

함정 격실에 적용되는 흡음재와 잔향시간에 따른 실내 소음 분석

Investigation of the Indoor Noise of Naval Vessel according to the Sound Absorption and Reverberation Time in a Cabin

한형석†·박미유*·조흥기*·김중길*·임동빈*·손윤준*

Hyung-Suk Han, Mi-Yoo Park, Heung-Gi Cho, Joong-Gil Kim, Dong-Been Im and Yoon-Jun Son

Key Words : Reverberation time(잔향시간), Room constant(룸 상수) Impact sound source(충격음원)

ABSTRACT

The sound field can be classified to the direct and reverberant sound field. If the sound absorption material in a room is not applied sufficiently, the reverberant sound field increases and the sound pressure in a room also increases when the sound source exists in a room. Therefore, the reverberation time should be controled in order to reduce the reverberant sound as well as sound pressure level in a room. Even though the reverberation time is specified and researched widely in architectural engineering, it is rarely performed in a marine engineering. Therefore, in this research, the reverberation time in a navel vessel is researched related to the noise reduction in a cabin

1. 서 론

실내 공간 내에 소음원이 존재할 때 실내의 음장은 음원에서 발생하는 직접 음장(Direct field)과 방의 특성에 따른 잔향 음장(Reverberation field)으로 구성된다. 방의 내부 벽 및 바닥이 강판으로 구성되어 있는 선박의 경우 일반 건축물에 비해 잔향시간이 크며, 그 결과 룸 상수(Room Constant)값이 작아져 잔향 음장이 커지므로 실내 소음은 커질 수밖에 없다. 따라서 침실 등 승무원들이 거주하는 격실뿐만 아니라 수중정보실과 같이 정숙이 요구되는 주요 격실에 대해서는 외부로부터 소음을 방음하기 위한 설계적 고려뿐만 아니라 내부 소음원에 의한 잔향음을 최소화 시킬 수 있도록 내장재의 설계 또한 매우 중요하다.

따라서 이 연구에서는 현재 운용중인 특정 함정의 실내 격실 잔향시간 조사를 통해 실내 격실에 적용되어 있는 흡음재 및 마감재의 종류에 따른 잔향시간을 측정하고, 잔향 음장이 함정의 실내 소음에 미치는 영향도를 분석하고자 한다.

일반적으로 건축물의 경우 잔향시간에 대한 조사가 활발히 이루어지고 있으며[1~3] 잔향시간에 따른 실내 음향

설계 반영이 적극적으로 이루어지고 있다. 함정의 경우 일반 건축물의 사무실 등과는 다르게 실내에 각종 장비들이 설치되므로 실내에 큰 소음원이 존재하며 실내의 흡음면적에 따라 실내 소음의 크기가 달라진다. 또한 해군 함정의 승조원들이 실내 소음에 대해 이전보다 더 정숙함을 요구하고 있지만 아직까지 함정의 실내 음장에 대한 세부적인 고려가 뚜렷하게 이루어지지 않고 있다.

이 연구에서는 최근 건조된 해군 함정에 대해 각 격실의 잔향시간 측정하고 함정 격실의 실내 내장재에 따라 잔향시간이 얼마나 차이 나는지 파악해보고자 한다. 또한 잔향시간을 통해 계산된 룸 상수를 가지고 실내의 소음원에 대해 실내 잔향시간에 따라 내부 소음크기가 얼마만큼 달라지는지 분석해 보고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험 방법

이 논문에서 잔향시간은 KS F 2864[4-5]에 따라 충격음에 대한 역 시간적분으로 감쇠곡선을 산출하는 충격응답 적분법을 이용하여 식 (1)[4]로부터 산출하였다.

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau)d(-\tau) + C \quad (1)$$

† 교신저자; 국방기술품질원
E-mail : hshan@dtaq.re.kr
Tel : (051) 750-2533, Fax : (051) 758-3992

* 국방기술품질원

여기서 $E(t)$ 는 충격응답제곱의 시간 적분값, $p(\tau)$ 는 충격응답, τ 는 시간, t_s 는 충격응답의 시작시간, t_f 는 충격 소음이 감쇠하여 배경소음과 같아지는 시간, C 는 t_s 와 t_f 사이에서의 충격 응답 제곱의 적분에 필요한 보정치이다.

