

# U-FRPM 기법을 이용한 원심팬 광대역소음의 효율적 예측

## Efficient Prediction of Broadband Noise of a Centrifugal Fan Using U-FRPM Technique

허 승, 정철웅<sup>†</sup>

(Seung Heo and Chulung Cheong<sup>†</sup>)

부산대학교 기계공학부

(접수일자: 2014년 8월 7일; 수정일자: 2014년 11월 17일; 채택일자: 2014년 12월 24일)

**초 록:** 유동광대역소음을 효율적으로 예측하기 위하여 통계적으로 난류를 재생하는 방법에 대한 많은 연구들이 최근에 진행되고 있다. 그 중에서도, FRPM(Fast Random Particle Mesh) 기법은 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식 해석을 통해 도출된 정상상태 유동장의 난류 운동에너지와 소산 값을 이용하여 특정한 통계적 특성을 가지는 난류를 재생하는 기법으로서 유동광대역소음 문제 등에 성공적인 적용 예에 대해서 보고되고 있다. 하지만 기존의 FRPM 방법은 축류팬과 같이 축 대칭 특성을 갖는 기계의 경우 정상상태의 유동장을 기초로 광대역소음을 예측하는 문제에는 적용할 수 있으나, 원심팬과 같이 볼루트 영역으로 인하여 축 대칭이 성립되지 않는 기계류의 유동광대역소음에는 적용할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 FRPM 기법을 확장하여, 원심팬에서 발생하는 광대역소음을 효율적으로 예측하기 위하여 비정상 RANS 방정식의 수치해와 연계하여 광대역소음원으로 고려되는 난류를 특정한 통계적 특성을 가지도록 재생할 수 있는 U-FRPM(Unsteady-FRPM) 기법을 제안하였다. 먼저 전산유체역학을 사용하여 RANS 방정식을 해석함으로써, 원심팬 주위의 비정상상태 유동장 정보를 도출하고, 음향상사법(Acoustic Analogy)을 기초로 도출된 유동소음원을 U-FRPM을 이용하여 모델링하였다. 모델링된 소음원은 경계요소법을 통해 구현되는 선형음향전파모델과 연계하여 수음점에서 광대역소음을 예측하는데 이용되었다. 예측된 결과와 실험결과의 비교를 통해 본 논문에서 제시한 방법의 유효성을 확인하였다.

**핵심어:** 원심팬, 유동소음, 팬광대역소음, U-FRPM기법

**ABSTRACT:** Recently, a lot of studies have been made about the methods used to generate turbulent velocity fields stochastically in order to effectively predict broadband flow noise. Among them, the FRPM (Fast Random Particle Mesh) method which generates turbulence with specific statistical properties using turbulence kinetic energy and dissipation obtained from the steady solution of the RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) equations has been successfully applied. However, the FRPM method cannot be applied to the flow noise problems involving intrinsic unsteady characteristics such as centrifugal fan. In this paper, to effectively predict the broadband noise generated by centrifugal fan, U-FRPM (unsteady FRPM) method is developed by extending the FRPM method to be combined with the unsteady numerical solutions of the unsteady RANS equations to generate the turbulence considered as broadband noise sources. Firstly, an unsteady flow field is obtained from the unsteady RANS equations through CFD (Computational Fluid Dynamics). Then, noise sources are generated using the U-FRPM method combined with acoustic analogy. Finally, the linear propagation model which is realized through BEM (Boundary Element Method) is combined with the generated sources to predict broadband noise at the listeners' position. The proposed technique is validated to compare its prediction result with the measured data.

**Keywords:** Centrifugal fan, Flow noise, Fan broadband noise, U-FRPM technique

**PACS numbers:** 43.50.Jh

<sup>†</sup>**Corresponding author:** Chulung Cheong (ccheong@pusan.ac.kr)  
School of Mechanical Engineering, Pusan National University,  
2, BusanDaehak-Ro, 63Beon-Gil, Geumjung-Gu, Busan 609-735, Republic of Korea  
(Tel: 82-51-510-3211, Fax: 82-51-514-7640)

## I. 서 론

팬 소음은 팬 날개깃 위의 정상 압력변동이 지배적인 영향을 미치는 순음소음과 유동 내의 난류와 팬 날개깃 사이의 상호작용에 의한 비정상압력변동이 지배적인 영향을 미치는 광대역소음으로 분류할 수 있다. 팬 주위의 유동장과 음장을 분리하여 유동소음을 해석하는 복합 전산공력음향(Hybrid Computational Aeroacoustic, 이하 H-CAA) 방법은 산업현장에서 팬 소음을 효율적으로 예측하기 위해 널리 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> H-CAA 방법에서 팬 주위의 유동장을 예측하기 위해 주로 사용되는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic, CFD)의 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식은 Reynolds 평균화 과정을 포함하고 있어 광대역소음원으로 고려되는 유동 내의 난류를 정확히 묘사하기에는 어려움이 있다. 이로 인하여 H-CAA 방법을 이용한 팬 소음 예측은 주로 팬의 순음소음에 국한되어 왔다. Lee *et al.*<sup>[2]</sup>은 전산유체역학의 RANS 방정식을 이용하여 팬 주위의 비정상상태 유동장을 예측하고, 예측된 비정상상태 유동장에 음향상사법(Acoustic Analogy)을 적용하여 소음원을 모델링, 모델링된 소음원을 선형음향전파모델에 적용하여 팬 소음을 예측하는 H-CAA 방법을 이용하여 냉장고 얼음제조용 원심팬의 내부 순음소음을 효율적으로 예측하였다. Heo *et al.*<sup>[3]</sup>은 Lee *et al.*<sup>[2]</sup>에 의해 제시된 H-CAA 방법을 이용하여 원심팬의 순음소음을 예측하고, 이를 저감하기 위한 기울어진 S-형상의 날개깃 뒷전을 가지는 원심팬을 개발하였다. 또한 Heo *et al.*<sup>[4]</sup>은 H-CAA 방법을 이용하여 원심팬의 주요한 소음원영역으로 고려되는 *volute tongue* 영역의 상대적 기여도를 분석하였다. 팬의 광대역소음을 예측하기 위해서는 유동장 내의 난류의 무작위(random) 움직임에 대한 묘사가 필수적이고, 전산유체역학의 수치기법 중 LES(Large Eddy Simulation)나 DNS(Direct Numerical Simulation)은 평균화 과정을 포함하고 있지 않기에 유동장 내의 난류의 움직임을 묘사할 수 있다. 하지만, 이러한 기법을 적용하기 위해서는 엄청난 수치적 비용이 수반되기에 산업현장에서 사용하기에는 어려움이 있다. 비교적 적은 수치적 비용으로 팬의 광대역소음을 예측

