

스테레오 PIV를 이용한 워터젯 흡입덕트 내부의 난류유동측정

권성훈* · 윤상열* · 전호환** · 김경천†
(2004년 2월 3일 접수, 2004년 3월 23일 심사완료)

Stereoscopic PIV Measurements on Turbulent Flows in a Waterjet Intake Duct

Seong Hun Kwon, Sang Youl Yoon, Ho Hwan Chun and Kyung Chun Kim

Key Words: Waterjet(물분사추진장치), Stereoscopic PIV(스테레오 입자영상유속계)

Abstract

Stereoscopic PIV measurements were made in the wind tunnel with the actual size waterjet model. The main wind tunnel provides the vehicle velocity while the secondary wind tunnel adjusts the jet issuing velocity. Experiments were performed at the range of jet to vehicle velocity ratio (JVR), 3.75 to 8.0 and the Reynolds number of 220,000 based on the jet velocity and the hydraulic diameter of the waterjet intake duct. Wall pressure distributions were measured for various JVRs. Three dimensional velocity fields were obtained at the inlet and outlet of the intake duct. It is found that severe acceleration is occurred at the lip region while deceleration is noticeable at the ramp side. The detailed three dimensional velocity fields can be used as the accurate velocity input for the CFD simulation. It is interesting to note that there are many different types of vortices in the instantaneous velocity field. It can be considered that those vortices are generated by the corner of rectangular section of the intake and Gortler vortices due to the curved wall. However, typical secondary flow with a pair of counter rotating vortex pair is clearly seen in the ensemble averaged velocity field.

기호설명

U, V, W : x, y, z 방향의 평균속도 성분
u, v, w : x, y, z 방향의 순간속도 성분
u', v', w' : x, y, z 방향의 속도섭동 성분
L : 모델 입구 길이, 540.02mm
R : 모델 출구 반경, 68mm

$$U^* = \frac{u}{U_\infty} \quad (U_\infty = 4 \text{ m/s})$$

$$\text{Turbulent Kinetic Energy} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

1. 서론

물분사 추진장치(waterjet)는 입구면과 출구면을 통과하는 유동의 모멘텀 차이에 의해 추진력을 발생하는 장치이다. 이 추진장치는 임펠러가 선체 내부에 위치하고 흡입덕트를 통해 추진유체를 공급 받는다는 점에서 전통적인 프로펠러 추진장치와는 다르다. 이 흡입덕트의 역할은 정압을 증가시켜 캐비테이션을 피하도록 하는데 있다. 흡입덕

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2324 FAX : (051)515-7866

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 조선해양공학과

트는 필연적으로 약간의 확산을 갖는 굽은 형상을 가지고 있다. 굽은 덕트는 유체 흐름을 방해하는 2차 유동문제를 갖는다.^(3,4) 이러한 물분사 추진장치는 저속에서 큰 추력이 필요로 하는 궤도차량용 보다는 고속의 선박용으로 개발되어져 왔다. 이에 따라 수륙양용의 궤도차량과 같이 저속의 경우에도 적용할 수 있도록 물분사 추진장치의 개선이 필요하다.

2차 유동은 흡입된 균일 유동을 불균일한 유동으로 변질시키며 원심력에 의한 속도증가로 ramp 부분에서 속도가 최대가 된다. 그러나 실선의 계측이나 풍동시험 결과에 의하면 오히려 lip부분에서 속도가 최대가 되는데, 이러한 관찰 결과로부터 흡입덕트 내부에는 일반적인 굽은 파이프와는 다른 축유동을 일으키는 유동현상이 있음을 알 수 있다. 그 차이는 선체 바닥면에서의 경계층에 의한 것으로 추정되며 경계층에서의 불균일한 속도는 lip에서는 고속으로 유입되고 ramp에서는 상대적으로 저속으로 유입됨에 따라 발생한다.^(5,6)

