

액체 Sloshing에 의한 진동감쇠기에
관한 실험적 연구

양 보 석*, 전 순 기**, 김 원 철***

An Experimetal Study on the Damping Characteristics
of Liquid Sloshing.

Bo Suk Yang*, Soon Ki Jun,** Won Chul Kim***

Abstract

This study is concerned with the fluid sloshing dampers to suppress the high vibration in the resonance and operating regions.

An experimental investigation was conducted to determine the logarithmic decrement, natural frequency, tuning frequency ratio of oscillation of liquids contained in an spherical rigid container. The decay of the vibration amplitude was studied for the range of liquid filling ratio in container.

The results of the investigation indicate that the sloshing motion of liquids results in an increase in the available effective damping when the filling ratio is in the region near $H/R=1.3-1.6$.

* 정회원, 부산수산대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 한독부산직업훈련원

***통영수산전문대학 기관과

1. 서 론

진동구조물에 부착된 강제용기내에 액체가 부분적으로 채워진 경우, 구조물의 진동에 의하여 액체의 유동, 즉 슬로싱(sloshing)을 일으키고 이 슬로싱 힘은 구조물을 가진 시키게 된다. 그리고 동시에 액체의 유동은 에너지 소모를 가져와 진동계의 감쇠기구로도 작용하게 된다. 이러한 문제는 특히 화학 및 원자력 플랜트에서 널리 사용되고 있는 수평원통형 용기의 내진설계(seismic design)에 있어서 최대 슬로싱력을 추정하는 것이 매우 중요한 문제중의 하나로 대두되고 있다. 또한 항공 우주공학에서도 액체 연료의 슬로싱에 의한 공진문제도 중요한 문제이다. 종래의 이 분야에 대한 연구는 크게 두 분야로 구별될 수 있다. 전자로서 진동계에 설치되어 있는 용기내의 액체가 슬로싱을 일으킬 때 이에 의한 구조물의 응답을 추정하기 위해서는 슬로싱력(sloshing force)을 정확히 평가하는 것과, 슬로싱 진동수와 공진을 피하기 위하여 슬로싱의 고유진동수를 구하는 것이다. 이에 관하여는 실험 및 이론적인 연구가 수행되고 있으며, 특히 각종 용기형상, 비선형 자유 표면과, 배플(baffle) 및 슬로싱 파두(wave height)의 영향 등을 중심으로 한 실험적 연구가 대부분이며, 슬로싱응답에 대한 이론적인 연구로는 Budiansky¹⁾, Kobayashi²⁾ 등이 있다. 후자로는 점성액체의 유동에 의한 에너지 소모기구를 계의 진동흡진기(Vibration absorber)로서 이용하고자 하는 것으로서 실험적 연구 중심으로 수행되어져 왔다. 즉 Abramson³⁾은 액체의 유동시 발생하는 액체의 관성력과 마찰손실 등으로 인하여, 액체가 부분적으로 채워진 강제용기가 감쇠기로 이용될 수 있음을 제시하였고, 이어서 여러가지 형상의 용기와 용기내에 부유물 또는 baffle 등을 설치하여, 액체의 슬로싱이 계에 미치는 진동특성과 진동감쇠 효과 등을 실험하였다. 그후 Summer⁴⁾와 Bauar⁵⁾ 등은 Senle-model container에 대한 액체 슬로싱 선형모델을 연구하여 우주추진체, 인공위성안테나의 진동감쇠기구 또는 미사일과 항공기의 연료탱크 등에 적용하였다. 최근에

Sayar⁶⁾는 구형용기를 진자형모델로 선형과 비선형 진동특성을 연구하였고, Modi⁷⁾는 슬로싱 압력과 액체의 전단력, 점성효과 등에 대하여 Troust형상의 nutaion damper를 실험하여 이론과 비교하였다. 이와 같은 일련의 연구는 주로 우주추진체, 인공위성, 미사일 등 항공우주공학의 특수한 환경에 한정된 적용을 위해 수행된 것이다.

본 연구에서는 이와 같은 액체슬로싱 현상을 진동이 과도한 기계 또는 구조물의 진동감쇠 기구에 응용할 수 있게 하기 위하여 구형용기를 이용한 자유진동 실험과 강제진동 실험을 수행하여, 액체 슬로싱 진동 감쇠 특성을 실험적으로 연구하였다. 이어서 간단한 구조로 설계된 슬로싱 감쇠기를 범용 평면연삭기에 응용하여 감쇠기로서 실용 가능성을 검토하였다.

