

## 수중초음속제트의 불안정성에 대한 실험적 고찰

정재권<sup>†</sup> · 이대훈\* · 차홍석\*\* · 박승오<sup>†</sup> · 권세진\*

### Experimental Observation of Instability of Supersonic Submerged Jets

Jaekwon Jung<sup>†</sup> · Dae Hoon Lee\* · Hong Seok Cha\*\* · Seung-O Park · Sejin Kwon<sup>†</sup>

#### ABSTRACT

An experimental investigation on the structure and dynamic behavior of two dimensional over-expanded air jets exiting into water was carried out. The high speed digital video imaging and static pressure distribution measurement were made to characterize the structure and time-dependant behavior of the jets. Mach number at the jet exit was 2.0 and was slightly less than the value predicted by the ideal nozzle calculation. Variance of jet spreading angle at different stagnation condition was measured as a function of mass flow rate. Periodic nature of the air jet distortion in water was observed and the frequency of the repetition was approximately 5-6 Hz for all cases tested. Three characteristic length scales were defined to characterize jet structure.  $L_1$ , maximum width of the plume when the periodic instability occurs,  $L_2$ , width of the jet where secondary reverse flow entrained jet flow and  $L_3$ , distance from the jet exit to the location where entrainment of the secondary reverse flow occurs. The ratio of  $L_1$  and  $L_2$  decreased with increasing stagnation pressure, i.e. mass flow rate.  $L_3$  increased with increasing stagnation pressure. The temporal behavior of static pressure measurements also showed peak around frequency of 5, which corresponds the frequency obtained by visual measurements

#### 초 록

2차원 수중 초음속 제트의 구조 및 유동 불안정성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 제트의 구조 및 시간에 따른 변화를 관찰하기 위하여 고속 디지털 카메라 촬영과 정압을 측정하였다. 공기 유량의 변화에 따른 제트의 구조를 초고속 촬영하여 이로부터 얻어진 장면에서 확산각을 구했다. 일련의 제트의 주기적인 특성에 따른 구조를 관찰하였고 불안정성의 초당 주기 발생 횟수가 5-6회 정도로 측정되었다. 세 가지 특성 길이  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  를 정의하였다.  $L_1$  은 불안정적 주기가 발생할 경우 최대제트의 폭 스케일,  $L_2$  는 2차적인 유동이 유입되는 곳의 제트의 폭 스케일,  $L_3$  는 노즐 출구로부터 2차적으로 유도된 유동이 유입되는 곳까지의 길이이다.  $L_1/L_2$  는 전압 즉, 탱크 압력이 증가함에 따라 감소하는 경향성을 가지고 있고  $L_3$  는 전압이 증가함에 따라 증가하는 경향성을 띄었다. 시간에 따른 정압 변화를 측정하였으며 FFT결과를 통해서 불안정성으로 인해 발생하는 주파수와 유사한 값인 5Hz에서 고유진동이 발생하는 것을 확인하였다.

- 2002년 5월 2일 접수 ~ 2002년 6월 24일 심사완료
- † 학생회원, 한국과학기술원(Korea Advanced Institute of Science and Technology)
- \* 주연락저자 E-mail=eternal@kaist.ac.kr 대전 유성구 구성동 373-1
- \*\* 정회원, 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

