

# USCG 형식승인을 위한 선박용 고정식 CO<sub>2</sub> 소화설비의 진동 특성 연구

## Study on Vibration Characteristics of a Ship's Fixed CO<sub>2</sub> Fire-extinguishing System for USCG Type Approval

정 호 연\* · 조 재 상\*\* · 구 희 모\*\* · 배 진 욱\*\*\* · 조 종 래†  
Hoyeon Jeong\*, Jaesang Jo\*\*, Heemo Goo\*\*, Jinwook Bae\*\*\* and Jongrae Cho†

(Received July 13, 2022 ; Revised August 10, 2022 ; Accepted August 11, 2022)

**Key Words :** Fixed CO<sub>2</sub> Fire-extinguishing System(고정식 CO<sub>2</sub> 소화설비), USCG(미해안경비대), ODS(운전중변형형상), Type Approval(형식승인), Modal Analysis(모드 해석), Resonance Avoidance(공진 회피)

### ABSTRACT

In accordance with the USCG type approval procedure, a fixed CO<sub>2</sub> fire-extinguishing system is mounted on a ship after obtaining type approval. For it to pass the vibration test for type approval, an appropriate vibration resistance design is required. In this study, we analyzed the severity of the vibration test standard UL2127 and developed a modularized test method for USCG type approval. Based on the proposed test method, the vibration response characteristics of each module were evaluated with three-axis vibration test machines. In the case of the cylinder module, damage was caused by excessive vibrations due to resonance, which can be mitigated by changing the rigidity of the boundary structure and shifting the natural frequency out of the frequency range of interest.

### 1. 서 론

선박 및 해양플랜트 설비에서 발생하는 해상화재 사고는 피난 및 구난의 범위가 육상 설비와는 달리 매우 한정적이며 밀폐된 공간이라는 특성상 접근성이 떨어져 화재의 진압이 매우 어렵다. 선내 화재의 신속한 진압이 실패할 경우 선박과 화물의 막대한 재산상 손실을 입힐 뿐만 아니라 환경오염 및 선원의 사망사고로까지 이어지게 되며 이와 같은 사례가 해

다 지속적으로 발생하고 있다.

이와 같은 해상 화재를 진압하기 위해 국제해사기구(IMO)는 국제해상인명안전협약(SOLAS)에 따라 고정식 CO<sub>2</sub> 소화설비를 선박에 필수적으로 탑재하도록 하고 있으며<sup>(1)</sup>, 미국의 경우 자국의 해양 안전과 해양 오염 방지를 위해 별도의 소화설비 형식승인 절차를 강제화(2017년) 함에 따라 더욱 강력한 해양 안전 규제를 시행하고 있다<sup>(2,3)</sup>. 이에 따라 미국 국적선에 탑재되는 고정식 CO<sub>2</sub> 소화설비는 반드시 USCG 형식승인을 득해야만 선박에 탑재할 수 있으나 2022년 현재까지

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical IT Convergence Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Professor  
E-mail : cjr@kmou.ac.kr

\* Member, KOMERI, Senior Researcher / Department of Mechanical IT Convergence Engineering, Korea Maritime & Ocean University

\*\* KOMERI, Principal Researcher / Korea Maritime & Ocean University  
\*\*\* NK Co., Ltd., Senior Researcher

# A part of this paper is presented at the KSNVE 2022 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Seon Jun Jang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

아시아에서 고정식 CO<sub>2</sub> 소화설비에 대한 USCG 승인 사례가 전무하다. 국내 제조사에서는 수년간 USCG 형식승인을 받기 위한 인증을 진행 중이나 까다로운 인증 절차와 시험비용, USCG에서 적용 중인 UL 2127 규격<sup>(4)</sup>에 따른 엄격한 성능을 요구하는 시험으로 인하여 인증 획득에 많은 어려움을 겪고 있다.

특히 진동시험의 경우 국제선급협회(IACS) 기준인 UR E10 standard<sup>(5)</sup>의 형식승인 기준 및 미해군규격 MIL-STD-167-1A(Type I)<sup>(6)</sup>의 함정 탑재장비에 대한 진동시험 기준보다 엄격한 내진동 성능을 요구하고 있어 부적합의 가능성이 매우 높다. 따라서 인증 획득을 위한 공진 회피 설계와 품질 신뢰성 확보가 반드시 필요하다. 또한 Fig. 1과 같이 대규모 소화 시스템 전체에 대한 시험을 수행할 수 있는 시험 설비가 존재하지 않는 관계로 이를 분리하여 시험할 수 있는 모듈화 시험 방안이 필요하지만 규격 내 명시되어 있지 않아 구체적인 시험 절차에 대한 개발과 연구가 필요하다.

