

레이저 변위계를 이용한 고속 회전스핀들의 필드 발란싱 기법

임성현^a, 박영일^{a*}Field Balancing Process of High Speed Spindle Using
Laser DisplacerSunghyun Lim^a, Yeong-il Park^{a*}^a Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science&Technology
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	2	January	2017
Revised	6	February	2017
Accepted	10	February	2017

Keywords:

Balancing
Field balancing
Phase balancing
Influence coefficient

ABSTRACT

In recent years, applications of high speed rotating bodies have diversified. It is necessary for a device rotating at high speed to be balanced to minimize vibration. It is necessary to reduce the unbalancing factor to evenly wind the yarn. In this study, we also attempted to devise a technique to minimize the unbalance that occurs while assembling the components of spindles and to simplify the balancing procedure in the field. To balance the spindle, the vibration of the rotating spindle was measured using a laser displacement meter. We also performed balancing using the influence coefficient method by considering the phase.

1. 서론

최근 생산성 향상을 위하여 고속회전체의 사용 분야가 다양화되고 있다. 고속 회전 기기의 경우 회전체의 불평형에 의한 진동으로 인하여 생산 제품의 품질 저하와 회전체를 지지하는 베어링의 파손과 같은 심각한 문제가 발생되기도 한다. 이러한 회전체 불균형에 의한 진동의 균형을 바로 잡기 위하여 불평형 요소를 제거하는 작업을 발란싱(balancing)이라고 한다.

합성섬유제조공정에서 사용되는 권취기는 제조된 원사를 지관에 감는 기기로서 사용자의 요청에 따라 긴 스피들을 장치하고 생산성 향상을 위하여 최근에는 12,000 rpm의 고속 회전하도록 설계되었다. 실제 작동 시 정지 시점에서 원사 권취 시작의 고속 회전까지 광범위한 영역을 고유진동수가 존재하지 않게 설계하는 것은 불가

능하고, 1차, 2차의 고유진동수를 넘겨 3차의 고유진동수까지의 영역을 사권취 영역으로 설계되게 된다.

그러므로 고속으로 회전하는 스피들의 발란싱 작업은 기기의 안정성 확보뿐만 아니라 권취 작업 시 원사가 끊어지지 않고 지관에 고르게 원사를 감기 위해서는 반드시 수행해야 하는 과정이다. 고속으로 회전하는 스피들의 경우에는 부품 단계에서 전용의 발란싱 기기를 활용하여 발란싱 작업을 수행하고 동시에 조립과정을 마친 후에도 현장에서의 발란싱 작업을 수행하여야 한다. 실제 권취기의 조립 시 부품별로 발란싱을 하여 조립하였기 때문에 조립 시 발생하는 조립공차 및 조립 시 추가되는 부품에 의한 불평형이 발생되며 이를 해결하기 위하여 조립상태의 권취기의 스피들에 대한 현장 발란싱 기법이 필요하게 된다.

현재 발란싱 분야의 선행연구 기술 중 많이 활용되는 방법은 영

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6352

Fax: +82-2-948-1651

E-mail address: yipark@seoultech.ac.kr (Yeong-il Park).

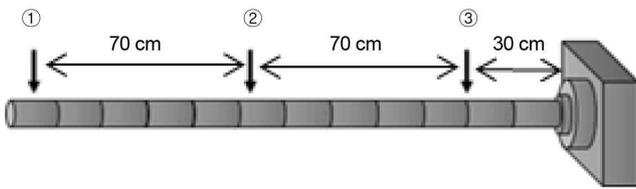


Fig. 1 Measurement plane of spindle

향계수법²⁾이며, 스피들의 진동과 위상을 측정하여 발란싱을 하는 기법과 위상¹⁾만 이용하여 발란싱 하는 기법 두 가지 방법이 있다. 본 논문에서는 두 가지 방법을 검토한 후 현장에서 쉽게 활용할 수 있는 기법인 위상만을 고려한 발란싱을 적용하였다.

