

액체로켓 연소기 재생냉각형 노즐의 벌징 공정 개발

류철성* · 최환석**

Development of Bulging Process for Regenerative Cooling Nozzle of Liquid Rocket Thrust Chamber

Chul-Sung Ryu* · Hwan-Suk Choi**

Abstract

A study has been conducted on the bulging process of regenerative cooling nozzle which is essential for the manufacturing of liquid rocket thrust chamber. Tension tests have been performed for the material to be used for the development of the bulging process and mechanical properties are obtained by the test. Two or three bulging tools were required to complete the bulging process. The necking of the material was a major failure encountered in the bulging process and a research has revealed that grain size of the material has considerable effect on its occurrence. The presently developed bulging process with a controlled grain size material has been successfully applied to the manufacturing of subscale and 30-tonf full scale regeneratively cooled nozzle while demonstrating the applicability and usefulness of the presently developed bulging process.

초 록

액체로켓 연소기의 제작에 필수적인 재생냉각 노즐의 벌징공정에 대한 연구를 수행하였다. 벌징공정을 개발하기 위하여 벌징시험용 재료에 대한 인장시험을 수행하여 기계적인 물성 값들을 획득하였다. 벌징공정을 완료하기 위해서는 벌징치구가 2개 또는 3개 필요하였다. 재료의 네킹이 벌징공정에서 발생하는 주된 실패 원인이었으며, 재료의 그레인 사이즈가 이 네킹 발생에 큰 영향을 미침을 본 연구에서 나타났다. 그레인 사이즈를 조절한 재료로 현재 개발된 벌징공정을 이용하여 축소형 및 30톤 실물형 재생냉각 노즐의 제작을 성공적으로 수행함으로써 본 연구에서 개발된 벌징공정의 적용성 및 유용성을 보여주었다.

키워드 : Regenerative Cooling Chamber(재생냉각 챔버), Bulging Process(벌징공정), Copper Alloy(구리합금)

1. 서 론

액체로켓 연소기의 재생냉각 챔버(regenerative cooling chamber)는 냉각 채널이 있는 내측구조

접수일(2007년12월14일), 수정일(1차 : 2008년 10월 23일, 2차 : 2008년 10월 27일, 게재 확정일 : 2008년 11월 1일)

* 연소기팀/csryu@kari.re.kr

** 연소기팀/hschoi@kari.re.kr

물(inner jacket)과 고압의 연소가스 압력에 견딜 수 있도록 구조적인 안정성을 위한 외피구조물(outer jacket)이 접합되어 제작된다. 액체로켓 연소기의 재생냉각 챔버는 외피구조물의 제작방식 [1]에 따라 전기도금 방식(electroplating method), 확산접합 방식(diffusion bonding method), 정수압 가압 방식(iso-static pressing method), 침투법(infiltration method)등과 기계 가공한 내/외측 구조물을 브레이징(brazing)하는 방식 등으로 구분할 수 있다. 위에서 언급한 이러한 여러 방식들 중에서 현재 국내에서 개발하고 있는 액체로켓 연소기의 재생냉각 챔버를 제작하는데 브레이징 방식을 사용하고 있다.

그림 1은 일반적으로 사용되고 있는 재생냉각형 액체로켓 연소기 형상을 보여준다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 연소기 챔버는 직경이 일정한 실린더 부와 이후 직경이 점차 감소하는 축소부, 그리고 노즐 목 이후 직경이 다시 증가하는 노즐로 이루어진다. 국내에서 브레이징을 이용하여 내/외측구조물을 접합하여 재생냉각 챔버를 제작하는데 두 가지 방식을 사용한다. 첫 번째 방식은 부시(bush) 삽입 방식이다. 이 방식은 그림 2에 나타낸 것과 같이 부시를 내측구조물에 먼저 조립하고 이후에 내/외측구조물을 조립한 후 브레이징 하는 방식이다. 그림 2에서 가공 완료된 내측구조물에 외피구조물을 조립하기 위하여 노즐목부에 부시를 조립한 후, 외측에 외피구조물을 조립하여 브레이징한다. 그러나 이 방식은 내측구조물과 외피구조물과의 조립성 때문에 부시가 불필요하게 삽입되어 연소기의 무게를 증가시키는 단점이 있다. 인공위성 발사체에서 구조물의 중량은 발사체 성능에 영향을 미치는 매우 중요한 요소이기 때문에 중량 감소를 위한 노력이 필요하다.

