

컨테이너 내부 화재진압을 위한 물분무창 설계에 관한 수치적 연구

한상구* · 최재혁** · 이원주***†

* 해양환경관리공단, ** 한국해양대학교 기관시스템공학부, *** 한국해양대학교 기관공학부

A Numerical Study on the Design of Water Mist Lance
for Fire Suppression in Container

Sang-goo Han* · Jae-hyuk Choi** · Won-Ju Lee***†

* KOEM, Korea

** Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Korea

*** Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Korea

요 약 : 컨테이너를 이용한 위험물의 해상운송이 증가함에 따라 적재불량으로 인한 위험물의 누설 등으로 선박에서 화재사고가 발생하고 있다. 한편, IMO(MSC.93)에서는 2016년 1월 1일 이후 건조되는 개방갑판상에 컨테이너를 5단 이상 적재하도록 된 모든 선박은 물분무창(Water Mist Lance, WML)이라는 소화장치를 선박에 의무적으로 비치하도록 규정하였다. 본 연구에서는 LS-DYNA를 이용하여 최적의 첨단곡률반경을 가지는 WML을 설계하기 위한 수치해석을 수행하였다. 첨단부분의 길이가 10 mm, 15 mm, 20 mm인 3가지 모델에 대한 해석결과 길이가 15 mm인 경우만 컨테이너 벽면을 관통하고, WML의 첨단부분에 손상을 일으키지 않는 결과를 나타내었다. 향후, 본 연구결과를 바탕으로 테스트용 WML를 제작하여 성능실험을 할 계획이며, 문제점은 지속적으로 개선해 나갈 것이다.

핵심용어 : 화재사고, 컨테이너, 물분무창, LS-DYNA, 첨단곡률반경

Abstract : Increasing marine transportation of dangerous goods using containers causes fire accidents on ships due to leakage of dangerous materials. In IMO (MSC.93), all vessels that are to be loaded five or more containers on weather deck area after 1 January 2016 are required to have a fire extinguishing system called Water Mist Lance (WML) on board. In this study, numerical analysis is performed to design WML with optimal edge radius of curvature using LS-DYNA. The analysis results for the three models with 10 mm, 15 mm and 20 mm lengths of the edge part showed that the only model with 15 mm length penetrated the wall of the container and did not cause damage to the edge of the WML. In the future, based on the results of this study, we will make a WML of prototype and conduct a performance test. And we will continue to improve the problems.

Key Words : Fire Accident, Container, Water Mist Lance, LS-DYNA, Radius of Edge Curvature

1. 서 론

경제적인 성장은 보편적으로 해상물동량의 수요를 창출하며 이에 부응하여 해상 교역을 위한 선박량 증가를 가져오게 된다(Shim, 2017). 특히, 세계 컨테이너 선박의 선복량은 매년 5% 이상의 증가세를 보이고 있으며, 2015년도는 7.6%의 큰 증가율을 나타냈다(Won and Kim, 2017). 이러한 컨테이너 선박의 증가는 각종 화물, 특히 포장된 상태의 위험물

(Dangerous Goods)의 운송 증가로 이어지고(KOMDI, 2015), 이러한 포장 위험물을 해상운송하기 위해서는 국제해상위험물규칙(IMDG CODE)에서 정하는 운송요건을 충족하여야 한다. 하지만, 화주들이 IMDG CODE에서 정한 엄격한 운송요건을 피하기 위해 일반 화물로 신고하는 경우가 종종 발생한다.

따라서, 위험화물이 일반화물로 둔갑되고, 선박이 열대 해역을 통과할 때 고온 다습한 날씨로 인해 컨테이너 내부의 온도가 오르면서 누설된 위험물이 자연발화 등으로 인한 폭발 및 화재가 발생하기도 한다(Korea P&I Club, 2017).

* First Author : poseidon@koem.or.kr, 051-400-7722

† Corresponding Author : skywonju@kmou.ac.kr, 051-410-4262

1998년부터 2006년까지 컨테이너 선박의 개방갑판구역 컨테이너에서 최소 12건의 화재사고가 발생하였으며(IMO, 2007), 이후에도 2010년 M/V CHARLOTTE MAERSK 등 다수 컨테이너 선박의 개방갑판구역에서 포장 위험화물 등으로 인한 화재가 발생하였다. 화재사고는 선박에서 발생하는 가장 위험한 사고 중의 하나이므로 이러한 화재를 진압하기 위해 선박에 설치되는 소화설비는 가장 중요한 안전장치 중 하나이다.

