

# 시효 발생한 저탄소 냉연강판의 가공형상 불량 방지를 위한 판재 교정기술 활용

박기철#

## Leveling of Aged Low Carbon Steel Sheets in order to Prevent Shape Defects after Stamping

K. C. Park

(Received January 19, 2015 / Revised April 22, 2015 / Accepted May 6, 2015)

### Abstract

In order to prevent shape defects such as fluting and stretcher strains during press forming of aged low carbon steel sheets, roller leveling conditions for reducing yield point elongation were studied. Yield point elongations of leveled sheets were determined as a function of leveling, which is defined as the plastic fraction or the ratio of plastically deformed part in sheet thickness section to the whole thickness of the sheet. By adjusting this plastic fraction during leveling to more than 78%, yield point elongation in the leveled sheets was reduced so no fluting occurred during subsequent tangential bending. Stretcher strains can be avoided by leveling the sheet to an 84% plastic fraction condition.

**Key Words:** Aging, Fluting, Stretcher Strain, Bending, Stamping, Leveling, Roller Leveler, Shape Defect

### 1. 서론

가전 제품의 외관이나 내관에 사용되는 내지문(후처리) 강판이나 도장강판의 경우, 냉간 압연과 소둔 및 도금 공정을 거친 후에 추가로 수지(resin)나 페인트가 도포된다. 그런데, 수지나 페인트 도포 후에 소부(baking)를 하게 되는데, 이때 강판은 시효(aging)가 촉진되어 상당한 수준의 항복점 현상이 발생하게 된다[1,2,3].

시효가 심하게 발생한 소재로 프레스 가공을 하게 되면 굽힘 변형부에서는 꺾임(fluting), 신장 변형부에서는 스트레처 스트레인(stretcher strain)이 나타나게 된다. 이러한 형상 불량의 대표적인 예를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 접선 굽힘(tangential bending)에서의 꺾임 발생 상황이다.

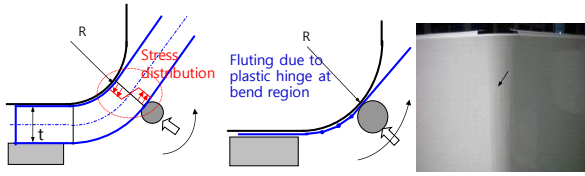
접선 굽힘은 굽힘 다이에 소재를 접선 형태로 접

촉시키는 굽힘 가공법인데, 시효가 크게 발생한 소재에서는 굽힘 부에 소성힌지(plastic hinge)가 형성되어 꺾임이 발생된다. 그리고 스트레처 스트레인은 성형부 주위의 평면에서 Fig. 1(b)와 같이 뒤틀스 밴드(Luders band)가 나타나는 현상이다.

이러한 불량 현상은 롤러 레벨링(roller leveling)과 같은 교정에 의해서 감소시킬 수 있다는 것은 기존의 문헌들[2,3]에 정성적으로 언급이 되어 있으나, 교정량에 대한 정량화와 이것이 형상불량에 미치는 영향에 대한 정량적인 연구결과는 찾아보기가 어렵다.

인장력 작용하에서의 판재 교정인 텐션 레벨러(tension leveler) 기술에 대한 연구는 교정에 필요한 연신을 발생 조건을 해석적으로 도출한 Kinnavy의 연구[4]와 탄소성 조건에서의 굽힘과 펴(bending-unbending) 공정을 수치적으로 해석하는 방법을 연

