

## 다단 축류압축기의 스톨특성에 대한 실험적 연구

임형수\*†, 임영천\* · 송성진\*\* · 강신형\*\* · 양수석\*\*\*

### 1. 서 론

다단 축류압축기는 항공용 엔진과 발전용 가스터빈에서 고압의 공기를 연소기에 공급하기 위하여 사용된다. 축류압축기는 비속도가 크기 때문에 고유량의 유체를 압축할 수 있지만, 상대적으로 압력 상승량이 적어서 다단으로 구성되어 사용된다.

압축기는 일반적으로 성능 곡선상 고압영역에서 효율이 좋도록 설계가 된다. 하지만 운전 중 만일의 경우 운전점이 임계점을 넘어서 운전이 된다면 축류압축기에 rotating stall이나 surge 같은 불안정한 현상이 나타난다.

Rotating stall은 선회실속이라고도 불리며 압축기 유로가 동익과 같은 방향으로 회전하는 스톨 셀에 의하여 국부적으로 막히는 현상이다. 이러한 스톨 셀로 인하여 결과적으로 압축기의 압력과 유량이 급격히 저하된다. 스톨의 발단에 관해서는 여러 원인이 거론되고 있으며 현재도 그 원인을 밝히기 위한 연구가 진행중이다. 하지만 일반적으로 낮은 축방향 유속, 흡입면에서의 경계층 성장, 불균일한 입구 유동각 등과 같이 다양한 원인에 의해 스톨이 발생한다고 알려져 있다.

Stall 발생의 형태에 따라 spike type 또는 mode type으로 구분을 한다. Spike type은 Fig. 1(a)와 같이 몇 개의 blade에서 separation이 발생하여 stall 발생하게 되는 것이고, mode type은 fig. 1(b)와 같이 압축기 입구의 유동장이 원주길이에 대하여 harmonic한 유동이 형성되면서 stall 이 발생하는 것을 의미한다.

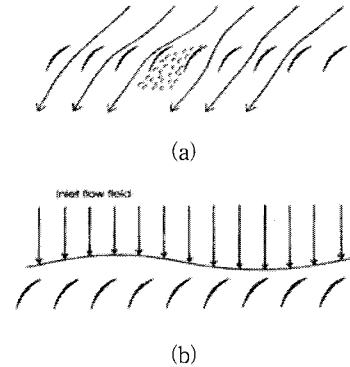


Fig. 1 Stall inception type (a) spike type (b) mode type [3]

Surge는 압축기, 연소기, 터빈으로 구성된 시스템에서 유동이 1차원적으로 진동을 하는 특성이 있다. 시스템에 따라서 반복적인 역류가 나타나거나 운전점이 일정하게 존재하지 못하고 특정한 성능 궤적을 나타내며 불안정한 운전 상태가 반복된다. Surge와 rotating stall과의 다른 점은 rotating stall은 압축기의 국부적인 현상이지만 surge는 시스템 전체적인 현상이라는 것이다.

이와 같이 rotating stall과 surge는 대표적인 압축기 불안정 특성으로써 시스템에 진동이나 불안정 유동상태를 유발시키고 압축기 출력을 저하시키는 원인이 되기 때문에 반드시 운전 중 발생해서는 안 되는 현상이다.

압축기의 높은 출력을 위해서는 압축기를 임계점 근처에서 운전하여야 하는데 그렇기 위해서는 스톨이나 서지에 대한 충분한 이해가 필요하다. 왜냐하면 불안정 특성을 충분히 이해하여야 임계점 근처에서 운전 중 어느 순간 스톨이나 서지가 발생하는 것을 예측하고 방지할 수 있기 때문이다. 해외에서는 이러한 압축기 불안정 현상에 대하여 1950년대부터 연구가 진행되었다. 그리고 오늘날에도 이 분야에 대하여 실험과 수치해석을 통하여 연구가 진행 중에 있다. 더 나아가 스톨이나 서지를 지연시키는 압축기 안정성 제어에 관한 연구도 다각도로 진행 중이다.

본 논문에서는 국내 연구기관에서 보유중인 4단 저속 연구

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원  
 \*\* 서울대학교 기계항공공학부  
 \*\*\* 한국항공우주연구원  
 † 교신저자, Email: limbo999@snu.ac.kr

용 축류 압축기를 이용하여 스톨에 관한 주요 특성을 실험을 통하여 소개하고자 한다. 국내 연구기설로 스톨 특성을 분석하고 그 결과를 선행연구와 비교함으로써 다단 축류압축기의 불안정 특성에 관한 국내 연구 기반을 마련한 데 의의를 두고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

본 실험에 사용된 4단 저속 축류압축기는 Fig. 2(a)와 같이 수직방향으로 제작이 되어 상부로 공기가 흡입되고 하부로 배출되는 구조이다. 압축기 입구로 흡입된 공기는 유동 상태를 균일하게 하기 위하여 설치한 필터를 지나고, 입구안내깃(IGV)과 4개의 단(동익렬, 정익렬)을 통해 압축되어 출구로 배출된다. 유량은 출구에 있는 스톨밸브를 사용하여 조절하였다.

