

## 30톤급 실물형 연소기 산화제 매니폴드 유동해석을 통한 유량 균일성 개선

김홍집\* · 김성구\* · 김종규\* · 한영민\*\* · 최환석\*\*

### Flow Analyses for the Improvement of Uniform Distribution at LOx Manifold of a 30 ton<sub>f</sub> Full-scaled Combustor

Hong Jip Kim\* · Seong-Ku Kim\* · Jong-Kyu Kim\* · Yeoung-Min Han\*\* · Hwan Seok Choi\*\*

#### ABSTRACT

Flow analyses have been performed to investigate the uniformity of propellant flow through the oxidizer manifold of a 30 ton<sub>f</sub> full-scaled combustor. Injectors were simulated as porous medium layers of equivalent pressure drops. The uniformity of oxidizer propellant has been analyzed for various diameters of holes in vertical/horizontal distributors and configurations of oxidizer inlet to propose an improved design solution. It has been proven that the mass flow uniformity were improved by adjusting the holes in vertical/horizontal distributors.

#### 초 록

30톤급 실물형 연소기의 산화제 매니폴드에서의 유동 균일성 문제를 파악하기 위하여 유동해석을 수행하였다. 분사기의 모사를 위하여 다공성 매질로 가정하고, 다공성도(porosity)를 조절하여 분사기 차압을 모사하였다. 수직 및 수평 분리막에서의 구멍의 직경, 입구 포트의 형상에 따른 유동의 균일성 정도를 파악하고, 개선된 설계 수정안을 제시하였다. 수직 및 수평 분리막 구멍의 형태와 배치 수정을 통하여 유량 균일성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words: Liquid Rocket Combustor(액체로켓 연소기), Oxidizer Manifold(산화제 매니폴드), Uniformity(균일성), Vertical/Horizontal Distributors(수직/수평 분리막), Hole Diameter(구멍 직경), Inlet Port(입구 포트)

#### 1. 서 론

액체 로켓엔진용 연소기의 매니폴드는 공급된 추진제를 분사기에 배분하는 역할을 한다[1,2]. 일반적으로 매니폴드는 연결된 분사기에 골고루 추진제를 공급하도록 설계되는 것이 바람직하다.

† 2008년 4월 10일 접수 ~ 2008년 5월 27일 심사완료

\* 정회원, 한국항공우주연구원 연소기팀

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

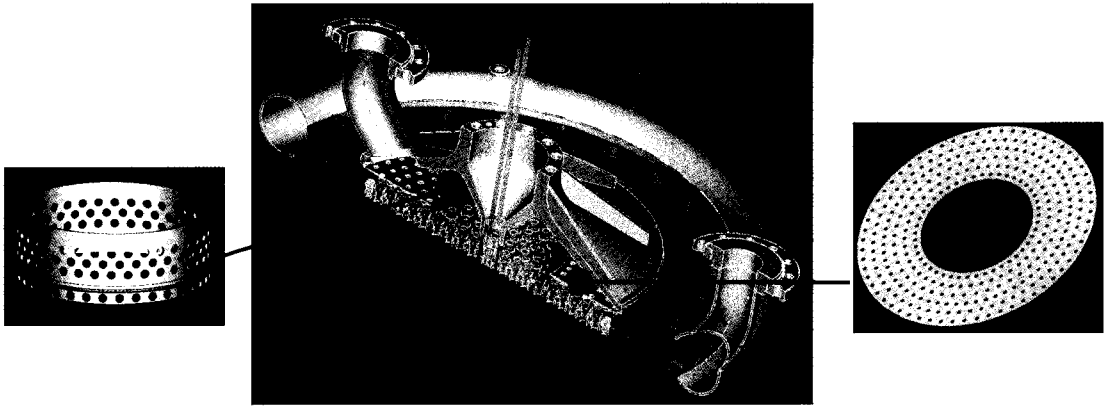


Fig. 1 Schematic of LOx Manifold of A 30 tonf Full-scaled Combustion Chamber

다시 말하면, 막냉각과 같은 별도의 냉각 기구를 고려하더라도 연소실 벽면으로의 균일한 열유속을 보장하기 위하여 분사기의 균일성을 확보하는 것이 필요하다.

