

파랑수역에서 비부력 원형 제트의 거동 Behavior of Non-buoyant Round Jet under Waves

유용욱* · 이종인* · 김영택*
Yong-Uk Ryu*, Jong-In Lee* and Young-Taek Kim*

요 지 : 본 연구에서는 파랑이 존재하는 수역에서 수평방향으로 분사되는 비부력 원형 난류제트의 거동을 검토하기 위해 수리실험을 수행하였다. 난류제트의 유속은 PIV(particle image velocimetry)기법을 이용하여 측정하였으며, 측정된 순간유속장을 위상평균하여 평균유속장으로 계산하였다. 수리실험에서는 상대적으로 작은 파고의 규칙 파가 사용되었으며, 파랑의 분산이 난류제트의 확산현상에 미치는 영향을 제트의 중심선유속과 횡단면유속의 변화를 통하여 관찰하였다. 또한 파랑의 위상변화에 따른 제트 거동을 파악하기 위하여 다른 세 위상순간에서 제트의 거동을 비교하였다. 제트의 중심선유속은 파고가 커짐에 따라 감소하였으며, 횡단면의 폭은 증가함을 알 수 있었다. 제트의 횡단면유속분포 특성인 자기상사성은 파고가 증가할수록 약해졌으나 축방향으로의 단면폭의 변화는 크지 않았다. 또한 파고에 대한 제트의 변화에 비해 파랑 위상에 대해서는 변화가 작음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 비부력제트, PIV, 중심선유속, 자기상사성, 규칙파

Abstract : The behavior of a non-buoyant turbulent round jet discharging horizontally was investigated experimentally. The instantaneous velocity field of the jet was obtained using the particle image velocimetry (PIV) method and used to calculate the mean velocity field by phase-averaging. This study tested regular waves with a relatively small wave height for a wavy environmental flow. The centerline and cross-sectional velocity profiles were reported to demonstrate the effect of the waves on the jet diffusion in respect of wave height and wave phase. The wave phase effect was studied for three phases: zero-upcrossing point, zero-downcrossing point, trough. From the results, it is found that the centerline velocity decreases and width of the cross-sectional profile increases as the wave height increases. In addition, the self-similarity of the cross-sectional profile appears to break down although the width of each case along the axial distance does not vary significantly. The phase effect is found to be relatively small compared to the wave height effect.

Keywords : non-buoyant round jet, particle image velocimetry, centerline velocity, self-similarity, regular wave

1. 서 론

연안개발에 따른 하폐수처리장의 오수처리와 연안역에 건설되는 발전소의 온배수 방출 등을 위해 해양으로의 수중 방류시스템이 운영되어지고 있다(이서, 1996; 김 등, 2000). 이러한 해양방류는 방류시설의 공사비 증대와 더불어 방류 지점 및 인접해역의 환경에 급격한 변화를 초래할 수 있으므로 이와 관련된 수공학, 환경공학, 해안해양공학 그리고 발전산업 등 여러 공학분야의 관심을 얻고 있다. 수중 방류에 의한 난류제트는 주변수를 유입하여 방출수와 혼합

시키므로 이는 오수 및 온배수의 희석을 위한 효율적인 기계작용으로 이용되어왔다.

해역으로 방류되는 수중방류의 경우에 주변수와의 상호 작용이 제트류의 희석과정에 많은 영향을 주며, 이 주변수가 정지해 있지 않는다면 제트류의 희석과정은 주변수의 흐름으로부터 많은 영향을 받을 수 있음을 예상할 수 있다. 흐름수역으로 유입되는 원형난류제트의 거동은 활발히 연구되어 왔으며, 제트의 분사방향과 주변수의 흐름방향에 따라 직각방향 흐름(Andreopoulos and Rodi, 1984; Camussi et al., 2002), 역방향 흐름(Rajaratnam, 1976; Chan and

*한국건설기술연구원 하천해안연구실(Corresponding author: Jong-In Lee, River and Coast Research Division, KICT, Ilsan, Gyeonggi 411-712, Korea, jilee@kict.re.kr)

Lam, 1998; Lam and Chan, 2002), 그리고 동방향 흐름 (Antonia and Bilger, 1973; Chu et al., 1999)으로 나뉘어 연구되어 왔다. 기 수행된 대부분의 연구는 정상류의 흐름수역으로 분류되는 제트에 대한 연구였으며, 제트와 주변수의 유속비 변화에 따른 제트 거동의 변화를 검토하였다.

해양방류 제트는 전술한 일방향 정상흐름이 아닌 비정상류의 흐름수역으로 분류할 수 있다. Shuto and Ti(1974)는 파랑수역으로 분류되는 플룸(plume)형 제트에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 파랑하중 아래에서 플룸(plume)의 시간평균 물입자속도 분석을 통해 플룸의 확산은 파에 의하여 증가한다는 것을 정성적으로 보여주었다. 그러나 평균유속장을 시간평균하여 분석함으로써 비정상류의 시간변화에 따른 관계는 제시하지 못하였다. Chin(1987)은 파랑이 부력제트의 거동에 미치는 영향을 고찰하였으며, 차원 해석을 통해 제트의 희석을 대표하는 6개의 무차원변수를 유도하였다. Chin(1987)은 파랑이 존재하는 자유수면 근처의 희석정도는 파가 존재하지 않을 때보다 크게 증가함을 확인하였으며, 특히 파랑이 제트의 출구 근처에서의 거동에 상대적으로 큰 영향을 준다고 보고하였다. 또한 미국 남동부에 위치한 해양배수구들에 대한 조사를 바탕으로 파랑이 제트의 희석에 대한 영향은 파랑수역으로 분사되는 제트의 저심분출 설계에 반영되어야 한다고 제안하였으며, 파랑에 의한 제트의 연행을 잠재적으로 모의할 수 있는 이론적 Lagrangian모형을 고안하였다(Chin, 1988). Chyan and Hwang(1993)은 파랑조건을 심해조건에서 천해조건까지 변화시키며 LIF-LDV(laser induced fluorescence-laser Doppler velocimetry) 기법을 이용한 연직제트의 농도와 유속을 동시에 측정하는 실험적 연구를 수행하였으며, Chin(1987)에 비해 2배에 가까운 확산율을 보고하였다. Koole and Swan(1994)도 LDV기법을 이용하여 천이수역조건의 작은 파고를 갖는 파랑수역으로의 제트를 측정하여 파랑의 유무에 따른 제트의 퍼짐 정도를 비교하였으며, 횡방향 유속단면도는 파가 존재할 때 모자형(top-hat)의 단면분포가 쉽게 사라지고 난류세기와 Reynolds stress가 커짐을 밝혔으며, 이러한 현상은 주변수와 혼합이 증가하는 것과 상관성이 있다고 추정하였다. Chyan and Hwang(1993)과 Koole and Swan(1994)의 연구는 시간평균을 이용한 통계적 분석을 하였으나, 비정상류인 파랑수역의 흐름에 영향을 받는 제트를 시간평균하면 제트의 확산정도를 과대평가할 수 있는 문제점이 발생한다. Mori and Chang(2003)은 규칙파 조건의 파랑하중 아래에서 제트 중심선의 거동을 검토하기

위한 실험적·이론적 연구를 수행하였다. LIF기법을 이용한 제트 중심선의 측정을 통해 파와 제트의 운동량의 비에 따라 제트의 거동을 3가지 유형으로 분류하고 이를 이용하여 제트 중심선의 위치를 모의하였다.

