

# 지상연소시험용 실물형 재생냉각 연소기(확대비 12)의 설계 및 제작

김종규\* · 한영민\* · 서성현\* · 이광진\* · 최환석\*

## Design and Fabrication of Full-Scale Regenerative Cooling Combustion Chamber ( $\epsilon=12$ ) of Liquid Rocket Engine for Ground Hot Firing Tests

Jong-Gyu Kim\* · Yeoung-Min Han\* · Seonghyeon Seo\* ·  
Kwang-Jin Lee\* · Hwan-Seok Choi\*

### ABSTRACT

Design and fabrication of a 30-tonf-class full-scale regenerative cooling combustion chamber of a liquid rocket engine for a ground hot firing test are described. It has chamber pressure of 60 bar and nozzle expansion ratio of 12 and manufactured to have a single welded structure of the mixing head and the chamber. The material of the mixing head is STS316L which has excellent mechanical property in cryogenic condition. The chamber comprise of the cylinder, nozzle throat, and 1st/2nd nozzle parts. The material of the inner jacket is copper alloy/STS329J1/STS316L and that of the outer jacket is STS329J1. The components of the combustor were manufactured by mechanical processing including lathing, milling, MCT, rolling and pressing. The machined components were integrated to a single body by means of general welding, electron beam welding(EBW), and brazing.

### 초 록

본 연구는 30ton급 액체로켓엔진 지상연소시험용 연소기의 설계 및 제작에 관한 것이다. 본 연소기는 연소압력이 60 bar, 노즐 확대비가 12이며, 헤드부와 연소실부가 용접되는 일체형 재생냉각형 연소기이다. 헤드부는 저온에서 기계적 특성이 좋은 STS316L을 사용하였다. 연소실부는 실린더부, 노즐목부, 1차 노즐부, 2차 노즐부로 구성되어 있다. 연소실부의 내피 재질은 동합금/STS329J1/STS316L, 외피 재질은 STS329J1을 사용하였다. 선반, 밀링, MCT, 롤링 및 프레스 등의 기계적 가공을 통하여 단품들을 완성하였다. 이러한 각 단품들을 조립하여 일반 용접 및 전자빔 용접, 브레이징 등을 적용하여 일체형으로 접합하였다.

**Key Words:** Liquid Rocket Engine (액체로켓엔진), Mixing Head (연소기 헤드), Regenerative Cooling Chamber (재생 냉각 연소실)

\* 한국항공우주연구원 연소기팀  
연락처, E-mail: bellstar@kari.re.kr

한국 최초의 액체 로켓인 KSR-III의 성공적인 발사 이후 한국항공우주연구원에서는 현재까지 30톤급 액체 로켓 엔진 개발을 수행하고 있으며, 그동안 다수의 30톤급 연소시험 검증용 연소기를 설계/제작/시험을 수행하여 성능을 검증하였다. 연소기는 크게 추진제(액체산소/케로신)를 분사시키는 헤드부와 분사된 추진제가 혼합되어 연소되는 연소실부로 구성되어 있다. 개발 초기의 헤드부와 연소실부가 탈부착이 가능한 연소압 52.5 bar인 모델부터 헤드부와 연소실부가 일체형인 연소압 60 bar, 확대비가 3.5인 완전한 재생냉각형 연소기까지 설계, 제작 되었다[1-4]. 확대비 3.5인 연소기는 노즐 확대부의 크기에 따른 제작비용 및 시간에 대한 부담감과 헤드부와 연소실부의 일체형에 대한 검증에 초점을 우선적으로 두어 노즐 확대부를 짧게 설계하였다. 이러한 일체형 연소기의 설계 및 제작의 경험을 바탕으로 노즐 확대비가 12인 실물형 재생냉각 연소기를 설계, 제작 중에 있다. 본 논문은 이에 관한 것으로 헤드부 및 연소실부 각각의 파트에 대한 설계 및 제작 공정에 관하여 기술하였다.

