

KFP 엔진 드로잉 부품 주름발생 억제에 관한 연구

정완진*, 김기택*, 오성국**, 안홍**, 이영호**
*삼성종합기술원 수퍼컴응용실, **삼성항공 엔진사업본부

A Study on the Supression of Puckering and Wrinkling
in drawing of KFP engine part

W.J.Chung*, K.T.Kim*, S.G.OH**, H. Ahn**, Y.H.Lee**

*Samsung Advanced Institute of Technology, Dept of Supercom Applications,

** Samsung Aerospace Co., Dept of Engine

ABSTRACT

In this study, drawing process of KFP engine airsealing bearing support part is analyzed by dynamic explicit finite element method. Puckering should be supressed to meet the specification. By investigating the influence of process parameter, the feasible process condition can be obtained. The corresponding experiment is carried out. There is good agreement between the experiment and FE simulation. From this result, it is shown that the dynamic explicit finite element method can be used effectively to avoid puckering and wrinkling problem in drawing process.

1. 서 론

최근 항공산업과 자동차산업등에서 판금성형공정개발시간을 단축하고 정밀도가 높은 제품을 얻기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 판금성형 공정개발시 스프링-백(Springback), 주름현상, 두께감소등에 의한 치수불량및 찢어짐등의 문제를 해결하기 위해서 이러한 기법의 활용이 유용할 것으로 기대되고 있다.

현재 국산전투기 사업(이하 KFP 사업)과 관련된 엔진의 국산화 품목으로 개발하고 있는 에어실링 베어링 서포트 부품은 드로잉 공정과 트리밍 공정을 통하여 생산된다. 이 부품은 위에 언급한 다양한 불량이 발생할 것으로 예상되어 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 활용하여 공정개발에 기여하고자 하였다. 종전에 발표된 연구 [1]에서 먼저 준정적 유한요소해석법(ABAQUS/Standard)을 이용하여, 펀치와 블랭

크 홀더와의 간격과 블랭크 홀더의 압력을 조절하면서 성형하였을 때의 스프링백 현상에 대한 영향을 파악한 결과 성형후 스프링백에 대해서는 큰 문제가 없음을 알 수 있었다. 또 주름현상에 대하여 여러 가지 인자의 영향에 대해 발표한 바 있다.

본 연구에서는 본 제품의 경우에 드로잉 공정에서 발생하기 쉬운 플랜지부위 주름 현상, 경사부 주름현상등을 해석하기 위해서 3차원 비선형 동적 유한요소해석법을 이용하여, 주름발생에 영향을 주는 여러가지의 공정변수에 대해서 분석해 보았다. 동적 유한요소해석법에 의한 주름현상의 예측에 대한 연구[2][3] 및 실험적 방법에 대한 연구[4][5]가 보고되어 왔으나 제한된경우에 대하여 단편적으로 보고되었을 뿐이고 급형의 형상, 재료의 재질 및 공정조건이 변경됨에 따른 일반적인 판단기준은 제공하지 못하므로 해석에 의한 정량적인 예측이 필요하다. 공정인자의 영향에 대해서는 본 해석결과를 기존의 정성적인 이론 및 실험결과와 비교분석하였다. 해석결과를 토대로 적합한 공정개발을 병행하여 계산에 의한 예측과 비교하여 이러한 해석적 접근방법의 유효성을 검증하고자 하였다.

2. 본 론

3차원박판성형공정에 대한 유한요소해석은 대변위와 회전을 수반하는 기하학적 비선형, 재료적 비선형 및 마찰을 포함한 접촉등의 비선형성을 포함하는 비선형 유한요소해석으로서 그 수렴해를 얻기가 용이하지 않다. 최근에 경계조건의 비선형성을 잘 해결할 수 있는 동적유한요소해석에 의한 박판성형공정의 해석에 성공적으로 적용되고 있다. 동적유한요소해석법은 시간적분법으로 중앙차분법(Central Difference Method)을 사용하여 각 step에서 반복계산을 하지 않고 동적평형방정식을 만족시키므로 수렴성의 문제가 없고 집중질량행렬(Lumped Mass Matrix)을 사용하여 계산시간 및 기억용량이 적게 요구되며 접촉문제해석이 용이해서 복잡한 형상의 문제를 쉽게 해석할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 동적유한요소해석 프로그램인 LS-Dyna3D[6]를 이용하여 3차원 주름현상을 분석하였다.

