

Fluent를 이용한 3톤급 액체로켓엔진 매니폴드 내 추진제 유동 균일성 해석

윤동호^a · 조현택^b · 장현수^c · 현성윤^c · 정진택^d · 홍용기^d · 윤영빈^{b,e*}

Propellant Flow Uniformity Analysis of 3 Tonf Liquid Rocket Engine Manifold Using Fluent

Dongho Yun^a · Hyeontaek Jo^b · Hyeonsoo Jang^c · Seongyoon Hyun^c ·
Jintaeg Jung^d · Yonggi Hong^d · Yuongbin Yoon^{b,e*}

^aInterdisciplinary Program in Space System, Seoul National University, Korea

^bDepartment of Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea

^cVitzro Nextech Co., Korea

^dR&D Center, Korean Air, Korea

^eInstitute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

ABSTRACT

Flow analysis was performed using Fluent to determine flow uniformity of 3 tonf liquid rocket engine propellant manifold. Based on the manifold initial design, the shape of the fuel distribution plate and propellant pipe inlet was changed to improve flow uniformity, and the flow uniformity of the computational analysis results for these initial and modified designs was compared/analyzed. As a result of the computational analysis, it was confirmed that the flow uniformity of the revised design was improved compared to the initial design.

초 록

3톤급 액체로켓엔진 추진제 매니폴드에서 유동 균일성을 파악하기 위하여 Fluent를 이용해 유동해석을 수행하였다. 매니폴드 초도 설계안을 기반으로 유동 균일성 향상을 위해 연료 분배판과 추진제 배관 유입구의 형상을 변경하였고, 이러한 초도 설계안과 수정 설계안들에 대한 전산해석 결과의 유동 균일성을 비교/분석하였다. 전산해석 결과, 초도 설계안과 비교하였을 때 수정 설계안의 유동 균일성이 개선되었음을 확인하였다.

Key Words: Fluent(Fluent), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Propellant Manifold(추진제 매니폴드), Flow Uniformity(유동 균일성)

Received 29 May 2023 / Revised 6 July 2023 / Accepted 13 July 2023

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2023년도 춘계학술대회(2023.5.24.~26, 라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

액체로켓엔진의 연소기 매니폴드는 추진제를 연소실로 분배하는 장치이다. 추진제 매니폴드는

연료와 산화제를 분사기에 배분하고 분사기에 균일하게 공급하는 역할을 하기 때문에 액체로켓엔진의 개발에 추진제 매니폴드의 설계는 중요한 역할을 한다[1]. 연소기 매니폴드가 균일하게 추진제를 분배하지 못할 경우 추력 성능의 손실이 발생할 수 있고 연소 불안정 현상이 발생할 수 있어 연소실에 연료와 산화제를 설계값에 맞게 지속적으로 공급하는 것이 필수적이다. 이에 매니폴드의 설계 단계에서, 전산해석을 통한 설계안에 대한 평가와 최적화 과정은 실물 제작 및 평가에 소요되는 노력을 절감할 수 있어 효과적이다.

따라서 매니폴드 내부 유동 균일성 전산해석은 액체로켓 개발에 있어서 매우 중요한 선행 조건이고, 국내외에서도 엔진 개발단계에서 매니폴드 유동 균일성에 대한 연구가 수행되고 있다. 매니폴드 유동 균일성을 분석하기 위해 Daiki Watanabe 등[2]은 매니폴드 유동 실험결과와 전산해석 결과를 비교하는 연구를 진행하여 엔진 개발에 활용하였고, 국내에서도 조미옥 등[3]은 한국형발사체(KSLV-II) 3단 엔진 연소기의 산화제 매니폴드 설계안을 평가하기 위해 OpenFOAM을 이용 전산해석 결과를 사용했다.

본 연구에서는 상용 프로그램인 Ansys의 Fluent를 사용했다. Fluent는 유체흐름, 열전달 및 화학반응을 모델링하기 위한 상용 프로그램이다. 다양하고 검증된 난류 모델을 제공해 정확도 높은 결과를 도출해낼 수 있어 여러 분야에서 활용되고 있다.

본 논문에서는 Fluent를 이용해 3톤급 액체로켓엔진 매니폴드의 전산해석을 하여, 설계안별 매니폴드 형상에 따른 유동 균일성을 비교 및 분석하였다.

