한국해안 · 해양공학회논문집
제 24 권 제 4 호, pp. 269~276, 2012년 8월

한강하구 염하수로 주변의 조석변화에 따른 염분분포와 담수와의 상관관계

Relation of Freshwater Discharge and Salinity Distribution on Tidal Variation around the Yeomha Channel, Han River Estuary

윤병일* · 우승범**
Byung Il Yoon* and Seung-Buhm Woo**

요 지 : 하구 및 감조 하천의 염분분포는 조석, 담수, 바람 그리고 지형적 효과와 같은 다양한 외력의 작용과 시스템의 결합에 의해서 독특한 특성을 보인다. 연안 및 하구지역에서 염분구조의 특성을 이해하는 것은 해양학적, 수질·생태학적 그리고 공학적 문제를 접근할 때 반드시 필요하다. 2007년 5월부터 6월까지 약 50일 동안 한강하구 염하수로의 남쪽과 북쪽입구 부근에서 수로방향의 염분분포를 파악하기 위해서 표층 염분을 관측하였다. 장기간의 염분 관측자료를 분석한 결과 장·단기적인 조석 변동과 담수에 따라서 염분의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 담수유입량의 계절적 변화에 따른 염하수로의 주축방향 염분분포의 특성을 국립수산과학원의 국가해양관측망 자료를 분석하여 제시하였다. 담수유입량과 염분분포의 관계를 비선형 회귀식을 사용하여 제시하였고, 조석과 담수유입량 그리고 지형적 영향을 고려한 염분침입 거리의 경험식을 제시하였다. 지형학적 영향까지 고려한 염분침입 거리의 경험식과 기존 문헌자료의 염분분포를 비교할 때 연구지역의 염분분포는 조석, 담수의 영향과 함께 지형적 영향에 의해서도 염수침입 한계 지점 및 염분분포의 구조적 특성이 변한다.

핵심용어 : 염분분포, 한강하구, 염하수로, 담수, 경험식

Abstract : Salinity distribution in estuary and tidal river is presented by many parameters including tidal forcing, river discharge and geographical effect. Understanding the characteristics of salinity structure is very important in the aspect of water-quality, ecological, and engineering viewpoint. Field measurement was carried out to study the distribution of salinity structure at 2 surface stations at Yeomha channel in the Han River estuary. The results of short- and long-term salinity change according to short and long tidal variability is investigated. For analyzing the axial salinity distribution at Yeomha channel, the salinity data from NFRDI is used in this study. The relationship between freshwater discharge and salinity distribution is represented through the nonlinear regression equation. The empirical equation for salt intrusion length scale, including tide, river discharge, and topographical effect is presented. As the comparison of empirical equation and existing data collected in study area, the characteristic of salt intrusion length and salinity distribution is changed by tide, fresh water, and geographical effect.

Keywords : salinity distribution, Han River estuary, yeomha channel, freshwater, empirical equation

1. 서 론

하구는 담수와 해수가 만나는 기수역으로 해양학적, 수질·생태학적 변화가 활발하며, 인위적인 활동에 의해 지속적인 변화가 일어나는 지역이다. 하구의 염분분포는 담수 유입량, 조석의 진폭과 위상변화, 바람, 수직·수평방향의 혼합작용, 바닥 및 측면 경계의 마찰작용의 시·공간적인 변화에 의해서 나타난다(Savenije, 2005). 조석 및 담수 유입에 의한 혼합 또는 성층, 경압 흐름의 변화로 나타나는 하구의 수직·수평적 염분분포는 해수순환 및 물질이동을 결정하는 중요한 원인 중에 하나이다. 염분의 시·공간적인 변화는 유기물, 박테리아 및 동·식물의 생존 및 분포에 큰 영향을 미치며 수자원의 확보 및 관리, 구조물 설치에 필요한 공학적인 설계에서도 매우 중요하다(Haas, 1977; Conomos et al., 1979; Kuo and Neilson, 1987).

경기만 한강하구역(Fig. 1)은 한강과 강화도 동쪽의 염하수로, 서쪽의 석모수로와 교동수로로 연결되어 있고, 임진강 및 예성강의 합류로 복잡하고 독특한 염분분포 특성이 나타날 것으로 예상된다. 이 중에서 한강은 유역면적이 36,674 km^2 유로 연장은 459 km이며, 유량 기준으로 할 경우에는 우리나라에서 가장 규모가 크다(건설교통부, 2002). 한강 본류는 한강종합개발사업(1982~1986년)의 일환으로 하상 굴착 및 수

* 인하대학교 해양과학과 (Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, Incheon 402-751, Korea)
** 인하대학교 해양과학과 (Corresponding author, Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, Incheon 402-751, Korea. sbwoo@inha.ac.kr)

중보(e.g. 신곡·한강수중보)를 건설하고 담수의 외해 유출을 차단하여 일정한 수위를 유지하였으나 외해에서 전파되는 조석 역시 상류로의 진입이 차단되어 수중보 상류의 조차는 크게 줄었다(장, 1989).

한강종합개발사업 이전에 조사된 염분 자료에 의하면 노량진(신곡수중보 상류 16 km) 및 행주대교 (신곡수중보 인근)에서 1966년 5월과 8월에 각각 15.82~35.52 psu 및 12.05~20.09 psu의 염분 범위로 측정되었다(김, 1972). 그러나 수중보 건설 이후 관측된 자료에 의하면 외해 조석의 정도에 따라 차이가 발생을 하지만, 전류리에서 신곡수중보 사이 구간에서 1.7 psu 이하의 염분이 관측된 결과(장, 1989; 김, 2002; 박, 2004)로 볼 때 신곡수중보 상류로의 염분 침입은 거의 없는 것으로 판단된다. 그러나 군사 접경 지역에 위치한 한강하구의 지리학적 이유와 연구목적 때문에 염분 관측기간이 대부분 한 조석주기 또는 그 이하의 관측 기간 동안 수행되었다는 단점이 있다.

