

웨지가 있는 원심 임펠러의 유동장 및 방사 음향장 해석 (II)

- 원심팬의 산란 음향장 예측 -

전 완 호* . 이 덕 주†

(2000년 9월 9일 접수, 2001년 6월 22일 심사완료)

An Analysis of the Flow Field and Radiation Acoustic Field of Centrifugal Fan with Wedge

- The Prediction of the Scattered Sound Field -

Wan Ho Jeon and Duck-Joo Lee

Key Words : Centrifugal Fan(원심팬), Boundary Element Method(경계요소법), Acoustic Source(음원), Kirchhoff Surface(Kirchhoff 표면), Helmholtz Integral Equation

Abstract

The objective of this study is to understand the generation mechanism of sound and to develop a prediction method for the acoustic pressure field of a centrifugal fan. If the fan is operating at the free field without the casing, the acoustic analogy is a good method to predict the acoustic of the fan. But, the casing gives a dominant effect to the radiated sound field and the scattering effect of casing should be considered. So, in this paper the Kirchhoff-BEM is developed, which can consider the scattering effect of the rigid body. In order to consider the scattering and diffraction effects owing to the casing, BEM is introduced. The source of BEM is newly developed, so the sound field of the centrifugal fan can be obtained. In order to compare the predicted one with experimental data, a centrifugal impeller and a wedge are used in the numerical calculation and the results are compared with the experimental data. Reasonable results are obtained not only for the peak frequencies but also for the amplitudes of the tonal sound. The radiated acoustic field shows the diffraction and scattering effects of the wedge clearly.

기호설명	
a	: 구의 직경(diameter of sphere)
a_0	: 음속(speed of sound)
C(P)	: 입체각(solid angle)
E	: 탄성계수(Young's modulus)
G	: 그린 함수(Green function)
L	: 헬름홀쯔 연산자(Helmholtz operator)
N	: 형상함수(shape function)
P	: collocation point
Q	: control point
J	: Jacobian
Y	: 어드미턴스(admittance)

그리스문자	
Σ	: 물체 표면
α	: 흡음양, $i\rho_0 a_0 Y$
β	: normal vibrating velocity
ρ	: 밀도(density)
ϕ	: acoustic potential
δ	: direc delta 함수
κ	: 파동수(wave number)

1. 서론

유체기계에 많이 사용되는 원심팬의 경우, 사용 에너지와 임펠러의 회전 각속도가 증가할수록 소음문제가 심각해지고 있다. 그래서 60년대 초부터 원심팬 소음을 해석하고, 소음원을 규명하려는 연

* LG 전자 디지털 어플라이언스연구소
 † 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
 E-mail : djlee@mail.kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3716 FAX : (042)8693781

구가 있었다.^(1,2) 그러나, 이러한 연구는 축류팬의 경우처럼 체계적이고 광범위하게 이루어지지 못했다. 이것은 원심팬이 축류팬에 비해서 구조가 복잡하고, 유동을 해석이 어려워 해석된 비정상 유동 자료가 없고, 임펠러가 케이싱으로 둘러싸여 있어서 케이싱의 음향학적 효과를 고려해야 하는 이유 때문이다. 그래서 본 논문에서는 원심팬의 소음 해석 기법을 개발하고, 그것을 자유공간에서 웨지와 상호작용하면서 작동하는 임펠러의 소음 실험치와 비교한다.

본 연구는 유동장을 해석해서 소음 계산에 필요한 힘의 변화를 계산한 후 음향 analogy를 이용하여 음향장을 계산하는 방법인 첫번째 논문을 이용한다. 즉, 유동장은 비정상 유동 계산에 많이 사용된 이산와류법을 이용하여 계산하고, 유동장에서 구한 임펠러 깃의 힘(압력)으로 임펠러 깃에서 비정상 압력의 교란에 의한 소음을 예측한다. 이 방법은 무한경계에서 이극이 움직이는 경우의 음향장을 예측하는 방법이므로 산란이나 회절의 효과는 고려되지 않으나 소음원의 규명이나 음압의 예측에는 쉽게 적용될 수 있다. 그러나 이 방법은 케이싱이나 덕트와 같은 구조물에 대한 고려가 없어서 구조물에 의한 산란이나 반사, 회절 등을 예측할 수 없다. 그러므로 실제 원심팬 형상인 케이싱 내부에 있는 임펠러의 소음이나, 덕트와 연결된 원심팬의 소음 등을 예측할 수 없다. 이러한 소음을 예측하기 위해서는 원심팬의 음원을 계산할 수 있는 기법과, 구조물에 의한 방사 효과(산란, 반사, 회절 등)를 계산할 수 있는 기법이 결합되어 있어야 한다. 그러나, 이러한 기법은 아직 개발되거나 발표된 것이 없다. 그래서 본 연구에서는 원심팬 음원의 구조물에 의한 방사 효과를 고려할 수 있는 Kirchhoff-Helmholtz BEM 방법을 개발하였다.⁽³⁾ 이 방법은 구조물에 의한 방사를 경계요소법으로 계산하지만 음원을 일반적인 경계요소법의 단극이나 이극이 아닌 원심팬을 싸는 Kirchhoff 표면에서의 포텐셜 값으로 넣어서 계산하는 기법이다. 이때 원심팬에 의해서 발생한 음원인 Kirchhoff 표면에서의 값은 앞 논문에서 개발한 자유공간에서의 소음 예측 기법을 이용하여 계산한다.