본 연구에서는 덕트 입구 및 덕트 내의 CFD 유동해석으로 확인된 캐비테이션의 발생여부 및 국부압력 집중점 등을 실제 유동실험을 통하여 확인하고자 한다. 이를 위해 흡입덕트의 입구 부분과 출구부분에서 속도장을 측정하여 물분사 추진장치의 최적 입구형상 도출을 위한 속도분포 계측시험을 수행한다. 또한 출구부분에서 발생하는 유동의 불균일성이나 2차유동의 발생현상을 정량적으로 관찰하기 위해 스테레오 PIV 기법을 적용하여, 순간유동장에 나타나는 와류분포와 난류강도 및 특징적인 비정상 비균일 유동 특성을 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 모델의 설계 및 제작

풍동실험을 위한 물분사 추진장치 모델은 전산 해석을 위한 그리드(grid)를 기초로 하여 제작되었다. Fig. 1은 모델제작 시 사용된 전산 그리드이며, 이를 CNC 코드로 전환하여 모델을 가공하였다. 본 실험의 전체적인 방향은 실험모델의 전체 크기를 실물과 거의 같게 하여 최대한으로 레이놀즈 상사를 이루고자 하였다. 실험에 사용된 모델은 (실물):(모델)의 비가 1:0.9에 맞추어 제작되어 실물실험을 위한 스케일로 제작되었다.

2.2 실험 풍동 제원

작동 유체가 물인 물분사 추진장치를 레이놀즈 상사하여 풍동에서 실험할 경우, 덕트 내의 유체 속도가 초음속에 달한다. 이때는 공기의 압축성에 의한 효과가 크게 나타나기 때문에 풍동실험에서 레이놀즈 상사는 의미가 없다. 선행 연구에 따르면 완전히 발달된 난류영역에서, 높은 레이놀즈 수일 때는 유체역학적인 현상이 거의 동일하게 나타나므로 본 실험에서는 운동학적(kinematic) 상사를 만족시키는 조건으로 실험을 수행하였다.

덕트 내의 유동 실험을 위한 풍동 시스템의 개략도는 Fig. 2와 같다. 궤도차량이 전진하는 속도 조건을 주기 위한 1차 풍동과 물분사 추진장치의 제트 속도 조건을 주기 위한 2차 풍동으로 구성되어 있다. 2차 풍동은 1차 풍동의 유체를 흡입하여 원하는 JVR을 줄 수 있도록 설계되었다. 이때, 1차 풍동의 유량에 비해 2차 풍동의 유량이 커지면, 대부분의 유체가 2차 풍동으로 흡입되므로, 수상에서 이동하는 차량의 흡입 조건과는 다르다. 따라서 1차풍동의 유량은 2차풍동에 비해 매우 큰 값을 가져야 한다.

1차 풍동은 흡입형으로서 모델이 장착되는 시험구간의 크기는 폭 2.1m×높이2.1m×길이20m 이고, 최대 풍속 23m/s일 때 풍동의 최대 유량은 5,040m³/min 이다. 시험구간의 측면에 모델이 설치되고, 차량 바닥의 효과를 주기 위해 풍동 내부의 덕트 입구면에 평판을 설치하였다.

2차 풍동의 입구면은 직경 20cm, 길이 5.6m 이고, 1차 풍동과의 간섭을 피하기 위해 10°로 기울어져 있다. 2차 풍동의 입구면에서 최대속도는 40m/s로 이때 유량은 75.4m³/min 이다.

