

액체로켓 엔진 연소기 내피 스피닝 제작 공정 개발

이금오^{a,*} · 유철성^a · 허성찬^a · 최환석^a · 최윤호^bDevelopment of Spinning Process for Manufacturing
Liquid Rocket Engine Thrust ChamberKeumoh Lee^{a,*} · Chulsung Ryu^a · Seongchan Heo^a · Hwanseok Choi^a · Younho Choi^b^aCombustion Chamber Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea^bResearch & Development 1 Team, Doowon Heavy Industry, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: kol@kari.re.kr

ABSTRACT

Spinning process to inner wall has been applied for reducing the weight of regenerative cooling chamber of liquid propellant rocket engine. The fractures of the blanks of cylinder part and nozzle throat part have been observed during spinning processes. In order to overcome the problem, the mandrel and the blank shape have been modified, and the inner wall was successfully manufactured through the modifications. The manufactured spinning prototype of nozzle throat part was successfully bulged without cracking and necking, and it was confirmed to secure sufficient formability necessary for fabricating thrust chamber.

초 록

액체로켓 엔진 재생냉각챔버의 무게 감량을 위하여 내피에 스피닝 공정을 적용하였다. 스피닝 도중 실린더부와 노즐목부의 블랭크에 파손이 발생하였다. 이 문제를 극복하기 위해 맨드럴 및 블랭크 형상을 수정하였으며 이러한 수정을 통해 스피닝을 사용하여 내피를 제작할 수 있었다. 제작된 노즐목부 스피닝 시제품은 균열이나 네킹없이 성공적으로 별징이 되어 연소기 제작에 적용할 수 있는 충분한 성형성을 확보한 것을 확인하였다.

Key Words: Chromium Copper Alloy(크롬 구리합금), Spinning(스피닝), Inner Wall(내피), Combustion Chamber(연소실), Regenerative Cooling Chamber(재생냉각 챔버)

1. 서 론

Received 5 June 2014 / Revised 12 November 2014 / Accepted 19 November 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2014년도 춘계학술대회(2014. 5. 29-30, 서울대학교) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

액체로켓 엔진은 연료 및 산화제가 연소기의 연소실에서 연소하면서 고온, 고압의 연소가스를 발생시켜 추력을 얻게 된다. 이 때 발생하는 고

온의 연소가스는 연소기 노즐목으로 압축되면서 마하수가 1이 되며, 노즐목을 통과한 이후에 연소가스는 유속이 증가하고 압력과 온도가 떨어지게 된다. 연소실 내부에서 발생하는 연소가스로부터 연소기의 열손상을 방지하기 위해 연소실 내부의 냉각 채널(channel)을 통해 연료를 유동시켜 연소실의 내부 벽면을 냉각시키는 재생냉각 챔버(regenerative cooling chamber) 형태의 연소실이 사용된다. 재생냉각 챔버는 냉각성과 냉각채널 내부의 압력, 온도 구배로 발생하는 열팽창에 따른 높은 열응력으로부터 구조적인 안정성을 향상시키기 위하여 연소실 내부벽면 또는 내피(inner wall)는 열전도가 좋고 강도를 향상시킨 크롬-구리합금을 사용하고 있다.

Fig. 1에서는 액체로켓 엔진 연소기에서 내피로 크롬-구리합금이 적용되는 영역을 나타내고 있다. 크롬-구리합금은 고온의 연소가스가 형성되는 실린더부(cylinder part)와 노즐목부(nozzle throat part)의 내피에서 사용된다.

크롬-구리합금은 일반적으로 용체화 처리 후 적당한 냉간가공과 시효 열처리를 수행하여[1] 전도도(conductivity)가 순동의 85% 이상 유지하면서[2] 강도는 순동의 2~3배 정도까지 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 크롬-구리합금은 크롬석출에 따른 시효경화 현상에 의해 600℃까지 항복 강도가 떨어지지 않는 특징을 가지고 있으며, 크롬이 보호 산화막의 화학적 특성을 개선하기 때문에 내식성(corrosion resistance)이 순동에 비해서는 좋은 편이다. 크롬-구리합금은 또한 탁월한 냉간 성형성(cold formability)과 좋은 열간 성형성을 가지고 있기 때문에[2], 소재를 다양한 소성가공 방법을 통해 제작 가능하다.

