차량용 터보차저의 소음도표 작성 및 응용

Noise Diagram of an Automotive Turbo Charger and Its Applications

이 형 일*

Hyeongill Lee

(2010년 1월 12일 접수 ; 2010년 2월 22일 심사완료)

Key Words : Turbocharger(터보차저), Noise Diagram(소음도표), Surge(서지), Mild Surge(마일드서지)

ABSTRACT

A test facility which can simultaneously measure turbocharger operating condition variables and vibro-acoustic emission in the situations that are quite similar to real internal combustion engine operating conditions has been introduced. Using this facility, a new method sweeping from full open throttle to deep surge region along constant speed curves can be utilized instead of the stationary method that has been traditionally used to obtain turbocharger compressor maps. Data covering an extensive range of the compressor performance map have been collected and analyzed. An experimental study is performed to define a noise diagram that correlates vibro-acoustic measurements to aerothermodynamic operating conditions. An instrumentation set in the facility allows the automatic definition of the operating point on the turbine and compressor map of the turbocharger. Also, radiated sound pressure and casing vibration data corresponding to the point are obtained by a microphone in the vicinity of the compressor casing and an accelerometer on the casing. The major source(s) of noise at specific operating point on the map can be easily identified with these maps. Also, acoustic characteristics of a given turbocharger at the vicinity of the surge as well as in the surge are also defined. Finally, the possibility to define mild surge region of a turbocharger using vibro-acoustic measurements is studied

1. 서 론

차량용 터보차저는 공기과급기의 일종으로서 Fig. 1에 설명된 바와 같이 엔진에서 연소 후 배출되는 배기가스의 유동 에너지를 이용하여 터빈을 회전시키고 이때 유도되는 회전동력을 이용하여 터빈축과 직결된 엔진 흡기구 측의 공기압축기를 회전시켜 강제적으로 공기를 압축하여 연소실로 공급하는 장치이다⁽¹⁾. 엔진의 출력 및 토크를 증대시킬 뿐만 아니라 배기가스 내의 오염물질을 저감하여 전 세계

적으로 더 엄격해져 가는 배기가스 규제를 만족시킬 수 있어 기존에 많이 사용되던 디젤엔진뿐만 아니라 가솔린엔진에서도 그 적용이 확대되고 있다⁽¹⁾.

터보차저를 구성하는 터빈 휠과 컴프레서 휠은 치대 200,000 rpm 이상의 고속으로 회전하므로 휠의 작은 불평형 질량에 의해서도 큰 진동이 유도되어 회전수 성분의 소음이 구조물에서 방사된다. 또한, 높은 유속으로 이동하는 다량의 배기가스가 터빈을 구동하고 동시에 컴프레서에서는 흡입 공기를 고속으로 압축하는데 이 과정에서 여러 개의 특이한 소음들이 발생된다. 이러한 소음들은 터보차저의 운전 조건에 따라 그 수준 및 특성 등이 크게 변화하므로 터보차저 전체 운전 영역에 대해서 발생되

* 교신저자 ; 정회원, 경북대학교 기계자동차공학부
E-mail : hilee@knu.ac.kr
Tel : (054)530-1406, Fax : (054)530-1407

는 소음을 분석하는 것이 필요하다.

이렇게 발생된 터보차저 소음들은 차체를 투과하여 실내로 유입되어 운전자에 안락감을 크게 훼손시키기 때문에 이들 소음을 일정 수준 이하로 관리하기 위하여 자동차 및 터보차저 제작 업체에서 많은 노력을 기울이고 있다⁽¹⁻³⁾.

터보차저에서 발생하는 다양한 진동 및 소음의 특성과 발생 원인에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔으며 관련 논문도 다수 발표되었다⁽¹⁻⁶⁾. 또한 터보차저 내부의 공기유동 특성을 파악하기 위하여 여러가지 센서를 이용한 다양한 연구가 수행되었으며, 관련 논문도 다수 발표되었다⁽⁷⁻¹¹⁾.

특정 엔진에 적합한 터보차저 선택에 도움을 주기 위하여 제공하는 컴프레서의 성능 지도와 유사한 형태로 터보차저의 운전 영역에서 발생하는 소음을 3차원 지도 형태로 표시하면 주어진 터보차저 전체 운전조건에서의 소음특성을 동시에 파악하는 것이 가능하다. 동시에 특정 소음 성분에 대하여 별도의 도표를 작성함으로써 터보차저 사용 영역 내의 각 위치에서의 소음수준 파악과 함께 소음의 발생 원인 분석도 가능하다.

