

연속누출을 가지는 액체 풀 확산 모델의 실험적 평가

김태훈^{1,2†} · 도규형^{1,2} · 김명배^{1,2} · 한용식¹ · 최병일^{1,2}

¹한국기계연구원 에너지플랜트안전연구소, ²과학기술연합대학원대학교 플랜트기계공학전공

Experimentally Evaluation of a Liquid Pool Spreading Model with Continuous Release

TAEHOON KIM^{1,2†}, KYU HYUNG DO^{1,2}, MYUNGBAE KIM^{1,2}, YONG-SHIK HAN¹, BYUNG-IL CHOI^{1,2}

¹Department of Plant Safety Technology, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM),
156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 34103, Korea

²Department of Plant System and Machinery, University of Science and Technology (UST),
217 Gajeong-Ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34113, Korea

Abstract >> In this study, an experimental investigation is performed for evaluation of a liquid pool spreading model with continuous release. The model considered in this study was developed based on a concept which means that the liquid pool spreading is governed by a balance between an inertia force from gravity and a frictional force from friction with the ground under the whole base of the liquid pool. For evaluation of the model, experimental study is performed. Experimental apparatus is setup for measuring release rate, spreading velocity, and evaporation rate from a liquid pool. The experimental results are compared with results from the model. By applying release and evaporation rates obtained from experiments to solving the model, liquid pool radius variation according to time can be obtained. For evaluation of an effect of friction force in the spreading model, results obtained from the models with and without the friction force are compared with those obtained from the experiments. As a result, it is shown that there exists a large deviation between the results obtained from the model without the friction force and the experimental results. On the other hand, the tendency of liquid pool radius variation according to time is similar between the results obtained from the model without the friction force and the experimental results.

Key words : Pool spreading(풀 확산), Continuous release(연속누출), Frictional force(마찰력)

Nomenclature

D : nozzle diameter in a funnel, m
 F : frictional force, m/s^2
 g : gravity acceleration, m/s^2
 H : liquid height in a funnel, m

h : pool height, m
 \dot{Q} : flow rate, m^3/s
 r : pool radius, m
 s : pool height ratio
 t : time, sec
 u : spreading velocity, m/s
 V : pool volume, m^3
 v : release velocity, m/s

[†]Corresponding author : thkim79@kimm.re.kr

Received : 2015.11.25 in revised form : 2015.12.23 Accepted : 2015.12.30

Copyright © 2015 KHNES

Greek symbols

Φ : shape factor

v_L : liquid viscosity

Subscripts

e : evaporation

r : release

1. 서 론

원유나 가스를 생산하는 플랜트나 원유를 원료로 하는 석유화학 플랜트에는 액상의 가연성이나 유독성 물질이 존재하게 된다. 보통의 경우 이 물질들은 공정장치(Process equipment)나 배관 내에 있으면서 여러 가지 공정을 거치게 된다. 그런데 여러 가지 이유로 이러한 물질이 대기 중으로 누출되면 해당 플랜트는 여러 위험에 직면하게 된다. 기체 상태의 가연성 물질이 분출되면 제트화재(Jet fire)나 폭발의 원인이 된다. 액체 상태로 누출되면 증발하면서 특정 표면을 퍼져나가는데, 증발된 기체는 증기운 폭발(Vapor cloud explosion)의 원인이 될 수 있으며, 표면 위의 액체는 풀화재(Pool fire) 또는 고임화재(Puddle fire) 근거가 될 수 있다. 배관에 분사 형태로 누출되면 분사화재(Spray fire)가 된다. 유독성 가스 또는 연소된 가스는 대기의 흐름에 의하여 주변으로 확산하게 된다.

이와 같이 산업 플랜트에서의 중대 사고는 가연성 또는 유독성 물질의 누출로부터 시작되기 때문에 누출된 액체의 퍼짐에 대한 연구는 액화수소나 LNG, LPG 플랜트, 해양 플랜트 등의 설계과정의 하나인 위해도 평가(Risk assessment)를 위한 필수적인 요소이다. 특히, 저온에서 보관된 액체가 누출된 경우에는 증발을 수반하면서 확산하게 된다.

