

## 중공 회전체형 감쇠기의 흡진작용에 관한 실험적 연구

김원철\* · 양보석\*\* · 문덕홍\*\*\*

### Damping Characteristics of a Hollow Rotor Type Absorber

W. C. Kim, B. S. Yang and D. H. Moon

#### Abstract

This paper describes a technique to suppress vibrations of structure under excitation by attaching the hollow rotor partially filled with liquid. The influence of the amount of liquid, number of fins and their widths on absorbing vibration is investigated. The results of experiments are summarized as follows:

1. The effect on suppressing vibration at filling ratio,  $\bar{H}=0.54$  is greatest.
2. The viscosity of liquid hardly influence on suppressing vibration.
3. The rotor fitted with two pins having width of pin  $= (D-D_r)/4$  is effective generally.
4. The vibration damping effect of the axial fins is greater than that of radial fins.

#### 1. 서 론

최근 펌프, 터빈, 압축기 등의 각종 회전기계는 점점 고압, 고속, 경량화되고 사용유체도 다양해짐에 따라 이들 회전기계에서 발생하는 진동문제의 해결이 중요한 연구과제로 되고있다. 따라서 질량, 강성 그리고 감쇠를 적절히 조절함으로써 주진동계의 고유 진동수에서 과도한 진동을 효과적으로 억제할 수 있는 동흡진기에 관한 연구가 많이 보고되고 있다<sup>1)~4)</sup>. 그러나 일반적으로 동흡진장치에 의해 진동을 억제할 수 있는 범위는 비교적 좁고, 비틀림

진동계에 이용되는 전자식 동흡진기<sup>5)</sup>는 일방향의 직선운동에 대해서는 별로 효과가 없으며, 충격식 동흡진기는 소음의 발생등으로 인한 어려움이 있다<sup>6)</sup>.

한편 진동구조물에 부착된 강체 용기내에 액체가 부분적으로 채워진 경우 구조물의 진동에 의하여 액체의 유동, 즉 슬로싱(sloshing)이 발생하고 이 슬로싱은 에너지 소모를 일으켜 진동계의 감쇠기구로도 작용하게 된다<sup>7)</sup>.

그리고 중공회전체내에 액체를 넣어 회전시키면, 액체는 축방향으로 정재파로서 작용하는 것이 알려져 있다<sup>8)</sup>. Sato는 이 정재파의 감쇠

\* 정회원, 통영수산전문대학 기관학과

\*\* 정회원, 부산수산대학교 기계공학과

\*\*\* 정회원, 부산수산대학교 기관공학과

작용을 이용하여 흡진기로서의 이용 가능성을 검토한 바가 있다<sup>9)</sup>. 그러나 충진비에 따른 전체적인 진폭특성이나, 액체의 점성과 핀의 형상효과등에 대해서는 체계적으로 고려하지 않았고, 이론의 경우도 액체의 점성을 무시한 비감쇠계에 대해 고찰하고 있다.

따라서 본 논문에서는 회전체와 함께 회전하는 내부 액체가 회전축 방향으로 공진되는 것을 이용하여, 액체력이 구조물의 진동을 억제시키는 흡진작용에 대한 특성을 구명하기 위해 점성이 서로 다른 액체에 대해 실험적으로 조사하였다. 또한 회전체의 축방향과 원주방향으로 핀을 부착하였을 경우, 핀수와 핀폭의 변화에 따른 회전액체의 정재파가 계의 흡진작용에 미치는 효과에 대해서도 고찰하고, 진동억제특성을 명확히 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내고 있다. 내경 70mm, 높이 80mm의 아크릴제 중공원통은 직경 6mm의 회전축에 부착되고, 상하 두개의 볼 베어링으로 지지되어 원통형 케이싱내에서 회전한다. 이 회전용기의 상하 덮개는 알루미늄 판으로 가공하여 회전축에 고정되고, 회전원통과 이것을 지지하는 케이싱은 폭 25mm, 두께 4mm 인 2개의 판 스프링 위에 고정되어 있다. 회전원통은 가변 직류전동기에 의해 0-3000rpm의 운전범위로 회전한다. 실험은 회전원통에 핀을 부착하지 않은 경우와 핀폭과 핀수를 바꿔가며 핀을 축방향과 원주방향으로 부착한 경우에 대해 수행하였다(Fig. 2). 또한 회전용기내에 액체의 종류와 충진비를 바꾸워 충진하기 위해 상부 알루미늄 덮개에 직경 5mm의 구멍을 축에 가깝게, 대칭으로 2개 만들었다. 회전용기와 케이싱 및 전동기를 합한 총질량은 약 3.56kg이었다.

