하게 제어하였으며, 로의 내부에서 시험이 이루어질 수 있도록 별도의 그립을 제작하였다. 인장시험기와 가열로 및 시험편의 배열을 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서 보듯이 변위측정센서(extenso-meter)를 장착하기가 곤란하므로 시험편의 표점에 대한 변형량을 직접 측정하기는 곤란하다. 본 연구에서는 시험기의 크로스헤드의 변위를 측정한 뒤 이를 보정하는 방법으로 시험편의 변형률을 환산하도록 하였다. 시험편의 어깨부의 반지름과 동일한 반지름을 갖는 흄을 가공한 상하의 그립에 시험편을 장착한 뒤, 덮개로 덮고 볼트로써 시험편을 그립의 흄부 속에 밀착시켜 그립에 밀착된 부분에서의 변형을 억제하도록 하였는데, 실제의 시험과정에서 크로스헤드의 행정거리와 표점의 거동에 차이가 발생하였다. 실제 표점의 거동보다 크게 측정이 되며, 이러한 차이는 시험편의 곡선

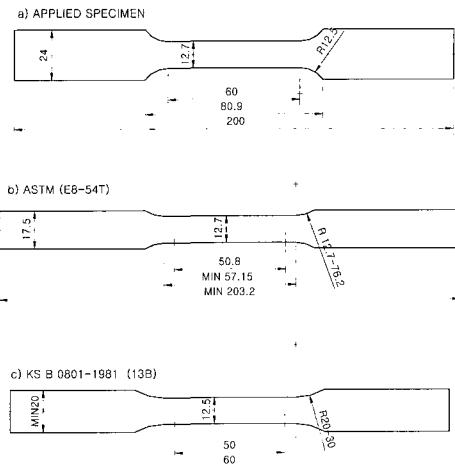


Fig. 1 The dimension of specimen

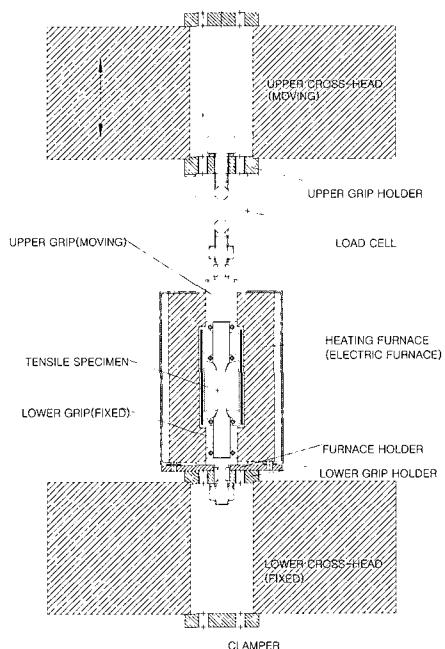


Fig. 2 Schematic diagram of the alignment of tensile specimen and heating furnace

부의 변형과 함께 그립 내부에 의해 물려있는 부분이 약간 끌려나오는 현상(slip)에 의해 나타나는 것이다. 크기는 최대하중점까지 실제변위에 거의 비례하여 나타나고 있었으며 최대하중점이 지나면 더 이상은 증가하지 않는 테, 최대 하중점에서 대체로 약 5mm 정도의 크기를 가

지고 있다. 이러한 현상은 실제의 변형률을 왜곡시키는 결과를 초래하므로 이 차이만큼을 보정해야 하는데, 본 연구에서는 예비시험을 통하여 크로스헤드의 행정변화에 대한 과측정량(over measured displacement)의 관계를 미리 구하여 이로부터 실제의 표점사이의 변형을 보정하였다. 예비실험에서의 과측정량을 Fig. 3에 나타내었다.