이와 같은 액체가 증발하면서 퍼져가는 액체의 확

산에 대한 여러 가지 모델이 발표되어 왔다. 확산모델들로는 비교적 간단한 모델로부터 3차원의 완전한 보존식¹⁾을 이용한 모델까지 여러 종류가 있다. 본 연구에서 고려하고자 하는 모델은 적분모델(Integral model)이다²⁾. 이 모델에서 고려하는 액체 풀의 확산을 관장하는 힘들은 중력과 점성력이 있다. 여기서 증발에 대한 모델은 액체 풀에 대한 에너지 방정식과 열전도 식을 이용하여 정립할 수 있지만 대부분의 모델들에서는 단위면적당 증발계수 개념을 도입하여 증발 부분을 간단히 처리하고 있다. 상수인 증발계수를 가정하여 질량 보존 식으로 처리하고 있다. 이 모델에서 점성력이 없다고 가정하면 액체 풀의 확산은 중력에 의해서만 이루어진다.

본 연구에서는 연속누출을 가지는 액체 풀의 확산 모델을 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하고자 한다. 실험의 안전성을 위해 LNG와 같은 가연성 물질 대신해서 액체질소(LN2)를 사용한다. 적분모델(Integral model)에서 점성력이 있는 경우와 없는 경우의 모델과 실험 결과를 비교하고자 한다.

2. 액체 풀 확산 모델

서론에서도 언급한 바와 같이 본 연구에서 고려하고자 하는 액체 풀의 확산 모델은 적분모델(Integral model)이다. 일반적으로 액체 풀의 현상을 모사할 때는 원칙적으로 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 방정식을 모두 고려하여야 한다. 이 중에 액체 풀의 증발 현상을 정확하게 모사하기 위해서는 에너지 방정식을 필히 고려하여야 한다. 그러나 에너지 방정식을 고려하게 되면 문제가 매우 복잡하게 되기 때문에 서론에서 언급한 바와 같이 대부분의 모델에서는 단위면적당 증발량 개념을 도입하여 에너지 방정식을 고려하지 않는다. 본 연구에서 고려하고자 하는 적분모델(Integral model) 역시 이와 같은 접근 방법을 사용한다. 먼저 질량 보존 방정식을 살펴보면 식 (1)과 같다.

$$\frac{dV}{dt} = \dot{Q}_r - \dot{Q}_e \quad (1)$$

식 (1)의 첫 번째 항은 용기로부터 액체 풀로 누출되는 액체의 유량을 의미하고 두 번째 항은 풀에서 주변으로 증발되는 액체의 양을 의미한다. 본 연구에서는 연속 누출을 가지는 액체 풀의 확산 현상을 살펴보기 때문에 식 (1)의 첫 번째 항은 시간에 따라 일정하게 된다.

다음으로 액체 풀의 운동량 보존 방정식을 살펴보면 식 (2)와 같다.

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{du}{dt} = \frac{4gh\phi}{r} - F \quad (2)$$

식 (2) 우변의 첫 번째 항은 중력에 의한 액체 풀의 확산을 발생시키는 구동력이며 두 번째 항은 마찰력이다. 여기서 ϕ 는 중력에 의한 풀의 확산 구동력에 미치는 풀의 형상에 관련된 함수로서 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi(s) = \begin{cases} 1-s & \text{if } s < 2 \\ -s^2/4 & \text{if } s \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

여기서 s 는 형상함수(Shape factor)이며 풀의 모양이 볼록한지(Convex), 오목한지(Concave)에 따라 달라진다³⁾. 마찰저항은 지면과 액체 풀 사이의 마찰에 의한 저항으로서 지면저항(Ground resistance)이라고 말할 수 있으며 풀의 확산 유동이 층류 유동이나 난류 유동이나에 따라 달라지며 또한, 지면의 상태(흙, 콘크리트, 바다 등)에 따라도 달라진다. 마찰저항은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며 자세한 내용은 참고 문헌에 나와 있다³⁾.

$$F = 2.53 \times j(s)^2 \times (3.0 \times v_L \times u / h_e^2) \quad (4)$$

여기서 $h_e = 3.38/40$, $j(s) = \begin{cases} 2/s & \text{if } s < 2 \\ 1 & \text{if } s \geq 2 \end{cases}$.

식 (2)에서 마찰저항이 없다고 가정하면 모델에서 액체 풀의 확산을 지배하는 힘은 중력 밖에 없게 된다. 본 연구에서는 마찰저항이 있는 경우와 없는 경우의 모델의 결과를 실험 결과와 비교할 것이다.

