

유한요소해석을 이용한 성형 롤 설계

김 광 희*
(99년 8월 30일 접수)

Design of Forming Rolls using Finite Element Analysis

Kwang-Heui Kim*

Key Words : Roll Forming(롤 성형), Finite Element Analysis(유한요소해석), Design of Forming Roll(성형 롤 설계), LS-DYNA

Abstract

Roll forming process is simulated with a commercial FEM code LS-DYNA. The rolls are treated as rigid bodies rotating with a constant angular velocity. The strip and the rolls are modeled with 4-node plate elements. It is assumed that the nodes along the front end of the strip move along paths given by sine functions. It is found that the analysis can be applied to the optimal design of forming rolls. With these analyses, it is expected that forming defects can be avoided and process development efforts can be reduced.

1. 서 론

롤 성형(roll forming) 공정은 금속 띠판(strip)을 연속적으로 설치된 여러 쌍의 성형 롤(forming roll) 사이로 통과시키면서 점진적인 굽힘(bending) 가공을 가하여 단면 형상이 일정하고 길이가 긴 제품을 매우 경제적으로 생산할 수 있는 공정으로 오래 전부터 널리 알려져 있다¹⁾. 그러나 이 공정의 긴 역사에도 불구하고 롤 성형된 제품, 성형 롤 및 성형 순서(roll pass sequence)의 설계 방법은 아직도 경험적이고 시행착오적인 방법에 크게 의존하고 있어서 신제품의 개발에 많은 시간과 비용이 소요되고 있다. 따라서 롤 성형 공정으로 생산된

새로운 제품이 시장에서 경쟁력을 빨리 확보하도록 하기 위해서는 개발 기간을 단축하고 개발비용을 절감할 수 있는 체계적이고 효과적인 설계방법이 필요한 실정이다.

지금까지의 롤 성형공정에 관한 연구들은 대부분 수치적인 방법(numerical technique)들로 해석적(analytic) 방법^{2,3)}과 유한요소해석으로 크게 나눌 수 있으며 직접 프로그램을 작성하거나^{4,5)} 상용유한요소해석 프로그램을 이용하였다⁶⁻⁹⁾. 그러나 지금까지의 연구들은 대부분 많은 가정을 도입하여 단순화시킴으로 인하여 실제 공정과 차이가 있어서 산업현장에서 생산되고 있는 복잡한 단면형상을 가진 제품의 해석에 적용하기에는 미흡하여 산

* 정희원, 부경대학교 기계·자동차 공학부

업체에서의 제품개발에 제한적인 도움밖에 주지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 최근 산업체에 많이 보급되고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 성형 공정을 실제 공정에 가깝게 해석하여 그 결과를 여러 가지 복잡한 단면형상을 가진 제품을 생산하기 위한 성형 롤 설계에 직접 적용할 수 있도록 하고자 하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석 프로그램

롤 성형 공정을 유한요소법에 의해 해석하는 방법은 띠판을 연속체(continuum)로 해석하는 방법과 박판(sheet)로 해석하는 방법이 있는데, 연속체로 해석하는 방법은 정확한 해(solution)를 얻을 수 있으나 계산량과 계산시간이 너무 방대하게 소요되므로 현재의 컴퓨터 성능으로는 실제 공정의 해석에 적용하기가 아직은 어려우며 대부분 박판으로 해석하고 있다. 또 유한요소법은 시간에 따른 재료의 거동을 묘사하는 방법에 의하여 내연적(implicit) 및 외연적(explicit) 시간 적분법으로 나눌 수 있다. 내연적 시간 적분법은 해의 정밀도는 우수하지만 컴퓨터의 메모리 용량이 커야 하고 계산 시간이 많이 소요되며 복잡한 3차원 문제의 경우 수렴(convergency)에 실패하여 해 자체를 얻을 수 없는 경우도 있다. 이에 비하여 외연적 시간 적분법은 시간 증분을 안정한계이하로 유지하면 축차(iteration)에 의한 수렴 없이 항상 해를 구할 수 있고 컴퓨터의 메모리를 적게 사용하므로 요소 수를 늘려 잡을 수 있으며 복잡한 형태의 접촉이 포함된 문제도 비교적 쉽게 빠른 시간 내에 해석된다.

