

薄板 燃燒管의 內徑 縮小 工程 解析

리승훈* 조대연** 홍성인*** 윤수진****

* 충남대학교 공과대학 기계공학과

** 한라중공업 (중) 연구소 일반장비팀

*** 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.

I. 서론

박판 연소관의 내경축소(Necking-In) 기술은 회전하는 맨드렐에 예비성형체를 장착하고 로울러로 압착시켜 소성변형영역을 국부화함으로써 두께변화를 주어 재료를 채워 내경을 축소, 박육의 튜브형 제품을 생산하는 회전가공법의 한 분야이다.¹⁾⁻²⁾

이 기술은 현재 항공·우주공학 분야에서의 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 발

표되지 않은 핵심 성형기술이다.

박판 연소관은 두께가 길이와 직경에 비해 매우 작으므로 치수제어, 파단 및 주름 발생 등의 여러 가지 심각한 문제가 발생된다. 따라서 이를 해결하기 위한 공정해석 작업이 필수적이다.

II. 모델링

본 연구의 해석 모델은 Fig. 1에 보여진 것과 같은 형상을 갖는다. 예비성형체를 회전하는 맨드렐에 장착하여 로울러를 축 방향으로 진행시켜 로울러와 맨드렐 사이에 재료를 채워 넣음으로서 공정이 완료된다. 예비성형체의

재료로는 성형성(formability)이 좋은 마래이징 강(maraging steel)을 사용하였다.

박판 연소관의 내경 축소 공정에서 발생하는 가장 큰 문제점은 Fig. 1에서 a로 표시된 맨드렐 경사부에 재료가 완전히 채워지지 않는 현상과 b로 표시된 좌측 끝부분에서의 가공후의 치수제어 문제, 로울러와의 접촉이 이루어지는 바깥면에서의 주름발생으로 크게 분류할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점들과 관련된 공정변수를 찾아 그 공정변수들 사이의 상호관계를 규명하고 이를 통해 최적의 가공조건을 찾아내었다. 또한 그 해석결과를 실험을 통해 얻어진 데이터와 비교하여 그 타당성을 조사하였다. 유한요소해석은 상용코드인 ABAQUS STANDARD를 이용하여 수행하였다.⁴⁾

1. 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 2차원 해석을 수행하였다.⁷⁾⁻⁸⁾ 실제 공정에서는 3개의 로울러를 사용하나 본 연구에서는 1개의 로울러를 사용한 것으로 해석하였다. 재료는 가공경화를 갖는 탄소성으로 가정하였고 로울러와 맨드렐은 강체로 가정하였다. 실제 공정에 있어서 냉각수의 사용으로 온도가 거의 상승하

지 않으므로 회전에 의한 열효과는 고려하지 않았다.

재료의 요소로는 CAX4(1st order axisymmetric quadrilateral)를 사용하였고, 접촉(contact)요소로는 IRS21A(axi-symmetric rigid surface)를 사용하였으며 1013개의 절점과 1069개의 요소를 사용하였다.

2. 해석모델

해석모델에 사용된 재료의 물성치는 다음과 같다.

탄성계수	$186E+09(N/m^2)$
밀도	$7.9(kg/cm^3)$
응력곡선	$1483.5(N/m^2)\epsilon^{0.095}$

Fig. 2에 공정을 수행하기 전의 초기 모델의 형상과 경계조건을 나타내었다. 로울러의 진입부로부터 맨드렐과 예비성형체의 접촉점까지의 거리는 80mm, 예비성형체의 외경은 88mm, 내경은 78mm, 맨드렐의 직경은 72.5mm이고 맨드렐의 경사각은 10°이다. 본 연구에서는 2차원 해석으로 두 가지 방법을 사용하였는데 첫 번째 해석 방법은 로울러가 Fig. 1의 b 부분까지 축방향으로 이동한 뒤 반경방향으로 이송되어 재료와 분리되는 2단계(step)으로 구성되어 있고 두 번째 해석방법은 로울러가 일정량의 이송간격으로 축방향으로 이동한 뒤 반경방향으로 이동하여 재료를 눌러주는 과정을 반복하는 wedge indentation으로 해석한 것이다. 두가지 해석방법이 나름대로의 장단점을 가지고 있는데 첫 번째 해석방법은 로울러의 형상을 결정할 수 있다는 장점을 가진 반면 주름발생과

