

전자장비 구조기인소음 저감방안의 실험적 검토

An Experimental Analysis of the Structure-Borne Noise Reduction on Electrical Equipment

이성현[†], 서윤호, 김원형*, 최영철**

(Seong-Hyun Lee[†], Yun-Ho Seo, Won-Hyoung Kim*, Young-Cheol Choi**)

한국기계연구원 시스템다이나믹스연구실, *삼성탈레스, **국방과학연구소

(접수일자: 2013년 12월 27일; 수정일자: 2014년 2월 5일; 채택일자: 2014년 2월 20일)

초 록: 본 논문은 전자장비의 구조기인소음 (structure-borne noise)의 실험적 저감방안 검토에 대한 내용을 다루었다. 수냉식 전자장비의 유일한 소음원인 냉각장치를 mock-up으로 제작하여 소음 특성을 파악하였으며, 전원에 의한 영향, 구조체 강성에 의한 영향, 팬 고정부위의 절연에 의한 효과, 마운트의 공진주파수가 미치는 영향 등에 대한 검토를 수행하였다. 이를 반영하여 제작된 전자장비 프로토타입의 소음 특성을 파악하였으며, 구조기인소음을 저감시키기 위하여 작동회전수(rpm) 조합, 마운트 종류 및 설치방법 등에 대하여 검토하였다. 냉각팬 작동 주파수의 1차, 4차 성분에 의하여 소음이 크게 발생하며, 구조체 강성증가, 팬 고정부위 절연, 마운트 공진주파수 저하, 작동회전수 조합, 마운트 선정방법 등에 의하여 전자장비의 구조소음을 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

핵심용어: 전자장비, 구조기인 소음, 냉각팬, 소음저감

ABSTRACT: In this paper, the structure-borne noise reduction on electrical equipment is discussed by the experimental analysis. The water cooling system in electrical equipment is the only noise source, so the mock-up was made to measure noise characteristics. Effects of power supply, stiffness, isolation of noise source and natural frequency determined by resilient mounts are investigated using the mock-up. The console prototype was made referring to noise reduction technique by the mock-up. The structure-borne noise level of a console prototype was measured and some experiments to reduce the noise was undertaken. The 1st and 4th harmonics of operating frequency of cooling fans causes highest structure-borne noise levels. The control of operating speeds of several DC cooling fan groups was tried. Also types and installation layouts of resilient mounts were investigated. To reduce structure-borne noise, followings can be applied: increase of stiffness, isolation of source, decrease of natural frequency of mount, combination of operating speed of fans, selection of mounts, and so on.

Keywords: Electrical equipment, Structure-borne noise, Cooling fan, Noise reduction

PACS numbers: 43.50. Gf

1. 서 론

수중함의 수중방사소음은 상대방에게 자함의 존재를 노출시킬 가능성을 높이고 자함의 탐지성능을 저하시킬 수 있는 생존성과 직결되는 중요한 요소이다. 수상함의 경우에는 주추진 장비를 포함한 소수의 장비의 소음이 수중방사소음에 영향을 미치지만,

수중함의 경우에는 주추진 장비 이외의 거의 모든 장비들의 공기기인 소음 (air-borne noise, 이하 공기소음), 구조기인 소음 (structure-borne noise, 이하 구조소음)이 선체를 통하여 전달되어 수중방사소음을 발생시킬 수 있다. 따라서 수중함에 탑재되는 장비들은 엄격한 소음기준으로 관리하게 되며, 전투체계 및 소나체계 등의 전자장비들도 예외는 아니다. 공기소음은 장비에서 발생하여 공기 중으로 전달되는 소음이며 음압레벨 혹은 음향파워레벨로 정의할 수 있다. 구조소음은 장비에서 구조물로 전달되는 진동

[†]Corresponding author: Seong-Hyun Lee (sh.lee@kimm.re.kr)
Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea
(Tel: 82-42-868-7895, Fax: 82-42-868-7440)

에 의하여 발생하는 소음을 의미하며, 일반적으로 진동 절연용 마운트 상단의 가속도레벨로 정의한다.

