

볼을 이용한 자동평형장치의 실험적 연구

⁰김유신*, 양보석**, 전상범*, 이장우***, 김성진***

(Experimental study of Auto Balancer Using Steel Ball)

(You-Shin Kim, Bo-Suk Yang, Sang-Bum Jeon, Jang-Woo Lee, Sung-Jin Kim)

1. 서론

오늘날 산업현장에서 사용되는 대부분의 기계와 가전 제품에는 회전기계가 중요한 역할을 담당하고 있고, 이러한 회전 요소에서 종종 진동이 발생하여 문제가 되고 있다. 이러한 진동이 발생시키는 원인 중에서도 회전체의 불평형(unbalance)이 대부분이다.

이러한 불평형 중에도 매 운전 사이클마다 불평형의 크기가 위치가 바뀌는 경우에는 평형잡이 기계로는 불평형을 수정할 수 없다. 이를 자동적으로 수정하는 장치로서 Thearle^{(1),(2)}가 볼(steel ball)을 이용한 자동평형장치를 제안하였고, 井上⁽³⁾⁻⁽⁵⁾는 2개의 볼을 내장한 1개 또는 2개의 원판을 설치하여 계의 기본적인 진동특성을 조사하였다. 그리고 불과 저점성유체를 내장한 단일원판의 자러진동에 대한 안정성을 조사한 연구결과⁽⁶⁾도 있다.

본 연구에서는 위의 이론들을 기초로하여 (i) 2개의 원판을 모델한 기본적인 진동거동, (ii) 자동평형장치로서 이용가능한 운전영역과 자러진동의 발생 영역 및 조건, (iii) 계의 파라미터, 즉 각속도, 원판내의 유체의 점성계수 및 볼의 갯수의 변화에 대한 자동평형장치의 성능 등을 실험적으로 조사하였다.

2. 자동평형장치의 메카니즘

Fig. 1에서 볼을 이용한 자동평형장치의 원리를

* 부산수산대학교 대학원
 ** 부산수산대학교 공대 기계공학과
 *** LG전자(주) 생활시스템 연구소

역학적으로 설명한다. O_0 및 O 를 각각 정지시 및 변위시의 rotor의 中心, G 를 rotor의 重心으로 하면, 축의 회전각속도 ω 가 축계의 고유진동수 ω_n 보다 낮은 경우는 O_0, O, G 는 Fig. 1(a)에서 표시한 것과 같이 순서대로 일직선으로 되며, 축은 ω 로 휘돌기 때문에 볼에서는 원심력 F 가 작용한다. F 의 반경방향과 접선방향의 분력을 N 과 T 라고 하면, N 은 볼에 작용하는 원판의 항력과 평형을 이루어 상쇄되지만, T 의 작용에 의해 볼은 rotor의 중심축으로 이동하여 불평형을 증대시키고, 동시에 심한 진동이 발생한다.

그러나 ω 가 ω_n 을 초과하면, Fig. 1(b)와 같이 O_0, G, O 의 순서가 되기 때문에, 볼은 T 에 의해 반경방향으로 이동하여 축계의 불평형을 없애고,

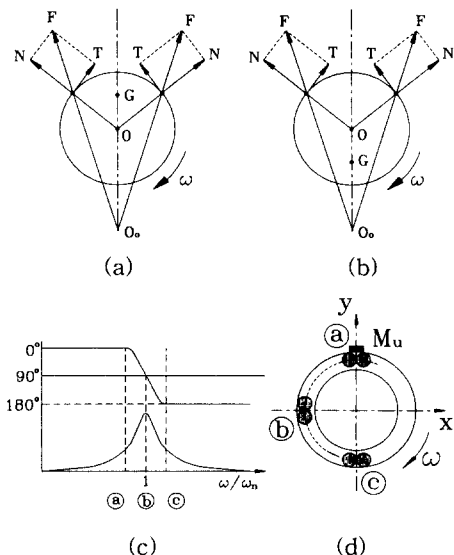


Fig. 1 Mechanism of auto balancer

따라서 계가 평형을 이루게 되며, O점은 O₀점과 일치하게 되고 접선력은 0이 된다. 이것이 Thearle⁽¹⁾에 의해 발명된 자동평형장치이다. 그리고 Fig. 1(c), (d)는 위험속도 전후에서의 볼의 거동(①→②→③)을 나타낸 것이다.