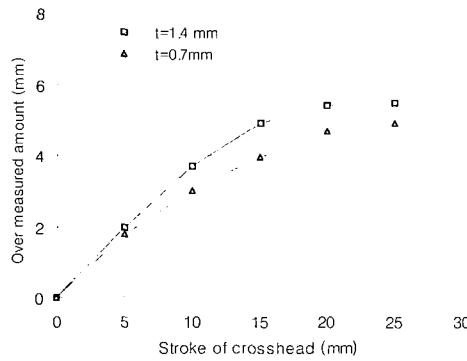


Fig. 3 The relationship between cross-head stroke and over measured displacement



Fig. 4 Experimental setup of testing machine

Fig. 4는 Tube식 가열로(furnace)를 장착한 상태의 인장시험기의 전경을 보여주고 있으며 Fig. 5는 상하의 그립 사이에 시험편을 끼워 넣은 상태(사진)를 보여주고 있다. 크로스헤드 사이에 가열로와 그립이 장치되어 있으며 가열로는 앞쪽으로 개폐할 수 있도록 제작되었다. 시험편은 인장시험 도중에 항상 가열로 속에 위치해 있도록 하였다.

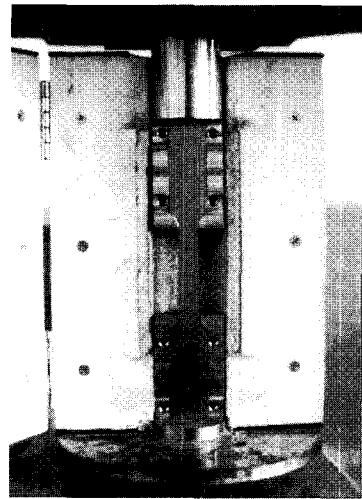


Fig. 5 Photo of tube furnace

2.3 인장시험 조건 및 데이터산출

인장시험 조건은 다음과 같다.

- 강종 : SCP 1종, SCP 3C종
- 재료두께 : 0.7t, 1.4t
- 시험편채취방향 : 0° (압연방향), 45°, 90°
- 시험온도 : 상온, 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C
- 인장속도 : 15 mm/min
- 이방성 측정 변형률 : 약 13% (공칭변형률)

여기서 0.7t와 1.4t는 두께를 나타내는 것으로서 각각 0.7mm와 1.4mm를 나타낸다.

