

에어컨 임펠러의 파손 거동에 관한 실험 및 수치적 연구

고병갑^{1*}, 이성철¹
¹인하공업전문대학 기계과

An Experimental and Numerical Study on the Fracture Behavior of Air conditioner Impellers

Byung-Kab Koh^{1*} and Sung-Chul Lee¹

¹Dept. of Mechanical Engineering, Inha Technical College

요약 에어컨 임펠러는 에어컨에 장착되어지는 부품으로서 모터 구동에 의하여 차가운 바람을 실내로 유입되도록 해주는 부분이다. 본 연구에서는 임펠러의 파손 원인을 수치적인 방법에 의하여 규명하고, 공진에 의한 파손 여부를 평가한다. 임펠러의 공진 여부를 판단하기 위하여 임펠러의 고유진동수와 Aerodynamic force에 의한 특성 주파수를 비교한다. 먼저, 임펠러의 고유진동수를 알기 위하여 모드 실험과 수치 계산을 병행한다. 즉, 구조 해석용 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 고유진동수와 모드 형을 계산하고, 이를 확인하기 위하여 실험적 주파수 분석을 수행한다. 공진 현상의 원인이 되는 외력에 대하여 임펠러 Blade에 작용하는 Aerodynamic force를 구하여야 하며, 본 연구에서는 V.E.M.(Vortex Element Method)에 근거한 유동 해석 프로그램을 수행하여 Aerodynamic force에 의한 특성 주파수를 얻는다.

Abstract An air conditioner impeller has been used to suck the warm air and to blow the chilled air by the centrifugal force induced from the rotation of it. To check the possibility of the fracture due to resonance, both numerical and experimental approach was carried out. For the structural analysis, the commercial code ANSYS based on the Finite Element Method was employed. The possibility of the fracture is the resonance between the natural frequency of impeller and characteristic frequency due to the aerodynamic forces. Experiment was carried out to see the natural frequency and numerical analysis based on the Vortex Element Method is performed to get the characteristic frequency. Comparing the natural frequencies that are calculated as described, we believe that resonance occurs.

Key Words : Natural frequency, Aerodynamic force, Vortex Element Method

1. 서론

에어컨 임펠러는 창문형 에어컨의 실내 측에 장착되어지는 부품으로 열 교환기를 통과한 뜨거운 공기를 흡입하여 차가운 공기로 변환, 팬의 회전력에 의해 실내로 다시 불어 넣어주는 장치이다. 그 구성은 Blade, Scroll, Inlet, 그리고 Exit로 나누어진다. 임펠러 Inlet 주위의 유체는 질량 보존의 법칙에 의하여 임펠러의 내부로 흡입되며, 이 때 대부분의 유체들은 Flow separation에 의하여

회전축 주위로 집중되어 Blade를 통과한다. 따라서 정압(Static pressure)이 Scroll 표면을 따라서 증가하며, 이로 인해 유체는 Scroll을 따라서 외부로 빠져나간다.

임펠러는 일반적으로 플라스틱으로 성형되며, 플라스틱의 탄성계수는 알루미늄 등에 비하여 상대적으로 작으므로 고유진동수도 상대적으로 낮다. 따라서 임펠러의 경우에는 공진에 의한 파손의 가능성이 존재한다[1,2].

에어컨의 내구성을 측정하기 위하여 Compressor의 수명 실험 결과 100 ~ 120일 경과 도중에 장착된 임펠러가

이 논문은 2008학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

*교신저자 : 고병갑(bkkoh@inhac.ac.kr)

접수일 09년 11월 12일

수정일 09년 12월 14일

게재확정일 09년 12월 16일

파손되었다. 이때의 회전수는 824 rpm이며, 에어컨의 정격 회전수는 900 rpm이다. 파손된 임펠러를 살펴보면 Rim 주위에서 파단이 발생하였고, 균열이 Rim과 연결된 Blade 위 부분으로부터 발생하여 Blade를 따라서 전진하여 Disk에까지 형성되었다. 균열은 그림 1에 나타난 바와 같이 임펠러 전체에 대하여 균일하게 분포하고 있다.



