

## 열처리된 대직경 알루미늄 튜브선삭에서 콜릿지그를 통한 진원도 향상에 관한 연구

김평호<sup>+</sup>, 임학진<sup>++</sup>, 이정민<sup>++</sup>, 이종환<sup>+++</sup>, 김정석<sup>\*</sup>

(Manuscript received: Aug, 21, 2012 / Revised: Sep, 18, 2012 / Accepted: Sep, 17, 2012)

### A Study on Roundness Improvement of Heat-treated Large Diameter Aluminum Tube-turning with Collet Type Jig

Pyeong Ho Kim<sup>+</sup>, Hak Jin Lim<sup>++</sup>, Jung Min Lee<sup>++</sup>, Jong Hwan Lee<sup>+++</sup>, Jung Suk Kim<sup>\*</sup>

#### Abstract

The purpose of this study is to evaluate the proposed jig for turning process of large-scale aluminum tube of D500mm through Finite Element Analysis (FEA). Also, a machining evaluation is conducted with general heat-treated and cryogenic heat-treated tubes. Dimensions of the specimens are determined to be suitable for collet appearance. The characteristics of equivalent stress and strain according to the expansion of the collet are evaluated by FEA. The aluminum tubes which are heat-treated by T4/T6 condition and cryogenic condition are machined by using a large-scale lathe machine and the roundness of machined tube is evaluated by using a 3D measuring machine. Through the results of this study, effects of each heat treatment and residual stress on the roundness are established.

**Key Words :** Cryogenic heat treatment(극저온 열처리), Roundness(진원도), Collet type jig(콜릿형 지그), Large diameter aluminum tube(대직경 알루미늄튜브)

## 1. 서론

알루미늄 합금은 가볍고 가공성이 좋으며 비강도가 높아서 자동차 산업과 우주항공 산업을 비롯한 소재의 경량화를 요하는 산업에서 자주 쓰이는 재료이다<sup>(1)</sup>. Al에 제2첨가원소로 Cu를 함유하는 알루미늄 합금을 2000계 합금이라 칭하는데, 대표적인 2000계 합금으로 고력 알루미늄합금인 두랄루민(Duralumin)이 있다. 두랄루민은 Cu를 포함하는 제2상의 석출에 의해 강화

되는 시효 경화형 알루미늄 합금으로 기계적 강도는 철강재와 비슷하나 비중이 2.8정도로 철강의 3분의 1정도이므로 중량당 강도는 매우 높다<sup>(2)</sup>.

알루미늄의 대표적인 열처리 방법 중 하나인 T6 처리는 열간 가공 후, 용체화처리(Solution treatment) 및 인공시효처리과정을 통해 최적의 기계적 성질을 얻는 방법이다. 용체화처리는 고용온도에서 수냉 과정이 포함되며, 이때의 급랭과정에서 발생된 온도구배로 인해 재료의 내부에는 인장잔류응력, 표면에

\* 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형연구소(ERC/NSDM) (juskim@pusan.ac.kr)  
주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30

+ 부산대학교 대학원 기계공학부

++ ㈜풍산 방산기술연구소

+++ 한국폴리텍항공대학 항공메카트로닉스과

서는 압축잔류응력이 발생한다. 재료표면에 발생된 압축잔류응력은 재료의 피로강도 향상 및 응력부식을 방지하는 등의 장점을 가지지만, 절삭가공시 재료에 변형을 일으켜 치수정밀도가 감소하는 문제가 발생된다<sup>(3-5)</sup>.

실린더형태의 중공축을 가지는 얇은 알루미늄 튜브의 가공방법은 한쪽 끝단을 작업자가 임의의 고정압으로 고정하여 가공을 한다. 그리고 중공축은 동일 외경을 갖는 중실축의 단면계수와 비교할 때 튜브의 두께가 얇을수록 굽힘 또는 비틀림에 의한 변형이 가중되므로 고정압에 의해 탄성변형과 소성변형이 모두 가해질 수 있으므로 튜브의 고정온 소재의 탄성변형 영역내에서 이루어져야 하므로 절삭가공을 통한 재료의 변형을 최소화하여 치수정밀도를 향상 시켜야 한다<sup>(6)</sup>.

