技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.9.781>

OpenFOAM을 이용한 액체 로켓 연소기의 산화제 매니폴드 내 유동 해석

조미옥*, 한상훈**, 김성구*, 최환석*

Flow Analysis of the Oxidizer Manifold for a Liquid Rocket Combustor using OpenFOAM

Miok Joh*, Sang Hoon Han**, Seong-Ku Kim* and Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

Flow in the oxidizer manifold of a liquid rocket combustor has been analysed using an open source CFD toolbox, OpenFOAM. The applicability of OpenFOAM to the problems with complex geometries involving porous media zones for simulating the pressure drop induced by the injectors has been evaluated by performing turbulent, incompressible steady-state flow analysis. The usefulness and applicable area of the OpenFOAM as a design evaluation and analysis tool will be confirmed and enlarged by further evaluation with various computational cases representing major physical phenomena in rocket combustion devices.

초 록

공개소스 전산유체 해석 라이브러리인 OpenFOAM을 이용하여 액체 로켓 연소기의 산화제 매니폴드 내 유동 해석을 수행하였다. 정상 상태의 비압축성 난류 유동 해석을 통하여 분사기 차압 모사를 위한 다공성 매질 영역이 포함된 복잡한 3차원 형상에 대한 유동 해석에 있어서의 OpenFOAM 적용 가능성을 평가하였다. 향후 로켓 연소장치 내의 주요 물리적 현상을 포함한 보다 다양한 해석 사례에 대한 평가를 수행함으로써 설계 평가 및 해석 도구로서의 OpenFOAM의 유용성 및 적용 범위를 확인/확대해나갈 계획이다.

Key Words : OpenFOAM(OpenFOAM), Liquid Rocket Combustor(액체 로켓 연소기), Oxidizer Manifold(산화제 매니폴드), Porous Media(다공성 매질), Flow Uniformity(유동 균일성), Pressure Loss(압력 손실)

1. 서 론

액체 로켓 연소기에서 추진제 매니폴드는 내부 체적, 질량 및 압력 손실에 대한 요구조건을

만족함과 동시에 구조적 건전성과 분사 면에서의 유동 균일성을 보장할 수 있도록 설계되어야 한다⁽¹⁾. 연소기의 개념 설계 단계에서 제시되는 매니폴드 설계안에 대한 평가 및 최적화 과정에서 수치해석 분야의 활용 범위를 확대함으로써 H/W 제작 및 시험에 소요되는 노력을 경감시킬 수 있다⁽²⁻⁵⁾. 해석 도구를 직접 개발하거나 상용 S/W를 도입함으로써 수치 해석 기반을 구축해 왔던 과거와는 달리 최근 전산유체역학 분야를 포함한 연속체역학 분야의 국내외 연구자들을 중

† 2012년 7월 17일 접수 ~ 2012년 8월 27일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원

** 정회원, 한국항공우주연구원

교신저자, E-mail : airshhan@kari.ac.kr

대전광역시 유성구 과학로 169-84

심으로 OpenFOAM(Open Field Operation And Manipulation)⁽⁶⁻⁸⁾과 같은 공개소스 라이브러리를 활용하려는 시도가 활발해지고 있다⁽⁹⁻¹³⁾.

공개소스 프로그램은 GNU GPL(General Public License)과 같은 공개 라이선스 정책이나 개발자의 결정에 따라 소스 코드가 함께 공개되는 프로그램을 통칭한다. 상용 해석 도구와는 달리 물리적 모델이나 수치 모델을 수정/추가함에 있어서 사용자의 소스 코드 접근에 제한이 없고, 대용량 해석 시 필연적으로 수반되는 막대한 라이선스 비용 또한 발생하지 않으며, 다양한 요구를 가진 사용자 그룹의 직접적인 참여로 프로그램의 검증/개선 속도가 빠르다는 장점이 있다.

