



삼중음속 풍동 가변노즐 자동 운영시스템 개발

고지훈^{a*}, 김희중^a, 김영준^a, 신성범^a, 김남균^a

Development of Variable Nozzle Automated System for Trisonic Wind Tunnel

Jihun Ko^{a*}, Heejung Kim^a, Youngjoon Kim^a, Seongbeom Shin^a, Namgyun Kim^a^a Agency for Defense Development, P.O.Box 35, Yuseong-gu, Daejeon 34060, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	17	October	2017
Revised	19	December	2017
Accepted	22	December	2017

Keywords:

Nozzle
Automation
Trisonic
Wind tunnel
Servo

ABSTRACT

It is necessary to design a suitable nozzle shape to achieve a Mach number in the trisonic wind tunnel (TWT). The nozzle shape of the Agency for Defense Development (ADD) TWT has been developed manually. This method results in a long setting time and some human errors. In order to address these problems, we propose a variable nozzle automated system for ADD TWT. It consists of an automated jack screw and nozzle plate protecting parts. The experimental results show that the proposed system yields better productivity and repeatability than the conventional nozzle system for wind tunnel tests. It can contribute toward the fast production of accurate aerodynamic data.

1. 서론

국방과학연구소 삼중음속 풍동 실험실은 1979년 미국 플루다인 (Fluidyne) 사에 의해 제작된 4×4 ft² 시험부를 갖는 불어내기 식 풍동 시험 설비이다. 여기서 삼중음속이라 함은 공기 유동의 3가지 속도 영역인 아음속, 천음속, 초음속 영역을 의미하며, 실제 가용 마하 수(Mach number)는 0.4~4.4이다. 풍동 시험은 비행체 모형에 공기의 흐름을 형성하여 공기 역학적 데이터를 획득하는 연구이다. 해당 실험실은 크게 압축기 및 공기저장탱크, 벨브시스템, 가변 노즐부, 시험부, 배기부로 구성되어 있다. 특히 풍동시험에서 요구되는 마하 수를 얻기 위해서는 가변 노즐부의 마하 수에 따른 형상 조정이 필수적이다. 기존 가변 노즐 시스템은 크게 노즐부 컨트롤 판넬, 상/하 로컬 신호 박스, 각 56개의 스테이션(station)에 설치된 삼상 유도 전동기 및 오버스트레스

(overstress), 스탱 너트(stop nut), 락 너트(lock nut)로 구성된 3종의 리미트 스위치(limit switch)와 릴레이(relay) 관련 전기배선, 유압시스템 등으로 구성되어 있다. 이를 구동하기 위해 시스템 운영자는 수작업으로 모터를 정, 역회전하여 마하 수에 따른 각 스테이션의 노즐 잭 스크류(jack screw)의 위치, 즉 해당 카운트(count) 값으로 설정하여 마하 수에 따른 가변 노즐의 형상을 조종한다. 그 결과 작업 인력과 시간이 상당히 요구되며, 노즐 설정에 대한 인적 오류도 빈번히 발생한다. 또한 시스템 로직(logic)이 하드웨어(hardware)적으로만 구성되어 있어 진동이나 온-습도에 의한 환경적인 요인에 의해 오류가 빈번히 발생하고 유지보수에 어려움이 많다. 특히 오버스트레스 리미트 스위치는 노즐 플레이트(nozzle plate)에 일정한 굽힘 이상이 발생했을 경우에만 작동하므로 노즐 형상에 대한 미세한 변화를 감지하거나 노즐 플레이트가 해당 마하 수로 정확하게 설정되어 있는지 확인할 수 없다.

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-0495

Fax: +82-42-821-3400

E-mail address: jihun@add.re.kr (Jihun Ko).

본 논문에서는 이를 개선하기 위한 노즐 형상 설정의 반복성과 풍동시험의 생산성 확보를 위해 노즐 잭 스크류의 자동 구동 장치를 구현하고, 가변 노즐부의 안전성 확보를 위해 가변 노즐 플레이트에 작용하는 응력 및 노즐 형상을 실시간으로 감시하는 가변 노즐 보호 장치를 개발하였다. 또한 실험을 통해 제안된 시스템의 생산성과 반복성을 확인하였다.

