

축류압축기의 입구안내깃 각도에 따른 스톨선구신호 특성 연구

배효조* · 임형수* · 송성진*** · 강신형** · 양수석***

Stall Inception Characteristics of Axial Compressor Varying IGV Stagger

Hyo-Jo Bae*, Hyung-Soo Lim*, Seung-Jin Song***, Shin-Hyoung Kang**, Soo-Seok Yang***

Key Words : Axial compressor(축류압축기), Stall(스톨), Rotating stall(선회실속), Stall inception(스톨선구신호), IGV(입구 안내깃), mode(모드), spike(스파이크), multi cell(멀티 셀)

ABSTRACT

Stall inception characteristics are researched to understand stall well. To realize different stall inception patterns, IGV stagger angle was changed. At design IGV stagger angle, spike, which is short length scale, is observed. Decreasing IGV stagger angle, spike changes to mode, which is long length scale, and further decreasing get multi cell. Compressor maps for each IGV stagger are shown to compare different stall inceptions. The characteristics of both spike and mode are confirmed in this experiment. Furthermore, transient from spike to mode is find. multi cell has 4cells and is little bit faster than mode. and multi cell shows 2nd, 3rd characteristics on compressor map.

기호설명

C_x	축방향 속도
m	셀 개수
\bar{U}	날개 회전 속도 (@ midspan)
Φ	유량 계수 ($= C_x / \bar{U}$)
Ψ	압력 계수 ($= (P_s - P_{t0}) / (1/2 \rho \bar{U}^2)$)
θ	센서 간 간격(°)
τ	두 센서의 신호간 위상차
$f_{pre stall}$	Prestall 주파수

하첨자

s	정압
$t0$	입구 전압

1. 서론

축류압축기는 항공기의 엔진과 발전소에서 사용되는 가스 터빈 엔진의 중요한 구성품이다. 국가 간의 교류가 갈수록 늘어나고 사람들의 국외 여행수효도 증가하면서 항공기엔진의 에너지 사용량도 기하급수적으로 증가하고 있다. 또한 현대인의 생활패턴이 갈수록 전기를 사용하는 전자기기 등에 의지하게 되면서 전기의 사용량도 해가 갈수록 증가하여 발전소에 요구되는 에너지 생산량도 높아만 가고 있는 요즘이다. 조사에 따르면 항공기와 발전소에서 사용되어지는 에너지의 양은 전체 산업의 에너지사용량의 절반을 넘어가는 지경에 이르고 있다.

대체에너지의 개발과 친환경 녹색에너지 성장의 중요성에 대해선 말할 필요가 없을 것이다. 하지만 그것 못지않게 현재 갖고 있는 화석연료의 효율적인 사용도 중요한 것이다. 위에서 언급했듯이 화석연료의 상당한양이 항공기와 발전소의 가스터빈 엔진에서 사용되어진다. 가스터빈의 효율을 조금이라도 향상시킨다면 이는 어마어마한 경제적 이익을 가져올 것은 자명한 것이다.

뿐만 아니라 교토의 정서에 의해 각국은 지구온난화를 일으키는 가스(green house gas)를 해마다 줄여 나가야한다. 화석연료를 많이 사용하는 가스터빈엔진의 효율을 증가시킨

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
** 서울대학교 기계항공공학부
*** 한국항공우주연구원 첨단추진기관팀
† 교신저자, E-mail : sjsong@snu.ac.kr

다는 것은 연료사용을 줄여 경제적인 이득을 가져올 뿐만 아니라 그만큼 배기가스의 양도 줄게 되어 친환경 산업을 이루게 되는 것이다.

이러한 가스터빈의 효율을 올리기 위해서는 압축기에서 공급되는 공기의 압력을 더 높이면 가능하다. 하지만 압축기의 압력을 계속 높게 되면 어느 순간 압축기의 압력이 급격하게 감소하고 심하게 진동하게 되는데 이것이 스톨(stall)이다. 스톨은 한번 발생하게 되면 거의 엔진을 꺼야 안정한 상태로 회복이 되기 때문에 미연에 방지해야한다. 스톨은 발전소에서는 안정적인 에너지공급을 방해하겠지만 항공기엔진의 압축기에서 스톨이 일어난다면 끔찍한 대형사고로 이어질 것이다.

