

여자만의 수질관리를 위한 허용유입부하량 산정

김형철*† · 이원찬** · 김종구*** · 홍석진** · 김경미**** · 조윤식** · 박성은** · 김진호**

*, ** 국립수산과학원 어장환경과, *** 군산대학교 환경공학과, **** E&WIS

Assessment of Permissible Inflow Load for Water Quality Management in Yeoja Bay, Korea

Hyung-Chul Kim*† · Won-Chan Lee** · Jong-Gu Kim*** · Sok-Jin Hong** · Kyoung-Mi Kim**** · Yoon-Sik Cho** · Sung-Eun Park** · Jin-Ho Kim**

*, ** Marine Environment Research Division, NFRDI, Busan, 619-902, Korea

*** Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan, 573-701, Korea

**** Environmental & Whole Information System, Seoul, 152-848, Korea

요 약 : 여자만은 유기물 오염이 점차 진행되어 가고 있으며, 해역의 수질관리를 위하여 유역으로부터 유입하는 육상기인 오염물질을 GIS 기법을 이용하여 발생부하량과 배출부하량을 산정하였다. 목표수질을 달성하기 위해 해역의 환경용량을 초과하여 유입하는 육상오염물질의 양을 박스모델로 계산하여 삭감부하량과 허용유입부하량을 평가하였다. 여자만의 수질을 해역생활환경기준 I 등급으로 회복하기 위한 허용부하량을 산정한 결과, 생물화학적산소요구량은 배출부하의 39.3%, 총인은 30.8%를 삭감해야 하고, 총질소의 경우 6.9%의 낮은 배출부하 삭감률을 나타내었다. 유역의 오염원 현황과 발생부하량 현황을 볼 때 토지계가 차지하는 오염부하 비중이 높고, 배출부하량에서도 가장 큰 비중을 차지하였다. 여자만의 해양환경 보호와 개선을 위해서는 육상기인 오염물질 중 점오염원 뿐만 아니라 축산계 및 토지계 부하 등 비점원 오염원에 대한 관리가 필요하다는 것을 시사한다.

핵심용어 : 허용유입부하량, 화학적산소요구량, 총질소, 총인, 여자만, 환경용량

Abstract : Based on the consideration of land based pollutant discharges from the basin and seawater quality related carrying capacity and the seawater quality improvement in receiving water bodies of Yeoja Bay where eutrophication and organic pollution are in progress, were evaluated. The permissible inflow loads of BOD, TN and TP by using the geographical features and box modelling method were estimated. As results, it is shown that the reduction rate of discharged BOD and TP loads were 39.3% and 30.8 %, respectively, however, 6.9% was estimated for TN. According to the pollutant loading in each tributary and generated load of the basin, it is given much weight on the land use group, and also was shown in discharged load estimation. This suggests that it is important to control nonpoint source pollutant such as livestock and land use groups as well as point source to contribute the proposition of the water quality improvement plan according to the characteristics of the bay.

Key Words : Permissible inflow load, COD, TN, TP, Yeoja Bay, Carrying capacity

1. 서 론

내만을 포함한 반폐쇄적 연안역에서 수질오염의 문제는 발전된 국가일수록 산업폐수와 생활하수 오염에 대한 대책 마련에 부심하고 있으며, 하수 및 폐수처리의 주요 목적 중 하나가 오염물질의 배출을 줄이고 나아가 육상오염물질의 최종 도착지인 해양의 환경을 보호하는 것이다. 인구가 밀집되고 도시가 발달된 지역일수록 연안역에서 오염물질 중 생활계, 산업계 및 양식계 배출수가 차지하는 비율이 높고, 전체 오염물

질 부하의 80% 정도를 차지하고 있다(UNEP, 2003). 인구의 증가로부터 비롯된 급격한 도시화와 산업화, 이로 인한 양식 수요의 증가 등으로부터 점차 환경 질이 악화되어가고 있고, 최근 기후와 관련된 영향이 수자원 관리와 연안환경 관리에 큰 위협의 요소로 대두되고 있다.

각 개별 국가에서 다양한 인간 활동으로부터 야기되어 배출되는 육상오염물질은 결국 바다로 흘러들어가 주변 국가로 이동하여 월경성 환경 문제(Transboundary environmental issue)를 일으키기 때문에 오래 전부터 주변국들은 물론 전 세계적으로 국제협력의 중요성을 강조하고 있다. 즉, 자국의 수질오염뿐만 아니라 국제적인 수질오염의 문제를 해결하기 위해 국

* 대표저자 : 정희원, hckim@nfrdi.go.kr, 051-720-2523

제협약과 국제기구 설립 등의 형태로 점차 범지구적 가치실현의 노력과 행동이 이루어지고 있다. 1974년에 지역해프로그램이 시작된 이후 육상활동으로부터 해양환경보호를 위한 범지구적실천계획(GPA)이 1995년에 발족되었고, 유엔 산하 세계국가간물평가(GIWA)가 1999년부터 시작되어 이러한 프로그램과 실천행동은 오염물질 배출 감소를 주요 목적중 하나로 포함하여 국제적인 주요관심 사항으로 이끌어냈다(UNEP/GPA Coordination Office, 2002; GIWA, 2004; UNEP/RSP, 2006). 이와 같이 육상기인 오염원에 대한 관리가 국제적인 주요 관심 사항으로 대두되면서 우리나라에서도 육상기인오염원에 대한 관리의 필요성을 공감하고 제도적인 기반마련에 보다 관심을 갖는 등 국가정책에 점진적으로 반영하고 있다.

우리나라에서는 육상오염물질의 선제적 관리체제의 하나로 마산만을 대상으로 오염물질 총량관리제도를 도입하여 시행 중에 있고, 일본에서는 세토내해와 동경만의 환경 보전과 부영양화에 의한 피해방지를 위해 오래전부터 관련 법을 제정하여 연안환경의 관리에 힘쓰는 등 지역의 오염부하량 정도에 따라 배출허용한도를 정하고 있다(Tsuzuki, 2006; 이 등, 2009). 미국에서도 최대일일오염부하량(TMDL, Total Maximum Daily Load)의 개념을 도입하여 수질오염물질 저감정책의 방법으로 적용하고 있고, 유럽에서는 북해를 대상으로 육상기인 오염물질의 효율적인 관리방법에 관하여 인접국들의 연합을 통해 긴밀한 협력체제를 구축하여 모델링기법을 이용한 통합유역관리를 실시하고 있다(USEPA, 2004; Arnold et al., 2005; Quevauviller et al., 2005).

해역의 수질관리를 위해서 육상으로부터 유입하는 오염물질의 양을 정량화하고 해역의 이용 목적에 맞는 수준으로 수질을 회복하기 위하여 육상오염물질의 허용부하량을 산정하기 위한 다양한 방법들이 시도되고 있는데, 간단한 박스모델을 이용하여 시스템 내·외로 물질의 유입·유출 간 평형을 이루는 물질수지 산정 방법(Shiro and Masahiro, 1998; 홍 등, 2007), 생태계모델을 이용하는 방법(Takeshi, 1988; 김 등 2007b; 이 등, 2008), 최근에는 오염물질과 경제와의 상관성을 지표로 개발하여 환경관리를 위한 도구로 사용하고 있다(Tsuzuki, 2006).

여자만은 조간대가 발달하여 새고막 등 각종 어패류의 생산과 산란, 생육장으로 높은 가치를 가진 해역으로 평가받고 있지만(Yoo, 1976; Min, 2004; 김 등, 2007a), 만 입구가 좁고 항아리 형태의 반폐쇄성 형태를 가진 지형적인 특성으로 유기물 유입에 의한 오염과 하계 집중 강우에 의한 저염화 현상 등 만 내 오염물질이 쉽게 빠져나가지 못하고 잔류하여 축적되기 쉬운 구조를 가지고 있다. 특히, 연안을 따라 유역 주변의 산업발달과 연안이용의 증가로 수질환경 관리가 우려되고 있는 해역이고, 국립수산과학원의 과거 10여 년 간 관측자료(국립수산과학원, 2011b)에 의하면, 만내 유기물의 오염이 점차 진행되고 있는 것으로 나타났다.

또한, 여자만으로 유입하는 주요 하천 중 이사천을 통해 유입하는 담수의 영향이 가장 크게 나타나고 있어(Lee et al., 2000), 유역을 통해 유입하는 전체 하천들과 하수처리장 유출

수의 수질측정 결과를 반영하여 유역의 발생부하량과 배출부하량을 GIS 기법을 이용하여 계산하였고, 여자만으로 유입하는 육상오염물질이 해역의 환경용량을 초과할 경우 목표수질달성을 위해 삭감해야할 유역의 배출부하량과 허용유입부하량을 추정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상해역

여자만은 동쪽에 여수반도와 서쪽에 고흥반도에 둘러싸여만 입구가 좁은 항아리 형태를 가지고 있으며, 만의 남북 방향의 길이가 약 30 km, 동서 방향으로 7~20 km로 만 남쪽의 백일도, 조발도 등 섬들에 의해 만들어진 수로를 통해 외해로 통하고 있다. 대상해역은 이러한 구조적인 특성으로 인해 해수교환이 원활하지 못하고 육상으로부터 유입하는 오염물질이 쉽게 빠져나가지 못하는 특징을 가지고 있다. 물질수지 산정을 위해 박스의 남측 방향의 외측 경계는 영남면 우천리에서 시작하여 낭도를 거쳐 조발도 우측 화양면 공진갑까지 경계로 하는 지역을 포함하고 있고, 여자만 주변에는 이사천 외 16개 하천과 순천하수종말처리장의 방류수에 의해 육상오염물질이 여자만으로 유입되고 있다. 여자만의 평균 수심은 8 m로 만 가장자리와 북측 및 서측지역을 따라 조간대가 발달하여 새고막 등 패류생산수역으로 생산성이 높은 해역이다. 여자만 유역에 거주하는 인구의 약 88%가 순천시에 거주하고 있으며 순천하수종말처리장에서 생활계 오염원을 처리하여 여자만으로 정화된 처리수를 방류하고 있고 주변 하천 중 여자만 북측 지역에 위치한 이사천과 칠동천 및 벌고천을 통해 육상오염물질의 90% 이상이 유입하고 있다(Fig. 1).

