

파랑수역으로 방류되는 비부력 원형 제트의 거동

Behavior of Neutrally Buoyant Round Jet in Wave Environment

유용욱*, 이종인**, 김영택***

Yong-Uk Ryu, Jong-In Lee, Young-Taek Kim

요 지

본 연구에서는 천해역에서 수평 방향으로 방류되는 비부력 원형 난류제트에 대한 수리모형실험을 수행하여, 파랑이 제트의 확산에 미치는 영향을 검토하였다. 수리모형실험시 대상 파랑은 진폭이 작은 규칙파를 적용하였으며, 난류제트의 순간적인 유속장은 입자화상유속계(particle image velocimetry, PIV)기법을 이용하여 측정하였다. 평균유속장은 PIV기법으로 측정된 순간유속장을 위상평균하여 계산하였으며, 파의 진폭을 변화시키며 실험을 수행하였고, 파의 진폭변화에 따른 제트의 유속분포로부터 제트의 중심선과 제트단면을 추정하였다. 제트의 중심선속도는 파의 진폭이 증가함에 따라 중심선속도의 감소 시점이 빨라졌으며, 제트의 횡단면분포의 고유특성인 자기상사성(self-similarity)이 단계적으로 사라졌다. 제트 중심선의 속도와 제트 유속단면은 제트의 확산정도를 알 수 있는 중요한 인자로서 파랑 진폭의 크기에 따른 이들 인자의 변화로부터 파랑의 분산이 난류제트의 확산현상에 미치는 영향을 알 수 있었다.

핵심용어 : 비부력제트, 입자화상유속계, 규칙파, 확산, 중심선속도, 횡단면분포

1. 서 론

난류제트와 파랑과의 상호작용은 수공학, 환경공학, 해안해양공학 그리고 발전산업등 여러 공학 분야에 중요한 문제로 여겨져 왔다. 이의 대표적인 예로 연안으로 방출되는 발전소의 냉각수나 오수를 들 수 있다. 대부분의 방출문제의 경우, 제트난류는 주변수를 유입하여 방출유체와 혼합시키므로 이는 방출수의 희석을 위한 효율적인 기계작용으로 이용되어 왔다. 만약, 이 주변수가 정지해 있지 않는다면, 제트류의 희석과정은 주변수의 흐름으로부터 많은 영향을 받을 수 있을 것이다. 제트와 정상류 흐름(steady current)간의 상관관계에 대한 연구는 다양하게 수행되어온 반면, 파랑같은 비정상류안의 제트는 상대적으로 작은 수의 연구가 수행되어 왔다. 초기의 연구로서 Shuto and Ti(1974)는 긴 파랑아래서의 플룸(plume)의 시간평균한 입자속도의 분석을 통하여 플룸의 확산은 파에 의하여 증가함을 정질적으로 보여주었다. Chin(1987)은 차원분석법(dimensional analysis)을 이용하여 제트의 희석을 대표하는 6개의 무차원변수를 유도하였으며 파랑이 존재하는 조건하에 자유수면 근처의 희석정도는 파가 존재하지 않을 때보다 크게 증가함을 증명하였다. Koole and Swan(1994)도 LDV기법을 이용하여 천이수역조건의 작은 진폭을 갖는 파의 아래에서 분사되는 제트를 측정하여 파의 유무에 따른 제트의 퍼짐의 정도를 보였다. Mori and Chang(2003)은 규칙파 아래에서 제트의 중심선의 움직임을 연구하였다. LIF(laser induced fluorescence)기법을 이용한 제트의 중심선의 측정을 통해 파랑아래의 제트의 거동을 파와 제트의 운동량의 비에 따라 3가지의 유형으로 분류하고 이를 이용하여 제트의 중심선의 움직임을 모의하였다.

* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 박사후연수생 E-mail : yuryu@kict.re.kr

** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 E-mail : jilee@kict.re.kr

*** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 E-mail : ytkim@kict.re.kr

본 연구는 중성부력을 갖는 원형 난류제트의 거동에 대한 진행규칙파의 영향을 연구하였다. 제트는 파랑전파의 반대방향으로 중간수심에서 방류되었으며 제트의 유속장은 입자화상유속계(particle image velocimetry, PIV)기법을 적용하여 측정되었다. 측정된 영역은 zone of establishment에 해당되는 영역으로 축방향거리가 제트출구직경의 35배인 지점에서부터 90배까지의 지점까지 측정하였다. 측정된 순간유속장은 위상평균을 하여 평균유속장을 구하였으며, 유속의 분포로부터 제트의 중심선(centerline)과 반폭(half width)의 위치를 확인하였다. 파랑이 제트확산에 주는 영향의 정도를 규명하기 위하여 파가 없는 상태의 동일한 조건의 제트와 다양한 크기의 진폭을 갖는 파랑 아래의 제트의 실험을 수행하였다.