이러한 스톨을 미리예측하고 방지하기위한 연구가 수십 년 동안 수많은 연구진들에 의해 연구되어 왔다. 아직까지 확실하게 스톨을 예측하고 정확하게 제어하는 방법은 개발되어있지 않는 실정이다. 하지만 스톨을 예측하고자 하는 노력들에 의해 스톨선구신호(stall inception)에 대해서 보고가 되어있다.

T. R. Camp^[1]와 I. J. Day^[2]는 두 개의 기본 스톨선구신호를 정의하였다. 모드(mode)와 스파이크(spike)가 그것이다. 모드는 상대적으로 크고 느리며 자연스럽게 스톨로 진행이 되는 반면 스파이크는 상대적으로 작고 순식간에 스톨로 발전하는 특징을 갖고 있다.

모드는 McDougall^[3]에 의해 저속 1단 압축기에서 처음으로 발견되었으며 Garnier^[4]에 의해 3단 고속 압축기에 확인되었다. 또한 Boyer^[5]와 Tryfonidis^[6]에 의해 많은 여러 압축기에서 모드가 존재함이 증명되었다.

스파이크는 Day에 의해 2개의 저속 압축기에서 발견되었으며 Wilson^[7]과 Freeman^[7]에 의해 확인되었다.

Longley^[8]는 같은 압축기가 두 가지의 스톨선구신호를 모두 가질 수 있다고 보고하였다. 또한 Camp와 Dobrzynski^[9]는 입구안내깃(Inlet Guide Vane)과 동익(rotor)의 각도(stagger angle)를 바꾸면 스톨선구신호가 변한다고 보고하였다.

최근연구로는 Day^[10]가 스톨선구신호의 변화는 동익의 팁 유동각이 중요한 인자라고 하였다.

스톨을 예측하기 위해서 스톨선구신호에 대한 수많은 연구가 있었지만 아직까지는 모드와 스파이크 두 가지 현상에만 집중되어있는 것이 사실이다. 하지만 스파이크와 모드 외에도 다른 신호들이 존재하고 보고되고 있기 때문에 스톨 선구신호에 대한 보다 폭넓은 연구가 필요하다. 본 연구에서는 문헌에 보고된 것을 바탕으로 IGV의 각도를 변화시켜 여러 가지 스톨선구신호를 구현한 후 그 특성을 분석해보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 서울대학교 압축기

실험에 사용된 연구용 1단 저속 축류압축기(서울대축류압축기)는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 상부로 공기가 유입되어 입구 안내깃(Inlet guide vane, IGV)과 동익단과 정익단을 거쳐 하부로 배출되는 구조이다. 출구단에 있는 스톨 밸브의 위치를 상/하 조정함으로써 압축기 유량을 조절할 수 있다. IGV, 동익단, 정익단은 각각 53, 54, 74개의 날개로 구성되었다. 동익 팁 직경은 1m이며 시스템 전체 높이는 3.89m이다. 운전 회전수는 800rpm이며, 이때의 동익 팁 속도는 약 40m/s이다.

기존의 서울대 축류압축기는 4단의 다단 축류압축기이다. 본 연구를 위해서는 IGV의 각도를 바꿔야 하는데 이는 다단 압축기에서 stage matching 문제가 발생하게 되어 1단으로 개조하게 되었다. 4단 압축기 일 때는 1단에서 모드가 지배적으로 발생하였으나, 1단으로 개조한 후에는 스파이크가 발생하였다. 이것의 이유에 대해서는 추가적인 실험과 연구가 필요할 것으로 보이며 본연구와는 다소 무관하므로 논하지