2. 무게 감량 및 제작비 절감을 위한 스피닝 공정의 필요성

액체로켓 엔진 연소기 노즐목부는 단순한 실린더 형태가 아닌 초음속 유동을 만들기 위해 축소되었다가 유동의 속도를 더욱 증가시키기

위해 확대되는 형상의 외형(contour)을 가지고 있다. 이러한 모래시계(hourglass) 형태의 노즐목은 연소가스를 아음속(subsonic)에서 초음속(supersonic)으로 속도를 증가시키기 위해 흔히 사용되는 형상이다.

러시아, 우크라이나 발사체의 재생냉각형 연소실은 냉각 채널이 형성되어 있는 내피(inner wall)에 외피(outer jacket)를 끼워서 브레이징(brazing)으로 접합을 하는데, 모래시계 형태의 노즐목부 제작을 하기 위해서는 내피에 외피를 끼운 후 내피를 벌징(bulging)해야 제작이 가능하다(Fig. 2). 이 때 내피는 대변형이 발생하게 되고, 이러한 대변형 발생 시 네킹이 일어나거나 파손되지 않아야 성공적으로 재생냉각형 연소실이 제작이 가능하게 된다[3,4]. 따라서, 노즐목부 소재는 결정립 크기(grain size)가 미세하고 균질한 소재여야만 한다.

재생냉각형 구리합금 내피를 제작 방식으로 주조 후 단조를 사용하여 제작한 제품은 Fig. 3과 같이 벌징을 수행하였을 때 제품이 찢어지거나 오렌지필(orange peel)이 나타나 실제 연소기 제품으로 사용할 수 없었던 문제가 있었다.

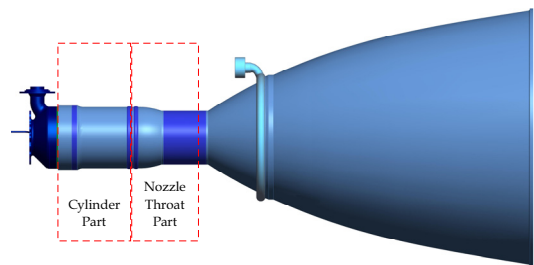


Fig. 1 Configuration of thrust chamber.

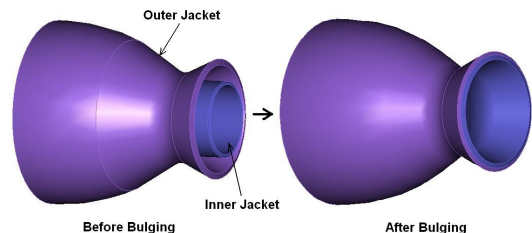


Fig. 2 Bulging method for nozzle throat part, before bulging (left) and after bulging (right)[3].

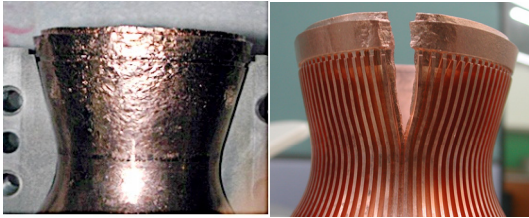


Fig. 3 Appearance of orange peel (left) or tearing (right) during bulging test of nozzle throat part.

벌징 공정으로 제품을 제작하는데 발생한 파손 원인을 분석하였을 때 제품의 조직(grain)이 균일하지 못하였고(Fig. 4), 평균 결정립 크기 (grain size)가 970~1600 μm 의 매우 큰 값을 가지고 있어 벌징이라는 대변형이 수반되는 소성변형을 가했을 때 재료의 성형 한계성을 넘어 결국 파손되는 결과가 나타났다[5].

일반적으로 대변형의 소성변형이 가능하기 위해서는 결정립 크기를 균일하게 미세화 시켜야 하며, 기존의 단조 공정으로는 결정립 크기를 균일하게 미세화 시키기 어려워 연소실을 Fig. 2와 같은 벌징 방식으로 제작하지 못하였고, Fig. 5와 같이 내부에 부쉬(bush)를 넣어서 모래시계 형태의 노즐목부를 제작할 수 밖에 없었다[5].

