

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.5.442

SPR 기법을 이용한 회전 블레이드의 변형 및 모션 측정

박재원*, 김홍일*, 한재흥*, 김도형**, 송근웅**

Measurement of Rotor Blade Deformation and Motions using Stereo Pattern Recognition Method

Jae-Won Park*, Hong-Il Kim*, Jae-Hung Han*, Do-Hyung Kim** and Keun-Woong Song**

ABSTRACT

A measurement system using stereo pattern recognition (SPR) method was configured to measure the rotor blade deformations and motions. An SPR-based measurement system was prepared using six stereo cameras. Through a series of experiments to evaluate the system measurement uncertainty, it was verified that the SPR system had less than 0.2mm standard uncertainty. The combined standard uncertainties for the lead-lag, flapping, and pitching motions were estimated as 0.296mm, 0.209mm, and 0.238°, respectively. The SPR system was installed at a general small-scaled rotor test system at Korea Aerospace Research Institute. The blade motions and elastic deformation were successfully measured under the conditions with rotating speeds of 360rpm or 589rpm, and collective pitch angles of 0°, 4°, or 6°. The advantages of the SPR system was analyzed in comparison with the measurement system used in Higher Harmonic Control Aeroacoustic Rotor Test -II.

초 록

회전 블레이드의 모션을 측정하기 위해 스테레오 패턴 인식 (stereo pattern recognition, SPR) 기법을 적용한 측정 시스템을 구성하고 실험을 수행하였다. 시스템 요구사항을 만족시키는 스테레오 카메라를 확보하여 SPR 기반의 측정 시스템을 준비하였다. 시스템의 측정불확도를 계산하기 위한 일련의 실험을 통해, 본 SPR 시스템이 2m~4.2m의 측정 거리에서 0.2mm 이내의 표준불확도를 가짐을 확인하였다. 이를 이용하여 계산한 블레이드 모션의 합성표준불확도는, 리드-래그, 플래핑, 비틀림 운동에 대해 각각 0.296mm, 0.209mm, 0.238° 이었다. 본 SPR 시스템을 한국항공우주연구원의 소형로터 시험장치에 설치하고 회전속도와 콜렉티브 피치각을 각각 360rpm, 589rpm, 그리고 0°, 4°, 6°로 바꾸어가며, 지상 제자리비행 조건에서 블레이드의 모션과 탄성 변형을 성공적으로 측정하였다. Higher Harmonic Control Aeroacoustic Rotor Test -II 에서 사용한 측정 시스템과의 비교를 통하여 본 시스템의 장점을 분석하였다.

Key Words : Rotor blade motion(회전 블레이드 운동), Optical shape estimation(광학식 형상 측정), 3-D shape reconstruction(3차원 형상 재구성), Stereo pattern recognition(SPR, 스테레오 패턴 인식)

† 2010년 12월 31일 접수 ~ 2011년 4월 28일 심사완료

* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
교신저자, E-mail : jaehunghan@kaist.ac.kr
대전광역시 유성구 대학로 291

** 정회원, 한국항공우주연구원

I. 서 론

고성능, 고효율의 회전 블레이드를 개발하기

위해서는 로터 주변의 공력과 그에 따른 거동 예측이 필수적이다. 따라서 블레이드를 설계하거나 연구하는 과정에서 다양한 구조 및 공력 모델이 개발되어 로터의 성능 예측에 쓰이고 있다. 하지만 로터는 그 기계적 구조와 그 공기역학적, 공력탄성학적 특성이 매우 복잡하므로 모델을 정확히 세우고 해석하기가 어렵다. 따라서 수치적 해석과 동시에 측정 실험이 수반될 필요가 있다.

회전하는 블레이드는 측정 장치를 연결하기 어렵다는 단점 때문에 이제까지 실험을 수행한 사례가 많지 않다. 이에 대한 해결책으로 1990년대 후반부터 광학 이미지를 통하여 구조물의 형상이나 변위를 측정하는 광학 측정 방식을 도입하였다. 이 방식은 구조물과의 접촉이 필요 없으므로 로터 블레이드의 변형 및 모션 측정에 효과적으로 적용될 수 있다. Flemming 등은 Projection Moiré Interferometry 방법을 이용하여 1998년[1]과 2001년[2]에 각각 회전 블레이드와 MAV 날개의 형상을 측정하였으며, Zhang 등은 2005년에 Fourier Transform Profilometry 방법을 활용하여 회전하는 팬 블레이드의 형상을 측정한다[3]. 독일(German Aerospace Center, German-Dutch Wind-tunnel), 프랑스(Office National d'Études et de Recherches AÉrospatiales), 그리고 미국(National Aeronautics and Space Administration Langley, US Army Aeroflightdynamics Directorate)이 참여한 Higher Harmonic Control Aeroacoustic Rotor Test (HART) - II에서는, 2001년부터 블레이드의 위치와 변형을 측정하기 위한 방법으로 스테레오 패턴 인식 (stereo pattern recognition, SPR) 기법을 사용해왔다[4]. HART-I에서 사용했던 Projection Grid Moiré 방법[5]에 비해, SPR 기법은 블레이드의 리드-래그, 플라핑, 비틀림 모션이 모두 측정 가능하고 비교적 간단한 시스템 구성과 계산 비용을 가진다는 장점을 제공하였다.

