

## 섭동해를 이용한 혼합 누출에 관한 연구

김명배

한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실

과학기술연합대학원대학교 플랜트기계전공

(2014년 7월 29일 접수, 2014년 12월 3일 수정, 2014년 12월 5일 채택)

### **A study of a combined release model using perturbation solutions**

Myungbae Kim

Department of Energy Plant Safety, Korea Institute of Machinery & Materials

Plant System and Machinery, Korea University of Science and Technology

(Received 29 July 2014, Revised 3 December 2014, Accepted 5 December 2014)

#### 요약

지금까지 관행적으로 액체의 누출은 순간누출과 연속누출로 분류 되어 왔다. 본 논문에서는 이러한 분류의 문제점을 인식하고 새로운 분류 방법을 찾기 위하여 제한된 시간 동안 누출되는 극저온 액체의 확산에 관한 연구를 수행하였다. 이러한 물리적 현상은 누출된 액체풀의 부피, 반경, 높이에 관한 연립 방정식에 의해 지배되며, 주요 변수는 단위면적당 증발률, 누출시간, 누출량의 3 개 이다. 섭동법에 의한 해를 효율적으로 구하기 위하여 독립된 형태의 부피에 관한 2차 미분방정식을 얻었다. 이 새로운 지배 방정식은 기존의 방법에 비하여 매우 간단하게 해를 얻을 수 있게 한다. 섭동해의 결과, 동일한 누출량인 경우에 누출시간이 작으면 연속누출이 순간누출로 이어지는 혼합 형태의 누출이 되나, 누출시간이 크게 되면 연속누출 형태로만 존재하게 된다. 동일한 누출시간의 경우에는 누출량이 작으면 연속누출 형태로만 존재하지만, 누출량이 증가할수록 혼합형태의 누출로 된다. 이러한 2개의 영역을 분할하는 경계를 섭동해를 이용하여 해석적으로 제시함으로써 누출의 새로운 분류에 대한 명확한 근거를 제시 하였다.

주요어 : 연속누출, 순간누출, 혼합누출, 섭동법, 극저온 액체

Abstract - Leak of liquid has been categorized conventionally into instantaneous release and continuous release. In this study, the spread of cryogenic liquid due to limited period of release is investigated for the first time to establish a new classification method with recognizing the irrationality of the conventional one. Such physical phenomena are governed by simultaneous equations concerning volume, radius and height of pool of the cryogenic liquid, and major parameters are evaporation rate per unit area, time of release, and spill quantity. The simultaneous governing equations is decoupled to get efficiently perturbation solutions. As the results, for the same spill quantity, in view of release model, combined release model that consists of continuous and consecutive instantaneous model is necessary with small time of release, while continuous model is solely required with large time of release. Also, the combined model is necessary for small spill quantity with the same time of release. These two regimes of release are clearly distinguished using the perturbation solution to provide a clear basis for the new classification of release models.

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

Department of Energy Plant Safety, Korea Institute of Machinery & Materials

Tel : 042-868-7340 E-mail : mbkim@kimm.re.kr

**Key words** : continuous release, instantaneous release, combined release, perturbation, cryogenic liquid

## 1. 서 론

석유화학 플랜트에서 가연성 물질의 누출(release)은 화재나 폭발로 이어질 가능성이 높기 때문에, 플랜트의 위험성 평가는 물론 위험도 기반의 플랜트 유지관리(Risk Based Inspection, RBI)에서도 누출에 대한 연구는 필수적이다.

