

## 가변 디퓨저를 장착한 원심 압축기 불안정성 연구

차봉준<sup>†</sup> · 임병준\* · 양수석\*

(2002년 1월 7일 접수, 2002년 6월 10일 심사완료)

### A Study on the Instabilities of the Centrifugal Compressor with Variable Diffuser

Bong-Jun Cha, Byeung-Jun Lim and Sook-Seok Yang

**Key Words:** Variable Diffuser(가변 디퓨저), Centrifugal Compressor(원심 압축기), Rotating Stall(선회실속), Surge(서지), Instability(불안정성)

#### Abstract

An experimental study on the performance and instability development characteristics of a centrifugal compressor equipped with a cambered variable diffuser has been performed with varying diffuser vane angles. The test was conducted at the design speed of 20,800 rpm and the 80% design speed of 16,640 rpm for 5 diffuser angles : 65°, 70°, 75°, 77.5°, 80°. The steady performance test results showed that choking mass flow rate decreases and total pressure ratio increases with a narrowed surge margin as the diffuser vane angle increases. Unsteady pressures were measured using high-frequency pressure transducers at the inducer and the diffuser throat to investigate the instability phenomena such as rotating stall and surge inside the compressor. From the unsteady measurements, it is found that the transient process from rotating stall to surge was mainly affected by diffuser angles. The results of the present study can be applied to the instability control of the centrifugal compressors using a variable diffuser.

#### 1. 서론

원심 압축기는 소형, 경량이며 1단으로도 높은 압축비를 얻을 수 있기 때문에 소형 항공기용 가스터빈 엔진이나 산업용 압축기 또는 터보차저 등에 많이 사용되고 있다. 원심 압축기의 개발과정에서 가장 큰 관건은 높은 압력비에서 충분한 작동영역을 확보하는 것이다. 원심압축기의 성능을 향상시키기 위한 노력들이 꾸준히 진행되어 오고 있는 가운데 최근에는 원심압축기의 운용영역을 넓히기 위한 압축기 불안정성에 대한 연구

들이 주류를 이루고 있다. 즉, 압축기 운용영역을 극대화시키고 안정한 운용영역을 확보하기 위한 불안정성의 예측기법과 불안정성에 대한 여러 가지 능동제어 기법들에 대한 것이다.

압축기의 불안정성은 운용조건 변화에 따른 압축유동의 국부적 또는 전반적인 파괴 현상을 말하는 것으로서 압축기의 작동한계를 결정하게 된다. 이러한 불안정성은 기계적 요소와 공력적 요소로 구분할 수 있는데 기계적 요소로서는 고속 회전에 따른 진동과 압력차이에 의한 축방향 변위 변화에 따른 기계적 간섭 등이 있을 수 있다.

공력적 요소로서는 유동이탈에 의한 국부적 불안정 요소인 선회실속(rotating stall)과 압축 시스템 전반에 걸친 불안정 요소인 서지(surge)가 있다. 선회실속은 임펠러 또는 디퓨저 일부에서 압축 유동이 블레이드면 또는 배인을 따라 흐르지 않고 일부가 이탈되는 국부적 실속현상으로서 이러한 이탈유동 셀(cell)이 임펠러 회전방향과 동일

\* 회원, 한국항공우주연구원 터보기계연구그룹

† 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원

터보기계연구그룹

E-mail : cha@kari.re.kr

TEL : (042)860-2334 FAX : (042)860-2626

한 방향으로 그러나 훨씬 적은 회전속도로 선회하는 불안정성 요소 즉, 압축기 원주방향으로의 국부적 불안정성을 말한다. 한편, 서지는 압축기의 작동 한계를 결정하는 요소로서 압축 시스템 전반에 걸쳐 발생하는 시스템 불안정성을 말하는데, 이것은 경계층 주위에서 발생하는 국부적인 역류현상을 수반하는 약한 서지(mild surge)와 유로 내부에서 전반적인 역류가 발생하는 강한 서지(deep surge)로 구분할 수 있다.

강한 서지가 발생하면 압축기 시스템은 급격한 성능저하와 과도한 기계적 부하 및 진동이 발생하며 이러한 상태가 지속되면 압축기 시스템이 파괴되는 치명적인 결과를 초래하게 된다. 이러한 압축기 불안정성 요소들에 대한 손실구조와 성장과정 그리고 압축기 성능에 미치는 영향들에 대한 역학적인 관계들이 축류 압축기의 경우에는 체계화가 되어있다. 그러나 원심압축기의 경우에는 유동이 복잡하기 때문에 현재까지 여러 가지 이론들이 제안되고 있음에도 불구하고 연구자들이 공감할 수 있는 일반화된 이론이 정립되어 있지 않은 상태이다.

