

<論 文>

두 액체로 충전된 회전체의 자려진동에 관한 실험적 연구

양 보 석* · 유 영 훈**
(1989년 1월 7일 접수)

Experimental Investigation on Self-Excited Vibration of a Rotor Filled with Two Kinds of Liquids

Bo Suk Yang and Young Hun Yu

Key Words : Vibration of Rotating Body(회전체의 진동), Self-excited Vibration(자려진동), Flow-induced Vibration(유동관련진동), Rotating Fluid(회전유체)

Abstract

The motions of a spinning rotor and a fluid enclosed in its cavity are known to have mutual interactions, which change the frequencies of forced vibrations and cause instabilities. These phenomena are of technical importance for fluid-cooled turbines as well as spin-stabilized satellites or rockets containing liquid fuels. In this paper the characteristics of unstable whirling of a rotor containing a partitioned cavity filled with two kinds of liquids are investigated experimentally. It studies the influence of rotational speed and filling ratio of two kinds of liquids on unstable whirling. As a result, it is found that the whirl velocity is approximately equal to, or slightly lower for large masses of trapped fluid than rotor critical speed. In case of a spinning rotor partially filled with two kinds of liquids the boundary surface plays a similar role to the free surface, and causes unstable forward whirl.

1. 서 론

비압축성 액체가 부분적으로 채워진 원통형 회전체 내에서는 어느 회전수 영역에서 회전체와 액체의 상호작용에 의해 자려진 비동기휘돌림이 발생한다. 이러한 현상은 원심분리기, 액체냉각터빈, 초전도발전기, 액체연료를 적재하고 있는 인공위성이나, 로켓 등에서 발생하고 있으며, 이들 현상을 명확히 규명하는 일은 공업적으로 중요한 일이다.

이 문제에 관한 연구는 1960년대 이후부터 각종

기계의 고속, 고출력화와 함께 급속히 발전되어 왔다. 특히 가스터빈축을 냉각시키기 위한 연구가 Schmidt⁽¹⁾와 Kollmann⁽²⁾에 의해 연구되었으며, 이들은 해석적인 모델로써 탄성축에 설치된 액체용기(chamber)를 갖는 무거운 원통을 집중요소로 하여 사용했다. Kollmann은 액체량에 의한 고유진동수(수정임계속도)의 변화를 측정하는 실험을 통해 수정임계속도 이상의 영역에서 넓은 범위의 불안정한 휘돌림현상을 발견하였다.

이들 연구는 액체를 비점성으로 간주한 것과 점성을 고려한 것으로 나누어진다. 전자로 Wolf⁽³⁾, Kuiper⁽⁴⁾, Lichtenberg⁽⁵⁾ 등은 액체를 비점성으로 가정하여 해석하였으며, 특히 Wolf는 비점성액체

* 정회원, 부산수산대학 박용기계공학과

** 정회원, 부산수산대학 대학원

를 내장하고 외부감쇠가 없는 계에 대하여 일정 진폭의 휘돌림진동을 가정하여 계의 고유진동수를 구하고, 실근이 존재하지 않는 범위로서 불안정영역을 구하고 있다. 후자로는 Erich⁽⁶⁾, Hendrich-Morton⁽⁷⁾, Saito⁽⁸⁾, Kaneko⁽⁹⁾, Ota⁽¹⁰⁾ 등이 액체의 점성과 외부감쇠를 고려한 계에 대하여 연구하였고, 자러진동과 점성의 관계를 조사하여 액체의 점성이 불안정진동의 발생원인이 아니고 불안정진동의 성장을 억제하는 역할을 함을 입증하였다. 이들 연구는 대부분이 회전체의 길이가 직경에 비해 매우 작은 경우, 단일액체로 한정되어 있다. 중공 회전체 내에 비중이 다른 2종류의 액체가 동시에 내장되어 경계층을 이루고 있는 경우의 회전체의 자러진동특성에 관해서는 본 연구와 동일한 시기에 Jinnouchi⁽¹¹⁾ 등에 의해 액체의 점성과 계의 외부감쇠를 무시한 경우에 대해 이론 및 실험적으로 연구되었으나 아직 불명확한 점이 많고 체계적인 불안정진동특성에 대해 실험적으로 연구되어 있지 않다. 그러나 부분적으로 액체를 내장하는 대부분의 회전체는 원통직경에 비해 길이가 매우 길다. 원심분리기 등의 경우는 비중이 다른 2종류 이상의 액체가 내장되며, 고속화의 경향에 따라 통상 계의 1차 고유진동수 이상의 높은 운전속도를 갖게 되고, 최근 불안정진동이 발생하고 있으므로 이들에 대한 자러진동특성을 규명하는 것이 시급히 요청되고 있다.

따라서 본 논문에서는 상기와 같은 문제들을 규명하기 위하여 비교적 긴 원통에 액체를 내장할 수 있도록 회전체를 제작하여 액체의 종류, 점도, 액체의 양 등을 파라미터로 하여 불안정영역의 범위와 진동진폭에 관해서 실험적으로 조사하였고, 비중이 다른 2액체를 동시에 내장한 경우 액체의 자유표면과 경계면에 의한 진동특성을 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내고 있다. 본 실험장치는 전동기분리형으로, 0~35rps의 운전범위를 갖는 변속전동기(1HP, AC)에 의해 V벨트로서 동력을 전달하여 회전체를 구동하며, 회전체축과 전동기축의 폴리의 직경비를 1:2로 하여 회전체의 변속범위를 0~70rps로 하였다.

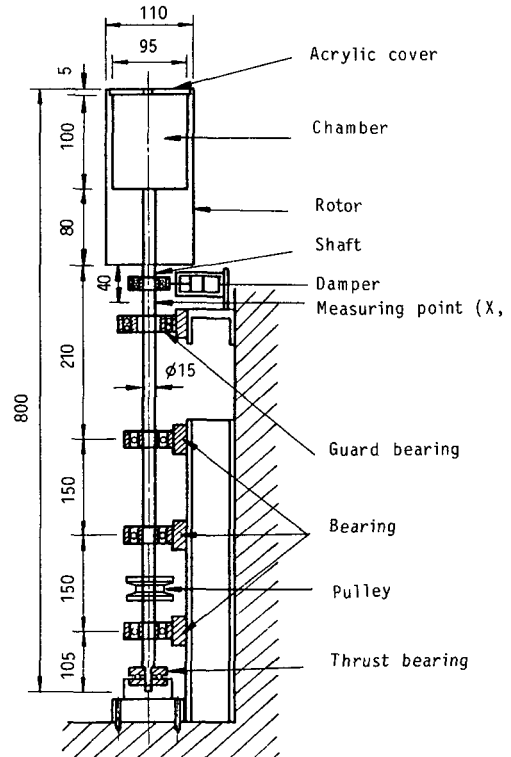


Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

회전체의 총길이는 800mm로 축직경 15mm인 강봉에 알루미늄으로 가공된 중공원통이 부착되어 있다. 회전체는 원통 아래로부터 각각 210, 360, 510 mm 지점에 볼베어링을 사용하여 축을 지지하였고, 축 하단은 회전체의 자중을 반도록 추력베어링을 설치하였다. 회전체의 과도한 진동을 감소시키기 위하여 대수감쇠율이 약 0.4469인 오일댐퍼(oil damper)를 원통아래 25mm 지점에 축과 직각방향으로 2개를 부착하였고, 80mm 지점에 과도한 진동진폭에 대해서 회전체를 보호하기 위해 보호베어링(guard bearing)을 설치하였다. 이때 회전체는 방향차가 없는 연직회전축계로서 x, y 방향의 기본급힘 고유진동수는 17.875Hz이다.

