

금속폭발억제재가 충전된 LPG 탱크의 비정상 열전달 및 압력변화 해석

Transient Analysis of Heat Transfer and Pressure Variation for
LPG Tank with Metal Explosion Suppression Material

김 호 영,* 장 효 환,** 전 철 균***
H. Y. Kim, H. W. Chang, C. K. Chun

ABSTRACT

As one of the explosion suppression methods of LPG tank exposed to hot environment by an accident or fire, some material which has large heat capacity and thermal conductivity can be installed inside the LPG tank in order to suppress the temperature increase of tank wall. In the present study, theoretical model for the horizontally locating cylindrical LPG tank with and without the aluminum explosion suppression material has been developed to predict the characteristics of system. As a parametric study, effects of two major parameters, thickness of material filling and initial vapor volume fraction, on the time variation of wall temperature, temperature and pressure in tank are numerically examined.

The results of present study show that the thickness of material filling does not give big differences in the suppression characteristics when the thickness of filling is larger than three inches. In case of material filling, there are marked suppression effects to the increase of wall temperature, average vapor temperature and pressure in tank compared with the case of no filling.

기 호 설 명

<영 문 자>

A : 안전밸브 토출 면적(m^2)

C : 기체 비열($J/Kg \cdot K$)

C_l : 액체상 LPG 비열($J/Kg \cdot K$)

k_i : i 방향 열전도 계수($J/m \cdot sec \cdot K$)

L : LPG 증발 잠열(J/Kg)

l : 탱크 길이(m)

P : 탱크내 압력(P_a)

P_{atm} : 대기압(P_a)

R : 기체상수($J/Kg \cdot K$)

r : 반경방향 좌표

T : 기체 온도(K)

T_l : 액체상 LPG 온도(K)

t : 시간(sec)

V : 기체 부피(m^3)

V_l : 액체상 LPG 부피(m^3)

* 정회원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

** 고려대학교 공과대학 기계공학과

*** 고려대학교 대학원

Z : 압축성 계수

<그리스 문자>

- α_a : 공기 열확산 계수(m^2/sec)
- β : 액면각($^\circ$)
- η : 무차원 반경방향 좌표
- θ : 무차원 기체 온도
- θ_l : 무차원 액체상 LPG 온도
- λ_i : 무차원 i 방향 열전도 계수
- ρ : 기체 밀도(Kg/m^3)
- ρ_l : 액체상 LPG 밀도(Kg/m^3)
- τ : 무차원 시간
- ϕ : 무차원 원주방향 좌표
- ψ : 원주방향 좌표

<하기 첨자>

- e : 금속폭발억제재 충전 위치
- f : 화염 위치
- i : 초기 상태
- l : 액체상 LPG
- s : 액 면
- w : 탱크벽 위치
- r, η : 반경 방향
- ϕ, ψ : 원주 방향

<상기 첨자>

- o : 이전 시간 단계의 값
- : 무차원 변수

1. 서 론

LPG를 저장 또는 운송하는 탱크의 폭발은 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)라는 용어로 정의되는 열폭발(Thermal Explosion)현상이다.^(1,2,3) 이는 LPG 탱크가 사고나 화재 등으로 인하여 높은 온도의 화염 등에 노출되었을때 주위로부터 탱크로의 열전달로 인하여 특히 탱크의 윗부분 즉 기체상의 LPG와 접한 탱크벽면의 온도가 급격히 상승되며 항복강도가 저하되어^(4,5) 안전 밸브 작동압력 이하에서도 탱크는 균열을 일으키며 파괴된다. 이때 누출되는 LPG는 갑

자기 대기압하에 놓이게 되므로 순간적인 과열상태(Superheat State)가 되며 순식간에 팽창하여 증발한후 주위 공기와 혼합 폭발한다. 이상과 같은 BLEVE를 억제하기 위하여서는 탱크벽면의 온도를 낮게 유지시켜 항복강도의 저하를 막아주어야 하며,⁽¹⁻³⁾ 이를 위하여 탱크벽면에 물을 분사시켜주는 방법과 탱크외부를 단열시켜 주는 방법, 탱크내부에 온도저하 시스템을 설치하는 방법이 있다. 이들중 세번째 방법은 열의 전달 및 흡수능력이 큰 재료를 탱크내부에 충전시켜서 외부로부터 전달되어 온 열을 충전재 자체가 흡수함은 물론 충전재를 통하여 열을 액체상의 LPG에 전달시켜 증발열로 소산시켜서 탱크벽면의 온도상승을 억제하는 방법이다. 이상의 개념으로 알루미늄합금(AA-3003) 박판에 Slot를 낸후 확장시켜 다이아몬드형의 많은 구멍들을 형성시킨 후 중첩시킴으로써 일종의 다공성 금속충진재를 개발하였으며 이를 EXPLOSAFE라 한다.^(3,6-7) EXPLOSAFE의 열전달 성능 즉 열전도 계수는 방향에 따라 다르게 나타나며 방향에 따른 열전도 계수들이 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Thermal conductivity of EXPLOSAFE

