

샌드위치 구조를 가지는 복합재의 손실계수 향상을 위한 설계

Design for Improving the Loss Factor of Composite with Sandwich Structure

이 창 민* · 전 관 수* · 강 동 석* · 김 병 준* · 김 종 훈** · 강 명 환*** · 서 영 수†
C. M. Lee, G. S. Jeon, D. S. Kang, B. J. Kim, J. H. Kim, M. H. Kang and Y. S. Seo

(Received November 24, 2015 ; Revised May 16, 2016 ; Accepted May 16, 2016)

Key Words : Composite(복합재료), Damping Material(감쇠재), Loss Factor(손실계수), Modulus of Elasticity(탄성계수), Resonance Frequency(공진주파수)

ABSTRACT

Underwater weapon system is required to structurally strong material, since as it is directly exposed to external shock. It should also be using the lightweight material in order to take advantage of buoyancy. Composite materials meet these requirements simultaneously. Particularly in the case of submarine, composite materials are widely used. It is important to have a high strength enough to be able to withstand external shock, but it is also important to attenuate it. In a method for the shock damping, viscoelastic damping materials are inserted between the high strength composite material as a sandwich structure. Shock attenuation can be evaluated in the loss factor. In ASTM(American Society of Testing Materials), evaluation method of the loss factor of cantilever specimens is specified. In this paper, mode tests of the cantilever are performed by the ASTM standard, in order to calculate the loss factor of the viscoelastic damping material by the specified expression. Further, for verifying of the calculated loss factor, mode test of compound beams is carried out. In addition, the characteristics of the material were analyzed the effect on the loss factor.

기 호 설 명

- D : 감쇠재와 기초빔 밀도 비
- η_s : 복합빔 손실계수
- f_n : 기초빔의 n 차 공진주파수(Hz)
- f_s : 복합빔의 s 차 공진주파수(Hz)
- H_1 : 감쇠재 두께(m)
- H : 기초빔 두께(m)

- ρ_1 : 감쇠재 밀도(kg/m³)
- ρ : 기초빔 밀도(kg/m³)
- T : 기초빔과 감쇠재 두께 비
- Δf_s : 복합빔의 반동력 밴드폭(Hz)

1. 서 론

현재 선박이나 잠수함 등의 구조물에는 기존의 금속재료에 비해 가볍고 높은 비강도와 비강성 특성을 가진 복합재료가 많이 이용되고 있다. 이러한 구

† Corresponding Author; Member, Agency for Defence Development
E-mail: sys@add.re.kr
* Member, LIG Nex1
** DACC Composite
*** Member, Agency for Defence Development

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2015 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

조물은 수중환경에 그대로 노출되어 다양한 진동원을 접하게 되며, 공진이 발생할 경우 구조물에 치명적일 수 있다. 따라서 구조물의 진동을 저감하는 설계가 중요하다. 이러한 방법 중 하나로 점탄성 재료의 감쇠재를 적용하는 방법이 가장 널리 이용된다. 점탄성 재료는 고분자 재료처럼 변형에 따른 내부 마찰에 의해 진동에너지가 열에너지로 변환되는 특성으로 인해 구조감쇠를 향상시킨다⁽¹⁾. 점탄성 재료에 의해 감쇠를 증가시키는 방법은 하나의 점탄성 재료층만을 부착하는 비구속층 감쇠처리 방법과 양면에서 자유층을 덮는 구속층 감쇠처리 방법이 있다. 전자의 방법은 굽힘변형에 대해서만 감쇠효과를 가지는 반면 후자의 방법은 굽힘변형과 전단변형에 대한 감쇠효과도 발생하여 후자의 방법이 감쇠효과가 좋은 것으로 평가되고 있다⁽²⁾. 감쇠재의 특성은 손실계수(loss factor)에 의해 결정이 되며, 이를 예측하는 다양한 기법이 연구되었다. 민천홍은 곡선맞춤법(curve fitting method)을 이용한 실험진동해석을 수행하여 일반점성 모델의 다자유도 곡선맞춤을 수행할 수 있는 연구를 수행하였다^(3,4). 박한일은 온도변화에 따른 감쇠재의 특성변화에 관한 실험을 수행하여 손실계수와 온도와의 연관성을 분석하였으며, 이두호는 온도와 주파수의 의존성을 고려한 구속형 제진보의 최대 손실계수를 설계하는 방법으로 특정모드의 손실계수를 최대화 하는 제진재의 부착 길이를 결정하는 방법을 제시하였다^(5,6). 이 논문에서는 감쇠재의 종류 및 특성이 손실계수에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 복합재 사이에 감쇠재가 삽입된 샌드위치 구조의 시편을 이용하여 ASTM E756-04⁽⁷⁾에서 제시된 방법에 의해 손실계수를 측정하고 수식을 통해 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