2. 실험장비 및 조건

수리모형실험은 폭 0.9m, 높이 1.2m, 길이 36m의 유리벽으로 제작된 2차원 단면조파수조에서 수행되었으며, 수심은 0.8m로 유지하였다. 스테인레스철로 만들어진 직경 4.54mm의 원형제트는 조파기에서 21m 떨어진 지점의 중간수심에서 수조의 중앙선을 따라 파랑 전파의 반대방향으로 수평하게 방류되었다. 제트의 방류속도를 일정하게 유지하기 위하여 수조위에 일정수두탱크(constant head tank)를 설치하고 이로부터 제트를 방류하였다. 수조 및 실험장치는 Fig 1에 도시되었다. 유속의 측정을 위하여 PIV기법을 적용하였다. PIV 시스템의 광원으로는 파장 532nm, 최대출력에너지 400mJ, 파동지속시간(pulse duration) 6ns 와 laser head당 최대 10Hz의 반복비를 갖는 dual-head frequency-doubled Nd:YAG laser를 사용하였다. 광막(Light sheet)의 생성을 위하여 실린더식(cylindrical)과 구체식(spherical)으로 구성된 광학렌즈가 사용되었다. 광막에 의해 발광되는 미세입자로 각각 57 μm 와 12 μm 의 평균직경을 갖는 두 종류의 입자가 쓰였으며, 두 입자의 침강속도(settling velocity)는 측정될 속도에 영향을 주지 않을 만큼 매우 작다. 이미지 기록장치로는 초당 8 프레임의 최대 프레임률(frames per second, fps), 1024×1280픽셀의 해상도와 12비트의 동적영역(dynamic range)을 갖는 CCD 카메라를 사용하였다. 조파기의 조절신호는 파고계와 카메라조작신호와 더불어 동기화(synchronization)시켰다. 제트의 출구 속도 u_0 는 1.14 m/s로 고정되었다. 제트의 출구에 의한 Reynolds수, $Re = u_0 D / \nu$,는 약 5200이었다. 여기서 ν 는 동점도계수(kinematic viscosity)이다. 파의 진폭은 상대적으로 작은 범위인 0.5cm부터 3.0cm까지의 5개의 크기였다.

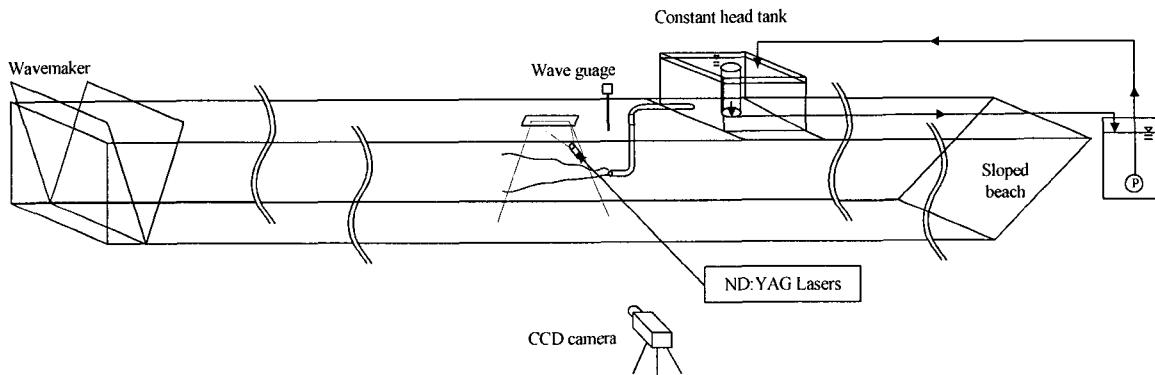


Fig 1. Experimental setup.