두 번째 방식은 벌징을 이용한 제작이다. 연소기 챔버를 제작할 때 노즐목(nozzle throat)을 기준으로 두 부분으로 나누어 각 부분에서 내측구조물과 외측 구조물을 기계 가공하여 조립한 후 브레이징으로 접합하면 부시 없이도 재생냉각 챔버의 조립이 가능하다. 그러나 노즐목부는 액체

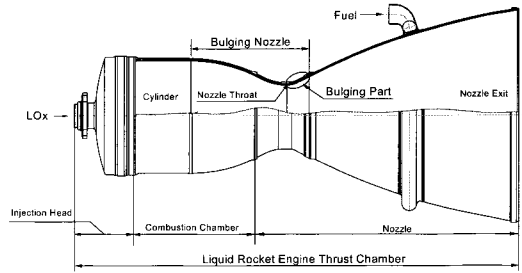


그림 1. 액체로켓 연소기 형상

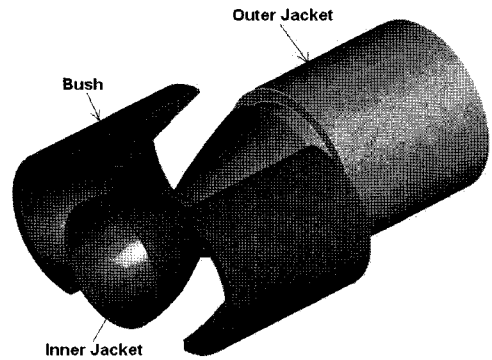


그림 2. 부시 삽입 방법의 연소기 재생냉각 챔버 제작

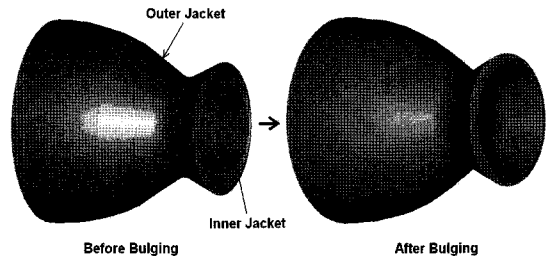


그림 3. 벌징 방법의 연소기 재생냉각 챔버 제작

로켓 연소기에서 열 하중(thermal load)이 가장 큰 영역으로 이러한 지점에 재료적, 구조적인 결함을 발생시킬 소지가 있는 용접부를 둘 경우 구조적인 안정성을 크게 저하시키기 때문에 일반적으로 노즐목에서 노즐 확대부 쪽으로 벗어나 열 하중이 노즐목에 비하여 작은 지점에 용접부를 두게 된다. 이 경우 그림 1에 나타내었듯이 노즐목보다 직경이 큰 노즐 확대부가 포함되기 때문에 내측구조물과 외피구조물을 조립할 때 기하학

적으로 간섭이 발생하여 두 개의 구조물을 조립할 수 없다. 이러한 단점은 그림 3에 나타난 벌징(bulging) 방식을 이용하면 극복할 수 있다. 그림 3에서 좌측의 형상처럼 내측구조물을 외측구조물에 조립할 수 있는 형상으로 설계하고, 외피 구조물과 조립한 후, 우측의 그림처럼 내측구조물을 노즐 형상으로 변형시켜 재생냉각 챔버를 제작할 수 있다. 본 연구는 내측구조물을 노즐 형상으로 변형시키는 벌징공정 개발에 관한 것이다. 이와 유사한 공정으로는 실린더 형태의 튜브(tube)를 원뿔형의 치구를 이용하여 깔때기 형상으로 만드는 공정을 예로 들 수 있으며, 이에 관한 실험적, 이론적 연구들이 이루어져 왔다[2-5].

