KSR-III 매니폴드의 추진제 분사균일성 해석

조원국*

Analysis on Propellant Injection Uniformity of KSR-III Manifold

Won-Kook Cho*

Abstract

A numerical analysis on the uniformity of propellant injection velocity of KSR-III has been carried out to give design improvements. Injector holes were approximated as porous media with the same pressure drop. The injection velocity is higher at the opposite side of the inlet for both LOX and fuel due to the static pressure rise in the stagnation region. Flow passages at the vertical circular plate in the LOX dome increase the uniformity of LOX injection. Little change was observed in the injection uniformity and pressure drop for the slanted LOX passage. Also provided were the O/F ratio distributions from the oxidizer/fuel injection velocity analysis.

초 록

3단형 과학로켓의 주엔진 추진제의 분사균일성에 대하여 수치해석을 수행하고 설계 개선안을 도출하였다. 분사기 유로는 동일한 압력강하를 가지는 다공성 매질로 처리하였다. 산화제와 연료 모두 공급 유로의 반대쪽에서 분사속도가 높은 것으로 예측되었으며 이는 유동정체에 따른 정압 상승에 기인한다. 산화제 매니폴드 내부의 수직분리판에 유로를 구성함으로써 매니폴드 중심과 외곽에서의 분사균일성을 향상시킬 수 있었다. 산화제 공급유로가 경사를 가지더라도 분사균일성과 압력손실에 미치는 영향은 거의 없었다. 또한 산화제/연료에 대한 분사속도로부터 혼합비의 분포를 예측하였다.

키워드 : 추진제 매니폴드(propellant manifold), 분사 균일성(injection uniformity), 수치해석(numerical analysis), fluent, 다공성 매질(porous media)

1. 서 론

연소실에서의 효율적인 연소를 위해서는 연료와 산화제를 연소실 공간에 균일하게 분사하는 것이 필수적이다[1]. 이에 대해서 기존의 설계가 타당한 수준인지 유동해석을 통하여 평가하고 또한 개선 방향을 제시하고자 한다. 해석에는 유동해석용 상용 프로그램인 Fluent[2]를 사용하였으며 분사기의 오리피스는 다공성 매질로 모사하였다[3]. 본 해석은 단순화된 형태의 오리피스 배열에 대한

* 로켓엔진연구그룹/ wkcho@kari.re.kr

해석을 포함하고 있으며 이를 통하여 다공성 매질을 통과하는 유체의 유동저항을 평가하였다. 또한 추진제의 분사속도 분포로부터 예측한 혼합비 분포가 제시될 것이다.

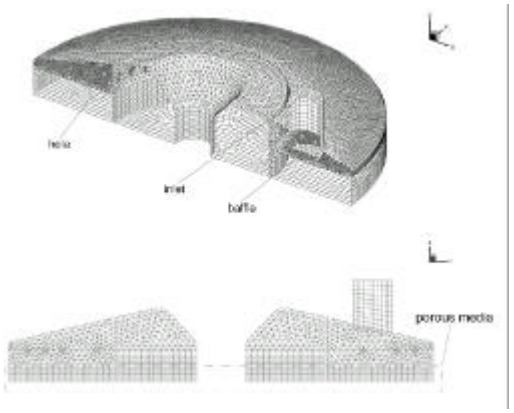

그림 1. 산화제 믹싱헤드의 격자계.

2. 해석방법

그림 1은 해석에 사용된 격자계로 개선안에 대한 것이며 입구 유로 바로 아래면의 칸막이(baffle)는 분사기 오리피스로의 직접적인 유입을 막는 기능을 하고 있다. 그림 1에서 점선으로 둘러싸인 부분이 오리피스를 모사하는 부분으로 다공성 매질을 나타낸다.

유동해석은 정상상태의 3차원 비압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 식을 지배방정식으로 하며 입구의 유속과 지름을 기준으로 한 레이놀즈 수가 5×10^6이므로 난류 유동으로 볼 수 있고 이에 대해서 $k-\varepsilon$ 난류 모형을 적용하였다. 대류항의 차분에는 1차 정확도의 상류도식을 적용하였는데, 이 기법은 오류확산이 커서 충분한 격자를 이용하지 않을 경우 수치해의 정확성이 떨어질 수 있으므로 주의를 요한다. 본 해석의 대상은 기하학적으로 매우 복잡하며 또한 오리피스를 다공성 매질로 근사하고 있어 수렴성이 그다지 좋지 못하며 이로 인하여 수렴성이 좋은 상류도식을 적용하게 되었다. 그러나 3.5절 이후의 결과는 2차 정확도의 QUICK 기법[4]을 적용한 결과이다. 다공성 매질에서의 유동장에 대한 수치해의 수렴성이 나빠지는 것은 수치해법 상 여기에서의 압력강하가 운동량의 이산화 방정식에 생성항으로 처리되며 따라서 이산화 방정식의 대각선 요소의 우월성이 작아지기 때문이다. 이에 대해서 특별히 효과적인 방법은 아직은 없는 실정이다. 또한 다공성 매질에서는 난류의 생성과 소산에 대한 특별한 처리가 없는 근사적인 방법이 적용되었다.

