

저탄소강판을 이용한 굽힘 가공에서 발생하는 꺾임현상에 대한 발생 기구 해석

박기철[#], 윤정봉¹

Analysis on the Mechanism of Fluting in the Bending of Low Carbon Steel Sheets

K. C. Park, J. B. Yoon

Abstract

In order to investigate the cause of fluting in tangential bending of low carbon steel sheet, an analytic analysis, an experiment and a series of finite element analysis for bending process were done. The fluting in bended sheet was due to the yield point elongation of material. Due to the yield point elongation, unstable plastic hinge was occurred in course of bending of elastic perfectly plastic sheet. According to the analysis and computational results, lower yield point elongation than 5% was required to prevent fluting in 0.5~0.6t sheet in 15~20mm radius bending.

Key Words: Tangential Bending, Fluting, Aging, Yield Point Elongation, Finite element Analysis of Bending, Low Carbon Steel, Plastic Hinge

1. 서론

가전 제품의 외판으로 많이 사용되는 저탄소강판은 일반적으로 냉간 압연후에 소둔 및 도금 공정 및 스킨패스압연을 거친다. 그리고 대부분이 도장강판 제조 라인에서 도장강판으로 만들어진 후에 최종 부품으로 성형된다. 도장강판을 제조하기 위해서는 전처리- primer coating - top coating -형상교정 설비(tension leveling)를 거치게 된다. 그런데 도장후 소부(baking) 중에 약60초 정도를 230°C 정도에 있게 된다. 이러한 고온 과정에서 강판은 시효(aging)가 촉진되어 상당 수준의 항복점 연신(yield point elongation, YPEL) 이 발생하게 된다.

항복점연신이 심하게 발생한 소재로 굽힘 가공을 하는 경우 굽힘가공부 강판에 꺾임이 발생한다. 이러한 꺾임은 일종의 plastic hinge 로 볼 수 있으며 이를 fluting 이라고 부르고 있다. 본 논문에서는 꺾임 발생에 미치는 항복점연신의 영향을 검토하였다. 먼저 해석적으로 꺾임이 발생할 수

있는 조건을 검토하여 발생 가능성을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고 굽힘가공 변형 해석을 통하여 항복점 연신이 거시적으로 관찰되는 꺾임에 미치는 영향을 검토하여 꺾임 현상이 나타나는 항복점 연신의 수준을 도출하였다.

2. 굽힘가공 공정 및 Fluting 발생 조건 검토

2.1 접선굽힘가공과 꺾임 발생

세탁기 frame 가공에 많이 사용되는 접선 굽힘가공 (tangential bending) 방법을 Fig.1 에 나타내었다. 이 방법은 정확한 형상으로 표면결함이 없이 가공 가능하며, 굽힘다이의 반경 (ex: 12mm, 20mm) 과 강판의 두께에 의하여 변형이 결정된다. 0.5t 의 저탄소 도장강판을 이용한 가공에서 꺾임이 발생한 예는 Fig.2 와 같다. 이러한 꺾임 발생은 소재에 발생한 시효(aging) 현상에 따른 것으로 알려져 있으며, 시효가 발생하지 않은 소재에서는 이 현상이 나타나지 않는다.

1. POSCO 기술연구소 박판연구그룹

교신저자: POSCO 기술연구소, E-mail: parkkc@posco.com

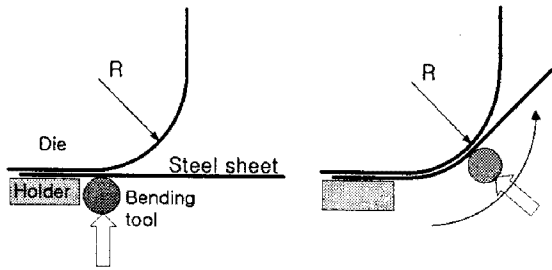


Fig.1 Tangential bending process.

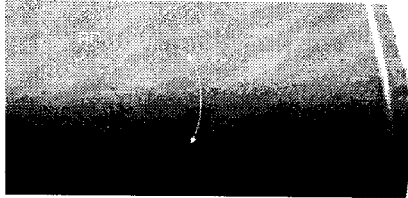


Fig. 2 Fluted steel sheet after bending.

2.2 시효 발생 원리

시효가 발생한 소재에서 나타나는 전형적인 응력-변형률 선도는 Fig.3 과 같다. 변형대가 점진적으로 확산되는 중에는 응력 증가 없이 변형이 발생한다.

