

축대칭 3차원 물체의 유동 소음 스펙트럼 측정

박 연 규* · 김 양 한**

(1997년 3월 6일 접수)

A Measurement of Flow Noise Spectrum of an Axisymmetric Body

Yon-Kyu Park and Yang-Hann Kim

Key Words : Turbulent Boundary Layer (난류 경계층), Frequency-Wavenumber Spectrum (주파수-파수 스펙트럼), Corcos Model (코코스 모델), Axisymmetric Body (축대칭 물체)

Abstract

The pressure fluctuation on the surface of a submerged body has been recognized as a dominant noise source. There have been many studies concerning the flow induced noise on a flat plate. However, the noise over an axisymmetric body has not been well reported. This paper addresses the way in which we have investigated the mechanism of noise generation due to an axisymmetric body. The associated experiments and signal processing methods are introduced. A 3-dimensional axisymmetric body whose length and diameter were 2m and 10.4cm, was prepared as a test specimen. The wall pressure on the surface of the body was measured in a large scale low noise wind tunnel at KIMM (Korea Institute of Machinery and Metals). To measure the wall pressure, we used two microphone arrays which were tangential and normal to the flow. Based on the measured signal, frequency-wavenumber spectrum which explains the structure of turbulence noise, was estimated. Tangential to the flow, there exists convective ridge at a relatively higher wavenumber region; this can cause spatial aliasing. To circumvent this problem, the cross spectrum was interpolated. The interpolation has been performed by unwrapping the phase and smoothing the cross spectrum. The phase unwrapping was done based on the Corcos model; the phase of cross spectrum decreases linearly with the distance between microphones. Aforementioned signal processings are possible by employing the experimental results that the estimated wavenumber spectrum quite resembles the Corcos model. We try to modify the Corcos model which is applicable to the flat plate, by altering the magnitude of cross spectrum to fit the experimental data more accurately. We proposed that this wavenumber spectrum model is suitable for the 3-dimensional axisymmetric body. Normal to the flow, there exists a little correlation between signals of different microphones. The circumferential wavenumber spectrum contains uniform power along the wavenumbers.

*한국표준과학연구원 역학연구부

**회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서론

유동 속에 놓인 물체의 표면에 형성되는 난류 경계 층은 유체 유동 소음의 중요한 원인이 된다. 이와 관련된 유체 유동 소음의 역학적 특성을 규명하기 위한 많은 연구^(1~5)가 있었으나, 대부분 평판에 대한 해석으로 제한되고 있다. 따라서, 평판 외에 보다 보편적인 형상의 물체, 즉 3차원 형상의 물체에 의한 유동 소음의 해석이 필요하다. 본 논문은 3차원 축대칭 물체가 시·공간적으로 균일한 속도를 갖는 유동장 속에 노출되었을 경우에 발생하는 유체 유동 소음의 역학적 특성을 실험적으로 다루고 있다.

유동 소음 측정은 실험 시편인 3차원 축대칭 물체에 길이방향과 원주방향으로 서로 다른 배열을 가진 두개의 마이크로폰 어레이(microphone array)를 준비하여 표면 음압 정보를 측정하는 방법을 택하였다. 이렇게 측정된 신호를 이용하여 난류의 구조를 설명해 줄 수 있는 주파수-파수 스펙트럼(frequency-wavenumber spectrum)^(1,2)을 계산하고, 이를 기본으로 시·공간상의 난류 소음 구조를 설명하며 그 실제 적용 가능성을 검토한다.

실험의 설계 및 실험 데이터의 처리에 있어 결정적인 요소는 마이크로폰 간격으로 결정되는 파수 영역의 엘리어싱(aliasing) 문제와 전체 어레이 크기, 즉 마이크로폰 사이의 거리에 마이크로폰 갯수를 곱한 양에 따른 파수의 분해능 등이다. 축대칭 물체의 길이방향에 따른 난류 소음 구조의 경우, 유체의 흐름에 의하여 높은 파수 영역에 형성되는 대류 피크(convective peak) 성분이 공간상의 엘리어싱 문제를 발생시킬 수 있다. 이 현상의 처리를 위하여는 보간(interpolation) 방법, 혹은 실제로 센서의 갯수를 증가시키는 방법이 있을 수 있다. 본 논문에서는 크로스 스펙트럼(cross spectrum)의 보간을 이용하여 엘리어싱을 처리하는 방법을 택하고 있다. 이는 센서의 갯수를 증가시키는 것이 실제로 어려운 경우 택할 수 있는 일반적인 방법이다.⁽³⁾ 이 때, 보간의 사전작업으로서 크로스 스펙트럼의 위상퍼기(phase unwrapping)와 스무딩(smoothing)이 필요하다. 본 논문에서는 실험으로 얻어진 파수 스펙트럼의 위상퍼기를 위하여 코코스 모델(Corcocos model)⁽⁴⁾에 기초를 둔 통계적 방법을 채택하고 있는데, 이러한 작업을 하게된 구체적인 배경은 실험

결과가 평판 경우의 파수 스펙트럼인 코코스 모델과 유사한 경향을 보인다는 사실이다. 그 자세한 사항은 본문에서 상세히 설명한다.