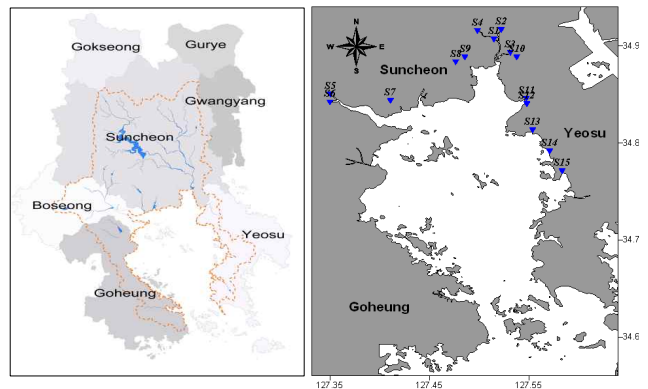


Fig. 1. Map showing the basin and inflow streams in Yeosja Bay. The name of streams as follow: S1(Suncheon waste water treatment plant), S2(Dong stream), S3(Haeryong stream), S4(Isa stream), S5(Beolgyo stream), S6(Childong stream), S7(Guryong stream), S8(Ssanglim stream), S9(Usan stream), S10(Soha stream), S11(Yeonhwa stream), S12(Dubong stream), S13(Banwol stream), S14(Gunghang stream), S15(Dalcheon stream), respectively.

여자만 해역 면적은 338.74 km²이며, 유역은 785.95 km²으로 해역 면적의 약 2.3배를 차지하고 있고, 총체적은 2.71 km²이다. 유역 내에는 6개 시·군이 위치하고 있다. 여자만은 해안선을 따라 순천시, 여수시, 보성군, 고흥군의 4개 시·군이 위치하고 있고, 유역 내에는 4개 시·군 외에 광양시와 곡성군 일부 지역이 포함되어 있다. 이 중 순천시의 면적이 가장 크며, 토지 지목으로는 임야가 가장 넓은 면적을 차지하고 있다(Fig. 1).

2.2 현장조사 및 분석

여자만의 점오염부하량 조사는 2007년 3월부터 10월까지 여자만으로 유입하는 하천과 하수처리장 방류수의 유량과 수질을 대상으로 매월 실시하였다. 조사지점은 하천 최말단부에 염분의 유입 영향이 없는 지점에서 표층수를 채수하였고, 채수된 시료는 미리 세척된 폴리에틸렌병에 보관하여 냉암소 상태로 즉시 실험실로 운반하여 분석을 실시하였다. 수질조사는 현장에서 직접 측정 가능한 수온, 염분, 용존산소, pH를 수질다항목측정기(556MPS, YSI, USA)를 이용하여 관측하였다. 하천유량은 하천의 단면을 일정간격으로 나누어 단면적을 구한 후, 직독식 전자유속계(BMF001, Veraport, UK)를 이용하여 각 구간의 유속을 측정하여 유량을 산정하였다. 유량조사는 가능한 동일 지점에서 실시하였으며, 바람 등 외부의 영향을 받지 않는 지점을 선정하여 측정하였다. 영양염류 등 분석 방법은 수질환경오염공정시험법(환경부, 2004) 및 해양환경공정시험기준(국토해양부, 2010)에 따라 측정하였다.

2.3 오염부하량 산정

대상지역의 오염부하량을 산정하기 위해서는 우선 오염부하량 산정 방법에 대한 결정이 필요하며, 본 연구에서 오염부하량 산정은 마산만 특별관리해역 연안오염총량관리 기술지침(해양수산부, 2006)과 환경부 수계오염총량관리 기술지침(환경부, 2007a)에 따라 수행하였다. 오염부하량 산정을 위한 오염원 자료는 2007년을 기준으로 생활계, 축산계, 산업계, 토지계, 양식계, 매립계 등 각 오염계별 오염원 현황자료와 환경기초시설운영자료, 상수도 및 하수도 통계자료, 물사용량 자료(환경부, 2007b), 여자만과 가장 가까운 여수 및 순천기상대의 월별 강우량자료(기상청, 2011), 수치지형도 등을 수집하였으며, 유역 편입률 작성을 위해 66개 연안 경계 자료와 2007년 기준 시·도별 행정구역도를 이용하였다.

수집된 오염원자료를 바탕으로 부하량산정 입력자료를 작성하였다. 생활계의 경우 시가 및 비시가 등 시가화 유형을 구분하여 하수처리관거 유형 및 정화조 유형을 구분하여 행정동·리별로 인구를 입력하고 가정용 및 영업용 물사용량을 행정동·리별로 입력하였다. 축산계의 경우 지정 유형과 처리형태에 따른 축종별 축산 두수를 각 축사별로 입력하고 산업계의 경우 지정 내역별로 업종별 배출업소 현황과 물사용량, 폐수발생 및 배출유량, 발생 및 배출수질 등을 입력하였다. 양식계의 경우 각 시설별로 시설면적 및 사료투입량, 방류유량 및 수질 등을 입력하고, 토지계의 경우 행정구역별로 토지

목별 면적을 입력하였다. 매립장을 비롯한 운영 중인 환경기초시설(하수처리장, 마을하수도 위생처리장, 산업폐수처리시설, 축산폐수처리시설, 매립장 공공처리시설)의 기본현황, 차집유형별 관거유입 및 관거이송, 직접이송, 방류되는 유량 및 수질 자료를 입력하였다.

2.4 허용부하량 추정

물질수지모델 계산을 위해 필요한 해양관측자료 중 염분과 오염물질인 화학적산소요구량, 총질소 및 총인의 농도는 국립수산과학원에서 2007년도에 수행한 국가해양환경측정망 자료(국립수산과학원, 2008)와 해양정선자료(국립수산과학원, 2011a)를 이용하였다. 하천유량 자료는 실측자료와 기상자료를 이용한 두 가지 방법으로 비교·검증하였다. 즉, 2007년도에 관측한 여자만 하천오염부하량 조사 자료를 이용한 방법과 여자만 유역면적에 연평균 강수량을 곱하여 총강수량을 계산하고, 유출율을 곱하여 산출한 방법을 이용하였다. 연간 물수지를 계산하기 위해서는 연유출율이 산출되어야 하며, 유출율을 알 수 없는 미지의 하천에 대하여는 유역의 규모, 토지 이용 등을 고려하여 경험적으로 값을 부여하는 경우가 많으며 본 연구에서는 주요 하천의 유출율의 평균값인 0.4를 적용하였다(동화기술, 1991; 동화기술, 2004). 육역으로부터 박스 내로 유입되는 오염부하 농도는 유입 하천유량 산정방법과 같이 두 가지로 수행하여 검증하였다. 즉, 2007년 여자만 오염부하량 조사에서 측정된 유입하천의 평균농도를 사용하였고, 또한 여자만 유역으로부터 오염부하 원단위에 의해 계산된 발생부하량을 근거로 유입부하량을 산정하여 산정된 연간 유입부하량을 연평균 강수량으로부터 계산된 하천유입유량으로 나누어 유입농도를 계산하여 적용하였다. 오염원자료로부터 산정한 소유역별 배출부하량과 실측자료로부터 산정한 소유역별 유달부하량을 통해 유달률을 산정하였고, 유달률 산정을 위해 필요한 생물화학적산소요구량(BOD) 유달부하량의 경우 마산만 특별관리해역 연안오염총량관리 기술지침(해양수산부, 2006)에서 사용한 변환계수(COD/BOD) 1.64를 이용하여 화학적산소요구량(COD) 유달부하량을 계산하였다.

어떤 시스템의 환경조건에서 해당 목표수질을 유지하기 위해 시스템에 유입되는 오염부하를 어느 정도까지 유입 또는 삭감시켜야 하는지에 대해서는 환경용량의 개념으로부터 출발된다. 따라서, 환경용량의 개념을 도입하여 허용부하량 산정에 관해서 간단한 박스모델을 이용하여 다음과 같이 설명할 수 있다(Shiro and Masahiro, 1998). 즉, Fig. 2와 같이 적용 해역을 하나의 박스로 하여 만 내·외로 유입 또는 유출하는 화학적산소요구량, 총질소 및 총인과 같은 오염물질의 수지를 생각하면 식 (1), (2)와 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$V \frac{dC_p}{dt} = R_f C_{pin} - Q_{10} C_p + Q_{01} C_{po} \quad (1)$$

$$Q_{01} = Q_{10} - R_f \quad (2)$$

$$\frac{dC_p}{dt} = \frac{1}{V} R_f C_{pin} - \frac{Q_{10}}{V} C_p + \frac{Q_{10} - R_f}{V} C_{po} \quad (3)$$

여기서, C_p : 만내 오염물질 농도(mg/L),
 V : 만의 체적(km³),
 R_f : 담수유입량(m³/s),
 C_{pin} : 육역에서 유입되는 오염물질 농도(mg/L),
 Q_{10} : 만내에서 만외로의 이송계수(m³/s),
 Q_{01} : 만외에서 만내로의 이송계수(m³/s),
 C_{po} : 외해의 오염물질 농도(mg/L)를 나타낸다.