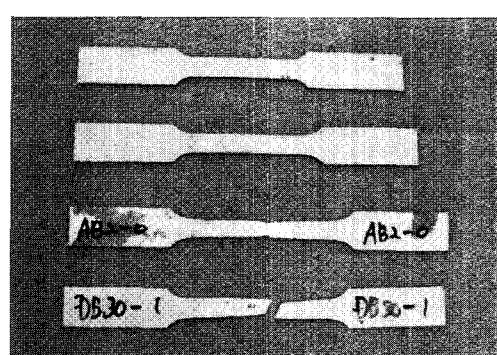


Fig. 6 Photo of the tensile specimens

박강판의 온도변화에 따른 인장특성

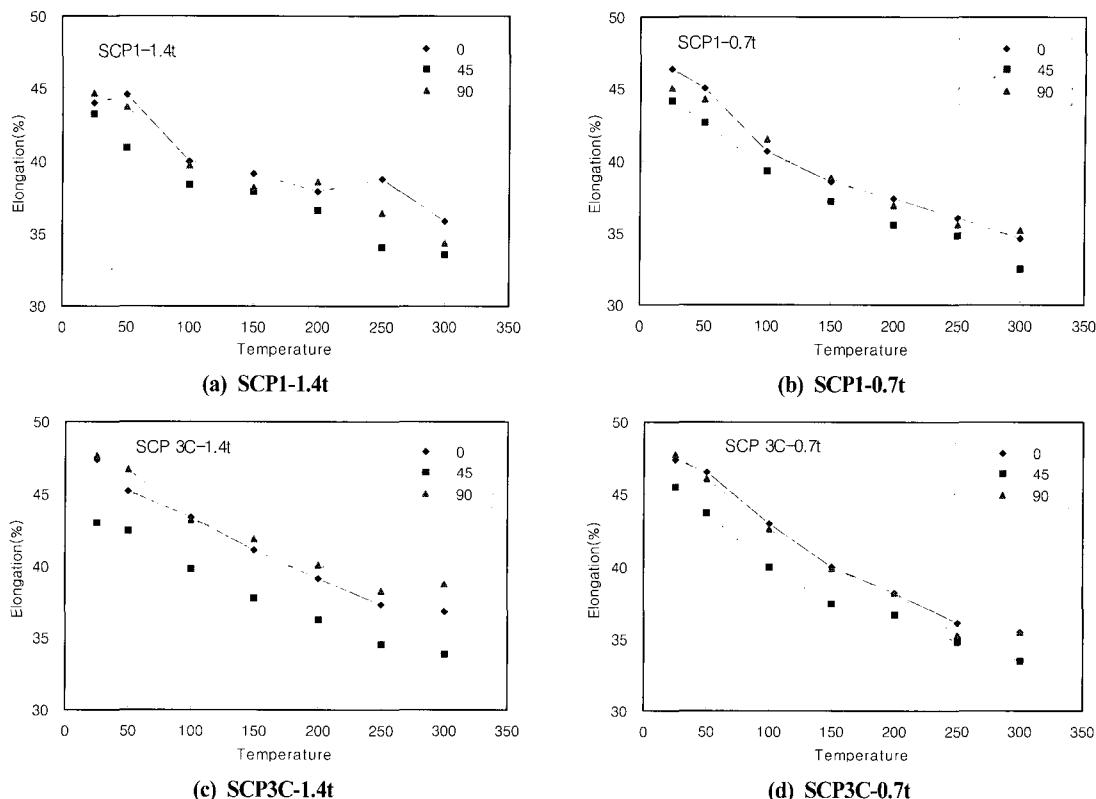


Fig. 7 The variation of total elongation along temperature(°C)

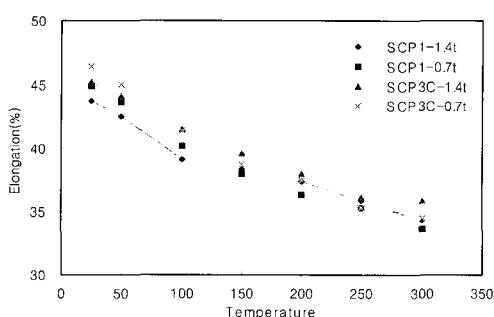


Fig. 8 The variation of total elongation along temperature(°C) for the various material

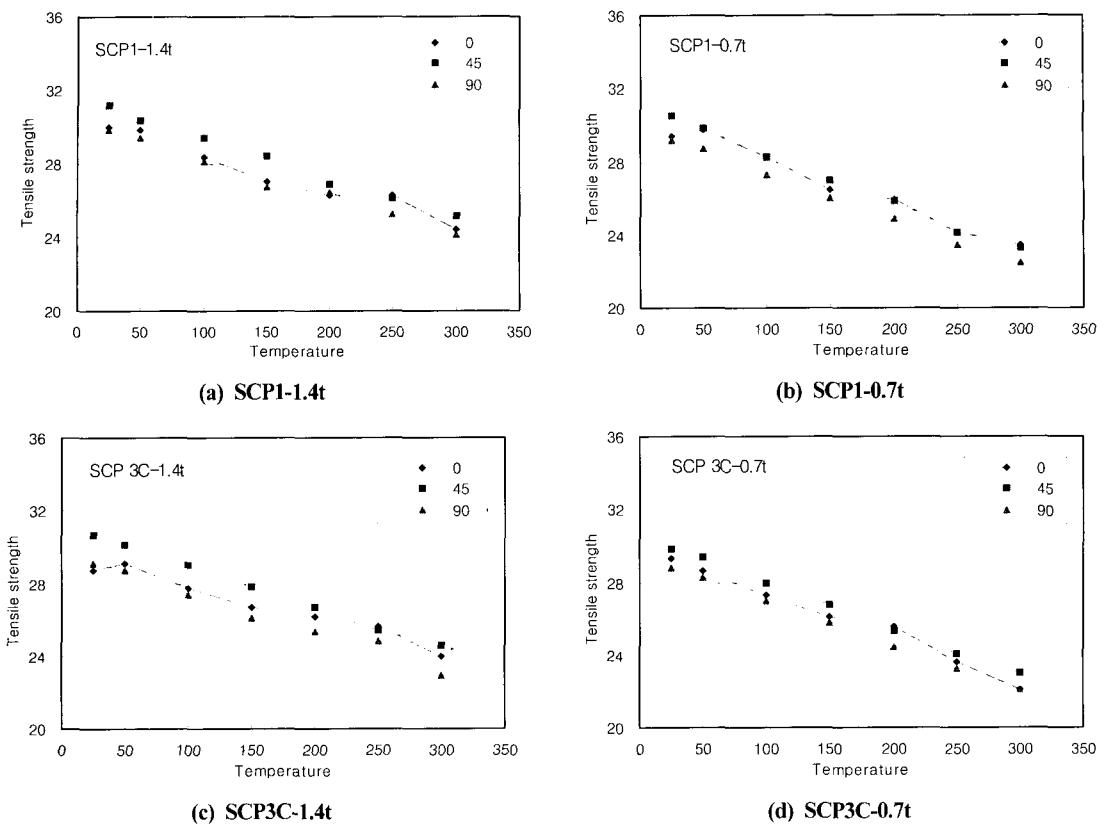
Fig. 6에 인장시험 전후의 시험편을 나타내었다. 인장 강도는 최대하중점에서 산출하였으며 연신율은 파단점에서 측정하였다. 이방성을 나타내는 R값(Lankford value)은 약 13%의 변형률상태에서 산출했다. 각각의 데이터는 시험편 채취방향에 대한 값을 평균하여 계산하였다.

