

원심압축기 유동해석 및 소음예측에 관한 연구

Flow-field Analysis and Noise Prediction of Centrifugal Compressor

⁰선효성*, 신인환*, 이수갑**

Hyosung Sun, Inhwan Shin, and Soogab Lee

ABSTRACT

The objective of this research is to suggest the noise prediction method of the centrifugal compressor. It is focused on the Blade Passing Frequency (BPF) component which is regarded as the main part of the rotating impeller noise. Euler solver is used to simulate the flow-field of the centrifugal compressor and time-dependent pressure data are calculated to perform the near-field noise prediction by Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) formulation. Indirect Boundary Element Method (IBEM) is applied to consider the noise propagation effect. Pressure fluctuations of the inlet and the outlet in the centrifugal compressor impeller are presented and Sound Pressure Level (SPL) prediction results are compared with the experimental data.

1. 서론

원심압축기에서 발생하는 소음의 특성을 이해하고 원심압축기를 구성하는 각종 설계변수들이 소음수준에 미치는 영향을 파악하기 위해서 예전부터 이론적인 연구와 실험적인 작업들이 많이 수행되어져 왔다[Refs. 1-2]. 이러한 연구의 결과들로부터 원심압축기의 중요부분인 임펠러(impeller)의 회전과 관련한 블레이드 통과 주파수(Blade Passing Frequency, BPF) 소음이 많은 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실들은 원심팬(centrifugal fan)이나 원심펌프(centrifugal pump) 등과 같은 기계에서의 회전하고 있는 블레이드와 컷오프(cut-off)의 상호작용에 의한 소음의 연구에서도 언급한 바가 있다[Ref. 3].

이번 연구에서는 이러한 불연속 주파수 소음(discrete frequency noise)을 예측하기 위해서 Euler 방정식을 이용한 원심압축기 임펠러의 유동

* 서울대학교 공력소음 및 소음제어 연구실

** 서울대학교 기계항공공학부

해석을 수행하고 경계요소법(Boundary Element Method, BEM)을 적용하여 소음해석을 수행하였다. 특히, 임펠러의 입구와 출구에서의 소음의 분포를 알아보기 위해서 원심압축기 내부와 외부의 소음해석을 동시에 수행할 수 있는 간접 경계요소법(Indirect BEM)을 사용하였다. 간접 경계요소법에 사용되는 주요변수들은 압력의 차이와 압력의 변화에 대한 차이에 관련된 것이며 이러한 변수들을 바탕으로 내부와 외부에서의 음향장을 계산하게 된다. 그리고, 계산의 효율을 위해서 간접 경계요소법은 변분법(variational approach)을 바탕으로 하여 계산식을 유도하였다[Ref. 4]. 이러한 접근방법의 이점은 결과적인 경계요소법 구성식이 대칭을 이루므로 계산시간이 감소한다는 것이다. 이후에 본문에서 제시되는 내용은 유동 해석기법과 경계요소법에 대한 설명과 아울러 이러한 두 방법의 적용을 통한 계산결과의 검증이 제시될 것이다.

2. 수치해석 기법

2.1 유동해석

원심압축기 임펠러의 입구와 출구에서의 압력의 주기적인 변동에 의한 유동의 비정상성(unsteadiness)을 해석하기 위해서 3차원 압축성 Euler 방정식을 적용하였다. 3차원 좌표계에서의 지배방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

본 연구에서는 유한체적법을 이용하여 비점성항의 공간 차분화에는 Roe의 FDS(Flux Difference Splitting) 방법을 적용하고 공간 차분 정확도의 향상을 위해서 Koren limiter를 도입한 MUSCL 기법을 사용하였다. 또한, 회전하는 임펠러의 비정상 유동장을 계산하기 위해서 AF-ADI 시간 적분법을 채택하였다.

유동해석에 이용되는 격자계는 회전하는 임펠러를 표현하기 위해서 moving grid를 사용하고 입구 덕트(inlet duct)와 디퓨저(diffuser)를 임펠러와 연결시키기 위해서 patched grid를 포함하였다.

