

# 입구 불균일 유동에 의한 원심압축기 스톨에 관한 실험적 연구

박재형\* · 강신형\*\*

## The Effect of Inlet Distortion on a Centrifugal Compressor

Jae-Hyoung Park\*, Shin-Hyoung Kang\*\*

Key Words : Centrifugal Compressor(원심압축기), Inlet Flow Distortion(입구 불균일 유동), Stall(실속)

### ABSTRACT

In this paper, the effect of circumferential inlet distortion on performance and stall has been experimentally investigated in a high-speed centrifugal compressor, comparing distorted cases with undistorted one. The performance of compressor was slightly deteriorated by defect of inlet static pressure which is caused by the circumferential inlet distortion. As stall was fully developed the inlet distortion did not affect the number of stall cell and the propagation velocity. It also did not affect stall inception at 40,000 and 50,000 rpm. However stall occurred at the lower flow rate for distorted flow at 60,000 rpm. For 50,000 rpm a unexpected phenomenon occurred : stall occurred first and then it disappeared.

### 1. 서론

원심압축기는 축류압축기에 비해 단단으로 보다 더 넓은 유량 범위에서 높은 압력을 얻을 수 있고 제작이 쉽고 고속회전과 소형화가 가능하다. 회전하는 임펠러의 원심력을 이용하여 유체를 압축할 수 있는 효과적인 장치로서 발전기나 터보 차저, 터보 냉동기와 같은 산업용으로 주로 사용되는데 공간적인 제약이나 다단으로 사용 시 임펠러 입구의 불균일 유동이 발생하게 된다. 이러한 입구 불균일 유동은 원심압축기 보다는 주로 축류압축기에서 연구되어 왔으며 성능을 감소시키고 작동 범위를 제한한다.

압축기는 저유량 영역에서 작동 시 스톨이나 서지와 같은 불안정성 특성들을 보이는데 스톨이 발생하면 압축비가 낮아지고 효율이 떨어지며 날개에 심한 진동이 발생한다. 하지만 스톨 근처에서 가장 높은

압축비를 얻을 수 있기 때문에 스톨과 서지를 연구하고 그 발생을 제어하는 것은 중요한 연구 주제가 되어 왔다.

항공기 엔진으로 사용되는 축류 압축기에서는 항공기 이착륙 시 그리고 순항 중 엔진으로 유입되는 장애물 등으로 인하여 엔진의 안정한 작동에 위협이 되고 있다. 심한 경우에는 엔진이 파괴되어 많은 손실을 입을 수 있다. 축류 압축기에서는 이러한 입구 불균일 유동을 반경방향과 원주방향의 형태로 구분하여 많은 연구를 하고 있다.(Longley<sup>(1)</sup>, Spakovszky<sup>(2)</sup>)

입구 불균일 유동이 원심압축기에 미치는 영향에 관한 연구로 Ariga 등<sup>(3)</sup>은 반경방향과 원주방향의 입구 불균일 유동이 성능 특성과 서지 한계선에 어떠한 영향을 미치는가를 실험적으로 연구했으며, Michela-ssi<sup>(4)</sup> 등은 임펠러 입구의 불류트에 의해 생성된 불균일 유동이 효율 특성에 미치는 영향에 대하여 비정상 유동 해석을 수행하였다. 위의 두 경우 모두 입구 불균일 유동은 압력 손실을 발생시키지만 작동 영역의

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : shkang@snu.ac.kr

변화에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며 Ariga 등의 연구에서 서지 한계선은 원주방향 입구 불균일 유동에 의하여 입구 불균일 유동이 없는 경우보다 더 낮은 유량에서 나타난다고 보고했다.

