

# 선박용 엔진의 탄성지지계에 관한 고찰( I )

한국해양대학교 교수 김 의 간

## 목 차

1. 머리말
2. 단순탄성 지지계의 기초이론 및 설계방법
3. 엔진탄성 지지계의 모델링 및 설치방법
4. 탄성지지 재료
5. 디젤엔진 탄성지지계의 동적해석 예

### 1. 머리말

선박에서 엔진을 설치하는 방법으로는 엔진을 직접 선체의 이중저에 고정하는 방법과 엔진에서 발생하는 진동이 그대로 선체에 전달되는 것을 저감 또는 외부로부터 전달되는 충격력을 절연, 흡수하도록 탄성지지를 이용하여 선체에 고정하는 방법으로 대별할 수 있다.

대형저속 디젤엔진은 탄성지지의 내구성 및 신뢰성 보장이 곤란하기 때문에 엔진을 선체의 이중저에 직접 고정하는 방법을 채택하고 있다. 그러나 엔진의 무게가 작고 회전 수가 비교적 높은 중·고속 추진용엔진, 발전기용 엔진 등에는 탄성지지를 채택하는 경향이 점증하고 있으며 최근에는 엔진의 회전수(300~400rpm)가 비교적 낮은 어선 추진용 엔진에도 어군 탐지기의 신뢰성을 높이기 위하여 탄성지지를 채택하는 경우가 증가하고

있다.

국내에서 탄성지지계에 관한 연구는 대부분 자동차용 엔진의 탄성지지계에 대한 것으로 1980년대 중반부터 대학과 연구소 등에서 자동차업체와 공동으로 이루어지고 있다. 그러나 자동차용 엔진의 경우에는 엔진의 자중에 비해 회전수가 높고, 기진력이 작을 뿐만 아니라 사용조건 및 운전조건에 있어서도 선박용 엔진과 차이가 크다.

또한 자동차용 엔진에 탄성지지계를 설계할 때에는 일반적으로 착화실패를 고려하지 않으나, 선박용 엔진에 탄성지지계를 설계할 때에는 착화실패 및 감통운전을 고려하여 탄성지지계의 여러가지 설계변수, 즉 탄성지지의 위치, 각도, 동특성 등을 바꾸어 가며 적절한 조건을 찾아내야 한다. 따라서 자동차용 엔진의 탄성지지계를 선박에 적용하기에는 문제가 있다.

선박용 디젤엔진의 탄성지지계에 대한 연구로는 일본의 미쓰비시 중공업에서 제작한 신가이 6500(심해 탐사선)모선의 메인엔진에 이중 탄성지지계를 연구하여 적용하였으며, 어선용 엔진을 주로 생산하고 있는 아까사까 철공(주)에서도 엔진 탄성지지계의 최적설계에 많은 노력을 기울이고 있다. 미쓰이 조선(주)에서는 엔진 탄성지지계에 능동제어를 적용한 결과를 보고하였다.

유럽의 경우에는 MAN-B&W, Sulzer,

SEMT Pielstick, MTU 등과 같은 디젤엔진 제작사들이 엔진 탄성지지계의 최적설계에 많은 연구와 노력을 투자하고 있다. 또한 세계최대 선박용 엔진 기술제휴선인 MAN-B&W, Holeby의 경우에도 네덜란드에 있는 "RUBBER DESIGN b.v."라는 전문용역회사에 탄성지지계에 대한 설계를 의뢰하고 있으며 많은 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

그러나 국내에서 선박용 엔진에 대한 탄성지지계의 연구는 미미한 실정에 있으며, 설계 및 부품 공급은 대부분 외국의 전문업체에 의뢰하고 있다.

여기서는 엔진 탄성지지계의 기본 개념을 이해하기 위하여 단순 탄성지지계의 기초이론, 엔진 탄성지지계의 모델링 및 설치방법, 탄성지지재료(방진 재료)의 특성에 대하여 간략히 기술하고자 한다. 또한 실제 엔진에 탄성지지를 적용한 계산예에 대해서도 검토한다.