갱신을 f 가 식(4)라면, 식(3)은 식(5)가 된다.

$$f = \frac{1}{\tau_f} = \frac{R_f}{V_f} = \frac{R_f}{(S_o - S_i)/S_o} \cdot \frac{1}{V} = \frac{Q_{10}}{V} \quad (4)$$

τ_f : 체류시간(day),
 V_f : 만내담수량(km³),
 S_o, S_i : 각각 만외 염분, 만내 염분

$$\frac{dC_p}{dt} = \frac{1}{V} R_f C_{pin} - f C_p + (f - \frac{R_f}{V}) C_{po} \quad (5)$$

식(5)가 정상상태일 경우 식(5)는 식(6)이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} R_f C_{pin} \text{ (체적부하)} &= f C_p - (f - \frac{R_f}{V}) C_{po} \\ &= f(C_p - C_{po}) + \frac{R_f}{V} C_{po} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)을 C_p 에 대하여 정리하면 식(7)로 표현할 수 있다.

$$C_p = \frac{R_f \cdot C_{pin}}{f \cdot V} + C_{po} - \frac{R_f \cdot C_{po}}{f \cdot V} \quad (7)$$

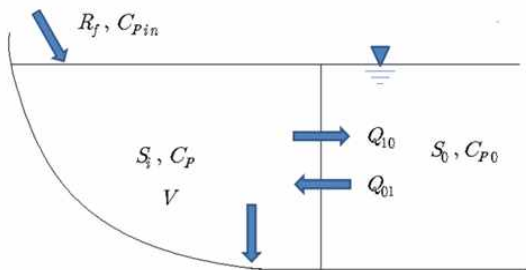


Fig. 2. Conceptual diagram of simple box model.

C_{pin} 유입농도에 따른 만내농도인 C_p 의 변화를 분석하고, 만내 오염물질의 해석생활환경 기준 I 등급을 유지하기 위한 하천 유입부하농도를 계산하여, 현재 유입부하농도에 대한 삭감 농도로부터 삭감량 또는 허용유입부하량을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 점오염원 유입부하량 산정

1) 점오염원 오염부하량 변동 특성

여자만으로 유입하는 주요 점오염원으로 동천, 해룡천, 이사천, 벌교천, 칠동천, 구룡천, 쌍림천, 우산천, 소하천, 연화천, 두봉천, 반월천, 궁항천, 달천천의 하천을 통한 유입과 순천하수종말처리장의 방류수가 여자만으로 유입하고 있다(Fig. 1). 2007년에 여자만으로 유입하는 주요 하천별 오염부하량 변동 특성은 다음과 같다(Fig. 3). 여자만으로 유입하는 전체 점오염원의 유량은 88~443,571 m³/d의 범위로 총 917,960 m³/d로 나타났다. 총 15개 하천 및 하수종말처리장 중 이사천에서 가장 높은 유량이 관측되었고, 벌교천, 순천하수종말처리장, 칠동천, 해룡천, 동천 순으로 높게 나타났다. 우산천 외 8개 하천에서는 월평균 20,000 m³/d 이하로 낮게 관측되었다.

화학적산소요구량(COD)의 점오염원별 유입부하량은 1~3,149 kg/d의 범위로 총 6,973 kg/d로 나타났다. 하천별 부하에서 이사천, 벌교천, 순천하수종말처리장, 칠동천 순서로 오염부하가 크게 나타났다.

총질소(TN)의 점오염원별 유입부하량은 0~1,857 kg/d의 범위로 총 4,208 kg/d로 나타났다. 하천별 부하에서 순천하수종말처리장, 이사천, 벌교천, 칠동천, 해룡천 순으로 높게 나타났다. 다른 항목과 비교하여 오염원별 오염부하량의 크기를 비교할 때, 순천하수종말처리장에서 발생하는 총질소의 부하가 전체의 44%를 차지할 만큼 크게 나타난 것이 특징적이며, 영양염류의 고도처리가 필요한 부분으로 부각되는 점이다.

총인(TP)의 점오염원별 유입부하량은 0~298 kg/d의 범위로 총 135 kg/d로 나타났다. 하천별 부하에서 순천하수종말처리장, 이사천, 벌교천, 칠동천, 해룡천 순으로 높게 나타났다. 순천하수종말처리장에서 발생하는 총인의 부하가 전체의 45%를 차지할 만큼 크게 나타난 것이 특징적이며, 총질소의 경우와 마찬가지로 여자만으로 유입하는 영양염류의 고도처리가 필요한 부분이다.

2) 월별 오염부하량 변동 특성

여자만으로 유입하는 주요 점오염원의 월별 부하량 변동 특성은 다음과 같다(Fig. 4). 여자만으로 유입하는 전체 점오염원 중 부하량의 80% 이상을 차지하는 순천하수종말처리장과 이사천 및 벌교천의 월별 발생 유량은 225,000~1,320,000 m³/d의 범위로 월 평균 655,538 m³/d로 나타났다. 월별 하천 유량 변동은 8월과 9월에 1,320,000 m³/d와 1,070,000 m³/d로 강우시기에 높은 반면, 6월에 225,000 m³/d로 가장 낮게 나타났다. 특히 강우시기인 8월에는 연중 낮은 유량을 나타내었던 벌교천

여자만의 수질관리를 위한 허용유입부하량 산정

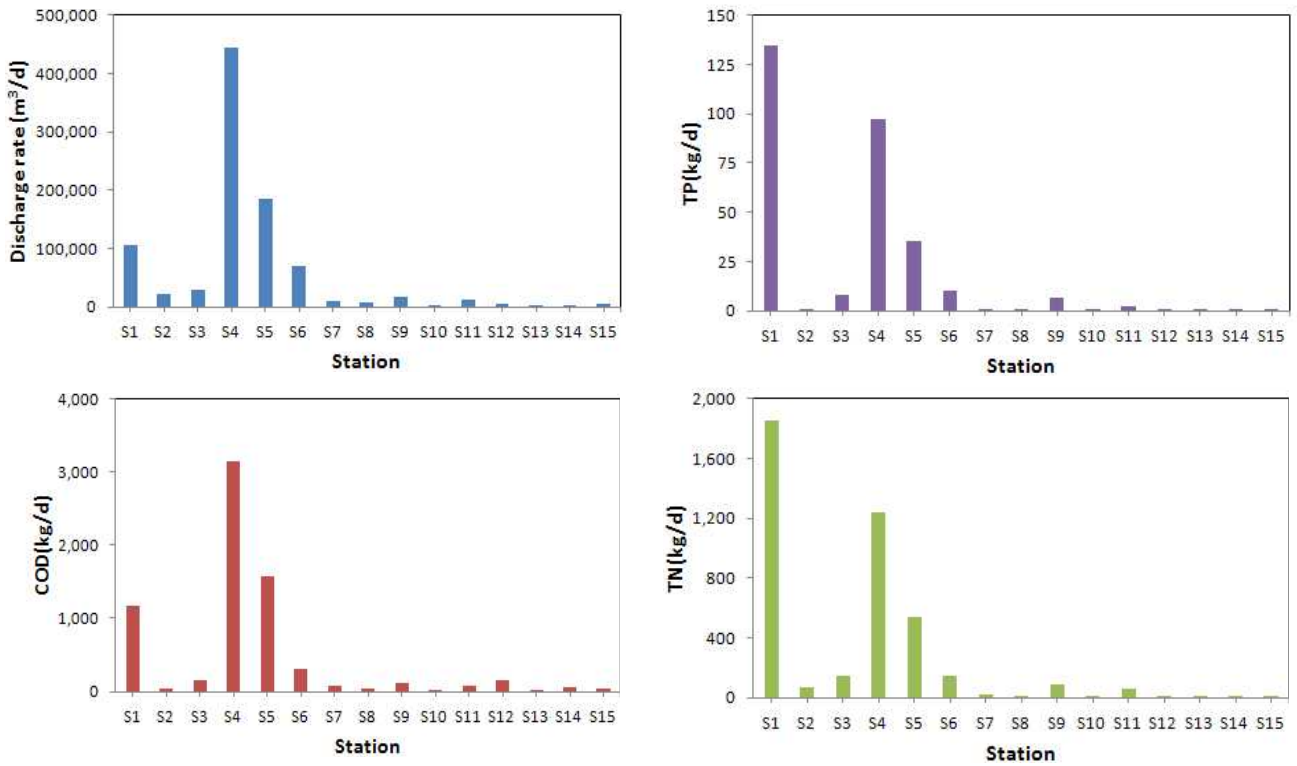


Fig. 3. The variation of each inflow pollutant load into Yeolja Bay, 2007.