본 연구에서는 로터 블레이드의 모션 측정을 위해 SPR 기반의 측정 시스템을 구성하였다. Motion Analysis 사의 Eagle Digital RealTime System을 측정 시스템으로 선정하고, 성능 검증을 위해 시스템의 측정불확도를 측정하였다. 항공우주연구원의 소형로터시험장치(general small-scaled rotor test system, GSRTS)에 측정 시스템을 설치하고 로터 블레이드 위에 마커를 부착하여 블레이드의 모션을 획득하였다. 본 SPR 시스템은 HART-II에서 사용한 측정 시스템보다 효율적인 방식으로 비슷한 수준의 성능과 활용 가능성을 제공하였다.

II. 본 론

2.1 측정 시스템

2.1.1 SPR 시스템

SPR 기법은 스테레오 카메라 이미지를 이용하여 구조물 표면에 부착된 반사 마커들의 3차원 좌표를 계산한 후, 이 불연속점들의 좌표를 이용하여 구조물의 형상을 재구성하는 방법이다. 시간에 따라 얻은 마커의 위치 데이터를 이용하여 구조물의 변형이나 운동 정보를 얻을 수 있다. 이 기법은 구조물의 단성 변형을 비롯한 강제 운동의 측정도 가능하므로 로터 블레이드 모션 측정에 효과적으로 적용할 수 있다[6]. 이에 따라 본 연구에서는 블레이드 모션 측정 방식으로써 SPR 기법을 선택하였다.

식 (1)은 3차원 좌표 X 와 카메라 이미지에 투영된 2차원 좌표 x 의 변환 관계를 표현한 것이다 [7]. 카메라 사이의 위치 정보와 카메라 내부 변수로 이루어진 카메라 투영행렬 P 를 구하는 과정을 카메라 교정(calibration)이라 한다. 교정 과정을 통해 계산한 행렬 P 를 이용하면, 식 (2)의 등극선(epipolar) 제약조건을 만족시키는 3차원 좌표 X 를 계산할 수 있다. 기초행렬 F 는 카메라 교정을 통해 얻은 K 와 R , t 로 이루어져 있다. 행렬 K 는 카메라 보정 행렬, R 과 t 는 각각 회전행렬과 이동행렬을 의미한다. x 와 x' 은 각각 다른 카메라 이미지 상의 2차원 좌표이다.

$$x = PX = K[R|t]X \quad (1)$$

$$x^T F x' = 0 \quad (2)$$

2.1.2 SPR 시스템 구성

SPR 시스템을 구성하기 위해 필요한 시스템의 요구 성능을 분석하였다. 고속으로 회전하는 블레이드를 측정하기 위해서는 정확하고 빠른 정합 알고리즘뿐만 아니라 빠른 셔터 속도와 샘플링 속도를 필요로 한다. 항공우주연구원의 소형로터 시스템은 2.13m의 회전 직경을 가지고 최대 1,080RPM으로 회전한다. 이 때 익단 속도는 약 220m/s이며, 이와 같은 마커의 빠른 이동속도는 마커의 번짐(blur) 효과를 발생시킬 수 있다. 번짐 효과를 완전히 배제하기 위해 오차를 1픽셀 이하로 줄여야 하고, 이 때 필요한 셔터속도는 약 20 μ s 이하, 즉 50kHz 이상이다. 하지만 현실적으로 번짐 효과를 완전히 배제하기 어렵고, SPR 알고리즘을 통해 어느 정도 보상이 가능하기 때문에, 수 kHz 이상의 셔터속도면 충분하다



Fig. 1. Eagle Cameras

Table 1. SPR System Specification

Resolution	1.3million pixels
Frame Rate (frame/sec)	Max. 500 @ 1280×1024 Max. 2,000 @ 1280×242
Shutter Speed	Max. 30kHz

고 판단하였다. 블레이드 모션을 최대 4차 주파수의 조화운동까지 보고자 할 때 필요한 최소 샘플링 속도는 방위각 45° 간격이다. 따라서 이의 3배 속도인 15° 간격으로 데이터를 얻는다고 할 때 필요한 샘플링 속도는 432Hz이다.

이러한 요구 성능을 바탕으로 Motion Analysis 사의 Eagle Digital RealTime System을 측정 시스템으로 선정하였다(Fig. 1). 선택한 시스템은 SPR 기법을 기반으로 한 3차원 좌표 추적 시스템으로, 적외선 인식 카메라와 소프트웨어, 카메라 교정 도구 등으로 구성되어 있다. 해상도 1280×1024에서 최대 500Hz의 샘플링 속도를 낼 수 있으며, 최대 셔터속도는 30kHz이다(Table 1).