k (w/m·k)	Style		
experiment	0.45	0.20	2.25
theory	0.409	0.106	2.414

이 금속폭발억제재의 열전달 및 열흡수 성능에 대한 실험들은 Venart et. al.⁽⁶⁾과 Applearld⁽³⁾에 의하여 행하여졌으며, Appleyard,⁽³⁾ King,⁽⁵⁾ Szego et. al.⁽⁷⁾과 National Gas Tek⁽⁸⁾ 등은 LPG 탱크 내부에 금속폭발억제재를 충전후 파이롯트 스케일의 폭발실험들을 수행하여 BLEVE의 억제효과를 실험적으로 입증하였다. 이러한 실험결과들로부터 적절한 충전 형태 및 충전 두께 등이 추천되었으나 실

험 횡수 및 외부 조건들이 제한되어 있고, 이에 대한 이론적인 해석은 현재까지 없는 실정이다.

본 연구에서는 실험적으로 도출된 EXPL-OSAFE의 열전달 및 흡수성능을 이론적인 모델을 통하여 해석함과 아울러 국내에서 사용 중인 탱크로리를 모델로 하여 금속폭발억제제의 적정 충전두께, LPG 탱크가 갑자기 높은 온도의 외부조건에 노출되었을때의 시간의 변화에 따른 온도 및 압력변화 등을 수치적으로 예측한다.

2. 이론 해석

본 해석에서는 일반적인 탱크로리의 길이가 반경에 비해 길기 때문에($l/R \approx 8 \sim 9$) 해석을 용이하게 하기 위하여 길이 방향의 열전달을 무시한 Fig. 1과 같은 2차원 원통형의 탱크로리를 해석모델로 채택하였다. 이때 화염은 탱크 외부 일정거리에 위치하고 금속폭발억제제는 탱크 내벽에 밀착 충전되어 있으며 아래쪽의 액체상으로 저장된 LPG는 증발하여 상부에 기체상을 이루며 2상이 함께 존재하고 있다. 여기서 탱크 상부에 존재하는 기체는 액면 가까이 아래쪽에 존재하는 기체보다 항상 높은 온도를 유지하므로 온도차에 의한 자연

대류 현상은 무시할 수 있으며 전도만으로 열이 전달되는 것으로 하였다. 또한 탱크내 액체상 LPG의 온도는 탱크내 압력에 대한 포화온도로 하였으며 탱크상부에 안전밸브가 부착되어 있어 허용 압력을 초과하면 밸브가 열리면서 기체상 LPG가 유출하게 된다.

2.1 기체상 열전도 방정식 및 경계조건

금속폭발억제제는 방향에 따라 열전도계수가 다른 물질(Orthotropic Material)이므로 이를 고려하면 Fig. 1에 나타난 것과 같이 화염과 탱크벽면 사이의 균질 기체구간, 폭발억제제가 충전되어 있는 비균질 고체-기체구간 가장 안쪽의 기체상 LPG만 존재하는 구간들에 공통적으로 적용되는 일반적인 비정상 무차원 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\rho} \bar{c} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\pi^2}{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\lambda_{\eta} \eta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda_{\phi} \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \right) \dots \dots \dots (1)$$

이식을 각 구간에 적용 해석할 때는 각 지점에서의 $\bar{\rho}$, \bar{c} , λ_{η} , λ_{ϕ} 값들을 각각 그 구간의 물질에 해당하는 값으로 취하고 탱크 중심으로부터 화염면까지 전 해석영역을 연속적으로 해석하므로써 구간과 구간의 접측면에서 별도의 계면조건을 고려하지 않고도 열유속(Heat flux)의 균형을 이룰 수 있다.

