

SiC와 흑연 입자 강화 주조용 Al기지 복합재료의 진동감쇠능에 미치는 강화입자조성의 효과

Effect of Reinforcement Content on Damping Capacities for Castable Aluminum Matrix Composites Reinforced with SiC and Graphite Particles

최 유 송*

Choi Yu-Song

ABSTRACT

Loss factors of A356, Mn-Cu alloy and aluminum matrix composites reinforced with SiC_p and Ni-coated graphite particles at various contents have been investigated using clamped-free cantilever beam method. The loss factors of half-power bandwidth of the specimens were measured over a wide range of frequencies from 50 to 3300Hz. Among the specimens, Al-10%SiC_p-10%C_p showed the highest loss factor at the mode I, while Mn-Cu alloy showed the highest loss factors at the modes II and III. Consequently, at the mode I the Al-10%SiC_p-10%C_p showed the loss factor of 0.00093, which is 2.64 and 1.58 times higher than those of A356 and Mn-Cu alloy, respectively.

주요기술용어 : Damping(감쇠), MMC, Aluminum, Silicon carbide(SiC), Graphite, Casting, Nickel

1. 서 론

기계류에서 발생하는 소음은 작업환경뿐만 아니라 일상생활에 있어서 소음공해로 분류되며 심각한 사회문제를 야기하고 있다^[1]. 또한, 잠수함과 어뢰의 추진기 및 선체내의 기계류에서 발생하는 소음은 수중무기체계에서 아주 중요한 은밀성(acoustic stealth)을 저하시킨다. 감쇠(damping)란 진동을 흡수하여 열로

분산시키는 특성을 말한다^[2]. 기계류에는 많은 소음원이 있으나 일반적으로 고속 회전하는 기계부품이 주 소음원으로 작용한다. 이러한 소음을 감소시킬 수 있는 방안의 하나로 고감쇠재료에 관한 연구가 오래전부터 진행되어오고 있다^[3].

현재 상업화된 고감쇠재료로 Mn-Cu계 합금인 소노스톤(SONOSTON)이 있다. 소노스톤은 우수한 기계적 특성과 고감쇠 특성을 가지고 있으며 군사용으로는 수상함 및 잠수함의 추진기(propulsor) 재료로 만수용으로는 엔진 등의 소음과 진동을 감소시키기

* 국방과학연구소 연구원

위한 재료로 사용되고 있다^[4]. 하지만, 중량문제 인해 경량성을 요구하는 분야의 적용에는 문제점이 있다.

근래에 와서 경량성과 고감쇠특성 그리고 우수한 기계적 특성을 지닌 입자강화 복합재료에 관한 관심이 모아지고 있으며, 그 중에서 흑연과 탄화규소입자(SiC_p)로 강화된 알루미늄기지 복합재료(Aluminum Matrix Composites ; AIMCs)에 많은 연구가 진행되고 있다^[5~7]. AIMC는 경량성, 내마모성^[8,9], 고온에서 치수안정성으로 인해 자동차산업^[10,11]과 우주항공분야에서 사용되고 있다.

입자강화 AIMC의 고감쇠 요인들로 다음과 같은 것들이 있다.

- i) 강화재와 기지 계면에서 내부 마찰(internal friction)에 의한 에너지 분산
- ii) 연성을 지닌 강화재의 미세변형에 의한 감쇠 효과
- iii) 강화재와 기지의 열팽창계수(CTE)차이에 의해 발생하는 계면의 높은 전위(dislocation) 밀도에 의한 에너지 분산
- iv) 계면에 존재하는 미세 공극에 의한 에너지 분산

그 외에 AIMC의 감쇠능에 영향을 미치는 인자로 제조공정, 입자형태, 첨가량, 입자종류 등이 있다^[12].

일반적인 강화입자로 많이 사용되고 있는 SiC_p 자체(intrinsic)로는 감쇠능이 거의 없으나 용융상태에서 Al과 응고되면서 입자의 계면에서 높은 전단응력^[13]이 발생하게 되고, 발생한 전단응력은 전위밀도를 증가시킨다^[14]. 증가된 전위밀도는 Granto-Lücke^[15]이론에 의해 감쇠능을 향상시키게 된다.

흑연은 이방성(anisotropic) 재료로서 graphen plane간의 낮은 결합력으로 인해 외부에서 가해지는 응력에 의해 쉽게 변형되고 변형 과정 동안 가해지는

응력은 내부마찰효과에 의해 열에너지로 소모되어 결국 높은 감쇠능을 나타내는 재료이다. Rohatgi *et al.*^[16]은 AIMC에 첨가된 흑연입자에 직선적으로 비례하여 감쇠능이 증가한다고 보고하였다.