하구역에서 다양한 원인에 의해서 변하는 수직·수평적인 염분분포 및 염수 침입에 대한 연구는 관측, 해석해 그리고 수치모델 등의 다양한 방법으로 수행되어 왔다(Ippen, 1966; Officer, 1973; Prandle, 1981; Garvine et al., 1992; Huang and Spaulding, 2000; Savenije, 2005; Brockway et al., 2006). 한강하구 지역의 염분분포에 대한 연구는 군사적인 이유로 접근 및 관측기간에 대한 제약이 있기 때문에 주로 수치모델을 이용한 방법으로 수행되었다. 그러나 수심자료의 불확실성과 보정과 검증에 필요한 관측자료가 부족하기 때문에 수치모델 결과의 정확성이 낮다. 따라서 생태학적 연구, 구조물 설계 및 수자원 관리와 같은 정책적 결정에 중요한 역할을 담당하는 염분분포에 대한 이해가 부족한 실정이다. 실질적으로 수치모형을 이용한 범위추정이 활발하게 수행되고 있으나 모형의 보정 및 검증과정이 다소 미흡하고 장기적인 범위 추정에 취약하기 때문에 담수 확산 범위추정의 기초가 되는 장기적인 염분 관측자료를 이용한 연구와 병행할 필요가 있다(조 등, 2008).

염분은 조석주기에 따라서 수 시간~수 일의 변화를 보이며, 담수유입량에 따라 수 일~수 개월의 변화를 보인다. 본 연구는 50일 이상 관측된 염분 관측자료를 이용하여 조석변동과 담수 유입량에 따른 한강하구역의 시·공간적인 염분분포 양상을 연구하였다. 또한, 담수의 계절적 변동에 따른 염분분포를 비교하기 위해 13년간 분기별로 관측된 국립수산과학원의 염분자료를 분석하여 염분과 담수유입량의 상관관계를 제시하였다. 염수침입 거리에 대해 간단하고 효과적인 분석을 위해 조석, 담수유입량 그리고 지형적 효과를 고려한 경험식을 산정하였다.

2. 재료 및 방법

국립수산과학원(NFRDI)에서는 우리나라 연안 및 근해역에 대하여 해양환경모니터링 체제를 구축하여 1996년부터 4회/년 조사를 정기적으로 실시하고 있다. 한국해양자료센터의 국가해양환경측정망 자료 중에서 인천 연안지역의 9개 정점에서 1997년부터 2009년까지 13년간의 염분자료를 수집하였다(Fig. 1; N1~N9 station). 제공되는 염분자료는 연 4회(2, 5, 8, 11월) 표층(해수면에서 1 m 아래)과 저층(바닥 저층에서 1 m 위)에서 관측되고 있다. NFRDI의 관측자료는 분기별로 1회 관측만 되는 제한적인 자료이기 때문에 반일주조, 일주조와 같은 단주기의 조석변동에 의한 염분변화는 고려하기 힘들다. 그러나 염분이 관측되는 시기가 고조 ±2시간이므로 이내(박, 2004)이기 때문에 한 조석주기 동안에 가장 높은 염분의 관측이 가능하다. 관측정점이 여러 곳이라 관측시간의 차이가 발생을 하기 때문에 조석의 영향이 완전하게 동일하다고 가정하기에는 무리가 있다. 그러나 장기적인 관측자료이기 때문에 계절적으로 담수유입의 변화가 큰 경기만 지역의 경우에는 상관관계 분석에서 큰 무리가 없다고 판단된다. 조 등(2008)은 경기만 남쪽해역의 아산 및 대산 연안에서 10년 동안의 NFRDI 자료를 이용하여 염분자료의 상관관계 및 육상에서 배출되는 담수유출량과 염분의 관계를 제시하였다. 본 연구에서도 NFRDI에서 제공하는 인천 연안지역의 염분자료를 이용하여 계절적, 공간적인 염분분포에 대해서 분석하였다.

일반적으로 하구에서 주축방향으로 염분변화는 대소조기의 조석변화와 담수량에 따라서 차이가 발생하고, 염수침입 한계지점도 변하지만, 그 형태는 크게 변하지 않는다(Savenije, 1993). Savenije(1993)는 16개의 하구의 염수침입 형태를 분석하여 깔때기 모양(funnel shape)의 지형적 형태를 갖는 하구는 돔(dome) 형태의 염분분포 형태를 보인다고 제시하였다. 본 연구지역인 염하수로는 윤·우(2011)에서 제시된 바와 같이 하구 입구에서 상류방향으로 단면적과 수로 폭이 지수적으로 감소하는 깔때기 모양의 지형적 형태를 보인다. 그러므로 본 연구지역의 수로방향의 염분분포는 Savenije(1993)가 제시한 바와 같이 상류방향으로 지수적으로 감소하는 형태를 보일 것으로 예상된다. 염분분포에 대한 연구는 많은 연구지역에서 다양한 연구자들에 의해서 제시되었는데(Prandle, 1981; Garvine et al., 1992; Savenije, 1993; Brockway et al., 2006; Huang and Spaulding, 2000; Monismith et al., 2002; Ralston et al., 2008), 그 형태는 지수적으로 감소하는 형태가 가장 많기 때문에 NFRDI의 염분자료에 비선형 회귀식을 적용하여 주축방향의 염분변화 형태를 분석하였다.

