

## 연료 매니폴드내의 분리판 장착에 따른 분사균일성 비교

유덕근\* · 조원국\*\* · 설우석\*\*

### Comparison of Injection Uniformity as the Dividing Plate Installation in Fuel Manifold

Doc Koon Yoo\* · Won Kook Cho\*\* · Woo Seok Seol\*\*

#### ABSTRACT

The injection uniformity of the fuel manifold in a liquid rocket engine has been analyzed with dividing plates to improve the cooling performance at the face plate. Three dimensional computational fluid dynamics analysis has been performed to compare the injection uniformity for 5 candidate designs and has been verified to compare with the measured data for the optimal manifold design. For the case I and II, the coolant mass flux increases as the whole working fluid is enforced to flow under the dividing plate. The injection uniformity decreases due to the variation of mass flux at the end of dividing plate and the concentration of mass flow rate at the center of manifold. However case III and IV have uniform injection performance due to reduced mass flux concentration as the coolant can flow along both upper passage and lower passage of the dividing plate. Among the candidate designs, case IV is thought to be the optimal dividing plate with regard to cooling performance and injection uniformity.

#### 초 록

분사면 냉각성능을 개선하기 위한 액체로켓 엔진 연료 매니폴드내의 분리판 설치에 따른 분사균일성 변화를 관찰하였다. 3차원 전산유동해석으로 5개 후보 설계에 대하여 분사균일성을 비교하였으며 최적 설계에 대하여 측정결과와 비교함으로써 해석방법을 검증하였다. case I과 II는 매니폴드로 공급되는 유량 전체가 분리판 아래로만 흘러 유속이 크게 증가한다. 하지만 분리판이 끝나는 지점에서의 유속변화와 분사면 중심에서의 유량의 집중으로 분사균일성이 크게 저하된다. 이에 비해 분리판이 입구에서 떨어져 장착된 case III와 IV는 유동이 분리판 위, 아래로 흐를 수 있어 유량집중이 완화되므로 균일한 분사특성을 가진다. 비교한 5가지 설계 중 냉각성능과 분사균일성 측면에서 case IV가 최적으로 판단된다.

Key Words : Injection uniformity(분사균일성), Liquid rocket engine(액체로켓엔진), Fuel manifold (연료 매니폴드), Cooling performance(냉각성능)

#### 1. 서 론

로켓엔진 연소기의 매니폴드는 추진제를 연소실로 공급하는 장치이다. 이원 추진제를 적용하는 보편적인 액체엔진의 경우, 산화제와 연료가 각각 헤드로 공급되며 이들은 분사기를 통하여 혼합되어 추진제 혼합물의 형태로 연소기로 공

\* 과학기술연합대학원대학교(UST) 발사체시스템전공

\*\* 한국항공우주연구원 엔진그룹

연락처, E-mail: wsseol@kari.re.kr

급되어 연소된다. 액체로켓엔진의 연소효율을 높이기 위해서는 산화제와 연료를 설계한 유량만큼 분사면에 대하여 공간상으로 균일하게 공급해야 한다.[1] 또한 헤드를 구성하는 분사면은 연소실의 고온 가스에 노출되므로 충분한 냉각 성능을 가지도록 설계되어야 한다.

본 연구에서는 분사면 전체의 냉각 성능을 향상시키기 위한 방법으로 연료 매니폴드 내에 분리막을 설치하여 분사면 중심까지의 유속을 증가시키고, 유량을 중심부에 강제로 공급할 수 있는 매니폴드 형상의 성능을 비교하였다. 이를 위하여 3차원 유동해석을 통해 연료 매니폴드내의 분리막 설치에 따른 냉각 성능 예측과 분무균일성 변화를 관찰하였다. 또한 실험결과와 비교함으로써 해석결과에 대한 타당성을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 해석 및 실험방법

해석은 Fluent v5.5[2]를 사용하였으며 유동 영역은 전체 헤드형상 중 30° 각도에 해당하는 부분만을 대상으로 한다. 비압축성 유동을 가정하였으며 압력항 처리는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고 난류변수는 표준  $k-\epsilon$  난류모델을 이용하였다. 대류항의 경우, QUICK기법을 사용하였고 확산항의 경우, 중앙차분을 난류변수에 대해서는 UD기법을 적용하였다.

