

# 고강도 알루미늄 7175 합금 링롤재의 급냉 및 응력제거처리후 잔류응력 유한요소해석 및 측정

박성한, 구송희, 이방업, 은일상  
국방과학연구소

## 요 약

고강도 알루미늄 합금 링롤재의 급냉, 링 팽창(expansion) 및 링 압축(compression) 응력제거처리 후 잔류응력을 예측하기 위하여 2차원 축대칭 열해석 및 탄소성 해석을 수행하였다. 급냉 및 응력제거처리 후 2단 과시효 처리(T73)된 링롤재에 대하여 3단계 절단법(Three step sectioning method)을 적용하여 링롤재의 두께에 따른 잔류응력 분포를 측정하였으며, 측정결과를 급냉 및 응력제거처리후 잔류응력 해석결과와 비교분석하였다.

링의 급냉후 원주 및 축방향의 잔류응력 해석값은 T73후 측정값과 비슷한 경향을 보였으며, 링의 내면과 외면에서 압축응력을 나타내었고 중심에서 인장응력을 나타내었다. 잔류응력은 링 팽창(T7351) 및 링 압축(T7352) 적용후 T73에 비해 현저히 감소하였으며, 축방향의 제거 효과가 원주방향보다 우수하게 나타났다. 또한 링 압축에 의한 제거효과가 링 팽창보다 크게 나타났다. 링롤재의 응력제거처리는 제거 효과 및 실용성 측면에서 링 압축 공정이 유리하며, 치수제어 및 장비용량 측면에서 링 팽창 공정이 유리하다는 결론을 얻었다.

## 1. 서 론

유도탄용 기체의 경량화 구조재로서 많이 사용되고 있는 고강도 알루미늄 합금 링롤재는 항복강도, 연신율, 파괴인성 및 좌굴강도 등의 설계 요구조건을 만족해야 할 뿐만 아니라 부품의 조립성을 확보하기 위하여 고정밀도의 치수 안정성이 요구된다. 부품 제작 공정상의 기계적 하중이나 열적 하중에 의하여 발생하는 재료 내부의 부적합 변형율(incompatible strain)이 잔류응력(residual stress)을 발생시킨다. 두께가 두꺼운 알루미늄 7175 링롤재의 강도 확보를 위한 용체화 열처리는 467℃의 높은 온도로 가열후 20℃의 물에 급냉하기 때문에 상당히 큰 잔류응력이 발생할 것으로 예상된다. 이와같이 잔류응력이 내재하는 제품을 기계가공할 때 응력 평형이 붕괴되어 변형이 발생된다. 국내에서 제작된 추진기관 스커트용 링롤재는 최종기계가공후 변형량이 컸으며, 또한 추진기관 구조용 링롤재는 최종기계가공후 복합재 연소관의 제작단계인 경화공정에 의해 잔류응력이 이완

되어 조립 및 분해가 어려울 정도의 변형이 발생하였다. 향후 국내개발이 요구되는 기체용 스커트는 두께가 아주 두꺼운 대형 링롤재로 부터 얇게 기계가공되므로 변형이 매우 심각할 것으로 예상되며 응력제거처리 공정 적용이 필수적이라고 판단된다. 선진국에서는 우주항공용 부품의 잔류응력의 크기를  $4\text{kg/mm}^2$  이하로 규제하고 있다.<sup>[1]</sup>

잔류응력을 제거하기 위한 방법은 소성가공, 고온가열 및 Uphill quench등이 있으며 강도 및 실용화등의 문제로 소성가공법이 주로 적용되고 있다. 잔류응력제거처리 효과를 최대로 하기 위해서는 중간제품에 가능한 균일 소성 변형을 가하는 것이 유리하다. 알루미늄 7075 형단조품의 경우에는 형단조시 사용된 같은 금형을 사용하여 소성변형율을 작게 주는 Tx54처리와 특별히 설계된 금형을 사용하여 Tx54보다 더 균일한 소성변형을 주는 Tx52처리가 적용되며<sup>[2]</sup>, 링롤재의 경우 링 팽창(Tx51) 및 링 압축(Tx52)이 주로 적용된다. 고강도 알루미늄 단조품의 경우 응력제거처리시 재료내부의 불균일한 소성변

형에 의해 응력제거 효과가 감소되어 기계가공 시 변형이 유발될 수 있다.