2. 가변 노즐 자동 운영시스템 구성

2.1 노즐 잭 스크류 자동 구동 장치

노즐 형상 조정은 유압 시스템과 잭 스크류의 위치 조절을 통해 가변 노즐플레이트의 굽힘 형태로 구현된다. 유압 시스템은 노즐 플레이트를 밀어내고 당기는 작용력으로, 잭 스크류 구동장치는 잭 스크류의 거리를 조정하는데 사용된다. 본 연구에서는 노즐 잭 스크류 구동을 기존의 수작업 방식에서 자동 구동 방식으로 개발하였다. 삼중음속 풍동의 기존 노즐 시스템은 Table 1과 같이 구성되어 있다. 주요 구성 부품들은 상, 하부의 잭 프레임에 조립되어 있고 좌, 우 측면에 사이드 월(side wall)을 조립하여 삼중음속 풍동을 구성한다. Fig. 1은 기존 삼중음속 풍동의 사이드 월을 제거한 가변 노즐의 내부이다.

Fig. 2는 노즐 플레이트의 굽힘을 변형시키기 위한 잭 어셈블리 시스템(jack assembly system)이다. 잭 어셈블리 시스템은 핀 홀(pin hole)을 이용해 노즐부 지지 구조물인 잭 프레임(jack frame)

과 핀으로 조립되어 있다. 노즐 플레이트에 각 마하 수에 해당하는 굽힘을 주기 위해 유압 실린더(hydraulic cylinder)를 이용해 릴리즈(release)라 불리는 밀어내는 방향으로 플레이트를 최대 굽힘 형상으로 만든다. 그리고 각 마하 수에 설정된 위치로 잭 스크류를 이동시킨 후 유압실린더를 컨투어(contour)라 불리는 당기는 방향으로 작동시키면 노즐 플레이트는 잭 스크류 위치에 의해 각 마하 수에 따른 노즐 형상을 생성한다⁵⁾.

본 연구에서는 노즐 잭 스크류를 자동 구동하기 위해 하드웨어는 노즐 잭 스크류가 위치한 56개 스테이션에 서보 모터(servo motor)를 1대씩 설치하고, 이에 대응하는 서보 드라이브(servo drive), 시스템 제어용인 프로그램이 가능한 로직 제어기(programmable logic controller, PLC) 모듈(module), 전원 및 회로보호모듈, 시스템 운영자용 터치 패널(touch panel), 워크스테이션(workstation) 등으로 구성하였다. 또한 시스템을 구동하기 위한 소프트웨어(software)는 시스템 전반의 제어 로직인 PLC 프로그램, 시스템 운영자용 휴먼 머신 인터페이스(human machine interface, HMI) 및 터치 패널용 작화 프로그램 등으로

Table 1 Components of conventional variable nozzle system

Components	Specification
Hydraulic pump	210 bar, 20 gpm
Hydraulic cylinder	4 inch × 2 ea / station
Nozzle plate	410 stainless steel
Motor	1/4 hp Induction motor / station
Jack screw	5 inch × 2P ACME THREAD / station
Power train	50:1 Worm gearbox & Spline / station
Precision	1/1,000 inch