2. 자유진동 실험

2-1. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 실험에 사용된 실험장치의 개략도로서 내경 100mm의 폴리에스텔 구를 철판(t3×150×250) 위에 고정 시키고, 양단에는 스프링 상수가 344N/m인 코일스프링을 각각 두개씩 고정단에 고정시켰으며, 길이 540mm, 직경 2mm인 steel wire로 지지된 2실 진자형으로 제작하였다. 구형용기는 구의 반지름을 R, 액체의 높이를 H로 하였을 때, 충전비(filling ratio) H/R의 값을 0으로부터 완전히 액체를 채웠을 때인 2.0까지 0.2씩 증가시키며 실험하였다.

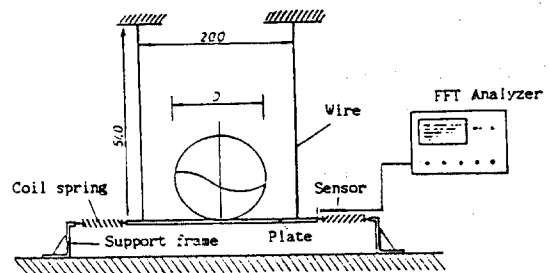


Fig.1 Experimental apparatus for free vibration.

본 실험에 사용된 측정방법은 plate 우단(Fig. 1)

에 와전류형의 비접촉식 변위계를 설치하여 주진동계의 좌우방향 진동변위를 출력신호로 주파수 분석기(CF-500 ONOSOKI)를 이용하여 주진동계의 진동변위, 시간응답파형, 주파수 분석 등을 X-Y 기록기에 기록하여 분석하였다.

2-2. 실험결과 및 고찰

먼저 용기내에 액체를 넣지 않은 상태로 계를 자유진동시켰을 때, 시간응답파형과 진동수스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 주진동계의 대수감쇠

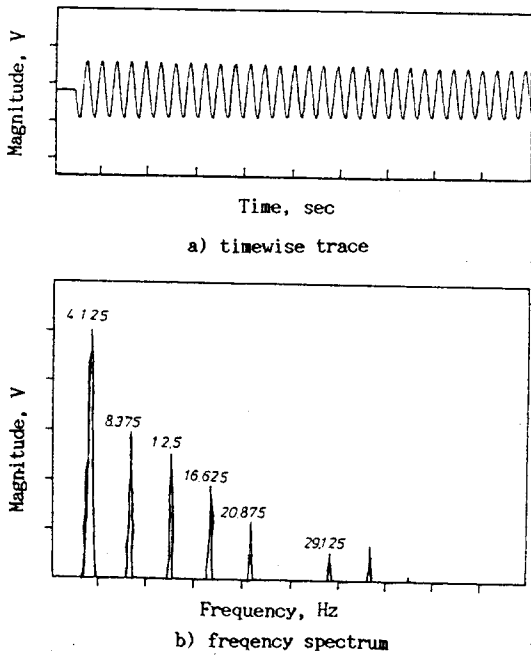


Fig.2 Timewise trace and frequency Spectrum

율은 0.0029로 계의 감쇠는 거의 없었고, 계의 기본고유진동수는 4.125Hz로, 2차 및 3차 성분은 각각 8.375Hz 및 12.5Hz이었다. 액체 충전비에 따른 영향을 조사하기 위하여 Table 1의 물, 디젤엔진유, 유압작동유, 물과 유압작동유의 혼합유 들을 사용하여 충전비의 변화에 대한 대수감쇠율을 조사하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 대체로 충전비의 증가,

즉 용기내의 액체량이 증가 함에 따라 대수감쇠율은 서서히 증가하여 충전비 H/R=1.6에서 최대의 감쇠효과를 보였으며, 완전히 채웠을 때(H/R=2.0)가 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 액체의 점성이 클수록 감쇠효과가 크며, 특히 디젤엔진유는 H/R=1.6에서 물에 비하여 대수감쇠율이 약 두배 이상인 0.224이 값을 나타내었다.

Table 1 Properties of liquids.

Kinds of liquids	Specific gravity (20°C)	Viscosity (20°C, N · s/m ²)
Water	0.999	1.06×10 ⁻³
Hydraulic oil	0.865	8.38×10 ⁻²
Diesel engine oil	0.875	1.09×10 ⁻¹

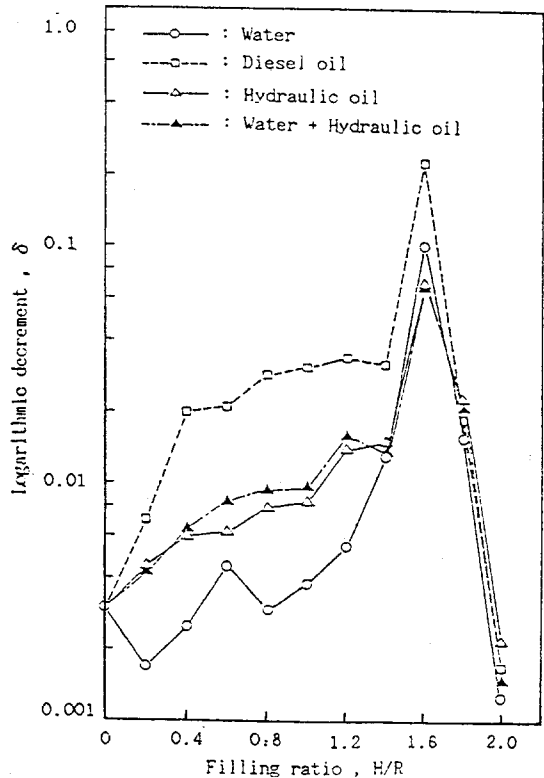


Fig.3 Logarithmic decrement.