인천연안과 강화도 사이에 위치하는 염하수로의 남쪽입구(초지대교 인근)와 북쪽입구(강화대교 인근)에서 2007년 5월에서 6월까지 총 50일 동안 표층에서 IDRONAUT의 Ocean Seven 304 CTD logger을 이용하여 염분을 장기 모니터링하였다(Fig, 1; S1 and S2 station). 장기적으로 관측된 염분과 팔당담 유량의 시계열 분석을 통해서 유량에 따른 염분 변화를 비교하였다. 두 정점의 수로방향 염분차이의 시계열 자

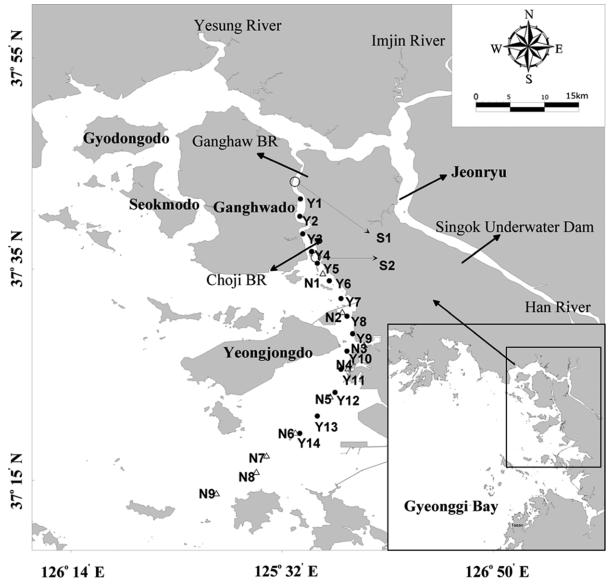


Fig. 1. Map of study area, Gyeonggi Bay and Han River estuary. Y1~Y14 stations (●) indicate the location of the salinity profiling during 1998 (refer to Fig. 2) and N1~N9 (△) stations are obtained data from NFRDI. During 50 days, the salinity mooring station (○) named S1 and S2 are located near Ganghaw and Choji Bridge, respectively.

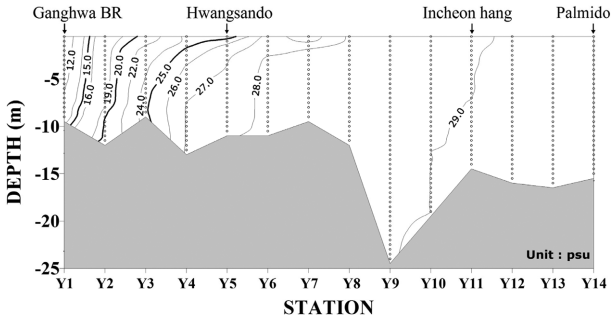


Fig. 2. Distribution of salinity in a vertical section along the estuary from Palmido to Ganghwa Bridge at August 1998. Dotted line indicates where CTD profiling position. A starting time of profiling is high tide at Ganghwa BR (station Y1 refer to Fig. 1) and an ending time is after 4 hour. These results were unpublished.

료를 유량과 대소조기에 따라서 기간을 분류하여, 각 기간의 담수와 조석변화에 따른 염하수로의 염분차이에 대해서 분석하였다.

Fig. 2에 1998년 8월에 팔미도(Fig. 1. Y14 station)에서 강화대교(Fig. 1. Y1 Station)까지 관측된 염분분포를 도시하였다. Y1에서 Y14까지 총 14개 지점에서 관측된 자료는 Y1 정점에서 고조일 때 관측을 시작하여 마지막 Y14 정점까지 소요된 관측시간은 총 4시간이다. 제시된 염분의 공간적인 분포를 보면 강화대교에서 염하수로 남쪽입구인 황산도까지의 수직적인 변화폭이 크게 나타나고 있지만, Y9 정점 이후에는 수직적으로 혼합된 형태를 보여준다. 관측시간이 4시간 정도 소요되어 조석 현상에 의한 차이가 공간적으로 존재한다.

Fig. 3에 한강홍수통제소(HRFCO)에서 제공하는 팔당댐의

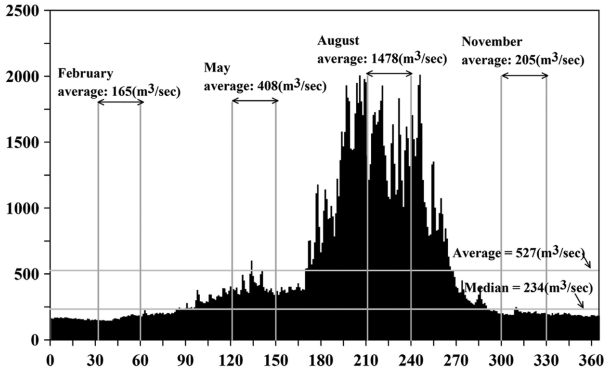


Fig. 3. Daily mean discharge rates at Paldang Dam in the Han River averaged over 1974-2009.

1974년부터 2009년까지 평균된 일류량 자료를 제시하였다. 팔당댐에서 유입되는 36년 동안의 일류량의 평균은 527 m^3/s이고 중간값은 243 m^3/s이다. 월별로 2, 5, 8, 11월의 월평균 유량은 각각 165, 408, 1478, 205 m^3/s로 계산되었다. 계절적인 담수 유입량의 차이가 확연하게 나타나므로 NFRDI에서 제공하는 염분자료는 담수 유입량 차이에 의한 계절적 변화에 대해서 고려하는 것이 바람직하다. 장기 모니터링 염분자료 분석 시 염분과 담수유입량의 상관관계를 위해서 2007년의 염분 관측 기간 동안과 동일한 시기의 한강(팔당댐), 임진강(적성) 유량 자료를 HRFCO에서 제공 받았다. 신곡수중보부터 상류 55 km 지점에 위치한 팔당댐은 감조구간의 한계선인 잠실수중보(신곡수중보 상류 37 km) 상류에 위치하므로 조석의 영향이 거의 없는 유량자료라고 판단된다. 염분과 담수의 상관관계를 분석하기 위해서 한강 본류의 지천에서 유입되는 유량은 팔당댐 전체 유량의 10% 미만이기 때문에 제외하였다. 임진강의 경우 임진강의 상류에 위치한 적성의 유량자료를 임진강 유량으로 정의하였다.