3. 실험

3.1 실험장치

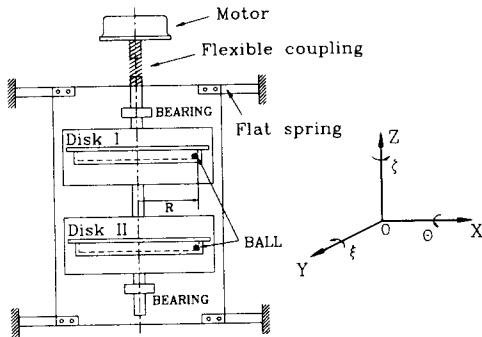


Fig. 2 Schematic diagram of experiment apparatus

Table 1 Natural frequency and logarithmic decrement

Natural Frequency	System	1st (ω_Y)	2nd (ω_θ)	3rd (ω_Z)
		1110 rpm (18.5Hz)	1695 rpm (28.25Hz)	2775 rpm (46.25Hz)
Rotor	1st	3400 rpm	8100 rpm	
	2nd			
Motor support		1st (1815 rpm)		
Logarithmic decrement		0.027		

계의 운동은 y축 병진운동과 θ 축 회전운동만을 고려한 실험장치를 Fig. 2에 나타내었다. 원판의 전동면(轉動面)은 아크릴 수지로 만든 얇은 원통이고, 회전축은 4개의 판스프링(leaf spring)으로 지지된다. 저압용 고무 호스를 끼워서 0.75kW(1HP)의 3상 유도전동기에 의해서 계를 구동시킨다. 계의 회전중심으로 부터 전동면까지의 거리(R)는 90

mm이다. 계의 총질량(M)은 21.91kg, 중심 회전 관성모멘트(I_θ)는 0.5023kg·m²이다.

Table 1은 전체 시스템의 고유진동수와 대수감쇠율 그리고 motor 지지대의 고유진동수를 나타내고 있다.

3.2 측정장치

본 실험에 사용한 측정장치의 개략도를 Fig. 3에 나타낸다. 센서(sensor)지지대에 부착된 와전류형 비접촉식 변위센서(proximeter)의 출력신호를 Data Acquisition Instrument(Bently Nevada)를 이용하여 회전체의 진동변위를, 그리고 keyphasor를 이용하여 축의 회전속도를 측정하였다. 진폭의 측정은 sensor를 상하 판스프링에 설치(2.5cm)하여 병진모드와 회전모드의 성분을 각각 분리해서 측정했다. 구의 움직임은 스트로보스코프(stroboscope)를 사용하여 관찰하였다.

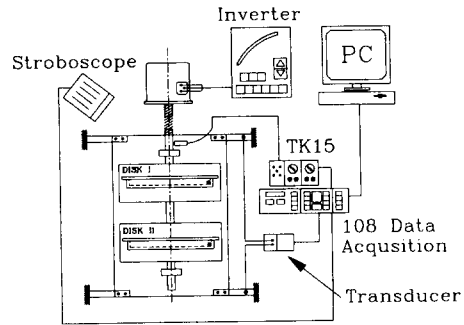


Fig. 3 Schematic diagram of measuring apparatus

3.3 실험방법

본 실험에서는 Table 2와 같이 원판 I(上), II(下)에 동시에 볼을 넣고 불평형질량은 동위상과 역위상으로 부착시켜서 실험하였다. 진동진폭은 정상상태(2090rpm)에서 측정하였고, 아래의 항목을 조사하였다.

- (1) 볼 갯수(1~7개)와 각가속도(3.01, 5.79, 11.42, 22.16 rad/s²)를 변화시켜서 볼의 거동과 자려진동영역을 조사.
- (2) 원판 내의 유체 점도 변화에 따른 자려진동의 발생영역과 볼 갯수 변화에 따른 자동평형장치의 성능을 조사.