판스프링의 자유진동파형을 이용하여 구한

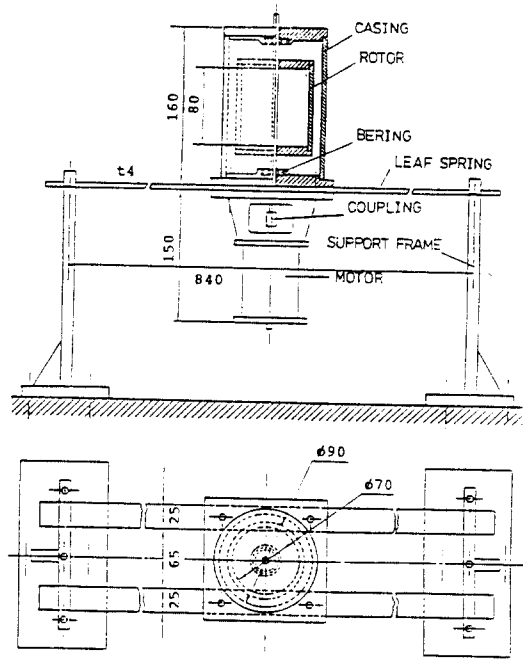


Fig. 1 Experimental apparatus.

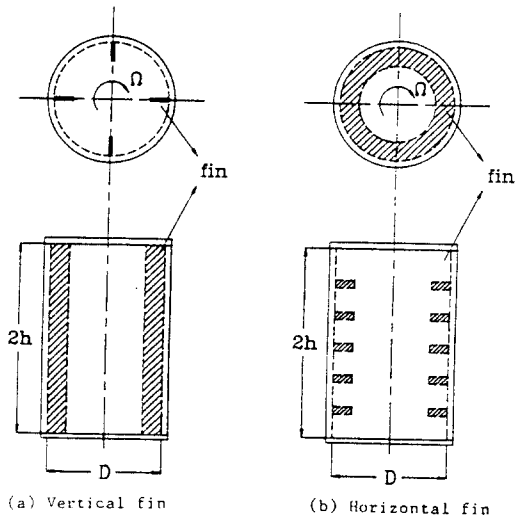


Fig. 2 Geometry of vertical and horizontal fins in hollow rotor.

판스프링의 감쇠비는 0.0078 이고, 대수감쇠율은 0.0498이었다.

케이싱은 2 개의 판 스프링위에 고정되어 있기 때문에, 2 개의 판 스프링이 동위상으로 진동하는 모드 (parallel mode)와 역위상으로 진

Table 1. Properties of liquids

Kinds of liquids	Specific gravity(20°C)	Viscosity (20°C) N·s/m <sup>2</sup>
Water	0.999	1.06×10 <sup>-3</sup>
Spindle oil	0.865	8.36×10 <sup>-2</sup>
Diesel oil	0.875	1.09×10 <sup>-1</sup>

동하는 모드 (cornical mode)에 대응하는 두 개의 고유진동수가 있고, 본 실험의 경우에 있어서 액체를 용기내에 담지 않았을 때 각각 13,625와 25,875 Hz이었다.

2.2 측정장치 및 실험방법

판 스프링의 중앙 부분에 와전류형 비접촉식 변위계를 설치하고, 변위계의 출력신호를 2 채널 주파수 분석기를 이용하여 진동진폭특성을 분석, 검토하고 기록하였다. 회전속도를 공진 영역부근인 12 Hz로 부터 14,875 Hz까지 0.125 Hz 간격으로 증가시키며 가진진동수에 따른 최대진폭을 측정하였다.

회전용기내에 부분적으로 액체를 넣어 회전시키면, 원심력에 의해 액체는 일정한 회전수에 이르렀을 때 용기의 외측 벽면에 붙게되어 원통링형상의 액체층을 형성하게되고, 이 층의 내측이 자유표면(free surface)이 된다. 이때 회전용기의 내경(D)과 평형상태에서 액체의 자유표면의 내경(D<sub>r</sub>)의 비를 충전비(filling ratio)  $\bar{H}$ 로 정의한다. 액체의 충전비를 0에서 1.0 까지 변화시키며 실험을 하였고, 충전비  $\bar{H}$ 가 0.5부근에서는 충전비를 더욱 세밀하게 변화시켰다. 그리고 점성에 의한 영향을 조사하기 위해 물, 디젤엔진유 및 유압작동유를 사용하여 앞의 조건에 의해 실험을 수행하였다. Table 1은 사용액체의 성질을 나타낸 것이다.

