선박용 엔진의 탄성지지계에 관한 고찰(Ⅱ)

한국해양대학교
교수 김 의 간

4. 탄성지지 재료

탄성 지지용 재료로서 일반적으로 이용되는 것은 방진고무, 금속스프링(코일스프링, 겹침판스프링, 접시스프링 등), 공기스프링 등이 있다. 이들 재료의 특성을 표1에 보이며 탄성지지 재료를 선정할 때에 이들 특성을 참고하여 선택하는 것이 바람직하다.

4.1. 방진고무

1) 방진고무의 장점
- 내부 감쇠가 크기 때문에 댐퍼가 필요없다.
- 진동수비가 1이상인 방진영역에서도 진동전달률은 거의 증대하지 않는다.
- 3방향의 강성계수를 광범위하게 갖게할 수 있다.
- 설계와 설치가 비교적 간단하고 금속과도 견고히 접착할 수 있으며 경량, 소형이다.
- 역학적 성질은 천연고무가 가장 우수하나 용도에 따라 합성고무로도 만들 수 있다.
- 서징이 별로 발생하지 않으며 발생하여도 극히 작다.
- 고주파수 영역에서 고체전파음의 절연성능이 있다.
- 탄성계수는 작으며, 종탄성계수 E=20~30kg/㎠, Poisson비 $\nu \fallingdotseq 0.5$, E=3G정도이다. (G는 전단탄성계수)

2) 방진고무의 단점
- 내열성, 내노화성, 내유성, 내열팽창 등에서 금속스프링보다 못하다.
- 저온에서는 고무가 경화하여 방진성능이 떨어진다.
- 크리프현상이 있으며 천연고무에 비하여 합성고무는 크리프현상이 크게 발생한다.

4.2 금속스프링

1) 금속스프링의 장점
- 고유진동수를 2~10Hz의 범위에서 선택할 수 있고, 경우에 따라서는 1Hz도 가능하다.
- 경비가 비교적 적게 든다.
- 설계 계산식이 확립되어 있다.
- 내유성, 내노화성, 내약품성, 내열성, 제품의 균일성, 하중 특성의 직선성 등이 훌륭하다.
- 큰 하중에서나 작은 하중 모두에서 이용할 수 있다.

2) 금속스프링의 단점
- 감쇠가 한방향에 한정된다.
- 코일스프링에는 감쇠가 없기 때문에 댐퍼를 필요로 한다.
- 고주파영역에서는 서징이 발생하고 댐퍼의 감쇠비를 크게하면 진동 전달률이 크게 된다.

표 1 탄성지지 재료의 일반적인 특성

항 목	코 일 스프링	방진고무	공 기 스프링	폼라버	펠 트	콜 크
진동계로서 선택 가능한 고유진동수(Hz)	2~10	5~100	0~5	2~5	25~50	20~30
다축방향 공용성	△	◎	○	○	△	○
간결성	○	◎	△	○	○	○
감쇠성능	×	○	○	×	△	○
고주파진동 절연성, 방음효과	×	○	◎	○	○	○
하중특성의 직선성	◎	○	○	×	×	×
내고온, 내저온성	◎	△	△	△	○	○
내유성	◎	△	△	×	○	○
내노화성	◎	△	△	×	○	○
제품의 균일성	◎	△	○	×	△	△
내크리프성	◎	○	○	△	△	○
내열팽창	◎	○	○	○	○	○
비 용	하	중	상	중	하	중
중 량	상	중	상	하	하	하
특성 계산치와의 일치	◎	○	○	×	×	×
설계의 용이성	◎	○	×	○	○	△
설치의 용이성	△	△	×	◎	◎	◎
수 명	◎	○	○	×	△	○

* 범예 : ◎우수 , ○양호, △보통, ×문제 있음.

4.3. 공기스프링

1) 공기스프링의 장점
- 방진고무, 금속스프링에 보다 고유진동수를 낮출 수 있고, 0~5Hz로도 할 수 있으므로 승용차 등의 방진에 적합하다.
- 고주파 영역에서의 진동절연 특성이 우수하고 방음효과도 크다.
- 설계에 있어 상당히 자유롭게 스프링 높이, 강성계수, 하중 등을 선택할 수 있다.
- 하중이 변화할 경우에도 기계의 높이와 고유진동수를 일정하게 할 수 있다.