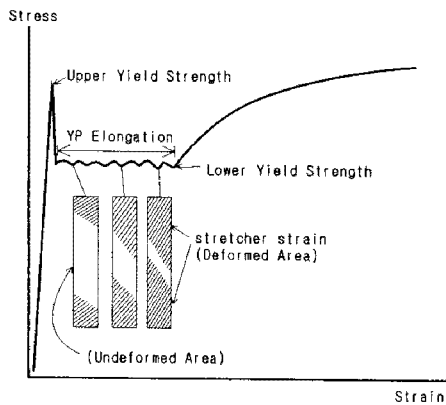


Fig.3 Yield point phenomenon in stress-strain curve.

이러한 불연속 항복현상이 발생하는 원인은 강종의 고용탄소가 전위 주위로 확산하여 전위의 이동을 방해하기 때문으로 알려져 있다[1]. 냉간 압연후 소둔된 저탄소 강판에는 고용탄소가 확산하여 전위 주변에 모여(Cottrell atmosphere) 전위의 이동을 방해하여 불연속 항복 현상이 나타난다. 스킨패스 압연등으로 소성변형을 가하면 새로운 가동전위가 생성되고 가동전위의 양이 충분할 경우 연속항복이 일어나는데 이는 스킨패스의 주목적중 하나이다. 그리고 다시 도장후 소부(baking) 과정에서 고용탄소 또는 질소는 이들

가동전위 주변에 집적하여 Cottrell atmosphere 를 형성하여 불연속항복을 일으키면서 항복강도가 상승하는 소위 bake hardening 을 일으켜 강화가 일어난다. 이를 미세조직으로 나타내면 Fig.4 와 같다.

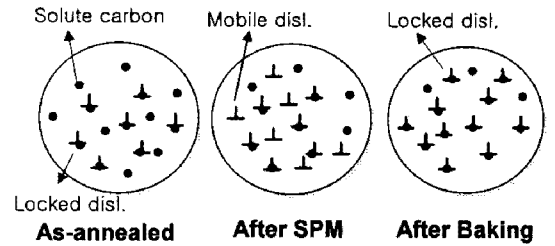


Fig.4 Microstructure of low carbon steels after annealing, skin pass rolling and baking.

가동전위가 고용전위에 고착되는 현상은 매우 작은 농도의 고용탄소에서도 가능하므로 저탄소강판 도장후 소부시에는 피할 수 없는 현상으로 알려져 있다. 따라서 도장후에 인장교정기(tension leveler) 등을 통하여 추가 소성변형을 가하여 불연속 항복현상을 감소 시켜야 한다.

2.3 불연속 항복특성과 꺾임 발생 조건

굽힘에서 변형은 Fig.5 와 같이 bending tool 과 접하는 부분에서 발생한다. 꺾임은 굽힘 진전과 함께 moment 가 충분히 증가하지 못하고 변형이 집중하여 발생하는 현상으로 변형 진전에 따른 모멘트 증가가 아주 작은 경우에 발생한다. (Fig.6)

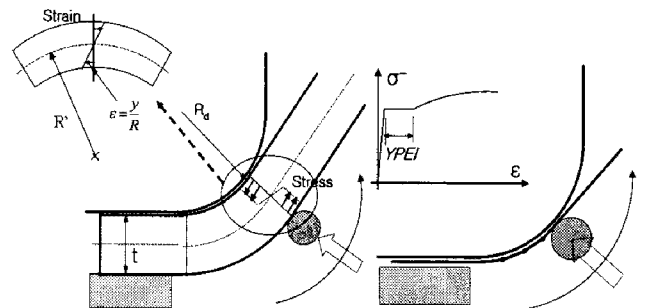


Fig.5 Stress and strain distribution in bended sheet and schematic illustration of fluting occurrence.

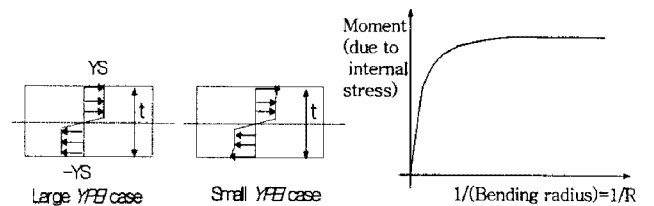


Fig.6 Two cases of stress distribution, moment and curvature relation in bended sheet.

항복점연신 (YPEI) 을 포함한 응력-변형률 관계를 반영한 굽힘부의 응력상태 (Fig.7) 에서 중요한 3가지 변형부를 정리하면 다음과 같다.