2.2 측정 성능 검증

2.2.1 시스템 측정불확도 [8]

시스템의 측정불확도는 참고문헌 8에 따라 정의하였다. 측정불확도는 크게 표준불확도와 합성 표준불확도로 구분할 수 있다. 표준불확도는 직접적인 측정값의 불확도를 의미하며, 합성표준불확도는 측정값을 입력으로 하여 계산되는 함수값의 불확도이다. 블레이드의 모션 정보는, SPR 시스템을 이용하여 블레이드 표면에 부착한 마커들의 X, Y, Z 좌표를 측정된 후, 이 값들을 이용하여 마커의 상대 위치를 계산함으로써 얻을 수 있다. 따라서 SPR 시스템으로 측정된 마커의 X, Y, Z 좌표 위치에 대한 불확도를 표준불확도로, 이를 이용하여 계산하는 블레이드 모션의 불확도를 합성표준불확도로 정의할 수 있다. 본 SPR 시스템의 표준불확도는 Type A 평가에 따라 반복 측정된 데이터의 분산 평균으로 계산하였고, 모션에 대한 합성표준불확도는 불확도 전파 법칙(propagation of uncertainty)에 따라 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$u_c^2(f) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (3)$$

2.2.2 표준불확도 측정 실험

마커의 3차원 위치에 대한 SPR 시스템의 표준 불확도를 평가하기 위해 반사 마커를 부착한 마이크로미터를 X, Y, Z 방향으로 각각 0mm, 1mm, 5mm, 10mm, 13mm 이동시키며 이동변위를 측정하였다. 기준 변위에 대한 측정값의 평균 제곱오차(mean square error)를 계산한 후, 평균의 제곱근을 표준불확도로 정의하였다. 좌표축은 XY-평면이 로터 평면과 평행하도록 설정하였다.

카메라의 배치가 시스템의 표준불확도에 미치는 영향도를 평가하기 위해, 로터 중앙과 카메라 사이의 거리, 로터 평면에 대한 카메라의 시선 각도, 두 가지를 조절 인자(factor)로 선정하여 분산분석(analysis of variance, ANOVA)을 실시하였다[9].

거리와 각도, 두 인자의 수준(level)은 각각 Table 2와 같이 3개 수준으로 선정하였으며, 9개 조건에서 측정한 표준불확도는 Table 3과 같다. 로터 평면, 즉 XY-평면상에서 회전하는 블레이드의 모션을 계산할 때 X축과 Y축을 구분하는 것은 의미가 없으므로 표준불확도는 XY-평면과 이에 수직인 Z축 방향으로 나누어 정리하였다.

Table 2. 2 factors with 3 levels for evaluation of measurement uncertainty

Level	Factor	Distance (m)	Angle (°)
1		1	40
2		2	50
3		2.8	60

Table 3. Standard uncertainty according to level of factors

	Level of Distance	Level of Angle	Standard Uncertainty	
			XY-Plane	Z-Axis
1	1	1	0.0243	0.0309
2	1	2	0.0424	0.0676
3	1	3	0.0436	0.0248
4	2	1	0.0928	0.117
5	2	2	0.0962	0.066
6	2	3	0.285	0.397
7	3	1	0.0794	0.140
8	3	2	0.265	0.309
9	3	3	0.106	0.140

Table 4. ANOVA table for XY-plane

XY	DF	SS	MS	F	p
Dist.	2	0.0275	0.0138	1.65	0.3
Angle	2	0.0111	0.00555	0.67	0.563
E	4	0.0333	0.00834		
T	8	0.0720			

Table 5. ANOVA table for Z-axis

Z	DF	SS	MS	F	p
Dist.	2	0.0473	0.0237	1.34	0.359
Angle	2	0.0126	0.00631	0.36	0.72
E	4	0.0709	0.0177		
T	8	0.131			

Table 4와 Table 5는 각각 XY-평면과 Z축 상의 표준불확도에 대한 분산분석표(ANOVA table)이며, DF는 자유도(degree of freedom), SS는 제곱합(sum of square), MS는 제곱평균(mean square)을 의미한다.

분산분석 결과에서 한 인자의 유의확률(p) 값이 0.05 이상이면 이는 신뢰구간 95% 내에서 그 인자의 영향을 받지 않는 동일한 집단이라는 의미이다. 거리와 각도 인자 모두 0.05보다 상당히 큰 p 값을 가지고 있으므로, 두 인자 모두 측정 불확도에 유의한 영향을 미치지 않는다는 결론을 내릴 수 있다. 하지만 거리의 유의확률이 각도의 유의확률의 약 1/2배 값을 가지므로 측정거리가 각도보다 비교적 더 유의한 영향을 미친다. 따라서 추가적으로 더 먼 거리인 4.2m에서 시스템의 표준불확도를 측정한 후, 측정거리 2m, 2.8m, 4.2m에서의 평균값을 시스템의 표준불확도로 정의하였다(Table 6).

