

지그의 가공오차 보정에 의한 블레이드 무게 중심 측정

Measurement of Gravity Center for Rotor Blades by Compensation of Machining Error in Jig

공재현¹, 김기성¹, 예상돈², 천세영³, 허관도^{2,✉}
Jae Hyun Kong¹, Ki Sung Kim¹, Sang Don Ye², See Young Chun³ and Kwan Do Hur^{2,✉}

¹ 동의대학교 기계공학과 대학원 (School of Mechanical Engineering, Dong Eui Univ.)

² 동의대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dong Eui Univ.)

³ 한국폴리텍 7 대학 (Korea Polytechnic.)

✉ Corresponding author: kdhur@deu.ac.kr, Tel: 051-890-1664

Manuscript received: 2010.2.18 / Revised: 2010.7.26 / Accepted: 2010.9.20

There are many unbalanced models such as helicopter's rotor blades, small-sized precision motor in industrial applications. In the real products, their gravity center usually does not accord with the desired gravity center. If the deviation is large between them, it can be a major cause of vibration and noise as the part of model rotate. Therefore the gravity center in the rotational parts should be controlled properly because of static and dynamic balancing of the parts. In the research, the rotor blade of unmanned helicopter has been selected to obtain the high quality of balancing. In order to achieve the purpose, measuring system has been developed. In the system applied principle is three point weighting method, which is one of the Multiple-point Weighting Method. It has circle fitting for compensation of machining error, after measuring the values. From this study, the results showed that the proposed measurement procedure gives reliable and precise gravity center.

Key Words: Three Point Weighting Method (삼중점 무게 측정 방법), Gravity Center (무게중심), Compensation of Machining Error (가공오차보정), Rotor Blades (로터 블레이드), Static Balancing (정적 밸런싱), Circle Fitting (원 궤적 산정), Unbalanced Model (비평형 형상), Unmanned Helicopter (무인 헬리콥터)

1. 서론

헬리콥터의 성능, 소음, 진동 및 안정성을 결정 짓는 핵심요소인 로터 시스템은 무인 헬리콥터의 개발 시 최우선적으로 개발되는 구성품 중의 하나이다. 로터 시스템을 구성하는 로터 블레이드는 기동비행을 위한 대부분의 하중을 감당해야 하며, 고속회전에 의해 발생하는 주기적인 하중 변화에 의한 무게 중심(gravity center) 오차가 블레이드의 구조에 극심한 반복 응력 및 피로 하중을 유발시킨다. 만약 블레이드의 무게 중심이 어긋나게 된

다면 블레이드가 고속으로 회전할 때 생기는 무게 중심 편차에 의해 기체에 무리가 가게 된다. 따라서 헬리콥터의 안전성과 성능향상을 위해 블레이드의 구조와 무게중심의 오차를 고려한 불평형 모멘트의 보정이 필요하다.^{1,2}

무게중심의 오차를 보정하기에 앞서 로터 블레이드의 정밀한 무게중심 측정이 필요하다. 무게중심을 측정하는 방법에는 검사체의 무게중심에 작용하는 중력의 힘에 의존하는 정적인 방법과 물체의 회전에 따라 진동을 유발시켜서 무게중심을 측정하는 동적인 방법이 있다.^{3,4}

정적인 측정 방법에는 다중점 무게 측정 방법 (multiple-point weighting method), 재 위치 측정법 (repositioning method), 불평형 모멘트 방법 (unbalance moment method)이 있고, 동적인 측정 방법에는 스핀 밸런스 방법 (spin balance method), 관성 모멘트 방법 (moment of inertia method) 등의 방법이 있다.