2.1 재료물성치 및 마찰계수시험

재료는 AMS-5669 인코넬 소재를 사용하였는데, 재료의 거동은 평면이방성 재료(normal anisotropic material)로 가정하였다. 재료실험은 두께 1mm인 소재의 압연 방향의 0°, 45°, 90° 방향으로 ASTM A370규격의 인장시편을 마련하여 Instron 4206으로 1mm/min의 이송속도로 수행하였다. 수행결과 Fig.1과 같은 응력-변형도 곡선을 얻을 수 있었으며 실제 계산에서는 이 곡선을 평균하여 사용하였으며 45° 방향은 가중치를 두 배로 주었다. 해석에서 응력-변형도 곡선은 연속적인 점 데이터로 입력

하였으며 선형적으로 보간되어 계산에 사용된다. 해석에서 평면이방성조건을 사용하였는데 평균 R 값(Rankford Value)은 신장을 15%에서 각 방향에 대해 구해진 R값을 응력-변형도곡선과 마찬가지로 구하였으며 1.08를 얻었다. 탄성계수는 248 Gpa를 얻었으며 포와송비는 0.3을 사용하였다. 마찰계수 측정실험은 편면마찰계수측정장치를 사용하여 실시하였다. 성형시 사용하는 드로잉유 사용시에 Fig.2와 같은 마찰계수 실험결과를 얻었으며 평균값은 0.076이었다.

2-2. 주름 발생에 대한 분석

축대칭형상의 박판 드로잉 성형에 있어서 판재에 가해지는 변형은 크게 두 가지 형태로 나누어 진다. 그 하나는 이축인장응력하에서의 변형이고, 다른 하나는 원주 방향으로 압축응력이 작용하여 주름을 유발하는 수축 플랜징이다. 본 제품과 같은 축대칭 드로잉성형품은 성형중에 압축응력을 받게 되며 좌굴에 의해서 주름이 발생할 수 있다.

공정에 사용된 금형의 제원은 Fig.3과 같고 펀치와 다이의 최소간격은 재료두께보다 약 2%큰 1.02mm로 하였다. 먼저 금형과 블랭크의 형상을 적절하게 고정하고 마찰상태와 블랭크 홀더압력등을 변화시키면서 영향을 분석하고, 블랭크의 형상 변화(내 외측반경 크기변화)를 주면서 성형과정을 분석하였다. 금형은 강체를 써서 표현하였고 실제 공정순서에 따라 금형을 동작시켰다. 작성된 금형데이터는 펀치 390 개, 다이 60개 블랭크 홀더 180개의 사각형유한요소격자형태로 나타내어지며 모델링된 형상은 Fig.4와 같다. 소재의 유한요소는 대체적으로 크기가 균일하게 유지되도록 하였으며 반경에 관계없이 8325개를 사용하였다. 동적 유한요소해석법을 사용하여 해석할 때 실제의 금형속도로 작동시키게 되면 해석시간이 매우 많이 소요되므로 10 m/sec의 속도를 사용하였으며 총 해석시간은 9msec이다. 현재의 해석 속도에서 운동에너지가 변형에너지의 수 %이내로 작으므로 해석결과를 준정적결과로 간주하여도 큰 오차가 없다고 판단된다.

본 공정에서 발생 할 수 있는 주름은 wrinkling(플랜지 부위에 나타나는 주름)과, Puckering(경사진 펀치 벽면에 발생하는 주름)으로 나눌수 있다.

먼저 블랭크 반경이 250 mm인 경우에 대하여 해석을 수행하여 플랜지 주름과 벽면 주름 및 변형상태에 대하여 분석하였다. Fig.5에서 블랭크 홀딩하중이 30톤인 경우에 플랜지와 경사벽면에서 주름이 발생하는 것을 확연히 관찰할 수 있다.