3. 결 과

3.1 조석과 담수에 의한 염분변화

인천항 조위, 담수유입량 및 S1(강화대교)과 S2(초지대교) 정점에서 관측된 표층 염분과 두 정점의 수평적인 염분차이의 시계열 그림을 제시하였다(Fig. 4). 염분 관측기간 동안에 팔당댐의 유량은 10~797 m^3/s, 임진강 유량을 합한 전체 담수는 57~1542 m^3/s로 유입되었다(Fig. 4A). 관측기간 중에서 담수 유입량이 1,000 m^3/s 이상 유입된 기간은 5월18일~21일까지, 5월 28일~31일까지 총 2회 발생하였다. 담수는 Park et al.(2002)에 의하면 일정한 비율로 강화도 서쪽의 염하수로와 동쪽의 석모수로를 통해서 경기만으로 유출되기 때문에 본 연구에서는 전체 담수유입량을 고려하였다.

인천항의 조석 변동과 염분의 변화를 비교하면 S1과 S2정점의 표층 염분 변화폭은 각각 0.5~22.2 psu와 4.0~30.8 psu의 범위로 하류의 S2 정점의 변화폭이 크게 나타났다(Fig. 4B). 조석성분이 제거된 장기적인 염분 변화를 보기 위해서 절단

Table 1. A variation of low pass filtered salinity at both during spring and neap periods. Unit : psu

St	Period						
	SP1	NP1	SP2 River	NP2 River	SP3	NP3	SP4
S1	18.0	15.6	12.8	2.6	10.5	9.2	15.0
S2	24.2	23.0	21.8	12.9	18.6	18.0	22.1
Horizontal Difference (S2−S1)	6.0	7.4	8.9	10.4	8.4	8.2	7.3

주파수 48시간을 사용한 low pass filter를 적용하였다. 조석 성분을 제거한 염분의 변화에서 담수에 의한 염분의 감소폭은 상류 지점에 위치한 S1정점이 S2정점 보다 감소하는 기울기가 크게 나타났으며 평수기 염분으로 회복되는 기간도 길게 나타났다(Fig. 4B).

관측된 염분자료는 4번의 대조기(SP; Spring period)와 3번의 소조기(NP; Neap period) 그리고 담수 유입량의 정도에 따라서 총 7개의 기간으로 분류하였고, 각 기간별 염분 차이를 Table 1에 제시하였다. 처음 대조기(SP1)와 담수 유입량이 증가하는 두 번째 대조기(SP2+River)를 비교하면, S1과 S2정점의 평균적인 염분의 수평분포 차이는 5.2 psu와 2.4 psu를 보인다. NP1 기간과 NP2+River 기간을 비교하면 S1정점은 15.4 psu, S2정점은 11.3 psu의 염분 차이를 보인다. 이후 S1과 N1 시기와 비슷한 염분 분포는 SP3와 NP3 기간에는 나타나지 않았다. SP1과 SP4 기간을 비교하면 2~3 psu의 차이를 보이고 있으므로, 두 번의 1,000 m^3/s 유입된 이후에 완전하게 평수기 상태의 담수 유입의 상태로 회복됐다고 볼 수는 없다. 적어도 NP2+River 기간 이후 약 20일 이상의 시간이 지난 이후에 평수기 상태의 염분 분포로 회복된다고 판단된다.

Fig. 4C에 두 정점간의 수로방향의 염분 차이와 단주기 조석 성분을 제거한 염분 차이의 장주기 성분의 시간변화를 제시하였다. 두 정점의 염분차이가 대조기와 소조기에 따라서 변화가 뚜렷하며, 담수 유입량에 따라서도 두 정점간의 차이가 크게 나타났다. 두 정점 사이의 표층 염분의 수로방향의 차이는 300 m^3/s 이하의 유량이 유입된 SP1과 NP1까지의 변화에서 소조기에는 평균적으로 약 7.4 psu 정도로 나타나고, 대조기에 차이가 작아져 6.0 psu로 나타난다. 또한, 1,000 m^3/s 이상 담수가 유입되는 시점의 두 정점간의 염분 변화 차이는 대·소조기, 각각 8.9과 10.4 psu로 나타났다. 평균 염분 자료와 마찬가지로 SP4 기간이 되어서도 수로방향의 염분 차이가 평수기 상태로 회복되는 것은 약간 미흡해 보인다.

저층에서 염분관측이 수행되지 않은 한계점과 전체 담수 유입량 중에 염하수로에 영향을 미치는 비율을 정확하게 산정할 수는 없지만, 담수유입의 영향이 강화대교와 초지대교까지는 직·간접적으로 영향을 미치고 있다고 판단된다. 상류에 위치한 강화대교가 초지대교 보다 담수의 영향이 직접적으로 영향을 받아 표층의 염분 차이가 크게 나타나고, 강화대교와 초지대교의 표층의 수평적 염분차이는 대조기에 비하여 소조기 때 크게 발생한다. 대조기에 비하여 소조기에 수평적 염분차이가 크게 나타나는 원인은 대소조기의 평균 유속 차이 때문이다. 대조기에 비하여 소조기 때 염분이 작더라도 평균유속이 대조기에 크기 때문에 수평방향의 염분차이는 소조기에 크게 나타난다(Uncles and Radford, 1980; Geyer et al., 2000). 또한, 담수는 염분경사를 하류방향으로 밀어내기 때문에 담수에 의해서도 수평방향의 염분차이가 크게 나타난다(Warner et al., 2005).

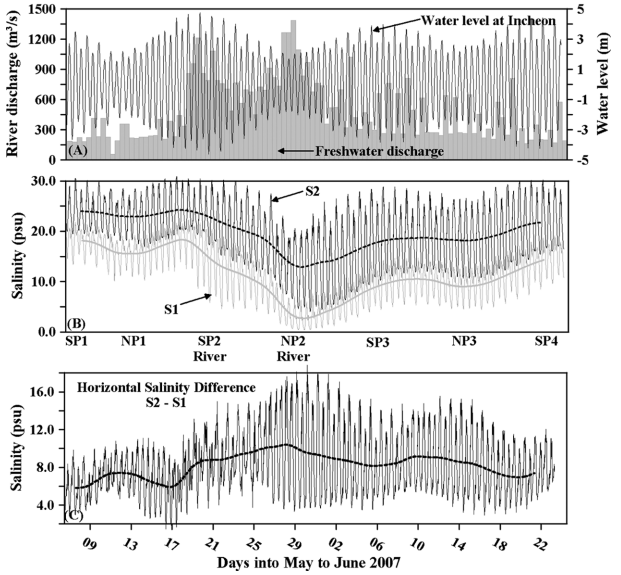


Fig. 4. The top panel is time series of water level at Incheon Harbor and freshwater discharge from Han and Imjin River. The middle panel is time series of surface salinity at S1 and S2 station. The bottom panel is horizontal difference of salinity between S1 and S2 station. Solid and dotted line is raw and low pass filtered data of salinity, respectively.