2. 벌징공정 핵심 기술

2.1 재료 열처리

액체로켓 연소기 재생냉각 챔버의 설계/제작에서 무게를 감소시키는데 벌징공정은 반드시 필요하다. 벌징공정은 내측구조물에서 노즐목 이후 실린더 형상의 영역을 노즐 형상으로 변형시키기 때문에 열/구조적인 하중에 의하여 일반적인 구조물에서 발생하는 변형 정도보다 더 큰 변형(large deformation)이 벌징공정에서 발생한다. 이러한 큰 변형이 발생할 때 재료에 네킹(necking)이 발생하지 않고 변형할 수 있는 성형성(formability)이 벌징공정에서 재료가 갖아야 할 매우 중요한 요소이다.

구리합금 재료의 경우 고온 열처리를 수행하면 재료의 연신율이 증가하여 벌징공정에서 성형성을 향상시킬 수 있다. 연소기 재생냉각 챔버 제작에 사용되는 구리합금에 대한 항복강도와 연신을 같은 기계적인 물성 값들을 가장 쉽게 얻을 수 있는 방법은 재료의 인장시험이다. 금속재료의 인장시험은 대상 구조물의 작동 환경에 따라 극저온, 상온, 또는 고온에서 시험이 수행되지만, 벌징공정이 상온에서 수행되기 때문에 본 연구에서는 상온 인장시험만을 수행하였다. 인장시험에 필요한 시편 제작 및 시험은 ASTM E8M의 규격

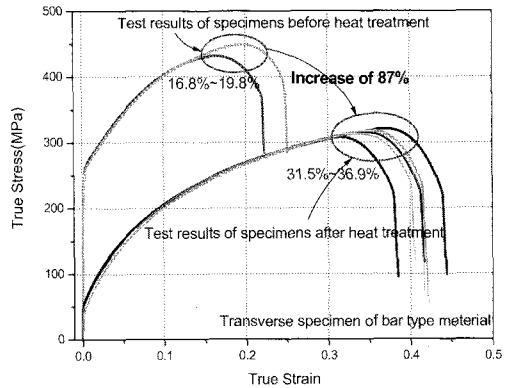


그림 4. 구리합금의 열처리 전후 상온 인장시험 결과(횡 방향 시편)

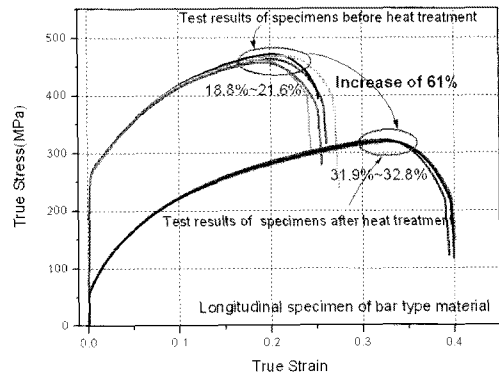


그림 5. 구리합금의 열처리 전후 상온 인장시험 결과(종 방향 시편)

[6]에 따라 수행하였다. 그림 4와 5는 연소기 챔버 제작에 사용한 구리합금의 고온 열처리 전후 진응력(true stress) - 진 변형률(true strain) 곡선을 보여준다. 액체로켓 연소기 재생냉각 챔버 제작용 구리합금은 연소기 챔버의 형상이 실린더 형상이기 때문에 원형의 봉재를 단조처리한 후 가공하여 사용된다. 인장시편은 봉재 형상의 재료에서 가로방향과 세로방향으로 가공하여 제작하였다. 인장시험 결과 고온 열처리를 하지 않은 세로방향 시편의 최대 균일 연신율은 약 18.8%~21.6%로 나타났다. 그러나 열처리 후 시편에서는 최대 균일 연신율이 31.9%~32.8%로 열처리 전 시편의 인장시험 결과에서 보여준 균일

