

알루미늄 링롤재의 급냉 및 요소제거 후 잔류응력의 유한요소해석

박성한* · 구송희* · 이방업* · 조원만* · 은일상*

Finite Element Analysis of Residual Stress after Quenching and Element Removal of Al Ring Rolls

Sung-Han Park*, Song-Hoe Koo*, Bang-Eop Lee*, Won-Man Cho*, Il-Sang Eun*

ABSTRACT

To predict residual stresses of aluminum ring rolls after quenching and element removal, 2-D and 3-D thermal elasto-plastic analyses were performed. Strains measured by three step sectioning method were directly compared to those analysed using ABAQUS's element removal. Numerical residual stresses after quenching had similar tendency to measured ones after 2 step aging, but the difference between numerical and measured ones was large. The difference is the reason why there are nonuniform residual stress distributions to ring height direction due to small height of ring. It is judged that the increase of ring height will improve the accuracy of measured ones and decrease the difference. By direct comparison between 3-D numerical strains to simulate three step sectioning method and measured ones, the accuracy of measurement and analysis can be improved.

It is concluded that there can be predicted the deformation behavior on machining complex shaped large structures with residual stresses.

초 록

고강도 알루미늄 대형 링롤재의 급냉 및 요소제거 후 발생하는 잔류응력을 2차원 및 3차원 유한요소 해석하였고, 3단계 절단법에 의해 측정된 변형율과 ABAQUS의 요소제거 기능을 이용한 해석값을 직접 비교하였다. 급냉후 잔류응력 해석결과는 2단 과시효후 측정값과 비슷한 경향을 보였으나 그 절대값의 차이가 크게 나타났다. 이는 링 시편의 높이가 작아 측정값이 부정확하였기 때문이며, 링의 높이를 증가시켜 높이방향으로 균일한 응력분포를 갖도록 하면 그 차이가 감소될 것으로 판단된다. 잔류응력을 측정하는 3단계 절단 과정을 모사한 3차원 해석결과와 측정된 변형율을 직접 비교함으로써 실험과 해석의 정확성을 향상시킬 수 있도록 하였다. 이로부터 잔류응력이 내재하고 형상이 복잡한 대형 알루미늄 구조물의 기계가공에 의한 변형을 정확히 예측할 수 있는 기반을 마련하였다.

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

1. 서론

우주항공용 경량화 구조재로 사용되는 고강도 알루미늄 대형 링롤재는 강도 확보를 위하여 용체화 열처리(solution heat treatment) 단계에서 400~500℃의 고온으로 가열 후 20℃의 물에 급냉된다. 급냉시 재료 내부의 급격한 온도 구배에 의한 열응력이 재료의 소성변형을 야기시켜 열 응력이 잔류응력으로 남게된다.

최근 알루미늄 중실축, 판재 및 링롤재 등에 대한 잔류응력해석 및 측정 결과가 발표되고 있다^{1), 2), 3)}. 측정값은 제거될 층에서 이완될 잔류응력이 균일해야 한다는 가정하에 계산된 값이므로 시편의 크기가 제한적이거나 형상이 복잡한 3차원 문제의 경우 상당한 오차를 포함할 수 있다. 따라서 3차원 문제의 경우 해석된 변형률과 측정된 변형률을 직접 비교해야만 해석방법의 정확성을 판단할 수 있다.

본 연구에서는 시편의 크기가 제한적인 알루미늄 대형 링롤재의 급냉후 잔류응력분포를 정확하게 예측하기 위하여 PATRAN 및 ABAQUS를 이용하여 2차원 및 3차원 열탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 7175 알루미늄 링롤재의 급냉 및 2단 과시효 처리후 3단계 절단법(three step sectioning)을 적용하여 측정된 결과와 잔류응력해석 결과를 비교 분석하였다. 특히 3차원 해석에서는 ABAQUS의 요소제거(element removal)기능을 이용하여 측정단계의 절단 과정을 동일하게 모델링한 후 해석된 변형률과 측정된 변형률을 직접 비교하였다.

2. 잔류응력측정

잔류응력 측정용 링롤재를 ID440×O.D600×H96mm로 기계가공한 후 467℃에서 6시간 유지후 20℃의 물에 급냉하여 용체화 열처리하였다. 이와같이 제작된 링 시편은 48hr내에 2단 과시효 처리 후 잔류응력을 측정하였다.

