

## 馬山灣의 長期間 물收支 및 海水交換 特性

### Long-Term Water Budget and Exchange Characteristics in Masan Bay

조흥연\* · 채장원\*

Hong Yeon Cho\* and Jang Won Chae\*

**要 旨** : 마산만의 악화된 수질을 개선하고 관리하기 위해서는 정확한 물수지 및 해수교환 특성 분석이 선결되어야 한다. 본 연구에서는 모형적용 영역을 4개의 해역으로 분할하여 월별로 물수지를 분석하였으며, 중요한 입력 자료인 유역 유출량은 유출계수(=0.7)를 이용하여 추정하였다. 물수지 분석모형을 마산만 및 인근해역에 적용한 결과는 다음과 같다. 마산만 유역의 용수공급에 의한 유출기여율은 1978년 10% 수준에서 점차 증가하여, 현재는 강우에 의한 유출량과 대등한 수준이다. 또한, 하수 차집관거에 의한 유출저감량은 총 유입량의 약 25% 정도이며, 강우 및 증발에 의한 純影響은 10% 정도이다. 한편, 마산만의 수리학적 정체시간은 약 3개월(97일)로, 해수교환이 잘 이루어지지 않는다. 해수교환에 의한 염도변화를 분석한 결과 월평균 강우와 염도의 시기적인 상관성은 없고, 염도간 지역적인 상관성만이 있는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 물수지, 해수교환, 유출계수, 수리학적 정체시간

**Abstract** □ Accurate analysis of water budget and seawater exchange characteristics is essential for the improvement and management of the degraded water quality in Masan Bay. In this study, water budget is simulated for the four divided coastal zones on the monthly base, and watershed runoff discharges which are important as input parameters are estimated using the runoff coefficient(=0.7). The main results are as follows: The runoff - contribution rate due to water supply discharge is increased from 10% in 1978 to the equivalent amount at present. The reduction quantity due to the wastewater interception is about 25% of total inflow discharges, and the net effects of both precipitation and evaporation is about 10%. As the hydraulic detention time in Masan Bay is estimated about 3 months, water exchange rate is to be very low. From the analysis of the salinity variation on account of water mixing, it appears no temporal correlation between monthly average precipitation and salinity, whereas only regional correlation is apparent.

**Keywords** : water budget, seawater exchange, runoff-coefficient, hydraulic detention time

## 1. 서 론

특별관리해역인 진해만(1982년 지정)은 연안도시, 항만, 임해공단 등으로부터 많은 오염물질이 유입되어 수질이 점차 악화되고 있으며, 이의 개선을 위한 특별 대책이 필요한 해역이다. 특히, 진해만 북부해역에 위치한 마산만은 오염이 가장 심각한 해역으로, 수질개선을 위한 노력(준설 및 하수처리장 건설)과 오염현상에 관한 과학적인 조사·연구가 타지역에 비하여 장기간에 걸쳐 수행되어 왔다(Table 1 참조; 서울대학교 미생물학과, 1976-79[해양개발연구소, 1980 재인용]; 해양개발연구소, 1980; 한국과학기술원 해양연구소, 1981-83; 한국과학기술연구원 해양연구소, 1988-89; 한국해양연구소, 1990; 이찬원, 1991; 한국해양연구소, 1991-92; 한국해양연구소, 1993-94; 국립수산진흥원, 1993-95; 이찬원, 1994; 한국해양연구소, 1996; 한국해양연구소, 1997). 이는 주로 해수유동, 적조, 영양염류순환, 성층화 등에 관한 기초적인 현상연구이며, 대

간에 걸쳐 수행되어 왔다(Table 1 참조; 서울대학교 미생물학과, 1976-79[해양개발연구소, 1980 재인용]; 해양개발연구소, 1980; 한국과학기술원 해양연구소, 1981-83; 한국과학기술연구원 해양연구소, 1988-89; 한국해양연구소, 1990; 이찬원, 1991; 한국해양연구소, 1991-92; 한국해양연구소, 1993-94; 국립수산진흥원, 1993-95; 이찬원, 1994; 한국해양연구소, 1996; 한국해양연구소, 1997). 이는 주로 해수유동, 적조, 영양염류순환, 성층화 등에 관한 기초적인 현상연구이며, 대

\*韓國海洋研究所 沿岸工學研究部 (Coastal Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

**Table 1.** List of scientific studies and water quality improvement plans.

시 기	주요 연구 성과 및 세부내용	수질개선 대책
'70년대 후반	진해만 해양기초조사 (1976-1979, 서울대학교 미생물학과)	
'80년대 전반	진해만의 적조 및 오염모니터링 시스템 개발을 위한 기초연구(1979-1983, 한국해양개발연구소)	특별관리해역 지정(1982)
'80년대 후반	연안환경 보전기술개발연구 (1988-1990, 한국해양연구소)	마산만 수질정화 기본계획 수립(1987)
'90년대 전반	진해만일원 오염실태 조사보고서 (1991, 경남대학교 환경문제연구소) 마산만 준설에 따른 해양환경 종합모니터링 (1990-1994) (경남대학교 환경문제연구소) 연안오염의 진행과정 및 변화예측연구 (1991-1992, 한국해양연구소) 폐쇄성 해역의 수질관리기술연구 (1993-1994, 한국해양연구소) 부영양화 및 적조현상 구명에 관한 연구 (1993-1995, 국립수산진흥원)	마산만 정화사업(1990.6-1994.12) 마산·창원하수종말처리장 건설(1993. 11. 가동, 1996. 현재 210,000톤/일 1차처리)
'90년대 후반 (계획)	연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구 (1994-1997, 한국해양연구소) 연안환경 개선기술(1995-1998, 한국해양연구소)	마산·창원하수종말처리장 확충(1999, 계획) 진해 행암동 하수종말처리장 건설(계획; 2001, 2011)

해역의 수질변동 예측에 중요한 하·폐수량의 유입 및 오염부하량에 대한 정량적인 연구 및 계절별·연별 변동 특성에 대한 정량적인 평가는 미흡한 실정이다.

수량·수질의 밀접한 관련성으로 인하여 그 중요성이 해역의 수질관리측면에서 더욱 부각되고 있는 물수지 분석, 즉 수문학적 순환(hydrological cycle) 분석은 대상해역의 중·장기적인 수질관리 차원에서 가장 우선적으로 수행되어야 하는 기본적인, 필수불가결한 과제이다. 또한, 연안역에 유입·유출되는 하·폐수량의 정확한 추정은 이에 수반되어 유입되는 오염물질 부하량의 추정, 수질의 지역적·시간적 변동성 예측 및 폐쇄성 해역의 정체시간(hydraulic detention time) 추정을 위한 필수조건이다.