본 연구에서는 규칙파 조건 아래에서 비부력의 원형 난류제트의 거동을 실험적으로 검토하였다. 제트는 파랑 전파방향의 역방향으로 중간수심에서 분사되었으며, 제트의 유속장은 PIV기법을 이용하여 측정하였다. 제트 유속을 측정할 영역은 자유제트(주변흐름이 없는 상태의 제트)의 확립흐름영역(zone of established flow, ZEF)에 해당되는 영역까지로서 측방향거리가 제트 출구직경의 약 35배에서 100배까지인 영역이다. 측정된 순간유속장은 위상평균을 하여 평균유속장을 구하였으며, 이로부터 제트의 중심선유속과 반폭(half width)의 위치를 확인하였고, 이를 바탕으로 확산율에 대한 영향을 검토하였다. 파고의 변화가 제트 확산에 미치는 영향 정도를 규명하기 위해 파고를 변화시키며 파랑수역을 형성하였고, 측정된 결과는 파가 존재하지 않는 동일한 조건의 제트와 비교하였다. 또한 파랑 위상의 영향을 검토하기 위해 영점상향교차점(zero-upcrossing), 파곡(trough), 영점하향교차점(zero-downcrossing)의 위상에서 제트의 거동을 비교하였다. 마지막으로 파랑의 입자유속, 순수 제트유속, 그리고 파랑수역내 제트유속의 관계로부터 비선형성을 추정하였다.

2. 배 경

2.1 원형제트의 중심선유속과 횡단면유속분포

제트의 흐름영역은 크게 흐름확립영역(zone of flow establishment, ZFE)과 확립흐름영역(zone of established flow, ZEF)으로 구분할 수 있다. ZFE는 제트출구로부터 출구유속이 일정하게 중심선 유속을 갖는 영역을 의미하며, 원류핵영역(potential core region)이라고도 불린다. ZEF는 제트의 횡단면 유속분포가 Gaussian분포를 갖고, 횡단면 유속분포가 자기상사성(self-similarity)을 갖는 영역을 말한다(Fischer et al., 1979). ZFE와 ZEF 사이에는 짧은 천이영역이 존재하며, 이 구간은 횡단면유속 Gaussian분포의 자기상사성의 유무에 따라 결정된다.

ZFE를 지난 제트의 중심선 유속은 감소하기 시작하며, 천이영역을 지나 ZEF영역내의 제트 중심선 유속은 다음과 같은 경험식으로 나타낼 수 있다(Pope, 2000).

$$\frac{U_m}{U_j} = \alpha \left(\frac{x-x_0}{D} \right)^n \quad (1)$$

여기서, U_m 은 중심선 평균유속, U_j 는 제트 방류속도, α 와 n 은 감소계수, x 는 제트의 축방향거리, x_0 은 제트의 가상 원점(virtual origin), D 는 출구직경이다. Hussein et al.(1994)은 가상원점이 제트출구 전면에서 출구직경의 4배되는 곳에 위치한다고 보고하였다. α 는 중심선 유속이 감소하기 시작하는 시점을 나타내는 값으로서 α 가 작을수록 중심선 유속이 제트출구에 가까운 거리에서 감소하기 시작함을 의미한다. 기존의 여러 연구에 의하면 자유제트의 α 는 5.5에서 6.0의 값을 갖는다고 보고하였다(Hussein et al., 1994; Cowen et al., 2001). 다른 감소계수인 n 은 중심선 유속의 감소율(decay rate)을 나타내며, 자유제트의 경우에 $n = -1.0$ 의 값을 갖는다고 여러 연구들에 의해 보고되어 있다(Hussein et al., 1994; Cowen et al., 2001).

원형제트의 ZEF내의 횡단면유속은 자기상사성을 갖는 Gaussian분포에 의해 나타내어지며, 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{U}{U_m} = \exp[-k(z/x)^2] \quad (2)$$

여기서, U 는 평균유속, z 는 중심선으로부터 방사거리, k 는 Gauss상수로서 유속실험결과로부터 결정되는 계수이다. 자유제트의 중심선과는 달리 파랑수역에서의 제트는 진동하기 때문에 방류방향으로 직선 분포를 보이지는 않는다. 따라서 진동하는 제트의 경우에 중심선은 각 축방향거리에서 최대수평유속이 일어나는 위치로 정의하였고, 중심선의 위치에 따른 이동좌표계인 또 하나의 수직좌표계 z_c 를 도입하였다. $z_c=0$ 은 각 단면의 최대수평유속을 갖는 연직좌표를 의미하며, 자유제트의 경우에 z_c 와 z 는 동일한 좌표이다.

2.2 파랑 대 제트의 운동량비

파랑수역에서 제트의 거동에 영향을 주는 변수는 제트와 주변흐름에서 찾을 수 있다. 제트와 관련된 변수로는 방류속도 U_j 와 제트의 출구직경 D , 그리고 방류수의 밀도 ρ_j 등이 있다. 주변흐름으로부터는 주변수의 밀도 ρ_w , 제트의 분사위치 h_j , 수심 h , 파고 H , 파수 k 등이 있고, 중력가속도 g 와 동점성계수 ν 등을 고려할 수 있다. 이러한 변수들로부터 제트와 파랑수역의 상호작용 분석을 위한 여러가지 무차원변수를 유추할 수 있으며, 대표적으로 난류도를 나타내는 방류수의 Re수, 방류밀도차에 따른 Fr수, 주변흐름의 변수인 파형경사 kH , 수심조건 kh 등을 들 수 있다. Mori and Chang(2003)은 파랑 대 제트의 운동량비(wave-to-jet

momentum ratio) R_M 을 제시하였으며, 제트의 중심선을 통과하는 횡단면에서 다음과 같이 정의된다.

$$R_M = \frac{gH^2}{8DU_j^2} \quad (3)$$

R_M 은 흐름영역 내 제트에 관한 기존의 연구들에서 많이 사용되는 주변흐름 대 제트의 유속비와 유사한 개념으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 전술한 여러가지 무차원 변수 중에서 파랑 대 제트의 운동량비에 대한 제트의 중심선 유속의 감소계수와 횡단면유속의 반폭의 변화에 중점을 두었다. 문제를 간단하게 하기 위하여 주변수와 방류수의 밀도차가 없는 비부력 제트를 고려하였고, 방류속도를 일정하게 하였으며, 제트의 분사위치를 중간수심에 고정된 후 파고를 변화시켜 다양한 운동량비를 갖게 하였다.

$$R_M = \phi(\alpha, n, b_n) \quad (4)$$

여기서, b_n 는 제트의 유속반폭으로서 제트의 중심선으로부터 횡방향으로 U_m/e 또는 $U_m/2$ 에 해당하는 지점까지의 거리로 정의되며, 이는 제트 중심선 유속의 감소와 확장된 제트의 너비를 나타냄으로서 내재적으로 제트확산정도(jet diffusion rate)를 의미하는 것이다. 본 연구에서는 중심선유속의 $1/e$ 에 해당하는 지점까지의 거리를 반폭으로 결정하였다.