한국항공우주연구원(이하 항우연)에서는 30톤급 실물형 연소기 개발과정 중 연소시험에서 추진제 유량과 열유속이 횡방향으로 불균일하게 나타난 문제가 발생되었다[3,4]. 이러한 문제는 실물형 연소기 벽면에 비정상적인 열부하(thermal load)를 가할 수 있어, 재생냉각 채널에서의 국부적 온도 상승 및 boiling, 또는 coking과 같은 현상을 야기할 수 있으며, 심한 경우 연소실 벽면 자체의 물리적 파괴를 가져올 수도 있다. 또한 매니폴드와 분사기를 통하여 균일한 추진제의 공급이 이뤄지지 못할 경우, 원하는 수준의 추력을 얻지 못할 수 있으며, 결국 발사체 고유의 임무를 수행하지 못하게 될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 매니폴드를 통한 비균일성 문제를 해결 또는 방지하기 위해서, 먼저 30톤급 실물형 연소기의 LOx 매니폴드를 대상으로 유동해석을 수행하였다. 이 때, 분사기 자체를 모두 다 모사하기 힘들기 때문에 다공성 매질(porous medium) 가정을 통하여 분사기 차압을 조정하는 방식을 통하여 모사하였다. 따라서 분사기에 걸리는 차압은 다공성 매질의 점성저항(viscous resistance)을 조절하여 맞추었다[5]. 이 과정을 통하여 초기 매니폴드 설계안의 문제

점을 파악하고, 이를 개선하기 위한 2가지 설계 수정안(분리막 구멍 직경, 입구포트 형상)에 대한 평가를 수행하였다. 이러한 결과를 바탕으로 향후 채택 가능한 설계 수정안을 제시하고자 하였다.

## 2. 유동 해석

### 2.1 해석대상 및 설계 수정안

본 연구는 항우연의 30톤급 실물형 연소기 개발모델 중에서, 횡방향으로 균일하지 못한 열유속 분포를 보였던 LOx 매니폴드를 기본 해석 대상으로 하였다. 대상 연소기는 연소압 52.5 bar, 막냉각을 제외한 혼합비 2.77에서 운영되며, 연소실 직경은 380 mm, 산화제의 총 유량은 62.98 kg/s이다. Fig. 1에 보이는 바와 같이 실물형 연소기의 LOx 매니폴드는 유동의 균일성을 확보하기 위하여 수직(왼쪽) 및 수평분리막(오른쪽)을 가지고 있다. 기존의 설계안은 수직분리막에 3열로 36개씩 총 108개의 직경 8 mm 구멍들이 존재한다. 또한 수평분리막은 총 6개의 열을 가지는데, 모두 직경이 6 mm로 총 315개이다.

매니폴드의 중심에 설치되는 점화를 위한 분사기로 인하여, Fig. 1에 보이는 바와 같이 산화제 유입 포트가 중심이 아닌 외곽에 설치되어, 반경방향으로 속도 성분을 가지도록 설계되어 있으므로 유입 포트 주위의 영역에는 산화제가

설계값으로 공급되지 않을 가능성이 있다. 이에 따라 분리막들에 대한 설계 수정안으로 수직분리막과 수평분리막의 안쪽에 존재하는 구멍들에 대하여 직경을 5 mm로 감소시킴으로써 차압을 증가시켜 상대적으로 외곽 영역에 산화제가 더 공급될 수 있도록 하였다. 이러한 설계안에 대한 자세한 정보를 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Detailed Design Specifications of Distributors

H0 (기존설계)	
수직분리막	직경 8mm
수평분리막	직경 6mm (안쪽 3열) 직경 6mm (바깥쪽 3열)
H1 (설계수정안)	
수직분리막	직경 5mm
수평분리막	직경 6mm (안쪽 3열) 직경 5mm (바깥쪽 3열)