## 1. 서 론

액상 환경내로 유입되는 초음속 가스 제트에 대한 연구는 1980년대 이래 활발해지기 시작했다. 액상환경으로 유입되는 초음속 가스 제트는 액체 금속을 연료로 사용하는 로켓 추진제에 산화제를 주입하는 인젝터 시스템, 접촉식 응축시스템, 가스 용해 시스템, 저장 화학 에너지 추진 시스템(SCEPS), 수중에서 발사하는 미사일의 노즐 등에서 유사한 응용을 찾을 수 있다. 그 밖에 2상(two phase) 혼합을 위한 화학 공정의 반응조(reactor)에도 널리 응용되고 있다. 액상 환경으로 분사되는 가스 제트의 경우는 두 가지 상 사이에서 일어나는 운동량의 교환, 큰 밀도차가 있는 경계면의 발달과 경계면의 불안정성, 두 가지 매질의 밀도차에 기인한 부력 효과 및 섞임 현상, 난류 유동장의 형성과 같은 복잡한 유동장이 형성되므로 이론적인 고찰이 용이하지 않고 광학 측정과 같은 실험적인 접근도 용이하지 않다. 그리고 이러한 복잡한 2상 제트의 구조에 대한 고찰에 있어서도 서로 상반된 의견들이 제시되고 있으며, 현상에 대한 확실한 물리적인 설명이 이루어지지 않은 상태이다. 2상 제트의 대표적이고 특징적인 현상의 하나인 복잡한 운동량 교환에 기인한 제트의 불안정성에 대한 연구도 수행되었다.

Ogden과 Parnell(1992)은 여러 가지 다른 형태의 노즐과 Fanno tube를 이용해 액체에서 형성되는 공기 초음속 제트의 특성을 관찰하기 위해서 초고속 카메라 촬영사진을 통해 확산율(spreading rate)을 측정하였고 여러 가지 형태의 노즐에서 형성된 확산율을 비교 분석하였다. 그리고 제트의 불안정성(instability)의 주기적 발생 빈도수 측정과 함께 제트를 좀 더 안정화시키는 간단한 기술을 제안하였다.

Wilson과 Gutmark(1992)는 노즐 단면의 모양이 원형, 타원형 및 사각형 모양인 것을 이용하여 실험하였고 단면의 종류에 따라 생성되는 제트의 확산율을 고속 카메라 사진 촬영을 이용하여 측정하였으며 예열된 공기로 음속 및 초음

속 제트를 수중으로 분사하여 온도분포를 측정하였다. 이러한 온도 분포 측정 결과를 이용하여 노즐단면 모양에 따른 제트와 주위 유동과의 섞임 현상에 대해 관찰하였다. 또 전도도 계측기를 이용하여 혼합 분율(mixing fraction)을 측정함으로써 제트의 섞임 과정과 섞임 과정에서 생기는 스케일 변화를 관찰하였으며, 노즐 출구에서 공기와 물의 경계면의 주기적인 변화를 관찰했다. 그리고 이러한 주기적인 변화가 경계면에서의 큰 전단 응력(shear stress)로 인해 생성된 vortices의 roll-up 현상에 기인한다고 기술하였다.

Loth(1989)는 공기가 공기 중으로 분사될 때와 수중으로 분사될 때의 차이점을 분석하기 위해 수중 제트를 가시화하고, 정압(static pressure) 분포를 측정하여 차이점을 관찰하였으며 액체의 유입현상 관찰을 위한 평균 및 변동(fluctuation) 속도를 구하였다. 또, 2차적인 충격파(secondary shock wave) 구조를 가시화를 통하여 관찰하였으며, 이러한 결과를 토대로 분사되는 제트의 유량의 변화에 따른 충격파 조직의 변화를 관찰하였다. 감마 광선 흡수 장치를 이용해 보이드율(void fraction)을 측정하였으며 이러한 결과를 토대로 두 가지 경우에 대한 차이점을 분석하였다. 2상 제트의 관찰 결과에서 제트의 유량이 증가할수록 유동의 고란 주파수와 강도가 감소하고 보이드율 측정 결과로부터 2상 제트의 폭이 단상 제트의 폭에 비해 커지는 결론을 얻었으며, LHF(locally-homogeneous flow) 개념을 도입한 수치적 해석을 통해 유동 특성에 대한 예측을 가능하게 했다.

Surin(1983)은 배출 상황과, 기상과 액상이 상호 작용을 일으키는 지역에 대한 부분에 연구의 초점을 맞추었으며 고속 카메라를 이용하여 수중 분사되는 공기 제트의 구조 및 Reverse shock 현상을 관찰했으며, 이를 토대로 제트의 불안정성을 설명하기 위하여 제트의 영역을 몇 가지로 구분하였다.