누출을 문자 그대로 해석하면 어떤 장치나 기계로부터 외부로 물질이 유출되는 현상을 의미한다. 유출되는 액체는 증발을 수반하면서 특정한 표면-지표면이나 바다 등을 확산(spread)해 나간다. 이러한 물리적 현상을 다루기 위하여 여러 가지의 확산모델이 개발되어 있다. 3차원의 완전한 보존식을 이용한 모델<sup>(1)</sup>, 얇은 층(shallow layer) 모델<sup>(2-5)</sup>, 간단한 물리적 모델(simple physical model)<sup>(6-9)</sup> 등이 존재한다. 얇은 층 모델은 축대칭 가정 하에 액체 풀의 속도와 높이를 반경과 시간에 대하여 푸는 편미분 방정식이다. 간단한 물리적 모델은 액체의 확산을 시간변화에 따른 액체풀 직경의 변화로 보는 것이며, 이 때 풀의 높이는 풀의 반경에 대하여 일정하다고 가정한다. 그 결과로 시간을 독립변수로 하는 2개의 상미분 방정식과 1개의 대수 방정식으로 정리된다. 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 처리 하고 있다.

이상의 확산모델들은 초기조건(initial condition)을 필요로 한다. 초기조건은 누출에 대한 모델에 의하여 결정되며, 누출모델은 순간누출(instantaneous release)과 연속누출(continuous release)로 구분된다. 미국석유협회(API, American Petroleum Institute)의 석유화학플랜트에 대한 위험도기반의 유지관리(RBI) 기준<sup>(10)</sup>에 의하면 순간누출은 액체가 급속하게 유출되어 단일의 덩어리 또는 풀의 형태로 확산 되는 것을 의미 하고, 연속누출은 비교적 긴 시간 동안 유출되는 것을 의미 한다. 순간누출은 저장탱크나 용기가 순간적으로 파괴되어 액체가 유출되는 경우에 해당하며, 반면에 비교적 작은 틈이나 구멍으로부터 액체가 계

속해서 흘러나오는 경우에는 연속누출로 판단하게 된다. 초기조건으로 설명하면 순간 누출은  $T=0$  에서 특정한 부피와 형상에 관한 값을 갖는다. 연속누출은  $T=0$  에서 부피와 형상에 관한 값이 전부 0 이다.

위와 같은 누출에 대한 분류는 명확성이 없으므로, 동 기준에서는 누출 총량이 4,536 kg 보다 크거나 누출 시간이 180 초 이하 이면 순간누출로 판단하고, 그렇지 않은 경우는 연속누출로 판단한다. 구멍의 크기가 6.35mm 이하이면 무조건 연속누출로 간주 한다. 그런데, 위와 같은 정량적 기준에 대한 근거는 찾기 어렵다. 순간누출이라는 물리적 현상은 수학에서의 델타 함수(delta function)와 같은 개념으로 실제적 상황을 단순화시킨 것 일뿐 이다. 이에 비하면 연속 누출은 비교적 명확하게 정의 될 수 있다. 그러므로 현실적으로 존재할 수 없는 순간누출과 연속누출로 구분되는 누출모델에 대한 관습적인 구분 방법에 문제점이 있다고 판단된다. 본 연구에서는 개념적으로나 정량적으로나 과학적 근거가 명백하지 않은 기준의 누출모델 구분 방법을 개선하기 위하여, 제한된 시간 동안 누출되는 극저온 액체의 확산에 연구를 처음으로 수행하였다.

## 2. 지배 방정식 및 정식화

액체가 확산될 때 여러 가지 힘들(힘들이 존재하지만 액화천연가스나 액화수소같은 극저온 액체의 경우에는 중력만을 고려하게 된다. 액체의 확산에 관여한 여러 가지 힘에 대한 설명은 참고문헌 7에 자세히 언급되어 있다. 확산되고 있는 액체를 반경과 균일한 높이를 갖는 원형 실린더라 가정하면 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다(7).

$$\frac{dR}{dT} = \sqrt{\alpha H} \quad (1)$$

콘크리트나 흙의 표면 위를 액체가 퍼져가는 경우는  $\Delta=1$  이다. 물의 표면 위를 퍼져가는 경우에는  $\Delta = 1 - \rho/\rho_w$  이다. 액화천연가스 수송 선박에서 액화천연가스가 누출되어 바다 위를 확산해가는 경우에

적용할 수 있다. 두 액체의 밀도 차에 의한 보정 항이라고 판단 할 수 있다.