Figure 1은 해석에 사용된 연료 매니폴드의 형상을 보여준다. 헤드전체의 유량은 약 25.8

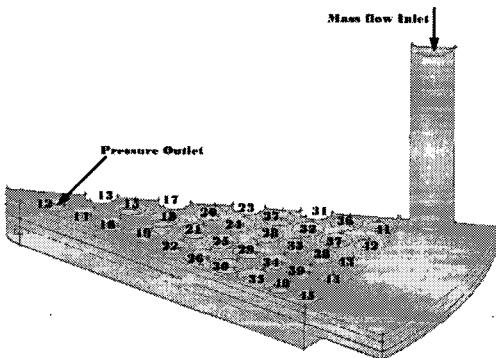


Fig 1. Shape of Fuel manifold model

kg/sec이고 실험에서의 결과와 비교하기 위해 동일한 값을 사용하였으며 해석에서의 Inlet mass flow는 2.05 kg/sec만큼 흘려보내 주었다. 분사공의 직경은 1.1 mm로 설정하였으며, 격자 크기 0.25 mm이 적용되어 해석에 필요한 만큼 충분히 조밀한 격자를 구성하였다. 해석에서의 유체는 물을 사용하였다.

Figure 2는 연료 매니폴드 내에 분리판이 설치된 형상을 보여준다. 분리판이 없는 기본형상(Standard), 유량을 중심으로 많이 흐르게 하는 U-턴 구조(Case I, II) 그리고 분리판을 유체입구에서 조금 떨어진 거리부터 설치하여 U-턴 구조와 함께 분리판 위로의 유동도 허용하는 형상(Case III, IV)으로 크게 3가지 볼 수 있다.

Figure 3은 실험장치를 나타내고 있다. 실제 분사기가 장착된 연료 매니폴드에서 분리판을 조건에 따라 장,탈착이 가능하다. 실험은 총 60초간 유량을 흘려보내주어 분사기별 유량을 측정하여 유량 분포도를 구하였다.

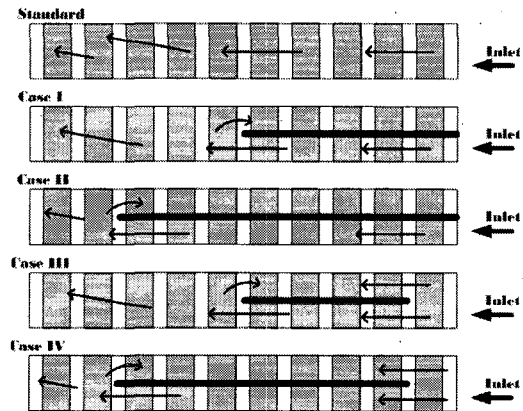


Fig 2. Schematic of dividing plate in fuel manifold

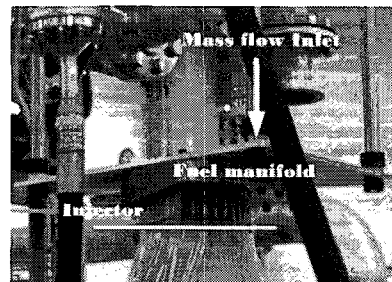


Fig 3. Experimental facility

## 2.2 해석결과 및 고찰

해석은 5가지 case에 대해 수행되었으며, 결과에 대한 신뢰성 확보를 위해서 해석과정에서 지정한 pressure outlet에서의 유량값 수렴정도를 살펴보았다. case IV의 5개의 pressure outlet에서의 유량값 수렴정도는 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 초기 계산과정에서는 유량이 일정하지 않아 그 차이가 크지만 계산이 진행됨에 따라서 점차 수렴이 됨을 보여준다.