# Corresponding Author : POSCO Product Application Center, E-mail: parkkc@posco.com



(a) Fluting occurred at tangential bending process



(b) Stretcher strain

Fig. 1 Shape defects of stamped panel due to aged sheet

구하였고 이를 이용한 해석 결과를 실험과 비교하여 교정 공정을 수치해석 할 수 있는 체계를 갖춘 Misaka와 Masui[5]의 연구가 대표적이다. 그리고 인장력이 거의 작용하지 않는 롤러 레벨러에 대해서도 Misaka와 Masui의 연구를 응용하는 활용 사례도 보고되고 있으며, 최근까지 이들의 연구를 응용한 기술들이나 유한요소해석으로 교정을 해석하는 연구들이 진행되고 있다[6~8]. 인장력이 작용하지 않는 조건에서의 교정인 롤러레벨링에 대해서는 주로 후판에 대한 연구 보고가 있었으며, 얇은 박판에 대한 연구 보고는 거의 없는 실정이다. 비록 대상은 후판재에 대한 롤러레벨러 교정 조건 해석기술을 연구한 내용이지만 박판에 대해서도 응용할 수 있는 보고로 Matoba 등[9]의 연구가 대표적이다. 이들은 곡률계수로 표현한 소성변형비의 개념을 도입하였고 롤러레벨러에서의 소재 곡률반경 계산 및 롤의 변형을 고려하는 방법과 교정하중에 대한 예측을 하였다. 이들의 연구는 이후의 연구에 많이 응용되고 있다. 롤러 레벨링 공정에 대한 유한 요소해석 연구도 많지는 않지만 몇 가지 사례들[10,11]이 보고되고 있다.

본 연구에서는 심하게 시효가 발생한 도장 강판에 대하여, 소재를 형상 결함 없이 가공하기 위한, 롤러 레벨러를 이용한 교정 기술에 대하여 실험적으로 검토하였다. 기존에 보고된 레벨러 해석기술을 바탕으로 강판 굽힘부의 꺾임과 신장성형부의 스트레처 스트레인을 방지하기 위한 롤러 레벨러 교정량의 정량화와 이를 이용한 레벨링 기술 활용 방안 에 대한 연구를 수행하였다.

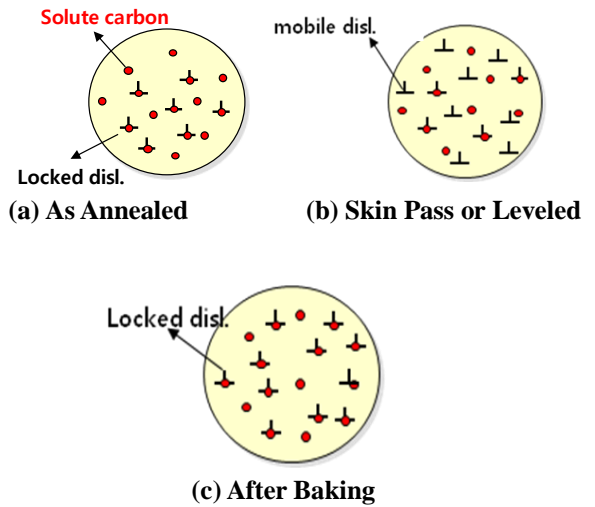


Fig. 2 Microstructure of low carbon steels after annealing, skin pass rolling and baking

## 2. 저탄소 강판의 시효 발생 원리와 레벨러 교정 이론

### 2.1 저탄소강판의 시효 발생 원리

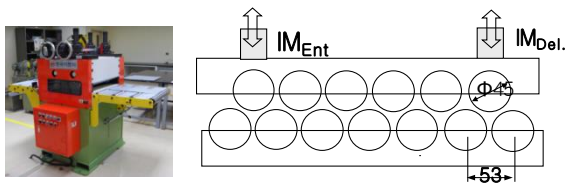
연속 소둔된 저탄소 강판에서 항복점 현상으로 대표되는 시효가 발생하는 이유는 강중에 고용된 탄소나 질소가 전위 주위로 확산하여 전위의 이동을 방해하기 때문으로 알려져 있다[1,12]. 냉간압연 후 연속 소둔된 저탄소강판에는 고용 탄소가 확산되어 전위 주위에 모여든 상태인 코트렐 분위기 (Cottrell atmosphere)가 형성되고[1] 이로 인해서 전위의 이동이 방해 받게 되어 불연속 항복 현상이 나타난다. 스킨패스 압연 등으로 소성변형을 소재에 부여하면 가동 전위가 생성되고 가공 전위의 양이 늘어나면서 연속 항복현상이 나타나게 된다. 그런데, 도장이나 수지 처리 후 소부 과정에서 고용탄소나 질소는 다시 가동 전위 주변에 집적하여 불연속 항복 문제를 발생 시킨다. 이를 개념적인 미세조직으로 나타내면 Fig. 2와 같다[12]. 연속소둔된 상태에서는 강중에 고용된 탄소에 의해서 전위가 모두 고착되어 있으나, 스킨패스 압연이나 레벨링에 의해서 가동전위가 생겨난다. 그러나 수지나 도장 처리 후의 소부과정에서 다시 가동 전위가 고용원소에 고착된 상태가 된다.

