

입구 안내익 영향으로 인한 원심 압축기 성능특성 시험연구

차봉준* · 박종호**

Experimental Study on the Effect of Inlet Guide Vane of a Centrifugal Compressor

Bong-Jun Cha*, Jong-Ho Park**

Key Word: IGV (입구안내익), Centrifugal Compressor (원심형 압축기), Surge (서지), Rotating Stall (선회실속), Steady State Performance (정상상태성능), Unsteady Performance Characteristics (비정상 성능특성), Prewhirl (예선회), Transitional Region (전이영역)

ABSTRACT

This paper reports an experimental investigation on a centrifugal compressor with the adjustable inlet guide vane. The compression system is composed of a radial impeller, a vaneless diffuser, and an IGV. The results have shown that surge line on the performance map is affected by the amount of prewhirl and the prewhirl has an effect on transient region between rotating stall and surge. The surge lines have been shifted toward the lower flow region with the increased positive prewhirl and the higher flow region with the increased negative prewhirl. During the unsteady performance test, it was also found that the transient region was reduced with the increased negative prewhirl, and weak signals of rotating stall were detected just before surge as the positive prewhirl was increased.

1. 서 론

입구 안내익 (Inlet Guide Vane)은 원심 압축기 입구에 설치되어 흡입되는 공기의 상대 마하수를 감소시켜 압축기 입구에서의 충격과 발생을 지연시키는 역할과 축류 압축기 후단에 원심 압축기가 설치된 복합 압축시스템의 경우, 축류 압축기 출구 유동각을 변화시켜 축류 압축기와 원심 압축기의 성능을 매칭 (matching) 시키기 위한 목적으로 사용되기도 있다.

최근까지 입구 안내익의 이러한 특성을 이용하여 원

심 압축기의 작동영역을 넓히기 위한 방법으로 서지 제어 또는 지연에 대한 연구들이 수행되어 왔는데 그 중에서 Rodgers⁽¹⁾는 높은 비속도와 인듀서 마하수로 작동되는 경우에는 디퓨저에서 선회실속이 발생할지라도 압축기가 서지에 이르지 않는다는 현상으로부터 서지의 발생원인이 디퓨저가 아니라 인듀서 부압면에서 충격과 박리에 의한 유로 막힘(flow blockage)에 의한 것이므로 임펠러 출구 마하수가 1.56 이상인 고속영역에서는 입구 안내익을 적절히 조절하면 서지마진(surge margin)을 확장시킬 수 있다는 연구결과를 발표한 바 있다.

입구 안내익과 함께 압축기 출구에 가변 디퓨저를 장착하여 원심 압축기의 작동영역을 확장시킬 수 있는 연구들도 발표되었는데, Harada⁽²⁾는 입구 안내익 설정각을 증가시켜 압축기 작동유량을 자유량쪽으로 변화

* 한국항공우주연구원 터보기계연구그룹

** 충남대학교 기계공학과

E-mail : cha@kari.re.kr

시킬 때 나타나는 좁은 작동영역을 확장시키기 위해 디퓨저 배인각을 유동조건에 따라 적절히 조절함으로써 디퓨저 배인에서의 유동박리에 의한 서지발생을 지연 또는 제거시킬 수 있었다는 연구결과를 발표하였다. 이 논문에서는 임펠러 출구 마하수가 1.21, 0.87일 때의 성능시험 결과를 보여주고 있는데 모두의 경우에서 임펠러 선회실속이 발생하여도 서지발생이 없었으며 임펠러와 디퓨저 모두에서 선회실속이 발생되어야 서지가 발생된다고 언급하고 있다. Simon⁽³⁾은 이러한 입구 안내익과 디퓨저를 이용한 동시 제어방법이 둘 중에 하나만을 사용하여 제어하는 방법보다 압축기의 전 작동영역에 걸쳐 효율 측면에서 더욱 유리하다는 것과 위 두 가지 요소를 제어하기 위한 최적조합은 유량비 및 압력비의 함수임을 시험적으로 규명한 바 있다.

이 밖의 입구 안내익에 의한 압축기 성능향상에 대한 연구결과로서 Ishino⁽⁴⁾는 자동차 터보차저용 소형 원심 압축기에 대한 성능시험과 유동해석을 통하여 예선회 영향이 임펠러 부압면에서 발생하는 역류영역을 감소시킨다는 사실과 임펠러 출구에서 쉬라우드와 허브 사이의 유동분포를 균일하게 하여 서지마진을 증가시키는 동시에 고압력비 및 고유량 영역에서 발생하는 미소한 유동 변동현상을 제거시키는 효과를 나타낸다는 연구결과를 발표한 바 있다. 또한, Kassens⁽⁵⁾는 입구 안내익 후류에서의 상세한 유동측정을 통하여 입구 안내익에 의한 유동변화가 임펠러 성능에 미치는 영향에 관한 연구와 압축기 입구에 입구 안내익 보다 훨씬 간단한 형상의 가변 볼류트형 스윌러를 장착한 연구결과를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 입구 안내익 설정각 변화가 원심 압축기 성능과 불안정성 발달과정에 미치는 영향들을 시험적으로 규명하였다. 이를 위하여 입구 안내익 설정각을 -40°에서부터 +40°까지 변화시키면서 이에 따른 압축기의 정상상태 성능 변화를 시험하였으며 비정상 운전영역에서 선회실속과 서지와 같은 불안정 요소의 발생 및 성장과정을 살펴보았다.

