

# 회전체 밸런싱 장치의 성능 평가 시험

이 영섭\*, 이 종원\*

(Performance Test of a Rotor Balancing Machine)

(Young - Seob Lee, Chong - Won Lee)

## 1. 서론

오래전부터 회전체 질량의 불균형에 의한 진동을 줄이기 위한 전용 밸런싱 장치와 프로그램이 개발되었다[1-5]. 그런데 밸런싱 장치는 센서로부터 측정된 진동 신호를 이용하여 밸런싱을 함으로 밸런싱의 반복성과 정밀도 등에 따라 그 장치의 성능을 평가할 수 있으며, 국제 표준 기구(ISO)에서도 장치의 성능을 평가하기 위한 각종 시험 규격들을 제시, 권장하고 있다[6].

본 연구에서는 강성 회전체의 밸런싱을 위해 연구실에서 제작한 탄성 베어링 밸런싱 장치에 대해 ISO 규격에서 제시하는 성능 평가 시험들을 기초로 회전체 밸런싱과 여러가지 시험을 수행하고, 장치의 특징과 성능을 알아보려고 한다.

## 2. 2자유도계 모형화

각 교정면에 존재하는 회전체의 불균형을 구하기 위하여 밸런싱 장치와 회전체로 구성된 계의 강체 모오드를 고려하여 2자유도로 모형화하였으며, 이를 Fig.2.1.에 나타내었다.

회전체와 베어링 부분을 고려한 운동 방정식은

$$\begin{bmatrix} M/r & M/l \\ -i_l & i_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_L \\ Z_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_L & K_R \\ -K_L/l & K_R/r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_L \\ Z_R \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -r_L & r_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_L \sin(\omega t + \alpha_L) \\ f_R \sin(\omega t + \alpha_R) \end{Bmatrix} \quad (2-1)$$

가 되며, 변수는 다음과 같다.

- M : 회전체와 베어링 부분의 질량.
- $i_l$  : 회전체와 베어링 부분의  $J_{y_0}$ 를  $L^2$ 로 나눈 양.
- $Z_L, Z_R$  : 각 베어링의 이동 변위.
- $K_L, K_R$  : 좌, 우측 베어링의 강성 계수.
- $f_L, f_R$  : 각 교정면에서의 불균형력.
- $\alpha_L, \alpha_R$  : 각 교정면에서의 불균형력의 각위치.

$$l_L = \frac{L_L}{L}, \quad l_R = \frac{L_R}{L}, \quad r_L = \frac{R_L}{L}, \quad r_R = \frac{R_R}{L}$$

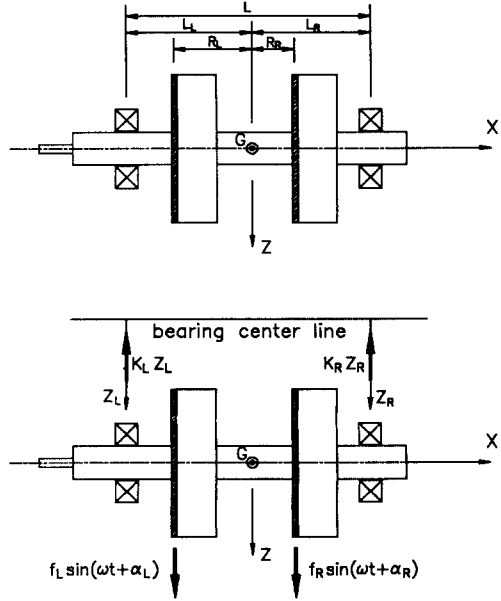


Fig.2.1. 밸런싱 장치와 회전체의 2자유도 모형화.

측정 가능한 진동 신호,  $Z_L, Z_R$ 을 이용하여 각 교정면에서의 불균형을 계산하면,

$$\begin{Bmatrix} f_L \sin(\omega t + \alpha_L) \\ f_R \sin(\omega t + \alpha_R) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -r_L & r_R \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M/r - \frac{K_L}{\omega^2} & M/l - \frac{K_R}{\omega^2} \\ -i_l + \frac{K_L l_L}{\omega^2} & i_l - \frac{K_R r_R}{\omega^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_L \\ Z_R \end{Bmatrix} \quad (2-2)$$

## 3. 밸런싱 장치와 시험용 회전체

### 3.1. 밸런싱 장치[5~7]

Fig.3.1.에는 연구실에서 제작한 탄성 베어링 밸런싱 장치의 베어링 지지대(bearing support)의 모습을 나타내고 있다. 베어링 지지대를 이용하여 밸런싱 장치를 구성할 때 모터의 축과 베어링의 중심이 일치하지 않으면, 회전체 회전시 축방향으로의 운동이 발생하므로 이를 방지할 수 있는 지지대가 필요하게 되며, 다이얼 게이지(dial gauge)를 이용하여 모터와 베어

\* 한국 과학 기술원 기계 공학과, 정희원

링의 중심을 정확히 맞추는 것이 요구된다.