부쉬타입의 노즐목은 추가되는 부쉬의 무게가 75톤급 지상용 연소기의 경우 약 51 kg을 차지할 정도로 매우 무겁기 때문에, 부쉬를 사용하지 않는 노즐목부의 제작은 연소기의 중량감량을 위해 필수적인 요소이다. 따라서 성공적인 벌징 방식의 노즐목을 제작하기 위해서는 노즐목부 소재의 조직 미세화로 인한 대변형이 가능하도록 소재의 조직을 미세화 시켜야 한다. 조직 미세화를 하기 위해서는 큰 소성변형을 소재에 균일하게 가하여 재료 내부에 많은 전위(dislocation)를 발생시키고, 재결정(recrystallization)을 통해 재료 내부를 안정화시킨다. 안정적으로 재료 조직을 미세화하고 소재 비용을 절감하기 위해서 대규모로 소성변형을 발생시키는 단조나 압연 등을 사용할 수 있다. 하지만, 이 방법은 높은 소성변형을 가했을 때 판재(plate)를 만드는데 효과적이지만, 연소기 내피와 같은 얇은 실린더 형태의 제품을 만들기에는 좋

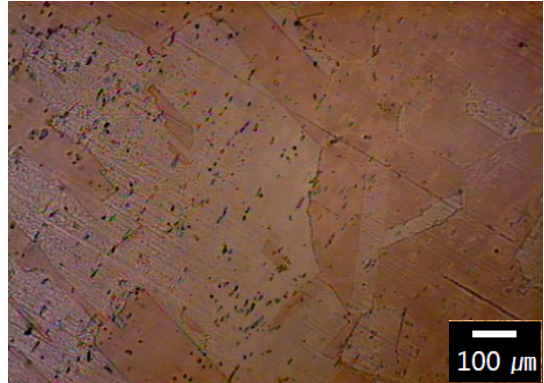


Fig. 4 Optical micrograph of tearing area of copper alloy[5].

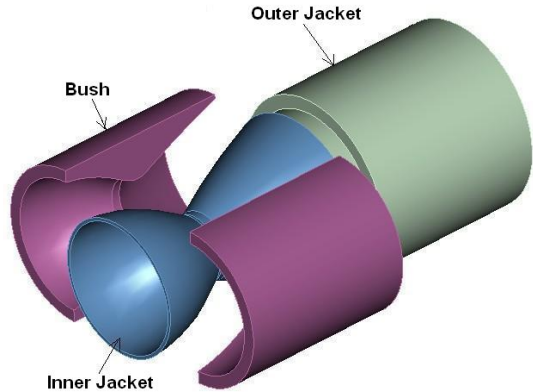


Fig. 5 Manufacturing method of bush insert type nozzle throat part[5].

지 않다. 높은 소성변형을 가하면서 튜브나 내부가 비어있는 공동(hollow) 형태의 제품을 제작하기 위해서는 플로포밍(flow forming)을 사용하거나 스피닝(spinning)과 같은 공정을 사용하여야 제작 가능하다.

재생냉각 챔버 내피는 실린더 내부가 비어있는 얇은 구조이기 때문에 내부의 소재를 모두 제거해야 한다. 이 과정에서 구리합금의 원소재 비용이 매우 고가이기 때문에, 속이 차있는 봉재 형태의 제품을 사용할 시에는 소재 제작 비용이 매우 상승하게 된다. 대형 엔진일수록 소재의 제거량이 매우 많아지게 되는데, 소형 엔진에 비해 제작비가 매우 큰 폭으로 상승하게 된다. 소재 비용 절감을 위해서 JAXA에서는 LE-X 엔진 개

발을 위해서 플로포밍으로 Zr-Cr-Cu 합금 연소실의 실린더부와 노즐목부를 제작하였으며, 재생냉각형 노즐 확장부에 대해서는 스피닝을 사용하여 제품을 제작하였다. 또한 제작된 실물 크기(full-size)의 연소기에 대해 연소시험(hot firing test) 계획을 발표하였다[6]. 하지만, 로켓엔진 연소기 재생냉각 채널 실린더부와 노즐목부의 제작에 필요한 구리합금을 스피닝 공정을 사용하여 제작하는 경우는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 상단에 사용되는 소추력 엔진에 사용되는 작은 사이즈의 실린더부와 노즐목부 내피부를 스피닝 공정을 사용하여 제작하였을 때 발생하였던 문제와 해결방안에 대해서 기술하였다.

