

항공기용 스트링거 롤 포밍공정의 3차원 강소성 유한요소해석

조주현¹, 김홍태¹, 이민철², 안규철³, 김희원³, 전만수[#]

Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Roll Forming Sequence of Stringer for Aircraft

J. H. Cho, H. T. Kim, M. C. Lee, G. C. An, H. W. Kim, M. S. Joun

Abstract

In this paper, we apply a three-dimensional rigid-plastic finite element method to simulate an unsteady-state roll forming process. A typical roll forming process is investigated from the standpoint of computer simulation and its realistic analysis model is proposed. The material is considered as bulk material and discretized into hexahedral finite elements. The presented approach is applied to simulating the roll forming process of straight stringer used for aircraft structure.

Key Words : Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법), Unsteady-State Analysis(비정상상태 해석), Roll Forming(롤 포밍), Straight Stringer(직선형 스트링거)

1. 서 론

롤 포밍(roll forming)은 회전하는 롤을 이용하여 연속적으로 박판에 굽힘변형을 야기시켜 패널(panel), 파이프 및 튜브, 채널(channel), 프레임(frame), 홈통(gutter) 등의 기다란 구조용 판재성형을 제조하는 것을 일컫는다. 롤 포밍은 생산성이 탁월하기 때문에 대량 생산의 측면에서 강점을 지니고 있으므로 롤 포밍의 산업 규모가 지속적으로 증가하고 있다. 롤 포밍 제품의 최대의 시장은 건설산업이며, 자동차 산업에서도 롤 포밍은 매우 중요하다.

롤 포밍은 주로 판재의 연속적인 굽힘변형에 의존하므로 소성가공 관점에서 보면 비교적 단순하다. 그러나 많은 공정이 연속되어 있기 때문에 공정 개발에 소요되는 비용과 시간이 비교적 많이 소요된다. 따라서 이러한 문제의 해결을 위하여 많

은 연구자들이 해석적 방법과 실험적 방법으로 롤 포밍에 관한 연구를 실시해 왔으며[1,2], 최근에는 유한요소법을 이용한 롤 포밍공정에 관한 연구[3-9]가 실시되고 있다.

Brunet 등[3,4]은 단면 해석을 위한 2차원 해석과 롤 스텐드 사이의 박판 해석을 위한 3차원 해석을 연계한 탄소성 유한요소해석 방법을 제안하였다. Kim 등[5, 6]은 강소성 유한요소법을 이용하여 정상상태의 롤 포밍 공정의 해석을 실시하였다. 이들은 초기치의 생성을 위하여 2차원 평면변형 문제로 해석하였고, 그 결과로부터 시작하여 축차적인 방법으로 3차원 유한요소해석 결과를 획득하였다. Alsamhan [7]은 계산 시간을 줄이기 위한 방법으로 이중 요소망(dual meshes) 방법을 냉간 롤 포밍 공정의 유한요소해석을 위하여 제안하였다. 최근에는 Boman [8] 등이 임의 라그랑지-오일러 수식화 기법(arbitrary Lagrangian and Eulerian

1. 경상대학교 기계공학과 대학원

2. 경상대학교 기계항공공학부 박사 후 과정

3. (주)아스트

경상대학교 기계항공공학부 E-mail:msjoun@gnu.ac.kr

formulation) [9]을 이용하여 정상상태의 U-자형 롤 포밍 공정을 해석하였다. 이들은 롤 주위의 요소를 조밀하게 함으로써 롤과 소재의 접촉 상태를 정확하게 예측하고자 하였다.