염분분포는 담수와 조석 조건이 어떻게 결합되는가에 따라서 변화 양상이 다르게 나타나는데, 평수기 이상(1000 m^3/s)의 유량이 집중된 경우 조석 변동에 의한 염분변화 보다 급격한 염분 차이가 나타나며, 평수기에 비하여 수로방향의 염분 차이가 크게 발생한다. 담수 유입량이 증가한 이후에 평수기 상태의 염분분포로 회복되는 시간은 20일 이상의 소요된다.

3.2 주수로 방향의 염분변화

하구 조석 운동, 바람, 수로 폭 및 수로의 형상에 의해 하구에서는 옆 방향으로의 염분 경사에 의한 2차적인 흐름이 존재한다(Wong, 1996). 그러나 본 연구에서는 관측자료의 한계로 수로방향으로의 염분분포에 관한 것만 논의한다.

NFRDI에서 제공하는 9개의 정점에서 13년간(1997~2009년) 월별 평균한 표층(Fig. 5B)과 저층(Fig. 5A)의 염분분포와 수직적인 염분차이(Fig. 5C)에 의하면 가장 외해 쪽에 위치한 N9 정점의 표층과 저층의 염분 차이는 1 psu 이하로 나타나지만, 상류로 갈수록 (e.g. N1 정점) 점 커져 5 psu 이상의 차이가 난다. 이런 염분의 수직적인 차이는 상대적으로 담수 유입량이 적인 2월에는 가장 적은 반면에 담수 유입량이 가장 큰 8월의 경우 상대적으로 크게 나타난다. 조석 작용, 바람의 영향, 지형적인 효과에 의해서 수직(vertical), 수평(lateral), 수로(axial)방향으로 변화가 있겠지만, 13년 평균한 자료이고 담수 유입량과 비슷한 변화를 보이는 것으로 보아 담수 유입에 의한 염분분포의 변화로 판단된다.

N4부터 N7 정점까지는 담수 유입이 강한 8월에 강한 변화를 보이는 지역으로 판단되며, N4 정점 이후 상류정점인 N1 정점까지는 평수기(5월, 11월)와 홍수기(8월)에 항시 담수의 영향을 직접적으로 받는 지역으로 판단된다. N8과 N9 정점의 염분은 월별로 29.7~31.5 psu의 범위로 변하는데 이는 담수 유입의 범위가 팔미도의 외해 방향으로는 크게 작용하지 않는 것을 의미한다. 즉, 장기적인 염분의 수로방향으로의 계절적 변화를 봤을 때 염하수로의 하구 입구는 팔미도 인근 지역으로 보인다. 하구 입구를 담수의 영향이 최대로 미치는 지역이라고 정의 할 때, 박(2004)이 제시한 하계 팔미도 해역까지 담수 영향권이 확대된다는 결과와 일치한다. 그러나 수직적인 염분차이에 의한 하구입구의 정의 등이 명확하게 제시되지 않았고, 제시된 관측자료 보다 외해에 위치하는 정점이 있다면 다른 결과가 도출될 수 있기 때문에 명확한 논의를 위해서는 추후 연구가 필요하다.

3.3 담수와 염분의 관계식

각 월 평균한 표층과 저층의 염분자료를 비선형 회귀분석을 이용하여 하구 입구로부터 상류 방향으로의 염분 변화를 비선형 회귀식으로 계산하여 Fig. 6에 제시하였다. 이 회귀식에서 Y축 값이 2로 나타나는 지점을 염수침입의 최대거리로 정의하였고, 각 월별 담수유입량에 따른 염수침입 거리를 Table 2에 제시하였다. 36년 평균한 담수 유입량 자료와 NFRDI의 관측자료가 존재하는 1997년부터 2009년까지의 평균 담수 유입량의 경우 각 월별로 거의 동일하다. 또한, NFRDI의 염분 관측기간인 각 월별 1일과 전일 2일 동안의 유량을 평균한 담수 유입량 자료도 계절별로 하계 기간의 30% 정도의 차이를 제외하면 비슷한 유량으로 나타났다(Table 2).