정적인 방법은 동적인 방법보다 정확성이 높고 측정방법이 용이하며, 동적인 방법은 정적인 방법 보다는 정확도가 다소 떨어지며 측정절차가 복잡하여 회전이 용이하지 않거나 파손의 우려가 있는 단점이 있다.^{5,6}

Lee 와 Yoo 는 위의 정적인 방법 중에서 다중점 무게 측정 방법의 한 개인 3 점 측정 방식을 채택하여 소형 대상물에 대한 불평형 모멘트를 측정하는 연구를 하였다.^{5,7}

본 연구에서는 정적인 측정 방법 중 3 점 측정 방식을 사용하여 무인 헬리콥터의 중요 부품 중 하나인 로터 블레이드의 무게 중심을 측정하고 보상이 가능한 시스템을 구성하는데 목적이 있다. 로터 블레이드는 대형 제품이고 3 차원 적인 형상을 가지는 모델이므로 Lee 와 Yoo 의 연구에 사용된 측정장치보다 고정 지그의 형상이 복잡하여야 한다. 지그의 복잡성 때문에 지그의 가공오차는 필연적으로 발생하며, 이를 보상하기 위하여 측정된 값들을 원 궤적 산정(circle fitting)하여 측정값을 얻는다. 이렇게 얻어진 측정값을 사용하여 표본 평균값과 표본 분산의 통계적 추정치를 허용하여 무게 중심을 구한다.

2. 무게 중심 측정 장치

2.1 측정 원리 및 방법

측정 방법은 로터 블레이드를 3 개 또는 그 이상의 로드셀로 지지하고, 무게중심은 각 지점에서 측정된 값을 이용하여 계산하는 것이다.

무게중심과 무게 두 가지 모두 측정이 가능하며, 기하학적 최적 조건의 사용으로 측정 대상에 대한 감도가 우수하고 무거운 물체의 무게중심 측정이 가능하다. 또한 정적 측정 방법 중 가장 빠른 장점이 있는 반면, 축의 영점을 결정하기 어려우며 측방향 효과(side effect)에 대한 보정식이 필요하다는 단점이 있다.⁷

로터 블레이드의 무게중심 측정 방법에 대해 Fig. 1 에 나타내었다.

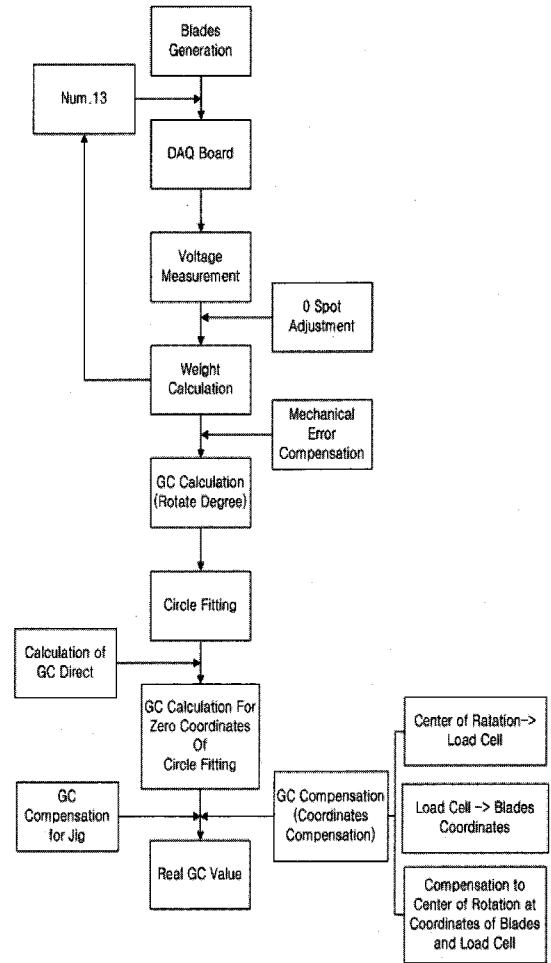


Fig. 1 Measurement process of the measuring system

무게중심을 측정 하기에 앞서 3 차원 측정기를 사용하여 블레이드 측방향과 폭방향에 대한 거리를 측정하여 블레이드에 대한 거리 중심을 측정한다. 0.0015V 분해능을 가지는 로드셀에서 나오는 전기 신호를 0.00173V 의 분해능을 가지는 증폭기를 거쳐서 자료획득보드(DAQ board)를 사용하여 전자 신호로 바꾸어 컴퓨터로 전송이 되면 무게중심 측정 프로그램에 의하여 전압이 측정이 된다. 전압으로 측정되는 자료획득보드의 분해능은 0.0011921mV 이며 식 (1)에 나타내었다.

