

액체로켓엔진 재순환 유로에서의 수격현상에 관한 실험적 연구

김보겸^{a,*} · 홍문근^{a,b} · 이지성^b · 김정환^b

Experimental Investigation on Water Hammer Phenomenon in the Recirculation Line of a Liquid Rocket Engine

Bokyem Kim^{a,*} · Moongeun Hong^{a,b} · Jisung Lee^b · Junghan Kim^b

^a*Aerospace System Engineering, University of Science and Technology, Korea*

^b*Launcher Propulsion Control Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea*

*Corresponding author. E-mail: c2493kr@ust.ac.kr

ABSTRACT

In a liquid rocket engine system, the flow of oxidizer into the combustion chamber is controlled by the main oxidizer shut-off valve. When the valve is closed, the oxidizer flows via the recirculation line, not into the combustion chamber. In this situation, the measured pressure could be much higher than a design value because of the water hammer phenomenon. In this paper, the experiments on the water hammer in the recirculation line with different initial conditions were conducted in order to study the pressure wave produced in each case. According to the experimental results, characteristics of the pressure wave in the recirculation line depend on the initial condition. To be specific, the pressure surge is maximized in case that the shock is condensation-oriented in the end of the recirculation line.

초 록

액체로켓엔진의 구성품인 연소기 산화제 개폐밸브는 연소기에 공급되는 산화제를 제어한다. 밸브가 닫힐 때 산화제는 연소기 대신 재순환 유로로 공급되며, 이때 발생한 수격현상에 의해 설계 기준보다 큰 압력이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 액체질소를 운용 유체로 사용하여 재순환 유로의 초기 조건에 따른 수격 시험을 수행하였으며, 그 결과 발생하는 압력파를 분석하였다. 초기 조건에 따라 재순환 유로 내부 압력파의 경향이 달랐으며, 특히 재순환 유로 끝단에서는 응축에 의한 수격이 발생할 때 압력이 최대로 커질 수 있음을 확인하였다.

Received 2 December 2020 / Revised 25 March 2021 / Accepted 30 March 2021

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2020년도 추계학술대회(2020. 11. 25-27),

파라다이스호텔 부산 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Key Words: Water Hammer(수격현상), Two-phase Flow(2상 유동), CIWH(Condensation Induced Water Hammer), Cryogenic Flows(극저온 유동), Main Oxidizer Shut-off Valve(연소기 산화제 개폐밸브)

1. 서 론

유체의 흐름을 제어하는 유공압시스템은 직선형 배관 이외에도 밸브, 펌프, 탱크, 오리피스, 엘보형 파이프 등과 같은 다양한 구성품으로 이루어져 있다. 유공압 구성품들은 유로 내부 단면적을 감소 시키거나 유체의 진행 방향을 전환하는 일종의 저항 역할을 한다. 배관 내부에 흐르는 유체의 압력은 구성품들에 의한 저항에 영향을 받게 되는데, 저항에 의해 유속이 감소하면서 생긴 운동량 변화는 압력으로 변환된다. 이때 발생하는 압력의 급격한 상승을 수격현상이라고 한다[1]. 이러한 수격현상은 예상치 못한 높은 수준의 압력파를 발생시켜 배관에 구조적인 충격을 줄 수 있는데, 배관의 설계압보다 큰 수격의 경우에는 배관이나 구성품이 파손될 수 있다.

극저온 환경에서의 수격현상은 액체질소나 액체산소 등을 사용하는 발사체, 인공위성 추진계통 시스템을 해석하기 위해 연구되고 있다[2,3]. 상온에서의 수격현상[4]과의 차이점은 큰 온도차에 따른 급격한 열전달에 의해 발생하는 상전이 현상 등이 대표적이다. 이러한 상전이 현상은 Two-phase flow(2상 유동)를 발생시켜 물리적인 현상의 복잡성을 가중시킨다. Gouriet 등[5]은 끝이 막힌 유로에 순간적으로 액체질소가 공급될 때의 현상을 실험하고 분석하였다. 진공에 가까운 낮은 압력의 비응축성 기체(Non Condensable Gas)로 채워진 초기 유로의 압력이 액체의 증기압보다 낮아 기화가 활발하게 이루어지고, 기화된 질소는 계속 밀어오는 액체질소에 의해 압축된다. 액체질소가 유로 끝단에 부딪힐 때 압력은 증가하게 된다. Shon[6]은 경수로의 수평관 내에서 발생하는 수격현상을 분석했다. 액체와 증기가 동시에 흐르는 수평관 내 유동의 조건에 따라 발생한 액체 슬러그 때문에 증기 공동이 생성된다. 포화증기의 응축에 의한 감압과 동시에

슬러그가 가속하며 충돌이 일어나는데 이 현상을 CIWH(Condensation Induced Water Hammer)라고 한다.