2. 해석대상 및 조건

2.1 해석대상

본 연구의 해석대상은 3톤급 액체로켓엔진 연소기의 헤드부 추진제 매니폴드이다. 매니폴드에 유입된 추진제를 헤드부 유입 유로에서부터 분

사기까지 균일하게 분배할 수 있는 매니폴드 최적의 설계안을 선별하기 위한 전산해석을 수행하였다. 매니폴드의 유동해석 영역은 매니폴드 유입구에서 분사기까지로 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 전산해석 시에는 매니폴드의 설계 모델링에서 내부 유로 유동 영역을 추출하여 내부 유로에서 유체의 유동에 대한 해석을 진행하였다.

매니폴드는 Fig. 1과 같이 헤드부 측면에 연결된 배관을 통하여 공급되어 분사기에 유입된다. 매니폴드 상단에서 연료(GCH₄)가 연료 분배판(Distributor)을 거쳐 유입되고 하단에서 산화제(LOx)가 유입된다. 인젝터는 원형 형태의 분사기 배열을 가지고 있으며, 연료 매니폴드는 유동의 균일성을 확보하기 위해 연료분배판을 가지고 있다. 또한 3D 프린팅을 통한 제작을 용이하기 위해 연료 분배판이 일정한 각도로 형성되어 있다. 이러한 형상을 가지는 매니폴드에서 유입 배관을 통해 유입된 추진제가 분사기에 균일하게 분배되는 설계안을 선별하기 위해 해석을 수행하였다.

매니폴드의 초도 설계안인 CDM(Conceptual Design Model)1(Fig. 2)에서 CDM2.1과 CDM2.2

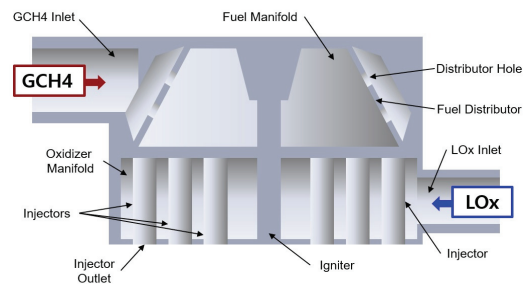


Fig. 1 Schematic manifold cut-off view.



Fig. 2 CDM1 manifold configuration.

는 유입배관 형상 및 분배관 홀 개수를 변화시켜 유동 균일성에 영향을 확인하고자 했다. CDM2.1과 CDM2.2은 초도 설계안에서 추진제의 유입 배관의 접합부 형상을 원형에서 타원형으로 Fig. 3와 같이 변경하였고 배관 면적을 증가시켰다. 또한 CDM2.1과 CDM2.2는 연료 분배관(Distributor)의 홀 개수와 홀 면적에 서로 차이를 두어 비교하였다.

모든 설계안에서 분사기 배치는 대칭 형상으로 규칙적이다. 따라서 추진제 유동해석은 형상을 고려하여 Fig. 3과 같이 전체의 1/2인 영역을 해석하여 해석시간을 단축하고 해석효율을 향상시켰다. 격자는 대칭면에 대해 Symmetry 조건을 적용한 격자(mesh)를 사용했다.

매니폴드 초도 설계안(CDM1)을 대상으로 격자 의존성을 평가하였다. Fluent 전산해석은 격자(mesh)의 수에 따라 결과의 차이가 있어 신뢰성 향상을 위해 격자 의존성 테스트가 필요하다. 따라서 매니폴드 기본 설계안(CDM1)을 기준으로 총 5개 Type의 격자를 설정하여 해석 결과를 비교하였다. 해석 결과는 Eq. 1과 같이 추진제의 질량유량 일치율(Flow Match Rate)로 비교하였고, 설계 질량유량에 99% 이상 일치하면 수렴한

것으로 판단하였다.

Flow Match Rate

$$= \left\{ 1 - \frac{|Inlet MFR - outlet MFR|}{Inlet MFR} \right\} \times 100 [\%] \quad (1)$$

격자 의존성 전산해석 결과는 Table 1과 같고, 이에 따라 1/2 영역의 추진제 매니폴드는 약 680만개 이상의 격자(mesh) 수일 경우 질량유량 측면에서 수렴하는 것을 확인하였다. 또한 Fig. 4와 같이 해석 대상에서 가장 작은 직경의 유로인 인젝터(Injector) 내부 유로에서 격자 형상을 확인하였을 때, 모델링한 격자의 최소 크기값이 적합한 것으로 보인다.

