

# 산화제 매니폴드 입구유동의 맥동 현상이 산화제 분사량에 미치는 영향

이건호\* · 변영환\*\* · 나양\*\*\*

## Effect of Inflow Fluctuation of LOX Manifold of Liquid Rocket on the Flow

Gunho Lee\* · Yung-Hwan Byun\*\* · Yang Na\*\*\*

### ABSTRACT

Effect of fluctuation imposed on the inflow to LOX manifold of liquid rocket has been analyzed numerically. Time-varying fluctuation was idealized by the sinusoidal signal and three different representative frequencies were considered. It was found that all the frequencies tested produced the consistent flow reactions in the manifold in that the place close to the region of injection showed oscillatory flow rate through injector orifices in phase with the inflow fluctuation whereas the other side exhibits characteristics which are out of phase.

### 초 록

수치해석 기법을 이용하여 산화제 매니폴드로 유입되는 유동의 맥동현상이 분사공을 통과하는 산화제 유량에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 세 가지 다른 주파수로 특정 지워지는 맥동현상을 입구유동에 부과하였을 때 모두 비슷한 유동 양상을 보였다. 즉, 산화제 입구와 가까운 지역에서는 분사공을 통한 유량이 부과된 맥동의 주파수와 같은 위상을 갖고 시간에 따라 변화하나, 반대편에서는 180°의 위상차를 보였으며, 주파수가 증가할수록 유량의 진폭이 증가하는 경향을 보였다.

Key Words: LOX Manifold(산화제 매니폴드), Fluctuation of Inflow(맥동 입구 유동), Frequency (주파수)

### 1. 서 론

† 2004년 8월 4일 접수 ~ 2004년 9월 6일 심사완료

\* 학생회원, 건국대학교 기계공학과 대학원

\*\* 중신회원, 건국대학교 항공우주공학과

\*\*\* 정회원, 건국대학교 기계공학과

연락처, E-mail: yangna@konkuk.ac.kr

액체로켓은 중요한 추진 시스템 중의 하나로 액체 연료와 산화제를 혼합하여 연소시킴으로써 필요한 추진력을 얻는다. 출력을 높이기 위해서

는 연료와 산화제를 미리 가압하여 연소실로 보내야 하는데, 이에에는 다음과 같은 두 가지 방식이 널리 사용되고 있다[1]. 즉, 고압의 연료를 탱크에 직접 저장하는 고압탱크 방식과 저압 상태로 탱크에 저장된 연료를 터보펌프를 사용하여 가압시키는 터보펌프 방식으로 크게 나뉘게 된다. 고압탱크 방식은 구조가 간단하다는 장점이 있지만, 고압을 지탱해내기 위하여 탱크의 벽 두께가 두꺼워져야 하므로 무게의 증가로 인해 엔진의 비추력이 낮아지는 단점이 있다. 반면에 터보 펌프 방식은 고속으로 회전하는 터보 펌프에서 진동, 캐비테이션 등의 문제가 발생할 수 있어 이를 방지하기 위한 고도의 기술이 요구되기는 하지만, 엔진의 크기가 작아지게 되어 비추력을 높일 수 있다는 장점을 갖고 있다. 일반적으로 터보펌프 방식이 고압 탱크 방식에 비해 장시간 운행에 적합하며, 탱크 무게의 감소로 인해 전체적으로 우월한 성능을 보이게 된다. 2003년도에 한국에서 자체 개발되었던 KSR-3에는 고압탱크 방식이 채택되었으나, 차세대 우주발사체인 KSLV에는 터보펌프 가압 방식이 사용될 예정인데, 엔진 시스템에서 터보펌프의 역할은 앞으로 계속해서 증대될 것으로 예측된다.