전술한 바와 같이 롤 포밍의 해석은 주로 정상상태의 가정하에서 이루어졌다. 물론 이러한 경우 정상상태의 가정하에서의 해석은 공정설계에 유용하게 쓰인다. 그러나 롤 스텐드 사이에서 모서리의 거동이 명확하게 나타나지 않는다. 정상상태의 가정하에서의 해석결과는 공정설계 인자의 자세한 효과를 해석하는데 한계가 있는 것이다. 비정상상태의 가정하에서의 접근이 널리 연구되지 않은 이유는 전체 롤 스텐드를 통과하는 연속적인 변형을 해석하기에는 컴퓨터의 계산시간이 많이 걸리기 때문이다. 최근 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입어 비정상상태의 롤 포밍 공정에 대한 해석의 길이 열리고 있다. 본 연구에서는 항공기 구조용 직선형 스트링거의 제조공정에 대한 3차원 유한요소해석을 실시하였다

2. 유한요소 수식화 및 해석모델

2.1 유한요소 수식화

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 V 와 경계영역 S 로 나누어지며 경계영역 S 는 표면력이 $t_i^{(n)} = \bar{t}_i^{(n)}$ 로 주어진 경계 S_{t_i} , 속도가 $v_i = \bar{v}_i$ 로 주어진 경계 S_v , 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 경계 S_c 등으로 세분화될 수 있다. 금형-소재 접촉면에서 압축력이 작용하면, 금형과 소재의 법선속도는 동일하다. 즉 S_c 에서 $v_n = \bar{v}_n$ 이다. 본 논문에서 하첨자 n 과 t 는 각각 법선성분과 접선성분을 의미한다.

소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화(isotropic hardening) 등의 성질을 가지고 있으며 von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따르며, 접촉면에서 일정전단마찰법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 자중 및 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장 v_i 를 구하자는 것이며, 벌칙기법을 이용하여 비압축성 조건을 처리하면, 다음의 약형으로 수식화된다.

$$\int_V \sigma'_{ij} \omega_{ij} dV + \int_V K \dot{\epsilon}_{ij} \omega_{ij} dV - \sum_{S_t} \bar{t}_i \omega_i dS + \int_{S_c} mkg(v_i) \omega_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서 가중함수 ω_i 는 경계 S_{v_i} 에서 영의 값을 갖는 임의의 함수이고,

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2}(\omega_{i,j} + \omega_{j,i}) \quad (2)$$

이다. 벌칙상수 K 는 매우 큰 값의 양수이며, 다음의 물리적 의미를 갖는다.

$$K \dot{\epsilon}_{ij} = \sigma_{ij} / 3 \quad (3)$$

따라서 벌칙기법을 사용할 경우, 압력분포는 속도장 해석결과로부터 자동적으로 구해진다.

식 (1)에서 k 는 전단항복응력이며, m 은 마찰상수이다. 함수 $g(v_i)$ 는 접촉면에서 소재와 금형의 상대속도의 영향을 반영하는 함수이며, 접촉면에서 미끄럼이 발생하면 그 절대값이 1 이 되고, 미끄럼이 발생하지 않으면 1 보다 작은 절대값을 갖는다. 즉, 함수 $g(v_i)$ 는 상대속도가 마찰에 미치는 영향을 고려하는 역할, 수치적 문제점을 완화시키는 역할, 고착상태(sticking state)를 만들어 줌으로써 전단응력이 이론적 한계를 못 넘게 하는 역할 등을 수행하는 함수이며, Chen 과 Kobayashi[10]가 제안한 다음의 함수가 가장 널리 사용되고 있다.

$$g(v_i) = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{(v_i - \bar{v}_i)}{a} \quad (4)$$

여기서 v_i 와 \bar{v}_i 는 각각 소재와 금형의 접선속도 성분을 나타내며, a 는 아주 작은 양의 상수이다.

식 (1)에서 편차응력텐서 σ'_{ij} 는 소성유동법칙에 의하여 다음과 같이 변형률속도 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 의 함수로 표현된다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (5)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 유효응력과 유효변형률속도를 의미한다. 식 (1)을 유한요소법에 의하여 이산화시키면, 비선형방정식이 유도된다. 이와 관련된 상세한 내용은 참고문헌[11]으로 대신한다.