OpenFOAM은 1990년대 초에 Imperial College의 두 연구자 Henry Weller와 Hrvoje Jasak을 중심으로 개발이 시작되어 2004년 말 OpenCFD Ltd.에 의해 v1.0이 공개되었으며, 'field'에 대하여 정의될 수 있는 다양한 응용 분야(유체, 구조, 전자기, 금융 등)에서 적용 가능하도록 개발된 C++ toolbox를 소스 코드와 함께 제공하고 있다. 본 연구에서는 OpenFOAM 라이브러리의 표준 solver를 이용하여 한국형발사체(KSLV-II) 3단 엔진 연소기의 산화제 매니폴드 설계안을 평가하기 위한 유동 해석을 수행하였으며, 분사 면에서의 유동 균일성 및 매니폴드 내의 압력 손실에 근거하여 각 설계안을 평가하였다.

II. 해석 대상 및 조건

2.1 해석 대상

본 연구의 해석 대상은 7톤급 액체 엔진 연소기의 헤드부에서 산화제로 채워지는 부분과 유입 배관으로 구성되는 산화제 매니폴드로, 산화제 주 밸브와 헤드부를 연결하는 유로인 유입 배관으로부터 공급받은 산화제를 90개의 분사기에 균일하게 분배할 수 있는 설계안을 선별하기 위한 해석을 수행하였다. 해석 영역은 Fig. 1에 제시한

Fig. 1. Configuration of analysis domain(OM1)

Table 1. Design alternatives selected for flow analysis

설계안	유입 배관 직경 [mm]	수평 분배판	배관 접합부 변형	cell 수
OM1	30.6	×	×	1,769,488
OM2	38.1	×	×	1,762,850
OM3	38.1	○	×	3,880,257
OM4	38.1	×	○	1,666,771

바와 같이 매니폴드 및 산화제 측 분사기로 설정하였으며, 헤드부의 직경은 약 184 mm, 최대 높이는 약 48 mm이다. 해석 대상 설계안 및 주요 차이점은 Table 1에 제시하였다.

기본 형상인 OM1(Fig. 1)에서 유입 배관 직경을 변화시킨 OM2(Fig. 2)를 기준으로 수평 분배판 삽입(OM3), 유입 배관 접합부 변형(OM4)에 따른 영향을 확인하고자 하였다. OM4는 Fig. 3에 제시한 바와 같이 유입 배관의 헤드부 접합 형상을 타원형으로 변경하고 접합부에 인접한 부위의 배관에 곡률을 적용함으로써 접합부에서의 유동 팽창에 의해 발생하는 재순환 유동을 억제하는 한편 산화제 유입 속도를 감소시킴으로써 압력 손실을 줄일 수 있는 방향으로 설계하였다. OM3의 수평 분배판에는 유동 균일성 향상을 위하여 산화제 유입 속도의 크기에 따라 영역별로 서로 다른 크기의 hole을 적용하였으며, hole 배치 및 크기 분포는 Fig. 4에 제시하였다.

Fig. 2. Geometry of inflow tube joint (OM2 & OM3)

Fig. 3. Modified geometry of inflow tube joint(OM4)

Fig. 4. Arrangement of holes in horizontal flow distributor (OM3)

해석 격자는 중심 면에 대해서 대칭 경계조건을 적용한 대칭 격자계로 구성하였으며, 이에 따라 전체 90개의 분사기 중 40개는 전체 형상이, 중심선에 위치한 10개의 분사기는 대칭면을 따라 절단된 형상이 해석 영역에 포함되었다. 분사기는 산화제 측 접선 hole이 8개인 동축 와류형 분사기로, 접선 hole 면은 격자의 질을 향상시키기 위하여 사각형으로 모사하였다. 설계안 별 해석 영역의 cell 수는 Table 1에 제시한 바와 같다.

