

유선추적법을 이용한 자유표면 예측기법 개발

김태효, 황상무
포항공과대학교 기계공학과

Prediction of Free Surface by Streamline-Tracing Method

T.H. Kim, S.M. Hwang
Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH

ABSTRACT

Tracing streamlines in global coordinate, especially with finite element mesh, requires much computation due to C_0 continuity of velocity field. In this study, a new approach is presented for the determination of streamlines from velocity field obtained by FE analysis. It is shown that amount of calculation can be drastically reduced and boundary of element can be easily treated. The approach is applied to the problem of free surface of deforming workpieces in shape rolling.

Key words: free surface, streamline-tracing method, shape rolling

1. 서론

자유표면은 소재의 표면 중 직접 금형과 접하지 않는 부분으로 내부의 응력변화 및 금형과 접한 부위의 변형에 따라 변화하므로 자유표면의 예측은 가공중인 소재의 변화 및 가공후의 형상을 아는 데 중요하다.

비정상상태 해석서는 소재표면의 변화를 바로 알 수 있으나, 정상상태 해석시에서는 형상을 미리 알 수 없으므로, 일단 자유표면을 가정하여 해석을 수행하고, 해석 결과를 바탕으로 자유표면을 보정한후 해석을 반복하는 기법이 주로 사용된다.

Oh 등[1]은 유선법을 이용하여 열연공정을 해석하였고, Dalin[2]는 주조공정에 이를 적용하여 bulging 을 예측하였다. 기존의 유선법은 단순히 경계면에서의 속도성분을 적분해 나가는 방식으로 계산량이 적고, 해석자체와는 무관하게 속도장만 알면 쉽게 구할 수 있는 이점이 있으나 정확도가 떨어지고, 금형이나 공구와의 접촉처리가 용이하지 않다. 이에 대해 Yamada 등[3]은 소재의 출구측 형상이 롤과 일치한다는 가정을 도입, mandrel rolling 을 해석하였으며, 열연 공정에도 유사한 가정을 적용하여 자유표면을 예측하였다[4]. Lee 등[5]은 표면상의 절점들에 대해 방향 벡터를 설정하

고 그 크기를 galerkin's method 를 사용하여 구함으로써 자유표면을 결정하였고, Chenot 등[6]은 표면상의 속도오차에 대한 functional 을 정의하고 이를 최소화하여 자유표면을 구하였다. 그러나 이러한 방법들 역시 여러 가지 기하학적인 가정을 도입하고 있으며 금형과의 접촉면이 일정하지 않을 경우 제대로 처리하지 못한다.

본 논문에서는 기존의 공간 좌표상에서 구하던 유선을 요소 좌표계로 옮겨 계산함으로써 계산속도를 향상시킬 수 있는 새로운 유선 추적법을 제시하였다. 그리고 이를 확장하여 압연공정해석에 사용될 수 있는 자유표면 예측기법을 제시, 몇가지 형상압연 공정에 적용하여 보았다.

2. 유한요소를 이용한 새 유선추적법

공간좌표계상의 속도장을 요소좌표계로 옮겨 보면 속도장이 요소좌표의 유리함수로 간단히 표현되고 요소 경계도 $\xi = \pm 1, \eta = \pm 1$ 로 정의되므로 쉽게 경계를 찾을 수 있다. 따라서 공간좌표계상의 속도장을 요소 좌표계로 치환하여 요소 좌표계상에서 유선을 구할 경우 좌표계상의 속도를 구하기가 쉽고, 경계를 찾는 것 역시 단순히 지게 되어 공간 좌표계

에서보다 많은 이점을 지니게 된다.

Fig.1 에 새 유선 알고리즘을 나타내었다. 먼저 초기 점에서의 속도를 이용하여 요소 경계면까지의 거리를 계산하고 경계면까지 도달하는데 걸리는 시간을 구한 후 그 값을 초기치로, Bulirsch-Stoer 법[7]을 사용하여 요소내부의 속도장을 적분해 나간다.