소성유동식을 나타내는 방법으로 강도계수와 가공경화지수로 표현되는 멱경화식을 사용하였는데, 이를 구하는 순서는 다음과 같다. 인장시험 데이터로부터 크로스 헤드의 행정을 측정한 뒤, Fig. 3에서 나타난 차이만큼을 보정하여 표점의 변형량을 산출한 뒤, 이로부터 응력 및 변형률을 산출하였으며, 미리 구해진 R값을 고려하여 유효변형률 및 유동응력을 계산하여 최종적으로 응력-변형률의 관계를 멱경화식으로 곡선보간하였다.

3. 시험결과 및 토의

3.1 연신율

본 연구를 통해 조사된 각 소재의 연신율을 Fig. 7에 재료별로 나타내었으며 이들을 종합하여 Fig. 8에 나타내었다. 재료의 종류에 있어서는 SCP1종 보다 SCP3C종의 연신율이 높으며 같은 재료에 있어서는 압연회수가 많은 0.7t의 경우가 1.4t의 경우보다 높은 값을 보이고

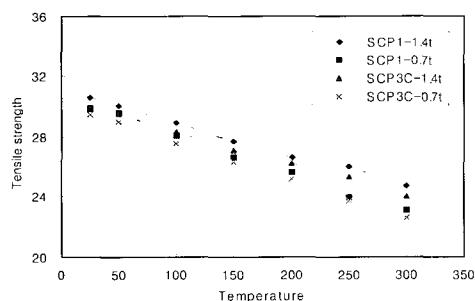
Fig. 9 The variation of tensile strength (kg/mm^2) along temperature($^\circ\text{C}$)

있다. 시험편의 채취방향에 대하여는 45° 방향이 가장 작게 나타나고 있으며 0° 및 90° 방향에서는 비슷한 값을 보이고 있다. 온도의 변화에 대하여는 온도가 증가함에 따라 전반적으로 연신율이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 온도의 변화에 따라 연신율이 변하는

것은 소재 내의 고용(C+N)양과 관련이 있다고 생각된다.⁽³⁾ 즉, 탄소강의 청열취성과 관계가 있는데, 일반적인 탄소강에서는 연신율이 온도증가에 따라 일단 감소했다가 200°C - 300°C 에서 최저를 이룬 후 다시 증가한다. 이러한 현상은 고용 (C+N)이 많은 강판일수록 변화가 현저하며, 고용 (C+N)이 거의 없는 경우에는 400°C 까지 단조감소하는 현상을 보인다.⁽⁵⁾ 자동차 차체용 강판의 경우에는 특히 높은 성형성이 요구되므로 KS 규격보다는 탄소량이 매우 적어 극저탄소강에 가까우므로, 300°C 까지의 온도증가에 대해서는 연신율이 감소하게 된다.