본 논문에서 해석하고 있는 형상의 경우, 실험은 임펠러에서 발생한 소음의 웨지에 의한 반사(reflection), 산란(scattering), 회절(diffraction) 효과가 나타날 것이다. 이러한 효과를 Fig. 1에 간략하게 나타냈다. 그림에서 웨지에 의해서 135도와 315도 방향으로 음이 많이 반사될 것을 예측할 수 있다.

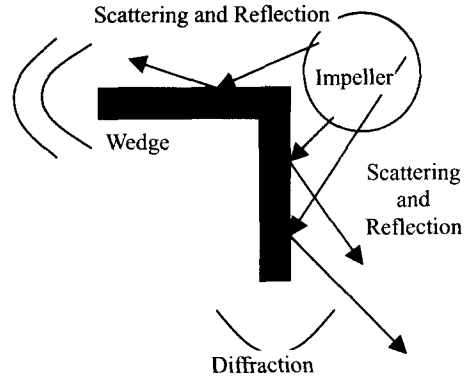


Fig. 1 Acoustic Field due to scattering effect of wedge

2. 본 론

2.1 Kirchhoff-Helmholtz BEM 방법

2.1.1 지배방정식

경계요소법의 단점중의 하나는 음원을 마음대로 모사할 수 없다는 것이다. 즉, 단극이나 이극 혹은 진동 외의 음원을 모사할 방법이 없다는 점이다. 그러므로 원심팬 같은 음원을 경계요소법으로 해석하기는 힘들다. 그래서 임의의 복잡한 음원을 고려할 수 있는 방법이 필요하고, 본 연구에서 개발한 방법이 그 해법이 될 수 있다. 이 방법은 경계요소법을 유도할 때 물체 표면 위의 적분항만 고려하는 것이 아니라 음원의 위치에 음원을 싸고 있는 Kirchhoff 표면을 만들어서 표면에 대한 적분항도 고려해서 경계요소법을 유도하는 것이다. 이때 Kirchhoff 표면에서의 값은 이미 계산해서 알고 있는 값으로 음원으로 작용하고, 이 음원을 경계요소법에 적용하는 것이다

유속이 적은 경우($Ma \ll 1$)에는 음장의 지배 방정식은 파동방정식이 된다.

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 \phi'}{\partial t^2} - \nabla^2 \phi' = 0 \quad (1)$$

$$p = +\rho_0 \frac{\partial \phi'}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 교란 속도포텐셜은 $\vec{v}' = -\nabla \phi$ 로 정의할 경우이다.

속도포텐셜 ϕ' 가 시간에 대해서 조화함수 형태(sinusoidal)로 주어진다면, 즉 $\phi'(\vec{x}, t) = \phi(\vec{x})e^{\pm j\omega t}$ 이

면 파동방정식은 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식이 된다.

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (3)$$

여기서 k 는 파동수 (wave number) 이고 ω / a_0 이다.

본 논문은 그린의 2 차 정의(Green's 2nd identity) 를 이용하여 경계요소법을 유도한다. 헬름홀츠 방정식의 연산자를 L 로 정의하면 식 (3)과 그린 (Green)함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L\phi = 0 \quad (4)$$

$$LG = -\delta(P-Q) \quad (5)$$

여기서 $\delta(P-Q)$ 는 delta 함수이다.

식 (4)에 그린 함수 G 를 곱하고 식 (5)에 속도 포텐셜을 ϕ 곱한 후 뺄 값을 체적적분하면

$$\int [GL\phi - \phi LG]dv = -\int \phi \delta dv \quad (6)$$

체적 v 는 관심이 되는 음장을 의미한다.

유도를 위해서 Fig. 2 와 같이 외부음장 문제를 고려하자. 위 식의 좌변은 그린의 2 차 정의를 이용하면 다음과 같이 변환된다.

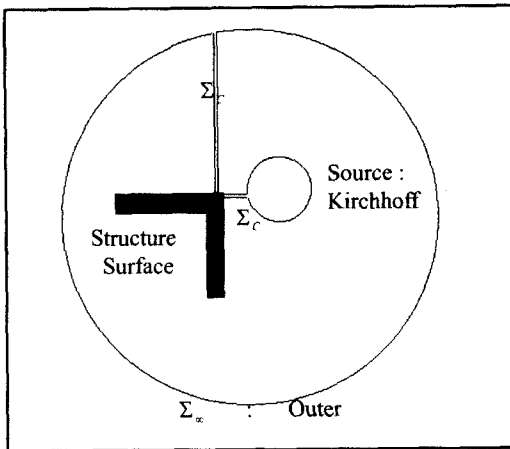


Fig. 2 Integral contours for exterior/interior acoustic field problem

$$\begin{aligned} L.H.S &= \int_V [G\nabla^2 \phi - \phi \nabla^2 G] dv = \int_S [G\nabla \phi - \phi \nabla G] \cdot \hat{n} dS \\ &= \int_S \left[G \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial G}{\partial n} \right] \cdot \hat{n} dS \end{aligned} \quad (7)$$

단위벡터 \hat{n} 는 항상 관심이 되는 영역의 바깥을 향하는 방향이 양이다. 만약, 물체표면에 외부 음장으로 향하는 단위벡터를 \hat{n} 으로 정하면

$$\begin{cases} \hat{n} = -\hat{v} & \text{(for exterior domain prob.)} \\ \hat{n} = +\hat{v} & \text{(for interior domain prob.)} \end{cases} \quad (8)$$

과 같이 정해져야 한다.