실험장치는 콘크리트 바닥에 고정하였다. 회전체의 회전속도는 광회전계를 이용하여 축단에서 측정하였다. 축의 진동변위는 원통하단의 40mm 지점에서 오일댐퍼의 방향으로 설치된 2개의 와전류형 비접촉식변위계(VK-202A, SHINKAWA)를 이용하였고, 변위계의 출력신호를 2채널 주파수분석기(CF-500, ONO SOKKI)를 이용하여 회전체의 변

위 및 진동파형 그리고 주파수분석을 수행하였다. 또한 오실로스코프를 이용하여 회전체축의 운동에 대한 리사주도형을 관찰하였다. 액체의 파동(wave motion)을 관찰하기 위해 원통의 상부에 아크릴판을 부착하여 원통내부의 액체운동을 조사하였으며, 사진을 촬영하였다.

2.2 실험방법

액체의 종류, 충전비(filling ratio) 및 회전속도 등의 영향을 조사하기 위해 회전속도를 8rps부터 1 rps 간격으로 증가하며, 회전체의 진동을 주파수분석하였다. 그리고 액체로는 물과 디젤엔진유를 각각 사용하여, 충전비를 0.1에서 1.0까지 변화하면서 주파수분석을 수행하였고, 유체에 의한 자려진동의 주파수와 진동특성을 조사하고 불안정영역을 설정하였다.

실험은 먼저 각각의 단일 액체의 진동특성을 관찰하기 위해 물과 디젤엔진유를 별도로 회전체의 원통에 충전시키면서 회전속도의 변화에 따른 진동특성을 평가하였고, 다음으로 2종류의 액체를 동시에 내장시켜 축의 진동특성과 파동을 실험하여 단일 액체의 경우와 비교, 검토하였다. 액체는 원통 상부의 아크릴판 중앙에 설치한 구멍을 통하여 적정량을 공급하였고, 회전속도가 일정하게 되었을

때 축의 진동변위를 검출, 분석하여 기록하였다. Table 1은 액체의 비중과 점성계수를 나타낸다. Fig. 2는 용기내부 액체의 충전비를 나타낸다. 이때 R은 원통용기의 내부반경이며, A, B 및 C는 회전체가 일정속도 이상에서 원통벽에 밀착되었을 때의 액체의 층두께이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일 액체만의 경우

단일 액체에 대한 종래의 결과 및 이들 액체가 동시에 내장된 경우의 실험결과와 비교검토하기 위해 단일 액체만의 경우에 대해 실험을 수행하였다. 또 종래에 불명확하였던 불안정영역과 진폭특성을 체계적으로 검토하였다.

Fig. 3의 (a)는 액체를 내장하지 않은 경우, 주파수분석을 수행한 것으로 회전속도가 17.875rps (1,073rpm)일 때 회전체의 잔류불평형에 의한 진동진폭이 가장 크고, 회전체의 1차 고유진동수가 된다. 축회전속도의 3/8배 성분은 베어링의 정렬(alignment)이 정확하지 않기 때문에 발생하는 성분이라 생각된다.

Fig. 3의 (b) 및 (c)는 각각 물, 디젤엔진유를 충전비 F가 0.5가 되도록 넣었을 때 응답곡선 및 회전속도와 휘둘림진동의 스펙트럼을 이용하여 표시한 것이다. 회전체 내부에 액체를 내장하여 서서히 회전을 증가시키면 액체는 회전체 내벽을 따라 상승하게 되어 회전체와 동심의 원통형상으로 부착하게 된다. 액체의 첨가로 인하여 회전체의 고유진동수는 각각 15.25, 15.625Hz로 변화되었다. 이 변화된 수정고유진동수는 액체의 충전비가 0.1에서 1.0까지 첨가된 액체의 양에 무관하게 일정하였다⁽²⁾. 회전속도를 증가하면 고유진동수에서 진폭이 급격히 상승하며, 동기휘둘림진동(1X)임을 알 수 있다. 그리고 더욱 회전속도를 높이면 액체의 자유표면의 불안정으로 인한 자려진동(1F)이 발생하며, 이 자려진동의 주파수(asynchronous frequency)는 수정고유진동수보다 낮은 주파수에서 발생한다. 회전속도가 증가하면 자려진동주파수는 회전주파수의 약 3/5배로 성장하면서 계의 고유진동수에 접근한다. 고유진동수에 접근한 후에는 회전속도가 증가하여도 자려진동성분은 고유진동수에서 지속하다가 도약(jump up)한다. 이 때의 회전속도는 액체의 종류와 충전비에 따라 다르며, Fig. 3에서 물은 37

Table 1 Properties of liquids(20°C)

Kinds of liquids	Specific gravity	Viscosity (N·s/m ²)
Water	0.999	1.06×10 ⁻³
Diesel engine oil	0.865	8.38×10 ⁻²

