

< 본문 >

Digital Recording Device를 이용한 회전중인 블레이드 표면의 압력섭동 측정

윤정식* · 강 웅* · 성형진†
(2005년 3월 22일 접수, 2005년 9월 14일 심사완료)

Measurement of Surface Pressure Fluctuations on a Rotating Blade Using a Digital Recording Device

Jung Sik Yun, Woong Kang and Hyung Jin Sung

Key Words: Rotating Blade(회전중인 블레이드), Wall Pressure Fluctuation(벽 압력 섭동), Digital Recording Device(디지털 저장 장치)

Abstract

A new measurement system of wall pressure fluctuations on a rotating machinery, composed of digital recording device, was developed and evaluated. The small-sized digital recording device was attached on the rotating machinery and then was detached for data reduction. In order to obtain the system transfer function of the digital recording system, a dynamic calibration was performed utilizing the signal from a 1/8 inch B&K microphone as input. The time history of the unsteady pressure was then reconstructed from the output of the sensor by using this transfer function. The reconstructed pressure signals showed good agreement with the reference signal in both temporal and spectral sense. This sensor was then used to measure the wall pressure fluctuations on a rotating blade. An array of microphones were installed on the blade in the circumferential and radial directions. Various statistical moments were obtained from the measurement data set. Comparison of these quantities with the existing studies demonstrated satisfactory agreement. These tests give credence to the relevance and reliability of this device for applications in more complicated turbulent rotating machineries.

기호설명

BPF : Blade passing frequency

RSF : Rotor shaft frequency

c : 브러쉬의 절반 길이, 슬립링 방향

C_p : 벽 압력 섭동계수 $P'_s/0.5\rho U_0^2$

d : 접촉 브러쉬 너비의 절반길이

D_a : 팬의 직경

f : 주파수

$G_{yy}(f)$: $y(t)$ 의 자기 스펙트럼

$G_{yx}(f)$: $y(t)$ 와 $x(t)$ 의 교차 스펙트럼

I : 브러쉬를 통하는 전류

L : 브러쉬 트랙의 절반 길이.

L_c : 익현 길이

U_t : 접선 속도(= rw)

Re_c : 익현 길이(L_c)를 기준으로 한 레이놀즈 수 (= $U_t L_c / \nu$)

* 한국과학기술원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3027 FAX : (042)869-5027

- P'_{ms} : 벽 압력 섭동의 근 제곱 평균
- \hat{r} : 슬립링자체의 전기 저항
- r^* : 무차원 반경 r/D_a
- R : 브러쉬 간격으로 인한 접촉저항 증가분
- Re_c : 익현 길이에 근거한 레이놀즈 수 UL_0/ν
- $R_{PP}(\xi, \Delta t; \xi_0)$: ξ_0 에서 벽 압력 섭동의 원주방향 교차 상관계수
- $R_{PP}(\zeta, \Delta t; \zeta_0)$: ζ_0 에서 벽 압력 섭동의 반경방향 교차 상관계수
- U_0 : 무차원 반경 $r^*=0.72$ 에서 블레이드의 접선 속도
- ξ : 원주방향 거리 간격
- ζ : 반경방향 거리 간격
- ρ : 공기 밀도
- $\Phi_{PP}(\xi, \omega; \xi_0)$: ξ_0 에서 벽 압력 섭동의 원주방향 교차 스펙트럼(cross-spectrum)
- $\Phi_{PP}(\zeta, \omega; \zeta_0)$: ζ_0 에서 벽 압력 섭동의 반경방향 교차 스펙트럼(cross-spectrum)

1. 서론

최근 블레이드와 로터의 설계에 고려해야 할 요소로서, 블레이드의 표면 압력 섭동이 회전기계의 성능 향상과 소음 저감 설계의 측면에서 대두되고 있다. 특히 환경 친화적인 새로운 대체에너지로써 많은 주목을 받고 있는 풍력 발전에서도 적용될 수 있는데, 전체 시스템의 성능을 좌우하는 핵심 요소인 회전자의 공력 설계에서⁽¹⁾ 블레이드의 표면 압력 섭동의 정보는 매우 유용하다. 표면 압력 섭동은 표면의 비정상 가진력(unsteady excitation force)과 직접적인 연관이 있을 뿐 아니라, 표면 근처에 발생하는 유동 소음과 밀접한 관계가 있다.^(2,3) 음향학적인 측면에서도 표면 압력 섭동은 원거리 소음장을 제어할 수 있는 주요한 인자중 하나이며, 음향상사이론을 이용한 소음 방사의 예측을 위한 중요한 항으로 작용된다.⁽⁴⁻⁶⁾ 블레이드 표면에서의 압력 섭동에 관해 많은 연구가 진행되어 왔지만,⁽⁷⁻¹⁰⁾ 정적인 블레이드의 경우에만 제한되어왔고, 풍력발전의 회전중인 블레이드와 같이 동적인 대상에서의 연구 사례는 매우 드물다. 이는 데이터 취득 장치와 측정 센