표면 Σ 는

$$\Sigma = \Sigma_x + \Sigma_c + S + \text{Kirchhoff} \quad (9)$$

로 이루어져 있다. Σ_x 에서의 적분량은 Sommerfeld 방사조건에 의해 사라지고 Σ_c 에서는 같은 위치에서 서로 부호가 다른 적분면이 겹치기 때문에 서로 상쇄된다. 그러므로 위 식에서 표면 적분은 물체표면에서의 적분량 (웨이 표면에서의 값)과 Kirchhoff 표면에서의 적분량 (임펠러의 음원)만 남게 된다. 한편, 우변은

$$\begin{aligned} R.H.S &= \int_V \phi(Q) \delta(P-Q) dv(Q) \\ &= C(P) \phi(P) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $C(P)$ 는 입체각(solid angle) 을 의미한다. 일반적으로 입체각을 계산할 경우는 다음과 같은 식을 적분하여 얻는다.⁽⁴⁾

$$C(P) = 4\pi + \int_S \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS \quad (11)$$

그러면 식 (6)은 다음과 같은 헬름홀츠 적분방정식이 된다.

$$\begin{aligned} C(P)\phi(P) &= \int_S \left[\phi(Q) \frac{\partial G}{\partial n}(P,Q) - \frac{\partial \phi}{\partial n} G(P,Q) \right] dS(Q) \\ &+ \int_{\text{Kirchhoff}} \left[\phi(K) \frac{\partial G}{\partial n}(P,K) - \frac{\partial \phi}{\partial n} G(P,K) \right] dS(K) \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식 (12)는 위치에 상관없이 음장 내 임의의 한점 P 에서의 음향량(acoustic quantity)은 음원인 Kirchhoff 표면에서의 값과 물체 표면 S 상에서의 단극(monopole) 과 이극(dipole) 값에 의하여 구

할 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 적분형 지배방정식은 3 차원 문제를 2 차원 문제화 함으로써 미지수의 개수를 감소시켜주는 장점을 제공하며, 먼 음장(far field)에서의 경계조건을 수학적으로 만족시켜 주기 때문에 비반사 경계조건을 고려할 필요가 없다.

만약 단극이나 이극 같은 점음원(point acoustic source) 이 있을 때 지배방정식은 비제차 파동방정식 (inhomogeneous wave equation)이 된다.

$$L\phi = -Q_{sc} \quad (13)$$

그런 함수는 앞에서와 마찬가지로

$$LG = -\delta(P-Q) \quad (14)$$

와 같이 정의된다. 그러면 헬름홀츠 적분방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C(P)\phi(P) = & \int_S \left[\phi(Q) \frac{\partial G}{\partial n}(P, Q) - \frac{\partial \phi}{\partial n} G(P, Q) \right] dS(Q) \\ & + \int_{\text{Kirchhoff}} \left[\phi(K) \frac{\partial G}{\partial n}(P, K) - \frac{\partial \phi}{\partial n} G(P, K) \right] ds(K) \quad (15) \\ & + \int_V Q_{sc}(X_{sc}) G(P, X_{sc}) dv \end{aligned}$$

위 식에서 우변의 첫 항은 물체 표면의 포텐셜과 그 미분값에 의한 영향이고, 두 번째 항은 Kirchhoff 표면에서의 포텐셜과 미분값에 의한 영향을 나타내고, 세 번째 항은 단극이나 이극에 의한 음원항을 나타낸다.

2.1.2 경계조건

물체의 특성에 따라 적용하는 경계조건은 Dirchlet 경계조건과 Neumann 경계조건 및 Robin 경계조건이 있고, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi &= f_1 \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} &= f_2 \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} &= \alpha \phi + \beta \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 α 와 β 의 의미는 각각 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \alpha &= i\rho_0 a_0 kY = (\text{coefficient}) \times (\text{admittance}) \\ \beta &= \text{normal vibrating velocity} \end{aligned} \quad (17)$$

α 는 주로 흡음재의 특성과 관련된 양으로 주

파수(k), 흡음재 두께 (d), 흡음재의 탄성계수(E , Young's modulus) 및 감쇄계수 (η) 와 다음과 같은 관계식을 갖는다.⁽⁶⁾

$$\alpha = k^2 \frac{d}{E(1+i\eta)} \quad (18)$$

본 연구에서는 일반적인 Robin 경계조건을 사용한다. 임의의 위치에서의 물리량들을 알기 위해서는 물체 표면에서의 $(\phi, \partial\phi/\partial n)$ 쌍을 알아야 하는데 계산은 항상 둘 중에 한 변수는 경계조건으로 주어지고 나머지 변수를 구하도록 되어 있다. 그래서 할당점(collocation point) P 를 표면에 두어서 표면상의 $(\phi, \partial\phi/\partial n)$ 를 결정한 후 음장 상의 관심이 되는 위치에서 식 (12)나 (15)를 적분하여 물리량을 구할 수 있다.

