

낙동강 하구역의 부유사 물질수지예측

류성훈* · 김경희** · 이인철***†

*, ***, 부경대학교 해양공학과, ** 일본히로시마대학교 공학연구과

Prediction of Suspended Solid Budget in Nakdong River Estuary

Sung-Hoon Ryu* · Kyung-Hoi Kim** · In-Cheol Lee***†

*, ***, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

** Department of Social and Environment Engineering, Hiroshima University, 739-8511, Japan

요 약 : 본 연구는 낙동강 하구역의 사주지형 변화를 예측하기 위한 기초적 연구로서 하천유량의 변화에 따른 부유사의 물질수지에 대하여 검토하였다. 낙동강 하구역의 부유사 물질수지는 갈수기시 60,708 kg/day가 유입하고, 홍수기는 306,892 kg/day가 외해를 통하여 유출하는 것으로 산정되었다. 낙동강 하구역은 전반적으로 갈수기 및 평수기에 부유사의 유입, 홍수기에 부유사의 유출이 반복 되지만, 사주지형 주변에서는 부유사의 유입과 유출 거동이 복잡하게 나타나 장기 지형변동 모니터링이 필요한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 부유사, 물질수지, 갈수기, 홍수기, 낙동강 하구

Abstract : To predict the deposition characteristic in the Nakdong river estuary, the material budget of Suspended Solid(SS) was investigated with the amount of Nakdong river discharge being set as dry season and flood season. The results of material budget of SS in dry season and flood season were 60,708 kg/day(inflow) and 306,892 kg/day(outflow), respectively.

Key Words : Suspended Solid, Material Budget, Dry season, Flood season, Nakdong River Estuary

1. 서 론

육역과 해양환경의 전이지역인 하구역은 육역으로부터 유입되는 담수와 해수의 상호작용이 활발한 해역으로 연안개발에 따른 지형 및 해양환경의 변화를 예측하는데 많은 어려움이 산재하고 있다. 낙동강 하구역은 하구의 조석변동 및 연평균 유출량 약 139억톤의 낙동강의 하천수 유입뿐만 아니라 우리나라 동해안 남부의 대한해협 부근 서수도를 통과하는 대마해류의 영향으로 인해 복잡한 해황을 나타내고 있는 해역으로(추, 2002), 매립사업, 하구둑 건설, 항로유지를 위한 준설사업 등으로 인해 장기간에 걸쳐 지속적으로 해안선과 사주지형이 변화하고 있다.

특히 하구둑의 건설 후, 담수 유출량이 수문으로 조절되면서 해수흐름 및 해저지형의 변화, 공유수면에 사주의 생성/소멸, 항로매물 및 소형어선 통항로의 협소화, 수심저하, 해안사고 및 저지대 침수피해가 증가하고 있으며(부산광역시 강서구청, 2004), 신항만 건설사업으로 인해 앞으로도 많은 변화가 예상되고 있다(김과 하, 2001).

하구역에서의 지형변화는 파랑, 조석, 지형조건뿐만 아니라 퇴적물 거동에 중요한 영향을 주는 부유사(SS, Suspended

Soild)수송량 외에도 다양한 외력인자가 복합적으로 작용하고 있어 제현상의 규명에 많은 어려움이 있다(Yanagi et al., 1994; Deloffre et al., 2005). 이에 김 등(2003)은 관측자료 및 수치해석 기법을 통해 낙동강 하구역 및 인접해역에서의 파랑의 변화를 계산하고 잉여에너지로 발생하는 해빈류를 분석하여 3차원적인 지형변화를 예측하였으며, 최근에는 윤(2009)이 STA기법과 지형변화 예측수치모형을 이용하여 낙동강 하구역의 토사 이동 경로 및 지형변화의 예측에 관하여 연구를 수행하였다.

한편 부유사(SS)수송량에 대한 연구로서는 김 등(1995)이 낙동강 하구둑 수문의 담수유입조건과 가덕수로에서의 개방경계조건을 고려하여 해수유동과 부유사 농도확산에 대한 수치실험을 실시하였으며, 신 등(2007)은 SWAT 모형을 이용하여 낙동강 유역에서 발생하는 부유사량 예측에 관한 연구를 수행하였다. 또한 부유사의 정량적 거동과 지형변화에 관계에 대한 연구로는, 이 등(2008)이 낙동강 하구 남단에 위치한 진우도를 중심으로 장기간 지형변동 모니터링 결과를 바탕으로 부유사(SS)수송량과의 관련성을 검토한 바 있으며, 유 등(2006)은 해도를 이용하여 낙동강 하구주변에 대한 과거 낙동강 하구역의 사주 변천과정을 분석하였다. 그리고 윤 등(2005)은 현상태의 지형자료를 바탕으로 해수유동장 재현/검증과 사주지형 단면의 Net-flux를 계산하여 낙동강 하구역에서의 물질수송능력의 평가와 사주 발달 특성에 대하여 다수의 연구를 수행하였다.