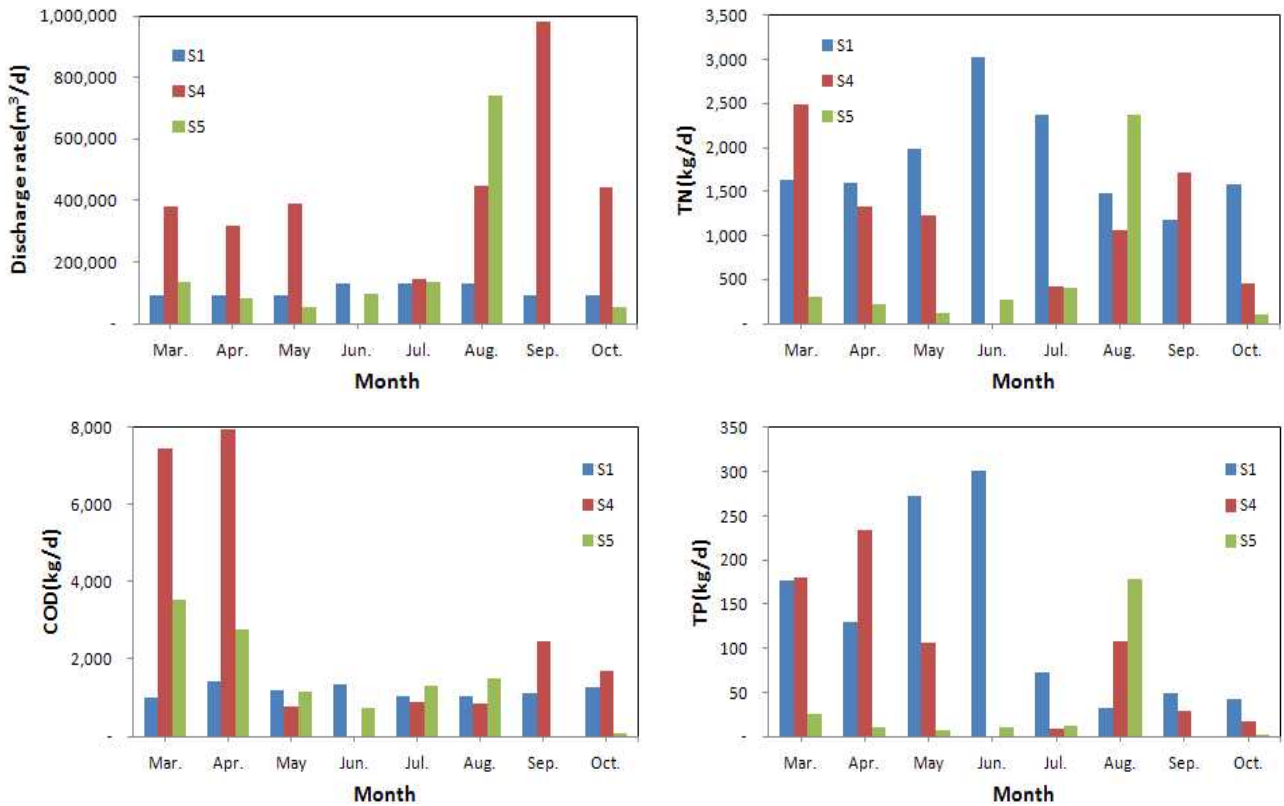


Fig. 4. Monthly variation of inflow pollutant load into Yeolja Bay, 2007.

에서 가장 높았으며, 하계에 여자만으로 유입되는 총 담수의 50%가 벌교천을 통해 유입되었다.

화학적산소요구량의 월별 변동 특성을 살펴보면, 여자만으로 유입하는 하천 중 부하량의 85% 정도를 순천하수종말처리장이 차지하고 있다. 이사천 및 벌교천의 월별 발생 부하량은 2,106~12,119 m³/d의 범위에 월 평균 5,315 m³/d로 나타났다. 3~4월에 11,973~12,119 m³/d로 가장 높게 나타났고, 이 중 이사천에서 60% 이상으로 높은 부하량을 차지하였다. 5월 이후부터는 연중 비슷한 월별 부하량 변동을 나타내고 있다.

총질소의 월별 변동 특성은 여자만으로 유입하는 부하량 중 순천하수종말처리장과 이사천 및 벌교천에서 전체의 87% 정도를 차지하고 있고, 2,139~4,910 m³/d의 범위에 평균 3,415 m³/d의 분포 특성을 나타내었다. 순천하수종말처리장에서 높은 기여율을 보였고, 주로 하계에 높은 특성을 보였다. 4~7월까지는 순천하수종말처리장에서, 8월에는 벌교천에서 그리고 9월에는 이사천에서 유입하는 총질소의 부하가 가장 높게 관측되어 월별로 각각 다른 부하량 변동 특성을 나타내었다.

총인의 월별 변동 특성은 여자만으로 유입하는 부하량 중 순천하수종말처리장과 이사천 및 벌교천에서 전체의 90% 정도를 차지하고 있고, 63~387 m³/d의 범위에 평균 251 m³/d의 분포를 나타내었다. 순천하수종말처리장에서 가장 높은 기여율을 보였고, 3~6월까지 높은 부하량을 보이다가 7월부터는 다소 작은 양이 여자만 내로 유입하고 있고, 8월에는 총인부하량의 대부분을 벌교천과 이사천에서 차지하고 있었다.

3.2 유역 오염원 현황

생활계 오염원으로 건축물 용도에서 주거를 목적으로 거주하는 건물의 인구, 즉 주민등록상 거주인구 현황을 배출원에 따라 분류하였다. 이때 배출원은 시가화 유형으로 시가와 비시가로 우선 구분하고, 이를 다시 하수처리구역과 하수미처리구역으로 구분하였다. 하수처리구역은 다시 분류식과 합류식으로 구분하고 하수미처리구역은 오수처리, 단독정화조, 미처리로 구분하였다. 인구의 경우 행정구역단위로 보고되므로 각 행정구역의 배출원별 인구에 유역편입률을 고려하여 여자만 유역 주거 인구를 추정하였으며, 여자만은 총 272,994인이 유역 내에 거주하는 것으로 나타났다. 2007년도 기준 여자만 유역의 오염원별 현황을 Fig. 5에 나타내었다. 배출원별로 살펴보면 합류식 인구가 214,219인으로 가장 많았고 단독정화조, 분류식, 오수처리, 수거식 순으로 나타났다. 또한 지역적으로는 순천시에서 240,596인으로 여자만 인구의 약 88%를 차지할 정도로 가장 크게 나타났다.

축산계 오염원은 한우, 젓소, 돼지, 가금 등 축산분뇨 발생 부하원단위를 적용하기 위한 축종 구분 기준에 따라 행정구역별로 축종별 사육두수 현황을 정리하였으며, 다시 각 행정구역의 유역편입률을 고려하여 사육두수를 추정하였다. 여자만 유역의 총 가축 사육두수는 약 74만 마리로 축종별 구성은 가금, 돼지, 소 순으로 높게 나타났다. 발생오염부하량 원단위가 돼지의 약 5배, 가금의 약 10~100배 큰 한우 및 젓소가 전체

의 약 2.5%를 차지하는 것으로 나타났고, 지역적으로 순천 및 여수시에서 큰 비중을 차지하고 있었다.

산업계 오염원은 행정구역별 폐수 배출업소현황을 배출량에 따른 종별로 구별하여 집계하였다. 폐수 배출업소 수는 각 행정구역의 유역편입 정도에 따른 유역편입률을 고려하되 유역에 조금이라도 포함되는 지역에 폐수 배출업소가 있는 경우, 편입률 1을 적용하여 개소 수를 집계하였다. 여자만의 폐수 배출업소 현황은 총 337개소로 배출규모가 가장 작은 5종이 대부분이었으며, 지역별로 순천시에서 약 220여 개소로 가장 많은 것으로 나타났다.

토지계 오염원은 토지 지목유형별 면적을 토지계 지목별 발생부하 원단위를 적용하기 위한 지목구분 기준에 따라 각 행정구역별로 정리하고, 이를 다시 각 행정구역별 지목별 면적은 유역편입률을 고려하여 연안별로 추정하였다. 여자만의 토지지목별 현황은 임야, 담, 전 순으로 면적 비중이 높게 나타났고, 지역별로 순천시에서 여자만의 절반 이상을 차지하고 있으며 다음으로 고흥군에 많이 포함되어 있는 것으로 나타났다. 대지가 차지하는 비중은 6%로 상대적으로 낮은 것으로 평가되었다.

매립계 및 양식계 오염원은 행정구역별 매립장 및 양식장 개소 수를 집계하였으며, 유역편입률은 폐수배출업소 현황과 동일하게 해당 연안에 조금이라도 포함되는 행정구역의 유역편입률을 1로 간주하였다. 2007년 기준 여자만에는 1개의 매립장과 총 16개의 양식장이 집계되었다. 매립장은 순천시에 위치하였고, 양식장은 보성군에 7개소로 가장 많았고, 여수시, 순천시 및 고흥군에서 각각 5개소, 3개소 및 1개소를 차지하였다.

3.3 발생부하량 산정

오염부하량은 각종 오염원으로부터 발생하는 오폐수 발생량, 발생부하량, 배출부하량, 유달부하량으로 구분된다. 오·폐수 발생량은 생활하수, 산업폐수, 축산폐수로 구분하여 산정하였다. 유역 내에서 발생하는 오염물질을 나타내는 발생부하량은 인구, 산업, 축산, 양식장, 토지이용 상태 등의 오염원에서 발생한 오염물질의 양을 나타내고, 배출부하량은 생활계, 산업계, 축산계, 자연계에서 발생한 부하량이 일련의 환경기초시설 등에서 처리과정을 거친 후 수계로 배출되는 양을 나타낸 것이다. 유달부하량은 배출된 부하량이 하천을 유하하는 과정에서 침전, 증발, 분해 등의 물리·화학·생물학적 작용을 통하여 감소된 오염물질의 양이 고려된 오염부하량이다.