평균한 각 월별 염분자료로부터 구한 방정식(Fig. 6)에서 각 월별 담수 유입량의 평균자료와 염수침입 거리의 상관관계를

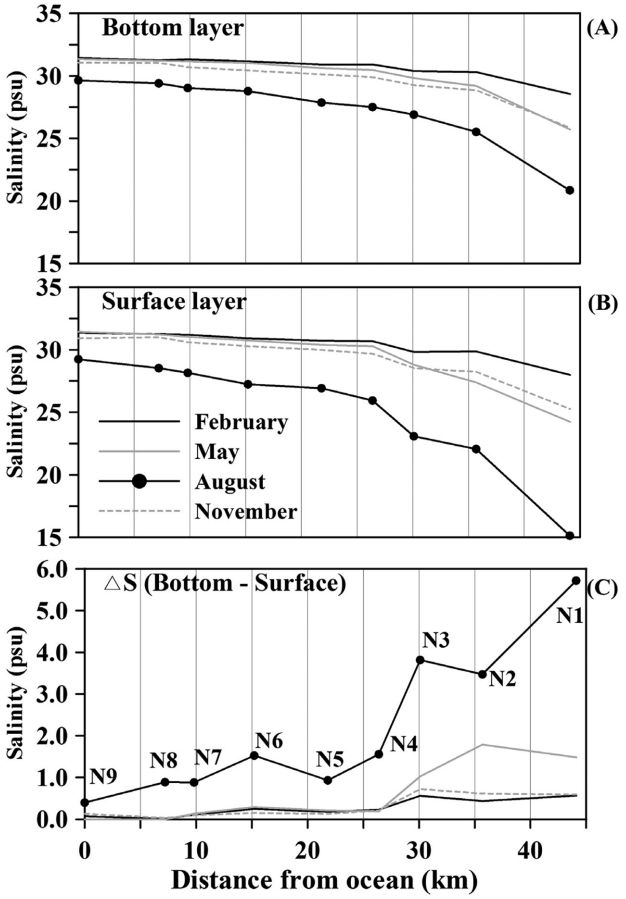


Fig. 5. Axial salinity distribution from NFRDI. The salinity data is calculated monthly (2, 5, 8 and 11) averaged during 13 years (1997~2009) at each station.

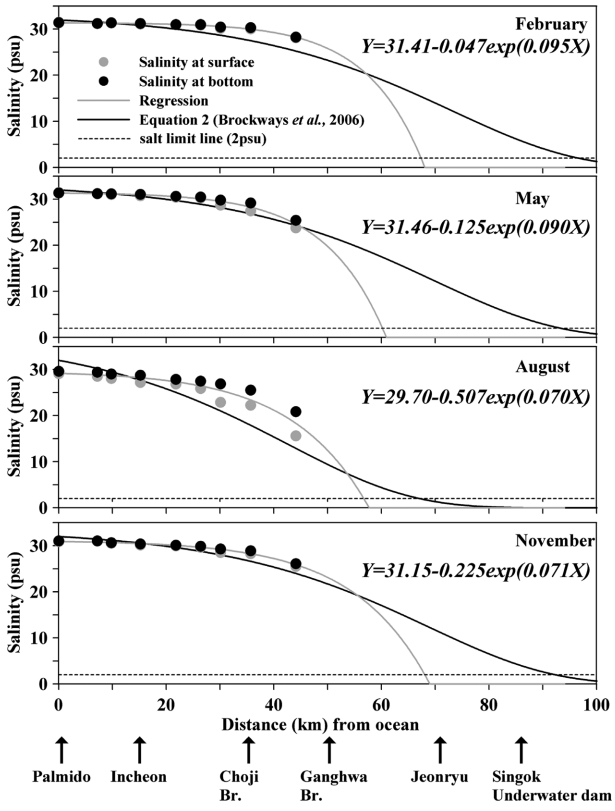


Fig. 6. The black circle and gray circle indicate bottom and surface averaged salinity during 14 years (1997~2009) from NFRDI, respectively. Non-linear regression lines (gray line) and salt intrusion length(2 psu; dotted line) according to seasonal freshwater discharge. The black line is empirical relation (Brockways et al., 2006) from Eq. (2).

Table 2. Freshwater discharge during 1974 to 2009, 1997 to 2009, and NFRDI Salinity observation and calculated the length of salt intrusion from non-linear regression line from Fig. 6 (gray lines)

Month	Freshwater discharge (m^3/s)			Salt intrusion length (km) from ocean
	1974~2009 Monthly mean	1997~2009 Monthly mean	NFRDI Salinity observation (3 days)	
2	165	154	164	68
5	408	400	381	61
8	1,478	1,714	1255	58
11	205	206	199	69

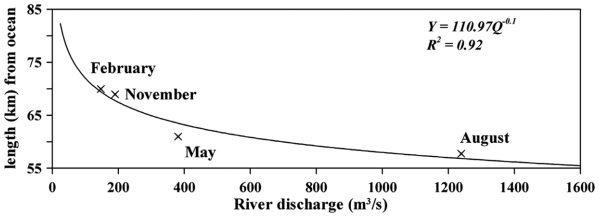


Fig. 7. Correlation between freshwater inflow Q and length of salt water intrusion length from ocean.

Fig. 7에 제시하였다. 상관도는 0.92로 나타났으며, 염수침입 거리와 담수 유입량(Q)의 상관관계는 식(1)과 같이 산출되었다.

$$L = 110.97Q^{-1/10} \quad (1)$$

Oey(1984)는 Hudson River에서 염수침입 거리가 $Q^{-1/5}$와 상관관계가 높다고 산출하였으며, Monismith et al.(2002)는 2 psu 이하의 범위를 나타내는 지역을 염수침입 한계 거리로 정의하면서 $Q^{-1/7}$의 상관식을 제시하였다. Monismith et al. (2002)는 Oey(1984)의 상관관계에 비하여 상대적으로 염분 관측 결과와 담수의 상관도가 높지 않은 이유는 수직 혼합에 의한 성층의 영향과 수심의 변화라고 주장하였다. 본 연구에서 산출한 상관식은 $Q^{-1/10}$로 Monismith et al.(2002)과 Oey (1984)의 연구에 비하여 담수와 염수의 상관관계가 낮은 것을 보여준다. 즉, 담수의 영향에 의해서 염분의 분포 및 염수침입 거리가 영향을 받지만 그 영향 정도가 다른 지역에 비하여 낮다는 것을 의미한다.

Savenije(2005)는 완전혼합 또는 부분혼합 하구에서 조석, 지형적 그리고 수문학적 상관관계에 따라 4가지 형태의 수로방향의 염분 변화 형태를 제시하였다(Fig. 8). Fig. 6의 각 월별 염분 평균자료를 이용하여 계산한 하구 입구에서 상류까지의 주축방향의 염분 변화 형태를 보면 Type 3 형태와 유사하다. Type 3의 돔 형태의 특징은 하구 입구에서는 염분 구배가 크지 않게 나타나고 오목한 모양의 염분 변화를 보여주지만 특정 위치 이후부터 급격한 감소가 나타난다. 뚜렷하게 보이는 특징은 월 변화(담수 유입량 차이)에 따라 염수 침입 거리는 차이를 보이기는 하지만 형태 자체는 크게 변하지 않는다는 것이다. 즉, 담수 유입량은 염수침입 거리의 증가 또는 감소를 조절할 수는 있지만 염수침입 형태 자체는 변화게 하지는 못하며, 염수 침입 형태를 만드는 가장 큰 원인은 하구의 지형적인 형태 및 조석과 매우 밀접한 관련이 있다(Savenije, 2005).

