

## 확산하는 액체질소의 증발에 관한 실험적 연구

김명배<sup>1,2,†</sup> · 최병일<sup>1,2</sup> · 김태훈<sup>1,2</sup> · 도규형<sup>1,2</sup> · 한용식<sup>1,2</sup> · 정경열<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 플랜트기계전공

## Experimental Study of the Evaporation of Spreading Liquid Nitrogen

MYUNGBAE KIM<sup>1,2,†</sup>, BYUNGIL CHOI<sup>1,2</sup>, TAE-HOON KIM<sup>1,2</sup>, KYHYUNG DO<sup>1,2</sup>, YONGSHIK HAN<sup>1,2</sup>,  
KYUNGYUL CHUNG<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Energy Plant Safety Department, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-no, Yusong-gu, Daejeon 34103, Korea  
<sup>2</sup>Plant System and Machinery Department, University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

†Corresponding author :  
mbkim@kimm.re.kr

Received 2 July, 2018  
Revised 3 August, 2018  
Accepted 30 October, 2018

**Abstract >>** The investigation of cryogenic liquid pool spreading is an essential procedure to assess the hazard of cryogenic liquid usage. In this experimental study, to measure the evaporation velocity when the pool is spreading, liquid nitrogen was continuously released onto unconfined concrete ground. Almost all of the reported results are based on a non-spreading pool in which cryogenic liquid is instantaneously poured onto bounded ground for a very short period of time. A simultaneous measurement of the pool location using thermocouples and of the pool mass using a digital balance was carried out to measure the evaporation velocity and the pool radius. A greater release flow rate was found to result in a greater average evaporation velocity, and the evaporation velocity decreased with the spreading time and the pool radius.

**Key words :** Spreading(확산), Liquid nitrogen(액체 질소), Evaporation velocity(증발 속도), Non-spreading pool(비확산 풀), Spreading pool(확산 풀)

### 1. 서론

액화수소, 액화천연가스, 액체질소 같은 극저온 액체는 보편적으로 많이 사용되고 있지만, 보관이나 운송중의 사고는 심각한 문제점을 가져올 수 있다.

극저온 액체가 저장용기에서 누출되어 외부로 확산하게 되면 액체풀(liquid pool)의 형태를 취하게 된다. 보통 주변의 온도는 극저온 액체의 증발온도보다 매우 높기 때문에, 극저온 액체풀은 주변과의 열교환

에 의하여 격렬한 증발이 발생한다. 결과적으로 다양한 열원에 의하여 열이 공급된 액체풀로부터 증기운(vapor cloud)이 형성된다. 주요 열원은 지면으로부터의 전도열, 주위 공기로부터의 대류열과 태양으로부터의 복사열 등이다. 누출된 극저온 액체가 가연성이라면 풀화재(pool fire)와 폭발의 가능성이 뚜렷하다. 더욱이 액체가 독성을 가지고 있다면 대기중으로 바람과 함께 확산되어, 누출 주변이 위험해질 수 있다. 따라서 극저온 액체풀의 확산과 증발에 대한 연

구는 극저온 액체 저장설비의 위험성 평가에 중요한 부분을 차지하고 있다.

플화산을 예측하기 위하여 해석적인 해법을<sup>1)</sup> 추구한 연구와 수치해석을<sup>2,3)</sup> 이용한 연구가 수행되면서 여러 가지 모델이 제안되었다. 모델의 대부분은 복사열전달과 대류열전달을 무시하고, 오직 토양으로부터의 전도열전달만을 고려하였다. 이러한 모델의 중요한 요소로, 증발속도-액체pool의 단위면적당, 단위시간당 증발된 부피-의 도입을 통하여 pool의 에너지 방정식을 생략하는 것을 거론할 수 있다. 증발속도는 실험적으로 구해질 수 있다.