Fig. 4는 용기내에 물을 H/R=0에서 부터 0.2씩 증가시켰을 때, 감쇠자유진동 파형의 일례를 나타낸다. 빈 용기의 경우 감쇠가 거의 없어 자유진동파형이 오래 지속되나, 충전비의 증가에 따라 계의 진동진폭이 감소하는 경향, 즉 대수감쇠율이 증가하며 충전비 H/R=1.6일 때 가장 큰 대수감쇠율을 보인다. 그리고 용기 속에 물이 완전히 충전된 경우는 액체의 슬로싱이 발생하지 않고, 단지 부가질량으로만 작용하므로 대수감쇠율이 매우 낮아진다. 특히 충전비 H/R=1.2에서부터 주진동계는 액체 슬로싱 힘과 액체자유 표면 넓이 및 액체 중량으로 인하여 H/R=1.6에서 가장 큰 영향을 받았다.

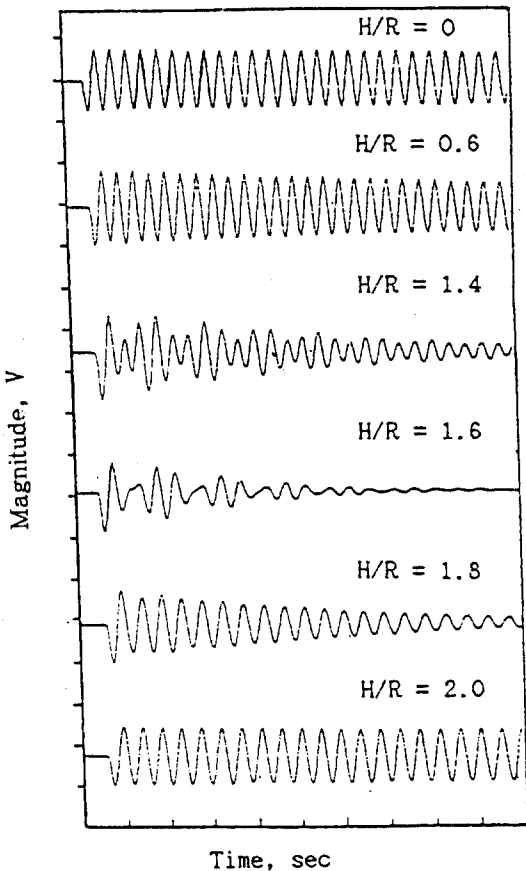


Fig.4 Decay record of system with sloshing damper (water).

Fig. 5는 물, 유압작동유, 디젤엔진유 및 혼합유의 H/R=1.6일 때의 진동파형을 나타내고 있다. 이 중 가장 감쇠효과가 큰 것은 디젤엔진유 였으며 다음은 물, 유압작동유, 혼합유 순으로 대부분 “맥놀이 (beat)” 현상을 반복하면서 급격히 진동진폭이 감소하고 있다. 맥놀이의 수는 물의 경우 5번 지속 후 0에