액체가 회전시, 정재파의 감쇠작용에 대한 핀(fin)의 영향을 관찰하기 위해 핀의 폭을 4, 5, 8.3 및 12.5mm의 3종류로 하고, 핀수를 2개 및 4개로 하여 회전체에 축방향으로 부착한 경우의 핀폭과 핀수에 따른 영향을 조사하였고, 원주방향으로도 같은 3종류의 핀폭을 회전용기내에 5개를 각각 부착시켜 원주방향의 핀

이 액체와 함께 회전할 때의 진동감쇠효과도 함께 조사하여 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 회전원통에 핀을 부착하지 않고 물, 디젤유 및 유압작동유를 내장한 회전원통에 대한 충전비  $\bar{H}$ 의 변화에 따른 주진동계의 최대진폭 변화를 나타낸 것이다. 이론치는 물에 대한 것으로 분현 (9)의 이론식을 이용하여 구했다. 이론식은 점성과 감쇠의 영향을 고려하지 않았기 때문에 실험과는 약간의 차이가 있으나, 비교적 잘 일치하고 있다. 회전용기내에 액체를 증가시키면, 처음에는 공진진폭은 커지나  $\bar{H}$ 가 0.6 근처에서 액체를 넣지 않은 경우와 공진진폭은 같아지고 액체를 더 증가시키면 공진진폭이 급격히 감소하여  $\bar{H}$ 가 0.54일 때, 최대진폭은 매우 작아져서 액체를 넣지 않은 경우의 최대진폭보다 약 1/4 정도까지 감소

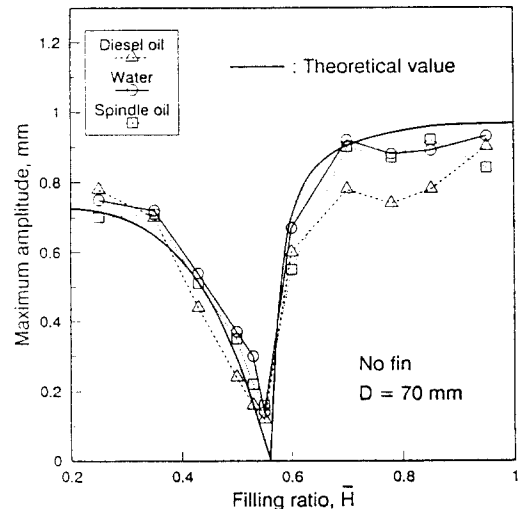


Fig. 3 Comparison of experimental values with theoretical values for without fin.

되었다. 따라서 용기내에 액체를 약 67~73% ( $\bar{H}=0.56\sim 0.52$ ) 정도 채웠을 때, 가장 진폭 감쇠특성이 탁월하고 거의 공진피크가 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

이때 액체의 최적충전상태는 물의 경우  $\bar{H}$ 가 0.56(67.8%), 유압작동유가 0.54(70.3%), 디젤유가 0.52(73.58%)로 약간씩 차이가 나고 있다. 이것은 액체의 비중과 점도가 각각 다르기 때문이라고 생각된다. 그림에서는 점성이 제일 큰 디젤유가 진폭억제효과가 가장 좋고 유압작동유, 물의 순서대로 됨을 알 수 있었으나 그 차이는 아주 작았다. 이것은 점성이 클수록 액체의 요동이 적어지나, 대신 마찰력은 커지기 때문으로 생각된다. 다시 액체의 양을 증가시키면 최대진폭은 다시 증가되어  $\bar{H}$ 가 0.4에서 액체를 넣지 않은 상태와 같아지고,  $\bar{H}$ 가 0에 가깝게 됨에 따라 공진진폭도 커지고 있는 것을 나타내고 있다.