액체의 부피는 다음과 같이 단위면적당 증발율을 사용하여 표현된다.

$$\frac{dV}{dT} = -E\pi R^2 + \beta; \quad (2)$$

$$\beta = Q/T_d \text{ for } 0 < T \leq T_d, \beta = 0 \text{ for } T > T_d$$

여기에서  $\beta$ 는 연속누출 또는 혼합누출을 의미하는 누출율이다. 일반적으로 누출율이 0 이면 순간누출로, 누출율이 특정한 값을 가지면 연속누출로 분류된다. 따라서 본 연구에서 취급하는 문제는 양 누출이 모두 포함된 혼합누출 문제라고 할 수 있다. 만일 누출량  $Q$ 를 일정하게 유지시키면서 누출시간  $T_d$  를 0으로 무한히 근접시키면, 누출율  $\beta$ 는 무한히 커지게 되어 수학에서의 델타 함수와 같은 형태가 되고 이는 순간 누출에 해당하게 된다. 현실적으로는 모든 누출이 유한한 누출시간을 가지기 때문에 혼합누출이 보다 현실적이다.

마지막으로 다음과 같은 대수 방정식이 필요하다.

$$H = V/\pi R^2 \quad (3)$$

초기조건은 다음과 같다.

$$V = 0, R = 0, H = 0 \text{ at } T = 0 \quad (4)$$

방정식과 초기 조건을 보다 일반적으로 다루기 위하여 다음과 같은 무차원 변수를 도입 한다.

$$v = V/\pi L^3, r = R/L, h = H/L, t = T/\tau \quad (5)$$

여기에서 특성 시간과 특성 길이는 다음 식과 같이 정의 된다.

$$\tau = T_d, \quad L = \alpha T_d^2 \quad (6)$$

식 (5)를 이용하여 지배 방정식 (1)~(3)을 무차원화 하면 다음과 같은 식들이 얻어 진다.

$$\frac{dv}{dt} = \beta_* - \epsilon r^2; \quad (7)$$

$$\beta_* = \frac{Q}{\pi \alpha^3 T_d^6} \text{ for } 0 < t \leq 1, \beta_* = 0 \text{ for } t > 1$$

$$\frac{dr}{dt} = \sqrt{h} \quad (8)$$

$$h = \frac{v}{r^2} \quad (9)$$

여기에서 식 (7)의  $\epsilon$ 은 무차원 증발률로 볼 수 있으며 다음과 같이 표현 된다.

$$\epsilon = \frac{E}{\alpha T_d} \quad (10)$$

식 (4)로부터 다음과 같은 무차원화된 초기 조건들이 얻어 진다.

$$v = 0, r = 0, h = 0 \text{ at } t = 0 \quad (11)$$

차원이 있는 지배 방정식 (1)~(3)을 지배하는 변수는 증발율과 누출량, 누출지속시간의 3개 인데, 무차원화를 통하여 얻은 무차원 지배 방정식 (7)~(9)를 지배하는 변수는 무차원 증발율과 무차원 누출율의 2개 임을 알 수 있다. 지배 방정식 (7)~(9)는 연립 미분 방정식이며, 연속 누출에 대한 경우의 섭동해 (perturbation solution)가 알려져 있다<sup>(7)</sup>. 여기에서는 보다 간단한 방법으로 해를 얻기 위하여 식 (9)를 식 (8)에 대입하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{dr^2}{dt} = 2\sqrt{v} \quad (12)$$

식(7)의 양변을 미분하고 식 (12)을 이용하면 다음과 같은 2차 미분 방정식이 얻어진다.

$$\frac{d^2v}{dt^2} + 2\epsilon\sqrt{v} = 0 \quad (13)$$

초기 조건은 다음과 같다.

$$v = 0, v'(0) = \beta_* \text{ at } t = 0 \quad (14)$$

식 (13), (14)로부터 부피만의 미분 방정식으로 변형된 것을 알 수 있다. 이 것은 기존의 연립방정식 해법<sup>(7)</sup>보다 매우 간단히 해를 얻을 수 있게 해준다.

