

# 주기적 선회실속이 발생하는 축류팬의 3차원 유동구조

강창식\* · 신유환\*\* · 김광호\*\*

## Three Dimensional Flow Structure under Rotating Stall in an Axial Flow Fan

Chang Sik Kang\*, You Hwan Shin\*\*, Kwang Ho Kim\*\*

**Key Words:** Axial Flow Fan(축류팬), Rotating Stall(선회실속), Leakage Flow(누설유동), Reverse Flow(역류), 이중 위상평균기법(Double Phase-Locked Averaging Technique)

### ABSTRACT

Experimental study was conducted to reveal the instability such as leakage flow and rotating stall in an axial flow fan. For this study, unsteady total pressure probe and multi-hole pressure probe were specially designed for measuring the flow field upstream and downstream of rotor. The measured pressure signal was analyzed by Single and Double Phase Locked Averaging Technique. From the result of total pressure fields at inlet and outlet of the rotor, the useful information on the structure of the stall cell in radial direction was provided. Also, detailed flow measurements were carried out with a specially designed high frequency multi-hole pressure probe, providing some insight to the leakage flow and their interaction.

### 1. 서론

터보기계에서의 비정상 유동에 대해서는 과거로부터 많은 연구가 이루어져 왔으며 최근에는 그것의 측정을 위해 LDV나 PIV가 사용되고 있지만 상당부분에 있어서 열선유속계에 의존하고 있다. 하지만 그것이 가진 여러 장점에도 불구하고, 유동장의 실제압력을 측정할 수 없는 단점을 갖고 있다.

터보기계에서 유동특성을 연구하는데 있어서 속도와 더불어 압력은 성능과 관련되어 보다 현실적인 정

보를 제공한다는 데 있어서 매우 중요하다.

터보기계의 불안정성은 안정운전영역의 경우에 다양한 와류성분들과 그들간의 비정상적인 상호 간섭효과 그리고 비교적 최근의 RI(Rotating Instability)<sup>(1)</sup>까지 많은 연구가 이루어졌으며 불안정운전영역에 있어서 불안정성은 선회실속과 서지 현상으로 대표된다.

Lakshiminarayana<sup>(2)</sup> 등은 저속의 축류압축기에 대해 후류 및 누설 유동에 의한 유동장과 난류유동의 변화를 측정하였고, Hongwei<sup>(3)</sup> 등은 축류압축기에서 LDV를 이용해 누설와류와 다양한 와류 성분들간의 비정상적인 상호간섭에 대해서 연구하였다.

선회실속하의 유동특성에 관한 연구는 Larguier<sup>(4)</sup>와 강창식<sup>(5)</sup> 등이 축류압축기 케이싱 벽면에서 측정된 비

\* 한국과학기술연구원

\*\* 한국과학기술연구원

E-mail : class9@hanmail.net

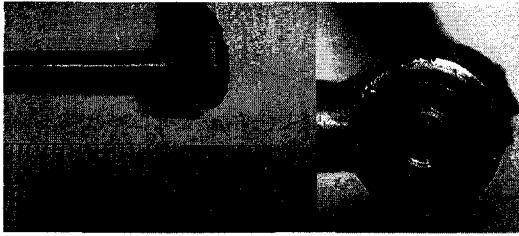


Fig. 1 (a) A Photograph of Total Pressure Probe

정상 압력을 통하여 선회실속셀 안의 블레이드 통로에서 발생하는 유동 메커니즘에 대해서 제안하였고, Puddu<sup>(6)</sup>와 Poensgen<sup>(7)</sup> 등은 축류압축기를 대상으로 열선유속계를 이용하여 3차원 유동장 측정을 수행하였다.

본 연구에서는 송풍기 특성곡선상에서 불안정성이 증대되는 선회실속 유량점 근처와 주기적인 선회실속이 발생하는 유량영역에서 비정상 압력측정을 수행하였다. 고주파수 압력센서를 이용하여 동익의 입구와 출구에서의 전압을 측정하였으며 5공프로우브를 제작하여 속도분포를 측정하였다.

