

## 75톤급 연소기 헤드부의 구조안정성 평가

유철성\* · 이금오\* · 최환석\*

### Evaluation of Structural Stability for a 75-tonf Class Thrust Chamber Mixing Head

Chulsung Ryu\* · Keumoh Lee\* · Hwanseok Choi\*

#### ABSTRACT

Structural tests for the mixing head of a 75tonf class thrust chamber were performed to verify structural stability. The mixing head of a thrust chamber is loaded by high pressure with regeneratively cooled fuel and cryogenic liquid oxygen(LOx) as well as it transfers thrust load generated by liquid rocket engine. Therefore structural stability of mixing head is a very important factor to work without any plastic deformation or structural failure. In this study, two mixing heads were manufactured using different welding methods, Tungsten Inert Gas(TIG) welding and Electron Beam Welding(EBW) and evaluated a structural stability. The results of structural tests showed that the mixing head assembled by EBW can withstand the applied design load without any structural failures and be structurally more stable than that of TIG welding.

#### 초 록

75톤급 연소기 헤드부의 구조적인 안정성을 검증하고자 구조시험을 수행하였다. 연소기 헤드부는 재생냉각된 연료와 극저온 산화제에 의하여 고압의 하중을 받을 뿐만 아니라 엔진에서 발생된 추력을 전달한다. 따라서 연소기 헤드부가 소성변형 또는 구조적인 손상 없이 작동하기 위해서는 헤드부의 구조안정성이 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 구조안정성 평가를 위하여 전자빔용접과 티그용접 두 가지 종류의 용접을 사용하여 헤드부를 제작하고, 구조적인 안정성을 평가하였다. 구조시험 결과 전자빔용접을 적용한 연소기 헤드부가 설계 하중조건에서 구조적인 손상 없이 안정하였으며, 티그용접 연소기 헤드부에 비하여 구조적으로 더 안정함을 보여주었다.

Key Words: 액체로켓 연소기 (Liquid Rocket Thrust Chamber), 구조시험(Structural Test), 구조안정성(Structural Stability), 연소기 헤드부(Thrust Chamber Mixing Head)

\* 한국항공우주연구원 연소기팀

† 교신저자, E-mail: csryu@kari.re.kr

액체로켓엔진 연소기 헤드부는 추진제로 사용되는 연료와 산화제를 인젝터를 통하여 연소실로 공급하는 역할뿐만 아니라 엔진에서 발생된 추력을 발사체에 전달하는 역할을 한다. 일반적으로 액체로켓엔진 연소기의 작동압력은 매우 높으며, 액체산소가 저장되는 산화제 매니폴드는 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 형상을 설계한다. 연소기 헤드부에서 추력을 전달하는 방식에는 트러스 구조물을 사용하는 방식과 산화제 매니폴드 구조물에 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. 이 방식은 주로 러시아에서 개발되는 발사체에서 사용한다. 국내에서 개발하는 75톤 액체로켓엔진은 엔진 상부에 김벌구조물을 장착하여 추력벡터제어를 수행한다. 본 연구에서는 엔진추력을 트러스 구조물 형상으로 전달하는 75톤급 연소기 헤드부를 티그용접(TIG welding)과 전자빔용접(EBW)을 각각 적용하여 제작하고, 구조시험을 통하여 구조적인 안정성에 대한 평가를 수행하였다.

## 2. 구조시험

### 2.1 연소기 헤드부 제작

국내에서 개발하고 있는 75톤급 연소기 헤드부 단면 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 이 연소기

