

원형실린더 와류발생 소음에 대한 경사각 효과

°홍훈빈*, 최종수**

The Effects of Yaw on the Vortex-Shedding Sound from a Circular Cylinder

Hoon-Bin Hong*, Jong-Soo Choi**

Abstract

For a cylinder in a uniform flow stream, sound is generated by the fluctuating pressure on the cylinder surface due to the vortex shedding behind the cylinder. It is known that the major parameters to predict the sound pressure are the characteristic length of the flow along the cylinder axis and the fluctuating lift coefficient. These parameters strongly depend on the Reynolds number and the yaw angle of the cylinder to the free stream. In this experimental study the effects of yaw on the flow parameters, and consequently on the generated sound are investigated. The surface pressure and the radiated sound are measured simultaneously for different yaw angles and showed that the reduced normal velocity component to the cylinder axis reduces the unsteady lift fluctuation which results in lowered sound pressure level. However, experimental result shows that "the cosine law" which uses the normal velocity component as a characteristic velocity for noise generation from a yawed cylinder needs to be carefully reviewed.

1. 서론

유동의 흐름 속에 놓여진 실린더에서의 소음은 실린더 후류에 존재하는 와류에 의하여 실린더 표면에 유기되는 변동압력에 기인하며, 실린더 후류에서 발생하는 와류의 형태는 레이놀즈수에 따라 그 특성이 변한다. 이러한 특성의 변화는 와류에 의한 소음의 발생 주파수를 유속과 실린더 직경으로 무차원한 스트로울수와 소음의 레벨에 영향을 미친다. 흐름의 방향에 대하여 경사각을 갖고 있는 실린더의 경우 특성 길이 및 스트로울수의 변화가 발생하는데, 스트로울수에

대한 관계를 $S_t=fD/U\cos\beta$ 로 나타낼 수 있다. 소음의 레벨은 유속과 실린더 축방향으로의 유동의 상관 길이(correlation length) 그리고 변동양력계수(fluctuating lift coefficient)에 의해서 결정되는 것으로 알려져 있으나[1], [2], 이들에 대한 경사각의 영향이 뚜렷하게 규명되어 있지 못하다. 본 연구에서는 유동의 흐름에 경사진 경우에 대한 이차원 원형실린더에서의 유동장과 소음에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실린더 소음 이론

유체의 흐름 속에 놓여진 실린더로부터 발생하는 소음은 Lighthill과 Curle에 의해 수학적으로 표현하

* 충남대학교 대학원 항공우주공학과

** 충남대학교 항공우주공학과

게 되었는데, 방사되는 소음원에 따라 세 가지의 항으로 소음식을 표현했다. 유동장내에 존재하는 비정상성(unsteadiness)에 의한 사극자(quadrupoles), 유동장내에 있는 물체의 표면에서 발생하는 응력 변동(fluctuating stress)에 의한 쌍극자(dipole), 그리고 경계층의 팽창(dilatation of boundaries)에 의한 단극자(monopole)로 구분할 수 있으며, 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \rho(x) - \rho_0 &= \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int \frac{1}{r} T_{ij}(y) dV(y) \\ &+ \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int \frac{1}{r} (\rho v_i v_j + p_{ij}) dS_j(y) \\ &- \frac{1}{4\pi a_0^2} \int \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} dS_i(y) \end{aligned}$$

v_i 와 p_{ij} 는 유동 내의 지점 y 에서의 속도와 응력 텐서(velocity and stress tensor)이고, $r=|x-y|$, T_{ij} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + p_{ij} - a_0^2 \rho \delta_{ij}$$

그리고 위 식의 적분은 모두 지연 시간(retarded time) $t-r/a_0$ 에서 하게 되며, 실린더의 표면에서 유기되는 소음을 계산하기 위해서는 두 번째와 세 번째 항을 이용하게 된다. 이 식은 실린더의 표면이 완벽한 강체인 경우, $v_i=0$, 아래와 같이 정의된 상관길이(correlation length : l_c) 및 도심(centroid : η)을 이용해 위 식을 다음과 같이 원거리 음압(acoustic pressure)에 대한 시간 제곱 평균에 대한 식으로 고쳐 쓸 수 있다.

$$l_c = 2 \int_0^L R_{pp}(\xi) d\xi$$

$$\eta = \frac{2}{l_c} \int_0^L \xi R_{pp}(\xi) d\xi$$

$$\overline{p^2} = \frac{\rho^2}{16 a_0^2} \frac{\cos^2 \theta}{r^2} \overline{C_L^2} U^6 S_i^2 2 l_c (L - \eta) \quad (1)$$

