

제목 : 터보압축기에서의 스톨 발단에 관한 연구동향  
(Review of stall inception in turbo compressors)

저자 : 강정식 (한국항공우주연구원, 선임연구원, 공학박사)

대분류 : 회전익 , 중분류 : 공력

## 1. 서론

터보 압축기는 효과적으로 유체를 압축시킬 수 있는 방법이지만, 스톨과 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 시스템의 불안정한 거동이 연소기에서의 화염을 소화시키기도 한다. 또한 서지는 압축기를 포함한 시스템 전체가 크게 진동하기 때문에 성능저하뿐 아니라 시스템이 파괴되는 현상을 초래할 수 있다. 그러므로 터보 압축기에서 스톨과 서지를 연구하고 그 발생을 제어하는 것은 중요한 연구 주제가 되어왔다.

스톨에 관한 연구는 스톨을 일으키는 원인, 스톨 셀(cell)의 거동, 스톨 모델링, 그리고 제어방법에 관한 연구가 주를 이루었다. Emmons et al. (1955)은 스톨 셀이 전파(propagation)하는 이유를 설명하였는데, 그 설명에 따라 선회 실속(Rotating Stall)을 이해하고 모델링을 할 수 있는 기초를 마련하였다. 그리고 Greitzer (1976 a, b)는 actuating disk 모델을 사용하여 압축기의 선회실속과 서지에 대한 모델링을 완성하였으며, 이것은 서지의 제어에 획기적인 계기를 마련하였다.

스톨을 제어하는 방법은 크게 능동 제어(active control)와 수동 제어(passive control)로 나뉜다. 수동 제어에서는 압축기의 쉬라우드에 그루브(groove)를 파는 방법 등으로 스톨 발생을 지연시키는 방법이며, 능동 제어는 액추에이터(actuator) 등을 사용하여 스톨이나 서지를 처음 발생시키는 작은 교란을 제어하거나, 제트(jet)를 분사하는 방법 등이 있다. 제트를 분사하는 방법은 추가적인 큰 동력원이 필요하기 때문에 실용성이 적지만, 스톨 발생 초기의 작은 교란을 제어하는 방법은 작은 에너지를 가지고도 스톨을 제어할 수 있기 때문에 큰 가능성을 가진 스톨 제어 방법으로 주목받고 있다.

최근에는 스톨에 대한 연구는 대부분 스톨의 발단(inception)에 대한 연구에 초점이 맞추어졌는데, 그 주된 이유는 다음과 같다. 첫째로 압축기가 스톨 한계점에서 더욱 가까이 작동될수록 일반적으로 압축기의 압력비와 효율이 증가하는 장점이 있

는 반면, 스톨 한계선 가까이에서 작동할 경우 여러 가지 작동상황의 변화로 인하여 압축기가 스톨이나 서지 영역으로 들어갈 경우 압축기의 안전에 큰 문제를 일으키게 되며, 터보엔진이나 터보제너레이터의 경우에는 문제가 더욱 심각해진다. 그래서 압축기를 스톨 한계점 근처에서 안전하게 작동시키려면 스톨이 발생하기 전에 스톨의 발생을 미리 감지해서 스톨의 발생을 방지할 필요가 있게 되었다(Garnier et al. 1991; Etchevers 1992; Höss et al. 2000). 그리고 둘째로 많은 압축기의 경우에 스톨이 일단 발생하면 단순히 유량을 증가시키는 방법으로 스톨이 제거되지 않아서 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. 또한 스톨이 발생하기 전에 작은 크기의 교란이 발생하며 이것을 제어함으로써 스톨을 제어할 수 있는 가능성이 제기됨에 따라 스톨발생 이전의 작은 크기의 교란에 대한 연구가 연구자들의 관심을 끌게 되었다. 이런 이유들로 인하여 스톨이 발생하기 전에 이를 미리 감지하여 스톨을 방지하려는 방법이 많이 연구되어져 왔다.

스톨 발단에 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.