하기 위하여 최근 H-CAA 방법과 통계적 난류 합성법을 결합한 팬 광대역소음 예측 기법들이 개발되고 있다. Heo *et al.*<sup>[5]</sup>은 Fourier 모드 중첩에 기초한 통계적 난류 합성법<sup>[6,7]</sup>과 H-CAA 방법을 결합한 팬 광대역소음 예측 기법을 개발하였고, 이를 냉장고 얼음제조용 원심팬에 적용하여 효율적으로 원심팬의 내부 광대역소음을 예측하였다. 또한, Heo *et al.*<sup>[8]</sup>은 Ewert *et al.*<sup>[9]</sup>에 의해 개발된 FRPM(Fast Random Particle Mesh) 기법과 H-CAA 방법을 결합한 팬 광대역 예측 기법을 개발하였고, 이를 원심팬에 적용하여 예측된 광대역소음을 측정치와의 비교를 통해 그 유효성을 검증하였다.

본 연구에서는 원심팬의 광대역소음을 효율적으로 예측하기 위해 H-CAA 방법과 비정상상태 유동장에 FRPM 기법을 적용할 수 있는 U-FRPM 기법을 결합한 U-FRPM-H-CAA 방법을 제안한다. 통계적 난류를 합성하기 위해 사용되는 FRPM 기법은 RANS 방정식 해석을 통해 예측된 정상상태 유동장의 난류 운동에너지와 소산값을 이용하여 특정한 통계적 특성을 가지는 난류 유동장을 재생하고, 이를 정상상태 유동장의 평균유동속도에 따라 대류시킴으로써 비정상상태의 난류 유동장을 합성하는 기법이다. 하지만, 원심팬과 같은 회전기계의 경우, 회전하는 날개깃의 상대적인 위치에 따라 소음이 발생하는 위치 및 소음의 크기 등이 변하므로, 회전기계의 소음을 예측하기 위해서는 회전기계 주위의 비정상상태 유동장 정보가 필수적이다. 선형연구<sup>[8]</sup>에서는 원심팬의 광대역소음을 예측하기 위해 URANS(Unsteady RANS) 방정식에 의해 해석된 비정상상태 유동장에 FRPM 기법을 적용하기 위한 기본적인 방법을 시도하였다. URANS 방정식에 의해 해석된 유동장의 난류 운동에너지와 소산값을 이용하여 대류하지 않는 통계적 난류를 재생하고 URANS 방정식에 의해 해석된 비정상상태의 유동장과 합성하여 비정상상태 난류 유동장을 도출하였다. 본 연구에서는 이를 확장하여 URANS 방정식에 의해 해석된 유동장의 난류 운동에너지와 소산값을 이용하여 유동장을 따라 대류하는 통계적 난류를 재생하고, 이를 URANS 방정식에 의해 해석된 비정상상태의 유동장과 합성함으로써 비정상상태 난류 유동장을 도출한다. 이러한

U-FRPM 기법을 H-CAA 방법과 결합하여 원심팬의 순음소음 및 광대역소음을 예측하고 그 결과를 실험 값과 비교함으로써 그 유효성을 확인하였다.

## II. 대상 원심팬

본 연구에서 냉장고 얼음제조용 원심팬을 대상으로 고려하였다. Fig. 1은 대상 원심팬 구조물을 보여 준다. 대상 원심팬 구조물은 선행연구<sup>[3,5,8]</sup>에서 고려된 원심팬과 동일한 팬으로, 10개의 날개깃을 가지는 원심팬과 DC모터, 3개의 모터지지대, 그리고 유

로 구성된다. 대상 원심팬은 2100 RPM의 일정한 속도로 회전하도록 설계되어 있어 350 Hz에서 BPF (Blade Passing Frequency) 소음이 나타나는 특징이 있다. 대상 원심팬 유로는 **draining hole**이라 명명된 작은 구멍을 가진다. 대상 원심팬 구조물은 냉장고의 내부에 설치되어 얼음을 제조하기 위해 사용되기 때문에 냉장고의 특성상 저온의 온도에서 작동하고, 이로 인해 대상 원심팬 구조물의 내부에 작은 얼음조각이 생성된다. **draining hole**은 이러한 작은 얼음조각의 생성을 억제하기 위해 유로에 설치되어 있다.

## III. H-CAA 방법

본 연구에서는 팬 소음 예측을 위해 H-CAA 방법을 사용하였다.<sup>[2]</sup> H-CAA 방법은 크게 3단계로 나누어 기술할 수 있는데, 먼저 전산유체역학을 이용하여 RANS 방정식을 해석을 통해 팬 주위의 비정상상태 유동장을 예측한다. 그리고 예측된 비정상상태 유동장에 음향상사법을 적용하여 팬의 주요 소음원 영역을 모델링한다. 마지막으로, 모델링한 소음원을 선형음향전파모델에 적용하여 팬으로부터 방사된 소음을 예측한다. 자세한 사항은 선행연구를 참고할 수 있으며, 적용과정은 Fig. 2에 간략히 나타내었다.