식 (1)로부터 주어진 위치에서 음압의 크기에 가장 큰 기여를 하는 항은 속도와 양력계수 그리고 상관길이가 됨을 알 수 있다. 양력계수는 시간에 대한 제곱 평균값으로 이를 구하기 위해 여러 방법들이 제시되었다.[3]

실린더가 흐름에 경사져 있을 때는 흐름에 수직인 경우와는 다른 양상을 갖게 되는데, 이런 경사각에 의한 실린더 주위 유동의 변화에 대한 선행자들의 많은 연구가 수행되었다 [4]-[8]. 흐름에 경사진 실린

더의 경우 실린더 길이방향으로 흐름이 존재하기 때문에 흐름에 수직인 경우와는 후류에서의 와류분포가 달라지게 되며 이로 인해 실린더 표면에서 유기되는 음압분포 또한 달라지게 되어, 결국 방사되는 소음레벨에 영향을 주게 된다. 흐름에 경사진 실린더 주위 유동의 해석을 위해 종종 "Independence Principle", 혹은 "Cosine Law"을 사용하게 되는데, 그 개념은 경사진 실린더로 유입되는 유체의 속도를 실린더에 수직인 속도성분과 평행한 속도성분으로 나누어 실린더에 수직인 유동의 속도성분만을 사용해 유동의 특성을 결정하게 된다. 실린더가 경사각을 가지면, 수직인 경우보다 실린더로 유입되는 실린더 축에 수직인 속도성분의 크기가 감소하게 되며, 이로 인해 실린더 후류에서의 와류발생주파수가 바뀌게 된다. 이를 수식으로 나타내면, $S_i = fD/(U \cos \beta)$. 즉, 위의 소음예측 식 (1)에서 실린더의 경사각을 고려하면, $\overline{p^2} \sim (U \cos \beta)^6$ 의 관계를 갖게 된다. 그러나, 선행자들의 실험은 주로 레이놀즈수 범위가 수십에서 수천 대에 이르는 작은 레이놀즈수에 대한 실험들이었으며, 이론에 대해서도 서로 다른 의견들이 많아서 "Cosine Law"의 적용가능한 경사각 범위에 대해 서로 다르게 주장하고 있다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 1은 균일한 흐름내에 경사진 실린더와 그 좌표계를 나타낸 그림이다. 실험을 위하여 사용된 모델은 직경이 20 mm이고 길이가 500 mm인 원형실린더로서 길이 방향을 따라 40 mm 간격으로 압전세라믹센서(PCB 103A)를 삽입하고 압력은 실린더 표면에 뚫린 직경 1 mm인 압력공을 통하여 측정할 수 있도록 하였다. 실린더 모델은 측정부 단면이 300×300 mm인 저소음 풍동에 가로놓여 설치되었고 실린더 끝단에서의 영향을 최소화하기 위하여 간격이 300 mm인 평행한 판을 흐름의 방향을 따라 측정부 양쪽에 설치하였다. 양쪽 벽면에는 구멍을 뚫어 실린더가 흐름의 방향에 대해 각기 0°, 15°, 30°의 경사각을 가질 수 있도록 하였고, 측정부의 윗면과 아랫면은 개방하여 Blockage 효과를 최소로 하고 하면에서의 원거리 소음 측정을 용이하도록 하였다. 실린더는 실린더의 축을 중심으로 회전과 전후 이동이 가능하도록 하여 설치된 압력공이 흐름의 방향에 대하여 측정 위치 및 각도를 변화시킬 수 있도록 하였다. 후류에는 두 개의 열선 풍속계가 이송장치 위에 설치

되어 원하는 위치에서 속도를 측정할 수 있도록 설계되었다.

풍동의 속도는 30 m/sec로 고정시키고, 실린더의 경사각을 바꾸어 가며 소음을 측정하였다. 이때 실린더에 수직인 유동의 속도에 기준한 레이놀즈수가 약 $35,000 < Re_n < 41,000$ 이었다. 측정부는 위, 아랫면이 개방되어 있는 관계로 입구로부터의 거리에 따라 속도가 감소하게 되므로, 풍동의 속도는 풍동수 축부 입구와 출구 사이의 압력차를 실린더가 위치할 측정부에서 피토판으로 계측된 속도로 보정하였으며, 흐름에 경사진 실린더는 실린더의 중심에서의 속도를 기준으로 사용하였다.