본 연구에서는 외연적 시간 적분법을 사용하는 동적(dynamic) 해석용 상용 유한요소해석 프로그램으로 최근 산업체에 많이 보급되고 있는 LS-DYNA를 이용하여 롤 성형 공정을 해석하여 성형 롤 설계에 직접 적용할 수 있도록 하였다.

2.2 해석 모델

롤 성형 공정으로 생산할 제품의 단면 형상과

각 단(pass, station)의 단면형상을 겹쳐 놓은 플라워(flower)를 Fig. 1에 나타내었다. 제품의 두께는 1.8 mm이며, 플라워는 AutoLISP을 이용하여 작성하였고¹⁰⁾, 계산시간을 줄이기 위하여 3단만으로 제품을 완성하도록 설계하였다. 각 단 사이의 거리는 350 mm이며 이 플라워로 설계한 첫 번째,

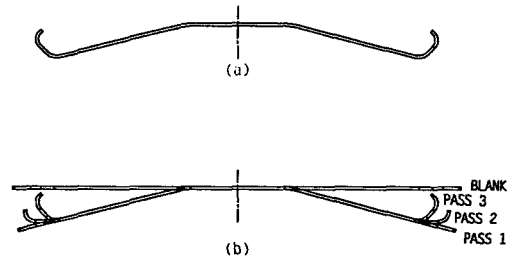


Fig. 1 Cross-sectional shape of the product(a) and the roll flower(b)

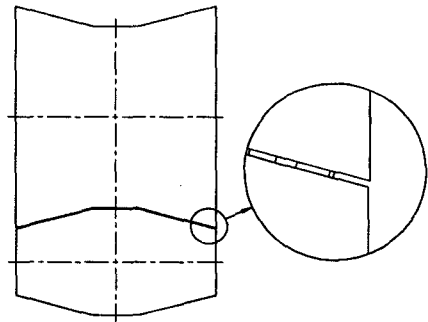


Fig. 2 Forming rolls of the 1st stand(PASS 1)

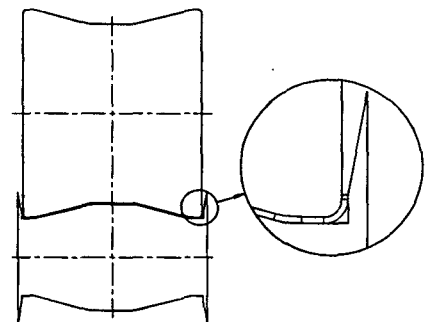


Fig. 3 Forming rolls of the 2nd stand(PASS 2)

두 번째, 세 번째 단의 성형 롤의 모습을 각각 Fig. 2, 3, 4에 나타내었다. 세 번째 단의 성형 롤의 형상은 일반적으로 Fig. 4(a)와 같이 아래쪽 롤의 가장자리가 위쪽 롤의 가장자리를 덮는 형태로 설계한다. 그러나 이와 비슷한 실제 롤 성형 공정에서는 띠판의 선단(front)이 위쪽 롤의 가장자리 부분에 간섭을 받아서 롤 틈새로 진입하지 못하는 경우가 자주 발생하므로 이를 피할 수 있도록 (b)와 같이 위쪽 롤의 가장자리가 아래쪽 롤의 가장자리를 덮는 형상이나 (c)와 같이 위쪽 롤의 가장자리 부분이 수평이 되도록 하여 간섭이 생기지 않도록 하는 형상을 갖도록 설계하여야 할 경우도 있으나 설계 단계에서 어느 형상을 선택할지는 설계자의 경험에 의존할 수밖에 없다. 만일 잘못 선택한 경우에는 롤을 수정해야 하므로 제품 개발 시간과 비용이 증가할 수 있다. 본 연구에서는 가장 적합한 형상을 선택할 수 있도록 이 세가지 형상을 모두 해석하였다.