일반적으로 압축기의 불안정성은 압축기 압력 상승곡선의 기울기가 양의 값을 가질 때 나타나고 디퓨저가 압축기 시스템의 불안정성을 지배한다고 알려져 있다.<sup>(1)</sup> Elder<sup>(2)</sup>는 원심 압축기의 서지 발생에 영향을 미치는 여러 가지 요인들 중 semi-vaneless space에서의 유동이 서지에 가장 큰 영향을 미친다고 발표한 바 있으며, Hunziker<sup>(3)</sup>는 원심 압축기 전체의 불안정성에 대한 임펠러, 디퓨저의 영향을 분석하여 압축기 시스템의 안정성은 주로 디퓨저 입구유동의 특성변화에 의해 결정된다는 연구결과를 발표하였다. Justen<sup>(4)</sup>은 여러 가지 형상의 디퓨저 베인에 대해 비정상 유동현상과 불안정성에 대한 영향을 실험적으로 연구하였는데 불안정성을 발생시키는 요소에 대해서는 명확히 언급하지는 않았다.

압축기 불안정성 제어에 대한 연구로서 Lawless<sup>(5)</sup>는 불안정성의 능동제어를 위하여 저속 원심 압축기에 대한 원주방향으로의 공간 푸리에 해석(Spatial Fourier Analysis) 등을 사용하여 불안정성 발생의 징후로 작용하는 공간적인 압력파를 확인하기 위한 실험적 연구를 수행하였는데 축류 압축기에 비하여 복잡한 다중 모드의 압력파가 존재한다는 연구결과를 발표하였다. 또한, Harada<sup>(6)</sup>

는 입구 안내깃과 가변 디퓨저를 동시에 조절하여 불안정성을 제어함으로써 낮은 작동유량에서도 서지가 발생하지 않는다는 연구결과를 발표하고 있다. 최근에 국내에서도 원심 압축기의 불안정 현상 및 발생에 대한 실험적 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(7-9)</sup>

본 연구의 목적은 가변 디퓨저의 각도변화에 의한 압축기 시스템의 성능특성 변화와 압축기의 불안정성 발생 및 발달과정을 실험적으로 규명하는 것이다. 연구방법으로서 가변 디퓨저 각도변화에 따른 압력비의 변화와 인두서와 디퓨저 목에서 측정된 비정상 압력신호를 비교하였으며 이러한 비교결과를 이용하여 압축기 시스템의 불안정성 발생 및 발달과정을 고찰하였다. 본 연구결과는 원심 압축기의 안전한 작동영역 결정과 불안정성의 예측 및 제어기법 개발에 응용될 수 있을 것이다.

## 2. 시험장치 및 측정

본 연구에 사용된 압축기 성능시험기는 Fig. 1과 같으며 가변 AC 모터로 구동되는 개방유로형이다. 시험장치의 주요 사양은 아래와 같다.

· 구동모터	2,300kW
· 최대 회전수	34,500 rpm
· 최대 유량	8 kg/sec
· 최대 출구압력	12 atm
· 입구압력조절	50 ~ 100 kPa
· 시험부 최대직경	700mm(radial or axial)

원심형 압축기 임펠러는 10개의 주날개와 10개의 보조날개로 이루어져 있으며 설계 회전수는 20,800 rpm이다. 임펠러에 대한 기하학적 형상은 Table 1과 같다.

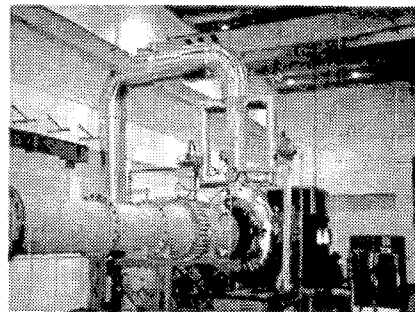
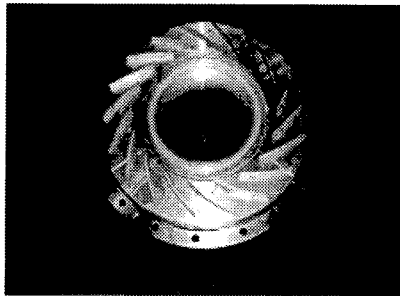


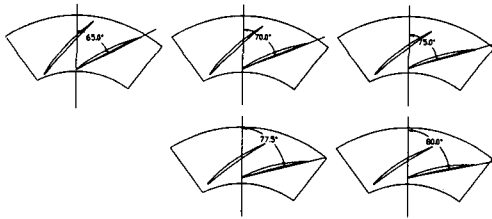
Fig. 1 Compressor test facility

**Table 1** Impeller configuration

출구 직경(D <sub>2</sub> )	357.9 mm
출구 넓이(B <sub>2</sub> )	19.6 mm
출구 날개각( $\beta_2$ )	0°
입구 Tip 직경(D <sub>1t</sub> )	207 mm
입구 Hub 직경(D <sub>1h</sub> )	54.2 mm

