論 文

大韓造船學會論文集
第 33 卷 第 4 號 1996年 11月
Transactions of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 33, No. 4, November 1996

Roll bending machine에 의한 선체외판의 곡면가공 해석

김유일*, 신종계**, 이장현***

Analysis of Ship Hull Plate Bending By Roll Bending Machine

by

You-Il Kim*, Jong-Gye Shin** and Jang-Hyun Lee***

요 약

선체 외판을 이루는 판부재 중에서 일차곡만을 가진 부품은 피라미드 형의 롤러 굽힘장치를 이용하여 제작한다. 일차곡 부재를 생산하기 위한 공정에서 가장 중요한 작업 변수는 중앙 롤러의 수직변위값이다.

본 연구에서는 이러한 굽힘 현상을 보의 탄소성 굽힘현상으로 모델링하여 해석해를 구하였으며, 엄밀한 역학적 이해를 위하여 유한요소해석법을 이용하여 굽힘현상을 해석하였다. 해석을 통하여 일정한 굽힘 곡률을 얻기 위한 중앙 롤러의 수직변위 값을 계산하였으며, 유한요소해석법은 보 요소와 평면변형율 요소를 이용하여 모델링하고 각각의 경우에 대한 해석을 수행하였으며 이 결과를 해석해와 비교하였다.

계산을 통하여 판에 가해야 할 굽힘곡률과 중앙롤러의 수직변위 사이의 관계를 도출하였으며 일차곡가공의 중요한 작업변수인 중앙롤러의 수직변위와 잔류곡률사이의 관계를 수치 데이터로써 정식화하였다.

Abstract

Pyramid type three roll bending machines are widely used in roll-bending process to produce singly curved plate. In forming singly curved plate, controlling the vertical displacement of the center roller is most important to acquire the shape required and automation system of the process.

접수일자 : 1996년 6월 3일, 재접수일자 : 1996년 10월 7일
*대우중공업(주) 선박해양기술연구소
**정회원, 서울대학교 조선해양공학과
***서울대학교 조선해양공학과 박사과정

In this paper roller bending process is modeled as an elastic-plastic phenomenon and analyzed using beam theory and finite element method. In finite element analysis the workpiece is modeled by using beam elements and plane strain elements respectively. Through the analyses vertical center roller displacement is obtained to get constant curvature distribution along arc length. The relationship between center roller displacement and curvature in steady state as well as residual stress and strain along plate thickness direction are calculated through finite element analysis.

1. 서 론

선체 외판은 여러 가지 3차원 곡면의 조합으로 이루어진 복잡한 구조물이며 특히 선수, 선미부의 외판은 복잡한 곡면의 기하학적 형상을 이루고 있다. 이러한 곡면은 일차곡가공, 선상가열, 프레스 가공을 이용하여 제작하고 있다. 특히 그러한 곡면제작은 bending roller에 의해 냉간가공을 수행함으로써 시작된다. 일차곡가공은 유압기를 이용하여 roller 위치를 제어하면서 수작업으로 일일이 곡률을 체크하는 과정을 거치게 된다. 작업이 숙련공의 경험에 전적으로 의존하게 되므로 생산성 측면에서 개선의 여지가 있고, 일차곡가공 후 얻어지는 가공의 정도가 다음 선상가열 등에 영향을 미치게 된다. 따라서 일차곡가공을 수행함에 있어서 정확한 곡률을 얻기 위해 역학적 특성에 관한 연구가 필요하게 되었다.