3. 파의 진폭의 영향

파랑수역으로 방류되는 제트의 중심선속도 u_c 를 제트방류속도에 의해 무차원화시켰다. 전술된 모든 실험안에 대하여, 무차원화된 제트의 평균중심선속도 u_c 를 Fig 2에 로그축척으로 제시하였

다. 파랑수역에서의 제트는 진동하기 때문에 자유제트의 중심선과 다르게 방류방향으로 직선으로 분포하지 않는다. 따라서 진동하는 제트의 경우 중심선은 수직단면에서 최대수평속도가 일어나는 위치로 정의하였고 중심선의 위치에 따른 이동좌표계인 수직좌표계 z_a 를 기준으로 중심선속도와 폭을 결정하였다. 본 연구의 측정영역인 $30 < x/D < 90$ 은 zone of establishment 영역으로 자기상사성 지역(self-similar region)으로도 불리며 이 영역내의 제트 중심선속도의 감쇠는 아래의 경험식에 의해 나타내어진다.

$$\frac{\langle u_c \rangle}{\langle u_j \rangle} = B \left(\frac{x - x_0}{D} \right)^n \quad (1)$$

여기서 $\langle u_c \rangle$ 는 중심선평균속도, $\langle u_j \rangle$ 는 제트방류속도, B 와 n 은 감소계수, x_0 은 제트의 가상원점(virtual origin)을 나타낸다. 실험안들의 비교를 위하여 자유제트의 가상원점인 $x_0 = 4D$ 를 모든 실험안에 적용하였다. 식(1)의 계수 n 은 중심선속도의 감소율(decay rate)을 나타내며, 자유제트의 경우 -0.1의 값을 갖고 있다고 연구되어 왔으며 본 연구에서는 -0.99의 값을 얻어 좋은 일치를 보였다. 파랑수역안의 제트의 경우 각각 5개의 다른 진폭을 갖는 파의 실험안에서 n 은 -0.94에서 -1.13의 범위를 보이며 차이는 상대적으로 작았으며, n 과 진폭의 뚜렷한 상관관계는 찾을 수 없었다. 이를 바탕으로 다른 감소계수인 식(1)안의 B 를 구하기 위하여 모든 실험안의 n 을 자유제트에 해당하는 값인 -1.0으로 고정하였다. 여기서 감소계수 B 는 중심선이 감소하기 시작하는 지점을 나타낸다. Fig 3은 B 와 파의 경사도 kA 의 관계를 보여주며, 그림안의 직선은 분포를 선형회귀(linear regression)한 것이며 아래의 식으로 표현된다.

$$B = -67.4kA + 5.4 \quad (2)$$

두 특성값의 관계로부터 파의 진폭이 증가할 때 B 값이 일정하게 증가함을 알 수 있으며, 특히 진폭이 가장 큰 실험안의 경우 B 값은 자유제트의 그 값에 비해 40%감소하였다. 위의 관계로부터 진폭이 큰 파랑일수록 중심선 속도는 일찍 감소한다는 결과를 알 수 있다.

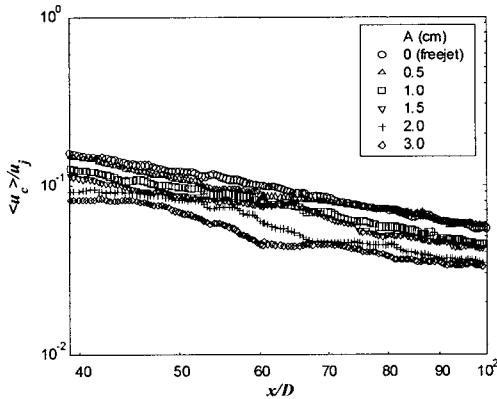


Fig 2. Jet centerline velocity distribution along the jet axial direction.

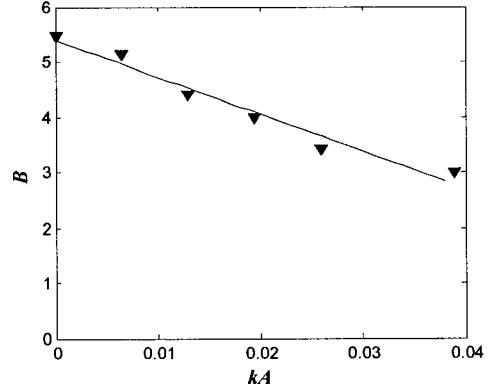


Fig 3. Centerline velocity decay coefficient B versus wave steepness kA .