Fig. 4는 액체 양의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 주진동계의 1차 고유진동수에 대해 무차원으로 나타낸 것이다. 여기서 고유진동수는 정상응답에 있어서 진폭이 최대가 되는 회전속도로 부터 구하였다. 그리고 이론값은 문헌(9)의 식을 이용하여 구한 것이다. 그림에서 액체양의 증가 즉, 충전비  $\bar{H}$ 가 감소함에 따라 고유진동수는 낮아진다.  $\bar{H}$ 가 0.65부근에서 액체를 채우지 않은 상태와 같아진 후 고유진동수는 약간 상승하다,  $\bar{H}$ 가 0.54 부근에서 고유진동수는 불연속으로 변하고, 이후 고유진동수는 아주 낮게 된다. 계속 액체의 양을 증가하여 가면 고유진동수는 다시 높아진다. 이것 역시 Fig. 3와 마찬가지로 Fig. 4에서도 고유진동수의 급격한 변화가 일어나는  $\bar{H}=0.54$  부근에서 최대진폭이 가장 작아지는 곳이라는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서도 이론치와 실험치의 경향은 거의 일치하고 있지만, 부분적으로 차이가 나고 있는 것은 이론식에서는 점성과 감쇠의 영향을 전혀 고려하지 않았기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5는 감쇠효과에 미치는 핀수의 영향을 고찰하기 위해 회전원통내에 핀을 부착하지 않

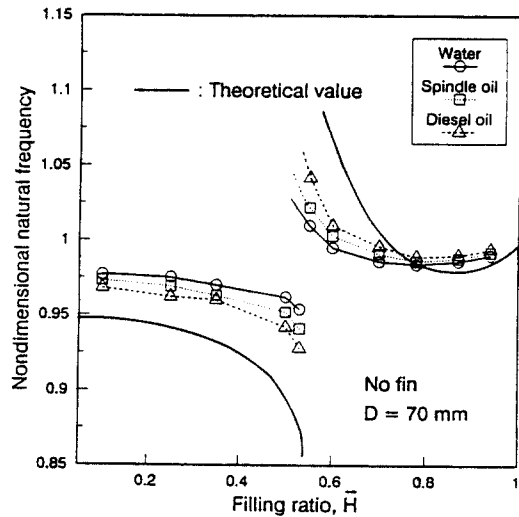


Fig. 4 Nondimensional natural frequencies.

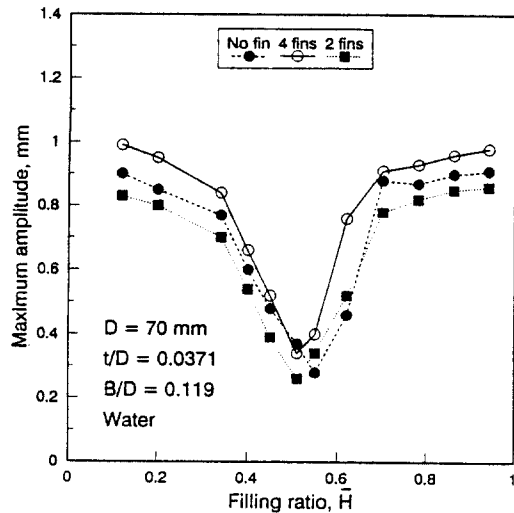


Fig. 5 The effect of number of axial fins.

은 경우와 축방향으로 핀을 각각 2 개 및 4 개를 부착시킨 경우, 충전비  $\bar{H}$ 에 대한 최대진폭의 변화를 나타낸 것이다. 이 경우 모두 핀길이는 80mm, 핀폭은 8.3mm로 하였다. 이 그림에서도 Fig. 3과 마찬가지로  $\bar{H}$ 가 0.54부근에서 최대진폭이 가장 작아진다. 그리고 핀을 2 개 부착한 경우는 핀을 부착하지 않은 경우와 비슷하나, 공진시 최대진폭을 억제시키는  $\bar{H}$ 의 영역이 핀을 부착하지 않은 경우보다 더 크다. 즉, 핀을 2개 부착했을 때,  $0.6 < \bar{H} < 0.5$  에

서는 액체력에 의한 흡진작용으로 공진시의 진폭이 작아져서 공진을 거의 감지할 수 없었다. 이것은 핀 사이에서 액체가 회전하고 핀 바깥쪽의 액체도 회전함으로써 액체의 요동에 의한 용기벽면과 핀의 마찰로 에너지 소멸을 일으키기 때문이라고 생각된다. 그러나 핀을 4 개로 하였을 경우에는 오히려 공진시의 진폭이 커지고 흡진역할을 하는  $\bar{H}$ 의 범위도 좁아짐을 알 수 있는데, 이것은 핀의 수를 증가시킬 수록 핀간격이 좁아짐으로써 핀 사이에 있는 액체의 회전력이 감소하여 액체력에 의한 요동과 마찰이 줄어들기 때문이다.