[그림 1] 파손된 임펠러

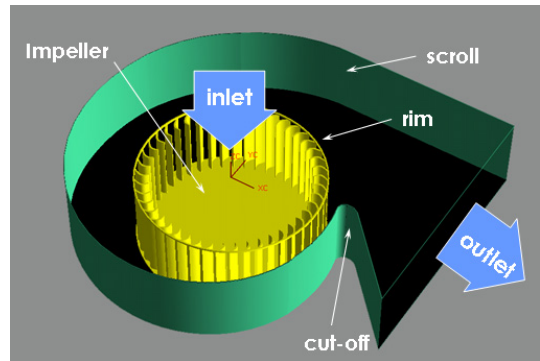
임펠러의 파손 원인을 규명하기 위한 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 첫째로 실험에 의한 방법과 두 번째로 수치 계산에 의한 방법이 있다. 본 연구에서 논의된 임펠러의 경우에는 파손 기간이 100 ~ 120 일 정도의 장시간이 소요되며, 실험을 위한 임펠러 제작을 위하여 금형을 제작하여야 하는 등 많은 비용이 소모된다. 따라서 수치 계산에 의한 파손 원인 규명이 필요하며 이 방법은 실험에 의한 방법에 비하여 비용과 시간이 적게 소요되는 장점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 임펠러의 파손 원인을 수치적인 방법에 의하여 규명하는 것이며, 공진에 의한 파손 여부를 각각 평가하는 것이다. 임펠러의 공진 여부를 판단하기 위하여 임펠러의 고유진동수와 Aerodynamic force에 의한 특성 주파수를 비교한다. 먼저, 임펠러의 고유진동수를 알기 위하여 모드 실험과 수치 계산을 병행한다. 즉, 구조 해석용 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 고유진동수와 모드 형을 계산하고, 이를 확인하기 위하여 실험적 주파수 분석을 수행한다. 공진 현상의 원인이 되는 외력에 대하여 임펠러 Blade에 작용하는 Aerodynamic force를 구하여야 하며, 본 연구에서는 V.E.M.(Vortex Element Method)에 근거한 유동 해석을 수행하여 Aerodynamic force에 의한 특성 주파수를 얻는다.

2. 이론해석

2.1 유동해석

그림 2는 에어컨 팬의 전체적인 형상을 표시한 것이다.



[그림 2] 에어컨 팬의 전체적인 형상

임펠러의 유동은 전반적으로 팬의 폭 방향으로 일정하게 흐른다고 가정하였고 유량은 실험을 통해서 얻어진 유량 값을 사용하였다. 그리고 비정상 이차원 유동 해석을 수행하는 데 있어서 V.E.M. Code를 사용하여 Cross flow fan 유동 해석을 수행하였다. 한편 임펠러 유동이 팬의 중심에서 Blade 입구 방향으로 향해서 유동이 거의 균일하게 흐르는 현상을 반영하였다.

유동장에서 속도 Potential ϕ 와 속도 \vec{u} 는 다음의 Laplace 방정식을 만족한다[3].

$$\nabla^2 \phi = 0, \quad \vec{u} = \nabla \phi \quad (1)$$

물체 경계면에서 유동과 물체 경계면 사이의 상대속도의 법선 성분이 0이 된다는 조건으로부터 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\vec{n} \cdot (\vec{u} - \vec{u}_B) = 0 \quad (2)$$

여기서, \vec{u}_B 는 물체 경계의 속도를 나타낸다. 무한 경계면에서는 물체로 인한 속도장의 Disturbance가 0이 된다는 조건을 갖는다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \vec{u} = 0 \quad (3)$$

