

컨테이너 화재진압을 위한 Mobile Water Monitor의 수치해석에 관한 연구

한상구¹ · 하민재² · 최재혁³ · 김종수[†]

(Received September 7, 2017 ; Revised September 21, 2017 ; Accepted September 29, 2017)

A study on computational fluid dynamics for development of mobile water monitor

Sang-Goo Han¹ · Min-Jae Ha² · Jae-Hyuk Choi³ · Jong-Su Kim[†]

요약: SOLAS협약에서 2016.1.1. 이후 건조되는 개방갑판 상부에 컨테이너를 5단 이상으로 적재하는 선박은 개방갑판구역 (Weather Deck) 화재를 진압하기 위하여 Mobile Water Monitor를 의무적으로 비치하도록 하였다. 본 연구에서는 Mobile Water Monitor 실험장치 제작에 앞서 SOLAS협약의 설계기준을 만족하는 모델을 설계하기 위하여 노즐 오리피스 및 정류격자 길이 계산을 위한 유동해석을 실시하였고, 설계 모델의 구조안정성 평가를 위하여 유동-구조 연성해석을 실시하였다. 그 결과, 노즐 오리피스는 입구압력 4bar~9bar에서 각 29mm, 27mm, 25mm, 24mm, 23mm, 22mm로 계산되었고, 35° 분사 시 정류격자 길이 4cm일 때 분사거리 47m, 90° 분사 시에도 정류격자 길이가 4cm일 때 26m로 가장 길었다. 또한, 유동-구조 연성해석을 통해 최대변형이 2.47mm, 최대응력은 154.7MPa로 허용응력인 205MPa보다 낮아 구조적으로 안전한 것으로 확인되었다. 해석결과를 기반으로 실험장치를 제작하여 성능시험을 실시하였다. 그 결과, 입구압력 4bar, 분사 각도 33.8°에서 분사거리 41m가 측정되었다. 해석결과와 차이가 있었으나, 분사각도와 외부 유동장에서 바람 등의 영향을 고려하였을 때 오차범위 내로 판단된다.

주제어: Mobile Water Monitor, 정류격자, 유동해석, 유동-구조 연성해석

Abstract: According to the SOLAS Convention, for vessels carrying more than five stages of containers on top of weather decks and constructed after 2016.1.1, a Mobile Water Monitor should be compulsorily provided to suppress weather deck fires. In this study, to design a model satisfying the design criteria of the SOLAS Convention prior to the production of the Mobile Water Monitor proto-type, flow analysis was performed to calculate nozzle orifice and stabilizer length, and flow-structure coupled analysis was performed to evaluate the structural stability of the design model. The nozzle orifice was thus calculated to be 29 mm, 27 mm, 25 mm, 24 mm, 23 mm, and 22 mm at 4 bar, 5 bar, 6 bar, 7 bar, 8 bar, and 9 bar, respectively; when the discharge angle was 35° and 90° and the stabilizer length was 4 cm, it was the longest at a distance of 47 m and 26 m. From the flow-structure coupled analysis, the maximum deformation was found to be 2.47 mm and the maximum stress to be 154.7 MPa, which was lower than the allowable stress, 205 MPa. An experimental apparatus was fabricated according to the analysis results, and tested for performance. Thus, a discharging distance of 41 m was measured at 4 bar and an injection angle of 33.8°. This result is different from the analysis result, but it was judged to be within the error range when considering the influence of wind on the injection angle and the external flow field.

Keywords: Mobile water monitor, Stabilizer, Flow analysis, Flow-structure coupled analysis

1. 서론

대부분의 선박은 화물을 운송하는 화물선이다. 화물선은 운송하는 화물의 종류에 따라 다양한 형태가 존재하는데, 최근에는 포장된 형태의 화물 즉, 컨테이너를 운송하는 컨테이너 선박이 크게 증가하였으며 컨테이너선을 이용한 포장된 상태의 위험물(Dangerous goods)의 운송 또한 크게 증

가하였다[1].

컨테이너를 이용한 위험화물 운송 시, 화주들은 사전에 화물에 대한 철저한 포장 및 고박을 실시하여야 하고, 더불어, 운송인에게 화물에 대한 주의사항을 사전에 충실히 고지해야 한다. 그럼에도 불구하고, 추가 운임이나 혹은 IMDG(International Maritime Dangerous Goods)코드에 규정된

[†]Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7590-6585>): Division of Marine Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: jongskim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4367

1 Korea Marine and Ocean University Graduate School, Korea, E-mail: poseidon@koem.or.kr, Tel: 051-400-7722

2 Department of Coast Guard Studies, Chonnam National University, E-mail: hmj153@naver.com, Tel: 051-410-4834

3 Division of Marine Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: choi_jh@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4257

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

보다 엄격한 운송 요건들을 피하기 위하여 무해한 제품으로 화물을 편법으로 기술함으로써 의도적으로 부정 신고하는 경우가 종종 발생한다. 이 경우 컨테이너 운송인은 화물 자체가 봉인되어 있기 때문에 컨테이너 내장 화물의 종류와 포장 등 적입상태를 알 수 없다. 이와 같이 위험화물이 일반 화물로 둔갑되고, 선박이 열대 해역을 통과하면서 고온 다습한 날씨로 인해 컨테이너 내부의 온도가 오르면서 자연발화 등으로 인한 폭발 및 화재가 발생하기도 한다[2].

1998년~2006년까지 컨테이너를 운송하는 선박에서 최소 12건의 화재·폭발사고가 발행하였으며, 2010년 이후에도 MSC FLAMINIA(2012년), H/J GREEN EARTH(2015년) 등 컨테이너 선박에서 위험화물 등으로 인한 화재사고가 지속적으로 발생하고 있다.

선박에서 발생하는 화재는 육상과 달리 인명 및 재산에 심각한 영향을 미칠 수 있는 중대 재난 사고에 속하며, 이러한 화재를 진압하기 위해 선박에 설치되는 소화설비는 가장 중요한 안전장치로 간주되고 있다. SOLAS협약에서는 개방갑판 상부에 컨테이너를 5단 이상으로 적재하는 선박은 기존 규정된 소화설비 이외에 Mobile Water Monitor(MWM) 4sets(너비 30m 미만 선박은 2sets)를 2016년 1월 1일부터 건조되는 선박에 의무적으로 설치하도록 규정하였다[3].

