

대변형 쉘 요소를 이용한 박 강판 형상교정 공정의 탄소성 유한요소 해석

박기철*, 황상무**

Analysis of Leveling Process of Sheet Steels by Elastic-Plastic Large Deformation Shell Elements

K.C. Park*, S.M. Hwang**

Abstract

For the analysis of leveling process by the 3-dimensional elastic-plastic finite element method, a finite element analysis program modeling large deformation of shell has been developed. This program for analyzing large deformation of sheet during leveling includes spring-back analysis as well as efficient contact treatment between sheet and rolls of leveler. This is verified by the simple leveling experiment with 5 rolls at laboratory. Besides the leveling examples, problems within the category of large strain and rotation, such as 3-dimensional roll-up and gutter occurrence at continuous bending-unbending process are also tested for verification of the program. The residual curvatures of strip predicted by finite element analysis are within 20% error range of the experiment. The formation and direction of anticlastic curvature or gutter during bending-unbending under tension is predicted and this agrees with the experimental results.

Key Words: Finite element analysis, Spring-back; Leveling, Roller leveling; Gutter, Anticlastic curvature

1. 서 론

철강소재를 많이 사용하는 자동차, 가전제품, steel can 등의 다양한 용도에서 원가절감과 경량화를 목적으로 얇고 강한 소재 적용이 급격하게 진행되고 있다. 이와 함께 가공공정의 자동화 및 고속화에 따라서 양호한 형상 (Wave 나 만곡이 작은 상태) 의 강판이 요구되고 있다. 그러나 얇고 강도가 강한 박판 일수록 제조공정에서 형상교정(leveling)이 어려우며, 가공단계에서는 스프링 백이 크고 연성이 작으

므로 최적 가공 조건을 잡기가 어려운 문제가 많이 발생하고 있다.

본 논문에서는 이러한 박판 가공 및 process line (특히 레벨링) 에서의 소재 변형 및 탄성 복원에 따른 스프링 백 문제 등의 해결에 이용이 가능한 유한요소해석 프로그램을 개발하고, 몇 가지 문제에 대한 그 적용 연구를 수행하였다. 레벨링 공정해석에 적합하도록 응력 해석이 정확하고, 편리한 접촉 처리 및 구성방정식의 반영이 효과적으로 가능한 그리고 해석 정밀도가 높은 스프링 백 해석 알고리즘을 포함하는 성형해석 프로그램을 개발과 그 적용 예를 정리하였다.

* POSCO 기술연구소 박판연구그룹

** 포항공과대학교 기계공학과

2. 대변형 셀 요소를 이용한 유한요소 수식화

2.1 변형의 표현 방법

스트립의 굽힘변형 효과를 정확히 반영하고, 모델링을 단순화하기 위하여 삼차원 셀(shell) 요소를 사용하였다. 사절점 셀 요소의 형상과 변위의 표현은 변형된(degenerated)셀 요소에 대한 Hughes⁽¹⁾의 방법을 사용 하였다.

2.2 구성방정식

탄-소성 속도 구성 방정식을 대변형 셀 요소에 사용하였다. 응력의 성분은 회전하는 셀의 면내 좌표계 (lamina basis) 에 대하여 표시하였으며, 면내좌표계(lamina basis)의 3-방향으로 수직응력이 영인 조건을 부과하였다. 변형률속도 형태의 Prantl-Reuss 구성방정식에서 응력과 변형률속도의 관계는 $\dot{\tau}_{ij} = C_{ijkl} D_{kl}$ 과 같이 적용하였다. \mathcal{K} 는 Kirchhoff 응력의 Jaumann 미분치이며, D 는 변형률속도이다. Kirchhoff 응력은 접선강성이 대칭 행렬이 되도록 하기 위해 도입한 것이나, 개정 라그랑지안 방법(updated Lagrangian formulation)에서는 이것이 Cauchy 응력과 거의 같다고 보아 이를 Cauchy 응력으로 대체하였다.

시간 증분에 따른 응력을 계산하기 위하여, 식 (1) 을 시간 t_{n+1} 의 면내 좌표계에 대하여 적용하고, 시간 t_n 면내 좌표계에 대한 응력성분은 시간 t_{n+1} 의 면내 좌표계에 대하여 표현하였다. 이 방법은 증분적으로 객관적(incrementally objective) 이라고 알려져 있으며⁽²⁾, 요소와 함께 회전하는 면내 좌표계를 사용하는 경우에 효율적으로 활용할 수 있다.