$$Q = E_{FSR} / 2^M \tag{1}$$

3 개의 로드셀을 사용한 3 점 측정 방법으로 3 개의 로드셀 위에 위치 고정 판을 올려 로터 블레

이드의 무게중심을 측정한다.

먼저 각각의 로드셀에서 나오는 전압을 측정하여 각각의 전압에 대해 0점 조절을 실시한다. 0점 조절이 이루어진 뒤 120° 간격으로 위치한 로드셀 위에 위치 결정 판과 지그를 올린 후 30° 간격으로 총 13 회 측정 후 지그와 위치 고정 판의 무게 및 무게중심을 측정하여 계산 후 보정 한다. 이때 사용된 계산식을 식(2) ~ (5)에 나타내었으며, 최소 3 번 이상의 측정이 필요하다. 식 (2)에서 j 값은 로드셀의 j 번째 측정 데이터 값을 나타내며, i 값은 로드셀의 순서를 나타낸다. 식(3)에서 w_k 값은 k 번째 분할 각도에서의 로드셀 당 측정 무게 합을 나타내며, 분할 각도 값인 k 에 대해서 식(4)에 나타내었다. 통계적 방법에 의한 블레이드의 측정 무게를 식(5)에 나타내었다.

$$W_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n W_j \tag{2}$$

$$W_k = \sum_{i=1}^n W_i \tag{3}$$

$$k = 2\pi / \Delta\phi + 1 \tag{4}$$

$$W_t = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n W_k \tag{5}$$

3 개의 로드셀에서 블레이드가 회전 후에 안정 상태, 즉 3 개의 로드셀에서 출력되는 신호당 출력 변화가 최소가 되는 순간까지의 1000 번의 측정을 한다. 이렇게 측정된 측정값을 블레이드의 무게 중심의 좌표 X_{CG} , Y_{CG} 라 하고, Fig. 2 에 나타낸 것과 같다고 가정했을 때 블레이드의 회전 각도별 무게 중심은 식 (6) ~ (7)에 의해 계산된다. Fig. 2 에 있는 정렬 오차인 θ 를 이용하여 좌표 측정렬이 되며 식 (8)에 나타내었다. Fig. 2 에서 X_{L0} , Y_{L0} 는 로드셀의 좌표축이고, X_L , Y_L 은 블레이드의 좌표축을 나타내고 있다.

$$X_{GC} = \{(W_1 - W_2 \sin \theta_2 - W_3 \sin \theta_3)R\} / W \tag{6}$$

$$Y_{GC} = \{(W_3 \cos \theta_3 - W_2 \cos \theta_2)R\} / W \tag{7}$$

$$X[T]_{\theta} = X' \tag{8}$$

블레이드의 개략적인 형상에 대해 Fig. 3 에 나타내었고, 길이 방향을 x 축으로 하고 폭방향을 y 축으로 정의하여 Fig. 4 에 나타내었다.