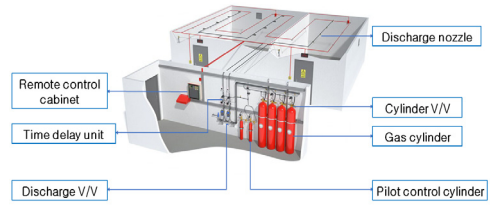
이 연구에서는 고정식 CO<sub>2</sub> 소화설비의 USCG 기준 내진동 성능을 만족하기 위한 시험 절차 개발과 내진동 성능 향상 방안을 다루었다. USCG 형식승인 규격인 UL 2127의 진동 조건을 분석하고, 대형 소화설비를 시험 단위로 모듈화한 구체적인 시험 방안을 제시하였다. 또한 가장 취약한 구조인 실린더 모듈의 동특성 분석 및 시험을 통해 공진 회피 방안을 연구하였으며 최종적으로 USCG 진동시험 기준에 충족되는 결과를 도출하였다.

## 2. USCG 형식승인 진동시험 방안

### 2.1 시험 방법

USCG 형식승인 진동시험은 UL 2127 edition 3 (2017) 규격에 따라 수행한다. 일반적으로 시험은 UL 미국시험소에서 진행하지만 시험체의 크기, 지정학적인 위치 및 비용적인 부분을 고려하여 UL 승인 및 3자 입회하에 국내시험소에서 진행하였다.

진동시험은 Table 1의 진동가진기를 사용하여 시료를 좌우(X), 전후(Y), 상하(Z) 방향별로 고정한다. 시료에 정현파 가진을 통하여 공진주파수를 찾고 최대 공진점에서 내구시험을 진행하는 방식으로 진행한다. 주파수 범위는 (10 ~ 60) Hz이며, 2 Hz 간격으로 주파수당 5 분 동안 가진하여 최대 공진점을 찾는다. 이때



(a) Diagram of extinguishing system



(b) Layout on a ship

Fig. 1 Compositions of fixed CO<sub>2</sub> fire-extinguishing system

Table 1 Test equipment

Equipment	Specification & type	
	Max. sine force	289 kN
	Max. payload	5 ton
	Table size	(2000 × 2000) mm
	Useful frequency	(2 ~ 1700) Hz
	Max. sine force	70 kN
	Max. payload	1 ton
	Table size	(1500 × 1500) mm
	Useful frequency	(2 ~ 2300) Hz
	Max. sine force	30 kN
	Max. payload	500 kg
	Table size	(1200 × 1200) mm
	Useful freq.	(2 ~ 2300) Hz

공진주파수는 식 (1)과 같이 진동시험기의 입력 범위  $D(f)_i$ 에 대한 시료 각 위치의 모니터링 센서에서 측정된 출력 범위  $D(f)_o$ 사이의 전달함수  $T(f)$ 에 의해 결정된다. 공진이 존재할 경우 최대 공진주파수에서, 존재하지 않을 경우 60 Hz에서 120분간 진동 내구시험을 실시한다.

$$T(f) = D(f)_o / D(f)_i \tag{1}$$

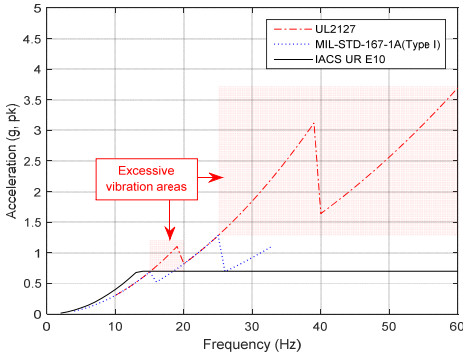


Fig. 2 Comparison of vibration test conditions

Table 2 Amplitudes of vibration tests

Test standard	Frequency (Hz)	Displacement (mm, pk-pk)	Acceleration (g, 0-pk)
UL2127 (2017)	10 ~ 19	1.52	0.3 ~ 1.1
	20 ~ 39	1.02	0.8 ~ 3.1
	40 ~ 60	0.51	1.6 ~ 3.7
MIL-STD-167-1A (type I) (2005)	4 ~ 15	1.52	0.1 ~ 0.7
	16 ~ 25	1.02	0.5 ~ 1.3
	26 ~ 33	0.51	0.7 ~ 1.1
IACS UR E10 (2018)	2 <sup>1/3</sup> ~ 13.2	2.0	0.01 ~ 0.7
	13.2 ~ 100	-	0.7

