

# 실리콘 오일을 이용한 동흡진기 감쇠 성능 향상에 대한 연구 The Study on the Improvement on Damping Ratio of Dynamic Absorber using Silicon Oil

곽용석† · 김원현\* · 주원호\*

Y.S. Kwak, W.H. Kim and W.H. Joo

**Key Words :** Dynamic Absorber(동흡진기), Damping ratio(감쇠비), Medium Speed Diesel Engine(중속디젤엔진)

## ABSTRACT

Many kinds of dynamic absorbers have been used to reduce the vibration of machineries and structures. In the typical ones, however low damping capacity, durability and limited install condition restrict their application. In this study, high damped dynamic absorber was proposed for diesel generator set. Developed absorber is composed with mass and coil springs. Silicone oil was filled inside the narrow gap between mass and casing. Viscous damping of silicon oil act as additional damping so that proposed dynamic absorber is suitable for D/G set which have adjacent resonance frequency to operation speed. The performance of the dynamic absorber was confirmed through the actual test on diesel engine generator set.

## 기 호 설 명

- $m_1$ : 발전기세트의 등가 질량
- $m_d$ : 동흡진기 질량
- $k_1$ : 발전기세트의 등가 강성
- $k_d$ : 동흡진기 강성
- $c_d$ : 동흡진기 감쇠 계수
- $F_0$ : 등가 가진 힘
- $\omega$ : 기진 주파수

으로 쉽게 적용 가능하고 선택 모드의 고유진동수 만 조절이 가능한 동흡진기(dynamic absorber)를 사용하면 공진에서의 진동을 효과적으로 제어할 수 있다.[1~5]

운전영역 근처에서 발생한 공진의 경우 동흡진기의 감쇠력이 충분하지 않을 때 갈라진 피크의 응답으로 인해 오히려 운전영역 응답이 더 증가할 위험이 있다. 따라서 내구성이 확보되면서 충분한 감쇠력을 갖는 동흡진기의 개발이 필요하다.

## 1. 서 론

중속디젤엔진 발전기세트에서의 공진 문제를 예방하기 위해 공진 회피 설계를 적용하고 있으나, 출력 및 운전속도 등에 대한 고객의 다양한 요구로 인해 방진 설계에 어려움이 있다. 특히, 발전기세트의 경우 기진력 성분이 다양하고 설계 보강을 할 경우에 해당 고유진동수 외에 다른 모드의 고유진동수 또한 영향을 받기 때문에 공진 발생시 효과적인 보강 방안을 내기가 쉽지 않다. 이러한 경우에 적은 비용

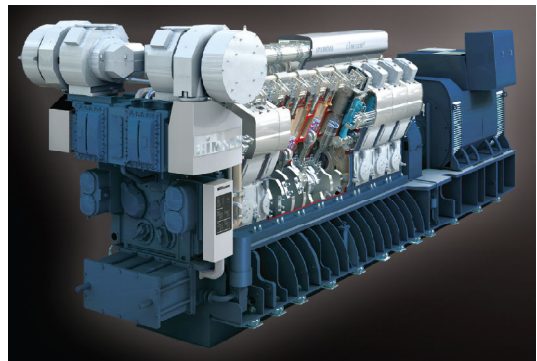


Figure 1 Medium speed marine diesel generator set

† 교신저자; 정희원, 현대중공업 선박해양연구소

E-mail : yskwak@hhi.co.kr

Tel : (052) 202-7404, Fax : (052) 202-5495

\* 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실

본 논문에서는 중속디젤엔진 발전기세트의 공진에 의한 진동 제어를 위해 실리콘 오일을 이용하여 감쇠 성능을 향상시킨 동흡진기에 대한 성능평가를 수행하였다. 실리콘 오일로 인한 감쇠력을 확인하기 위해 test rig 조건에서 실리콘 오일 충전 전/후의 응답을 비교하였으며, 최종적으로 실증 시험을 통해 발전기세트에서 진동 저감 효과를 확인하였다.