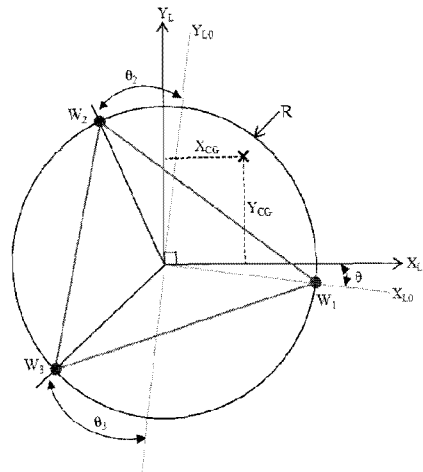


Fig. 2 Principle of 3-point weighting method

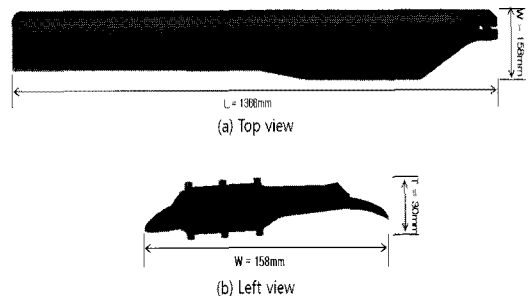


Fig. 3 Top and left view of rotor blade

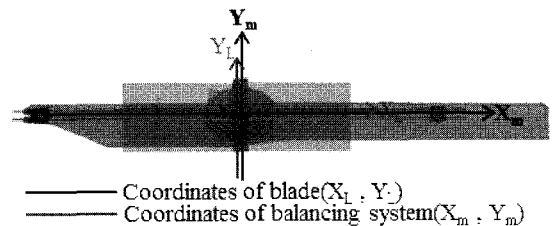


Fig. 4 Configuration of the axis in the measuring system

회전 각도 별로 계산된 무게 중심 값을 원 궤적 산정을 하여 원 궤적 산정된 원점에 대한 무게 중심 값을 계산한다. 이렇게 계산된 무게 중심 값

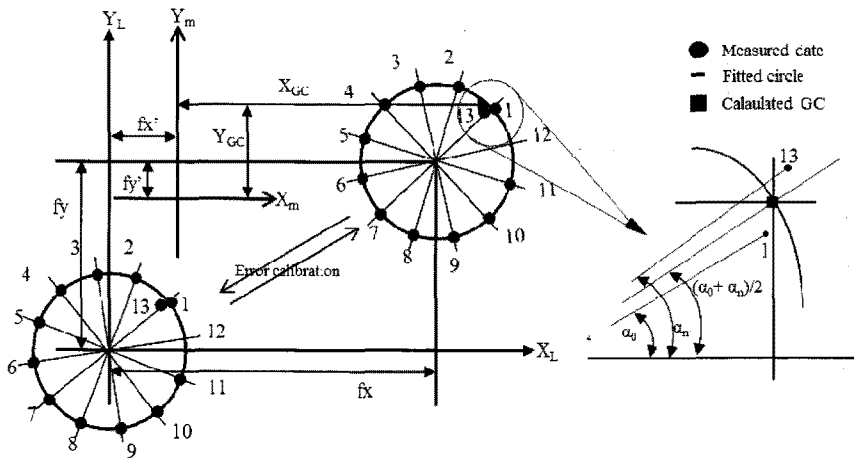


Fig. 5 Machining error calibration of alignment jig

을 로드셀에 대한 0 점 보정과 블레이드의 무게 중심에 대한 0 점 보정, 원 궤적 산정을 한 가공오차에 대해 보정하여 실제 무게중심 값을 계산할 수 있다.

2.2 측정용 지그의 가공오차 보정 방법

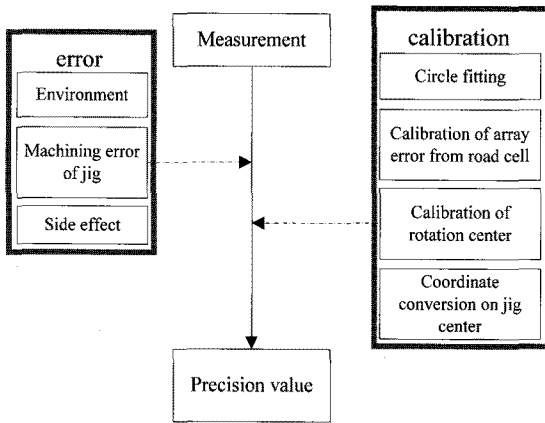


Fig. 6 Procedure of error calibration

블레이드 측정시 발생하게 되는 오차를 보정하는 과정 및 각각의 요소들에 대하여 Fig. 6에 나타내었다.