가동전위가 고용 원소에 의해 고착되는 현상은 매우 작은 고용 탄소량에서도 가능하므로 저탄소 강판 소부 과정에서는 피할 수 없는 현상으로 알려

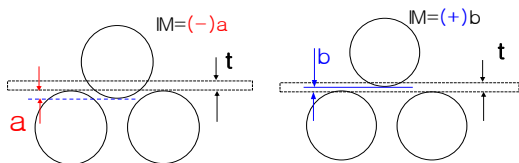
져 있다[1]. 따라서, 소부 후에 적절한 소성변형을 부여함에 의하여 항복점 현상을 감소시켜야 가공중의 형상 불량 발생을 방지할 수 있다[2,3,12].

### 2.2 롤러 레벨러 교정 이론

롤러 레벨러는 인장력이 작용하지 않거나 매우 작게 작용하는 조건에서 다수의 워크 롤(work roll)을 통과하면서 점진적인 변형을 소재에 가해서 형상개선 및 시효가 발생한 소재의 기계적 특성을 개선시킬 수 있다고 알려져 있다[12,13]. 본 연구에서는 실험용 레벨러와 철강 가공 판매점(coil center)에 있는 판재 전단 가공 설비(cut-to-length line)의 레벨러를 이용하여 시효 감소에 대한 레벨러 교정 조건의 영향을 실험적으로 연구하였다. 철강 가공판매점 현장들에서 사용되는 레벨러에 적용하기 전에 실험실에서 교정 조건 설정에 사용한 롤러 레벨러와 레벨러의 작업 조건인 인터메시(intermesh, IM) 정의는 Fig. 3에 나타내었다. 롤러레벨러는 입측에서 상부와 하부 워크 롤에 의해 벤딩 변형을 크게 가하고, 출측에서는 두께 정도의 워크롤 상·하부 간격을 유지하여 판재에 내재되어 있는 형상 불량 및 형상 편차를 감소시켜서 평탄한 판재로 만드는 설비인데, 상부 워크 롤의 최저점과 하부 워크롤의 최고점이 같은 높이에 있는 때를 인터메시 영(zero)이라고 하며, 상·하부 워크롤 간격이 이보다 작아지는 경우가 음수 값의 인터메시가 적용된 것으로 표현한다.



(a) Typical experimental leveler



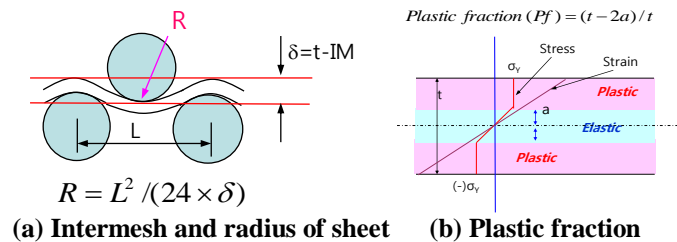
(b) Definition of intermesh

Fig. 3 Roller leveler used for leveling experiment and definition of intermesh

롤러 레벨러에서의 소재 변형은 다수의 워크 롤 사이를 소재가 거처가면서 나타나므로 고려해야 할 인자가 많아서 엄밀하게 변형을 계산하는 것은 어렵다. 일반적으로는 인터메시로 결정된 상부와 하부 롤 사이에서 굽힘 변형을 받는 강판의 곡률반경 (R)은 단순 탄성 굽힘 변형으로 가정하면 재료역학적인 고려로 구할 수 있다. 그리고 Matoba[9]의 연구에서도 롤러 레벨러 변형 해석에 이 식을 사용하였다. 이 식은 Fig. 4(a)에 나타난 워크 롤 사이의 거리(L)와 인터메시(IM) 및 소재 두께(t)의 관계로 다음 (1) 식과 같이 구해진다.