2.1.3 요소의 이산화

요소는 2 차의 isoparametric 요소로서 8 절점 사각형과 6 절점 삼각형 요소를 사용했다.

이러한 요소와 형상함수 N_α 로 표면좌표와 물리량을 근사화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_i &= \sum_\alpha N_\alpha(\xi) X_{i\alpha} \\ \phi &= \sum_\alpha N_\alpha(\xi) \phi_\alpha \\ \phi' &= \sum_\alpha N_\alpha(\xi) \phi'_\alpha \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $X_{i\alpha}, \phi_\alpha, \phi'_\alpha$ 는 절점상에서의 값을 의미한다.

이제 식 (19)를 이용하여 이산화를 수행하면 다음과 같은 선형 방정식을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} \left[4\pi + \sum_{m=1}^{NNODE} C_{mj} \right] \phi_j - \sum_{m=1}^{NNODE} \sum_\alpha a_{mj}^\alpha \\ = \sum_{m=1}^{NNODE} \sum_\alpha b_{mj}^\alpha \phi'_{m\alpha} + Q_j \end{aligned} \quad (20)$$

여기서

$$a_{mj}^\alpha = \int_\alpha N_\alpha(\xi) \frac{\partial G(P, Q(\xi))}{\partial n} \Big|_{J(\xi)} d\xi \quad (21)$$

$$b_{mj}^\alpha = \int_\alpha N_\alpha(\xi) G(P, Q(\xi)) \Big|_{J(\xi)} d\xi \quad (22)$$

$$C_{mj}^\alpha = \int_\alpha \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) \Big|_{J(\xi)} d\xi \quad (23)$$

$$Q_j = \int_{Kirchhoff} \left[\phi(K) \frac{\partial G}{\partial n}(P, K) - \frac{\partial \phi}{\partial n} G(P, K) \right] ds(K) \quad (24)$$

로 정의된다.

여기서 식 (24)는 Kirchhoff 표면의 적분으로 이미 알고있는 값이므로 바로 적분되어서 어느 값을 갖게 된다. 적분 (21), (22) 및 (23)은 Gaussian 적분을 사용한다. 여기서 $r \rightarrow 0$ 인 경우 식 (21),(22),(23)은 특이성(singular)을 갖으며, 국소 극좌표계(local polar coordinate)로 변환하여 적분하였다.

2.1.4 해의 비유일성

비유일성 문제는 특정 주파수에서 해가 유일하게 구해지지 않는 현상을 말한다. 이것은 Neumann 이나 Dirchlet 경계조건을 갖는 물체내부의 고유진동수에서 발생하는 것으로 물리적인 의미를 갖는 현상이 아니라 적분방정식의 풀이과정에서 행렬식이 weak form 이 되기 때문에 발생한다. 이러한 문제는 외부음장의 해석시에만 발생하며, 많은 해결방법이 연구되어 있다. 본 연구에서는 Schenck 가 제안한 CHIEF(Combined Helmholtz Integral Equation Formulation)방법을 이용하였다.⁷⁾ 이 방법은 물체 내부에 몇 개의 점(CHIEF points)을 잡아서 그 점에서 헬름홀츠 방정식을 적용시켜서 비유일성을 없애는 방법이다.

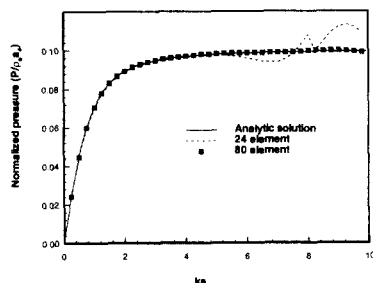
2.1.5 풀이방법(solution procedure)

행렬식 (20)은 최소자승법(least-squares procedure)을 이용하여 구한다.

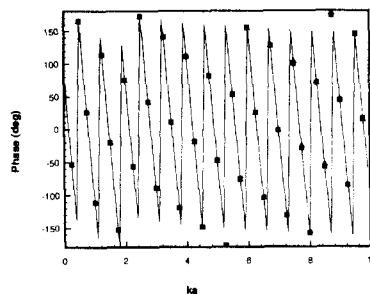
$$P = \frac{-jka(r/a)}{(1 + jka)} e^{-jk(r-a)} \quad (25)$$

