creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:48009-200000173941

공학석사 학위논문

그래핀 감쇠재의 수치해석 모델에 관한 연구

Study on Numerical Analysis Model of Graphene Damping Material

울산대학교 대학원
중공업융합기술공학과
이 현 규

그래핀 감쇠재의 수치해석 모델에 관한 연구

지 도 교 수 김 동 해

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2018년 12월

울산대학교 대학원
중공업융합기술공학과
이 현 규

이현규의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 유 정 수 (인)

심사위원 김 동 해 (인)

심사위원 강 옥 현 (인)

울산대학교 대학원

2019 년 2 월

그래핀 감쇠재의 수치해석 모델에 관한 연구

이현규

울산대학교 중공업융합기술공학과

국문 요약

오늘날 다양한 산업 분야에서 진동과 소음을 저감하는 사안은 중요하게 여겨지고 있다. 진동과 소음은 기계나 구조물의 문제를 발생시키며, 손상과 수명저하의 원인이 되며, 특히 일반적인 금속으로 만들어진 기계나 구조물은 자체의 진동 감쇠능력이 떨어져 문제 발생 가능성이 더 커지게 된다. 이러한 자체 감쇠 성능이 부족한 단점을 보완하기 위하여, 보편적으로 점탄성 감쇠재료가 사용되고 있다. 점탄성 재료는 진동 감쇠 기능과 소음을 저감하는 기능을 동시에 갖고 있으며, 이는 점탄성 재료의 진동 에너지를 소산시키는 능력에 기인한다.

점탄성 재료는 주파수와 온도에 따라 감쇠 성능이 변하는 성질을 가지고 있으므로 사용하는 환경에 따라 감쇠성능을 예측하여 사용하는 것이 필요하다. 본 연구에 사용된 점탄성재인 그래핀 감쇠재는 폴리우레탄을 베이스로 한 재료에 산화 그래핀을 조각의 형태로 혼합하여 기존의 폴리우레탄의 감쇠성능보다 더 성능을 향상시키기 위하여 만든 새로운 재료이다.

점탄성 측정 방법은 크게 선형 점탄성과 비선형 점탄성으로 나눌 수 있으며, 본 연구는 선형 점탄성 범위에서 시험을 진행하였다. 시험 방법으로는 외팔보의 공진법을 사용하는 ASTM-E756을 채택하였고, 시험 오차를 줄이기 위하여 루트 부가있는 빔 시편을 제작하였으며, 주파수 영역에서 감쇠재의 영 모듈러스, 전단 모듈러스, 손실계수를 측정하였다. 또한, 시험의 신뢰도를 높이기 위하여 임팩트해머를 이용한 방법과 자석가진 방법으로 측정하여 결과를 비교하였다.

계측을 통하여 얻어진 결과로부터 사용 주파수 대역에 대한 감쇠재의 성능의 경향성을 예측하기 위하여 점탄성 재료를 모델링하였다. 모델링 방법으로 일반화된 맥스웰 모델을 사용하고, 유전자 알고리즘을 이용한 최적화를 통하여 적절한 차수를 선택하여 점탄성재료의 성능을 예측할 수 있는 모델을 결정하였다.

본 연구의 방법을 사용하여, 그래핀 감쇠재 이외에도 새로운 점탄성 감쇠재를 개발할 때 사용한다면, 사용되는 환경에 맞는 적합한 감쇠재를 제작할 수 있을 것으로 생각하며 다양한 산업에 적용될 가능성이 있다고 판단된다.

목 차

목 차 ····· i

List of Tables ····· iii

List of Figures ····· iii

1. 서론 ····· 1

1.1. 연구의 배경 및 필요성 ····· 1

1.2. 점탄성재 관련 연구 문헌 조사 ····· 3

1.3. 그래핀 감쇠재 ····· 5

2. 이론 ····· 6

2.1. 감쇠와 점탄성재료의 이론 ····· 6

2.1.1. 감쇠(Damping) ····· 6

2.1.2. 손실계수 측정법 ····· 7

2.1.3. Q-factor ····· 9

2.2. 점탄성물질(Viscoelastic material) ····· 10

2.3. 푸리에 변환(Fourier transform) ····· 11

2.4. 선형 점탄성 모델 ····· 12

2.4.1. 점탄성재에서 온도와 주파수에 의한 영향 ····· 13

2.4.2. 유리 천이 온도 (Glass transition temperature) ····· 14

3. 점탄성재료의 특성 계측 ····· 15

3.1. 시험방법 ····· 16

3.1.1. 임팩트해머 시험신호 ····· 17

3.1.2. 자석가진 시험신호 ····· 18

3.1.3. SDOF 시스템의 조화 응답(Harmonic response) ····· 19

3.1.4. SDOF 시스템의 충격 응답(Impulse response) ····· 20

3.1.5. 보의 오일러 방정식 ····· 20

3.1.6. 베이스 빔 계산 방법 ····· 22
3.1.7. Oberst 빔 계산 방법 ····· 23
3.1.8. Sandwich beam 계산 방법 ····· 24
3.2. 시험장치 ····· 25
3.2.1. 자석가진 시험 장치 개요도 ····· 28
3.3. 시편 사양 ····· 29
3.4. 계측 결과 ····· 31
3.4.1. Base beam ····· 31
3.4.2. Oberst beam ····· 32
3.4.3. Sandwich beam ····· 35
3.4.4. 그래핀 감쇠재와 폴리우레탄 감쇠재 비교 ····· 38
3.5. 시험결과 분석 ····· 42
4. 점탄성재료의 모델링 ····· 45
4.1. 최적화 기법(Optimization) ····· 47
4.2. 유전 알고리즘 ····· 48
4.3. 모델의 적용 ····· 49
4.3.1. 그래핀 감쇠재 시험 결과 ····· 49
4.3.2. Maxwell model ····· 53
4.3.3. Kelvin-Voigt model ····· 53
4.3.4. Generalized Maxwell model ····· 53
4.4. Optimization 결과 비교 ····· 62
5. 결론 및 향후 과제 ····· 63
참고 문헌 ····· 64
ABSTRACT ····· 66

List of Tables

Table. 1 Dimension of specimens ····· 29
Table. 2 Test results of 250mm graphene specimens ····· 43
Table. 3 Test results of 300mm graphene specimens ····· 43
Table. 4 Test results of 300mm polyurethane specimens ····· 43
Table. 5 Test results of 350mm graphene specimens ····· 43

List of Figures

Fig. 1-1 The conceptual picture of the graphene damping material ····· 5
Fig. 1-2 Mixing of main ingredient & hardener ····· 5
Fig. 2-1 1/N-power bandwidth method ····· 7
Fig. 2-2 Continuous peak response ····· 8
Fig. 2-3 Q-factor ····· 9
Fig. 2-4 Viscoelastic material's stress & strain ····· 10
Fig. 2-5 Maxwell model ····· 12
Fig. 2-6 Kelvin-Voigt model ····· 12
Fig. 2-7 Standard model ····· 12
Fig. 2-8 Generalized Maxwell model ····· 12
Fig. 2-9 Viscoelastic material's Young's modulus & loss factor ····· 13
Fig. 2-10 Young's modulus vs Loss factor ····· 13
Fig. 2-11 Glass transition temperature ····· 14
Fig. 2-12 Viscoelastic material's shear modulus & loss factor ····· 14
Fig. 3-1 ASTM E-756 specimens ····· 16
Fig. 3-2 Time signal of impact hammer test ····· 17
Fig. 3-3 Time signal of accelerometer ····· 17
Fig. 3-4 Frequency response function of impact hammer test ····· 17
Fig. 3-5 Time signal of magnetic excitation ····· 18

Fig. 3-6 FRFs each mode of magnetic excitation(300mm Oberst beam) ····· 18
Fig. 3-7 Single degree of freedom model ····· 19
Fig. 3-8 Beam element ····· 20
Fig. 3-9 Configuration diagram of measurement equipment ····· 25
Fig. 3-10 Exciter ····· 26
Fig. 3-11 Magnetic excitation test device ····· 26
Fig. 3-12 Power amplifier ····· 27
Fig. 3-13 Function generator ····· 27
Fig. 3-14 Conceptual diagram about magnetic excitation ····· 28
Fig. 3-15 Oberst beam specimens ····· 30
Fig. 3-16 Young's modulus of base beam (impact hammer test) ····· 31
Fig. 3-17 Young's modulus of base beam (magnetic excitation) ····· 31
Fig. 3-18 Young's modulus about comparative test result ····· 32
Fig. 3-19 Loss factor about comparative test result ····· 32
Fig. 3-20 Young's modulus about comparative test result ····· 33
Fig. 3-21 Loss factor about comparative test result ····· 33
Fig. 3-22 Young's modulus about comparative test result ····· 34
Fig. 3-23 Loss factor about comparative test result ····· 34
Fig. 3-24 Shear modulus about comparative test result ····· 35
Fig. 3-25 Shear loss factor about comparative test result ····· 35
Fig. 3-26 Shear modulus about comparative test result ····· 36
Fig. 3-27 Shear loss factor about comparative test result ····· 36
Fig. 3-28 Shear modulus about comparative test result ····· 37
Fig. 3-29 Shear loss factor about comparative test result ····· 37
Fig. 3-30 Young's modulus about graphene & polyurethane ····· 38
Fig. 3-31 Loss factor about graphene & polyurethane ····· 38
Fig. 3-32 Shear modulus about graphene & polyurethane ····· 39

Fig. 3-33 Shear loss factor about graphene & polyurethane ····· 39
Fig. 3-34 Average Young's modulus about graphene & polyurethane ····· 40
Fig. 3-35 Average loss factor about graphene & polyurethane ····· 40
Fig. 3-36 Average Shear modulus about graphene & polyurethane ····· 41
Fig. 3-37 Average Shear loss factor about graphene & polyurethane ····· 41
Fig. 4-1 Maxwell model ····· 45
Fig. 4-2 Kelvin-Voigt model ····· 45
Fig. 4-3 Standard model ····· 45
Fig. 4-4 Generalized Maxwell model ····· 46
Fig. 4-5 An example of finding maximum value on parabolic surface ····· 47
Fig. 4-6 Young's modulus of graphene damping material ····· 49
Fig. 4-7 Young's modulus of graphene damping material ····· 49
Fig. 4-8 Loss factor of graphene damping material ····· 50
Fig. 4-9 Loss factor of graphene damping material ····· 50
Fig. 4-10 Shear modulus of graphene damping material ····· 51
Fig. 4-11 Shear modulus of graphene damping material ····· 51
Fig. 4-12 Shear loss factor of graphene damping material ····· 52
Fig. 4-13 Shear loss factor of graphene damping material ····· 52
Fig. 4-14 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=1) ····· 53
Fig. 4-15 Young's modulus of graphene damping material (k=1) ····· 54
Fig. 4-16 Loss factor of graphene damping material (k=1) ····· 54
Fig. 4-17 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=2) ····· 55
Fig. 4-18 Young's modulus of graphene damping material (k=2) ····· 55
Fig. 4-19 Loss factor of graphene damping material (k=2) ····· 56
Fig. 4-20 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=3) ····· 57
Fig. 4-21 Young's modulus of graphene damping material (k=3) ····· 57
Fig. 4-22 Loss factor of graphene damping material (k=3) ····· 58

Fig. 4-23 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=4) ····· 59
Fig. 4-24 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=5) ····· 59
Fig. 4-25 Curve fitting of sandwich beam by magnetic excitation(k=3) ····· 60
Fig. 4-26 Shear modulus of graphene damping material (k=3) ····· 60
Fig. 4-27 Loss factor of graphene damping material (k=3) ····· 61

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 필요성

산업현장에서 기계나 구조물의 불필요한 진동 및 소음을 줄이는 것은 중요한 사안이다. 최근 진동 및 소음에 대한 규제가 강화되고 있어 진동 및 소음을 저감하는 친환경적인 환경을 만드는 것이 더욱 중요해지고 있다. 그러나 금속재료로 제작되는 대부분의 기계나 구조물은 자체적인 감쇠성능이 작기 때문에 진동 및 소음 문제 발생 가능성이 더 커지게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 표면에 점탄성재(Viscoelastic material)를 처리하여 방진 및 감쇠성능을 높이는 방법이 널리 사용되고 있다.

점탄성(Viscoelastic)이란 물질에 있어, 점성과 탄성을 동시에 가지는 성질을 뜻한다. 점성(Viscosity)이란 유체의 흐름에 저항하는 성질이며, 탄성(Elasticity)이란 물체에 외력이 가해진 뒤 원래의 모양으로 돌아가려는 성질을 뜻한다. 금속재료의 경우 내부감쇠효과가 작아 탄성만을 고려하지만, 고무와 비슷한 대부분의 고분자재료는 금속재료와 달리 내부감쇠효과가 커서 점성과 탄성을 모두 고려하여야 한다.

점탄성재에 대한 물성치 중 진동소음분야에서의 관심의 대상이 되는 물성은 손실계수(Loss factor)와 영 모듈러스(Young's modulus)라고 할 수 있다. 손실계수는 가진된 진동에너지에 대한 손실된 진동에너지의 비(比)로 정의한다. 손실계수가 크다는 것은 진동에너지의 감쇠를 크게 발생시키는 의미로 대표적인 소재로는 고무(Rubber)이다. 영 모듈러스는 재료를 굽힐 때 단단한 정도를 뜻하며 상대적으로 단단한 소재는 영 모듈러스가 크다.

탄성은 외부에너지를 저장하는 역할을 하며, 점성은 재료 내에서 외부에너지를 마찰, 열에너지 등의 형태로 계(System)로부터 에너지를 제거, 소산시키는 역할을 한다. 이 점성효과로 인하여 에너지를 분산하는 특성이 있는 재료를 점탄성재라고 할 수 있다. 대표적인 점탄성재는 고무, 폴리우레탄 등의 고분자물질이다. 일반적으로 이러한 재료들의 점성 및 탄성은 온도와 주파수에 따라 변화하는 것을 실험적으로 알 수 있다.

점탄성재의 성질을 측정하는 방법은 크게 시간영역에서 측정하는 정적인 방법과 주파수 영역에서 측정하는 동적인 방법이 있다. 시간 영역에서 대표적인 측정방법으로 크립(Creep) 응답법과 응력 완화법이 있으며, 주파수 영역에서 대표적인 측정방법으로는 동적 기계 분석법(DMA)과 동적 기계 열 분석법(DMTA)이 있다. 동적 기계 분석법에서 동적 기계 물성(Dynamic mechanical property)을 복소 모듈러스(Complex modulus)의 형태로 얻을 수 있다.[1] 이 복소 모듈러스는 선형 점탄성 이론에서 저장 모듈러스와 손실 모듈러스의 합으로 나타낼 수 있으며, 실수부를 저장 모둘러스(Storage modulus, Elastic component), 허수부를 손실 모듈러스(Loss modulus, Viscous component)라고 부른다.

비공진법은 주파수에 의존하는 손실계수를 측정 주파수 대역 내에서 모두 측정할

수 있는 방법이며, 임피던스 방법(Impedance method)과 전달 함수 방법(Transfer function method)이 있다. 임피던스 방법은 외부에서 동적 힘을 작용하여 동적변위를 측정함으로써 손실계수를 측정하는 방법이며, 전달 함수 방법은 재료의 끝단에 동적변위를 가하고 양단에서의 동적변위를 측정하여 손실계수를 구하는 방법이다. 측정 주파수 영역에서 손실계수를 주파수에 대한 연속함수의 형태로 측정할 수 있는 장점은 있으나, 측정 주파수 대역 내에 필연적으로 존재하는 측정 장치의 고유 진동수에서 일어나는 공진 현상의 영향으로 측정 결과의 신뢰도가 낮아지는 단점을 갖고 있다. 따라서 비공진법 측정 시험 시 측정 장치의 공진 현상에 의한 외부의 영향이 최소화되도록 장치를 구성해야 한다.

공진법은 주파수에 의존하는 손실계수를 공진 주파수에서 측정하는 방법으로 실험방법이 비공진법에 비해 쉬운 장점이 있다. 단점으로는 측정 센서의 감도(Sensitivity)문제로 인하여 가속도 센서를 사용하는 경우에는 저주파수에서 변위센서를 사용하는 경우에는 고주파수에서 신뢰성 있는 실험 결과를 얻기 힘들다. 공진법을 이용한 점탄성 재료의 특성 실험은 대부분 탄성 물질인 금속 표면에 점탄성 물질을 붙여서 실험을 실시하는 것이다.[2]

본 연구에서는 공진법을 사용하는 ASTM-E756(American Society for Testing and Materials)[3]을 선택하고 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용한 곡선 맞춤법(Curve-fitting method)을 이용하여 정확성을 높였다. 따라서 점탄성재료의 성능을 미리 예측할 수 있게 하는 진동 해석을 실시하였다. 또한 정확한 손실계수와 영 모듈러스를 얻기 위해 넓은 주파수 영역에서 측정하는 공진법을 이용하여 가속도계 센서를 사용하고 부가 질량의 영향이 없는 충격 망치(Impact hammer)를 사용한 방법과 가진기(Exciter)를 이용한 자석 가진장치를 만들어 공진점 부근에서 정현파 스위프(Sine sweep)를 한 방법을 비교하여 실험의 정확도를 올리고자 하였다.

1.2. 점탄성재 관련 연구 문헌 조사

점탄성물질의 진동 혹은 구조물에서 진동감쇠특성 및 제어 등에 대한 이론적 해석 및 실험에 대해 오래전부터 지금까지 연구되고 있다. 점탄성물질의 기반이 되는 이론들은 고체에서의 파(Wave)의 전파에 대한 운동방정식들은 에너지 보존, 모멘트 보존, 질량보존 등의 3가지의 기본적인 보존법칙에 기초하고 있다.

처음 체계적인 이론적인 해석은 Nashif[4] 에 의해서라고 할 수 있다. Jones[5]는 댐핑 재료의 온도와 주파수에 따른 동특성 변화를 연구하였으며, Warnaka와 Miller[6]는 고분자에서 Strain의 온도와 주파수의 상관관계에 관한 연구를 하였다.

비교적 단순한 구조를 가지는 경우에는 이론적으로 해석이 가능하지만, 복잡한 형상의 구조물 혹은 다중의 층 구조를 가지는 경우엔 수치해석 방법이 효과적이라고 할 수 있다. 손실계수와 영 모듈러스를 계측하기 위한 측정방법은 잘 체계화되어 표준 시험 방법들이 주로 사용되고 있다.

표준 시험방법에서는 규격화(Standardization)된 시편을 사용하고 있는데 Oberst 빔 또는 샌드위치 빔을 주로 사용한다. 다양한 규격의 시편이 있지만 측정 결과에는 큰 차이가 없다고 할 수 있다. 손실계수와 영 모듈러스 측정을 위한 시험방법은 크게 2가지로 구분할 수 있다.

시편에 진동을 가진하는 방법과 시편에 전달되는 진동을 측정하는 진동신호를 측정방법이다. 우선 시편에 진동신호를 가하는 방법을 살펴보면, 전자기 장치를 사용하여 시편에 힘을 가하여 진동을 발생시키는 비접촉 가진 방법이 대표적이다. 시편에 발생된 진동을 측정하는 방법으로는 Piezo type의 가속도계, 속도 혹은 변위 측정센서를 시편에 설치하여 측정방법을 사용하고 있는데 ASTM E-756 등이 대표적이다. 이 때 시편의 설치방법은 시편의 한쪽 끝은 고정(Clamp)하고 다른 한쪽 끝은 자유단으로 설치한다.

국제표준인 ISO 6721-3[7]은 플라스틱 재료에 대한 방법으로 ASTM E-756에서 권장하는 비접촉 가진 방법과 비접촉 진동 측정방법을 또한 제시 및 권장하며, 시편의 고정 방법에 있어선 양쪽 끝이 자유롭게 움직일 수 있도록, 양쪽이 자유단인 경우도 포함하고 있다. 하지만 이러한 경계조건을 제대로 구현하기 어렵기 때문에 다소의 오차는 포함하게 된다.

이 외에, 일본 표준인 JIS G 0602[8] 에서는 앞의 시편 설치방법에 더 실질적인 방법도 포함하고 있다. 예로, 비접촉 방법으로 가진할 수 없는 경우를 고려하여 진동 가진기에 시편을 고정하여 진동을 가하는 접촉식 가진 방법을 제시하고 있다.

또한 비접촉 진동측정방법 외에도 가속도센서 등 진동측정 센서들을 시편 위에 직접 부착하는 접촉식 진동측정 방법도 제시하고 있다. 특히 임팩트해머로 시편을 가진하여 재료의 진동특성을 평가하는 방법을 제시하는데, 이 경우엔 주파수 변화에 따른 특성을 분석하는 방법들과 달리 한 주파수에 대한 결과만을 얻게 된다. 하지만 이 방법은 시편이 구조물의 형상을 가지는 경우에는 유용한 방법이다. 한편, Pritz[9]는 가진기를 사용하여 다양한 시편에 대해 진동을 발생시키고 가속도센서를

이용하여 시편의 진동을 측정함으로서 손실계수와 영 모듈러스를 구하는 방법을 제안하였다.

위의 표준방법에 의해 얻어지는 측정 자료들로부터 손실계수를 결정하는 방법은 시편에 진동을 발생시키기 위한 입력신호 대 시편의 진동 신호의 출력 신호 비를 FFT(Fast Fourier Transform)한 주파수 응답함수에 대해 '3 dB' 방법을 적용하는 것이 대표적인 방법이다. 즉, 응답함수 값은 주파수에 따라 몇 개의 최대값(Peak)을 갖게 되는데 이 주파수는 시편의 공진주파수에 해당된다. 각 공진 주파수에 대해 응답함수의 최대값을 중심으로 3 dB 감소하는 지점까지의 주파수 범위를 결정하면 시편의 손실계수를 계산할 수 있다.

시편은 자체지지가 가능한 것은 그대로 설치하면 되지만, 시편이 무른 소재의 경우는 시편의 물성이 잘 알려진 혹은 잘 측정된 단단한 기준 시편 위에 도포하거나, 기준 시편 사이에 샌드위치 형태로 시편을 제작, 설치할 수 도 있다. 각각의 방법에 따른 손실계수 값의 산출방법에 대해서는 ASTM E-756에서 상세히 기술되어 있다.

위에서 언급한 표준방법들을 모두 비교해 볼 때 공통적으로 권장하는 방법은, 비접촉방법에 의한 진동 가진과 비접촉 방법에 의한 진동신호의 측정이다. 금속 재료의 경우 시편의 가진은 일반적으로 전자기 장치를 이용하여 진동신호를 시편에 발생시켜주고 있으며, 이들 시편에 전달되는 진동신호를 비접촉식 방법으로 측정하기 위한 방법으로는 피에조 형태의 속도센서, 변위센서를 사용하기도 하고 좀 더 감도가 좋은 레이저 진동계 등이 사용되기도 한다.

한편, 전자기방식으로 진동이 가능한 시편이 아닌 경우는 직접 시편에 진동을 가할 수 없게 된다. 따라서 이 경우는 시편에 작은 금속재(Metal material)를 부착하여 가진하는 방법을 택할 수 있다. 하지만 이때 부착된 금속재료와 시편간의 상호작용으로 인해 시편의 정확한 물리량을 구하는데 오차를 포함하는 문제점이 있다. 감쇠재들의 손실계수와 영 모듈러스는 일반적으로 온도와 주파수에 의존하는 것으로 알려져 있으나 대부분의 자료에서 온도와 주파수에 대한 정보를 모두 제공하지 않고 있으며, 온도와 특정 주파수에서 측정값 혹은 그들의 평균값을 제시하고 있어 사용하는데 주의가 필요하다.

특히 플라스틱을 비롯하여 대부분의 고분자 재료는 조성비에 따라 그 특성 변화가 많기 때문에 시편제작에 주의가 요구되며 연구 결과 또한 많이 부족하다. 하지만 현재 감쇠재에 관한 다양한 조건에서의 시편, 온도변화, 주파수 변화에 대해서 종합적으로 실험 및 연구된 바는 거의 없는 실정이다.