연신율에 비하여 약 61% 증가하는 결과를 보여주었다. 가로방향 시편의 인장시험 결과에서는 열처리 전 시편의 최대 균일 연신율이 16.8%~19.8%이나, 열처리 후 31.5%~36.9%로 열처리 전에 비하여 약 87% 증가하였다. 열처리 전후 시편에 대한 인장시험 결과들을 비교한 결과 별징공정이 필요한 내측구조물에 고온 열처리를 하면 재료의 0.2% 오프셋 인장강도와 탄성계수는 감소하나, 연신율은 크게 증가하여 별징에 필요한 재료의 성형성(formability)을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 액체로켓 연소기 재생냉각 챔버 제작용 내측구조물은 별징하기 전에 고온 열처리를 한 후 별징공정에 사용돼야 한다.

2.2 재료의 그레인 사이즈

국내에서 액체로켓 연소기 재생냉각 챔버의 내측구조물로 사용되는 구리합금은 외국의 재료와 그 조성이 매우 유사하다. 외국의 재료는 오랜 기간 동안 많은 연소기들의 재생냉각 챔버 제작에 사용되었으며, 연소시험을 통하여 재생냉각 챔버용 재료로 적합한 성능을 가진 재료라고 확인되었다. 또한 외국의 재생냉각 챔버 제작에는 별징공정이 사용되기 때문에 별징공정을 적용하는데도 적합한 재료임을 알 수 있다. 그러나 국내에서는 액체로켓 연소기 개발 역사가 다른 선진국에 비하여 매우 짧고, 국내생산 재료를 이용하여 별징방식의 재생냉각 챔버를 설계/제작을 하지 않았다. 따라서 국내생산 구리합금이 별징공정에 적합한 재료인지 확인하고, 재생냉각 챔버 제작에 필요한 별징공정을 개발하기 위하여 축소형 및 30톤급 연소기 노즐의 별징 시험용 시편을 제작하고, 별징공정을 수행하였다. 시험 결과 별징을 성공한 시편도 있고, 실패한 시편도 있었다. 동일한 시편에 대하여 동일한 별징공정을 수행하였으나 성공과 실패의 서로 다른 결과들을 보여주는 원인을 찾고자 별징 시험을 마친 시편들의 조직을 분석하였다. 별징을 성공한 시편의 조직과, 실패한 시편의 조직의 차이점을 분석한 결과 그레인 사이즈가 큰 재료는 별징공정 중에 네킹이 발생하여 파손되었으나, 그레인

사이즈가 상대적으로 작은 시편은 별징이 성공적으로 수행되었다. 별징을 실패한 시편의 그레인 사이즈 측정 결과는 표 3에 나타내었다. 표 3에서 네킹 발생부는 별징공정 중 네킹이 발생하여 파손된 영역을 의미하고, 네킹이 발생하지 않은 영역은 동일한 시편에서 네킹이 발생하지 않은 영역을 의미한다. 측정 위치는 시편의 길이를 삼

표 3. 축소형 연소기 별징 실패 시편에서의 그레인 사이즈

위치	네킹 발생부		네킹이 발생하지 않은 영역	
	최대	최소	최대	최소
상	1025	112	240	90
중	970	85	200	95
하	1600	100	180	100