본 논문에서는 원주방향 입구 불균일 유동이 고속으로 회전하는 원심압축기의 성능 특성에 미치는 영향과 저유량 영역에서 발생하는 스톨의 특성, 즉 스톨 셀의 개수나 전과속도, 스톨 발단 등에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

## 2. 시험 장치 및 측정 방법

### 2.1. 시험 장치

시험 설비는 임펠러에 동축으로 연결된 터빈을 2대의 이동식 공기 압축기로 구동한다. 터빈으로 유입되는 공기를 조절하기 위해 터빈 입구에 유량 조절 밸브를 사용 설치하였으며, 이에 의해 회전수를 조절한다. 임펠러의 회전에 의해 입구 대기의 공기는 안정실을 통하여 유입되고 임펠러를 지난 공기는 배인없는 평행 디퓨저를 통해 압력 상승이 일어나고 체적이 큰 콜렉터를 지나게 되고 압축된 공기는 외부로 배출된다. 시험에 사용된 시험 설비를 Fig. 1에 나타내었다. 시험 설비에 관한 더 자세한 사항은 조성국 등<sup>(5)</sup> 과 Kang 등<sup>(6)</sup>에 잘 나타나있다.

압축기 설계 회전수와 유량은 각각 60,000 RPM과 0.334 kg/s이다. 시험용 임펠러는 18개의 주날개를 가지고 있으며, 직경은 110mm이고, 티타늄 합금으로 제작되었다. Fig. 2에 입구 불균일 유동을 발생시키기 위한 장치를 나타내었다. 길이 100 mm, 두께 4 mm인 판을 임펠러 입구 원관내에 설치하여 case1은 원판을 두 부분, case2는 세 부분, case3은 네 부분으로 나누어 원주방향으로 불균일 유동이 유입되도록 제작했다. Table 1에 임펠러의 주된 사양을 나타내었다.

### 2.2. 측정 방법

데이터 측정에 대한 전반적인 흐름도가 Fig. 3에 나타나있다. 임펠러의 회전수는 터빈의 회전축 끝 부근에 코일이 감긴 자석을 부착하고 자석의 회전에 따라 발생하는 유도기전력의 위상을 이용하여 정밀하게 측정하였다. 온도를 측정하기 위하여 T-type 열전대를 사용하였고, 회전수와 온도의 신호는 디지털 신호로

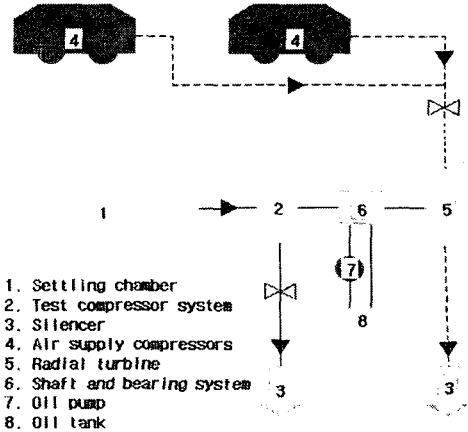


Fig. 1 Schematic diagram of experiment apparatus

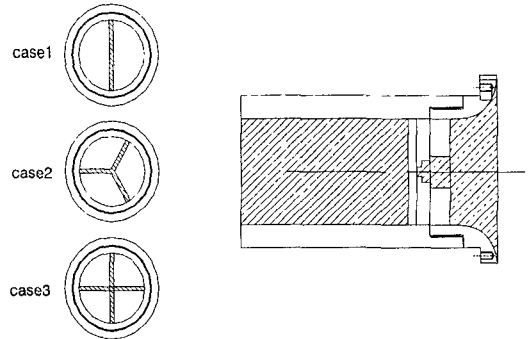


Fig. 2 Configuration of distortion generator

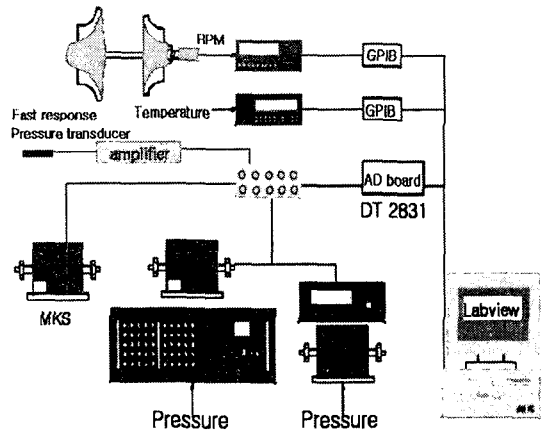


Fig. 3 Data acquisition flow chart

Table 1 Geometry and Specifications of the test impeller

Impeller diameter	110 mm
Inducer tip diameter	63.4 mm
Inducer hub diameter	20.4 mm
Backsweep angle	-35°
No. of Impeller blades	18
Design speed	60,000 RPM
Design flow rate	0.3445 Kg/s
Impeller tip width( $B_3$ )	5.5 mm
Impeller tip clearance	0.3 mm
Diffuser type	Parallel type
Diffuser radius ratio	2.6
Vaneless diffuser exit width	5.8 mm

변환하여 GPIB를 통하여 받아들인다.

