

진동파워흐름해석을 위한 난류흐름에 의한 입력파워 추정 및 적용

임구섭^{†*}, 홍석윤^{**}, 박영호^{**}, 최영달^{*}, 정태석^{*}

STX 조선(주) 조선해양연구소^{*}

서울대학교 조선해양공학과^{**}

Estimation and Application of Turbulent Flow-Induced Input Power for Vibrational Power Flow Analysis

Gu-sub Lim^{†*}, Suk-yoon Hong^{**}, Young-ho Park^{**}, Young-Dal Choi^{*}
and Tea-Seok Joung^{*}

STX Shipbuilding Co., Ltd. Shipbuilding & Ocean Research Institute^{*}

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University^{*}

Abstract

Turbulent flow-induced vibrations generate the structural fatigue and noise problems. In this paper, using Corcos, Smol' yakov-Tkachenko, Fflowcs Williams and Chase models, the input power generated by distributed fluid force is predicted for power flow analysis (PFA) of turbulent flow-induced vibration. Additionally, the Fast Fourier Transform (FFT) is used to raise the calculation efficiency. PFA results obtained are compared with the classical modal solutions for verifications. Analytic results using the fluid models show good agreements with those of modal analysis, respectively.

*Keyword : Power Flow Analysis(파워흐름해석법), Fast Fourier Transform(고속푸리에변환), Fluid Model(유체모델), Input Power(입력파워), Flow-Induced Vibration(유체기인진동)

1. 서론

저주파 영역에서의 구조물의 진동에서는 변위해에 기반을 둔 유한요소법(FEM)이나 경계요소법(BEM)이 주로 이용되고 있다. 하지만 수송 기계의 속도가 빨라지고 무게가 가벼워짐에 따라 중고주파 영역 동/소음문제가 중요하게 되었다.

중고주파 영역에서의 진동해석을 유한요소법이 나 경계요소법으로 해석을 할 경우, 해석주파수가 높아짐에 따라 비용과 시간이 급격히 증가하게 되고 해석결과 또한 불확실하게 되어 신뢰도가 떨어지게 된다.

이런 기존의 변위법에 기반을 둔 방법의 단점을 극복하고 중고주파 영역에서의 신뢰성 있는 해석결과를 주기 위해 고안 된 것이 통계적에너지해석법(Statistical Energy Analysis, SEA)이다.

이 방법은 대상구조물을 몇 개의 하부시스템으로 나누고 각 하부시스템에서 한 개의 평균된 에너지 값을 제시한다. 하지만 이 방법은 하부시스템에서의 평균된 에너지 값만을 제시하므로 구조물 내부에서 진동에너지의 변화나 진동파워 흐름에 대한 정보를 얻기가 어렵다. 또한 모드 밀도가 높은 고주파수 대역에서의 해석에 제한되고 있다. 이런 SEA의 단점을 보완하고 고주파수 뿐만 아니라 중주파수 대역에서 또한 진동 해석이 가능한 방법으로 파워흐름해석법(Power Flow Analysis, PFA)이 제안되었다. 파워흐름해석법은 편미분방정식을 기반으로 하기 때문에 공간상에서의 전반적인 진동에너지의 변화 뿐만 아니라 진동파워의 전달경로도 예측할 수 있는 장점이 있다. 또한 부분적인 감쇠 처리와 파워 입력과 같은 국부적인 효과를 처리할 수 있다.

파워흐름해석법은 진동에너지가 열에너지처럼 흐른다는 전제하에 유도되었고 중고주파 대역의 새로운 해석기법으로 Belov(1977)에 의해 제안된 이후 Nefske와 Sung(1989)은 보의 굽힘진동에 대해 파워흐름유한요소법(Power Flow Finite Element Method, PPFEM)을 적용하였다. Wohlever와 Bernhard(1992)는 일차원 요소인 봉과 Euler-Bernoulli 보에 대하여 파워흐름해석법을 확립하였으며 Bouthier와 Bernhard(1990)는 이차원 요소인 막과 얇은 판의 면외 진동에 대한 에너지지배방정식을 유도하였다. Cho(1993)는 파워의 투과 및 반사계수를 이용한 구조물의 연성관계를 연구했다. 또한 서울대학교 선박소음진동연구실의 박도현(2001)은 박판에서 면내성분을 고려한 파워흐름모델을 개발하였고 서성훈(2003)은 박판에서 횡방향, 종방향 및 전단방향의 3 자유도에 대한 유한요소식을 유도하고 파워흐름유한요소법을 기반으로 한 진동해석프로그램인 PFADS(Power Flow Analysis Design System)를 개발하였다.

