

원심압축기 스톨 발단에 관한 실험적 연구 (II)

- 스톨 경고 방법 -

강 정 식* · 강 신 형*

(2001년 3월 5일 접수, 2001년 7월 25일 심사완료)

Experimental Study on Stall Inception in a High-Speed Centrifugal Compressor (II)

- Stall Warning Method -

Jeong-Seek Kang and Shin-Hyoung Kang

Key Words: Stall Inception(스톨 발단), Centrifugal Compressor (원심압축기), Stall Warning Method(스톨 경고 방법), Spectrum at Impeller Frequency(임펠러 주파수의 스펙트럼)

Abstract

Stall inception in a high-speed centrifugal compressor has been examined. The main objective was to find stall precursor and to develop a reliable stall warning method. For stall warning, a method which uses the spectrum at impeller frequency is suggested. The use of the spectrum at impeller frequency as a stall warning method showed a warning time of about two hundreds impeller revolutions. This method uses only one sensor that it has made the stall warning method more useful. And the well-known traveling wave energy method proved to be a good method for stall warning also in a high-speed centrifugal compressor. The warning time was about one hundred impeller revolutions at lower speeds, and about one thousand impeller revolutions at higher speeds. The stall warning methods used here were found to be robust and reliable. Therefore, it seems to be promising to set up a reliable stall avoidance control based on this analysis

기호설명

- f : 주파수
- f_{imp} : 임펠러 주파수
- $f(t)$: 목적함수
- SFC : 공간 푸리에 계수
- t : 시간
- TWE : 회전하는 파의 에너지

상첨자

- : 시간 평균 값

† 책임저자, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : kangsh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7113 FAX : (02)883-0179

1. 서론

압축기에서 스톨과 서지는 압축기의 압축비와 효율을 저하시킬 뿐 아니라 시스템의 파괴를 초래할 수 있기 때문에 오랫동안 스톨과 서지에 대한 현상적인 연구 뿐 아니라, 이들을 효과적으로 제어할 수 있는 방법이 연구되어져 왔다. 그리고 최근 10여 년 동안에는 스톨이 발생하기 전에 이를 미리 감지하여 스톨을 방지하려는 방법이 많이 연구되어져 왔다. 이런 스톨 발단에 관한 연구는 스톨이 발생하기 전에 스톨의 선구 신호(precursor)가 존재하는지, 존재한다면 어떤 조건하에서 존재하는지, 그리고 그것을 감지하기 위한 가장 신뢰성 있는 방법은 무엇인지를 중심으로 활발히 진행되어져 왔다.

스톨의 선구 신호를 추정하고 해석하기 위하여 여러

가지 방법이 제시되었다. 대표적인 방법은 Moore와 Greitzer^(1,2)가 예측한 축방향 속도의 섭동이 원주방향으로 모드를 이루며 회전하는 현상을 측정하는 것인데, 이를 위하여 로터 상류의 동일한 축방향 위치에서 원주방향으로 균일한 간격으로 여러 개의 열선이나 고속 압력변환기를 설치하여 동시에 신호를 측정하고, 이를 공간 푸리에 변환(spatial Fourier transform)을 통하여 원주방향으로 분포된 작은 크기의 회전하는 파를 측정하는 방법이 주로 사용되었다. 작은 크기의 회전하는 파가 존재할 경우 공간 푸리에 계수의 위상이 일정한 속도로 전파하게 되는데, 이는 위상-시간의 그림에서 일정한 기울기를 가진 직선으로 나타나며, 이를 스톨의 선구신호로 생각한다 (McDougall 등,⁽³⁾ Garnier 등,⁽⁴⁾ Etchevers,⁽⁵⁾ Tryfonidis 등,⁽⁶⁾ Boyer 등⁽⁷⁾). 또한 이 공간 푸리에 계수들을 이용하여 회전하는 파의 에너지를 계산하여 선구신호를 감지하는 회전하는 파의 에너지(Traveling Wave Energy, TWE) 방법도 개발되었다 (Garnier 등,⁽⁴⁾ Tryfonidis 등⁽⁶⁾). 그리고 비정상 압력신호에 웨이블렛 신호를 이용하거나 (Liao 등,⁽⁸⁾ Le,⁽⁹⁾ Höss 등⁽¹⁰⁾), 카오스 이론을 이용하는 방법도 제안되었다 (Bright 등⁽¹¹⁾). 스톨의 경고방법은 다양한 스톨 발달과정에서도 신뢰성 있게 스톨의 발달을 예측해야 하며, 스톨 경고 시간이 길면 길수록 좋다. 이런 면에서 위의 각각의 방법들은 특정 경우에는 좋은 성능을 보이지만, 다양한 압축기와 실험 속도에서 신뢰할 수 있는 방법은 아직 제시되지 못했으며, 지속적인 연구가 필요한 상황이다.

