

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.2.058>

# 초음속 노즐에서 발생하는 유동 이력현상에 대한 실험적 연구

남종순\* · 김희동\*

## Experimental Study on the Flow Hysteresis Phenomenon in a Supersonic Nozzle

Jongsoon Nam\* · Heuydong Kim\*

### ABSTRACT

Hysteresis phenomena in fluid flow systems are frequently encountered in many industrial and engineering applications and mainly appear during the transient processes of change of the pressure ratio. Shock-containing flow field in supersonic nozzles is typically subject to such hysteresis phenomena, but associated flow physics is not yet understood well. In the present study, experimental work has been carried out to investigate supersonic nozzle flows during the transient processes of change in the nozzle pressure ratio. Time-dependent surface wall pressures were measured by a multiple of pressure transducers and the flow field was visualized using a nano-spark Schlieren optical method. The results obtained show that the hysteresis phenomenon is strongly dependent on the nozzle geometry as well as the time scale of the change of pressure ratio.

### 초 록

유체 유동 시스템 내 히스테리시스 현상은 현재 다양한 산업 및 공학적인 응용분야에서 매우 빈번하게 발생되고 있으며, 이는 압력비 변화과정에서 주로 나타난다. 충격파를 포함한 초음속 노즐 유동장에서 히스테리시스 현상이 매우 발생하기 쉬우며, 이에 대한 물리적 유동특성에 대해서는 여전히 많이 알려지지 않았다. 본 연구에서는 노즐 압력비 변화에 따른 초음속 노즐내부 유동특성에 대해 조사하기 위해 실험적 연구를 수행하였다. 시간에 따른 노즐 벽압력 변화를 측정하기 위하여 다수의 압력변환기를 사용하였으며, 유동장의 가시화를 위해 나노스파크 쉐리렌 가시화 기법을 적용하였다. 연구 결과를 통해 히스테리시스 현상은 노즐의 기하학적 형상뿐만 아니라 시간에 따른 압력비 변화에 크게 의존함을 알았다.

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Hysteresis Phenomenon(이력현상), Shock Wave(충격파), Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Supersonic Flow(초음속 유동)

접수일 2011. 11. 30, 수정완료일 2012. 3. 7, 게재확정일 2012. 3. 13

\* 학생회원, 안동대학교 대학원 기계공학과

\*\* 중신회원, 안동대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 24-25, 부산 노보텔 엠베서더) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

### 1. 서 론

일반적으로 이력(Hysteresis)현상은 유동을 구동하는 압력조건이 증가하는 과정과 감소하는

과정에 따라 유동장의 형태가 다르게 나타나는 것을 의미하며, 이러한 현상은 지금까지 단순히 발생하는 자연현상으로만 인식되어 왔다[1]. 그러나 최근 다양한 산업 응용에서 과도과정(Transient Process) 즉 정상상태로 도달하기까지의 과정에서 발생하는 유동장의 경계조건이 정상상태의 유동특성에 큰 영향을 미치게 되는 것이 알려지게 되면서, 과도상태의 유동현상에 대한 많은 관심이 집중되고 있다[2, 3].

예를 들어, 산업용 보일러 등에서 배출되는 고압증기의 경우, 밸브의 개방과 폐쇄과정에서 발생하는 유동장은 압력조건이 증가하는 과정과 감소하는 과정으로 특성화할 수 있으나, 이러한 두 과정에서 발생하는 고압증기의 유동은, 동일한 순간 압력임에도 불구하고 전혀 다르게 나타나게 된다[2-4].

최근 연구에서 초음속 제트 유동의 경우, 제트 압력비가 증가하는 과정과 감소하는 과정에서 동일한 순간 압력비에서, 초음속 제트 유동의 특성은 전혀 다르게 나타난다는 것이 보고되어 있다[5]. 실제 이러한 유동 이력현상은 유체기계의 성능이나 수명 등에 큰 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고, 그간 과도유동에 대한 연구결과는 찾아보기 드물다.

구체적으로 이러한 유동 이력현상이 왜 발생하게 되는지? 어떠한 조건에서 발생하게 되는지? 또 이러한 이력현상에 미치는 유동변수는 무엇인지? 이러한 유동 이력현상을 어떻게 제어

할 수 있는지에 대한 연구사례는 매우 드물다.