지금까지 중고주파수 대역에서 구조물의 파워흐름해석은 주로 집중하중이나 기계장치에 의한 분포하중에 의한 진동문제에 국한되어왔다. 하지만 최근 매우 중요시 되고 있는 자동차나 비행기의 실내 소음과 잠수함이나 배, 파이프 진

동에서의 유체 소음등은 비정상 유체흐름(unsteady flow)이나 난류 유동(turbulent flow)에 잠겨있는 구조물에 작용하는 압력 변동(pressure fluctuation)에 의해서 발생한다. 특히 외부경계흐름에서 유체의 흐름이 총류에서 난류로 변하게 되면 유체에 의해 구조물에 임의의 분포하중이 가해지게 되고 이 하중은 고주파수 성분을 포함하게 되어 이를 해석하는 것이 유체에 의한 진동문제를 해석하는 것에 중요한 부분이 된다.

따라서 본 논문에서는, 난류 유동에 의한 중고주파 영역에서의 구조물의 진동파워흐름해석을 위해 유체의 난류흐름의 거동을 표현하는 유체 모델들을 사용하여 입력파워를 계산하고 이를 단순지지된 유한 평판에 적용, 해석해 보았다. 또한 각각의 유체모델을 이용한 파워흐름해석법의 진동에너지밀도와 모달 해석에 의한 진동에너지밀도를 비교함으로써 타당성을 검증해 보았다.

2. 이론

2.1 파워흐름해석법

파워흐름해석법에서 구조물의 원거리영역의 진행파(propagating wave)에 대한 에너지지배방정식은 에너지의 저장과 소멸, 전달관계를 이용하여 유도된다. 이차원 구조물인 평판의 굽힘파에 대한 에너지지배방정식은

$$-\frac{c_{gf}^2}{\eta\omega} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \langle e \rangle + \eta\omega \langle e \rangle = \Pi_m \tag{2.1}$$

이다. 여기서 $\langle e \rangle$ 는 시간 평균한 굽힘 에너지밀도의 원거리 영역성분이고, c_{gf} 는 굽힘파에 대한 군속도, η 는 이력감쇠계수, Π_m 는 굽힘파에 대한 입력파워를 나타낸다. 단순지지되어 있는 평판 경계에서의 외부로 전달되는 파워가 없기 때문에 에너지밀도는 푸리에급수(Fourier series)를 이용하여

$$\langle e \rangle = \sum_{m,n=0}^{\infty} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (2.2)$$

으로 나타낼 수 있다. 또한 입력파워도 식 (2.2)과 유사하게

$$\Pi_{in}(x,y) = \sum_{m,n=0}^{\infty} B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (2.3)$$

으로 나타낼 수 있고 여기서 B_{mn} 은 각 모드에 따른 파워의 기여도로서

$$B_{mn} = \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} \Pi_{in}(x,y) \cos\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) dx dy \quad (2.4)$$

이다. 식 (2.2)과 식 (2.3)을 식 (2.1)에 대입하여 에너지밀도를 구하면

$$\langle e \rangle = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right)}{\left(\frac{c_{gf}^2}{\eta\omega}\right) \left[\left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 \right] + \eta\omega} \quad (2.5)$$

이다.

2.2 입력파워 계산

파워흐름해석에서 사용되는 입력파워는 유한구조물의 임피던스(impedance)가 종고주파수 영역으로 갈수록 무한구조물의 임피던스에 수렴해 간다는 가정에 의해 무한구조물의 임피던스법을 사용한다. 평판에 점 가진이 될 경우의 입력파워는

$$\Pi_{in} = \frac{1}{2} \text{Re}(Fv^*) = \frac{1}{2} |F|^2 \text{Re}(1/Z_m) \quad (2.6)$$

이다. 여기서 Z_m 은 가진력이 작용하는 곳에서의 무한평판 임피던스로서

$$Z_{\infty} = 8(D\rho_s h_s)^{1/2} \quad (2.7)$$

이다. 여기서 D , ρ_s , h_s 는 평판의 굽힘강성과 밀도, 두께이다.

유체에 의해 평판이 가진 될 경우, 평판의 표면에는 분포된 임의가진(random excitation)이 작용하게 된다. 이를 표현하기 위한 입력파워

식은

$$\Pi_{in} = \frac{1}{8(D\rho_s h_s)^{1/2}} \text{Re} \left(\iint_s S_{xx'} \alpha_{xx'} dx dy \right) \quad (2.8)$$

이다. 여기서 $S_{xx'}$ 는 평판의 X 와 X' 에서의 교차 파워스펙트럼(cross-power spectrum)으로서 서로 다른 평판의 위치에서 입력되는 파워의 상관관계를 나타내는 항이다. 또한 $\alpha_{xx'}$ 는

$$\alpha_{xx'} = (1 + j\eta/2) \times \left[H_0^{(1)}(k(1 + j\eta/4)r) - H_0^{(1)}(jk(1 + j\eta/4)r) \right] \quad (2.9)$$

이며 위 식은 평판에 가진력이 입력될 경우, 평판의 거동을 나타낸다. 여기서 $H_0^{(1)}$ 은 제 1종 Hankel 함수(Hankel function of the first kind)이며, k 는 구조물의 파수, r 는 X 와 X' 두 지점에서의 거리를 나타낸다.

