

# 자연에너지를 이용한 항만 수질 개선연구

김 현 주 / 한국해양연구소 해양개발시스템연구센터  
김 종 인 / 동아대학교 토목공학과

## 서 론

동해는 파랑이 거칠어 안전한 정박 및 항내 작업을 위하여 케이슨과 소파블록(테트라포드)를 이용하여 튼튼한 방파제를 시설하여 항만을 개발하여 왔다. 그러나, 동해는 조류가 약하여 이들 항만 내에서의 해수교환은 매우 불량한 편이며, 이에 따른 수질악화가 심화되고 있는 것으로 알려지고 있다. 동해 항만의 대부분이 이러한 문제점을 안고 있으며, 대표적인 항만이 주문진항인 것으로 평가된다. 이로부터,

항만수질 개선을 위하여 주기적으로 오니 준설 등을 해오고 있으며, 해수교환을 촉진시키기 위해 외곽방파제 일부를 절개하고 파랑제어 및 해수교환 촉진을 위한 배치 최적화를 시도하려는 계획 등이 검토된 바 있다. 또한, 방파제 일부를 해수교환형 방파제로 재건설하는 등의 방안이 제시된 바 있다.

한편, 인류에게 식량, 환경 및 에너지 자원 등의 문제는 인류의 존속을 위하여 해결하지 않으면 안되는 인류적 과제로 다가오고 있고, 이에 대응하기 위하여 연안 생산성과 환

경 자정력 향상 및 자연에너지 개발과 이용 등이 적극 검토되고 있다. 이러한 문제를 종합적으로 다루기 위해서는 각각이 효율적으로 검토되고 개선되어야 할 뿐 아니라 종합적인 개선 방안도 검토되지 않으면 안된다. 이를 위한 방안의 하나로써 자연에너지를 이용하여 해역환경을 개선하고, 연안 생산성을 향상시킴으로써 전술한 3가지 문제를 만족시키며 연안을 개발하는 방안이 검토될 수 있다.

해양연구소 해역개발시스템 연구센터는 이를 위한 핵심장

치의 개발 및 응용연구를 진행하고 있으며, 본 연구는 그 일부를 활용하여 주문진항에 적용한 경우에 대해 타당성을 평가해보는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 자연에너지를 이용한 해역환경개선기술 현황을 조사 및 분석하였고, 주문진항의 수질현황을 검토한 후 가용한 자연에너지를 분석하여 적용시스템을 구성하였다. 이 시

스템의 가동에 따른 항내 해수 교환 특성을 수치실험을 통해 해석 및 평가함으로써 수질개선의 가능성을 검증하고자 하였다.

### 자연에너지를 이용한 해역환경제어기술

해양환경 개선기술은 다양하게 개발되어 왔으나, 그 메카

니즘을 중심으로 분류해보면 내부부하를 저감시키는 방안, 해역자정능력을 복구 및 향상시키는 방안 및 해난사고 등에 의한 오염 부하 저감 및 방제 기술 등으로 대별할 수 있다. 이들 해양환경 개선기술을 정리해보면 <표 1>과 같이 유입저감, 용출억제, 내부생산저감, 직접정화, 해수교환 촉진, 에어레이션 등으로 분류할 수