따라서 매니폴드 전산해석 모델링에 약 680만개의 격자(mesh) 수가 전산해석의 효율 및 결과 정확성 측면에서 적절하다고 판단하고 Table 2와 같이 격자(mesh)를 생성해 전산해석을 진행하였다.

2.2 해석 조건

매니폴드 내부의 유동은 연료(GCH₄)와 산화제(LOx)가 유입되는 다상 유체의 거동이기에 때문에

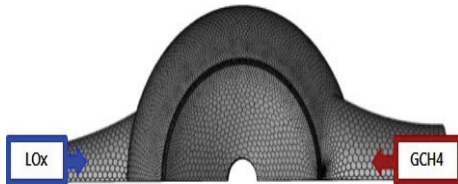


Fig. 3 CDM2.1, CDM2.2 manifold configuration.

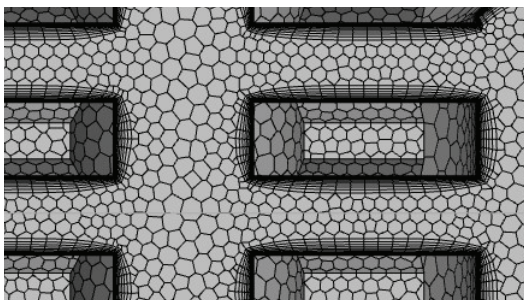


Fig. 4 Manifold minimum diameter tube mesh shape.

Table 1. Comparison flow match rate of CDM1 by number of mesh.

Num. of Mesh	LOx Flow Match Rate [%]	GCH ₄ Flow Match Rate [%]
5,123,194 (75%)	94.32	99.97
6,819,743 (100%)	99.97	99.99
8,085,174 (118%)	99.98	99.85
9,805,448 (143%)	99.97	99.91
10,322,956 (151%)	99.66	99.98

Table 2. Number of mesh by manifold design.

Model #	Number of Mesh
CDM1	6,819,743
CDM2.1	6,944,895
CDM2.2	6,874,063

VOF(Volume of Fluid)를 사용하였다. 난류 모델의 경우 realizable k- ϵ 모델을 선택하였고 그 외의 전산해석 세부 설정은 아래 Table 3과 같다.

매니폴드의 경계조건은 Table 4와 같다. 3등급 액체로켓엔진 설계 유량은 산화제(LOx)의 경우 6.53 kg/s이고 연료(GCH₄)는 1.93 kg/s이지만, 본 연구에서는 매니폴드의 1/2 영역을 Symmetry 조건으로 해석하기 때문에 산화제와 연료 각각 1/2의 유량인 3.265 kg/s와 0.965 kg/s가 유입되도록 유입 조건을 설정하였다. 해석에 사용된 산화제(LOx)와 연료(GCH₄)의 물성치는 Table 4와 같이 유입 배관의 입구 조건에서의 NIST 상태량 데이터[5]를 사용하였다. 그리고 본 연구는 추진제의 유동 균일성을 확인하기 위한 전산해석이므로

단열조건으로 해석하여 매니폴드에서 추진제의 열전달에 의한 효과는 고려하지 않았다[3,4].

3. 매니폴드 유동 균일성 전산해석 결과

매니폴드 설계안 유동 균일성 판단기준인 매니폴드의 유량분포(Flow rate distribution)는 Eq. 2와 같이 정의하였다. 매니폴드는 설계안 변경을 통해 각 분사기의 MFR(Mass Flow Rate) \dot{m}_i 이 분사기당 설계 유량인 \dot{m}_t 와 $\pm 5\%$ 이내 오차 범위 안에 분포하는 것을 목표로 했다.

Manifold flow rate distribution

$$= \frac{(\dot{m}_i - \dot{m}_t)}{\dot{m}_t} \times 100[\%] \quad (2)$$

Table 3. Fluent setting conditions.

Models		Setting
Simulation type		3D, Symmetry
Solver	Type	Pressure-based
	Time	Steady
	Gravity	Enabled (9.81 m/s ²)
Multiphase model	Model	VOF
	Volume fraction parameters	Implicit, Implicit Body Force
	options	Sharp/Dispersed
Viscous Model	Model	realizable k- ϵ
	options	enhanced wall treatment

Table 4. Boundary conditions and materials.