측정된 결과로부터 압력과 속도분포를 통해 팁 부근의 누설와류에 대해 토의하였으며, 선회실속의 동익의 입구와 출구의 압력장을 측정하여 그 유동구조에 대해서 논의하였다.

## 2. 실험장치 및 측정 시스템

### 2.1. 축류팬 실험장치

실험에 사용된 축류팬은 설치각을 임의로 조정할 수 있는 조정 피치용 축류팬으로 본 연구에서의 모든 실험은 설계시의 설치각 22° 에서 수행되었다. 케이싱의 내경은 710mm, 허브비는 0.5, 회전익의 단면은 자유와류형, 다항식으로 이루어진 프로파일을 가지며 허브면의 코드는 138mm, 팁에서는 107mm이다. 회전익의 날개 수는 10개이고, 간극은 블레이드 중앙을 기준으로 평균 1.5mm이다. 고정익은 설치하지 않았고, 구동용 전동기는 3상 220V, 11kW이며 회전수는 1750rpm이다.

### 2.2. 측정시스템 및 방법

본 연구에서는 비정상 압력 측정을 위해 고주파수 압력센서를 이용한 전압 및 5공프로우브를 제작하였다. 동익 전방과 후방의 전압측정을 위하여 Fig. 1(a)와



Fig. 1 (b) A Photograph of 5-hole Pressure Probe

같이 고주파수용 압력센서를 이용하여 전압 프로우브를 제작하였으며, 속도측정을 위하여 Fig. 1(b)와 같은 5공프로우브를 이용하였다.

측정은 동익의 팁, 전연으로부터 38.5mm(Bell Mouth로부터 310mm해당), 후연으로부터 49.5mm 위치한 곳에서 반경방향으로 프로우브를 이송하면서 측정하였다. 측정된 신호는 앰프, 저주파 통과 필터를 걸쳐 A/D Board 및 신호분석기를 통해서 PC로 저장되게 된다. 블레이드 통과 신호와 축 회전 신호는 광센서를 사용하여 얻어졌고, 각 측정신호에서 선회실속에 대한 위상을 조정하기 위한 기준신호는 동일한 축 방향 위치로부터 동익의 회전 반대 방향으로 60° 만큼 떨어진 벽면에 설치하여 위상평 균을 하는 데 사용되었다.

본 연구에서는 블레이드 통과 주파수를 고려하여, 0.083msec(12KHz)로 샘플링 하였다. 이것은 블레이드 한 피치 구간에 40개의 측정점에 해당한다. 기준신호는 실험에 사용된 송풍기의 선회실속 속도가 16Hz 정도의 저주파 성분인 것을 고려해 필터를 사용하여 100Hz 이상의 성분은 제거하였다. 측정된 데이터의 처리와 분석을 위해서는 단일위상평균기법<sup>(8)</sup>과 이중위상평균기법<sup>(9)</sup>등의 방법을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 축류팬 특성곡선

본 연구에 사용된 실험용 팬의 특성곡선을 Fig. 2의 (a)에 나타내었다. 여기서 유량계수( $\phi$ )와 압력계수( $\psi$ )는 식(1)과 (2)에 의해서 정의된다.

$$\phi = \frac{V_x}{U} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\Delta P_t}{\frac{1}{2} \rho_{air} U^2} \quad (2)$$

위의 식에서  $V_x$ 는 축방향 속도성분을,  $U$ 는 동익 팁에서의 원주속도를 나타낸 것이며,  $\Delta P_t$ 는 로터 입·출구의 전압력차를 나타낸다.

