

자기보상형 액체 평형장치에 관한 연구

⁰양 보석*, 이 재무**

(A Study of Self-Compensating Liquid Balancer)

(Bo-Suk Yang, Jae-Moo Lee)

1. 서론

회전체에는 그 정도의 차이는 있으나 다소간의 불평형이 존재하며 이 불평형(unbalance)은 기계의 소음과 진동을 발생시키는 원인이 되고 있다. 특히 고속회전체의 경우 불평형에 의한 소음진동은 기계의 수명, 제품의 품질과 성능을 저하시키며 불시에 발생하는 기계고장의 주요인으로 알려져 있다. 즉 기계진동의 원인은 회전체의 불균일한 질량분포에 있으므로 진동을 최소화하기 위해서는 회전체의 질량을 균일하게 해야 할 필요가 있고 또 발생한 불평형에 대응하는 보정중량을 부착하거나 제거하여 회전체의 불평형을 제거하는 평형잡이(balancing)가 채용되고 있다.¹⁾ 그러나 회전체에서 불평형의 크기와 방향이 매 운전사이클 마다 변화하는 경우에는 이러한 방법이 유효하지 않다. 불평형을 갖는 회전축을 자기보상형으로 평형잡이하는 장치를 처음 고안한 사람은 Thearle로 알려져 있다.²⁾ 그는 동심원 궤도 내를 자유롭게 운동하는 2개의 강구(steel ball)를 이용하여 위험속도 이상에서 위상을 이용하여 불평형과 반대측에 강구를 자동적으로 이동시켜 평형잡이를 하도록 고안하였으나, 소음과 자려진동의 발생 등 많은 문제점이 발생하였다.³⁾ 4)

또 액체를 자동평형에 이용하는 것으로는 액체를 부분적으로 충만한 원통용기를 회전체에 고정하고, 액체의 원심력을 이용하여 자동적으로 불평형을 수정하는 방법 등이 연구되어 왔다.^{5) 6)} 이 방법도 위험속도 이상에서만 유효하고 위험속도 이하에서 휘둘림 진폭을 조장하기 때문에 위험속도 통과에는 좋지 않은 문제점을 야기시키고 있다. 따라서 본 연구

에서는 액체를 이용한 위험속도 이상에서 불평형의 반대측으로 액체를 이동시켜, 이것을 평형질량으로서 이용하여 축의 휘둘림 진폭을 감소시키는 방안으로서 자기보상형 액체평형장치를 제안하고 기지의 정불평형에 대한 이론과 실험을 통하여 그 유용성을 검증하고 결과를 나타낸다.

2. 이론해석

2.1 작동원리

Fig.1은 본 평형장치의 작동원리를 나타낸다. 회전축에 불평형이 없으면 베어링 중심선 O와 축심 S는 일치하여 회전하고, 이때의 액체의 자유표면은 파이프 선단과 일치하며 용기내의 액체 자유표면은 용기와 동심의 ring형상이되고 이때 액체의 자유표면의 반경은 r_1 가 된다.

그림(b)에서 보는것 처럼 불평형이 존재하게 되면 위험속도 이상에서 액체는 역위상관계에 의해 불평형과 반대방향으로 쏠리게 되고 이 쏠린 액체의 원심력에 의해 일정한 회전수에서 밸브가 열리고 액체는 불평형력에 대응하는 만큼 빠져나가게 된다. 다음 외통으로 빠져나간 액체의 원심력과 불평형에 의해 발생하는 원심력이 평형을 이루게 되면 그림(c)와 같은 상태를 유지하게 된다.

