

## 물질순환모델을 이용한 울산해역의 수질예측

신범식\* · 김규한\* · 편종근\*\*

\*관동대학교 공과대학 토목환경학부

\*\*명지대학교 토목환경공학과

## The Prediction of Water Quality in Ulsan Area Using Material Cycle Model

BUM-SHICK SHIN\*, KYU-HAN KIM\* AND CHONG-KUN PYUN\*\*

\*Division of Civil and Environmental Engineering, Kwandong University, Gangwondo, Korea

\*\*Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

**KEY WORDS:** Material Cycle Model 물질순환모델, Three Dimensional Hydrodynamic Model 3차원 해수유동모델, Water Quality 수질, Eutrophication Index 부영양화지수

**ABSTRACT:** Recently, pollution by development in coastal areas is going from bad to worse. The Korean government is attempting to make policies that prevent water pollution, but it is still difficult to say whether such measures are lowering pollution to an acceptable level. More specifically, the general investigation that has been done in KOREA does not accurately reflect the actual conditions of pollution in coastal areas. An investigation that quantitatively assesses water quality management using rational prediction technology must be attempted, and the ecosystem model, which incorporates both the 3-dimensional hydrodynamic and material cycle models, is the only one with a broad enough scope to obtain accurate results. The hydrodynamic model, which includes advection and diffusion, accounts for the ever-changing flow and (quality) of water in coastal areas, while the material cycle model accounts for pollutants and components of decomposition as sources of the carbon, phosphorus, and nitrogen cycles. In this paper, we simulated the rates of dissolved oxygen(DO), chemical oxygen demand(COD), total nitrogen(T-N) and total-phosphorous(T-P) in Korea's Ulsan Area. Using the ecosystem model, we did simulations using a specific set of parameters and did comparative analysis to determine those most appropriate for the actual environmental characteristics of Ulsan Area. The simulation was successful, making it now possible to predict the likelihood of coastal construction projects causing ecological damage, such as eutrophication and red tide. Our model can also be used in the environmental impact assessment (EIA) of future development projects in the ocean.

### 1. 서 론

경제의 급속한 발전과 연안에 대한 이용도가 점차 증가함에 따라 연안의 매립, 항로 및 박지의 준설, 방파제 및 구조물의 건설이 증가하고 있다. 이러한, 연안 개발에 따라 발생하는 해양환경의 변화 즉, 해저지형, 해수의 흐름, 수질 및 저질 등의 물리, 화학적인 변화로 인한 해양 생태계의 변화도 계속 증가하고 있다. 최근, 이러한 해양 생태계 및 자연환경의 변화가 심각해짐에 따라 환경의 가치를 배려한 개발의 필요성이 국민들 사이에서 인식되고 있다. 따라서 개발에 따른 환경의 변화를 정량적으로 파악하고 예측하는 방법이 필요하다. 자연적 및 인공적으로 변화하는 연안 환경을 정량적으로 평가하고, 장래변화를 예측하기 위해서는 연안의 물리·화학적 그리고, 생물학적인 관측 자료를 이용한 데이터의 분석과 신뢰성 있는 예측기법이 개발되어야 한다. 이류 및 확산현상을 포함하는 물리적인 유동장을 파악하고 생태계 구성요소의 흐름을 수식화하는 모형이 사용되어지고 있다.

일반적으로 해양의 수질예측에 많이 이용되는 있는 부영양화모델의 하나인 물질순환모델은 생물체와 무생물체를 일괄하여 무기물질과 유기물질로 나누고, 이들 상호간의 물질흐름을 취급하여 영양염류와 COD의 거동을 파악할 수 있으며, 모델은 해수의 유동특성을 재현할 수 있는 3차원 해수유동모델과 비보존성 물질에 대한 수질을 예측하기 위한 생태계 모델로 구성되어 있다. 해역의 수질예측에 대한 국내 연구는 3차원 물질순환모델을 이용하여 진해만에서의 빈산소 수괴 예측에 관하여 연구(최우정, 1993)한 바 있고, 생태계모델을 이용하여 영양염류 부하량에 따른 식물플랑크톤 농도를 예측하고 부영양화 억제를 위한 방안(김종구, 1994)을 제시한 바 있으며, 가막만의 어장환경용량을 산정(조은일, 1996)한 경우도 있다. 울산항과 그 주변해역에 관한 연구를 살펴보면, 생태계모델을 이용하여 울산만 주변의 수질변화에 대한 연구, 현지 관측을 통한 울산만의 수질, 저질 환경인자의 변화 등이 있었다. 본 연구에서는 울산항을 대상으로 주변해역의 수질변화를 예측하기 위한 3차원 해수유동모델과 비보존성 물질에 대한 분포를 재현하기 위한 생태계모델로 구성된 물질순환모델을 이용하여, 구조물 건설에 따른 환경영향을 파악하고자 한다.

제1저자 신범식 연락처: 강원도 양양군 양양읍 산7번지  
033-671-3436 sbs114@kd.ac.kr

## 2. 연구내용 및 방법

울산해역의 수질변화를 조사하고 예측하기 위해, 3차원 해수유동모델(Nakata et al., 1983)과 질소순환모델을 결합한 물질순환 모델을 이용하였다. 이 조합된 모델은 유체역학적이고, 생화학인 구성으로 수질의 현황 및 장래의 변화를 예측할 수 있다. 물질순환모델을 이용한 울산해역의 수질을 예측하기 위한 첫 번째 단계로는 수치모델을 수행하기 위한 기본자료(기상, 수질, 지형)의 수집이고, 두 번째로는 해수유동모델을 이용하여 울산해역의 물질의 거동을 파악할 수 있는 물리해양환경의 변화에 대한 실험을 수행하는 것이다. 마지막으로 생태계 모델에서는 조사된 수질자료를 입력하고, 해수유동모델에서 도출된 흐름장을 이용하여 대상해역의 수질현황 및 변화를 예측하게 된다.