점탄성 물질의 손실계수 계산은 ASTM E756-04에 명시되어 있다. 이 중 이 논문에서 사용하는 샌드위치 구조를 가지는 시편 중 감쇠재의 손실계수를 계산하는 방법은 식(1)과 같다.

$$\eta_1 = \frac{A\eta_s}{A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_s)^2} \quad (1)$$

여기서,

$$A = (f_s/f_n)^2(2 + DT)(B/2)$$

$$B = 1/[6(1 + T)^2]$$

$$D = \rho_1/\rho : \text{density ratio}$$

f_n : resonance frequency for mode n of base beam, Hz

f_s : resonance frequency for mode s of composite beam, Hz

$$T = H_1/H : \text{thickness ratio}$$

H_1 : thickness of damping material, m

H : thickness of base beam, m

$\eta_s = \Delta f_s/f_s$: loss factor of sandwiched specimen

Δf_s : half-power bandwidth of mode s of composite beam, Hz

ρ_1 : density of damping material, kg/m^3

ρ : density of base beam, kg/m^3

이다.

2.2 시험구성

감쇠재의 손실계수 측정을 위해 사용된 시편은 Fig. 1과 같이 폭, 길이, 두께가 각각 20 mm, 290 mm, 6 mm의 샌드위치 구조를 가지는 시편으로 2 mm의 두께를 가지는 기초빔 사이에 2 mm의 두께를 가지는 3종류의 감쇠재를 삽입하여 제작하였다. 시험 구성은 Fig. 2와 같다. 시편의 크기는 ASTM 기준에 비해 크게 제작되었는데 이는 접촉식 센서의 사용으로 오는 오류를 줄이기 위함이다. 또한 기초빔의 공진주파수를 확인하기 위해 2 mm의 두께를 가지는

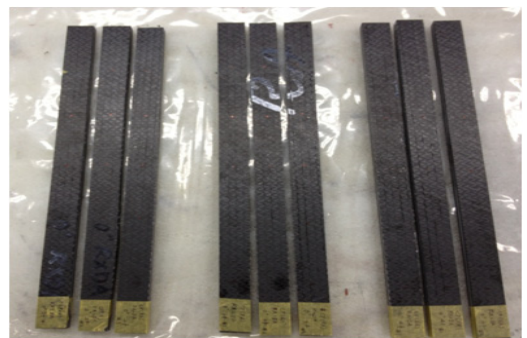


Fig. 1 Test specimens

기초빔을 추가로 제작하였다. 기초빔은 복합재료를 이용하여 성형되었고, 3종류의 감쇠재는 각각 A사, B사에서 제작된 것으로 특성은 Table 1에 나타나있다. A사에서 제작된 감쇠재는 비닐에스터 계열, B사에서 제작된 감쇠재는 에폭시 계열이다. 시험의 구성은 Fig. 2와 같다. 시편의 길이 290 mm 중 40 mm를 고정시켜 실제 시험에 빔의 길이는 250 mm가 된다. 시험에 사용된 주파수 분석기는 DATA Physics 제품을 사용하였고, 가속도 센서와 임팩트 해머는 Dytran 제품을 사용하였다. 가속도 센서의 위치는 고정되는 40 mm를 제외한 250 mm 중 하단 50 mm 부분에 부착하였고, 임팩트 해머는 상단 50 mm 부분에 가진을 하였다. 또한 시험의 정확성을 위해 5회 가진하여 평균한 응답 값을 이용하였다.

