

터보압축기의 스톨 발단에 관한 연구 리뷰

강정식* · 강신형**

Review of Stall Inception in Turbocompressors

Jeong-Seek Kang*, Shin-Hyoung Kang**

Key Words: Stall inception (스톨 발단), Rotating stall (선회 실속), Compressor (압축기)

ABSTRACT

Stall inception means the phenomena of rotating stall initiation. The initiation mechanism of rotating stall, the existence of stall precursor, the behavior of stall precursor, stall warning scheme and control scheme are the main interests in stall inception research. Compared to the studies on rotating stall which has long history, the stall inception has been studied for about recent 20 years. After the first discovery of stall precursor in about 20 years ago, many studies were reported on stall inception phenomena. The inception pattern of "mode" and "spike" were found, and some of its characteristics are known. And now the stall inception has become one of the fascinating fields in turbomachinery. The development stall control scheme which apply the reliable stall warning scheme will play a great role in future compressor and aeroengine. This paper reviews the results and analysis methods on stall inception studies.

1. 서 론

터보 압축기는 산업용이나 항공기 엔진 등에서 효과적으로 유체를 압축시킬 수 있는 방법이지만, 스톨(실속)과 서지라는 고유한 특이 현상들이 압축기의 작동에 제한을 가하기 때문에 스톨과 서지는 오랫동안 많은 연구의 주제가 되어 왔다. 스톨이 발생하면 압력비가 떨어지고 효율이 낮아지며, 날개에 심한 진동을 일으킨다. 그리고 압축기가 연소기와 터빈으로 연결될 경우에는 연소기에 들어가는 유체의 온도를 상승시켜서 터빈으로 들어가는 온도가 과열되는 현상이 발생하며, 때로는 스톨과 서지로 인한 유체의 역류와 시스템

의 불안정한 거동이 연소기에서의 화염을 소화시키기도 한다. 또한 스톨에 이어서 발생하는 서지는 압축기를 포함한 시스템 전체가 크게 진동하기 때문에 성능 저하뿐 아니라 시스템이 파괴되는 현상을 초래할 수 있다. 그러므로 터보 압축기에서 스톨과 서지를 연구하고 그 발생을 제어하는 것은 중요한 연구 주제가 되어왔고, 소위 "Smart Jet Engine"이라 불리는 현대의 또는 다가올 미래의 첨단 가스터빈 엔진에 사용되는 압축기에서 가장 중요한 관심의 분야도 바로 이 서지나 스톨에 의한 공력학적 불안정성을 스스로 진단하고 능동 제어하는 기술로 평가되고 있다⁽¹⁾.

스톨을 효과적으로 제어하기 위하여 스톨 현상에 대한 수학적 이론에 관한 연구가 80년대 이후로 활발히 이루어지면서, 특정 조건에서 작은 크기의 교란이 완전히 발달된 스톨을 일으키는 것을 발견하였다⁽²⁻⁴⁾. 이로부터 스톨이 발생하는 과정 (stall inception)에 대

* 한국항공우주연구원 항공추진그룹

** 서울대학교 기계항공공학부

책임저자 E-mail : jskang@kari.re.kr

한 연구는 스톨의 제어에 대한 획기적인 기대와 함께 활발히 일어나게 되었다.

여러 연구자들에 의하여 스톨의 발달에 관한 연구가 약 20여 년간 수행되면서 스톨에는 크게 모드(mode)와 스파이크(spike)의 두 가지의 다른 선구현상이 존재한다는 것이 알려졌다. 뿐만 아니라 스톨의 선구신호(precursor)를 감지하는 방법과 스톨의 발생을 예측하는 방법에 관한 훌륭한 결과들이 보고되면서, 스톨 발달이라는 연구 분야는 터보기계 연구 분야 중에서 많은 가능성을 약속하는 독립된 하나의 연구 분야를 이루었다.

스톨이나 서지에 관한 연구는 50년대부터 활발히 시작되어 연구의 결과들을 종합하는 여러 편의 연구서적이거나 논문들이 있는 반면에, 스톨의 발달 분야는 비교적 최근에 시작한 연구이어서 아직까지 종합적으로 정리된 문건이 발표된 적이 없다. 본 논문은 현재까지 약 20여 년간 진행되어온 스톨 발달에 관한 연구결과들을 요약하고, 앞으로의 가능성과 방향에 대하여 제시하였다.