본 논문에서는 알루미늄 링롤재의 급냉 및 응력제거 처리 후 두께에 따른 잔류응력 분포를 예측할 목적으로 PATRAN 및 ABAQUS를 이용하여 2차원 축대칭 열해석 및 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 의해 예측된 잔류응력 분포는 실제 T73, T7351 및 T7352 처리된 알루미늄 링롤재에 대해 3단계 절단법(three step sectioning method)을 적용하여 측정된 결과와 비교분석하였다.

## 2. 잔류응력측정 및 해석

### 2.1 실험 개요

Fig.1은 본 실험절차를 개략적으로 나타낸 것이다. 링롤재를 I.D440×O.D600×H96mm로 기계가공하고, 467℃에서 6시간 유지후 20℃의 물에 급냉하여 용체화 열처리하였다. 급냉된 각 링 시편들은 자연 시효를 방지하기 위하여 -20℃에서 냉동 보관하고 24시간 이내에 잔류응력제거처리를 실시하였다. 이와 같이 제작된 링 시편은 48hr 내에 2단 과시효 처리(2 step aging : T73) 후 잔류응력을 측정하였다.

링 팽창(T7351) 제거방법은 2,500 Ton 프레스의 펀치가 링 내면에 설치된 썬기 형태의 분할치구를 벌릴 때 링 시편이 반경방향으로 팽창되도록 하였다. 이때 원주방향 변형율은 제거 처리 후 내경을 기준으로 1.5%, 3.3% 와 3.7%가 적용되었다.

링 압축(T7352) 제거방법은 링 시편을 5,000 Ton 프레스의 평 금형사이에서 축방향으로 압축시키는 것이며, 압축 변형율은 링의 높이를 기준하여 제거처리 후 1.08%, 1.58%, 3.1% 및 4.4%가 적용되었다. 냉간소성 변형시 마찰을 줄이기 위해 분말 이형재를 사용하였다.

### 2.2 잔류응력 측정

링 시편의 두께에 따른 원주방향 및 축방향의 잔류응력을 정밀 측정하기 위하여 3단계 절단법을 적용하였다.<sup>[3]</sup> 이 방법은 Fig.2와 같이 전분할(parting out), 반분할(splitting) 및 층 제거(layer removal) 순서로 절단되며, T73, T7351 및 T7352 처리된 링의 잔류응력 분포는 여러 가지 해법에 근거하여 절단순서와 역으로 계산

(computation)된다. 계산에 사용된 E와  $\nu$ 는 각각 7458kg/mm<sup>2</sup>과 0.3이며<sup>[1]</sup>, T73 처리 후 측정된 항복강도는 44kg/mm<sup>2</sup> 이었다.

전분할 단계에서는 T73 처리된 링이 급냉 후 전형적인 Full cosine 잔류응력 분포를 갖기 때문에 측정 오차를 줄이기 위하여 Fourier series 역계산법<sup>[4]</sup>을 적용하였다. T7351 및 T7352 처리된 링은 시편의 폭에 대한 잔류응력 곡선의 주기(W/d)가 크기 때문에 두께에 따른 잔류응력 분포가 선형적이라고 가정한 Straight line method을 적용하였으며<sup>[3]</sup>, 이 경우 전분할 단계에서의 역계산 오차는 작은 것으로 알려져 있다<sup>[5]</sup>.

반분할 단계에서는 힘의 평형 및 적합 방정식을 만족하고 중간층 제거의 효과도 고려한 consistent splitting model<sup>[6]</sup>을 적용하였으며, 층제거 단계에서는 이전에 제거된 층들의 영향을 고려한 stretch bending model<sup>[3]</sup>을 적용하였다.