한편 압축기의 압력 변화를 측정하기 위해 fig. 2(b)와 같이 고속응답 압력센서(Kulite社 XCQ-062)를 1단 동익 상류 코드 길이의 1/4 위치에 설치하였고, 8개의 압력센서를 원주 방향으로 45°간격으로 설치하여 스톨과 관련된 압력 신호를 측정하여 특징을 분석하였다. 4단 저속 축류 압축기에 관한 세부 사양은 Table 1에 나타내었다.

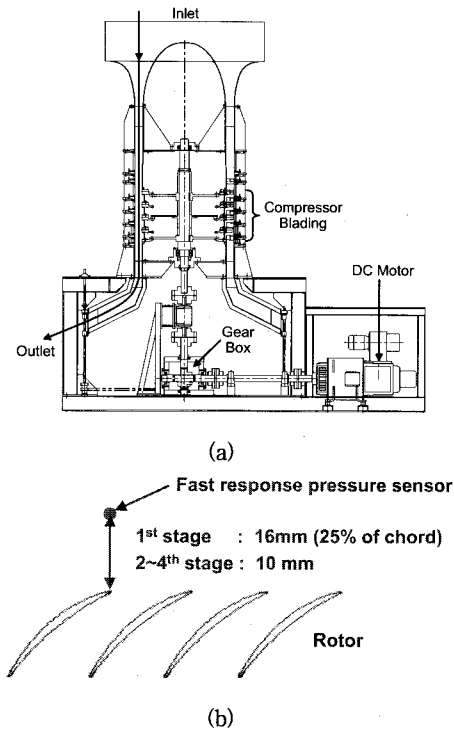


Fig. 2 Experimental equipment (a) 4-Stage low speed axial compressor (b) Fast response pressure sensor set up

Table 1 Specification of test facility

# of stage	4
# of IGV/rotor/stator	53 / 54 / 74
Height [m]	3.89
Tip radius [m]	0.5
Hub/Tip ratio	0.85
Aspect ratio	1.2
Chord_rotor [mm]	62.5
Stagger_rotor [deg]	51
DC motor [kW]	55

실험에 사용된 축류압축기는 최대 1200 rpm까지 회전 가능하고, 운전 회전수는 800 rpm이다. 압축기 회전수에 따른 무차원 성능을 알아보기 위하여 650, 800, 1000 rpm에서 성능 실험이 진행되었다.

실험 방법은 축류 압축기를 일정한 회전수로 운전하는 상태에서 출구의 스톨 밸브를 연속적으로 닫아 압축기의 유량을 줄임으로써 임계점을 지나게 하여 스톨을 강제로 유발시킨 후 그때의 여러 물리적 변화를 측정하였다.

## 3. 축류 압축기 스톨 특성

### 3.1 압축기 성능과 스톨

축류압축기의 무차원 성능 특성을 살피기 위하여 운전 회전수인 800 rpm과 650, 1000 rpm에 대하여 성능 시험을 실시하였다. 유량은 스톨밸브를 이용하여 조절하였고, 유량을 줄여가면서 스톨이 발생하지 않은 영역, 스톨 발달 영역, 스톨 완전 발달 영역에서의 성능을 측정하였다.

Figure 3은 3가지 회전수에 대한 무차원된 성능을 나타낸

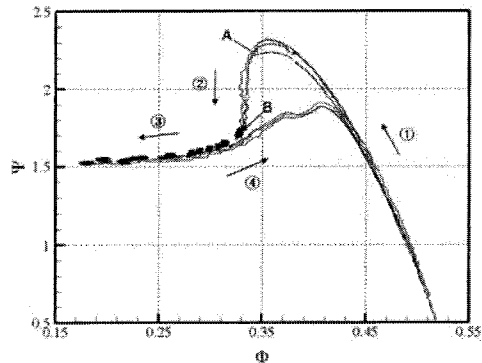


Fig. 3 Non-dimensional characteristic curve of 4-stage axial compressor (650, 800, 1000 rpm)