본 연구에서는 경사진 실린더에 대한 "Cosine Law"의 성립 여부에 대해 확인을 하고, 경사각이 증가하면서 실린더 후류에서의 와류분포에 어떤 변화가 생기는지, 방사되는 소음에는 어떠한 영향을 주는지에 대하여 살펴보았다.

4. 실험결과 및 토론

실험데이터의 해석시 예상되는 측정오차는 각 결과를 도시한 그림에 표시하였으며, 이때의 오차는 측정된 데이터수(N)로부터 구한 precision error (or random error)이다. Bias error는 교정(calibration) 과정을 통해 보정을 할 수 있으므로 무시하고 실험을 통한 측정과정에서 발생하는 precision error만 표했다. 모든 과정은 Bendat & Piersol[9]의 과정을 따랐다.

4.1. 표면 압력 측정

Fig. 2는 실린더 표면의 센서가 실린더의 전방 정체점으로부터 90° 지점에 놓여 있을 때 측정된 표면 압력의 스펙트럼을 구한 결과이다. 스펙트럼상 주파수 간격 Δf 는 2Hz이며, 200회의 평균을 취한 결과로서 95%의 신뢰도에서 측정오차는 7.1%이다. 실린더의 경사각이 증가하면서, 스트롤수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 수직인 실린더의 경우는 기본 주파수의 2배에 해당하는 주파수에서 2차 하모닉(harmonic)성분도 나타났다. 그러나, 경사각이 증가하면서 하모닉들은 사라지며, 특정 주파수에서 뚜렷한 피크를 보이던 경사각 0°의 경우와는 달리 와류 발생주파수의 분포가 점차 넓어지며, 소음의 레벨도 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 3에서 실선으로

나타낸 것이 경사각이 0° 일 때 실험을 통해 측정된 스트롤수에 경사각의 Cosine 값을 곱해준 결과이다. 실험값이 이론값보다 작은 값을 보이고 있지만, 비슷한 실험을 수행한 Chiu & Lienhard[4]의 결과에서도 이론과 실험에 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 실린더 후류에서 와류발생주파수는 실린더에 수직인 속도성분에 의해 무차원화됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 실린더 전면의 정체점으로부터 90° 위치의 표면에서 측정된 압력으로부터 실린더 길이방향으로 공간에 대한 상관관계계수 (cross-correlation coefficient)를 구한 것이다. 그림에서 실선은 실험값을 지수함수를 사용하여 Curve fitting 한 결과로써, 이를 이용하여 위에서 정의된 상관길이 및 도심을 계산했다. 계산된 상관길이 및 도심은 후에 후류에서 열선 풍속계로 측정된 속도의 상관길이 및 도심과 비교될 것이다(Fig. 9, 10). 또한 상관길이 및 도심은 이론식에 적용하여 소음값을 예측하는데 사용되어지며 후에 실험에 의하여 측정된 결과와 비교될 것이다. 각각의 실험값에 숫자로 표기한 값은 측정 데이터로부터 계산한 오차인데, 실린더 길이 방향으로 각각의 위치에서 예측된 최대오차를 표기했다. 그림에 나타나듯이 경사각이 상관길이에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

4.2. 실린더 후류 속도

균일한 흐름 속에 놓여진 경사진 실린더로부터 후류에서의 와류거동에 어떠한 변화가 일어나는지 살펴보기 위해 열선 풍속계를 사용해 실린더 표면에서의 압력과 후류에서의 속도를 이용하여 상관관계를 측정했다(Fig. 5, 6, 7). 열선 풍속계는 실린더의 중앙(mid-span)에서 후류 방향으로 실린더 직경의 9배, 수직인 방향으로 6배만큼 되는 영역을 분할하여 각각의 격자점에서 속도를 측정했다. 실험은 유속이 30 m/sec 일 때 수행되었고, 각 측정점에서 1초 동안 5,000개의 데이터를 측정하여 평균하였다. 와류의 중심 위치(vortex core)는 등고선의 중심에 해당하고 각각의 등고선에서의 상관관계계수의 값이 수치로써 표시되었다. 경사각이 0° 일 때는 아주 규칙적인 와류분포를 볼 수 있으나, 경사각이 증가하면서 규칙적인 와류분포는 사라지고, 상관관계계수값도 경사각이 0° 일 때보다 상대적으로 작은 값을 보임을 알 수 있다. 또한 경사각이 증가하면서 후류방향으로 규칙적인 와류거동을 보이는 영역이 점차 감소하고 있다. 그러나, 상관관계계수의 최대값을 보이고 있는 지점