링 시편의 두께에 따른 원주방향 및 축방향의 잔류응력을 정밀 측정하기 위하여 3단계 절단법을 적용하였다⁴⁾. 이 방법은 그림 1과 같이 전분할(parting out), 반분할(splitting) 및 층제거(layer removal)

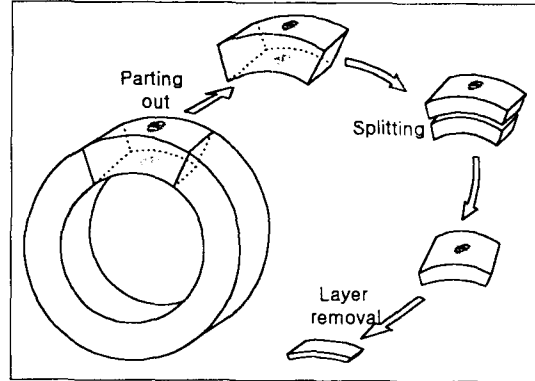


그림 1. 3단계 절단법

순서로 절단되며, 링의 잔류응력 분포는 여러 가지 해법에 근거하여 절단순서와 역으로 계산(computation)된다. 전분할 단계에서는 2단 과시효처리된 링이 전형적인 Full cosine 잔류응력 분포를 갖기 때문에 측정 오차를 줄이기 위하여 Fourier series 역계산법⁵⁾을 적용하였다.

$$\sigma_b = \sum_{i=1} R_i A_i \cos\left(\frac{i\pi}{H} y\right)$$

반분할 단계에서는 힘의 평형 및 적합 방정식을 만족하고 중간층 제거의 효과도 고려한 consistent splitting model⁶⁾을 적용하였다.

$$\sigma_a(y) = \widehat{\sigma}_a(y) - \Delta\sigma_{a0} + (\Delta\sigma_{a0} + \sigma_{a1} - \widehat{\sigma}_{a1}) \frac{y}{a}$$

$$\sigma_b(y') = \widehat{\sigma}_b(y') - \Delta\sigma_{b0} + (\Delta\sigma_{b0} + \sigma_{b1} - \widehat{\sigma}_{b1}) \frac{y'}{b}$$

층제거 단계에서는 이전에 제거된 층들의 영향을 고려한 stretch bending model¹⁾을 적용하였다.

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \left[-\frac{(t-z)}{2} \left(\frac{d\epsilon_x}{dz} + \mu \frac{d\epsilon_y}{dz} \right) + 2(\epsilon_x + \mu\epsilon_y) - 3(t-z) \int_0^z \frac{\epsilon_x + \mu\epsilon_y}{(t-z)^2} dz \right]$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} \left[-\frac{(t-z)}{2} \left(\frac{d\epsilon_y}{dz} + \mu \frac{d\epsilon_x}{dz} \right) + 2(\epsilon_y + \mu\epsilon_x) - 3(t-z) \int_0^z \frac{\epsilon_y + \mu\epsilon_x}{(t-z)^2} dz \right]$$

링의 내·외면에 3채널 스트레인 게이지(EA-06-125BZ-350) 각 3개씩을 높이방향으로 24mm, 48mm 및 72mm 위치에 부착하였으며, 스트레인 인디케이터(P-3500) 및 Balance unit(SB-10)로 변형율을 측정하였다. 링 절단시 직경 0.3mm의 wire로 방전가공을 실시하여 가공 응력을 최소화하였다. 전분할 단계에서는 edge의 영향을 최소화하기 위하여 Coupon의 폭과 두께의 비(w/t)를 1.2로 하였고⁷⁾, 층제거 단계에서는 층의 두께를 약 5mm로 절단하였다.

3. 잔류응력해석

잔류응력은 열해석과 탄소성 해석을 연속적으로 수행하여 계산하였다. 해석에 필요한 모델링은 PATRAN 6.0을 이용하였고, 응력해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 5.5를 사용하였다⁷⁾. 열해석 및 탄소성 해석에 사용된 모델은 2차원 축대칭 선형 4변형 요소 및 3차원 선형 8절점 육면체 요소를 사용하였다. 열해석의 경우 ABAQUS film user subroutine을 작성하여 온도함수인 heat flux 경계조건을 적용하였다. 3차원 해석의 경우 ABAQUS의 요소제거 기능을 이용하여 실제 잔류응력 측정시 절단 순서와 동일하게 요소를 제거할 수 있도록 모델링 하였다. 그림 2는 2차원 열 및 응력 해석모델을 나타내는데 (1)은 열해석시 온도의 함수인 열전달계수를 적용시키기 위하여 user subroutine을 작성하여 ABAQUS의 input file에 추가하였다. (2)는 응력해석시 대칭성을 고려한 축방향 변위조건이다. 그림 3

은 3차원 열 및 응력 해석모델을 나타내는데 대칭성을 고려하여 90° 만 모델링하였으며 절단면은 대칭조건을 단열이나 변위로 구속하였다. 잔류응력 측정시 3단계 절단 과정을 모사하기 위해 요소를 그림 4와