IMO의 제83차 해사안전위원회에서는 선박의 개방갑판구역 컨테이너 화재를 진압하기 위한 소화설비에 대해 논의를 시작하였으며, 2014년 제93차 해사안전위원회 회의에서 “2016년 1월 1일 이후 건조되는 개방갑판상에 컨테이너를 5단 이상 적재하도록 된 모든 선박은 Water Mist Lance(WML, 물분무창)와 Mobile Water Monitor를 선박에 의무적으로 비치”하도록 하였다(IMO, 2014).

해상인명안전협약(SOLAS) Reg. II-2/7.3.1.1에서는 WML에 대해 “컨테이너 벽을 관통하여 소화주관에 연결되었을 때 폐쇄공간(컨테이너 등) 내부에 물분무를 발생할 수 있는 관통 노즐을 갖춘 관으로 이루어져야 한다”라고 규정하고 있다(SOLAS, 2016). 이는 기본적으로 화재가 발생한 컨테이너 내부에 강재(Steel Plate)로 제작된 컨테이너 벽면을 WML로 관통시켜 작동해야 하므로, 기존 선박에 설치되어 있는 미분무 소화설비 노즐과는 차별성을 가져야 한다. 즉, 끝단의 첨단곡률반경(Apex Curvature Radius)이 강재를 관통할 수 있을 정도로 작아야 하며, 이 경우 첨단부분이 충분한 강성을 가질 수 있어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 SOLAS 규제강화에 대응하기 위하여 WML의 국산화 연구를 하였으며, 이를 위해 최적의 첨단곡률반경을 가지는 모델을 선정하기 위한 수치적 연구를 수행하였다.

2. WML 기초설계를 위한 수치해석

2.1 지배방정식 등 이론적 배경

WML를 이용한 화재진압을 위해서는 소화수가 컨테이너 내부에 분무되어 1) 소화수의 증발잠열로 인한 냉각효과, 2) 수증기 생성과 체적 팽창에 따라 주위 산소농도가 낮아지는 질식효과, 3) 소화수의 분무에 의한 복사열 차폐효과 등의 소화원리를 이용하여 화재를 진압하는 방식이다.

소화수를 컨테이너 내부에 분무하기 위해서는 우선 WML가 컨테이너 벽면을 관통해야 하고 이를 위해서는 WML의 첨단부분 곡률반경이 설계 시 중요한 고려요소가 된다.

따라서, 본 연구에서는 3차원 구조물의 비선형 동적 거동 해석, 충돌 및 접촉 해석에 일반적으로 이용되고 있는

LS-DYNA 프로그램을 사용하였다.

LS-DYNA의 기초이론을 설명하기 위해 Fig. 1과 같이 도식화 하였고, LS-DYNA는 운동량방정식을 이용하여 기본적인 계산이 수행되며, 지배방정식은 아래와 같다.

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} n_i = t_j(t) \quad (2)$$

$$x_i(X\alpha, t) = D_i(t) \quad (3)$$

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_i = 0 \quad (4)$$

경계 ∂b_1 에서 건인 경계조건 (2), 경계 ∂b_2 에서 변위 경계조건 (3), $x_i^+ - x_i^-$ 일 때 내부경계 ∂b_3 를 통한 접촉 불연속 (4)를 만족하는 운동량방정식 (1)에 대한 해답을 찾는다.

여기서 σ_{ij} 는 Cauchy 스트레스이다. Cauchy 스트레스는 연속적으로 움직이는 물체의 어느 점에 대한 응력을 9가지의 응력으로 정의하며, 3개의 서로 수직인 응력과 6개의 서로 수직인 전단응력으로 구성된다. ρ 는 재료의 밀도, f 는 Body의 하중밀도이다. \ddot{x} 는 가속도로 콤마는 공변 미분을 나타낸다. n_j 는 ∂b 의 엘리먼트 영역에 바깥쪽으로 향하는 방향을 나타낸다.

$$\dot{E} = V s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p+q) \dot{V} \quad (5)$$

에너지방정식 (5)는 시간으로 미분되고, 상태방정식 평가 및 전체 에너지 균형을 위해 사용된다. 여기서 s_{ij} 는 편차응력, p 는 압력, q 는 체적점성을 나타낸다.