합성표준불확도를 계산하기 위한 식은 블레이드 모션의 계산식을 통해 유도할 수 있다. 블레이드의 리드-래그, 플래핑, 비틀림 모션은 정지 상태의 좌표를 기준으로 회전 시에 블레이드가 움직인 변위로 계산하였으며, 그 계산식은 식 (4)~(6)과 같다. x, y, z 는 계산된 quarter-chord 점의 좌표를, x_{LE}, y_{LE}, z_{LE} 와 x_{TE}, y_{TE}, z_{TE} 는 각각 앞전과 뒷전을 따라 부착한 마커의 좌표를 의미하며, $x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$ 는 정지 상태에서의 quarter-chord 점의 좌표이다. r 은 마커의 반지름 위치, x_h, y_h, r_h 는 힌지 마커의 x, y 좌표와 반지름, Ψ 는 방위각, l 은 코드길이를 가리킨다.

Table 6. Standard uncertainty

	Standard Uncertainty
$u(x) = u(y)$	0.145 mm
$u(z)$	0.187 mm

Table 7. Combined standard uncertainties

	Combined Standard Uncertainty
$u(d_\zeta)$	0.296 mm
$u(d_\beta)$	0.209 mm
$u(\theta)$	0.238 °

Lead-Lag Motion

$$d_\zeta = \sqrt{(x - x_{ref})^2 + (y - y_{ref})^2} \tag{4}$$

Flapping Motion

$$d_\beta = z - z_{ref} \tag{5}$$

Torsional Motion

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{z_{LE} - z_{TE}}{\sqrt{(x_{LE} - x_{TE})^2 + (y_{LE} - y_{TE})^2}} \right] \tag{6}$$

식 (4)~(6)을 식 (3)에 대입하여 식 (7)~(9)와 같은 합성표준불확도 계산식을 구하였다. Table 6의 표준불확도 값을 대입하여 계산한 합성표준 불확도의 최대값을 Table 7에 나타내었다. 블레이드 모션에 대한 측정불확도는, 2m~ 4.2m의 측정 거리에서, 약 0.2~0.3mm, 0.24° 이하이다.

Uncertainty of Lead-Lag Motion

$$u^2(d_\zeta) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{5}{8} + \frac{2r^2}{r_h^2} \cos^2 \Psi \sin^2 \Psi \\ + \frac{2r^2}{d_\zeta^2 r_h^2} \left[(x_r - x_h)^2 \sin^4 \Psi \right. \\ \left. + (y_r - y_h)^2 \sin^4 \Psi \right] \end{array} \right\} u^2(x) \tag{7}$$

Uncertainty of Flapping Motion

$$u^2(d_\beta) = \frac{4}{5} u^2(z) \tag{8}$$

Uncertainty of Torsional Motion

$$u^2(\theta) = 2 \left[\frac{\cos \theta}{l} \right]^2 [u^2(x) + u^2(z)] \tag{9}$$

2.3 로터 블레이드 모션 측정

항공우주연구원의 GSRTS에 SPR 시스템을 설치하여 회전하는 로터 블레이드의 리드-래그, 플래핑 모션과 비틀림 형상을 측정하였다.

2.3.1 소형로터시험장치(GSRTS) 개요

Fig. 2는 항공우주연구원의 항공시험동에 있는 GSRTS이다. 높이 5m의 안전용 펜스 안쪽에 높

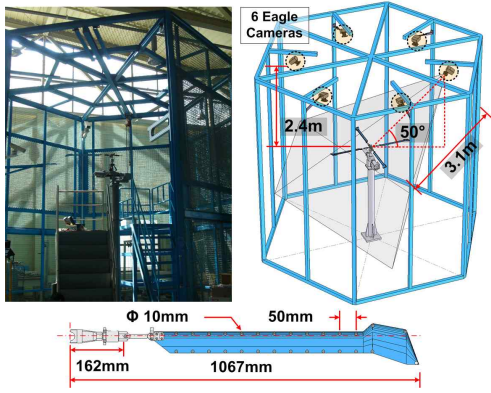


Fig. 2. System Setup at GSRTS

이 약 2.7m의 회전시험대가 설치되어 있다. 로터 시스템은 4개의 패들형 축소 블레이드를 장착한 무한지 로터이다. 로터 시스템은 약 2.13m의 회전 직경을 가지고 있으며 최대 600RPM까지 회전이 가능하다. SPR 시스템은 총 6대의 카메라로 구성하였으며, 카메라는 펜스 상부에 설치하였다. 측정거리는 약 3.1m이고 카메라의 각도는 50°이므로 Table 7과 같은 0.2~0.3mm, 0.24° 이내의 측정불확도로 블레이드 모션을 측정할 수 있다. 힌지와 허브에는 방위각과 컬렉티브 피치각을 측정하기 위해 마커를 부착하였고, 블레이드의 모션 측정을 위해 앞전과 뒷전을 따라 방사상으로 약 0.31R에서 1R까지 50mm 간격으로 직경 10mm의 반사 마커를 부착하였다(Fig. 3). 모션 데이터는 0.97R까지 표현하였으며, 이는 깃털형상의 특성상 모션 계산을 위한 마커를 부착하는 데에 한계가 있기 때문이다.