### 3. 섭동해

증발율 E는 보통 매우 작은 값을 가지므로, 자연스럽게  $\epsilon$ 을 섭동변수(perturbation parameter)로 선택하고 다음과 같이 해의 형태를 가정한다.

$$v = v_0 + \epsilon v_1 + \epsilon^2 v_2 + \dots \quad (15)$$

식 (15)를 식 (13)에 대입하고  $O(\epsilon^4)$ 까지만 정리하면 다음의 식들이 얻어진다.

$$(v_0'')^2 = 0 \quad (16)$$

$$2v_0''v_1'' = 0 \quad (17)$$

$$(v_1'')^2 + 2v_0''v_2'' = 4v_0 \quad (18)$$

$$2v_0''v_3'' + 2v_1''v_2'' = 4v_1 \quad (19)$$

$$(v_2'')^2 + 2v_1''v_3'' + 2v_0''v_4'' = 4v_2 \quad (20)$$

식 (16)으로부터 식 (17)은 자동적으로 만족되고 식 (20)에서의 4차 오더 섭동항은 고려할 필요가 없으므로, 결국 식 (16)~(20)은 3차 항까지의 섭동해를 구할 수 있게 해준다.

#### 3.1 연속누출( $t \leq 1$ )

식 (17)은 자동적으로 만족되기 때문에 3차항까지의 새로운 식 4개에 대한 초기조건도 8개가 되어야 한다. 이를 위하여 식 (14)에 식 (15)를 적용하면 다음과 같이 각 섭동항들에 대한 초기 조건들이 얻어진다.

$$v_i(0) = 0 \text{ for } i = 0, 1, 2, 3 \quad (21)$$

$$v_0'(0) = \beta_*; v_i'(0) = 0 \text{ for } i = 1, 2, 3 \quad (22)$$

식 (16)~(20)를 초기조건 식 (21) 과 (22)를 적용하여 풀면 다음과 같은 해를 얻게 된다.

$$v_0 = \beta_* t \quad (23)$$

$$v_1 = -\frac{8}{15} \sqrt{\beta_*} t^{5/2} \quad (24)$$

$$v_2 = \frac{2}{45} t^4 \quad (25)$$

$$v_3 = \frac{8}{7425} \beta_*^{-1/2} t^{11/2} \quad (26)$$

반경에 대한 해는 부피에 대한 해를 이용하여 식 (7)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$r_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \beta_*^{1/4} t^{3/4} \quad (27)$$

$$r_1 = -\frac{2}{15\sqrt{3}} \beta_*^{-1/4} t^{9/4} \quad (28)$$

$$r_2 = -\frac{2\sqrt{3}}{675} \beta_*^{-3/4} t^{15/4} \quad (29)$$

$$r_3 = -\frac{2\sqrt{3}}{4455} \beta_*^{-5/4} t^{21/4} \quad (30)$$

위와 같은 해들은 저자의 연구결과(9)와 정확히 일치하고 있다.

#### 3.2 순간누출( $t > 1$ )

순간누출의 해법은 누출이 종료되는  $t=1$ 에서의 값을 이용하여 이후의 값을 예측하는 것이다. 편의를 위하여 다음과 같은 시간 좌표를 새롭게 설정 한다.

$$t' = t - 1 \quad (31)$$

새로운 시간을 기준으로 한 초기 조건은 누출이 종료되는 순간의 부피와 그 미분치이며 다음과 같은 값을 갖는다.

$$v(t'=0) = \beta_* - \frac{8}{15} \sqrt{\beta_*} \epsilon + \frac{2}{45} \epsilon^2 + \frac{8}{7425 \sqrt{\beta_*}} \epsilon^3 \quad (32)$$

$$v'_\tau \equiv v'(t=0) = -\epsilon r^2|_{t'=0} \quad (33)$$

따라서 초기 조건은 식 (32)와 (33)을 이용하여 다음과 같이 얻어 진다.

