다단 축류압축기의 안정성 개선을 위한 실험적 연구

임영천* · 임형수* · 송성진** · 강신형**

Experimental Research of Multi-Stage Axial Compressor Stability Enhancement by Air Injection

Youngcheon Lim* · Hyungsoo Lim* · Seungjin Song** · Shinhyoung Kang**

ABSTRACT

A rotating stall, an instable phenomenon of compressor, brings about reducing the pressure rise, the efficiency of compressor and a mechanical demage. In order to improve instability and extend operating range, it was performed that a stability enhancement experiment applying air injection method at the 4-stage low-speed axial compressor. The coanda nozzle was used to inject air in axial direction at rotor tip and 8 injectors were set up at regular interval at the upstream of 1st stage rotor. At 80% speed, injectors were worked before rotating stall happened. As injecting the 5.4% air of mode inception flow rate, the stability of compressor operation enhanced about 4%.

초 록

압축기에 불안정한 특성인 선회실속(Rotating stall)이 발생하면 압력 및 효율이 저하되고, 기계적인 손상도 야기한다. 이러한 불안정성을 개선하고 안정 운전영역을 넓히기 위해 4단 저속 축류압축기에 공기 분사(Air injection) 방법을 적용하여 안정성 개선 실험을 실시하였다. 동익 팁에 축방향으로 공기를 분사할 수 있도록 하기 위해 코안다 효과를 적용한 노즐을 사용하였고, 8개의 인젝터를 1단 동익 상단에 등간격으로 설치하였다. 축류 압축기 80% speed로 운전하면서 선회실속이 발생하기 전에 공기 분사를 실시하였고, 모드(Mode) 발생 유량의 5.4%에 해당하는 공기를 분사하여 약 4%의 안정성 개선 효과를 얻었다.

Key Words: Axial Compressor, Rotating Stall, Air Injection, Mode

1. 서 론

터보기계에 있어 안정적인 운전을 방해하는 두 가지의 대표적인 공기역학적 불안정 현상에는 선회실속과 서지(Surge)가 있다. 선회실속은 비대칭한 축 흐름으로 의해 압축기의 블레이드 간 통로(Passage)에서 발생하고, 압축기 성능을 급격하게 저하시킨다. 서지는 큰 진폭을 가진 축대칭 1차원 진동으로 시스템 전체에 영향을 주

* 서울대학교 기계공학과 대학원
** 서울대학교 기계항공공학부
임영천, E-mail: lyc2216@hanmail.net

는 불안정한 흐름이다.[1],[2]. 이런 불안정한 현상은 압축기의 성능과 효율을 저하시킬 뿐 아니라 기계적인 손상을 초래하는 요인이 된다. 이러한 불안정 흐름을 방지하고 안정된 운전을 지속하기 위하여 공기 분사(Air injection), IGV(Inlet Guided Vane) 조절, 케이싱 트리트먼트(Casing treatment), 재순환(Recirculation) 등 다양한 연구가 진행되었다[1],[2],[3],[5],[6]. 본 연구에서는 서울대가 보유하고 있는 4단 축류 압축기에 이들 방법 중 공기 분사방법을 적용하여 안정성 개선 실험을 수행하였다.

2. 실험 장비 및 실험 방법

2.1 실험 장비

실험에 사용된 4단 저속 축류압축기는 Fig. 1(a)와 같이 지면에 수직으로 제작되었고, 공기가 위쪽에서 흡입되어 IGV를 지나 4개의 단(동익+정익)에서 압축되어 스로틀을 통해 아래쪽으로 배출된다. 축류압축기의 자세한 사양은 table 1과 같다.[7]

압축기의 성능을 측정하기 위해 IGV 상단에서 전압력을 원주방향으로 12개 위치에서 측정하였고, 4단 정익 하단에서 정압을 8개 위치에서 측정하였다. 또한, 선회실속 발생시 압력변화와 실속 발단 시점을 측정하기 위해서 고속응답 압력센서(Kulite社 XCQ-062)를 1단 동익 상단 코드길이의 1/4 지점에 3개 설치하였다.

Figure 1(b)와 같이 8개의 인젝터를 원주방향으로 일정한 간격으로 설치하였고, 공기 분사시 7.5kW의 블러워 2개를 외부소스로 사용하였다. 인젝터는 Fig. 1(c)처럼 코안다 효과를 갖는 노즐을 사용하여 공기가 축방향으로 분사되어 동익 팁 흐름에만 영향을 주도록 하였고, 1단 동익 팁에서 상류쪽으로 4mm 위치에 설치하였다. 인젝터 노즐의 폭은 60mm이고 출구 높이는 2mm로 설정하였다.

