

## 해수유동모델을 이용한 황해 환경용량의 개략 산정

김광수<sup>(1)</sup>, 김동명<sup>(2)</sup>, 박청길<sup>(2)</sup>

### A Rough Estimation of Environmental Capacity in the Yellow Sea using a Numerical Hydrodynamic Model

by

Gwang Su Kim<sup>(1)</sup>, Dong Myung Kim<sup>(2)</sup> and Chung Kil Park<sup>(2)</sup>

#### 요 약

3차원 해수유동모델을 이용하여 황해의 잔차류를 시뮬레이션한 결과, 북위 34° 25' 위도선을 통한 잔차류량은 조석주기당 약 4km<sup>3</sup>, 체류시간은 약 6년으로 산정되었고, 황해의 남동 경계선을 통한 잔차류량은 조석주기당 약 13km<sup>3</sup>, 체류시간은 약 2.5년으로 산정되었다. 황해의 용존산소량은 하계의 해수중 용존산소를 5.0mg/l 이상으로 유지하면서, 약 58×10<sup>6</sup>ton의 화학적 산소요구량(COD)을 수용할 수 있으므로, 유기오염 부하량의 한계로 표현한 황해의 환경용량은 황해로 유입하는 주요 하천들의 연간 유기오염 부하량의 약 8배에 해당한다. 하계에 있어서, 북위 34° 25' 위도선의 전체 수층을 통한 잔차류량은 하루에 약 57×10<sup>3</sup>ton의 용존산소를 수송하고, 또한 황해의 남동 경계선의 전체 수층을 통한 잔차류량은 하루에 약 203×10<sup>3</sup>ton의 용존산소를 수송하는 것으로 산정되었다. 따라서 황해가 해수중의 용존산소를 전혀 감소시키지 않고, 유입 하천의 유기오염 부하량을 수용할 수 있는 환경용량은, 북위 34° 25' 위도선을 통한 잔차류에 의한 용존산소 수송량을 기준으로 표현할 경우에는 황해로 유입하는 주요 하천들의 화학적 산소요구량(COD) 부하의 약 3배에 해당하고, 또한 황해의 남동 경계선을 통한 잔차류에 의한 용존산소 수송량을 기준으로 표현하면, 황해로 유입하는 주요 하천들의 화학적 산소요구량(COD) 부하의 약 10배에 해당한다.

#### Abstract

The results of residual currents simulation by a three-dimensional hydrodynamic model showed the water volume transport and the residence time to be about 4km<sup>3</sup> per tidal cycle and about 6 years through the line of latitude, 34° 25' N in the Yellow

(1) 정회원, 목포해양대학교 해상운송시스템학부

(2) 부경대학교 환경공학과

Sea, and to be about 13km<sup>3</sup> per tidal cycle and about 2.5 years through the southeastern boundary line of the Yellow Sea, respectively. On the bases of the entire seawater volume of the Yellow Sea and dissolved oxygen (DO) in summer, the environmental capacity of the Yellow Sea for reception of the maximum pollution load without reducing DO concentration below 5.0mg/ℓ in seawater may be estimated to be about 58×10<sup>6</sup>tons of chemical oxygen demand (COD), which is equivalent to the load about 8 times as high as the annual organic pollution load from 14 major rivers. On the bases of DO transports by residual currents calculated on the line of 34° 25' N latitude and on the southeastern boundary line of the Yellow Sea being about 57×10<sup>3</sup>tons and about 203×10<sup>3</sup>tons of DO per day, respectively, the environmental capacities of the Yellow Sea for reception of the maximum pollution loads without reducing DO concentration in seawater may be equivalent to COD loads about 3 times and 10 times, respectively, as high as the existing organic pollution loads from 14 major rivers.

Keywords: 잔차류(residual currents), 체류시간(residence time), 용존산소(dissolved oxygen), 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand), 유기오염부하(organic pollution load), 환경용량(environmental capacity)

## 1. 緒 論

黃海는 한반도와 중국 대륙에 의해 둘러싸인 반폐쇄성 해역으로서 중국의 黃河와 長江(揚子江)을 비롯하여 한반도의 압록강, 한강 등 수많은 하천으로부터 연간 약 1,200km<sup>3</sup>의 하천수가 유입하고 있다(UNEP[1992], 柳[1994]).

중국과 한반도에는 황해·발해 연안을 따라서 도시가 발달하고, 각종 산업활동 및 개발사업이 활발해지면서 인구의 집중이 심화되고 있다. 최근에는 수질오염, 어류의 남획, 무모한 연안매립 및 해안개발 등 인간에 의한 자연조건의 변화 때문에 황해의 환경이 악화되고 있어서 황해의 연안역 일부에서는 하계에 貧酸素水塊가 형성되는 해역이 나타나고(顧[1991]), 황해의 생태계에서 생물종이 감소함에 따라 생물자원에 대한 지속적 이용이 우려된다(She[1993]).

중국에서 황해로 유입하는 유기오염부하가 한국에서 유입하는 오염부하의 15배가 넘는 것으로

추정된다(Lee and Valencia[1992], 환경처[1993]).

그리고 황해는 오염물질의 체류시간이 길고 자정 능력이 비교적 작은 반면에, 다른 해역에 비하여 유기오염부하가 크고(이[1993]), 부영양화와 저층수의 무산소화는 장기적인 문제로 대두될 가능성이 높으므로 저층수의 용존산소와 유기물 오염에 대한 감시의 필요성이 제기되었다(이[1993]). 또한 근래에 황해의 생태학적 수용력(ecological carrying capacity)에 대한 중요성이 지적되었다(박과 최[1993]). 그래서 황해의 우수한 자연조건과 풍부한 자원을 지속적으로 이용하기 위해서는 자정능력에 근거한 합리적인 해양환경관리의 필요성이 제기되고 있다(김 등[1996]).