제트의 횡단면 평균속도가 Fig 4에 제시되어있다. Fig 4는 측정영역($x/D=[35, 90]$)안의 파의 진폭의 크기에 따른 6개의 유속단면을 보여주고 있다. 각 유속단면의 평균속도는 해당하는 횡단면의 중심선속도에 의해 무차원화되었으며 얻어진 값은 무차원화된 횡방향 거리에 대하여 그려졌다. 이 속도의 횡단면분포로부터 제트의 반폭 $\eta_{1/2}$ 이 정의되는데, 제트의 반폭 $\eta_{1/2}$ 는 $u/u_c = 0.5$ 에 상응하는 z_a/x 의 위치로 정의되는 무차원값으로 이는 원형제트의 반경거리비율과 제트의 확대율을 나타내어왔다.

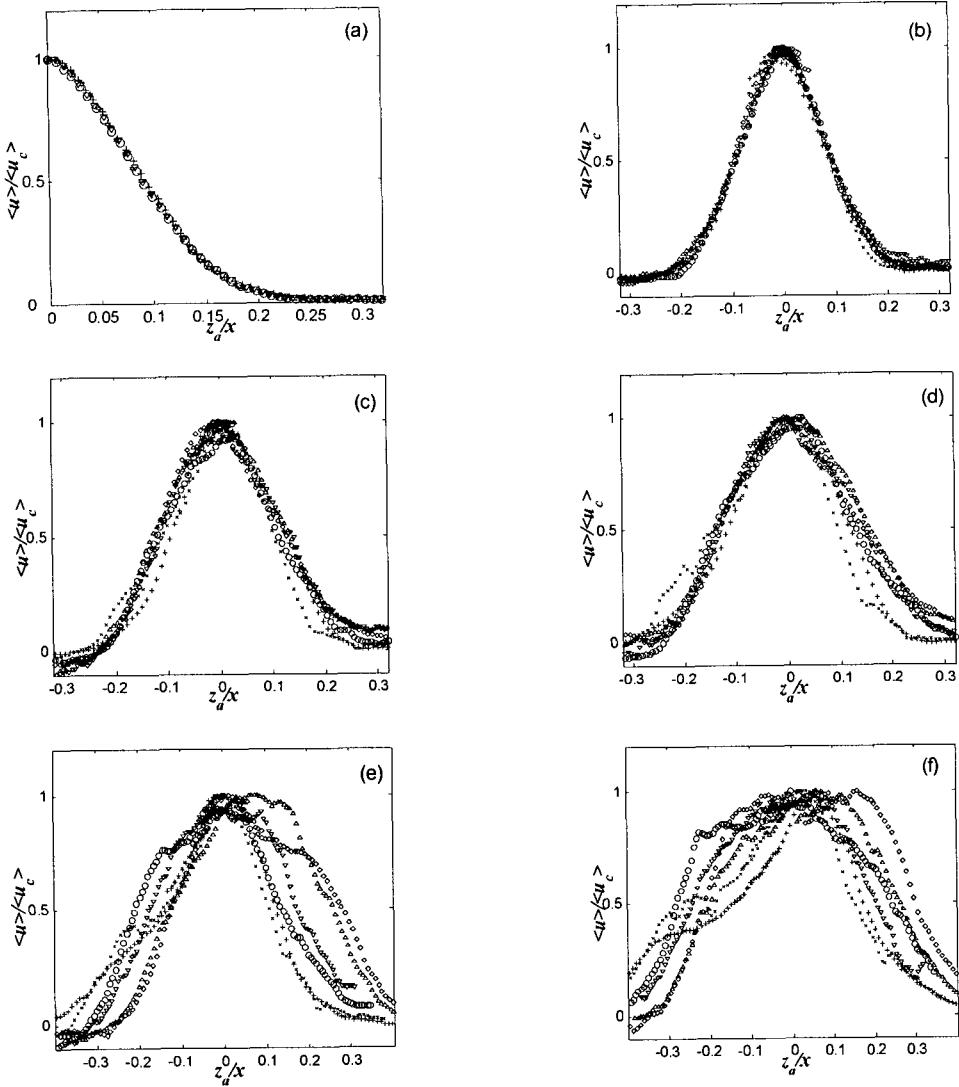


Fig 4. Cross-sectional jet velocity profiles at $x/D = 40(+)$, $47(\times)$, $57(o)$, $64(\diamond)$, $77(\triangle)$, and $95(\nabla)$ for the cases of (a) $A = 0.0$ cm, (b) $A = 0.5$ cm, (c) $A = 1.0$ cm, (d) $A = 1.5$ cm, (e) $A = 2.0$ cm, and (f) $A = 3.0$ cm.