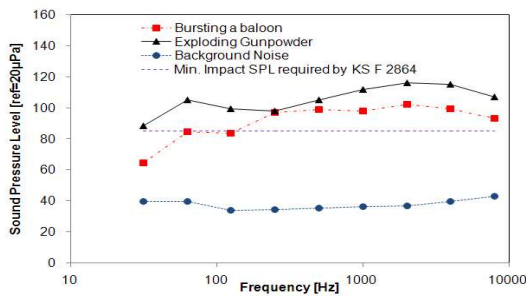
잔향시간은 마이크로폰(B&K Type 4189)을 격실 중심에 설치한 상태에서 충격응답에 대해 20Hz~8kHz의 1/1 옥타브 각 주파수 밴드에 대해 산출하였다.

2.2 충격음원

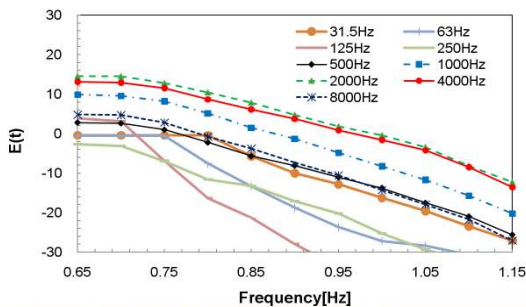
KS F 2864에서 충격응답은 음원자체의 잔향이 없고 무지향성이며 핑크소음의 파형으로 여러 옥타브 대역의 잔향시간을 동시에 측정 가능한 음원을 사용하도록 권고하고 있으며 배경소음 대비 45dB이상 높은 출력을 낼 수 있는 음원을 권고하고 있다.

이 연구에서 측정하고자 하는 합정 격실의 배경소음이 40dB를 넘지 않는다고 가정하면 85dB 이상의 음원이 필요하다. 이 연구에서는 합정 격실과 유사한 크기의 일반 건축물 사무실에서 여러 충격 음원을 사용하여 합정 격실의 잔향시간 측정에 적합한 음원을 선정하였다. 충격음으로는 화약충과 풍선을 사용하였으며, 충격음의 스펙트럼 및 감쇠곡선은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 풍선을 터뜨려 발생한 충격음은 크기가 저주파구간(31.5~125Hz)에서 KS F 2864에서 제시하는 기준을 만족하지 못함을 알 수 있었다.

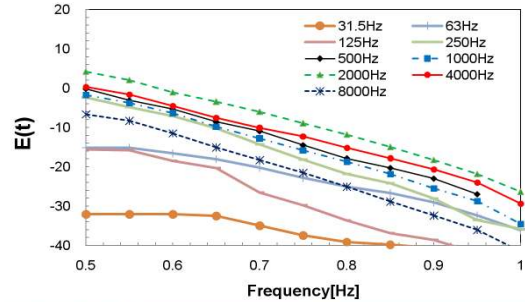
Table 1과 같이 충격응답적분법을 이용하여 잔향시간을 계산해본 결과 충격음원으로 화약충과 풍선을 사용했을 때 31.5~63Hz의 저주파 구간에서 잔향시간의 차이가 크게 날 수 있었다.



(a) Spectra of the impact sound



(b) Sound attenuation curves for exploding gunpowder



(c) Sound attenuation curves for bursting a balloon
Fig. 1 Spectra and sound attenuation curves for the impact sound

Table 1 Measured reverberation time according to the different impact sound source

Frequency [Hz]	Reverberation Time [sec]	
	Exploding gunpowder	Bursting balloon
31.5	1.1	2.3
63	0.9	1.4
125	0.8	1.0
250	0.9	0.9
500	1.1	1.0
1000	1.0	0.9
2000	1.1	1.0
4000	1.1	1.0
8000	0.9	0.9

이는 앞서 언급한 바와 같이 풍선을 터뜨려 발생한 충격음이 저주파 구간에서 충분한 음압 크기를 가지지 못하기 때문으로 판단된다. 하지만 화약충의 경우 불꽃 발생 등으로 인한 위험성 때문에 건조중인 합정에서 충격음으로 사용하기가 힘들다. 따라서 이 연구에서는 충격음원으로 풍선의 파열음을 사용하였으며 잔향시간 측정주파수는 125Hz~8kHz로 선정하였다.