본 연구에서는 초음속 노즐 내부에서 발생하는 유동 이력현상을 실험적으로 조사하기 위하여, 몇 가지 형태의 초음속 노즐을 설계 제작하여, 실험을 수행하였다. 실험에서는 유동 이력현상을 발생시키기 위하여, 노즐 상류에 위치한 정체실의 압력의 시간변화를 전자제어밸브를 사용하여 정체실의 압력을 증가시키거나 감소시킬 수 있도록 하였다. 이 때 노즐 내부에서 발생하는 초음속 유동을 가시화하고, 순간 벽면압력을 측정하여, 이력유동의 특성을 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Figure 1에는 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략을 나타내었으며, 압축기에서 압축된 공기는 건조기를 거쳐, 공기 저장기(Reservoir Tank)에 저장된다. 그 후 고압의 건조공기는 전자제어 밸브를 거쳐 정체실로 유동하게 되며, 정체실 하류에 설치한 측정부인 초음속 노즐을 통하여 대기로 방출하도록 구성되어 있다.

실험에서 압력 시간변화를 일정하게 유지하기 위해 노즐 상류에 위치한 정체실의 압력을 전자제어 밸브를 이용하여 조절한다.

한편 정체실 하류에는 Fig. 2에 도시한 바와 같은 전형적인 수축-확대 노즐을 설치하였다. 이러한 초음속 노즐들의 상세형상은 Table 1에 요약하였으며, 모두 6종류의 노즐을 설계/제작하여 실험에 사용하였다. 이들 노즐은 동일한 유량조건을 얻기 위하여, 목 높이  $D_t=11.0$  mm로, 그리고 노즐 목의 곡률반경  $R=90$  mm로 동일하게 설계하였다. 그러나 노즐출구의 높이  $D_e$ 와 노즐의 길이  $L_1$ 을 변화시켜, 설계마하수가 다른 노즐을 얻을 수 있었다. 한편 본 실험에서 사용한 노즐 대부분은 노즐의 출구의 두께( $t$ )가 0에 가까운 매우 날카로운 노즐을 사용하였으나, 노즐 출구 두께가 유동 이력현상에 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위해, Noz D의 노즐은 출구두께를 5 mm로 제작하였다. 또 Noz E와 Noz F는 노즐의 설계마하수는 동일하지만, 길이가 다르도

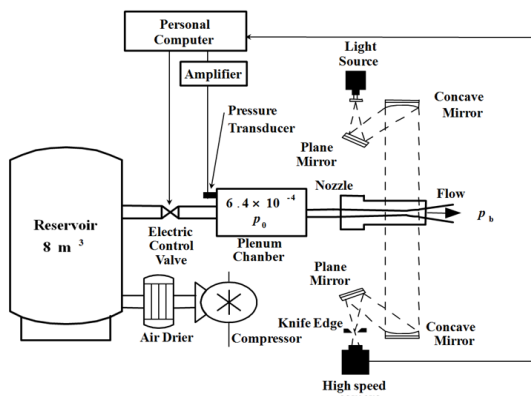


Fig.1 Experimental Apparatus

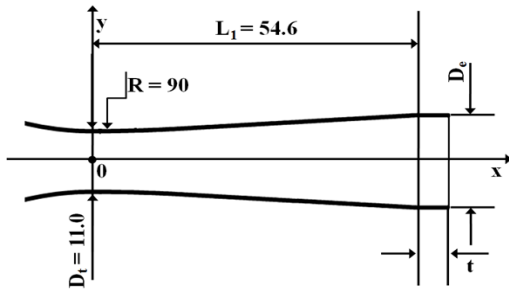


Fig. 2 Nozzle Geometry

Table 1. Nozzle Configurations

	$L_1$ (mm)	$t$ (mm)	$D_e/D_t$	$M_e$
Noz A	54.6	0	1.3	1.64
Noz B	54.6	0	1.5	1.85
Noz C	54.6	0	1.8	2.06
Noz D	54.6	5	1.8	2.06
Noz E	54.6	0	1.8	2.06
Noz F	53.6	0	1.8	2.06

록 제작하였다. 그리고 모든 노즐의 폭은 10 mm로 동일하게 설계 하였다.