추적점이 요소의 경계를 벗어나는 경우, 그 위치에서의 속도를 이용, 경계까지 돌아가는데 필요한 시간을 계산하여 마지막 추적에 소요된 시간에서 뺀 후 추적을 반복하며 요소의 경계에는 선형구간을 두어 경계에서 추적이 반복되는 것을 막는다.

3. 자유표면의 예측

압연공정은 소재와 구동하는 롤 사이의 마찰력에 의한 것으로 소재상의 모든 변형은 소재와 롤의 접촉에 기인한다. 따라서 롤과 소재의 접촉영역이 정해지면 자유표면을 비롯한 소재의 모든 변형 또한 정해지게 되므로 소재 표면상의 유선이 롤과 접하는 점을 찾아 유선이 롤과 접하는 양을 결정하면 그때의 유선이 바로 자유표면이 된다.

Fig.2 는 제시한 자유표면 알고리즘의 순서도이다. 유동해석에 의해 구해진 소재내부의 속도장을 앞서 제시한 유선추적법을 이용, 표면상의 유선을 추적하여 롤과의 접점을 찾는다. 찾은 접점과 가정한 접점과의 오차를 이용하여 새 접점을 결정하고 현재의 유선이 새접점을 지나도록 보정한다. 표면상의 모든 유선의 추적 및 보정이 끝나면 변형된 새 요소 격자를 이용, 다시 유동해석을 하며, 자유표면 보정이 일정 오차내에 들어 갈 때까지 보정을 계속한다.

4. 유효 변형율의 계산

소재내부의 응력계산시 소재의 유효변형율이 필요한 경우 다음과 같은 방법으로 유효변형율을 계산한다. 즉, 해당요소를 지나는 유선을 역추적하여 변형율이 0인 경계까지 유효변형율 속도를 적분하여 구한다. 이것은 앞서 제시한 유선추적법을 이용하여 동일한 방법으로 구현하였다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서 제시한 유선추적법을 기존의 방법[8]과 비교하였다. 이 방법은 유선을 추적하는데 공간상의 속도적분은 Euler 법을 사용하고, 요소의 경계와의 접점은 Newton-Raphson 법을 사용하였다. 비교를 위한 가상 속도장은 2 차원의 경우는 ± 1 사이의 공간에 대해 원점에서의 vortex flow 를, 3 차원의 경우는 z 방향으로 일정 속도를 가지는 screw flow 를 사용하였다.

Fig.3, 4 에 주어진 속도장에서 유선추적을 한 결과를 비교하였다. 본 논문에서 제시한 유선추적법은 심한 변화가 있는 중심 부근에서도 잘 찾아 가는 것을 볼 수 있다.

표1 은 기존의 유선법과 제시된 방법의 계산 시간을 비교한 도표로, 새 방법이 기존 방법에 비해 시간을 상당히 줄일 수 있었음을 보여준다.

제시된 자유표면 예측 알고리즘을 몇가지 형상 압연 공정에 적용해 보았다. 선택한 공정은 선재압연 패스의 일부로, 롤 접선속도와 마찰계수는 각각 0.5 rad/s, 0.3, 소재는 0.2% 저탄소강을 사용하였다. 해석은 벌칙 강소성 유한요소법[8]을 사용하여 유동만을 해석하였다. Fig.5-7 은 각 공정에 사용된 소재과 롤의 형상 및 자유표면이 보정되어 가는 과정을 보여준다.

Fig.8 은 자유 표면 보정에 따른 입출측 간의 mass flow 의 오차로 보정이 이루어짐에 따라 차가 줄어들어 표면이 보정이 거듭됨에 따라 점점 자유표면을 찾아 감을 알 수 있다.

Fig.9 은 각 공정 조건에 대해 출측 단면의 변화 및 폭퍼짐의 양상을 보여 준다. 그림에서 보듯 롤 접촉영역 전, 후에서도 폭퍼짐이 일어나고 있음을 쉽게 알 수 있다.

6. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문은 기존의, 공간 좌표계에서 구하던 유선을 요소 좌표계로 옮겨 계산하는 새로운 유선 추적법을 제안하였다. 또한 이를 확장하여 압연공정 정상상태 해석시 형상의 변화를 예측할 수 있는 자유표면 예측 알고리즘을 제시하고, 몇 가지 형상압연공정에 적용하였다.