정상상태 시험결과, 입구 안내익 설정각이 (+)방향으로 증가함에 따라 서지점과 운전영역이 저유량쪽으로 이동하는 반면 설정각이 (-)방향으로 증가하게 되면 서지점과 운전영역이 초기에는 고유량쪽으로 이동하다가 설정값이 -20°를 초과하게 되면 오히려 저유량쪽으로 이동하는 상반된 결과를 보였다. 비정상 운전 특성 시험에서는 압축기가 정상상태에서 비정상상태 운전영역으로 이동할 때 나타나는 선회실속과 선회실속 발생이후 압축기가 서지에 도달하는 과정을 분석하

였다. 입구 안내익 설정각도는 서지점의 이동뿐만 아니라 압축기의 작동점이 선회실속에서 서지로 이동하는 천이영역에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

2. 시험장치 및 측정

성능시험기는 Fig. 1과 같이 가변 AC 모터로 구동되는 개방유로형으로서 시편 압축기를 구동시키는 구동부는 2,300kW 용량의 모터, 기어박스, 토오크미터 및 시편 압축기의 회전축을 지지하는 베어링 시스템으로 구성되어 있다. 압축기 유량은 입구에 설치된 벤츨리형 유량계로 측정되며 압력비는 출구에 설치된 압력조절용 밸브에 의해 조절된다. 또한 압축기가 서지상태로부터 신속히 벗어날 수 있도록 서지 완화(surge relief) 밸브가 설치되어 있다.

Fig. 2는 성능시험에 사용된 원심형 시편 압축기의 임펠러를 나타내고 있다. 이 임펠러는 10개의 주날개와 10개의 보조날개로 되어 있으며 설계점에서의 회전수는 20,800 rpm이고 유량과 압력비는 각각 4.5 kg/sec와 2.6이다. 임펠러에 대한 기하학적 형상은 Table 1과 같다. 가변 입구 안내익은 Fig. 3과 같이 조절용 레버를 사용하여 내부에 원주 방향으로 균일하게 설치된 7개의 안내익의 설정각이 변화하도록 구성되어 있다. 안내익은 캠버가 없고 스팬 방향으로 비틀림이 없는 단면이 대칭인 쇠기형으로 설계되었다.

입구 안내익 변화에 따른 압축기의 성능을 시험하기 위하여 임펠러 직경의 2.25배 상류지점에 입구 안내익을 설치하였는데 이것은 원주방향으로의 균일한 유동각 분포를 유지하기 위함이다. 입구 안내익에 대한 풍동실험을 통하여 안내익 각도에 따라 원주방향으로 균일한 유동각이 분포됨을 확인하였다. 임펠러 입구에서의 평균전압력 측정을 위하여 임펠러 입구부 RMS 반경에 직경 1.0mm의 소형 전압력 프로브를 설치하였다.

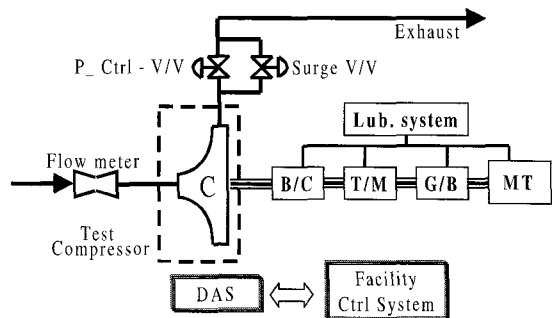


Fig. 1 Schematic diagram of compressor test facility

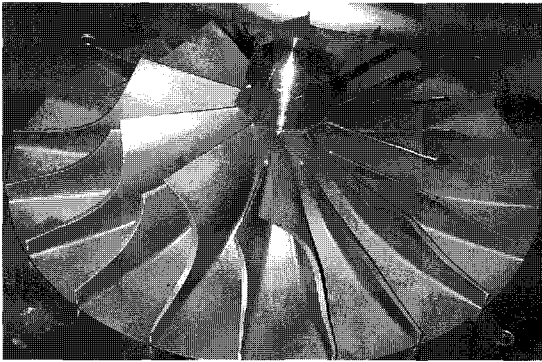


Fig. 2 Test impeller

Table 1. Impeller configuration.