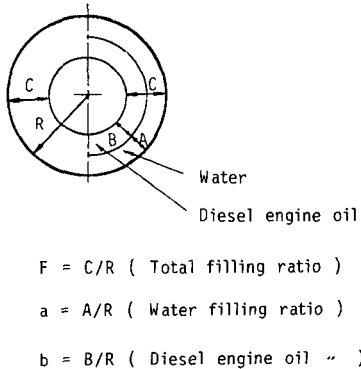


Fig. 2 Filling ratios

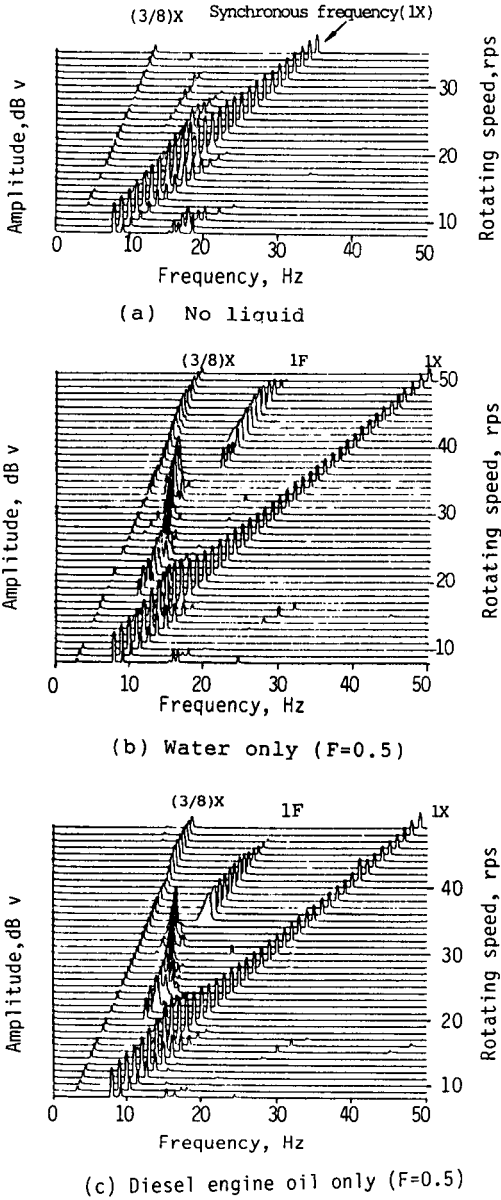


Fig. 3 Three-dimensional spectrum of rotor vibration (x direction)
 1X: Synchronous vibration component due to unbalance
 1F: Asynchronous vibration component due to free surface

rps, 디젤엔진유는 35rps에서 도약한다.

Fig. 4는 물과 디젤엔진유의 경우, 충전비를 0.1에서 1.0까지 변화하였을 때 각각의 충전비에서 발생하는 자러진동의 한계를 3차원으로 도식한 것이

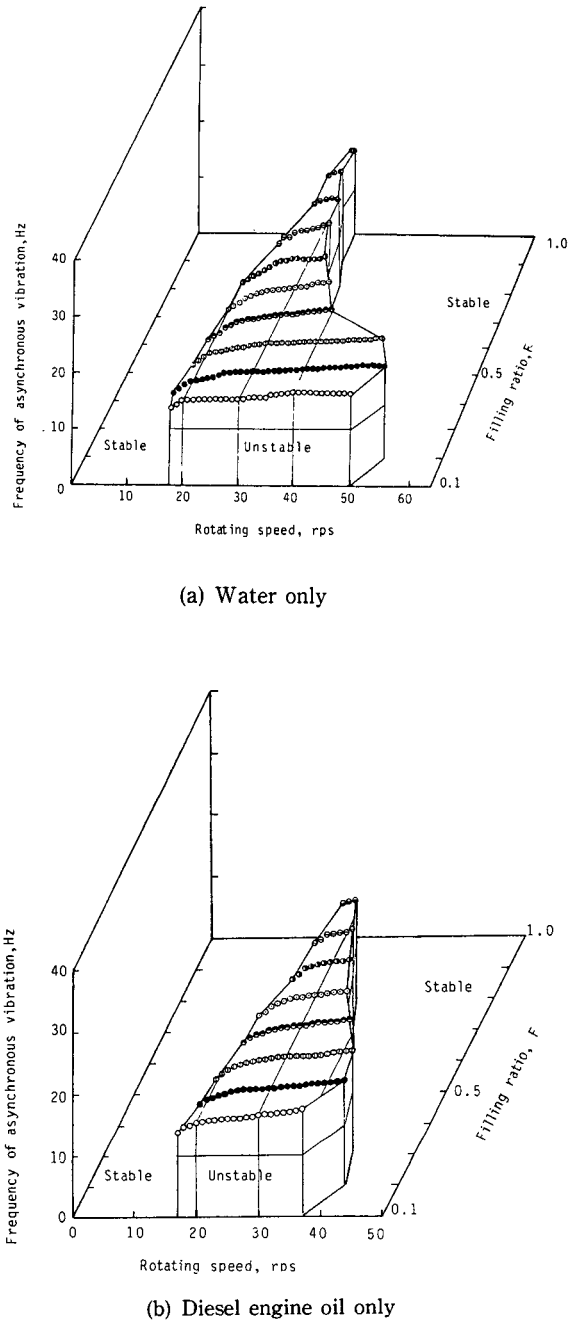


Fig. 4 Three-dimensional instability map of rotor

다. (a)의 경우, 충전비가 0.2일 때 불안정영역의 범위가 가장 크고, 이것을 기준으로 충전비가 증가하거나 감소할수록 불안정한 영역이 점차 좁아지며, 충전비가 1.0인 경우(액체의 자유표면이 없는

경우)에 액체는 단지 부가질량의 역할만을 한다. (b)는 디젤엔진유만의 경우로, 전체적으로 진동의 발생범위가 좁아진다. 이는 액체의 점성에 의해 고체벽 부근에 경계층이 존재하는 것에 의해 벽면에 작용하는 유체력에 축심변위와 위상의 어긋나는 성분이 발생하고, 이것이 음의 감쇠력으로 작용하기 때문으로 생각된다. 그리고 자러진동주파수는 충전비가 적을수록 빠르게 수정고유진동수에 접근하게 되고, 접근후에는 일정한 주파수를 유지하나 충전비가 클수록 이 자러진동수는 낮게 된다.

Fig. 5는 물과 디젤엔진유만의 경우 회전속도에 따른 진동진폭의 크기를 RMS치로 나타낸 것이다.

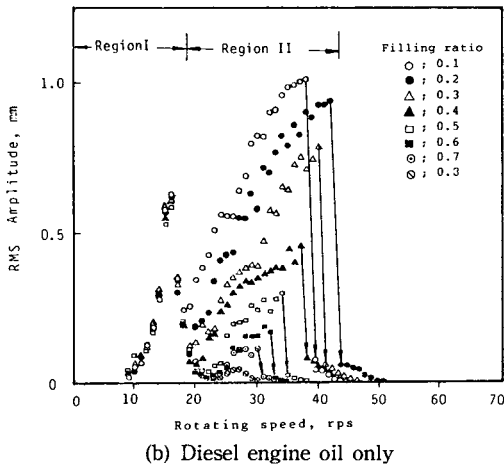
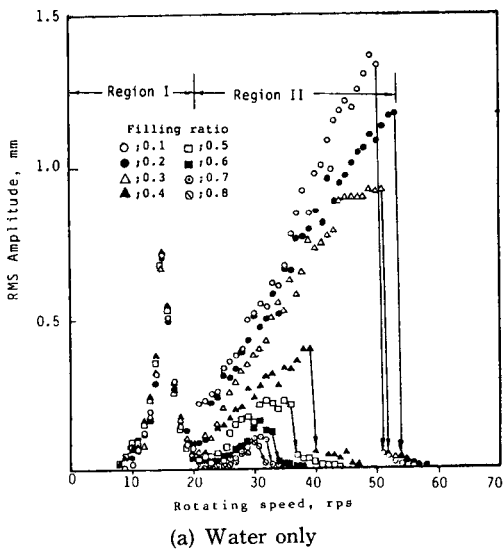