1.3. 그래핀 감쇠재

본 연구에 사용된 점탄성재인 그래핀 감쇠재는 폴리우레탄을 베이스로 한 재료에 산화 그래핀(Graphene oxide)을 조각(Flake)의 형태로 혼합하여 기존의 폴리우레탄의 감쇠성능보다 더 성능을 향상시키기 위하여 만든 새로운 재료이다. 산화 그래핀의 혼합량에 따라 감쇠성능이 달라지게 만들었으며, 일반적으로 조성비는 전체 폴리우레탄 질량대비 1~10%wt를 사용하고 있으며, 점탄성재에 따라 최적의 조성비를 실험을 통하여 찾아야 한다.[10] 또한 물리적 성질을 바꾸기 위하여 경화제의 분자량(Molecular weight)을 변화시키며 다른 특성을 가진 그래핀 감쇠재를 만들 수도 있다. 제작 및 사용 방법은 주제와 경화제를 1:2 비율로 골고루 섞어 제작한 뒤 철판에 도포하여 사용하며, 감쇠 성능을 더 높이기 위해서 구속층(Constraint layer)을 설치하는 방법이 많이 사용된다.

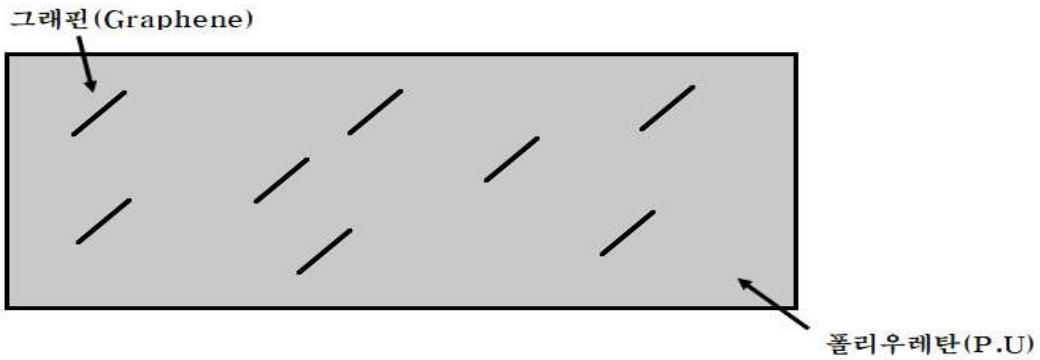

Fig. 1-1 The conceptual picture of the graphene damping material

Fig. 1-2 Mixing of main ingredient & hardener

2. 이론

2.1. 감쇠와 점탄성재료의 이론

2.1.1. 감쇠(Damping)

감쇠란, 진동에 있어 시간이 지남에 따라 진폭이 감소되는 현상이며, 이 때 진동 에너지가 열이나 소리로 바뀌는 메커니즘(Mechanism)을 말한다. 감쇠가 크다는 것은 소산되는 에너지가 많아 진동이 빠르게 감소하는 것을 뜻한다.

감쇠의 종류에는 점성감쇠(Viscous damping), 쿨롱감쇠(Coulomb damping), 구조감쇠(Structural damping)가 있다. 점성감쇠는 물, 공기, 기름 등과 같은 유체 내에서의 저항으로 인한 에너지손실을 뜻하며, 점성 감쇠력은 진동하는 물체의 속도에 비례한다. 쿨롱감쇠는 건마찰감쇠로도 부르며, 건조한 두 표면의 마찰로 인한 에너지 손실을 뜻한다, 이때의 감쇠력은 크기가 일정한 상태로 진동이나 운동에 반대되는 방향으로 작용한다. 구조감쇠는 고체감쇠나 이력감쇠로도 부르며, 물체가 외력을 받을 때 물체 내에서 변형이 생기며 내부에서의 마찰로 인해 발생하는 에너지 손실을 뜻한다.

공진(Resonance)은 외력의 진동수와 물체의 고유진동수가 일치하여, 진동수가 동조되어 상대적으로 작은 가진력에도 물체에 큰 진동이 발생하는 현상을 말한다. 공진 현상이 발생하면 물체에 큰 충격이 가해지기 때문에 공진에서의 응답을 줄이기 위한 노력이 필요하다. 감쇠의 영향은 공진점에서 크게 작용하며, 이는 공진에서의 응답을 효과적으로 저감할 수 있는 방안이다.

2.1.2. 손실계수 측정법

손실계수(Loss factor)를 구하는 방법으로는 반치폭법 (Half-power bandwidth method), 대수감쇠법 (Logarithmic decay method) 등 몇 가지가 있지만 가장 많이 사용하는 방법은 반치폭법과 대수감쇠법이라고 할 수 있다.

그러나 반치폭법에 경우 정확한 반동력점(Half-power point)을 측정하기 어려우므로 본 연구에서는 보편적으로 적용할 수 있는 1/N-power bandwidth method를 사용하였다.

2.1.2.1. 반치폭법

$\omega_{1,2} = \sqrt{(\frac{k}{m})[1 \pm \eta\sqrt{N^2-1}]}$ 여기서, $(\frac{k}{m})$은 ω_n 이다. (2.1)

$\frac{\triangle\omega}{\omega_n} = \sqrt{1+\eta\sqrt{N^2-1}} - \sqrt{1-\eta\sqrt{N^2-1}}$ 으로 식을 구하고

여기서 손실계수 η를 산출할 수 있다.

정리하면,

$\eta = \frac{\sqrt{(\frac{\triangle\omega}{\omega})^2 - \frac{1}{4}(\frac{\triangle\omega}{\omega})^4}}{\sqrt{N^2-1}}$ 이다.

$N = \sqrt{2}$일 때, 반치폭법으로 부른다.

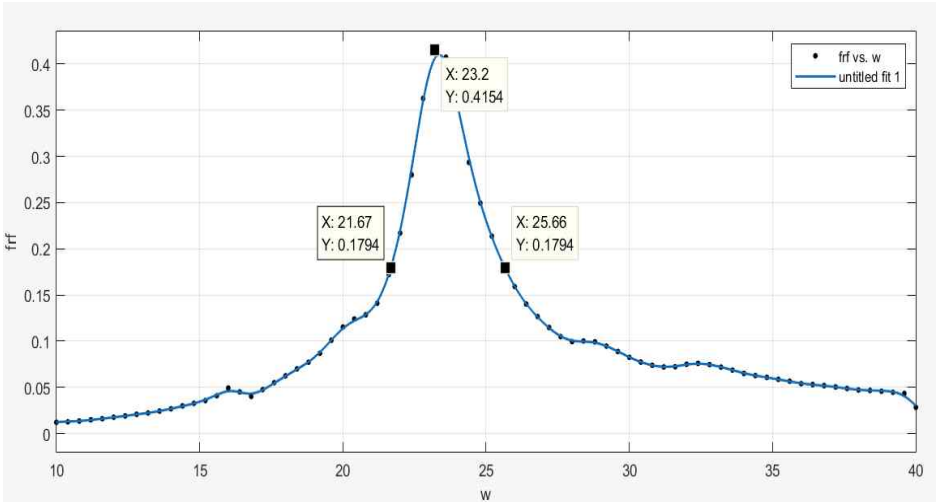

Fig. 2-1 1/N-power bandwidth method

2.1.2.2. 대수 감쇠율(Logarithmic decrement)

대수 감쇠율이란 진동하는 물체의 진폭이 크기가 줄어드는 연속되는 진폭의 크기 변화로부터 감쇠특성을 구하는 방법이다. 일반적으로 감쇠상수나 감쇠비 등과 같은 감쇠와 관련된 값을 직접 관찰하거나 측정하기 어렵다. 그러나 부족 감쇠의 경우, 한 주기 사이의 연속된 두 최대 진폭으로부터 감쇠비(Damping ratio)를 구할 수 있다. 부족감쇠의 응답은 아래와 같다.

$$x(t)=e^{-\zeta\omega_n t}(A_1\cos\omega_d t+A_2\sin\omega_d t) \tag{2.2}$$

연속한 두 Peak 진폭에 대해 감쇠 진동주기 T_d 만큼 시간차와 $\omega_d=\frac{2\pi}{T_d}$ 를 적용시키면 두 진폭의 비는 아래와 같이 유도된다.

$$\frac{X_1}{X_2}=\frac{e^{-\zeta\omega_n t_0}A_1\cos\omega_d t_0+A_2\sin\omega_d t_0}{e^{-\zeta\omega_n(t_0+T_d)}A_1\cos\omega_d(t_0+T_d)+A_2\sin\omega_d(t_0+T_d)}=\frac{e^{-\zeta\omega_n t_0}}{e^{-\zeta\omega_n(t_0+T_d)}}=e^{\zeta\omega_n T_d} \tag{2.3}$$

여기에 자연로그를 취하면 다음과 같다.

$$\delta=\ln(\frac{X_1}{X_2})=\zeta\omega_n T_d=\zeta\omega_n\frac{2\pi}{\omega_d}=\zeta\omega_n\frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}=\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{2.4}$$

ζ 가 충분히 작다고 보면 $\sqrt{1-\zeta^2}\approx 1$로 볼 수 있으며, 다시 정리하면, $\delta=2\pi\zeta$, $\zeta=\frac{\delta}{2\pi}$ 이다. 여기서 감쇠비 ζ 는 $\eta=2\zeta$로 나타낼 수 있다.

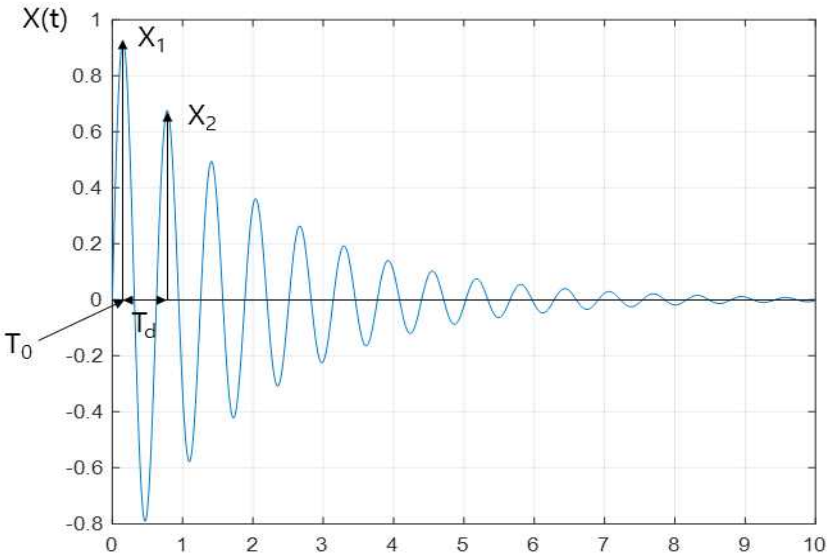

Fig. 2-2 Continuous peak response

2.1.3. Q-factor

물리학과 공학에서 품질 인자(Quality factor) 또는 Q 인자(Q factor)는 공진 첨예도로 불리며, 저 감쇠된 진동자나 공진기(Resonator)가 어떠한지를 나타내며, 중심 주파수에 따른 공진기의 대역폭을 결정한다. 높은 Q인자 값은 진동에 대해서 저장된 에너지에 비하여 에너지 손실이 적다는 것을 나타내며, 이 경우 진동은 천천히 줄어든다. Q 인자의 역수를 손실계수(Loss factor)라고 하며 Q 인자가 작다는 것은 손실계수가 크다는 것을 의미한다. 반치폭법(3dB 감소하는 밴드폭)에서는 Q 인자의 역수를 손실계수로 정의한다. 즉, 반치폭법에서 $Q=\eta^{-1}$ 이다.

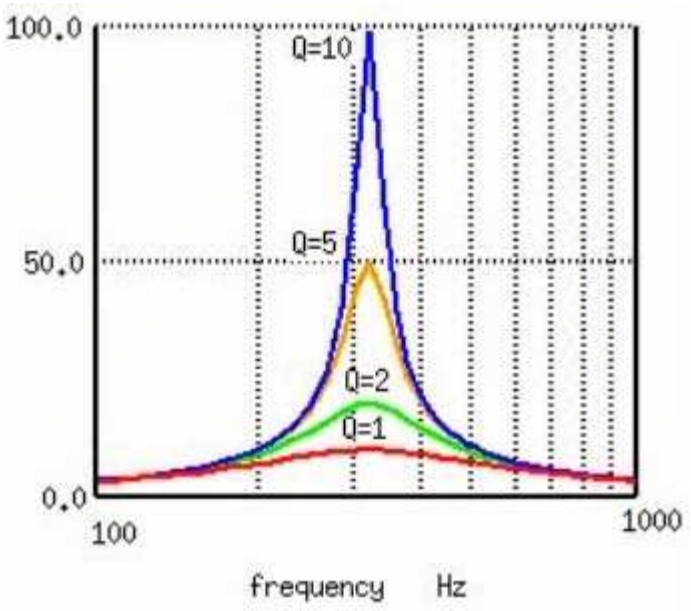

Fig. 2-3 Q-factor

2.2. 점탄성물질(Viscoelastic material)

일반적으로 가진 주파수의 범위에 상관없이 진동을 감소시킬 수 있는 효과적인 방법은 감쇠를 증가시켜 에너지 소실을 증가시키는 방법이다. 감쇠를 증가시키는 일반적인 방법은 점탄성 재료를 진동 시스템에 부착하는 방법인데, 대표적 점탄성 재료로는 고무, 폴리머, 우레탄 등이 있다. 점탄성 재료의 강성 및 감쇠 특성은 온도와 주파수에 따라 변하는 것이 실험적으로 확인되어 왔다. 따라서 점탄성 재료를 사용하여 진동계를 설계하는 경우에는 가진 주파수는 물론 온도 범위까지 고려하여야 한다. 점탄성 재료의 시간영역 에서의 응력(σ)과 변형률(ε) 사이의 관계는 다음과 같이 주어진다.

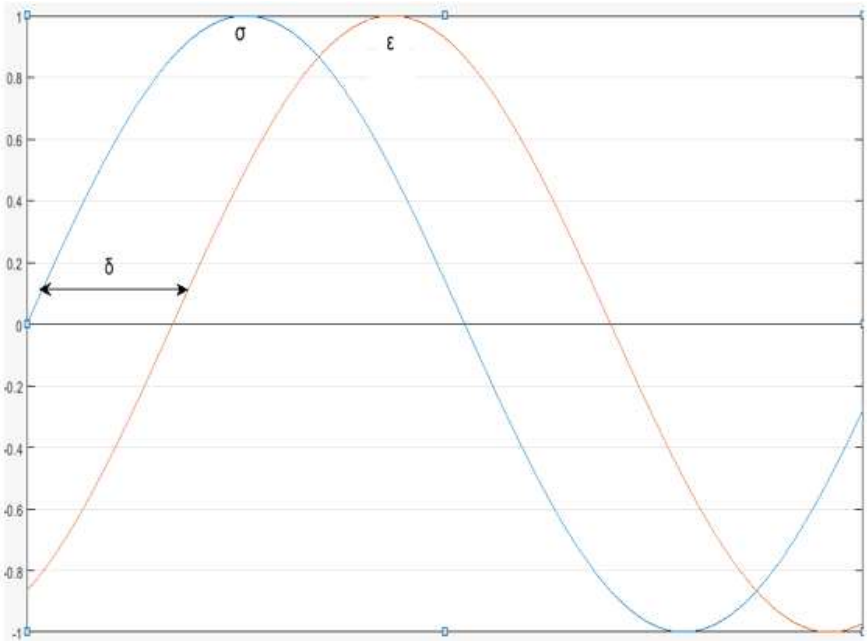

Fig. 2-4 Viscoelastic material's stress & strain

$\rightarrow \sigma = \sigma_0 \sin(2\pi f t)$

$\rightarrow \epsilon = \epsilon_0 \sin(2\pi f t + \delta)$

$\rightarrow \eta = \tan(\delta)$

응력과 변위 사이에서는 동적응답이 지연되며, 지연된 시간이 길수록 손실계수가 커서 소실되는 에너지가 많다는 뜻이다.

점탄성 재료의 영 모듈러스와 전단 모듈러스는 일반적으로 복소 모듈러스(Complex modulus)로 나타난다.

$$E^* = E_0(1+i\eta),\ G^* = G_0(1+i\eta) \tag{2.5}$$

로 표현되고 복소 모듈러스의 실수부를 저장 모듈러스(Storage modulus)라고 하며, 허수부를 소실 모듈러스(Loss modulus)라고 한다.

이를 다시 실수부와 허수부로 정리하면,

$$\begin{aligned} E^{*}(\omega) &= E^{'}(\omega) + iE^{''}(\omega) \\ &= E^{'}(\omega) + i\eta E^{'}(\omega) \\ &= E^{'}(\omega)(1 + i\eta) \end{aligned} \tag{2.5.1}$$

로 표현가능하며, 여기서 손실계수(Loss factor) 는 실수부와 허수부의 비(比)이다.

$$\eta = \frac{E^{''}(\omega)}{E^{'}(\omega)} \tag{2.6}$$

허수부가 크다는 것은 손실되는 에너지가 많다는 뜻이고, 감쇠가 더 빨리 일어난다는 뜻이다.

2.3. 푸리에 변환(Fourier transform)

주기함수의 진동 스펙트럼은 주기 T가 무한대로 되면 연속적인 것으로 볼 수 있다. 불규칙 진동은 일반적으로 주기함수가 아니며, 연속 진동 스펙트럼을 결정하기 위해선 푸리에 급수에 있어서 주기가 무한대가 되는 극한의 경우로 생각하는 푸리에 적분을 이용한다. 푸리에 변환은 현대 시계열 해법(Time series analysis)의 기본이 되며, 대부분 진동실험의 주어진 기록에서 주어진 기록의 진폭과 위상을 결정하는 계산을 수행 가능케 한다.

푸리에 적분(Fourier integral)은 다음과 같이 정의된다.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \tag{2.7}$$

푸리에 급수에서 정현파(Sine wave)의 이산 스펙트럼의 합과는 달리, 푸리에 적분은 정현파의 연속 스펙트럼의 합으로 간주할 수 있다. 위 방정식의 X(f)량은 x(t)의 푸리에 변환(Fourier transform)이라 부르며, 다음 방정식으로 계산할 수 있다.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \tag{2.8}$$

위의 두 방정식을 푸리에 변환 쌍(Fourier transform pair)이라 한다.

2.4. 선형 점탄성 모델

점탄성 재료는 탄성과 점성을 가진 감쇠특성을 갖는데, 점탄성 재료 특성을 모델링하는 방법은 선형 강성과 점성을 조합하는 방식들이 가장 널리 사용된다. 조합 모델로는 맥스웰 모델[11], 켈빈-보이트 모델[12], 그리고 두 모델을 다시 조합한 표준 모델(Standard model)[13]이 있다. 아래의 그림들은 세 가지 모델링 방법을 보여주는데 이들을 통칭하여 '고전적 모델링'이라 부르기도 한다.

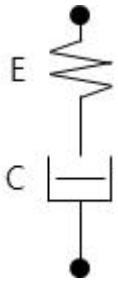

Fig. 2-5 Maxwell model

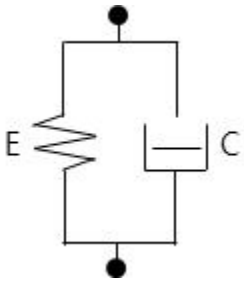

Fig. 2-6 Kelvin-Voigt model

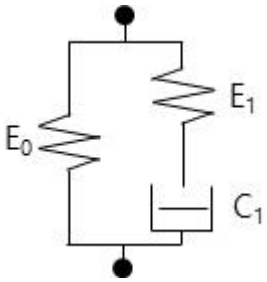

Fig. 2-7 Standard model

여기서 발전된 이론으로는 이러한 기본모델 요소들을 다수로 병렬이나 직렬로 연결하여 나타내는 비선형 모델링 방법이 있으며 일반화된 맥스웰 모델(Generalized Maxwell Model, GMM)[14][15]이 많이 사용된다.

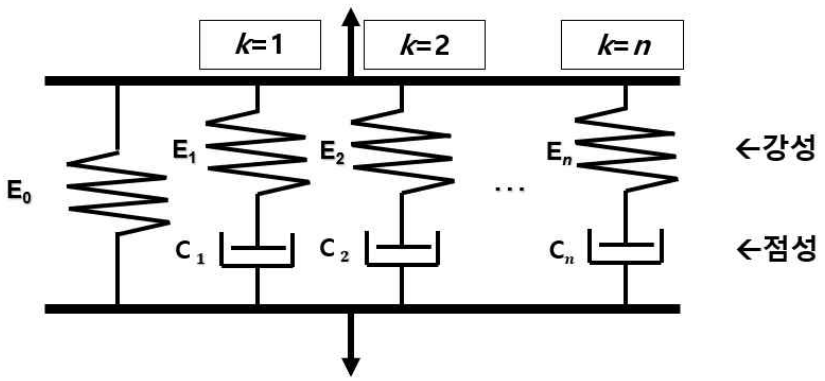

Fig. 2-8 Generalized Maxwell model

여기서 k는 각 요소의 차수(Order)를 뜻하며, 시험결과에 따라 개수를 적절히 선택하는 작업이 필요하다. 어떠한 모델이 점탄성 물체의 특성을 가장 잘 반영하는가 하는 것은 재료마다 다르다. 또한 일반적으로 어떤 모델도 모든 점탄성 물체의 특성을 정확히 반영하지는 못한다. 따라서 다양한 점탄성재료를 완벽하게 표현할 수 있는 모델은 존재하지 않으므로, 감쇠재의 성능 시험결과를 토대로 곡선맞춤법(Curve-fitting method)을 사용하여 차수를 선택하고 오차가 가장 적은 모델을 선정하는 것이 중요하다.

2.4.1. 점탄성재에서 온도와 주파수에 의한 영향

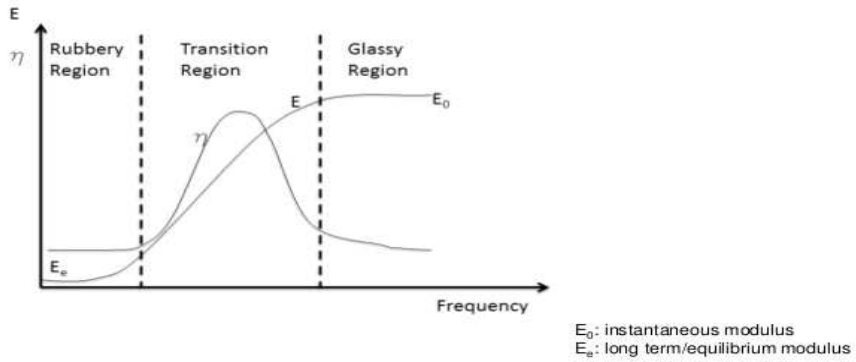

Fig. 2-9 Viscoelastic material's Young's modulus & loss factor (frequency domain)

일반적인 점탄성재는 온도와 주파수에 영향을 받는다. 주파수가 증가함에 따라 영 모듈러스, 전단 모듈러스가 증가하며 유리와 비슷한 성질(Glassy)을 띄게 된다. 주파수가 감소함에 따라 영 모듈러스, 전단 모듈러스가 감소하며 고무와 비슷한 성질(Rubbery)을 띄게 된다. (Fig. 2-9 참조) 온도는 주파수와 반대인 경향을 띄는데 온도가 증가함에 따라 고무와 비슷한 성질을 띄며, 온도가 감소함에 따라 유리와 비슷한 성질을 띠게 된다. 손실계수는 유리 영역(Glassy region)과 고무 영역(Rubbery region)에서 통상 나타나며, 이는 고무적 성질과 유리적 성질이 함께 나타날 때 최적의 감쇠성능을 보여준다는 것을 알 수 있다. 이 손실계수가 증가하는 천이 영역(Transition region)을 통상적으로 진동 감쇠를 위한 점탄성재를 사용하기 좋은 실용적 영역(Practical region)이라고 한다. 위의 그래프는 로그-로그 스케일의 그래프이며, 아주 넓은 주파수 범위 ($0 \sim 10^4 Hz$)에서 나타낸 그래프이다. 실제 실용적인 영역에서의 손실계수의 변화는 크지 않다. 아래의 그래프[Fig. 2-10]는 영 모듈러스와 손실계수를 같은 온도에서 도시한 그래프이다.