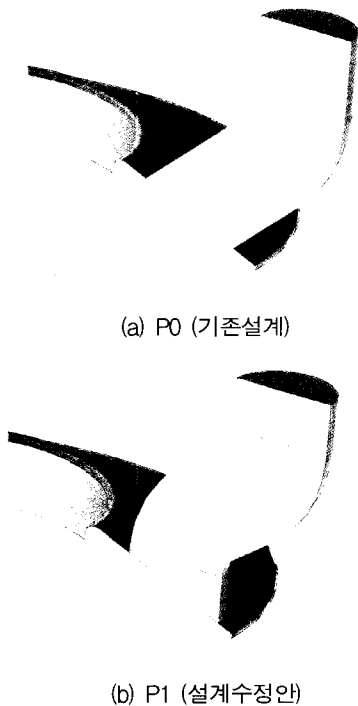
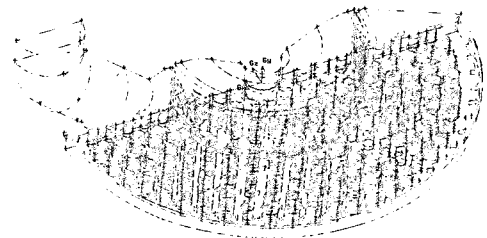
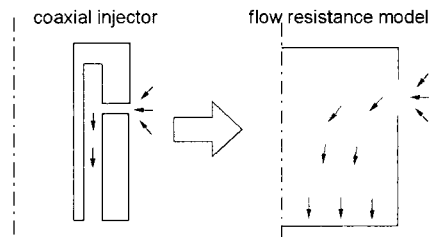


Fig. 2 Port Configurations of Oxidizer Inlet

이와 더불어 산화제 유입 포트의 형상에 대한 효과도 살펴보았다. 해석대상인 연소기에서는 전체적인 연소기의 높이를 줄이기 위하여 입구 포트가 경사진 형상을 가진다. 앞서 언급한대로 기존의 설계안에서는 Fig. 2(a)와 같이, 산화제가 중심방향으로 향하는 형상을 가지고 있기 때문에 매니폴드의 외곽 영역에 산화제가 적게 공급될 수 있는 가능성이 생기게 된다. 그러므로 이를 해소하고자 하는 방안의 하나로서, Fig. 2(b)와 같이 유동이 반경방향으로 속도를 최소화하도록 하는 설계안을 제시하였다. 최종적으로 포트와 구멍의 형상에 따라 4개(H0P0(초기 설계안), H0P1, H1P0, H1P1)의 매니폴드 형상을 고려하였다.



(a) LOx manifold



(b) Injector Modelling

Fig. 3 Configuration of LOx manifold and injector modelling using porous medium

2.2 해석 방법

유동해석은 상용 프로그램인 Fluent v 6.3[5]을 사용하여, standard  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용하였다. 작동 유체는 액체 산소(LOx)로서 약 65

bar, 90 K의 압력과 온도에서 운용되며,  $\rho=1153 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu=2.0659\text{e-}4 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 이다[6]. 본 연구에서는 유동 균일성 파악을 주목적으로 하였으므로, 매니폴드 벽면으로의 열전달을 고려하지 않았다.

먼저 Fig. 3(a)와 같이 수평 분리막 아래로 배치된 분사기 자체를 그대로 모델링하였으며, 분사기를 통한 차압은 Fig. 3(b)처럼 다공성 매질(porous medium) 가정을 통한 유동저항 모델을 적용하였다[5]. 그러나 분사기 개수 자체가 매우 많고 분리막 구멍의 개수 역시 모두 423개에 달하기 때문에 원주방향으로 180° 대칭계산을 하였음에도 불구하고 해석격자수를 충분히 구성하지 못했다. 따라서 1차 해석을 통해서 크게 변별력이 있는 결과를 얻지 못하였다.