출구 직경(D2)	357.9 mm
출구 날개각(β_2)	0°
입구 Tip 직경(D _{ti})	207 mm
입구 Hub 직경(D _{hi})	54.2 mm
출구 마하수(Mu)	1.05

압축기의 비정상 성능특성을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같은 측정부를 구성하였다. 비정상상태에서의 성능 시험은 정확한 유량의 측정도 중요하지만 공력학적 불안정 상태에서 발생하는 압력과 유량의 요동을 측정하는 것이 주된 목적이므로 경계층이 충분히 작은 경우, 관의 중심에 설치한 열선 유속계(hot-wire)의 출력으로 비정상상태에서의 전이유량을 측정하여도 큰 오차가 없을 것으로 판단되어 입구 안내의 상류지점에 열선 유속계를 설치하였다. 열선 유속계는 벤츨리 유량계를 사용하여 보정되었으며 정상상태에서 벤츨리 유량계에서 측정된 유량과 약 2% 측정오차를 나타내었다.

서지 때 발생하는 역류현상을 검출하기 위하여 Kulite 압력 변환기가 부착된 직경이 1mm인 2개의 튜브를 사용하여 T형 전압력 프로우브를 제작하였다. T형 프로우브는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 임펠러 입구부 RMS 반경 지점과 출구 폭 중간지점에 프로우브 관입구를 각각 상류방향과 하류방향으로 향하게 설치하였다. 또한 선회실속을 측정하기 위하여 임펠러 인두서에 30° 간격으로 2개의 Kulite 압력 변환기를 설치하였다. 압축기 전압력비는 임펠러 입구부와 출구 플레넘(plenum)에 설치된 Kulite 압력 변환기로부터 측정된 압력의 비로 정의하였다.

Kulite 압력 변환기와 열선 유속계로부터 측정된 전이신호들은 증폭기를 거쳐 디지털 레코더에 기록되었으며 압축기 운용상태의 판단을 위하여 신호분석기에

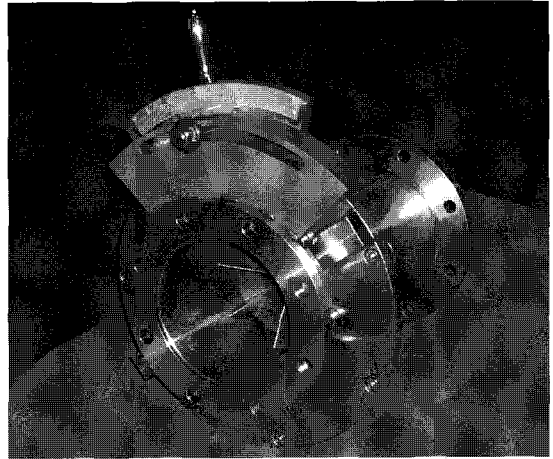


Fig. 3 Variable Inlet Guide Vane

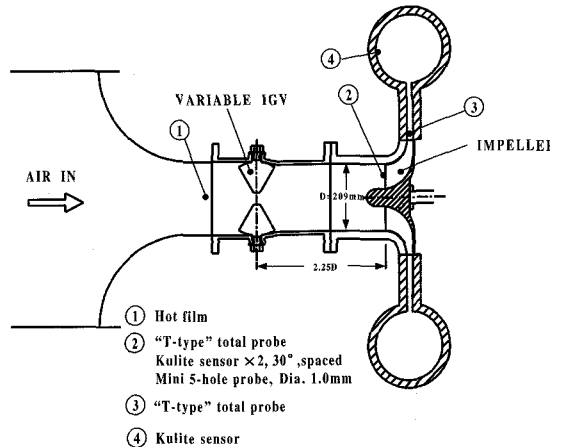


Fig. 4 Unsteady data measurement location.

의해 실시간 모니터 되었다. 압축기 불안정성은 디지털 레코더에 저장된 신호들을 FFT(Fourier Frequency Transfer)를 통해서 시간에 대한 신호 크기로 변화시켜 해석하였다. 선회실속 신호처리의 경우, FFT를 통해서 압력요동의 주파수대를 찾아내고 인두서에 30° 간격으로 설치한 2개의 Kulite 압력 변환기의 신호를 cross-correlation 하여 시간지연을 구한 다음 선회실속 셀(cell)의 수와 선회속도를 구하게 된다. 선회실속의 셀 수와 회전속도를 구하는 식은 아래의 관계식을 사용하였다⁽⁶⁾.

$$m = \frac{360^\circ}{30} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (1)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi}{m \cdot \tau_1} \quad (\text{radians/sec})$$

여기서 m은 셀 수, ω_s 는 선회실속의 회전 각속도, τ_1 은

선회실속 신호의 압력 요동 주기이고 τ_2 는 두 신호사이의 시간지연이다. 서지신호는 압축기 각 부분으로부터 측정된 압력신호와 열선 유속계 신호의 크기 변화를 비교하여 검출하였다.