3. 수리모형실험

3.1 실험장치와 측정기법

수리모형실험은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 폭 0.9 m, 높이 1.2 m, 길이 36 m의 2차원 수로에서 수행되었으며, 실험수심은 0.8 m로 설정하였다. 수로내 반사파를 제어하기 위해 수로의 한쪽 끝에 약 5%의 반사율을 갖는 1:5.5의 경사의 소파층을 설치하였다. 스테인리스로 제작된 직경 4.54 mm의 원형제트는 조파기에서 21 m 떨어진 지점의 중간수심에서 수로의 중앙선을 따라 조파기를 향해 설치되었다. 제트의 방류속도를 일정하게 유지하기 위하여 수로 상단에 정수위탱크(constant head tank)를 설치하고, 이로부터 제트를 방류하였으며, 방류속도는 유량계와 출구에서의 유속측정을 통해 일정함을 확인하였다.

본 실험에서는 유속측정을 위하여 PIV기법을 이용하였다. 구축된 PIV시스템은 Fig. 2와 같으며 광원장치, 영상 취득장치, 영상저장 및 분석장치로 구성된다. 광원으로는 파장 532 nm, 최대 출력에너지 400 mJ, 파동지속시간(pulse

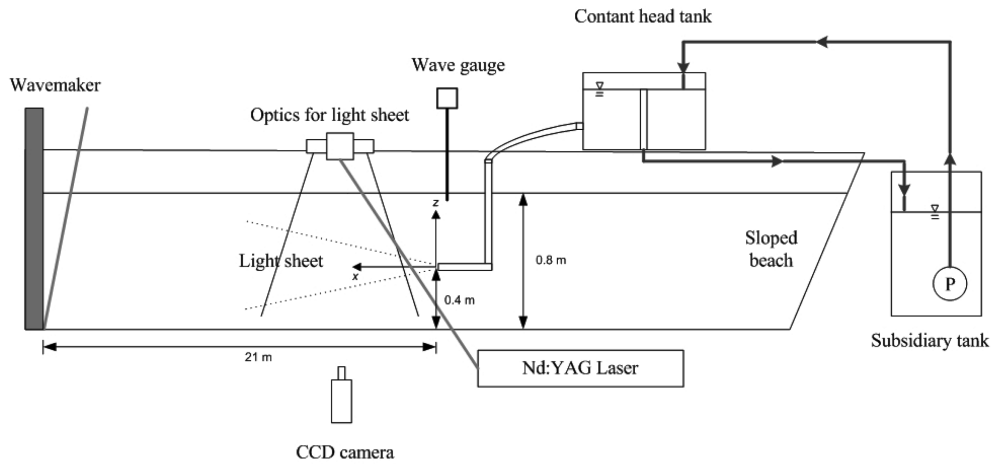


Fig. 1. Wave flume and experimental setup.

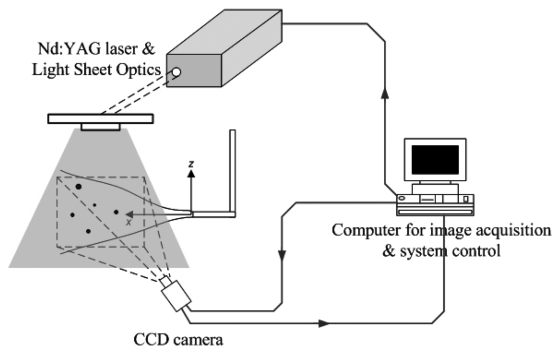


Fig. 2. Sketch of the PIV system.

duration) 6 ns, 그리고 laser head당 최대 10 Hz의 반복비를 갖는 Dual-head Nd:YAG laser를 사용하였다. PIV화상을 얻기 위하여 각각 57 μm 와 12 μm 의 평균직경에 약 1.02의 비중을 갖는 두 종류의 입자를 배포하였다. 이미지 기록장치로는 1024 \times 1280픽셀의 해상도와 12bit의 분해능(dynamic range)을 갖는 CCD카메라를 사용하였으며, CCD 카메라는 Nikon 60 mm 렌즈를 장착하고 f/5.6의 조리개 값을 사용하였다. CCD카메라에 의한 PIV화상의 기록은 준정상상태(quasi-steady state)의 유속장을 측정하기 위해 조파기 작동 후 12분, 제트 분사 후 2분을 기다린 후 시작하였다. 분사 후 측정시간은 6분 이내로서 방류량은 전체 수조 내 유량에 비해 극소량이기 때문에 수위의 변화에 영향을 주지 않았다. 본 실험에서는 측정영역(field of view, FOV)을 네 영역으로 나누어 PIV측정을 수행하였으며, 이웃하는 FOV사이에 겹쳐지는 부분을 두어 공간적인 연속성을 갖도록 하였다. 다수의 FOV를 이용한 이유는 PIV의

약점이라 할 수 있는 속도경사에 의한 오차를 줄이고 자기상사성을 나타내는 $x/D=[35, 100]$ 의 영역을 모두 측정하기 위함이다. 두개의 레이저 시간차(Δt)는 제트출구에 가까운 두개의 측정영역의 경우에 4.0 ms, 출구에서 떨어진 나머지 두개의 측정영역은 8.0 ms를 사용하였다. 조파기와 PIV시스템, 그리고 파고계 등의 모든 실험장치를 동기화(synchronization)하여 측정에 의한 오차를 최소화하였다.

속도장은 화상쌍(image pair)을 2화상 상관기법(two-frame/single-pulsed cross-correlation)을 이용하여 계산하였으며, 화상의 배경잡음을 먼저 제거하고, Fast Fourier Transform (FFT)을 이용하여 수행하였다. 속도장의 정도를 높이기 위하여 64 \times 64픽셀의 큰 조사구간(interrogation area)에서 속도벡터를 계산하고, 선행된 계산을 바탕으로 다시 32 \times 32 픽셀의 조사구간에서 속도벡터를 결정하였다. 속도벡터가 계산된 후, 잘못 계산된 벡터를 제거하기 위하여 중간값여과(median filter)법을 이용하였으며, 제거된 속도벡터는 주변 속도벡터들을 이용하여 선형보간법으로 재산정하였다.