위에서 기술한 초음속 노즐에서 발생하는 이력유동은 노즐 벽면에 설치한 다수의 정압공으로부터 순간압력을 측정하여 해석하였으며[1], 또 유동장을 정성적으로 조사하기 위하여 Nano-Spark광원을 장착한 쉐리렌 가시화기법을 이용하였다. 이 쉐리렌 장치는 정체실 상류의 전자제어 밸브로부터 전기적인 신호와 동기화되어 있어, 유동장을 순간적으로 가시화할 수 있다. 본 연구 논문에서는 가시화 결과만 기술하였다. 또 적용된 정체실의 압력 시간 변화를 정량화하기 위하여, 노즐 상류의 정체실 압력을  $P_o$ , 그리고 노즐 하류의 배압인 대기압을  $P_b$ 로 하여, 이들의 비를 노즐 압력비  $NPR=P_o/P_b$ 로 정의하였다. 그리고 전자제어 밸브의 개폐시간을 조절하여, NPR의 시간변화  $\dot{\phi}$  즉

$$\dot{\phi} = \frac{NPR_f - NPR_i}{\Delta t} \quad (1)$$

으로 정의하였다. 위의 식에서 하첨자 f와 i는 각각 압력변화의 최종상태와 최초상태를 의미하며, 분모의  $\Delta t$ 는 압력변화의 시간 간격을 의미한다 [1].

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 설계마하수( $M_e$ )의 영향

노즐 벽면에서 발생하는 충격파와 경계층의

비선형 간섭현상으로 발생하는 이력현상은 노즐의 팽창비와 관련 있는데, 각 노즐은 상류 정체실의 압력 시간변화를 거의 동일하게 설정하여 설계마하수에 따른 이력현상을 조사하였다.

Figure 3에는 Noz A를 사용한 경우에 초음속 노즐 내부에서 발생하는 고속 유동장의 가시화 사진을 나타내었다. 그림의 결과들은 정체실 상류의 전자제어 밸브를 서서히 개방하여, NPR을 1.7에서부터 증가시켜 2.2까지 설정한 후, 밸브를 서서히 닫아 NPR을 다시 원래의 값 즉 1.7로 감소시킨 일련의 압력비 시간변화 과정에서 얻어진 것이다. 압력비가 증가함에 따라 노즐 목에서 발생하는 충격파의 위치가 하류로 이동하게 되며, 이와 더불어 충격파의 형태도 변화하게 된다. 이것은 노즐 벽면에서 발생하는 난류경계층과 충격파의 간섭현상[6]에 기인한 것으로, 충격파가 노즐 상류에 위치할 때는 수직형의 형태에서 하류로 이동함에 따라 경사충격파의 형태로 변화하며 충격파 하류에 또 다른 충격파가 발생하게 된다. NPR이 2.2인 경우, 선두 충격파는 노즐의 하류단 바로 상류에 위치하며, 충격파를 수반하는 초음속 제트류가 대기로 방출하는 것을 관찰할 수 있다.

한편 NPR이 2.2에서 1.7로 다시 감소하는 과정에서 측정된 유동장은, 충격파의 위치나 형태 등으로부터 관찰할 때, NPR의 증가과정에서 얻어진 것과 다소 다르다는 것을 알 수 있다. 이러한 이력현상은 후술하는 바와 같이 본 연구의 다른 형태의 노즐에서도 발생하였다.

Figure 4, 5는 Noz B, C를 사용하여 가시화한 유동장의 사진이다. 이때 Noz B는 1.72에서 3.2

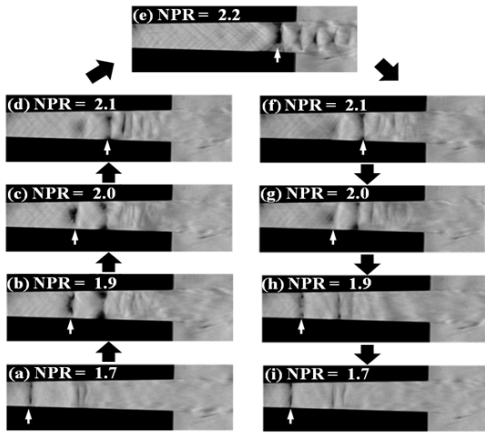


Fig. 3 Schlieren Photographs (Noz A,  $\dot{\phi} = 0.113(1/s)$ )

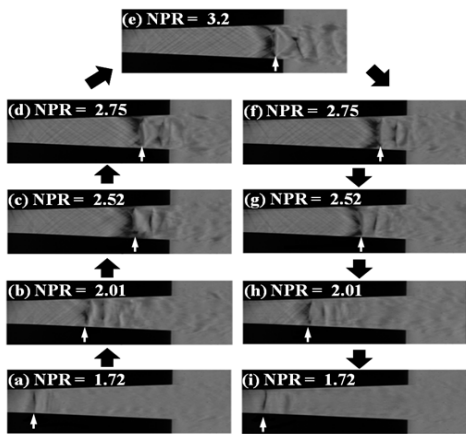


Fig. 4 Schlieren Photographs (Noz B,  $\dot{\phi} = 0.114(1/s)$ )