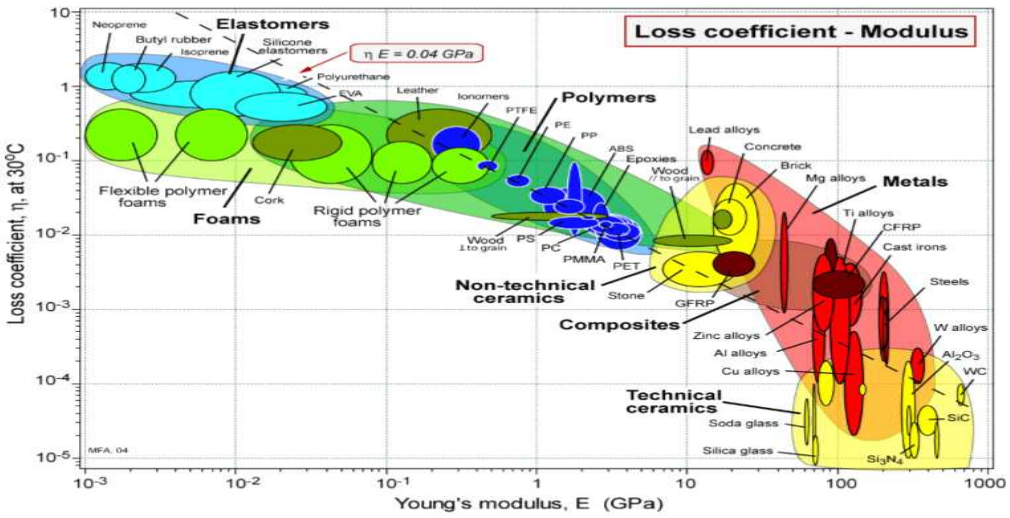

Fig. 2-10 Young's modulus vs Loss factor[16]

2.4.2. 유리 천이 온도 (Glass transition temperature)

점탄성 물질이 고무상태(Rubbery)에서 유리상태(Glassy)로 변하는 온도이며, 비체적-온도 그래프에서 기울기가 변하는 온도이다. 유리 천이 온도는 동적 기계 손실인자(손실계수)의 최고점이 아니다. 손실계수의 최고점은 유리 천이 온도보다 높은 곳에서 일어나고 주파수에 따라 변하기 때문에 재료의 고유 특성이 아니다.

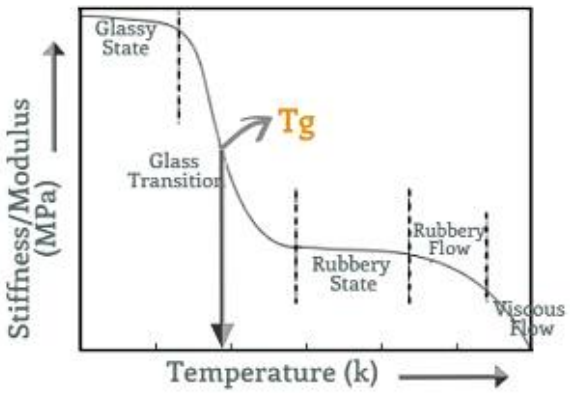

Fig. 2-11 Glass transition temperature

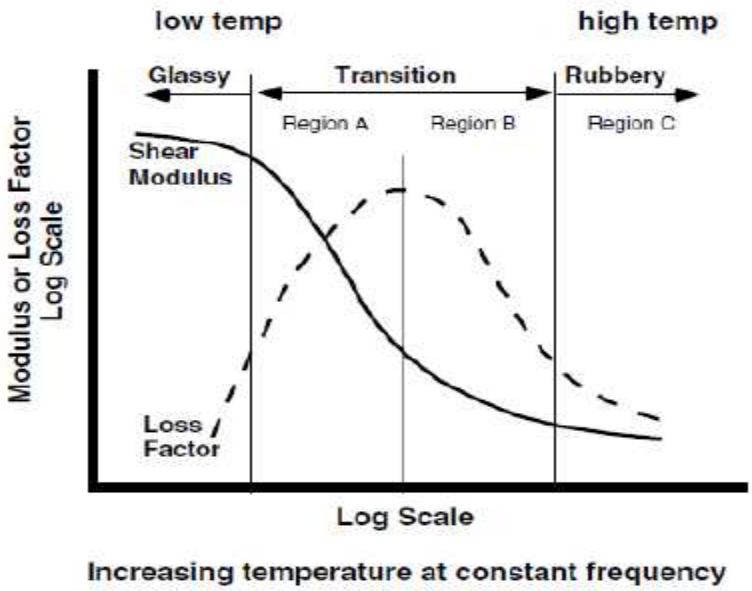

Fig. 2-12 Viscoelastic material's shear modulus & loss factor (temperature domain)

3. 점탄성재료의 특성 계측

점탄성재료의 특성을 계측하는 방법은 크게 접촉식 방법과 비접촉식 방법이 있다. 접촉식 방법은 비접촉식 방법을 사용하여 측정하기 힘든 경우에 오차를 포함하게 되지만 시험을 쉽게 하는 방법으로 JIS 혹은 KS 규격에서 포함하고 있다.

비접촉식 방법은 말 그대로 접촉을 하지 않는 방법이다. 대부분의 규정에서는 이 방법을 권장한다. 이 방법은 시편의 접촉하지 않으면서 진동을 가하는 장치가 필요하다. 이때 진동신호를 시편에 집적 가하지 않고 비접촉식으로, 예로, 전자기식 가진 방법의 경우는 전자기 신호에 의해 따른 힘이 시편에 가해지도록 하게 된다. 하지만 전자기 가진의 경우 시편의 성분이 금속을 포함해야 되며, 플라스틱처럼 비금속재료인 경우는 적용하지 못하는 단점이 있어서 시편에 작은 금속부착물을 설치하여 사용하며, 이 경우 부착된 금속에 의해 측정하는 손실계수와 영 모듈러스에 영향을 준다.

한편, 시편에 가해진 진동을 측정하는 방법에 있어서 시편에 직접 센서를 부착하지 않고 시편 뒤에 변위센서를 설치하거나 혹은 시편에 레이저 빔을 반사시킬 수 있는 레이저진동계 등을 이용하여 비접촉식 센서를 사용함으로 진동을 측정할 수도 있다.

온도조건은 시험조건 상 감쇠재의 사용 환경에 따라 일정한 간격의 온도변화를 주며 감쇠재의 성능을 계측한다. 그러나 온도환경을 맞추기 위해서는 온도를 조절하는 장치와 새로운 시험장치가 필요하게 된다. 이번 연구에서는 온도는 실내에서 진행하였고 비교적 일정한 상온(25℃)조건에서 시험을 진행하였다.

임팩트 해머 시험의 경우, 반복재현성이 떨어지며, 시험결과의 편차가 큰 것을 확인하였다. 자석가진의 경우, 정현파 스위프로 일정한 힘을 가하며 시험을 진행하였고, 시험 결과 편차가 작았으며, 반복재현성이 우수한 것으로 확인하였다.

3.1. 시험방법

본 연구의 시험방법 ASTM-E756의 규정을 따르며, 공진법을 사용한다. 임팩트해머 방법과 비접촉가진 방법의 하나인 자석가진 방법을 사용하여, 두 시험을 비교하고 편차가 적은 데이터 값들을 추출하여 그래프로 도시한다. 시험에는 아래 그림 [Fig. 3-1]의 세 종류의 시편을 사용하였다. (시편의 재질 : SS400)

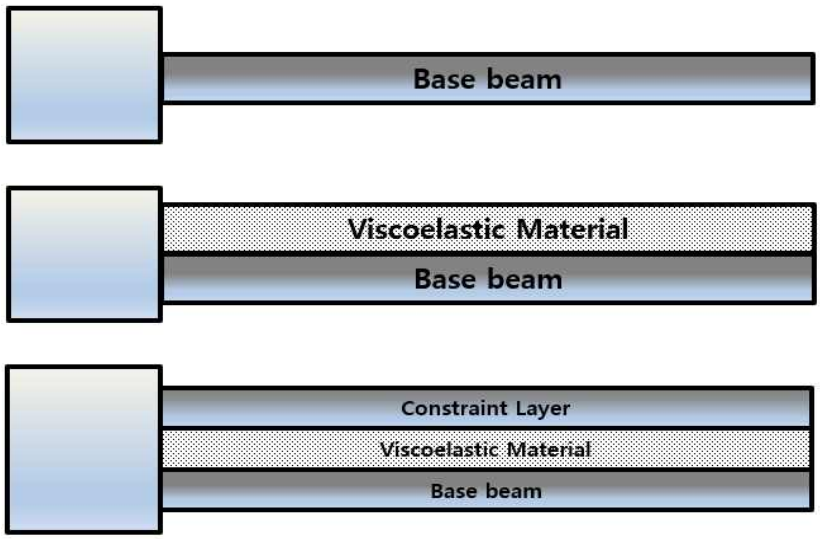

Fig. 3-1 ASTM E-756 specimens

첫 번째, 감쇠재를 표면처리 안한 베이스 빔(Base beam, Uniform beam)과 두 번째, 감쇠재를 한쪽 면에만 표면처리한 Oberst 빔과 세 번째, 감쇠재를 한쪽면에 처리한 뒤 구속층(Constraint layer)을 설치한 샌드위치 빔을 사용하였다.

베이스 빔의 시험결과와 Oberst 빔의 시험결과를 비교하여 영 모듈러스(Young's modulus)와 감쇠재 만의 손실계수를 구한다.

그리고 베이스 빔의 시험결과와 샌드위치 빔의 시험결과를 비교하여 전단 모듈러스(Shear modulus)와 감쇠재 만의 손실계수를 구한다.

샌드위치 빔 시편의 경우, ASTM-E756의 방법을 이용하기 위해서는 구속층과 베이스 빔의 두께가 같아야 한다.

3.1.1. 임팩트해머 시험신호

시편에 자유단(Free-end) 가속도계를 부착한 뒤, 시편의 고정단(Clamped)을 가진한다. 아래의 그림[Fig. 3-2]은 임팩트해머로 가진했을 때의 시간신호이다.

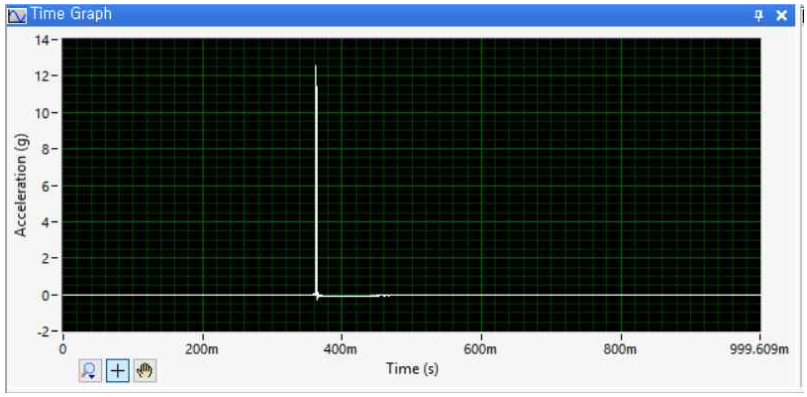

Fig. 3-2 Time signal of impact hammer test

임팩트해머로 가진하면 시편에 설치된 가속도계의 시간신호는 아래의 그림 [Fig. 3-3]과 같이 나온다.

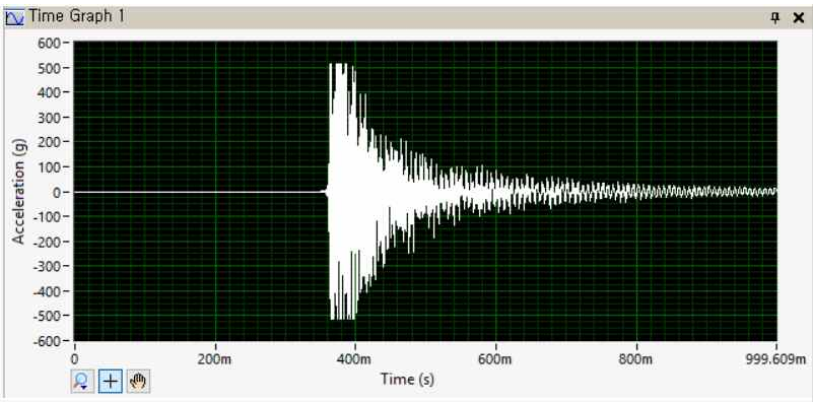

Fig. 3-3 Time signal of accelerometer

시간신호 데이터를 푸리에 변환하여 임팩트해머 시험의 FRF(Frequency Response Function, Accelerance(A(ω)/F(ω)))를 구할 수 있다.

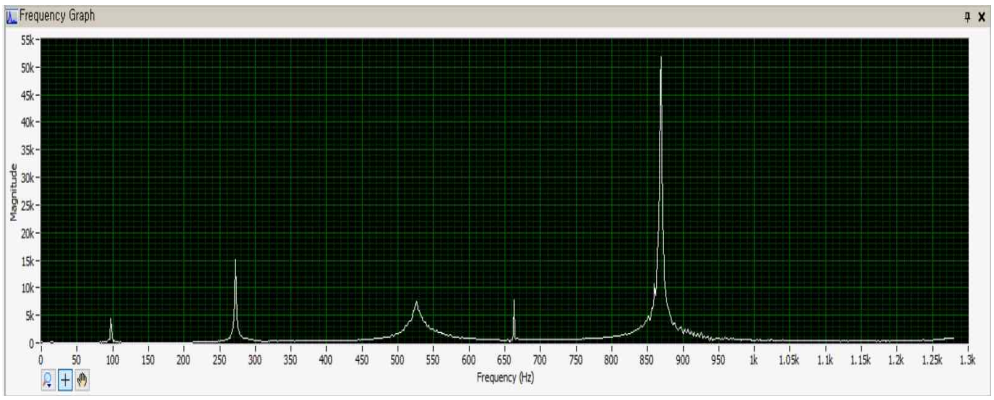

Fig. 3-4 Frequency response function of impact hammer test (300mm Oberst beam)

3.1.2. 자석가진 시험신호

시편의 고정단(Clamped)에 가속도계를 설치하고, 자석가진 시험장치를 시편의 자유단(Free-end)에 설치한다. 가진기(Exciter)를 이용하여 입력한 주파수로 시편을 가진한다. 아래의 그림[Fig. 3-5]은 가속도계의 시간신호이다.

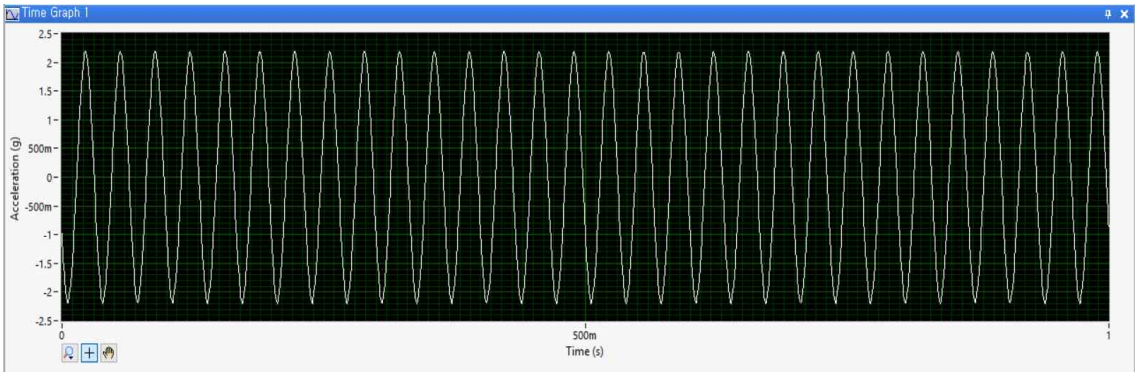

Fig. 3-5 Time signal of magnetic excitation
(30Hz excitation)

자석가진 시험은 Oberst 빔과 샌드위치 빔의 임팩트해머 시험 결과를 바탕으로, 고유진동수를 찾고, 고유진동수 근처(±10~100Hz)의 주파수를 정현파 스위프하여 자석가진 시험을 진행한다. 시편에 설치된 가속도계의 시간신호를 푸리에 변환한 Peak-hold 방법을 사용하여 공진점의 Q-factor를 구한 뒤 감쇠재의 손실계수를 구한다.

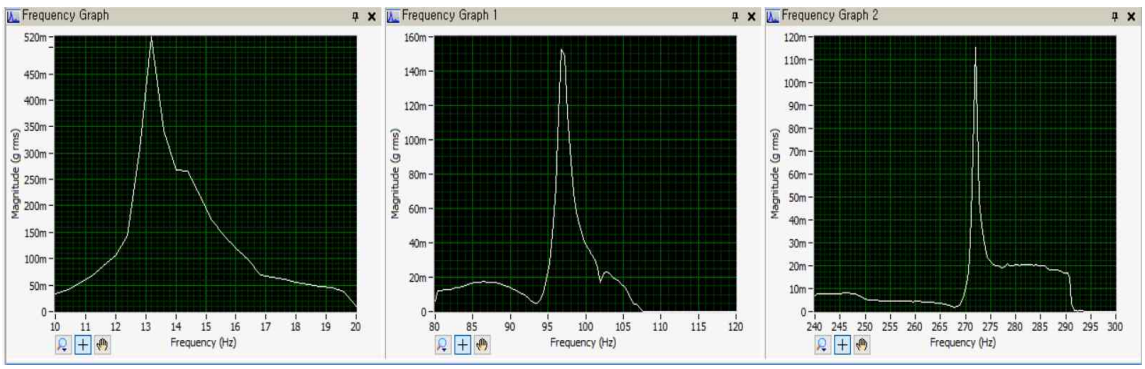

Fig. 3-6 FRFs each mode of magnetic excitation(300mm Oberst beam)
(1st mode: Left, 2nd mode: Center, 3rd mode: Right)

3.1.3. SDOF 시스템의 조화 응답(Harmonic response)

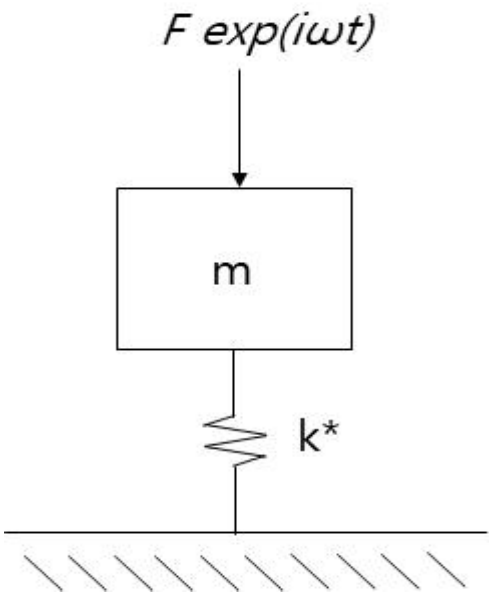

Fig. 3-7 Single degree of freedom model

위의 그림[Fig. 3-7]과 같이 1자유도(SDOF) 계를 고려해보면 운동방정식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+k(1+i\eta)x=Fe^{i\omega t} \tag{3.1}$$

여기서 $k^*=k(1+i\eta)$ 이며, 이는 점탄성 스프링요소의 복소 강성(Complex stiffness)이다. 힘이 $f(t)=Fe^{i\omega t}$ 의 형태로 조화적으로 가진된다면, 응답은 $x(t)=Xe^{i\omega t}$ 의 동적응답(Dynamic response)을 나타낸다. 위 식 (3.1)의 해를 구하면 아래와 같다.

$$x(t)=\frac{Fe^{i\omega t}}{k-m\omega^2+ik\eta} \tag{3.2}$$

3.1.4. SDOF 시스템의 충격 응답(Impulse response)

식 (3.1)을 푸리에 변환(Fourier Transform)하여 SDOF 계의 응답을 주파수 영역으로 변환하여 계산할 수 있다. 주파수 영역에서의 운동방정식은 아래와 같다.

$$-m\omega^2 X(\omega)+k^* X(\omega)=F(\omega)=F \tag{3.3}$$

여기서 $X(\omega)$는 시간 영역에서의 응답 $x(t)$의 푸리에 변환이며, $F(\omega)$는 가진의 푸리에 변환이며, k^*는 복소 강성이며, 이 값은 복소 모듈러스(E^* 또는 G^*)에 비례한다. 위 식 (3.3)의 해를 구하면 아래와 같다.

$$X(\omega)=\frac{F}{k^*-m\omega^2} \tag{3.4}$$

3.1.5. 보의 오일러 방정식

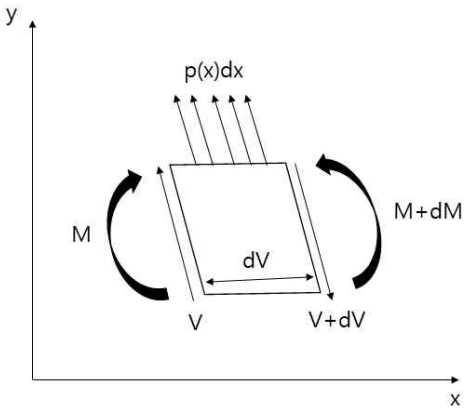

Fig. 3-8 Beam element

보의 횡 진동(Lateral vibration)에 대한 미분 방정식을 구하기 위하여 위 그림 [Fig. 3-8]과 같이 보의 한 요소에 작용하는 힘과 모멘트를 고려한다. V와 M은 전단 및 굽힘 모멘트이며, p(x)는 보의 단위 길이 당 하중이다. y 방향의 힘과 요소의 우측의 임의의 점에서의 모멘트를 합하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dV-p(x)dx&=0 \\ dM-Vdx-\frac{1}{2}p(x)(dx)^2&=0 \end{aligned} \tag{3.5}$$

극한을 취하면 다음의 관계식을 구할 수 있다.

$$\frac{dV}{dx}=p(x),\ \frac{dM}{dx}=V \tag{3.6}$$

위 식의 왼쪽은 보의 길이에 따른 전단 변화율이 단위길이 당 하중과 같음을 보여주고, 오른쪽은 보의 길이에 따른 모멘트의 변화율이 전단과 같음을 보여준다.
위의 두 개의 식을 정리하면 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2M}{dx^2} = \frac{dV}{dx} = p(x) \tag{3.7}$$

위의 그림의 좌표계를 이용하여 굽힘 모멘트와 곡률(Curvature)의 관계를 정리하면 아래와 같다.

$$M = EI\frac{d^2y}{dx^2} \tag{3.8}$$

이 식을 위의 (3.7)에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d^2}{dx^2}(EI\frac{d^2y}{dx^2}) = p(x) \tag{3.9}$$

자중에서 정적 평형위치에 관하여 진동하는 보에선 단위 길이당 하중은 질량과 가속도로 인한 관성력과 같으며 위 그림에서 보인 p(x)와 같은 방향의 조화운동을 가정하면 다음과 같다.

$$p(x) = \rho\omega^2 y,\ \ \rho = \text{보의 단위 길이 당 질량}$$

이를 앞에 식에 대입하면,

$$\frac{d^2}{dx^2}(EI\frac{d^2y}{dx^2}) - \rho\omega^2 y = 0, \tag{3.10}$$

EI (굽힘 강성)이 상수인 경우 다시 정리하면,

$EI(\frac{d^4y}{dx^4}) - \rho\omega^2 y = 0$ 이며, $\beta^4 = \rho\frac{\omega^2}{EI}$ 를 대입하면,

$$\frac{d^4y}{dx^4} - \beta^4 y = 0$$

균일 보에서의 진동에 대한 4차 미분 방정식을 얻을 수 있다. 이 미분 방정식의 일반해는 다음과 같다.

$$y = A\cosh\beta x + B\sinh\beta x + C\cos\beta x + D\sin\beta x \tag{3.11}$$

위의 식들로부터 구한 고유진동수는 다음과 같다.

$$\omega_n = \beta_n^2\sqrt{\frac{EI}{\rho}} = (\beta_n l)^2\sqrt{\frac{EI}{\rho l^4}} \tag{3.12}$$

3.1.6. 베이스 빔 계산 방법

아래는 베이스 빔으로 영 모듈러스와 손실계수를 계산하는 식이다.

$$E = \frac{(12\rho l^4 f_n^2)}{(H^2 C_n^2)} \quad , \tag{3.13}$$

$$\eta = \frac{(\Delta f_n)}{(f_n)} \tag{3.14}$$

여기서,

$C_n =$ 빔의 $Clamped-free$ 경계조건의 모드 계수.

