

파랑에너지를 이용한 항내 해수순환증진에 대한 연구 A Study on the Water Circulation Enhancement inside Harbor Utilizing Wave Energy

오병철* · 전인식** · 정태성*** · 이달수*

Byung-Cheol Oh*, Insik Chun**, Tacsung Jung***, and Dalsoo Lee*

요 旨 : 본 논문에서는 파랑에너지를 이용하여 항외의 해수를 항내로 유도하여 항내의 해수순환을 향상시키는 방법에 대하여 검토하였다. 파랑에너지를 활용하여 항내의 해수순환을 도모하기 위한 해안구조물로서는 월류제를 채택하여 제주외항에 적용하고 그 효과를 확률적인 관점에서 정량적으로 평가하였다. 월류제를 통한 해수유입량은 파고와 조위에 의하여 결정되는 것으로 가정하였으며 해수유입율과 파고 및 조위간의 함수관계는 수리모형실험 결과로부터 구하였다. 파랑수치모형의 후산자료와 검조소의 조위관측자료로부터 계산된 파고와 조위의 확률분포로부터 월류제를 통한 해수유입량의 확률분포를 구하는 방법을 제시하여 제주 외항에 적용한 결과 월류제를 통한 유량의 확률분포는 Gamma 함수에 근접하는 것으로 나타났으며 월류제의 최적위치에 대해서도 논의하였다. 그리고 월류제의 유무에 따른 항내오염확산을 계산하여 월류제에 의한 항내수질정화효과를 평가하였다.

핵심용어 : 월류제, 해수유입율, 연속방류, 순간방류

Abstract □ In the present paper, a method which enhances the circulation of harbor waters by using wave energy was investigated. The overflow levee was selected as a coastal structure helping the harbor circulation, and was applied to Jeju-outer-port site so as to estimate its effectiveness quantitatively in probabilistic point of view. It was assumed that sea water influx rate through the overflow levee into the harbor depended upon wave height and tidal level and a functional relationship among them was calculated using the results of hydraulic experiment. The probability distribution of water influx could be obtained from hindcasted wave data and measured tidal elevations at Jeju harbor. The Gamma distribution was appeared to best fit the estimated influx distribution, and the optimal location of the levee was discussed. Finally, water quality purification effect was investigated by computing the contaminant material dispersion according to whether the levee was or not.

Keywords : overflow levee, water influx rate, continuous release, instantaneous release

1. 서 론

우리나라의 경우 항만 및 어항의 개발시 항내의 정온 및 가동을 확보를 위해서 설치되는 방파제 등 외곽시설이 외해로부터의 침입파랑을 효과적으로 차단하고 있으나 한편으로는 이러한 구조물이 해수에 대하여 비투과성이므로 항만의 폐쇄성을 증대시켜 해수순환성이 저하되어 항

만 수질오염이 악화되는 경향이 있다. 일반적으로 비투과성 방파제가 설치되면 항내·외간의 해수교환력이 떨어져서 오염물질 등이 항내에 머무르는 시간이 길어지므로 항내의 오염이 가속될 뿐만 아니라 오염원에 포함된 유기물이 분해됨에 따라 항내 해수의 용존산소가 다량 소모되어 빈산소상태를 야기시켜 항내의 수질에 부정적인 영향을 미친다.

*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Corresponding author: Byung-Cheol Oh, Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. bco@kordi.re.kr)

**건국대학교 공과대학 토목공학과(Department of Civil Engineering, Konkuk University)

***한남대학교 공과대학 토목환경공학과(Department of Civil & Environmental Engineering, Hannam University)

지금은 개발 지향적인 과거와는 달리 환경과 공존하는 지속 가능한 개발에 대한 요구가 증대되고 있어 항만의 개발에 있어서도 친환경성 및 친수성이 강조되고 있는 실정이다. 그러므로 환경 친화적인 항만의 개발을 위해서는 항내의 해수순환력을 증대시켜 수질오염을 저감하는 것이 매우 중요하게 인식되고 있다. 항내의 수질을 보호하기 위해서는 육상 또는 선박으로부터의 오염원을 차단하는 것이 가장 바람직한 방법이지만 이를 위해서는 많은 경비가 소요되는 육상오염원에 대한 충분한 정화시설을 설치하여야 하며 또한 불법 폐기물을 항내에 투기하는 선박에 대한 지속적인 단속이 이루어져야하므로 현실적으로 많은 어려움이 따른다.

우리나라에서 대부분의 항만은 해수순환성을 증대시키기 위한 별도의 대책을 강구한 예가 없는 실정으로 항내 해수교환은 조석현상에만 의지하고 있는 형편이나 항만의 폐쇄성으로 인하여 그 효과는 매우 미미하다. 그러나 최근에는 기존의 불투과성 방파제의 일부를 투과성으로 설계한 제체투과성 해수교환방파제를 설치하여 조석 외에 파랑에너지를 적극적으로 이용하여 항내 오염물질의 희석률을 증대시키고 함께 빠른 시간내에 외해로 배출되도록 함으로써 항내의 수질을 개선하는 방안에 대한 연구가 수행되고 있다(이달수, 2001). 파랑에너지를 이용하여 항내 해수유입을 유도하는 시설물로서는 제체투과성방파제(단면형식은 원호형 등 여러 가지가 있음), 월류제(overflow levee) 등이 있다. 제체투과성방파제는 재래식 방파제에 비하여 단면의 형상이 복잡하고 단면변화에 따라 해수유입 유량이 민감하게 변화하는 것으로 나타나고 있다. 월류제는 월파를 유도하여 항내 해수유입을 도모하는 것이 주요 목적이며 부수적으로 쇄파에 의한 잉여용력의 공간경사를 발생시켜 파랑류의 증대를 유도하는 구조물이다(Fig. 1). 일본의 일부 어항에서는 출하 전 활어를 임시로 항내에 보관하는 경우에 월류제를 활용하여 파랑에너지에 의한 외해수의 유입을 유도하여 활어의 생존에 필요한 산소를 공급함과 동시에 양호한 수질을 유지하는 데 사용되고 있다(乃万俊文, 1977).

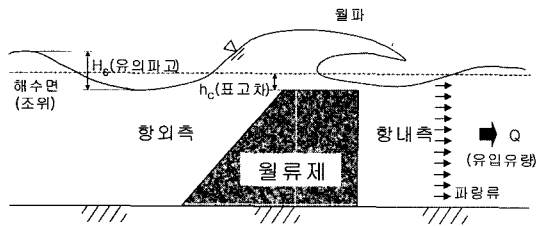


Fig. 1. Conceptual diagram of water influx by overflow levee.

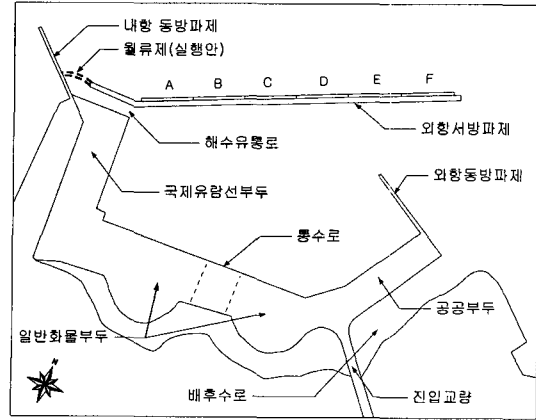


Fig. 2. Lay-out of Jeju outer port.

