

주파수 영역에서 로터 및 팬의 소음 예측

(Predictions of Rotor and Fan Noise in the Frequency domain)

0 정 춘면 *** 박 승철 ** 이 덕 주*
Chun-Meun,Chung Seung-Cheol,Park Duck-Ju,Lee

요약문

주파수 영역에서 로터의 thickness noise는 블레이드의 여러가지 기하학적인 조건, 즉 블레이드 수, 블레이드의 사잇각, 에어포일의 모양 그리고 반경방향의 블레이드 끝모양에 따라서 해석되어진다. 본 논문은 비 등간격 로터의 기하학적 조건에 따른 음신호의 위상간섭 영향을 고찰하기 위해서 등간격을 이루는 로터에 대해서 해석된 Hanson의 방법을 확장하였다. thickness noise를 6개의 블레이드를 가진 로터에 대하여 15° , 30° , 45° , 비 등간격을 이루는 경우와 각각에 45° tip angle로 sweepback되었을때 먼 거리의 음향학적 음신호와 그 스펙트럼을 계산하였다.

주파수 영역에서 로터 및 팬의 소음 예측

(Predictions of Rotor and Fan Noise in the Frequency domain)

0 정 춘면 *** 박 승철 ** 이 덕 주*
Chun-Meun,Chung Seung-Cheol,Park Duck-Ju, Lee

1. 서 론

로터 및 팬에 대한 소음의 연구는 주로 군사적이나 도심 환경적 측면에서 Helicopter에 대하여 주로 행해졌고, 경제적인 측면으로는 제트 엔진보다는 연비 절감효과가 좋은 turbofan이나 profan을 많이 사용함에 따라 이에대한 소음연구가 많이 이루어졌다. 근래에는 문화생활의 고급화에 따라 자동차, 가전기기 또는 컴퓨터 등에서 사용되는 팬에서 유발되는 소음이 문제시되어 이를 제어하는 것에 많은 관심이 주어지고 있다.

이제까지 연구되고 있는 회전익의 소음에 관한 연구의 대부분은 Lighthill의 음향학적 유추(analogy)개념을 확장한 Ffowcs-Williams와 Hawkins의 방정식으로부터 그 출발점을 삼는다. 다시 말해서 물체의 주변에 체적변화에 의한 효과를 나타내는 monopole, 물체표면의 압력변화 효과를 나타내는 dipole, 유체의 난류유동 특성에 의한 quadpole 음원을 분포시키고 여기서 전파

되는 음신호의 발생시간 및 그 위치와 관찰자의 위치에 따른 음원과의 지연시간에 의해서 음향학적 압력과 강도를 결정하여 시간영역 혹은 주파수 영역에서의 그 영향을 해석하는 것이다. 관찰자가 듣는 음신호는 여러 음원으로부터 진폭과 위상이 서로 다른 음파를 발생하여 관찰자 위치에서 상호 위상간섭에 의해서 합성된 음신호로 구성된다. 회전익의 위상간섭은 음원의 분포위치에 따라서 결정되는데, 이는 블레이드의 시위방향과 반경방향의 영향, 그리고 서로 다른 블레이드간의 위상간섭으로 나눌 수 있다. 즉 회전익 소음의 변수로는 블레이드의 수, 그 사잇각, 후퇴각, 익면 모양, twist 각 등이 있으며, 이들의 기하학적 변수와 더불어 음신호의 위상간섭 현상은 블레이드 끝의 속도에 따라서 많은 영향을 받는다. 이들 변수들의 영향을 고찰하기 위해 본 논문에서는 Hanson의 Acoustic analogy harmonic frequency 방법을 사용하여 로터가 정지 회전하는 경우에 대하여 monopole 항만을 고려하여 관찰한다. 특히 기존의 발표된 이론들은 블레이드가 등간격을 이루고 있으나, 본 논문은 비 등간격을 고려하기 위하여 그 사잇각

* 과학기술원 항공공학과
** 대우 중공업 헬기 사업부
*** 과학기술원 항공과 석사과정

에 따라 지연된 시간을 결정하는 해를 수
정하여 표현하였고 twist 각의 효과는 연
구 수행중에 있다.