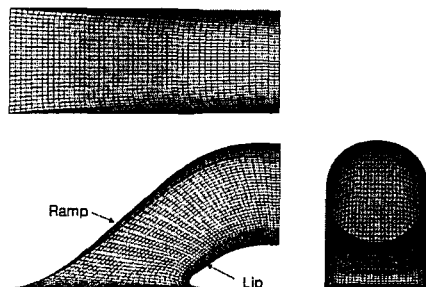


Fig. 1 Computation grid data for experimental model

2.3 속도측정장치

Fig. 3은 스테레오 PIV 장치의 개략도를 나타낸다. 본 실험에 사용된 PIV 시스템은 스테레오 PIV 시스템이며, Mini Nd-Yag 레이저와 2대의 CCD 카메라, 동기장치(synchronizer) 그리고 PowerView 소프트웨어(TSI)로 이루어져 있다. 후처리와 3차원 속도장을 추출하기 위해 본 연구실에서 독자적으로 개발한 후처리용 소프트웨어(PIVACE)와 스테레오 PIV 전용 소프트웨어를 사용하였다. CCD 카메라는 2K× 2K 픽셀(pixel)의 고해상도와 12bit의 분해능(gray-resolution)을 가지고 있어 속도추출 시 정확도를 높일 수 있으며, 최소 200ns까지 Δt 를 조절할 수 있다. Mini Nd-Yag 레이저의 최대출력은 120mJ/pulse이며 532nm의 파장을 가진다. 렌즈는 50, 60mm Nikon 렌즈가 사용되었으며, 화상전체의 초점을 맞추기 위해 렌즈 기울임(tilting)이 이루어졌다.

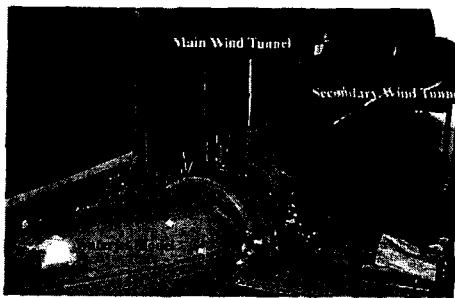


Fig. 2 Wind tunnels and model

측정영역은 모델형상이 상하대칭이므로 아래쪽을 4부분으로 나누어 측정하였다. 또한 속도보정용 타겟을 위치시키기 위해 레이저 평면을 입구면으로부터 13mm 이격시켜 실험을 하였다. 이 때의 레이저 평면의 두께는 2mm로서 측정에 적합한 크기이다.

스테레오 PIV의 측정한계로 인하여 측정 영역의 크기는 200mm×200 mm이고, 속도측정을 위한 두 이미지간의 시간 간격인 Δt 는 속도가 빠른 입구하류 부분에서 150 μ s로 하였고, 느린 입구상류 부분에서는 110 μ s로 하여 속도장 추출시 생길 수 있는 오차를 최소화하였다. 속도추출 시 사용된 two-frame cross correlation을 위한 조사 구간(interrogation window)의 크기를 48×48 픽셀 (50% 화상중복)로 하여 3차원 속도벡터를 구하였다.

2.4 실험조건

스테레오 PIV계측은 흡입덕트 입구영역과 출구영역에서 조건을 달리하여 수행되었다. 입구 영역에서는 차량 실제 속도와 가장 유사하게 수행되었으며 이때의 1차 풍동의 유속은 약 4m/s, 2차 풍동의 제트유속은 32m/s로 유지되었다 (JVR= 8).

출구영역에서는 제트의 유속에 비해 2차 유동의 속도가 작기 때문에 보다 정확한 측정을 위해 속도비가 낮은 JVR=3.75에서 측정하였다. 즉, 1차 풍동의 속도가 4m/s 일 때 2차 풍동의 속도를 15m/s로 설정하여 실험을 실시하였다.

3. 3차원 속도 측정 영역 및 결과

Fig. 4는 입구부분에 대한 속도벡터와 W방향 속도성분의 컨투어(contour)를 보여주며 500회의 순간속도장을 평균한 결과이다. 여기서 U는 1차 풍동내의 유동방향(streamwise), V는 수직방향(spanwise), W는 깊이방향(crosswise)의 속도성분을 각각 나타낸다. 모델의 상하 모서리지점에서 최대 약 0.9U ∞ 정도로 유입이 상당히 크게 이루어짐을 확인할 수 있다. 물분사 추진장치 내부로의 유입되는 속도성분인 W 컨투어를 통해 lip에 가까운 쪽의 값이 ramp 부근에 비해 두 배정도 큼을 확인할 수 있다. 이는 lip과 ramp의 형상 차이에 의한 것으로 상대적으로 완만한 ramp에서 W 속도성분이 작게 나오는 것이라 판단된다.