2. 본 론

2.1. 연구의 시작

스톨이라는 현상이 발견된 이후, 스톨에 관한 연구는 스톨을 일으키는 원인, 스톨 셀(cell)의 거동, 스톨 모델링, 그리고 제어방법에 관한 연구가 주를 이루었다. 초기의 연구자인 Emmons 등⁽⁵⁾은 처음으로 선형화된 안정성 해석방법인 perturbation potential을 이용하여 스톨현상을 해석하고 스톨 셀이 전파(propagation)하는 이유를 설명하였는데, 그 설명에 따라 선회 실속(rotating stall)을 이해하고 모델링을 할 수 있는 기초가 마련되었다. Greitzer^(6,7)는 actuating disk 모델을 사용하여 압축기 시스템의 불안정성인 서지에 대한 모델링을 확립하였는데, 이 결과들은 스톨과 서지의 제어에 획기적인 계기를 마련하였다.

압축기 시스템에 관한 1차원적인 해석을 통하여 압축기 시스템의 불안정성 거동에 대한 연구가 큰 진전을 보이면서, 시스템에 관한 모델링과 함께 압축기의 임펠러가 있는 부분에서는 2차원적인 해석을 병행하여 수행하면서 스톨의 발달에 관한 연구가 가능하게 되었다. Moore⁽⁸⁾는 단단압축기에서 작은 교란(small perturbation)을 Fourier 급수 형태로 표현하여 특성곡선이

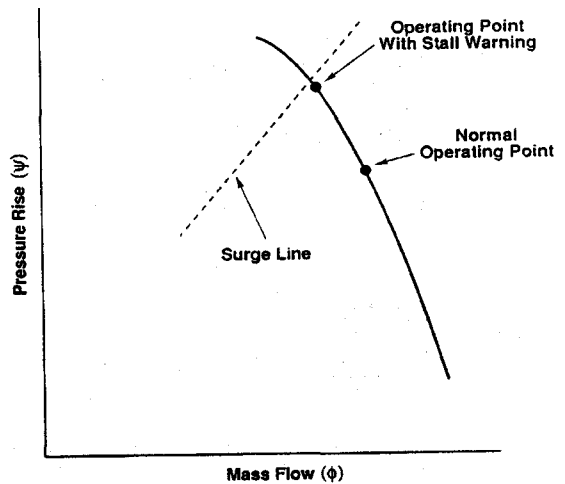


Fig. 1 Concept of compressor operation with stall warning scheme (Garner et al., 1991)

변형된 미분방정식과 연계하여 해석함으로써 스톨 셀의 속도가 셀의 전파에 따른 압력비의 반응시간에 따라 결정됨을 발견하였는데, 이 방법은 Moore와 Greitzer^(2,3)에 의하여 발견되어 작은 크기의 교란이 운동량 균형, 원주방향의 평균된 운동량의 균형, 그리고 질량의 보존을 표현하는 세 개의 비선형 편미분 방정식에 의하여 표현되었다. 이 모델을 통하여 Moore와 Greitzer는 로터의 상류에서 축방향 속도의 섭동이 원주방향으로 회전하며, 이 회전하는 작은 크기의 파가 스톨로 발전하는 현상을 발견하였다. 스톨에 관한 이 모델 이후로 원주방향으로 존재하는 작은 크기의 파에 대한 실험적 검증 작업이 이루어 졌고, McDougall 등⁽⁴⁾이 1단의 저속 축류압축기에서 실험을 통하여 처음으로 이 파의 존재를 입증하였다.

스톨에 관한 이전의 다른 연구들에서도 가끔씩 스톨의 발달(stall inception or stall onset)이라는 용어들이 비슷하지만 조금씩 다른 의미로 가끔씩 사용되었지만, 본 연구에서 사용하는 의미의 스톨 발달은 Moore와 Greitzer^(2,3)에 의하여 시작되었다고 할 수 있겠다.

2.2. 연구의 목적 및 방향

스톨의 발달에 관한 연구는 다음의 몇 가지 목적으로 인해 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 첫째로 압축기가 스톨 한계점에서 더욱 가까이 작동될수록 일반적으로 압축기의 압력비와 효율이 증가하는 장점이 있으므로 엔진설계자는 항상 서지마진을 줄이

기를 기대한다^(9,10). 그렇지만 압축기가 서지 한계선 가까이에서 작동할 경우 여러 가지 작동상황의 변화로 인하여 압축기가 스톨이나 서지 영역으로 들어갈 경우 압축기의 안전에 큰 문제를 일으키게 된다. 그래서 압축기를 스톨 한계점 근처에서 안전하게 작동시키려면 스톨이 발생하기 전에 스톨의 발생을 미리 감지해서 스톨의 발생을 방지할 필요가 있게 되었다^(9~11). 그러면 Fig. 1에 예시된 바와 같이 압축기를 작동 한계선 근처에서 운영할 수 있게 된다. 그리고 둘째로 많은 압축기의 경우에 스톨이 일단 발생하면 단순히 유량을 증가시키는 방법으로 스톨이 제거되지 않기 때문에 문제가 된다. 그래서 압축기의 스톨 발생 이후에 스톨을 능동 제어하는 방법을 선택하기보다는 스톨이 발생하기 전에 스톨의 발생을 미리 감지해서 스톨의 발생을 방지할 필요성을 느끼게 되었다^(9,12). 또한 스톨이 발생하기 전에 작은 크기의 교란이 발생하며 이것을 제어함으로써 스톨을 제어할 수 있는 가능성이 제기됨에 따라 스톨 발생 이전의 작은 크기의 교란에 대한 연구가 연구자들의 관심을 끌게 되었다^(13,14). 이런 이유들로 인하여 스톨의 발달에 관한 연구는 많은 연구자들의 관심이 되어 왔다.