Vortex는 유동의 지배 방정식 중의 하나인 운동량 보존 법칙에 Curl을 취하면 다음과 같은 Vorticity transport equation의 지배를 받는다.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \omega = \nu \nabla^2 \omega \quad (4)$$

식(4)의 해를 구하는 방법은 각 Time step마다 두 단계로 분리하여 해석하는 것이 수치 해석의 안정성 면에서 바람직하다. 따라서 식(4)를 두 형태로 나누어 매 Time step마다 다음의 두 방정식을 따로 해결한다.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \omega = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nu \nabla^2 \omega \quad (6)$$

첫 번째 Step은 Convection에 의해 Vortex가 전송되는 것으로 식(5)의 해를 만족하도록 Vortex가 전송된다. 식(5)의 해는 Vorticity ω 에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \vec{u}(\vec{x}) &= \int \vec{K}_\delta(\vec{x} - \vec{x}') \omega(\vec{x}') d\vec{x}' \\ &= \sum_{i=1}^N \Gamma_i \vec{K}_\delta(\vec{x} - \vec{x}') \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 N 은 유동장 내의 Vortex 수이며, $\vec{K}_\delta(\vec{x})$ 는 Poisson 방정식의 Integral kernel이다.

회전하는 Blade 유동 해석을 위해서는 Blade 표면을 요소로 나누고 Vortex를 분포 시키고 Blade 면에 뿌려진 Vortex 각각이 경계 조건을 만족시키는 Vortex의 크기를 구해야 한다. 본 연구에서는 Blade에 해당하는 Multi-Connected Domain문제를 다루기 위해, 각각의 Blade가 선형적인 관계를 가지고 서로 영향을 미친다고 가정하고 다음과 같은 행렬을 구성한다.

$$\begin{bmatrix} K^{1,1} & K^{1,2} & \dots & K^{1,Q-1} & K^{1,Q} \\ K^{2,1} & K^{2,2} & \dots & K^{2,Q-1} & K^{2,Q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ K^{Q,1} & K^{Q,2} & \dots & K^{Q,Q-1} & K^{Q,Q} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma^1 \\ \Gamma^2 \\ \vdots \\ \Gamma^Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} rhs^1 \\ rhs^2 \\ \vdots \\ rhs^Q \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서, Q 는 Blade의 수를 나타내며, 위 첨자는 각각의 Blade위의 Vortex군을 나타내고, $K^{i,j}$ 는 j -번째 Blade 위의 Vortex 군이 i -번째 Blade 위의 Vortex 군에 미치는 영향을 나타낸다.

실제로 회전하고 있는 Blade의 표면에서의 경계 조건은 다음과 같은 식을 적용한다.

$$\left[(\vec{u}_{bv} + \vec{u}_{uv} + \vec{u}_{bs}) - \vec{\Omega} \times \vec{r} \right] \cdot \vec{n} = 0 \quad (9)$$

여기서, \vec{u}_{bv} 는 Blade위의 Vortex에 의한 속도, \vec{u}_{uv} 는 Shedding된 Vortex에 의한 속도, \vec{u}_{bs} 는 유로 위의 Source에 의한 속도, \vec{r} 는 Collocation point의 위치, $\vec{\Omega}$ 는 Blade의 각속도, \vec{n} 는 법선 방향의 단위 벡터이다.