3. 실험 연구

앞에서 언급한 모델을 평가하기 위해서 액체 누출을 모사할 수 있는 실험 장치를 제작하여야 한다. 실험 장치는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 액체 누출 현상을 모사할 수 있는 액체 누출 모사 장치와 액체가 누출된 후 확산되는 속도 및 액체 풀의 증발량을 측정할 수 있는 장치이다. Fig. 1은 본 연구에서 구현하고자 하는 실험 장치의 개략도 이다. 본 연구에서는 시간에 따라 누출량이 일정한 연속누출을 고려하고 있기 때문에 액체를 누출되는 표면 위에 일정하게 공급하는 것이 중요하다. 이를 구현하기 위해 유량계를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 유량계 대신에 깔때기를 사용하여 누출량을 일정하게 유지 하고자 한다. 그 이유는 유량계를 사용하여서는 액체질소를 표면 위에 일정하게 공급하기 힘들기 때문이다. 본 연구에서 사용하는 유체는 극저온의 액체 질소이다. 유량계를 사용할 경우 액체 질소가 흘러가는 배관, 제어밸브, 유량계 등을 냉각시

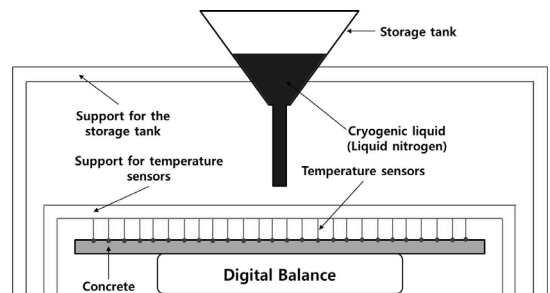


Fig. 1 Schematic diagram for experimental apparatus

키지 않고 액체 질소를 누출 시킬 경우 액체 질소가 아니라 기체 질소가 누출되게 된다. 또한 유량계 내부에는 액체와 기체가 동시에 지나갈 가능성이 있기 때문에 이럴 경우 유량을 정밀하게 제어하기 힘들게 된다. 이러한 이유로 액체의 수두를 이용한 액체 누출 모사 방법을 고안하였다. 깔때기의 목이 좁은 부분에 단면이 일정한 관을 연결하였다. 극저온 액체는 쉽게 증발하기 때문에 증발을 방지하기 위하여 깔때기와 배관은 단열재를 이용하여 단열을 시켜 주었다. 깔때기 내 액체의 수위가 높으면 깔때기 출구로 누출되는 액체의 누출 속도는 증가하게 된다. 즉, 깔때기 내 액체의 수위와 누출 속도는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v = C\sqrt{2gH} \quad (5)$$

여기서 C는 유량계수로서 깔때기와 관의 형상과 관련된 계수이다. 식 (5)에서 보듯이 누출 속도는 액체의 종류와는 상관이 없다. 따라서 유량계수를 구하기 위해 본 연구에서는 물을 사용하였다. 깔때기를 지지대에 고정하여 놓고 저울 위에 올려놓는다. 깔때기 내부에 물을 채운 후 액체를 누출 시키면서 물의 무게 변화를 측정한다. 측정된 물의 무게 변화로부터 시간에 따른 누출량을 구한다. 이 누출량으로 부터

누출 속도를 계산한 후 식 (5)에 대입하여 유량계수를 구한다. Fig. 2는 누출되는 배관의 단면의 지름(6, 8, 10 mm)이 변함에 따라 누출계수 변화를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 반경이 커질수록 유량계수는 커지는 것을 확인할 수 있다. 이 유량계수와 액체질소의 수위를 알고 있으면 액체질소의 누출 속도를 계산할 수 있다.

다음으로 액체 풀의 확산 시간을 구할 수 있는 장치에 대하여 살펴보고자 한다. 본 연구에서는 액체가 Concrete 위로 누출되는 경우를 고려한다. 풀의 확산 시간을 측정하기 위해 연구 초반에는 비디오카메라를 이용하고자 하였으나 액체 질소 증발에 따라 안개와 같은 것이 생성되어 비디오카메라를 이용하여서는 액체 풀의 거동을 전혀 볼 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 Verfondern and Dienhart⁴⁾가 수행한 방법에 착안하여 온도센서를 이용하여 액체 풀의 확산 속도를 측정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 온도 센서를 5 cm 간격으로 Concrete 표면에 접촉시켜 놓았다. 액체 질소가 깔때기로부터 누출이 일어나기 때문에 액체 질소가 도달하게 되면 온도센서에서 측정되는 온도는 약 70°C/sec의 속도로 급격하게 변하게 된다. 누출 시작한 시간으로부터 온도센서의 온도가 급격하게 변한 시점까지 걸리는 시간과 온도 센서의 위치를 통해 확산 속도를 결정할 수 있다.