2.3 손실계수 계산

점탄성 물질은 온도에 의해 손실계수 특성이 변한다는 것을 앞서 언급한 바가 있다. 따라서 온도 특성의 영향을 배제하기 위해 동일 온도를 유지하는

제품 제작실에서 18℃의 온도로 모든 시험을 수행하였다. 손실계수 계산을 위해 우선적으로 기초빔의 모드시험을 수행하였다. 손실계수를 계산하기 4개의 모드를 선정하였다. 손실계수 계산을 위해 우선적으로 기초빔의 공진주파수의 측정이 필요하다. 이 논문의 계산에서는 Fig. 3과 같이 3개의 시편을 이용하여 기초빔의 공진주파수를 측정하였고, Tables 2, 3과 같이 공진주파수와 손실계수의 평균치를 계산하였다. 손실계수의 계산은 기초빔의 손실계수가 높은 경우 감쇠재의 감쇠효과를 확인하기 어렵기 때문에 기초빔의 손실계수 측정을 통해 복합빔의 손실계수에 미치는 영향을 확인할 필요가 있다. 복합빔 모드시험도 기초빔 시험과 동일하게 수행하였다. Figs. 4~6은 각 시편의 주파수 응답 스펙트럼이며,

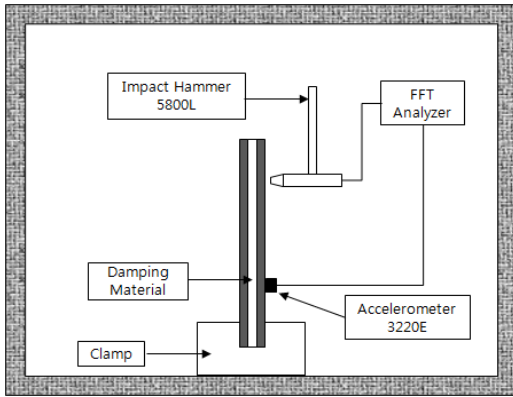


Fig. 2 Experimental setup

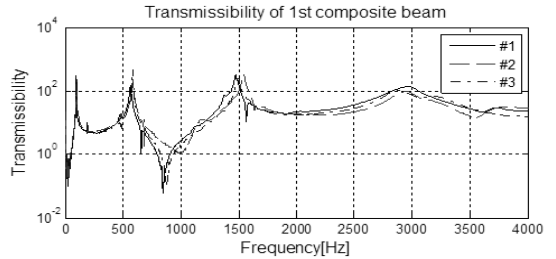


Fig. 4 FRF of 1st composite beam

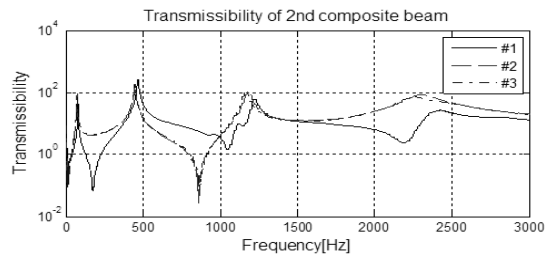


Fig. 5 FRF of 2nd composite beam

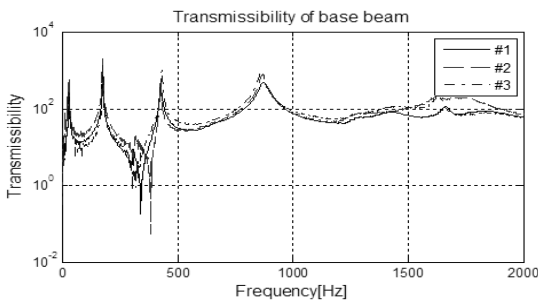


Fig. 3 FRF of base beam

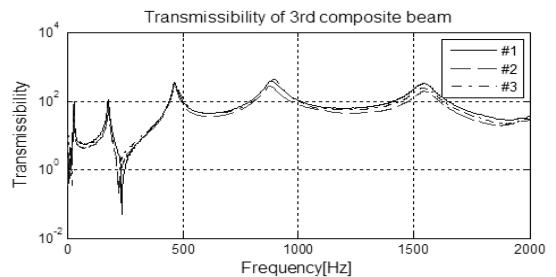


Fig. 6 FRF of 3rd composite beam

Table 1 Specification of damping material

Material	Component	Density(kg/m ³)
#1	Vinyl ester	1040
#2, #3	Epoxy	1210

Table 2 Resonance frequency for mode 4 of base beam

1st mode(Hz)	2nd mode(Hz)	3rd mode(Hz)	4th mode(Hz)
31	177	428	869

Table 3 Loss factor of base beam

1st mode(%)	2nd mode(%)	3rd mode(%)	4th mode(%)
0.7	0.5	1.0	3.3

Tables 4~6은 각 시편의 공진주파수이다. 앞선 시험 결과와 식 (1)을 이용하여 감쇠재의 손실계수를 계산할 수 있다. 그 결과는 Tables 7~9와 같다. Tables 7~9에서 알 수 있듯이 1번 감쇠재와 2번 감쇠재의 손실계수는 비슷한 반면 3번 감쇠재의 손실계수는 높은 것을 알 수 있으며, 모든 감쇠재의 손실계수가 기초빔에 비해 훨씬 높으므로 감쇠재에 의한 감쇠특성 확인이 가능하다. 향상된 손실계수가 실제 구조물의 손실계수를 향상시키는지 확인하기 위해 샌드위치 구조의 복합빔의 손실계수를 계산하였다. 시편과 시험 구성 및 방법은 앞서 언급된 것과 동일하며 그 결과는 Tables 10~12와 같다. 복합빔의 손실계수가 낮은 이유는 감쇠재 구속층의 고강성에 의해 제진효과가 저감되기 때문이다. 손실계수는 반치폭법(half power bandwidth method)으로 계산하였다. 통상적으로 감쇠비가 5% 이하인 시스템의 경우 반치폭법(half power bandwidth method)으로 감쇠비를 계산하여도 오차가 크지 않다. 기초빔과 복합빔의 감쇠비는 Table 3과 Tables 10~12와 같이 대부분 5% 이내(손실계수 10%)이므로 반치폭법을 적용하였고, 상용프로그램인 STAR 6.0으로 감쇠비를 계산하였다.