3.2 인장강도

Fig. 9에 온도에 따른 인장강도의 변화를 재료별로 비교하여 나타내었으며 이들을 종합하여 Fig. 10에 나타내었다. 전반적으로 온도가 증가함에 따라 반비례하여 인장강도가 단조감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 온도의 변화에 따라 인장강도가 변하는 것은 위에서 언급한 청열취성과 관계가 있는 것으로 생

Fig. 10 The variation of tensile strength (kg/mm^2) along temperature($^\circ\text{C}$) for the various material

각된다.⁽³⁾ 보통의 탄소강에서는 온도증가에 따라 인장강도가 일시적으로 증가하여 200°C~300°C에서 피크를 이룬 후 다시 감소한다. 이는 소성변형시의 변형시효에 따르는 현상으로 고용(C+N)이 많은 강판일수록 변화가 현저하다. 이때의 변형시효란, 열을 가할 경우 C 또는 N이 전위를 고착시키기 때문에 강화되는 현상으로, C+N의 양을 아주 적게 하면 이 현상이 없어져서 온도의 증가에 따라 단조감소하게 된다. 따라서, 고용(C+N)이 거의 없는 경우에는 피크현상이 발생하지 않고 단조감소한다.⁽⁵⁾ 본 시험에 사용된 차체용 강판은 탄소량이 매우 적은 극저탄소강에 가까우므로, 300°C까지의 온도증가에 따른 인장강도의 감소는 일반적인 현상이라 할 수 있다.

시험편의 채취방향의 경우, 압연방향에 대하여 45° 방향이 가장 크며, 90° 방향에서 가장 작은 값을 보이고 있다. 재료의 종류에 있어서는 SCP1종 보다 SCP3C종의 인장강도가 다소 작으며 같은 재료에 있어서는 0.7t의 경우가 1.4t의 경우보다 낮은 값을 보이고 있다.

Table 2 Lankford values for the angle with respect to rolling direction

Material-thickness	Angle w.r.t. rolling dir.			Average
	0°	45°	90°	
SCP1-1.4t	1.68	1.46	1.96	1.64
SCP1-0.7t	1.86	1.57	2.00	1.75
SCP3C-1.4t	1.82	1.38	2.02	1.65
SCP3C-0.7t	2.00	1.56	2.16	1.82

3.3 이방성

이방성계수는 흔히 R값(Lankford value)으로 나타내는데, 이는 인장시험시 두께의 변형에 대한 폭의 변형비로서 압연시 결정입자의 배열에 기인한다. 따라서 시험재의 온도보다는 시료의 재질 및 압연량에 따라 다르다고 생각되어 상온에의 이방성만 조사하였으며 그 결과를 Table 2 및 Fig. 11에 나타내었다. 압연방향에 대하여 0°, 45°, 90° 방향에서 채취한 시험편에 대하여 약 13%의 변형률 상태에서 측정하여 평균치로 산출하여 나타되었는데, 45° 방향의 시험재에서 가장 작게 나타나고 있으며 0° 및 90° 방향에서는 비슷한 가운데 90°에서 다소 높은 값을 보이고 있다. 재료의 종류에 있어서는 SCP 1종 보다 SCP 3C종의 경우가 높으며 같은 재료에 있어서는 압연회수가 많은 0.7t의 경우가 1.4t의 경우보다 높은 값을 보이고 있다. 시험편의 종류보다는 두께차에 따른 변화가 크며 SCP 3C의 경우에서 시료방향에

따른 변화가 크게 나타난 점은 특기할 만 하다.