$E =$ 영 모듈러스, Pa.

$f_n =$ 모드별 공진 주파수, Hz.

$\Delta f_n =$ 모드별 $1/N-power$ 밴드폭, Hz.

$H =$ 빔의 두께, m.

$l =$ 빔의 길이, m.

$n =$ 모드번호 : 1,2,3...

$\eta =$ 빔의 손실계수, 무차원.

$\rho =$ 빔의 밀도, kg/m^3.

$C_1 = 0.55959$

$C_2 = 3.5069$

$C_3 = 9.8194$

$C_4 = 19.242$

$C_5 = 31.809$

$C_n = (\frac{\pi}{2})(n-0.5)^2 \ , \ n > 3$

3.1.7. Oberst 빔 계산 방법

아래는 Oberst 빔으로 감쇠재의 영 모듈러스와 손실계수를 계산하는 식이다.

$$E_1 = \frac{E}{(2T^3)}[(\alpha-\beta)+\sqrt{(\alpha-\beta)^2-4T^2(1-\alpha)}], \tag{3.15}$$

$$\eta_1 = \eta_c[\frac{(1+MT)(1+4MT+6MT^2+4MT^3+M^2T^4)}{(MT)(3+6T+4T^2+2MT^3+M^2T^4)}] \tag{3.16}$$

여기서,

$c = index\ \ number : 1, 2, 3...(c = n)$

$D = \rho_1/\rho,$ 밀도비.

$E =$ 베이스 빔의 영모듈러스, $Pa.$

$E_1 =$ 감쇠재의 영모듈러스, $Pa.$

$f_n =$ 베이스 빔의 모드 별 공진 주파수, $Hz.$

$f_c = Oberst$ 빔의 모드 별 공진 주파수, $Hz.$

$\Delta f_c = Oberst$ 빔의 모드 별 $1/N-power$ 밴드 폭, $Hz.$

$H =$ 베이스 빔의 두께, $m.$

$H_1 =$ 감쇠재의 두께, $m.$

$M = E_1/E$ 영 모듈러스의 비.

$T = H_1/H,$ 빔 두께의 비.

$\alpha = (f_c/f_n)^2(1+DT)$

$\beta = 4+6T+4T^2$

$\eta_c = \Delta f_c/f_c,\ Oberst$ 빔의 손실계수.

$\eta_1 =$ 감쇠재의 손실계수.

$\rho =$ 베이스 빔의 밀도, $kg/m^3.$

$\rho_1 =$ 감쇠재의 밀도, $kg/m^3.$

3.1.8. Sandwich 빔 계산 방법

아래는 Sandwich 빔으로 감쇠재의 전단 모듈러스와 전단 손실계수를 계산하는 식이다.

$$G_1 = [A - B - 2(A-B)^2 - 2(A\eta_c)^2][\frac{(\frac{2\pi C_n EHH_1}{l^2})}{(1-2A+2B)^2 + 4(A\eta_c)^2}], \quad (3.17)$$

$$\eta_2 = \frac{(A\eta_c)}{[A - B - 2(A-B)^2 - 2(A\eta_c)^2]} \quad (3.18)$$

여기서,

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

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

$C_n =$ 빔의 $Clamped-free$ 경계조건의 모드 계수.

$D = \rho_1/\rho,$ 밀도비.

$E =$ 베이스 빔의 영 모듈러스, $Pa.$

$f_n =$ 베이스 빔의 모드 별 공진 주파수, $Hz.$

$f_s =$ 샌드위치 빔의 모드 별 공진 주파수, $Hz.$
$\triangle f_s =$ 샌드위치 빔의 $1/N-power$ 밴드폭, $Hz.$

$G_1 =$ 감쇠재의 전단 모듈러스, $Pa.$

$H =$ 베이스 빔의 두께, $m.$
$H_1 =$ 감쇠재의 두께, $m.$

$l =$ 빔의 길이, $m.$

$s = Index\ \ number : 1,2,3,...(s=n)$

$T = H_1/H,$ 두께비.

$\eta_2 =$ 감쇠재의 전단손실계수.

$\eta_s =$ 샌드위치 빔의 손실계수.

$\rho_1 =$ 감쇠재의 밀도, $kg/m^3.$

$\rho =$ 베이스 빔의 밀도, $kg/m^3.$

3.2. 시험장치

시험장치는 신호 분석기(FFT Signal analyzer), 임팩트 해머(Impact hammer), 가속도계, 전자식 가진기, Power amplifier, Function generator 가 사용된다. 신호분석기는 N.I Signal Express[17]를 이용하며, 가속도계는 1축 가속도계로 무게는 0.5g의 매우 질량 부가 효과가 적은 것을 사용한다. 임팩트 해머는 끝단부분을 금속팁으로 바꿔서 보다 더 고(高)진동수에서의 응답분석을 용이하게 하였다. 임팩트 해머 방법 외 자석가진 방법을 사용하기 위하여 아래와 같은 장치[Fig. 3-9]를 설치하여 시험하였다.

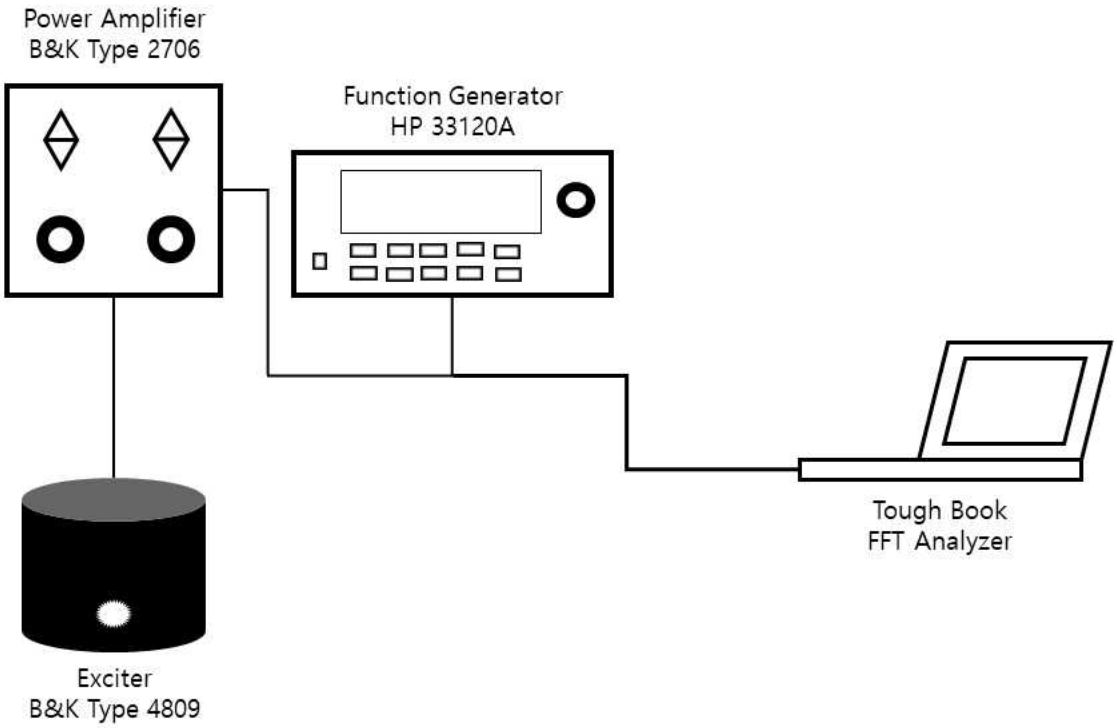

Fig. 3-9 Configuration diagram of measurement equipment

아래는 전자식 가진기 [Fig. 3-10]와 자석가진 장치 설치 사진 [Fig. 3-11]이다.

Fig. 3-10 Exciter

Fig. 3-11 Magnetic excitation test device

아래는 Power amplifier [Fig. 3-12]와 Function generator의 사진 [Fig 3-13]이다.

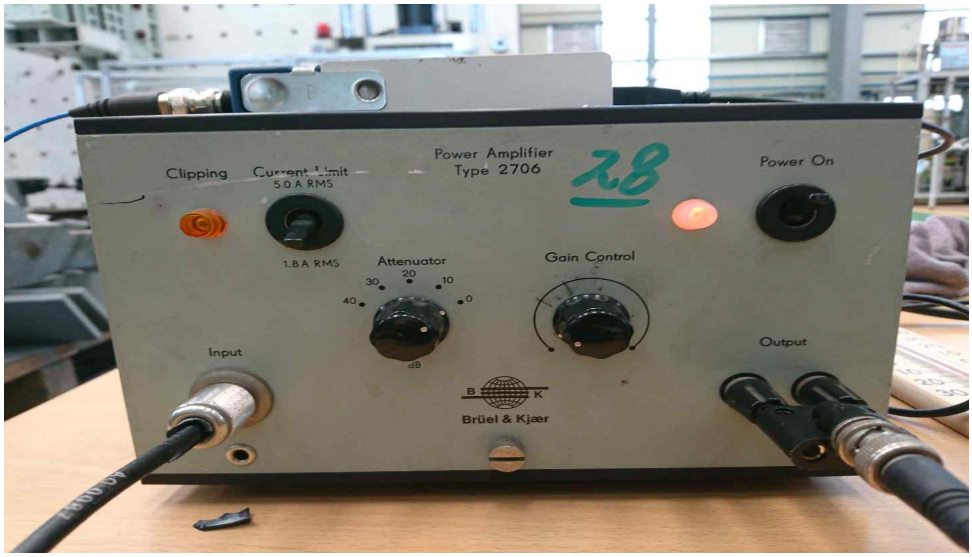

Fig. 3-12 Power amplifier

Fig. 3-13 Function generator

3.2.1. 자석가진 시험 장치 개요도

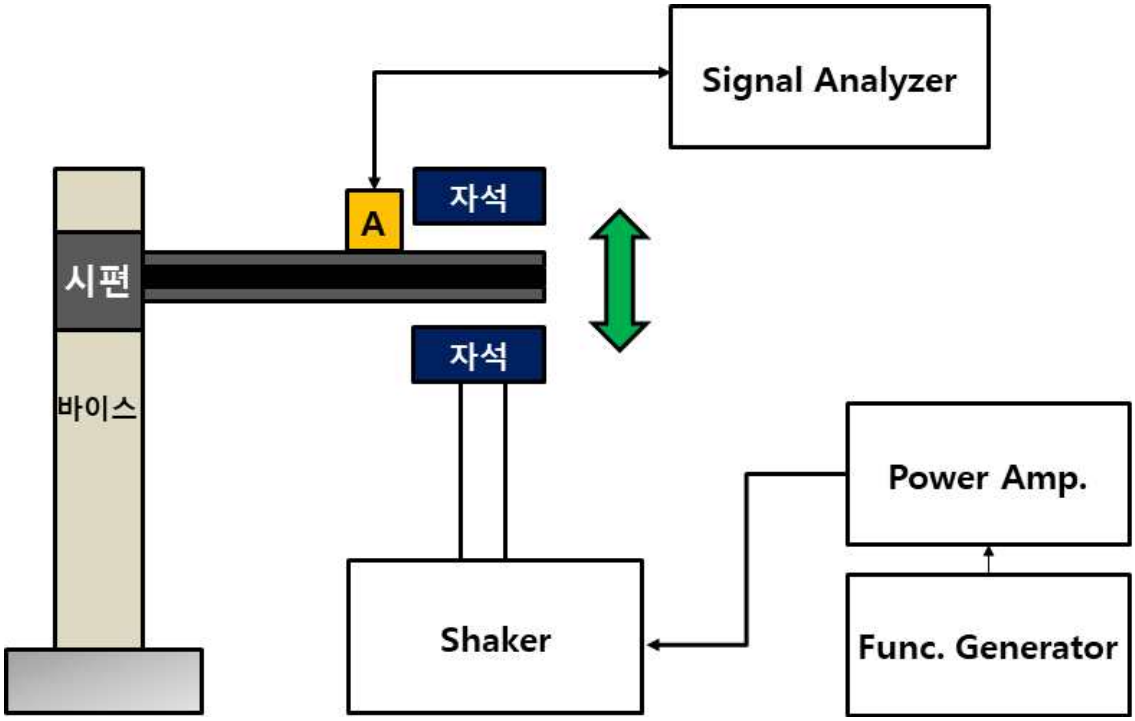

Fig. 3-14 Conceptual diagram about magnetic excitation

위 그림[Fig. 3-14]은 자석가진 개요도이다. Power amplifier로 전압을 주기 전, 먼저 Function generator의 정현파 스위프 모드를 설정하고, 공진 구간(Resonance bandwidth)의 진동 범위를 입력한다. 스위프 시간을 설정한 뒤, Power amplifier로 전압을 준다. 가진기가 구동되면, Function generator의 Trigger 버튼을 눌러 정현파 스위프를 시작한다. 시험이 끝나면 Signal analyzer의 기록을 중지하고, Power amplifier의 전압을 제거한다.

3.3. 시편 사양

빔의 공진점에서만 손실계수 측정이 가능하므로 1 kHz까지의 주파수 대역에서 감쇠 성능을 측정하기 위해서 다양한 길이의 시편을 제작하였다. 각 공진점 별로 감쇠성능, 특성을 추출하여 하나의 그래프로 나타내게 된다. 특히 이번 연구에서는 3개의 시편을 제작하여 시험의 신뢰도를 높이고자 하였다. 시편의 사양은 아래의 표 [Table. 1]와 같다.

Table. 1 Dimension of specimens

길이(mm)	250	300	350
폭(mm)	10	10	10
두께(mm)	2	2	2

길이별로 그래핀 감쇠재 시편 Oberst 빔 3개 , 샌드위치 빔 3개씩, 총 18개의 시편을 제작하였다. 추가적으로 폴리우레탄 시편의 Oberst 빔 3개, 샌드위치 빔 3개, 총 6개의 시편을 제작하였다. 다 합해서 24개의 시편을 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 하였고 데이터가 잘 얻어지지 않을 시 반복 시험하여 최선의 결과를 도출하였다.

시편은 감쇠재를 철 빔에 도포 처리하여서 시편을 제작하였다. 그래핀 감쇠재는 주제와 경화제를 1:2의 비율로 섞어서 제작한다. 경화제의 분자량을 조절하면서 그래핀 감쇠재의 성능을 조정하고 물리적 성질을 바꿀 수 있다. 샌드위치 빔의 구속층(Constraint layer)의 두께는 베이스 빔과 동일한 두께로 제작하였다.

아래의 사진[Fig. 3-15]은 제작된 Oberst 빔 시편의 일부 사진이다.

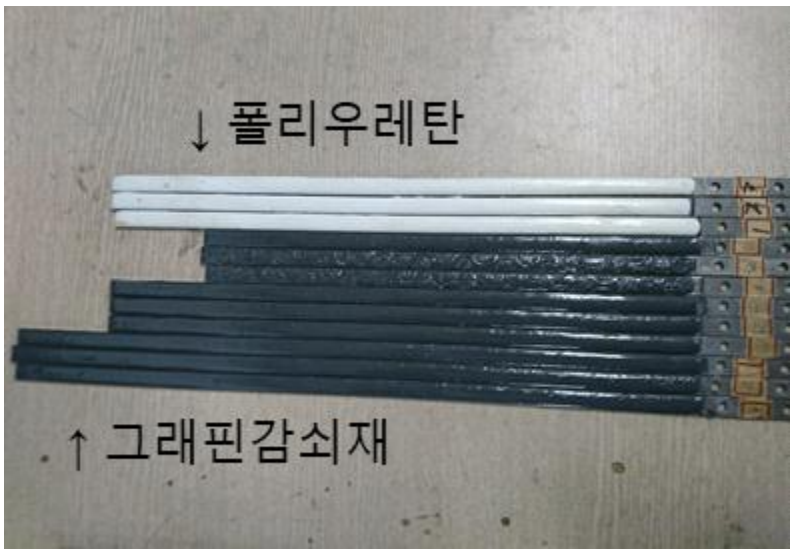

Fig. 3-15 Oberst beam specimens
(polyurethane: gray, graphene damping material: black)

루트(Root)를 제작하여 Clamped-Free 조건에 부합하도록 제작하였다. 루트가 없으면 시편의 고정조건이 민감하게 변화하여 시험에 편차를 발생시킬 가능성이 생긴다. 샌드위치 빔의 감쇠재의 두께는 대략 1mm 정도이고, Oberst 빔의 감쇠재의 두께는 대략 1~2mm 사이에서 제작되었다.

감쇠재를 도포할 때 정확한 폭과 높이로 제작하기 어려움이 있기 때문에, 먼저 도포하여 제작한 뒤, 칼로 폭과 높이를 최대한 균일하게 조절한다. 밀도가 낮은 감쇠재를 도포할 경우, 높이를 1mm 이상 제작하기 어려움이 있기 때문에, 경화제의 분자량을 크게 해서 감쇠재의 밀도를 높게 하는 것이 필요하다.

3.4. 계측 결과

3.4.1. Base beam

[Fig. 3-16]은 베이스 빔을 임팩트해머 시험하여 영 모듈러스를 나타낸 그래프이다.

[Fig. 3-17]은 베이스 빔을 자석가진 시험하여 영 모듈러스를 나타낸 그래프이다.

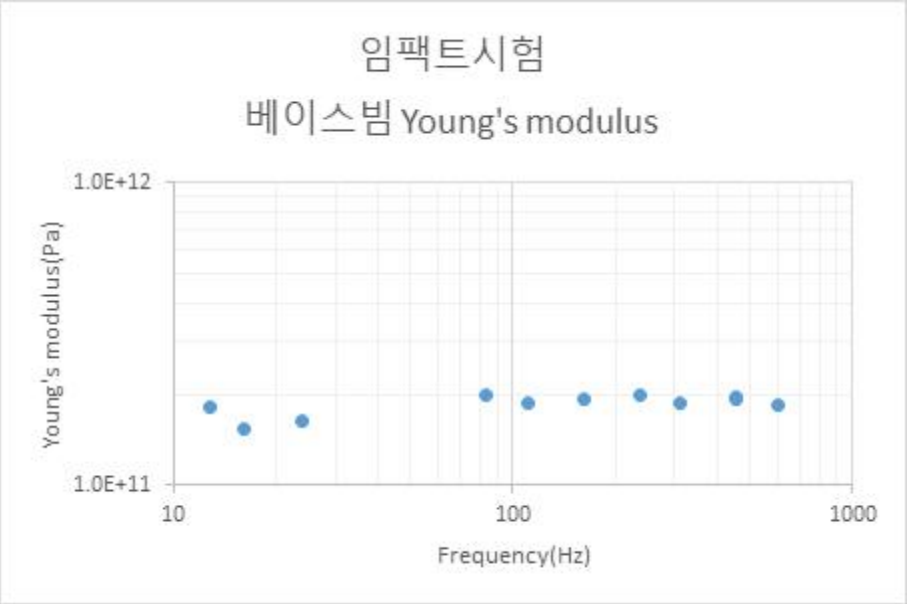

Fig. 3-16 Young's modulus of base beam (impact hammer test)

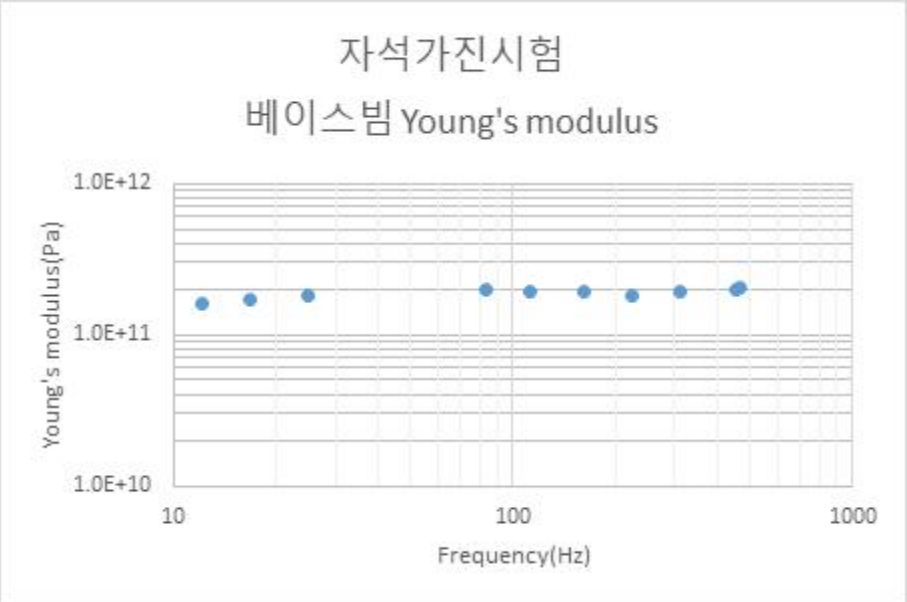

Fig. 3-17 Young's modulus of base beam (magnetic excitation)

3.4.2. Oberst beam

[Fig. 3-18]과 [Fig. 3-19]는 그래핀 감쇠재를 도포한 250mm 시편 3개의 각각의 영 모듈러스와 손실계수 결과를 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 비교하여 나타낸 그래프이다.

[Fig. 3-20]와 [Fig. 3-21]은 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편 3개의 각각의 영 모듈러스와 손실계수 결과를 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 비교하여 나타낸 그래프이다.

[Fig. 3-22]와 [Fig. 3-23]은 그래핀 감쇠재를 도포한 350mm 시편 3개의 각각의 영 모듈러스와 손실계수 결과를 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 비교하여 나타낸 그래프이다.