오염물질의 수용에 관한 환경용량(environmental capacity)은 환경이 그의 생태계에 부정적인 영향을 받지 않고 수용할 수 있는 최대의 오염부하량이며, 환경의 확산 및 자정능력에서 유래하므로 수식화를 통하여 산정 가능하다. 그리고 해양오염과 관련하여 반폐쇄적인 내만의 환경용량은 만과 외양 사이의 해수교환량으로 표현될 수 있다(西村[1977]). 또한 환경용량은 수질 예측을 통하여 산

정이 가능하며 수질 예측에 있어서 수치모델은 유용한 수단이 되고 있다(中川 등[1985]).

용존산소는 생물 생식을 위한 주요 수질인자로서 해양에서의 그 분포는 해양의 생화학적 구조의 특성을 나타내고 수괴의 이동이나 혼합 과정을 설명하는데 필요하다. 또한 저층수의 빈산소화는 해역의 부영양화 또는 과영양화와 밀접한 관계가 있다(日本水産資源保護協會[1990a]). 그래서 각종의 인위적 오염부하가 해양의 용존산소에 미치는 영향을 정량적으로 평가하면 해역의 환경용량을 산정할 수 있다. 그리고 저층 빈산소수괴의 거동을 예측하기 위하여는 3차원 유동모델을 이용하여 저층수의 흐름을 자세히 표현할 필요가 있다(日本水産資源保護協會[1990b]).

연안해역에서 잔차류의 주성분은 조석잔차류, 밀도류 및 취송류이다. 단기간의 물질 분산 예측에는 조류와 잔차류를 선형결합한 유동장에서 확산을 계산하지만, 장기간의 물질 분산 예측에는 잔차류만을 이용하여 확산을 계산한다(柳[1993]).

Nozaki *et al.*[1991]과 柳[1994]는 각각  $^{228}\text{Ra}$ 와 염분을 이용하여 황해 및 동지나해의 체류시간을 산정한 바가 있고, 황해에 대한 수질관리의 필요성이 제기됨에 따라 김 등[1996]은 황해의 수질을 조사하고 3차원 생태계모델을 이용하여, 황해의 환경용량을 산정한 바가 있으나, 황해를 대상으로 잔차류에 의한 환경용량이나 해수체류시간을 산정한 연구는 찾아보기 어렵다.

따라서 본 연구는 3차원 해수유동모델에 의하여 계산된 잔차류량을 이용하여 황해의 환경용량을 산정하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 황해에서 잔차류에 의한 해수체류시간을 산정함과 동시에, 잔차류에 의한 하계의 용존산소 수송량이 하천(강)들을 통하여 황해로 유입하는 유기오염부하를, 황해의 수질을 악화시키지 않으면서, 어느 정도까지 수용할 수 있는지를 화학적 산소요구량(COD) 기준으로 정량화함으로써 황해가 가지는 환경의 수용력을 산정하였다. 이러한 결과는 황해의 환경을 평가하는 기준으로 뿐만 아니라 황해의 수질 관리를 위한 정책 자료로 활용될 것이다.

## 2. 材料 및 方法

### 2.1 해수유동모델

본 연구에 이용된 해수유동모델(COSMOS)은 내만에서 밀도류계의 3차원 해석을 위한 유체역학 모델이며, 생태계모델을 위한 유동장의 모델로서도 이용될 수 있는 Multi-level model이다(中川 등[1985]). 그리고 다양한 기능이 설정되어 있어서 광범위한 응용이 가능한 이 유동모델은 7개의 기본방정식을 유한차분근사에 의하여 수치 계산하며, 차분 Scheme은 Up-stream을 이용한 Explicit scheme을 채택하고 있다.

잔차류는 하나의 조석주기에 대하여 유속를 적분 평균한 Time-averaged current를 의미한다.

### 2.2 해수유동 시뮬레이션

#### 2.2.1 모델 영역

발해와 황해를 포함하는 모델 영역을 Fig. 1과 같이 외해 경계를 남쪽의 양자강 하구 남부까지, 외해쪽의 제주도 동쪽까지 설정하고, 해안선 굴곡을 충분히 고려하여 동서 및 남북 방향으로 동일한 매  $1/12^\circ$  (9.26km)의 정방 격자가 54168개( $122 \times 148 \times 3$ )로 이루어진 격자망으로 구성하여, Choi [1989]가 동중국해에 적용한 3차원 모델의 격자 크기와 비슷하게 하였다. 또한 모델 영역의 수심별 수층은 3개의 층으로 나누었다. 즉 표층·중층·저층의 유동특성, 유광층 및 수온약층의 깊이를 고려하여 표층(Level 1: 해면~수심 20m), 중층(Level 2: 수심 20m~60m), 저층(Level 3: 수심 60m~해저)으로 구분하였다(Yanagi and Takahashi [1993]).

#### 2.2.2 입력 자료

해수유동모델의 입력 자료를 Table 1에 제시하였다(김 등[1996]).