것인데, 그 경향이 전범위에 걸쳐 일치하였다. X축은 유량을 무차원한 것으로 입구속도를 회전속도로 나눈 값이다. Y축은 압력상승을 무차원한 것으로 4단과 1단의 압력차이를 동압으로 나눈 값이다. 일정한 회전수에서 유량 밸브를 닫아 유량을 줄일 때, 스톨이 발생하지 않는 안정한 영역에서는 성능 궤적이 ①과 같다. 그 후 임계점 A에서 스톨이 발달하여 성능이 ②와 같이 B로 하강하고 스톨이 완전히 성장하게 된다. 그리고 유량을 더 줄였을 때 스톨이 완전히 발달된 영역에서의 성능 궤적은 ③과 같으며, 마지막으로 유량을 늘려서 스톨 영역을 빠져나올 때의 궤적은 ④와 같다. 여기서 안정한 영역으로 돌아갈 때 A지점으로 돌아가지 않고 다른 지점으로 돌아가는 hysteresis가 나타난다.

Figure 4(a)는 운전 회전수인 800 rpm에서 유량과 압력의 변화를 시간에 대하여 나타낸 것이다. X축이 시간, Y좌축이 압력상승계수, Y우축이 유량계수이다. Fig. 4(b)는 1단 동익상단에 원주방향으로 등간격으로 설치한 고속응답 압력변환기를 통해 계측한 스톨 발달시 정압 변화를 fig. 3(a)와 동일한 시간에 대해서 나타낸 것이다.

유량을 서서히 줄일 때 임계점 근처( $\Phi = 0.351 @ 142 \text{ rev}$ )에서 모드가 발생하는데 이때서부터 압력이 급격히 감소하지는 않고, 스톨 셀이 어느 정도 성장한 이후( $\Phi = 0.342 @ 160 \text{ rev}$ ) 압력과 유량이 줄어들었다.

그리고 스톨이 완전 발달한 후 무차원 압력과 유량이 어느

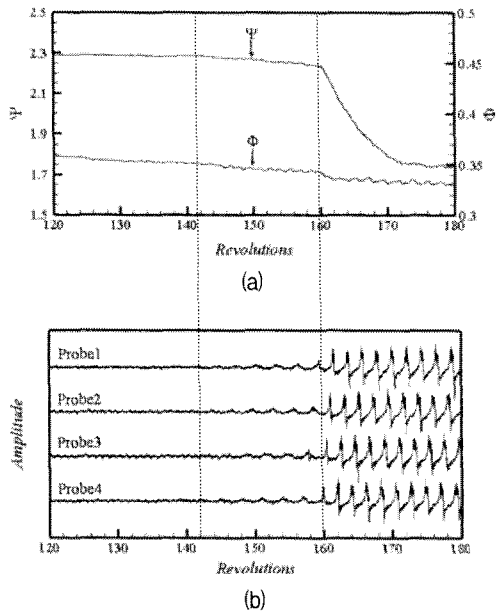


Fig. 4 Change of compressor characteristic for stall cell (a) Chnge of non-dimensional compressor characteristic (b) Growth of stall cell

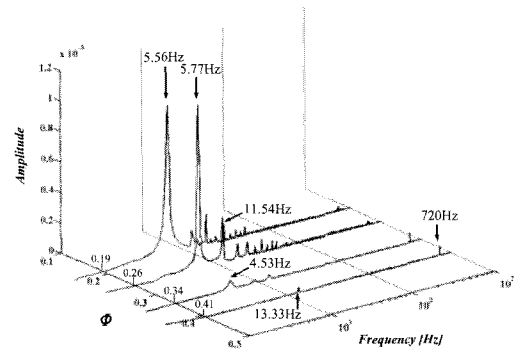


Fig. 5 Frequency analysis for compressor characteristic

Table 2 Comparison of stall frequency for compressor rotation speed

RPM	$f_{imp}$	$f_{mode}$	$f_{stall}$	$f_{mode}/f_{imp}$	$f_{stall}/f_{imp}$
650	10.8 Hz	3.3 Hz	4.7 Hz	30.5 %	43.5 %
800	13.3 Hz	4.53 Hz	5.77 Hz	34 %	43.4 %
1000	16.5 Hz	5.8 Hz	7.2 Hz	35.2 %	43.6 %

값에 수렴하는데, 이것은 스톨 발생 후 압축기 성능이 감소한 압력계수와 유량계수에 수렴하는 스톨의 특성이다.

Figure 5는 운전 회전수인 800 rpm에서 유량에 따른 주파수 특성을 보기 위하여 특정 유량일 때의 순간 압력 신호를 FFT한 결과이다. 안정한 상태인 고유량( $\Phi = 0.41$ )에서는 축주기에 해당하는 주파수 13.33 Hz와 BPF에 해당하는 720 Hz에서 주된 주파수 특성을 나타냈다. 임계점 근처에 해당하는  $\Phi = 0.34$ 에서는 모드가 발생하게 되는데, 이로 인하여 4.53 Hz에서 주파수 특성이 나타났다.

