

## 7톤급 연소기 헤드부 구조설계

유철성\* · 이금오\* · 허성찬\* · 최환석\*

### Structural Design of Injector Head Part of 7ton class Thrust Chamber

Chulsung Ryu\*<sup>†</sup> · Keumoh Lee\* · Seongchan Heo\* · Hwanseok Choi\*

#### ABSTRACT

Structural design of the injector head part of a 7ton class thrust chamber was preformed. Structural stability of an injector head part is a very important factor for a thrust chamber of a liquid rocket engine because it is loaded by high pressure of liquid oxidizer and fuel in addition to thrust load. Structural design requirements were first defined to design the injector head part of the 7ton class thrust chamber and the basic configuration was designed on the basis of the design requirements. A high strength steel that has been locally developed was applied to the injector head part of the thrust chamber. A total of twelve design configurations have been analyzed to select structurally the most stable design configuration.

#### 초 록

7톤급 연소기 헤드부에 대한 구조설계를 수행하였다. 액체로켓엔진 연소기 헤드부는 추진제로 사용되는 산화제와 연료에 의하여 고압의 하중뿐만 아니라 추력 하중을 받기 때문에 구조적인 안정성은 매우 중요한 요소이다. 7톤급 연소기 헤드부 구조설계를 위하여 먼저 구조설계 요구조건을 설정하고, 이를 바탕으로 기본형상을 설계하였다. 구조설계에 사용된 재료는 국내에서 개발된 고강도 스테인리스강을 적용하였다. 설계된 기본형상에서 구조적으로 가장 효과적인 형상을 도출하기 위하여 총 12종류의 해석모델에 대하여 구조해석을 수행하고, 그 결과들로부터 구조적으로 가장 안정한 형상을 선정하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Injector Head Part of Thrust Chamber (연소기 헤드), Structural Design(구조설계), Thrust Chamber(연소기)

#### 1. 서 론

액체로켓엔진 연소기 헤드부는 추진제로 사용되는 연료와 산화제를 인젝터를 통하여 연소실로 공급하는 구조를 갖고 있다. 일반적으로 액체로켓엔진 연소기의 작동압력은 매우 높으며, 액체산소가 저장되는 산화제 매니폴드는 고압 및

\* 한국항공우주연구원 연소기팀

† 교신저자, E-mail: csryu@kari.re.kr

극저온 환경에서 작동된다. 또한 엔진이 김벌링(gimballing)을 하는 경우 엔진에서 발생된 추력을 연소기 헤드부에서 전달하기 때문에 연소기 헤드부는 구조적으로 안정해야 하며, 무게 또한 최소화해야 된다.

액체로켓엔진 헤드부 형상은 크게 두 종류로 구분될 수 있다. 첫 번째 종류는 김벌 구조물을 이용하여 추력벡터제어(Thrust Vector Control)를 하는 방식이다. 이 경우 연소기 헤드부 상부에 김벌구조물을 장착할 수 있도록 헤드부 형상이 설계된다. 연소기 헤드부에서 추력을 전달하는 방식에는 돔 형상의 헤드부 형상에 추력전달을 위한 트러스 형상의 구조물을 함께 사용하는 방식과 산화제 매니폴드 구조물을 추력을 전달할 수 있는 형상으로 설계하여 직접 김벌구조물을 장착하는 방식이 있다. 미국과 유럽에서 개발된 액체로켓엔진 연소기의 경우 산화제 매니폴드 구조물에 김벌구조물을 직접 장착하는 형태이다. 두 번째 종류는 소형 추력기를 사용하여 추력벡터제어를 하는 방식에 사용되는 연소기 헤드부 형상이다. 이러한 종류의 연소기 헤드부는 일반적으로 돔 형상으로 설계/제작된다. 고압저장용기의 형상인 돔 형상의 구조물에 대한 구조적인 안정성에 대한 연구는 많이 존재한다 [1,2]. 본 연구에서는 7톤급 3단 액체로켓엔진 연소기 헤드부가 엔진 상부에 김벌구조물을 장착하여 추력벡터제어를 수행하는 점을 고려하여 헤드부 형상을 설계하였으며, 구조해석을 수행하여 구조적인 안정성을 평가하였다.