## 2. 최근 진행된 연구개발 현황 및 성과 Review

많은 선행 연구를 통하여 현재까지 스톨의 발단에는 크게 모드(mode) 형태와 스파이크(spike) 형태의 두 가지가 있음이 발견되었다. Moore & Greitzer(1986 a, b)는 시간에 따른 스톨과 서지의 발달에 관한 모델을 제시하였는데, 이 모델을 통하여 로터의 상류에서 축방향 속도의 섭동이 원주방향으로 회전하며, 이 회전하는 작은 크기의 파(modal wave)가 스톨로 발전하는 모드 형태의 스톨 발단을 발견하였다. 그 후에 McDougall et al.(1990)은 1단의 저속 축류압축기에서 회전하는 파를 처음으로 측정하여 이 파의 존재를 입증하였다. 이 회전하는 파는 Garnier et al. (1991), Etchevers (1992), Day (1993), Lawless et al. (1994), Tryfonidis et al. (1995), Hoying (1995), Boyer et al. (1995), Escuret et al. (1996), Bright et al. (1997), Jahnen et al. (1999)에 의하여 1단의 축류압축기와 다단의 축류압축기, 저속압축기와 고속압축기에서 실험적으로 검증되었으며, Tryfonidis et al. (1995), Wilson et al. (1994), Höss et al. (2000)에 의하여 실제 터보엔진들 에까지 적용되어 실험적으로 검증되었다. Fig. 1에는 터보엔진(MTU engine, Day

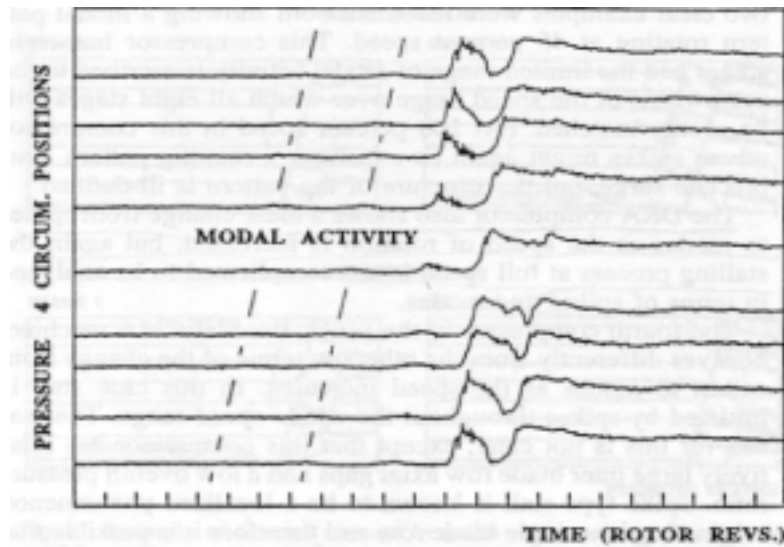


Fig. 2 Example of modes in a high-speed compressor taken from the MTU measurements

Fig. 1 Example of modes in a high-speed axial compressor. (Day et al., 1999)

et al. 1999)에서 스톨이 발생하기 전에 모드(mode) 형태의 스톨 발달을 보이는 예를 나타내었다. He (1997), Saxer-Felici et al. (1998), Hoying et al. (1998)은 수치해석을 통하여 축류압축기에서 스톨의 발달에 대한 연구를 수행하였다. 이런 스톨 발달에 관한 연구에서는 스톨이 발생하기 전에 스톨의 선구(precursor) 신호를 발견하고, 이를 효과적으로 감지할 수 있는 방법을 개발하며, 또한 이를 이용하여 스톨을 미리 제어하는 방법을 개발하는 데 초점이 맞추어져 왔다.

스톨을 일으키는 다른 메커니즘은 Day (1993)에 의하여 발견되었는데, 그는 소위 스파이크(spike)라 불리는 로터 유로의 몇 개의 길이에 해당하는 짧은 길이의 파가 생성되어 완전 발달된 스톨로 발달하는 현상을 발견하였다. Fig. 2에는 한 축류압축기(C106 compressor, Day 1993)에서 스파이크 형태의 스톨 발달을 보이는 예를 나타내었다. Day et al. (1999)과 Höss et al. (2000)은 압축기의 작동조건에 따라 모드 형태와 스파이크 형태의 스톨발달을 모두 나타낼 수 있음을 보였으며, Camp & Day(1998)는 모드와 스파이크 형태의 스톨발달의 다른 원인을 규명하였다.