Figure 2 (b)은 동익의 팁, 전연으로부터 38.5mm 상류, 케이싱 벽면에서의 정압신호를 안정 및 불안정 운전영역에 해당하는 유량에 대해 각각 나타낸 것이며, Fig. 2 (c)는 해당 유량에 대한 압력 진폭 스펙트럼을 나타낸 것이다.

실험결과 특성곡선 상의 임계점을 지나 유량이 더 감소하게 되면  $\phi=0.316$ 에서 안정운전영역에서와는 달

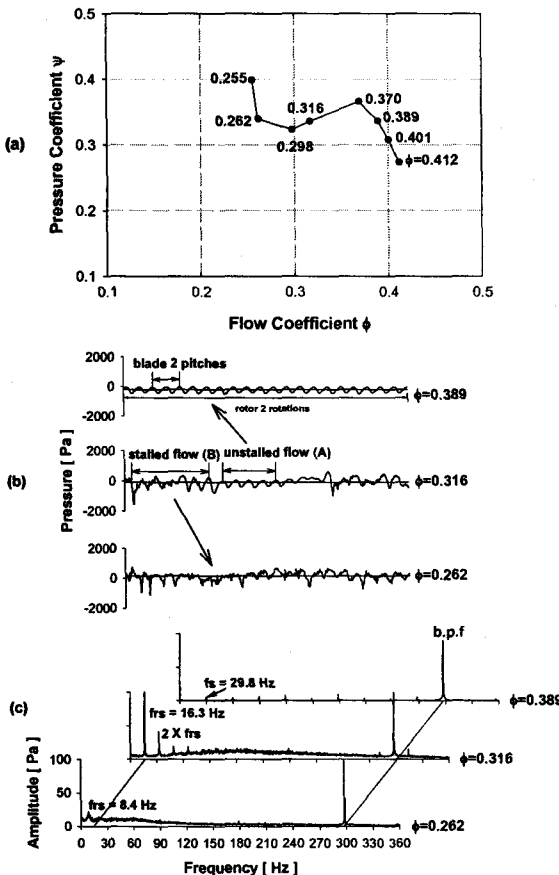


Fig. 2 (a) Fan Characteristics, (b) Instantaneous Wall Static pressure signals with Various Flow Rates (c) Pressure Amplitude Spectra with Various Flow Rates

리 선회실속에 의해 유량과 압력이 급격하게 감소하게 된다. 또한 스펙트럼 결과에서 알 수 있듯이, 블레이드 통과 주파수 외에 선회실속 성분( $f_{rs}=16.3\text{Hz}$ )이 지배적인 요소로 출현하는 것을 알 수 있고, Fig 2 (b)처럼 안정운전영역에서의 파형과  $\phi=0.298$  이하 영역에서의 신호가 변갈아 가면서 주기적으로 반복되는 현상을 보인다.

유량을 더 줄여  $\phi=0.298$ 이 되면 블레이드 통과 주파수 성분을 제외하고는 특별한 이산주파수 성분이 관찰되지 않는 비주기적 압력파형의 특성을 갖는 광대역 압력스펙트럼(Broad-Band Pressure Frequency Spectrum)(2)의 형태로 변화되는 것이 관찰된다.

본 연구에서는 선회실속 유량점에 가까운,  $\phi=0.370$ 에서의 불안정성과  $\phi=0.316$ 와 같이 주기적인 선회실속이 출현하는 유량영역에서의 유동메커니즘에 대해서 고찰하였다.

### 3.2. 송풍기의 불안정성

Figure 3 (a)와 (b)는 위상평균에 의한 케이싱 벽면에서의 정압력 분포를 식 (2)의 압력계수와 같이 무차원수로 표현하여 보여준다. 여기서, (a)는 동익의 팁, 전연으로부터 코드 길이의 비율에 해당되는 각각의 측정점에서의 결과를 보여주었고, (b)는 전연으로부터 12.5% 하류에 위치한 측정점에서의 결과를 송풍기 특성곡선상의 세 개의 대표적인 유량점에 대해서 보여준다.