여자만의 총 발생부하량은 1일 기준으로 생물화학적산소요구량은 64,345.9 kg, 총질소는 14,066.4 kg, 총인은 2,462.6 kg로 산정되었다(Table 1). 발생부하량은 산업계, 축산계, 생활계, 토지계 순으로 높게 나타났으며, 산업계는 전체의 약 40%를 차지하고 있으며, 생활계와 축산계가 각각 25%, 28%를 차지하여 산업계 발생부하량이 상대적으로 높게 나타났다. 지역별로는 보성군과 순천시에서 약 85%로 대부분이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 오염원별로 자세히 살펴보면 보성군은 산업계 발생이 대부분을 차지하는 반면, 순천시는 생활계와 축산계의 비중이 높게 나타나고 있는 것이 특징적이다(Fig. 6).

여자만의 수질관리를 위한 허용유입부하량 산정

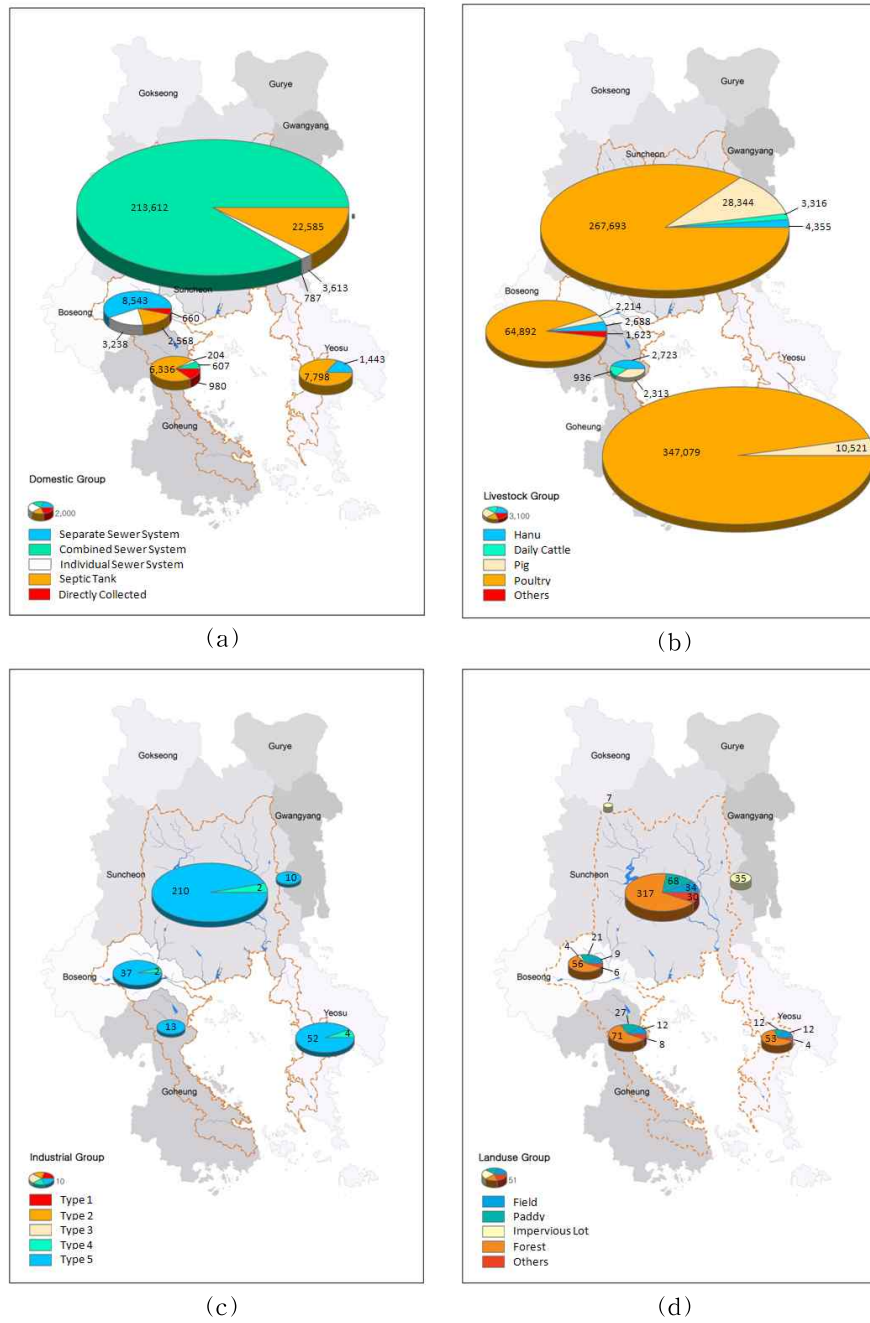
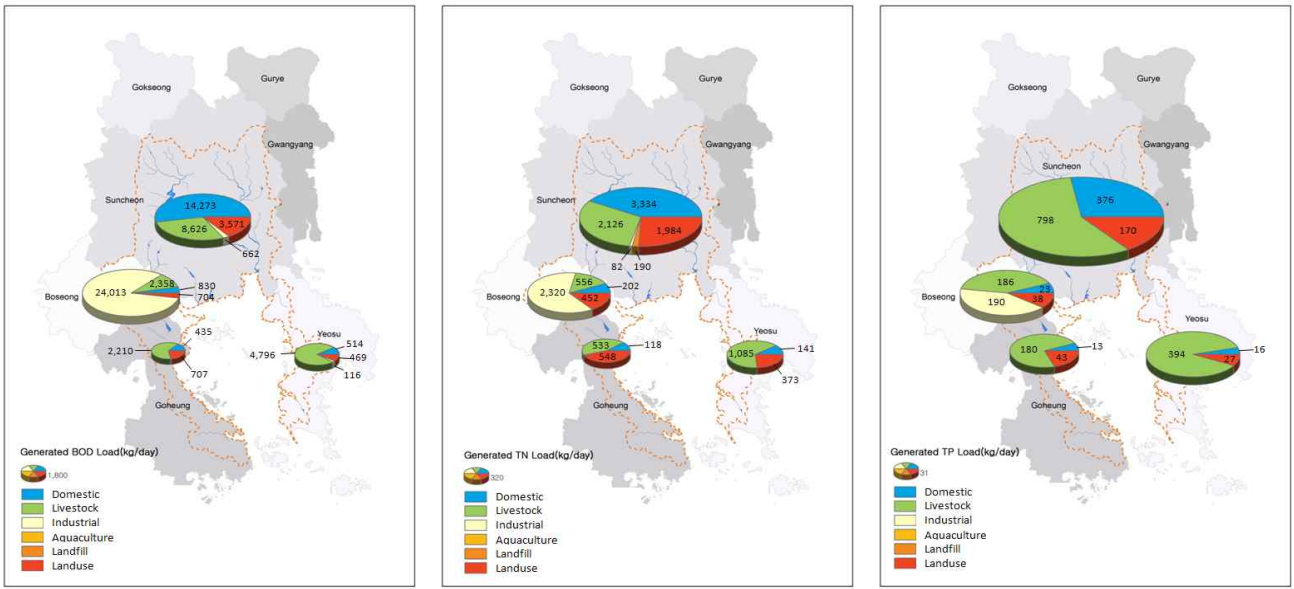


Fig. 5. Pollutant loading in each tributary of Yeolja Bay basin, 2007. (a) Domestic group, (b) Livestock group, (c) Industrial group, (d) Land use group.

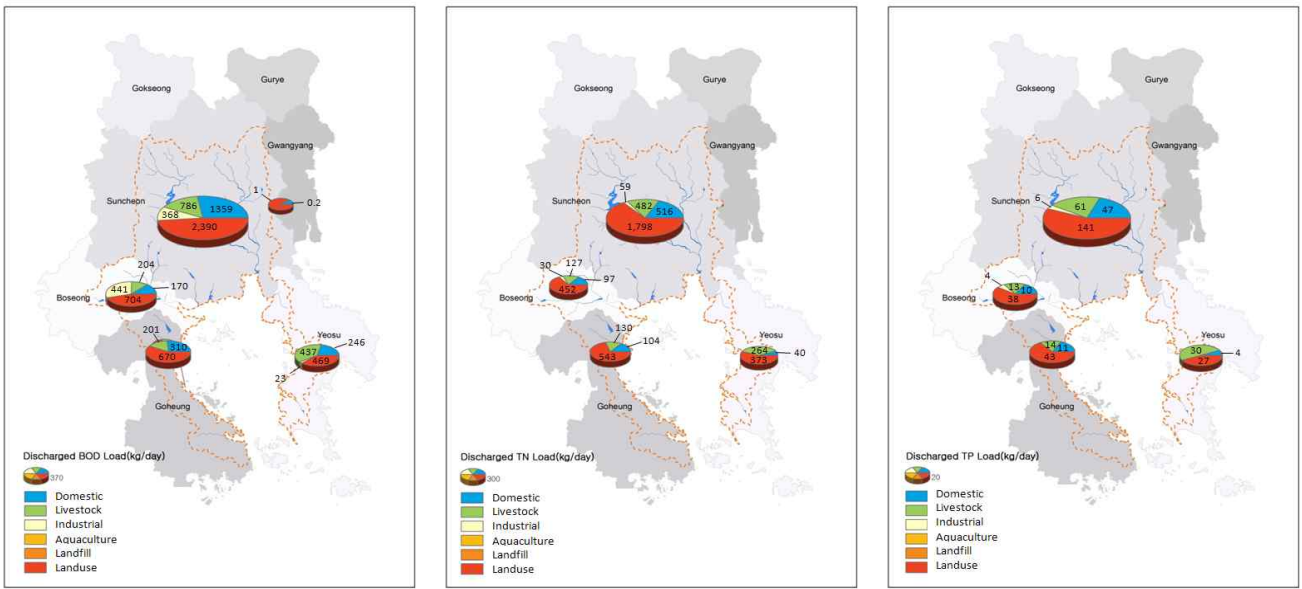
Table 1. Generated loading of BOD, TN and TP in Yeolja Bay basin(Unit : kg/d)