- (3) 실험 (2)에서 구한 동·역위상에서의 최적 점성유체를 고려한 각가속도 및 볼 갯수 변화에 따른 자동평형장치의 성능을 조사하였다.
- (4) 실험 (2)와 (3)에서 구한 최적점도의 유체와 볼의 갯수 및 각가속도로써 질량비($M_u / (n \cdot M_b)$)의 변화에 따른 자동평형장치의 성능을 조사하였다.

Table 2 Ball and unbalance masses

No. of Ball n	Mass M_b (g)	Diameter D_b (mm)	Unbalance of Ball, U_b (gmm)	Unbalance U_u (gmm)
1	10.04	13.45	836.08	$M_u \times 95\text{mm}$ = 953.8 (g·mm)
2	5.6	11.1	943.8	
3	3.52	9.5	896.52	
4	2.72	8.7	925.87	
5	2.04	7.85	870.7	
7	1.50	7.1	865.53	

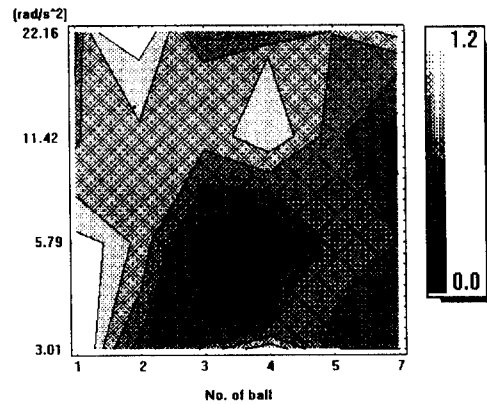
$U_b = \sum F_{b,r}$

3.4 실험결과

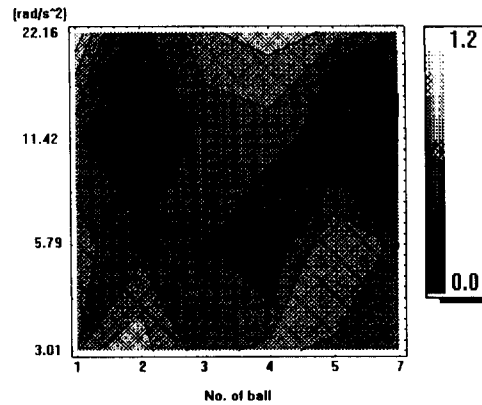
3.4.1 실험 (1)

Fig. 4는 불평형질량 10.04g을 원판 I(225°), 원판 II(45°)에 부착하여 볼의 갯수와 각가속도 변화에 대한 진동진폭을 나타내었다. 볼 갯수 변화에 대한 진동진폭값은 대략 4~7개에서 낮았고, scatter도 적었다. 그리고 각가속도 변화는 대략 5.79와 11.42 rad/s²에서 scatter가 적었고, 또한 진동진폭값이 초기 진폭(불평형질량만 고려한 경우)보다는 작았다. 하지만 Fig. 5에서 보듯이 1차 위험속도 통과 후 부터 거의 2차 위험속도까지(심하면 정상운전 상태까지) 과도한 자려진동이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(a)는 Start-up시의 자려진동이 발생하는 것을 Direct(점선)와 1×진폭(실선)으로 나타내었다. Fig. 5(b)는 이때의 Cascade선도를 나타낸다.

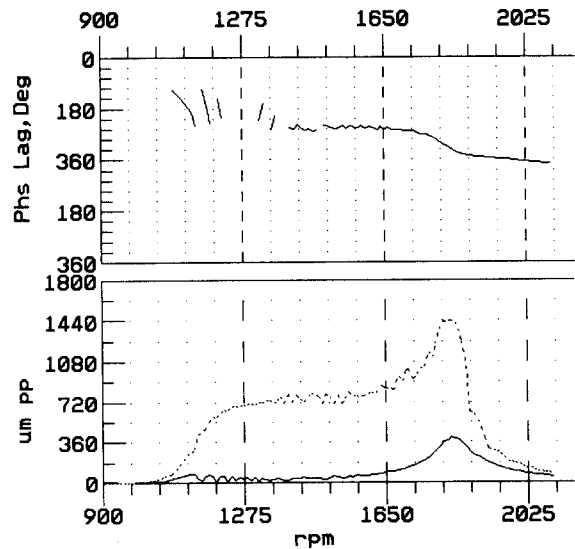


(a) Disk I(upper)

