한국음향학회지 제31권 제6호 pp. 391~398 (2012)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.31, No.6 (2012)
http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2012.31.6.391

복합 CAA 방법과 FRPM 기법을 이용한 냉장고 얼음제조용 원심팬의 광대역 소음 예측

Broadband Noise Prediction of the Ice-maker Centrifugal Fan in a Refrigerator Using Hybrid CAA Method and FRPM Technique

허승 · 김대환 · 정철웅

(Seung Heo, Daehwan Kim, and Cheolung Cheong)

부산대학교 기계공학부

(접수일자: 2012년 5월 8일; 채택일자: 2012년 6월 28일)

초 록: 본 연구에서는 기존의 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) 방정식을 이용하는 복합 CAA(Computational AeroAcoustics) 방법에 광대역 소음원 생성을 위한 FRPM(Fast Random Particle Mesh) 기법을 적용하여 원심팬 광대역 소음 예측을 수행하였다. 먼저, RANS 방정식을 이용하여 원심팬 주위의 유동장을 예측하여 주요한 소음원 영역을 추론하고, 추론된 소음원 영역에 FRPM 기법을 적용하여 통계적 특성을 만족하는 난류를 재생하였다. RANS 방정식으로부터 해석된 유동장과 FRPM 기법으로부터 재생된 유동장을 이용하여 합성한 유동장에 음향상사법(Acoustic Analogy)을 적용하여 원심팬의 소음원을 생성하였다. 생성된 원심팬의 소음원을 경계요소법(Boundary Element Method)으로 구현된 선형전파모델에 적용하여 원심팬의 광대역 소음을 예측하였다. 원심팬에 대한 소음 측정값과의 비교를 통하여 제안된 기법이 원심팬의 순음 소음 및 광대역 소음 예측에 효과적임을 확인하였다.
핵심용어: 원심팬, 광대역 소음, 복합 CAA 방법, FRPM 기법
투고분야: 소음 및 공력음향 분야(10.7)

ABSTRACT: In this paper, prediction of centrifugal fan was conducted through combination the hybrid CAA method which was used to predict the fan noise with the FRPM technique which was used to generate the broadband noise source. Firstly, flow field surround the centrifugal fan was computed using the RANS equations and noise source region was deducted from the computed flow field. Then the FRPM technique was applied to the source region for generation of turbulence which satisfies the stochastic features. The noise source of the centrifugal fan was modeled by applying the acoustic analogy to the synthesized flow field from the computed and generated flow fields. Finally, the broadband noise of the centrifugal fan was predicted through combination the modeled noise source with the linear propagation which was realized using the boundary element method. It was confirmed that the proposed technique is efficient to predict the tonal and broadband noises of centrifugal fan through comparison with the measured data.
Key words: Centrifugal fan, Broadband noise, hybrid CAA method, FRPM technique
ASK subject classification: Noise and Aeroacoustics (10.7)

I. 서 론

소음에 대한 사람들의 인식이 증가하면서 생활환경 소음이 삶의 질을 평가하는 주요한 요소 중 하나로 인식되고 있다. 이와 더불어, 가전제품의 소음은 제품구입을 결정하는 주요한 요소 중 하나로 자리잡고 있다. 이러한 추세에 맞추어 가전제품 제조업체에서는 가전제품의 소음 예측 기법 개발 및 저소음 기술 개발이 제품개발과정에서 주요한 역할을 하고 있다. 가전제품 중 냉장고는 그 특성상 생활과 밀접한 공간에서 24시간 작동되므로, 소비자들은 다른

"이 논문은 2012년도 한국음향학회 춘계학술대회에 발표했던 논문입니다."

***Corresponding author:** 정철웅(ccheong@pusan.ac.kr)
609-735 부산광역시 금정구 장전동 부산대학교 특공관 10418호
(전화: 051-510-3211)

가전제품의 소음에 비해 냉장고 소음에 민감하게 반응한다. 따라서, 냉장고 산업에서는 냉장고의 주요한 소음원을 파악하고 저감하는 기술 개발이 주요한 기술로 대두되고 있다.