2) 공기스프링의 단점
- 구조가 복잡하고 대형으로 된다.
- 압축공기가 필요하다.
- 댐퍼를 병용하는 경우가 많다.
- 내열성, 내노화성, 내유성 등에서 금속스프링보다 성능이 뒤떨어진다.
- 상하방향의 운동만을 허용하는 장치(guide)가 필요한 경우가 많다.

5. 디젤엔진 탄성지지계의 동적해석 예

5.1 엔진 지지대에 전달되는 진동속도를 제어한 예

그림 8은 MAN-B&W사에서 제작한 6L58/64엔진(428rpm, 7290KW)을 선체의 이중저에 직접 고정하였을 때와 탄성지지를 채택하여 고정하였을 때에 엔진에서 발생하는 진동이 지지대로 전달되는 진동레벨을 옥타브 밴드로 각각 측정하여 비교한 것이다.

이 그림으로 부터 엔진을 탄성지지 함으로써 가청 주파수범위에서 진동과 소음이 효과적으로 상당히 감소하였음을 알 수 있다. 본 엔진에 채택한 탄성지지는 그림 9에서와 같은 이중 방진고무(sandwiched rubber)이다.

5.2 엔진 탄성지지계의 동적해석 예

본절에서는 실제 선박의 추진용 디젤엔진 탄성지지계를 1질점 6자유도계로 모델링하고 탄성지지계의 동적거동을 해석한 예를 설명한다. 탄성지지계에서 좌표축은 전체 탄성지지계의 관성주축과 동일하게 취하였다.

여기서 대상으로한 선박 추진용 디젤엔진은 HYUNDAI SEMT-Pielstick 16PA6V-280이며, 엔진의 주요 요목은 표 2와 같다. 이 엔진의 탄성지지계 좌표 및 방진고무의 동특성은 그림 10과 같다. 본 엔진의 탄성지지계에 대한 자유진동 계산결과는 표 2와 같다.

여기서 계산 대상으로 한 엔진은 4행정 16시린더 V형이므로, 가스압력에 의한 기진력은 X축 방향의 토크가 주성분을 이루고 이를 벡터 합성하면 4차 성분이 주기진력으로 된다. 또한 이 경우 1, 2차 불평형 관성력과 우력은 0으로 되고, 왕복관성력은 5차까지 고려하였다. 또한 강제진동은 시린더가 정상적으로 폭발할 때와 착화실패가 발생하는 두가지 경우에 대하여 계산하였다.

그림 11과 그림 12는 탄성지지계의 4차와 0.5차 성분의 전달률을 계산한 결과이다. 그림 13은 정상운전시에 엔진의 무게중심에서 주 진동차수인 4차 성분의 각변위를 계산한 결과이다.

이들 그림을 검토하여 보면 탄성지지계의 4차 성분의 전달률과 그때의 엔진 무게중심에서의 진동진폭은 엔진의 사용회전수 전범위에 걸쳐 상당히 양호하게 감소한 것을 알 수 있다. 탄성지지계의 0.5차 성분의 전달률은 그림 12에서와 같이 엔진의 연속최대회전수 근방에서 각 방향으로 큰 값을 나타내고 있으나, 엔진이 정상적으로 운전될 때에는 0.5차 성분의 기진력이 작으므로 전달률이 크다고 하여도 문제될 것은 없다.

그러나, 선박에서는 운항중 엔진의 일부 시린더에서 착화실패가 발생하거나 또는 감통운전을 해야 하는 경우가 가끔 발생하게 된다. 이때에는 시린더가 정상적으로 폭발할 때에는 문제로 되지 않았던 0.5차, 1차, 1.5차 등 낮

