

낙동강 하천유출수의 3 차원 거동해석 3-Dimensional Behaviours and Analysis of the River Discharged Plume in the Nakdong Esutary

이종섭¹, 주귀홍², 윤은찬¹

Jong Sup Lee¹, Gwi-Hong Joo², Eun Chan Yoon¹

1. 서 론

낙동강 하구는 서쪽으로 진해만, 동쪽으로는 부산항과 인접해 있으며 생태보호구역, 철새도래지로서 자연환경보전상 중요한 해역이다. 1987년 11월 낙동강 하구둑 건설이후 명지주거단지 매립, 신호공단 매립이 이루어졌으며 최근에는 가덕도 북쪽 해안에 부산신항만이 건설되고 있는 중이다. 낙동강 하구둑 건설지점에서 유로연장 509.7km, 유역면적 23,560km², 500년 빈도의 설계홍수량과 홍수위는 18,300m³/sec, EL. 3.7m로서 한국 제2의 하천이다. 홍수시 유출수의 거동을 항공사진의 탁도분포로부터 유추하면 동쪽으로는 부산항 입구까지 서쪽으로는 가덕수도까지 확장되고 있음을 볼 수 있다. 그동안 낙동강 하구역에서 많은 해양조사와 해수유동 수치모델링이 행해졌으나 대부분이 밀도차를 고려하지 않았기 때문에 하천유출수의 확산에 미치는 밀도효과를 설명할 수 없었으며 현 시점에서 낙동강 하천유출수의 확산기구에 대해서는 잘 알려져 있지 않고 있다.

Kourafalou et al.(1996)은 3차원 경압해수유동모델인 POM(Blumberg and Mellor, 1987)을 South Atlantic Bight에 적용하여 밀도류에 영향을 미치는 여러가지 파라미터에 대한 모델의 반응을 조사하여 담수확산의 확산범위와 형태를 연구하였다. 이들 연구 결과에 의하면 바람이나 조석 등의 강한 외력이 존

재하지 않을 때 하구로부터 유출된 하천플룸은 하구 전면에서 저염수의 수괴가 형성되고 코리올리 힘에 의하여 북반구에서 시계방향의 흐름인 고기압성 흐름이 형성되며, 이 고기압성 흐름은 관성력과 코리올리힘이 평형을 이룬다(Garvine, 1987).

본 연구에서는 낙동강 하구역에서 관측된 수온·염분의 자료로부터 낙동강 유출수의 3차원적인 거동특성을 밝히고 POM을 이용하여 하천플룸의 동역학적 운동기구를 해석하여 낙동강 유출수의 확산기구를 해석하는데 그 목적이 있다.

2. 낙동강 하천유출수의 3 차원 거동특성

2.1 조사내용 및 방법

낙동강 하구역 및 가덕도 주변 연안해역의 평수시의 해수유동 및 낙동강 유출수의 확산양상을 평가하기 위하여 1998년 부산신항건설에 따른 해양조사결과(부경대학교 해양과학공동연구소, 1999)를 분석하였다. 해양조사는 1998년 1월, 3월, 5월, 7월, 8월 및 10월 총 6회에 걸쳐 수온·염분의 수평분포 및 연직분포를 측정하였다. 수온·염분의 관측은 CTD(Sea Bird 19)를 이용하여 측정하였으며 봉상온도계를 사용하여 정점별 표층수온을 현장에서 측정하였다. 해양관측 정점은 Fig. 1에서와 같이 총 41개로 하였다.

¹ 부경대학교 건설공학부 (Department of Civil Engineering, Pukyong University, Busan 608-739, Korea)

² (주)한성개발공사 환경사업부 (Department of Environment, Hansung Development & Consultant Ltd, Busan 608-029, Korea)

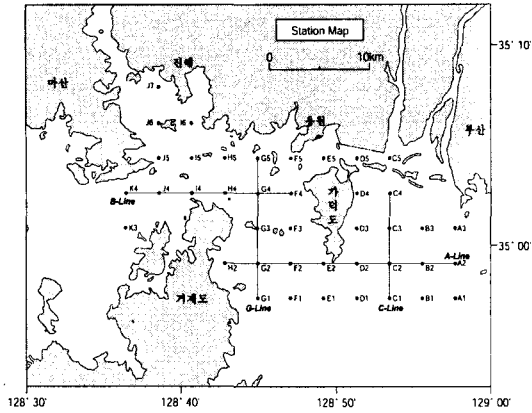


Fig. 1. Station map of CTD.