본 연구에서 흑연과 SiC_p가 균일하게 첨가된 AIMC를 강화입자의 조성별로 주조하여 강화입자 조성에 따른 감쇠특성을 알아보고자 하였다. 또한, 고감쇠 재료인 Mn-Cu계 합금과 주조용 알루미늄합금인 A356과 감쇠특성을 비교분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 잉곳은 INCO사의 GrA-Ni 10S4G, DURALCAN사의 F3S20S, 창원특수강에서 공급받은 Mn-Cu계 합금 그리고 A356 Al합금이다. 각각의 화학적 조성 및 강화재 조성 그리고 기계적 특성은 표 1과 표 2에 나타나 있다. INCO사의 GrA-Ni 10S4G는 A356에 4vol.%의 Ni 코팅된 흑연입자와 10vol.%의 SiC_p가 첨가된 잉곳이며, Duralcan사의 F3S20S는 A356에 20vol.%의 SiC_p만 첨가된 잉곳이

[표 1] Compositions for A356, AIMCs and Mn-Cu alloy

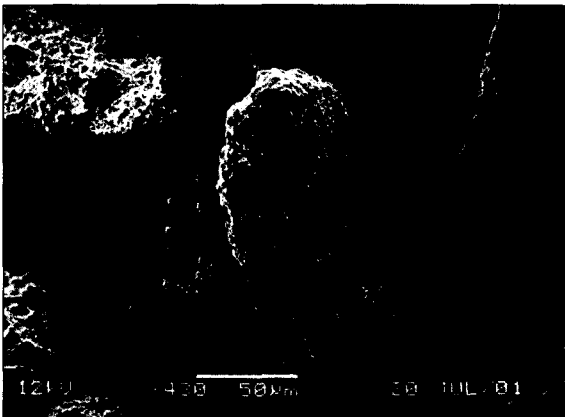
	합금원소(wt.%)							강화재 (vol.%)	
	Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Ni	Al	SiC _p	흑연
GrA-Ni	9.2	0.58	0.16	0.10	0.19	-	Bal.	10	4
F3S20S	9.7	0.39	0.81	0.39	-	-	Bal.	20	-
Mn-Cu alloy	-	-	3.0	54.25	37.0	1.5	4.25	-	-
A356	7.0	0.35	0.15	0.05	0.1	-	Bal.	-	-

[표 2] Mechanical properties for A356, AIMCs and Mn-Cu alloy

	A 356	F3S 20S	GrA- Ni	Mn-Cu alloy
UTS (MPa)	262	317	275	586
Yield Strength (MPa, 0.2% offset)	185	310	260	275 (0.1% proof stress)
Elongation, %	5.0	0.4	0.55	25
Hardness (HRB)	57	77	71	150 (Brinell)
Density (g/cm ³)	2.68	2.77	2.73	6.92

[표 3] Reinforcement contents(vol.%) and casting condition for each specimen

No	Specimens	SiC _p	흑연	용해조건
1	A356	-	-	잉곳 재용해
2	Al-10%SiC _p -4%C _p	10	4	잉곳 재용해
3	Al-10%SiC _p -10%C _p	10	10	2번 시편에 Ni-코팅된 흑연첨가
4	Al-20%SiC _p -0%C _p	20	-	잉곳 재용해
5	Al-20%SiC _p -4%C _p	20	4	4번 시편에 Ni-코팅된 흑연첨가
6	Mn-Cu alloy	-	-	재용해



[그림 1] SEM micrograph of Ni-coated graphite

다. AIMC의 흑연 조성을 변화시키고자 사용된 Ni 코팅된 흑연입자는 INCO사의 상품명 NOVAMET을 사용하였다. NOVAMET의 SEM사진은 그림 1에 나타나 있다. 각 시편의 자세한 주조조건은 표 3에 나타나 있다.

표 3에 나타난 바와 같이 네 종류의 AIMC를 강화재 조성별로 고주파용해로를 사용하여 주조하였다.

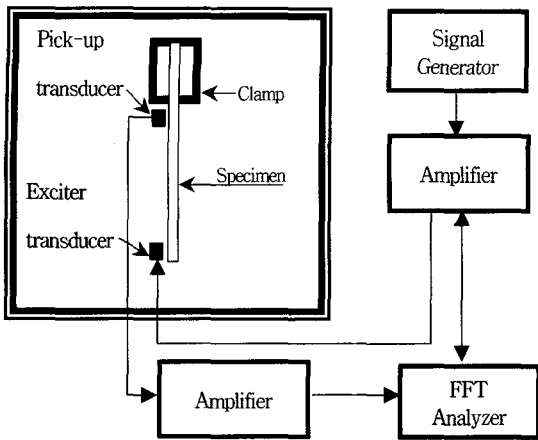
AIMC 주조시 사용된 stir-casting과정은 문헌을

참조하였다^[17]. Ni 코팅된 흑연입자는 첨가 전 약 400℃에서 2시간 정도 가열 후 첨가하였다. 흑연입자 첨가시 교반기의 회전속도는 500rpm으로 조절하였으며, 입자 첨가 후 교반시에는 200rpm으로 회전속도를 조절하였다. 주조된 AIMC와 A356시편은 T6조건(540℃에서 12시간 용체화 처리 후 급냉, 그리고 160℃에서 24시간 시효처리)으로 열처리를 하였다.

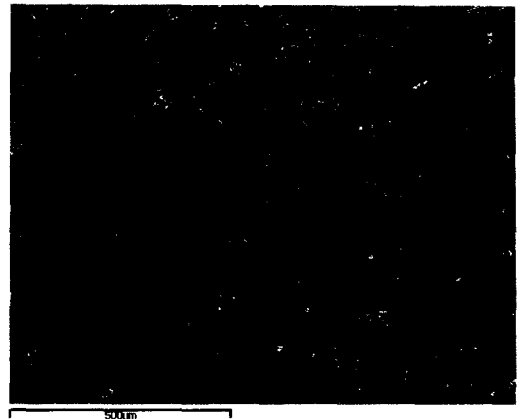
시편에 대해 미세조직관찰은 시편 연마 후 JEOL사의 전자주사현미경(SEM), JSM-5900을 사용하였으며, 화학조성분석은 Oxford사의 EDS, INCA Energy 200을 사용하였다.