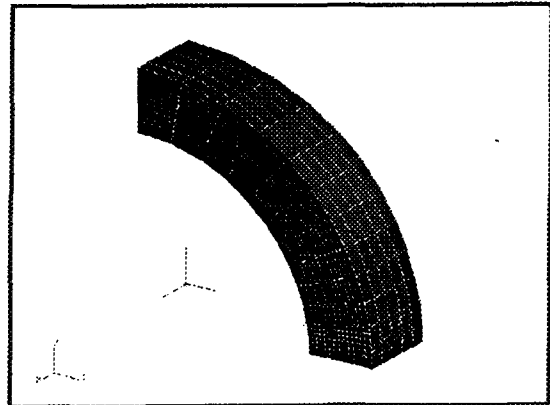


그림 3. 3차원 열응력해석 모델링

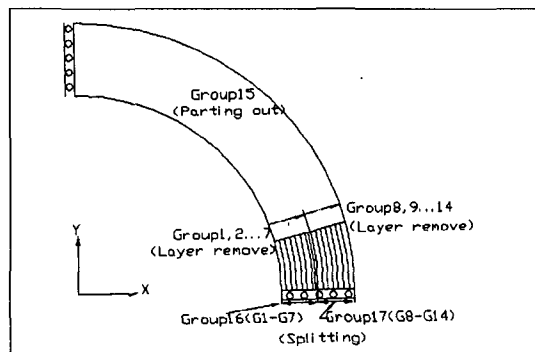


그림 4. 3단계 절단 모델 및 요소의 grouping

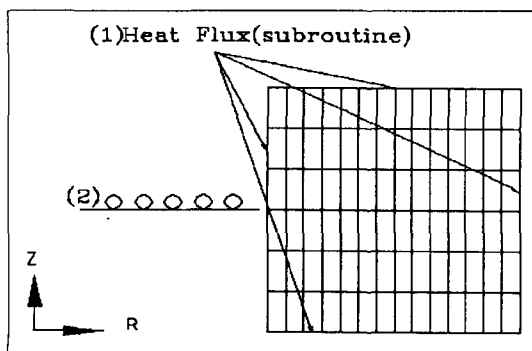


그림 2. 2차원 열 및 응력해석 모델

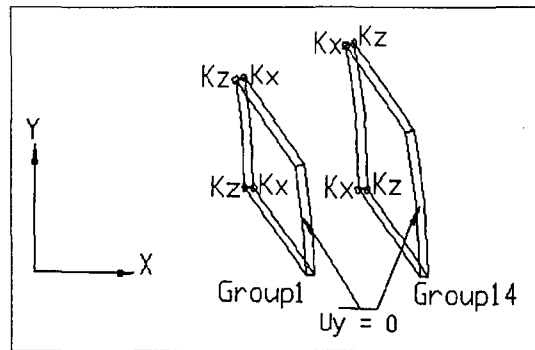


그림 5. 3차원 스프링 요소

표 1. 요소의 grouping

절 단 단 계	제 거 될 group
전분할 단계 (parting out)	G15
반분할 단계 (splitting)	외측 coupon : G17
	내측 coupon : G16
층제거 단계 (layer removal)	외측 coupon : G8,G9,G10,G11,G12,G13
	내측 coupon : G7, G6, G5 ,G4, G3,G2

표 2. 비열 및 열전도 계수

Temp (°C)	Specific heat (J/kg·K)	Conductivity (W/mm·K)
20	825	0.123
100	961	0.136
200	958	0.145
300	1003	0.156
400	1126	0.163
467	1209	0.166

표 3. 열 전달 계수

Temp.-Sink(°C)	Heat Transfer Coef. (W/10 ⁶ mmK)
30	2500
50	2600
70	3000
100	5400
165	11900
205	12900
245	12700
295	10200
455	1200

표 4. 열 팽창 계수 및 탄성계수

Temp. (°C)	Expansion coefficient (mm/mm)	Elastic modulus (kg/mm ²)
20	2.322E-5	7408
300	2.935E-5	
400	3.016E-5	
467	3.038E-5	4755

표 5. 탄소성 물성

Temp. (°C)	Yield stress (kg/mm ²)	Plastic strain (ε)
20	1st	14.06
	2nd	18.54
467	1st	1.56
	2nd	1.71

같이 grouping하였다. 요소제거 과정을 표 1.에 나타내었으며 ABAQUS에서는 group 제거 과정을 하나의 STEP으로 하여 비선형해석을 하였다. 요소제거 단계에서 수치적 강체 이동과 회전을 제어하기 위해 층을 완전히 제거한 최종 group1 과 group14의 절점에 그림 5에 나타낸 바와 같이 node-to-ground spring(spring상수: 10^{-10})을 적용하였다. 적용 예로서 2차원 잔류응력해석 방법 및 요소제거 기능을 이용하여 스킵트용 링롤재의 기계가공시 잔류응력 이완에 의한 변형거동을 모델링 하였다.