정상 유동의 성능 평가를 위해서 대기의 온도와 압력을 측정하고 입구 불균일 유동의 손실을 측정하기 위해 입구 불균일 유동 발생 장치 하류에서 4곳의 정압을 측정하였고, 임펠러 출구와 디퓨저 출구에 각각 3 곳을 측정하였다. 콜렉터에서 전온도를 측정하여 디퓨저 출구에 이용하였다. 실험은 20,000 rpm에서 60,000 rpm까지 이루어졌다.

비정상 유동의 압력을 측정하기 위하여 빠른 응답 특성을 보이는 압력 변환기(Kulite XCQ-093)를 임펠러 출구( $R/R_2 = 1.1$ )의 원주방향 8곳에 등간격(45°)으로 디퓨저 벽면에 밀착하여 설치하였다. 입구 불균일 유동에 의한 스톨 발달의 영향을 분석하기 위해서는 모든 case에 대해서 동일한 조건에서 실험을 해야 하므로 정확한 유량과 임펠러 회전수 측정이 중요하다. 따라서 압축기 스톨링(throttling) 밸브의 정밀한 조작을 통해서 유량과 임펠러 회전수를 고정시킨 후 데이터를 측정하는 방법을 사용하였다. 신호는 20, 161 Hz의 속도로 측정하였으며 데이터는 약 4초간 80,000 개를 측정하였다. 회전수는 약 4초간 40개를 측정하여 평균하여 사용하였다. 유량은 20,161 Hz로 10,000개의 데이터를 받아 평균하여 사용하였다.

각각의 센서에서 측정된 아날로그 신호는 신호증폭기를 통하여 증폭되었고 관찰하고자 하는 대역의 주파수가 임펠러 회전수 이하이므로 1 kHz의 저대역 통과 필터를 사용하였다. 신호 증폭기를 통과한 아날로그 신호는 A/D 변환기(DT2838)를 통하여 디지털 신