본 연구에서는 조립상태의 스피들에서 발생하는 불평형을 줄이기 위한 현장 발란싱 기법을 개발하였다. 스피들의 발란싱 작업을 위하여 회전하는 스피들에서 발생하는 진동을 측정 부위의 진폭을 측정하는 방법을 사용하였다. 레이저 변위계를 사용하여 위상을 고려한 스피들의 진동을 측정하기 위하여 스피들의 진동의 크기와 최대 점 위치 그리고 위상 측정 기준점을 측정하여 스피들의 불평형 벡터를 측정하였다. 이를 활용하여 고속으로 회전하는 스피들에 발란싱 기법을 소개하고 실제 현장 발란싱 작업을 통해 나타난 발란싱 결과를 비교하였다.

2. 스피들 진동 측정

2.1 진동 측정

Fig. 1과 같이 외팔보 형태의 스피들 진동은 스피들 회전부를 지지하는 베어링 부위에서 진동의 측정점을 잡기에 어려움이 있어 측정 대상 지점의 진동을 직접 측정하기 위해 변위 측정센서를 사용하였고 본 실험에서는 레이저 변위계를 사용하였다. 레이저 변위계는 Fig. 2와 같이 스피들의 중심과 수평인 지점에 설치하였다. 또한 불평형 진동 방향인 위상을 측정하기 위하여 스피들에 반사판을 부착하였다.

위상 측정을 위해서 Fig. 3과 같이 레이저가 반사판을 반사할 때 발생하는 피크점을 기점으로 스피들의 진동 피크점을 찾아 위상을 계산하는 방법을 사용하였다. 레이저 변위계가 반사판을 지날 때 측정값을 기준신호로 하며 스피들이 회전 할 때 최대 변위 지점과의 각도 측정을 통해 편심의 위상을 찾을 수 있다. 공진에서는 스피들의 편심의 위치는 최대 변위 방향에서 90° 이동한 지점에 위치한다. 진동을 측정하기 위하여 Keyence의 LK-80d를 이용하였다.

2.2 스피들 모드해석

스피들의 고유진동수와 진동형을 측정하기 위하여 타격시험을



Fig. 2 Laser displacement meter

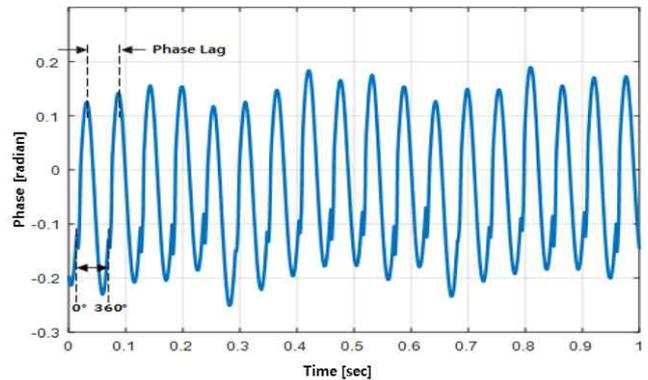


Fig. 3 Phase calculation

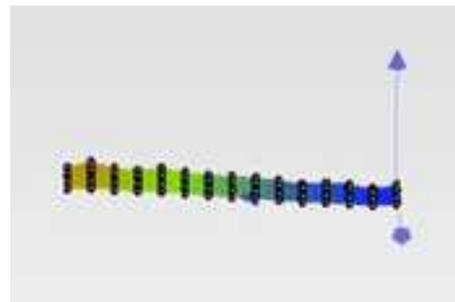


Fig. 4 The 1st natural frequency mode



Fig. 5 The 2nd natural frequency mode

진행하였고 타격시험 결과 1차 고유진동수 19 Hz, 2차 고유진동수는 38 Hz로 측정되었다. 1차 고유진동수에서는 측정면 ①부분이 불평형에 의한 진동을 가장 크게 발생시키게 되므로 집중적인 발란싱 작업이 요구되게 된다. 또한 2차 고유진동수에서는 측정면 ③