2.2 조사결과 및 고찰

조사자료의 분석에 있어서 중요한 요인 중의 하나는 낙동강 하구유출유량으로서, Fig. 2 는 낙동강 홍수통제소의 1998 년 수문기상 관측자료(낙동강 하구둑) 중에서 일별 총방류량을 나타낸다. 여기에서 관측시기 중에서 3 월은 평수기에 해당되고 7 월은 비교적 많은 양의 강수로

인해서 상당한 양의 방류가 있었고 8 월은 홍수로 인한 커다란 유출이 있었다.

2.2.1 수온-염분 수평분포의 계절변화

Fig. 3에서 수온의 수평분포는 계절별로 뚜렷한 차이를 발견할 수는 없지만 염분은 계절변화가 뚜렷하다. 3월의 염분의 수평분포는 가덕도를 중심으로 동쪽해역은 담수유출의 영향으로 염분의 변화가 크게 나타나 하구역의 27.0psu에서 외해역의 33.5psu 까지 나타났으며 하구 염분전선은 사주로부터 남쪽 8.0km 떨어진 곳에 형성되었다.

7월의 경우에 Fig. 2에서 나타나는 바와 같이 7월 중순부터 많은 양의 강수로 인하여 방출수량이 증대하여 염분전선이 하구사주로부터 약 24km 까지 확장되고 있으며, 유출은 가덕도 남단을 우회하여 거제도 북동쪽의 가덕수도까지 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 이때 등염분선의 경사를 살펴보면 유출의 왼쪽에서는 염분경사가 매우 크게 나타나고 있다.

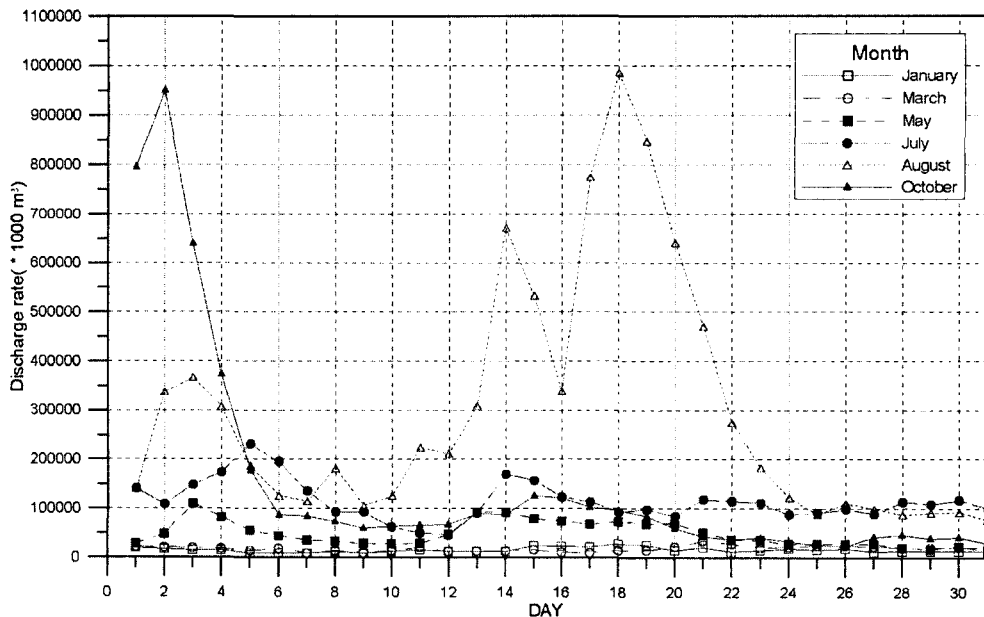


Fig. 2. Fresh water discharge of Nakdong river in 1998.

