

## CAA를 이용한 2D 원형 실린더 공력 소음 해석

박인철,<sup>1</sup> 고영주,<sup>1</sup> 최종수,<sup>2</sup> 김병수<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 대학원 항공우주공학과

<sup>2</sup>충남대학교 항공우주공학과

### TWO-DIMENSIONAL COMPUTATIONAL AEROACOUSTICS SIMULATION OF SOUND GENERATED BY FLOW AROUND A CIRCULAR CYLINDER

I.C. Park,<sup>1</sup> Y.J. Go,<sup>1</sup> J.S. Choi<sup>2</sup> and B.S. Kim<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Aerospace Engineering, Graduate School, Chungnam Nat'l Univ.

<sup>2</sup>Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

*Researches in the area of aeroacoustics have been conducted by two methods. In the first method theoretical formula or experimentation are utilized, and in the second method flow field analysis and acoustic analogy are utilized. In contrast to the first method, the second method does not need new experiments for every individual change of flow configurations and conditions, and it can predict their effects by the flow field analysis, which makes the second method preferred than the first one. In this paper numerical analysis to predict noise generated by a turbulent flow about a two dimensional circular cylinder by use of CAA (Computational Aeroacoustics) method is conducted and the results are compared to the available experimental data.*

**Key Words :** 전산공력음향학(CAA), 전산유체역학(CFD), 비정상유동(Unsteady Flow), 공력소음(Aeroacoustics), 소음(Noise), 원형 실린더(Circular Cylinder)

#### 1. 서 론

최근에 들어 컴퓨터의 계산 속도가 빨라짐에 따라 CFD(Computational Fluid Dynamics) 분야가 급진적으로 발전하고 있다. 그에 따라 이제는 거의 모든 유동 현상을 CFD로 해석할 수 있게 되었다. 또한 컴퓨터의 계산속도 향상과 계산 알고리즘이 발전하면서 유동 해석과 소음 해석을 동시에 해석할 수 있는 CAA(Computational Aeroacoustics) 분야가 발전되고 있다. 유동과 소음은 모두 Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로 가진다. CFD 해석은 움직이는 복잡한 형상을 빠르게 계산할 수 있다는 장점이 있지만 소음 해석용으로 사용하기에는 해의 왜곡 현상이 너무 심하기 때문에 적합하지 않다. 실제 100dB의 소음의 경우 1Pa 정도의 압력 교란값을 가

지기 때문에 정확한 소음 해석을 위해서는 해석 결과의 높은 정확도가 요구된다.

본 논문에서는 다양한 유동 해석이 가능하며, 세계적으로 다양한 산업체 및 연구 현장에서 많은 사용자들에 의해 사용되고 있는 유동해석 상용프로그램인 Fluent[1]를 사용하였다. 그리고 대상 형상은 기하학적으로 가장 단순하면서도 실용적인 면에서 적용예가 많은 형상이고, 따라서 유동장 해석의 관점에서도 다양하게 연구[2,3]되어 온 2차원 원형 실린더 주위의 유동에 의한 공력 소음에 대해서 연구하였다.

CAA해석은 두 가지 방법으로 접근을 하였다. 첫 번째 방법은 근거리에서의 소음을 확인 하고자 할 때 사용하는 방법으로 CFD 해석 결과값을 직접 소음 해석에 사용하는 직접소음 계산 방법이다. 두 번째 방법은 원거리의 소음을 확인 하고자 할 때 사용하는 방법으로 CFD 계산을 선 수행 후에 해석한 결과를 바탕으로 하여 Source Data를 Export하여 Source Data를 후처리하여 소음 해석을 하는 방법이다. 두 가지 방법을 활용하여 소음원의 위치에 따른 효율적인 소음 해석 방법을 제안하고자 한다.

Received: February 11, 2012, Revised: March 15, 2013,

Accepted: March 16, 2013.