2.2 진동 가속도 비교

선박 및 함정의 진동시험 규격 중 부적합이 많이 발생하는 MIL-STD-167-1A (type I) 및 IACS UR E10의 진동 조건을 UL2127 시험조건과 함께 가속도 값으로 비교하여 Fig. 2 및 Table 2에 나타내었다.

UL2127 조건의 최대가속도 값은 3.7 g로써 IACS 규격에 비해 5.3배 이상 높은 가속도 조건이며, 미해군 규격과 비교했을 시 16 Hz ~ 20 Hz 영역과 25 Hz 이상의 영역에서 상대적으로 높은 진동값으로 가진함을 알 수 있다. 공진이 16 Hz 이상에서 발생할 경우 과도한 가속도 값이 인가되어 시료의 파손 및 변형의 가능성이 매우 높을 뿐 아니라, 공진이 발생하지 않을 경우 또한 60 Hz에서 최대 가속도인 3.7 g의 내구 시험을 견뎌야하는 조건이므로 전체 시험 주파수 범위를 고려한 내진동 설계가 필요하다.

2.3 시스템 모듈화 방안

해당 소화설비는 선박 전구역을 대상으로 설치되는 대규모 시스템이며, 또한 선박 규모에 따라 수십개 이

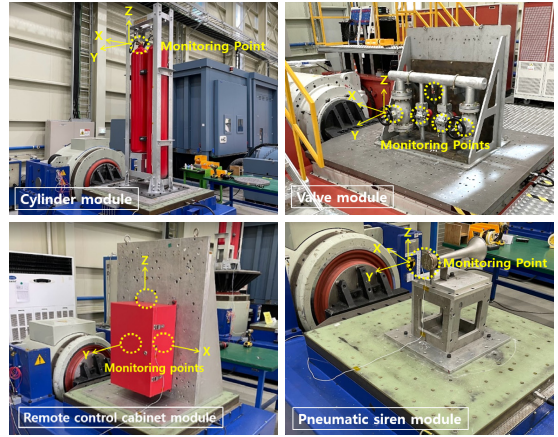


Fig. 3 Test setup of modules for vibration test

Table 3 Specification of CO<sub>2</sub> cylinders for the vibration test

Cylinder capacity (L)	CO <sub>2</sub> filling ratio	Weight(total) (kg)	Storage pressure (MPa)
68	0.67	130	5.8
82.5	0.67	148	5.8

상의 CO<sub>2</sub> 가스 실린더가 결합된 형태로 소화설비 전체 시스템에 대한 진동시험이 불가능 하다. 따라서 전체 소화 시스템 중 핵심 구성품을 모듈화 하는 방안이 필요하지만 시험 규격에서는 구체적으로 명시되어 있지 않다. 형식승인 시험을 진행하기 위하여 전체 설비를 시험 가능한 총 4개의 모듈로 나눈 구성안을 Fig. 3과 같이 제시하였다. 모듈의 구성은 두 개의 실린더가 결합된 실린더 모듈(cylinder module), 배관에 피팅되는 밸브류와 노즐을 결합된 밸브 모듈(valve module), 방출 제어를 위한 RCC 모듈(remote control cabinet module), 마지막으로 대피 알람 발생을 위한 공압 사이렌 모듈(pneumatic siren module)로 나누었다.공압 사이렌 모듈, RCC 모듈 및 실린더 모듈은 공압 라인으로 상호 연결되어 제어되는 구조이지만 모듈화 시 공압 라인 전체를 시료에 구현할 수 없는 관계로 각 모듈로부터 1차적으로 체결되는 동관 니플까지를 시료로 한정하였으며, 최종 모듈화된 시료들은 승인기관 UL로부터 승인을 득하였다.