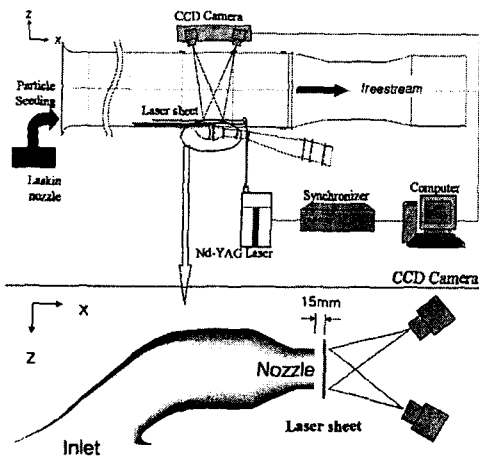


Fig. 3 Schematic of the experimental set-up for stereo - PIV measurement

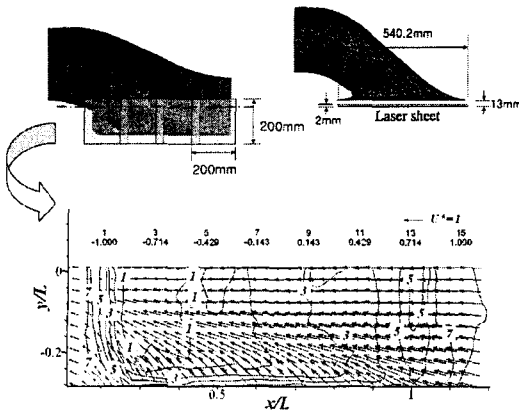


Fig. 4 The model and vectors at x-y plane of intake

Fig. 5는 흡입덕트 노즐의 출구 영역에 대한 순간 속도장을 나타내는데, z/R 값이 -1인 부분이 ramp이고 1인 부분이 Lip이다. 전체적으로 복잡한 거동을 보이고 있으며, 하나의 순간 속도장 내에 다수의 와(vortex)가 관찰되고 있다. 전체적인 순간유동장의 경향으로 보아 주요하게는 lip 근처와 ramp 근처에서 발생했을 것으로 추정되는 두 개의 반전와류쌍(counter-rotating vortex pair)들이 확인되고 있다. 우선 lip에서 곡률에 의한 2차 유동의 발생으로 인한 와(vortex)의 쌍이 확인되고 있으며 이는 곡관의 단면내에서 압력분포의 차이에 의해 발생한 것이다. 즉 lip에서의 압력이 ramp에서의 압력보다 높기 때문에 앞서의 압력 측정결과에서 예상되는 현상이다. 그리고 ramp 쪽에서 발생된 와의 쌍은 일반적으로 오목한 벽면에서 경계층이 생성됨에 따라 발생하는 Gortler 와동(vortices)일 것으로 판단된다. 이러한 와들은 2차 유동의 불안정성(secondary instability)을 유발해 또 다른 2차 와들을 생성시켜 복잡한 유동 구조를 형성시키는 것을 순간유동장을 통해 확인할 수 있다. 또한 모델의 형상을 고려할 때 사각형 입구로부터 원형 출구로 바뀌면서 모서리로부터 발생한 와가 있을 것으로 판단된다. 그리고 곡관을 지나 얼마되지 않은 영역이기 때문에 충분히 발달되지 못해 이러한 2차 유동이 전체 제트에 걸쳐 형성되어 있지 못하고 있음을 알 수 있다. 또한 순간 속도장들을 통해 상하좌우 그리고 유동방향으로 복잡한 진동을 하고 있음을 확인할 수 있으며 이는 각 와들을 유발하는 불안정성

