

자기보상형 액체 평형장치의 평형잡이 성능에 관한 연구

양보석* · 이재무** · 김원철*** · 고장권****

A Study on Balancing Performance of Self - Compensating Liquid Balancer

B. S. Yang · J. M. Lee · W. C. Kim · J. K. Koh

Key words : Balancer(평형장치), Balancing(평형잡이), Rotor(회전체), Unbalance Vibration(불평형진동)

Abstract

A Self-compensating liquid balancer is proposed, which consists of the vessel contains liquid available to compensate for rotor unbalance, and the vessel provides four sets of suction pipe and reservoir.

Under the centrifugal field the liquid moves through the pipe from the side of the unbalance mass to the reservoir located on the symmetrically opposite side. The liquid balancer was confirmed experimentally to be useful for the balancing of rotor over the critical speed, and the whirling amplitude after balancing decreases to almost constant value in spite of the location and size of unbalance.

1. 서 론

회전체는 그 정도의 차이는 있으나 다소간의 잔류 불평형이 존재하며, 이 불평형(unbalance)은 기계의 소음과 진동을 발생시키는 원인이 되고 있다. 특히 고속회전체의 경우 불평형에 의한 소음진동은 기계의 수명, 제품의 품질과 성능을 저하시키

며 불시에 발생하는 기계고장의 주요인으로 알려져 있다. 즉 기계진동의 원인은 회전체의 불균일한 질량분포에 있으므로, 진동을 최소화하기 위해서는 회전체의 질량에 대응하는 보정중량을 부착하거나 제거하여 회전체의 불평형을 허용잔류불평형 이하가 되도록 공장시운전시 평형잡이기계(balancing machine)에서 평형잡이(balanc-

* 부경대학교 기계공학과 (원고접수일 : 97년 4월)

** LG정밀(주)

*** 경상대학교 기관공학과

**** 제주대학교

ing)가 시행되고 있다¹⁾.

그러나 회전체에서 불평형의 크기와 위치가 매운전사이클마다 변화하는 경우에는 이러한 방법이 적용될 수 없다. 불평형을 갖는 회전축을 자기보상형으로 평형잡이하는 장치를 처음 고안한 사람은 Thearle로 알려져 있다²⁾. 그는 동심원 궤도내를 자유롭게 운동하는 2개의 강구(steel ball)를 이용하여 위험속도 이상에서 위상이 역전하는 성질을 이용하여 불평형과 반대측에 강구를 자동적으로 이동시켜 평형잡이를 하도록 고안하였으나, 소음과 자러진동의 발생등 많은 문제점이 발생하였다.^{(3),(4)}

또 액체를 평형잡이에 이용하는 것으로는 액체를 부분적으로 충전한 원통용기를 회전체에 부착하고, 액체의 원심력을 이용하여 자동적으로 불평형을 수정하는 방법등이 연구되어 왔다.^{(5),(6)} 이 방법도 위험속도 이상에서만 유효하고 위험속도 이하에서는 휘돌림 진폭을 조장하기 때문에 위험속도 통과에는 좋지 않는 문제점을 야기시키게 된다.

따라서 본 연구에서는 위험속도이하에서 휘돌림 진폭을 증가시키지 않으면서 위험속도 이상에서 불평형의 반대측으로 액체를 이동시켜, 이것을 수정질량으로 이용하여 축의 휘돌림 진폭을 감소시키는 방안으로서 자기보상형 액체평형장치를 제안하고 주어진 불평형에 대한 이론과 실험을 통하여 그 유용성을 검토하였다.

2. 이론해석

2.1 작동원리

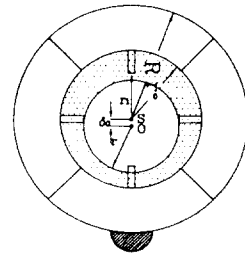
Fig. 1은 본 평형장치의 작동원리를 나타낸다. 회전축에 불평형이 없으면 베어링 중심선 O와 축 중심 S는 일치하여 회전하고, 이때의 액체의 자유표면은 파이프선단과 일치하며, 용기와 동심의 ring 형상이 되고 이때 자유표면의 반경은 r_1 가 된다. Fig. 1(b)에서 보는 것처럼 불평형이 존재하게 되면 위험속도 이상에서 액체는 역위상관계에 의해 불평형과 반대방향으로 쏠리게 되고, 이 쏠린 액체의 원심력에 의해 일정한 회전수에서 밸브가 열리고 액체는 불평형력에 대응하는 만큼 빠져나가게

된다. 다음 외통으로 빠져나간 액체의 원심력과 불평형에 의해 발생하는 원심력이 평형을 이루게 되면, Fig. 1(c)와 같은 상태를 유지하게 된다.