Oxidizer Inlet	Material	LOx
	Temperature [K]	96
	mass Flow Rate [kg/s]	3.265
	Density [kg/m ³]	1124
Fuel Inlet	Material	GCH ₄
	Temperature [K]	515
	mass Flow Rate [kg/s]	0.965
	Density [kg/m ³]	20.773

3.1 초도 설계안

초도 설계안인 CDM1의 유동 균일성 전산해석 결과는 Fig. 5와 같다. 전산해석 결과 매니폴드 유량 분포는 연료(GCH₄) - 3.21~6.76%이고 산화제(LOx) - 14.29~6.27%이다. 매니폴드 정압 분포를 보았을 때 연료와 산화제의 매니폴드 유입구(Inlet)에서 높은 정압이 형성될 것으로 예측되었다. 이에 수정 설계안에서는 연료와 산화제의 유입구(Inlet)의 직경을 증가시켰다.

매니폴드에서 분사기 홀로 유입되는 평면에서의 정압분포인 Fig. 6은 질량 유량의 분포와 유사한 분포를 보인다. 분배관을 통과한 연료가 빠른 속도로 분배관 구멍을 통과해 중심부로 유량이 집중되어 중심부에 높은 정압이 형성되는 현상이 예측되었다. 따라서 중심부 유량 집중 현상을 해소하기 위해 연료 분배관의 구멍 개수 및 직경을 증가시켜 수정 설계안을 설계했다.

3.2 수정 설계안

초도 설계안의 전산해석 결과를 반영하여 수정 설계안을 설계하였다. 추진제 유입구 직경을 초도 설계안 대비 연료 41%, 산화제 28% 확대했고 접합부 형상을 원형에서 타원형으로 변경하였다. 또한 연료 분배관의 구멍 개수 및 직경