	Sum.	Population	Livestock	Industry	Land	Aquafarm	Landfill
BOD	64,345.9	16,052.6 (24.9 %)	17,990.1 (28.0 %)	24,826.7 (38.6 %)	5,451.5 (8.5 %)	16.7 (0.0 %)	8.3 (0.0 %)
TN	14,066.4	3,796.0 (27.0 %)	4,300.6 (30.6%)	2,418.8 (17.2 %)	3,357.5 (23.9 %)	3.3 (0.0 %)	190.2 (1.3 %)
TP	2,462.6	427.1 (17.3 %)	1,558.0 (63.3%)	198.9 (8.1 %)	277.9 (11.3 %)	0.0 (0.0 %)	0.7 (0.0 %)



(a) (b) (c)

Fig. 6. Generated load of BOD(a), TN(b) and TP(c) in Yeolja Bay basin, 2007.



(a) (b) (c)

Fig. 7. Discharged load of BOD(a), TN(b) and TP(c) in Yeolja Bay basin, 2007.

3.4 배출부하량 산정

여자만의 총 배출부하량은 1일 기준으로 생물화학적산소요구량은 8,806.8 kg, 총질소는 5,020.9 kg, 총인은 449.1 kg으로 산정되었다(Table 2). 생물화학적산소요구량의 경우 토지계, 생활계, 축산계 순으로 높게 나타났고, 총질소 및 총인의 경우, 토지계, 축산계, 생활계, 산업계 순으로 높게 나타났으며, 이 중 토지계가 절반이상을 차지할 정도로 높은 기여율을 보였다. 지역별로는 순천시와 총 배출량의 절반가량을 차지하고

있으며, 산업계의 발생부하량이 큰 폭으로 감소한 보성군의 경우 발생부하량은 순천시와 비슷한 수준이었으나 배출되는 양은 순천시의 1/3 가량으로 감소한 추세였다(Fig. 7).

국토해양부(2009)의 자료에 의하면, 육상기인 오염원 관리를 위해 전국연안 66개 단위해역과 단위유역 중에서 25개 관리우선 대상해역 및 유역을 선정하여 복합형, 공단형, 비점오염원형 및 원인미상형의 4가지 유형으로 구분하였고, 여자만은 이 중 유역의 오염원이 뚜렷하게 파악되지는 않았지만 해역의 오

Table 2. Discharged loading of BOD, TN and TP in Yeoja Bay basin(unit : kg/d)

	Sum.	Population	Livestock	Industry	Land	Aquafarm	Landfill
BOD	8,806.8	2,085.6 (23.7 %)	1,628.5 (18.5 %)	843.2 (9.6 %)	4,232.8 (48.0 %)	16.7 (0.2 %)	0.0 (0.0 %)
TN	5,020.9	722.2 (14.4 %)	1,037.2 (20.7 %)	92.3 (1.8 %)	3,165.9 (63.0 %)	3.3 (0.1 %)	0.0 (0.0 %)
TP	449.1	72.0 (16.0 %)	117.2 (26.1 %)	10.7 (2.4 %)	248.3 (55.3 %)	0.9 (0.2 %)	0.0 (0.0 %)

염현상은 진행 중인 원인미상형으로 분류되었다. 여자만의 유역 오염원 현황과 발생부하량 및 배출부하량 산정 결과로부터 여자만은 유역의 배출부하량이 대지를 통한 기여가 가장 높게 평가되어 뚜렷한 오염원의 구분이 점오염원의 실측에 의해 쉽게 평가되기는 어려울 것으로 보인다. 즉, 하계 강우에 의해 연 중 가장 많은 육상오염부하가 여자만으로 유입되기 때문에 (Fig. 4) 하천 등으로 유입되는 점오염원 뿐만 아니라 비점오염원의 정확한 평가가 필요할 것으로 판단된다. 따라서, 배출원별 평가에 있어서 산업계와 축산계가 차지하는 비율이 높게 나타나 이러한 시사점을 반영하고 있다.

3.5 허용오염부하량 산정

실측자료를 이용한 하천 유입유량 및 유입농도와 함께 강수 자료와 원단위를 이용하여 산출한 유입유량 및 유입농도를 비교·검증해 보았다. 모델입력인자로 적용되는 유입유량에서 총담수유입량은 실측의 경우 13.14 m³/s이나 강우자료의 경우 13.34 m³/s로 실측대비 강우자료에 의한 유량이 1.5% 정도 높게 나타났다. 유입농도의 경우 실측자료와 원단위 자료를 이용한 결과를 비교하면, 생물화학적산소요구량의 경우 각각 7.59 mg/L, 7.64 mg/L, 총질소의 경우 각각 4.576 mg/L, 4.356 mg/L, 총인의 경우 0.324 mg/L, 0.390 mg/L로 각각 산출되었다. 실측대비 원단위의 유입농도가 생물화학적산소요구량과 총질소의 경우, 각각 약 1%와 5%의 상대오차 범위로 나타났고, 총인의 경우 20% 정도로 다소 높게 나타났다(Table 3).

박스모델을 이용하여 여자만으로 유입하는 오염물질의 삭감량과 허용유입부하량을 계산하여 Table 4에 나타내었다. 해역 생활환경기준 I 등급(COD 1 mg/L 이하, TN 0.3 mg/L 이하, TP 0.03 mg/L 이하)을 유지하기 위하여 육역으로부터 여자만으로 유입하는 오염부하 삭감량을 Table 3의 원단위로 계산된 유입농도를 근거로 계산한 결과, 생물화학적산소요구량은 현재 유입농도 7.64 mg/L를 4.64 mg/L로, 총질소는 4.356 mg/L를 4.056 mg/L로, 총인은 0.390 mg/L를 0.270 mg/L로 삭감시켜야 해역생활환경기준 I 등급수를 유지할 수 있었다.

오염부하 삭감량은 현재 유입농도에서 환경기준치를 만족하는 허용농도를 뺀 값에 유입유량을 곱하여 산정하였다. 여자만을 해역생활환경기준 I 등급수로 유지하기 위한 오염부하 삭감량은 생물화학적산소요구량의 경우 배출부하량의 39.3%인 3,457.7 kg/d를, 총질소의 경우 배출부하량의 6.9%인 345.5

kg/d를, 총인은 배출부하량의 30.8%인 138.3 kg/d로 각각 산정되었다. 허용유입부하량은 총배출부하량에서 삭감부하량을 뺀 값으로 산정하였으며, 여자만의 해역생활환경기준 I 등급을 유지하기 위한 허용유입부하량은 생물화학적산소요구량의 경우 5,349.0 kg/d, 총질소의 경우 4,675.2 kg/d, 총인의 경우 310.7 kg/d로 각각 산정되었다.

해역의 환경용량을 초과한 수질 오염물질은 수 이용목적에 따라 수질을 회복시키는데 필요한 오염물질의 삭감부하량을 산정하여 적정 수준의 수질 관리 대책을 세워야 할 것이다. 육상오염물질 중 화학적산소요구량과 총질소 및 총인의 유기물 항목에 대해 적정 오염부하량 산정 등의 많은 연구가 진행되고 있는데, 최근에는 1인당 오염물질 배출량과 국내총생산과의 관계에 대해 생물화학적산소요구량(BOD)과 총질소(TN) 및 총인(TP)의 자료분석을 통해 경제학적 관점에서 분석하기도 하고, 환경오염과 경제발전과의 상관성을 연구하는데 있어

Table 3. Input data used in the model

	Item	Unit	Value
	Precipitation	m ³ /s	18.14
	Evaporation	m ³ /s	15.63
	River inflow	m ³ /s	10.63
	Total inflow of fresh water ¹⁾	m ³ /s	13.14
	Total inflow of fresh water ²⁾	m ³ /s	13.34
	Salinity in system		31.58
	Salinity outer system		33.28
COD	C _p	mg/L	1.69
	C _{p0}	mg/L	0.80
	C _{pin} ³⁾	mg/L	7.59
	C _{pin} ⁴⁾	mg/L	7.64
TN	C _p	mg/L	0.684
	C _{p0}	mg/L	0.100
	C _{pin} ³⁾	mg/L	4.576
	C _{pin} ⁴⁾	mg/L	4.356
TP	C _p	mg/L	0.053
	C _{p0}	mg/L	0.017
	C _{pin} ³⁾	mg/L	0.324
	C _{pin} ⁴⁾	mg/L	0.390

- 1) In situ data was used
- 2) Precipitation data was used
- 3) 1) value and in situ load were used
- 4) 2) value and discharged load were used

Table 4. Estimated reduction amounts of discharged loads and permissible inflow loads for BOD, TN and TP to achieve water quality standard in Yeoja Bay(Unit : kg/d)

	Water quality standard		Reduction amount of pollutant	Permissible inflow load
	Grade	Concentration (mg/L)		
BOD	I	1	3,457.7 (39.3 %)	5,349.0 (60.7 %)
TN	I	0.3	345.5 (6.9 %)	4,675.5 (93.1 %)
TP	I	0.03	138.3 (30.8 %)	310.7 (69.2 %)

많은 매개 변수 중 총질소와 총인을 주요 평가 항목으로 사용하고 있다(Tsuzuki, 2004; Tsuzuki, 2009).

