

시간영역 빔포밍을 사용한 풍력터빈 축소모델 소음원 측정

조태환*, 김철완

Acoustic Noise Measurement for the Wind Turbine Blade by Using Time-domain Beamforming

TaeHwan Cho*, CheolWan Kim

Abstract

The wind tunnel test to identify the acoustic noise source position of the wind turbine blade was conducted in KARI low speed wind tunnel. Microphone array and time-domain beamforming methodology was applied to this study. To reduce the data processing time, a modified beamforming method with a criteria between calculation time step and grid size for rotating angle in the cylindrical coordinate system was proposed. The test results shows that the data processing time to identify the noise source position was reduced to 20% compared with conventional method. And the dominant noise source of the blade moves from inboard to blade tip as the frequency increases.

Key words

Wind Tunnel Test(풍동시험), Wind Turbine(풍력터빈), Acoustic noise(공력소음), 빔포밍(beamforming)

(접수일 2009. 6. 23, 수정일 2009. 8. 11, 게재확정일 2009. 8. 11)

* 한국항공우주연구원 공력구조팀

■ E-mail : thcho@kari.re.kr ■ Tel : (042)860-2628 ■ Fax : (042)860-2604

Nomenclature

V_{wind} : wind speed, m/s

V_{rot} : rotational speed, m/s

subscrip

KARI LSWT : KARI Low Speed Wind Tunnel

NREL : National Renewable Energy Laboratory

1. 서론

풍력터빈은 친환경에너지원으로 각광받고 있으며, 시장규모가 최근 매 3년 동안 2배 이상 성장하는 급격한 성장세를 보이고 있다. 풍력터빈 설치 및 운영에서 큰 제한을 주는 요인 중 하나는 풍력터빈 시스템에서 발생하는 소음에 대한 사항이다. 유럽 및 미국 등 많은 국가에서는 풍력터빈 소음에 대한 규제를 적용하고 있으며, 이로 인해 풍력터빈 시스템은 상대적으로 시스템 효율이 낮은 저회전수 영역에서 시스템을 운영하고 있다.

풍력터빈 시스템의 소음원 중 가장 큰 소음원의 블레이드에서 발생하는 공기역학적인 소음으로 알려져 있으며⁽¹⁾, 이러한 블레이드 공력소음 저감을 위해 블레이드 끝단 형상 변경, 저소음 익형개발과 같은 방법이 연구되고 있다. 풍력터빈 블레이드에서 발생하는 공력소음을 저감하기 위해서는 주 소음원의 위치 및 발생 원인에 대한 연구를 바탕으로 저소음설계가 진행되어야 한다. 풍력터빈 블레이드의 공력소음원에 대한 연구는 유럽 및 미국 등에서 실물터빈을 대상으로 진행된 바 있으며⁽²⁾, 최근 국내에서도 실물풍력터빈의 소음원 파악을 위한 연구가 수행된 사례가 있다⁽³⁾.

본 논문은 축소모델 풍력터빈을 활용한 풍동시험 연구의 일환으로 수행되었으며, NREL Phase VI 풍력터빈 모델의 12% 축소모델을 사용하였다. 축소모델을 사용한 공력성능 시험결과는 기존 논문에 수록되어있으며^(3,4), 본 논문에서는 공력소음원 시험에 관련된 연구결과를 수록하였다.

2. 풍동시험

한국항공우주연구원 중형아음속풍동(이하 KARI LSWT)은 2009년까지 150여회의 시험을 수행한 풍동으로 본 시험이 수행된 폐쇄형 시험부의 단면적은 4m x 3m이며, 최대 풍속은 120m/s, 난류강도는 0.1% 이내이다. 1998년 시험설비 완공 후 측정된 시험부 유질이 Table 1에 나타나 있다.

2.1 풍력터빈 시험장치

풍력터빈 풍동시험의 축소효과를 파악하기 위해 실 모델 풍동시험결과가 공개되어 있는 NREL Phase VI 모델의 12% 축소모델을 사용하였다. 풍동시험 모델의 블레이드 반경은 0.6m이며, 고정 회전수(600RPM) 조건에서 대부분의 시험이 수행되었다. 시험장치에 대한 상세 사항은 참고문헌[4~6]에 나타나 있다.