## 2. 본론

### 2.1 액체로켓엔진 연소기 헤드부 형상설계

7톤급 연소기 헤드부는 극저온 유체인 액체산소(LOx)와 연소실 재생냉각 챔버를 냉각시킨 후 공급되는 케로신(kerosene)을 인젝터로 공급하는 매니폴드부와 다수의 인젝터로 구성되고, 형상적으로 엔진이 작동될 때 발생하는 추력을 전달할 수 있는 구조이어야 한다. 7톤급 연소기 헤드부 구조설계에서 고려해야 할 사항들은 형상, 구조

적인 안정성, 재료, 접합기, 작동수명, 무게, 제작비용 등이다. 연소기 헤드부는 최대작동조건인 압력과 추력하중에서 구조적으로 안정해야 한다. 그리고 엔진의 김벌링에서 받는 하중과 엔진시스템을 구성하는 터보펌프, 가스발생기 및 기타의 부품들이 장착되기 때문에 이러한 구조물의 무게와 진동하중으로부터 구조적으로 안정하도록 설계되어야 한다.

### 2.2 연소기 헤드부 제작용 재료

연소기 헤드부 제작용 재료의 선정에서 고려되어야 할 사항들은 재료의 강도(strength), 제작성(fabricability), 작동환경에서 적합성(compatibility), 그리고 파괴인성(fracture toughness)과 결함 성장 저항성(resistance to flaw growth), 및 제작비용들이다. 국내에서 개발된 연소기 헤드부에는 크게 2종류의 재료를 사용하였다. 추진제로 사용되는 액체산소에 의한 극저온의 환경에서 재료의 취성이 없는 UNS S31603을 산화제 돔과 인젝터를 조립하는 매니폴드에 사용하였으며, 고온의 연소가스와 노출되는 인젝터 페이스 플레이트(injector face plate)는 열전도율이 좋은 구리합금을 사용하였다. 이 분야 선진국의 경우 국내에서 사용되는 UNS S31603 대신에 03X12H10MTPY나 정밀주조와 HIP처리를 한 고강도 재료인 Inconel 718을 사용하여 극저온의 환경과 고압 그리고 엔진에서 발생하는 추력 하중을 받는 연소기 헤드부의 구

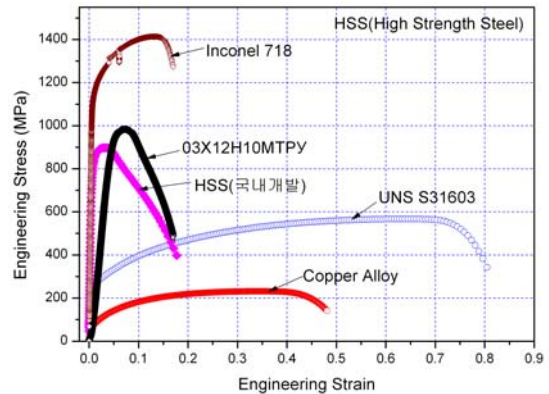


그림 1 연소기 제작용 재료의 인장시험 결과 비교

조적인 안정성을 향상시킬 뿐만 아니라 무게 또한 최소화되도록 하였다[3].