2.2 해석모델

롤 포밍공정 해석에서 가장 중요한 점은 소재의 형상이다. 스트링거의 소재는 매우 길어서 비정상상태의 가정 하에서 전체 모델을 해석할 경우 매우 많은 유한요소격자가 필요하다. 그래서 본 연구

에서는 긴 소재 중에서 일정 부분만을 해석영역으로 선택하였다. 선택된 소재의 길이는 전체 시물레이션을 통틀어서 2 개의 롤 스텐드에 접촉하도록 결정하였다.

압연공정은 일반적으로 소재가 롤과 떨어지지 않는 중립점(neutral point)[12]이 존재하여 롤의 회전속도와 같은 속도로 움직이기 때문에 해석하기가 어렵다. 롤 시스템에 있는 중립점을 유한요소법으로 예측하기 위해서는 롤 바이트 근처에서 유한요소격자가 상당히 조밀해야 한다. 그러나 비정상상태의 가정 하에서의 성형해석은 과도한 컴퓨터의 계산시간 때문에 비현실적이다. 게다가 예측된 중립점은 마찰법칙과 같은 조건에 매우 민감하다. 경험적으로 볼 때 실제 몇 개의 절점만이 롤에 접촉하고, 그 결과 마찰응력은 Fig. 5 에서와 같이 적정 수의 절점을 사용할 경우 해석 스텝마다 변한다. 비정상상태의 가정하에서의 해석에서 롤 바이트에서 절점의 수가 항상 만족 할 수는 없고, 소재의 속도를 롤과 소재의 접촉으로 계산한다면 소재의 일정한 속도를 얻기는 매우 어렵다. 그러나 일반적인 롤 포밍에서 길이방향으로 늘어나는 것은

무시할 수 있고 선택된 예처럼 대칭면을 가진다고 한다면 대칭면에 존재하는 절점의 길이방향의 속도 성분은 같다고 가정할 수 있다. 따라서 대칭면이나 롤 바이트 영역에 존재하는 자유표면상의 절점을 길이방향으로 속도가 주어진 경계로 간주하였다.