Fig. 5 Growing trend of RMS amplitudes

그림에서 영역 I은 회전체의 불평형이 진폭크기에 주된 영향을 미치는 영역으로서 회전체의 고유진동수에서 액체의 충전비에 무관하게 진동진폭이 증가한다. 영역 II는 액체 자유표면의 불안정에 의해 발생하는 영역으로 액체의 종류와 충전비의 변화 즉, 자유표면의 넓이에 따라서 자러진동에 의한 진동진폭의 크기가 달라진다. 동일한 충전비에서 점성이 작은 물의 경우 진동진폭과 진폭 성장속도가 크고, 점성이 큰 디젤엔진유의 진동진폭과 진폭 성장속도가 작다. 이는 액체의 분포형상의 변화가 점성으로 인해 진폭증대에 대해 시간적으로 늦어지기 때문으로 생각된다⁽¹⁰⁾. 즉 위험속도 이상에서 회전체의 자러속도 (spin velocity)와 휘돌림속도 (whirl velocity)에 차이가 생기고 점성이 크면 액체는 회전체 내벽에 붙어 돌러는 힘이 커짐으로 베어링 중심선을 중심으로 하는 원을 자유표면으로 갖는 분포형상으로부터 벗어나서 균일두께의 분포에 가깝게 되어 자러적인 힘을 일으키기 어렵기 때문이다. 전체적으로 충전비가 작을수록 진동진폭이 크며, 자러진동의 주파수가 도약 (jump up)할 때 액체 자유표면의 불안정에 의한 진동진폭이 급격히 감소 (jump down)하여 안정하게 된다.

3.2 비중이 다른 2종류의 액체가 동시에 내장된 경우

원통내부에 비중이 다른 물과 디젤엔진유가 동시에 내재된 상태에서 회전할 경우 비중이 큰 물은 원통벽에 달라붙고 디젤엔진유는 원통내부로 밀려나게 되어 물과 디젤엔진유 사이에 경계면이 형성된다. 액체에 의한 자러진동이 소멸한 뒤 경계면에 의한 자러진동이 새롭게 발생한다. 경계면에 의한 자러진동의 발생 및 소멸은 경계면을 형성하는 물과 디젤엔진유의 충전비 변화에 따라 다르다. 따라서 본 실험에서는 물과 디젤엔진유의 충전비를 3가지의 경우로 분류하여 검토하였다.

첫째, 물의 충전비가 일정하고, 디젤엔진유의 충전비가 변화하는 경우.

둘째, 전체 충전비를 일정하게 한 상태에서 물의 충전비를 증가하고, 디젤엔진유의 충전비를 감소한 경우.

셋째, 물과 디젤엔진유의 충전비를 동일하게 변화한 경우.

Fig. 6의 (a)~(f)는 물과 디젤엔진유의 충전비를 변화하여 축진동의 주파수분석을 수행한 결과이

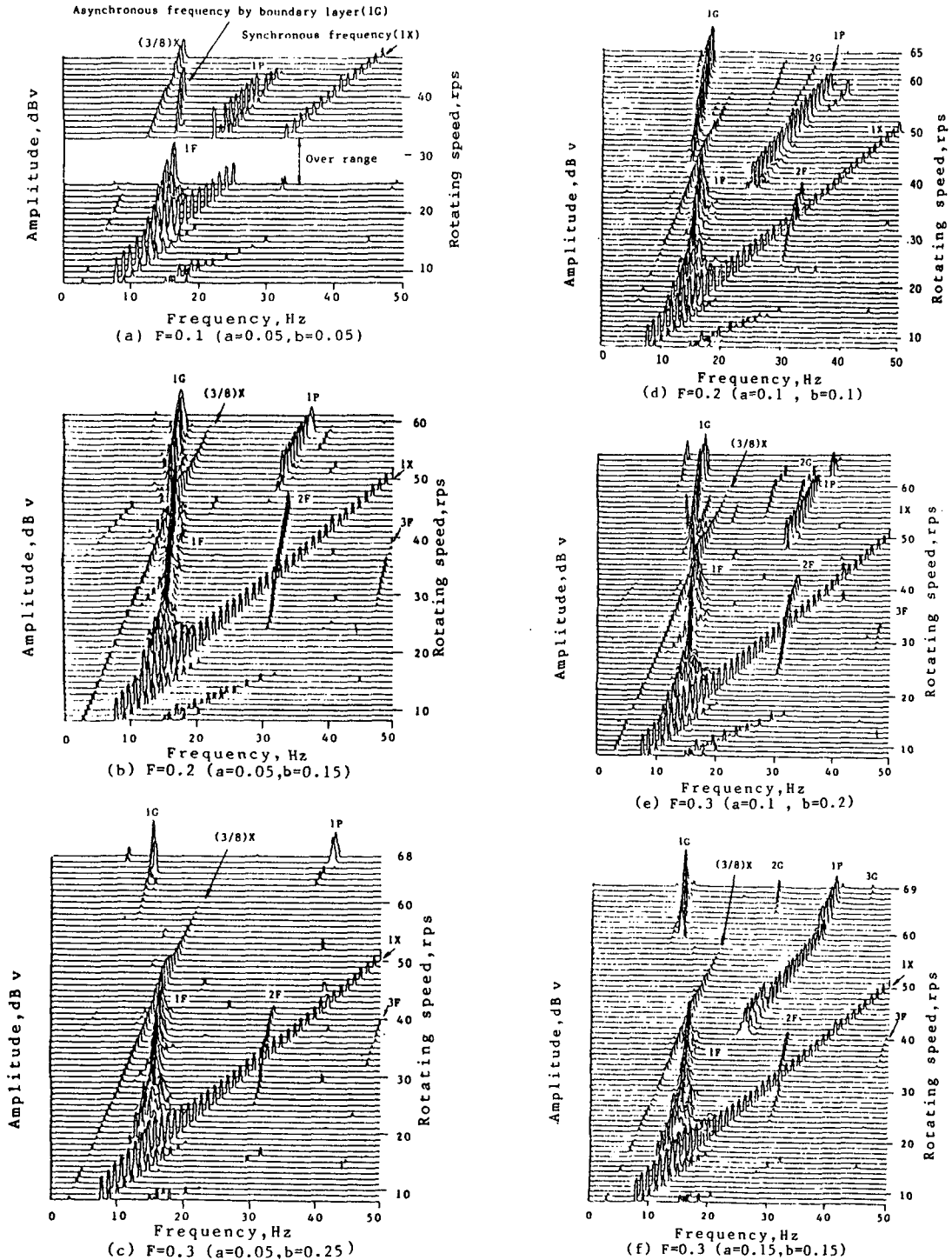


Fig. 6 Three-dimensional spectrum of rotor vibration (water and diesel engine oil)
 1X : Synchronous component due to unbalance, 1F, 2F, 3F : Asynchronous component, its 2nd and 3rd harmonics at free surface, 1G, 2G, 3G : Asynchronous component, its 2nd and 3rd harmonics at boundary surface, 1P : Asynchronous component at free surface due to 1G, 2G and 3G