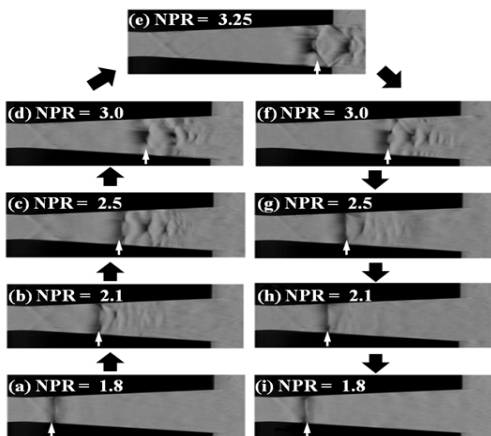


Fig. 5 Schlieren Photographs (Noz C,  $\dot{\phi} = 0.113(1/s)$ )

까지, 그리고 Noz C는 1.8에서 3.25까지의 범위에서 NPR을 변화 시켰다. 두 노즐의 내부 유동은 Noz A와 유사하게 나타나며, NPR의 증가과정과 감소과정에서 발생하는 이력현상 즉, NPR의 증가과정의 충격파와 감소 과정에서 발생하는 충격파의 위치나 형태가 동일한 NPR에서 상이하게 나타났고, 이때 발생하는 충격파는 설계 마하수가 2.06인 Noz C에서 강하게 발생하였다.

설계마하수가 다른 각 노즐에 대한 결과들을 정량적으로 정리하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림의 횡축은 노즐의 NPR을 그리고 종축은 노즐 목으로부터 선두충격파까지의 거리  $L$ 을 노즐 목의 높이  $D_t$ 로 무차원화 하여 설계마하수에 따른 세 형태의 노즐에서 발생하는 유동 이력을 비교하였다. Noz A는 설계 마하수는 1.64로 작지만 NPR 범위가 1.7에서 2.2까지 다른 노즐에 비해 크지 않아 비교적 뚜렷한 이력현상이 발생하였다. NPR 2.0과 2.1에서 증가와 감소하는 과정 사이에 0.5정도의 충격파 위치의 차이가 발생하였다. 그리고 Noz B와 Noz C의 결과를 비교하면 비슷한 NPR범위에서 결과를 측정하였지만 설계 마하수가 1.86과 2.06으로 다르게 설정하여 나타나는 이력현상은 상이하다. Noz B는 NPR 2.52에서 0.2정도의 충격파 위치 차이가 발생하였고, Noz C는 NPR 2.5에서 0.8정도의 충격파 위치 차이가 발생하였다.

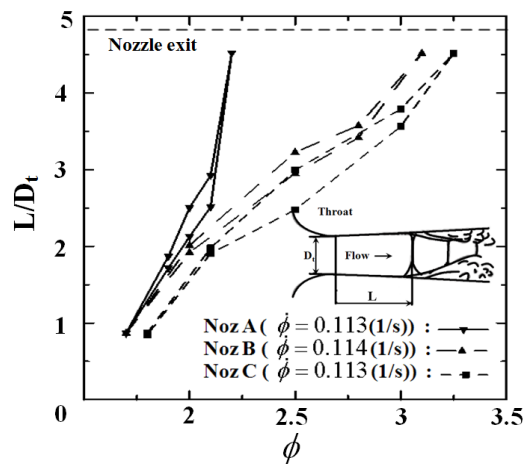


Fig. 6 Comparison of Hysteresis Diagrams for Shock Wave Positions (Noz A, Noz B, Noz C)

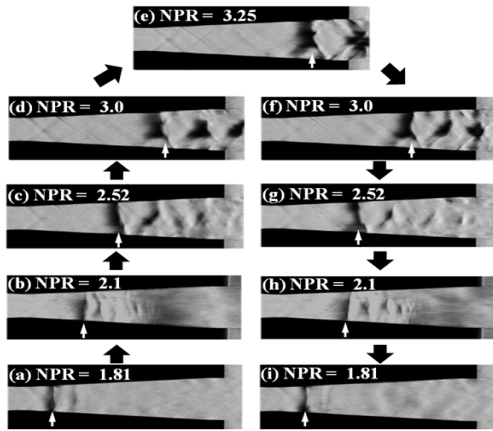


Fig. 7 Shlieren Photographs (Noz D,  $\phi = 0.114(1/s)$ )