스톨이 발생하기 전에 스톨의 선구 신호를 측정하고 해석하기 위하여 여러 가지 방법이 제시되었다. 대표적인 방법은 Moore & Greitzer (1986 a, b)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(space Fourier transform, SFT)을 통하여 원주방향으로 분포된

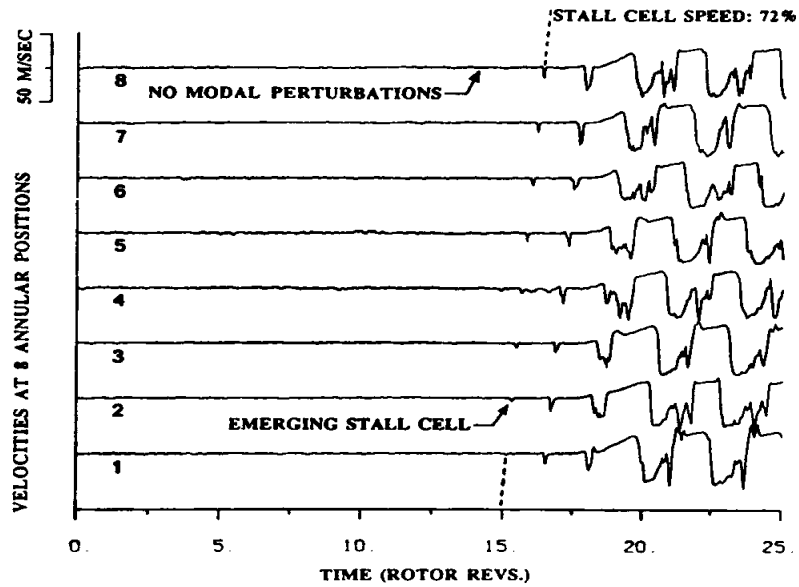


Fig. 8 Hot-wire measurements from the C106 compressor (1.2 percent clearance) showing a stall cell emerging from a flow field in which no modal perturbations can be detected

Fig. 2 Example of a spike type stall inception in an axial compressor. (Day, 1993)

작은 크기의 회전하는 파를 측정하는 방법이 주로 사용되었다. 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, 이를 스톨의 선구신호로 생각한다 (McDougall et al. 1990; Garnier et al. 1991; Etchevers 1992; Tryfonidis et al. 1995; Boyer et al. 1995). 또한 이 공간 푸리에 계수들을 이용하여 회전하는 파의 에너지를 계산하여 선구신호를 감지하는 회전하는 파의 에너지(Traveling Wave Energy, TWE) 방법도 개발되었다 (Garnier et al. 1991; Tryfonidis et al. 1995). 그리고 비정상 압력신호에 웨이블릿 신호를 이용하거나 (Liao et al. 1996; Le 1996; Höss et al. 2000), 카오스 이론을 이용하는 방법도 제안되었다 (Bright et al. 1997). 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.

원심압축기에서도 스톨에 관한 연구는 많이 진행되어졌다. Johnson (1964), Abdel-Hamid et al. (1979), Abdel-Hamid (1980), Frigne & Van den Braembussche(1985), 신유환 등(1998)은 원심압축기의 베인없는 디퓨저에서 스톨에 관한 연구를 수행하였고, Frigne et al. (1984), Kämmer et al. (1986)은 원심압축기의 인듀서에서 스톨현상을 보고하였다. 그렇지만 스톨 발달에 관한 연구에