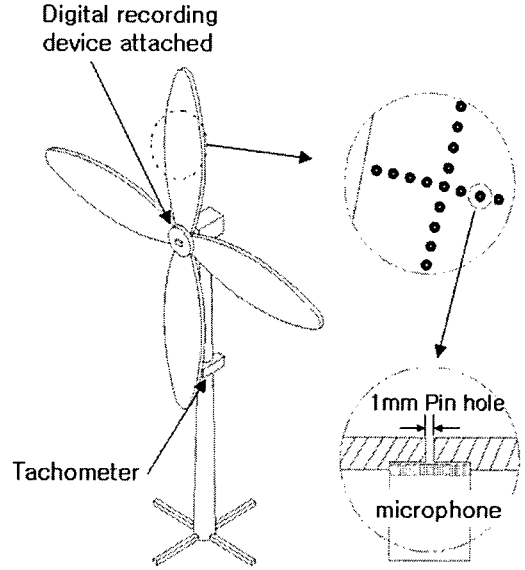


Fig. 1 Schematic diagram of digital recording device and microphone

서의 연결선의 설치 등과 같은 실제 측정 장치 구성에 있어서 어려움에 기인한다. 최근 들어 Carolus와 Stremel⁽¹¹⁾은 회전중인 축류형 팬 블레이드 표면의 압력섭동을 측정하기 위해서 슬립링(slip ring)을 사용하였다. 팬 블레이드에 설치된 압력 센서로부터 신호를 회전하는 팬의 hub에 설치된 증폭기로 증폭한 뒤, 슬립 링을 통해 신호를 전달 받는다. 그러나 슬립 링은 브러쉬 접촉을 이용하여 고정된 데이터 처리 장치에 신호를 전달하기 때문에 브러쉬와 회전축간의 접촉 저항과 신호 전달에 의한 전기 노이즈가 발생할 수 있다. 또한 슬립 링 장치의 특성 상 채널수를 늘리는 것에 한계가 있다.

동적 대상의 표면 압력 섭동을 측정하기 위한 다른 방안으로 텔레메트리 시스템을 적용할 수 있다.⁽¹²⁾ 텔레메트리 시스템은 센서로 측정된 블레이드의 압력 섭동 데이터를 무선으로 실시간 전송할 수 있는 장점이 있지만, 역시 무선 송수신 전기장치에 의한 노이즈가 발생할 가능성이 높을 뿐 아니라, 비용이 많이 들고 채널 수도에 한계가 따른다.

본 연구에서는 이러한 어려움을 해결하고자 MP3(MPEG Audio Layer-3)로 알려진 digital recording device를 사용하는 방법을 택하였다.

digital recording device는 크기가 아주 소형이어서 취급이 용이하며, 측정대상이 동적인 상태라도 그 측정 대상에 부착시켜서 데이터를 취득할 수 있으므로 측정이 편리하다. 현재는 digital recording 기술이 급속도로 발전하고 있어서 그 기능도 우수하다. 크기가 소형이지만 데이터의 저장용량이 giga급으로 커지고 있어서 여러 차례에 걸쳐 데이터를 측정할 수 있으며, 데이터의 보관도 용이하다. 본 실험에서는 마이크로폰으로 회전하는 블레이드의 압력 섭동 데이터를 측정하게 되며 이 데이터는 팬의 허브 부분에 미리 부착된 digital recording device에 저장된다. 여기에 저장된 데이터를 개인용 컴퓨터에 옮겨서 데이터를 처리하면 저비용으로 다수채널의 데이터를 측정할 수 있는 것이다. 즉 digital recording device가 채널 선택 박스, A/D 변환기 그리고 저장 장치의 역할을 하게 되는 것이다. 이러한 digital recording device를 이용한 측정 시스템의 신호의 보다 높은 신뢰성을 위해서는 주파수 응답 신호에서의 보상이 필요하게 된다. 이를 위해 본 연구에서는 제안된 digital recording device를 이용한 측정 시스템에서 얻은 압력 섭동 신호와 기존의 압력 섭동 측정 시스템에서 신호를 비교하여 선형 전달 함수를 구하였다. 전달함수는 우퍼스피커의 랜덤 압력 섭동 신호를 이용하여 측정 시스템의 압력 섭동 신호를 재구성하는 데 사용된다. 재구성된 압력 섭동 신호는 기존의 측정 시스템에서 얻은 신호와 시간 및 주파수 영역에 걸쳐 비교하였다. 제안된 digital recording device를 이용한 측정 시스템에서 실제적 활용성의 평가를 위해 회전하는 블레이드의 표면 압력 섭동을 원주방향과 반경방향으로 설치된 다중 배열형 마이크로폰을 이용하여 측정하였다. 이를 통해 블레이드 표면 압력 장의 시공간적인 통계적 특성을 보였다.

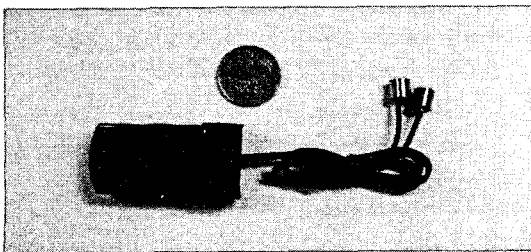


Fig. 2 Digital recording device & microphones

2. 실험 장치

2.1 실험장치 구성

본 실험은 Fig. 1과 같이 블레이드의 표면에 압력섭동 센서인 마이크로폰을 설치하고 블레이드의 허브 부분에 장착된 digital recording device에 연결하여 마이크로폰으로부터 측정된 데이터가 저장되도록 하였다. 전방에서 바람을 일으키면 블레이드와 허브에 장착된 digital recording device가 함께 회전하며 회전중인 블레이드의 표면압력 섭동 데이터를 저장하게 된다. 표면의 압력 섭동을 측정하기 위한 센서로서 (주) 소리텔에서 제작한 직경 7.9mm, 높이 7.5mm인 원통형의 마이크로폰을 블레이드 표면에 설치하였고, 지름 1mm인 홀을 통해서 압력 섭동이 측정되도록 하였다. 허브에 장착된 digital recording device는 (주) iriver에서 제작한 iFP-595T는 폭 25mm, 길이 50mm, 두께 10mm의 직사각형의 형태로서(Fig. 2) 기존 내장 프로그램을 수정하여 사용하였다. 이 장치는 마이크로폰으로부터 취득한 압력 섭동 신호를 A/D 변환을 하고 이 변환된 데이터를 자체 메모리에 저장한다. 기존의 압력섭동 측정 시스템은(Fig. 3a) 마이크로폰들로부터 얻어진 신호를 채널 선택 박스를 통해 구분하고 증폭기에서 신호를 증폭시켰다. 그리고 A/D 보드를 통해 디지털화하며 개인용 컴퓨터에서 결과 처리를 하였다. 그러나 본 연구의 digital recording device를