냉장고의 주요 소음원은 압축기와 팬으로 알려져 있다. 냉장고에서 팬은 응축기에서 생성된 차가운 공기를 냉장고 전체에 순환시키고, 기계실 내부의 압축기와 응축기의 온도를 저감하고, 냉장고 외부 저장공간에 얼음을 생성하기 위한 차가운 공기를 공급하는 등 여러 가지 목적으로 사용된다. 이러한 팬의 회전에 의한 유동소음의 저감을 위해서는 발생메커니즘을 밝힐 수 있는 효율적인 소음예측기술 개발이 선행되어야 한다. 팬 유동소음을 예측하기 위해 전산유체역학을 기반으로 한 복합 CAA 방법은 현재 산업현장에서 널리 사용되고 있다. Lee 등[1]은 전산유체역학의 RANS 방정식을 기반으로 한 복합 CAA 방법을 개발하여 냉장고 얼음제조용 원심팬의 내부 순음 소음을 효과적으로 예측하였다. Heo 등[2]은 Lee 등[1]에 의해 개발된 복합 CAA 방법을 이용하여 냉장고용 얼음제조용 원심팬의 내부 순음 소음을 예측하였고 이를 이용하여 저소음 원심팬을 개발하였다. RANS 방정식을 기반으로 한 복합 CAA 방법은 효율적으로 팬의 순음 소음을 예측할 수 있지만, 광대역 소음을 예측에는 한계가 있다. 팬의 광대역 소음을 예측하기 위해서는 광대역 소음원으로 고려되는 유동장 내의 난류의 움직임에 대한 정확한 예측이 필요하나, 시간에 대한 평균과정을 포함하는 RANS 방정식으로부터 예측된 유동장은 유동장내의 난류의 무작위한(Random) 움직임을 묘사하는데 한계가 있다. 전산유체역학의 수치기법 중 LES(Large Eddy Simulation)나 DNS(Direct Numerical Simulation)은 유동장내의 난류의 무작위한 움직임에 대한 예측이 가능하나, 엄청난 수치적 비용이 수반되므로 산업현장에서 적용하기 어렵다. Heo 등[3]은 Fourier 모드 중첩에 기초한 난류합성방법을 사용하여 냉장고 얼음제조용 원심팬의 내부 광대역 소음을 효율적으로 예측하기 위한 방법론을 제시하였다. Fourier 모드 중첩에 기초한 방법은 균질(homogeneous)하고 등방성의(isotropic) 자유 난류 유동장에만 적용할 수 있다는 가정 때문에 적용영역이 한정되어있다. 이번 논문에서는 Heo 등[3]에 의해 제시한 효율적인 광대역 소음 해석방법을 확장하여 Fourier 모드 중첩법 대신에 Ewert 등[4]에 의해 개발된 FRPM 기법을 이용하여 원심팬의 내부 광대역 소음을 효율적으로 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. FRPM 기법은 Fourier 모드 중첩에 기초한 난류합성방법에 비해 수치적 비용이 적다는 장점과 RANS 방정식으로부터 얻은 유동장의 지역적 정보로부터 난류를 재생하므로 비균일한(non-uniform) 평균 유동의 유동장에도 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 원심팬의 내부 광대역 소음을 예측하기 위해 전산유체역학의 RANS 방정식을 이용하여 원심팬 주위의 유동장을 해석하고, 해석된 유동장에 FRPM 기법을 적용하여 광대역 소음원으로 인식되는 난류를 유동장내의 통계적 특성을 만족하도록 재생하였다. RANS 방정식으로부터 얻은 유동장과 FRPM 기법으로부터 얻은 유동장으로부터 합성된 유동장에 음향상사법을 적용하여 원심팬의 소음원을 생성하고 이를 선형음향전파모델과 결합하여 원심팬의 덕트를 통한 방사 소음을 예측하였다. 예측된 원심팬의 소음 스펙트럼을 측정값과 비교하여 그 유효성을 증명하였다. 이번 연구의 대상인 냉장고 얼음제조용 원심팬은 선행연구[2,3]에서 다룬 원심팬과 동일한 팬으로서 증발기 주위의 찬 공기를 냉장고의 외부 저장공간에 공급하기 위해 사용된다.

II. 복합 CAA 방법

선행연구[1,2]에서 적용한 복합 CAA방법은 간략하게 3단계로 나누어 기술할 수 있는데, 먼저 전산유체역학의 RANS 방정식을 이용하여 회전하는 팬 주위의 유동장을 예측하고 예측한 유동장에 음향상사법을 적용하여 팬의 소음원을 모델링한다. 마지막으로, 모델링한 소음원과 선형전파모델을 결합하여 덕트를 통한 방사 소음을 예측한다. 다음 각 절에서 각각의 단계별 방법에 대해서 간략히 기술하였다. 자세한 사항은 선행연구[1,2]를 참고할 수 있다.