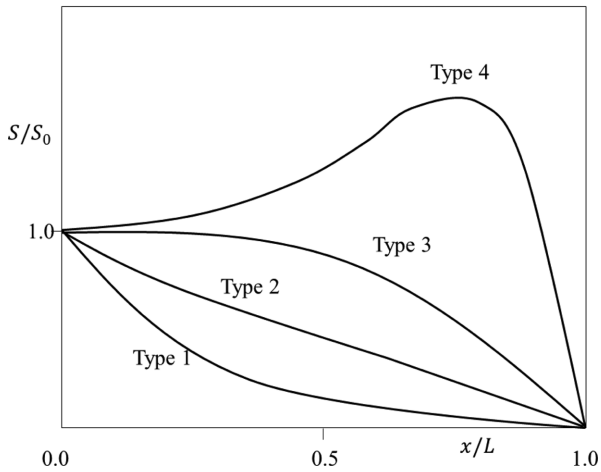


Fig. 8. Four type of salt intrusion curves (Savenije, 2005), in which L is the salt intrusion length, x is the distance from the estuary mouth, S_0 is the salinity at the estuary mouth and S is the salinity corresponding with the distance(x).

3.4 염분침입 거리 산정

하구역에서 담수, 조석 그리고 지형적 영향을 고려한 염수침입 거리의 산출을 위한 경험식의 적용은 간단하면서도 유용한 방법으로 많은 연구자들이 염수침입 거리 산정을 위해 다양한 방법과 경험식을 제시하였다. 본 연구에서 염수침입의 한계 거리는 2 psu가 나타나는 지점으로 정의하였고, Savenije (2005)가 제시한 하구의 지형적인 형태와 담수의 영향을 고려할 수 있는 Brockways et al.(2006)가 제시한 식(2)을 이용하여 염수침입 거리를 계산하였다.

$$x_L = \left(\frac{1}{\beta}\right)\ln\left(\frac{4.6A_0\beta\kappa_x}{Q} + 1\right) \quad (2)$$

여기서, A_0는 하구 입구의 단면적이고 β는 감소 계수 또는 하구의 지형적 수렴 정도이다. 본 연구에서는 Woo and Yoon (2011)과 윤·우(2011)에서 제시된 염하수로의 하구입구 단면적 $A_0(\approx 46945\mathrm{m}^2)$와 지형학적 수렴 $\beta(\approx 0.028\mathrm{km}^{-1})$ 사용하였다. κ_x는 주축방향의 혼합계수로 $\kappa_x = -Q/(\beta A_0 slope)$로 경사(slope)는 Fig. 7의 각 월별 비선형 회귀식의 감소값을 사용하였다.

Fig. 6에 NFRDI의 자료로부터 구한 비선형 회귀식(Fig. 6; 회색선)과 월별 혼합계수, 담수 그리고 지형적 수렴 정도가 포

Table 3. Results of salt intrusion from empirical relations (Brockways et al., 2006)

Month	Salt intrusion length (km) Non-linear regression	River discharge Q (m^3/s)	Slope	Mixing Coefficient K_x (m3/s)	Salt intrusion (km) Empirical relation
2	68	164	0.05	5.6	95
5	61	381	0.13	11.1	91
8	58	1255	0.5	20.1	69
11	69	199	0.23	4.7	92

함된 식(2)를 이용하여 계산된 염수 침입거리 경험식(Fig. 6; 검은선)을 제시하였다. 회귀식 및 관계식에 의한 염수침입 거리(2 psu 이하)를 Table 3에 제시하였다. 비선형 회귀식에 비해 경험식의 염수침입 거리가 모든 월에서 크게 나타났다.

기존 문헌자료(장, 1989; 김, 2002; 박, 2004)와 비교할 때 하구 입구(팔미도)에서 70 km 상류의 전류리에 0~2 psu 범위의 염분이 관측되었고, 85 km 상류인 신곡수중보에서는 염수침입이 거의 없는 점으로 볼 때, 비선형 회귀식 보다는 조석, 담수 및 지형적 영향이 고려된 경험식(식(2))이 좀 더 타당한 결과라고 판단된다. 85 km 상류지점에서도 2 psu 이상의 염분이 나타나는 현상은 경험식에서 신곡수중보와 같은 인위적인 구조물에 의한 염분의 침입 방지 등이 고려되지 않았기 때문이다. 현 상태의 염분 분포에 대한 정확한 분석을 위해서는 연구지역의 인위적인 구조물(신곡수중보)의 고려한 관계식의 향상 및 추가 검증이 요구된다. 또한 다수의 수로가 연결된 연구지역의 특성을 고려한 염수침입의 관계에 대한 연구도 필요하다.

4. 결론 및 제언

경기만 한강하구 염하수로의 남쪽과 북쪽에서 장기간 관측된 염분의 특성은 조석과 담수 유입량에 따라 변화가 뚜렷하게 나타난다. 특히 두 정점의 수평 염분차이는 담수 유입이 증가하면서 커지고, 대조기에 비해 소조기 때 크게 증가한다. 담수의 급격한 증가에 의해 염분이 감소 된 이후에 평수기 상태의 염분 상태로 회복되기 위해서는 약 20일 이상의 시간이 필요한 것으로 판단된다.