2.2 소음해석

원심압축기 임펠러의 유동해석을 바탕으로 임펠러에 의한 소음원을 정의하기 위해서 이중극(dipole) 점음원(point source)을 기반으로 하는 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) 방정식을 적용하였다[Ref. 5].

$$p(\vec{x}, t) = \frac{\cos \theta f}{4\pi} \left\{ \frac{i\omega}{rc} + \frac{1}{r^2} \right\} e^{i\omega(t-r/c)} \quad (2)$$

식 (2)에서 $p(\vec{x}, t)$ 는 음압, $\cos \theta$ 는 방향성을 표시하고 있으며, f 는 음원의 강도, ω 는 방사되는 주파수, r 은 음원과 관찰자 사이의 거리, c 는 음속을 나타낸다. 또한, 근접장(near-field)과 원음장(far-field)에서의 소음의 영향은 각각 $1/r^2, 1/r$ 으로 표현할 수 있다.

경계요소법은 음향경계에서의 적분을 통하여 일정한 위치까지 공기중으로 전파되는 음압을 예측할 수 있는 방법이다. 이 방법은 Helmholtz 적분식으로 잘 알려져 있다[Ref. 6].

$$Cp(\vec{r}_{dr}) = \int_S \left[G(\vec{r}, \vec{r}_{dr}) \frac{\partial p(\vec{r})}{\partial n} - \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_{dr})}{\partial n} p(\vec{r}) \right] dS \quad (3)$$

여기에서, \vec{r} 는 경계요소 표면 위의 성분이고 \vec{r}_{dr}

는 계산하고자 하는 위치를 표시하며 C 는 지배 파동방정식(wave equation)의 기본해(fundamental solution)로부터 나오는 Dirac 함수의 적분에서 발생하는 상수를 의미한다.

간접 경계요소법의 적분식을 유도하기 위해서 간접 경계요소법에서 많이 사용되는 접근방법을 이용하였다[Ref. 7]. 이것은 직접 경계요소법(Direct BEM)에서 사용되는 적분식(식 (3))을 경계에 의해 내부와 외부로 구성되는 두 개의 음향 공간에 접목시키는 것이다. 이러한 접근방법에서 적분식 안에 포함된 Green 함수는 서로 상쇄되고 두 개의 적분식 안에 포함되어져 있는 수직벡터(normal vector)의 반대방향의 특성을 이용하여 새로운 경계변수와 적분식을 유도하게 된다. 이러한 변수와 내외부를 포함하는 일정한 위치에서의 음압의 분포는 결과적으로 다음과 같은 식에 의해서 계산되어진다.

$$\delta p = p_1 - p_2$$

$$\delta dp = \left(\frac{\partial p}{\partial n} \right)_1 - \left(\frac{\partial p}{\partial n} \right)_2$$

$$p(\vec{r}_{dr}) = \int_S \left[\delta p(\vec{r}) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_{dr})}{\partial n} - G(\vec{r}, \vec{r}_{dr}) \delta dp(\vec{r}) \right] dS \quad (4)$$

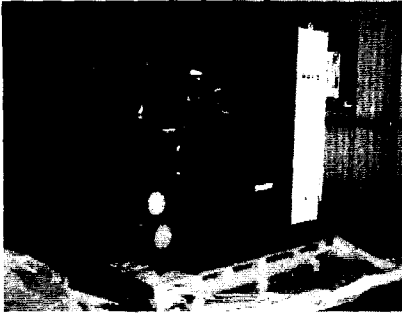
여기에서, δp 는 경계의 양쪽면 사이의 압력의 차이를 표시하며 δdp 는 수직한 방향에서의 압력의 변화의 차이를 나타낸다.

3. 해석결과 및 검토

위에서 설명한 해석기법의 검증을 위해서 소형의 원심압축기 임펠러 모델을 적용하였다. 12개의 임펠러 블레이드와 12개의 스플리터(splitter)를 가지고 있으며 70,000 rpm의 속도로 반시계 방향으로 회전하고 있다. 임펠러 입구와 출구에서의 첫 번째(fundamental) BPF는 각각 14,000 Hz, 28,000 Hz로 계산되어지며 높은 주파수 영역에 포함되어 있다. Figure 1은 유동해석과 소음예측을 하기 위해 이용되는 원심압축기의 전체시스템과 임펠러 모델을 보여주고 있다.

계산에 이용되는 임펠러의 형상은 이미 삼성테크윈(주)에서 상용프로그램을 기반으로 하여 설계한 것으로서 설계점에서의 유동해석의 결과에서는 박리현상(separation phenomenon)은 보이지 않았다. 이런 사실을 기초로 하여 계산시간의 절약을

위해 3차원 Navier-Stokes 방정식을 대신하여 Euler 방정식을 유동해석법으로 채택하였다.