입력파워 추정하는데 있어 또 다른 형태는 $S_{xx'}$ 와 $\alpha_{xx'}$ 를 파수에 대해 푸리에변환(Fourier transform)을 이용하여 나타낼 수 있다. 이를 파수-주파수 스펙트럼이라고 하며 이를 이용하면 입력파워는

$$\Pi_{in} = \frac{1}{8(D\rho_s h_s)^{1/2}} \times \text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(k_x, k_y, \omega) e^{j(k_x x + k_y y)} \alpha(X, k_x, k_y) dk_x dk_y \right] \quad (2.10)$$

이다. 여기서 $\alpha(X, k_x, k_y)$ 는 공간에 대한 푸리에 변환으로서

$$\alpha(X, k_x, k_y) = \int_0^L \int_0^L \alpha_{xx'} e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} dx dy \quad (2.11)$$

이며 공간적인 에너지의 흐름을 나타낸다.

3. 유체모델

유체력에 의한 파워흐름해석 입력파워 추정시 사용되는 $S_{xx'}$ 와 이를 파수에 대한 푸리에변환이나 실험을 통하여 얻어지는 파수-주파수 파워스펙트럼(wavenumber-frequency spectrum)에는 일반적으로 Corcos 모델, Chase 모델,

Ffowcs Williams 모델, Smol' yakov-Tkachenko 모델이 사용된다.

3.1 Corcos 모델

Corcos 는 구조물에 일정한 방향으로 유체가 지난간다고 가정하고 실험값이 지수적으로 감소하는 것을 아래와 같은 교차관계(cross correlation)로 나타내었다.

$$S_{XX'} = \phi_{pp}(\omega) e^{-\gamma_1 |\omega \xi_1 / U_c|} e^{-\gamma_2 |\omega \xi_2 / U_c|} e^{-j\omega \xi_1 / U_c} \quad (3.1)$$

여기서 $\xi_1 = x_1 - x_2$, $\xi_2 = y_1 - y_2$ 이다. 식 (3.1)을 파수에 따라 푸리에변환을 하면 파수-주파수 스펙트럼을 얻게된다.

$$\phi(k_x, k_y, \omega) = \phi_{pp}(\omega) \frac{\gamma_1}{\pi[(k_x U_c / \omega - 1)^2 + \gamma_1^2]} \frac{\gamma_2}{\pi[(k_y U_c / \omega)^2 + \gamma_2^2]} \quad (3.2)$$

여기서 γ_1 와 γ_2 는 유동방향과 유동방향의 수직인 방향으로의 간섭성(coherence)을 나타내는 상수이고 실험을 통하여 일반적으로 $\gamma_1 = 0.11$, $\gamma_2 = 0.70$ 값을 가진다. k_x 와 k_y 는 각 방향에 대한 파수, U_c 는 대류속도(convection velocity)로서 일반적으로

$$U_c = 0.5 \sim 0.8 U_0 \quad (3.3)$$

로 나타낸다. 여기서 U_0 는 자유유동속도(free stream flow speed)이다.

또한 $\phi_{pp}(\omega)$ 는 자유유동속도를 변화시켜 가면서 한 지점에서 측정된 값으로 유체에 의한 가진력의 크기를 나타내고 이는

$$\phi_{pp}(\omega) = \begin{cases} 10^{-5} \rho^3 \delta^* U_0^3 \left(\frac{\omega \delta^*}{U_0} \right)^{-0.5}, & \frac{\omega \delta^*}{U_0} < 1.5 \\ 10^{-4} \rho^2 \delta^* U_0^3 \left(\frac{\omega \delta^*}{U_0} \right)^{-5}, & \frac{\omega \delta^*}{U_0} > 1.5 \end{cases} \quad \delta^* \cong \frac{1.83}{\text{Re}^{1/2}} x \quad (3.4)$$

이다. 여기서 ρ 는 유체의 밀도, δ^* 는 유체의 외부유동에서 각 지점에서의 경계층의 두께, Re 는 레이놀즈 수(Reynolds number)이며 이 무차원수는 유체의 층류유동과 난류유동을 판단하는 기준이 되는 수이다.

이 Corcos 모델의 단점은 $k \leq k_c$ 영역 즉 대류영역(convective area)에서 예측값이 실험값보다 더 큰 값을 준다는 것이다.