## 2. 고감쇠 동흡진기 설계

### 2.1 동흡진기 이론 모델 구축

발전기세트와 동흡진기에 대한 등가 2자유도 모델을 구축하여 동흡진기에 의한 주 시스템의 동적 특성을 이론적으로 파악하였다. 각 절점에서의 정상상태 응답을 조화가진에 의한 조화응답으로 가정하여 동적 응답과 정적 응답의 비인 동적 배율(dynamic magnifier)로 나타내었다.

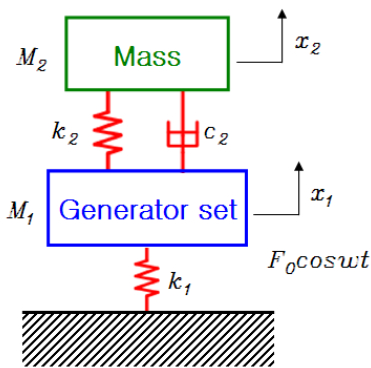


Figure 2 Schematic diagram of a dynamic absorber

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \sqrt{\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2) + [\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)]^2}} \quad (1)$$

여기서,

$$\mu = m_d / m_1, \quad \delta_{st} = F_0 / k_1,$$

$$\omega_1 = k_1 / M_1, \quad \omega_d = k_d / M_d,$$

$$f = \omega_d / \omega_1, \quad \zeta = c_d / 2M_d \omega_1,$$

$$g = \omega / \omega_1.$$

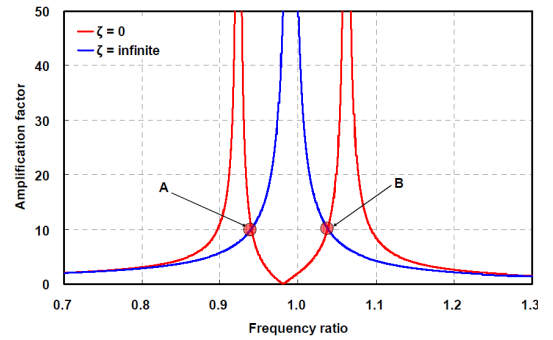


Figure 3 Dynamic magnifier

Figure 3은 동흡진기가 고착된 상태와 감쇠가 없는 강성만으로 작동하는 동흡진기의 동적배율을 보여준다. 두 응답은 항상 두 점(A,B)에서 교차하게 되는데, 동흡진기 최적 강성의 조건은 두 교점이 한 쪽으로 치우치지 않고 같은 높이로 있을 때이다. 최적 감쇠계수는 두 교점에서 동적 배율 기울기가 0이 되는 조건으로 정의된다.

최적 설계 이론에 따른 동흡진기 최적 튜닝 주파수  $f_{opt}$  와 최적 감쇠  $\zeta_{opt}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (2)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (3)$$

### 2.2 동흡진기 기본 설계

발전기세트의 대표적 탄성 모드인 비틀림 모드를 대상으로 40Hz ~ 60Hz 범위에서 주파수 제어가 가능한 수평형 동흡진기를 목표로 설계하였다.

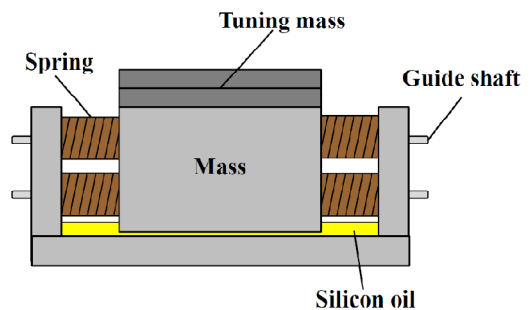


Figure 4 Concept design of a dynamic absorber

비틀림 모드 제어용 동흡진기 설계 개념을 Figure 4에 나타내었다. 충분한 내구성을 확보하기 위해 코일 스프링을 강성체로 사용하였다. 코일 스프링은 강성을 조절하기 어렵기 때문에 질량체의 무게를 조절하는 방식을 사용하여 주파수를 조정하였다.