3. 실린더부 스피닝 공정개발

액체로켓 엔진 연소기 실린더부는 분사기를 통하여 공급된 연료와 산화제가 연소되어 약 3,000 K 이상의 고온 가스가 발생하는 영역이다. 연소기 실린더부 내피는 직경에 비해 길이가 긴 원통형의 형태로 되어 있어 스피닝으로 제작하기는 매우 까다로운 형상이다. 이러한 연소실 실린더부를 제작하기 위하여 한국항공우주연구원의 발사체 탱크부 제작에 사용하는 스피닝 장비를 사용하였으며, 큰 소성변형을 가능하게 하기

위해 고온에서 단조 및 압연 등으로 제작하여 결정립 크기(grain size)가 균일하게 미세화된 구리합금 블랭크(blank)를 사용하였다.

Fig. 6은 스피닝을 진행하기 전의 구리합금 블랭크 형상을 보여주고 있다. 스피닝 장비의 주축(headstock)에 목표 형상으로 제작된 치구인 맨드럴(mandrel)을 장착하고 블랭크를 맨드럴 축에 고정시킨 후 제품의 부축(tailstock)이 블랭크를 유압으로 밀어서 스피닝이 가능하게 한다.

실린더부 스피닝 공정 개발과정 초기에 제품의 부축(tailstock) 부위에서 원주방향(circumferential) 파손이 발생하였다(Fig. 7). 이러한 파손은 일반적으로 스피닝 공정중에 반경 방향(radial)으로 인장응력이 발생하면서 생기는 균열의 형태이다[7]. 파손원인을 분석하였을 때, 롤러가 블랭크에 하중을 가하여 스피닝이 진행되는 동안 주축에서 회전력을 가하는 맨드럴과 소성변형이 일어나고 있는 블랭크 사이에서 미끄러짐이 발생하였으며, 이로 인해서 접촉부위의 온도가 상승하여 연질의 크롬-구리합금의 강도가 상대적으로 저하되어 네킹 발생 후 파손되는 현상으로 판단되었다. 연소기 성형에 사용되는 크롬-구리합금의 경우 상온에서 450℃의 온도까지 온도가 높아질수록 항복강도와 인장강도가 떨어지는 현상이 나타난다[1]. 실제로 스피닝 제작시 축 주변의 표면 온도를 측정된 결과 주변의 온도보다 30~50℃ 높은 것으로 나타났다(Fig. 8). 미끄러짐

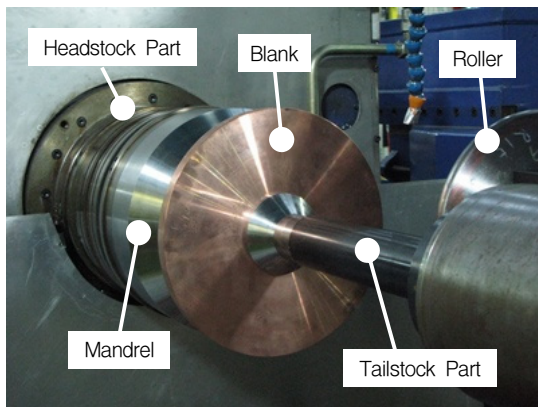


Fig. 6 Initial blank shape for spinning process of cylinder part.

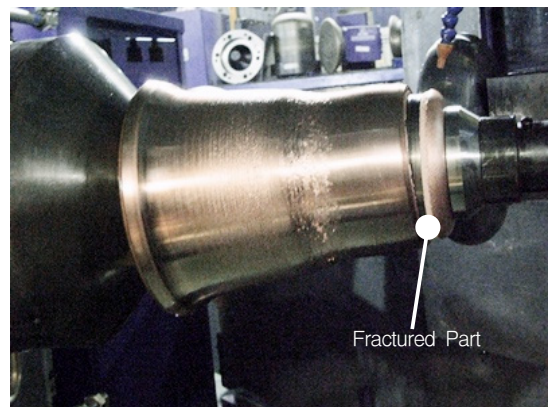


Fig. 7 Example of failure observed in spinning process of cylinder part.