본 연구에서는 대상 원심팬 구조물 주위의 비정상 유동장을 예측하기 위해 상용 전산유체역학 프로그램인 STAR-CD<sup>TM</sup>을 사용하여 3차원 RANS 방정식을 해석하였다. RANS 방정식은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) = 0, \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) \\ & = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right], \end{aligned} \tag{2}$$

여기서,  $\bar{\dots}$ 는 평균화된 변수를 의미하고,  $\rho$ 는 밀도,  $u$ 는 속도,  $p$ 는 압력, 그리고  $\mu$ 는 점성 상수를 의미한다. Eq.(2)를 해석하기 위해서는 Reynolds 응력에 대

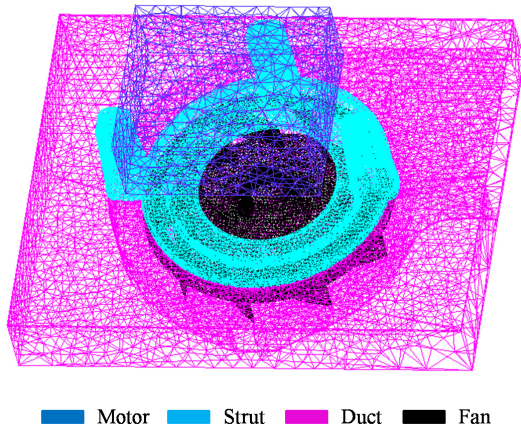


Fig. 1. Target centrifugal fan system.

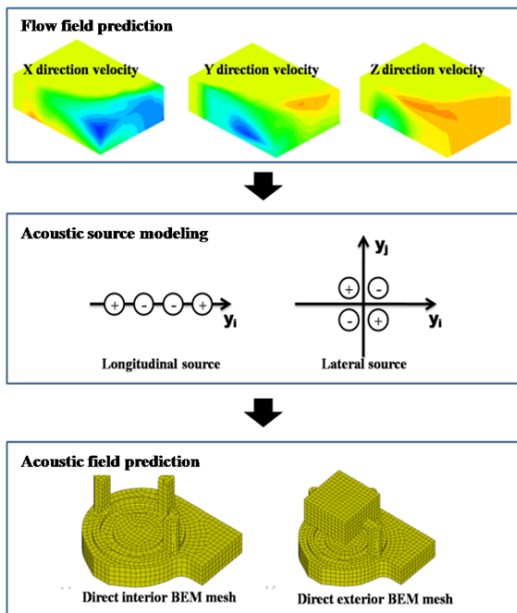


Fig. 2. Procedure of H-CAA method.

한 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 Reynolds 응력을 모델링하기 위해 high Reynolds k-ε 난류모델을 사용하였다. 효율적인 격자 생성을 위해 사면체 격자를 이용하여 대상 원심팬 구조물을 격자화 하였고, 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 이용하여 RANS 방정식을 수치적으로 해석하였다.

대상 원심팬 구조물과 같이 내부 비정상상태 유동에 의해 생성되는 소음은 이극자 소음원과 사극자 소음원을 이용하여 모델링할 수 있다.<sup>[10]</sup> 내부 비정상상태 유동장으로부터 모델링된 소음원은 Lighthill의 음향상사법<sup>[11]</sup>과 Curle의 음향상사법<sup>[12]</sup>을 통해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left\{ \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right\} p(y_k, t) = \left( \frac{\partial}{\partial y_i} \right) [f_i(y_k, t)] - \left( \frac{\partial}{\partial y_i} \right) \left( \frac{\partial T_{ij}(y_k, t)}{\partial y_j} \right), \quad (3)$$

여기서  $f_i(y_k, t)$ 는 단위 부피에 작용하는 힘을 의미하며,  $T_{ij}(y_k, t)$ 는 Lighthill 응력 텐서를 의미한다. Velarde-Suárez *et al.*<sup>[13]</sup>은 원심팬의 주요한 소음원영역을 확인하기 위해 실험적 연구를 수행하였고, 회전하는 날개깃에서 토출된 유동과 volute tongue 영역의 상호작용으로 인한 volute tongue 영역의 압력변동이 주요한 소음원임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 회전하는 날개깃과 volute tongue 영역 사이의 유동장 정보로부터 사극자 소음원을 모델링하고, 모델링된 사극자 소음원을 선형음향전파모델을 구현하기 위해 적용하는 경계요소법(Boundary Element method, BEM)에 적용함으로써 volute tongue 영역 벽면에 의한 이극자 소음원과 유동장 내의 난류에 의한 사극자 소음원을 고려한다. 다만, 회전하는 팬 날개깃 위의 이극자 소음원은 고려하지 못한다. 그러나, cut-off 영역을 포함하는 30° 너비의 volute tongue 영역을 원심팬의 주요한 소음원영역으로 고려한 H-CAA 방법의 적용을 통한 원심팬 내부 소음예측의 유효성은 선행연구를 통해 확인할 수 있다.<sup>[2,3,4,5,8]</sup> Lighthill 응력 텐서는  $T_{ij} = \rho u_i u_j + [(p - p_0) - c^2(\rho - \rho_0)] \delta_{ij} - \sigma_{ij}$ 로 정의되고, 여기서  $c$ 는 음속,  $\delta_{ij}$ 는 kronecker delta,  $\sigma_{ij}$ 는 점성에 의해 생성되는 응력을 의미한다. 움직

이는 유체 내에서 점성 응력과 엔트로피 변동은 그 크기가 작으므로 무시할 수 있기에, 사극자 소음원은 근사화된 Lighthill 응력 텐서를 사용하여 모델링할 수 있고, 근사화된 Lighthill 응력 텐서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[14]</sup>

$$S_{ALST} = \frac{\partial^2 \rho u_i u_j}{\partial x_i \partial x_j}. \quad (4)$$