제 2장에서는 3차원 축대칭 물체 주위 유체 유동 소음의 역학적 구조가 시·공간적으로 어떠한 형태를 갖고 있는가를 표현하여 주는 주파수-파수 스펙트럼의 기본이론을 설명하고 있고, 제 3장은 관련 실험 및 결과를 다루고 있다.

2. 주파수-파수 스펙트럼

본 장에서는 난류 경계층에 의한 유체 유동 소음의 구조를 시·공간적으로 파악하기 위한 방법으로 주파수-파수 스펙트럼의 개념 및 이론적 배경을 소개한다. 본 장의 제 1절에서는 주파수-파수 스펙트럼의 기본 개념을 소개하고, 실제적인 계산과 관련된 신호처리 방법들을 제 2절에서 다루고 있다.

2.1 주파수-파수 스펙트럼

주파수-파수 스펙트럼은 시간정보인 주파수와 공간 정보인 파수의 함수로 표현되며, 따라서 난류 경계층 내압력장의 시·공간적 특성 파악에 중요한 도구가 된다. 어떠한 정해진 위치에서의 시간정보의 취득은 쉽게 이루어질 수 있지만, 공간정보의 취득을 위하여는 여러개의 센서를 사용해야 한다는 어려움이 있다.

해석의 편의를 위해 1차원의 경우를 생각하면, 시간지연과 공간지연의 함수로 표현되는 상관함수(correlation function)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R(r, \tau) = E[p(x, t)p(x+r, t+\tau)] \quad (1)$$

여기서, p 는 압력을 t , τ 는 각각 시간과 시간지연을, 그리고 x , r 은 각각 공간과 공간지연을 의미한다.

식 (1)에 표현된 상관함수의 시간축을 따른 푸리에 변환(Fourier transform)을 크로스 스펙트럼(cross spectrum)으로 정의하며 그 수학적 표현은 다음과 같다.

$$C(r, w) = \int_{-\infty}^{\infty} R(r, \tau) e^{-jw\tau} d\tau \quad (2)$$

여기서, w 는 각주파수를 나타낸다.

주파수-파수 스펙트럼은 식 (1)에 표현된 상관함

수의 시간과 공간에 따른 두번의 푸리에 변환으로 정의되며, 따라서 식 (2)에 표현된 크로스 스펙트럼의 공간축을 따른 푸리에 변환으로 표현됨을 알 수 있다. 즉,

$$P(k, w) = \int_{-\infty}^{\infty} C(r, w) e^{-jkr} dr \quad (3)$$

와 같이 주파수-파수 스펙트럼을 표현할 수 있다. 여기서, k 는 파수를 나타낸다.

2.2 신호 처리 방법

일반적인 난류 유동장에서의 파수 스펙트럼은 두 개의 피크성분을 갖는다.⁽¹⁻³⁾ 첫번째, 즉 적은 값의 파수에서 나타나는 피크는 소리의 전파를 나타내는 음향피크이며, 보다 높은 파수에서는 유동의 흐름, 즉 대류의 영향을 나타내는 대류 피크가 나타난다. 음향 피크는 주파수를 음속으로 나눈 값에 위치하며, 대류 피크는 주파수를 유동 속도로 나눈 값에 위치한다. 유동의 속도는 소리의 전파속도에 비해 상대적으로 작기 때문에 대류 피크는 음향 피크에 비해 높은 파수 영역에 위치함을 알 수 있다. 따라서, 음향 영역의 해석과는 달리 센서 사이의 간격에 따른 공간상의 엘리어싱이 발생할 가능성이 높음을 알 수 있다.

공간상의 엘리어싱 문제를 해결하기 위하여는 기본적으로 공간에서 보다 촘촘한 간격에서의 정보를 필요로 한다. 이를 달성하기 위한 방법은 실제로 센서 사이의 간격을 작게하여 측정을 수행하는 것인데, 이를 위하여는 많은 수의 센서를 필요로 하고, 따라서 현실적인 제약을 받는다. 직접적인 센서의 증가외에 생각 할 수 있는 방법은 측정점 사이의 값을 보간하여 예측하는 방법이다. 이 때, 주의하여야 할 사항은 보간이 행하여지는 함수가 실제 측정점 사이에서 급격하게 변한다면 보간에 의한 결과가 실제값과 큰 차이를 나타낸다는 사실이다. 그러나, 보간이 행하여지는 함수의 거동에 대한 정보가 주어진다면, 보간은 상대적으로 근사한 실제값의 예측을 할 수 있을 것이며, 따라서 공간상의 엘리어싱의 해결에 유용하게 사용될 수 있다.