<표 1> 연안환경개선기술의 분류 및 특성

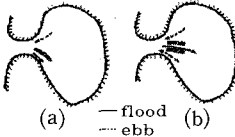

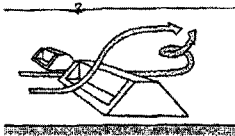
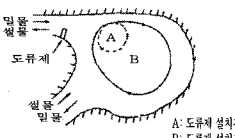
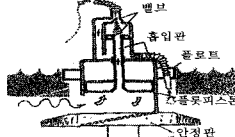
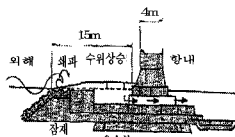
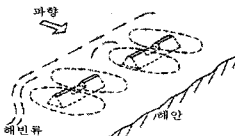
정화공법	방 법	기술과제	기 능 성			경 제 성	
			영향범위	직접효과	지속성	제작/건설비	유지비
유입저감	유입수 정화법	효율적 오폐수 처리기술	양호	양호	양호	처리장 건설비	운용유지비
	해역차단법	대상층 차단장치 계류 및 기동성	차단/보호 범위내	양호	양호	차단장치 설치	필요시 보수
용출저감	준설공법 (오니제거)	박층준설, 2차오 탁 방지, 준설토 처리기술	폐쇄성 해역 효과 큼	용출제어 효과	오염물 재퇴적전까지 유효	공사 규모에 좌우	운용유지비는 불필요
	석회 살포법						
	모래덮기 방법						
	호기성 유지	경운 및 폭기	작업범위				
내부생산저감	응집제를 이용한 탈인	합성응집제 개발	국부적	양호	불량	불필요	응집제 투여
	해조류 이용 영양염 흡수	해조장 조성기술	국부적	양호	양호	해조장/인공해저	
직접정화	여과처리법	고효율 여과장치	국부적	양호	불량	여과장치	장치운용비
	생물여과처리법	생물막 접촉확대	국부적	양호	보통		
	사석공극 접촉/산화처리법	사석공극 확대기술 및 다기능화	국부적	생물여과 효과 큼	보통	해안구조물 부가기능	불필요
	응집침전처리법	응집제 살포장치 침전물 처리	국부적	양호	보통		응집/수거비
해수교환촉진	수로(도류제)이용 해수도입법	유동제어기술개발	유속 증진시 효과적	양호	양호	해안공사 병행시 경제적	지반보수비
	만(항)구 지형 개량법	유동제어기술 해수교환방파제	유속 증진시 효과적	양호	양호	해안공사 병행시 경제적	항로매몰시준설비용
	도수 및 희석법	충분한 청정수의 확보 및 송수	유속 증가시 효과적	교환촉진	양호	송수, 저장 시설비	동력 필요, 전력비쌘
에어레이션	인공폭기법	순환촉진, 경제적 에너지 확보	산기관 부근 좁은영역	폭기 및 연직혼합	연속산기법 효과적	산기장치 필요	동력 필요, 전력비쌘
	구조물 이용	해역이용목적부합 구조물 형식/배치	해안구조물 부근에 국한	쇄파시 폭기효과 큼	높음	구조물의 부가기능	불필요
기타	간석지 조성법	간석지 조성기술	간석지 부근	양호	양호	간석 조성비	불필요
	인공해빈조성법	양빈과 사빈보호	해빈 부근	양호	양호	해빈 조성비	양빈비용

있다. 유입저감기술은 유입수 처리, 유입외해수 정화, 전수 심 또는 표층 차단 등에 의해 육상이나 외해로부터 유입되는 오폐수를 정화처리하거나 유입을 방지하는 기술이다. 용

출저감기술에는 준설, 모래나 석회살포, 호기성 유지방안 등이 있으며, 이들은 저층의 유기오니를 준설하거나 모래나 석회로 덮어서 용출을 억제하고 경운 및 폭기로 호기성을

유지하는 방법이 있다. 내부생 산저감기술은 응집제를 살포하여 인 등을 응집처리하는 응집제 살포법과 해조류에 의한 질소, 인 등을 제거하는 영양염 흡수법 등이 있다.

〈표 2〉 자연(해양)에너지를 이용한 연안환경개선기술의 종류 및 특성

	공법	개념도	원리 및 효과	비고
조석	만구개량		해수교환이 저조한 폐쇄성 만내 자유진동주기와 근접한 강제진동주기를 가질 수 있도록 만구의 형상, 단면적 개량 및 수로 굴삭에 의해 해수교환을 촉진시키는 방법	일본 · 北海道 · 宮城縣 · 京都府
	수로공법		천해역에 국소적인 깊은 수로를 조성하여 만내 해수교류, 교환 및 저층수의 유동을 촉진시키는 수질 및 저질을 개선시키는 방법 - 간석지 수로공 - 밀도류 수로공	일본 · 宮城縣 · 愛知縣
해류	용승류 발생 구조물		해저제방, V형 연직도류제 등을 설치하여 배후에 용승류를 발생시켜, 저층의 영양염을 광달층으로 운송함으로써 식물성 플랑크톤의 발생·증식을 촉진하고 양호한 어장을 조성함.	일본 · 青林縣 · 愛知縣
	조류 제어 구조물		왕복 조류의 한 방향성분을 유동제어구조물에 의해 강화시켜 하류 또는 조석 잔차류를 증대시켜 해수교환량을 증대시킴. - 조류 왕복시 만구의 유량계수 조절법 - 수평 순환류 조장시키는 방법	
파랑	파동펌프		파랑에너지를 이용하여 용존산소가 풍부한 표층수를 저층으로 공급함으로써 저층수의 호기성을 유지하고 연직혼합을 촉진시키는 방안.	일본 · 長崎縣
	해수도입 방과제		구조물에 대한 입사파의 run-up이나, 소파에 따른 평균수위의 상승으로 동수경사를 형성하여 항(만)내부로 외해수를 도입시키는 해안구조물 이용.	일본 · 岩手縣
	연안류 발생 구조물		이안제, 인공리프 등의 파랑제어구조물을 이용하여 파 에너지를 흐름으로 바꾸는 방법으로 구조물 주위에 순환류를 조성하여 알·부유유생, 해초의 포자, 유주자 등의 분산을 억제하고 정온화시킴.	일본 · 岩手縣 · 北海道