### 2.1 대상해역의 선정

우리나라의 동남부해안에 위치한 울산해역(Fig. 1)은 일본열도·태평양·동남아에 이르는 해상교통로의 요충지에 있어 오래 전부터 대륙과 해양을 연결하는 문호의 구실을 하고 있다.

울산항의 풍향은 북동계열(N-NE)이 주로 불고, 외측은 개방되어 있어 남동방향(S-SE)의 바람은 항내에 파랑을 일으켜 많은 영향을 주고 있으며, 울산해역 일원의 조석현상은 매우 미약하며, 대조차 48.2cm 평균조차 32.6cm, 소조차 17.0cm를 보이고, 항내 전역의 조류속도는 0.23m/sec로서 선박의 조선이 나 접안하역에 직접 영향을 미치지 않고 있다.

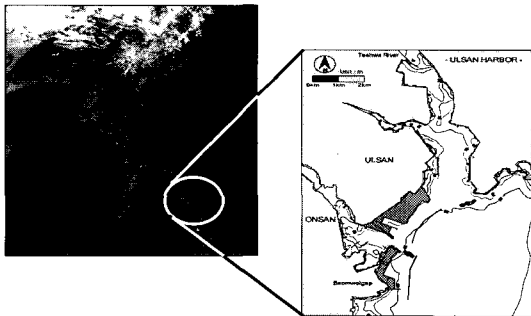


Fig. 1 The site of the study

### 2.2 해수유동모델

해역에서 물질의 이동은 오염물질 투입초기에는 조류와 조류의 수평 연직점성과 직각방향의 난류확산에 의해 분포하지만 그 이후에는 물질의 분산이 흐름의 항류성분에 의존하는 부분이 크기 때문에 조석류에 대해 수층별 수질을 시뮬레이션하기 위해 해수의 연직운동을 내부경계면을 고정해서 면을 통과하는 연직류로 표현하는 다층 model을 이용하여, 밀도류의 영향으로 흐름의 연직 방향 변화 또는 연직 방향의 순환류를 고려하기 위한 3차원 모델을 적용하였다. 유체의 운동을 정식화한 운동방정식, 연속방정식을 이용하였으며, 기본식은 다음과 같다.

#### · 운동방정식

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v + w \frac{\partial v}{\partial z} + f_0 k \cdot v = -g \nabla \zeta - \frac{g}{\rho_0} \int_{-H}^0 \nabla \rho dz + [\nabla \cdot (A_H \nabla)]v + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (1)$$

#### · 연속방정식

$$\nabla \cdot v + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

#### · 자유수면 조건

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \int_{-H}^{\zeta} v dz \right) = 0 \quad (3)$$

여기서,  $u, v$ 는 수평방향 유속,  $w$ 는 수직방향유속,  $f_0$ 는 코리올리변수,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\zeta$ 는 평균해면으로부터의 수면 높이,  $H$ 는 저면으로부터의 평균해면 높이,  $g$ 는 중력가속도,  $A_H$ 와  $A_z$ 는 수평 및 수직방향 확산계수,  $t$ 는 시간,  $z$ 는 수직좌표,  $k$ 는 수직방향의 단위벡터이다. 울산해역에 대한 해수유동실험을 수행하기 위해서는 각 상태량에 대한 적절한 경계조건의 설정이 필요하다(Table 1). 경계에서의 조위는 기존자료 및 현지 관측 결과를 이용하여 반일 주조성분인 M2(주태음반일주조)와 S2(주태양반일주조)분조를 이용하였다.

계산격자는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 정방격자를 구성하여 수행하였으며, x, y 방향의 격자크기를 각각 50m로 하였으며, 전체격자는 300×380×4층으로 구성하였다. 수평확산계수는 국외에서는 여러 관측자에 의해 보고되고 있으나, 국내에서는 확산계수의 측정치가 단편적이고 전체적으로 적용할 시에는 문제가 있다. 일본의 경우를 살펴보면, 동경만, 오사카만 등에 대한 확산계수를 조사한 결과 대부분이  $10^3 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 범위로 측정되었다(Morikawa and Murakami, 1986; Unoki et al., 1980). 본 연구에서는 주변에서 조사된 값이 없으므로, 이 범위인  $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였다. 대상해역에 대한 해수유동 수치모형실험에 있어서 사용된 주요 입력조건은 Table 1과 같으며, 모델 계산영역은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Input data for 3-D hydrodynamic model

Parameter	Assigned value
Total grid value	300×380×4=(456,000)
Grid size	Δx= Δy=50m
Water Depth	chart datum + MSL
Time interval	10sec
Level thickness	1st Level : 0m ~ 2m
	2nd Level : 2m ~ 5m
	3rd Level : 5m ~ 10m
	4th Level : below 10m
Horizontal Diffusion Coefficient	$1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$
Vertical Diffusion Coefficient	$1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$
Calculation time	5 tidal cycle