단위:μm

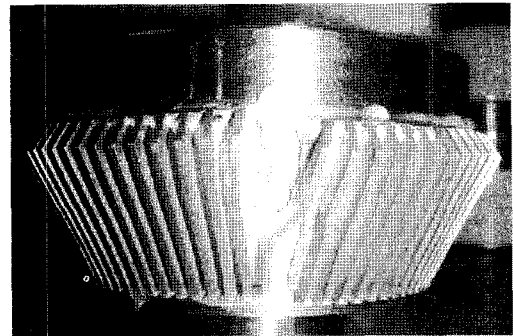


그림 6. 별징시편의 네킹 발생 형상

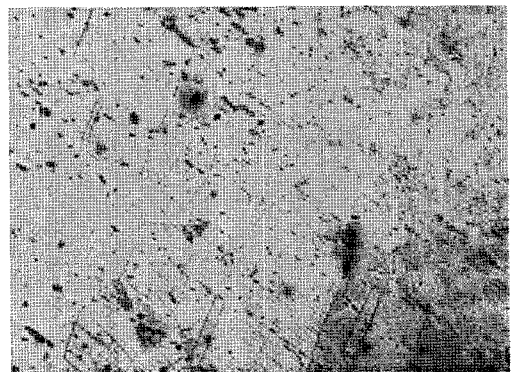


그림 7. 네킹 발생부의 조직 형상(x200)

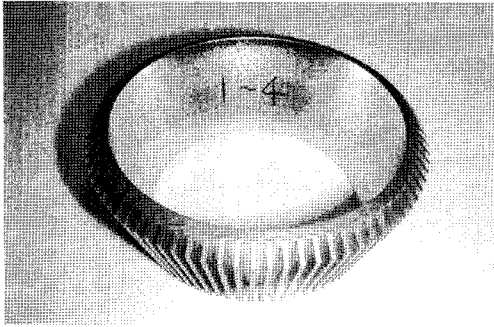


그림 8. 별징을 성공한 시편 형상



그림 9. 네킹이 발생하지 않은 영역의 조직 형상(x200)

등분하였을 때 위치를 나타낸다. 측정결과에서 알 수 있듯이 네킹이 발생한 영역에서의 그레인 사이즈가 네킹이 발생하지 않은 영역에서의 그레인 사이즈보다 매우 크게 형성되어 있음을 알 수 있다. 네킹이 발생하지 않은 영역에서의 최대 그레인 사이즈는 약 $240\ \mu\text{m}$ 로 나타났다. 이러한 결과들로부터 별징공정을 적용할 구리합금의 그레인 사이즈는 $240\ \mu\text{m}$ 보다 크지 않아야 별징을 성공할 수 있음을 의미한다. 그러나 액체로켓 연소기 노즐의 별징 성공을 위한 그레인 사이즈 조건을 결정하기 위해서는 향후에 더욱 많은 시험을 통하여 결정해야 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 사용한 시편의 노즐 확대비는 면적기준으로 약 1.8로 만약 이 노즐 확대비보다 더 큰 별징이 필요하다면 별징 성공에 필요한 구리합금의 그레인 사이즈도 변화할 수 있다.

그림 6은 국내재료를 이용하여 제작한 축소형 연소기의 별징시험용 시편의 별징 후의 형상이다. 사진에서 볼 수 있듯이 구조물에 네킹이 발생하여 파손되었다. 그림 7은 그림 6에서 보여준 구조물의 재료 조직 형상이다. 그림 8은 그림 6의 구조물과 동일한 시편으로 별징을 성공적으로 완료한 시편형상이다. 그림 9는 별징이 실패한 그림 6의 시편에서 네킹이 발생하지 않은 영역에서의 조직형상이다. 그림 9의 그레인 사이즈와 그림 7에서 보여준 그레인 사이즈를 비교하여 보면 별징을 성공한 시편의 그레인 사이즈가 더 작게 형성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 구리합금 재료의 그레인 사이즈가 별징공정에서 네킹 발생 유무에 크게 영향을 미치기 때문에 별징공정을 이용하여 액체로켓 연소기 재생냉각 챔버를 성공적으로 제작하기 위해서는 단위 면적 또는 단위 체적당 일정한 개수 이상의 그레인이 형성된 구리합금 재료를 사용해야 한다.

3. 액체로켓 연소기 별징공정

액체로켓 연소기의 재생냉각 챔버 제작용 구리합금에 대하여 인장시험, 조직분석 및 별징 시험을 수행한 결과 아래와 같이 별징에 필요한 공정을 개발하였다.