3. 성능시험 및 결과

입구 안내익 장착 효과와 비교하기 위하여 먼저, 예선회가 없는 경우(IGV=0°)에 대하여 설계점 속도의 65%에서부터 설계점 속도(N=100%)까지 성능시험을 수행하였다. 예선회 성능시험은 설계점 속도의 80%와 100%에서 입구 안내익 설정각을 -40°에서부터 +40°까지 5°씩 변화시키면서, 한 개의 고정된 회전수에 대하여 유량 초크(flow choke) 지점부터 서지가 발생될 때까지 수행하였다. 저유량 범위에서는 Kulite 압력 변환기 신호들을 관찰하면서 선회실속과 서지 발생여부를 확인하고 서지가 발생하면 서지 완화 밸브를 열어서 서지 상태에서 벗어나도록 하였다.

3.1 입구 안내익 설정각에 따른 성능변화

입구 안내익은 압축기 임펠러 인두서로 유입되는 유동에 원주속도 성분을 만들어 주는 역할을 하게 되는데 이를 예선회(prewhirl)이라 한다. Fig. 5는 입구 안내익에 의해 형성되는 인두서 입구 속도 삼각형을 나타내고 있다. 입구 예선회는 임펠러 회전방향과 동일한 원주속도 성분을 주는 경우를 양(+)의 예선회, 회전방향과 반대되는 원주속도 성분을 주는 경우를 음(-)의 예선회라 정의하였다.

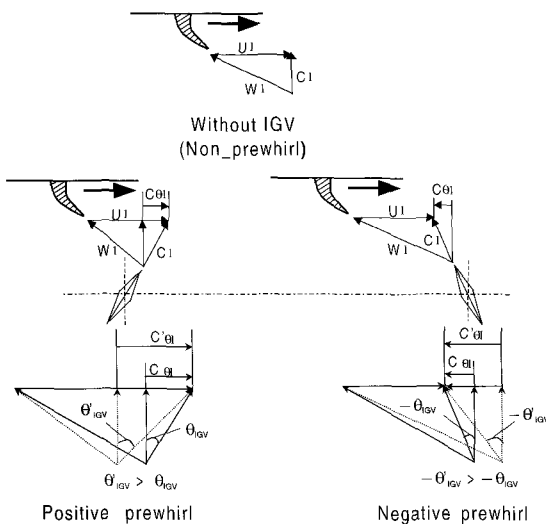


Fig. 5 Inlet velocity diagram

입구 예선회가 압축기 성능에 미치는 영향은 아래의 단위 유량당 압축기 일을 나타내는 Euler 식으로부터 알 수 있다.

$$W = [U_2 C_{\theta 2} - U_1 C_{\theta 1}] \quad (2)$$

양(+)의 예선회의 경우, 예선회 성분이 없는 경우 ($W = U_2 C_{\theta 2}$)에 비해 압축기 일이 감소하는 반면, 입구 상대마하수를 감소시킴으로써 임펠러 인두서 날개 끝 부분에서의 충격과 발생을 지연 또는 억제시킬 수 있는 장점이 있다. 동일한 압축기 작동조건에서 양(+)의 예선회가 있는 경우, 압축기 최대 효율은 예선회 각도에 비례하여 증가하다가 어느 각도 이상이 되면 오히려 감소하게 된다는 연구논문이 발표된 바 있다.⁽⁷⁾

한편, 음(-)의 예선회의 경우에는 압축기 일은 증가하게 되어 높은 압력비를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 압축기 효율은 감소하는 것으로 알려져 있다.

Fig. 6은 예선회가 없는 경우, 즉 입구 안내익 설정각이 0°일 때 설계점 속도의 65%에서부터 설계점 속도까지 압축기의 성능을 시험한 결과를 나타내고 있다. 성능곡선도의 형태를 볼 때 베인없는 디퓨저 장착에서 볼 수 있는 반경류 임펠러의 특징인 완만한 전압력 상승과 넓은 작동영역 그리고 인두서 초킹에 의한 최대 유량이 제한되는 경향을 확인할 수 있다.

임펠러 입구에서 임펠러 회전방향과 동일한 방향의 양(+)의 예선회가 있는 경우, Fig. 7에서 보듯이 압축기 유효 작동영역에서 전압력비가 떨어지고 서지점이 저유량쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이것은 입구 예선회로 인해 임펠러 채널에서 유동의 확산(diffusion)