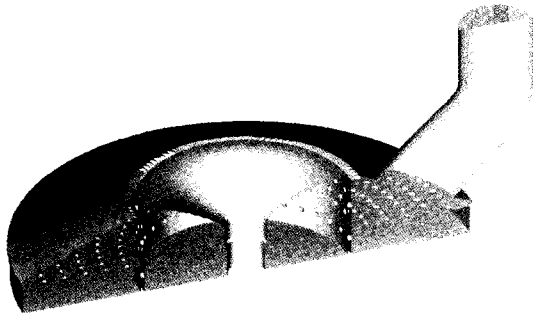


Fig. 4 Cut-off view of a configuration

분사기 자체가 직접적으로 유동특성을 결정짓는 연료 매니폴드 해석에서와는 달리, LOx 매니폴드의 경우에는 입구 포트와 수직/수평 분리막의 영향에 비해 분사기 배치는 2차적인 요인이라 판단하였다. 따라서 해석을 가능하게 하기 위해 분사기 자체를 제거하고, 매니폴드 아래 바닥면을 일정두께를 갖는 균일한 다공성 층으로 가정하였다. 이러한 접근 방법은 차압 조건이 동일한 무한히 작은 분사기가 매니폴드에 무수히 많이 배치된 경우라고 생각할 수 있다.

또한 현재 항우연의 지상연소시험장의 경우에는 연소기가 수직형이 아닌 수평형으로 설치된다. 이 때 매니폴드는 중력의 영향을 받을 수 있으므로 이러한 영향을 함께 평가하기 위해 원주

방향 전체를 해석영역으로 선정하였다. Fig. 4는 계산 영역을 반만 표시한 그림이다.

### 3. 결 과

#### 3.1 중력의 영향

항우연의 지상연소시험장 설비는 앞서 언급한 대로 연소기가 수평형으로 장착하게 되는데, 이러한 양상을 살펴보기 위해 먼저 기본 설계안을 포함한 4가지 형상에 대하여 중력의 영향을 살펴해보았다. 해석결과, 중력의 영향은 매우 미비하게 나타났는데, 이러한 결과는 본 해석대상의 경우 중력이 차압에 의해 구동되는 운동관성력에 비해 매우 작음을 의미한다. 따라서 실제로 실험형 연소기 시험에서 나타난 비균일 분포의 원인에서 수평장착에 의한 중력의 효과는 제외할 수 있을 것으로 여겨진다. 향후의 결과들은 모두 중력의 영향을 배제하였다.

#### 3.2 설계안에 따른 추진제 분포 비교

4가지 형상에 대하여 분사기면 출구에서의 단위면적당 추진제의 질량유량 분포를 통해, 추진제 분포를 비교하였다. Fig. 5를 통해 알 수 있듯이, 분사기 출구면에서의 유동분포는 산화제 입구 포트에 대하여 전체적으로 대칭적으로 나타나며, 수직분리막으로 나뉘는 바깥쪽 영역에서는 입구포트 부근( $\theta=0^\circ$ )이 가장 적고 반대쪽( $\theta=180^\circ$ )으로 갈수록 유량이 증가하는 형태를 보이고 있다. 이는 입구 포트에 의해 매니폴드의 외곽에서 중심으로의 속도 성분을 가지고 공급되는 연유로, 입구 포트의 반대쪽에 집중되는 것으로 파악된다. 비록 P1 형상이 중심 방향으로의 속도 성분을 감소시키고자 제안된 설계안이기는 하지만 입구 포트의 반대쪽에 유동이 집중되는 경향을 없애지는 못하는 것으로 보인다.