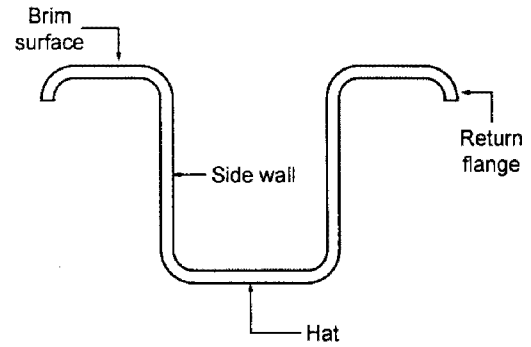


Fig. 1 Cross-section of the straight stringer studied in this paper

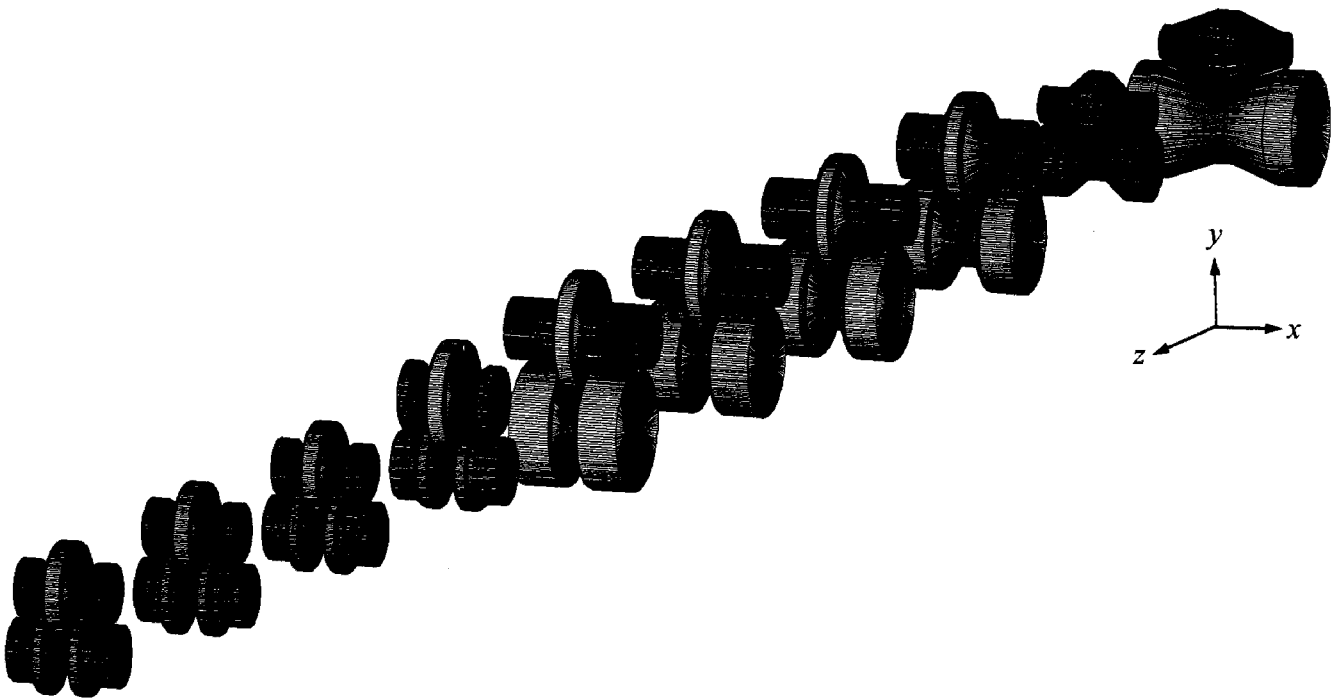


Fig. 2 Straight stringer roll forming processes

3. 직선형 스트링거의 롤 포밍공정해석

항공기 구조용 스트링거의 단면은 무게는 가볍고 강성을 높이기 위하여 얇고 굽은 형상으로 되어 있다. 그래서 직선형 스트링거는 롤포밍 공정으로 제작하는 것이 유용하다.

본 연구에서 해석하고자 하는 스트링거의 단면은 Fig. 1 과 같다. 스트링거는 직선으로 되어 있고 대칭성을 가지고 있다. 본 논문에서 대상으로 하는 직선형 스트링거는 10 개의 롤 스텐드로 구성된 롤 포밍기로 만들어진다. 롤 포밍기의 롤 스텐드는 Fig. 2 와 같으며 각각의 롤 스텐드는 2 개의 롤로 구성되어 있다. 소재가 변형률 속도의 영향을 받지 않기 때문에 대칭면에 있는 표면상의 절점의 길이방향 속도는 1mm/s 로 하였고, 각 롤의 각속도는 대칭면에서 롤의 원주 속도가 1mm/s 가 되도록 결정하였다.

마찰법칙으로 일정전단마찰법칙을 적용하였고, 윤활유의 분위기에서 작업이 이루어지는 것을 감안하여 마찰상수를 0.05 로 간주하였다.

소재의 유동응력을 구하기 위하여 감소성 유한요소법으로 인장시험 해석을 실시하였고 그 결과 Fig. 3 에서 비교하였으며 유동응력은

$$\bar{\sigma} = 348.35 \bar{\epsilon}^{0.196} \text{ MPa}$$

이다[13].