참고문헌에 나타난 축소모델을 활용한 풍력터빈 블레이드

Table 1. KARI LSWT Flow Quality

q/q (%)	α (°)	T(°C.)	u'/U (%)	v'/U (%)	w'/U (%)
0.3	0.1	0.3	0.07	0.13	0.13

공력성능 풍동시험 결과는 Fig. 1과 같이 블레이드에서 발생하는 발전성능(토크)이 실물모델에 비해 매우 낮은 값을 보이며, 특히 저속영역에서 풍속에 대한 토크의 선형성이 나타나지 않음을 보여주고 있다. 또한, 축소모델 풍력터빈 블레이드 표면에 'dot'를 부착하여 저속영역에서 나타나는 실속을 방지함으로써 풍속에 대한 토크의 선형성을 회복할 수 있음을 보여주고 있다⁽⁴⁾. 풍력터빈 블레이드 소음원 시험은 공력성능 시험과 동일한 'dot'를 부착한 표면조건과 'dot'를 부착하지 않은 표면조건에 대해 수행하였으며, 본 논문에는 공력성능 측면에서 실물모델과 유사성을 갖는 'dot'를 부착한 상태의 시험결과를 수록하였다.

2.2 소음원 측정장치

블레이드 소음원 측정을 위해 144개의 마이크로폰을 Fig. 2와 같이 9개의 동심원 상에 배치한 마이크로폰 어레이를 사

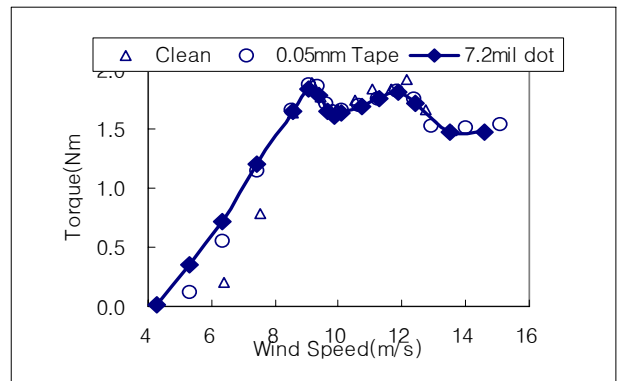


Fig. 1 Aerodynamic performance of scaled wind turbine blade

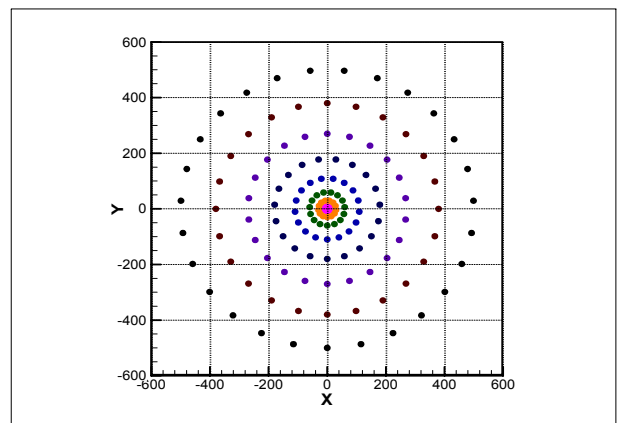


Fig. 2 Microphone array

용하였다. 어레이의 최외곽 중심원의 직경은 1m이며, 각 중심원의 직경은 log 함수 간격을 가지고 있다. 마이크로폰 어레이의 두께는 10mm이며, Fig. 3과 같이 풍동시험부 흐름상류방향 바닥면에 설치하였다. 데이터 획득은 VIPER(GbmH)를 사용하였으며, 교류전원에 의한 영향을 감소하기 위해 500Hz high pass filter를 적용하였다. 블레이드 각 회전에 대해 일정한 데이터를 획득하기 위해 회전당 2000개의 데이터를 획득하였으며, 데이터 해석을 위해 총 50회전 데이터의 ensemble을 사용하였다. 소음원 측정시스템의 검증은 위해 전체 측정시스템이 설치된 상태에서 시험부에 고정음원(스피커)를 설치한 후, 소음원 측정시스템을 사용하여 구한 소음원의 위치와 스피커의 위치를 비교하였다. 시스템 검증결과는 주 측정범위에서 소음원의 위치는 블레이드 반경 기준 5% 이내에서 일치하고 있으며, 배경소음 측정결과(Fig. 4)는 블레이드에