본 연구에서는 제주 외항을 대상으로 하여 월류제에 의한 해수교환력을 정량적으로 검토하고 조석뿐만 아니라 파랑에너지를 이용하여 항만의 환경친화성을 강화시키는 방법에 대하여 논의하였다. 제주 외항은 늘어나는 물동량과 관광수요에 대처하기 위하여 8만톤급의 선박이 접안할 수 있도록 설계되었다(Fig. 2). Fig. 2에서 보는 바와 같이 제주 외항의 주요 시설물로서는 서방파제(1,425 m), 동방파제(390 m), 해수유통로, 국제유람선부두, 일반화물부두 및 공공부두 등이 있으며 항내의 평균수심은 11 m 정도이다. 제주 외항의 설계에서는 기존의 항만 설계에서는 볼 수 없었던 해수유통로를 서방파제와 국제유람선부두 사이에 설치하여 항내의 해수순환 증대를 도모함과 함께 어도로서의 기능을 수행하도록 하여 친환경적인 개념을 도입한 우리나라 최초의 항만이다.

그러나 제주 외항의 설계에서 도입된 해수유통로는 항내의 해수교환을 조석에너지에만 의존하고 있으므로 본 연구에서는 Fig. 2에서 점선으로 표시된 위치에 파랑에너지를 이용하는 월류제를 설치하는 안에 대하여 수리모형실험과 수치실험을 병행하여 제주 외항의 해수순환력을 비교·검토하였다.

월류제는 다음과 같은 착안점을 고려하여 Fig. 2의 해수유통로의 외해측 전방에 60 m 길이의 원호형으로 설치하는 것으로 하였다.

- ① 파랑에너지가 집중되는 장소에 설치될 것
- ② 항내정온도 및 기동율에 긍정적인 요소로 작용할 것
- ③ 월파를 효과적으로 발생시킬 것
- ④ 파랑에 의하여 항내로 유입된 외해수가 외해로 빠져나가지 않게 할 것

2. 조석에 의한 해수교환

Fig. 2에서 보는 바와 같이 기존의 제주 외항의 설계에서는 서방파제와 국제유람선부두 사이에 폭 50m의 해수유통로를 설치, 조석현상을 이용하여 항내의 해수순환을 유도하고 있다. 본 연구에서는 2차원 유한요소 조석수치모형(FEM2D)(정태성, 1992)을 사용하여 해수순환을 검토하였다. 조석수치모형은 제주 외항에서 관측된 자료에 대하여 검증되었으며 한국해양연구원(2001)의 보고서에 자세히 기술되어 있다. 해수유통로를 통한 조류는 대조기에 1.1 cm/sec 정도이며 1 조석주기당 항내 해수유입량은 66,870 m³ 정도로 나타나고 있다. 그러므로 제주 외항의 평균수심을 11 m, 항내수면적을 1 km²으로 가정하면 항내의 수량은 11,000,000 m³이므로 대조기 때 해수교환율은 1.2%/day로 매우 미미하다. 여기서 해수교환율은 항내 해수체적에 대한 1일간의 해수유입량의 비로 정의하였다.

3. 파랑에 의한 해수교환

월류제(Fig. 1)는 인위적으로 쇄파와 월파를 발생시켜 외해수를 항내로 유입시키는 구조물로서 조류의 소통정도는 월류제가 없는 경우보다 다소 적어지지만 파랑이 비교적 큰 해역에서는 파랑에너지를 이용하여 충분히 이를 극복할 수 있다.

해수면이 월류제의 정상보다 같거나 약간 높은 경우에는 월파로 인하여 항내로 유입된 외해수가 파랑의 위상이 반대로 역전된 다음에도 월류제의 효과적인 역류 차단효과 때문에 외해로 흘러 나가지 못하므로 해수유입효과가 양호하다. 한편, 월류제의 정상이 해수면보다 충분히 낮은 경우에는 월류제의 역류차단효과가 감소되어 월류제를 넘어 항내로 들어간 외해수의 일부는 파랑의 위상이 역전시 외해로 유출될 수도 있으므로 해수유입효과가 저하될 수 있다. 월류제에서 일어나는 파랑의 수리역학적 현상은 비선형성이 매우 강한 쇄파로서 현재의 파랑이론으로 그 거동을 예측 및 규명하는 것은 매우 어렵기 때문에 수치모형으로 월류제를 통한 월파량을 산정하는 것은 현실적으로 어렵다고 사료되므로 월류제 설치에 의한 해수유입효과는 수리모형실험을 통하여 파악하는 것이 바람직하다고 생각된다.

월류제 단위폭당 해수유입량(Q)은 유의파고(H_s), 주기(T), 해수면(조위)과 월류제 정상의 표고차(h_c) 등의 함수로 나타낼 수 있다(Fig. 1참조). 그러나 파고, 주기 및 표

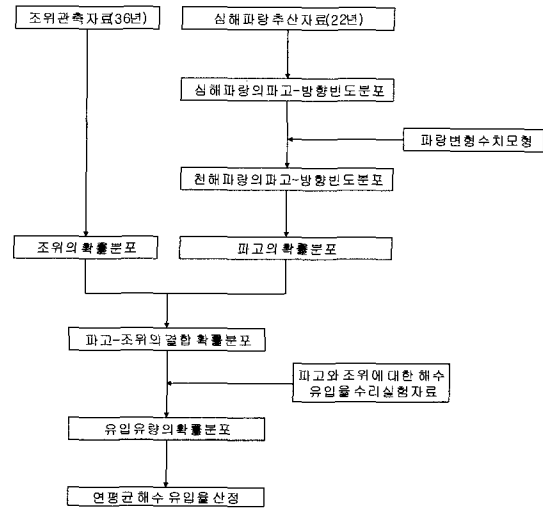


Fig. 3. Flow diagram for the calculation of annual mean water discharge through overflow levee.

고차를 모두 바꿔가면서 수리실험을 하려면 실험의 경우의 수가 매우 많으므로 제주 외항 해역의 파랑추산자료로부터 회귀분석으로 구한 파고-주기 관계식(한국해양연구원, 2001참조)을 사용하여 실험 경우의 수를 줄였다.

한편, Fig. 3은 월류제 설치에 의하여 외해에서 항내로 유입되는 연평균 해수유입율을 계산하는 흐름도를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 월류제에 의하여 발생하는 연평균 해수유입율을 평가하기 위해서는 장기간에 걸친 조위자료와 파랑자료가 필요하다. 본 연구에서는 국립해양조사원이 제주항에서 36년간(1964-1999) 관측한 조위자료와 해양수산부(2001)의 22년간(1979-2000)파랑추산 자료를 활용하였다.

3.1 파고와 조위에 따른 월류제 해수유입율 산정

월류제에 의한 해수유입율의 실험결과를 정리하면 Table 1과 같으며 Fig. 4는 Table 1로부터 구한 유의파고별 해수유입율을 해수면(조위)과 월류제 상단의 표고차(h_c)의 함수로 재구성한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 해수유입은 표고차(또는 조위)보다는 파고의 변화에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있으므로 파랑에너지가 집중되는 곳에 월류제를 설치하면 해수유입효과를 극대화할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 파고가 작을수록 조위 변화에 따른 해수유입율의 편차는 작아지는 경향을 나타내고 있다.

해수유입량을 정량적으로 산정하기 위해서는 여러 가

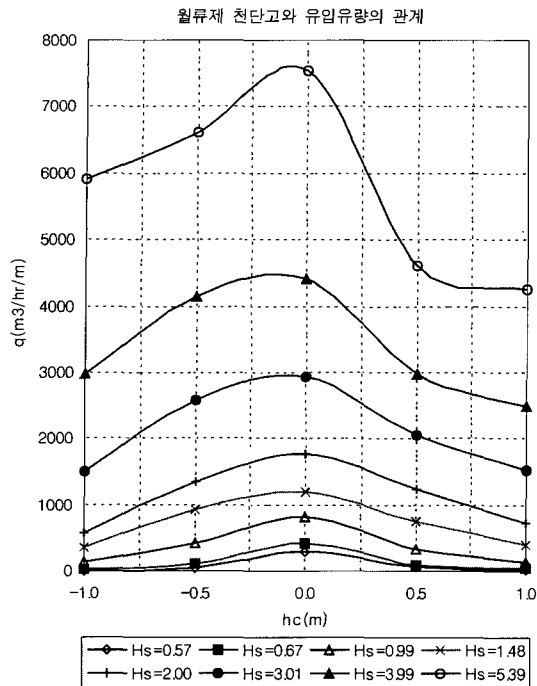


Fig. 4. Variation of influx according to significant wave heights and top level of the levee.