증발속도를 측정하기 위한 많은 실험<sup>4,8)</sup>에서 극저온 액체는 확산이 제한되는 지표면(bounded ground)에 순간적으로 부어져 방출시간이 증발시간에 비하여 매우 짧았다. 이러한 비확산pool(non-spreading pool)에서는 지표면의 온도가 계속 감소하기 때문에 전도에 의한 열유속도 지속적으로 감소하게 된다. 보통 제한된 표면에서의 비확산pool의 확산속도는 측정하지 않는다.

실제 사고에서는 극저온 액체가 제한되지 않는 지표면(unbounded ground) 위로 계속적으로 누출되는 경우가 대부분이기 때문에 액체pool이 확산하면서 증발하게 된다. 확산pool은 연속적으로 온도가 높은 새로운 지표면 위를 퍼져가기 때문에 전도에 의한 열에너지를 비확산pool보다 많이 받을 수 있게 된다.

본 연구에서는 확산pool의 증발속도를 측정하기 위하여 원뿔 형태의 깔때기를 사용하고 방출시간 동안 일정한 누출량이 유지되도록 설계하였다. 이를 위하여 열전대를 이용하여 확산하고 있는 액체pool의 선단(front) 위치와 액체pool의 질량을 동시에 측정하였다.

## 2. 실험 장치 및 절차

깔때기, 콘크리트 판, 전자저울로 구성된 실험장치는 Fig. 1과 같이 실험실 내에 설치되어 바람이나 햇빛의 영향을 최소화할 수 있도록 하였다.

깔때기는 액체질소를 공급하는 장치로 깔때기 벽을 통한 열전도를 최소화하기 위하여 단열 처리되었

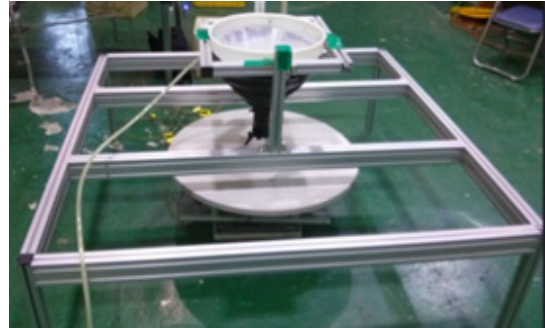
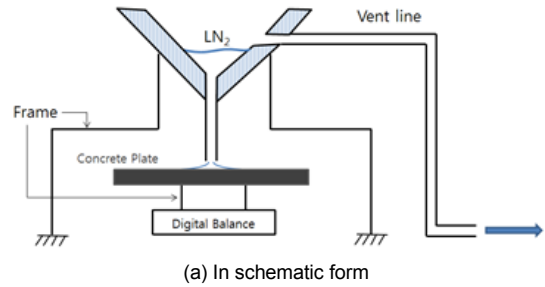


Fig. 1. The experiment apparatus

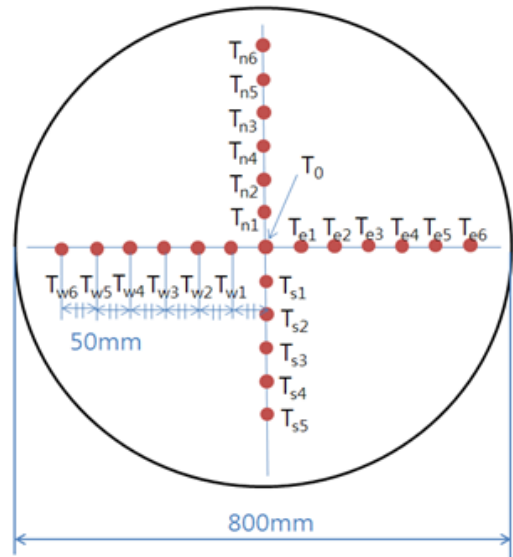


Fig. 2. Concrete ground with the thermocouples

으며 콘크리트 판위에 약간의 틈을 두고 설치되었다. 콘크리트 판은 직경 0.8 m, 두께 0.025 m이며 콘크리트 판의 중심에 액체 질소가 수직으로 누출된다. 0.1 g의 분해능이 있는 전자저울이 콘크리트 판 위를 확

