

담수유입에 의한 폐쇄성 내만의 물질체류시간 수치예측

김진호* · 이인철**†

* 국립수산과학원 어장환경과, ** 부경대학교 해양공학과

A Numerical Prediction of Residence Time According to Freshwater Influx in Enclosed Bay

Jin-Ho Kim* · In-Cheol Lee**†

* Marine Environment Research Division, National Fisheries Research and Development Institute, Busan, 700-800, Korea

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

요 약 : 본 연구에서는 EFDC모델과 입자추적모델을 이용하여 마산만의 담수유입에 의한 폐쇄성 내만의 물질체류시간을 산정하였다. 마산만의 해수유동을 재현하고 이를 바탕으로 평균체류시간을 계산하였다. 마산만의 조석에 의한 평균물질체류시간은 만 북측과 돌섬 부근까지가 약 110일이내, 모도 주변 해역이 약 40일, 부도에서 외해까지 약 20일 정도로 산정되었다. 담수유입에 따른 마산만의 4개 소해역별 평균물질체류시간은 I 과 II영역에서 약 81일로 감소하였으나, 마산만의 외해측에 위치한 III과 IV영역은 각각 58일과 17일로 증가하였다.

핵심용어 : 체류시간, 담수유입, 폐쇄성 내만, 수치예측, 마산만

Abstract : This study is to examine the effect of freshwater influx on residence time to understand a long-term material transportation in enclosed bay. To predict the residence times of the coastal water in Masan bay, we were carried out the numerical simulations by using a EFDC model to simulate seawater circulation and particle tracking. The average residence times of Masan bay obtained from the particle release simulations under the condition to neglect a freshwater influx were estimated to be about 110 days in northern part of the bay to near Dotseom, 40 days in around Modo and 20 days in Budo to open sea. However, the average residence times under the condition consider with freshwater influx decreased about 81 days in both Region I(northern Masan bay to near Dotseom) and Region II (Dotseom to Modo), but the Region III(Modo to Budo) and Region IV(Budo to open sea) increased about 58 days and 17 days, respectively.

Key Words : Residence time, Freshwater influx, Enclosed bay, Numerical prediction, Masan bay

1. 서 론

마산만은 진해만의 동북측 끝에 위치하여 외해수와의 교환이 이루어지는 가덕수로와 견내량 해협과는 지리적으로 매우 멀리 떨어져 있을 뿐만 아니라 연안지형이 좁고 남북으로 긴 형태를 가지고 있어 조류소통 및 해수교환이 매우 미약하다. 평균유속이 약 2~3 cm/sec에 불과한 마산만(김 등, 1986)으로 매일 유입되고 있는 담수량은 2008년 기준 약 756,000톤(국토해양부, 2009)으로 만의 크기에 비해 적지 않은 담수가 유입되고 있으며 이와 동시에 육상기인 오염물질의 유입 및 저면침적이 장기간 진행된 결과 매년 심각한 수질오염문제가 발생하였다. 특히 주요 담수유입원인 삼호산호천, 남천, 창원천 등이 모두 만

의 가장 안쪽에 위치하고 있어 하천을 통해 유입되는 오염물질이 외해로 유출되기까지 매우 오랜 시간이 소요될 것으로 예상되고 있다(신 등, 2004).

이전 연구에서도 마산만 수질오염의 원인이 하천을 통한 오염물질의 다량 유입으로 분석된 바 있고(홍 등, 1985; 이 등, 1990; 양, 1992; 김 등, 1994; 홍 등, 2007), 유 등(2008)은 하천을 통해 유입된 오염물질이 내만에 축적됨을 밝혔으며, 만내의 흐름도 하천으로부터의 담수유입량에 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(김 등, 1992; 장 등, 1993; 김, 1994). 그밖에 마산만의 오염문제와 관련하여 이와 도(1986)는 퇴적물의 중금속 함량 조사를 통한 오염원인 조사를 수행하였고 이 등(1995)은 표층저질의 유기염소화합물의 농도분석을 통하여 오염정황을, 윤과 이(2004)은 마산만의 준설사업과 하수처리장 가동시 마산만의 수질환경에 미치는 영향에 대해 조사한 바 있다. 이러한

* 대표저자 : 정희원, tool20@nfrdi.go.kr, 051-720-2528

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

극심한 수질오염으로 인해 마산만은 2000년 2월 해양오염방지법의개정에 따라 우리나라 연안의 5개 특별관리 해역 중 한 곳으로 고시되었으며, 2008년부터 연안오염총량관리가 시행되고 있다(국토해양부와 경상남도, 2008).