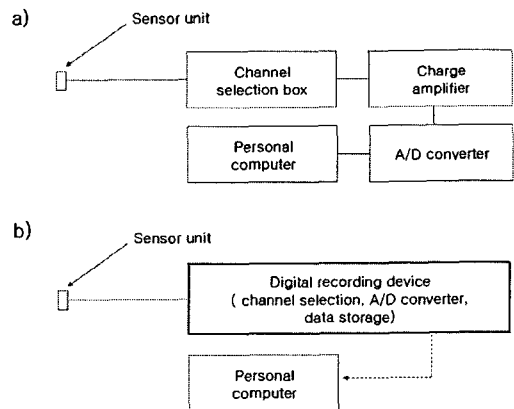


Fig. 3 Block diagrams of pressure measurement system
a) conventional method b) digital recording device

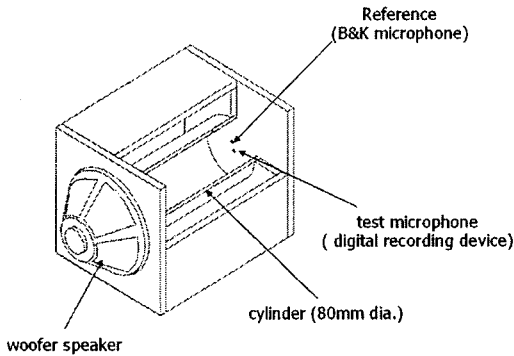


Fig. 4 Pressure calibrator

사용할 경우에는(Fig. 3b) 장치가 아주 소형이지만 신호를 선별하고 A/D 변환을 행하며 데이터의 저장까지도 할 수 있다. 얻어진 데이터는 개인용 컴퓨터로 다운로드하여 결과 처리를 하면 되므로 아주 편리하다. 현재는 digital recording 기술이 급속도로 발전하고 있고 데이터의 저장 용량도 giga급으로 대용량화 되고 있다. 본 연구에서 사용한 digital recording device의 데이터 샘플링 주파수는 16000Hz를 선택하였고 한 채널당 3,200,000개의 데이터를 얻었다. 여기에 저장된 회전중인 블레이드의 표면 압력 섭동 데이터를 개인용 컴퓨터에 다운로드하여 LabVIEW 프로그램을 사용하여 처리하였다. 스펙트럼 분석을 위한 FFT window size는 32,768로 하였고 약 98회의 앙상블 평균을 해주었다. 블레이드의 회전수 측정을 위해서는 Ono sokki 사의 HT-5200 digital tachometer를 사용하였다.

2.2 digital recording device에 연결한 마이크로폰의 검정

Digital recording device에 연결한 마이크로폰의 주파수 특성을 알기 위해서 B&K type 1405 화이트 노이즈 생성기에 우퍼스피커를 설치하여 10Hz~20,000Hz의 화이트 노이즈를 생성시켜 실험하였다. 계략도가 Fig. 4에 그려져 있다. 본 실험실에서 제작한 검정용 챔버의 벽면에 기준 마이크로폰(B&K 1/2 condenser microphone, Type 4133)과 digital recording device에 연결된 마이크로폰을 위치시키고 동시에 압력을 측정하여 주파수에 따른 출력 값의 변환 값을 기준 마이크로폰과 대상 마이크로폰을 비교하였다. 기준마이크로폰의 데이

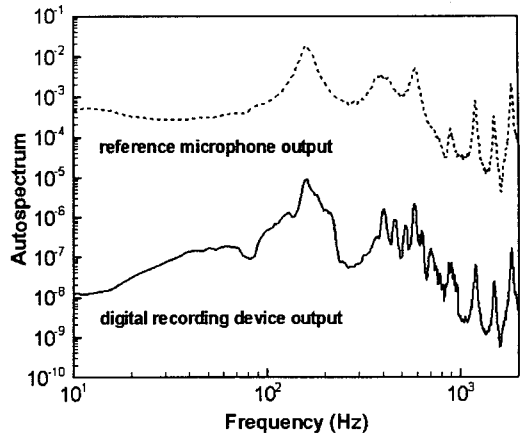


Fig. 5 Comparison of autospectra from reference microphone and digital recording device

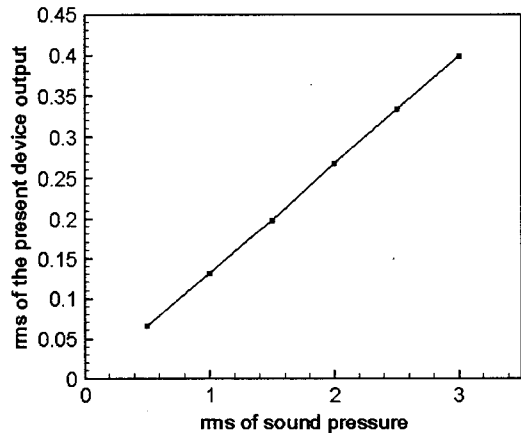


Fig. 6 Linearity of digital recording device output

터 취득은 기존의 장치를 이용하였다. 두 가지 센서의 오토스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. 두 스펙트럼의 형상에는 약간의 차이가 있음을 알 수 있고 digital recording device를 통해서 얻은 신호가 기준 신호에 가까워지도록 하기 위해서 크기와 위상 등의 보상을 해주어야할 필요성이 있음을 알 수 있다.