황해와 동중국해에서 연중 가장 안정한 유동이

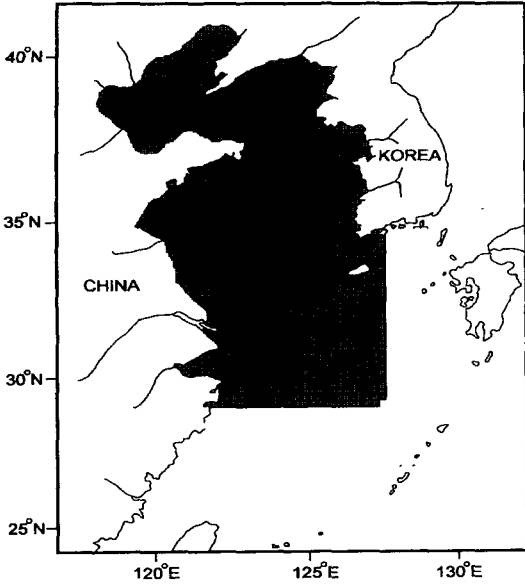


Fig. 1 Finite-difference grid of the three-dimensional model in the Yellow Sea

조류이고 가장 탁월한 조석이 M<sub>2</sub>분조이므로(柳 [1994]) 모델 영역내에서 해수 유동을 재현하기 위하여 M<sub>2</sub>분조의 조위와 위상에 대한 외해 경계치는 Choi[1980]의 자료를 이용하였으며, 지형 및 수심은 해도 No. 836(대한민국 수로국[1989]), No. 361(일본해상보안청[1990]) 및 No. 94027(미국 DMA[1990])의 자료를 이용하였다. 또한 육상의 하천을 통하여 모델 해역으로 유입하는 담수 유량은 규모가 비교적 큰 14개의 하천에 대해서 문헌의 값(柳[1994], 김 등[1996])을 이용하였으며 하계의 유량을 우선적으로 적용하였으나 하계의 유량이 불명인 하천은 연평균 유량을 이용하였다. 그리고 발해, 황해 및 동중국해에서 하계의 탁월풍을 조사하여 평균 풍향과 풍력을 모델 해역의 전역에 일정하게 적용하였다.

### 2.2.3 시뮬레이션 방법

조석류에 의한 조석잔차류, 담수의 유입에 의한 밀도류, 바람에 의한 취송류가 합성되어 나타나는 잔차류를 재현하였다. 중국과 한반도에 위치한 14

Table 1 Input data for a three-dimensional hydrodynamic model

Parameter	Input vlaue
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 9.26\text{km}$
Water depth	Chart datum+MSL
Time interval	150 sec
Level	1 : 0m~20m 2 : 20m~60m 3 : 60m~bottom
Water temp. & Salinity at open boundary	1 : 26°C, 31.98‰ 2 : 16°C, 32.48‰ 3 : 8°C, 32.66‰
Coriolis coefficient	$f = 2\omega \sin \Phi$ , $\beta = \partial f / \partial y$
Surface friction coef.	0.0013
Interlayer friction coef.	0.0013
Bottom friction coef.	0.0025
Horizontal viscosity coef.	1.0E7 (cm <sup>2</sup> /s)
Horizontal diffusion coef.	1.0E7 (cm <sup>2</sup> /s)
Wind direction & force	Southerly, 3.5m/s
Calculation time	30 tidal cycle
Flowrate of freshwater	
Korea	
Yongsan R.	1.333E7 (m <sup>3</sup> /day)
Keum R.	3.417E7 (m <sup>3</sup> /day)
Han R.	1.097E8 (m <sup>3</sup> /day)
Daedong R.	4.082E7 (m <sup>3</sup> /day)
Aprock(Yalu) R.	9.589E7 (m <sup>3</sup> /day)
China	
Liaohe	1.644E7 (m <sup>3</sup> /day)
Daling R.	2.740E6 (m <sup>3</sup> /day)
Luan R.	1.096E7 (m <sup>3</sup> /day)
Huanghe(Yellow R.)	1.149E8 (m <sup>3</sup> /day)
Guanhe	6.300E7 (m <sup>3</sup> /day)
Old Yellow R.	6.300E7 (m <sup>3</sup> /day)
Doulong R.	6.300E7 (m <sup>3</sup> /day)
Changjiang R.	4.088E9 (m <sup>3</sup> /day)
Qiantangjiang	9.863E7 (m <sup>3</sup> /day)

개의 주요 하천을 통한 담수의 유입과 하계의 우수품인 평균 풍속 3.5m/s의 남풍(대한민국 수로국 [1989])를 연속적으로 취송시켜 유동이 정상상태에 도달한 최종 주기의 조석을 조석주기로 평균한 항

류를 잔차류로 하였다. 또한 발표된 자료(Yanagi and Takahashi[1993])를 이용하여 잔차류에 의한 해수의 순환형태를 비교·검토하였다.

### 2.3 환경용량 산정

황해의 동쪽에 위치한 한반도의 남서단과 서쪽에 위치한 중국대륙을 연결하는 북위 34° 25' 위도선을 통하여 황해의 외해와 내해로 유출입하는 잔차류량을 계산하여 황해 내해에서의 체류시간, 즉 평균통과시간을 산정하였다. 또한 황해의 남동 경계선을 통하여 황해의 외해와 내해로 유출입하는 잔차류량을 계산하고 황해에서 해수의 체류시간을 산정하였다.

그리고 황해의 해수중에 용해된 총산소량이 하계에 해수중의 용존산소농도를 한국의 해역 환경기준 3급수에 해당하는 5.0mg/ℓ 이상으로 유지하면서 유입 하천의 유기오염 부하량을 어느 정도까지 수용할 수 있는지를 산정하고, 또한 계산된 잔차류에 의하여 황해로 수송되는 용존산소량이 해수중의 용존산소를 전혀 감소시키지 않으면서 수용할 수 있는 화학적 산소요구량(COD)의 한계를 계산함으로써 황해의 환경용량을 산정하였다. 그러나 대기로부터의 재폭기, 해류, 해양생태계 내에서의 생물·화학적 반응 등은 김 등[1996]의 연구에서 취급되었기 때문에 본 연구에서는 이들을 고려하지 않고, 단지 하계 평균 수온 및 염분 조건하의 용존산소와 잔차류량을 고려하였다.