$$v_0(0) = \beta_*, v_1(0) = -\frac{8}{15}\sqrt{\beta_*}, v_2(0) = \frac{2}{45},$$

$$v_3(0) = \frac{8}{7425\sqrt{\beta_*}} \quad (34)$$

$$v'_0(0) = 0, v'_1(0) = -\frac{4}{3}\sqrt{\beta_*}, v'_2(0) = \frac{8}{45},$$

$$v'_3(0) = \frac{4}{675\sqrt{\beta_*}} \quad (35)$$

새로운 시간을 도입해도 방정식 (16)~(20)은 변하지 않으므로 위의 초기 조건들을 이용하여 해를 구하면 다음과 같다.

$$v_0 = v_\tau \quad (36)$$

$$v_1 = -\sqrt{\beta_*}\left(t'^2 + \frac{4}{3}t' + \frac{8}{15}\right) \quad (37)$$

$$v_2 = \frac{1}{12}t'^4 + \frac{2}{9}t'^3 + \frac{4}{15}t'^2 + \frac{8}{45}t' + \frac{2}{45} \quad (38)$$

$$v_3 = \frac{1}{4\sqrt{\beta_*}}\left(\frac{1}{45}t'^6 + \frac{4}{45}t'^5 + \frac{4}{27}t'^4 + \frac{16}{135}t'^3 + \frac{4}{75}t'^2 + \frac{16}{675}t' + \frac{32}{7425}\right) \quad (39)$$

이상의 부피에 관한 해는 기존의 결과(9)와 비교하면 매우 간단히 표현된 것을 알 수 있다. 반경에 관한 해는 다음 식을 이용하여 연속누출의 경우와 동일한 방법으로 얻어 질 수 있으며, 단순한 과정이므로 반경에 관한 해는 생략 한다.

$$r^2 = -\frac{1}{\epsilon} \frac{dv}{dt} \quad (40)$$

#### 4. 결과 및 토의

섭동법을 이용한 해의 타당성을 검증하기 위하여 Runge-Kutta 방법에 의한 수치해를 이용하였다. 수치 계산은 몇 번의 시도를 통하여 정확한 해를 얻을 수 있었고, 따라서 본 연구에서는 이 방법에 의한 수치해를 정확한 해라고 판단하고 섭동해와 비교 하였다. 계산 조건은 LNG가 콘크리트 표면 위를 확산해 가는 경우이며,  $E = 4.2 \times 10^4$  m/s이고, 밀도는  $420 \text{ kg/m}^3$  이다.

누출량을 고정하고 누출시간을 변화시키면서, 시간에 대한 액체풀의 부피와 반경을 Fig. 1-3에 제시하였다. 부피에 관한 계산결과를 비교해보면 누출시간이 작은 경우( $T_d=0.1, 1 \text{ sec}$ ) 수치해와 섭동해가 구분하기 어려울 정도로 일치하고 있지만, 누출시간이 30초로 증가하면 확산의 끝 부분에서 수치해와 섭동해가 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 저자의 이전 연구결과<sup>(7)</sup>에서도 알려진 바 있다. 이러한 정도의 차이는 섭동해가 가지는 장점에 비하면 충분히 용인될 수 있는 차이라고 판단 된다.

누출량을 고정하고 누출시간을 증가시킬 때 얻어지는 확산의 형태를 Fig. 4에 나타내었다. 편의상 섭동해만을 이용하였으며 누출시간이 20초 이하인 경우 불연속한 점이 존재하는 것을 알 수 있다. 이 점이 경계로 연속누출이 순간누출로 변화되는 순간 이다. 누출시간이 30초로 증가하게 되면 이러한 불연속한 점이 없어지는 것을 알 수 있는데, 이 경우 액체가 전부 증발한 후에도 누출이 지속되기 때문에 연속누출의 형태를 가지게 된다. 즉 일정한 누출량에서 누출시간이 증가하게 되면 혼합누출에서 연속누출로 변화하게 된다. 이러한 현상은 누출시간을 감소시켜 무한히 작게 한다면 물리적으로 순간누출이 되는 것으로 부터도 설명될 수 있다.