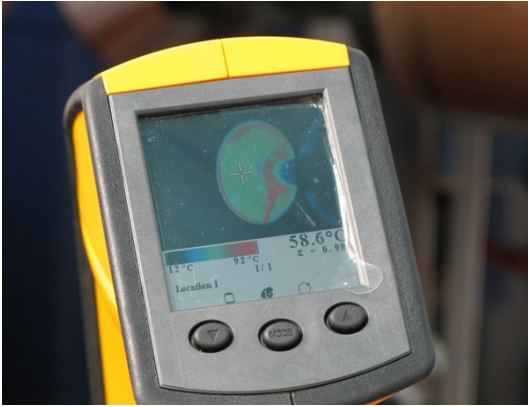


Fig. 8 Measurement of temperature distribution during spinning process.

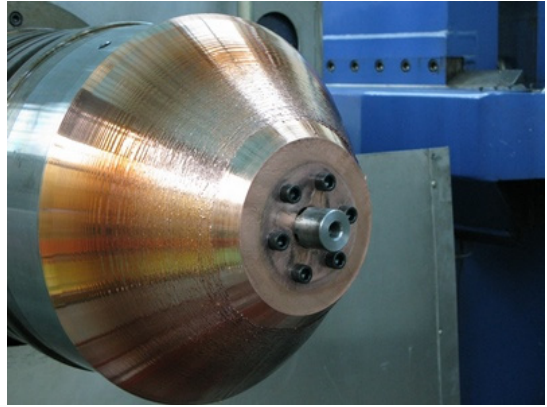


Fig. 10 Fixing blank by bolts to spinning mandrel.

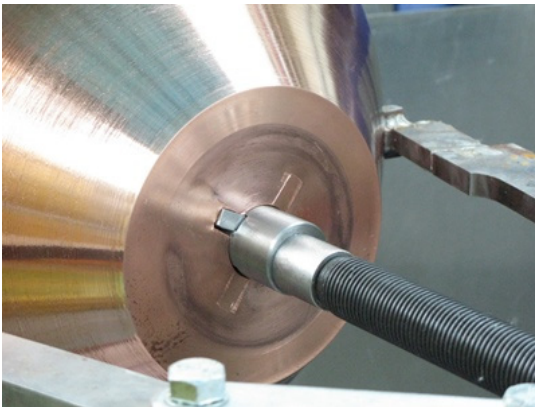


Fig. 9 Attachment of keys for slip prevention.

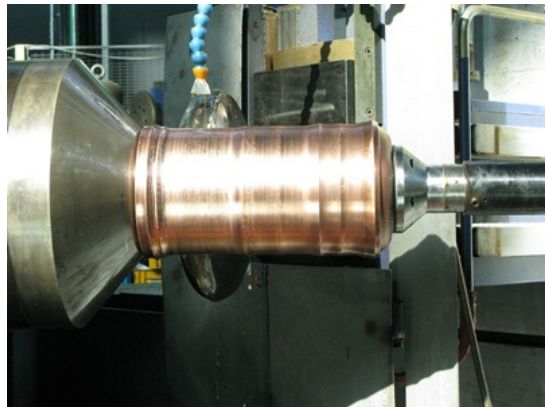


Fig. 11 Final spinning product of cylinder part.

이 발생하는 블랭크 내부면의 경우 표면 상승 온도보다 높은 온도 상승이 있었을 것으로 예상되며 상당한 재료의 연화가 발생하였을 것으로 생각된다.

미끄러짐(slip) 현상을 방지하기 위해서 맨드릴 축에 키(key)를 삽입하는 방식을 사용하였으며 (Fig. 9), 키 삽입방식은 블랭크의 미끄러짐 방지에는 효과적이었으나, 키가 원주방향의 하중을 버티지 못하고 부러지는 현상이 발생하였다. 따라서 키를 삽입하여 블랭크의 미끄러짐을 방지하는 방식은 효과적이지 못한 것으로 판단되었으며, 맨드릴에 홀(hole)을 가공한 후 탭(tap)을 내서 블랭크를 볼트로 고정하는 방식으로 블랭크의 미끄러짐을 방지하였다.