$$R = L^2 / (24 \times (t - IM)) \quad (1)$$

교정 중인 소재의 곡률반경이 가장 작을 때(가장 인터메시 값이 작을 때)로 일반적으로 레벨러 입측의 2번째 또는 3번째 롤)가 소재에 변형이 가장 크게 가해지게 되는데, 이때 소재 전체 두께에 대해서 소성변형을 받는 부분의 면적비를 소성비(plastic fraction)라고 하여 롤러 레벨러 기술 분야에서 사용하고 있다[9,13,14]. 일반적으로 롤러 레벨러의 입측 인터메시로 계산한 이 값으로 롤러 레벨러 교정 조건을 정의[13,14] 하는데, 본 연구에서도 이를 따라 입측 인터메시로 구한 소성비로 레벨링 변형의 크기를 정의하였다.

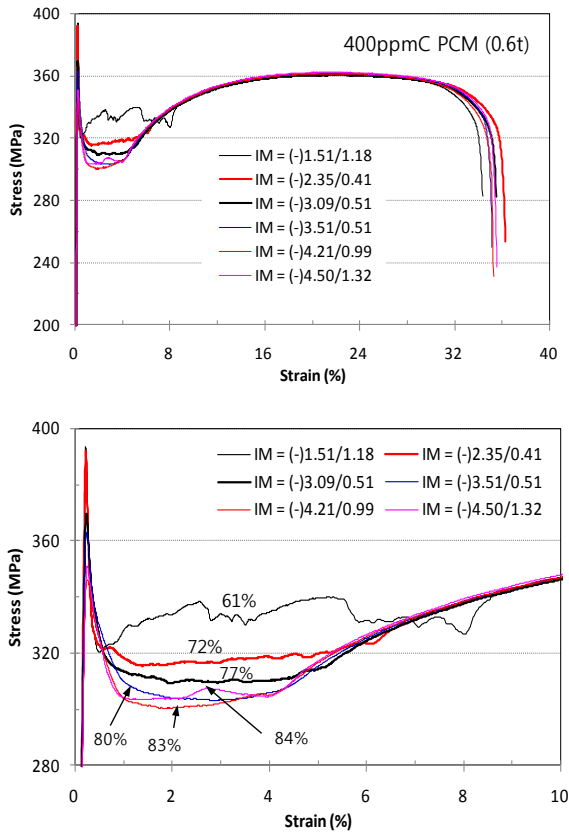


(a) Intermesh and radius of sheet (b) Plastic fraction



(c) Shape defects due to severe leveling

Fig. 4 Definition of plastic fraction, bending radius of sheet during roller leveling and shape defects due to severe leveling



**Fig. 5 Stress-strain curves of leveled sheet (0.04% C) at 6 different plastic fraction conditions. Numbers in legends are “Ent.IM/Del.IM” of tested roller leveler**

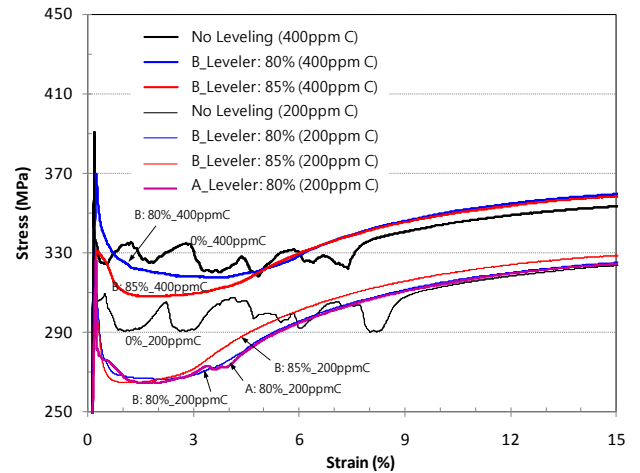
소성비의 일반적인 정의는 Fig. 4(b)에 나타내었다. 이러한 소성비는 위의 (1) 식으로 구해지는 굽힘 변형 중의 소재 곡률반경과 소재의 두께(t), 항복강도( $\sigma_y$ ), 탄성계수(E) 를 이용하며 간단히 구할 수 있으며, 레벨러 입측 인터메시와 소성비의 관계는 다음 (2) 식과 같이 된다.

$$Plastic\ fraction\ (Pf) = 1 - \frac{\sigma_y L^2}{12 \times Et \times (t - IM)} \quad (2)$$

관재 전단 가공설비(cut-to-length line)에 있는 롤러 레벨러에서 과도한 굽힘 변형이 발생하는 경우 나타나는 표면 결함 예를 Fig. 4(c)에 나타내었다.