해역으로 유입 또는 외해로 유출되는 유량을 1년에 몇회의 간헐적인 측정으로 산정하는 경우는 시기적 변동성이 큰 유량을 표현하는 과정에도 문제가 있으며, 오염부하량 추정, 관련된 수질항목의 농도분포 모의 및 분석에 많은 오차가 포함될 수 있다(Di Toro and Connolly, 1980). 그러나, 우리나라 대부분 연안해역의 하천 유량측정자료는 매우 부족한 실정이므로, 특정시점에서 측정된 자료를 이용하여 하천유량을 대표하는 방법을 이용하고 있다. 이 방법은 측정시점의 특성만

을 반영하는 값으로, 중·장기적인 수량변동을 반영할 수 없을 뿐만 아니라, 계절적인 변동성도 정성적·정량적으로 반영하기가 곤란하다.

외국(일본, 미국 등)의 경우, 연안역으로 유입되는 소규모 하천에 대한 유량관측 및 오염부하량 관측 등은 지방자치단체 또는 관할 부서에서 정기적으로 관측을 수행하고 있다. 반면, 우리나라의 경우에는 대하천 및 주요 지천에 대해서만 정기적인 유량 및 수질관측을 건설교통부(수자원공사), 환경부 등에서 수행하고 있으며, 연안해역으로 직접 유입되는 소하천에 대해서는 정기적인 관측이 시행되고 있지 않다. 그러나, 강우의 변동성과 밀접한 관련이 있는 유역유출을 모형으로 구성할 수 있다면, 간헐적인 측정으로 파악할 수 없는 유량의 장기적·계절적인 변동성을 고려한 유역의 물수지분석은 가능하다.

따라서, 본 연구에서는 간헐적이거나 기존의 유량측정자료(한국해양연구소, 1996)를 활용하여 비교적 간단한 유역유출모형(강우-유출모형)을 수립하였다. 이는 물수지분석 모형의 입력자료를 추정하는 모형으로, 담수 유입량의 계절별, 연별 변동성을 모의할 수 있다. 한편, 분할된 해역에 대하여 물수지를 계산할 수 있는 모형을 구성하여, 마산만 및 인접해역의 물수지를 파악하

고, 유입수량의 년별·계절별 변동량 특성 및 마산만의 해수교환율, 염도와 강우의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 물수지 분석모형의 구성

### 2.1 지배방정식

물수지분석모형의 지배방정식은 질량보존식으로, 계산영역에 대하여 유입량과 유출량의 차이는 단위시간당 水 體積의 변화와 동일함을 의미한다(Fig. 1 참조).

$$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_o \quad (1)$$

여기서,  $V$ =계산영역의 水 體積,  $Q_i$ =유입량,  $Q_o$ =유출량이다.

대상해역의 물수지 분석은 해역을 지형과 해수순환 특성을 고려하여 적절하게 분할하고, 분할된 영역으로의 유입량과 영역으로부터의 유출량을 산정하여 관계식을 이용한다. 그리고, 정상상태의 장기간 물수지 분석모형의 지배방정식은 분석기간 동안 수체적의 변화가 없거나 무시할 만한 정도라는 가정하에서는  $Q_i = Q_o$ 로 표현할 수 있다. 여기서, 유입량은 물수지 분석을 수행하기 위하여 분할된 해역(계산영역)으로의 유입량으로, 해역과 연결된 유역의 유출량에 해당한다. 마산만 유역의 유출량은 강우에 의한 유출량 및 낙동강 수계로부터의 공급용수(마산, 창원, 진해의 생활·공업용수는 낙동강의 진동 및 본포 취수장으로부터 공급)에 의한 유출량으로 구분할 수 있다. 유역 유출량은 하수처리를 위한 차집관거를 통하여 일정량이 타지역으로 이동되어 유출되기도 하므로, 이 경우에 해당하는 유역유출량의 이동을 고려하였다.

한편, 해역의 수표면을 통한 강수는 유입량에 해당하고, 증발은 유출량에 해당하며, 이 양은 인근 기상측 후소의 자료로 계산할 수 있다. 따라서, 각 영역간 해

수 이동량은 분할영역의 연결상태를 고려한 물수지 분석모형으로부터 신속하게 추정할 수 있다. 여기서, 한 영역의 유출량은 영역간의 연결관계에 따라 타 영역의 유입량에 해당할 수도 있다.

### 2.2 월별 유역유출량 추정

물수지 분석 모형에서 가장 중요한 과정은 강우 및 용수공급 자료를 이용한 해역의 유입량(유역의 유출량) 추정이다. 연안역으로 유입되는 소하천은 유출측정 자료가 일시적인 자료에 국한되어 있거나 전무한 실정이므로, 강우자료를 이용한 간편한 추정방법에 주로 의존한다. 따라서, 본 연구에서는 강우에 의한 유역 유출의 복잡한 과정을 유출계수(유출량/강우량)를 이용하여 표현하는 개념적인 식(Jolankai, 1983; 합리식 등)으로 월평균 유역유출량을 추정하였다.

$$[WR] = \alpha[P \cdot A] + \beta[SW] \quad (2)$$

여기서,  $WR$ =유역유출량,  $P$ =강우량,  $A$ =유역면적,  $SW$ =용수공급량,  $\alpha$ =강우성분의 유출계수,  $\beta$ =공급용수성분의 유출계수이다.

유출계수( $\alpha, \beta$ )는 1995, 1996년 마산만 주요 유입하천인 봉암천, 삼호천 등에 대하여 측정된 하천유출량 자료(총 12개 하천, 1995. 6~1996. 4 기간의 월별 측정자료)를 이용하여 추정하였다. 우선, 용수공급에 의한 유출율은 100%(유출계수  $\beta=1.0$ )로 가정하고, 측정된 유출량과 추정식(Eq. 2)으로 계산된 유역유출량의 절대편차가 최소가 되는 조건하에서 강우성분의 유출계수를 시행착오법으로 추정하였다(관측치와 추정치의 대비도: Fig. 2 참조; 상관계수  $r^2=0.723$ ). 추정된 유출계수( $\alpha$ )는 0.7(강우의 약 70%가 유출에 기여)로, 전국평균 유출계수인 0.55보다는 큰 값을 보이고 있으나, 이는 이 지역이 도시지역, 소유역 특성을 반영하기 때문인 것으로 추정된다.

한편, 유출량 계산의 정확성을 높이기 위해서는 보다 많은 자료의 축적, 주요 유입하천에 대한 정기적인 유출측정 또는 수위계의 설치 등을 통하여 강우-유출모형을 수립해야 한다. 그러나, 정기적인 측정이 수행되지 않고 있는 현 시점에서는 간략한 모형을 이용하여 개략적인 양의 추정 및 변동성을 고려하는 과정이 유용할 것으로 사료된다.

### 2.3 물수지 분석 수행과정

본 모형은 기본적으로 월별 물수지 분석을 수행하도

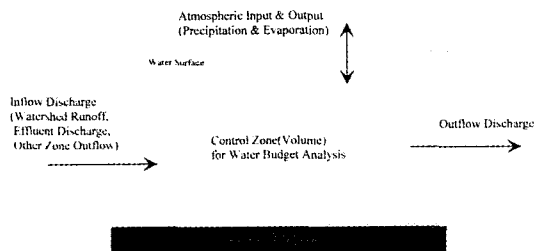


Fig. 1. Schematic diagram of the water budget analysis model.