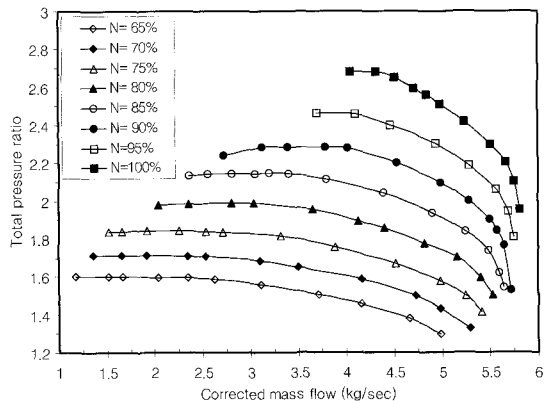


Fig. 6 Compressor total pressure ratio with no prewhirl at the design speed

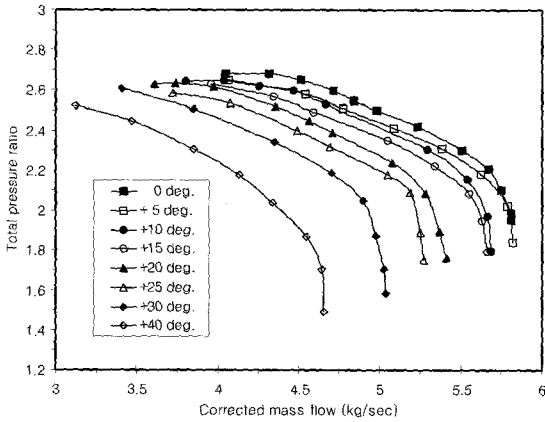


Fig. 7 Compressor performance test map with a positive prewhirl at the design speed.

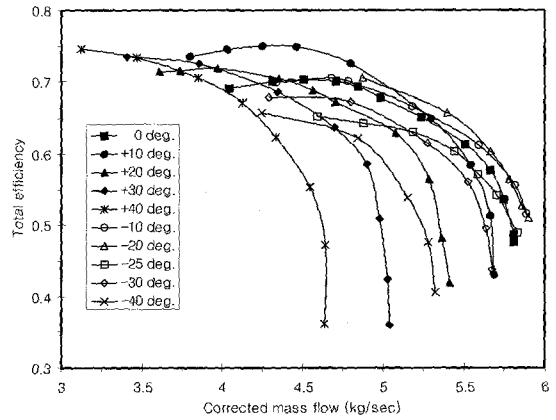


Fig. 9 Compressor total efficiency with a prewhirl at the design speed

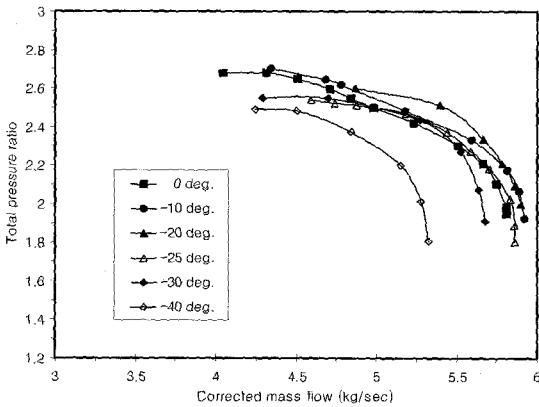


Fig. 8 Compressor performance test map with a negative prewhirl at the design speed.

ratio) 혹은 임펠러 날개 하중(blade loading)이 감소함에 따라 임펠러 출구 압력이 낮아지는 것으로 생각되며 입구 예선회가 없고 다만 임펠러 회전속도가 줄어들어 날개 하중이 줄어든 것과 비슷한 효과를 나타낸다. (+) 예선회 각도가 증가함에 따라 압축기 작동선의 기울기는 음의 방향으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 압축기 작동선이 음의 방향으로 기울기가 증가하면 압축기의 안정성이 증가하게 되는데, 이것은 양의 예선회에 의해 임펠러 블레이드의 부압면에 발생하는 실속 영역의 발달이 억제되어 나타나는 현상으로 판단된다.

임펠러 회전방향과 반대 방향의 음(-)의 예선회가 있는 경우 Fig. 8에서 보듯이 -20°까지는 압력비 및 초킹 유량이 증가하다가 그 이상이 되면 오히려 압력비 및 초킹유량이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 초기에는 음(-)의 예선회가 증가함에 따라 Euler 식에 의해서

압축기 일이 증가되어 전압력비가 상승하게 되지만 지나치게 예선회 각도가 커지게 되면 인두서 입구에서 상대마하수가 커지고, 축방향으로 돌러야 할 유동각이 증가하기 때문에 압력손실이 증가하게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 경우, 예선회 각도 -20°까지만 음의 예선회 효과를 기대할 수 있다고 판단된다.

Fig. 9는 예선회 각도에 따른 전효율을 나타내고 있다. 양(+)의 예선회의 경우, 전효율은 예선회가 없는 경우에 비해 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 최대 효율은 약 6.4% 정도 증가하고, 초킹유량은 약 20% 감소되었다. 반면, 음(-)의 예선회의 경우, 예선회각 -20°까지는 예선회가 없는 경우의 전효율 분포가 고유량쪽으로 약간 이동한 것과 유사한 변화를 보이고 있으나, 이후부터는 압축기 손실이 상당히 증가하여 효율과 작동유량이 감소하는 것을 알 수 있다.

3.2 입구 안내의 설정각에 따른 불안정성 특성변화

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 고속회전에 따른 진동과 압력차이에 의한 축방향 변위 변화에 따른 회전체와 구조물과의 기계적 간섭 등이 있을 수 있다.

공력적 요소로서는 유동이탈에 의한 국부적 불안정요소인 선회실속과 압축 시스템 전반에 걸친 불안정요소인 서지가 있다. 선회실속은 임펠러 또는 디퓨저 일부에서 압축 유동이 날개면 또는 베인을 따라 흐르지

않고 일부가 이탈되는 국부적 실속현상으로서 이러한 이탈유동 셀(cell)이 임펠러 회전방향과 동일한 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.