한편, 황해를 포함하는 모델 해역으로 유입되는 하천의 오염부하량을 각 종 문헌을 조사하여 화학적 산소요구량을 기준으로 Table 2에 나타내었다(김 등[1996]).

## 3. 結果 및 考察

### 3.1 황해의 잔차류

Fig. 2에 제시한 잔차류의 분포를 살펴 보면, 황해의 표층과 중층에서 반시계방향의 순환류가 존재하여 Yanagi and Takahashi[1993]의 시물레이션

Table 2 The pollution loads as COD of rivers flowing into the Yellow Sea

Name of River	COD(ton/day)
KOREA	
Aprock(Yalu) R.	660
Daedong R.	350
Han R.	650
Keum R.	240
Yeongsan R.	55
CHINA	
Liaohe	170
Daling R.	30
Luan R.	110
Huanghe	1,180
Guanhe	350
Old Huanghe	350
Doulong R.	350
Changjiang R.	15,590 ( 75.8%)
Qiantangjiang	470
Total	20,555 (100.0%)

결과와 일치하였으며, 저층에서도 시계 방향의 순환 흐름이 미약하지만 시계 방향의 순환류가 존재하는 Yanagi and Takahashi[1993]의 결과와 큰 차이가 없었다. Choi[1980]의 2차원 수치시물레이션 결과와 비교하면 전반적 흐름 형태는 유사하였으나, 유속 자료가 제시되지 않아서 정량적 비교는 불가능하였다. Yanagi and Takahashi[1993]도 또한 3차원 수치시물레이션을 통하여 황해의 유동을 제한하고, 최[1993]의 관측 결과와 비교하여 유동 형태를 증명하였으나 정량적으로 검증하지는 못하였다.

잔차류는 황해 전역에 걸쳐서 대체로 10cm/s 이하의 유속을 나타내었으며, 황해의 중앙부에서는 전반적으로 작은 유속을 보인 반면, 양자강 부근 해역에서 유속이 비교적 크게 나타났다. 한편 한반도 서해안의 태안반도 및 금강 하구로부터 서쪽으로 약 50km의 외해역의 표층과 중층에서 각각 4~6cm/s, 1~2cm/s의 잔차류 유속을 보였고, 양자강 하구와 제주도를 연결하는 선상의 중앙에서 제주도쪽의 해역에서는 표층과 중층에서 각각 3~6cm/s, 1~2cm/s의 잔차류 유속을 보였다. 이

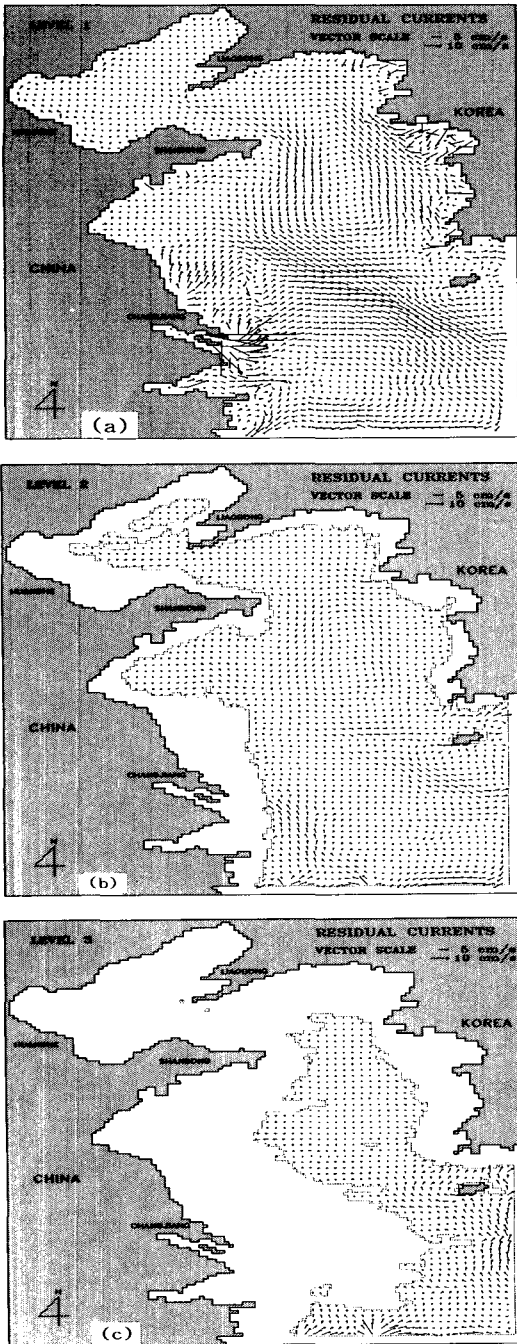


Fig. 2 The computed residual currents of the Yellow Sea from the three-dimensional model : (a) surface, (b) middle and (c) bottom level

러한 유속 분포는 Yanagi and Takahashi[1993]의 시뮬레이션 결과와 대체로 일치하는 것으로 판단된다.