## 2. 실물형 재생냉각 연소기의 설계

본 논문에서 고려된 연소기는 연소압력이 60 bar, 추진제 총 유량 및 혼합비는 각각 88.8 kg/s, 2.44인 연소기다. 또한 분사기의 차압은 11 bar, 재생냉각 차압은 연료 유입부에서부터 연소기 헤드까지 16.3 bar이다. 기본 설계 규격을 Table 1에 나타내었고, 확대비 12인 실물형 재생냉각 연소기의 전체 형상을 Fig. 1에 나타내었

Table 1. Specifications of a Combustion Chamber

Chamber Pressure	6.0	MPa
Total Flow Rate	88.8	kg/sec
Oxidizer Flow Rate	63.0	kg/sec
Fuel Flow Rate	25.8	kg/sec
O/F ratio	2.4	
C* Efficiency	96.0	%
C* (design)	1710.1	m/sec
Contraction Ratio	4.4	
Injector Pressure Drop	11.0	Bar
Chamber Cooling Pressure Drop	15.0	Bar

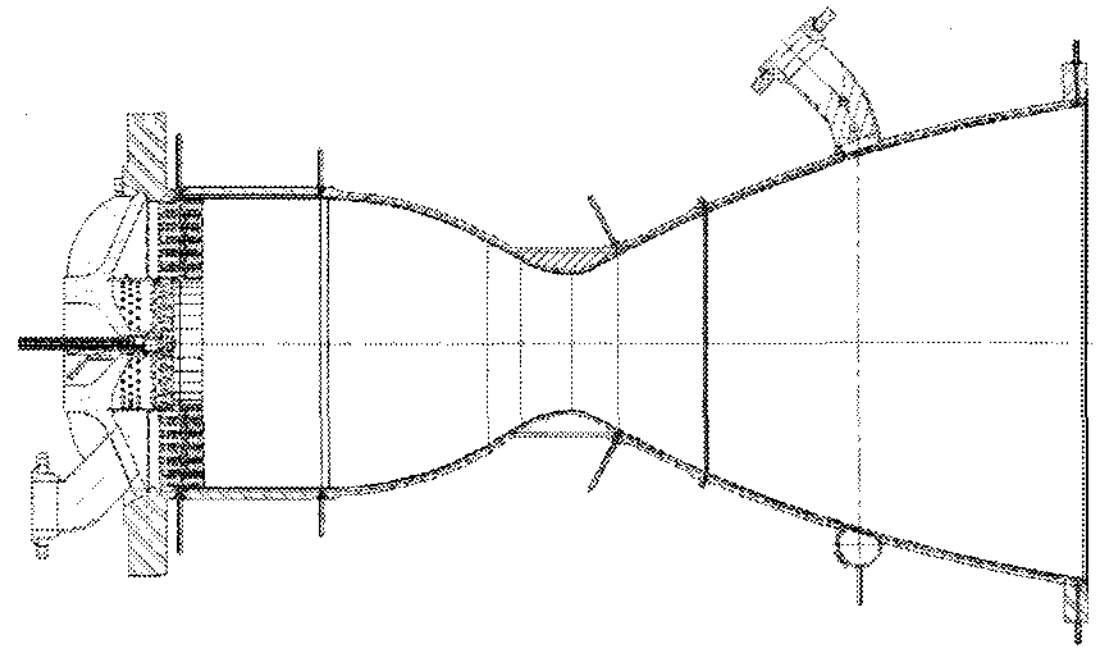


Fig. 1 Full-Scale Regenerative Cooling Combustion Chamber ( $\epsilon=12$ )

다. 위에서도 언급하였듯이 크게 연소기는 헤드부와 연소실부로 구성되고 각각 제작되어 접합이 되는 방식이다. 각각의 형상 및 특징을 살펴보면 다음과 같다.