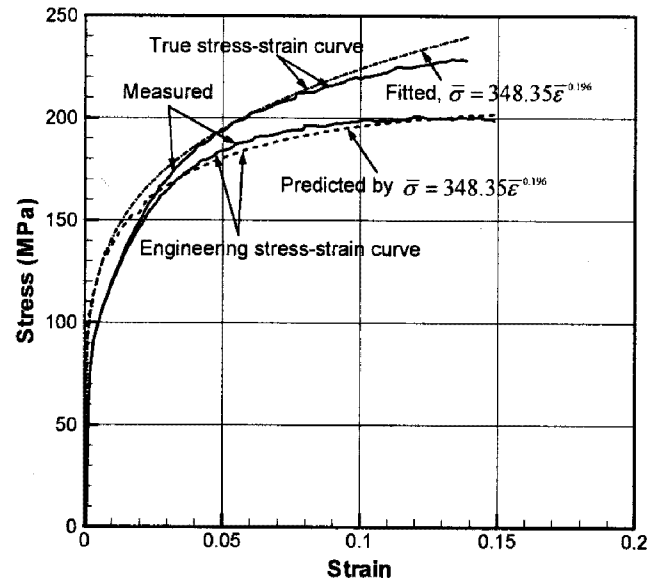


Fig. 3 Tensile test results used for acquisition of flow stress of the sheet material