블레이드를 끼우는 위치 고정 원판의 회전 중심은 이론적으로 Fig. 2에 나타내어진 데로 꼭지점에서 반력을 측정하는 삼각형의 도심에 위치해야 한다. 그러나 형상 가공 시 가공오차는 필연적으로 생기며, 이러한 가공오차에 대한 보정은 필수

적이다. 가공오차에 대한 보정 방법을 Fig. 5에 나타내었다.

X_L, Y_L 은 로드셀에 의한 좌표축을 블레이드 축에 맞게 정렬 후 나타낸 것이다. X_m, Y_m 은 블레이드 위치 고정용 지그의 좌표축을 나타낸 것이다.

약 30°로 블레이드를 이동한 후 측정값을 2라 하고 같은 방법으로 13회 측정값을 변호로 나타내었다.

α_x 에 대한 식을 식(9)에 나타내었다. 시작점과 마지막 점에서의 좌표값들의 통계적 평균값을 의미한다.

$$\alpha_x = \frac{\alpha_1 + \alpha_{13}}{2} \tag{9}$$

α_x 는 회전 중심으로부터 실제 무게중심 위치가 향하는 방향을 의미한다.

모든 측정이 끝난 뒤 원 궤적 산정한 측정값들은 하나의 원을 그리게 되며, 원의 중심은 측정된 로드셀 좌표와 회전 중심에 불일치에 의한 오차를 가지고 있다.

13개의 점은 측정 시 오차로 인하여 정확히 동심원 상에 있지 않기 때문에 하나의 원을 구하기 위해 원 궤적 산정을 하였고 Levenberg-Marquardt 방정식을 사용하여 원의 방정식을 구하였으며 식(10)와 식(11)에 나타내었다.

$$f(x) = \frac{1}{2} \sum_{e=1}^n [f_e(x)]^2 \tag{10}$$

$$(x - f_x)^2 + (y - f_y)^2 = r_{GC}^2 \quad (11)$$

축 정렬 된 로드셀 좌표와 가공오차에 의한 회전 중심과의 차이 (f_x, f_y) 와 최종 블레이드 위치 고정용 지그의 좌표축과의 오차 (f'_x, f'_y) 를 보정하는 일련의 좌표변환 행렬식을 식 (12) ~ (14)에 나타내었다.

식 (12)는 회전 중심을 축 정렬된 로드셀의 좌표축 X_L, Y_L 로 좌표 변환에 관한 관계식이다. 식 (13)은 식 (9)의 α_x 와 식 (11)의 r_{GC} 를 이용하여 회전 중심에 대한 무게중심을 구한 후 축 정렬된 로드셀에 대한 좌표로 이동하는 행렬식을 나타낸 것이다.

$$X'[T]_{-f_x, f_y} = X'' \quad (12)$$

$$X''[T]_{f_x, f_y} = X''' = X' \quad (13)$$

$$X'[T]_{f'_x, f'_y} = \text{Real GC} \quad (14)$$

결국 실제 무게중심인 Real GC 는 식 (11)의 r_{GC} 식 (9)의 α_x 와 식 (12), 식(13) 및 식(14)에 의한 좌표변환에 의해 구해진다.