3.2 실험조건

제트의 출구속도 U_j 는 1.14 m/s로 고정하였으며, 제트출구의 초기조건에 의한 Reynolds수, $Re=U_j D/\nu$ 는 약 5200이다. 제트의 유속측정은 먼저 파랑이 없는 상태에서 수행되었다. 자유제트의 측정 목적은 계속결과를 기존 연구들과 비교함으로써 본 실험의 정확도를 검증하고, 파랑이 존재하는 조건의 결과와 비교하여 파랑의 영향을 분석하기 위함이다. 본 연구에서는 주기 2.0 sec의 규칙파를 적용하였으며, 파수는 1.30, 파장은 4.85 m이다. 그리고 실험에 적용된 파고는 1.0 cm, 2.0 cm, 3.0 cm, 4.0 cm, 6.0 cm이다.

Table 1. Experimental conditions

$H(\text{cm})$	kH	R_M	Type by R_M
1.0	0.0130	0.021	I
2.0	0.0258	0.084	II
3.0	0.0388	0.189	II
4.0	0.0518	0.335	III
6.0	0.0778	0.755	III

Table 1은 실험조건으로서 파형경사 kH 와 파랑 대 제트의 운동량비 R_M 이 제시되어 있다. Mori and Chang(2003)은 실험을 통해 제트 중심선의 진동거동의 형태를 3가지 유형으로 분류하였다. 즉, 중심선이 대칭형으로 진동을 하는 유형(Type I), 비대칭형 진동을 하는 유형(Type II), 마지막으로 비연속적인 제트의 중심선을 갖는 유형(Type III)으로 구분하였다. 이는 파랑 대 제트의 운동량비에 의해 구분되어지며, 본 연구에서 수행한 실험안도 이와 같이 구분하여 실험조건과 더불어 Table 1에 수록하였다. 본 연구에서는 각각의 실험안에 대해 190개의 순간유속장을 측정하였으며, 평균유속은 이로부터 위상평균(phase average)하여 구하였다. 일정한 파랑의 위상에서 순간유속장을 측정하기 위해 PIV유속단면은 0.5 Hz 간격으로 취득하였으며, 이는 파랑의 한 주기당 하나의 유속장만이 측정되었음을 의미한다. 5개 실험안 모두 영점상향교차점(zero-upcrossing)의 위상에서 측정하였으며, 제트의 거동 특성에 있어 위상의 영향을 살펴보기 위해 $H=2.0$ cm조건에서는 파곡(trough)과 영점하향교차점(zero-downcrossing)에서도 같은 조건으로 순간유속을 취득하였다.

4. 실험결과

4.1 파고의 영향

흐름이 없는 정체수역($H=0$ cm)으로 방류되는 제트인 자유제트(free jet)의 평균유속을 분석하기 위해 PIV기법으로 측정된 순간유속장을 시간평균하였다. 정체수역으로 방류되는 제트는 주변수 흐름에 의한 외력이 존재하지 않으므로 평균값 특성은 축대칭 거동을 보이게 되며 시간평균이 가능하다. 반면, 제트가 방류되는 주변수가 정지되어 있지 않고 운동량을 가질 경우에는 제트의 유속장은 축대칭의 거동을 하지 않을 수 있다. 이와 같은 외력에 의한 제트 거동의 특성은 통계적 분석을 위한 평균법의 적용에 있어서 고려해야 할 중요한 요소이며, 주변수가 정상류인 경우에는 시간평균의 적용이 적합할 수 있지만, 비정상류인 경우에는 시간평균으로 인해 결과를 왜곡시킬 수 있다. 따라서, 비

정상류인 경우에는 시간평균보다는 조화평균(ensemble average)이 적합할 수 있다. 본 연구의 제트 또한 방류되는 주변수가 일정한 주기를 갖고 진동하는 비정상류이기 때문에 제트의 평균유속장은 조화평균인 위상평균(phase average)을 적용하여 계산하였다. 이와 같은 위상평균을 적용할 경우, 순간유속은 다음과 같은 성분으로 분해할 수 있다.

$$u_i = \langle u_{ii} \rangle + u_i' = (u_{wi} + \langle u_i \rangle) + u_i' \quad (5)$$

여기서, u_i 는 순간유속, $\langle u_{ii} \rangle$ 는 전체 위상평균유속, u_{wi} 는 주변수의 입자유속, $\langle u_i \rangle$ 는 전체 평균유속에서 주변수의 입자유속을 제외한 제트 위상평균유속, u_i' 는 난류변동, $\langle u_i \rangle$ 는 유속의 방향성분이다. 식 (5)에서 알 수 있는 바와 같이 $\langle u_{ii} \rangle$ 는 전체 평균유속으로서 제트와 파랑수역의 평균유속을 포함하고 있고, 이는 실험으로부터 측정되었다. 파랑의 입자유속은 사용된 파랑의 비선형성이 작기 때문에 선형파이론으로 산정하였다. 순간유속이 측정된 위상은 전술한 바와 같이 파랑의 영점상향교차점(zero-upcrossing)이다. 본 실험에서의 제트는 수평방향으로 방류되는 제트이므로 x방향 유속성분을 제트 거동 분석에 사용하였고, 평균유속요소 $\langle u_i \rangle$ 를 U_0 로 표시하였다.

Fig. 3은 파랑수역으로 방류되는 제트의 파고변화에 따른 중심선 유속분포를 도시한 것으로서 ZEF에 해당되는 $x/D=[35 \ 100]$ 의 중심선 유속분포는 제트의 출구속도로 무차원화 하였다. Table 1의 모든 실험조건에 대해 무차원화된 제트의 평균중심선유속의 분포를 무차원화된 축방향거리로 나타내었다. 본 실험에서 수행된 자유제트의 중심선유속 분

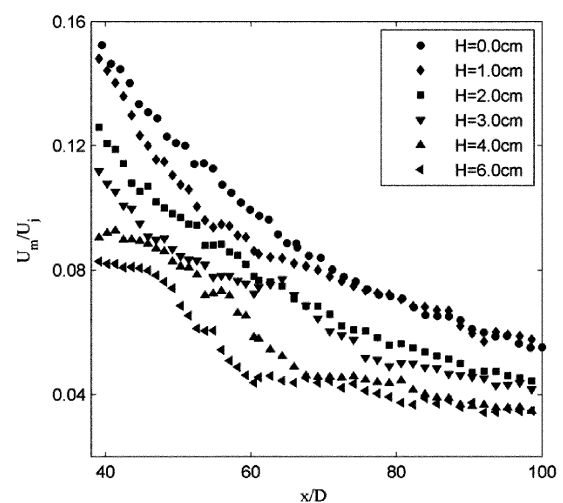


Fig. 3. Centerline velocity distribution of the jet under waves with different wave heights.