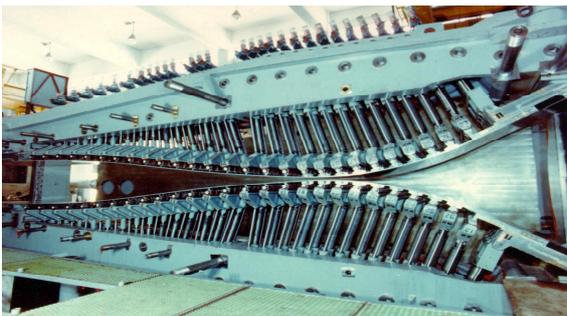


Fig. 1 Conventional variable nozzle system

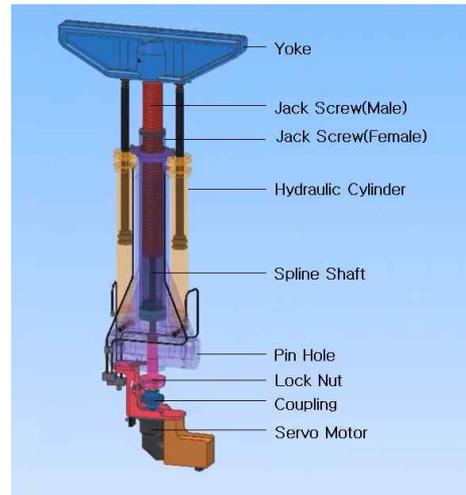


Fig. 2 Jack assembly system

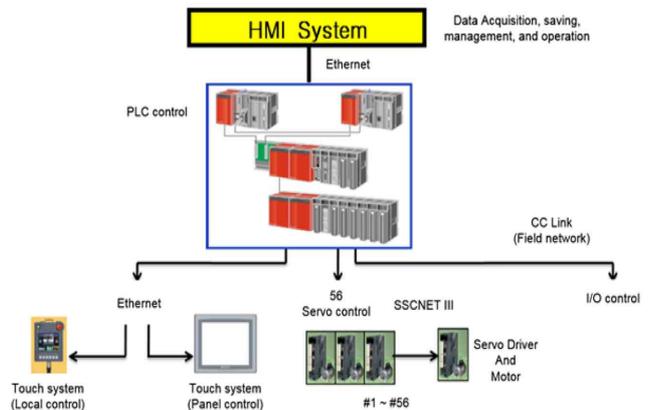


Fig. 3 Control structure of nozzle automated system

구성하였다^[1].

Fig. 3은 본 시스템 하드웨어의 개략도이다. 기존 노즐 시스템은 1/4 마력(horse power) 삼상 유도전동기를 이용하였다. 그러나 잭 스크류가 특정 구간 이동 시 토크(torque) 부족으로 인해 구동이 불가능한 경우가 발생하였다. 본 연구에서는 가변 노즐부의 최대 토크를 확인하기 위해 전 구간에 대해 토크를 측정하였다. 그 결과 노즐 상부에서는 6번 스테이션에서 13.8 Nm, 노즐 하부에서는 28번 스테이션에서 14.12 Nm로 최대 토크가 발생하였다. 본 시스템 설계 시 제작사에서 제공하는 감속기 효율을 적용하여 기존 워름(worm) 감속기는 동력전달 효율이 36 %이고, 제안된 시스템의 헬리컬(helical) 감속기는 동력전달 효율이 92 % 이상이다. 이를 고려하여 본 시스템 설계 시 기계적인 출력 토크는 소요 토크의 150 %가 되도록 설치하였다. Fig. 4는 실제 각 스테이션에 설치된 5 마력 급 서보모터, 서보드라이브 및 데이터 수집 및 전송을 위한 로컬신호박스를 나타낸 것이다.

시스템 운영자는 워크스테이션 기반의 HMI 및 메인/휴대용 터치 패널을 이용하여 시스템의 구동, 설정, 관리 등이 가능하다. 특히 Fig. 5는 본 시스템의 HMI로 윈더웨어(Wonderware) 사의 작화 프로그램인 Intouch Developer를 이용하여 개발되었다. Fig. 6은 본 프로그램의 구조로서 PLC 모듈과 이더넷(Ethernet)을 통해 서보모터 및 유압시스템의 제어, 센서 데이터 획득 및 상태 모니터링, 분석에 이용되고 있으며, 유연성과 재사용성이 우수하여 타 유사 시스템에도 적용이 가능하다^[6].



Fig. 4 Overview of nozzle automated system

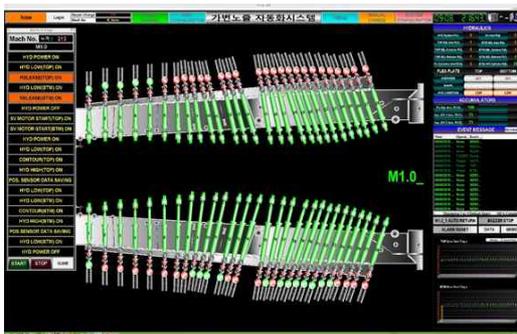


Fig. 5 HMI for nozzle automated system

Fig. 7은 가변 노즐 자동 운전의 흐름도로서 시스템 운영자가 마하 수만 설정하면 순차 제어에 의해 잭 스크류와 유압 실린더를 구동하여 노즐 형상을 생성한다. 특히 노즐 잭 스크류의 위치 설정 시 서보모터 제어는 S자 곡선(S-curve)형태로 진행되도록 구현하였다. 해당 스테이션에 목표 위치가 입력되면 서보모터는 목표 위치의 0~10 % 구간은 가속, 10~90 % 구간은 등속, 90~100 % 구간은 감속 운전을 실시한다. 또한 서보모터 운전 시 과부하(overload)가 발생할 경우 서보드라이브의 소손될 수 있으므로 이를 방지하기 위해 정격 출력의 1.5 배를 초과할 경우 서보모터의 구동축을 정지시켜 시스템을 보호하였다^[3].