2.3.2 측정 조건

로터 시스템의 측정 조건은 로터 회전속도와

Table 8. Operating Conditions

Collective Pitch Angle	0°	4°	6°
Rotating Speed	360RPM		589RPM
Tip Speed	40.2m/s		65.8m/s
Sampling Rate	144Hz		114Hz
Camera Shutter Speed	5kHz		

컬렉티브 피치각을 변수로 하여 조절하였다. 회전속도와 컬렉티브 피치각을 각각 360RPM, 589RPM, 그리고 0°, 4°, 6°으로 선택하여 총 6가지 조건에 대해 측정 실험을 수행하였다. SPR 시스템의 샘플링 속도는 회전속도에 따라 각각 144Hz와 114Hz로 선정하였다. 전자는 방위각 15° 간격으로 데이터를 획득하도록 설정한 것이고, 후자는 31회전 동안 방위각 1° 간격으로 데이터를 획득하도록 회전속도와 샘플링 속도에 약간의 차이를 준 것이다. 블레이드 회전 속도가 비교적 낮기 때문에, 카메라 셔터속도는 5kHz로 설정하였다. 측정 조건은 Table 8에 정리하였다.

2.3.3 측정 결과

선정한 6가지 측정 조건으로 로터를 회전시키며 각각 20초 동안 데이터를 획득하였다. 로터 시스템의 평형이 완벽하지는 않기 때문에, 측정된 데이터는 SPR 시스템의 측정불확도뿐만 아니라 로터의 비정상 운동 등에 의한 잡음을 포함하고 있다. 따라서 측정 데이터로부터 모션 정보를 얻기 위해서는 데이터 회귀(regression) 과정이 필요하다. 이를 위하여 식 (10)과 같은 단순조화운동의 식을 이용하였다. 식 (10)은 플레잉 각(β)을 회전 방위각 ψ 에 대한 주기운동의 합으로 나타낸 것이다. 블레이드의 모션은 로터 회전속도의 정수배 주파수를 가지는 단순조화운동의 합

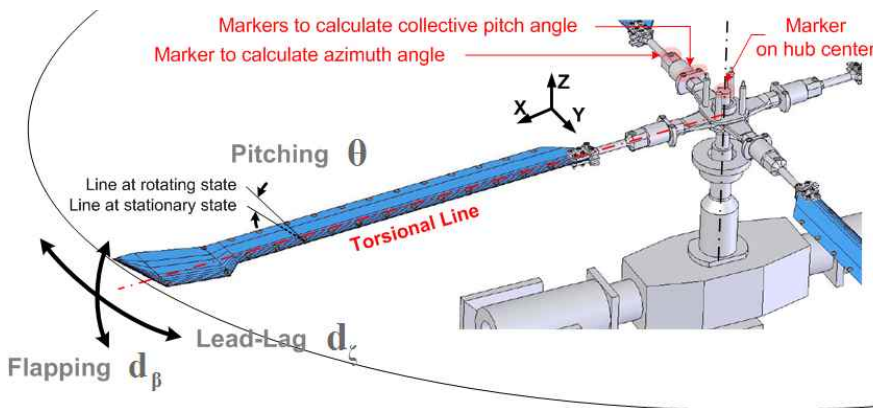


Fig. 3. Markers to calculate blade motions

으로 표현할 수 있다[10]. 따라서 주파수 분석을 통해 블레이드 모션이 최대 4차 주파수 운동까지 보임을 확인한 후, 1차~4차 조화운동의 합으로 모션 측정 데이터를 회귀하였다.

$$\beta(\Psi) = a_0 - a_1 \cos(\Psi) - b_1 \sin(\Psi) - a_2 \cos(2\Psi) - b_2 \sin(2\Psi) - a_3 \cos(3\Psi) - b_3 \sin(3\Psi) - a_4 \cos(4\Psi) - b_4 \sin(4\Psi) - \dots \quad (10)$$

블레이드 피칭 모션은, 회전 시 측정된 앞전과 뒷전 마커 사이의 각도에서 콜렉티브 피치각과 시위선에 대한 블레이드 표면의 오프셋을 뺀 값으로 계산하였다. 하지만 SPR 시스템으로 측정된 콜렉티브 피치각은 제어 입력인 0°, 4°, 6°와 다소 차이가 있었으며, 또한 블레이드에 따라, 그리고 블레이드가 위치한 방위각에 따라 다른 값을 가졌다. 이는 측정 오차가 아니라 로터의 평형이 제대로 맞추어지지 않았기 때문에 발생한 문제였으며, 현재 로터의 평형을 깃끝 카메라를 통해 육안으로 맞추기 때문에 발생한 것이라고 할 수 있다. 따라서 이 오차는 데이터 처리 과정에서 보정하였다. 먼저 블레이드의 콜렉티브 피치각을 방위각 90° 간격으로 측정한 후 방위각에 대한 값으로 곡선 적합(curve fitting)하여, 방위각에 따른 이 수치들을 기준 콜렉티브 피치각으로 설정하였다.