합정에 탑재되는 소음원 장비에 대한 공기소음 및 구조소음의 측정절차, 방법 및 장비별 최대허용 소음수준은 합정 설계 건조 기준^[1,2] 및 미해군 규격^[3,4]에 명시되어 있다. 상기의 기준에는 조선소와 장비 제작사 간의 계약에 의하여 공기소음 및 구조소음 기준을 설정할 수 있으며, 특별한 계약이 없는 경우에는 공기소음은 1/1 옥타브 밴드로, 구조소음은 1/3 옥타브밴드로 장비별 권장 기준을 사용하도록 제시하고 있다. 본 연구에서 사용된 수중함용 전자장비의 경우에는 공기소음과 구조소음 모두 1/3 옥타브 밴드로 허용 기준이 정해져 있으며, Fig. 1은 본 장비의 구조소음 허용기준을 나타내고 있다. 허용오차 (tolerance)는 3 dB이다. 본 연구에서는 허용기준을 기준으로 16~10,000 Hz 밴드에 대한 저감방안 검토를 수행하였다.

수상함용 전자장비의 경우에는 공기소음 및 구조소음에 대한 관리기준이 없어서 공랭식으로 설계 및 제작되고 있으나, 수중함용 장비의 경우에는 엄격한 관리기준을 만족시키기 위하여 수냉식으로 검토되고 있다. 수냉식 전자장비의 유일한 소음원은 내부의 열을 식히기 위한 냉각장치이며, 냉각장치는 차가운 냉매가 흐르는 배관과 공기를 순환시키기 위한 냉각팬으로 구성된다. 본 연구에서는 냉각장치에서 발생하여 전자장비의 하단으로 전달되는 구조소음을 검토하기 위하여, 수냉식 냉각장치 mock-up에 대한 실험적 검토를 수행하였다. 이를 반영하여 제작된 콘솔 프로토타입에 대해서 구조소음 저감방안을 검토하여 정리하였다.

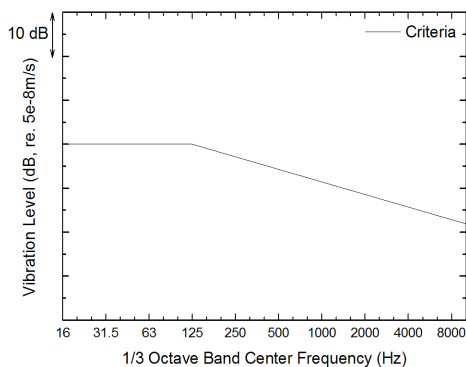


Fig. 1. Criteria of the structure-borne noise.

II. 수냉식 냉각장치 Mock-up

전자장비의 유일한 소음원으로 작동하는 냉각장치를 시험용 mock-up으로 제작하여 구조소음을 측정함으로써, 주요 소음원에 대한 특성을 파악하였다. 구조소음을 측정하기 위하여 사용된 장비를 Fig. 2에 보이고 있으며, 다음과 같다: Accelerometer(PCB, Type 352C33), FFT Analyzer(B&K, Pulse labshop with 17 channel Pulse Data Acquisition Unit Type 3560-C), Calibration Exciter(B&K, Type 4294).

Fig. 3은 수냉식 냉각장치 mock-up을 보이고 있으며, 하부에 4개의 고무마운트를 설치하고 마운트 상부에서 3축에 대한 구조소음을 측정하였다. 본 냉각장

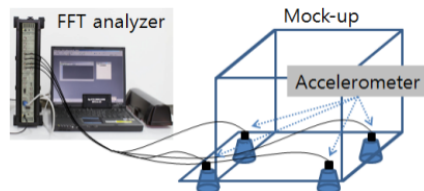
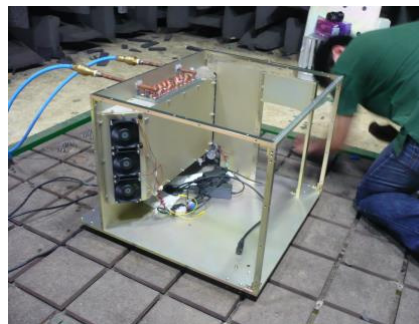


Fig. 2. Measurement setup.