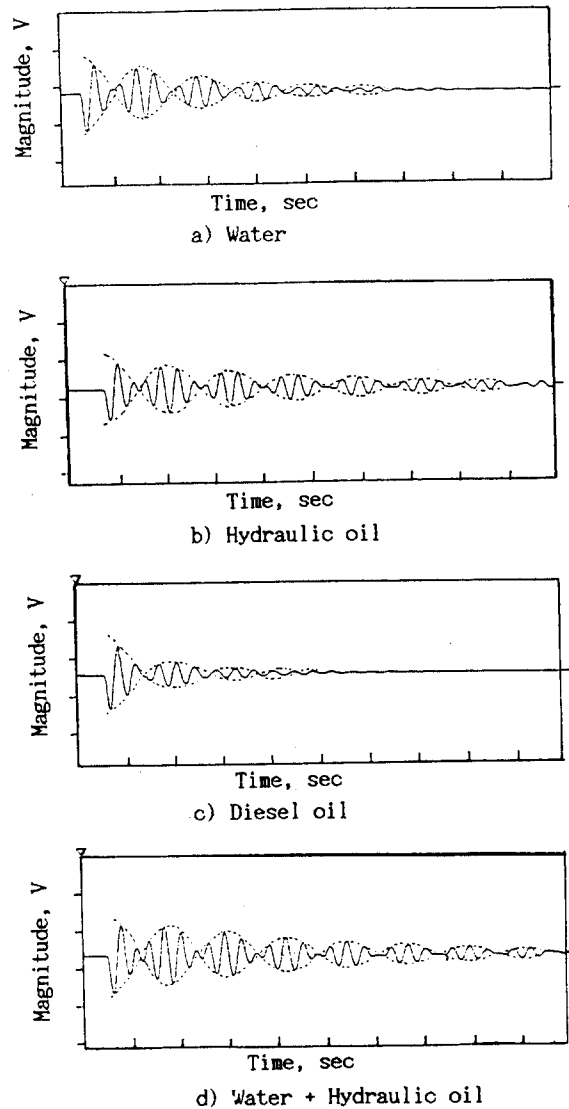


Fig.5 Decay record of system with sloshing damper (H/R=1.6)

수렴되었고, 디젤엔진유는 3번 지속 후 거의 0으로 되었다. 반면 유압작동유와 혼합유는 7번에서 8번 정도 지속 후 0으로 되어, 점도가 맥놀이 감소에 큰 영향을 주고 있다.

한편 물의 충전비 변화에 따른 주파수분석의 결과, 주진동계와 액체슬로싱파의 1차, 2차 및 3차의 고유진동수를 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 Budiansky¹⁾의 이론 액체파동 진동수는, 주진동계의 고유진동수 이론값과 충전비 1.6에서 서로 교차하고 공진상태를 보여준다. 실험결과도 역시 충전비 1.6에서 주진동계의 고유진동수와 액체파동 고유진동수가 가장 근접되어 이론값과 실험결과가 일치되고 있음을 보여준다. 주진동계의 고유진동수는 충전비 0.6 부근까지는 거의 이론값과 유사하였으나, 그후 충전비 증가에 따라 이론값과 차이를 보이는 것은 이론값이 비교적 단순

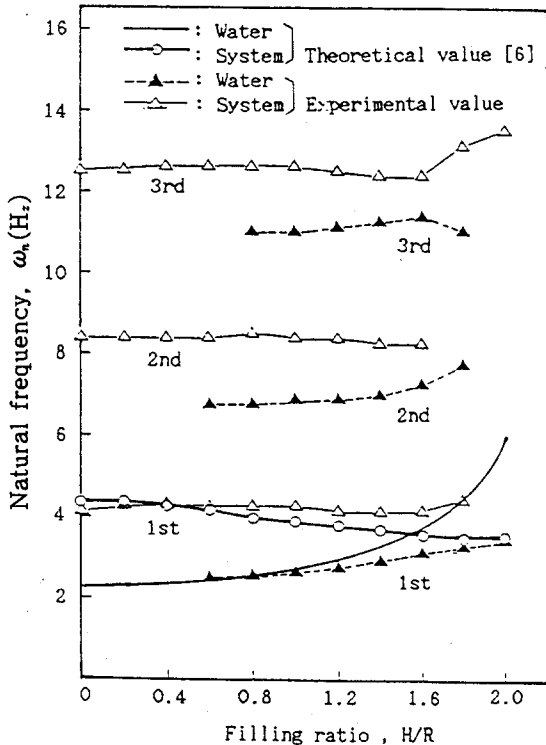


Fig.6 Natural frequencies of main system and slosh wave.

한 가정에 의해 유도되었기 때문으로 생각된다. 특히 액체 슬로싱파의 고유진동수와 가장 근접한다. 그러므로 이곳에서는 맥놀이 현상이 심하게 나타나고, 규칙적인 형태로 급속히 감소하였다. 이러한 양상은 점성이 다른 대부분 액체들도 유사하였다.

Fig. 7은 대수감쇠율과 동조진동수비와의 관계를 나타낸다. 여기서 동조진동수비는 계의 고유진동수와 액체슬로싱파의 고유진동수 비 ($\Omega = \omega_p / \omega_n$)로 표시되며, 대수감쇠율이 최대일 때의 비를 임계동조 주파수라 정의한다. 대부분 액체는 동조 진동수비 0.76 부근에서 대수감쇠율이 최고치에 도달하였다. 이와 같은 자유진동의 실험결과는 주진동계의 고유진동수

