

## 헬륨분사를 통한 액체산소 과냉각에 관한 실험적 연구

권오성\* · 조남경\* · 정용갑\* · 하성업\* · 이중엽\* · 김현중\*\*

# Experimental Study of Liquid Oxygen Sub-cooling by Helium Injection

Oh-Sung Kwon\* · Nam-Kyung Cho\* · Yong-Gahp Chung\* · Seong-Up Ha\* · Joong-Youp Lee\*  
Hyun-Joong Kim\*\*

### ABSTRACT

Test of liquid oxygen sub-cooling by helium injection, which is one of the method of temperature conditioning of cryogenic propellant in liquid propulsion rocket, is performed. The sub-cooling effect at different He injection flow rate with the same initial liquid oxygen mass is compared. Test results showed liquid oxygen temperature decrease of 5~6 °C under test condition. And the required time for cooling is inversely proportional to He injection flow rate.

### 초 록

액체추진기관을 사용하는 발사체의 극저온 추진제 온도 conditioning 방안의 일환으로 헬륨분사에 의한 액체산소 과냉각 시험을 수행하였다. 동일한 질량의 액체산소에 대하여 서로 다른 유량의 헬륨을 분사하고 냉각 특성을 비교하였다. 시험조건 하에서 약 5~6 °C의 냉각 효과를 얻을 수 있었으며 외부 단열상태에서 특정 온도까지 냉각되는 시간은 헬륨 분사량에 반비례함을 알 수 있었다.

Key Words: Sub-cooling(과냉각), He Injection(헬륨분사), Liquid Oxygen(액체산소)

### 1. 서 론

액체추진기관을 사용하는 발사체에 있어서 발사 전 대기과정 동안의 극저온 추진제 온도 상승은 geysering 현상을 발생시켜 배관과 밸브 및 주변 구조물에 손상을 초래할 수 있다. 또한, 점화시 배관 내의 기포가 터보펌프로 유입되어

cavitation을 발생시킬 수 있다. 이의 방지를 위한 극저온 추진제 온도 conditioning 방안에는 재순환방식, 헬륨분사 방식, bleeding 방식 등이 있는데[1] 본 논문에서는 헬륨분사에 의한 극저온 추진제 과냉각 방법에 대해 시험을 수행하였다. 헬륨분사 방식은 비응축 가스인 헬륨을 배관 내에 분사하여 포화영역에서 극저온 추진제의 증발 및 분압차에 의한 헬륨기포 내로의 확산 현상을 이용하여 증발잠열에 의한 냉각효과를 얻는 방식이다[2, 3].

\* 한국항공우주연구원 추진제어그룹

\*\* ㈜로템 기술연구소 선행연구팀

연락처, E-mail: oskwon@kari.re.kr

## 2. 시험 설비 및 시험 조건

### 2.1 시험 설비

Figure 1은 시험설비의 개략도이다. 추진제 공급 배관을 모사하는 시험용 탱크는 이중 진공 단열 및 MLI 방식을 적용하여 외부로부터의 열 침입을 최대한 줄이고자 하였다. 헬륨은 탱크 내부로 삽입된 0.25 inch 튜브를 통하여 탱크 하부에서 분사된다. 헬륨분사 라인과 벤트 라인에는 체적유량계와 온도, 압력계를 설치하였다. 수직 방향으로 10개의 온도 센서가 삽입되어 있으며 탱크 하부로부터 180mm 지점에서 시작하여 210mm 간격으로 장착되어 있다. 추진제의 총진량은 차압센서를 통하여 액위를 측정하여 계산하도록 하였다.