(a)



(b)

Fig. 3. The water cooling system mock-up (a) before removing case, (b) after removing case.

치에는 4극 모터를 사용한 6대의 냉각팬이 사용되었으며, 냉각장치의 입구와 출구에 각각 3대씩 설치되어 있다. 구조소음에 관한 함정 설계 건조 기준^[2] 및 미해군규격^[4]은 정상작동 조건에서 장비의 탄성마운트 상단에서 3축에 대하여 측정하도록 되어있다. 모든 측정점의 모든 방향에 대하여 기준을 만족하도록 명시하고 있으나, 본 논문에서는 모든 측정값을 에너지 평균하여 나타내었다.

전원의 종류에 따른 영향을 검토하기 위하여 교류 및 직류 전원을 공급하며 측정을 수행하였다(Fig. 4 참조). 모든 팬은 설계회전속도인 3500 rpm으로 작동시켰으며, 4극 모터의 특성상 팬 회전 속도의 1차, 4차 성분에서 구조소음이 크게 발생하게 된다. 교류 전원 공급 시에 직류전원에 비하여 냉각팬 작동회전수의 1차, 4차 성분이 낮아지면서 레벨이 커지는 경향을 보이고 있다. 교류전원의 경우, 6대의 팬이 각각 다른 회전속도로 작동한다는 것을 의미하며, 이

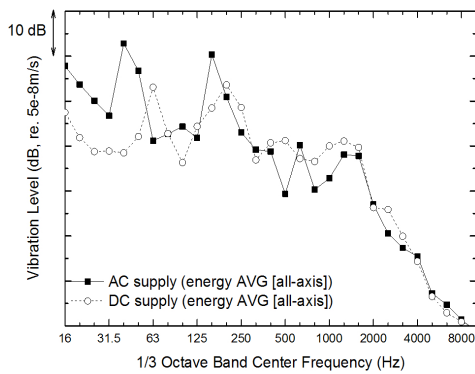


Fig. 4. Measured structure-borne noise of the mock-up with AC/DC supply.

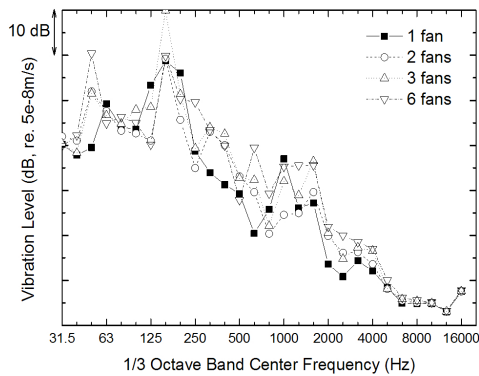


Fig. 5. Measured structure-borne noise of the mock-up for number of operating cooling fans.

를 확인하기 위하여 냉각팬의 작동 대수를 변경하면서 구조소음을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 교류 전원을 공급하는 경우 냉각팬의 작동 대수에 따라서 측정결과와 peak가 변화하는 것을 확인하였으며, 이로부터 본 연구에서는 직류전원만을 이용하여 전자장비의 구조소음을 측정하였다.

목업의 유일한 소음원인 냉각팬 고정부위절연에 의한 효과를 검토하기 위하여 팬 고정용 판과 구조물 사이에 3 mm 제진 시트를 삽입하고 테이프로 고정된 후에 구조소음 레벨을 측정 및 비교하였다(Fig. 6 참조). Fig. 7에서 보이는 바와 같이 63, 200 Hz 밴드에서 약 10 dB 감소하는 것을 확인하였다.

목업의 케이스를 결합하는 것에 따른 효과를 Fig. 8에 나타내고 있으며, 케이스를 고정함에 따른 강성 증가로 인하여 63, 200 Hz 밴드에서 구조소음 레벨이 크게 감소함을 확인하였다. 구조체 자체의 강성 증가에 의한 효과를 구현하기 위하여 Fig. 9와 같이 목업의 두께를 보강하고 지지부위를 보강하여 측정을



Fig. 6. The isolation of the cooling fan assembly.