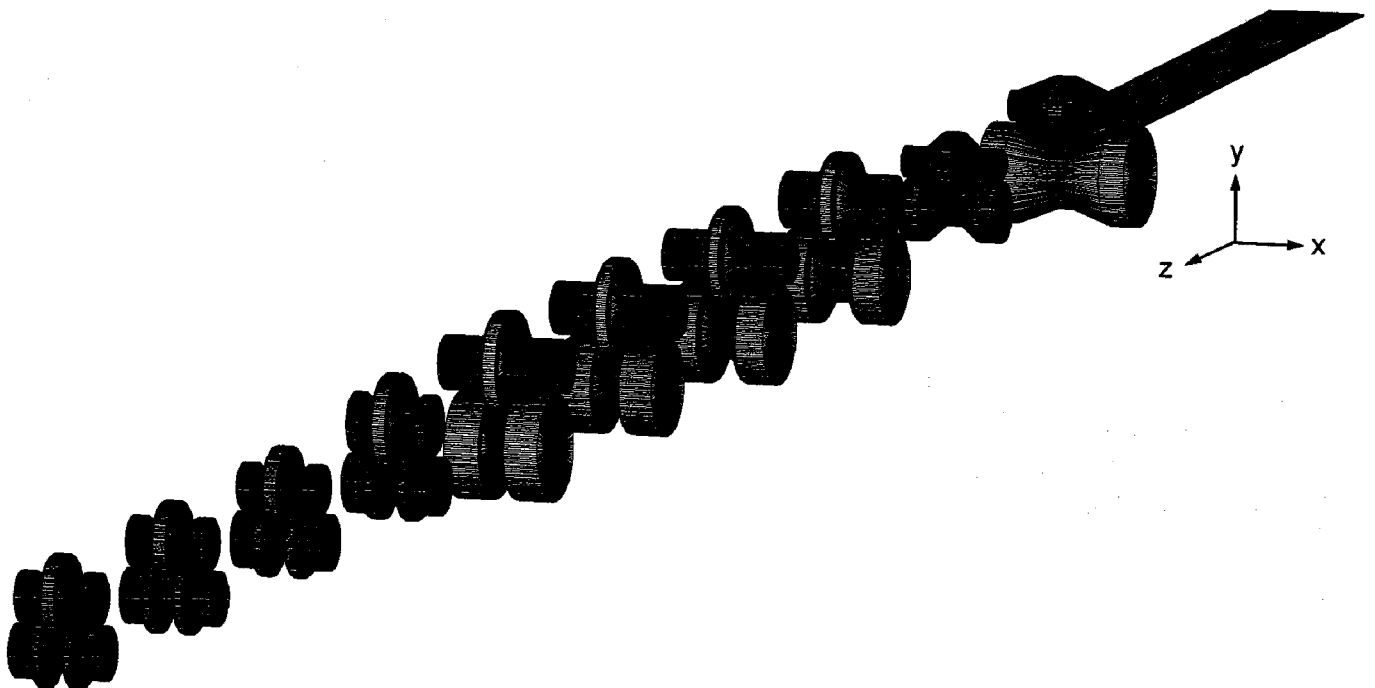


Fig. 4 The finite element mesh used for this study

유한요소격자와 롤 스텐드는 Fig. 4 와 같다. 유한요소격자는 2604 개의 절점과 1620 개의 육면체 요소로 이루어져 있다. 상세한 소재의 유한요소격자는 Fig. 5 와 같다. 이 유한요소격자는 해석의 정확도와 계산시간 면에서 유효하다. 소재의 두께는 1.803mm 이다. 소재가 롤 스텐드에 무리없이 진입하게 하기 위하여 소재에 챔퍼링을 하였고 유한요소격자에도 반영하였다. Fig. 6 은 스트링거의 성형해석결과를 보여주고 있다.

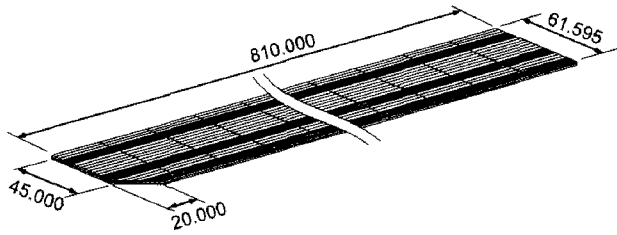


Fig. 5 Finite element analysis model of initial material

4. 결론

본 연구에서는 스트링거의 롤 포밍 공정의 유한요소해석을 실시하였다. 강소성 유한요소법을 사용하였고 롤 스텐드 사이의 소재의 유동거동을 자세하게 나타내기 위하여 비정상상태의 가정 하에서 해석을 수행하였다. 해석모델에서 대칭면이나 롤 바이트 영역의 자유 표면상의 절점은 속도가 주어진 경계로 간주하였고 롤과 소재의 접촉면에는 일정전단마찰법칙이 적용되었다.

이러한 접근방법은 항공기 구조용 직선형 스트링거의 롤 포밍공정에 성공적으로 적용되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신인력양성사업의 일환으로 실시된 연구 결과의 일부이며 경상대 TIC 장비를 사용하였음.

참 고 문 헌

- [1] M. Kiuchi and T. Koudabashi, 1985, Automated design system of optimal roll profiles for cold roll forming, Proc. 3rd Int. Conf. on Rotary Metal Working Processes, Kyoto, Japan, pp. 423-436.