상세구조를 살펴보면 중심부에 있는 질량체가 수평방향으로 거동할 수 있도록 가이드 축 4개가 질량체를 관통하여 지지하고 있으며, 양쪽으로 총 8개의 스프링이 연결되어 있다. 스프링이 서로 병렬로 연결되어 있기 때문에, 전체 시스템의 강성은 스프링 강성의 8배가 된다. 질량체 위에는 여러 개의 추가 질량을 올려서 주파수 조정을 한다. 질량체는 동흡진기 바닥에서 약간 떠있으며 그 사이 간극을 실리콘 오일로 충전한다. 실리콘 오일은 질량체 바닥 사이 간극에서 점성 댐핑을 가지며 이는 동흡진기 시스템의 감쇠력을 높여준다.

### 2.3 실리콘 오일을 이용한 고감쇠력 구현

동흡진기 질량체 바닥 면적을 A라 하고, 사이간극을 h라 할 때, 점성 댐핑력 C는 식 4와 같이 표현한다. 이때 실리콘 오일은 비압축성이며 Newtonian fluid로 가정하였다.

$$C = \mu \frac{A}{h} = \rho\gamma \frac{A}{h} \quad (4)$$

$$C_c = 2\sqrt{km} \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{C}{C_c} = \frac{\rho\gamma A}{2h\sqrt{km}} \quad (6)$$

감쇠력은 실리콘 오일의 점도와 질량체 바닥 면적과 정비례하며 바닥간극과는 반비례 관계에 있다. 따라서, 동흡진기의 감쇠력은 실리콘 오일의 점도, 바닥 간극, 질량체 바닥 면적의 영향을 받으며 최적 감쇠에 맞도록 세가지 인자를 조절하였다.



Figure 5 Viscous damping model

## 3. 고감쇠력 성능평가

실리콘 오일로 인한 고감쇠 효과를 평가하고자 시험장치(test rig)를 제작하였다. 시험장치는 수평방향의 강체 모드를 갖도록 높이 방향으로 긴 블록을 사용하였고, 해당 모드 방향으로 유압가진기로 가진하여 진동 응답을 구현하였다.

### 3.1 시험장치 단독 조건

시험장치 단독으로 충격시험을 수행하여서 해당 주파수와 모드 형상을 확인한 결과, 수평방향 모드는 50.6Hz에서 존재하였다. 30~70Hz 범위의 가진 응답 시험 결과에서 시험장치 상부 수평방향으로 50Hz에서 높은 수준의 응답이 발생함을 확인하였다. 응답 결과는 Figure 6에 동흡진기 적용 응답 결과와 비교하여 나타내었다.

시험장치 수평방향 모드 50.6Hz를 목표로 하여 동흡진기 주파수를 조정하였다.

### 3.2 동흡진기 적용 조건

동흡진기 적용 시험은 동흡진기 질량체 바닥에 실리콘 오일을 충전 전/후 조건으로 구분하여 수행된다. 동흡진기는 고유진동수 해당 모드와 동일한 50Hz로 조정하여 시험장치 상단에 설치하였다.

#### (1) 실리콘 오일 충전 전

시험장치 단독조건에서 존재하던 50.6Hz의 수평 모드 고유진동수는 동흡진기 설치 후 35.2Hz와 56Hz의 두 피크로 갈라졌다. 유압가진기 가진 응답 계측 결과, 기존 공진 모드였던 50Hz에서의 수평방향 응답은 95%이상 저감하였고 갈라진 양쪽 피크에서의 응답 수준도 단독 조건 피크에서 응답과 비교하면 1/3수준이다.