2.2 유한요소모델링

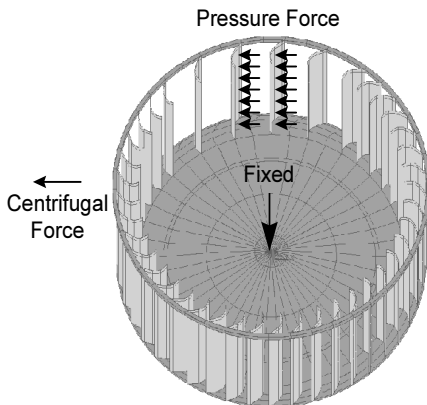
임펠러의 형상은 크게 Disk, Blade, 그리고 Rim으로 구분되며 Disk와 Blade는 두께 방향의 치수가 다른 방향의 치수에 비하여 상대적으로 작으며, Rim의 경우에는 세 방향의 치수가 서로 비슷하다. 따라서 Disk와 Blade는 Shell 요소로, Rim은 Brick 요소로 형상을 구성한다. 본 해석에서 적용한 Shell 요소[4]는 8개의 절점을 가지며 (Serendipity Element), 3 차원 Brick 요소[5]는 20 개의 절점을 갖는다.

임펠러는 플라스틱의 일종인 ABS HF-380으로 성형되며, 본 연구에서는 선형 탄성으로 가정하고 해석을 수행하였고, 물성치는 표 1과 같다.

[표 1] 임펠러의 물성치

Material Property	ABS HF-380
Young's modulus	1.4e+9 [Pa]
Poisson's ratio	0.4155
Density	1.05e+3 [Kg/ m ³]
Yielding stress	4.71e+7 [Pa]

임펠러에 작용하는 가진력 조건은 회전 운동에 대한 각속도와 양력을 유발하는 압력 차이이며, 경계 조건은 축과 결합되는 부분에서의 고정 경계 조건이다. 가진력 조건에서 회전 운동에 대한 각속도는 정격 운전 수 900 rpm이며, 압력 차는 107.1 Pa이며, 이 값을 Blade에 Surface pressure로 입력한다. 그림 3은 경계 및 가진력조건을 표시한 것이다.



[그림 3] 경계 및 가진력조건



[그림 4] 충격 가진 실험 장치

3. 결과 및 고찰

모드 해석에 대한 유한 요소 해석[6]을 임펠러에 적용하여 모드 해석을 수행하였고 표 2에 고유진동수를 표시하였다. 표 2에서 알 수 있듯이 1, 2차 고유진동수와 3, 4차 고유진동수, 그리고 5, 6차 고유진동수가 일치하였다. 즉, 모드 형은 흡수 모드에 대하여 90° 회전하여 짝수 모드가 발생하며, 이는 임펠러의 형상이 원형으로 축 대칭이므로 발생하는 것이다. 따라서 공진 해석 및 평가에서는 1차, 3차, 5차 등의 흡수 번째 고유진동수와 Aerodynamic force에 의한 특정 주파수를 비교하면 된다.

[표 2] 해석에 의한 고유진동수

Mode	Natural frequency(Hz)
1, 2	34.4
3, 4	42.1
5, 6	67.7

상용 해석 소프트웨어를 사용하여 임펠러에 대한 고유진동수와 고유 모드를 구하였으나, 대상의 재질이 비선형성이 강한 Viscoelastic material이므로 실험을 통해 해석에서 얻은 결과를 보완할 필요가 있다. 따라서 Impact hammer를 이용한 충격 가진 실험을 통하여 임펠러의 고유진동수를 규명하였다. 그림 4는 충격 가진 실험 장치를 도시한 것이다.

먼저 해석과 동일한 경계 조건을 주기 위하여 팬을 축에 고정시킨 후 축 단을 고정 시켰다. 그리고 Impact hammer로 일정한 지점을 충격 가진하여, 전 주파수 대역에서 동일한 에너지를 가지는 입력을 팬에 주었다. 또 팬의 Rim 부분에 가속도계를 부착하여 팬의 반지를 방향에 발생하는 진동 응답을 측정하였다. 주파수 분석을 위해서는 B&K의 FFT Analyzer를 사용하였으며, 이를 이용하여 입력 신호가 일정 범위 이내일 경우에 전달 함수를 구하는 Trigger를 이용하였다. 그리고 입력 신호에는 Rectangular Window를, 출력 신호에는 Exponential Window를 사용하였다. 또한, 고려의 대상이 되는 주파수 영역은 최대 400 Hz이므로 입력 신호를 0.00125초로 Sampling하였다. 외란의 영향을 가능한 배제하기 위하여 Averaging하였다.