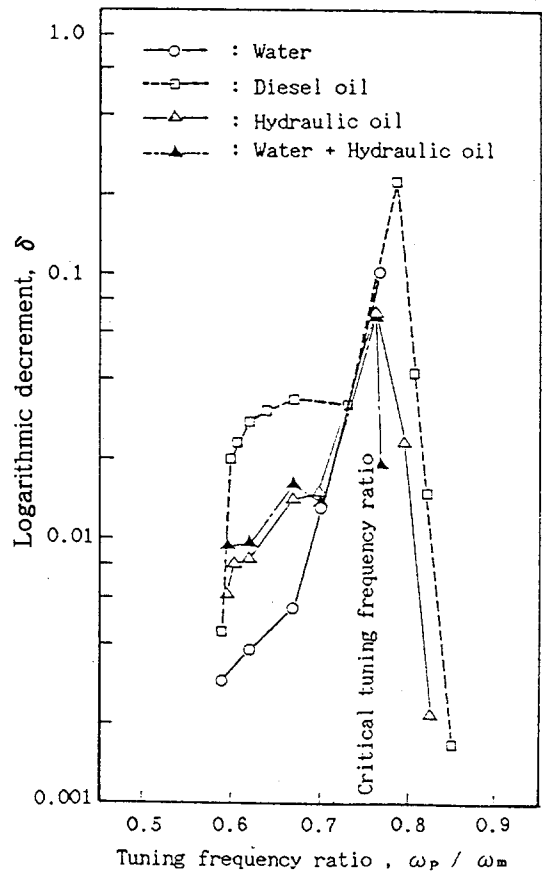


Fig.7 Relation with logarithmic decrement and tuning frequency ratio.

와 액체파동의 고유진동수가 동조 하므로서 주진동계에 많은 진동감쇠를 제공함을 나타낸다.

3. 강제진동 실험

3-1. 실험장치 및 실험방법

강제진동 실험장치는 Fig. 8과 같이 주진동계를 2개의 연장판($t5 \times 320 \times 600$) 스프링(leaf spring)을 사용하여 수직방향으로만 변위를 구속하였고, 주진동계 하단에 편심거리 0.075mm의 원판이 부착된 가변전동기(0~3600rpm, DC 서보모터)를 설치하여, 전동기 회전시 발생하는 불평형력에 의한 원심식 가진력으로 주진동계를 가진하였다. 주진동계 상단에는 구형용기를 고정시켰으며, 구형용기는 직경 100, 145 및 200mm의 투명한 아크릴로 슬로싱 액체의 유동을 관찰할 수 있게 하였다. 측정은 plate 상단에 비접촉식 변위계를 설치하여 상하방향의 진동변위를 자유진동 실험과 같은 방법으로 하였다.

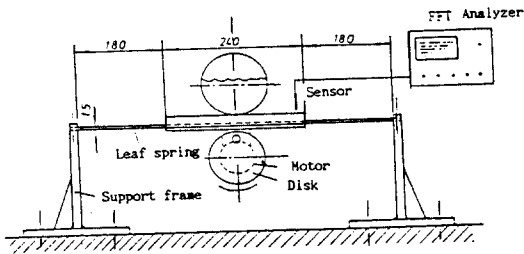


Fig.8 Experimental apparatus for forced vibration.

3-2. 실험결과 및 고찰

Fig. 9는 직경 200mm의 구형용기의 경우, 24Hz부터 35Hz까지의 가진주파수에 대한 주진동계의 변위 진폭곡선으로, 빈 용기인 경우의 주진동계는 일반적인 1자유도계의 진폭곡선을 나타내며, 32.5Hz의 공진점에서 과도한 진동(2.0mm)을 보여주고 있다. 용기에 물이 완전히 충전되었을 경우, 물의 부가질량으로 계의 고유진동수가 26.5Hz까지 감소하고, 또한 약 3.3mm의 과도한 진동을 일으키고 있다. 각 파라미터 중에서 가장 낮은 진폭을 갖고 있는 충전비 1.3에서의 진폭곡선은 주진동계의 공진점(1차)과

29.75Hz에서의 액체파동에 의한 공진점(2차)이 나타나고 있으며, 1차 공진점의 진폭은 0.55mm, 2차 공진점은 0.3mm로, 액체가 전혀 없는 경우에 비해 진동진폭이 약 72.5% 감소하였다.

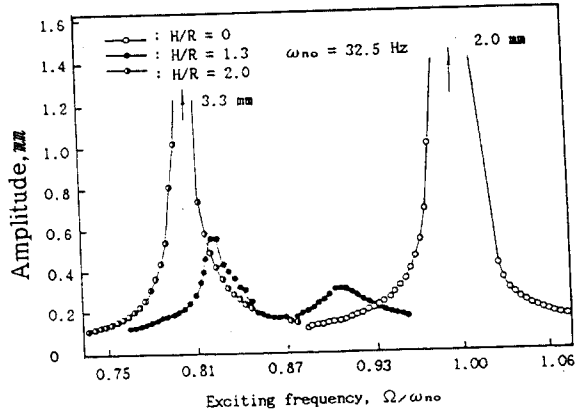


Fig.9 Vibration amplitude of vibrating system (water).