실린더 모듈의 경우 Table 3과 같이 미국교통부(DOT)의 기준에 따른 표준 압력과 용량의 실린더를 사용하며 CO<sub>2</sub>가 충전된 상태에서 진동시험을 진행한다.

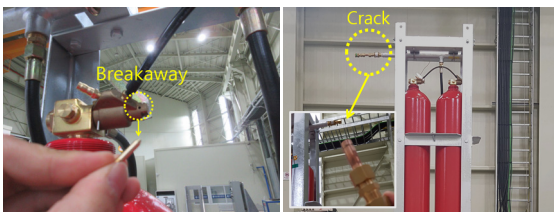
SOLAS 규정에 의거하여 실린더의 CO<sub>2</sub> 충전 비율은 67%를 초과해서는 안되며 소화효율상 허용치 이내 최대 질량으로 충전한다. 따라서 시험 전 완충된 질량 조건을 확인하여 충전량이 고유진동수에 미칠 수 있는 영향을 최소화하도록 한다.

### 3. 진동시험 결과

고정식 CO<sub>2</sub> 소화설비의 4가지 형태의 시험 모듈을 대상으로 진동시험을 수행하였다. 공진주파수 탐색을 통해 각 모듈별 최대 공진점을 찾아 입력 변위에 대한 출력 변위의 비(ratio)를 Table 4에 각 축 방향별로 나타내었다. Y축의 과도한 공진이 발생한 RCC 모듈의 경우 외함 공진에 따른 최대 전달률이 14.8배로 높은 응답이 나타났으나 캐비닛 내부는 진장품이 아닌 동관과 밸브로만 구성되어 있는 단순한 구성품으로 이루어져 부적합 사항이 발생하지 않았다. 밸브 모듈 및 공압 사이렌 모듈 역시 3.1배 이내의 전달률을 보이며 특이사항이 관찰되지 않았으며, 형식승인 진동시험 기준에 적합하도록 설계되어 있음을 확인하였다.

**Table 4** Result of the resonance search test

Module	Maximum resonance point		
	Axis	Hz	Transmissibility
Cylinder	X	12	4.4
	Y	12	4.8
	Z	38	1.3
Valve	X	54	2.8
	Y	60	3.1
	Z	48	2.9
RCC	X	No resonance	
	Y	58	14.8
	Z	No resonance	
Pneumatic siren	X	34	2.5
	Y	20	3.0
	Z	20	2.4



**Fig. 4** Faults of cylinder module during the test

그러나 실린더 모듈의 경우 수평방향 12 Hz의 저주파수 구간에서 발생한 4.4배 ~ 4.8배의 큰 변위 응답으로 Fig. 4와 같이 상부 가스 방출 밸브의 안전핀 이탈 및 동배관의 파손이 발생하였다. 이는 질식사고와 같은 안전사고를 일으킬 수 있는 주요 부적합 사항으로써 공진 회피 설계가 반드시 반영되어야 함을 알 수 있다.

### 4. 실린더 모듈 개선

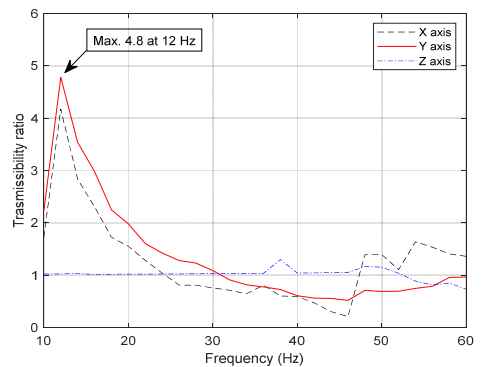
#### 4.1 실린더 모듈 동특성 분석

진동시험기를 이용하여 확인한 실린더 모듈의 축별 초기 진동 응답 특성은 Fig. 5와 같다. 두 개의 실린더 결합 형태가 상부로 길게 솟아있는 구조 특성상 수평방향 X, Y축의 공진에 따른 과도한 응답이 발생하였으며, 최대 변위 증폭비는 Y축 12 Hz에서 4.8배로 나타났다.