직접정화기술에는 여과처리, 생물여과처리, 사석간 접촉산화처리, 응집침전처리방법 등이 있으며, 여과처리는 여과장치를 이용하여 수중의 오탁유기물을 여과하여 제거하는 방법이고, 생물여과처리는 여과재 표면에 미생물을 부착시켜 생물막에 의한 수중 유기물을 산화분해하는 방법이고, 사석간 접촉산화처리는 자갈이나 사석에 부착된 생물막을 이용하여 오탁수중의 유기물을 산화분해하는 방법이고, 응집침전처리는 응집제를 이용하여 유기물을 침전시켜 제거하는 방법이다. 해수교환 촉진기술은 수로나 도류제를 이용하여 국지적 유속을 변화시켜 해수교환을 촉진시키는 방법, 만구나 항구의 형상 및 배치를 개량시키거나 해수교환형 방파제를 설치하여 해수교환을 촉진시키는 방법과 동력을 이용하여 청정해수를 송수함으로써 희석 및 교환을 촉진시키는 방법 등이 있다. 에어레이션 기술에는 인공폭기에 의한 연직혼합의 촉진 및 용존산소의 증가에 의해 호기성 수질을 유지시키고 확산시키는 방법과 경사면이나 해변에서의 파랑의 쇄파에 의한 용존산소의 증가방법 등이 있다.

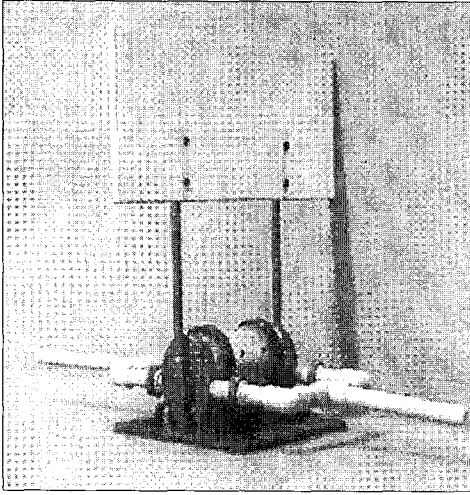
연안역의 수질환경은 수산생물 생식환경으로서 중요하며, 최근에는 water front 개발과 관련한 amenity를 위하여 중요성이 강조되고 있다. 연안역의 환경개선을 위해서는 <표 1>의 개선방안이 대상해역의 오염 및 부하 정도, 지형적 조건 및 자연에너지 등을 고려하여 단독 또는 복합적으로 검토하여야 한다. 여기서, 자연에너지를 이용하여 적용 가능한 분야는 직접정화, 해수교환 촉진, 에어레이션 등이라 할 수 있다. 이들 공법의 종류 및 특성은 <표 2>에 나타난 것과 같다.

동해의 가용 자연에너지는 파랑, 바람, 태양열 및 온도차 등이라 할 수 있고, 이들 에너지를 활용한 해수교환 촉진시스템을 검토하였다. 여기서는 주문진항 방파제의 전면 또는 상부에 시설하는 간이장치로서 검토하였고, 파력 및 풍력을 이용한 송수 시스템을 대상으로 한다. 파동펌프는 하부힌지된 진자판에 의해 파랑에너지를 흡수하여 청정해수를 항만이나 양식용 육상수조나 송수 또는 양수할 뿐 아니라 파력발전용 1차 변환장치로서 활용 가능한 요소장치로서 <그림 1>에 나타난 것과 같다. 파동펌프는 방파제 전면부의 떨