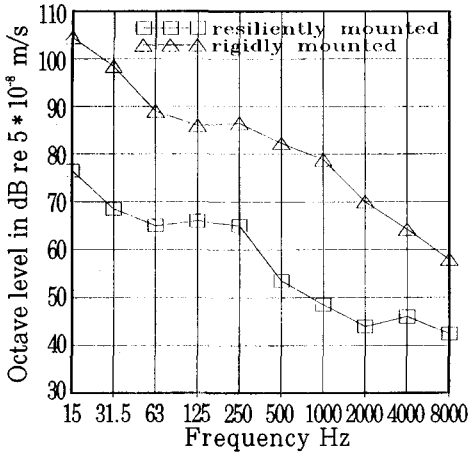


그림 8 직접지지와 탄성지지시의 전달 진동레벨 비교

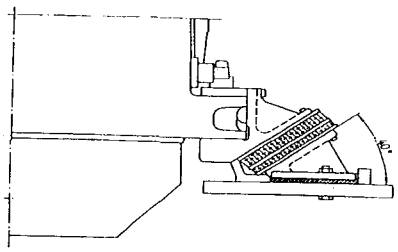


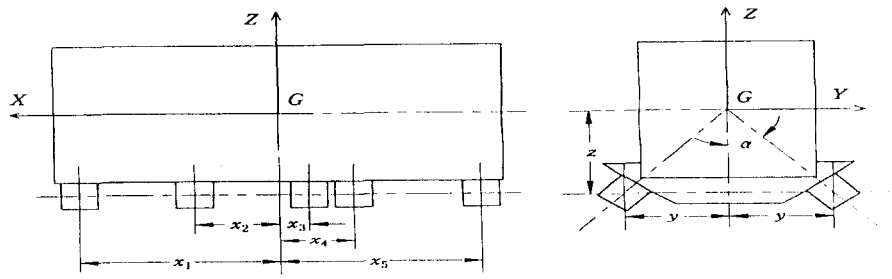
그림 9 탄성지지의 형태

표 2 엔진 요목

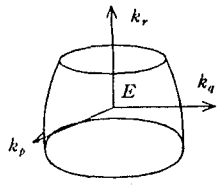
No. of Cylinder	16
BHP×RPM at MCR	6400bhp×1000rpm
PMI at MCR	21.6bar
Bore×Stroke	280㎜×290㎜
Firing order	1-6-2-4-8-3-7-5
Bank angle	60°
Connection ratio(R/L)	0.254
Reciprocating mass	73.1㎏
Total weight	35,000㎏

표 3 탄성지지계의 고유진동수 및 진동모드

No.	Natural Frequency : CPM	Vibration mode					
		X (Longi)	Y (Trans)	Z (Vertical)	θ_x (Rolling)	θ_y (Pitching)	θ_z (Yawing)
1	236.2	0.0000	1.0000	0.0000	-0.5949	0.0000	0.0401
2	280.8	1.0000	0.0000	0.0668	0.0000	0.3730	0.0000
3	423.5	0.0000	0.0284	0.0000	-0.1089	0.0000	1.0000
4	449.6	-0.1137	0.0000	1.0000	0.0000	0.0956	0.0000
5	573.6	-0.4782	0.0000	-0.1801	0.0000	1.0000	0.0000
6	793.8	0.0000	0.1984	0.0000	1.0000	0.0000	0.0245



(a)



(b)

(units: length:mm, angle:°, stiffness: MN·m^{-1}, damping: MN·sec m^{-1}

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y	z	a
1601	681	239	1619	-	-	700	861	0
k_p	k_q	k_r	c_p	c_r				
2.8	2.8	4.9	0.0313	0.0313	0.0414			

(c)

그림 10 엔진 탄성지지계의 좌표 및 방진고무의 동특성

은 차수의 변동 토크가 급격히 증가하게 된다. 따라서 이들이 엔진의 사용회전수 범위내에 존재할 때에는 이들 차수에 의한 전달력이 탄성지지계에 미치는 영향을 주의 깊게 검토하여야 한다.

그림 14와 그림 15는 엔진의 A열 No.1 실린더(선미쪽에서 바라볼 때 왼쪽 Bank중 선미에 가장 가까운 실린더)에서 착화실패가 발생하는 경우, 선수쪽에서 바라볼 때 선수쪽 좌측에 설치된 탄성지지(No.1 방진고무)를 통해 지지대로 전달되는 조화성분 중에서 가장 큰 0.5차와 합성력을 실린더가 정상폭발할 때와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 실선으로 표시한 Xn, yn, Zn는 실린더가 정상적으로 폭발하는 경우의 전달력을, 점선으로 표시한 Xm, ym, Zm는 착화실패가 발생하는 경우의 전달력을 나타낸다.

그림 14의 0.5차 성분을 살펴보면 정상폭발할 경우에는 거의 0에 가까운 값을 가지나 착화실패가 발생하는 경우에는 무부하 회전수(idling speed)인 400rpm과 연속최대회전수인 1,000rpm근처에서 비교적 높은 값을 가져 바람직하지 못한 양상을 보이고 있다.