입구 포트의 영향을 Fig. 5에서 보다 자세히 살펴보면, 수직분리막 안쪽과 바깥쪽 영역 모두에서 포트의 형상 변화에 의한 영향은 분리막 구멍의 변화에 비하여 크지 않았으며 동일한 경향성이 유지됨을 확인할 수 있었다. 따라서 포트

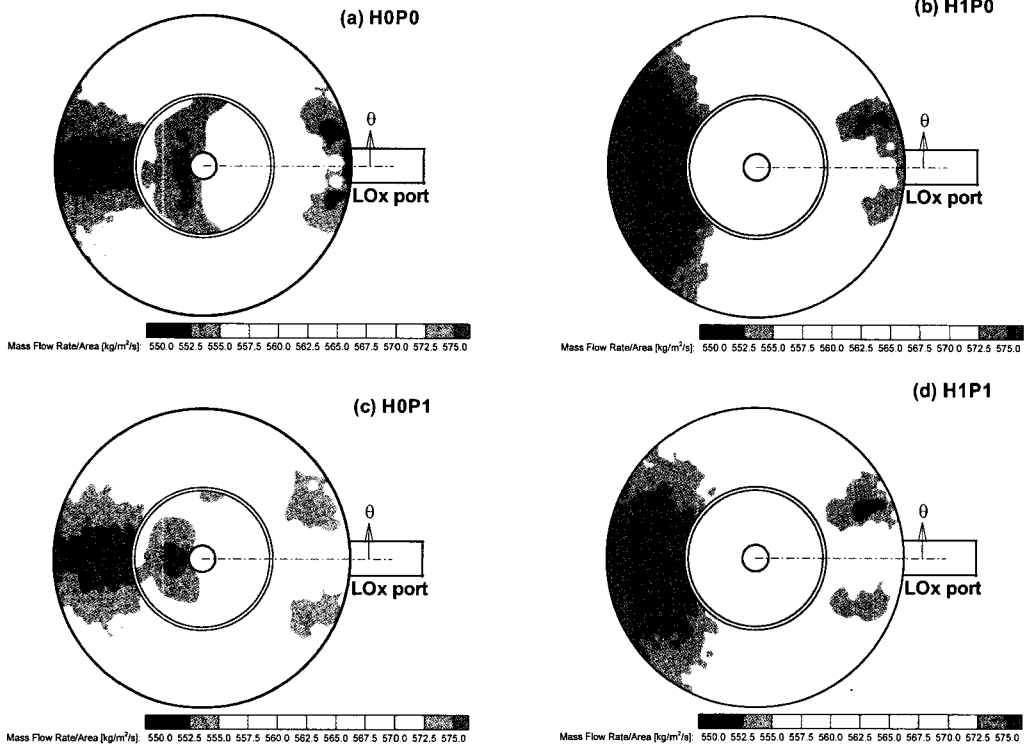


Fig. 5 Mass Flux Distributions at the Exit Plane of Injectors for Various Configurations

의 형상을 수정하는 설계수정안(P0→P1)은 배제되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 양상은 앞으로 설계될 차압 특성에서도 검증될 수 있었다.

이번에는 분리막의 설계변경 효과를 살펴보았다. Fig. 5에 제시된 면적당 질량유량 분포를 바탕으로 수직분리막의 안쪽 영역과 바깥쪽 영역에서의 단위면적당 질량유량 분포를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 5와 6에서 알 수 있듯이 수직분리막 구멍의 직경 감소(H0→H1)는 분리막 안쪽 영역에서 원주방향으로의 유동 균일성을 상당히 향상시키는 효과를 보여 주고 있다. 반면에 수평분리막 구멍의 직경 감소(H1)는 바깥쪽 영역에서는 약간의 효과는 있기는 하지만, 그 정도가 미미한 것을 알 수 있다. 따라서 수평분리막 구멍의 직경 감소를 통해서 원주방향으로 전체적인 유동 균일성의 향상을 꾀하기는 어렵다고 판단된다.

Table 2에서 각 설계안에 따른 매니폴드에 걸리는 차압을 살펴보았다. 구멍의 직경 감소(H0→H1)에 따라 약 0.3~0.4 bar의 차압 상승이 관찰된다. 하지만 이것보다는 입구 포트 형상의 변화에 의해 약 1.15~1.2 bar 정도의 차압이 증가되는 양상이 더 뚜렷하다. 이 결과로부터 유동의 균일성을 향상시킬 수 없는 입구 포트의 변화는 채택될 수 없음을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