다. 첫째로, 물의 충전비를 0.05로 고정하고 물을 덮는 디젤엔진유의 충전비를 각각 0.05, 0.15 및 0.25로 변화한 때 즉, 경계면의 면적을 일정하게 하고 자유표면의 면적이 변화할 때의 결과를 Fig. 6의 (a), (b) 및 (c)에 나타낸다. 디젤엔진유의 자유표면의 파동에 의해 발생하는 자러진동성분(1F)의 발생경로와, 도약하여 안정하게 되는 경향은 디젤엔진유의 단일 액체만의 경우와 매우 흡사하다. 그러나 물과 디젤엔진유의 경계면의 파동에 의해 발생하는 새로운 자러진동성분(1G)이 계의 고유진동수에서 발생하며, 물을 덮고 있는 디젤엔진유의 양이 많을수록 자러진동이 발생하는 회전속도는 높아지며, 발생하는 영역도 넓어진다. 즉 Fig. 6의 (a), (b) 및 (c)에서 경계면에 의해 자러진동이 발생하는 회전속도는 각각 34~40rps, 46~59 rps 및 65rps이다. 또한 안정하여진 자유표면은 경계면의 불안정으로 인하여 다시 불안정하게 된다. 이러한 현상은 그림에서 잘 나타나고 있으며 1P로 표시하였다.

Fig. 7(a)는 이들의 진동진폭의 크기를 RMS값으로 나타낸 것이다. 영역 I, II의 구별은 단일 액체만의 경우와 같으며, 영역 II의 초기에 발생하는 휘돌림진동진폭의 주된 영향은 디젤엔진유의 자

유표면의 파동에 의한 것이며, 후기에 발생하는 휘돌림진동은 경계면의 파동에 의한 것이다. 자유표면에 의해 발생하는 진동진폭은 전체 충전비가 작을수록 크게 되고, 진동진폭의 성장속도 또한 빠르

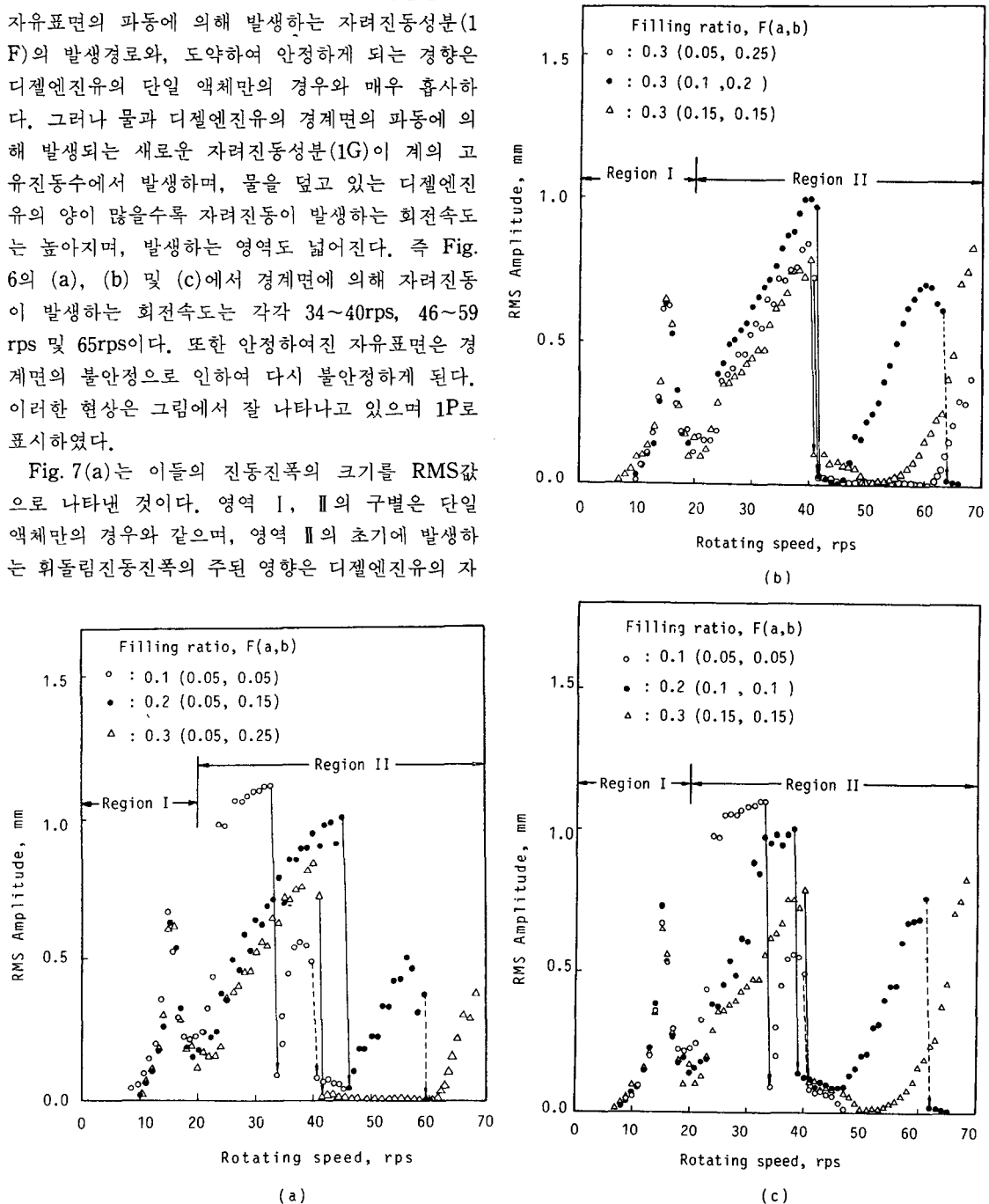


Fig. 7 Growing trend of RMS amplitudes

다. 자유표면에 의한 휘돌림진동이 소멸한 이후 경계면에 의한 불안정진동이 발생하며, 경계면을 덮고 있는 디젤엔진유의 충전비가 작을수록 진폭성장속도가 빠르고 최대진폭 또한 크다.

둘째로, 전체충전비를 0.3으로 고정하고 물과 디젤엔진유의 충전비를 변화한 경우의 주파수분석결과는 Fig. 6의 (c), (e) 및 (f)이다. 이는 자유표면의 면적을 일정하게 하고 경계면의 면적을 변화시킨 경우로써 디젤엔진유의 자유표면에서 발생하는 자려진동성분(1F)은 물과 디젤엔진유의 충전비 변화에 무관하게 거의 동일한 회전속도(41~42rps)에서 도약하여 안정해지며, 경계면에 의한 자려진동성분은 물의 충전비가 0.1일 때 가장 빨리 발생하고, 물을 덮고 있는 디젤엔진유의 양이 가장 많을 때 늦게 나타난다.