부분의 진동이 크지만 상대적으로 그 크기가 작아 불평형에 의한 영향도 작게 나타나게 된다. 그러나 실제 불평형 원인 지점이 스핀들 전체에 분포되어 있는 경우도 있으므로 3면 발란싱을 통해 모든 부분에 대한 발란싱을 수행하였다. 또한 불평형에 의한 진동의 크기가 가장 큰 공진점에서 발란싱을 수행하기 위해서 1차 고유진동수에 해당되는 19 Hz(1,140 rpm)에서 발란싱 작업을 진행하였으며, 2차 고유진동수인 38 Hz(2,280 rpm)에서 발란싱 결과를 확인하였다.

3. 스핀들 단면 발란싱 과정

모드해석 결과를 보면 1차 고유진동수에서 외팔보 ①부분이 가장 큰 불평형 진동을 나타내므로 이 부분에서의 단면 발란싱을 수행하여 스핀들의 발란싱 과정을 확립하고 이를 바탕으로 다면 발란싱으로 확대 적용한다.

3.1 스핀들의 진동 측정

먼저 스핀들의 불평형으로 인한 초기 진동 상태를 측정한다. 스핀들을 19 Hz에 해당하는 1,140 rpm으로 회전시키고 레이저 변위 센서에서 측정된 결과를 이용하여 불평형 진동량(A_0)과 위상(Φ_0)으로 초기 진동 벡터(\vec{V}_0)를 구한다. 불평형을 제거하기 위해서는 초기 진동 벡터의 반대 방향의 $-\vec{V}_0$ 벡터의 진동을 발생시키는 보정질량을 부착하면 발란싱이 완료된다.

초기 진동 크기와 위상을 계산하기 위하여 스핀들에 크기를 알고 있는 매개질량을 부착하여 그 영향을 포함한 진동을 위상차(Φ_1)와 진동레벨(A_1)로 매개질량 영향 진동 벡터 \vec{V}_1 을 측정한다. Fig. 6에서 초기 진동 벡터 \vec{V}_0 와 매개질량 영향 진동 벡터 \vec{V}_1 을 활용하여 매개질량 벡터 \vec{V}_t 를 구한다.

3.2 보정질량 계산

Fig. 7를 보면 보정벡터 \vec{V}_c 는 초기 불평형 벡터의 반대방향인 $-\vec{V}_0$ 이다. 보정질량의 크기는 매개질량으로부터 다음과 같이 구한다.

$$\frac{m_t}{A_1} = \frac{m_c}{A_c}, m_c = \frac{A_c}{A_1} m_t \quad (1)$$

m_t 는 매개질량의 질량 값, m_c 는 보정질량의 질량 값, A_1 은 매개질량 벡터의 크기, A_c 는 보정 벡터의 크기이다. 또한 Φ_c 는 보정질량 부착 위치를 나타내는 위상 값으로 매개질량 부착 위치에서 측정된 각도이다.

Table 1 Calibration mass and attachment position

Correction plane	Correction mass [g]	Correction phase [deg.]
1	0.22	140
	1.03	160