누출시간을 고정하고 누출량을 증가시키는 경우에 대한 경향이 Fig. 5 에 제시되어 있다. 누출량이 10, 100  $\text{m}^3$  인 경우 30초에서 불연속한 점이 존재하여 30초 이후에는 순간 누출로 존재하게 된다. 누출량이 1  $\text{m}^3$  으로 감소하게 되면 누출시간내에 증발이 완료되는 연속누출의 형태로 된다.

즉 누출량 1  $\text{m}^3$ 의 경우는 누출시간은 30초 이하만 그 전에 부피가 0이 되는 것을 의미한다. 풀의 면적이 특정한 값 이상이 되면 증발량이 누출량보다 커지게 되므로, 누출 즉시 증발하는 현상이 본 모델에서

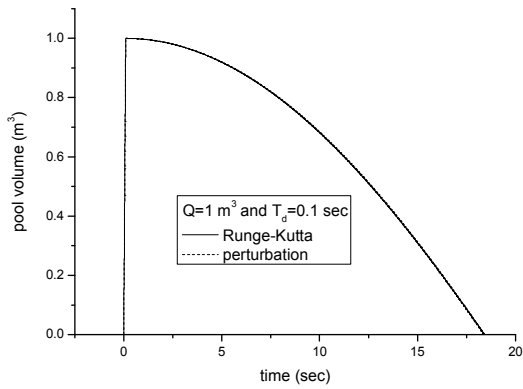


Fig. 1. Pool volume vs. time with  $T_d=0.1s$ .

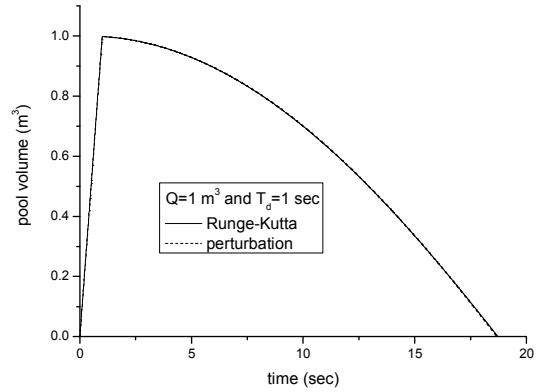


Fig. 2. Pool volume vs. time with  $T_d=1s$ .

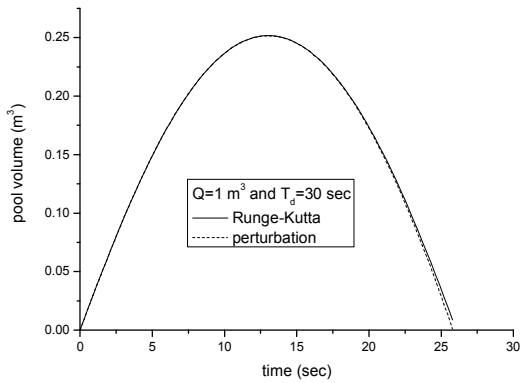


Fig. 3. Pool volume vs. time with  $T_d=30s$ .

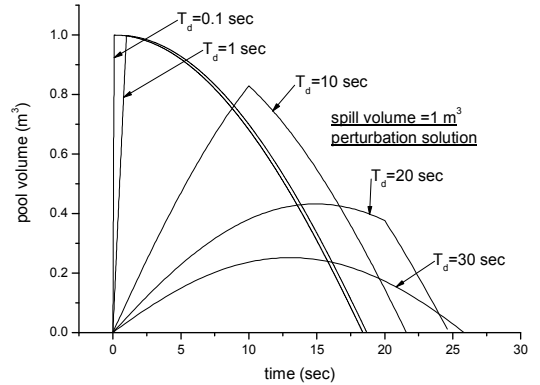


Fig. 4. Pool spread pattern with release time

는 허용이 되고 있는 것을 알 수 있다. 반경에 관한 방정식 (8)로부터 반경은 단조 증가하는 함수이기 때문에, 시간 증가에 따라 증발량은 계속적으로 증가하게 된다.