((X/D, Y/D)=(1, ±1))에서는 경사각이 바뀌어도 상관관계계수값에 큰 차이는 나타나지 않는다. 경사진 실린더의 길이방향으로 유동의 흐름이 존재함으로 인해 실린더 후류에서의 와류거동이 규칙성을 잃게 되는 것이다. 앞에서 표면압력으로부터 구한 상관관계와 실린더 후류에서 속도의 상관관계를 비교하기 위해 (Fig. 5, 6, 7)에서 표면압력과 가장높은 상관관계를 갖는 와류의 중심에 해당하는 위치를 이은 선을 따라 실린더 후류에서 속도분포를 측정했다. 측정위치는 실린더의 축을 기준으로 후류방향으로 실린더 직경의 0, 1, 2배(X/D=0, 1, 2), 흐름에 수직한 방향으로 실린더 직경의 1배(Y/D=1) 되는 곳에서 측정했다. Fig. 8은 실린더 후류에서 속도의 상관관계를 경사각과 실린더 후류로 거리를 변화시켜 가며 측정한 결과이다. 경사각의 영향보다는 실린더의 후류방향으로 거리의 영향이 더 크게 작용함을 쉽게 알 수 있다. 이는 앞의 Fig. 5, 6, 7에서 알 수 있듯이 동일한 측정지점 (X/D, Y/D)에서는 경사각에 관계없이 상관관계계수값이 거의 일정했다. 그러나, 실린더 후류방향으로 거리가 멀어짐에 따라 상관관계계수값은 점차 감소하고 있으므로, Fig. 9와 같이 경사각보다 후류방향으로 거리의 영향이 더 크게 작용한 것을 알 수 있다.

4.3. 표면압력과 속도의 상관길이의 비교

앞에서 구한 표면 압력의 상관관계계수와 실린더 후류 속도 상관관계계수로부터 지수함수를 이용, curve fitting 과정을 통해 상관관계 함수를 구하고, 이로부터 상관길이(correlation length)와 도심(centroid)을 구한 결과가 Fig. 9, 10 이다. “sy30”는 표면압력(s)으로부터 구한 값이며, 경사각이 30° (y30)임을 의미하고, 같은 방법으로 “hy30”은 열선풍속계(h)를 이용하여 동일한 경사각에서 측정한 결과를 의미한다. 실린더 축으로부터 후류방향으로의 거리에 대해 상관길이 및 도심을 기호로 나타냈는데, 가로 및 세로축 모두 실린더 직경(D)에 의해 무차원화된 값이다.

표면압력으로부터 구한 상관길이는 Fig. 4에서 보았듯이 경사각에 관계없이 일정한 값을 가지는데, 열선풍속계로 구한 후류속도의 상관길이는 후류방향으로 동일한 지점(X/D)에서 경사각에 따라 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 실린더 주위 유동장의 특성이 아니고 측정상의 오차로 생각된다. 후류방향으로 거리가 증가함에 따라 후류속도의 상관길이는 급격히 감소하고 있다. X/D=0일 때는 표면압력의 상관길이

보다 2배가량 큰 값을 보이는데, 이는 열선풍속계가 실린더의 표면으로부터 너무 멀리 떨어진 비교적 상관계수의 값이 작은 위치에서 측정되었기 때문인 것으로 추정된다. X/D=1일 때는 상관길이가 표면압력으로부터 구한 상관길이와 비슷한 값을 보이며 따라서 표면압력으로부터 구한 상관길이가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. X/D=2인 곳에서는 표면압력과 후류속도 사이의 상관관계계수값이 약 0.1 정도로 작아지기 때문에 상관길이의 값이 상당부분 감소한다. 이러한 값은 Moeller[10]의 실험과 비슷한 결과이다.

4.4. 양력 계수 측정

소음예측식에서 상관길이 이외에 필요한 값은 와류에 의한 실린더의 변동양력계수이다. 양력계수 측정을 위한 실험은 참고문헌 [3]의 방법을 따랐으며, 이 실험에서는 실린더를 15° 간격으로 회전시켜 가며, 각각의 위치에서 실린더 표면에 유기되는 변동압력의 자승평균값(RMS)값을 측정했다. Fig. 11은 실린더 표면에 유기되는 변동압력의 자승평균값을 측정하여, 실린더에 수직인 속도성분을 이용하여 구한 압력계수의 분포를 나타낸 결과이다. 실린더로부터 발생하는 압력은 흐름의 방향으로 약간 기울어진 쌍극자(dipole)분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 또한 경사각이 증가함에 따라 압력계수의 값이 작아짐을 알 수 있는데 이는 표면압력을 무차원하는데 사용된 속도, 즉 실린더에 수직한 성분이 특성속도로서 적합하지않기 때문이라고 생각된다.