* 대표저자 : 정희원, firesinger@gmail.com, 051-629-6586

† 교신저자 : 정희원, ilee@pknu.ac.kr, 051-629-6586

한편, 사주의 생성, 소멸 및 수심변화가 극심한 낙동강 하구 사주지형의 장기예측을 위해서는 하천유입량 변화에 따른 사주 지형 주변에서의 부유사 거동을 정량적으로 해석할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 낙동강 하구역의 사주지형 변화를 예측하기 위한 기초적 연구로서 하천유량의 변화에 따른 부유사의 물질수지에 대하여 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 하천유량의 산정

본 연구에서는 강우-유출모형인 Tank model(이, 2001)을 이용하여 낙동강의 일별 하천유량을 산정하였다. 계산에 필요한 매개변수는 한국수자원공사(1989)의 낙동강수계 다목적댐 연계 운영방안 연구보고서에서 제시된 낙동강 유역 탱크모델 매개변수를 이용하였으며, 기상조건등의 지역특성을 고려하여 낙동강 유역을 4개 권역으로 분할하여 계산하였다. 각 권역별 기상청의 일별 강우량(안동, 부산) 및 증발량 자료(연주, 구미, 함천, 밀양)를 입력조건으로 하여 1998년부터 2000년까지 3년간의 모의발생 실험을 실시하였다.

2.2 부유사의 Net-flux 산정

1) 해수유동 수치실험

본 연구의 해수유동 수치모형은 Leendertse(1971)에 의해 개발되어 수차례 검증된 수심적분 2차원모형을 이용하였다. 계산 대상영역은 Fig. 1에 나타난 낙동강 하구역을 남북으로 5.5 km, 동서방향으로 7.0 km로 구축하였으며, 격자체계는 $\Delta x = \Delta y = 70$ m인 등격자망을 사용하였다. 그리고 수심은 해도(No. 202, 206)와 현장조사 자료를 참고하였으며, 평균해수면은 1.11 m로 정의하고, 조석의 외해 경계조건은 M_2 , S_2 , K_1 및 O_1 의 4대 분조를 고려한 노(2004)의 경계조위를 이용하였다. 한편, 수치실험의 계산시간간격은 CFL안정조건에 의해 3초로 설정하고, 수치실험은 갈수기(Case 1 ; 무하천 유량조건), 평수기(Case 2) 및 홍수기(Case 3 ; 홍수기 유량조건)로 구분하여 각각 15일간 수치실험을 실시하였다(윤 등, 2005).

2) 단면별 해수유통량의 Net-flux 산정

해수유동 수치실험 결과를 바탕으로 부유사 거동의 물리적 영향인자로 판단되는 해수유통량의 단면 유량 Flux를 산정하였다. 낙동강 하구역의 단면 유량 Flux를 계산하기 위한 소영역분할은 해양물리 및 이화학적 환경인자(수온, 염분, COD, TN, TP, SS