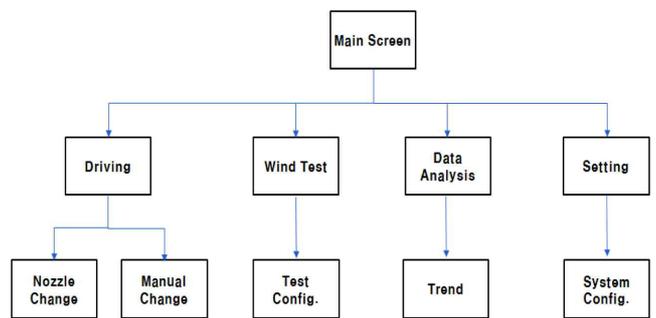


Fig. 6 HMI structure for nozzle automated system

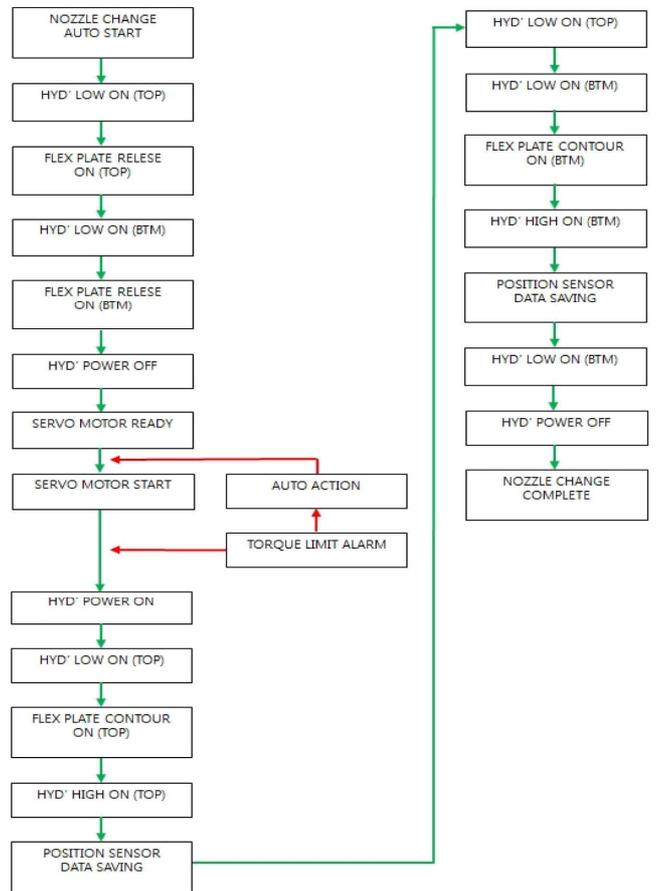


Fig. 7 Flow chart of nozzle control

2.2 가변 노즐 보호 장치

풍동 시험 시 필요한 노즐 형상은 원하는 마하 수를 생성하는데 필수적인 요소이다. 가변 노즐 형상의 오차를 최소로 유지하기 위해서는 플레이트의 변위 데이터를 실시간으로 수집하고 처리하여 플레이트에 실시간으로 인가되는 응력에 대한 알람 및 인터럽트를 수행하는 시스템이 필요하다.

이를 위해 본 풍동 가변 노즐 보호 장치는 노즐 잭의 56개 스테이션에 각각 스탱 너트, 락 너트, 오버스트레스 3종의 리미트 스위치와 노즐 상, 하부 27, 28번을 제외한 스테이션에 1종의 위치센서(potentiometer)를 설치하였다. 또한 노즐 상, 하부에는 각각 1개의 로컬 신호 수집 박스를 설치하고 이를 통해 노즐 잭 시스템의 각 스테이션에서 발생하는 센서 신호를 수집하고, 산업용 네트워크(industrial network)를 이용하여 주제어반에 전달한다. 주제어반 PLC는 수집데이터에 대해 분석을 실시하고 긴급 상황 발생 시 이에 대응하는 조치를 취할 수 있도록 보호 로직을 구동하며, 이더넷 통신을 통해 HMI에 가변 노즐의 상태를 실시간 표시하고 데이터를 저장한다²⁾.