3.2 Smol' yakov-Tkachenko 모델

Smol' yakov-Tkachenko 는 Corcos 모델의 단점을 보완하기 위해 유동방향과 유동방향의 수직방향과의 관계를 굵이 아닌 함으로 나타내고 이른 파수-주파수 스펙트럼을 얻었다.

$$\phi(k_x, k_y, \omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \phi_{pp}(\omega) A(\omega) h(\omega) \left(\frac{U_c}{\omega} \right)^2 [F(k_x, k_y, \omega) - \Delta F(k_x, k_y, \omega)]$$

$$F(k_x, k_y, \omega) = \left[A^2 + (1 - U_c k_x / \omega)^2 + ((\gamma_1 / \gamma_2) U_c k_y / \omega)^2 \right]^{-3/2}$$

$$\Delta F(k_x, k_y, \omega) = \frac{1}{n} \left\{ A^2 + 1 + \frac{n}{m} \left[\left(m - \frac{U_c k_x}{\omega} \right)^2 + \left(\frac{U_c k_y}{\omega} \right)^2 - m^2 \right] \right\}^{-3/2}$$

$$A(\omega) = \gamma_1 [1 - \mu U_c / \gamma_1 U_0 \omega^* + (\mu U_c / \gamma_1 U_0 \omega^*)^2]^{1/2}, \quad \omega^* = \omega \delta^* / U_0$$

$$h(\omega) = [1 - \gamma_1 m A / \gamma_2 n^2 \sqrt{1 + A^2 - mn}]^{-1}$$

$$m = (A^2 + 1) / (A^2 + 5n - 4)$$

$$(3.5)$$

여기서 $\mu = 0.031$, $n = 1.005$ 이다.

위 식을 통하여 Corcos 모델보다는 대류영역에서의 예측값이 실험값에 많이 근접하였다.

3.3 Ffowcs Williams 모델

Corcos 모델보다 더 정확히 예측하기 위해 Ffowcs Williams 는 Corcos 의 실험을 바탕으로 파수-주파수 스펙트럼을 구하였고 이를 Hwang 과 Geib 이 수정하여

$$\phi(k_x, k_y, \omega) = \left(\frac{U_c (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}}{\omega} \right) \frac{\gamma_1 \gamma_2 \pi^{-2}}{[(k_x U_c / \omega - 1)^2 + \gamma_1^2][(k_y U_c / \omega)^2 + \gamma_2^2]} \quad (3.6)$$

식을 얻었다.

3.4 Chase 모델

Chase 는 Ffowcs Williams 모델보다 더 정확한 값을 예측하기 위해 실험을 통해서 아래 식을 구하였다.

$$\phi(k_x, k_y, \omega) = \rho_0^2 v_*^3 [c_M k_x^2 K_M^{-5} + c_T (k_x^2 + k_y^2) K_T^{-5}]$$

$$K_i^2 = (\omega - U_c k_x)^2 / (h_i v_*^*)^2 + (k_x^2 + k_y^2) + (b_i \delta)^{-2}$$

(3.7)

여기서 ρ_0 는 유체밀도, v_* 는 마찰속도(friction velocity) 이다. Chase 는 실험통해 무차원수 값 $h_M \approx 3$, $c_T = 0.0474$, $c_M = 0.0745$, $b_T = 0.378$, $b_M = 0.756$ 제안하였다.

4. 유체모델 계산

Fig. 1 은 k_x 값에 따라 파수-주파수 스펙트럼 결과를 보인 것으로 그 결과를 보면, k_x 의 값이 ω/U_c 의 값과 같아지는 즉 $k_x = k_c = \omega/U_c$ (convective wavenumber)인 영역에서 파수-주파수 스펙트럼의 결과가 같아지는 것을 알 수 있다. 하지만 각 스펙트럼의 결과가 $k_x \leq k_c$ 은 대류영역에서는 값의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 각 영역의 값의 기여도를 보면 $k_x = k_c$ 인 영역에서는 모든 유체모델의 파수-주파수 스펙트럼 값이 $\phi_{(Corcos)} \approx \phi_{(F.W)} \approx \phi_{(Chase)} \approx \phi_{(sm-tk)}$ 되는 것을 볼 수 있다. 그래서 상대적으로 값의 각 모델마다 크게 차이를 보이는 대류영역에서의 값의 차이가 중요하게 된다.

5. 고속 푸리에변환을 이용한 계산시간 개선

유체모델을 이용한 파워흐름해석법에서의 입력파워계산에는 Gauss 적분법을 사용하였었다. 하지만 입력파워를 Gauss 적분법으로 계산할 경우 파수의 범위를 결정하기가 어렵고 각 파수마다 적절한 적분점을 매번 찾아야 하며 각 파수의 값마다 적분점의 수가 급격히 증가하는 단점이 있다. 이를 해결하고 계산시간의 효율을 위해 각 유체모델의 파수-주파수 스펙트럼에 고속 푸리에변환(fast Fourier transform, FFT)을 적용하였다.