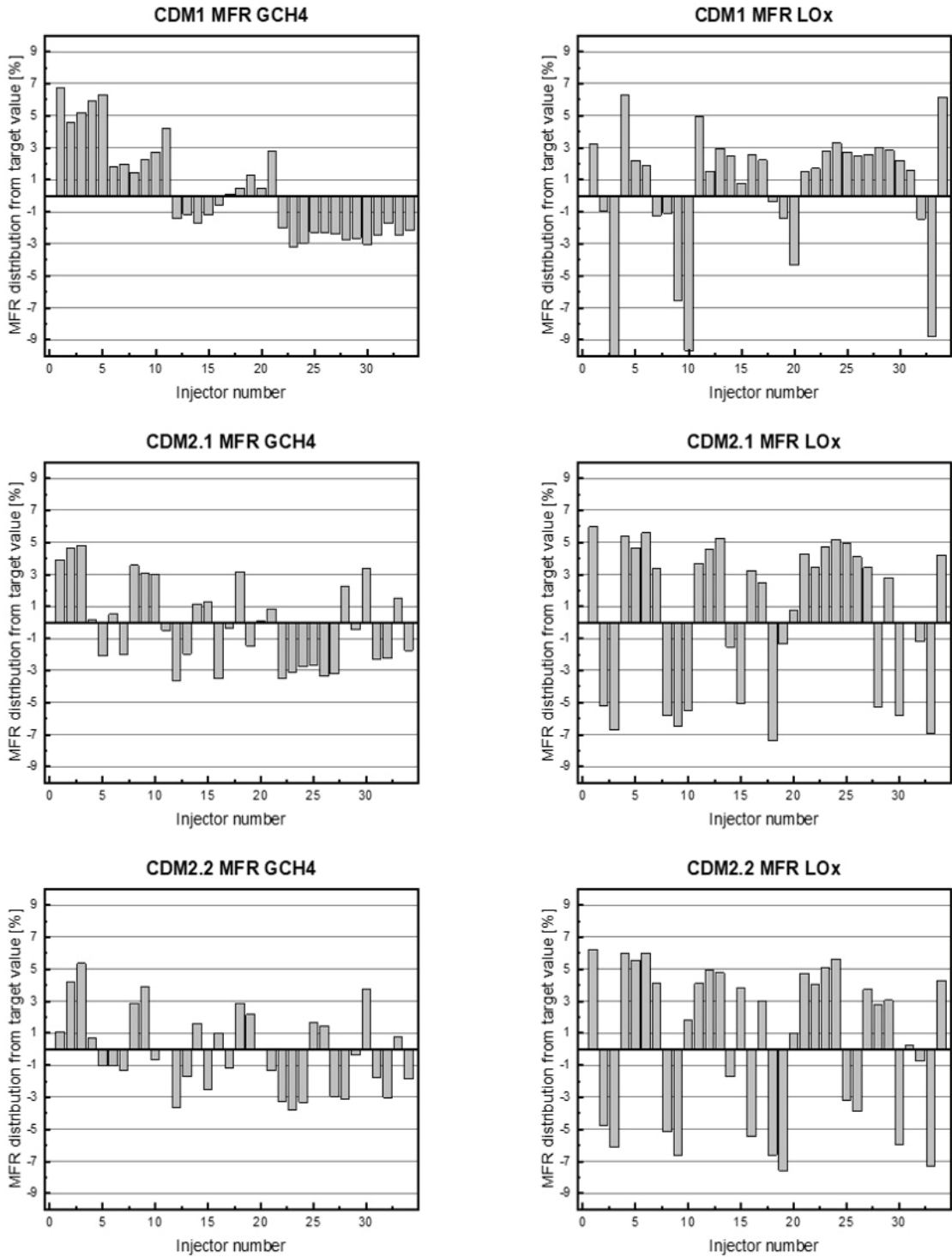


Fig. 5 Mass flow rate per injector number GCH4 (left), LOx (right).

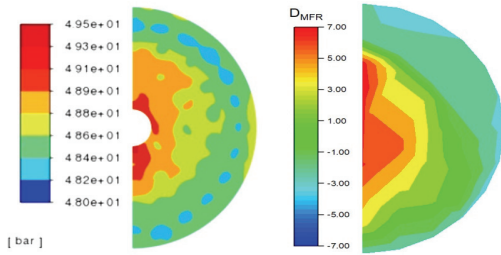


Fig. 6 CDM1 fuel static pressure(left), MFR distribution (right).

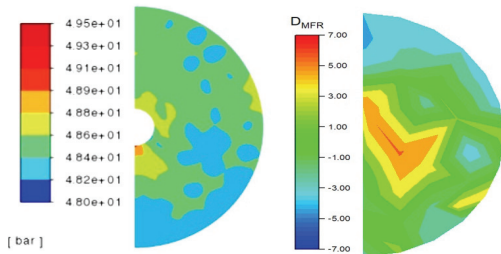


Fig. 7 CDM2.1 fuel static pressure(left), MFR distribution (right).

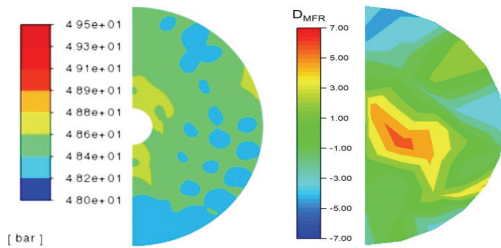


Fig. 8 CDM2.2 fuel static pressure(left), MFR distribution (right).

을 증가시킨 설계안을 CDM2.1과 CDM2.2의 2가지로 설계하였다.

3.2.1 CDM2.1

수정 설계안인 CDM2.1은 기본 설계안에서 추진제가 유입되는 접합부의 형상을 타원으로 변경하였고 직경을 확대했다. 또한 연료 분배판의 구멍 개수를 1.86 배 증가시켰고, 연료 분배판 구멍의 직경을 각 열별로 1 배에서 2 배까지 점차적으로 증가시켰다. CDM2.1 유동 균일성을 전산해석한 결과는 Fig. 5와 같다. 전산해석 결

과 매니폴드 유량 분포는 연료(GCH₄) -3.63~4.82%이고 산화제(LOx) -7.39~5.96 %로 초도 설계안(CDM1)에 비해 유량 편차가 감소한 것을 확인할 수 있었고 전반적인 유동 균일성도 향상될 것으로 예측되었다. 초도 설계안(CDM1)과 비교했을 때 Fig. 7과 같이 연료의 분배판 홀 개수와 직경을 증가시켜 매니폴드 중심부에 높은 정압이 형성되어 유량이 집중되는 현상이 완화될 것으로 예측되었다. 산화제의 유동은 산화제 유입구(Inlet) 반대편의 분사기에서 상대적으로 낮은 유량이 예측되었다.