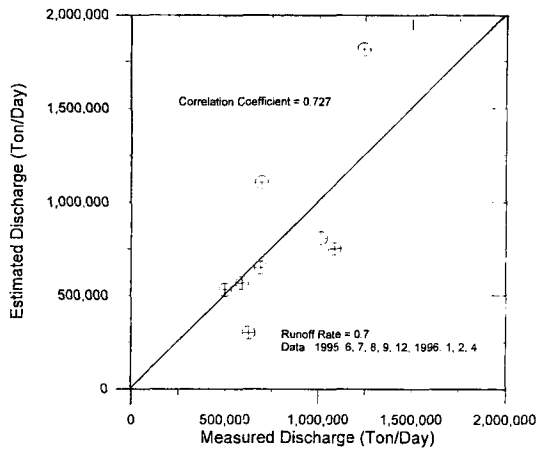


Fig. 2. Comparison of the observed and estimated river discharge.

록 구성하였으며, 계절별 양상 및 년변화를 파악하기 위해서는 월별로 계산된 결과를 해당기간에 대하여 처리(평균)된 결과를 이용하여야 한다. 물수지 분석의 단계별 수행과정은 다음과 같다.

진저리: 대상해역의 영역분할 및 유역분할

0단계: 주요 입력자료 READING

(강우량, 증발량, 용수공급량 등)

1단계: 영역으로의 유입량 계산(식 (2) 참조)

2단계: 수표면을 통한 증발 및 강우량 계산

3단계: 영역간 연결관계를 고려한 유출량 계산

(식 (1) 참조; 행렬계산)

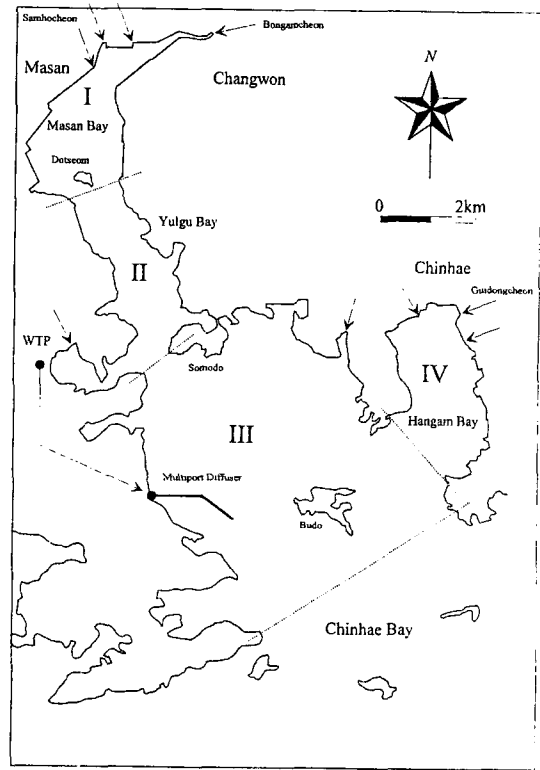
4단계: 분할영역의 수리학적 교환시간 계산

5단계: 각 영역별 기본정보 및 모형의 주요 추정정보 출력

### 3. 물수지 모형의 적용

#### 3.1 마산만 해역의 개요

본 연구에서 수립된 모형을 마산만, 울주만, 행암만을 포함하는 진해만 북부해역에 적용하였다. 이 해역을 4개의 영역으로 분할(Fig. 3 참조)하고, 각 영역의 모형 수행을 위한 기본정보를 Table 2에 제시하였다. 영역 I은 수질개선을 위하여 1990년대 초반 준설을 수행한 해역으로, 생활하수 및 공장폐수 등에 의한 오염부하가 집중되는 해역이며, 영역 II는 영역 I에 부하된 오염원이 외해로 이동하는 통로에 해당된다. 영역 I,II는 소모도 좌안의 좁은 통로를 통하여 해수가 교환되는 반폐쇄성 해역으로, 외해와의 해수교환이 매우 약



WTP : Wastewater Treatment Plant

Fig. 3. Zonation of the model application area.

한 영역이다. 영역 III은 1993년 11월 이후 덕동 하수종말처리장에서 1차 처리된 하수를 수중 다중방류관(multiport - diffuser)을 통하여 방류하는 옥계해역과 일반선박의 항해가 금지된 진해항을 포함하고 있는 해역으로, 외해와의 해수유동이 타 영역에 비하여 활발하다. 한편, 영역 IV는 진해시의 오염부하가 집중되는 지역으로, 영역 III을 일부 거쳐 외해로 오염물이 유출된다.

#### 3.2 물수지분석 모형의 입력자료

물수지분석 수치실험을 수행하기 위한 기본 입력자료는 월별 강우량, 용수공급량, 하수량 및 주요 모형 매개변수이다. 따라서, 마산만 유역의 강우량 자료는 1985년 개국한 마산측후소의 자료를 이용하였으며, 1985년 이전의 자료는 마산측후소 강우자료와 상관성이 큰(상관계수=0.91 이상) 충무(1993년부터 통영), 부산, 거제측후소의 자료를 산술평균하여 사용하였다(기상청, 1991~1996; 중앙기상대 1976~1990). 또한, 용수공급량 자료는 통계연보 및 한국수자원공사에서 제시한 자료(한국수자원공사, 1993; 이길성, 1996)를 이

**Table 2.** Zone information of the Masan Bay.

Zone No.	Surface Area ( $\times 10^6 \text{m}^2$ )	Ratio of Surface Area	Mean Depth(m)	Water Volume ( $\times 10^7 \text{m}^3$ )	Watershed Area ( $\text{km}^2$ )	Remark
I(Masan Bay)	9.28	0.125	7.5	6.96	193	I → II
II(Yulgu Bay)	9.42	0.127	11.1	10.46	-	I → II → III →
III(Chinhae Bay)	45.85	0.619	11.7	53.65	-	II → III →
IV(Hangam Bay)	9.56	0.129	7.7	7.36	46	IV → III →
Sum	74.11	1.000	-	78.43	239	

(Description) - : Lateral watershed runoff are not considered

용하였으며, 하수처리량 자료는 마산시 덕동에 위치한 환경시설관리사업소(구 하수종말처리장)의 월별 처리량 자료를 입수·이용하였다. 1976년부터 1996년까지의 강우량, 증발량은 Table 3, 4에 제시된 바와 같으며, 마산·창원·진해시의 용수공급량은 1977년부터 1996년까지의 자료이다. 한편, 1993년 11월 가동을 개시한 하수처리장의 방류량은 1993년 가동이후부터 1996년까지의 자료이다.