식 (2.10)와 식 (2.11)을 각각 k_x 와 k_y , x 와

y 에 대하여 이차원 이산 푸리에변환을 사용하였다. 먼저 범위를 정하고 샘플링을 하고 이차원 이산 푸리에변환(discrete Fourier transform, DFT) 식을 유도하면 Π_{in} 은

$$\Pi_{in} = \frac{1}{8(D\rho_3 h_s)^{1/2}} \text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(k_x, k_y, \omega) \alpha(X, k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \right]$$

$$= \frac{1}{8(D\rho_3 h_s)^{1/2}} \times \text{Re} \left\{ \sum_{n1=0}^{N1-N2-1} \sum_{n2=0}^{N2-1} \phi_n(k_{x_n}, k_{y_n}, \omega) \exp \left[j \left(\frac{2\pi n1}{N1} \right) \right] \exp \left[j \left(\frac{2\pi n2}{N2} \right) \right] \alpha(X, k_{x_n}, k_{y_n}) \right\}$$

$q_1 = 0, 1, 2, 3, \dots, N_1 - 1$

$q_2 = 0, 1, 2, 3, \dots, N_2 - 1$ (5.1)

와 같이 표현할 수 있다. 또한 $\alpha(X, k_x, k_y)$ 는

$$\alpha(X, k_x, k_y) = \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} \alpha_{XX} e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} dx dy$$

$$= \frac{1}{N_3 N_4} \sum_{n3=0}^{N3-N4-1} \sum_{n4=0}^{N4-1} \alpha(x_{n3}, y_{n4}) \exp \left[-j \left(\frac{2\pi n3}{N3} \right) \right] \exp \left[-j \left(\frac{2\pi n4}{N4} \right) \right]$$

$q_3 = 0, 1, 2, 3, \dots, N_3 - 1$

$q_4 = 0, 1, 2, 3, \dots, N_4 - 1$ (5.2)

로 표현할 수 있다. 위 식들과 같이 이산 푸리에변환식에 고속 푸리에변환을 사용한다. 고속 푸리에변환을 사용할 경우 이산 푸리에변환을 사용하는 것보다 더 효율적으로 계산할 수 있다.

6. 모달해석을 이용한 평판의 에너지밀도

파워흐름해석법에 사용되는 유체에 의한 입력파워 추정의 타당성을 검증하기 위해서 임의의 가진을 받는 평판의 모달해석을 통해 파워흐름해석법에 의한 에너지밀도의 타당성을 검증한다. 먼저 임의의 가진을 받는 평판에서의 평균 제곱된

형변위는

$$\overline{u^2(x,y)} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{(\rho h)^2} \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \phi_r(x,y) \phi_s(x,y) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \phi_i(x_i,y_i) \phi_j(x_j,y_j) \times \text{Re} \left[\int_0^{\infty} H_r(\omega) H_s^*(\omega) S_{ij}(\omega) d\omega \right] \quad (6.1)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ϕ_r 와 ϕ_s 는

$$\phi_r = \sin\left(\frac{r\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{r\pi y}{L_y}\right), \phi_s = \sin\left(\frac{s\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{s\pi y}{L_y}\right) \quad (6.2)$$

이다. 그리고 $H_r(\omega)$ 는 전달함수로서

$$H_r = \frac{1}{\omega_{mn}^2 - \omega^2(1 - j\eta)} \quad (6.3)$$

표현할 수 있다. 여기서 ω_{mn} 는

$$\omega_{mn} = \sqrt{\frac{D}{\rho_s h_s} \left[\left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 \right]} \quad (6.4)$$

식 이다. 식 (6.1)에서 서로 교차하는 항들을 무시 할 경우 식 (6.1)은

$$\overline{u^2(x,y)} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{(\rho h)^2} \times \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \phi_r(x,y)^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \phi_i(x_i,y_i) \phi_j(x_j,y_j) \times \text{Re} \left[\int_0^{\infty} H_r(\omega)^2 S_{ij}(\omega) d\omega \right] \quad (6.5)$$

이 된다. 평판의 운동에너지는

$$T = \frac{1}{2} \overline{\rho h V^2(x,y)} \quad (6.6)$$

이다. 평판의 위치에너지는 원거리영역(far field)에서는 운동에너지와 같으므로 전체에너지는 운동에너지의 두배이다.

$$e = 2T = \overline{\rho h V^2(x,y)} \quad (6.7)$$

7. 수치적용

본 논문에서 유도된 고속 푸리에변환을 이용한 입력파워 추정이 타당함을 보이기 위해 단 일평판에 대해서 각 유체모델을 이용하여 파워 흐름해석와 모달해석을 수행하여 보았다. 또한 각 유체모델의 k_x , k_y 각에 따른 값의 변화를 살펴보았다. 평판의 재질은 강철로 가정하였고 $L_x = L_y = 1m$, $\eta = 0.01$, $h = 0.0016m$ 로 하였다. 유체는 공기로 가정하여 각각의 인자를 대입하였다. 그리고 가진주파수는 800Hz 로하였고, 각 유체모델에 사용되는 인자들은 앞에서 언급한 값을 사용하였다. 대류속도는 $U_c = 0.65U_0$ 를 사용하였으며 U_0 의 값은 35.8m/s 로 하였다.