Eq.(4)를 바탕으로, 24개의 단극자 음원으로부터 1개의 사극자 음원을 모델링하기 위해서는 단극자 음원과 사극자 음원 사이의 물리적/수학적 관계에 대한 정의가 필요하다. 본 연구에서는 부록의 연구과정에 기초하여 단극자 음원으로부터 사극자 소음원을 모델링하였다. 대상 원심팬 구조물로부터 방사된 소음을 예측하기 위해서는 원심팬 유로의 벽면과 소음원 사이의 상호작용과 소음원들 사이의 상호작용을 고려할 수 있는 전파모델을 필요로 한다. 본 연구에서는 이를 위해 Green 함수를 사용하였고, 수치적 해석을 위해 경계요소법을 사용하였다. 경계요소법은 상용 프로그램인 SYSNOISE™를 통해 구현하였다. 원심팬 유로 내부의 소음원으로부터 방사된 소음을 원심팬 유로 외부의 임의의 위치에서 예측하기 위해서 다중-영역 경계요소법(Multi-domain BEM)을 사용하였다. 다중-영역 경계요소법은 직접 내부 경계요소법(direct internal BEM)과 직접 외부 경계요소법(direct external BEM)의 순차적인 적용을 통해 소음원으로부터의 방사소음을 예측하는 기법으로, 직접 내부 경계요소법의 적용을 통해 예측된 정보를 직접 외부 경계요소법의 경계값으로 적용하여 내부 소음원에 의한 외부의 음장을 해석할 수 있다.

본 연구에서 사용된 H-CAA 방법 및 U-FRPM H-CAA 방법을 통한 대상 원심팬 구조물의 소음 예측치에 대한 검증을 위해 먼저 대상 원심팬 구조물에 대한 소음을 측정하였다. 소음 측정은 125 Hz의 컷오프 주파수 그리고 16 dB의 배경소음을 가지는 반무향실에서 수행되었고, 소음 측정을 위한 마이크로폰은 대상 원심팬 구조물로부터 1.2 m 떨어진 곳에 위치한다. 대상 원심팬 구조물의 소음 측정에 관한 자세한 사항은 선행연구<sup>[3]</sup>에서 확인할 수 있다. Fig. 3

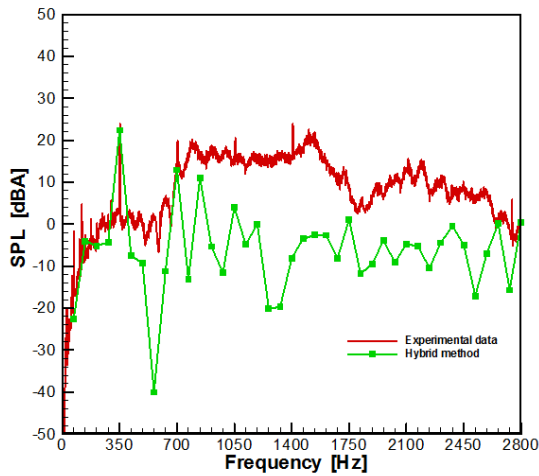


Fig. 3. Comparison of the measured data and the predicted value using Hybrid method.

은 대상 원심팬에 H-CAA 방법을 통한 소음 예측치와 대상 원심팬의 소음 측정치를 비교하여 보여준다. 팬 소음에 지배적인 기여도를 보이는 BPF 소음은 H-CAA 방법을 통해 비교적 정확한 예측이 가능함을 확인할 수 있으나, 고주파수영역의 광대역소음은 예측치와 측정치 사이의 큰 오차로 인해 H-CAA 방법을 그대로 적용하기에는 어려움이 있음을 확인할 수 있다. 이는 H-CAA 방법의 적용을 위해 사용하는 RANS 방정식의 유동장 분해능의 한계에서 기인한 것으로 사료된다. RANS 방정식은 Reynolds 평균화과정을 포함하고 있어 저주파수 특성을 가지는 결정론적인(deterministic) 난류의 움직임은 묘사할 수 있지만, 고주파수 특성을 가지는 무작위 난류의 움직임은 묘사할 수 없다. 본 연구에서는 광대역소음 예측에 한계를 가지는 H-CAA 방법을 개선하기 위해 특정한 통계적 특성을 만족하는 난류를 합성할 수 있는 FRPM 기법을 RANS 방정식 해석을 통해 예측한 비정상상태 유동장에 적용하였다.

#### IV. U-FRPM기법

Ewert *et al.*<sup>[9]</sup>에 의해 제안된 FRPM 기법은 디지털 여과함수(digital filter kernel)를 이용하여 특정한 통계적 특성을 가지는 난류를 유동장 내에 재생하기 위한 기법이다. 난류의 변동성분은 공간상의 수치적 백색소음(white-noise)과 디지털 여과함수의 합성곱

(convolution)을 통해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_i(X,t) = \int_{V_s^n} \hat{A}G(X-X')U_i(X',t)d^nX', \quad (5)$$

여기서  $G$ 는 공간상의 디지털 여과함수를 나타내고,  $U_i$ 는 공간상의 수치적 백색소음,  $\hat{A}$ 는 난류 변동성분의 크기를 조절하기 위한 크기 함수를 나타낸다. 평균유동속도에 따라 대류하는 난류를 구현하기 위해서는 시간/공간상에서 상관성이 없는 수치적 백색소음이 필요하기에 수치적 백색소음은 다음과 같은 특성을 가진다.

$$\langle U_i(X,t) \rangle = 0, \quad (6)$$

$$\langle U_i(X,t)U_j(X+r,t) \rangle = \rho_0(X)^{-1}\delta_{ij}\delta(r), \quad (7)$$

$$\frac{D_0}{Dt}U_i = \left( \frac{\partial}{\partial t} + u_0 \cdot \nabla \right) U_i = 0, \quad (8)$$