2.2 밸런싱전의 휘둘림 진폭(δ_0)

고유 진동수 이상에서는 위상이 역으로 되어 충전된 액체가 불평형력과 반대측으로 액면의 두께가 최대로 되기 때문에 밸브가 작동전의 용기의 상태는 Fig.1 (a)에서 보는 것 처럼 진폭을 δ_0 로 표시하고 힘의 평형으로 부터 운동방정식은

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = (m\omega^2 - m_0r_0\omega^2)e^{i\omega t} \quad (1)$$

* 정회원, 부산수산대학교 기계공학과

** 부산수산대학교 기계공학과 대학원

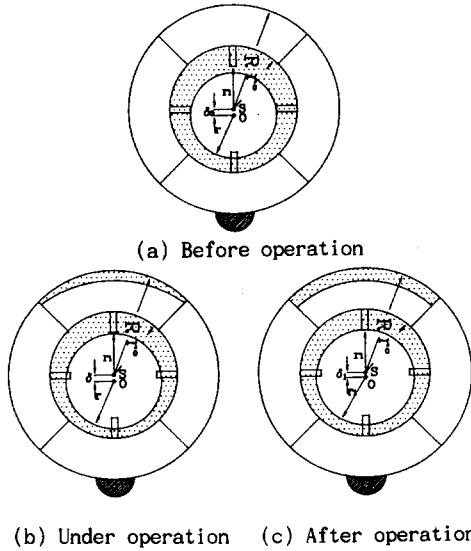


Fig.1 Operating procedure of liquid balancer

이 된다. 식 (1)의 해를

$$x = \delta_0 e^{i\omega t} \quad (2)$$

라 두면

$$\delta_0 = \frac{(m_a \omega^2 - m_b r_0 \omega^2)}{[(K - M \omega^2)^2 + (C \omega)^2]^{1/2}} \quad (3)$$

이 되고, 여기서 $m_b r_0 \omega^2$ 은 액체편량에 의한 원심력이다. 그리고 $\zeta = C / C_c$, $C_c = 2M \omega_n$ 라 정의하면, 식 (3)은

$$\delta_0 = \frac{(m_a - m_b r_0) / M}{[(\tau^2 - 1)^2 + (2\zeta \tau)^2]^{1/2}} \quad (4)$$

단 $\tau = \frac{\omega_n}{\omega}$ 이다.

2.3 밸런싱 후의 휘돌림진폭 (δ_1)

다음에 일정 회전수에서 밸브가 열리게 되고 Fig. 1의 (b)와 같이 밸런서가 작동중의 진폭을 δ , 액면 반경을 r 이라 하면, 밸브를 통하여 외통으로 빠져나간 물의 원심력은

$$\pi \rho (r^2 - r_1^2) B (R - \delta) \omega^2 \quad (5)$$

이 된다. 식 (5)를 식 (1)의 우변 항에 더하게 되면, 진동계의 운동방정식은

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = [m_a \omega^2 - \pi \rho (r^2 - r_1^2) B (R - \delta) \omega^2] e^{i\omega t} \quad (6)$$

이 된다. 식 (6)의 해를 $x = \delta_1 e^{i\omega t}$ 라 두고 식 (6)에 대입하여 풀면

$$\delta_1 \{ [(K - M \omega^2)^2 + (C \omega)^2]^{1/2} - \pi \rho (r^2 - r_1^2) B \omega^2 \} = m_a \omega^2 - \pi \rho (r^2 - r_1^2) B R \omega^2 \quad (7)$$

이 얻어진다. 액체의 이동이 종료될 때의 회전각속도를 밸런싱 회전수라 하고 ω_b 으로 나타낸다.

Fig. 1의 (c)와 같이 밸런싱 과정이 종료하게 되면

$$r_1 = r_i + \delta_1 \quad (8)$$

의 관계가 성립되고, 이 식의 양변에 제곱을 취하면

$$r_1^2 = (r_i + \delta_1)^2 = r_i^2 + 2r_i \delta_1 + \delta_1^2$$

이 되고, 이를 다시 쓰면

$$r_1^2 - r_i^2 = 2r_i \delta_1 + \delta_1^2$$

의 관계가 얻어진다. 결국 밸런싱 완료후의 액체자유표면은 $r_1 = r$ 이 되기 때문에, 상기 식을 식 (7)에 대입하면

$$\delta_1 \{ [(K - M \omega_b^2)^2 + (C \omega_b)^2]^{1/2} - \pi \rho (2r_i \delta_1 + \delta_1^2) B \omega_b^2 \} = m_a \omega_b^2 - \pi \rho (2r_i \delta_1 + \delta_1^2) B R \omega_b^2 \quad (9)$$