이러한 일차곡가공에 대한 해석은 단순 보이론(beam theory)을 이용하여 영구곡률 계산을 수행한 연구가 많았다. Oh[4]는 유한요소법을 이용하여 박판에 대한 일회의 굽힘과정을 해석하였고, Hansen[1]은 피라미드 roll bending 과정에서의 판의 변형을 이론과 실험적으로 연구하였다. 이러한 연구들은 주로 보이론을 이용한 단순해석에 그치거나 단 일회의 강제변위를 가하여 굽히는 과정에 대한 해석에 그치고 있으며 주로 박판에 대한 해석을 수행하였다. 따라서 일차곡가공의 기하학적 특성만을 어느 정도 한계 내에서만 파악할 수 있는 단점을 지니고 있다. 그러한 연구들은 가공판의 두께가 길이에 비하여 큰 부재의 해석에는 적용할 수 없으며, 롤러의 직경이 변화하는 경우에 대해서는 그 변화를 적절히 반영할 수 없다. 그리고 판의 변형량이 매우 큰 경우 적절한 탄소성해석을 할 수 없으며 판의 두께 방향에 분포하는 변형율과 응력에 대한 정보를 얻을 수 없는 단점을 가지고 있다. 해석해를 통하여 부재에 분포하는 응력과 변형율을 구하는 과정이 어려울 뿐만 아니라 롤러와 판의 접촉점이 지속적으로 변하는 역학적 특성을 이론식을 통해 모델링하는 것이 불가능하기 때문이다.

본 연구에서는 보이론에 의한 해석과정을 이용하여 전산프로그램을 작성하였으며 유한요소법을 이용한 수치모델을 개발하여 잔류곡률 뿐만 아니라 잔류응력 및 잔류변형률에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한 가공될 판을 2-절점 보 요소와 4-절점 평면변형율 요소를 이용하여 유한요소 모델링한 후 각각의 모델에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 비교 검토하였다. 그리고 일차 곡가공 작업의 능률화 및 자동화의 자료 구축을 위하여, 하중 조건과 영구곡률 사이의 관계에 대한 수치데이터를 구축하였다.

1.1 일차곡가공의 역학적 특성

Bending roller에 의한 일차 곡가공의 개략적인 모습은 Fig. 1에 보인 바와 같다. 먼저 수직 방향의 변위를 가지는 center roller와 고정된 두개의 side roller사이에 판을 위치시킨 다음 center roller에 수직 방향의 변하지 않는 강제 변위를 가해 굽힌다. 다음으로 3개의 roller가 회전하면서 판을 연속적으로 굽히는 과정을 거친다. 이 때 중앙 롤러의 수직 변위는 변하지 않는다. 역학적으로는

이동하는 강제 변위력에 의한 판의 탄소성 굽힘 현상으로 파악할 수 있다. 부재는 롤러 사이에서 탄소성 굽힘변형을 하지만 롤러를 빠져나오면서 스프링백(spring-back) 하는 과정을 거친다. 이 때 영구변형이 일어나 판 전체에 잔류곡률이 생기는 것이다. 가공할 재료의 특성은 다음의 Fig. 2와 같이 굽힘모멘트와 곡률 사이의 관계로 표현할 수 있다.

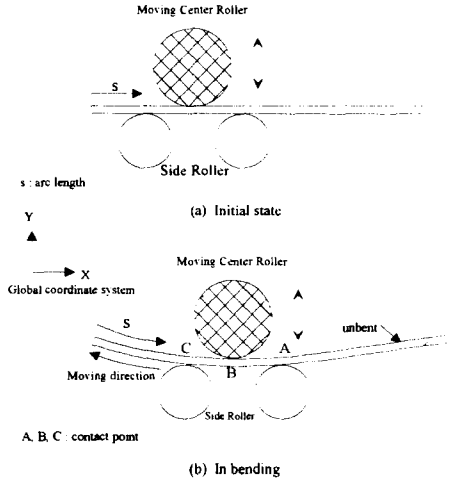


Fig.1 Configuration of roller bending procedure

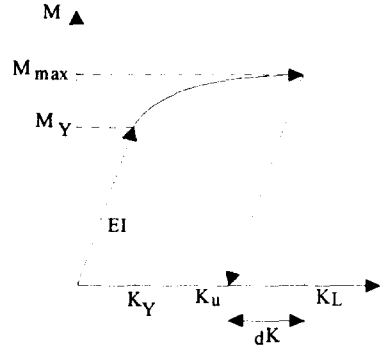


Fig. 2 Bending cycle on a moment-curvature diagram

굽힘 상태의 곡률과 spring-back후의 곡률 사이의 관계는 식(1)과 같이 주어진다.