제시된 유선 추적법은 계산량을 대폭 감소시키고 정확성을 높일 수 있었으며 이를 응용한 자유표면 예측 알고리즘을 실제 형상압연공정에 적용시킨 결과 접촉영역의 변화 및 형상의 변화를 잘 추정함을 보여주었다.

7. 참고 문헌

- [1] S.I. Oh, S. Kobayashi, "An approximate method for a 3D analysis of rolling", *Internat. J. Mech. Sci.*, 1975, vol.17, pp.293-305
- [2] J.B.Dalin, J.L. Chenot, "Finite element computation of bulging in continuously cast steel with a viscoplastic model", *Internat. J. Numer. Methods Engrg.*, 1988, vol.25, pp.147-163
- [3] K. Yamada, S. Ogawa, S. Hamazu, "Three dimensional analysis of mandrel rolling using rigid-plastic finite element method", *NUMIFORM89*, 1989, pp.375
- [4] K. Yamada, S. Ogawa, M. Ataka, "Three dimensional analysis of flat rolling using rigid-plastic finite element method coupled with roll deformation analysis", *NUMIFORM92*, 1992, pp.755-760
- [5] Y. S. Lee, P. R. Dawson, T. B. Dewhurst, "Bulge prediction in steady state bar rolling process", *NUMIFORM89*, 1989, pp.323
- [6] J. L. Chenot, P. Montmitonnet, A. Bern, C. Bertrand-Corsini, "A method for determining free surfaces in steady state finite element computation", *Computer Methods in App.Mech.Eng.* 1991, vol.92, pp.245-260
- [7] J. Stoer, R. Bulirsch, 1980, "Introduction to Numerical Analysis", New York, Springer-Verlag
- [8] S.M.Hwang, M.S.Joun and J.S. Park, "A Penalty Rigid-Plastic Finite Element Method for the Determination of Stress Distribution at the Toll-Workpiece Interfaces in Metal Forming" *Proc. 18th NAMRC*, University Park, pennsylvania, 1990, pp.13

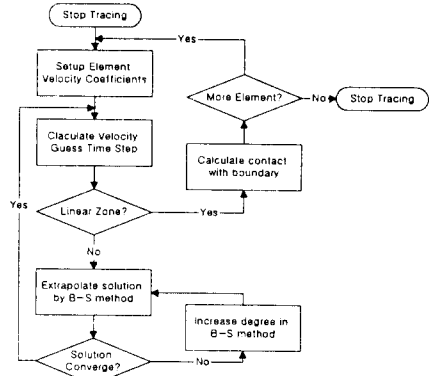


Fig.1 유선 추적 알고리즘

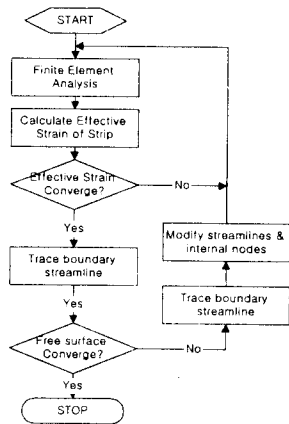


Fig.2 자유표면 예측 알고리즘

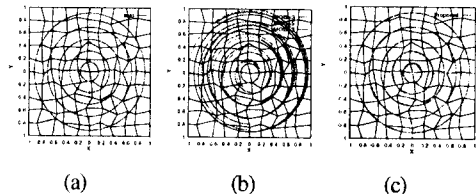


Fig. 32 차원 vortex flow 상에서의 유선추적법 비교;(a) exact solution, (b) 기존의 방법 (c) 제시한 방법

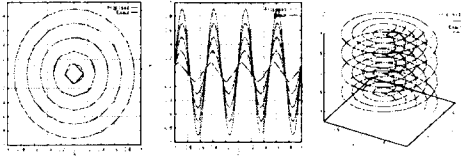


Fig. 4.3 차원 screw flow 상에서의 유선추적 결과

요소수		100	400	1600	10000
통과 요소수	Old	1011	8423	68555	1092414
	New	1144	9010	71680	1108414
계산 시간 (sec)	Old	0.80	6.71	55.33	14:51.38
	New	0.11	0.78	5.67	1:21.58