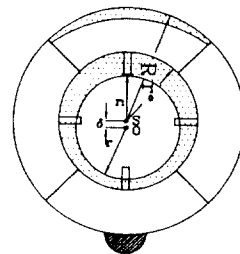
2.2. 평형잡이 전의 휘돌림진폭 δ_0

고유진동수 이상에서는 불평형력과 변위의 위상이 역으로 되어 충전된 액체가 불평형력과 반대측으로 이동하여 액면의 두께가 최대가 되기 때문에 밸브가 작동전의 용기의 상태는 Fig. 1(a)에서 보는 것처럼 진폭은 δ_0 로 표시된다. 이때 힘의 평형으로부터 운동방정식은 다음과 같다.

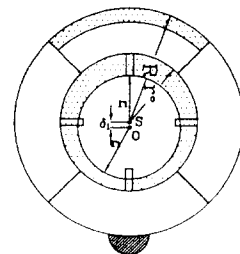
$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = (ma\omega^2 - m_b r_0 \omega^2) e^{i\omega t} \quad (1)$$



(a) Before operation



(b) Under operation



(c) After operation

Fig. 1 Operating procedure of liquid balancer

여기서 m 과 m_b 는 각각 회전체의 불평형 질량, 액체의 편량을 나타낸다. 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

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

단 $\tau = \omega_n/\omega$ 이다.

2.3 평형잡이 후의 휘돌림진폭 δ_1

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

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

이 된다. 여기서 B 는 평형장치의 높이이다. 식 (5)를 식 (1)의 우변 항에 더하게 되면, 진동계의 운동 방정식은

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

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

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

이 얻어진다. 액체의 이동이 종료될 때의 회전각속도를 평형잡이 회전수(balancing speed)라 정의하고 ω_b 로 나타낸다. Fig. 1의 (c)와 같이 평형잡이 과정이 종료하게 되면

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

의 관계가 성립되고, 이 식의 양변에 제곱을 취하

여 정리하면

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

의 관계가 얻어진다. 결국 평형잡이 완료후의 액체 자유표면은 $r_1 = r_i$ 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 항은 미소하므로 이를 생략하면 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 $m_c = 2\pi\rho r_i B R$ 이라 하면, 상기 식은 다음과 같이 된다.

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

상기 식을 정리하면, 평형잡이 후의 휘돌림 진폭이 다음과 같이 얻어진다.

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

단 $\tau_1 = \omega_n/\omega_b$ 이다.

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

$$\frac{\delta_1}{\delta_0} = \frac{m a [(\tau^2 - 1)^2 + (2\xi\tau)^2]^{1/2}}{\{ [(\tau_1^2 - 1)^2 + (2\xi\tau_1)^2]^{1/2} + m_c / M \} (m a - m_b r_0)} \quad (11)$$

와 같이 구할 수가 있다.

2.4 미지의 불평형에 대한 검토

회전축계의 불평형 크기와 위상이 미지의 값이기 때문에, 이 미지의 불평형이 작용하는 경우 본 평형장치의 성능을 검토하였다. 평형장치 작동중의 회전체에 작용하는 힘의 평형관계에 의해 다음 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} [(\tau^2 - 1)^2 + (2\xi\tau)^2]^{1/2} \delta = \frac{m a - m_b r_0}{M} \cos(\theta_0 - \theta) \\ - \frac{\rho V}{2M} R (\sin\theta + \cos\theta) \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

$$\delta_0 = \frac{(ma - m_b r_0)/M}{[(\tau^2 - 1)^2 + (2\xi\tau)^2]^{1/2}} \quad (14)$$

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 수 있다.