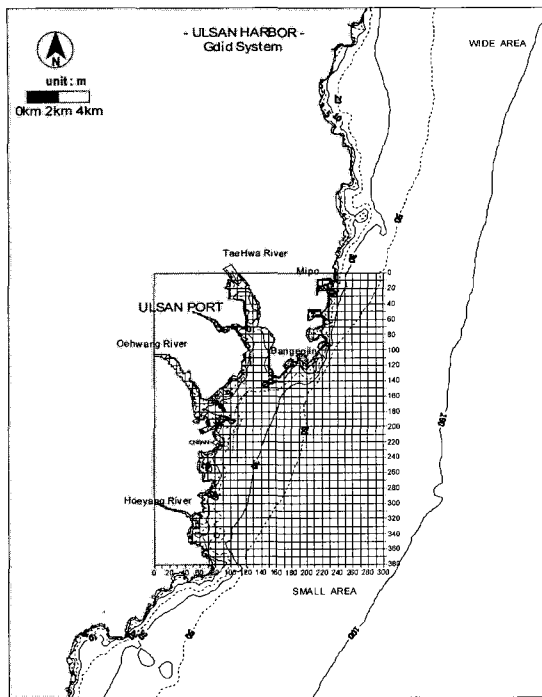


Fig. 2 Finite-difference grid of Ulsan area

2.3 물질순환모델

본 연구에서 사용된 물질순환모델(Nobuyuki, 1998)은 해수 유동모델에 사용된 격자망과 동일하게 적용하였고, 해수유동 모델의 계산결과에서 도출된 유속장을 입력자료로 한다. 생태계 모델의 재현을 위한 모델의 구성요들에 대한 각 수질항목 중 무기태 질소와 인은 I-N(inorganic-nitrogen)과 I-P(inorganic-phosphorus)로 구분하여 비생물군으로 취급하였으며, 유기질 질소와 인은 O-N(organic-nitrogen)과 O-P(organic-phosphorus)로 생물군으로 나타내었다 (K. Nakata et al., 1992). 특히, 본 모델에서는 유입부하(육상기원), 저니로부터의 용출에 의한 COD(COD1)와 수역의 내부생산에 의한 COD (COD2)로 구분하여, 물질순환을 재현하였다.

모델에서는

- ① 해역경계와의 유출입, 육지로부터의 부하유입
- ② 해역 내에서 생기는 수리적 과정(이류확산) 외에 Table 2에 나타내는 각 구성 요소의 생성·소실 과정을 고려했다.

모델의 기본방정식은 다음에 나타내는 수질자료의 보존식(이류확산식)으로 나타낼 수 있다.

Table 2 The process of creation disappearance in the numerical model

COD, Nitrogen, Phosphorus	DO
내부생산	대기와의 교환
수중에서의 유기물분해	내부생산에 따른 증가
수중에서의 유기물침강	수중의 COD분해에 따른 소비
저니로부터의 용출	저니에서의 소비

$$\frac{\partial C_k H_k}{\partial t} = -\frac{\partial M_k C_k}{\partial x} + \frac{\partial N_k C_k}{\partial y} + (w_f C)_{k-1/2} - (w_f C)_{k+1/2} - \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x H_k \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y H_k \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) - \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{k-1/2} + \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{k+1/2} + \left( \frac{\partial C_k H_k}{\partial t} \right)^* = 0 \quad (4)$$

여기서,  $C_k$ 는 총평균농도,  $w_f$ 는 침강속도,  $K_x, K_y$ 는 수평확산계수,  $K_z$ 는 연직확산계수,  $H_k$ 는 총평균두께,  $M_k, N_k$ 는 각층의 선유량 성분이고, 마지막 항은 생성·소멸항이며 이것은 질소의 이동경로이다. 이러한, 각 구성요소의 흐름은 Fig. 3에 나타내는 바와 같다.

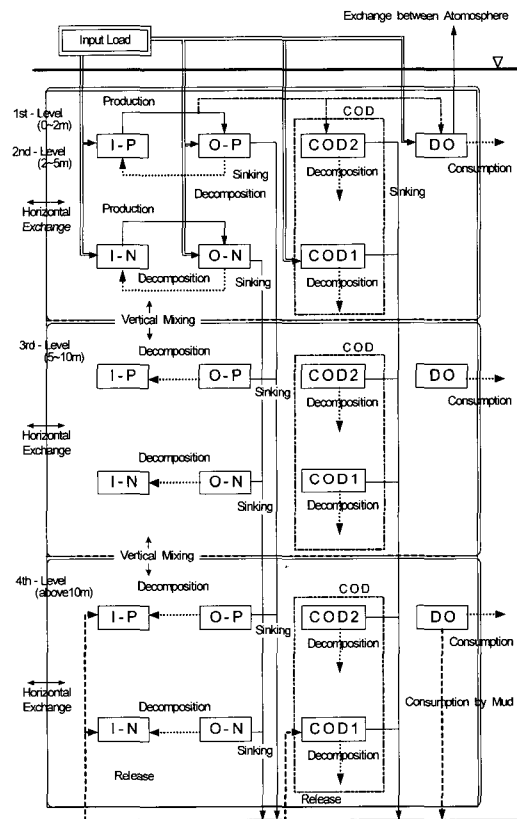


Fig. 3 The concept of nutrient cycle model

모델에 구성요소들에 대한 기본 입력 값들은 수질관측결과를 이용하였다. 생태계 모델의 시뮬레이션을 위한 모델의 구성요소들에 대한 각 수질항목 중 DO, COD, T-N, T-P는 실측 자료를 이용하여 산정하였다.

연직확산계수의 경우,  $1\text{cm}^2/\text{sec} \sim 10\text{cm}^2/\text{sec}$ 는 완전혼합조건을 나타내고,  $0.1\text{cm}^2/\text{sec}$ 는 경미한 혼합조건을 나타낸다고 보고되고 있으며, 기존연구에서 보고된 자료를 적용하였다. 생태계모델의 생물학적 parameter에 대해서는 주변해역의 실측자료가 부재하고, 또한 광범위하여 대부분은 문헌자료를 통하여 선정하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 대상해역의 수질현황

수치모형실험의 입력자료 및 검증자료로 사용하기 위하여

주변해역을 대상으로 실시한 사후환경영향조사자료(2000년 4, 7,10,12월, 2001년 2,5,8,11월, 2002년 2,5,8,11월, 2003년 2,5,8,11월, 울산신항만 개발사업 사후환경 영향조사 보고서)를 수집 하였다.