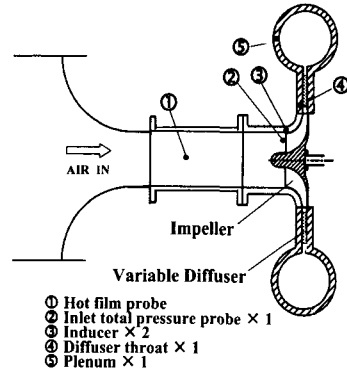


**Fig. 2** Variable diffuser



**Fig. 3** Diffuser angle

디퓨저 입구각 변화에 따른 압축기 성능특성과 불안정성을 규명하고자 Fig. 2와 같은 가변 디퓨저를 제작하였다. 디퓨저 베인은 에어포일 형상(NACA-65)의 캠버형으로서 허브에서 팁까지 비틀림이 없는 18개의 베인으로 구성되어 있으며 입구각을 60°에서 80°까지 변화시킬 수 있는 가변형 구조이다. Fig. 3은 디퓨저 각도의 설정을 나타낸 것으로 디퓨저 베인 입구각은 반경방향에 대한 베인의 각도로 정의하였다. 본 연구에 사용된 압축기의 경우, 설계점 속도인 20,800 rpm에서 1차원 성능해석에 의해 계산된 임펠러 출구 유동각은 70°이다. 성능시험은 압축기 설계점 회전수인 20,800 rpm (N=100%)과 설계점 회전수의 80%인 16,640 rpm (N=80%)에 대하여 디퓨저 베인 입구각을 65°, 70°, 75°, 77.5°, 80°로 변화시키면서 수행되었다. 압축기 시스템의 불안정 현상인 선회실속이나 서지 등은 유동상태가 매우 불규칙하고 빠르게



**Fig. 4** Unsteady measurement instrumentation

변하는 비정상현상(unsteady phenomena)이다. 이러한 비정상 상태에서의 압력변화를 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 측정장치를 구성하였다. 압력측정은 PSI 8400 전자식 압력스캐너와 응답속도가 200 kHz인 Kulite 압력 변환기(XTE-190)를 사용하였으며 온도 측정에는 J형 열전대를 사용하였다. 비정상 운용상태에서의 천이유량을 측정하기 위해 임펠러 입구 상류지점에 유량과 유속계 출력 전압에 따라 보정된 열선 유속계(TSI IFA100 system)를 설치하였다. 압축기 입구에는 천이전압력을 측정하기 위하여 입구부 RMS 반경에 Kulite 압력 변환기가 부착된 전압력 프로브를 설치하였다. 압축기 비정상상태에서의 전압력비는 입구부와 출구 plenum에 설치된 Kulite 압력 변환기로부터 측정된 천이전압력의 비로 정의하였다. 또한 선회실속의 발생과 실속 셀의 회전주기 등을 측정하기 위하여 인듀서 끝부분에 원주방향으로 90° 간격으로 2곳, 디퓨저 목부분 1곳에 Kulite 압력 변환기를 설치하였다.

Kulite 압력 변환기와 열선 유속계로부터 측정된 천이신호들은 증폭기를 거쳐 디지털 레코더에 기록되었으며 압축기 운용상태의 판단을 위하여 신호분석기에 의해 실시간 모니터 되었다. 압축기 불안정성은 디지털 레코드에 저장된 신호들을 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해서 주파수에 대한 신호 크기로 변화시켜 해석하였다. 원주방향 불안정성 요소인 선회실속은 인듀서에 장착한 두 개의 압력변환기 신호들을 cross-correlation 시켜서 검출하였으며 축방향 불안정성 요소인 서지는 압축기 각 부분으로부터 측정된 압력신호와 열선 유속계 신호의 크기 변화를 비교함으로써 검출하였다.

### 3. 시험결과

#### 3.1 디퓨저 각도에 의한 압축기 성능변화

베인이 있는 디퓨저를 장착한 원심압축기의 경우 다음과 같은 두 가지의 극한적인 운용조건이 나타난다. 먼저 압축기의 회전수가 일정할 때 압축기의 유량이 설계점 유량에 비해 감소되면 디퓨저 입구 속도성분 중에서 반경방향 속도 성분이 감소하는 반면, 접선방향 속도성분이 증가되어 디퓨저로 유입되는 평균 절대유동각이 반경방향으로부터 커지게 된다. 즉, 평균절대유동각과 디퓨저 베인 입구각과의 입사각이 양(+ )의 방향으로 증가됨에 따라 디퓨저 베인에서 유동박리에 따른 과도한 압력손실에 의한 실속과 같은 불안정성이 발생되어 압축기가 서지상태에 이르게 된다. 반대로 압축기 유량이 설계점 유량보다 증가하게 되면 반경방향 속도성분이 증가됨에 따라 평균절대유동각과 디퓨저 베인 입구각 사이의 입사각이 음(-)의 방향으로 증가되어 디퓨저 베인 목부분에서 유량 쇼크(flow choke)가 발생된다. 디퓨저를 장착한 압축기의 유량 쇼크는 디퓨저 목부분에서 발생하게 되는데 유량 쇼크는 디퓨저 입구의 전압력과 전온도 그리고 디퓨저 베인의 목면적의 함수이다. 따라서 압축기 회전수가 일정할 경우에는 유량 쇼크는 디퓨저 목면적에 따라 결정된다.