식(1)의 무차원화 과정에서 사용된 주요 변수들은 다음과 같다.

$$\theta = \frac{T - T_i}{T_f - T_i}, \quad \phi = \frac{\psi}{\pi}, \quad \eta = \frac{r}{r_f}, \quad \tau = \frac{t \alpha_a}{\pi^2 r_f^2} \dots \dots \dots (2)$$

본 모델은 탱크 중심을 지나는 수직선에 축대칭을 이루므로 반원형태를 해석함으로써 전체를 해석할 수 있다. 해석에 필요한 초기 조건 및 경계조건들은 다음과 같다.

$$\tau = 0, \quad \eta = 1; \quad \theta = 1 \text{ (화염면)} \dots \dots \dots (3)$$

$$0 \leq \eta < 1; \quad \theta = 0$$

$$\tau > 0, \quad \eta = 1; \quad \theta = 1 \text{ (화염면)}$$

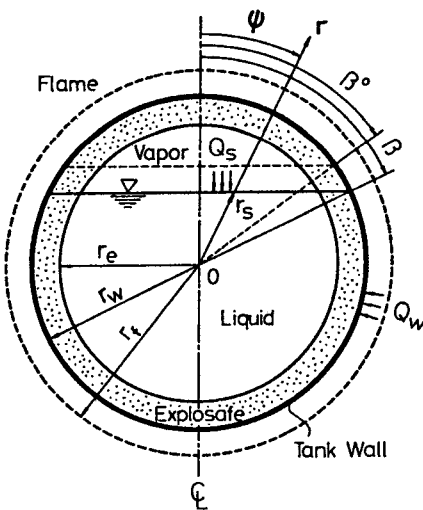


Fig.1 Schematics of the heat transfer model for the tank lorry with EXPLOSAFE

$$\eta = \eta_s ; \theta = \theta_l(\text{접촉면}) \dots\dots (4)$$

$$\phi = 0, 1; \frac{\partial \theta}{\partial \phi} = 0(\text{축대칭면})$$

액면이 중심점 이하일때 $\eta = 0$ 의 점에 대하여 열전도 방정식을 다음과 같이 변형하여 적용한다.

$$\bar{\rho} C \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \Big|_{\eta=0} = \left\{ 2\pi^2 \lambda_\eta \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} + 2\pi^2 \frac{\partial \lambda_r}{\partial \eta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \frac{1}{2} \frac{\partial^3}{\partial \eta^2 \partial \phi} \left(\lambda_\phi \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \right) \right\} \Big|_{\eta=0} \dots\dots (5)$$

2.2 탱크로리 내부의 상태량

기체상 LPG의 압력은 기체의 비이상성을 고려하면 다음과 같이 주어진다.⁽⁹⁾

$$P = Z \rho R T_{av} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 T_{av} 는 기체의 평균온도이며 Z 는 압축성계수이다. 기체의 밀도는 이전 시간 단계에서의 기체 질량 M^o 및 Δt 동안의 기체 질량 변화량 ΔM , 기체 부피 V 로부터 다음과 같이 구한다.

$$\rho = \frac{M^o + \Delta M}{V} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 ΔM 은 Δt 동안 증발에 의해 증가된 기체 질량 M_{ev} 와 안전 밸브를 통해 유출된 기체 질량 M_{out} 과의 차이이다.

$$\Delta M = M_{ev} - M_{out} \dots\dots\dots (8)$$

이때 기체의 부피는 이전 시간 단계에서의 값 V^o 에서 증발 질량에 상당하는 액체상 LPG의 부피만큼 변화하므로 다음과 같이 구한다.

$$V = V^o + \frac{M_{ev}}{\rho_l} \dots\dots\dots (9)$$

기체 증발량은 Δt 동안 액체상 LPG로 전이된 열량으로부터 구할 수 있다.

$$M_{ev} = \frac{Q_s + Q_w - Q_h}{L} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 Q_s 는 기체상과 액체상의 접촉면(Interface)을 통한 열전달량이며 Q_w 는 탱크벽을 통해 유입된 열전달량, Q_h 는 액체상 LPG

의 자체온도 상승에 소요되는 열량이다. 이들은 각각 다음과 같다.

$$Q_s = \int_t^{t+\Delta t} \int_0^\beta \left(k_r \cos \psi \frac{\partial T}{\partial r} - k_\phi \frac{\sin \psi}{r} \frac{\partial T}{\partial \psi} \right) \Big|_{r=r_s} \cdot \frac{r_w \cos \beta}{\cos^2 \psi} d\psi dt \dots\dots\dots (11)$$

$$Q_w = \int_t^{t+\Delta t} \int_\beta^\pi k_r \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_w} r_w d\psi dt \dots\dots (12)$$

$$Q_h = \int_t^{t+\Delta t} \rho_l V_l C_l T_l dt \dots\dots\dots (13)$$

안전 밸브가 열렸을때 밸브를 통한 유출 기체 질량은 베르누이 방정식으로부터 다음과 같이 구한다.

$$\dot{M}_{out} = \frac{A}{2l} \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{2P(P - P_{atm})}{ZRT} \right)^{1/2} dt \dots\dots (14)$$