$$K_u(s) = K_L(s) - dK \quad (1)$$

여기서, $K_u(s)$, $K_L(s)$, M(s)는 각각 잔류곡률, loading 시의 곡률 분포, 굽힘 모멘트를 말한다. M_y는 판의 맨 바깥쪽에서 최초로 항복이 일어날 때의 값이다. 식(1)의 오른쪽 두 번째 항은 spring-back되는 양이다.

2. 보 이론을 이용한 정식화

실제 굽힘 현상을 연속적인 과정이지만 연속적인 굽힘을 집중하중에 의한 굽힘이 반복되어 잔류곡률이 생기는 과정으로 가정한다. 즉, 먼저 양단 단순 지지된 보에 강제변위를 가하고 스프링백 현상을 거친 후의 잔류 변형을 구한다. 다시 동일한 과정의 해석을 판의 s 방향으로 s_b만큼 이동된 지점에서 수행한다. 이를 가공이 이루어지는 부분에 대하여 반복적으로 수행하면 Fig. 3에 보인 것과 같이 매 단계에서의 영구 곡률이 중첩되어 최종 곡률이 얻어진다.

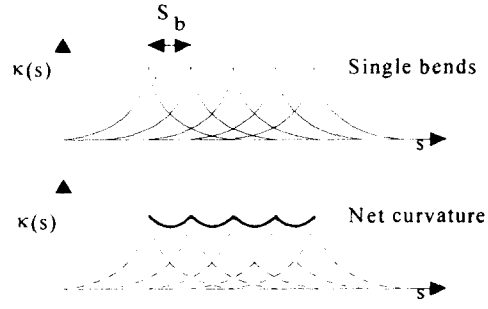


Fig. 3 Sequential bending

계산 과정의 초기조건으로는 center roller의 변위값, 초기 곡률 분포, 또는 판에 가해야할 곡률 분포를 들 수 있다. Fig. 4에는 해석을 위한 좌표계와 미소요소가 정의되어 있다.

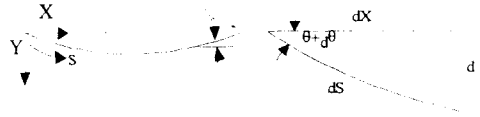


Fig. 4 Coordinate system and differential part of a workpiece

Fig. 4로부터 미소변형 요소 사이에는 아래와 같은 기하학적 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} dX(s) &= \cos(\theta + d\theta)ds \\ d\theta(s) &= K(s)ds \\ dY(s) &= \sin(\theta + d\theta)ds \end{aligned} \quad (2)$$

윗 식(2)를 적분하면 가공될 판의 초기 기하학적 형상을 계산할 수 있게 된다. 일차곡가공 해석을 위한 모델은 원하는 곡률을 얻기 위한 center-roller의 변위량(Y_p)을 얻을 수 있어야 하고, 반대의 경우도 계산할 수 있어야한다. 이미 판의 연속적인 굽힘을 집중하중에 의한 굽힘 및 제하 과정의 중첩으로 시뮬레이션할 수 있음을 보였다. 이 때 집중하중에 의한 일 회의 변형완성과정을 시뮬레이션하기 위해서는 주어진 Y_p 또는 원하는 곡률값까지 그 값들을 증가시키면서 $K(s)$와 $M(s)$ 또는 $M(s)$와 Y_p가 서로 평형 상태를 이루는 점을 찾아야 한다. 이 과정에서 아래와 같이 각 변수들이 내연적(implicit)인 형태이므로 곡률의 값을 점차적으로 증가시키면서 증분적(incremental)인 계산을 해야한다. 이 때 i 번째 증분의 계산에서 arc-length에 따른 θ, X, Y 는 각각 다음 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \theta^i(s) &= \theta_0^i + \int_0^s K^i(s)ds \\ X^i(s) &= X_0^i + \int_0^s \cos(\theta_0^i + \int_0^s K^i(s)ds)ds \\ Y^i(s) &= Y_0^i + \int_0^s \sin(\theta_0^i + \int_0^s K^i(s)ds)ds \end{aligned} \quad (3)$$