한국형발사체 액체로켓엔진용 연소기 산화제 개폐밸브의 운영 중에도 극저온 유체의 응축에 의한 수격현상이 발생한다. 연소기 산화제 개폐밸브는 일종의 3방향 밸브로써, 밸브 작동 전에는 재순환 유로를 통해 산화제 탱크로 산화제를 재순환시킨다. 한편, 엔진 연소 중에는 밸브가 개방되어 재순환 유로는 차단되고 주유로가 개방됨으로써 연소기로 산화제를 공급한다. 엔진이 연소되는 동안 재순환 유로에 남아있던 액체산소는 온도가 상승하면서 기화한다. 이후 엔진 종료 시점에 밸브가 닫히면, 산화제는 다시 순간적으로 재순환 유로로 공급되는데, 이때 극저온 환경에서의 수격현상이 발생하면서 재순환 유로의 구조적 파손을 동반할 수 있는 큰 압력이 발생할 수 있다. 결국 엔진의 안정적인 운용을 위해서는 밸브 재순환 유로에서의 수격현상에 대한 이해가 요구된다. 이에 본 연구에서 액체질소를 이용하여 재순환 유로 내부 초기 상태와 밸브 입구 압력에 따른 극저온 환경에서의 수격현상에 대한 시험 결과를 소개하고자 한다.

2. 시험 설비 개요

2.1 연소기 산화제 개폐밸브

연소기 산화제 개폐밸브(MOV, Main Oxidizer shut-off Valve)는 액체추진기관의 연소기에 산화제의 공급을 조절하는 장치이다. 본 시험에서 사용된 연소기 산화제 개폐밸브의 단면과 밸브 개폐 상태에 따른 유체의 흐름을 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 밸브 몸체 가운데 스프링으로 둘러싸인 밸브 작동부(Moving part)의 움직임으로 밸브의 개방이 제어된다. 밸브가 닫혀 있는 상태

에서는 산화제는 재순환 유로를 통해 흐르며 구동압력이 공급되면 밸브 운동부에 힘이 작용해 밸브가 개방되고, 산화제는 연소기에 공급된다. 개방 후에 산화제의 운용압력은 밸브 운동부를 들어 올리는 방향으로 작용한다. 즉, 구동가스의 공급 없이 산화제의 운용 압력만으로 밸브 개방이 유지된다. 이러한 밸브를 개방 자체 유지 타입(Self-sustainable) 포핏 밸브라고 한다[7,8]. 구동부 압력이 없는 상태에서 산화제의 밸브 입구 압력이 대략 2.15 MPa 이하로 감소하게 되면 밸브가 닫히기 시작하며, 이때 밸브가 닫히는데 소요되는 밸브 행정 시간은 약 8 ms이다.

2.2 시험 설비

Fig. 2에서 시험 설비 사진과 함께 유동의 방향을 나타내었으며, Fig. 3(a)와 (b)에서 각각 측

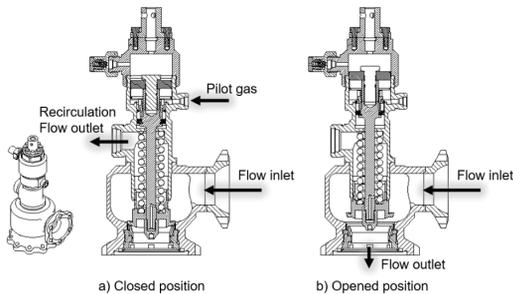


Fig. 1 Sectional view of the main oxidizer shut-off valve.

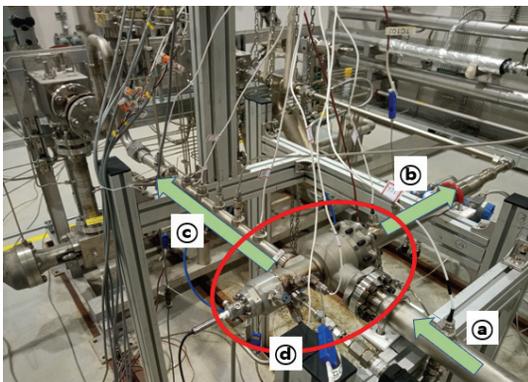


Fig. 2 Experiment setup (a: valve inlet, b: valve outlet, c: recirculation line, d: MOV).