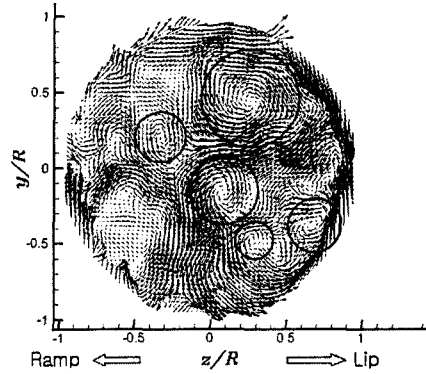


Fig. 5 Instantaneous velocity vectors of outlet

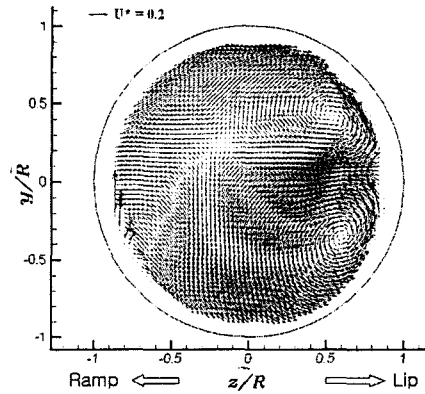


Fig. 6 Mean velocity vectors of outlet

(instability)의 혼합도 한 원인일 것이라 판단된다. 순간속도장을 시간평균(ensemble average)한 결과를 나타낸 Fig. 6에서는 lip 쪽의 2차 유동에 의한 와의 쌍이 나타나고 있으며, 더불어 ramp 쪽의 대각선 방향의 유동들은 Gortler 와동의 흔적이라 판단된다. 이는 물분사 추진장치 출구유동의 주요한 구조를 말해주고 있다. 따라서 이러한 구조에 의한 운동량손실이 예상되며, 물분사 추진장치의 성능저하와도 관계된다고 판단된다. Fig. 6의 평균속도장은 1000장의 순간속도장을 (4.07m/s)로 무차원화하여 시간평균하고 y축과 z축은 출구반경($R=68\text{mm}$)으로 무차원화 한 것이다. 전체적으로 상하 비대칭적인 경향은 와의 진동에 비해 시간평균회수가 모자라기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 노즐 출구에서의 레이놀즈 응력을 $U_\infty = 4\text{ m/s}$ 으로 무차원화한 값이다. Fig. 7(a)를

보면 모델 내부 형상 테두리 쪽과 lip 쪽의 $u'v'$ 의 값이 크게 나타난다. 제트의 테두리쪽의 값은 이미지 왜곡에 의한 오차인 것으로 추정되며, lip 가까운 쪽에서 $u'v'$ 값은 x, y 방향으로의 난류구조가 강하게 나타남을 말해 주고 있다. 또한 Fig. 7(b)에서는 2차유동으로 보이는 와 구조가 lip 쪽으로 크게 나타나며 ramp 쪽에서도 아래위로 생성되었음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 7(c)에서는 $y/R=0$ 의 부근에서 난류값이 큼을 확인할 수 있다. 이것을 종합해보면 lip 쪽으로 난류에너지 교환이 활발하게 이루어지고 있으며 $y/R=0$ 를 중심

으로 양분화 되어 발생함을 알 수 있다. 이는 평균속도장에서 확인된 와의 구조와 일치함을 알 수 있다. 하지만 1000장의 속도장 시간평균에도 불구하고 제트유동에 있어 난류해석의 값을 보여 주지는 데는 다소 모자람을 알 수 있다.

4. POD 해석 결과

POD(Proper Orthogonal Decomposition) 해석은 난류구조의 특징을 규명하기 위해 많은 연구자들이 시도해온 방법이다. POD기법에 의해 유동장