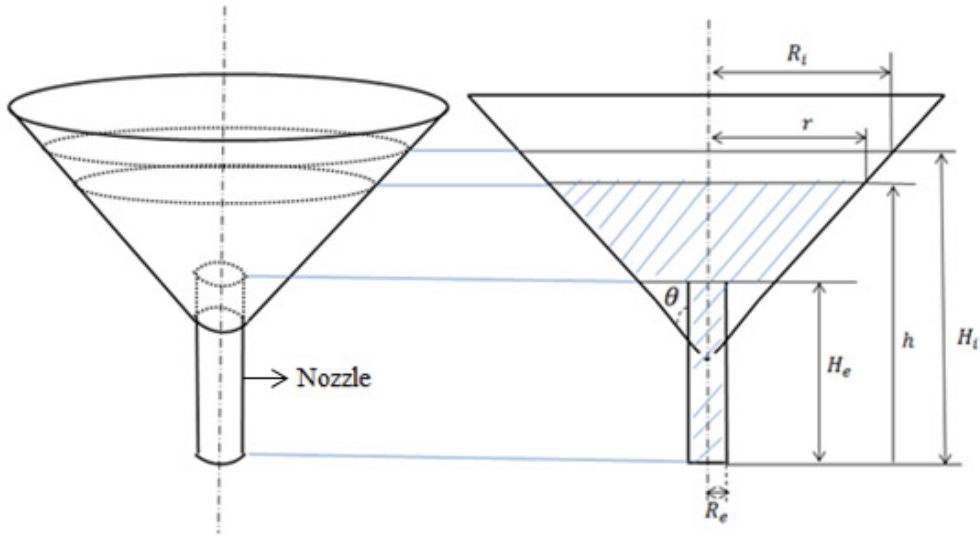


Fig. 3. Design parameters for the funnel

산(spread)해 가는 액체질소의 질량을 측정하기 위하여 사용되었다. 전자저울의 데이터는 데이터 측정 시스템으로 연결된다. 콘크리트 판위를 확산해가는 액체질소의 선단(front) 위치를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 25개의 열전대를 네 방향으로 설치하였다. 판의 중심에도 열전대가 설치되어 확산이 시작되는 시간을 알 수 있도록 하였다. 열전대들 사이의 간격은 0.05 m이다. 액체 질소의 증발온도가  $-196^{\circ}\text{C}$ 이므로 열전대의 온도가  $-190^{\circ}\text{C}$  이하로 강하하는 순간이 액체질소의 선단이 그 열전대를 지나가는 순간이라고 가정할 수 있다. 열전대 신호 역시 데이터 측정시스템에 연결되어 액체질소의 선단 위치와 그 때의 액체질소 질량을 동시에 측정할 수 있게 된다. 각 열전대에 액체질소 선단이 도달한 시간은 네 방향에 대한 값들을 이용 평균을 취하였다.

깔때기를 설계함에 있어 비교적 일정한 유량이 흘러나오도록 하기 위하여 원뿔의 각도를 Fig. 3과 같이 되도록 크게 하였다. 원뿔형 용기와 연결되는 노즐의 직경은 6, 8, 10 mm이며, 공칭 누출 유량은 각각  $3.4 \times 10^{-2}$ ,  $5.6 \times 10^{-2}$ ,  $9.0 \times 10^{-2}$  kg/s이다. 액체질소 7.5리터를 탱크에서 깔때기로 붓기 위하여 노즐의 출구를 패드(pad)로 막는다. 깔때기에 액체질소가 부어지면 수초 동안 격렬한 증발이 수반되지만, 잠시 후

액체질소는 안정된 상태를 보인다. 이것은 초기의 매우 큰 온도 차이가—액체질소와 깔때기의 벽 사이—단열에 의하여 급격하게 줄어들기 때문이다. 액체질소의 안정화는 노즐을 통한 누출유량에 직접적인 영향을 주기 때문에 매우 중요하다. 안정화된 것을 확인하고 노즐 출구를 막고 있는 패드를 제거하면 액체질소가 콘크리트 판 위로 누출된다. 판의 중심에 설치된 열전대는 실험의 시작을 알려주는 용도이며, 실험의 신뢰도를 높이기 위하여 3개의 노즐에 대하여 2회씩 총 6회의 실험이 반복되었다.