일회 굽힘의 평형상태를 찾기위한 iteration을 수행하기 위해서는 K_{max}^0을 0으로 가정하고 최대 곡률의 증가량($\triangle K_{max}$)을 작은 값으로 가정한다. 이 $\triangle K_{max}$를 점차 증가시켜서 $K_{max}^i = K_{max}$ 또는 $Y = Y_p$가 될 때까지 계산한다. 이 때 K_{max}는 판에 가해야 할 목적곡률, Y_p는 작업조건으로서의 center-roller의 수직변위값이다. 새로운 최대 곡률 (K_{max}^{i+1}) 은 식(4)와 같으며, 굽힘 모멘트는 식(5)과 같다. 식(5)에 $\varepsilon = K\eta$을 적용하면 식(6)을 얻는다.

$$K_{max}^{i+1} = K_{max}^i + \triangle K_{max}, \; K_{max}^0 = 0 \quad (4)$$

$$M(s) = 2b\int_0^{t/2} \sigma\eta \, d\eta \quad (5)$$

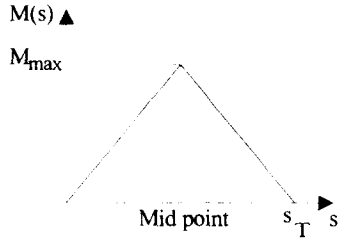
$$M(s) = \frac{2b}{[K(s)]^2}\int_0^{\varepsilon_{max}} f(\varepsilon)\varepsilon d\varepsilon, \; \varepsilon_{max} = K(s)\frac{t}{2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} f(\varepsilon) &= E\varepsilon \quad \text{in elastic state} \\ f(\varepsilon) &= \sigma(\varepsilon) \quad \text{in elastic-plastic state} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 η는 neutral line 으로 부터 두께방향의 거리, E는 영율(Young's modulus), $f(\varepsilon)$은 재료의 응력-변형율 사이의 관계를 나타내는 식이며, ε은 변형률, σ는 응력, ε_{max}는 최대변형율, t는 판의 두께, b는 판의 폭이다. EI 는 굽힘강성으로 정의하고, 식(5)를 식(7)에 대입하여 정리하면 최대 모멘트는 다음과 같이 탄성 및 탄소성영역에 따라 서로 다른 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} M_{max}^{i+1} &= EIK_{max}^{i+1} \quad (K_{max}^{i+1} < K_Y) \\ M_{max}^{i+1} &= \frac{2b}{[K_{max}^{i+1}]^2}\int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma(\varepsilon)\varepsilon d\varepsilon \quad (K_{max}^{i+1} \geq K_Y) \end{aligned} \quad (8)$$

s_T가 굽힘 영역 안에 있는 보의 길이라면 굽힘모멘트가 집중하중이 가해지는 점을 중심으로 선형적으로 분포한다고 가정할 수 있다. 따라서 식(8)에서 구한 M_{max} 를 이용하여 다음과 같은 직선함수로 표현할 수 있다.



$$\begin{aligned} M^{i+1}(s) &= M_{max}^{i+1}\frac{2s}{s_T} \quad s \leq \frac{s_T}{2} \\ M^{i+1}(s) &= M_{max}^{i+1}(2 - \frac{2s}{s_T}) \quad s \geq \frac{s_T}{2} \end{aligned}$$

Fig. 5 Assumed bending moment distribution

위에서 가정한 arc-length 에 따른 굽힘모멘트의 값을 식(8)에 대입하여 i 번째 iteration의 곡률 분포를 계산한다.