충격 가진 실험을 수행한 결과, 계의 응답을 이용하여 구한 임펠러의 전달 함수에서 35, 62 Hz 부근에서 저차 고유진동수를 가지고 있음을 알 수 있었다. 또한 대상의 형상이 축 대칭이므로 상당히 근접한 주파수에서 대칭 모드가 발생하고 있음을 확인 할 수 있었다. 충격 가진 실험에서 구한 고유진동수를 정리하면 표 3과 같다.

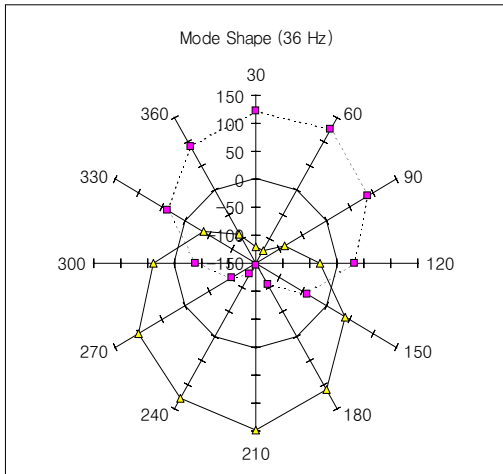
[표 3] 실험에 의한 고유진동수

Mode	Natural frequency(Hz)
1	36
2	36
3	62

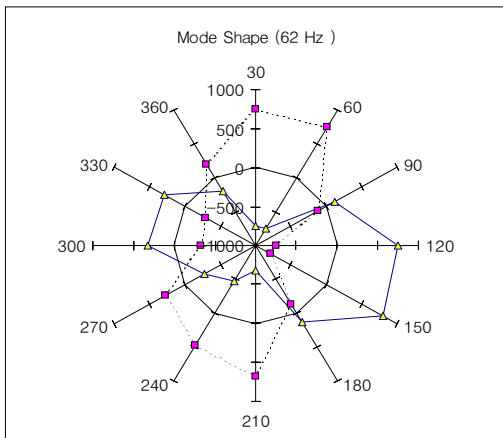
표 2와 표 3을 비교해 보면, 1, 2차 고유진동수는 일치하나, 3차 이상의 진동수에서는 다른 값을 나타내고 있

다. 이는 임펠러의 재질이 점탄성 재료인 플라스틱이며, 플라스틱은 일반적으로 가진력의 주파수가 증가하면 Young률도 증가하는 성질이 있기 때문에 발생하는 현상이다. 따라서 실험과 해석에서 구한 고유진동수가 각각 다를 수 있으며 Aerodynamic force와 비교하기 위한 고유진동수는 실험에서 구한 값을 적용한다.

그림 5와 6은 36 Hz와 62 Hz 부근에서의 모드 형을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 36 Hz는 팬에 부착된 축의 굽힘에 의해 발생하는 고유진동수로서 팬의 형상, 특히 Rim의 형상 변동을 유발하지 않음을 알 수 있다. 또한, 62 Hz에 해당하는 모드 형은 반지름 방향으로 Nodal line을 가지고 원주 방향으로는 Nodal line을 가지지 않는 가장 기본적인 고유 진동 형상임을 알 수 있다. 따라서 36 Hz와 62 Hz 사이에는 Rim의 변형을 유발하는 고유진동수가 존재 하지 않음을 알 수 있다.