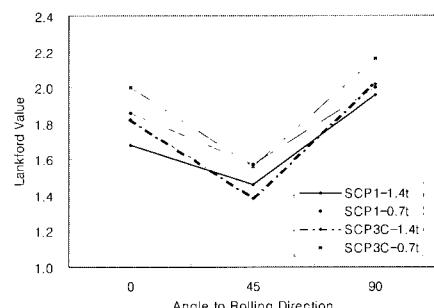


Fig. 11 The variation of R-values for various steel sheets along the angle w.r.t rolling direction

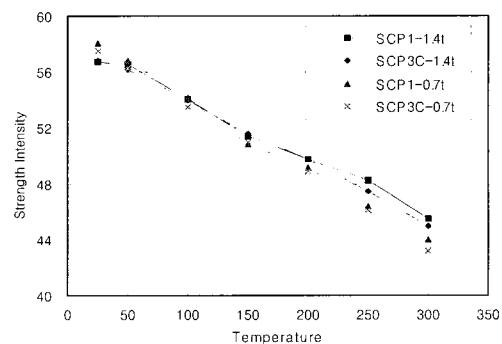


Fig. 12 The variation of strength intensity K (kg/mm^2) along temperature(°C) for the various material

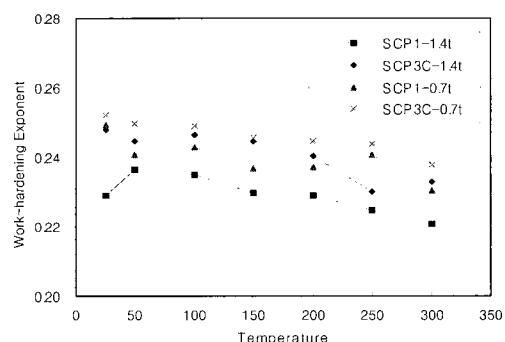


Fig. 13 The variation of work-hardening expo- nent(n) along temperature for the various material

