

有限要素法을 이용한 薄板 燃燒管의 內徑 縮小 工程 解析

리승훈* 홍성인** 윤수진***

* 충남대학교 공과대학 기계공학과

** 충남대학교 공과대학 기계공학과 교수

*** 국방과학연구소

In this paper, some of the critical factors in Necking-In process are investigated using a numerical analysis. The optimal processing parameters are established and applied to the actual processes. FEM analysis is carried out based on elastic-plastic work hardening model using ABAQUS/Standard. The results obtained from the commercially available code ABAQUS/Standard are compared with the experimental data and shows a good agreement with experimental data. The purpose of this paper is to search for the relations among the roller angle, feed length, and working force. Stress, strain distribution, displacement and increase in the length of the workpiece are also investigated.

1. 서론

박판 연소관의 내경축소(Necking-In) 기술은 회전하는 맨드렐에 관상의 예비성형체를 장착하고 로울러로 압착시켜 소성 변형영역을 국부화함으로써 두께변화를 주어 내경을 축소, 박육의 튜브형 제품을 생산하는 회전가공법의 한 분야이다.¹⁾⁻²⁾ 이 기술은 소성영역의 국부화를 통해 작은 가공력으로 제품을 생산할 수 있다는 장점과 함께 제품의 경량화, 정밀도의 향상, 생산단가의 절감 등의 측면에 있어서도 우수성을 갖고 있다.

내경축소 기술은 현재 항공·우주공학 분야에서 연소관 제작, 프린터 산업 등에서의 고속 잉크 분사 노즐, 의료 산업에서의 주사기 제작 등 다양한 분야에 적용되고 있고 점차로 그 용도가 확대되고 있다.³⁾ 그러나 이에 대한 이론 및 실험 연구결과는 국내외에 있어서 거의 발표되지 않은 핵심 성형기술이다.

박판 연소관은 두께가 길이와 직경에 비해 매우 작으므로 탄성회복에 의한 두께증가와 내경성장 등의 치수제어 문제, 파단 및 주름 발생 등의 여러 가지 문제가 발생할 것으로 예상된다. 따라서 이를 해결하기 위한 공정해석 작업이 필수적이다.

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 내경축

소 공정에 있어서의 주요 공정변수들간의 상호관계를 밝히고 이를 통해 최적의 가공조건을 찾아내는 것을 목적으로 한다. 유한요소 해석은 상용코드인 ABAQUS/Standard⁴⁾를 통해 이루어졌고 해석결과는 실험결과와의 비교를 통해 타당성을 검토하였다.

2. 공정설명

내경축소공정의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 회전하는 맨드렐에 예비성형체를 장착하고 로울러를 축방향으로 이송시켜 소재를 압착, 로울러와 맨드렐 사이에 재료를 채워넣은 다음 로울러가 가공물로부터 분리됨으로서 공정이 완료된다.

예비성형체의 재료로는 성형성(formability)이 좋은 마레이징강(maraging steel)을 사용하였고 가공에 의한 온도상승을 억제하기 위해 냉각수를 충분히 사용하였다. 1차실험에서 사용한 주요공정 변수는 Table. 1과 같다.

Roller	lead angle, α	relief angle, β	forming radius, r
	30°	10°	4mm
Rotating velocity	220 r.p.m		
Feed rate	220 mm/min		
Feed length	80mm		

Table. 1 Processing parameter

실제 실험에서 발생한 문제점은 크게 두가지로 분류할 수 있는데 첫번째는 Fig. 1에서 a로 표시된 맨드렐 경사부에 재료가 잘 채워지지 않는 현상이다. 재료가 완전히 채워졌을 경우 이 경사부는 10°의 경사각을 이루나 측정

결과 7~10°에 이르는 V형의 경사각을 형성하여 재료가 잘 채워지지 않음을 알 수 있었다. 두 번째 문제점은 가공물 내·외면에서의 내경성장과 두께증가 문제이다. 이밖에도 로울러와의 접촉이 이루어지는 외면에서의 주름발생과 로울러 진입부에서의 심한 내경성장 문제 등이 발생하였는데 가공후 가공물의 외면은 황삭을 거치고 로울러의 진입부는 절단하게 되므로 큰 문제가 되지 않는다고 판단된다.

3. 모델링을 위한 고려사항.