육상오염물질의 하천부하 이외에도 마산만 수질악화에는 미약한 해수유동으로 인한 물질체류시간의 증가가 매우 큰 영향을 미치고 있다. 마산만의 해수순환과 관련한 연구로는 마산만의 3차원 해수유동 수치실험(정, 1996), 해수교환을 산정(류 등, 1998), 그리고 수리모형실험(오와 안, 1999; 주 등, 2000) 등 다수의 연구결과가 있다. 그러나 체류시간의 경우 그 공간적 차이를 볼 수 있는 Zimmerman(1976)과 Takeoka(1984)의 개념을 처음으로 박 등(2009, 2011)이 마산만을 대상으로 적용한 바 있으나 국외의 체류시간 연구(Murakami, 1991; Abdelrhman, 2005)에 비하면 현재까지 국내에 적용한 연구는 매우 부족한 실정이다.

본 연구는 EFDC 모델을 이용하여 박 등(2009, 2011)이 마산만에 적용한 바 있는 Zimmerman(1976)과 Takeoka(1984)의 체류시간을 적용하고 주요 하천의 담수유입량을 고려하여 마산만의 평균체류시간에 미치는 담수유입의 영향을 검토한 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 수치실험개요

본 연구에 사용된 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)는 연안, 하구, 호소, 습지, 저수지 등의 유동 및 물질수송을 모의하는 3차원 수치모델로서 미국 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)에서 Hamrick(1992)에 의해 개발되었으며 크게 유동, 퇴적물 이동, 수질의 세 요소로 구성되어 있다. EFDC모델은 수직·수평적으로 2차원 및 3차원화가 용이하며, 수질 모델과 퇴적물 이동 모델의 접합이 용이한 장점을 가진다(김 등, 2011). 본 연구에서는 마산만의 해수유동 재현을 위해 EFDC 3차원 해수유동 수치모형 실험을 수행하였으며, 계산 대상영역은 마산만을 중심으로 돌섬, 모도, 부도, 진해항을 포함하여 설정하였다(Fig. 1). 그리고 EFDC모형의 입자추적모듈을 이용하여 물질의 체류시간을 계산하였으며, 개방경계의 각 격자점에서 매 시간 간격마다 주요 4개 조석분조(M_2 , S_2 , O_1 및 K_1)의 조화상수를 이용하여 경계조위를 설정하였다. 계산 격자간격은 $\Delta x = \Delta y = 200m$ 의 67×86 개의 격자 cell로서 활성 cell은 총 2,189개로 구성하였으며, 계산시간 간격은 CFL안정조건에 따라 1초로 하여 40일간 수치계산을 실시하였다. 또한 입자추적모듈을 이용한 체류시간의 계산은 계산시간간격을 1시간으로 하여 총 120일 동안 수치실험을 실시하였으며, 한 격자 당 1개의 입자를 고려하여 순간방류조건으로 계산하였다.

그리고 담수유입량의 입력조건은 마산만 내측에 위치한 삼호, 산호 및 양덕천(Fig. 1의 F1지점)에서 약 $43,197 m^3/day$ 와 내동, 창원, 남천천(Fig. 1의 F2지점)에서 $87,845 m^3/day$ 로 설정

하였다. 그리고 마산만의 물질 체류시간의 공간적 분포특성을 파악하기 위하여 만내 수질 항목별 농도분포(국토해양부와 경상남도, 2008; 국토해양부, 2009)를 근거로 하여 크게 4개 소영역으로 구분하여 해석하였다. 즉, I 영역은 마산만의 내측~돌섬, II영역은 돌섬~모도, III영역은 모도~ 부도까지이며 마지막으로 IV영역은 부도~행암만을 포함한 외해경계까지로 구분하였다.