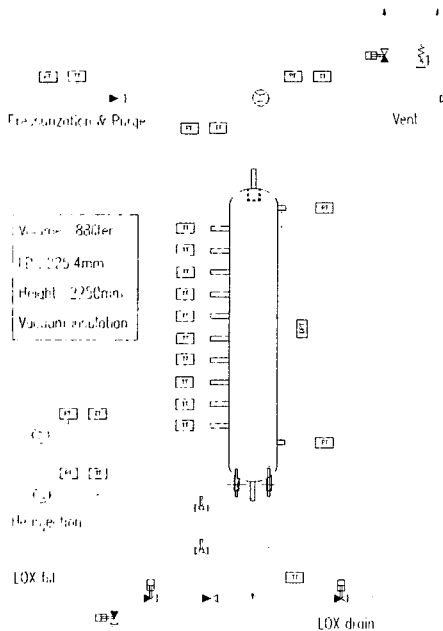


Fig. 1 Schematic of test apparatus

### 2.2 시험 조건

본 시험에서는 극저온 추진제로서 액체산소를 사용하였다. 초기 동일한 질량의 액체산소를 충전하고 대기압 조건에서 포화상태에 도달할 때까지 대기한 뒤 헬륨을 분사하였다. 두 가지 경우의 헬륨 분사량에 대하여 시험을 수행하고 온

도 변화 경향을 비교하였다. Table 1에 시험 조건을 나타내었다.

Table 1 Test condition

		1차 시험	2차 시험
액체산소	총진량 (kg)	54.7	55.0
	초기온도 (°C)	-182.6	-182.6
헬륨	압력 (bar)	0.37	0.55
	온도 (°C)	14.7	13.5
	유량 (ℓ/m)	58	85
	SCFM	2.80	4.66
분사시간 (min)		21	23

## 3. 시험 결과

### 3.1 헬륨 분사량에 따른 냉각 효과 비교

Figure 2는 헬륨이 분사되는 동안의 액체산소의 온도변화를 보여준다. 헬륨을 분사하기 직전 대기압 상태에서 안정화를 이루고 있을 때 액체산소의 온도는 -182.6°C를 기록하고 있다. 1차 시험에서 2.80 SCFM의 헬륨을 21분 동안 분사한 후 액체산소의 온도는 -187.3°C로서 4.7°C 감소하였다. 2차 시험에서 4.66 SCFM의 헬륨을 23분 동안 분사한 후 액체산소의 온도는 -188.4°C로서 5.8°C 냉각되었다. 온도는 분사 종료 직전 1분 동안의 평균값을 취하였다.

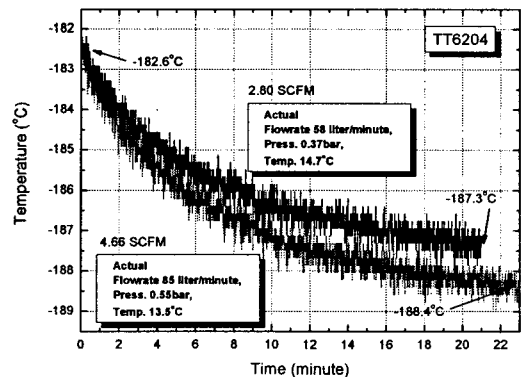


Fig. 2 Temperature variation on cooling process

SCFM 기준으로 약 1.7배의 헬륨을 분사하였음에도 불구하고 과냉각되는 온도의 차이는 약 1℃ 정도로 크지 않았는데, 이는 헬륨 분사량 증가에 따라 액체산소의 증발에 의한 냉각량도 커지지만 분사되는 헬륨에서 액체산소로 전달되는 열량도 증가하기 때문이다. 또한, 냉각이 진행될수록 온도의 감소량이 줄어들었는데 이는 포화 증기압의 감소에 의해 액체산소의 증발량이 감소하기 때문이다.

Figure 2를 통하여 액체산소가 특정 온도로 냉각되는데 필요한 시간은 헬륨 분사량에 반비례함을 알 수 있는데, 결국 본 시험에서와 같이 외부로부터의 열침입이 없을 경우에는 액체산소를 동일한 온도로 냉각하기 위해서는 같은 질량의 헬륨가스가 소요됨을 알 수 있다. Table 2에 분사량, 시간, 냉각온도 사이의 관계를 정리하였다.