#### (2) 실리콘 오일 충전 후

동흡진기에 실리콘 오일을 주입한 상태에서의 성능 평가를 수행하였다. 실리콘 오일은 Wacker사의 점도 100,000 cSt 로 사용하였고 이 때의 감쇠력은 계산상으로 5400 Ns/m 이며 감쇠비는 10.7%이다.

실리콘 오일 충전 상태의 계측 결과를 충전 전과 시험 장치 단독일 경우의 응답과 비교하여 Figure 6에 나타내었다.

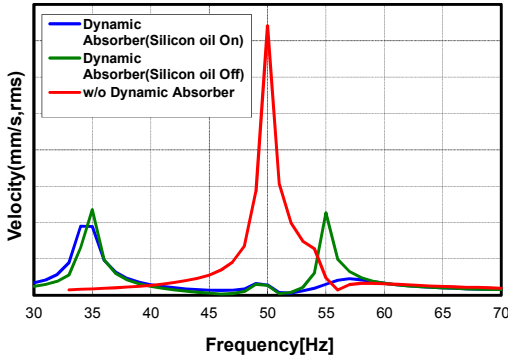


Figure 6 Response comparisons of variable cases

갈라진 두 피크에서의 응답을 살펴보면 55Hz에서는 실리콘 오일 충전 상태에서의 응답수준은 충전 전 상태에서와 비교해 79% 이상 저감된 진동수준을 보인다. 이는 실리콘 오일의 점성 댐핑이 시스템 전체 감쇠력에 추가적인 요소로 작용한 것을 뜻한다. 하지만 35Hz에서의 피크에서 댐핑 상태의 응답은 무댐핑 상태 응답과 비교해 20% 저감된 진동 수준을 보인다.

### 3.3 고찰

결론적으로 시험장치 적용시험에서 예상과 벗어난 결과가 나온 것은 질량비(mass ratio)의 영향을 무시하였기 때문이다.

#### (1) 시험장치 실제 고유진동수

시험장치의 고유진동수는 동흡진기 자중에 영향을 받는다. 하지만 동흡진기의 자중이 설치 대상물 유효질량의 10%를 넘지 않도록 하는 것이 일반적인 설계관점이므로, 동흡진기 자중이 고유진동수에 미치는 영향이 작다고 할 수 있다. 본 시험에서는 동흡진기 설치 지점에서 50.6Hz 수평방향 모드의 유효질량은 485kg이다. 동흡진기의 자중이 200kg이므로 동흡진기 자중으로 인한 시험장치 실제 고유진동수는 다음과 같이 변한다.

$$f_{actual} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{m_1 + M_d}} \quad (7)$$

따라서 동흡진기를 설치하였을 경우 시험장치의 실제 고유진동수는 8Hz 가량 떨어진 42.6Hz가 되

며 이는 동흡진기 최적 튜닝 주파수에도 영향을 준다.

#### (2) 동흡진기 최적 튜닝 주파수

동흡진기의 최적 튜닝 주파수는 동흡진기로 인해 갈라진 두개의 피크의 높이가 같아질 때의 주파수로 식 2와 같이 질량비의 함수로 정의된다. 일반적인 동흡진기에서 질량비가 10%를 넘지 않으므로 최적 튜닝 주파수는 대상체의 고유진동수보다 약간 낮추어 잡는다. 본 시험에서는 질량비가 무려 18.6%로 최적 튜닝 주파수는 대상체 고유진동수와 큰 편차를 갖는다.

동흡진기 자중에 의한 실제 고유진동수가 42.6Hz이므로 최적 튜닝주파수는 36Hz이다. 이는 시험조건에서 사용된 동흡진기의 튜닝 주파수인 50.2Hz와 큰 주파수 차이로 전체 시스템의 오조정(mistuning) 효과를 가져온다.