따라서 본 연구에서는 Ø500mm급 대형알루미늄 튜브의 정밀가공을 위한 치공구를 설계 및 해석하고, 열처리 공정별로 구분된 대형알루미늄 튜브의 가공 및 진원도 측정을 통하여 잔류응력의 제거를 위한 극저온 열처리의 유효성을 평가하였다.

## 2. 대형알루미늄 튜브 가공용 치공구

### 2.1 유한요소 해석조건

본 연구에서 Ø500×500×10mm(Dia.×Length×Thick.)의 대형 알루미늄 튜브를 가공하기 위한 방법으로는 공작기계의 척(Chuck)에 소재를 직접 고정하거나 가공전용 치공구를 제작하여 고정하는 2가지 방법이 있다. 소재를 척에 직접 고정하는 방법은 소재의 한쪽편을 척에 고정하면서 척의 조임력에 의해 소재가 변형되고 진원도 공차가 3~5mm를 벗어남을 확인하였다. 척의 조임력에 의해 튜브의 변형을 방지하기 위해서는 튜브 내경의 전면을 고르게 고정할 수 있는 치구가 필요하다.

대형 알루미늄 튜브 가공전용 치구는 Fig. 1에서와 같이 소재의 내경을 전체적으로 고르게 고정하기 위해 단방향에서 120°씩 양방향으로 갈라져 있는 콜릿형으로 설계하였다. 설계된 콜릿형 치공구는 우측편에 있는 볼트를 회전시킴으로써 콜릿(Collet)을 확장 시키는 슬라이드블록(Slide block)을 축방향으로 이동시키고 경사면 이동에 의해 콜릿이 직경방향으로 확장되면서 튜브소재에 고정력이 작용된다.

내경 Ø492mm으로 가공된 알루미늄 튜브를 장착할 수 있는 여유를 가져야 하기 때문에 콜릿 축소의 치수는 Ø490.5mm이며, 튜브의 내경을 고정시키기 위해 콜릿을 최대 확장하였을 때의 치수는 Ø493.2mm로 되도록 설계하였다. 콜릿은 확장시 튜브의 내경 치수인 Ø492mm보다 많이 확장되어 튜브를 완전히 고정하여야 하나, 필요이상으로 과다 확장되면 알루미늄 튜브의 변형이 발생되므로 알루미늄 튜브의 탄성변형 한계점 이내의 외력만 작용하고 가공시 튜브가 헛돌거나 탈거되지 않는 범위를 찾아야 한다.

또한 콜릿의 구조상 양끝단에서 벌어지는 양이 제일 많으므로 Fig. 2의 (a)와 같이 직선형 내경가공과 Fig. 2 (b)의 단차형 내경가공으로 나누어 콜릿지그에 적합한 알루미늄 튜브의 시편형태를 검증하였다. 콜릿의 확장에 의한 알루미늄 튜브의 변형량을 예측하기 위한 유한요소해석(FE-simulation)은 위해 Ansys workbench의 Static structure Case를 이용하여 설계한 치공구의 유효성을 검증하였다.

유한요소해석시 사용된 물성값은 Table 1에서와 같이 콜릿을 제외한 부품들은 SCM440소재를 사용하였고 콜릿은 슬라이드블록에 의해 늘어나야 하므로 비교적 강도가 작으면서 알루미늄보다 강한 SM45C 소재를 사용하였다.