이 되고, 여기서 δ_1^2 이상의 항을 생략하면 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_1 \{ (K - M \omega_b^2)^2 + (C \omega_b)^2 \}^{1/2} = m_a \omega_b^2 - 2\pi \rho r_i \delta_1 B R \omega_b^2 \quad (9)'$$

여기서 $m_c = 2\pi \rho r_i B R$ 라 하면, 식 (9)'는 다음과 같이 정리된다.

$$\delta_1 \{ [(K - M \omega_b^2)^2 + (C \omega_b)^2]^{1/2} + m_c \omega_b^2 \} = m_a \omega_b^2$$

상기 식을 정리하면 밸런싱후의 휘돌림 진폭이 다음과 같이 얻어진다.

$$\delta_1 = \frac{m_a}{[(\tau_1^2 - 1)^2 + (2\zeta \tau_1)^2]^{1/2} + m_c / M} \quad (10)$$

단 $\tau_1 = \frac{\omega_n}{\omega_b}$ 이다.

여기서 δ_1 / δ_0 를 밸런싱 회전수에 대한 잔류진폭율이라 정의하면 식 (4), (10)에서

$$\frac{\delta_1}{\delta_0} = \frac{ma[(\tau^2-1)^2+(2\xi\tau)^2]^{1/2}}{[(\tau^2-1)^2+(2\xi\tau)^2]^{1/2}+m_0/M} (ma-m_0r_0) \quad (11)$$

로 구할 수가 있다.

2.4 미지의 불평형에 대한 검토

회전축계의 불평형의 크기와 위상이 미지의 값이기 때문에 이 미지의 불평형이 작용하는 경우의 본 밸런서의 성능을 검토한다. Fig. 2는 밸런서 작동중의 회전체에 작용하는 힘의 평형관계를 나타내고, 이 관계에 의해 다음식이 유도된다.

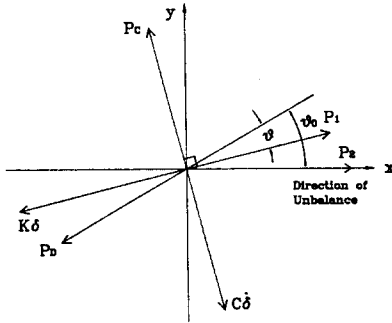


Fig. 2 Force balance of under operation

$$[(r^2-1)^2+(2\xi r)^2]^{1/2}\delta \quad (12)$$

$$= \frac{ma-m_0r_0}{M} \cos(\theta_0-\theta) - \frac{\rho V}{2M} R(\sin\theta + \cos\theta)$$

$$\rho VR = \frac{2U \sin(\theta_0-\theta)}{\cos\theta - \sin\theta} \quad (13)$$

식 (12) 에서 $\theta = \theta_0$, $V = 0$ 으로 놓으면, 작동전의 진폭 δ_0 가 다음과 같이 유도되고, 이는 앞의 식(4)와 동일하다.

$$\delta_0 = \frac{ma - m_0r_0}{M [(r^2-1)^2+(2\xi r)^2]^{1/2}} \quad (14)$$

또 식 (12), (13) 에서 휘돌림 진폭 δ 는

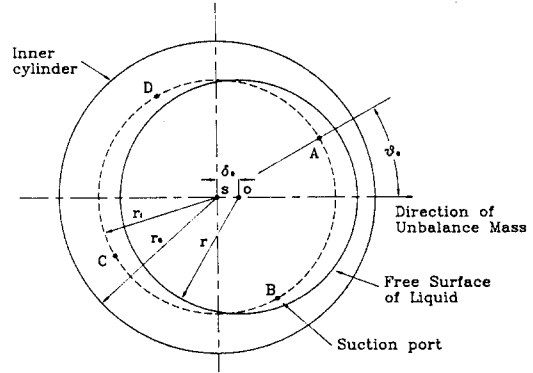
$$\delta = \delta_0 \frac{\cos\theta_0 - \sin\theta_0}{\cos\theta - \sin\theta} \quad (15)$$

와 같이 구할 수가 있다.