(a)



(b)

Figure 1. (a) Integrated centrifugal compressor system and (b) Impeller model geometry

Figure 2는 Euler solver에 의한 정압(static pressure)의 분포를 보여주고 있으며 양호한 압력의 상승과 아울러 임펠러 입구와 출구에서의 압력 변동의 모습도 잘 묘사하고 있다.

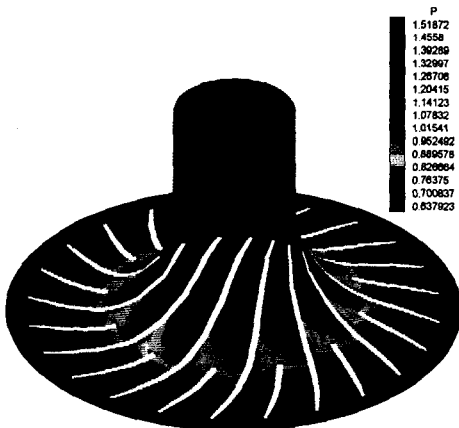
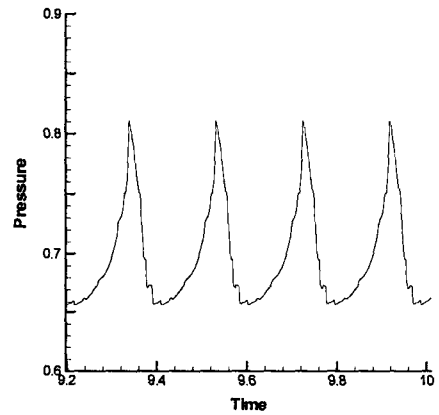
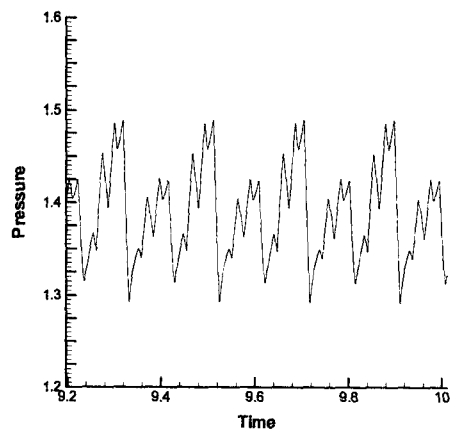


Figure 2. Static pressure contour

이러한 압력변동의 양상을 자세하게 알아보기 위해서 임펠러 입구와 출구에서의 시간변화에 따른 압력분포와 이 데이터를 기반으로 하여 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 수행하였다. Figure 3에 제시된 압력의 변화는 주기성을 보여주고 있으며 특히, 출구에서는 유동의 복잡함으로 인하여 불규칙한 형상을 보여주고 있다. 주파수 영역에서는 기본(fundamental) BPF와 그것의 하모닉(harmonic)으로 표현되는 불연속 주파수 소음(discrete frequency noise)이 두드러지며 출구에서는 임펠러 블레이드의 영향에 의한 서브하모닉(sub-harmonic) 성분도 보여진다(Figure 4).



(a) Impeller inlet part

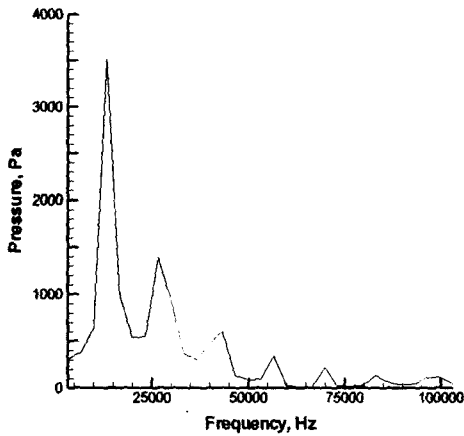


(b) Impeller outlet part

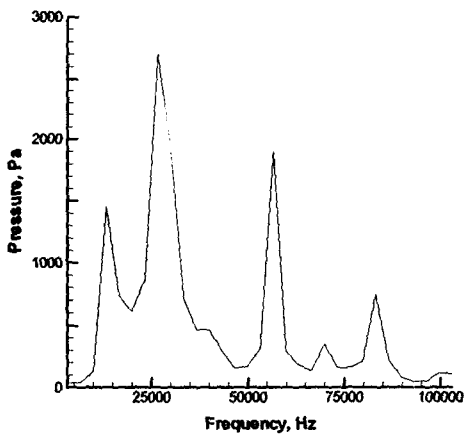
Figure 3. Pressure fluctuations in the time domain

원심압축기 임펠러에 의한 소음예측 기법의 검

증을 위해서 원심압축기 시스템의 중심으로부터 1.5(m)의 거리만큼 떨어져 있는 지점에서 소음분포를 측정하였다(Figure 5). 원심압축기의 다른 구성 요소에 의한 소음의 영향을 최소화하기 위해서 입구덕트의 바로 앞에서 소음 스펙트럼(spectrum)을 측정하였다.