Table 3 Value of water quality

Season	SW-1	SW-2	SW-3	SW-4	SW-5	SW-6	SW-7	SW-8	SW-9	SW-10	SW-11	Ave	
COD (mg/L)	Spring	2.24	1.72	1.28	1.27	1.09	1.28	1.26	1.04	0.96	0.69	1.12	1.27
	Summer	3.46	2.95	2.33	1.68	2.41	2.68	2.36	1.70	1.45	1.61	2.06	2.24
	Fall	2.50	2.10	1.67	1.43	1.62	1.55	1.54	1.29	1.13	1.14	1.41	1.58
	Winter	1.95	1.63	1.43	1.42	1.44	0.95	1.13	1.07	0.89	0.74	1.23	1.26
	Ave.	2.54	2.10	1.68	1.45	1.64	1.61	1.57	1.27	1.11	1.04	1.46	1.59
T-N (mg/L)	Spring	0.61	0.44	0.21	0.19	0.20	0.19	0.28	0.18	0.27	0.09	0.13	0.25
	Summer	0.69	0.64	0.30	0.20	0.26	0.26	0.28	0.21	0.30	0.12	0.22	0.31
	Fall	0.60	0.45	0.22	0.15	0.24	0.22	0.26	0.16	0.23	0.09	0.14	0.25
	Winter	0.33	0.21	0.12	0.09	0.20	0.19	0.17	0.09	0.10	0.05	0.07	0.15
	Ave.	0.56	0.44	0.21	0.16	0.23	0.22	0.24	0.16	0.22	0.09	0.14	0.24
T-P (mg/L)	Spring	0.07	0.05	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
	Summer	0.12	0.10	0.09	0.04	0.05	0.04	0.06	0.04	0.03	0.04	0.06	0.06
	Fall	0.09	0.07	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04
	Winter	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03
	Ave.	0.08	0.06	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04
DO (mg/L)	Spring	7.86	8.22	8.32	8.47	8.98	8.34	8.33	8.44	8.58	9.25	8.10	8.44
	Summer	7.43	7.60	7.97	8.19	8.68	8.52	8.46	8.03	7.93	8.04	7.85	8.06
	Fall	7.93	8.12	8.31	8.48	8.69	8.46	8.51	8.38	8.48	8.64	8.21	8.38
	Winter	8.23	8.29	8.62	8.59	8.54	8.48	8.76	8.64	8.7	8.61	8.41	8.53
	Ave.	7.86	8.06	8.30	8.43	8.72	8.45	8.51	8.37	8.42	8.64	8.14	8.35

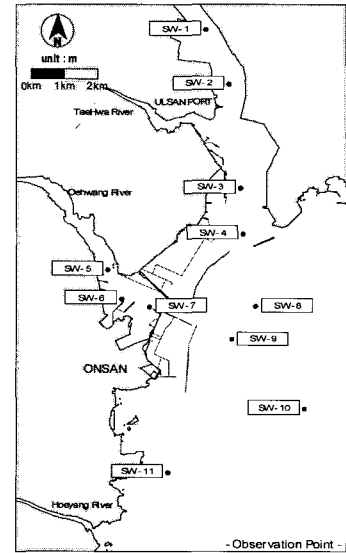


Fig. 4 Locations of sampling

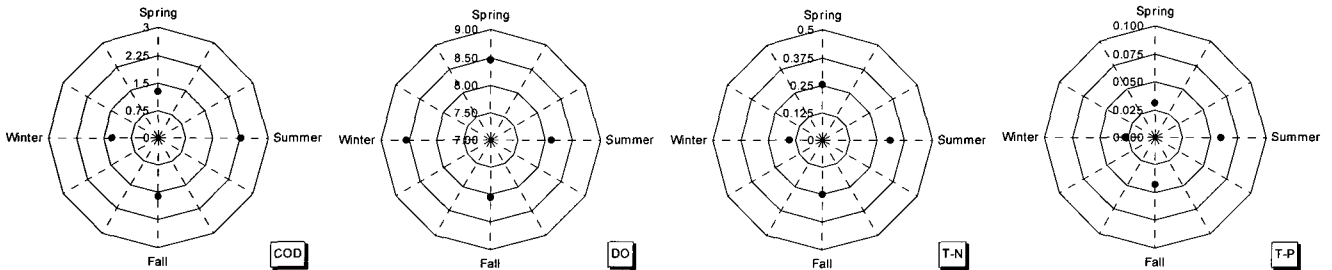


Fig. 5 Variations of COD, T-N, T-P, DO by seasons

대상해역에 대한 수질조사결과 중 물질순환모델의 입력자료로 이용되는 COD, T-N, T-P, DO에 대하여 정리한 결과는 Table 3에 나타내는 바와 같다. 계절에 따른 변화를 살펴본 Fig. 5와 같이 해수 중의 유기물량을 간접적으로 나타내는 지표로서 해역의 유기오염의 척도로 이용되는 화학적 산소요구량(COD)의 농도를 보면 COD는 1.04~2.54mg/L(평균 1.59mg/L)로 나타났으며, 여름철에 가장 큰 값을 나타내고 있으며, 영양염류 중 T-N은 0.086~0.555mg/L(평균 0.24mg/L), T-P는 0.020~0.082mg/L(평균 0.04mg/L)의 범위를 나타냈다. DO는 7.90~8.59mg/L(평균 8.35mg/L)로 전 지점에서 해역 수질기준 I 등급으로 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

해역에서 획득한 관측자료는 다음과 같은 관계에 의해 환산식에 의해 각각의 입력자료 사용하였다.

- ① 유기질 인(O-P) : (DOP)+(POP)
- ② 무기질 인(I-P) : (PO4-P)
- ③ 유기질 질소(O-N) : (DON)+(PON)
- ④ 무기질 질소(I-N) : (NH4-N)+(NO3-N)+(NO2-N)

⑤ 내부생산에 의한COD(DCOD)

$$: (\text{Chl-a}) \times (\text{C/Chl-a}) \times (\text{COD/C})$$

⑥ 일차오탁의 COD(COD1)

$$: \{(\text{DOC})+(\text{POC})\} \times (\text{COD/C}) - (\text{DCOD})$$

⑦ 용존산소 : (DO)

수질 시뮬레이션은 계절별 관측에 따른 결과의 평균값을 사용하였으며, 추후 계절적 변화에 대한 장기간의 검토가 필요할 것으로 사료된다. 층별 수질분포에 대한 관측은 수행되지 않았으므로, 이에 대해서는 층별로 동일한 조건을 Table 4에서 나타내는 바와 같이 입력하였다.