임펠러 후방에 배인없는 디퓨저를 장착한 경우, 일반적으로 임펠러 입구부분에서 발생하는 유동박리나 임펠러 출구부분에서 발생하는 선회실속이 불안정 유동현상의 대표적인 경우이다. 서지현상의 경우 위의 현상들이 발전하여 어느 순간 주 유로가 막힘으로써 유동장이 역류현상을 일으키는 것으로 생각된다⁽⁹⁾.

3.2.1 불안정성의 측정

시험에서 선회실속과 서지는 인두서에서 측정된 두 개의 압력신호를 cross-correlation하여 위상차를 계산하여 판단하였다. Fig. 10은 선회실속과 서지가 발생하였을 때 인두서에 30° 간격으로 설치된 Kulite 압력 변환기에서 측정된 압력신호이다. 선회실속은 원주방향으로 발생하는 불안정성이므로 동일한 축방향 위치에 원주방향으로 30° 간격으로 장착된 두 개의 Kulite 압력 변환기의 신호는 그림에서와 같이 위상차를 갖는 동일한 주파수의 신호로 나타난다. 또한 실속이 발생하여 유동이 박리된 영역이 임펠러의 회전방향과 동일한 방향으로 회전함으로써 원주방향의 위치가 다른 두 개의 Kulite 압력

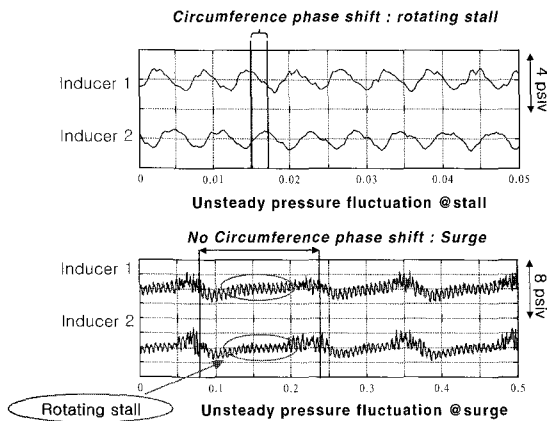


Fig. 10 Rotating stall and surge signals at inducer

변환기에서 측정된 압력신호에는 위상차가 나타나게 된다. 반면, 서지의 경우는 유동의 요동이 축방향으로 발생하므로 원주방향으로의 위상차가 나타나지 않는다.

3.2.2 불안정성 발생과정 변화

입구 안내의 설계각에 따른 선회실속과 서지현상을 규명하기 위하여 정상상태 성능시험과 동일한 시험조건에서 Kulite 압력 변환기와 열선 유속계를 사용하여 압력변동을 측정하였다. Fig. 11은 입구 안내의 설계각에 따른 약한 서지 발생점을, Table 2는 약한 서지가 발생할 때까지 측정된 선회실속에 의한 압력요동의 최대 진폭과 주파수를 나타내고 있다.

음(-)의 예선회에 대하여 선회실속 발생에서 서지에 이르는 작동영역은 0°에서 -20°까지의 각도에서는 큰 차이가 나타나지 않았고 -30°의 경우 선회실속 발생 직후에 서지가 발생하였다. -20°까지의 음(-)의 예선회에서는 0°의 경우와 유사하게 선회실속이 충분히 발달한 다음 서지가 발생하였지만 -30°의 경우는 선회실속 발생 직후에 서지가 발생하였다. 따라서 -20°까지는 예선회보다는 선회실속이 서지를 유발시키며 -30° 이상에서는 예선회 각도 증가에 의한 유동박리가 심화됨에 따라 임펠러 내부유동이 매우 불안정하게 되어 서지가 발생한다고 판단된다. 양(+)의 예선회의 경우에는 각도가 증가함에 따라 선회실속 발생에서 서지 발생에 이르는 작동영역이 급격히 감소하였으며 선회실속 신호의 최대 진폭 또한 감소하는 것을 볼 수 있는데 이것은 양(+)의 예선회에서는 선회실속 보다는 예선회에 의한 입사각 증가가 서지 발생의 주요 원인이 된다고 생각된다.

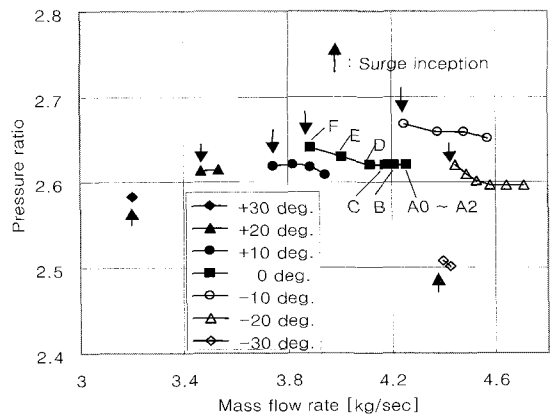


Fig. 11 Rotating stall and surge inception points for IGV angles (@N=100%)

Table 2. Frequency analysis of pressure signals during rotating stall and surge for IGV angles.