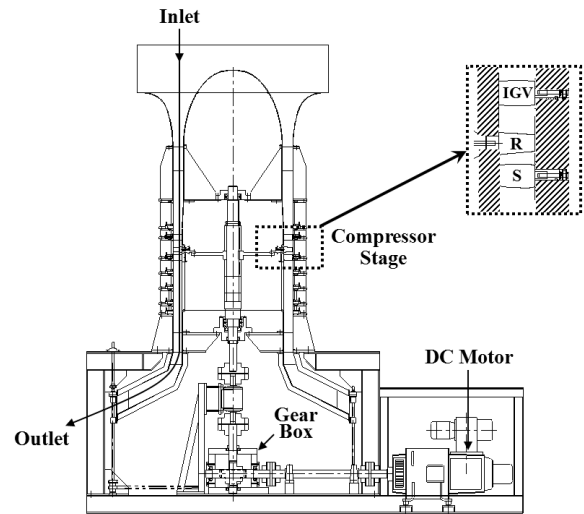


Fig. 1 Schematic of single stage low speed axial compressor (SNU compressor)

Table 1 Characteristics of SNU compressor

# of stage	1
# 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 moter [KW]	55

않겠다.

2.2 측정 및 실험방법

정상 상태일 때의 축류압축기 유량은 IGV 전단에 원주방향으로 12개의 위치에서 측정된 전압력과 정압력을 이용하여 축 방향 속도를 구하여 얻었으며, 압력 상승은 원주방향으로 평균된 입구 전압력과 정익 하단의 정압 차로 구하였다. 실험은 압축기의 디자인 스피드인 800rpm에서 수행되었다.

일정한 회전수에 대해 스톱 밸브를 서서히 닫아 유량을 줄였으며, 이때 유량과 압력 상승을 동시에 측정하였다. 고속 응답 압력 변환기(Kulite, XCQ-062)를 이용하여 스톱과 스톱선구신호를 수집하였다. 고속응답 압력 변환기는 스톱선구신호의 회전 속도를 계산하기 위하여 1단 동의 상단 4mm위에 원주방향으로 45°동일한 간격으로 8개를 설치하였다.

여러 가지의 스톱선구신호를 구현하기 위하여 IGV의 각도(stagger angle)를 바꾸었다. Day에 의하면 동의의 팁 인시던스(tip incidence) 각도가 증가하면 스톱선구신호가 스파이크에서 모드로 변하였다고 하였다. 서울대학교 압축기가 1단 압축기로 개조한 후 디자인 IGV각도에서 스파이크가 관측되고 있기 때문에 동의의 팁 인시던스 각도가 증가하는 방향으로 IGV의 각도를 바꿔야 했다. 이는 IGV 각도를 디자인 각도인 32°보다 작게 하는 것이었다. 그래서 32°를 시작으로 각도를 줄여나가면서 스톱선구신호의 변화 양상을 관측하였다. 첫 번째 목표는 문헌대로 스파이크가 관측되던 압축기에서 IGV각도를 줄였을 때 모드로 바뀌는 것을 확인하는 것이었다. 두 번째는 추가적으로 다른 스톱선구신호를 구현하는 것이었다.

3. 실험결과

3.1 IGV각도 변화

3.1.1 32°

앞의 Fig. 2는 디자인 IGV각도에서의 8개의 고속응답 압력 변환기들의 신호를 차례대로 나열한 것이다. 이렇게 함으로써 스톱 혹은 스톱선구신호가 원주방향으로 회전하는 것을 알 수 있으며, 회전 속도와 스톱셀(stall cell)의 개수를 관별 할 수 있다.

32°에서는 위와 같이 스파이크가 관측되었다. 스파이크는 그 이름에서 알 수 있듯이 스파이크처럼 생긴 신호를 볼 수 있다. 위 그래프의 붉은 선을 따라 스파이크 신호가 원주방향으로 회전하는 것을 볼 수 있으며 그 회전속도는 축회전속(800rpm)의 58%였다. 또한 스파이크의 특징대로 곧바로 스톱으로 발전하는 것이 관측되었다.