계산은 요소수에 따른 값의 정확도를 비교하기 위하여 24 와 80 개의 요소를 사용하였다. 그림의 (a) 에서 파선은 24 개의 요소이고 점은 80 개이고 실선은 해석해이다. 요소수가 24 개인 경우는 무차원 파동수가 5.0 정도까지는 해석해를 잘 따라가지만 그 이상에서는 많은 오차가 있다. 80 개의 요소인 경우는 무차원 파동수 10 까지 해석해를 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다. 이것은 해의 정확도가 요소수 즉, 격자간격과 밀접한 연관이 있는 것을 알 수 있는데 일반적으로 한 파장에 평균 5 개의 격자점이 있어야 파동을 잘 모사할 수 있다고 알려져 있다. Fig. 3 (b)에 위상의 값을 비교한 것이 있다. 위상은 24 요소를 쓴 경우나 80 요소를 쓴 경우나 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

외부음장의 경우와 같이 구의 내부음장도 계산할 수 있다. 비록 경계요소법이 외부음장 해석 시 더 이점이 많으나 내부음장 계산에서도 정확한 해를 구할 수 있다. Fig. 4 는 맥동하는 구 내부의 $r/a=1/2$ 인 지점에서 정규음압의 크기와 위상을



(a) Amplitude of the normalized pressure



(b) Phase of the normalized pressure

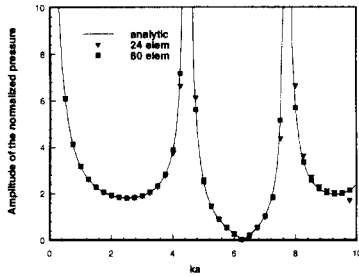
3. Kirchhoff-Helmholtz BEM 의 검증

3.1 경계요소법의 검증

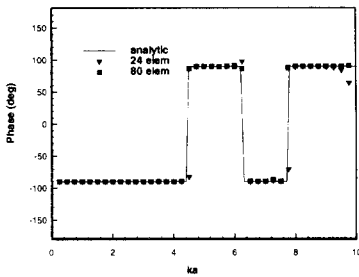
경계요소법을 검증하기 위하여 구에 의한 방사 문제를 구의 내부와 외부에 대하여 해석하였다. 구의 방사 문제는 해석해(analytic solution)가 존재하기 때문에 수치계산의 검증용으로 많이 사용된다.

Fig. 3 은 속도 v_n 으로 맥동(pulsating)하는 반경 a 인 구에서 방사하는 음압을 거리 $r=10a$ 인 위치에서 정규압력(normalized pressure : $P/\rho_0 a_0$)을 그른 것이다. 계산은 무차원 파동수 ka 가 0.25 에서 10 까지 변화하도록 하여 해석해와 비교하였다.

Fig. 3 Normalized pressure with respect to ka for a outer acoustic field of a pulsating sphere(triangle : 24element, rectangular : 80 element)



(a) Amplitude of the normalized pressure



(b) Phase of the normalized pressure

Fig. 4 Normalized pressure with respect to ka for an inner acoustic field of a pulsating sphere at r/a = 10

무차원 파동수에 대하여 표시한 것이다. 이 경우 해석해는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$\frac{P}{\rho_0 a_0 v_n} = \frac{j a}{\sin(ka) - ka \cos(ka)} \frac{\sin(kr)}{r} \quad (26)$$

고주파수는 $\text{tanka} = ka$ 를 만족하는 값으로 $ka = 0, 0.450, 7.76$ 등이다.

크기와 위상이 모두 해석해를 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다. 고주파수에서 24 요소를 쓴 경우는 값이 잘 따라가지 못하는 부분도 있으나 80 요소를 쓴 경우는 크기와 위상 모두 해석해와 잘 일치한다.

3.2 Kirchhoff-BEM 방법의 검증

본 논문에서 개발한 Kirchhoff-BEM 방법을 검증하기 위해서 자유공간에 단극과 이극이 있는 경우의 음압 분포와 단극과 이극을 Kirchhoff 표면으로 산 면에서의 값을 이용해서 계산한 결과를 비교하였다. 이것을 그림으로 간단히 나타내면 Fig. 5 와 같다.



(a) Monopole

(b) Monopole and

Fig. 5 Validation of the Kirchhoff Source

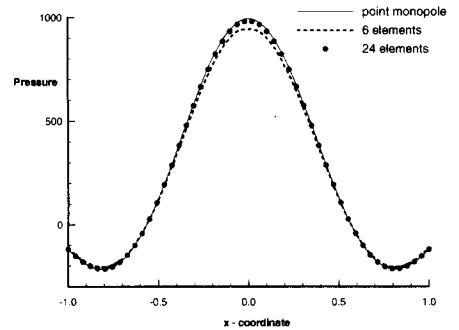


Fig. 6 Pressure distribution with respect to x coordinate at free field. Kirchhoff surface with 24 elements is exact with the point monopole source

Fig. 5 (a) 와 같이 단극에 의한 음향장과 (b)와 같은 단극을 산 Kirchhoff 표면을 동일한 위치에 두었을 경우의 음향장을 비교하는 것이다. 음원을 산 표면은 크기 $0.02 \times 0.02 \times 0.02$ (m)인 사각형 상자이고, 이 표면을 6 개의 요소(한면에 한 개의 요소)로 나눈 경우와 24 개의 요소(한면에 4 개의 요소)로 나눈 경우를 비교하였다. 주파수가 300Hz 일 때 자유공간의 원점에 단극이 있는 경우와 단극을 산 음원에서 단극에 의한 포텐셜 값을 구한 후, 식에 의해서 음장을 계산한 그림이 Fig. 6 과 같다. 그림은 x 축을 따라서 음압을 계산하여 그린 것이다.