정확한 길이변화를 예측할 수 없고 이송률을 고려할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 이에 비해 두 번째 해석방법은 가공력의 분포가 실제 가공과 유사하고 길이 변화의 보다 정확한 예측이 가능하고 주름의 발생 등을 고려할 수 있다는 장점을 갖고 있으나 이 해석방법을 통해서 로울러의 형상을 결정할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 또한, 로울러와 예비성형체가 접촉과 분리를 반복하므로 유한요소해석상 과도한 수의 단계(step)를 필요로 하여 해석이 복잡하며 연속적인 가공력의 변화를 얻을 수 없다는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 위의 첫 번째 해석방법을 기본으로 해석을 수행하였고 이를 indentation 방식을 통해 얻어진 결과와 비교하였다. 또한, 유한요소해석을 통해 얻어진 결과는 실제 가공결과를 통해 얻어진 데이터와 비교되었다.

실제 가공에 있어서는 30°의 로울러 전방각(α)과 220mm/sec의 로울러 이송속도, 220 r.p.m.의 로울러 회전속도를 사용하였다.

III. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 로울러의 전방각(α), 로울러의 이송거리, 로울러의 이송률을 주요 공정변수로 선택하였다.

먼저, 적합한 로울러의 전방각(α)을 찾아내기 위해 α 가 20°, 30°, 40°인 경우에 대해 각각 해석을 수행하였다. 로울러 전방각이 20°인 경우를 해석한 결과 맨드렐의 경사부에서 재료가 잘 채워지지 않는 현상이 발생하였다. 이는 로울러의 전방각이 너무 작아서 반경 방향으로의 유동이 충분히 발생하지 않는 것이 원인인 것으로 밝혀졌다. 로울러 전방각이 40°인 경우는 로울러의 진행에 따라 좌굴(buckling)현상이 발생하였다. 이는 재료의 유동이 원만하지 않아 재료가 끌림으로서 발생

된 것으로 밝혀졌다. 로울러 각이 30°인 경우에는 재료가 잘 채워졌고 좌굴현상도 발생하지 않았다. 따라서 30° 근방의 각도가 가공에 적합한 로울러 전방각인 것으로 판단된다.

Fig. 3은 30°의 로울러 전방각과 76mm의 로울러 이송거리를 사용하여 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에 보여진 해석결과를 보면 맨드렐 경사부분에 재료가 잘 채워지지 않았음을 알 수 있다. 해석과 동일한 변수를 사용한 실제 실험에 있어서도 마찬가지로 현상이 발생하였는데 이는 로울러의 이송거리에 따른 재료의 유동과 관련이 있는 것으로 추정된다. 재료가 완전히 채워졌을 경우 맨드렐 경사부의 각도는 10°를 이루나 실제 가공물을 측정된 결과 경사각이 로울러의 진행방향으로 7-10°로 변화하였고 이는 해석을 통해 얻은 결과와 거의 유사한 경향을 나타내었다.

이송거리가 재료의 채워짐에 미치는 영향과 이송거리에 따른 재료의 유동성향을 조사하기 위해 예비성형체와 맨드렐이 접촉하는 부분까지 로울러를 완전히 이송시킨 76mm를 기준으로 이송거리 변화를 주어 해석을 수행하였다.

Fig. 4와 Fig. 5에 로울러의 이송거리가 70mm인 경우와 80mm인 경우의 변형된 형상을 나타내었다. 그림에 보여진 것과 같이 이송거리를 줄인 경우에 재료가 잘 채워짐을 알 수 있다. 이송거리가 70mm인 경우는 그림에 나타난 것과 같이 재료가 잘 채워져 비교적 만족할만한 결과를 얻을 수 있었으나 이송거리가 80mm인 경우는 맨드렐 경사부에서의 재료의 채워짐이 불량하였고 그림에 나타난 바와 같이 재료의 파일업현상이 발생하였다. 이러한 결과는 맨드렐의 경사각과 밀접한 관련을 갖는 것으로 밝혀졌다. 본 연구의 해석모델은 맨드렐의 경사각이 10°로 완만하기 때문에 로울러가 이송거리 76mm의 위치에 도달하기 전(70mm)에 축 방향으로 충분한 재료의

유동이 발생하여 재료를 잘 채워주게 되고, 로울러를 70mm보다 더 진행시키면 재료가 잘 채워지지 않는 현상이 발생하였다.