그리고 밸런싱 장치와 시험용 회전체로 구성된 계의 고유 진동수를 충격 시험을 통하여 구하였으며, 그 값은 6.25Hz와 8.62Hz이었다.

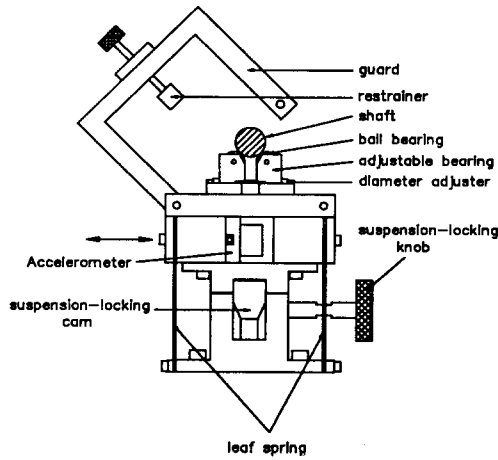


Fig.3.1. 탄성 베어링 밸런싱 장치의 베어링 지지대.

### 3.2. 시험 장비

시험 장치도는 Fig.3.2.에 나타내었으며, 센서는 압전 소자를 이용하여 만든 가속도계를 사용하였고, 좌, 우측 베어링에서 사용된 가속도계의 감도( sensitivity )는 0.895( pC/m/s<sup>2</sup> )와 0.731( pC/m/s<sup>2</sup> )이다. 앰프는 B&K사의 전하 증폭기( TYPE2635 )를 사용하였으며, 이득( gain )값은 모두 0.316V/m/s<sup>2</sup>로 맞추었다. 필터( filter )는 Wavetek회사 제품으로 모델명은 model852이며, 컷 오프 주파수( cut-off frequency )를 60Hz로 맞추었다.

사용된 모터는 DC서어보 모터( SanYo사 R720 T-012 EL8 )로 정격 회전속도는 3,000rpm이며, 속도는 모터 제어기로 제어된다. 사용된 A/D변환기는 LAB MASTER A/D변환기이며, 연코더에서 나오는 트리거/클락 신호를 이용하여 필터를 거쳐 나오는 진동 신호를 매 회전당 200개씩 샘플링한다.

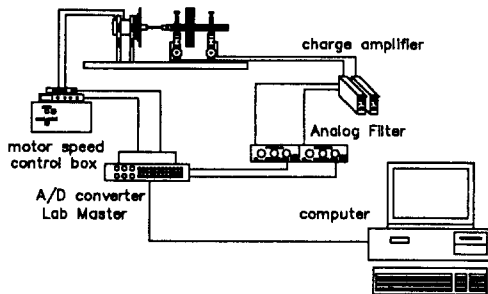


Fig.3.2. 시험 장치도.

### 3.3. 시험용 회전체

시험에서 사용된 회전체를 Fig3.3.에 나타내었으며, 회전체의 질량은 9.345kg이며, 질량 중심에 대한 y방향의 질량 관성

모멘트,  $I_{yo}$ 는 0.36kg·m<sup>2</sup>이다. 교정면은 그림에 나타난 바와 같으며, 좌, 우측 교정면의 디스크 중심으로부터 60mm위치에 지름이 5mm인 크기의 구멍이 36개 있어 시도 질량과 교정 질량을 끼워 넣을 수 있게 되어 있다. 그리고 모터와의 회전 전달을 위하여 축의 좌측끝이 커플링에 물릴 수 있도록 지름이 8mm, 길이 30mm의 봉 형상이 만들어져있다.

