선체 상부구조의 진동제어장치

정 태 영 〈한국기계연구원〉

1. 개 요

선박의 과도한 진동은 피로파괴에 의한 선체구조 자체의 손상이나 탑재장비의 손상 및 기능이상은 물론, 승선한 사람들에게 불쾌감을 조성하며 승무원의 작업능률의 저하등을 유발할 수 있다. 그러므로, 각국의 선급이나 국제표준기구(International Standard Organization)에서도 선박진동의 허용기준을 권유사항으로 제시하고 있스며, 선주들도 이를 근거로 진동수준이 낮은 선박을 건조해 주도록 조선소에 요구하고 있다. 따라서, 조선소에서는 설계초기단계에서부터 선박진동의 극소화를 위한 노력을 하게되는 데, 이의 일환으로 프로펠러와 주기관으로부터 오는 주요기진력의 주파수와 선박구조물의 고유진동수가 일치하지 않도록 설계하는 공진회피설계가 이루어지고 있스며, 또한 주요기진력의 발생 메카니즘을 파악하여 기진력의 크기 자체를 작게하려는 노력도 시도되고 있다. 그러나, 이러한 설계단계에서의 예방적 대처에도 불구하고 적지않은 선박에서 건조후 과도한 선박진동현상이 발견되고 있는 데, 이 경우의 대처방안의 하나로서 진동제어장치를 설치하여 진동을 줄이는 방법을 고려해 볼 수 있다. 최근 일본에서는 이와 관련하여 여러가지의 진동제어장치가 성공적으로 개발되어 실용화되고 있는 데, 본고에서는 이들 중 특히, 거주구역인 상부구조의 진동을 제어하기 위하여 개발된 장치들에 대하여 알아보기로 한다.

진동제어장치는 여러가지 관점에서 분류될 수 있스나 크게 나누어 기진원의 전달경로에 설치되어 전달자체를 막는 장치와 진동하는 구조물에 취부되어 진동에너지를 흡수하는 동흡진기로 나눌 수 있다. 전자에 해당되는 장치로 선체 상부구조를 포함한 선미부의 진동제어를 위하여 실용화 된 것으로는 Kawasaki조선소에서 개발한 "Damp Tank"를 들 수 있스며, 이 장치는 프로펠러 바로 위의 선체에 설치되어 프로펠러표면전달기진력의 전달을 막아준다. 동흡진기는 진동하는 구조물에 질량-감쇠-스프링계로 구성된 별도의 진동계를 취부하여 공진시켜 이 진동의 관성력을 반력으로하여 원래 구조물의 진동을 줄여주는 장치이다. 동흡진기는 제어방법에 따라 수동형, 반능동형, 능동형으로 분류할 수 있는 데, 수동형은 구조계의 진동을 제어하기 위하여 종래부터 사용되어온 것으로서, 기구가 간편한 반면 동흡진기의 고유진동수 및 감쇠특성 조정이 어렵고 동흡진기의 고유진동수가 단일함으로 단일한 진동수의 기진력에만 유효하다. 이에 반하여 능동형은 구조물의 진동을 진동센서로 감지하고 이 신호를 받아 액츄에이터에 연결된 보조질량의 운동을 최적제어하여 능동적으로 진동제어를 수행할 수 있는 기능을 가진 동흡진기를 말한다. 반능동형은 진동하는 구조물의 주파수를 감지하여 동흡진기의 고유진동수가 이를 추종하도록 고안된 것을 말하며, 진동수추종형 또는 동조형이라고 말할 수 있다. 선체 상부구조의 진동은 주기관의 사용회전수 및 선체 적하 조건등이 변하여 제어되어야 할 진동의 주요 주파수가 변할 수 있으며 또한, 프로펠러와 주기관등에서 오는 복수의 진동수 성분을 갖기 때문에 수동형 동흡진기를 이용하여 충분한 진동제어효과를 얻기가 어렵다. 따라서, 개발된 대부분의 동흡진기는 진동수추종형 또는, 능동형 동흡진기이다. 진동수추종형 동흡진기로 실용화 된 것으로는 Mitsubishi중공업에서 개발한 유체식 동흡진기, 일

본강관주식회사(NKK)에서 개발된 진자-스프링식 동흡진기와 IHI에서 개발된 원심진자식 동흡진기를, 능동형 동흡진기로 실용화 된 것으로는 IHI에서 최근 개발된 유압식 "Active Mass Damper"를 들 수 있다. 이하에서는 이들 장치들에 대하여 기본원리 및 특징과 실용사례등을 소개한다.