헤드부는 연료 매니폴드(fuel manifold)와 산화

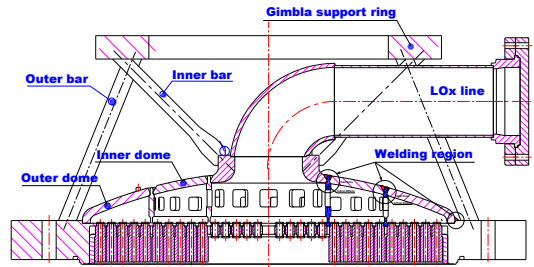


Fig. 1. Section View of 75 tonf Class Thrust Chamber Mixing Head

제 매니폴드(LOx manifold), 인젝터(injector) 그리고 추력전달을 위한 트러스(truss) 구조물로 구성된다. 연소기 헤드부에서 서로 다른 용접방식은 산화제 매니폴드인 돔 구조물의 조립에 적용된다. Fig. 1에 나타내었듯이 이 돔 구조물은 가장 내측에 액체산소(LOx)를 공급하는 공급라인과 연결되는 산화제 공급부가 있으며, 반경반향으로 내측 돔(inner dome)과 외측 돔(outer dome) 구조물로 구성된다. 산화제의 압력에 돔 구조물의 구조적인 안정성을 높이고자 내부에는 수직보강재(vertical stiffener) 2개가 존재한다. 반경이 작은 내측 수직보강재는 산화제 공급부와 내측 돔과 용접되며, 직경이 큰 외측의 수직보강재는 내측과 외측 돔과 용접된다. 그리고 외측 돔 끝단은 연소기 헤드부 플랜지부와 용접된다.

### 2.2 구조시험

티그용접과 전자빔용접으로 제작된 연소기 헤드부 구조시험에는 헤드부가 받는 하중조건을 모사할 수 있는 구조시험 전용 장비를 사용하였다. Fig. 2는 이 구조시험 장비와 구조시험을 하기 위하여 스트레인게이지와 변위게이지가 부착된 구조시험용 연소기 헤드부 형상을 보여준다. 구조시험은 연소기 작동조건인 추력하중 75톤, 매니폴드 압력 7.2 MPa, 연소실 압력 6.0 MPa과 이 작동조건에 설계 안전계수(design safety factor) 1.2를 적용한 설계하중(design load) 조건으로 수행하였다.

연소기가 작동을 시작하면 헤드부는 압력하중

및 추력하중을 받으며, 이러한 하중들에 의하여

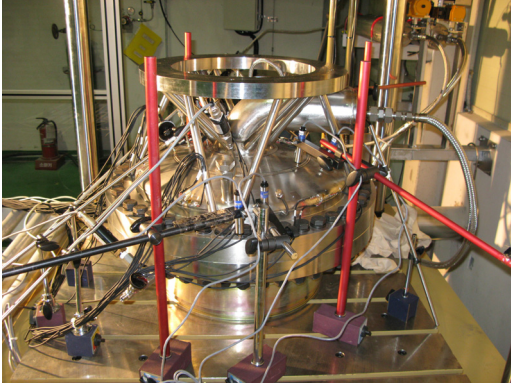


Fig. 2. Configuration of Structural Test for Thrust Chamber Mixing Head

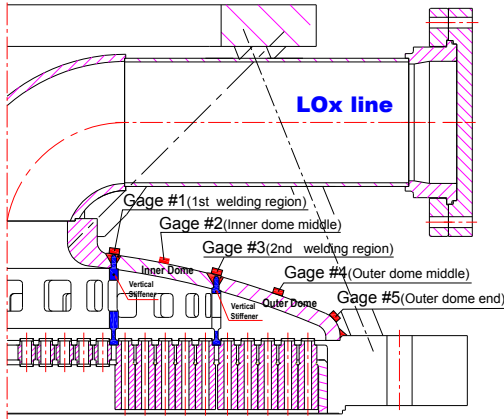


Fig. 3. Locations of Strain gage Attachment

헤드부가 구조적으로 변형된다. 이러한 변형을 측정하고자 스트레인 게이지(strain gage)와 변위 게이지(LVDT)를 연소기 헤드부에 부착 및 장착하여 압력 및 추력하중의 증가에 따른 연소기 헤드부의 변형률 및 변위를 측정하였다. 스트레인 게이지는 Fig. 3에 나타내었듯이 연소기 헤드부 내측의 직경이 작은 수직보강재와 내측 돔과의 용접부, 내측 돔에서 반경방향으로 중간 위치, 헤드부 내측의 직경이 큰 수직보강재와 내측 및 외측 돔과의 용접부, 외측 돔에서 반경방향으로 중간 위치 그리고 외측 돔의 끝단 곡률부에 부착하여 추력하중과 매니폴드, 연소실부에서 압력 증가에 따른 구조물의 변형을 측정하였다.