Fig. 6은 2개의 핀을 축방향으로 부착시킨 경우, 물, 디젤유 및 유압작동유의 충전비  $\bar{H}$ 에 대한 최대진폭의 변화를 나타냈다. 이 때의 핀폭은 8.3mm로 하였으며, 핀을 부착시켰을 경우의 액체의 점성효과를 검토하였다. 핀을 부착하였을 때가 핀을 부착하지 않은 경우보다 점성이 클 수록 공진시 최대진폭을 억제시키는 효과가 감소한다. 이 역시 핀 사이에 있는 액체의 회전력이 점성에 의해 더욱 감소되고, 이에 따라 액체면에 의한 마찰과 요동이 줄어들기 때문이라고 생각된다.

Fig. 7은 폭이 4.5, 8.3 및 12.5mm인 핀을 2개씩, 회전원통에 부착한 경우, 물의 충전비  $\bar{H}$ 에 대한 핀폭의 영향을 나타낸 것이다. 이 경우 역시  $\bar{H}$ 가 감소하면 즉, 액체의 양이 증가하면 공진점에서의 최대진폭은 점점 감소하여  $\bar{H}$ 가 0.52 부근에서 최소로 되었다가 다시 증가함을 알 수 있다. 이 경우 핀이 두개일 때, 핀폭이 8.3mm에서 진폭감소효과가 가장 양호하였다. 이것도 Fig.5에서와 같이 두개의 핀을 부착하였을 경우, 회전용기 용적의 약 70%의 액체를 채우고 핀 폭이 액체 높이의 약 반정도의 폭을 점유하였을 경우, 액체의 일부는 액체의 요동시 용기와 핀면과의 접촉으로 점성마찰을 일으키게 되고, 나머지 액체는 핀의 측면에서 회전력에 의한 정재파의 영향으로 언직방향에 생기는 진동진폭을 억제시키기 때문에 진폭억제 효과가 가장 양호하다고 생각된다.

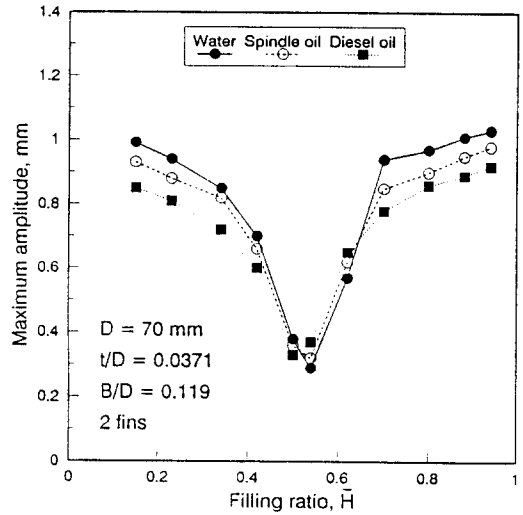


Fig. 6 The effect of viscosity of liquids.

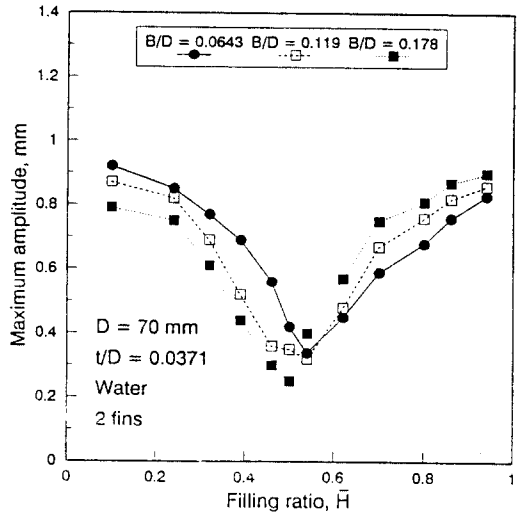


Fig. 7 The effect of width of axial fins.