터보펌프를 운영하는 경우, 주어진 운행범위 내에서 추진제펌프와 이를 구동하기 위한 터빈, 터빈에 필요한 동력 시스템, 기어 트랜스미션, 추진제 입출구 덕트 등의 기본적인 요소들이 안정적이면서도 신뢰성있게 작동하도록 시스템을 설계하여야 하는데, 이를 위해서는 각 부분에 대한 방대한 기초연구 및 선형적 지식이 필요하게 된다. 본 그룹에서는 과거에 산화제 매니폴드 내의 유동장에 대한 수치해석적 연구를 수행하고, 분사공 모델의 개선을 통해 계산수행 시간을 줄이기 위한 방안에 대해 보고하였는데 [2], 본 연구에서는 터보펌프를 통과하여 산화제 매니폴드로 유입되는 산화제의 유량이 시간에 따라 변화하는 경우, 즉 터보펌프의 특성 등으로 인해 유입산화제에 규칙적인 맥동현상이 부과되는 경우, LOX dome의 하부에 위치한 분사

공을 통해 연소실로 배출되는 산화제 유량에 어떤 영향이 주어지는지를 파악하는 것이 주요 목적이 된다. 입구의 맥동 현상이 분사공을 통한 산화제 유량에 시간에 따른 큰 변동을 야기한다면 이는 곧 연소 불안정성으로 연결되기 때문에 이에 대한 특성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 이를 위해서 LOX dome으로 유입되는 산화제가 시간 상에서 주기함수적인 특성을 가질 때 매니폴드 내부의 유동이 어떻게 반응하는지를 수치해석의 방법을 통해 살펴보았다.

참고문헌으로부터 얻은 세 가지 다른 주파수 특성을 유입되는 산화제에 부과하였으며, 유동해석용 상용 프로그램인 CFDRC사의 CFD-ACE+를 사용하여 해석을 수행하였다. 계산영역은 KSR-3의 산화제dome의 실제 형상과 매우 유사하도록 구성하여 해석의 현실성을 높였으며, 해석 결과를 추후에 PIV를 이용한 실험결과와 비교, 검증하기 위해서 실험이 현실적으로 가능하도록 유동파라미터를 단순화하였다. 그러나 분사공 한 개당의 유량은 실제 운영조건과 같도록 하였다.

## 2. 수치해석 방법

주어진 3차원의 계산영역에서 standard  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하여 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) 방정식의 해를 구하였다. 산화제 매니폴드로 유입되는 작동 유체는 액체산소이며, 액체 상태가 유지되도록 하기 위해서 온도는 87K로 유지하였다. 실제 액체로켓의 경우, 압력이 약 30~40기압 정도로 유지되므로, 열역학적 측면에서 보면 이 상태에서 작동유체가 기화되는 양은 무시할 수 있다. 입구 질량은 5.4 kg/s로 일정하게 유지하였으며, 매니폴드 입구의 유속과 지름을 기준으로 한 레이놀즈수가 대략  $10^6$  정도이다. 입구 경계조건에 필요한 난류강도는 3%로 주었으며, 자세한 내용은 Kim et. al[2]에 기술되어 있다.

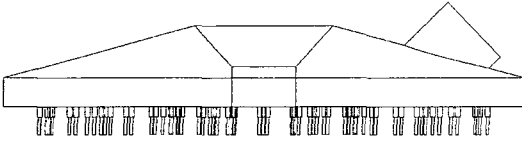


Fig. 1 Computational domain for LOX manifold

Figure 1은 해석에 사용된 산화제 매니폴드의 형상을 갖는 계산영역인데, 예분산판[3]의 영향을 배제하고 본 연구의 목적인 산화제 입구의 맥동현상에 집중하기 위해서 예분산판을 장착하지 않은 상태에서 해석을 수행하였다. 매우 복잡한 형상의 계산영역을 효과적으로 처리하게 위해서 사면체로 구성된 비정렬 격자계를 사용하였는데, 해석에 약 60만개 정도의 격자수가 이용되었다. 격자수의 증가는 더 높은 해의 정확성을 줄 수 있으나, 몇 가지 예비 계산 결과를 토대로 하여 충분한 정확성을 얻을 수 있도록 그 격자수를 결정하였다.

작동유체는 앞서 언급한 바와 같이 액체 산소이며, dome 입구에서의 유동 조건은 주 엔진 연소실의 운전조건과 물성치로부터 결정되었다 (Table 1).