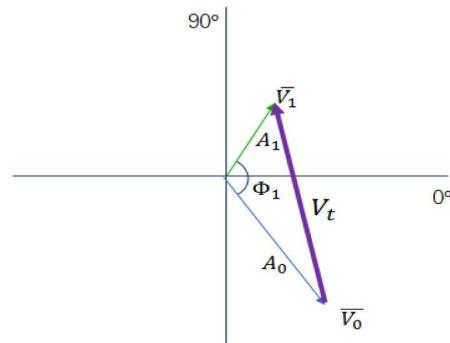


Fig. 6 Unbalanced state vector and add mass state vector

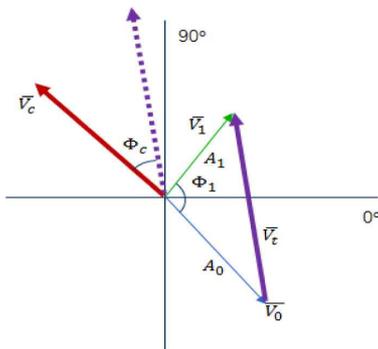


Fig. 7 Calculation for correction vector

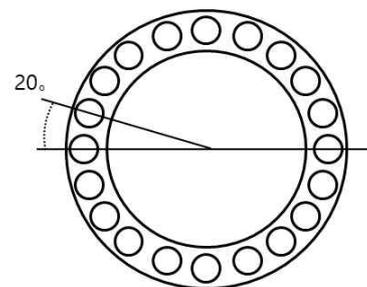


Fig. 8 Mounting position

그러나 스핀들에는 보정질량을 부착할 수 있는 위치가 Fig. 8과 같이 20° 간격으로 되어 있어 Fig. 9와 같이 계산한 보정 벡터를 20° 간격의 벡터로 분해하여 수정 적용한다. 두 수정 보정 벡터의 합이 계산된 보정벡터와 동일하도록 두 부분에서의 크기와 위상을 계산하며 이 과정을 통하여 보다 정확한 발란싱을 구현할 수 있다.

3.3 보정질량 부착 후 진동 측정

위의 절차에 따라 스피ndl의 단면 발란싱을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 9는 스피ndl을 회전시키면 측정된 초기 진동을 나타내고 Fig. 10은 매개질량 부착에 의한 보정질량 계산한 선도이다. 보정질량과 보정 위상을 계산한 위치에 보정질량을 부착한 후 진동레벨을 측정한다. 실제 계산된 보정질량과 위상 값은 1.24 g, 156°이지만 수정 보정질량 부착 위치 값으로 계산하면 Table 1과 같다.

Fig. 11은 발란싱 전후 진동 크기를 비교한 것으로 초기 진동 크기가 약 0.2 mm의 진동량을 보였으나 발란싱 작업 후 약 0.05 mm 정도로 진동량이 줄어들어 약 70% 이상 불평형 진동이 감소하는 결과를 확인할 수 있었다.

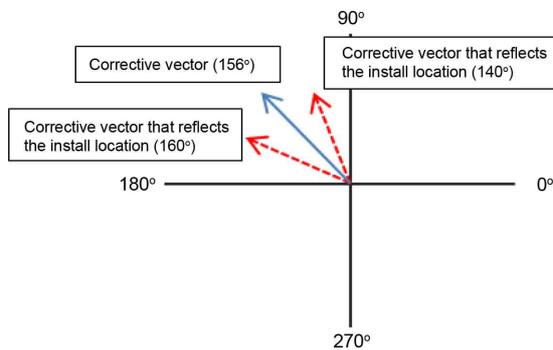


Fig. 9 Vector calculation considering mounting position

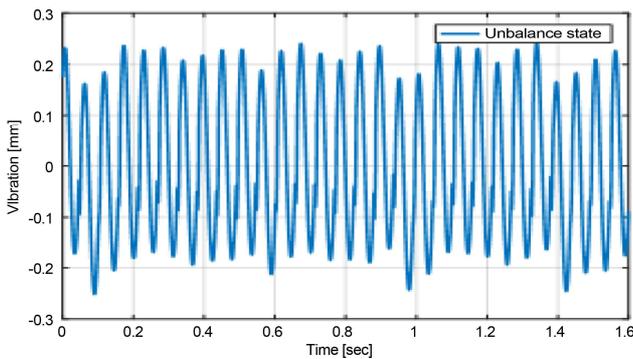


Fig. 10 Single plane: unbalance state

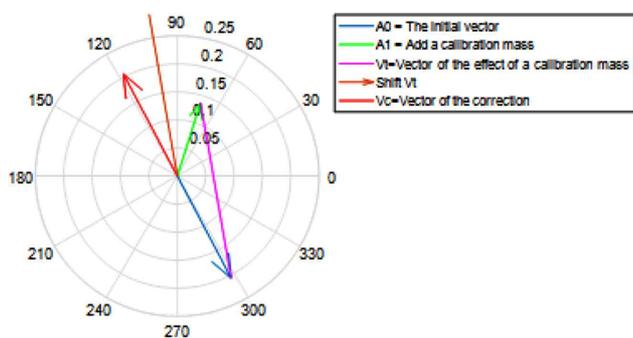


Fig. 11 Correction vector for spindle

4. 다면 스피ndl 발란싱 기법

4.1 위상을 고려한 영향계수법^[1]