작동유체는 산화제로서 액체 산소이며 입구의 유동 조건은 다음의 주 엔진 연소실의 운전조건과 물성치로부터 결정할 수 있고 분사기 출구에서는 연소실 압력이 유지되므로 일정한 압력을 부여하였다.

산화제 공급량 : 37.5 kg/s
밀 도 : 1140 kg/m^3
점 성 계 수 : 0.0002 $pa\cdot s$
입구관의 지름 : 31.8 mm
입 구 유 속 : 28.85 m/s

앞서 기술하였듯이 분사기 오리피스는 다공성 매질로 모사되므로 이 부분에서의 압력강하는 속도의 크기에 비례하는 점성손실 항과 속도의 제곱에 비례하는 관성손실 항으로 이루어진다. 본 해석은 이 두 항 중 후자만을 고려하고 있는데 Fluent 설명서는 작은 지름을 가지는 관의 다발을 다공성 매질로 근사할 경우 이러한 접근이 적합한 것으로 기술하고 있다. 이에 의하면 압력 구배는 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^{3} C_{2ij}\left(\frac{1}{2}\rho v_j |v_j| v_j\right) \qquad (1)$$

다공성 매질을 통과하는 평균 유속과 압력강하로부터 계수 C_{2ij}를 구할 수 있으며 압력강하는 수치해석으로 구할 수 있다.

오리피스 입구의 평균 유속 (d=4mm): 6.1 m/s
오리피스 출구의 평균 유속 (d=2mm): 24 m/s

다공성 매질의 깊이: 19 mm
연소실 분사면의 평균 유속: 0.24 m/s

다공성 매질의 유동저항 계수는 식(1)에 다음에 제시한 다공성 매질의 깊이, 평균 유속 및 압력강하 값을 적용하여 구할 수 있다. 이와 관련된 유동해석에 관해서는 다음절에서 자세히 기술하였으며 본 절에서는 단순히 결과만 제시한다.

$$\Delta p_{CFD} = 3.2\times10^{5}\ pa \rightarrow C_{2ij} = 5.1\times10^{5}$$

본 연구에서 사용한 다공성 매질은 오리피스를 모사한 것이므로 오리피스의 방향에 따라 유동 방향이 결정된다. 다공성 매질을 통과하는 유동 역시 주유동 방향이 아닌 다른 방향으로의 유동은 억제되어야 하는데 이를 위하여 다공성 매질의 유동저항 계수 C_{2ij}를 유동이 있는 방향보다 10^{2}~10^{3} 배 정도 크게 줄 것이 권장되고 있으며 (Fluent user's guide[2] 참조) 본 해석에서는 이를 수용하여 오리피스 유로 방향과 수직인 나머지 두 방향에 대한 유동의 저항을 주유동 방향의 10^{2} 배로 주었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 다공성 매질에서의 유동 저항

오리피스는 4mm에서 2mm로 지름의 변화를 가지며 각각 7mm, 12mm의 길이로 구성된다. 여기에서의 압력강하를 예측하기 위하여 단순화된 3차원 오리피스 모형 (그림 2)에 대한 해석을 수행하여 면적 변화에 대한 압력의 변화를 평가하였다.

그림 3은 각 위치의 오리피스를 통과하는 유량과 다공성 매질로 모사하였을 경우에 대한 같은 위치를 통과하는 유량을 나타낸다. x 축의 수는 입구에서 가까운 쪽에서부터 오리피스의 순서를 나타내며 다공성 매질의 경우는 전체 출구 면적을 6 등분하였을 때 입구에서 가까운 쪽부터 순서를 나타낸다. 유동해석을 통한 압력강하 값으로부터 다공성 매질의 유동저항을 준 것이 오리피스를 직접 모사한 경우와 유사한 결과를 주는 것을 알 수 있다. 같은 입구유량을 부여하였음에도 전체적인 유량이 미소한 차이를 보이는 것은 유동해석에서의 오차는 아니며 유량을 계산하는 기능에 오차가 있는 것으로 추정된다. 이 해석을 통해서 작은 지름의 오리피스 다발을 다공성 매질로 취급하여 구한 유동장의 정량적인 정확성을 확인하였다.