내경 축소 공정의 정확한 해석을 위해서는 회전과 축방향 이송을 모두 고려하여야 하므로 3차원 해석이 필요하다. 그러나 3차원 해석은 유한요소해석상 과도한 수의 요소와 해석상의 복잡성으로 인해 과도한 작업시간을 필요로 하는 등 수행상에 있어서 여러 가지의 어려움을 갖고 있다.⁵⁾ 따라서 공정을 단순화시켜 2차원으로 해석하는 작업이 필요하다.⁶⁾ 내경 축소 공정에 있어서 회전력인 접선방향의 힘은 반경방향과 축방향 힘에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으므로 본 연구에서는 회전력을 무시하고 축대칭으로 가정하여 2차원해석을 수행하였다.⁷⁾⁻⁸⁾ 모델링에 사용된 가정은 다음과 같다.

- 회전력을 무시하여 2차원 축대칭으로 가정하였다.
- 재료는 등방성인 가공경화를 갖는 탄소성으로 가정하였고 von Mises의 항복조건과 associated flow rule을 따른다.
- 로울러와 맨드렐은 강체로 가정하였다.
- 실제 공정에 있어서 냉각수의 사용으로 온도가 거의 상승하지 않으므로 회전에 의한 열효과는 고려하지 않았다.
- 로울러와 맨드렐이 동일한 속도로 회전하므

로 마찰은 거의 없는 것으로 가정하였다.

- 실제 공정에 있어서는 3개의 로울러를 사용하나 1개의 로울러를 사용한 것으로 가정하였다.
- 로울러의 이송속도가 매우 느리므로 정적인 것으로 해석하였다.

4. 해석모델

해석모델의 초기형상과 경계조건을 다음의 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 (a)는 forward 방식을 사용한 해석모델의 초기형상을 나타내고 (b)는 backward 방식을 사용한 해석모델의 초기형상이다.

본 연구에서 사용한 wedge indentation 방식의 해석은 Fig. 3에 보여진 것과 같이 로울러가 반경방향으로 이동하여 재료를 압착하는 step 1과 재료로부터 분리되는 step 2, 이송롤로부터 계산된 일정한 이송간격만큼 축방향으로 이동하는 step 3를 총 이송거리만큼 반복함으로써 완료된다.

기존에 사용하던 extrusion 방식의 해석은 이송롤을 고려할 수 없고 표면에서의 주름발생을 예측할 수 없으며 축방향 가공력이 실제 가공보다 크게 작용한다는 단점을 갖고 있다. 이에 비해 본 연구에서 사용한 wedge indentation 방식은 이송롤의 영향을 고려할 수 있고 주름의 발생을 고려할 수 있으며 반경방향과 축방향 가공력의 비가 실제와 유사하다는 장점을 갖고 있다.

해석모델은 1350개의 요소와 1245개의 절점으로 구성되어 있고 재료의 요소로는 CAX4(1st order axisymmetric quad-rilateral)를 사용하였고, 접촉(contact)요소로는 IRS21A(axis ymmetric rigid surface)를 사용하였다.

해석모델에 사용된 재료의 물성치는 다음의 Table. 2과 같다.

탄성계수	186E+09(N/m ²)
밀도	7.9(kg/cm ³)
응력곡선	1483.5(N/m ²)ε ^{0.085}

Table. 2 Material propertiès

5. 해석결과 및 고찰

5-1. Forward 방식의 가공법

로울러의 α, β, r이 각각 30°, 10°, 4mm 이고 이송거리가 80mm, 로울러가 예비 성형체의 좌측 자유단에서 맨드렐의 경사부로 이동하는 forward 방식으로 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 해석을 통해 얻은 가공물의 최종형상을 나타낸 것으로 맨드렐의 경사부에 재료가 잘 채워지지 않았음을 알 수 있다. 이러한 현상이 맨드렐 경사부가 충분한 소성영역에 도달하지 않았기 때문에 발생한 것으로 추정할 수도 있으나 Fig. 5에 보여진 유효소성변형율(effective plastic strain) 분포를 보면 맨드렐의 경사부가 충분히 소성변형영역에 도달했음을 알 수 있다.

따라서 맨드렐 경사부가 제대로 채워지지 않는 현상이 이 부분에서의 재료의 유동성향과 관련이 있는 것으로 추정되어 이송거리를 변화시켜 해석해 보았다.