잔류응력해석에 사용된 열적 및 기계적 물성치는 Yoshihara 등⁸⁾의 값을 사용하였다. 열해석에 사용된 Al 7175의 비열 및 열전도 계수는 표 2.에 나타내었고, 특히 열해석시 링롤재와 물의 접촉면에서 경계조건은 Heat flux⁹⁾를 표 3.과 같이 온도에 따른 열전달계수로 변환하여 사용하였다. 잔류응력해석에 사용된 열팽창계수, 탄성계수 및 탄소성 물성은 표 4. 및 표 5.에 나타내었고 포와송비는 0.3을 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 급냉시 온도 및 열응력 분포

그림 6은 냉각시간이 10.2초일 때의 2차원 온도해석 결과이며 표면에서 온도가 140°C 정도로 떨어졌으나 내부는 300°C를 유지하고 있어 상당히 큰 열응력이 예상된다. 200초에서는 링롤재의 전체 온도가 20°C로 거의 균일해졌으므로 열 응력은 소모되었으나 냉각시 과도한 열 응력에 의해 국부적 소성 변형이 발생하여 잔류응력이 존재하게 된다. 그림 7과 그림 8은 열처리후(200초) 2차원 및 3차원 열응력 해석결과를 나타내었는데, 이들의 응력분포는 유사하며 3차원 탄소성해석에 적용된 변위경계조건이 타당함을 보여 주고 있다.

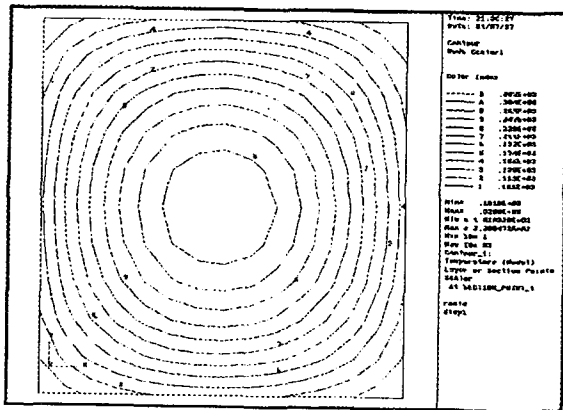


그림 6. 온도분포 (10.2초후)

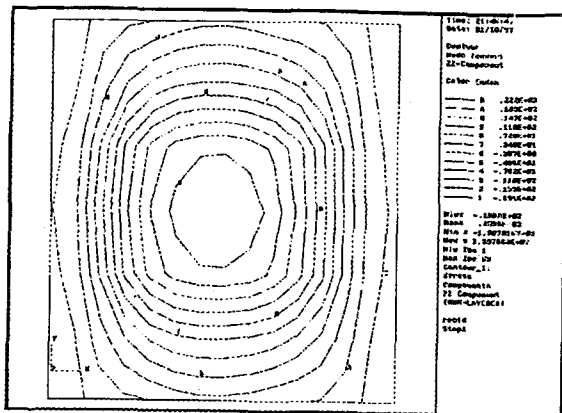


그림 7. 2차원 원주방향 잔류응력분포(200초후)

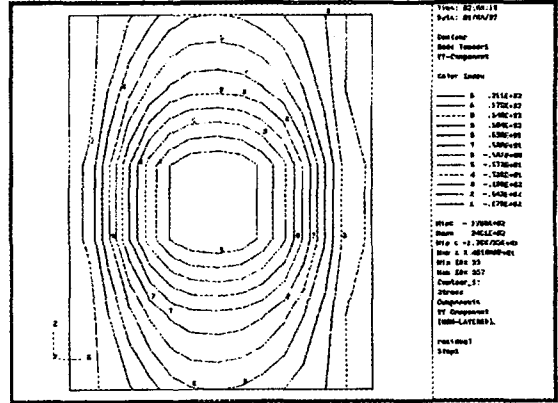


그림 8. 3차원 원주방향 잔류응력분포(200초후)

4.2 급냉 후 잔류응력 분포

4.2.1 원주방향 잔류응력

그림 9는 원주방향 잔류응력의 2차원 및 3차원 해석 결과와 측정결과를 비교하여 나타낸 것이다. 해석값은 링롤재의 높이 방향으로 중심부(center, 48mm), 중간부(middle, 24mm) 및 표면(edge, 0 mm)에서 나타낸 것이다. 중심부와 표면에서 3차원의 잔류응력 절대값이 2차원보다 작게 나타난 것은 3차원 해석의 경우 원주방향의 요소분할로 인하여 링의 내면과 외면으로 전달되는 열량이 2차원보다 상대적으로 작아서 냉각속도가 감소되기 때문으로 판단된다. 측정값은 내면 및 외면에 부착된 6개의 게이지로부터 획득한 변형율의 평균값과 중심부와 중간부에 부착된 게이지들로부터 얻어진 2개의 변형율들을 통계처리하여 error bar로 나타낸 것이다. 링의 급냉 후 원주방향의 잔류응력 해석값은 edge 영향을 제외하고 급냉 및 2단 과시효후 측정값과 비슷한 경향을 보였다. 해석값은 측정값과 상당한 차이를 나타내었으며, 중심부에서 표면으로 갈수록 edge 영향이 증가하여 변화가 크게 나타났다. Altschuler 등^[1]은 알루미늄 7075 합금의 경우 2단 과시효처리시 시효온도가 다른 알루미늄 합금보다 높기 때문에 시효후 잔류응력이 급냉 후 보다 40% 정도 감소한다고 보고하였다. 이 값을 제외한 해석값과 측정값이 차이가 나는 주된 원인은 그림 10에 나타낸 바와 같이 링롤재의 높이가 작아 측정시 제거될 층에서 응력이 불균일하기 때문이며 부정확한 열적 및 기계적 물성값들의 영향도 있는 것으로 판단된다.