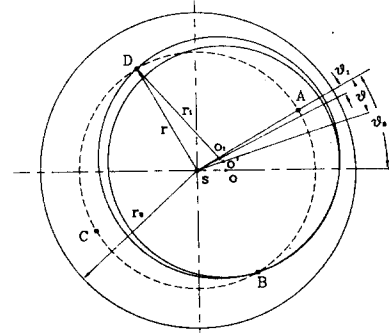
Fig. 3에 미지의 불평형에 대한 작동전후의 상태를 나타낸다. 그림에서 A, B, C, D는 각각 4개로 구성된 밸브의 흡입구 단을 나타낸다. 그림 (a)는 작동전의 상태로 불평형의 반대방향으로 액체의 편향이 솔리고 초기진폭 δ_0 로 휘돌고 있다. 또 (b)는 밸브

가 열리는 회전속도 이상에서 밸브가 열려 물이 빠져나감으로서 불평형의 방향을 수정해 가고 있는 상태이다.

장치 작동후에는 외봉으로 빠져나가는 액체량이 증가함에 따라 θ 는 감소하여, 회전중심이 O에서 O'로 이동하고, 다시 용기내의 액체표면의 반경이 $r_1 = O_1D$ 에 도달하면 흡입구 D로 부터 유출이 종료된다. 그러나 흡입구 C는 아직 액체중에 있으며, 이후에는 흡입구 C에서만 액체의 흐름이 계속된다. 흡입구 D의 흐름이 종료되는 조건은 Fig. 3으로 부터



(a) Before operation



(b) Under operation

Fig. 3 Analysis of unknown unbalance

$$r_1^2 = r_i^2 + \delta^2 + 2r_i\delta \sin\theta \quad (16)$$

가 성립하며, 이때의 진폭은 $\delta = \delta_1 = O_1S$, 불평형의 방향 $\theta = \theta_1$ 은 식 (16)의 조건하에서 식 (13), (15)에 의해서 구하여진다. 또한 외봉으로 유출된 액체의 양은

$$V_1 = \pi (r_1^2 - r_i^2) B$$

이 된다. 다음에 흡입구 C만으로 액체의 흐름이 계

속되고 θ 를 수정하면서 진폭이 감소한다. 흡입구 C로의 새로운 유출량을 V 라 하면, 외통으로 빠져나간 액체의 원심력은

$$P_C = \rho \left(\frac{V_1}{2} + V \right) R \omega^2, \quad P_D = \rho V_1 \frac{R \omega^2}{2}$$

가 된다. 결국 밸런싱이 완료되어 흡입구 C로부터 액체의 흐름이 종료되고, 용기내의 액체표면이 흡입구 C에 일치할 때의 회전중심을 O_2 라 하면

$$\delta = \delta_2 = O_2S, \quad r_2 = O_2C$$

가 되며, 이때의 진폭은

$$\delta = \delta_0 \left(\sin \theta_0 - \frac{\rho V_1 R}{2U} \right) / \sin \theta \quad (17)$$