여기서  $u_0$ 는 정상상태 유동장의 평균유동속도를 의미한다. 본 연구에서는 에너지 소멸 기울기는 정확히 묘사할 수 없지만 우수한 여과특성을 가지는 Gaussian 에너지 스펙트럼에 기초한 Gaussian 디지털 여과함수를 사용하였다.<sup>[15]</sup>

$$G(X-X') = \exp\left(-\frac{\pi}{2} \frac{|x-X'|^2}{l_s^2}\right), \quad (9)$$

$$l_s = C_l \frac{k}{\epsilon}, \quad (10)$$

여기서  $l_s$ 는 난류길이크기를 의미하고,  $k$ 는 평균 난류 운동에너지,  $\epsilon$ 는 난류의 소산, 그리고  $C_l$ 은 길이 크기상수를 의미한다. 난류 변동성분의 크기를 조절하는 크기 함수는 두 점 사이의 난류 변동성분의 분산으로부터 수치적 백색성분의 특성, 디지털 여과함수의 특성, 그리고 비압축성 유동장을 가정하면 다음과 같이 정의할 수 있다.<sup>[9]</sup>

$$\hat{A} = \sqrt{\frac{\rho_0 \hat{R}}{l_s^3}}, \quad (11)$$

$$\hat{R} = \frac{2l_s^2 k}{3\pi}. \quad (12)$$

소음원영역을 N개의 겹치지 않는 제어체적을 통해 난류 변동성분을 다음과 같이 이산화할 수 있다.

$$\psi_i(X, t) \cong \hat{A}(X) \sum_{k=1}^N G[X - X_k^c(t)] \frac{r_{ik}(t)}{\rho_0(X_k^c)}, \quad (13)$$

여기서  $X_k^c$ 는 제어체적의 질량중심의 위치를 나타내고,  $r_{ik}$ 는 제어체적 내의 수치적 백색소음의 적분값을 의미한다. 수치적 백색소음과 디지털 여과함수의 합성곱을 통해 난류 변동성분을 재생하기 위해서는 제어체적 내에 위치한 수치적 백색소음을 1차로 여과하여 해석 격자점에 위치시켜야하고, 해석 격자점에 위치한 수치적 백색소음을 2차로 여과하여 통계적 특성을 만족하도록 해야 한다. 이를 위해 FRPM 기법은 2차 디지털 여과함수로 Eq.(9)에 나타난 Gaussian 디지털 여과함수를 적용하고, 1차 디지털 여과함수로 다음과 같은 디지털 여과함수를 적용한다.

$$G_1(X, X_k^c) = \frac{1}{\Delta x \Delta y \Delta z} g\left(\frac{x - x_k^c}{\Delta x}\right) g\left(\frac{y - y_k^c}{\Delta y}\right) g\left(\frac{z - z_k^c}{\Delta z}\right), \quad (14)$$

$$\text{여기서, } g(\xi) = \begin{cases} 1 - |\xi| & \text{for } |\xi| \leq 1 \\ 0 & \text{for } |\xi| > 1 \end{cases}. \quad (15)$$

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

$$\psi_i(X_{lmn}, t) = \hat{A}(X_{lmn}) \sum_l \sum_{m'} \sum_{n'} G_1(X_{lmn} - X_{l'm'n'}) \sum_{k=1}^N g\left(\frac{x_{l'm'n'} - x_k^c}{\Delta x}\right) g\left(\frac{y_{l'm'n'} - y_k^c}{\Delta y}\right) g\left(\frac{z_{l'm'n'} - z_k^c}{\Delta z}\right) \frac{r_{ik}(t)}{\rho_0(x_k^c)}. \quad (16)$$

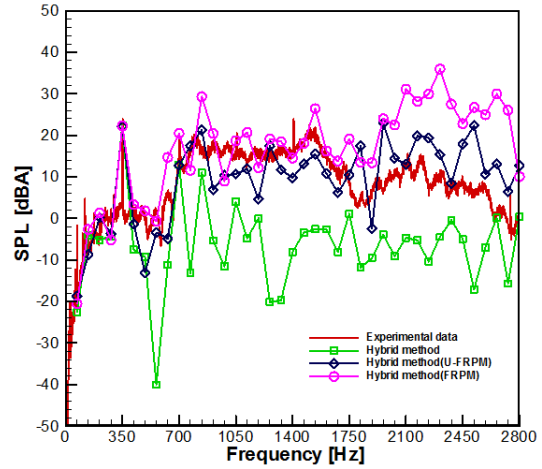


Fig. 4. Comparison of the measured data and the predicted value using proposed technique.

FRPM 기법은 RANS 방정식 해석을 통해 예측된 정상상태 유동장의 난류 운동에너지와 소산 값, 그리고 해석 격자점의 간격을 이용하여 광대역소음원으로 고려되는 난류를 특정한 통계적 특성을 만족하도록 재생하고, 이를 정상상태 유동장의 평균유동속도에 따라 대류시키면서 정상상태 유동장과 합성함으로써 비정상상태 난류 유동장을 합성하는 기법이다. 하지만, 원심팬과 같이 회전기계의 경우, 회전하는 날개깃의 상대적인 위치에 따라 소음이 발생하는 위치 및 소음의 크기 등이 크게 변동한다. 그러므로 회전기계의 소음을 예측하기 위해서는 회전기계 주위의 비정상상태 유동장 정보를 통한 소음 예측이 필수적이다. 이를 위해, URANS 방정식 해석을 통해 예측된 비정상상태 유동장의 난류 운동에너지와 소산 값, 그리고 해석 격자점의 간격을 이용하여 특정한 통계적 특성을 만족하도록 난류를 재생하여야 한다. 선행연구<sup>[8]</sup>에서는 URANS 방정식 해석을 통해 예측된 비정상상태 유동장 정보를 이용하여 대류하지 않는 난류를 재생하였고, 본 연구에서는 비정상상태 유동장의 평균속도(mean-flow)를 따라 대류하는 난류를 재생한다. 본 연구에서 제안한 U-FRPM 기법의 해석 알고리즘은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 소음원영역으로 고려되는 volute tongue 영역에 Eqs.(6)과 (7)을 만족하는 수치적 백색소음 생성.
- ② 임의의 t시간에서의 유동장에 FRPM 기법을 적용, 수치적 백색소음으로부터 특정한 통계적 특성을

만족하는 난류 재생.