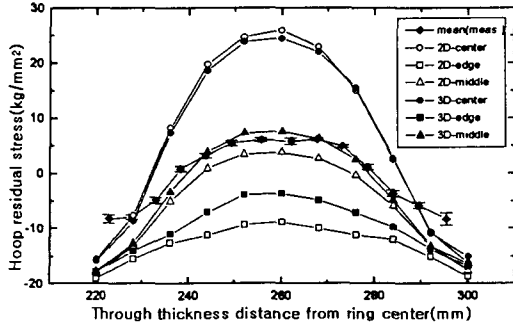


그림 9. 원주방향 잔류응력분포

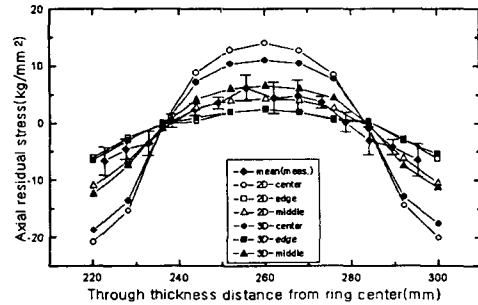


그림 11. 축방향 잔류응력분포

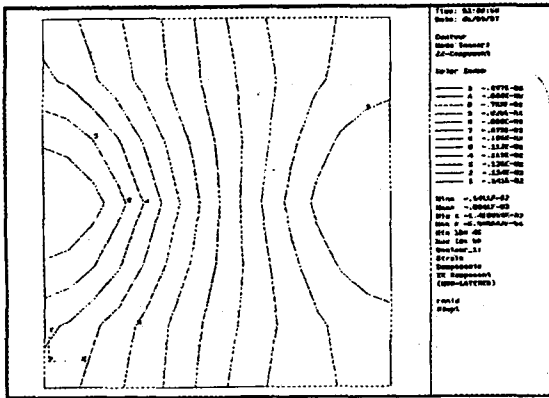


그림 10. 2차원 원주방향 변형률분포

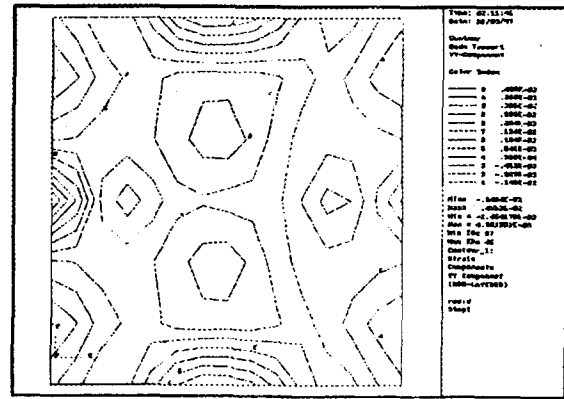


그림 12. 2차원 축방향 변형률 분포

4.2.2 축방향 잔류응력

그림 11은 축방향의 잔류응력 해석 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. 잔류응력 해석값은 측정값과 비슷한 경향을 보였으며, 원주방향과 유사한 분포를 나타내었다. 축방향 측정값의 error bar는 원주방향보다 크게 나타났는데, 이는 그림 10과 그림 12의 비교로부터 설명되며, 3개의 게이지가 부착된 위치에서 획득된 변형률들이 축방향의 경우 원주방향보다 상대적으로 불균일 하기 때문이다.

본 시험에 사용된 높이/두께비가 1.0인 링롤재의 경우 해석결과는 측정결과와 상당한 차이를 나타내었으며, 그림 13과 같이 높이/두께비를 1.0 및 3.0으로 한 시험의 해석결과를 비교해보면 3.0의 경우 1.0보다 층이 제거될 높이 방향으로 비교적 균일한 응력분포를 보여 해석값과 측정값이 보다 근접한 값을 나타낼 것으로 판단된다.