### 21 연소기 헤드부

확대비 12인 연소기 헤드부는 확대비 3.5인 연소기의 헤드부와 동일한 것으로 확대비 3.5인 연소기의 헤드부를 연소실부와 절단하여 재사용하였다. 헤드부는 산화제 돔, 분사기 매니폴드, 점화분사기, 주분사기, 최외각 냉각분사기, 분사기형 배플, 산화제 수평/수직 분리막, 분사기면, 추진제 공급배관 등으로 구성되어 있다. 주분사기는 recess 수가 1.0인 혼합형의 동축 와류형 분사기이며, 총 216개의 분사기를 분사기면에 10열로 배열하였다. 연소실 벽면의 열적 보호를 위하여 분사기면의 최외각에 48개의 냉각분사기를 배치하여 연료만 분무되도록 하였고, 연소 안정성을 위해 분사기면 5열의 위치에 허브 및 6개의 블레이드로 구성, 총 60개의 분사기형 배플을 배치하였다. 점화분사기는 OFO 충돌형 분사기를 적용하였고, 산화제의 수평/수직 분리막을 산화제 매니폴드 안에 삽입하고 또한 산화제의 균일한 분포를 위해 분리막의 홀 크기를 산화제 입구를 기준으로 변화시켰고, 그 효과는 유동해석을 통해 검증하였다. 좀 더 자세한 사항은 참고문헌[4]에 상세히 기술하였다.

### 22 연소실부

연소실은 실린더부, 노즐목부, 1차 노즐부, 2차

노즐부, 그리고 연료 유입부로 구성된다. 각 파트는 냉각 채널이 가공되는 내피와 외피로 구성되며, 각각은 브레이징(brazing)으로 서로 접합된다. 또한 각 파트들은 전자빔 용접(EBW)을 통해 접합된다. 냉각 채널은 Fig. 2와 같은 사각형 채널을 갖도록 하였다. 실린더부와 노즐목부의 채널은 각각 연소실의 축방향에서 30°, 15°로 기울어진 나선형이고 1차 노즐부와 2차 노즐부의 채널은 축방향과 평행한 직선형이다. 나선형의 채널은 열유속이 높은 실린더부와 노즐목부의 냉각 효과를 높이기 위함이다.

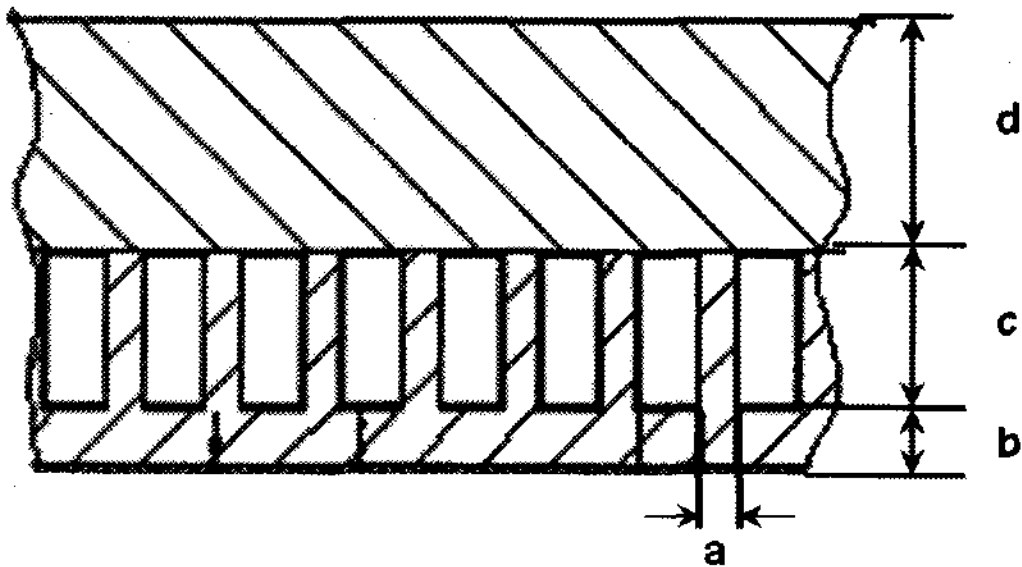


Fig. 2 Schematic of Cooling Channel

연료의 유입은 Fig. 1과 같이 2차 노즐부(확대비 7.5지점)에 연료 유입 배관 및 연료링을 통하여 이루어지고, 유입된 연료는 연소기 헤드 방향과 노즐 끝 방향으로 분리되어 유입된다. Figure 3에 연료 유입의 개략도를 나타내었다. 노즐 끝 방향으로 유입된 연료는 노즐 끝의 collector에서 옆 채널로 유입, 헤드 방향으로 흐르고 연료링에서 직접적으로 헤드 방향으로 흐르는 연료와 Fig. 3에 나타낸 collector에서 혼합되어 헤드 방