정 센서의 위치와 센서 포트를 확인할 수 있다. 재순환 유로 내부에서 발생하는 압력파의 전파 과정을 측정하기 위해 재순환 유로 전단(Re-1), 중간(Re-2), 후단(Re-3)에 압력 센서를 설치하였다. 극저온용 압력 센서는 KULITE사의 CT-375-170BARA와 CT-375-70BARA 모델을 사용하였으며, 해당 센서는 -190°C 온도 환경에서 약 $\pm 4\%$ 의 오차범위를 가진다. 재순환 유로 내부에서의 빠른 압력 전파를 측정하기 위해 NI(National Instruments)사의 cDAQ(Compact Data Acquisition) 모듈을 사용해 측정 주파수를 50 kHz로 선정하였다. 또한 재순환 유로 압력 초기 조건을 확인하기 위해 KELLER사의 PA-23SY 상온용 압력 센서를 Re-1과 Re-2 지점 사이에 설치했다. PA-23SY는 상온 온도에서 약 $\pm 0.25\%$ 의 오차범위를 가진다. 온도 센서로는 SENTECH ENG사의 T타입 노출형 열전대 온도 센서를 사용하여 입구, 재순환 유로 전단과 후단에 설치하였다. 온도 센서의 측정 오차는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이며, 온도 센서의 낮은 반응 속도를 고려하여 측정 주파수는 50 Hz로 선정하였다.

2.3 시험 방법 및 시험 초기 조건

우선 밸브 작동 없이 재순환 유로로 액체질소를 공급하여 재순환 유로를 충분히 냉각시킨 이후에 구동압력을 공급하여 밸브를 개방하고 밸브의 재순환 유로를 차단하였다. 이후 산화제 개폐밸브의 구동압력을 해압한 상태에서 액체질소 공급탱크와 이어지는 설비용 밸브를 차단해 산화제 개폐밸브 입구 압력을 감소시켰다. 밸브 입구 압력이 특정 압력 이하로 감소하면 밸브가 닫히면서 액체질소가 재순환 유로를 향해 순간적으로 재공급되도록 하였다. 이때 재순환 유로로 공급된 액체질소는 유로 끝단에 설치된 직경 5 mm인 오리피스를 만나 수격현상에 의한 압력파가 발생하고 이후 유로 내부로 전파 된다.

수격현상에 대한 질소 밀도의 영향을 알아보기 위해서 재순환 유로의 초기 온도 조건을 변화시키고자 하였다. 밸브가 개방되어 있는 동안, 즉 재순환 유로가 차단되어 수격현상 시험이 시작되기 전까지 상온 대기로부터의 열전달로 인

해 재순환 유로 내부 온도가 상승하게 된다. 밸브가 닫히는 순간에서의 재순환 내부 온도 조건 선정은 실시간 온도 측정값 확인을 통해 이뤄졌으며, 결과적으로 3가지 초기 온도(T_0) 조건에 대해 시험을 수행하였다. 또한 수격현상은 일반적으로 속도 변화량과 밀접한 관계가 있기 때문에, 재순환 유로로의 액체질소 초기 질량유량을 결정하는 초기 압력 조건 변화에 따른 영향을 알아보려고 하였다. 각 시험의 초기 압력 및 온도 조건을 Table 1에 정리하였으며, 재순환 유로에서의 초기 조건 P_0 은 PA-23SY 상온용 압력 센서, T_0 는 Re-3 지점의 온도 측정값을 의미한다.

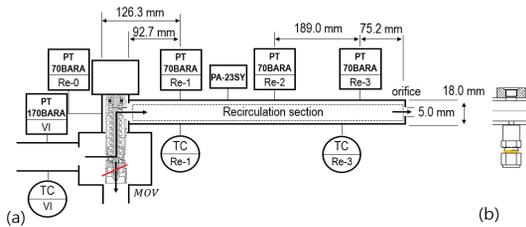


Fig. 3 (a) Schematics of sensor locations and (b) the P-T module.

Table 1. Initial conditions of the experiments.

		#1	#2	#3
Recirculation line	P_0 [MPaA]	0.287	0.212	0.169
	T_0 [°C]	-153	-187	-123
	Initial density [kg/m^3]	8.79	9.25	4.01
Valve inlet (at VI)	Initial pressure [MPa]	3.77	3.66	3.66
	Initial temperature [°C]	-173	-186	-186
	Initial density [kg/m^3]	709	772	771

3. 시험 결과

3.1 $T_0 = -153^\circ\text{C}$

재순환 유로 초기 온도가 -153°C 일 때 각 측정 위치에서의 압력과 온도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에서 각각 밸브가 닫힌 후 재순환 유로 내부가 정상 상태가 될 때까지 압력과 온도 변화를 확인할 수 있다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 밸브 가까이 위치한 Re-1 지점은 밸브 내부 액체질소로부터의 열전달에 의해 초기 온도가 Re-3 지점과 비교하여 상대적으로 낮게 측정된다. 주요 현상이 발생하는 구간을 I, II, III로 나누어 Fig. 4(a)에 표시하고 해당 구간에서의 압력 그래프를 Fig. 5에 정리하였다. 주요 구간에서의 특징은 다음과 같다.

