

저탄소강판을 이용한 굽힘 가공에서 발생하는 꺾임 현상에 대한 발생기구 해석

박기철[#]· 윤정봉¹

Analysis on the Mechanism of Fluting in the Bending of Low Carbon Steels

K. C. Park, J. B. Yoon

(Received May 10, 2007)

Abstract

In order to investigate the cause and condition 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 related with 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 15~25mm radius bending. The tendency of fluting occurrence was reduced as decreasing the radius of bending, increasing thickness of bended sheet, and removing irregularity in sheet and bending processes.

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

1. 서 론

가전 제품의 외판으로 많이 사용되는 저탄소강판은 일반적으로 냉간 압연 후에 소둔과 도금 공정 및 스키neapolis 압연을 거친다. 그리고 대부분 도장강판 제조 라인에서 도장강판으로 만들어진 후에 최종 부품으로 성형된다. 도장강판을 제조하기 위해서는 전처리-하도(primer coating)-상도(top coating)-형상교정 설비(tension leveling)를 거치게 된다. 그런데 도장 후 소부(baking) 중에 약60초 정도를 230°C 정도에 있게 되며, 이러한 고온 과정에서 강판은 시효(aging)가 촉진되어 상당 수준의 항복점 연신(yield point elongation, YPEL)이 발생하게 된다[1~2]. 항복점연신이 발생하면 소재는 강도 측면에서는 고강도화가 되어 유익한 점이 있는 반면에 시효

가 심하게 발생한 소재로 굽힘 가공을 하는 경우 굽힘 가공된 강판에 불연속적인 변형인 꺾임이 발생한다. 이러한 꺾임은 일종의 소성 힌지(plastic hinge)로 볼 수 있으며 이를 플루팅(fluting)이라고 부르고 있다[3~4]. 부품에 이러한 불균일 소성변형이 발생하면 부품으로서의 기능과 상품성이 없어지게 되므로 가전업체에서는 중요한 결함으로 다루어지고 있다.

이러한 굽힘 가공에서의 꺾임 현상에 대해서는 연구된 논문이 많지 않았다. 용접 캔(3-piece can)의 몸통 성형 시에 항복점 연신과 꺾임의 관계 및 후 공정의 영향은 Aratani[3]와 Tosaka[4]의 논문이 발표 되어 있다. 이 연구들은 실험적으로 0.18t 소재를 45mm 직경으로 굽히는 경우 4.5% 정도의 항복점 연신 이상에서 꺾임이 발생하는

1. POSCO 기술연구소

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

결과를 얻었다. 그러나 가전강판에서 많이 사용하는 0.5~0.6mm 두께의 저탄소강판에 대한 관련 연구는 없었다. 항복점 연신 발생조건 및 발생한 항복점연신의 크기를 제어하는 방법에 대하여는 가전용 강판에 대하여는 아직 불충분 하지만 일부 보고되어 있다[3~5].

본 논문에서는 꺾임 발생에 미치는 항복점연신 크기의 영향을 검토하였다. 먼저 해석적으로 꺾임이 발생할 수 있는 조건을 검토하여 발생 가능성은 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고 굽힘가공 변형 해석을 통하여 항복점 연신이 거시적으로 관찰되는 꺾임 발생에 미치는 영향을 검토하여 꺾임 현상이 가시적으로 나타나는 항복점 연신의 수준을 도출하였다.

2. 굽힘가공 공정 및 꺾임 발생조건 검토

2.1 접선 굽힘가공과 꺾임 발생

세탁기의 프레임(frame) 가공에 많이 사용되는 접선 굽힘가공(tangential bending) 방법을 Fig. 1에 나타내었다. 이 굽힘 가공 방법은 정확한 형상으로 표면결함이 없이 가공이 가능하여 대부분의 가전제품 조립라인에서 사용되고 있다. 이 가공은 굽힘이다이(bending tool) 반경과 강판의 두께에 의하여 변형이 결정되는 특성이 있다. 그리고 굽힘 부にく임 발생 문제는 상대적으로 굽힘 반경이 큰 세탁기에서 문제가 많이 발생한다고 업계에서는 보고되고 있다. 세탁기의 경우는 모델마다 다르나, 굽힘이다이의 반경이 12~25mm 등의 수준으로 상당히 크다.