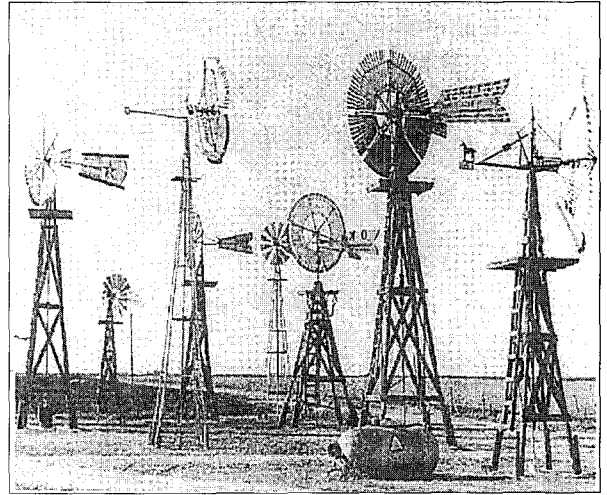
어진 곳에 설치되어 파랑에너지를 흡수함으로써 배후역의 정온도를 향상시키므로 배열을 이용하여 잠재 효과도 얻을 수 있다. 풍력펌프는 Aeromotor water system에 의한 것으로서 <그림 2>와 같이 구성된 다익풍차를 이용하여 원하는 곳으로 양수하는 시스템이다. 이 장치는 방파제의 상부에 설치가능하며, 방풍 효과도 있는 것으로 알려져 있다. 이들 펌프는 파력 및 풍력을 이용하여 목표 송수량과 토출압력(양정)을 만족시키는 형식으로 설계 및 적용이 가능하도록 되어 있다. 그림 3에 파동펌프를 이용하여 청정한 외해수를 항만으로 송수시키는 장면을 나타내었다.

## 주문진항의 수질현황 및 자연에너지 가용량 해석

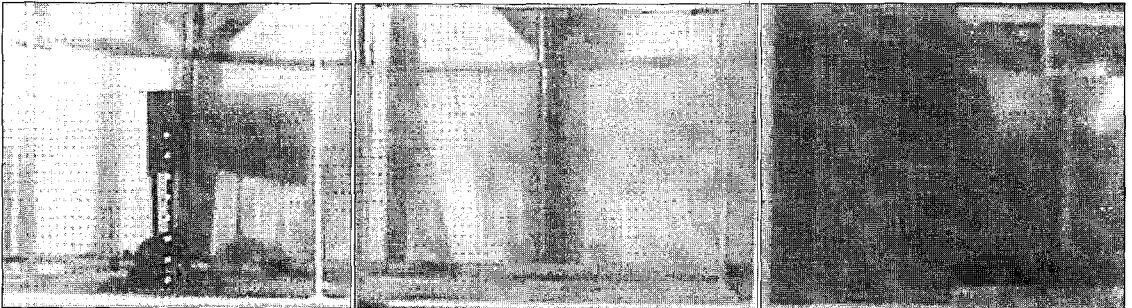
주문진항은 우리나라 동해의 대표적인 어항으로써 강원도 강릉시에 위치해 있으며, 지역 특성상 수산생산기지로서 뿐만 아니라 주변 관광권을 연계한 해양관광벨트 개발 등의 가능성이 큰 곳이다. 따라서, 이러한 잠재적 자원을 충분히 활용하기 위해서는 쾌적하고 활기 있는 항만으로 정비할 필요가 있다.



〈그림 1〉 파동펌프



〈그림 2〉 풍력펌프



파동펌프

송수관

방파제

방수관

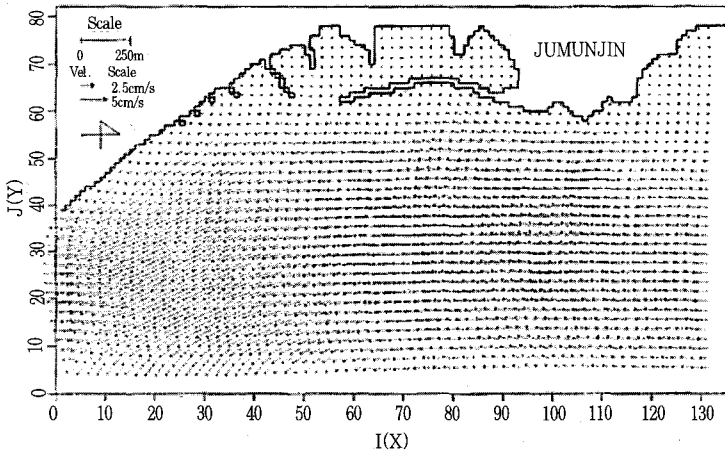
〈그림 3〉 파동펌프에 의한 외해수의 항내 송수 장면

동해수산연구소(1998)는 연안역 정점별 해양오염 실태를 계절별로 조사하고 있으며, 주문진항 주변해역의 조사는 항만의 안과 밖을 대상으로 실시되고 있다. 항외의 외해수는 청정한 편이나 항내의 수질오