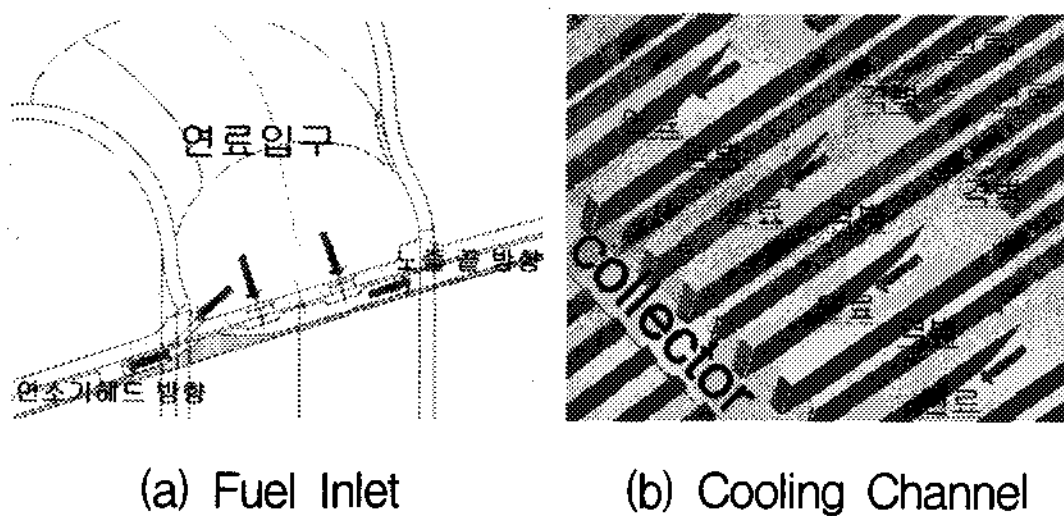


Fig. 3 Schematic of fuel inlet and cooling channel

향으로 유입된다. 두 방향의 유량은 50:50 으로 설계하였고, 평판 형태의 모사시제를 제작하여 연료 분배의 균일성을 확인하였다[5].

### 3. 실물형 재생냉각 연소기의 제작

연소기 제작은 밀링 가공, 선반 가공, MCT 가공 등의 기계적 가공과 전해 연마 등의 표면 처리를 거쳐 각 단품들이 가공되고, 이러한 단품들은 일반 용접, 전자빔 용접, 브레이징 등의 방법을 통해 접합되어 완성된다. 각각의 제작 방식을 살펴보면 다음과 같다.

#### 3.1 연소기 헤드부

분사기 및 분사기 매니폴드, 분사기면, 산화제 돔 등의 각 단품들이 완성되면 Fig. 4와 같이 각 단품들을 조립하여 1차, 2차 브레이징 후 최종적으로 산화제 돔과 분사기 매니폴드를 용접하고, 연소실부와의 전자빔 용접을 위한 구조로 가공한다. 또한 분사기 면에 열적 보호를 위해서 ZrO<sub>2</sub> 열차폐 코팅(TBC)을 실시한다. 좀 더 자세한 공정은 참고문헌[4]에 기술하였다.