### 3. 구조시험 결과

#### 3.1 티그용접 연소기

티그용접 연소기 헤드부의 5곳에 부착된 스트레인 게이지로부터 측정된 각각의 변형률로부터 아래의 식 (1)을 이용하여 주변형률을 계산하였다[1,2].

$$\epsilon_{1,2} = \frac{(\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ})}{2} + \frac{\sqrt{(\epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{90^\circ})^2 + [2\epsilon_{45^\circ} - \epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{90^\circ}]^2}}{2} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ})}{\epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{90^\circ}} \right]$$

$\epsilon_{0^\circ}$ ,  $\epsilon_{90^\circ}$  그리고  $\epsilon_{45^\circ}$ 은 연소기 헤드부 돔에서 반경방향, 원주방향 그리고 반경방향에서 원주방향으로 45° 방향으로 부착된 각각의 게이지들에서 측정된 변형률이다. 각  $\phi$ 는 스트레인 게이지  $\epsilon_{0^\circ}$ 와 최대 주변형률  $\epsilon_1$ 사이의 각을 나타낸다. 연소기 헤드부의 5곳에 부착된 스트레인 게이지로부터 측정된 각각의 변형률을 식 (1)을 이용하여 계산한 결과는 Table 1에 나타내었다. 구조시험 결과 내측과 외측 돔의 중앙에서 다른 측정위치보다 변형률이 상대적으로 크게 나타났다. 주변형률을 식 (1)을 이용하여 계산한 후 주응력과 최대 전단응력은 평면응력(plane stress) 구성관계식(constitutive equation)인 아래의 식 (2)로 계산할 수 있다[3].

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_1 + \nu\epsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_2 + \nu\epsilon_1) \\ \tau_{\max} &= \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\nu$ 는 프와송의 비(Poisson ratio)이며, E는 탄성계수(Elastic modulus)이다. 연소기 헤드부에서 돔과 매니폴드 제작에 사용된 STS316L 재료

Table 1. Comparison of Principal Strains for TIG Welded Thrust Chamber Mixing Head

Locations of strain gage attachment	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
1st weld region	-6.019E-6	-5.725E-4
Inner dome middle	1.02E-3	5.040E-4
2nd weld region	5.630E-4	-6.852E-4
Outer dome middle	1.27E-3	6.288E-4
Outer dome end	1.789E-4	7.606E-5

Table 2. Comparison of Principal Strains and Von-Mises Stresses for TIG Welded Thrust Chamber Mixing Head

Locations of strain gage attachment	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	Von-Mises Stress (MPa)
1st weld region	-41.0	-132.3	117.3
Inner dome middle	270.0	186.6	239.4
2nd weld region	82.4	-119.0	175.3
Outer dome middle	336.5	232.8	298.5
Outer dome end	46.5	29.9	40.8

의 프와송의 비는 0.3을 사용하였으며, 탄성계수는 인장시험 결과로부터 얻은 210 GPa을 사용하여 주응력을 계산하였다. 식 (2)로부터 얻은 주응력을 이용하여 폰-미세스 응력(Von-Mises stress)은 아래의 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (3)$$

Table 2에는 설계하중을 적용하였을 때 각각의 변형률 측정위치에서 주응력 및 폰-미세스 응력을 나타내었다. 변형률이 가장 큰 외측 돔 중앙에서 가장 큰 응력이 나타나고, 외측 돔의 끝단부에서 가장 낮은 응력 상태를 보여준다. 연소기 헤드부의 설계 하중조건을 주었을 때 내측과 외측 돔 중앙에서 재료의 0.2% 오프셋 항복강도(0.2% offset yield strength)인 221 MPa 보다 큰 응력 값을 보여주고 있으나, 다른 측정위치에서는 재료의 항복강도보다 낮은 응력상태를 보여

주었다. 이러한 결과로부터 내측과 외측 돔의 두께 증가를 통한 구조적인 보강이나 용접부의 개선이 필요함을 알 수 있다.