에서 r_1 을 r_2 로 치환하여 식(17)의 조건을 이용하여 구하여 진다. 결국 여기서 C에의 흐름이 멈추고 밸런싱이 종료된다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 4에 본 실험에 사용된 장치를 나타낸다. 3중 원통의 아크릴 수지제의 용기로 외통이 200mm, 내통이 150mm이며, 내벽에 내경이 4 mm인 파이프를 설치하였다. 또 외통에는 스프링을 장착한 밸브를 설치하여 액체의 유동을 제어하도록 하였다. 그리고 외통과 내통에 액체에 의해서 발생하는 자력진동을 줄이기 위해서 각각 90° 방향으로 배플을 설치하고, 외통에는 90° 간격으로 완전히 차단했으며, 내통에는 액체의 흐름에 지장이 없는 범위내에서 90° 간격으로 각각 4 개씩의 배플을 설치했다. 또한 내통의 내벽에 설치된 파이프는 불평형이 존재하지 않을 경우의 축심으로 부터 액체자유표면(r_1)과 일치하도록 길이를 설정했다. 여기서 축심으로 부터 내통까지의 길이는 65mm이다. 그리고 용기내에 액체를 충전하기 위해 아크릴에 직경 4mm의 구멍을 만들었다. 회전체의 질량은 $M = 2.7\text{kg}$ 이고, 이 계의 1차위험 속도는 1470 rpm이다. 또한 센서지대에 부착된 와전류형 비접촉식 변위센서의 출력신호를 주파수 분석기(FFT)를 이용하여 회전체의 진동변위를 측정하였고, tachometer를 이용하여 축의 회전속도를 측정하였다.

3.2 실험방법

로터전체를 밸런싱한 후, 용기의 내통에 파이프의 선단과 일치하는 만큼의 초기수량의 물을 봉입한 후, 밸브가 열리는 회전속도로 회전시킨다. 이 때 위험속도 이상에서 밸브가 작동한 후 각 불평형량에 따른 축의 휘둘림진폭과 회전수를 비접촉식 변위계와 tachometer로 측정한다. 작동액으로서 물을 이용하고, 본 실험에서는 내통에 충전되는 액체의 초기수량을 100ml로 하였으며, 파이프이 길이는 액체 자유표면과 일치하는 5.1mm로 하였다. $m = 1.18\text{g}, 1.58\text{g}, 1.78\text{g}$ ($U = 112, 150, 170\text{ gmm}$)의 불평형질량

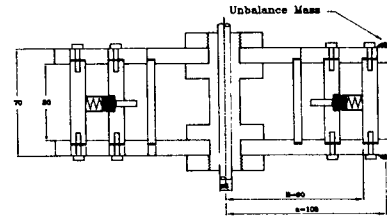
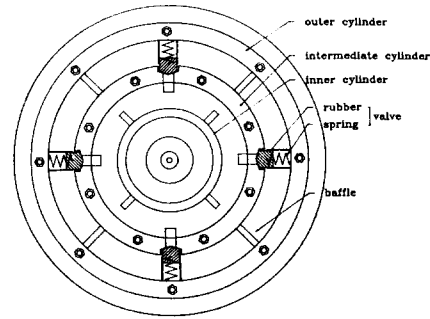


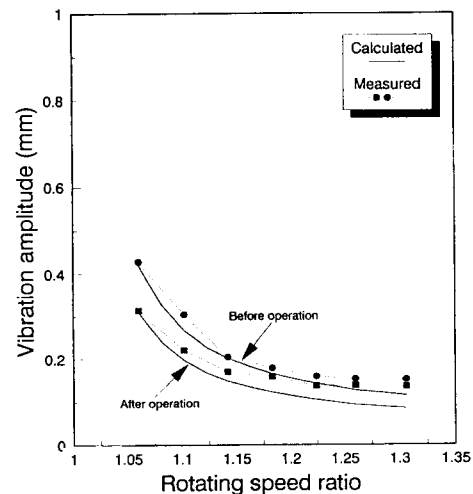
Fig. 4 Detail drawing of balancer

을 각각 회전체에 부착하고 밸런싱전의 진폭을 측정하고 다음에 일정 회전수에서 밸브가 열려 밸런싱이 완료된 후의 진폭을 측정하였다.