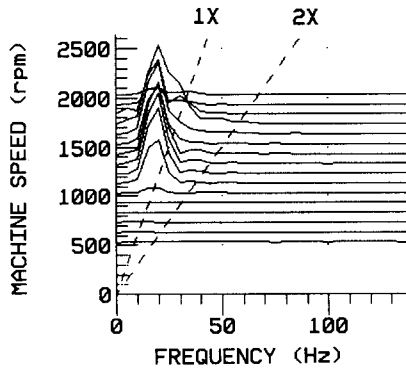


(b) Disk II(bottom)

Fig. 4 Effect of number of steel ball and angular acceleration



(a) Bode plot



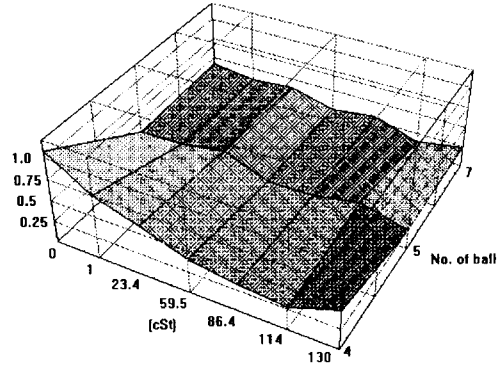
(b) Cascade plot

Fig. 5 Diagram for self-excited vibration

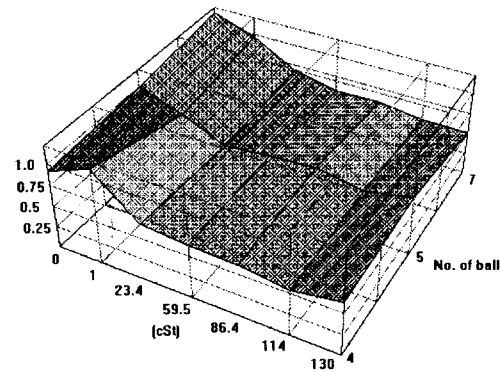
3.4.2 실험 (2)

실험 (1)에서의 자려진동의 발생을 억제하기 위해 불평형질량을 동위상(원판 I (45°), 원판 II (45°)) 및 역위상(원판 I (315°), 원판 II (135°))으로 설치한 경우에 대하여 볼의 갯수와 유체 점도의 변화에 대해 실험을 수행하였다. 이때 사용한 점도는 1, 23.4, 59.5, 86.4, 114, 130, 135.5 및 163cSt이다. Fig. 6에 나타내듯이 역위상인 경우에는 볼 갯수가 7개, 점도가 110~120cSt일 때가 가장 진동 진폭이 낮은 것을 알 수 있다. 그러나 그 이상의 점도에서는 볼의 거동을 방해하는 힘이 증대하기 때문에 수정능력을 오히려 악화시켰다. 그리고 동위상인 경우에는 약 160~170cSt에서 좋은 결과값을 보였다.

이때 자려진동의 발생영역은 점도의 증가에 따라 감소하여 동위상과 역위상 모두 점도가 110~120cSt일 때부터 자려진동이 사라졌다. 이에 대한 그림은 Fig. 7(a), Fig. 8(a)에 나타내었다. 볼 갯수가 7개일 때에 불평형이 동위상인 경우, 점도 160~170cSt에서 평균치가 원판 I, II 모두 약 50% 정도 진동진폭이 감소하였다. 불평형이 역위상인 경우, 점도 110~120cSt에서 원판 I이 평균 약 80%, 원판 II가 약 45% 정도 진동진폭이 감소하였다. 점도변화에 대한 진동진폭의 감소는 Fig. 7(b)과 Fig. 8(b)에 나타내었다.