### 3. 결과 및 고찰

시간  $t_l$ 의 함수인 누출유량(spill rate)을 결정하기 위하여 Fig. 3에 깔때기의 형상을 보였다. 출구를 막고 있는 패드가 제거되는 순간이  $t_l=0$ 이다. 누출될 액체질소의 부피  $V$ 는 높이  $h$ 만의 함수이다.

$$V = \frac{\pi}{3}(h - \beta)^3 \tan^2 \theta - \frac{\pi}{3}(H_e - \beta)^3 \tan^2 \theta + \pi R_e^2 H_e \quad (1)$$

여기에서  $H_e \leq h \leq H_i$ ,  $\beta = H_i - R_i / \tan \theta$ .

$$V = \pi R_e^2 h \quad (2)$$

여기에서  $0 \leq h \leq H_e$ . 유량계수  $C_d$ 를 이용하여

$$\frac{dV}{dt_1} = -C_d \sqrt{2gh} \pi R_c^2 \quad (3)$$

여기에서  $g$ 는 중력상수이며 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{dV}{dh} \frac{dh}{dt_1} = -C_d \sqrt{2gh} \pi R_c^2 \quad (4)$$

$$\frac{(h-\beta)^2}{\sqrt{h}} dh = -\frac{C_d R_c^2 \sqrt{2g}}{\tan^2 \theta} dt_1 \quad (5)$$

$$\int_{H_i}^{H_e} \frac{(\eta-\beta)^2}{\sqrt{\eta}} d\eta = -C_d R_c^2 \sqrt{2g} \int_0^{t_d} \frac{1}{\tan^2 \theta} dt_1 \quad (6)$$

여기에서  $t_d$ 는 액체의 방출시간이다. 식 (6)을 적분하면

$$\frac{2}{5} H_e^{5/2} + 2\beta^2 H_e^{1/2} - \frac{4}{3} \beta H_e^{3/2} - \frac{2}{5} H_i^{5/2} - 2\beta^2 H_i^{1/2} + \frac{4}{3} \beta H_i^{3/2} + \frac{t_d C_d \sqrt{2g} R_c^2}{\tan^2 \theta} = 0 \quad (7)$$

그러므로

$$C_d = \frac{\tan^2 \theta}{t_d \sqrt{2g} R_c^2} \left( \frac{2}{5} H_e^{5/2} + 2\beta^2 H_e^{1/2} - \frac{4}{3} \beta H_e^{3/2} - \frac{2}{5} H_i^{5/2} - 2\beta^2 H_i^{1/2} + \frac{4}{3} \beta H_i^{3/2} \right) \quad (8)$$

액체의 방출시간은 물을 이용하여 간단히 실험할 수 있으며, 각 노즐직경 6, 8, 10 mm에 대하여 0.56, 0.52, 0.54이다. 시간에 따른 질량 누출률(mass spill rate)  $Q_L$ 은 다음과 같다.

$$Q_1 = C_d \rho \pi R_c^2 \sqrt{2gh} \quad (9)$$

노즐에서 나온 액체는 콘크리트판 중앙에 도달하여 반경 방향으로 확산(spread)한다. 확산시간  $t$ 에 따라 액체질소의 증가율  $Q_2^i$ 은 다음과 같다.

$$Q_2^i = \frac{W_i - W_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (10)$$