## 2. 단순 탄성지지계의 기초이론 및 설계방법

### 2.1 기초이론

왕복기계, 회전기계 등은 여러가지 원인으로 해서 운전 중에 진동이 발생한다. 이 진동에 의하여 생기는 힘  $F$ 는 그림1과 같이 스프링과 대쉬포트를 거쳐서 지지대로 전달된다. 이때 지지대로 전달되는 힘  $F_t$  와  $F$ 의 비를 전달률(Transmissibility, TR)이라 한다. 이는 식(1)과 같이 되며 이 관계를 도시하면 그림 2와 같이 된다.

$$TR = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta \frac{\omega}{p})^2}}{\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{p^2})^2 + (2\zeta \frac{\omega}{p})^2}} \quad (1)$$

$\zeta$ : 감쇠비,  $p$ : 계의 고유각진동수,  
 $\omega$ : 외력의 각진동수

식(1)은 기계로부터 기초로 전달되는 힘의 관계를 표시한 것이나 거꾸로 기초로부터 기계로 전달되는 힘도 같은 관계식으로 된다.

TR은  $\zeta$ 의 값, 즉 감쇠의 값에 관계없이  $\omega/p = \sqrt{2}$ 에서는 1,  $\omega/p > \sqrt{2}$ 에서는 1보다 작고,  $\omega/p < \sqrt{2}$ 에서는 1보다 크게 된다. 따라서 지지대로 전달되는 진동을 방지하기 위해서는  $\omega$ 에 비하여  $p$ , 즉 계에 대한 고유각진동수를 가능하면 작게 하는 것이 좋다. 바꾸어 말하면 강성계수  $k$ 가 작은 유연한 스프링을 사용할수록 좋다.

그림 2를 검토하여 보면  $\omega/p > \sqrt{2}$ 의 범위에서는  $\zeta$ 가 클수록 전달률이 크므로 불리한 것 같으나 그 차는 별로 크지 않으며, 또한  $\omega/p > \sqrt{2}$ 의 범위에 도달하는대는 필연적으로 공진점을 통과하여 진폭이 커지기 때문에 이것을 피하기 위해서도 감쇠를 주는 대쉬포트를 필요하다.

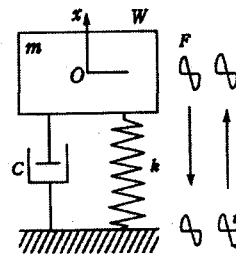


그림 1 진동의 전달

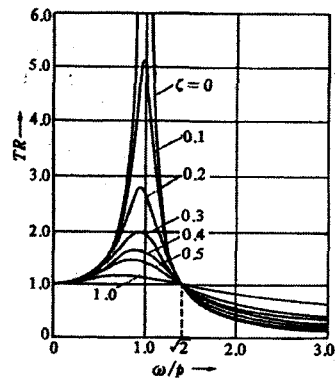


그림 2 진동 전달률

한편 전달률은 변위에 대해서도 식(1)이 그대로 적용된다. 그림 1의 진동계에 있어서 지지대가 변위  $u = a \sin \omega t$  로 진동하고 있는 경우 물체  $\omega$  에 전달되는 전달률과  $\omega/p$  의 관계도 그림 2와 같게 된다. 즉,  $\omega/p > \sqrt{2}$  의 범위에서는 전달률은 언제나 1보다 작게 되고  $p$  가 작을수록  $\omega$  의 진폭은 지지대의 진폭에 비하여 작게 된다. 따라서 지지대의 진동을  $\omega$  에 전달하지 못하도록 할 때에도  $p$  를 작게, 즉 지지대의 강성계수를 작게하면 좋다.

위에서 살펴본 바와 같이 탄성지지의 효과를 크게 하기 위해서는 지지대의 강성계수를 작게 할수록 좋으나, 기계 자체의 변위, 진동 진폭은 거꾸로 크게 되어 기계가 정적으로 불안정하게 되고 흔들리게 된다. 따라서 이를 고려하여 탄성지지계를 설계하여야 한다.

## 2.2 설계방법

1) 기진원이 되는 기기로부터 발생하는 기진력의 방향, 진동수 및 크기를 조사한다.

2) 탄성지지시에 기기의 고유각진동수  $P$  를 기기의 주요 기진력의 최저 상용회전수에 대한 각진동수  $\omega$  의 1/3이하가 되도록 한다. 만약 이러한 조건을 도저히 만족시킬 수 없는 경우라도  $p$  는  $\omega$  의  $1/\sqrt{2}$  이하로는 유지해야 한다.

3) 탄성지지를 끝낸 다음 지지부와 고정부에 배관이나 배선 등이 시공되고, 때로는 동력의 출력축을 고정축과 연결해야 될 경우가 생긴다. 이때에 배관 등의 강성이 탄성지지 강성의 1/10이하일 경우에는 이들이 계획한 진동 절연성능에 미치는 영향은 무시할 수 있으나, 1/10이상일 경우에는 이들의 강성을 낮출 필요가 있다. 이를 위해서는 유연성을 갖는 커플링이나 관을 사용하여야 한다.