한편, 8월에는 Fig. 2에서 나타나는 바와 같이 커다란 홍수유출이 있었다. 따라서 8월 22일의 결과는 홍수유출의 영향을 잘 나타내 주는 결과임을 확인할 수 있고, 6.0~22.0psu의 저염수가 나타나고 있으며, 염분의 기울기로부터 낙동강 홍수유출수의 거동을 추정하면 표층에서는 가덕도 남단을 우회하여 가덕수로를 따라 진해만 입구까지 약 40km에 걸쳐서 확장하고 있음을 볼 수 있다. 한편, 동쪽으로는 관측자료가 없어서 잘 알 수는 없으나 12.0~14.0psu의 등염분선의 확장이 서쪽보다 훨씬 더 제약받고 있는 양상을 나타낸다. 한편, 가덕도 남단의 동쪽에서는 주위수보다 큰 16.0~22.0psu의 고염분수가 존재하는데 이는 국부적인 지형성 와동의 결과로서 여겨진다. 이상의 결과를 요약하면, 낙동강 유출수는 하천유량이 적은 갈수기에는 하구 사주로부터 약 10km 까지 확산되며 하천유량이 커짐에 따라 우측으로 편향되어 가덕수로를 따라 진해만 입구까지 확산되고 유출의 왼쪽에서 염분경사가 크게 나타난다.

2.2.2 염분 연직분포의 계절변화

낙동강 유출수의 성층화 현상의 계절적인 변화를 알아보기 위해서 평수기인 3월과 풍수기인 7월, 홍수기인 8월의 염분 연직분포를 Fig. 1에 나타낸 C-line, A-line, G-line 및 B-line 에 대하여 나타낸 그림은 Fig. 4 와 Fig. 5와 같다.

Fig. 4에서 3월의 경우 C-line에서는 저염수는 상층 5m 이내에서 C3 지점의 남쪽까지 중간혼합의

상태를 나타내고 있으며, A-line에서 담수층의 폭은 C2에서 A2 지점의 동쪽까지 표층 5m이내에서 국한되어 나타나고 있다. 한편, C-line의 C2 지점에서 염분이 약간 크게 나타나는 것은 관측시기인 낙조류시 진해만 해수의 이류에 의한 것으로 사료된다. Fig. 5에서 7월의 경우 낙동강 유출수는 C-line에서 C2 지점까지 강혼합 상태로 나타나며, A-line에서는 C2 지점부터 서쪽으로 표층 10m이내에서 나타나며 E2에서 D2 지점 사이에 담수층의 core가 존재한다. G-line에서 27.0psu 이하의 담수층은 표층 3m 내에서 G3 지점까지 확장된다. 8월의 경우 C-line에서 C1 지점까지 수심 5m 부근에 강한 염분악층을 나타내며, A-line에서 H2 지점에 이르기까지 표층 10m 이내에서 담수층이 존재한다. 여기서, D2 지점에서 염분농도가 커지는 것은 Fig. 3의 염분수평분포에서 나타난 지형성 와동에 의한 용승현상으로 보여진다. G-line에서도 담수층은 G5지점까지 표층 5m내에서 나타나고 있으며, B-line에서는 22.0psu의 담수가 K4 지점 근방까지 표층 2~3m 층에서 확산되고 있음을 볼 수 있다.

이들 결과로부터 낙동강 유출수의 성층화는 평수시에는 표층 5m 이내에서 중간혼합의 양상을 나타내며 담수층이 나타내는 범위가 가덕도 남단의 낙동포에 국한된다. 그러나, 하천유량이 많아질수록 성층화 현상이 크게 나타나며 담수층의 확산범위는 서쪽으로는 진해만 입구까지 나타나고 있다. 이때, 국부적으로 존재하는 지형성 와동은 염분의 연직분포에 커다란 영향을 미친다.