### 3.2 황해의 환경용량

#### 3.2.1 북위 34° 25′ 위도선을 기준으로 산정한 잔차류량과 체류시간

잔차류 시뮬레이션의 결과, 황해의 한반도 남서단과 중국 동부를 연결하는 북위 34° 25′ 위도선을

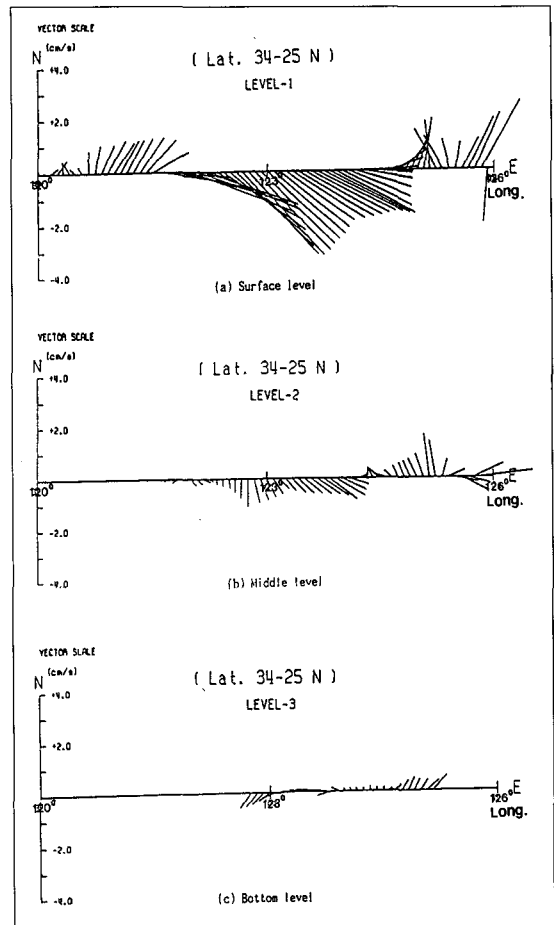


Fig. 3 The distributions of residual currents along 34° 25′ N latitude line in the Yellow Sea : (a) surface, (b) middle and (c) bottom level

Table 3 Water volume transport by residual currents, water volume and residence time in the Bohai Sea and the Yellow Sea calculated on the line of latitude 34° 25' N

Level	Water volume transport by residual currents		Water Residence volume time (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> ) (year)
	Inflow (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /tide)	Outflow (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /tide)	
1	3091.8	2241.6	7381
2	299.2	1225.5	7416
3	271.9	195.8	1315
Total	3662.9	3662.9	16112 6.2

통하여 황해의 외해와 내해로 유출입하는 잔차류의 각 수층별 유속 분포를 Fig. 3에 제시하였다.

황해의 중앙부에서는 표·중·저층의 모든 수층에서 외해로 유출하는 유향을 보였고, 저층으로 갈수록 유속은 감소하였다. 그리고 한반도와 중국의 양쪽 연안에서는 표층에서 내해로 유입하는 유향을 나타내었으나, 중국의 연안쪽에서는 수심이 얕아서 중층과 저층에서 흐름은 나타나지 않았다. 북위 34° 25' 위도선을 통하여 황해의 외해와 내해로 유출입하는 해수의 각 수층별 및 전체 수층을 통한 잔차류량과 체류시간을 Table 3에 제시하였다. Table 3과 Fig. 4와 같이 북위 34° 25' 위도선에서의 전체 수층을 통한 잔차류량은 1 조석주기당  $3.66 \times 10^9 \text{ m}^3 (= 7.07 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{day})$ 로 계산되었으며, 이 해역으로 유입하는 하천 유량  $0.53 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 약 13배에 해당한다. 한편 M<sub>2</sub> 조석잔차류에 의하여 계산된, 豊後水道와 太平洋 간의 恒流量 및 紀伊水道와 태평양 간의 恒流量은 각각 1 조석주기당  $3.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ 와  $3.69 \times 10^8 \text{ m}^3$ 로 보고되었는데(新日本氣象海洋[1986]), 황해의 잔차류량은 이 항류량의 10배 정도에 불과하므로 해역의 크기에 비하여 황해의 해수 교환은 매우 느리다. 또한 Kang *et al.*[1991]은 대한해협에서 M<sub>2</sub>분조류에 의한 해수 수송량(volume transport)을  $7.633 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유입량(inflow)과  $7.608 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유출량(outflow)으로 산정하였는데, 유입량과 유출량의 차를 잔차류량으로 보면 대한해협의 잔차류량은

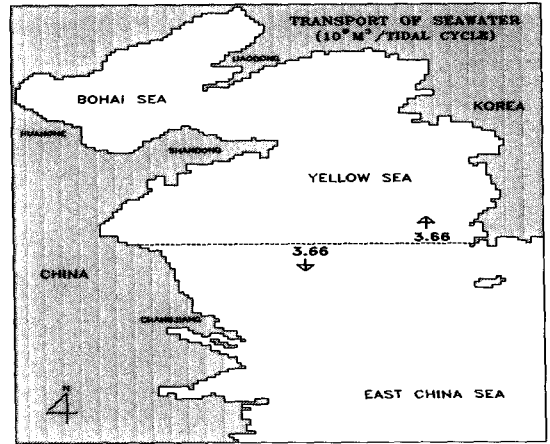


Fig. 4 Water volume transport (10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>/tidal cycle) by residual currents calculated on 34° 25' N latitude line in the Yellow Sea

$0.25 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{s}$ , 즉 1조석주기당  $10,800 \times 10^9 \text{ m}^3$ 로서 황해의 약 2950배에 해당하므로 황해의 잔차류량은 매우 저조하다. 물론 황해에서 M<sub>2</sub>분조의 진폭이 조석 진폭의 50%이상을 차지하는 점을 고려하면 잔차류량은 실제로 약 2배까지 증가할 수도 있다.