2. 유체식 동흡진기

유체식 동흡진기로서 선박의 상부구조진동제어를 위해 실용화된 것으로는 Mitsubishi에서 개발한 "방진탱크"를 들 수 있다[1][2]. 방진탱크의 원리는 그림 1에서 보는 바와 같이 U자형의 탱크에 물을 넣어 이 유체량을 동흡진기의 질량으로 이용한다. 물의 거동은 선체 횡동요를 방지하는 감요수조와 유사하나, 물의 운동주기를 짧게하기 위하여 양측 탱크의 수면상에 공기실을 설치하여 높은 공기압을 주어 큰 값의 공기스프링으로 작동하게 한다. 이 때, 방진탱크의 고유진동수는 다음과 같다.

$$\omega = \sqrt{\frac{2g + 2\frac{k}{\rho}\left(\frac{P}{h}\right)}{Le}} \qquad (1)$$

여기서,

$$Le = 2H + \frac{A_1}{A_2}L$$

이며 각 기호는 다음과 같다(Fig. 2참조).

g = 중력가속도
ρ = 유체의 밀도
k = 비열비
P = 공기실의 압력
h = 공기실의 높이
H = 연직부의 길이
L = 수평부의 길이
A_1 = 연직관의 단면적
A_2 = 수평관의 단면적

(1)식에서 알 수 있듯이 방진탱크의 고유진동수는 공기실 압력의 제곱근에 비례하며 따라서, 제원이 결정된 후에도 공기실의 압력을 변화시켜 고유진동수를 쉽게 조정할 수 있다.

상부구조중량이 약 800톤인 26만톤 VLCC의 상부구조 전후진동을 제어하기 위하여 길이 4.1m, 폭

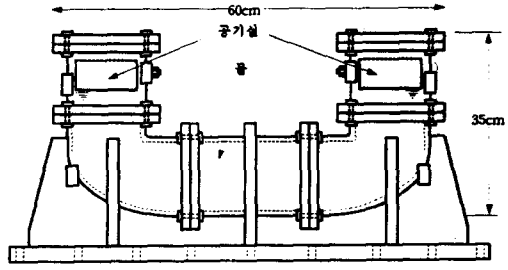


Fig. 1 U자형 유체식 동흡진기 모형의 일례[1]

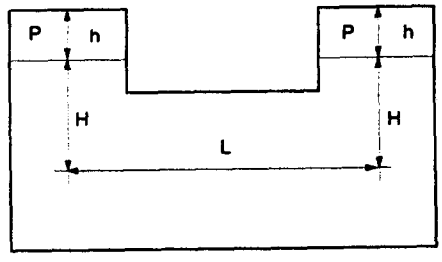


Fig. 2 U자형 유체식 동흡진기 해석모델[2]

2.3m, 수중량 15톤의 유체식 동흡진기를 적용하여 제어효과를 확인하였다.

3. 원심진자식 동흡진기

원심진자식 동흡진기는 Fig. 3과 같이 회전축을 포함하는 평면을 자유롭게 진동할 수 있는 두개 이상의 진자가 회전하는 축에 취부되어 있는 구조를 가지며 , 회전으로 인한 원심력의 합은 0이 되도록 회전하는 축에 취부된다. 이 때, 회전축 방향과 평행으로 움직이게 되는 원심진자의 고유진동수는 다음과 같다[3].

$$\omega = \omega_s \sqrt{\frac{mRr + mr^2 + I_3 - I_2}{mr^2 + I_1}} \qquad (2)$$

여기서

ω = 동흡진기의 고유진동수
ω_s = 회전축의 회전각속도
m = 원심진자의 질량
r = pivot축으로부터 진자의 질량중심까지의 거리
R = 회전축으로부터 pivot축까지의 거리
I_1 = 질량중심을 지나며 pivot축에 평행한 축 1에 관한 진자의 관성모멘트