감쇠능 측정에 사용된 감쇠능측정장치의 구성은 그림 2와 같다.

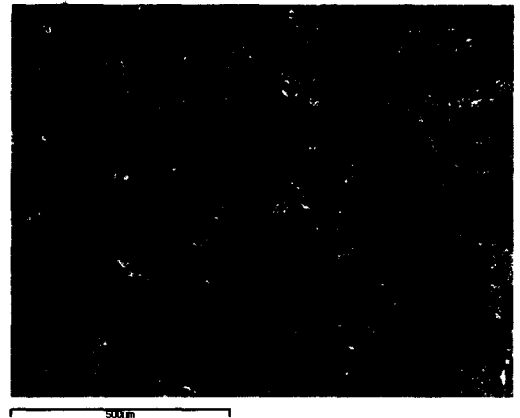
감쇠능 측정은 시편의 한쪽 끝을 클램프로 고정시킨 후 비접촉식 가진용 트랜스듀서(exciter transducer, B&K사 MM0002)를 이용해 시편을 진동시키고 측정 시편의 반대편에 부착된 비접촉식 측정용 트랜스듀서(pick-up transducer, B&K사, MM0004)로 응답



[그림 2] Damping measurement system



(a)



(b)



(c)

성을 측정하였다. 응답신호는 휴렛-팩커드(Hewlett-Packard)사의 FFT(Fast-Fourier Transform, 35670A) 분석기를 이용해 주파수응답함수(frequency response function)로 분석하였다.

감쇠능 측정은 외팔보(clamped-free flexure)방식의 ASTM E756-83의 측정법을 사용하였으며, 감쇠능 측정용 시편은 오버스트식(Oberst-Type)으로 크기는 10×2×150 mm이다.

감쇠능 측정 결과에서 굽힘진동모드별로 감쇠손실 계수(damping loss factor), η 를 $(f_2 - f_1) / f_r$ 로 구하였다. f_2 와 f_1 은 주파수응답함수의 최고점(f_r)에서 3dB만큼 낮은 반대역(half-power bandwidth) 주파수이다.

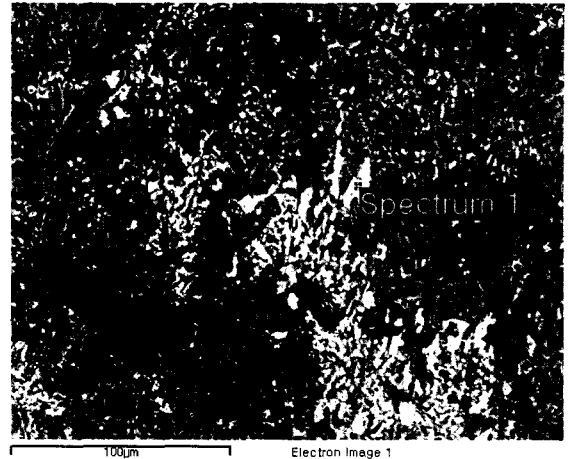
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미세조직

주조된 AIMC의 SEM(backscattered electron image의 compo-image) 미세조직사진이 그림 3에 나타나 있다. 그림 3을 통해 AIMC에 첨가된 흑연입자



(d)



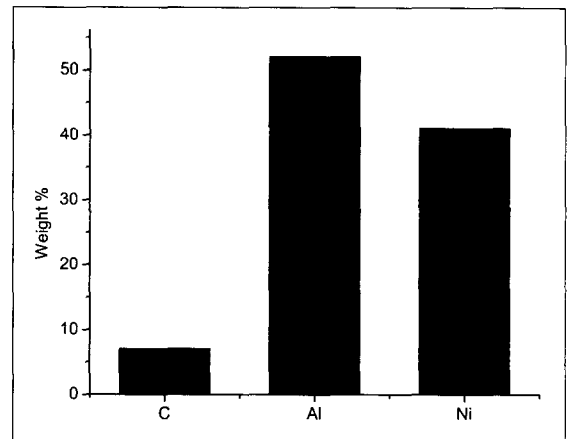
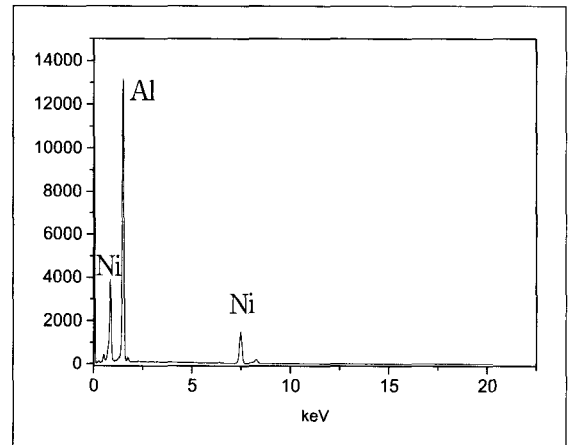
[그림 3] SEM micrographs for (a) Al-10%SiC_p-4%C_p,
 (b) Al-10%SiC_p-10%C_p,
 (c) Al-20%SiC_p-0%C_p, (d) Al-20%SiC_p-4%C_p

및 SiC_p가 균일하게 분포되어있음을 확인하였으며 기공은 관찰되지 않았다. Ni 코팅된 흑연입자를 첨가한 시편(그림 3(a), (b)와 (d))의 경우 Rajan *et al.*^[18]의 보고와 같이 흑연입자에 코팅된 Ni이 기지금속인 Al에 대해 입자표면의 젖음성을 향상시킴으로 첨가와 균일한 분산이 이루어짐을 확인하였다. 그림 3의 (a), (b), (d)에서 흰색으로 나타나는 영역에 대해서 EDS 분석을 실시하였다. 그 결과가 그림 4에 나타나 있다. Ip *et al.*^[19]의 연구보고에서 Ni이 기지의 Al과 반응하여 Al₃Ni가 생성되는 것으로 보고하였는데 그들의 실험결과와 본 실험에서 행한 합금조성 및 실험 조건을 비교해 볼 때 그림 3의 흰부분에 대한 그림 4의 EDS 분석 결과로 보아 이 석출물은 Al₃Ni인 것으로 사료된다.