원심압축기에서는 스톨발단에 대한 연구결과가 많지 않다. Lawless 등⁽¹²⁾은 저속의 원심압축기에서 스톨발단 연구를 수행하였는데, 공간 푸리에 변환을 통하여 스톨이 발생하기 전에 원주방향으로 분포된 작은 크기의 파가 존재함을 보였으며, 약 14바퀴의 스톨 경고시간을 얻었다. 대부분의 스톨 발달 연구가 축류압축기에서 수행되어져 왔기 때문에 원심압축기에서의 스톨 발달 현상에 대하여는 알려진 바가 드물어서 많은 연구가 필요한 상황이다.

본 논문의 전편(Part I)에서는 고속의 원심압축기에서 스톨 발달에 관한 연구를 수행하였으며, 스톨발단 과정에서 임펠러의 회전주파수가 스톨을 일으키는 데 밀접한 관련이 있음에 대하여 상세히 기술하였다. 본 논문에서는 스톨의 발달을 미리 감지하는 방법의 개발에 대하여 기술하였다. 회전하는 파의 에너지 방법이 원심압축기에서도 스톨을 미리 경고하는 방법으로 사용될 수 있음을 보였으며, 또한 임펠러 주파수의 스펙

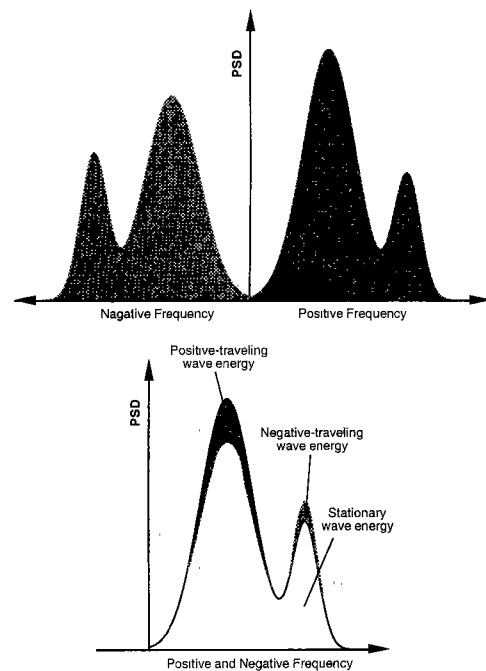


Fig. 1 An example of nonaxisymmetric spectrum and its division into positive, negative, and stationary wave energy parts

트럼의 증가를 스톨의 시작을 미리 알리는 방법으로 제안하여 좋은 결과를 얻었다.

2. 스톨 경고 방법

스톨 경고점은 이 논문의 전편(Part I)에서 스톨점을 결정하는 방법과 동일한 기준으로 결정되었으며, 다음의 식(1)로 표현되었다.

$$\text{if } \bar{f}(t) \geq 2\bar{f}(t - \Delta t) \rightarrow \text{Stall} \quad (1)$$

여기서 $f(t)$ 는 목적함수이고, \bar{f} 는 임펠러가 10바퀴 회전하는 동안의 f 의 평균값이고, $\bar{f}(t - \Delta t)$ 는 임펠러가 약 100바퀴 회전할 동안의 f 의 평균값이다. 이 논문에서 Δt 는 임펠러가 500바퀴 회전하는 시간을 사용하였다. 목적함수로는 다음에 설명한 회전하는 파의 에너지와 임펠러 주파수의 스펙트럼을 사용하였으며, 각각의 결과를 비교하였다.