2.3 유한요소 모델링

탄소성 대변형 문제의 비정상상태 수식화를 updated Lagrangian formulation 으로 하였다. 변형하는 스트립, V, 에는 외력(traction) \bar{t}_i 이 표면 S_i 의 S_{t_i} 에, 변위 $u_i = \bar{u}_i$ 가 표면 S_u 의 S_{u_i} 부분에 작용하고 있다. 여기서는 이러한 면 중에서 접촉 경계조건이 적용될 수 있는 면을 S_c 라고 하고 따로 처리하기로 하며, 이는 바로 롤과 스트립이 접촉하는 면이다. 접촉 경계면에서는 쿨롱 마찰을 고려하였다.

시간 $t = t^{(n+1)}$ 의 변형을 해석하기 위하여, n 번째 시간 증분의 i 번째 반복계산 단계, (n, i)단계,가 끝난 시점에서 (n, i) 에 기초한

(n, i+1) 형상에 대한 지배방정식은 (1)식과 같다.

$$\frac{\partial T_{ij}^{\zeta(n,i+1)}}{\partial x_i^{\zeta}} = 0 \quad \text{in } V^{\zeta} \quad (1)$$

$$T_{ij}^{\zeta(n,i+1)} n_j^{\zeta} = \bar{t}_j \quad \text{on } S_{t_j}^{\zeta}; \quad u_i^{(n+1)} = \bar{u}_i^{(n+1)} \quad \text{on } S_{u_i}^{\zeta}$$

$$u_i^{(n,i+1)} n_{m_i}^{\zeta} = \bar{u}_i^{(n,i+1)} n_{m_i}^{\zeta} \quad \text{on } S_{c_m}^{\zeta} \quad \text{where } \zeta = t^{(n,i)}$$

T_{ij}^{ζ} 은 $t=\zeta=t^{(n,i)}$ 에 기초한 공칭응력(1st Piola-Kirchhoff stress) 이며, n_i^{ζ} 는 $S_{t_i}^{\zeta}$ 면에서의 수직 단위벡터이다. 그리고 $n_{m_i}^{\zeta}$ 는 박판과 접촉하는 tool 면에 수직인 단위벡터이다. 하중 및 변위경계는 바로 수식화에 반영될 수 있으나, 접촉경계조건의 경우는 penalty method 를 이용하여 하중경계조건으로 처리하였다.

Tool 면은 접촉 처리의 일관성과 간편성을 이용하기 위하여 유한요소로 처리하였다. Benson 과 Zhong⁽³⁾ 에 의하여 제안된 방법을 이용하여 접촉점 탐색과 접촉이 발생한 strip 절점에 대한 접촉력 계산을 수행하였다.

지배방정식의 적분형 (weak form) 에 대한 발산정리(divergence theorem) 을 이용하여 변형 및 spring back 과정의 수식화를 하였다.⁽³⁾

3. 검증 및 해석 예제

3.1 Anticlastic curvature 발생 해석

3.1.1 삼차원 탄성 roll-up

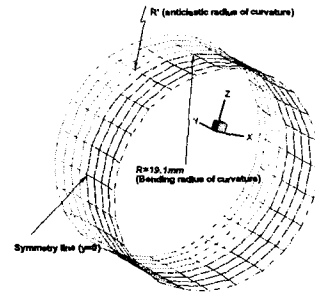


Fig.1 Deformed shape of sheet with $\nu=0.49$, when on end is rotated 2π .

유한한 폭을 갖는 박판이 순수 굽힘변형을 받아 곡률반경 R 로 변형하면, Poisson's ratio 에 의하여 anticlastic curvature 가 발생하며, 선형 탄성이론에서 그 크기는 $R' = R/\nu$ 과 같다. R 은 굽힘곡률반경, R'

는 anticlastic radius of curvature, 그리고 ν 는 Poisson's ratio 이다.

해석에 고려한 Poisson's ratio 는 0.0, 0.3 그리고 0.49 이다. 모델링에는 24×4 개의 요소가 사용되었다. 모델링에서 symmetry 조건이 $y=0$ 선에 부과되었으며, $x=120\text{mm}$ 선에 2π 의 회전을 가하였다. Fig.1 은 Poisson's ratio 가 0.49 인 경우에 끝 단이 1 회전한 경우의 확대한 박판 모양이다. 굽힘변형에 의한 anticlastic curvature 의 발생을 명확히 볼 수 있다.

Fig.2 는 plate 길이 중앙의 단면 형상을 정리한 것이다. Anticlastic curvature 는 Poisson's ratio 가 커질수록 증가한다. 그런데, anticlastic curvature 의 크기가 선형 탄성 식에서 예측되는 값에 비하여 해석으로 구한 값이 매우 작다. 굽힘변형에 동반한 기하학적 비선형성의 영향으로 인한 것임을 Fig.3 에서 알 수 있다. 박판의 끝 단을 1 회전시키는 데 소요되는 모멘트가 Poisson's ratio 가 영이 아닌 경우에는 anticlastic curvature 에 의하여 매우 커지는 현상에서 알 수 있다.