Fig. 4(a)는 회전속도 589RPM, 콜렉티브 피치각 6°일 때 측정된 방사상 방향의 블레이드 비틀림 각 분포를 방위각 90° 간격으로 그린 것이다. 그래프에 나타난 비틀림 각은 블레이드 본래의 비틀림 각과 회전에 따른 변형을 더한 수치이다. 본 실험에서는 회전에 의한 변형이 매우 작았기 때문에 이 데이터는 무의미하다고 판단하여 회전하는 동안의 비틀림 형상 분포를 그래프로 나타내었다. 'reference'는 참고문헌 11에서 얻은 블레이드의 비틀림 각 분포이며, 0.31R에서 0.87R까지 측정값과 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 깃끝에서 나타나는 약 2°의 비틀림 각 차이는 급격한 비선형적 형상에 의해 나타난 것으로 판단된다. 이는 부착된 마커의 위치를 사전에 측정함으로써 데이터 처리 시 보정할 수 있다.

Fig. 4의 (b)와 (c)는 회전속도 589RPM, 콜렉티브 피치각 6°에서의 블레이드 리드-래그 모션과 플래핑 모션이다. 이 두 가지 모션은 블레이드 앞전과 뒷전의 마커를 이용하여 앞전으로부터 20.5mm에 있는 블레이드의 탄성축의 위치를 계산한 후, 탄성축에서의 모션으로 표현하였다. 탄성축은 블레이드의 비틀림 중심축이므로, 비틀림 운동이 일어나더라도 축 위의 좌표는 변하지 않

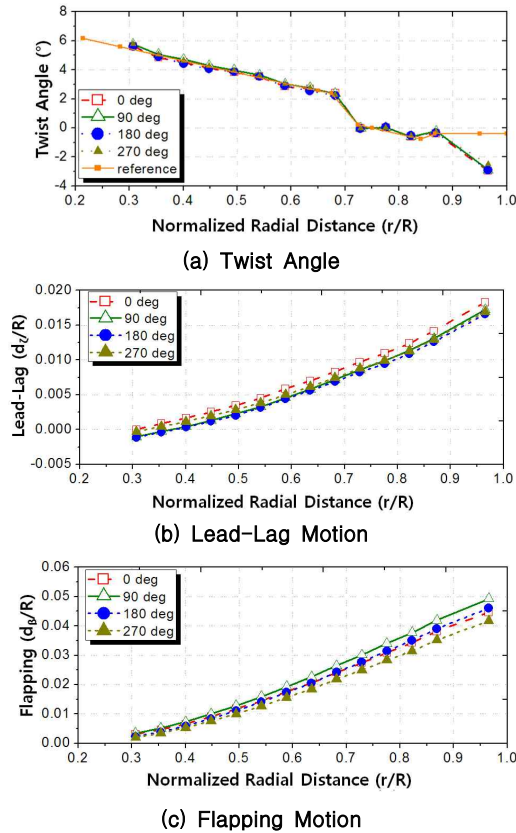


Fig. 4. Radial Distribution of Motions for 6°/589RPM at four azimuth angles

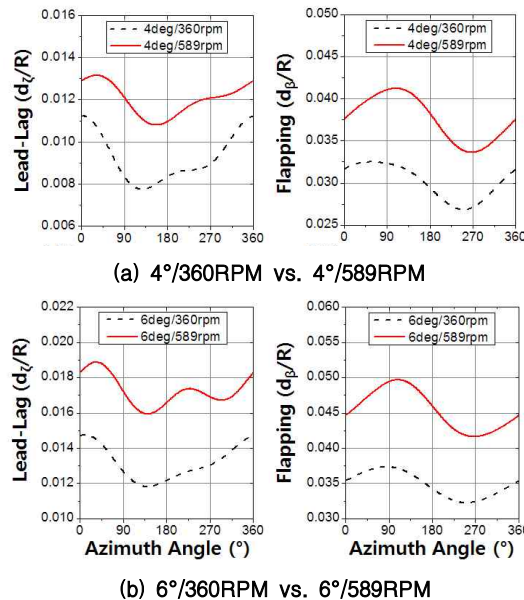
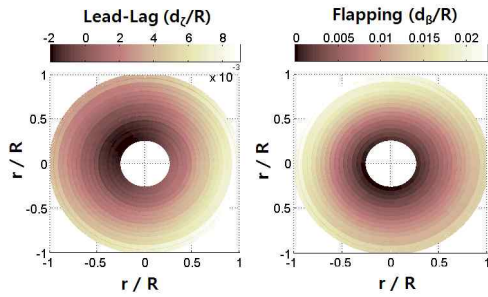