실린더의 표면에서 측정된 압력간의 위상각은 참고문헌 [3]에서도 나타냈듯이 아래와 뒷면에서 180°의 차이를 보이고 있었다. 이로부터 실린더 표면을 따라 서로 다른 시간에 측정된 압력과 위상차를 이용하여 적분을 통해 실린더 표면에서의 변동양력계수를 구할 수 있다(Gerrard[11]). 이런 과정을 통해 구한 자승평균 양력계수(RMS)는 경사각이 0°, 15°, 30°에 대해 각각 0.177, 0.111, 0.072 이었다. 이러한 값들은 선행 연구결과와 비교할 때 작은 값들이나 (Blake[1]), 기존의 연구결과에서도 실험장치와 실험 조건에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 특히 실험장치가 와류에 의하여 진동을 하는 경우 양력계수가 크게 계측되며, 실린더 길이에 따라 유동의 분포가 이차원을 만족시키지 못할 경우 측정위치에 따라 이 값의 차이가 있을 수 있음을 예측할 수 있다.[11]

4.5. 원거리 소음 및 이론과의 비교

실린더로부터 방사되는 소음의 원거리에서의 특성을 알아보기 위해 마이크로폰을 이용하여 원거리 소음을 측정했다. 측정지점은 실린더 축과 흐름에 수직인 방향으로 실린더 축으로부터 50 cm만큼 떨어진 곳이며, 측정된 음압은 기준음압 20 μ Pa을 사용하여 음압레벨(dB)로 환산하였다. 스펙트럼은 100번씩 평균하여 구하였고(최대오차 10%), 세 가지의 경사각에서 측정하였다. Fig. 12에서 경사각이 0° 일 때는 피크점에서의 소음레벨이나 주파수가 뚜렷하게 나타난다. 경사각이 증가하면서 소음발생 주파수는 점차 넓어지며, 소음레벨 또한 감소하는 경향을 보이고 있다. 실린더에 수직인 속도성분에 의한 스트롤수는 경사각이 증가하면서, 0.196, 0.185, 0.182로 경사각의 효과를 고려한 "Cosine Law"가 비교적 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

흐름 속에 놓여 있는 임의의 형태를 갖는 물체로부터 발생하는 공력소음의 레벨은 앞에서 언급했듯이 Lighthill-Curle의 이론식을 사용하여 예측할 수 있다. 예측식을 통한 계산에는 앞에서 구한 상관길이, 도심, 스트롤수, 및 양력계수를 이용하게 된다. 계산 결과를 아래 <Table 1> 으로 나타냈다.

<Table 1> Results from experiment and prediction(dB)

Yaw angle	Surface Pressure	Exp.	Velocity
0°	87	86	87
15°	82	76	82
30°	75	72	75

"Surface Pressure"로 표시한 항목은 실린더의 표면압력으로부터 구한 상관길이 및 도심을 이용해 예측한 결과이고, "Velocity"로 표시한 항목은 실린더 후류(X/D=1)에서 측정된 속도 상관길이 및 도심을 이용해 예측한 결과이다. 예측식 (1)에서 사용된 속도는 경사진 실린더축에 수직인 속도성분만을 사용했다. 경사각이 없는 경우는 실험값과 소음예측식으로 부터 구한 값이 매우 잘 일치하나 경사각이 있는 경우에는 약간의 차이를 보이고 있다. 그러나 속도를 증가시켜 측정한 결과에서는 이들간의 차이가 매우 적어짐을 확인하였다. 한편, 실린더 후류속도로부터 구한 상관길이 및 도심을 이용한 예측값은 표면압력

으로부터 구한 예측값과 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. 이는 Fig. 9, 10에서 보듯이 실린더 표면에서 측정된 상관길이 및 도심의 값이 후류속도로부터 구한 상관길이 및 도심과 큰 차이를 보이지 않기 때문이다. 상관길이 및 도심은 경사각의 변화에 대해 일정한 분포를 보였으며, 실린더축에 수직인 속도성분으로부터 계산한 스트롤수 역시 경사각의 변화에 대해 일정한 값을 가짐을 앞에서 확인했다. 그러나 변동양력계수는 같은 레이놀즈수에서도 경사각에 따라 더 작은 양력계수를 보이며 이는 실린더 축방향으로의 속도성분에 의한 효과로 양력계수가 실린더축에 수직인 속도성분만에 의해 그 특성이 결정되지 않는 것이라 판단된다.