마지막으로 액체 풀에서의 증발량을 측정하는 방법을 살펴보고자 한다. 액체 질소가 Concrete 위로 누출되어 풀을 형성하면 주변으로부터 열을 받기 때문에 증발이 일어난다. 시간에 따른 증발량을 구하기 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전자저울 위에 Concrete를 올려놓고 시간에 따른 액체 풀의 무게 변화량을 측정하였다. 앞에서 언급한 방법으로 구한 액체 질소의 공급량과 전자저울에 의해 측정된 액체 풀의 무게 변화 결과를 조합하면 시간에 따른 액체 질소의 증발량을 구할 수 있다. Fig. 3은 본 연구에서 구현한 실제 실험 장치를 보여준다. 실험 장치에서 보면 알

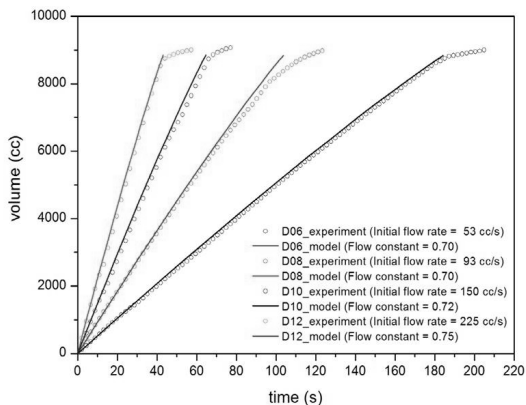


Fig. 2 Release volume according to time

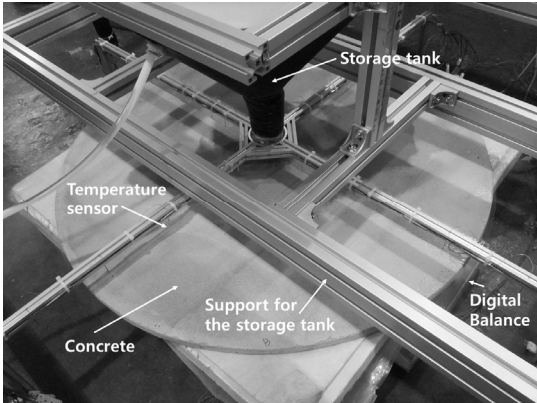


Fig. 3 Experimental apparatus

Table 1 Experimental cases

Experiments	Nozzle diameter	Release rate
Case 1	6 mm	53 cm ³ /s
Case 2	8 mm	93 cm ³ /s
Case 3	10 mm	146 cm ³ /s

수 있듯이 액체 풀의 확산 속도를 측정하는 온도센서는 90도 간격을 두고 네 방향으로 나열되어 있다.

4. 결과 및 토의

4.1 액체 질소 누출량

누출되는 액체 질소의 누출량을 조절하기 위하여 깔때기에 연결되어 있는 노즐의 지름을 Table 1과 같이 바꾸면서 실험을 수행하였다. 이 때 깔때기 내부에 채워진 액체질소의 수위는 일정하게 하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 액체 질소의 수위가 같을 때 배관 지름이 커질수록 누출량은 커지는 것을 알 수 있다.

4.2 실험 결과

Fig. 4는 온도 센서를 이용하여 실험적으로 구한 시간에 따른 풀의 반경 변화를 보여 준다. 실험 장치에서 보듯이 총 네 개의 온도 센서가 누출지점으로