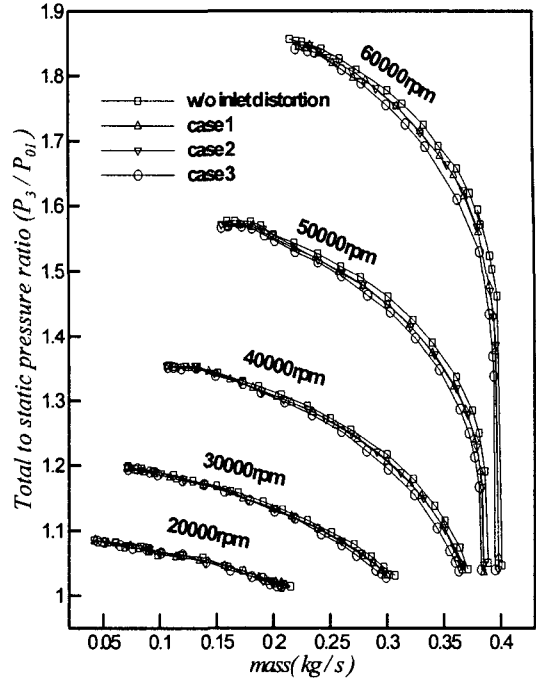


Fig. 4 Performance curve

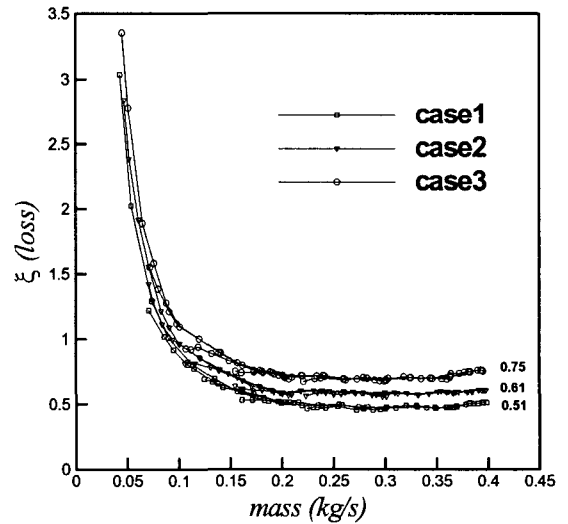


Fig. 5 Loss coefficient

호로 변환되어 컴퓨터에 저장된다. A/D 변환기는 8채널만 측정할 수 있기 때문에 또 하나의 A/D 변환기를 통해서 임펠러 회전수와 유량, 임펠러 입구 정압을 측정하였다. 모든 데이터 수집은 Labview 프로그램을 통해서 수행되었다. 20,000 rpm에서는 스톨 발생을 잘 확

인할 수 없었기 때문에 실험 회전수는 30,000 rpm에서 60,000 rpm까지 수행되었다.

### 3. 시험 결과 및 결론

#### 3.1. 정상 유동 실험 - 성능 특성

시험을 통해 측정된 압축기의 성능 곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 세로축에 디퓨저의 출구( $R/R_2 = 2.0$ )에서 측정된 정압을 대기압으로 나누어서 정압비(total to static pressure ratio)를 가로축에는 유량을 나타내었다.

임펠러 회전수를 고정하고 유량을 증가시키면 초크(choke)가 발생하였다. 베인없는 디퓨저에서는 임펠러 인듀서에서 초크가 발생한다고 알려져있다. 초크가 발생한 유량에 대해 임펠러 입구의 상대속도를 구해보면 230.16m/s로 임펠러 입구에서 초크는 발생하지 않았기 때문에 정확한 위치는 알 수 없지만 임펠러 내에서 초크가 발생한다고 추정할 수 있다.

성능 곡선에서 입구 불균일 유동이 존재하는 경우에 초크 유량이 줄어들었다. 이는 (1)식<sup>(7)</sup>으로부터 동

$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho_{01} a_{01} \left( \frac{P_1}{P_{01}} \right)^{\frac{\kappa+1}{2\kappa}} \quad (1)$$

일한 회전수에서 초크가 발생하는 면적은 같다고 한다면 입구 불균일 유동에 따른 압력손실에 의해서 초크 유량이 줄어든다는 것을 설명할 수 있다.

case1에서 case3으로 갈수록 손실이 증가하여 더 낮은 압력비를 나타낸다. 입구 불균일 유동에 따른 압력손실 계수를 (2)식으로 정의하자.

$$\xi = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2)$$

Fig. 5에 실험을 통해 측정된 데이터로부터 계산한 손실계수를 나타내었다. 이를 통해 알 수 있는 것처럼

Table 2 The number of cells in fully developed stall

	w/o id	case1	case2	case3
30000	2	2	2	2
40000	2	2	2	2
50000	3	3	3	3
60000	3	3	3	3

입구의 손실 증가가 압축기 성능을 감소시키는 역할을 한다.

#### 3.2. 비정상 유동 실험

##### 3.2.1 완전 발달된 스톨의 특성

스톨이 완전히 발달한 경우에 Frigne 등<sup>(8)</sup> 및 강정석<sup>(9)</sup>은 스톨 셀과 전파속도를 구하기 위해 식(3)과 식(4)를 이용하였다. 여기서  $f_{stall}$ 은 스톨의 주파수,  $\theta^\circ$ 는 두 센서사이의 떨어진 각도,  $\tau$ 는 두 센서 사이에서 측정된 스톨의 시간 간격,  $w_s$ 는 스톨 셀의 전파속도이다.