그림에서 실선은 단극에 의한 음원분포를 나타내고, 파선은 6 개의 요소로 모사한 표면에 의한 음압을 나타내고 점은 24 개의 요소로 모사한 표면에 의한 음압을 나타낸다. 그림에서 24 개의 요소로 나눈 경우는 단극의 경우와 완전하게 일치함을 확인할 수 있다. 이 때 원점은 음원에 의해서 무한대의 음압을 가지므로 계산에서 제외시켰다.

자유공간에서 x 축 방향의 방향성을 갖는 이극이 있는 경우와 24 개의 요소를 가진 Kirchhoff 표면의 경우를 비교한 그림이 Fig. 7 이다. 음압을 x 축에 대해서 그려보면 Fig. 7 과 같이 된다. 그림에

서 실선이 점 이극 음원에 의한 음압을 나타내고, 파선이 6 요소로 모사한 Kirchhoff 표면에 의한 음압을, 점이 24 요소로 모사한 Kirchhoff 표면에 의한 음압을 나타낸다. 그림에서 6 요소의 경우는 많은 차이가 발생하나 24 요소의 경우는 동일한 값을 나타냄을 알 수 있다.

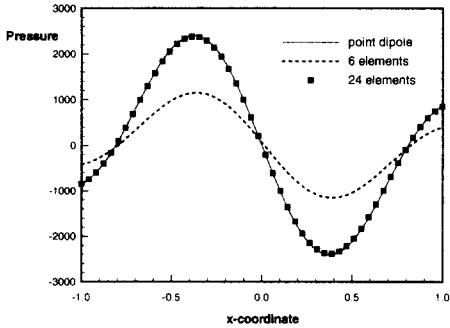
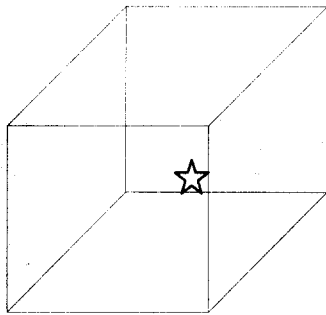
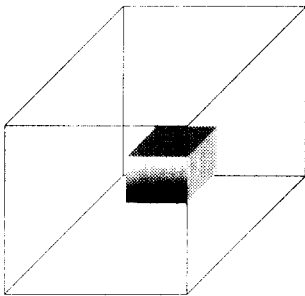


Fig. 7 Pressure distribution with respect to x coordinate at free field. Kirchhoff surface with 24 elements is exact with the point dipole source at 300 Hz



(a) Monopole in a box



(b) Kirchhoff source in a box

Fig. 8 Source and its Kirchhoff surface within a box

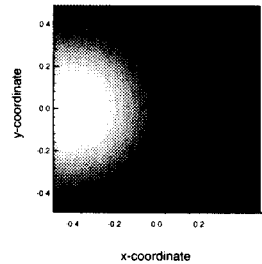
단극이 닫힌 공간인 사각형 박스 안에 있는 경우 (Fig. 8(a))와 단극을 쓴 Kirchhoff 표면을 동일한 위치에 둔 경우 (Fig. 8(b))를 비교하였다. 계산은 300Hz에 대해서 수행하였다. 상자의 크기는 1×1(m)의 크기이고, 음원은 (-0.4,0.0,0.0)의 위치에 있다. Kirchhoff 표면은 작은 사각형 상자이고, 크기는 0.02×0.02×0.02(m)이다. 단극이 있는 경우와 자유음장에서의 단극의 정보를 가진 Kirchhoff 표면이 있는 경우의 z=0 인 평면에서의 음압값을 비교하면 Fig. 9와 같다.

이상의 결과로 Kirchhoff - Helmholtz BEM 방법이 경계요소법에서 음원을 그 음원을 둘러싼 표면의 포텐셜과 포텐셜의 수직 미분의 값으로 나타낼 수 있다는 것을 확인했다. 이 Kirchhoff 표면을 임펠러를 감싸게 한 후, 임펠러에 의한 표면 상의 음압 포텐셜을 구하면, 그 표면이 임펠러의 방향과 세기를 나타내는 음원이 될 수 있다.

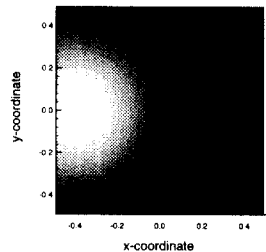
4. 웨지 에 의한 산란 효과 해석

4.1 Kirchhoff 표면 구성과 음원 세기

본 연구에서는 웨지에 의한 음향효과를 고려하는 방법으로 본 연구에서 개발된 Kirchhoff - Helmholtz BEM 방법을 이용하며, Kirchhoff 표면의 음압값은 유동장 자료로부터 Lawson의 방정식을 이용하여 구한다.