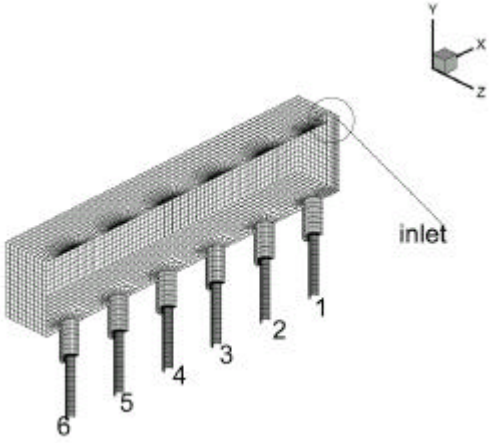

그림 2. 분사기 오리피스에서의 유동해석을 위한 격자계.

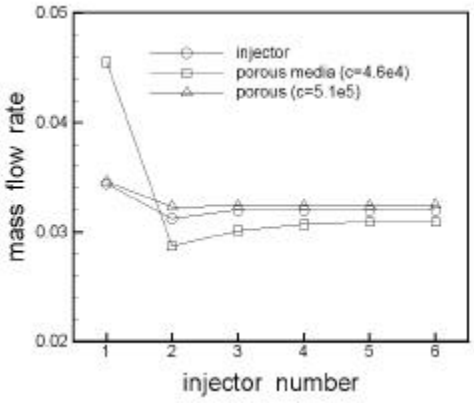

그림 3. 오리피스와 다공성 매질 모형에서의 유량분포.

3.2 산화제 매니폴드에서의 분사균일성

그림 4는 연소실 분사면에서의 산화제 공급량 분포를 도시하는 것으로 각각 수정 전과 이후의 결과를 나타낸다. 분사속도는 전반적으로 균일한 분포를 가지는데 이는 오리피스에서의 압력강하가 매니폴드 내부형상에 의한 압력 변동에 비하여 월등히 크기 때문으로 풀이된다. 만일 오리피스 유로에서 극단적으로 큰 압력강하를 가진다면 믹싱헤드의 형상과 관계없이 일정한 분사 분포를 보일 것이다. 하지만 이를 위해서는 추진제 공급을 위해서 지나치게 높은 공급압력이 필요하게 되므로 이는 현실적인 방안이 될 수 없다.

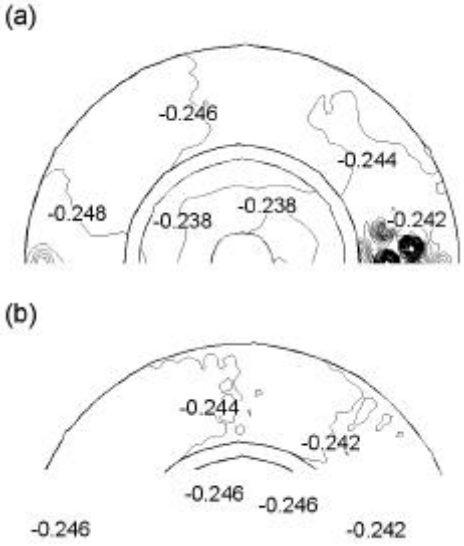

그림 4. 연소실 분사면에서의 분사속도 분포;
a) 설계 원안, b) 수정안.

설계 수정 전/ 후의 가장 큰 차이는 분사면 동심원 안팎에서의 분사속도인데 그 이유는 분사면 중심부로의 유체 이동 경로와 바깥쪽 동심원상의 분사면으로 흐르는 유체의 경로가 다르기 때문이다. 부연하면 전자의 경우 수직 측벽의 타원형 유로를 통과하는 반면 후자는 고리 모양의 수평 원판에 나있는 유로를 통과하기 때문이다. 이러한 불균일의 직접적인 원인은 전체 측벽에 대한 유로 면적비와 수평 원판에서의 유로 면적비가 조화를 이루지 못하기 때문이다. 이를 해소하기 위하여 수평 원판의 구멍 지름을 6mm로 변경하였고 해석 결과 균일성 향상에 효과가 있음을 확인하였다. 하지만 이를 설계에 반영하기 위해서는 이에 의한 압력강하의 증가를 염두에 두어야 할 것이다. 본 결과에 의하면 수정전 입구의 압력은 약 4.1 기압이던 것이 수정후 약 4.3 기압으로 상승한 것으로 밝혀져 설계 수정에 의한 산화제의 공급 압력 상승분은 0.2 기압 정도일 것으로 추정된다.

표 1. 다공성 매질 내의 유동저항 변화와 믹싱헤드 수정에 의한 분사 속도 범위.