2.1 RANS 방정식을 이용한 유동장 해석

회전하는 원심팬 주위의 유동장을 예측하기 위해

상용 전산유체역학 프로그램인 STAR-CD™을 사용하여 RANS 방정식을 해석하였다. 변수를 평균값과 변동값으로 분리한 후, 시간평균과정(앙상블평균과정)을 수행한 RANS 방정식은 식(1), (2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}\\&+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right]\\&+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)\end{aligned} \tag{2}$$

식(2)를 해석하기 위해서 레이놀즈 응력$\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)$에 대한 모델링이 필요하다. 이를 위해 standard K-ε 난류모델을 이용하였다. K와 ε에 대한 수송방정식을 구현하기 위해 다음과 같은 상수를 사용하였다.

$$\begin{aligned}&C_{1\epsilon}=1.44,\ C_{2\epsilon}=1.92,\ C_{\mu}=0.09,\\&\sigma_k=1.0,\ \sigma_{\epsilon}=1.219\end{aligned} \tag{3}$$

팬의 회전을 모델링하기 위해 Sliding mesh 기법을 이용하였다. 이를 위해 원심팬 시스템을 포함하는 유동장은 원심팬을 포함하는 회전격자와 회전격자와 원심팬 시스템을 포함하는 정지격자로 나누어 격자화 되었다(그림 1 참조). 효율적인 격자생성을 위해 사면체격자를 이용하였고 생성된 격자를 이용하여 RANS 방정식을 공간 이산화하였다. RANS 방정식은 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 이용하여 해석하였다. 유동장 해석은 원심팬 주위의 유동장이 동일한 형태를 반복적으로 나타낼 때까지 수행하였다.

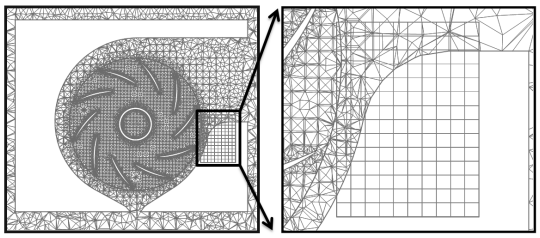

그림 1. 선형 보간 적용을 위한 삽입 격자
Fig. 1. Inserted mesh for linear interpolation.

2.2 음향상사법을 이용한 소음원 모델링

내부 비정상 유동에 의해 생성되는 소음은 사극자 음원과 이극자 음원을 이용하여 모델링 할 수 있다.[5] 내부 비정상 유동장으로부터 유도된 음원과 그 음원의 전파에 관한 지배 방정식은 Lighthill의 음향상사법과 Curle의 확장된 음향상사법을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.[6,7]

$$\begin{aligned}&\left\{\nabla^2-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial \tau^2}\right\}p(y_k,t)\\&=\left(\frac{\partial}{\partial y_i}\right)[f_i(y_k,t)]-\left(\frac{\partial}{\partial y_i}\right)\left(\frac{\partial T_{ij}(y_k,t)}{\partial y_j}\right)\end{aligned} \tag{4}$$

여기서, f_i는 단위 부피에 작용하는 힘을 의미하며, T_{ij}는 Lighthill 응력 텐서를 의미한다. 팬 소음은 이극자 음원으로 고려되는 회전하는 팬 날개깃 위의 압력변동에 기인한 소음이 지배적인 것으로 알려져 있다. 이는 본 연구에서 선형전파모델을 구현하기 위해 적용되는 경계요소법의 경계조건 적용을 통해 대체할 수 있다. 또한 움직이는 유동장에서 점성응력과 엔트로피변동은 무시할 수 있다는 가정으로부터 Lighthill 응력 텐서를 Cheong 등[8]에 의해 사용된 근사화된 Lighthill 응력 텐서로 근사화할 수 있다. 그러므로, 내부 비정상 유동장내의 팬 소음원은 근사화된 Lighthill 응력 텐서를 이용하여 식(5)와 같이 사극자 음원으로 모델링할 수 있다.

$$S_{ALST}=\frac{\partial^2 \rho u_i u_j}{\partial x_i x_j} \tag{5}$$

회전하는 원심팬 주위의 유동장을 예측하기 위해 이용된 사면체격자를 이용하여 음원을 모델링하기에는 수치적 어려움이 있다. 따라서, 선행연구[1-3]에서 제시하는 주요한 소음원 영역인 원심팬 덕트의 Volute tongue 영역에 그림 1과 같이 모서리의 길이는 0.003 m인 육면체격자를 삽입하고 선형 보간법을 이용하여 유동장 정보를 계산하였다. 육면체격자내의 유동장 정보를 이용하여 사극자 음원을 모델링하였다.