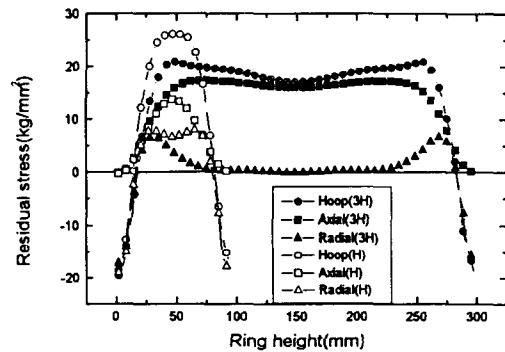


그림 13. 높이/두께가 3.0인 링롤재의 잔류응력분포

4.3 요소 제거

그림 14와 그림 15는 3단계 절단법 적용시 링으로부터 절단된 부분(coupon)이 측정부위의 변형을 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 중심부(center : 48mm)에서 측정된 원주 및 축방향의 변형을 변화

($\Delta \epsilon$)와 ABAQUS의 요소제거기능을 적용한 3차원 해석 값을 직접 비교하였다. 측정값과 해석값은 두방향 모두 상당한 오차를 나타내었으나, 전분할부터 반분할시 변형율은 증가하며 층제거시 감소하는 비슷한 경향을 나타내었다. 그림 16과 그림 17은 3차원 해석결과로서 전분할, 반분할 및 층제거 후 잔류응력의 이완거동을 나타내고 있다. 그림 18은 요소제거기법을 스킵트 기계 가공에 적용한 결과로서 링롤재로부터 스킵트를 황삭 및 정삭가공 후 내경 및 외경의 변형거동을 나타내고 있다. 그림 19, 그림 20 및 그림 21은 급냉, 황삭, 정삭 후 잔류응력 이완거동을 나타내고 있다.

ABAQUS의 요소제거 기능을 이용하여 측정된 변형율과 해석값을 직접비교함으로써 실험과 해석의 정확성을 향상시킬 수 있도록 하였으며, 잔류응력을 측정하기 어려운 복잡한 형상을 갖는 구조물의 잔류응력을 예측할 수 있게 되었다. 또한 요소제거기능을 적용함으로써 측대칭 알루미늄 합금 구조물의 가공에 의한 변형을 예측할 수 있게 되었다.

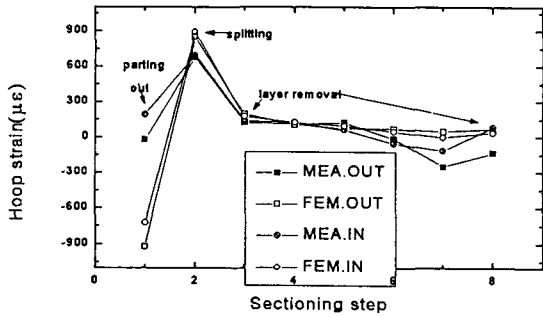


그림 14. 3단계 절단시 원주방향 변형율 이완거동

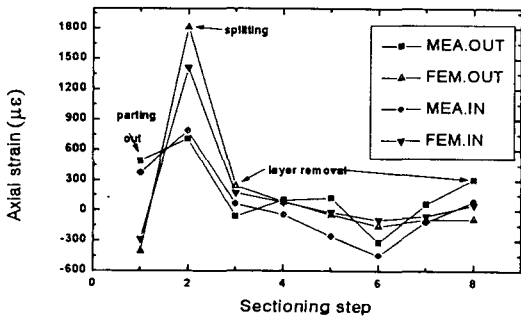


그림 15. 3단계 절단시 축방향 변형율 이완거동

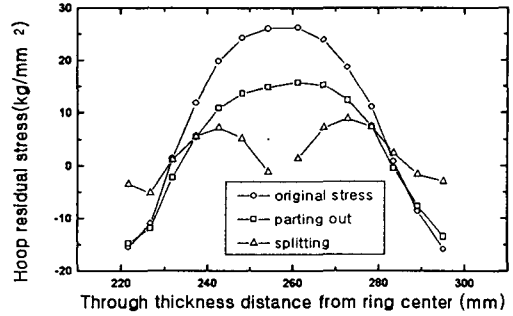


그림 16. 원주방향 잔류응력 이완거동 (전분할 및 반분할 후)

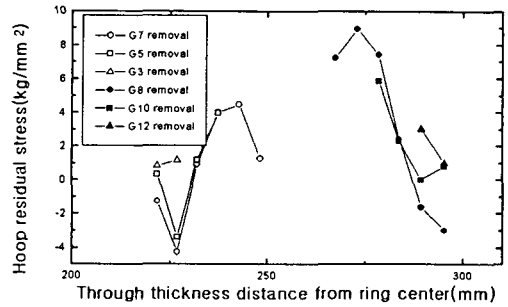


그림 17. 원주방향 잔류응력 이완거동 (층제거 후)

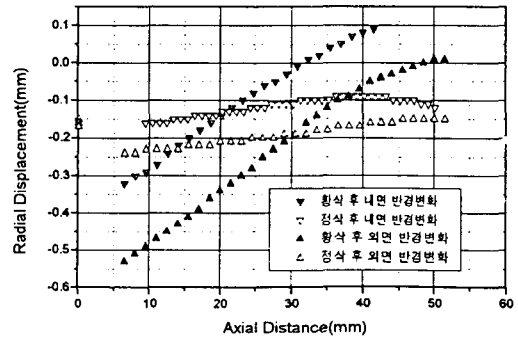


그림 18. 스킵트 황삭 및 정삭후 반경변화

5. 결 론

고강도 알루미늄 대형 링롤재의 급냉시 발생하는 잔류응력을 2차원 및 3차원 해석하였고, 3단계 절단법에 의해 측정된 변형율과 해석값을 직접 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