**Table 3.** Total precipitation for annual, summer and winter season period.

Year	Annual(A) (mm)	Summer(S) (mm)	Winter(W) (mm)	S/A (%)	W/A (%)
1976	1175.1	498.4	158.3	0.424	0.135
1977	1301.5	529.1	185.7	0.407	0.143
1978	1211.4	825.9	208.3	0.682	0.172
1979	1851.3	1241.9	228.0	0.671	0.123
1980	1991.5	1127.8	144.1	0.566	0.072
1981	1300.3	950.3	172.0	0.731	0.132
1982	1242.6	674.3	208.4	0.543	0.168
1983	1603.6	960.2	35.6	0.599	0.022
1984	1502.0	1128.4	206.7	0.751	0.138
1985	2349.1	1357.2	122.1	0.578	0.052
1986	1297.8	842.4	187.3	0.649	0.144
1987	1559.4	1067.7	108.3	0.685	0.069
1988	823.1	488.0	346.8	0.593	0.421
1989	1814.1	1261.4	210.7	0.695	0.116
1990	1530.5	883.0	177.4	0.577	0.116
1991	2022.9	1568.3	170.0	0.775	0.084
1992	1306.6	657.5	263.3	0.503	0.202
1993	1640.6	1120.4	119.4	0.683	0.073
1994	730.9	181.9	145.8	0.249	0.199
1995	956.2	517.1	198.3	0.541	0.207
Mean	1460.5	894.1	179.8	0.595	0.139
S.D.	411.7	350.9	63.6	0.129	0.084
C.O.V.	0.282	0.392	0.354	0.217	0.604

### 3.3 모형의 적용결과 및 해수교환 특성

#### 3.3.1 마산만 유역의 유출량 특성

마산만 유역의 유출량 특성을 분석하기 위하여 대부분의 유역유출이 집중되는 I 영역에 대하여 유역유출량, 강우 및 용수량의 상대적인 유출기여율 등을 계산하였다(Table 5 참조). 계산된 결과는 연평균, 동계, 하계기간 동안의 월 유입량(일평균 유입량)에 해당하는 값으로 제시하였다. 하계 및 동계기간은 각각 6~9월,

**Table 4.** Total evaporation for annual, summer and winter season period.

Year	Annual(A) (mm)	Summer(S) (mm)	Winter(W) (mm)	S/A(%)	W/A (%)
1976	1179.2	479.5	290.0	0.407	0.246
1977	1173.5	488.2	305.0	0.416	0.260
1978	1342.4	548.0	297.0	0.408	0.221
1979	1169.5	429.2	279.4	0.367	0.239
1980	1083.0	397.2	275.9	0.367	0.255
1981	1170.8	477.9	272.2	0.408	0.232
1982	1154.2	519.8	258.4	0.450	0.224
1983	1087.5	454.5	288.8	0.418	0.266
1984	1139.4	461.2	241.6	0.405	0.212
1985	1077.8	474.1	265.9	0.440	0.247
1986	1137.9	455.7	270.3	0.400	0.238
1987	1105.6	406.5	260.8	0.368	0.236
1988	1180.5	473.8	237.5	0.401	0.201
1989	1153.3	474.9	244.5	0.412	0.212
1990	1151.2	510.0	251.6	0.443	0.219
1991	1063.6	405.3	253.9	0.381	0.239
1992	1149.8	475.9	283.3	0.414	0.246
1993	1019.9	349.1	298.6	0.342	0.293
1994	1295.9	587.2	282.7	0.453	0.218
1995	1144.7	450.9	308.3	0.394	0.269
Mean	1149.0	465.9	273.3	0.405	0.239
S.D.	73.2	53.7	21.3	0.029	0.023
C.O.V.	0.064	0.115	0.078	0.072	0.096

Table 5. Yearly variation of the inflow/outflow components in Zone I.

Year	Annual average					Summer Season				
	WR	SW	IW	SW/WR (%)	IW/TR (%)	WR	SW	IW	SW/WR (%)	IW/TR (%)
1976	434,960	0	0	0	0	561,153	0	0	0	0
1977	481,746	38,000	0	7.9	0	595,716	38,000	0	6.4	0
1978	448,396	46,000	0	10.3	0	929,826	46,000	0	4.9	0
1979	685,247	47,624	0	6.9	0	1,398,135	47,624	0	3.4	0
1980	737,115	49,026	0	6.7	0	1,269,752	49,026	0	3.9	0
1981	481,289	63,630	0	13.2	0	1,069,879	63,630	0	5.9	0
1982	459,945	64,880	0	14.1	0	759,112	64,880	0	8.5	0
1983	593,564	66,433	0	11.2	0	1,081,025	66,433	0	6.1	0
1984	555,946	67,244	0	12.1	0	1,270,428	67,244	0	5.3	0
1985	869,489	102,850	0	11.8	0	1,527,981	102,850	0	6.7	0
1986	480,364	110,715	0	23.0	0	948,402	110,715	0	11.7	0
1987	577,192	132,616	0	23.0	0	1,202,052	132,616	0	11.0	0
1988	304,660	158,364	0	52.0	0	549,407	158,364	0	28.8	0
1989	671,466	173,060	0	25.8	0	1,420,126	173,060	0	12.2	0
1990	566,495	189,000	0	33.4	0	994,111	189,000	0	19.0	0
1991	748,750	203,690	0	27.2	0	1,765,644	203,690	0	11.5	0
1992	483,621	383,530	0	79.3	0	740,235	383,530	0	51.8	0
1993	607,247	390,095	4,996	64.2	0.5	1,261,384	390,095	4,996	30.9	0.3
1994	270,533	387,763	127,676	143.3	19.4	204,789	387,763	127,676	189.3	21.5
1995	353,925	360,461	178,818	101.8	25.0	582,168	360,461	178,818	61.9	19.0
1996			212,730					212,730		
Mean	540,597	380,462	212,730	70.4	23.0	1,006,566	380,462	212,730	37.8	15.3
		(92-'95)	(96)				(92-'95)	(96)		
Variance	152,372	-	-	-	-	395,019	-	-	-	-
C.O.V	0.282	-	-	-	-	0.392	-	-	-	-

12~3월까지의 4개월로, 수질관리 및 한국의 유출특성을 고려하여 구분하였다. 하계는 평균기온이 20°C 이상이고, 강우가 집중되는 시기로 비교적 수질이 악화되는 시기에 해당하고, 동계는 평균기온이 10°C 이하이고, 강우의 영향이 적은 시기에 해당한다.

마산만 유역의 용수공급에 의한 유출기여율은 강우량에 따라 년변동이 있으나, 1985년 이전까지는 10% 내외이며, 1986년 이후부터는 20~30% 정도이고, 용수공급량이 급격히 증가한 1992년 이후(이 기간의 강우량은 평균 이하)에는 평균 60~140% 정도에 이르고 있다. 계절별로 보면 강우량이 많은 하계의 경우보다 동계의 경우가 유출기여율이 높으며, 1992년 이후 동계의 강우유출은 용수공급에 의한 유출의 약 50%에 해당하는 양이다.