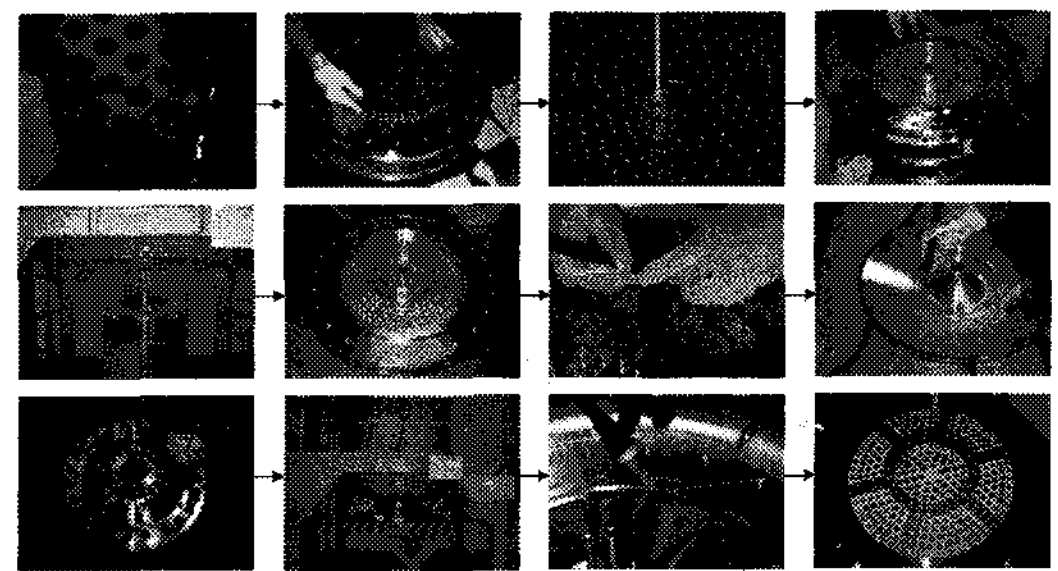


Fig. 4 Mixing Head Assembly Procedures

#### 3.2 연소실 부 - 실린더부, 노즐목부, 1차 노즐부

실린더부, 노즐목부, 1차 노즐부는 내피의 재질은 동합금이며 외피는 STS329J1의 소재를 사용하였다. Figure 5에 냉각 채널을 가공 중인 실린더부, 노즐목부, 1차 노즐부의 내피 형상을 나타내었다. 실린더 부와 1차 노즐부는 내피와 외피를 각각 가공하여 조립 후 브레이징을 실시한다. 노즐부는 내피와 외피의 조립이 가능하도록

부시(bush)를 제작, 삽입하였다. Fig. 5에 부시의 형상을 보면 두 부분으로 분리되어 있어서 채널이 가공된 내피에 조립이 되고 최종적으로 외피가 조립되어 브레이징 된다. 각각의 파트는 브레이징을 한 후 X-ray 촬영을 실시하여 냉각 채널의 막힘 여부를 확인하고, 강도 및 기밀시험을 실시하여 브레이징의 상태를 확인한다.