1) 재료의 단조 및 열처리

액체로켓 연소기의 재생냉각 챔버 제작에 사용되는 구리합금은 생산 후 단조처리를 한다.

2) 구리합금 재료의 조직을 분석

액체로켓 연소기에 사용되는 구리합금의 경우 그레인 사이즈가 별징공정의 성공 유무에 큰 영향을 미치기 때문에 별징공정을 수행하기 전에 재료의 그레인 사이즈를 확인한다. 표 3에 나타난 그레인 사이즈 측정 결과는 재료의 그레인 사이즈가 $240\ \mu\text{m}$ 보다 크지 않아야 함을 보여준다. 따라서 그레인 사이즈가 $240\ \mu\text{m}$ 보다 크게 형성된 재료는 단조처리를 재 수행하거나 재생산한 재료를 사용한다.

3) 별징노즐 제작 재료의 인장시험 수행

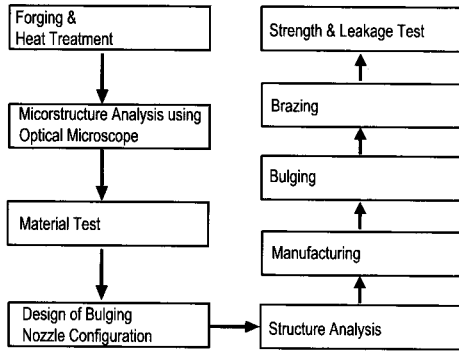


그림 10. 벌징공정 흐름도

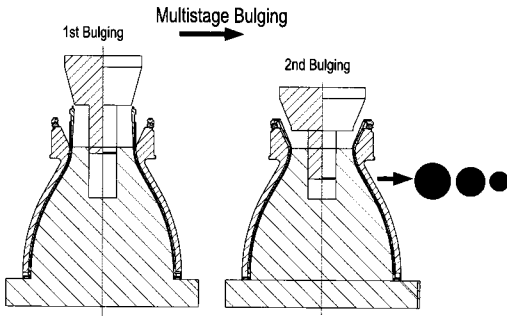


그림 11. 다단계 벌징공정 형상

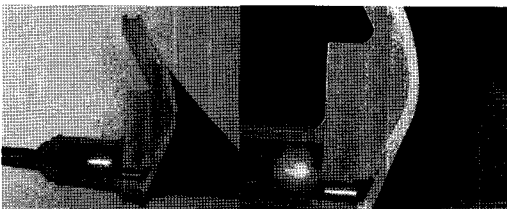


그림 12. 축소형 연소기 노즐 벌징 후 형상

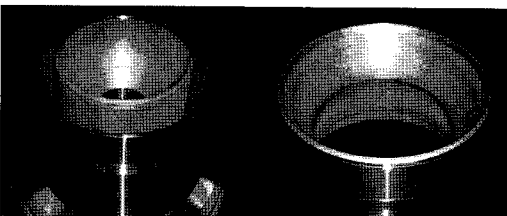


그림 13. 30톤급 연소기 노즐 벌징 전후 형상

인장시험 시편을 제작하고, 인장시험을 수행하여 재료의 항복응력, 연신율, 탄성계수 등의 기계적인 물성 값들을 획득한다. 이러한 기계적인 물성 값들은 벌징노즐의 설계/해석에 사용된다.

4) 내측구조물의 형상 설계

내측구조물과 외측구조물을 조립할 수 있고, 벌징공정 완료한 후 벌징노즐의 형상과 연소기의 성능을 고려하여 설계된 노즐의 형상이 일치되도록 재생냉각 챔버의 내측구조물의 형상을 설계한다.

5) 내측구조물의 구조해석 수행

내측구조물의 벌징노즐부가 벌징 후에 노즐 형상으로 정확하게 변형되는지 검증하고, 변형된 구조물의 변형률 분포를 분석하여 내킹의 발생 유무를 확인하기 위하여 구조해석을 수행한다. 만약 벌징노즐부의 변형률이 재료의 한계변형률보다 크게 나타나면 벌징부의 노즐확대비를 조정하거나 성형성이 더 좋은 재료를 사용해야한다.