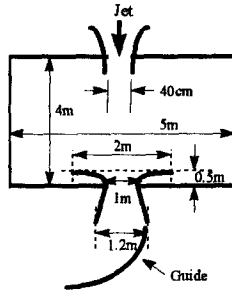
본 논문의 제 3장에서 기술하겠지만, 실험적으로 측정된 크로스 스펙트럼은 평판 예측 모델의 일종인 코코스 모델과 매우 근접한 경향을 갖고 있다. 이로부터 크로스 스펙트럼이 코코스 모델이 예측하는 바를 따름을 가정할 수 있고, 따라서 공간상의

엘리어싱을 해결하기 위한 방법으로 크로스 스펙트럼이 코코스 모델을 따른다는 가정을 토대로, 이의 내삽을 시도하는 것이 가능하다.⁽³⁾ 크로스 스펙트럼은 복소 함수로 크기와 위상을 갖는다. 따라서, 내삽은 크로스 스펙트럼의 크기와 위상에 각각 적용되어야 한다. 그 중 위상에 대한 내삽의 사전작업으로서 반드시 위상퍼기의 과정을 거쳐야 함을 알 수 있는데, 이는 위상이 겹쳐진 부분의 내삽은 실제 값과 다른 결과를 가져올 수 있기 때문이다. 전술한 바와 같이 크로스 스펙트럼은 코코스 모델을 따르며, 따라서 본 논문에서는 위상퍼기에 있어서 코코스 모델에 기초를 둔 통계적 방법을 적용하고 있다. 코코스 모델이 예측하는 크로스 스펙트럼의 위상은 거리에 따라 선형적으로 변한다.

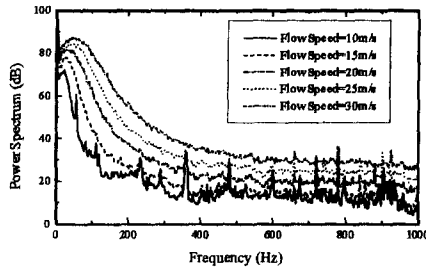
난류장의 구조상, 측정점 사이의 거리가 멀어질수록 상관도가 떨어져 잡음의 영향이 크게 나타나는 현상은 잘 알려져 있다. 이 잡음의 영향을 줄이기 위한 방법으로 크로스 스펙트럼의 크기와 위상에 각각 이동 창문함수(moving window) 기법을 통한 스무딩(smoothing)을 할 수 있다.⁽⁶⁾ 이는 임의의 한 지점에서의 값을 나타냄에 있어 그 지점을 중심으로 하는 작은 창문함수를 통한 평균을 취하여 나타내는 기법으로, 일종의 저대역 통과 필터(low pass filter)를 적용함을 의미한다. 따라서, 고주파 성분에서 나타나는 잡음의 영향을 줄일 수 있다. 스무딩시에 다양한 형태의 창문함수가 임의적으로 사용될 수 있으나 본 논문의 경우에는 한 창문함수(Hann window)를 이용하고 있다. 이것은 한 창문함수가 사각 창문함수에 비해 양 끝으로 갈수록 낮은 값을 갖기 때문에 사각 창문함수에 비해 분산(variance)의 감소 면에서 좋은 결과를 가져올 수 있기 때문이다.⁽⁶⁾ 또한, 무한 길이를 갖는 가우시안 창문함수와 달리 일정한 길이를 갖기 때문에 그 적용이 용이하다는 점이다.

3. 실험 및 결과

본 논문의 목적을 한마디로 표현하면 3차원 측대칭물체 표면에서의 압력 변동 현상을 실험을 통해 해석하고, 이를 기반으로 유체 소음을 적절히 대표할 수 있는 파수 스펙트럼을 제시하는 것이다. 이를 위하여는 해석 시편인 3차원 측대칭 물체와 함께 유동소음 측정의 필수환경인 대규모 저잡음 풍동의 완비가 필요하다. 본 실험에서는 이를 위하



(a) Dimension of a low noise wind tunnel



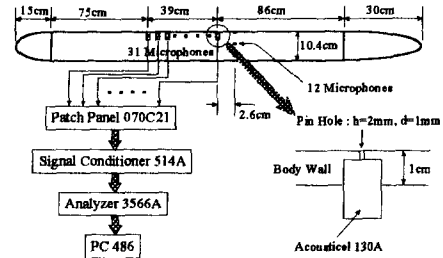
(b) Background noise level

Fig. 1 Characteristics of a large scale low noise wind tunnel.