제품의 단면 형상이 좌우 대칭이므로 오른쪽 반

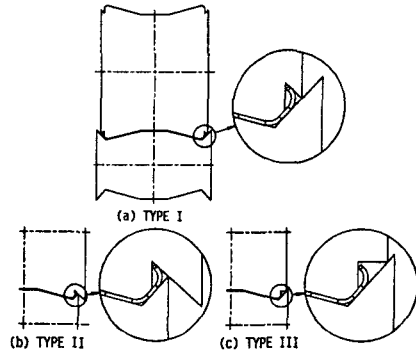


Fig. 4 Three types of forming rolls of the 3rd stand(PASS 3)

만 해석하였고, 롤과 띠판의 유한요소 모델과 좌표축을 Fig. 5에 나타내었다. 띠판의 전진 방향을 z축 방향으로 잡았고, 띠판의 초기 위치는 그림에서 보인 것과 같다. 직선AA'는 좌우 대칭의 중심선이며, 계산 시간을 줄이기 위하여 띠판의 길이는 각 단 사이의 거리의 2.2배 정도인 765.625 mm로 택하였다. 이 길이는 해석의 마지막 단계에서 띠판이 1,

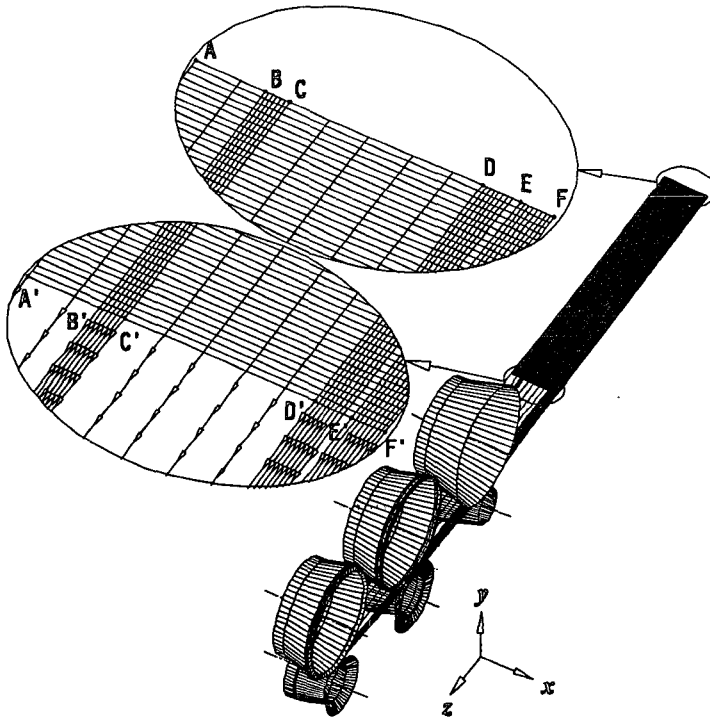


Fig. 5 FEM model of the strip and forming rolls.

2, 3단 모두에 걸쳐 있을 최소의 값이다. 제품의 오른쪽 반을 만들기 위해 소요되는 평편한 띠판의 폭은 129.463 mm로 택하였다. 이 폭은 굽힘부의 중립면(neutral plane)의 위치가 띠판의 두께 방향의 한 가운데 면(mid-plane)에 있는 것으로 가정한 것이며, 실제의 공정에서는 중립면이 굽힘 반경(bend radius) 쪽으로 이동하므로 이보다 약간 작아야 할 것으로 보인다. 롤과 띠판을 4 절점(node) 사각형 요소로 모델링하였고, 띠판의 요소 수는 8120개이고 롤의 요소 수는 모두 2700개이다.

2.3 경계 조건 및 물성치

해석 시간을 줄이기 위하여 띠판의 전진 속도는 실제 공정의 속도보다 빠른 10 m/s로 잡았고, 롤의 최소 반경이 75 mm 이므로 띠판의 전진 속도보다 약간 빠른 원주속도를 가지도록 각 롤의 회전속도를 133.3 rad/s로 잡았다.

띠판이 전진하면서 선단이 롤 사이로 원활하게 진입할 수 있도록 하기 위하여 Kiuchi의 방법^{2,3)}과 비슷한 방법으로 Fig. 5에서의 화살표들과 같이 띠판의 선단인 직선A'F'상의 절점들이 각 단의 롤 틈새의 대응하는 위치에 있는 점들을 정현(sine)함수 형상으로 통과하는 것으로 가정하여 시간에 따른 변위(displacement) 조건을 부여하였고, 띠판의 선단이 세 번째 단의 롤 틈으로 진입하면 이 변위 조건을 해제하였다.