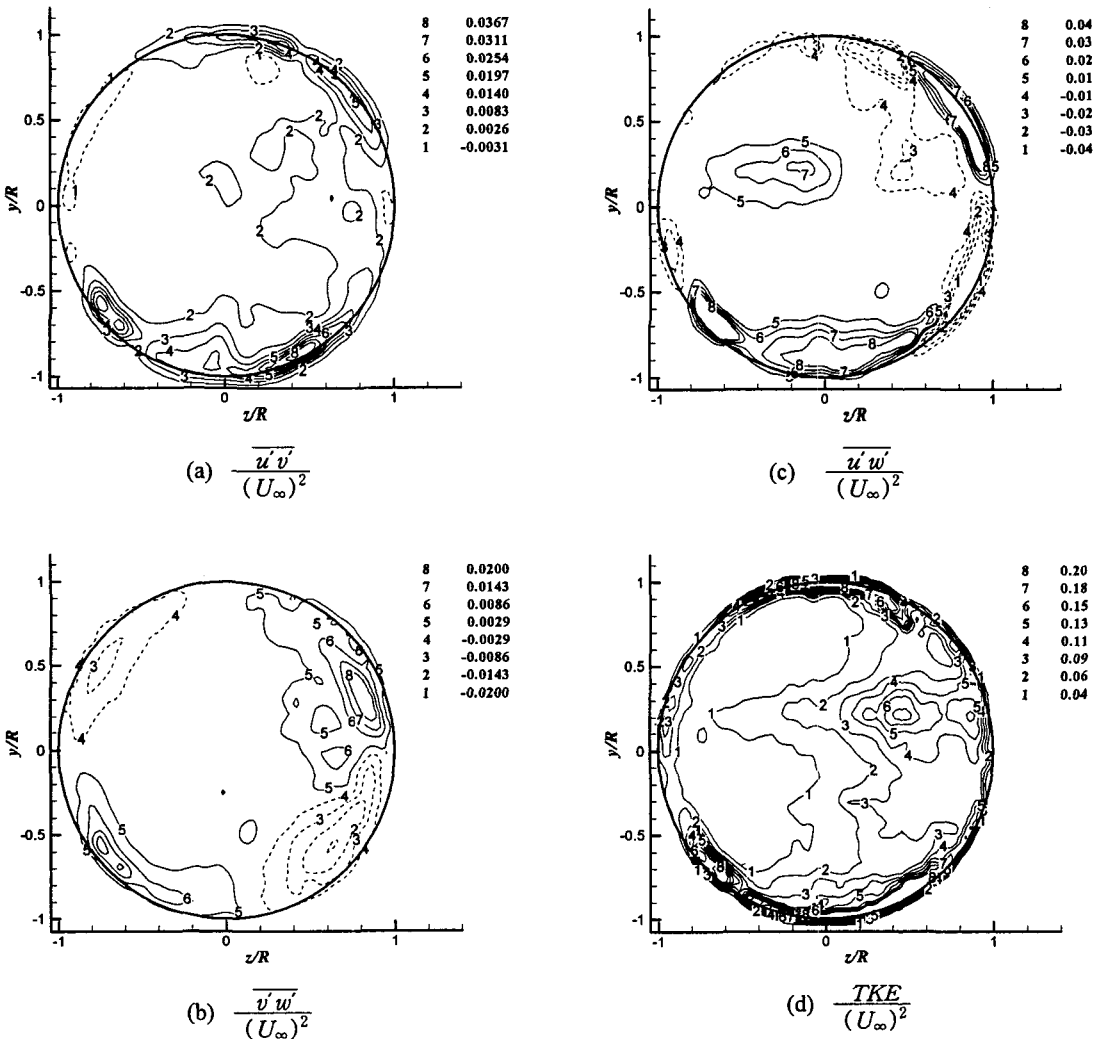


Fig. 7 Contour of Reynolds stresses and turbulent kinetic energy

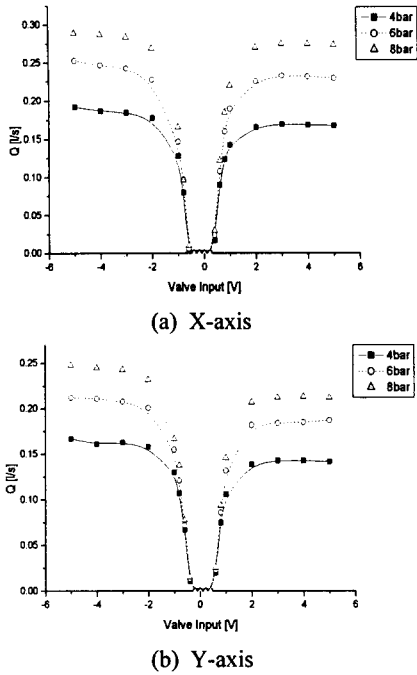


Fig. 3 Flow characteristics of proportional directional control valve

Fig. 4의 회로로부터 발생되는 자려진동 출력파형의 진폭 V_a 와 주파수 ω_s 를 이용하여 고유진동수와 감쇠비를 구하였다.⁽⁴⁾

$$\frac{y(s)}{V_i(s)} = \frac{K_o \omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_s}{\xi} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{RK_o K_d e_a}{2V_a \omega_n} \quad (3)$$

여기에서 ξ 은 자려진동파형의 주파수와 안정한계점에서의 주파수의 비, 즉 $\xi = \omega_s / \omega_c$ 로 이며, R 은 자려진동파형의 진폭전압과 안정한계점에서의 편차전압의 비, 즉 $R = V_a / e_c$ 이다. K_o 는 밸브입력전압에 따른 실린더 변위차이다. K_d 는 LVDT 이득이며 본 논문에서는 1이다. 이때, 공압 X-Y플로터 파형의 진폭의 변화량이 5% 이내

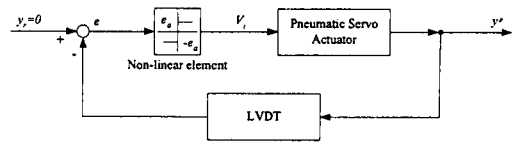