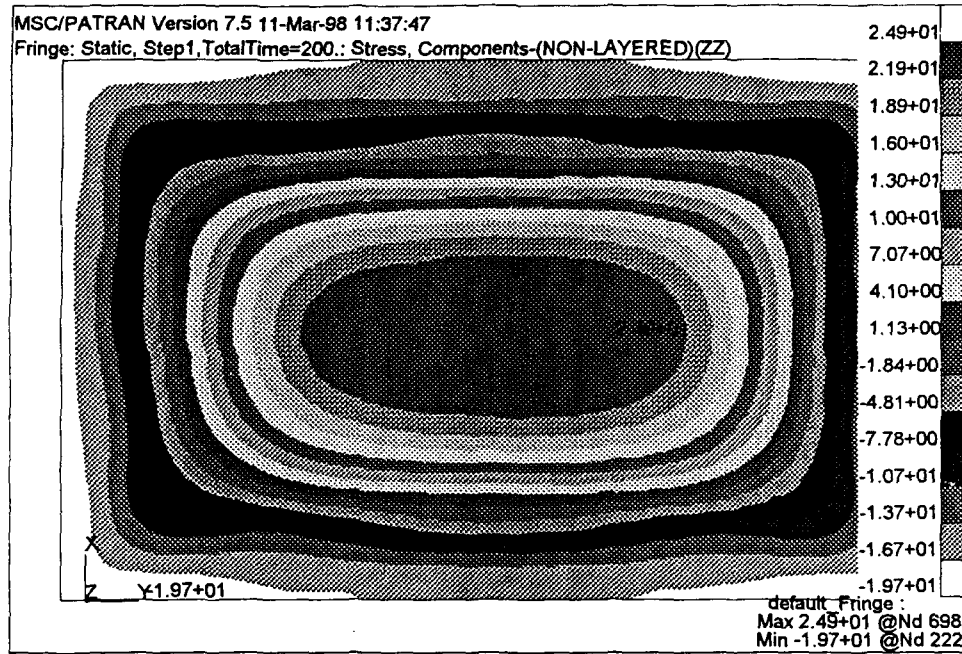


그림 19. 급냉후 원주방향 잔류응력분포

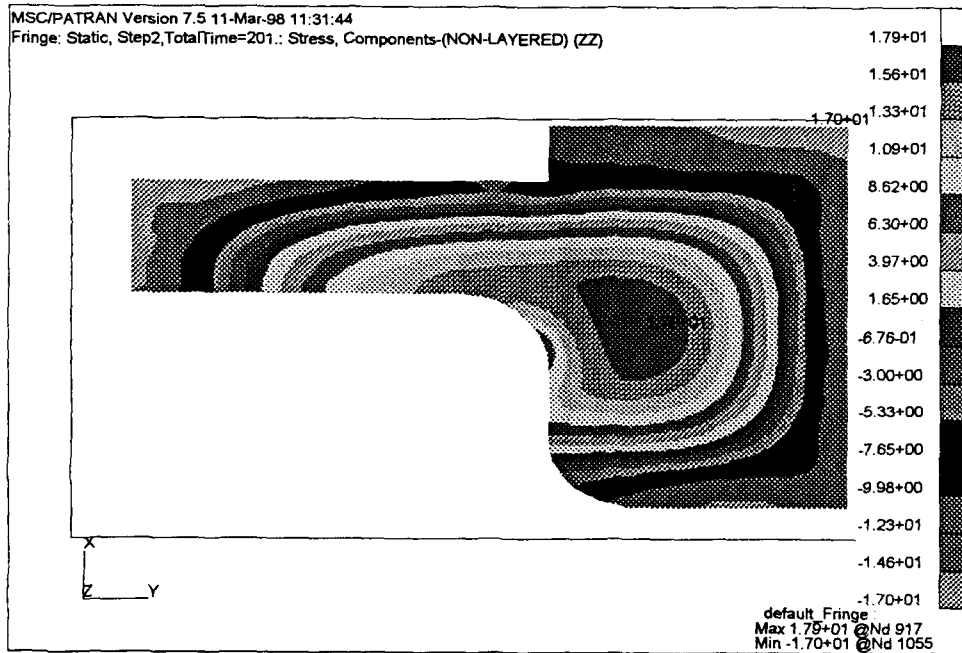


그림 20. 황삭후 원주방향 잔류응력 분포

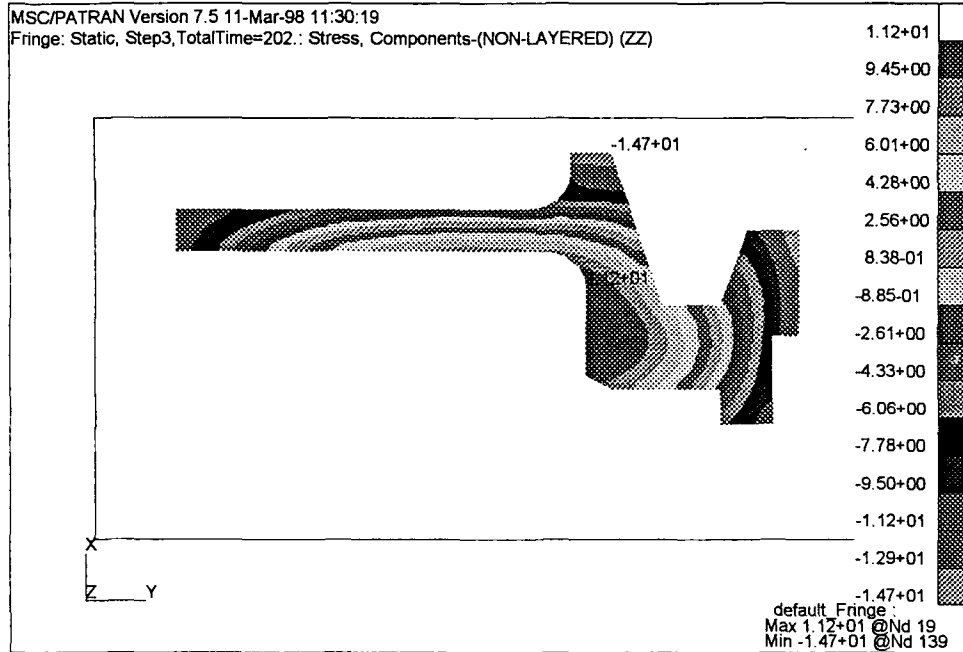


그림 21. 정삭후 원주방향 잔류응력분포

- 1) ABAQUS의 요소제거기능을 이용하여 측정된 변형율과 해석값을 직접비교함으로써 실험과 해석의 정확성을 향상시킬수 있게 되었고 잔류응력을 측정하기 어려운 일반적인 알루미늄 구조물의 잔류응력 및 기계가공시 변형도 예측할 수 있게 되었다.
- 2) 급냉상태에서 원주 및 축 방향의 잔류응력 해석값은 2단 과시효처리후 측정값과 비슷한 분포를 보였으나, 차이는 크게 나타났다.
- 3) 높이/두께 비가 1.0인 대형 링롤재의 잔류응력 해석결과는 측정결과와 상당한 오차를 보였으며, 이는 측정시 제거된 층의 응력분포가 높이 방향으로 불균일하기 때문이다. 따라서 시편 링의 높이를 증가시켜 높이방향으로 균일한 응력분포가 되도록 해야만 비교적 균일한 측정값을 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 해석의 신뢰도를 높이기 위해서는 2단 과시효처리 효과를 고려해야 하고 정확한 물성치를 적용해야 하며, 링롤재의 높이를 증가시켜 정확한 측정결과를 획득할 수 있는 보완연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. P. Jeanmart, B Dubost and J. Bouvaist : "A Finite Element Calculation of residual stresses after quenching and compression stress relieving of high strength Aluminium alloys of forgings", ICRSI, 1988, pp.587~594.
2. P. Jeanmart and J. Bouvaist : "Finite element calculation and measurement of thermal stresses in quenched plates of high strength 7075 aluminium alloy", Mat. Sci. Tec. Vol. 1, 1985, pp.765~769.