#### (3) 감쇠력 평가

시험장치의 유효질량과 동흡진기 자중을 고려한 동흡진기 2자유도 이론 모델을 이용하여 동적 배율(dynamic magnifier) 해석을 수행하였다. 동적 배율은 무차원수 이므로 계측값과 직접적인 비교는 불가능하나, 응답 성분의 경향은 예측할 수 있다. 해석 결과를 유압가진기로 가진한 시험장치의 응답 계측결과와 비교하여 Figure 7에 나타내었다. 결과를 살펴보면 해석값과 계측값이 갈라진 고유진동수가 일치할 뿐 아니라 응답의 경향도 일치하는 것을 알 수 있다. 해석 결과에서도 응답 결과와 마찬가지로 35Hz에서의 피크가 55Hz의 피크보다 큰 것을 확인할 수 있는데, 이것은 35Hz 응답 피크에서 감쇠의 영향력이 적게 미치는 것을 설명해준다.

질량비를 고려한 최적 튜닝 주파수를 적용하여 해석한 결과를 살펴보면 Figure 8(a)에서 나타나듯 튜닝 후 주파수가 양쪽으로 고르게 갈라지며 응답 수준 또한 앞의 경우보다 훨씬 낮은 수준이다. 또한 양 쪽 피크에서 모두 감쇠가 고르게 작용하는 것을 알 수 있다.

실제 엔진에 최적 주파수로 적용하였을 경우에 감쇠가 전 주파수 영역에서 고르게 반영될 것인지 해석적으로 확인하여 Figure 8(b)에 나타내었다. 동흡진기 질량비가 작은 만큼 갈라지는 주파수의 폭이 크지 않으나, 양쪽 피크에서 모두 감쇠의 영향이 크게 작용하는 것을 확인하였다.

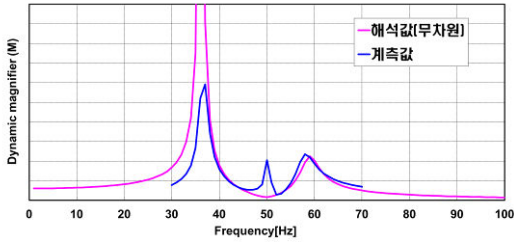
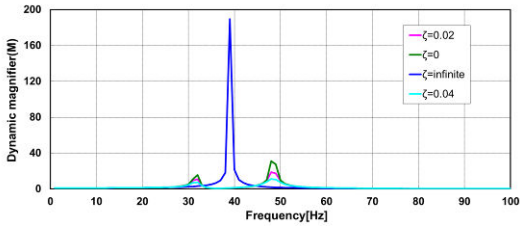
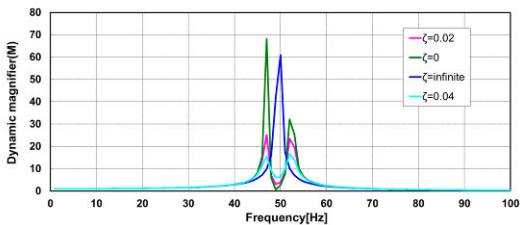


Figure 7 Comparisons between measurement and analysis result considering mass ratio effect



a) Test rig



b) Medium speed diesel engine

Figure 8 Dynamic magnifier with tuned dynamic absorber at optimal frequency

#### 4. 실 엔진 적용 성능평가

실제 엔진에서 동흡진기의 성능을 평가하기 위해 HIMSEN 엔진에 동흡진기를 장착하여 성능시험을 수행하였다. 기존 동흡진기의 체결 방식은 발전기 측 베이스프레임 내부에 볼트로 체결하도록 되어 있으나, 대상 엔진이 양산용 엔진이라는 제약조건으로 동흡진기 하부에 초강력 자석을 연결한 지그(jig)로 발전기 상단에 고정하는 방법을 선택하였다.

동흡진기 설치 전/후 충격시험 FRF를 비교하여 Figure 9에 나타내었다. 결과를 살펴보면 동흡진기 설치 전 50.6Hz에 있던 비틀림 모드가 43.7Hz와 54.4Hz로 갈라진 것을 알 수 있다. 갈라진 두 피크는 동흡진기의 충분한 감쇠력으로 인해 FRF 응답수준이 50% 이상 완만하게 저감되었다.