이는 그림 15의 합성 전달력에도 그대로 영향을 미치고 있다. 그림 15에서 실린더에서 착화실패가 발생하는 경우, 200rpm 근처에서 큰 값이 나타나는 것은 4차 성분 뿐만 아니라 1차, 1.5차 성분의 영향도 합성된 결과이다.

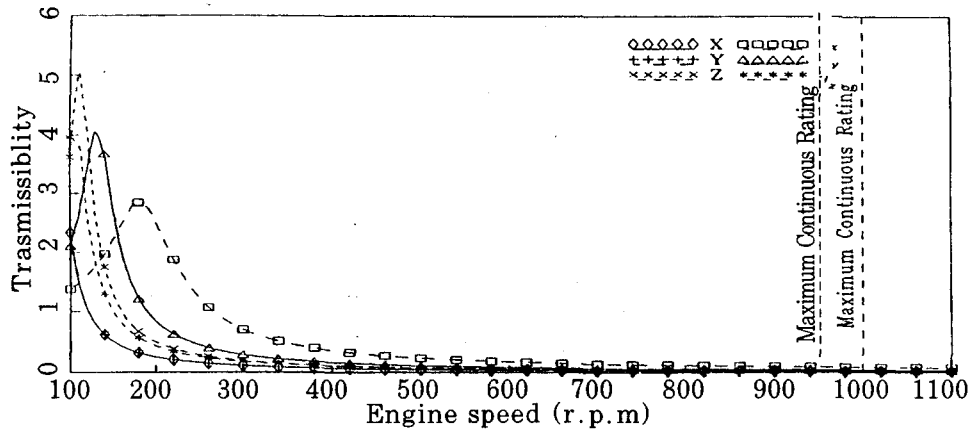


그림 11 4차 성분의 전달률

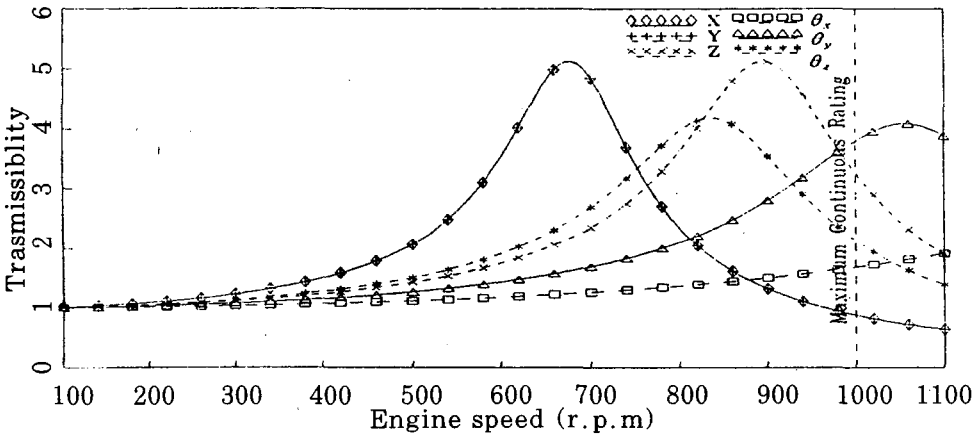


그림 12 0.5차 성분의 전달률

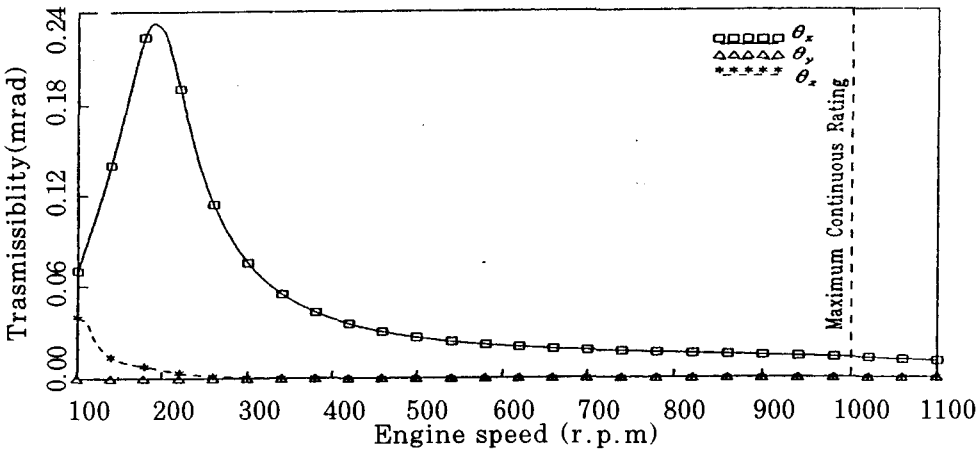


그림 13 정상운전시 엔진의 무게중심에서 4차 성분에 의한 각변위

여기서 탄성지지의 설치각도, 동특성을 적절히 변경하면 전달력을 어느 정도 줄일 수 있다. 그러나 군함, 특수목적선과 같이 엔진으로부터 발생하는 진동과 소음이 문제로 되고, 더욱 정숙을 요하는 경우에는 이중 탄성지지계를 적용하는 것이 바람직하다. 이에 대한 설명은 지면 관계로 생략하나 관심있는 분은 문헌을 참고하길 바란다.