본 연구에서는 MWM 개발을 위해 선행적으로 유동해석을 실시하여 최적의 모델을 선정하고 시제품을 제작, 성능 시험을 실시함으로써 해석결과와 비교하였다.

2. MWM의 유동해석

2.1 MWM

MWM는 현대 포춘호(총톤수 64,054톤) 폭발·화재사고(2006), 캐롤 머스크(총톤수 92,198톤) 화재사고(2010) 등과 같이 컨테이너선의 개방갑판(Weather Deck)구역에서 화재 발생 시 화재를 진압하기 위하여 사용하는 소화장치이다. 일반적으로 MWM는 화재발생 시 긴급으로 설치하여 상하 및 좌우로 소화제의 분출방향을 조정할 수 있도록 설계되어 있다. 소화제가 주입되는 압력, 분사각도 및 노즐의 직경에 영향을 받아 소화유체가 분사된다. 소화제인 유체는 MWM의 하부 Body와 연결되어 유입되어 관로를 타고 흘러 좁아지는 노즐을 통과하면서 유체의 속도가 증가하게 되고 이후 소화지점에 분사된다. 따라서, 설계상 가장 주요한 파라미터는 분사거리가 된다[4].

최근 대부분의 실험은 컴퓨터를 이용한 전산해석을 수행한 이후 결과를 설계에 반영하여 최종 모델을 제작하는 방법을 취하고 있다. 이러한 방법을 이용하면 많은 시행착오를 줄일 수 있고, 이에 따른 추가 비용을 절감할 수 있기 때문이다.

본 장에서는 설계된 초기 MWM 모델에 대하여 사용압력별 노즐 오리피스 사양, 정류격자 길이를 유동해석을 통해 도출하였고, 유동-구조 연성해석을 통해서 분사거리를 계산하였다.

2.2 MWM 유동해석

2.2.1 MWM의 노즐 오리피스 유동해석

MWM는 크게 Valve part와 Support part로 구성되어 있다. Valve part로 유체가 유입되어 강한 압력이 형성하며, 강한 압력에 의한 추력을 Support part에서 지지하여 고정하는 형태이다. MWM의 분사거리 파악을 위한 유동해석을 위하여 Figure 1과 같이 3D 모델링을 수행하고 노즐 형상을 나타내었다.

또한, MWM의 3차원 모델의 출구유량 및 분사거리에 대한 유동해석을 위해서는 외부에 유체가 유동할 수 있는 외부 유동장이 필요하다. 본 해석에서는 분사거리를 고려하여 유동장의 크기를 분사방향으로 70m, 높이방향 20m, 폭 2m로 설정하여 생성하였고, ANSYS Workbench를 사용하여 유한요소 모델로 Figure 2에 나타내었다. Figure 2의 우측은 유동장 도메인을, 좌측은 노즐부분을 확대한 모습이다. 유한요소 모델의 구성정보를 Table 1에 나타내었다.

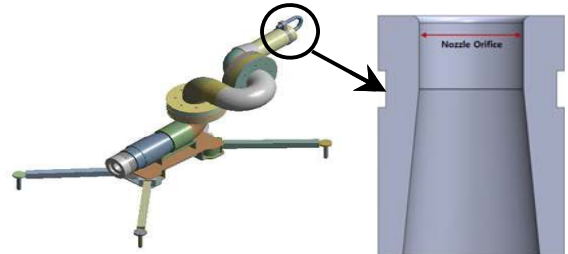


Figure 1: 3D Modeling & nozzle orifice of MWM

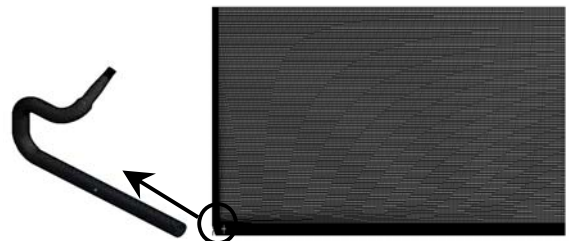


Figure 2: Flow field (right) & finite element model (left) of MWM

Table 1: Finite element model information of MWM

Category	Nodes	Elements
Mesh	2,224,850	3,675,445

유동해석을 위한 경계조건으로 분사되는 유체는 상온의 물을 사용 하였고, 외부 유동장은 대기 조건과 같은 상온의 공기를 사용하였다. 유체가 중력에 의해 떨어지는 효과를 부여하기 위하여 중력조건을 전체 유동장에 부여하였다.

또한, MWM의 곡관을 따라 외부 유동장에 분사되는 유동특징을 고려해 가장 정확한 해석결과를 나타낸 SST (Shear Stress Transport) 난류 조건을 사용하였다.

초기 전체 유동장 조건은 공기로 가득 차있는 상태로 해석을 수행 하였고 Table 2에 조건들을 나타내었다.

MWM의 입구 압력조건인 4bar ~ 9bar의 압력에 따라 유동해석을 수행할 노즐 오리피스를 분류하였고, 노즐의 출구를 통해 분사된 유체가 빠져나가는 외부 유동장의 경계에 대기조건과 같은 0bar Opening조건을, 외부 유동장의 바닥면은 Wall로 설정하여 Figure 3과 같이 나타내었다.

Table 2: Boundary conditions of MWM

Parameters	Conditions
Discharged fluid	25°C Water
Outside fluid	25°C Air
Turbulence	SST(Shear Stress Transport)
Initial condition	25°C Air

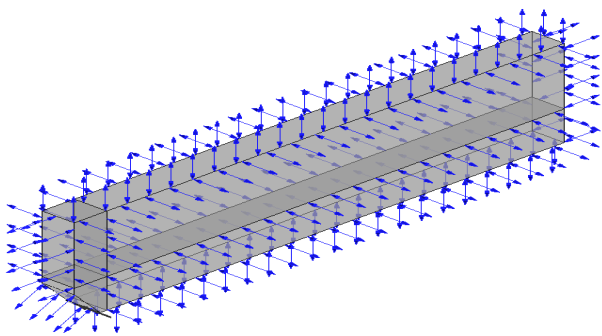


Figure 3: Boundary of External Flow Field of MWM

2.2.2 MWM 분사각도 및 정류격자 길이에 따른 유동해석

본 절에서는 MWM의 분사각도 및 노즐의 정류격자(Stabilizer) 길이에 따른 분사거리를 예측하는데 목적이 있으며, 노즐의 기본 디자인으로부터 정류격자 길이를 변화시켰을 때 분사거리에 미치는 영향을 확인해보고자 하였다. 여기서 정류격자는 노즐에서 토출되는 유체의 유속을 균일하게 만드는 역할을 한다.