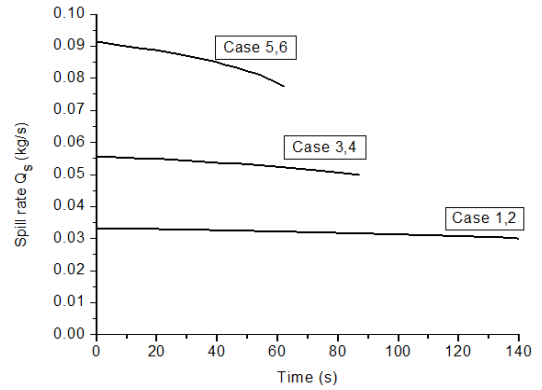


Fig. 4. Spill rate  $Q_s$  with time for the three nozzles

여기에서  $t_i$ 는 액체 선단이 열전대  $i$ 에 도달하는 시간이며,  $W_i$ 는 그 시점의 액체질량이다. 노즐로부터 판위에 도달하는 시간은 약 0.1초 정도이므로 무시하고  $t=t_i$ 를 가정하였다.

갈때기의 상부는 개방되어 있기 때문에 액체가 방출하는 동안 여기에서 증발되는 양  $Q_3$ 는 다음과 같다.

$$Q_3 = \rho \pi r^2 E_n = \rho \pi E_n \tan^2 \theta \left[ h - \left( H_i - \frac{R_i}{\tan \theta} \right) \right]^2 \quad (11)$$

여기에서  $E_n = 1.77 \times 10^{-5}$  m/s이며, 비확산물의 증발속도(evaporation velocity)로 별도의 실험에서 얻어진 값이다. 그러므로 실질적인 질량 누출률  $Q_s$  (kg/s)은 다음과 같다.

$$Q_s = Q_1 - Q_3 \quad (12)$$

실질적인 누출률은 갈때기의 구조 때문에 시간에 따라 변화하는 값이며 Fig. 4에 제시하였다. 공칭누출률(nominal spill rate)은  $t=0$ 에서의 값이다.

증발속도(evaporation velocity, m/s)  $E_i$ 는 확산하는 액체의 단위면적당, 단위시간당 증발하는 부피이므로 다음과 같은 식 (13)으로 표현된다.

$$E_i = \frac{Q_s^i - Q_2^i}{\rho A_i} \quad (13)$$

액체질의 선단이 열전대에 접촉하기 전후의 온도변화와 동시에 측정된 액체질의 무게를 Fig. 5와 Fig. 6에 표시하였다. 이로부터 전자저울의 분해능인 0.1 g이 충분한 정밀도를 갖고 있는 것을 알 수 있다. 또한 열전대의 반응시간도 전체 측정시간에 비하여 매우 짧아 극저온 액체선단의 열전대 도달을 명확하게 측정할 수 있다는 사실도 알게 된다.

측정 결과의 분석은 Table 1과 Fig. 7에 정리되어 있다. Table 1에 열전대 번호, 그 위치에 도달되는 액체질의 시간, 액체질의 반경 및 면적 등이 기록되어 있다. 액체질과 콘크리트판 사이의 전체적인 온도차가 감소하기 때문에 액체질의 확산에 따라 증발속도가 감소하는 것을 Fig. 7로부터 알 수 있다.