Fig. 6은 이송거리 73mm인 경우의 해석결과를 나타낸 것으로 맨드렐의 경사부가 비교적 잘 채워졌음을 알 수 있다. 로울러의 이송거리가 73mm를 기준으로 커질수록 경사부의 채워짐은 점차로 나빠짐을 해석을 통해 알 수 있다.

따라서 forward 방식으로 연소관을 가공할

경우 원하는 형상을 얻기 위한 최적의 이송거리는 73mm임을 알 수 있었다.

Fig. 7은 가공시간에 따른 축방향의 길이신장을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 맨드렐 경사부에 이르러 로울러의 진행방향과 반대방향의 축방향으로 급격한 길이의 신장이 일어난다. 이러한 축방향의 급격한 길이의 신장은 맨드렐의 경사부와 소재사이의 간격이 좁아져 유동량이 많아지기 때문에 발생하는 것으로 이러한 유동량의 증가는 이 부분에서의 급격한 가공력의 증가로 나타난다.

Fig. 8은 시간에 따른 로울러에 작용하는 반경방향 반력의 변화를 나타낸 것이고 축방향과 반경방향의 가공력의 비는 약 1 : 3 인 것으로 나타났다.

Fig. 9는 반경방향의 응력분포를 나타낸 것이다. 로울러의 소재의 접촉면에서는 압축력이 발생하고 접촉면의 좌·우에서는 인장력이 발생함을 알 수 있다. Fig. 10은 축방향의 응력분포를 나타낸 것으로 로울러의 전면에서는 로울러의 진행방향으로, 로울러의 후면에서는 로울러의 진행방향과 반대방향으로 응력이 발생함을 알 수 있다.

맨드렐 경사부에서의 축방향 유효소성변형을 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 그림을 통해 맨드렐 경사부에서는 로울러 진행방향으로의 유동이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

위의 결과를 종합해보면 맨드렐 경사부에서 로울러의 진행에 따라 로울러의 진행방향과 반대방향으로의 재료의 유동이 크게 발생하여 일정거리 이상의 이송거리로 로울러가 진행하면 재료의 채워짐이 점차 나빠진다는 것을 알 수 있다.

경사부의 길이가 긴 연소관을 제작하기 위한 내경축소공정에서 forward 방식의 공정을 선택할 경우 원하는 가공결과를 얻기 위해서는 로울러의 이송거리를 줄여야만 함을 위의 결과를 통해 알 수 있다. 그러나 이러한 가공

법은 가공물의 경사부가 일부는 소성변형을 받고 일부는 소성변형역에 도달하지 않아 바람직하지 않은 결과를 초래하게 된다.

맨드렐의 경사부 끝단까지 소성변형을 주며 원하는 가공결과를 얻기위한 방법으로 다음의 backward 방식을 도입하였다.

5-2. Backward 방식의 가공법

기존에 제작한 연소관은 전술한 forward 방식의 공정으로 제작되었다. 기존의 연소관은 경사부의 경사각이 45° 정도이기 때문에 경사부의 길이가 매우 짧아서 forward 방식을 이용하여도 맨드렐의 경사부가 제대로 채워지지 않는 문제가 심각하게 발생하지는 않았다.

그러나 본 연구의 해석모델은 맨드렐 경사부의 경사각이 10° 로 매우 완만한 형상을 갖고 있기 때문에 경사부의 길이가 매우 길어 forward 방식으로는 최적의 제품을 얻을 수 없다는 결론을 얻을 수 있었다.

따라서 backward 방식이 적합할 것으로 예상되어 해석을 수행하였다.

Fig. 12는 backward 방식으로 해석한 경우의 최종형상을 나타낸 것으로 그림에 나타난 결과를 살펴보면 예상과 같이 맨드렐의 경사부가 비교적 잘 채워져 있음을 알 수 있다.

유효소성변형을 분포를 Fig. 13에 나타내었다. 같은 위치에서의 forward 방식의 유효소성율분포를 나타낸 Fig. 11과 비교해 보면 backward 방식의 경우에 소성변형량이 더 큼을 알 수 있다.