액체상 LPG의 온도는 시간에 따라 변하며 주어진 시간에서의 액체상 LPG의 온도는 탱크내 압력하의 포화온도를 택하였으며 탱크내 위치에 따른 액체상 LPG의 온도차는 무시하였다. 본 연구에서는 프로판에 대한 포화증기압-포화온도의 실험식⁽¹⁰⁾을 다음과 같이 다항식으로 변형하여 사용하였다.

$$T_l = 369.8(0.6767165 + 0.694623 P - 0.6056656 P^2 + 0.2357296 P^3)$$

또한 증발에 따른 액면 변화를 계산하기 위하여 다음식을 사용했다.

$$r_s(\psi) = \frac{r_w \cos \beta}{\cos \psi} \dots\dots\dots (15)$$

$$2\beta - \sin 2\beta = 2\beta^o - \sin 2\beta^o + \frac{2M_{ev}}{r_w^2 \rho_l} \dots\dots (16)$$

이때 β 는 중심점을 지나는 수직선으로부터 액면이 탱크벽에 접하는 점과 중심점을 잇는 선 사이의 각도로써 액면각이라 부르기로 한다.

이상 상태량에 관한 식들은 차원을 갖는 형태로 유도되었으나 계산에 적용시는 모두 적절한 값으로 무차원화 시켰다.

2.3 해석 방법

이상 유도된 식들로부터 수치해를 얻기 위하여는 수치해석을 통해 식 및 조건들을 차분

화 시켜야 한다. 먼저 열전도 방정식(1)은 유한 검사체적에 대해 적분하여 차분식을 얻었고 이때 비정상항에 대해서는 Fully-Implicit Scheme을 사용하였다.⁽¹¹⁾ 또한 전열량 계산식들, 식(11)~식(13)에 대해서는 사다리꼴 적분공식을 적용하였으며 식(17), 즉, 액면각 계산에는 Newton Raphson 방법을 사용하였다.

이 결과들을 토대로 계산을 행함에 있어서 방법으로 TDMA (Tridiagonal-Matrix Algorithm)를 채택하였으며 개략적인 계산의 순서는 다음과 같다. 먼저 초기치 및 필요한 상태량들을 지정하고 액체상의 열전달량, 증발량, 액면변화를 계산한뒤 기체 온도를 계산, 수렴시킨다. 다음은 기체의 평균온도를 계산하여 기체의 압력을 계산하고 이 압력으로부터 액체온도를 계산한다. 액체온도가 수렴할때까지 처음부터 전과정을 반복 수행한다. 다음은 압력을 확인하여 안전 밸브 허용압력 초과여부를 판정한후 유출량을 계산하고 이 모든 과정이 완료되면 다음 시간 단계로 넘어가 계산을 계속한다.

3. 결과 및 고찰

LPG는 상온 상압하에서 기체상태로 존재하나 쉽게 액화되는 탄화수소를 통칭한다. 본 해석에서는 LPG의 대표성분인 프로판의 상태량을 계산에 사용하였다. 이때 온도의 함수로 상태량을 표시한 실험식들을^(9,10) 사용하므로써 온도 변화에 따른 상태량 변화를 고려하였다. 또한 외부화염 온도는 1123K (850℃), 초기탱크로리 온도는 293K (20℃)로 하였고 금속폭발억제재 충전 두께는 추천된 두께를⁽³⁾ 고려하여 0.0762 m (3 인치), 0.1143 m (4.5 인치), 0.1524 m (6 인치), 전체충진 (0.9525 m), 비충진 (0.0 m) 등을 채택하였다. 이밖에 초기 LPG 기체상이 차지하고 있는 부피를 탱크부피의 10%, 30%, 50% 및 70%로 변화시켜서 안전밸브가 열리는 시기, 즉 탱크내의 압력이 국내 10 ton 탱크로리 설계압력인 1824102 Pa 에 도달하는 시간까지 계산을 수행하였다.

3.1 탱크내 온도 분포

Fig. 2는 초기 LPG 기체상의 부피가 10%, 금속폭발억제재 충전두께 (T. O. E)가 0.0762 m인 경우로써 시간에 따른 탱크 중심축상의 반경방향 온도 분포를 도시한 것이며 계산에 사용한 특정시간($\pi^2 r_f^2 / \alpha_a$)은 43935.2 sec이다. 온도 분포는 시간이 지남에 따라 탱크 벽면 및 액면부근의 기체상 온도가 상승함을 보여주고 있다. 이때 금속폭발억제재와 기체상간의 경계면에서 온도 구배의 불연속성이 나타나며 액체부위쪽이 기체상 중간 부분보다 약간 높은 온도를 나타내고 있다. 이 불연속성은 열전도 특성이 다른 두 물질이 서로 접하고 있기 때문에 나타나는 것이며 액체상 온도는 열전달에 의한 온도증가보다 탱크내 압력 증가로 인한 액체의 비등온도 상승효과가 큰 것과 기체의 낮은 전열성으로 인해 기체 중심부에 열이 전달되는데 시간이 걸림으로써 보다 높게 나타나는 것으로 해석된다.