염은 심각하며, 항내의 표층수에 비해 항외의 저층수는 수온이 1.8℃ 낮고, 염분은 5.38‰ 높고, DO는 0.58ml/l 높게 나타났다.

한편, 동해 연안역은 조류가 약하여 항내 해수교환은 불량

하지만 바람 및 파랑 에너지는 비교적 높은 편이다. 따라서, 해수교환을 위한 자연에너지로서 바람이나 파랑에너지를 사용하는 것이 적합할 것으로 생각된다. 주문진 인근해역의 파랑에너지 부존량 해



〈그림 4〉 조류분포도(창조)

석을 위해서는 강릉(경포) 연안파랑관측소의 파랑자료가 가용하다. 강릉연안 파랑관측은 해안선으로부터 1.2km(수심 15m) 지점에 설치한 PUV를 이용하여 관측되고 있으며, 1990~1994간 관측한 결과(해운항만청)를 이용하여 가용 에너지를 평가하였다. 5년간 평균 유의파고는 0.77m, 평균 유의파주기는 6.78sec로 나타났고, 이를 wave power로 계산하면 약 2kW/m에 달한다. 한편, 바람에너지는 동해에서 관측된 1992~1995년간 풍속자료를 이용하였다. 그 결과, 겨울과 봄에는 에너지 밀도가 높고, 여름에는 낮은 특징을 보였지만 년 평균 8.788W/m<sup>2</sup>의 바람에너지가 가용함을 알 수 있었다. 자연 에너지를 이용한 송수(양수)펌

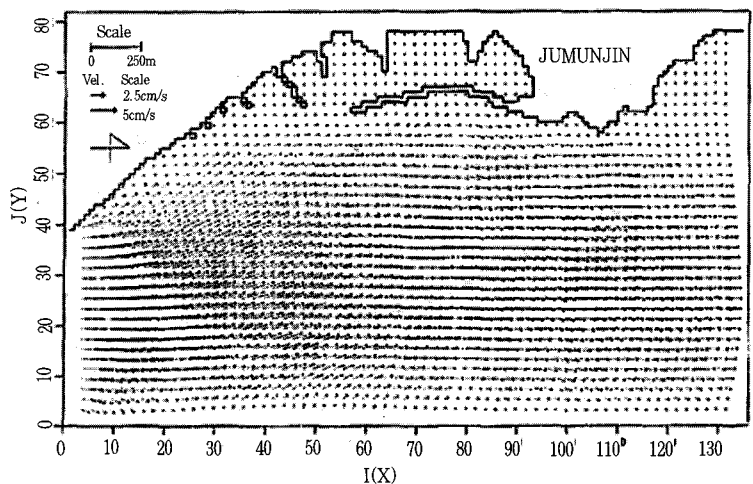
프는 일정한 입력에너지에 대해 송수량과 양정(흡입 및 토출압력)이 반비례하므로 이를 고려하여 설계하여야 한다.

### 자연에너지 이용형펌프에 의한 항내 해수교환해석

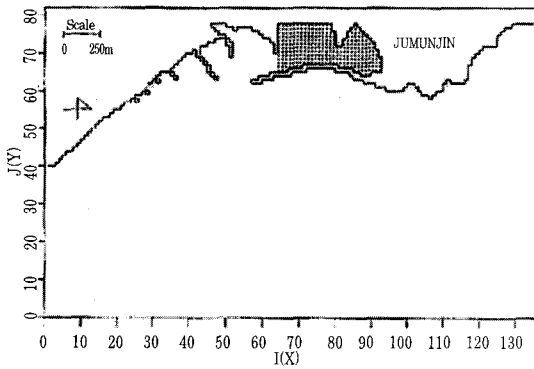
주문진 주변해역의 해수유동

특성을 재현하고, 송수에 따른 해수교환 특성을 해석하기 위하여 조류를 수치시뮬레이션하였다. 조류는 수심평균된 2차원 연속방정식 및 운동량방정식을 유한차분법을 이용하여 이산화하고 ADI법을 이용하여 해를 구하였다. 해수유동의 수치시뮬레이션 예를 창조시 및 낙조시 최강류에 대해 〈그림 3〉 및 〈그림 4〉에 나타내었다.