2.1 회전하는 파의 에너지(TWE) 방법

공간 푸리에 계수의 파워 스펙트럼은 Fig. 1에 나타

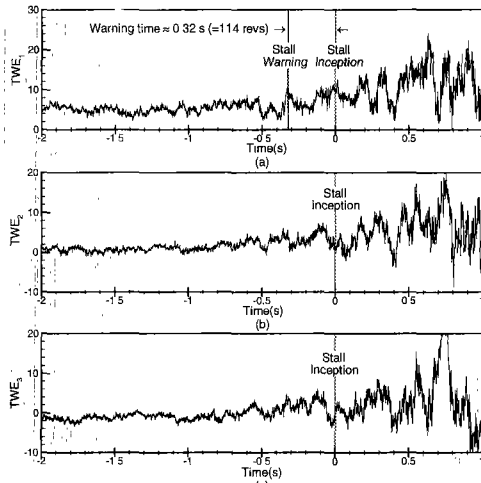


Fig. 2 The traveling wave energy at 35% speed
 (a) TWE from 1st spatial Fourier coefficients
 (b) TWE from 2nd spatial Fourier coefficients
 (c) TWE from 3rd spatial Fourier coefficients

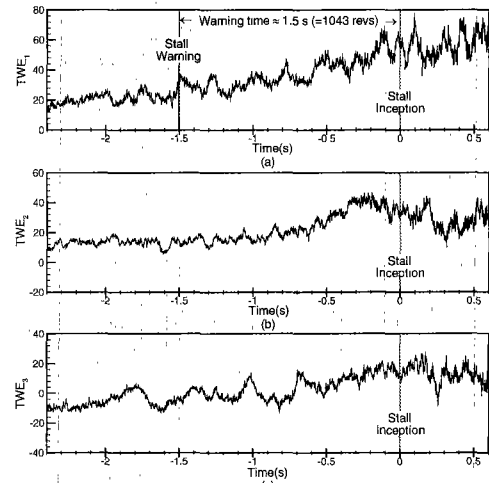


Fig. 4 The traveling wave energy at 70% speed
 (a) TWE from 1st spatial Fourier coefficients
 (b) TWE from 2nd spatial Fourier coefficients
 (c) TWE from 3rd spatial Fourier coefficients

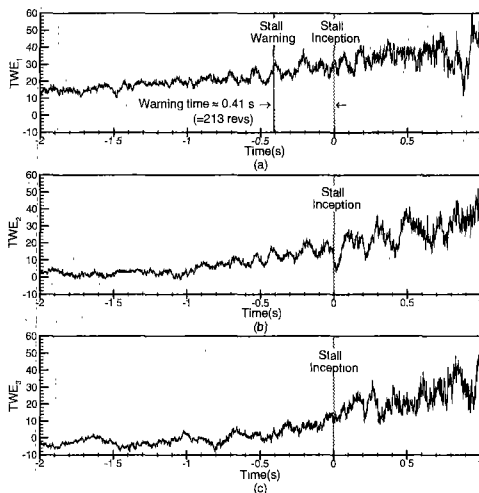


Fig. 3 The traveling wave energy at 52% speed
 (a) TWE from 1st spatial Fourier coefficients
 (b) TWE from 2nd spatial Fourier coefficients
 (c) TWE from 3rd spatial Fourier coefficients