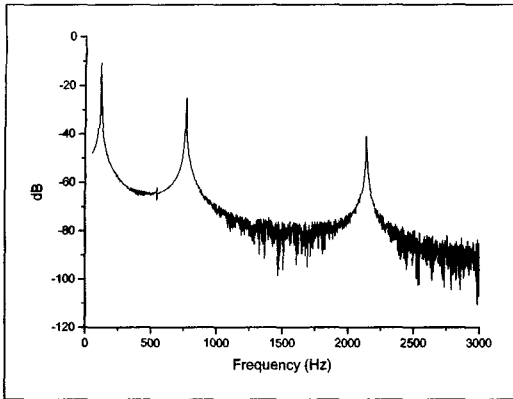
3.2 진동감쇠특성

3.2.1 재료별 진동감쇠특성

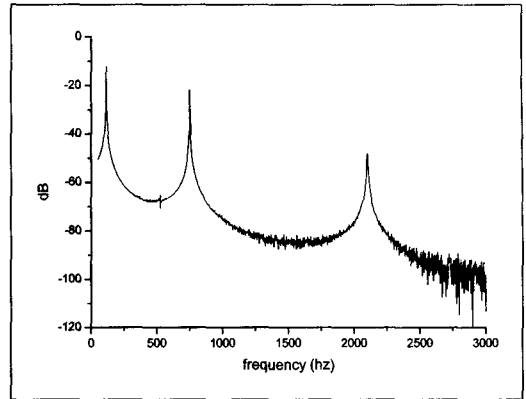
그림 5는 각 시편들의 굽힘진동시험 결과를 주파수 응답함수로 나타낸 것이다. AIMC들은 50에서부터



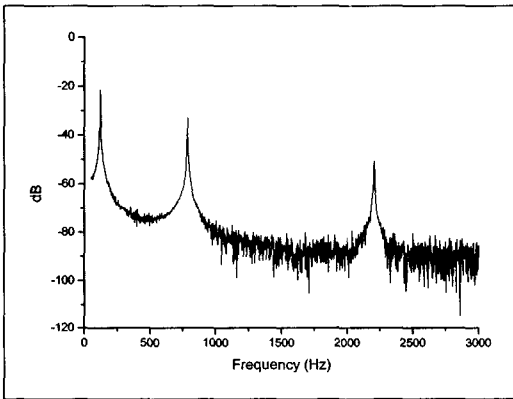
[그림 4] SEM micrograph and EDS analysis result conducted on Al₃Ni of Al-10%SiC_p-10%C_p