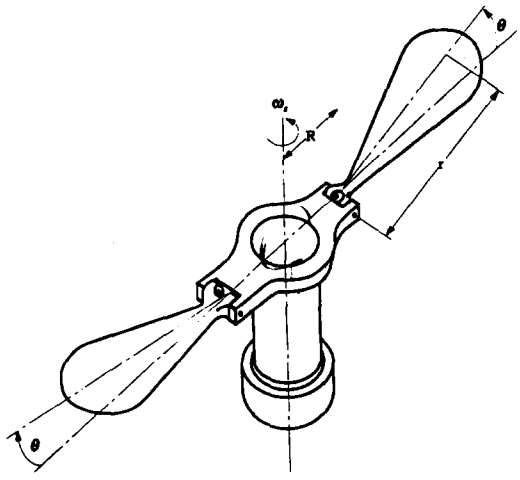


Fig.3 원심 진자식 동흡진기의 요소[3]

I_2 = 질량중심과 pivot점을 지나며 pivot축에 수직인 축 2에 관한 진자의 관성모멘트

I_3 = 질량중심을 지나며 축 1과 축 2에 수직인 축 3에 대한 진자의 관성모멘트

식(2)로 부터 원심진자식 동흡진기의 고유진동수는 회전축의 회전각속도에 비례한다는 것을 알 수 있으며 따라서, 회전축의 회전각속도를 변화시켜 원심진자식 동흡진기의 고유진동수를 선체 상부구조물의 진동수에 추종하도록 한다. 일본 IHI에서는 이러한 원리를 이용하여 Fig. 4와 같이 모터, thrust bearing, 진자들로 구성된 선체 상부구조 진동제어용 원심진자식 동흡진기를 개발하여 3만톤 일반화물선과 10만톤 유조선에 적용하고 유용성을 검증하였다.

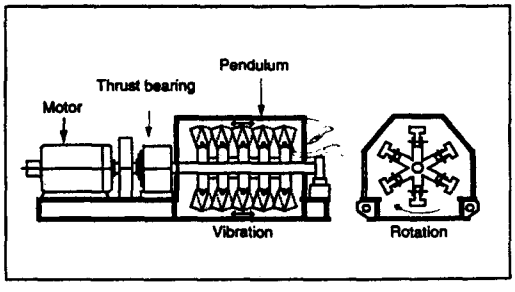
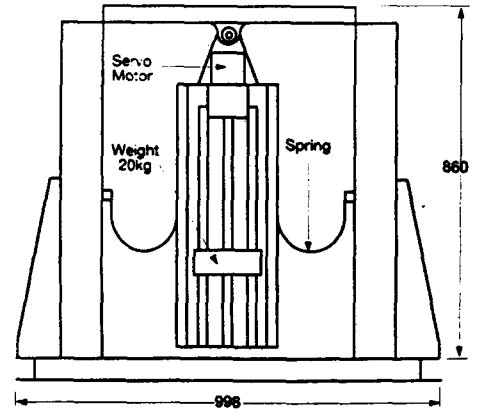


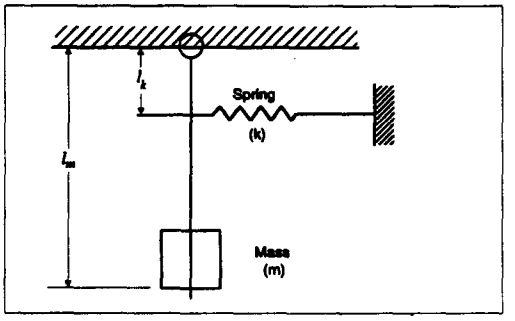
Fig. 4 IHI에서 개발된 원심진자식 동흡진기[4]

4. 스프링-진자식 동흡진기

일본강관주식회사(NKK)에서 개발한 스프링-진자식 동흡진기는 Fig. 5(a)와 같이 stepping motor를 사용하여 진자에 달려있는 무거운 추의 위치제어를 통하여 동흡진기의 고유진동수를 용이하게 조정할 수 있도록 고안되었다[5]. 이 스프링-진자식 동흡진기의 고유진동수는 다음 식으로 주어진다.



(a) 구성 개념도



(b) 수학적 모델링

Fig. 5 스프링 · 진자식 동흡진기의 일례[5]

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}\left(\frac{l_k}{l_m}\right)^2 + \frac{g}{l_m}} \qquad (3)$$

여기서, 각 기호는 Fig. 5(b)에 표시된 바와 같다.

실선적용사례로는 재화중량 4만톤급 화물선에 길이 1.6m, 폭 1.0m, 높이 1.5m, 가동부 중량 800Kg인 스프링-진자식 동흡진기를 설치하여 선체 상부구조 전후진동이 공진점에서 약 1/4정도로 감소됨을 확인하였다.