이상에서 언급된 연속누출 과 혼합누출-연속누출 과 순간누출로 이루어진 누출-의 조건을 분석하기 위하여, 연속누출을 누출시간 내에 증발이 완료되는 확산이라고 정의할 수 있다. 혼합누출 조건에서 누출시간을 증가시키거나 누출량을 감소시키면 연속누출을 얻을 수 있다. 이러한 경계는 다음과 같은 수학적 조건에 의하여 결정된다.

$$v = 0 \text{ at } t = 1 \tag{41}$$

식 (41)을 연속누출의 해에 적용하면, 다음과 같은 방정식이 얻어진다.

$$\beta_* - \frac{8}{15} \sqrt{\beta_*} \epsilon + \frac{2}{45} \epsilon^2 + \frac{8}{7425 \sqrt{\beta_*}} \epsilon^3 = 0 \tag{42}$$

식 (42)를 풀면 최종적으로 다음 식이 얻어진다.

$$\epsilon \cong 2.370 \sqrt{\beta_*} \tag{43}$$

2차 섭동해를 이용하면 식 (43)에서 계수 2.370이 2.326으로 변경 된다. 식 (43)을 차원이 있는 물리량으로 전환하면 다음과 같다.

$$T_d^2 = 2.370 \frac{1}{E} \sqrt{\frac{Q}{\pi \alpha}} \tag{44}$$

식 (44)를 도표로 나타내면 Fig. 6 과 같으며, 누출 영역과 각 영역에 대한 경계가 누출시간과 누출량의

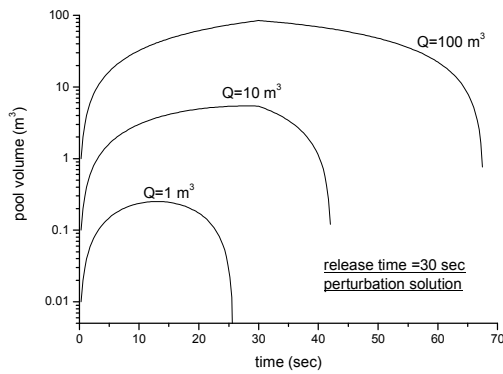


Fig. 5. Pool spread pattern with spill volume

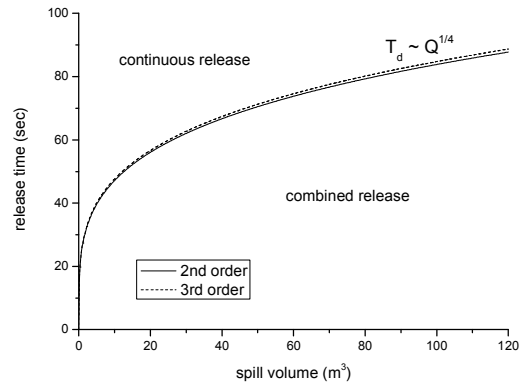


Fig. 6. Classification of the release mode

관계로써 표시되었다.