③ 임의의  $t$ 시간에서의 유동장과 재생된 난류로부터 임의의  $t$ 시간에서의 난류 유동장 합성.

④ 임의의  $t$ 시간에서의 수치적 백색소음은 임의의  $t$ 시간 유동장의 유동속도와 임의의 시간간격  $\Delta t$ 에 의해 소음원영역인 *volute tongue* 영역 대류.

⑤ 소음원영역인 *volute tongue* 영역 밖으로 대류된 수치적 백색소음은 제거. 임의의  $t$ 시간 유동장의 유동속도에 의해 대류된 수치적 백색소음으로 인해 해석 격자부피 내의 수치적 백색소음이 존재하지 않을 시, 새로운 수치적 백색소음 생성.

⑥ 재배열된 수치적 백색소음과 임의의  $t + \Delta t$  시간에서의 유동장에 FRPM 기법을 적용, 새로운 난류 재생.

⑦ ③~⑥의 과정을 반복 수행.

Fig. 4는 본 연구에서 제안된 기법을 통한 예측치와 측정치를 비교하여 보여준다. FRPM/U-FRPM 기법과 H-CAA 방법을 결합한 예측 기법은 기존의 H-CAA 방법보다 측정치에 잘 일치함을 확인할 수 있다. 하지만, FRPM 기법과 H-CAA 방법을 결합한 예측 기법은 1750 Hz 이후의 고주파수에서 큰 예측치를 보여주며, 측정치와 큰 오차를 가짐을 확인할 수 있는데, 이는 재생된 난류가 평균유동속도에 의해 대류하지 않고 새로운 난류가 계속 합성됨에 따라 수치적 백색소음의 시간상의 특성을 만족하지 못한 결과로 사료된다. U-FRPM 기법과 H-CAA 방법을 결합한 예측 기법은 전 주파수에서 측정치와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이는 선행연구와 달리 재생된 난류를 평균유동속도에 의해 대류시킴으로써 수치적 백색소음의 시간상의 특성을 만족하도록 한 결과로 사료된다. 참고로 선행연구에서 적용하였던 H-CAA 방법의 소음원 모델링 과정에 오류를 발견하여 이를 개선한 모델을 본 논문에서 적용하였다. 개선된 알고리즘은 부록에 자세히 기술하였다.

## V. 결 론

본 연구에서는 원심팬 광대역소음의 효율적 예측을 위해서 팬 순음 소음 예측을 위해 사용하고 있는 H-CAA 방법과 통계적 난류 합성을 위해 개발된

FRPM 기법을 결합한 새로운 예측기법을 제안하였다. H-CAA 방법은 비정상상태 유동장을 예측하기 위해 사용되는 RANS 방정식의 유동장 분해능의 한계로 인해 효율적인 원심팬의 순음소음 예측에는 적합하지만, 광대역소음 예측에는 한계가 있었다. 선행연구에서의 대류하지 않는 재생 난류를 가지는 FRPM H-CAA 방법은 고주파수영역에서 측정치와 큰 오차를 보이는 한계가 있었다. 하지만, 본 연구에서 제안된 U-FRPM H-CAA 방법은 측정치와의 비교를 통해 원심팬의 순음소음과 광대역소음을 비교적 정확히 예측할 수 있음을 확인하였다. 이는 선행연구와 달리, 재생 난류가 유동장의 평균유동속도에 의해 대류함에 따라 수치적 백색소음 특성을 만족하도록 한 결과이다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. NRF-2013R1A1A2012672). 또한 본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.20134030200290).

## 부 록

음원을 포함하는 음파 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = q(x, t) = \int_V q(y, t) \delta(x - y) d^3 y, \quad (\text{A.1})$$

여기서  $q$ 는 음원을 의미하고, 이는 음원의 발생영역의 적분을 통해 나타낼 수 있다. 음원에 의한 음장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(x, t) = \int_V \frac{q\left(y, t - \frac{|x - y|}{c}\right)}{4\pi|x - y|} d^3 y. \quad (\text{A.2})$$

$q$ 를 통해 표현되는 음원을 단극자 소형 음원(monopole

compact source)으로 가정하면 음장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(x,t) = \frac{Q\left(t - \frac{|x|}{c}\right)}{4\pi|x|}. \quad (\text{A.3})$$

$q$ 를 통해 표현되는 음원을 힘의 발산 정의를 통해 다음과 같이 이극자 음원(dipole source)으로 가정할 수 있다.

$$q(x,t) = -\nabla f(x,t). \quad (\text{A.4})$$

이극자 음원은 같은 크기/반대 위상을 가지는 아주 가까이 위치한 두 단극자 음원으로 정의할 수 있고, 이러한 정의를 통해 단극자 음원과 이극자 음원 사이의 관계식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & -Q(t)\{\delta(x) - \delta(x - \delta l)\} \\ & = -Q(t)\left\{\delta_1 \frac{\partial}{\partial x_1} \delta(x) + \delta_2 \frac{\partial}{\partial x_2} \delta(x) + \delta_3 \frac{\partial}{\partial x_3} \delta(x)\right\} \\ & = -\nabla Q(t)\{\delta \delta(x)\} \\ & = -\nabla\{f(t)\delta(x)\}. \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Eq.(A.5)로부터 이극자 음원의 크기는 단극자 음원의 크기와 이극자 음원을 생성하기 위한 두 단극자 음원 사이의 거리를 통해 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다. 이극자 음원에 의한 음장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p(x,t) & = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{f e^{i\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)}}{4\pi r} \right] \\ & = -\frac{\partial r}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{f e^{i\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)}}{4\pi r} \right] \\ & = \frac{1}{4\pi} \cos\theta \left[ \frac{i\omega f}{c} \frac{f}{r} + \frac{f}{r^2} \right]. \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

여기서  $f$ 는 이극자 음원의 크기,  $\omega$ 는 주파수,  $r$ 은 음원과 수음점 사이의 거리, 그리고  $\theta$ 는 이극자 음원의 축과 수음점 사이의 각을 나타낸다. 사극자 음원은

