

# 덕트가 로터 소음 방사에 미치는 영향

## Duct Effects on rotor noise in radiation

최한림\*·정기훈\*\*·이덕주\*\*\*

Han-Lim Choi, Ki Hoon Chung and Duck Joo Lee

**Key Words** : Ducted noise radiation(덕트 소음 방사), Lowson's Method(로슨 방법), Boundary Element Method(경계요소법), Rotor noise(로터 소음), Time marching freewake method(시간전진 후류법)

### ABSTRACT

Sound generation and radiation from the duct-rotor system are calculated numerically. The wake geometries of a two-bladed rotor are calculated by using a time-marching free-wake method without a non-physical model of the far wake. Acoustic free field due to a rotating rotor is obtained by Lowson's equation. Using Kirchhoff source, rotating sources are modeled as stationary ones and can be inserted in the thin body boundary element method. The Kirchhoff source is validated through calculation of acoustic pressure due to a rotating point force. The thin body boundary element method (thin body BEM) is validated through calculation of acoustic radiation of ducted dipole. Using Kirchhoff source and thin body BEM, acoustic radiation of a ducted rotating source is calculated. Acoustic shielding is observed by inserting a duct and shows different phenomena at each major frequency. Acoustic radiation of a real duct-rotor system is also calculated using this method and the ducted acoustic field is significantly different from rotor only.

## 1. 서론

최근 헬리콥터가 여러 방면에서 자주 이용되면서 헬리콥터의 주요 소음원인 로터(rotor) 소음 역시 민군 할 것 없이 큰 문제가 되고 있다. 로터 소음의 대부분은 헬리콥터의 양력 발생을 위해 큰 압력차를 가지고 회전하는 로터, 즉 회전하는 힘에 의해서 발생한다. 따라서 정확한 로터 소음을 예측하고 이를 줄이는 연구를 진행함에 있어서 로터가 회전하면서 그 표면에 작용하는 비정상 유동장의 정확한 해석이 필수라 하겠다. 실제로 이러한 로터 주위의 비정상 유동장을 정확하게 예측하기 위한 연구들이 지난 20 여년간 꾸준히 진행되어왔다. 이러한 유동장 예측에는 와류법(vortex method)와 CFD 를 이용한 방법들이 대세를 이루고 있으나, 정확한 비정상 와류의 거동을 해석하는 데 있어서 아직은 와류법이 CFD 보다는 앞서 있는 상황이다.

이와는 별도로 회전하는 소음원에 대한 소음을 해석하기 위한 연구 역시 활발하게 진행이 되어왔으며 과거에는 단순히 회전하는 소음원에 대한 연구들이 행해져 왔으나 최근에는 덕트, 헬리콥터의 동체등과 같은 로터주위의 구조물에 의한 영향을

고려한 소음 해석들이 이루어지고 있다[1-4]. 소음해석에는 유한차분법, 경계요소법, 유한요소법 등 다양한 방법들이 이용되지만 경계요소법이 소음해석의 특성상 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 로터 주위에 덕트가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 비정상 로터 유동장을 시간 전진 자유 후류법(Time marching free wake method)을 이용하여 정확하게 해석하고 각각의 경우에 대하여 로터 소음을 로슨 방법(Lowson's method)과 경계요소법을 이용하여 해석하였다.

## 2. 유동장 해석

### 2.1 시간 전진 자유 후류법

시간전진 후류법은 3 차원 포텐셜 유동을 지배하는 Laplace 식의 우변에 와류에 의한 source term 이 추가된 식을 풀게 되며 매 시간 전진을 통해서 매시간 변화하는 로터주위의 와류를 계산하게 된다. 이는 미리 와류의 형상을 주어지고 계산을 prescribed wake method 와 가장 다른 점이라 할 수 있으며 이를 통해 보다 정확한 와류의 비정상 거동을 예측할 수 있게 되는 것이다. 자세한 수치적인 방법은 [5,6]에 서술되어 있다.