여 한국기계연구원(KIMM) 소재의 풍동을 이용하였다. Fig. 1은 사용된 풍동의 제원 및 유속별 배경소음 특성을 나타낸다.

먼저 풍동의 특성을 고려하여 3차원 축대칭 물체를 설계, 제작하였다. 물체의 길이를 결정하는데 있어 세가지 사항을 고려하였다. 즉, 물체 앞부분의 난류로의 천이가 발생하는 구간, 실제 측정구간의 유입을 줄이기 위한 여유길이등을 고려하였으며, 그 결과 물체의 길이를 2 m로 결정하였다. 풍동 입구에서 2 m가 경과하였을 때 일정유속이 유지되는 부분은 10 cm로 측정되었고, 따라서 물체의 직경을 10 cm로 정하였다.

물체 표면에서의 표면 압력 및 파수 스펙트럼을 측정하기 위하여 물체 표면에 마이크로폰 어레이를 설치하였다. 이 때, 유동에 평행한 방향과 수직인 방향의 거동을 살펴보기 위하여 물체의 길이방향과 원주방향으로 두개의 다른 어레이를 사용하였다. 먼저 길이방향의 경우 1.3 cm 간격으로 총 31개의 마이크로폰을 설치하였는데, 첫번째 마이크로폰의 장착 위치는 난류의 발생 지점을 고려하여 물체의 앞 부분으로부터 75 cm가 경과한 위치로 하였다. 이 어레이의 전체 크기(1.3 cm×31)와 마이크로폰

**Fig. 2** Axisymmetric body and experimental set-up.

의 갯수를 고려할 때, 해석가능한 파수의 범위는 약 242 m^{-1} , 파수 영역에서의 분해능은 약 15.1 m^{-1} 가 됨을 알 수 있다.

원주방향 어레이의 경우 물체의 앞 부분으로부터 116.6 cm가 경과한 위치에 30° 의 간격으로 12개의 마이크로폰을 장착하였는데, 이는 마이크로폰의 제원과 축대칭 물체의 반경을 고려할 때 최대한 사용가능한 마이크로폰의 갯수이다. 이 어레이를 사용해 측정할 수 있는 파수의 범위는 약 120 m^{-1} 가 되며, 파수 영역에서의 분해능은 약 20 m^{-1} 가 된다.

모든 마이크로폰의 장착에 있어서 핀홀(pin-hole) 방식을 사용하였는데, 그 길이는 2 mm, 직경은 1 mm로 하였다. 이 핀홀에서 공명이 발생하는 주파수는, 그 파장이 핀홀 길이의 4배인 8 mm가 되는 약 43 kHz임을 쉽게 추론할 수 있다. 이는 본 논문의 관심 주파수 뿐만 아니라 인간의 가청 주파수를 훨씬 초과하는 양이기 때문에 핀홀의 영향은 무시할 수 있다.

본 실험에서는 신호의 취득에 있어 32채널의 동시 샘플링이 가능한 주파수 분석기(HP 3566 A)를 사용하였으며, 시간신호를 취득하여 식 (1)에 표현된 기대값을 구하는 대신 첫번째 채널에 대한 각 채널의 주파수 응답함수를 직접 구하는 방법을 채택하였다. 각 채널별의 주파수 응답함수를 알고 있을 때, 채널에 따른 상대적 위상과 크기를 알 수 있다. 즉, 거리에 따른 위상과 크기의 정보인 크로스 스펙트럼을 구할 수 있게 된다. 주파수-파수 스펙트럼은 식 (3)에 의해 크로스 스펙트럼으로부터 직접 계산될 수 있다.

이상에서 기술한 축대칭 물체와 마이크로폰 어레이의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 축대칭 물체의 제원 및 마이크로폰의 장착위치, 신호 취득 시

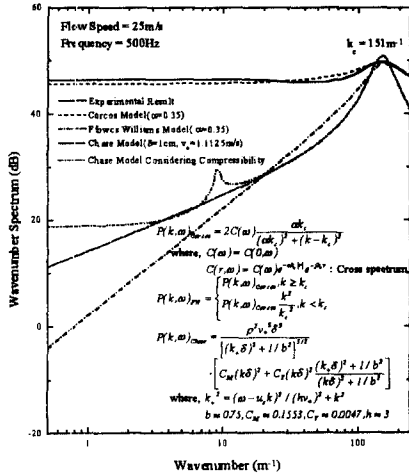


Fig. 3 Comparison of wavenumber spectrum models.

스텝, 핀홀 등을 나타내고 있다.