또한, Fig. 13에서 로울러와 소재의 접촉면을 살펴보면 forward 방식에 비해 접촉면적이 더 큼을 알 수 있다. 이러한 접촉면적의 증가는 소성변형영역의 국부화를 저해하는 요인으로서 가공력의 증가를 유발하게 된다.

forward 방식의 경우와 반력과 비교해보면

backward 방식의 경우가 최대 가공력에 있어서 약 1.023배 큰 가공력을 필요로 함을 알 수 있다.

backward 방식의 경우 로울러와 소재의 처음 접촉할때에는 forward 방식보다 접촉면적이 큰 값을 나타내었으나 두 번째 접촉부터는 backward 방식이 오히려 접촉면적이 작았다. 이로 인해 평균가공력에 있어서는 backward 방식이 오히려 더 작은 값을 나타내었는데 이러한 접촉면적의 감소는 두께증가 문제와 큰 관련을 갖는다. Fig. 14는 가공물의 외면에서의 변위를 나타낸 것으로 backward 방식의 가공법이 두께증가 문제를 해결하는데 바람직함을 알 수 있다.

시간에 따른 로울러에 작용하는 반력의 변화를 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 15는 반경방향의 반력을, Fig. 16은 축방향의 반력을 나타낸 것이고 축방향 반력과 반경방향 반력의 비는 약 1 : 3.5 인 것으로 나타났다.

5-3. 로울러의 형상에 따른 변화

가공에 적합한 최적의 로울러의 형상을 찾기위해 로울러 전방각 α 의 영향을 조사해 보았다. Fig. 15는 α 가 각각 20° , 30° , 40° 인 경우의 로울러와 소재가 접촉하는 가공물의 외면에서 반경방향으로의 변위를 나타낸 것이다.

그림의 결과로부터 로울러의 전방각이 큰 경우에 정밀한 가공을 할 수 있음을 알 수 있다.

소재와 맨드렐이 접촉하는 가공물의 내면의 경우 로울러의 전방각에 따른 변위의 영향은 거의 작은 값이었으나 α 값이 20° 인 경우에 가장 정밀한 가공을 할 수 있었다.

로울러의 전방각 α 에 따른 가공물의 내·외면에서의 변위의 변화를 종합해 보면 α 의

증가에 따라 탄성회복에 의한 두께증가와 내경증가는 커지게 된다.

위의 결과로부터 정밀한 치수제어를 위해 적절한 로울러의 전방각은 20° 근방임을 알 수 있다.

로울러 전방각에 따른 가공력의 크기를 비교해 보면 α 가 30° 인 경우의 값을 기준으로 α 가 20° 인 경우 1.034배, α 가 40° 인 경우 0.960배의 가공력이 필요하였다. 따라서 로울러의 전방각 α 가 증가함에 따라 필요한 가공력은 감소함을 알 수 있다.

최소 가공력 조건에 의한 로울러 전방각은 40° 라고 말할 수 있다. 그러나 위의 결과와 같이 40° 의 α 각을 사용할 경우 정확한 치수 제어에 문제가 생겨 내경증가와 두께 증가의 문제가 발생하게 된다. 따라서 최소 가공력 조건과 치수제어 문제를 모두 고려한 최적의 로울러 전방각은 30° 근방이라는 결론을 얻을 수 있다.

6. 결론

박판 연소관의 유한요소해석을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 연소관 제작시 경사부의 치수제어 문제에 있어서 로울러의 이송거리가 주요변수임을 밝혀내었고 적합한 이송거리를 찾아내었다.
- 경사부의 길이가 긴 연소관의 경우 forward 방식보다 backward 방식의 가공법이 적합하다.
- 로울러의 전방각 α 가 커지면 내경증가와 두께증가문제가 심각해짐을 증명하였고 최소 가공력 조건과 치수제어 조건을 통해 최적의 로울러 전방각을 찾아내었다.
- 해석을 통해 가공력을 찾아내었고 응력, 변형률, 유효소성변형률 분포를 찾아내었다.

- 축방향과 반경방향 가공력의 비는 약 1 : 3~3.5인 것으로 나타났다.
- 주름은 소재와 로울러의 접촉면인 외면에서만 발생하였고 내면에서는 발생하지 않았다.
- 해석을 통해 얻은 결과를 실험 데이터와 비교한 결과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

7. 앞으로의 연구방향

- 마찰의 영향
- 온도의 영향
- 이송률의 변화에 따른 영향
- 3차원 해석

tube flow-turning using ball' Advanced Technology of Plasticity 1996 Vol. II, pp. 547-552