포로부터 가상원점은 약 $x_0=4D$ 로 확인되었다. 파랑수역의 제트의 경우에는 진동거동으로 인하여 가상원점의 결정이 어렵기 때문에 각 실험안들의 비교를 쉽게 하기 위하여 자유제트의 가상원점인 $x_0=4D$ 를 모든 실험안에 적용한 후, 최소자승법으로 식 (1)의 감소계수를 결정하였다. 식 (1)의 계수 n 은 자유제트의 경우에 본 실험에서의 값이 -0.99로서 기존의 연구들에 의해 제시된 -1.0과 좋은 일치치를 보였다. 파랑수역에서의 제트의 경우에는 모든 실험안의 중심선 유속분포로부터 n 은 -0.94~1.13의 값을 보였고, 파고 변화에 비해 n 값의 차이는 상대적으로 크지 않았다. 또한 파고의 크기에 따라 n 값이 변동하는 결과에서 파고와 n 사이의 뚜렷한 상관관계는 찾을 수 없었다. 이러한 n 값의 작은 변동은 실험오차와 제트와 파랑간의 비선형성도 영향을 미친 것으로 판단되며, 결과적으로 파고는 제트의 자기상사영역 내에서 중심선 속도의 감소율에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

n 값은 파고변화에 민감하지 않고 10% 내외의 미소한 변동을 보이므로 모든 실험안에서 평균값에 가까운 $n=-1.0$ 을 식 (1)의 n 값으로 설정하였다. 고정된 n 값을 바탕으로 중심선유속의 감소시점을 알 수 있는 감소계수를 결정하였으며, 각 실험안의 R_M 에 대한 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 중심선 유속분포의 회귀분석으로부터 얻어진 자유제트($R_M=0$)의 α 값은 5.5로서 이는 Hussein et al.(1994)의 $\alpha=5.8$ 과 Cowen et al.(2001)의 $\alpha=5.9$ 와 좋은 일치치를 보여준다. Fig. 4의 감소계수 α 의 분포는 파고가 증가함으로 인해 운동량 비 R_M 이 증가할수록 α 값이 감소하고, 파고가 클수록 중심

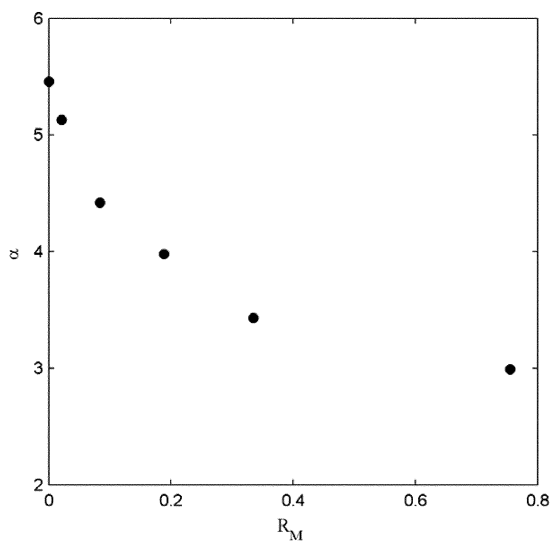


Fig. 4. Decay coefficient α vs. wave-to-jet momentum ratio R_M .

선 속도는 일찍 감소한다는 결과를 보여준다. 그리고 파고가 가장 큰 조건의 경우에 α 값은 자유제트에 비해 45% 정도 감소함을 알 수 있다. 중심선유속에 미치는 파고의 영향은 Koole and Swan(1994)의 연구결과와 일치하는 것이며, Koole and Swan(1994)은 제트출구 근처에서의 원통모양의 모자형 유속단면(top-hat velocity profile)이 자유제트에 비해 파랑수역의 제트에서 모양이 일찍 붕괴되고, 넓어지기 시작한다고 보고하였다. 이 결과는 제트의 원류핵영역인 ZFE에서 중심선유속의 감소에 파랑이 직접적인 영향을 미친다는 것을 확인시키는 것이며, 이는 결과적으로 자기상사영역에서의 확산에도 영향을 줄 것으로 판단된다.

중심선 유속분포에 이어 제트의 확산정도를 살펴보기 위해 제트유속의 횡단면 분포를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5는 측정영역($x/D=[35, 100]$)내에서 파랑이 존재하는 각 실

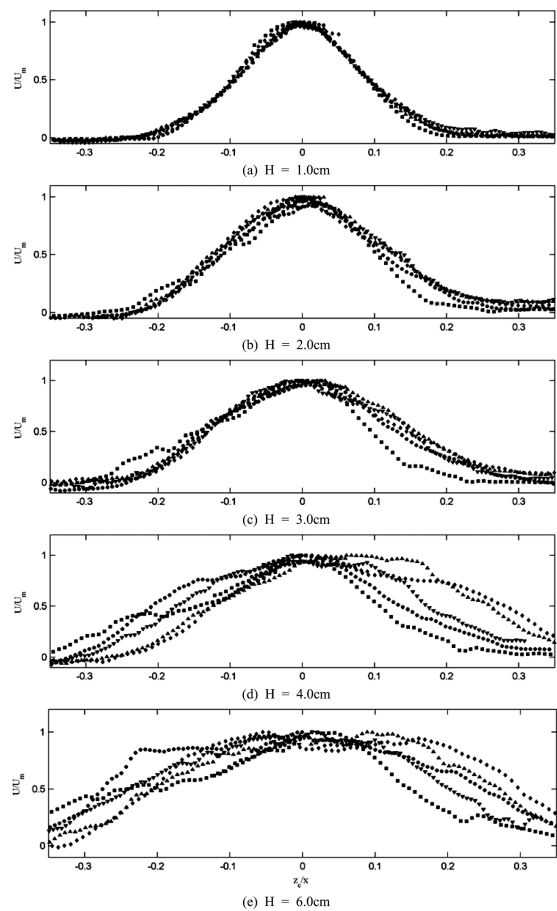


Fig. 5. Cross-sectional profile of the jet mean velocity for different wave heights at $z_0/x = 50$ (●), 60 (◆), 65 (■), 75 (▲), 95 (▼).