3.1.2 16°

Fig. 3에서는 16° IGV 각도에서의 고속응답 압력 변환기들의 신호를 보여주고 있다. 우선 왼쪽의 붉은 라인을 따라 스파이크가 전파됨을 볼 수 있다. 하지만 이는 오래가지 못하고 사라지게 된다. 신호의 회전 속도와 형태가 스파이크임을 확인해준다. 특이한 점은 이후에 스톱틀을 더 닫음으로써 다시금 스파이크가 생기는 것이 아니라 모드로 보이는 신호가 관찰 된 것이다. 후에 다른 IGV 각도에서 모드 신호가 관찰되지만 이 신호는 완전한 모드 신호와는 그 모습이 완벽히 일치하지는 않았다. 하지만 그 회전속도와 신호의 크기정도가 모드의 그것과 흡사하였다. 이는 스파이크에서 모드로 스톱선구신호가 변하고 있는 천이과정으로 파악된다. 여타 다른 문헌에서도 스파이크와 모드가 같이 존재하는 압축기가 보고 된 적이 있다.

3.1.3 8°

32°에서는 스파이크를 16°에서는 스파이크와 모드의 천이

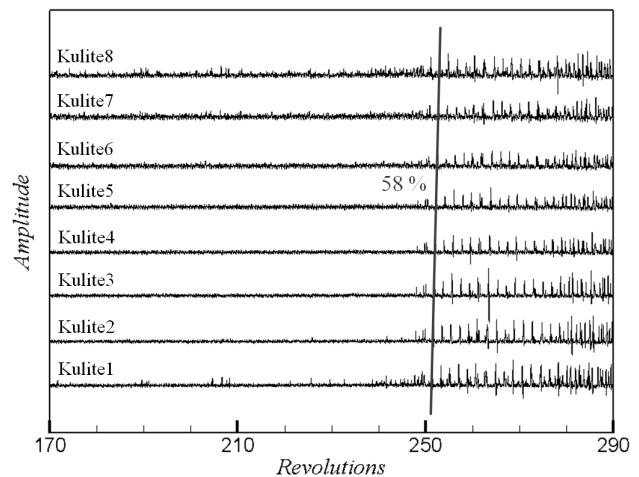


Fig. 2 stall signals from fast pressure transducers at 32° IGV

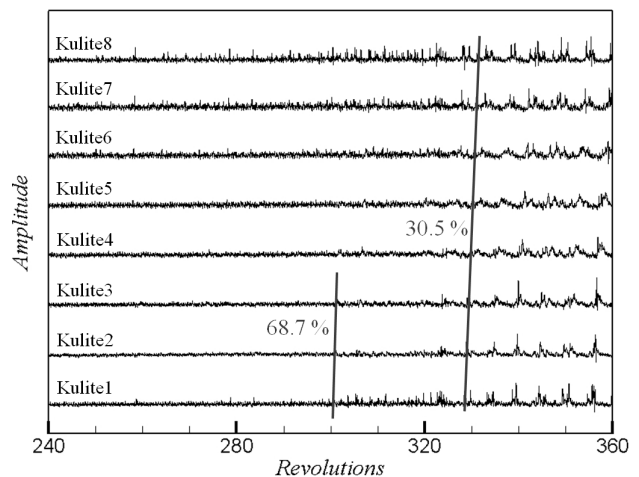


Fig. 3 stall signals from fast pressure transducers at 16° IGV

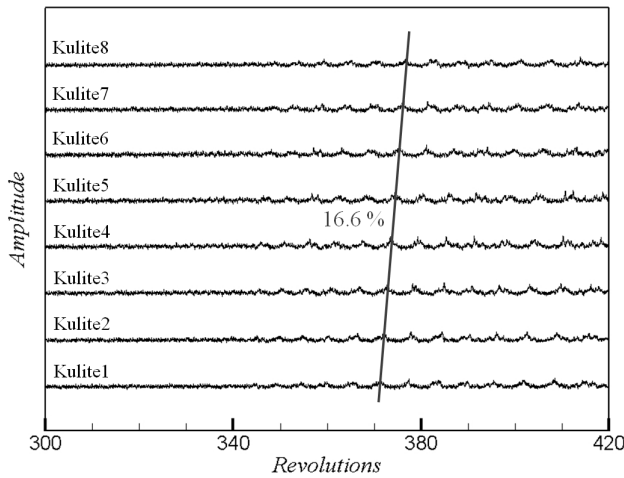


Fig. 4 stall signals from fast pressure transducers at 8° IGV

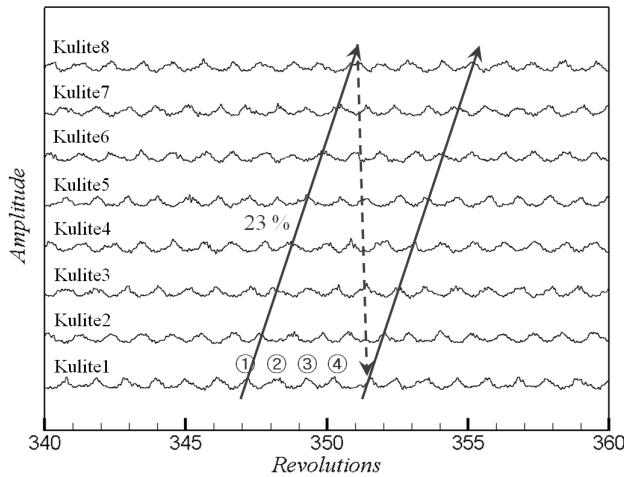


Fig. 5 stall signals from fast pressure transducers at 0° IGV