한편, 하수 차집관거에 의한 마산만으로의 담수유입

차단 정도는 총 유입량의 약 15~35%이며, 평균 23%에 해당한다. 그러나, 현재 1일 하수처리량 210,000톤은 설계용량(250,000톤/일)에 근접한 양이므로 하수처리장의 증설없이 향후 더 이상의 마산만의 담수 및 오염물질 유입 저감효과는 기대할 수 없을 것으로 파악된다. 또한, 계절적인 측면에서 살펴보면, 하계의 유입차단효과는 평균 강우량 기준으로 15% 정도에 불과하므로, 강우가 집중되는 이 기간에는 대부분의 오염물질이 마산만으로 계속 유입되고 있다. 따라서, 하절기에는 하수처리장의 건설 및 준설로 인한 수질의 개선효과는 기대하기 어렵다. 반면, 동절기에는 하절기에 비하여 하수처리장 건설에 의한 오염부하량 차단효과가 크다. 그러나, 준설효과는 준설후에도 마산만으로 다량의 오염물질이 지속적으로 유입되기 때문에, 그 정량적인 효과 파악을 위한 연구가 수행되어야 한

Table 5. Continued.

Year	Winter Season				
	WR	SW	IW	SW/WR (%)	IW/TR (%)
1976	178,219	0	0	0	0
1977	209,067	38,000	0	18.2	0
1978	234,511	46,000	0	19.6	0
1979	256,652	47,624	0	18.6	0
1980	162,270	49,026	0	30.2	0
1981	193,643	63,630	0	32.9	0
1982	234,586	64,880	0	27.7	0
1983	40,042	66,433	0	165.9	0
1984	232,710	67,244	0	28.9	0
1985	137,464	102,850	0	74.8	0
1986	210,869	110,715	0	52.5	0
1987	121,928	132,616	0	108.8	0
1988	390,439	158,364	0	40.6	0
1989	237,213	173,060	0	73.0	0
1990	199,723	189,000	0	94.6	0
1991	191,392	203,690	0	106.4	0
1992	296,432	383,530	0	129.4	1.3
1993	134,425	390,095	4,996	290.2	23.1
1994	164,147	387,763	127,676	236.2	30.6
1995	223,253	360,461	178,818	161.5	
1996			212,730		
Mean	202,449	380,462	212,730	187.9	36.5
		(92-'95)	(96)	-	-
Variance	71,609	-	-	-	-
C.O.V	0.354	-	-	-	-

Description: WR=Estimated watershed runoff (precipitation only) [Ton/Day], SW=Supplied water discharge [Ton/Day], IW=Intercepted wastewater discharge [Ton/Day], TR=Total watershed runoff (WR+SW) [Ton/Day]

다. 한편, 유입되는 오염물질이 해양생태계에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 농도와 총량의 관점에서 동시에 고려하는 연구가 수행되어야 한다.

### 3.3.2 강우 및 증발의 영향

강우와 증발이 물수지 분석에 미치는 영향을 파악하기 위하여 분할된 영역의 수표면을 통한 물의 유입·유출량을 각각 강우량·증발량 자료를 이용하여 계산하였다.

영역 I(참고: 전체 수표면적의 1/8에 해당)에 대한 강우 및 증발의 영향은, 평균적으로 강우에 의한 유입량이 증발량에 의한 유출량보다 1.27배 정도 크고, 하계에도 1.92배 정도 크다. 반면, 동계에는 증발에 의한 대기로의 유출량이 강우에 의한 유입량보다 1.52배 정도 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다(Table 6(a) 참조).

한편, 강우에 의한 대상해역의 총 유입량 및 증발에 의한 유출량 자료(Table 6(b) 참조)를 이용하여 계산한 총 유출량(영역 III 유출량: 년평균 1,190,254톤/일, 하계 1,967,494톤/일, 동계 650,309톤/일)에 대한 강우 및 증발량의 물수지 기여도는 다음과 같다. 년평균 비는 강우의 경우 24.9%, 증발의 경우 19.6%에 해당하는 양이며, 하계에는 각각 28.1%, 14.7%이며, 동계에는 각각 17.1%, 26.0%이다. 증발 및 강우의 순영향만을 고려하면 약 5~13%에 해당하는 양으로, 전체영역에 대한 물수지 기여율은 평균적으로 약 10% 정도로 볼 수 있다. 그러나, 하계에는 증발량도 많고 강우량도 많아 증발에 의한 염도증가 및 강우에 의한 염도 감소 등의 효과를 파악하기 위해서는 월별변화보다 짧은 시간규모에서의 연속적인 관측자료에 의존한 분석이 수행되어야 한다.

### 3.3.3 영역별 물수지 분석결과

물수지 분석을 월별로 수행하였다. 한편, 영역 II, III의 유역유출은 이 지역의 유출에 대한 정보가 전무하고, 전체 영역에 대한 유출기여율이 작을 것으로 판단되어 무시하였다. 물수지 모형의 적용결과 분석은 현 상태(1996년)의 물수지 상황을 중점적으로 수행하였다. 현상태의 물수지 상황은 자연적인 강우·유출성분은 20년간의 자료의 평균값, 용수공급량은 최근 4년(92-'95) 평균값, 그리고 하수량은 1996년의 자료를 이용하여 계산된 결과이다(Table 7 참조). 여기서, 영역

Table 6. Precipitation, evaporation and precipitation to evaporation ratio.

I 영역	(a) Zone I (Masan Bay)			전체 영역	(b) The whole zone		
	연평균	하계	동계		연평균	하계	동계
강우[유입량]*(톤/일)	37,132	69,136	13,904	강우[유입량]*(톤/일)	297,056	553,088	111,232
증발[유출량]*(톤/일)	29,213	36,091	21,135	증발[유출량]*(톤/일)	233,704	288,728	169,080
강우량/증발량	1.27	1.92	0.66	강우량/증발량	1.27	1.92	0.66

\*해역의 수표면을 통한 강우에 의한 유입량 및 증발에 의한 대기로의 유출량

**Table 7.** The major estimated results by the water budget model.

Zone No.	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
Inflow component	watershed runoff precipitation(*)	Zone I outflow precipitation(*)	Zone II, IV outflow effluent discharge	watershed runoff precipitation(*)
Outflow component	Zone II inflow evaporation(**) wastewater(\$)	Zone III inflow evaporation(**)	precipitation(*) open sea outflow evaporation(**)	Zone III inflow evaporation(**)
Daily inflow(DI)	708,329 1,174,298 370,181	716,248 1,206,533 362,950	1,151,040 1,803,856 686,117	205,844 316,917 125,246
Precipitation(P)	37,132 69,136 13,904	37,726 70,242 14,126	183,877 342,361 68,853	38,320 71,348 14,349
Evaporation(E)	29,213 36,091 21,135	29,680 36,668 21,473	144,663 178,723 104,661	30,148 37,246 21,811
Daily outflow (DO=DI+P-E)	716,248 1,206,533 362,950	724,294 1,240,107 355,603	1,190,254 1,967,494 650,309	214,016 351,019 117,784
Ratio(DI/DO) (Dimensionless)	0.989 0.973 1.020	0.989 0.973 1.021	0.967 0.917 1.055	0.962 0.903 1.063
Detention time (Water Vol./DO)	97.2 57.7 191.8	144.4 84.3 294.1	450.7 272.7 825.0	343.9 209.7 624.9

(Description) \*: Atmospheric input to the water surface by the precipitation \*\*: Atmospheric output from the water surface by the evaporation \$: Intercepted wastewater discharged to the Okgye coastal zone by the diffuser Shaded cell values are estimated values by the water budget model. The three values in a cell are represents annual, summer and winter season, respectively. Unit of the detention time is days. The other variable units are all ton/day.