2.3 압력섭동 측정 시스템의 선형 모델

마이크로폰에 입력되는 음압의 rms 값에 대한 digital recording device의 출력(V)의 rms 값을 보면 이 둘의 관계가 선형적임을 알 수 있다(Fig. 6). 아주 낮은 주파수 대역을 제외하고는 입력되는 음압의 레벨과 관계없이 digital recording

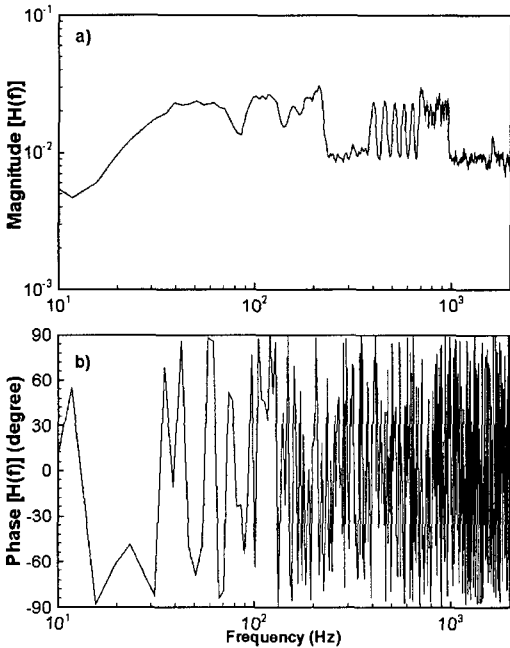


Fig. 7 Transfer function of the digital recording device signal a) magnitude b) phase

device로 획득한 신호의 오토스펙트럼 형상은 거의 불변하였다. 그러므로 입력과 출력의 관계에 대해서 선형 모델을 제시할 수 있다.

이 모델의 기초적인 가정은 기준 마이크로폰은 왜곡과 위상지연이 존재하지 않고 기준 마이크로폰의 출력은 입력되는 압력섭동에 대해서 직접적으로 비례한다는 것이다. 그래서 비례상수가 마이크로폰의 감도에 대응한다. 이 가정에 기초하여 기준 마이크로폰의 출력을 digital recording device에 연결된 마이크로폰의 입력으로 가정하고, 기준 마이크로폰의 출력과 이 장치의 출력으로부터 선형 모델이 도출된다. 입력 $x(t)$ 와 출력 $y(t)$ 사이의 전달함수 $H(f)$ 는 다음과 같다. [Bendat and Piersol⁽¹³⁾]

$$H(f) = E \left[\frac{\tilde{G}_{yy}(f)}{\tilde{G}_{yx}(f)} \right] \quad (1)$$

여기서 $\tilde{G}_{yy}(f)$ 와 $\tilde{G}_{yx}(f)$ 는 $y(t)$ 의 오토 스펙트럼과 $y(t)$ 과 $x(t)$ 의 크로스 스펙트럼을 나타낸다. 그리고 $E[\cdot]$ 는 기대치를 나타내며 $\tilde{(\cdot)}$ 는 유한한 기록 길이(finite record length)를 가

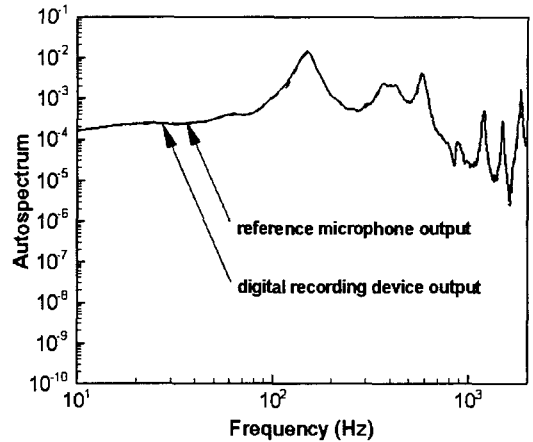


Fig. 8 Signal reconstruction

진 이산 시간 급수(discrete time series)에 기초한 estimation을 나타낸다. 입력 $x(t)$ 는 기준마이크로폰의 출력 신호이며, 출력 $y(t)$ 는 digital recording device의 출력 신호이다. 이 전달함수 $H(f)$ 의 형태는 Fig. 7에 나타나 있다. Digital recording device를 통한 마이크로폰의 주파수 응답은 주파수의 함수임을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 이 digital recording device를 적용할 경우 정확한 측정을 위해서 신호의 크기와 위상 등의 보상을 해주어야 할 필요가 있다.

2.4 비정상 압력섭동 신호의 재구성

아래의 절차에 따라서 digital recording device에 연결된 마이크로폰으로 측정된 출력 신호를 재구성 시킨다.

(1) digital recording device의 출력 신호를 이산 푸리에 변환한다.

$$Y(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_n \exp\left(-j\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2)$$

(2) digital recording device의 신호로부터 수정된 이산푸리에 변환은 다음과 같다.

$$X(f_k) = \frac{Y(f_k)}{H(f_k)} \quad (3)$$

(3) 역이산 푸리에 변환을 하면 수정된 시간역 신호가 도출된다.

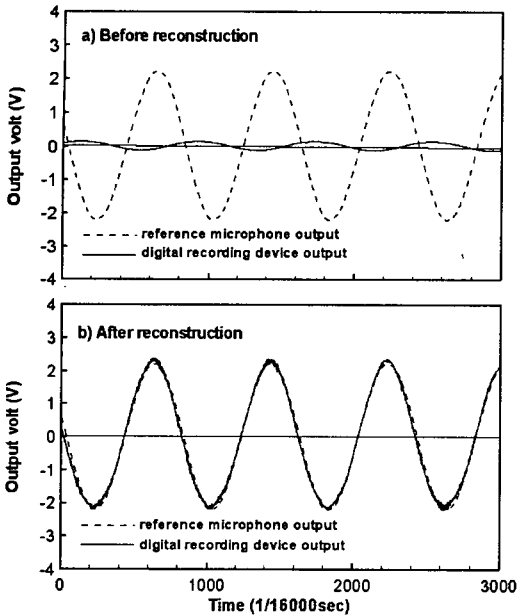


Fig. 9 Signal reconstruction of 20Hz sine wave input a) Before reconstruction b) after reconstruction

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(f_k) \exp\left(j \frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (4)$$

앞서 Fig. 5에서 보았던 화이트 노이즈를 입력 하였을 경우 나타나는 기준 마이크로폰의 신호와 재구성 과정을 거친 후의 digital recording device의 출력신호를 비교한 것을 Fig. 8에 나타내었다. 재구성된 신호의 오토스펙트럼은 거의 모든 주파수 영역에 걸쳐서 크기와 위상이 보상되어, 기준 마이크로폰 신호의 오토스펙트럼과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이렇게 신호의 재구성 과정을 통해서 digital recording device로 측정된 신호에 신뢰성을 부여할 수 있다.