스톨 발달에 관한 연구는 다음의 질문들에 대한 대답을 중심으로 진행되어져 왔다. 즉, 어떤 메커니즘으로 스톨이 발생해서 완전히 발달하는가, 스톨이 발생하기 전에 선구 신호가 존재하는가, 선구 신호가 존재한다면 어떤 방법으로 측정하는 것이 가장 효과적인가, 스톨 선구신호는 어떤 특징 (패턴, 전파 속도 등)을 가지고 있는가, 어떻게 스톨 선구 신호를 스톨 제어 방법에 사용할 것인가 하는 질문들이다^(9,15,16). 여러 연구자들에 의하여 위의 질문들에 대한 대답이 많이 알려졌고, 앞으로는 실제적인 적용의 분야에서 더욱 많은 연구가 있을 것이라고 기대된다.

2.3. 주된 결과

Moore 와 Greitzer^(2,3)의 모델에 의하여 로터의 상류에서 축방향 속도의 섭동이 원주방향으로 회전하며, 이 회전하는 작은 크기의 파 (modal wave)가 스톨로 발전하는 모드 형태의 스톨 발달이 제안되자 많은 연구자들의 관심이 "Mode"라는 스톨 선구신호의 측정에 관심이 모아졌다. Mode는 로터 날개의 몇 개에 해당하는 스톨 셀과는 달리 압축기의 원주 스케일로 존재하기 때문에 McDougall⁽¹⁷⁾은 6개의 열선 (hot-wire)을

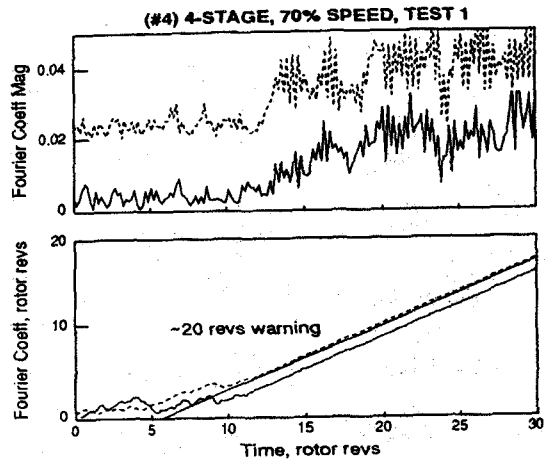


Fig. 2 Time history of first and second Fourier coefficients (Tryfonidis et al., 1995)

원주방향으로 균일한 간격으로 배치하여 mode를 "circumferential harmonic"의 위상 (phase)과 크기로 측정하였다. 이 방법은 시간에 따른 원주방향의 mode의 존재를 확인할 수 있는 방법으로서 후에 Garnier 등⁽⁹⁾에 의하여 "공간 푸리에 변환 (space Fourier transform)"이라는 이름으로 정착되고, 후에 스톨의 발달을 실험적으로 연구하는 대부분의 연구자들에 의하여 사용된다. 원주방향으로 측정한 수가 N 개이면, 공간 푸리에 계수 (C_k)는 아래의 식(1)과 같이 표현된다.

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V_n \exp\left[-\frac{2ikn\pi}{N}\right] \quad (1)$$

여기서 k 는 모드번호이고 V_n 는 축방향 속도 또는 압력이다. 작은 크기의 회전하는 파가 존재할 경우 공간 푸리에 계수의 위상이 일정한 속도로 전파하게 되는데, 이는 시간-위상 (phase)의 그림에서 위상이 일정한 기울기를 가진 직선으로 나타나며, 이것은 스톨의 선구 신호가 발생한 것으로 간주된다^(4,9,10,15,18). Fig. 2에는 4단 코아 압축기에서 스톨이 발생하기 직전에 공간 푸리에 계수의 크기와 시간-위상(phase)의 데이터를 나타낸 그림으로서 위상이 선형적으로 증가하는 예를 보인다.