2.3 잔향시간 측정 격실 및 조건

합정의 잔향시간 조사를 위해 특정 합정에 대해 Table 2와 같이 격실을 선정하고 Fig. 2와 같이 충격음원을 이용하여 잔향시간을 평가하였다. 충격음원은 2.2절 검토 결과와 같이 풍선의 파열음을 사용하였다.

Table 2에서 격실은 내부 벽의 내장재 구조에 따라 Type 1~4로 분류하였으며 이들 구조는 Fig. 3과 같다. 격실에 사용되는 흡음재는 폴리마이드폼(Polyimide foam), 미네랄울(Mineral wool) 등을 사용하며 이들 표면 마감 처리는 Fig. 3(b)와 같이 유리섬유직물(Glass cloth)로 마감한 후 페인팅하거나 Fig. 3(c)와 같이 유리섬유직물로 마감한 후 타공 처리하는 구조를 사용한다.



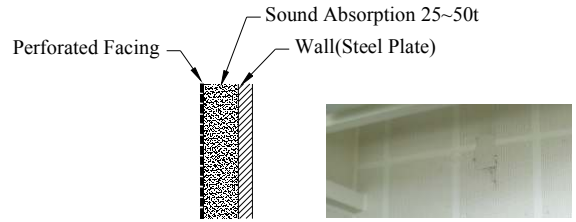
Fig. 2 Impact sound by bursting balloon in a navel vessel

Table 2 Specification of the testing rooms for reverberation time

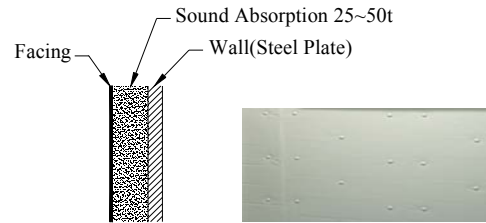
No.	Room Name	Size (W×D×H)	Type of Wall	Applied Position
1	DIV Officer Room	4m×5m×2m	(4)	Wall(4 side) and Ceiling
2	Captain Room	4m×5m×2m	(4)	Wall(4 side) and Ceiling
3	No.10 Officer Room	4m×2.5m×2m	(3)	Wall(1 side) and Ceiling
4	Flag Pilot Room	5m×6m×2m	(2)	Wall(4 side)
5	Ward Room	4m×3.5m×2m	(4)	Wall(4 side)
6	CPO Mess Room	6m×7m×2m	(4)	Wall(4 side) and Ceiling
7	Code Room	3m×3m×2.5m	(1)	-
8	Communication Room	9m×7m×2.5m	(3)	Wall(1 side of 7m×2.5m)
9	Reading Room	7m×4m×3m	(2)	Wall(4 side) and Ceiling
10	No.8 Crew RCN Room	3m×3m×2.5m	(4)	Wall(4 side) and Ceiling
11	No. 8 Crew Living Room	11m×4m×2.5m	(3)	Wall(1 side of 4m×2.5m)
12	No. 5 CPO Living Room	7m×3.5m×3m	(3)	Wall(1 side of 3.5m×3m) and Ceiling
13	No. 7 Crew Living Room	7m×3.5m×3m	(3)	Wall(1 side of 3.5m×3m) and Ceiling
14	No. 7 CPO Living Room	7m×3.5m×3m	(3)	Wall(1 side of 3.5m×3m) and Ceiling



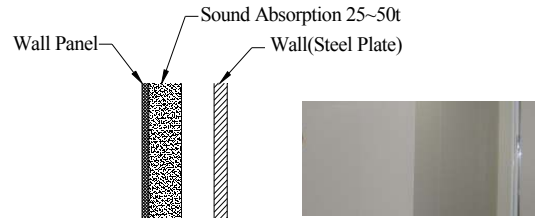
(a) Type 1(no interior material)