Table 2 Elapsed time to reach the same liquid oxygen temperature

액체산소 온도		-187℃		-186℃	
시험	분사량 (SCFM)	시간 (min.)	소모량 (SCF)	시간 (min.)	소모량 (SCF)
1차	2.80	15	42	8	22.4
2차	4.66	9	41.94	5	23.3

탱크 내부 액체산소의 수직방향 온도 경향을 Table 3에 나타내었다. 액체산소의 초기 충전량이 적어 수직 방향의 온도분포 경향을 살펴보기에는 어려움이 있지만, 시험 결과 수직 방향의 온도차는 약 0.1℃로서 내부의 격렬한 혼합에 의해 거의 동일한 온도를 보여주었다. 온도는 분사 종료 후에도 액체산소에 잠겼다고 판단되는 센서들의 분사 종료 직전 1분간 평균값이다.

Table 3 LOX temperature according to height

센서명	TT6201 (℃)	TT6202 (℃)	TT6203 (℃)	TT6204 (℃)
1차시험	-187.23	-187.19	-187.24	-187.31
2차시험	-188.33	-188.24	-188.34	-188.35

### 3.2 액체산소 질량을 통한 증발량 비교

Figure 3은 헬륨이 분사되는 동안 탱크 내 액체산소의 질량 변화를 보여준다. 차압센서의 출력값을 대기압 포화상태인 액체산소의 액위로 환산하여 질량을 계산하였다. 1차 시험에서는 약 7.1kg의 질량이 감소하였고, 2차 시험에서는 약 8.8kg이 감소하였다. 이는 헬륨 기체 내로의 증발 및 확산 과정을 통하여 ullage로 빠져나간 질량이라고 볼 수 있는데, 시간이 지날수록 증발량이 완만히 감소하기는 하였으나 벤트되는 가스의 유량 변화에 비해서는 그 변화율이 크지 않았다.

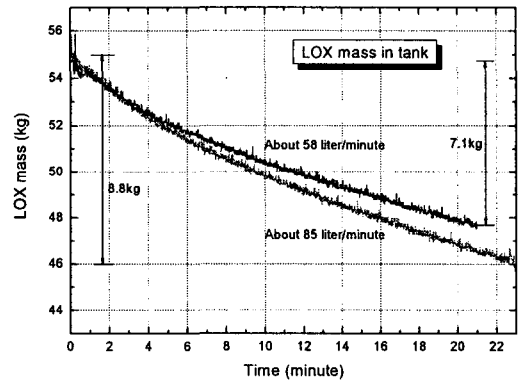


Fig. 3 Liquid oxygen mass variation

### 3.3 탱크 내부 상태에 대한 고찰

Figure 4는 1차 시험에 대한 탱크 내부 ullage 압력 및 유량을 나타낸다.

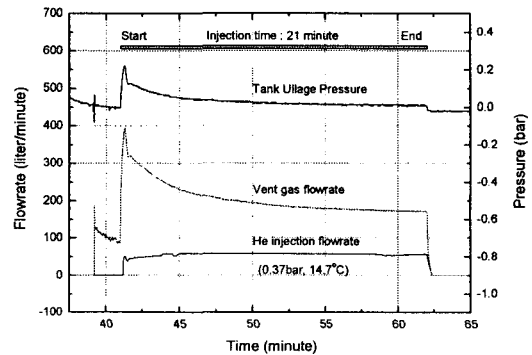


Fig. 4 Ullage pressure & vent flow-rate for 1<sup>st</sup> test

헬륨 분사량은 압력 레귤레이터를 이용하여 조절하였는데 초기 ullage 압력의 급격한 상승으로 인하여 불안정한 공급을 보이다가 점차 안정된 분사유량을 보여주었다. 분사 초기에는 벤트되는 가스의 유량이 급격히 증가하였으나 시간이 지날수록 점차 감소하였고 이는 액체 산소의 냉각이 진행됨에 따라 증발량이 점차 감소하기 때문으로 판단된다. Ullage 압력은 헬륨분사 직전 거의 대기압 상태로 유지하다가 분사 시작 후 벤트되는 가스의 유량 변화와 비슷한 양상을 보여주었는데 전체적으로 압력은 매우 낮았다.