(a) Impeller inlet part



(b) Impeller outlet part

Figure 4. FFT distributions in the frequency domain

측정된 소음분포의 결과에서는 첫 번째 BPF에 해당하는 14,000 Hz와 BPF의 서브하모닉(sub-harmonic)으로 판단되는 7,000 Hz에서의 피크값(peak value)이 나타난다. 이러한 불연속한 주파수에서의 소음성분에 대하여 계산을 수행하였으며 비교적 정확하게 예측을 한다는 것을 알 수 있

다(Figure 6).

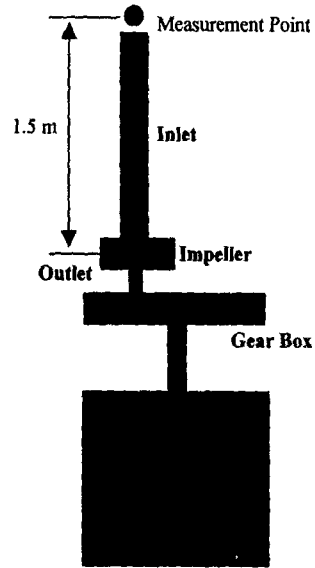


Figure 5. Experimental setup for noise measurement

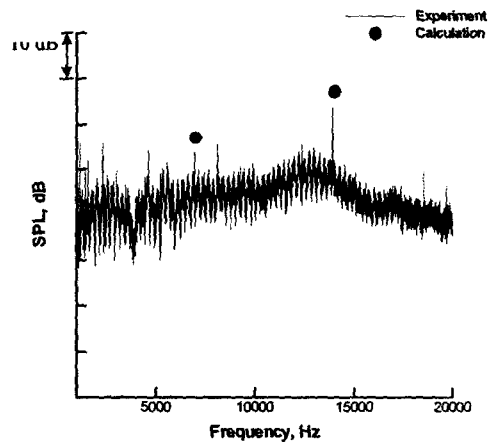


Figure 6. Comparison of computation results and experimental data

4. 결론

이번 연구에서는 원심압축기 소음의 수치적인 예측방법을 제시하였다. Euler solver는 원심압축기 임펠러의 유동해석과 입구와 출구에서의 압력변동을 계산하기 위해서 사용되었으며 이러한 정보를 바탕으로 FW-H 방정식을 적용하여 공력에

의한 소음원을 정의하고 소음전파를 모사하기 위해서 간접 경계요소법을 이용하였다. 소음예측 결과의 검증을 위해서 소음측정 실험을 수행하였으며 이것으로부터 임펠러의 회전에 의한 BPF 소음 성분이 중요하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 불연속한 소음을 계산한 결과는 소음측정 결과와 비교되었으며 비교적 정확한 예측을 할 수 있었다. 이러한 원심압축기 임펠러에 의한 소음예측 기법의 개발을 바탕으로 저소음 설계기술 개발을 위한 초석을 마련할 수 있을 것이다.

후 기

이번 연구에 많은 도움을 주신 삼성테크윈(주) 관계자 여러분께 감사의 글을 올립니다.

참 고 문 헌

1. A. Stirnemann, H. Zogg, and F. Stocker, "Prediction of Turbo Compressor Noise," INTER-NOISE, Florida, USA, December 1999.
2. W. Jeon, and J. Lee, "A Study on the Noise Reduction Method of a Centrifugal Compressor," INTER-NOISE, Hague, Netherlands, August 2001.
3. M. Morgenroth, and D. S. Weaver, "Sound Generation by a Centrifugal Pump at Blade Passing Frequency," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, 1998.
4. S. G. Mikhlin, *Variational Methods in Mathematical Physics*, MacMillan, New York, 1964.
5. A. P. Dowling, and J. E. Ffowcs Williams, *Sound and Sources of Sound*, John Wiley and Sons, 1983.
6. R. D. Cickowski, and C. A. Brebbia, *Boundary Element Methods in Acoustics*, Elsevier Applied Science, New York, 1991.
7. P. K. Banerjee, *The Boundary Element Methods in Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1994.