영향계수는 다양한 방법으로 계산이 가능하다. 본 연구에서는 변위를 기준의 영향계수법과 매개질량의 위치 즉 위상을 기준의 영향계수법을 검토한 후 현장에서 적용하기 유리한 방법으로 위상을 고려한 영향계수법을 적용하였다.

영향계수법을 구성하는 행렬식은 식 (2)와 같다.

$$\overline{K_{ij}u_i} = \overline{v_i} \quad (2)$$

$\overline{v_i}$ 는 측정면 i 에서의 크기와 위상으로 이루어진 진동벡터, $\overline{u_i}$ 는 초기 불평형 진동량과 위상으로 이루어진 i 면에서의 진동벡터이며, K_{ij} 는 j 면에 단위 질량 부하에 대한 측정면 i 에서의 영향계수이다. 진동 크기를 알지 못하면 K_{ij} 를 구하지 못하기 때문에 측정된 진동 값의 위상을 이용하여 계산한다. 즉, 측정값 $\overline{v_i}$ 는 벡터이므로 $\overline{v_i} = V_i e^{j\theta_i}$ 와 같이 표기하며

$$\overline{K'_{ij}} = \frac{\overline{K_{ij}}}{V_i} \quad (3)$$

라 두면 식 (2)은 식 (4)와 같이 된다.

$$\overline{V_i K'_{ij} u_i} = \overline{V_i e^{j\theta_i}} \quad (4)$$

위 식에서 V_i 를 양변에서 삭제하면 식 (5)이 된다.

$$\overline{K'_{ij} u_i} = e^{j\theta_i} \quad (5)$$

$\overline{K'_{ij}}$ 는 위상으로부터 영향계수를 계산한 행렬이다. 이 식을 이용하기 위해서는 반드시 $\overline{K'_{ij}}$ 를 계산하여야 한다.

$$\overline{K_{ij}} = V_i \overline{K'_{ij}} = \frac{V_i e^{j\theta_i}}{W_{ij}} \quad (6)$$

W_{ij} 는 매개질량을 평면 j 에 부착 후 평면 i 에서의 보정 질량 값

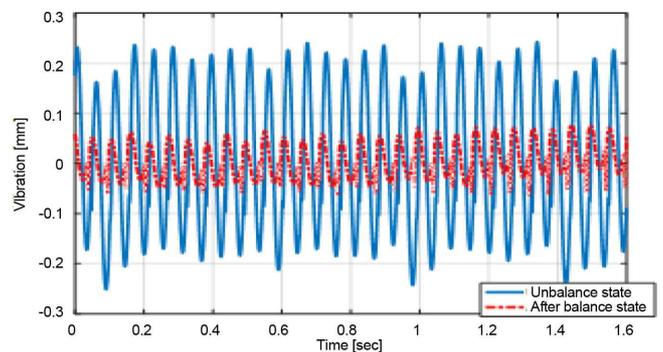


Fig. 12 Single plane: unbalance state vs. after balance state

이다. 이 값은 위상을 이용한 단일 평면 발란싱 방법을 이용하여 계산할 수 있다. \bar{z}_i 는 단면의 초기 불평형 벡터, \bar{z}_{ij} 는 매개질량의 위치가 0도일 때 측정 벡터 그리고 불평형량의 위상 θ_{1ij} , \bar{R}_{ij} 는 매개질량의 위치가 처음 부착한 위치에서 180도 이동시켜 부착하였을 때 측정 벡터이다. 그리고 불평형량의 위상은 θ_{2ij} 로 표기하며, \bar{c}_{ij} 는 매개질량 영향 진동벡터를 뜻한다. 마지막으로 t_i 는 매개질량의 크기로 정의한다.