- I: 재순환 유로의 압력이 증가하여 유로 후단 (Re-3)이 포화상태가 될 때까지의 구간
- II: 이후 배관 내부 오리피스에서 수격현상이 발생하고 액체가 전파되는 구간
- III: 부분적 응축으로 인한 충격파가 발생하고 이에 따라 액화된 후 압력파가 전파되는 구간

다음 절에서 각 구간에서의 현상에 대해 설명하도록 한다.

3.1.1 밸브 몸체 내부 압력 상승 및 재순환 유로 포화상태 진행 구간

밸브 입구 압력 감소로 인해 산화제 개폐밸브가 닫히면 밸브 몸체 내부와 재순환 유로에 액체질소가 공급되기 시작한다. Fig. 5(a)의 Re-0의 ①구간에서 압력이 상승하는데, 이는 밸브가 닫히면서 주유로로 흐르던 액체질소가 재순환 유로로 유입되기 때문이다. 또한 Fig. 5(a)의 VI의 ②에서 보는 바와 같이 밸브가 닫히면 순간적으로 차압이 크게 걸려있는 재순환 유로로 연결되면서 밸브 입구 압력은 0.843 MPa까지 감소했다가 재순환 유로에 압력이 형성되면서 회복된다. 한편, 재순환 유로 내부는 액체질소의 유입과 함께 기화로 인해[5] 압력이 증가하다가, 재순환

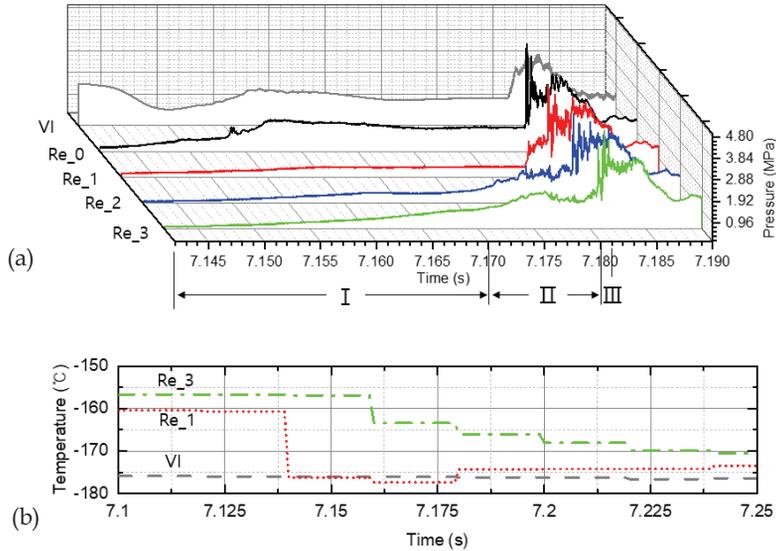


Fig. 4 Experimental results for $T_0 = -153^\circ\text{C}$ and $P_0 = 0.287 \text{ MPaA}$ (gray:VI, black:Re-0, red:Re-1, blue:Re-2, green:Re-3), (a) Pressure graph, (b) Temperature graph at each positions(gray---:VI, red.....:Re-1, green---:Re-3).

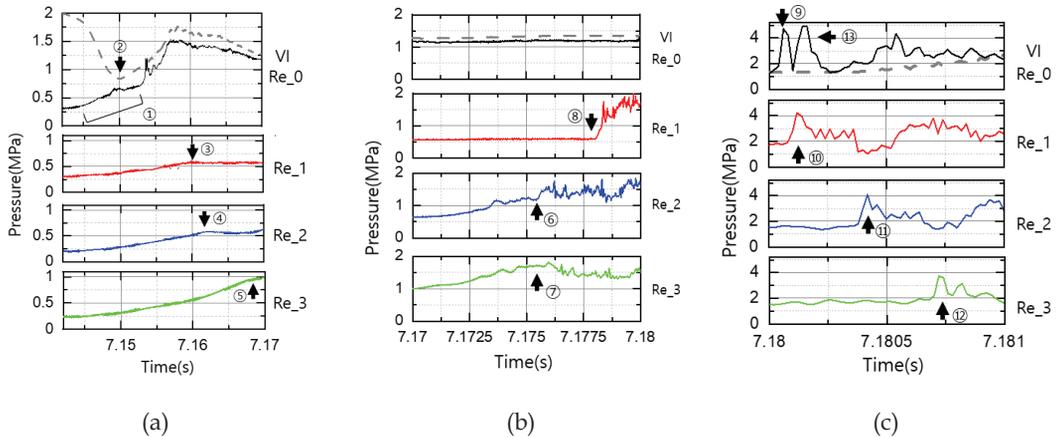


Fig. 5 Experimental results for $T_0 = -153^\circ\text{C}$ and $P_0 = 0.287 \text{ MPaA}$ (gray---:VI, black:Re-0, red:Re-1, blue:Re-2, green:Re-3), (a) Pressure graph at I section, (b) Pressure graph at II section, (c) Pressure graph at III section).