Figs. 2~5 는 각각 Corcos 모델, Smol' yakov-Tkachenko 모델, Ffowcs Williams 모델, Chase 모델을 보여준다. 이 결과에서 값의 변화가 k_y 와 보다는 k_x 에 따라 많이 변하는 것을 알 수 있다. 또한 k_x 의 값이 k_c 가 되는 영역에서 각 모델의 값의 차이는 조금씩 있지만 에너지가 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 유체에 의한 파워를 고려시 이 영역을 중심으로 하여 고속 푸리에변환을 수행하였다.

Figs. 6~9 는 각 유체모델을 이용하여 입력파워를 구한 결과이다. Corcos 모델과 Ffowcs Williams 모델의 경우는 각 모델의 식에서 공간적으로 변하지 않는다. 이는 각 모델의 식(3.2), 식 (3.6)을 보면 알 수 있다. Smol' yakov-Tkachenko 모델과 Chase 모델의 경우, 공간적으로 0.1dB ~ 0.15dB 정도의 변화가 있는데 이는 경계층 두께의 변화를 나타내는 항을 포함하고 있기 때문이다. 하지만 그 영향은 미묘하다고 할 수 있다.

Figs. 10~13 은 구하여진 입력파워를 바탕으로 파워흐름해석을 통한 에너지밀도 값을 보여주고 있다. Fig. 14 는 모달해석을 통한 에너지밀도 값을 보여주고 있다. 결과를 비교해 모달해석의 경우 공간적으로 약간의 값의 차이는 있지만 대체로 균일한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 15 를 보면 파워흐름해석에서 구한 에너지밀도 값과 0.5~1dB 정도 차이나는 것을 알 수 있다. 이는 파워흐름해석에 적용한 고속 푸리에변환을 이용한 입력파워 추정과 그

로 인한 에너지밀도의 값이 타당하다는 것을 보여준다.

8. 결론

본 논문에서는 난류 유동에 의한 진동파워흐름해석을 위해 분포 유체력에 기인한 입력파워를 계산하고 다양한 유체모델을 사용한 입력파워 추정이 타당한가를 알아 보았다. 또한 입력파워 추정시 고속 푸리에변환을 사용하여 계산의 효율성을 증가시켰다. 수행된 연구결과는 모달해석의 임의가진에 의한 에너지밀도와 파워흐름해석에서의 에너지밀도를 비교하여 검증하였다.

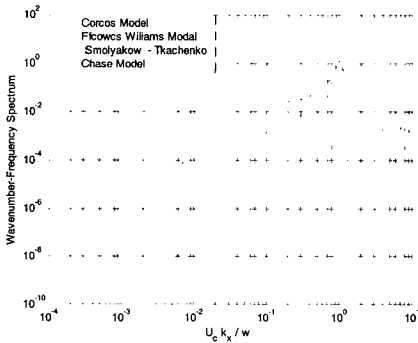


Fig. 1 각유체모델의 k_x 에 따른 파수-주파수값의 변화. —, Corcos; ···, Ffowcs Williams; - -, Smoly' akow-Tkachenko; - · -, Chase.