Table 1. Water influx through levee measured from experiment (단위 : m³/hr/m)

H_s (cm) \ h_c (cm)	-100	-50	0	50	100
57	0	40	280	56	24
67	28	111	409	91	44
99	122	429	818	327	139
148	354	922	1194	744	405
200	566	1351	1755	1233	727
301	1497	2587	2940	2058	1520
399	2974	4136	4413	2984	2481
539	5907	6617	7539	4597	4243

지 파고와 조위 또는 표고차에 대한 해수유입율을 미리 계산하여야 한다. 본 연구에서는 수리모형실험으로부터 얻어진 해수유입율 자료(Table 1)에 내삽과 외삽기법을 적용하여 임의의 유의파고와 표고차에 대한 해수유입율을 계산하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

3.2 월류제에 의한 연평균 해수유입율 산정

앞에서 언급한 바와 같이 월류제에 의한 단위폭당 해수유입율(Q)에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 유의파고(H_s)와 조위와 월류제 상단의 표고차(h_c)이므로 다음과 같

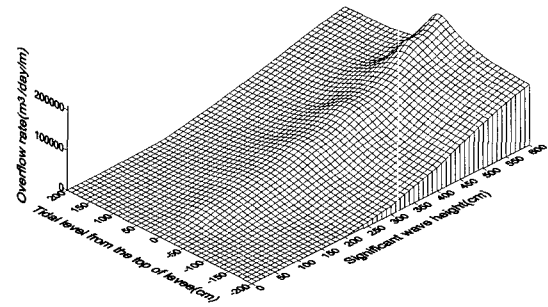


Fig. 5. Perspective view of water influx through levee.

은 함수관계를 가정할 수 있다.

$$Q = f(H_s, h_c) = f(H_s, E_t - E_l) \tag{1}$$

여기서 E_t 와 E_l 은 각각 조위와 월류제 상단의 표고이다. 그러므로 월류제 상단의 표고가 고정된 경우를 고려하면 해수유입율은 유의파고와 조위의 함수로 표현된다. 그러나 실제의 해양에서 유의파고와 조위는 일정하지 않고 시시각각으로 변화하는 물리량으로서 수학적으로 확률변수로 취급할 수 있으며, 이러한 경우 해수유입율은 확률변수의 함수이므로 특정한 분포를 갖는 확률변수로 표현될 수 있다. 따라서 월류제의 효과를 평가하기 위해서는 특정한 파고와 조위에 대한 해수유입율보다는 연평균해수유입율 등 통계적인 변수를 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

조위의 확률분포를 구하기 위하여 국립해양조사원이 1964년부터 1999년까지 36년 동안 관측한 1시간 간격의 제주항 조위자료를 분석하였다. Fig. 6은 제주항 조위의 초과확률을 나타낸 것이다. 이 그림에서 표기된 조위는 국립해양조사원이 고시한 기본수준면(DL) 기준이며 평균수면(141.7 cm)을 초과하는 확률은 51%이고 제주항의 사당평균 만조위인 293 cm를 초과하는 확률은 0.08%로 계산되었다.

한편, 월류제 설치지점에서의 파랑관측자료는 없기 때문에 여기서는 해양수산부(2001)의 심해파랑 추산자료(1979년-2000년; 22년)에 파랑변형모델(SWAN과 EMS3D) (Ris, 1997; Copeland, 1985; Suh *et al.*, 1997)을 사용하여 월류제 앞에서의 파랑 분포를 계산하였다. 본 연구에서 사용된 파랑모형에 대한 상세한 내용은 한국해양연구원(2001)의 보고서를 참조할 수 있다. 심해파랑은 22년간 매 시간마다 추산되어 총 64,288개의 자료가 있는데 이 모든 자료에 파랑변형모델을 적용하여 월류제 전방에서의 파랑을 계산하는 것은 방대한 시간과 노력이 필요하므로 여기서는 먼저 심해파랑의 파고-방향빈도분포를 구한 후 수

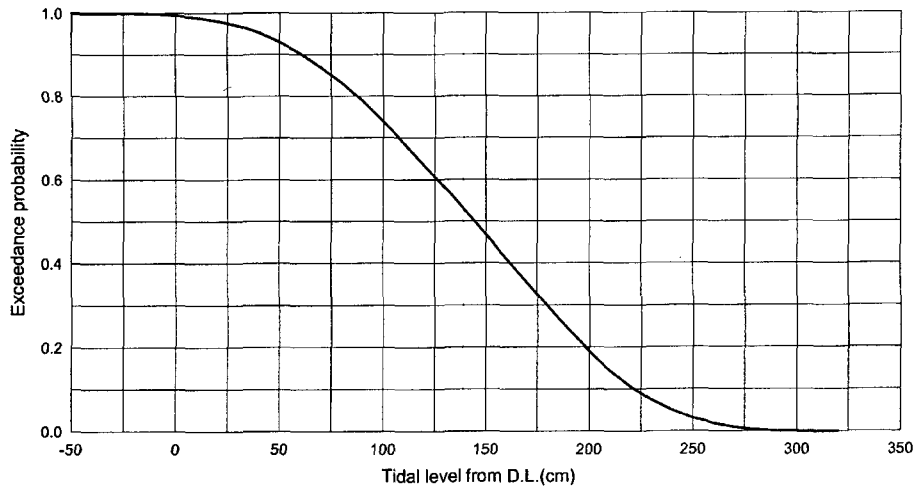


Fig. 6. Exceedance probability of water level at Jeju port.

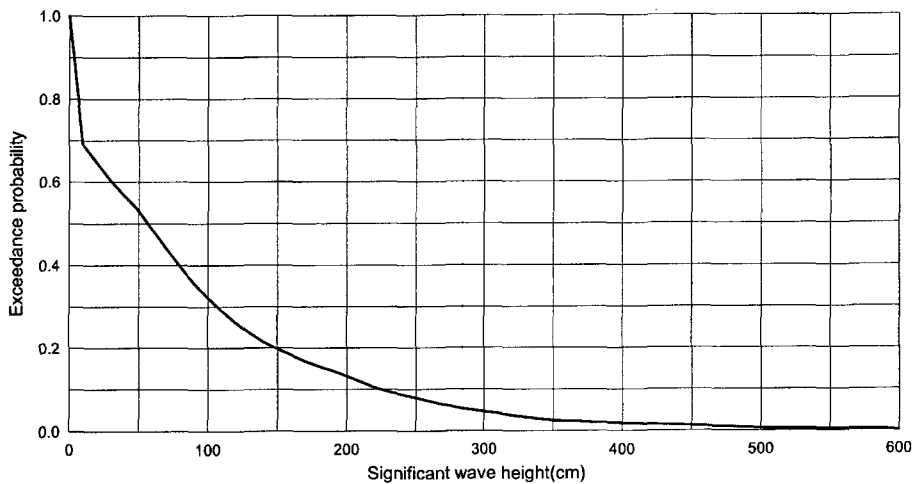


Fig. 7. Exceedance probability of wave height at site of levee proposed.

치모델을 사용하여 월류제 전방의 파고-방향빈도분포로 변환시키는 방법을 사용하였다(Goda, 1985). Fig. 7은 월류제 전방에서의 유의파고의 초과확률분포도를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 유의파고 10 cm를 초과하는 확률이 68.8%이므로 10 cm이하 파랑의 출현빈도는 31.2%로 높게 나타나고 있다. 이와 같이 월류제 전방에서 낮은 파고의 출현빈도가 크게 나타나는 것은 제주외항의 심해측에서 출현하는 S계열(ESE-WSW 까지 모두 7개의 파향)의 파랑은 제주항으로 전파시킬 수 없기 때문인 것으로 생각된다. 그러므로 본 연구에서는 S계열의 심해파랑 출현시 월류제 전방의 파고는 영(zero)로 간주하였다.