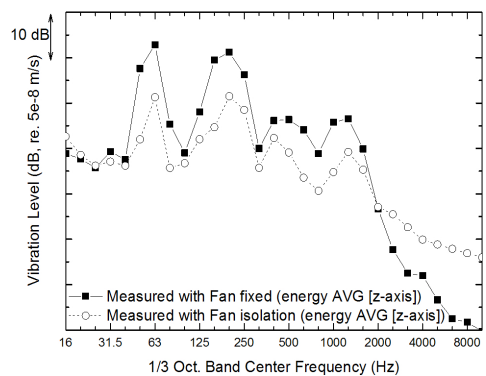


Fig. 7. The influence of a fan assembly isolation on the structure-borne noise the mock-up.

수행하였다. 30 kg 이었던 보강 전의 목업이 보강 후에는 54 kg으로 증가하였다. Fig. 10에서 보이는 것처럼 보강 후에 500 Hz 이하의 대역에서 최대 10 dB 감소하는 경향을 보인다.

전자장비의 하부에 설치되는 마운트의 고유진동수에 의한 영향을 검토하기 위하여 수상함용 장비에 널리 사용되는 와이어로프 마운트(ENIDINE社, WR12-800-08)를 설치한 후에 보강된 목업에 대한 구조소음

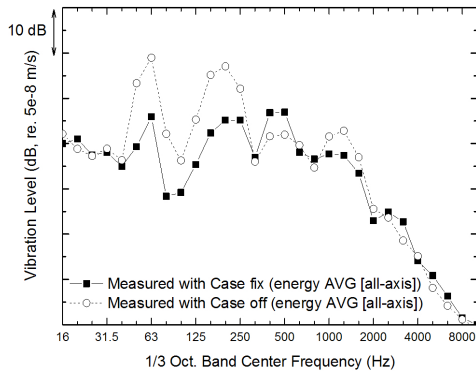


Fig. 8. The influence of a case fixing condition on the structure-borne noise of the mock-up.

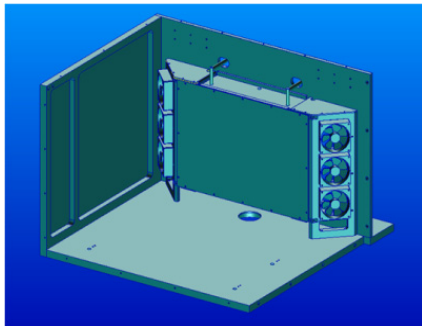


Fig. 9. 3-D model of the modified mock-up.

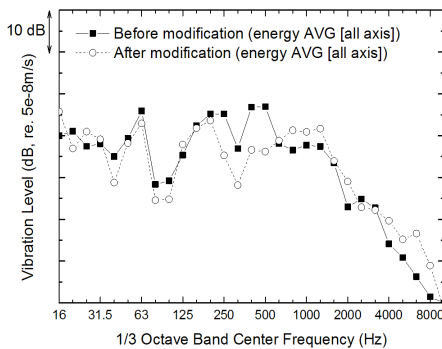


Fig. 10. The influence of a modification on the structure-borne noise of the mock-up.

측정을 수행하였다. 목업의 자체 무게가 54 kg이며, 정적처짐(static deflection)으로 계산되는 상기 마운트에 의한 고유진동수는 약 11 Hz이다. 목업의 내부 및 외부에 약 80kg의 질량을 추가하여 고유진동수를 약 6 Hz로 낮춘 후 측정결과를 비교하였다. Fig. 11은 질량 추가 후 측정하는 상황을 보이고 있으며, Fig. 12는 질량 추가 전과 후의 구조소음 측정결과를 보이고 있다. 63 Hz 이하의 대역에서 저감됨을 확인할 수 있다.