2.5 신호의 재구성 테스트

전달함수의 정확도를 테스트하기 위해서 함수 발생기를 이용하여 여러 주파수의 sine wave를 입력하고 B&K microphone으로 얻은 신호와 digital recording device에서의 출력신호 그리고 재구성 후의 신호를 비교하였다. 신호를 재구성하기 전에는 digital recording device로부터 얻은 신호는 위상지연이 있었으며 신호의 크기도 작았

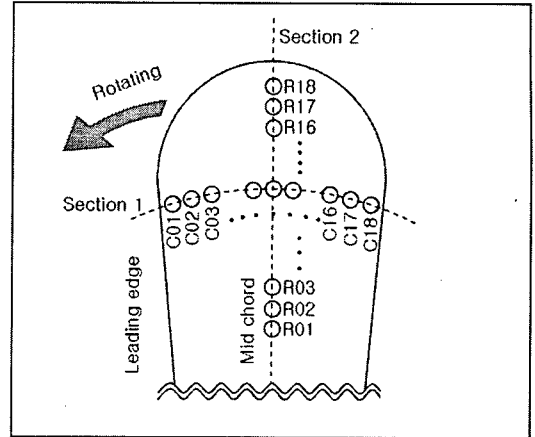


Fig. 10 Positions of microphone on blade surface

다. 그러나 앞서 보인 신호 재구성 방법을 적용한 후를 살펴보면 신호가 B&K microphone로 획득한 것과 거의 동일하게 향상되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 20Hz의 sine wave를 입력하였고 재구성 전후의 신호를 비교한 것이다. 재구성 전(Fig. 9a)에는 기준 신호와 digital recording device의 출력신호에는 차이가 있었지만 재구성 과정을 거친 후에는 두 신호가 동일해진 것을 알 수 있다(Fig. 9b).

3. 결과 및 고찰

3.1 실험장치 구성

팬을 풍동 출구 전면 1m 지점에 위치시키고, tachometer와 digital recording device의 위치는 Fig. 1과 같다. Fan은 Han-il electronics에서 제조한 것이며 날의 개수는 4개이다. 팬의 직경은 764mm이고 tip에 대한 hub의 비율은 17%이다. 유체는 밀도가 1.2kg/m³인 공기이며 blade의 회전수는 100, 200, 300, 400rpm이 되도록 풍속을 조절하였다. Chord length를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_c)는 회전수가 200rpm일 때 hub부분에서는 6,800이며 tip부근에서는 75,000이다. 회전수가 400rpm일 때에는 레이놀즈수는 hub부분에서는 13,500이며 tip부근에서는 150,000이다. Sampling frequency는 16,000Hz이고 데이터의 취득 시간은 200초로써 데이터의 총 개수는 3,200,000개이다. 데이터 처리를 위한 FFT window의 크기는 32,768로 하였다. 압력섭동 측정을 위한 마이크로폰의 상세한

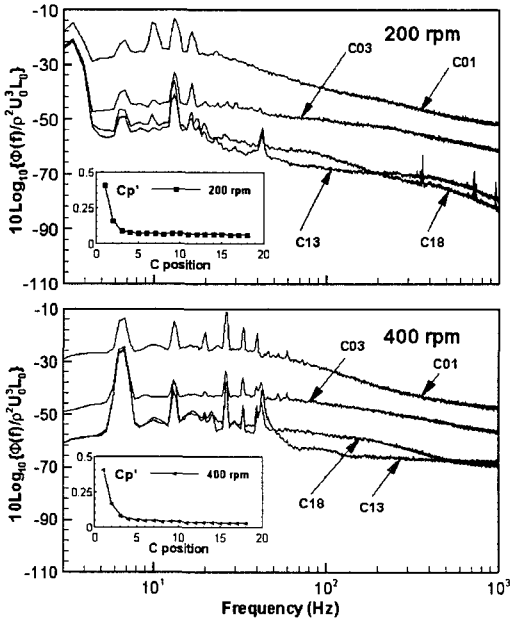


Fig. 11 Auto-spectra and C_p' at section 1

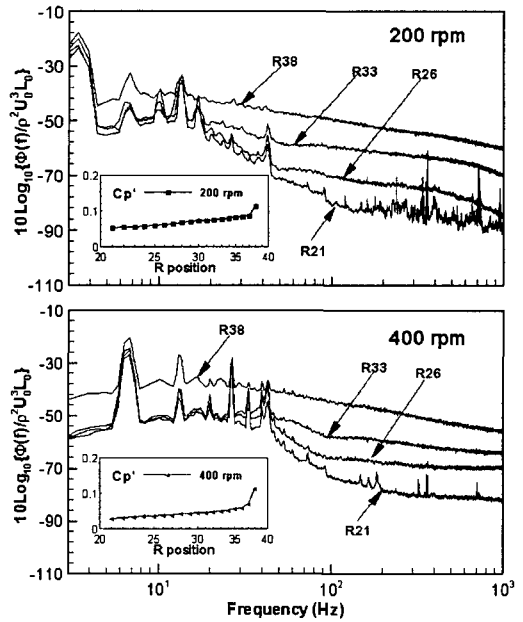


Fig. 12 Auto-spectra and C_p' at section 2

위치는 Fig. 10과 같다. 원주 방향을 따른 단면 1의 위치는 $r = 275\text{mm}$ 로써 $r^* = 2r/D_a = 0.72$ 정도 되는 지점이다. 이 단면의 chord length는 190mm이며 이곳은 hub와 끝단으로 인한 2차 유동의 효과가 나타나지 않을 것이라고 예상되는 지점이다. 10mm 간격으로 C01에서 C18까지 18지점에서 마이크로폰으로 압력섭동 데이터를 취득하였다. 단면 2는 blade의 mid chord를 따르는 지점이며 10mm의 간격으로 R01에서 R18까지 18개의 지점에서 데이터를 취득하였다. R01의 위치는 $r = 195\text{mm}$ 로써 $r^* = 2r/D_a = 0.51$ 정도이며 R18의 위치는 $r=365\text{mm}$ 로써 $r^* = 2r/D_a = 0.96$ 인 지점이다.