$$\delta \pi = \int_v \rho \ddot{x}_i \delta x_i dv + \int_v \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_v \rho f_i \delta x_i dv - \int_{\partial b_1} t_i \delta x_i ds = 0 \quad (6)$$

식(6)은 평형방정식을 요약한 형태로 가상일의 주요 상태를 나타낸다. 이 방정식은 노드점에서 상호 연결된 유한요소 메쉬를 겹쳐 놓고, 시간에 따라 각 부분을 추적하는 방법으로 계산된다.

$$x_i(X\alpha, t) = x_i(X_\alpha(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^k \varphi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (7)$$

식(7)은 시간에 따른 노드점의 위치를 나타내는 공식으로 φ_j 는 파라메트릭 좌표 (ξ, η, ζ) 의 형상(보간) 함수이다. k 는 요소에 정의된 노드점의 수, x_i^j 는 i 방향의 j 노드의 좌표이

다. 유한요소의 위치는 도출된 노드점에 종속된 유한요소의 격자를 겹쳐 놓는 방법으로 계산된다.

$$\delta\pi = \sum_{m=1}^n \delta\pi_m = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho x_i \ddot{\Phi}_i^m dv + \int_{v_m} \sigma_{ij}^m \Phi_{i,j}^m dv - \int_{v_m} \rho f_i \Phi_i^m dv - \int_{\partial b_1} t_i \Phi_i^m ds \right\} = 0 \quad (9)$$

$$\Phi_i^m = (\varnothing_1, \varnothing_2, \dots, \varnothing_k)_i^m \quad (10)$$

식 (8)에서 $\delta\pi$ 는 n 개의 요소들을 합한 것이며, 식(9)는 다음과 같이 행렬 표기 방정식이 된다.

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho N^t Nadv + \int_{v_m} B^t \sigma dv - \int_{v_m} \rho N^t b dv - \int_{\partial b_1} N^t t ds \right\}^m = 0 \quad (11)$$

$$\sigma^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (12)$$

여기서, N 은 보간 매트릭스, σ 는 응력벡터, B 는 변형률-변형 매트릭스이며, a 는 노드의 가속도 벡터를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} a_{x_1} \\ a_{y_1} \\ \dots \\ a_{z_k} \end{bmatrix} = Na \quad (13)$$

$$b = b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

b 는 body force load 벡터이고, t 는 traction load가 적용되었다(Hallquist, 1998; Kwon, 2016).

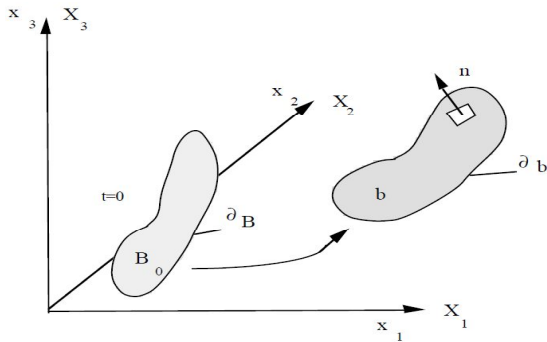


Fig. 1. Notation of LS-DYNA.

2.2 수치해석 방법

Fig. 2는 WML의 3D 모델을 나타내었다. WML의 관통 성능을 해석하기 위하여 Fig. 3과 같이 총 3개의 모델을 선정하였으며, 각 모델은 동일한 형상에 각 치수를 변경하였다. 또한, 컨테이너 벽면(판)의 두께는 1.6 mm를 적용하여 해석을 진행하였다.

WML(Piercing 노즐 포함)의 유한요소 모델에 사용된 Nodes의 개수는 25,536개이고, Elements의 개수는 25,170개이다. WML에 사용된 재질은 SUS316L이다.

WML를 수치해석하기 위하여 적용된 고정 경계조건은 효율적인 관통해석을 위하여 판(Plate)으로 설정하였고, 판 끝단 전체의 모든 방향에 대해 자유도를 구속하였으며, 이를 Fig. 4와 같이 나타내었다.

Fig. 5는 WML의 하중 경계조건을 나타내었다. 25 m/s의 속도로 이동하며, 외부에서 컨테이너 벽면(판)을 충돌하는 조건을 적용하였으며, 3개 모델에 동일한 조건을 적용하여 해석을 진행하였다.