Fig. 2에 미지의 불평형에 대한 작동전후의 상태를 나타낸다. 그림에서 A, B, C, D는 각각 4개로 구성된 밸브의 흡입구 단을 나타낸다. Fig. 2 (a)는 작동전의 상태에서 불평형의 반대방향으로 액체의 편량이 쏠리고 초기진폭 δ_0 로 휘돌고 있다. 또 Fig. 2 (b)는 밸브가 열리는 회전속도 이상에서 밸브가 열려 물이 빠져나감으로서 불평형의 방향을 수정해 가고 있는 상태이다.

장치 작동후에는 외통으로 빠져나가는 액체량이 증가함에 따라 θ 는 감소하며, 회전중심이 O에서 O'로 이동하고, 다시 용기내의 액체표면의 반경이 $r_1 = O_1D$ 에 도달하면 흡입구 C는 아직 액체중에 있으며, 이후에는 흡입구 C에서만 액체의 흐름이 계속된다. 흡입구 D의 흐름이 종료되는 조건

은 Fig. 2로부터

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

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 외통으로 유출된 액체의 양 V_1 은

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

이 된다. 다음에 흡입구 C 만으로 액체의 흐름이 계속되고 θ 를 수정하면서 진폭이 감소한다. 흡입구 C로의 새로운 유출량을 V라 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 평형잡이가 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

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

에서 r_1 을 r_2 로 치환하여 식(17)의 조건을 이용하여 구하여진다. 결국 여기서 C에의 흐름이 멈추고

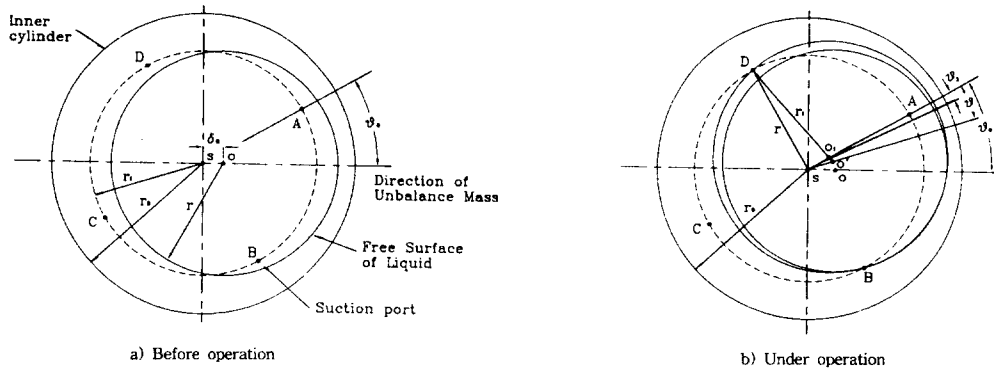


Fig. 2 Analysis of unknown unbalance

평형잡이가 종료된다.

3. 실험

3.1 실험장치

Fig. 3에 본 실험에 사용된 장치를 나타낸다. 3중 원통의 아크릴 수지제의 용기로 외통이 200 mm, 내통이 150 mm이며, 내벽에 내경이 4 mm 인 파이프를 설치하였다. 또 외통에는 스프링을 장착한 밸브를 설치하여 액체의 유동을 제어하도록 하였다. 즉 밸브질량의 원심력과 밸브스프링의 예압력의 관계에 의해 일정 속도 이상에서 밸브가 열리므로 파이프를 통하여 내통에서 외통으로 액체가 이동하도록 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 범위 내에서 90° 간격으로 각각 4개의 배플을 설치했다. 또한 내통의 내벽에 설치된 파이프는 불평형이 존재하지 않을 경우의 축심으로부터 액체자유표면(r_1)과 일치하도록 길이를 설정했다. 여기서 축심으로부터 내통까지의 길이는

65 mm이다. 그리고 용기내에 액체를 충전하기 위해 아크릴에 직경 4 mm의 구멍을 만들었다. 회전체의 질량은 $M = 2.7\text{kg}$ 이고, 이 계의 1차 위험속도는 1470 rpm이다. 또한 센서지대에 부착된 와전류형 비접촉식 변위센서의 출력신호를 주파수 분석기(FFT)를 이용하여 회전체의 진동변위를 측정하였다.