(b) Type 2



(c) Type 3



(d) Type 4

Fig. 3 Constructions of the wall in a navel vessel

특히 외부로부터의 소음에 대한 큰 차음 효과를 요구하는 벽체의 경우 Fig. 3(d)와 같이 공기층을 두고 흡음재를 설치한 후 표면 마감재로 월 판넬(Wall panel)을 설치하는 이중 벽체 구조가 사용된다. 벽체의 구조로 보았을 때 Fig. 3(d)의 경우 차음 효과는 매우 뛰어날 것으로 판단되지만 내부에 소음원이 있을 경우 잔향 음장의 효과로 인해 실내 소음이 상승할 수 있을 것으로 판단되며 타공 구조를 사용하는 Fig. 3(c)의 경우 내부 음원에 대한 벽체 흡음률이 가장 높아서 잔향 음장으로 인한 소음이 가장 적을 것으로 판단된다.

2.4 실험 결과

Table 3은 Table 2의 격실들에 대한 잔향시간 측정 결과이다. 잔향시간 측정 결과 2.3절에서 언급한 바와 같이 벽의 내장재가 Fig. 3(d)의 Type 4로 된 경우 잔향시간이 대체적으로 길게 측정되었다. 방의 크기가 유사하면서 벽의 내장재가 다른 원상사식당(Type 4)과 도서시청각실(Type 2)의 잔향시간을 비교해보면 원상사식당의 잔향시간이 500Hz, 1000Hz 및 2000Hz에서 각각 도서시청각실 대비 각각 2.6배, 2.2배, 2.8배의 잔향시간을 가짐을 알 수 있었다. 이와 같이 Fig. 3의 Type 4 벽체 구조의 경우 차음 효

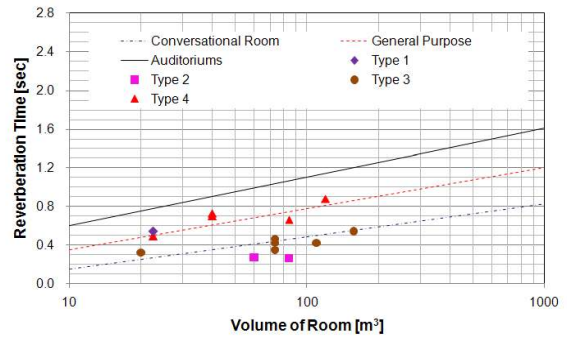
과는 뛰어날지라도 내부 음원 존재 시 잔향 음장의 증가로 인해 실내음압 증가를 초래할 것으로 예측되므로 흡음률이 높은 마감재를 월 판넬 위에 적용하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

MIL-STD-1472F[6]에서는 대화가 이루어지는 방 (Conversational room)에 대해 잔향시간을 Fig. 4와 같이 규제하도록 제시하고 있다. 이 연구에서 조사한 14개 격실에 대해서 500Hz, 1000Hz 및 2000Hz의 잔향시간을 Fig. 4에 표시해 보면 벽체의 구조가 Type 2일 경우 “Conversational Room”의 기준을 충분히 만족시키며 Type 3의 경우 규격 상한치에 근접하거나 약간 초과함을 알 수 있다. 하지만 Type 1, 4의 경우 “Conversational Room”의 기준에 대해서는 크게 초과하며 “General Purpose”의 기준과 비슷하거나 약간 초과함을 알 수 있었다.

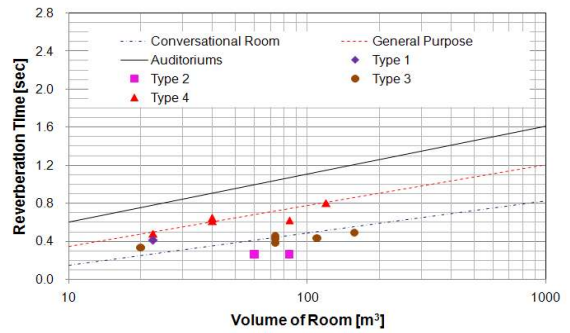
이와 같이 함정의 실내 잔향시간 조사결과 군사 작전 상 명료한 대화 전달이 필요한 여러 격실이 MIL-STD-1472F의 “Conversational Room”의 기준을 초과하고 있으며, 실내 흡음면적 증가로부터 잔향시간의 저감이 필요함을 알 수 있었다.