Table 4 Initial condition for material cycle model

Level	COD1	COD2	I-P	I-N	O-P	O-N	DO
1 <sup>th</sup>	1.43	0.16	0.018	0.018	0.147	0.063	8.350
2 <sup>nd</sup>	1.43	0.16	0.018	0.018	0.147	0.063	8.350
3 <sup>rd</sup>	1.43	0.16	0.018	0.018	0.147	0.063	8.350
4 <sup>th</sup>	1.43	0.16	0.018	0.018	0.147	0.063	8.350

3.2 수치모형실험의 적용성 검토

3차원 해수유동모델의 적용성을 검토하기 Fig. 6에 나타난 2 지점에서의 관측결과와 수치모형실험결과를 비교하였다.

관측자료는 2004년 8월에 울산항 전면에서 2개 정점(PC-1 및 PC-2)의 중층에 대한 15일과 30일간 연속적으로 관측한 유속으로 조화분석 결과에 의하면 울산항 동쪽에 위치한 PC-1 정점의 평균대조 최강유속은 20.1cm/s이고, 온산항 남동측에 위치한 PC-2 정점의 대조 최강유속은 41.8cm/s로 해안에 가까운 PC-1 보다는 유속이 다소 크며, 소조 최강유속은 4.6cm/s이다.

실험결과는 2004년 8월의 조건을 입력한 수치모형실험 결과이다. 실험은 매 계산시각마다 모델의 개방경계에서 입력되는 조위는 기존의 조석 관측자료를 이용하였으며, 모델의 계산치가 조석 및 조류 관측치와 잘 일치할 때까지 경계조건을 수정하면서 반복실험을 수행하였다. 본 실험의 조위는 울산항 조위 기준면(D.L.)을 기준으로 하였다. Fig. 6에 나타나는 바와 같이 조위에 대한 검증은 관측치보다 다소 작게(99%) 재현이 되었고, 유속에 대해서는 실험결과가 다소 크게(102%) 나타나고 있으나, 전반적으로 본 모델에서 제시된 결과는 대상해역의 흐름을 잘 나타내고 있다고 판단된다.

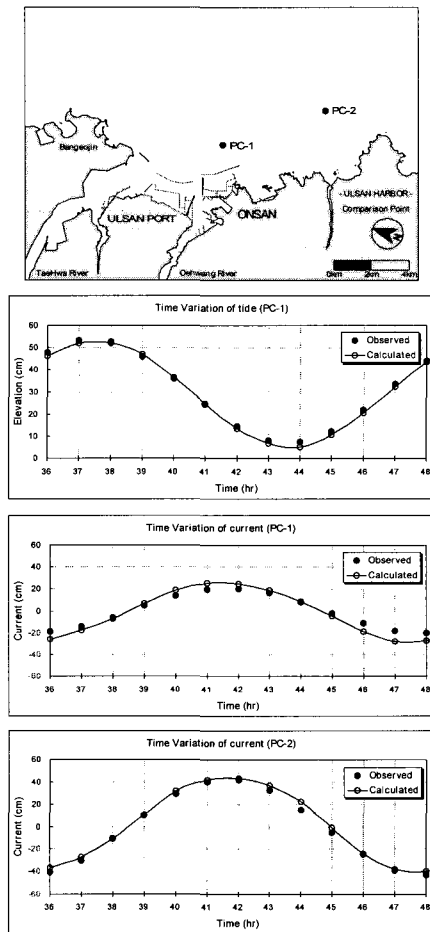


Fig. 6 Comparison points and result of tidal current between calculated and observed results

3.3 해수유동 실험결과

해수유동 실험은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 구조물 건설 전과 후에 대해 각각 수행하였다.

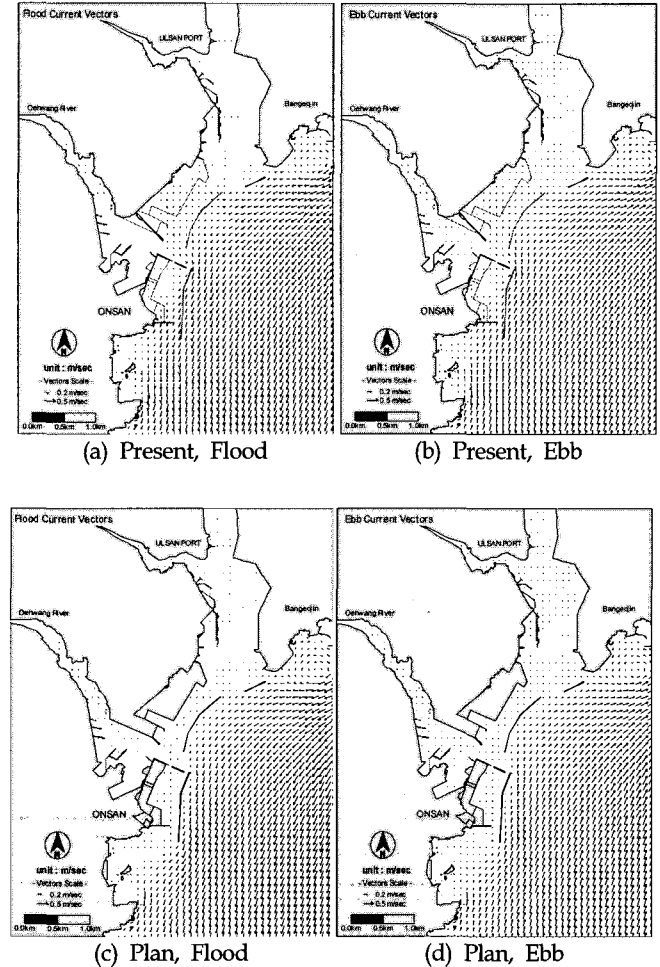


Fig. 7 The average flow pattern with 3D hydrodynamic model

해수유동 실험결과 창조시 표층의 해수유동 형태는 북동쪽에서 남측으로의 흐름은 울산항 인근해역을 지나면서 흐름이 약화되는 특성을 보이고 있다.