Fig. 4 Self-excited oscillation system of pneumatic servo cylinder system

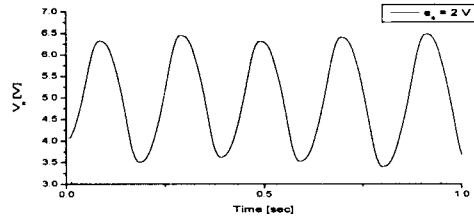
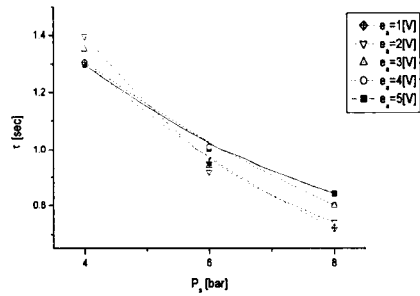
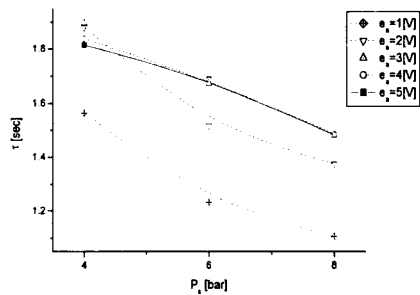


Fig. 5 Typical self-excited oscillation wave



(a) Equivalent time constant of X-axis



(b) Equivalent time constant of Y-axis

Fig. 6 Identified parameters by self-excited oscillation method

로 수렴하는 지점을 안정한계점으로 설정하였다. 감쇠비가 0.9보다 크면, 위의 식 (1)은 등가시상수 τ 를 사용한 간략화된 전달함수식 (4)로 표현가능하다. Fig. 4에 도시된 자려진동방법을 이용하여 구한 출력파형이 Fig. 5에 도시되어 있다.

이 우세함을 알 수 있다. 전반적으로 lip 쪽에 와가 많이 분포하고 있으나, 반전와류쌍의 축이 변하고 있음을 알 수 있다. 즉 일종의 진동유동현상으로 파악된다. Fig. 8(c)는 mode01부터 mode10까지를 합한 것이고, Fig. 8(d)은 모드 전체를 합하여 경향을 확인해 본 것인데, 순간 유동장과 비교했을 때 유사함을 알 수 있다. 10번째까지의 모드 합은 와가 ramp 쪽으로도 퍼져 있음을 알 수 있다. 즉 lip쪽에 강한 와가 존재하고 있지만 전반적으로 많은 양의 와가 전면에 퍼져 있음을 말해준다.