5. 결론

원형실린더에서의 와류에 의한 발생소음과 관련한 연구는 공력소음 연구의 기초가 되는 분야로 많은 연구자들에 의하여 다양한 실험조건 및 실험방법으로 연구가 수행되어 왔다. 그러나, 아직까지도 후류에서의 와류거동과 이로 인한 소음발생과 관련하여 확실하게 검증되지 못한 사실들이 많으며, 특히 경사진 실린더의 경우 소음예측식의 적용 가능성과 이때 사용되는 무차원변수에 대한 연구가 부족하였다. 본 연구에서는 경사진 실린더 후류에서의 유동특성과 이로 인한 실린더 표면에서의 압력변화와 발생소음에 대한 실험을 동시에 수행하여 이들 상호간에 연관성에 대한 이해를 넓혔고, 특히 소음발생의 주요 변수인 변동양력계수를 기존의 방법과는 다른 독자적 방법으로 특정함으로써 이론적 소음발생 예측식의 타당성을 검증하였다. 또한 소음예측식에서 사용되는 주요변수인 변동양력계수에 대한 실험을 통하여 경사진 실린더 주위 유동의 삼차원 효과가 양력계수에 많은 영향을 줄을 보였으며, 이로 인한 소음 감소효과가 경사각으로 인한 수직속도성분의 감소에 의한 영향에 추가됨을 밝혔다.

후기

본 연구는 1996년도 한국과학재단의 특정기초연구 과제(과제번호 : 96-0200-08-01-3)와 관련한 연구의 일부로써 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

Nomenclature

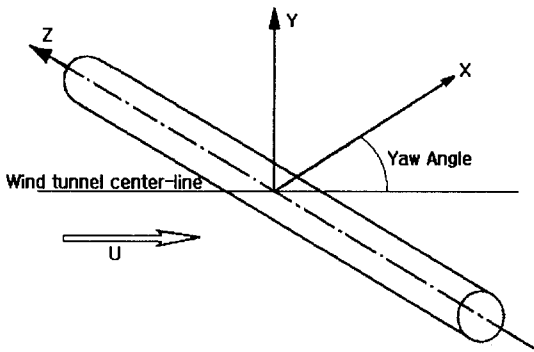
$\overline{p^2}$: 제곱평균 변동압력
$\overline{C_L^2}$: 제곱평균 양력계수
D	: 실린더 직경
L	: 실린더 길이
N	: 데이터수
Re_n	: 실린더축에 수직인 속도성분을 기준으로 한 레이놀즈수
R_{pp}	: 상관함수
S_t	: 스트로울수
U	: 유속
a_0	: 340 m/sec
f	: 진동수
l_c	: 상관길이
r	: 실린더로부터 측정지점까지의 거리
t	: 시간
β	: 실린더 경사각
θ	: 유동의 흐름방향과 측정지점 사이의 각 or 실린더 원주방향으로의 각
ρ	: 밀도
$\rho - \rho_0$: 변동밀도
γ	: 도심

circular cylinders", J. Fluid Mech., vol.128, pp.81-107, 1983

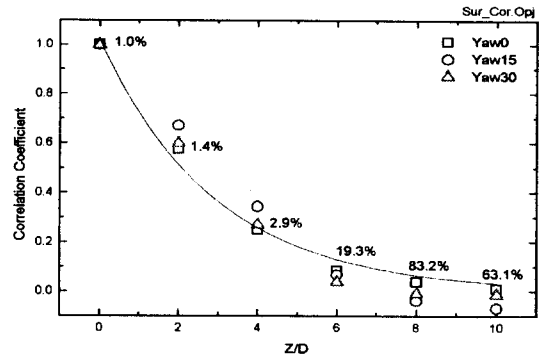
- [8] Smith, R.A., Moon, W.T., & Kao, T.W., "Experiments on flow about a yawed circular cylinder", ASME D : J. Basic Eng., vol.94, no.4, pp.771-776, Dec. 1972
- [9] Bendat, J.S., Piersol, A.G., "Random Data", John Wiley & Sons, 1986
- [10] Moeller, M.J., "Measurement of unsteady forces on a circular cylinder in cross flow at subcritical Reynolds numbers", Ph.D. thesis of MIT, 1982
- [11] Gerrard, J.H., "An experimental investigation of the oscillating lift and drag of a circular cylinder shedding turbulent vortices", J. Fluid Mech., vol.11, part 2, pp.244-256, 1961