MSC.1/Circ.1472에서는 분사각도 30~35°범위에서의 40m 이상의 수평도달거리와 15~20m 이상 고(高)단 이상 적재된 컨테이너에 소화유체를 수직으로 분사하여야 하므로 유동해석을 위한 분사각도는 35°와 90°로 설정하였다.

MWM 노즐 해석의 전체 도메인 형상은 35°분사각도의 경우 길이 70 m, 높이 30 m의 크기이며 2D로 형상을 간략화 하였다. 90°분사각도의 경우 길이 5m, 높이 30m의 크기이며 마찬가지로 2D로 간략화 하였다. 노즐 정류격자의 길이는 3cm, 4cm, 5cm로 구분하여 노즐을 디자인하였다. 유동해석을 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS FLUENT R17.1을, 해석 데이터의 후처리에는 CFD-Post를 사용하였다.

Table 3은 MWM 노즐 해석의 유한체적모델 격자 정보를, Figure 4와 Figure 5는 MWM 노즐의 해석을 위한 전체 도메인의 모습과 도메인에 적용한 격자(Meshing)의 형상을 나타내었다. Figure 4는 35°분사각도의 경우, 전체 도메인 형상(Figure 4 (a))과 노즐 도메인 및 격자 형상(Figure 4 (b))이며, Figure 5는 90°분사각도의 경우, 전체 도메인 형상

(Figure 5 (a))과 노즐 도메인 및 격자 형상(Figure 5 (b))이다. 관내 벽면에 의한 유동을 충분히 발달시키기 위해 노즐 길이는 노즐 직경의 4배 이상으로 구성하였다.

Table 3: Finite volume model grid information of MWM nozzle analysis

Case	Type	Nodes	Elements
35°	3 cm	276,887	278,200
	4 cm	277,887	279,200
	5 cm	278,887	280,200
90°	3 cm	166,979	168,356
	4 cm	185,079	186,576
	5 cm	186,679	188,196

Table 4: Boundary conditions of MWM flow analysis

Category	35°	90°
Material	Fresh water, 25 °C	Fresh water, 25 °C
Eddy model	SST	SST
Inlet condition	405,300 Pa, Pressure-inlet	405,300 Pa, Pressure-inlet
Outlet condition	0 Pa, Outlet-vent	0 Pa, Outlet-vent
Wall condition	No slip wall	No slip wall
Remark	Standard atmosphere	Standard atmosphere

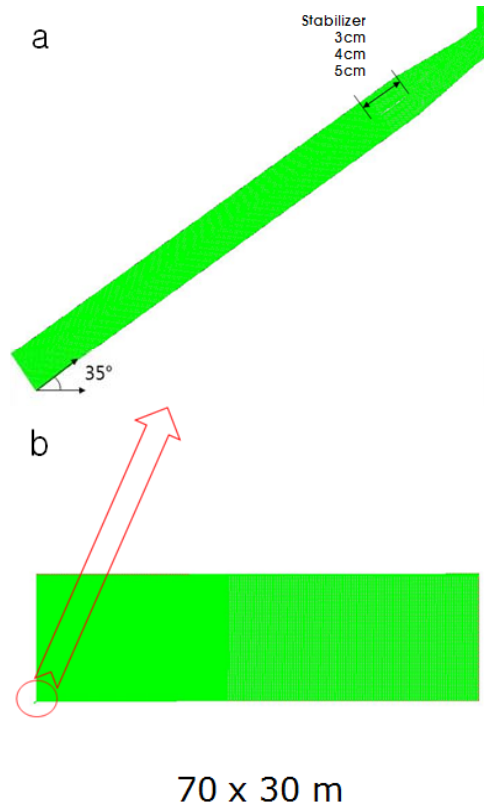


Figure 4: In case of 35° Discharge angle, a: Entire domain and grid shape, b: Nozzle domain and grid shape

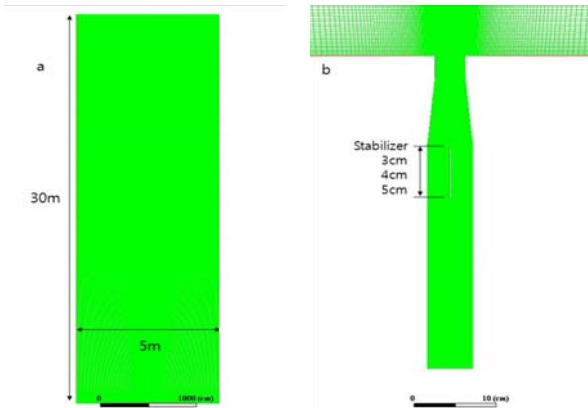


Figure 5: In case of 90° Discharge Angle, a: Entire domain and grid shape, b: Nozzle domain and grid shape

Table 4는 본 연구에서 수행한 MWM의 유동해석을 위한 경계조건을 나타내었다. 관련한 내용을 상세히 서술하면, 작동유체는 청수(Fresh water)로 하였고, 난류모델은 노즐의 정류격자 길이의 변화가 분사거리에 주요하게 영향을 미치므로 Wall 주변과 Stream line을 모두 고려하는데 특화되어 있는 SST모델을 적용하였다. 입구 및 출구 조건은 MWM의 검사에서 활용되는 조건을 참고하여 각각 405,300Pa (= 4atm)과 0Pa 압력조건으로 설정하였다. 대기조건은 표준대기(Standard atmosphere) 물리량을 참고하여 기압: 101,325Pa, 대기온도: 15°C, 중력 가속도: 9.8066m/s², 공기밀도: 1.225kg/m³로 적용하였다.

2.2.3 MWM 구조해석

본 절에서는 MWM의 Valve part와 Support part의 구조해석을 진행하였다. Valve part로 유체가 유입되어 강한 압력이 작용하며, 강한 압력에 의한 추력을 Support part에서 지지하는 작동형태를 보인다. 따라서, 해석의 효율성 및 정확도를 높이기 위하여 유체의 압력 및 추력이 작용하는 형태를 고려하여 MWM의 모델링 및 해석을 진행하였다.

Figure 6는 MWM 유한요소 모델이며, 사용된 Node의 개수는 178,815개, Element의 개수는 214,706개이다. Mobile Water Monitor에 사용된 재료는 SUS316L이다.