입구 안내의 각도	A_p [psi]	f_p [Hz]
-30°	0.07	142
-20°	0.37	152
-10°	0.33	160
0°	0.32	164
+10°	0.13	170
+20°	0.05	175
+30°	0.02	180

여기서, f_p : 선회실속 압력요동 주파수

A_p : 선회실속 압력요동 최대 진폭

3.2.3 선회실속 발생 및 발달과정

예선회 성분이 없는 경우, 선회실속의 발생 및 발달 과정을 관찰하기 위하여 Fig. 12와 13은 예선회가 없는 경우의 설계점 속도에서 압축기가 선회실속 상태에서부터 약한 서지상태로 진행되는 동안 인듀서에서 측정된 압력신호와 FFT결과를 나타내고 있다. 임펠러의 회전주파수는 약 350 Hz이며 선회실속에 의한 압력요동은 약 160 Hz의 주파수대에서 아주 작은 진폭으로 나타나기 시작한다(A0~A2), 유량이 감소함에 따라 점진적으로 진폭이 증가하여 최대값에 도달하였고 완전히 발달한 경우 주파수는 약 164 Hz였다(A~E). 선회실속은 임펠러가 약 230회 회전하는 동안 선회실속 주파수가 나타나기 시작한 상태에서 최대 진폭의 약45% (A0~A1)까지 진폭이 증가한다. 이러한 선회실속의 발생과정에서 선회실속 신호는 초기에 간헐적으로 나타나다가 최대 진폭의 약 70%(A2)에 도달하면 최대 진폭에 도달할 때까지 연속적으로 증가하였다(A2~E). 유량이 더 감소하면 낮은 주파수대(약 7.3Hz)의 서지 신호가 나타났다.

3.2.4 선회실속 주파수 및 셀수의 변화

압축기의 임펠러에 발생한 선회실속은 임펠러의 회전방향과 같은 방향으로 회전한다. 따라서 입구 안내의 각도가 (+)로 설정된 경우, 임펠러 입구의 예선회가 임펠러의 회전방향과 같은 방향으로 주어지므로 선회실속의 회전 속도가 증가하게 되어 압력 요동 주파수가 증가된다. 음(-) 예선회의 경우는 선회실속의 회전방향과 반대 방향의 입구 유동이므로 선회실속의 회전 속도가 감소하는 경향을 보여주고 있다(Table 2).

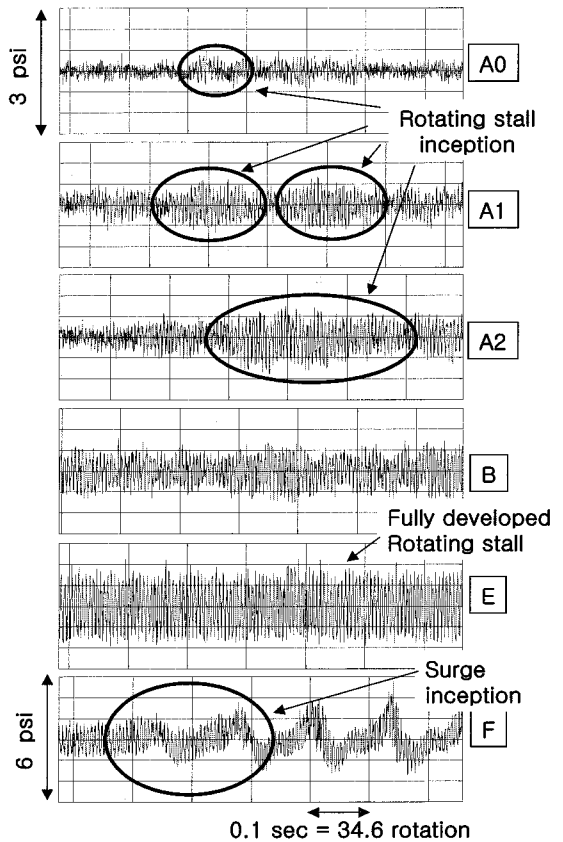


Fig. 12 Inducer pressure signal (IGV angle = 0°, @N=100%)

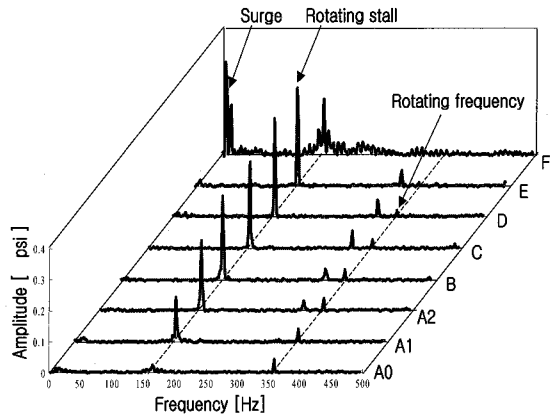


Fig. 13 FFT results of inducer pressure signal (IGV angle = 0°)

선회실속의 셀수 계산 결과, 정수로 나타나지 않았는데(약 2.6) 이것은 두 개의 센서 설치각도의 오차 등에 의한 것으로 판단된다. 셀수는 완전히 발달한 선회실속의 경우에는 모든 각도에서 일정하게 나타났다.