유로 전단 Re-1(③)와 Re-2(④), Re-3(⑤) 지점에서 압력이 일정한 구간이 나타난다. 이러한 구간이 나타나는 이유는 각 구간에서 상변화가 시작되는 포화상태에 돌입했기 때문으로 판단된다. Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 Re-1 지점에서의 측정된 온도가 약 -177°C 인데, 해당 온도에서의

질소가 상변화하는 조건인 증기압은 0.58 MPa 로써 Re-1 지점에서 측정된 일정한 압력값과 잘 일치하기 때문이다(Fig. 5(a)의 ③참조). Re-3(⑤) 지점에서는 측정된 온도는 약 -163°C 이고 이때 측정 압력값(0.96 MPa)와 증기압(1.48 MPa)은 일치하지 않는다. 이는 앞에서 언급한 온도 센서

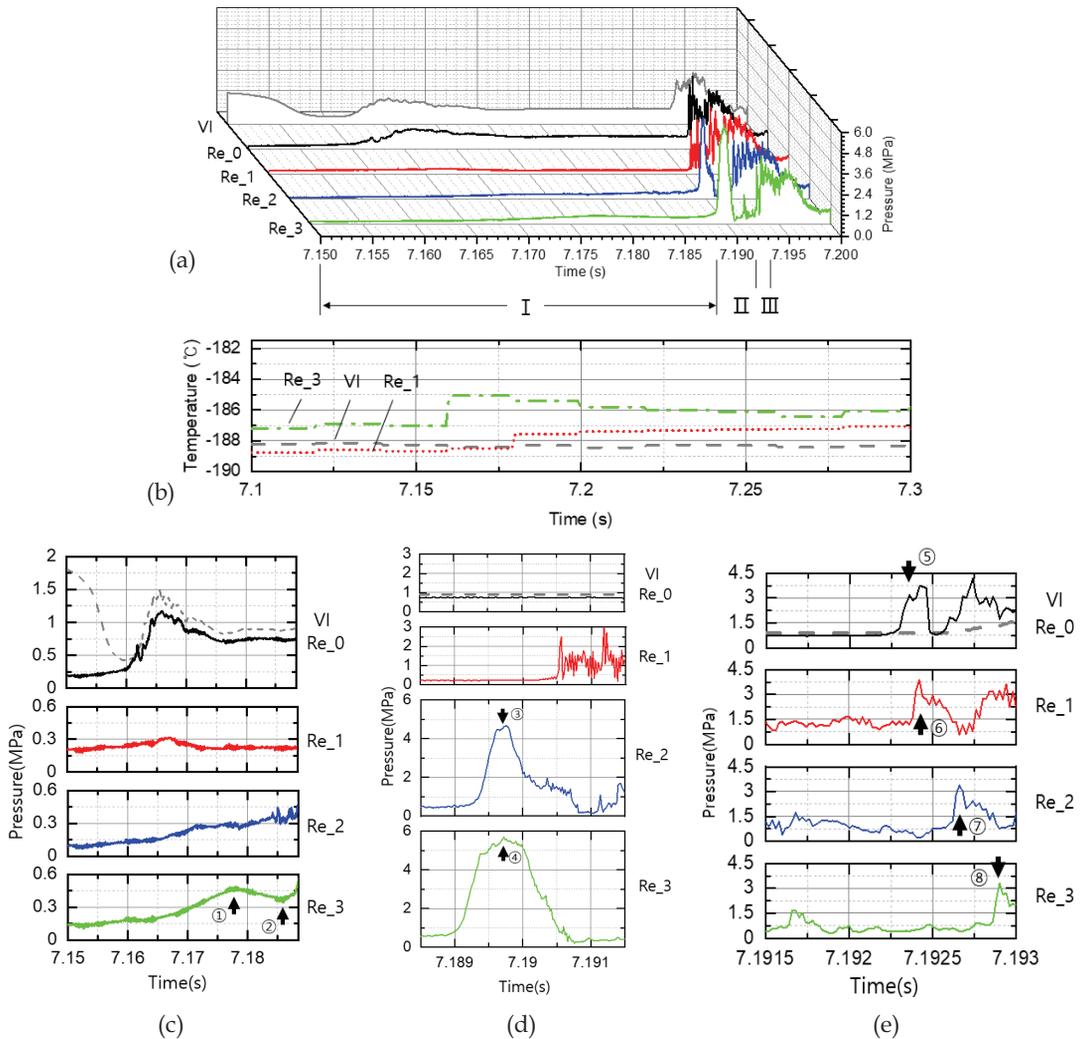


Fig. 6 Experimental results for $T_0 = -187^\circ\text{C}$ and $P_0 = 0.212 \text{ MPaA}$ (gray:VI, black:Re-0, red:Re-1, blue:Re-2, green:Re-3), (a) Pressure graph, (b) Temperature graph at each positions(gray-:VI, red-:Re-1, green-:Re-3) (c) Pressure graph at I section, (d) Pressure graph at II section, (e) Pressure graph at III section(-:VI).