Fig. 6과 Fig. 7에 이송거리가 70mm인 경우의 반경방향과 축방향의 응력분포를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 반경방향의 응력은 재료가 로울러와 접촉하는 부분에서는 -방향으로, 접촉부의 좌우에서는 반대방향인 +방향으로 발생함을 알 수 있다. 축방향의 응력은 로울러의 전방에서는 -방향으로, 로울러의 후방에서는 +방향으로 작용함을 나타낸다.

Fig. 8과 Fig. 9에 indentation 해석을 통해 얻은 해석결과를 나타내었다. Fig. 8은 1mm 간격의 이송량으로 해석한 것이며 Fig. 9는 3.5mm 간격의 이송량으로 해석한 것으로 총 이송거리는 70mm이다. 두 가지 해석의 결과를 비교해보면 로울러의 이송률은 맨드렐 경사부에서의 재료의 채워짐에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11에 이송거리가 70mm인 경우의 가공시간에 따른 반경방향 반력과 축방향 반력의 변화를 나타내었고 Fig. 12와 Fig. 13에 이송거리가 80mm인 경우의 가공시간에 따른 반경방향 반력과 축방향 반력의 변화를 나타내었다.

그림에 보여지듯이 이송거리가 70mm인 경우는 로울러의 진행에 따라 반력이 일정값으로 균일하게 유지됨을 알 수 있다. 그러나 이송거리가 80mm인 경우는 로울러의 진행에 따라 반력이 일정하게 유지되다가 맨드렐 경사부에 이르러 급격히 증가함을 알 수 있다. 급격한 반력의 증가는 맨드렐의 경사부에 로울러가 이르러 재료의 유동량이 많아지고 파일업이 발생하기 때문인 것으로 추정된다. 해석을 통해 얻은 반경방향의 반력과 축방향의 반력의 비는 약 2 : 1인 것으로 나타났고 반력의 최대값은 이송거리에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다. 그림의 결과를 통해 이송거리가

70mm인 경우 80mm와 비교하여 약 절반의 반력이 발생함을 알 수 있다. Indentation 해석을 통해 얻어진 반경방향과 축방향의 반력의 비는 약 3 : 1로 나타났다.

Fig. 14와 Fig. 15에 이송거리가 70mm와 80mm인 경우의 축 방향으로의 재료의 신장을 나타내었다. 그림에 보여진 것처럼 이송거리가 70mm의 경우는 신장량이 일정한 비율로 균일하게 증가하였는데 80mm의 경우는 맨드렐의 경사부에서 축 방향 재료의 신장량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 이러한 축 방향으로의 재료의 신장은 반력의 변화와 동일한 경향을 나타내며 이것은 이 부분에서 로울러와 맨드렐 사이의 간격이 좁아져 많은 양의 유동이 발생하기 때문이다. Fig. 16에 indentation 해석을 통해 얻어진 가공시간에 따른 축 방향 길이의 신장을 나타내었다. 실험을 통해 얻은 데이터와 비교해보면 축 방향으로의 재료의 신장은 indentation 해석을 통해 얻은 값이 더 근사함을 알 수 있었다.

Fig. 17에 로울러 진입부의 변형된 형상을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 끝부분이 약간 위로 뜨게 되는 현상이 발생하는데 본 해석에 있어서는 이 현상이 그다지 심각하게 나타나지는 않았다. 그러나 실험에 있어서는 재료가 뜨는 양이 해석결과와 많은 차이를 보이며 크게 나타나서 끝 부분의 내경이 다른 부위에 비해 현저히 커지는 결과가 발생하였다. 가공 후 이 부분은 절단하게 되므로 완성된 제품에 있어서는 별다른 영향을 미치지 않으나 이러한 현상의 원인에 대한 규명은 필요하다고 생각된다. 로울러 진입부의 직경증가가 이송률과 관련을 갖는 것으로 추정되어 indentation 해석을 통해 이송률을 변화시켜 보았다. Fig. 18과 Fig. 19에 1mm와 3.5mm 간격의 이송량을 갖는 경우의 내경의 변화를 시간에 따른 변위로 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 이송률이 큰 경우에 직경증가가

더 큼을 알 수 있다. 따라서 로울러 진입부에서의 직경증가를 감소시키기 위해서는 이송률을 감소시켜야 함을 알 수 있다. 그러나 해석을 통해 얻은 이러한 결과는 실험결과와 큰 차이를 나타내므로 로울러 진입부에서의 직경증가에 대한 명확한 원인규명이 필요할 것으로 판단된다.