그리고 북위 34° 25' 위도선에서의 잔차류량과 황해의 체적을 이용하여 산정한 황해의 체류시간은 6.2년으로 나타났으며, Nozaki *et al.*[1991]이 <sup>228</sup>Ra을 이용하여 산정한 황해의 체류시간 5~6년과 거의 일치하였다.

### 3.2.2 황해의 남동 경계선을 기준으로 산정한 잔차류량과 체류시간

한반도 남서단과 제주도 서단 그리고 중국의 양자강 하구 남부를 연결하는 황해의 남동 경계선을 통하여 황해의 내해와 외해(동중국해)로 유입 및 유출하는 잔차류량을 Table 4 및 Fig. 5에 제시하였으며, 또한 발해를 포함한 황해에서의 해수 체류시간을 황해의 남동 경계선을 기준으로 산정하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Water volume transport by residual currents, water volume and residence time in the Bohai Sea and the Yellow Sea calculated on the south-eastern boundary of the Yellow Sea

Level	Water volume transport by residual currents		Water volume (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	Residence time (year)
	Inflow (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /tide)	Outflow (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /tide)		
1	3,146.9	9,921.2	10,108	
2	4,777.2	4,631.7	10,546	
3	5,161.6	542.7	2,315	
Total	13,085.7	15,095.6	22,969	2.5

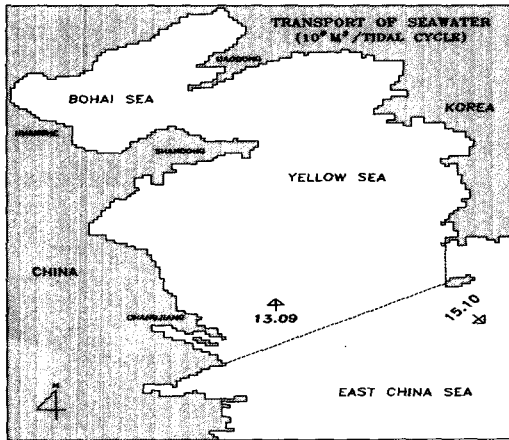


Fig. 5 Water volume transport (10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/tidal cycle) by residual currents calculated on the southeastern boundary of the Yellow Sea

황해 남동 경계선의 전체 수층을 통하여 황해의 내해와 외해로 유입 및 유출하는 1 조석주기당 잔차류량은 각각  $13.09 \times 10^9 \text{ m}^3$  ( $=25.30 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{day}$ )와  $15.10 \times 10^9 \text{ m}^3$  ( $=29.18 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{day}$ )로 계산되었으며, 이 잔차류량 중에서 유출량은 유입량보다  $3.88 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{day}$ 만큼 크게 나타났다. 이 차이는 모든 하천을 통하여 황해로 유입하는 하천의 총유량에 해당하며, 특히 양자강의 유량에 기인한다. 그리고

황해 남동 경계선을 통하여 황해의 내해로 유입하는  $25.30 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 잔차류량은  $3.88 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 하천수 총유입량의 약 6.5배에 해당하며, 또한 북위  $34^\circ 25'$  위도선을 통하여 황해의 외해와 내해로 유출입하는 잔차류량,  $7.07 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 약 3.6배에 해당한다,

한편 황해의 남동 경계선을 통한 잔차류량과 발해를 포함한 황해의 체적을 이용하여 산정한 체류시간은 약 2.5년으로 나타났으며 柳[1994]가 염분을 이용하여 황해에서의 담수 평균체류시간(평균 통과시간)을 추정 한 결과인 2~3년과 일치하였다.

따라서 황해의 남동 경계선과 북위  $34^\circ 25'$  위도선에서 각각 산정한 잔차류량을 비교해 보면, 잔차류량 산정 기준선이 황해의 남쪽에서 북쪽으로 진행할수록 폐쇄성이 점차 강해져서 잔차류량이 줄어 들고 체류시간은 증가함을 알 수 있다.

### 3.2.3 용존산소를 기준으로 산정한 황해의 환경용량

Fig. 6과 같이 해역을 구분한 모델 해역에서 계산에 의한 황해의 표면적과 체적은 각각  $4.89 \times 10^{11} \text{ m}^2$ 와  $21.22 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 로서  $4.04 \times 10^{11} \text{ m}^2$ 의 실제 표면적과  $17.62 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 의 실제 체적(李[1992], UNEP[1992])보다 크게 나타났으며, 실제의 크기에 대한 상대오차가 각각 21%와 20%였다. 이것은 연구의

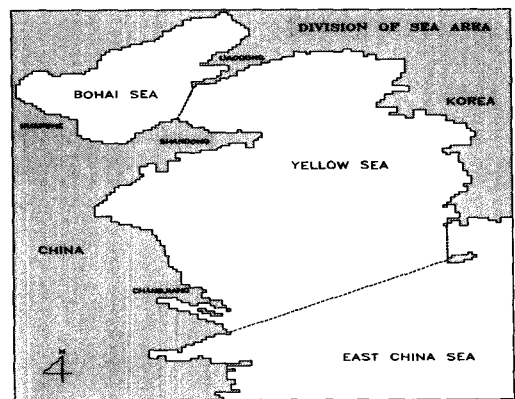


Fig. 6 The division of model area into the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea



Table 5 Surface area, water volume, dissolved oxygen quantity and dissolved oxygen capacity of the Yellow Sea in model region

Level	1	2	3	Mean	Total
Surface area (10 <sup>9</sup> m <sup>2</sup> )	489	360	151		
Water volume (10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	8.58	10.32	2.32		21.22
Salinity (‰)	31.98	32.48	32.66	32.37	
Temp. (°C)	26.0	16.0	8.0	16.7	
DO conc. (mg/l)	6.77	8.10	9.58	8.03	
DO quantity (10 <sup>6</sup> ton)	58.14	83.63	22.18		163.95
DO capacity (10 <sup>6</sup> ton)	15.23	32.03	10.60		57.86

대상 해역을 평면 격자를 이용하여 모델 해역을 구성함으로써 구면이 평면으로 전환되는 데에 오차가 발생하였고, 해도의 수심을 이용하는 과정에서 오차가 개입된 것으로 보인다. 또한 양자강 하구도 황해의 표면적과 체적의 산정에 포함되었기 때문이다.