## 3. 소음 해석

### 3.1 회전하는 점힘에 의한 소음 해석

로터에 의한 소음은 로터 표면에 압력에 의하여 형성되는 정상힘과 비정상힘의 회전에 의하여

\* KAIST 항공우주공학과 대학원  
E-mail : airman@acoustic.kaist.ac.kr  
Tel : (042) 869-3756, Fax : (042) 869-3710

\*\* 한국항공우주연구원 회전외그림

\*\*\* KAIST 항공우주공학과

발생하며 이는 다음과 같이 Lowson 식을 통해 구할 수 있다[7].

$$4\pi p = \frac{1}{a_0 r (1-M_r)^2} \left( \dot{F}_r + \frac{F_r \dot{M}_r}{(1-M_r)} \right) + \frac{1}{r^2 (1-M_r)^2} \left( F_r \frac{(1-M^2)}{(1-M_r)} - F_r M_i \right) \quad (1)$$

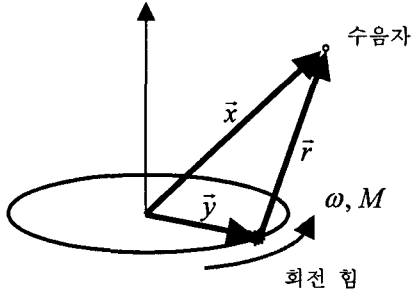


그림 1. 회전하는 힘에 의한 소음 발생

식(1)에서  $a_0$ 는 음속,  $F_i$ 는 힘,  $r$ 은 음원과 수음자간의 거리이고,  $\bar{x}$ 와  $\bar{y}$ 는 그림 1에서 보이는 것처럼 수음자와 음원의 위치벡터이다.  $M_r = (x_i - y_i)M_i / r$ 와 같이 정의 되며  $M$ 은 회전하는 힘의 마하수이고 아래첨자  $i$ 는 벡터성분을 나타낸다.

### 3.2 Kirchhoff 음원 모사

일반적으로 회전하는 로터의 주위에는 헬리콥터 동체나 필요에 따라서 쉬라우드(shroud)와 같은 구조물들이 있으며 이러한 구조물들에 의해 소음은 변형이 된다. 이러한 산란이나 회절등을 해석하기 위하여 경계요소법과 같은 수치방법들이 이용되게 되는데, 이때 회전하는 소음원을 경계요소법과 같은 방법과 연계시키기 위하여 정지된 Kirchhoff 음원을 이용한다[8,9]. Kirchhoff 음원의 그림 2와 같이 회전하는 소음원을 완전히 둘러싼 폐곡면을 이루게 되며, 회전하는 소음원의 특성은 Kirchhoff 음원표면의 압력과 압력의 미분으로 완전히 치환된다.

이때, Kirchhoff 음원으로 대체된 로터 소음은 다음과 같이 Kirchhoff 음원의 표면적분을 수행함으로써 구할 수 있다.

$$\phi(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Kirchhoff}} \left[ \phi(K) \frac{\partial G}{\partial n}(P, K) - \frac{\partial \phi}{\partial n}(K) G(P, K) \right] dS(K) \quad (2)$$

이때,  $\phi(P)$ 는 음압,  $\phi(K)$ 와  $\partial \phi / \partial n(K)$ 는 Kirchhoff 음원 표면의 음압과 음압의 미분치를 나타낸다.  $G(P, K)$ 와  $\partial G / \partial n(P, K)$ 는 자유음장의 그

린함수와 그의 표면에서의 미분함수를 의미한다

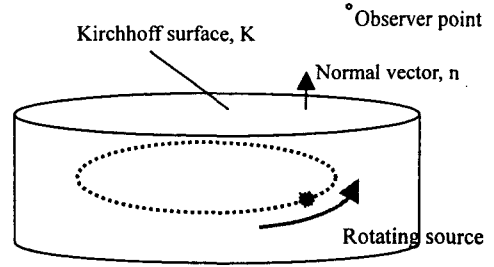


그림 2. Kirchhoff 음원

이때, Kirchhoff 음원으로 대체된 로터 소음은 다음과 같이 Kirchhoff 음원의 표면적분을 수행함으로써 구할 수 있다.