수식에 의해 계산된 감쇠재의 손실계수가 높으면 복합빔의 손실계수도 동일한 결과를 가져온다. 다만 1차 모드에서 감쇠재의 손실계수가 부정확한 것을 알 수 있다. 이는 1차 모드의 경우 손실계수 계측 시에 비선형 효과가 크게 야기 되며, 샌드위치구조의 복합빔을 이용한 점탄성재료의 탄성계수 및 손실계수 평가 방법이 저주파수 영역에서는 정확도가 떨어지기 때문이다^(2,8).

Table 4 Resonance frequency for mode 4 of 1st composite beam

Specimen	1st mode(Hz)	2nd mode(Hz)	3rd mode(Hz)	4th mode(Hz)
#1	94	564	1472	2971
#2	98	583	1539	2944
#3	95	581	1539	2945

Table 5 Resonance frequency for mode 4 of 2nd composite beam

Specimen	1st mode(Hz)	2nd mode(Hz)	3rd mode(Hz)	4th mode(Hz)
#1	78	466	1210	2420
#2	72	445	1180	2300
#3	73	447	1160	2260

Table 6 Resonance frequency for mode 4 of 3rd composite beam

Specimen	1st mode(Hz)	2nd mode(Hz)	3rd mode(Hz)	4th mode(Hz)
#1	30	178	464	884
#2	28	177	464	878
#3	30	180	467	895

Table 7 Loss factor of 1st damping material

	Loss factor of #1(%)	Loss factor of #2(%)	Loss factor of #3(%)
1st mode	18.0	20.2	22.3
2nd mode	7.9	9.0	3.6
3rd mode	5.5	5.8	5.8
4th mode	18.6	17.4	18.0

Table 8 Loss factor of 2nd damping material

	Loss factor of #1(%)	Loss factor of #2(%)	Loss factor of #3(%)
1st mode	3.3	2.9	3.6
2nd mode	8.0	8.3	6.9
3rd mode	11.7	11.0	10.6
4th mode	13.9	15.3	16.7

Table 9 Loss factor of 3rd damping material

	Loss factor of #1(%)	Loss factor of #2(%)	Loss factor of #3(%)
1st mode	28.3	45.8	27.3
2nd mode	29.0	25.1	21.9
3rd mode	20.0	24.5	25.3
4th mode	43.2	42.4	53.9

Table 10 Loss factor of 1st composite beam

	Loss factor of #1(%)	Loss factor of #2(%)	Loss factor of #3(%)
1st mode	1.1	1.0	0.7
2nd mode	1.9	1.6	0.6
3rd mode	1.8	1.8	1.7
4th mode	7.0	6.5	6.8