12 Hz의 공진 상태에서 각 실린더별 길이방향으로 5 곳에 가속도계를 부착하여 auto spectrum 및 cross spectrum을 측정하였으며, Vibrant사의 ME'scope 소프트웨어로 센서간의 위상 및 진폭값을 애니메이션화하여 Fig. 6에 나타내었다. 공진 상태에서 실린더 상부에 과도한 진동 증폭이 나타남을 알 수 있으며 주요 부속품의 파손원인을 가지적으로 확인할 수 있다.

#### 4.2 공진 회피 방안

시험품의 공진을 회피하기 위한 연구는 탄성 마운트를 이용한 방법, 가진주파수를 변경하는 방법, 시료의 고유주파수를 변경하는 방법 등의 여러 방안이 연구되어 오고 있다<sup>(7-10)</sup>. 실린더 모듈의 경우 자체 기진



**Fig. 5** Transmissibility of the initial cylinder module

력이 없으며, 설계상 마운트가 설치되는 구조가 아니기 때문에 고유주파수를 변경하는 방법으로 접근하였다.

$$w_n^2 = \frac{k}{m} \quad w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [\text{rad/s}] \quad (2)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [\text{Hz}] \quad (3)$$

식 (2), 식 (3)과 같이 고유진동수( $f_n$ )는 시료의 강성( $k$ )에 비례하며 질량( $m$ )에 반비례하는 특성을 이용하여 시험 주파수 범위 회피를 통한 보강안을 세우고 해석을 통해 검증하였다.

실린더 모듈의 공진주파수인 12 Hz에서 고유주파수를 상승시키게 되면 더욱 높은 가속도 조건의 가진 주파수와 공진이 발생하게 되며 상부가 취약한 진동 모드에 따른 파손 가능성이 높아진다. 따라서 상부 주요 부품의 보호를 위해 시료의 강성을 낮추는 방법으로 접근하였으며 시험에서 요구하는 최저 주파수 10 Hz 미만의 영역으로 공진을 회피시키는 방안을 연구하였다. 선박의 레이더 마스트의 경우 선박 기진력과 공진을 피하기 위해 하부 브래킷의 강성을 변경하여 공진을 회피하는 사례를 참고하였으며<sup>(11)</sup>, 구조 개선에 따른 제작비와 입회비용 등의 지연손실을 최소화하고자 사전에 ansys의 modal analysis를 이용하여 해석을 수행하였다.

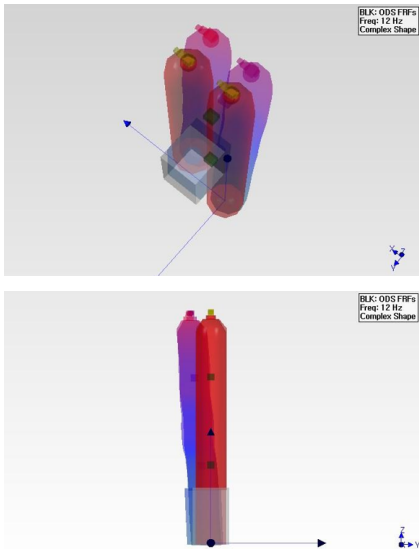
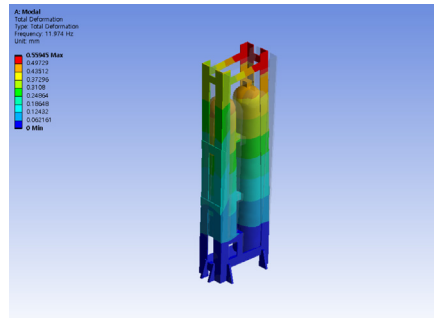
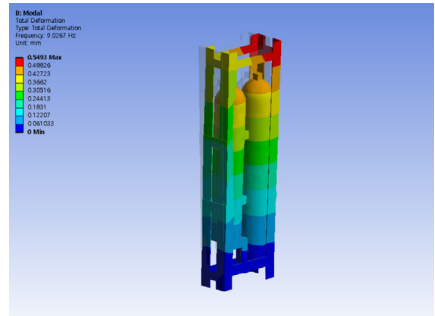


Fig. 6 ODS of the cylinder module during the vibration test (12 Hz)