해석을 위한 조건으로는 바디(Body)와 플랜지(Flange)는 완전고정을 하고 알루미늄 튜브와 바디는 접합조건으로 하여 콜릿과 튜브가 완전히 밀착된 상태에서 콜릿이 확장된다고 가정

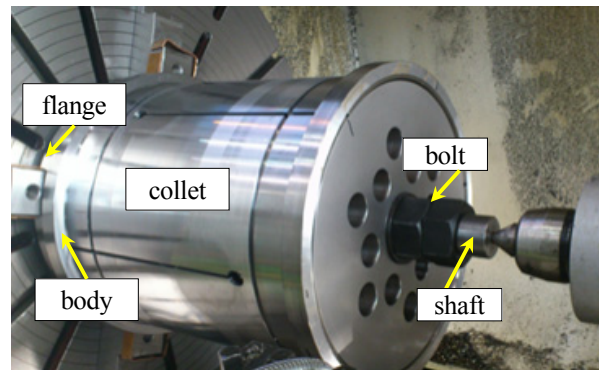


Fig. 1 Photograph of Al tube collet jig

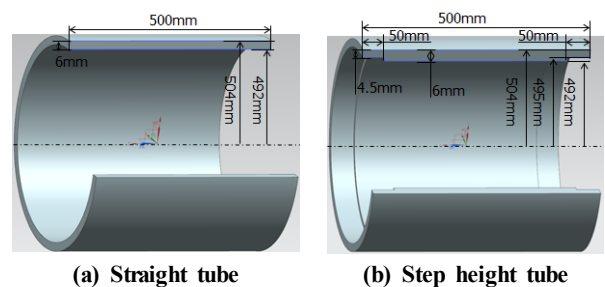


Fig. 2 3D model of Al tube

Table 1 Parts material and mechanical properties

| Material                     | SCM440           | SM45C  | Al2014-T6 |
|------------------------------|------------------|--------|-----------|
| Part                         | Rod, Shaft, Body | Collet | Tube      |
| Young's modulus(MPa)         | 200              | 205    | 72        |
| Poisson's ratio              | 0.29             | 0.29   | 0.33      |
| Density(kg/mm <sup>3</sup> ) | 7870             | 7850   | 2810      |
| Yield strength(MPa)          | 700              | 490    | 414       |
| Ultimate strength(MPa)       | 1050             | 686    | 469       |

하였다. 콜릿, 바다, 슬라이드블록이 맞닿는 경사면에는 윤활마찰조건을 부여하고 통상적인 마찰계수인 0.15를 부여하였으며, 슬라이드블록에 설계상으로 이동할 수 있는 거리인 10mm 변위를 주어 타임스텝(Time step)당 1mm를 이동하도록 설정하여 이때의 총변위와 등가응력을 도출한 뒤, 알루미늄 탄성영역의 응력값과 비교하였다.

### 2.2 유한요소 해석결과

Fig. 3는 콜릿형 지그에 장착된 알루미늄 튜브의 총변형량(Total deformation)으로 완전고정으로 지정되었던 바다와 샤프트는 파란색으로 변화가 없고 슬라이드블록의 이동에 의한 콜릿의 확장으로 콜릿과 알루미늄 튜브의 변화량을 볼 수 있다. 콜릿의 구조특성상 확장을 위해 콜릿형상으로 잘라놓은 부분의 양끝단의 변형량이 많음을 확인할 수 있다. Fig. 4은 콜릿형 지그의 등가응력(Equivalent stress)으로 총변형량과 동일하게 콜릿의 양끝에서 응력이 높게 예측되었다.

Fig. 5는 직선형튜브와 양끝 단차가 있는 튜브의 콜릿확장에 따른 응력분포로 직선형 튜브는 응력이 길이방향으로 길게 분포된 형태를 보이고, 양끝단차가 있는 튜브는 원주방향으로 응력이 길게 분포된 형태를 보이고 있다. 또한 Fig. 6는 슬라이드블록의 이동량에 따른 콜릿형 지그의 응력값으로 양끝단차가 있는 튜브의 응력이 직선형 튜브보다 더 낮음을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 7은 콜릿과 튜브가 접촉하여 생성되는 면압으로 양끝단차가 있는 튜브의 면압이 직선형 튜브보다 더 높으므로 튜브의 고정력은 양끝단차를 넣은 튜브가 더 좋음을 확인할 수 있다. 따라서 콜릿형 지그에 적합한 튜브의 형태는 양끝단차를 넣은 형태이며, 콜릿형태로 잘라진 끝부분에서 중심부쪽으로 올수록 응력은 고르게 분포됨을 확인할 수 있다.