참고문헌

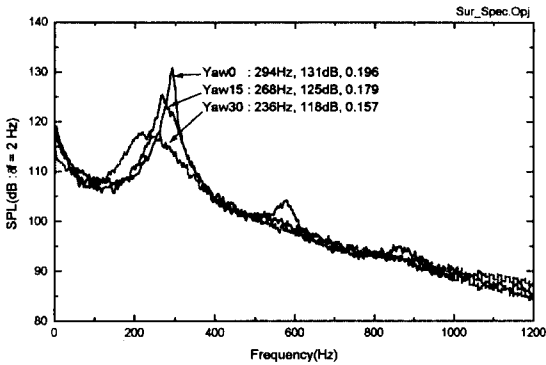
- [1] Blake, W.K., "Mechanics of flow-induced sound and vibration", Academic Press, Inc., 1986
- [2] Blevins, R.D., "Flow-induced vibration", Van Nostrand Reinhold Company, 1977
- [3] 홍훈빈, 최중수, "원형실린더에서의 와류발생 소음에 대한 실험적 연구", 1997년 한국항공우주학회 추계학술논문집, 1997. 11.
- [4] Chiu, W.S., Lienhard, J.H., "On real fluid flow over yawed circular cylinders", ASME D : J. Basic Eng., vol.89, no.4, pp.851-857, Dec. 1967
- [5] Hanson, A.R., "Vortex shedding from yawed cylinders", AIAA J. vol.4, no.4, pp.738-740, 1966
- [6] King, R., "Vortex excited oscillations of yawed circular cylinders", ASME I : J. Fluids Eng., vol.99, no.3, pp.495-502, September 1977
- [7] Ramberg, S.E., "The effects of yaw and finite length upon the vortex wakes of stationary and vibrating



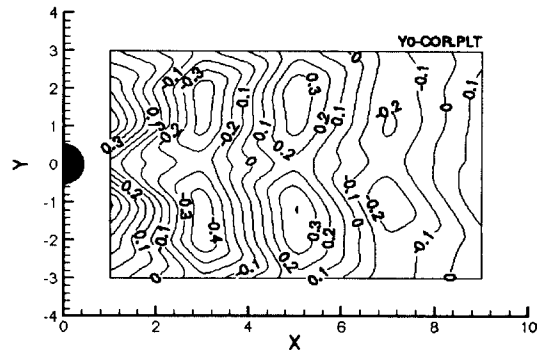
(Fig. 1) Coordinate of yawed cylinder



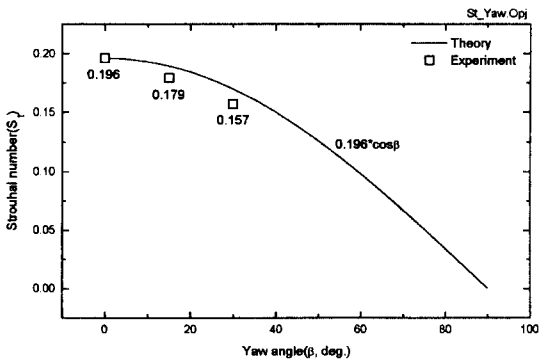
(Fig. 4) Surface pressure correlation



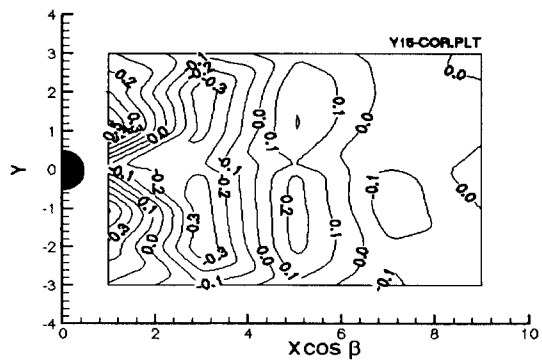
(Fig. 2) Surface pressure spectrum



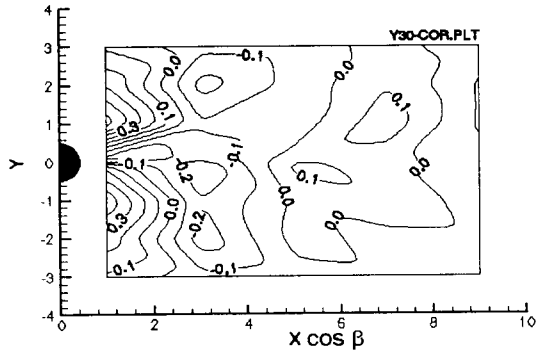
(Fig. 5) Cross-correlation of pressure and velocity(Yaw = 0 deg.)