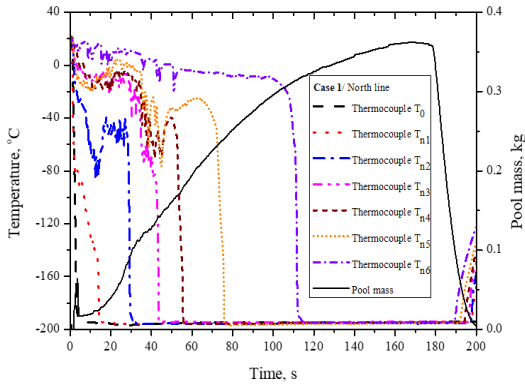


Fig. 5. Temperature in the north line and pool mass

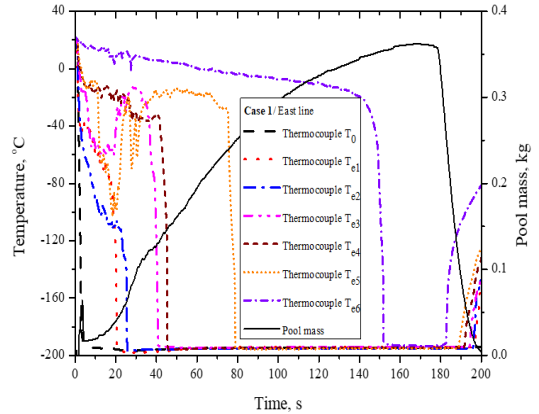


Fig. 6. Temperature in the east line and pool mass

Table 1. Pool radius and evaporation velocity with time (to be continued)

Case	i	Time (s)	Radius (m)	Pool area (m <sup>2</sup> )	Q <sub>1</sub> (kg/s)	Q <sub>2</sub> (kg/s)	Q <sub>3</sub> (kg/s)	E (m/s)
1	1	15.86	0.05	7.85E-03	3.43E-02	1.26E-03	1.41E-03	4.96E-03
	2	28.72	0.10	3.14E-02	3.41E-02	5.44E-03	1.34E-03	1.24E-03
	3	40.75	0.15	7.07E-02	3.38E-02	3.33E-03	1.26E-03	5.48E-04
	4	52.88	0.20	1.26E-01	3.35E-02	3.30E-03	1.19E-03	3.05E-04
	5	90.84	0.25	1.96E-01	3.25E-02	2.63E-03	9.44E-04	1.93E-04
	6	126.16	0.30	2.83E-01	3.13E-02	1.42E-03	6.93E-04	1.30E-04
2	1	16.23	0.05	7.85E-03	3.43E-02	1.23E-03	1.41E-03	4.97E-03
	2	25.05	0.10	3.14E-02	3.42E-02	4.54E-03	1.36E-03	1.24E-03
	3	37.67	0.15	7.07E-02	3.39E-02	4.75E-03	1.28E-03	5.45E-04
	4	57.15	0.20	1.26E-01	3.34E-02	2.57E-03	1.16E-03	3.06E-04
	5	98.25	0.25	1.96E-01	3.23E-02	2.43E-03	8.93E-04	1.92E-04
	6	135.11	0.30	2.83E-01	3.09E-02	1.36E-03	6.24E-04	1.29E-04
3	1	14.59	0.05	7.85E-03	5.64E-02	2.06E-03	1.36E-03	8.47E-03
	2	26.22	0.10	3.14E-02	5.57E-02	2.58E-03	1.25E-03	2.10E-03
	3	42.53	0.15	7.07E-02	5.46E-02	4.90E-03	1.08E-03	9.18E-04
	4	51.53	0.20	1.26E-01	5.40E-02	6.67E-03	9.83E-04	5.12E-04
	5	66.80	0.25	1.96E-01	5.26E-02	7.20E-03	8.09E-04	3.22E-04
	6	79.68	0.30	2.83E-01	5.13E-02	5.43E-03	6.51E-04	2.18E-04