월류제 상단의 표고가 주어지면 Fig. 6과 Fig. 7에 나

타난 조위와 유의파고의 확률분포로부터 유의파고(H_s)와 표고차(h_c ; 조위의 표고-월류제 상단의 표고)의 결합확률분포가 도출된다. Fig. 8은 월류제 상단의 표고가 평균해면(DL상 141.7 cm)인 경우에 대한 유의파고와 표고차의 결합분포를 나타낸다. 그러므로 월류제를 통한 연평균 해수유입율은 다음 식으로 계산된다.

$$\bar{Q} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} Q(H_s, h_c) p(H_s, h_c) dH_s dh_c \quad (2)$$

여기서 \bar{Q} 는 연평균 해수유입율이며 $p(H_s, h_c)$ 는 결합확률밀도함수이다. 해수유입율 Q 와 결합분포 p 는 각각 Fig. 5와 Fig. 8에 도시되어 있으며 월류제 상단의 표고를 평균해면(DL상 141.7 cm)로 하고 연평균 해수유입율을 구

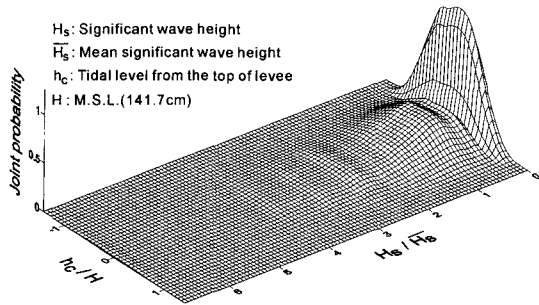


Fig. 8. Joint probability of significant wave height and tidal level.

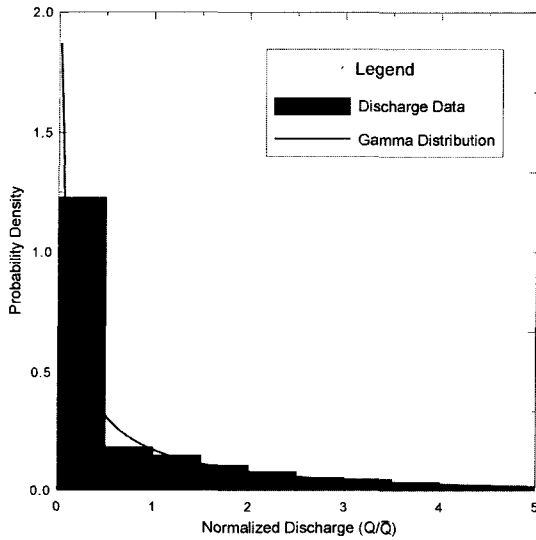


Fig. 9. Histogram of discharge through levee and corresponding Gamma distribution.

하면 $12380.1 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 이므로 월류제의 폭을 60 m로 가정하면 연 평균 초당 약 8.6톤의 외해수가 월류제를 통하여 향내로 유입함을 알 수 있다. 한편, Fig. 5와 Fig. 8을 이용하여 월류량의 히스토그램을 그리면 Fig. 9와 같다. Fig. 9의 히스토그램에서 보는 바와 같이 월류량의 확률밀도는 작은 값에서 매우 크게 나타나고 있으므로 월류량은 전반적으로 매우 좌측으로 치우쳐진(left-skewed) 분포를 보이고 있다. 우리나라에서 일어나는 자연현상 가운데 치우침(skewness)이 심한 확률분포는 강우 및 유역과 하천의 유량분포에서 흔히 나타나고 있으며 이러한 분포를 설명할 수 있는 수학적 확률모형은 Gamma 분포가 가장 적합한 것으로 알려져 있다(김양수, 2001). Gamma 분포는 2개의 모수(parameter)를 포함하고 있으므로 Fig. 9에 모멘트법으로 모수를 추정

한 후 구한 Gamma 분포도 동시에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 월류량의 히스토그램과 Gamma 분포의 이론 곡선은 잘 일치함을 알 수 있다.

3.3 월류제의 최적 위치에 관한 고찰

월류제의 연평균 월류량은 월류제 상단의 표고, 조위의 확률분포 및 유의파고의 확률분포로부터 구할 수 있으므로 파랑에너지를 이용하여 외해수를 향내로 유입시키는 월류제는 파랑에너지밀도가 강한 서방파제(Fig. 2참조) 부근에 설치되는 바람직하다. 제주 외항의 서방파제를 따라서는 조위의 확률분포가 현실적으로 일정하다고 생각할 수 있으므로 월류제의 최적위치는 월류제 상단을 고정시킨 후 서방파제 위치에 따른 파고분포로부터 계산한 연평균 해수유입율을 비교 평가하여 결정하는 것이 합리적이라고 사료된다. Fig. 2에 해수유입을 평가를 위한 서방파제를 따른 파고분포 계산 구역을 각각 A, B, C, D, E, F로 표시하였다. 각 구역에서의 유의파고는 파랑변형 수치모형(SWAN, EMS3D)을 이용하여 심해파고분포로부터 해당 구역의 천해파고분포를 계산한 후 유의파고의 초과확률을 구하여 3.2 절에서 설명한 방법으로 연평균 해수유입율을 산정하였다. 수치모형에 의한 파고 계산시 Fig. 2에 표기된 각 구역에는 여러 개의 계산 격자점(EMS3D 수치모형의 격자 간격은 5 m임)이 포함되므로 구역에 포함되는 모든 격자점에 대한 평균유의파고를 계산하여 해당 구역에 대한 유의파고의 초과확률을 계산하였다.

Fig. 10과 Table 2는 Fig. 2에 표기된 서방파제의 구역별 연평균 해수유입율을 비교한 것이다. Fig. 2와 Table 2에서 보는 바와 같이 월류제의 설치지점(Fig. 2에서 “실행안”으로 표시됨)에서 연평균 해수유입율이 가장 크게 나타나고 있다. 따라서 파랑에너지를 이용하는 해수순환시스템을 채용할 경우 월류제, 제체투과성방파제 등 해수교환시설물의 설치위치로는 Fig. 2에서 제시한 월류제의 위치가 최적인 것으로 평가된다. 한편, 제주외항의 굴절도와 파랑변형수치모형결과(한국해양연구원, 2001)를 고찰하여 보아도 월류제 설치위치에서 파랑에너지가 집중되는 현상을 관찰할 수 있다. 또한 파향선의 간격은 서방파제의 서측 제두부의 서측에서 좁게 나타나고 제간부에는 넓어진 후 동측 제두부에서 좁아지는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 Fig. 10에도 반영되어 월류제 설치위치에서 연평균 해수유입율이 최대이며 제간부를 따라 유입율이 감소하여 D 구역에서 최소가 된 후 다시 증가하기 시작하여 서방파제 동측 제두부인 F구역까지 증가 추세가 이어지고 있다.