Fig. 3 Acoustc wind tunnel test for wind turbine blade

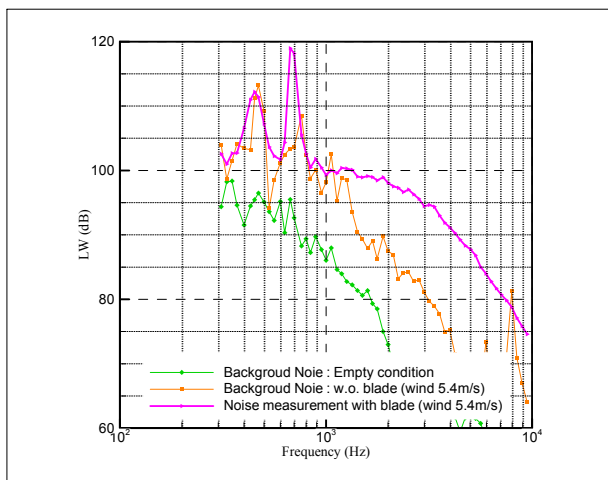


Fig. 4 Background noise

서 발생한 소음은 1kHz 이상 주파수에서는 배경소음에 비해 10dB 정도 큰 값을 나타내고 있다.

3. 풍동시험

3.1 시간영역 회전체 빔포밍

빔포밍을 사용한 소음원 측정기법은 주소음원의 위치를 파악하기 위해 풍동시험 및 야외시험에 활용되고 있다. 각 마이크로폰에서 측정된 신호의 위상은 음원과 마이크로폰 사이의 거리에 의해 결정되므로 각 신호의 위상차에는 음원과 마이크로폰 사이의 거리에 대한 정보가 포함되어 있다. 빔포밍 기법은 마이크로폰 어레이상의 각 마이크로폰이 갖는 기하적인 위치정보를 사용하여 마이크로폰에서 측정된 신호를 재구성한 후, 이를 해석하여 음원의 위치를 파악하는 기법이다⁽⁷⁾.

풍력터빈 블레이드와 같이 회전하는 소음원의 경우 음원과 마이크로폰 사이의 거리가 시간에 따라 변하므로 음원의 위치를 정확히 파악하기 위해서는 측정신호 해석에 음원의 회전운동을 반영하여야 한다. 회전 이동하는 소음원에 대한 빔포밍 기법은 Sijtsma 등에 의해 연구되었으며, 음원의 회전을 반영하기 위해 Fig. 5와 같이 해석격자를 음원과 동기된 상태로 이동시키며 신호해석을 수행하는 방법이다⁽⁸⁾.