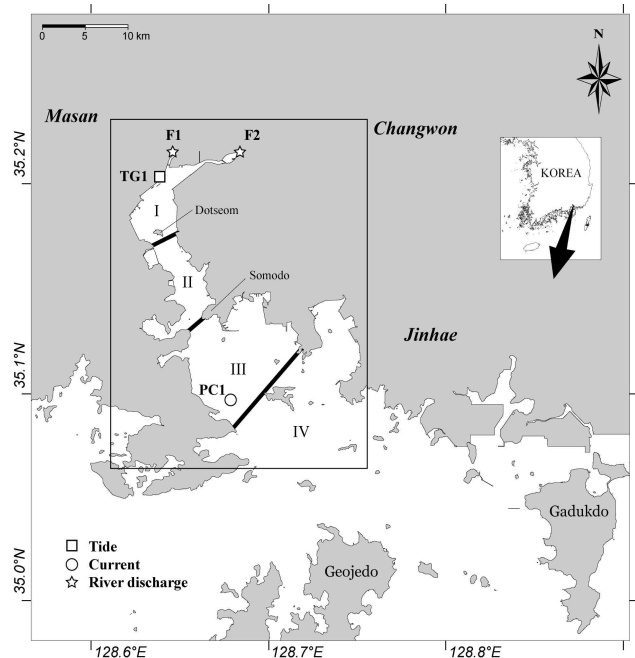


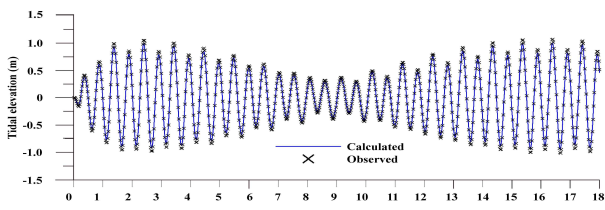
Fig. 1. Study area and observation stations.

2.2 수치모델의 검증

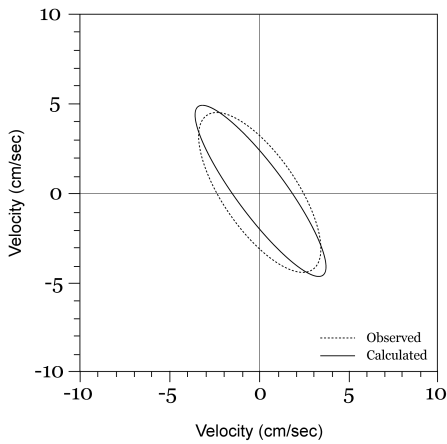
본 수치모델의 검증은 국립해양조사원의 마산항 검조소 조위 관측자료와 18일간의 계산조위 시계열로부터 조위검증을 실시하였으며, Fig. 1의 조류관측 정점에서의 반일주조 조류다윈의 관측치와 계산치를 비교하여 조류계산결과를 검증하였다. 그 결과는 Fig. 2에 나타내었으며 수치모델로부터 얻어진 계산 결과는 관측치와 대체로 잘 일치하는 것을 알 수 있어 본 해수유동 모델의 재현성은 양호한 것으로 판단된다.

2.3 평균체류시간 산정

본 연구에서 체류시간은 만내의 입자가 만 입구 경계를 처음으로 벗어날 때까지 소요되는 시간으로 산정하였다. 이는 해역에서 임의의 정점을 출발한 입자의 체류시간은 조석이 탁월한 해역에서는 입자의 방류시점에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 따라서 계산기간의 대조기, 소조기에 각각 고조, 저조, 최강창조, 최강낙조시에 각 격자별 입자를 방출한 계산을 수행하여 총 8회에 걸쳐 시뮬레이션한 후 이를 평균하여 평균체류시간을 구하였다.



(a) Tidal elevation



(b) Semi-diurnal tidal current ellipse

Fig. 2. Comparison between observed and calculated values of (a) tidal elevation and (b) semi-diurnal tidal current ellipse.