4) 스프링 받침대의 강성은 충분히 높게 하여야 받침대상에 설치되는 기기들의 축중심이 어긋나지 않게 되고, 받침대 자신의 탄성진동 영향도 작게 된다.

5) 기진원이 되는 기기를 탄성지지하면 기진력의 전달은 줄어들어 목표를 달성할 수 있으나 기기 본체의 진동은 탄성지지 이전보다 크게 된다. 발생한 진동이 기기 고유의 진동허용값을 초과할 경우에는 기기와 스프링으로 구성되는 진동계에서 스프링으로 받치는 질량을 크게 하면 진폭은 줄어든다. 이때문에 때로는 스프링상에 중량물을 추가하는 경우도 있다. 이와같은 부가질량을 관성블럭(inertia block)이라 한다.

6) 탄성지지계의 수직방향 고유진동수  $f (= p/2\pi)$  가 5Hz 이상이면 방진고무를, 이하이면 코일스프링을, 2Hz 이하이면 공기스프링을 탄성지지로 사용하는 것이 좋다.

7) 스프링은 가능하면 진동계가 비연성이 되도록 배치한다. 탄성지지계의 비연성화는 3.2절에서 설명한다.

8) 이상의 순서로 탄성지지계가 설계되면 스프링 부재의 정적힘을 계산하고 필요한 경우에는 응력을 구하여 이들이 허용범위 내에 있는지를 확인한다.

## 3. 엔진 탄성지지계의 모델링 및 설치방법

### 3.1 엔진 탄성지지계의 모델링

탄성지지를 설치한 디젤엔진의 경우 진동계산을 용이하게 하기 위하여 그림 3과 같이 다섯가지 경우로 분류한 집중 질량계로 모델링할 수 있다.

그림 3에서 (a)는 일반적으로 엔진 탄성지지계에 적용하는 모델로 엔진과 엔진에 부착되는 발전기 및 기타 부착물을 하나의 강체로 가정한 1질점-6자유도계이다. (b)는 해양 탐사선 또는 군함의 엔진을 소음차폐용 상자(enclose box)내에 설치하는 경우에 적용하는 이중 탄성지지계이다. (c)는 엔진과 엔진의 부착물이 각각 독립된 지지를 갖는 경우로 중간축에 탄성커플링이 설치되는 모델이다. (d), (e)는 엔진을 좀더 세분한 모델이다. 이

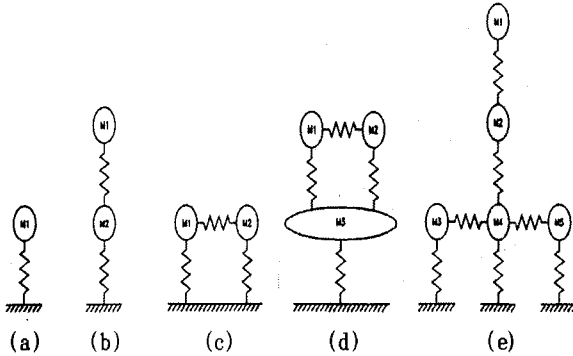


그림 3 엔진 탄성지지계를 집중질량계로 치환한 모델링

중에서 (d)는 엔진과 발전기 그리고 공동지지 베드를 각각 집중 질량화한 예이고, (e)는 엔진을 5질점계로 세분한 것으로 필요시 질점계를 증가시킬 수 있다.

그러나 일반적으로 탄성지지의 강성이 엔진 본체의 강성에 비해 아주 작으므로 엔진을 분할하여 모델링하지 않더라도 특별한 경우를 제외하고는 해석상 오차는 거의 없다. 따라서 대부분의 엔진탄성지지계는 그림 3(a)의 1질점-6자유도계 모델로 단순화하여 진동을 해석한다.

### 3.2. 탄성지지계의 비연성화

기계를 탄성지지할 경우 기계의 형상이 복잡하거나, 탄성체의 설치 위치에 의하여 탄성체 상의 기계는 6자유도, 즉 전후, 좌우, 상하의 3방향 직선운동과 이들 축들레의 회전운동을 하게 된다. 그런데 이러한 운동은 일반적으로 독립하여 존재하는 것이 아니고 서로 연성하여 일어난다. 예를들어 기계가 상하진동을 하면 기계상부는 좌우방향으로 같은 진동수로 진동하는 것과 같다.