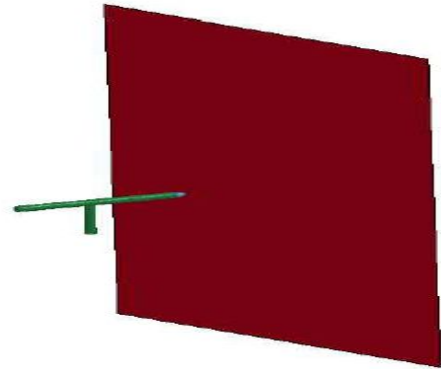


Fig. 2. 3D model of container & WML.

| WML Model 1 | WML Model 2 | WML Model 3 |
|-------------|-------------|-------------|
| | | |

Fig. 3. Piercing nozzle models of WML.

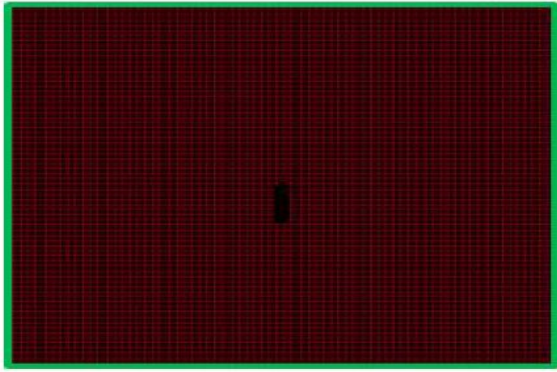


Fig. 4. Fixed boundary condition of container wall.

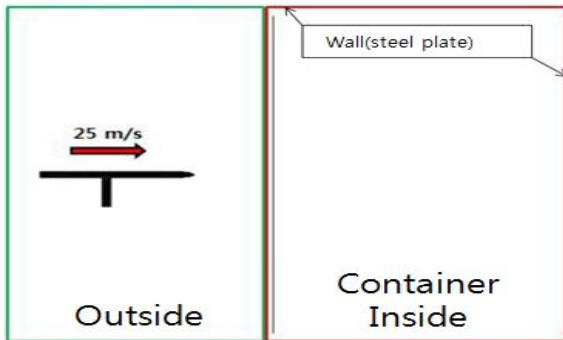


Fig. 5. Load boundary condition of WML.

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 WML 수치해석 결과

3.1.1 WML 설계 형상

Fig. 6과 Fig. 7은 본 연구에서 설계한 WML의 2차원 형상 및 유한요소모델이다. 선박에서 사용되는 소화호스와 WML를 연결하는 접속부, 소화수량을 조절하는 밸브, 손잡이 및 컨테이너 벽면을 관통할 수 있는 침단부분을 가지고 소화수를 분무할 수 있는 관통노즐로 구성되어 있다.

3.1.2 수치해석 결과

Fig. 8~Fig. 10에 WML 각 모델별 시간변화에 따른 관통 응답 거동을 나타내었다. 관통해석을 위한 충돌시간은 0.012초~0.02초이다. 0.009초에 컨테이너 벽면에 닿는 순간이며 0.01초에서 각 모델과 컨테이너 벽면에 응력이 작용하기 시작하고 0.011초에 최대응력으로 인한 변형이 최대인 순간이다. 0.012초~0.02초는 충돌 후 각 모델별 컨테이너 벽면 관통 여부를 나타낸 모습이다.

Fig. 11~Fig.12는 충돌로 인해 컨테이너 벽면과 모델 1에 작용한 최대응력 상태를 시각화해서 나타내었다.

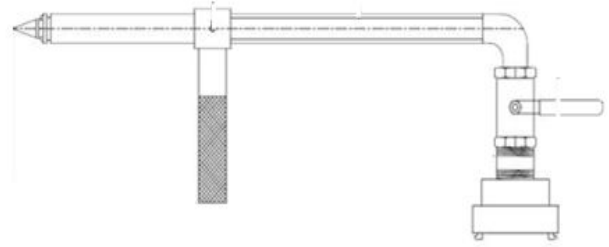


Fig. 6. Schematic diagram of WML including piercing nozzle.



Fig. 7. Finite element model of WML.