의 낮은 반응 속도 때문으로 보인다. Re-3의 온도는 계속 감소하는 경향을 보이기 때문에 실제 온도는 측정값보다 낮아, 더 낮은 증기압을 가질 것이라고 예상된다. 즉 압력이 일정한 구간은 상변화가 시작되는 포화상태로 볼 수 있다.

유로 입구부터 포화상태가 되는 이유는 같은 압력에서 Re-1 지점에서의 온도가 Re-2, Re-3 지점의 온도보다 더 낮아 상대적으로 낮은 압력에서 포화상태가 시작되기 때문이다. Re-1 지점에

서는 밸브 몸체에서 기화되어 들어오는 질소가 Re-2 지점으로 방출되기 때문에 압력을 계속 일정하게 유지할 수 있고, Re-2 지점에서도 동일한 현상이 일어난다.

3.1.2 재순환 유로 수격현상 및 액체 전파 구간

Fig. 5(b)는 II 구간에서의 압력 변화를 보여준다. Re-2와 Re-3 지점에서의 압력이 완만하게 증가하며(⑥, ⑦), Re-3 지점에서는 최대 1.8 MPa

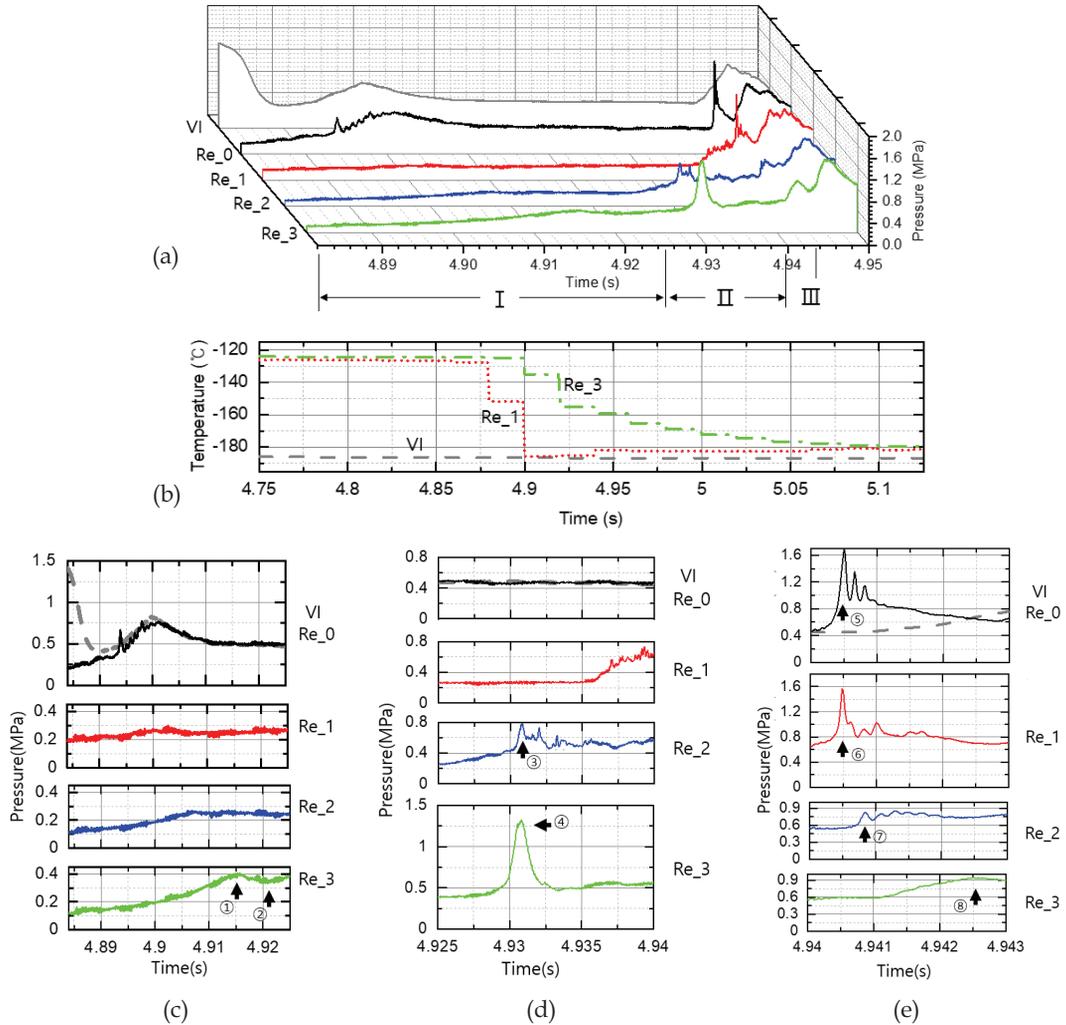


Fig. 7 Experimental results for $T_0 = -123^\circ\text{C}$ and $P_0 = 0.169 \text{ MPa}$ (gray:VI, black:Re-0, red:Re-1, blue:Re-2, green:Re-3) (a) Pressure graph, (b) Temperature graph at each positions(gray---:VI, red-----:Re-1, green---:Re-3) (c) Pressure graph at I section, (d) Pressure graph at II section, (e) Pressure graph at III section(---:VI).