본 연구에서는 수중으로 분사되는 과잉 팽창 초음속 제트의 불안정성 관측을 위하여, 제

트의 가시화와 압력 측정을 수행하였으며 측정된 데이터의 분석을 통하여 수중 제트의 거동을 파악하였다. 본 연구의 결과를 통해 수중제트의 실험적 연구방법에 대한 방법론을 확립할 수가 있었고 다른 상으로 전파하는 제트에서의 불안정성의 존재를 확인할 수가 있었다. 이러한 결과를 통해 수중 추진기관의 불안정성에 대한 연구들 다양한 응용이 가능할 것으로 기대된다.

### 2. 실험 장치

설계 마하수 2.2인 초음속 노즐을 제작하고 수중 환경을 모사할 수 있는 수조를 만들어 이를 결합하여 수중에서 초음속 제트가 형성 되도록 설계하였다. 노즐 목의 높이는 2mm, 폭은 2cm, 노즐 출구의 높이는 4mm 인 직사각형 모양의 단면이 되도록 설계하였다. 수조는 넓이 1m, 높이 2m, 폭 2cm 로 설계하였다. 이와 같이 수조의 폭을 넓이나 높이에 비해 작게 설계한 이유는 2차원적인 제트의 특성을 관찰하고 광학적 실험의 용이성을 위한 것이다. 수조의 전체적인 모양은 Fig. 1과 같다.

### 3. 실험 방법 및 결과

#### 3.1 노즐 출구 유동 가시화 (공기-공기)

Shadowgraph 를 이용하여 노즐 출구의 유동을 촬영한 결과는 Fig. 2 에서 볼 수 있다. 이 결과는 노즐을 수조에 장착하고 수조에는 물을 채우지 않은 채 대기 중으로 초음속 제트를 분사한 결과이다. Fig. 2 에서 아래쪽이 노즐 출구 부분이며 노즐 출구 쪽에 뚜렷한 경사 충격파를 관찰 할 수 있었다. Fig. 2 의 가장 왼쪽부터 압력 탱크의 내부의 압력(stagnation pressure)이 5.1기압, 4.6기압, 4.0기압, 3.0기압일 때의 결과이다. 노즐 출구에서 수직 충격파가 생길 조건인 2기압(탱크 압력)을 넘는 조건에서 공기가 분사되면 가시화 장면에서도 알 수 있듯이 노즐 출구 이후 부분까지 초음속 유동이 형성된다.

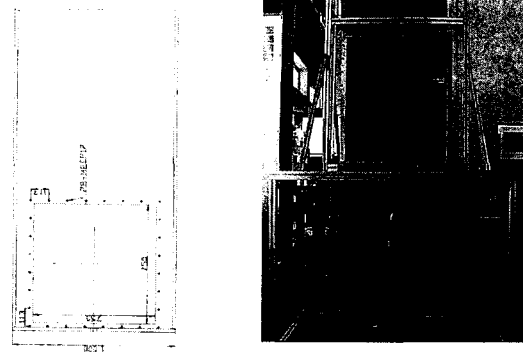
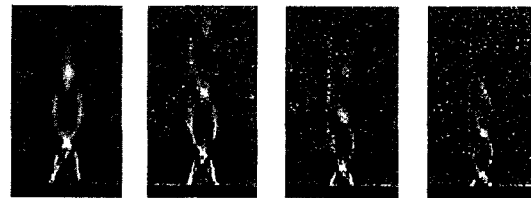


Fig. 1 Design and fabricated result of water tank



(a)5.1atm (2)4.6atm (3)4.0atm (4)3.0atm

Fig. 2 Visualization of nozzle exit at each total pressure condition

#### 3.2 수중 제트의 가시화 (공기-물) 및 확산률 측정

공기가 노즐을 통해서 수중으로 분사 될 때는 기포 발생 때문에 육안으로도 쉽게 제트와 물이 이루는 경계를 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 CCD 고속 카메라를 이용해 수조내에 형성된 공기 제트를 촬영하였다.