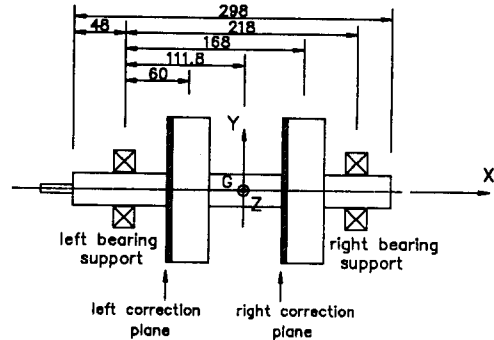


Fig.3.3. 시험용 회전체.

## 4. 시험

전 시험을 통하여 회전체의 회전속도를 1895rpm으로 하였고, 각 시험마다의 속도 차이는 5rpm이내이었다.

### 4.1. 회전속도 동기 진동 신호

A/D변환기에서 변환된 진동 신호를 50번 평균화시켰으며, 관심있는 회전속도 동기 진동 신호를 검출해내기 위해서 푸리에 급수( fourier series )를 이용하였다.

한 주기의 갯수가 P개인 진동 신호, f(i)를 전개하면

$$f(i) = a_0 + \sum_{n=1}^P ( a_n \cos \frac{2\pi ni}{P} + b_n \sin \frac{2\pi ni}{P} ) \quad (4-1)$$

으로 나타내어지며, 여기서 회전속도에 동기되는 계수는

$$a_1 = \frac{2}{P} \sum_{i=1}^P f(i) \cos \frac{2\pi ni}{P}, \quad b_1 = \frac{2}{P} \sum_{i=1}^P f(i) \sin \frac{2\pi ni}{P}$$

이고, 진동 신호의 동기 성분은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{동기 신호} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \sin ( \omega t - \tan^{-1} \frac{b_1}{a_1} )$$

### 4.2. 커플링의 불균형에 의한 영향

커플링은 회전체에 연결되어 같이 회전하게 됨으로 회전체를 밸런싱하는 데 영향을 미쳐 진동 신호에서 커플링의 불균형에 의한 영향을 찾아 내어 제거해 주면, 순수한 회전체의 불균형에 의한 진동 신호를 얻을 수 있다.

Fig.4.1.에는 커플링은 고정시키고, 회전체를 임의의 각도로 회전시키면서 연결하였을 때, 각 베어링에서 3번 측정된 진동 신호들을  $U_1 + jV_1, U_2 + jV_2, U_3 + jV_3$ 로 나타내었으며, 순수한 커플링의 불균형에 의해 베어링에 나타나는 진동량을  $U + jV$ 로

표시하였다. 그리고  $u_1 + jv_1$ ,  $u_2 + jv_2$ ,  $u_3 + jv_3$ 은 회전체의 불균형에 의한 진동 신호를 나타내었다. 그러면 각 베어링에서의 진동 신호는 항상 회전체와 커플링의 불균형에 의해서 발생되며, 회전체의 물리는 각도를 변화시키더라도 회전체의 불균형에 의한 진동 신호의 크기는 변하지 않지만, 위상은 변하게 된다. 위의 관계를 식으로 나타내면,

$$\begin{aligned} U_i + jV_i &= u_i + jv_i + U + jV \quad i = 1, 2, 3 \\ u_i^2 + v_i^2 &= \text{constant} \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (4-2)$$

관계가 성립되고, 커플링의 불균형에 의한 진동 신호는

$$\begin{aligned} U &= \frac{[(U_1^2 - U_2^2 + V_1^2 - V_2^2)(V_2 - V_3) - (U_2^2 - U_3^2 + V_2^2 - V_3^2)(V_1 - V_2)]}{2[(U_1 - U_2)(V_2 - V_3) - (U_2 - U_3)(V_1 - V_2)]} \\ V &= \frac{[(U_1^2 - U_2^2 + V_1^2 - V_2^2)(U_2 - U_3) - (U_2^2 - U_3^2 + V_2^2 - V_3^2)(U_1 - U_2)]}{2[(V_1 - V_2)(U_2 - U_3) - (V_2 - V_3)(U_1 - U_2)]} \end{aligned} \quad (4-3)$$

가 되며, 회전체의 불균형에 의한 진동 신호는

$$u_i + jv_i = (U_i - U) + j(V_i - V) \quad i = 1, 2, 3 \quad (4-4)$$

가 됨을 알 수 있다. 시험을 통하여 좌측 베어링에서 커플링의 불균형에 의한 영향은 약 0.006V, 255도이고, 우측 베어링에서는 약 0.0077V, 5도의 값을 나타내었으며, 위의 값을 좌, 우측 베어링의 진동 신호에서 제거한 나머지 양을 회전체의 불균형에 의한 진동 신호라 하였다.