## 3. 열처리조건에 따른 형상정도의 변화

### 3.1 Al2014 열처리공정 및 조건

알루미늄 열처리공정의 대표적인 공정인 용체화처리는 합금 원소들인 Cu, Mg, Si 등이 알루미늄합금에 고용될 수 있는 최대 온도가열로 유지 후 급랭시켜 상온에서 경화요소가 고용된 상태로 만드는 공정이다. 그리고 시효경화(Ageing) 과포화 고용체에서 제2상을 석출안정상태로 만드는 것으로서 자연시효는 상온에서 석출경화하는 것이고 인공시효는 필요온도에서 인위적으로 석출경화 시키는 것이다. 알루미늄합금을 용체화 처리할 때 생기는 잔류응력으로 인하여 절삭가공할 때 탄성응력의 평형이 깨어져 새로운 응력의 평형에 도달하면서 재료의 치수를 변화시키고 형상정밀도를 손상시키므로 잔류응력의 제거가 필요하다<sup>(7)</sup>. 금속의 잔류응력을 제거하기 위해 본 연구에서는 급열(Uphill quench)법을 이용하여 잔류응력을 제거하여

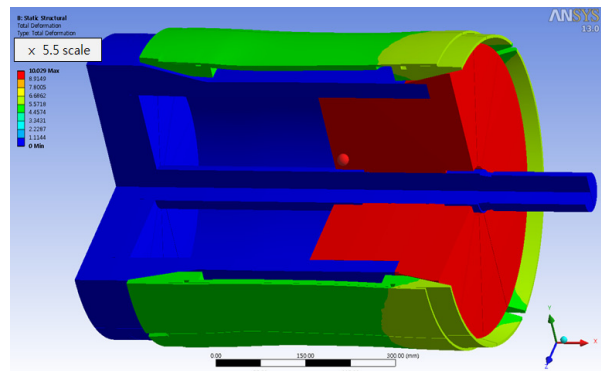


Fig. 3 Total deformation distribution

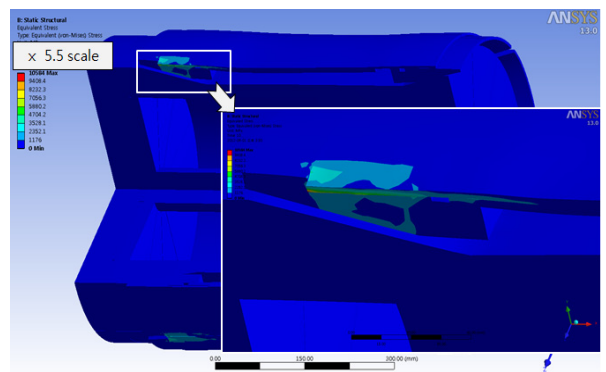
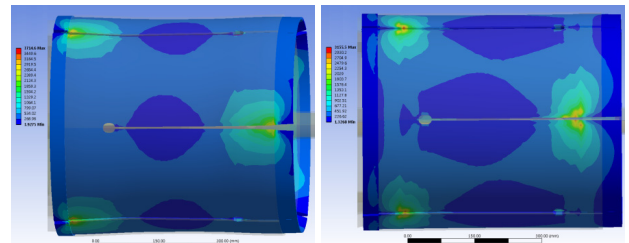