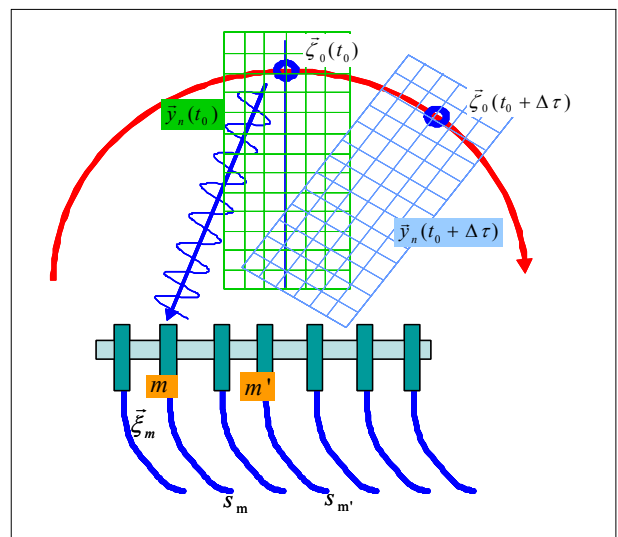


Fig. 5 Beamforming for the rotating noise source

Fig. 6에서 회전하는 음원의 경우 일반적으로 사용되는 빔포밍 해석결과에 비해 회전체 빔포밍 해석결과는 음원의 위치를 보다 명확히 나타내고 있다. 회전체 빔포밍 기법은 음원의 회전운동을 반영하기 위해 각 시간간격별로 이동된 해석격자점에 대해 계산을 수행하여야 하므로 데이터 해석에 많은 시간이 소요된다. 본 논문에서는 이러한 해석시간을 단축하기 위해 해석격자를 원통형 좌표계를 형성한 후, 시간간격과 회전방향 격자 간격에 일정한 조건을 부여하여 동일반경의 해석격자점에서는 1회 계산만을 수행하도록 하였다.

Fig. 7과 같이 원통형 좌표계에서 각도방향 해석격자의 간격을 회전시간간격에 의한 각도와 일치되게 격자를 형성하면, 동일반경에 위치한 격자점 'j'와 'j+1'은 각각 'kΔτ'와 '(k+1)Δτ' 시간 후에 동일한 해석격자점에 위치하게 되므로, 회전체 빔포밍 계산에서 사용되는 음원(격자)위치와 마이크로폰 사이의 거리에 대한 계산은 동일한 값을 갖게 된다. 그

러므로 해석격자점 'j+1'에서 요구되는 계산은 격자점 'j'에서 수행한 'Δτ' 이전 시간의 계산 결과를 사용할 수 있다. 해석격자점의 회전방향 격자간격을 아래 식과 같이 시간간격 각도의 정수배로 설정하면 격자점에 대한 계산은 반경 방향으로 1회만을 수행한 후 회전방향 격자점 들은 이전 계산결과를 사용할 수 있으므로 전체 계산시간을 크게 단축할 수 있다.

$$\Delta \theta = \frac{2\pi\Omega}{60} \Delta \tau \times K$$

동일한 시험결과에 대해 측정결과 데이터 처리에 소요되는 시간을 비교한 결과(Table 2)는 본 논문에서 제안한 방법은 기존 회전체 빔포밍 방법에 비해 데이터 처리시간을 1/5 이하로 단축하였음을 보여준다.

3.2 시험 시스템 검증

회전체 빔포밍 기법검증을 위해 Fig. 8과 같이 회전반경 0.55m에 whistle를 장착한 후 200RPM으로 회전시킨 상태에서 마이크로폰 어레이를 사용하여 whistle에서 발생되는 음원의 위치를 파악하였다. 4kHz 주파수에서 파악한 음원의

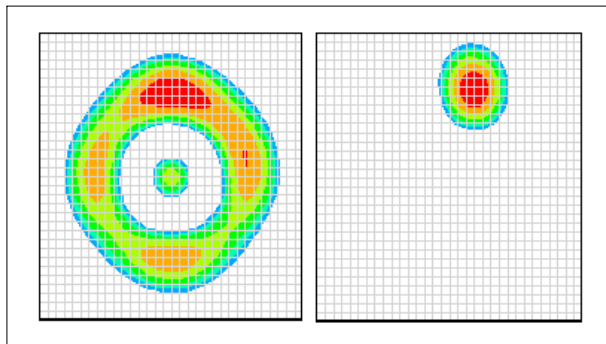


Fig. 6 Beamforming results : Conventional method(left), Rotating method(right)