Table 5에서와 같이 황해의 하계 평균 수온 16.7°C, 평균 염분 32.37‰에서 100% 용존산소 포화농도는 8.03mgO<sub>2</sub>/l 이므로, 황해에 있어서 전체 수층의 해수중에 용해된 총산소량(total DO quantity)은 163.95×10<sup>6</sup>ton으로 산정되었다. 또한 표층, 중층, 저층의 수온이 각각 26°C, 16°C, 8°C일 때의 용존산소 포화농도와 한국의 해역 환경 기준 3급수의 용존산소 농도 5.0mg/l 와의 차이를 계산한 후, 각 수층의 체적을 이용하여 각 수층별 이용 가능한 용존산소를 산정한 결과, 하계의 황해 전체에 있어서 해수층의 용존산소를 5.0mg/l 이상으로 유지하면서 수용 가능한 유기오염 부하량의 한계는, 산소요구량으로 나타내면, 약 58×10<sup>6</sup> ton의

산소량(DO capacity)에 해당한다. 따라서 하계의 용존산소를 기준으로 산정한 황해의 환경용량은 약 58×10<sup>6</sup> ton의 화학적 산소요구량(COD)이 되며, 이것은 황해로 유입하는 양자강을 비롯한 주요 하천들의 연간 유기오염 부하량의 약 8배에 해당한다.

### 3.2.4 잔차류에 의한 용존산소 수송량을 기준으로 산정한 황해의 환경용량

북위 34° 25′ 위도선의 전체 수층을 통한 1 조석주기당 잔차류량, 3.66×10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>는 하루에 약 57×10<sup>3</sup>ton의 용존산소를 수송할 수 있으며, 이 용존산소 수송량은 하천을 통하여 모델 해역으로 유입하는 COD 부하량, 약 2만ton/day의 약 3배에 해당한다. 또한 황해의 남동 경계선의 전체 수층을 통한 1 조석주기당 잔차류량, 13.09×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>(= 25.3×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/day)는 하루에 약 203×10<sup>3</sup>ton의 용존산소를 수송할 수 있으며, 이 값은 하천을 통하여 모델 해역으로 유입하는 COD 부하량 약 2만 ton/day의 약 10배에 해당한다.

그래서, 황해가 해수층의 용존산소를 전혀 감소시키지 않고, 유입 하천의 유기오염부하량을 수용할 수 있는 환경용량은, 북위 34° 25′ 위도선과 황해의 남동 경계선의 전체 수층을 통한 각각의 잔차류량을 기준으로, 황해로 유입하는 양자강을 비롯한 주요 하천들의 유기오염 부하량의 각각 약 3배와 10배에 해당한다.

### 3.2.5 황해의 환경용량 산정 오차 분석

황해의 환경용량을 산정하는 과정에서 오차를 크게 유발하는 요소는 여러 분조 중에서 M<sub>2</sub>분조만을 고려하였다는 점과 계산된 황해의 체적이 실제의 체적보다 크게 나타났다는 점이다.

M<sub>2</sub>분조는 황해의 조석을 일으키는 기조력의 50%이상을 차지하기 때문에, 실제 잔차류량은 계산 잔차류량의 약 2배까지 증가할 수도 있고, 또한 황해의 계산 체적이 실제 체적에 비하여 20% 크게 나타났기 때문에 실제의 잔차류량은 20% 감소할 수도 있다. 따라서 실제 잔차류량은 계산 잔

차류량의 약 1.6배에 해당할 가능성이 있다. 그래서 황해의 환경용량은 계산된 환경용량의 약 1.6 배까지 될 수도 있을 것으로 판단된다. 그리고 황해의 계산 잔차류에 대한 정량적 검증을 보강하는 것은 앞으로 계속해야 할 연구 과제이다.

#### 4. 結 論

3차원 해수유동모델을 이용하여 잔차류를 재현하고 잔차류량을 계산하여 황해에서의 해수체류시간을 산정함과 동시에, 황해가 하천(강)들을 통하여 유입하는 유기오염부하를, 수질이 악화되지 않으면서, 어느 정도까지 수용할 수 있는지를 화학적 산소요구량(COD) 기준으로 정량화함으로써 황해의 환경용량을 산정한 결과는 다음과 같다.

1. 잔차류는 황해 중앙부의 표층과 중층에서 반시계방향의 환류를 형성하였으나, 저층에서는 뚜렷한 환류가 나타나지 않았다. 그리고, 한반도의 남서단과 중국대륙을 연결하는 북위 34° 25' 위도선을 통한 잔차류량은 조석주기당 약 4km<sup>3</sup>, 체류시간은 약 6년으로 산정되었으며, 또한 한반도의 남서단과 제주도 서단 그리고 양자강 하구 남부를 연결하는 황해의 남동 경계선을 통한 잔차류량은 조석주기당 약 13km<sup>3</sup>, 체류시간은 약 2.5년으로 산정되었다.