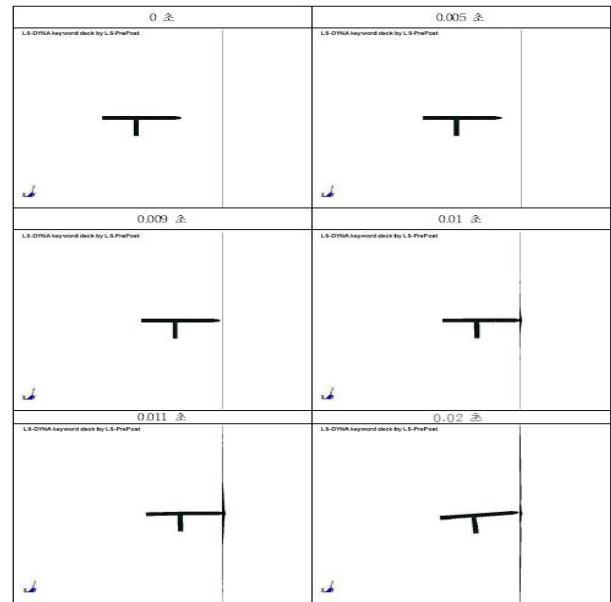


Fig. 8. Penetration response behavior of WML model 1.

컨테이너 벽면은 항복응력을 벗어났지만 인장강도 범위 내에 있어 충돌 시 컨테이너 벽면에 변형만 발생되었고, WML 자체는 항복응력 이하의 힘이 작용하여 변형이 발생되지 않았기 때문에 본 연구에서 목표로 하는 WML 침단 부분의 손상은 없었으나, 컨테이너 벽면을 관통하는 성능을 확보하지 못하였으므로 침단부분의 곡률반경 설계가 부적합한 것으로 판단하였다.

컨테이너 내부 화재진압을 위한 물분무장치 설계에 관한 수치적 연구

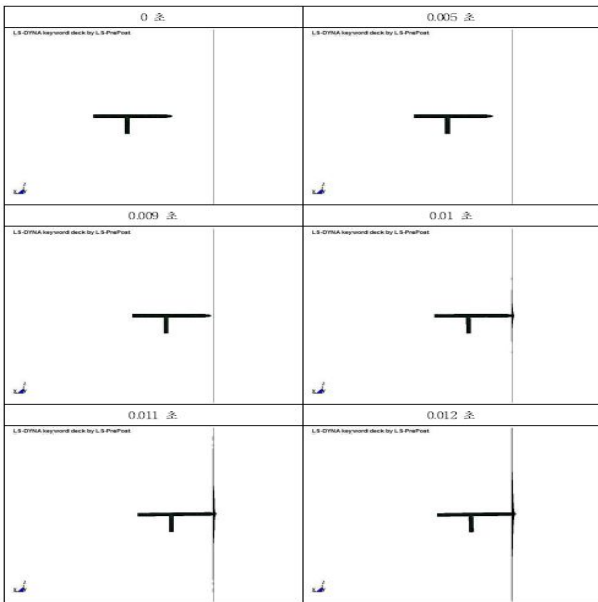


Fig. 9. Penetration response behavior of WML model 2.

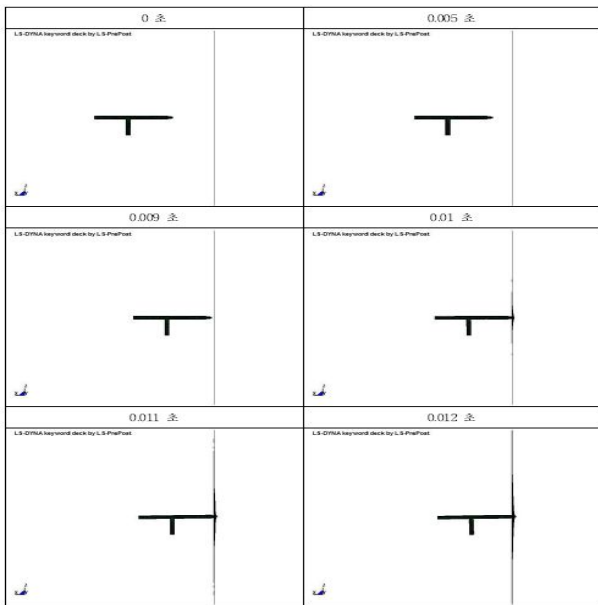


Fig. 10. Penetration response behavior of WML model 3.