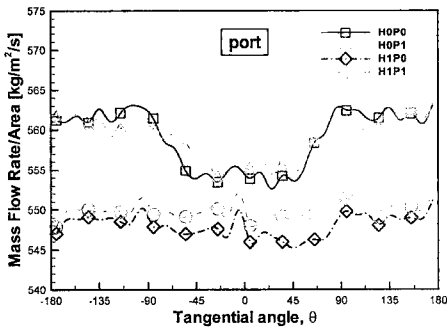
Table 5 Pressure Drop for Various Designs

형상	차압[bar]
H0P0(초기설계안)	11.30
H0P1	12.45
H1P0	11.66
H1P1	12.86

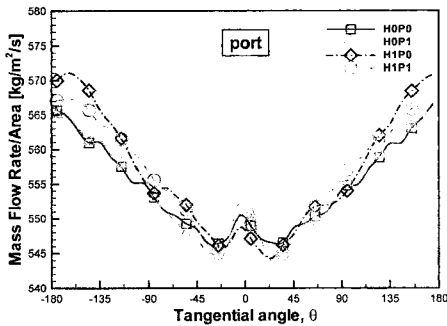
Figure 6(b)에 보이는 바와 같이 입구 포트 부

근( $\theta=0^\circ$ )에는 상대적으로 산화제가 작게 공급되고, 입구 포트의 반대쪽( $\theta=180^\circ$ )으로 갈수록 많이 공급되는 특성이 관찰되었다. 이러한 특성은 산화제 입구 포트가 중앙에 설치되지 않음으로 인하여 발생하는 문제인데, 실제 엔진시스템의 배치에 있어 gimbal 등의 문제로 인하여 외곽에 산화제 입구 포트를 두는 경우는 종종 발생한다 [7]. 따라서 산화제 입구 포트를 고정된 상태에서, 보다 바람직한 설계수정안은 수직분리막의 설계변경을 H1에서와 동일하게 가져가는 대신, 수평분리막의 경우에는 입구 포트 부근( $\theta=0^\circ$ )의 구멍 직경을 증가시키고 반대쪽( $\theta=180^\circ$ )으로 갈수록 직경을 감소시키는 것이 바깥쪽 영역의 원주방향 불균일성을 효과적으로 완화시킬 것으로 사료된다.

크기를 갖는 설계안이 좋을 것으로 판단된다. 먼저 이러한 설계안의 개연성을 확인하기 위하여, 기존 6열을 5열로 바꾸고, 수평분리막에 대하여 90도의 간격으로 입구포트 부근( $\theta=0^\circ$ )의 구멍 직경을 7mm, 반대쪽( $\theta=180^\circ$ )을 5mm, 나머지 아래위 영역을 6mm로 변경하는 안(H2P0)을 먼저 해석해 보았다. 그 결과, 분사균일성이 향상됨을 확인할 수 있었다.



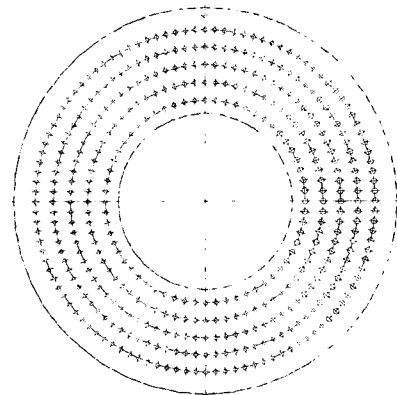
(a) Inner region of vertical distributor



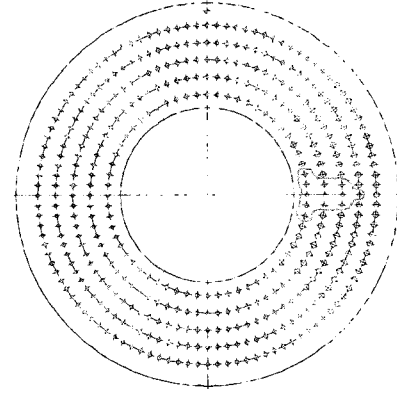
(b) Outer region of vertical distributor