Table 3 Measured reverberation time

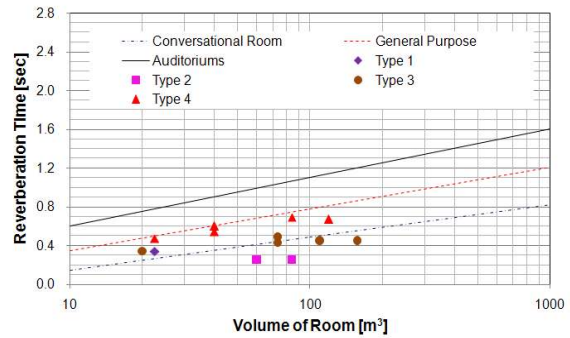
No.	Room Name	Type of Wall	Reverberation Time at 1/1 Octave-band [sec]							
			125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	
1	DIV Officer Room	(4)	0.67	0.63	0.70	0.64	0.60	0.61	0.60	
2	Captain Room	(4)	0.92	0.77	0.73	0.61	0.54	0.62	0.61	
3	No.10 Officer Room	(3)	0.71	0.39	0.32	0.33	0.34	0.40	0.40	
4	Flag Pilot Room	(2)	0.67	0.33	0.27	0.26	0.25	0.25	0.32	
5	Ward Room	(4)	0.66	0.85	0.88	0.80	0.67	0.61	0.58	
6	CPO Mess Room	(4)	0.60	0.74	0.66	0.62	0.69	0.72	0.64	
7	Code Room	(1)	0.52	0.51	0.54	0.41	0.34	0.31	0.31	
8	Communication Room	(3)	0.71	0.50	0.54	0.49	0.45	0.42	0.42	
9	Reading Room	(2)	0.46	0.39	0.26	0.26	0.25	0.26	0.31	
10	No.8 Crew RCN Room	(4)	0.50	0.40	0.49	0.48	0.47	0.47	0.42	
11	No. 8 Crew Living Room	(3)	0.57	0.53	0.42	0.43	0.45	0.49	0.47	
12	No. 5 CPO Living Room	(3)	0.57	0.40	0.35	0.42	0.49	0.53	0.49	
13	No. 7 Crew Living Room	(3)	0.57	0.46	0.42	0.38	0.43	0.50	0.46	
14	No. 7 CPO Living Room	(3)	0.76	0.53	0.46	0.45	0.49	0.52	0.49	



(a) 500Hz



(b) 1kHz



(c) 2kHz

Fig. 4 Reverberation time suggested by MIL-STD-1472F and measured ones in a naval vessel

3. 분석

함정의 실내 소음은 주추진기, 기계류 등 외부에 있는 소음원의 전달소음과 HVAC, 내부 설치 장비 등 내부소음으로 나누어 볼 수 있다. 외부로부터 전달되는 소음을 저감하기 위해서 외부 소음원의 소음 저감 및 격실의 방음 대책 등 다양한 형태의 방음대책이 설계에 반영된다. 이러한 방음대책이 충분하게 적용되었다 할지라도 실내의 흡음면적이 작아 잔향음이 클 경우 동일한 음향파위를 가진 장비가 설치되었을 때 실내 소음의 차이가 크게 발생될 수 있다. 식(2)는 반 자유 음장(Semi-anechoic field)에서 직접 음장(Direct field)과 잔향 음장(Reverberant field)으로 구성된 전체소음을 나타낸다.