Table 11 Loss factor of 2nd composite beam

	Loss factor of #1(%)	Loss factor of #2(%)	Loss factor of #3(%)
1st mode	1.0	1.1	1.4
2nd mode	2.0	2.6	3.0
3rd mode	4.6	4.3	4.2
4th mode	4.9	5.2	6.0

Table 12 Loss factor of 3rd composite beam

	Loss factor of #1(%)	Loss factor of #2(%)	Loss factor of #3(%)
1st mode	5.9	5.6	5.7
2nd mode	8.0	6.8	6.4
3rd mode	7.3	8.9	9.5
4th mode	12.6	11.9	16.4

Table 13 Shear modulus of 1st composite beam

	Shear modulus #1(MPa)	Shear modulus #2(MPa)	Shear modulus #3(MPa)
1st mode	68.86	79.40	139.14
2nd mode	86.28	127.58	128.28
3rd mode	124.08	124.05	124.05
4th mode	220.26	220.82	220.54

Table 14 Shear modulus of 2nd composite beam

	Shear modulus #1(MPa)	Shear modulus #2(MPa)	Shear modulus #3(MPa)
1st mode	9.34	5.86	6.51
2nd mode	79.80	57.54	59.31
3rd mode	105.94	106.03	106.08
4th mode	247.53	246.97	246.29

Table 15 Shear modulus of 3rd composite beam

	Shear modulus #1(MPa)	Shear modulus #2(MPa)	Shear modulus #3(MPa)
1st mode	0.12	0.06	0.12
2nd mode	1.09	1.05	1.18
3rd mode	4.88	4.87	5.04
4th mode	6.46	6.17	6.99

2.4 결과분석

앞 절의 3가지 감쇠재에 대한 손실계수를 계산한 결과 3번 감쇠재의 손실계수 특성이 뛰어난 것을 확인하였다. 이의 분석을 위해 식 (2)와 같이 ASTM에 명시된 수식에 의해 샌드위치 구조를 가지는 복합체의 전단탄성계수를 계산하였으며, 그 결과는 Tables 13 ~ 15와 같다.

$$G_1 = [A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_s)^2] \times \frac{(2\pi C_n EHH_1)}{l^2} \left[\frac{1}{(1 - 2A + 2B)^2 + 4(A\eta_s)^2} \right] \tag{2}$$

여기서,

C_n : coefficient for mode n , of clamped-free (uniform) beam

C_1 : 0.559 59

C_2 : 3.5069

C_3 : 9.8194

C_4 : 19.242

$C_n = (\pi/2)(n - 0.5)^2$, for $n > 3$

E : young's modulus of base beam, Pa

G_1 : shear modulus of damping material, Pa

l : length of beam, m

Tables 13 ~ 15에서 확인할 수 있듯이 1, 2번 시편의 경우 감쇠재의 전단탄성계수가 1차 모드를 제외하고 유사한 값을 가지며, Tables 10 ~ 12의 복합체의 손실계수 결과와도 유사한 경향을 보인다. 1번과 2번 감쇠재를 비교하였을 때, 재질이 다름에도 불구하고 손실계수가 유사한 이유는 재질과 무관한 재료의 특성이 손실계수에 영향을 미친다고 예측할 수 있다. 1차 모드의 결과가 부정확한 이유는 앞서 언급한 바와 같이 샌드위치구조의 복합체를 이용한 점탄성재료의 탄성계수 및 손실계수 평가 방법이 저주파수 영역에서는 정확도가 떨어지기 때문이다. 반면 3번 시편의 경우 감쇠재의 전단탄성계수가 확연히 낮으며, 복합체 손실계수도 높은 것을 알 수 있다. 다만 구속층인 복합체의 고강성에 의해 효과는 감소한 것으로 추정된다. 하나의 시편에서 주파수가 높아질수록 탄성계수가 증가하는데 이는 탄성계수가 주파수와 비례하기 때문이다. 전단탄성계수는 인장탄성계수와

Table 16 Test result of elongation

	#1	#2	#3
Tensile strength(N/mm ²)	11.2	10.8	3.07
Elongation(%)	104	113	169

비례하기 때문에 인장탄성계수 측정을 통해 감쇠재의 전단탄성계수 경향을 예측할 수 있다. 수지의 서로 다른 배합을 통해 제작된 2번과 3번 감쇠재를 KS M 3006(2003) 규격에 의해 신장률을 측정하였으며, 그 결과는 Table 16과 같다. Table 16에서 알 수 있듯이 3번 감쇠재의 신장률이 높은 것을 알 수 있으며, 전단탄성계수 역시 낮은 것으로 예측할 수 있다.