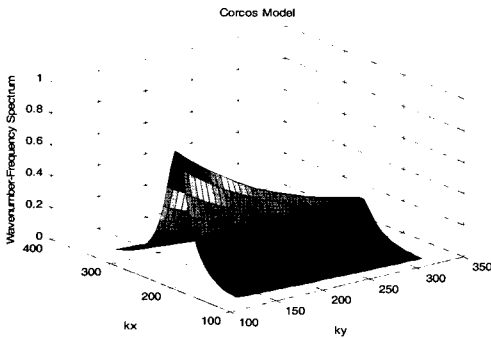


Fig. 2 Corcos 모델의 k_x, k_y 에 따른 파수-주파수값

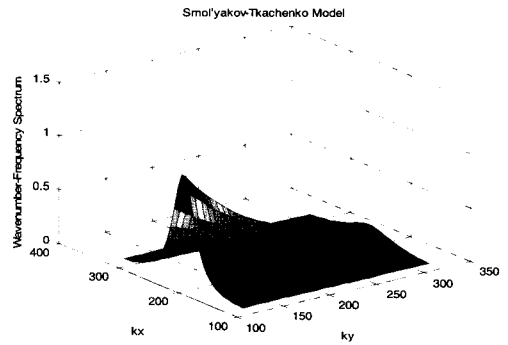


Fig. 3 Smoly' akow-Tkachenko 모델의 k_x, k_y 에 따른 파수-주파수값

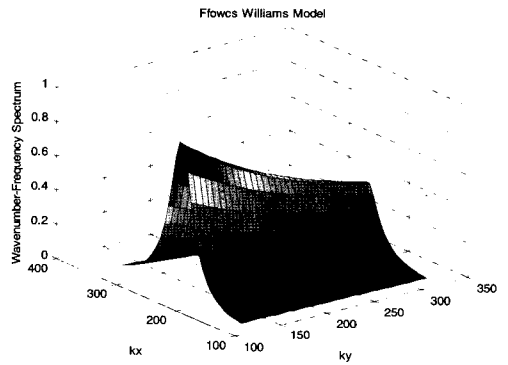


Fig. 4 Ffowcs Williams 모델의 k_x, k_y 에 따른 파수-주파수값

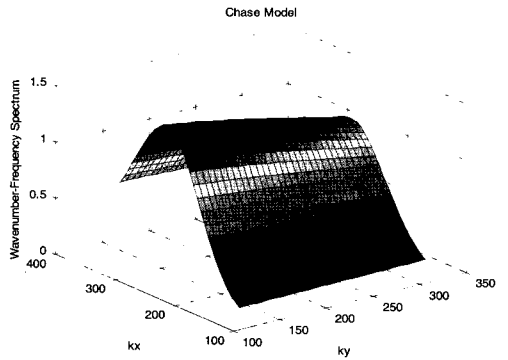


Fig. 5 Chase 모델의 k_x, k_y 에 따른 파수-주파수값

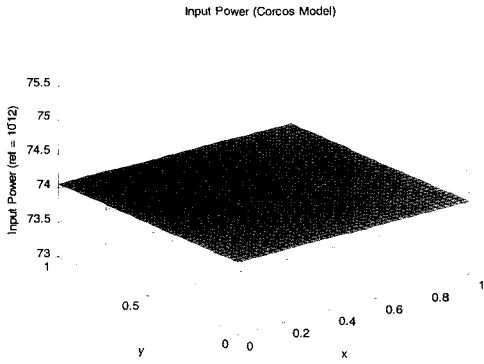


Fig. 6 Corcos 모델을 이용한 입력파워값

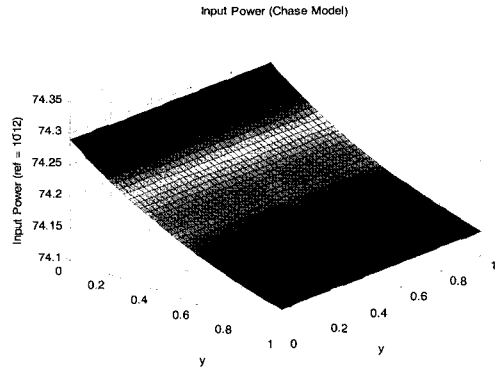


Fig. 9 Chase 모델을 이용한 입력파워값

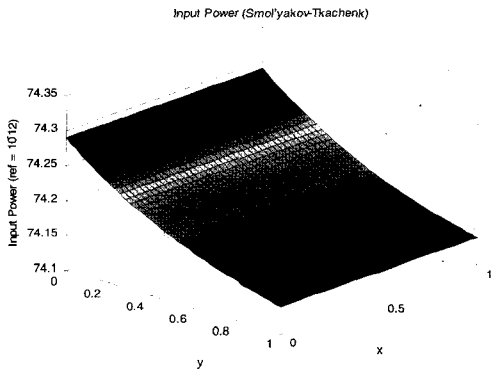


Fig. 7 Smoly' akov-Tkachenko 모델을 이용한 입력 파워값

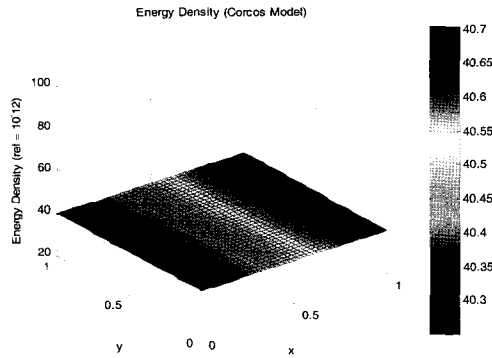


Fig. 10. Corcos 모델을 이용한 파워흐름 에너지밀도

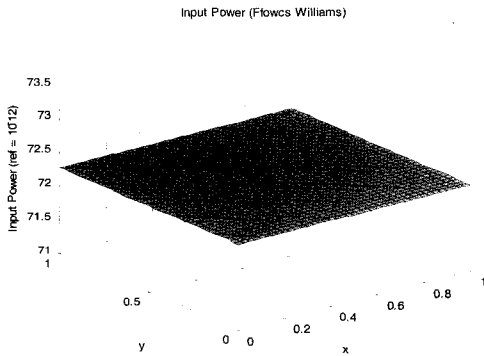


Fig. 8 Ffowcs Williams 모델을 이용한 입력파워값

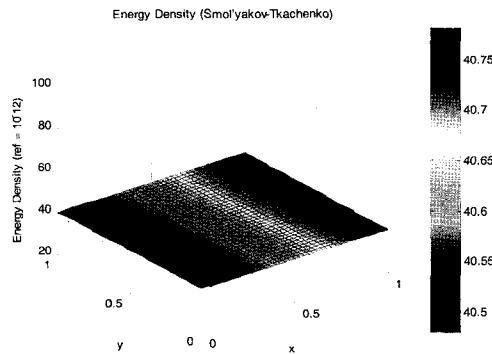


Fig. 11. Smoly' akov-Tkachenko 모델을 이용한 파워흐름 에너지밀도

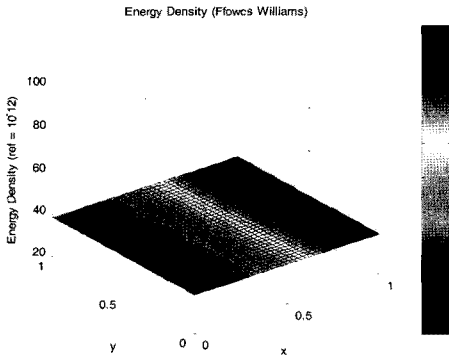


Fig. 12 Ffowcs Williams 모델을 이용한 파워흐름 에너지밀도