	산화제 분사 속도 범위 (m/ s)
C_{2ij}	5.1×10^{5}
설계 원안	0.238~0.248
설계 수정안	0.242~0.246

다공성 매질에서의 유동 저항변화와 설계 수정에 의한 분사 균일성을 표 1에 정리하였다. 여기에서 제시하는 분사 균일성은 표준편차와 같이 수학적으로 잘 정의된 값은 아니며 그림으로부터 육안으로 확인한 분사 속도의 범위를 나타낸다. 표에 나타난 값은 입구 바로 아래 오리피스에서의 국부적인 최대값 등은 고려하지 않은 값으로 전체적인 분포에 대한 정보를 나타내는 것이다.

여기에 제시한 결과로부터 수평원판의 구멍 지름을 기존의 설계안을 유지하였을 경우에 대한 산화제의 분사 균일성을 평가할 수 있으며 또한 이를 바탕으로 개선안을 마련할 수 있다. 다만 본 해석은 믹싱헤드와 오리피스에 대한 유동해석을 동시에 수행하지 못한 한계를 가지고 있으므로 오리피스를 다공성 매질로 모사함으로써 발생할 수 있는 오차를 감안해야 할 것이다.

믹싱헤드 내부의 공간은 매우 복잡한 모양을 하고 있어 이 곳에서의 유동장을 관찰하는 것이 쉽지 않은데 여기에서는 대략적인 유동 형태를 파악

하고자 유체 입자의 궤적을 그림 5에 도시하였다. 입구에서 유입된 유체 입자들이 믹싱헤드 내부 공간을 지나 수평/수직 판에 있는 구멍을 통과하여 오리피스로 빠져나가는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 구체적인 분사 성능은 알 수 없지만 전체적인 유체의 흐름을 파악할 수 있을 것이다.

그림 5. 산화제 믹싱헤드 내부에서의 유체 입자 궤적선.

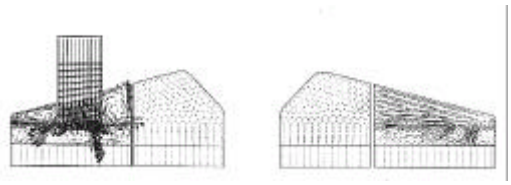

그림 6. 대칭면에서의 속도벡터.

그림 6은 각각 분사기 믹싱헤드의 대칭면에서의 속도분포를 나타내었다. 속도벡터는 입구에서 유입된 유체가 수평원판의 구멍을 통과하여 분사면 중심부 및 바깥쪽 동심원 형태로 분포된 오리피스로 이동하는 특징을 보여주고 있다.

3.3 연료 분사 균일성

입구의 유동 조건은 연소실의 운전조건과 RP-1의 물성치로부터 결정하였다. 분사기 출구에서의 압력은 연소실 압력이 일정하게 유지되는 것으로 가정하였으며 비압축성 유동의 경우 압력의 절대값은 의미를 가지지 않으므로 여기에서의 압력을 0으로 주었다.

연료 공급량 : 16.2 kg/s
밀 도 : 800 kg/m^3
점 성 계 수 : 0.002 $pa \cdot s$
입구관의 지름 : 41.2 mm
입 구 유 속 : 15.2 m/s

믹싱헤드 내부에서의 압력분포를 그림 7에 나타내었다. 고리 모양의 바깥쪽 굵은 관과 믹싱헤드의 중심부가 그림 7의 p1~p12로 표시한 가는 관으로 연결되며 전체 압력강하의 대부분은 이곳과 다공성 매질로 모사된 분사기에서 발생한다. 따라서 전체적인 압력분포에서는 우리가 원하는 특성을 알기 어려우므로 그림에서 압력의 레벨을 분사기 윗면에서의 압력분포를 잘 나타낼 수 있도록 표시하였다. 연결관 p1~p12에 인접한 부분에서 낮은 압력을 가지며 이러한 영역이 띠모양으로 믹싱헤드의 바깥쪽에 위치한다. 믹싱헤드 내부에서는 입구에서 먼쪽에서 약간 높은 압력 분포를 유지한다.

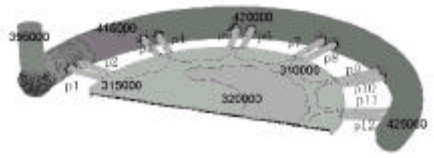

그림 7. 연료 매니폴드 표면의 정압분포.

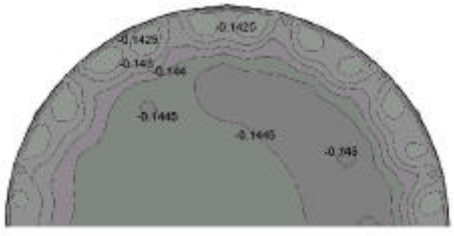

그림 8. 연료분사 속도분포.