롤은 강체(rigid body)로 처리하였고 공간상에 고정된 각 회전축을 중심으로 일정한 회전속도 133.3 rad/s로 회전하도록 하였으며, 띠판과의 접촉면에서의 마찰계수는 0.1로 잡았다. 띠판의 요소는 Belytschko-Tsay 쉘(shell) 요소 수식¹¹⁾을 사용하도록 하였고, 띠판의 소재는 CHSP60C이고 물성치는 박기철 등의 실험치¹²⁾를 이용하였다.

3. 해석결과 및 검토

해석은 HP C160 공학용 워크스테이션에서 수행하였으며, 각 경우의 해석 시간은 CPU 시간으로 60시간 정도가 소요되었다.

세 번째 단의 롤 형상을 Fig. 4(a)와 같이 설계하였을 경우(TYPE I)에 띠판의 선단이 세 번째 단의

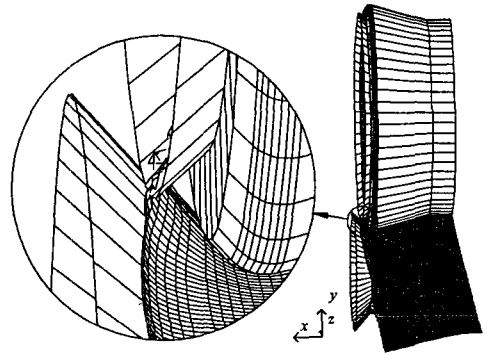


Fig. 6 Deformed shape of the strip when its front enters the 3rd stand with TYPE I forming rolls

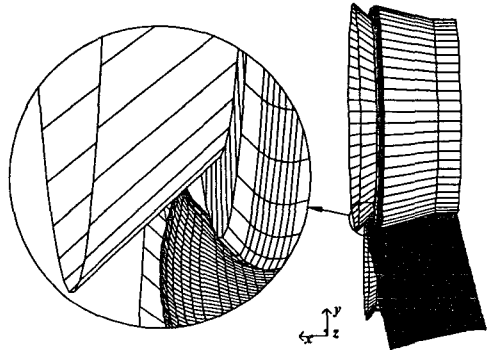


Fig. 7 Deformed shape of the strip when its front enters the 3rd stand with TYPE II forming rolls

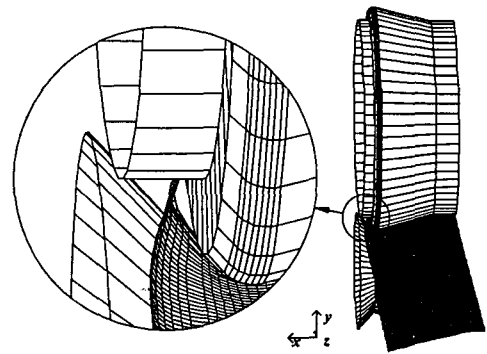


Fig. 8 Deformed shape of the strip when its front enters the 3rd stand with TYPE III forming rolls

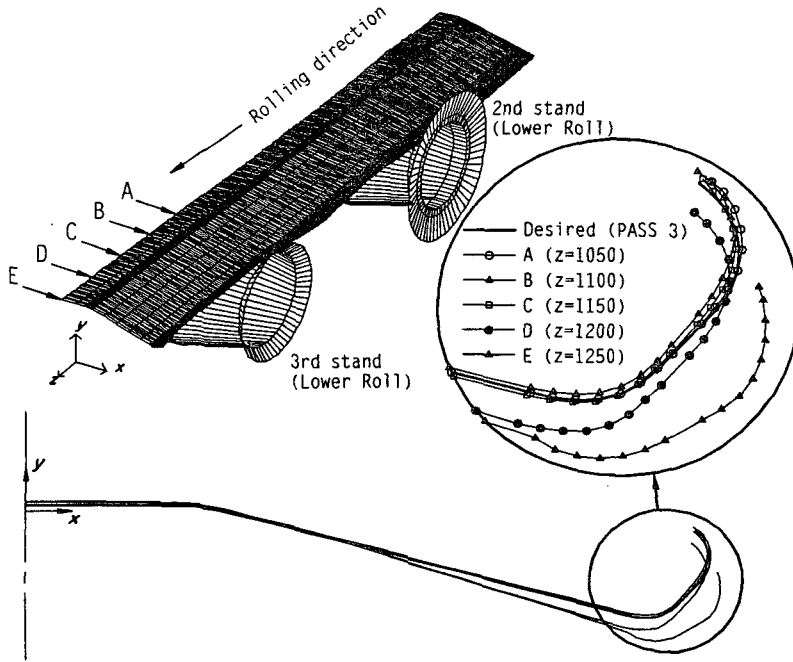


Fig. 9 Cross-sectional shapes of the mid-plane of the strip when its front is passed through the 3rd stand with TYPE II forming rolls