\* Corresponding author, E-mail: kbskbs@cnu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.1.022>

© KSCFE 2013

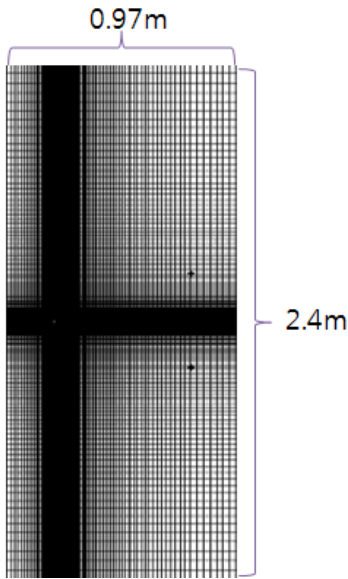


Fig. 1 Direct noise analysis mesh

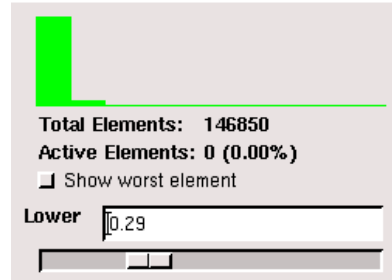


Fig. 3 Mesh skewness

• Grid check(Skewness)

$$Q_{BAS} = \max\left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e}\right]$$

$\theta_{max}$  = Largest angle in face or cell

$\theta_{min}$  = Smallest angle in face or cell

$\theta_e$  = Angle for equiangular face or cell



Fig. 4 Equi-angle skewness[1]

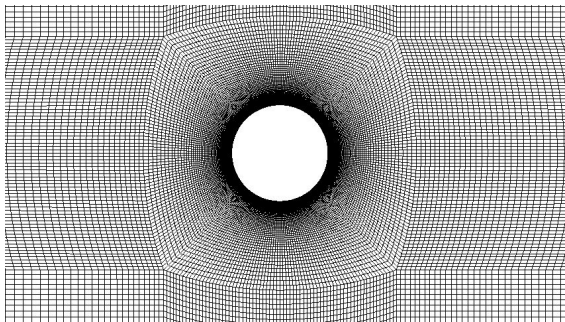


Fig. 2 Mesh of near cylinder

2. 수치 해석 방법

2.1 격자 생성

격자의 형태에 따라서 수치적 해의 질도 결정된다. 격자의 형태가 불규칙적이고 격자의 비틀림이 심할수록 해의 질이 떨어지게 된다. 이러한 격자상의 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 정렬 격자를 사용하여 격자를 구성하였다. 격자 생성은 Gambit 2.4.6을 사용하였으며, 격자는 근거리 해석의 경우 146,850개의 cell들로 이루어져 있으며, 원거리 해석의 경우 70,426개의 cell들로 이루어져 있다.

Fig. 1의 계산 격자계에서 직접 소음 계산 방법의 격자가 실린더의 크기에 비교 하였을 때 크기가 Y축 방향 즉 유동의 수직인 방향으로 크기가 큰 것은 소음 해석 지점을 0.1~1 m 까지 다양한 지점에서의 압력 변화값을 얻어 소음을 해석하

기 위해 격자의 크기를 Y축 방향으로 확장하였기 때문이다. 실린더 근처를 확대한 Fig. 2의 격자계에서 보듯이 격자의 Skewness를 향상시키기 위해 실린더에 근접한 구간을 사각형 형태에서 약간의 곡면이 있는 형태로 변경하였다. 그로 인하여 근접한 구간이 직사각형일 경우 보다 격자의 찌그러짐을 방지하여 Skewness를 향상시킬 수 있었다.

완성된 격자의 Skewness check type을 Equi-angle Skewness로 하여 확인하면 위의 Fig. 3과 같이 최고 0.29의 값을 가지게 된다. Gambit에서 지원하는 격자 Skewness의 확인 방법으로 격자를 구성하고 있는 모서리의 각도를 이용하여 찌그러진 정도를 확인하는 Equi-angle Skewness check의 원리[1]는 Fig. 4와 같다. 소음해석을 수행할 경우 Maximum Skewness가 0.29로 나왔기 때문에 소음해석에 격자의 질이 영향을 미치지 않을 것이라 판단을 하여 소음 해석을 진행하였다.