2.3 선형전파모델을 이용한 소음 예측

원심팬 내부 유동소음을 예측하기 위해 음향상사

법의 적용을 통하여 모델링 한 소음원을 선형전파모델에 적용하였다. 원심팬 덕트의 벽면과 음원 사이의 상호작용과 음원들 사이의 상호작용을 고려할 수 있는 선형전파모델을 구현하여 위해 그린함수를 이용하였다. 그린함수의 수치적 해석을 위해 경계요소법을 이용하였고, 경계요소법은 상용 프로그램인 SYSNOISE™을 이용하여 구현하였다. 복합 CAA 방법을 이용하여 예측한 소음을 냉장고 팬 그릴의 원심팬 시스템을 이용하여 측정한 값과 비교하여 그림 2에 나타내었다. 측정값을 위한 측정 장비, 측정 위치, 측정 방법 등은 선행연구[2,3]에서 자세히 기술하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 첫번째와 두번째 BPF에서 예측값과 측정값이 비교적 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나, 1050 Hz 이상의 고주파수 영역에서는 예측값과 측정값 사이에 큰 차이가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 복합 CAA 방법의 적용을 위해 이용한 전산유체역학의 RANS 방정식으로 해석할 수 있는 유동장 분해능의 한계에서 비롯된 것으로 사료된다. RANS 방정식은 유동장의 시간평균과정을 통해 저주파수의 특성을 가지는 결정론적인(deterministic) 난류의 움직임을 묘사할 수 있으나, 고주파수의 특성을 지니는 무작위한 난류의 움직임을 묘사하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 고주파수 영역의 소음원으로 인식되는 작은 크기의 무작위한 움직임을 가지는 난류를 재생할 수 있는 Ewert[4] 등에 의해 제안된 FRPM 기법을 도입하였다.

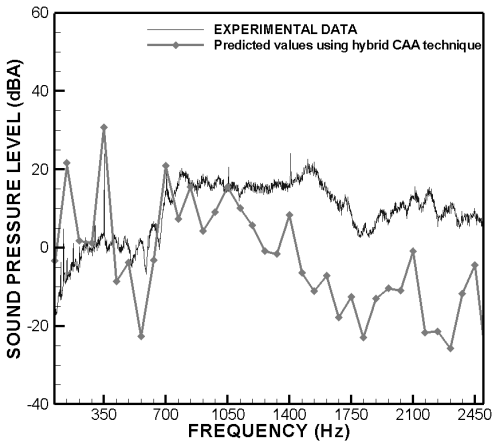

그림 2. 복합 CAA 방법을 이용한 예측값과 측정값의 비교
Fig. 2. Comparison of SPL spectrum predicted using the hybrid CAA method with the measurement.

III. 난류합성모델

광대역 소음원으로 고려되는 난류를 재생하기 위해 RANS 방정식 해석을 통해 예측한 유동장에 FRPM 기법을 적용하여 난류 유동장의 통계적 특성을 만족하는 난류를 재생하였다.[4]

3.1 통계적 소음원 모델링

통계적 소음원 모델링은 음향상사법과 밀접한 관계가 있으며, 난류 유동장에 의한 소음은 소음원과 음파방정식의 관계를 이용하여 나타낼 수 있다.

음압 관계식은 원거리에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(X,t)=\frac{1}{2\pi}\int_{V_s}\iint_{-\infty}^{\infty}\hat{G}(X_1,X,\omega)q_s(X_1,t_1)\exp[-i\omega(t-t_1)]dt_1d\omega dX_1 \quad (6)$$

여기서 $\hat{G}$는 음파 전달함수와 관련된 그린함수를 의미한다. q_s는 소음원을 의미하다. 원거리 스펙트럼은 식(6)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{S}(X,\omega)=\iint_{V_s}\int_{-\infty}^{\infty}\widehat{G^*}(X_1,X,\omega)\hat{G}(X_1+r,\omega)\langle q_s(X_1,t_1)q_s(X_1+r,t_1+\tau)\rangle\exp[i\omega\tau]d\tau dX_1dr \quad (7)$$

여기서 괄호<…>는 앙상블평균을 의미한다. 식(7)으로부터 원거리 스펙트럼은 식(8)과 같이 소음원 영역내의 두 점 사이의 상호 상관함수에 의해 정의될 수 있다.

$$R(X_1,r,\tau)=\langle q_s(X_1,t_1)q_s(X_1+r,t_1+\tau)\rangle \quad (8)$$

3.2 FPRM기법의 이론

FRPM(Fast Random Particle Mesh) 기법은 디지털 여과함수(Digital filter kernel)를 이용하여 유동장내의 난류의 통계적 특성을 만족하도록 난류를 재생하기 위한 통계학적 모델이다. 난류의 변동성분은 공간상의 수치적 백색소음(white noise)와 여과함수(filter kernel)의 합성곱(convolution)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_i(X,t)=\int_{V_S^n}\hat{A}G(X-X')\,U_i(X',t)d^nX' \tag{9}$$