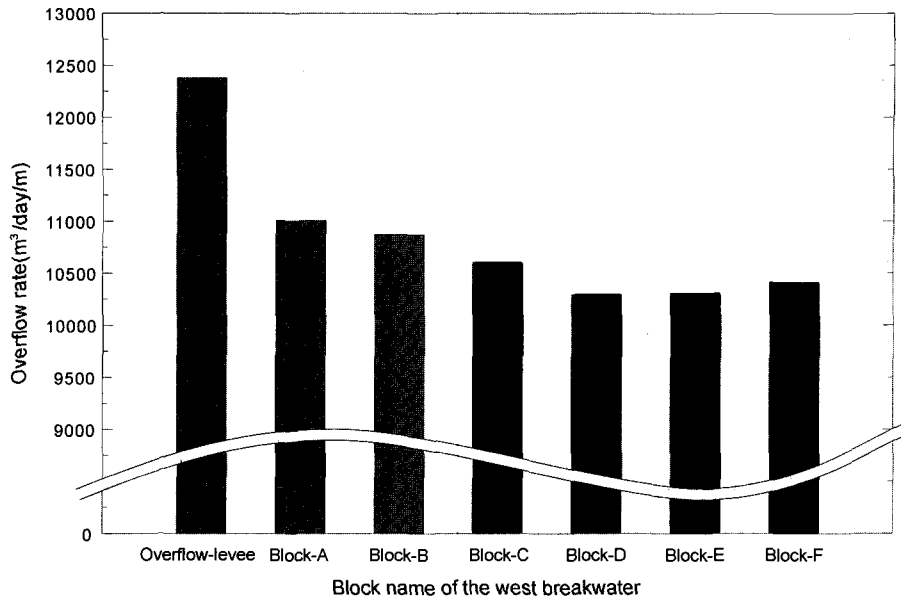


Fig. 10. Variation of annual influx according to levee sites.

Table 2. Estimated annual influx at the specified levee site

서방파제 구역명	월류제	A	B	C	D	E	F
연평균유입율 (m³/day/m)	12380.1	11005.5	10875.1	10601.9	10292.2	10307.1	10414.5

3.4 월류제 상단의 최적 표고에 관한 고찰

월류제 상단 표고의 변화는 표고차 h_c 의 확률분포를 변화시키므로 월류제 상단의 최적표고는 조위의 확률분포로부터 결정된다. 조위의 초과확률분포(Fig. 6)로부터 표고차 h_c 에 대한 초과확률분포를 도출한 후 3.2 절에서 설명한 방법으로 표고차의 변화에 따른 연평균 해수유입량을 산정하였다.

Fig. 2에 표기된 월류제 위치에서의 유의파고의 초과확률분포(Fig. 7)를 사용하여 월류제 상단의 표고변화에 따른 연평균 해수유입율을 구하여 Fig. 11과 Table 3에 나타내었으며 월류제 상단의 표고는 평균해면을 기준으로 하였다. Fig. 11과 Table 3으로부터 월류제 상단의 표고에 따른 연평균 해수유입율은 평균해면보다 10 cm 높은 곳에서 최대가 되며 월류제 표고가 이 점보다 낮거나 높아짐에 따라 해수 유입율은 단조롭게 감소하는 경향을 보이고 있다. 월류제 상단의 최적표고는 평균해면상 10 cm로 나타났으나 월류제 표고를 평균해면상으로 한 경우와의 상대적인 차이는 0.2%에 불과하다.

4. 항내 해수교환의 검토

Fig. 2에서 제시된 위치에 월류제(월류제 상단의 표고는 평균해면으로 함)를 설치하는 경우 파랑에너지에 의한 연평균 해수유입율은 약 12380 m³/day/m로 월류제의 폭을 60m로 가정하면 초당 8.6톤의 외해수가 항내로 순유입되는 것으로 계산되었다. 그러므로 월류제 설치를 통해서 항내로 유입되는 외해수에 의한 제주외항의 해수교환율은 약 6.8%/day로서 해수유통로의 조석에 의한 해수교환율 1.2%/day보다는 상당히 크게 나타나고 있으며, 또한 파랑에너지를 이용하는 월류제에 의한 항내 해수유입량은 순유입량으로서 항내의 순해수교환에 지대한 역할을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

여기서는 해수교환효과를 보다 구체적으로 파악하기 위하여 제주 외항의 오염을 가정한 후 조석과 파랑에 의한 외해수의 유입으로 발생되는 항내오염의 희석에 따른 농도변화를 고찰하여 항내의 순해수순환을 검토하였다. 제주외항 해수순환의 검토 대상안은 Fig. 2에 표시된 해수유통로안(제1안)과 월류제안(제2안)으로 설정하였다.

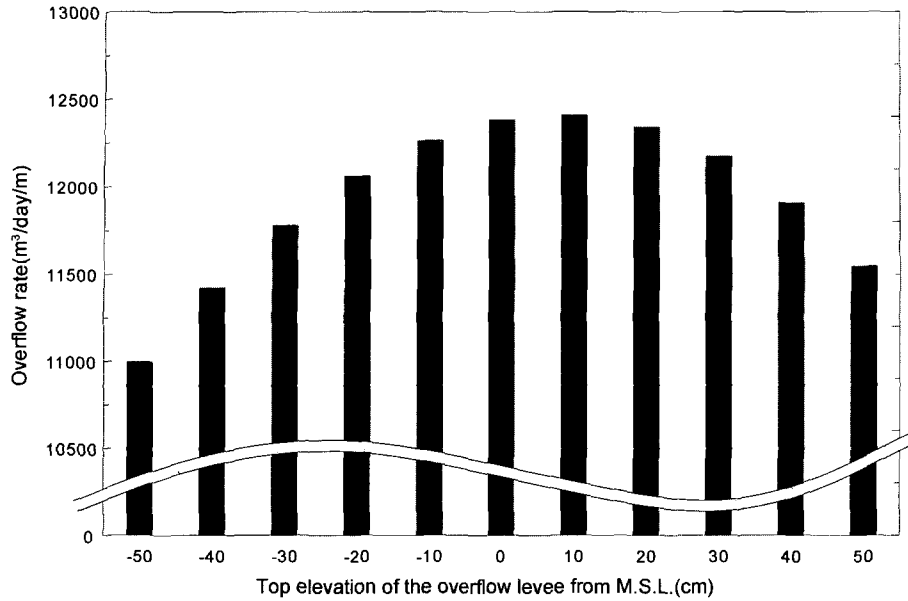


Fig. 11. Variation of annual influx according to top level of the levee.

Table 3. Estimated annual influx according to the specified levee level

월류제상단표고(cm)	연평균유입율($m^3/day/m$)	월류제상단표고(cm)	연평균유입율($m^3/day/m$)
-50	10997.3	0	12380.1
-40	11421.7	10	12406.4
-30	11778.7	20	12338.5
-20	12061.3	30	12172.7
-10	12263.5	40	11907.7
		50	11544.6

조석에 의한 항내의 순해수순환을 파악하기 위해서 먼저 항내 유속분포를 계산하여야 한다. Fig. 12와 Fig. 13은 제1안과 제2안에 대하여 2차원 유한요소 유동모형(정태성, 1992)으로 계산한 항내유속분포를 나타낸다. Fig.

12는 조석잔차류이며 Fig. 13은 조석에 월류제의 연평균 유입유량을 부과하여 계산한 제주외항내 유속분포도이다. 이 두 그림에 나타난 유속 벡터장으로부터 월류제에 의한 외해수의 순유입효과를 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 제1안의

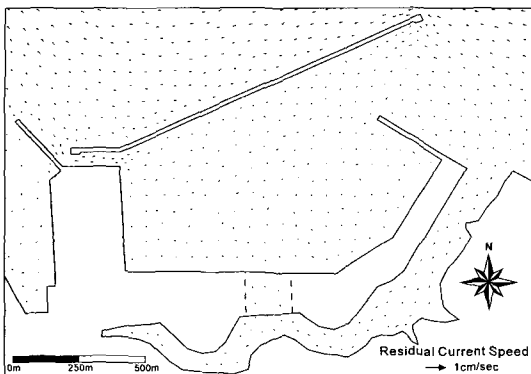


Fig. 12. Residual current distribution with flow channel.

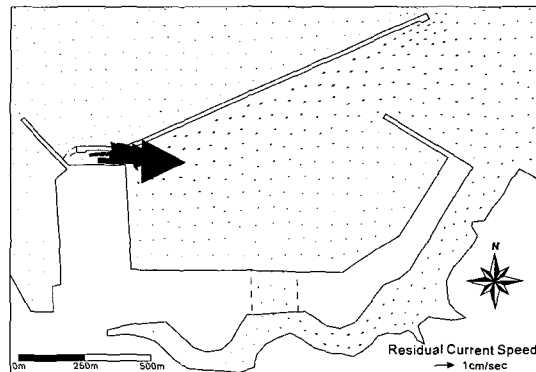


Fig. 13. Residual current distribution with overflow levee.