3.2 실험방법

회전체전체를 평형잡이한 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 휘돌림진폭과 회전수를 비접촉식 변위계와 tachometer로 측정한다. 작동액으로서 물을 이용하고, 본 실험에서는 내통에 충전되는 액체의 초기수량을 100 ml로 하였으며, 파이프의 길이는 액체 자유표면과 일치하는 5.1 mm로 하였다. $m = 1.18\text{ g}, 1.58\text{ g}, 1.78\text{ g}(U = 112, 150, 170\text{ g} \cdot \text{mm})$ 의 불평형질량을 각각 회전체에 부착하고, 평형잡이전의 진폭을 측정하며 다음에 일정 회전수에서 밸브가 열려 평형잡이가 완료된 후의 진폭을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 휘돌림 진폭

Fig. 4는 각각 불평형 $U = 112, 150, 170\text{ g} \cdot \text{mm}$ 에 대해 실험과 이론계산으로부터 구한 평형잡이 전후의 진폭을 비교하여 나타낸 것이다. 이 결과로부터 본 평형장치의 작동에 의해 진폭은 작동전에 비해 감소하며, 또 회전속도비가 높을수록 유체유동의 영향등으로 실험치가 이론치에 비해 약간 큰 값을 나타내고 있으나 대체로 그 경향은 실험치와 이론치가 일치하고 있다.

4.2 잔류진폭을

불평형량 $170\text{ g} \cdot \text{mm}$ 의 경우, 외통으로 빠져나간 액체의 양을 평형질량으로 할때의 평형잡이 회전수비에 대한 잔류불평형율의 변화에 대해 이론

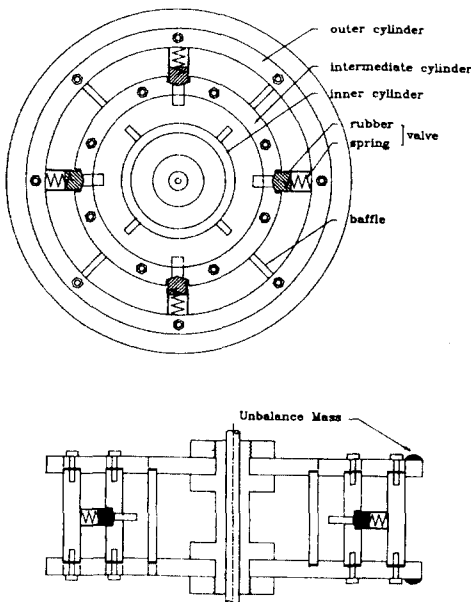


Fig. 3 Detail drawing of balancer

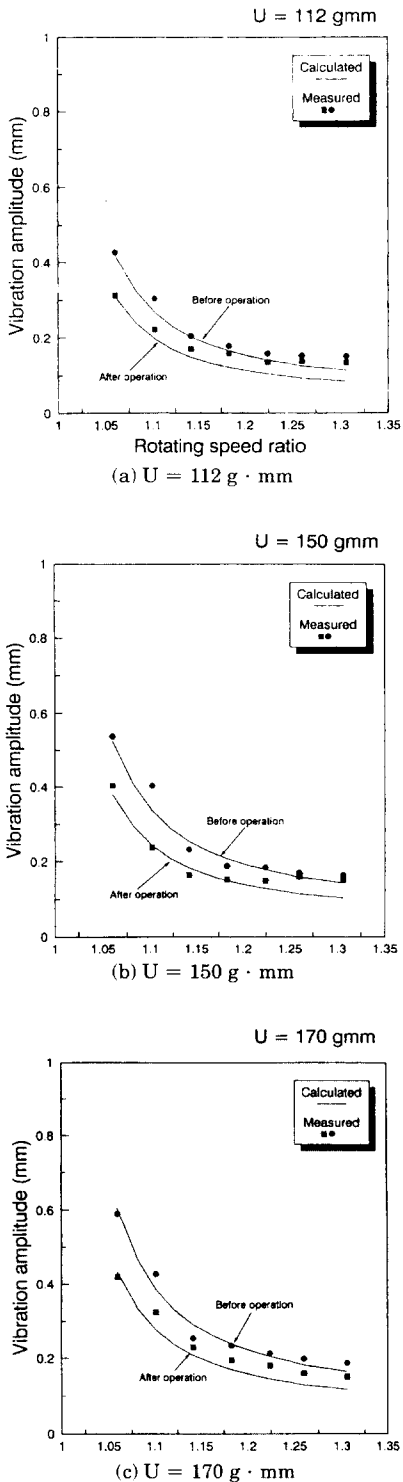


Fig. 4 Vibration amplitude before and after operation

치와 실험치의 비교 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 그림으로부터 평형잡이 회전수가 높을수록 잔류진폭이 감소하고 있고, 또한 실험치가 다소 높게 측정되고 있으나 그 경향은 이론치와 잘 일치하고 있다.