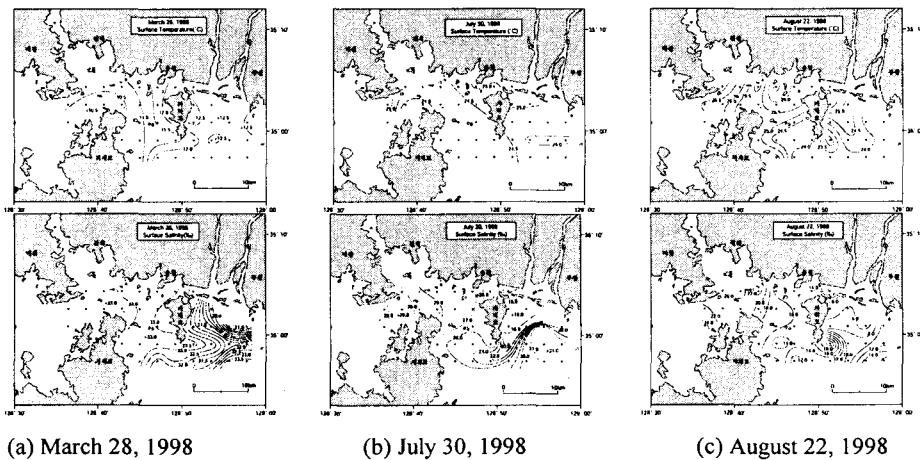
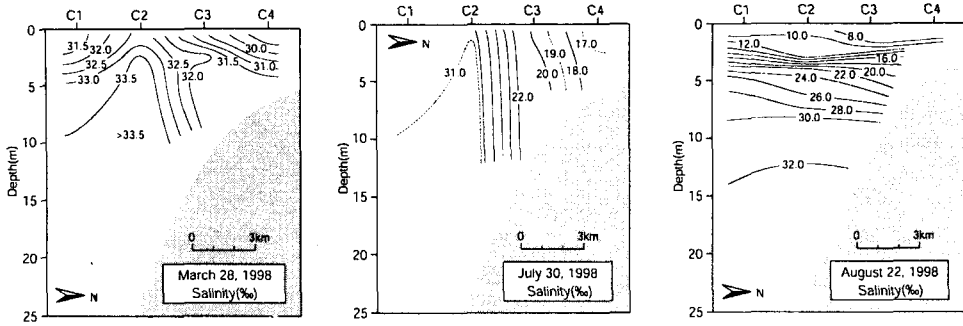
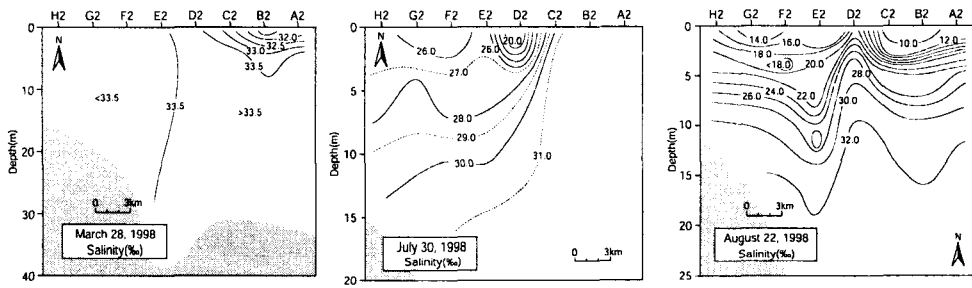


Fig. 3. Horizontal distribution of surface temperature and salinity in 1998.

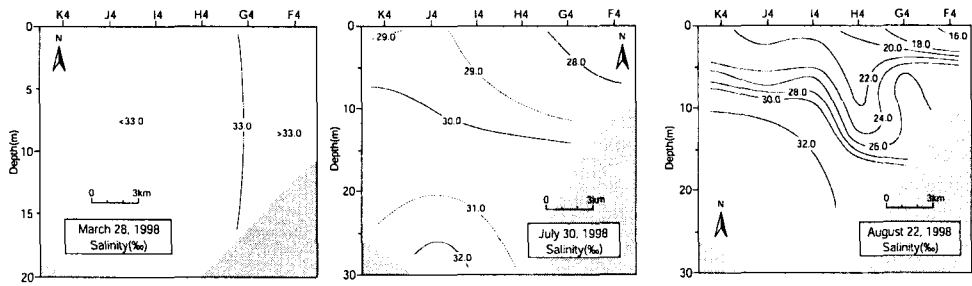
(Line-C)



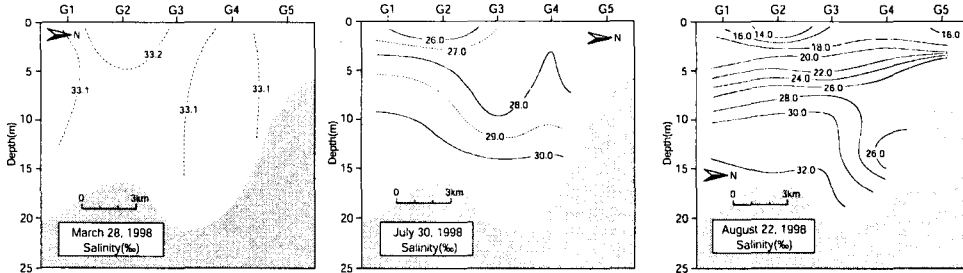
(Line-A)



(Line-G)



(Line-B)



(a) March 28, 1998

(b) July 30, 1998

(c) August 22, 1998

Fig. 4. Cross sectional distribution of salinity at the section C, A, G and B in March, July and August.