Figure 7 ~ Figure 8에 Mobile Water Monitor에 적용된 고정 경계조건을 나타내었다. 호스와 연결되는 부분의 앞뒤 방향 자유도를 구속하였으며, 선체와 체결되는 Support leg pin 부분의 모든 방향의 자유도를 구속하였다.

Figure 9은 MWM 하중 경계조건을 나타낸 그림이다. Valve part의 내부에 작동 유체가 유입되어 내압이 작용하며 Working pressure의 최고 압력인 24bar를 적용하여 해석을 진행하였다. 실제 Inlet에서 24bar를 적용하면 유체의 이동 방향에 따라 압력 차에 의하여 압력이 실제적으로 감소하는 경향을 보이지만 구조물의 안전성을 고려하여 모든 방향에 내압(24bar)이 작용한다고 가정하여 해석을 진행하였다.

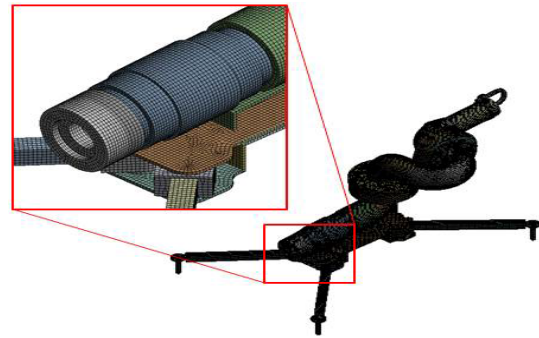


Figure 6: Finite element model of MWM

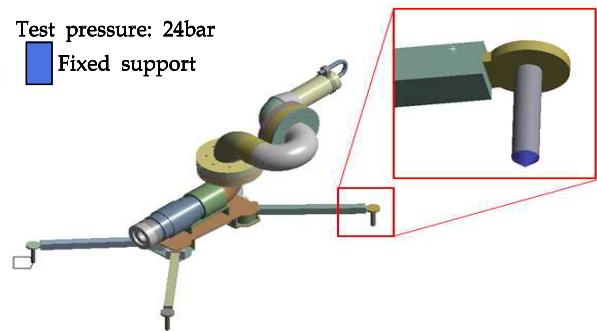


Figure 7: Fixed support of MWM

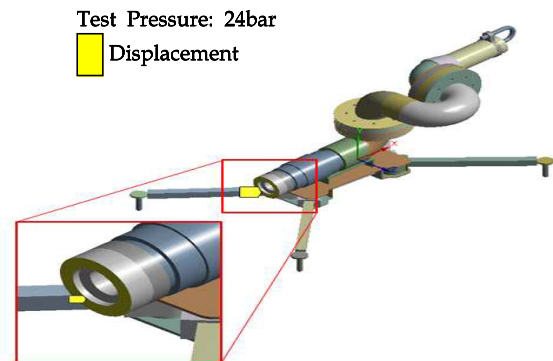


Figure 8: Boundary condition of MWM

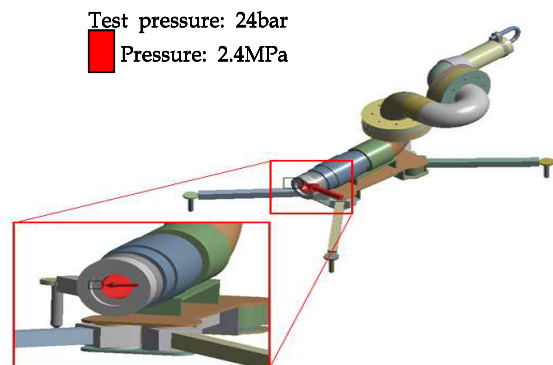


Figure 9: Load condition of MWM

3. MWM의 유동해석 결과

3.1 MWM 노즐 오리피스 유동해석 결과

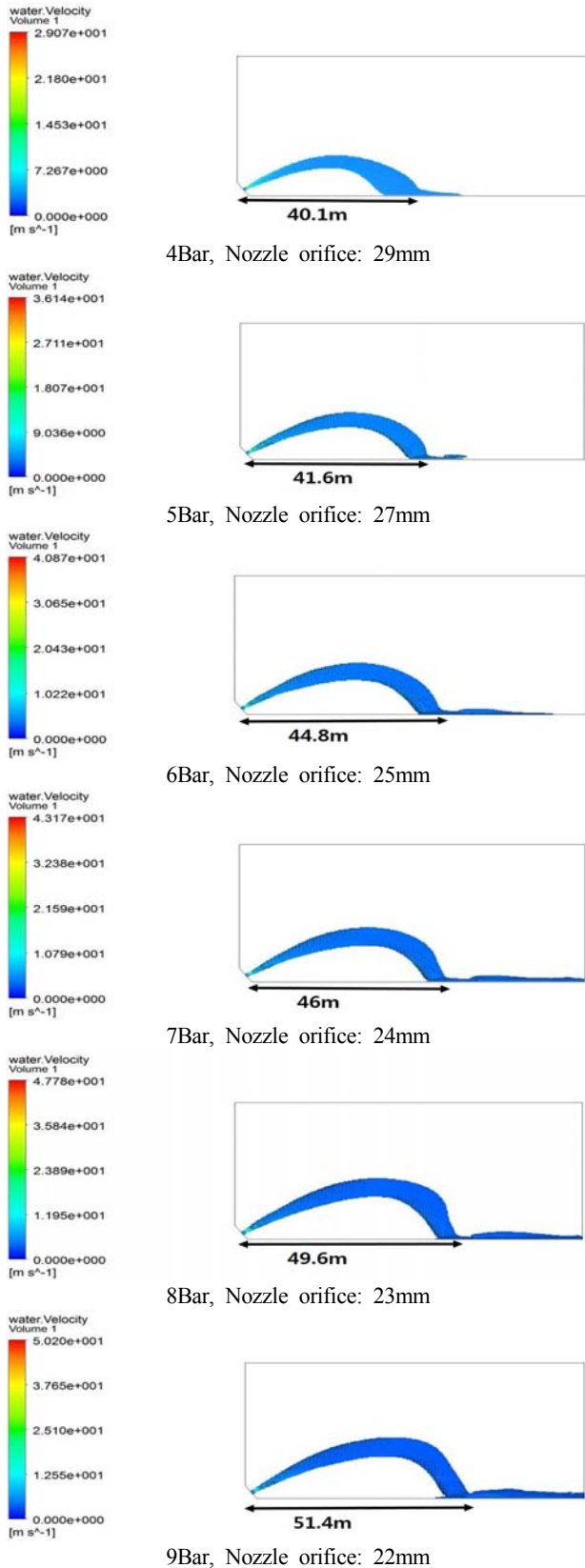


Figure 10: The discharge distance by nozzle orifice diameter

MWM 입구 압력 조건인 4bar ~ 9bar까지 각 노즐 오리피스 직경 및 입구압력에 따른 설계 목표(분사거리 40m이상, 유량 60m³/h 이상) 만족여부를 판별할 수 있는 유동해석 결과를 Figure 10에 나타내었다.