Fig. 5는 압축기 회전수가 20,800 rpm, 16,640 rpm 일 때 디퓨저 베인 각도 변화에 따른 압축기의 전압력 변화를 나타내고 있다. 디퓨저 베인의 각도가 감소하면 디퓨저 목의 면적은 증가하고, 베인의 각도가 증가하면 디퓨저 목의 면적은 감소하기 때문에 베인각이 65° 에서부터 80° 까지 증가함에 따라 유량 쇼크가 저유량쪽으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 최대 전압력비도 베인각이 증가함에 따라 약 14% 증가하였는데 이는 저유량 영역에서의 높은 임펠러 출구 전압력과 디퓨저 베인에서의 입사각이 감소하여 디퓨저에서의 압력회복률이 증가하기 때문이다. 반면, 유량 쇼크점에서부터 서지점까지 유효 작동영역은 65° 일 때가 가장 넓고, 80° 의 경우는 65° 의 46% 정도로 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 목면적이 감소함에 따라서 디퓨저 베인으로 유입되는 평균 절대유동각이 변화할 수 있는 각도 범위가 좁아진다는 것을 의미한다.

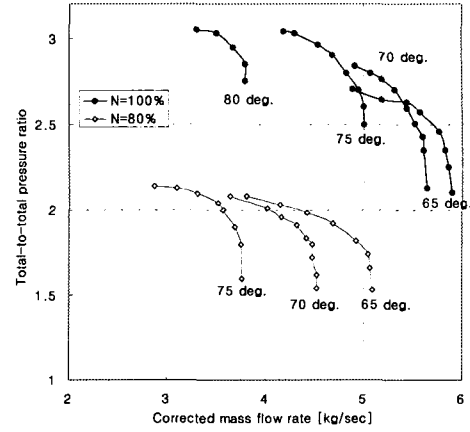


Fig. 5 Compressor performance map(Pressure ratio, @N=100%, N=80%)

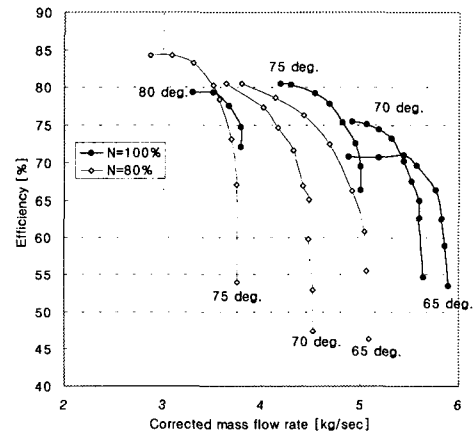


Fig. 6 Compressor performance map(Efficiency, @N=100%, N=80%)

Fig. 6은 디퓨저 베인 각도 변화에 따른 압축기의 전효율 변화를 나타내고 있다. 전반적인 분포 특성이 전압력비의 경우와 같이 베인각이 증가함에 따라 전효율도 높게 나타나고 있는 경향을 볼 수가 있다.

#### 3.2 디퓨저 각도에 의한 불안정성 특성변화

##### 3.2.1 압축기 불안정성 측정 및 특성

압축기의 불안정성 발생과 발달과정을 관찰하기 위하여 시험부에 장착한 Kulite 압력 변환기들과 열선 유속계 신호를 디지털 레코더를 사용하

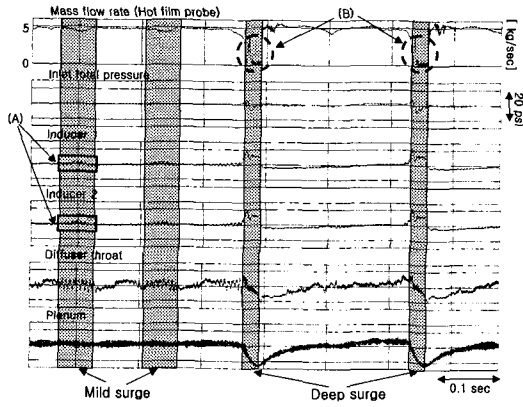


Fig. 7 Transient pressure traces(Diffuser angle : 70° , @N=100%)

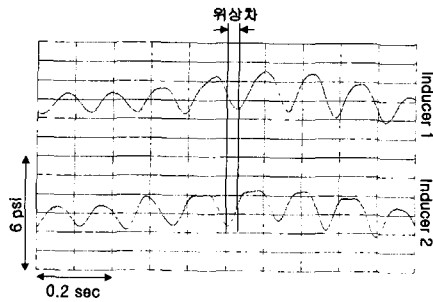


Fig. 8 Rotating stall signals at inducer (Diffuser angle : 70° , @N=100%)

여 20 kHz의 표본화 속도로 저장하였다. Fig. 7은 압축기 설계점 회전수에서 디퓨저 베인 각도가 70° 일 때 선회실속과 서지의 발생과정 동안 측정된 비정상 압력신호와 유량변화를 나타낸 것이다.

Fig. 7의 (A)는 선회실속이 발생하였을 때 인듀서에서 측정된 압력신호이다. 이 부분을 확대하여 보면 선회실속은 원주방향으로 발생하는 불안정성이므로 동일한 축방향 위치에 원주방향으로 90° 간격으로 장착된 두 개의 Kulite 압력 변환기의 신호는 Fig. 8에서와 같이 위상차를 갖는 동일한 주파수의 신호로 나타난다. 실속이 발생하여 유동이 박리된 영역이 임펠러의 회전방향과 동일한 방향으로 회전함으로써 원주방향의 위치가 다른 두 개의 Kulite 압력 변환기에서 측정된 압력 신호에는 위상차가 나타나게 된다.