Fig.3은 Fig. 2와 같은 경우에 대해서 탱크 벽면에서의 시간에 따른 ϕ -방향 온도 분포의 변화를 도시한 것으로 시간이 경과함에 따라 탱크 벽면온도는 상승하며 그 최고온도는 탱크 중심축상의 상단 벽면에서 나타나고, 액면에 가까워질수록 그 온도가 감소함을 보여준다. 또한 시간 경과에 따라 벽면 온도의 상승폭은 최고온도에서 약간 크게 나타난다.

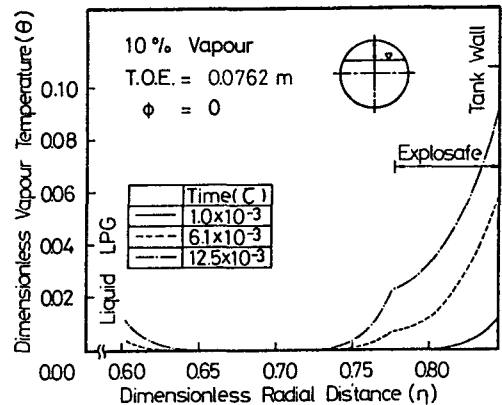


Fig.2 Time variations of the vapour temperature distribution along centerline

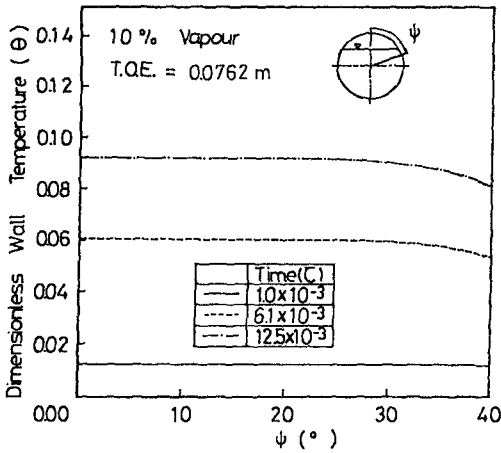


Fig.3 Time variations of anglewise wall temperature

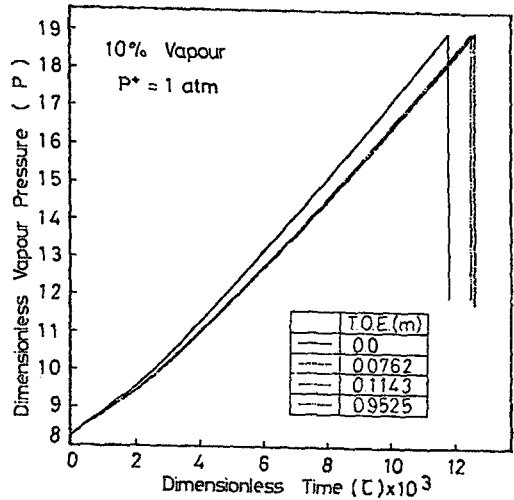


Fig.4 Time variations of the pressure in tank for the various thicknesses of EXPLOSAFE

3.2 충전 두께의 영향

Fig. 4는 기체상 LPG 초기 부피가 탱크 부피의 10%일때 급속폭발억제제의 충전두께를 변화시키면서 시간에 따른 탱크내 압력 변화를 밸브의 열림시기까지 비교 도기한 것이다. 모든 경우 $\tau = 0.002$ 이후 탱크내 압력이 거의 선형적으로 증가하며 압력증가율은 충전두께 0.0762 m 이상인 경우 큰 차이를 보이지 않으나 비충진시(0.0 m)는 압력증가가 훨씬 급격하다. 이는 외부로부터 전달된 열이 충전물이 없는 경우에는 기체 온도상승, 즉, 직접적인 압력증가에 많은 양이 쓰여지나 충전물이 있는 경우는 충전물 자체가 열을 흡수하여 기체 온도상승을 억제시켜 압력 상승을 저해 하는데서 기인하는 것으로 해석된다. 전체 충전(0.9525 m)인 경우는 0.0762 m나 0.1143 m의 경우보다 약간 큰 압력 상승율을 보이는데 이것은 충전량이 늘어남에 따라 열 흡수 능력과 병행하여 열전달 능력이 향상되어 나타나는 현상으로 해석된다. 그림에서 나타나는 압력 급강하선은 안전 밸브의 개방을 뜻하는 것으로 밸브 개방 시기는 압력증가가 급격한 비충진시가 가장 빠르고 충전물 사용량은 이보다 늦으며 충전 두께에 따른 차이는 그리 크지 않음을 알 수 있다.