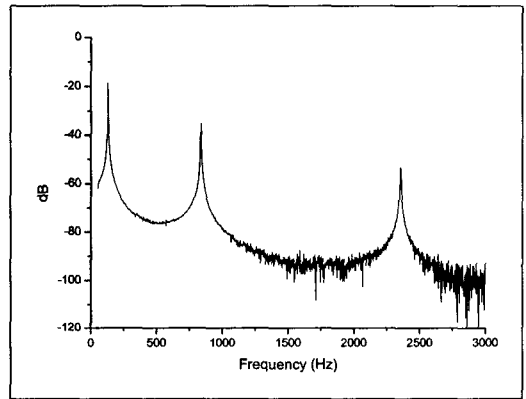
(a) Al-10%SiCp-4%Cp



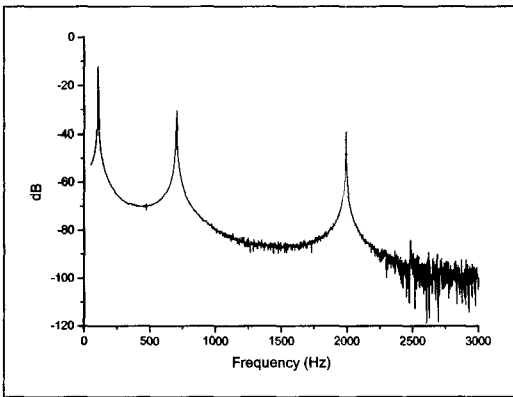
(b) Al-10%SiCp-10%Cp



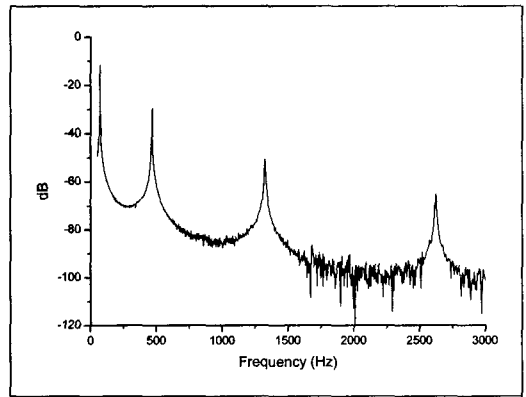
(c) Al-20%SiCp-0%Cp



(d) Al-20%SiCp-4%Cp



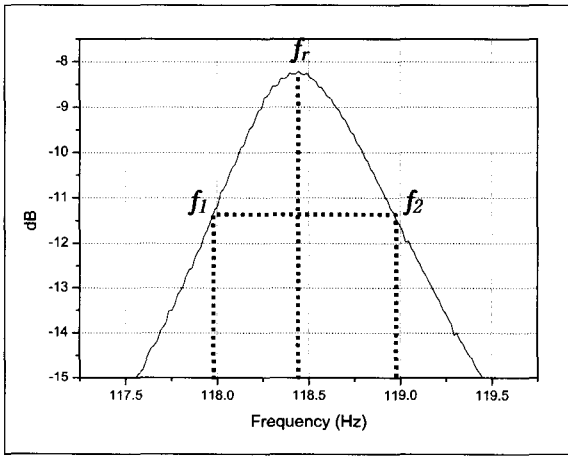
(e) A356



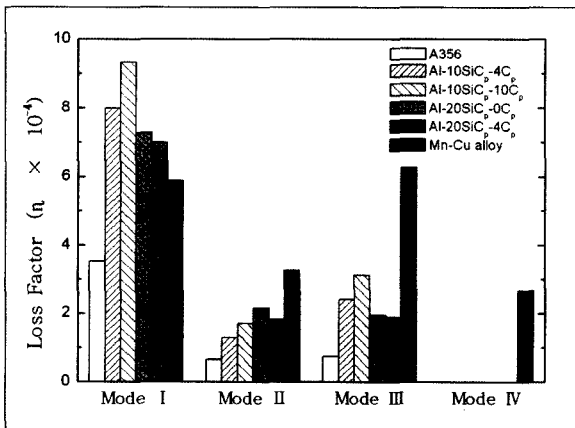
(f) Mn-Cu alloy

[그림 5] Frequency response spectrum for A356, AlMCs and Mn-Cu alloy excited with broadband white noise

3,300Hz의 주파수 범위에서 3개의 굽힘진동모드가 나타나는 반면 Mn-Cu계 합금은 4개의 굽힘진동모드가 관찰된다. AIMC의 mode I 공진주파수는 약 110Hz 근처에서 나타나며 mode II는 약 700Hz 그리고 mode III의 경우 약 2,000Hz에서 나타났다. 측정된 결과를 바탕으로 그림 6에 나타난 바와 같이 반대역 방법을 적용하여 각 굽힘진동모드별 감쇠손실계수를 구하였으며 그 결과가 그림 7에 나타나 있다. Mode I



[그림 6] Half-power bandwidth measurement for Al-10%SiC_p-10%C_p



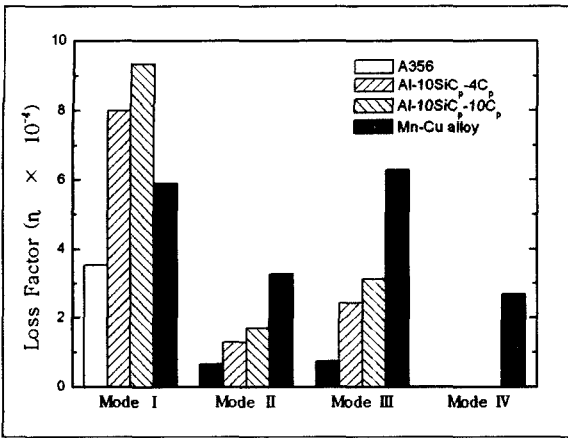
[그림 7] Loss factors for A356, AIMCs and Mn-Cu alloy

에서 AIMC시편들의 감쇠능이 A356보다 2배 이상 높으며 고감쇠재료인 Mn-Cu계 합금보다 감쇠특성이 우수함을 확인하였다. A356과 Al-10%SiC_p-4%C_p 그리고 Al-20%SiC_p-0%C_p의 굽힘진동감쇠 측정결과를 Lee *et al.*^[20]의 impulse-frequency response법을 이용한 측정결과와 비교하여 mode I과 mode III에서 일치한다. AIMC중 mode I에서 가장 감쇠특성이 우수한 Al-10%SiC_p-10%C_p의 감쇠손실계수는 0.000933으로 A356에 비해 2.64배 그리고 Mn-Cu계 합금에 비해 1.58배 높다. Mode II와 mode III에서는 Mn-Cu계 합금의 감쇠손실계수가 mode II와 mode III에서 각각 0.000325와 0.000627로 AIMC들에 비해 높다. 이는 mode I에서는 AIMC에 첨가된 흑연입자와 SiC_p 첨가로 인한 감쇠기구가 Mn-Cu계 합금의 감쇠기구로 알려진 쌍정계(twin boundaries)의 이동성과 비강자성(anti-ferromagnetic)^[21]에 의한 감쇠효과보다 더 효과적으로 작용하는 반면 mode II와 mode III에서는 Mn-Cu계 합금의 감쇠기구가 더 효과적이기 때문인 것 같다. 실제로 어떠한 굽힘진동모드가 소음감소에 효과가 있는지는 정확히 알 수 없지만, 추가적인 시험을 통해 AIMC와 Mn-Cu계 합금의 소음특성이 거의 유사함을 확인하였다^[22].