Fig. 5. Comparison of lead-lag and flapping motions for different conditions



(a) Lead-Lag Motion (b) Flapping Motions

Fig. 6. Radial and azimuthal distribution of motions at 0°/360RPM

는다. 따라서 동시에 발생하는 리드-래그 모션이나 플래핑 모션에 영향을 미치지 않는다. 각각 래그 방향과 윗 방향을 양수로 하여, XY-평면상의 움직임, 그리고 평면에 수직한 방향의 움직임으로 정의하였다. 깃끝에서의 최대 변위는 각각 19.5mm와 52.6mm이었다.

Fig. 5는 두 가지 측정 조건에서의 리드-래그와 플래핑 모션 측정 결과를 각각 한 그래프에 그린 것이다. 방위각에 따른 모션의 경향은 유사하나, 회전속도가 360RPM일 때보다 589RPM일 때, 그리고 콜렉티브 피치각이 4°일 때보다 6°일 때 더 큰 모션을 가진다. Fig. 6은 회전속도 360RPM, 콜렉티브 피치각 0°일 때의 모션 분포를 나타낸 것이다. 리드-래그 모션은 135° 부근에서, 플래핑 모션은 약 315° 부근에서 최대 모션을 보인다.

2.4. HART 측정 기술과의 비교

2001년 이래 HART-II와 HART-III에서는 로터 블레이드의 blade-vortex interaction 소음을 줄이기 위한 고조파조화제어를 연구하기 위해, SPR 기법을 사용하여 블레이드의 변형을 측정해 왔다. HART에서 사용한 방식은 스트로보스코프를 블레이드 회전속도와 동기화시켜 하나의 방위각에서만 데이터를 획득하는 방식이다. 이러한 측정 과정을 여러 개 방위각에 대해 수행하면, 방위각에 따른 변형 데이터를 얻을 수 있다. HART-II에서는 15° 간격으로 총 24번의 측정을 통해 변형 데이터 분포를 획득하였다. 이 때 필요한 샘플링 속도는, 1,041RPM으로 회전하는 로터에 대해, 약 3~6Hz에 불과하다. 또한 스트로보스코프를 이용하여 이미지를 얻기 때문에 낮은 셔터 속도로 인해 발생할 수 있는 마커의 번짐 현상이 거의 없다. 이와 같이, HART의 방식은 측정 로터의 회전속도에 따라 발생할 수 있는 측정 시스템의 성능 제한이 없다는 장점이 있다. 하지만 이 방식은 방위각에 따른 변형 데이터를 획득하기 위해 여러 번의 측정을 해야 하므로 시간이 오래 소요될 뿐 아니라 모션이 정상 운동을 할 때에만 적용이 가능하다. 또한, 측정을 위한 스테레오 카메라를 블레이드 하단에 설치하였기 때문에 로터 본체나 타워 등에 의한 시야 방해로 넓은 시계(field of view)를 확보하기 힘들다.

이와 다르게 본 연구에서는 카메라를 로터의 상부에 설치하여 방해물 없이 로터 평면 전체를 측정할 수 있도록 하였다. 또한 샘플링 속도를

Table 9. Comparison of SPR Systems between KAIST and HART Progra

	KAIST	HART Program
Experimental Conditions		
Capture Volume	2.5m×2.5m×1m (Whirl Tower)	3.5m×3.5m×1m (Wind Tunnel)
System Setup	Ceil Installation	Ground Installation
Sampling Rate	114 or 144 Hz (Max. > 500Hz)	3 or 6 Hz
Performance		
Theoretical Uncertainty	< 0.2mm	0.4mm
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Efficient measurement ❖ Applicable to unsteady motion ❖ Large FOV (no obstacle) ❖ Once installed, no more hardship 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Easy to synchronize measurement at any azimuth angle ❖ No need of high sampling frequency ❖ Less blur effect
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Difficult to synchronize at an exact azimuth angle ❖ Higher possibility of blur effect ❖ More difficult system installation 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Inefficient measurement ❖ Impossible to measure unsteady or transient motion ❖ Limited FOV

높여, 1회전 동안 15° 간격의 데이터를 연속적으로 획득하였다. 이 방식은 한 번의 측정으로 모든 방위각에 대한 데이터를 얻을 수 있고 비정상 운동에 대해서도 적용할 수 있다는 장점이 있다.

하지만 로터의 회전속도가 높아질수록 고속의 샘플링 속도가 필요하므로, 만약 최대 샘플링 속도 이상을 요구하는 비정상 운동의 경우에는 측정 방법을 개선하여 적용해야 할 것으로 판단된다.