험안별 5개의 횡단면 유속을 나타낸 것이며, 각각의 횡단면 유속은 해당 중심선 유속으로 무차원화 하였다. Fig. 5의 횡단면 유속분포로부터 파고가 증가함에 따라 제트의 자기상사성이 점점 약해지는 것을 알 수 있다. Fig. 5(a)는 $H=1.0$ cm인 경우로서 횡단면 유속이 자유제트에 비해 약간 분산된 분포를 보이지만 자기상사성은 유지되고 있음을 보여준다. Figs. 5(b)와 5(c)의 $H=2.0$ cm와 $H=3.0$ cm의 경우에는 횡단면의 폭이 증가하고 상대적으로 분산된 분포를 보이지만 자기상사성의 경향을 잃지 않음을 알 수 있다. Figs. 5(d)와 5(e)에 제시된 $H=4.0$ cm와 $H=6.0$ cm의 경우에는 유속단면은 더 이상 겹쳐지지 않으며, 자기상사성을 보이지 않는다. 또한, 비대칭적인 단면의 형태도 더욱 두드러지며, 이는 파랑수역의 비대칭적인 주변수의 운동량이 파고의 크기에 비례하여 커짐에 따라 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. Table 1에서 제시된 바와 같이 파랑 대 제트의 운동량비인 R_M 에 의해 분류된 $H=1.0$ cm는 Type I, $H=2.0$ cm와 $H=3.0$ cm는 Type II, 그리고 두드러진 비대칭 거동을 보이는 $H=4.0$ cm와 $H=6.0$ cm의 경우는 Type III에 속한다. Fig. 5에 제시된 유속의 단면분포는 중심선의 거동을 고려하지 않았지만, 각 실험안을 R_M 으로 분류할 때 각각 다른 특성을 볼 수 있다. 먼저 Fig. 5(a)의 $H=1.0$ cm (Type I)는 연속적인 중심선이 대칭적으로 진동하는 제트 형으로서 이에 해당하는 유속단면은 축대칭의 분포를 갖는 것으로 관측되었다. 여기서, 중심선의 대칭이란 주변수의 영향으로 상하로 진동하는 중심선의 진폭과 주기가 일정함을 의미하며, 이는 중심선을 축으로 하는 유속단면의 축대칭과는 다른 의미이다. $H=2.0$ cm와 $H=3.0$ cm, 즉 Type II는 중심선이 비대칭적 거동을 하는 경우로서 자기상사성을 어느 정도 지키고 있으나 점점 분산되기 시작하며 Type I에서 보였던 축대칭의 특성도 약해져가는 것을 알 수 있다. 불연속과 비대칭의 중심선 거동을 보이는 Type III인 $H=4.0$ cm와 $H=6.0$ cm의 경우에는 유속단면이 더 이상 자기상사성을 보이지 않으며, Gaussian분포 또한 보이지 않는다. Type II와 Type III 사이에서 횡단면분포의 자기상사성과 분포형태가 확연히 차이가 남을 알 수 있다.

Fig. 6은 파고변화에 대한 제트의 유속반폭 b_u 의 변화를 축방향에 따라 도시한 것이다. 반폭은 $U/U_m=0.37$ 에 상응하는 z/x 의 위치로 결정하였으며, Fig. 5에서 살펴본 바와 같이 파랑수역의 제트는 주변흐름의 비대칭적인 유속분포에 의해 제트의 축대칭 특성이 약해진다. 따라서 Fig. 6에서는 중심선을 기준으로 자유수면방향(upper)의 반폭과 수조 바닥방향(lower)의 반폭으로 구분하였다. 도시된 유속단

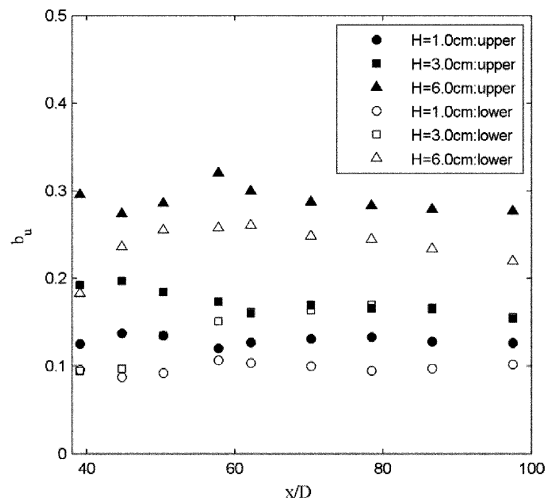


Fig. 6. Half width of the wave-jet velocity profile along the axis.

면의 분포로부터 파랑수역내 제트의 퍼짐(spreading)은 파고가 증가할수록 넓어짐을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 자유제트는 대칭성을 가지고 있어 반폭 개념을 이용하지만, 파랑수역의 제트는 주변수의 영향으로 축대칭성을 더 이상 보이지 않으며 Fig. 6의 반폭 분포로부터 중심선을 기준으로 자유수면방향의 반폭이 바닥방향의 반폭에 비해 약 10~30% 정도 큰 값을 보임을 알 수 있다. 그리고 축방향으로의 증감 경향은 크지 않았다. 이러한 분포로부터 파랑수역내의 제트는 파고의 증가에 따라 퍼짐현상이 두드러지지만, 하류로 진행하면서 증가하지는 않았다. 결과적으로 파랑은 제트의 출구에 가까운 초기영역에서 상대적으로 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 제트의 자기상사성은 파고가 커질수록 약해지지만 유속의 횡단면분포에 미치는 영향은 크지 않았다.

Fig. 7은 Fig. 6에 도시한 실험안과 다른 3개의 실험안에 대해 R_M 에 따른 제트의 반폭 변화의 평균값을 도시한 것이다. 자유제트의 b_u 는 0.09로서 Hussein et al.(1994)의 $b_u=0.09$ 와 Cowen et al.(2001)의 $b_u=0.10$ 과 좋은 일치를 보인다. Fig. 7의 반폭 분포로부터 파고가 커짐에 따라 두 반폭의 차이가 증가하는 것을 알 수 있으며, 자유수면방향의 반폭의 증가율이 상대적으로 커짐을 볼 수 있다. 가장 큰 진폭을 갖는 실험안($H=6.0$ cm)의 경우, 제트의 폭 $2b_u$ 는 자유제트의 폭에 비해 2배 이상 증가하였다. 두 반폭의 합으로 얻어진 제트의 유속폭은 파고의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 일정한 주기의 파랑을 이용하였으므로 파고가 제트 폭의 확장고 상관성이 있음

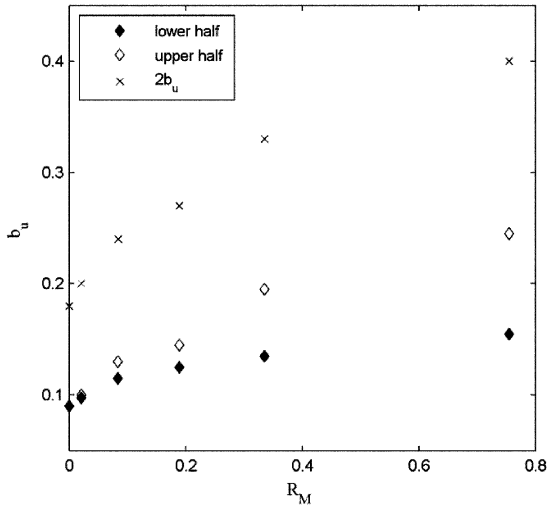


Fig. 7. Half width of the wave-jet vs. wave-to-jet momentum ratio R_M

을 보여주고, 제트의 폭은 제트의 확산 정도를 나타내는 지표인 제트 폭의 변화로부터 파랑이 제트의 확산에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4.2 파랑 위상의 영향

서로 다른 파고에 대한 파랑수역내 제트의 유속측정과 분석은 Fig. 5에 제시한 영점상향교차점의 위상 결과로 검토하였다. 따라서 하나의 위상에서만 결과를 분석하였기 때문에 위상 변화에 따른 평균중심선속도와 제트 유속폭의 변화를 검토할 필요가 있다. 이를 위해 $H=2.0\text{ cm}$ 조건에서 파곡과 영점하향교차점에 해당하는 두 위상에서 추가적인 계측을 수행하였으며, 그 결과를 영점상향교차점의 위상에서 얻어진 결과와 비교하였다.