### 3. 시험 결과 및 고찰

#### 3.1 롤러레벨러 교정에 따른 응력-변형률 선도 변화



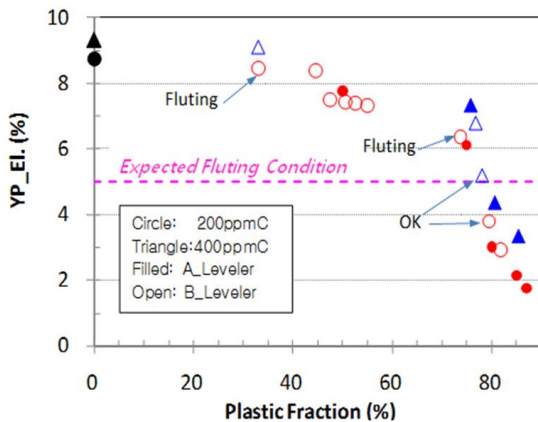
**Fig. 6 Stress-strain curves of 200ppmC and 400ppmC steel sheets at different plastic fraction conditions**

0.6mm 두께의 저탄소(탄소 함량 0.04%) 아연도금 강판으로 제작한 도장강판 (PCM, Pre-Coated Metal)으로 시험한 인터메시에 따른 응력-변형률선도(stress strain curve)의 변화를 Fig.5 에 정리하였다. 교정에 사용한 롤러 레벨러의 상·하 워크 롤 수는 각각 9개와 10개 인데, 워크 롤 사이의 거리(pitch)는 60mm 이고 직경은 55mm 이다. Fig.5 에 나타낸 숫자는 레벨러의 입측/출측 인터메시인데, 입측 인터메시가 -1.51, -2.35, -3.09, -3.51, -4.21, -4.50 은 각각 소성비로는 61%, 72%, 77%, 80%, 83%, 84% 에 해당한다.

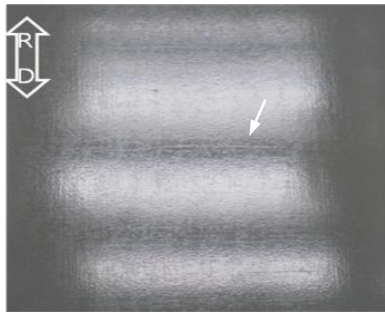
인장 시험은 KS13B 시편에서 10mm/min 속도로 시험하였다. 교정 변형이 작게 부여 되어 항복점 연신이 매우 큰 경우에는 전연신율 (total elongation) 이 낮아지나, 교정이 소성비 70% 이상으로 되어 항복점 연신이 다소 작아지는 경우는 연신율에 큰 차이가 없어지는 것을 알 수 있다.

소성변형비가 80% 미만에서는 5% 이상의 항복점 연신 (yield point elongation) 이 나타나고 있으나 소성비 80% 수준에서는 심한 항복점 현상은 없어져서 항복점연신 4% 이하가 되며, 소성비가 커질수록 점점 안정된 항복 거동을 보이는 것을 알 수 있다.

두가지의 서로 다른 강도 강판(탄소 함량이 0.02%와 0.04% 인 소재)과 두께의 서로 다른 레벨러로 교정 변형의 크기를 다르게 하여 제작한 시편의 응력-변형률 선도의 일부 예를 Fig. 6에 정리하였다. 이 결과에서 소성비와 항복점 연신의 관계를 정리하여 Fig. 7(a)에 나타내었으며, Fig. 3의 롤러레벨러로 변형을 심하게 가하여 교정한 경우에 나타나는 표



(a) Plastic fraction and yield point elongation



(b) Surface defects occurred at leveled sheet when plastic fraction is larger than 85%

Fig. 7 Relation between plastic fraction and yield point elongation, and surface defects due to severe leveling

면 결함의 예를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 소재 강도와 레벨러 설비 구성이 다르더라도 소성비가 동일하다면 유사한 수준으로 교정이 되는 것을 2가지 소재와 2가지 레벨러를 이용한 시험 결과인 Fig. 6의 응력-변형률 선도와 Fig. 7(a)의 소성비와 항복점 연신의 관계에서 알 수 있다.