하는 모습을 보이고, 마침내 8°에서는 완전한 모드 신호가 관찰 되었다. Day의 연구결과와 똑같이 동익의 인시던스 각도를 증가시키는 방향으로 IGV각도를 바꾸자 스파이크에서 모드로 스톨선구신호가 변화하였음을 확인하였다. 한 가지 특이한 점은 16°에서 관측된 천이지역에서의 모드와 그 속도와 모양이 다르다는 점이다. 이는 천이지역에서의 스톨선구신호에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 8°에서 모드의 속도는 종전보다 훨씬 느린 축회전속도의 16.6%였다.

3.1.4 0°

문헌에서 보고된 스파이크에서 모드로의 변화는 확인이 되었지만 추가적인 IGV각도 변화를 통하여 다른 스톨선구신호를 찾고자 하였다. 0°의 IGV각도에서는 스파이크도 모드도 아닌 새로운 스톨선구신호가 발견되었다. 문헌조사를 통하여 이것이 멀티셀(multi-cell)이라는 스톨선구신호라는 것을 알아냈다. 계산 결과 그 회전속도는 모드보다 조금 빠른 23%였으며 셀의 개수는 그래프에 보이듯이 4개로 확인되었다.

3.2 성능곡선

스톨선구신호에 의한 차이는 비단 신호의 속도와 모양의 차이만 가져오는 것은 아니다. 압축기의 성능과 스톨발생점에서 차이 발생하게 된다. 스톨선구신호들의 특징을 찾아내기 위하여 전압, 정압 데이터들을 통하여 각각의 IGV각도별로 압축기 성능곡선을 그려서 비교하여 보았다.

Fig. 6은 IGV 32°, 16°, 8°, 0°의 압축기 성능곡선을 나타낸 것이다. 왼쪽아래에는 IGV의 각도(stagger angle)의 정의를 나타낸 것이다.

이미 스파이크와 모드의 압축기 성능곡선 상에서의 차이점을 많이 알려져 있다. 스파이크(IGV 32°)의 경우 압축기 성능곡선의 접선의 기울기가 음수인 지점, 즉 압력 상승량이 최대인 점에서 스톨이 발생한다. 하지만 모드(IGV 8°)의 경우 압력이 최대인 점에서 스톨이 발생하지 않고 최대 압력점에서 더 유량을 감소시키면 압력이 조금 떨어지게 되고 조금 더 저 유량에서 스톨이 발생한다.