Fig. 3은 유속이 25 m/s, 주파수가 500 Hz일 경우, 실험적으로 구한 파수 스펙트럼과 여러 파수 스펙트럼 모델들과의 비교를 나타낸다. 이 때 파수 스펙트럼의 계산에 있어, 제 2장에서 기술한 바와 같은 위상퍼기와 스프딩 및 보간의 신호 처리 과정을 거치지 않았는데, 이는 측정값과 여러 평판 예측 모델들과의 공정한 비교를 수행하기 위함이다. 코코스 모델과 폭스 윌리엄스 모델의 경우 α 값을 0.35로 하였으며, 체이스 모델의 경우 경계층 두께(δ)를 1 cm로 하였다. 경계층 두께로부터 마찰 속도는 다음 식에 의해 주어진다.⁽⁷⁾

$$v_* = \left(\frac{C_f}{2}\right)^{\frac{1}{2}} U$$

$$C_f = 0.0450 \left(\frac{U}{U\delta}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

식 (4)에 의해 $v_* = 1.1125$ m/s임을 계산할 수 있고, δ 와 v_* 의 값을 이용하여 체이스 모델을 계산할 수 있다. 여러 파수 스펙트럼 모델들 중에서 코코스 모델이 실제 측정된 파수 스펙트럼과 가장 근접한 결과를 보여주고 있으며, 이로부터 코코스 모델에 기초를 둔 보간 등의 신호 처리 방법이 타당성을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 25 m/s의 유속에 대하여 거리차이가 11.7 cm인 두 지점(1번째 채널과 10번째 채널)에서 측정된 신호 사이의 주파수에 따른 크기와 위상차를 나타낸다. 위상퍼기와 스프딩을 수행하기 전

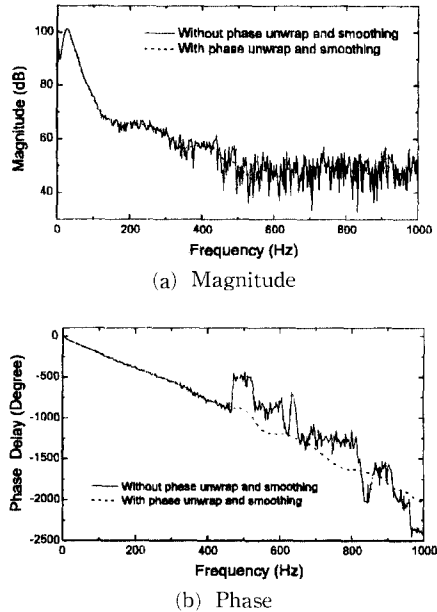


Fig. 4 Magnitude and phase along frequency : $r=11.7$ cm (Flow speed=25m/s).

과 수행한 후의 결과를 각각 실선과 점선으로 표시하였다. 실선으로 표현된 위상퍼기와 스프딩을 수행하기 전의 결과를 볼 때, 고주파로 갈수록 크기와 위상 모두에 강한 요동성분이 발생하고 있음을 알 수 있다. 파장이 짧은 고주파의 경우, 파동이 인지하는 두 측정점 사이의 상대적인 거리차가 커짐으로 인해 상관도가 떨어지기 때문이다. 위상의 경우 저주파 영역에서는 주파수에 따라 선형적으로 감소하는 특성을 나타내고 있는 반면, 주파수가 증가하면 이러한 특성이 사라짐을 보여준다. 위상퍼기와 스프딩을 수행한 결과를 볼 때, 위상의 경우 모든 주파수 영역에서 선형적으로 감소하는 특성을 나타내며, 크기와 위상 모두 스프딩에 의해 요동성분의 감소를 가져왔음을 알 수 있다. 이 때 스프딩에 있어 80 Hz의 크기를 갖는 한 창문함수(Hann window)를 사용하였다.

Fig. 5는 거리에 따른 크기와 위상의 변화, 즉 크로스 스펙트럼의 크기와 위상을 나타낸다. Fig. 4와 마찬가지로 실선은 위상퍼기와 스프딩을 수행하기 전의 결과를 나타내며, 점선은 수행한 후의 결과를 나타낸다. 위상퍼기와 스프딩에 의해 요동의 정도가 많이 감소하였음을 알 수 있고, 특히 위상의 경우 거리에 따라 선형적으로 감소하는 특성을 보임으로써, 코코스 모델의 예측과 일치하게 되었

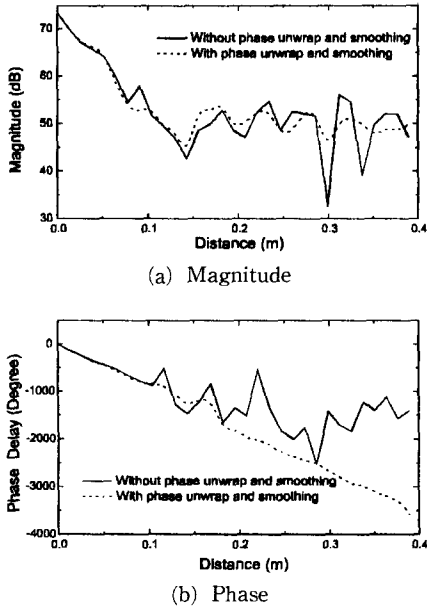


Fig. 5 Cross spectrum at the frequency of 500 Hz (Flow speed=25m/s).