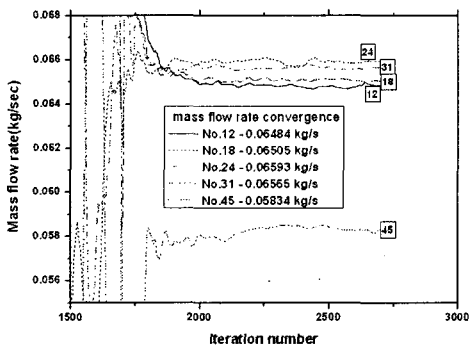


Fig 4. Convergence of mass flow rate on pressure outlet

Figure 5는 반경위치에 따른 분사기들의 평균 유량분포를 나타낸 해석결과이다. 기본 형상, 즉 분리판이 없는 연료 매니폴드에서는 유량분포는 비교적 균일한 상태를 가지는 것을 볼 수 있다. Case I과 II는 모든 유량이 동일한 경로를 지난 후 분리판이 끝난 지점에서 U-턴하기 때문에 U-턴 하는 지점에서 분사공을 통과하는 유량의 불

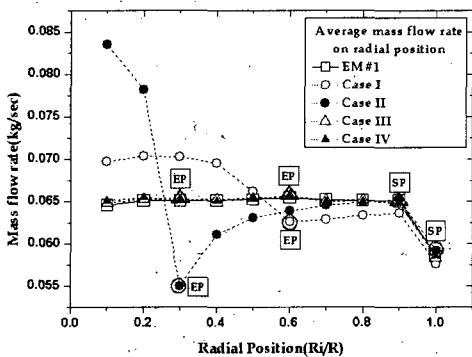


Fig 5. Mass flow rate distribution of injectors on the radial position.

균일이 심해진다. 그 정도는 분리판의 길이가 길어지는 case II에서 더 심해진다. 이에 비해 case III와 IV의 경우는 유동의 불균일성이 거의 없음을 확인할 수 있다. 이것은 기본형상에서의 유량 균일성과 비교해보아도 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

Case III와 IV에서의 유량의 균일성이 기본형상(Standard)과 비교하여 차이가 없는 이유는 분리판의 설치가 연료 매니폴드 입구에서 일정거리 떨어져 설치되어 있어 분리판 상하로 자유로이 유동이 흐를 수 있기 때문이다.

Figure 6은 각각의 조건에 대한 유량 균일성을 정규표준편차를 사용하여 정량적으로 나타내었다. 위의 결과에서 볼 수 있듯이 case I과 II의 경우 편차가 큰 것을 알 수 있다. 하지만 분리판 양쪽으로 흐름이 자유로운 Case III, IV는 전체 분사기에 대해 유량이 균일하게 공급됨을 알 수 있다.

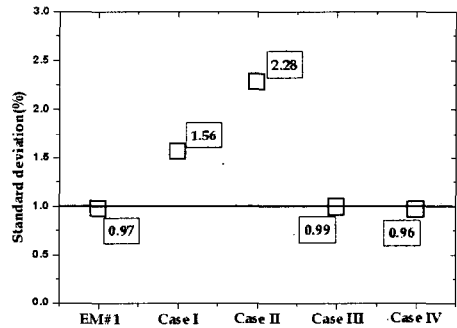


Fig 6. Normal standard deviation values

Figure 7은 case별 냉각유체의 속도크기를 나타낸다. 측정위치는 분리판 아래쪽의 단면을 잘라 ( $Y=6\text{mm}$ ) 표시하였다. 기본형상의 경우 거의 유속변화가 없는 것을 알 수 있다. 하지만 case I의 경우 분리판이 냉각유체의 입구에서부터 설치되어 있어 한방향, 즉 분리판에 의해 나누어진 연료 매니폴드로 전 유량이 빠른 속도로 이동한다. 특히 분리판이 끝나는 지점을 전후로 해서 유속변화가 심하며 이 부근에서의 분무균일성도 저하됨을 알 수 있다. 이러한 정도는 case II에서 분리판의 길이가 더 길어졌을 때 더 심해진다. 반경방향에서의 유속변화가 더 커지며 분리판이