III의 유출량을 100으로 가정하는 경우, 영역 I로 유입되는 유역유출량이 59.5(유출량비 60.2), 영역 IV의 유역유출량이 17.9(유출량비 18.0), 영역 III으로 유입되는 하수량이 17.9이며, 증발에 의한 손실량이 4.7을 차지하고 있음을 알 수 있다(Table 8 참조).

해양개발연구소(1980)가 영역 III 외해경계에서 측정 한 조석(月齡 19~20일)에 의한 유출입량(평균  $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 1조석주기에 해당하는 값으로 만일동안의 조석 유출입량으로 가정)과 연평균 영역 III 총유출량(약  $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ /만일)의 비는 약 0.02, 즉 조석유출입량에 비하면 담수유입량은 약 2.0% 정도에 해당하는 양이다. 그리고, 전 영역의 평균수면에 대한 체적( $7.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ )에 비하면, 조석유출입량은 약 15%에 해당한다. 한

편, 조석유출입량에 대한 영역 III 유출량은 약 0.1%에 해당한다.

한편, 물수지 분석결과를 이용하여, 각 영역의 수리학적 정체시간(유입량에 대한 대상수체의 체적비,  $V/Q$ )을 계절별로 계산하였다(Table 8 참조). 마산만(영역

**Table 8.** Inflow and outflow rates for all zones.

항목(연평균)	영역 I	영역 II	영역 III	영역 IV
총 유입량(톤/일)	708,329	716,248	1,151,040	205,844
총 유출량(톤/일)	716,248	724,294	1,190,254	214,016
상대적 유입량 (영역 III 유입량=100)	61.5	62.2	100	17.9
상대적 유출량 (영역 III 유출량=100)	60.2	60.9	100	18.0



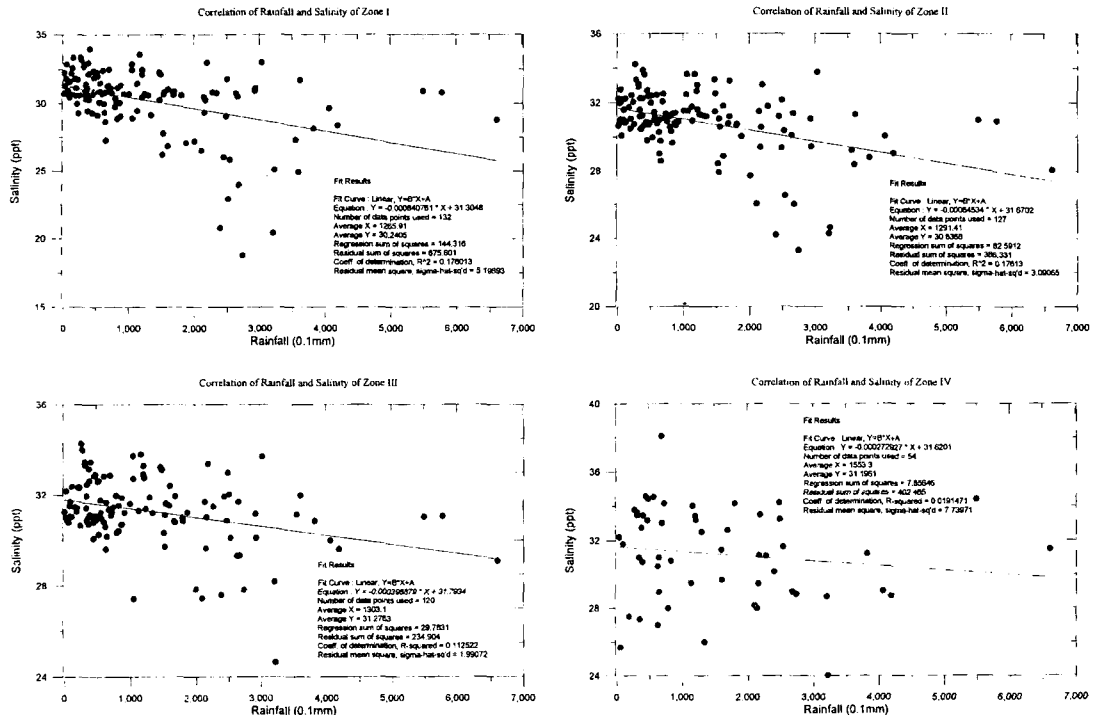


Fig. 4. The plots of the precipitation and salinity correlation.

I) 및 울구만(영역 II)의 경우에는 각각 년평균 97일, 144일이며, 하계의 경우 58일, 84일이며, 동계의 경우 192일, 294일이다. 전 영역에 대하여 계산된 수리학적 정체시간(각 영역 정체시간의 합계)은 년평균 약 1,000일 정도이며, 하계의 경우는 624일, 동계의 경우 1,940일이다. 해양연구소(1981)에서 계산한 마산만의 담수교체시간은 약 139일을 제시하고 있으나, 특정한 측정시점에 해당하는 값으로 본 물수지 분석 모형과의 직접적인 비교는 곤란한 점이 있다. 또한, 담수교체시간의 정의도 전체 수체적에 대한 하천유입량의 비가 아닌 관측에 의한 만내의 담수체적(전체 수체적의 약 8%)을 하천유입량으로 나눈 값에 해당하므로, 본 계산치와 비교할 경우에는 1,737일 정도의 정체시간에 해당하는 값으로 판단하여야 할 것이다. 반면, 담수체적에 의한 교체시간으로 산정하면, 년평균 약 125일이다.

### 3.3.4 담수유입에 의한 염도 변화

유역유출로 인한 담수유입은 해역의 염도와 상관성이 있을 것으로 판단되어, 장기간(간헐적이나, 1976년부터 1996년까지의 자료) 염도자료를 분할된 영역별로 평균하여 구한 값(수심평균된 값)과 강우량 자료의 상호분석을 통하여 상관계수를 구하였다(Fig. 4 참조).

그 결과, 상관성이 없는 것(상관계수=0.1 정도)으로 나타났으며, 이는 강우에 의한 유출현상이 월단위의 기간보다 작은 시간규모하에서 이루어지고 있으며, 외해로의 유출도 강우기간중에만 표층을 통하여 유출되고, 조석에 의한 해수유동에 의한 점진적인 혼합으로 서서히 만내의 염도를 저하시키고 있는 것으로 추정된다. 왜냐하면, 각 영역별 염도의 상관계수는 약 0.76 정도로 담수유입이 많은 영역 I의 염도가 가장 낮고, 외해영역으로 갈수록 염도가 증가하는 경향을 보이고 있기 때문이다(Fig. 5 참조). 한편, 영역 I-II-III의 염도는 상관성이 큰(상관계수=0.73, 0.79) 반면, 영역 III-IV의 상관성은 작은(상관계수=0.33) 것으로 나타나고 있다. 이는, 영역 IV와 영역 III의 혼합이 전체적으로 이루어지지 않고 국지적으로만 이루어지거나, 또는 외해수와 외해경계와의 근접성(외해경계와의 근접성)으로 인한 것으로 판단된다.