Fig. 13~Fig. 14는 충돌결과로 인한 컨테이너 벽면과 모델 2의 첨단부분에 발생하는 최대 등가응력을 시각적으로 나타내었다. 해석결과 충돌로 인해 컨테이너 벽면은 인장강도를 벗어나 과공이 발생하였으며, WML 자체는 항복응력 이하로 변형이 발생되지 않았기 때문에 본 연구에서 목표로 하는 WML 첨단 부분의 설계가 적합한 것으로 판단하였다.

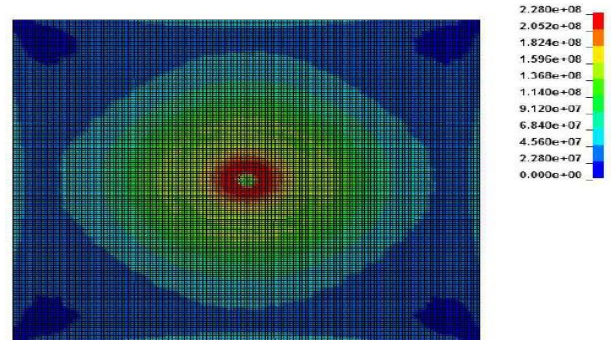


Fig. 11. Max. equivalent stress of container 1.

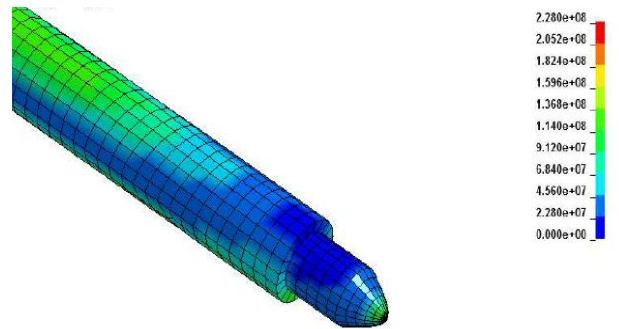


Fig. 12. Max. equivalent stress of WML 1.

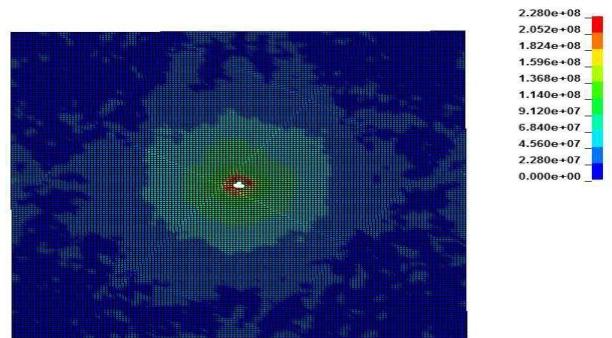


Fig. 13. Max. equivalent stress of container 2.

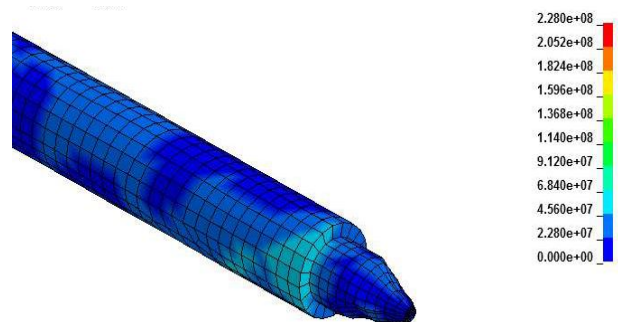


Fig. 14. Max. equivalent stress of WML 2.

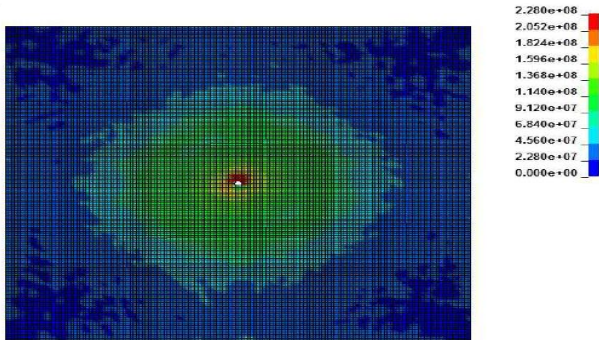


Fig. 15. Max. equivalent stress of container 3.