3. 수치실험결과

하천플룸의 거동기구를 해석하기 위하여 POM을 단순화된 해안에서 하천유출량만 존재하는 경우와 하천유출량과 조석력이 있는 경우에 대하여 수치실험을 수행하였다.

3.1 수치모형 실험조건

수치모형에 있어서 격자간격은 1km로 두었고, 수평격자수는 100 x 70으로 설정하였고, 연직방향으로는 10개의 층으로 나누어 계산하였다. 하천 유출부는 북쪽에 위치하고 있고, 하천유출수에 따른 담수의 동역학적인 역할은 일반적으로 내부대륙붕(해안선에서 수심 20m 이내)에 영향을 주기 때문에(Kourafalou et al., 1996) 수심은 20m로 일정하게 주어졌다.

초기조건으로는 낙동강하구역의 염분농도 35psu인 정지 수역으로 염분 0psu인 담수를 전 수심에 걸쳐 강제적으로 주었고, 유량은 Fig. 2의 방류량 자료로부터 평수시의 유량인 500CMS로 산정하였다.

3.2 하천유량에 의한 밀도차만을 고려한 경우

조석이나 기타 외력을 고려하지 않은 경우에 흐름이 하천수로를 통과하는 과정에서 가속되어 하구에서 연안으로 유입하면 jet를 형성하게 되고, 이것은 관성력과 부력이 평형을 이룬 결과이다(McClimans, 1986).

이 흐름은 지구자전에 의한 편향력에 의해서 하구전면에서 시계방향의 고기압형 순환을 형성하며, 이때 고기압형 순환의 크기는 내부중력 파속 C_i 와 지구자전으로 인한 편향력 f 의 비인 경압성 Rossby 변형반경의 크기로 확산된다(Oey et al., 1992). 이 고기압성 순환을 따라 흐르는 흐름 가속도의 방향은 고기압형 순환의 중심부로 향하게 된다. 고기압성 순환의 흐름이 연안으로 접근함에 따라 흐름은 분기하여, 순환방향의 흐름은 하구부근에서 유출수와 부딪혀 주순 환보다 약한 이차적인 고기압성 순환을 일으킨다. 또한 반대방향의 흐름은 해안선을 따라 흐르고 편향력과 해안에 직각방향의 압력경사와 균형을 이루면서 연안류를 형성하게 된다.

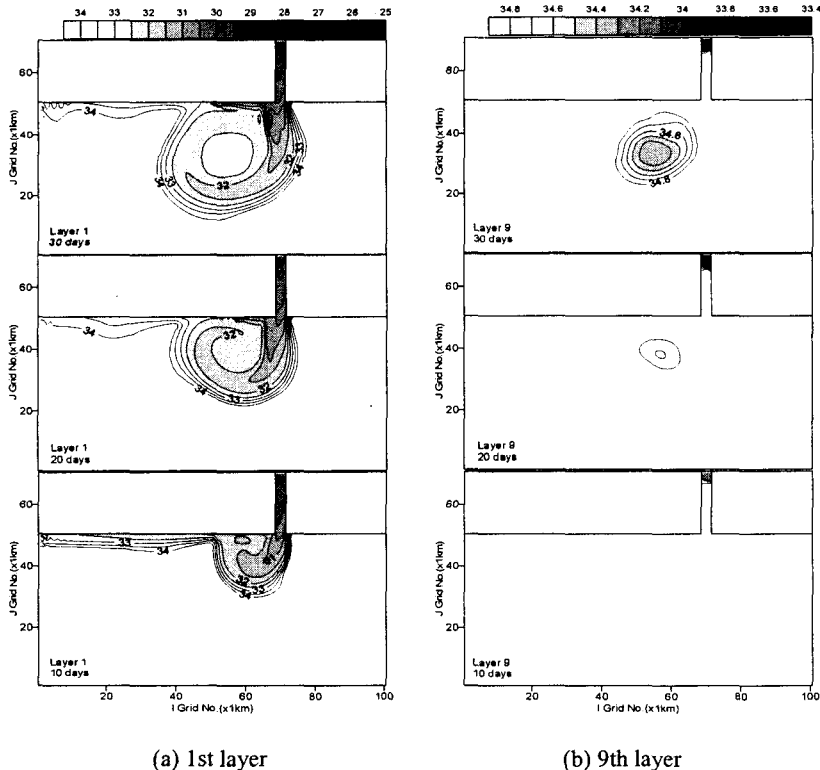


Fig. 5. Time evolution of Horizontal salinity distribution in the 1st layer and 9th layer.