Fig. 10은 물과 디젤엔진유의 충전비에 따른 무차원 감쇠비를 나타낸 것이다. 공진점에서 감쇠비(ζ)는 주진동계의 진폭을 불평형원판의 편심으로 나눈 값인 공진배율(Ds)과 $Ds = 1/2 \zeta$ 의 관계가 있으므로, $\zeta = 1/2Ds = 1/2(U_0/U_{max})$ 로 표시되고, 그림에서 $H/R = 0$ 인 경우의 감쇠비(ζ_0)로 무차원화 하였다. 충

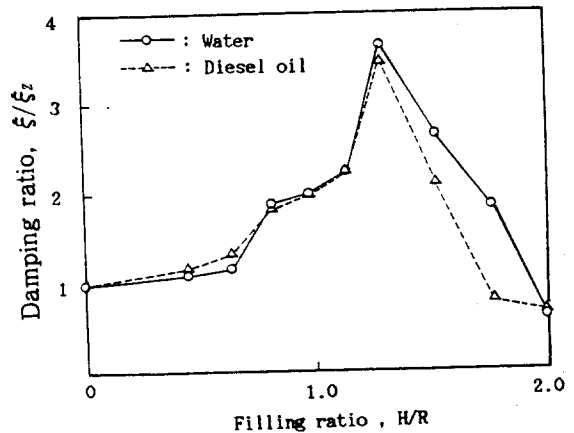


Fig.10 Damping ration.

전비에 다른 무차원 감쇠비(ζ/ζ_0)는 빈용기에서 부터 서서히 증가하여 $H/R=1.3$ 에서 최대가 되고, 다시 급격히 감소하여 완전히 채워졌을 때, 0.606로 최소가 되었다. 자유진동 실험에서 액체파동의 고유진동수와 주진동계의 고유진동수가 가장 근접된 $H/R=1.6$ 에서 가장 높은 대수감쇠율을 얻었고, 강제진동 실험의 경우 또한 두 고유진동수가 가장 근접한 $H/R=1.3$ 에서 높은 감쇠비를 나타내고 있다.

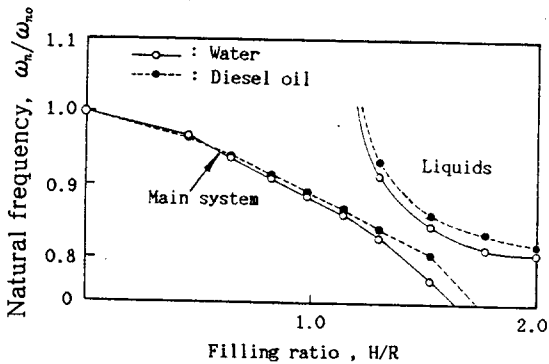


Fig. 11 Natural frequencies.

Fig. 11은 $H/R=0$ 일 때의 1차 고유진동수 ω_{n0} 으로 무차원화하여 충전비 변화에 따른 고유진동수비를 나타내었다. 액체 충전비의 증가에 따라 액체의 부가질량에 의해 계의 총질량이 증가하므로 진동계의 고유진동수는 점차 낮아지며, 이때 액체파동 mode는 Fig. 12(a)와 같으며, 파동진동수는 감소하고, 파고 또한 매우 크게 됨을 보이고 있다. 공진점 부근에서 액체는 Fig. 12(c)와 같은 형태로 파동진동수가 낮아져 주진동계의 고유진동수와 액체파동 진동수의 2개의 진동 mode가 존재하고, 이때 서로 근접된 2개 진동 mode의 물리적 간섭은 주진동계에 높은 감쇠효과를 주었다. 충전비 $H/R=1.3$ 이상, 즉 어느 정도 이상의 액체가 용기에 충전되면 액체파동 진동수는 낮아져 포화하는 경향을 보인다.

한편 각각의 충전비에서 측정된 정적처짐 U_0 로 최대진동진폭(U_{max})을 무차원화하여 Fig. 13에 표시하였다. 진폭비는 충전비 증가에 따라 높은 값에서 부터

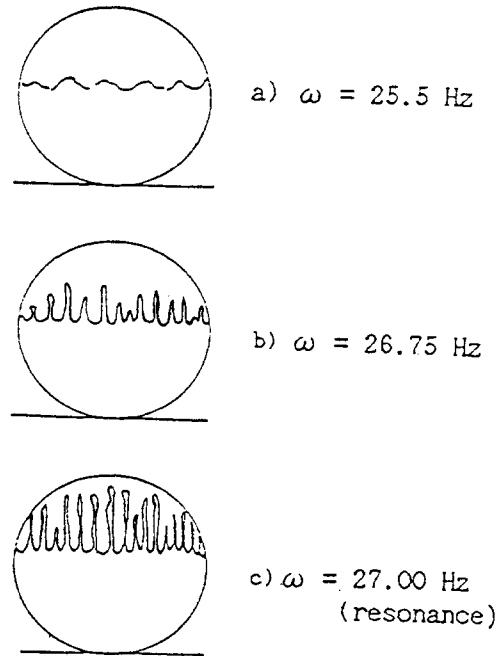


Fig. 12 Variation of fluid wave motion modes ($H/R=1.3$)