3.2 분사각에 따른 정류격자 길이 유동해석 결과

유동해석은 분사각도를 35°와 90° 두 가지로 구분하였고, 각 조건에서 노즐 정류격자의 길이를 3, 4, 5cm 로 다양화 하였을 때 나타나는 분사거리의 변화를 확인하고자 하였다. 해석 방법에는 35° 분사의 경우 시간에 따른 변화가 없는 정상상태 해석으로 계산하였고, 90° 분사의 경우 시간에 종속된 비정상상태로 해석을 수행하였다.

분사거리에 대한 정의는 35° 분사각도의 경우, 노즐에서 분사된 물이 포물선 형태를 그리며 노즐과 동일한 높이에 다시 도달하기까지의 최소거리로 하였다. 90° 분사각도의 경우, 노즐에서 분사된 물이 가장 높은 위치에 도달한 높이로 정의하였다.

3.2.1 35° 분사각도의 경우

Figure 11은 분사된 청수의 속도구배(Velocity gradient)를 시각화한 그림이다. 분사거리는 위에서 설명한 정의를 바탕으로 'a'선을 기준으로 하였다. 속도구배를 기준으로 분사거리를 표현할 경우 노즐 정류격자 3cm = 40m, 4cm = 44m, 5cm = 42m로 정류격자의 길이 4cm에서 물의 분사거리가 가장 길었다. 이러한 분사거리에 대한 해석결과는 Figure 12를 통해서 분명하게 확인할 수 있다. Figure 12는 Figure 11의 'a' 선을 기준으로 한 분사거리와 유체속도의 관계를 나타낸다. 하지만, 유체 속도는 분사되는 청수와 대기의 공기를 구분하지 못한다. 그러나 실제 소화노즐에서 분사되는 물줄기는 약 1~2m 직경의 원형으로 나타나기 때문에 속도구배를 활용하여 분사거리를 나타내는 것은 현실적이지 못하다.

MWM의 해석을 위해서는 대기의 공기를 제외한 분사된 청수만을 대상으로 한 현실적인 해석결과가 필요하다. 그렇기 때문에 Figure 13을 통하여 청수의 체적 분율(Volume fraction)을 기준으로 분사거리를 다시 나타내었다. Figure 13에서 분사거리는 노즐 정류격자의 길이 3cm = 44m (Figure 13 (a)), 4cm = 47m (Figure 13 (b)), 5cm = 45m (Figure 13 (c))이고 위와 동일하게 분사거리를 확인하기 쉽도록 Figure 14를 통해 그래프로 나타내었다. 속도구배를 나타낸 Figure 14와 마찬가지로 물의 체적 분율로 나타낸 해석에서도 노즐 정류격자의 길이 4cm에서 분사거리가 가장 길게 나타났다. 또한, Figure 14에서 'c'의 영역으로 표시한 것과 같이 약 1~2m 영역에 걸쳐 구배가 나타나므로 앞서 보인 속도구배를 활용한 해석보다 더욱 현실적이라 할 수 있다.

3.2.2 90° 분사각도의 경우

MWM의 해석 중 분사각도가 90°인 경우, 분사된 물은 중력 및 대기 조건과의 밀도 차이로 인해 분수대에서 볼 수 있는 물의 형태로 낙하하게 된다. 이러한 물의 형상은 점성력 보다는 관성력에 종속되게 된다.

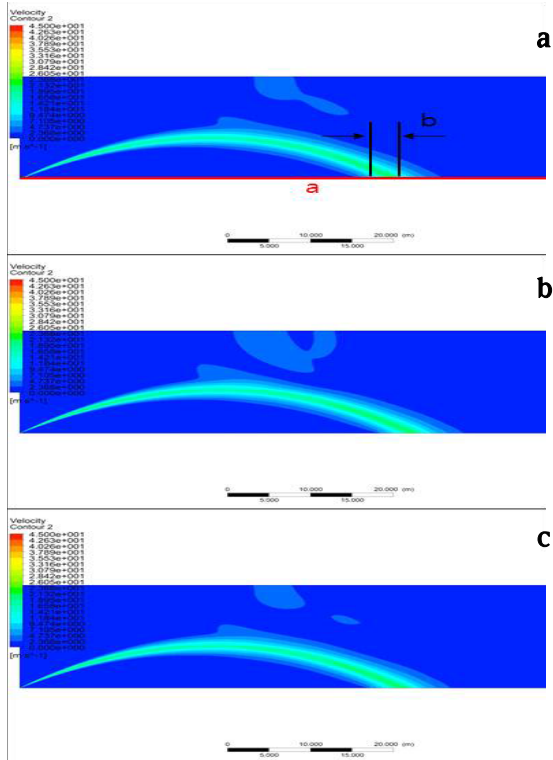


Figure 11: Fluid velocity gradient of stabilizer(a: 3cm, b: 4cm, c: 5cm) at a 35° discharge angle