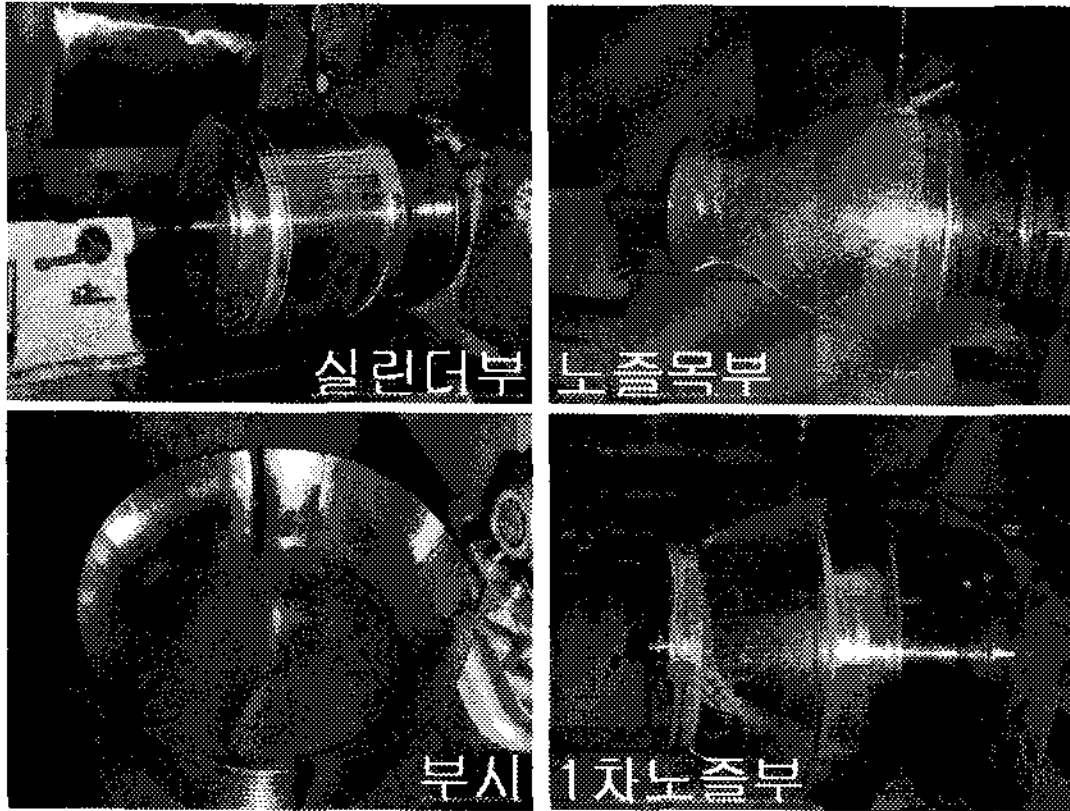


Fig. 5 Inner Jacket (cylinder, throat, 1st nozzle)& Bush

### 3.3 연소실 부 - 2차 노즐부, 연료 유입부

2차 노즐부 역시 내피와 외피로 구성되어 있으나 다른 파트와는 재질과 제작 방법에 있어서 차이가 있다. 우선 내피의 경우는 재질이 동합금이 아닌 STS 계열의 재질을 사용하였다. 이는 연소 시 연소 가스의 온도가 1차 노즐부를 지나면서 감소하기 때문에 열적으로 부담이 크지 않아 비용면에서 동합금보다 유리한 STS 계열의 재질을 적용하였다. 2차 노즐부 내피는 먼저 STS329J1과 STS316L을 EBW를 수행하여 접합시킨 후 내/외경 및 채널 가공을 실시한다. 후에 동합금 재질인 1차 노즐부 내피와 EBW를 수행