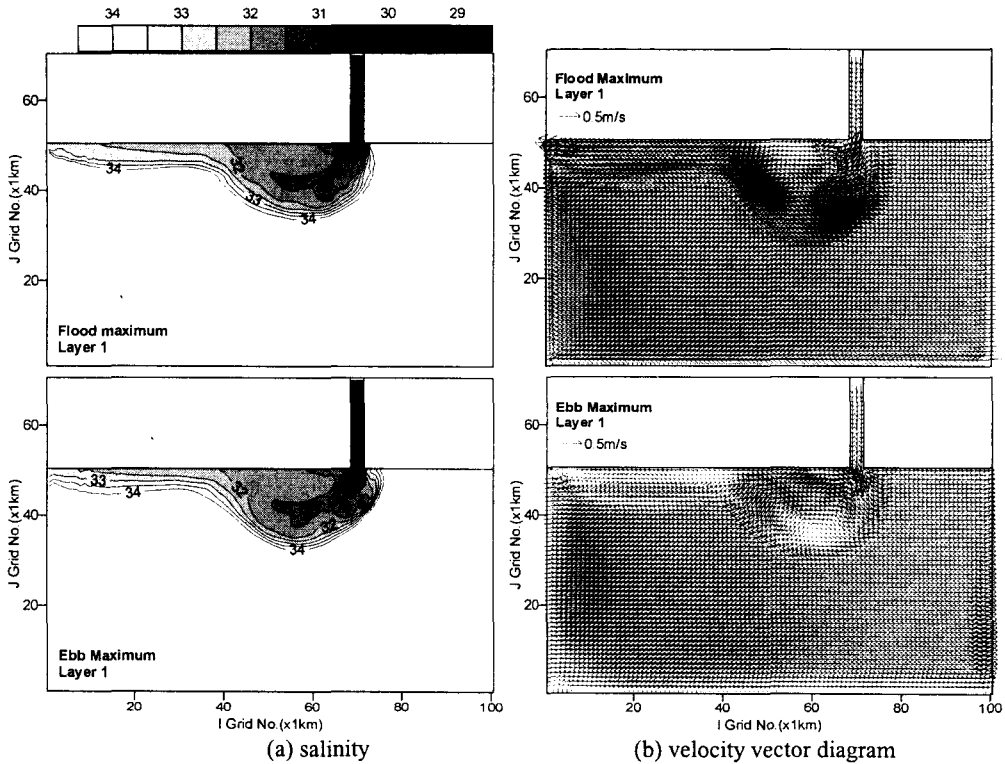


Fig. 6. Horizontal salinity and velocity vector diagram in the 1st layer.

Fig. 5는 표층과 저층의 수평염분분포를 10일 간격으로 도시한 것으로서 위에서 기술한 고기압형 순환과 연안류의 발달을 잘 나타내고 있고 순환의 중앙부에서는 저염수의 pool이 생성된다.

3.3 조석과 하천유량을 고려한 경우

하천유출수의 거동에 대한 조석의 영향을 알아보기 위하여 CASE1 과 동일한 유출조건 하에서 M_2 와 S_2 분조의 진폭을 각각 40cm, 20cm로 산정하고 모형에서 동서 양단의 경계에서 동일한 진폭을 가지고 양단에서 28° 의 위상차를 가지는 조석을 적용시켰을 때 대조기의 창조류 최강류시와 낙조류 최강류시의 표층의 수평염분장과 유속장을 Fig. 6에 나타냈다. 이때 하구전면에서 순환은 조류에 의해서 외해로의 확장은 제한되어 플룸의 형태는 반원의 형태를 띄고 하천유출수에 의한 연안류의 폭은 증가하는 특징을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 낙동강 하구역 및 가덕도 주변 연안해역에서 낙동강유출수의 확산양상을 파악하기 위해서 1998년의 해양조사자료를 분석하였다. 그리고 현지조사결과를 통하여 논의된 하천플룸의 동역학적인 거동기구를 해석하기 위하여 3차원 경압해수유동모델인 POM을 이용하여 단순화된 해안에서 하천유출만 존재하는 경우와 하천유출수에 조석이 존재하는 경우에 대한 수치실험을 수행하였다.