2. 본 론

기본 방정식의 해

고체 경계면이 있는 유동장의 파동
방정식은 Ffowcs-Williams 와 Hawkings의
방정식이다.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \right] \rho H(f) = \frac{\partial}{\partial t} Q \delta(f) \quad (1)$$

여기서

$$Q = [\rho_0 v_i + \rho(u_i - v_j)] \frac{\partial f}{\partial x_i}$$

H : Heaviside fuction

$$\vec{f}(\vec{x}, t) = 0 \quad \text{at the surface body}$$

윗식의 일반해는 Goldstein[2]으로부터

$$\vec{\rho}(\vec{x}, t) = \frac{1}{c_0^2} \int_{-T}^T \int_{s(\tau)} \left(-\rho_0 v_n \frac{\partial G}{\partial \tau} \right) ds(y) d\tau$$

으로 표현된다. -- (2)

여기서 G 는 Green 함수이고

$$G = \frac{\delta(t - \tau - R/c_0)}{4\pi R}$$

$$R = |\vec{x} - \vec{y}|$$

τ : 지연시간

으로 표현된다.

이에 대한 일반해는 원거리에서

$$p(\vec{x}, t) =$$

$$\iiint \frac{1}{4\pi R} g \left(\gamma_0 + U t - \frac{R}{c_0}, r_0, \xi_0 \right) d\xi_0 d\gamma_0 dr_0$$

이다. --(3)

여기서

$g = \left(\rho_0 U^2 \frac{\partial^2 h}{\partial \gamma^2} \right)$ 는 monopole만을 고
려한 음원 함수이고 h는 블레이드의 단면
두께를 나타낸다. 관찰자와 음원의 거리
는

$$R = [(x + \xi_0)^2 + y^2 + r_0^2 - 2y r_0 \cos(\gamma_0/r_0)]^{1/2}$$

이고, γ_0 는 시위 방향, ξ_0 는 단면두께방
향, t는 관찰자 시간, x는 관찰자 위치이다.
주파수 영역에서 해석하기 위하여 음원함
수를 Fourier 변환을 하면

$$\Psi \left(\frac{\omega}{U} \right) = \int_{-\infty}^{\infty} g e^{i \frac{\omega}{U} \gamma_0} d\gamma_0 \quad (4)$$

이된다. 변환된 g를 (3)식에 대입하고
Fourier 적분식

$$p(\vec{x}, t) = \int p(\vec{x}, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad \text{과비교하}$$

여 $p(\vec{x}, \omega)$ 를 구한다.

먼 거리에 있는 관찰자에 대하여 음압의
Fourier 계수는

$$P_n = \frac{1}{4\pi r} \exp \left[i \left(\frac{\Omega r}{c_0} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \int_0^{\infty} J_n \left(\frac{n\Omega r_0}{c_0} \sin \theta \right) \int_{-\infty}^{\infty} \Psi \left(\frac{n}{r_0} \right) \exp \left[i \left(\frac{n\Omega}{c_0} \xi_0 \cos \theta \right) \right] d\xi_0 dr_0 \quad (5)$$

으로 표현되며, 관찰자 위치에서 $\omega = n \Omega$
의 주기성을 가지므로 음압의 Fourier series
전개가 가능하다.[4]

비 등간격 로터

등간격 로터의 블레이드 수가 B 일때
s 번째 블레이드의 음원의 강도는 l=0에서

$g_s(\gamma_0 + \gamma_s, r_0, \zeta_0)$ 이며, B 블레이드에 의한 전체 음원의 강도는

$$g = \sum_{s=1}^B g_s(\gamma_0 + \gamma_s, r_0, \zeta_0) \quad \text{---(6)}$$

이다.