Fig. 7(b)는 이 때의 진동진폭을 나타내며, 경계면에 의해 발생하는 최대 휘돌림 진동진폭은 회전속도의 한계로 인하여 정확한 비교는 어렵다. 자유표면에 의해 발생하는 진동진폭의 성장속도와 도약하는 회전속도는 거의 동일한 경향을 보이나 최대진폭은 물과 디젤엔진유의 충전비가 동일한 경우가 가장 적게 나타나고 있다.

셋째로, 물과 디젤엔진유의 충전비를 같은 비율로 하여, 전체 충전비를 0.1, 0.2 및 0.3으로 변화한 경우이다. 주파수분석의 결과는 Fig. 6의 (a), (b) 및 (f)이고, 진동진폭은 Fig. 7(c)에 나타난다. 이때 자유표면에 의해 발생하는 자려진동성분(1F)은 디젤엔진유의 자유표면적이 형성되는 전체 충전비가 증가할수록 오래 지속한다. 이때 최대 진동진폭의 크기는 충전비가 증가할수록 작아지며, 성장속도 또한 낮아진다. 경계면에 의해 발생하는 진동주파수성분은 물과 디젤엔진유의 충전비가 클수록 휘돌림은 높은 회전속도에서 발생하며, 오래 동안 지속한다. 그리고 최대 진동진폭은 점차 커지고, 진폭성장속도는 점차 작아지는 경향을 보인다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 물과 디젤엔진유의 충전비 변화에 따라서 경계면에서 발생하는 자려진동의 한계를 나타낸 것이다. (a)는 물의 충전비를 각각 0.05, 0.1 및 0.15로 고정하고 디젤엔진유의 충전비를 증가한 경우이다. 전체적으로 경계면을 덮고 있는 디젤엔진유의 충전비가 증가할수록 경계면에 의한 자려진동이 발생하는 회전속도가 높아지며, 불안정영역도 넓어진다. 이것은 동일한 물의 표면적을 누르는 디젤엔진유 압력이 크기 때문이며, 이

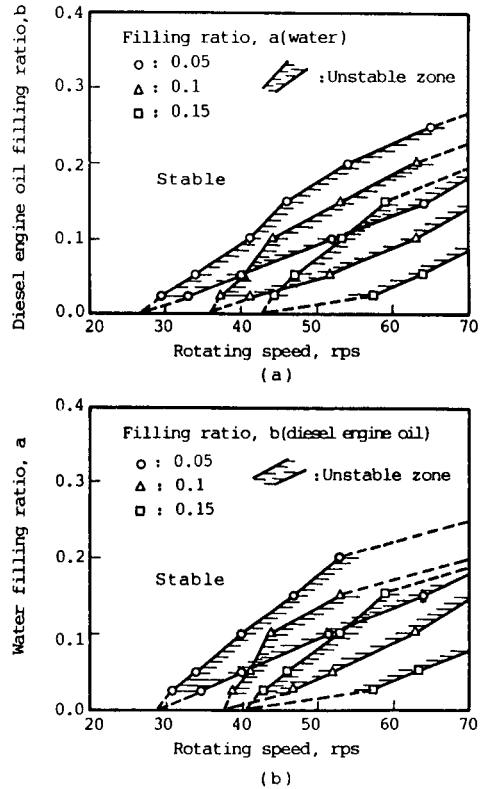
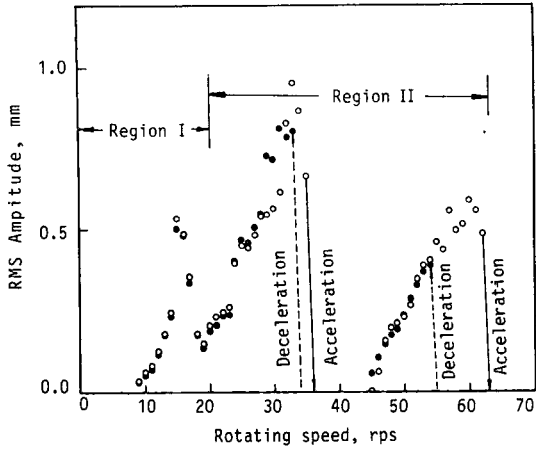


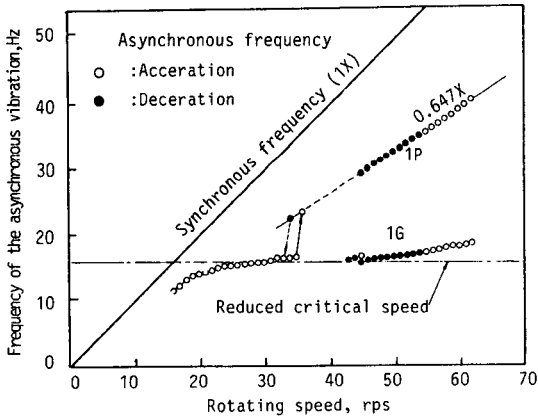
Fig. 8 Comparison of unstable region by boundary surface between water and diesel engine oil

압력은 디젤엔진유의 충전비가 클수록 크게 된다. (b)는 디젤엔진유의 충전비를 각각 0.05, 0.1 및 0.15로 일정하게 하고 물의 충전비를 증가한 경우로써 물의 충전비가 증가할수록 자려진동이 발생하는 회전속도는 높게 된다. 이 경우는 물의 표면, 즉 경계면을 덮고 있는 디젤엔진유의 충전비가 일정한 경우로써 충전비가 0.2일 때 불안정범위가 가장 넓다. 이것은 단일 액체만의 경우 액체의 자유표면에 의한 불안정진동성분의 특성과 동일하다.

Fig. 9는 물과 디젤엔진유의 충전비가 각각 0.15인 경우, 회전속도를 서서히 가속 또는 감속하였을 경우에 발생하는 휘돌림진동의 히스테리시스 현상을 나타낸다. 즉, 회전속도의 가속시 자유표면에 의한 자려진동성분(1F)은 35rps까지 이지만, 감속시는 33rps까지이다. 경계면에 의한 자려진동성분(1G)은 가속시는 47~62rps의 회전속도 범위에서 발생하였으며, 감속시는 47~54rps의 회전속도 범위에서 발생하였다. 따라서 회전속도를 가속할 때 자유표면에서는 2rps, 경계면에서는 8rps의 히



(a) Growing trend of RMS Amplitude



(b) Asynchronous whirl frequencies of rotor vibration

Fig. 9 Hysteresis phenomena of rotor vibration ($F=0.2, a=0.1, b=0.1$)

스테리시스 현상이 발생하였다. 이때의 진동진폭은 전체적으로 감속의 경우가 진동진폭이 작다. 이러한 현상은 축회전속도가 변하여 진동진폭이 변화했을 때 액체의 점성으로 인해 액체의 분포형상이 늦어져 나타나게 된다.