### 5. 결론

액화천연가스나 액화수소 같은 극저온 액체가 플랜트에서 유출되는 형태는 지금까지 순간누출과 연속누출의 형태로 구분되어 왔다. 누출 형태는 확산모델의 초기조건에 반영되어 극저온 액체의 확산을 지배하게 된다. 연속누출은 일반적으로 액체가 증발을 완료할 때까지 액체가 연속적으로 누출되는 모델이다. 순간누출은 수학적으로는 누출시간이 없이 순간적으로 누출이 완료되고 동시에 확산이 시작되는 모델이다. 따라서 연속누출은 누출과 확산이 액체가 증발을 완료할 때까지 지속되는 모델이다. API 규정<sup>(10)</sup>에서는 정량적으로 순간누출과 연속누출의 기준을 제시하였지만 과학적인 근거를 차기 어렵다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 인식하고 연속누출과 순간누출에 대한 과학적인 근거를 찾고자 노력하였다. 이를 위하여 제한된 누출시간을 갖는 문제를 특정한 확산 모델에 적용하여 연속누출과 혼합누출로 정의할 수 있다는 것을 입증 하였다. 이 과정에서 기존의 방법에 비하여 비교적 쉽게 섭동해를 구할 수 있는 새로운 지배방정식을 유도 하였고, 수치계산 결과와 비교하여 그 정확성을 검증 하였다. 본 연구의 결과와 API 규정의 가장 큰 차이는 순간누출이라는 현상은 수학적으로 단순화된 가정일 뿐 현실에 적용할 수 없다는 것이며, 따라서 누출은 순간누출과 연속누출이 아닌 연속누출과 혼합누출-연속누출과 순간누출의 혼합-로 분류되어야 한다는 것 이다.

### 기호설명

- g : 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)
- h : 무차원 액체풀높이
- r : 무차원 액체풀반경
- v : 무차원 액체풀부피
- t : 무차원 시간
- E : 단위면적당 증발률(m/s)
- H : 액체풀의 높이(m)
- Q : 누출량(m<sup>3</sup>)
- R : 액체풀의 반경(m)
- T : 시간(s)
- T<sub>d</sub> : 누출지속시간(s)
- V : 액체풀의 부피(m<sup>3</sup>)
- α : 2gΔ(m/s<sup>2</sup>)
- β : 누출율(m<sup>3</sup>/s)
- β\* : 무차원 누출율
- Δ : 1 또는 1-ρ/ρ<sub>w</sub>
- ε : 무차원 증발률
- ρ : 액체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- ρ<sub>w</sub> : 물의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

### 하첨자

- 0: 영차항
- 1: 1차항
- 2: 2차항
- 3: 3차항

## References

1. Venetsanos, A. G. and Bartzis, J. G.: "CFD modelling of large-scale LH2 spills in open environment", Proceedings of International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy, 125~136, (.2005).
2. Stein, W. and Ermak, D. L.: "One-dimensional numerical fluid dynamics model of the spreading of liquefied gaseous fuel (LGF) on water", Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-53078, (1980),
3. Verfondern, K. and Dienhart, B.: "Experimental and theoretical investigation of liquid hydrogen pool spreading and vaporization", Int. J. Hydrogen Energy, Vol.22, No.7, 649~660, (1997).
4. Brandeis, J. and Kansa, E.: "Numerical simulation of liquefied fuel spills: I. Instantaneous release into a confined area", Int. J. Num. Methods in Fluids, Vol.3, 333~345, (1983).
5. Brandeis, J. and Ermak, D.: "Numerical simulation of liquefied fuel spills:II. Instantaneous and continuous LNG spills on an unconfined water surface" , Int. J. Num. Methods in Fluids, Vol.3, 347~361, (1983).
6. 김명배, 도규형, 한용식, 최병일: "누출된 액체의 증발과 확산에 관한 1차 섭동해", 대한기계학회논문집 B, 35권 3호, 287~291, (2011).
7. 김명배, 도규형, 한용식, 최병일: "연속적으로 누출되는 액체fuel의 확산에 관한 고차 섭동해": 대한기계학회논문집 B, 36권 9호, 907~913, (2012).
8. Briscoe, F. and Shaw, P.: "Spread and evaporation of liquid", Prog. Energy Comb. Sci., Vol.6, 127~140, (1980).
9. Kim, M., Kim, T. and Choi, B.: "Study of continuous spill with a limited period of release", Accepted for publication in Journal of Mechanical Science and Technology, (2014).
10. American Petroleum Institute: "Consequence analysis in an API RBI assessment", API RP 581 PART 3, 3-21~3-22, (2008).