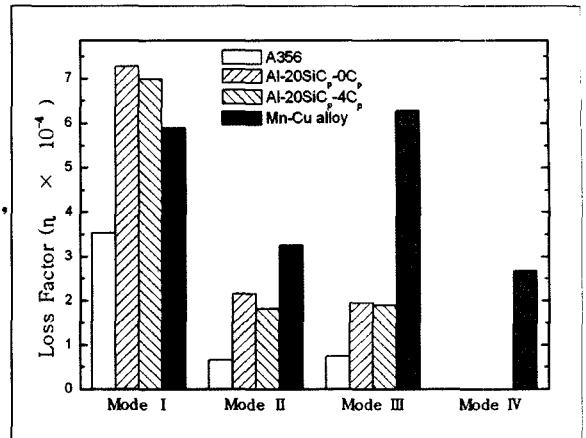
3.2.2 흑연함량에 따른 진동감쇠특성

그림 8에서 10vol.%의 SiC_p를 함유하고 있는 AIMC들의 흑연입자 함량에 따른 감쇠능변화를 살펴보면, 감쇠능은 첨가된 흑연입자의 함량이 4에서 10vol.%로 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다.

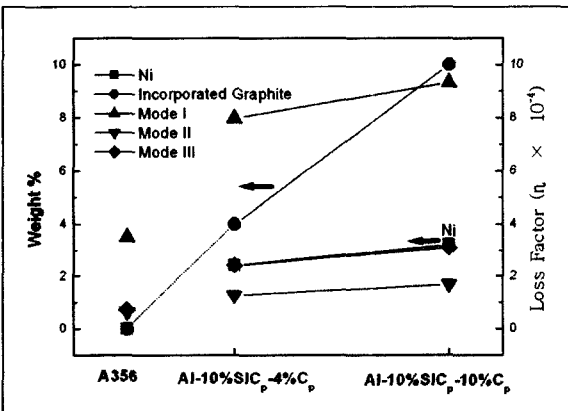
Rohatgi *et al.*^[12]은 흑연입자를 첨가한 AIMC의 감쇠능은 첨가된 흑연입자의 함량에 따라 직선적(linear)으로 증가한다고 발표하였다. 그림 8에서 AIMC의 감쇠능은 첨가된 흑연입자의 함량에 따라 증가하지만



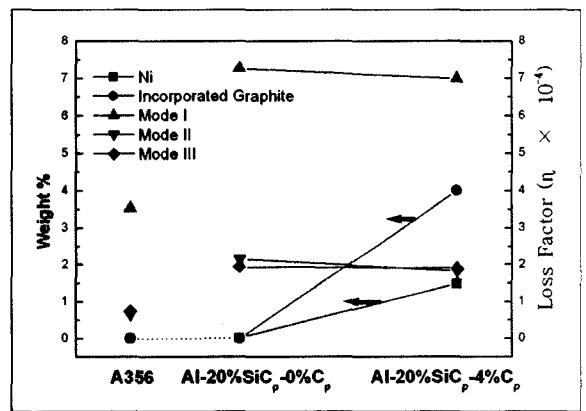
[그림 8] Loss factors for A356, Al-10%SiC_p-4%C_p, Al-10%SiC_p-10%C_p and Mn-Cu alloy



[그림 10] Loss factors for A356, Al-20%SiC_p-0%C_p, Al-20%SiC_p-4%C_p and Mn-Cu alloy



[그림 9] Variation of loss factors, Ni content and incorporated graphite particles for A356, Al-10%SiC_p-4%C_p, Al-10%SiC_p-10%C_p



[그림 11] Variation of loss factors, Ni content and incorporated graphite for A356, Al-20%SiC_p-0%C_p, Al-20%SiC_p-4%C_p

Rohatgi *et al.*이 발표한 바와 같은 직선적인 감쇠능 증가를 따른다고 보기에 본 실험결과를 통해서 어려운 것 같다. 그림 9에서 Ni 코팅된 흑연입자의 첨가량이 4에서 10vol.%로 증가됨에 따라 Ni의 wt.%도 증가함을 알 수 있다.

그림 10에서 20vol.%의 SiC_p를 포함한 AIMC의 감쇠능 측정결과가 나타나있다. Al-20%SiC_p-4%C_p와 Al-20%SiC_p-0%C_p의 감쇠능은 A356에 비해 높지만

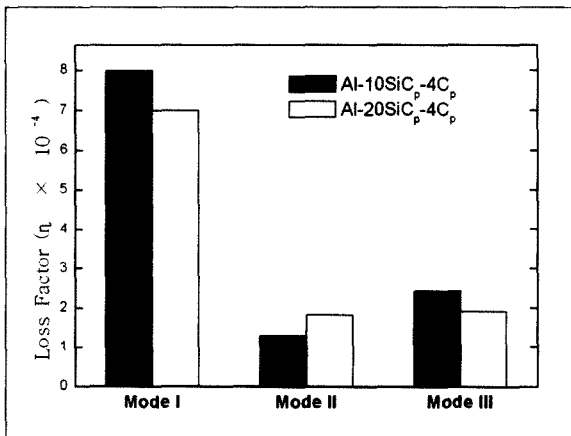
Ni 코팅된 흑연입자가 첨가된 Al-20%SiC_p-4%C_p의 감쇠능은 Al-20%SiC_p-0%C_p보다 모든 굽힘진동모드에서 낮다.