3. 결 론

이 논문에서는 복합재 사이에 감쇠재가 삽입되어 성형되는 샌드위치 구조의 구조물에 대한 손실계수를 계산하였다. 3가지 감쇠재를 이용하여 ASTM E756-04 규격에 의해 시험을 수행하였다. 3가지 감쇠재 중 1번 감쇠재는 비닐에스터 재질이고, 2번, 3번 감쇠재는 에폭시 재질의 감쇠재이다. 감쇠재는 공압을 이용하여 수지흐름 매체를 통하여 수지를 프리폼 전 영역에 고루 함침시킨 후 경화제로 경화시키는 RTM(resin transfer molding)공법으로 성형된다. 이때 주입되는 수지의 물리적 특성에 의해 감쇠재의 손실계수가 결정된다. 이 논문에서는 수지의 물리적 특성 중 신장률에 초점을 두고 감쇠재를 제작하였다. 서로 다른 재질의 1번과 2번 감쇠재의 손실계수 결과에 따르면 재질은 다르지만 신장률이 유사하기 때문에 손실계수의 향상을 가져 올 수 없었다. 반면 같은 재질의 수지의 배합을 달리하여 제작한 2번, 3번 감쇠재의 손실계수 결과는 신장률이 높은 감쇠재의 이용이 손실계수 또한 높은 결과를 나타내었고, 이는 ASTM 규격의 전단탄성계수의 계산을 통해서도 확인할 수 있다. 결과적으로 감쇠재를 이용하여 손실계수를 향상시키기 위해서는 탄성계수가 비교적 가능한 재료를 선정하여 신장률이 높은 즉, 탄성계수를 낮게 하는 설계를 하는 방법이 효과적인 것을 확인하였다.

References

- (1) Lee, C. M. and Lee, J., 2001, A Study on the Evaluation of Loss Factor and Young's Modulus of Damping Materials on Temperature Condition, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 9, pp. 391~397.
- (2) Kim, S. S., Cho, D. S. and Lee, M. W., 1999, Optimum Design of Viscoelastic Layered Beam to Minimize Flexural Vibration, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 1, pp. 90~98.
- (3) Min, C. H., Park, H. I. and Bae, S. R., 2008, Experimental Vibration Analysis Damped Beam Model Using Multi-degree Curve Fitting Method, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 22, No. 1, pp. 584~585.
- (4) Min, C. H., Park, H. I. and Bae, S. R., 2008, Experimental Vibration Analysis for Viscoelastically Damped Circular Cylindrical Shell Using Nonlinear Least Square Method, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 22, No. 3, pp. 41~46.
- (5) Park, H. I., Shon, J. G., Min, C. H. and Bae, S. R., 2007, An Experimental Study on the Measurement of Elastic and Damping Coefficients of a Composite Material, Journal of Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 1, pp. 26~31.
- (6) Lee, D. H., 2008, Optimal Layout Design of Frequency- and Temperature-dependent Viscoelastic Materials for Maximum Loss Factor of Constrained-layer Damping Beam, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 185~191.
- (7) ASTM E756-04, Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials.
- (8) Nashif, A. D., 1985, Vibration Damping, John Wiley & Sons, Inc.



Chang-Min Lee is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. He received M.S. degree from Pusan National University. His research interests are shock/vibration.



Gwan-Soo Jeon is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1.



Myung-Hwan Kang is received a B.S. degree from Kyungpook National University in 2007. M.S. degree from Postech in 2009. He is currently a researcher at the Agency for Defense Development, Korea. His research interests are underwater acoustic stealth technologies.



Dong-Seok Kang is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1.



Yong-Soo Seo is currently a senior researcher at Agency for Defense Development. He received the B.S. degree, M.S. degree and the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Pusan National University, Korea in 1999, 2001 and 2005, respectively. His research interests are in the reduction of noise in the ship.



Jong-Hun Kim is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, DACC Composite.