Table 1. Computation parameters

| Geometry data |         | manifold condition(87K) |                        |
|---------------|---------|-------------------------|------------------------|
| $D_{in}$      | 59.5 mm | $M_{in}$                | 5.4 kg/s               |
| $D_{inj}$     | 2.2 mm  | $\mu$                   | 0.0002 pa · s          |
|               |         | $\rho$                  | 1140 kg/m <sup>3</sup> |
|               |         | $V_{in}$                | 3.4 m/s                |

여기서  $D_{in}$ 은 산화제 dome 입구관의 직경이며,  $D_{inj}$ 는 분사공 출구의 직경이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 LOX dome 입구에서의 이상화된 맥동유동

Sutton[4]은 액체로켓과 관련된 다양한 실험을 수행하여 많은 정보를 제공하였는데, 8초 동안 고정된 Vulcain HM 60의 연소실 실험에서 산화제 분사공 매니폴드의 압력 진폭과 주기를 측정하여 시간에 따른 그래프를 보고하였다. 처음 몇 초 동안에는 500Hz까지의 저주파수 영역에서 Chugging현상이 나타났으며, 500Hz ~ 600Hz 사이에서 연속적으로 나타난 진동은 연료공급 장치와 연관되어 있는 것으로 생각되었다. 또 1500Hz 근처의 고주파수 영역에서 발생된 진동은 고주파 압력변환기가 장착되어진 산화제 매니폴드의 고유 공진주파수와 관련된 것으로 추측되었다.

한편 Ertas[5]는 액체 로켓의 터보 펌프의 완충기에 대한 설계과정 중에, 120Hz 주위에서 매우 큰 진폭이 발생하는 것을 확인하였는데, 이는 터보펌프로부터 산화제가 유입되는 경우에, 펌프에서 토출되는 유량 특성이 펌프의 블레이드의 수 보다는 펌프 자체의 진동에 더 많은 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다.

본 연구의 목적은 산화제 매니폴드 입구에서의 맥동 현상이 내부 유동장에 미치는 영향을 알아보기 위한 것인데, Sutton[4] 및 Ertas[5]의 실험결과로부터 유추할 수 있듯이, 맥동현상이 터보 펌프와 같은 산화제 및 연료 공급 장치의 특성으로 인해 발생할 수 있을 뿐만 아니라, 매니폴드의 자체의 고유진동수와도 관련될 수 있으므로, 위에서 언급된 다양한 범위의 주파수 영역 (120~1500Hz)에서 수치실험을 수행하는 것이 타당하다고 판단되었다. 실제 운행 중인 로켓에서는 연소실에서 발생하는 다양한 종류의 진동이 매우 중요한 역할을 하겠지만 이에 대한 정량적인 데이터가 아직 충분히 많지 않기 때문에 우선은 연소실의 영향을 고려하지 않은 경우를 채택하였다. 그러나 보다 현실적인 해석이 되기 위해서는 연소실이 매니폴드에 미치는 영향을 고려하기 위한 연구가 추후에 계속적으로 수행되어야 할 것으로 생각된다.

본 연구의 계산에 사용된 주파수와 시간 간격

Table 2. Time parameters

| Frequency | Periodic time | Time step       |
|-----------|---------------|-----------------|
| 120Hz     | 0.08333 sec   | 0.000520833 sec |
| 500Hz     | 0.002 sec     | 0.000125 sec    |
| 1500Hz    | 0.000667 sec  | 0.000041667 sec |