공간 푸리에 변환의 방법을 통하여 McDougall⁽¹⁷⁾에 의하여 처음으로 발견된 Mode는 후에 Garnier 등⁽⁹⁾, Etchevers⁽¹⁰⁾, Day⁽¹⁹⁾, Lawless 등⁽²⁰⁾, Tryfonidis 등⁽¹⁵⁾, Hoying⁽²¹⁾, Boyer 등⁽¹⁸⁾, Escuret 등⁽¹⁶⁾, Bright 등⁽²²⁾, Jahnke 등⁽²³⁾에 의하여 1단의 축류압축기와 다단의 축

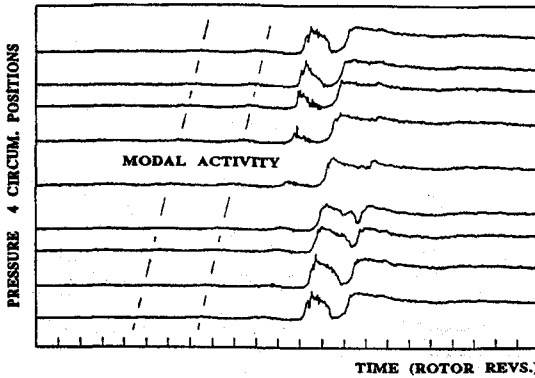


Fig. 3 Example of modes in a high-speed axial compressor (Day et al., 1999)

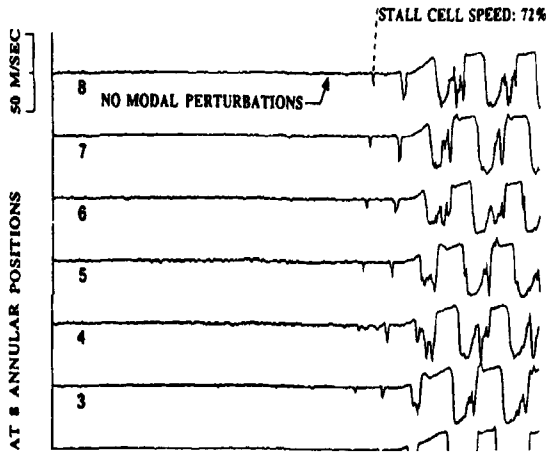


Fig. 4 Example of a spike type stall inception in an axial compressor (Day, 1993)

류압축기, 저속압축기와 고속압축기에서도 그 존재가 실험적으로 검증되었으며, Tryfonidis 등⁽¹⁵⁾, Wilson 등⁽²⁴⁾, Höss 등⁽¹¹⁾에 의하여 실제 터보엔진들에까지 적용되어 그 존재가 실험적으로 검증되었다. Fig. 3에는 터보엔진 (MTU engine, Day 등⁽²⁵⁾)에서 스톨이 발생하기 전에 모드(mode) 형태의 스톨 발달을 보이는 예를 나타내었는데, 원주방향으로 분포된 9개의 고속응답 압력센서의 측정을 통해 스톨이 발생하기 전에 원주방향으로 약한 파 (mode)가 발생하여 회전하는 현상을 보인다.

스톨을 일으키는 다른 메커니즘은 Day⁽¹⁹⁾에 의하여 발견되었는데, 그는 스톨이 발생하기 전에 스파이크 (spike)라 불리는 로터 (rotor) 유로의 몇 개의 길이에 해당하는 짧은 길이의 파가 생성되어 완전 발달된 스톨로 발달하는 현상을 발견하였다. Fig. 4에는 한 축류

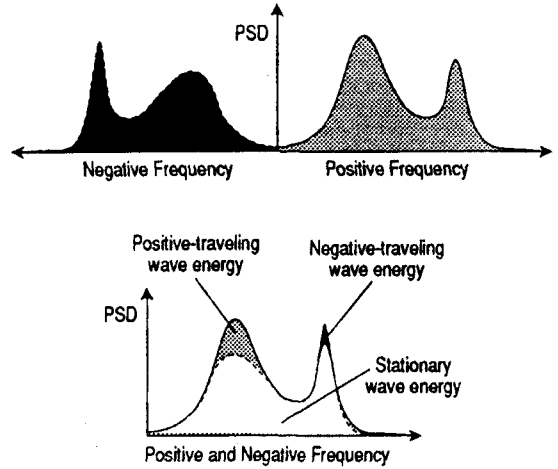


Fig. 5 A sample of nonaxisymmetric spectrum and its division into positive, negative, and stationary wave energy parts. TWE (Traveling wave energy) is calculated from this spectrum (Tryfonidis et al., 1995)