서지의 경우는 유동의 요동이 축방향으로 나타나므로 원주방향으로의 위상차가 나타나지 않는

다. 열선 유속계에서 측정된 유량변화를 보면 약한 서지와 강한 서지 모두의 경우에서 유량의 요동이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이것은 약한 서지의 경우 임펠러 또는 디퓨저에서 국부적이고 주기적인 유동의 역류로 인하여 압축기 입구로 유입되는 유동이 감소하여 나타나는 것으로 판단된다. 반면, 강한 서지가 발생하면 Fig. 7의 (B)에서 볼 수 있듯이 압축기 시스템 전체에 걸쳐 역류가 발생하며 압축기 입구까지 압축된 유동의 역류로 인하여 큰 진폭의 압력 요동이 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 3.2.2 디퓨저 각도에 따른 불안정성 특성변화

Fig. 9와 Fig. 10은 압축기 설계점 속도에서 디퓨저 베인 각도가 65° 일 때 최대 압력비에 도달할 때까지 작동점과 인듀서와 디퓨저 목에서 측정된 압력신호이다. 작동점 A1에서 A2까지 압력비가 증가하다가 A2 이후 약간 감소하고 다시 A4까지 압력비가 증가하는 경향을 보이고 있다. 일반적인 압축기의 성능곡선은 최대 압력비에 도달할 때까지 압력비가 계속 증가하다가 최대 압력비 직후에 압력비가 감소하는 영역에서 압축기 시스템의 불안정적인 서지가 발생하는데 65°의 경우에는 압력비가 감소하였다가 다시 증가하는 영역이 나타났다. 작동점 A1의 압력신호를 보면 디퓨저 목에서 작은 진폭의 간헐적인 압력요동이 나타나기 시작하였으며, A2에 이르러서는 진폭이 큰 주기적인 압력요동으로 나타났고 A3까지 압축기 단 전체의 압력비가 감소하는 것을 보이고 있다. A2의 인듀서와 디퓨저 목에서의 압력요동을 비교해 보면 디퓨저 목에서의 압력요동 발생 직후에 인듀서의 압력요동이 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 디퓨저 압력요동의 발생원인은 디퓨저에서의 부분적인 역류현상인 것으로 판단되며 이러한 부분 역류현상으로 인하여 디퓨저의 유동확산성능이 감소하여 압력비의 저하가 발생한 것으로 추정된다.

디퓨저에서 발생한 이러한 압력요동은 유량이 더욱 감소하면 다시 압력요동이 감소되었고 압력비가 증가하였다(A3~A4). BB 영역에서는 최대 압력까지 인듀서에서 간헐적인 압력요동이 계속되다가 선회실속과 거의 동시에 약한 서지가 발생하였다(A5).

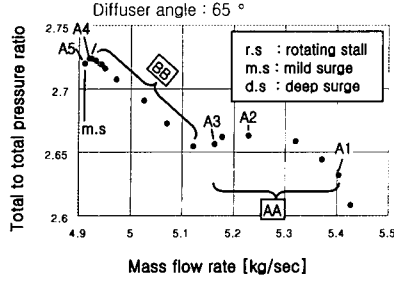


Fig. 9 Pressure ratio in low mass flow (Diffuser angle : 65°, @N=100%)

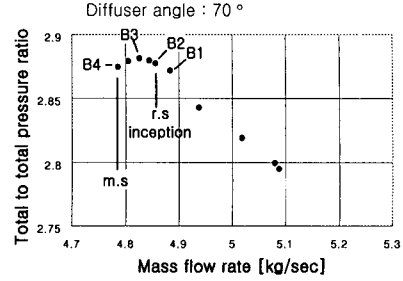


Fig. 11 Pressure ratio in low mass flow (Diffuser angle : 70°, @N=100%)

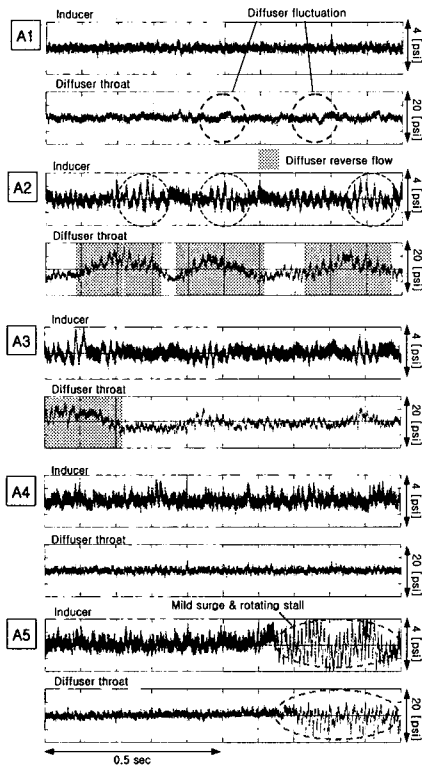


Fig. 10 Transient pressure traces(Diffuser angle: 65°, @N=100%)