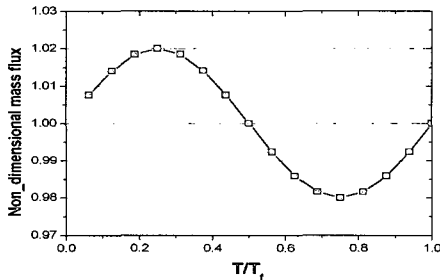


Fig. 2 Mass flux made dimensionless by time averaged mass flux at inlet

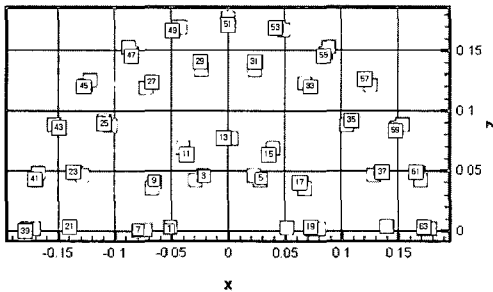


Fig. 3 Location of injector orifices

은 Table 2에 정리되어 있다. 평균유량의 2%의 진폭을 가지며 시간에 따라 sin 함수로 변화하는 이상화된 입구 조건이 Fig. 2에 나타나 있다 여기서  $T_0$ 는 유동특성의 주기를 나타낸 것이며, 가로축의 시간은  $T_0$ 로 무차원화 되었다. Fig. 3은 앞으로 보여질 결과에 대한 이해를 높이기 위한 것으로, 분사공 위치와 분사공의 고유번호가 표시되어 있다.

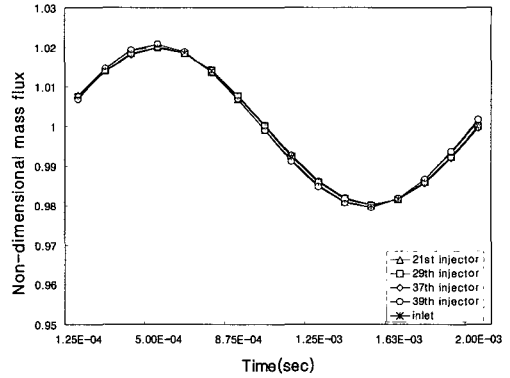


Fig. 4 Mass flux made dimensionless by time averaged mass flux at each injector orifice for 120Hz case

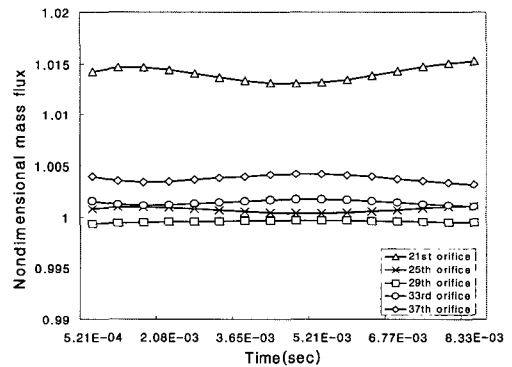


Fig. 5 Mass flux through injector orifices made dimensionless by space-averaged mass flux for 120Hz case

### 3.2 입구에서 120Hz의 특성으로 유입된 경우

앞서 언급한 바와 같이 Ertas[5]는 120Hz의 주파수에서 터보펌프가 큰 진폭으로 진동하는 것을 관찰하였는데, 이는 상당히 낮은 진동수 특성을 갖는 경우라고 할 수 있다. Fig. 4에는 몇 개의 선택된 분사공에서 시간에 따른 유량의 변화를 보여주고 있는데, 각각의 분사공에서의 유량을 그 분사공에서의 시간평균된 유량으로 정규화하여 세로축에 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 입구에서 2%의 진폭을 갖고 산화제가 유입될 때, 각각의 분사공들은 2%가 아닌 서로

다른 진폭값을 가질 수 있다는 것을 알 수 있다. 특히 산화제가 유입되는 입구 근처에 위치한 분사공들(21번과 39번 분사공)이 다른 쪽 면에 있는 분사공들보다 더 큰 진폭을 보이는데 그 상대적 크기는 입구에 주어진 주파수에 따라 달라진다.