압축기 (C106 compressor, Day⁽¹⁹⁾)에서 스파이크 형태의 스톨 발달을 보이는 예를 나타내었다. Day 등⁽²⁵⁾과 Höss 등⁽¹¹⁾은 압축기의 작동조건에 따라 저속에서는 스파이크 형태의 스톨 발달이 일어나고, 고속에서는 모드 형태의 스톨발단이 일어나는 경우를 발견하였다. 어떤 원인에 의하여 서로 다른 두 발달의 패턴을 보이는 지에 대한 연구는 Camp & Day⁽²⁶⁾에 의하여 수행되었다. 그들은 몇 개의 다단 압축기에서 발견된 모드와 스파이크 형태의 스톨발단에 대한 시험결과와 분석을 통하여 스파이크는 로터의 틈을 중심으로 발생하는 유동의 박리에 의한 스톨발단인 반면에, 모드는 압력비 선도에서 기울기가 0근처인 곳에서 원주방향의 맥동이 스톨을 일으키는 현상임을 밝혀내었다.

원주방향의 스톨 선구신호가 발생하면 공간푸리에 계수의 위상이 선형적으로 증가하지만, 이것은 여러 가지 노이즈가 심한 실제 엔진의 작동상황에서는 위상이 선형적으로 나타나는 구간이 매우 짧거나 발견되지 않을 수도 있다. 그러므로 회전하는 선구신호의 에너지를 평가하는 방법이 Etchevers⁽¹⁰⁾에 의하여 제안되고, Tryfonidis 등⁽¹⁵⁾에 의하여 TWE (Traveling Wave Energy)라는 이름으로 확립되었다. 이 방법은 공간 푸리에 계수의 에너지 스펙트럼을 계산하고 그 면적으로부터 양의 방향으로 회전하는 에너지와 음의 방향으로 회전하는 에너지를 계산하며, 두 방향의 에너지 값의 차이로부터 회전하는 파의 에너지의 크기와 방향을 계산하는 방법이다. Fig. 5는 TWE방법의 개념도를 설명

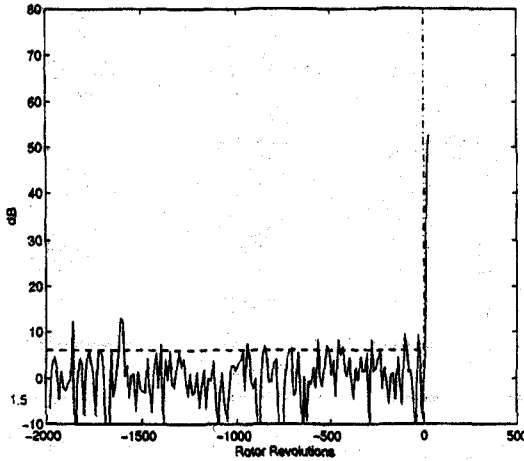


Fig. 6 Traveling wave energy in a NASA 35 rotor (Bright et al., 1997)

한다. 이 방법은 에너지의 적분형태로 계산이 되기 때문에 Escuret 등⁽¹⁶⁾, Bright 등⁽²²⁾, Day 등⁽²⁵⁾, Höss 등⁽¹¹⁾, 강정식 등^(27,28)에 의하여 노이즈가 많은 실제 상황에서도 스톨의 선구신호를 발견하는데 좋은 결과를 나타내었다. Fig. 6은 Bright 등⁽²²⁾에 의하여 NASA 35 축류압축기에서 TWE를 이용한 결과를 나타내었다.

2.4. 스톨 경고 방법

스톨이 발생하기 전에 스톨이 발생할 것이라는 사실을 스톨의 선구신호를 측정해서 사전에 아는 것이 스톨의 발달을 연구하는 주된 목적 중의 하나이며, 이런 방법을 스톨의 경고방법 (stall warning scheme)이라 한다. 스톨의 경고방법에서는 경고시간을 길게 얻는 것과, 다양한 경우에서도 스톨을 안정적으로 경고하는 신뢰성 있는 방법에 대한 연구가 수행되어 왔다.

가장 먼저 사용된 방법은 공간 푸리에 계수의 위상이 선형적으로 증가하는 것을 측정하는 방법인데, 이 방법은 경고시간이 길지 않으며, 노이즈가 많은 상황에서는 사용하기 어려운 점이 있다^(4,10). 이어서 나타난 TWE 방법은 공간푸리에 계수를 이용하여 회전하는 파의 에너지를 계산하는 방법으로서 여러 가지 압축기에서 신뢰성과 경고시간 면에서 좋은 결과를 보였다^(11,16,22,25,27,28). 그리고 비정상 압력신호에 웨이블릿 (wavelet) 신호를 이용하거나^(11,29,30), 카오스 이론을 이용하는 방법도 제안되었다⁽²²⁾. 경고방법에 대한 연구는 다양한 압축기에서 긴 경고시간을 얻기 위한 연구와 이를 압축기의 안정성 제어에 이용하려는 방법으로 계속 연구될 것이다.