6) 내측구조물 및 벌징치구 구조물 가공

설계 및 구조해석이 완료된 벌징노즐 및 치구 구조물을 가공한다.

7) 벌징 수행

가공이 완료된 2개 이상의 벌징치구를 이용하여 다단계(multistage) 벌징공정으로 벌징을 수행한다.

8) 브레이징

벌징공정을 성공적으로 수행한 후 브레이징을 이용하여 내측구조물과 외측구조물을 접합한다.

9) 재생냉각 챔버의 강도/기밀시험

브레이징 후 재생냉각 챔버의 구조적인 안정성 검증 및 브레이징의 접합성 결함 유무를 확인하기 위하여 재생냉각 챔버 내부에 대한 강도/기밀시험을 수행한다.

이와 같은 벌징공정의 흐름도는 그림 10에 나타내었다. 그림 11은 여러 개의 벌징공정을 이용하여 노즐을 벌징하는 다단계 벌징공정의 형상을 보여준다. 본 연구에서 개발한 벌징공정의 검증은 연소시험용 축소형 연소기 노즐과 30톤급 연소기 노즐에 대하여 벌징을 수행하여 확인하였

다. 그림 12는 축소형 연소기의 벌징 후 노즐의 형상이며, 그림 13은 30톤급 연소기 노즐의 벌징 전후 형상을 보여준다. 벌징시험 결과 두 개의 서로 다른 크기의 노즐이 성공적으로 벌징되어 본 연구에서 개발한 벌징공정의 유용함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

액체로켓 연소기 재생냉각 챔버의 제작에 필수적인 벌징공정을 개발하기 위하여, 구리합금에 대한 인장시험과 조직분석을 수행하였으며, 축소형 및 고압축소형 연소기 그리고 30톤급 실물형 연소기용 벌징노즐 시편을 제작하여 벌징시험한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 벌징공정에 사용되는 구리합금 구조물은 고온 열처리를 한 후 재료의 연신율이 매우 크게 증가함을 인장시험을 통하여 확인하였다. 따라서 벌징을 수행할 벌징노즐 구조물을 가공 후 고온 열처리가 필요하다.

2) 벌징공정은 노즐의 기하학적 형상을 고려하여 2개 이상의 벌징공정을 사용하는 다단계 벌징공정이 필요하다.

3) 노즐의 벌징공정 중에 네킹 발생은 구리합금 재료의 그레인 사이즈가 일정한도 이상으로 크게 형성되었을 때 발생하므로 벌징공정의 성공은 소재조직 구조의 치밀화와 함께 벌징 전 초기 재료의 조직분석이 필요하다.

향후에는 벌징공정으로 제작한 액체로켓 연소기 챔버 노즐에 대한 조직분석 데이터를 축적하여 벌징노즐의 제작에 성공적으로 사용될 수 있는 표준화된 그레인 사이즈가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. R. Kindermann et al., Advanced production and process technologies for current and future thrust chambers of liquid rocket engines, 4th International Conference on Launcher Technology, Space Launcher Liquid Propulsion, December 2002, Belgium
2. Y. M. Hung and Y. M. Huang, Elasto-plastic Finite-Element Analysis of the Axisymmetric Tube-Flaring Process with Conical Punch, The international Journal of Advanced manufacturing technology, Vol. 18 2001, pp.390-398
3. T. Daxner, F. G. Rammerstorfer, and F. D. Fischer, Instability phenomena during the conical expansion of circular cylindrical shells, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol. 194, 2005, pp.2591-2603
4. Yuung-Hwa Lu, Study of tube flaring ratio and strain rate in the tube flaring process, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 40, 2004, pp.305-318
5. F. D. Fischer, F. G. Rammerstorfer, and T. Daxner, Flaring-An analytical approach, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 48, 2006, pp.1246-1255
6. Standard Test Method for Tension Testig of Metalic Materials[Metric] (ASTM E 8M)