따라서 Ψ 항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Psi &= \int \sum_{s=1}^B g_s(\gamma_0 + \gamma_s, r_0, \zeta_0) \\ &\quad \exp\left(i \frac{n}{r_0}(\gamma_0 + \gamma_s)\right) d\gamma_0 \\ &= \sum_{s=1}^B \exp\left(i \frac{n}{r_0} \gamma_s\right) \end{aligned}$$

$$\int g_s(\gamma_0 + \gamma_s, r_0, \zeta_0) \exp\left(i \frac{n}{r_0} \gamma_0\right) d\gamma_0 \quad \text{---(7)}$$

위식에서 $\gamma_s=0$ 일때 블레이드에 대한 fourier 변환은 다음과 같이 정의한다.

$$\Psi_0 = \int g_s(\gamma_0, r_0, \zeta_0) \exp\left(i \frac{n}{r_0} \gamma_0\right) d\gamma_0 \quad \text{---(8)}$$

전체 블레이드 수가 B이고, 비 등간격을 이루는 블레이드를 한쌍으로 하여 각 쌍의 조합으로 생각하면, 즉, 한쌍의 블레이드 수가 B_p 이고 q 쌍을 이루며, 각 쌍의 사잇각이 $\delta_j (j=1, \dots, q)$ 일때로 생각하면, 이때 음원 강도의 Fourier 변환은

$$\Psi = \sum_{s_p=1}^{B_p} \left[\sum_{j=1}^q \exp\left(-i \frac{n}{r_0} \gamma_j\right) \Psi_0 \right]_{s_p} \quad \text{---(7)}$$

으로 표현된다. 여기서 $(\gamma_j)_{s_p}$ 는 블레이드 사잇각이고 다음과 같다. [3]

$$(\gamma_j)_{s_p} = [2\pi(S_p - 1) / B_p + \delta_j] r_0 \quad \text{---(8)}$$

Thickness noise 하모닉의 결과식

임의의 한 블레이드의 단면 함수는 아래와 같다.

$$h(\gamma_0, r_0) = b t_b H(x - MCA / b) \quad \text{---(9)}$$

여기서,

$$x = \gamma_0 / b$$

b : 시위 길이

t_b : 에어포일의 최대 두께

MCA : sweep 위치

H : 무차원화된 두께함수 이다.

Ψ_c 를 시위두께의 fourier 변환이라하고, 시위 방향의 noncompactness를 나타내는 무차원 양, $k_x = mB_p r / b$ 이라하면,

$$\Psi_c(k_x) = \int_{-1/2}^{1/2} H(x) \exp(ik_x x) dx \quad \text{---(10)}$$

이제 이 식들을 식(5)에대입하면

$$\begin{aligned} P_{mB_p} &= -\sum_{j=1}^q [\exp(-imB_p \delta_j)] \rho_0 c_0^2 \frac{1}{2\pi y_r D} \\ &\quad m^2 B_p^3 M_T^2 \sin \theta \exp\left[imB_p \left(\frac{\Omega r}{c_0} - \frac{\pi}{2}\right)\right] \\ &\quad \times \int_0^1 J_{mB_p}(mB_p Z M_T \sin \theta) \\ &\quad \exp[i(\phi_0 + \phi_s)] t_b B_D^2 \Psi_c(k_x) dZ \quad \text{(11)} \end{aligned}$$

여기서 $Z = r_0 / r_T$ $y_r = r \sin \theta$ 이고

$$\phi_0 = 2mB_p M_T \cos \theta \frac{FA}{D}$$

$$\phi_s = \frac{2mB_p}{Z} \frac{MCA}{D}$$

는 각각 offset 과 sweep 에 의한 phase shift 를 나타내고, M_T 는 tip mach no. 이고 r 은 관찰자 거리, θ 는 관찰자의 radiation angle, B_D 는 시위 길이 와 블레이드직경의 비이다. 위식은 블레이드 사잇각이 비등간인 경우에 대한 thickness noise 의 최종적인 결과식이며, 음압의 복소 fourier series 계수를 나타낸다. 그리고 시간영역으로 환산하면 다음과 같다.

$$p(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} P_{mBp} \exp(-imBp\Omega t) \quad \text{--(12)}$$

3. 계산결과 및 토의

계산은 6 blade 를 가진 rotor에 대하여 하였다. 먼저 비 등간격으로 유도한 식(12)의 정확성을 검증하기 위하여 등간격으로 사잇각을 대입하여 원래의 등간격식의 결과와 일치함을 보았다.