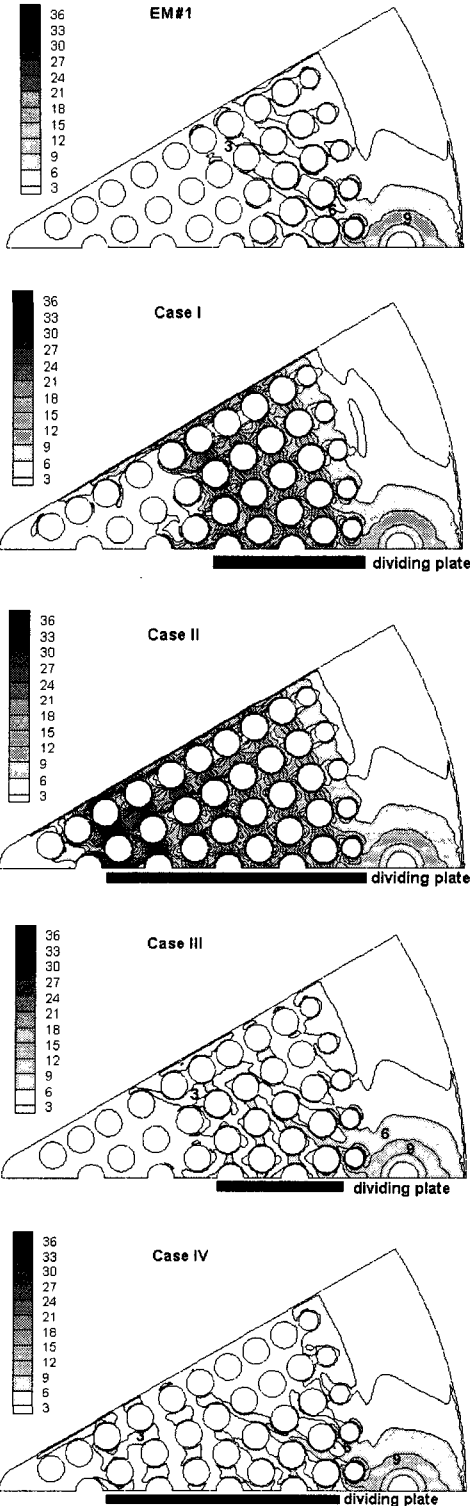


Fig 7. Velocity magnitude distribution at Y=6 mm

끝나는 부근에서 분무균일성도 case I에 비해 더 심하게 저하된다.

Case III과 IV의 경우는 분리판의 설치된 곳은 유속이 증가하여 분리판의 끝나는 지점에서의 유속변화가 생긴다. 하지만 분리판이 입구에서 일정거리 떨어져 설치되어 있기 때문에 유량이 집중되지 않아 분리판에 의해 생기는 유속변화는 크지 않다. 또한 분리판 상단으로 자유로이 흐름이 가능하기 때문에 분무균일성도 일정함을 보여준다.

본 연구에서는 냉각성능 해석은 수행되지 않았다. 분리판의 크기가 약간 다르긴 하지만 Jet A-1 유체를 사용하여 냉각성능을 해석한 이전 결과[3]에 미루어 볼 때 case II가 가장 좋을 것으로 판단된다. 하지만 case II의 경우는 분무균일성이 가장 떨어지는 결과를 보여주므로 실제 적용에는 부적합하다. 해석결과를 종합해볼 때 기본형상에 비해 냉각성능이 우수하고 분무균일성에서도 뛰어난 연료 매니폴드 구조는 case IV라 할 수 있다.

Figure 8은 반경방향으로 각각의 case별 속도 크기를 나타낸 그림이다. 기본형상의 경우 입구에서의 속도가 유지되지 못하고 점차 줄어든다. 기본형상과 분무균일성면에서 동일한 성능을 가지는 case III과 IV의 경우는 입구로 들어온 유체의 속도가 plate 설치된 곳까지 유지된다.