여기서 G는 공간상의 여과함수를 나타내고, U_i는 공간상의 수치적 백색소음을 나타낸다. $\hat{A}$는 난류 변동성분의 크기를 조절하기 위한 크기 함수를 나타낸다. 난류 유동장의 통계적 특성을 만족시키기 위해, 공간상의 수치적 백색소음은 다음과 같은 특성을 만족해야 한다.

$$\langle U_i(X,t)\rangle=0 \tag{10}$$

$$\langle U_i(X,t)\,U_j(X+r,t)\rangle=\rho_0(X)^{-1}\delta_{ij}\delta(r) \tag{11}$$

$$\frac{D_0}{D_t}U_i=\left(\frac{\partial}{\partial t}+u_0\cdot\nabla\right)U_i=0 \tag{12}$$

여기서, u_0은 평균유동 속도를 의미한다. 그리고 공간상의 여과함수는 다음과 같이 가우시안(Gaussian) 함수의 형태로 가정한다.

$$G(X-X')=\exp\left(-\frac{\pi}{2}\frac{|X-X'|^2}{l_s^2}\right) \tag{13}$$

$$l_s=C_l\frac{K^{\frac{3}{2}}}{\epsilon} \tag{14}$$

여기서, K는 난류 운동에너지를 의미하고 ε은 난류의 소산을 의미한다. C_l은 길이규모 상수를 의미하며 본 연구에서는 0.651을 적용하였다.

마지막으로, 두 점 사이의 난류 변동성분의 공분산으로부터 수칙적 백색소음의 특성과 여과함수 그리고 비압축성 유동의 가정을 적용하면 다음과 같이 난류 변동성분의 크기 함수를 정의할 수 있다.

$$\hat{A}=\sqrt{\frac{\rho_0\hat{R}}{l_s^n}} \tag{15}$$

$$\hat{R}=\frac{2l_s^2K}{3\pi} \tag{16}$$

3.3 FPRM기법의 육면체격자로의 이산화

소음원영역을 N개의 겹치지 않는 제어체적으로 나누어 난류 변동성분을 이산화하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_i(X,t)\cong\hat{A}(X)\sum_{k=1}^{N}G\left(X-X_k^c(t)\right)\frac{r_{ik}(t)}{\rho_0\left(X_k^c\right)} \tag{17}$$

여기서 X_k^c는 제어체적의 질량 중심의 위치를 나타내고, r_{ik}는 각각의 제어체적에 대한 수치적 백색소음의 적분값을 나타낸다. 식(10) - (12)의 수치적 백색소음의 특성으로부터 r_{ik}은 다음과 같은 특성을 가진다.

$$\langle r_{ik}(t)\rangle=0 \tag{18}$$

$$\langle r_{ik}(t)r_{jl}(t)\rangle=\delta_{ij}\delta_{kl}\delta m_k \tag{19}$$

여기서, δm_k는 제어체적의 질량을 의미한다. 수치적 백색소음의 시간에 대한 특성은 복합 CAA 방법의 적용을 위해 해석한 비정상 유동장의 시간에 대한 특성으로 대체할 수 있으므로, 본 연구에서는 제어제척으로 적분한 수치적 백색소음의 시간에 대한 특성은 고려하지 않았다.

수치적 백색소음과 여과함수의 합성곱을 이용해 난류 변동성분을 재생하기 위해서는 제어체적 내에 위치한 수치적 백색소음을 여과하여 격자점에 위치시켜야 하며, 격자점에 위치한 수치적 백색소음을 여과하여 난류 유동장의 통계적 특성을 만족시켜야 한다. 격자점의 수치적 백색소음을 여과하여 난류 유동장의 통계적 특성을 만족시키기 위해서 여과함수로 식(13)에 나타나 있는 가우시안 함수를 적용하였고, 제어체적내의 수치적 백색소음을 여과하여 격자점에 위치시키기 위해 여과함수로 다음과 같은 함수를 적용하였다.

$$G(X,X_k^c)=\frac{1}{\triangle x\triangle y\triangle z}g\left(\frac{x-x_k^c}{\triangle x}\right)g\left(\frac{y-y_k^c}{\triangle y}\right)g\left(\frac{z-z_k^c}{\triangle z}\right) \tag{20}$$

$$g(\xi)=\begin{cases}1-|\xi| & \text{for}|\xi|\le 1\\ 0 & \text{for}|\xi|>1\end{cases} \tag{21}$$