2.2 난류 모델

난류 모델과 관련하여 기존의 소음 관련 연구에서는 k-ε 모델[4]이나 SST 모델[5] 등 서로 다른 종류의 난류모델을 사용한 예들이 있고, 사용하는 모델에 따라 계산 결과에 영향을 미칠 것은 어느 정도 예측 가능하다.

본 연구에서는 기존의 유사 형상에 대해 수행된 논문[6]을 참조하여 난류모델을 선택하였고, 사용한 SST k-ω 난류모델

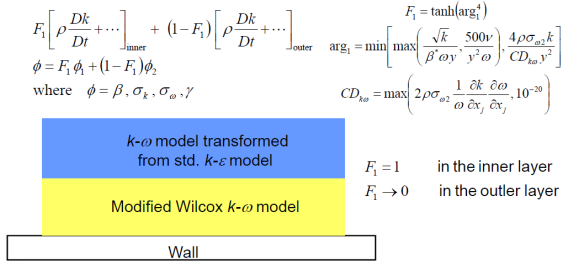


Fig. 5 SST model blending equations[1]

은 Far-field에서의 k-ε 모델의 Free-stream의 독립성과 함께 Near-wall 부근에서의 k-ε 모델의 정확도 높은 알고리즘을 적용하는 난류 모델로서 Fig. 5에 사용한 모델의 Blending equation들에 대한 설명이 나와 있다. 해석에는 second order upwind scheme을 사용하여 유동 해석과 소음 해석을 진행하였다.

2.3 Acoustic Computation Methodology

Fluent에서 사용하는 소음해석에는 Ffowcs Williams and Hawkins(FW-H)[1] Model을 사용한다. 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} T_{ij} H(f) - \frac{\partial}{\partial x_i} [P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) + \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f)$$

$T_{ij}$ 와  $P_{ij}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right]$$

Lighthill과 Curle은 방사되는 소음원에 따라 세 가지의 항으로 소음식을 표현하였는데, 유동장 내에 존재하는 비정상성(Unsteadiness)에 의한 사극자(Quadrupoles), 유동장내에 있는 물체의 표면에서 발생하는 응력 변동(Fluctuating Stress)에 의한 쌍극자(Dipole), 경계층의 팽창(Dilatation of Boundaries)에 의한 단극자(Monopole)로 구분할 수 있는데 Fluent에서는 사극자에 의한 소음은 고려하지 않는다. 또한 실린더의 표면이 완벽한 강체라고 한다면 다음과 같다.

$$p'(\vec{x}, t) = p'_T(\vec{x}, t) + P'_L(\vec{x}, t)$$

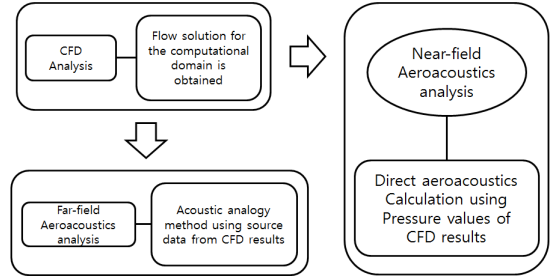


Fig. 6 Integration of CFD and CAA analysis[7]

$$4\pi p'_T(\vec{x}, t) = \int_{f=0} [\frac{\rho_0 (\dot{U}_n + U_n)}{r(1-M_r)^2}] dS + \int_{f=0} [\frac{\rho_0 U_n r \dot{M}_r + a_0 (M_r - M^2)}{r^2 (1-M_r)^3}] dS$$

$$4\pi p'_L(\vec{x}, t) = \frac{1}{a_0} \int_{f=0} [\frac{\dot{L}_r}{r(1-M_r)^2}] dS + \int_{f=0} [\frac{L_r - L_M}{r^2 (1-M_r)^2}] dS + \frac{1}{a_0} \int_{f=0} [\frac{L_r r \dot{M}_r + a_0 (M_r - M^2)}{r^2 (1-M_r)^3}] dS$$