- [7] 홍성인, '상계해법과 유한요소법을 이용한 스피닝공정해석에 관한 연구', 한국소성가공학회춘계학술대회, 23-30, 1996
- [8] M. Hayama, H. kudo, 'Analysis of diametral growth and working faces', Bulletin of the JSME, vol.22, No.167, May 1979, vol.22, pp.776-784

참고문헌

- [1] C. L. Packham, 'Metal spinning and shear and Flow forming', Metallurgia and Metal Forming, June 1976, pp.203-206
- [2] C. Wick, 'Metal Spinning : A Review and Update', Manufacturing Engineering, January 1978, pp.73-77
- [3] K. X. CHEN, L. K. SHI, , 'Metal Spinning Technique in China and Throughout the World in 1980's', Proc. Int. Conf'. Rotary Forming', 1989, pp.75-82
- [4] Hibbit, Karlsson, 'ABAQUS/Standard manual'
- [5] 홍성인, '유동성형(Flow Forming)공정 근사해석에 관한 연구', 한국소성가공학회추계학술대회, 39-46, 1993
- [6] E. Doege, 'Experimental research and FEM analysis of steel behavior during

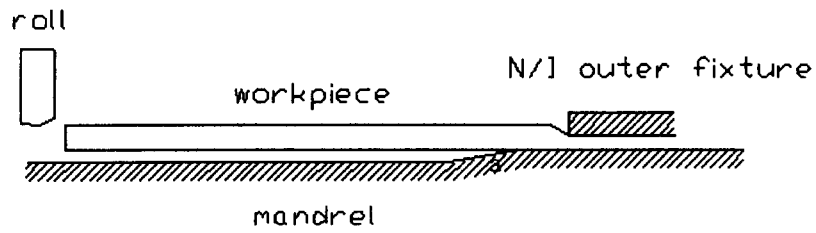


Fig. 1 Schematic drawing for Necking-In process

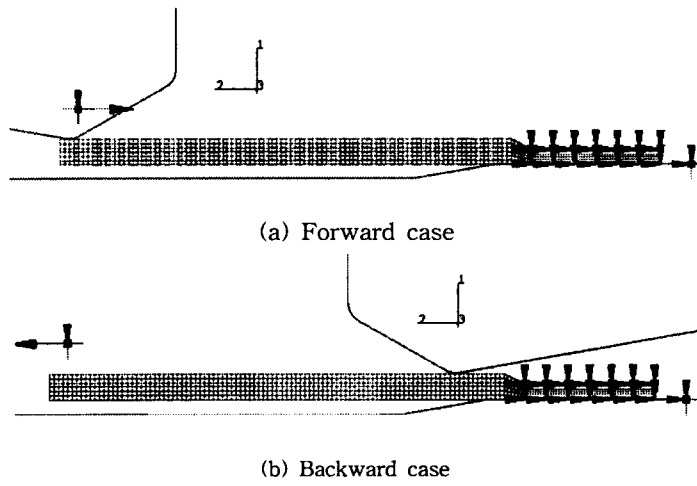


Fig. 2 Initial Modeling

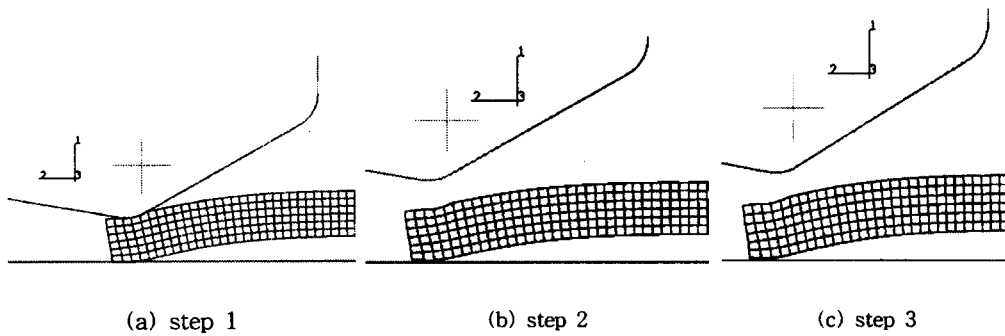


Fig. 3 Steps in Necking-In process