Fig. 3-18 Young's modulus about comparative test result (250mm graphene damping material)

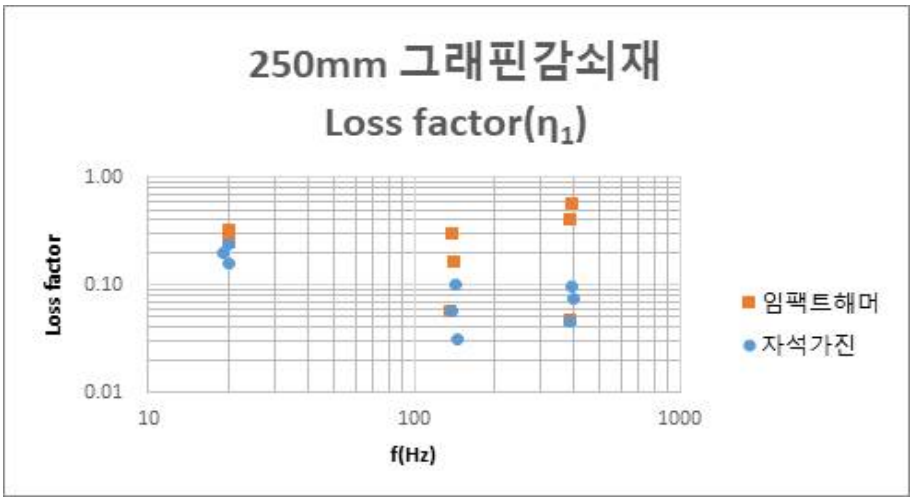

Fig. 3-19 Loss factor about comparative test result (250mm graphene damping material)

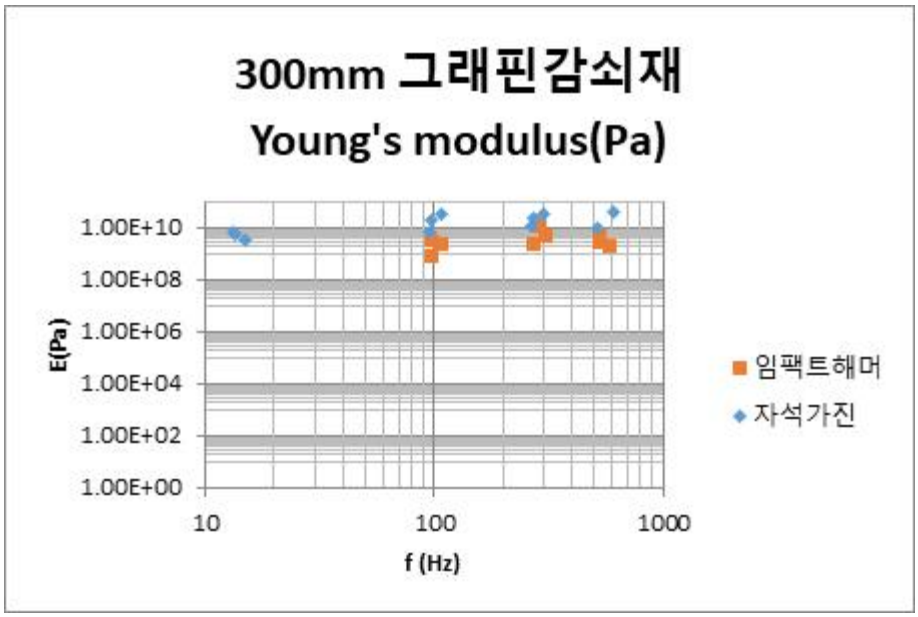

Fig. 3-20 Young's modulus about comparative test result (300mm graphene damping material)

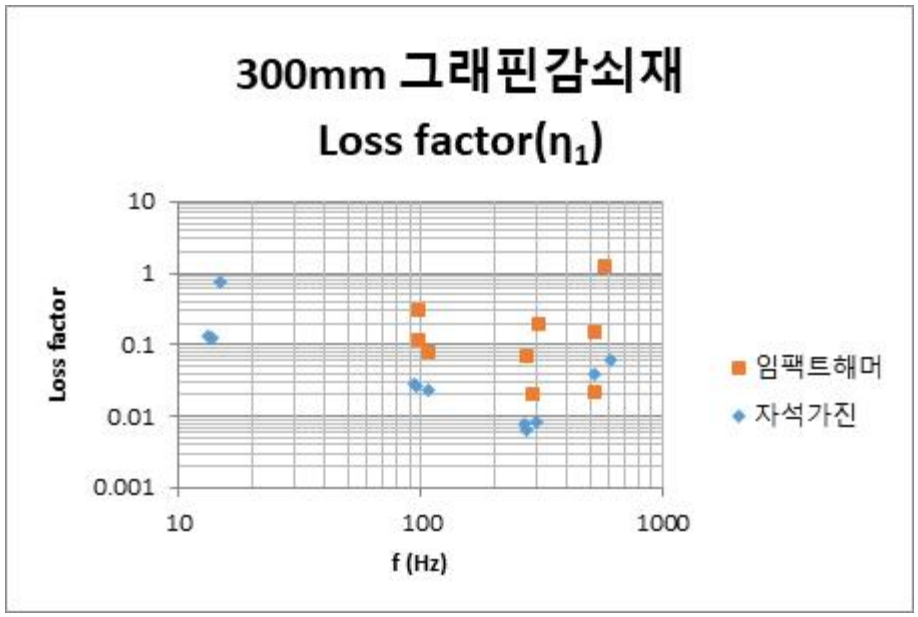

Fig. 3-21 Loss factor about comparative test result (300mm graphene damping material)

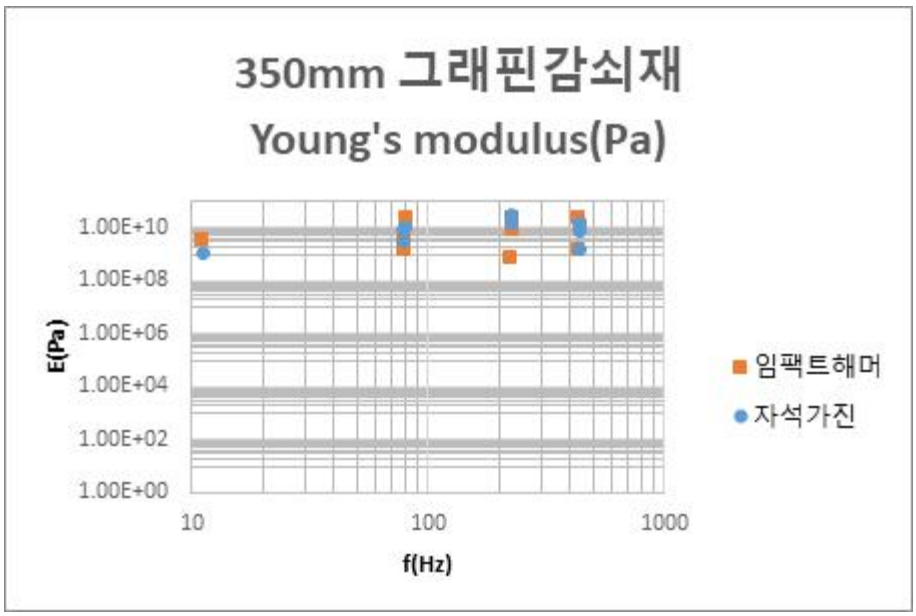

Fig. 3-22 Young's modulus about comparative test result (350mm graphene damping material)

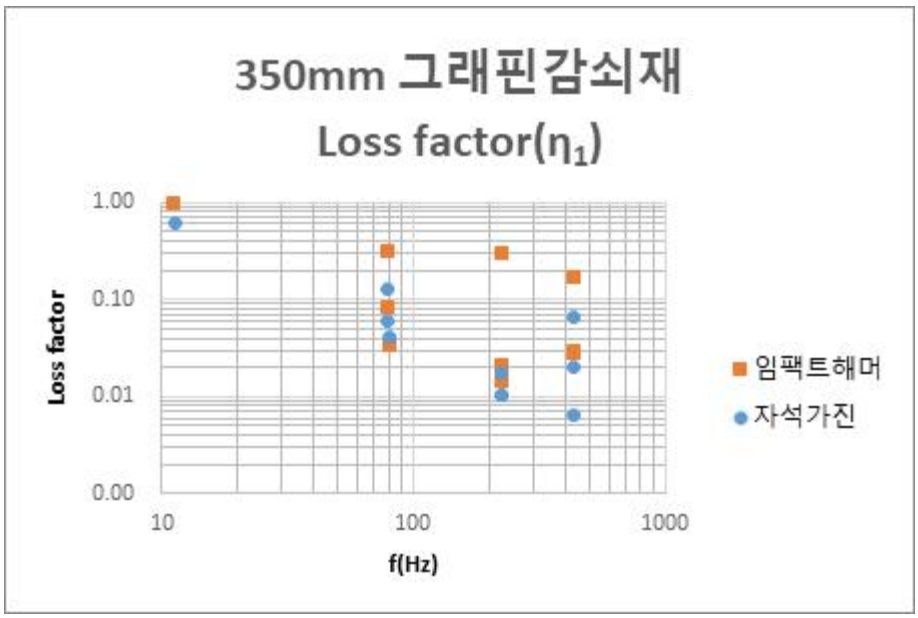

Fig. 3-23 Loss factor about comparative test result (350mm graphene damping material)

3.4.3. Sandwich beam

[Fig. 3-24]와 [Fig. 3-25]은 그래핀 감쇠재를 도포한 250mm 시편 3개의 각각의 전단 모듈러스와 전단 손실계수 결과를 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 비교하여 나타낸 그래프이다.

[Fig. 3-26]과 [Fig. 3-27]는 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편 3개의 각각의 전단 모듈러스와 전단 손실계수 결과를 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 비교하여 나타낸 그래프이다.

[Fig. 3-28]과 [Fig. 3-29]는 그래핀 감쇠재를 도포한 350mm 시편 3개의 각각의 전단 모듈러스와 전단 손실계수 결과를 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 비교하여 나타낸 그래프이다.

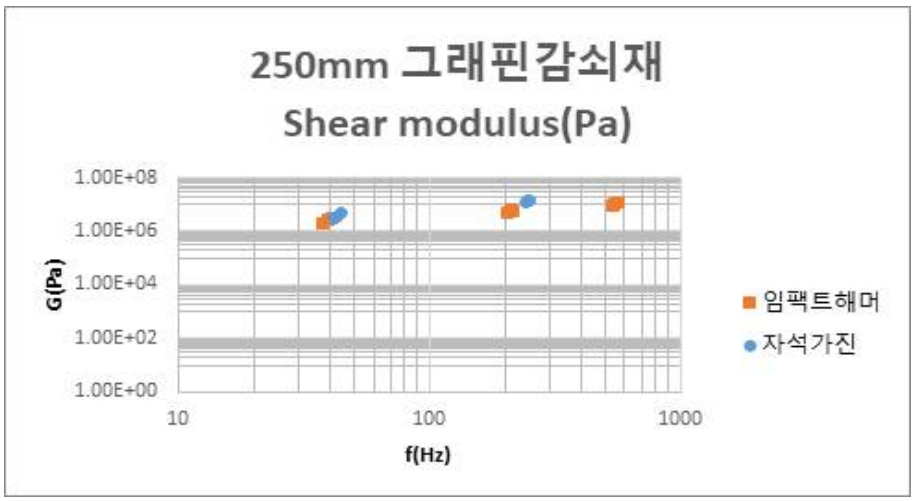

Fig. 3-24 Shear modulus about comparative test result (250mm graphene damping material)

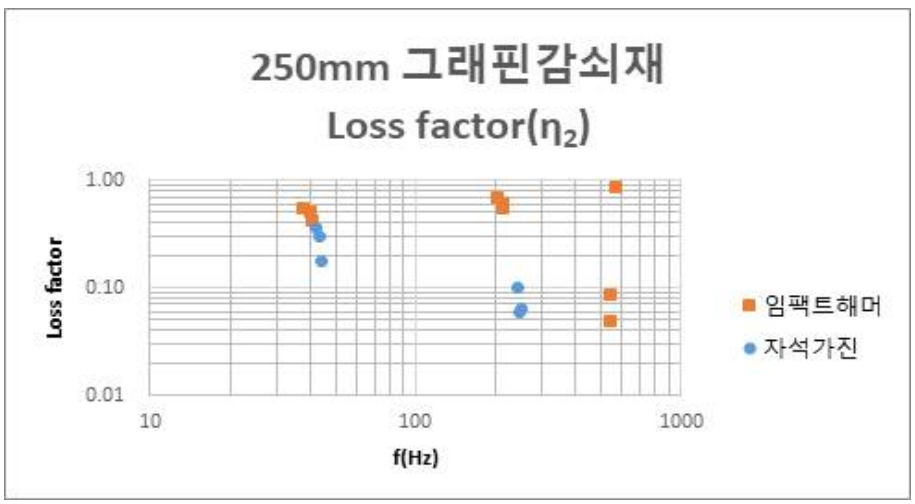

Fig. 3-25 Shear loss factor about comparative test result (250mm graphene damping material)

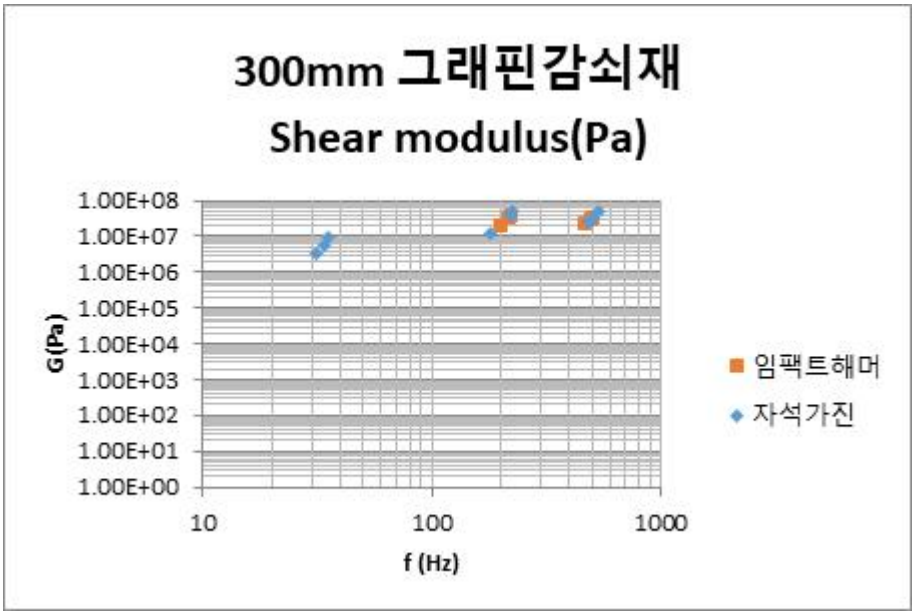

Fig. 3-26 Shear modulus about comparative test result (300mm graphene damping material)

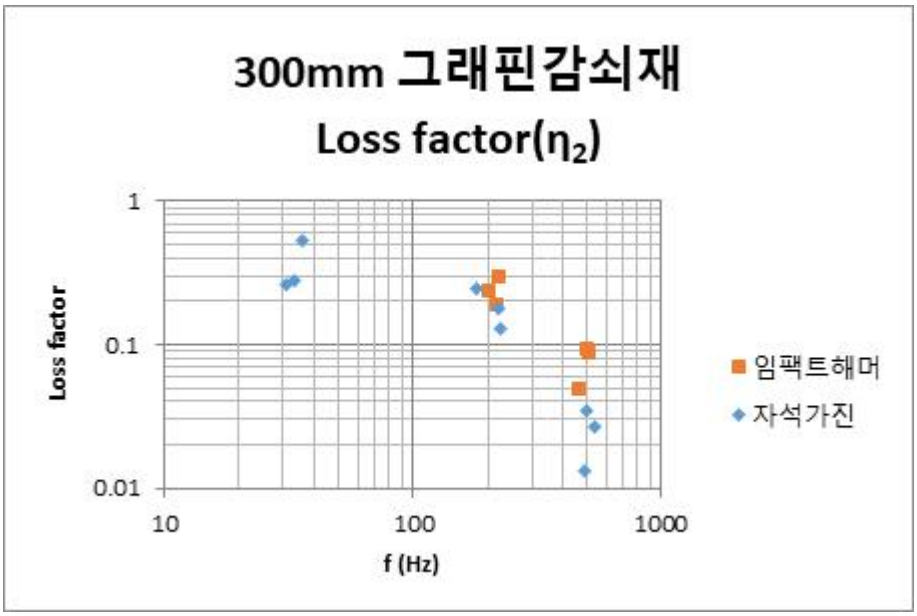

Fig. 3-27 Shear loss factor about comparative test result (300mm graphene damping material)

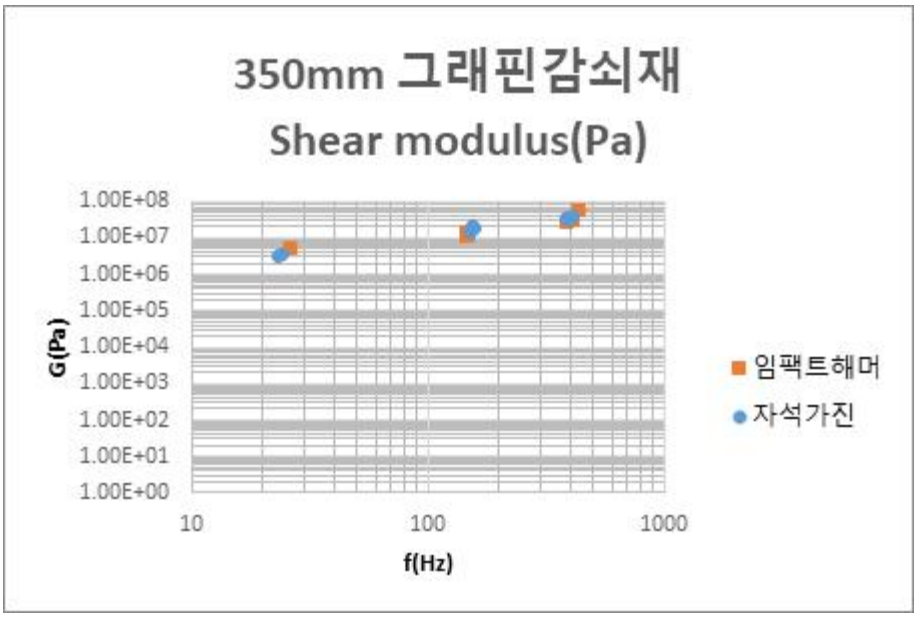

Fig. 3-28 Shear modulus about comparative test result (350mm graphene damping material)

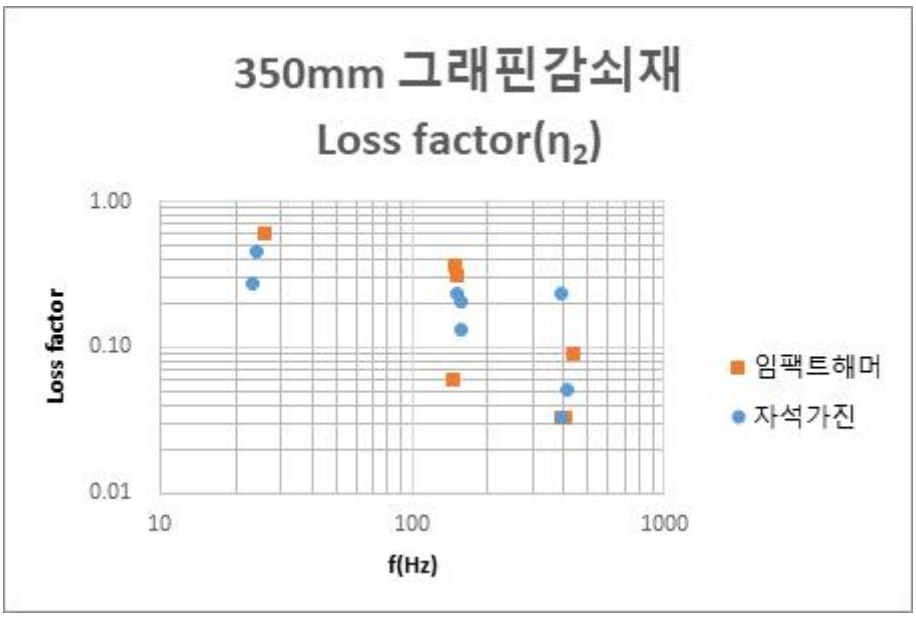

Fig. 3-29 Shear loss factor about comparative test result (350mm graphene damping material)

3.4.4. 그래핀 감쇠재와 폴리우레탄 감쇠재 비교

[Fig. 3-30]은 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편의 영 모듈러스 시험결과와 폴리우레탄을 도포한 300mm 시편의 영 모듈러스 시험결과의 비교자료이다.

[Fig. 3-31]은 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편의 손실계수 시험결과와 폴리우레탄을 도포한 300mm 시편의 손실계수 시험결과의 비교자료이다.

[Fig. 3-32]은 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편의 전단 모듈러스 시험결과와 폴리우레탄을 도포한 300mm 시편의 전단 모듈러스 시험결과의 비교자료이다.

[Fig. 3-33]은 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편의 전단 손실계수 시험결과와 폴리우레탄을 도포한 300mm 시편의 전단 손실계수 시험결과의 비교자료이다.

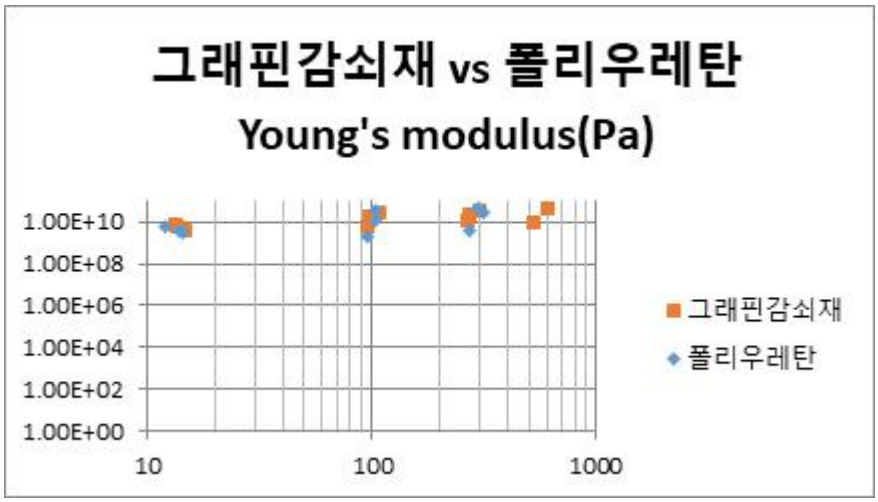

Fig. 3-30 Young's modulus about graphene & polyurethane

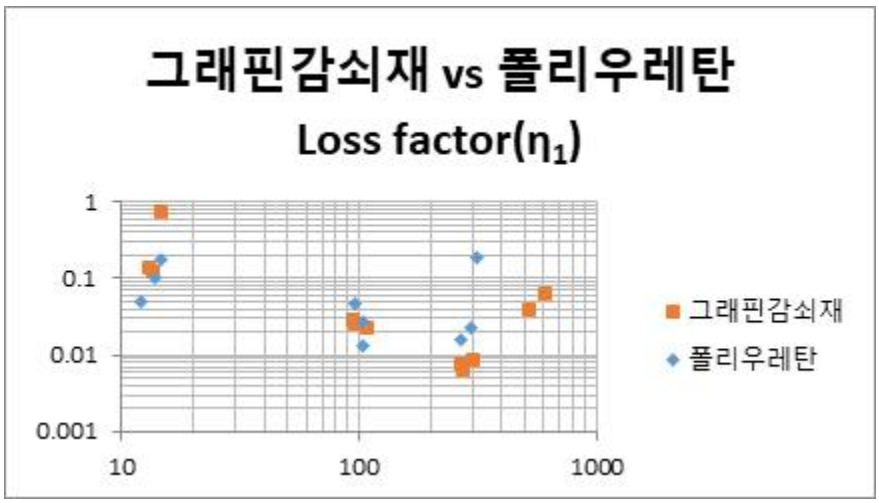

Fig. 3-31 Loss factor about graphene & polyurethane

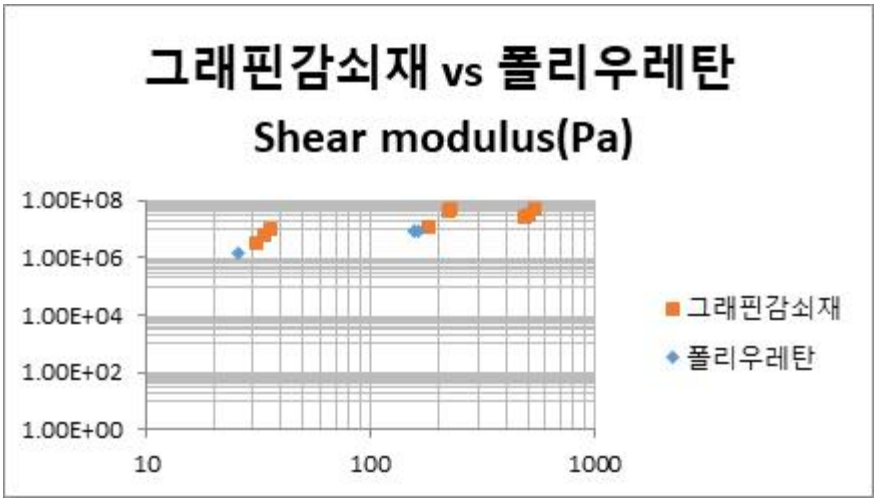

Fig. 3-32 Shear modulus about graphene & polyurethane

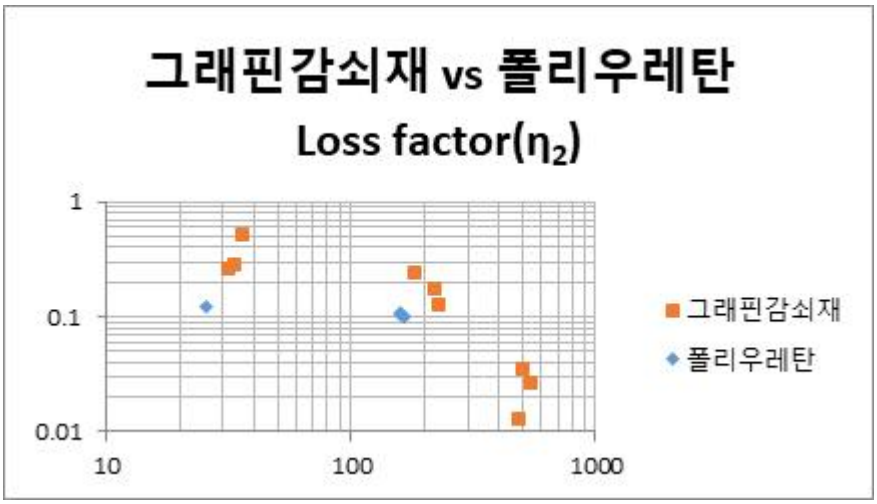

Fig. 3-33 Shear loss factor about graphene & polyurethane

[Fig. 3-34]는 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편의 영 모듈러스 시험결과와 폴리우레탄을 도포한 300mm 시편의 영 모듈러스 시험결과의 평균 비교자료이다.