## 4. 모형의 활용방안

수질관리를 위한 유역 및 해역에 대하여 적절한 유입량·유출량이 산정되면, 이 산정된 유량자료와 오염

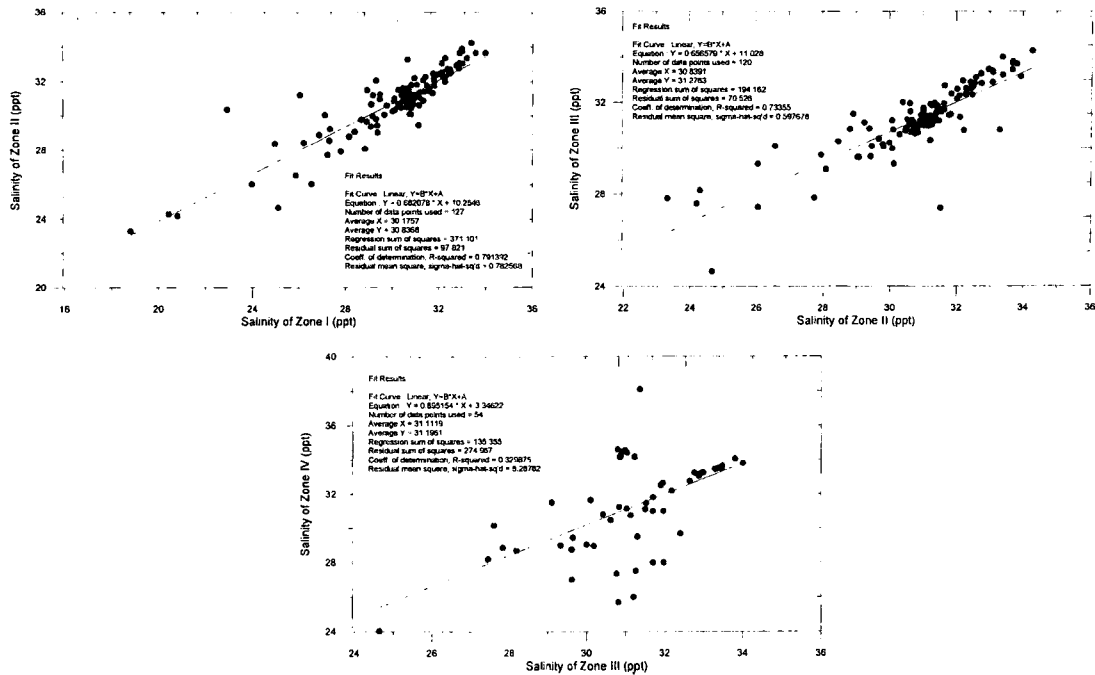


Fig. 5. The salinity correlation plots between adjacent zones.

부하량과의 상관관계식을 도출할 수도 있다(한국해양 연구소, 1997; Fig. 6 참조). 한국해양연구소(1997)는 일단위의 유출량 자료와 오염부하량으로부터 도출된 상관관계를 이용하여, 마산만 유역의 COD 오염부하량 추정식을 산정하였다(Fig. 6 참조). COD 부하의 경우에는 상관관계가 큰 것(상관계수=0.702)으로 파악되었으며, 해역의 수질모델링을 위한 입력자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 반면, 토지이용도 등의 영향을 많이 받는 총인 및 총질소의 오염부하량과의 상관관계는 거의 없는 것(상관계수=0.42~0.49)으로 파악되고 있으므로, 보다 확장된 모형의 구성 적용이 필요할 것으로 판단된다.

한편, 유량-오염부하량 자료로부터 도출된 오염부하량 추정식은, 비정기적이고 간헐적인 자료라 할지라도 상관성이 있으면, 유량이 주어진 경우 용이하게 오염부하량을 추정할 수 있다. 그러나, 상관성이 없는 경우에는 유역의 토지이용도, 인구 등을 고려하여 보다 복잡한 형태의 오염부하량 추정모형을 수립하여야 한다. 한편, 본 모형은 장기적인 영역별 수질변동 및 오염물질 수치분석을 통하여, 연안역 수질개선을 위해 보다 효율적이고 정량화된 연안역의 수질관리모형으로 활용할 수 있다. 또한, 물수지 모형의 결과는 학제

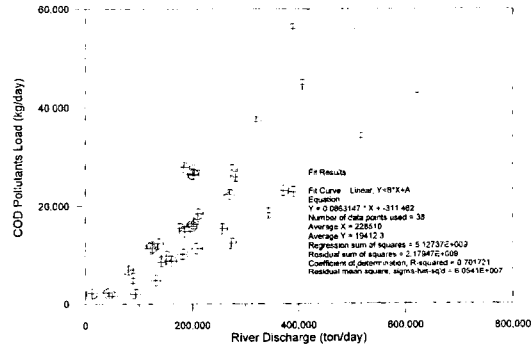


Fig. 6. The Correlation lines between river discharge and COD pollutants loads.

적으로 수행되는 다양한 연구에 있어서도 기본적인 입력자료이므로, 기존의 일시적 관측자료를 사용하던 수질관련모형에 대하여 보다 타당성있고 계절 변동성이 반영된 입력자료를 제공할 수 있다.

### 5. 결론 및 향후 연구방향

본 연구를 수행한 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 마산만 및 인접해역의 물수지에 중요한 영향을 미치는 요소는 강우량, 용수공급량, 하수처리량이다.

여기서, 강우에 의한 유역유출량의 시기적 변동성이 가장 큰 반면, 용수공급량은 1977년 이후로 꾸준히 증가하다가 1992년 이후 약 380,000톤/일로 급증하여 현재에 이르고 있다. 또한, 하수처리량은 1996년 현재 약 210,000톤/일로, 최대처리용량(250,000톤/일)에 근접하여 하수처리장 증설이 없는 한 큰 변동이 없을 것으로 판단된다. 따라서, 1985년 이전에는 강우에 의한 유출 기여율이 지배적이었으나, 1992년 이후는 강우와 용수에 의한 유출기여율이 대등한 수준이나, 계절별(동계·하계) 유출기여율의 상대적인 변화는 매우 크다.