결과에서 알 수 있듯이, 유량이 감소하여 선회실속점에 가까워질수록 블레이드 전연으로부터 12.5% 하류에 위치한 부분에서 압력면과 흡입면의 압력차이가 최대가 되는 것을 알 수 있고, 완전히 개방된 유량점과 비교할 때, 선회실속점 근처에서는 약 두 배 정도의 압력차가 발생하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 이와같이 블레이드 통과에 의한 압력면과 흡입면의 압력차이는 케이싱과 블레이드 팁 간극을 통해서 강한 누설유동을 일으키게 되고, 주유동의 높은 압력에 의해 누설외류로 발전하게 되어 불안정성을 증가시키는 역할을 하게 된다. 또한 압력차이의 최대 위치가 전연 부근에 위치하는 결과는 기존의 연구와 유사한 결과라 할 수 있다.<sup>(3)</sup>

Figure 4 (a)~(d)는 동익의 후연으로부터 4mm 위치에서 측정된 전압력 분포와 축방향 속도성분을 블레이드 두 개의 통로에 대해서 보여준다. 여기서 압력과 속도는 각각 식 (1)과 (2)의 압력계수와 유량계수

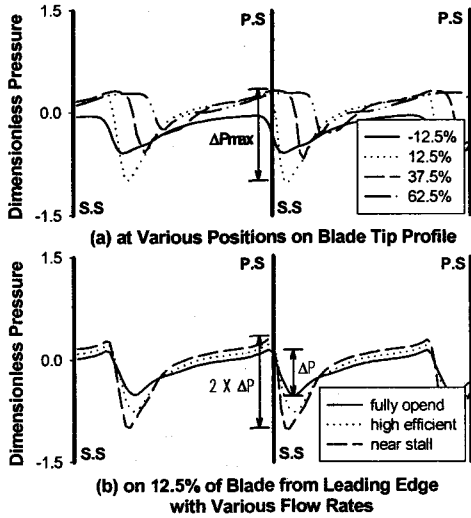


Fig. 3 Distributions of Phase-averaged Wall Static Pressure

와 같이 무차원수로 표현하였다. 그림 (a)는 케이싱 벽면으로부터 반경방향으로 15mm떨어진 팁근처에서의 전압력 분포를 특성곡선상의 각각의 유량점에 대해서 나타내고, (b)는 그것에 해당되는 축방향( $V_x$ )과 접선방향( $V_t$ ) 속도성분을 나타낸다. (c)와 (d)는 선회실속이 발생하는 유량점 근처에서의 전압력 분포와 속도성분을 스패의 중앙과 허브부분에 대해서 보여준다. 결과에서 알 수 있듯이, 전압력 분포의 경향은 접선방향 속도 성분의 경향에 의존적이라는 것을 알 수 있다.

이는 측정점의 위치가 블레이드 후연으로부터 매우 가까운 위치에서 측정되었기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.4 (c)와 다른 두 위치에서의 결과를 비교해 볼 때, 비교적 유동이 원활한 중앙부분과는 달리, 허브면에서는 후류의 크기와 폭이 크게 증가된 것을 알 수 있고, 팁에서는 더욱 더 복잡한 유동특성을 갖는 것을 알 수 있다. (a)와 (b)의 결과에서는 다른 두 위치에서와는 달리, 선회실속 유량점으로 갈수록 압력면에서 흡입면을 지나 전압력 손실이 커지고, 그 영역이 확대되는 것을 알 수 있고, 이 경우에 속도 성분을 보면, 접선방향 속도가 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 다른 두 위치의 경우와는 달리 팁 근처에서만 나타나고, 선회실속 유량점으로 갈수록 더욱더 심화되는 현상으로서 강한 회전 성분의 누설유동에 의한 교란이 상대적으로 주유동의 접선방향 속도 성분을 크게 약화시키고, 결과적으로 접선방향 속도 성분의 경향에 의존적인 전압력에 큰 손실을 가져오는 것으로 이해할 수 있다. 이것은 Lakshiminarayana<sup>(3)</sup>의 Leakage Interaction에 대한 전압력 손실 영역의 발생과 확대를 잘 설명해주는 결과라 할 수 있다.