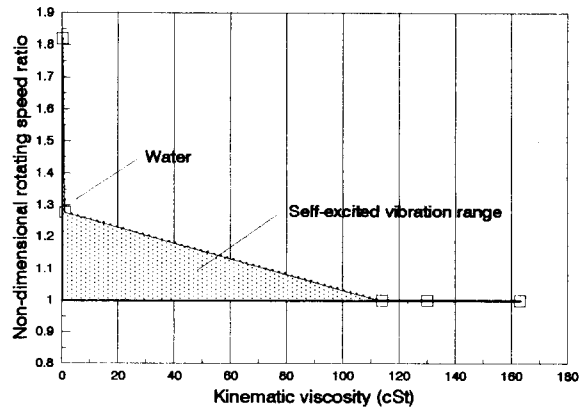


(a) Disk I(upper)

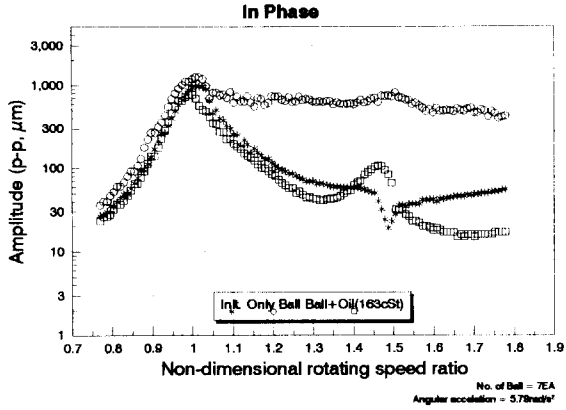


(b) Disk II(bottom)