Fig. 10은 맨드릴에 블랭크를 볼트로 고정시킨 후 제작한 스피닝 시제품을 보여주고 있다. 볼트 체결 방식은 키 체결방식에 비해 미끄러짐 현상을 방지하기 위한 충분한 하중을 지지하였으며, 제작 중 미끄러짐을 방지하여 접촉부위의 온도 상승이 나타나지 않았고, 최종 스피닝까지 제품의 파손없이 실린더부의 제작이 가능하였다. 실린더부 제작은 전단 스피닝(shear spinning)과 컨벤셔널 스피닝(conventional spinning)의 조합으로[7,8] 공정을 개발하였으며, 최종적으로 스피닝이 완료된 실린더부 내피는 Fig. 11과 같이 제작을 완료하였다.

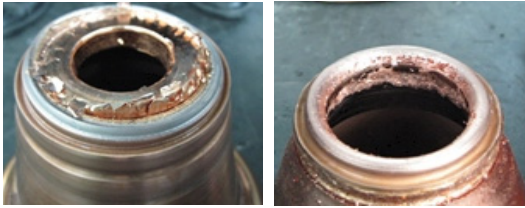


Fig. 12 Examples of necking (left) and fracture (right) observed during spinning process of nozzle throat part.



Fig. 13 Attachment of keys on mandrel (left) and failure during spinning process of nozzle throat part (right).

4. 노즐목부 스피닝 공정개발

본 연소기 노즐목부 내피를 제작하기 위하여 실린더부 제작에 사용된 스피닝 장비를 사용하였으며, 미세한 결정립 크기를 가진 구리합금 블랭크를 제작하기 위해 실린더부와 마찬가지로 고온에서 단조 및 압연 등으로 제작하였다. 제작된 블랭크는 스피닝을 통해 큰 소성 변형이 발생하게 되는데, 이를 통하여 블랭크 내부 조직은 더욱 미세화된 조직으로 바뀌게 되어 매우 미세하면서도 균질한 조직을 가진 구리합금 노즐목부 내피를 제작할 수 있다.

노즐목부의 스피닝 공정 개발 초기에는 실린더부와 파손 양상은 약간 다르지만, 실린더부 파손부와 비슷한 위치인 부축(tailstock)과 블랭크가 접촉하고 있는 부위에서 파손이 발생하였다(Fig. 12). 실린더부와 비슷하게 블랭크와 맨드릴 사이의 미끄러짐에 의한 온도상승이 1차적인 파손원인으로 판명되었다. 미끄러짐에 의한 파손의 방지를 위해서 실린더부와 마찬가지로 키 방식으로 블랭크 센터를 고정시켜 스피닝을 수행하였

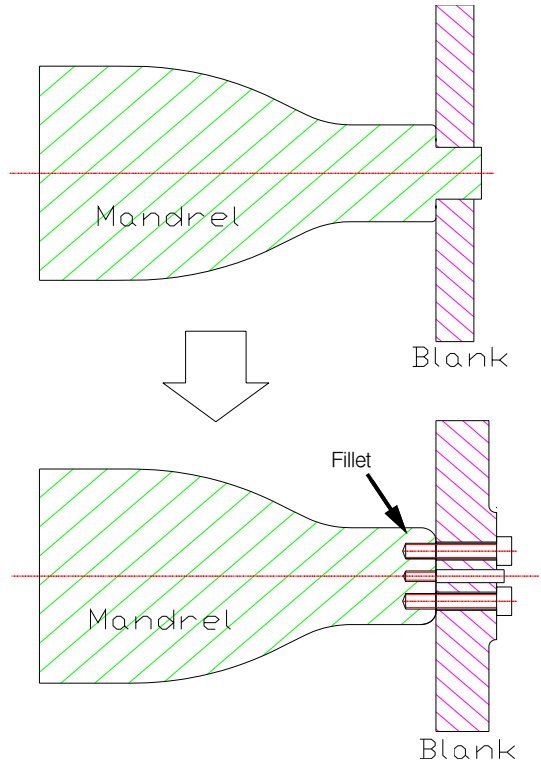


Fig. 14 Initial (upper) and modified (lower) spinning mandrel and blank of nozzle throat part.

으나 블랭크의 앞부분이 파손되는 양상은 계속되었다(Fig. 13).