Fig. 8은 전술한 세 위상에서 위상평균된 제트 중심선유속을 도시한 것이다. Fig. 8의 유속분포는 제트출구와 가까운 영역에서는 세 위상에서 차이가 있으나, $x/D > 60$ 의 영역에서는 거의 차이가 없음을 알 수 있고, 이는 제트의 출구에서 멀어질수록 파랑의 위상은 중심선유속에 영향을 미치지 않음을 의미한다. 이와 같은 결과는 일정한 흐름 (uniform current) 수역에서 제트 거동에 관한 연구와 차이가 있는 것이다. 파랑수역과 같은 주변흐름은 각 방향으로의 유속이 지속적으로 변하는 파랑의 주기에 의해 제한되고, 상대적으로 짧은 주기 동안만 영향을 미치게 됨으로서 제트의 특성은 진동하는 주변흐름유동에 의해 변하지만, 그 변화는 어떤 특징적인 모습을 보이지 않는 것으로 추정된다.

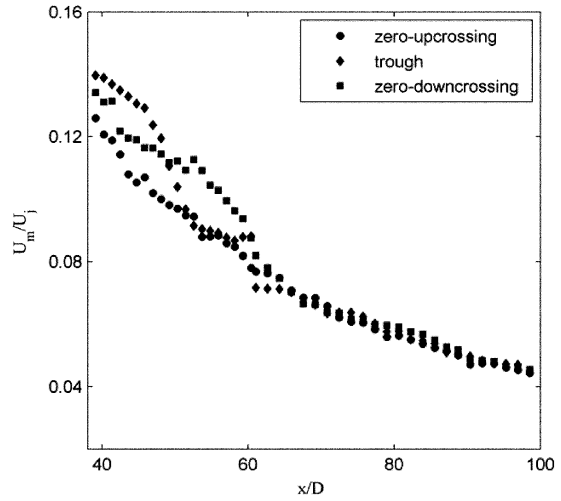


Fig. 8. Jet centerline velocity distribution at different wave phases.

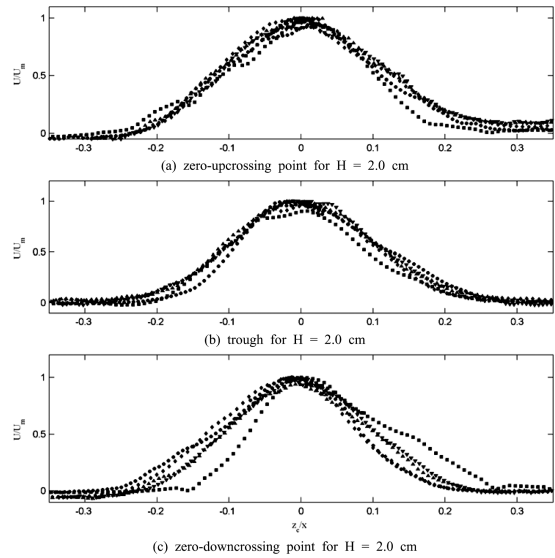


Fig. 9. Cross-sectional profile of the jet mean velocity at different wave phases at $z_0/x = 50(\bullet)$, $60(\blacklozenge)$, $65(\blacksquare)$, $75(\blacktriangle)$, $95(\blacktriangledown)$.

Fig. 9는 $H=2.0\text{ cm}$ 조건에서 서로 다른 세 위상에서 얻어진 평균유속의 횡단면도를 도시한 것이다. 각 위상에서의 횡단면도는 서로 비슷한 분포를 보이며, 자기상사성이 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 세 위상에서의 제트 유속폭 $2b_u$ 의 축방향 분포를 나타낸 것이다. 유속폭의 값은 Fig. 8과 같이 제트 출구에 가까운 영역에서 약간의 차이를 보이지만 전체적인 축방향 분포는 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과

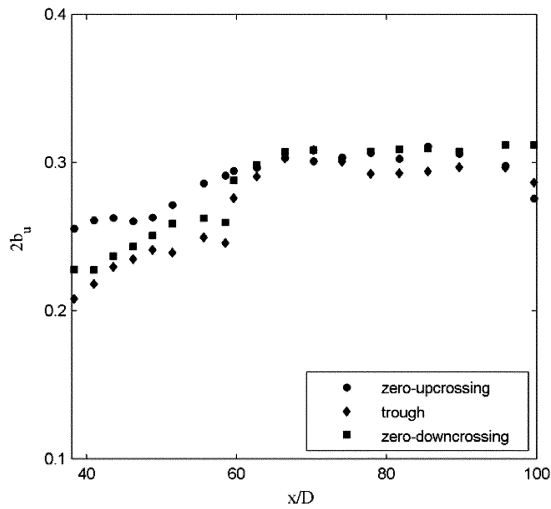


Fig. 10. Jet width at different wave phases.

로부터 파랑의 위상은 제트의 확대정도에 영향이 크지 않음을 의미한다. 그러나 본 연구에서는 한 주기의 파랑에서 3개의 위상조건만을 고려하였기 때문에 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4.3 비선형 영향 및 속도측정의 오차

식 (5)에 나타난 바와 같이 본 연구에서는 유속 분석시 파랑 입자의 속도는 측정된 평균유속으로부터 선형적으로 분리할 수 있다는 가정을 도입하였다. 그러나 제트확산에 있어서 비선형 분산효과(nonlinear dispersion effect)가 어느 정도 역할이 있을 것으로 예상된다. 따라서 이러한 비선형 영향을 측정된 유속, 자유제트 유속, 그리고 제트의 축에서 파입자 속도의 관계로 부터 분석해 보았다.

$$U_m = U_{jm} + U_w + f_{nl}(U_{jm}, U_w) \quad (6)$$

여기서, U_{jm} 은 자유제트의 중심선유속, $f_{nl}(U_{jm}, U_w)$ 은 제트와 파랑의 상호작용에 의한 비선형항(nonlinear term)이다.

Fig. 11은 비선형항 $f_{nl}(U_{jm}, U_w)$ 의 값을 자유제트의 중심선유속으로 무차원하여 파고별로 나타낸 것이다. Fig. 11에서 비선형효과는 파고가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있으며, 특히 파고가 가장 큰 $H=6.0$ cm의 경우에 비선형항은 자유제트유속의 약 50%에 달하였다.