Fig. 3 은 공기 유량( $\dot{m}$ )의 변화에 따른 확산율(spreading rate)을 측정한 결과이다. 확산율의 측정은 촬영된 사진의 노즐 출구 부분에서 제트의 경계부분이 유동 흐름 방향과 이루는 각을 측정한 결과이다. 이러한 측정결과는 각각의 유량변화에 따라 얻은 여러 개의 측정값을 평균한 것이다. 확산율 측정 결과를 보면 공기의 유량이 0.025kg/s 이후인 구간에서는 공기의 유량이 증가함에 따라 확산율이 증가한다는 결과를 얻었다. 하지만 그 이전 구간에서는 불규칙적인 경향성을 띄게 된다. 이러한 현상이 생기는 원

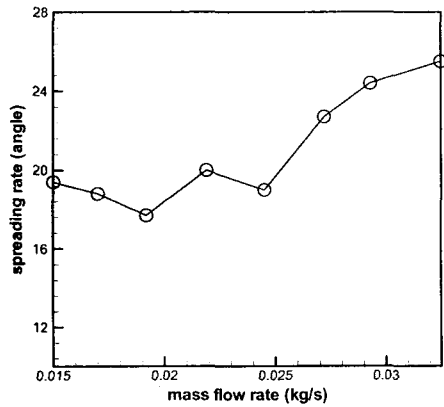


Fig. 3 Spreading rate

인은 유량이 줄어들어 따라 노즐을 통해 분사된 공기 유동이 주위의 불안정적인 요소의 영향을 많이 받아 노즐 출구에서의 확산율이 어떠한 일정한 값을 가지지 않고 유량이 많을 때의 제트 유동에 비해 순간의 확산율 값이 크게 변하기 때문이다.

### 3.3 수중 제트의 불안정성

Surin(1983)의 Reverse shock 파Ogden and Parnell(1992)의 Reverse flow 현상은 수중에서 제트가 형성 될 때, 분사되는 공기와 수조 내에 차 있는 물의 큰 밀도 차로 난류 eddy가 활발히 생성되는 것으로 인해 생겨나는 현상이다.

고속 촬영에서 얻어진 연속된 촬영 결과를 살펴보면 수중에서 형성된 제트가 불안정성(instability)과 관련된 반복적으로 발생하는 주기적인 특성을 지닌다는 것을 알 수 있다.

주기적인 특성은 크게 4가지 과정으로 나눌 수 있다(Fig. 4). 첫 번째 과정(Fig. 4 (a))은 분사되는 공기와 수조 내에 있는 물의 큰 밀도 차, 그리고 경계면 사이의 shear stress와 연관된 작은 스케일의 난류 eddy가 발생하면서 제트 경계 부분에 굴곡이 발생한다. 작은 스케일이라는 것은 4가지 과정으로 분류했을 때 두 번째 과정에서 생기는 스케일에 비해 상대적으로

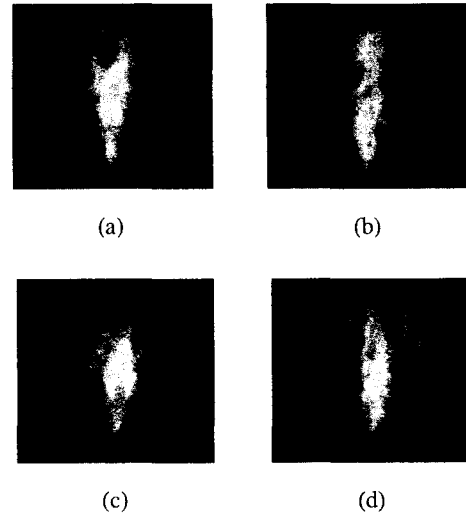


Fig. 4 Periodic change of jet structure

작은 값을 뜻한다. 실제로 공기가 공기 중으로 분사되는 경우에 비해 공기의 천 배에 이르는 밀도를 가진 물로 공기가 분사될 경우 두 가지 매질의 큰 밀도 차와 점성 차에 의해서 더 큰 스케일의 난류 eddy가 발생한다.