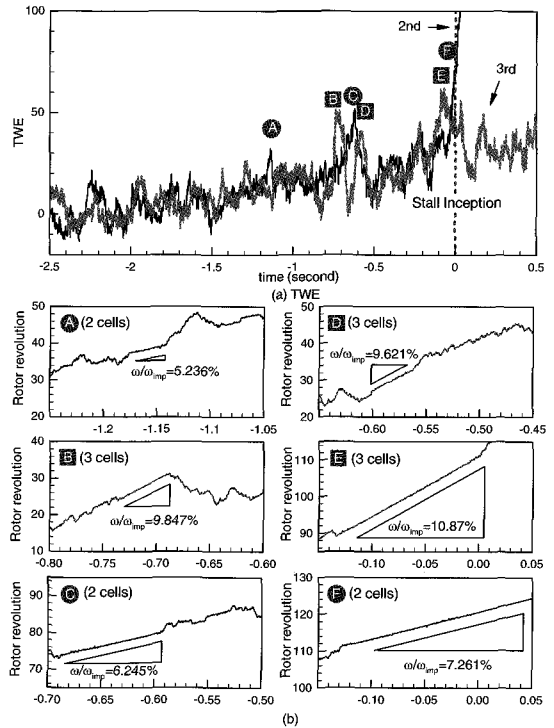


Fig. 7 Traveling wave energy and phase of spatial Fourier coefficient near stall inception point (Measurement position R/R2=1.1) (a) TWE of 2nd and 3rd coefficients (b) phase of SFC (Kang et al., 2003)

2.5. 원심압축기에서의 스톨 발달 연구

원심압축기에서도 스톨에 관한 연구는 많이 진행되어 왔지만, 스톨 발달에 관한 연구에 있어서는 그렇지 않다. 앞에서 보아온 대로 대부분의 스톨 발달 연구가 축류압축기에서 수행되어져 왔으며, 원심압축기에서는 연구가 매우 드물다. Chen 등⁽³¹⁾은 중국과 독일의 공동 연구를 통하여 압력비 약 2의 대형 원심압축기에서 쉬라우드의 자오면방향을 따라 여러 개의 고속응답 압력 변환기로 스톨 발달에 대한 연구를 수행하여 스톨의 선구신호를 측정하였다. Lawless 등⁽³²⁾은 저속의 원심압축기에서 스톨발달 연구를 수행하였는데, 공간 푸리에 변환을 통하여 스톨이 발생하기 전에 원주방향으로 분포된 작은 크기의 파가 존재함을 보였으며, 약 14마이크의 스톨 경고시간을 얻었다. 강정식 등^(27,28)은 압력비 약 2의 소형 원심압축기의 베인없는 디퓨저에서 스톨이 발생하기 전에 2개의 셀 구조와 3개의 셀 구조가 작은 크기로 성장과 소멸을 반복하는 현상을 발견하였고 (Fig. 7), 인듀서의 상류에서도 스톨 선구신호를 측

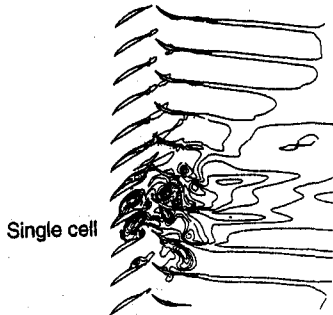


Fig. 8 Instantaneous entropy contour after stall inception from numerical simulation (He, 1997)

정하였으며^(33,34), 스톨 경고방법으로 회전하는 파의 에너지 방법을 응용하여 수 백 바퀴의 스톨 경고시간을 얻었다. 원심압축기에서는 임펠러, 디퓨저에서의 발달 현상에 대한 계속적인 연구와 입구 조건의 변화에 따른 스톨 발달현상에 대한 연구가 필요한 상황이다.