Fig. 10과 11은 물과 디젤엔진유의 충전비가 각각 0.1일 때 주파수분석을 수행하고, 이때의 진동파형과 리사쥬도형을 비교한 것이다.

①, ②는 회전속도가 각각 10, 15rps로서, 진동의 주원인은 회전체의 잔류불평형이다. 특히, 회전속도가 15rps인 ②는 계의 고유진동수 부근으로 파형의 진폭이 크게 나타난다. 리사쥬도형은 반시계

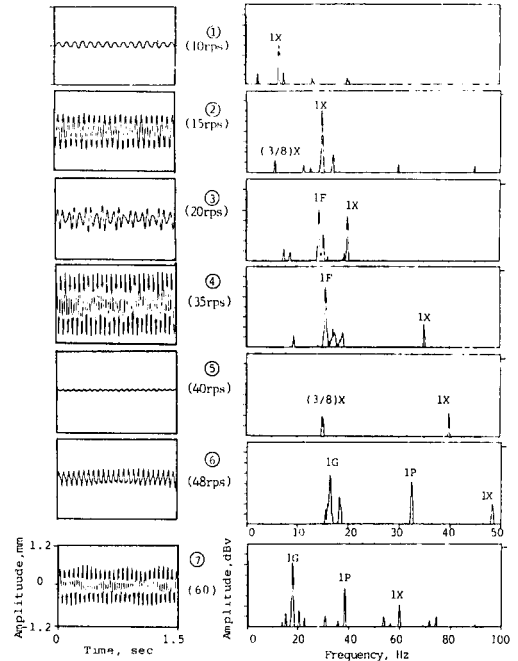


Fig. 10 Timewise traces and frequency spectra of rotor vibration (water & diesel engine oil, $a=0.1, b=0.1$)

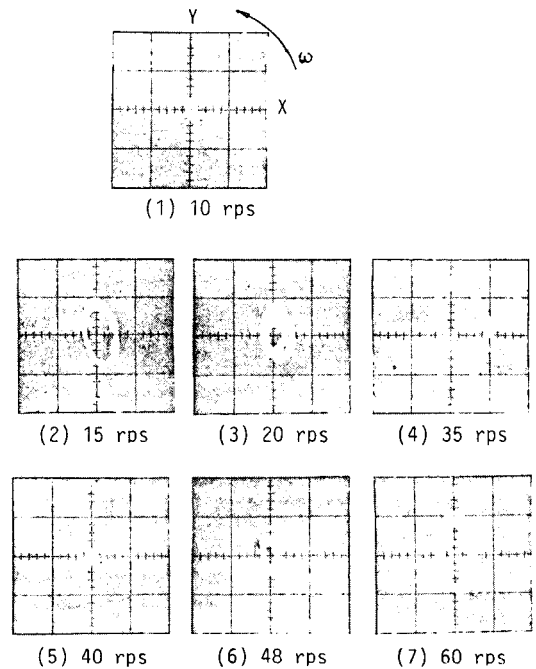
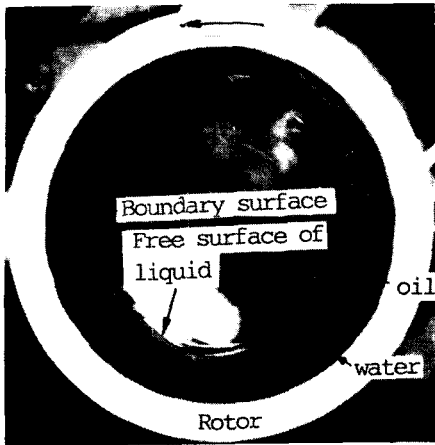
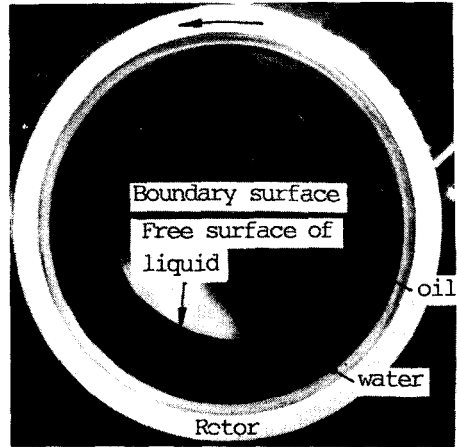


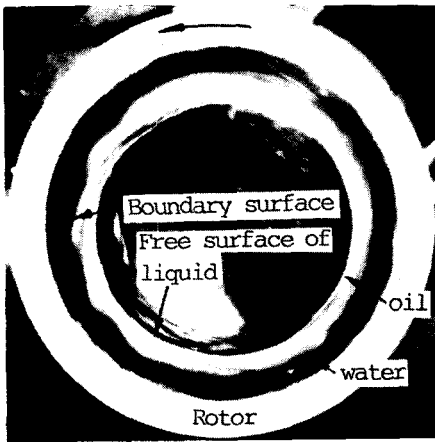
Fig. 11 The trace of whirl vibration (water & diesel engine oil)



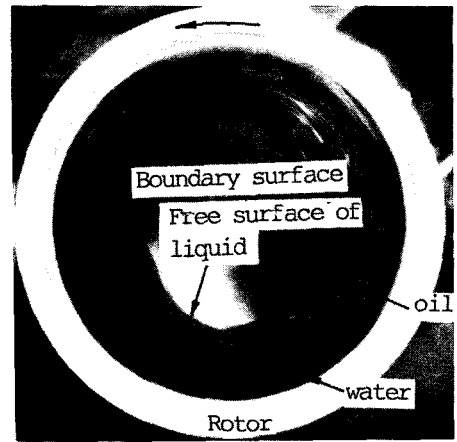
(a) 20 rps



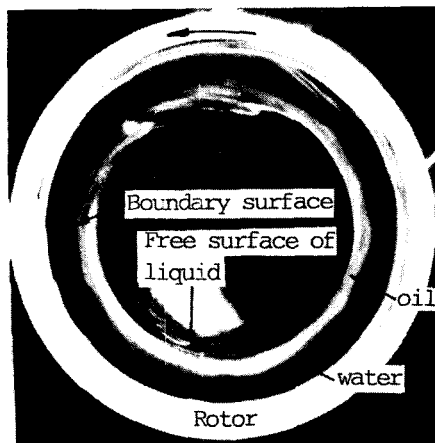
(d) 50 rps



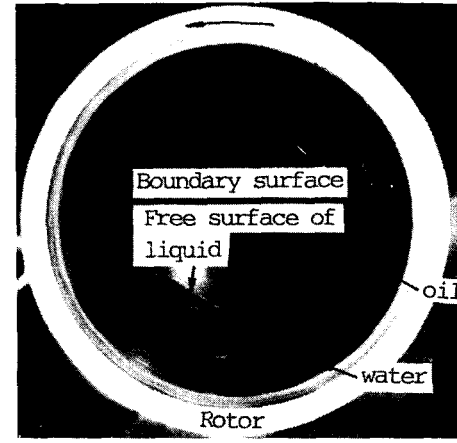
(b) 30 rps



(e) 63 rps



(c) 40 rps



(f) 69 rps

Fig. 12 Liquid wave motion ($F=0.3$, $a=0.15$, $b=0.15$)