$U_i$ 와  $L_i$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U_i = v_i + \frac{\rho}{\rho_0} (u_i - v_i)$$

$$L_i = P_{ij} + \rho u_i \hat{n}_j (u_n - v_n)$$

2.4 CAA 해석 방법

공력 소음 해석은 두 가지 방법으로 접근 하였다. 각각은 장단점을 가지고 있다. 소음원에서 가까운 근거리 영역의 소음을 확인하고자 한다면 소음원 근처의 비선형적인 유동 현상을 확인할 수 있는 직접 소음 계산 방법을 사용하는 것이 효율적이다. 원거리 영역의 소음은 거리에 따라 급격성을 가지고 있고, 압력 변동 값이 일정하기 때문에 직접 소음 계산보다는 Fluent에서 지원하는 소음 해석 알고리즘을 활용하여 계산하는 것이 효율적이다. 소음 해석에 요구되는 정확도를 확보하기 위해서는 많은 격자가 필요하게 되고 그에 따라 계산 시간도 증가하기 때문에 CFD 계산값을 바로 사용하는 직접 계산 방법으로는 한계가 있다. Fluent에서 지원하는 소음 해석 방법은 먼저 유동 해석을 수행한 후에 소음 해석을

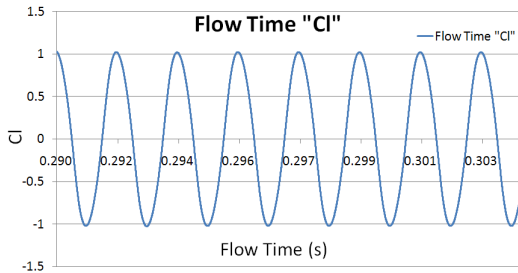


Fig. 7 Cylinder  $C_L$

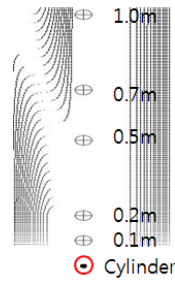


Fig. 9 Monitoring points

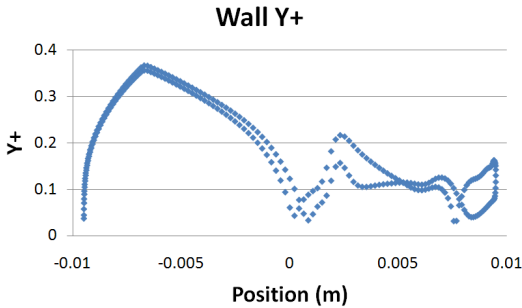


Fig. 8 Wall  $Y^+$

선을 활성화하게 되면 Time Step별로 Source Data를 저장하게 된다. 충분한 양의 Source Data를 확보하게 되면 Source Data를 Acoustic Pressure로 변환하게 되고 이를 FFT하여 소음 계산 결과를 확인할 수 있다. 이 과정을 개략적인 흐름도로 표현하면 Fig. 6과 같다.

### 3. 수치 해석

#### 3.1 유동 해석

유동의 조건으로는 해석 대상인 원형 실린더의 지름의 크기는 0.02 m, 유속 30 m/s의 조건으로 해석을 진행하였다. 해석 초기 조건을 정리하면 다음의 Table 1과 같다. 유동 해석 결과 실린더의  $C_L$ 값을 살펴보면 Fig. 7과 같다.