그림 8은 분사면에서의 유출속도를 나타내는 것으로 압력분포와 유사한 특징을 가진다. 연료 주입 유로에서 먼 위치에 높은 분사속도를 가지는 것은 입구부분에서 유동의 정체로 높은 압력(그림 7 참조)이 형성되는 현상에 기인한다. 입구 유로와의 연결부에서의 압력손실은 점차 완만하게 회복되어 입구에서 가장 먼 180° 위치에서 가장 높은 압력을 가지며 이로 인하여 입구 반대편위치에서의 분사속도가 가장 큰 값을 가진다. 이에 대한 개선안으로 연결관의 굵기를 다르게 하는 방법이 적용될 수 있을 것이다. 하지만 해석결과 분사균일성이 만족할 만한 수준인 것으로 판단하고 더 이상의 설계 변경은 이루어지지 않았다.

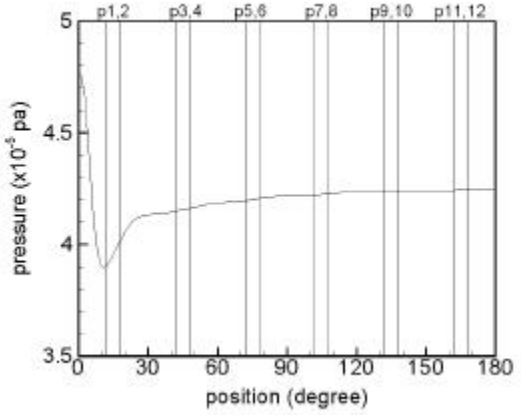

그림 9. 연료공급 링에서의 압력분포.

그림 9는 연료공급 매니폴드 주위를 감싸는 도넛 모양의 관에서의 압력분포를 나타낸다. 이는 그림 7과 같은 것이지만 위치에 따라서 압력이 변화하는 정도를 알기쉽게 나타낸다. 그림에 표시한 p1,2 ...은 그림 7의 연결 위치를 나타내며 입구를 기준으로 하여 각도로 나타내었다. 입구 직후에 급격한 압력손실이 발생하며 약 20°이후에 서서히 압력이 회복되어 180°에서 가장 높은 값을 가진다.

3.4 산화제 매니폴드 설계변경

초기 설계안에서 약간의 수정이 진행되었으며 본 절에서는 이에 대한 분사균일성 해석을 다루고자 한다. 그림 10에 산화제 매니폴드의 수정된 모습을 나타내었다. 우선 입구의 지름이 59.5mm로 확장되었다. 또한 매니폴드의 내부와 외부를 분리하는 수직벽의 아래부분에 반타원 모양의 유로를 형성하여 분사균일성 증진을 꾀하였다. 이는 용접성을 고려하여 진원모양으로 변경될 것이다. 그러나 유량분배에 미치는 영향은 크게 변화하지 않을 것이며 여기에서는 초기 변경 모습에 대한 결과만을 제시한다. 또한 수평판의 효과를 확인하기 위하여 이를 제거한 결과를 구하였다. 본 절부터는 그간의 설계변경을 반영하여 앞서의 것들과는 다소 다른 유동조건을 적용하였다. 즉, 산화제 유량 $\dot{m}$=50.84 kg/ s에서의 분사기 압력손실 Δp=8.467 atm (=124.4 psi)을 사용하였다. 표 2에 분사기에서의 압력 손실에 대하여 정리하였다. 설계조건에서의 유동조건을 생각하면, 산화제 유량 $\dot{m}$=40.9 kg/ s이며 이때 압력손실은 Δp=5.46 atm (=80.2 psi)이 된다. 다공성 매질층이 20mm일 때 식 (1)의 유동손실 계수는 7.12×10^5이다.

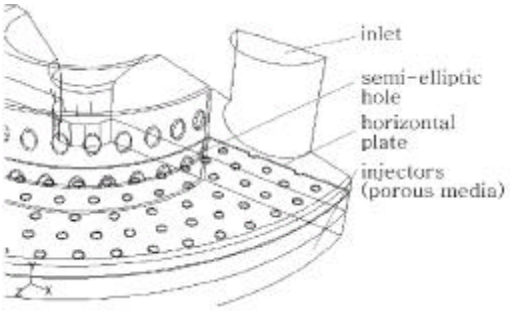

그림 10. 설계변경된 산화제 매니폴드 개략도.

그림 11은 위에 설명한 경우에 대한 결과를 나타낸다. 위에서부터 차례로, 입구가 확장된 설계안, 반타원 유로 추가 설계, 수평판을 제거한 경우에 대한 산화제 분사속도를 나타낸다. 단, 이 속도는 분사면적에 대하여 평균적인 것이므로 실제 좁은 유로를 가지는 분사기에서의 속도와 비교할 수는 없다. 따라서 여기에서는 분사속도의 분포만을 고려한다.