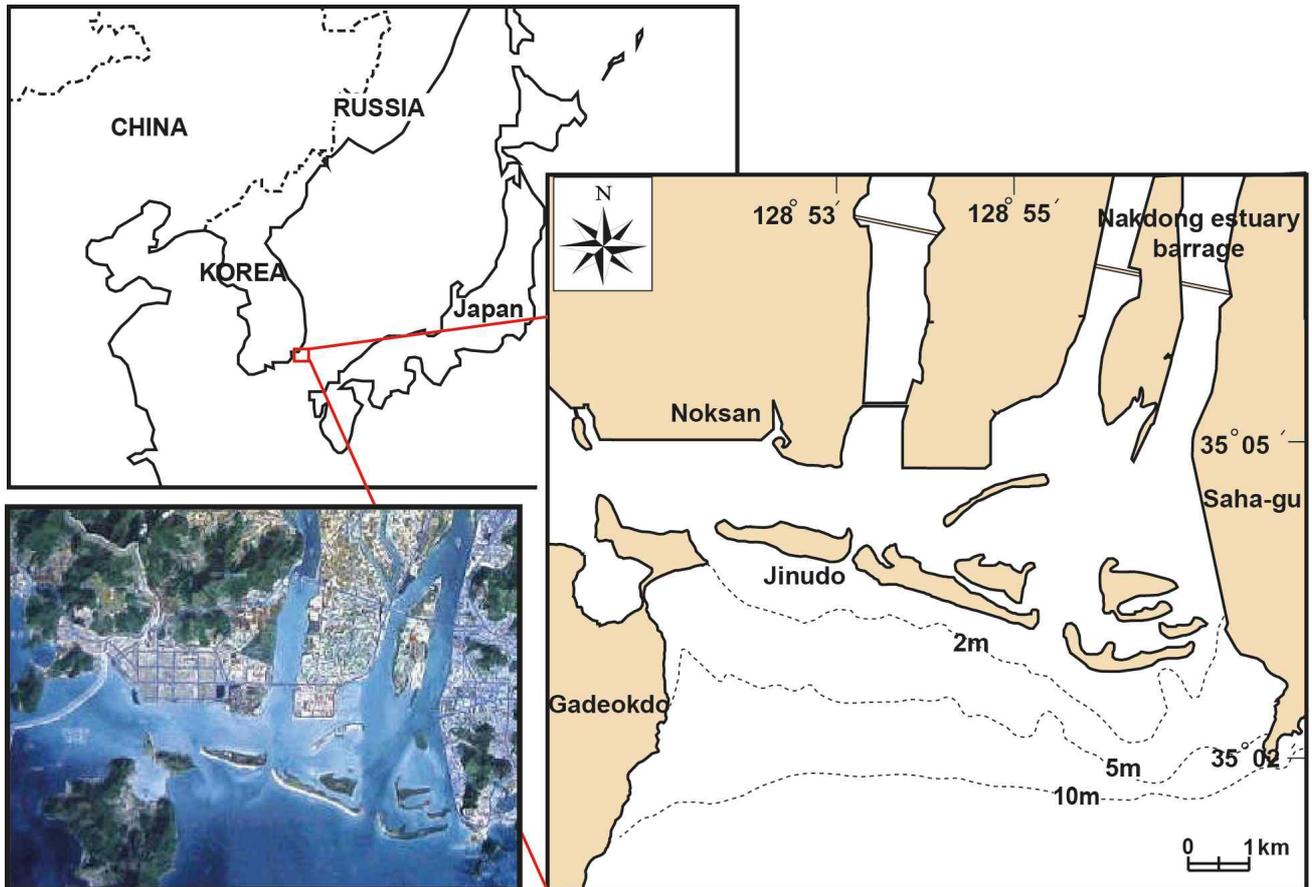


Fig. 1. Location of Nakdong river estuary with satellite image and isobathymetry map.

등)의 현장조사결과(부산광역시, 1999)를 바탕으로 군집(Cluster) 분석에 의해 환경인자특성이 동일한 영역으로 구분한 후, 하천수 유입과 외해로의 유출 및 사주간의 해수소통을 고려하여 7개의 내부 영역과 5개의 외부 영역으로 분할하였다(Fig. 2).

3) 단면 영역별 부유사의 Net-flux 산정

상기 단면유량 Flux와 부유사 농도를 이용하여 소영역간의 부유사 Net-Flux를 산정하였다. 부유사 농도는 부산광역시(1999)의 Fig. 2에 나타난 조사정점에서 1999년도 1월~12월에 걸쳐 수행된 월 1회 현장조사 자료를 사용하였다. 그리고 홍수기와 갈수기의 부유사 농도는 각각 하계(7월~9월)와 동계(12월~2월)의 평균농도를 사용하였으며, 부유사 농도 값이 존재하지 않는 영역은 인근의 정점에서 조사된 부유사 농도값을 보간하여 적용하였다. Table 1은 동계(갈수기)와 하계(홍수기)의 소영역별 부유사 농도를 나타낸다.