$$K^{i+1}(s) = \frac{M^{i+1}(s)}{EI} + K^{i} \quad (K^{i}(s) < K_Y)$$

$$M^{i+1}(s) - M^{i}(s) = \frac{2b}{[K^{i+1}(s)]^2}\int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma(\varepsilon)\varepsilon d\varepsilon - \frac{2b}{[K^{i}(s)]^2}\int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma(\varepsilon)\varepsilon d\varepsilon \quad (K^{i} \geq K_Y) \tag{9}$$

ε_{max}가 $K(s)$의 내연함수(implicit function)이므로 iteration에 의해 방정식을 풀어야 한다. 계산된 $K(s)$로 부터 이미 보인 식(3)에 의해 다시 새로운 형상을 계산한다. 이상의 계산을 보 중앙부의 처짐량 Y가 원하는 값(Y_p)에 도달할 때까지 반복하거나 원하는 곡률값에 도달하도록 계산한다. 원하는 처짐량까지 계산한 후의 결과는 Y_p의 값에 따라 생기는 잔류곡률의 값을 알 수 있고 원하는 곡률값까지 도달한 후의 결과는 이 값을 얻기 위한 center-roller의 수직변위값이다. 식(3)을 이용하여 변형된 형상을 구할 수 있으며, 만약 i 가 n 번째에서 원하는 값에 수렴한다면, spring-back 되는 양은 다음 식(10)으로 계산한다.

$$K_u(s) = K^{n}(s) - \frac{M^{n}(s)}{EI} \quad (K^{n}(s) \geq K_Y)$$
$$K_u(s) = 0 \quad (K^{n}(s) < K_Y) \tag{10}$$

식(10)으로 부터 얻어진 영구곡률 ($K_u(s)$)은 center roller의 변위를 s_b만큼 평행 이동시킨 후 변형을 계산하는 계산과정에서 초기조건으로서 이용된다. 그 초기조건(K^0_{new})은 아래 식(11)과 같이 계산된다. 이상의 계산을 가공될 부분의 전체 길이에 걸쳐 반복적으로 수행하면 잔류곡률을 얻을 수 있다.

$$K^0_{new} = K^{n}(s - s_b) \tag{11}$$

2.2. 해석 결과

판의 굽힘 가공을 단순 굽힘(single bending)과 연속 굽힘(sequential bending)으로 나누어 계산하였다. 단순 굽힘은 강제변위를 한 번 가하여 spring-back하는 과정을 말하고, 연속 굽힘은 동일한 강제변위량을 가진 하중을 이동시키면서 굽힘을 가하는 과정을 말한다. 보의 길이 L은 1m, 두께 t=20 mm, center roller가 판의 중앙을 중심으로 전체 길이의 50% 부분만을 이동하며 강제변위 값 Y_p는 7.5mm, die의 폭 s_T는 0.4m로 가정하였다. 재료의 Young's modulus E는 200GPa, 항복응력 σ_Y는 200MPa, tangent modulus Et는 50 MPa 로 가정하였다.

Fig. 6에 보인 두 개의 곡선은 각각 하중을 가했을 때 (time 1)와 하중을 제거하여 spring-back 했을 때 (time 2)의 arc length에 따른 곡률 분포를 나타낸다. Side roller쪽의 곡률이 낮은 기울기로 증가하는 구간은 아직 탄성 상태이고, center roller 쪽의 급격히 곡률이 증가하는 구간이 소성 영역이다. 판이 spring-back했을 때 소성 영역의 영구 곡률만 남게 된다.

Fig. 7은 동일한 Y_p를 가하면서 10번의 single bending을 연속적으로 가하여 판을 굽혔을 때의 시뮬레이션 결과이다. 가공 후 arc length에 따른 곡률 분포를 나타낸 것이다.