여기까지는 이미 문헌에서 알려진 바이다. 스파이크에서 모드로의 천이지점(IGV 32°)에서는 스톨발생지점이 모드처럼 압력의 최대점이 아닌 더 저 유량점에서 발견되었다. 하지만 16°에서 스파이크와 모드의 천이지역이라는 것은 성능곡선으로도 확인되었다. 확실히 스톨의 발생지점이 성능곡선의 접선의 기울기가 양수인 곳이지만 모드보다는 압력이 덜 떨어지고 스톨이 발생함을 볼 수 있다. 만약 모드와 스파이크 사이에서 IGV각도를 좀 더 다양하게 변화시켜가면서 성능곡선을 그린다면 이러한 스파이크에서 모드로의 천이를

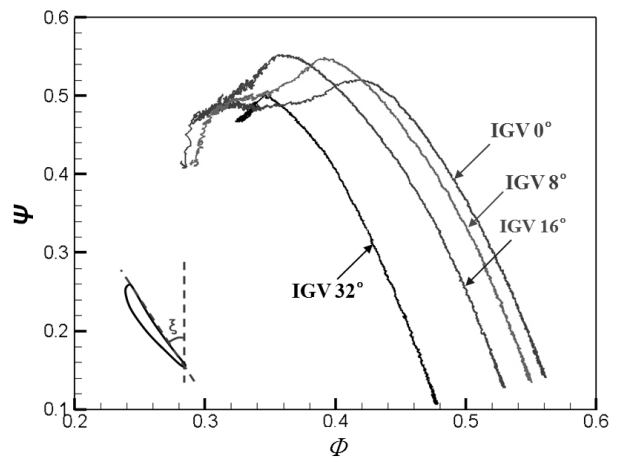


Fig. 6 compressor maps of 4 different IGV stagger

Table 2 speed and the number of stall inception

IGV각도	Prestall type	회전속도	개수
32°	spike	58%	-
16°	spike+mode	-	-
8°	mode	17%	1
0°	multicell	23%	4

더 확실하게 보여 줄 것이라 생각된다.

멀티셀(IGV 0°)의 경우는 또 다른 형태를 보여준다. 압력의 최대점에서 스톨이 발생하지 않는다는 점은 모드와 같다. 유량을 계속해서 감소시키면 압력이 조금 떨어지게 된다. 하지만 멀티셀은 모드와 다르게 압력이 다시 조금 상승하면서 스톨이 발생하게 된다. 이러한 현상은 T. Kroeckel^[11]도 보고하였다. 압력의 최대점에서 스톨이 일어나지 않고 압력이 다시 감소하는 것을 2차 특징(secondary characteristics)이라고 하였으며, 이는 압력이 최대점에서 멀티셀이 발생하고 여기서 스톨을 더 닫으면 압력이 하강하는 것이다. 그 후 풀스팬(full span)스톨이 발생할 때까지 다시 압력이 상승하는 3차 특징(tertiary characteristics)을 보인다.

3.3 셀 속도와 개수

셀 속도와 개수를 계산하는 방법은 강정식^[12]의 스톨 선구신호분석 방법을 사용하였다 그에 따른 셀 속도와 개수를 구하는 식은 아래와 같다.

$$\text{셀 개수 } m = \frac{360}{\theta} \tau f_{pre stall}$$

$$\text{스톨전파속도 } [rad/sec] = \frac{2\pi}{m} f_{pre stall}$$

여기서 θ 는 센서간 간격(°), τ 는 두 센서의 신호 간 위상차, $f_{pre stall}$ 은 pre stall의 주파수를 의미한다. 이같은 계산 방식을 통하여 계산한 각각의 속도와 셀 개수는 Table 2와 같다.