[Fig. 3-35]은 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편의 손실계수 시험결과와 폴리우레탄을 도포한 300mm 시편의 손실계수 시험결과의 평균 비교자료이다.

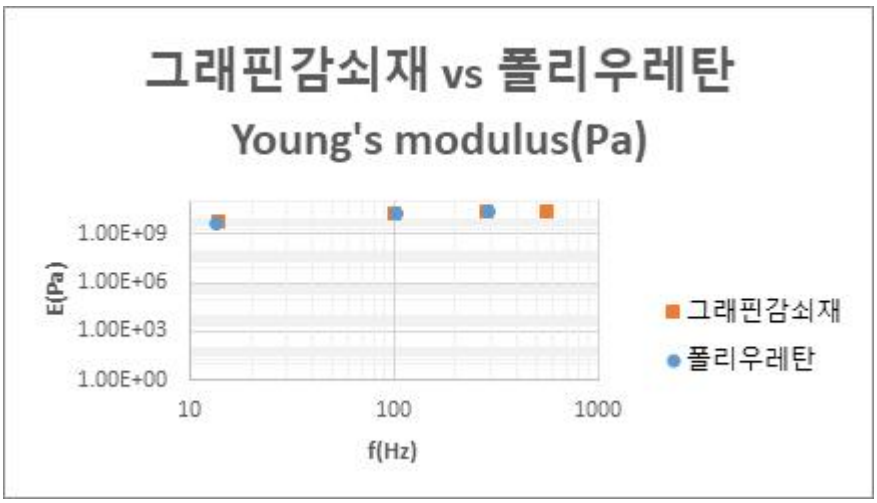

Fig. 3-34 Average Young's modulus about graphene & polyurethane

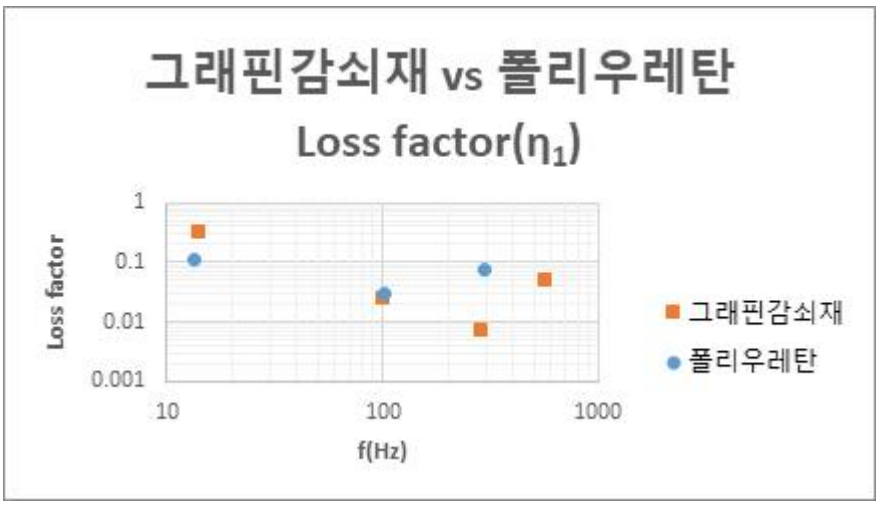

Fig. 3-35 Average loss factor about graphene & polyurethane

[Fig. 3-36]은 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편의 전단 모듈러스 시험결과와 폴리우레탄을 도포한 300mm 시편의 전단 모듈러스 시험결과의 평균 비교자료이다.
[Fig. 3-37]은 그래핀 감쇠재를 도포한 300mm 시편의 전단 손실계수 시험결과와 폴리우레탄을 도포한 300mm 시편의 전단 손실계수 시험결과의 평균 비교자료이다.

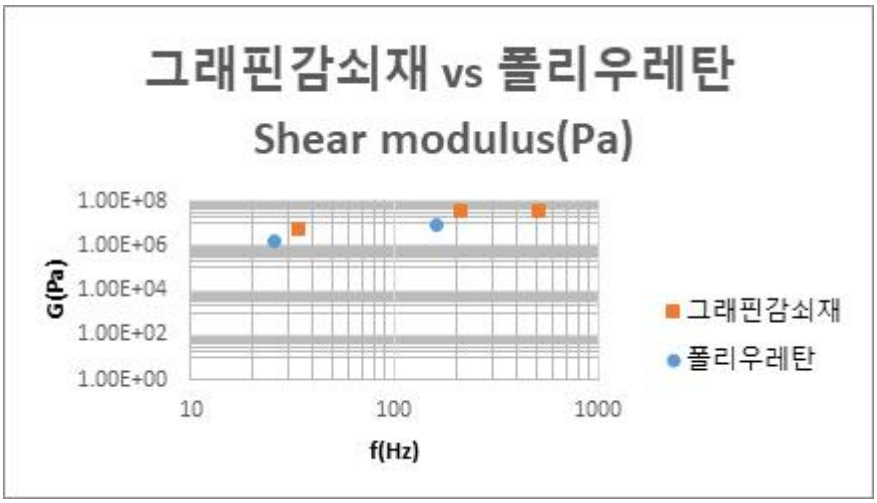

Fig. 3-36 Average Shear modulus about graphene & polyurethane

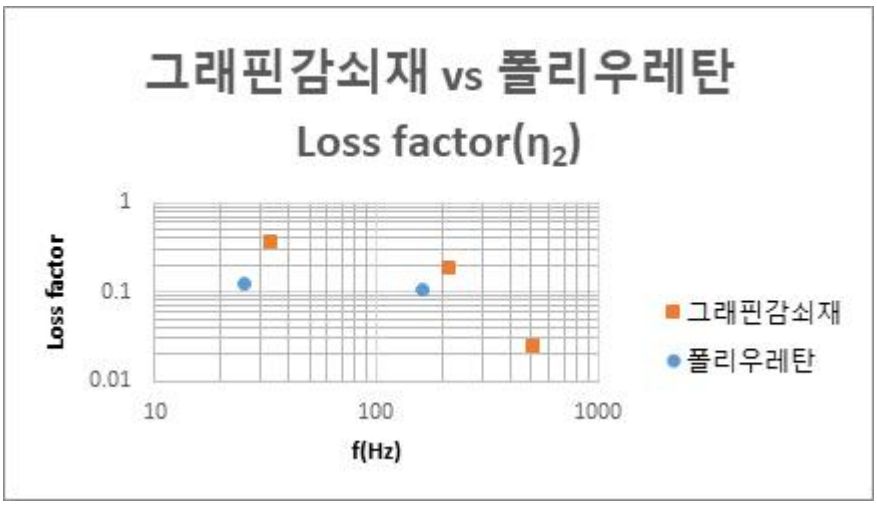

Fig. 3-37 Average Shear loss factor about graphene & polyurethane

3.5. 시험결과 분석

임팩트해머와 자석가진의 시험결과를 분석해보면, 임팩트해머 시험의 경우에는 손실계수를 구할 때 손실계수 측정 시 필요한 진폭과 밴드폭에 편차가 커서 최소한의 편차가 발생하는 데이터를 추출해서 사용하였다.

자석가진의 경우에는 시험 시 진폭이 미세하고 밴드폭에 편차가 적어, 시험결과들의 편차가 적었다. 자석가진의 경우, Power amplifier의 세기를 디지털로 설정할 수 있다면, 더 나은 데이터를 얻을 수 있을 것이다.

베이스 빔의 영 모듈러스는 문헌 상 나와 있는 200GPa과 두 방법의 시험 모두 비슷한 결과를 얻을 수 있다. ASTM E-756의 권고 사항은 시험 결과의 1차 모드를 제거하는 편이 낫다고 했다. 이는, 1차 모드의 값(진폭)이 크게 나오거나 작게 나오며, 다른 데이터들에 비해 편차가 크기 때문이다. 그러나 이번 논문에서는 1차 모드가 다른 모드에 비해 크게 변화가 심하지 않을 경우에는 데이터에 포함시켜 Curve-fitting하여, 저(低)주파수에서의 감쇠재의 성능을 알아보고자 하였다.

그래핀 감쇠재의 영 모듈러스는 평균적으로 1.47E+10 값을 얻었으며, 전단 모듈러스는 평균적으로 약 2E+07 값을 얻었다. 그래핀 감쇠재의 손실계수는 0.14~0.29, 전단손실계수는 0.12~0.37의 값을 얻었다.

폴리우레탄의 영 모듈러스는 평균적으로 1.1E+10의 값을 얻었으며, 폴리우레탄의 전단 모듈러스는 평균적으로 9.17E+06의 값을 얻었다. 폴리우레탄의 손실계수는 0.02~0.07, 전단손실계수는 0.11~0.32의 값을 얻었다.

결과를 분석해 보면 대부분 임팩트 시험의 손실계수가 더 크게 나왔는데 이는 진폭이 일정하지 않고, 시험할 때 마다 똑같은 진폭을 얻기 어려워, FRF(Frequency Response Function)의 Coherence가 좋은 시험들을 선별하여 구하였다. 따라서 반복재현성이 좋은 자석 가진 시험에 비해 신뢰도가 낮다고 볼 수 있다. 자석가진 시험의 손실계수는 비교적 일관성이 좋았고, 반복시험의 결과 항상 비슷한 결과들을 얻을 수 있었다. 이는 자석가진 시험의 반복재현성이 임팩트해머 시험에 비해 우수하다고 볼 수 있다.

Table. 2 Test results of 250mm graphene specimens

250mm 그래핀감쇠재 평균데이터	Young's modulus(Pa)	Shear modulus(Pa)	Loss factor(η_1)	Loss factor(η_2)
임팩트해머	5.57E+09	6.17E+06	0.27	0.48
자석가진	3.60E+10	8.62E+06	0.11	0.18

Table. 3 Test results of 300mm graphene specimens

300mm 그래핀감쇠재 평균데이터	Young's modulus(Pa)	Shear modulus(Pa)	Loss factor(η_1)	Loss factor(η_2)
임팩트해머	3.89E+09	3.00E+07	0.22	0.16
자석가진	2.20E+10	2.46E+07	0.11	0.10

Table. 4 Test results of 300mm polyurethane specimens

300mm 폴리우레탄 평균데이터	Young's modulus(Pa)	Shear modulus(Pa)	Loss factor(η_1)	Loss factor(η_2)
임팩트해머	6.61E+09	1.17E+07	0.02	0.32
자석가진	1.5E+10	6.64E+06	0.07	0.11

Table. 5 Test results of 350mm graphene specimens

350mm 그래핀감쇠재 평균데이터	Young's modulus(Pa)	Shear modulus(Pa)	Loss factor(η_1)	Loss factor(η_2)
임팩트해머	1.08E+10	2.27E+07	0.20	0.21
자석가진	1.01E+10	2.11E+07	0.16	0.20

250mm 시편의 시험 결과를 보면 영 모듈러스는 다른 시편의 결과와 큰 차이가 없었지만, 전단 모듈러스가 조금 낮게 나왔고, 전단 손실계수가 다른 시편의 결과에 비해 크게 나왔다.

300mm 시편 결과의 그래핀이 혼합되지 않은 폴리우레탄 시편은 개수가 많지 않아 시험의 평균값이 신뢰도가 떨어지지만, 이를 그래핀 감쇠재와 비교해보면 그래핀 감쇠재에 비하여 폴리우레탄의 영 모듈러스, 전단 모듈러스, 손실계수, 전단 손실계수 등이 대체적으로 비슷하거나 낮게 나왔다. 그러나 폴리우레탄 임팩트해머 시험의 경우, 그래핀 감쇠재에 비하여 많이 낮거나 큰 손실계수를 얻었는데, 이는 반복재현성이 떨어지는 임팩트 해머 시험의 한계를 보여준다.

폴리우레탄 시험 결과 손실계수(η_1)가 0,02~0.07 정도로 그래핀 감쇠재에 비해 낮게 측정되었고, 전단손실계수(η_2)는 그래핀 감쇠재와 비교하여 0.11~0.32 정도로 크거나 비슷한 값을 얻을 수 있었다.

350mm 시편의 시험 결과를 보면 임팩트해머와 자석가진 시험의 결과가 유사하게 측정되었다. 빔 시험을 할 때, 빔의 길이가 짧을 경우, 고 진동수의 측정 그래프가 명확하게 얻기 어렵고, 노이즈(Noise)가 많이 발생한다. 350mm 의 빔을 가진하였을 경우에 임팩트해머 시험과 자석가진의 시험결과가 비슷하게 나왔다. 빔의 길이가 400mm 이상일 경우, 외팔보조건의 시험에서는 보의 처짐이 발생하여, 이는 또 다른 오차를 발생시킬 우려가 있다. 빔의 두께가 2mm일 때, 350mm의 빔 시험이 가장 편차가 적을 것이라는 것을 시험의 결과로 알 수 있었다.

4. 점탄성재료의 모델링

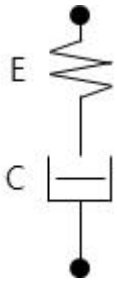

Fig. 4-1
Maxwell
model

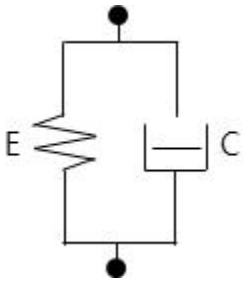

Fig. 4-2
Kelvin-Voigt
model

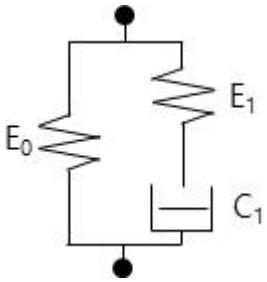

Fig. 4-3
Standard
model

앞에 설명한 점탄성재료의 모델링 방법에는 맥스웰 모델(Maxwell model), 켈빈 보이트 모델(Kelvin-Voigt model), 표준 모델(Standard model) 이 있다. 이 모델들을 주파수영역에서 얻어진 결과와 비교하기 위해서는 라플라스 변환(Laplace transform)이 필요하다.

맥스웰 모델의 전달함수(Transfer function)를 주파수영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$H_{maxwell}(\omega) = \frac{i\omega EC}{E + i\omega C} \tag{4.1}$$

켈빈-보이트 모델의 전달함수를 주파수 영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$H_{KV}(\omega) = E + iwC \tag{4.2}$$

표준 모델의 전달함수를 주파수 영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$H_{std}(\omega) = \frac{E_0 E_1 + i\omega C(E_0 + E_1)}{E_1 + i\omega C} \tag{4.3}$$

일반화된 맥스웰 모델은 강성 한 개 요소에 맥스웰 모델을 병렬로 연결시키는 모델이다. 앞에서 일반화된 맥스웰 모델을 설명했을 때, 차수를 증가시키면서 적합한 모델을 적용시킨다고 하였다.

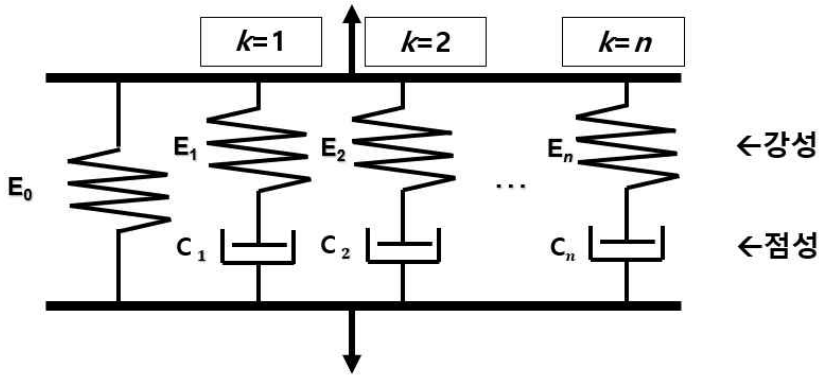

Fig. 4-4 Generalized Maxwell model

일반화된 맥스웰 모델의 전달함수를 주파수 영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$H_{GMM}(\omega) = E_0 + \sum_{k=1}^{n} \frac{i\omega E_k C_k}{E_k + i\omega C_k} \tag{4.4}$$

적절한 차수 k를 선택하여 점탄성재료의 시험결과를 토대로 점탄성재료의 성능을 예측하는 모델을 만든다. 차수 k는 최적화 기법(Optimization)을 사용하여 추정할 수 있으며, k는 데이터의 개수보다 많을 경우 오버 피팅(Over-fitting)이 될 가능성이 크다. 따라서 적절한 최적화 기법을 사용하여 모델링오차가 작은 차수 k를 찾는 것이 중요하다고 할 수 있다.

4.1. 최적화 기법(Optimization)

최적화란, 특정의 집합 위에서 정의된 실수, 함수, 정수에 대해 그 값이 최대나 최소가 되는 상태를 해석하는 문제이다. 본 논문은 최적화를 통하여 점탄성 모델링과 수치해석 간의 오차를 줄이는 데 사용하였다. 점탄성 감쇠재를 성질을 표현하기 위해 일반점성 감쇠모델의 곡선맞춤법으로 계산 된 사례는 아래와 같다.

Van loon[18]은 실험데이터를 전달함수로 표현하는데 필요한 변수를 통합해 초기치로 나타내고 이를 테일러 전개하여 반복 계산하였다. 이 방법은 초기치에 따라 발산할 가능성이 존재하고, 계산시간이 비교적 오래 걸린다. Mergeay[19]는 Time domain의 전달함수 데이터를 이용하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 계산 시간은 비교적 짧으나 고유모드의 정확도가 떨어진다. Ibrahim 과 Mikulcik[20] 은 Time domain에서 고유치 해석을 하여 비선형 항을 찾는 방법이다. 이 방법 또한 고유모드의 정확도가 떨어지는 방법이다.

최적화방법 중 널리 쓰이는 경사 하강법(Gradient descent)에 대해 설명하자면, 경사하강법은 1차 근사값 발견용 최적화 알고리즘이다. 기본 아이디어는 함수의 기울기를 구하여 기울기가 낮은 쪽으로 계속 이동시켜서 극값에 이를 때까지 반복시키는 것이다. 그러나 이 방법은 초기치에 영향을 크게 받아 국소적인 최소값이나 최대값에서 계산을 멈추는 단점이 있다. 따라서 정확성을 높이기 위해서는 많은 반복계산이 필요하다.

비교적 최근에 개발 된 최적화 기법 중 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, G.A)가 있다. 이 기법은 초기치를 무작위로 선택하여 새로운 초기치를 만들고 최소값과 최대값을 찾는 기법이다. 이 방법 역시 시간이 많이 걸리나, 반복계산의 필요성이 적고, 컴퓨터가 자동으로 최적화를 시킬 수 있기 때문에 많이 사용되고 있다.

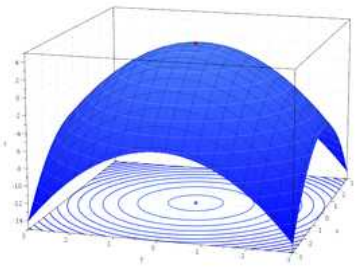

Fig. 4-5 An example of finding maximum value on parabolic surface

4.2. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 자연계 생물의 유전학을 본뜬 이론이며, 병렬적이고 전역적(Global)인 탐색 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 다윈의 적자생존 이론을 기본 개념으로 한다. 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 정해진 형태의 자료구조로 표현한 다음, 이들을 점차적으로 진화, 교배, 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 만들어 낸다. 여기에서 해들을 나타내는 자료구조는 유전자이며, 이 자료구조들을 변형함으로써 점점 더 좋은 해를 만들어 내는 과정을 진화로 표현할 수 있다.[21][22] 요약하자면, 유전 알고리즘은 목적 함수 f(x)를 최적화하는 해(Solution)인 x를 찾기 위해, 진화를 모방한(Simulated evolution) 탐색 알고리즘이라고 말할 수 있다.

이번 논문에서 함수는 'f(x)=$|x^{test}-x^{model}|^2$' 이며, 시험데이터와 모델링의 오차를 제곱의 형태로 사용했다. 이 함수 f(x)의 오차가 가장 적어지는 차수(order) k를 찾아서 점탄성재료를 모델링할 때 오차를 줄이면서, 점탄성재료의 성능을 예측할 수 있도록 하는 것이 목표 과제이다. 점탄성 감쇠재는 비선형 모델이므로, 유전자 알고리즘을 사용하는 것이 오차를 줄이는 최적화 방법 중 좋은 것으로 확인하였다.

유전 알고리즘은 특정한 문제를 풀기 위한 알고리즘이라기 보단 문제를 풀기 위한 접근방법에 가까우며, 유전 알고리즘에서 사용할 수 있는 형식으로 바꾸어 표현할 수 있는 모든 문제에 대해서 적용할 수 있다. 일반적으로 문제가 계산 불가능할 정도로 복잡할 경우 유전 알고리즘을 사용하여, 실제 최적 해를 구하지는 못하더라도 최적 해에 가까운 답을 얻기 위한 방안으로써 접근할 수 있다. 이 경우 해당 문제를 푸는 데 최적화되어 있는 알고리즘보다 좋은 성능을 보여주지는 못하지만, 대부분 받아들일 수 있는 수준의 솔루션을 보여줄 수 있다.

이러한 생물의 진화 과정, 자연 선택과 유전 법칙 등을 모방한 알고리즘들로 진화 전략(Evolutionary strategies), 유전 프로그래밍(Genetic programming) 등 여러 형태의 이론과 기법들이 최근 많이 연구되고 있다. 유전 알고리즘은 이 중에서 가장 기본이 되는 대표적 알고리즘이며, 자연과학/공학 및 사회과학 분야 등 다양한 분야에서 비선형 방정식 또는 계산 불가능한 복잡한 최적화 문제를 해결하는 데 널리 사용되고 있다.