3. 박성한, 구송희, 이방업, 은일상 : "고강도 알루미늄 7175합금 링롤재의 급냉 및 응력제거 처리후 잔류응력 해석 및 측정" 한국추진공학회지 1권 1호 1997, pp.104~110.
4. SAE Information report, "Methods of residual stress measurement - SAE J936", Handbook supplement, J936, 1965.
5. J.R. Shadley, J.R. Jr. Sorem, and E.F.

- Rybicki: "A Fourier series back computation method for the parting out step in residual stress measurement in pipes", J. Pressure vessel Tech., VolIII, 1989, pp.225~233.
6. E.F. Ribicki, J.R. Shadley and W.S. Shealy: "A consistent splitting model for experimental residual stresses analysis", Experimental Mech., 1983, pp.438~445.
 7. ABAQUS user's Manual, V.5.5, Vol.1, 2.
 8. N. Yoshihara and S. Tsuyama: "Development of large high strength aluminum alloy component for spacecraft", NKK Tech, Reviews, No. 64, 1992, pp.21~27.
 9. Nukiyama: S. J. Soc. Eng., Vol. 37, p. 367, 1934, pp. 367.
 10. Y. Altschuler, T. Kaatz, and B. Cina: "Relief of residual stresses in high strength aluminum alloy by cold working", ASTM STP 993, pp.19~28.