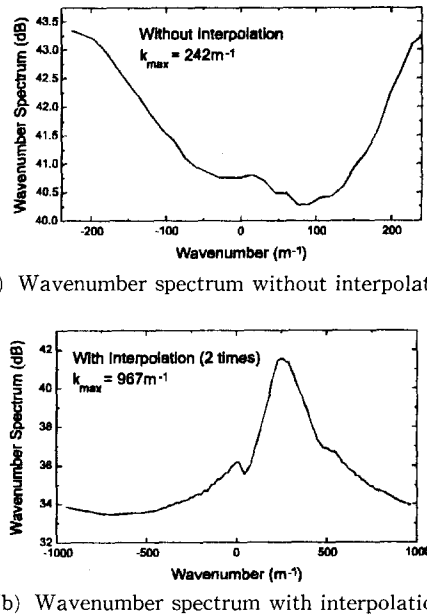


Fig. 6 Effects of interpolation on the wavenumber spectrum (Flow speed =15m/s, Frequency =500 Hz).

음을 알 수 있다. 또한, 위상퍼기에 의하여 크로스 스펙트럼의 보간이 가능해 졌음을 보여주고 있다.

Fig. 6은 파수 스펙트럼에의 보간의 효과를 나타

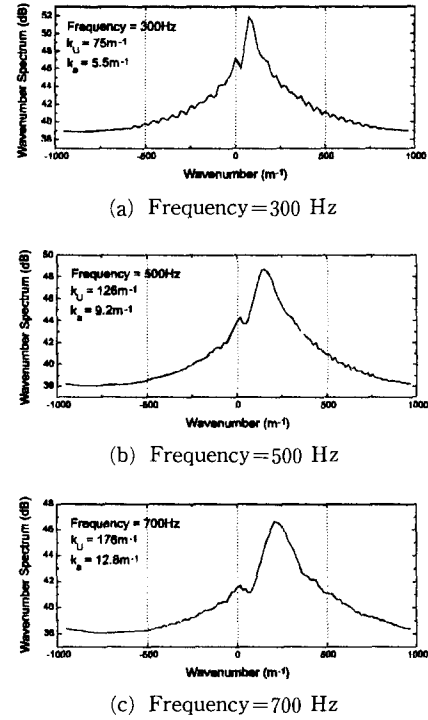


Fig. 7 Wavenumber spectrum for different frequencies (Flow speed=25m/s).

낸 그림이다. 유속이 15 m/s, 주파수가 500 Hz일 때의 파수 스펙트럼을 나타낸 Fig. 6의 (a)는 보간을 수행하지 않은 결과를, (b)는 보간을 수행한 결과를 나타낸다. 이때 보간은 2차에 걸쳐 실시하였고, 그 결과 공간상에서의 샘플링 간격을 1/4로 줄일 수 있었으며, 해석 가능한 파수 한계를 4배로 늘릴 수 있었다. (a)를 볼 때 대류 피크 성분에 있어 공간상의 엘리어싱이 발생함을 보여주고 있는데, (b)의 경우 보간에 의해 해석가능 파수 범위가 확대됨으로써 공간상의 엘리어싱 문제가 해결되었음을 보여주고 있다.

Fig. 3에서 Fig. 6에 걸쳐 본 논문에서 사용한 신호처리 방법들의 타당성을 검증하였다. 이후의 결과들은 전술한 신호처리 방법들을 적용한 것이다.