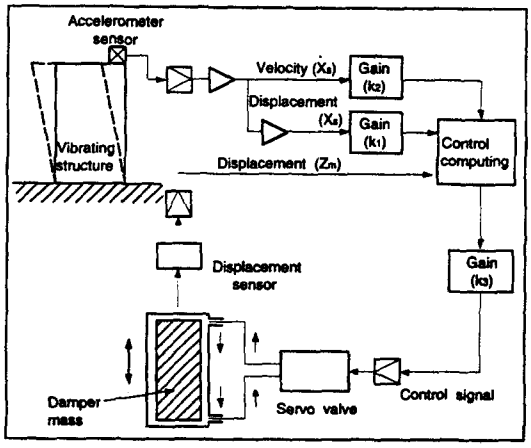


Fig. 6 유압식 능동제어 시스템의 구성도[6][7]

5. 유압식 능동형 동흡진기

앞절에서 소개한 동흡진기들은 동조형 또는 주파수추종형 동흡진기이며 엄밀한 의미에서 능동형 동흡진기라고 말할 수 없다. 이러한 반능동형 및 수동형 동흡진기의 단점은 구조물이 단 하나의 공진주파수로 진동하는 경우에만 효과적이며 또한, 선체 상부구조물과 같은 거대 구조물의 진동제어를 위하여는 그에 상응하는 큰 질량의 동흡진기가 필요하다는 데에 있다. 이에 반하여, 능동형 동흡진기는 상대적으로 가벼운 질량으로 구조물의 진동이 시간에 따라 불규칙적으로 변화하며 여러 주파수 성분을 갖는 경우에도 응용이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 그러나, 능동형 동흡진기를 가동시키기 위해서는 외부에서 동력을 공급해 주어야 한다는 단점이 있다.

일본 IHI에서는 선체 상부구조진동의 제어를 위해 유압식 액츄에이터에 의해 구동되는 능동형 동흡진기를 개발하였는 데, prototype의 모델실험을 통하여 수동형 동흡진기에 비하여 약 두배의 효과가 있슴을 확인하였다[6][7]. 유압식 능동형 동흡진기는 damper mass와 이를 움직이는 유압 액츄에이터 unit, 액츄에이터를 구동시키기 위한 유압생성 unit과, 구조물의 진동을 감지하는 진동센서, damper mass의 변위를 감지하는 변위센서 및 이들 신호를 받아 처리하고 필요한 명령신호를 내 보내는 컴퓨터로 이루어진 제어 unit으로 구성되어 있다. Fig.6은 유압식 능동제어 시스템의 제어시스템에 관한 구성도를 보여주고 있다.

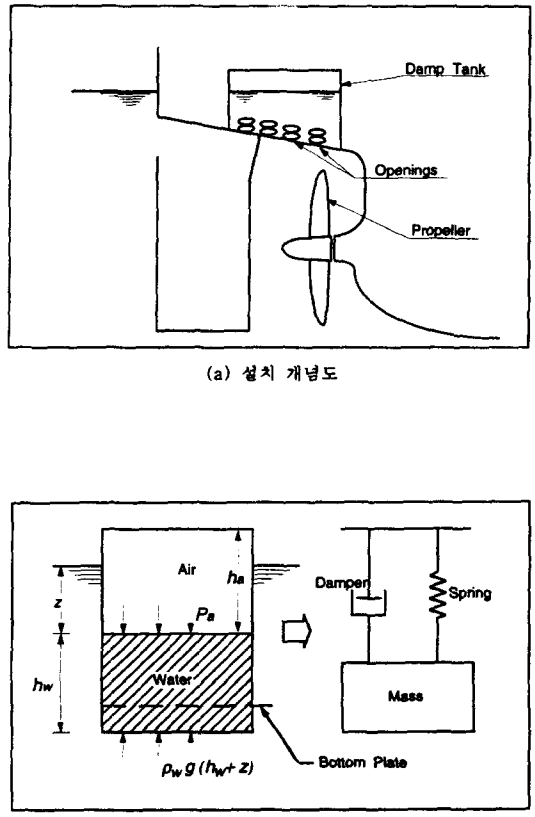


Fig. 7 "Damp Tank"의 시스템 개념도[8]