낸 바와 같이 주파수 0인 원점에 대하여 대칭이지 않고 양과 음의 주파수 영역이 나타나는데, 양과 음이 겹치는 부분은 정지파, 양의 값만 존재하는 부분은 양의 방향으로 회전하는 파, 그리고 음의 값만 존재하는 부분은 음의 방향으로 회전하는 파의 의미를 가지고 있다. 그리고 비대칭인 부분의 면적은 각각 양과 음의

방향으로 회전하는 파의 에너지를 나타낸다 (Etchevers,⁽⁵⁾ Tryfonidis 등⁽⁶⁾). 그러므로 양과 음의 스펙트럼의 면적의 차이로부터 일정 시간 동안 존재한 회전하는 파의 에너지와 회전방향을 알 수 있다. 이 방법은 에너지의 적분을 사용하는 방법이어서 노이즈가 많은 상황에서도 스톨 발단을 경고하는데 좋은 결과를 나타내었다 (Tryfonidis 등,⁽⁶⁾ Höss 등⁽¹⁰⁾).

Etchevers,⁽⁵⁾ Tryfonidis 등⁽⁶⁾은 회전하는 파의 에너지 방법을 사용하여 스톨의 발단을 미리 감지하는 경고시간(warning time)을 얻는데 좋은 결과를 얻었으며, 이로부터 이 방법을 스톨의 발생을 예측하는 방법으로 제안하였다. Day 등⁽¹³⁾도 회전하는 파의 에너지가 5단의 축류압축기(DRA압축기)에서 스톨을 경고하는데 좋은 결과를 보였으며, 특히 스파이크 형태의 스톨 발단의 경우에도 경고시간은 짧지만 회전하는 파의 에너지 방법이 효과가 있음을 설명하였다.

이 논문에서는 회전하는 파의 에너지를 구하기 위하여 임펠러가 약 30회전하는 동안의 데이터를 공간 푸리에 변환하여 양과 음의 방향으로 회전하는 에너지를 계산하였다. 그리고 임펠러가 약 한 바퀴 회전한 후 동일한 과정을 수행하였다. 그리고 목적함수를 1차 공간 푸리에 계수로부터 계산한 회전하는 파의 에너지를 사용하여, 식(1)의 기준을 따라 임펠러가 10바퀴 회전하는 동안 1차 공간 푸리에 계수로부터의 회전하는 에너지의 평균값이 스톨이 발생하기 전의 평균에너지의

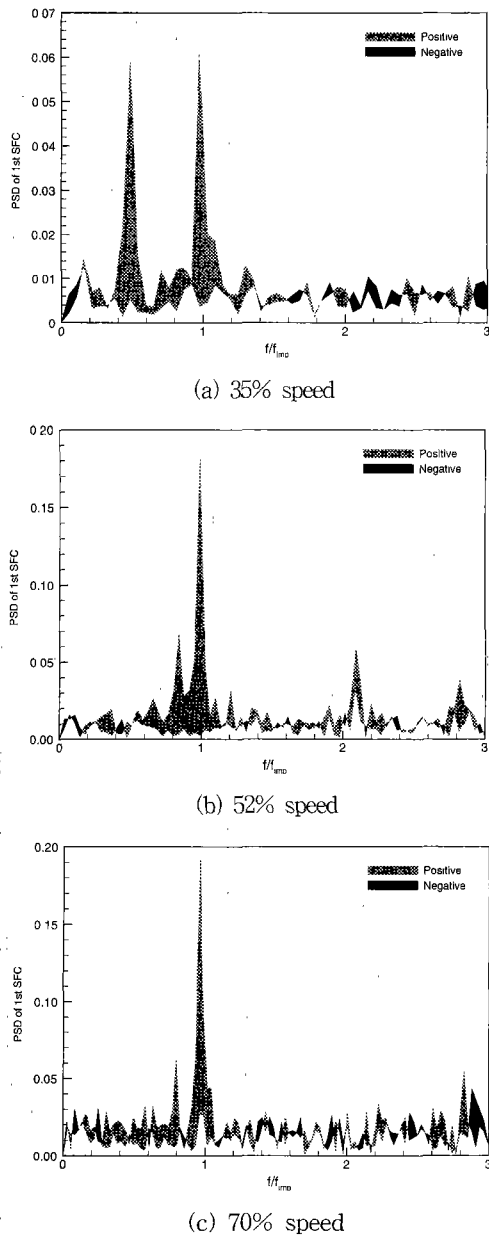


Fig. 5 PSD from 1st spatial Fourier coefficients. Gray areas : forward traveling wave energy; black areas : negative traveling wave energy; white areas : stationary wave energy

두 배가 되면 스톨을 경고하는 시간으로 정하였다.