Figure 5는 각각의 순간에서 공간 평균된 유량으로 무차원화된 유량분포를 한 주기 동안 보여주고 있다. 산화제 유입구 쪽에 위치한 분사공에서는, 산화제 입구에 부과된 시간적 특성과 동일한 양상 즉, 입구에서 주어진 sin 함수와 같은 위상을 보여주나, 산화제 입구의 반대쪽에 위치한 분사공들의 경우를 살펴보면 산화제 유입구로부터 멀어짐에 따라 sin 거동의 특성이 약해지다가 산화제 유입구 반대 쪽에 있는 분사공에서는 입구의 거동과 위상이 완전히 달라진 cos 함수의 거동을 보여주게 된다. 이는 산화제의 입구쪽과 반대쪽의 유동이 180°의 위상차로 특징 지워지는 특성을 갖고 있음을 나타낸 것이라 할 수 있다.

Figure 6은 산화제가 매니폴드에 유입되는 유량이 최대(◇), 최소(△), 평균(×, ○)인 시간에서 공간평균에 대한 유량 변동을 나타낸 것이다. Original이라고 표시된 경우는 입구에서 산화제가 맥동 현상없이 일정하게 유입된 경우를 의미

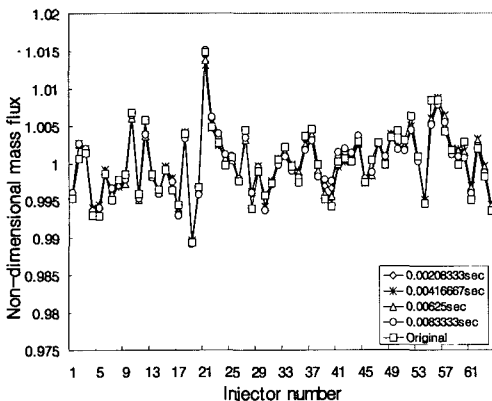


Fig. 6 Mass flux made dimensionless by space averaged mass flux for 120Hz case

한다. 그림에서 보는 바와 같이 각 분사공에서의 유량 분포는 맥동이 없는 경우와 유사한 거동을 보인다. 분사공에 따라 조금씩의 차이는 있지만 주어진 입구 조건에 따른 분사공의 반응은 무시할 정도로 작다고 보아야 할 것이다.

### 3.3 입구에서 500Hz의 특성으로 유입된 경우

Sutton[4]의 실험결과를 이용하여, 500Hz의 특성을 갖는 유량이 공급되었을 경우에, 산화제 매니폴드 내부의 유동에 어떤 변화가 보이는 지

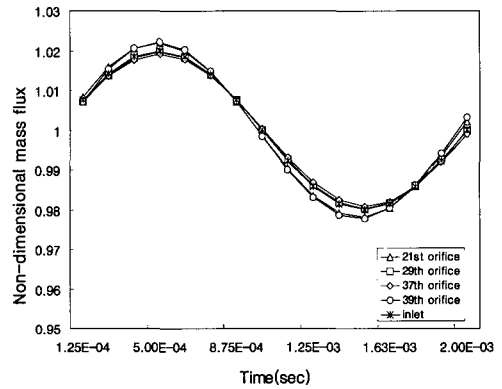


Fig. 7 Mass flux made dimensionless by time averaged mass flux at each injector orifice for 500Hz case

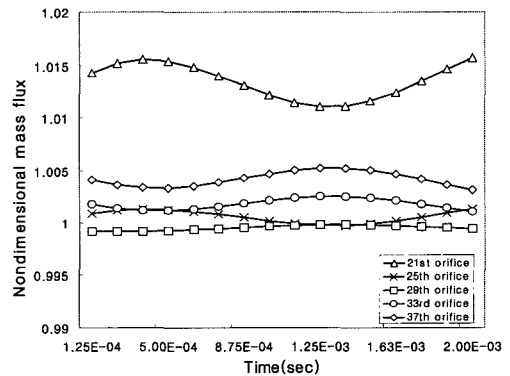


Fig. 8 Mass flux through injector orifices made dimensionless by space-averaged mass flux for 500Hz case