두 번째 과정(Fig. 4 (b))은 제트 경계 부분의 작은 스케일의 난류 eddy가 제트 내의 유동이 계속 전진하면서 서로의 속도 차에 의해 불규칙적으로 중첩이 되어 큰 스케일의 난류 eddy를 형성하게 되고, 이로 인해서 제트와 물 사이의 경계부분에 커다란 굴곡이 생겨나면서 제트의 유동 흐름 방향의 횡 방향 폭이 다른 곳에 비해 급격히 감소하는 부분이 생긴다. 난류 eddy의 중첩 현상은 초고속 카메라 촬영장면에서 시각적으로 확인할 수 있으나 정확히 수식적으로는 표현이 불가능하였다. 이러한 중첩 현상과 유사한 현상이 vortex merging[10] 현상이다.

세 번째 과정(Fig. 4 (c))은 두 번째 과정으로 인해 단면적이 좁아진 이후 부분에서 단면적 감소가 그 이후의 유동에 저항적인 역할을 하게 되어 일시적으로 단면적 감소 이후 부분에 공기가 축적이 되고 계속적으로 공급되는 공기의 유량에 의해 유동 흐름 방향 역 방향 또는 수직 방향으로의 물과 공기가 뒤섞인 2차적인 유동이

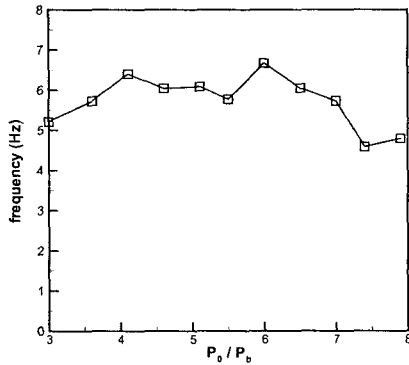
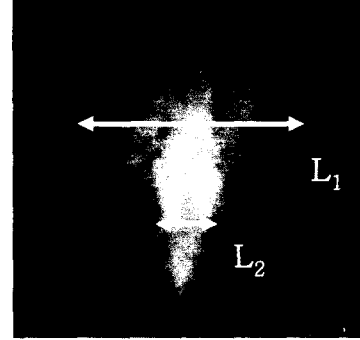


Fig. 5 Frequency of periodic behaviour

유도되고 이와 함께 제트의 횡방향 폭이 최대가 된다. 그리고 2차적인 유동이 제트의 주유동으로 유입되는 부분이 생긴다.

네 번째 과정(Fig. 4 (d))은 세 번째 과정으로 인해서 유도된 유동이 시간이 경과함에 따라 역방향 흐름의 유도가 시작된 아래 부분의 제트 유동 내로 지속적으로 유입되면서 유입되는 부분의 횡방향 폭을 감소시키고 유동이 계속 전진하면서 유도된 유동이 서서히 소멸하는 과정이다. 이러한 네 번째 과정이 진행되고 유동이 계속 전진하면서 서서히 첫 번째 과정의 현상이 다시 나타나게 된다. 네 번째 과정이 진행된 후, 첫 번째 과정이 나타나지 않고 2차적인 유동이 유입되는 부분의 폭이 감소함으로 인해서 두 번째 과정이나 세 번째 과정이 다시 발생하는 경우도 생겨난다. 이러한 과정이 여러 차례 불규칙적으로 반복이 되면서 수중에서 형성된 공기 제트가 불안정성을 가지게 되는 것이다.