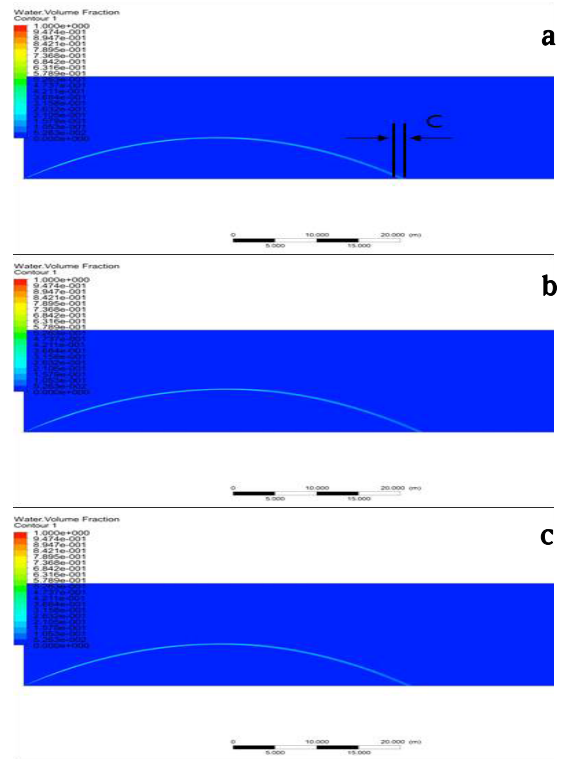


Figure 13: Water volume fraction of each stabilizer (a: 3cm, b:4 cm, c:5 cm) at 35° discharge angle

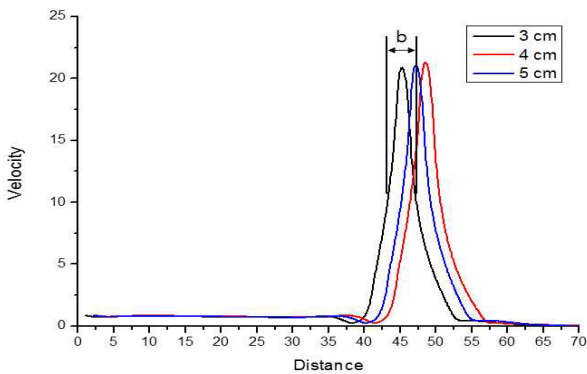


Figure 12: Fluid velocity graph of each stabilizer at 35° discharge angle

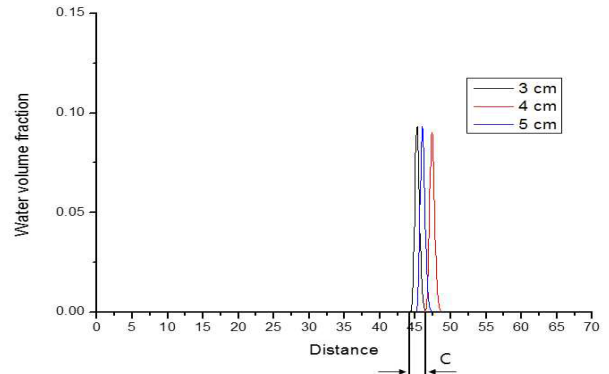


Figure 14: Water volume fraction graph of each stabilizer at 35° discharge angle

다시 말하자면, 난류성이 강하게 작용하기 때문에 시간이 지남에 따라 액적의 형태가 다양하게 변화하므로 비정상상태를 가정하여 해석을 수행하였다.

MWM의 운용 조건에는 수직분사도 포함되어 있으므로 90°의 분사각도를 대상으로 한 전산유동해석을 수행하였다. 35° 분사각도의 해석과 마찬가지로 Figure 15를 통해 분사된 청수의 속도구배를 시각화하였다. 속도구배를 기준으로 표현한 경우, 분사거리는 각 각의 노즐 정류격자 길이에 따라 3cm = 25m, 4cm = 27m, 5cm = 25m 로 나타났으며 이 중 4cm에서 청수의 분사거리가 가장 길었다. 이것은 35°분사각도의 실험과 동일한 결과이다. 이러한 분사거리에 대한 해석을 분명하게 확인할 수 있도록 Figure 16을 통해 그래프로 나타내었다.

Figure 16은 Figure 15의 ‘D’선을 기준으로 한 분사거리와 유체속도의 관계를 나타낸다. 이 ‘D’선은 노즐 출구 중심의 수직선이다.

35° 분사각도와 동일하게 90° 분사각도의 경우에도, Figure 17을 통해 청수의 체적 분율(Volume fraction)을 기준으로 분사거리를 다시 나타내었다. Figure 17에서 MWM의 분사거리는 노즐 정류격자의 길이 3cm = 25m (Figure 17 (a)), 4cm = 26m (Figure 17 (b)), 5cm = 25m (Figure 17 (c))으로 나타났다. 분사거리를 확인하기 쉽도록 Figure 18을 통해 청수 체적 분율과 분사거리와의 관계로 그래프로 나타내었다. 35° 분사각도와 동일하게 90° 분사각도의 경우, 물의 체적 분율로 나타낸 해석에서도 노즐 정류격자의 길이 4cm에서 분사거리가 가장 긴 것으로 나타났다.

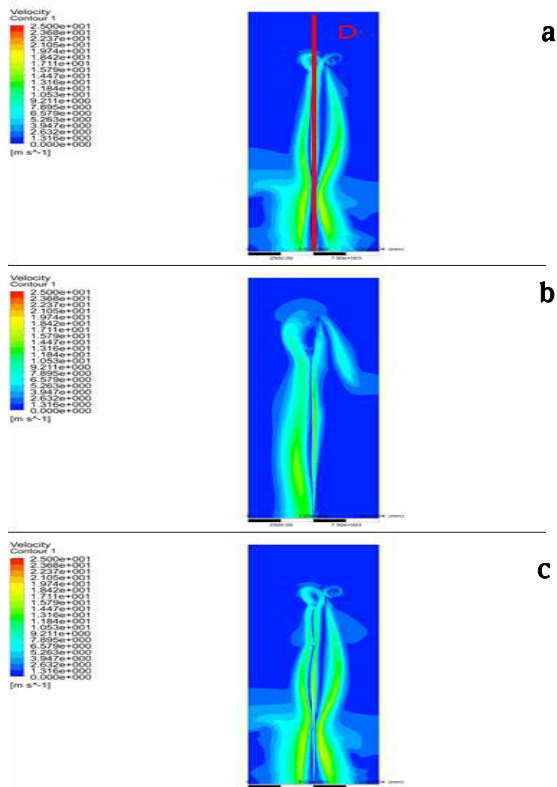


Figure 15: Fluid velocity gradient of stabilizer (a: 3cm, b: 4cm, c: 5cm) at a 90° discharge angle