사잇각이 15° 30° 45° 경우에 대하여, dffset은 zero 로하고 sweepback이 영인 경우와 45°로 tip이 sweep된 경우에 대하여, $Mt=0.9$ 일때 등간격인 경우와 비교하였다. 15°인 경우 harmonic number ,mB가 8,16,20,28,...일때 30°일때는 mB= 4,8,10,14,...에서 음압이 영이 되었고 45° 일대는 영이 되는 mB가 존재하지 않았다. sweep의 경우 식은

$$MCA(z) = \frac{\tan\theta_t}{(1-z_s)^{n-1}} (z-z_s)^n \quad \text{으로하였다.}$$

여기서 θ_t 는 tip angle, z_s 는 시작 위치이다. forward와backward 인 경우 $n=1$ 로 계산하여 보았으나 약간의 수치변화만 있을 뿐 가시적인 결과는 없었다. 각각의 사잇각의 변화에 대한 스펙트럼의 변화는 일단 마하 수가 크기때문에 미색하였고, backward sweep을 준 경우 harmonic number 전 영역에서 음압이 위상간섭으로 인하여 감소함을 알수 있다. Taper 를 준 경우 root와 tip 에서 시위비가 1:1 인 경우를 기준으로 하여 0.5:1, 1:2 일때 비교하였다. 1:2인 경우 일정간격으로 음압이 증가하였으나 0.5:1일때는 별 차이가 없었다. 이는 블레이드 끝부분의 영역이 음압에 지배적이기 때문이라생각된다.

4. 결 론

본 논문이 thickness noise만을 고려하였기 때문에 실제의 소음을 정확히 예측하지는 못하지만 블레이드 형상과 위치에 대한 각각의 parameter가 소음에 미치는 영향을 연구함으로써, 이의 결과는 저소음 설계시에 응용될 수 있다.

참고문헌

- [1]. D.B.Hanson, "The influence of propellers design Parameters on Far Field Harmonic Noise in Forward Flight " ,AIAA Paper,79-0609,1979.
- [2]. M.E Goldstein, "Aeroacoustic", McGraw-Hill ,New York,1976
- [3]. 박 승철, " 로터 소음에 있어서의 위상간섭 영향 " , 항공우주학회, 1990, 3
- [4]. D.B.Hanson, " Helicoidal Surface Theory for Harmonic Noise of Propeller in the Far Field",AIAA, Vol.18, No.10,1980.