특히 시스템 보호 장치에 적용된 각 센서의 기능은 다음과 같다. 스탱 너트 리미트 스위치는 노즐 잭 스크류를 구동하여 각 마하 수에 해당되는 기계적인 위치에 정확하게 위치해 있는지를 확인해 준다. 락 너트 리미트 스위치는 잭 스크류가 외력에 의해 회전되지 않게 고정되어 있는지 확인용으로 사용된다. 오버스트레스 리미트 스위치는 노즐 플레이트의 과대 굽힘을 감지한다. 위치 센서는 각 마하 수에 따른 노즐 플레이트의 변위와 과대 굽힘 정도를 검출한다. 본 시스템은 이 센서들에서 이벤트(event)가 발생하면 Table 2와 같은 보호동작을 실시한다. 특히 노즐 플레이트의 과대 굽힘을 방지하기 위해 위치 센서의 측정된 결과를 (A) ± 2.42 mm 이상일 때와 (B) ± 2.42 mm 미만일 때로 구분하여 보호 동작을 설정하였다.

또한 본 시스템에서는 노즐 플레이트 안전성 확보를 위해 락 너트 리미트 스위치, 오버스트레스 리미트 스위치, 위치센서는 노즐

Table 2 Protecting action for events

Sensor name	State	Jack Screw	Hydraulic Cylinder
Stop-nut	ON	Hold	Don't care
	OFF	Action	Don't care
Lock-nut	ON	Hold	Hold
	OFF	Action	Action
Overstress	ON	Hold	Hold
	OFF	Action	Action
Potentiometer	(A)	Hold	Hold
	(B)	Action	Action

잭 스크류와 유압 실린더 작동에 관련이 있으며, 스탱 너트 리미트 스위치는 노즐 잭 스크류 구동에만 관여를 한다.

Fig. 8은 가변 노즐 보호 장치의 전체 구조도이다. PLC는 데이터를 수집하고 분석하여 시스템 보호 동작을 수행하는 주제어기이다. HMI는 시스템의 상태 데이터를 수집하고 표시 및 저장한다. 실린더 구동용 유압시스템은 가변 노즐 플레이트를 이동시킨다. 서보모터 시스템은 원하는 마하 수를 생성하기 위해 설정된 위치로 노즐 잭 스크류를 구동시킨다.

Fig. 9는 풍동 가변 노즐 상, 하부에 설치된 리미트 스위치의 구성도이다. 노즐 상, 하부의 리미트 스위치에 각각 DC 24 V를 공급하기 위한 전원장치가 있으며, 각 스테이션에 해당하는 노즐 플레이트에는 3종의 리미트 스위치가 설치되어 있다. 센서의 출력은 On / Off 신호로 이를 수집하기 위해 상, 하부 로컬박스 내부에는 디지털 입력(digital input) 모듈이 설치되어 있다. 각 스테이션 당 스탱 너트 리미트 스위치 2 채널(channel), 락 너트 리미트 스위치 2 채널, 오버스트레스 리미트 스위치 8 채널로 구성되어 있으며, 전체 노즐 시스템은 노즐 상, 하부 각 28개 스테이션이므로 총 672 채널의 디지털 입력 채널이 필요하다.