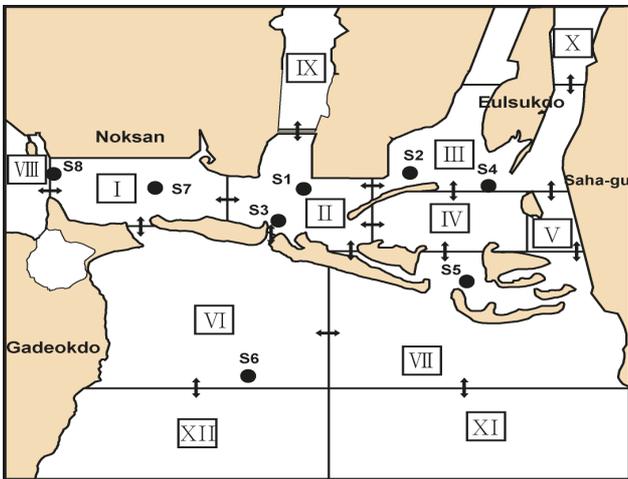


Fig. 2. Section division for prediction of net flux(↔) and observation point of suspended solid(●).

Table 1. SS concentration of each region in Nakdong river estuary(Unit : mg/L)

Section	Winter	Summer	Section	Winter	Summer
I	19.42	23.23	VII	12.25	8.86
II	15.79	15.21	VIII	22.67	18.07
III	10.07	9.24	IX	16.94	12.22
IV	11.49	8.19	X	10.07	9.24
V	11.49	8.19	XI	15.54	12.00
VI	15.54	12.00	XII	15.54	12.00

3. 결과 및 고찰

3.1 하천유량 산정 결과

강우-유출모형인 Tank model에 의해 낙동강 유역의 삼랑진

지역의 일별 하천유량을 산정한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 일별 유출량 계산값(-)과 하천유출량(●)의 실측값의 경시변화로부터 하천유출량의 계산치와 실측치간의 상관계수(R²)는 약 0.73이었으며 계산값이 다소 과소평가된 경향을 나타내었으나, 일별 유출량의 경시변화는 전반적으로 양호하게 재현된 것으로 판단된다.

낙동강 유역의 삼랑진에서의 3년간(1998년~2000년)의 연평균 하천유출량은 약 10.42×10³ m³/sec로 산정되었으며, 이중 장마와 태풍이 빈번하게 발생하는 하계절인 7월~9월의 유출량은 1998년~2000년에 걸쳐 각각 54.5%, 59.1%, 65.8%로서 연간 총 하천유출량의 50% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 한편, 낙동강 하구역으로 유입하는 연평균 담수유입량은삼랑진의 하천유출량으로부터 비류량으로 추정하면, 서낙동강이 약 133,948×10³ m³/day, 을숙도 좌우측의 낙동강 하구둑에서 각각 약 382,925×10³ m³/day이었으며, 장림하수처리장으로부터의 담수유입량은 약 720×10³ m³/day로 산정되었다.

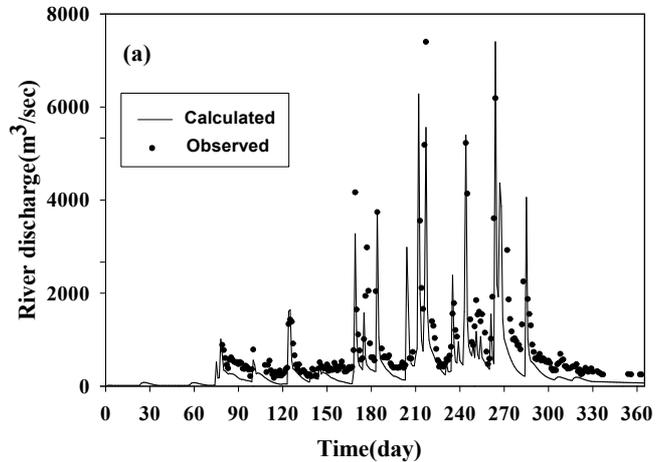


Fig. 3. Time series of calculated and observed Nakdong River discharge in 1999(Samrangjin).

3.2 부유사의 Net-flux 산정 결과

1) 해수유동 수치실험 결과

낙동강 하구역의 평수기와 갈수기의 해수유동은 거의 유사한 흐름으로 나타났으며, 갈수기의 경우는 창조류시에 약 0.5 m/sec의 유속으로 외해로부터 사주 사이의 수로를 통한 해수의 유입량이 많은 것으로 나타났다. 반면에 낙조류시는 약 0.2 ~ 0.3 m/sec의 유속범위로 사주지형 사이의 수로를 통해 외측으로 유출되는 양상을 보였으나, 백합등과 다대등 사이의 수로를 통한 유출은 미약한 것으로 나타났다. 그리고 홍수기의 해수유동은 장자도와 백합등 사이의 수로를 통해 약 1.0 ~ 1.3 m/sec의 빠른 흐름으로 하천수가 외해측으로 유출하는 경향을 보였다.