또한, 격자가 실린더의 표면에 난류 모델과 유동바리 예측에 적합하도록 밀집되어 있는지 확인하기 위해 해석 후  $Y^+$  값을 확인하여 보았다. Fig. 8에서와 같이 실린더의  $Y^+$  값을

Table 1 Flow Condition[8]

Flow Velocity	30 (m/s)
Density	1.225 ( $kg/m^3$ )
Temperature	300 (K)
Viscosity	1.7894e-05 (kg/m-s)

확인하여 본 결과 가장 큰 값이 0.368이기 때문에 실린더 벽면에 충분히 격자를 밀집시킨 것을 알 수 있었다. Fig. 7의  $C_L$  데이터를 사용하여  $C_L$ 의 한주기 T를 확인하여 스트로울수 (Strouhal number)를  $St = D/TU$ 로 계산 후에 결과 값을 비교하여 보면 다음의 Table 2와 같다. 실험값과 해석값의 St를 비교하여 오차 백분율을 계산해 보면 1.04%인 정확도가 높은 해석값을 얻었기 때문에 다음 단계인 소음 해석을 진행하였다.

#### 3.2 소음 해석

먼저 직접 소음 계산 방법을 사용하여 소음을 계산 하였다. 소음을 해석 지점을 결정하여 아래의 그림과 같이 격자 안에 Point를 지정하여 시간에 따른 압력 변화값을 기록하였다. 계산 영역 중앙에 있는 실린더의 크기(0.02 m)와 대비하여 수직 방향으로 선정된 모니터링 대상점들의 위치를 격자 선들과 함께 Fig. 9에서 보여주고 있다.

실험값인 0.5 m에서 측정된 소음 값과 거리에 따른 소음 레벨의 변화를 확인하기 위해 소음 해석 지점을 변화하여 0.04 m, 0.1 m, 0.2 m, 0.5 m, 0.7 m, 1 m의 여섯 지점에서의 소음 해석을 수행하였다. 해석 지점들 중 0.7 m 지점에서 Monitoring된 압력값은 Fig. 10과 같고, 이 압력값을 FFT를 통해 Sound Spectrum으로 가시화하면 Fig. 11과 같은 결과를 얻게 된다.

Fluent에서 지원하는 소음계산 방법으로 계산을 하려면 먼저 유동 해석을 완료한 후에 소음해석을 위한 설정을 하고, 다시 한 번 계산을 하면서 Source Data를 저장한 후에, 저장된 Source Data를 후처리하면 된다. 직접 소음 계산 방법과 달리 소음을 확인하고자 하는 지점을 Point로 지정 하지 않아도 Source Data를 활용하여 원하는 여러 위치에서의 소음 해

Table 2 St number

	T (s)	St	Error (%)
Exp.[8]	-	0.192	-
Calculation	0.00344	0.194	1.04%

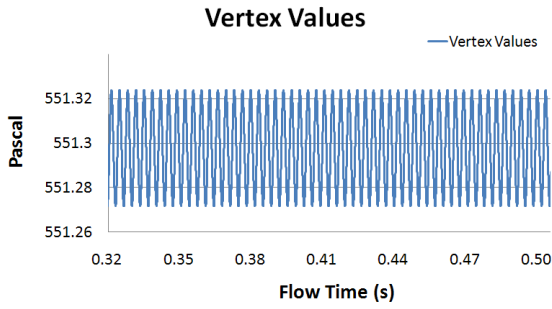


Fig. 10 Pressure monitored at a point (0.7 m)

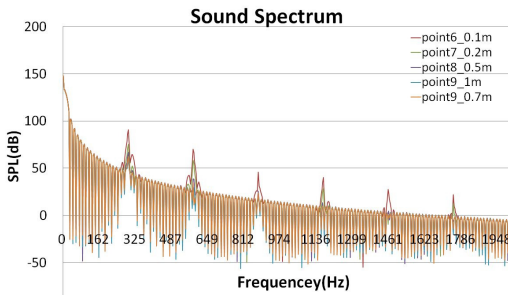


Fig. 11 Cylinder sound spectrum

석이 가능하다[6]. 해석이 완료된 후에 Source Data를 후처리 하면 Acoustic Pressure로 변환된 결과를 얻을 수 있다. Acoustic Pressure를 확인한 후에 FFT를 통해서 각각의 위치에 따른 소음을 가시화 하면 Sound Spectrum을 확인할 수 있다. 소음 해석 결과를 0.5 m 지점에서의 실험값과 비교하여 정리 하면 다음의 Table 3과 같다.