2.2 실험 방법

압축기 성능은 유량변화에 대한 압력상승으로 나타낸다. 압축기의 유량을 변화시키기 위해서

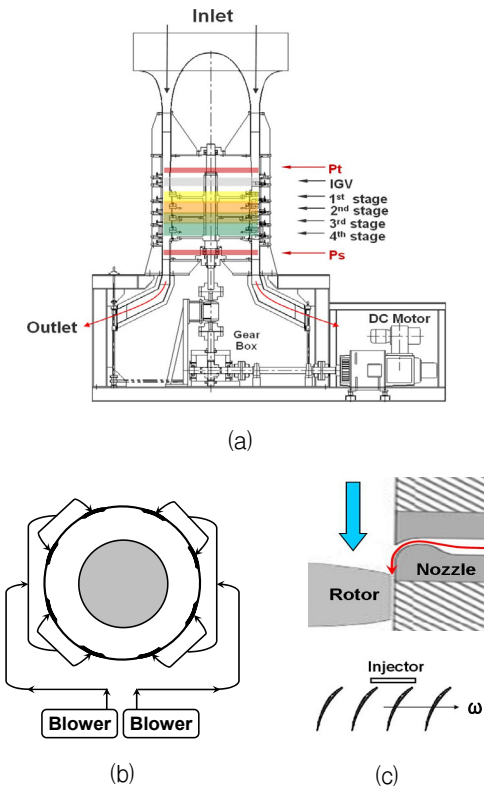

Fig. 1. Experimental equipments set up (a) 4-stage low speed axial compressor (b) Injectors setting at 1st stage (c) Injector location

Table 1. Specification of test facility

# of stage	4
# of blade IGV / Rotor / Stator	53 / 54 / 74
Height [m]	3.89
Tip radius [m]	0.5
Hub/Tip ratio	0.85
Aspect ratio	1.2
Chord length of rotor [mm]	62.5
Stagger angle of rotor [°]	51
DC motor [kW]	55

출구 스로틀을 조절하였고, 그때 나타나는 압력변화를 측정하였다. 압력상승은 IGV 상단의 전압력 측정값과 4단 정익 정압력 측정값의 차를 이용하였다.

압축기의 성능변화와 실속을 측정하기 위하여

10,000Hz로 압력변화 데이터를 수집하여 성능곡선을 얻었다. 성능곡선에서 실속발단 위치는 실속이 발생하기 전에 나타나는 모드 신호가 감지되는 지점을 기준으로 하였다. 모드 발생시점을 판단하기 위해 압력변화에 대한 공간퓨리에 변환(Spatial Fourier Transform)을 수행하였다. Fig. 2는 시간에 대한 무차원 유량·압력계수와 공간퓨리에 변환 위상(Phase)·크기(Magnitude)를 나타낸 것이다. 공간퓨리에 변환(SFT) 위상(Phase)이 일정한 기울기를 나타내는 시점과 공간퓨리에 변환 크기(Magnitude)의 값이 증가하는 시점이 있다. 이 시점이 모드가 발생한 시기이며, 이 시점을 실속 발단 시점으로 정의 하였다.

공기 분사량은 모드 발생기준 유량의 5.4%로 실시하였고, 80% 속도에서 분사하지 않을 때와 분사할 때의 압축기 성능을 측정하여 안정성 개선을 비교하였다.

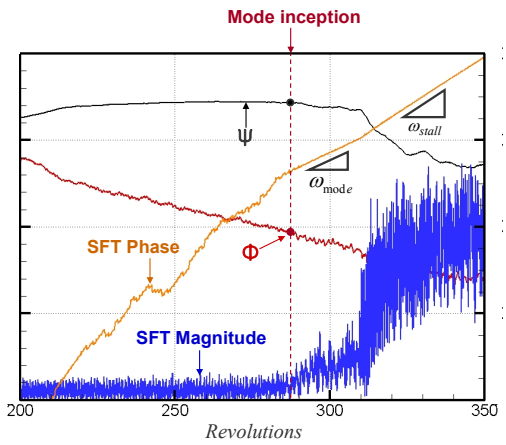

Fig. 2. Mode inception reference

3. 압축기 안정성 개선

3.1 압축기 성능곡선

압축기의 성능은 Fig. 3에 도시하였다. 이것은 무차원화 된 성능곡선으로 유량계수에 대한 압력상승 계수를 나타낸다. 유량을 줄이면 압력은 서서히 상승하다가 임계점에 도달하면 실속이 발생하여 압력이 감소하게 된다.