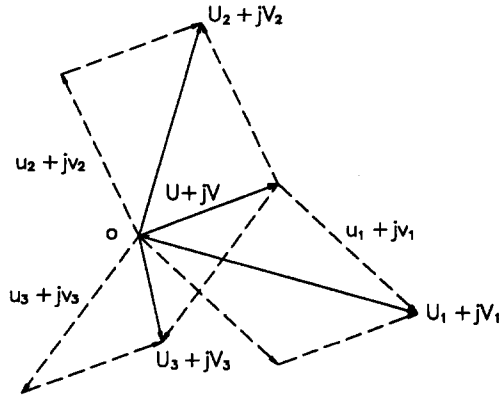
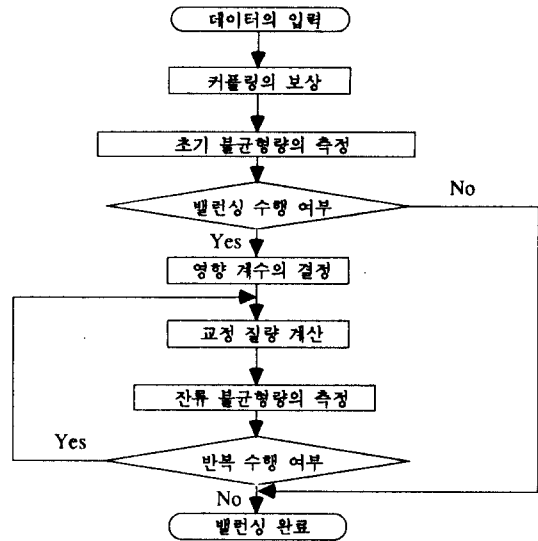


Fig.4.1. 커플링의 불균형에 의한 영향 추정.

#### 4.3. 밸런싱

본 연구에서는 강성 회전체를 영향 계수법을 이용하여 2면 밸런싱을 수행하였으며, 과정을 흐름도로 나타내었다[2-5].

본 연구에서 이용된 밸런싱 알고리즘은 밸런싱 장치의 운용을 위해 개발된 프로그램을 이용하였으며, 이에 대한 자세한 내용은 참고 문헌[5]에 있다. 시험에서는 시도 질량과 교정 질량을 각 교정면의 반경, 60mm에 위치한 구멍에 직경 5mm의 연마봉을 끼워넣는 방법을 사용하였으며, 12번의 밸런싱을 수행하였다.



#### 4.3.1. 초기 불균형에 의한 진동 신호

진동 신호중에서 회전체의 초기 불균형에 의한 신호를 Fig.4.2에 나타내었으며, 각 교정면에서의 불균형량으로 환산한 결과를 Fig.4.3에 나타내었다.

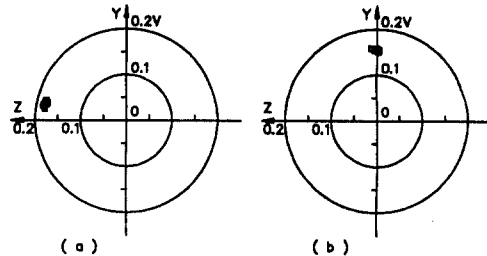


Fig.4.2. 회전체의 초기 불균형에 의한 진동 신호.  
(a) 좌측 베어링. (b) 우측 베어링.

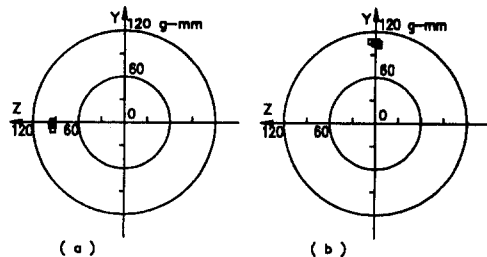


Fig.4.3. 회전체의 초기 불균형량.  
(a) 좌측 교정면. (b) 우측 교정면.

#### 4.3.2. 영향 계수

영향 계수를 구하기 위해서 사용된 시도 질량은 각 시험에서 반경 60mm위치에 0.8g에서 1.25g까지의 질량을 좌, 우측 교정면에서 각각 0도와 180도 되는 위치에 달아 측정하였다.