$$m = \frac{360^\circ}{\theta^\circ} \cdot \tau \cdot f_{stall} \quad (3)$$

$$w_s = \frac{2\pi f_{stall}}{m} \text{ (rad/sec)} \quad (4)$$

Table. 2에 입구 불균일 유동이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대해서 계산된 스톨 셀의 수를 나타내었다. Table. 2로부터 30,000 rpm과 40,000 rpm에서는 2개의 스톨 셀이, 50,000과 60,000 rpm에서는 3개의 스톨 셀이 완전히 발달하였다. 스톨 셀의 전파속도는 30,000 rpm에서는 임펠러 주파수에 대해( $w_s/w_{imp}$ ) 약 8.4%, 40,000 rpm에서는 약 8.1%, 50,000 rpm에서는 약 9.1%, 60,000 rpm에서는 약 8.1%의 속도로 회전하였다. 스톨 셀의 개수나 전파 속도는 입구 불균일 유동의 영향을 받지 않는 것으로 나타난다.

##### 3.2.2 스톨 발달

입구 불균일 유동이 스톨 발달에는 어떠한 영향을 주는가를 알아보자. 임펠러 출구에 설치된 8개의 고속 응답 압력 변환기에서 측정된 압력 신호의 섭동량의 RMS값을 평균 압력값으로 나눈 값을 유량에 대해서 Fig. 6, 7, 8에 나타내었다.

Fig. 6에서는 스톨이 모든 case의 실험에 대해서 비슷한 유량에서 발생하고 있음을 보인다. Fig. 7에서는 마치 스톨이 더 낮은 유량에서 발생한 것처럼 보이나 자세히 살펴보면 압력 섭동량이 작을 뿐 비슷한 유

량에서 스톨이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7로부터 입구 불균일 유동이 스톨 발달에 아무런 영향이 없는 것처럼 보인다.

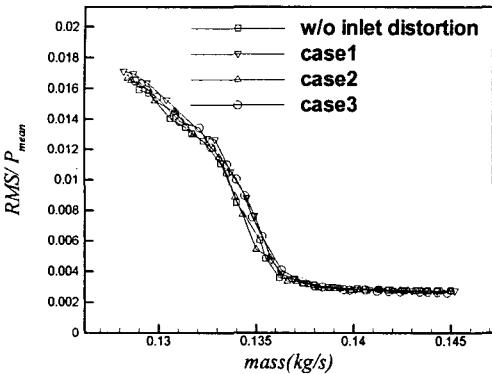


Fig. 6 Comparison of pressure perturbation at impeller exit ( $R/R_2 = 1.1$ ) in case of  $N=40000$  rpm

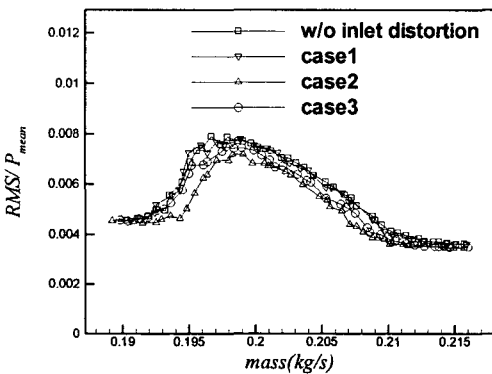


Fig. 7 Comparison of pressure perturbation at impeller exit ( $R/R_2 = 1.1$ ) in case of  $N=50000$  rpm

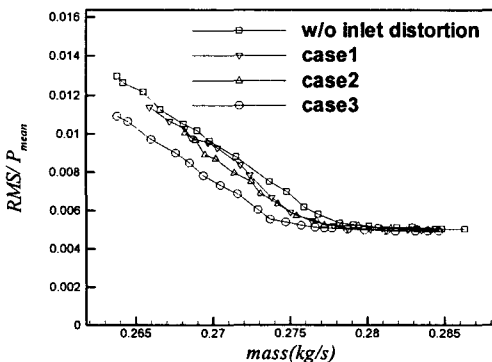


Fig. 8 Comparison of pressure perturbation at impeller exit ( $R/R_2 = 1.1$ ) in case of  $N=60000$  rpm

하지만 Fig. 8에서는 다른 현상을 보인다. case1과 case2의 경우에는 스톨 발생에 대해서 입구 불균일 유동이 없는 경우와 비교하여 논하기가 힘들지만 case3을 통해서 볼 때 비록 압력 섭동량은 작지만 더 낮은 유량에서 스톨이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 Ariga의 논문에서의 보고된 원주 방향 입구 불균일 유동이 서지 한계선에 미치는 영향과 같은 결과인가는 서지 한계선까지 실험을 더 해본 후에 결정할 수 있는 문제이다.