$$W_{ij} = \frac{z_i}{c_{ij}} \times t_i \quad (7)$$

측정평면 i 에서 보정평면 j 일 때, 단일 발란싱 수행 시 보정질량은 식 (22)와 같이 계산할 수 있다. 여기서 보정질량의 부착 위치는 Fig. 13의 θ_{3ij} 에 처음 매개질량을 부착한 위치의 각도를 더해 주면 보정질량의 부착 위치이다.

$$\theta_{3ij} = \cot^{-1} \left(\frac{\cot \theta_{2ij} - \cot \theta_{1ij}}{2} \right) \quad (8)$$

위상 영향계수 $\bar{K}_{ij} = e^{\theta_{ij}} / \bar{w}_{ij}$ 이므로 식 (5)에서 불평형 벡터 \bar{u}_i 를 구할 수 있고 보정질량의 부착 위치는 $-\bar{u}_i$ 이다.

4.2 다면 발란싱 실험 및 결과

먼저 Fig. 1의 스핀들 ①, ②, ③ 각 면 초기 불평형을 포함한

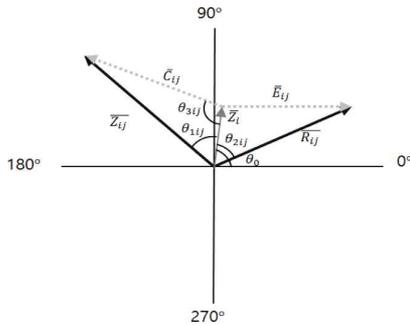


Fig. 13 Phase calculation diagram (19 Hz)

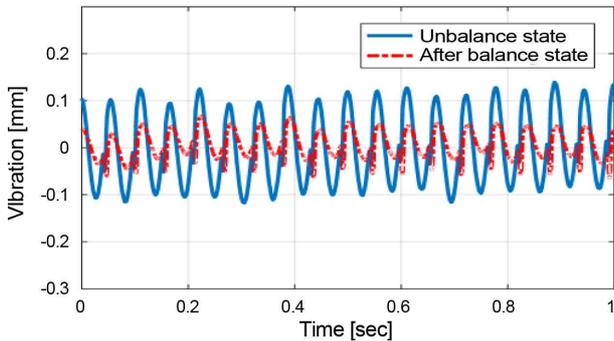


Fig. 14 Plane 1: comparison of unbalanced and balanced conditions (19 Hz)

진동을 측정하여 초기 진동벡터를 구성한다. 그리고 측정평면 ①에 레이저 센서를 위치하고 ①면에 매개질량을 설치하여 진동을 측정하고 매개질량 설치 위상 +180도 지점에 같은 질량의 매개질량을 이동 설치한 후 진동을 측정하여 매개질량 영향벡터를 구한다. 평면 ②, ③에서도 매개질량을 이동하여 동일한 방법으로 진동을 측정한다. 측정된 데이터로 식 (7)을 이용해 \bar{W}_{ij} 를 구한다. Fig. 13과 같이 측정데이터를 토대로 보정 질량 및 위상인 $\bar{W}_{11}, \bar{W}_{21}, \bar{W}_{31}$ 과 θ_3 을 계산한다. 이와 같은 절차는 레이저 센서를 측정평면 ②와 측정평면 ③에 위치시킨 후 동일한 절차로 진동을 측정하고 측정 데이터를 토대로 $\bar{W}_{12}, \bar{W}_{22}, \bar{W}_{32}$ 와 $\bar{W}_{13}, \bar{W}_{23}, \bar{W}_{33}$ 을 계산한다. 각 매개질량 벡터와 위상을 식 (7), (8)을 이용하여 계산한다. 계산된 값을 다시 식 (5)에 대입하여 불평형 벡터 값을 구한다. 보정질량의 부착 위치는 $-\bar{u}_i$ 이다.