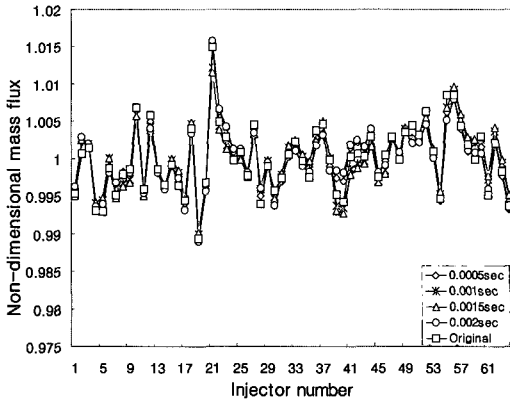


Fig. 9 Mass flux made dimensionless by space averaged mass flux for 500Hz case

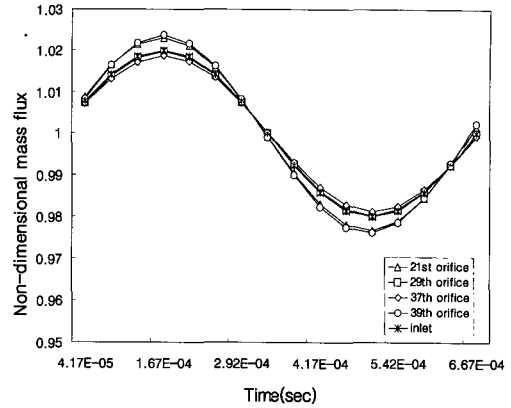


Fig. 10 Mass flux made dimensionless by time averaged mass flux at each injector orifice for 1500Hz case

에 대해 알아보았다. Fig. 7은 매니폴드 입구에서 500Hz의 주파수로 산화제를 공급하였을 경우, 선택된 몇 개의 분사공을 통해 배출되는 유량의 시간에 따른 변화를 보여 주고 있다. Fig. 4에서와 유사한 양상을 볼 수 있는데, 120Hz의 경우에 비해 산화제 입구 쪽에 위치한 분사공이 더 큰 진폭을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 입구에서의 맥동 주파수가 120Hz에서 500Hz로 증가하게 되면, 산화제 유입구 쪽에 위치한 분사공을 통한 유량은 더 큰 진폭을 갖게 되고, 이는 연소실로 유입되는 유량이 공간상에서 더 큰 불균일성을 갖도록 한다.

Figure 8은 Fig. 5에서와 같이, 각 시간에서 공간 평균된 유량으로 무차원화된 유량 특성을 보여주고 있다. 앞서 살펴본 120Hz의 경우에서와 같이 산화제 입구 쪽에 위치한 분사공에서는 sin 함수의 특성을 보여주는 반면, 산화제 반대쪽의 분사공에서는 위상이 180° 바뀐 cos 함수의 거동을 보여주는데, 500Hz의 경우 산화제 입구 쪽과 그 이외 지역에서의 유량의 불균일한 공급 정도가 더 심화되고 있음을 알 수가 있다. Fig. 9는 분사공을 통한 유량의 불균일성 정도를 나타낸 것인데, 입구유동에 맥동을 주지 않은 경우(그림에서 original로 표시된 경우)에 비해 불균일성이 상대적으로 크게 증가하지는 않았음을 보여주고 있다.

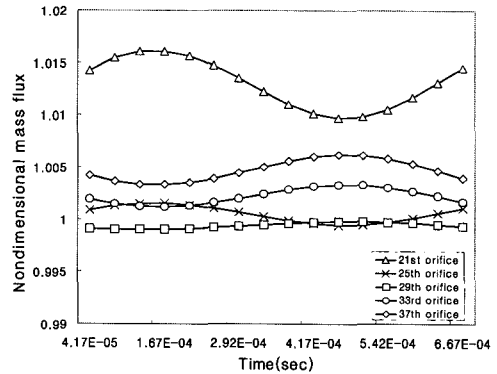


Fig. 11 Mass flux made dimensionless by space averaged mass flux for 1500Hz case

### 3.4 입구에서 1200Hz의 특성으로 유입된 경우

마지막으로 입구에서 1200Hz의 특성이 부과된 경우를 살펴보았다. 시간에 따른 유량의 변동을 보여주는 Fig. 10은 입구에서 평균유량의 2%의 진폭으로 산화제가 유입될 경우 최대 2.3%의 진폭을 갖는 분사공이 존재한다는 것을 의미한다. 이는 120Hz 또는 500Hz의 경우와 비교하여 볼 때 분사공을 통한 유량의 불균일성이 더 증가되었음을 의미한다. Fig. 11은 공간 평균된 값으로 무차원화된 유량 분포를 보여 주는