Fig. 5와 실험에서 획득된 다수의 순간 속도장들 중에서는 POD 해석결과와 비교해 볼 때 고차 모드와 유사한 구조가 많이 관찰되었다. 또한 전반적으로 반시계 방향으로의 와가 좀 더 많이 나타남을 알 수 있다.

5. 결론

형상이 크게 변화하는 영역 주변 즉 흡입구 부근과 수평으로 꺾이는 지점에서 큰 가감속 영역이 존재함을 출구 속도장을 통해 예측할 수 있었다. 즉 ramp에서 감속을 lip에서는 가속을 초래하고 있으며, 이는 물분사 추진장치의 특성상 피할 수 없는 현상이다. 그러나 본 연구의 목적 중 하나인 노즐 출구에서의 균일한 속도분포를 얻기 위한 덕트의 최적형상의 도출은 가능하리라 판단된다.

2차원적인 유동에서 예상되어지는 현상을 확인하기 위한 3차원 속도측정실험에서는 흡입구 전면적에 대한 유동장을 확인하였고, 출구에서 2차 유동 현상을 분석해 낼 수 있었다. 이는 전산해석결과와 비교 시에 사용될 수 있어 전산해석의 경계조건, 비교/검증 자료의 기초가 된다.

또한 출구의 유동의 측정을 통해 압력과 속도의 상관관계와 2차 유동, Gortler 와동 등 유동구조를 확인하였고, 입구에서 제트 출구로의 곡관 지점 설계에 있어 제트의 운동량손실을 초래하는 원인에 대한 자료를 획득하고 나아가 형상최적화를 위한 설계에 있어서 기초를 마련하였다. 앞으로 곡관 부분에서 ramp와 lip에서의 압력차가 최소가 되도록하여 2차 유동을 최소화하는 형상설계가 이루어져야 함을 확인하였다. 물분사 추진장치의 형상으로 인해 발생되어진 출구 부분의

강한 난류 유동 현상은 제트 유동 연구에 많은 정보를 줄 수 있으리라 생각되어진다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Roberts, J. L., Walker, G. J. and Davis, M. R., 1997, "Flow Distribution at Waterjet Intakes," *Proc. FAST'97*, pp. 669~675.
- (2) Mununga, L. and Huntsman, I., 1999, "Waterjet Intake Flow Improvement Using Boundary Layer Blowing and Vortex Generators," *Transactions of IPENZ*, Vol. 26, No. 1/EMCh, pp. 1~6.
- (3) Hale, M. R. and Vorrie, D. H., 1964, "Hydro-Jet Propulsion Reduces Vibration," *Engineering*, 198:118~119.
- (4) Alexander, K., Coop, H. and Terwisga, T., 1994, "Waterjet-Hull Interaction: Recent Experimental Results," *SNAME Translations*, 102:87~105.
- (5) Hu, P. and Zangeneh, M., 1999, "Investigations of 3D Turbulent Flow Inside and Around a Water-jet Intake Duct Under Different Operating Conditions," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 121, pp. 396~404.
- (6) Lumley, J. L., 1967, "The Structure of Inhomogeneous Turbulent Flow," In A. M. Yaglom and V. I. Tatarski, editors *Atmospheric Turbulence and Wave Propagation*, pp. 166~178.
- (7) Sirovich, L., 1987, "Turbulence and The Dynamics of Coherent Structures PART I: Coherent Structures," *Quarterly of Applied Mathematics*, pp. 561~571.
- (8) Kim, K. C. and Yoon S. Y., 2000, "PIV Measurements of the Flow and Turbulent Characteristics of a Round Jet in Crossflow," *Journal of Visualization*, Vol. 3, No. 2, p. 179.