울산신항 남방파제 인근 해역에서의 창·낙조시 유속은 21 cm/sec ~ 35 cm/sec 정도로 나타내고 있으며, 범월갑 방파제 안 및 방파제에서의 창조시 유속은 23 cm/sec ~ 31 cm/sec의 범위를 나타내고 있다. 한편, 낙조시에는 창조시와는 반대로 남측에서 북측으로 해안선 및 등수심선을 따라 흐르는 흐름의 양상을 나타내고 있으며, 범월갑 방파제안 및 방파제에서는 25 cm/sec ~ 34 cm/sec로 나타내고 있음을 알 수 있었다.

구조물 건설 후에 대한 실험결과 유속 및 유향의 분포는 현재상태와 유사하게 나타나고 있으나, 구조물에 의한 영향으로 현재상태의 항 내측으로 흐르는 흐름의 방향이 외측으로 변경되는 것을 알 수 있다. 따라서 구조물에 의한 영향으로 흐름의 방향이 다소 외측으로 변경될 것이며, 이러한 영향은 낙조시보다 창조시에 크게 나타나고 있다.

3.4 생태계모델 실험결과

생태계 모델은 3차원 해수유동모델의 계산에서 도출된 흐름장의 결과와 Table 4에서 제시한 초기조건을 모델에 입력한 후 실험을 수행하였다.

생태계 모델의 적용 가능성을 검토하기 위해서 현지관측에서 획득한 10개 저점에 대한 DO, T-P, T-N, COD에 대한 관측결과와 계산결과의 상대오차를 이용하여, 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

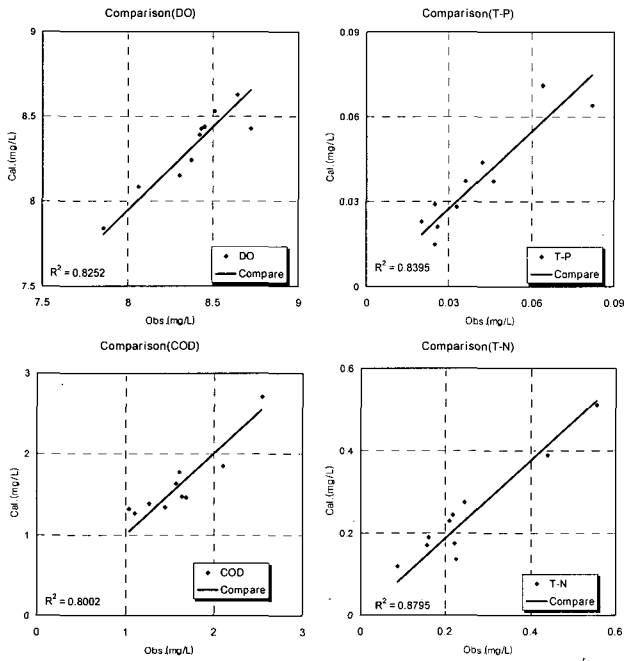


Fig. 8 Comparison between predicted and observed water quality

또한, 관측자료에 대한 실험결과가 적합한지를 판단하기 위해 각 항목별로 단순회귀분석을 실시하여 적합성을 검토하여 유사정도를 검토하였다. 분석결과 자료의 적합성을 나타내는 결정계수 R<sup>2</sup>(coefficient determination)은 DO의 경우 0.8252로 83%가 표본회귀선에 적합한 것으로 나타났으며, T-P의 경우는 84%, T-N은 88%, COD는 80%로 나타나 표본회귀선이 전체자료의 80%이상을 반영하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로 볼 때 본 실험에서 사용된 초기조건 및 경계조건이 대상해역의 수질현황 재현에 적합한 것으로 판단된다.

또한, 각 안에 대한 수질항목에 대한 검토를 수행하였으며, 해양환경 수질기준으로 제시되고 있는 COD(=COD1+COD2), TP(=IP+OP), TN(=IN+ON), DO로 나타낼 수 있으며, 실험결과에는 위의 4개의 인자를 7개로 나누어 나타내었다.

1) 공사이전

구조물 설치 이전에 대한 해양수질환경 실험을 수행한 결과 Fig. 9에서 나타나는 바와 같이 표층과 저층이 거의 같은 범위의 값을 보이고 있으며, 각각의 인자에 대한 실험결과가 다음과 같다.