접선 벤딩에서 꺾임이 발생하지 않기 위해서는 항복점 연신이 5% 미만이어야 한다는 저자의 기존 연구 결과[12]를 참고하여, 실험 결과에서 소성비와 항복점 연신의 관계를 정리한 Fig. 7(a)를 보면, 접선 벤딩에서 소성변형비 78% 이상은 되어야 꺾임과 같은 형상 결함이 없어지게 되는 것을 알 수 있다. 그리고 75% 이상에서는 소성비 증가에 따라서 매우 급격하게 항복점 연신이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 소성변형이 어느 수준 이상이 되면 소성변형에 따른 가동 전위의 증가가 매우 급격해 지는

것을 의미한다. 그리고 소성비 70% 이하에서는 항복점 연신의 변화는 매우 느리게 발생하므로 가공 전위 변동도 크지 않음을 알 수 있다.

한편, 과도한 굽힘변형이 레벨러 입측에서 발생하는 경우는 굽힘 가공 중에 작은 규모의 꺾임이 소재에 나타나는 경우가 있음을 실험실 레벨러에서 심하게 인터메시를 가한 경우의 표면 결함 사진인 Fig. 7(b)에서 알 수 있다. 그리고 이는 생산공정 중에 설치된 레벨러에서 나타난 Fig. 4(c)와 같은 불량과 같은 것으로 보인다. 즉, 소성비가 85% 이상에서 심하게 교정하게 되면 레벨러의 워크 롤 배열과 교정 속도에 따라서는 교정 중에 작은 규모의 꺾임이 발생하여 표면 결함으로 될 수 있으므로 주의하여야 함을 알 수 있다.

### 3.2 롤러 레벨러 교정에 의한 스트레처 스트레인 방지 조건

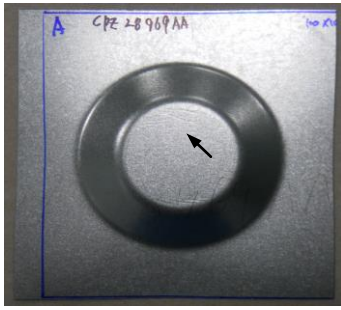
프레스 성형으로 스트레처 스트레인 발생 모사 시험을 하는 방법을 고안하여 부품의 스트레처 스트레인 방지를 위한 교정 조건도출에 활용하였다.

시험의 크기는 100×100mm의 정사각형이며, 컵드로잉을 하는 공구(다이 직경 52.6mm, 다이 곡률반경은 8mm이다. 그리고 펀치 직경은 50mm이며 펀치 곡률반경은 8mm이다.)로 얇은 높이의 드로잉 가공을 실시하였다. 이때 블랭크홀더 하중은 20kN, 윤활은 추가로 도유를 하지 않는 조건으로 시험하였다. 드로잉 깊이에 따라서 가공 면에 스트레처 스트레인이 발생하는 지 관찰하게 된다.

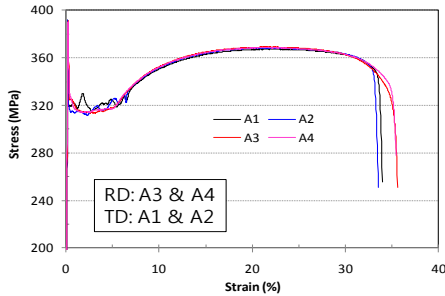
실제로 부품 가공시에 스트레처 스트레인이 발생한 소재로 평가한 결과와 이 소재(0.4t, 수지 후처리된 저탄소강재)의 응력-변형률 선도의 예를 Fig. 8에 나타내었다. 드로잉 높이는 7mm이며, 소재 항복점 연신은 4.9~6.5% 수준으로 상당히 크게 발생하였다. Fig. 8의(a)에 나타난 평가 시험편의 표면에 스트레처 스트레인이 크게 발생해 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9와 같은 성형 높이 1.5mm의 엠보스(emboss) 가공부가 있는 부품의 엠보스 가공 부분에서 스트레처 스트레인이 발생하지 않는 소재(Good Mat.)로 Fig. 8에 나타난 모사 시험을 성형높이 2.0, 2.5 그리고 3.0mm로 시험하는 경우 2.5mm부터는 스트레처 스트레인이 발생하였다. 이때의 압연방향 항복점 연신은 2.2%이다.