3.2 벽 압력 섭동의 auto-spectra 와 RMS

측정한 벽 압력 섭동의 공간적 발달 특성을 조사하고자 스펙트럼을 구하였고 두 점의 상관관계는 주파수 영역으로 푸리에 변환(Fourier transform)하여 얻어진다.

$$\Phi_{PP}(\xi, \omega; \xi_0) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{PP}(\xi, \tau; \xi_0) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

$$\Phi_{PP}(\xi, \omega; \xi_0) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{PP}(\xi, \tau; \xi_0) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

벽 압력 섭동계수(C_p')는 다음과 같이 정의한다.

$$C_p' = \frac{P_{rms}}{0.5\rho U^2} \quad (7)$$

회전 속도 200rpm과 400rpm일 때의 원주방향(단면 1)에서 측정한 데이터의 주파수 대역에서 auto-spectrum과 마이크로폰의 각 위치에 따른 벽 압력 섭동계수를 Fig. 11에 나타내었다. 200rpm의 경우에 벽 압력 섭동계수는 leading edge 부근에서 최대치를 가지는 데, 이는 블레이드의 회전으로 인해 불어오는 유동과 블레이드의 충돌에 의해 leading-edge에서 소음이 발생하는 것으로 생각할 수 있으며, 이는 기존의 연구 결과와 일치한다[Paterson과 Amiel⁹]. Leading edge에서 trailing edge방향으로 급격히 감소하고 측정지점 C05이후로는 전반적으로 감소하는 경향을 가지긴 하지만 거의 일정한 값을 가진다. 400rpm의 경우에도 스펙트럼과 벽 압력 섭동 계수는 200rpm의 경우와 유사한 경향을 가진다. 그러나 200rpm일 때에 비해서 400rpm인 경우가 broad band noise의 주파수

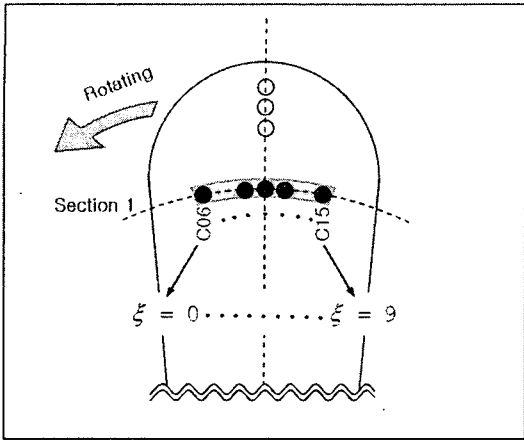


Fig. 13 Position of pressure transducers on the blade surface at section 1

영역이 더 넓게 나타나는 경향을 확인할 수 있다. 200rpm과 400rpm에 대한 반경방향(단면 2)에서 측정된 데이터의 auto-spectrum과 벽 압력 섭동계수는 Fig. 12에 나타내었다. 벽 압력 섭동계수는 hub부분에서 blade의 tip 부분으로 갈수록 증가한다. 그리고 tip에 가장 가까운 부분에서 급격하게 높아지는 것을 확인할 수 있다. 반경 방향으로 측정하였을 경우에는 tip부분이 소음의 근원지가 되는 것을 예상할 수 있다. spectrum을 살펴보면 peak가 생기는 곳을 쉽게 볼 수 있는데 이것은 회전 기계에서 축의 회전수와 일치하는 주파수에서 발생하는 RSF와 회전수와 날개의 굽과 일치하는 주파수에서 발생하는 BPF이며, 이들은 토음 소음으로 발생하며, harmonic 성분들도 나타나게 된다. 그 원인으로서는 각각 회전축의 진동과 입구 유동이 블레이드를 통과할 때 생기는 압력 섭동으로 알려져 있다. 200rpm인 경우에 있어서 BPF와 RSF는 다음의 식으로 도출된다.

$$RSF = \frac{rpm}{60} = \frac{200}{60} = 3.33 \text{ Hz} \quad (8)$$

$$BPF = \frac{rpm \times N}{60} = \frac{200 \times 4}{60} = 13.33 \text{ Hz} \quad (9)$$

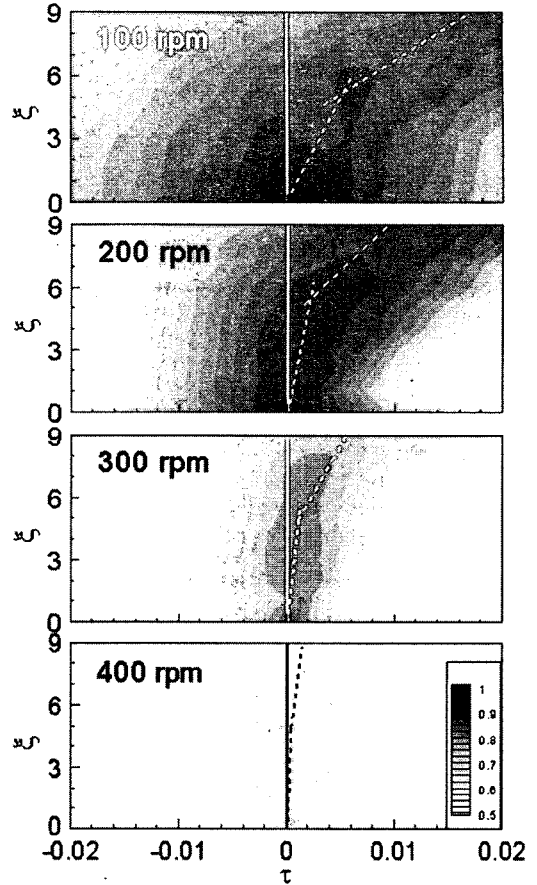


Fig. 14 Cross-correlation of pressure fluctuations at section 1

$N = \text{blade의 개수}$

BPF, RSF의 주파수에서 발생하는 peak의 분포는 축류형 팬에서의 표면 압력 섭동에 대한 기존의 연구 결과[Carolus와 Stremel⁽¹¹⁾]와 같은 경향을 보인다.