Fig. 6 Effect of number of steel ball and fluid viscosity for out of phase

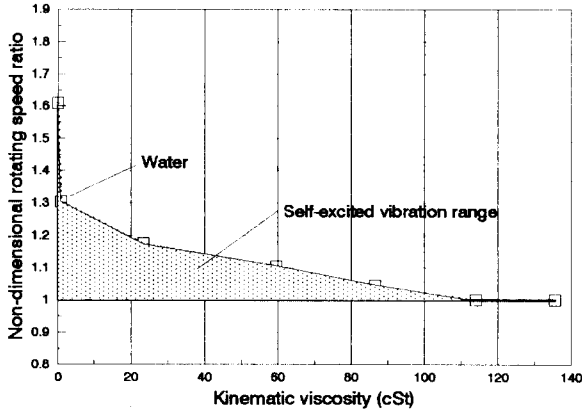


(a) Self-excited vibration range

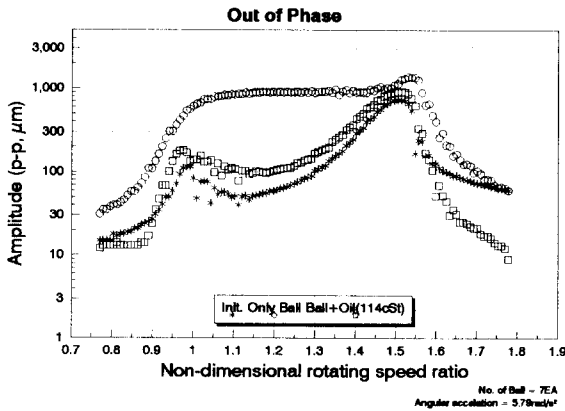


(b) Response curve

Fig. 7 Self-excited vibration range and vibration amplitude for in phase



(a) Self-excited vibration range

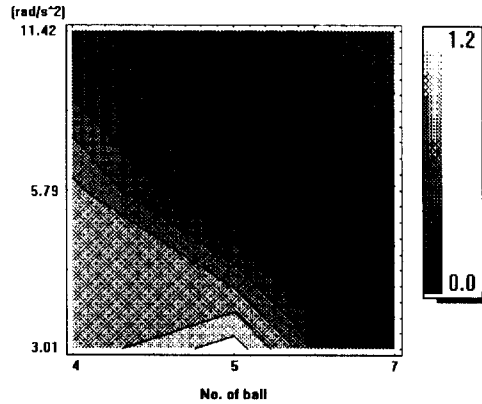


(b) Response curve

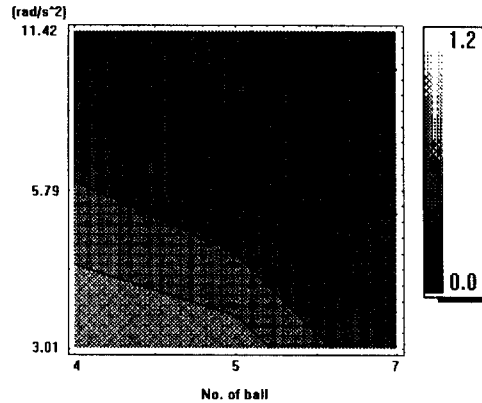
Fig. 8 Self-excited vibration range and vibration amplitude for out of phase

3.4.3 실험 (3)

앞의 실험에서 구한 최적점도에서 볼의 갯수와 각가속도의 변화에 대한 동위상과 역위상에 실험 결과를 각각 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보듯이 동위상 또는 역위상 모두 각가속도는 5.79rad/s^2 , 볼 갯수가 7개일 경우가 가장 scatter가 적었고, 이때 진동진폭은 약 50~70% 감소하였다.

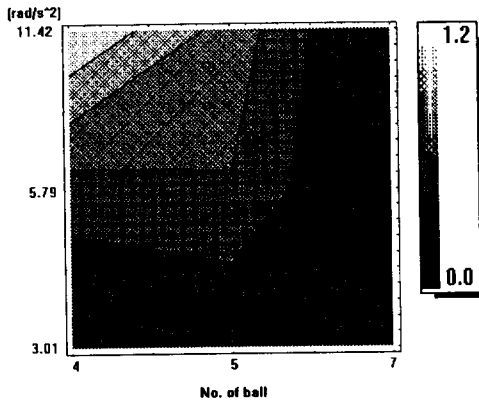


(a) Disk I(upper)

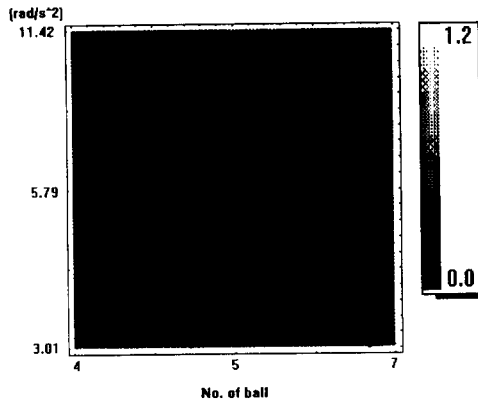


(b) Disk II(bottom)

Fig. 9 Vibration amplitude for variation of angular acceleration and number of steel ball (In phase)



(a) Disk I (upper)

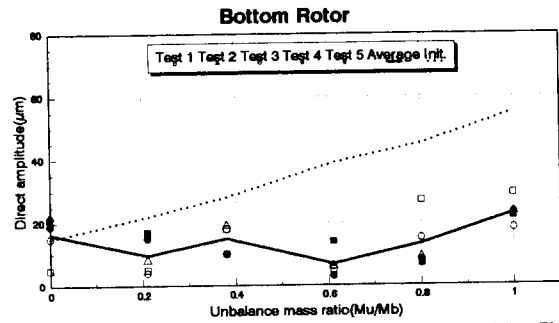
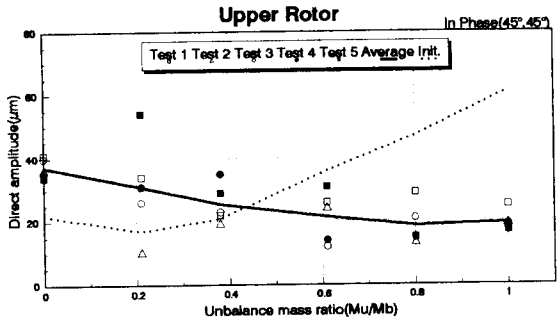


(b) Disk II (bottom)