국가해양환경측정망의 수질자료(국립수산과학원, 2011b)를 이용하여 여자만의 2000~2010년까지 해양수질 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 여자만에서 관측한 3개 정점의 표층과 저층 및 표·저층 평균농도를 화학적산소요구량, 총질소 및 총인에 대해 각각 표현하였다. 화학적산소요구량의 최근 11년 동안 평균 농도는 표층과 저층에서 각각 1.67 mg/L, 1.55 mg/L로 나타났고 표·저층간 뚜렷한 차이는 보이지 않았다. 표·저층 평균은 1.64 mg/L로 나타나 해역생활환경 II등급의 수준을 보였고, 시간이 갈수록 해역의 수질 농도는 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 여수지역 강우량 자료를 이용하여 연도별 평년편차 변화와 여자만의 연도별 화학적산소요구량 농도를 비교하였으며, 그 결과 거의 유사한 변동 특성을 나타내었다.

이와 같은 결과로부터 여자만의 수질은 여자만 유역으로부터 유입되는 육상기인 오염물질에 의해 그 영향이 크게 나타나는 것으로 해석된다(Fig. 9).

여자만의 2002~2010년까지 해역의 총질소 농도는 표층과 저층이 각각 0.512 mg/L, 0.470 mg/L(표·저층 평균 0.491 mg/L)로 해역생활환경 II등급 수준을 나타내었고, 시간이 갈수록 점차 해역의 수질 농도가 다소 높아지는 경향을 나타내었다. 또한 여수지역 강우량 자료와 비교하여도 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 여자만의 총인 농도의 연도별 변화를 살펴보면, 과거에 비해 뚜렷이 감소하는 경향을 나타내었고, 표층과 저층 평균이 각각 0.052 mg/L, 0.053 mg/L(표·저층 평균 0.053 mg/L)로 해역생활환경 II등급을 다소 초과하는 수준을 나타내었다. 총인 농도의 연도별 분포에서 2007년과 2008년을 제외하고는 총질소의 농도 분포와 거의 유사하게 나타났다.

여자만으로 유입하는 점오염원 중 순천하수처리장의 유량이 다른 하천에 비해 상대적으로 적으나, 총질소와 총인의 부하는 오히려 전체 부하량의 절반 정도를 차지할 만큼 크게 나타나고 있어(Fig. 3), 여자만 내 질소와 인의 농도는 순천하수

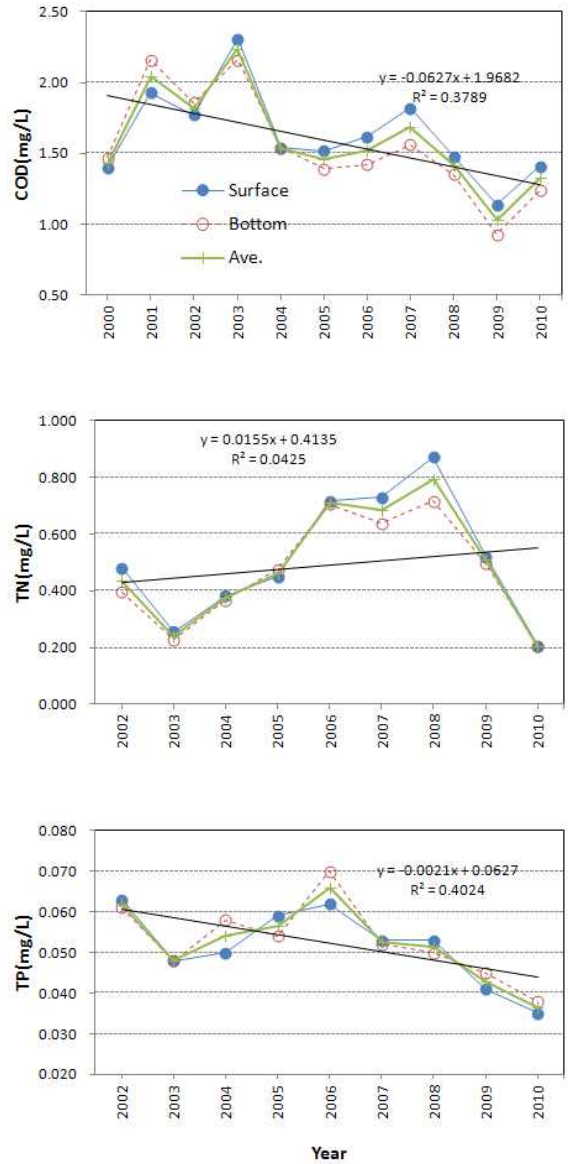


Fig. 8. Yearly variation of COD, TN and TP concentration in Yeoja Bay from 2000 to 2010.

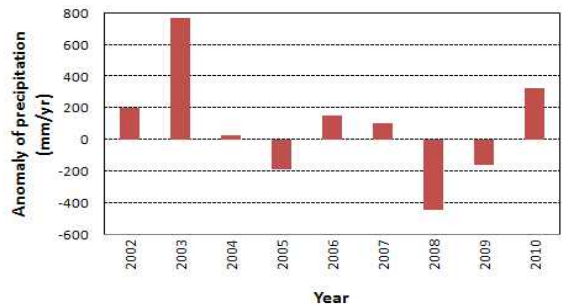


Fig. 9. Anomaly of precipitation in Yeosu area from 2002 to 2010.

처리장의 배출수에 의해 그 영향이 가장 크게 나타날 수 있고, 또한 지리적으로 여자만 안쪽에 위치하고 있어서 해수교환에 의한 희석의 효과도 적을 것으로 판단된다. 또한 여자만은 만 입구가 좁고 전체적으로 호리병 모양의 형태를 가져 해수의 체류시간이 9~20일 정도로 길기 때문에(Hwang et al., 2005; Lee, 1983) 육상으로부터 유입되는 오염물질이 만 외측으로 쉽게 빠져나가지 못하고 만 내에 축적되는 지형적인 특성을 가지고 있어 이러한 여자만의 수질 변화 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. 하수처리장 배출수의 영향으로 인해 해역의 부영양화와 수질오염이 진행되는 현상은 마산만에서도 관찰되고 있으며, 하수처리장 배출수가 만 전체 수질에 미치는 영향이 크게 나타나(오 등, 2005), 향후 하수처리장의 이설 또는 질소와 인의 고도처리가 필요할 것으로 생각된다.

여자만의 허용부하량 산정 결과, 총질소의 경우 생물화학적 산소요구량과 총인의 배출부하량의 삭감율인 39.3%와 30.8%과 비교하여 6.9%의 낮은 삭감율을 보이고 있다. 유역의 오염원 현황과 발생부하량 현황으로 볼 때, 총질소 발생부하량의 경우 토지계가 차지하는 비율이 23.9%로 타 발생원보다 상대적으로 높았다(Table 1). 또한 배출부하량 역시 토지계가 차지하는 비율이 63.0%로 타 배출원과 비교하여 가장 높게 분석되었고, 생물화학적 산소요구량과 총인의 배출부하량 또한 토지계에서 50%를 전후하여 높은 기여율을 보였다(Table 2). 이러한 결과로부터 여자만 유역으로부터 발생되어 배출되는 부하는 토지계가 차지하는 기여율이 상당히 높기 때문에 하천 등을 통한 점오염원으로부터의 유입과 함께 특히 여름철 강우에 의해 유역 주변의 축산계와 전, 담 등 농지를 통한 토지계로부터 발생하는 비점오염부하의 유입 영향 또한 클 것으로 판단된다. 본 연구에서 낮은 총질소 부하 삭감률의 계산 결과로부터 유역의 비점오염원에 의한 영향을 보다 정확하게 산정할 필요가 있을 것으로 사료되며, 향후 후속 연구가 필요할 것으로 보인다. 따라서, 여자만의 수질관리를 위해서는 육상으로부터 유입되는 오염물질의 관리는 점오염원 뿐 아니라 비점오염원의 관리에도 특히 주의를 기울여야 할 것이며, 질소와 인과 같은 오염물질의 하수처리장 고도처리가 필수적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

4. 결론

여자만의 수질관리를 위해 육상으로부터 유입하는 오염물질의 양을 GIS 기법을 이용하여 유역의 발생부하량과 배출부하량을 계산하였고, 목표수질 달성을 위해 삭감해야 할 배출부하량과 허용유입부하량을 박스모델을 이용하여 산정하였다.