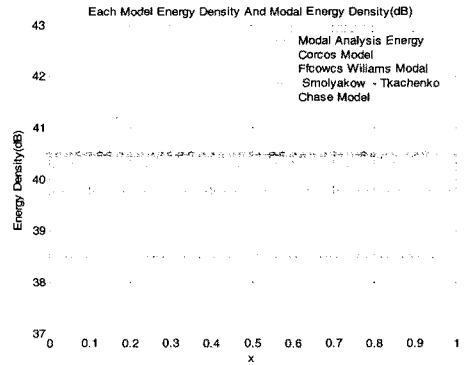


Fig. 15 각 유체모델을 이용한 파워흐름 에너지밀도와 모달에너지밀도 비교

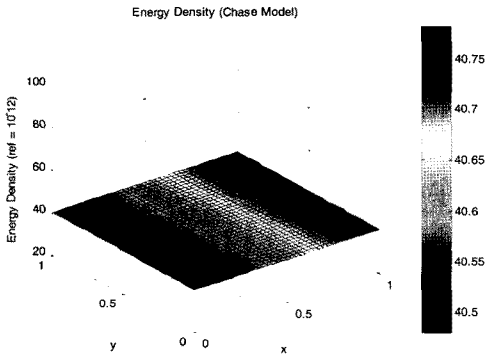


Fig. 13 Chase 모델을 이용한 파워흐름 에너지밀도

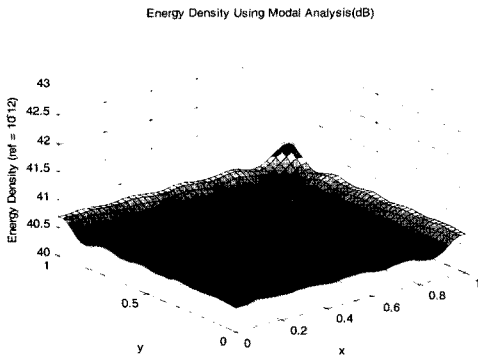


Fig. 14 모달해석을 이용한 에너지밀도

참 고 문 헌

- 서성훈, 2005, “ 다차원 구조부재 연성구조물의 중고주파 진동해석을 위한 파워흐름유한요소법 개발”, 공학박사학위논문, 서울대학교
- 김동진, 2005, “ 파워흐름해석을 위한 분포가진 및 연결부 가진의 입력파워 추정 연구”, 공학석사학위논문, 서울대학교
- F.HAN, L.G.MONGEAU AND R.J.BERNHARD, 1998, “ Energy flow analysis of beams and plates for random distributed loading”, Journal of fluids and structures, 12, 315-333
- F.HAN, R.J.BERNHARD AND L.G.MONGEAU, 1999, “ Prediction of flow-induced structural vibration and sound radiation using energy flow analysis”, Journal of sound and vibration, 227, 685-709
- W.R.GRAHAM, 1997, “ A comparison of models for the wavenumber-frequency spectrum of turbulent boundary layer pressure”, Journal of sound and vibration, 206, 541-565



< 임 구 섭 >



< 홍 소 연 >



< 최 영 달 >



< 정 태 석 >