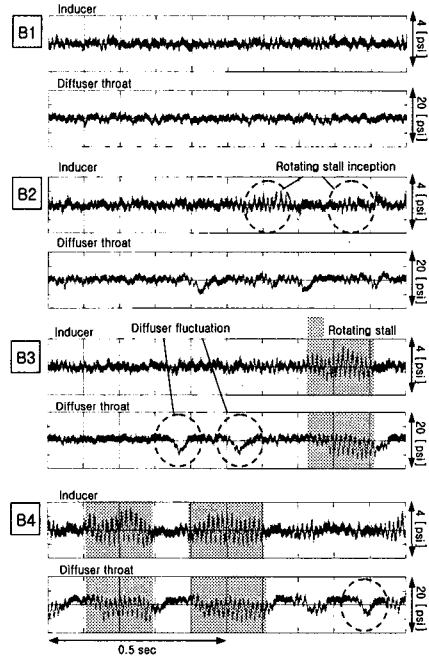


Fig. 12 Transient pressure traces(Diffuser angle: 70°, @N=100%)

Fig. 11과 Fig. 12는 압축기 설계점 속도에서 디퓨저 베인 각도가 70° 일 때 불안정성 발생과정을 나타낸 것이다. 작동점 B1은 정상상태이고, 작동점 B2에서는 인듀서의 선회실속이 간헐적으로 발생하기 시작하고 디퓨저 목에서도 압력요동이 나타났다. 작동점 B3에서는 디퓨저 목에서도 압력요동을 뚜렷이 볼 수 있다. 작동점 B1~B3의

작동영역에서는 임펠러나 디퓨저의 불안정이 나타나기 시작하지만 압력비가 계속 상승하는 것을 보아 아직 전체 압축기 시스템의 불안정성은 발생하지 않음을 알 수 있다. 압력비가 최대가 되는 작동점 B3에서는 디퓨저의 압력요동과 선회실속이 반복되면서 나타났다. 이러한 디퓨저나 임펠러에서의 부분적인 불안정성 발생 빈도가 높아지면서 압력비가 감소하기 시작했다. 디퓨저에서의 압력요동은 선회실속 신호와 중첩되면서 압축기 단 전체의 압력비가 낮아지고 시스템 전

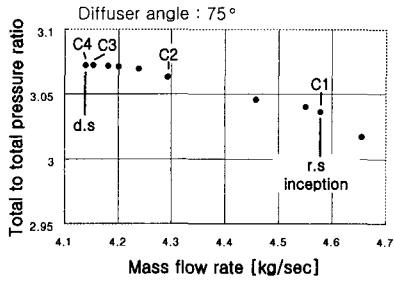


Fig. 13 Pressure ratio in low mass flow (Diffuser angle : 75°, @N=100%)

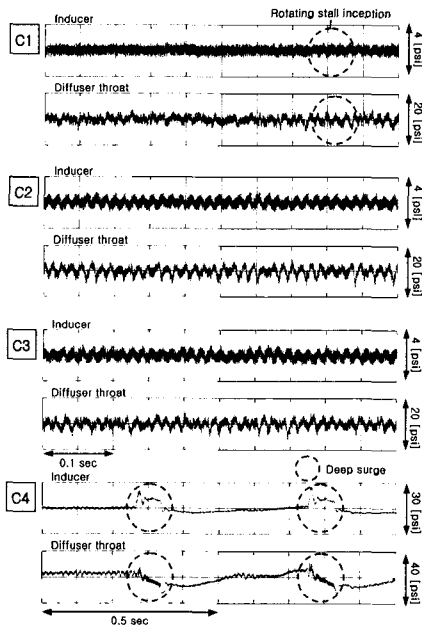
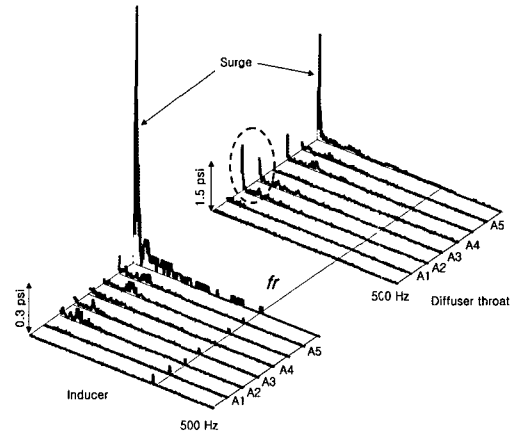


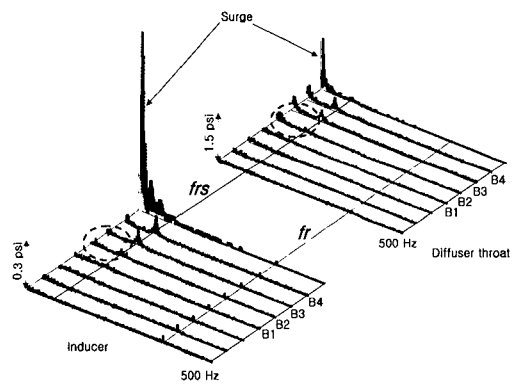
Fig. 14 Transient pressure traces (Diffuser angle : 75°, @N=100%)

체의 불안정성이 나타났다(B4).