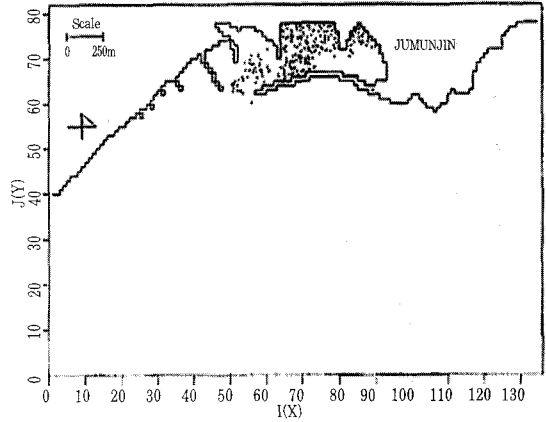
항내수의 유동에 의한 해수교환을 파악하기 위해 대상영역에 수치입자를 투입하고 시간에 따른 이동을 추적함으로써 해수교환율을 평가하는 Lagrangian 입자추적을 실시하였다. 해수교환을 평가 기준선은 경계면을 기준으로 하여 항내측 전체 항만공간을 대상으로 하였다. 각 항내영



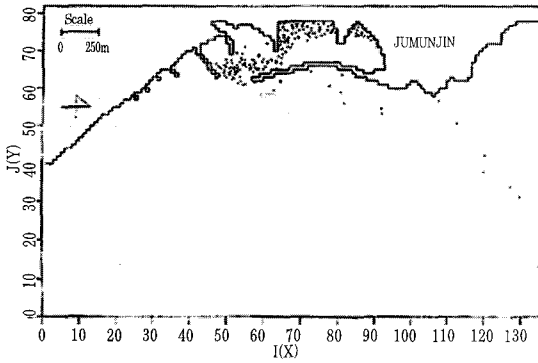
〈그림 5〉 조류분포도(낙조)



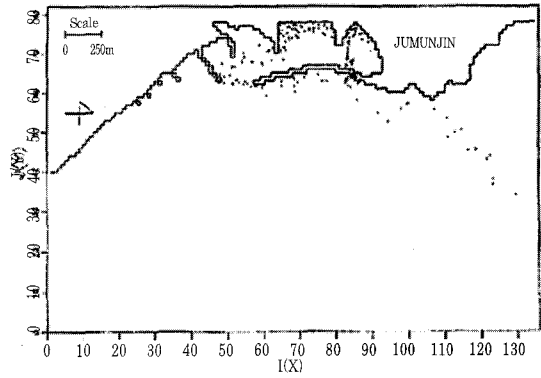
〈그림 6〉 초기조건



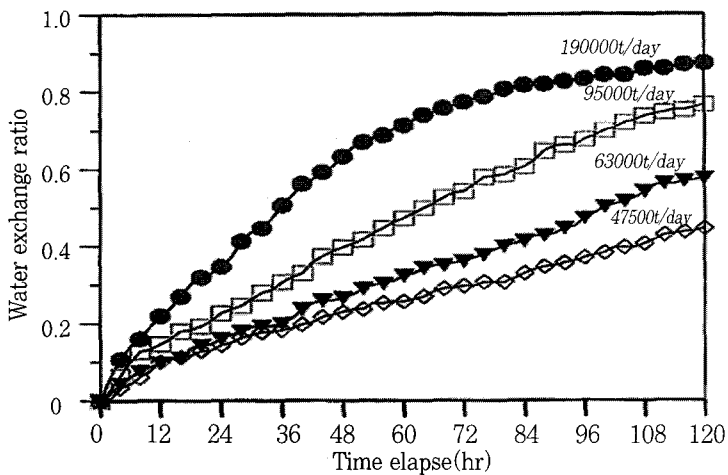
〈그림 7〉 1일 후의 해수교환 상태



〈그림 8〉 2일 후의 해수교환 상태



〈그림 9〉 3일 후의 해수교환 상태



〈그림 10〉 송수량에 따른 해수교환율의 변화

역을 및 송수량 등에 따른 해수교환율의 변화특성을 고찰하였다.