3. 결과 및 고찰

3.1 조석에 의한 평균체류시간(Case I)

Fig. 3는 조석만을 고려한 수치실험(Case I) 결과로부터 얻어진 마산만의 평균체류시간의 수평적 공간분포를 나타낸다. 전반적으로 외해경계로부터 만내측으로 갈수록 평균체류시간이 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 체류시간은 외해경계에서 가까운 부도 주변에서 약 40일, 비교적 조류의 흐름이 빠른 부도 양측 수로 부근에서 약 20일로 감소하였으며, 해역이 좁아지는 모도 남측과 해군부두 부근에서는 약 40일~60일로 평균체류시간이 급격하게 증가하였다. 이는 진해항 입구 부근에서 약 10일의 체류시간이 불과 몇 km 내의 만내측에서 약 20일 이상으로 증가하는 것과 유사하였다. 또한 만내 북측으로 갈수록 체류시간은 증가하여 모도 주변에서 약 40일, 돌섬 부근에서 약 100일, 만북측에 위치한 주요하천 인근에서는 약 110일 이상으로 계산되었다. 이로부터 마산만의 최북단에 위치한 하천으로부터 유입된 오염물질이 만중앙부에 위치한 모도 부근을 통과하는데 약 40일이 소요되며, 조류의 흐름이 상대적으로 빠른 외해측의 부도 주변해역까지 빠져나가기까지는 약 80일이 소요되는 것으로 추정할 수 있다.

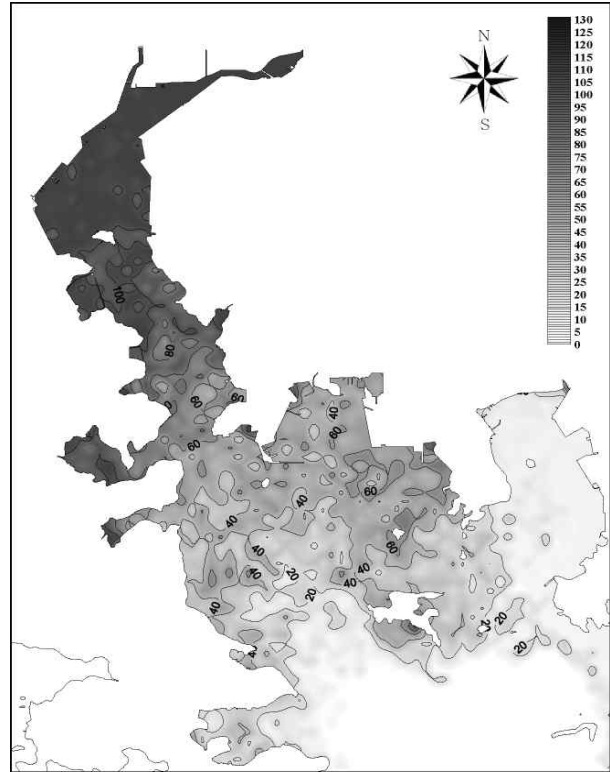


Fig. 3. Horizontal distribution of average residence time in Masan Bay by Case I of numerical simulation.

3.2 담수유입량을 고려한 평균체류시간(Case II)

Fig. 4는 상기 조석현상에 담수유입량 조건을 고려하여 계산한(Case II) 마산만의 평균체류시간의 수평적, 공간적 분포를 나타내며 조석만을 고려한 체류시간(Fig. 3)과의 차이는 Fig. 5에 나타내었다. 담수유입을 고려한 평균체류시간은 외해측에서는 수치실험결과와 유사하였으나 만내측에서는 다소 체류시간이 감소하는 것으로 나타났다. 평균체류시간은 모도 부근 해역에서 약 70일, 돌섬~만의 최북단의 주요하천 부근에서 약 80일로 산정되었다. 이는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 담수유입량을 고려할 경우 만중앙부에 위치한 모도 부근까지 약 20일정도 체류시간이 감소하지만, 모도를 경계로 외해로 갈수록 약 10일~20일 정도로 체류시간이 상대적으로 증가하였다. 이는 마산만의 북측에서 유입된 담수로 인하여 표층을 통한 외해로 의 다소 강한 흐름으로 만내측~모도까지 체류시간이 짧아지지만 모도를 경계로 외해까지는 담수유입의 영향 범위를 벗어남에 따라 오히려 흐름을 방해하여 상대적으로 체류시간이 증가하는 것으로 추측되어 마산만의 물질 체류시간에 미치는 담수유입의 영향범위 한계는 모도부근까지로 판단된다.