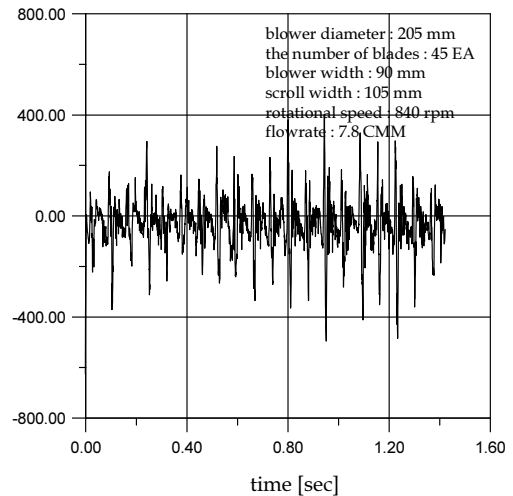


[그림 5] 36Hz에서의 모드 형(1차 모드)

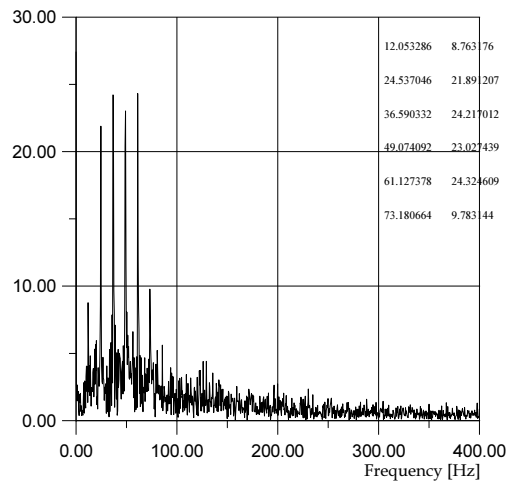


[그림 6] 62Hz에서의 모드 형(3차 모드)

그림 7은 Blade의 Vortex strength가 시간에 따라 변화하는 것을 표시한 것이다. Vortex strength는 시간에 따라 Deterministic한 양상을 나타내는 것이 아니라 비규칙적인 변화 양상(Random)을 나타내는 것이 두드러진다[7]. 그러나 주기적으로 Vortex strength의 Peak이 나타난다. 이는 Blade가 회전할 때 Cut-off 근처에서 나타나는 Standing vortex가 있기 때문에 나타나는 현상이다. 이 Blade vortex strength는 Blade의 양력을 나타내는 척도이기 때문에 Blade에 걸리는 Aerodynamic force가 매우 급격하게 변화하고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 Vortex strength에 대하여 Fast Fourier Transform을 하면 Blade에 작용하는 Aerodynamic force의 특성 주파수를 알 수 있다.



[그림 7] 시간에 따른 Vortex strength



[그림 8] Power spectrum of the vortex strength signal

그림 8은 824 rpm인 경우에 대한 것이다. 그림 8에 나타난 바와 같이 Blade 회전수에 관련된 주파수에서 Peak이 두드러지게 나타난다. 두드러지는 특성 중에 하나가 rpm과 상관이 있는 첫 번째 Peak의 크기보다는 3번째 Peak이 매우 크다는 것이다. 그리고 Peak이 6차 Harmonic까지 두드러지는 것이 흥미롭다. 그리고 150Hz 이상에서는 에너지가 점차 감소하는 양상을 나타내고 있다.

그림 8의 Power spectrum으로부터 Aerodynamic force에 의한 특성 주파수는 표 4로 나타낼 수 있다.

[표 4] Aerodynamic force에 의한 주파수

Mode	Natural Frequency(Hz)
1	12.1
2	24.5
3	36.6
4	49.1
5	61.1
6	73.2

표 3에 나타난 3차 고유진동수인 62 Hz와 표 4에 나타난 5차 특성 주파수인 61.1 Hz가 일치한다. 즉, 임펠러가 가지는 고유한 진동수 중에서 3차 모드와 외력 즉, 양력에 의한 특성 주파수의 5차 모드가 일치하며 이 때 공진 현상이 발생한다. 따라서 본 연구에서 적용한 임펠러는 공진에 의한 파손이 발생함을 수치적으로 예측할 수 있고, 이는 Compressor 수명 시험 시 파손된 팬의 경우에 의하여 검증되었다.