Table 4 Noise reduction from reducing reverberation time (500Hz)

Type of absorption on the wall	Room name	Reverberation time (T)		Room constant (R)		Diff. btw L_w and L_p		Noise reduction from reducing reverberation time
		Measured	Limit from MIL-1472F	Base on the measured time	Base on the limit from MIL-1472F	Base on the measured time	Base on the limit from MIL-1472F	
1	Code Room	0.54	0.27	7.8	18.8	1.7	4.3	2.6
3	No.10 Officer room	0.32	0.25	12.9	17.9	3.3	4.2	0.9
4	DIV Officer Room	0.70	0.35	10.5	24.1	2.7	4.9	2.2
4	Captain Room	0.73	0.35	10.0	24.1	2.5	4.9	2.4
4	Ward Room	0.88	0.51	24.9	47.3	5.0	6.1	1.2
4	CPO Mess Room	0.66	0.46	24.1	37.4	4.9	5.7	0.9
4	No.8 Crew RCN Room	0.49	0.27	8.7	18.8	2.1	4.3	2.2

Table 6 Noise reduction from reducing reverberation time (2000Hz)

Type of absorption on the wall	Room name	Reverberation time (T)		Room constant (R)		Diff. btw L_w and L_p		Noise reduction from reducing reverberation time
		Measured	Limit from MIL-1472F	Base on the measured time	Base on the limit from MIL-1472F	Base on the measured time	Base on the limit from MIL-1472F	
1	Code Room	0.34	0.27	13.7	18.8	3.5	4.3	0.8
3	No.10 Officer room	0.34	0.25	11.9	17.9	3.1	4.2	1.1
4	DIV Officer Room	0.60	0.35	12.5	24.1	3.2	4.9	1.7
4	Captain Room	0.54	0.35	14.1	24.1	3.5	4.9	1.3
4	Ward Room	0.67	0.51	34.2	47.3	5.6	6.1	0.5
4	CPO Mess Room	0.69	0.46	22.9	37.4	4.8	5.7	1.0
4	No.8 Crew RCN Room	0.47	0.27	9.2	18.8	2.3	4.3	2.0

Table 5 Noise reduction from reducing reverberation time (1000Hz)

Type of absorption on the wall	Room name	Reverberation time (T)		Room constant (R)		Diff. btw L_w and L_p		Noise reduction from reducing reverberation time
		Measured	Limit from MIL-1472F	Base on the measured time	Base on the limit from MIL-1472F	Base on the measured time	Base on the limit from MIL-1472F	
1	Code Room	0.41	0.27	10.8	18.8	2.8	4.3	1.5
3	No.10 Officer room	0.33	0.25	12.4	17.9	3.2	4.2	1.0
4	DIV Officer Room	0.64	0.35	11.6	24.1	3.0	4.9	1.9
4	Captain Room	0.61	0.35	12.3	24.1	3.1	4.9	1.7
4	Ward Room	0.80	0.51	27.8	47.3	5.2	6.1	0.9
4	CPO Mess Room	0.62	0.46	26.0	37.4	5.0	5.7	0.7
4	No.8 Crew RCN Room	0.48	0.27	9.0	18.8	2.2	4.3	2.1

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{2\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2)$$

여기서 L_p 는 음원에서 "r" 떨어진 지점에서의 음압, L_w 는 음향파워, r은 음원으로 부터의 거리(가상 구의 반경), Q는 방향성 인자(Directivity factor, $\cong 1.0$), R은 룸 상수(Room Constant)이다.

식 (2)로부터 룸 상수가 작아 충분히 큰 잔향 음장을 가질 경우 전체 소음 레벨이 커짐을 예측할 수 있다. 여기서 룸 상수는 세이빈의 잔향시간 계산식으로부터 식(3)과 같이 2절에서 측정된 잔향시간을 가지고 계산할 수 있다.

$$R = \frac{SA}{S-A} = \frac{S}{\frac{TS}{0.161V} - 1} \quad (3)$$

여기서 V는 방의 체적, S는 방의 표면적, A는 방의 흡음 면적(= $S\bar{\alpha}$), $\bar{\alpha}$ 는 평균 흡음률, T는 잔향시간이다.