Figure 4 (b)의 "A"는 후류의 존재만 관찰되는 중앙과 허브에서와는 달리, 축방향 속도 성분이 크게 감소하고, 접선방향 속도 성분이 증가하는 영역이, 블레이드 피치의 60%되는 위치에서 발견되는 것을 알 수 있다. 이때, (a)의 전압력 분포에서 알 수 있듯이, 이 위치에서는 블레이드의 압력면으로 부하가 매우 커지는

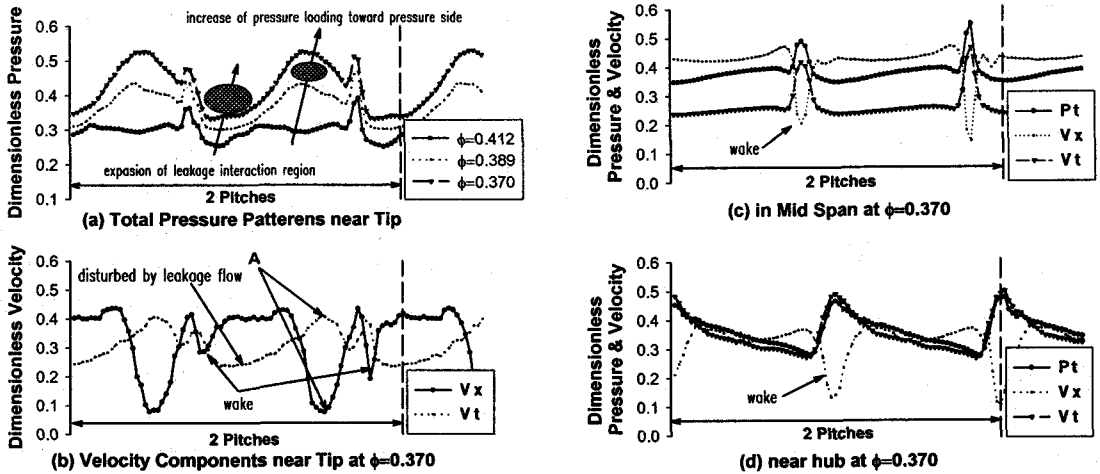


Fig. 4 Distributions of Phase-averaged Total Pressure and Velocity Components

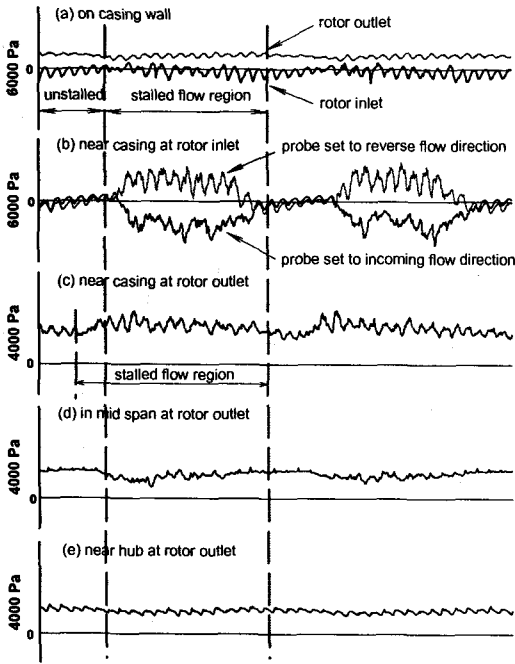
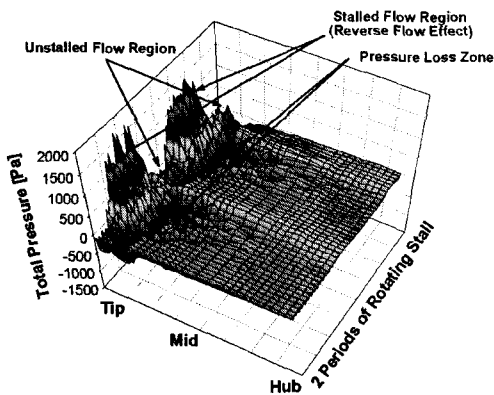