Table 1. Continued

Case	i	Time (s)	Radius (m)	Pool area (m <sup>2</sup> )	Q <sub>1</sub> (kg/s)	Q <sub>2</sub> (kg/s)	Q <sub>3</sub> (kg/s)	E (m/s)
4	1	15.01	0.05	7.85E-03	5.64E-02	2.66E-03	1.36E-03	8.47E-03
	2	32.33	0.10	3.14E-02	5.53E-02	2.31E-03	1.19E-03	2.09E-03
	3	41.53	0.15	7.07E-02	5.47E-02	5.43E-03	1.09E-03	9.19E-04
	4	52.73	0.20	1.26E-01	5.39E-02	6.25E-03	9.69E-04	5.10E-04
	5	62.74	0.25	1.96E-01	5.30E-02	5.99E-03	8.57E-04	3.23E-04
	6	82.24	0.30	2.83E-01	5.10E-02	5.64E-03	6.18E-04	2.18E-04
5	1	14.15	0.05	7.85E-03	9.08E-02	3.53E-03	1.28E-03	1.39E-02
	2	26.51	0.10	3.14E-02	8.86E-02	3.24E-03	1.07E-03	3.41E-03
	3	34.89	0.15	7.07E-02	8.69E-02	9.55E-03	9.26E-04	1.49E-03
	4	42.00	0.20	1.26E-01	8.52E-02	1.55E-02	7.94E-04	8.22E-04
	5	48.14	0.25	1.96E-01	8.35E-02	1.14E-02	6.71E-04	5.20E-04
	6	59.06	0.30	2.83E-01	7.91E-02	1.37E-02	4.13E-04	3.42E-04
6	1	13.79	0.05	7.85E-03	9.08E-02	3.63E-03	1.29E-03	1.39E-02
	2	25.79	0.10	3.14E-02	8.87E-02	3.33E-03	1.09E-03	3.41E-03
	3	34.50	0.15	7.07E-02	8.70E-02	8.04E-03	9.34E-04	1.49E-03
	4	45.04	0.20	1.26E-01	8.44E-02	1.14E-02	7.34E-04	8.14E-04
	5	52.00	0.25	1.96E-01	8.23E-02	1.01E-02	5.90E-04	5.12E-04
	6	60.89	0.30	2.83E-01	7.85E-02	1.35E-02	3.82E-04	3.40E-04

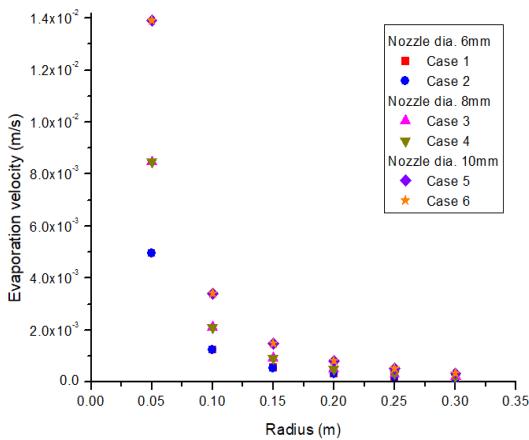


Fig. 7. Evaporation velocity with pool radius

본 연구의 결과를 비교하기 위하여 Table 2에 타 연구 결과를 제시하였다. 제시된 타 연구 결과들은 전부 비확산폴에 대한 측정 결과이며, 아직까지 확산 폴에 대한 타 연구 결과를 찾지 못하였다. 본 연구에서 측정된 증발속도를 기준으로 확산폴에서의 증발

속도 확산폴에서의 증발속도보다 일반적으로 큰 것을 알 수 있다. 이것은 비확산폴과 확산폴의 특성에 기인하는 것으로, 비확산폴에서는 액체폴과 열공급 원인 확산판(spreading plate) 사이의 온도가 지속적으로 감소하는 반면, 확산폴에서는 확산하는 액체가 지속적으로 온도차가 큰 새로운 환경에 접하게 되기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 연속적으로 누출되어 확산되고 있는 액체질소 폴에 대하여 증발속도를 측정하였다. 사고 사례로부터 연속적인 누출이 순간적인 누출보다 매우 높은 확률이고, 지금까지 보고된 모든 연구에서 측정된 증발속도는 비확산폴에 대한 연구이기 때문에, 본 연구에서 개발된 확산하고 있는 액체 폴에 대한 증발속도 측정 방법은 중요한 의미를 가지고 있다고 판단된다.