Fig. 4 Equivalent stress distribution of assembled Al tube



(a) Straight tube

(b) Stepped tube

Fig. 5 Equivalent stress distribution of collet

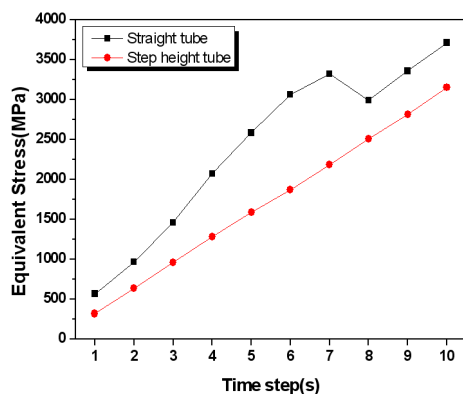


Fig. 6 Equivalent stress of collet

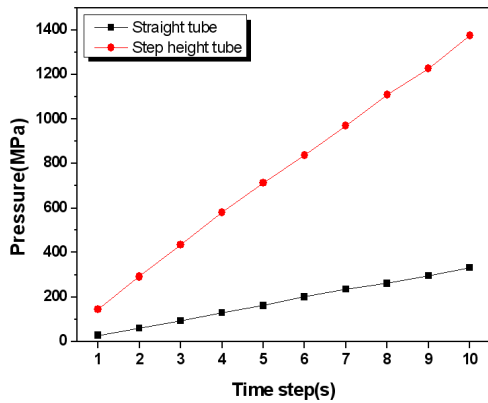
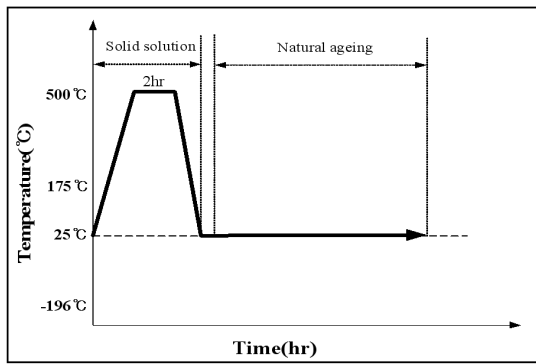
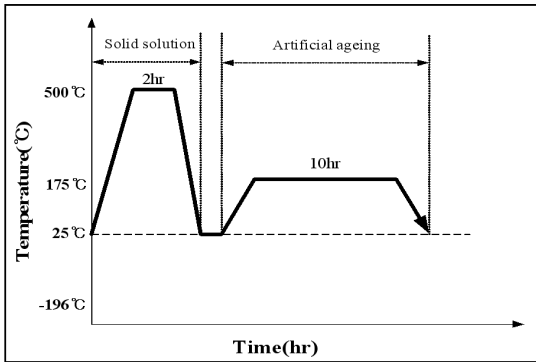


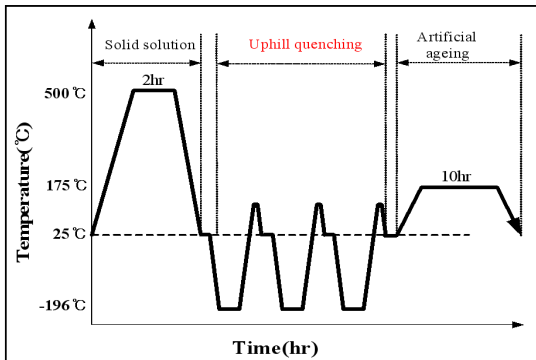
Fig. 7 Surface Pressure of Al tube



(a) T4 heat treatment



(b) T6 heat treatment



(c) Cryogenic heat treatment

Fig. 8 Heat treatment conditions of T6 and cryogenic for Al2014

알루미늄튜브의 진원도를 평가하였다.