7톤급 연소기 헤드부는 초기 안으로 국내에서 개발한 재료를 사용하여 구조설계를 진행하였다. 그림 1은 연소기 헤드부 제작용 재료인 Inconel 718, 03X12H10MTP, UNS S31603, 국내개발 고강도 스테인리스강, 그리고 구리합금의 상온 인장시험 결과를 보여준다. 인장시험 결과 Inconel 718 재료는 러시아에서 연소기 헤드부용으로 사용되는 03X12H10MTP 재료에 비하여 0.2% 오프셋 항복강도(0.2% offset yield strength)가 36.7% 높으며, 국내개발 고강도 스테인리스강에 비교하였을 때 46.4% 높게 나타나 압력과 추력하중을 받는 연소기 헤드부 제작용 재료로 사용하여 구조적인 안정성과 무게를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 국내개발 고강도 스테인리스강과 러시아 재료인 03X12H10MTP를 비교하였을 때 국내개발 고강도 스테인리스강이 러시아 재료에 비하여 0.2% 오프셋 항복강도가 7.1% 낮은 값을 보여주고 있으나 기계적인 항복강도에서 53 MPa 차이로 유사한 특성을 보여준다.

### 2.3 구조설계 및 해석

7톤급 연소기 헤드부 구조해석에서는 한계하중(limit load)으로 탈설계점 작동조건 #3을 선정하였다. 7톤급 연소기 헤드부 형상은 중앙에 점화기가 있어 점화용 연료가 외부에서 공급될 수 있도록 하였으며, 산화제 매니폴드는 내측구조물(inner shell structure)과 외측구조물(outer shell structure) 그리고 산화제 공급라인이 존재한다. 이 산화제 매니폴드는 산화제를 인젝터에 공급하는 역할뿐만 아니라 엔진에서 발생된 추력은 전달할 수 있도록 하였다. 산화제 매니폴드 하부에는 인젝터 조립부가 있으며 구리합금인 인젝터 페이스 플레이트(injector face plate)와 산화제와 연료 매니폴드 사이에 있는 인젝터 중간 플레이트(injector middle plate) 사이로 재생냉각 챔버에서 유동되어 온 연료가 공급된다. 그림 2에 7톤급 연소기 헤드부 형상과 연소기가 작동될 때 헤드부가 받는 하중들을 나타내었다. 그림 2와 같이 설계된 연소기 헤드부 형상에서 산화

제 매니폴드의 내측구조물과 외측구조물의 각 변화에 따라 동일한 두께를 갖는 구조물이지만 구조적인 안정성에 차이가 나타난다. 따라서 7톤급 연소기 헤드부 형상설계는 이러한 점을 고려하여 내측구조물과 외측구조물의 각을 변화시킨 모델들에 대하여 구조해석을 수행하고 그 결과들로부터 인젝터 조립부의 변형이 최소화되고, 산화제 매니폴드의 요구 체적(volume)을 만족하는 형상을 선정하였다.

연소기 헤드부에서 인젝터 조립부는 산화제 매니폴드 내부압력과 인젝터 조립부 중앙과 연결된 추력하중을 받는 내측구조물에 의하여 평탄도를 유지하지 못하고 변형될 수 있다. 따라서 인젝터 조립부 중앙과 연결된 내측구조물의 끝단부에서 산화제 매니폴드 내부압력과 추력하중에 의하여 발생하는 반력(reaction force)이 최소화되었을 때 인젝터 조립부의 변형을 최소화할 수 있다. 연소기 헤드부 산화제 매니폴드 형상에서 내측구조물과 외측구조물의 각 변화에 따라 연소기 헤드부 중앙에서 발생하는 반력이 최소화 되는 각을 찾기 위하여 내측구조물의 각과 외측구조물의 각을 변화시켰다. 이러한 내측과

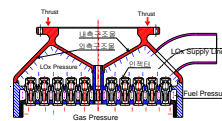


그림 2 7톤급 연소기 헤드부 적용 하중 분포

표 1 7톤급 연소기 헤드부 하중조건(OD#3)

구분	연소실 부 압력 (MPa)	연료 매니폴드 압력 (MPa)	산화제 매니폴드 압력 (MPa)	추력 하중 (ton)
한계하중	8.05	9.60	10.11	8.19
설계항복하중	9.66	11.52	12.13	9.83