Fig.6에서는 블랭크 홀딩하중이 70톤인 경우에 플랜지에서 주름이 약간 발생하면서 제품이 성형되는 것을 볼 수 있다. 이 때 경사벽면부에서의 주름은 발생하지 않고 성형이 되며 두께는 대부분의 영역에서 0.7mm이상으로 비교적 균일한 변형이 유지된다. Fig.7에서는 블랭크 홀딩 압력이 80톤일 때 주름이 거의 없는 상태로 성형이 되지

만 펀치와 블랭크홀더사이에서 소재가 심하게 늘어나 두께가 감소하는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 플랜지 주름에 대하여 살펴보면 30톤에서는 크게 주름이 발생하였고 70톤에서도 미소한 주름이 발생하였다. 80톤에서는 주름이 발생하지 않았다. 해석에서는 블랭크홀딩압력으로 일정하중을 계속 부여하게 되는 데 주름이 일단 발생하면 급격히 커지며 성장을 억제할 수 있는 기구가 없다. 그러나 실제 유압 프레스에서 성형하는 경우는 유압기구의 작용에 의해 다시 늘리게 되고 주름의 산을 따라 늘린 흔적이 남는다. 경사벽면부 주름은 30톤에서는 크게 발생하지만 70톤부터는 발생하지 않는다. 위의 해석결과로부터 블랭크 사이즈가 250mm일 때 플랜지주름과 경사벽면 주름을 동시에 발생시키지 않으면서 비교적 균일한 두께로 성형할 수 있는 적합영역을 찾기 힘들며 존재하여도 매우 범위가 좁을 것을 예상할 수 있다. 본 제품이 트리밍 후 벽면부분을 사용 함으로 플랜지 주름의 발생을 다소 허용하고 경사 벽면부 주름억제에 중점을 둔다면 블랭크홀딩압력 70톤 근처에서 원하는 성형이 가능함을 알 수 있다.

다음으로 블랭크 반경이 270mm일 때 블랭크 홀딩 압력이 60톤, 70톤, 80톤인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 블랭크 홀딩압력이 60톤인 경우는 벽면주름이 발생하지 않았으나 플랜지 주름이 다소 발생하였다. 전체적인 변형을 보면 대체적으로 약 0.7mm이상의 양호한 두께분포를 보인다. (Fig.8) 70톤의 경우는 경사벽면주름과 플랜지 주름이 발생하지 않으며 펀치선단에서 급격한 두께감소를 보인다.(Fig.9) 80톤의 경우는 마찬가지로 경사벽면주름 및 플랜지 주름이 발생하지 않으나 70톤보다 더 변형이 심해져 두께가 크게 감소한다.

블랭크 반경이 200mm (블랭크 홀딩 압력 60톤) 일때는 30% 행정에서부터 벽면에 주름이 발생하기 시작하여 종반 행정에서 주름의 높이가 감소되어 최종적으로 상당한 크기의 주름이 잔존하는 것을 알 수 있었다. (Fig.10). 블랭크 반경이 200mm인 경우에 블랭크 홀딩 압력을(60톤, 80톤) 변화시켜도 다소 주름이 줄기는 하지만 없애는 것은 불가능하였다. 블랭크 외측반경을 200mm로, 블랭크 홀딩 압력을 30 톤으로 고정하고 마찰계수들(0.03, 0.10, 0.165) 변화시키면서 벽면주름의 크기변화를 분석하였다. 마찰계수가 증가함에 따라 주름이 감소되는 현상을 확인할 수 있었다. (Table 1.) (Table 2.)에 각 계산된 경우에 대하여 플랜지 주름의 잔존높이를 나타내었고 (Table 3.)에 경사벽면주름 발생여부를 나타내었다.

위의 해석결과로부터 블랭크 사이즈가 클 수록 반경방향의 장력이 증가하여 벽면부 주름 및 플랜지 주름이 발생하기 어려운 것을 알 수 있다. 또한 블랭크 홀딩력이 클 수록 주름발생은 억제되나 국부적인 소재의 연신이 일어나기 쉽게 된다. 일반적으로 경사부 벽면이 수직에 가까우면 플랜지 주름이 더 발생하기 쉽고 수평에 가까울수록 벽면부 주름이 발생하기 쉬운 것으로 알려졌는데 형상이 복잡한 경우는 판별이 어렵

다. 해석결과로부터 본 경우는 플랜지 주름이 더 억제하기 어려운 것을 알 수 있다.