### 3.2 노즐의 형상 영향

#### 3.2.1 노즐 출구두께(t)의 변화

Figure 7은 Noz D의 가시화 결과이다. Noz D는 노즐 출구두께를 5mm로 제작하여, Noz C의 결과와 비교하였다. 이때 두 노즐의 설계마하수 및 노즐의 길이는 동일하게 제작하여, 노즐 출구의 두께가 유동 이력현상에 미치는 영향을 조사하였다. NPR은 1.81에서 3.25까지 변화 시켰다. Noz D 역시 위의 결과와 같은 유동장이 형성되었다. 그리고 각각의 노즐에서 NPR의 증가와 감소과정에서의 동일한 NPR에서 나타나는 충격파의 위치는 노즐 출구두께의 영향에 의해 다소 다르다. 이력현상은 난류경계층과 충격파의 간섭현상에 의하여 주로 발생하게 된다. 이때, 노즐 출구 두께는 난류전단층의 발달과 불안정성에 영향을 미치게 되며, 이러한 유동 특성이 경계층 내부의 아음속 부분을 통하여 상류로 전파하여 다시 간섭현상에 영향을 미치게 된다. 이러한 결과를 Fig. 8에 그래프로 정리하였다. 그림의 횡축은 NPR이며, 종축은  $L/D_t$ 로 나타내어 비교하였다. Noz C와 Noz D는 유사한 이력현상이 나타난다. 하지만 NPR 3.0에서는 다소 상이하다는 것을 알 수 있다. Noz C는 0.3정도의 충격파 위치의 차이가 발생한 반면, Noz D는 NPR의 증가 과정과 감소과정에서 발생한 충격파의 위치가 거의 동일하게 나타났다. 이는 노즐 출구의 두께가 유동 이력현상을 줄이는데 영향

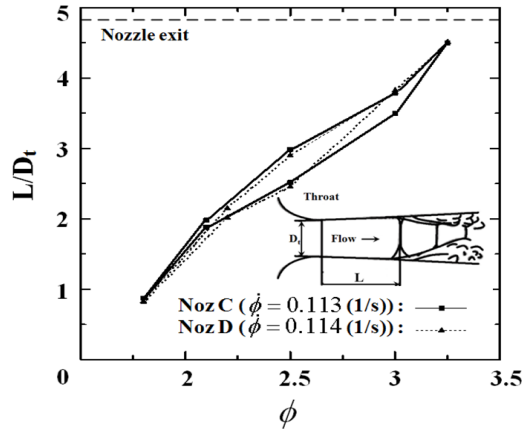


Fig. 8 Comparison of Hysteresis Diagrams for Shock Wave Positions (Noz C, Noz D)

을 미친다는 것을 알 수 있다.

#### 3.2.2 노즐 길이( $L_t$ )의 변화

Noz E와 Noz F는 노즐의 설계마하수는 동일하지만, 길이를 Noz E는 54.6 mm로 하고 Noz F는 53.6 mm로 제작하여 실험을 하였다.

Figure 9, 10은 Noz E, F를 가시화한 결과이다. 두 노즐의 NPR은 1.8에서 3.25까지 동일하게 변화 시켰으며, 노즐 내부 유동장은 유사한 결과가 나타났다. 두 노즐 내부에 발생하는 첫 번째 충격파의 위치를 정량적으로 정리하여 Fig. 11에 나타내었다.

그림의 횡축은 NPR을 나타내고, 종축은  $L/D_t$ 이며, 두 노즐에서 발생하는 유동 이력을 비교하였다. Noz E와 Noz F 두 노즐의 이력현상은 유사하게 나타났는데, 이러한 결과는 실험에서 변화시킨 노즐의 길이가 1 mm로 변화가 크지 않았기 때문이라고 판단된다. 향후 노즐 길이를 다양하게 변화시켜 노즐 길이가 이력현상에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 초음속 노즐 내부에서 발생하는 유동 이력현상을 실험적으로 조사하기 위하여, 몇 가지 형태의 초음속 노즐을 설계 제작하