있어서는 그렇지 않다. 앞에서 보아온 대로 대부분의 스톨 발달 연구가 축류압축기에서 수행되어져 왔으며, 원심압축기에서는 연구가 매우 드물다. Lawless et al. (1995)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. 이런 배경에서 강정식(2002)은 원심압축기의 베인없는 디퓨저의 스톨 발달에 관한 연구에서 중요한 연구결과를 보고하였다. 스톨이 발생하기 전에는 2개의 셀 구조와 3개의 셀 구조를 가진 선구 신호가 작은 크기로 성장과 소멸을 반복하는 현상을 발견하였는데 이 작은 크기의 셀을 “작은 셀(pre-cell)”이라고 명명하였다. 작은 셀이 발생하면 공간 푸리에 계수의 위상이 선형적으로 증가하며, 회전하는 파의 에너지가 증가한다. 작은 셀은 완전 발달된 스톨 셀보다 조금 낮은 속도로 회전하거나 거의 동일한 속도로 회전하며, 보통 임펠러가 수 십 회전하는 동안에 성장하였다가 소멸한다. 작은 셀은 2개의 작은 셀 구조와 3개의 작은 셀 구조가 서로 교차하며 성장과 소멸을 반복할 경우가 많은데, 이것은 두 작은 셀 구조가 서로 에너지 교환을 통하여 서로의 성장과 소멸에 상호작용하는 것으로 밝혀졌다. 이렇게 작은 셀이 여러 번 성장, 소멸하며 완전 발달된 스톨로 발달하는 현상은 이제까지 축류압축기의 연구에서 보고된 모드(mode)나 스파이크(spike) 형태의 스톨 발달과는 아주 다른 스톨 발달형태이다. 그래서 이것을 “작은 셀에 의한 스톨(pre-cell stall)”이라고 명명하였다. 작은 셀에 의한 스톨은 베인없는 디퓨저를 가진 원심압축기에서의 고유한 스톨 발달 형태로 생각된다. 스톨 경고방법에서도 공간푸리에 계수의 위상을 이용하는 방법과 회전하는 파의 에너지를 이용하는 방법으로 약 0.2~2.3초(200~1200바퀴)의 경고시간을 얻을 수 있었다.

### 3. 향후 전망

스톨 발달에 관한 연구를 통하여 압축기에서 스톨의 제어방법뿐 아니라 엔진의 설계 및 제어방법에도 큰 변화가 있을 것으로 예상된다. 경고시간이 길고 신뢰성 있는 경고방법이 개발된다면 압축기의 효율, 제어방법, 작동특성에서 큰 진전이 있을 것이다. 뿐만 아니라 항공기 및 발전용 가스터빈 엔진에서는 소위 smart engine 이라 부르는 차세대 엔진의 개발이 한층 앞당겨 질 것이다.

### 참고문헌

BOYER, K. M., KING, P. I. & COPENHAVER, W. W. 1995 Stall Inception in Single-Stage Transonic Compressors with Straight and Swept Leading Edges. *AIAA Journal of Propulsion and Power* **11**, No. 6,

November–December, 1363 ~ 1366.

- BRIGHT, M. M., QAMMAR, H. K., WEIGL, H. J. & PADUANO, J. D. 1997 Stall Precursor Identification in High-Speed Compressor Stages Using Chaotic Time Series Analysis Methods. *ASME Journal of Turbomachinery* **119**, 491 ~ 500.
- CAMP, T. R. & DAY, I. J. 1998 A Study of Spike and Modal Stall Phenomena in a Low-Speed Axial Compressor. *ASME Journal of Turbomachinery* **120**, 393 ~ 401.
- DAY, I. J. 1993 Stall Inception in Axial Flow Compressors. *ASME Journal of Turbomachinery* **115**, 1 ~ 9.
- DAY, I. J., BREUER, T., ESCURET, J., CHERRETT, M. & WILSON, A. 1999 Stall Inception and the Prospects for Active Control in Four High-Speed Compressors. *ASME Journal of Turbomachinery* **121**, 18 ~ 27.
- EMMONS, H. W., PEARSON, C. E. & GRANT, H. P. 1955 Compressor Surge and Stall Propagation. *ASME Transactions* **77**, 455–469.
- ESCURET, J. F. & GARNIER, V. 1996 Stall Inception Measurements in a High-Speed Multistage Compressor. *ASME Journal of Turbomachinery* **118**, 690 ~ 696.
- ETCHEVERS, O. 1992 Evaluation of Rotating Stall Warning Schemes for Axial Compressors, M.S. Thesis, MIT Dept. of Aeronautics and Astronautics, Sep.
- FRIGNE, P. & VAN DEN BRAEMBUSSCHE, R. 1984 Distinction Between Different Types of Impeller and Diffuser Rotating Stall in a Centrifugal Compressor With Vaneless Diffuser. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **106**, 468–474.
- FRIGNE, P. & VAN DEN BRAEMBUSSCHE, R. 1985 A Theoretical Model for Rotating Stall in the Vaneless Diffuser of a Centrifugal Compressor. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **107**, 507–513.
- GARNIER, V. H., EPSTEIN, A. H. & GREITZER, E. M. 1991 Rotating Waves as a Stall Inception Indication in Axial Compressors. *ASME Journal of Turbomachinery* **113**, 290 ~ 302.
- GREITZER, E. M. 1976a Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors, Part I: Theoretical Compression System Model. *ASME Journal of*

*Engineering for Power* **98**. 190-198.