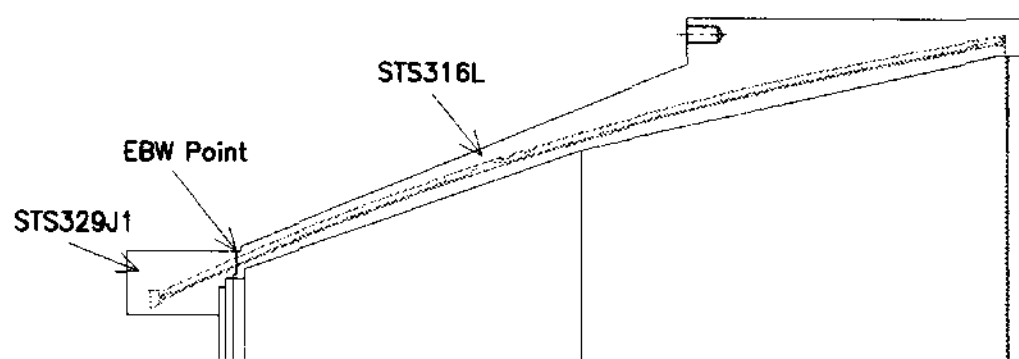


Fig. 6 Schematic of 2nd Nozzle Inner Jacket

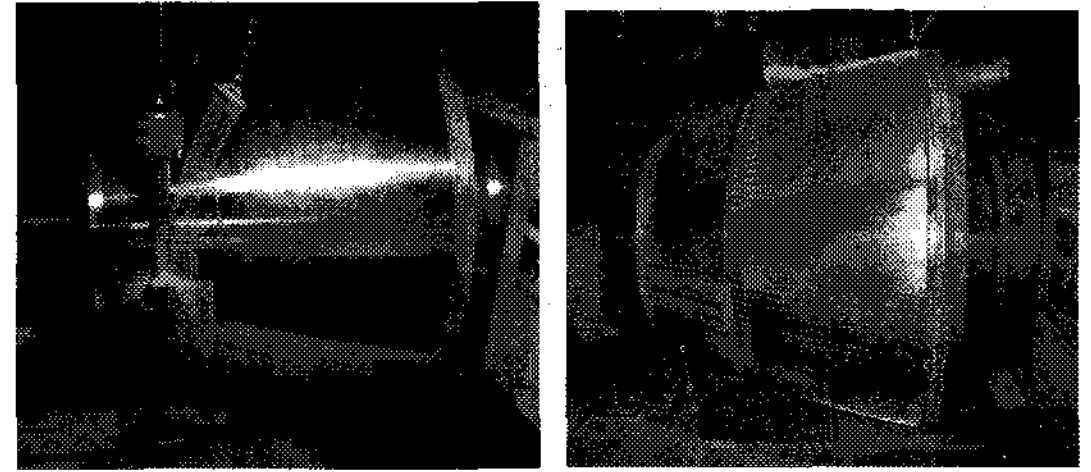


Fig. 7 2nd Nozzle inner Jacket Fabrication

하여 접합할 때 동합금이 STS316L과는 직접적으로 EBW가 용이하지 않아 Fig.6과 같이 STS329J1을 2차 노즐부 앞단에 약 50 mm 두어 1차 노즐부와 EBW가 가능하도록 하였다.

2차 노즐부의 외피는 STS329J1의 재질이며 링형상의 소재를 내/외경 가공하는 다른 파트들과는 달리 평판소재를 롤링 및 프레스 등의 공정을 거쳐 가공한다. 2차 노즐부는 직경이 크기 때문에 링형상의 소재를 가공하는 것은 비용 및 제작 측면에서 비효율적이다. 이에 평판을 Fig.8과 같이 롤링을 하여 콘(cone)형상으로 가공 후 용접한다. 완성 후 프레스를 위한 열처리를 실시하고 내피의 조립면과 동일한 형상을 갖는 Fig.9와 같은 내/외부 금형을 만들고 그사이에 롤링하여 완성된 소재를 삽입하여 유압프레스를 이용하여 프레스를 실시한다. 열처리와 프레스를 반복적으로 수행하여 외피를 완성하고, 연료 유입 홀을 전둘레에 걸쳐 가공하고 연료링이 용접되는 부위를 정삭 가공 한 후 Fig. 10과 같은 연료링과 연료 유입구를 용접한다. 그리고 난 후 내피와의 브레이징을 위해 외피의 내/외경을 정삭 가공한 후 외피 내부면에 필러를 장착하고, 내피와 조립 후 브레이징을 실시한다. 각각의 파트들이 완성되면 EBW을 통해 접합된다. 실린더부 내피와 노즐목부 내피, 노즐목부 내피와 1차