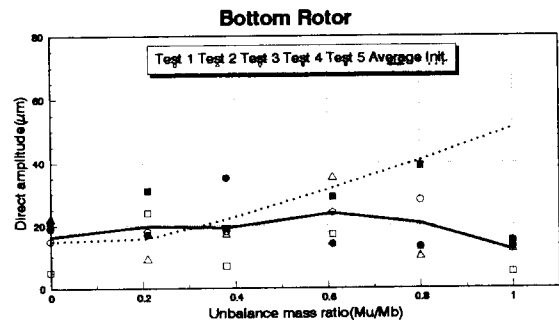
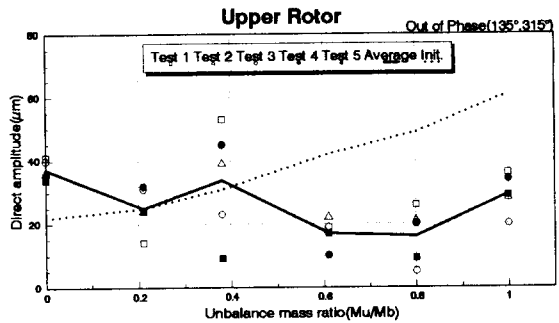
Fig. 10 Vibration amplitude for variation of angular acceleration and number of steel ball (Out of phase)

3.4.4 실험 (4)

실험 (2)와 (3)의 결과를 토대로 볼의 갯수 7개, 각가속도 5.79rad/s^2 , 그리고 유체의 점도는 동위상과 역위상일 경우에 실험 (2)와 같이 하여 질량비 (불평형질량/볼 전체 질량)를 0.0 ~ 1.0로 변화시킨 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 질량비가 0.5 이상에서 불평형질량의 변화에 따른 수정능력이 향상되었다.



(a) In phase



(b) Out of phase

Fig. 11 Vibration amplitude for versus mass ratio

4. 결과

본 연구에서는 볼을 이용한 자동평형장치의 실험을 통하여 기본적인 진동 거동을 조사하였고, 각 파라미터(점도, 각가속도, 볼 갯수)의 변화에 따른 평형잡이 성능을 검토하였다. 본 실험에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 불평형질량을 서로 동위상 또는 역위상으로 부착시 볼에 의한 자러진동은 항상 발생하였고, 불평형의 수정능력도 좋지않았다(Fig. 4). 그러나 원판 내에 점성유체를 완전히 충전시켰을 경우, 자러진동영역은 점도가 증가함에 따라 좁아지며, 수정능력도 약 50% 향상되는 것을 확인하였다(Fig. 7).
- (2) 회전 각가속도의 크기는 수정능력과는 거의 관계없고, 단지 위험속도 통과시 각가속도가 클수록 공진배율이 작아지게 된다.
- (3) 볼 갯수가 7개일 경우, 정상운전(2092rpm)에서 실험편차가 가장 적고, 평형잡이 성능도 양호하다..
- (4) 위의 결과로 부터 자동평형장치의 평형잡이 성능은 최대 불평형질량(μ)에 대한 최적 점도와 볼의 갯수에 의해서 결정되고, 질량비가 0.5 이상에서는 볼에 의한 수정능력이 양호하다 (Fig. 11).

향후 연구과제로는 자동평형장치를 세탁기 등의 실체에 적용시켜서 본 실험의 결과와 비교하고, 위험속도 통과시 볼에 의한 공진배율의 증가를 억제하는 방안 등이 고려된다.

참고문헌

- (1) Thearle, E.L., *Trans. ASME*, 54(1932), APM-54-12.
- (2) Thearle, E.L., *Mech. Des.*, 22(1950), 9.
- (3) 井上·ほか 2名, *日機論*, 33-246(1967), 206
- (4) 井上·ほか 3名, *日機論*, 45-394, C(1976), 646.
- (5) 井上·ほか 2名, *日機論*, 49-448, C(1983), 2142.
- (6) 이종길, "An Investigation of Dynamic Stability of Self-Compensating Dynamic Balancer", 한국 소음진동공학회지, 제4권 제4호, pp.435-442, 1994.