의 압력이 측정되었다. 이때 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)의 Re-3 지점에서 측정된 온도 (-164°C)와 압력(1.6 MPa)으로부터 재순환 유로의 질소는 액체 상태임을 짐작할 수 있다. 또한 Re-3 지점에서의 압력 증가폭(⑦)의 정도가 Re-2에서보다(⑥) 더 큰 것으로 보아 발생한 파동이 역방향으로 진행된다고 짐작할 수 있다. 한편, Re-1은 (⑧ : 7.178 s) 지점에서 수격현상에 의해 발생한 압력파가 도착해, 가장 늦게 포화상태 구간을 벗어난다.

3.1.3 재순환 유로 부분적 응축으로 인한 충격파 발생 및 전체 액화 후 구간

Fig. 5(c)는 III구간에서의 압력 변화를 보여준다. 역방향으로 전파한 액체는 밸브 몸체 내부에 존재하는 액체와 충돌해 충격파가 발생하고, 이때의 압력은 오리피스에서 발생한 수격현상에 의한 압력보다 크다. 그 이유는 몸체 내부와 Re-1 지점 사이에 발생한 부분적 응축이 영향을 주었을 것으로 예상할 수 있다. Re_0에서 먼저

반응한 것을 보아 수격 발생 지점이 Re_0에 더 가까운 것을 예상할 수 있다(⑨ : 7.18006 s). 발생한 압력파는 액체로 가득 찬 재순환 유로를 Re_1(⑩ : 7.18012 s), Re_2(⑪ : 7.18042 s), Re_3(⑫ : 7.18072 s)의 순서로 전파된다. 유로 내 파동의 전파 속도는 대략 630 m/s로써 액체 질소에서의 음속과 비슷한 값을 갖는다. 한편, Re-0에서 보다 높은 주파수의 압력 섭동이 관찰되는데, 이는 밸브 내부 형상 및 내부 구성품에 의한 영향으로 예상된다.

3.2 $T_0 = -187^\circ\text{C}$

유로 초기 온도가 -187°C 일 때 각 위치에서 압력과 온도 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 본 시험 결과의 특징은 Re-3 지점에서 포화상태가 된 후 압력이 감소했고(Fig. 6(c) ①, ②참조). 그 후 최대 5.7 MPa(Fig. 6(d) ④ 참조) 압력이 측정되었다. 이는 같은 지점에서 Fig. 5(b) ⑦에서 발생한 압력보다 더 큰 값이다. 하지만 초기 온도 -153°C 일 때 진행한 시험과 비교해서 밸브 입구의 초기 압력이 낮고(Table 1. 참조) Fig. 5(b)와 Fig. 6(d)에서 VI 지점에서의 압력도 0.89 MPa로 더 낮았기 때문에 밸브 입구 압력 이외에 다른 요인이 수격현상에 영향을 준 것으로 보인다.

이러한 수격현상의 원인으로 포화증기의 응축에 의한 감압을 예상할 수 있다[6]. Re-3 지점의 포화증기가 급격히 응축해 압력이 감소하면서 Re-2에 위치한 액체가 가속되 오리피스에 부딪히면서 더 큰 압력 변화가 생긴 것으로 판단된다. $T_0 = -153^\circ\text{C}$ 조건에서의 시험에서도 응축이 수격현상에 영향을 줄 수 있지만 Re-3에서 압력의 감소 경향은 확인할 수 없는데 이는 초기 온도 -187°C 에서 진행된 시험과 비교해 높은 밸브 입구 압력으로 인하여 유입되는 질소 기체의 영향이 더 크기 때문이라고 예상할 수 있다[9].

Fig. 6(e)에서는 수격현상에 의한 압력파의 영향이 시차를 두고 Re-0에서도 관측되며, 분리되었던 액체가 충돌하면서 생긴 충격파는 Re-0 ⑤ : 7.19236 s와 재순환 유로 ⑥ : 7.19242 s,

⑦ : 7.19266 s, ⑧ : 7.1929 s에서 순서대로 측정된다. 전파 속도는 대략 787.5 m/s가 나오는데 처음 시험보다 빠른 이유는 더 낮은 온도의 액체가 매질로 작용하기 때문이다.