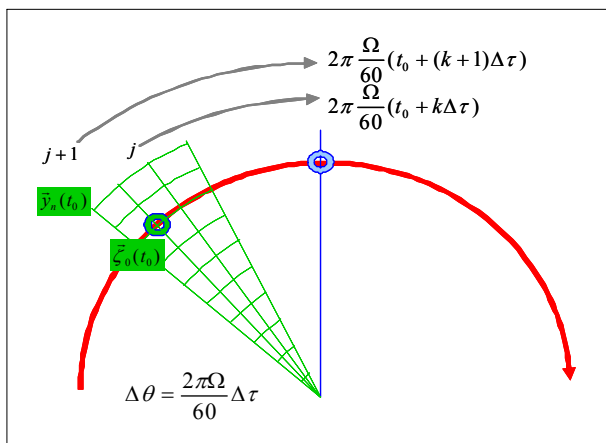


Fig. 7 Rotating beamforming method in cylindrical coordinate

Table 2. Comparison of data processing time for rotating beamforming methods

	직교좌표계	원통형 좌표계
Microphones	144 ch.	144 ch.
Sampling	4000/rev.	4000/rev.
주파수범위 (Δf)	0.3~10kHz (10Hz)	0.3~10kHz (10Hz)
해석격자 (I x J)	1000 (25x40)	1050 (30x35)
Processing time	40min/rev.	7min/rev.

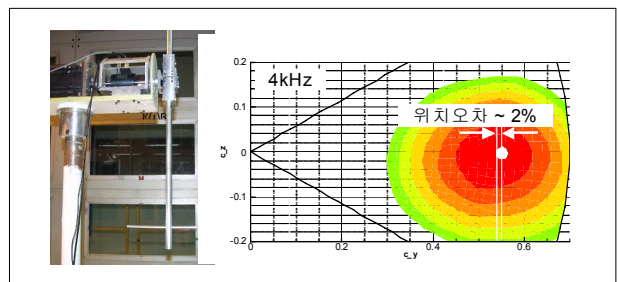


Fig. 8 Beamforming results : rotating whistle

위치오차는 반경기준 2%로 나타났으며, 이를 통해 시험에 사용된 측정기법은 회전하는 블레이드에서 발생하는 주 소음원의 위치를 파악하기 위해 사용될 수 있음을 알 수 있다.

3.3 풍력터빈 블레이드 소음원 측정

마이크로폰 어레이 시스템을 사용하여 풍력터빈 블레이드의 소음원의 위치를 측정하였다. 블레이드는 600RPM으로 회전시켰으며, 블레이드 표면에 0.18mm ‘dot’를 코드 10% 위치에 부착하였다. 풍속조건은 블레이드 축에 수평한 흐름 방향에 대해 5.4m/s~13.3m/s 조건에서 시험을 수행하였다. 회전음원에 대한 빔포밍 해석을 수행하여 파악한 주파수별 주 소음원의 위치는 Fig. 9~Fig. 10과 같다. 2kHz 주파수에서는 블레이드 반경 80% 부근에서 주 소음원이 위치하고 있으며, 4kHz 이상 주파수에서는 블레이드 끝단 부근에 주 소음원이 위치하고 있다.

풍력터빈 블레이드 소음저감을 위해 일반적으로 블레이드 끝단 형상을 변경하여 저소음 블레이드 설계를 수행하고 있으나, 시험결과는 낮은 주파수 영역에서는 블레이드 반경 80% 부근에 주 소음원이 위치하고 있음을 보여주고 있다. 이는 저소음 블레이드 설계를 위해서는 블레이드 끝단 뿐만 아

니라 블레이드 내부영역에 사용되는 익형에 대한 소음도 고려되어야 함을 보여준다.

4. 결론

풍력터빈 블레이드의 소음원의 위치를 파악하기 위해 회전하는 소음원에 대해 적용할 수 있는 시간영역 회전체 빔포밍 기법을 제안하였으며, 데이터처리 시간을 기존 방법에 비해 1/5로 단축하였다. 축소모델 블레이드 소음원 측정시험을 통해 파악한 주 소음원의 위치특성은 블레이드 공력소음 저감을 위해서는 블레이드 끝단 형상 뿐만 아니라 내부에 사용된 익형에 대해서도 소음저감이 고려되어야 함을 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 소음원 측정기법을 활용하여 실물 풍력터빈 블레이드의 소음원 특성을 보다 빠르게 파악할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원에서 수행중인 ‘전문화 연구