Table 9에 정리된 바와 같이, 본 SPR 시스템은 500Hz 이상의 최대 샘플링 속도가 가능하고 넓은 시계를 확보할 수 있기 때문에 HART에서와 달리 한 번의 실험으로 모든 방위각에 대한 데이터를 얻을 수 있다. 시스템의 측정불확도 역시 0.2mm 이하로 HART에서 사용한 측정 시스템과 유사한 수준을 가지므로, 추후 정확한 방위각과 측정 데이터를 얻을 수 있다면 HART의 측정 시스템보다 효율적이면서 더 높은 수준의 데이터를 제공할 것으로 예상된다.

III. 결 론

본 논문에서는 SPR 기법을 이용한 3차원 좌표 측정 시스템을 확보하여 회전 블레이드의 모션과 탄성 변형을 측정하였다. 측정 요구 성능을 분석하여 Motion Analysis 사의 Eagle Digital RealTime System을 SPR 시스템으로 선정하였다. 측정 대상과 카메라 사이의 거리, 로터 평면에 대한 카메라 시선 각도를 변화시키며 시스템의 측정불확도를 계산한 결과, 거리 2m~4.2m, 각도 40°~60° 범위 내에서 마커 좌표의 측정불확도는 2mm 이내로 확인되었다. 이 수치를 이용하여 리드-래그, 플레핑, 비틀림 모션에 대한 합성표준불확도를 계산한 결과 각각 0.296mm, 0.209mm, 0.238°이었다. 본 SPR 시스템을 항공우주연구원의 소형로터시험장치에 설치하여 로터 블레이드의 모션과 비틀림 변형을 측정하였다. 로터 회전 속도를 360RPM과 589RPM, 컬렉티브 피치각을 0°, 4°, 6°로 변화시키며 총 6가지 조건에서 측정 실험을 수행하였다. 단순조화운동의 합으로 블레이드 모션과 비틀림 변형을 성공적으로 획득하였다.

본 연구는 국내 최초로 SPR 기법을 이용하여 블레이드의 변형을 측정한 것으로, HART에서 사용한 측정 시스템과 비교하여, 더 빠른 샘플링 속도와 넓은 시계를 제공하였다. 따라서 보다 쉽고 효율적인 방법으로 모션을 측정할 수 있도록 하였으며, 비정상 모션 데이터까지 취득할 수 있

다는 장점을 가지고 있다. 1,000RPM 이상의 고속 회전에서 샘플링 속도의 한계나 리드-래그 모션의 측정불확도 증가 등의 문제점이 아직 남아 있기는 하나, 측정 방법을 개선함으로써 향후 풍동이나 실물 크기의 회전시험대에도 설치되어 국내 헬리콥터 연구와 기술 발전에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군 겸용 구성품 개발사업 (KARI주관) 위탁연구 결과 중 일부임.

참고문헌

- 1) Fleming, G. A., "Measurement of Rotorcraft Blade Deformation using Projection Moiré Interferometry", *Proceedings of SPIE*, No. 3411, 1998, pp. 514-527.
- 2) Fleming, G. A., Bartram, S. M., Waszak, M. R., and Jenkins L. N., "Projection Moiré Interferometry Measurements of Micro Air Vehicle Wings", *Proceedings of SPIE*, No. 4448-16, 2001.
- 3) Zhang, Q., Su, X., Cao, Y., Li, Y., Xiang, L., and Chen, W., "Optical 3-D shape and deformation measurement of rotating blades using stroboscopic structured illumination", *Optical Engineering*, Vol. 44(11), 113601, 2005.
- 4) Schneider, O., "Analysis of SPR measurements from HART II", *Aerospace Science and Technology*, Elsevier, Vol. 9, 2005, pp. 409-420.
- 5) Pengel, K., Merker, E., and Lehmann, G., "The Higher-Harmonic Control Aeroacoustic Rotor Test (HART) in the DNW-LLF", Technical Report, European Research Office of the U.S. Army, London, England, 2000.
- 6) Kim, H.-I., Kim, H.-Y., Park, H.-J. and Han, J.-H., "Development of a Point Tracking System for Measuring Structural Deformation Using Commercial Video Cameras", *Int'l J. of Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 10, No. 2, 2009.
- 7) Hartley, R. and Zisserman, A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*, second edition, Cambridge University Press, 2003.

8) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", International Organization for Standardization, ISBN 92-67-10188-9, 1st edition, 1993.

9) 박경진, 강병수, 해석적 설계방법론, 동화사, 2010.

10) Gessow, A, Myers, G. C. Jr., *Aerodynamics of the Helicopter*, Fredrick Ungar Publishing Co. New York 1967.

11) 한국항공우주연구원, 헬리콥터용 힌지없는 허브시스템 핵심기술 선행연구(II) - 2차년도 최종보고서, 산업자원부, 2002, p.237.