- Elastic: $a = (YS \times R) / E$ (1)
- No hardening: $b - a = R \times YPEI$ (2)
- Hardening: $c - b = t / 2 - b$ (3)

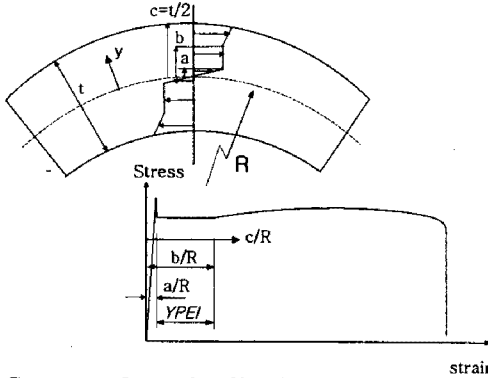


Fig.7 Stress and strain distribution in bended sheet including the yield point elongation effect.

강판 내에서 (2) 식에 표시한 b-a 영역의 두께에 대한 비가 작을수록 꺾임 발생에 대한 저항이 커진다, 따라서 꺾임 발생 조건이 알려져 있는 경우 이를 기준으로 하여 꺾임이 발생할 다른 조건에 대한 검토를 할 수 있다. 다음의 Table 1 은 몇가지 굽힘 반경과 두께조건에서 (b-a)/t 를 계산하고 알려진 fluting 발생 한계조건 (R=20mm, t=0.5mm, 발생기준: YPEI=5%)에 기준한 발생조건과 비교하였다.

Table 1 Ratio of no hardening region in bended sheet.

YPEI (%)	YS (MPa)	R=20, t=0.5		R=20, t=0.6		R=15, t=0.5	
		a	(b-a)/t	a	(b-a)/t	a	(b-a)/t
2	298	0.029	0.80	0.029	0.67	0.022	0.60
3	311	0.030	1.20	0.030	1.00	0.023	0.90
4	324	0.031	1.60	0.031	1.33	0.024	1.20
5	337	0.033	2.00	0.033	1.67	0.025	1.50
6	350	0.034	2.40	0.034	2.00	0.025	1.80
7	363	0.035	2.80	0.035	2.33	0.026	2.10
8	376	0.036	3.20	0.036	2.67	0.027	2.40

Table 1 에서 (b-a)/t 가 2.0 인 경우 꺾임이 발생한다고 보면 굽힘곡률반경(R)이 작을수록 꺾임 발생이 억제되며, 두께가 감소할 수록 불리해

진다. 그리고 항복점연신(YPEI)이 작은 소재인 경우가 유리하다. 그리고 이러한 경향은 현장의 경험적인 사실과 일치하였다.

3. 굽힘부 꺾임 발생 해석

3.1 해석 방법

굽힘부의 꺾임 발생에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 소재 특성은 저탄소강판의 항복응력과 항복점연신(YPEI)의 관계를 고려하여 Fig.8 과 같이 YPEI=4.0%~8.0% 인 경우에 대하여 해석하여 꺾임 발생 특성을 분석하였다.

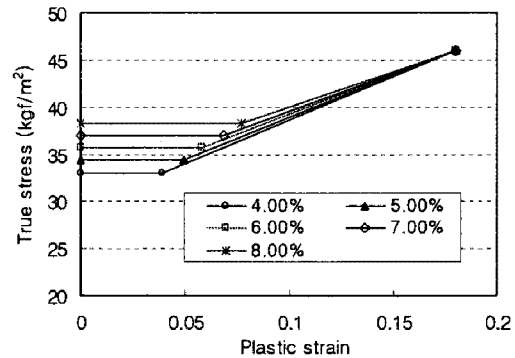


Fig.8 Stress and strain relation used for analysis.

해석은 Fig.9 와 같은 3차원 shell 요소에 2차원 경계조건을 반영하여 수행하였다[2]. Fig.9 의 한쪽 끝을 구속하고 반대 쪽에 moment 를 가하는 방법으로 굽힘 변형을 모사하였다. 항복점연신이 1.8% 발생한 조건의 소재로 0.1%의 두께 불균일을 중앙의 (5mm 간격) 세 요소에 반영하고 해석을 수행한 결과는 Fig.10 과 같다.

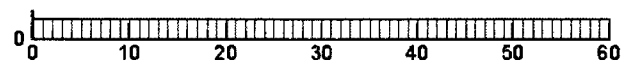


Fig.9 Modeled bending specimen for simulation.

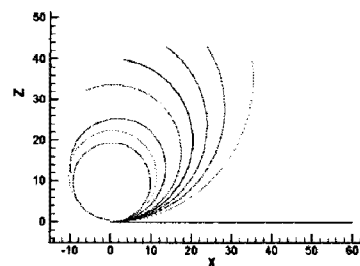


Fig.10 Deformed shape of sheet with 1.8% YPEI and 0.1% irregularity due to end rotation.