그림 11에 나타난 20vol.%의 SiC_p를 포함한 AIMC에서 Ni 코팅된 흑연입자의 첨가량에 따른 Ni 함량 변화를 살펴보면 Ni이 측정되지 않은 Al-20%SiC_p-0%C_p에 비해 Ni 코팅된 흑연을 첨가시킨 Al-20%SiC_p-4%C_p에서는 Ni의 함량이 1.47%로

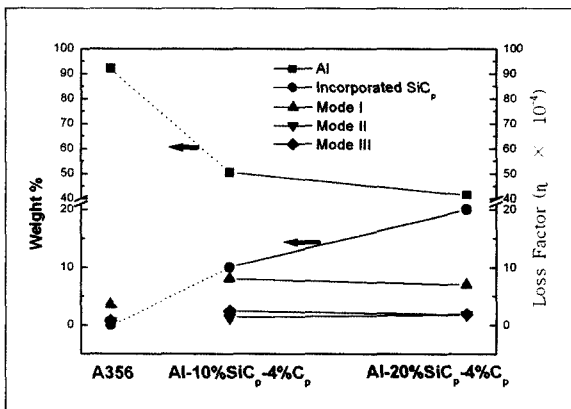
측정되면서 감쇠능이 감소하였다. 이러한 결과에서 Ni 코팅된 흑연입자첨가에 따른 Al-20%SiC_p-4%C_p의 감쇠능 감소는 흑연입자에 코팅된 Ni과 관계가 있는 것으로 사료된다.

3.2.3 SiC_p 함량에 따른 감쇠특성분석

SiC_p 입자의 조성변화에 따른 AIMC의 감쇠능 변화가 그림 12에 나타나 있다. 알루미늄에 동일한 4vol.%의 흑연입자를 포함하고 SiC_p의 함량만



[그림 12] Variations of loss factors with SiC_p content.



[그림 13] Variation of loss factors with SiC_p and Al contents

10vol.%와 20vol.%로 증가할 경우 감쇠능은 mode II 를 제외하고 감소한다. 이는 Aghajanian *et al.*^[10]과 Zhang *et al.*^[14]의 AIMC에서 SiC_p 함량증가에 따른 감쇠능변화 측정결과와 일치한다.

Aghajanian *et al.*은 SiC_p 증가에 따라 감쇠능은 초기에는 증가하다가 이후 감소한다고 보고하였으며 이는 SiC_p의 vol.%가 증가함에 따라 Al 기지의 부피 감소와 관련이 있을 것이라고 보고하였다. 그림 13에서 EDS분석결과 SiC_p가 증가함에 따라 Al기지 함량이 감소함을 확인하였다.

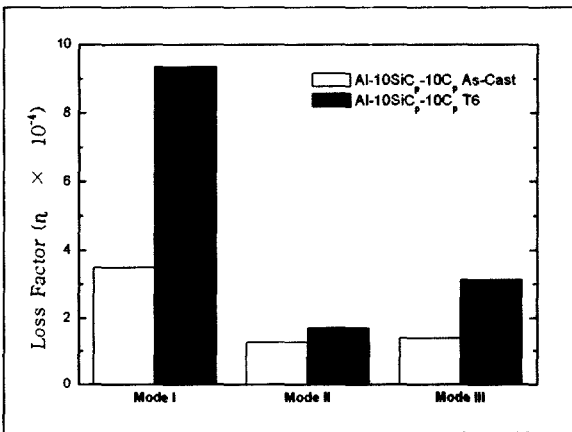
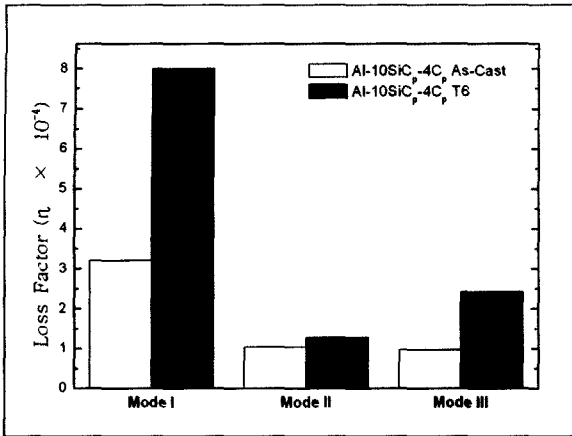
3.2.4 열처리가 감쇠능에 미치는 영향

Al-10%SiC_p-4%C_p와 Al-10%SiC_p-10%C_p 시편에 대해 주조 후와 T6조건에서 열처리 후의 감쇠능변화를 조사하였으며 그 측정결과가 그림 14에 나타나 있다. 그림 14의 결과를 통해서 주조 후 시편에 비해서 T6조건에서 열처리한 후에 감쇠능이 증가함을 알 수 있다.

4. 결 론

SiC_p와 Ni 코팅된 흑연입자를 첨가한 여러 조성의 AIMC를 주조하여 A356, Mn-Cu계 합금과 감쇠특성을 비교분석하였다.

1. 감쇠능 측정결과 mode I에서 AIMC가 기존의 고 감쇠 재료로 알려진 Mn-Cu계 합금보다 감쇠특성이 우수하였으며, mode II와 III에서는 Mn-Cu계 합금의 감쇠특성이 AIMC보다 우수하였다. 이러한 결과는 mode II와 III에서 Mn-Cu계 합금의 감쇠기구인 쌍정계(twin boundaries)의 이동성과



[그림 14] Variation of loss factors after as-casted and T6

비강자성(anti-ferromagnetic)에 의한 감쇠효과가 AIMC의 감쇠기구보다 더 효과적으로 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

2. 10vol.% SiC_p를 첨가한 AIMC들은 첨가된 흑연입자의 함량에 따라 감쇠능이 증가하였지만, 20vol.%의 SiC_p를 첨가한 AIMC들은 Ni 코팅된 흑연이 첨가되지 않은 Al-20%SiC_p-0%C_p에 비해 Ni 코팅된 흑연이 첨가된 Al-20%SiC_p-4%C_p의 감쇠능이 더 낮았다.