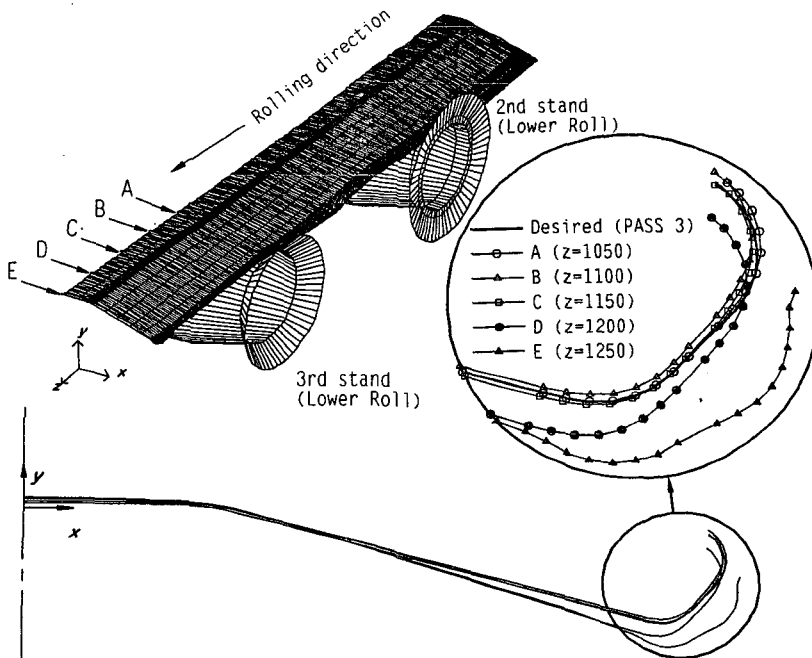


Fig. 10 Cross-sectional shapes of the mid-plane of the strip when its front is passed through the 3rd stand with TYPE III forming rolls

롤 틴새로 진입할 때 띠판의 가장자리 부분이 제대로 진입하지 못하고 심하게 찌그러지고 일부 요소는 띠판으로부터 분리되려 하는 모습을 Fig. 6에서 보여주고 있다. 이 경우에는 더 이상 해석이 진행되지 못하였으며, 따라서 이러한 롤 형상으로는 원하는 제품을 얻을 수 없을 것으로 판단할 수 있다.

세 번째 단의 롤 형상을 Fig. 4(b)와 (c) 같이 설계하였을 경우(TYPE II, TYPE III)에 띠판의 선단이 세 번째 단의 롤 틴새로 진입할 때의 모습을 각각 Fig. 7과 8에 보여주고 있다. 두 경우 모두 무난하게 진입함을 알 수 있으나, TYPE III의 경우는 롤 설계와 제작이 더 용이하지만 띠판의 가장자리 부분에서 롤과 접촉하지 않는 영역이 생겨서 제품의 형상 정밀도가 떨어질 가능성이 있다.

이를 검토하기 위하여 띠판의 선단이 세 번째 단을 통과한 후의 띠판의 한 가운데 평면의 단면 형상을 TYPE II의 경우는 Fig. 9에, TYPE III의 경우는 Fig. 10에 각각 보였다. 두 그림을 비교하여 보면 단면 형상이 거의 같음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 택한 제품을 생산하기 위한 세 번째 단의 롤 형상은 TYPE II와 TYPE III 중에서 어느 것을 택하여도 좋지만 전술한 바와 같이 TYPE III가 롤 설계와 제작이 더 용이하므로 추천할 만한 형상이라고 할 수 있다.