2. 황해의 용존산소량은 하계의 해수중에서 용존산소를 5.0mg/l 이상으로 유지하면서 약 58×10<sup>6</sup> ton의 화학적 산소요구량(COD)을 수용할 수 있는 용량이며, 유기오염 부하량의 한계로 표현한 황해의 환경용량은 연간 황해로 유입하는 주요 하천들의 유기오염 부하량의 약 8배에 해당한다.

3. 하계에 있어서, 북위 34° 25' 위도선의 전체 수층을 통한 잔차류량은 하루에 약 57×10<sup>3</sup>ton의 용존산소를 수송하고, 또한 황해의 남동 경계선의 전체 수층을 통한 잔차류량은 하루에 약 203×10<sup>3</sup>ton의 용존산소를 수송하는 것으로 산정되었다. 따라서 황해가 해수중의 용존산소를 전혀 감소시키지 않고, 유입 하천의 유기오염 부하량을 수용할 수 있는 환경용량은, 북위 34° 25' 위도선을

통한 잔차류에 의한 용존산소 수송량을 기준으로 표현할 경우에는 황해로 유입하는 주요 하천들의 화학적 산소요구량(COD) 부하의 약 3배에 해당하고, 또한 황해의 남동 경계선을 통한 잔차류에 의한 용존산소 수송량을 기준으로 표현하면, 황해로 유입하는 주요 하천들의 화학적 산소요구량(COD) 부하의 약 10배에 해당한다.

#### 參 考 文 獻

- [1] 김광수·박정길·조은일, 1996, "생태계 모델을 이용한 황해의 환경용량 산정", 한국수질보전학회지, 12(4), 383-399.
- [2] 박용철·최중기, 1993, "폐기물 해양배출에 대한 해양환경적 고찰", 한국해양학회지, 28(2), 143-156.
- [3] 이광우, 1993, "황해의 환경보전을 위한 국제협력연구의 현황과 전망", 한국해양학회지, 28(4), 332-338.
- [4] 이동수, 1993, "우리나라 주변해역의 오염현황과 오염원", 한국해양학회지, 28(2), 132-136.
- [5] 이석우, 1992, "韓國近海海象誌", 集文堂, 서울, 7p
- [6] 최병호, 1993, "황해 및 동중국해륙봉에서의 해류관측", 한국해양·해양공학학회지, 5(4), 414-426.
- [7] 환경처, 1993, "한·중 환경협력 추진방안 수립 연구(최종보고서)", 대외경제정책연구원, 312p.
- [8] Choi, B. H., 1980, "A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea", KORDI, Rep., 80-82.
- [9] Choi, B. H., 1984a, "A three-dimensional model of the East China Sea", Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas, Elsevier Oceanography Series, 39, 209-224.
- [10] Choi, B. H., 1984b, "Observed and Computed Tidal Currents in the East China Sea" J. Oceanol. Soc. Kor., 20(1), 56-73.
- [11] Choi, B. H., 1990, "A finite-grid three-dimensional M<sub>2</sub> tidal model of the East China Sea", Modeling marine systems, Vol. 1,

- 167-185.
- [12] Guo, B., 1993, "Major features of the physical Oceanography in the Yellow Sea", *J. of Oceanogr. of Huanghai & Bohai Seas*, Vol. 11, 7-17.
- [13] Kang, S. K., Lee, S. R. and Yum, K. D., 1989, "Tidal computation of the East China Sea, the Yellow Sea and the East Sea", *Oceanography of Asian Marfinal Sea, Elsevier Oceanography Series*, Vol. 54, 25 - 48.
- [14] Lee, D. S. and Valencia, M. J., 1992, "Pollution", In: *Atlas for Ocean Policies in East Asian Seas*. East-West Center,
- [15] Nozaki, Y., Tsubota, H., Kasemsupaya, V., Yashima, M. and Ikuta, N., 1991, "Residence time of surface water and particle-reactive  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the East China and Yellow Seas", *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 55, 1265-1272.
- [16] She J., 1993, "Monitoring and Research/Environment and Their Ecological Effects in YSLME", 1p
- [17] UNEP, 1992, "Working plan of North-west Pacific region", China national report, 26-30, UNEP(OCA)/NCWP.WG.2.
- [18] Yanagi T. and Takahashi, S., 1993, "Seasonal variation of circulations in the East China Sea and the Yellow Sea", *J. Oceanogr. Japan*, Vol. 49, 503-520.
- [19] 柳哲雄, 1993, "海況モデル", 沿岸海洋研究ノート. 30(2), 187-195.
- [20] 柳哲雄, 1994, "黄海·東シナ海の物質輸送", 沿岸海洋研究ノート. 31(2), 239-256.
- [21] 西村 肇, 1977, "環境容量の概念について", 海洋科学, 42-45.
- [22] 新日本気象海洋, 1986, "瀬戸内海營養鹽類總合管理モデル作成調査", 昭和60年度 環境廳委託業結果報告書.
- [23] 日本水産資源保護協會, 1990a, "IV. 貧酸素水塊形成についてモデリング", 漁場環境容量策定事業.
- [24] 日本水産資源保護協會, 1990b, "V. 漁場環境容量策定手法の検討". 漁場環境容量等検討事業, 675-831.
- [25] 中田喜三郎・石川公敏・松川康夫, 1985, "内灣の流動場の數値實驗", 沿岸海洋研究ノート, 22(2), 96-108.
- [26] 顧宏堪, 1991, "渤海東海海洋化學", 科學出版社, 北京, 12p.