Fig. 6은 불평형량의 변화에 대한 잔류불평형을 나타낸 것으로서, 불평형량에 관계없이 잔류불평형율은 거의 일정한 값을 나타내고, 이는 본 평형장치가 불평형에 원활하게 대응하고 있음을 나타내고 있다.

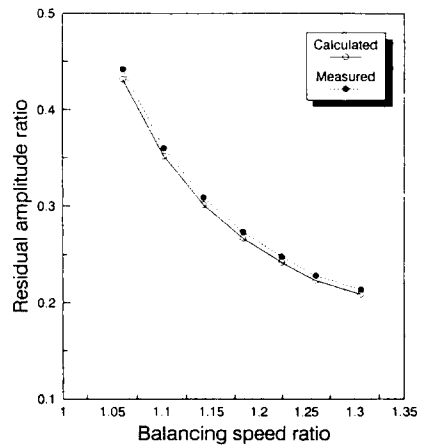


Fig. 5 Relation between balancing speed ratio and residual amplitude ratio

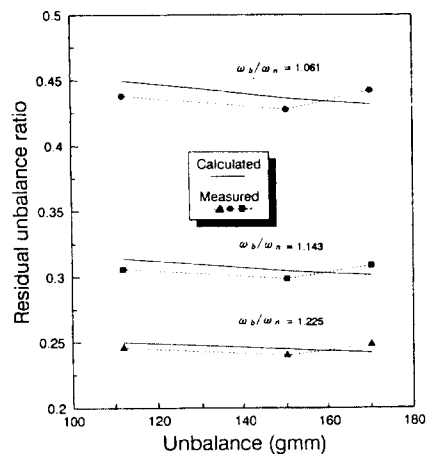


Fig. 6 Relation between unbalance and residual unbalance ratio

4.3 불평형위치의 영향

회전체의 경우 일반적으로 불평형과 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 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다.

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

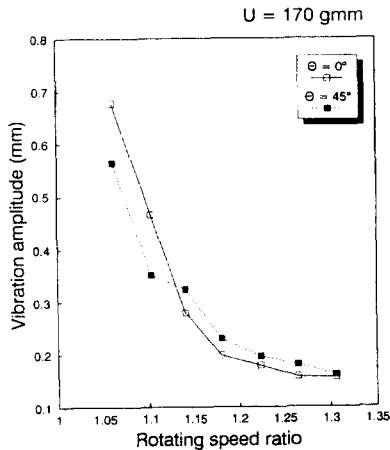


Fig. 7 Vibration amplitude for unbalance direction

5. 결 론

본 연구에서는 자기보상형 액체 평형장치를 제안하였고, 이론 및 실험을 통하여 그 성능을 조사하였다. 액체의 편량에 의한 액체의 이동량을 제어함으로써 그 이동된 액체의 원심력을 평형질량으로서 이용하는 자동평형잡이의 가능성을 이론 및 실험에 의해 확인하였다. 이러한 자동평형잡이의 특징은 불평형량의 크기와 방향에 대응하여, 액체의 이동량을 적절히 조절하므로써 진동진폭을 감

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

참고문헌

- 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, pp.745 - 753, 1934.
- 3) Jongkil Lee, "Theoretical and Experimental Analysis of Self - compensating Dynamic in Rotating 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), 日本機械學會論文集(C編), 45卷 394號, 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) 양보석, "전자동 세탁기의 진동감쇠에 관한 연구", (주) 금성사 연구보고서, 1993.
- 7) 양보석, "전자동 세탁기용 Auto Balancer 개발에 관한 연구", (주) 금성사 연구보고서, 1994.