2-3. 중앙에 구멍이 있는 블랭크의 사용검토에 대한 분석

이 제품은 성형후 트리밍하여 벽면부만 사용하기 때문에 주름 발생방지등을 위해서 중앙에 구멍이 있는 블랭크를 사용하는 경우가 있다. 이 방법은 소재가 내측에서 외측으로 변형되어 나가기 때문에 원주방향의 압축응력이 감소하여 벽면부의 주름을 방지하기 쉬운 반면 구멍이 없는 블랭크를 사용할 때보다 상대적으로 내측구멍 부위에서의 반경방향으로 파단(찢어짐)현상이 발생하기 쉽다. 블랭크 내측반경을 (20mm, 40mm, 60mm) 변화시키면서 해석하여 (블랭크 외측반경: 250 mm, 마찰계수 : 0.03, , 블랭크 홀딩압력 : 60톤). 내측반경이 20mm, 40mm 일때는 찢어짐이 발생하는 데 Fig.11에 내측반경이 20mm인 경우에 찢어짐이 발생하는 것을 볼 수 있다. 내측반경이 60mm일때는 찢어짐이 발생하지는 않았다. 그러나 외형상으로는 찢어지지 않는 않지만 유효 소성변형율이 100%이상이 되어 실제공정에서는 파단 가능성이 매우 크고 변형이 심하게 일어난 것을 알 수 있다. 내측반경이 20mm인 경우에 성형과정 동안의 파단이 일어난 위치에서의 변형을 주변형도상에 표현하여 파단 발생 전후의 양상에 대해 알 수 있도록 하였다. (Fig.12) 파단이 일어난 시점에서 변형경로가 불연속적으로 바뀌면서 변형이 급격하게 진전됨을 알 수 있으며 변형경로가 주변형도의 2사분면에 위치하므로 반경방향으로 인장 응력상태에 있고 원주방향으로 압축응력상태에 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 분석결과로부터 구멍이 있는 블랭크의 사용은 피하기로 하였다.

3. 실험 및 결과분석

위에서 분석된 결과를 토대로 다음과 같이 2차에 걸쳐 실험을 수행하였다. 1차 실험에서는 해석에서의 예측과 달리 블랭크 외반경이 250mm인 경우에 대하여 실시하였는데 블랭크 홀딩압력을 최대한(80톤)으로 하여도 주름을 제거할 수 없었다. 그 원인은 이 때 다이에서 반경 215 mm 위치에 약 0.7mm 크기의 단이 존재하였기 때문이며 이로 인해 비교적 양호한 조건에서 실험하였음에도 플랜지 주름 및 벽면 주름이 크게 발생하였다. 해석결과 실제와 같이 Fig.13에 주름발생과정이 잘 나타나는 것을 볼 수 있다. 이때 제품의 성형후 최종 외반경은 해석에서 218 mm이므로 실제치수 217mm와 큰 차이가 없었다. 이 단을 제거한 후 소재반경을 270mm로 하여 실험을 수행하였다. 실제 실험에서는 블랭크 홀딩압력을 70ton으로 하여 실험을 수행하였을 때 주름없이 제대로 성형된 제품을 얻을 수 있었다. 해석에서는 60ton에서 더 양호한 결과를 얻었으나 해석시 재료의 국부적인 연신은 소재의 유한요소크기나 금형형

상의 세밀한 표현정도에 따라 민감한 것을 감안하면 큰 오차 없이 주름 및 변형예측이 이루어졌다고 본다. 현재의 금형형상에 대해서 정확한 해석을 위해서는 곡면부위에서 보다 세밀한 금형면 분할과 작은 요소가 요구된다.

4. 결 론

KFP 사업과 관련된 엔진의 국산화 품목으로서 개발하고 있는 에어실링 베어링 서포트 부품의 드로잉 성형 공정에서의 주름현상발생에 대한 해석 및 실험을 통한 결론은 아래와 같다.

- (1) 플랜지 주름(wrinkling)에 대하여 홀딩 압력을 변화시키면서 해석한 결과 임계 홀딩압력을 구할 수 있었다.
- (2) 경사진 벽면 주름(puckering)발생에 영향을 미치는 공정인자에 대한 고찰 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 블랭크 홀딩압력이 커지고 마찰계수가 커짐에 따라 반경 방향으로의 장력이 증가하여 주름발생은 억제된다. 블랭크 반경이 커질수록 반경 방향으로의 장력이 증가하여 주름발생은 억제된다. 어느 정도 이내로 블랭크 반경이 감소하면 주름발생을 방지할 수가 없다.
- (3) 블랭크 내측반경을 변화시키면서 해석하였더니, 내측반경이 40mm 이하일 때는 찢어짐이 발생하고 60mm 이상 일 때는 찢어짐이 관측되지 않았으나 국부적으로 두께가 심하게 감소하는 것을 알 수 있었다.
- (4) 이상의 결과를 토대로 실험을 수행하여 해석과 부합하는 결과를 얻었으며 허용기준내의 제품을 얻을 수 있었다.