#### 4. 계산 결과

두 가지의 소음 해석 방법을 사용하여 근거리 영역에서 원거리 영역까지 각각 다른 지점에서 측정되는 소음을 해석한 결과 Table 4와 같은 계산 결과를 얻을 수 있었다. 직접 소음 해석 방법과 이론적인 소음 계산값, Source Data를 사용한 계산값, 실험값을 비교한 결과 Fig. 12와 같이 실린더 근거리 영

Table 3 Comparison of results at 0.5 m

	Frequency (Hz)	SPL (dB)	SPL Error (%)
Experiment (0.5 m)	292	87	-
Calculation (Direct Method)	292.2078	66.83	23.18
Calculation (Source Data)	286.06	82.30	5.71

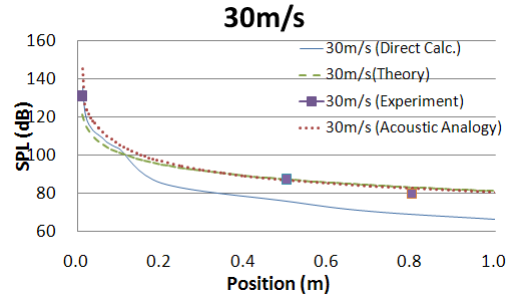


Fig. 12 Resultant SPL according to the distance

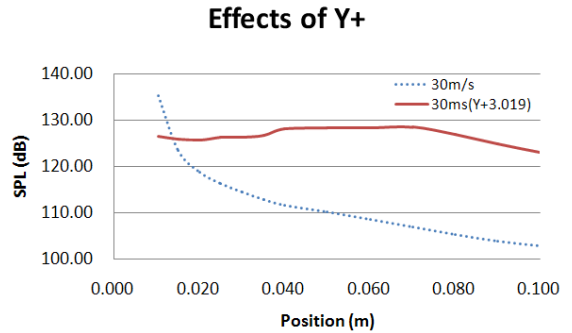


Fig. 13 Result of mesh parametric study

역은 직접 소음 해석 방법이 정확도가 높고, 원거리 영역에서는 Source Data를 사용한 방법이 정확도가 높은 것을 알 수 있었다.

Source Data를 사용한 방법은 실린더 표면의 소음 값을 실험값에 비교하였을 때, 너무 높은 값으로 예측하는 것을 알 수 있었다. 이는 실린더 표면의 불규칙적인 유동을 고려하지 않고 거리에 따른 규칙성만을 적용하였기 때문인 것으로 예상된다. 따라서 근거리 영역의 소음 해석은 Source Data를 사용한 방법이 적절치 않다는 것을 확인할 수 있었다. 그에 반해 실린더 표면에서 멀어질수록 실험값과 이론값이 거의 일

Table 4 Resultant SPL according to the distance

Distance	SPL (dB)		Error (%) $ a - b  / a$
	Method (a) (Source Data)	Method (b) (Direct Calculation)	
0.04	114.61	114.35	0.23
0.1 m	101.36	90.84	10.38
0.2 m	92.13	75.32	18.25
0.5 m	82.30	66.83	18.80
0.7 m	79.12	62.02	21.61
1.0 m	75.87	58.37	23.07