- 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* **98**. 199-217.
- GREITZER, E. M. & 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* **108**, 231 ~ 239.
- HE, L. 1997 Computational Study of Rotating-Stall Inception in Axial Compressors. *AIAA Journal of Propulsion and Power* **13**, No. 1, January- February, 31 ~ 38.
- HOYING, D. A. 1995 Stall Inception in a Multistage High-Speed Axial Compressor. *AIAA Journal of Propulsion and Power* **11**, No. 5, September-October, 915 ~ 922.
- HOYING, D. A., TAN, C. S., VO, H. D. & GREITZER, E. M. 1998 Role of Blade Passage Flow Structures in Axial Compressor Rotating Stall Inception. ASME Paper No. 98-GT-588.
- HÖSS, B., LEINHOS, D. & FOTTNER, L. 2000 Stall Inception in the Compressor System of a Turbofan Engine. *ASME Journal of Turbomachinery* **122**, 3 2 ~ 44.
- JAHNEN, W., PETERS, T. & FOTTNER, L. 1999 Stall Inception in a 5-Stage HP-Compressor with Increased Load Due to Inlet Distortion. ASME Paper No. 99-GT-440.
- JANSEN, W. 1964 Rotating Stall in a Radial Vaneless diffuser. *ASME Journal of Basic Engineering*, Dec., 750-757.
- KANG, J. S., CHO, S. K. & KANG, S. H. 2000 Unsteady Flow Phenomena in a Centrifugal Compressor Channel Diffuser. ASME Paper No. 2000-GT-451.
- KANG, J. S. & KANG, S. H. 2001 Stall Inception in a High-Speed Centrifugal Compressor. ASME Paper No. 2001-GT-301.
- KÄMMER, N. & RAUTENBERG, M. 1986 A Distinction Between Different types of Stall in a Centrifugal Compressor Stage. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **108**, 83-92.
- LAWLESS, P. B. & FLEETER, S. 1995 Rotating Stall Acoustic Signature in a

- Low-Speed Centrifugal Compressor: Part 1-Vaneless Diffuser. *ASME Journal of Turbomachinery* **117**, 87 ~ 96.
- LAWLESS, P. B., KIM, K. H. & FLEETER, S. 1994 Characterization of Abrupt Rotating Stall Initiation in an Axial Flow Compressor. *AIAA Journal of Propulsion and Power* **10**, No. 5, Sept.-Oct., 709 ~ 715.
- LE, D. K., OWEN, A. K. & MATTERN, D. L. 1996 Multiscale Analysis of Stall Inception and Instabilities in an Axi-Centrifugal Turboshift Engine. AIAA Paper No. 96-3174.
- LIAO, S. & CHEN, J. 1996 Time-Frequency Analysis of Compressor Rotating Stall by means of Wavelet Analysis. ASME Paper No. 96-GT-57.
- MCDUGALL, N. M., CUMPSTY, N. A. & HYNES, T. P. 1990 Stall Inception in Axial Compressors. *ASME Journal of Turbomachinery* **112**, 116~125.
- MOORE, F. K. & 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* **108**, 68 ~ 76.
- SAXER-FELICI, H. M., SAXER, A. P., INDERBITZIN, A. & GYARMATHY, G. 1998 Prediction and Measurement of Rotating Stall Cells in an Axial Compressor. ASME Paper No. 98-GT-67.
- TRYFONIDIS, M., ETCHEVERS, O., PADUANO, J. D., EPSTEIN, A. H. & HENDRICKS, G. J. 1995 Prestall Behavior of Several High-Speed Compressors. *ASME Journal of Turbomachinery* **117**, 62 ~ 80.
- WILSON, A. G. & FREEMAN, G. 1994 Stall Inception and Development in an Axial Flow Aeroengine. *ASME Journal of Turbomachinery* **116**, 216 ~ 225.
- 강정식, 2002 원심압축기의 스톨 발달에 관한 실험적 연구, 서울대학교 박사학위논문