3.3 $T_0 = -123^\circ\text{C}$

재순환 유로 내부 초기 온도가 -123°C 일 때 각 위치에서 압력과 온도 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 이 시험 조건에서 특징은 밸브가 닫힐 때 밸브 입구 압력이 가장 낮고 온도차는 가장 크다는 것이다. Re-3 지점에서 포화상태가 된 후 압력이 감소한다. 그 후 진행되는 수격현상을 Fig. 7(d)에서 확인할 수 있다(④ : 4.93082 s). $T_0 = -187^\circ\text{C}$ 에서 얻은 시험 결과의 경향과 비슷하지만 최대 압력의 크기는 낮았는데 그 이유는 낮은 밸브 입구 압력 때문일 것이다. 다른 시험 조건에서와 같이, Fig. 7(e)에서 발생한 충격파가 재순환 유로에 전파되는 것을 볼 수 있다. 이때 Re_1(⑥ : 4.94048 s)에서 Re_0(⑤ : 4.9405 s)보다 압력 상승이 먼저 관측되는데 이는 수격 발생 지점이 앞선 시험에 비해 Re_1지점과 가깝기 때문이라고 예상할 수 있다.

4. 결 론

액체로켓엔진 재순환 유로의 수격현상을 이해하기 위해 재순환 유로 내부의 초기 조건을 바꿔가며 수격 시험을 수행하였다. 밸브가 닫히고 재순환 유로로 액체질소가 유입되면, 질소가 기화하면서 유로 내부 기체의 압력은 증가한다. 전단에서 후단 순으로 포화상태가 진행되고, 후단은 시간이 갈수록 기체가 압축되고 온도가 감소하며, 포화 압력은 전단과 비교하여 상대적으로 높게 유지된다. 오리피스와 맞닿아 있는 후단부터 응축에 의해 질소가 액화된다. 이때 재순환 유로 후단에서의 압력은 급격한 응축에 의한 수격이 발생할 때 최대로 커질 수 있다. 이후 재순환 유로 후단에서 전단으로 압력파가 전파되면서 유로 내부의 액화가 진행되고, 밸브 몸체 내

부의 유동과 충돌하면서 충격파가 발생한다.

재순환 유로에서의 이와 같은 수격현상은 재순환 배관의 설계 압력을 넘어서는 수준의 높은 압력 상승을 야기할 수 있으며, 결과적으로 재순환 배관의 구조적 파손으로 이어질 수 있다. 수격현상을 완화하기 위해서는, 간단하게는 밸브가 닫히는 시점에서의 밸브 입구 압력을 낮춰 재순환 유로의 질량유량 유입을 감소시킴으로써 재순환 유로 내부의 압력 상승 속도를 줄일 필요가 있다. 또한 재순환 유로 후단의 오리피스 지름을 증가시킴으로써, 오리피스 전단 재순환 유로 내 압력을 감소시키고 동시에 포화상태의 유체 부피를 줄임으로써 결과적으로 응축으로 인한 수격현상을 완화시킬 수 있을 것으로 예상하고 있다. 이를 확인하기 위해 오리피스 크기 변화에 따른 수격현상에 대한 추가적인 시험을 향후 수행할 예정이다.

References

1. Záruba, J., *Water hammer in pipe-line systems*, Elsevier, 1993
2. Kwon, K.C., Lee, E.S., Park, S.M., Kang, S.J. and Rho, B.J., "An Experimental Study on Water-Hammer Effect for Spacecraft Propulsion System," *Proceedings of the KSME Conference*, pp. 288-293, 2001.
3. Lecourt, R. and Steelant, J., "Experimental investigation of waterhammer in simplified feed lines of satellite propulsion systems," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 6, pp. 1214-1224, 2007.
4. Porca, P., Lema, M., Rambaud, P. and Steelant, J., "Experimental and numerical multiphase-front fluid hammer," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 30, No. 2, pp. 368-376, 2014.
5. Gouriet, J.B., Huertas-Martinez, A., Buchlin, J.M., Vetrano, M.R. and Steelant, J., "Multiphase fluid hammer with cryogenic fluids," *Proceedings of Space Propulsion*, 2016.
6. Shon, Y.U., and Chun, M. H. "A parametric study of condensation-induced water hammer in nuclear power plants," M.S. Thesis, KAIST, 1990.
7. Kim, D., Hong, M., Park, J. and Lee, S.Y., "Study for the Development of a Main Oxidizer Shut-off Valve for Liquid Rocket Engines," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 113-119, 2013
8. Hong, M., "Opening Characteristics of a Main Oxidizer Shut-off Valve," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 45, No. 11, pp. 989-997, 2017.
9. Dirndorfer, S., *Steam condensation induced water hammer in a vertical up-fill configuration within an integral test facility: experiments and computational simulations*, Doctoral dissertation, Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr München, 2017.