두 개의 여과함수, 제어체적으로 적분한 수치적 백색소음, 그리고 크기 함수를 적용하여 난류 변동성분은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_i(X_{lmn},t)=\hat{A}(X_{lmn})\sum_{l'}\sum_{m'}\sum_{n'}G_1(X_{l'm'n'}) \sum_{k=1}^{N} g\left(\frac{x_{l'm'n'}-x_k^c}{\triangle x}\right)g\left(\frac{y_{l'm'n'}-y_k^c}{\triangle y}\right)g\left(\frac{z_{l'm'n'}-z_k^c}{\triangle z}\right) \quad (22)$$

3.4 FPRM기법의 수치적 적용

RANS 방정식을 해석하여 얻은 유동장으로부터 선형 보간법을 이용하여 추출한 Volute tongue 주위의 주요한 소음원 영역의 임의의 시간에서의 난류 운동에너지와 난류의 소산을 그림 3에 나타내었다. 난류의 운동에너지와 소산을 이용하여 식(14)의 난류 길이규모와 식(15)의 난류 변동성분의 크기함수를 계산하여 그림 4에 나타내었다. 소음원 영역에 식(18), (19)의 특성을 만족하도록 수치적 백색소음을 생성하고 제어체적내의 수치적 백색소음을 식(20), (21)의 여과함수를 이용하여 격자점으로 여과한 수치적 백색소음과 격자점으로 여과된 수치적 백색소음을 식(13)의 가우시안 함수를 여과함수로 적용하여 난류 유동장의 통계학적 특성을 만족하는 난류의 변동성분을 그림 5에 나타내었다. 그림 4(b)에 제시된 난류 변동성분의 크기함수와 그림 5(b)에 제시된 난류의 변동성분을 이용하여 재생한 난류 유동장과 RANS 방정식을 해석하여 예측한 유동장을 합성하여 얻은 유동장을 RANS 방정식 해석하여 예측된 유동장과 함께 그림 6에 나타내었다. FRPM 기법을 통해 재생된 난류 유동장과 RANS 방정식 해석하여 얻은 유동장을 합성한 유동장이 기존의 RANS 방정식을 해석하여 얻은 유동장보다 작은 규모의 난류들이 소음원 영역의 유동장내에 고르게 분포하고 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 이러한 작은 규모의 난류들은 원심팬 내부 광대역 소음원으로 작용한다.

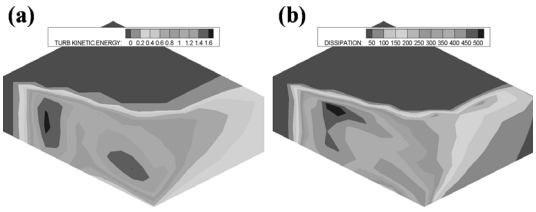

그림 3. RANS 방정식으로부터 얻은 유동장 정보: (a) 난류 운동 에너지, (b) 난류 소산

Fig. 3. Flow field information obtained from RANS equations: (a)Turbulence kinetic energy and (b) Turbulence dissipation.

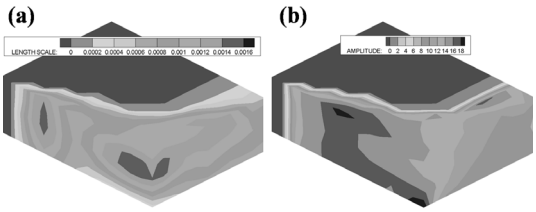

그림 4. 계산한 유동장 정보: (a) 난류 적분 길이규모, (b) 가우시안 여과함수의 크기 함수

Fig. 4. Computed flow field information: (a)Turbulence integral length scale and (b) Amplitude function of Gaussian filter kernel.

IV. 원심팬 내부 소음 예측

본 연구에서 제안된 팬 내부 소음 예측 기법의 효율성을 검증하기 위해, FRPM 기법을 통해 합성된 유동장에 복합 CAA 방법을 적용하여 예측한 원심팬 내부 광대역 소음 결과를 기존의 복합 CAA 방법으로 예측한 결과, Fouier 모드 중첩법을 통해 합성된 유동장에 복합 CAA 방법을 적용하여 예측한 결과 및 원심팬 시스템을 이용한 측정 결과와 비교하여 그림 7에 나타내었다. FRPM 기법을 통해 합성된 유동장에 복합 CAA 방법을 적용하여 예측한 결과는 복합 CAA 방법으로 예측한 결과와는 달리, 700 Hz이상의 고주파수 영역에서 측정값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이는 RANS 방정식을 통해 얻은 유동장에 FRPM 기법의 적용하여 재생한 유동장내의 작은 규모의 난류들이 난류 유동장의 통계적 특성을 만족하여 소음에 기인하는 난류의 특성을 잘 묘사하고 있기 때문으로 사료된다. Fourier 모드 중첩법을 RANS 방정식을 통해 얻은 유동장에 적용하여 예측한 결과는 고주파수 영역에서 측정값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있지만, BPF에서 측정값과 차이가 발생함을 확인할 수 있다. FRPM 기법을 이용한 예측결과는 Fourier 모드 중첩법을 이용한 예측결과와 달리 고주파수 영역에서의 광대역 소음뿐 아니라