이 연구에서는 터보차저 전용 시험장치인 가스벤치를 이용하여 운전변수를 자동으로 제어하면서 필요한 데이터를 연속적으로 측정하는 연속운전시험(sweep test) 방법을 제시하고 운전변수를 고정시킨 상태에서 데이터를 계속하는 기존 정상상태시험(stationary test)을 대체함으로써 시험에 소요되는 시간과 비용을 대폭적으로 절감할 수 있음을 확인하였다. 또한, 터보차저 컴프레서 성능인자와 소음을 동시에 측정한 다음 시간을 매개로 연관시킴으로써 터보차저 운전 영역에 소음을 표시하여 소음도표를 작성하였다.

이와 같은 소음도표를 이용하면 소음이 크게 발생하는 터보차저 운전 영역을 정의하고 그 원인을 분석할 수 있다. 아울러, 터보차저 내에 ‘불안정한 공기유동(surge)’ 발생시 소음특성을 분석하고, surge 진입 직전 특이한 소음 발생하는 영역(mild surge area)을 정의함으로써, 소음신호를 이용하여 주어진 터보차저에 대하여 ‘surge’ 발생 위험없이 작동시킬 수 있는 영역을 신속하고 용이하게 정의할 수 있다.

2. 소음도표 작성

2.1 시험장치

이 연구에 필요한 시험은 Fig. 2 및 Table 1에 설명되어 있는 터보차저 가스벤치를 이용해 수행되었다.

이 장치의 특성 및 주된 기능은 다음과 같다. 1) 액화천연가스를 연소시킨 배기가스에 압축 공기를 첨가하여 정해진 온도에서 터빈을 구동함으로써 실제

Fig. 2 Schematic diagram of the turbocharger test facility

Table 1 Major capacities of the turbocharger test bench

Max turbine inlet flow rate	$\geq 0.3\text{kg/s}$
Max turbine inlet temperature	$\geq 1,000^{\circ}\text{C}$
Max turbine inlet pressure	$\geq 4\text{ bar}$
Operation	Full automatic
Electric heater	Installed

Fig. 1 Configuration of an automotive turbocharger

엔진에서의 터보차저 운전 조건과 유사한 상황으로 시험이 가능하다. 2) Fig. 2에서 도시된 바와 같이 터빈과 컴프레서의 입구 및 출구에서 성능에 영향을 주는 변수(공기온도, 공기압 및 공기유량)의 측정이 가능하다. 3) 터빈에 공급되는 공기의 최대 유량은 0.30 kg/s 이상이고 최고 온도는 1000°C 이상으로, 이 범위에서 구동되는 다양한 크기의 터보차저를 시험할 수 있는 유연성을 보유하고 있다. 4) 터보차저 효율과 성능을 계산할 수 있으며 측정된 성능변수들과 소음 수준을 이용하여 ‘Surge’ 영역을 정량적으로 정의할 수 있다.

2.2 시험 방법

앞에서 언급한 바와 같이 터보차저 유량지도 작성성을 위한 시험에 병행하여 소음 데이터의 측정이 이루어진다. 유량지도를 작성하기 위해 필요한 터보차저 회전수와 컴프레서 입구와 출구의 온도 및 압력, 컴프레서 입구 측 유량 등을 Fig. 2의 터보차저 전용 시험장치를 이용하여 측정하였다. 이들 데이터는 컴프레서의 유동 영역을 정의하는 컴프레서 유량지도를 결정한다. 유량지도를 작성하기 위해서는 동작영역내의 다양한 동작점(operating point)에서 데이터를 수집하여야 한다. 이와 같이 다수의 측정 위치를 이동하는 방법에 따라 ‘Stationary Test’ 및 ‘Sweep Test’로 크게 나뉘어진다.