국가해양관측망자료를 이용한 13년 동안 평균한 염하수로 수로방향의 월별 염분의 비선형 회귀곡선을 이용하여 염수침입 거리를 산정하였다. 염수침입 거리는 담수 유입량에 따라서 차이를 보이기는 하지만 염수 침입 형태는 거의 변하지 않는 것으로 나타났다. 산정한 각 월별 염수침입 거리와 담수 유입량의 상관식(power-law regression)을 볼 때 전형적인 값인 1/3~1/5과 다르게, 1/10($x_L \approx Q^{-1/10}$) 정도의 관계성을 보인다. 염수 침입은 조석, 담수 유입량뿐 만이 아니라 지형적 영향에 의해서도 결정되기 때문이다. 지형적 효과를 고려한 경험식을 적용하여 염수 침입거리를 계산한 결과 기존 문헌자료의 염수침입 거리와 일치하는 결과를 보여주었다. 본 연구의 경험식은 신곡수중보와 같은 인위적인 구조물에 의한 영향이 고려되지 않았기 때문에 한계가 존재한다. 본 연구에서 제시된 관계식 및 염분자료를 이용한 수치모델 결과와의 비교 분석을 통해서 인위적인 구조물에 의한 영향을 판단할 필요가 있으며, 다수의 수로로 연결된 연구지역의 특성을 고려한 염수침입 및 염분분포에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해수순환 및 생태계 변화 예측기술개발).

참고문헌

건설교통부 (2002). 한강 하천정비 기본계획(팔당댐~하구).

김동화 (2002). 한강하구역에서의 생지화학적 상호작용연구. 석사학위논문, 인하대학교.

김정균 (1972). 하계 한강하류의 식물성 플랑크톤의 분류와 해수 지표성. 한국육수학회지, 15, 31~41.

박경수 (2004). 한강 하구역의 염분 분포 및 생태환경 특성. 한국습지학회지, 6(1), 14~31.

윤병일, 우승범 (2011). 조석 전파 특성을 활용한 한강하구 주요 수로의 지형학적 수렴과 바닥 마찰 간의 관계에 대한 연구. 한국해안 · 해양공학회논문집, 23(5), 383-392.

장현도 (1989). 한강종합개발 이후 한강하구 및 경기만에서의 퇴적환경의 변화. 석사학위논문, 인하대학교.

조홍연, 조범준, 김상준 (2008). 계절별 염분 자료를 이용한 아산만 연안의 담수 영향범위 추정. 한국해안·해양공학회논문집, 20(2), 219-231.

Brockway, R., Bowers, D., Hoguane, A., Dove, V. and Vassele, V., (2006). A note on salt intrusion in funnel-shaped estuaries: application to the Incomati estuary. Mozambique. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 66(1-2), 1-5.

Conomos, T. J., Smith, R. E., D. Peterson, H. S., Hager, W. and Schemel, L. E. (1979). Processes affecting seasonal distributions of water properties in the San Francisco Bay estuarine system. In T. J. Conomos (ed.), San Francisco Bay: The Urbanized Estuary. Pacific Division, Am. Ass. Adv. Sci., San Francisco, Calif. 115-141.

Garvine, R. W., McCarthy, R. K. and Wong, K. C. (1992). The axial salinity distribution in the Delaware Estuary and its weak response to river discharge. Estuarine Coastal Shelf Science, 35, 157-165.

Geyer, W. R., Trowbridge, J. and Bowen, M. (2000). The dynamics of a partially mixture estuary. Journal of physical Oceanogra-

phy, 30, 2035-2048.

Haas, L. W., (1977). The effect of the spring-neap tidal cycle on the vertical salinity structure of the James. York and Rappahannock River, Virginia, U.S A. Estuar. coast. mar. Sci., 5, 485-496.

Huang, W. and Spaulding, M. (2000). Correlation of sub-tidal salinity and freshwater inflow in a tidal river. Journal of Waterway, Port, and Ocean Engineering, ASCE. 126(5). 264-266.

Ippen, A. T. (1966). Estuary and Coastline Hydrodynamics. McGraw-Hill, New York.

Kuo, A. Y. and Neilson, B. J. (1987). Hypoxia and salinity in Virginia estuaries. Estuaries 10, 277–283.

Monismith, S. G., Kimmerer, W., Burau, J. R. and Stacey, M. T. (2002) Structure and flow-induced variability of the subtidal salinity field in northern San Francisco Bay. Journal of physical Oceanography, 32, 3003-3019.

Oey, L. Y. (1984). On steady salinity distribution and circulation in partially mixed and well mixed estuaries, Journal of physical Oceanography, 14, 629-645.

Officer, C. B. (1976). Physical Oceanography of Estuaries (and associated coastal waters). Wiley.

Park, K., Oh, J. H., Kim, H. S. and H. H. Im (2002). Case study: Mass Transport Mechanism in Kyunggi Bay around Han River Mouth. Journal of Hydraulic Engineering, 128(3), 257-267.

Prandle, N. A. (1981). Salinity intrusion in estuaries. Journal of Physical Oceanography, 11, 1311-1324.

Ralston, D. K., Geyer, W. R. and Lerczak J. A. (2008). Subtidal salinity and velocity in the Hudson River Estuary: Observations and modeling. Journal of Physical Oceanography 38(4), 753-770.

Savenije, H. H. G. (1993). Composition and driving mechanisms of longitudinal tidal average salinity dispersion in estuaries. Journal of Hydrology, 144, 127-141.

Savenije, H. H. G. (2005). Salinity and Tides in Alluvial Estuaries. Elsevier, Amsterdam.

Uncles, R. J., and Radford, P. J. (1980). Seasonal and spring-neap tidal dependence of axial dispersion coefficients in the Severn a wide, vertically mixed estuary. Journal of Fluid Mechanics, 98, 703-726.

Warner, J. C., Geyer, W. R. and Lerczak, J. A. (2005). Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. Journal of Geophysical Research, 110(C05001), doi:10.1029/2004JC002691.

Woo, S. B. and Yoon, B. I. (2011). The classification of estuary and tidal propagation characteristics in the Gyeong-Gi bay, South Korea, Journal of Coastal Research, Special Issue 64, 1624-1628.

원고접수일: 2012년 7월 18일
수정본채택: 2012년 8월 13일
게재확정일: 2012년 8월 14일