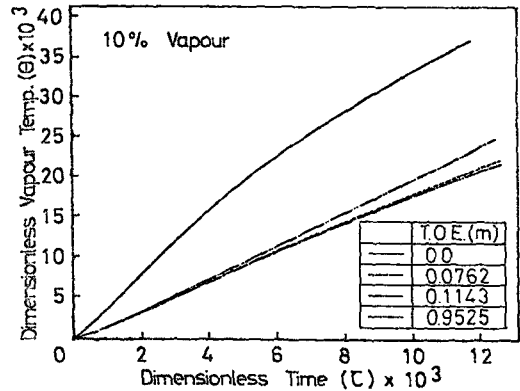


Fig.5 Time variations of the vapour average temperature for the various thicknesses of EXPLOSAFE

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 경우의 시간에 따른 탱크내 기체상 평균온도 변화를 도기한 것으로써 시간이 지남에 따라 기체상 평균온도는 증가함을 보여준다. 온도 증가율은 충전물이 없는 경우가 가장 크며 충전물이 있는 경우는 이보다 상당히 작고 충전 두께 변화에 따른 차이는 크지 않다. 이는 급속폭발억제제의 열흡수 및 전달 능력이 기체상보다 훨씬 크기 때문에 나타나는 현상으로 해석된다. 충전 두께에 따른 변화를 관찰해 보면 0.0762 m 및 0.1143 m의 경우 전체충진(0.9525 m)

보다 온도 상승율이 약간 낮았는데 이는 0.1143가 0.0762 m보다 열흡수 능력과 크고 전체 충전의 경우 열흡수 능력과 아울러 열전달 능력이 향상되어 기체부위로의 열전달이 촉진되어서 보다 빨리 전체 기체 온도를 상승시켜주는 결과인 것으로 해석된다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 경우의 중심축상 반경방향 온도 분포를 동일 순간에서 비교도시한 것으로 0.0762 m 이상 충전된 경우들의 온도 분포는 거의 같지만 충전물이 없는 경우는 벽면 근처에서 매우 높은 온도를 가지며 온도 구배 또한 큰 것을 보여준다. 이는 충전물이 없을때 열전도 계수가 작은 기체상만 벽면 가까이 존재하여 내부로의 열전달은 용이하지 않고 국부적인 가열만 일어나는 것을 의미한다. 반면 충전물이 있을 때는 탱크 벽면을 통해 전달된 열이 일부는 충전물 자체에 흡수되고 일부는 액체상 LPG 쪽으로 전달되므로써 기체가 열에 사용되는 양이 상대적으로 적고 온도도 낮은 것으로 해석된다.

Fig. 7은 벽면 최고온도 즉 중심축 상단벽

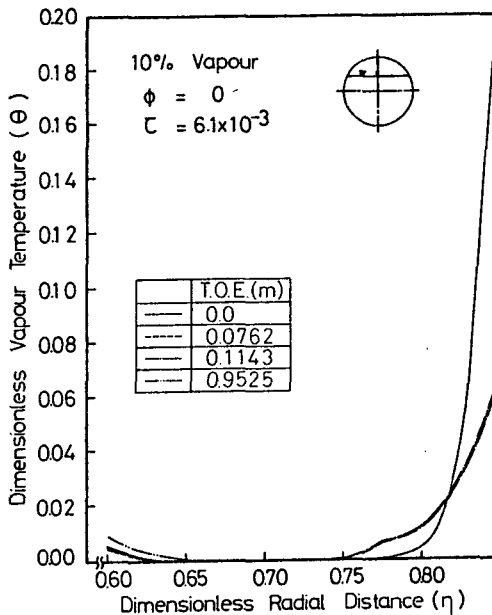


Fig.6 Temperature distributions along the centerline for the various thicknesses of EXPLOSAFE

의 시간에 따른 온도변화를 각각의 충전두께에 대하여 비교 도시한 것으로 시간 경과에 따라 온도는 증가하지만 증가율은 감소한다. 또한 비충진의 경우는 충전된 경우들에 비하여 상대적으로 높은 온도를 나타내고 있다. 또한 충전물 사용시는 온도도 낮고 두께 변화에 따른 차이가 거의 없음을 보여 준다.