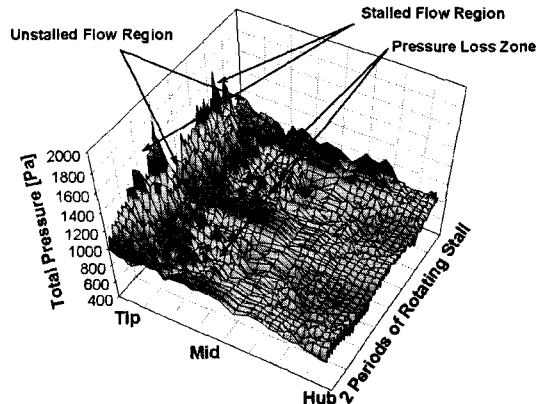
Fig. 5 Distributions of Phase-averaged Wall Static Pressure and Total Pressure Signals under Stall Condition

것을 알 수 있다. 본 연구에서는 반경방향 속도성분을 측정하지는 못했지만 Inoue<sup>(8)</sup>가 측정한 결과와 비교해 볼 때, 현 위치의 측정점에서 누설와류의 존재를 예상할 수 있다.

### 3.3. 선회실속 영역의 압력장



(a) at Rotor Inlet



(b) at Rotor Outlet

Fig. 6 Total Pressure Fields at Inlet and Outlet of Rotor under Stall Condition

Figure 5은 동익의 팁 전연으로부터 상류 38.5mm, 하류 49.5mm에서 측정된 전압 신호들을 이중위상평균 기법을 이용하여 평균한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 전압신호에서도 (a)의 정압력 결과와 마찬가지로 비실속 영역과 실속 영역(ref.(5) 참고)이 구분되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 (b)에서는, 측정점이 동익의 입구입을 감안할 때, 역류효과를 표현할 수 있는 높은 양압이 팁의 실속영역에서 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 반대로 입구 유동에서 볼 때 전압력 손실을 의미한다.

Figure 5 (c)~(d)의 결과에서 알 수 있듯이, 실속영역은 원주방향으로 로터 후방에서 더욱더 확대된 것을 알 수 있고, 스패의 중앙에서는 축소되고 허브쪽에서는 그 영향이 거의 사라진 것을 알 수 있다.

Figure 6 (a)와 (b)는 동익의 팁 전연으로부터 상류 38.5mm, 후연으로부터 49.5mm 하류에서 측정된 전압력장을 보여주고 있다. (a)에서 알 수 있듯이, 팁 부근의 실속구간에서 강한 역류효과가 나타나는 것을 알 수 있고, 반경방향으로 실속셀 아래에는 압력 손실이 커지는 영역이 국부적으로 존재하는 것을 확인 할 수 있다. 입구와 비교해서 동익 후방의 전압력장에서는 팁부근에서 실속영역이 더욱 더 확대된 것을 알 수 있고, 입구와 마찬가지로 팁과 중앙사이에 압력 손실이 커지는 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 스패방향으로 입구쪽 실속영역 아래에 이러한 전압력 손실영역이 국부적으로 존재하는 것은 열선유속계를 이용하여 측정된 Poensgen<sup>(7)</sup>과 일치하는 것이며 본 연구에서는 동

의 출구에서도 입구와 유사한 유동구조를 갖는다는 것을 확인 할 수 있다.