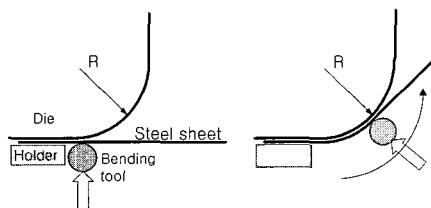


Fig. 1 Tangential bending process

두께가 0.5mm인 저탄소 도장강판을 이용한 가공에서 꺾임이 발생한 예는 Fig. 2와 같다. 일정한 규칙적인 간격으로 굽힘 변형이 집중하여 꺾임흔적을 볼 수 있다. 이러한 꺾임 발생은 소재에 발생한 시효(aging) 현상에 따른 것으로 알려져 있으며, 시효가 발생하지 않은 소재에서는 이 현상

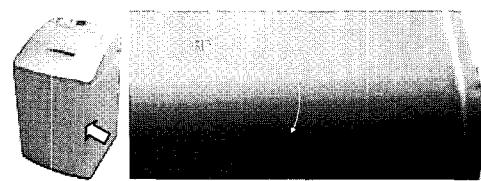


Fig. 2 Fluted steel sheet after bending

이 나타나지 않는다. 그리고 가공 시에 특정한 강판에서 두께 및 곡률반경에 따라서 발생하는 경우도 있고 발생하지 않는 경우도 있다고 한다.

2.2 저탄소강판의 시효 발생 원리

시효가 발생한 소재에서 나타나는 전형적인 응력-변형률 선도는 Fig. 3과 같다. 변형 영역이 점진적으로 확산되는 중에는 항복점 연신 구간에서는 응력 증가 없이 변형이 발생한다.

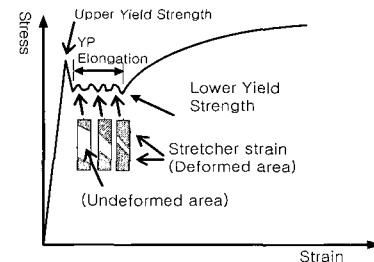


Fig. 3 Yield point phenomenon in stress-strain curve

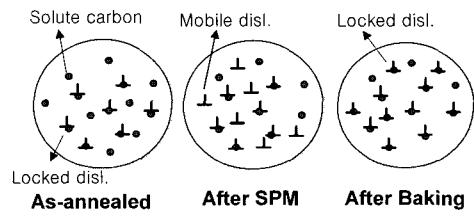


Fig. 4 Microstructure of low carbon steels after annealing, skin pass rolling and baking

이러한 불연속 항복현상이 발생하는 원인은 강중의 고용탄소가 전위(dislocation) 주위로 확산하여 전위의 이동을 방해하기 때문으로 알려져 있다 [1~2]. 냉간압연 후 소둔된 저탄소 강판에는 고용탄소가 확산하여 전위 주변에 모여(Cottrell atmosphere) 전위의 이동을 방해하여 불연속 항복 현상이 나타난다. 스키드 퍼스(skin pass) 압연 등으로 소성변형

을 가하면 새로운 가동전위(mobile dislocation)가 생성되고 가동전위의 양이 충분할 경우 연속항복이 일어나게 된다. 그리고 다시 도장 후 소부 과정에서 고용탄소 또는 질소는 이들 가동전위 주변에 집적하여 코트렐분위기(Cottrell atmosphere)를 형성하여 불연속항복을 일으키면서 항복강도가 상승하는 소위 소부경화(bake hardening) 현상이 발생하게 된다. 이를 미세조직으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

가동전위가 고용전위로 고착되는 현상은 매우 작은 농도의 고용탄소에서도 가능하므로 저탄소 강판 도장 후 소부시에는 피할 수 없는 현상이다. 따라서 도장 후에 인장교정기(tension leveler) 등을 통하여 추가 소성변형을 가하여 불연속 항복현상을 감소시켜야 한다. 저탄소 강판 가공 시에는 굽힘 가공뿐만 아니라 성형성 확보를 위하여도 가공 전에 강판에 적절한 방법으로 소성변형을 부여할 것이 권장되고 있다[3~6].