Fig. 6 Tangential Mass Fluxes at the exit plane of injectors

횡방향으로의 균일성 향상을 위하여, 수평 분리막을 큰 영역으로 구분하여 세 가지 정도의



(a) H3P0

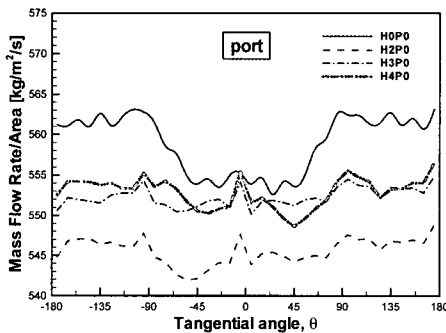


(b) H4P0

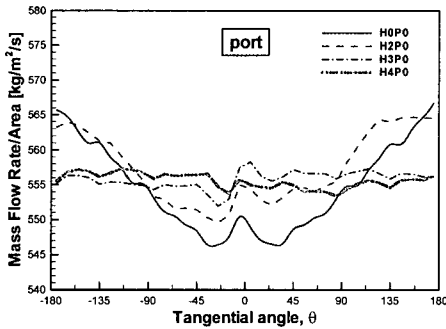
Fig. 7 Possible Designs of Horizontal Distributors

기존의 수평분리막을 설치한 경우, Fig. 5와 6의 결과와 같이 산화제 입구 포트의  $0^\circ$  부근과  $180^\circ$  부근의 유량편차가 약  $\pm 2.2\%$  정도 발생하는데 이를 차압으로 환산하면 약  $\pm 0.4$  bar 정도에 해당한다. 이를 보정하기 위해 전체 손실 차압이 약 0.5 bar로 발생하도록, 산화제 입구 포트로부터  $0^\circ$  부근은 6.0 mm,  $\pm 90^\circ$  부근은 4.1 mm,  $180^\circ$  부근에는 3.6 mm 구멍을 배치하였다.

자세한 수평분리막 구멍의 형상은 Fig. 7(a)와 같다. 이와 같은 조건(H3P0)에 대하여 유동해석을 수행하였고, 분사 균일성의 측면이 상당히 많이 개선되는 것을 파악할 수 있었다. 하지만 Fig. 8 (b)의  $\theta=0^\circ$  근처에서와 같이 입구 포트의 진행 방향으로 수평 분리막에 정사영되는 부분의 분사기들로 상당히 많은 유량이 집중되는 현상이 발견되었다.



(a) Inner region of vertical distributor



(b) Outer region of vertical distributor

Fig. 8 Tangential Mass Fluxes at the exit plane of injectors for various design configurations

최종적으로 Fig. 7(b)의 설계안(H4P0)과 같이, 입구 포트의 방향으로 정사영된 부분(폐곡선 참조)에 존재하는 구멍들의 직경을 4.1mm로 줄여 분포시키는 최종적인 설계안을 도출하여 이에 대한 유동 해석을 진행하였다. 그 결과 Fig. 8과 9에 보이는 바와 같이  $\pm 0.21\%$  정도의 표준편차를 가지는 균일한 유동 분포를 얻을 수 있었다.

이번에는 차압 특성을 파악해 Table 3에 정리하였다. 원래의 설계안에 비하여 수평 분리막 구

멍의 크기가 감소하였기 때문에 차압이 0.6 bar 증가하여 11.9 bar이다. 이 값은 Table 2에서 포트의 변화(P0→P1)에 의해 수반되는 차압보다는 작은 값이다. 실제로는 매니폴드와 분사기에 할당된 차압의 범위를 고려하여 설계 수정안이 결정되어야 하며, 이 값은 설계시 할당된 값인 12 bar의 범위 안에 들어가기 때문에 채택 가능하다고 하겠다. 따라서 이 설계안(H4P0)으로 확정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