3.3 벽 압력섭동의 상호상관관계

원주 방향과 반경 방향의 두 경우에 있어서 시간의 변화에 따른 각 지점간의 상호상관관계(cross correlation)을 살펴보았다. 상호 상관관계 도출을 위해서 원주방향으로 측정된 마이크로폰의 위치를 Fig. 13에 나타내었다. 10개의 지점 C06, C07, ..., C14, C15에서의 상호상관관계를 알아보았다. C06을 기준지점으로 하였으며 xi는 C06을 기준으로 해서 원주방향의 이동거리를 나타내고

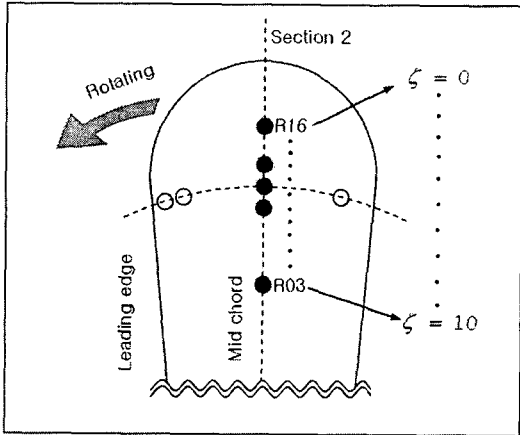


Fig. 15 Positions of microphone on blade surface

τ 는 시간(sec)을 나타낸다.

원주 방향과 반경 방향의 상호상관관계의 정의는 다음과 같다.

$$R_{PP}(\xi, \Delta t; \xi_0) = \frac{\langle P'(\xi_0, t) P'(\xi_0 + \xi, t + \Delta t) \rangle}{\sqrt{P'(\xi_0, t)^2} \sqrt{P'(\xi_0 + \xi, t + \Delta t)^2}} \quad (10)$$

$$R_{PP}(\zeta, \Delta t; \zeta_0) = \frac{\langle P'(\zeta_0, t) P'(\zeta_0 + \zeta, t + \Delta t) \rangle}{\sqrt{P'(\zeta_0, t)^2} \sqrt{P'(\zeta_0 + \zeta, t + \Delta t)^2}} \quad (11)$$

상호 상관관계 도출을 위해서 원주방향으로 측정 한 마이크로폰의 위치를 Fig. 13에 나타내었다. 10개의 지점 C06, C07, …, C14, C15에서의 상호 상관관계를 알아보았다. C06을 기준지점으로 하였으며 ξ 는 C06을 기준으로 해서 원주방향의 이동거리를 나타내고 τ 는 시간(sec)을 나타낸다. 각 지점은 1cm씩 떨어져 있으며 100rpm, 200rpm, 300rpm, 400rpm 의 4가지 경우를 측정하였다(Fig. 14). 검은색 굵은 실선은 $\tau=0$ 일 때이고 높은 값을 연결하는 굵은 점선은 유동의 대류현상을 나타낸다. 100rpm과 200rpm처럼 회전수가 상대적으로 낮은 경우에는 상관정도가 높게 나타나고 대류 속도를 뚜렷하게 관찰할 수 있지만 회전수가

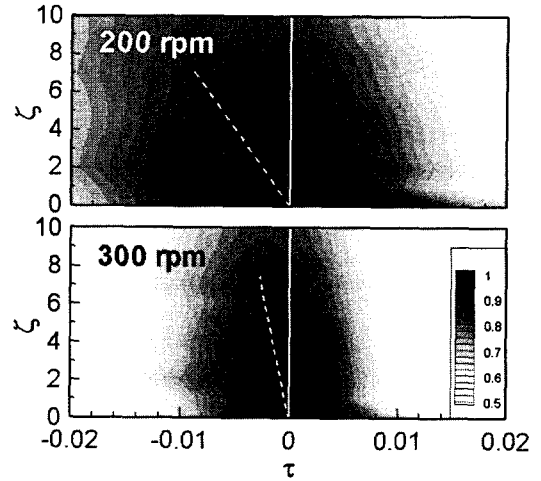


Fig. 16 Cross-correlation of pressure fluctuations at section 2

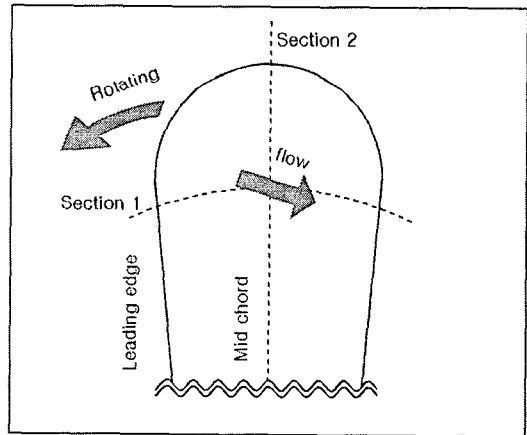


Fig. 17 Flow direction on rotating blade surface

커질수록 상관도는 낮아지며 대류속도는 빨라지는 것을 알 수 있다. Fig. 15는 반경방향으로 측정한 마이크로폰의 위치를 나타낸다. 11개의 지점 R03, R04, …, R12, R13에서의 상호상관관계를 알아보았다. R03을 기준지점으로 하였으며 ζ 는 R03을 기준으로 해서 반경방향의 이동거리를 나타내고 τ 는 시간(sec)을 나타낸다. 각 지점은 1cm씩 떨어져 있으며 200rpm, 300rpm의 두 가지 경우를 측정하였다(Fig. 16). 높은 값을 연결하는 굵은 점선은 유동의 대류현상을 나타내는데 원주 방향과는 달리 굵은 점선이 음수의 기울기를 가진다. 이것은 유동이 hub부분에서 tip방향으로 흐