본 연구에서 적용한 발란싱 기법을 통해 구해진 보정질량과 위상 값은 Table 2와 같고 각 지점에서 측정한 진동 결과는 Figs. 14-16이다. 1차 고유진동수(rpm)에서의 발란싱 결과는 Table 3과 같다. 평면 ①에서는 약 67.2%, 위치 ②에서는 45.5% 진동이 감소하였고, 보정위치 ③의 경우 초기 진동량이 낮아 비교 대상에 포함시키지 않았다.

그리고 Figs. 17-19는 1차 고유진동수인 19 Hz(1,140 rpm)에서의 발란싱 결과의 스핀들을 2차 고유진동수에 해당하는 38 Hz(2,280 rpm)로 회전시키며 측정한 진동 결과이다. Table 4는 발란

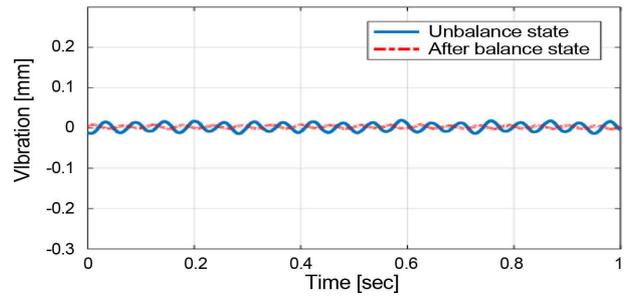


Fig. 15 Plane 2: comparison of unbalanced and balanced conditions (19 Hz)

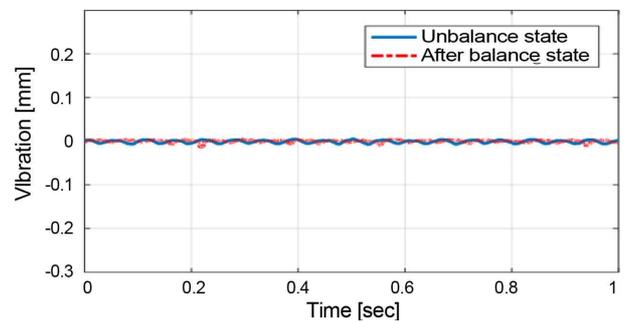


Fig. 16 Plane 3: comparison of unbalanced and balanced conditions (19 Hz)

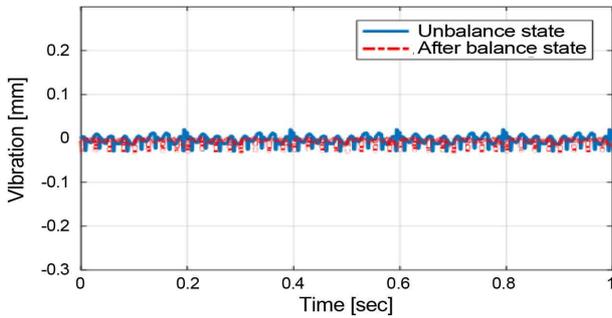


Fig. 17 Plane 1: comparison of unbalanced and balanced conditions (38 Hz)

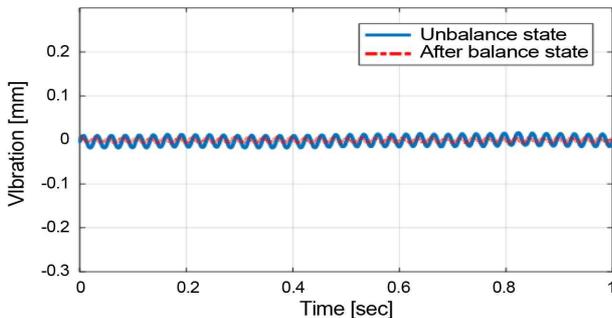


Fig. 18 Plane 2: comparison of unbalanced and balanced conditions (38 Hz)