진동 절연 시스템의 가장 단순한 예는 Fig. 13에 보이고 있는 1 자유도 모델이며, 상하방향으로만 움직

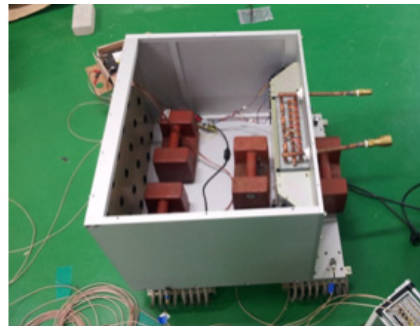


Fig. 11. The installation of the added mass (80 kg) on the modified mock-up.

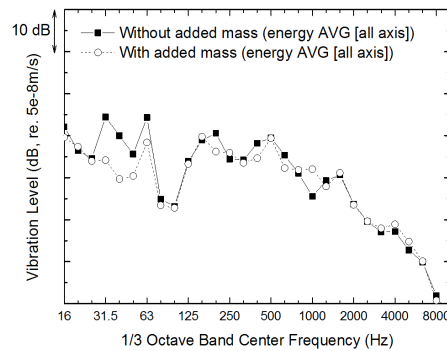


Fig. 12. The influence of the added mass (80 kg) on the structure-borne noise of the modified mock-up.

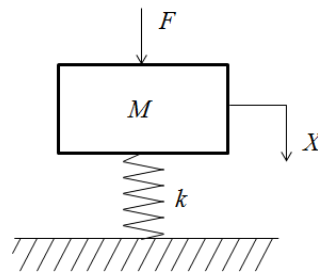


Fig. 13. A single degree of freedom system.

이며 댐핑은 무시된다. 이러한 1자유도 모델은 지지하고 있는 바닥 구조의 임피던스가 절연용 마운트에 비하여 매우 큰 경우에 적용 가능하다. 마운트 상부와 하부의 진동레벨의 차이로 정의되는 진동전달율(vibration transmissibility)은 가진주파수와 마운트의 고유진동수의 비가 1.4배 이상이면 감소하기 시작하며, $1/f_d^2$ 의 비율로 감소한다고 알려져 있으며, 진동전달율이 10%이하가 되려면 가진주파수와 고유진동수의 비가 최소 3.5 이상이어야 한다고 알려져 있다.^[5] 본 연구의 경우와 같이 마운트 하단의 레벨보다는 마운트 상부의 레벨을 저감시켜야 하는 경우에도, 마운트에 의한 고유진동수를 낮추는 것이 중요함을 확인하였다.

III. 콘솔 프로토타입

2장에서 설명한 수냉식 냉각장치 목업에 대한 측정결과를 참고하여 콘솔프로토타입을 제작하였다. 콘솔의 구조소음을 와이어로프 마운트 상부에서 측정하였으며, 측정 상황 및 내부 팬 설치현황은 Fig. 14에 나타내고 있다. 정상작동조건인 좌측 및 우측 팬이 모두 3500 rpm으로 작동하는 경우, 1차, 4차, 8차 성분인 63, 250, 500 Hz 밴드에서 구조소음이 크게 측정되었다(Fig. 15참조). 16 Hz 밴드의 경우 와이어로프 마운트가 x축을 따라 나란히 배치됨으로 인하여 y방향으로 공진이 발생하여 크게 증폭되는 것으로 짐작된다. 1장에서 설명한 전자장비의 구조소음기준(Fig. 1)과 비교하면 250 Hz 밴드에서 약 5.5 dB 초과

하는 수준이다.

가장 크게 구조소음이 측정되는 250 Hz 밴드 레벨 저감을 위하여 냉각팬의 작동회전수를 두 그룹(좌측 팬은 3000 rpm, 우측팬은 3500 rpm)으로 나누어 작동시키며 측정된 구조소음 결과를 Fig. 15에 기존의 결과와 비교하고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이, 작동회전수를 두 그룹으로 분리하게 되면 4차 성분이 200, 250 Hz 밴드로 나뉘게 되어 레벨이 낮아지게 된다. 구조소음기준과 비교하면, 200, 250 Hz 밴드에서 각각 0.8, 2.7 dB 초과한다. 구조소음기준의 경우 허용오차인 3 dB를 고려하면 기준을 만족하는 수준이다. 다수의 냉각팬의 작동회전수를 제어함으로써 구조소음 기준을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

마운트 종류 및 설치방향에 따른 영향을 검토하기 위하여, 유사한 탄성계수를 갖는 2종의 마운트에 대하여 다음과 같은 조건에 대하여 구조소음 측정하였다:

1. 고무 마운트 일렬 배치,
2. 와이어로프 마운트 일렬 배치,
3. 와이어로프 마운트 마름모 배치.