2.3 불연속 항복특성과 꺾임 발생 조건

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

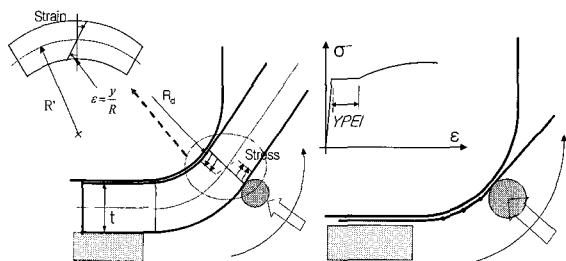


Fig. 5 Stress and strain distribution in bended sheet and schematic illustration of fluting occurrence

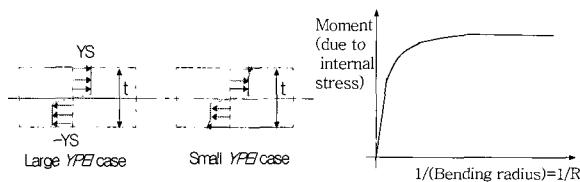


Fig. 6 Two cases of stress distribution, moment and curvature relation in bended sheet

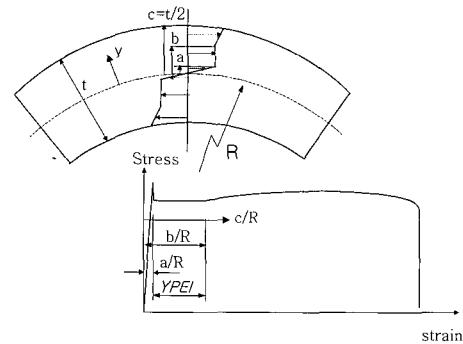


Fig. 7 Stress and strain distribution in bended sheet including the yield point elongation effect

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

$$\text{Elastic: } a = (YS \times R)/E \quad (1)$$

$$\text{No hardening: } b - a = R \times YPEI \quad (2)$$

$$\text{Hardening: } c - b = t/2 - b \quad (3)$$

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 조건을 예측할 수 있다. Table 1 은 몇 가지 굽힘 반경과 두께조건에서 $(b-a)/t$ 를 계산하고, 보고된 굽힘부 꺾임(플루팅) 발생 한계조건($R=20mm$, $t=0.5mm$, 발생기준: $YPEI=5\%$)에 기준한 발생조건과 비교하였다.

Table 1 Ratio of no hardening region in bended sheet and fluting limit

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 1에서 $(b-a)/t$ 가 2.0인 경우 꺾임이 발생한다고 가정하면, 굽힘 곡률반경(R)이 작을수록 꺾

임 발생이 억제되며, 두께가 감소할 수록 불리해진다. 그리고 항복점연신(YPEL)이 작은 소재인 경우 유리하다. 그리고 이러한 경향은 현장에서 알려진 경험적인 사실과 일치하고 있다.

3. 굽힘부 꺾임발생 해석

3.1 해석방법

굽힘 부의 꺾임 발생에 대한 다양한 조건에서의 검토를 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 사용한 저탄소강판의 경우 도장 전과 후의 인장 강도는 380MPa 수준으로 일정하나, 항복강도는 시효가 발생할수록 증가하여 항복점 연신과 일정한 관계를 가진다. 이러한 저탄소강판의 항복응력과 항복점연신(YPEL)의 관계를 고려하여 Fig. 8과 같이 $YPEL=4.0\% \sim 8.0\%$ 인 경우에 대하여 고려하였으며, 해석적으로 꺾임 발생 특성을 분석하였다.