2.2 임펠러 주파수의 스펙트럼을 이용한 방법

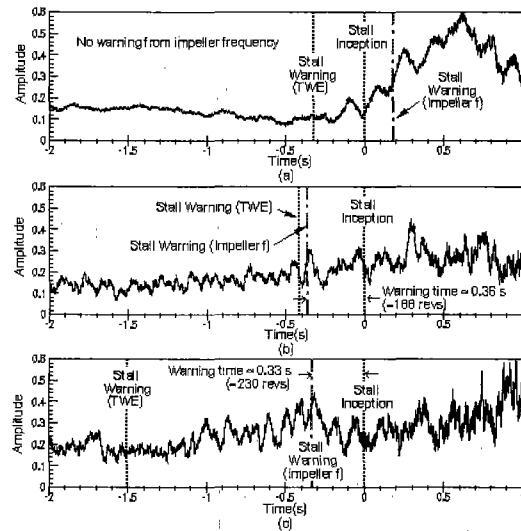


Fig. 6 Time histories of the spectrum of impeller frequency (a) 35% speed (b) 52% speed (c) 70% speed

이 논문의 전편(Part I)에서 스톨이 발생하기 전에 임펠러 주파수의 스펙트럼이 증가하는 것은 실험된 모든 속도에서 일반적으로 나타나는 현상임을 보였다. 이 현상으로부터 임펠러 주파수의 스펙트럼의 증가는 스톨을 경고하는 방법으로 사용될 수 있을 것이다. 그래서 목적함수를 임펠러 주파수의 파워스펙트럼을 사용하여, 식(1)의 기준을 따라 임펠러가 10바퀴 회전하는 동안 압력비의 섭동 데이터로부터 계산한 임펠러 주파수의 스펙트럼이 스톨이 발생하기 전의 값의 두 배가 되면 스톨을 경고하는 시간으로 정하였다.

3. 결 과

3.1 회전하는 파의 에너지(TWE) 방법

35% 속도에서의 회전하는 파의 에너지(TWE)를 Fig. 2에 나타내었다. 1차 푸리에 계수로부터의 에너지는 스톨이 발생하기 114바퀴(0.32초) 전에 스톨을 경고하였다. 그리고 스톨을 경고하는 순간에서의 에너지 스펙트럼을 Fig. 5(a)에 나타내었는데, 임펠러 주파수와 임펠러 주파수의 0.5배 주파수에서의 에너지가 주도적이며, 고주파수에서도 양의 방향으로 회전하는 에너지가 많이 나타났다. 2차와 3차 공간 푸리에 계수에서도 회전하는 에너지의 크기가 스톨로 접근하면서 증가하는 경향을 보였다.

52% 속도에서의 회전하는 파의 에너지를 Fig. 3에

나타내었다. 1차 푸리에 계수로부터의 에너지는 스톨이 발생하기 213바퀴(0.41초) 전에 스톨을 경고하였다. 그리고 스톨을 경고하는 순간에서의 에너지 스펙트럼을 Fig. 5(b)에 나타내었는데, 임펠러 주파수에서의 에너지가 주도적이며, 고주파수에서도 양의 방향으로 회전하는 에너지가 많이 나타났다. 2차와 3차 푸리에 계수에서도 회전하는 에너지의 크기가 스톨로 접근하면서 증가하는 경향을 보였다.