실험을 통해 얻은 가공물의 표면을 조사한 결과 로울러와 재료의 외측 접촉면에서 주름이 발생하였다. Indentation 해석을 통해서도 이러한 주름이 발생하였는데 실험과 해석 모두에 있어서 재료의 내측에서는 주름이 거의 발생하지 않았다. 로울러와 재료의 접촉면에서의 주름의 발생은 로울러의 이송속도와 관련된 것으로 주름의 발생을 줄이기 위해서는 이송률을 낮출 필요가 있다. 그러나 주름은 외측면에서만 발생하고 재료의 외측면은 황삭을 거치게 되므로 이러한 주름의 발생은 큰 문제가 되지 않으므로 외측면의 주름발생을 줄이기 위해 이송률을 낮출 필요는 없다고 판단된다.

IV. 결론

본 논문을 통해 박판 연소관의 내경축소 공정에 있어서의 주요한 공정변수를 찾아내었고 그 공정변수가 가공에 미치는 영향을 조사하였다. 공정을 정적인(static) 것으로 가정하여 로울러의 형상, 로울러의 이송거리 등의 공정변수를 찾아내었고 이를 바탕으로 가공에 적합한 로울러의 형상과 이송거리, 가공력, 스트레인 분포, 길이의 신장 등을 알아내었다. 본 해석을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 가공에 적합한 로울러의 각을 찾아내었다.
- (2) 테이퍼부의 치수제어 문제에 있어 로울러의 이송거리가 주요 변수임을 밝혀내었고

가공에 적합한 이송거리를 찾아내었다.

- (3) 해석을 통해 가공력과 응력분포, 변형률분포, 길이의 신장량 등을 찾아내었다.
- (4) 해석을 통해 얻은 가공변수를 이용하여 실제 가공에 적용한 결과 주름의 발생은 가공물의 외부표면에서만 발생하고 내면에서는 거의 발생하지 않았다.

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 tube flow-turning using ball' Advanced Technology of Plasticity 1996 Vol. II, pp. 547-552
- [7] 홍성인, '상계해법과 유한요소법을 이용한 스피닝공정해석에 관한 연구', 한국소성가공학회추계학술대회, 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