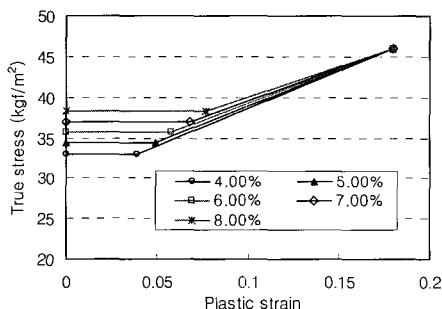


Fig. 8 Stress and strain relation used for analysis

유한요소 해석은 탄소성 구성방정식을 반영한 대변형 해석이 가능한 프로그램을 사용하였다[7]. Fig. 9와 같은 3차원 shell 요소에 2차원 경계조건을 반영하여 수행하였다. 요소의 길이는 1mm이며 전체 시편의 길이는 60mm이다. 소성변형에서의 비선형적 응력-변형률 관계를 정확히 반영하기 위하여 21개의 두께 방향의 적분점을 사용하였다. Fig. 9의 한쪽 끝을 구속하고 반대 쪽에 변위로 회전(rotation)을 가하는 방법으로 굽힘 변형을 모사하였다. 임의의 지점에서 발생하는 불안정 현상을 방지하고 공정 중에 있는 불완전성을 반영하기 위하여 길이 중앙의 요소와 여기에 5mm 떨어진 요소에 대하여 두께를 0.1% 감소시킨 조건으로 해석하였다. 그리고 불균일 크기 영향을 알아보기 위하여 불균일 정도가 0.2%인 경우도 고려하였다.

항복점연신이 1.8% 발생한 조건의 소재로 0.1%

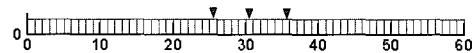


Fig. 9 Modeled bending specimen for simulation

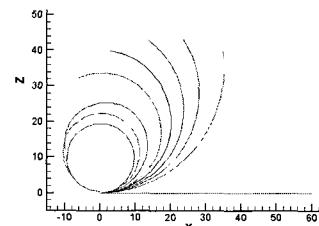


Fig. 10 Deformed shape of sheet with 1.8% YPEL and 0.1% irregularity due to end rotation

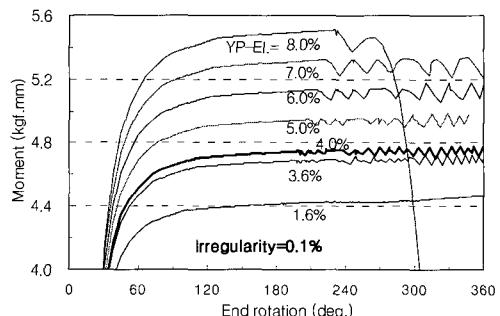


Fig. 11 Relation between moment and curvature of bending process for elastic-plastic sheet

의 두께 불균일을 중앙의(5mm 간격) 세 요소에 반영하고 해석을 수행한 결과는 Fig. 10과 같다. 항복점 연신이 작은 경우는 아무 문제없이 굽힘 형상이 매우 매끈하게 가공이 되고 있음을 알 수 있다.

3.2 해석결과

굽힘 진행에 따른 소재 내부 모멘트의 변화를 Fig. 11에 정리하였다.

모멘트 변화와 해석 시편의 변형을 관찰하면, 굽힘에 따른 모멘트의 변화에서 가장 먼저 일어나는 물결 모양의 모멘트 불안정 시점이 꺾임 발생 시점임을 알 수 있다. 이러한 꺾임 발생 시점은 항복강도가 낮을수록 빨라지나, 꺾임의 크기는 항복점연신이 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다. 이는 항복점연신이 증가할수록 항복강도가 커져서 탄성변형 부분의 영역이 넓어져 모멘트의 증가가 지속적으로 나타나므로 꺾임발생 시점이 늦어지거나, 꺾임 발생 후 항복점 연신 구간에서는

변형이 진행되어 충분한 모멘트 증가를 나타내는 시점까지 소요되는 변형이 커져서 꺾임의 크기는 증가하기 때문으로 볼 수 있다. 즉, 항복점연신의 크기가 작은 경우에는 모멘트 진폭이 매우 작으나 항복점 연신이 커질수록 모멘트 불안정에 따른 진폭이 커져 꺾임 발생 위험이 높아진다고 볼 수 있다. Fig. 12는 굽힘 변형 중의 예측한 시편 변형 형상이다. 항복점연신(YPEL)이 5%이하인 경우 꺾임 발생 크기가 미약하고 추가 변형에 의하여 거의 보이지 않음을 알 수 있다. 그러나 5% 이상의 YPEL에서는 뚜렷한 꺾임이 발생되고 있음을 시각적으로 알 수 있다.