70% 속도에서의 회전하는 파의 에너지를 Fig. 4에 나타내었다. 1차 푸리에 계수로부터의 에너지는 스톨이 발생하기 1043바퀴(1.5초) 전에 스톨을 경고하여, 아주 긴 경고시간을 보였다. 그리고 스톨을 경고하는 순간에서의 에너지 스펙트럼을 Fig. 5(c)에 나타내었는데, 여기에서도 임펠러 주파수에서의 에너지가 주도적이며, 고주파수에서도 양의 방향으로 회전하는 에너지가 많이 나타났다. 2차와 3차 푸리에 계수에서도 회전하는 에너지의 크기가 스톨로 접근하면서 증가하는 경향을 보였다.

회전하는 파의 에너지 방법(TWE)은 세 가지 속도 모두에서 만족할 만한 경고시간을 보였다. 그리고 이 방법은 회전수가 증가할수록 경고시간이 증가하는 경향을 보였다. 그리고 이 논문의 전편(Part I)에서 보인 공간 푸리에 계수의 위상과 주파수 분석에서 볼 수 있듯이 임펠러 주파수는 스톨을 발생시키는 요인으로서, 그리고 또한 스톨을 경고하는 에너지 증가의 요인으로서 중요한 역할을 하고 있다. 회전하는 파의 에너지 방법이 원심압축기에 적용된 것은 세계적으로도 처음이며, 그 결과 만족할 만한 스톨경고시간을 얻은 것은 아주 귀한 결과이다.

3.2 임펠러 주파수의 스펙트럼을 이용한 방법

압축기를 스로틀링하여 스톨로 접근해 가면서 임펠러 주파수의 스펙트럼의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 35%속도에서는 임펠러 주파수의 스펙트럼이 스톨 발단 근처에서 증가하기는 하지만 식(1)에 나타난 기준대로 2배 이상 증가하는 것은 스톨 발단 이후에 나타나서, 경고시간은 전혀 보이지 않는다. 52% 속도에서는 경고시간이 0.36초로 임펠러가 188바퀴 회전하는 시간이며, 이것은 회전하는 파의 에너지에 의한 결과와 비슷한 시간이다. 70% 속도에서는 경고시간이 0.33초로 임펠러가 230바퀴 회전하는 시간이다.

스톨이 발생하기 전에 항상 임펠러 주파수의 파워스펙트럼이 커지므로, 이것을 식(1)의 기준을 사용하여 스톨을 경고하는 방법으로 사용하였을 때 52%와 70%

의 속도에서 적절한 경고시간을 얻었다. 35%의 속도에서는 경고시간이 전혀 없는 반면에, 임펠러의 회전속도가 증가할수록 긴 경고시간을 보였다. 그러므로 이 방법은 임펠러의 회전속도가 빠를수록 스톨을 경고하는데 더 좋은 결과를 보인다고 할 수 있겠다. 이 방법의 또 하나의 장점은 회전하는 파의 에너지 방법은 여러 개의 센서에서의 동시측정이 필요한 반면에, 임펠러 주파수의 스펙트럼은 하나의 센서의 측정에서도 사용이 가능하다는 것이다.

이 방법이 모든 압축기에서 스톨을 경고하는데 좋은 결과를 보일지의 여부는 다른 여러 개의 압축기에서의 검증이 필요하다. 그렇지만 Tryfonidis 등,⁽⁶⁾ Day 등,⁽¹³⁾ Höss 등⁽¹⁰⁾의 실험결과와 Hendricks 등⁽¹⁴⁾의 수치해석 결과에 의하면 임펠러 주파수가 스톨의 시작과 연관이 있는 것으로 밝혀졌으므로, 임펠러 주파수의 스펙트럼을 이용하여 스톨을 경고하는 방법은 많은 압축기에서 좋은 방법이 될 수 있으리라 기대된다.