비틀림 모드는 발전기 프레임 상단에서 응답을 통해 가장 잘 나타난다. 동흡진기 설치 전/후의 발전기 프레임 NDE상단의 응답계측 결과를 Figure 10에 나타내었다. 동흡진기 설치 전 응답을 살펴보면 예상대로 830rpm에서 3.5차 성분과 비틀림 모드(48.4Hz)에 의한 응답피크가 나타난다. 동흡진기 설치 후 진동응답을 살펴보면 설치 전 830rpm에 있던 3.5차 성분과 비틀림 모드의 응답피크가 사라지고, 700rpm과 900rpm에 두 개의 피크로 갈라졌음을 알 수 있다. 충분한 감쇠력으로 인해 두 피크의 응답 수준이 기존 피크의 절반 이하로 줄어들었으며 매우 완만한 곡선을 이루고 있다.

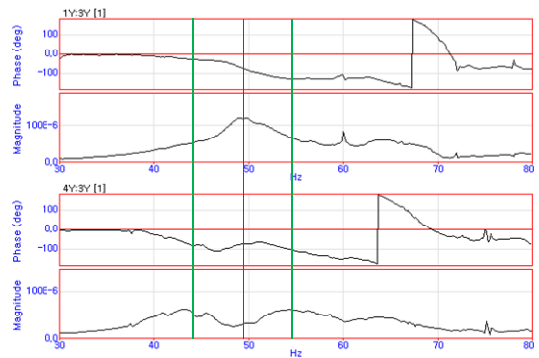


Figure 9 Change of FRF with dynamic absorber

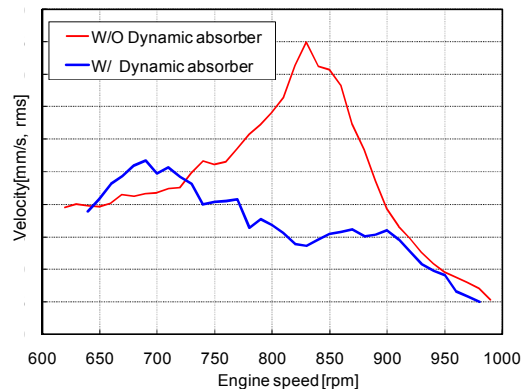


Figure 10 Response reduction effect with dynamic absorber

## 5. 결 론

본 연구에서는 실리콘 오일을 이용한 고감쇠력을 갖는 중속디젤엔진 비틀림 모드 제어용 동흡진기를 제안하였다. 시험장치를 이용한 성능검증을 수행한 결과, 실리콘 오일 충전 시 10% 이상의 높은 감쇠비와 최대 60% 이상 추가적인 진동 저감효과가 있는 것을 확인하였다. 최종적으로 실증 시험을 통해 발전기세트에서 약 50% 이상의 진동 저감 효과가 있고, 고감쇠 성능으로 인해 작동 주파수 좌우에서 추가의 진동 피크도 나타나지 않음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) Harris, C. M., 1961, Shock and Vibration Handbook, 4th Ed, McGraw-Hill., New York
- (2) Ormondroyd, J., Den Hartog J.P., 1928, The theory of the dynamic vibration absorber. Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Applied Mechanics 50, pp. 9~22.
- (3) Brock, J. E., 1946, A note on the damped vibration absorber. Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Applied Mechanics 13, A-284.
- (4) Tienhaara. H., Mikonaho. H., 2007, Engine Dynamics and Vibration. International Council on Combustion Engines 2007, Vienna, Austria, pp. 203
- (5) Jeong, S. H., Kim, W. H., and Lee S. M., 2010, Vibration Control of 4-Stroke Diesel Generator Set Using Fine Frequency Tunable Dynamic Absorber, Internoise 2010, Lisbon, Portugal