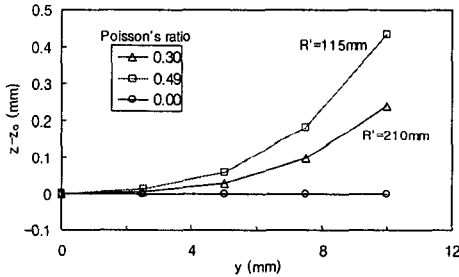


Fig.2 Shape of anticlastic curvature at middle of sheet when end point rotated one revolution.

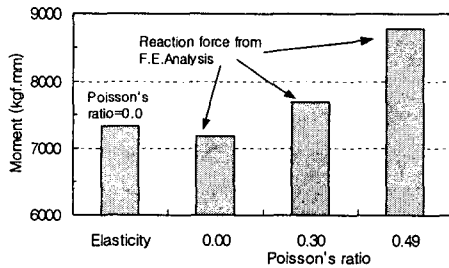


Fig.3 Reaction moment invoked when bending a sheet by rotating one end up to 1-revolution.

3.1.2 연속 굽힘 공정에서의 소성 굽힘과 Gutter 발생

박판 제조 공정 중 소성 굽힘에 따른 anticlastic curvature 인 gutter 발생 예측에 적용 가능성을 보기 위하여 실제 용융 도금 라인을 약 1/6 로 축소한 모델을 이용하여 실험한 결과와 삼차원 변형 해석한 결과를 비교하였다. 소재의 두께는 0.3mm 이며, 항복강

도는 211MPa 이다. 모델은 Fig.4 와 Fig.5 에 나타내었다. 시편의 길이와 폭은 각각 636mm 와 25mm (대칭 고려한 값으로 실체는 50mm)이다. 시편을 위로 400mm 드로잉 후 gutter 모양을 구하였다.

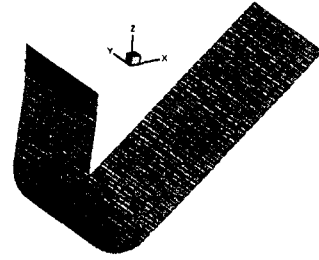


Fig.4 Part of specimen model and 3-D simulation model for model CGL Processes.

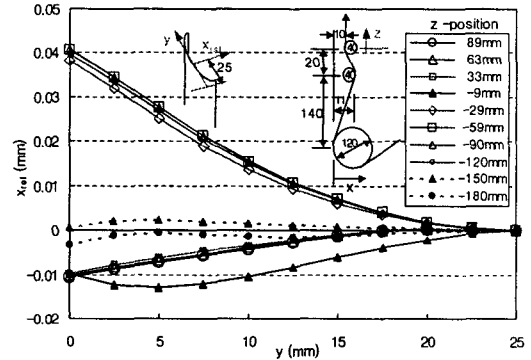


Fig.5 Shape of sheet (gutter) at several position of CGL process. The x_{rel} means the relative coordinate to the symmetry node. Intermesh is 1mm. $T=2.5\text{kgf/mm}^2$.

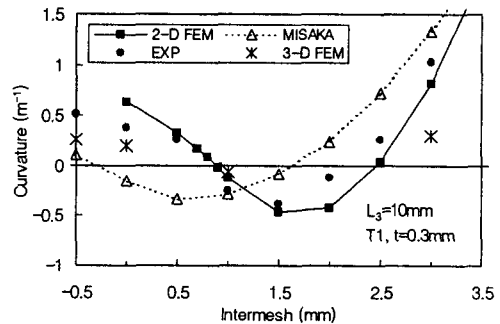


Fig.6 Comparison of gutter results predicted by 3-D finite element analysis to the experiment, 2-D finite element analysis and Misaka model.

Fig.5 는 intermesh 가 1mm 인 경우, 각 지점의 gutter 를 나타낸다. x_{rel} 은 대칭선에 대한 동일 수준 절점들의 상대적인 x 방향 위치를 나타낸다. 직경이 가장 큰 첫째 롤(직경 120mm)을 통과한 다음에 gutter 는 그 롤에 대하여 오목하게 변형한다. 그리고 두개의 40mm 직경 롤을 연속으로 통과한 다음에는 첫째 롤에 대하여 약간 볼록한 상태로

변형한다. 이는 Fig.6 에 나타낸 실험 결과와도 일치하는 결과이다. Fig.6 에는 삼차원 해석에 의해 구한 결과와 2-D 해석⁽³⁾ 그리고 Misaka model⁽³⁾ 을 적용한 결과를 함께 비교하였다. 3 차원 해석의 결과는 모두 다른 간이적인 해석 결과보다 gutter 값이 작게 나왔으나, 경향은 동일하게 나타난다. 이는 삼차원 해석에 반영된 gutter 발생 변형의 기하학적 비선형 효과에 원인이 있는 것으로 생각된다. 그리고 intermesh 값이 큰 경우의 해석 값이 실험 값에 비하여 작은 것은 충분한 드로잉 길이를 해석하지 않은 원인으로 추정된다.