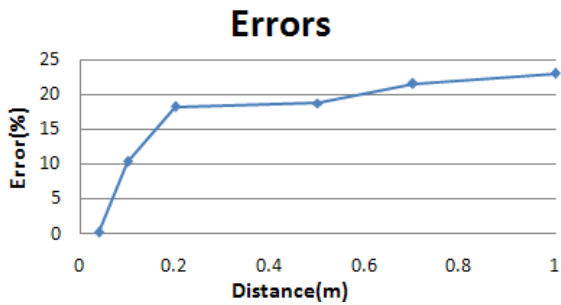


Fig. 14 Errors of computed SPL by direct method

정한 패턴과 작은 오차값을 확인할 수 있었다. Source Data를 사용한 해석 방법과는 반대로 직접계산 방법은 실린더 표면에 근접할수록 정확도가 향상되는 것을 알 수 있다. 이것은 실린더의 주변에서는 격자가 많이 밀집이 되어 있지만 실린더에서 점점 멀어질수록 격자 크기의 증가에 의한 해의 왜곡 현상과 함께 압력장 계산의 정확도가 낮아지기 때문으로 파악된다. 아래의 Fig. 13에서 격자 밀집에 따른 해석 결과의 차이를 확인할 수 있다.

또한 Fig. 14에서와 같이 0.2 m 이상의 지점에서 오차율이 비교적 일정한 것은 격자의 크기가 0.2 m 이상 지점부터는 변화가 작기 때문이다. 즉 직접 소음 계산 방법을 사용하여 원하는 지점의 소음을 해석하기 위해서는 해석 지점까지 충분히 많은 격자를 생성하거나 이미 격자가 밀집되어있는 근거리의 소음 해석에 적합하다.

## 5. 결 론

원형 실린더 주위 유동에 의한 공력 소음에 대하여 두 가지 소음 해석 방법을 사용하여 계산한 결과, 소음원인 실린더에 근접한 근거리 영역에서는 직접 소음 해석 방법이 정확도가 높고, 반면에 Source Data를 사용한 소음 해석의 경우 해석 위치가 크게 영향을 미치지 않기 때문에 원거리 소음 해석에 적합하다. 하지만 이 경우 유동의 해석이 먼저 수행되어야 하고, Source Data를 충분히 확보할 때까지 계산을 계속 수행하여야 하기 때문에 계산 시간을 많이 필요로 한다는 단점이 있다.

효율적인 소음 해석을 수행하기 위해서는 소음을 해석하고

자 하는 지점의 위치와 소음원과의 거리에 따라 위에서 언급한 두 가지 계산법의 차이점을 고려하여 소음 해석 방법을 결정한다면 해석의 정확도뿐만 아니라 계산 시간도 절감할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2010-0014978)의 일부임을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 2009, Ansys, Ansys Fluent 12.0, "Theory Guide," Ansys.
- [2] 2004, Myong, H.K., "Unsteady 2-D Laminar Flow Simulation past a Circular Cylinder," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.9, No.4, pp.41-47.
- [3] 2004, Myong, H.K., "Flow Simulation past a Circular Cylinder by 2-D URANS," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.9, No.4, pp.48-54.
- [4] 2010, Kim, W., Hur, N. and Jeon, W.H., "Numerical Analysis of Unsteady Flow Field and Aeroacoustic Noise of an Axial Flow Fan," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.15, No.4, pp.60-66.
- [5] 2012, Kim, J.S., Kim, H.S. and Hyun, K.T., "Development of Uneven Fan by Aero-Acoustics Analysis & Optimization method," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.17, No.1, pp.16-22.
- [6] 2009, Reinaldo, M., Orselli, Julio, R., Meneghini and Fabio S., "Two and three-dimensional Simulation of Sound Generated by Flow Around a Circular Cylinder," *AIAA* 2009-3270.
- [7] 2004, Kang, K.J., Kim, Y.W., Lee, D.J. and Huh, D.N., "CFD-CAA couple methods for analysis of aeroacoustics," *KSAS04-2427*, pp.768-773.
- [8] 1997, Hong, H.B. and Choi, J.S., "Experimental Study on the Vortex-Shedding Sound from a Circular Cylinder," *KSAS*, pp.473-480.