이렇게 구하여진 무게 중심값을 이용하여 표본 평균값과 표본 분산의 통계적 추정치 식을 이용하여 신뢰도 구간을 획득할 수 있으며 식 (15) ~ (17)에 나타내었다.

$$x_G = \bar{x} \pm t_{v,p} S_x \quad (P\%) \quad (15)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (16)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (17)$$

여기서 $(x_i - \bar{x})$ 는 x_G 의 편차이다. 표본 표준 편차, S_x 는 $\sqrt{S_x^2}$ 로 얻는다. t 추정자인 변수 $t_{v,p}$ 는 유한한 자료 집합에 사용되는 새로운 가중함수로부터 구할 수 있다. t추정자의 값은 확률 P와 표준 분산의 자유도, v의 함수이며, Table 1에 나타내었다.

Table 1 Distribution of $t_{v,p}$

v	t_{50}	t_{90}	t_{95}	t_{99}
1	1.000	6.314	12.706	63.657
2	0.816	2.920	4.303	9.925
3	0.765	2.353	3.182	5.841
4	0.741	2.132	2.770	4.604
5	0.727	2.015	2.571	4.032
6	0.718	1.943	2.447	3.707
7	0.711	1.895	2.365	3.499
8	0.706	1.860	2.306	3.355
9	0.703	1.833	2.262	3.250
10	0.700	1.812	2.228	3.169

2.3 측정 장치

3 점 측정 방법을 이용하기 위해서 3 개의 로드셀을 이용한 측정장치와 로드셀의 위치에 대해 Fig. 7에 나타내었다.

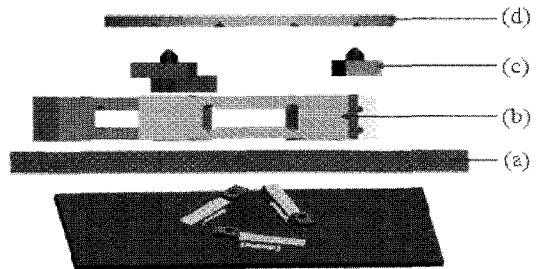


Fig. 7 Schematic diagram of the measuring system

(d)부는 v-slot 이 있는 회전 원판으로서 로터 블레이드 지그부와 연결되며, v-slot 이 있어 위치 고정 핀에 의해 측정 중에는 움직이지 않도록 구성하였다. 측정 시 발생하는 마찰력과 주변환경 등의 영향으로 원판을 로드셀에 올릴 때 마다 무게 중심이 미세하게 변하며, 이때 정밀도는 로드셀의 분해능과 원판 및 지그의 가공 정밀도에 의한 영향을 받는다. 따라서 위치 정밀도가 우수한 ball and vee 타입의 구조로 원판을 제작하였다. 측정시 (c)부는 회전 원판 위치 고정핀으로서 회전 원판의 회전시에 일정한 위치에 올 수 있도록 하는 역할을 하며, (d)부의 v-slot 과 접촉하여 측정 중 움직임이 없도록 하고, 회전시 $0^\circ, 360^\circ$ 는 항상 일치하도록 하였다. (b)부는 로드셀로 3 점 측정을 위해 3 개의 로드셀을 이용하였다. 로드셀의 배열을 회전 접선 방향으로 고정시킨 것은 회전 원판

에 의해 측정 시 회전에 의한 측정 오차값을 줄이기 위한 것이다. (a)부는 밸런싱 측정 장치의 로드셀 설치판로서 로드셀을 고정해주는 역할을 한다.

측정 장치의 무게중심 및 무게에 대한 0 점 보정 후 회전각도에 따라 각각의 로드셀로부터 획득한 신호 값들을 통하여 W_1, W_2, W_3 의 전압 측정, 무게 계산, 각도 별 무게중심 계산, 원 궤적 산정과 좌표 보정 등을 통하여 적층 블레이드의 무게와 무게중심 좌표 측정 값이 계산된다.