Table 2는 안전밸브 개방시기 및 이때의 벽면 최고온도를 충전 두께에 따라 비교한 것으로 10% 초기 기체상일때 충전물 사용시 두께에 따른 온도차이는 크지 않은데 비해 비사용시는 3배 가까운 고온임을 알 수 있다. 밸브 개방시기 역시 충전물 비사용시가 가장 빠

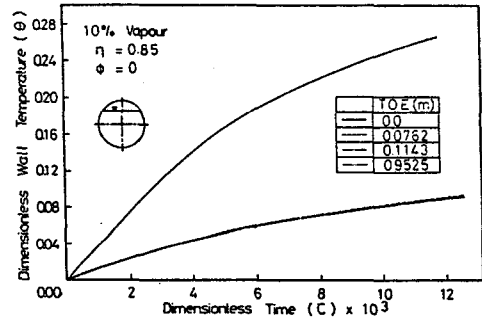


Fig.7 Time variations of the maximum wall temperature for the various thicknesses of EXPLOSAFE

Table 2. Maximum wall temperature at the valve opening time for the various thicknesses of EXPLOSAFE and initial vapour volume fractions

T.O.E. (m)	V %	Valve Opening Time (τ)	Maximum Temp. (θ) (At Valve opening Time)
0.0	10	11.8×10^{-3}	0.2663
0.0762	10	12.6×10^{-3}	0.0923
	30	38.7×10^{-3}	0.1943
	50	78.3×10^{-3}	0.3009
	70	133.0×10^{-3}	0.4172
0.1143	10	12.6×10^{-3}	0.0914
0.1524	10	12.6×10^{-3}	0.0913
0.9525 (Full)	10	12.5×10^{-3}	0.0908

는데 이는 충전물 사용시는 충전물이 열을 흡수, 압력증가를 억제하는데서 기인하는 것으로 해석된다.

3.3 초기 기체상 부피의 영향

Fig. 8은 0.0762m 두께로 충전된 경우의 시간에 따른 탱크 내부 압력변화를 초기 기체상 부피 점유율에 따라 비교 도시한 것이다. 초기 기체상 점유율이 클수록 압력 상승율은 적으며 안전 밸브 열람시기는 늦다. 이는 초기 기체상이 큰 부피를 차지할수록 기체상을 가열하는 열량 및 증발량이 압력증가에 미치는 영향은 상대적으로 감소되어 나타나는 현상으로 해석된다.

Fig. 9는 0.0762 m 충전시 시간에 따른 기체상 평균온도 증가를 비교 도시한 것이다. 초기 기체상의 점유율이 클수록 온도 상승율은 작지만 안전 밸브 열람시의 온도는 높은 것을 알 수 있다. 이는 기체상의 부피가 클수록 열전달 능력이 저하되어 온도 상승율은 감소되나 밸브 개방시까지 오랜 시간이 경과하므로 외부에서 전달되는 총 열량은 증가하여 높은 평균온도를 나타내는 것으로 해석된다.

Fig. 10은 0.0762 m 충전시 시간에 따른 벽면 최고온도의 변화를 비교 도시한 것으로 시간 경과에 따라 벽면 온도는 증가하지만 그 증가율은 차츰 감소함을 보여준다. 충전물이 있는 경우, 비교적 초기에서는 온도 증가율이 서로 비슷하지만 초기 기체상의 부피 점유율이 작을수록 온도 증가율이 빨리 감소한다. 이는 초기에는 충전재의 열흡수가 주된 작용을 하기 때문에 온도 증가율은 비슷하나 그후는 상부에서 충전재를 통하여 액체 부위로 열이 전달되는 상태가 되며 이때 상부와 액면과의 거리가 가까운 즉 기체상 점유율이 적은 경우 일수록 열전달이 잘되어 벽면 최고온도의 상승을 억제하여 나타나는 현상으로 해석된다. 그러나 전체적으로 볼때 초기 기체상의 부피 점유율이 벽면 최고온도 증가율에 미치는 영향은 크지 않으며 밸브 열람시기에서의 벽면 최고온도는 점유율이 클수록 열리기까지의 시간이 길어져서 더 높은 온도를 가지는 것을

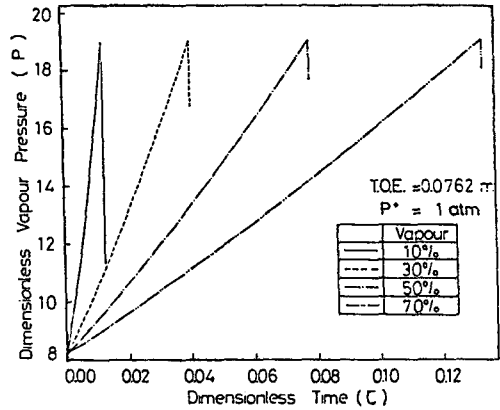


Fig.8 Time variations of the pressure in tank for various initial vapour volume fractions