해석 예로서 주문진항 내항을 기준으로 하여 1일 18만톤의 외해수를 항내로 송수하여 다수 지점에서 방류할 경우에 대한 해수교환 특성을 검토하였다. 계산 초기조건은 〈그림 6〉과 같고, 시간의 경과에 따른 해수교환 양상을 〈그림 7〉

~(그림 9)에 나타내었다. 그림으로부터, 시간의 경과에 따라 해수교환은 활발해지며, 가장자리나 돌제 배후에서는 교환이 정체됨을 볼 수 있다.

해수교환의 정도를 논의하기 위한 해수교환율에 대한 정의 및 평가방법은 다수가 제안되어 있으나, 여기서는 전술한 입자추적에 의한 해수유출률을 해수교환율( $E_w = 1 - N_{pi}/N_{po}$ ;  $N_{pi}$ :항내 잔류 입자수,  $N_{po}$ :초기투입 입자수)로 정의하여 적용하였다. 전술한 방법을 이용하여 다양한 송수량(송수량은 1일 190,000톤, 95,000톤, 63,000톤 및 47,500톤)으로 외해수를 항내로 송수할 경우에 대한 해수교환 특성을 비교하여 <그림 10>에 나타내었다. 그림으로부터 해수교환율은 송수량에 따라 거의 일정하게 증가함을 볼 수 있고, 송수량에 의한 강제배수 효과가 탁월한 교환동력임을 알 수 있다.

마찬가지 방법으로 동일 방류량을 1, 2, 3, 4 개 지점으로 나누어 방류한 실험도 수행한 결과, 1지점에 방출했을 경우와 4지점에 방출했을 경우의 해수교환율은 크게 차이 나지는 않았으나 국지적인 정체역의 해소를 위해서는 분산하여 다지점에서 방류하는 것

이 양호함을 알 수 있었다.

## 결론

동해안에 위치한 항만 및 남해안의 내만은 수질오염 상태가 심각하여 쾌적한 연안공간을 제공하지 못할 뿐 아니라 생산성도 저하시키고 있는 실정이다. 특히, 청정해역으로 알려진 동해에서도 항만 내부 및 주변해역은 수질오염이 심각하며, 이는 파랑이 거칠어 선박의 안전한 정박 및 항내 작업을 위하여 견고하게 축조한 방파제에 의해 항 내부의 해수교환이 나쁘고 육상으로부터의 오염물질 부하가 증가하고 있기 때문인 것으로 알려져 있다. 한편, 남해안의 경우에도 내만은 해수교환이 비교적 좋지 않으며, 임해도 시 및 공업단지의 조성에 따른 오염물질의 유입량 증가와 내만형 양식장의 밀식에 의한 자가오염의 심화로 인하여 연안오염이 심화되고 있다.

본 연구는 이러한 항(만)의 해역환경을 개선시키기 위하여 물리적 개선기술을 중심으로 기술현황을 분석하였고, 특히 자연에너지를 이용하는 방안에 대해 종합적으로 검토하였다. 또한, 그 적용성을 고찰하기 위하여 항내수질이

문제시되고 있는 주문진항을 대상으로 파동펌프 및 풍력펌프를 목표 송수량에 대응되게 설치하여 항내로 송수할 경우에 대해 해수교환 특성에 대한 수치실험적 검토를 수행하였다.

그 결과, 조류가 약한 동해안 주문진항은 항내 유동이 매우 미약하여 해수교환이 거의 이루어지지 않았으나, 자연에너지 이용형 펌프를 가동함에 따라 해수교환은 양호하게 촉진됨을 확인할 수 있었다. 조류가 미약한 주문진항에서는 파동펌프의 송수에 의한 강제배수력이 해수유동원이 되므로 교환율은 송수량과 거의 비례하여 촉진됨을 알 수 있었다.

자연에너지를 이용한 해역환경개선기술은 해양외력을 에너지로서 흡수함으로써 해안구조물에 대한 작용외력을 저감시키며, 배후 해역의 정온화를 통하여 해양공간자원의 활용도 개선됨을 기대할 수 있다. 또한, 해역환경을 개선시킨다는 점에서 뿐만 아니라 이를 위해 화석연료를 소모시키지 않음으로써 지구환경 보전에 기여할 수 있다는 점도 강조할 수 있다. ㉠