Fig. 5 는 위에서 언급한 네 가지 과정을 한 주기(cycle)로 했을 때, 압력 탱크의 압력, 즉 전압(stagnation pressure)의 변화에 따라서 1초 동안 한 주기의 발생 횟수를 측정된 값을 나타낸다. 이 실험결과는 각각의 전압의 변화에 따라서 실험을 반복적으로 8회 거듭하여 측정된 값을 평균한 값이다. Fig. 5 의 결과를 보면 전압( $P_0$ )이 변함에 따라 불안정적 주기의 발생 횟수가 크게 변하지 않고 어느 정도 일정한 값을

Fig. 6 Definition of  $L_1$  and  $L_2$ 

가진다. 주기 발생 횟수는 대략적으로 5회에서 6회 사이의 값이다.

본 연구를 통해서 앞의 4가지 과정 중 3번째 과정이 일어나는 현상의 장면들을 자세히 분석했다. 세 번째 과정은 다른 과정에 비해 차이점이 뚜렷하고 비교적 오랜 시간 동안 일어나기 때문에 다른 과정들과 확연히 구분이 되므로 3번째 과정이 일어나는 촬영장면 중에서 제트의 횡방향 폭이 최대가 될 때의 장면을 선정해 그 촬영 결과를 비교 분석하였다. 역방향으로 유도되면서 제트의 횡방향 폭이 가장 극대화 되는 곳의 폭( $L_1$ (Fig. 6))과 역방향으로 유도된 유동이 주유동인 제트로 유입되는 곳의 폭( $L_2$ (Fig. 6))을 전압( $P_0$ , 탱크 압력)을 변화시켜가면서 측정된 결과는 Fig. 7 과 같고 이 결과는 노즐 출구의 높이  $D$ 로 무차원화 한 것이다.

전압( $P_0$ )의 변화에 따라 노즐 출구로부터 최대폭이 되는 곳과 2차적인 유동이 유입되는 곳의 위치가 변하므로 노즐 출구로부터 위치 변화에 따른 제트의 폭 변화에 대한 부분을 고려하기 위해서 두 폭의 비를 구했다. 그 관찰 결과는 Fig. 8 과 같다.

Fig. 10 은 노즐 출구로부터 제트의 주 유동과 수직, 역 방향으로 유도된 유동이 유입되는 곳의 경계 부분까지의 길이( $L_3$ (Fig. 9))를 노즐 출구 높이  $D$ 로 무차원화 한 것이다. 그 결과를 살펴보면 전압(탱크압력)의 변화에 따른 출구에서부터 유동이 유입되는 곳의 경계 부분까지의 길이( $L_3$ ) 변화가 뚜렷한 것을 알 수 있고, 그 결