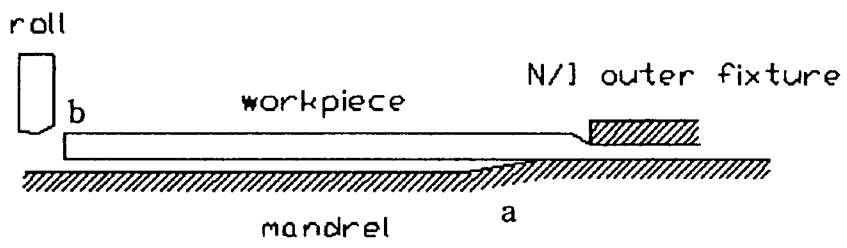


Fig. 1 Schematic drawing for Necking-In process

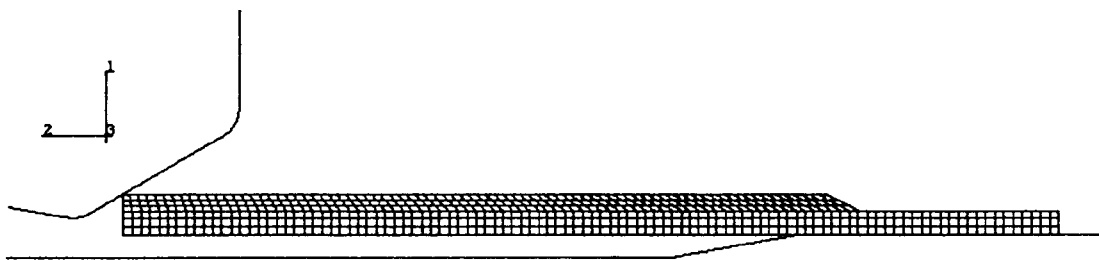


Fig. 2 Initial modeling

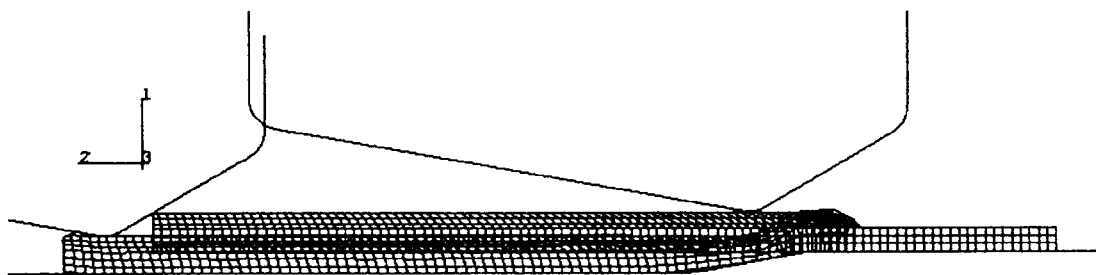


Fig. 3 Deformed shape, 76mm feed length

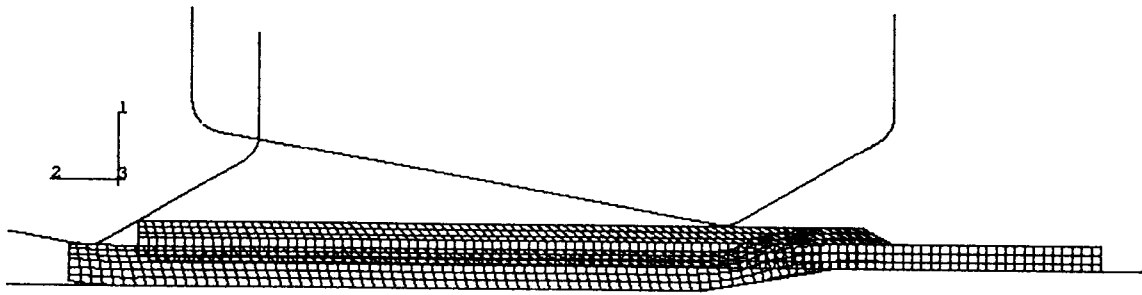


Fig. 4 Deformed shape, 70mm feed length

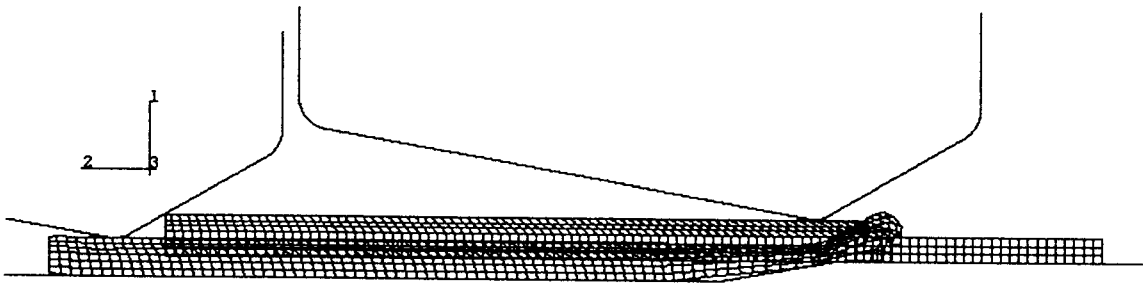


Fig. 5 Deformed shape, 80mm feed length

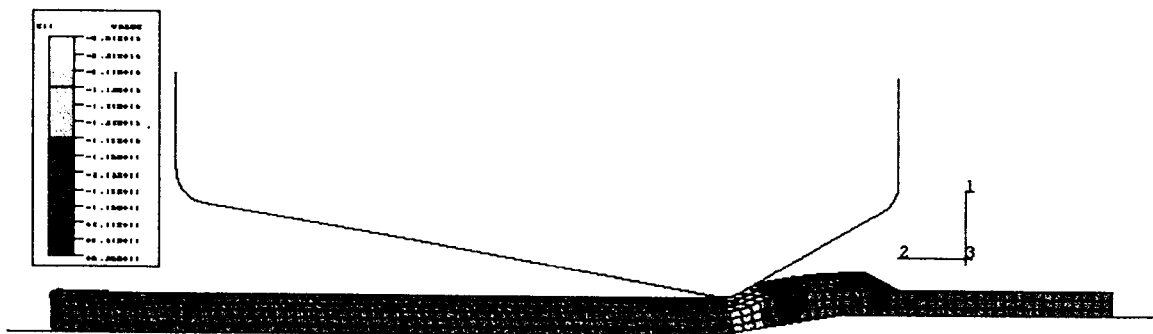