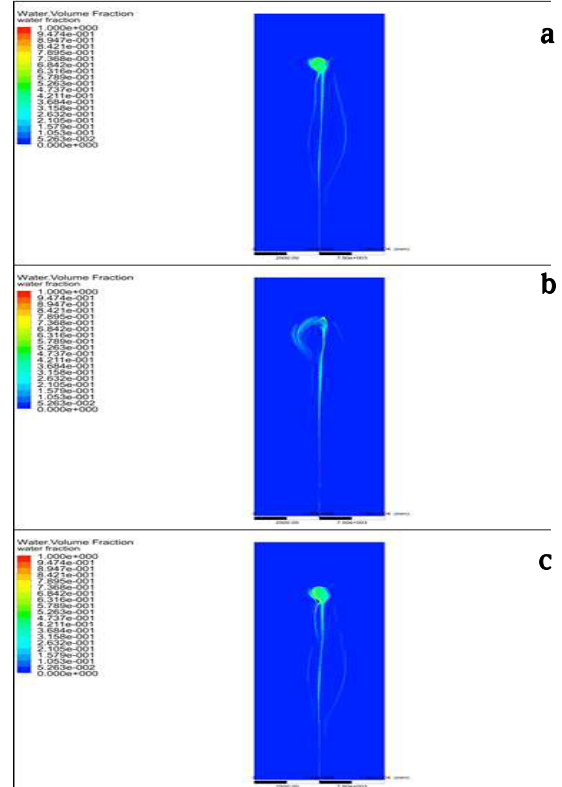


Figure 17: Water volume fraction of each stabilizer (a: 3cm, b: 4cm, c: 5 cm) at 90° discharge angle

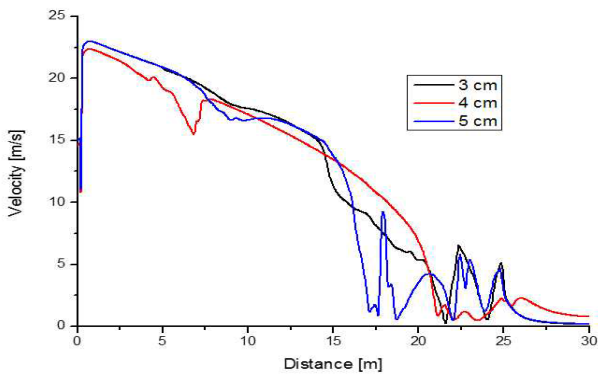


Figure 16: Fluid velocity graph of each stabilizer at 90° discharge angle

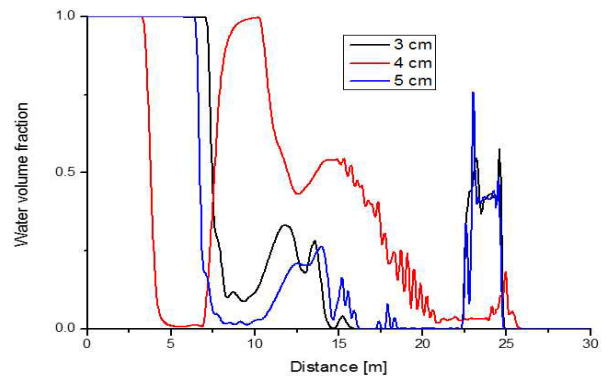


Figure 18: Water volume fraction graph of each stabilizer at 90° discharge angle

3.3 분사각에 따른 정류격자 길이 유동해석 결과

Figure 19 ~ Figure 24에 MWM의 내압해석 결과를 나타 내었다. MWM의 최대 변형은 2.47mm로 구조물의 총 길이에 비하여 미미한 변형이므로 구조안전성에 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단되며, 최대 응력은 약 154.7 MPa이 발생하여 허용응력 205 MPa보다 낮으므로 MWM는 구조적으로 안전하다고 판단된다.

각 Part별로 해석 결과를 검토하면 Valve part의 최대 변형은 MWM의 최대 변형이 발생하는 2.47 mm이며, 물이 분사되면서 압력이 작용하는 Spray shield stem과 Cock 부위

에서 발생한다.

최대응력은 약 154.7 MPa이 Pipe 내부에서 곡률로 발생하는 모멘트에 의하여 발생하였으나, 허용응력이 205 MPa 보다 낮으므로, Valve Part는 구조적으로 안전할 것으로 판단된다.

Support part의 최대 변형은 0.52 mm이며, Valve part를 고정하는 위치에서 발생하며, Valve part에 내압이 작용하며 발생하는 주력에 의하여 최대 변형이 발생한다. 최대 응력은 약 154.7 MPa이 Support 하부의 지지구조에서 발생하며, Valve part 주력에 의한 변형으로 압축이 일어나 최대응력이 발생한다.

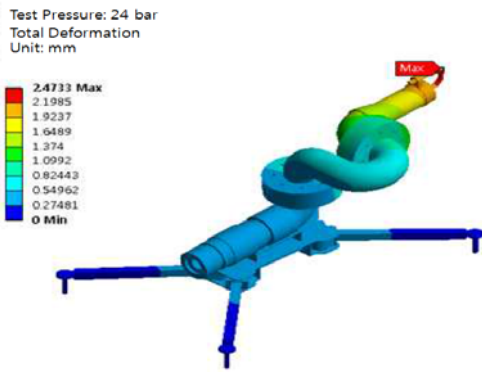


Figure 19: Max. Displacement of MWM

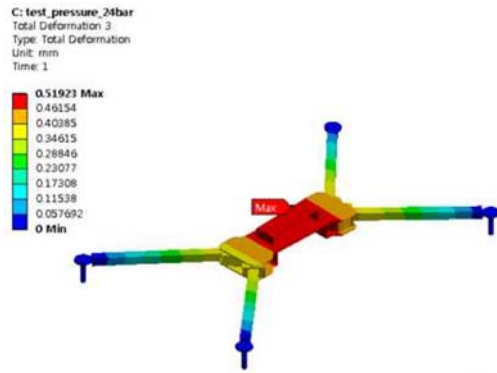


Figure 23: Max. Equivalent stress of support part



Figure 20: Analysis result of MWM

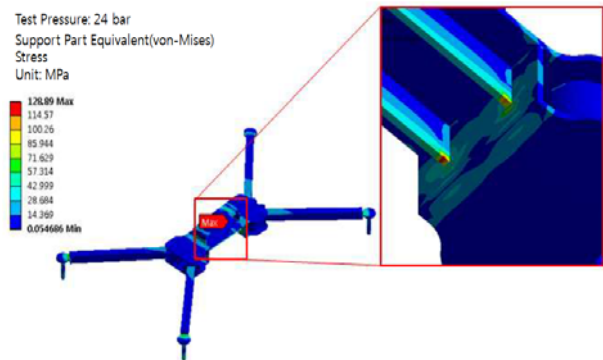


Figure 24: Max. Equivalent stress of support part

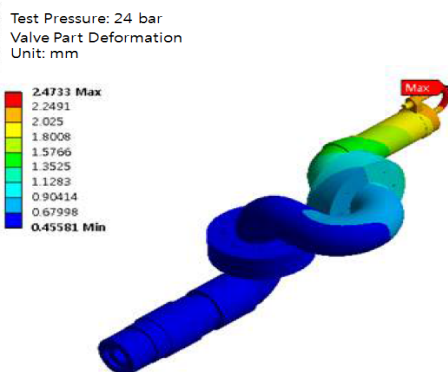


Figure 21: Max. Equivalent stress of valve part

하지만 Support part의 허용응력이 205 MPa보다 낮으므로, Support part는 구조적으로 안전하다고 판단된다.