6. Air Layer를 이용한 "Damp Tank"

일본 Kawasaki조선소에서 개발된 "Damp Tank"는 그 원리가 동흡진기와는 달리 Fig. 7(a)과 같이 프로펠러 상부 선체에 설치되어 프로펠러로 부터 전달되는 프로펠러 표면전달기진력의 전달을 감소시켜 주는 장치이다[8]. 이 장치는 Fig.7(b)에서 보는 바와 같이 수학적으로 1-자유도계로 모델링할 수 있스며, 탱크안의 유체량과 부가수질량이 질량으로, 탱크중의 공기층이 스프링으로 또한, 탱크하부에 뚫어 놓은 구멍들이 감쇠로 작용한다. 이 1-자유도계의 스프링상수는 선형이론으로 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$K = A_0(\rho_\omega g + k\frac{P_a}{h_a}) \tag{4}$$

여기서,

A_0 = "Damp Tank"의 밑면적
ρ_ω = 물의 밀도
g = 중력가속도
k = 공기상수
P_a = 탱크내의 공기압
h_a = 탱크내 공기층의 두께

이로부터 "Damp Tank"의 공기압 및 공기층 두께를 조절하여 계의 강성계수를 변화시킬 수 있고 따라서, 이를 이용하여 "Damp Tank"의 고유진동특성을 프로펠러 표면전달 기진력이 최소로 전달되도록 설계할 수 있다.

1992년 현재까지 6척의 선박에 적용되었스며, 시운전 결과 "Damp Tank"를 설치한 경우에는 설치하지 않은 경우에 비하여 선미진동이 약 40%정도 감소한 것으로 보고되었다.

7. 결 언

지금까지 선체 상부구조 진동제어를 위하여 최근에 개발된 장치들에 대하여 살펴보았다. 앞에서 언급된 바와 같이 이들 대부분은 조선 제 1국인 일본에서 개발된 것이며, 최근들어와 국내에서도 이에 관한 관심이 많아져 늦게나마 연구가 시작되었으나 한두편의 기초연구를 제외하고는 국내에서 아직 구체적 개발사례가 발표되지 않고 있다(예로서, [9], [10]). 개발된 장치들을 잘 살펴 보면 기본원리 측면에서 전혀 새로운 것이 아니며 제작상의 어려움도 그리 크지 않을 것으로 판단되는 데, 국내에서는 이러한 장치들에 관한 실용화연구들이 너무 소홀히 다루어진 감이 없지 않으며 앞으로 활성화되어야 할 연구분야의 하나임이 분명하다.

참 고 문 헌

[1] Kagawa, K., et al., "Development of Tuned Liquid Damper for Ship Vibration (1st Report)", *Trans. of West-Japan Soc. of Naval Arch., Vol. 78*, 1989 (in Japanese)

[2] Kagawa, K., et al., "Development of Tuned Liquid Damper for Ship Vibration (2nd Report)", *Trans. of West-Japan Soc. of Naval Arch., Vol. 81*, 1990 (in Japanese)

[3] Reed, F. E., "The Use of the Centrifugal Pendulum Absorber for the Reduction of Linear Vibration", *Jour. of Applied Mechanics, June* 1949

[4] Yoshida, Y., "Development of a Centrifugal Pendulum Absorber for Reducing Ship Superstructure Vibration", *ASME Jour. of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, 1989

[5] Kondo, K., Ohta, T. and Satoh, H., "Vibration Control of Superstructures of Ships by Means of a Dynamic Vibration Absorber with Adjustable Mass", *Jour. of the Society of Naval Arch. of Japan, Vol. 162, Dec.* 1987 (in Japanese)

[6] Takeda, Y. et al., "Development of Active Mass Damper for Ships by Hydraulic Control", *Jour. of the Society of Naval Arch. of Japan, Vol. 171*, 1992 (in Japanese)

[7] Kakinouch, T. et al., "Active Mass Damper Demonstration for Ship Vibration Reduction", *Naval Engineers Journal, May* 1992

[8] Yamano, T. and Shimizu, H., "Development of a New Reduction System of Vibration Due to Surface Force", *PRADS '92, Vol. 1, England*, 1992

[9] 정태영외, "선체진동 능동제어 시스템개발(I)", 한국기계연구원 보고서 BSI003-041.M, 1993

[10] 김사수외, "선박용 동흡진기 시스템에 관한 연구", 대한조선학회 1994년 춘계 연구발표회, 1994