‘Stationary Test’는 터보차저 동작변수를 ‘Surge’ 점과 터보차저의 효율이 임계치보다 떨어지는 ‘Choke’점 사이에 미리 정해진 측정위치에 고정, 유지시켜 성능변수들이 정상상태에 도달한 다음 데이터를 측정하는 방법으로 종래에 많이 사용되어 오던 방법이다⁽⁷⁻¹¹⁾. 동작변수에 대한 자동 조절이 불필요하므로, 고가의 복잡한 시험장치 없이 비교적 간단하게 시험이 가능하지만, 각 시험위치에서 정상상태에 도달한 후 데이터 측정이 이루어지므로 지도상의 여러 위치에서 데이터 수집하기 위해서는 많은 시간이 소요된다. 따라서, 시간 및 비용 측면의 문제로 측정점 수가 제한적일 수 밖에 없다. 아울러, 터보차저가 실제 차량에 장착되는 경우, 정상상태에서 작동되는 경우가 거의 없어 실제 상황과 다른 조건에서 데이터 측정이 이루어진다는 단점이 있다.

‘Sweep Test’는 컴프레서 성능 영역에서 각 회전

수마다 정해진 ‘Surge’점과 ‘Choke’점에 대하여, 일정한 회전수를 유지하면서 컴프레서 출구에 부착되어 있는 부스트 압력 제어용 밸브를 일정한 속도로 개방시키면서 실시간으로 성능 데이터를 측정한다. 각 측정점에서 정상상태에 도달할 필요가 없으므로 측정 시간을 크게 절감할 수 있다. 아울러 변수가 지속적으로 변동되는 상태에서 측정이 이루어지므로 실제 동작 상태와 유사한 상태의 성능 데이터를 얻을 수 있다. Fig. 3에 정상상태시험을 통해 측정한 컴프레서 유량 데이터를 연속 운전 조건에서 측정한 데이터와 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 모든 측정 회전수에서 연속운전시험 결과가 정상 상태 측정점들을 매우 근접해서 통과하고 있음을 보여주고 있다. 이 연구에서는 실제 동작상태와 유사한 환경에서 신속하게 데이터를 측정하기 위하여 연속운전시험 방법을 이용하였다.

터보차저 유량지도를 작성하기 위한 연속운전시험을 수행하는 동안 Fig. 4에 도시되어 있는 바와 같이 컴프레서 하우징에서 일정한 거리(10 cm)만큼 떨어진 위치에 고정된 마이크로폰(PCB 130D20)을

Fig. 3 Compressor flow map, key: $\circ$, steady state test; $\bullet$, sweep test

Fig. 4 Measurement set-up for noise and vibration

이용하여 소음을 측정하는 동시에 컴프레서 하우징 볼트 상부에서 가속도계(PCB 320C15)를 이용하여 수직방향의 진동을 측정하였다.

컴프레서 운전영역에 소음 특성과 표현하기 위해서는 공통 변수를 기준으로 터보차저 성능변수(유량, 압축비)와 소음 데이터를 연관시켜야 한다. 그러나, 이 두 종류의 데이터 측정에 이용된 샘플링 비가 크게 달라 직접적인 연관이 불가능하고 다음과 같은 데이터 처리 과정을 통하여 매칭이 이루어진다.

(1) 성능변수 데이터 측정

유량 및 압력비 등 터보차저 성능 변수는 100 Hz 이하의 매우 낮은 샘플링 비로 측정된다. 각각 회전수에 대해 유량과 압력비 데이터 측정치를 시간으로 정리한다.

(2) 소음 데이터 측정

일정한 터보차저 회전수에서 측정한 소음 데이터 중 관심 소음 성분만을 추출하여 시간을 기준으로 소음 데이터를 정리한다. 일반적으로 데이터 변동이 크기 때문에 일정한 수의 데이터로 평균을 취하여 대표값을 결정하고, 이를 시간을 기준으로 표시한다. Fig. 5는 관심 주파수 대역의 소음 추출한 값과 이를 평균한 값을 비교하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 소음 평균치가 원래 소음 측정치를 충실히 대표하고 있다.

(3) 성능변수와 소음 매칭

Fig. 6에 설명된 바와 같이, 특정 위치의 성능변수에 대해 측정시간을 기준으로 가장 근접한 시간에 측정한 소음 데이터를 탐색하여 성능변수 데이터에 맵핑시킨다. 이 과정을 통해 두 개의 다른 측정 시스템에서 측정된 데이터가 시간을 매개로 하여 소음을 성능변수(유량, 압력비) 함수로 정리함으로써 컴프레서 유량 특성 위에 소음 수준을 표시하여 소음도표를 작성할 수 있다.