### 4.3.3. 밸런싱의 반복

초기 불균형 상태에서 첫번째 교정후 각 교정면에서의 불균형량의 크기는 1/8 ~ 1/12로 줄어들었으며, 3~4번의 밸런싱을 통하여 좌, 우측 교정면에서의 불균형량의 크기는 2g-mm까지 줄어들었다. 3번째 밸런싱에 대한 과정을 Fig.4.4.에 나타내었으며, 그림에 나타난 수치는 밸런싱의 반복수와 그 상태에서의 각 교정면의 불균형량의 크기를 나타내고 있다.

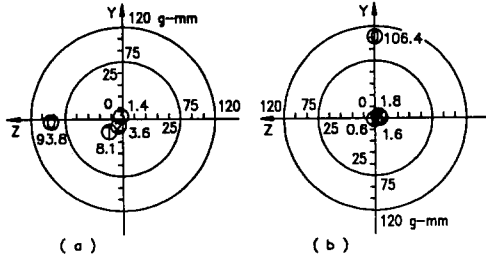


Fig.4.4. 밸런싱의 반복 후, 잔류 불균형량.  
(a) 좌측 교정면. (b) 우측 교정면.

### 4.3.4. 불균형량 저감비와 주파수 성분 비교

Table.4.1.에는 밸런싱 전, 후의 각 교정면에서의 불균형량과 불균형량 저감비를 나타내었다.

Fig.4.5.에서 Fig.4.6.까지의 그림은 12번째 밸런싱에 대한 자기스펙트럼으로 초기 불균형에 의한 진동 신호의 자기스펙트럼과 밸런싱 후의 자기스펙트럼을 나타내었다. 밸런싱 후, 31.6Hz(1895rpm)에 해당되는 동기 진동 성분들은 상당히 많이 줄어든 것을 알 수 있다.

Table.4.1. 밸런싱 전, 후의 불균형량 비교.

시험	좌측			우측		
	교정전 (g-mm)	교정후 (g-mm)	저감비 (%)	교정전 (g-mm)	교정후 (g-mm)	저감비 (%)
시험1	93.0335	1.1397	98.77	104.573	0.6005	99.43
시험2	93.3579	1.2417	98.67	102.976	2.0500	98.01
시험3	94.1161	1.4147	98.50	105.011	1.6381	98.44
시험4	93.7687	0.0238	99.97	106.399	2.8991	97.28
시험5	93.2048	0.6069	99.35	105.882	1.5193	98.57
시험6	94.6324	0.4252	99.55	106.738	0.8662	99.19
시험7	93.1673	1.1277	98.79	104.108	1.0257	99.01
시험8	94.2310	1.3105	98.61	107.480	1.0939	98.98
시험9	94.2494	1.8142	98.08	104.576	2.0212	98.07
시험10	94.2898	0.5071	99.46	102.077	1.5119	98.52
시험11	96.5303	0.4395	99.54	103.746	1.3695	98.68
시험12	98.2379	1.6613	98.31	106.399	2.3131	97.83

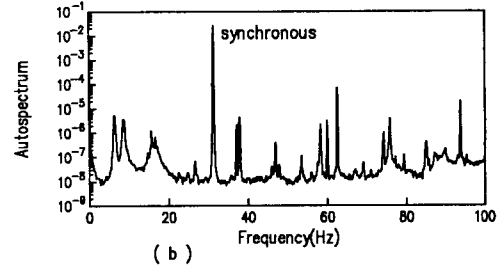
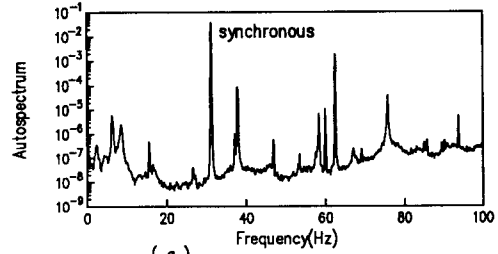


Fig.4.5. 초기 불균형에 의한 진동 신호의 자기스펙트럼.  
(a) 좌측 베어링. (b) 우측 베어링.