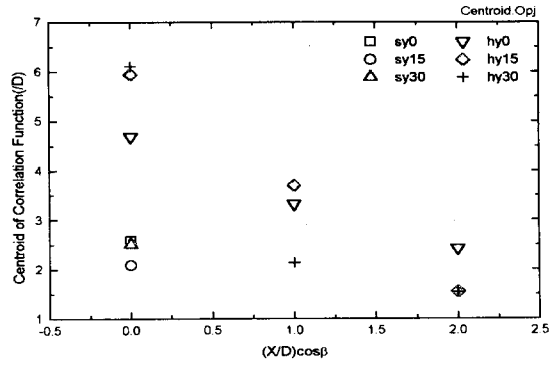
(Fig. 3) Yaw effect on the Strouhal number



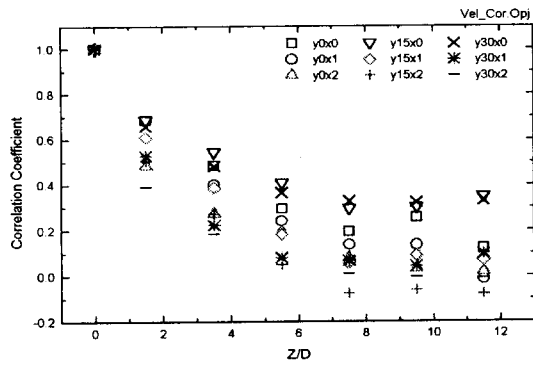
(Fig. 6) Cross-correlation of pressure and velocity(Yaw = 15 deg.)



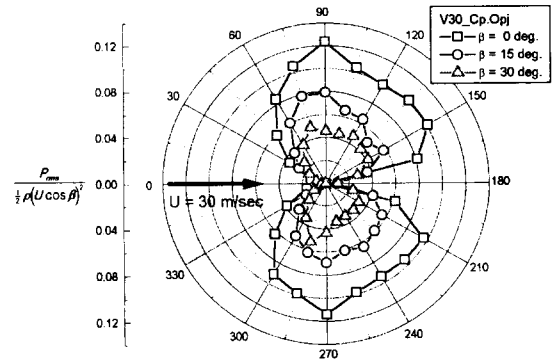
(Fig. 7) Cross-correlation of pressure and velocity (Yaw = 30 deg.)



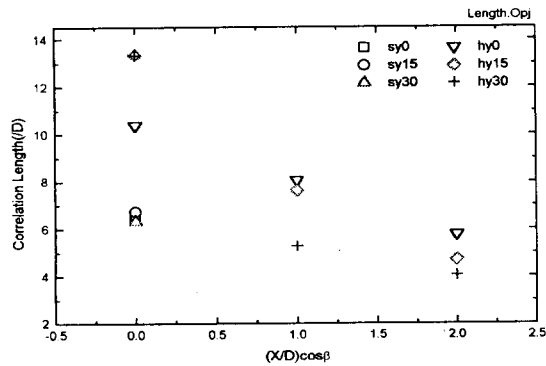
(Fig. 10) Centroid of correlation function



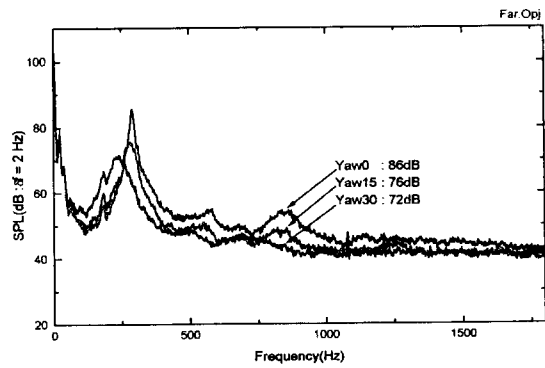
(Fig. 8) Velocity correlation



(Fig. 11) C_p distribution on the surface of cylinder



(Fig. 9) Correlation length



(Fig. 12) Far-field sound pressure