표 1 유선추적시 계산시간 비교

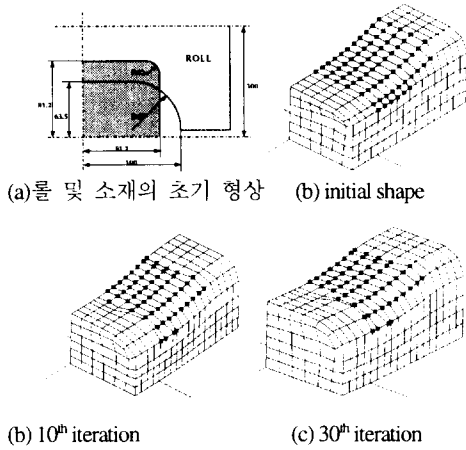


Fig. 5 공정 1

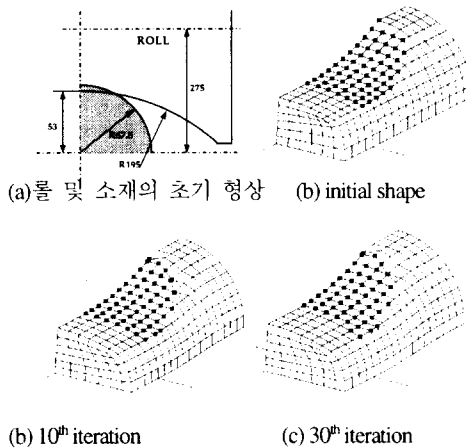


Fig. 6 공정 2

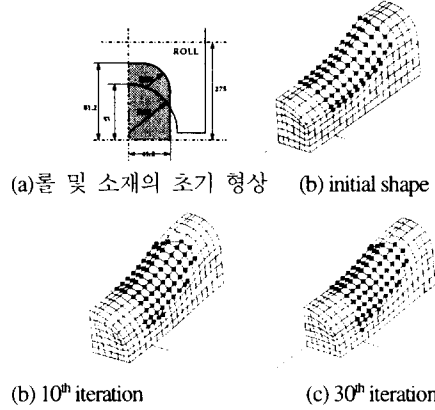


Fig. 7 공정 3

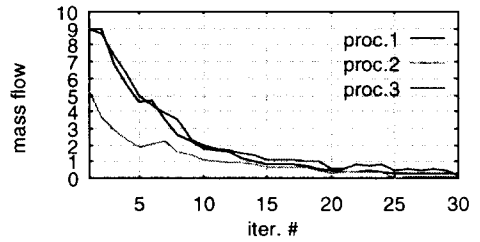


Fig. 8 입 출측 mass flow error의 변화

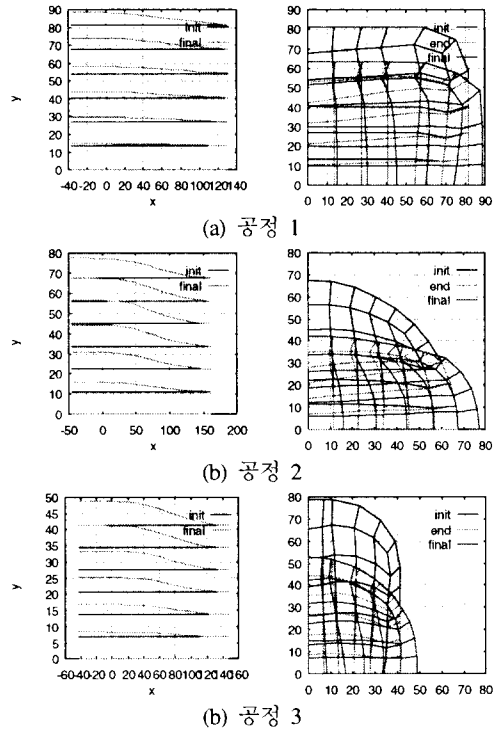


Fig. 9 자유표면 예측에 따른 폭퍼짐 및 단면 형상의 변화