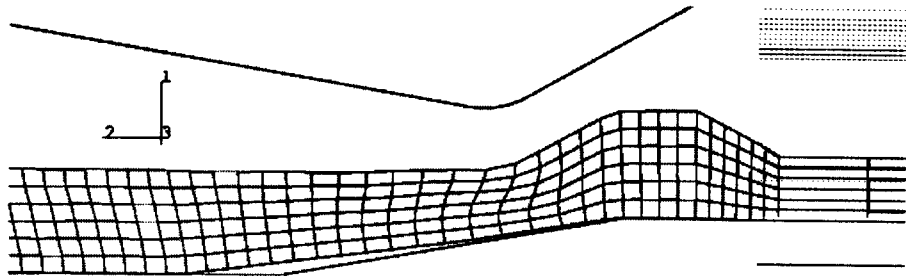


Fig. 4 Deformed shape

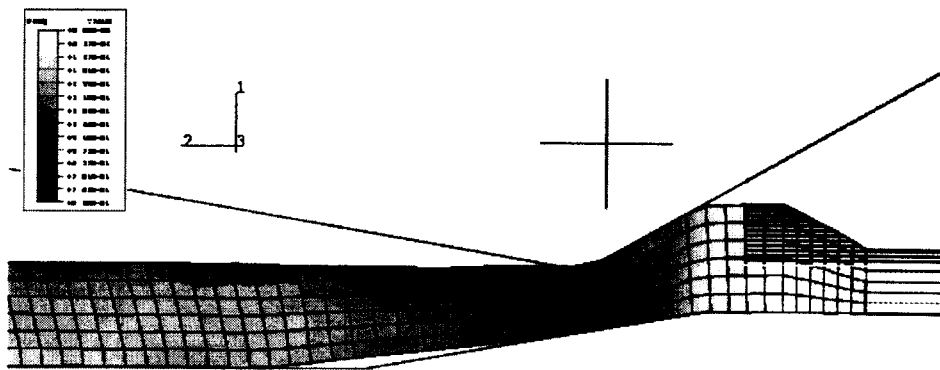


Fig. 5 Contour of effective plastic strain

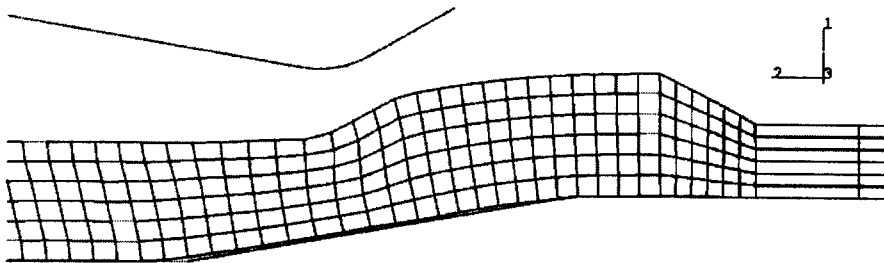


Fig. 7 Deformed shape, 73mm feed length

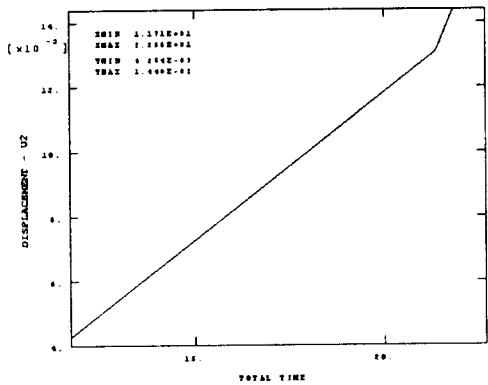


Fig. 7 Increased length of z-direction

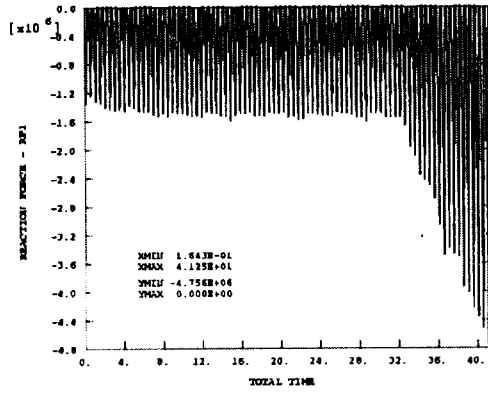


Fig. 8 Reaction force of r-direction

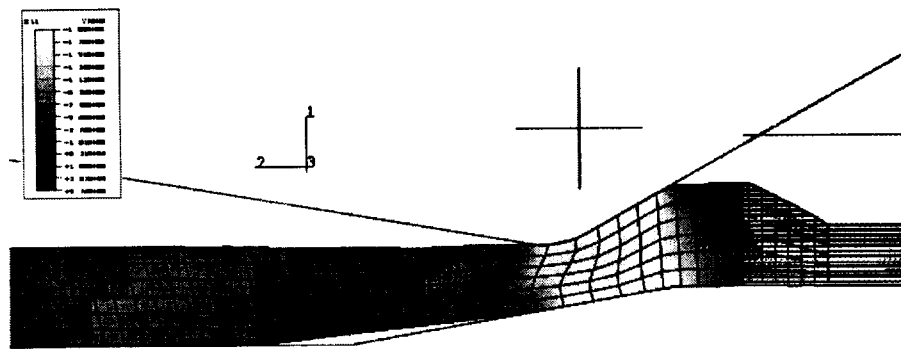


Fig. 9 Contour of stress, S11

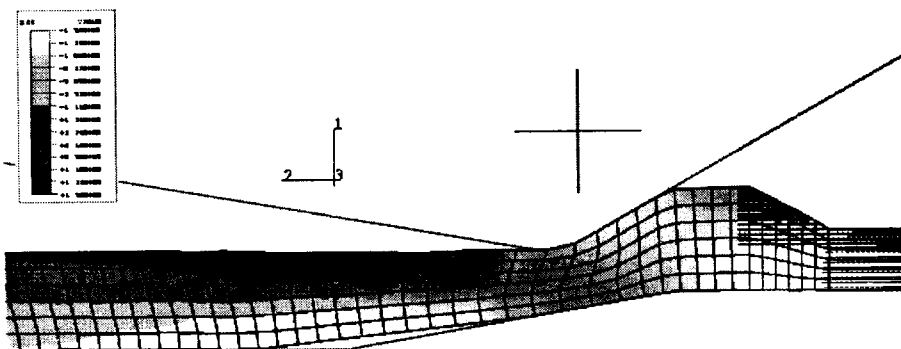