OM2를 대상으로 격자 의존도를 평가하였으며, 격자 밀집도에 따른 분사기 질량 유량율 (MFR: Mass Flow Rate) 및 압력 손실 편차를 Table 2에 제시하였다. 기준 격자계(OM2_176) 대비 각각 약 66 %와 179 %의 격자 밀집도를 갖는 경우 MFR과 압력 손실 편차 범위가 OM2_176 대비 각각 약 1.4 %와 2.1 % 이내일 것으로 예측되었다. OM3(Fig. 5)의 경우 수평 분배판 삽입의 영향으로 다른 설계안에 비하여 전체 cell 수는 많으나 국부적으로 격자가 밀집되어 있는 수평 분배판 주변 영역을 제외하면 다른 설계안과 유사한 수준의 격자 밀집도를 갖고 있으며, OM2에 대한 격자 의존도 평가 결과로부터 OM3의 해석 결과에서 국부적인 격자 밀집에 따른 영향 또한 배제할 수 있는 것으로 판단된다.

Table 2. Grid sensitivity analysis(OM2)

case ID	cell 수	MFR 편차 범위 [%OM2_176]	압력 손실 편차 [%OM2_176]
OM2_116	1,159,362 (65.8%)	-1.178~1.059	1.058
OM2_176	1,762,850 (100.0%)	0	0
OM2_315	3,152,054 (178.8%)	-1.137~1.428	-2.089

Fig. 5. Computational grid(OM3)

2.2 분사기 모사 모델

본 연구에서는 분사기 내부 형상을 직접 다루지 않고 분사기에 의한 차압을 모사하기 위하여 분사기 내부를 가상의 다공성 매질 영역으로 가정하였다^(3,4). 다공성 매질 모델은 와류형 분사기에서 접선 hole과 유입되는 유동이 이루는 각도에 따라 분사기 hole 별 유동 저항이 달라지는 현상 등 분사기 내부와 매니폴드 유동 간 상호작용을 세부적으로 정확하게 모사할 수 없다는 한계는 갖고 있으나, 개념 설계 단계에서 제시되는 다양한 설계안에 대한 선별 목적으로는 충분히 유용한 방법인 것으로 판단된다.

다공성 매질이 포함된 정상 상태의 비압축성 난류 유동 해석에는 OpenFOAM에서 제공하는 표준 solver 중 하나인 porousSimpleFoam을 사용할 수 있다. OpenFOAM의 표준 solver에서는 다공성 매질 영역에 대하여 Navier-Stokes 방정식에 점성 저항과 관성 저항의 합 또는 속력에 대한 지수함수로 정의되는 생성항 S_i 를 추가하고, 비정상 해석 시 시간 미분 항에 다공도 γ (다공성 매질 영역의 전체 부피 중 유체가 차지하는 부피의 비율)를 곱하여 다공성 매질에 의한 감쇠 효과를 모사한다⁽¹⁴⁾. porousSimpleFoam에서의 운동량 방정식은 식 (1)~(3)과 같이 표현되며, 대류 및 확산 항에서는 다공도를 고려하지 않은 속도 (superficial velocity) u_i 를 사용한다. 식 (1)에서 ν 는 동점성계수, τ_{ij} 는 응력 텐서, 식 (2)에서 p 는 압력, ρ 는 밀도, 식 (3)에서 D_{ij} 와 F_{ij} 는 각각 점성 저항과 관성 저항 텐서를 의미한다.

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \hat{S}_i \quad (1)$$

$$\hat{p} = \frac{p}{\rho} \quad (2)$$

$$\hat{S}_i = -(\nu D_{ij} + \frac{1}{2} |u_{kk}| F_{ij}) u_i \quad (3)$$

분사기 내부가 실제 다공성 매질로 채워져 있고 분사기 내부에서의 속도나 구배 값을 정확하게 예측하고자 한다면 전술한 운동량 방정식에서 다공도가 고려된 속도(physical velocity) 값을 사용할 필요가 있다. 그러나 본 해석에서와 같이 유동 균일성 평가를 목적으로 분사기 입구 hole에서 일정한 정압 조건을 형성하기 위하여 분사기 내부 영역을 가상의 다공성 매질로 가정한 경우에는 임의의 다공도 값을 적용하여 속도를 구한다 하더라도 물리적인 의미가 없고, 분사기 출구에서의 MFR은 다공도 고려 여부와 무관하게 동일한 값이 도출되므로, 해석의 목적 및 효율성을 고려할 때 식 (1) ~ (3)에 제시한 기본 formulation을 사용하는 것이 유효하다고 판단된다.