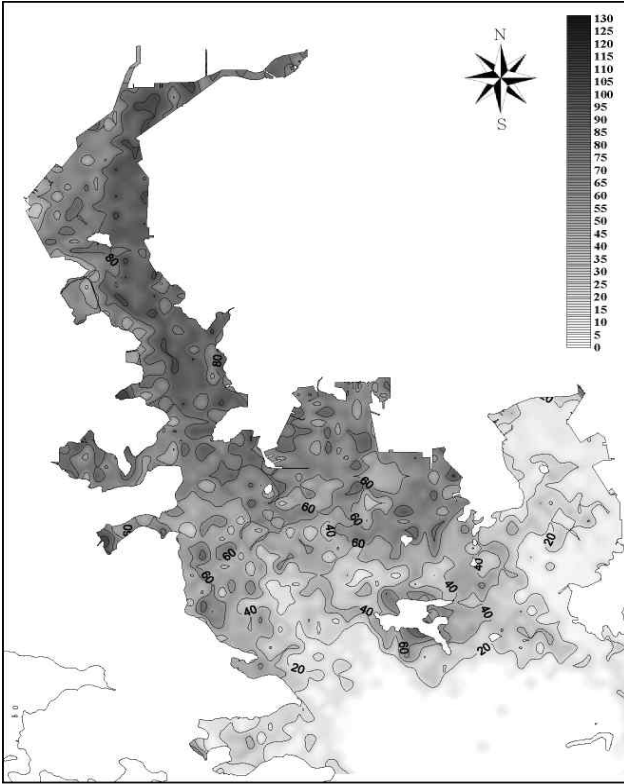


Fig. 4. Horizontal distribution of average residence time in asan Bay by Case II of numerical simulation.

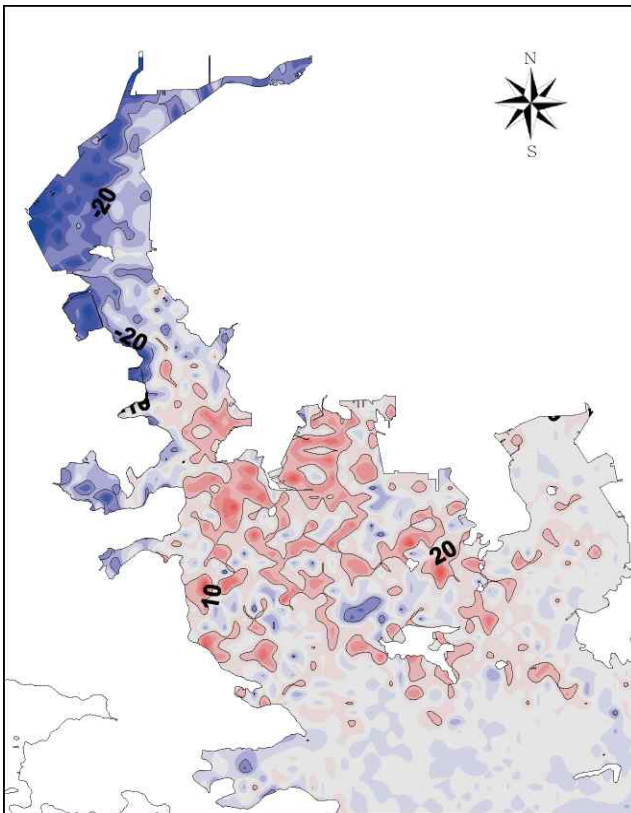


Fig. 5. Difference of average residence time between Fig. 3 and Fig. 4.