2.3 소음도표의 예

앞 장에서 설명한 전용 시험 장치 및 방법을 이용하여 연구 대상 터보차저에 대해 컴프레서 유량 지도와 유사한 형태로 운전 영역내의 소음 크기를

표시한 소음도표를 작성하였다.

터보차저 전용 시험 장치에서 측정된 시간과 회전수에 따른 컴프레서 입구 유량 및 압축비는 Fig. 7과 같다. 터보차저 운전의 시작점은 ‘Choke’점이고 종료점은 ‘Surge’점이다. 따라서, 시간에 따라 압력비는 감소하고, 유량은 증가함을 보여주고 있다.

Fig. 5 Comparison of raw and averaged noises

Fig. 6 Procedure for mapping acoustic data to flow data

Fig. 7 Compressor flow and pressure characteristics

정상상태시험 및 연속운전시험을 이용하여 샘플 터보차저의 성능변수(유량, 압력비)를 측정한 결과를 Fig. 8에 서로 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 정상상태시험에서 정의된 점들을 연속운전시험을 통해 정의된 점들이 아주 근접하여 통과하고

있음을 알 수 있다.

Fig. 8 Comparison of stationary and sweep measurements

Fig. 9 Noise level for a turbocharger given speed and time

Fig. 10 Diagram for the overall turbocharger noise

(1) 전체소음도표

터보차저의 각 회전수에서 Fig. 2의 마이크로폰을 이용하여 측정한 전체 소음을 앞 장에서 소개된 방법을 이용하여 맵핑한 다음 시간을 기준으로 표시하면 Fig. 9과 같다. 이 결과를 유량지도 위에 표시하면 Fig. 10과 같은 3차원 소음도표를 얻을 수 있다. 도표상의 숫자는 소음레벨(dBA)을 나타낸다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 해당 터보차저의 동작영역 내의 소음분포 및 소음이 증가 또는 감소하는 영역을 손쉽게 파악할 수 있다. 전체적으로 터빈 및 컴프레서의 회전수가 증가함에 따라 소음 수준이 증가하며 회전수가 동일한 경우에도 운전 조건에 따라 소음 수준이 변화한다.

(2) 특정 성분에 대한 소음도표

마이크로폰으로 측정된 전체 소음 데이터를 바탕으로 지도상 각 위치의 소음에 대한 원인 및 기여도 분석을 위하여 목적에 따라 특정한 성분을 추출하여 다양한 소음도표를 작성하는 것도 가능하다. 본 연구에서는 컴프레서 날개 수에 비례하는 주파수를 가진 특정한 성분의 소음에 대한 도표를 작성하였다. 도표상의 숫자는 소음레벨(dBA)을 나타낸다.

Fig. 11에 주어진 결과를 보면, 이 성분 소음은 대체적으로 터보차저 회전수에 비례하여 증가하지만 사용 영역의 중앙부에서 급격히 증가함을 알 수 있다. 이 결과를 Fig. 10의 전체 소음도표와 비교

Fig. 11 Diagram for the special noise with frequency corresponding to compressor wheel blades

분석하면 도표 중앙 상부 ‘A’ 영역의 전체 소음에 대한 이 성분 소음의 기여도가 매우 높음을 알 수 있다.

3. 소음도표 응용

위에서 설명한 바와 같이, 목적에 따라 다양한 형태로 작성된 소음도표는 다양하게 응용할 수 있다.

이 연구에서는 소음도표를 이용하여 터보차저 내부 공기 유동이 불안정한 영역의 소음 특성을 검토하는 방법과 소음 특성을 분석한 결과를 이용하여 불안정한 공기 유동이 발생할 가능성이 있는 영역을 정의하는 방법에 대해 검토하였다.

3.1 Surge 소음 검토

터보차저의 작동 조건에 따라, 컴프레서를 통과하는 공기 흐름이 임계치보다 작아지는 경우에는 압축 공기가 컴프레서를 통과하여 입구 측으로 주기적으로 역류하는 불안정한 현상이 발생하는데 이

Fig. 12 Vertical acceleration at the compressor housing bolt during noise diagram test