Fig. 6 Stress contour of r-direction, 70mm feed length

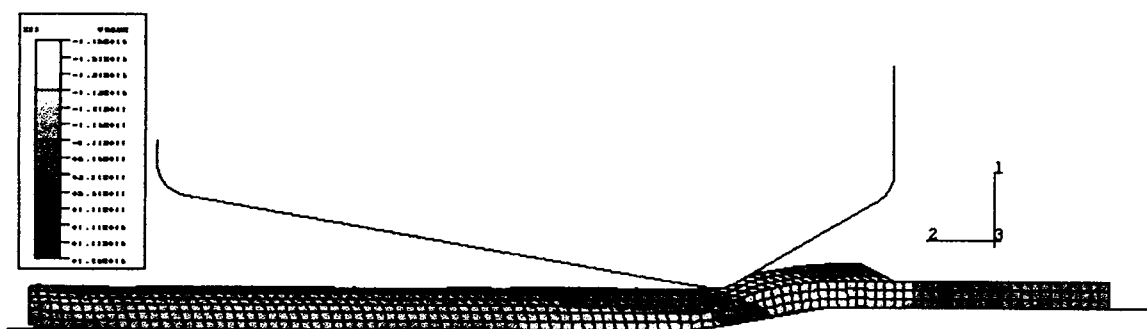


Fig. 7 Stress contour of z-direction, 70mm feed length

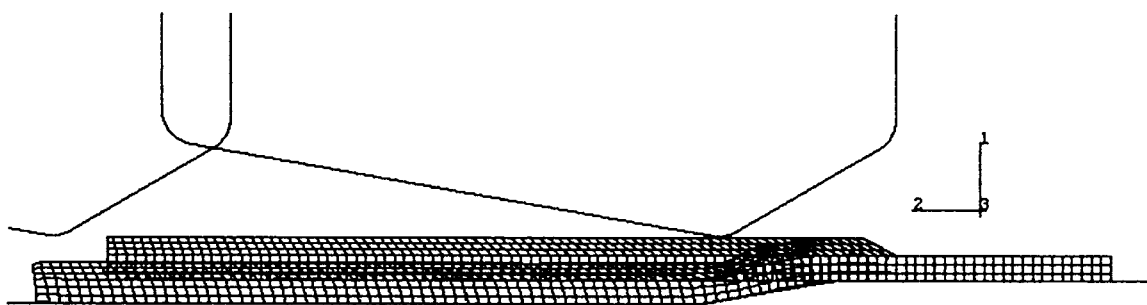


Fig. 8 Deformed shape by indentation, 1mm feed interval

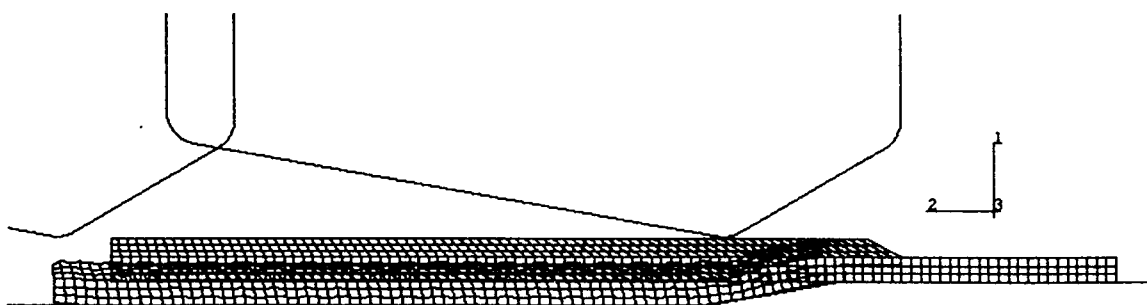


Fig. 9 Deformed shape by indentation, 3.5mm feed interval

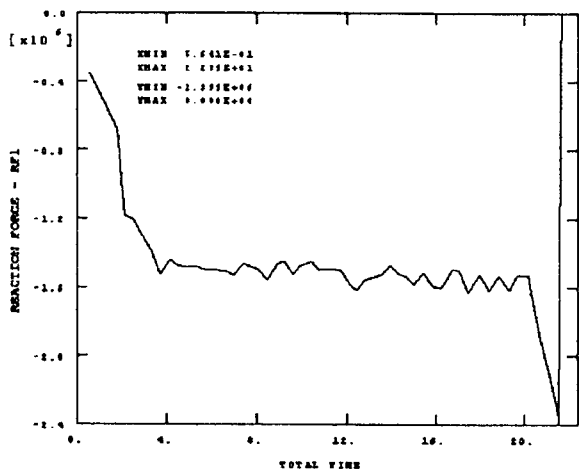


Fig. 10 Reaction force of r-direction, 70mm feed length