르는 성분을 가진 것이 아니라 tip방향에서 hub부분으로 흐르는 성분을 나타내는 것임을 알 수 있다. 이러한 유동 방향은 블레이드가 원주 방향으로 볼 때 블레이드의 중심이 leading/trailing edge 쪽보다 오목하고, 반경방향으로 볼 때 tip쪽이 hub쪽보다 볼록한 3차원적 형상으로 이루어져있기 때문으로 간주된다. 원주 방향과 반경방향의 상관 정도와 대류 특성으로 유추해 볼 때 blade 표면상에서 유동의 흐름방향이 Fig. 17처럼 흐르는 곳이 존재하는 것을 생각해 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 측정대상이 회전 중인 경우에 표면 압력 섭동을 측정할 수 있는 새로운 한 가지 방법으로 마이크로폰이 연결된 digital recording device를 이용하는 방법을 제안하고, 실제 회전하는 블레이드에 적용해보았다. 획득한 신호의 정확도를 향상시키기 위해서 기존의 측정 시스템과의 선형 전달 함수를 이용한 신호 재구성 과정을 통해 기존 압력 섭동 측정 시스템과 동등한 수준으로 신호의 정확성을 향상시켰다.

제안된 digital recording device를 이용한 측정 시스템에서 실제적 활용성의 평가를 위해 회전하는 블레이드의 표면 압력 섭동을 측정하기 위한 풍동 실험을 수행하였다. 블레이드의 원주방향과 반경방향으로 설치된 다중 배열형 마이크로폰을 이용하여 블레이드의 표면 압력 섭동을 동시 측정 표면 압력 장의 시공간적인 통계적 특성을 보였다. 제안된 측정시스템으로부터 얻은 결과들이 회전하는 블레이드에 관한 기존의 연구들과 일치하는 것을 통해 digital recording device를 이용한 표면 압력 섭동 측정 시스템의 유용성을 확인하였다.

본 연구를 통해 밝혀낸 회전하는 블레이드위의 유동의 특성은 다음과 같다; leading edge와 tip 부근에서 주 소음원임을 확인 하였고, 회전수를 높였을 때 broad band noise가 나타나는 주파수 영역이 넓어지는 것을 확인하였다. 또한 블레이드 위의 유동의 방향이 tip쪽에서 hub방향으로, leading edge에서 trailing edge 방향으로 흐르는 것

을 알 수 있었다. 원주 방향과 반경방향 모두 blade의 회전수가 증가할수록 대류속도는 증가하였고 상관정도는 낮아지는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, M.S., Kim, J.H. and Lee, Y.H., 2004, "A Study on Aerodynamic and Analysis and Design of Wind Turbine Blade," *J. the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 28, No. 5, pp. 847~852.
- (2) Farabee, T.M. and Casarella, M.J., 1986, "Measurement of Fluctuating Wall Pressure for Separated/Reattached Boundary Layer," *J. Sound Vib.*, Vol. 19, pp. 1092~1110.
- (3) Lee, I. and Sung, H.J., 1999, "Development of an Array of Pressure Sensors with PVDF Film," *Exp. Fluids*, Vol. 26, No. 1, pp. 27~35.
- (4) Curle, N., 1955, "The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamics Sound," *Proc. R. Soc. Lond.*, Vol. 231, pp. 505~514.
- (5) Fflows Williams, J.E. and Hawkings, D.L., 1969, "Sound Generation by Turbulence and Surface in Arbitrary Motion," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. 264, p. 321.
- (6) Guo, Y.P., Joshi, M.C., Bent, P.H. and Yamamoto, K.J., 2000, "Surface Pressure Fluctuations on Aircraft Flaps and Their Correlation with Far-Field Noise," *J. Fluid Mech.*, Vol. 415, pp. 175~202.
- (7) Ölçmen, S.M. and Simpson, R.L., 1994, "Influence of Wing Shapes on Surface Pressure Fluctuations at Wing-Body Junctions," *AIAA J.*, Vol. 32, No. 1, pp. 6~15.
- (8) Haupt, D.B., Rautenberg, M. and Abdel-Hamid, A.N., 1998, "Blade Excitation by Broad-band Pressure Fluctuations in a Centrifugal Compressor," *ASME J. Turbomach.*, Vol. 110, pp. 129~137.
- (9) Paterson, R.W. and Amiet, R.K., 1977, "Noise

- and Surface Pressure Response of an Airfoil to Incident Turbulence," *J. Aircraft*, Vol. 14, No. 8, pp. 729~736.
- (10) Hanson, D.B., 1974, "Spectrum of Rotor Noise Caused by Atmospheric Turbulence," *The journal of Acoustical Society of America*, Vol. 56, No. 1, pp. 110~126.
- (11) Carolus, T.M. and Stremel, M., 2002, "Blade Surface Pressure Fluctuations and Acoustic Radiation from an Axial Fan Rotor Due to Turbulence Inflow," *Acta Acoustica United With Acustica*, Vol. 88, pp. 472~482.
- (12) Lee, H. J., Lee, S. R., Kim, W. D. and Han, S. W., 2002, "Service Torque Measurement of Rotating Shaft by Using Telemetry System," *J. of the KSME*, Vol. 39, No. 1, pp. 46~50.
- (13) Bendat, J.S. and Piersol, A.G., 2000, "Random Data Analysis and Measurement Procedures Third Edition," *Wiley-Interscience Publication*.