실린더부와 달리 노즐목부는 스피닝이 지속되는 동안 블랭크를 맨드릴의 중심부 쪽에서 지지해주는 면적이 너무 작아(노즐목의 면적과 비슷하기 때문에 현 연소기에서는 매우 작은 지지면적을 가지고 있음) 이 부위에서 스피닝 진행 도중 블랭크가 계속 파손되었다. 계속된 블랭크의 파손을 방지하고 성공적인 스피닝을 수행하기 위해서 Fig. 14에 나타난 것과 같이 맨드릴과 블랭크를 동시에 수정하였다.

- 1) 노즐목 블랭크 중심부의 파손을 방지하기 위해 블랭크와 접촉하고 있는 맨드릴 시작 경사면에 모따기(fillet) 반경을 크게 주어 접촉 면적을 증가시킨다.
- 2) 노즐목 블랭크 중심부가 파손되지 않도록 중심부의 블랭크 두께를 증가시킨다.

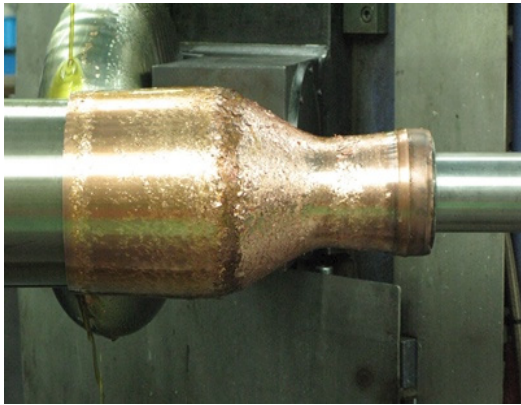


Fig. 15 Final spinning product of nozzle throat part.

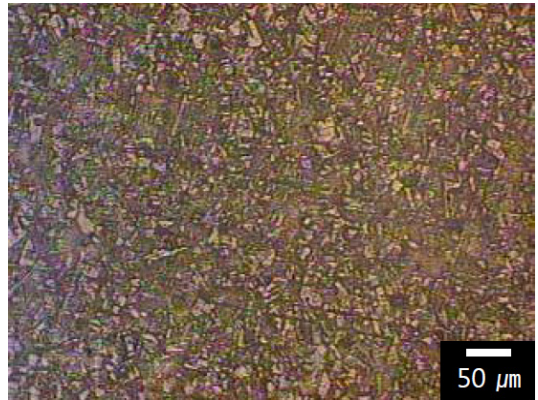


Fig. 16 Optical micrograph of copper alloy manufactured by spinning process.

3) 블랭크가 미끄러지지 않도록 볼트로 고정한다.

위에 언급한 스피닝 공정 개선을 통하여 Fig. 15와 같이 연소기 노즐목부의 스피닝을 성공적으로 수행할 수 있었으며, 제작된 제품의 가공을 통해 실제 연소기에 사용할 수 있도록 가공여유까지 포함된 수준으로 제작을 완료하였다.

5. 노즐목부 벌징시험

스피닝 공정으로 제작된 노즐목부의 조직 미세화 정도를 측정하기 위해 Fig. 16과 같이 스피닝 후 재결정화 열처리를 거친 노즐목부 스피닝 제품의 조직사진을 촬영하였으며, 평균 결정립 크기를 EBSD(Electron BackScatter Diffraction)를 사용하여 측정하였다(Fig. 17).

Figs. 16, 17에서 측정된 결정립 크기도 약 10-14 μm 정도로 매우 미세화 되었음을 알 수 있었으며 Fig. 4와 비교했을 때 매우 우수하고 균질한 조직이 나타난 것들이 확인되었다. 노즐목부가 벌징공정에 의한 대변형이 발생하였을 때 파손되지 않고 벌징이 가능한지 확인하기 위하여 스피닝 후 재결정 열처리한 노즐목부 스피닝 시제품을 가공하여 벌징시험을 수행하였다.