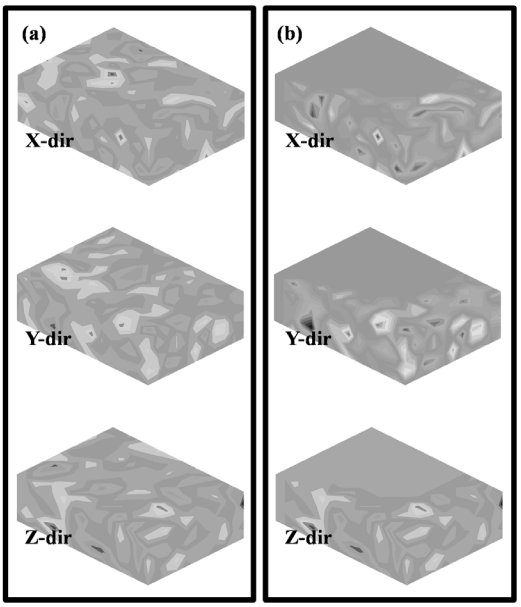

그림 5. 디지털 여과 함수를 통한 수치적 백색소음 윤곽선 (a) 식(20)에 의한 수치적 백색소음, (b) 식(13)에 의한 수치적 백색소음

Fig. 5. Contour of numerical white noise through digital filter kernel: (a) Numerical white noise by Eq.(20) and (b) Numerical white noise by Eq.(13).

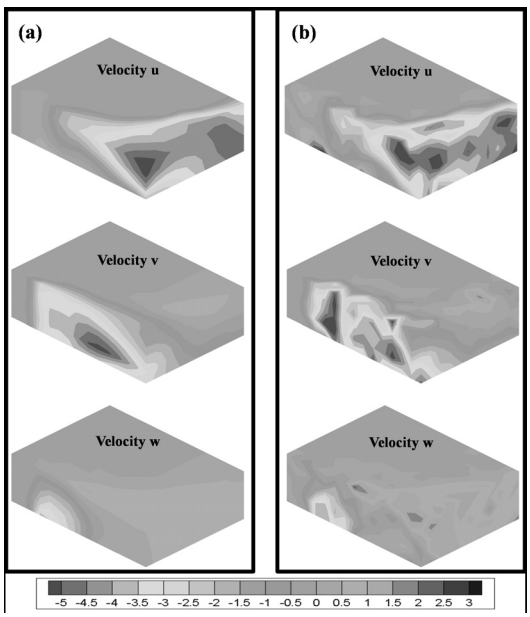

그림 6. 속도 유동장 비교: (a) RANS 방정식으로부터 얻은 속도 유동장, (b) FRPM 기법 적용으로 합성된 속도 유동장

Fig. 6. Comparison of velocity fields: (a)Velocity field obtained from RANS equations and (b)Velocity field generated by applying FRPM technique.

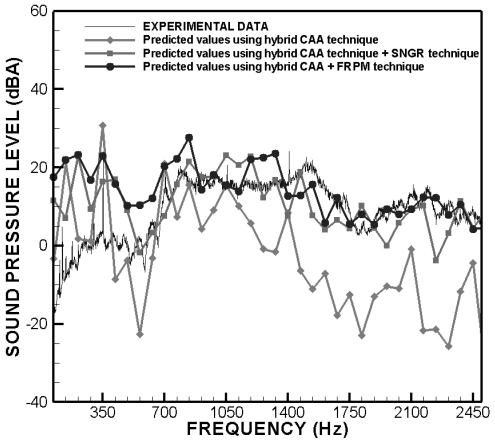

그림 7. 예측값과 측정값의 비교

Fig. 7. Comparison of predicted SPL spectrum with the measured data.