이극자 음원의 발산 정의 또는 단극자 음원의 두 번의 발산 정의를 통해 정의할 수 있다. 이를 통해 사극자 음원은 다음과 같은 관계식을 가짐을 알 수 있다.

$$T(t) = Q(t)\delta l_1 \delta l_2 = f(t)\delta l. \quad (\text{A.7})$$

사극자 음원에 의한 음장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} p(x,t) & = \frac{\partial}{\partial x_k} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{T e^{i\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)}}{4\pi r} \right] \\ & = \frac{1}{4\pi} \cos\theta \cos\phi \left( -\frac{\omega^2 T}{c^2} \frac{T}{r} + 2\frac{i\omega T}{c^2} + \frac{2T}{r^3} \right). \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Eq.(A.7)에서 확인할 수 있듯이, 단극자 음원으로부터 이극자 음원/사극자 음원을 모델링하기 위한 물리적/수학적 관계식을 증명하기 위해 차원분석(dimensional analysis)을 수행한다. 음압은 다음과 같은 차원을 가진다.

$$p = \left[ \frac{M \cdot \frac{L}{T^2}}{L^2} \right] = \left[ \frac{M}{T^2 L} \right], \quad (\text{A.9})$$

여기서  $M$ 은 질량의 차원,  $L$ 은 길이의 차원, 그리고  $T$ 는 시간의 차원을 의미한다. Eq.(A.9)과 Eq.(A.3)으로부터 단극자 음원의 차원은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = p \cdot r = \left[ \frac{M}{T^2 L} \cdot L \right] = \left[ \frac{M}{T^2} \right]. \quad (\text{A.10})$$

Eq.(A.6)에 나타난 이극자 음원에 의한 음장으로 부터 다음과 같이 이극자 음원의 차원을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f & = \int p \cdot r dr = \left[ \frac{M}{T^2 L} \cdot L \cdot L \right] \\ & = \left[ \frac{ML}{T^2} \right] = \left[ \frac{M}{T^2} \cdot L \right] Q \cdot \delta l. \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Eq.(A.8)에 나타난 사극자 음원에 의한 음장으로



부터 다음과 같이 사극자 음원의 차원을 나타낼 수 있다.

$$T = \iint p \cdot r dr dr = \left[ \frac{M}{T^2 L} \cdot L \cdot L \cdot L \right] = \left[ \frac{ML^2}{T^2} \right] = \left[ \frac{M}{T^2} \cdot L \cdot L \right] = Q \cdot \delta l \cdot \delta l. \quad (A.12)$$

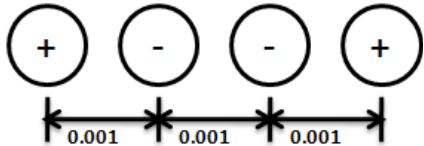


Fig. A1. Acoustic quadrupole source modeling.

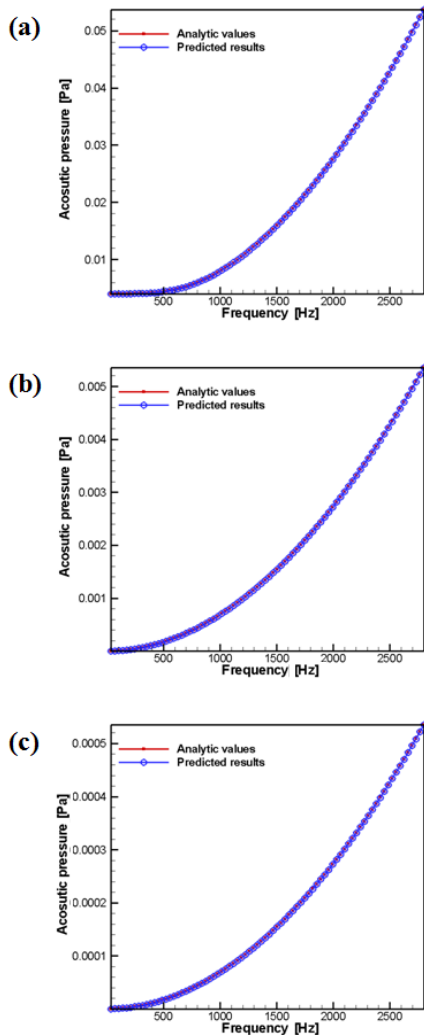


Fig. A2. Comparison of acoustic pressure between analytic values and predicted results according to an observation position of (a)  $r = 0.1$  m, (b)  $r = 1$  m, and (c)  $r = 10$  m.

단극자 음원으로부터의 사극자 음원의 모델링 기법의 유효성을 검증하기 위해, 모델링된 사극자 음원으로부터의 예측치와 이론치의 비교를 수행한다. 사극자 음원의 크기를 ‘10’으로 가정하고 단극자 음원 사이의 거리를 ‘0.001’로 가정하면, 단극자 음원의 크기는 ‘5000000’이 된다.<sup>[16]</sup> 이를 이용하여 Fig. A1과 같이 사극자 음원을 모델링한다. 모델링된 사극자 음원을 경계요소법에 적용하여 모델링된 사극자 음원의 예측치를 도출하고, Eq.(A.8)로부터 사극자 음원의 이론치를 도출한다. Fig. A2는 예측치와 이론치를 비교하여 보여준다. Fig. A2 (a), (b), 그리고 (c)는 모델링된 사극자 음원과 수음점사이의 거리가 0.1 m, 1 m, 그리고 10 m일 때를 각각 나타낸다. Fig. A2로부터 Eq.(A.7)에 기초하여 단극자 음원으로 사극자 음원 모델링하는 것이 유효함을 확인할 수 있다.