후기

본 연구의 수행을 위하여 마찰계수시험을 수행해 주신 포항제철 연구소 한수식박사님께 감사드립니다.

참고 문헌

[1] 오성국,정완진,안홍,이영호,"KFP 엔진 박판 부품 드로잉 성형 해석", 박판성형기술의 진보(양동열,허훈,김용환 편), 박판성형심포지움, 한국소성가공학회 및 대한금속학

회, pp.163-172, 1994

[2] H. Aoh and E. Nakamachi, " 3-D Sheet Metal Forming Simulation of Automobile Panel by Thin Shell Finite Element Method", VDI Berichte 894, VDI--Verlag CmbH, Dusseldorf, 1991, pp.357-379.

[3] K.B.Nielsen and J. Danckert, " Instabilities in Sheet Metal Forming Analysed with Explitit Finite Element Methods", Proceedings of the IDDRG'94, pp.377-388,1994

[4] T.Tatenami and Y. Seki," Effect of Controlling of Holding Force on Supressing Wrinkle in Sheet Metal Forming",Proceedings of 4th ICTP, pp.1917-1922,1994.

[5] M. Gotoh, 임철록, 정채훈,"원통 드로잉 성형에 있어서의 puckering억제조건과 FEM-Simulation해석",한국소성가공학회 '94 추계학술대회 논문집 pp.80-94,1994

[6] LS-DYNA3D Version 930, " Users Manual, LSTC, 1994

| 마찰계수 | 0.03 | 0.1 | 0.165 |
|-----------|-------|-------|-------|
| 주름높이 (mm) | 2.577 | 0.454 | 0.349 |

Table.1 마찰계수에 따른 경사벽면 주름 변화

| 블랭크 반경 (mm) 홀딩 압력(ton) | 250 | 270 |
|---------------------------|------|------|
| | 30 | 6.63 |
| 60 | 1.81 | 1.66 |
| 70 | 0.94 | 0.07 |
| 80 | 0.00 | 0.00 |

Table.2 블랭크크기 및 홀딩압력에 따른 플랜지 주름높이 변화

| 블랭크 반경 (mm) 홀딩 압력 (ton) | 200 | 250 | 270 |
|----------------------------|-----|------|------|
| | 30 | 발생 | 발생 |
| 60 | 발생 | 발생 무 | 발생 무 |
| 70 | 발생 | 발생 무 | 발생 무 |
| 80 | 발생 | 발생 무 | 발생 무 |