Fig. 10은 풍동 가변 노즐 상, 하부에 설치된 위치 센서의 구성도이다. 노즐 상, 하부의 위치 센서에 각각 DC 10 V를 공급하기

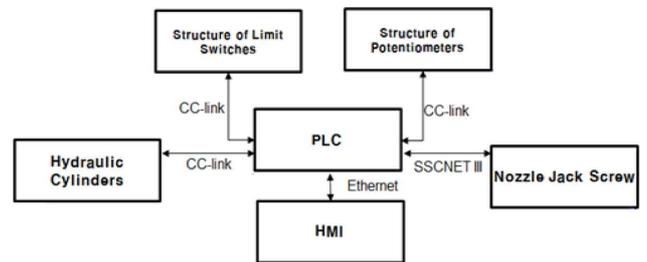


Fig. 8 Nozzle protecting system

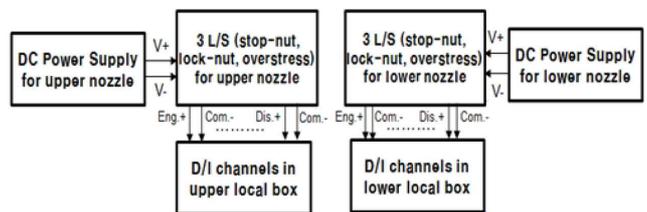


Fig. 9 Limit switches for nozzle protection

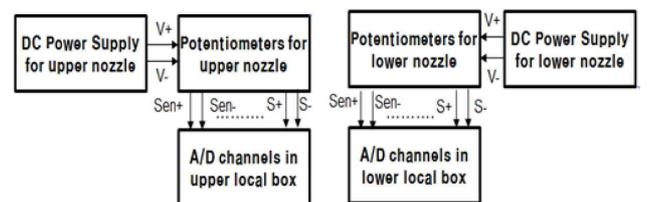


Fig. 10 Potentiometers for nozzle protection

위한 전원 장치가 있고, 노즐 플레이트의 각 스테이션에는 위치 센서가 설치되어 있다. 위치 센서에 인가되는 전압과 출력 전압을 수집하기 위해 상, 하부 로컬 신호박스에는 아날로그 디지털 변환기(analog to digital converter, ADC) 모듈을 설치하였다. 신호 수집을 위해 노즐 상, 하부 각각 1번 스테이션은 4 채널, 2번에서 26번 스테이션까지는 2 채널로 구성하였으며, 전체 시스템에 대해서는 총 108 채널이 필요하다. 또한 위치 센서의 입력전압을 측정하는 것은 해당 센서가 수동 소자이므로 인가전압에 따른 출력 값의 변화를 보상하여 정확한 데이터를 산출하기 위해서이다.

3. 시스템 성능 평가

3.1 가변 노즐 형상 조정 실험

본 가변 노즐 시스템은 마하 수 1.0에서 4.4까지의 노즐 형상을 생성한다. 마하 수 0.4에서 1.0까지의 노즐 형상은 동일하므로 마하 수 1.0 미만에 대해서는 실시하지 않는다. 본 연구에서는 노즐 형상의 재현 반복성 및 소요시간을 측정하였다.

Fig. 11은 가변 노즐 플레이트의 변위를 측정하는 구성도이다. 플레이트에 수직으로 설치된 위치 센서는 각 스테이션의 노즐 플레이트의 변위를 측정하여 해당 마하 수에 따른 노즐 형상의 반복 정밀도를 확인할 수 있도록 해 준다^[4]. Fig. 12~16는 마하 수 1.6, 2.0, 2.4, 3.0, 3.6에 대해서 노즐 형상을 5회 반복 설정한 후 각 스테이션의 변위를 측정된 결과이다. 본 시스템에는 1번 스테이션에 2개의 위치센서가 설치되어 있어 해당 변위값은 0, 1번 스테이션에 각각 표시하였다. 본 실험 결과를 통해 본 시스템은 노즐 플레이트에서 허용하는 오차 범위인 0.05 mm 이내의 반복 정밀도를 나타내고 있으며, 노즐 상, 하부 플레이트의 동일 스테이션에 대한 최대 변위차도 정상적인 마하 수 생성이 가능한 0.5 mm 이내로 측정되었다.

Table 3은 각 마하 수마다 30회 반복 실험을 통해 상, 하부 스테이션 9번에서 수집된 노즐 형상 측정 데이터를 통계적으로 분석한

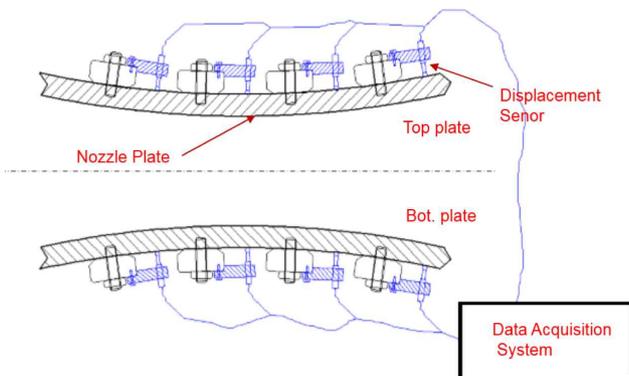


Fig. 11 Displacement measurement

결과이다. 실험을 통해 마하 수에 따라 노즐 형상이 정상적으로 설정되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 실험에 적용된 스테이션은 노즐목과 확산기(diffuser)의 중심점으로 풍동시험에서 가장 중요한