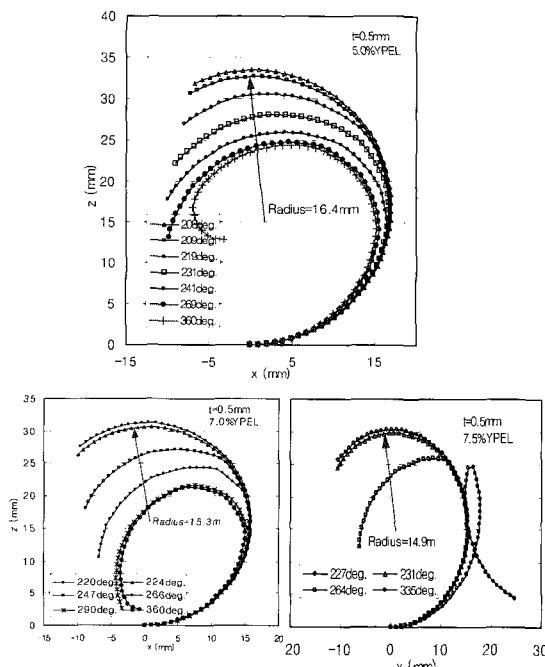


Fig.12 Deformed shape due to end rotation of sheet

꺾임(fluting)현상에 미치는 두께의 영향을 보기 위하여 두께를 달리한 소재에 대하여 동일 비율의 불균일을 반영하여 굽힘 변형을 해석 하고 Fig. 13 에 정리하였다.

두께가 두꺼워 질수록 꺾임 발생은 빨라지나 그 크기는 작아지는 것을 볼 수 있다. 꺾임 발생이 빨라지는 것은 두께가 두꺼울수록 항복점 연신 구간에 진입이 빨라지기 때문이며, 그 정도가 작아지는 것은 추가변형에 의하여 항복점 연신 구간을 벗어나는 것이 또한 빨라지기 때문으로 생각된다. 0.6t 에 비하여 0.7t 강판의 경우는 꺾임

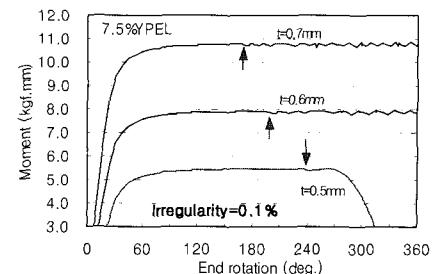


Fig. 13 Relation between moment and curvature of bending sheets with different thickness

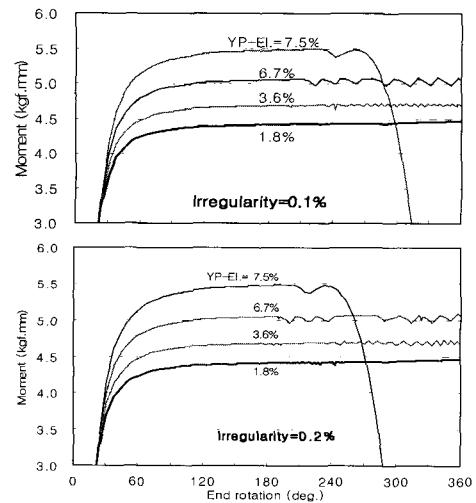


Fig.14 Relation between moment and curvature of bending process for elastic-plastic sheet at 0.1% and 0.2% thickness irregularities

발생 정도가 매우 미약하여 관찰하기가 용이하지 않을을 알 수 있다.

Fig. 14 에는 두께 불균일이 0.1%인 경우와 0.2%인 경우에 끝 단에 작용시킨 회전과 이에 따른 모멘트 변화를 나타내었다. 불균일의 증가에 따라서 꺾임 발생 시점이 빨라지는 것을 알 수 있다. 따라서 굽힘 가공 시에 부분적인 모멘트 불균일 또는 진동 등의 발생을 줄일 수 있는 대책이 필요함을 알 수 있다.

3.3 시험결과 비교

굽힘부 반경이 20mm인 경우에 플로팅이 발생한 소재와 양호한 소재의 기계적 특성을 Table 2에 비교하였다. 같은 용도의 소재에서 양호재는 항복점연신(YPEL)이 4%인 데 비하여 결함 발생소재는

6% 수준이었다. KS13B 인장시험으로 10mm/min의 속도로 시험한 인장시험 응력-변형률 선도는 Fig. 15와 같다. 이 결과로부터 항복점 연신이 5% 정도가 플루팅 발생을 결정짓는 인자가 될 수 있으며, 굽힘변형 해석으로부터 얻은 결과가 타당함을 알 수 있다.