3. SiC_p 함량에 따른 감쇠특성을 조사한 결과 20vol.%의 SiC_p를 첨가한 AIMC에 비해서 10vol.%의 SiC_p를 첨가한 AIMC의 감쇠능이 mode I과 III에서 높았다. 또한, T6조건에서의 열처리가 AIMC의 감쇠능을 증가시킴을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] B. Taylor, New Scientist, Jan., 14. 1989, p.41.
- [2] H. Kolsky, Mechanics and Mechanisms of Material Damping, ASTM, Philadelphia, PA., 1992, pp.4~27.
- [3] J. Zhang, R. J. Perez, C. R. Wong and E. J. Lavernia, "Effects of Secondary Phases on the Damping Behavior of Metals, Alloys, and Metal Matrix Composites", Mater. Sci. Eng., Vol.R13, 1994, pp.325~389.
- [4] I. G. Ritchie, K. W. Sprungmann and M. Sahoo, "A High Damping Mn/Cu-Based Alloy for Marine Propeller Applications", J. de Physique, Vol.46, 1985, pp.C10-409~C10-412.
- [5] I. A. Ibrahim, F. A. Mohamed and E. J. Lavernia, "Particulate reinforced metal matrix composites-a review", J. Mater. Sci., Vol.26, 1991, pp.1137~1156.
- [6] J. Kim, S. K. Lee and E. J. Jun, "금속복합재료", Bull. of Kor. Inst. Met., Vol.3, No.2, 1990, pp.130~141.
- [7] C. R. Wong and S. Holcomb, Mechanics and Mechanisms of Material Damping, ASTM, Philadelphia, PA., 1992, pp.76~93.

- [8] B. C. Pai, P. K. Rohatgi and S. Venkatesh, "Wear Resistance of Cast Graphite Aluminum Alloys", *Wear*, Vol.30, 1974, pp.117~125.
- [9] H. Chen and A. T. Alpas, "Wear of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Nickel-Coated Carbon Fibers", *Wear*, Vol.192, 1996, pp.186~198.
- [10] M. K. Aghajanian, C. A. Andersson, R. J. Wlener, and B. R. Rossing, "High Reinforcement content Metal Matrix Composites for Automotive Applications", SAE Technical Paper Series 950263, International Congress and Exposition Detroit, Michigan, Feb, 27 Mar. 2, 1995, p.1.
- [11] S. Boulton and R. Whitaker, "Performance Characteristics of Al MMC Rotor Materials", SAE Technical Paper Series 973025, International Congress and Exposition Detroit, Michigan, Feb, 27 Mar. 2, 1995, p.63.
- [12] P. K. Rohatgi, D. Nath, S. S. Singh and B. N. Keshavaram, "Factors Affecting the Damping Capacity of Cast Aluminum-Matrix Composites", *J. Mater. Sci.*, Vol.29, 1994, p.5975.
- [13] M. Taya and R. J. Arsenault. *Metal Matrix Composites*, Pergamon Press, Oxford, 1989, p.51.
- [14] J. Zhang, R. J. Perez and E. J. Lavernia, "Effect of SiC and Graphite Particulates on the Damping Behavior of Metal Matrix Composites", *Acta Metall. Mater.*, Vol.42, No.2, 1994, pp.395~409.
- [15] A. Wolfenden and J. M. Wolla, "Metal Matrix Composite: Mechanism and Properties", Academic Press, Boston, 1991, pp.287~328.
- [16] P. K. Rohatgi, R. Asthana, and A. Kumar, "Damping Capacity of Aluminum Alloy Matrix Composites", World Materials Congress, 1988, p.375.
- [17] W. Wu and J. Beech, "The Production of Aluminum-Graphite Particle Composites by Using the Full Mold Process", *The Foundryman*, Feb., 1990, p.83.
- [18] T. P. D. Rajan, R. M. Pillai, B. C. Pai, "Review Reinforcement Coatings and Interfaces in Aluminium Metal Matrix Composites", *J. Mat. Sci.*, Vol. 33, 1998, p.3491.
- [19] S. W. Ip, R. Sridhar, J. M. Toguri, T. F. Stephenson, and A. E. M. Warner, "Wettability of Nickel Coated Graphite by Aluminum", *Mater. Sci. Eng.*, Vol.A244, 1998, p.31.
- [20] D. G. Lee, S. H. Ko, S. S. Kim and S. H. Lee, "Al-Si계 주조복합재료의 진동감쇠능에 미치는 강화입자의 영향", *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol.40, No.9, 2002, pp.970~975.
- [21] S. P. Rawal, J. H. Armstrong and M. S. Misra, "Damping Characteristics of Cast Graphite-Magnesium Composites", *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol.9, No.[7-8], 1988, pp.1001~1008.

[22] Y. S. Choi, S. S. Kim and T. U. Hur, "A Comparative Study on Propulsor Materials for Underwater Weapons", Proceedings of

Undersea Defense Technology, Nexus Media, Cheju, Korea, 2002.