2) 단면별 해수유동량의 Net-flux 산정 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 해수유동 수치실험을 통해 계산된 갈수기와 홍수기의 15일간 단면별 유량 flux의 산정결과를 나타낸다.

갈수기에는 낙동강 하구의 서측에 위치한 부산 신항으로부터의 유입 flux가 $1,380 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 가장 많았으며, 이는 낙동강 하구둑으로부터의 유입 flux $96 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 에 비해 약 14배 많은 양이었으며, 서쪽 외해측(XII)에서 VI영역으로의 유입량은 $9,246 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$, VII영역에서 외해로 유출하는 flux는 $10,715 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 산정되었으며(Fig. 4), 사주 주변에서의 유량은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 특히, 하천유량이 많은 홍수기에는 낙동강 주 수로(10)를 통한 유입 flux가 $262,793 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 로서 사주지형 주변의 수로를 통해 외해측으로 대량 유출하고 일부는 부산 신항측으로 유출되는 것으로 나타났다(Fig. 5).

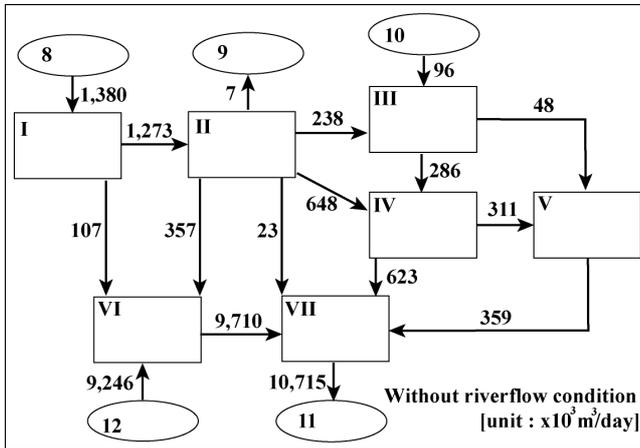


Fig. 4. Divisional distribution of the net water flux(Dry season).

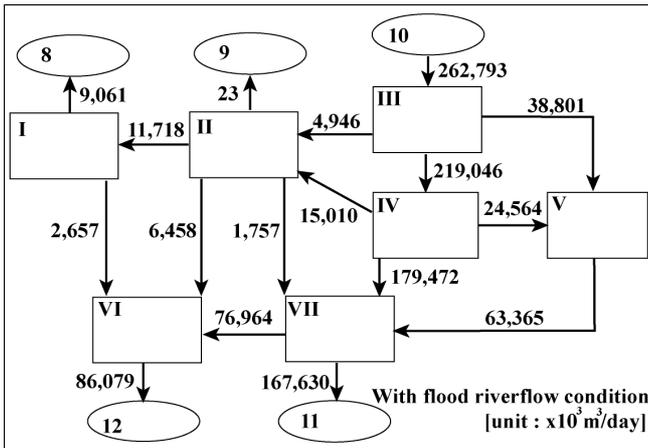


Fig. 5. Divisional distribution of the net water flux(Flood season).

3) 부유사의 Net-flux 산정 결과

앞절의 낙동강 하구역의 단면별 해수유통량의 Net-flux와 부유사 농도를 기초로 얻어진 갈수기와 홍수기의 부유사의 Net-flux산정결과는 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 갈수기에는 부산 신항에서 유입된 부유사가 낙동강 하구역의 동측으로 수송되는 경향을 보였으며, 단면 II, III, V 및 VII 영역에서는 부유사가 유입되고, 단면 I, IV 및 VI영역에서는 부유사가

유출되는 것으로 나타났다. 특히, VII영역의 부유사의 유입 Net-flux는 약 167,173 kg/day이었으며, VI영역에서 유출 되는 부유사 Net-flux는 약 130,934 kg/day로 가장 많았다(Fig. 6).