3.3 소해역별 비교 고찰

Fig. 1의 마산만의 4개 소해역(I영역~IV영역)의 각 격자별 평균체류시간의 평균값과 담수유입을 고려하였을 때 체류시간의 증감율을 Table 1에 나타내었다. 소해역별 체류시간을 살펴보면, I영역(만내측~돌섬)의 체류시간은 담수유입 조건(Case II)에서 약 79일로서 조석에 의한 결과(Case I)에 비해 체류시간이 약 24.5% 감소하여 담수유입량의 영향이 가장 두드러진 해역으로 나타났다. 다음으로 II영역(돌섬~모도)은 담수유입으로 인해 체류시간이 약 81일 정도로 Case I의 결과와 비슷하였다. 그러나 마산만의 외해측에 위치한 III영역(모도~부도)과 IV영역(부도~행암만을 포함한 외해경계)은 담수유입의 영향범위를 벗어나 오히려 체류시간이 각각 22.7%와 33.9%로 증가하는 것으로 나타나, 마산만의 오염물질 수송에 미치는 담수유입의 영향범위 한계는 대략 모도 인근영역으로 추정할 수 있다.

Table 1. The average value of residence time at each region in each case (Unit : Day)

Region	Case I	Case II	Remark
I	105.11	79.33	-24.5 %
II	84.35	80.85	-4.2 %
III	47.67	58.47	+22.7 %
IV	12.61	16.89	+33.9 %

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 EFDC수치모델을 이용하여 마산만의 해수유동을 재현하고 담수유입량을 고려하여 마산만의 평균 물질체류시간을 산정하여, 마산만의 오염물질 수송에 미치는 담수유입의 영향에 대하여 검토하였다. 연구로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

마산만의 조석에 의한 평균물질체류시간은 만북측과 돌섬 부근까지가 약 110일이내, 모도 주변 해역이 약 40일, 부도에서 외해까지 약 20일 정도로 산정되었다.

담수유입에 따른 마산만의 4개 소해역별 평균물질체류시간은 I과 II영역에서 약 81일로 감소하였으나, 마산만의 외해측에 위치한 III과 IV영역은 각각 58일과 17일로 증가하였다.

이상으로부터 마산만의 오염물질 수송에 미치는 담수유입의 영향이 가장 두드러진 해역은 만내측~돌섬까지의 범위이며, 그 영향범위의 한계지점은 모도 인근해역으로 추정되었다.

장기적인 물질 순환에 영향을 미치는 하천유량변화에 따른 물질의 체류시간 산정을 통해 마산만과 같은 폐쇄성 해역에서의 수질관리해역을 설정하는데 있어, 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