배치에 대하여 계산된 유속분포의 경우(Fig. 12)에는 제주 외항 항내(특히, 국제유람선부두와 일반화물부두 및 공공부두 전방 수역)와 배후수로에서의 유속은 매우 미약하게 나타나고 있으므로 조석효과만으로 항내의 오염을 회복시키는 데에는 상당히 긴 시간이 소요될 것으로 판단된다.

해수유통로 외해측 전방에 외해수의 유입을 위한 월류제를 설치한 제2안의 경우에는 외해수의 순유입으로 인하여 해수유통로뿐만 아니라 외항의 국제유람선부두, 일반화물부두, 공공부두의 전면 수역과 배후수로에서의 유속이 제1안에 비하여 크게 나타나고 있어 항내 오염의 방지 및 수질개선에 큰 도움이 될 것으로 사료된다. 제2안의 배치에 대하여 계산된 유속분포의 경우(Fig. 13)를 고찰해보면 제주외항에서 서방과제를 따라서 외항 입구 방향으로 큰 흐름이 형성(제1안에서는 이러한 흐름이 명백하게 나타나지 않음)되는 것을 볼 수 있으며, 더욱이 항내의 부두 쪽에서도 제1안의 경우보다는 큰 흐름장이 만들어지고 있어 해수순환에 긍정적 효과를 기대할 수 있다.

제2안의 경우 해수유통로에서의 유속은 9.1 cm/sec로 제1안의 0.1 cm/sec보다 훨씬 크게 나타나고 있어 파랑에너지에 의한 연평균 초당 8.6톤의 해수 순유입으로 야기되는 운동량이 항내의 유속 증대의 주요 원인으로 생각된다. 제1안과 제2안에 있어서 제주 외항내 유속분포의 가장 큰 차이는 제1안의 경우 유선이 외항입구에서 출발하

여 항내를 거쳐 해수유통로로 빠져나가는 것이 주된 패턴인데 반하여 제2안의 경우 항내 유동의 양상은 반대로 나타나고 있는 현상이다. 그러므로 제1안에서는 조석에 의하여 외항입구로부터 유입되는 해수로 인하여 항내해수교환이 이루어지지만 월류제를 배치한 제2안에서는 파랑에너지에 의해 유도되는 해수의 순유입량이 항내해수교환에 지대한 기여를 하는 것으로 생각된다.

4.1 오염물질의 연속방류실험

본 연구에서 “오염물질의 연속방류”란 공간상의 임의의 고정 점에서 오염물질이 일정한 질량유량(mass flowrate)으로 임의의 순간부터 연속적으로 대상 해역에 부하되는 것을 의미한다. 제주 외항의 해수순환효과를 평가하기 위하여 오염원의 연속방류실험을 제1안과 제2안의 평면배치에 대하여 실시하였다. 오염물질 확산은 2차원 유한요소모형(Falconer, 1986)을 사용하였으며 자세한 내용은 한국해양연구원(2001)의 보고서를 참조할 수 있다.

오염물질은 제주 외항의 중앙에서 1 kg/sec의 질량유량이 연속적으로 방류되는 상황을 상정하였으며 확산계수는 1 m²/sec로 가정하고 30일 후 외항내의 농도분포도를 비교하였다. 여기서 설정한 상황은 실제의 현상이 아니며 제1안과 제2안의 상대비교를 통하여 개별 우위를 평가하기 위한 가상적인 상황이다. Fig. 14와 Fig. 15는 각각 제1안과 제2안에 대한 상대적인 비교·평가를 위한 오염물

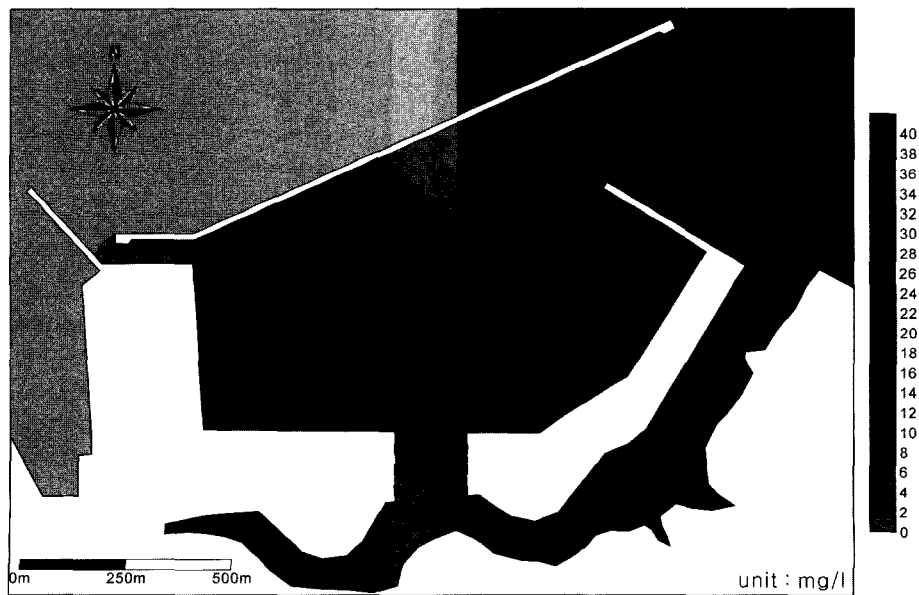


Fig. 14. Concentration distribution for continuous contaminant source with flow channel(after 30 days).

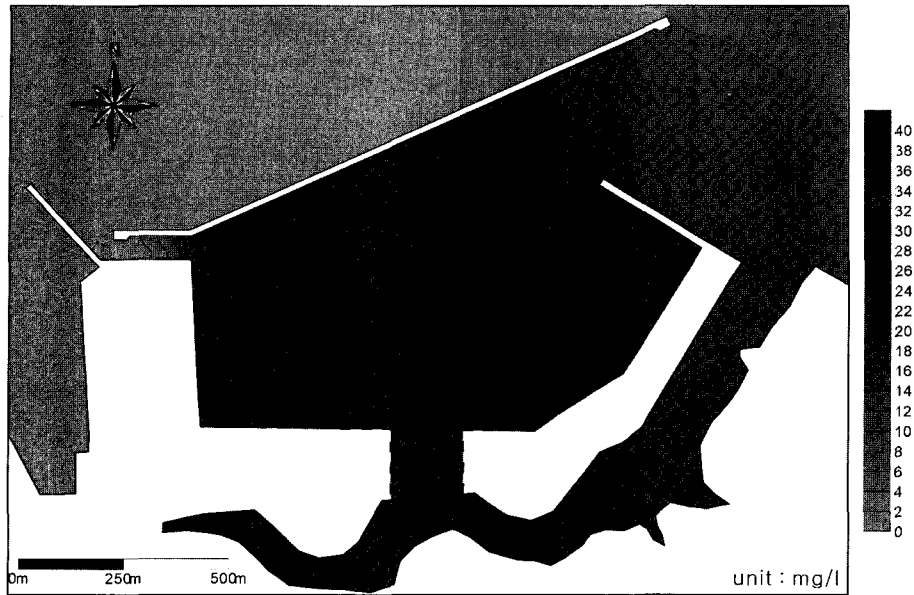


Fig. 15. Concentration distribution for continuous contaminant source with levee(after 30 days).

질의 농도분포도를 나타낸다.