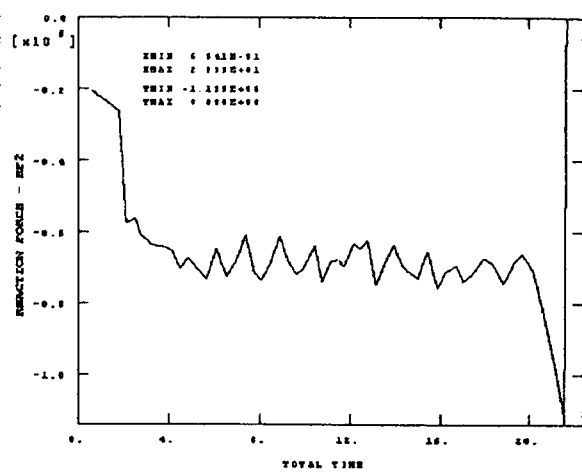


Fig. 11 Reaction force of z-direction, 70mm feed length

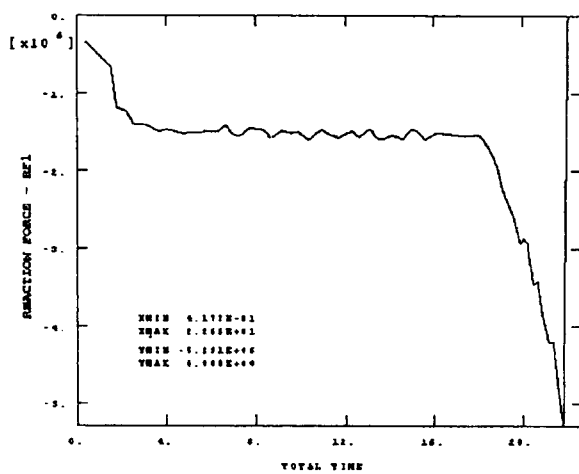


Fig. 12 Reaction force of r-direction, 70mm feed length

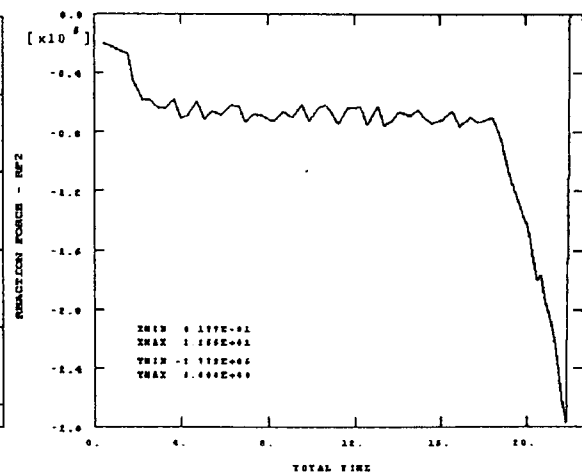


Fig. 13 Reaction force of z-direction, 70mm feed length

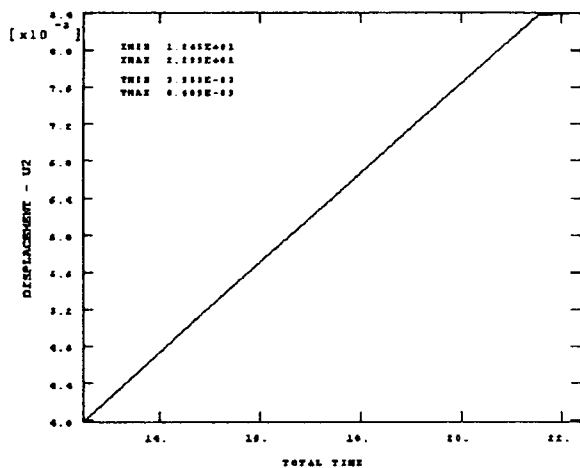


Fig. 14 Increased length of z-direction, 70mm feed length