Fig. 18은 가공 후 노즐목 시제품의 벌징 시험 결과를 보여주고 있다. 제작 결과에서 알 수 있듯이 벌징 시험 후 실린더 형상이 노즐 형상으로

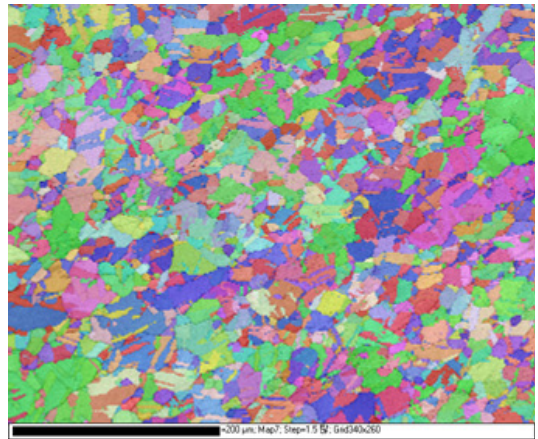


Fig. 17 Color grain map by EBSD of the copper alloy manufactured by spinning process.



Fig. 18 Bulging test of spined nozzle throat inner wall, before bulging (left) and after bulging (right).

변형되었음을 알 수 있으며, 기존의 제품과 같이

균열이나 오렌지필(orange peel), 네킹 없이 별징 공정이 완료되었다. 본 결과로부터 노즐목부 스피닝 제품은 실제 연소기의 내피에 사용할 수 있도록 충분한 성형성을 확보한 것을 확인할 수 있었으며, 향후 제작되는 연소기에 적용할 수 있는 공정이란 것을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

액체로켓 연소기 실린더부와 노즐목부 내피를 제작하기 위해 스피닝 공정을 적용하였으며, 스피닝 공정에서 발생하였던 블랭크의 파손을 방지하기 위해 맨드릴과 블랭크의 설계를 개선하였다. 연소기 실린더부와 노즐목부 스피닝 공정에서 블랭크와 맨드릴 사이의 미끄러짐 현상에 의한 온도상승으로 국부적으로 재료의 강도가 저하되어 그 결과로 블랭크에 파손이 발생된 것으로 분석되었으며, 이를 방지하기 위해 맨드릴 볼트체결, 모깎기, 블랭크 형상변경 등을 추가하였고, 이를 통해 실린더부 및 노즐목부 내피 시제품을 스피닝 공정으로 제작하는데 성공하였다. 제작된 노즐목부 스피닝 시제품은 내부 조직크기가 균일하고 미세화된 상태로 제작이 되었으며, 균열이나 네킹없이 별징이 되어 연소기 제작 공정에 적용할 수 있도록 충분한 성형성을 확보한 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 “한국형발사체개발사업”으로 수행되었습니다.

References

1. Final Report of Manufacturing Plate of Copper-Chromium Contacts, Korea Institute of Machinery & Materials, 1993.
2. "Chromium Copper," World Wide Web location http://www.copper.org/resources/properties/microstructure/chrom_cu.html, Version 1.0, 2014.
3. Ryu, C.S., Lee, K.O. and Choi, H.S., "Evaluation of Formability of Copper Alloy for Regenerative Cooling Chamber of Thrust Chamber," *Journal of the Korean Society of Aeronautical and Space Science*, Vol. 37, No. 9, pp. 939-945, 2009.
4. Heo, S.C., Ryu, C.S., Lee, K.O. and Choi, H.S., "Bulging Process Design of Inner Liner for Nozzle Throat of Thrust Chamber," *Proceedings of the Korean Society of Aeronautical and Space Science Fall Annual Conference*, Jeju, Korea, Nov. 2013.
5. Ryu, C.S. and Choi, H.S., "Bulging Process of Liquid Rocket Combustion Chamber Nozzle," *Journal of the Korean Society of Aeronautical and Space Science*, Vol. 36, No. 3, pp. 271-278, 2008.
6. Kurosu, A., Sunakawa, H., Kojima, M., Yamanishi, N., Noda, K., Ogawara, A., Tamura, T., Mizuno, T. and Kobayashi, S., "Progress on the LE-X Cryogenic Booster Engine," *4th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS)*, St Petersburg, Russia, Jun. 2011.
7. Wong, C.C., Dean, T.A. and Lin, J., "A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 14, pp. 1419-1435, 2003.
8. Music, O., Allwood, J.M. and Kawai, K. "A Review of the Mechanics of Metal Spinning," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 1, pp. 3-23, 2010.

1. Final Report of Manufacturing Plate of Copper-Chromium Contacts, Korea Institute