Fig. 8에서는 Al2014에 대한 T4, T6, 극저온열처리의 조건을 나타내었다. (a)는 T4열처리로 용체화처리공정인 500°C에서 2시간동안 유지한 후에 급랭시켜 상온에서 자연시효 시키는 것이고, (b)는 T6열처리로 용체화처리후 10시간동안 175°C를 유지하여 인공시효 시켰고, 극저온열처리(Cryogenic heat treatment)는 용체화처리 후 상온에서 -196°C인 극저온으로 급랭(Quenching)시킨후 다시 고온으로 급열하여 잔류응력을 제거하였다.

### 3.2 Al2014 tube 진원도 평가

D500×L600×10T의 소재를 3가지 방법의 공정으로 열처리 후 내경가공 후 Fig. 9과 같이 대형알루미늄 가공 전용 콜릿팅 지그에 장착하여 6T의 두께로 외경가공하여 진원도를 측정하였다. 가공시 사용된 공작기계는 한국공작기계 PROTEC-13N 대형NC선반을 사용하였으며, 알루미늄특성상 열에 의해 인서트 의 응축이 발생하기 때문에 가공시에 절삭유를 충분히 공급하여 열을 방출시켰다. 또한 가공하고자 하는 소재가 두께 대비 지름과 길이가 매우 크기 때문에 소재의 두께가 7mm 이하가 되면 황삭가공시 반경방향 절입깊이 0.5mm 이상으로 절삭하면 튜브의 진원도가 3~5mm이상 변화하기 때문에 황삭시 절입깊이를 0.3mm, 정삭시 절입깊이를 0.05mm로 설정 및 가공하여 튜브의 형상오차를 최소화하였다. 알루미늄가공은 주축회전수와 이송량을 빠르게 하지 않으면 칩이 연속형으로 나와 소재와 공구사이에 엉켜서 가공표면을 손상시키고 형상정밀도의 저하를 가져오므로 절삭속도를 500m/min, 이송속도는 0.12mm/rev로 설정하였다.

3차원형상정밀도 평가에 사용된 장비는 Fig. 10의 사진과 같이 Carl Zeiss-Accura 장비를 사용하였고 측정 프로브(Probe)는 VAST XXT로 측정오차는 5μm이다. 진원도 측정방법은 Fig. 11에서와 같이 튜브의 상단면으로부터 양끝 100mm구간을 제외하고 100mm간격으로 45°간격으로 8번(360°) 측정하여 진원도를 평가하였다.

Table 2와 3은 각각의 열처리된 소재를 6T 두께로 가공하여 내·외경의 진원도를 측정한 결과로 T4 열처리된 소재의 외경진원도 평균값은 5.15mm, T6 열처리된 소재의 외경진원도 평균값은 1.87mm, 극저온열처리된 소재의 외경진원도 평균값은 0.50mm로 극저온열처리로 잔류응력을 제거한 튜브의 형상정밀도가 일반열처리한 튜브의 형상정밀도보다 우수함을 확인할 수 있다. 또한, 대형알루미늄 튜브 가공시 두께가 얇아질수록 치수정밀도 확보의 어려움이 발생되는데 극저온열처리된 튜브의 내경과 외경의 치수가 유사함을 알 수 있다. 이는 내경의 치수정밀도가 확보되면 외경의 진원도도 동일하게 좋아짐을 확인할 수 있다. T4열처리된 튜브의 진원도가 가장 나쁘게 측