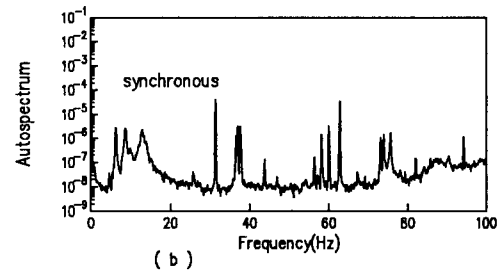
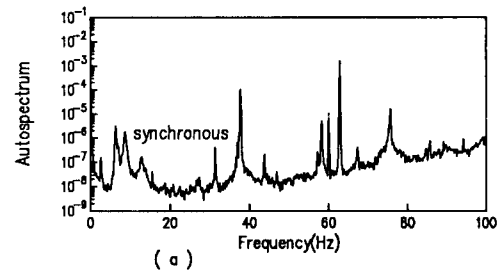


Fig.4.6. 잔류 불균형에 의한 진동 신호의 자기스펙트럼.  
(a) 좌측 베어링. (b) 우측 베어링.

### 4.4. 회전체의 각도 위치에 따른 신호의 변화

Fig.4.7.에는 커플링은 같은 각도 위치에, 그리고 회전체를 60도마다 회전시키면서 커플링에 연결하였을 때 얻은 결과를 나타내며, 회전체가 커플링에 물리는 각도를 변화시키더라도 각 교정면에서는 최대 6g-mm이내의 불균형량을 갖는 것으로 나타났다.

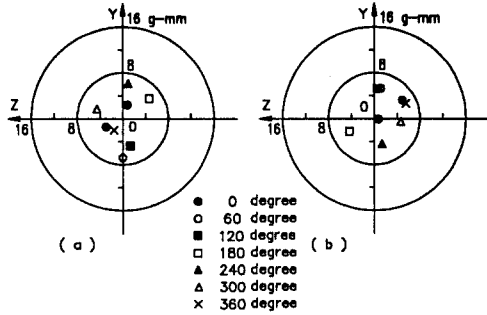


Fig.4.7. 커플링은 같은 각도에, 회전체를 60도씩 돌린 뒤의 불균형량의 변화.

(a) 좌측 교정면. (b) 우측 교정면.

#### 4.5. 불균형 질량의 변화

밸런싱된 상태에서 불균형 질량을 임의 위치에 붙이고, 이 양을 정확히 찾는지를 알아봄으로써, 시험에서 사용된 장비와 프로그램의 정확성, 그리고 장치의 성능을 알아볼 수 있다.

##### 4.5.1. 교정면에 질량을 더하는 경우

밸런싱된 상태에서 좌측 교정면의 반경 60mm, 50도에 1.25g을 질량을 더하였을 때의 결과를 밸런싱 반복과정마다 각 교정면에 더해진 불균형량으로 계산하여 Fig.4.8에 나타내었으며, 각 교정면에서 최대 약 6.0g·mm, 2.9도의 차이가 발생하였다.

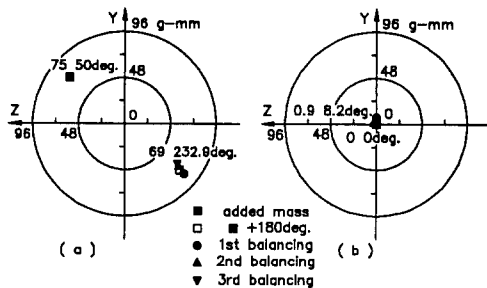


Fig.4.8. 좌측 교정면의 50도에 1.25g을 더한 경우.

(a) 좌측 교정면. (b) 우측 교정면.

##### 4.5.2. 교정면에 질량을 더하고, 제거하는 경우

좌측 교정면의 반경 60mm, 290도에서 1.45g을 제거하고, 우측 교정면에서는 1.45g을 60도에 더했을 때 시험한 결과를 Fig.4.9에 나타내었으며, 각 교정면에서의 차이는 최대 9.48g·mm, 6.27도이었다.

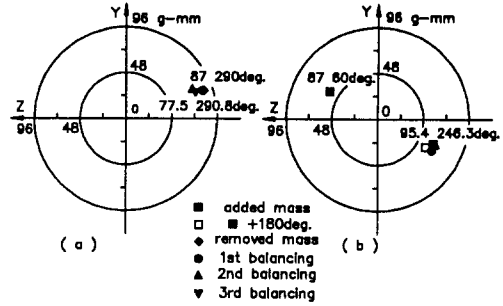


Fig.4.9. 1.45g을 좌측 교정면의 290도에서 제거하고,

1.45g을 우측 교정면의 60도에 더한 경우.

(a) 좌측 교정면. (b) 우측 교정면.