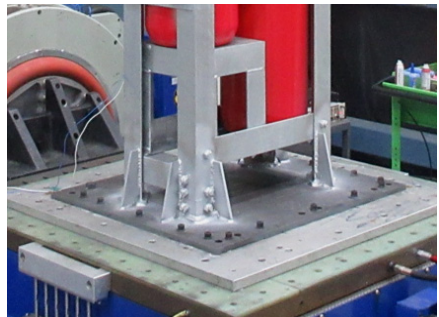


(a) Bracket added (1<sup>st</sup> natural frequency 12 Hz)



(b) Bracket removed (1<sup>st</sup> natural frequency 9 Hz)

Fig. 7 Modal analysis of the cylinder module

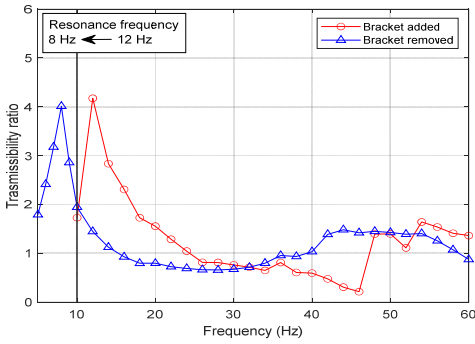


(a) Before (bracket added)

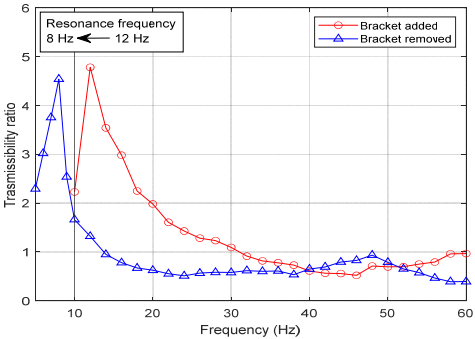


(b) After (bracket removed)

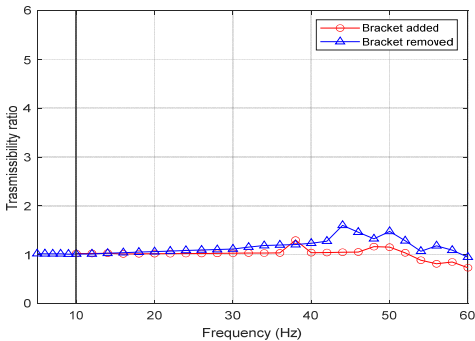
Fig. 8 Comparison before and after the reinforcement



(a) Response of X-axis



(b) Response of Y-axis



(c) Response of Z-axis

**Fig. 9** Transmissibility before and after the reinforcement

실린더 모듈의 하부 강성이 집중되는 프레임 하부 4곳의 브라켓을 제거하였을 시 1차 고유주파수 해석 결과는 Fig. 7에서 보여준다. ODS에서 확인한 모드와 동일한 형상을 보였으며, 브라켓 제거에 따라 시료의 고유주파수는 12 Hz에서 9 Hz로 이동하였다. 고유주파수가 목표 주파수 대역으로 이동하는 경향을 해석

으로 확인한 후 Fig. 8과 같이 구조 변경된 실린더 모듈의 시험을 통해 진동 응답 변화를 확인하였다.

### 4.3 개선 후 진동 응답

진동시험기를 통해 확인한 실제 응답 특성을 개선 전후로 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 구조 변경된 실린더 모듈의 고유주파수 이동을 확인하기 위해 5 Hz ~ 10 Hz 범위에서 1 Hz 간격으로 공진탐색을 추가 수행하였다. 강성 변경을 통해 개선된 모듈의 최대 공진주파수는 수평방향 12 Hz에서 8 Hz로 이동하였으며, 해석결과와 1 Hz의 오차가 발생하였지만 목표 주파수 영역으로 적절하게 이동하였음을 확인하였다. 최대 공진점에서 전달률은 여전히 4배 이상의 응답 특성을 나타냈으나 관심 주파수 대역인 가진 주파수 영역 10 Hz ~ 60 Hz의 범위를 한정하여 분석하였을 시 최대 전달률은 X축 4.4배에서 1.9배로, Y축의 경우 4.8배에서 1.7배로 현저하게 저감되었음을 볼 수 있다. 일반적으로 공진 발생의 기준이 되는 2배 이상의 전달률이 더 이상 발생되지 않았으며 공진 회피 설계가 적절히 이루어졌음을 알 수 있다.