주요 구성요소에 대한 재원을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Specification of measurement components

Circle plate	Diameter	Length	Weight
	200mm	14mm	Kg
Fixing pin	Diameter	Length	Weight
	5.12mm	23.44mm	kg
Load cell	Rated load	Output	Resolution
	5kg	$2.0 \pm 0.2mV/V$	0.015%

로터 블레이드가 무게중심 측정 장치에 올라간 상태를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 (1)은 로터 블레이드의 고정부로서 로터 블레이드와 무인 헬리콥터의 로터 암이 연결되는 홀과 핀으로 고정하였다. Fig. 8의 (2)는 로터 블레이드 지그 부와 회전 플레이트가 연결되는 부분이다.

Fig. 8의 (3)은 지그의 길이방향의 무게 평형을 위하여 Fig. 8의 (1)과 동일한 모델을 이용하여 제작하였다. Fig. 8의 (3)의 핀은 로터 블레이드에 영향을 주지 않고 길이 방향으로 무게중심이 맞도록 Fig. 8의 (a)와 같이 아래쪽으로 향하게 하였다. 블레이드 고정용 지그의 형상을 Fig. 9에 나타내었다.

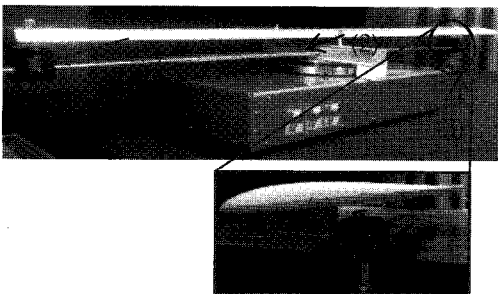


Fig. 8 Static balancing device of rotor blades

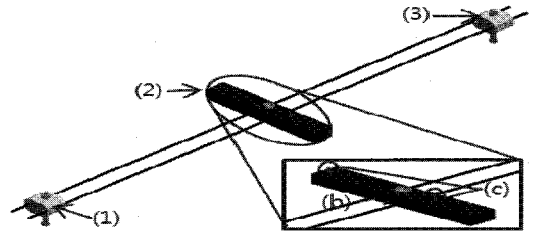


Fig. 9 Schematic drawing of jig for rotor blades

Fig. 9의 (1)은 블레이드와의 고정부로서 블레이드의 X, Y, Z, M_x 방향에 대해 구속을 한다. Fig. 9의 (2)의 (C)는 블레이드의 Y 방향이동에 대한 구속을 가지며, (b)는 지그좌표축의 원점이 되는 부분으로 3차원 측정기를 사용하여 얻어진다. 3차원 측정기의 재원을 Table 3에 나타내었다. Fig. 9의 (3)은 (1)의 대칭요소로 구성된다.

Table 3 Specification of CMM

Company	Dukin
Model	TOP-1076C
Resolution	1×10^{-4}
Range	700 x 100 x 600(mm)

3. 블레이드 무게중심 측정 결과

로터 블레이드의 무게중심을 첫번째로 측정하여, 원 궤적 산정으로 보정된 값을 Fig. 10에 나타내었다.

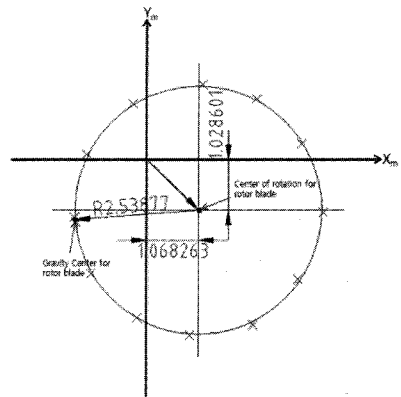


Fig. 10 Result of GC measurement for rotor blade

원 위에 표시된 x 표시는 13회 측정이 이루어진 것을 나타낸다. 무게중심 측정 장치의 오차 신

뢰도를 얻기 위하여 총 7 번의 반복 측정을 하였으며 측정값을 Table 4 에 나타내었다.