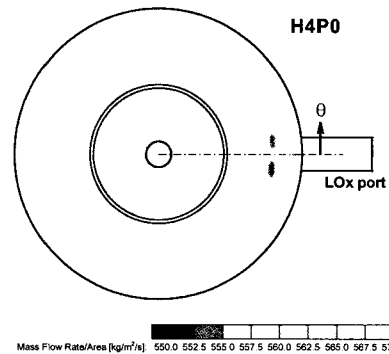


Fig. 9 Mass Flux Distributions at the exit plane of injectors(H4P0)

Table 6 Pressure Drop for Various Designs

형상	차압 [bar]
H0P0(초기설계안)	11.30
H1P0	11.66
H2P0	11.39
H3P0	11.78
H4P0(최종설계안)	11.90

최종설계안의 적용가능성을 Fig. 10에 도시된 바와 같이 실제 연소시험에서 계측된 열유속을 통해 검증하였다[3,4]. 그림에서 알 수 있듯이, 횡방향으로의 열유속 편차는 초기설계안(H0P0)의 경우 평균대비  $\pm 28.4\%$ 에 이르렀으나, 최종설계안(H4P0)에서는  $\pm 10.9\%$ 로 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이러한 시험 결과를 바탕으로, 본 연구에서의 일련의 개선 과정과 최종설계안의 타당성을 간접적으로 확인할 수 있었다.

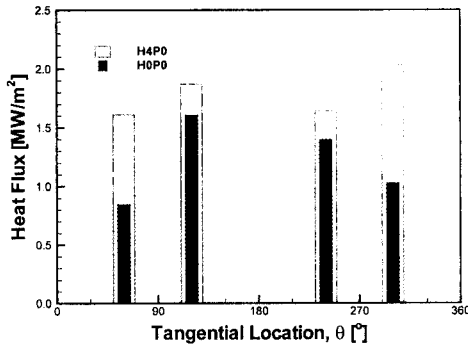


Fig. 10 Tangential Heat Fluxes from Hot-Firing Tests

#### 4. 결 론

실물형 연소기의 LOx 매니폴드에서 유동해석을 통하여 유동의 비균일성 문제를 검토하고 개선된 설계안을 제시하였다. 이를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 중력의 영향은 연소시험에서 나타난 열유속 불균일성의 원인이 될 수 없음을 파악하였다.
- 초기 설계안에서는 분사면에서의 전체적 유동분포는 입구 포트 근방( $\theta=0^\circ$ )에서 가장 적고 반대편( $\theta=180^\circ$ )으로 갈수록 현저히 증가한다.
- 산화제 유입 포트 형상 변화(P0→P1)는 유동 균일성 개선 효과가 미미하여 설계수정안에서 배제하였다.
- 분리막 구멍의 변화(H0→H1)를 통하여, 수직 분리막의 구멍 직경 감소는 안쪽 영역의 균일성을 향상시킴을 확인하였다.

○ 산화제 입구포트에서 반대쪽으로 가면서 구멍 직경에 차등을 두어 적용하는 기법을 통하여 분사 균일성을 확보할 수 있었다. 이 설계안은 최종적으로 연소시험을 통해 획득된 횡방향 열유속 분포를 바탕으로 간접적으로 타당성을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-propellant Rocket Engines," AIAA, Vol. 147 Progress in Astronautics & Aeronautics, 1992
2. 김학중, 변영환, 조원국, 설우석, 나양, "액체 로켓의 산화제 매니폴드 내 유동해석을 위한 분사공 모델링," 한국추진공학회지, 제8권, 2호, 2004, pp.1-9
3. 한영민, 김종규, 문일윤, 서성현, 최환석, 이수용, "실물형 액체로켓엔진 연소기 케로신 냉각 연소시험 성능결과," 한국추진공학회 추계학술대회, 2006
4. 양승호, 김희태, 강동혁, 안규복, 서성현, 한영민, 최환석, "실물형 재생냉각 액체로켓엔진 연소기(확대비3.5) 연소시험," 한국추진공학회 추계학술대회, 2007
5. Fluent User's Manual, Version 6
6. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
7. Sutton, G. P., *Rocket Propulsion Elements*, John Wiley & Sons, Inc., 1992