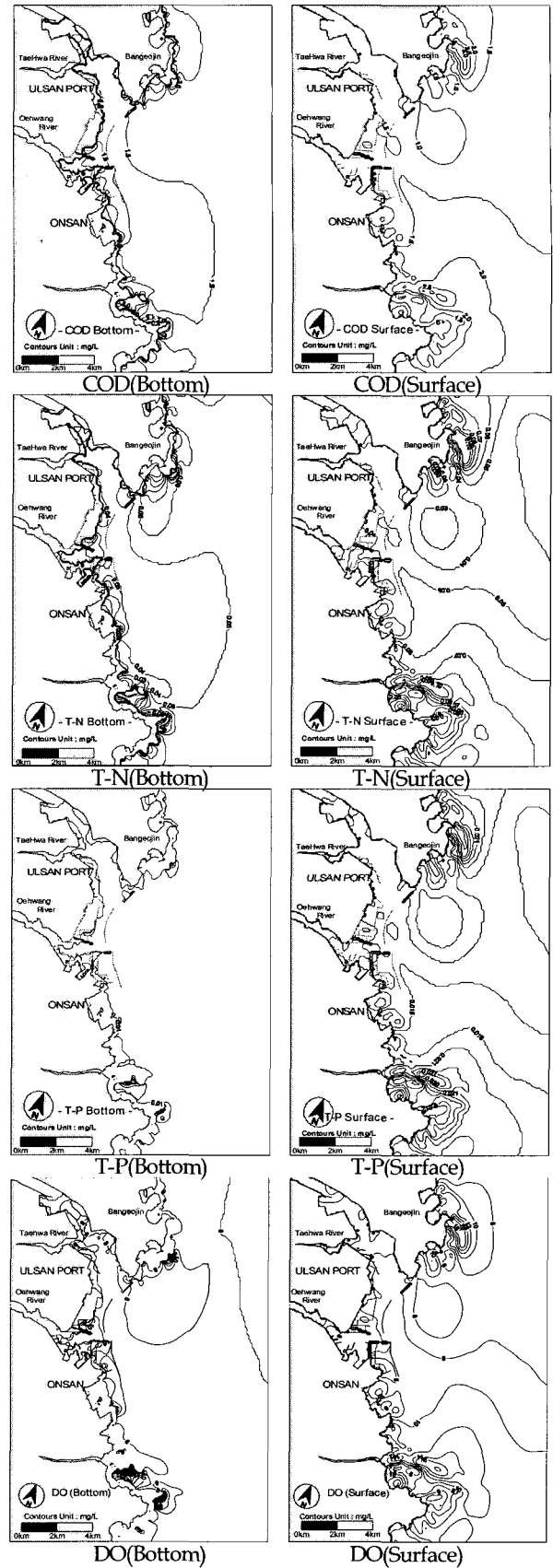


Fig. 9 The distribution of the simulated DO, COD, T-N, T-P (Before construction)

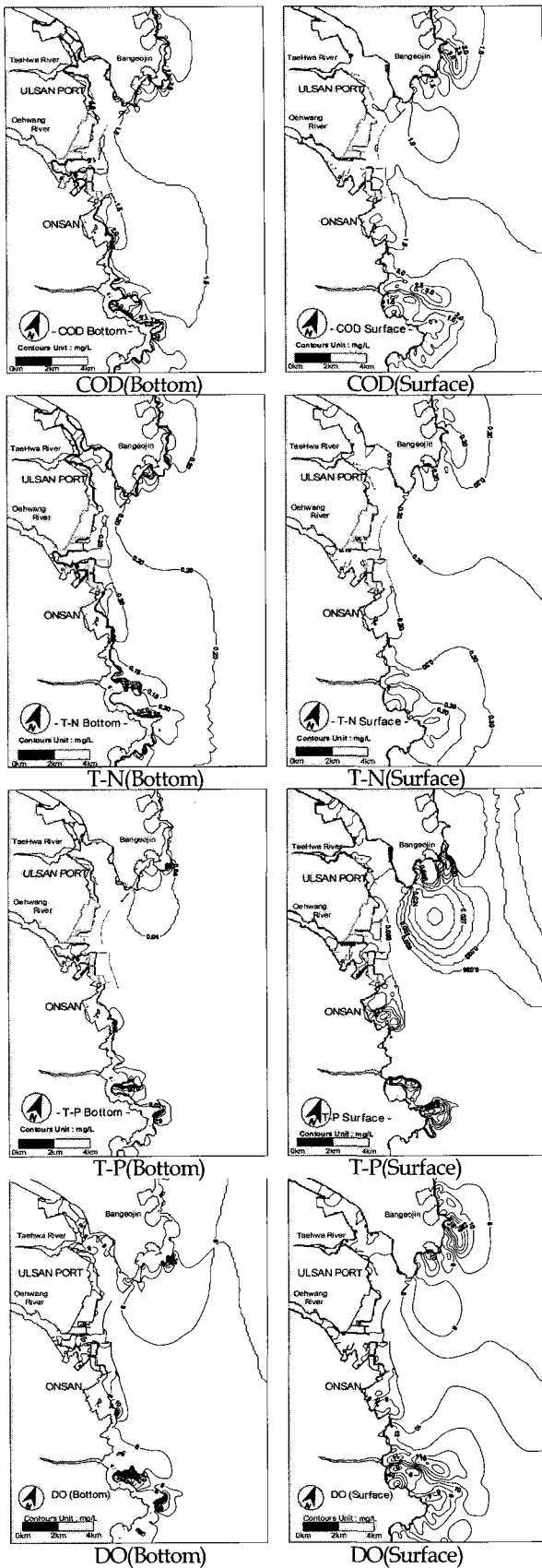


Fig. 10 The distribution of the simulated COD, T-N, T-P, DO (After construction)

질소의 경우 본 실험에서는 I-P(Inorganic-Phosphorus)와 O-P(organic-Phosphorus)를 이용하여 평가를 수행하였으며, 수질관측결과 0.5~0.7mg/L의 범위인 0.5mg/L로 나타나고 있다.

인의 경우에는 대상해역 주변의 수질관측자료와 비교한 결과, 본 실험에서 나타내고 있는 0.05mg/L의 범위와 관측결과와 일치하고 있는 것으로 나타났다.

2) 공사이후

구조물 건설 후에 나타날 수 있는 수질환경에 대한 실험결과 구조물 건설 전에 비해 다소 악화되는 경향이 나타나고 있으나, 그 영향은 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

COD는 해역에서 구조물 건설 전에 비해 전반적으로 낮아지는 결과를 나타내고 있으나, 온산항 내측에서 최대 2.7mg/L을 나타내고 있으므로, 현재상태 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다고 할 수 있다. 온산항 내측에서는 약 0.007mg/L정도 감소하는 것으로 나타났으나, 대상해역 남측해역에서의 수질이 악화될 것으로 예상된다.

DO의 경우에도 구조물 건설 후 COD변화에서 나타나는 대상해역 남측의 DO가 낮아질 것으로 판단된다. 구조물 건설 전과 비교한 결과 온산항 내측에서는 약 0.03mg/L의 DO가 감소하는 결과를 나타내고 있으며, 울산신항 내측에서도 감소하는 결과를 확인할 수 있다.

유기물의 변화를 확인 할 수 있는 질소의 경우, 구조물 건설에 따라 온산항 내측에서는 0.06mg/L의 변화가 예상되고 있으나, 온산항 항 입구에서의 수질변화에서는 0.07~0.1mg/L의 질소가 감소되는 것으로 보아 항 입구부의 수질은 향상될 것으로 나타나고 있다.