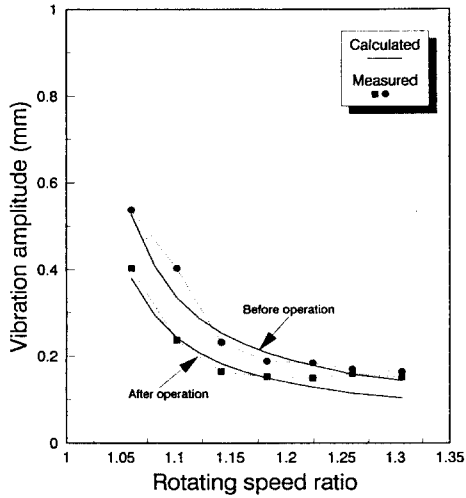
4. 결과 및 고찰

4.1 휘둘림 진폭

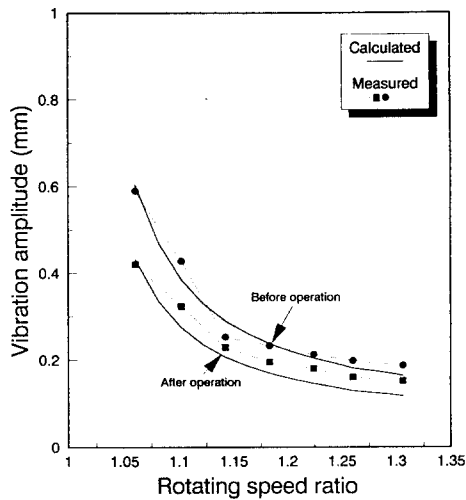
Fig. 5는 각각 불평형 $U = 112, 150, 170\text{ gmm}$ 에 대해 실험과 이론계산으로부터 구한 밸런싱 전후의 진폭을 비교하여 나타낸 것이다. 이 결과로부터 본 밸런서의 작동에 의해 진폭은 작동전에 비해 감소하며, 또 회전속도비가 높을 수록 실험치가 약간 큰 값을 나타내고 있으나 대체로 그 경향은 실험치와 이론치가 일치하고 있다.



(a) $U = 112\text{ gmm}$



(b) $U = 150 \text{ gmm}$



(c) $U = 170 \text{ gmm}$

Fig. 5 Vibration amplitude before and after operation (comparison calculated with measured)

4.2 잔류진폭을

불평형량 170 gmm의 경우 외통으로 빠져나간 액체의 양을 평형질량으로 할 때의 밸런싱 회전수비에 대한 잔류불평형율의 변화를 이론치와 실험치에 대해 비교한 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 밸런싱 회전수가 높을 수록 잔류진폭이 감소하고 있음을 알 수 있고, 또한 실험치가 다소 높게 측정되고 있으나 그 경향은 이론치와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 불평형량의 변화에 대한 잔류불평형율을 나타낸 것으로서, 불평형량에 관계없이 잔류불평형율은 거의 일정한 값을 나타내고, 이는 본 밸런서가 불평형에 원활하게 대응하고 있음을 나타내고 있다.

4.3 불평형위치의 영향

회전체의 경우 일반적으로 불평형량과 그 방향은 미지이기 때문에 본 실험에서는 불평형의 방향(θ)을 밸브가 설치된 방향($\theta = 0^\circ$)과 45° 인 방향($\theta = 45^\circ$)의 두 조건에 대해 각각 휘둘림 진폭의 실험 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

이 결과로부터 불평형의 방향이 밸브의 방향과 일치할 때의 진폭이 높은 회전수영역에서 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

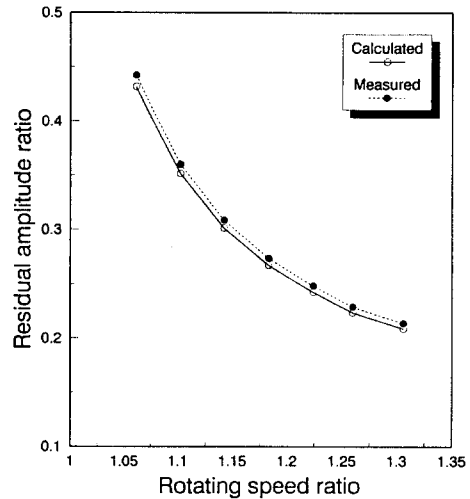


Fig. 6 Relation between balancing speed ratio and residual amplitude ratio (comparison calculated with measured)