## 5. 결론

이 연구에서는 선박용 고정식 CO<sub>2</sub> 소화설비의 USCG 형식승인을 위한 UL2127 진동시험 규격을 분석하고 시스템의 모듈화 방안을 제시하였다. 각 모듈별 진동가진기 시험을 통해 동특성을 분석하였으며 과도한 응답을 나타낸 실린더 모듈을 대상으로 공진 회피 설계를 진행하였다.

ODS를 통한 실린더 모듈의 동적모드형상을 확인하고 12 Hz의 공진주파수를 시험 최저 주파수인 10 Hz 미만으로 이동시키기 위한 강성 제어 방안을 연구하였다. 해석을 통해 구조 변경안의 1차 고유주파수 이동 경향을 확인하였으며 개선된 시료에 실제 가진 시험을 통해 결과를 확인하였다. 실린더 모듈의 하부 브라켓 제거를 통해 강성을 낮춤으로써 공진주파수는 12 Hz에서 8 Hz로 이동하였으며, 과도한 공진을 나타낸 수평방향의 최대 전달률은 시험 주파수 범위에서 X축 -35%, Y축 -43%로 하향되어 2배 이하의 응답으로 저감되었다. 최종적으로 개선된 구조를 바탕으로 진동 내구시험을 실시하였으며 UL2127의 내진동 기준을 만족하였다.

이 연구를 통해 개발 진행된 고정식 CO<sub>2</sub> 소화설비는 아시아 최초로 USCG 형식승인 진동시험을 통과하였으며, 향후 소화설비 기자재의 국산화에 따른 추가 인증 진행 시 최적화 설계의 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구임(미주시장사업확장을 위한 USCG 형식승인 기준 CO<sub>2</sub> 소화설비 SYSTEM 기술 개발).

## References

(1) Guidance SOLAS Chapter II-2, 2015, Construction - Fire Protection, Fire Detection and Fire Extinction.

(2) MSC Guidelines for Carbon Dioxide Fire Suppression Systems, 2017, Procedure Number: E1-06.

(3) 46 CFR 162.161, 2012, Fixed Clean Agent Fire Extinguishing Systems.

(4) Underwriter Laboratories, Inc., UL 2127 Edition 3, 2017, Standard for Safety for Inert Gas Clean Agent Extinguishing System Units.

(5) IACS UR E10 Rev.7, 2018, Test Specification for Type Approval, pp. 4~5.

(6) US Department of Defense, 2005, Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment (TYPE-I Environmentally and TYPE-II Internally Excited), MIL-STD-167-1A, pp. 4~8.

(7) Yun, D. Y., Jeon, B. G., Jung, W. Y., Chang, S. J. and Shin, Y. J., 2019, Analysis of Anchorage Behavior Characteristics of the Electrical Cabinet using Shaking Table Tests, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 43~50.

(8) Kim, C. J., 2019, Response Analysis of Supported System with Mount Module Including Basement Mass-block, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 51~56.

(9) Song, A. Y., Yim, S. H., Kwon, B. O., Han, D. H. and Jung, H. J., 2021, Structural Design through Test and Analysis of Structure Equipped with Vibration Isolator System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 589~596.

(10) Kim, J. D. and Yoon, M. C., 2021, Characteristics of Forced Vibration System according to the Frequency of External Exciting Force, Journal of Convergence for Information Technology, Vol. 11, No. 9, pp. 130~137.

(11) Park, J. H., Lee, D. Y., Yang, J. W. and Song, C. Y., 2019, Design Enhancement to Avoid Radar Mast Resonance in Large Ship using Design of Experiments, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 33, No. 1, pp. 50~60.



**Hoyeon Jeong** received a B.S. in Department of Marine Engineering from Mokpo National Maritime University, Korea, in 2009. He then received M.S. degree in Weapon System Engineering from Pukyong National University, Korea, in 2020.

He is currently a Ph.D. candidate in the National Korea Maritime & Ocean University, Korea and a Senior Researcher in the field of sound, vibration and shock at Korea Marine Equipment Research Institute(KOMERI).



**Jongrae Cho** received a B.S. from Busan National University, Korea, in 1982. He then received an M.S. and Ph.D. from KAIST, Korea, in 1984 and 1993, respectively. He is currently a professor at the Department of Mechanical

Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea. His research interests include metal forming analysis, nonlinear analysis, structural and seismic analysis, and design of plant equipments based on codes.