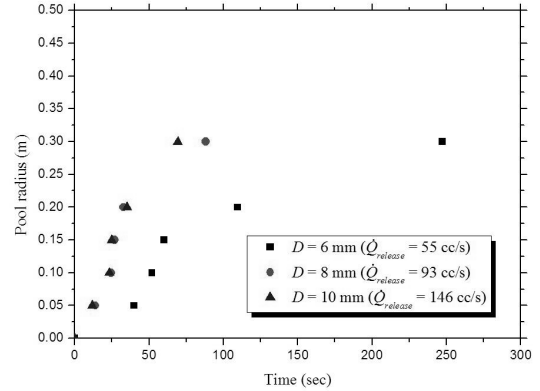


Fig. 4 Experimental results for pool radius

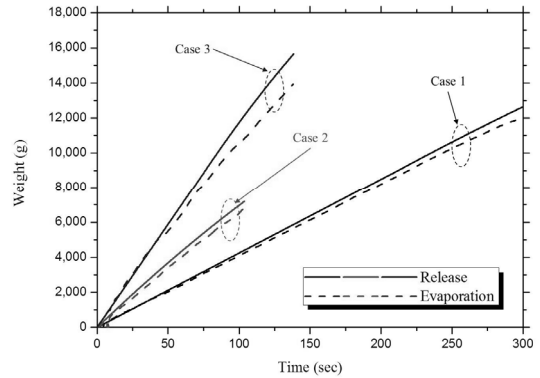


Fig. 5 Release and evaporation rate according to time

부터 같은 거리만큼 떨어져 있다. 한 지점에 액체가 도달할 때까지 걸린 시간은 네 개의 온도 센서로부터 얻은 결과를 평균하여 구하였다. 그림에서 보면 누출량이 작을수록 풀의 반경이 증가하는 속도가 감소한다. Case 2와 Case 3은 확산 속도가 크게 차이가 나지 않는 것처럼 보여 진다. 그 이유는 이상적으로 액체가 퍼질 때 액체 풀의 단면 형상은 원에 가까워야 하지만 실제 현상에서는 액체 풀이 사방으로 균일하게 퍼지지 않기 때문에 네 개의 온도 센서로부터 구한 확산 시간이 큰 차이가 나는 경우가 생긴다. 이러한 Uncertainty로 인하여 Case 2와 Case 3은 큰 차이가 없는 것처럼 보여 진다. 이를 개선하게 위해서는 원주 방향으로 온도 센서를 더 사용하여할 것

Table 2 Evaporation rate

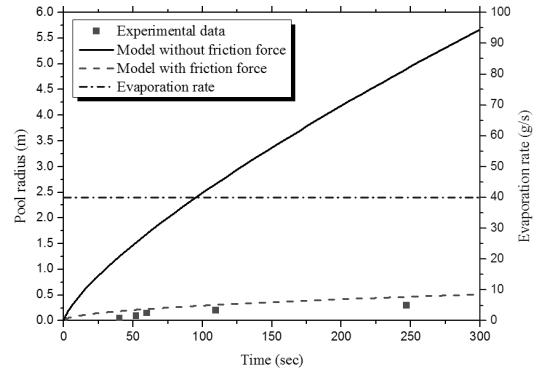
Experiments	Release rate	Evaporation rate
Case 1	40.5 g/s	39.8 g/s
Case 2	75.2 g/s	66.5 g/s
Case 3	118.1 g/s	105.2 g/s

으로 생각된다.

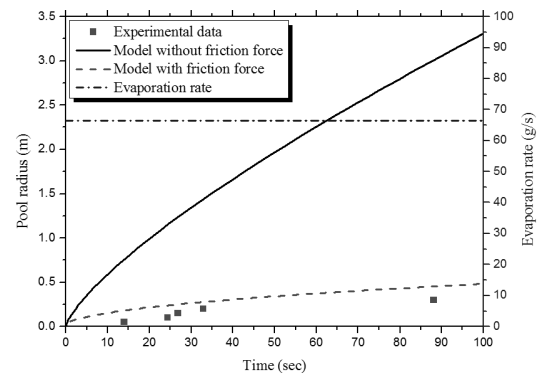
Fig. 5는 전자저울로 측정된 액체 풀의 무게 변화를 이용하여 구한 총 증발량과 공급량의 시간에 따른 변화를 보여 준다. 그림에서 보듯이 시간에 따른 총 증발량의 변화는 선형에 가깝다. 이에 따라 증발량 그래프의 기울기를 구하면 Table 2와 같이 증발율 (Evaporation rate)을 구할 수 있다.