링의 내·외면에 3채널 스트레인 게이지(EA-06-125BZ-350) 각 3개씩을 높이방향으로 24mm, 48mm 및 71mm 위치에 부착하였으며, 스트레인 인디케이터(P-3500) 및 Balance unit(SB-10)로 변형율을 측정하였다.

링 절단시 기계가공응력을 줄이기 위하여  $\phi$  0.3mm의 wire로 방전가공을 실시하였으며, 가공 치구 장착전과 치구 해체후 변형율 차이를 측정하여 가공 응력 및 치구 응력을 최소화하였다. 전분할 단계에서는 Coupon의 폭과 두께의 비(w/t)를 1.2로 하였고, 층제거 단계에서는 층의 두께를 3~6mm로 절단하였다.

### 2.3 잔류응력해석

고강도 알루미늄 합금의 경우 급냉시 석출경화에 의한 체적변화가 유발되지 않으므로 잔류응력은 열 해석 및 탄소성해석을 연속적으로 수행하여 계산될 수 있다. 해석에 필요한 모델링은 PATRAN 6.0을 이용하였고, 응력해석은 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 ABAQUS 5.6을 이용하였다. 열해석 및 탄소성 해석에 사용된 해석 모델은 2차원의 축대칭 4변형 선형요소 및 접촉요소를 사용하였고, Fig.3은 링 팽창 해석 모델링을 나타내고 있다. 잔류응력은 급냉후 발생하는 온도변화에 의한 열응력해석으로 계산하였으며, 링팽창 및 링압축에 의한 응력제거처리 공정후 남은 잔류응력은 열응력

에 의한 잔류응력상태에서 탄소성해석으로 계산하였고, 이때 적용된 변형량은 소성변형을 3%를 적용하였다. 잔류응력해석에 필요한 열적 및 기계적 물성치는 Yoshihara등<sup>[1]</sup>의 값을 사용하였으며, 20℃의 항복강도는 14kg/mm<sup>2</sup>을 사용하였다. 특히 열해석시 경계조건인 온도에 따른 열전달계수는 ABAQUS에 내장된 film user subroutine<sup>[7]</sup>을 이용하여 적용하였다. 2단 과시효 영향은 해석에서 고려하지 않았다.

링 팽창 및 링 압축 제거처리 해석에 사용된 마찰계수( $\mu$ )는 0.05를 적용하였다.<sup>[8]</sup>

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 급냉 후 잔류응력분포

Fig.4는 링의 두께에 따른 원주방향의 잔류응력 해석 결과 및 측정 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 링의 급냉후 원주방향의 잔류응력 해석값은 edge 영향을 제외하고 T73후 측정값과 비슷한 경향을 보였으며, 링의 중심에서는 인장응력을 나타내었고 링의 내면과 외면에서는 압축응력을 나타내었다. 이분포는 알루미늄 중공재의 급냉시 나타나는 응력분포<sup>[9]</sup>와 잘 일치한다. 해석값은 링롤재의 급냉후 계산값이며, 측정값과의 비교를 위하여 게이지들이 부착된 동일 위치인 높이 방향으로 중심부(center, 48mm), 중간부(middle, 24mm) 및 표면(edge, 0mm)에서 나타낸 것이다. 측정값은 T73처리후 3개의 게이지로부터 획득한 변형율의 평균으로부터 계산된 값이다. 전분할 단계에서는 Fourier series 방법을 적용하였으며, 최소자승법을 사용하여 근사화하였다. 해석값은 측정값과 상당한 차이를 나타내었으며, 중심부에서 표면으로 갈수록 edge 영향이 증가하여 변화가 크게 나타났다. Altchuler등은 알루미늄 7075 합금의 경우 시효처리 후 잔류응력이 급냉 후 보다 40% 정도 감소한다고 하였다.<sup>[2]</sup> 이 값을 제외한 해석값과 측정값의 차이는 Fig.5에 나타낸 바와 같이 링롤재의 높이가 작아 급냉 후 재료내부의 원주방향 변형을 분포가 균일하지 않고 이로 인하여 잔류응력 측정시 게이지 부착위치에서 획득된 변형율의 평균값이 절단시 이완된 변형율을 대표하지 못하기 때문에 주로 발생되며, 측정값의 역계산에 도입되는 가정 및 해석시 사용되는 열적 및 기계적 성질들이 정확하지 않기 때문으로 판단된다.