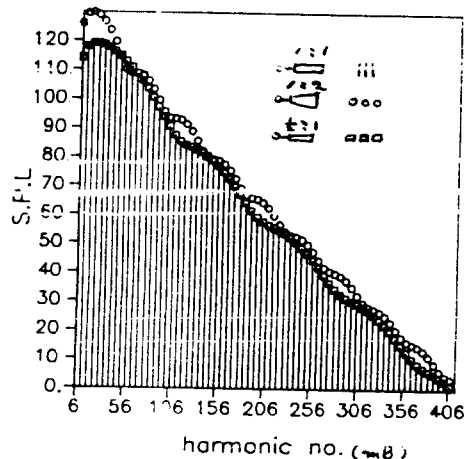


그림1) Taper 된 경우 스펙트럼비교

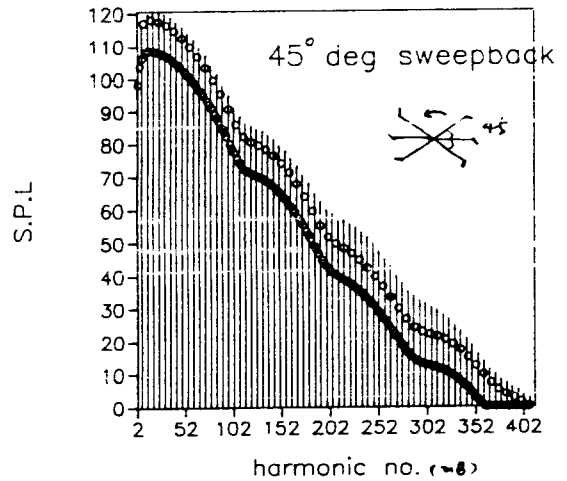
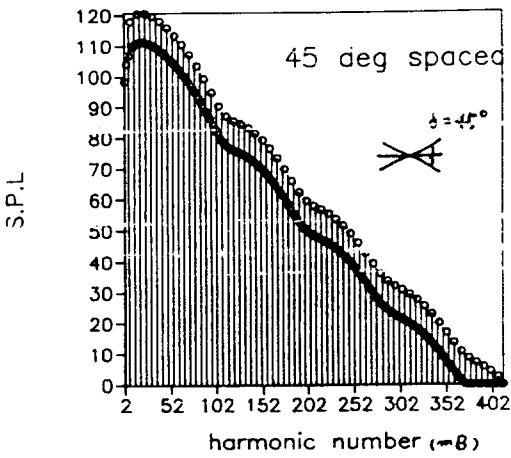
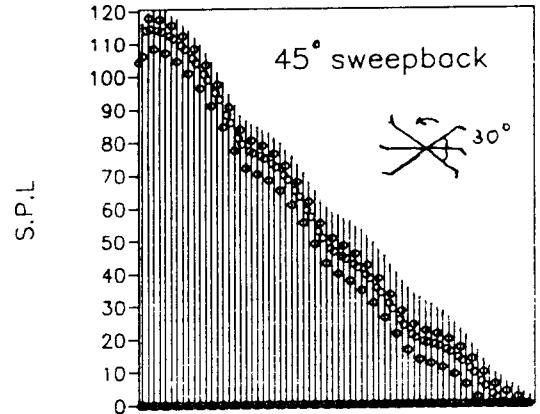
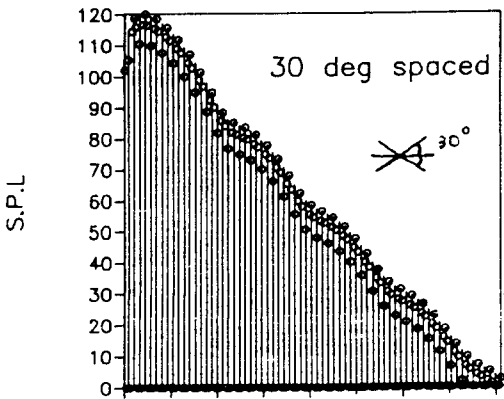
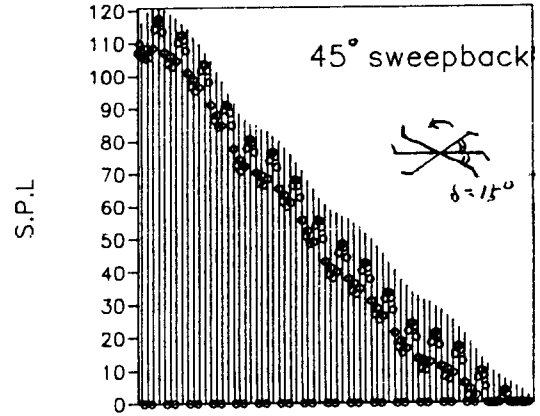
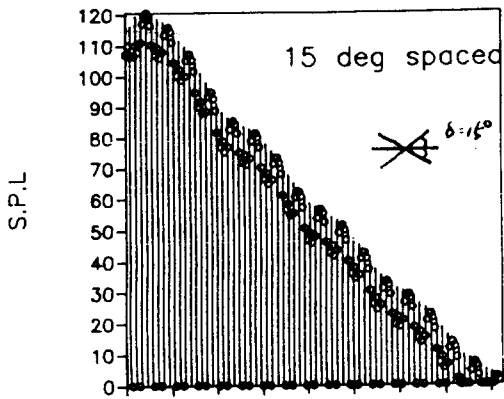


그림2) 사잇각이 15°, 30°, 45°인 경우(···)와 등간격(||||) 간의 스펙트럼 비교

그림3) 사잇각이 15°, 30°, 45°, 이고 각각 45° sweepback 된 경우(···)와 등간격(||||)의 스펙트럼 비교