4. 결론

입구 예선회에 의한 압축기 성능변화를 관찰하였다. 양(+)의 예선회의 경우, 입사각 증가에 따른 입구 유로의 축소로 인한 초크유량의 감소를 확인하였고 (+) 예선회 각도가 증가함에 따라 압축기 작동선의 기울기는 음의 방향으로 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 이것은 양의 예선회에 의해 임펠러 블레이드의 부압면에 발생하는 실속영역의 발달이 억제되어 압축기의 안정성이 증가하게 된 것으로 판단된다.

음(-)의 예선회의 경우, 초기에는 입사각 증가가 그리 크지 않고 입구 유동이 인듀서 날개면을 따라 더 잘 유입되어 전체적으로 전압력비 및 유량이 증가하게 되지만 어느 한계를 넘어설 경우(본 시험의 경우 -20°) 인듀서 부분에서의 과도한 유동방향 변경 등으로 인듀서 손실이 급격히 증가하고 유로도 좁아져 오히려 전압력비와 유량이 줄어드는 결과를 나타내었다.

한편, 비정상상태에서의 성능시험 결과, 다음과 같은 몇 가지 사실을 확인할 수 있었다.

1. -20° 까지의 음(-)의 예선회에서는 선회실속이 충분히 발달한 다음 서지가 발생하였지만 -30° 의 경우는 선회실속이 완전히 발달하기 전에 서지가 발생하였다.
2. 양(+)의 예선회의 경우에는 각도가 증가함에 따라 선회실속 발생에서 서지 발생에 이르는 작동영역이 급격히 감소하였으며 선회실속 신호의 최대 진폭 또한 감소하였다.
3. 입구 안내익의 각도가 양(+)방향으로 설정된 경우, 임펠러 입구의 예선회가 임펠러의 회전방향과 같은 방향으로 주어지므로 선회실속의 회전 속도가 증가하였고, 음(-)의 예선회의 경우는 선회실속의 회전 방향과 반대 방향의 입구 유동이므로 선회실속의 회전 속도가 감소하였다. 선회실속의 셀수는 입구 안내익의 각도와 무관하게 일정하게 나타났다.

입구 안내익 각도에 의한 입사각의 변화는 단순한 작동점의 이동뿐만 아니라 선회실속이나 서지 같은 비정상 성능특성에도 변화를 일으킨다는 사실을 확인하였다. 이러한 결과는 입구 안내익을 사용하는 원심 압축기 시스템을 구성하는데 실증적 결과로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Rodgers, C., 1990, "Centrifugal Compressor Inlet Guide Vanes for Increased Surge Margin," ASME-Paper No. 90-GT-158.
- (2) Harada, H., 1996, "Study of A Surge-Free Centrifugal Compressor with Automatically Variable Inlet and Diffuser Vanes," ASME-Paper No. 96-GT-153.
- (3) Simon, H., Wallmann, T., Monk, T., 1987, "Improvements in Performance Characteristics of Single-Stage and Multistage Centrifugal Compressors by Simultaneous Adjustments of Inlet Guide Vanes and Diffuser Vanes," *Journal of Turbomachinery* Vol. 109, pp. 41~47.
- (4) Ishino, M., Iwakiri, Y., Bessho, A., 1999, "Effects of Variable Inlet Guide Vanes," ASME-Paper No. 99-GT-157.
- (5) Kassens, I. and Rautenber, M., "Flow Measurements Behind the Inlet Guide Vane of A Centrifugal Compressors," ASME-Paper No. 90-GT-158.
- (6) Frigne, P., Van Den Braembussche, P., 1984, "Distinction Between Different Types of Impeller and Diffuser Rotating Stall in a Centrifugal Compressor With Vaneless Diffuser," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 468~474.
- (7) Rodgers, C., Shapiro, L., 1973, "Design Considerations for High-Pressure-Ratio Centrifugal Compressors," ASME-Paper No. 730-GT-31.
- (8) 홍용식, *가스 터빈 엔진*, 1988, 청문각.
- (9) Pampreen, R., 1983, *Compressor Surge and Stall*, Concept ETI, Inc.
- (10) 차봉준, 임병준, 조규식, 이대성, 1999, "입구 안내익에 의한 원심압축기 성능특성 시험연구," 대한기계학회 유체공학부문 추계학술대회 논문집, pp. 128~133.
- (11) 강정식, 강신형, 2001, "원심압축기 스톨 발달에 관한 실험적 연구(I) -스톨 발달 과정," 대한기계학회 제25권 10호, pp. 1436~1444.