향후 연구과제로서 잔류응력 해석 및 측정 결과를 정확하게 비교하기 위해서는 2단 과시

효처리 효과를 해석에서 고려해야 하며, 링롤재의 높이를 증가시켜 egde 영향을 줄이고, 정확한 고온 물성치를 획득해야 한다.

Fig.6은 축방향의 해석 및 측정 결과를 비교한 것이다. 링의 급냉후 축방향의 잔류응력 해석값은 T73후 측정값과 비슷한 경향을 보였으며, 원주방향과 동일한 분포를 나타내었다.

Fig.7은 반경방향의 해석결과이며, edge 효과를 제외한 해석값은 원주 및 축 방향의 응력보다 상당히 줄어들었으나, 최대 7kg/mm<sup>2</sup>이었다. 이 값은 잔류응력 측정값의 역계산시 2축 응력가정에 영향을 줄 것으로 판단된다. 응력분포는 원주 및 축 방향 분포와 다르게 인장응력만을 나타내었다.

#### 3.2 링 팽창 효과

Fig.8 및 Fig.9는 원주 및 반경 방향의 해석 및 측정 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 해석 결과는 급냉 후 링 팽창이 적용된 계산값이며, 측정 결과는 T7351 처리된 측정값이다. T7351 처리된 링들의 전분할 단계에서는 straight line 방법을 적용하여 근사화 하였다. 해석 및 측정 결과는 비슷한 경향을 나타내며, 잔류응력이 T7351 처리 후 T73에 비해 상당히 감소하였음을 알 수 있다. 측정값들은 오차를 고려하여 적용된 3가지 소성변형율에 관계없이 최소자승법을 이용하여 한 개의 직선으로 근사화 하였다. 해석값과 측정값으로 부터 근사화된 직선의 기울기를 비교해 보면 축방향의 응력제거효과가 원주방향보다 크게 나타났는데, 이는 링 팽창시 적용된 축방향의 소성변형을 분포가 원주방향보다 상대적으로 균일하기 때문이며, 잔류응력이 없다고 가정한 링의 냉간 탄소성 해석 결과로도 확인되었다. Fig.10은 3% 링 팽창 후 재료내부의 원주방향 변형을 분포이다. Fig.5에 나타낸 분포와 다르게 이 변형을 분포는 반경방향으로 band를 형성하고 있으며, band 내에서는 거의 균일하다. 절단시 게이지로부터 획득된 변형율은 이 band들이 제거될 때 얻어진 평균값이므로 해석결과와 측정결과가 일치된 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

링 팽창 후 측정된 반경방향 탄성복원량은 0.3~0.5%이며, 링의 치수제어가 쉬웠고, 장비의 성형하중은 1,100~1,500 Ton 정도 소요되었다.

#### 3.3 링 압축 효과

Fig.11 및 Fig.12는 T7352 처리 후 원주 및 축 방향의 해석 및 측정결과를 Fig.8 및 Fig.9와 동일하게 나타낸 것이다. T7352 처리 후 잔류응

력은 T73에 비해 현저히 줄어들었다. 또한 두 방향의 해석값과 측정값은 원주방향의 edge 영향을 제외하고 비슷한 경향을 보였으며, 축방향의 응력제거 효과가 원주방향보다 약간 우수하게 나타났다. Fig.13은 3% 링 압축 후 재료내부의 축방향 변형을 분포이며, 절단시 제거되는 층에서 높이방향으로 상당히 불균일한 분포를 보이고 있다. 측정시 게이지로 부터 획득된 평균 변형율로 부터 계산된 측정값은 해석값과 정량적으로 비교하기 어렵다. 그러나 원주방향의 소성변형을 분포는 링 압축시 데드메탈역 및 금형과 링 사이의 마찰 영향을 고려한다면 축방향에 비해 상대적으로 불균일하여 원주방향응력이 축방향보다 상대적으로 클 것으로 판단된다.