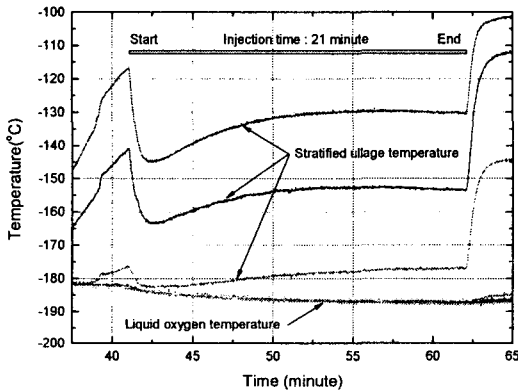


Fig. 5 Temperature trend in a tank for 1<sup>st</sup> test

Figure 5는 탱크 내에 수직 방향으로 장착된 10개의 온도센서 값을 보여준다. 헬륨이 분사되기 전 액체산소는 포화상태를 유지하고 있고 ullage의 온도는 성층화를 이룬 상태에서 상승하고 있다. 헬륨이 분사되는 동안 액체산소는 높이 방향으로 거의 동일한 온도를 보이면서 -187°C 이하로 떨어졌고, ullage의 온도는 분사 직후 급격하게 감소했다가 완만히 상승하여 평형상태를 이룬 뒤 분사 중지 후 다시 급격하게 상승하였다. 이는 액체산소를 통과하면서 냉각된 헬륨과 액체산소 온도에서 증발된 기체산소가 유입되면서 초기에는 ullage 온도가 급격히 떨어지지만, 냉각이 진행될수록 액체산소의 증발량이 감소하여 ullage 온도는 점차 상승 후 평형을 이루는 것으로 보여진다.

특정 온도값은 액체산소의 온도 변화를 따라가다가 분사 중지 후 갑자기 상승하였는데, 이는 분사 과정동안 액체산소 내의 기포에 의해 밀려 올라간 액체에 잠겨 있다가 분사 중지 후 다시 ullage로 노출된 온도센서로 추정된다.

#### 4. 결 론

두 가지 헬륨 분사 유량에 대하여 액체산소 과냉각 시험을 수행하고 온도 변화 특성을 비교하였다. 초기 질량 약 55kg, 온도 -182.6°C의 액체산소 조건에서 2.80 SCFM의 헬륨을 21분 동안 분사하여 4.7°C의 냉각 효과를 얻었으며, 4.66 SCFM의 헬륨을 23분 동안 분사하여 5.8°C의 냉각 효과를 얻을 수 있었다.

SCFM 기준으로 1.7배의 분사량 차이에도 불구하고 과냉각된 온도 차이는 약 1°C로서 그다지 크지 않았는데, 이는 분사량 증가에 따라 액체산소의 증발에 의한 냉각량도 커지지만 분사되는 헬륨에서 액체산소로 전달되는 열량도 증가하기 때문으로 사료된다. 또한, 동일 온도까지 냉각하는데 필요한 시간은 헬륨 분사량에 반비례함을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Elliot Ring, Rocket propellant and pressurization systems, Prentice-Hall Inc., 1964
2. P. S. Larsen, J. A. Clark, W. O. Randolph and J. L. Vaniman, "Cooling of Cryogenic Liquids by Gas Injection", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 8, 1962, pp.507-520
3. A. F. Schmidt, "Experimental investigation of liquid-hydrogen cooling by helium gas injection", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 8, 1962, pp.521-528