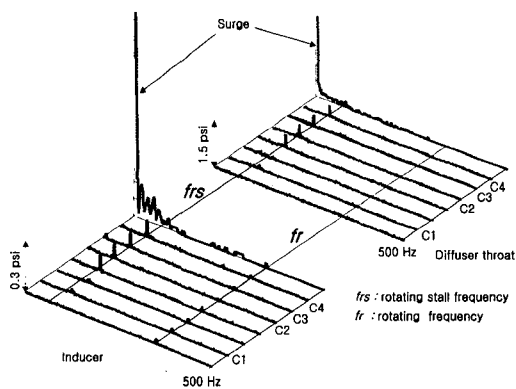
압축기 설계점 속도에서 디퓨저 베인 각도가 75° 일 경우에는 작동점 C1에서 선회실속이 발생하여 최대 압력비가 나타나는 작동점 C3까지 선회실속이 유지되었다(Fig. 13, Fig. 14). C2와 C3에서는 임펠러와 디퓨저 목에서의 선회실속신호가 뚜렷이 나타났다. C2와 C3에서 인듀서와 디퓨저 목의 선회실속신호의 주파수가 일치하는 것(약 70 Hz)으로 보아 인듀서에서 발생한 선회실속 신호가 임펠러 통로를 지나면서 진폭이 커진 것으로 판단된다. 또한 75°의 경우, 약한 서지가 발생하



(a) Diffuser vane angle : 65°



(b) Diffuser vane angle : 70°



(c) Diffuser vane angle : 75°

Fig. 15 FFT results

지 않고 바로 시스템 전체에 걸친 역류를 수반하는 강한 서지가 발생하였다(C4).

정상상태에서 서지에 이르는 동안 각 작동점에서 압력신호들을 FFT한 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 디퓨저 각도가 65° 인 경우, 선회실속 주파수가 뚜렷하게 나타나지 않고 낮은 주파수대(회전주파수의 50% 이하)에서 넓은 영역에 걸쳐 압력요동이 발생한 것을 볼 수 있으며 디퓨저 목에서는 서지 발생 전(작동점 A2~A3)에 진폭이 크고 낮은 주파수(약 2.4 Hz)의 압력요동이 나타나는 것을 볼 수 있다(Fig 15-A). 이것은 앞에서 살펴본 바와 같이 임펠러 출구 유동각과 디퓨저 각도와의 차이가 커서 발생하는 유동의 박리에 의한 부분 역류현상 때문에 나타나는 압력요동으로 판단된다. 70°의 경우, 작동점 B2에서 디퓨저 압력요동 신호와 거의 동시에 선회실속이 발생한 것을 볼 수 있다(Fig 15-B). 디퓨저 목에서 발생한 압력 요동은 65°의 경우와 유사한 2.4 Hz의 주파수를 나타내었다. 따라서 이 경우도 유동박리에 의한 부분역류현상으로 생각된다. 75°의 경우는 인듀서와 디퓨저에서 선회실속 신호가 뚜렷하게 나타났고 서지 발생 이전에 선회실속이외의 다른 압력요동은 나타나지 않았다(Fig 15-C). 77.5°와 80°의 경우도 75°의 경우와 유사한 경향을 나타내었다.

디퓨저 베인 각도에서 강한 서지의 발생과정을 비교하기 위해 첫 번째 강한 서지 사이클 직전부터 서지 발생까지의 압력신호를 Fig. 16에 나타내었다. 65°의 경우, 강한 서지 발생 직전에 인듀서와 디퓨저 목의 압력요동이 증가하는 것을 볼 수 있는데 약한 서지가 발생한 상태에서 인듀서의 선회실속과 디퓨저의 압력요동이 중첩되면서 강한 서지가 발생한다. 70°의 경우는 부분적인 역류에 의한 약한 서지가 발생한 상태에서 강한 서지가 발생하였다.

불안정성 발생과정을 살펴보면, 65°와 70°에서는 디퓨저의 불안정성이 시스템 전체의 불안정성에 강한 영향을 미치고 있으며 75° 이상의 각도에서는 인듀서에서 발생한 선회실속신호가 증폭되어 디퓨저에서 나타나고 약한 서지의 발생 없이 디퓨저의 압력수준이 서서히 높아지면서 강한 서지가 발생하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 정리하면, 베인 각도가 작은 65°와 70°의 경우는 임펠러 출구 유동각이 작동영역에서 많이 벗어난 상태로 디퓨저에서 경계층 박리 등의 손실로 인해 압력확산이 잘 이루어지

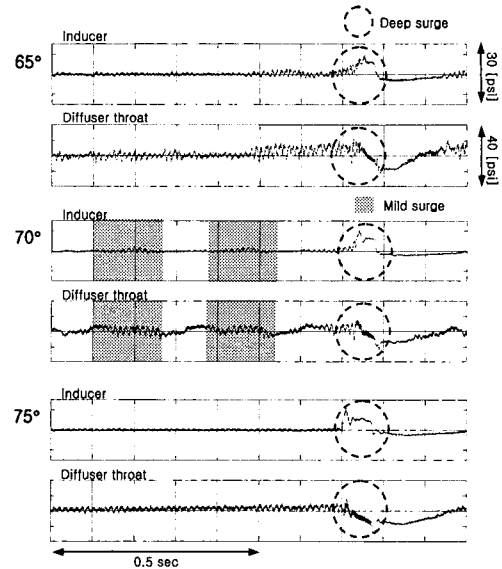


Fig. 16 Deep surge onset at diffuser angles

지 않고 이로 인한 부분적인 역류현상 때문에 압축기 시스템 전체의 불안정성이 증가한다고 판단된다.