(a) Stretcher strain simulated tested specimen



(b) Stress-strain curve of tested sheet

Fig. 8 Stretcher strain occurrence test specimen (drawing height=7mm case) and stress-strain curve of tested sheet

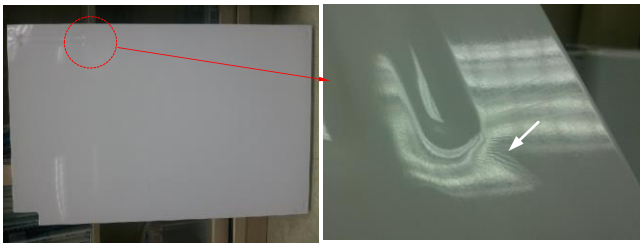


Fig. 9 Stamped part with emboss forming and stretcher strain occurred near the emboss region

교정을 하지 않은 도장강판 평가(test) 소재를 가지고 소성비를 82%, 84%, 86%로 각각 레벨링해서 스트레처 스트레인 모사 시험한 결과를 Table 1에 정리하였다. 도장강판 소재를 84% 소성비로 롤러 레벨러 교정을 하는 경우에 Fig. 9의 부품 가공에서 양호한 소재와 같은 결과를 얻을 수 있을 것임을 Table 1에서 알 수 있다. 그리고 이 84% 소성비로 조건으로 교정한 소재로 부품 가공한 경우 스트레처 스트레인과 같은 형상 불량 발생하지 않고 양호하게 가공되었다.

Table 1의 결과를 보면, 스트레처 스트레인이 문제되는 부품 가공용 소재 선정을 위해서는 아래와 같

Table 1 Comparison of stretcher strain occurrence tendency of good material and test materials leveled at three different plastic fraction conditions

OK & Test Mat.	Dir.	Thick. (mm)	YP (MPa)		$\Delta$ YP (MPa)	YP.El. (%)	Stretcher Strain Test			Y_bending (R15) nose radius (mm)
			Upper	Lower			DH=2.0	DH=2.5	DH=3.0	
Good Mat.	RD	0.605	328.0	270.5	57.5	2.19	GOOD	BAD	BAD	12.9
	TD	0.605	360.4	302.7	57.7	6.08				12.7
Test_82%	RD	0.609	355.1	286.9	68.2	4.53	BAD	BAD	BAD	8.8
	TD	0.609	376.2	307.5	68.8	8.16				7.9
Test_84%	RD	0.610	327.3	276.0	51.2	2.36	GOOD	BAD	BAD	12.8
	TD	0.610	363.0	303.2	59.8	5.59				12.7
Test_86%	RD	0.610	321.3	273.7	47.6	1.91	GOOD	GOOD	BAD	13.2
	TD	0.610	357.7	299.5	58.2	4.04				13.1

은 절차가 필요함을 알 수 있다.

엠보스 가공 부분이 있는 부품 가공에 적용하는 소재에 대해서는 먼저 해당 부품 가공에 적합한 소재의 모사시험 스트레처 스트레인 발생 한계를 알아낸다. 그리고 다양한 소성비 수준의 레벨링 조건으로 시편을 만들어 스트레처 스트레인 모사 성형 시험을 실시한다. 시험 결과를 보고 스트레처 스트레인 방지에 적합한 적절한 수준의 롤러 레벨링 소성비 조건을 구할 수 있다.

그리고 Table 1의 결과에서 엠보스스 성형 높이 (DH) 가 높을수록 요구되는 소성비(plastic fraction) 수준은 증가되는 것도 알 수 있다.