각각의 마운트 설치조건은 Fig. 16에 보이고 있으며, 각 조건에 따른 구조소음 측정결과를 Fig. 17에 나타내었다. 와이어로프 마운트 일렬 배치 시 16 Hz 밴드에서 크게 측정되고 있으며, 와이어로프 마운트 마름모 배치 시 및 고무마운트 설치 시에는 이러한 경향이 사라진다. 전자장비 구조소음 기준과 비교하면, 고무마운트 설치시 250 Hz 대역에서 0.8 dB 초과하며, 와이어로프 설치시 250, 500 Hz 대역에서 약 3, 2 dB 초과한다. 측정 허용오차를 고려하면 와이어로



Fig. 14. Measuring positions for the console prototype.

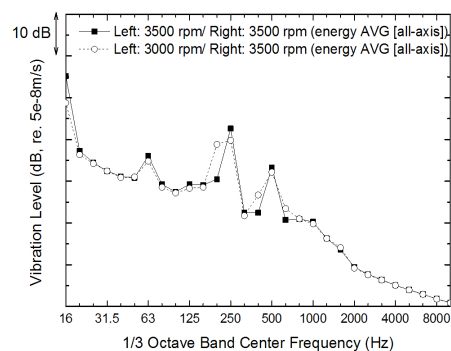


Fig. 15. Measured structure-borne noise of the console prototype with different operating conditions.

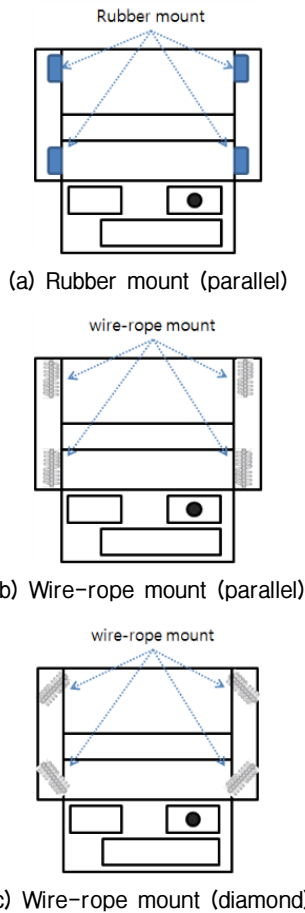


Fig. 16. Installation of isolators for the console prototype.

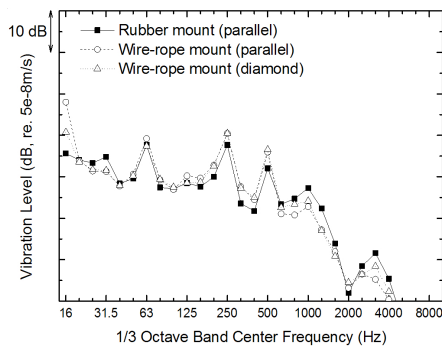


Fig. 17. Measured structure-borne noise of the console prototype with different mount installation conditions.