(2) 수표면을 통한 강우 및 증발이 물수지에 미치는 영향은 유·출입량의 5~13% 정도로 추정되었다. 본 연구에서 수행한 물수지 분석에서는 월단위의 시간규모에서 그 영향을 고려하였으므로, 보다 작은 시간규모(몇일 또는 주)에 대한 강우 및 증발의 영향이 상쇄되어 보다 작은 영향(純影響)을 미치는 것으로 추정되고 있다. 그러나, 강우기간 및 무강우기간 등 월단위 이하의 시간규모에 있어서는 강우 및 증발의 영향이 본 계산결과보다는 클 것으로 사료된다.

(3) 최근, 마산만 유역유출은 용수공급량 및 강우에 의한 영향이 대등하며, 하수처리장의 건설로 23% 정도의 하수량이 마산만으로 유입되지 않고 옥계해역으로 방류되고 있다. 그러나, 하계에는 하수차집량이 전체 유출량에 미치는 영향은 보다 작은 15% 정도로 파악되었다. 반면, 유출량이 적은 동계에는 약 37%로 하수처리에 의한 마산만 오염물질 차단효과 및 유입량 차단영향이 타 시기에 비하여 큰 것으로 나타났다. 즉, 하천 등을 통한 마산만의 오염부하는 하계에 집중되고 있음을 알 수 있다.

(4) 한편, 월단위 시간척도하에서 강우와 해역의 수심평균 염도의 상관성을 분석한 결과, 상관성이 없는 것(상관계수=0.02~0.17)으로 파악되었으며, 서서히 진행되는 담수혼합으로 인하여 해역간 염도의 상관성은 0.7 정도의 큰 값을 나타내었다. 반면, 영역 III-IV의 영역별 상관성은 국지적인 혼합 및 외해와의 근접성으로 인하여 낮게 나타났다. 한편, 수리학적 정체시간은 마산만, 울구만의 경우 각각 97일, 144일로 계산되었다. 이는 해역의 폐쇄성, 정체성에 기인하는 수치로 유입된 담수는 일시적으로 일정구간에 대하여 표층으로 유출되는 양상이 있으나, 전체적으로는 灣內 해수와 서서히 혼합되고, 입자성 오염물질은 서서히 침전되어 저질의 오염을 증가하는 요인으로 작용하고 있음을 알

수 있다.

향후 연구방향은 유역유출 및 해역의 담수 유입량 자료의 축적 및 관련모형의 수립이 해역의 환경관리를 위해서는 필수적이다. 따라서, 관리대상 해역의 유입량 추정을 위한 월단위 이하 시간규모의 유량관측 및 수위표 설치, 오염부하량 추정 등에 대한 종합적인 연구가 필요하다. 특히, 강우·유출현상에 직결된 비점오염원 모형 및 폭풍시 저층과 수층의 혼합양상, 조석에 의한 확산효과 등에 대한 영향을 정량적으로 추정할 수 있는 모형의 수립이 필요하며, 이를 위해서는 강우의 영향 및 그로 인한 오염부하를 보다 작은 시간규모(월 또는 시간)에서 파악하기 위한 연구를 수행하여야 할 것으로 사료된다. 또한, 해역의 장기적인 수질관리를 위한 모형으로 본 연구에서 수립한 물수지 분석모형을 활용할 수 있으며, 이와 관련하여 정량적인 오염물질 수지분석 모형을 수립하고, 계절별·년별 수질변동을 예측할 수 있는 모형의 개발·적용·검증이 시급하다.

## 참고문헌

- 국립수산진흥원, 1993. 부영양화 현상 및 적조현상 규명에 관한 연구, 제1차년도 연차보고서, 환경처, 과학기술처.
- 국립수산진흥원, 1994. 부영양화 현상 및 적조현상 규명에 관한 연구, 제2차년도 연차보고서, 환경부, 과학기술처.
- 국립수산진흥원, 1995. 부영양화 현상 및 적조현상 규명에 관한 연구, 제3차년도 최종보고서, 환경부, 과학기술처.
- 기상청, 1991~1996. 기상연보.
- 이길성, 1996. 낙동강 수계 실시간 최적 저수관리 시스템 개발(분석모델 부분) 보고서, 한국수자원공사.
- 이찬원, 1991. 진해만 일원 오염실태 조사보고서, 환경처.
- 이찬원, 1994. 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링(1990~1994), 경남대학교 환경문제연구소. 마산시.
- 중앙기상대, 1976~1990. 기상연보.
- 한국과학기술연구원 해양연구소, 1988. 연안환경 보전기술 개발연구, -1차년도-, BSPG 00057-184-4, 과학기술처.
- 한국과학기술연구원 해양연구소, 1989. 연안환경 보전기술 개발연구, -2차년도-, BSPG 00083-242-4, 과학기술처.
- 한국과학기술원 해양연구소, 1981. 진해만의 적조 및 오염모니터링 시스템 개발을 위한 연구, 제2차년도 보

- 고서, BSPE 00031 - 56 - 7.
- 한국과학기술원 해양연구소, 1982. 진해만의 적조 및 오염모니터링 시스템 개발을 위한 연구, 제3차년도 보고서, BSPE 00044 - 66 - 7.
- 한국과학기술원 해양연구소, 1983. 적조 및 오염모니터링 연구, - 진해만 -, 제4차년도 보고서, BSPE 00048 - 80 - 7.
- 한국수자원공사, 1993. 낙동강 유역권 용수이용현황조사 자료집, IPD - 93 - 6.
- 한국해양연구소, 1990. 연안환경 보전기술 개발연구, 3차년도 -, BSPG 00112 - 315 - 4, 과학기술처.
- 한국해양연구소, 1991. 연안오염의 진행과정 및 변화예측 연구, 1차년도 -, BSPG 00138 - 381 - 4, 과학기술처.
- 한국해양연구소, 1992. 연안오염의 진행과정 및 변화예측 연구, 2차년도 -, BSPG 00150 - 466 - 4, 과학기술처.
- 한국해양연구소, 1993. 폐쇄성 연안해역의 수질관리기술 연구(I), BSPN 00205 - 613 - 2, 과학기술처.
- 한국해양연구소, 1994. 폐쇄성 연안해역의 수질관리기술 연구(II), BSPN 00241 - 720 - 2, 과학기술처.
- 한국해양연구소, 1996. 연안역이용 및 통합관리를 위한 연구(II, III), BSPN 00322 - 968 - 7, 제4부 마산·진해만 수질환경관리모델 개발, 과학기술처.
- 한국해양연구소, 1997. 연안환경 개선기술, 제 5 장 연안수질 개선효과 및 환경회복도 추정기술, 제2단계 1차년도 연차보고서, BSPN 00307 - 949 - 2, 환경부, 과학기술처.
- 해양개발연구소, 1980. 진해만의 적조 및 오염모니터링 시스템 개발을 위한 기초연구, BSPE 00022 - 43 - 7, 한국과학기술연구소.
- Di Toro, D.M. and Connolly, J.P., 1980. *Mathematical models of water quality in large lakes, Part 2: Lake Erie*, EPA-600/3-80-065.
- Jolankai, G., 1983. Modeling of non-point source pollution, In *Application of ecological modelling in environmental management*, Part A (edited by S.E. Jorgensen), Chap. 8, Elsevier Scientific Publishing Co.