Table 4 Measured data for rotor blade

	X value (mm)	Y value (mm)	Weight (kg)
1	1.068263	-1.028601	2.243049
2	1.063529	-1.030177	2.242103
3	1.074233	-1.017066	2.241787
4	1.074210	-1.015586	2.241569
5	1.066972	-1.011079	2.241386
6	1.076610	-1.024824	2.240522
7	1.064930	-1.040067	2.239968

Table 4 의 결과에서, 로드셀에 의한 국부좌표계로부터 로터 블레이드의 회전 중심 평균값이 X 축으로 1.069821mm, Y 축으로 -1.023914mm 좌표에 위치하며, 로터 블레이드의 평균 무게는 2241.483 g 로서, 분해능이 1 g 인 전자저울로 무게 측정 결과 2248 g 과 6.517 g 의 오차가 존재했다.

그리고 식 (14) ~ (16)에 나타내어진 표본 평균값과 표본 분산의 통계적 추정치 식을 이용하여 X 추정구간 $\pm 0.012592\text{mm}(95\%)$, Y 추정구간 $\pm 0.02455\text{mm}(95\%)$ 을 확인하였다. 이러한 결과값은 유한 통계법에 의해 다음 측정값이 X 추정구간 $\pm 0.012592\text{mm}$, Y 추정구간 $\pm 0.02455\text{mm}$ 의 범위 안에 들어올 확률이 95%라는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 다중점 무게 측정 방법과 지그의 가공오차를 보정할 수 있는 무게 중심 측정 장치를 개발하여 무인 헬리콥터용 로터 블레이드에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

로터 블레이드의 무게 중심 측정 결과 로드셀에 의한 국부 좌표계로부터 로터 블레이드의 회전 중심 평균값이 X 축으로 1.069821mm, Y 축으로 -1.023914mm 이동된 좌표에 위치한다는 결과를 얻었다.

로터 블레이드의 무게 중심은 로드셀에서 측정된 국부 좌표계상에서 4 사분면에 위치한다는 것을 확인하였다.

로터 블레이드 측정 결과에 대한 통계적 추정치에 의해 X 축으로 $\pm 0.012592\text{mm}$, Y 축으로 $\pm 0.02455\text{mm}$ 의 95%의 신뢰도를 갖는 X, Y 축 오차 값을 얻었다.

지그와 회전 플레이트의 무게를 제외한 로터 블레이드의 평균 무게값은 2241.483 g 으로 분해능이 1 g 인 전자 저울로 측정된 블레이드의 무게 2248 g 과 비교한 결과 6.517 g 의 오차가 존재했다.

본 연구는 기계적 가공과 센서의 정도보다는 3 차원 측정기를 이용한 가공오차 보정, 측정방법, 원 제적산정, 지그에 의한 정밀도 개선에 초점을 두고 있다. 더 높은 정밀도의 가공 정도와 로드셀을 사용하게 되면 시스템의 정밀도는 더욱 향상될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 결과임.

참고문헌

1. Bielawa, R. L., "Rotary Wing Structural Dynamics and Aeroelasticity," AIAA Inc., 1992.
2. Kim, K. S., Ye, S. D., Kong, J. H., Lee, O. Y. and Hur, K. D., "Measurement of gravity center for unmanned helicopter blade," Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 305-306, 2009.
3. Boynton, R. and Winter, K., "Mass Properties Measurement Handbook," 57th Annual Conference of Society of Allied Weight Engineers, Paper No. 2444, 1998.
4. Boynton, R., "Mass Properties Measurement Errors Which Could Have Been Easily Avoided," 58th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers, Paper No. 2454, 1999.
5. Lee, S. P., "Error-compensating Techniques in 3-Point Weighing Method to Measure Unbalance Properties," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 11, pp. 42-49, 2006.
6. Yoo, I. J. and Lee, S. P., "Precise Measurement of Center of Gravity Using 3-Point Weighing Method," Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 283-284, 2006.
7. Lee, S. P., "Precise Measurement of Unbalance Moment Using 3-Point Weighing Method," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 57-63, 2006.