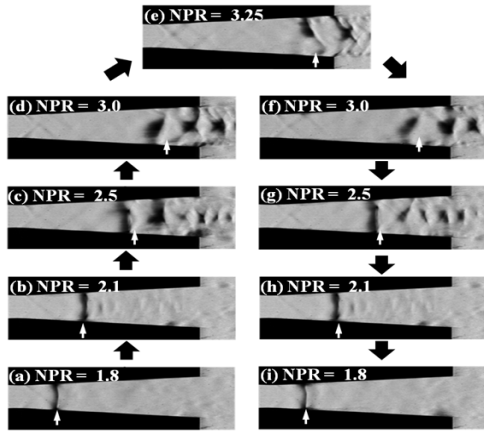


Fig. 9 Schlieren Photographs (Noz E,  $\phi = 0.112$  (1/s))

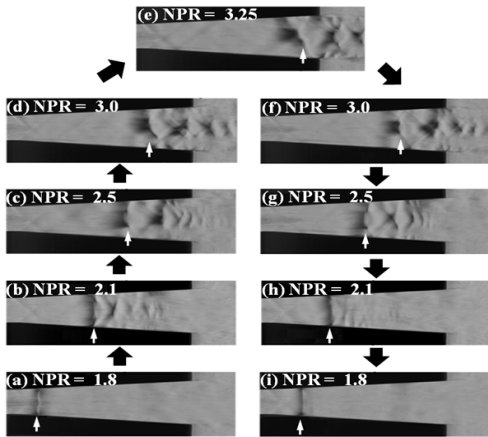


Fig. 10 Shlieren Photographs (Noz F,  $\phi = 0.114$ (1/s))

여, 노즐 내부에서 발생하는 초음속 유동을 가시화하여, 이력유동의 특성을 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 초음속 노즐에서 발생하는 고속 유동장은 NPR의 증가하는 과정과 감소하는 과정에 측정된 충격파의 위치나 형태가 다르다.
- (2) 비슷한 NPR 범위에서 각 노즐의 팽창비를 바꾸어 설계 마하수를 다르게 하면 이력현상은 상이하게 나타난다.
- (3) 노즐 출구 두께는 난류전단층의 발달과 불안정성에 영향을 미쳐 유동이력 현상의 발생을 줄여준다. 그리고 다양한 노즐 길이에 대한 연구가 필요하다.

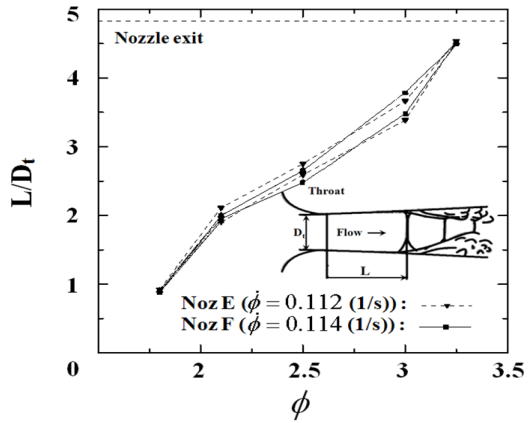


Fig. 11 Comparison of Hysteresis Diagrams for Shock Wave Positions (Noz E, Noz F)

### 참고 문헌

1. Matsuo S., Setoguchi T., Shiomi N., and Kim H. D., "Hysteretic Phenomena of Shock Waves with Asymmetric Characteristics in a Supersonic Nozzle," 11th Asian Symposium on Visualization, Niigata, Japan, ASV11-12-06, 2011
2. Yasunobu T., Matsuoka K., Kashimura H., Matsuo S., and Setoguchi T., "Numerical Study for Hysteresis Phenomena of Shock Wave Reflection in Overexpanded Axisymmetric Supersonic Jet," Journal of Thermal Science, Vol. 15, No. 3, 2006, pp.220-225
3. Welsh, F. P., "Electron Beam Fluorescence Measurements of Shock Reflection Hysteresis in an Under-Expanded Supersonic Jet," Proceedings of the 21st International Symposium on Shock Waves, Vol. 2, Panther Publishing, Fyshwick, Australia, 1997, pp.863-868
4. Kim H. D., Kang M. S., Otobe Y., and Setoguchi T., "The Effect of Nonequilibrium Condensation on Hysteresis Phenomenon of Under-Expanded Jets," Journal of

- 
- Thermal Science and Technology, Vol. 23, No. 3, 2009, pp.856-867
5. Irie T., Kashimura H. and Setoguchi T., "Hysteresis Phenomena of Mach Disk in an Underexpanded Jet," Bulletin of JSME, Vol. 702, No. 71, 2005, pp.412-419
6. Hadjadj A., "Numerical Investigation of Shock-Reflection Phenomena in Overexpanded Supersonic Jet," AIAA Journal, Vol. 42, No. 3, 2004, pp.570-577