여자만을 해양생활환경기준 I 등급으로 회복하기 위해서 육상으로부터 유입되는 오염부하의 삭감률은 생물화학적 산소요구량의 경우 배출부하량의 39.3%인 3,457.7 kg/d, 총질소는 배출부하량의 6.9%인 345.5 kg/d, 총인은 배출부하량의 30.8%인 138.3 kg/d로 각각 산정되었다. 이때, I 등급의 수질환경을

유지시키기 위한 육상기인 오염물질의 허용유입부하량은 생물화학적 산소요구량의 경우 5,349.0 kg/d, 총질소의 경우 4,675.5 kg/d, 총인의 경우 310.7 kg/d로 각각 산정되었다.

여자만의 수질을 해양생활환경기준 I 등급수로 유지하기 위한 허용부하량 산정 결과, 생물화학적 산소요구량과 총인의 경우 배출부하량의 39.3%와 30.8%를 삭감해야 하지만 총질소의 경우 6.9%로 낮은 삭감율을 나타내었다. 그리고, 여자만 유역의 발생부하 처리율(1-배출부하량/발생부하량)은 생물화학적 산소요구량은 86%, 총인은 82% 정도이나, 총질소는 64%에 불과하여 여자만 유역의 총질소 발생부하 처리율이 낮게 나타났고, 이중 축산계와 토지계 발생부하의 처리율이 가장 낮게 나타났다. 여자만 유역의 오염원 현황과 발생부하량 현황으로 볼 때, 총질소의 경우 토지계가 차지하는 비중이 크며 배출부하 역시 가장 크게 나타났다.

여자만은 현재 화학적 산소요구량, 총질소 및 총인과 같은 유기물의 농도가 해양생활환경 II 등급의 수질환경을 유지하고 있고, 최근 10여 년간 자료 분석을 통해 화학적 산소요구량과 총인의 농도는 점차 감소하는 경향이 있었지만, TN의 농도는 점차 증가하는 추세이다. 여수지역의 10여 년간 강우량 자료와 여자만 내 화학적 산소요구량 농도와의 연도별 변화를 살펴보면, 평년 대비 강우량이 높았던 연도에서 여자만 내 유기물 농도가 높게 나타나 여자만의 수질은 유역으로부터 유입하는 육상기인 오염물질의 영향을 크게 받는 것으로 평가되었다.

여자만으로 유입하는 점오염원 중 순천하수처리장의 유량이 다른 하천에 비해 상대적으로 적으나, 총질소와 총인의 부하는 오히려 전체부하량의 50% 정도를 차지할 정도로 높게 나타나고 있다. 즉, 여자만 내 수질환경은 순천하수처리장의 배출수의 영향이 크게 나타나 여자만의 수질환경을 관리하기 위해서는 하수처리장 배출수의 고도처리가 필요할 것으로 판단된다. 또한 여자만의 해양환경 보호와 개선을 위해서는 육상 오염물질 중 점오염원 뿐만 아니라 축산계 및 토지계 부하 등 비점오염원에 대한 관리가 필요할 것으로 판단되며, 축산분뇨 및 전, 담 등 경작지의 비점오염원 저감 대책 마련이 필요하다. 향후 유역의 비점오염원에 대한 영향을 보다 정확하게 산정하는 등 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원(남·서해안에서의 해양생태계 변화에 따른 김양식장 적정수용량 등 조사, RP-2011-ME-046)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 국립수산과학원(2008), 한국해양환경 조사연보 2007, p. 408.
- [2] 국립수산과학원(2011a), 정선해양관측 홈페이지, http://portal.nfrdi.re.kr/page?id=aq_env_cross_02_01.

- [3] 국립수산과학원(2011b), 한국해양환경 조사연보 2010, p. 434.
- [4] 국토해양부(2009), 2008 육상기인오염원 관리대책수립연구, p. 525.
- [5] 국토해양부(2010), 해양환경공정시험기준, p. 495.
- [6] 기상청(2011), 기상연감홈페이지, <http://web.kma.go.kr/communication/webzine/yearbook.jsp>.
- [7] 김주일, 서영일, 이선길, 김성태, 주 현, 장선익, 오택운 (2007a), 여자만 저층트롤 어획실태와 종조성, 한국수산공학회지, 제43권, 제4호, pp. 241-250.
- [8] 김형철, 최우정, 이원찬, 구준호, 이필용, 박성은, 홍석진, 장주형(2007b), 수질관리를 위한 시화호의 환경용량 산정, 한국환경과학회지, 제16권, 제5호, pp. 571-581.
- [9] 동화기술(1991), 호수환경조사법, p. 365.
- [10] 동화기술(2004), 상·하수도공학, p. 587.
- [11] 오현택, 구준호, 박성은, 최윤선, 정래홍, 최우정, 이원찬, 박종수(2005), 하수처리장 개선이 마산만 수질에 미치는 영향 분석, 한국환경과학회지, 제14권, 제8호, pp. 777-783.
- [12] 이대인, 엄기혁, 김귀영, 홍석진, 이원찬, 장주형(2008), 연안의 효율적 수질관리 방향과 해양환경영향평가, 해양환경안전학회지, 제14권, 제1호, pp. 29-37.
- [13] 이창희, 장원근, 고성훈, 남정호(2009), 마산만 특별관리해역의 수질오염총량계획에 반영된 부하량 할당 특성 및 한계, 해양정책연구, 제24권, 제2호, pp. 1-26.
- [14] 해양수산부(2006), 마산만 특별관리해역 연안오염총량관리 기술지침, p. 144.
- [15] 홍석진, 이원찬, 윤상필, 박성은, 조윤식, 권정노, 김동명 (2007), 마산만의 자생 유기물 저감을 위한 단순 박스모델의 적용, 해양환경안전학회지, 제13권, 제2호, pp. 111-118.
- [16] 환경부(2004), 수질환경오염공정시험법, p. 355.
- [17] 환경부(2007a), 수질오염총량관리제 고시·훈령·규정집, pp. 197-265.
- [18] 환경부(2007b), 물환경정보시스템 홈페이지, <http://water.nier.go.kr/>.
- [19] Arnold, G. E., J. L. Wim and M. W. Blind(2005), The concerted action Harmoni-CA: facilitating the dialogue and bridging the gap between research and the WFD implementation. Environmental Science and Policy, Vol. 8, No. 3, pp. 213-218.
- [20] GIWA(2004), GIWA homepage, <http://www.giwa.net/>.
- [21] Hwang, D. W., G. Kim, Y. W. Lee and H. S. Yang (2005), Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes. Marine Chemistry, Vol. 96, pp. 61-71.
- [22] Lee, M. C.(1983), The exchange of sea water in Yeolja Bay, Bull. Korean Fish. Tech. Soc., Vol. 19, No. 1, pp. 33-39.
- [23] Lee, Y. G., Y. S. Chu, K. K. Jung, H. J. Woo and H. J. Lee(2000), Depositional processes of fine-grained sediments and foraminiferal imprint of estuarine circulation by summer floods in Yoja Bay, Southern coast of Korea, J. Oceanal. Soc. Korea, Vol. 35, pp. 109-123.
- [24] Min, D. K.(2004), Mollusks in Korea, Hanguel Graphics, p. 387.
- [25] Quevauviller, P., P. Balabanis, C. Fragakis, M. Weydert, M. Oliver, A. Kaschl, G. Arnold, A. Kroll, L. Galbiati, J. M. Zaldivar and G. Bidoglio(2005), Science-policy integration needs in support of the implementation of the EU Watr Framework Directive, Environmental Science and Policy, Vol. 8, No. 3, pp. 203-211.
- [26] Shiro, M. and I. Masahiro(1998), Study on eutrophication and permissible inflow loads of nitrogen and phosphorus in enclosed coastal seas, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 45, pp. 1001-1005.
- [27] Takeshi, H.(1988), The role of modelling in the control of seawater pollution, Water Science and Technology, Vol. 20, pp. 277-286.
- [28] Tsuzuki, Y.(2004), Water pollutant load per capita running into coastal area and lakes, and economic development level of developing counties, Proceedings of 12th Global Enviroment Symposium, Japan Society of Civil Engineers, pp. 129-134.
- [29] Tsuzuki, Y.(2006), An index directly indicates land-based pollutant load contributions of domestic wastewater to the water pollution and its application, Science of the Total Environment, Vol. 370, pp. 425-440.
- [30] Tsuzuki, Y.(2009), Comparision of pollutant discharge per capita (PDC) and its relationships with economic development: An indicator for ambient water quality improvement as well as the Millennium Development Goals (MDGs) sanitation indicator, Ecological indicator, Vol. 9, pp. 971-981.
- [31] UNEP(2003), Regional seas strategies for sustainable development, p. 40.
- [32] UNEP/GPA Coordination Office(2002), Water supply and sanitation coverage in UNEP Regional Seas need for regional wastewater emissions targets? 1st draft, p. 60.
- [33] UNEP/RSP(2006), United Nations environmental programmxe, Regional Seas Programme homepage. <http://www.unep.org/regionalseas/>.
- [34] USEPA(2004), Total maximum daily loads(TMDL) homepage, <http://www.epa.gov/owow/tmdl>.
- [35] Yoo, J. S.(1976), Korean shells in colour, Iljisa, p. 196.

원고접수일 : 2011년 10월 19일

원고수정일 : 2011년 11월 14일 (1차)

: 2011년 12월 02일 (2차)

게재확정일 : 2011년 12월 26일