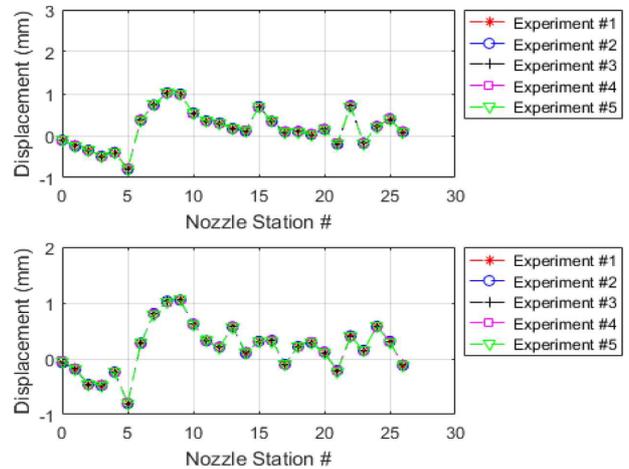


Fig. 12 Displacement of M1.6 nozzle

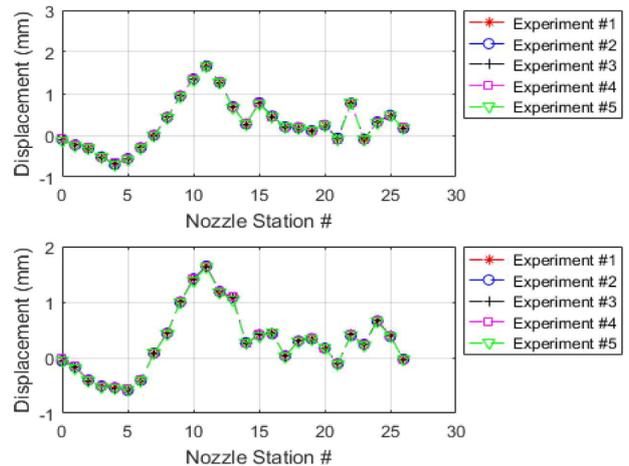


Fig. 13 Displacement of M2.0 nozzle

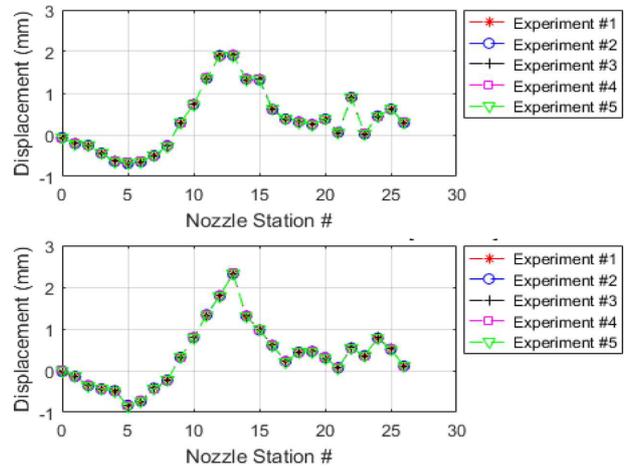


Fig. 14 Displacement of M2.4 nozzle

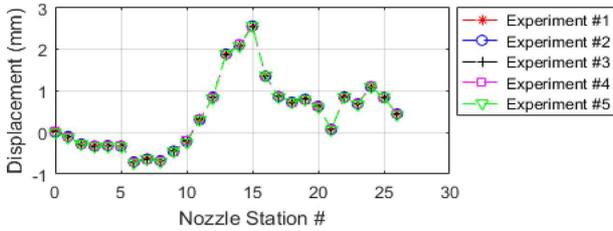
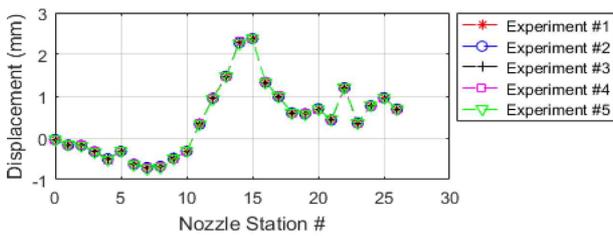


Fig. 15 Displacement of M3.0 nozzle

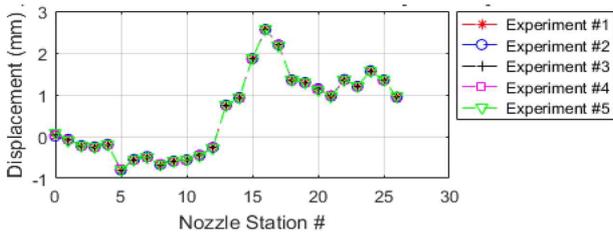
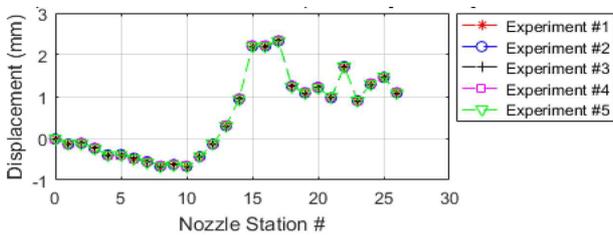