Table 2. Comparison among experimental results

	Liquid	Ground material	Release method	Pool type	Result
Present work	LN <sub>2</sub>	Concrete	Continuous	Spreading	$E=1.29 \times 10^{-4}$ $\sim 1.39 \times 10^{-2}$ m/s
Zabetakis and Burgess <sup>9)</sup>	LH <sub>2</sub>	Paraffin wax	Instantaneous	Non-spreading	$E=4.23 \times 10^{-4}$ $\sim 1.27 \times 10^{-3}$ m/s
Takeno et al <sup>5)</sup>	LH <sub>2</sub>	Lime stone	Instantaneous	Non-spreading	$E=3.10 \times 10^{-4}$ $\sim 1.80 \times 10^{-3}$ m/s
Olewski et al <sup>6)</sup>	LN <sub>2</sub>	Concrete	Instantaneous	Non-spreading	$E=5.92 \times 10^{-5}$ $\sim 8.38 \times 10^{-4}$ m/s
Olewski et al <sup>7)</sup>	LN <sub>2</sub>	Concrete	Not-known	Non-spreading	$E=5.70 \times 10^{-5}$ $\sim 8.05 \times 10^{-4}$ m/s
Reid and Wang <sup>4)</sup>	LNG	Insulating concrete, soil, sand, dry polyurethane	Instantaneous	Non-spreading	$E=8.50 \times 10^{-5}$ $\sim 1.20 \times 10^{-3}$ m/s

확산하고 있는 액체 풀의 증발속도 측정을 위하여 누출유량, 액체 풀의 선단 위치와 질량의 동시 측정이 필요하였다. 비확산풀에서는 풀의 면적이 고정되어 있기 때문에, 증발속도 측정을 위하여는 시간에 따른 질량의 측정만이 필요하다.

누출유량이 클수록 증발속도가 증가하였으며, 증발속도는 시간에 따라 감소하였다. 타 연구에서 측정된 증발속도에 비하여 본 연구에서 측정된 증발속도가 일반적으로 더 큰 값을 보이는데, 이는 타 연구 결과들은 전부 비확산풀에 대한 결과이기 때문으로 판단된다. 비확산풀에서는 풀 면적이 고정된 상태에 있기 때문에 바닥으로부터의 열전달이 지속적으로 감소하는 반면, 확산풀에서는 새로운 표면과 액체 풀이 계속 접촉하기 때문에 열전달이 보다 효과적으로 이루어질 수 있게 되기 때문이다.

## References

1. F. Briscoe and P. Shaw, "Spread and evaporation of liquid", Prog. Energy Comb. Sci., Vol. 6, 1980, pp. 127-140.
2. J. Brandeis and E. J. Kansa, "Numerical simulation of liquefied fuel spill: I. Instantaneous release into a confined area", Int. J. for Numerical Methods in Fluid, Vol. 3, 1983, pp. 333-345.
3. W. Stein and D. L. Ermak, "One-dimensional numerical fluid dynamic model of spreading of liquefied gaseous fuel (LGF) on water", National Technical Information Service, US Department of Commerce, 1980.
4. R. C. Reid and R. Wang, "The boiling rate of LNG on typical dike floor materials", Cryogenics, Vol. 18, 1978, pp. 401-404.
5. K. Takeno, T. Ichinose, Y. Hyodo, and H. Nakamura, "Evaporation rates of liquid hydrogen and liquid oxygen spilled onto the ground", J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 7, No. 5, 1994, pp. 425-431.
6. T. Olewski, L. Vechot, and S. Mannan, "Study of the Vaporization Rate of Liquid Nitrogen by Small and Medium-Scale Experiments", The Italian Association of Chemical Engineering, Vol. 31, 2013, pp. 133-138.
7. T. Olewski, L. Vechot, and S. Mannan, "Validation of liquid nitrogen vaporization rate by small scale experiments and analysis of the conductive heat flux from the concrete", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 35, 2015, pp. 277-282.
8. K. Verfondern and B. Dienhart, "Pool spreading and vaporization of liquid hydrogen", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, 2007, pp. 2106-2117.
9. M. G. Zabetakis and D. S. Burgess, "Research on the hazard associated with the production and handling of liquid hydrogen", WADD Technique Report, 1960, pp. 60-141.