스파이크의 경우 스파이크의 발생 후 곧바로 스톨로 발전하기 때문에 셀의 개수를 판별하기가 불가능 하였다.

4. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 스톨 선구신호의 특성을 이해하기 위하여 저속 1단 축류 압축기에서 입구 안내 깃의 각도를 변화시켰다. 이를 통해 기존의 스파이크에 추가적으로 스파이크모드 천이지점과 모드, 멀티셀의 스톨선구신호를 구현하였다.
- 2) 문헌에서 조사한대로 스파이크와 모드의 회전속도와 성능곡선 상에서 스톨의 발생점의 위치 등의 특징을 확인하였으며, 이에 추가적으로 스파이크 모드 천이현상과 멀티셀의 특징들을 찾을 수 있었다.
- 3) 스파이크 모드 천이지역에서는 스파이크 신호가 나타났으나 금방 사라졌으며, 그 후 스파이크 보다는 훨씬 느린 모드에 가까운 속도의 모드와 흡사한 신호가 관측되었다. 이는 스파이크에서 모드로 변해가는 것을 보

여준다. 성능곡선 상에서 스톨발생지점도 모드와 스파이크의 발생지점의 사이에서 발견되었다.

- 4) 모드가 발생한 IGV각도에서 더욱 IGV각도를 줄이자 멀티셀이라는 새로운 스톨 선구신호를 발견하였으며, 셀의 개수는 4개 회전속도는 23%로 모드보다는 조금 더 빠른 속도를 보여주었다. 성능곡선상에서는 압력의 하강 후 다시 상승하는 2차, 3차 특징을 보여주었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) T. R. Camp and I. J. Day, 1998, “A Study of Spike and Modal Stall Phenomena in a Low Speed Axial Compressor,” J. of Turbomachinery Vol. 120.
- (2) I. J. Day, 1993, “Stall Inception in Axial Flow Compressor,” J. of Turbomachinery, Vol. 115.
- (3) N. M. McDougall, N. A. Cumpsty, and T. P. Hynes, 1990, “Stall Inception in Axial Compressor,” J. of Turbomachinery, Vol. 112.
- (4) V. H. Garnier, A. H. Epstein, E. M. Greitzer, 1991, “Rotating Waves as a Stall Inception Indication in Axial compressor,” J. of turbomachinery Vol. 113.
- (5) K. M. Boyer, P. I. King and W. W. Copengaver, 1993, “Stall Inception in Single-Stage High-Speed Compressors With Straight and Swept Leading Edges,” AIAA Paper No. 93-1870.
- (6) M. Tryfonidis, O. Etchevers, J. D. Paduano, A. H. Epstein and G. J. Hendricks, 1995, “Pre stall Behavior of Several High-Speed Compressors,” J. of turbomachinery Vol. 117.
- (7) A. G. Wilson and C. Freeman, 1994, “Stall Inception and Development in Axial Flow Aeroengine,” J. of Turbomachinery Vol. 116.
- (8) J. P. Longley, H. W. Shin, R. E. Plumley, P. D. Silkowski, I. J. Day, E. M. Greitzer, C. s. Tan and D. C. Wisler, 1996, “Effects of Rotating Inlet Distortion on Multistage Compressor Stability,” J. of Turbomachinery Vol. 118.
- (9) B. Dobrzynski, H. Saathoff and G. Kosyna, 2007, “Influence of the Rotor Tip Stagger Angle on Axial Compressor Stall Inception,” 7th ETC, Athens.
- (10) T. Houghton and I. J. Day, 2010, “Stability Enhancement by Casing Grooves : The Importance of Stall inception Mechanism and Solidity,” Turboexpo 2010, GT2010-

- 22284.
- (11) T. Kroeckel, S. J. Hiller and P. Jeschke, 2011, "Application of a Multistage Casing Treatment in a High Speed Axial Compressor Test Rig," Turboexpo 2011, GT2011-46315.
- (12) 강정식, 2002, "원심압축기의 스톨 발달에 관한 실험적 연구," 박사학위논문.