(a) Sound pressure by the point monopole source at x = -0.4



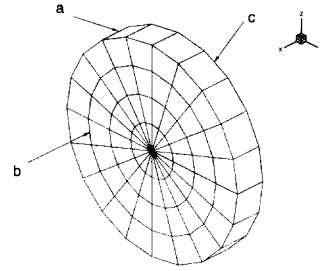
(b) Sound pressure by Kirchhoff surface at x = -0.4

Fig. 9 Comparison of the Kirchhoff - BEM on the box with the point monopole. (24 element, 300 Hz)

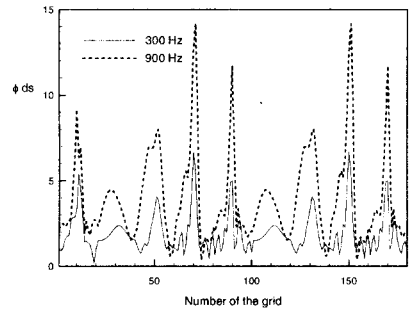
계산은 Weidemann 이 실험한 형상에 대하여 수행하였다. 임펠러의 직경은 0.28(m)이고, 원심팬의 직경은 0.28(m), 내경은 0.112(m)이고 입구각과 출구각은 23.4°와 33.5°이다. 임펠러와 웨지의 간격은 0.0028(m)이다.

계산에 사용된 Kirchhoff 표면의 격자와 경계요소법에 사용된 격자가 Fig. 10 에 있다. Fig. 10(a)에서 임펠러를 싸고 있는 것이 Kirchhoff 표면의 격자로 180 개의 요소로 되어 있다. 그림에서 Kirchhoff 표면의 반쪽 면만 나타내고 있다. Kirchhoff 표면의 격자는 반경이 0.14 이고 폭이 0.042 로 임펠러의 바로 바깥면을 싸도록 만들어져 있다. Fig. 10(b) 에서 원판 형상으로 나타나는 것이 음원을 싸고 있는 Kirchhoff 표면 격자이고 웨지가 경계요소법을 계산하기 위한 격자이다.

Kirchhoff 표면의 각 격자점에서의 음원 포텐셜의 크기가 Fig. 11 에 있다. 그림에서 a 라고 쓴 것이 임펠러의 폭을 싸 격자이고, b 가 왼쪽면 격자이고 c 가 오른쪽면 격자이다. Fig. 11(b)의 x 축 변수인

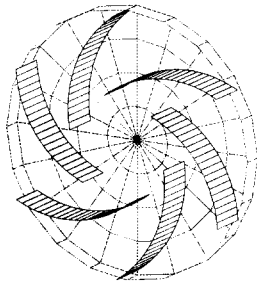


(a) Mesh Index

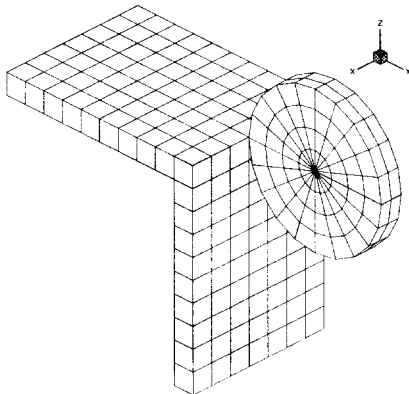


(b) Source strength at the Kirchhoff surface

Fig.11 Source strength at the Kirchhoff surface

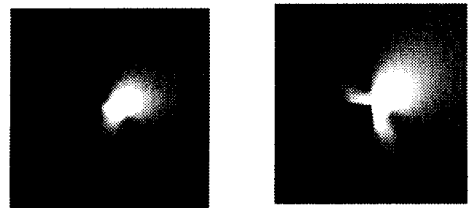


(a) Impeller and lower half grid of the Kirchhoff surface

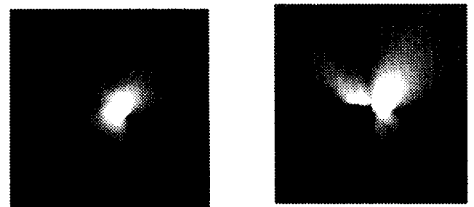


(b) Mesh of the Weidemann's wedge and Kirchhoff surface

Fig. 10 Mesh of the Wedge and Kirchhoff surface



(a) 900 Hz



(b) 1200 Hz

Fig. 12 Calculated acoustic field around the wedge. Left figure is the source field and the right figure is the total acoustic field

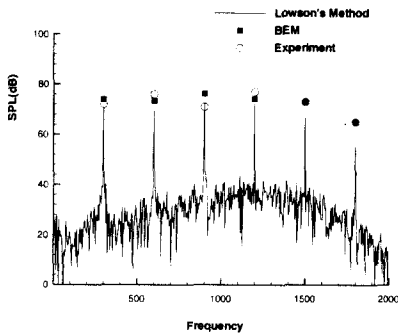


Fig. 13 Calculated SPL with measured data

격자수 20 까지가 격자 a 에 해당하는 격자이고, 21 부터 100 까지가 왼쪽면인 b 격자이며 101 이상은 임펠러의 오른쪽면이다. 격자점 10 근처가 웨지와 만나는 점으로 피크가 존재하며, 강한 음원임을 알 수 있다. 또한 임펠러 폭 보다는 왼쪽면이나 오른쪽면이 음원에 더 가까이 있으므로 그 세기가 폭의 피크보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이것을 통해서 소음 발생은 임펠러와 웨지가 가까운 부분에서 많이 발생함을 확인할 수 있다.