3.2 Roller 교정 공정 해석

실험실적 롤러 교정기(roller leveler) 를 제작하고 실험하여 탄성회복 양을 비교하였다. 사용한 롤러교정기는 Fig.7 에 그리고 재료특성은 Table 1 에 나타내었다. 입측 압하량-출측 압하량은 각각 1.58mm-0.92mm 그리고 3.17mm-1.83mm 의 두 가지 조건을 사용하였다.

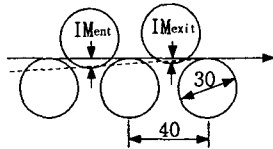


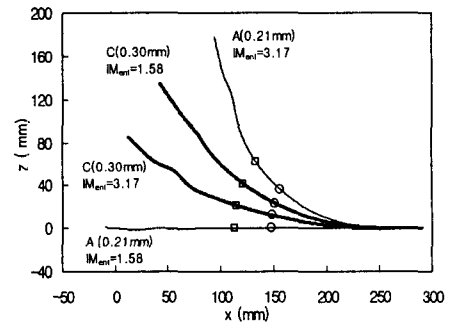
Fig.7 Experimental roller leveler.

Table 1 Mechanical properties of tested sheet

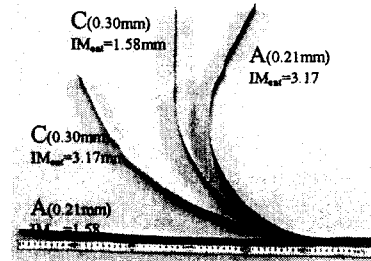
	t(mm)	YS(MPa)	YP-El(%)	TS(MPa)	U-El.(%)	El.(%)
A	0.21	368	0.6	447	13.9	22.2
B	0.23	222	0.0	358	19.9	30.5
C	0.30	196	0.0	355	24.4	43.1
D	0.30	310	2.1	397	20.4	32.7

실험은 폭이 50mm 이고 길이는 620mm 인 강판을 350mm 드로잉하고, 정상상태 변형부분에서 스프링 백 후의 곡률을 측정하였다. 해석은 두께 방향으로 9 개의 적분점을 이용한 0.5mm 길이의 shell 요소를 사용하였으며 롤은 0.47mm 길이의 요소를 사용하였다. Fig.8 에는 A 와 C sheet 에 대한 해석 및 실험 결과를 비교하여 나타내었다. 드로잉 길이 차이에 따른 회전 양의 차이를 감안하면 실험과 해석 결과의 경향이 일치함을 알 수 있다. 해석 및 실험 결과를 비교해본 결과 해석과 실험에서 구한 spring back 곡률이 20% 이내의 오차범위에서 일치함을 알 수 있었다.

(3) 박기철, 2002, "냉연강판 레벨링 공정의 삼차원 탄소성 유한요소 해석", 포항공과대학교 대학원 박사학위논문



(a)



(b)

Fig.8 Unloaded A and C sheet (a) after 190mm drawing of 300mm length by finite element simulation, (b) after 350mm drawing for 620mm length by experiment.

4. 결론

레벨링 공정 해석에 적합한 쉘 요소를 이용한 삼차원 탄소성 프로그램을 작성하고 이를 탄 및 소성변형에서의 anticlastic curvature 와 gutter 발생 해석 문제, 그리고 roller leveler 해석에 적용하여 결과를 검증하였다. 개발 프로그램은 이들 강판 레벨링 문제의 해석에 적절한 정도의 정밀도로 적용이 가능함을 알 수 있었으며, 향후 좀더 정확한 구성방정식 및 적분방법을 적용하면 더욱 정밀한 해석이 가능할 것으로 예상된다.

참고 문헌

- (1) T.J.R. Hughes and W.K. Liu, 1981, "Nonlinear Finite Element Analysis of Shells: Part 1. Three Dimensional Shells", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 26, pp.331-361.
- (2) J.R. Hughes and J. Winget, Finite Rotation Effects in Numerical Integration of Rate Constitutive Equations arising in Large-Deformation Analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.15 (1980), pp.1862-1867