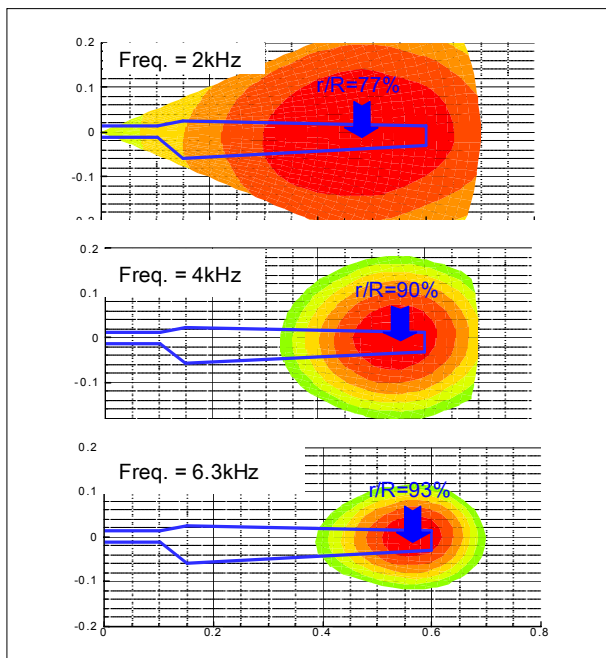


Fig. 9 Noise source position : wind 5.4m/s

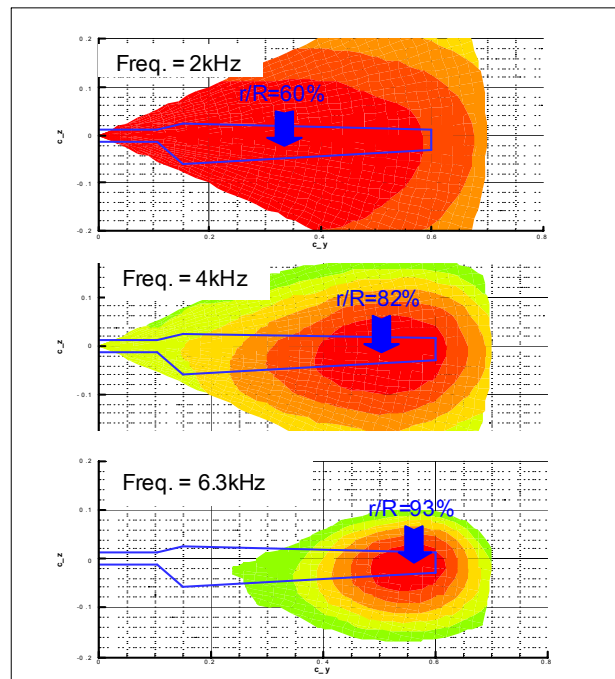


Fig. 10 Noise source position : wind 13.3m/s

사업'의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

[1] Wagner, S., "Wind turbine noise", Lawrence Univ., 2006.
 [2] Schepers, G., "MEXICO : Final report", ECN, 2007.
 [3] 정상수, "풍력발전기 블레이드 시험 및 방사소음특성 평가", 신재생에너지 전망세미나, 2009.

[4] 조태환, 장병희, "KARI LSWT 표준풍력터빈 풍동시험", 한국신재생에너지학회지, 2006.12.
 [5] 조태환, 장병희, "KARI LSWT 표준풍력터빈 풍동시험2", 한국신재생에너지학회지, 2007.7.
 [6] 조태환, 김철완, "KARI LSWT 표준풍력터빈 풍동시험3", 한국신재생에너지학회지, 2008.7.
 [7] Muller, T., "Aeroacoustic measurement", Springer, 2002.
 [8] Sijtsma, P., "Location of rotating source by phased array measurements", AIAA-2001-2167, 2001.

조 태 환



1993년 한국과학기술원 물리학과 학사
1995년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학석사

현재 한국항공우주연구원 공력구조팀
(E-mail : thcho@kari.re.kr)

김 철 완



1988년 서울대학교 항공과 학사
1990년 서울대학교 항공과 석사
1997년 미시간대 항공우주공학과 박사

현재 한국항공우주연구원 공력구조팀
(E-mail : cwkim@kari.re.kr)