질소와 함께 유기물을 확인할 수 있는 인은 표층의 실험결과 온산항 입구에서 다소 증가하는 경향을 보이고 있으나, 저층에서의 실험결과 감소하는 결과를 나타내고 있으므로, 주변해역에 대한 수질변화 및 생태계에 미치는 영향은 작을 것으로 판단된다. 본 실험은 오염 부하량이 극대화 될 수 있는 하계의 평균적인 계산을 수행했으나, 현지관측결과에서 나타나는 바와 같이 겨울철의 수질이 개선되고 있는 부분을 고려하고, 외부로의 유입에 대해 좀 더 상세하게 검토해야할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 해수유동 모델을 이용하여 조석류를 재현하였고, 생태계 모델을 이용하여 울산해역 주변의 물질순환과정을 재현한 후 구조물 건설이 수질에 미치는 영향을 유기오염도의 지표인 화학적 산소요구량(COD), 부영양도의 지표로서 질소(N), 인(P)과 같은 영양염류, 수산생물에 직접적으로 영향을 미치는 용존산소(DO)의 변화에 대해 검토하였다.

1) 해수유동 실험결과 창조시 표층의 해수유동 형태는 북동쪽에서 남측으로의 흐름은 울산항 인근해역을 지나면서 흐름이 약화되는 특성을 보이고 있다. 구조물 건설 후에 대한 실험결과 유속 및 유향의 분포는 구조물 건설 전과 유사하게 나타

나고 있으나, 구조물에 의한 영향으로 현재상태의 항 내측으로 흐르는 흐름의 방향이 외측으로 변경되는 것을 알 수 있다. 따라서 구조물에 의한 영향으로 흐름의 방향이 다소 외측으로 변경될 것이며, 이러한 영향은 낙조시 보다 창조시에 크게 나타나고 있다.

2) 구조물 설치 전·후 대한 실험을 수행한 결과 외부유입 및 내부오탁에 의한 COD는 구조물 건설 후 전반적으로 낮아지는 결과를 나타내고 있으나, 온산항 내측에서 최대 2.7mg/L을 나타내고 있으므로, 현재상태 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다고 할 수 있다. DO의 경우, 관측결과인 6.06~9.86mg/L의 범위보다 다소 높게 산정되었으나, 구조물 건설 전과 비교한 결과 온산항 내측에서는 약 0.03mg/L의 DO가 감소하는 결과를 나타내고 있으며, 울산신항 내측에서도 감소하는 결과를 확인할 수 있다. 유기물의 변화를 확인 할 수 있는 질소는 구조물 건설에 따라 온산항 내측에서는 다소 높아지고 있으나, 온산항 항 입구에서의 수질변화에서는 0.07~0.1mg/L의 질소가 감소되는 것으로 보아 항 입구부의 수질은 향상될 것으로 나타나고 있다.

본 연구는 연안에 건설되는 각종 구조물에 의한 환경변화가 환경악화를 일으키기 시작하는 오염물질 부하량의 한계 즉, 자정능력의 한계인 환경용량을 산정하기 위한 기초실험이며, 이러한 연구를 위해서는 해수유동, 육상 오염 부하량, 해역 내에서의 물질순환 과정 등을 고려한 연구를 추후 진행하고자 한다. 또한, 해역의 부영양화도(Eutrophication Index)를 산정하여 육상으로부터의 오염물질 유입에 대한 영향을 재현하여, 오염 부하의 정량적 관리를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구의 일부는 G-7 환경기술개발사업과 지역혁신인력양성사업과 지역협력연구센터의 지원이 있었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

김광수 (1998). "생태계모형을 이용한 울산만의 수질 시뮬레이션", 한국항만학회지, 제12권, 제2호, pp 313-322.  
 김종구, 박청길, 신성교 (1995). "진해만 해역의 하계 부영양화 모델링 (I) -생태계모형을 이용한 식물플랑크톤 농도 분포

시뮬레이션", 대한환경공학회지, 제17권, 제2호, pp 121-135.  
 김현덕, 김종인, 류청로 (2001). "영일만내의 유동과 수질특성에 관한연구", 한국해양공학회지, 제15권 제4호, pp 28-37.  
 나기환, 김승근, 남정배 (1999) "울산만의 수질, 저질 환경인자의 변화", 한국물환경학회 춘계학술발표회, pp 109-112.  
 울산지방해양수산청 (2004). 울산 신항만 개발사업(울산신항 방파제 1단계(1공구) 축조공사) 사후환경영향조사보고서.  
 조은일, 강기봉 (2003). "물질순환모형을 이용한 제주항의 수질 관리(III) - 오염부하의 정량적 관리.", 한국환경과학회지, 제12권, 제3호, pp 307-317.  
 조은일, 박청길, 이석모 (1996). "생태계모형을 이용한 어장환경 용량 산정", 한국물환경학회 춘계학술발표회, pp 25-26.  
 최우정 (1993). "진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 시뮬레이션", 부산수산대학교 대학원 박사학위논문  
 Morikawa, R. and Murakami, K. (1986). "Fluctuation characteristics of long period current in Tokyo Bay-investigation by field observation data in the bay-", Technical Note of the Port and Harbor Research Institute, No 550, pp 1-50 (in Japanese).  
 Nakata, K., Horiguchi, H., Taguchi, K. and Setoguchi, Y. (1983). "Three dimensional simulation of tidal current in Oppa Bay". National Research Institute for Pollution and Resources, Vol 12, pp 17-36 (Japanese).  
 Nakata, K. and Takeaki, K. (1992). "A Model of the Formation of Oxygen Depleted Water in Tokyo Bay", Nakata Pro. Adv. Mar. Tech. Conf. Vol 5, pp 107-132.  
 Nobuyuki Yamane. (1998). "The study on the water quality model with consideration of an ecosystem model". Ph.D. Theses, Osaka university (in Japanese).  
 Shin, B.S., Kim, K.H. and Pyun, C. K. (2005). "Prediction of Water Quality in Ulsan Area Using the Ecosystem Model", Asian and Pacific Coasts (APAC), pp. 667-670.  
 Unoki, S., Okazaki, M. and Nagashim. H. (1980). "Circulation in Tokyo Bay", Tech. Rep. Phys. Oceanogr. Lab. Inst. Phys. and Chem. Res. 4, pp 263 (in Japanese).

2005년 5월 27일 원고 접수

2006년 2월 9일 최종 수정본 채택