프 마운트 일렬배치 조건을 제외하면 허용기준을 모두 만족하는 수준이다. 고무마운트 설치시 160~630 Hz 대역에서는 낮게 측정되었으며, 630 Hz 이상의 대역에서는 크게 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전자장비의 구조소음 저감을 위하여 수냉식 냉각장치 목업 및 콘솔 프로토타입에 대한 다양한 조건에서의 구조소음을 측정하였으며, 구조소음 저감방안에 대한 실험적인 검토를 수행하였다. 이로부터 도출된 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 냉각용 팬 조립체에 교류 전원을 공급하게 되면 작동 부하에 따라 각각의 팬의 작동회전수가 변화하며, 이로 인하여 구조소음 레벨이 커지는 것을 확인하였다.
- 2) 목업의 케이스를 고정한 경우에 강성증가에 따른 효과로 인하여 고정하지 않은 경우에 비하여 팬 작동회전수의 1차, 4차 성분에서 구조소음이 약 10 dB 감소하는 경향을 보였다.
- 3) 팬 조립체 고정부위를 절연하는 경우 팬 작동회전수의 1차, 4차 성분에서 구조소음이 약 10 dB 감소하는 것을 확인하였다.
- 4) 구조체의 두께를 키우고 지지부위를 보강하여 강성을 증가시킴으로써, 구조소음이 500 Hz 이하의 대역에서 최대 10 dB 감소하였다.
- 5) 구조체의 무게 증가를 통해 마운트의 고유진동수를 11 Hz에서 6 Hz 대역으로 감소시킨 후 63 Hz 이하의 대역에서 구조소음이 저감되는 것을 확인하였다.
- 6) 전자장비의 유일한 소음원인 냉각팬이 4극 모터로 구동됨에 따라 구조소음의 경우 작동회전수의 4차 성분이 크게 측정되며, 작동회전수를 두 그룹으로 분리하여 작동시킴으로서 레벨을 낮출 수 있음을 확인하였다.
- 7) 와이어로프 마운트를 설치하는 경우, 설치 방향에 따라서 측정결과가 영향을 받으며, 일렬로 배치하는 경우 마운트 설치방향과 수직인 방향으로의 공진에 의하여 16 Hz 밴드에서 크게 측정되며, 마름모 형태로 배치하는 경우에는 이러한 영향이 사라진다. 고무마운트 설치시 160~630 Hz 대역에서는 와이어로프 마운트에 비하여 낮게 측정되었으며, 630 Hz 이상의 대역에서는 크게 측정되었다.
- 8) 냉각팬의 제어방식이 가변방식이 아니어서,

각 냉각팬의 작동회전수입력값의 조합에 따라서 실제 작동회전수가 변하게 되는데, 이로 인하여 구조소음이 영향을 받는 것으로 짐작되며, 따라서 열효율 및 구조소음 관점에서 최적화된 위치별 팬의 작동회전수 설정이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국방과학연구소의 지원을 받아 수행한 연구과제 결과 중 일부이다.

References

1. Republic of Korea Navy, *Criteria for Airborne Noise Acceptance and Measurements of Shipboard Equipment* (2009).
2. Republic of Korea Navy, *Criteria for Structureborne Vibratory Acceleration Acceptance and Measurements of Shipboard Equipment* (2009).
3. MIL-STD-740-1(SH), *Airborne Sound Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment*, NAVSEA, 1986.
4. MIL-STD-740-2(SH), *Structureborne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment*, NAVSEA, 1986.
5. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *2005 Handbook: Fundamentals* (2005), pp. 7.19-7.21.

저자 약력

▶ 이 성 현 (Seong-Hyun Lee)



1999년 2월: KAIST 기계공학과 학사
2001년 2월: KAIST 기계공학과 석사
2006년 2월: KAIST 기계공학과 박사
2009년 10월: 삼성물산 건설부문
2010년 1월 ~ 현재: 한국기계연구원 선임연구원

▶ 서 윤 호 (Yun-Ho Seo)



2003년 2월: 연세대학교 기계공학과 학사
2009년 2월: KAIST 기계공학과 박사
2012년 6월: 현대중공업 기술개발본부
2012년 7월 ~ 현재: 한국기계연구원 선임연구원

▶ 김 원 형 (Won-Hyoung Kim)



2002년 2월: 영남대학교 기계공학부 학사
2002년 8월 ~ 현재: 삼성탈레스 전문연구원

▶ 최 영 철 (Young-Cheol Choi)



1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 학사
1993년 2월: 경북대학교 전자공학과 석사
1993년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원