링 압축후 반경방향 탄성복원량은 0.3~0.4% 정도였으나, 압축량의 변화에 따라 내경 증가량이 크게 변하기 때문에 링의 치수제어가 어려웠으며, 장비의 성형하중은 약 3,000~4,500Ton 정도 소요되었다.

Fig.8 및 Fig.9에 나타낸 링 팽창 효과와 Fig.11 및 Fig.12에 나타낸 링 압축 효과 비교로 부터 링 압축에 의한 응력제거 효과는 링 팽창에 비해 축방향의 경우 비슷하게 나타났으나, 원주방향의 경우에는 크게 나타났다. 그러나 제거처리 공정의 적용성을 고려할 때 링 팽창은 링의 치수제어 및 성형하중 측면에서 링 압축보다 유리하다. 따라서 링롤재의 응력제거처리는 제거효과 및 실용성 측면에서 링 압축이 유리하며, 치수제어 및 장비 용량 측면에서 링 팽창이 유리하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

고강도 알루미늄 7175 합금 링롤재의 급냉 및 제거처리 후 잔류응력을 해석하고, 3단계 절단법을 적용하여 측정한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 링의 급냉후 원주 및 축방향의 잔류응력 해석값은 edge를 제외하고 T73후 측정값과 비슷한 경향을 보였으며, 링의 내면과 외면에서 압축응력을 나타내었고 중심에서 인장응력을 나타내었다.

2. 잔류응력은 링 팽창(T7351) 및 링 압축(T7352) 후 T73에 비해 현저히 감소하였으며, 두 공정 적용시 축방향의 제거효과가 원주방향

보다 크게 나타났다.

3. 링 압축에 의한 응력제거 효과는 링 팽창에 비해 축방향으로 비슷하게 나타났으나, 원주방향으로 약간 크게 나타났다.

4. 링롤재의 응력제거처리는 제거효과 및 실용성 측면에서 링 압축이 유리하며, 치수제어 및 장비용량 측면에서 링 팽창이 유리하다.

향후 연구과제로서 잔류응력 해석 및 측정결과를 정확하게 비교하기 위해서는 2단 과시효 처리 효과를 해석에서 고려해야 하며, 링롤재의 높이를 증가시켜 edge 영향을 줄이고, 정확한 고온 물성치를 획득해야 한다.

#### 참고문헌

1. Naotake, Yoshinara and Seishi Tsuyama, "Development of large high strength aluminium alloy component for spacecraft", NKK Thec. Reviews No.64, 1992.
2. Y. Altschuler, T.Kaatz, and B. Cina, "Relief of residual stresses in high strength Aluminum alloy by cold working", ASTM STP 993.
3. SAE Information Report, "Methods of residual stress measurement-SAE J936", Handbook supplement J936, 1965.
4. Shadley, J.R., Sorem.J.R, Jr. and Rybicki, E.F., "A Fourier series back computation method for the parting out step in residual stress measurement in pipes", J. Pressure vessel Tech., Vol.III, 1989.
5. Shadley, J.R. and Rybicki, E.F., Shealy, W.S., "Application guideline for the parting out step in a through thickness residual stress measurement procedure", Strain, 1987.
6. Ribicki, E.F., Shadley, J.R and Shealy, W.S., "A consistent splitting model for experimental residual stresses analysis", Experimental Mech., 1983.
7. ABAQUS User's Manual, V.5.6, Vol.I II.
8. Handbook of metalforming, Ed. by Lange Kurt, McGraw Hill Co., 1985.
9. Brinksmier, E.. etc. "Residual stresses-Measurement and causes in machining process", Annals CIRP, vol.31, 1982.