$$\phi(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Kirchhoff}} \left[ \phi(K) \frac{\partial G}{\partial n}(P, K) - \frac{\partial \phi}{\partial n}(K) G(P, K) \right] dS(K) \quad (2)$$

이때,  $\phi(P)$ 는 음압,  $\phi(K)$ 와  $\partial \phi / \partial n(K)$ 는 Kirchhoff 음원 표면의 음압과 음압의 미분치를 나타낸다.  $G(P, K)$ 와  $\partial G / \partial n(P, K)$ 는 자유음장의 그린함수와 그의 표면에서의 미분함수를 의미한다.

### 3.3 얇은물체 경계요소법

덕트와 같이 얇은 물체에 의한 소음의 산란, 회절등을 해석하기 위하여 다음과 같은 얇은 물체에서의 직접 경계요소법을 이용하였다[10,11].

$$\int_S \{ (\hat{n}_p \times \nabla_p G) \cdot (\hat{n} \times \nabla [[\phi]]) + k^2 (\hat{n}_p \cdot \hat{n}) G [[\phi]] \} dS = 4\pi \frac{\partial \phi}{\partial n_p} + 4\pi \partial \phi_s / \partial n_p \quad (3)$$

이때,  $\hat{n}_p$ 는 p 점에서의 표면에 수직한 정규벡터이고,  $[[\phi]] = \phi^+ - \phi^-$ ,  $k$ 는 파수(wave number),  $\phi_s$ 는 입사압력을 나타낸다. 입사파가 Kirchhoff 음원으로부터 방사되는 경우에는 앞절에서 서술한 바와 같이 다음과 같은 식을 통해서 입사압력을 구할 수 있다.

$$\phi_s(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Kirchhoff}} \left[ \phi(K) \frac{\partial G}{\partial n}(P, K) - \frac{\partial \phi}{\partial n}(K) G(P, K) \right] dS(K) \quad (4)$$

## 4. 해석방법 검증

### 4.1 로터 유동장 해석 검증

본 연구에 쓰인 시간전진 자유후류법의 검증을 위해 로터의 유동장을 해석하고 로터 표면에 가해지는 압력을 실험결과와 비교하였다[12].

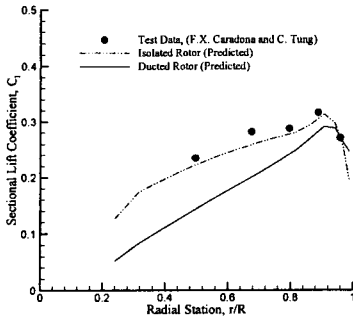


그림 3. 단면 양력계수 비교

그림 3 은 로터단면의 양력계수를 비교한 그림이다. 점선으로 표시된 예측치와 기호로 표시된 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다.

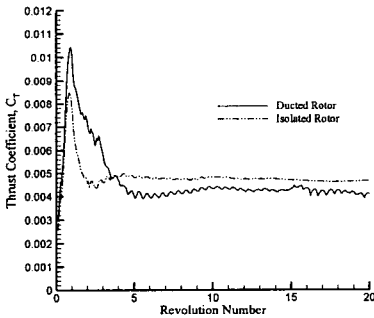


그림 4. 전체추력계수의 수렴곡선

그림 4 는 전체추력계수의 수렴곡선을 보여주고 있다. 실험에 의한 수렴치가 0.0046 이고 수치해석에 의한 수렴치가 0.00463 으로 매우 정확한 해석결과를 보여주고 있다. 이와 같이 검증된 프로그램을 이용하여 덕트내에 놓여있는 로터의 유동장도 해석해보았다. 그림 5 는 자유후류법을 통해 해석된 로터와 덕트 로터의 후류형상을 보여주고 있다. 그림 3 과 4 의 실선으로 표시된 데이터가 덕트 로터의 데이터이며 로터가 덕트내에 삽입되면서 전체적인 양력분포가 낮아졌음을 알 수 있으며 이는 덕트가 로터 주위의 유동을 모아주는 역할을 하면서 로터와류로 인해 로터에 유도되는 유도속도가 증가하기 때문이다.