제1안의 경우에는 국제유람선부두 전방 수역을 포함하여 넓은 구역에서 농도값이 40 mg/l 이상으로 나타났으나 제2안의 경우에는 오염원의 부하지점에서만 30 mg/l 이상의 농도를 보이고 있다. 따라서 월류제를 설치한 제2안이 제1안보다 순해수순환력이 우수하다고 평가할 수 있다. 특히, 해수유통로에서의 오염 농도는 제1안에서는 높게 나타났으나, 제2안에서는 월류제에 의한 해수유입으로 인하여 농도가 매우 낮게 나타나고 있다. 또한, 배후수로에서의 농도를 비교하여도 제2안이 제1안보다 해수순환의 측면에서 우수하다고 평가할 수 있다.

제1안의 경우 조석에 의한 해수교환효과가 작아서 항내의 오염이 가중될 뿐만 아니라 해수 유통로를 통하여 항내의 오염이 외해로 전파되는 현상이 나타나고 있으나 제2안의 경우에는 파랑에 의한 해수교환효과가 크게 나타나서 항내의 수질개선에 도움이 되며 더욱이 해수 유통로에서 발생하는 빠른 유속에 의한 운동량으로 인하여 항내의 오염물질이 해수유통로를 통하여 외해로 확산되는 것이 차단되므로 제주 외항의 오염이 기존의 제주 내 항에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러므로 오염원 연속방류실험의 경우 월류제를 배치한 제2안이 제주 외항내의 해수교환력이 우수하여 제1안보다 항내 수질오염에 대한 방어 및 정화 능력이 양호한 것으로 사료된다.

4.2 오염물질의 순간방류실험

본 연구에서 “오염물질의 순간방류”란 공간상의 임의의 고정 점에서 오염물질이 일정한 질량유량(mass flowrate)으로 1일 동안만 대상 해역에 부하되는 것을 의미한다. 제주 외항의 해수순환효과를 평가하기 위하여 오염원의 순간방류실험을 제1안과 제2안의 평면배치에 대하여 실시하였다. 여기서 오염원은 제주외항의 중앙에 있는 것으로 생각하였으며 오염물질이 질량유량 1 kg/sec의 율로 1일간 유출된 후 멈춘 경우를 상정하고 제1안과 제2안에 대한 오염확산 수치모의를 수행하였다. 이 경우 1일간 유출된 오염물질의 총량은 86.4톤이다.

오염물질이 방류 후 3일 경과된 시점에서 제1안과 제2안에 대한 제주 외항의 오염물질 농도분포를 각각 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 제1안의 경우에는 배후수로의 왼쪽 모퉁이에서 오염농도가 높게 나타나고 있는데 이는 항내 및 배후수로에서의 유속이 매우 작아서(Fig. 12참조) 오염물질의 이동이 유속에 의한 이송(advection)보다 확산(diffusion)에 의하여 지배되기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 제2안의 경우에는 파랑에너지에 의한 외해수의 순유입으로 인하여 항내 및 배후수로에서의 유속이 제1안보다 크게 나타나므로(Fig. 13참조) 전반적으로 항내 및 배후수로의 농도가 낮게 나타나고 있다. 따라서 월류제를 배치한 제2안의 경

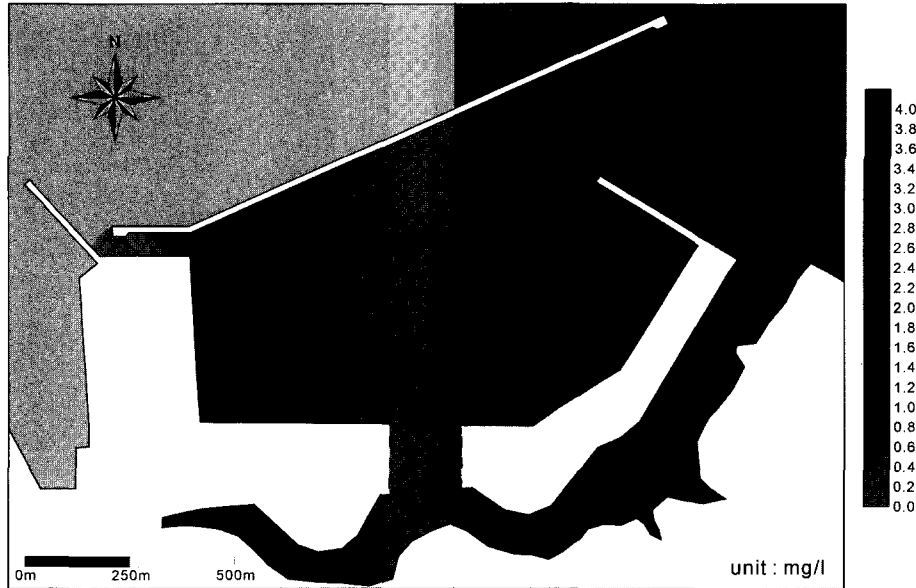


Fig. 16. Concentration distribution for instantaneous discharge with flow channel(after 3 days).

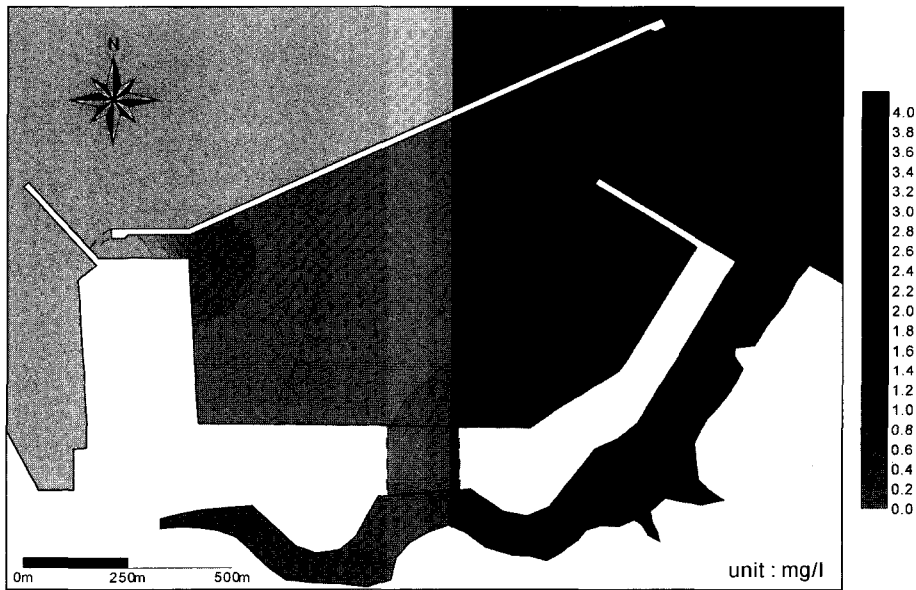


Fig. 17. Concentration distribution for instantaneous discharge with levee(after 3 days).

우 파랑에 의한 해수유입이 신선한 외해수를 공급할 뿐만 아니라 항내 해수에 운동량(유속)도 동시에 제공하는데 이 두 요인의 상승작용이 항내의 수질정화에 상당한 역할을 하는 것으로 평가할 수 있다.

Fig. 18과 Fig. 19는 각각 제1안과 제2안에 대한 7일 경과 후의 농도분포를 나타내고 있는데 전반적으로 3일

후의 농도에 비하여 낮아진 것을 관찰할 수 있다. Fig. 18의 제1안의 1주일 후 최대농도는 1.8 mg/l이며 Fig. 19의 제2안의 최대 농도는 1.0 mg/l로 이 값은 제1안의 최대농도의 56% 정도로 나타나고 있어 월류제에 의한 외해수의 순유입이 항내의 수질개선에 대단히 효과적임을 알 수 있다.