4.3. 모델의 적용

4.3.1. 그래핀 감쇠재 시험 결과

길이가 다른 시편들을 시험하여 그래핀 감쇠재의 다양한 고유진동수에서 얻은 영 모듈러스, 전단 모듈러스, 손실계수를 추출하고 이 데이터들을 주파수 별로 정리하여, 내림차순으로 정리하여 모델링에 사용한다. 비슷하게 만든 3개의 시편으로 시험한 결과를 평균 내어 그래핀 감쇠재의 동특성을 그래프로 표현하였다.

[Fig. 4-6]와 [Fig. 4-7]은 그래핀 감쇠재의 영 모듈러스의 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 비교한 그래프이다. [Fig. 4-8]와 [Fig. 4-9]는 그래핀 감쇠재의 손실계수의 임팩트해머 시험과 자석 가진 시험을 비교한 그래프이다.

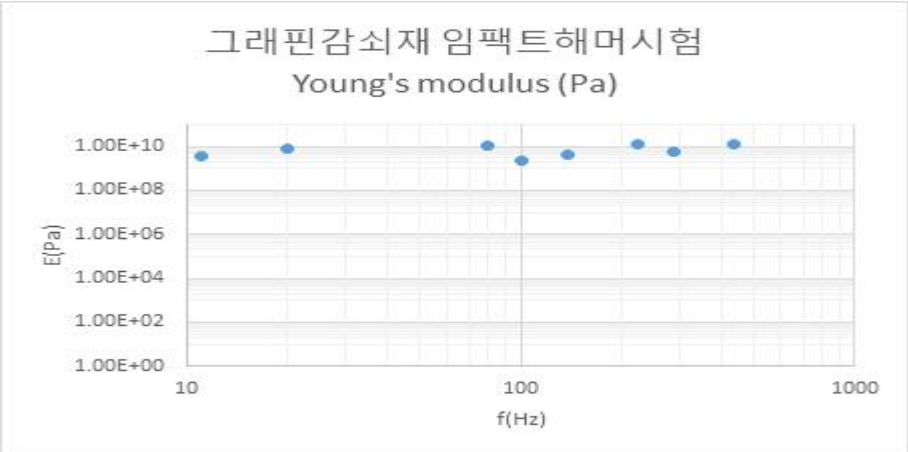

Fig. 4-6 Young's modulus of graphene damping material (impact hammer test)

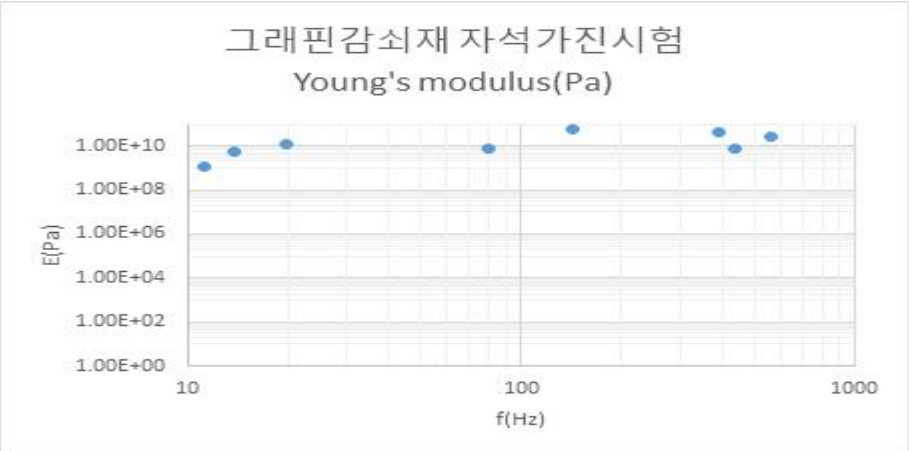

Fig. 4-7 Young's modulus of graphene damping material (magnetic excitation)

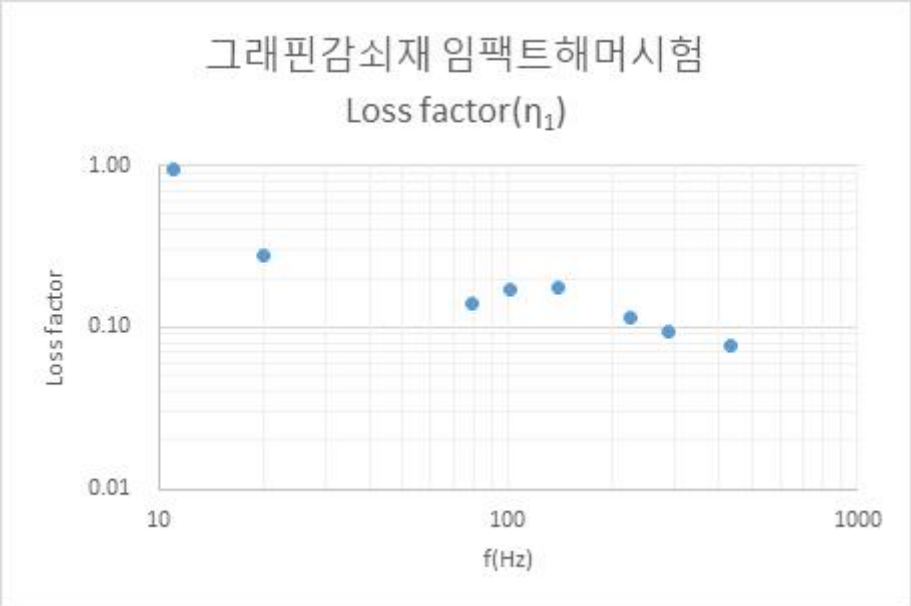

Fig. 4-8 Loss factor of graphene damping material (impact hammer test)

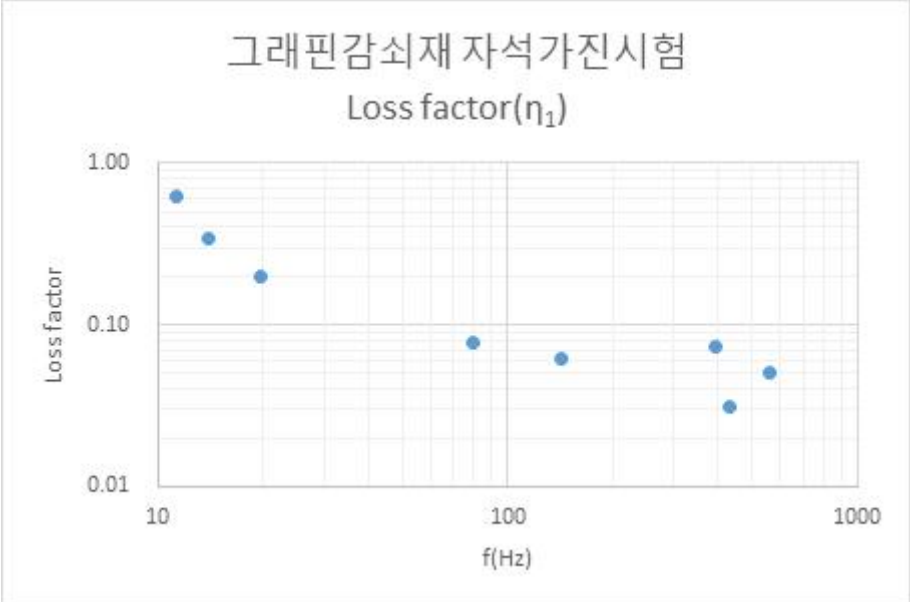

Fig. 4-9 Loss factor of graphene damping material (magnetic excitation)

[Fig. 4-10]과 [Fig. 4-11]은 그래핀 감쇠재의 전단 모듈러스의 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 비교한 그래프이다.

[Fig. 4-12]과 [Fig. 4-13]는 그래핀 감쇠재의 전단 손실계수의 임팩트해머 시험과 자석가진 시험을 비교한 그래프이다.

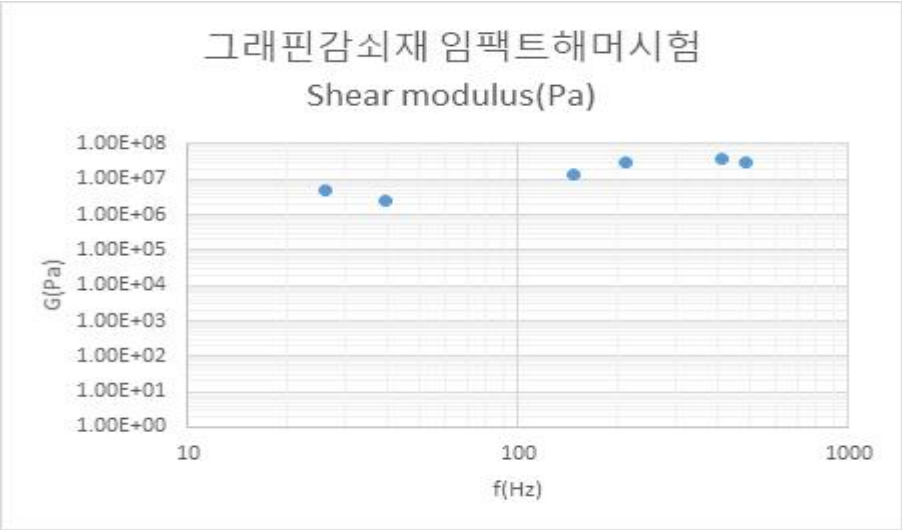

Fig. 4-10 Shear modulus of graphene damping material (impact hammer test)

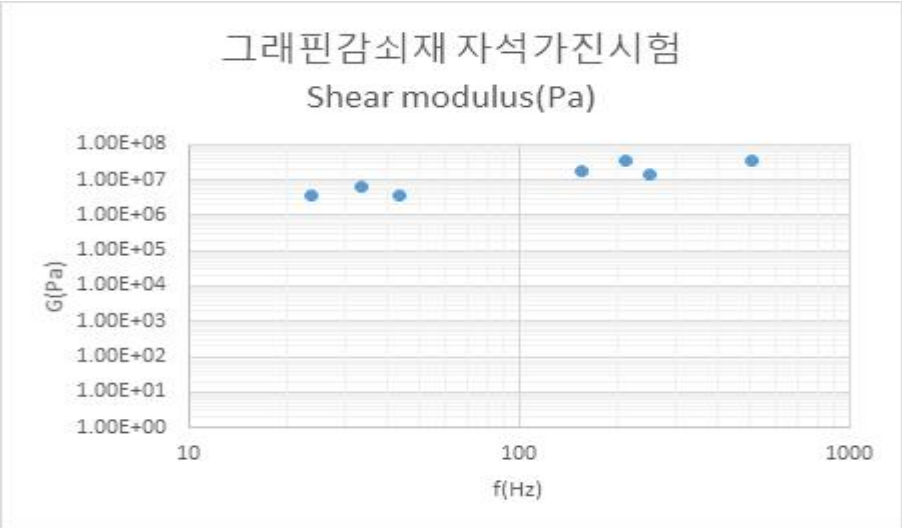

Fig. 4-11 Shear modulus of graphene damping material (magnetic excitation)

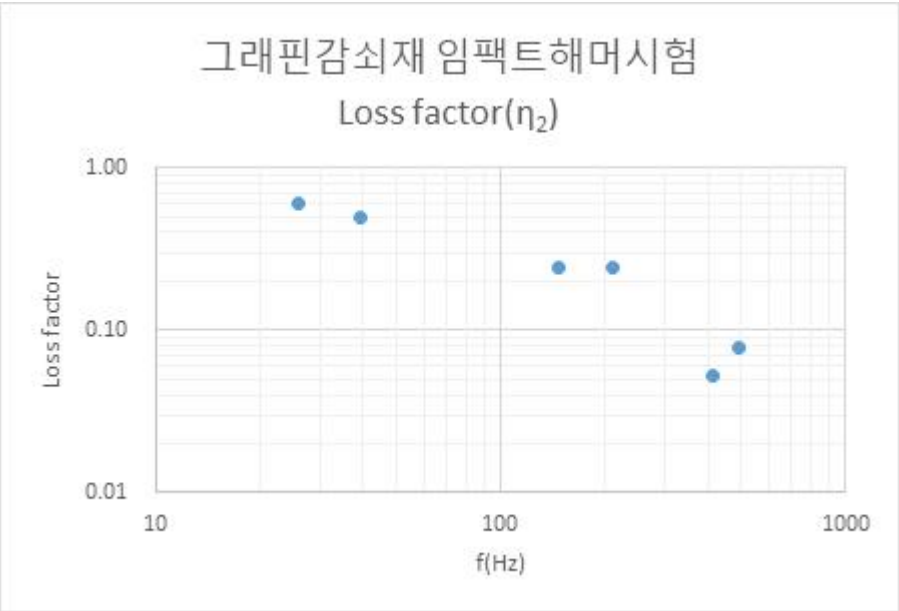

Fig. 4-12 Shear loss factor of graphene damping material (impact hammer test)

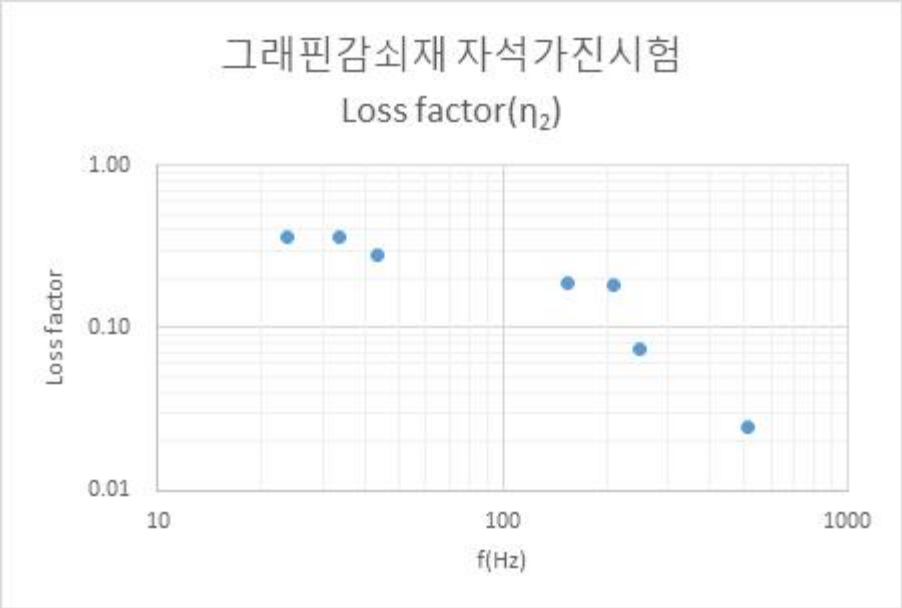

Fig. 4-13 Shear loss factor of graphene damping material (magnetic excitation)

4.3.2. Maxwell model

맥스웰 모델은 점탄성재의 성질을 모델링하는 강성과 점성을 직렬로 연결한 하나의 요소 모델이다. 비선형 방정식 모델이기는 하나, 차수가 1차여서 이번 그래핀 감쇠재의 최적화를 위한 적절한 곡선 맞춤이 어렵다.

4.3.3. Kelvin-Voigt model

켈빈-보이트 모델은 점탄성재의 성질을 모델링하는 강성과 점성을 병렬로 연결한 하나의 요소 모델이다. 선형 방정식 모델이며, 차수가 1차여서 1차 그래프의 형태를 가지며, 최적화를 위한 적절한 곡선 맞춤이 어렵다.

4.3.4. Generalized Maxwell model

일반화된 맥스웰 모델은 강성 하나에 맥스웰 요소를 병렬로 연결하는 모델이다. GMM의 차수가 '1'일 때 Standard model이며, 맥스웰 요소의 개수를 변화시키면서 점탄성재를 표현하기 위한 최적모델을 찾는다. 맥스웰 모델은 점탄성재를 모델링하는데 널리 사용되며, 감쇠재의 성능의 경향을 예측하는 모델을 만드는데 일반적으로 많이 사용된다.

4.3.4.1. Young's modulus & Loss factor(η_1)

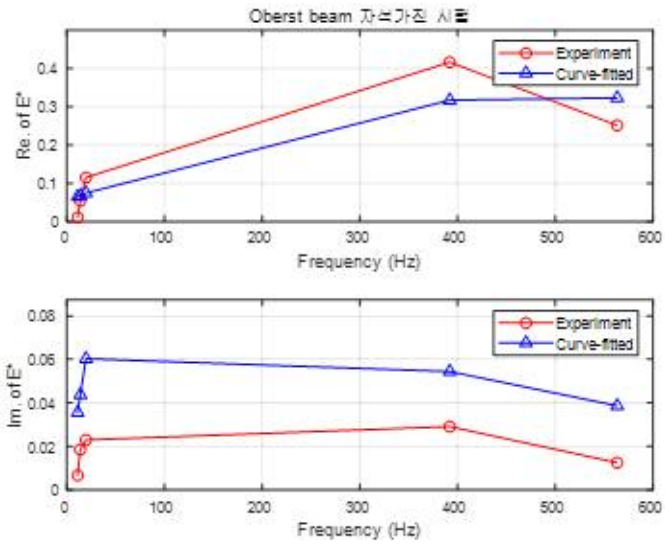

Fig. 4-14 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=1)

위의 그림[Fig. 4-14]은 차수가 '1'일 때 곡선 맞춤한 결과이다. Standard model은 어느정도 시험결과와 비슷하게 곡선맞춤이 되었지만, 주파수 도메인에 영 모듈러스와 손실계수를 그래프를 그렸을 때, 적합한 결과가 나타나지 않았다.

아래의 그림[Fig. 4-15]은 차수가 '1'일 때, 영 모듈러스의 경향을 예측하는 그래프이며, 아래의 그림[Fig. 4-16]은 손실계수의 경향을 예측하는 그래프이다.

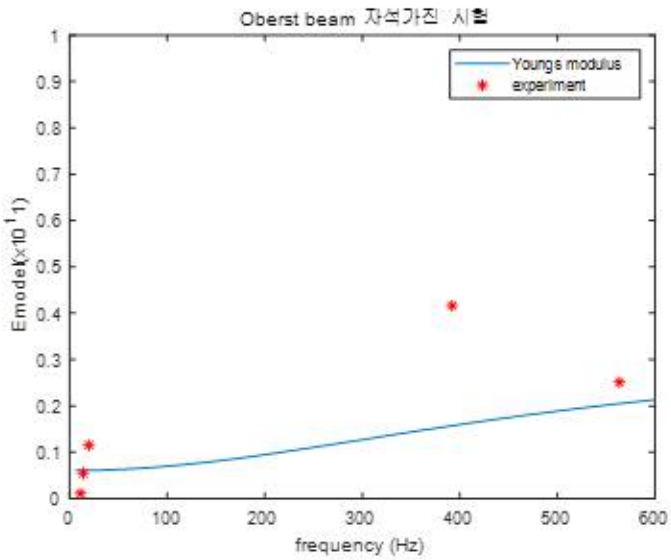

Fig. 4-15 Young's modulus of graphene damping material (k=1)

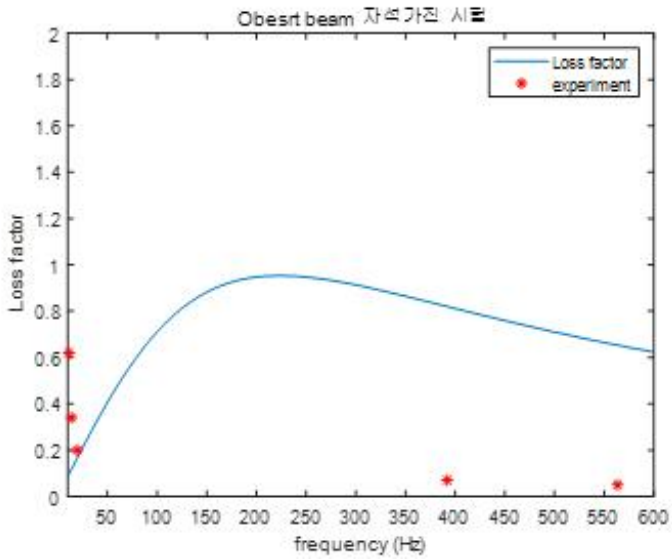

Fig. 4-16 Loss factor of graphene damping material (k=1)

차수가 '1'인 모델의 영 모듈러스는 어느정도 시험결과의 경향에 비슷하게 따라가는 결과를 보여주지만, 손실계수를 그래프로 그렸을 때, 시험데이터와 편차가 발생한다.

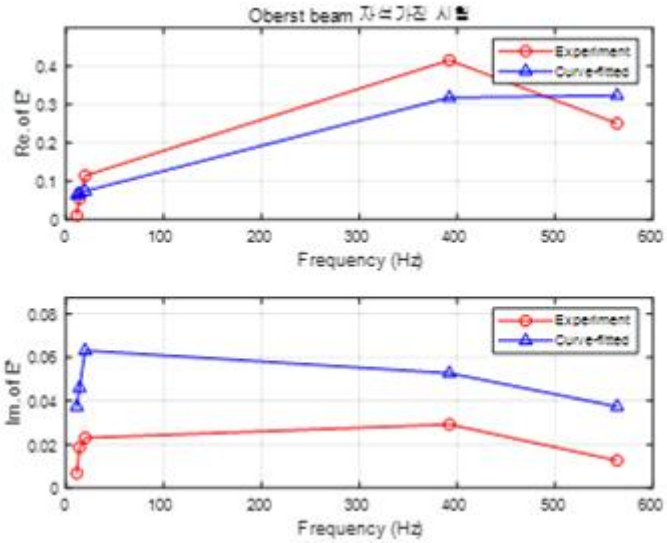

Fig. 4-17 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=2)

위의 그림[Fig. 4-17]은 차수가 '2'일 때 곡선 맞춤한 결과이다. 어느정도 시험결과와 비슷하게 곡선맞춤이 되었지만, 주파수 도메인에 영 모듈러스와 손실계수를 그래프를 그렸을 때, 적합한 결과가 나타나지 않았다.

아래의 그림[Fig. 4-18]은 차수가 '2'일 때, 영 모듈러스의 경향을 예측하는 그래프이며, 아래의 그림[Fig. 4-19]은 손실계수의 경향을 예측하는 그래프이다.

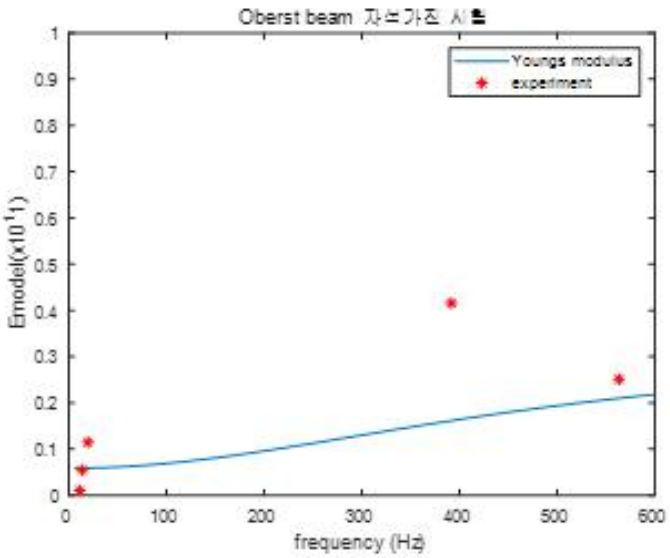

Fig. 4-18 Young's modulus of graphene damping material (k=2)

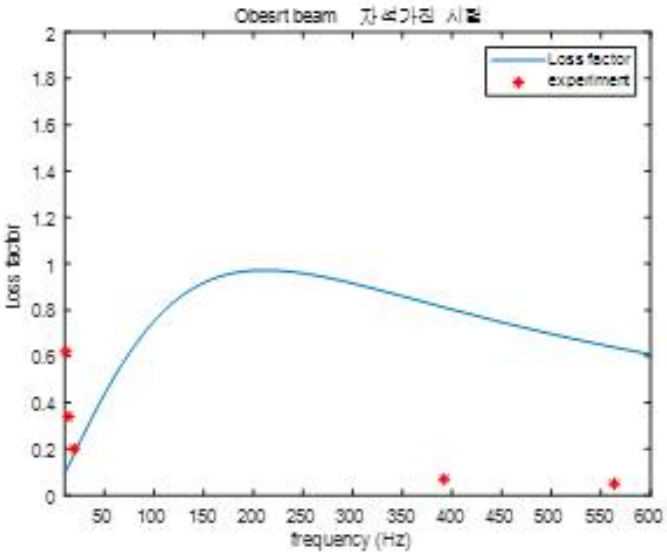

Fig. 4-19 Loss factor of graphene damping material (k=2)

차수가 '2'인 모델의 영 모듈러스는 어느정도 시험결과의 경향에 비슷하게 따라가는 결과를 보여주지만, 손실계수를 그래프로 그렸을 때, 시험데이터와 편차가 발생한다. 계속 차수를 늘려가면서 시험데이터와 편차가 최소화가 되는 차수를 찾는 최적화가 필요하다.