Fig 4에 제시된 유속단면의 분포로 부터 파랑수역의 제트의 퍼짐(spread)은 파의 진폭이 커질수록 넓어져 감을 알 수 있다. Fig 5는 모든 실험안의 제트의 폭을 제트의 축방향에 따라 나타내었다. 전술한 바와 같이 자유제트는 대칭성을 갖고 있어 반폭의 개념을 이용하나, 파랑수역의 제트는 주변수의 영향으로 축대칭성을 더 이상 보여주지 않는다. 따라서 제트의 퍼짐의 비교를 위하여 유속단면의 중심선 양쪽에 위치하는 $u/u_e = 0.5$ 에 상응하는 두 z_a/x 의 위치의 거리로 폭을 결정하였다. Fig 6은 Fig 5안에 분포된 각 실험안의 제트너비의 평균값을 파경사도 kA 의 대한 함수로 나타내었다. 제트의 폭은 kA 에 대하여 선형적으로 증가하며, 이는 아래의 선형회귀식으로 나타내어질 수 있다.

$$2\eta_{1/2} = 6.33kA + 0.16 \quad (3)$$

가장 큰 진폭을 갖는 실험안($A=3.0\text{cm}$)의 경우, 제트의 폭은 자유제트의 폭에 비해 2.3배나 증가하였다. 본 연구에서는 일정한 파주기를 이용하였으므로 이는 파의 진폭이 제트의 폭의 확장과 상관이 있음을 보여주고, 결국 제트의 확산에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

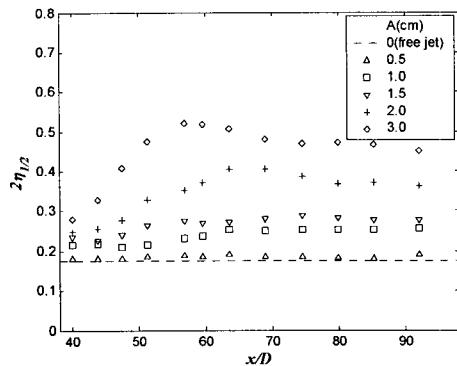


Fig. 5. Jet width $2\eta_{1/2}$ against axial distance x/D .

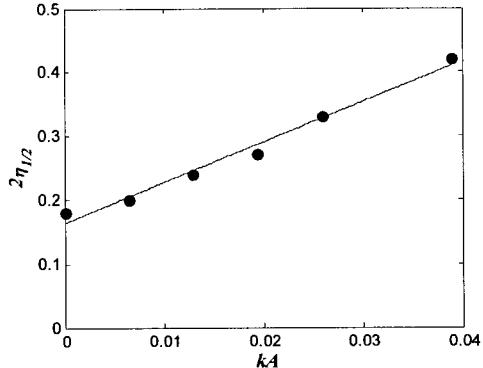


Fig. 6. Jet width vs. wave steepness kA .

4. 결 론

본 연구에서는 파랑수역안의 중성부력 난류원형제트의 실험적 연구를 PIV기법을 적용하여 수행하였다. 파의 진폭이 증가함에 따라 중심선속도의 감소시점이 빨라졌으며, 제트의 폭도 증가하였다. 제트의 중심선속도와 유속단면의 폭은 제트의 확산의 정도를 나타내는 인자로서 파랑 진폭의 크기에 따른 이들 인자의 변화로부터 파랑의 분산이 제트의 확산을 증가시킨다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- Chin, D.A. (1987) Influence of surface waves on outfall dilution. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 113, pp. 1006-1018.
- Koole, R. & Swan, C. (1994) Measurement of a 2-D non-buoyant jet in a wave environment. Coastal Engineering, Vol. 24, pp. 151-169.
- Mori, N. & Chang, K.-A. (2003) Experimental study of a horizontal jet in a wavy environment. Journal of Engineering Mechanics. Vol. 129, pp. 1149-1155.
- Shuto, N. & Ti, L.H. (1974) Wave effects on buoyant plumes. Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, pp. 2199-2208.