Table 2 Mechanical properties of two steel sheets

Fluting	dir.	t (mm)	YS (MPa)	YP-EI (%)	TS (MPa)	U-EI (%)	T-EI (%)
No Fluting	RD	0.52	324	3.9	380	20.0	34.9
Occurred	RD	0.49	336	6.2	375	19.5	33.3

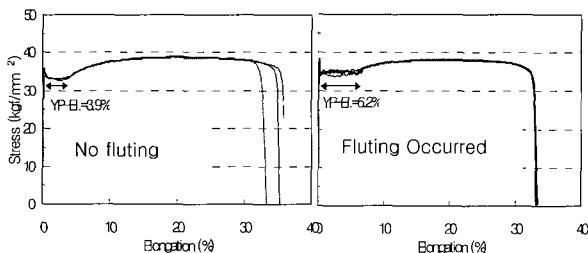


Fig. 15 Stress-strain curve of two compared sheets

4. 결 론

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

(1) 접선 굽힘가공에서의 굽힘부 꺾임(플루팅) 발생은 항복점연신 현상으로 인한 가공경화 능력 부족으로 발생한 것으로 굽힘 가공 진전에 따라서 모멘트가 충분히 증가되지 않은 조건에서 발생하는 현상이었다. 해석적으로 도출한 플루팅 발생 조건을 통하여 굽힘 곡률반경(R)이 클수록, 두께가 감소할수록, 그리고 항복점연신(YPEL)이 증가할수록 꺾임 발생이 용이함을 알 수 있었다.

(2) 0.5~0.6mm 두께의 저탄소강판으로 반경 15~25mm 정도로 굽힘 가공하는 경우에 발생하는 꺾임(fluting)은 항복점연신이 5%이하에서는 발생 크기가 미약하고 추가 변형에서 거의 보이지 않을 정도가 되었으나, 5%이상의 항복점연신 소재에서는 꺾임의 크기가 커서 시각적으로 관찰되는 수준이며 추가 변형에 의한 꺾임 크기 감소도 미약

하였다.

(3) 강판 특성 및 가공공정 중에 존재하거나 가해지는 불균일을 줄일수록 굽힘 가공에서의 꺾임 발생을 줄일 수 있음을 두께 불균일의 크기를 달리한 해석 결과에서 알 수 있었다. 그리고 강판이 두꺼울수록 얇은 경우에 비해 빠른 시점에 꺾임이 발생하지만 시각적으로 보일 정도의 큰 꺾임은 방지될 수 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서는 소재의 항복점연신 현상을 거시적인 인장시험에서의 응력과 변형률 관계와 실제 굽힘 가공과는 다소 차이가 있는 소재와 금형의 접촉을 고려하지 않는 간단한 방법으로 굽힘부 꺾임 발생을 해석하였다. 그러나 좀더 엄밀한 굽힘부 꺾임 발생조건을 연기 위해서는 항복점연신 현상이 고려 가능한 구성방정식을 이용하고 좀더 실제적인 가공 공정을 반영한 해석이 추가적으로 필요하다.

참 고 문 헌

- [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, The Adam Hilger Series on New Manufacturing Processes and Materials, IOP Publishing Ltd, pp. 191~195.
- [3] M. Aratani, A. Tosaka, O. Furukimi, T. Obara, H. Kuguminato, 1997, The Effect of Deformation Conditions on the Occurrence of Fluting at 3-Piece Can Body Making, 鉄と鋼, Vol.83, No.4, p. 251.
- [4] A. Tosaka, M. Aratani, H. Kuguminato, 1995, Thin-Gage and High-Strength N-added High-Strength Tin Mill Blackplates with Good Canning Properties, 川崎製鉄技報, Vol.27, No.3, pp. 169~176.
- [5] 阿部光延, 1997, 材質面からみたスキンパスとレベラ-の差異と問題点, 第171回塑性加工ツツボヅウム(レベラ-とスキンパスミルの形状矯正技術の現状と問題), pp. 11~18.
- [6] 太田哲, 1989, 프레스가공기술 매뉴얼, 기전연구사, p. 32.
- [7] 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.