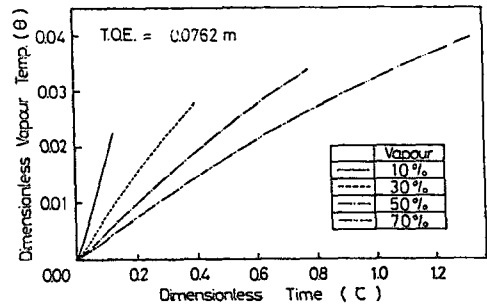


Fig.9 Time variations of the vapour average temperature for various initial vapour volume fractions

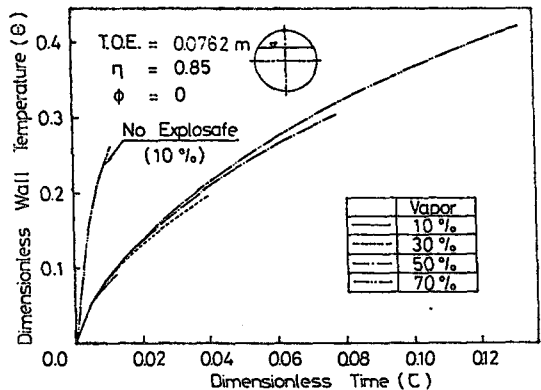


Fig.10 Time variations of the maximum wall temperature for various initial vapour volume fractions

보여준다. 그러나 이러한 온도증가를 비충진 시와 비교하면 최고온도의 크기나 증가율에 있어서 큰 차이가 있으며 상대적으로 낮은 값을 충전시에 갖게됨을 알 수 있다.

4. 결 론

이상 고찰한 결과들은 다음과 같이 요약된다.

1. 벽면 최고온도는 탱크 중심축 상단부에 나타난다.

2. 금속폭발억제제를 충전하지 않은 경우는 0.0762 m 이상을 충전한 경우에 비하여 벽면 최고온도, 기체상 평균온도, 탱크내 압력이 매우 큰 값을 나타내며 그 증가율도 또한 크다.

3. 금속폭발억제제를 충전하지 않은 경우, 충전한 경우보다 안전 밸브 열림시기가 빠름에도 불구하고 벽면 최고온도 및 기체상 평균온도는 높은 값을 갖는다.

4. 금속폭발억제제 충전으로 인한 온도저하 및 압력 상승을 저하는 0.0762 m 이상이면 비슷한 효과를 얻는다.

5. 초기 기체상 LPG 부피 점유율이 클수록 안전 밸브 열림시기는 늦어지고 밸브 열림시의 벽면 최고온도는 높아진다.

후 기

본 연구는 1986년도 문교부 학술연구 조성비의 지원으로 수행된 것이며, 이에 대하여 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. W.L. Walls, "The BLEVE - Part 1", Fire Command, May 1978.
2. W.L. Walls, "Just What is A BLEVE?", Fire Journal, Nov. 1978.
3. R.D. Appleyard, Testing and Evaluation of the Explosafe System as a Method of Controlling the Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, Report prepared for Transport Canada Research and Development Centre, TP2740, 1978.
4. J.D. Landes and J.A. Begley, "Recent Developments in J_{IC} Testing", Developments in Fracture Mechanics Test Methods Standardization, ASTM STP 632, pp. 57-81, 1977.
5. A. King, Effects of JP-4 Pool Fire Environments on 1/5 Linear Scale LPG Tank Cars Containing Explosafe Foil, Report for Vulcan Industrial Packing, Transport Canada, Queen's University, April 1980.
6. J. Venart, R. Prasad and M. Callaghan, Thermal Conductivity and Conductance of Explosafe, Report Prepared for Transport Canada, Contract Number OSD82-00085, Univ. of New Brunswick, 1984.
7. A. Szego, K. Premji and R.D. Appleyard, Evaluation of Explosafe Explosion Suppression System for Aircraft Fuel Tank Protection, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Report #AFWAL-TR-80-2043, 1980.
8. National Gas Tek Corp., Explo-safe Tests, Feb. 1984.
9. R.C. Reid, J.M. Prausnitz and T.K. Sherwood, The Properties of Gases and Liquids", McGraw-Hill, 1977.
10. 일본 LPG 협회, LPG 기술총람, 정우에너지 주식회사, 1983.
11. S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, 1980.