6개의 자유도를 갖는 진동계는 6개의 고유진동수와 이에 따른 진동모드를 갖게 되는데

운동방정식만 정확하게 유도하면 고유진동수, 진동모드, 기진력에 대한 응답 등은 계산기를 이용하여 구할 수 있다. 그러나 6자유도 연성계에서 질량이나 스프링을 변경하면 전체의 고유진동수와 응답에 영향을 미치기 때문에 탄성지지를 계획함에 있어 매우 불편하다. 따라서 이와같은 불편을 없애기 위하여 직선운동이나 회전운동이 가능하면 단독으로 존재하도록 진동모드를 분리하는 것이 좋다.

진동모드를 분리하는 것을 비연성화한다고 하는데 이를 위한 조건으로는 강체에 대하여 중심위치와 관성주축, 탄성지지계에 대하여 탄성중심 위치와 탄성주축을 알고 있어야 한다.

관성주축은 어떤 축들레로 강체를 회전시켰을 경우 우력이 발생하지 않는 축을 말하며, 무게중심을 통하는 관성주축은 강체의 형상에 관계없이 무게중심에서 직교하는 3축으로 된다는 것이 이론적으로 알려져 있다.

한편, 탄성지지계의 탄성주축은 어떤 축방향으로 이 탄성지지계에 힘을 가하였을 경우 힘의 방향과 작용점의 변위가 일치하고 또한 탄성지지계 전체에 각변위를 일으키지 않는 축을 말한다. 이 축은 스프링의 강성과 배치에만 관계하고 질량에는 무관하다. 물론 무게중심 위치와도 관계없다. 일반적인 탄성지지계에서는 1점에서 서로 직교하는 3축이 탄성중심으로 된다는 것이 이론적으로 알려져 있으며 이와같은 교점을 탄성중심이라 한다.

강체가 탄성지지된 진동계에서 무게중심이 탄성중심과 일치하고 관성주축이 탄성주축과 일치하는 경우가 완전 비연성이며, 그림 4와 그림 5가 여기에 해당한다. 이 경우에 각각의 운동은 독립적이며 1자유도계의 진동이론을 단독으로 적용할 수 있다.

관성주축과 탄성주축은 일치할수록 비연성의 정도는 크게 된다. 그림 6은 관성주축과

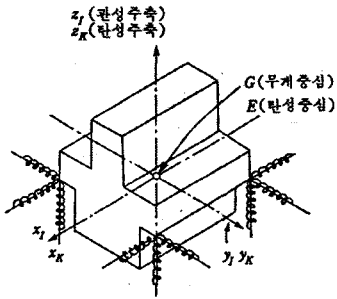


그림 4 완전 비연성계(T형 지지)

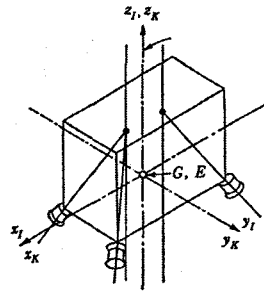


그림 5 완전 비연성계(2중 경사지지)

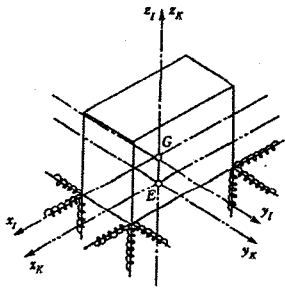


그림 6 부분 비연성계(전차형 지지)

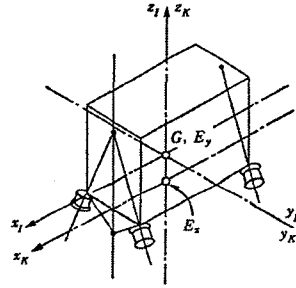


그림 7 부분 비연성계(경사지지)

탄성주축이 서로 평행하며 그중 한개만이 일치하는 경우이고, 그림 7은 2개가 서로 일치하는 경우로서 소위 경사지지계이다. 이 경우에는 2자유도계의 해법으로 탄성지지계의 진동특성을 해석할 수 있다.

그러나, 실제 선박용 엔진의 탄성지지계를 비연성화하기 위해서는 탄성지지의 설치 위치 및 동특성을 변경하여야 하는데 이는 한계가 있으므로 완전 비연성화를 이루는 것은 거의 불가능하다.

또한 완전 비연성화가 총체적인 진동 절연의 면에서 항상 바람직한 것은 아니며 경우에

따라서는 엔진의 사용조건을 고려하여 적절하게 부분 비연성화 하는 것이 바람직할 때도 많다.

〈다음호에 계속〉