방향으로 전진회돌림(forward whirl)을 하였고 휘돌림반경이 성장하였다. ③, ④는 물의 자유표면에 의한 자러진동(1F)이 발생하여, 회전주파수(1X)와의 사이에 파형의 울림현상이 현저하게 발생한다. ⑤는 자유표면에 의한 자러진동성분이 소멸한 후이다. 이때 진동파형은 거의 안정한 상태이다. ⑥, ⑦은 경계면에 의해 발생한 자러진동성분(1G)과 이로 인해 다시 불안정하여진 자유표면의 자러진동성분(1P)이 발생한다. 진동파형은 이들 성분과 회전주파수(1X)와의 울림현상이 나타난다. 회전속도가 60rps인 ⑦에서는 경계면에 의한 진동성분(1G)이 급격히 증가하여 진동파형 및 리사주도형의 휘돌림진폭이 커진다.

Fig. 12는 물과 디젤엔진유의 충전비가 각각 0.15일 때, 회전속도에 따라 용기내의 액체의 자유표면과 경계면에서의 파동을 용기의 위쪽에서 사진을 찍은 것이다. 위험속도 이상의 회전속도 즉 20 rps에서는 디젤엔진유의 자유표면에서만 파동(wave motion)이 발생하고, 경계면은 안정하였다. 이때의 자유표면파의 주파수는 회전체의 회전속도에서 회전체의 휘돌림속도를 뺀 약 7~8Hz이다. 30rps의 경우에는 자유표면보다 주로 경계면에서 압력파의 발생이 뚜렷하고 자유표면의 일부에서 흐트러짐이 발생하였으며, 압력파의 주파수는 약 14Hz이다. 40rps에서는 축진동진폭이 과대하여 격심한 자러진동이 발생하고 자유표면에서 파도가 붕괴되는 격심한 파동이 발생하였다. 회전속도가 증가하여 50rps의 경우에는 자유표면 및 경계면에서의 파동이 소멸되어 안정한 상태로 된다. 60rps 이상의 회전속도에서는 경계면에 의한 불안정한 파동이 크게 발생하였다. 경계면의 불안정으로 인해 자유표면을 형성하는 디젤엔진유의 파동 또한 그 흐트러짐이 발생하여 불안정하게 되며, 전체적으로 자유표면에서 8Hz, 경계면에서는 14Hz의 파동이 발생하였다. 이러한 현상을 통하여 회전축의 자러진동을 일으키는 유체력은 액체의 원심파로서 축회전속도보다 느리게 회전하는 후진파가 원인임을 알 수 있다. 또한 종래의 축진동에 의한 단일 액체의 미소한 파동을 논하는 선형근사이론은 본 실험에서와 같이 격심한 자러진동에 의해 비교적 큰 파동이 발생하는 경우와 2액체가 내장된 경우 자유표면과 경계면에서 동시에 파동이 발생하여 상호영향을 미치는 경우에는 적용될 수 없으며 새로운 이론의 확립이 요구된다.

4. 결 론

액체의 자유표면과 경계면을 갖는 회전체에 있어서 내장된 부분유체에 의해 발생하는 자러진동특성을 실험적으로 조사하였고 얻어진 중요한 결론은 다음과 같다.

(1) 비중이 다른 두 액체를 내장한 회전체의 경우, 두 액체 사이의 경계면은 자유표면과 유사한 역할을 하며 상호작용에 의해 복잡한 압력파동을 일으켜 자러진동을 발생시킨다.

(2) 물과 디젤엔진유를 내장한 회전체에서 물의 충전비가 일정한 경우 물을 덮고 있는 디젤엔진유량이 많을수록 경계면에 의한 자러진동의 주파수는 높아지고, 영역은 넓어진다.

(3) 물과 디젤엔진유를 내장한 회전체에서 물을 덮고 있는 디젤엔진유의 양이 일정한 경우, 경계면에 의한 불안정영역은 단일 액체의 자유표면에서 발생하는 불안정영역과 동일한 경향을 보인다.

(4) 원통내의 액체가 가득찼을 경우 자러진동은 발생하지 않고, 단지 부과된 질량으로써 역할을 한다.

(5) 원통내의 액체의 자유표면이 넓을수록 진동진폭의 성장속도가 빠르며 최대진폭도 커진다.

참 고 문 헌

- (1) Schmidt, E., 1958, "Das Gleichgewicht eines Wasserringes mit freier Oberfläche in einem Rotierenden Hohlkörper", *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik*, Vol. 9b, pp. 622~627.
- (2) Kollmann, F.G., 1962, "Experimentelle und Theoretische Untersuchungen über die Kritischen Drehzahlen flüssigkeitsgefüllter Hohlkörper", *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, Ausgabe B, Vol. 28, pp. 147~153.
- (3) Wolf, J.A. Jr., 1968, "Whirl Dynamics of a Rotor Partially Filled with Liquid", *Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, Series E, pp. 676~682.
- (4) Kuiper, M., 1964, "On the Stability of a Flexibly Mounted Rotating Cylinder Partially Filled with Liquid", *Applied Scientific Research, Section A*, Vol. 13, pp. 121~137.
- (5) Lichtenberg, G., 1982, "Vibration of an Elastically Mounted Spinning Rotor Partially Filled with Liquid", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 104,

- pp. 389~396.
- (6) Érich, F.F., 1967, "The Influence of Trapped Fluids on High-Speed Rotor Vibration", Trans. ASME, Journal for Industry. Vol. 89, Series B, pp. 808~812.
 - (7) Handricks, S. L. and Morton, J.B., 1979, "Stability of a Rotor Partially Filled with a Viscous Incompressible Fluid", Journal of Applied Mechanics 46, pp. 913~918.
 - (8) Saito, S. and Someya, T., 1979, "Self-Excited Vibration of a Rotating Hollow Shaft Partially Filled with Liquid", ASME, paper 79-DET-62.
 - (9) Kaneko, S. and Hayama, S., 1983, "On Free Oscillations of Liquid Partially Filling a Rotating Cylinder", Trans. JSME, Vol. 49, No. 439, pp. 370~391.
 - (10) Ota, H. et al., 1986, "Experiments on the Vibration of a Hollow Shaft Partially Filled with Liquid", Trans. JSME, Vol. 52, No. 474, pp. 474~482.
 - (11) Jinnouchi, Y. et al., 1988, "Dynamic Instability of a High-Speed Hollow Cylindrical Rotor Partially and Filled with Two Kinds of Liquids (Inviscid and No External Damping)", JSME, Paper No. 88-0276.