스톨이 완전 성장한  $\Phi = 0.26$ 에서는 5.77 Hz에서 주파수 특성이 나타나는데 이것이 스톨 주파수이다. Table 2에 650, 800, 1000 rpm에서 발생한 모드와 완전 발달한 스톨의 주파수 비를 나타냈다. 전반적으로 모드는 축 회전속도의 약 30%속도로 회전하였으며, 스톨이 완전 발달한 후에는 모드보다 빠른 약 43%의 속도로 스톨이 회전하는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 기존 문헌에 소개된 스톨 회전 속도의 결과와 잘 일치한다.

### 3.2 스톨 셀 특성

Stall 발생하면 stall cell 특성에 따라 part span stall 또는 full span stall로 나눈다. 그것은 blade의 stall cell 위치에 따라 나누는데 Fig. 6(a)와 같이 stall cell이 blade의 일부분에만 형성되면 part span stall이라 하고, Fig. 6(b)와 같이 blade 전체에 생기면 full span stall이라고 한다.

축류 압축기에서 발생한 스톨 셀의 개수와 셀이 완전 성장

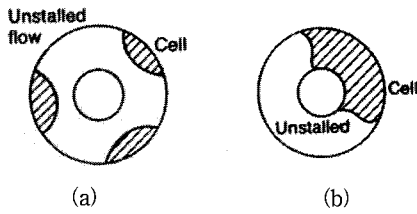


Fig. 6. Stall cell characteristic (a) part span stall (b) full span stall

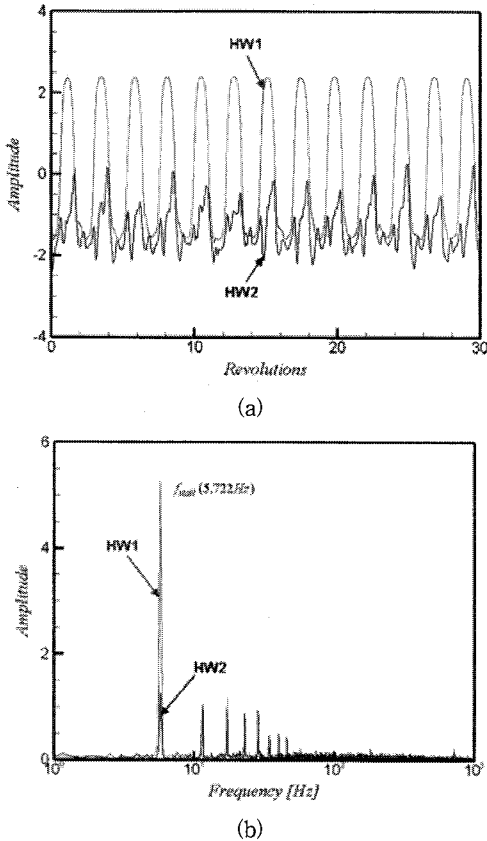


Fig. 7 Stall cell measurement by hot-wire (a) Hot-wire signal near rotor tip and hub (b) The result of frequency analysis

하였을 때, full span인지 part span인지를 확인하기 위하여 열속 유속계(Hot-wire Anemometer)를 이용한 측정이 수행되었다. HW1은 팁 벽면에서 3mm 떨어진 곳에, HW2는 허브 쪽 벽면에서 3mm 떨어진 곳에 설치하였다. 따라서 완전 성장한 스톨이 full span stall이면 stall cell이 blade 전체에 생기므로 HW2에도 스톨 신호가 측정될 것이며, part span stall 이라면 stall cell이 rotor tip 부근에 생기므로 HW1에만 스톨 신호가 측정될 것이다. 또한 full span 스톨 이라면 셀 개수가 1개 일 것이며, part span 스톨 이라면 셀의 개수가 복수개로 측정될 것이다. 이때, 스톨 셀 성장시 셀이 원주방향으로 회전할 것이기 때문에 열선유속계를 수직하게 설치하여 원주방향

으로 셀이 이동할 때의 신호를 측정할 수 있도록 하였다.

Figure 7(a)는 스톨 셀이 완전 발달하였을 때, HW1과 HW2에서 측정한 신호를 시간에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 동의 팁 근처인 HW1에서는 스톨이 완전 성장하였을 때, 스톨 셀에 의하여 신호 교란이 주기적이고 일정한 크기로 나타나는 것을 알 수 있다.