반타원 유로를 개설함으로써 매니폴드 안쪽과 바깥쪽의 분사속도 차이가 줄어든다. 설계 원안에서 매니폴드의 안쪽에 높게 형성되던 유속이 평균값에 가까워진 것을 확인할 수 있다. 그러나 그 정량적인 차이는 크지 않으므로 설계 원안 역시 균일성 측면에서는 우수하다고 할 수 있다. 반면에 수평판을 제거한 경우는 위의 두 경우에 비하여 균일성이 현저하게 나빠진다.

표 2. 분사기 요소에서의 압력 손실.

$\dot{m}$ kg/s	Δp atm (psi)	비고
50.84	8.467 (124.4)	수류 실험
40.9	5.480 (80.53)	외삽한 결과

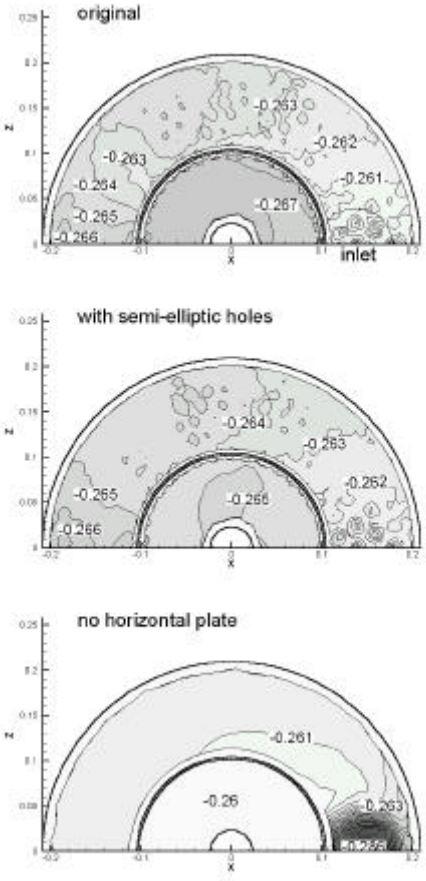

그림 11. 분사면에서의 산화제 분사속도 분포.

세 경우의 결과로 판단하여 수평판의 존재는 필수적이며 반타원 역시 균일성에 일조하므로 수평판과 반타원 (또는 진원)을 구성한 형태를 개선된 설계안으로 결론 내린다. 특히 반타원의 역할은 그림 12에서 알 수 있다. 이 그림은 반타원 높이 1/2의 수평한 단면에서 속도벡터를 나타낸 것이다. 반타원형 유로를 통하여 유체의 흐름이 있는 것을 알 수 있다. $0<x<0.1$ 에서는 유체가 매니폴드 안에서 밖으로 흐르며 $-0.1<x<0$에서는 반대 현상을 보인다. 이는 분사속도가 작은 입구쪽에서는 분사속도를 증가시키고 반대로 분사속도가 큰 입구 반대쪽에서는 감소시키는 작용을 한다. 결론적으로 요약하면, 수직벽 아래쪽에 유로를 구성한다면 균일성 확보에 도움이 될 것이다. 유로의 형태는 중요하지 않으므로 제작성을 고려하여 결정할 수 있다.

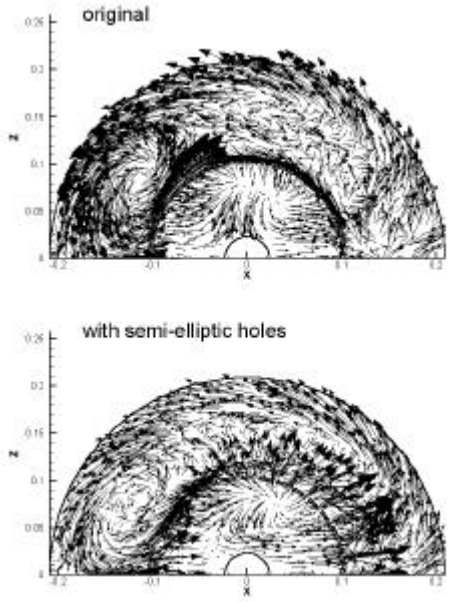

그림 12. 속도벡터.

3.5 산화제 공급유로 변경

본 절에서는 주엔진의 산화제공급 유로변경에 따라 분사균일성 변화와 압력손실 증감에 대하여 관찰한다. 기존의 외형은 그림 10에 도시하였다.

그림 13은 산화제 공급유로가 변경된 도면을 나타낸다. 자세한 형상은 도면 KL3E1002를 참조하기 바란다. 이는 주엔진 김발장치와의 간섭을 피하기 위하여 변경된 것이다. 변경 이후의 산화제 공급유로는 수직방향에 대하여 46°의 각도를 가지게 되며 유입되는 산화제는 입구 반대방향으로 치우치게 된다. 기존의 산화제 분사속도 역시 입구 반대쪽에서 높게 유지되므로 이러한 현상은 분사속도의 불균일을 가중시킬 것으로 예상된다. 이에 본 해석에서는 분사균일성의 변화정도를 예측하고 산화제 매니폴드 내부의 압력손실을 평가하고자 한다.