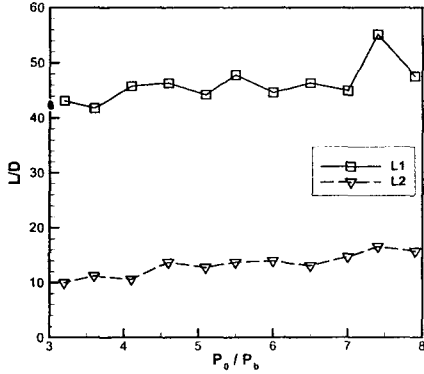


Fig. 7 Variance of  $L_1$  and  $L_2$  according to total pressure change

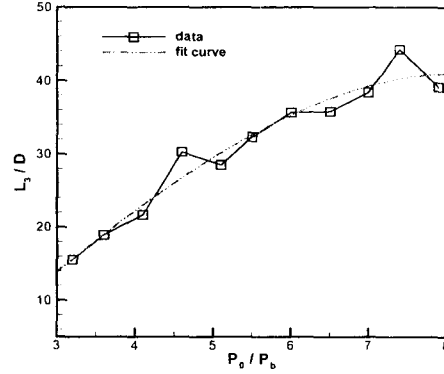


Fig. 10 Plot of  $L_3$  as a function of total pressure

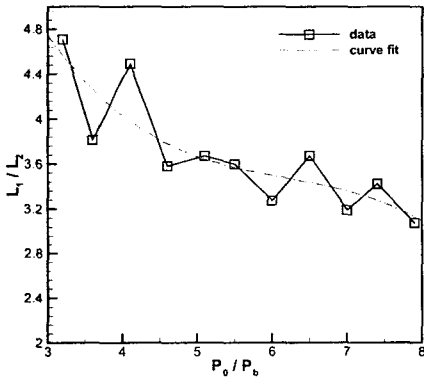


Fig. 8 Variance of  $L_1/L_2$  according to total pressure change

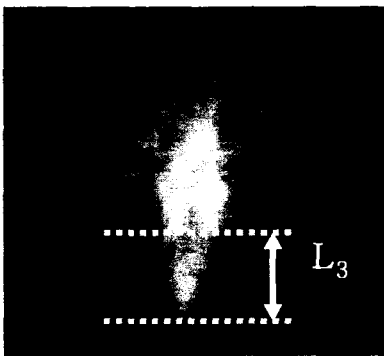


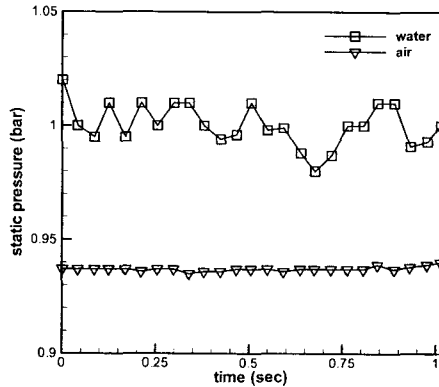
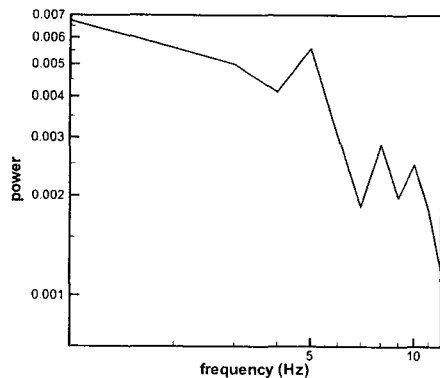
Fig. 9 Definition of  $L_3$

과는 전압이 커질수록  $L_3$ 가 증가한다는 것이다. 이는 전압이 커지게 되면 노즐을 통과하는 유량이 증가함에 따라 제트 중심의 운동량이 증가하게 되어 난류 eddy의 영향으로 제트의 폭이 감소하여 폭이 감소된 부분이 제트 유동에 대한 저항 역할을 하게 되더라도 전압이 낮아 제트 유동의 유량 감소로 인해 운동량이 줄어든 제트에 비해 노즐 출구로부터 비교적 먼 곳까지 안정된 제트가 유지되기 때문이다.

### 3.4 압력측정

제트 유동 내에 일어나는 변화를 관찰하기 위해 시간에 따른 압력 변화를 측정하였다. 노즐 출구의 시간에 따른 압력 변화를 측정하기 위해 초당 25개의 압력 측정 결과를 얻었으며 노즐 출구로부터 100D정도까지 제트가 충분히 발생한 후 1초 동안 실험한 결과이다. Fig. 11 은 주어진 전압(탱크 압력)조건 하에서 시간에 따른 노즐 출구의 압력 변화를 측정한 결과이다.

수중으로 분사될 경우 노즐 출구 부근에서 시간에 따른 압력 변화(요동)가 나타나는 원인은 실험 시간(1초)동안 탱크 압력의 변화가 거의 없는 가운데 수중으로 분사될 경우 밀도 차와 점성 차가 큰 2상 유동의 특성으로 인해서 불안정성이 발생하고 이러한 불안정성이 노즐 출구 부근의 제트 유동 압력 변화에 기여한 것이다.

Fig. 11 Pressure history at  $P_0 = 6\text{atm}$ Fig. 12 FFT transform of pressure measurement at  $P_0 = 6\text{atm}$ 

시간에 따른 노즐 출구의 압력변화가 주파수 영역에서는 어떠한 특성을 가지는지 확인하기 위하여 시간에 따른 압력 변화 실험 데이터를 FFT 변환하였다. FFT 를 사용하여 수중으로 분사되는 경우 시간에 따른 노즐 출구의 압력 변화를 변환한 결과는 Fig. 12 이다.