HW2에서 측정한 값을 보면, HW1에서 측정한 값보다 불규칙하지만 신호가 증감하는 위상이 HW1과 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 스톨이 완전 성장하였을 때, 스톨 셀이 blade 전체에 발생하는 full span 스톨임을 의미한다. 하지만 신호 모양이 HW1와는 차이가 있는데 그것은 실험 장비 구조상 허브 쪽에 있는 슬롯에 의하여 스톨 셀 신호뿐만이 아니라 다른 신호도 측정되었기 때문이다.

Figure 7(b)는 스톨이 완전히 성장하였을 때 HW1과 HW2에서 측정된 신호를 이용하여 주파수 분석(FFT)을 한 것이다. 두 위치에서 측정한 신호 모두 5.722 Hz에서 주파수 특성이 나타났으며 이것이 스톨 주파수이다. 800 rpm(13.3 Hz)으로 운전시 5.722 Hz로 스톨이 회전하였기에 동의 회전속도의 약 43% 속도로 완전 발달한 스톨셀이 회전을 할 수 있었다. 하지만 Fig. 5(a)와 같이 HW1의 스톨 셀 신호가 HW2보다 규칙적이고 반복성이 강한 것을 나타냈기 때문에 FFT시 위상 크기가 HW1이 HW2보다 크게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 서울대에서 보유하고 있는 다단 축류압축기에서 발생하는 스톨에 관한 여러 특성에 관한 결과를 소개하였다. 스톨 특성에 대하여 접근하는 방법에는 여러 방식이 있겠지만 본 연구에서는 스톨에 관한 특성 분석을 다음의 각도에서 살펴보았다.

- 1) 3가지 회전 속도에 대하여 무차원된 압축기 성능을 측정하였다. 정상 상태뿐만 아니라 임계점 이후 스톨이 완전 발달된 상태에서 유량을 임의로 줄였을 때의 성능 궤적을 알 수 있었다.
- 2) 무차원 압력, 유량과 스톨 셀 성장의 관계를 비교하여 스톨 셀 성장에 따른 성능 변화를 확인할 수 있었다.
- 3) 압축기가 안정 상태에서 스톨이 완전 발달된 상태까지의 주요 운전점에서 주파수 분석을 수행하였으며, 운전점에 따른 주파수 변화를 확인하였다.
- 4) 스톨이 완전 성장하였을 때, 스톨 셀이 full 또는 part span stall 인지 열선유속계를 이용하여 계측하였다. 실험에

사용된 압축기의 경우 스톨이 완전 발달하였을 때 허브와 팁 부분에서 모두 스톨 신호가 감지되었으며, 이 결과로 full span stall이라는 것을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 항공우주부품기술개발사업의 “차세대 초소형/고부하 압축기 다분야 통합기술 개발” 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) E. M. Greitzer, 1976, “Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors Part I, II,” *Journal of Engineering for Power*, pp. 190~217.
- (2) F. K. Moore and E. M. Greitzer, 1986, “A Theory of Post-Stall Transients in Axial Compression Systems : Part I,” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, pp. 68~76.
- (3) I. J. Day, 1993, “Stall Inception in Axial Flow Compressors,” *Journal of Turbomachinery*, Vol. 115, pp. 1~9.
- (4) C. I. Hah, J. Bergner, H. P. Schiffer, 2006, “Short Length-Scale Rotating Stall Inception in a Transonic Axial Compressor—Criteria and Mechanisms,” *ASME TurboExpo*, GT2006-90045.
- (5) H. D. Vo, C. S. Tan, E. M. Greitzer, 2005, “Criteria for Spike Initiated Rotating Stall,” *ASME TurboExpo*, GT2005-68374.
- (6) I. J. Day, T. Breuer, J. Escuret, M. Cherrett, A. Wilson, 1999, “Stall Inception and the Prospects for Active Control in Four High-Speed Compressors,” *Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, pp. 18~27.
- (7) V. H. Garnier, A. H. Epstein, E. M. Greitzer, 1991, “Rotating Waves as a Stall Inception Indication in Axial Compressors,” *Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 290~302.
- (8) 강정식, 강신형, 2000, “원심압축기 스톨 발달에 관한 실험적 연구,” *유체기계연구개발 발표회 논문집*, pp. 200~210.
- (9) J. F. Escuret, V. Garnier, 1996, “Stall Inception Measurements in a High-Speed Multistage Compressor,” *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 690~696.
- (10) 임형수, 조민기, 강신형, 송성진, 2008, “축류압축기의 스톨 발달에 관한 연구,” *유체기계연구개발 발표회 논문집*, pp. 169~175.