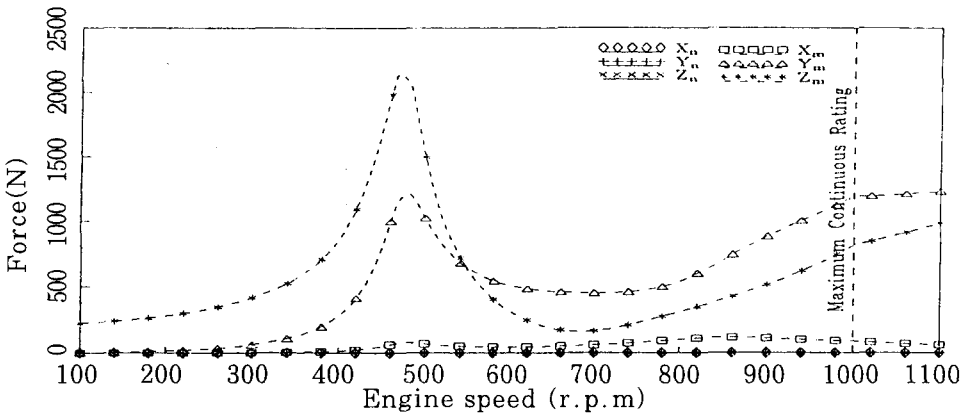


그림 14 No. 1 방진고무를 통하여 지지대로 전달되는 0.5차 성분의 전달력
(실선: 정상운전, 점선: 착화실패)

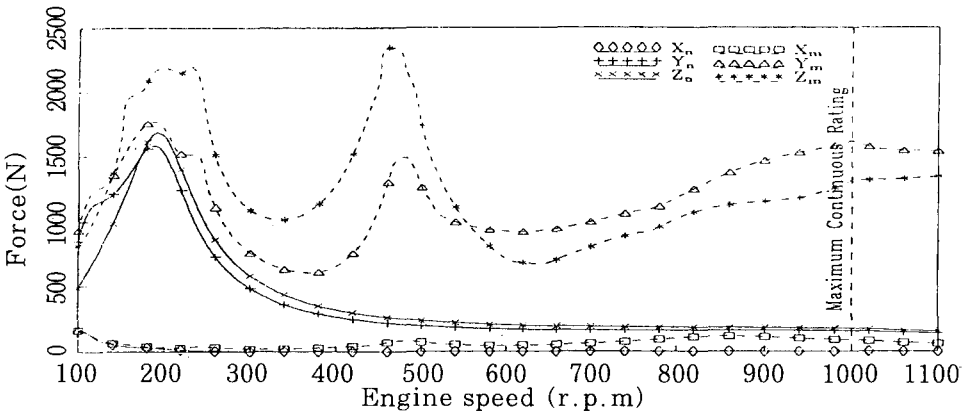


그림 15 No. 1 방진고무를 통하여 지지대로 전달되는 합성전달력
(실선: 정상운전, 점선: 착화실패)

참고문헌

1) 戶原春산○, 防振ゴム, 日本鐵道車輛工業會, 1975
2) 吉井冬樹 外, "主機關の防振對策について", 日本漁船, 第284號, 1989.
3) Donath, "Resilient mounting of diesel engines", MAN-B&W Licensees Meeting Paper, 1987.
4) 김성춘 외, "선박용 디젤엔진의 탄성지지계 설계에 관한 연구", 박용기관학회지, 18권 5호, 1994.
5) 장민오, "엔진의 이중 탄성지지계에 대한 진동특성", 한국해양대학원 석사논문, 1995.