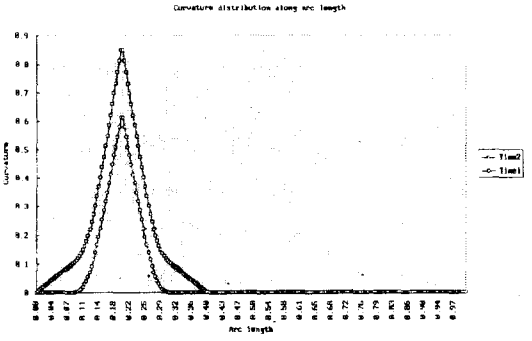


Fig.6 Curvature distribution along arc length in case of single bending

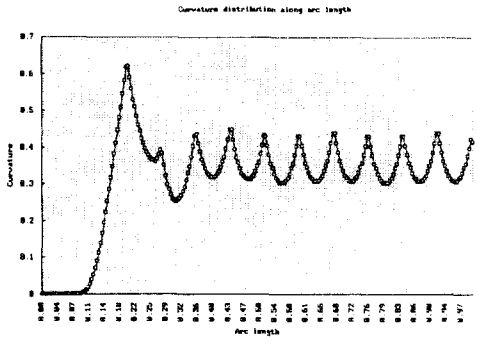


Fig.7 Curvature distribution along arc length after simulation with analytic model

3. 유한요소법에 의한 수치 시뮬레이션

보이론을 이용한 모델은 일차곡가공의결과에 대한 기학학적정보를 제공할 수는 있지만 변형량이 커지거나, 부재의 두께와 길이에 비가 커지는 경우에 한계를 지니다. 또한 역학적 특성값인 잔류응력이나 잔류변형율에 대한 정보의 산출이 어렵다. 그리고 롤러가 회전하면서 판과의 접촉점이 변화하고 지속적으로 spring-back이 일어나는 과정을 모델링해야할 필요가 생긴다. 이러한 역학적 현상의 모델링은 해석해로써는 불가능한다. 이러한 단점을 극복하고, 응력 변형율 분포 및 롤러와 부재 사이의 접촉에 의한 변형, 지속적인 spring-back의 발생을 구하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치모델을 개발하여야 할 필요가 있다. 이 해석을 위하여 solver로써 ANSYS를 이용하였다.

3.1 유한 요소 모델

평판의 굽힘 가공을 유한요소로 모델링하여 수치 계산을 수행하였다. 유한요소는 2-절점 보요소와 4-절점 평면변형율 요소를 이용한 두 가지 경우로 나누어 해석하였다. Fig. 9에는 평면변형율 요소를 이용한 모델링의 예를 보인 것이다. 그림에 보인 바와 같이 가공될 판과 롤러의 접촉부에 접촉 요소를 두어 롤러가 강제 변위를 가지고 이동하면 동시에 판의 접촉면이 롤러와 동일한 상하

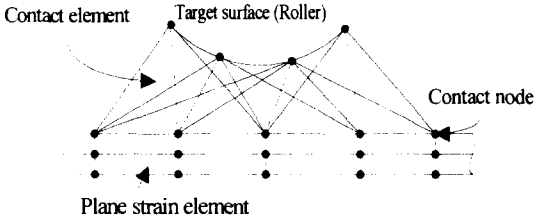


Fig. 9 Finite element model near the contact surfaces

변위를 가지며 움직이도록 모델링하였다. 이 때 롤러는 완전강체이며, 미끄럼은 없다고 가정하였다. Fig. 9에서 원으로 표현된 점은 롤로와 가공될 판의 접촉을 모델링하기 위하여 생성한 접촉요소(contact element)이다. 가공 될 부재를 2-절점 보요소 및 4-절점 평면변형율 요소를 이용하여 모델링하여 각각의 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 계산에 이용된 재료조건 및 가공 조건은 위의 이론해에서 가정한 것과 동일하다.

3.2 수치 계산 결과

Fig. 10은 일 회의 굽힘 만을 가하고 다시 하중을 제거하는 과정을 거친 후 부재에 발생하는 곡률의 분포를 나타낸 것이다. 이 결과는 해석적인 방법, 보 요소를 이용한 유한요소해석, 평면 요소를 이용한 해석의 결과를 각각 도시하고 있다. Spring-back후 소성 영역의 곡률만이 영구 곡률로 남음을 알 수 있다.