3.2 해석 결과

굽힘 진행에 따른 소재 내부 모멘트의 변화를 Fig.11 에 정리하였다. 항복점연신의 크기가 작은 경우에는 moment 진동이 매우 작으나 항복점 연신이 커질수록 moment 불안정에 따른 모멘트 진폭이 커져 꺾임 발생 위험이 높아지는 것을 알 수 있다.

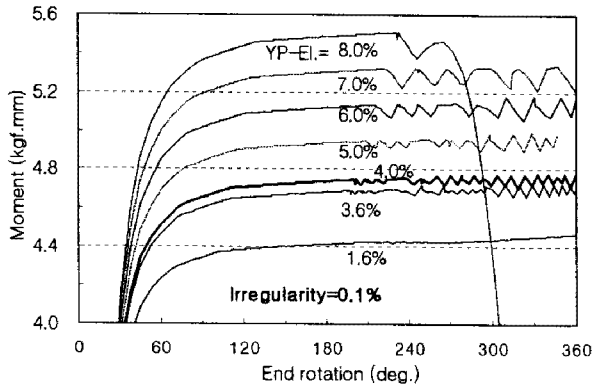


Fig.11 Stress and strain relation used for analysis.

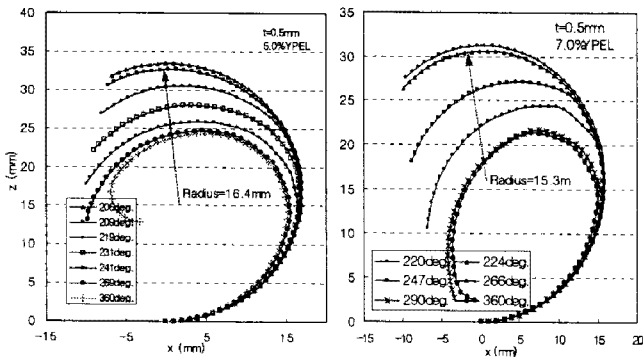


Fig.12 Stress and strain relation used for analysis.

Fig.12 는 굽힘변형 중의 시편형상이다. YPEI 이 5% 이하인 경우 꺾임 발생 크기가 미약하고 추가 변형에 의하여 거의 보이지 않음을 알 수 있다. 그러나 5% 이상의 YPEL 에서는 뚜렷한 꺾임이 발생되고 있음을 알 수 있다.

3.3 실험결과

R=20mm 인 굽힘가공에서 fluting 결함 발생재와 양호재 소재 특성을 Table 2 에 비교하였다. 같은 용도의 소재에서 양호재는 항복점연신 (YPEL) 이 4% 인데 비하여 결함 발생소재는 6% 수준이었다. KS13B 인장시편으로 10mm/min 의 속도로 시험한 인장시험 응력-변형률 선도는 Fig.13 과 같다. 이 결과로부터 항복점 연신이 5% 정도

가 fluting 발생을 결정짓는 인자가 될 수 있으며, 굽힘변형 해석으로부터 얻은 결과가 타당함을 알 수 있다.

Table 2 Mechanical properties of two steel sheets.

Result	dir.	t (mm)	YS (MPa)	YP-EI (%)	TS (MPa)	U-EI (%)	T-EI (%)
OK	RD	0.52	324	3.9	380	20.0	34.9
NG	RD	0.49	336	6.2	375	19.5	33.3

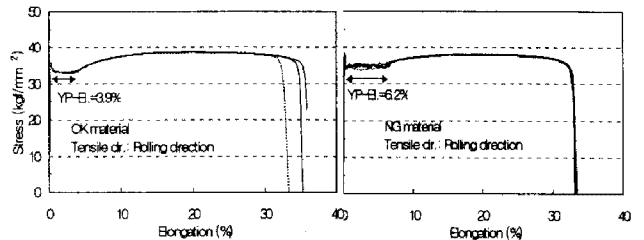


Fig.13 Stress-strain curve of two compaed sheets.

4. 결론

해석적 고찰과 굽힘변형에 대한 간단한 시뮬레이션을 통하여 접선 굽힘가공에서의 꺾임 발생 조건에 대하여 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 접선굽힘가공에서의 꺾임(fluting)은 항복점 연신 현상으로 인하여 굽힘가공 진전에 따른 moment 가 충분히 증가되지 않은 조건에서 발생하는 현상이다.

(2) 항복점 연신을 5% 이하로 관리하는 경우 0.5~0.6mm 두께 저탄소강판으로 반경 15~20mm 정도의 굽힘가공에서 발생하는 꺾임(fluting)은 방지 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] R. Pearce, 1991, Sheet Metal Forming, The Adam Hilger Series on New Manufacturing Processes and Materials, IOP Publishing Ltd, pp. 191 ~ 195.
- [2] 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 Steel Sheet, ISIJ International, Vol.42, No.9, pp.990~999.