이 연구에 참여한 김진호는 2단계 BK21 사업의 지원을 받아 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 국토해양부, 경상남도(2008), 마산만 특별관리해역 제1차 연안오염총량관리 기본계획, pp. 1-234.
- [2] 국토해양부(2009), 마산만 연안오염총량관리 연구, pp. 1-977.
- [3] 김종구, 박청길, 김광수(1994), 하계 마산만의 부영양화 제어를 위한 생태계모델의 적용, 한국환경과학회지, 3(3), pp. 1-11.
- [4] 김종화, 장선덕, 김삼곤(1986), 마산만의 해수유동에 관여, 한국수산과학회지, 19(3), pp. 274-280.
- [5] 김종화, 이문옥, 강주복(1992), 마산만의 오염물질 수송에 미치는 바람 효과, 한국어업기술학회지, 28(4), pp. 385-397.
- [6] 김진혁, 박건형, 김기철, 서경석(2011), 대산항 해역의 부유사 확산 수치모사, 대한환경공학회논문집, pp. 16-24.
- [7] 김차겸(1994), 진해만 조류 및 취송류의 3차원 수치모형 실험, 한국해양학회지, 29(2), pp. 95-106.
- [8] 류청로, 김종규, 설동관(1998), 조류에 의한 내만의 해수 교환율 산정 모델 -입자추적모델의 응용-, 한국해양공학회지, 12(4), pp. 76-82.
- [9] 박성은, 홍석진, 이원찬(2009), Particle Tracking Model을 이용한 평균체류시간의 공간분포 계산, 한국해양공학회지, 23(2), pp. 47-52.
- [10] 박성은, 이원찬, 홍석진, 김형철, 김진호(2011), 조석주기 별 오염물질 방출에 따른 마산만의 체류시간 및 해수교환율 변화, 한국해양환경공학회지, 14(4), pp. 249-256.
- [11] 신소영, 이충일, 황선출, 조규대(2004), 마산만 주변해역에서 오염인자와 해양환경변동과의 관계, 해양환경안전학회지, 10(2), pp. 69-79.
- [12] 양동범(1992), 1986년 하계 마산만의 각종 질소화합물분포와 산소소비율에 대한 연구, 한국해양학회지, 27(4), pp. 303-310.
- [13] 오영민, 안희도(1999), 마산만 해수순환특성에 대한 수리모형실험, 대한토목학회지, 19(2-6), pp. 687-694.
- [14] 유민욱, 김영도, 류시완, 서일원(2008), 마산만 조위를 반영한 오염물질의 이송 및 확산 연구, 대한상하수도학회·한국물환경학회 2008공동 추계학술발표회, pp. 516-517.
- [15] 이상진, 도길명(1986), 마산만 해저토층의 중금속류의 함량, 경남대학교 환경문제연구소 환경연구, 8, pp. 11-19.
- [16] 윤석진, 이인철(2004), 마산만 준설사업 및 하수처리장 가동에 따른 진해만의 수질변동, 한국해양공학회 2004년도 학술대회지, pp. 117-122.
- [17] 이지원, 민병윤, 송전종명, 협본충명(1995), 마산만 표층저질에 잔류하는 유기염소화합물, 경남대학교 환경문제연구소 환경연구, 17, pp. 96-101.
- [18] 이찬원, 민병윤, 권영택, 양운진, 이규환(1990), 마산만 퇴적물의 중금속 및 유기염소화합물 오염에 관한 연구, 경남대학교 환경연구소 생산기술연구소논문집, 12, pp. 5-24.
- [19] 장선덕, 김차겸, 이종섭(1993), 진해만 조류의 현장관측 및 수리모형실험, 한국수산과학회지, 26(4), pp. 346-352.
- [20] 정태성(1996), 마산·진해만 조류에 관한 3차원 수치모형, 대한토목학회논문집, 16(2-1), pp. 63-72.
- [21] 주진규, 황병기, 이정렬(2000), 부영양화 모형을 이용한 마산만 수질 예측, 한국물환경학회·대한상하수도학회·한국수도협회 공동추계학술발표회, pp. 351-353.
- [22] 홍석진, 이원찬, 윤상필, 박성은, 조운식, 권경노, 김동명(2007), 마산만의 자생 유기물 저감을 위한 단순 박스모델의 적용, 해양환경안전학회지, 13(2), pp. 111-118.
- [23] 홍순우, 하영칠, 안태석(1985), 진해만의 수질과 생태계에 관한 요인분석에 관하여, 한국물환경학회지 수질보전, 1(1), pp. 9-17.
- [24] Abdelrhman M. A.(2005), Simplified Modeling of Flushing and Residence Times in 42 Embayments in New England, USA, with Special Attention to Greenwich Bay, Rhode Island, Estuarine Coastal and Shelf Science, 62, pp. 339-351.
- [25] Hamrick, J. M.(1992), A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects, The College of William and Mary, VIMS, Special report 317.
- [26] Murakami K.(1991), Tidal Exchange Mechanism in Enclosed Regions, In: Proceedings of the Second International Conference on hydraulic Modelling of Coast Estuary and River Waters, 2, pp. 111-120.
- [27] Takeoka, H.(1984), Fundamental Concepts of Exchange and Transport time scale in a Coastal sea, Continental Shelf Research, 3, pp. 311-393.
- [28] Zimmerman, J. T .F.(1976), Mixing and Flushing of Tidal Embayments in the Western Dutch Wadden Sea, Part I: Distribution of Salinity and Calculation of Mixing Time Scale, Netherlands Journal of Sea Research, 10, pp. 149-191.

원고접수일 : 2011년 10월 14일

원고수정일 : 2011년 12월 12일 (1차)

2011년 12월 16일 (2차)

게재확정일 : 2011년 12월 26일