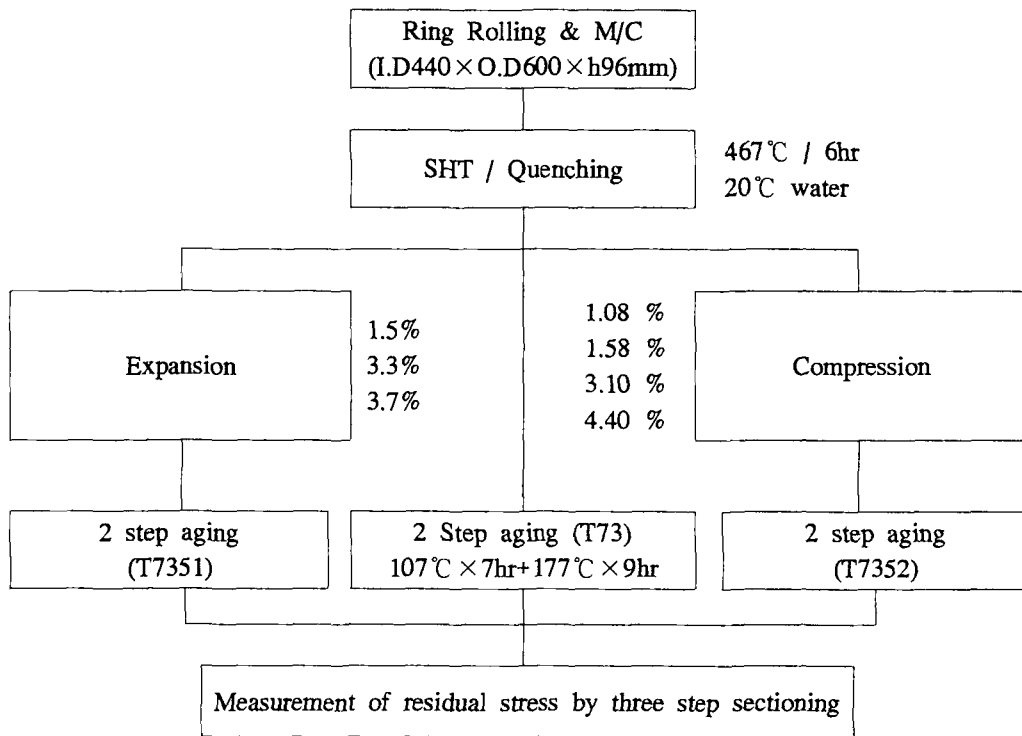


Fig.1 Experimental Procedure

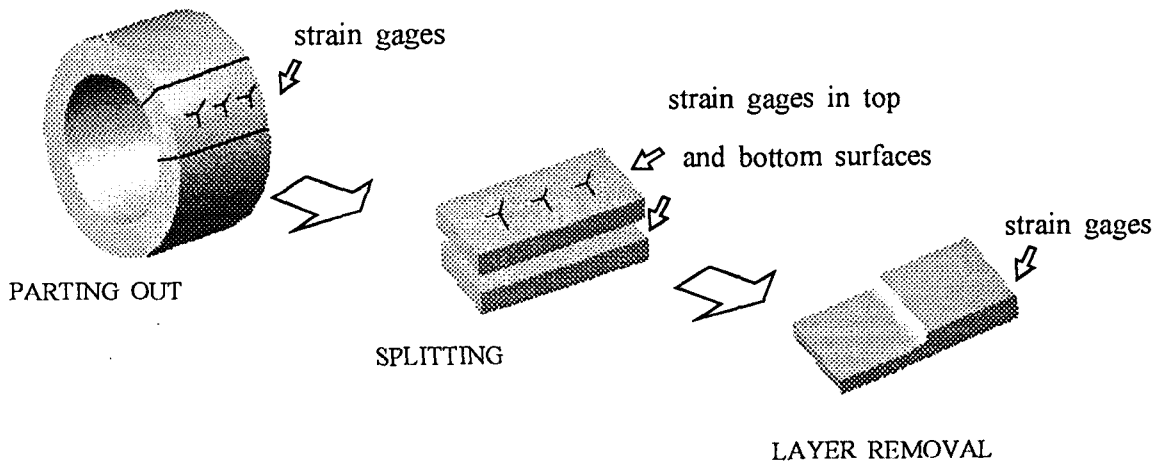


Fig.2 Three step sectioning procedure

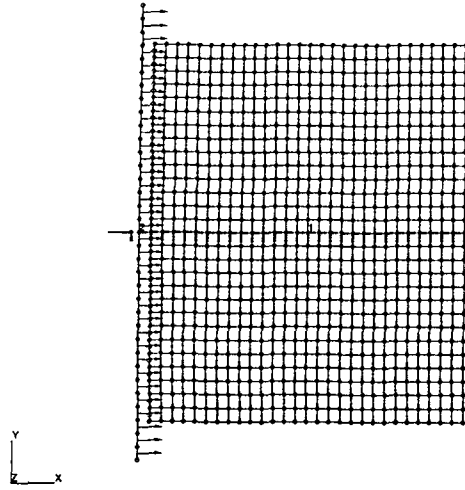


Fig.3 The FEM model for residual stress analysis in expansion

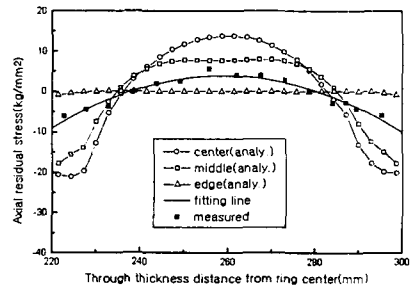


Fig.6 Comparison of analysis and measured axial residual stress distribution (analysis after quenching and measured after T73)

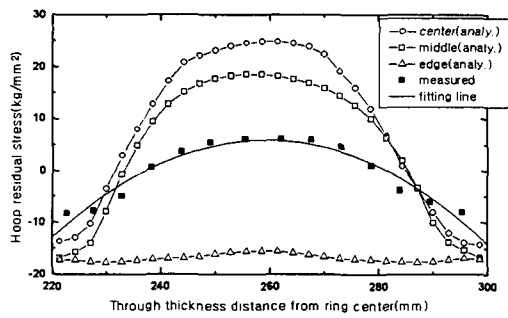