또한 plate 끝단에서의 유속변화가 그다지 심하지 않음을 확인할 수 있다. 이에 반해 case I과 II의 경우는 plate를 지남에 따라 입구에서의

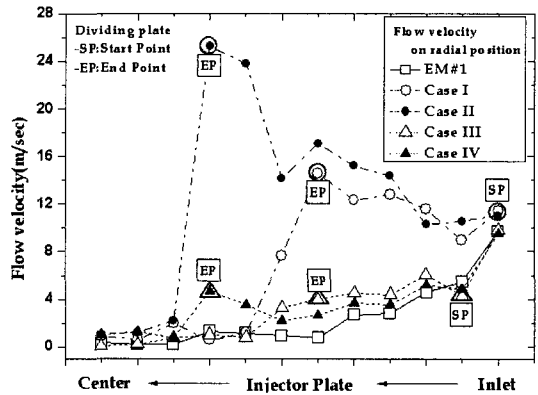


Fig 8. Velocity magnitude of cases on radial position

유속보다 훨씬 더 큰 값을 가지며, 그에 따라 plate 끝단에서의 유속변화 역시 매우 큰 값을 나타낸다.

냉각성능뿐만 아니라 분사균일성면에서도 뛰어난 case IV의 해석결과와 실험결과를 비교해 보았다. Fig. 9에서와 같이 해석과 실험결과 모두 평균유량 대비  $\pm 2\%$ 의 오차범위 내에서 균일한 분사특성을 가진다.

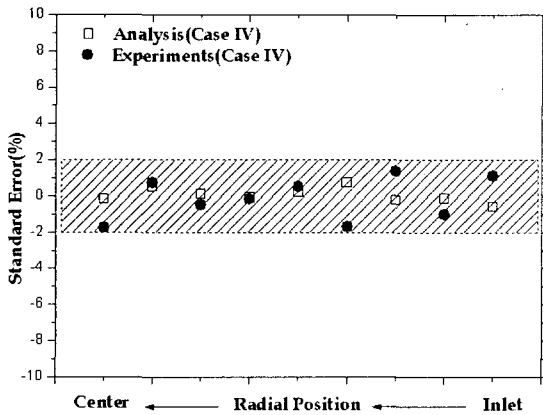


Fig 9. Deviation value of numerical calculation and experiments on radial position

### 3. 결 론

액체로켓 연소기 분사면의 냉각성능 향상을 위한 매니폴드내의 분리판 장착에 따른 분사균일성에 대한 해석을 수행하고 최적 설계를 선정하였다. 해석 방법은 측정결과와 비교함으로써 검증은 마쳤다. Case I과 II의 경우는 분리판이 유동입구에 바로 장착되어 유량 전체가 분리판

아래로만 흐르게 된다. 이는 유체의 유속을 크게 증가시켜 냉각성능을 향상시키지만 분리판이 끝나는 지점에서 극심한 유속변화와 중심으로의 유량 집중으로 분사균일성을 저해한다. Case III와 IV의 경우, 분리판이 유동입구로부터 떨어져 있어 유체가 분리판 상, 하로 자유로이 흐른다. 분리판의 설치로 분리판 아래의 유속은 증가하나 case I과 II와는 달리 분리판 위로의 흐름이 가능하여 분리판이 끝나는 지점에서 유속변화가 작으며 이는 분사 균일성 측면에서 유리하다. Case IV는 냉각성능과 분사균일성을 고려할 때 최적 형상으로 판단되며, 이러한 분사특성은 실험을 통해서 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 공공기술연구회에서 시행한 기본연구사업인 “로켓 엔진 연소기 고성능화 기술개발사업” 연구결과의 일부이며, 제작 및 실험에 도움을 주신 (주)비츠로테크와 한국항공우주연구원 연소기그룹의 강동혁님께 감사의 마음을 전합니다.

### 참 고 문 헌

1. 김학중, 변영환, 조원국, 설우석, 나양, 한국추진공학회지, Vol.8, No.2, pp.1-9, 2004.
2. Fluent v.5.5 User's manual, 2000.
3. 조원국, 설우석, “로켓엔진 분사면의 냉각성능 향상”, 한국추진공학회지, 제9권, 제3호, pp.92-100, 2005. 9