2.3 해석 조건 및 가정

유동 해석에 사용된 해석 도구 및 주요 기법/가정은 Table 3에, 경계조건과 작동 유체 및 상태량은 Table 4에 각각 제시하였다. 액체산소의 상태량은 유입 배관의 입구조건 (81 bar, 110 K)에서의 NIST 유체 상태량 데이터⁽¹⁵⁾를 사용하였다. 분사기 설계 차압(9.5 bar)을 모사하기 위한 다공성 매질의 점성 저항 값은 기본적으로 등방성을 가정하여 조정하였으며, 수렴 조건에 도달한 해석 결과를 기준으로 분사기 접선 hole에서의 정압(면적 가중 평균값) 조건이 만족될 때까지 점성 저항 값을 계속 변화시키면서 해석을 수행하였다.

Table 3. Analysis tool, schemes and assumptions

해석 도구 solver	OpenFOAM-2.1.x(-2.1.0 기반) porousSimpleFoam
지배 방정식	3차원 비압축성 RANS
난류 모델	realizable k-ε standard wall function
해석 기법	pressure based(SIMPLE)
공간 차분	대류항: 2차 정확도 풍상차분 확산항: 2차 정확도 중앙차분
분사기 차압 모사	다공성 매질의 점성저항 $D = (\frac{\Delta p}{\Delta x}) \frac{1}{\mu} \frac{\rho A}{\dot{m}}$

Table 4. Boundary conditions and operating fluid properties

입구조건 (MFR) [kg/s]	14.5580
출구조건 (압력) [bar]	0 (gauge)
작동 유체	액체산소 (LOX)
밀도 [kg/m ³]	1061.6
점성계수 [kg/m·s]	1.3398e-4

III. 매니폴드 설계안 평가

각 설계안의 평가에 있어서 유동 균일성 확보를 위한 설계 요구조건은 다음과 같이 가정하였다.

각 분사기 출구에서의 산화제 MFR 값 $\dot{m}_i$ 은 분사기 당 목표 유량인 $\dot{m}_t$ (전체 MFR을 분사기 개수 N 으로 나눈 값)의 $\pm 1\%$ 이내, 즉 아래 식에서 $|D_{MFR}| \leq 1$ 이어야 한다.

$$D_{MFR} = \frac{(\dot{m}_i - \dot{m}_t)}{\dot{m}_t} \times 100 \quad (4)$$

$$\dot{m}_t = \frac{\sum \dot{m}_i}{N} \quad (5)$$

또한 터보펌프 토출압, 즉 엔진 시스템의 성능과 관련된 설계 인자 중 하나인 추진제 매니폴드 내의 압력 손실 정도도 설계안 평가 지표로 고려하였다.

3.1 유동 균일성

설계안 별로 분사기 접선 hole 중심에 근접한 수평 단면에서의 정압 분포 예측 결과를 Fig. 6 - 9에 제시하였다. 기본 형상인 Fig. 6의 OM1에서는 유입 유동이 헤드 면에 직접 도달하는 영역에서 국부적으로 높은 정압이 형성될 것으로 예측되었다. 유입 배관의 직경을 증가시킨 Fig. 7의 OM2에서는 헤드부로 유입되는 산화제의 평균 속도 값이 감소함에 따라 유동 편중 현상 또한 완화되어, OM1 대비 균일한 정압 분포를 나타내고 유동 균일성 또한 향상될 것으로 예상되었다. OM2에 수평 분배관을 삽입한 Fig. 8의 OM3에서는 유동의 재분배 효과에 의하여 다른 설계안 대비 더욱 균일하고 낮은 정압 분포를 나타내며, 수평 분배관 없이 OM2에서 유입 배관 접합부만을 변형시킨 Fig. 9의 OM4도 OM2에 비하여 정압 분포의 균일성이 향상될 것으로 예측되었다.