#### 4. 결론

시효가 발생한 저탄소 강판으로 프레스 가공시에 발생하는 접선 굽힘에서의 꺾임과 엠보스 가공되는 부분이 있는 부품에서의 스트레처 스트레인 발생을 방지하기 위한 롤러 레벨러 교정 조건을 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 롤러 레벨러에서의 변형 부가를 소성비로 정량화(표시) 하면, 롤러 레벨러의 종류 및 저탄소 강판의 탄소량이 다른 경우에도, 강판에 발생한 시효가 레벨링 후에 변화되는 정도는 소성비의 함수로 나타낼 수 있었다.

(2) 접선 굽힘 가공 중에 발생하는 꺾임 방지를 위해서는 소성비로 78% 이상의 롤러 레벨링 변형이 더해져야 함을 알 수 있었다. 그리고 75% 이상에서는 소성비 증가에 따라서 매우 급격하게 항복점 연신이 감소하며, 소성비 70% 이하에서는 소성비 변동에 따른 항복점 연신의 변화는 매우 느리게 발생

하였다.

(3) 스트레처 스트레인 방지를 위한 레벨링 변형의 크기는, 스트레처 스트레인 모사 시험으로 해당 부품에 적합한 소재의 스트레처 스트레인 모사시험 한계 높이를 결정하고, 다양한 소성비 수준으로 교정한 검토 소재로 스트레처 스트레인 모사시험을 실시하여 해당 용도에 맞는 적당한 교정 수준(소성비)을 찾을 수 있었다.

(4) 엠보스 가공의 변형 크기가 증가할수록 스트레처 스트레인 방지를 위한 레벨링 변형(소성비)은 커진다.

## REFERENCES

- [1] W. C. Leslie, 1981, The Physical Metallurgy of Steels, International Student ed., McGraw-Hill International Book Company, pp. 74~90.
- [2] R. Pearce 1991, Sheet Metal Forming, IOP Publishing Ltd, New York, pp. 191~204.
- [3] W. F. Fosford, R. M. Caddell, 2007, Metal Forming 3<sup>rd</sup> Ed., Cambridge University Press, NewYork, pp. 289~295.
- [4] M. G. Kinnavy, 1972, Recent Developments in Tension Leveling, Iron and Steel Engineer Year Book, pp. 605~ 610.
- [5] Y. Misaka, T. Masui, 1978, Shape Correction of Steel Strip by Tension Leveller, Transactions ISIJ, Vol.18, pp. 475-484.
- [6] Y. Kimura, M. Ueno, Y. Sodani, 2002, Proc. 44<sup>th</sup> MWSP Conference Proceedings Vol. XL, Iron and Steel Society, Orlando, Florida, USA, pp. 1011~1021.
- [7] K. C.Park, Y. W. Jeon, K. J. Jeong, 1997, Analysis of Deformation and Residual Curvature of Steel Sheets in Strip Process Lines, Trans. Mater. Process., Vol. 6, No. 2, pp. 118~135.
- [8] F. Yoshida, M. Urabe, 1999, Computer-aided Process Design for the Tension Levelling of Metallic Strips, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 89-90, pp. 218~223.
- [9] T. Matoba, M. Ataka, T. Jimma, 1995, Calculation Method of Roller Leveling Conditions for Steel Plates, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 36, No. 418, pp. 1306~1311.
- [10] H. Kano, K. Kenmochi, I. Yarita, 1998, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Steel Rolling : Steel Rolling '98(eds. Makuhari), Iron and Steel Institute of Japan, Chiba, Japan, pp. 313~317.
- [11] K. C. Park, S. M. Hwang, 2002, Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Sheel Sheet, ISIJ International, Vol. 42, No. 9, pp. 990~999.
- [12] K. C. Park, J. B. Yoon, 2007, Analysis on the Mechanism of Fluting in the Bending of Low Carbon Steels, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 4, pp. 317~322.
- [13] K. C. Park, H. J. Kim, K. S. Kim, 2006, Leveling Condition in Cut-To-Length Lines to Produce Low Residual Stress Flat Plate from Hot Rolled Coils, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 4, pp. 311~318.
- [14] E.Thesis, 2002, Everything You Need to Know about Flatteners and Levelers for Coil Processing-Part2: Flattening Solutions and the Anatomy of a Bend Flat-Rolled Metals, The Fabricator, November 7.