2.6. 유동해석을 통한 연구

스톨 발달에 관한 연구를 난류모델을 포함한 3차원 유동해석을 통하여 수행하기 위해서는 스톨 셀 (cell) 또는 선구신호가 여러 개의 블레이드 (blade)에 걸쳐있거나, 모든 블레이드에 걸쳐있기 때문에, 유동해석에서는 실제적인 날개의 수를 모두 계산해야 하고, 로터의 회전에 의한 비정상 유동계산을 수행해야 하므로 계산량이 아주 방대해지는 문제가 있다. 그래서 아직까지 모든 압축기 날개를 고려한 스톨발달에 관한 연구를 유동해석을 통하여 수행한 결과는 많지 않다. 최근에는 컴퓨터의 처리용량과 속도가 빨라지면서 조금씩 유동해석에 의한 결과가 보고 되고 있다. He⁽³⁵⁾는 수치해석 방법 (quasi-three dimensional time marching Navier-Stokes method with a mixing-length turbulence model)을 통하여 10개의 rotor와 10개의 stator가 있는 1단의 축류압축기를 해석하였는데 Fig. 8에 나타내었듯이 모드를 통하여 스톨 셀이 발생해서 회전하는 결과를 잘 모사하였다. Saxer-Felici 등⁽³⁶⁾은 15개의 rotor와 stator에 대해서 2차원 비정상 비점성 유동해석을 수행하여 스톨 셀의 구조가 일정하지 않음을 알게 되었고 전파 속도는 축 회전속도의 61~66%가 되는 결과를 얻었으며, 계산 결과의 한 예를 Fig. 9에 나타내었다. Hoying 등⁽³⁷⁾은 8개의 rotor에 대한 수치해석을 통하여 작은 크기의 셀 (short length scale stall)을 해석하였는데, 이 셀의 형성이 익단 와류 (tip vortex flow)와 관련된

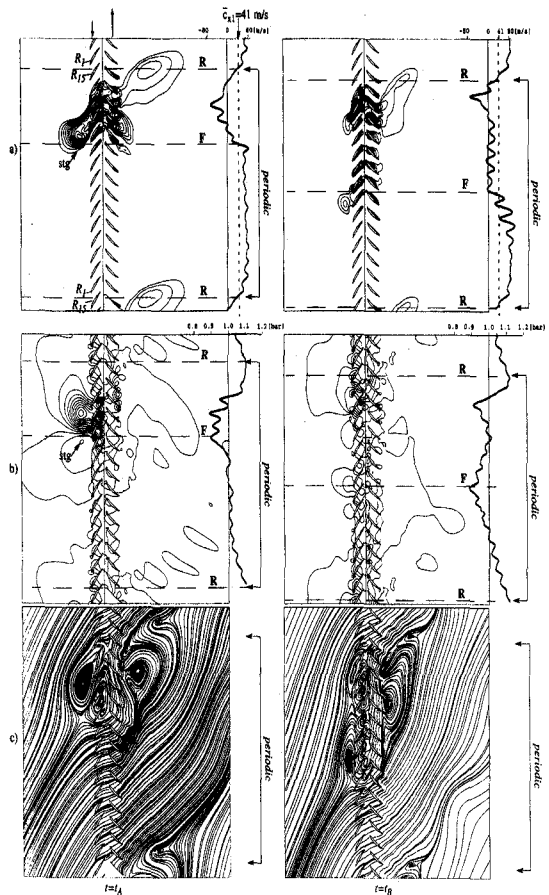


Fig. 9 (a) contours of negative axial velocity, (b) static pressure contours, (c) instantaneous cell-frame streamlines (Saxer-Felici et al, 1998)

어 있음을 밝혔다. 스톨 발달에 관한 수치연구는 3차원으로 실제 날개의 수를 계산해야 하며, 다단의 압축기, 비정상 유동해석, 난류유동 등을 고려해야 더욱 정확한 모사가 가능하므로 앞으로 컴퓨터기술의 발달에 따라 더욱 많은 연구가 있으리라 생각된다.

3. 결론

터보압축기에서 스톨 발달에 대한 연구는 압축기의 제어와 안전성 향상에 큰 발전을 이룰 것으로 예측된다. 엔진의 설계에 있어서도 능동제어를 통하여 압축기의 안정성을 향상시키는 기술이 미래의 첨단 엔진의 방향으로 제시되고 있는 시점에서 스톨의 발달에 대한 연구는 점점 가속화 될 것으로 예상된다. 최근 약 20여 년간의 연구를 통하여 스톨의 선구신호가 존재함을 밝