Fig. 6. Sectioned view of static pressure across the tangential holes(OM1)

Fig. 7. Sectioned view of static pressure across the tangential holes(OM2)

Fig. 8. Sectioned view of static pressure across the tangential holes(OM3)

Fig. 9. Sectioned view of static pressure across the tangential holes(OM4)

Fig. 10. Sectioned view of streamlines with velocity contour (OM2)

Fig. 11. Sectioned view of streamlines with velocity contour (OM4)

유입 배관 접합부 형상에 따른 유동 특성의 변화는 Fig. 10 - 11에 제시한 분사기 상부 수평 단면에서의 유선 및 속도 값 분포로부터 유추할 수 있으며, OM2에서 관찰되는 접합부 근처의 재순환 유동 및 와류에 의한 유동 저항이 OM4에서는 약화/소멸됨에 따라 전체적으로 OM4가 OM2보다 균일한 유속 및 정압 분포를 갖게 될 것으로 예측되었다.

Fig. 12에 각 설계안에서의 분사기 별 MFR 분포 및 분사 면에서의 개략적인 MFR 분포를 분사기 당 목표 유량 대비 편차(D_{MFR})로 제시하였으며, 분사기 번호는 Fig. 4에서 확인할 수 있다. D_{MFR} 및 MFR 표준편차의 범위로 판단할 때 (d)의 OM4가 가장 양호한 설계안인 것으로 볼 수 있으나, (c)의 OM3도 유입 배관으로부터의 유동이 분배판에 직접 부딪히는 영역을 제외하면 전체적으로 OM4와 비슷한 수준의 유동 균일성을 나타내는 것으로 예측되었다.

설계안 별 D_{MFR} 범위, OM2 대비 D_{MFR} 개선 정도 및 MFR의 표준편차는 Table 5에 정리하였다. 해석 대상으로 선정한 네 설계안 중 모든 분사기에 대하여 $|D_{MFR}| \leq 1$ 이어야 한다는 요구조건을 만족하는 설계안은 없었으며, OM4 또는 OM3의 최적화를 통해 유동 균일성을 개선하는

(a) OM1

(b) OM2

(c) OM3

(d) OM4

Fig. 12. D_{MFR} per injector(left) and D_{MFR} distribution on the injector plate(right)

Table 5. MFR deviation statistics

설계안	OM1	OM2	OM3	OM4
D_{MFR} 범위	-4.280 2.470	-2.426 2.632	-2.393 1.254	-1.755 1.745
D_{MFR} [%OM2 D_{MFR}]	176.4 93.8	100.0 100.0	98.6 47.6	72.3 66.3
평균 MFR [g/s]	161.7	161.7	161.7	161.7
MFR 표준편차 [g/s]	3.075	1.862	1.329	1.318
MFR 표준편차 [%평균]	1.902	1.151	0.8219	0.8153

것이 바람직할 것으로 판단된다. OM3의 경우 수평 분배관의 hole 크기를 최적화함으로써 국부적인 MFR 불균일성을 개선할 수 있을 것으로 판단되나, 분배관 삽입에 따른 압력 손실 및 질량 증가, 제작 공정과 관련된 품질/신뢰도 관리 등 다양한 개발 요구조건을 동시에 고려할 필요가 있다.

3.2 압력 손실

산화제 유입 배관 입구와 분사기 접선 hole 간 전압력 차로 나타낸 설계안 별 매니폴드 차압은 Table 6에 제시하였으며, 유입 배관 직경이 크고 수평 분배관이 없으며 접합부 변형을 통해 재순환 유동 형성을 억제한 OM4가 가장 작은 차압을 실현할 것으로 예측되었다. OM2에 수평 분배관을 삽입한 OM3에서의 차압 상승 폭은 OM2 대비 약 12.14 % 수준으로 나타났다.