Fig. 16 Displacement of M3.6 nozzle

Table 3 Statistical results of displacements

Mach Number		Average	Standard deviation	Standard error
1.6	TOP	0.980 mm	0.0111 mm	0.0020 mm
	BOT	1.054 mm	0.0066 mm	0.0012 mm
2.0	TOP	0.933 mm	0.0197 mm	0.0036 mm
	BOT	0.998 mm	0.0069 mm	0.0013 mm
2.4	TOP	0.290 mm	0.0021 mm	0.0004 mm
	BOT	0.319 mm	0.0052 mm	0.0009 mm
3.0	TOP	-0.489 mm	0.0037 mm	0.0007 mm
	BOT	-0.454 mm	0.0049 mm	0.0009 mm
3.6	TOP	-0.633 mm	0.0055 mm	0.0010 mm
	BOT	-0.595 mm	0.0076 mm	0.0014 mm

위치이다⁷⁾.

Table 4는 노즐 형상을 마하 수 1.0 에서 4.0으로 교체한 결과이다. 가변 노즐 자동 운영 시스템의 구현을 통해 운영자 2인을 투입

Table 4 Comparison of productivity for wind tunnel test

	Conventional system	Proposed system
Motor speed	1800 rpm	1800 rpm
Man power	2	1
Elapsed time	1602 sec.	104 sec.

하여 수작업으로 각 스테이션에 대해 개별 운전을 실시하였던 기존 노즐 교체 방법에 비해 약 15배 정도의 빠른 속도로 교체를 완료하여 풍동 시험의 생산성을 향상시켰다.

4. 결론

본 논문은 국내 유일의 국방과학연구소 삼중음속 풍동 가변노즐 자동 운영 시스템을 개발하고 그 결과에 대해 분석하였다. 삼중음속 풍동시험 시 마하 수를 생성하기 위해 잭 스크류를 구동하여 노즐 형상을 설정하는 것은 필수적이다. 본 연구는 수작업에 의해 가변 노즐의 형상을 설정하여 작업시간이 많이 소요되고 오류가 빈번히 발생하는 기존 시스템을 개선하기 위해 서보모터를 이용한 잭 스크류 자동 구동 장치와 노즐 플레이트의 실시간 응력 감시용 보호 장치를 구현하였다. 그 결과 기존 시스템에 비해 풍동 시험 시 요구되는 노즐 형상을 신속하고 높은 반복 정밀도로 설정이 가능하게 되어 현재 국방 유도무기 체계 개발에 기여하고 있다.

References

- [1] Ko, J. H., Kim, H. J., 2014, Report of the Nozzle Automation in TWT, Agency for Defense Development.
- [2] Ko, J. H., Kim, H. J., Shin, S. B., Kim, Y. J., 2016, The Flexible Nozzle Safety System for Wind Tunnel and Controlling Method Thereof, KR Patent: 10-1661150.
- [3] Kim, H. J., Ko, J. H., Shin, S. B., Kim, Y. J., 2017, Final Report of TWT Nozzle Upgrade and Automation Project, Agency for Defense Development.
- [4] Kim, H. J., Ko, J. H., Shin, S. B., Kim, Y. J., 2017, Measuring Device for Displacement of Flexible Nozzle System, KR Patent: 10-1736941.
- [5] Mcwherter, C. R., Fetter, A. R., 1978, Wind Tunnel Facilities Operation Handbook, FLUIDYNE Engineering Corporation.
- [6] Ko, J. H., Kim, H. J., Shin, S. B., Kim, Y. J., Kim, N. G., 2017, HMI Program for Flexible Nozzle in the Trisonic Wind Tunnel, Republic of Korea Program: C-2017-015111.
- [7] Song, S. M., Ma, S. J., Kim, K. W., Kim, C. W., 2017, A Study About Kinematics Characteristics of Variable Nozzle Operating in High Speed Environment, 2017 KSMTE Spring Conference, 177.