Fig. 13 Noise characteristics in the ‘surge’ area

현상을 서지(surge)라고 한다. 이러한 현상은 터보차저의 효율 및 컴프레서의 날개의 내구력을 크게 저하시키므로 터보차저의 동작 가능 영역이 이 현상의 발생 여부에 따라 결정된다. 따라서, 이 현상에 대한 적절한 대응방안을 취하기 위하여 그 발생을 사전에 예지하거나 또는 발생시 조속히 감지해내는 것이 아주 중요하고, 이를 위해 다양한 방법들이 시도되어 왔다⁽⁵⁻¹¹⁾. 일반적으로 ‘Surge’ 현상은 컴프레서 동작변수의 불안정한 변동 또는 소음 등이 동반되므로 이를 이용하여 감지하는 방법이 많이 시도되어 왔다⁽⁵⁻⁹⁾. 예를 들어 압력센서나 열선이나 열판으로 측정된 공기유동량의 변동을 바탕으로 유도된 공기역학적 특성을 이용하여 감지하는 방안이 전통적으로 적용되어 왔으며⁽⁵⁻⁸⁾ 최근에는 진동 및 소음의 특성을 이용하여 터보차저에서 발생하는 불안정한 공기의 유동을 감지하는 방법도 소개되었다⁽⁹⁾. 또한, 회전하는 축의 거동을 측정하기 위해 사용되는 변위 센서를 이용하여 터보차저의 회전축의 거동을 계측하여 불안정한 현상을 감지하는 방법도 이용되어 왔다^(10,11).

3장에 소개된 방법을 이용하여 ‘Surge’ 영역에서 발생하는 진동 및 소음 특성을 검토하였다. 터보차저에서 발생하는 소음에 대하여 청각 및 동작변수 변동을 이용하여 ‘Surge’ 발생 여부를 파악하고, 발생시 ‘Surge’ 영역에서 측정된 소음 및 진동에 대하여 시간 및 주파수 영역 특성을 분석하였다.

‘Surge’ 영역내 진동 데이터를 정상 상태의 데이터와 Fig. 12에 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, surge 영역에서는 넓은 대역의 주파수에 걸쳐 큰 변동이 발생함을 알 수 있다. 또한, ‘Surge’가 발생하는 경우의 소음 분석 결과는 Fig. 13에 설명되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 정상 상태에서 발생하지 않았던, 큰 폭의 음압 변동이 약 0.3초의 주기로 발생한다. 이는 기존에 보고된 논문들의 내용과 일치하는 현상이다⁽⁵⁾. 위의 시험 결과를 이용하면 주어진 터보차저의 소음도표상에 ‘Surge’ 한계선을 설정하는 것이 가능하다.

3.2 Mild Surge 소음 검토

최근의 연구 결과에 따르면, ‘Surge’ 영역의 인접 부에는 특이한 소음을 발생시키는 영역이 존재하고 이러한 영역을 ‘Mild Surge’ 영역이라고 정의한다⁽⁵⁾.

Fig. 14 Sound pressure level in the specific frequency (0.5~2.0 kHz) range

이 영역에서 터보차저에서 발생하는 소음의 특성을 정의한 다음, 이러한 특성을 가진 소음에 대한 도표를 작성하면 주어진 터보차저에 대해 ‘Surge’ 발생 우려가 있는 영역을 정의할 수 있다.

(1) Mild Surge 소음 특성

3장의 시험장치를 이용하여 ‘Mild Surge’ 영역의 소음 특성을 정상 상태의 특성과 비교하여 특이한 성분을 파악하였다. surge 인접 영역에서의 소음 변화 특성을 관찰하기 위해 일정한 회전수를 유지하면서 정해진 경로를 통해 surge에 근접시키면서 시험을 실시하였다. 소음의 주파수 특성을 분석한 결과를 Fig. 14에 정리하였다. 그림에서 보는 바와 같이 ‘Mild Surge’ 영역에서는 정상상태에 비하여 500~2000 Hz 대역의 소음이 크게 증가하여 정점에 도달한 후 급격히 감소한다. 소음의 정점 위치는 ‘Surge’ 점에 해당되고, 이후 소음이 감소되는 것은 장비가 ‘Surge’ 점을 확인하고 신속하게 ‘Surge’ 영역을 벗어났기 때문이다.