식 (2)으로부터 소음원에서 "r" 거리에 떨어져 있는 지점에서의 음압은 소음원의 음향파워가 일정하다고 가정하면 룸 상수에 의해 결정된다. 식 (3)에서 룸 상수는 잔향시간에 반비례하므로 잔향시간이 짧아지면 룸 상수가 커져 음압은 작아지게 된다.

Table 4~6은 식(2)~(3)으로부터 Table 3의 측정 격실 중 측정된 잔향시간이 MIL-STD-1472F에서 제시하는 "Conversational Room"의 잔향시간보다 초과하는 격실에 대해 잔향시간을 MIL-STD-1472F에서 제시하는 기준치 값으로 수정했을 때 음압 저감량의 예측치 계산 결과이다.

Table 4~6에서 벽체 구조가 Fig. 2 의 Type 1,4의 경우 MIL-STD-1472F에서 제시하는 잔향시간 기준치와 실제 측정치의 차이가 가장 크며, MIL-STD-1472F에서 제시하

는 기준치까지 잔향시간을 저감할 경우 소음레벨은 500Hz 대역에서 최대 2.6dB까지 저감됨을 예측할 수 있다.

이와 같이 정숙함을 요구하는 격실이나 명료한 대화가 필요한 작전 구역에 대해서는 실내 벽체에 흡음형 마감재를 적용하여 잔향시간을 관리할 필요가 있으며 이를 통해 함내 소음 수준을 추가적으로 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

함정의 여러 격실에 대한 잔향시간 측정 결과 내부 마감재에 따라 잔향시간이 크게 달라짐을 알 수 있었으며 작전 상 명료한 대화 전달이 필요한 다수의 격실이 MIL-STD-1472F에서 제시하는 “Conversational Room”의 잔향시간 기준을 만족하지 못함을 알 수 있었다. 대부분의 격실은 HVAC 등 소음원을 가지기 때문에 잔향시간이 길 경우 울림에 의한 대화 방해뿐만 아니라 잔향 음장에 의한 실내 소음 레벨의 상승을 초래하므로 이러한 잔향시간에 대한 관리는 매우 필요하다고 판단된다.

특히 MIL-STD-1472F에서 제시하는 “Conversational Room”의 잔향시간을 초과하는 격실에 대해 잔향시간을 MIL-STD-1472F의 기준치까지 저감시켰다고 가정하여 이론식을 통해 예측해보면 실내 소음이 500Hz 대역에서 최대 2.6dB까지 줄어들음을 예측할 수 있었다.

이와 같이 정숙함을 요구하는 격실이나 명료한 대화가 필요한 작전 구역의 경우 실내 흡음면적 증가로부터 잔향시간을 저감함으로써 실내 음질 향상뿐만 아니라 실내 소음 레벨 저감을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 함정의 실내 마감재에 따른 잔향시간 평가를 통해 실내 마감재에 따른 흡음 성능을 조사, 분석함으로써 향후 함정의 실내 음장 분석 및 설계에 기초적인 자료가 될 것으로 기대된다.

후 기

이 연구를 위해 협조해 주신 해군 관계자 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Lee, G.T., 1995, "Fundamental Study on Transient Decay in Acoustic Field of Architecture Closed Space", Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 11, No. 1, pp.123-138.

(2) Kim, M.J. and Lee, B.K., 2006, "Field Measurement and Evaluation of the Reverberation Time in Residential Buildings", Journal of Korean Society of Living and

Environmental System, Vol. 13, No. 3, pp.213-221.

(3) Lee, B.K. and Kim, M.J., 2005, "Field Measurement and Analysis of the Reverberation Time in Apartment Houses", Proceeding of Architectural Institute of Korea Conference, Vol.25, No. 1, pp.363-366.

(4) KS F 2864, 2002, "Measurement of the reverberation time of rooms with reference to the other acoustic parameters"

(5) Oh, Y.K., Joo, J.S., Jung, K.Y. and Kim, S.W., 2001, "Measurement of the reverberation time of rooms with reference to the other acoustic parameters", Proceeding of KSNVE Annual Autumn Conference, pp.362-396.

(6) MIL-STD-1472F, 1998, "Department of Defense Design Criteria Standard : Human Engineering"