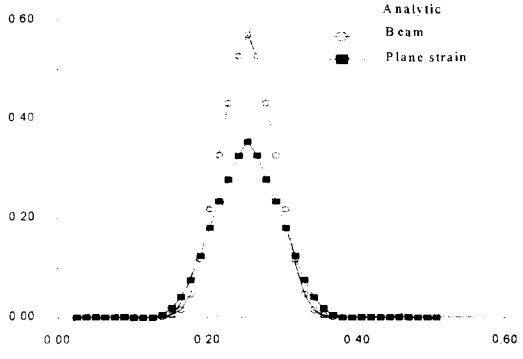


Fig. 10 Spring-back된 후의 $K(s)$

그리고 길이의 중앙점을 중심으로 전체 길이의 1/2 인 부분에 결쳐 center roller를 이동시켜 가공하는 과정을 시뮬레이션하였다. 이때 전체의 과정을 40개의 load step으로 나누어 연속적인 과정을 이산화시켰다. Center roller가 수직 방향 강제 변위를 가지는 단계를 load step 1(LS-1)로, 다음으로 수평 방향강제 변위를 가지는 단계를 load step 2(LS-2)부터 load step 40(LS-40)까지로 나누었다.

Fig. 11 과 Fig. 12에는 각 load step 단계에서 판의 arc-length 방향에 분포하는 곡률을 보여주고 있다. Fig. 11은 보요소를 이용한 유한요소해석, fig. 12는 평면요소를 이용한 해석의 과정을 보여주고 있다. 보 요소로 모델링 했을 때는 'under shoot effect'가 나타나는 것을 알 수 있는데, 평면변형율 요소모델일 때는 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. LS-1에서 동일한 Y_p에 의한 최대곡률의 결과가 평면변형율 요소 모델의 경우에 보 요소모델의 결과보다 작은 것을 확인할 수 있다. 이 때문에 effective penetration이 빠르게 정상상태에 도달하기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 평면요소르 모델링한 해석의 경우에 정상상태에 도달한 부분의 평균곡률(0.31)이 보 요소로 모델링한 경우의 값(0.4)에 비하여 작은 것을 확인할 수 있다. Hardt등[3]는 동일한 작업조건을 가진 가공에 대하여 보이론에 의해 계산된 곡률값이 실험에 의해 계측된 값보다 약 15%~30% 정도 큰 값을 주는 것을 확인하였다. 따라서 평면요소를 사용한 유한요소해석의 결과가 실제 현상을 좀 더 정확하게 시뮬레이션한다는 것을 확인할 수 있었다.

일차곡가공 해석은 주어진 작업조건에 따라 arc-length 방향에 분포하는 곡률을 얻을 뿐만 아니라 원하는 곡률은 얻기위해 판에 가해야 할 center roller의 수직 변위값을 찾을 수 있어야 한다. 위에서 제시한 해석적인 방법을 이용하여 정상상태의 곡률을 얻기 위한 Y_p값을 수치적으로 정리하였다. 그리고 유한 요소 해석을 통한 시뮬레이션의 결과를 동시에 도시하여 비교하였다(Fig. 13).