4. 결론

이 논문에서는 고속으로 회전하는 원심압축기에서 스톨 발단 연구를 수행하였다. 스톨이 발생하기 전에 미리 경고할 수 있는 방법을 연구하였으며, 주된 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 회전하는 파의 에너지 방법은 스톨을 경고하는 좋은 성능을 보였으며, 실험을 수행한 설계속도의 70% 이하에서는 임펠러의 회전수가 증가할수록 더욱 긴 경고시간을 보였다. 저속에서는 약 임펠러 100바퀴(0.32초)의 경고시간을 보였으며, 고속에서는 약 임펠러 1000바퀴(1.5초)의 경고시간을 보였다.

(2) 임펠러 속도에 관계없이 임펠러 주파수의 스펙트럼이 스톨로 접근하면서 증가하므로, 이 값의 증가가 스톨을 경고하는 방법으로 사용될 수 있음을 보였으며, 약 임펠러 200 바퀴(0.36초)의 경고시간을 얻었다. 이 방법은 하나의 센서로부터의 데이터를 이용하므로 여러 개의 센서를 사용하는 기존의 방법보다 실제적인 유용성이 더욱 높다.

참고문헌

- (1) Moore, F. K., and Greitzer, E. M., 1986, "A Theory of Post-Stall Transients in Axial Compression Systems: Part 1-Development of Equations," *ASME Journal of Engineering for*

- Gas Turbines and Power*, Vol. 108, pp. 68~76.
- (2) Greitzer, E. M., and Moore, F. K., 1986, "A Theory of Post-Stall Transients in Axial Compression Systems: Part 2-Application," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, pp. 231~239.
- (3) McDougall, N. M., Cumpsty, N. A., and Hynes, T. P., 1990, "Stall Inception in Axial Compressors," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 112, pp. 116~125.
- (4) Garnier, V. H., Epstein, A. H., and Greitzer, E. M., 1991, "Rotating Waves as a Stall Inception Indication in Axial Compressors," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 290~302.
- (5) Etchevers, O., 1992, "Evaluation of Rotating Stall Warning Schemes for Axial Compressors," M.S. Thesis, MIT Dept. of Aeronautics and Astronautics, Sep.
- (6) Tryfonidis, M., Etchevers, O., Paduano, J. D., Epstein, A. H., and Hendricks, G. J., 1995, "Pre-stall Behavior of Several High-Speed compressors," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 62~80.
- (7) Boyer, K. M., King, P. I., and Copenhaver, W. W., 1995, "Stall Inception in Single-Stage Transonic Compressors with Straight and Swept Leading Edges," *AIAA Journal of Propulsion and Power*, Vol. 11, No. 6, November-December.
- (8) Liao, S., and Chen, J., 1996, "Time-Frequency Analysis of Compressor Rotating Stall by means of Wavelet Analysis," ASME Paper No. 96-GT-57.
- (9) Le, D. K., Owen, A. K., and Mattern, D. L., 1996, "Multiscale Analysis of Stall Inception and Instabilities in an Axi-Centrifugal Turbohaft Engine," AIAA Paper No. 96-3174.
- (10) Höss, B., Leinhos, D., and Fottner, L., 2000, "Stall Inception in the Compressor System of a Turbofan Engine," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 32~44.
- (11) Bright, M. M., Qammar, H. K., Weigl, H. J., and Paduano, J. D., 1997, "Stall Precursor Identification in High-Speed Compressor Stages Using Chaotic Time Series Analysis Methods," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 491~500.
- (12) Lawless, P. B., and Fleeter, S., 1995, "Rotating Stall Acoustic Signature in a Low-Speed Centrifugal Compressor: Part 1-Vaneless Diffuser," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 87~96.
- (13) Day, I. J., Breuer, T., Escuret, J., Cherrett, M., and Wilson, A., 1999, "Stall Inception and the Prospects for Active Control in Four High-Speed Compressors," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, pp. 18~27.
- (14) Hendricks, G. J., Sabnis, J. S., and Feulner, M. R., 1997, "Analysis of Instability Inception in High-Speed Multistage Axial-Flow Compressors," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 714~722.