Fig. 7은 유속이 25 m/s일 때, 주파수의 변화에 따른 파수 스펙트럼을 나타낸다. 대류 피크와 음향 피크의 위치 모두 주파수가 증가함에 따라 증가하고 있음을 보여주는데, 음향 피크의 경우 파수 영역에서의 분해능의 한계로 인해 그 해석에 제한점을 갖게 된다. 예를 들어 500 Hz의 경우 음향 피

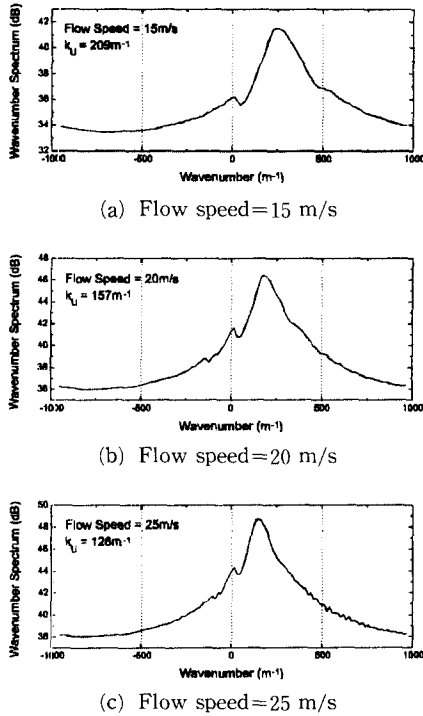


Fig. 8 Wavenumber spectrum for different flow speeds (Frequency=500 Hz).

크의 위치는 9.2 m^{-1} 가 되는데, 이는 파수 영역에서의 분해능인 15.1 m^{-1} 에 비해 작은 값을 갖게 되므로 정확한 해석이 불가능하게 된다. 이 경우 음향 피크는 15.1 m^{-1} 에 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 500 Hz의 주파수에 대하여, 유속의 변화에 따른 파수 스펙트럼을 나타낸다. 음향 피크의 경우 유속에 상관없이 일정한 값을 나타내고 있는데 반하여, 대류 피크의 경우 유속이 증가함에 따라 그 위치가 감소하며 나타나고 있음을 보여준다. 이 때, 대류 피크는 자유 유동 피크($k_u = w/U$)보다 다소 높은 파수에 위치하게 된다.

Fig. 5에 나타난 크로스 스펙트럼의 크기와 위상을 살펴볼 때, 위상의 경우는 코코스 모델이 예측하는 바와 같이 거리에 따라 선형적으로 감소하는 특성을 보이고 있으나, 그 크기는 코코스 모델이 예측하는 거리에 따른 지수함수적 감소 특성과는 차이를 나타내고 있다. 따라서, 실험적 결과에 기초하여 크로스 스펙트럼의 크기에 수정을 시도하고자 한다. 이는 평판 예측모델인 코코스 모델을 수정하여 3차원 축대칭 물체에 의한 유동 소음 예측

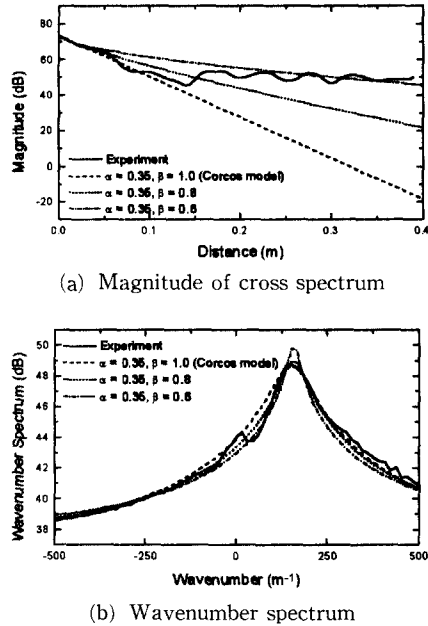


Fig. 9 Modification of Corcos model ; Effects of β 's (Flow speed=25 m/s, Frequency=500 Hz).

에 적합하도록 보완하는 작업이 된다.

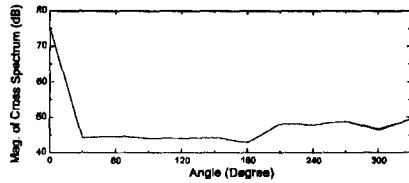
데시벨 단위로 표현된 크로스 스펙트럼의 크기, 즉 Fig. 5의 (a)를 볼 때 거리의 1차함수가 아닌 근(root)함수의 형태를 가짐을 알 수 있으며, 이로부터 코코스 모델의 보다 개선된 표현으로 다음과 같이 크로스 스펙트럼을 수정할 수 있다.

$$C(r, w) = C(w) e^{-\alpha k_c |r|^\beta} e^{-jkcr} \quad (5)$$

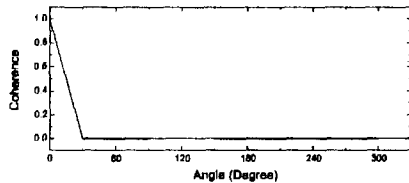
여기서, β 는 크로스 스펙트럼의 크기를 보다 정밀하게 근사하기 위해 도입한 상수로, α 값과 마찬가지로 실험적으로 결정되어야 할 것이다.