(2) Mild Surge 영역

앞 절의 시험 결과에 따라, 전체 측정된 소음에서 500~2000 Hz 주파수 대역의 소음을 추출하여 소음도표를 작성하였다. 이 대역의 소음이 정상상태 대비 급격히 증가하는 점을 기준으로 ‘Mild Surge’ 영역을 정의하였다. 이러한 방법으로 정의된 ‘Mild Surge’ 영역을 유량지도 상에 나타내었다. Fig. 15에서 빗금으로 표시된 부분이 해당 영역이다. 그림에 주어진 결과를 보면, 시험된 모든 터보차저 회전수

Fig. 15 Mild surge area on the turbocharger compressor flow map

에서 ‘Surge’ 영역에 진입하기 직전에 ‘Mild Surge’ 영역이 존재함을 알 수 있다.

4. 결 론

‘Sweep Test’가 가능한 터보차저 전용 시험장치인 가스벤치를 이용하여 터보차저 컴프레서 유량지도와 유사한 형태로 컴프레서의 (유량, 압축비) 데이터 위에 소음을 매칭시켜 소음도표를 작성하였다. 전체 소음에 대한 도표를 이용하여 전체 운전영역에서 터보차저에서 발생하는 소음의 분포를 분석할 수 있다. 아울러, 일반적으로 터보차저에서 문제를 자주 발생시키는 특정 소음 성분에 대한 도표를 작성함으로써 다양한 사용 조건하에서 전체 소음에 대한 해당 소음의 기여도를 분석할 수 있었다. 분석 결과에 따르면, 예상했던 바와 같이 회전수가 증가함에 따라 소음이 증가하는 경향을 보이고 있으나, 일정한 형태가 아닌 특정 영역에서는 영역 왜곡 현상이 나타나 보다 정밀한 소음 분포를 이해할 수 있다.

동일한 장치를 이용하여 터보차저 ‘Surge’ 인접 영역에서의 발생하는 소음의 주파수 특성을 정의하였다. 시험 결과에 따르면 해당 영역에서는 0.5~2.0 kHz 대역의 소음이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 터보차저 작동시 상기 주파수 영역의 소음을 검토함으로써 터보차저 작동 조건이 ‘Surge’ 인접 영역인지를 손쉽게 파악하고 터보차저가 ‘Surge’ 영역으로 진입하는 것을 예방할 수 있다. 이를 활용하면 실사용 조건에서 터보차저가 ‘Surge’

영역에서 동작하는 것도 방지할 수 있다.

후 기

1. 이 논문은 2008학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음.

2. 터보차저 가스벤치 시험에 적극 협조해주신 (주)계양정밀에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Arnold, S., 2004, "Turbocharger Technologies to meet Critical Performance Demands of Ultra-low Emissions Diesel Engine," SAE Technical Paper 2004-01-1359.

(2) Kim, B. H., Hong, S. S. and Song, J. E., 2006, "A Study on Turbocharger Noise for Passenger Powertrains," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1707~1712.

(3) Trochon, E. P., 2001, "A New Type of Silencers for Turbocharger Noise Control," SAE Technical Paper, Vol. 19, No. 2, pp. 11~18.

(4) Andrs, L. S., Rivadeneira, J. C., Chinta, M., Gjika, K. and LaGue, G., 2007, "Nonlinear Rotordynamics of Automotive Turbocharger: Prediction and Comparisons to Test Data," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 129,

pp. 488~493.

(5) Galindo, J. W., Serrano, J. R., Guardiola, C. and Cervell, C., 2006, "Surge Limit Definition in A Specific Test Bench for the Characterization of Automotive Turbocharger," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 30, pp. 449~4624.

(6) Kang, J. S. and Kang, S. H., 2001, "Stall Inception in a High Speed Centrifugal Compressor," ASME Paper 2001 -FT-0301

(7) Gravdahl, J. T. and Egeland, O. E., 1999, Compressor Surge and Rotating Stall, Springer-Verlag, London.

(8) Gravdahl, J. T. and Egeland, O. E., 1999, Compressor Surge and Rotating Stall: Modeling and Control, Springer, London.

(9) Atakis, N., Mathioudakis, K., Kefalakis, K. and Papiliou, K., 2004, "Turbocharger Unstable Operation Diagnosis Using Vibroacoustic Measurement," ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 126, pp. 840~847.

(10) Bently, D., Goldman, P. and Yuan, J., 2001, "Rotor Dynamics of Centrifugal Compressor in Rotating Stall," Orbit 2Q01, pp. 40~50.

(11) Bently, D. and Goldman, P., 2000, "Vibrational Diagnostics of Rotating Stall in Centrifugal Compressors," Orbit 1Q01, pp. 32~40.