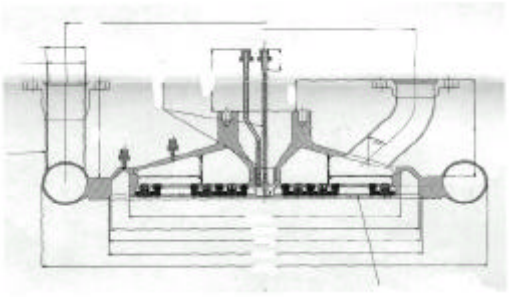

그림 13. 변경된 산화제 공급배관 모습

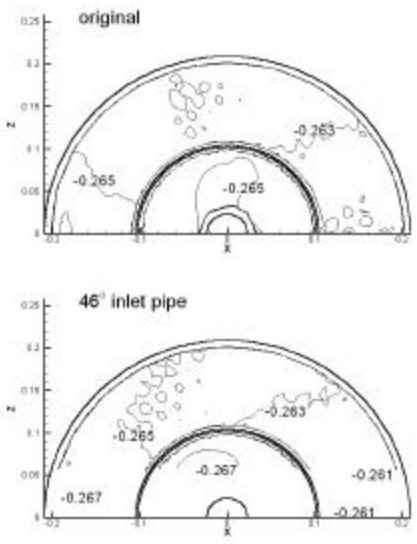

그림 14. 분사면에서의 산화제 분사속도 분포

분사면에서의 유속분포를 그림 14에 도시하였다. 아래 그림이 46° 경사진 산화제 배관에 대한 결과를 나타낸다. 그림의 분사속도 (m/s)는 분사면에 대한 면적평균값의 의미를 가지며 실제 분사공에서의 분사속도와는 많은 차이를 가지므로 이를 분사속도로 오인하지 않기 바란다. 산화제 입구는 그림 오른편에 있으며 공급유로와 평행하게 산화제가 유입되는 것으로 가정한다. 배관의 경사에 의하여 유동이 전체적으로 왼쪽으로 치우치며 따라서 입구 반대쪽의 분사속도가 높아진다. 이는 분사균일성 저하를 나타내는 것이다. 하지만 정량적인 차이는 거의 없으므로 입구배관 변경에 의한 분사균일성 문제는 없을 것이다.

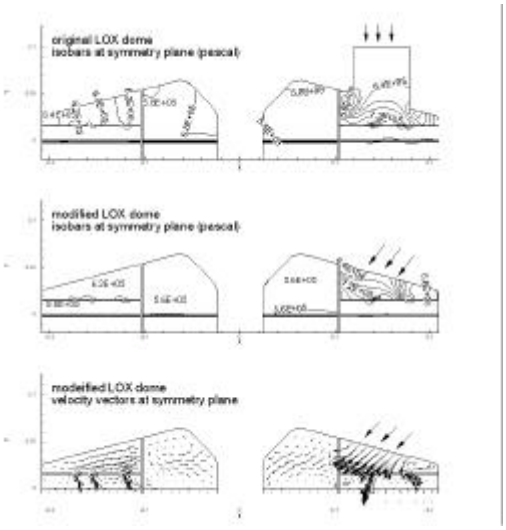

그림 15. 대칭면에서의 압력 분포 및 속도 벡터.

그림 15는 대칭면에서의 압력 분포 및 속도벡터를 나타내는 것이다. 그림에 표시한 압력의 단위는 Pa (N/m^2)이다. 유입속도의 방향이 바뀜으로써 산화제 돔 내부의 유동형태가 영향을 받는데 그림에 표시한 대칭면에서의 결과로 볼 때 0.02<x<0.2 영역이 직접적인 영향하에 있는 것으로 판단할 수 있다. 산화제의 유입 방향이 산화제 돔 중심으로 치우쳐 있기 때문에 입구 아래쪽의 압력 분포가 변화된 것을 볼 수 있다. 그림에 나타난 값으로는 정략적인 차이를 언급하기 어려우며

표 3에 산화제 돔 내부에서의 압력 손실을 정리하였다. 압력 손실의 기준은 산화제 돔 상부 표면과 산화제 공급배관이 접한 면에서 분사기 출구까지이다. 표에 제시한 값은 대칭면에서 유입배관의 최외곽 2점과 중심에서의 값을 평균한 것이다. 산화제 공급배관 변경에 의하여 압력강하 역시 약간 증가하였다. 그러나 정략적인 차이는 역시 크지 않으므로 설계변경에 의한 심각한 문제는 없을 것으로 예상된다.