성능곡선 상에서 공기분사 유무에 따른 안정

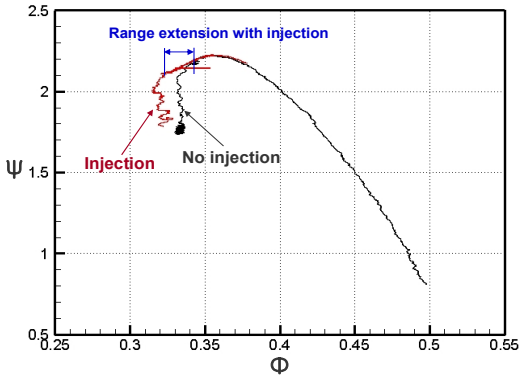

Fig. 3. The comparison of no-injection and injection compressor characteristic curve

성 개선을 비교하기 위해 정규화된 실속 유량계수 변화(The changes in the normalized stalling flow coefficient)를 사용하였으며 정의는 다음과 같다.[3]

$$\Delta\phi_{stall} = \frac{(\phi_{stall})_b - (\phi_{stall})}{(\phi_{stall})_b} \times 100$$

여기서, $(\phi_{stall})_b$는 분사하지 않을 때 실속이 발생하는 유량계수이며, ϕ_{stall}는 분사를 통해 개선된 실속 발생 유량계수이다.

3.2 인젝션시 안정성 개선

모드 발생기준 유량의 5.4% 공기를 분사하였을 때와 분사하지 않았을 때의 성능이 Fig. 3에 도시되었다. 성능곡선을 비교해 보면 공기분사를 하였을 때 운전영역이 연장된 것을 알 수 있다. Fig. 4는 공기분사 유무에 따른 실속 지점들만을 도시하였다. 분사하지 않을 때 선회실속이 평균 $\phi = 0.347$에서 발생하고, 5.4%의 공기를 분사할 때 평균 $\phi = 0.334$에서 선회실속이 발생하는 것을 볼 수 있다. 분사를 통해 운전 영역이 무차원 유량계수를 기준으로 약 0.013이 연장 되었다. 이것을 $\Delta\phi_{stall}$로 계산해 보면 약 4%가 나타나고, 이는 공기분사를 통해 실속유량계수가 감소하여 안정한 운전영역이 연장된 것을 정량적으로 확인할 수 있다.

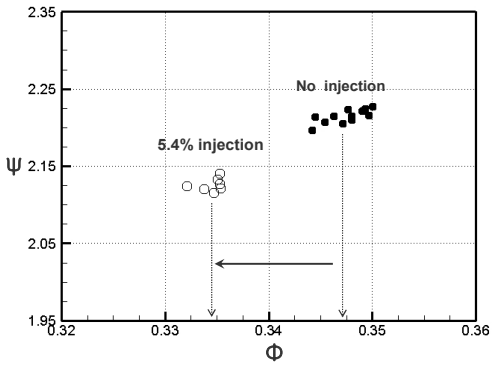

Fig. 4. The stability range extension by injection

운전영역이 연장된 것은 분사를 통한 고속 공기가 동익 팁에 입사각(Incidence angle)를 감소시켜 블레이드의 로딩이 감소되기 때문이다.[3]

4. 결 론

4단 저속 축류압축기에 공기 분사 시스템을 설치하여 분사를 통한 압축기 안정성 개선에 대한 실험을 실시하였다.

- 동익 팁 부근에 공기 분사를 통해서 압축기 운전영역이 개선되는 것을 알 수 있었다.
- 모드 발생 유량 대비 5.4%의 공기분사를 통하여 압축기의 안정한 운전영역이 약 4% 개선되었다.
- 공기 분사를 실시하여 고속의 공기를 동익 팁에 가해주면 입사각이 감소하게 되고 블레이드 로딩이 줄어 실속 발생을 지연시킴으로 안정한 운전영역을 연장할 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 항공우주부품기술개발사업의 “차세대 초소형/고부하 압축기 다분야 통합기술 개발” 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Paduano, J. D., Epstein, A. H., Valavani, L., Longely, J. P., Greitzer, E. M., Guenette, G. R., "Active Control of Rotating Stall in a Low-Speed Axial Compressor," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, January 1993, pp.48-56
2. D’Andrea, R., Behnken, R. L., Murray, R. M., "Rotating Stall Control of Axial Flow Compressor Using Pulsed Air Injection," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 119, October 1997, pp.742-752
3. Suder, Kenneth L., Hathaway, Michael D., Thorp, Scott A., Strazisar, Anthony J., Bright, Michelle B., "Compressor Stability Enhancement Using Discrete Tip Injection," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 123, January 2001, pp.12-23
4. Day, I. J., Freeman, C., "The Unstable Behavior of Low and High-Speed Compressors," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 116, April 1994, pp.194-201
5. Day, I. J., "Active Suppression of Rotating Stall and Surge in Axial Compressors," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, January 1993, pp.40-47
6. Strazisar, A. J., Bright, M. M., Thorp, S., Culley, D. E., Suder, K. L., "Compressor Stall Control Through Endwall Recirculation," ASME Paper No. GT2004-54295, June 2004
7. 임형수, 조민기, 강신형, 송성진, “축류압축기의 스톨발단에 관한 연구,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2008, pp.169-175