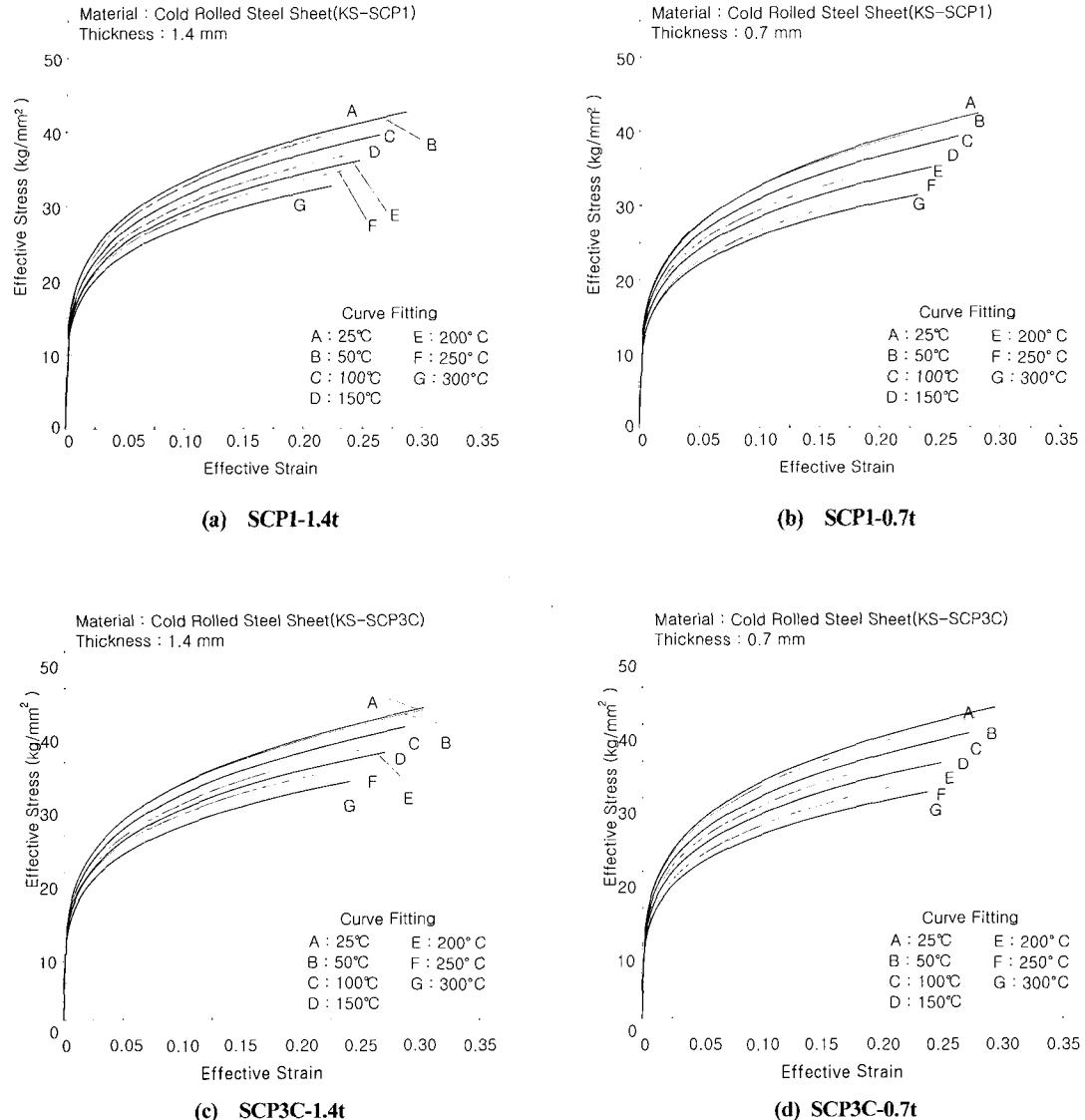


Fig. 14 Flow stress vs. effective strain relationship at various temperature

3.4 소성유동곡선

소성유동곡선은 역경화식($\bar{\sigma} = K\varepsilon^n$)을 사용하였으며 이를 구성하는 강도계수(K)와 가공경화지수(n)를 Table 3에 나타내었으며 이들을 종합하여 Fig. 12 및 Fig. 13에 나타내었다. 여기서 유효보간영역(effective fitting zone)은 시험치와 곡선보간치가 일치하는 변형률 구간을 나타낸다.

전반적으로 온도가 증가함에 따라 강도계수는 거의 반비례하여 단조감소하는 경향을 보이고 있으며 가공경화지수의 경우에는 큰 변화는 없으나 온도가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 실험을 통해 조사된 응력-변형률의 그래프(곡선피팅)를 Fig. 14에 나타내었다. 이 그림은 각 강종에 대하여 응력-변형률의 관계를 온도별로 보간하여 나타낸 그림으로, 온도가 상승함에 따라 같은 변형률에 대하여 유동응력이 작아짐을

보여주고 있다.

Table 3 Strength intensity(K) and work-hardening exponent(n) at various temperature

Material -thick.	Temp. (°C)	K (kg/mm ²)	n	Effective fitting zone
SCP1 -1.4t	25	56.718	0.2291	0.03-0.25
	50	56.543	0.2364	0.03-0.25
	100	54.087	0.2351	0.03-0.24
	150	51.372	0.2297	0.03-0.23
	200	49.754	0.2290	0.03-0.22
	250	48.250	0.2248	0.03-0.21
	300	45.513	0.2207	0.03-0.20
SCP3C -1.4t	25	56.809	0.2480	0.03-0.27
	50	56.216	0.2448	0.03-0.26
	100	53.968	0.2465	0.03-0.26
	150	51.563	0.2447	0.03-0.25
	200	49.774	0.2405	0.03-0.24
	250	47.451	0.2299	0.03-0.225
	300	44.970	0.2330	0.03-0.22
SCP1 -0.7t	25	58.032	0.2493	0.03-0.26
	50	56.804	0.2407	0.03-0.255
	100	54.120	0.2429	0.03-0.243
	150	50.810	0.2367	0.03-0.231
	200	49.146	0.2372	0.03-0.22
	250	46.405	0.2408	0.03-0.21
	300	43.987	0.2304	0.03-0.202
SCP3C -0.7t	25	57.501	0.2522	0.03-0.271
	50	56.244	0.2498	0.03-0.26
	100	53.555	0.2490	0.03-0.25
	150	50.978	0.2458	0.03-0.237
	200	48.838	0.2447	0.03-0.225
	250	46.072	0.2440	0.03-0.214
	300	43.181	0.2377	0.03-0.208

4. 결 론

상온 및 온간성형 영역에 대하여 자동차용 냉연강판의 단축인장시험을 수행하였다. 사용재료의 강종에는 SCP1종과 SCP 3C종을 대상으로 하였으며 시험온도는 온간성형의 범위 이내로 상온에서부터 300°C까지의 범위에서 50°C 간격으로 수행하였다.