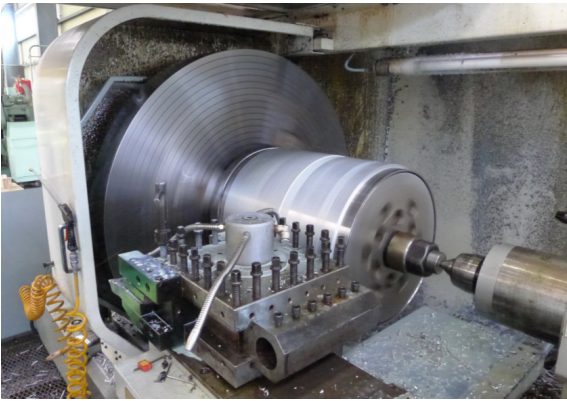


Fig. 9 Photograph during turning experiment

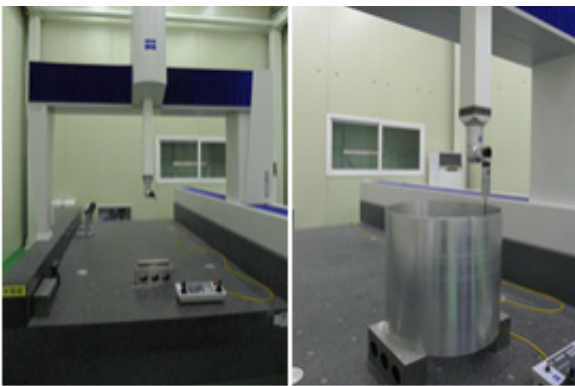


Fig. 10 Photograph of 3D measurement equipment

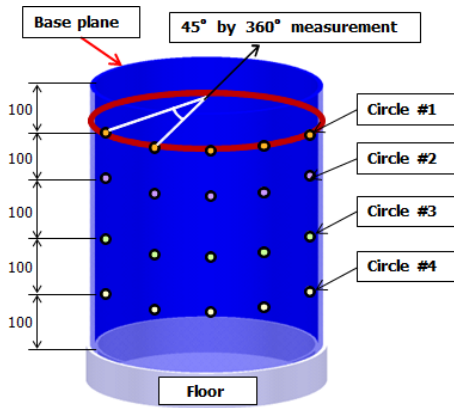


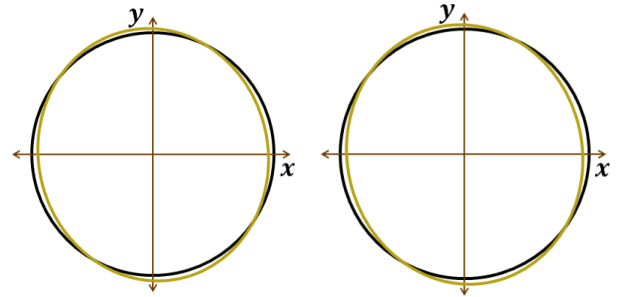
Fig. 11 Roundness of measurement point

Table 2 The result of measured roundness in outside diameter (mm)

|          | Al2014-T4 | Al2014-T6 | Al2014-Cryo |
|----------|-----------|-----------|-------------|
| Circle 1 | 4.691     | 2.259     | 0.516       |
| Circle 2 | 5.153     | 2.044     | 0.516       |
| Circle 3 | 5.153     | 1.757     | 0.463       |
| Circle 4 | 5.609     | 1.433     | 0.518       |
| AVG      | 5.152     | 1.873     | 0.503       |

Table 3 The result of measured roundness in inside diameter(mm)

|          | Al2014-T4 | Al2014-T6 | Al2014-Cryo |
|----------|-----------|-----------|-------------|
| Circle 1 | 2.259     | 1.948     | 0.496       |
| Circle 2 | 2.044     | 1.440     | 0.445       |
| Circle 3 | 1.757     | 1.002     | 0.439       |
| Circle 4 | 1.433     | 0.659     | 0.483       |
| AVG      | 1.873     | 1.262     | 0.466       |



(a) Inner roundness shape (b) Outer roundness shape

Fig. 12 Variation of roundness

정된 것은 용체화처리 때 생성된 소재 내부의 잔류응력이 가공 시에도 영향을 미치며 튜브의 두께가 얇아질 경우 진원도 오차 값은 더욱 나빠진다. 그리고 T6 열처리된 튜브의 진원도는 T4 열처리된 소재보다는 진원도가 2배정도 좋게 측정되었는데 이는 용체화처리에 발생하는 소재의 내부응력이 시효경화를 거치면서 결정체의 일부가 비교적 안정적인 자리로 돌아가기 때문에 상대적으로 절삭가공시에 진원도가 좋게 나온다고 판단된다. 그리고 극저온열처리된 소재는 용체화처리 직후에 급 열을 통하여 재료내부에 발생된 응력을 상쇄시킨 후 시효경화 처리를 하기 때문에 내부응력이 소거된 상태에서 절삭가공을 하면 소재의 두께가 얇아지더라도 튜브의 진원도가 확보됨을 확인할 수 있다.