Fig. 14 에는 하중을 가하였을 때(LS-1)와 하중

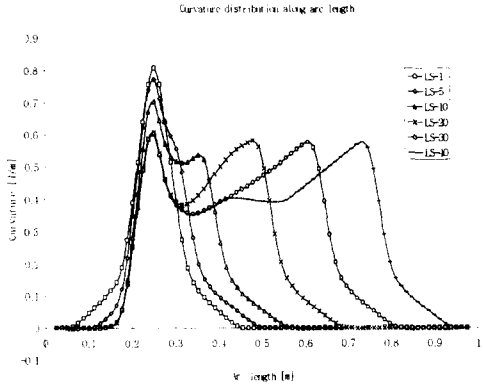


Fig. 11 K(s) at each load step for beam element

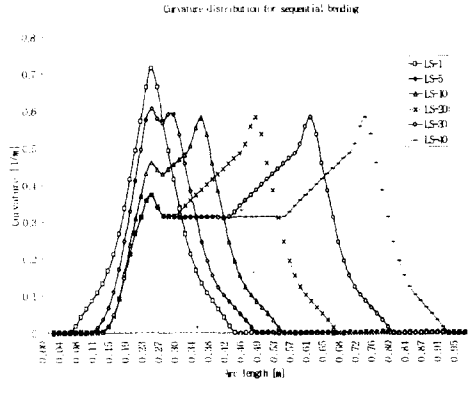


Fig. 12 K(s) at each load step for plane strain element

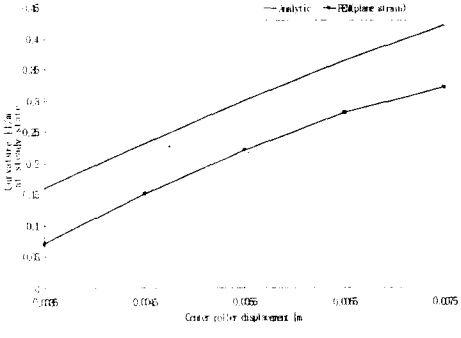


Fig. 13 Relationship between Y_p and K in steady state

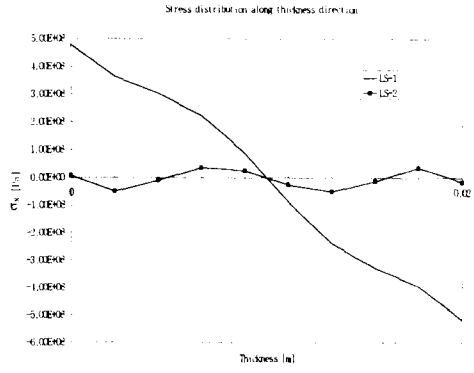


Fig. 14 Stress distribution along the thickness direction

이 사라진후 두께 방향에 분포하는 응력분포(σ_x) 를 보여주고 있다. 두께 방향으로 대칭적으로 분포함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 일차곡가공의 과정을 보이론을 이용한 해석해를 구하고, 곡률 분포를 얻기 위한 center roller의 변위관계식을 구하였으며, 판 굽힘 과정을 보 요소와 평면변형율 요소 및 접촉 요소를 이용한 수치모델을 개발하여 시뮬레이션하였다. 수치 simulation에서는 잔류곡률 분포와 잔류응력과 변형률을 구하였으며, center roller의 수직변위에 따른 곡률 분포를 얻었다. 역으로 원하는 곡률을 얻기 위한 center roller의 변위를 계산하였다. 이러한 해는 기존의 연구와 정성적으로 일치하는 결과를 주었으며 일차곡가공 공정의 자동화를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Hansen, N.E., Jannerup, O., "Modeling of Elastic-Plastic Bending of Beams Using a Roller Bending Machine", Transactions of the ASME, Vol.101, pp304-310 , 1979

[2] Yang, M., Shima, S., "Simulation of Pyramid Type Three-roll Bending Process", International Journal of Mechanical Science, Vol.30, No.12, pp.877-886,1988

[3] Hardt, D.E., Constantine, E.,and Wright, A., "A Model of the Sequential Bending Process for Manufacturing Simulation", Journal of Engineering for Industry, Vol.114, pp181-187, 1992

[4] OH, S.I., and Kobayashi, S., "Finite Element Analysis of Plane-strain Sheet Bending", International Journal of Mechanical Science, Vol.22, pp583-594, 1980

[5] Yang, M., Shima, S., Watanabe, T., "Model-based Control for Three-Roll Bending Process of Channel Bar", Transaction of the ASME, Vol. 112, pp346-351, 1990

[6] Hardt, D.E., Chen, B., "Control of Sequential Brakeforming Process", Journal of Engineering for Industry, Vol. 107, pp141-145, 1985