### 3.2 전자빔용접 연소기

티그용접을 적용한 연소기 헤드부와는 달리 전자빔용접으로 제작된 연소기 헤드부는 돔의 두께방향 전체가 용접되는 상태로 제작된다. 이전에 국내에서 개발된 연소기 헤드부 제작에는 티그용접을 사용하였다. 그러나 전자빔용접이 티그용접에 비하여 동일한 형상의 연소기 헤드부를 구조적으로 더 안정되도록 제작할 수 있다고 판단되어 제작공정의 검증 및 향후 제작되는 연소기에 적용 가능성을 확인하고자 전자빔용접 헤드부를 제작하고, 구조시험을 통하여 티그용접 적용 헤드부와 구조적인 안정성 차이를 확인하였다. 전자빔용접 연소기 헤드부에서 스트레인 게이지는 티그용접 헤드부와 동일한 위치에 부착하였다. Table 3에 설계하중 조건의 구조시험으로 얻은 주변형률을 나타내었다. 내측과 외측 돔 중앙에서 최대 주변형률은 각각 6.861E-4와 8.035E-4로 동일위치에서 티그용접 연소기 헤드부의 구조시험 결과에서 나타난 1.02E-3과 1.27E-3에 비하여 32.7%와 36.7% 감소하였다. 내측과 외측 수직보강재 용접부에서는 -3.928E-4와 6.752E-4로 티그용접 헤드부에서 측정된 -5.725E-4와 -6.852E-4에 비하여 각각 31.4%와 1.5% 감소하였다. 그러나 외측 돔 끝단 곡률부에서는 전자빔용접 헤드부에서 -6.497E-4로 측정되었으나 티그용접 헤드부에서는 1.789E-4로 나타

Table 3. Comparison of Principal Strains for Electron Beam Welded Thrust Chamber Mixing Head

Locations of strain gage attachment	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
1st weld region	1.894E-4	-3.928E-4
Inner dome middle	6.861E-4	4.296E-4
2nd weld region	6.752E-4	4.564E-5
Outer dome middle	8.035E-4	5.250E-4
Outer dome end	1.797E-4	-6.497E-4

Table 4. Comparison of Principal Strains and Von-Mises Stresses for Electron Beam Welded Thrust Chamber Mixing Head

Location of strain gage attachment	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	Von-Mises Stress (MPa)
1st weld region	16.5	-77.4	86.8
Inner dome middle	187.8	146.4	170.9
2nd weld region	158.7	57.2	139.3
Outer dome middle	221.4	176.5	202.8
Outer dome end	-3.5	-137.3	135.6

나 363% 크게 증가하였다. 비록 전자빔용접 헤드부의 외측 돔 끝단 곡률부에서 티그용접 헤드부보다 변형률이 크게 증가하였지만 그 값이 다른 측정위치의 변형률과 유사하기 때문에 티그용접 헤드부에 비하여 전자빔용접 헤드부가 동일한 하중조건에서 구조물 전체적으로 균일하게 변형을 하고 있으며, 결과적으로 구조적으로 더 안정함을 알 수 있다. Table 4에는 설계하중조건에서 주응력과 폰-미세스 응력을 나타내었다. 설계하중 조건에서 티그용접 헤드부에서는 내측 돔과 외측 돔 중앙에서 헤드부가 재료의 0.2% 오프셋 항복강도인 221 MPa보다 크게 나타났으나 전자빔용접 헤드부에서는 모든 측정위치에서 재료의 항복강도보다 낮게 나타나 구조적으로 안정함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 동일한 연소기 헤드부도 제작공정에 따라 구조적인 안정성 차이가 발생되기 때문에 구조설계에서 제작공정 또한 고려되어야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

75톤급 액체로켓엔진 연소기 헤드부에 대한 구조안정성 평가를 구조시험을 통하여 수행하였다. 티그용접과 전자빔용접을 각각 적용한 동일한 형상의 75톤급 연소기 헤드부에 대한 구조시험 결과 티그용접 연소기 헤드부에서는 재료의 항복강도 이상으로 변형되는 영역이 존재하였다. 그러나 전자빔용접 연소기 헤드부에서는 모든 측정위치에서 재료의 항복강도보다 작게 변형되어 전자빔용접을 적용한 75톤급 연소기 헤드부가 설계하중 조건에서 구조적으로 안정함을 보여주었다. 이러한 결과로부터 향후 설계/제작되는 연소기 헤드부에 전자빔용접을 제작공정으로 적용함으로써 연소기의 구조적인 안정성을 증가시키고 무게는 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. Akhtar S. Khan and Xinwei Wang, Strain Measurements and Stress Analysis, New Jersey, Prentice Hall, 2001, pp.74-82
2. Johh Vaughan, Application of B & K Equipment to Strain Measurements, Bruel & Kjaer, 1975, pp.112-114
3. Ugural A. C. and Fenster S. K., Advanced Strength and Applied Elasticity, London, Edward Arnold, 1981, pp. 52