이상의 결과로부터 유동 균일성 및 차압 측면에서 가장 양호한 설계안은 OM4인 것으로 예측되었으며, 모든 설계안이 매니폴드 차압 요구조건을 만족한다는 가정 하에서 보다 정밀한 MFR 조정이 요구될 경우 OM4의 접합부 형상 최적화, OM3의 수평 분배관 hole 크기 최적화 또는 OM3과 OM4의 결합 등을 추가적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 6. Total pressure drop across the manifold

설계안	매니폴드 차압 [bar]	OM1 대비 증가분 [%]
OM1	2.5242	0.00
OM2	1.3141	-47.94
OM3	1.4736	-41.62
OM4	0.9564	-62.11

IV. 결 론

공개 소스 전산유체 해석 도구인 OpenFOAM의 표준 solver를 이용하여 액체 로켓 연소기의 산화제 매니폴드 내 유동 해석을 수행한 결과 매니폴드 형상에 따른 유동 특성 변화를 확인할 수 있었으며, 분사기 출구에서의 MFR 분포 및 매니폴드 내 압력 손실을 기준으로 최적의 설계안을 선정할 수 있었다. 향후 액체 로켓 연소장치의 주요 물리 현상이 포함된 다양한 사례에 대한 해석을 수행하고 결과를 검증함으로써 OpenFOAM의 적용 범위를 확인/확대해 나갈 계획이다.

참고문헌

- 1) Huzel, D. K. and Huang, D. H., *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*, AIAA, 1992.
- 2) 김성구, 김종규, 한영민, 유철성, " 75톤급 연소기의 산화제 매니폴드 설계/해석," KARI-CC T-TM-2007-012-v.1-rev.1, Dec. 2007.
- 3) 김홍집, 김성구, 김종규, 한영민, 최환석, " 30톤급 실물형 연소기 산화제 매니폴드 유동해석을 통한 유량 균일성 개선," *한국추진공학회지* 제12권 제3호, 2008, pp.16~23.
- 4) 김홍집, 최환석, " 가스발생기 연료 및 산화제 매니폴드 유동해석을 통한 유량균일성 파악," *한국항공우주학회지* 제37권 제11호, 2009, pp.1140~1147.
- 5) Watanabe, D., Imai, K., Ogawara, A., Yamanishi, N., Neghishi, H., Kawatsu, K., Kurosu, A., and Noda, K., " Application of High Fidelity Simulation to LE-X Engine Development," *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, AIAA 2011-5930, Jul. 2011.
- 6) Jasak, H., Jemcov, A., and Tuković, Ž., " OpenFOAM: A C++ Library for Complex Physics Simulations," *International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics*, Sep. 2007.
- 7) OpenFOAM Foundation, *OpenFOAM Programmer's Guide*, Version 2.1.0, Dec. 2011.
- 8) OpenFOAM Foundation, *OpenFOAM User Guide*, Version 2.1.0, Dec. 2011.
- 9) Chapuis, M., Fureby, C., Fedina, E., Alin, N., and Tegnér, J., " LES Modeling of Combustion Applications using OpenFOAM,"

ECCOMAS CFD 2010, 14-17 Jun. 2010.

10) Petropoulou, S., " Industrial Optimization Solutions based on OpenFOAM® Technology," *ECCOMAS CFD 2010*, 14-17 Jun. 2010.

11) 박준권, 강관형, " Source 공개 코드 OpenFOAM에 대한 리뷰," *한국전산유체공학회지* 제15권 제3호, Sep. 2010, pp.46~53.

12) 한가람, 임성한, 허강열, " OpenFOAM을 이용한 난류연소현상 해석 및 내연기관에의 적용," *제41회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집(2010*

년도 추계학술대회), 2010, pp.319~330.

13) 이희범, 이신형, " 자유수면 유동 해석을 위한 경계면 포착 기법들에 대한 비교 연구," *한국전산유체공학회 2012년도 추계학술대회 논문집*, May 2012, pp.548~555.

14) Hafsteinsson, H. E., *Porous Media in OpenFOAM*, Spring 2009.

15) *NIST Chemistry WebBook - Thermophysical Properties of Fluid Systems*, <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.