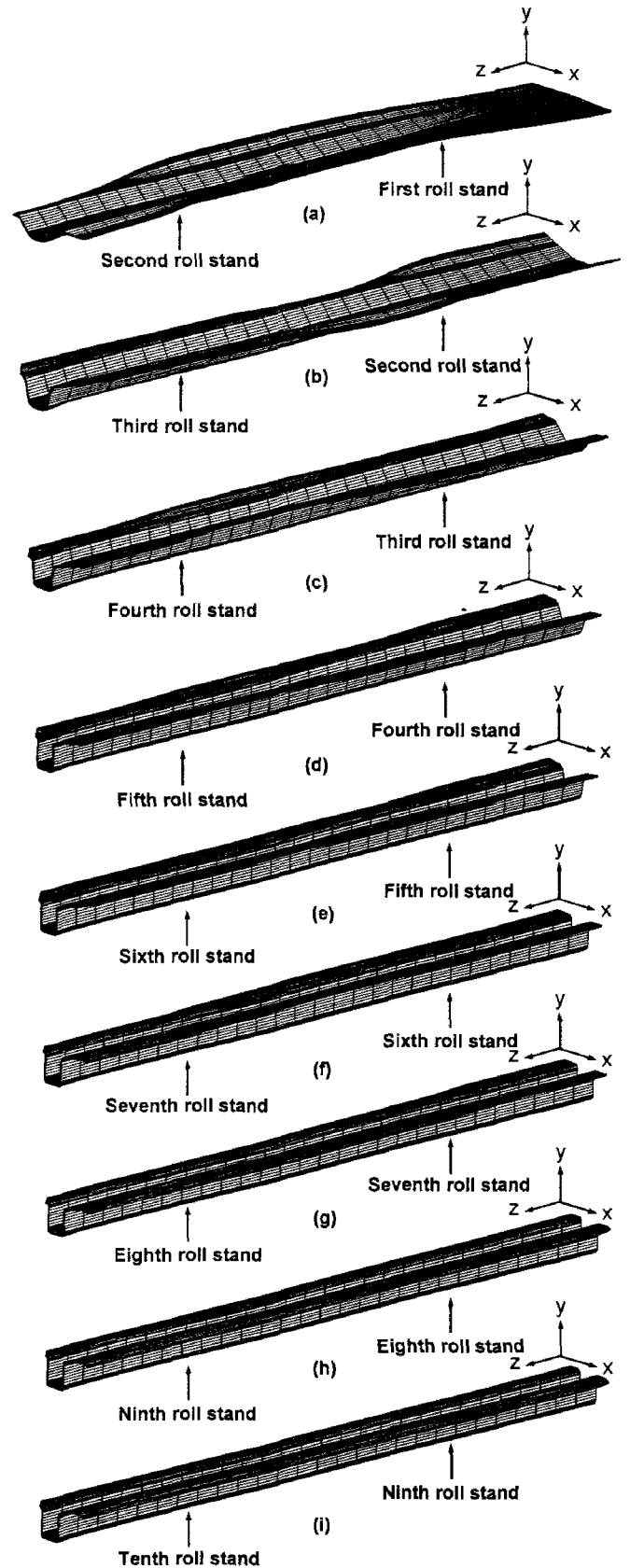


Fig. 6 The predicted results of the stringer ring rolling process

- [2] M. Kiuchi and T. Koudabashi, 1985, Automated design system of optimal roll profiles for cold roll forming, Proc. 3rd Int. Conf. on Rotary Metal Working Processes, Kyoto, Japan, pp. 423-436.
- [3] T. R. Walker and R. J. Pick, 1990, Approximation of the axial strains developed during the roll forming of ERW pipes, J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 22, pp. 29-44.
- [4] M. Brunet and S. Ronel, 1994, Finite element analysis of roll-forming of thin sheet metal, J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 45, pp. 255-265.
- [5] M. Brunet and B. Lay and P. Pol, 1996, Computer aided design of roll-forming of channel sections, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 60, pp. 209-214.
- [6] N. S. Kim, S. I. Oh, 1999, Analysis tool for roll forming of sheet metal strips by the finite element method, Ann. CIRP, Vol. 48(1), pp. 235.
- [7] S. M. Hong, S. Y. Lee, N. S. Kim, 2001, A parametric study on forming length in roll forming, J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 113, pp. 774-778.
- [8] A. Alsamhan, I. Pillinger, P. Hartely, 2004, The development of real time re-meshing technique for simulating cold-roll-forming using FE methods, J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 147, pp. 1-9.
- [9] R. Boman, L. Papeleux, Q. V. Bui, J. P. Ponthot, 2006 Application of the arbitrary Lagrangian Eulerian formulation to the numerical simulation of cold roll forming process, J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 177, , pp. 621-625.
- [10] R. Boman and J.-P. Ponthot, 2000, ALE methods for determining stationary solutions of metal forming processes, Proc. Of ECCOMAS 2000, Barcelona, Spain.
- [11] C. C. Chen, S. Kobayashi, , 1978, "Rigid-Plastic FEA of Ring Compression", ASME AMD, Vol. 28, pp. 163~174
- [12] 전만수, 이형일, "연속체역학에서 유한요소법까지", ITC.
- [13] S. M. Hwang and M. S. Joun, "Analysis of Hot Strip Rolling by a Penalty Rigid-Viscoplastic Finite Element Method", Int. J. Mech. Sci., Vol. 34(12), 1992, pp. 971~984.
- [14] 최인수, 엄재근, 이민철, 전만수, 2006, 강소성 유한요소법에 의한 인장시험의 해석, 2006년도 한국소성가공학회 추계학술대회, pp. 371-377