FFT 변환 결과를 살펴보면 전압의 변화에 크게 관계없이 5 Hz 에서 peak 를 발견할 수 있다. 이 값은 불안정성 발생 주파수 관찰에서 측정되었던 5 Hz 에서 6 Hz 사이의 값과 비슷한 값이다. 이러한 결과로부터 2상 유동에 의해

생겨나는 주기적 불안정성과 제트 유동 내의 압력 변화가 상관관계가 있음을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결론

수중에서 형성된 초음속 유동의 가시화와 압력 측정을 통해 확산율, 불안정성특성 등에 대한 고찰을 하였다. 이상의 결과를 정리하면 아래와 같다.

(1) 0.025kg/s 이상의 공기 유량이 분사되면 제트의 확산율은 증가하지만, 그 보다 작은 양의 공기 유량이 분사되면 유량에 따른 특별한 경향성은 파악하기 어렵다.

(2) 수중에서 형성되는 제트는 반복적인 주기적 특성을 가지고 불안정하게 형성된다. 이와 같은 주기적인 특성은 크게 네 가지 과정으로 나눌 수 있으며 이러한 네 가지 과정이 계속해서 반복되어 발생한다.

(3) 전압( $P_0$ ) 변화에 따른 불안정적 특성 주기의 발생 주파수는 대략 5에 이르렀다.

(4) 주기적인 현상 중 세 번째 과정이 일어날 때 전압이 증가함에 따라  $L_1/L_2$ 는 감소하고  $L_3$ 는 증가하는 특성을 관찰하였다.

(5) 수중 제트의 경우 시간의 변화에 따라 얻어진 압력 측정 데이터를 FFT 변환했을 때, 전압 변화에 크게 영향을 받지 않고 불안정성 발생 주파수 5-6Hz 와 유사한 값인 약 5Hz 에서 peak 가 생기는 것을 확인 할 수 있었다. 이로부터 밀도 차와 점성 차이가 큰 두 가지 매질의 섞임 현상으로 인해 같은 매질의 섞임 현상에서 보다 큰 불안정성이 생기게 되고 이러한 불안정성과 연관되어 제트 유동의 압력 변화가 생겨나는 것을 확인할 수 있었다.

#### 참고 문헌

1. T.R Ogden, L.A Panrell, 'Shear Low control of Gas Jets In Liquids', AIAA

- 92-3139 (1992)
2. E. Loth, 'Study of Plane Underexpanded Air Jets in Water', AIAA 89-1798(1989)
  3. K.J. Wilson, E. Gutmark, 'Supersonic Submerged Heated Jets', AIAA 92-3138(1992)
  4. V.A. Surin, V.N Evchenko, 'Propagation of a Gas Jet in a Liquid', J. Engng. Physics, 45, 1091(1983)
  5. A.A Townsend, 'Mechanism of penetration of free Turbulent Jets,' Mechanics, Periodical Collection of Translations, NO. 4, 61-90 (1968)
  6. Nikolas E. Kotsovinos, 'A note on the spreading rate and virtual origin of a plane turbulent Jet', J. Fluid Mech, Vol.77, part 2, pp. 305(1975)
  7. James J. Flora, 'Virtual origins of a Free Plane Turbulent Jet', AIAA Vol.7, No,12
  8. Marc A. Kolpin, 'The flow in the mixing region of a Jet', Fluid Mech. 18(1963)
  9. E. Loth, G.M. Faeth, 'Structure of Underexpanded Round Air Jets Submerged in Water', Int. J. Multiphase Flow Vol.15, No.4, pp. 589-603(1988)
  10. A.H. Nielwen, X. He, 'Vortex merging and spectral cascade in tow-dimensional flows', Physics of Fluid, Vol.8, No.9, pp. 2263-2265(1996)
  11. B.K. Hodge, Keith Koenig, 'Compressible fluid dynamics', Prentice-Hall Inc, (1995)