Fig. 10 Contour of stress, S22

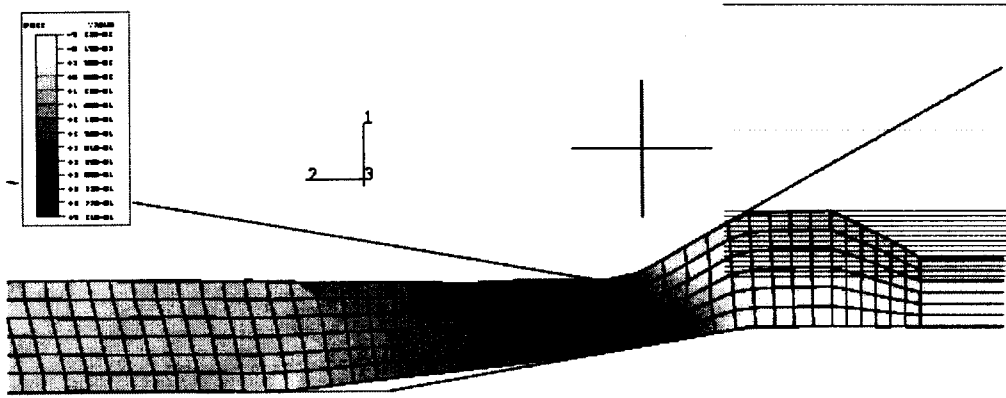


Fig. 11 Contour of effective plastic strain, PE11

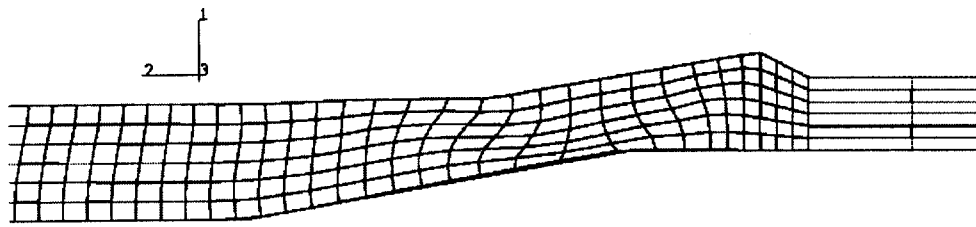


Fig. 12 Deformed shape, backward case

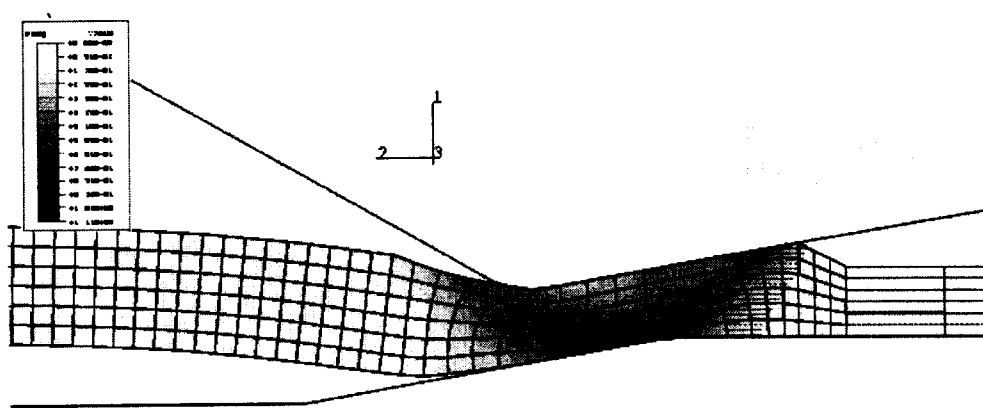


Fig. 13 Contour of effective plastic strain, Peeq

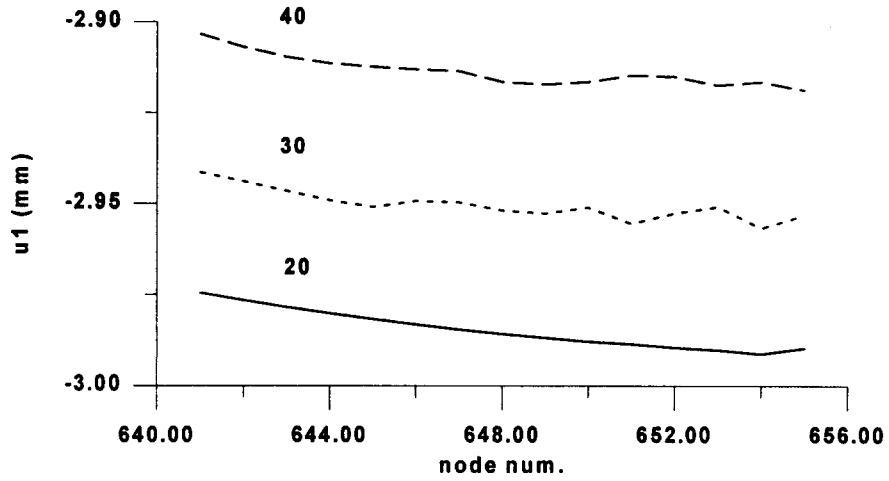


Fig. 14 Displacement at outer surface

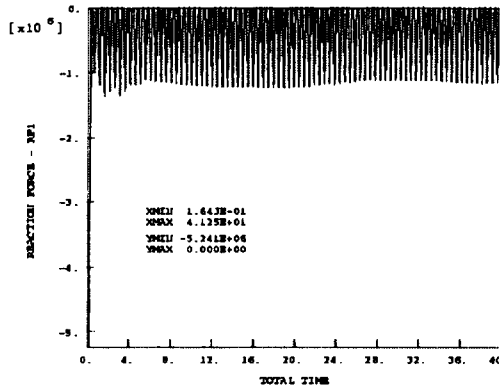


Fig. 15 Reaction force, RF1

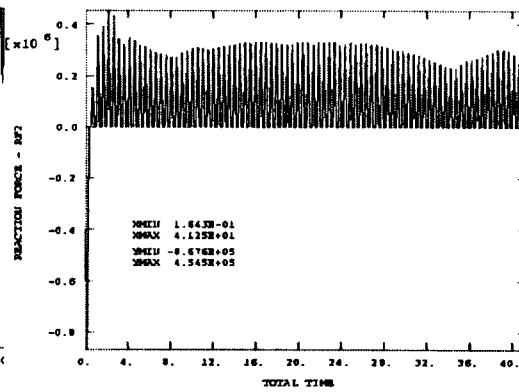


Fig. 16 Reaction force, RF2