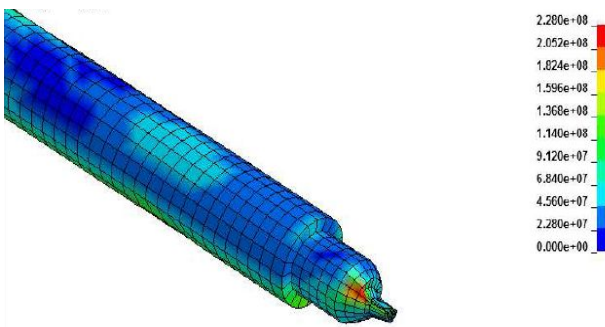


Fig. 16. Max. Equivalent Stress of WML 3.

Fig. 15~Fig. 16은 충돌결과로 컨테이너 벽면과 모델 3의 첨단부분이 변형된 형상과 충돌로 인해 이들에 작용한 최대 등가응력을 시각화하여 나타내었다. 해석결과 컨테이너 벽면은 인장강도를 벗어나 과공이 발생되었지만, WML 모델 3은 첨단 부분이 인장강도에는 이르지 않았을지라도 항복응력을 벗어나 심한 변형이 발생되었으므로 요구 성능을 확보하지 못한 것으로 판단하였다.

따라서, WML 각 모델별로 본 연구에서 목표로 하는 성능기준에 부합하는 수치해석 해설결과를 낸 모델 2가 가장 적합한 것으로 판단하였다.

추가적으로 컨테이너 벽면 및 WML의 각 모델에 대한 등가응력 결과는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Analysis Results of Equivalent Stress

| | | Max. Equivalent Stress (MPa) |
|--------|-----------|------------------------------|
| Model1 | Container | 272.0 |
| | WML | 139.1 |
| Model2 | Container | 369.4 |
| | WML | 148.4 |
| Model3 | Container | 612.6 |
| | WML | 330.6 |

4. 결 론

본 연구에서는 선박의 컨테이너 내부 화재를 소화하기 위하여 SOLAS협약에서 2016년 1월 1일부터 건조되는 개방갑 판상 컨테이너를 5단 이상 적재하도록 설계된 선박이 의무적으로 비치하도록 한 소화장치인 WML에 대하여 수치해석적 방법을 사용하여 연구를 수행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. WML 모델 1(10 mm)에 대한 해석결과 관통 노즐의 첨단 부분의 변형은 없었지만, 컨테이너 벽면을 관통하지 못하였다.

2. WML 모델 2(15 mm)에 대한 해석결과 관통 노즐의 첨단 부분의 변형이 없었고, 컨테이너 벽면도 관통하였다.

3. WML 모델 3(20 mm)에 대한 해석결과 컨테이너 벽면은 관통하였지만, 관통 노즐의 첨단 부분의 변형이 발생하였다.

향후, 수치해석 결과를 바탕으로 테스트용 WML를 제작, 성능실험을 실시하여 문제점은 지속적으로 개선할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 시행한 산업기술혁신사업 기술개발 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] IMO(2007), Proposed review of SOLAS chapter II-2 with regard to fire protection of cargoes carried on deck, Maritime Safety Committee, 83rd session, Agenda item 25.
- [2] IMO(2014), Report of The Maritime Safety Committee on its Ninety-Third Session, Maritime Safety Committee, 93rd session, Agenda item 22.
- [3] IMO(2016), SOLAS (Consolidated Edition 2016), Translated and Compiled by Korea Register, pp. 542-545.
- [4] John O. Hallquist, 1998. LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Thchnology Corporation
- [5] KOMDI(2015), Korea Maritime Dangerous Goods Inspection & Research Institute, Introduction of International Maritime Dangerous Goods Code, pp. 8-9.
- [6] Korea P&I Club(2017), Safe transport of Dangerous Goods through container, Circ. Number 17/02-02.
- [7] Kwon, O. H.(2016), Effect of Vehicle Impact Conditions on Collisional Deformation Between Vehicle and Giard-rail through LS-DYNA Analysis, Master Thesis, Gachon University.

- [8] Shim, Y. T.(2017), A Study on Optimization of Remaining Oil Recovery System from Sunken Vessels, Ph.D Thesis, KMOU.
- [9] Won, Y. Y. and C. Y. Kim(2017), Development of “World Containership capacity (in TEU terms) Standards Index; WCSI”, Journal of Korea Port Economic Association, Vol. 33, No. 1, pp. 11-30.

Received : 2017. 11. 03.

Revised : 2017. 11. 15.

Accepted : 2017. 12. 28.