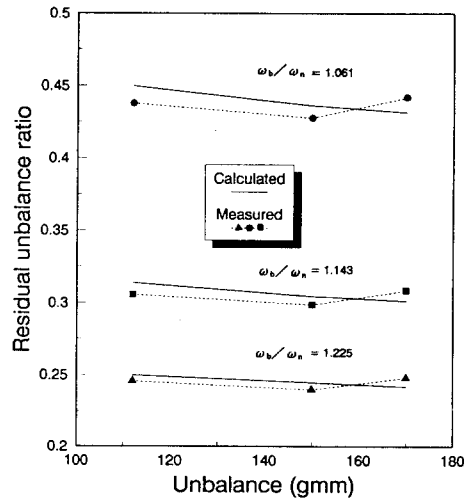


Fig. 7 Relation between unbalance and residual unbalance ratio (Comparison calculated with measured)

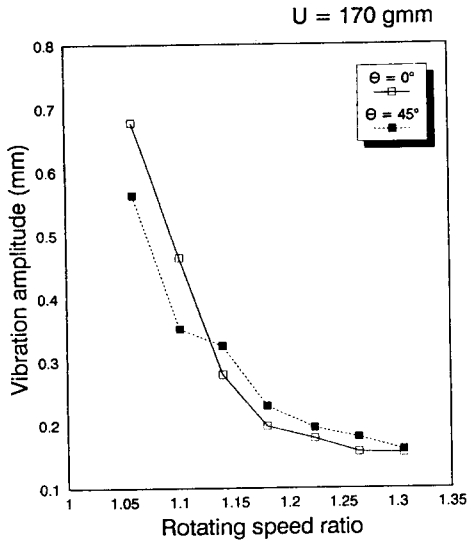


Fig. 8 Vibration amplitude for unbalance direction

5. 결 론

본 연구에서는 자기보상형 액체 평형장치를 제안하였고, 이론 및 실험을 통하여 그 성능을 조사하였다. 액체의 편향에 의한 액체의 이동량을 제어함으로써 그 이동된 액체의 원심력을 평형질량으로서 이용하는 자동밸런싱의 가능성이 이론 및 실험에 의해 확인되었다. 이러한 자동밸런서의 특징은 불평형의 크기와 방향에 대응하여, 액체의 이동량을 적절히 제어하므로서 진동진폭을 감소시키는 것이다.

본 연구에서는 작동액으로 사용된 물의 양을 100 ml로 고정하여 액체 자유표면에 따라 pipe의 길이를 한정하였으나, 물의 양을 조절하고, 위험속도 이상에서 발생할 가능성이 있는 자력진동의 문제를 줄인다면 보다 효과가 있을 것으로 기대된다. 특히 액체의 이동량을 제어하는 주된 역할을 하는 밸브를 적절하게 개선하여 조정한다면, 이러한 방식에 의한 밸런싱법은 세탁기와 같은 경우 기존에 사용되고 있는 액체 밸런서에 비해 본 자기보상형 액체 평형장치는 불평형의 크기에 상관없이 전 운전범위에 있어 진동진폭을 줄이는데 매우 효과적이며 저진동, 저소음화에 기여할 것으로 생각된다.

- 1) Darlow, M.S., Balancing of High-Speed Machinery, Springer-Verlag, 1989.
- 2) Thearle, E.L. and Schenectady, N.Y., "Dynamic Balancing of Rotating Machinery in the Field," Journal of Applied Mechanics, APM-56-19, pp745-753, 1934.
- 3) Jongkil-Lee "Theoretical and Experimental Analysis of self-compensating dynamic in Rotoring mechanism" 美國 Utah 大學 博士學位論文 (1993)
- 4) 井上順吉外3人, 自動平衡裝置(その基礎的特性), 日本機械學會誌論文集C編, pp 646~652(1979-6)
- 5) 飯島弘外2人, 液體を用いた回轉自動 つりあわせ法(第2報, 遠心力場の液體壓を利用する方法) 日本 機械學會論文集(C編 55卷 520號 (1989-12)
- 6) 梁保錫 "全自動 洗濯機の 振動低感に 関한 研究" (株) 金星社 研究報告書(1993)