점차 감소하여 $H/R=1.3$ 서 최소값을 보였으며, 다시 급격히 증가하여 $H/R=2.0$ 에서 약 20정도의 값을 보이고 있다.

4. 슬로싱 감쇠기의 응용

본 연구에서 제안하는 슬로싱 감쇠기의 성능을 확인하기 위한 응용예로서 경년변화로 인해 비교적 큰 진동이 발생하고 있는 실제 사용중인 평면연삭기에 적용하여 그 효과를 검토하였다.

Fig. 14와 같이 간단한 구조로 설계된 슬로싱감쇠기를 주축상단에 부착하여 진동감쇠효과를 조사하였다. 먼저 감쇠기가 부착되지 않은 상태에서 진동주파수와 진폭을 측정된 결과 주축의 회전수는 47.75Hz 이었으며, 이때 주축의 진동진폭은 29M 이었다. 절삭깊이 0.025mm로 절삭가공시는 축회전수가 절삭력에 의해 47.00Hz로 낮아졌다.

측정된 주축의 진동진폭이 상당히 낮기 때문에, 감

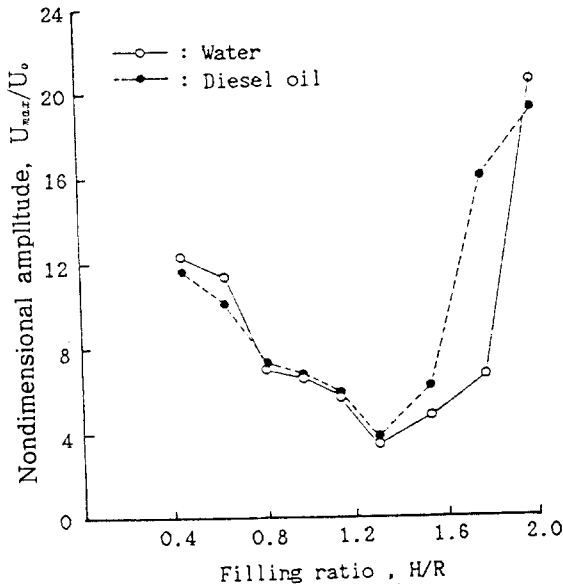


Fig.13 Nondimensional maximum amplitude.

최효과를 보다 크게 하기 위해 직경 100mm의 두개의 구형용기를 2개의 유연한 연강판(t5×13×150)인 leaf spring의 양단에 부착시켜, 주축의 회전수와 감쇠기의 고유진동수를 일치시키기 위하여 충전비를 1.3으로 물을 충전시켰다.

연삭기 주축의 회전수와 같게 동조된 감쇠기를 주축에 부착하여 공회전시의 주파수와 진동진폭을 조사한 결과, 주축 진동진폭은 22 μ m로, 감쇠기를 부착하지 않은 경우에 비하여 진폭이 약 7 μ m 감소하였다. 절삭시험을 위하여 열처리된 S45C(\square 30×150)의 시험편을 절삭깊이 0.025mm, 테이블 이송 5m/min로 절삭하면서 감쇠기를 부착시켰을 때와 부착하지 않은 경우의 진동진폭을 조사한 결과, 9 μ m의 진동진폭이 감소하였고, 이는 감쇠기를 부착하지 않은 경우에 비해 진폭이 40.9% 감소한 것을 나타낸다. 연삭된 시험편의 표면조도를 측정하기 위하여 표면거칠기 시험기(Shimadzu SE-3C)을 이용하여 연삭방향으로 중심선평균조도(μ m, Ra)를 측정였으며, 측정위치는 시험편의 길이 방향으로 한쪽끝에서 30mm씩 등간격으로 분할해서 3개소를 측정하여 평균적인 것을 선택하

였다.