#### 4.2 경계요소법의 검증

얇은 물체 경계요소법을 검증하기 위하여 덕트내에 놓여있는 이극소음의 방사문제를 해석하여 엄밀해와 비교하였다[13]. 그림 6 은 원거리에서의 소음의 방향성을 비교한 그림이며  $k=8.3$  과  $3.25$  의 두 경우에 있어서 모두

엄밀해서 예측해가 잘 일치함을 알 수 있었다.

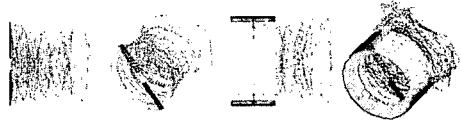


그림 5. 로터와 덕트 로터의 후류형상

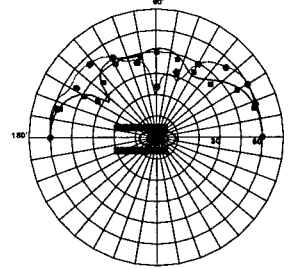


그림 6. 덕트내의 이극소음에 의한 방사소음비교 (-: 예측해, ○: 엄밀해  $k=8.3$ , ■: 엄밀해  $k=3.25$ )

### 5. 해석 결과

#### 5.1 덕트 로터의 소음 방사 해석

앞의 4 장에서 검증된 방법들을 이용하여 덕트 내에 놓여있는 로터의 유동장을 해석하고 이의 소음방사를 해석해 보았다. 그림 7 은 해석된 덕트 로터 시스템의 모습을 보여주는 그림이다.