했으며, 선구신호의 측정방법과 이 신호를 제어에 이용하는 방법에서 많은 연구가 있었고, 긍정적인 결과들이 보고되었다. 향후에는 스톨의 선구신호를 압축기의 능동 제어에 이용하는 방향으로 더욱 많은 연구가 이루어질 것으로 예상되며, 그 결과들은 터보 압축기나 엔진기술의 발전에 큰 영향을 미칠 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Greitzer, E. M., 1998, "Smart Jet Engines - Case History of a Multidisciplinary Research Program," JSME International Journal, Series B, Vol. 41, No. 1, pp. 90-102.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Emmons, H. W., Pearson, C. E. and Grant, H. P., 1955, "Compressor Surge and Stall Propagation," ASME Transactions, Vol. 77, pp. 455-469.
- (6) Greitzer, E. M., 1976a, "Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors. Part I: Theoretical Compression System Model," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 98, pp. 190-198.
- (7) Greitzer, E. M., 1976b, "Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors. Part II: Experimental Results and Comparison with Theory," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 98, pp. 199-217.
- (8) Moore, F. K., 1984, "A Theory of Rotating Stall of Multistage Compressors," Part I, II, III," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 98, No. 2, Apr., pp. 313-336.
- (9) 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.
- (10) Etchevers, O., 1992, "Evaluation of Rotating Stall Warning Schemes for Axial Compressors," M.S. Thesis, MIT Dept. of Aeronautics and Astronautics, Sep.
- (11) 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.
- (12) Paduano, J. D., 1998, "Recent Developments in Compressor Stability and Control," ISROMAC, Vol. C, pp. 1103-1122.
- (13) Epstein, A. H., Ffowcs Williams, J. E. and Greitzer, E. M., 1989, "Active Suppression of Aero-dynamic Instabilities in Turbomachines," Journal of Propulsion and Power, Vol. 5, No. 2, pp. 204-211.
- (14) Paduano, J. D., 1992, "Active Control of Rotating Stall in Axial Compressors," Ph.D. Thesis, MIT Dept. of Aeronautics and Astronautics, Feb.
- (15) 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.
- (16) Escuret, J. F. and Garnier, V., 1996, "Stall Inception Measurements in a High-Speed Multistage Compressor," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 118, pp. 690-696.
- (17) McDougall, N. M., 1988, "Stall Inception in Axial Compressors," PhD Dissertation, University of Cambridge, United Kingdom.
- (18) 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.
- (19) Day, I. J., 1993, "Stall Inception in Axial Flow Compressors," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 1-9.

- (20) Lawless, P. B., Kim, K. H. and Fleeter, S., 1994, "Characterization of Abrupt Rotating Stall Initiation in an Axial Flow Compressor," AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 5, Sept.-Oct., pp. 709~715.
- (21) Hoying, D. A., 1995, "Stall Inception in a Multistage High-Speed Axial Compressor," AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 5, Sept.-Oct. pp. 515-922.
- (22) 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.
- (23) Jahnen, W., Peters, T. and Fottner, L., 1999, "Stall Inception in a 5-Stage HP-Compressor with Increased Load Due to Inlet Distortion," ASME Paper No. 99-GT-440.
- (24) Wilson, A. G. and Freeman, G., 1994, "Stall Inception and Development in an Axial Flow Aeroengine," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 216-225.
- (25) 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.
- (26) Camp, T. R. and Day, I. J., 1998, "A Study of Spike and Modal Stall Phenomena in a Low-Speed Axial Compressor," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 120, pp. 393-401.
- (27) 강정식, 2002, "원심압축기의 스톨 발달에 관한 연구," 서울대학교 공학박사학위논문, 2월
- (28) Kang, J.S. and Kang S.H., 2003, "Stall Inception in a Vaneless Diffuser of a Centrifugal Compressor," ASME Paper No. GT2003-38358.
- (29) Liao, S. and Chen, J., 1996, "Time-Frequency Analysis of Compressor Rotating Stall by means of Wavelet Analysis," ASME Paper No. 96-GT-57.
- (30) Le, D. K., Owen, A. K. and Mattern, D. L., 1996, "Multiscale Analysis of Stall Inception and Instabilities in an Axial-Centrifugal Turboshift Engine," AIAA Paper No. 96-3174.
- (31) Chen, J., Hasemann, H., Shi Li and Rautenberg, M., 1994, "Stall Inception Behavior in a Centrifugal Compressor," ASME Paper No. 94-GT-159.
- (32) 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.
- (33) 강정식, 강신형, 2001, "원심압축기 스톨 발달에 관한 실험적 연구(1) -스톨 발달 과정", 대한기계학회논문집 B권, 제25권 제10호, pp. 1436-1444.
- (34) 강정식, 강신형, 2001, "원심압축기 스톨 발달에 관한 실험적 연구(2) -스톨 경고 방법", 대한기계학회논문집 B권, 제25권 제10호, pp. 1445-1450.
- (35) He, L., 1997, "Computational Study of Rotating-Stall Inception in Axial Compressors," AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 13, No. 1, Jan.-Feb., pp. 31-38.
- (36) Saxer-Felici, H. M., Saxer, A. P., Inderbitzin, A. and Gyarmathy, G., 1998, "Prediction and Measurement of Rotating Stall Cells in an Axial Compressor," ASME Paper No. 98-GT-67.
- (37) Hoying, D. A., Tan, C. S., Vo, H. D. and Greitzer, E. M., 1998, "Role of Blade Passage Flow Structures in Axial Compressor Rotating Stall Inception," ASME Paper No. 98-GT-588.