Fig. 15는 중심선평균 표면조도(μ m, Ra)를 기록한 예로서 감쇠가 없을 때의 표면조도는 골이 깊고, 불규칙한 형태를 보이며, 최고조도폭이 8 μ m이었고, 감쇠기를 부착시켰을 때의 표면조도는 상당히 안정된 형

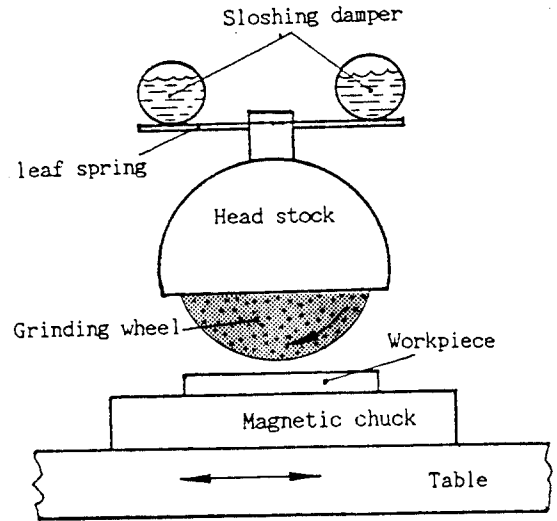


Fig.14 Experimental apparatus.

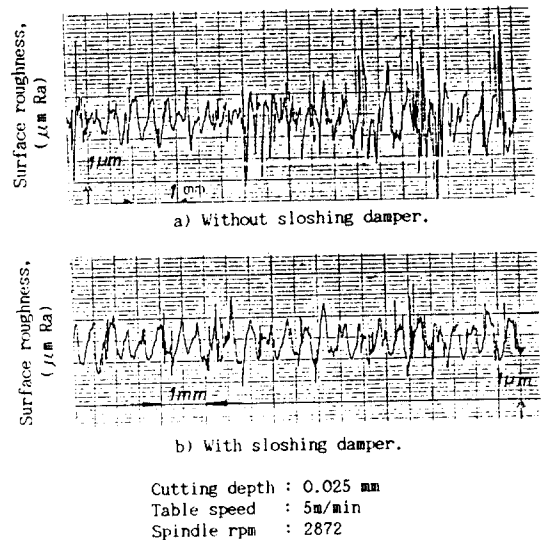


Fig.15 Recording of surface roughness curve.

Cutting depth : 0.025 mm
 Table speed : 5m/min
 Spindle rpm : 2872

대로 최고조도폭이 $4\mu\text{m}$ 로되어 감쇠기로서 훌륭한 성능을 발휘하고 있음을 잘 보여주고 있다.

5. 결 론

계의 운전영역에서 발생하는 과도한 진동을 효과적으로 억제하기 위하여 구형용기를 이용한 액체슬로싱의 자유진동 및 강제진동 실험을 통하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 액체슬로싱의 고유진동수와 주진동계의 진동수가 서로 공진 또는 가장 근접할 때 진동계는 큰 진동진폭의 감쇠효과를 얻었고, 이론과 실험이 일치한 충전비 1.3에서 1.6사이일 때 가장 진동진폭 감쇠효과가 탁월하였다.

2) 자유진동실험에서 대수감쇠율이 최대로 되는 임계 동조주파수비는 0.76 부근이었고, 이때 대부분 진동파형은 맥놀이 현상이 발생되었다.

3) 범용 평면연삭기에 응용한 경우, 제안된 액체슬로싱 감쇠기는 진동진폭의 감쇠와 표면조도의 향상에 탁월한 효과를 보였고, 감쇠기로 사용할 수 있음이 확인되었다.

4) 소음이 없고, 방향성이 없으며, 크기와 중량이 비교적 적어 경제적인 흡진기로 이용될 수 있다.

참고문헌

1. B. Budiansky, "Sloshing of Liquids in Circular Canals and Spherical Tanks", *Aero/Space Sci.*, Vol. 27., No. 3, pp. 161-173. 1960
2. N. Kobayashi, et al., "A Study of the Liquid Slosh Response in Horizontal Cylindrical Tanks", *Trans. ASME, J. of Pressure Vessel Technology*, pp. 32-38, 1989
3. H. N. Abramson, "The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers", NASA SP-106
4. I. E. Summer and A. J. Stofan, "Experimental Sloshing Characteristics and a Mechanical Analogy of Liquid Sloshing in a Senle-model Container Liquid Oxygen Tank", NASA TMX-999, 1964
5. H. F. Bauar, "Schwingungen nichtischbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf einen neuen Damper für Satelliten-Ausleger", *Ingenieur-Archiv*, Vol. 49, No. 2, pp. 119-136, 1980
6. B. A. Sayar, "Fluid Slosh Dampers," Dept. of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology, pp. 37-94, 1977
7. V. J. Modi and F. Welt, "Vibration Control Using Nutation Dampers," *Folw Induced Vibrations*, pp. 369-376, 1987
8. D. D. Kana, "Validated Spherical Pendulum Model for Rotary Liquid Slosh," *Spacecraft*, pp. 188-195. 1988
9. 양보석 외 3인, "액체와 고체분말 sloshing의 흡진효과에 관한 실험적 연구," 대한 기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 135-138, 1990