#### 4.5.3. 불균형량 저감비[6]

각 교정면에서 변화시킨 불균형량과 최종적으로 찾아낸 불균형량사이의 차이로부터 불균형량 저감비를 계산해 낼 수 있다. 교정면에 질량을 더하는 경우의 저감비는 92.0%이고, 질량을 더하고, 제거하는 경우의 저감비는 좌측 교정면에서는 89.0%, 우측 교정면에서는 90.3%이었다.

#### 4.6. 잔류 불균형량의 크기와 각도 추정[6]

밸런싱 후, 각 교정면의 잔류 불균형량의 크기와 각 위치를 알아보기 위하여 12번째 밸런싱된 후, 반경 60mm 위치에 불균형 질량 0.15g을 각 교정면의 8개 위치에 더했으며, 이때 구해진 결과를 Fig.4.10에 나타내었다. 좌측 교정면에서의 평균값은 10.78g·mm이었고, 진폭은 0.396g·mm, 그리고 최고값을 나타내는 각도는 약 166도이었다. 우측 교정면에서는 평균값이 8.18g·mm이고, 진폭은 2.24g·mm이었으며, 최고값을 나타내는 각도는 231도이었다.

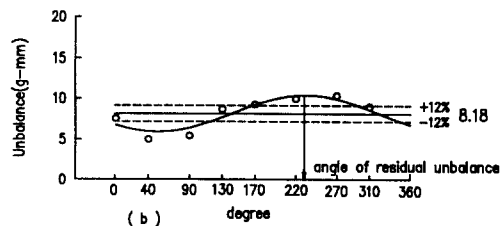
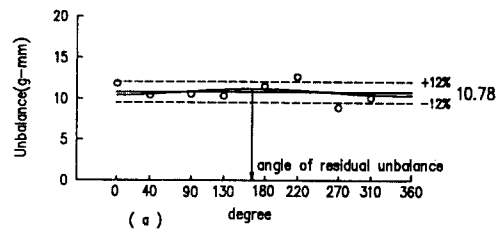


Fig.4.10. 각 교정면의 잔류 불균형량의 추정.

(a) 좌측 교정면. (b) 우측 교정면.

## 5. 결론

1. 커플링의 불균형에 의한 영향은 상당히 작은 것으로 나타났다.

2. 밸런싱을 하는 데 필요로 하는 초기 불균형, 영향 계수의 측정과 각 교정면에 더해진 교정 질량의 값들은 여러 번의 밸런싱의 결과 일정함을 알 수 있었다.

3. 주파수 영역에서 등기 진동 성분의 크기 감소로부터 밸런싱의 효과를 확인할 수 있었다.

4. 밸런싱된 회전체에서 질량의 불균형을 발생시켰을 경우, 이로부터 추정된 불균형량의 저감비는 약 89%이상인 것으로 나타났다.

5. 밸런싱 후, 9.0g-mm의 불균형량을 이용하여 각 교정면에서의 잔류 불균형량을 추정한 결과, 약 2.24g-mm이하인 것으로 나타났다.

6. 여러 시험 결과로부터 2자유도의 모형화와 수식, 그리고 밸런싱을 수행하는 알고리즘의 타당성을 검증할 수가 있었다.

7. 본 밸런싱 장치는 9.345kg인 회전체를 1895rpm에서 밸런싱을 하였을 때, 커플링의 불균형에 의한 영향을 제거한 상태에서 각 교정면에서 10g-mm이하의 잔류 불균형량을 얻을 수가 있으며, ISO규격의 허용 오차를 감안하고, 커플링의 불균형에 의한 영향을 제거하지 않아도 G1.0급의 정확도를 갖는 밸런싱을 할 수 있다.

## 6. 참고 문헌.

1. 김 성욱. "영향 계수법을 이용한 고속회전축의 Multi-Plane Multi-Speed 밸런싱", 한양 대학교 대학원 석사 학위 논문, 1992.
2. J. S. Rao, Rotor dynamics, Halsted Press, New Delhi, 1983.
3. John M. Vance, Rotordynamics of turbomachinery, John Wiley & Sons, 1987.
4. M. S. Darlow, Balancing of High-speed Machinery, Springer-Verlag New York Inc., 1989.
5. 이 영섭. "회전체 밸런싱 장치와 운용 프로그램 개발", 한국 과학 기술원 석사 학위 논문, 1991.
6. ISO Standard Handbook. 4, ISO, 1985.
7. "Balancing set type3516 User's Manual", B & K Co, 1979.