인장시험을 통해 인장강도, 연신율, 이방성계수, 소성 유동곡선에 대한 데이터를 추출하였으며 온도별로 데이터시스템을 구성하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 것은 프레스성형에 가장 많이 사용되는 소재의 온간 특성으로, 이러한 특성을 데이터베이스화 하므로써 온간성형 또는 온도의 변화가 수반되는 프레스성형의 해석을 위한 기초자료로서 효과적으로 활용할 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 한국공업 규격, 1974, 금속재료 인장시험 방법(KS B 0802)
- (2) 편집부편, 1989, 프레스 편람. 대광서림, pp.1~67.
- (3) 김재원, 이규배, 이준성, 조명래, 표창률, 1997, 기계 재료학, 희중당, pp.151~201.
- (4) 이항수, 김충환, 전기찬, 김중재, 유동진, 1994, 금형 재료의 열특성이 스템핑에 미치는 영향, 한국소성가 공학회 및 대한금속학회 공동 박판성형심포지움 논문집(박판성형기술의 진보), pp.79~86.
- (5) Robert A. Ayres, 1985, Thermal gradients, strain rare, and ductility in sheet tensile specimens, Metallurgical Transactions A, Vol.16A, pp.37~43.
- (6) Yong H. Kim and R. H. Wagoner, 1987, An analytic investigation of defotmation-induced heating in tensile testing, Int. J. Mech. Sci., Vol.29, No.3, pp.179~194.
- (7) T. Ohwue, H. Takechi and Y. Furuno, 1987, Temperature dependence of tensile properties and draw ability of steel sheets in warm working condition, Journal of JSTP, Vol. 28, No. 314, pp.225~231.
- (8) T. Ohwue, H. Takechi and Y. Furuno, 1990, Temperature dependency of mechanical properties of steel sheets and its application to deep drawing in warm working condition, Advanced Tech. of Plasticity, Proc. 3rd Int. Conf. on Tech. of plasticity, pp.1283~1288.
- (9) 渡部 豊臣, 1987, 局部加熱プレス成形における加熱装置と金型構造, プレス技術, Vol.25, No.9, pp.64~70.
- (10) 武智 弘, 大上 哲郎, 1987, 軟鋼版の青熱強化深絞り加工, プレス技術, Vol.25, No.9, pp.28~35.
- (11) T. Ohwue, H. Takechi and Y. Furuno, 1987, "Deep drawability of square shells in warm working condition", Journal of JSTP, Vol. 28, No. 318, pp.706~711.
- (12) T. Ohwue, T. Katayama and M. Usuda, 1991,

- Formability of high strength steel sheets in warm working condition, IDDRG Working Group Meeting, pisa, Italy, pp.1~7.
- (13) J. O. Kumpulainen, A. J. Ranta-Eskola and R. H. O. Rintamaa, 1983, Effects of temperature on deep drawing of sheet metals, *J. Engineering Materials and Technology*, Vol.105, pp.119~127.
- (14) 김종호, 최치수, 나경환, 1995, 크랭크프레스와 유압프레스에서 스테인리스 강판의 온간드로잉 성 비교, *한국소성가공학회지*, 제4권, 제4호, pp.345~352.
- (15) J. H. Kim, C. S. Choi, B. Y. Jeong and G. H. Lee, Deep drawing of stainless steel in warm working condition using a single crank press", Proc. 4th Int. Con. on Tech. of Plasticity, Beijing, China, pp.1691~1694.
- (16) C. P. Livitsanos and P. F. Thomson, 1975, The optimum forming temperature of transformable austenitic stainless steels, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol.15, pp.117~127.
- (17) 山崎 淳, 1992, アルミニウム板材の温成形法, 塑性と加工, Vol.33, No.375, pp.404~410.