베인의 각도가 75° 이상의 경우, 최대 압력 작동점 부근에서 유동각이 베인 각도와 차이가 크지 않아 디퓨저에서의 불안정성이 크지 않다고 판단된다. 하지만 유량이 더욱 감소하여 최대 압력 작동점을 지나 압축기의 성능곡선이 양의 기울기를 갖는 경우, 작은 요동에 의해서도 동적 불안정성이 발생하므로 디퓨저에서 부분역류가 발생하지 않는다고 하더라도 임펠러에서 발생하여 성장한 선회실속의 영향과 중첩된 디퓨저 압력요동이 전체 시스템의 불안정성에 영향을 미친다고 판단된다.

#### 4. 결론

원심 압축기의 작동영역을 확장하기 위해 사용되는 가변 디퓨저의 각도 변화에 따른 성능특성 변화와 불안정성의 발생과정을 실험을 통해 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 가변 디퓨저를 장착한 압축기의 유효 작동영역은 디퓨저 베인각도가 큰 경우, 디퓨저 목면적이 감소하여 디퓨저 베인으로 유입되는 평균 절대유동각이 변화할 수 있는 각도 범위가 좁아



지므로 작동영역은 감소하였으나 저유량 영역에서의 높은 임펠러 출구 전압력과 디퓨저 베인에서의 입사각이 감소하여 최대 압력비는 증가하였다.

(2) 디퓨저 베인 각도에 따라 불안정성의 발생과 발달과정이 변화하였다. 디퓨저 베인 각도가 작은 경우(65°, 70°)에는 디퓨저에서의 불규칙한 압력요동이 시스템 전체의 불안정성을 야기하였으며 선회실속은 약한 서지와 거의 동시에 발생하였다.

(3) 디퓨저 베인 각도가 큰 경우(75° 이상)에는 인듀서와 디퓨저에서 거의 동시에 동일한 주파수의 선회실속이 발생하였으며 선회실속이 발생한 상태에서도 유량의 감소에 따라 압력상승은 계속 유지되었다. 디퓨저에서는 선회실속 신호 이외의 다른 압력요동은 나타나지 않았으며 약한 서지의 발생 없이 선회실속에서 강한 서지가 발생하였다.

(4) 압축기 시스템 전체에 걸친 역류를 동반하는 강한 서지의 경우, 디퓨저 베인 각도가 작은 경우(70° 이하)에는 선회실속과 약한 서지가 먼저 발생하였으나 베인 각도가 큰 경우(75°) 이상에서는 선회실속에서 바로 강한 서지가 발생하였다.

(5) 가변 디퓨저를 장착한 압축기는 적절한 디퓨저 베인의 각도를 조절함으로써 넓은 범위의 작동영역을 확보할 수 있지만 디퓨저 베인 각도에 따라 불안정성의 발생과정이 다르므로 불안정성 발생의 경고나 제어기법 개발에는 이러한 요인들을 고려해야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) Greitzer E. M., 1981, "The Stability of Pumping Systems," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 103, pp. 193~242.
- (2) Elder R.L. and Gill M.E., 1985, "A Discussion of the Factors Affecting Surge in Centrifugal Compressors," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 499~506.
- (3) Hunziker R. and Gyarmathy G., 1993, "The Operational Stability of a Centrifugal Compressor and its Dependence on the Characteristics of the Subcomponents," ASME Paper No. 93-GT-284.
- (4) Justen F., Ziegler and Gallus H.E., 1999, "Experimental Investigation of Unsteady Flow Phenomena in a Centrifugal Compressor Vaned Diffuser of Variable Geometry," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, pp. 763~771.
- (5) Lawless P. B., Fleeter S., 1993, "Rotating Stall Acoustic Signature in a Low Speed Centrifugal Compressor : Part 2 - Vaned Diffuser," ASME Paper No. 93-GT-254.
- (6) Harada Hideomi, 1995, "Study of a Surge-free Centrifugal Compressor with Automatically Variable inlet and Diffuser Vanes," ASME Paper No. 96-GT-153.
- (7) Du-Yeol Lee, Chang-Sik Kang, You-Hwan Shin and Kwang-Ho Kim, 2002, "Characteristics of Rotating Stall in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser," *KFMA Journal of Fluid Machinery*, Vol. 5, No. 6, pp. 42~48.
- (8) Jeong-Seek Kang, Shin-Hyoung Kang, 2001, "Experimental Study on Stall Inception in a High-Speed Centrifugal Compressor (I) - Inception Type," *Transaction of the KSME - B*, Vol. 25, No. 10, pp. 1436~1444.
- (9) Jeong-Seek Kang and Shin-Hyoung Kang, 2001, "Experimental Study on Stall Inception in a High-Speed Centrifugal Compressor (II) - Stall Warning Method," *Transaction of the KSME - B*, Vol. 25, No. 10, pp. 1445~1450.