Fig. 9는 유속 25 m/s, 주파수 500 Hz에 대하여 β 값에 따른 크로스 스펙트럼의 크기와 파수 스펙트럼의 변화를 나타낸다. 이 때 α 값은 0.35로 고정하였다. β 값의 변화에 따라 파수 스펙트럼에서의 대류 피크의 형상에 변화를 가져옴을 알 수 있는데, $\beta=0.8$ 일 경우 실험적으로 구한 파수 스펙트럼과 가장 근접한 결과를 보이고 있다.

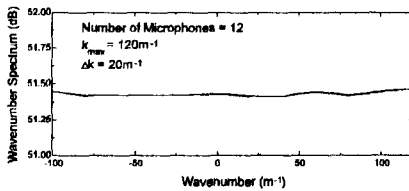
유동에 수직한 방향으로의 통계적 특성, 즉 원주 방향 어레이를 이용한 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 크로스 스펙트럼의 크기를 볼 때, 0° 에서 강한 피크를 나타내는, 마치 임펄스와 같은 형태를 가짐을 알 수 있다. 이는 상관도에서도 확인할 수



(a) Magnitude of cross spectrum



(b) Coherence



(c) Wavenumber spectrum

Fig. 10 Circumferential wavenumber spectrum.

있다. 각도별 상관도를 나타내는 Fig. 10의 (b)를 볼 때 서로 다른 채널 사이에는 상관도가 급격히 감소하여 나타남을 알 수 있다. 그 결과 Fig. 10의 (c)에 나타난 파수 스펙트럼은 전체 파수 영역에 걸쳐 일정한 값을 나타내고 있다. 즉, 서로 다른 채널 사이에는 상관도가 없는 백색 잡음같은 특성을 나타내는 것이다.

4. 결론

3차원 축대칭 물체에 의한 유체 유동 소음의 역학적 해석을 실험적으로 수행하였고 그 결과를 정리하였다.

길이 2 m, 직경 10 cm의 3차원 축대칭 물체의 표면에 길이방향으로 1.3 cm 간격으로 31개의 마이크로폰을, 원주방향으로 30° 간격으로 12개의 마이크로폰을 장착하여 유체 유동 소음의 측정을 수행하였다. 측정된 신호에 대하여 파수 스펙트럼을 계산하였고 이를 여러 평판 예측 모델들과 비교하였는데, 그 중 코코스 모델과 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 크로스 스펙트럼의 위상 켄기와 스브딩 및 보간법을 사용하여 대류 피크의

존재로 인해 발생할 수 있는 공간상의 엘리어싱 문제를 해결하였다. 계산된 파수 스펙트럼은 음향 피크와 대류 피크를 나타내고 있지만, 음향 피크의 경우 파수 영역에서의 분해능의 한계로 정확한 값을 예측하는데는 제한점을 갖는다.

3차원 축대칭 물체에 의한 유체 유동 소음의 구조를 보다 정밀하게 근사하기 위한 목적으로, 코코스 모델의 수정을 수행하였다. 이는 크로스 스펙트럼의 크기에 행하여 졌다.

유동에 수직인 방향으로는 서로 다른 채널 사이에 상관성이 매우 작아 파수 스펙트럼은 마치 백색 잡음과 같이 전 파수 영역에 걸쳐 일정한 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한, 저잡음 풍동의 이용에 도움을 주신 한국기계연구원에도 감사드립니다.

참고문헌

- (1) S. H. Ko and H. H. Schloemer, 1992, "Flow Noise Reduction Technique for a Planar Array of Hydrophones," *J. of Acoust. Soc. Am.*, Vol. 92, No. 6, pp. 3409~3424.
- (2) C. H. Sherman, S. H. Ko, and B. G. Buehler, 1990, "Measurement of the Turbulent Boundary Layer Wave-Vector Spectrum," *J. of Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88, No. 1, pp. 386~390.
- (3) K. Herbert, 1994, "Wall-Pressure Spectrum in a Flat Plate Turbulent Boundary Layer and Downstream of a Turbulent Boundary Layer Manipulator," MIT, Ph. D. Thesis.
- (4) G. M. Corcos, 1964, "The Structure of the Turbulent Pressure Field in Boundary Layer Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 18, pp. 353~378.
- (5) M. S. Howe, 1991, "Surface Pressures and Sound Produced by Turbulent Flow over Smooth and Rough Walls," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 90, No. 2, pp. 1041~1047.
- (6) 박연규, 김양한, 1993, "순간 진동수 추정 방

법론의 비교와 외팔보, 엔진 블록 및 자동차 문
진동에의 적용예,” 한국소음진동공학회지, Vol.
3, No. 4, pp. 341~352.

(7) R. W. Fox and A. T. McDonald, 1985, Introduc-
tion to Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, p.
448.