선행연구에서는 Eq.(A.7)에 기초한 본 연구의 사극자 음원 모델링 기법과 달리, Eq.(A.13)에 기초하여 사극자 음원을 모델링하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial x_i \partial x_j} = Q \delta l_1 \delta l_2 f^2. \quad (A.13)$$

본 연구와 선행연구에서의 음원 모델링 기법의 차이에 의한 예측결과의 차이를 확인하기 위하여, URANS 방정식 해석을 통해 도출된 비정상상태 유동장에 H-CAA 방법을 적용하여 대상 원심팬 시스템의 소음을 예측한다. Fig. A3은 두 음원 모델링 기법을 적용한 H-CAA 방법을 통한 대상 원심팬 시스템

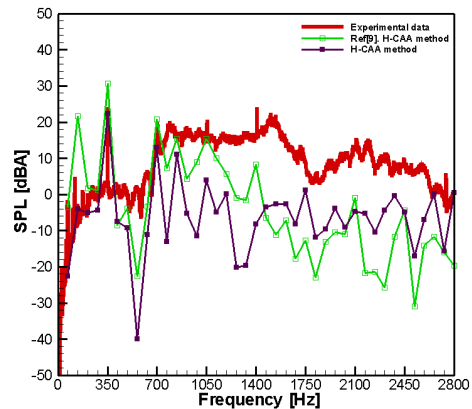


Fig. A3. Comparison of SPLs between measured data and predicted results.

의 소음 예측치를 측정치와 비교하여 보여준다. 선행연구의 음원 모델링 기법을 적용한 H-CAA 방법의 예측결과는 저주파수영역에서 과대평가하는 반면 고주파수 영역에서는 과소평가하는 특징을 보인다. 본 연구의 음원 모델링 기법을 적용한 H-CAA 방법의 예측결과는 저주파수영역에서 측정치와 비교적 잘 일치하는 반면 고주파수영역에서는 과소평가하는 특징을 보인다. 두 음원 모델링 기법의 예측결과를 비교하면, 저주파수영역에서는 선행연구의 예측치가 본 연구의 예측치보다 큰 반면, 고주파수영역에서는 본 연구의 예측치가 선행연구의 예측치보다 큼을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 Eqs.(A.7)과(A.13)에서 확인할 수 있듯이, 사극자 음원의 공간차분과 주파수에 대한 의존성에 의한 것으로 사료된다.

## References

1. M. Tournour, Z. El Hachemi, A. Read, F. Mendonca, F. Barone, and P. Durello, "Investigation of the tonal noise radiated by subsonic fans using the aero-acoustic analogy," Fan Noise Conference 2003, Senlis, France.
2. S. Lee, S. Heo, and C. Cheong, "Prediction and reduction of internal blade-passing frequency noise of the centrifugal fan in a refrigerator," Int. J. Refrig. **33**, 1129-1141 (2010).
3. S. Heo, C. Cheong, and T.-H. Kim, "Development of low noise centrifugal fan a refrigerator using inclined S-shaped trailing edge," Int. J. Refrig. **34**, 2049-2091 (2011).
4. S. Heo, D. Kim, and C. Cheong, "Analysis of relative contributions of tonal noise sources in volute tongue region of a centrifugal fan" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **33**, 40-47 (2014).
5. S. Heo, D. Kim, C. Cheong, and T.-H. Kim, "Prediction of internal broadband noise of a centrifugal fan using stochastic turbulent synthetic model" (in Korean), Trans. KSNEV. **21**, 1138-1145 (2011).
6. W. Béchara, C. Bailly, and P. Lafon, "Stochastic approach to noise modeling for free turbulent flows," AIAA J. **31**, 445-463, (1994).
7. C. Bailly, P. Lafon, and S. Candel, "Computation of noise generation and propagation for free and confined turbulent flow," AIAA Conference, 96-1732 (1996).
8. S. Heo, D. Kim, and C. Cheong, "Broadband noise prediction of the ice-maker centrifugal fan in a refrigerator using hybrid CAA method and FRPM technique" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **31**, 391-398 (2012).
9. R. Ewert, J. Dierke, J. Siebert, A. Appel, M. Siefert, and O. Komow, "CAA broadband noise prediction for aeroacoustic design," J. Sound Vib, **330**, 4139-4160 (2011).
10. J. Ryu, C. Cheong, S. Kim, and S. Lee, "Computation of internal aerodynamic noise from a quick-opening throttle valve using frequency-domain acoustic analogy," Appl. Acoust. **66**, 1278-1308 (2005).
11. M. J. Lighthill, "On sound generated aerodynamically, I. general theory," Proc. Roy. Soc. **211A**, 564-587 (1952).
12. N. Curle, "The influence of solid boundaries on aerodynamic sound," Proc. Roy. Soc. **231A**, 505-514 (1955).
13. S. Velarde-Suárez, R. Ballesteros-Tajadura, J. P. Hurtado-Cruz, and C. Santolaria-Morros, "Experimental determination of the tonal noise sources in a centrifugal fan," J. Sound Vib. **295**, 781-796 (2006)
14. C. Cheong, P. Joseph, Y. Park, and S. Lee, "Computational on aeolian tone from a circular cylinder using source models," Appl. Acoust. **69**, 110-236 (2008).
15. M. Dieste, G. Gabard, "Random-vortex-particle methods for broadband fan interaction noise," AIAA 2010 Conference
16. D. Russell, J. Titlow, and Y. Bemmen, "Acoustic monopoles, dipoles, and quadrupoles: An experiment revisited," Am. J. Phys. **67**, 660-664 (1999).

## 저자 약력

### ▶ 허 승 (Seung Heo)



2009년 02월: 부산대학교 학사  
2011년 02월: 부산대학교 석사  
2011년 03월 ~ 현재: 부산대학교 박사 재학

### ▶ 정 철 웅 (Cheolung Cheong)



1997년 02월: 서울대학교 학사  
1999년 02월: 서울대학교 석사  
2003년 02월: 서울대학교 박사  
2006년 03월 ~ 2010년 03월: 부산대학교  
조교수  
2010년 04월 ~ 현재: 부산대학교 부교수