MWM의 각 Part에 대한 구조해석 결과는 Table 5에 정리하였다.

Table 5: Analysis result summary

Part		Max. deformation (mm)	Max. stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Evaluation
MWM	Valve part	2.47	154.7	205	OK
	Support part	0.52	128.9	205	OK

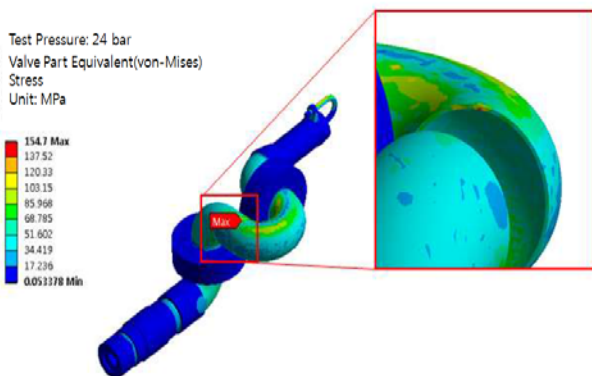


Figure 22: Max. Equivalent stress of valve part

4. MWM의 시제품 성능시험

유동해석을 통하여 4 cm의 정류격자가 최적화 디자인임을 확인하고, 이를 바탕으로 MWM를 제작하여 성능시험을 수행하였다. 성능시험은 선급검사원 입회하에 예비시험 (Preliminary test)의 형식으로 진행되었으며 그 결과는 Table 6을 통해 확인할 수 있다.

앞선 전산유동해석을 통하여 35° 분사각도에서 분사거리는 47m로 계산되었으며 실제 실험에서는 33.8°에서 41m로 6m의 차이가 있었다. 하지만 이러한 오차는 분사각도에서의 1.2°차이와 유동해석에서는 포함되지 않는 바람에 의한

Table 6: Preliminary test results of MWM

Category	Case 1.	Case 2.
Nozzle model	4cm Stabilizer	
Inlet pressure	4.0 bar	4.0 bar
Flow rate	62.7 m ³ /h	63.8 m ³ /h
Profection angle	33.8°	90°
Profection distance	41 m	26 m

영향을 고려하였을 때 오차범위 내에 있는 것으로 판단된다. 유동해석 수행 시, 다양한 대기조건을 가정하여 많은 경우의 수로 해석을 진행한다면 더욱 정확한 해석결과를 얻을 수 있을 것이다.

90°분사각도에서의 전산유동해석과 실험에서 관찰된 분사거리는 각각 26m로 두 값은 동일하였다. 이러한 90° 분사각도에서의 정확한 유동해석의 결과는 실험조건에서 분사각도의 차이가 없었을 뿐만 아니라 계산에서 시간에 따른 변화를 반영한 비정상해석을 수행하였기 때문에 판단된다. 본 해석에서 수행한 비정상상태의 해석은 정상상태와 비교하여 약 10배 이상의 반복계산이 수행되었다. 무거운 계산을 수행한 만큼 정확도도 더욱 향상되었을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 SOLAS 규정에 따른 컨테이너선박 개방 갑판(Weather deck)용 소화장치인 MWM의 각 Part의 수치해석을 통해 설계기준을 만족하는 모델을 선정하고 이를 시제품으로 제작하여 성능시험을 실시하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) MWM 시제품 제작에 앞서 노즐 오리피스, 정류격자 선장을 위한 유동해석 및 구조안정성을 위한 유동-구조해석을 통해 SOLAS에서 정한 설계기준을 만족하는 모델을 선정하였다.

(2) 유동해석 결과, 노즐 오리피스는 4bar~9bar에서 각 29mm, 27mm, 25mm, 24mm, 23mm, 22mm로 계산되었고, 35° 분사 시 정류격자 길이 4cm일 때 분사거리 47m, 90° 분사 시에도 4cm일 때 26m로 가장 길었다. 또한, 유동-구조 연성해석을 통해 최대변형이 2.47mm, 최대응력은 154.7MPa로 허용응력 205MPa보다 낮아 구조적으로 안전한 것으로 확인되었다.

(3) 수치해석을 통해 선정된 모델로 시제품을 제작하여 분사거리 측정시험과 수치해석 결과를 비교한 결과 13%의 오차를 확인할 수 있었다.

(4) 시중에 판매되고 있는 MWM는 단일형 노즐을 사용하여 분선의 소화전 압력에 따른 적용성이 떨어지지만, 본 연구를 통해 개발된 제품은 소화전 압력에 따라 적합한 노즐을 선택할 수 있어 선주입장에서는 선박의 규모에 따라 제품을 선택할 수 있는 장점이 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 시행한 산업기술혁신사업 기술개발 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] C. H. Kang, Improving Storage Facilities for Dangerous Container Cargo in Busan Port, M.S. Thesis, Department of Shipping and Port Logistics, Korea Maritime and Ocean University, Korea, 2016.
- [2] KOREA P&I CLUB, Safe Transport of Dangerous Cargo through Containers (Circular Number: 17/02-02), <http://www.kpiclub.or.kr/board/bbs>, Accessed February 8, 2017.
- [3] IMO, SOLAS, Consolidated Edition, Translated and compiled by Korea Register, 2016.
- [4] Y. C. Ryu, B. K. Seo, J. H. Seung, Y. H. Lee, and Y. C. Park, "Study of computational fluid dynamics for projection distance prediction of the form monitor," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 15, no. 10, pp. 5939-5944, 2014.