Fig. 12은 극저온 열처리된 튜브의 측정된 진원도 모양으로 (a)는 내경의 진원도 모양이고, (b)는 외경의 진원도 모양으로 실제 측정된 진원도 오차보다 5배 정도 과장되어 그려진 그림이다. 진원도 형상은 타원형상을 그리고 있으며, 타원이 그려진 방향은 내경과 외경이 동일한 방향으로 타원이 됨을 알 수 있다. 이는 두께가 충분히 확보된 상태에서 내경을 가공하여 콜릿에 장착 후 외경을 가공하여 소재를 탈거하면 튜브의 두께가 직경, 길이에 비해 얇으므로 진원의 형태를 유지하기가 어려운 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 대형알루미늄 튜브 가공용 치공구형상을 설계하여 제작하였다. 또한, Al2014 소재의

일반열처리와 극저온열처리된 소재를 가공 후 잔류응력을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 일반열처리방법인 T4, T6열처리하여 가공된 알루미늄튜브의 잔류응력 오차보다 극저온열처리하여 가공된 알루미늄튜브의 잔류응력 오차가 개선됨을 확인할 수 있었다.
- (2) 알루미늄가공은 절입깊이를 작게 하고 이송량과 회전수를 증가시켜 가공하여야 함을 확인할 수 있었다.
- (3) 콜릿타입으로 설계된 지그가 알루미늄 튜브 가공에서 잔류응력 향상에 유효함을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 논문은 방위사업청의 민군겸용기술개발사업과제(09-DU-MP-02) 지원으로 수행되었음.

### References

- (1) Park, K. J., Ko, D. H., Kim, B. M., Lim, H. J., Lee, J. M., and Cho, Y. R., 2010, "Effect of Cryogenic Treatment on Residual Stress and Tensile Properties for 6061 Al Alloy," *Kor. J. Met. Mater.*, Vol. 49, No. 1, pp. 9~16.
- (2) Lee, H. I., Han, Y. S., Kim, D. H., and Kim W. T., 2009, *Comprehension and Practical use of an Aluminum Application Technology*, The Korea Metal Journal, Republic of Korea.
- (3) Jang, H. S., 1997, *The handbook of advanced Aluminum Technology*, Hanlimwon, Republic of Korea.
- (4) Kang, D. H., Lee, B. J., Yun, C. B., and Kim, K. W., 2010, "Study on Torsional Strength of Induction Hardened Axle Shaft," *Transactions of the KSME A*, Vol. 34, No. 5, pp. 645~649.
- (5) Ian, M., 2004, *Residual Stress Reduction During Quenching of Wrought 7075 Aluminum Alloy*, A Thesis for a Master, Worcester Polytechnic Institute, United States.
- (6) Jeon, Y. S., Jang, S. M., and Kang S. G., 2010, "Influence of Fixed Pressure on the Machining Accuracy of Inner Diameter of Hollow Shaft," *KSMTE*, Vol. 19, No. 3, pp. 381~387.
- (7) Kim, H. S., and Lee, D. N., 1978, "Relief of Residual Quenching Stresses in 2024 Aluminum Alloy," *Kor. J. Met. Mater.*, Vol. 16, No. 4, pp. 233~242.
- (8) Kim, S. I., 2006, "A Study on the Cutting Characteristics of Al Alloy in End Milling for Various Hardnesses(I)," *Transactions of KSMTE*, Vol. 15, No. 1, pp. 82~87.