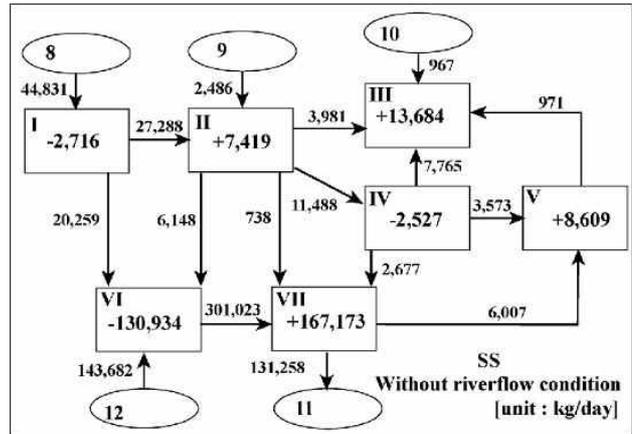


Fig. 6. Calculated result of SS mass balance in each section(Dry season).

그리고 Fig. 7에 나타낸 홍수기의 부유사 Net-flux산정 결과를 살펴보면, 낙동강 본류로부터 부유사의 유입량이 가장 많았으며, 외해와 부산 신항측에 접하고 있는 영역에서는 모두 부유사의 유출 Net-flux가 많은 것으로 계산되었다. 특히, 낙동강 하구의 사주지형 주변에서는 대마등 남단과 장자도 북단 및 백합등 북단으로 형성되는 단면 IV와 V영역에서 부유사의 집적량이 크게 나타나 사주지형변화가 현저할 것으로 예측되었다.

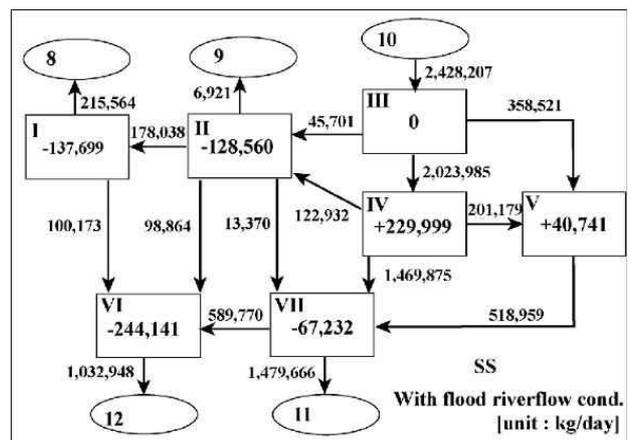


Fig. 7. Calculated result of SS mass balance in each section(Flood season).

한편, 상기의 단면별 부유사의 Net-flux계산결과를 바탕으로, 낙동강 하구역 수체적을 하나의 Box로 설정하여, Box로 유입하는 부유사량과 외해로 유출하는 부유사량의 물질수지를 계산하였다. 이 결과를 살펴보면 갈수기에는 부유사의 유입과 유출량이 각각 191,966 kg/day과 131,258 kg/day로서 낙동강 하구역 내 순유입 물질수지는 60,708 kg/day로 산정되었으며, 이 중 70

%이상인 44,831 kg/day가 부산 신항측에서 유입되고 약 20%는 외해측으로부터 유입되는 것으로 나타났다. 반면에 홍수기에 부유사의 유입과 유출량은 각각 2,435,128 kg/day와 2,728,178 kg/day로서, 낙동강 하구역을 통해 외해로 유출되는 부유사 Net-flux가 306,892 kg/day로 산정되었다. 특히, 사주지형 주변에서는 유입과 유출 거동이 복잡하여, 대마등과 장자도 및 백합등으로 형성된 단면 IV와 V영역이 다른영역에 비하여 부유사의 집적량이 많은 것으로 예측되었다. 이는 낙동강 하구역의 토사이동은 하천유출수와 파랑 등의 계절적 변동요인에 의해 사주지형의 퇴적현상이 크게 변동하는 윤(2009)의 연구와 유사한 결과로서, 급후 이에 대한 장기적인 모니터링 과 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 낙동강 하구역의 사주지형 변화를 예측하기 위한 기초적 연구로서 하천유량의 변화에 따른 부유사의 물질수지에 대하여 검토하였다. 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다. 강우-유출모형인 Tank model을 이용하여 계산한 1998년부터 2000년(3년간)의 낙동강 수계의 평균하천유량은 약 $10.42 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로서, 홍수기인 7월~9월의 유입량이 연간 유입량의 50% 이상을 차지하였다.