3.2.2 CDM2.2

수정 설계안인 CDM2.2는 CDM2.1과 동일하게 초도 설계안(CDM1)에서 추진제가 유입되는 접합부의 형상을 변경하고 유입 직경을 확대한 설계안이다. 반면, 분배판의 구멍의 개수는 1.37 배 증가, 구멍의 직경은 일괄적으로 1.6 배 확대시켰다는 차이점이 있다. CDM2.2 유동 균일성을 전산해석한 결과는 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 전산해석 결과 매니폴드 유량분포는 연료(GCH₄) -3.77~5.36%이고 산화제(LOx) -7.57~6.23%이고, 추진제 유량 분포의 편차가 감소한 것을 확인할 수 있었고 전반적인 유동 균일성도 향상될 것으로 예측되었다. 연료의 유동 균일성은 초도 설계안(CDM1)과 비교했을 때 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 향상되었고 매니폴드 중심 집중현상이 완화되었으나, 연료 분배판의 형상에 차이가 있는 CDM2.1과 비교했을 때에는 연료 측면에서 CDM2.1이 더욱 유량 균일성이 향상될 것으로 예측되었다.

각 매니폴드 설계안별 유동 균일성을 비교한 수치는 Table 5와 같다.

Table 5. Comparison flow rate distribution by model.

Model #	GCH ₄ Flow rate distribution [%]	LOx Flow rate distribution [%]
CDM1	-3.21 ~ 6.76	-14.29 ~ 6.27
CDM2.1	-3.63 ~ 4.82	-7.39 ~ 5.96
CDM2.2	-3.77 ~ 5.36	-7.57 ~ 6.23

초도 설계안 CDM1과 비교해 수정 설계안 CDM2.1과 CDM2.2는 유동 균일성 면에서 개선되었고, 특히 CDM2.1의 연료 유동 균일성은 설계시 목표한 오차 범위 내의 유동 분포를 보였다. 해석대상으로 선정한 3개의 설계안 중 연료와 추진제 모두 매니폴드 유량분포 설계목표인 $\pm 5\%$ 이내 오차 범위 안에 분포하는 설계안은 없었지만, 연료(GCH_4) 영역에서 목표한 유동 균일성을 달성한 CDM2.1의 최적화를 통해 산화제(LOx)의 유동 균일성을 개선하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. CDM2.1은 산화제(LOx) 유동 영역에 분배판을 추가하거나 유입구 형상을 최적화함으로써 유량 불균일성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

상용 프로그램인 Fluent를 이용하여 3톤급 액체로켓엔진 연소기 매니폴드의 유동 균일성을 파악하기 위한 전산해석을 수행하였다. 기존의 연구들과 달리 매니폴드내 산화제와 추진제의 유동 균일성을 동시에 예측하였다. 기본 설계안의 매니폴드 성능을 개선하기 위해 연료 분배판의 형상과 매니폴드 유입 배관 접합부를 개선한 수정 설계안에 대하여 해석하여 유동 특성을 확인하였다. 해석 결과 유입구 형상을 타원형으로 변경한 설계안이 유동 균일성 개선되었고, 분배판의 형상이 유동 균일성에 영향이 있는 것으로 판단된다. 수정 설계안의 경우도 유량 균일성의 향상을 형상 변경 등의 다양한 시도를 통하여 개선이 필요하지만, 엔진설계 단계에서 액체로켓엔진의 매니폴드 유동 균일성을 향상시킬 수 있는 설계 형상을 제시했다는 것에 의의가 있다.

후 기

본 연구는 서울대학교 항공우주기술연구소의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2021R1A2C2003759, RS-2023-00249707, RS-2022-00156358)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Haidn, O.J., "Advanced rocket engines," *Advances on propulsion technology for high-speed aircraft*, Vol. 1, pp. 6-1, 2008.
- 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*, San Diego, California, p. 5930, Jul. 2011.
- Joh, M.O., Han, S.H., Kim, S.K. and Choi, H.S., "Flow Analysis of the Oxidizer Manifold for a Liquid Rocket Combustor using OpenFOAM," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 40, No. 9, pp. 781-788, 2012.
- Kim, H.J. and Choi, H.S., "Flow Analyses for the Uniform Distribution of Propellants at Manifolds of a Full-scale Gas Generator," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 37, No. 11, pp. 1140-1147, 2009.
- "NIST Chemistry WebBook-Thermophysical Properties of Fluid Systems," retrieved 14 Apr. 2013 from <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
- ANSYS Fluent 2022 R1, "Ansys Fluent User's Guide," ANSYS, Inc., Canonsburg, P.A., U.S.A., 2022.