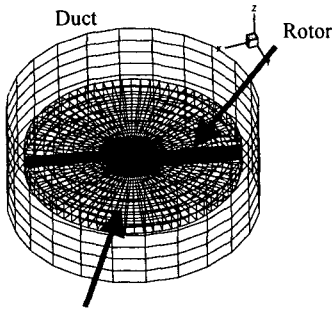
그림 8 은 덕트 로터와 로터 단독의 경우에 단순히 로터에 의해 발생하는 소음의 방향성을 비교한 그림이다. 즉 덕트 로터의 경우에 덕트의 소음산란과 같은 영향이 배제된 소음 방향성을 보여주는 그림이다. 하지만 덕트에 의해서 영향받은 로터표면의 압력치변화에 의한 로터소음원 자체의 변화는 알 수 있는 그림이다. 그림에서 두 경우가 두드러진 차이를 보이는 위치는 로터의 축방향인 90 도 근처의 음압이다. 덕트 로터의 경우에는 그림 4 에서 보이는 바와 같이 로터 표면의 유동에 비정상 성질이 더 강해짐으로 인해서 축방향의 음압이 커지게 되는데 이런 특성이 반영된 결과라 하겠다. 반면 다른 영역에서는 두 경우가 큰 차이를 보이고 있지 않다. 그림 9 는 덕트 로터의 경우에 있어서 덕트에 의한 산란 효과를 보여주는 그림이다. 덕트의 산란 효과는 앞의 경우와 달리 로터의 회전평면인 0 도, 180 도 근처에서 크게 나타나고 있으며 덕트에 의한 소음 차단 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에 의해 지원되고 항공우주 연구원에서 수행중인 민군겸용 기술개발사업의 “헬리콥터 반 토오크 시스템 기술 개발” 과제의 위탁과제 중 일부분을 밝히며 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Eversman, W., “Radiated Noise of Ducted Fans,” DGLR/AIAA paper No. 92-02-139, May 1992
- (2) Eversman, W., “Ducted Fan Acoustic Radiation Including the Effects of Nonuniform Mean Flow and Acoustic Treatment,” AIAA paper No. 93-4424, October 1993
- (3) Myers, M. K. and Lan, J. H., “Sound Radiation from Ducted Rotating Sources in Uniform Motion,” AIAA paper No.93-4429, October 1993
- (4) Dunn, M. H., Tweed, J. and Farassat, F., “The Application of a Boundary Integral Equation Method to the Prediction of Ducted Fan Engine Noise,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 227, (5), 1019-1048, 1999
- (5) Na, S. U. and Lee, D. J., “Numerical Simulations of Wake Structure Generated by Rotating Blades Using a Time-Marching Free-Vortex-Blob Method,” *European Journal of Mechanics*, 18, (1), 1999, pp. 147-159.
- (6) Chung, K. H., Na, S. U., Jeon, W. H., Lee, D. J., “A Study on Rotor Tip-Vortex Pairing Phenomena by using Time-Marching Free-Wake Method,” American Helicopter Society 56th Annual Forum, Virginia Beach, Virginia, May 2-4, 2000.
- (7) Lowson, M. V., “The sound field for singularities in motion,” *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 286, 559-572, 1965
- (8) Jeon, W. H. and Lee, D. J., “An analysis of the flow and aerodynamic acoustic sources of a centrifugal impeller,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 222, (3), 505-511, 1999
- (9) Jeon, W.H., “A numerical study on the flow and sound fields of centrifugal impeller located near a wedge,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 266, (4), 785-804, 2003
- (10) Wu, T. W. and Wan, G. C., “Numerical modeling of acoustic radiation and scattering by thin bodies using a Cauchy principle integral equation,” *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 92, (5), 2900-2906, 1992
- (11) Ih, K.D. and Lee, D.J., “Development of the Direct Boundary Element Method for Thin Bodies with General Boundary Conditions,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 202, (3), 361-373, 1997
- (12) Martinez, R., “Diffracting open-ended pipe treated as a lifting surface,” *AIAA*, Vol. 26, (4), 396-404, 1988
- (13) F. X. Caradona and C. Tung, “Experimental and Analytical Studies of a Model Helicopter Rotor in Hover”, TR-81-A-23, 1981, NASA



Kirchhoff source  
그림 7. 덕트 로터 시스템

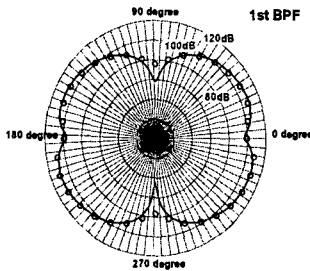


그림 8. 로터소음의 방향성(O: 덕트 로터의 source field, -: 로터 단독의 source field)

## 6. 결 론

로터소음에 덕트가 미치는 영향에 대해 자유후류 법과 경계요소법을 이용하여 해석하였다. 각각의 방법에 대하여 적절한 검증예를 통하여 신뢰성을 확보한 후 해석을 수행하였다. 덕트의 삽입은 로터 주위의 유동을 보다 비정상상태로 만들어서 로터의 축방향의 소음을 증가시키지만 다른 영역에서의 소음원 자체에는 큰 영향이 없다. 하지만 로터소음이 방사하는데 있어서 로터의 회전평면의 소음 차단 효과가 큼을 알 수 있었다. 향후 덕트의 형상변화를 통한 이러한 덕트의 특성을 보다 깊이 연구할 필요가 있다.

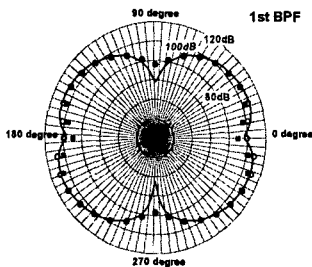


그림 9. 로터 소음의 방향성(O: 덕트 로터의 source field, ■: 덕트 로터의 ducted field, -: 로터 단독의 field)