Table.3 블랭크크기 및 홀딩압력에 따른 경사벽면 주름 발생 여부

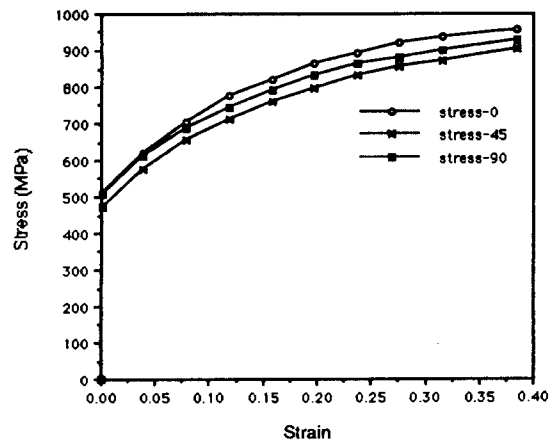


Fig.1 응력-변형도 Curve

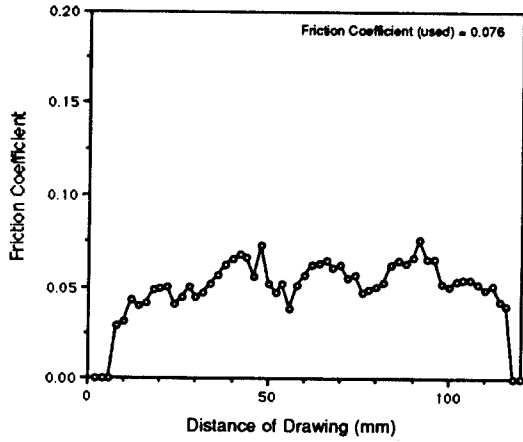


Fig.2 편면마찰측정장치에 의해 측정된 마찰계수

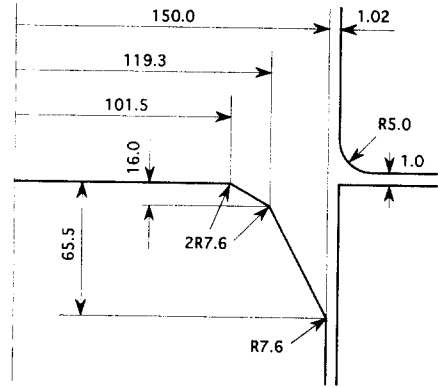


Fig.3 금형형상

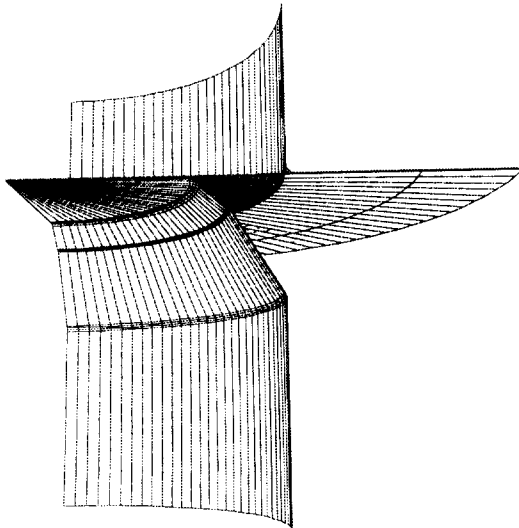


Fig.4 모델링된 금형 및 소재형상

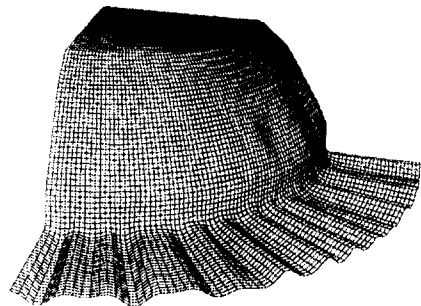


Fig.5 최종변형형상 (B.H.F=30ton, O.D.=250mm)

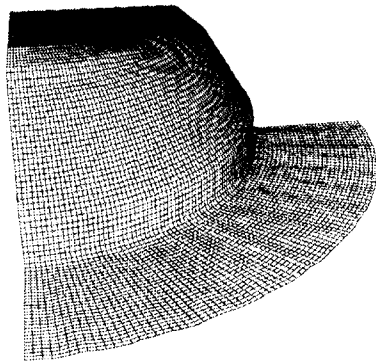


Fig.6 (a) 최종변형형상 (B.H.F=70ton, O.D.=250mm)

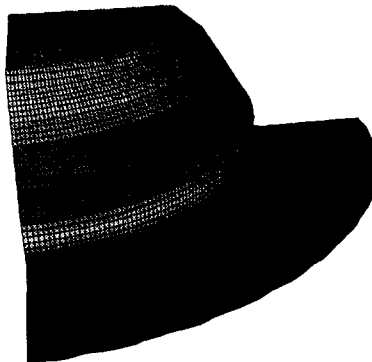


Fig.6 (b) 최종 두께분포 (B.H.F=70ton, O.D.=250mm)

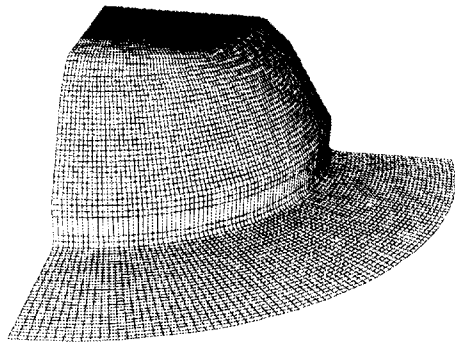
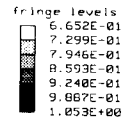


Fig.7 최종 변형형상 (B.H.F=80ton, O.D.=250mm)

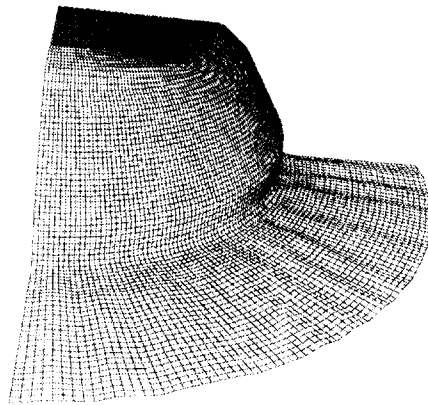


Fig.8 (a) 최종변형형상 (B.H.F=60ton, O.D.=270mm)