평균유속의 수렴조사는 각 실험안의 위상평균유속으로 수행되었으며, 평균값은 각 위상에서 190개의 PIV 순간유속장으로 계산되었다. 100개와 190개의 순간값을 이용한 평균값의 비교에서 두드러진 차이는 발견되지 않았으며, 표

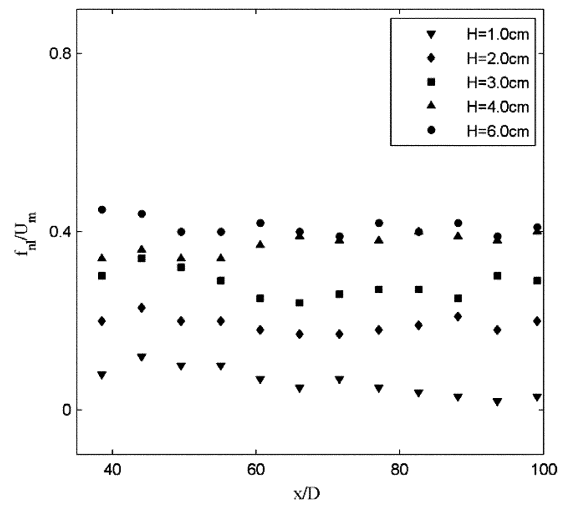


Fig. 11. Nonlinearity of jet-wave interaction.

본값수의 제곱근으로 무차원화된 RMS(root-mean-square)는 5% 이하로 나타났다. 이는 본 연구에서 평균값계산을 위해 사용된 190개의 표본값수가 충분하고, 얻어진 평균값의 오차는 5% 이내임을 의미한다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 파랑수역내에서 비부력 원형제트의 거동을 검토하기 위해 PIV기법을 이용한 유속측정을 수행하였다. 제트는 중간수심에서 파랑전파방향의 역방향으로 수평 방류되었으며, 파랑수역은 상대적으로 작은 진폭을 갖는 규칙파를 이용하였다. 유속측정은 제트의 자기상사성을 보여주는 영역에서 실시되었으며, 취득된 순간유속으로부터 평균을 얻기 위하여 위상평균법이 사용되었다. 제트의 거동에 미치는 파고의 영향을 검토하기 위해 5개의 서로 다른 파고가 사용되었으며, 파랑 위상의 영향을 검토하기 위해 3개의 다른 위상에서의 제트 거동을 측정하였다.

제트의 중심선유속의 감소정도를 나타내는 제트의 감소계수 n 은 파고에 의존적이지 않았으며, 모든 실험안에서의 n 값은 정체수역환경에서의 감소계수와 유사하였다. 감소계수 α 는 제트의 감소시작단계를 나타내는 것으로서 파고에 강한 의존성을 보였다. 파고가 6.0 cm인 조건에서 제트의 α 값은 자유제트에 비해 45% 감소하였다. 유속의 횡단면분포 결과로부터 파랑 대 제트의 운동량비(wave-to-jet momentum ratio)가 상대적으로 작은 경우의 평균유속 분포는 자기상사성이 강하게 나타났으나, 파랑의 운동량이 커질수록 제

트의 자기상사성은 점차 소멸되었다. 그리고 제트의 폭은 파고증대에 따라 증가하는 경향을 보였으나, 축방향에 따른 폭의 변화는 크지 않았다. 이와 같이 제트 중심선유속의 빠른 감소와 제트의 퍼짐이 증가하는 것으로부터 파고증가가 제트의 희석과 확산을 가속시킨다는 것을 알 수 있었다. 또한, 파랑 위상의 변화에 따른 제트 중심선과 횡방향 퍼짐을 검토하였으나, 파고에 비해 그 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. 이는 반복적인 파랑 운동에 의해 제트 거동이 변하지만, 그 변화는 뚜렷한 경향을 보이지 않음을 의미한다.

본 실험은 2차원 수로에서 수행됨으로 인해 제트의 y 축 방향에 대한 검토가 이루어 지지 못했으며, 향후 이에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 제트에 미치는 파랑의 영향만을 분석하기 위해 실질적으로 고려해야 할 여러 인자들을 제외하였으며, 실질적인 적용을 위해서는 다양한 인자들을 고려한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김영도, 서일원, 강시환, 오병철 (2000). 3차원 원역모형을 이용한 수중방류수의 근역 혼합특성 민감도 분석. 대한토목학회논문집, 20(5B), 689-700.
- 이재형, 서일원 (1996). 수중 다공확산에 의해 방류된 온수의 확산거동 예측. 대한토목학회논문집, 16(II-3), 281-290.
- Andreopoulos, J. and Rodi, W. (1984). Experimental investigation of jets in a cross flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 138, 93-127.
- Antonia, R.A. and Bilger, R.W. (1973). An experimental investigation of an axisymmetric jet in a co-flowing air stream. *Journal of Fluid Mechanics*, 61, 805-822.
- Camussi, R., Guj, G. and Stella, A. (2002) Experimental study of a jet in a crossflow at very low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 454, 113-144.
- Chan, C.H.C. and Lam, K.M. (1998). Centerline velocity decay of a circular jet in a counterflowing stream. *Physics of Fluids*, 10, 637-644.
- Chin, D.A. (1987). Influence of surface waves on outfall dilution. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113, 1006-1018.
- Chin, D.A. (1988). Model of buoyant jet-surface wave interaction. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 114, 331-345.
- Chu, P.C.K., Lee, J.H. and Chu, V.H. (1999). Spreading of turbulent round jet in coflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 193-204.
- Chyan, J.M. and Hwang, H.H. (1993). On the interaction of a turbulent jet with waves. *Journal of Hydraulic Research*, 31, 791-810.
- Cowen, E.A., Chang, K.-A. and Liao, Q. (2001). A single camera coupled PTV-LIF technique. *Experiments in Fluids*, 31, 63-73.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, N.H. (1979) *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, New York.
- Hussein, H.J., Capp, S.P. and George, W.K. (1994). Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 258, 31-75.
- Koole, R. and Swan, C. (1994). Measurement of a 2-D non-buoyant jet in a wave environment. *Coastal Engineering*, 24, 151-169.
- Lam, K.M. and Chan, C.H.C. (2002). Time-averaged mixing behavior of circular jet in counterflow: Velocity and concentration measurements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 861-865.
- Mori, N. and Chang, K.-A. (2003). Experimental study of a horizontal jet in a wavy environment. *Journal of Engineering Mechanics*, 129, 1149-1155.
- Pope, S.B. (2000). *Turbulent flows*, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent jets*, Elsevier Scientific, Amsterdam, The Netherlands.
- Shuto, N. and Ti, L.H. (1974). Wave effects on buoyant plumes. *Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering*, Copenhagen, 2199-2208.

Received November 26, 2007

Accepted December 13, 2007