Fig.4 Comparison of analysis and measured hoop residual stress distribution (analysis after quenching and measured after T73)

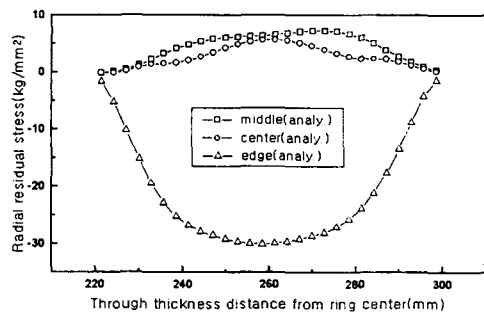


Fig.7 Radial residual stress distribution (analysis after quenching)

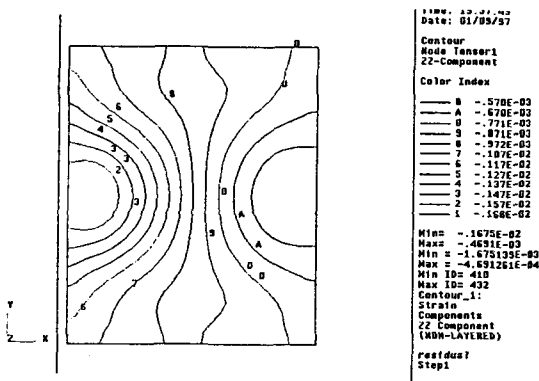


Fig.5 Hoop strain distribution after quenching

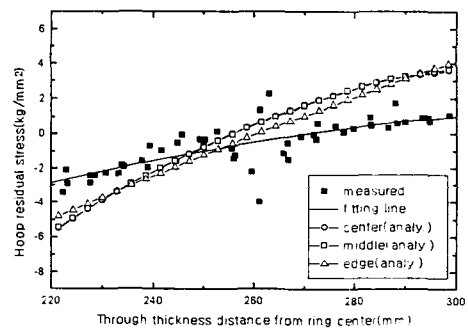


Fig.8 Comparison of analysis and measured hoop residual stress (analysis after quenching and measured after T7351)