특이한 것은 다른 실험들과 달리 50,000 rpm의 경우 Fig. 7에서 볼 수 있는 것처럼 스톨이 발생되었다가 다시 사라진다는 것이다. 강정식<sup>(5)</sup>의 연구에서는 이러한 특성은 보고 되지 않았다. Emmons 등<sup>(10)</sup>은 원심압축기의 경우 이와 같은 현상을 mild 서지와 deep 서지로 구분하여 보고한바 있으나 그 원인에 대해서는 밝히지 않았다. 본 연구에서 나타난 현상이 Emmons 등의 mild 서지에 해당하는 것인가를 결정하는 것과 이러한 현상이 발생하는 원인에 대해서는 향후에 더 연구를 해야 할 것이다.

현재까지는 입구 불균일 유동에 의한 스톨 발달에 관한 연구를 중심으로 이루어졌다. 이러한 입구 불균일 유동이 서지 한계선과는 어떠한 관계가 있는가 하는 것도 관심의 대상이므로 향후에 입구 불균일 유동에 의한 서지 한계선에 대한 영향을 중심으로 연구를 할 것이다.

#### 4. 결론

원심압축기에서 입구 불균일 유동이 스톨에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 임펠러 입구에 입구 불균일 유동 발생 장치를 설치하여 실험을 수행하였다. 연구를 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 성능 특성은 입구에서의 손실이 많을수록 초크가 빨리 일어나고 더 낮은 성능을 나타내었다.
- 2) 스톨이 완전히 발달한 경우에 스톨 셀의 개수와 전파속도 등은 입구 불균일 유동에 의한 영향은 없는 것으로 나타났다.
- 3) 설계 회전수보다 낮은 회전수에서는 스톨 발달이 입구 불균일 유동의 영향을 거의 받지 않지만 설계 회전수에서는 입구의 압력 손실이 클수록 더 낮은 유량에서 스톨이 발생하였다.
- 4) 50,000 rpm에서는 스톨이 발생하다가 사라지는

특이한 현상을 발견했으며 아직 정확한 원인을 밝히지 못해 더욱 연구가 필요한 실정이다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부의 “원심압축기 성능 향상 및 시스템 안정화 연구” 연구과제의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Longley, J. P., 1996, "Effects of Rotating Inlet Distortion on Multistage Compressor Stability," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 181~188
- (2) Spakovszky, Z. S., 1999, Rotating Stall Control in a High-speed Stage With Inlet Distortion : Part II-Circumferential Distortion," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, pp. 517~524
- (3) Ariga, I. and Kasai, N., 1983, "The Effect of Inlet Distortion on the Performance Characteristics of a Centrifugal Compressor," *Journal of Engineering for Power*, Vol.105, pp. 223~230.
- (4) Michelassi, V., 2001, "Performances of Centrifugal

Compressor Impellers in Steady and Unsteady Flow Regimes under Inlet Distortion," *ASME* 2001-GT-0325

- (5) 조성국, 강신형, 1998, "소형 원심압축기의 성능평가에 대한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B권* 제22권 제8호, pp. 1052~1063.
- (6) Kang, S. H. and Kang, J. S., 1998, "A Hybrid Method of Performance Prediction for Channel Diffusers," *Proceedings of the Forth KSME - JSME Fluids Engineering Conference*, pp. 105~108.
- (7) Dixon, S. L., 1978, "Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery," Pergamon Press.
- (8) Frigne, P. and Van Den Braembussche, R. 1984, "A Theoretical Model for Rotating Stall in the Vaneless diffuser of a Centrifugal Compressor," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 507~513
- (9) 강정식, 2002, "원심압축기의 스톨 발달에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 공학박사학위논문
- (10) Emmons, H. W. and Pearson, C. E., 1955, "Compressor Surge and Stall Propagation," *ASME Transactions*, Vol 77, pp. 455~469