BPF에서의 순음 소음도 측정값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이는 Fourier 모드 중첩법을 이용하는 방법은 전단 유동이 없는 자유 유동에 적합한 방법으로 합성된 유동장의 자가 소음만을 소음원으로 고려하는 반면, FRPM 기법을 이용하는 방법은 RANS 방정식 해석을 통해 얻은 유동장의 지역적 정보를 활용하여 자유 유동뿐 아니라 전단 유동에도 적합한 방법으로 합성된 유동장의 전단 소음과 자가 소음을 모두 고려하기 때문이다. 하지만, 원심팬의 광대역 소음을 예측하기 위해 제시된 예측 방법들은 700 Hz 이하의 주파수 영역에서 측정값과 비교하여 과예측을 나타내다. 이는 계산모델의 경우 원심팬 시스템만 이용하였지만, 소음 측정을 위한 실험의 경우 원심팬 시스템과 축류팬 시스템을 포함하는 냉장고 팬 그릴을 이용하였기 때문인 것으로 사료된다. 이는 추후 좀 더 정밀한 계산을 통하여 확인해야 할 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서는 원심팬의 내부 광대역 소음을 효율적으로 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 비정상 RANS 방정식을 해석하는 전산유체역학 방법을 이용하여 팬 주위의 유동장 정보를 계산하고 평균유동장 정보를 입력값으로 하여 시공간상에서 무작위한 움직임의 난류를 재생하기 위한 방법으로 통계적 합

성 모델인 FRPM 기법을 적용하였고 마지막 단계로 내부 유동 환경에서 음향파의 전파를 고려할 수 있도록 모델링한 소음원을 가지고 경계요소법을 적용하였다. 제시한 방법을 실제 가정용 냉장고에 사용되는 원심팬에 대하여 적용하였고, 측정값과의 비교를 통하여 그 유효성을 증명하였다. 선행연구[3]에서 제시한 원심팬의 광대역 소음 해석방법에서는 고려할 수 없었던 평균유동의 효과를 본 연구에서 제시한 해석방법에서는 고려할 수 있기 때문에 순음 소음인 BPF 소음도 잘 예측함을 확인할 수 있었다. 또한 본 논문에서 사용한 난류합성모델은 Smirnov 등[9]에 의해 제안된 변환행렬을 적용하여 비등방성 난류장에도 적용할 수 있기 때문에 보다 다양한 산업현장의 유동기인 광대역 소음문제에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0004938). 또한 본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20114010203080).

참고문헌

1. S. Lee., S. Heo., C. Cheong., "Prediction and reduction of internal Blade-passing frequency noise of the centrifugal fan in a refrigerator," *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, no. 6, pp. 1129-1141, 2010.
2. S. Heo., C. Cheong, T.-H. Kim., "Development of low noise centrifugal fan a refrigerator using inclined S-shaped trailing edge," *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, no. 8, pp. 2076-2091, 2011.
3. 허승, 김대환, 정철웅, 김태훈, "통계적 난류합성 모델을 이용한 원심팬 내부 광대역 소음 예측", *한국소음진동공학회논문집*, 21권, 12호, pp. 1138-1145, 2011.
4. R. Ewert, J. Dierke, J. Siebert, A. Neifeld, A. Appel, M. Siefert, O. Kornow, "CAA broadband noise prediction for aeroacoustic design," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, no. 17, pp. 4139-4160, 2011.
5. J. Ryu, C. Cheong, S. Kim, S. Lee, "Computation of internal aerodynamic noise from a quick-opening throttle valve using frequency-domain acoustic analogy," *Applied Acoustics*, vol. 66, pp. 1278-1308, 2005.
6. M.J.Lighthill, "On sound generated aerodynamically," *I. general theory, Proc. Roy. Soc*. 211A, 1952.
7. N. Curle, "The influence of solid boundaries on aerodynamic sound," *Proc. Roy. Soc*. 231A, 1955.
8. C. Cheong, P. Joseph, Y. Park, S. Lee., "Computation of Aeolian tone from a circular cylinder using source models," *Applied Acoustics* vol. 69, pp. 110-126, 2008.
9. A. Smirnov, S.Shi, I.Celik, "Random flow generation technique for large eddy simulations and particle dynamic modeling," *Journal of Fluid Engineering*, vol. 123, no. 2, pp. 359-371, 2001.

저자 약력

▸ 허 승(Seung Heo)

2009년 2월: 부산대학교 학사 졸업
2011년 2월: 부산대학교 석사 졸업
2011년 3월 ~ 현재: 부산대학교 박사 재학

▸ 김 대 환(Daehwan Kim)

2007년 2월: 부산대학교 학사 졸업
2009년 2월: 부산대학교 석사 졸업
2009년 3월 ~ 현재: 부산대학교 박사 재학

▸ 정 철 웅(Cheolung Cheong)

1997년 2월: 서울대학교 학사 졸업
1999년 2월: 서울대학교 석사 졸업
2003년 2월: 서울대학교 박사 졸업
2006년 3월 ~ 2010년 3월: 부산대학교 조교수
2010년 4월 ~ 현재: 부산대학교 부교수