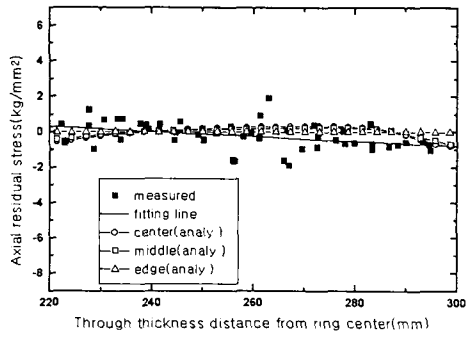


Fig.9 Comparison of analysis and measured axial residual stress (analysis after expansion and measured after T7351)

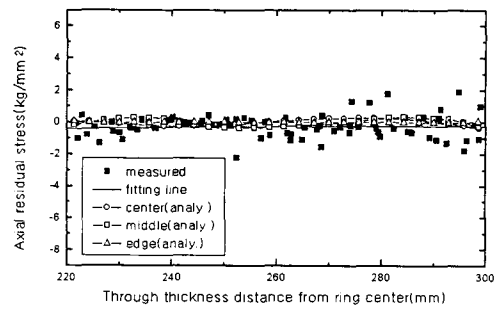


Fig.12 Comparison of analysis and measured axial residual stress (analysis after compression and measured after T7352)

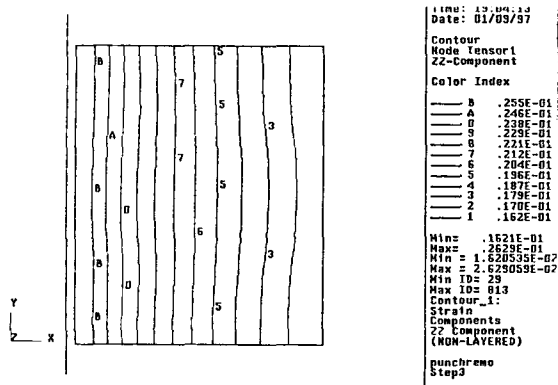


Fig.10 Hoop strain distribution after 3% expansion

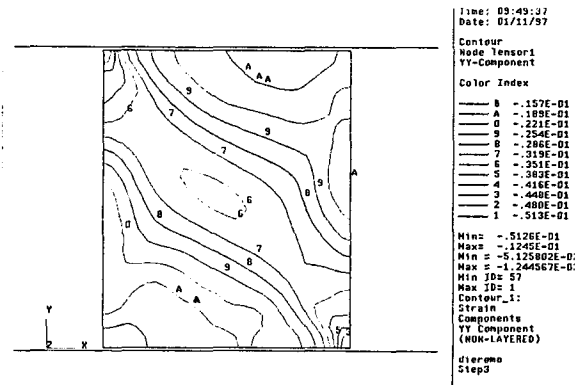


Fig.13 Axial strain distribution after 3% compression

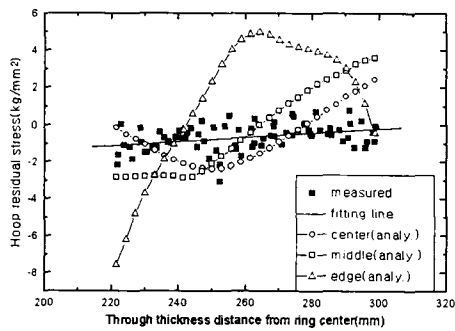


Fig.11 Comparison of analysis and measured hoop residual stress (analysis after compression and measured after T7352)