Fig. 9와 10에서 선단 쪽이 아래 쪽으로 처지면서 형상의 완성도가 떨어지는 현상이 보이는데, 이것은 제품을 3단의 성형만으로 완성하려고 함에 따라 띠판의 가장자리 부분이 길이 방향으로 과도하게 늘어나기 때문이며 따라서 단수를 늘려서 변형이 과도하게 생기지 않도록 하여야 할 것으로 판단된다.

소재와 롤 사이의 접촉처리에 소요된 시간이 전체 해석 시간의 57%정도를 차지하였다. 본 연구에서 사용한 LS-DYNA는 구조물의 동적 해석을 위해 개발된 범용 프로그램이어서 다양한 해석을 할 수 있는 장점이 있으나 소성 가공 해석 전용 프로그램에 비하여 효율이 떨어지는 것으로 보인다. 이 프로그램으로 많은 성형 단수를 가진 공정을 해석하고자 하면 롤의 수가 증가함으로 인하여 접촉면의 수도 증가하여 접촉처리에 소요되는 시간의 비중이 훨씬 커져서 해석 시간이 과도하게 길어질 것

으로 보인다. 따라서 롤 성형 공정의 특성을 충분히 고려하여 롤과 띠판 사이의 접촉을 효율적으로 처리하여 해석 시간을 대폭 줄일 수 있는 전용 해석 프로그램의 개발이 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 동적 해석용 상용, 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 롤 성형 공정을 해석하여 그 결과를 성형 롤의 설계에 직접 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 성형 롤 설계 시 본 연구의 방법으로 해석을 수행하여 최적의 롤 형상을 선택함으로써 신제품의 개발 기간을 단축하고 개발비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

롤 성형 공정의 특성이 충분히 고려되어 해석 시간이 짧은 전용 해석 프로그램의 개발과 롤 설계 및 해석이 통합된 프로그램의 개발이 추가 연구로 요구된다.

참고문헌

- 1) Society of Manufacturing Engineers, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4th ed., Vol.2, Chapter 8, 1984
- 2) Kiuchi, M., "Analytical Study on Cold Roll Forming Process", Report of the Inst. Ind. Sci., Univ. of Tokyo, 23, 1, 1973
- 3) Kiuchi, M., "CAD System for Cold Roll-Forming", Annals of CIRP, Vol. 38, pp. 283-286, 1989
- 4) Brunet, M. and Ronel, S., "Finite Element Analysis of Roll-Forming of Thin Sheet Metal", J. Mater. Process. Technol., Vol. 45, pp. 225-260, 1994
- 5) Nefussi, G., Proslie, L. and Gilormini, P., "A Simulation of Cold-Roll Forming for Elastoplastic Materials", Int. J. Mech. Sci., Vol. 40, No. 1, pp. 15-25, 1998
- 6) Rebelo, N., Nagtegaal, J.C., Taylor, L.M. and Passman, R., "Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods in the Simulation of Metal Forming Processes",

- ABAQUS Users Conf., Newport, RI, 1992
- 7) McClure, C.K. and Li, H., "Roll Forming Simulation using Finite Element Analysis", Manufacturing Review, 8, 114, 1995
 - 8) Senayake, R.S., Cole, I.M. and Thirumarudchelvan, S., "The Application of Computational and Experimental Techniques to Metal Deformation in Cold Roll Forming", J. of Mater. Process. Technol., Vol. 45, pp. 155-160, 1994
 - 9) Heislitz, F., Livatyali, H., Ahmetoglu, M.A., Kinzel, G.L. and Altan, T., "Simulation of Roll Forming Process with the 3-D FEM Code PAM-STAMP", J. of Mater. Process. Technol., Vol. 59, pp. 59-67, 1996
 - 10) 김광희, "냉간 롤 성형 공정의 컴퓨터 이용 설계 시스템의 개발", 부경대학교 논문집, 제2권, 제2호, pp. 271-279, 1997
 - 11) Belytschko, T., Lin, J.I. and Tsay, C.S., "Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 42, pp. 225-251, 1984
 - 12) 박기철, 한수식, 김광선, 권오준, "레이저 용접 테일러드 블랭크의 기본 성형특성 I: 인장변형 특성", 한국소성가공학회지, 제7권, 제1호, pp. 23-35, 1998
 - 13) Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA User's Manual, Version 940, 1997