4.3 실험 결과와 액체 풀 확산 모델의 비교

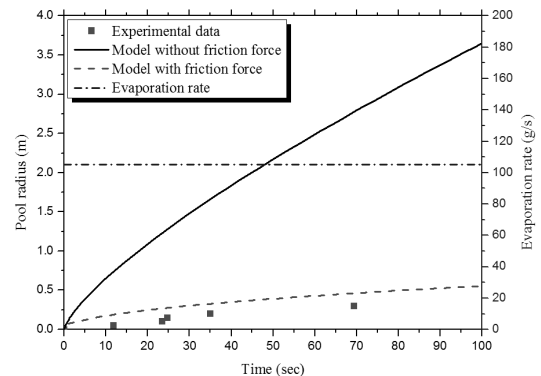
액체 질소를 이용한 실험 결과를 이용하여 앞에서 제시한 모델과 비교하였다. 실험에서 얻은 공급량과 증발을 값을 질량 보존 방정식인 식 (1)의 우변에 대입하여 액체 풀의 반경 변화를 모델로부터 구하였다. Fig. 6은 실험과 모델로부터 구한 시간에 따른 반경 변화 그래프를 보여준다. 검정 실선은 마찰력이 없는 경우의 시간에 따른 풀 반경 변화 모델 결과를 보여 주며 빨강 점선은 마찰력이 있는 경우의 시간에 따른 풀 반경 변화 모델 결과를 보여준다. 실험의 경우 액체 풀이 확산할 때 바닥과 액체 풀 사이에 마찰력이 항상 존재하게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 모델에서 마찰력이 없는 경우 액체 풀이 퍼질 때 방해하는 저항이 없으므로 마찰력이 있는 경우와 비교하면 아주 빠르게 액체 풀이 퍼지는 것을 확인할 수 있다. Table 3은 모델 결과로부터 구한 확산속도를 보여준다. 표에서 보는 바와 같이 마찰력이 없는 경우의 확산 속도가 마찰력이 있는 경우의 그것보다 8배 이상 빠른 것을 확인할 수 있다. 그림에서 보면 마찰력이 없는 경우 모델로부터 구한 반경 변화는 실험 결과와 많은 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 6 Comparison between experimental results and the models

Table 3 Spreading speed obtained from models

Cases	without the friction	with the friction
Case 1	0.0230 m/s	0.0012 m/s
Case 2	0.0363 m/s	0.0043 m/s
Case 3	0.0407 m/s	0.0049 m/s

와 다르게 마찰력을 고려한 모델 결과는 시간에 따른 반경 변화 경향성이 실험 결과와 오차 40% 이내로 일치하는 것을 볼 수 있다. 모델과 실험결과의 경향성은 잘 일치하지만 절대적인 값의 차이는 존재한다. 이를 보완하기 위해서 액체 풀의 확산 모델에서 액체 풀의 확산을 방해하는 마찰저항의 모델을 보완하면 실험 결과를 좀 더 정확하게 예측할 수 있는 액체 풀의 확산 모델을 만들 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 연속누출을 가지는 액체 풀 확산 모델을 평가하기 위한 실험 연구를 수행하였다. 먼저 액체 풀 확산 현상을 모사하기 위한 실험 장치를 설계 및 제작하였다. 특히 연속 누출을 모사하기 위해 깔때기를 이용한 액체 누출 모사 장치를 제안하고 연속 누출이 가능한지를 실험적으로 증명하였다. 또한 온도 센서 배열을 통해 액체 풀의 확산 속도를 측정하였으며 저울을 이용하여 액체 풀의 증발량을 구하였다. 또한 액체 풀 확산 모델에서 마찰저항 유무에 따른 액체 풀 확산 현상변화를 살펴보았다. 그 결과 마찰저항이 없는 경우가 액체 풀이 더 빨리 확산 되는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 모델로부터 구한 액체 풀 반경 변화를 실험으로부터 구한 반경 변화와 비교한 결과, 마찰저항을 고려한 모델의 시간에

따른 반경 변화 경향성이 실험 결과와 일치하는 것을 확인하였다. 실험 결과를 좀 더 정확하게 예측하기 위해서는 액체 풀 확산 모델에서 액체 풀 확산을 방해하는 마찰저항 모델을 개선할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2015년도 미래창조과학부재원으로 신기술융합형성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. A. G. Venetsanos and J. G. Bartzis, "CFD Modelling of Large-Scale LH2 Spills in Open Environment", Proc. of International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy, pp. 125-146.
2. D. M. Webber, "On Models of Spreading Pools", J. Loss Prevention in the Process Industries, 25, 2012, pp. 923-926.
3. C. J. H. van den Bosch and R. A. P. M. Weterings, "Methods for the Calculation of Physical Effects (TNO Yellow Book)", 3rd Ed, 1997, TNO, The Hague, The Netherlands.
4. K. Verfondern and B. Dienhart, "Pool Spreading and Vaporization of Liquid Hydrogen", Int. J. Hydrogen Energy, 32, 2007, pp. 2106-2117.