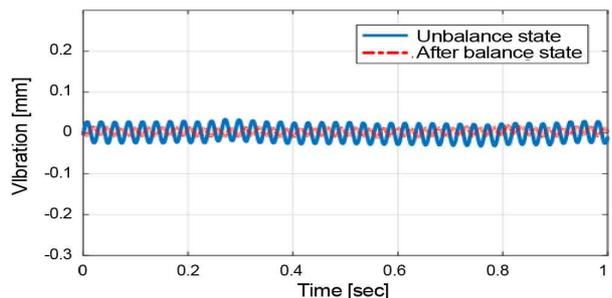


Fig. 19 Plane 3: comparison of unbalanced and balanced conditions (38 Hz)

Table 2 Calibration mass and attachment position

Correction plane	Correction mass [g]	Correction phase [deg.]
1	1.89	80
	0.23	100
2	1.20	15
	2.42	30
3	1.81	90
	1.88	105

상에 의한 진동 크기 감소율을 보여준다. 2차 고유진동수에서의 감소율이 크지만 전체적인 진동 크기가 작아 1차 고유진동수에서 발란싱만으로도 충분한 결과를 얻을 수 있다.

Table 3 Vibration reduction amount (19 Hz)

Position ①	Position ②	Position ③	
67.2	45.5	-	Reduction ratio [%]

Table 4 Vibration reduction amount (38 Hz)

Position ①	Position ②	Position ③	
95.1	68.2	51.7	Reduction ratio [%]

5. 결론

본 연구에서 권취기의 고속 스피들의 불평형에 의한 진동을 제거하기 위하여 스피들 조립상태에서의 현장 발란싱 기법을 개발하였으며 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다. 스피들 진동의 측정에는 기존에 많이 사용되는 가속도계에 의한 진동 측정에 어려움이 있어 레이저 변위 센서를 이용하여 진동을 측정하였고 스피들에 반사판을 특정 위치에 부착하여 위상을 측정하였다.

다면 발란싱을 수행하여 스피들 발란싱 기법을 확인하였고 이를 바탕으로 스피들 전체의 불평형을 발란싱할 수 있는 다면 발란싱 기법을 적용하였다. 발란싱 작업은 외팔보 형태의 스피들의 1차 고유진동수에서 시행되었고 1차 고유진동수에서 그 결과를 확인한 결과 충분한 결과를 얻어 발란싱 작업은 후후 1차 고유진동수에 해당하는 회전수에서 실행하면 된다. 다면 발란싱은 발생하는 진동의 위상만을 고려한 위상 영향계수법을 적용하였으며 이를 적용하여 스피들의 불평형을 발란싱하는 시험을 수행하였다. 발란싱 작업은 1차 고유진동수 시험 결과 발란싱 전후에서의 진동 크기가 감소하였다.

본 연구결과를 검토하기 위하여 부품별 발란싱을 진행한 스피들의 진동과 본 연구에 적용된 실험결과를 비교하였다. 측정된 모든 평면에서 부품별 발란싱보다 현장 발란싱 결과로 진동이 감소하였으며 본 연구에서 적용한 발란싱 기법은 실제 권취기의 고속 스피들의 현장 발란싱 기법으로 사용하기 적합한 것으로 판단된다. 보정질량의 추가로 인해 스피들의 고유진동수가 변화할 수 있다.

향후 본 연구에서 진행한 실험에 대한 결과를 주파수 전 영역대에서 평가하여 보정질량에 의한 전체적인 발란싱에 대한 평가를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Foiles, W. C., Bently, D. E., 1988, Balancing With Phase Only (Single-Plane and Multiplane), *J. Vib., Acoust., Stress, and Reliab.*, 110:2 151-157.
- [2] Rao, J. S., 1983, *Rotor Dynamics*, JOHN WILEY and SONS, New York.
- [3] Den, H. J. P., 1985, Dover Published Inc, New York.
- [4] Yang, B. S., 1985, *Vibration of Rotational Mechanics*, InterVision, Seoul.
- [5] Koo, J. H., Kim, I. H., Hur, N. S., 2012, A Study on Balancing of High Speed Spindle Using Influence Coefficient Method, *Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 11:4 104-110.