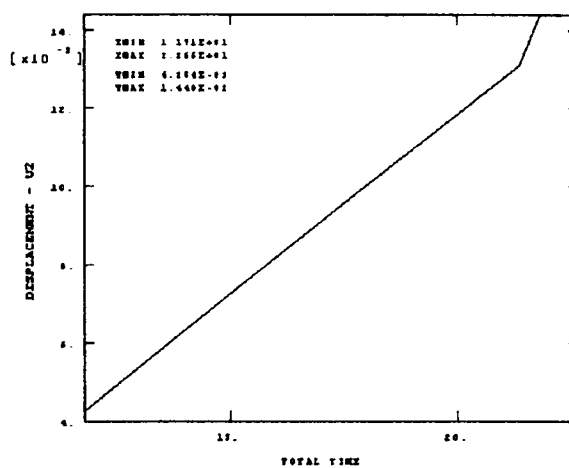


Fig. 15 Increased length of z-direction 80mm feed length

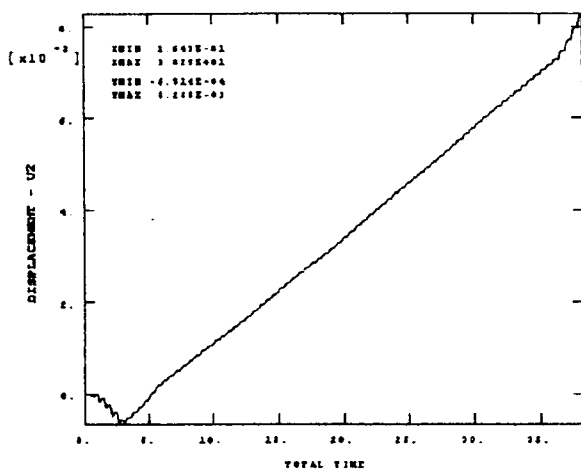


Fig. 16 Increased length of z-direction

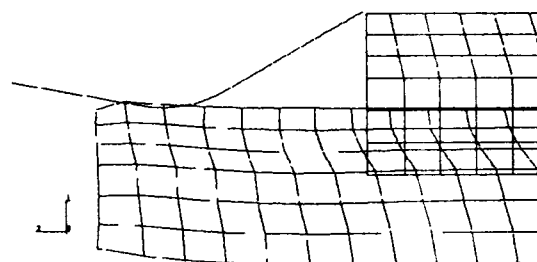


Fig. 17 Deformed shape of end part

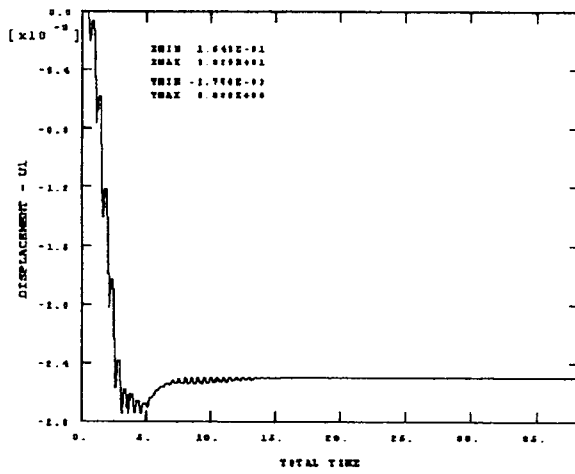


Fig. 18 Variation of inner-diameter,
1mm feed interval

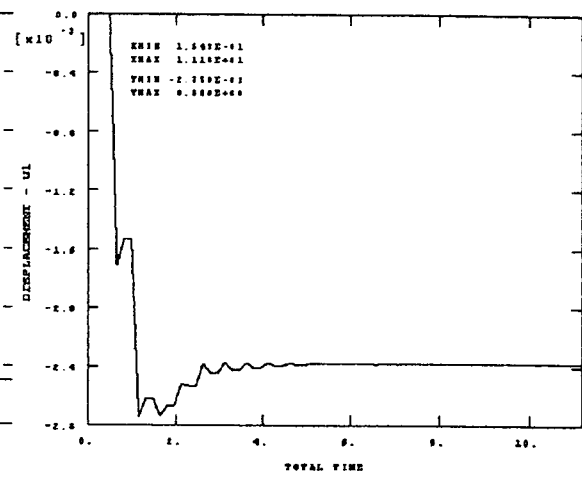


Fig. 19 Variation of inner-diameter
3.5mm feed interval