## 6. 결론

송풍기의 불안정성이 증대되는 유량영역과 주기적인 선회실속이 발생하는 유량점에 대해서 비정상 압력을 측정하였으며, 분석한 결과로부터 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 측정된 동익의 후방, 전압력 분포의 경향은 접선방향 속도 성분에 크게 의존하는 것을 알 수 있었다.

선회실속 유량점으로 갈수록 블레이드의 팁, 전연으로부터 코드의 12.5% 하류위치에서 압력면과 흡입면의 정압력 차이가 최대가 되는 것을 알 수 있었다.

선회실속 유량점으로 갈수록 동익의 팁 부근에서 누설유동으로 인한 전압력 손실 영역이 확대되는 것을 알 수 있었고, 블레이드 압력면에 부하가 커지는 것이 확인되었다.

실속영역에서는 동익의 입구, 팁 부근의 실속영역에서 강한 양압이 형성되는 역류효과가 동반되고, 반경방향으로 그것의 아래쪽에는 압력손실이 큰 영역이 존재하는 것이 확인되었다.

선회실속하의 입구와 출구의 압력장은 그 구조에 있어서 유사한 특성을 갖는 것을 확인 할 수 있었다.

팁 부근에서의 실속영역은 입구보다 출구에서 원주 방향으로 확대되었고, 스펜방향으로는 허브면으로 갈수록 입구와 출구에서 동일하게 그 영향력이 점차 사라지는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발 사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였으면, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Joachim Marz, Chunill Hah and Wolfgang Neise, 2002, "An Experimental and Numerical Investigation into the Mechanism of Rotating Instability" J. of

Turbomachinery, Vol 124, pp. 367~375.

(2) Lakshminarayana, B., Pouagare, M. and Davino, R., 1982, "Three-Dimensional Flow Field in the Tip Region of a Compressor Rotor Passage-Part II: Turbulence Properties", J. of Engineering for Power, Vol. 104, pp. 772~782.

(3) Hongwei Ma and Haokang Jiang, 2001, "Three-Dimensional Turbulent Flow in The Tip Region of an Axial Compressor Rotor Passage at a Near Stall Condition", ASME TURBO EXPO 2001, 2001-GT-0331.

(4) Larguier, R., 1981, "Experimental Analysis Methods for Unsteady Flows in Turbomachines", J. of Engineering for Power, Vol. 103, pp. 415~423.

(5) 강창식, 신유환, 김광호, 이두열, 2002, "비정상 압력측정을 통한 축류팬 유동특성에 관한 연구", 유체기계저널, 제 5권 제 3호, pp. 15~24.

(6) P. Puddu and C. Palomba, 1995, "The Relative Flow Field Upstream and Downstream of an Axial-Flow Compressor Rotor during Rotating Stall", IGTC, Vol. II, pp. 165~172.

(7) C.A Poensgen, and H.E. Gallus, 1994, "Rotating Stall in a Single Stage Axial Flow Compressor", ASME IGTI paper, 94-GT-210.

(8) Motoo Kuroumaru, Masahiro Inoue and Tako Hikaki, 1982, "Measurement of Three Dimensional Flow Field behind on Impeller by Means of Periodic Multi-sampling with a Slanted Hot Wire. JSME Paper No. 209-4, Vol 25, pp. 1674~1681.

(9) 신유환, 김광호, 1998, "임펠러 출구에서의 유동 측정 기법", 유체기계저널, 제 2권 제 1호, pp. 81~87.

(10) 신유환, 김광호, 1998, "선회실속하의 원심 임펠러 출구 유동 특성", 유체기계저널, 제 2권 제 2호, pp. 5~12.

(11) D. Kato, E. Hirose, K. Ichida and E. Outa, 1995, "Numerical and Experimental Study on Deep Stall Cell Behavior in an Axial Compressor", IGTC, Vol. II, pp. 173~180.