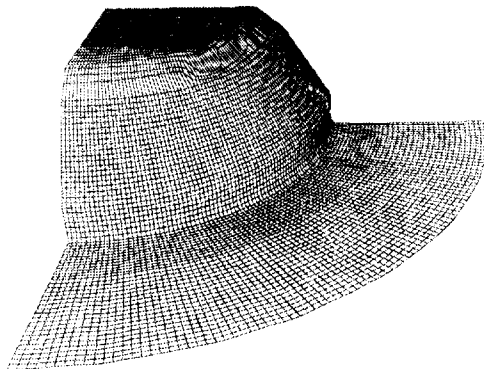


Fig.8 (b) 최종두께분포 (B.H.F=60ton, O.D.=270mm)

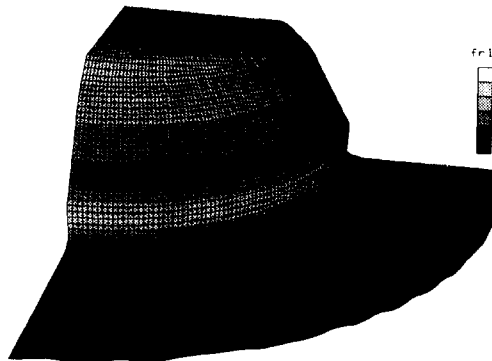
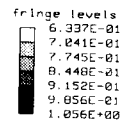


Fig.9 최종변형형상 (B.H.F=70ton, O.D.=270mm)



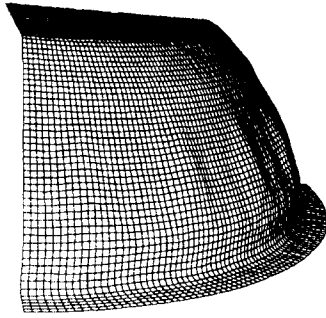


Fig.10 최종변형형상 (B.H.F=60ton, O.D.=200mm)

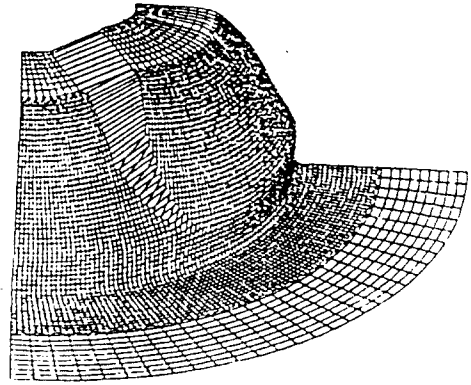


Fig.11 파단 발생 현상
(B.H.F=60ton, O.D.=250mm, I.D.=20mm)

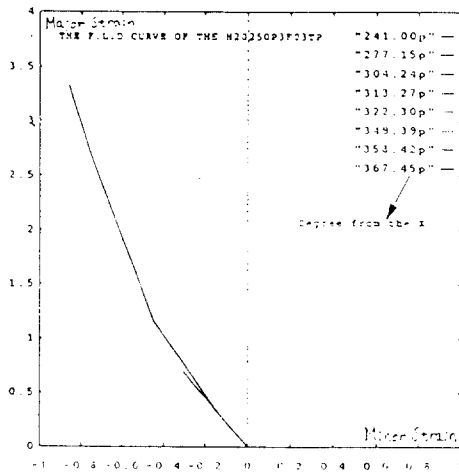


Fig.12 파단이 발생한 점의 주변형도 곡선
(B.H.F=60ton, O.D.=250mm, I.D.=20mm)

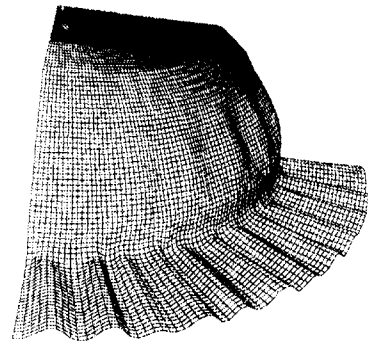


Fig.13 다이에 단이 존재한 경우의 주름
발생형상 (B.H.F.= 70ton, O.D.=250mm)