것으로서 다른 주파수에서의와 동일한 양상을 발견할 수 있다. 그러나 1500Hz의 경우에는 저주파수의 경우에 비해 sin 함수나 cos 함수의 진폭이 더 크게 나타난 것을 알 수 있다.

따라서 입구유동에 부과된 주파수의 크기에 관계없이 각각의 분사공에서는 비슷한 유동 양상을 보이나, 주파수가 증가함에 따라 유량의 시간에 따른 변화의 진폭이 더 커지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 설명하기 위해서는 매니폴드 내부의 유동구조가 갖는 주파수 특성 파악이 선행되어야 하며, 이들 유동구조에 주어지는 외력 주파수와 이들과의 상호관계에 대한 이해가 있어야 할 것이다. 본 연구에 사용된 매니폴드 내부에는 커다란 2개의 유동패턴이 매니폴드 좌우측에 각각 존재하므로[2] 각각의 패턴이 외부 forcing에 어떻게 반응하는지를 파악하는 것은 쉽지 않으나, 추후에 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

산화제 매니폴드로 유입되는 액체산소가 시간에 따라 맥동 현상을 보이는 경우에, 분사공을 통해 연소실로 배출되는 유량 분포가 어떤 특성을 보이는지 알아보기 위한 수치해석적 연구를 수행하였다. 실제 KSR-3와 매우 비슷한 형상을 갖는 계산 영역을 택하였으며 분사공 한 개당의 유량을 실제 운행조건과 같도록 하여 해석의 현실성을 높였다. 본 연구에서는 문헌을 통해 얻은 세 가지의 다른 주파수 특성 (120, 500, 1500Hz)을 매니폴드로 유입되는 산화제에 부과하고, 각각의 경우에 대해 내부 유동장을 수치해석 하였다.

산화제 유입구와 가까운 지역에 위치한 분사공을 통해 배출되는 유량은, 입구를 통해 유입되는 산화제에 부과된 주파수와 같은 위상을 보이나, 그 반대쪽에 위치한 분사공에서는 180°의 위상차

를 갖고 산화제가 배출되었다. 본 연구에서 살펴본 세 가지 주파수의 경우 모두 비슷한 유동 양상을 보여주었는데, 주파수가 증가할수록 맥동현상의 효과가 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 매니폴드 내부에 존재하는 커다란 2개의 유동 구조[2]가 시간에 따라 서로 다른 위상 특성을 갖고 상호작용하기 때문인 것으로 판단되나, 정확한 물리적 원인을 알아내는 것은 추후의 연구과제가 될 것이다.

#### 후 기

이 연구는 한국항공우주연구원의 위탁 과제인 “로켓엔진 연소기 헤드 내의 열/유동 해석 연구”의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. K. K. Huzel, and D. H. Huang, “Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines,” AIAA, Washington DC, 1992
2. H. Kim, Y. H. Byun, W. Cho, W. Seol, Y. Na, “Modeling of Injector Orifice for the Flow Analysis in LOX Manifold of Liquid Rocket,” KSPE J., Vol. 8, No. 2, pp.1-9, 2004
3. W. K. Cho, “Analysis on Propellant Injection Uniformity of Main Engine of KSR-3,” KARI-RERD-TM, 2002
4. G. P. Sutton, “Rocket propulsion elements,” John wiley & sons, inc., N. Y., 2001, pp.348-355
5. B. H. Ertas, E. Al-Khateeb and J. M. Vance, “Rotodynamics Bearing Dampers for Cryogenic Rocket Engine Turbopumps,” J. Propulsion and Power, Vol. 4, 2003, pp.674-682