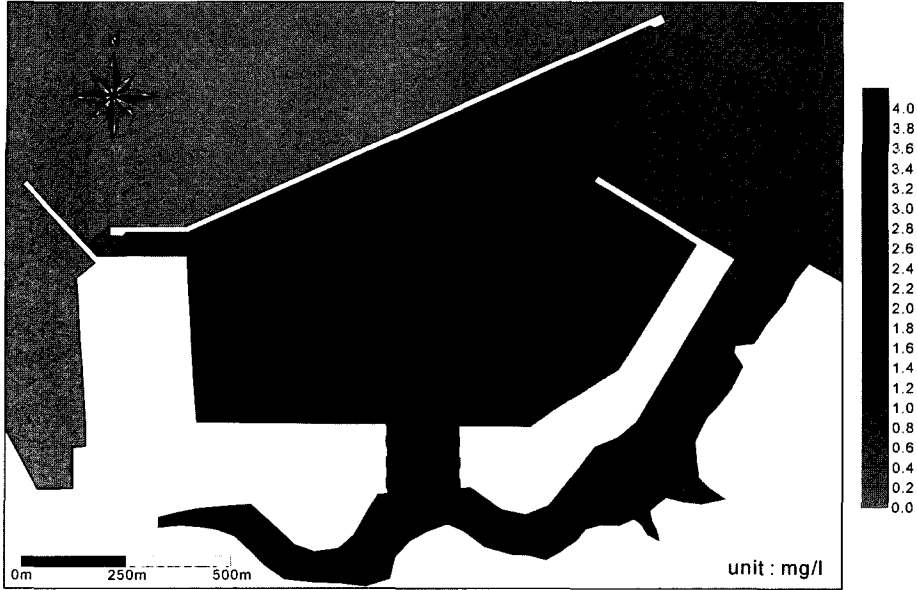


Fig. 18. Concentration distribution for instantaneous discharge with flow channel(after 7 days).

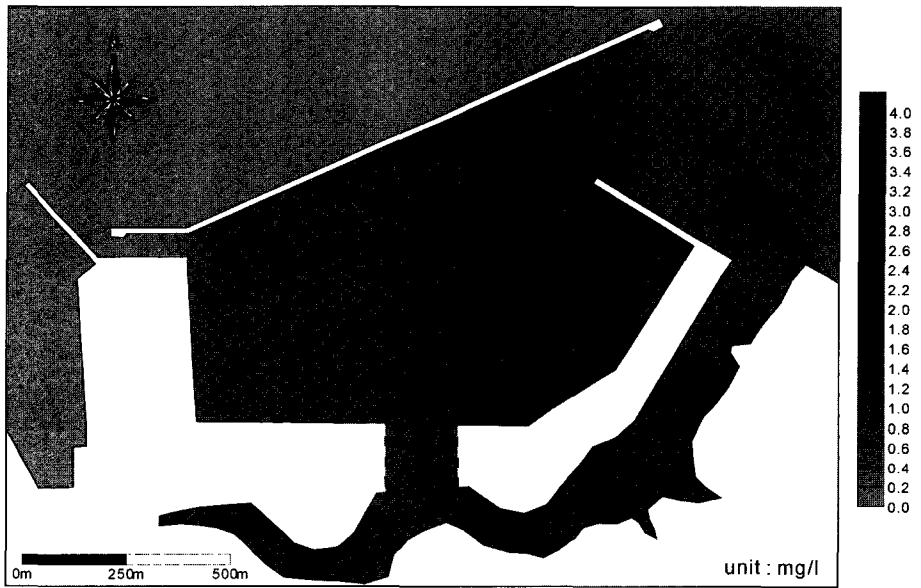


Fig. 19. Concentration distribution for instantaneous discharge with levee(after 7 days).

5. 결론 및 토의

제주 외항의 해수순환 촉진을 위하여 제안된 해수유통로 시설의 기능이 기대치에 미치지 못하는 것으로 나타남에 따라 파랑에너지를 적극적으로 이용하여 항내 해수순환 강화를 도모할 수 있는 월류제를 해수유통로의 외

해측 전방에 설치하는 방안에 대한 세부적인 검토를 수행하였다. 제주 외항의 파향선도 및 파랑변형수치모형 등의 결과 등을 종합하면 제주외항 서방파제 서측 제두부와 제주내항 동방파제 사이의 해역에 파랑이 집중되는 현상이 나타나는데 이 해역에 월류제를 설치함으로써 파랑에너지 집중이라는 자연적인 악조건을 역으로 이용하여 제

주의항의 효율적인 해수교환 및 수질개선을 도모함으로써 환경친화적인 항만건설을 유도함과 동시에 항만정온도 개선과 항만가동을 향상 등 항만의 기능성 측면에서도 긍정적인 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

월류제를 통한 해수유입율은 조위와 월류제 상단의 표고차 및 유의파고에 의하여 결정되며 조위와 유의파고가 확률변수이므로 해수유입율은 결정론적으로 계산하는 것보다 확률론적으로 취급하는 것이 바람직한 것으로 사료된다. 제주항 조위의 확률분포와 월류제 설치 지점의 유의파고 분포 및 해수유입율 수리실험결과로부터 추정된 파랑에 의한 제주 외항의 연평균 해수유입율은 초당 8.6톤으로 나타났다.

월류제의 최적설치 위치는 주로 유의파고 분포에 의존하며 제주 외항의 경우 최적위치는 외항서방파제 서측 제두부와 내항 동방파제 사이의 해역인 것으로 나타났다. 조위의 분포는 월류제 상단의 표고 결정에 가장 큰 영향을 미치며 제주 외항 월류제의 경우 평균해면상 10 cm 위치가 최적 표고로 나타났으나 상단표고를 평균해면으로 한 경우와의 해수유입율 차이는 0.2%에 불과하다.

해수유통로안(제1안)에 대한 제주 외항내의 유속분포는 매우 미약하여 조석에 의한 항내해수교환 및 수질오염개선효과는 기대하기 어려운 것으로 나타났으나 월류제를 도입한 경우(제2안)에는 해수유통로에서 파랑에 의하여 외항내로 유입하는 강한 흐름이 형성되어 항내해수교환과 수질개선에 큰 효과가 있는 것으로 나타났다.

오염원을 제주 외항 중앙에 위치시켜 오염물질을 연속 방류하는 경우에 대하여 수치모의평가한 결과 월류제를 설치하는 안이 해수유통로 안보다 항내뿐만 아니라 배후수로에서 우수한 수질정화효과를 갖는 것으로 평가되었다. 또한, 86.4톤의 오염물질을 제주외항 중앙에서 순간방류하는 경우에 대해서는 월류제 안이 해수유통로 안보다 청정한 외해수의 유입(1주일당 평균 520만톤)으로 인한 해

수교환효과에 때문에 항내오염에 대한 희석효과가 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

- 김양수, 2001. 한국에서의 강우와 하천유량의 확률모형에 관한 사적 서신(personal communication).
- 이달수, 2001. 해수교환방파제의 실용화연구. 해양정책 R&D 동향, 제2호, pp. 13-17.
- 정태성, 1992. 이동경계를 고려한 유한요소 해수유동모형. 한국해양안·해양공학회지 제4권 제3호, pp. 146-155.
- 이달수, 2001. 해수교환방파제의 실용화 연구. 해양정책 R&D 동향, 제2호, pp. 13-17.
- 한국해양연구원, 2001. 제주외항방파제(1단계) 축조공사 대안 설계 해양조사 및 수치모델 용역 보고서. 802p.
- 해양수산부, 2001. 해상파랑관측 및 조사. 214p.
- 乃万俊文, 1977. 養殖漁場の水質改善工法. 水産土木 Vol. 23, No. 2, pp. 65-72.
- Falconer, R.A., 1986. Water quality simulation study of a natural harbor. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE*, 112(1), 15-34.
- Goda, Y., 1985. Random seas and design of maritime structures. University of Tokyo Press, 323p.
- Massel, S.R., 1993. Extended refraction-diffraction equation for surface waves. *Coastal Eng.*, 19, 97-126.
- Ris, R.C., 1997. Spectral modelling of wind waves in coastal area. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Repot No. 97-4, TUDelft, 160p.
- Suh, K., Lee, C., and Park, W., 1997. Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography. *Coastal Eng.*, 32, 91-117.

Received August 1, 2002

Accepted August 28, 2002