4. 결론

본 연구에서는 Compressor 수명 시험 시 파손된 창문형 에어컨에 장착된 임펠러의 파손 원인에 관하여 고찰하였다.

임펠러의 고유진동수를 구하기 위하여 유한 요소 해석과 실험을 병행하였고, 수치 계산은 플라스틱의 물성치가 비선형이므로 실험 결과와 일치하지 않음을 알았다. 양력에 의한 특성 주파수를 구하기 위하여 V.E.M.을 이용한 유동 해석 프로그램을 수행하였으며, 계산 결과 얻은 특성 주파수를 임펠러의 고유진동수와 비교하였다. 임펠러의 3차 고유진동수와 외력에 의한 5차 특성 주파수가 일치하였고, 이로 인해 임펠러가 파손되었다고 판단하였다.

본 연구에서는 임펠러에 대하여 공진에 의한 파손 평

가법을 제시하였고, 향후 이와 유사한 형상의 팬에 대하여 같은 방법으로 파손 여부를 판단하여 실제 제품 설계에 도움이 되리라 생각된다. 또한, 구조물의 고유진동수를 구하는 방법을 수치적 방법과 실험적 방법에 대하여 제시하였다. 특히, 구조물이 플라스틱인 경우는 계산과 실험 결과가 상이하며 그 이유는 구조물의 비선형성에 기인함을 알았다. 유동 해석 프로그램을 이용하여 특성 주파수를 추출하였고, 이 특성 주파수는 소음과 유동 손실에 밀접한 관계가 있으므로 향후 이와 연계된 연구가 필요하리라 생각된다.

참고문헌

- [1] Kamemoto, K., Kurasawa, H., Matsumoto, H. and Yokoi, Y., "Complete Unsteady-Calculation of Two-Dimensional Flows through a Centrifugal impeller by an Advanced Vortex Method," Proceedings of the 5th Asian International Conference on Fluid Machinery, Seoul, Korea, Vol.1,[1] pp. 133-140, 1997.
- [2] Shi, Q., Zhang, F., and Fan, S., "Stay Vibrations and Cracks Induced by Vortex Shedding: A Review of Current Status," Proceedings of the 5th Asian International Conference on Fluid Machinery, Seoul, Korea, Vol. 1, pp. 263-270, 1997.
- [3] Lewis, R., Vortex Element Method for Fluid Dynamic Analysis of Engineering Systems, Cambridge University Press, Cambridge
- [4] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, 'The Finite Element Method', Fourth Ed., Vol. 1,2, McGraw-Hill, 1991.
- [5] Stephen H. Crandall, Norman C. Dahl, and Thomas J. Lardner, 'An Introduction to the Mechanics of Solid', Second Ed., McGraw-Hill.
- [6] Harris and Crede, 'Shock & Vibration Handbook', McGraw-Hill, 1976.
- [7] Yamamoto, K., Kawahashi, M., Sekimoto, O., Tonami, Y., and Fujita, Y., "Analysis of Impeller Flow Field in a Centrifugal Fan by Image Processing," J. of the Visualization Society of Japan, Vol. 16, No. 60, pp. 27-33, 1996.

고 병 갑(Byung-Kab Koh)

[정회원]



- 1995년 8월: 한양대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 1997년 2월 : Univ. of Virginia 박사 후 연구원
- 1998년 3월 ~현재 : 인하공업전문대학 기계과 교수

<관심분야>
구조해석 및 최적설계

이 성 철(Sung-Chul Lee)

[정회원]



- 1982년 2월 : 한국항공대학교 항공공학과(공학석사)
- 1993년 2월 : 카이스트 기계공학과(공학박사)
- 1982년 2월 ~1998년 2월 : 한국과학기술원 연구원
- 1998년 3월 ~현재 : 인하공업전문대학 기계과 교수

<관심분야>
기계가공