외측구조물의 각 변화에 따른 연소기 헤드부 중앙에서 힘의 평형이 되는 형상을 찾기 위한 하중 조건은 설계점 작동조건을 적용하였다. 연소기 헤드부 산화제 매니폴드 형상에서 내측구조물과 외측구조물의 각 변화에 따른 총 12종류 형상을 설계하여 산화제 매니폴드의 요구체적을 만족하고, 연소기 헤드부 중앙에서 반력이 최소화 되는 형상 모델을 선정하였다. 이 모델을 7톤 연소기 헤드부 형상으로 선정하고, 연소기 작동 조건에서 가장 큰 하중을 받는 탈설계점 작동조건 #3에서 구조적인 안정성을 확인하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석에는 탈설계점 작동조건 #3에서 설계안전계수 1.2를 적용한 설계항복하중(yield design load)을 주어 구조해석을 수행하였다. 표 1에 선정된 헤드부 구조해석에 사용된 하중조건들을 나타내었다.

### 2.3 구조해석 결과

표 2는 7톤급 연소기 헤드부의 인젝터 조립부 중앙에서 반력이 가장 작은 type 8 모델에 대한 탈설계점 작동조건 #3의 하중 조건에서 구조해석 결과를 보여준다. 구조해석 결과 최대 Von-Mises 응력은 659.9 MPa로 재료의 0.2% 오

표 2 헤드부 구조해석 결과(Von-Mises Stresses)

형상	Max. Von-Mises Stress (MPa)	Margin of Safety
Type 8	659.9	0.14

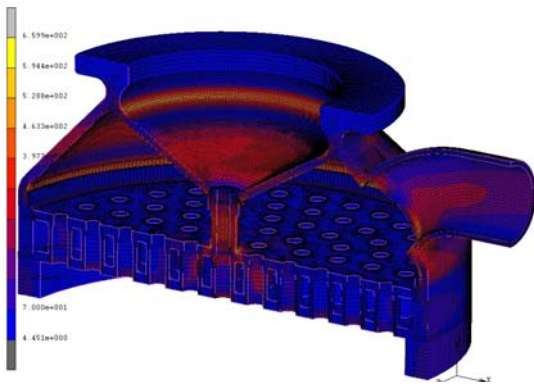


그림 3 연소기 헤드부 Von-Mises 응력 분포(Type 8)

프셋 항복응력(0.2% offset yield strength)인 750 MPa보다 작게 나타났으며 안전여유(margin of safety)는 0.14로 설계된 연소기 헤드부가 구조적으로 안정하게 작동될 수 있음을 알 수 있다. 그림 3은 type 8 모델에 대한 Von-Mises 응력분포를 보여준다.

### 3. 결론

7톤급 연소기 헤드부에 대한 구조설계를 수행하였다. 액체로켓엔진 연소기 헤드부는 추진제로 사용되는 산화제와 연료에 의하여 고압의 하중뿐만 아니라 추력 하중을 받기 때문에 구조적인 안정성은 매우 중요하다. 구조설계에 사용된 재료는 국내에서 개발된 고강도 스테인리스강을 적용하였다. 7톤급 연소기 구조설계를 위하여 먼저 구조설계 요구조건을 설정하고, 이를 바탕으로 기본형상을 설계하였다. 설계된 기본형상에서 구조적으로 가장 효과적인 형상을 도출하기 위하여 총 12 종류의 해석모델에 대하여 구조해석을 수행하고 구조적으로 가장 안정한 형상을 선정할 수 있었다. 구조설계 형상은 향후 구조시험을 수행하여 구조적인 안정성을 검증할 예정이다.

### 참고 문헌

1. J. Biachut., "Plastic Loads for Internally Pressurized Torispheres," Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 64, 1995, pp. 91-100
2. V. N. Skopinsky and A. B. Smetankin, "Parametric Study of Reinforcement of Pressure Vessel Head with Offset Nozzle," Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 80, 2003, pp. 333-343
3. 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", 2002