Fig. 8은 회전원통에 핀폭이 4.5, 8.3 및 12.5mm인 중공원판형상의 반경방향 핀을 회전원통 내측에 축방향, 등간격으로 각각 5개씩 부착시킨 경우의 물의 충전비  $\bar{H}$ 에 대한 최대진폭의 크기를 나타낸 것이다. 이 경우는 축방향으로 핀을 부착시킨 경우와는 달리, 충전비  $\bar{H}$ 가 0.4 근처에서 진폭은 감소하였다가 액체를 증가시키면 다시 진폭은 증가하고, 핀폭이 넓어질 수록 진폭감소효과는 거의 없으며 최적조건의 충전비  $\bar{H}$ 의 값도 변화됨을 알 수 있

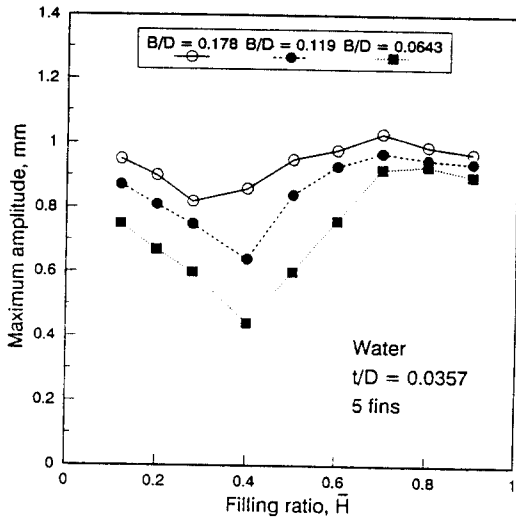


Fig. 8 The effect of radial fins.

다. 이것은 원주방향의 핀에 의해 액체의 운동이 방해되어 공진시 액체가 요동하지않고, 용기 또는 핀과 액체의 사이에서 마찰과 요동을 일으키지 않으므로 액체의 흡진역할이 크게 저하되었기 때문이라고 생각된다.

#### 4. 결 론

공진 영역에서의 최대진폭을 억제하기 위해, 중공회전체의 내부에 액체의 양을 변화시키면서 액체의 점성과 핀의 형상효과 등에 의한 진동진폭특성을 실험적으로 조사하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 중공 원통의 회전체에 충전되는 액체의 양을 적절히 변화시키면, 액체의 충전비  $\bar{H}=0.54$  부근에 있어서 액체력에 의한 진동진폭 감소에 상당한 효과를 얻었으며, 일종의 액체흡진기로서의 이용 가능성을 실험적으로 확인하였다.
- 2) 액체의 점성은 진동진폭 억제에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 3) 흡진작용은 액체의 요동에 의해 영향을 받으며, 2 개의 핀을 부착하였을 때가 가장 양호한 감쇠효과를 얻었으며, 핀수가 더욱 증가할 수록 효과는 저하된다.

- 4) 충전된 액체가 회전에 의해 용기벽면에 붙어 평형상태를 유지할 때, 용기벽면에서 액체의 자유표면까지 거리의 반점도의 핀폭  $[(D-D_i)/4]$ 이 효과가 가장 양호하다.
- 5) 핀을 축방향으로 부착한 경우가 원주방향으로 핀을 부착한 경우보다 진동감쇠 효과가 더욱 양호하다.

#### 참 고 문 헌

- 1) P. Lieber and D.P. Jensen, "An Acceleration Damper Development, Design and Some Applications", Trans. ASME, Vol.67, pp. 523-530, 1945
- 2) J.B. Hunt and J.C. Nissen, "The Broadband Dynamic Vibration Absorber", Trans. ASME, Vol.83, No.4, pp. 573-578, 1982
- 3) H. Yamaguchi, "Damping of Transient Vibration by a Dynamic Absorber", JSME, Vol.54, No.499, pp. 561-568, 1987
- 4) M.A. Nobile and J.C. Snowdon, "Viscously damped Dynamic Absorber of Conventional and Noble Design", J. Acoust. Soc. Am., Vol.61, No.5, May, pp. 1198-1208, 1977
- 5) K. Seto and Y. Iwata, "振子式 制振装置の最的 調程法", JSME, Vol.51, No.467, pp. 1454-1461, 1984
- 6) 양보석, 김종환, 김원철, "자유진량체를 갖는 충격식 흡진기의 특성에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol.9, No.1, pp. 75-81, 1992
- 7) 양보석, 진순기, 김원철, "액체 Sloshing에 의한 진동감쇠기에 관한 실험적 연구", 한국정밀공학회지, Vol.8, No.1, pp. 96-104, 1991
- 8)金子, 葉山, "回轉圓筒内に 部分的으로 채워진 液體의 自由表面波에 關한 研究", JSME, Vol. 49, No. 439, pp. 370-391, 1982
- 9) Y. Sato, "Dynamic Absorber Using a Hollow Rotor Partially Filled with Liquid", JSME, Vol.54, No.504, pp. 1629-1636, 1987