Fig. 8 2nd Nozzle Outer Jacket Rolling Procedure



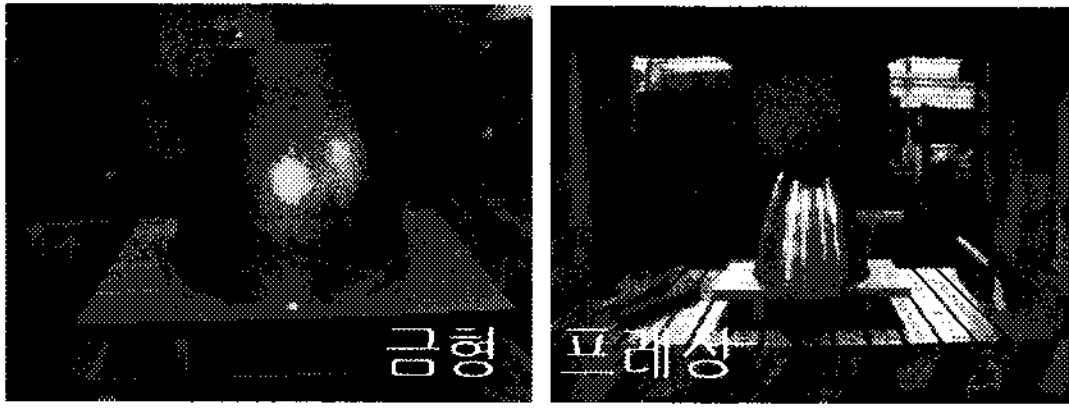


Fig. 9 2nd Nozzle Outer Jacket Pressing Procedure



Fig. 10 Photographs of Fuel Inlet Part

노즐부 내피, 1차 노즐부 내피와 2차 노즐부 내피 사이에 EBW가 이루어지고 외피에 삼입링을 조립하여 전둘레 용접을 실시한다. 연소실부의 가공이 완료되면 연소실부 전체에 대한 강도 및 기밀시험을 수행하고, 연소기 헤드부의 분사기면과 동일하게 ZrO<sub>2</sub> 열차폐 코팅을 실시한다. 최종적으로 헤드부와 연소실부를 여러 치구를 이용하여 조립, EBW를 통해 접합하고, 삼입링을 맞춤 가공하여 삼입한 후 전둘레 용접을 실시한다. 현재 헤드부와 연소실부와의 접합 공정이 실시되고 있어 기존에 제작되었던 확대비 3.5 연소실과 헤드와의 접합 공정사진을 Fig. 11에 나타내었다.

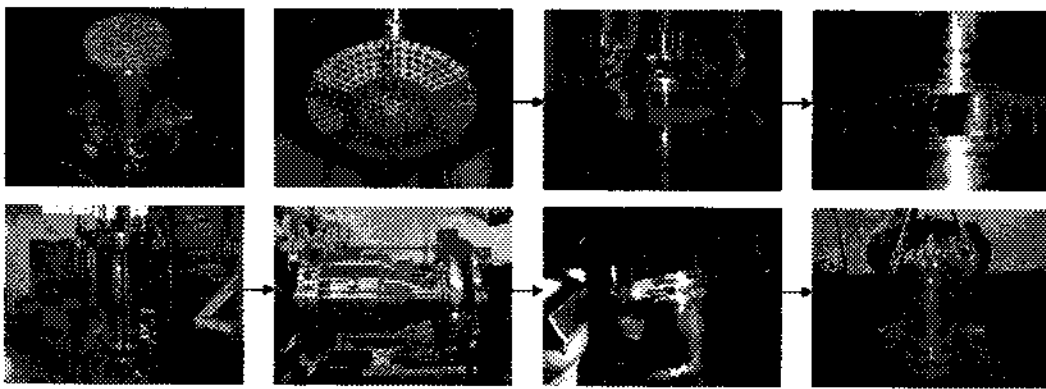


Fig. 11 Photographs of Final Welding Procedures ( $\epsilon=3.5$ )

#### 4. 맺 음 말

확대비 3.5인 지상연소시험용 일체형 재생냉각 연소기의 설계 및 제작 경험을 바탕으로 연소압력 60 bar, 추진제 유량 88.8 kg/s, 노즐 확대비가 12인 지상연소시험용 실물형 재생냉각 연소기를 설계, 제작하였다. 이러한 실물형 연소기의 설계 및 제작 기술은 향후 고성능, 대형화 연소기의 개발에 직접 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 한영민, 김승한, 서성현, 조원국, 최환석, 설우석, 이수용, "지상연소시험용 실물형 고압 연소기의 설계", 한국추진공학회 춘계학술대회논문집, 2005.
2. 김종규, 서성현, 김승한, 한영민, 유철성, 설우석, "실물형 고압 연소기의 연소시험 검증용 제작", 한국추진공학회 춘계학술대회논문집, 2005.
3. 한영민, 김종규, 문일윤, 이광진, 서성현, 최환석, 이수용, "실물형 액체로켓엔진 연소기 물냉각 연소시험 성능결과", 한국추진공학회 춘계학술대회논문집, 2006.
4. 김종규, 한영민, 유철성, 최환석, "지상연소시험용 실물형 재생냉각 연소기의 설계 및 제작", 한국항공우주학회 추계학술대회논문집, 2007.
5. 이광진, 김종규, 한영민, 김희태, 김홍집, 최환석, "재생냉각 연소기의 냉각채널 형상에 대한 연료 균일성 평가시험", 한국항공우주학회 추계학술대회논문집, 2007.