현지조사결과로부터 낙동강유출수의 영향범위는 하천유출량이 평수기에는 염분전선이 하구사주로부터 약 8km 지점에 존재하며, 하천방류량이 풍부한 7, 8월에는 유속이 우측으로 편향되어 하구사주로부터 가덕도 남단을 우회하여 가덕수도를 따라 진행만까지 약 40km까지 확산되며 이때 유속의 좌측에서는 염분경사가 크게 나타난다. 낙동강유출수의 성층화는 평수기에는 표층 5m 이내에서 중

간혼합의 양상을 나타내고 담수층이 나타나는 범위가 가덕도 남단의 낙동포에 국한된다. 그러나 하천유량이 증가할수록 성층화 현상이 크게 나타나며 담수층의 확산범위는 서쪽으로는 진해만 입구까지 나타나고 있다. 이때 국부적으로 나타나는 지형성 와동은 염분의 연직분포에 커다란 영향을 미친다.

수치모형실험결과 밀도차에 의한 부력효과는 하천유출수의 거동에 커다란 영향을 미치며 관성력과 편향력의 평형은 하구전면에서 고기압형 순환을 형성하고, 육지경계를 따라 발달하는 연안류는 편향력과 압력경사력의 균형에 의한 것으로 보여진다. 따라서 홍수시에 낙동강 하천유출수의 염분전선이 유출의 왼쪽에서 기울기가 크게 나타나고 진해만 입구까지 확장하는 것은 하구전면에서 발생하는 고기압형 순환과 연안류에 의한 것으로 보여진다. 그리고 조석은 고기압형 순환의 외해로의 확장을 제한하고, 연안류의 폭을 증가시키는 역할을 하였다. 따라서, 낙동강 하구유출수의 거동특성을 보다 정확히 해석하기 위해서는 실험에서의 하천유량과 조석을 모두 고려한 수치실험레이션의 수행이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- Blumberg, A.F. and G. L. Mellor, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coastal Ocean model., *AGM*, 4, pp. 1-16.
- Cha-Kyum Kim, 1994. Three-Dimensional Numerical Model Experiments of Tidal and Wind-Driven Currents in Chinhae bay., *J. Korean Soc. of Oceanogr.*, Vol. 29, No. 2, pp.95-106.
- Chao, S.-Y. and W. C. Boicourt, 1986. Onset of estuarine plumes., *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 16, pp. 2137-2194.
- Garvine, R.W., 1987. Estuary plumes and fronts in shelf waters : A layer model., *J. Phy. Oceanogr.*, Vol. 17, pp. 1877-1896.
- Ikeda, M., 1984. Coastal flows driven by a local density flux., *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, pp. 8008-8016.
- I. Bang and H.J Lie, 1999. A Numerical Experiment on the Dispersion of the Changjiang River Plume., *J. Korean Soc. of Oceanogr.*, Vol. 34, No. 4, pp. 185-199.
- Kao, T. W., G. Park, and H. P. Pao, 1977. Buoyant surface discharge and small-scale oceanic fronts: A numerical study., *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, No. 12, pp. 1747-1752.
- Kourafalou, V. H. and Oey, L. Y. and John, D. W. and Thomas, N. L., 1996. The fate of river discharge on the continental shelf, Part : Modeling the river plume and inner shelf coastal current., *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, pp. 3415-3434.
- McClimans, T. A., 1986. *Estuarine fronts and river plumes, in Physical Processes in Estuaries*, J. Dronkers and W. van leussen, eds., Springer-Verlag, New York, pp. 55-69.
- Oey, L. Y. and P. Chen, 1992. A model simulation of circulation in the Northeast Atlantic Shelves and seas., *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, No. 20, pp. 087-20, p. 115.
- Oey, L. Y. and G. L. Mellor, 1993. Subtidal variability of estuarine outflow, plume, and coastal currents : A model study., *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 23, pp. 167-171.