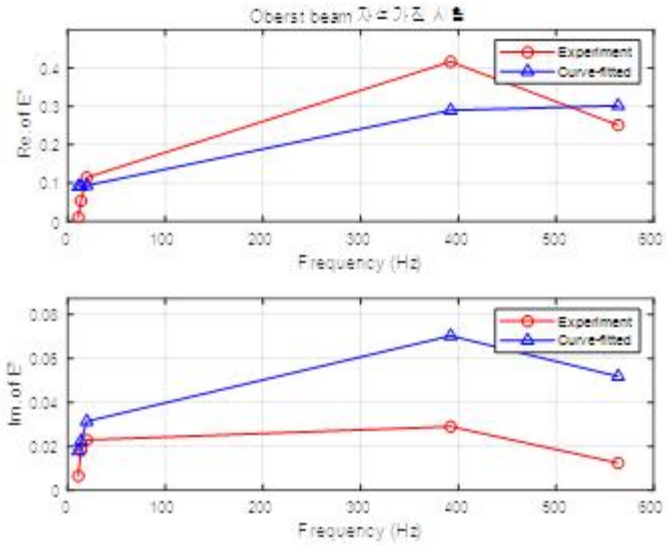

Fig. 4-20 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=3)

위의 그림[Fig. 4-20]은 차수가 '3'일 때 곡선 맞춤한 결과이다. 어느정도 시험결과와 비슷하게 곡선맞춤이 되었다. 그리고 주파수 도메인에서 영 모듈러스와 손실계수를 그려봤을 때, 비교적 양호한 그래프를 그릴 수 있었다.

아래의 그림[Fig. 4-21]은 차수가 '3'일 때, 영 모듈러스의 경향을 예측하는 그래프이며, 아래의 그림[Fig. 4-22]은 손실계수의 경향을 예측하는 그래프이다.

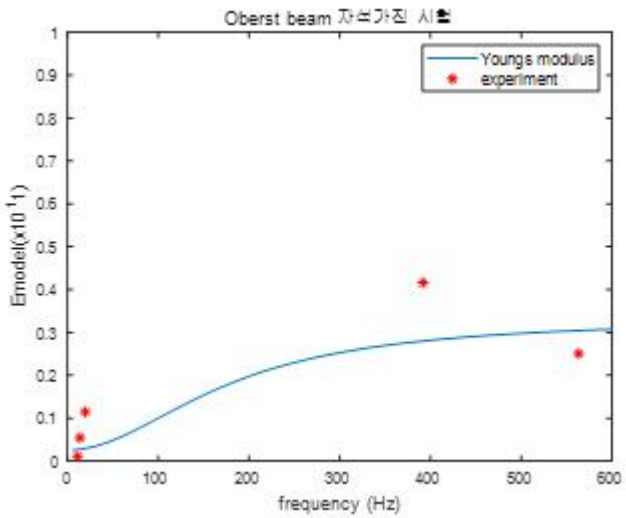

Fig. 4-21 Young's modulus of graphene damping material (k=3)

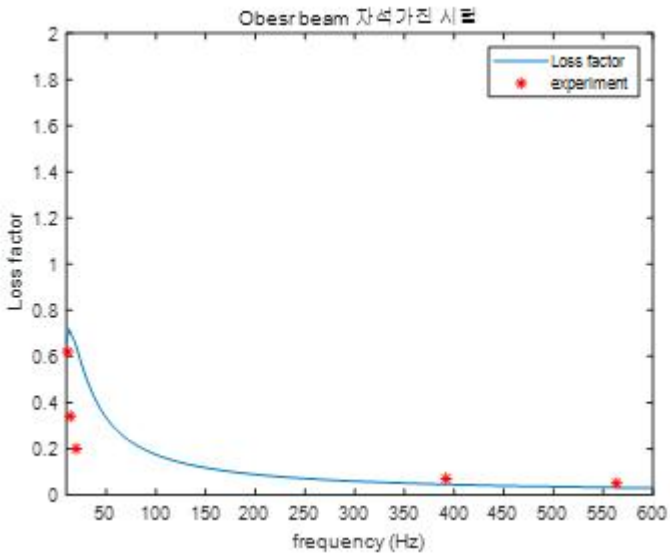

Fig. 4-22 Loss factor of graphene damping material (k=3)

차수가 '3'인 모델의 영 모듈러스는 어느정도 시험결과의 경향에 비슷하게 따라가는 결과를 보여주었고, 손실계수를 그래프로 그렸을 때에도 시험데이터와 편차가 작은 그래프를 그릴 수 있었다. 이번 그래핀 감쇠재의 GMM 요소의 차수는 '3'으로 구해졌고, 현재 사용된 데이터는 5개이다. 따라서 차수가 5 이상인 결과는 오버피팅하는 결과를 가져올 가능성이 높아서 본 연구에서는 차수가 5 이하 일 때까지만 프로그램을 실행하였다.

아래의 그림[Fig. 4-23]과 [Fig.4-24]는 차수가 '4', '5'일 때 곡선맞춤한 결과이다. 차수가 '3'일 때 비하여, 시험데이터와 곡선맞춤의 편차가 커졌고, 영 모듈러스와 손실계수를 주파수 도메인에 그렸을 때 또한 편차가 커졌다.

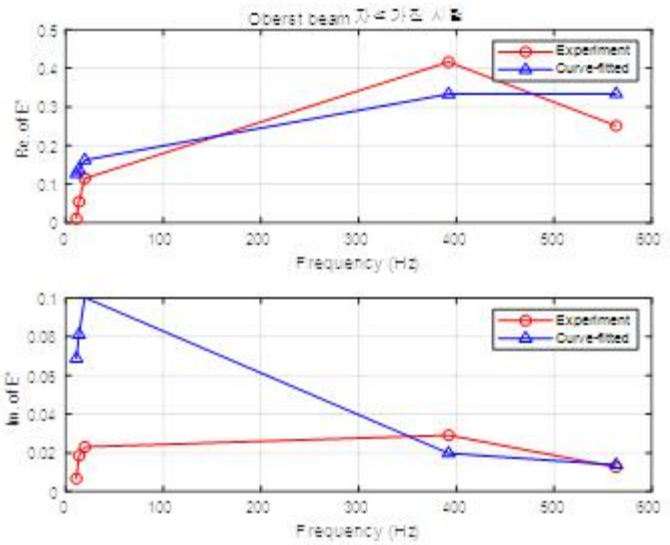

Fig. 4-23 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=4)

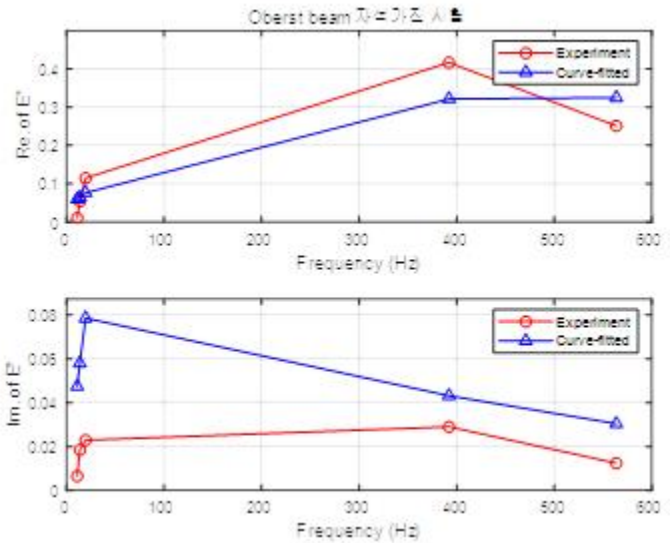

Fig. 4-24 Curve fitting of Oberst beam by magnetic excitation(k=5)

4.3.4.2. Shear modulus & Loss facotr(η_2)

전단계수를 일반화된 맥스웰 모델로 곡선맞춤을 할 때에도 영 모듈러스와 같은 식이 사용된다. 따라서 위와 같은 방법으로 최적화를 진행하며, 가장 나은 결과를 찾은 결과, 영 모듈러스의 경우와 같이 차수가 '3' 일 때 최적의 그래프를 그릴 수 있었다.

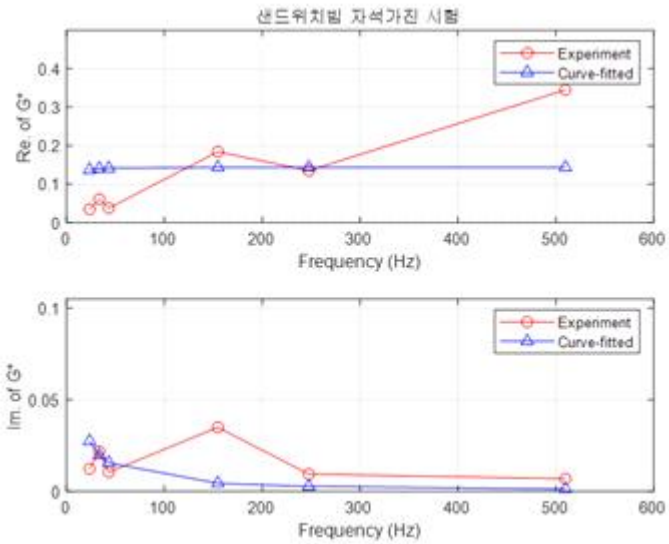

Fig. 4-25 Curve fitting of sandwich beam by magnetic excitation(k=3)

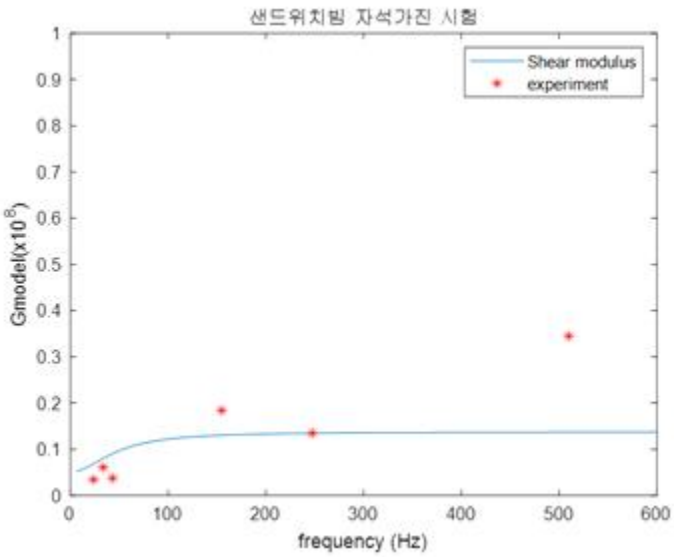

Fig. 4-26 Shear modulus of graphene damping material (k=3)

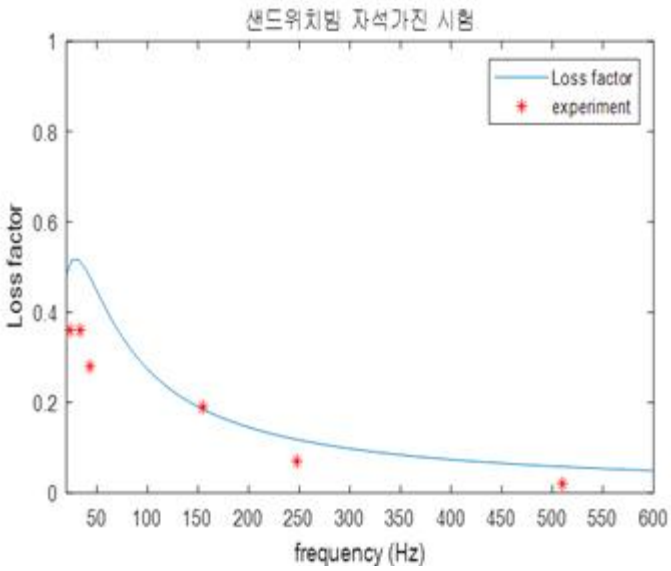

Fig. 4-27 Loss factor of graphene damping material (k=3)

샌드위치 빔의 모델링 최적화 결과 앞의 Oberst 빔에 비하여, 시험 결과가 높은 진동수로 가면서 감소하는 경향이 작아. 곡선맞춤에 어려움이 있었다. 편차가 작은 데이터를 선별하여서 최적화 작업을 하였다.

점탄성 감쇠재는 주파수가 증가함에 따라 성질이 수렴하는 경향이 있으므로, GMM 으로 곡선맞춤 하였을 때, 수렴하는 결과를 보여주었다. 더 좋은 시험 데이터를 얻기 위해서는 길이가 다양한 시편이 필요하다고 판단된다.

4.4. Optimization 결과 비교

맥스웰 모델은 강성과 점성이 직렬로 연결된 모델이며, 켈빈-보이트 모델은 강성과 점성이 병렬로 연결된 모델이다. 일반화된 맥스웰 모델(GMM)은 맥스웰 모델을 병렬로 연결한 모델이다. 맥스웰 모델과 켈빈-보이트 모델은 차수가 1이므로, 최적화를 진행하기 어려웠다. 따라서 이번 논문에서는 일반화된 맥스웰 모델을 사용하여 최적의 차수를 찾기 위해 MATLAB[23]을 이용하여 반복 계산(실행)을 하였다. 즉, 'f(x)=$|x^{test}-x^{model}|^2$'가 최소가 될 때의 차수를 이용하여 모델링한다.

맥스웰 모델과 켈빈-보이트 모델은 차수가 1이므로, 차수를 변경하지 않아도 된다. 일반화된 맥스웰 모델의 경우 시험데이터가 적거나, 편차가 클 경우, 차수를 변경하면서 하여도 양호한 결과를 얻기 어려웠다. 그러나 앞의 맥스웰 모델과 켈빈-보이트 모델과 같은 단순한 모델에 비하여, 곡선 맞춤(Curve-fitting)이 양호한 결과를 보여주었다. 차수는 데이터의 개수를 초과하지 아니하여야 한다. 차수가 데이터의 개수보다 클 경우, 오버 피팅(Over-fitting)이 될 가능성이 높고, 그래프가 수렴하지 않고 발산하는 결과를 보여준다.

그래핀 감쇠재의 맥스웰 모델과 켈빈-보이트 모델의 결과를 검토해보면, 차수가 1이기 때문에 대부분의 자료가 곡선맞춤하기가 어려웠고 특히, 켈빈-보이트 모델은 손실계수가 1차 함수의 형태로 수렴하지 않고 계속 증가하는 그래프를 보여주었다. 결과적으로 단순한 모델을 사용한 점탄성재의 특성 분석은 양호하지 않은 것을 알 수 있었다.

따라서 단순한 모델을 직렬이나 병렬로 연결한 모델을 사용하여 점탄성재의 특성을 분석하는 것이 타당하다고 할 수 있다. 이번 시험의 경우 일반화된 맥스웰 모델의 차수가 '3' 에서 영 모듈러스, 전단 모듈러스, 손실계수 모두 양호한 곡선맞춤을 보여주었고, 데이터의 개수에 따라 차수를 증가시키면서 최적의 차수 n(=k) 값을 찾았다. 그래핀 감쇠재의 일반화된 맥스웰 모델의 시험결과를 분석해보면, 그래핀 감쇠재는 낮은 진동수, 즉 낮은 고유진동수에서 최적의 감쇠성능을 나타낼 것으로 판단되며, 주파수가 증가함에 따라 감쇠성능이 감쇠할 것을 시험이나 곡선맞춤의 결과를 통해 예상할 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 선박 및 해양플랜트에서 사용되고 있는 그래핀 감쇠재의 감쇠성능 특성을 계측을 통하여 다양한 환경에서 사용할 수 있는 선형 점탄성 수치해석 모델을 산정하였다. 외팔보의 공진법을 사용하여 주파수 영역에서 감쇠재의 영 모듈러스, 전단 모듈러스, 손실계수를 측정하였으며, 측정 결과에 적합한 선형 점탄성 모델을 결정하기 위하여 최적화를 시도한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

수치해석 모델에 관한 연구를 통하여, 일반적으로 진동소음 저감을 위해 사용되는 점탄성재의 시험방법의 정립과 시험 결과의 모델링을 통한 감쇠재가 사용되는 환경에서의 성능을 예측할 수 있는 방법을 알 수 있었다. 본 연구의 방법을 사용하여, 그래핀 감쇠재 이외에도 새로운 점탄성 감쇠재를 개발할 때 사용한다면, 사용되는 환경에 맞는 적합한 감쇠재를 제작할 수 있을 것으로 생각하며 다양한 산업에 적용될 가능성이 있다고 판단된다.

자석가진 시험의 손실계수는 비교적 일관성이 좋았고, 반복시험의 결과 항상 비슷한 결과들을 얻을 수 있었다. 이는 자석가진 시험의 반복재현성이 임팩트해머 시험에 비해 우수하다고 볼 수 있다. 그래핀 감쇠재의 시험결과를 분석해보면, 그래핀 감쇠재는 낮은 진동수에서 최적의 감쇠성능을 나타내고 있으며 주파수가 증가함에 따라 감쇠성능이 감쇠하는 것을 알 수 있었다.

그래핀 감쇠재는 그래핀을 혼합하지 않은 폴리우레탄과 비교하면 영 모듈러스, 전단 모듈러스, 손실계수, 전단 손실계수의 결과 값이 달라졌고, 그래핀 감쇠재의 종합적인 감쇠성능이 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 사용된 그래핀 감쇠재의 계측결과에 다양한 모델을 적용한 결과 일반화된 맥스웰 모델이 가장 적합한 것으로 판단되었다. 일반화된 맥스웰 모델로 곡선 맞춤한 결과는 3차가 실험 결과와의 오차가 가장 적은 것을 알 수 있었다.

향후에 그래핀 감쇠재의 진동저감 성능을 위한 더 정밀한 시험을 하기 위하여, 음향가진 방법과 같은 비접촉 가진 방법과 비접촉 센서를 사용한다면, 시험의 편차를 줄여서 시험의 결과의 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다. 또한 온도를 조절할 수 있는 챔버(Chamber)를 제작하여 시편의 온도를 변화, 유지시키는 장치가 있다면, 온도에 따른 그래핀 감쇠재의 성능 측정을 할 수 있을 것이다.

그리고 산화 그래핀 이외에 다른 조각(Flake)를 혼합하여 제작하거나, 폴리우레탄 외 다른 베이스를 사용하거나, 다양한 조합으로 새로운 점탄성 감쇠물질을 제작하고 시험하여, 사용되는 환경에서 최적의 감쇠를 가질 수 있는 점탄성물질을 예측하여 제작할 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

[1] G. Mattei, 2014, Dynamic Mechanical Analysis (DMA), Universita Di Pisa.
[2] 손재근, 2007, 복합재의 탄성 및 감쇠 계수 측정에 관한 실험 연구, 한국해양대학교.
[3] ASTM E756-98, Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials, American Society for Testing and Materials
[4] Ahid D. Nashif, 1985, Vibration damping, John Wiley & Sons, Inc.
[5] David I. G. Jones, 2001, Handbook of Vibration Damping, John Wiley & Sons, LTD.
[6] G. E. Warnaka , H. T. Miller ,1966, Strain-Dependent Properties of Polymers I. Rubber Chemistry and Technology.
[7] ISO 6721-3, 1994, Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 3: Flexural vibration - Resonance-curve method, International Organization for Standardization.
[8] JIS G 0602, 1993, Test Methods For Vibration-Damping Property In Laminated Damping Steel Sheets Of Constrained Type, Japanese Industrial Standards.
[9] T.Pritz , 1982, Transfer function method for investigating the complex modulus of acoustic materials: Rod-like specimen, Journal of Sound and Vibration.
[10] 오일권, 오정환, 정정환, 2014, 진동 감쇠용 조성물 및 이를 이용한 진동 감쇠재, 대한민국 특허청.
[11] Christensen, R. M ,1971, Theory of Viscoelasticity. London Academic Press.
[12] Meyers, Chawla, 1999, Mechanical Behaviors of Materials, Mechanical behavior of Materials, Prentice Hall, Inc.
[13] David Roylance, 2001, Engineering Viscoelasticity , MIT.
[14] Wiechert, E ,1889, Ueber elastische Nachwirkung, Dissertation, Königsberg University, Germany.
[15] Wiechert, E, 1893, Gesetze der elastischen Nachwirkung für constante Temperatur, Annalen der Physik.
[16] Granta CES EDUPACK, 2010, Material and Process Selection Charts, Cambridge University.
[17] Getting Started with SignalExpress, 2015, National Instruments Corporation.
[18] Van loon, 1974, Modal Parameters of Mechanical Structures, Ph. Doctor dissertation, Katholieke University., Leuven.
[19] Mergeay, M., 1982, Multi Degree of Freedom Parameter Estimation Methods

for Modal Analysis, Annals of the CIRP.
[20] Ibrahim, S.r. , Mikulcik, E.C., 1977, A method for the Direct Identification of Vibration Parameters from the free Response, The Shock and Vibration Bulletin.
[21] 문병로, 2008, 쉽게 배우는 유전 알고리즘: 진화적 접근법. 한빛미디어.
[22] Mitchell, Melanie, 1996, An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, MIT Press.
[23] MATLAB, 1994-2018 The MathWorks, Inc.

ABSTRACT

Study on Numerical Analysis Model of Graphene Damping Material

Lee, Hyeon-Kyu

Dept. of Convergence Technology for Heavy Industries
The Graduate school
University of Ulsan
Ulsan, Korea

It is important to reduce vibration and sound in industrial fields. Vibration and noise cause mechanical and structural problems, which can result in damage and deterioration of machine's life. In particular, machines and structures made of metals tend to have less damping capability and become more likely to make problems. Viscoelastic damping materials are commonly used to compensate for the lack of internal damping performance. The viscoelastic material has both a vibration damping function and a noise reduction function, which is attributed to its ability to dissipate the vibration energy of the viscoelastic material.

Since the viscoelastic material has a property of varying the damping performance depending on the frequency and the temperature, it is necessary to predict the damping performance depending on the used environment. The viscoelastic damping material used in this study is a new material made by mixing graphene oxide in a polyurethane based material to improve the damping performance of conventional polyurethane.

The viscoelasticity measurement method can be roughly divided into linear viscoelasticity and nonlinear viscoelasticity, and this study was conducted in the range of linear viscoelasticity. The ASTM-E756 using a cantilever beam resonance method was used as a test method. A beam specimen with a root was fabricated to reduce the test error. As a result, the Young's modulus, shear modulus and loss factor of the damping material were measured in the frequency domain. In order to increase the reliability of the test, both the impact hammer test and the magnetic excitation method had been carried out and compared.

The viscoelastic materials are modeled to predict the performance tendency of the damping material with respect to the used frequency domain from the results obtained through measurements. The generalized Maxwell model which is optimal model was selected through optimization using genetic algorithm to predict the performance of viscoelastic material.

In this study, the procedure for predicting the damping performance of viscoelastic material has been developed by the measurements and model optimization. This work may be utilized to select a suitable damping material for each environment and to develop new damping material and it may be applied to various industries.