표 3. 산화제 돔 내부의 압력강하.

	Δp atm (psi)
original model	6.22 (91.4)
modified model	6.46 (94.9)

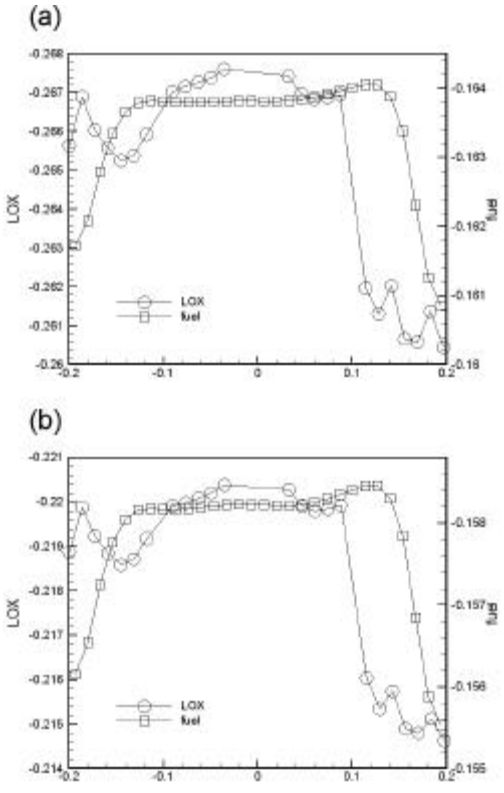

그림 16. 분사면 대칭선에서 산화제/연료의 분사속도분포. (a) case-D, (b) case-O1.

3.6 분사면에서의 혼합비 분포

본 해석에서 산화제와 연료의 분사속도를 구하였으므로 두 결과를 종합한다면 혼합비를 예측 할 수 있다. 본 절에서는 다음의 두 경우에 대한 혼합비를 제시한다.

설계조건 (case-D):
산화제 유량 = 40.9 kg/ s
연료 유량 = 17.5 kg/ s

탈설계점 유동조건 (case-O1):
산화제 유량 = 33.7 kg/ s
연료 유량 = 16.9 kg/ s

그림 16은 위의 두 경우에 대한 산화제와 연료의 분사속도를 나타낸다. 그림은 분사면과 대칭면이 만나는 선에서의 분사속도이며 편의상 대칭선이라는 용어로 표기하였다. 하지만 기하학적인 대칭선은 아니므로 혼동이 없기를 바란다. 결과로부터 산화제나 연료의 유량이 변화하더라도 분사속도의 모습은 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 유량의 변화폭이 작기 때문으로 풀이되며 유동특성이 완전히 바뀔 정도의 유량변화에 대해서는 성립하지 않을 것이다. 그림 16의 y축 스케일이 모두 다르므로 주의하기 바란다. 그림 16(a)의 경우 -0.1<x<0.1 부근의 연료/ 산화제 유속이 설계점의 혼합비 수준이며 -0.2<x<-0.1에서는 산화제가 0.1<x<0.2에서는 연료의 농도가 높다. 한편 그림 16(b)는 전반적으로 산화제의 유량이 작으므로 대부분의 영역에서 연료의 농도가 높게 나타나며 산화제의 농도가 높은 곳은 x=-0.2부근의 좁은 영역에 국한될 것이다.

4. 결 론

KSR-III 매니폴드에서 추진제의 분사 균일성을 해석하였다. 본 해석을 통해서 분사 균일성을 향상시킬 수 있는 수정안을 도출하였으며 수정 전후에 대한 분사 균일성을 비교하여 설계 수정에 의

한 성능 향상을 평가하였다. 본 해석 결과를 근거로 분사속도의 균일성을 개선하기 위하여 산화제 공급 파이프의 지름 59.5mm로 변경하고, 수평 분리판의 유로 지름은 6mm로 변경하며 수직판 아래부분에 매니폴드 내/외부 공간을 연결하는 유로를 구성하였다. 또한 산화제의 유입 방향은 분사균일성에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였고 추가적인 자료로서 분사면에서의 혼합비 분포를 제시하여다.

참 고 문 헌

1. 채연석 외, 3단형 과학로켓 개발사업(III), 과학기술부, 2000.
2. Fluent user's guide, 1996.
3. 조원국, 3단형 과학로켓의 주엔진 추진제 분사 균일성 해석, KARI-RERD-TM-2000-001-v.1- rev.1, 한국항공우주연구원, 2000.
4. B.P. Leonard, A stable and accurate con- vective modelling procedure based on quadrat- ic upstream interpolation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.19, 59-98, 1979.