낙동강 하구역의 해수유동은 갈수기시에는 사주 주변의 흐름이 미약하였으나, 홍수기는 낙동강 하천유출수가 사주 주변을 통과하여 외해로 유출하는 흐름이 우세하여 하구역의 해수유동에 하천 유출량이 크게 기여하는 것으로 나타났다.

부유사의 단면별 Net-flux 산정결과, 갈수기에는 진해만에서 유입된 부유사가 낙동강 하구역의 동측으로 수송되는 경향을 보였으며, 홍수기는 낙동강 본류로부터 부유사의 유입량이 가장 많으며 외해측과 진해만측에 접하고 있는 영역에서는 모두 부유사의 유출 Net-flux가 많은 것으로 계산되었다.

낙동강 하구역의 부유사 물질수지는 갈수기는 60,708 kg/day가 하구역내로 유입하고, 홍수기는 306,892 kg/day가 하구역에서 외해로 유출하는 것으로 산정되었다.

후 기

이 연구에 참여한 류성훈은 2단계 BK21 사업의 지원을 받아 연구하였으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 김상호, 신승호, 양상용, 이중우(2003), 낙동강 하구 사주 발달에 관한 연구, 한국해양환경공학회지, 6(3), pp. 26-36.
 [2] 김석운, 하정수(2001), 낙동강 하구와 주변 연안역의 표층 퇴적상 및 퇴적환경 변화, 한국수산학회지, 34(3), pp. 268-278.

[3] 김재중, 김기철, 이정만(1995), 낙동강 하구에서의 부유사 거동에 관한 연구, 한국해양공학회지, 19(1), pp. 120-131.
 [4] 노재영, 이경훈, 윤한삼, 류청로, 김영표(2004), 낙동강 하천유출특성에 따른 Plume 영향해역 예측 수치모의, 한국해양환경공학회, 2004년도 추계학술대회 논문집, pp. 176-184.
 [5] 부산광역시(1999), 신호지방공업단지 개발사업 사후환경관리 99년 종합보고서. pp. 138-188.
 [6] 부산광역시 강서구청(2004), 낙동강 하구 오염해역 및 소형선 통항로 확보 준설연구용역 보고서, pp. 101-130.
 [7] 신현석, 강두기, 갈병석(2007), SWAT 모형을 이용한 낙동강 부유사량 예측에 관한 연구, 대한토목학회, 2007 대한토목학회 정기학술대회논문집, pp. 2006-2009.
 [8] 유창일, 윤한삼, 류청로, 이인철(2006), 해도분석을 통한 낙동강 하구 사주 면적의 시·공간 변화, 한국해양공학회지, 20(6), pp. 54-60.
 [9] 윤은찬(2009), STA기법과 지형변화 예측모형에 의한 낙동강 하구역 토사이동해석, 부경대학교 박사학위논문, pp. 94-195
 [10] 윤한삼, 이인철, 류청로(2005), 낙동강 하구역내 사주간의 단면유량플릭스 수치모의, 한국해양환경공학회지, 8(4), pp. 186-192.
 [11] 이인철(2001), Tank모델에 의한 영일만 유입오염부하량의 계절변동 예측, 한국해양환경공학회지, 6(3), pp. 63-71.
 [12] 이인철, 임성필, 윤한삼, 김현태(2008), 낙동강 하구역 사주지형변동과 부유사(SS) 수송량 산정, 한국해양공학회지, 11(2), pp. 70-77.
 [13] 추효상(2002), 하계 한국 남해의 해황 변동과 멀치 초기 생활기 분포특성, 한국수산학회지, 35(1), pp. 77-85.
 [14] 한국수자원공사(1989), 낙동강 수계 다목적댐 연계운영방안 연구(1차보고서). pp. 150-160.
 [15] Deloffre, J., R. Lafite, P. Lesueur, S. Lesourd, Verney R. and Guezennec L.(2005), Sedimentary processes on an intertidal mudflat in the upper macrotidal Seine estuary, France, Estuarine Coastal and Shelf Science, 64(4), pp. 710-720.
 [16] Leendertse, J. J.(1971), A water quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal sea, Rand Corporation, pp. 1-20.
 [17] Yanagi, T., T. Hagita and T. Saino(1994), Episodic Outflow of Suspended Sediments from the Kii Channel to the Pacific Ocean in Winter, Journal of Oceanography, 50, pp. 99-108.

원고접수일 : 2011년 08월 08일
 원고수정일 : 2011년 09월 15일
 게재확정일 : 2011년 09월 22일