계산된 결과에 의한 음장이 Fig. 12 에 나타나 있다. 그림은 왼쪽부터 음원만 있는 경우의 음향장과 전체 음향장을 나타내는 것이다. 주파수는 900Hz 와 1200 Hz 이다.

900Hz 와 1200Hz 는 대칭이 되지 않은 방향성을 가진 이극과 비슷한 특성을 나타낸다. 이것은 180 개의 Kirchhoff 표면이 나타내는 음향장으로 원심형 임펠러 자체의 소음원 특성이 나타나는 것이다. 전체 음향장을 살펴보면 저주파수의 경우는 웨지가 없는 음원만의 경우와 비슷하나, 고주파수로 가면 Fig. 1 의 그림에서 확인한 반사 패턴이 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 음압이 135°와 315°의 각도로 많이 방사하는 웨지에 의한 반사효과가 확실하게 나타난다.

이 계산에 의한 스펙트럼이 Fig. 13 에 있다. 그림에서 직선으로 된 스펙트럼은 자유공간에서 계산한 음압 신호를 FFT 한 것이고, 사각형은 개발된 Kirchhoff - BEM 방법을 이용한 결과로 웨지의 산란, 반사 효과까지 고려한 것이다. 또한, 원은 Weidemann 의 실험치 중 피크에 해당하는 실험치만 나타낸 것이다. 자유공간의 값과 실험치는 600 과 1500, 1800 Hz 근처에서 약 4-5dB 의 차이가 나타남을 알 수 있다. 이것은 웨지 효과를 고려하면 600 Hz 의 경우는 약 4dB 가 증가하여 3dB 의 차이가 나며, 1500 과 1800Hz 의 경우는 5dB 씩

증가하여 실험치와 동일한 값이 됨을 알 수 있다. 고 주파수로 갈수록 웨지 효과가 커짐을 알 수 있다. 이상의 계산으로 개발된 Kirchhoff - BEM 방법을 이용하여 원심팬의 음원을 정확히 예측 가능하며, 구조물 효과를 고려한 전체 음장을 2~3dB 차이로 정확히 예측할 수 있음을 확인했다.

5. 결 론

원심팬 소음을 해석하는 기법을 개발하고, Weidemann 이 실험한 형상에 대해서 해석하였다. Acoustic analogy 로 음압을 계산할 때의 단점인 구조물에 의한 산란효과를 고려하기 위해서 Kirchhoff-Helmholtz BEM 을 새롭게 개발하고 검증하였다. 이 방법은 공력음원을 계산한 후, 그 음원이 있는 위치를 Kirchhoff 표면으로 감싸고 그 표면에서의 음압 값을 이용해서 경계요소법의 음원으로 대입하는 방법이다. 이 방법을 이용한 Weidemann 의 원심 임펠러와 웨지의 해석 결과 웨지에 의한 산란효과를 확인할 수 있었고 팬 소음을 실험치와 2~3dB 이내로 정확히 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Gutin, L., 1948, "On the Sound Field of a Rotating Airscrew," English Translation NACA TM No. TM1195
- (2) Lohmann, D., 1992, "Prediction of Ducted Radiator Fan Aeroacoustics with a Lifting Surface Method," DGLR/AIAA 92-02-098.
- (3) Wan Ho Jeon, Duck Joo Lee, 1999, "An Analysis of the Flow and Sound Field of a Centrifugal Fan Located Near a Wedge," 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 99-1830.
- (4) Seybert, A. F., Soenarko, B., Rizzo, F. J. and Shippy, D. J., 1985, "An Advanced Computational Method for Radiation and Scattering of Acoustic Waves in Three Dimension," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 77, pp. 362~368.
- (5) 이강덕, 이덕주, 1997, "일반경계조건을 가진 얇은 물체에 대한 직접경계요소법의 개발", 한국소음진동공학회지, Vol.7, No.6, pp. 975-984.
- (6) Martinez, R., 1991, "The thin-shape breakdown (TSB) of the Helmholtz integral equation," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 5, pp. 2728~2738.

- (7) Schenck, H. A., 1968, Improved Integral Formulation for Acoustic Radiation Problems," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 44, pp. 41 ~ 58
- (8) Malbequi, P., Candel, S. M and Eric Rignot, 1987, "Boundary Integral Calculations of Scattered Fields : Application to a Spacecraft Launcher," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 82, pp. 1771 ~ 1781.
- (9) Weidemann, J., 1971, "Analysis of the Relations Between Acoustic and Aerodynamic Parameters for a Series of Dimensionally Similar Centrifugal Fan Rotors," NASA TT F-13,798.