

부유식 해양구조물의 해역정온화 기술

홍기용, 김현주, 최학선(한국기계연구원 선박해양공학연구센터 해양기술연구부)

1. 서언

이용 가능한 육상공간의 부족과 폐기물, 소음, 대기오염 등 각종 공해유발 산업의 증가로 국토의 황폐화가 심각한 문제로 대두하고 있는 현시점에서, 연근해 해양공간의 적극적 개발을 통한 문제해결이 대안으로 부상하고 있다. 연근해에 설치가능한 대형 부유식 구조물은 담수화 시설, 폐기물 처리시설, 위험물 저장창고, 발전소 등의 공해유발 시설의 용도 뿐 아니라 해상비행장, 주거시설, 레저시설 등의 기능을 수행할 수 있다. 부유식 구조물은 심해에 설치되는 경우에 고정식(또는 매립식) 구조물에 비해 건설 및 설치비가 저렴하고, 철거가 용이하며, 공해유발 시설의 육상 설치에 따르는 주민과의 마찰을 피할 수 있는 장점을 지닌다. 그러나 부유구조물은 해양파, 해류, 바람 등의 해상조건에 의하여 동적거동을 하게되어 작업 및 거주환경에 영향을 줄뿐만 아니라 안전성의 확보 관점에서도 육상 구조물과는 전혀 다른 어려움을 갖는다. 따라서 부유구조물의 장점을 살리면서 작업성 및 안전성을 향상시키기 위한 적극적 대책으로, 부유구조물에 영향을 미치는 해역의 환경적 특성의 제어를 통하여 부유구조물의 동적거동을 기준 허용치 이하로 완화시키는 해역정온화 방법을 강구할 필요가 있다.

해역정온화를 위한 제어기술은 부유구조물에 유입되어 구조물의 운동을 유발하는 파랑에 대한 제어기술과 주변해역의 해류 및 시설물의 배출수 등에 의해 유발되는 국지조류에 대한 제어기술의 두 분야로 크게 대별될 수 있다. 해역정온화를 위한 제어구

조물의 설계를 위해서는 파랑 및 해수유동과 관련된 여러 핵심기술의 확보가 필수적이다. 이들 핵심기술들은 환경조건들에 대한 이론적, 수치적 해석법의 개발과, 설계인자들의 변화에 따른 성능평가를 통한 제어구조물의 최적설계, 그리고 해석법 및 설계 구조물의 성능 검증을 위한 모형시험기법의 개발 등을 포함한다. 파랑 제어기술은 구조물에 입사하는 파랑의 정확한 추정을 기초로 하며 이를 위해서는 구조물주위에서 발생하는 파의 굴절, 회절, 반사 등의 해석과 천해지역의 수심변화에 따른 파랑변형의 해석이 필요하다. 파랑 제어를 위한 구조물로는 방파제의 설치가 고려될 수 있으며, 이를 위해서는 부유구조물의 운동특성, 설치장소의 지형, 해양의 환경조건에 적합한 방파제의 설계가 필수적이다. 따라서 효과적인 방파제의 형식 및 형태에 대한 연구와 각각의 소파효과 등에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 수심에 따라 최적 방파제의 형식은 달라질 수 있으며 방파제의 형식에 따라서는 이의 설치를 위한 계류시설이나 지반에 대한 연구가 요구된다. 모형시험과 실험실 실험을 통한 해석법의 검증과 설계인자의 도출은 구조물의 설계에서 필수적이므로 제어구조물 모형시험기법의 정립이 또한 필요하다. 또한 방파제로서의 역할 뿐 아니라 파랑에너지를 이용하는 복합 구조물로서의 기능에 대한 연구가 시설의 효율적 운용 관점에서 중요하다.

해양환경 인자중 조류는 구조물 및 지반에 작용하는 주요 외력으로서의 역할뿐 아니라 퇴적물의 형성이나 오염물질의 확산 등에 가장 큰 영향을 주는 인자이다. 따라서 해상에 부유구조물 및 방파제 등의



대형 구조물이 설치되는 경우 이에 따른 조류의 유동변화 관측 및 예측에 관한 연구가 구조물의 안전성 및 환경보전의 관점에서 필수적이라 하겠다. 부유구조물의 설치시 야기되는 주변해역의 물리적 환경 변화가 주변시설에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고, 예상되는 제문제의 적극적 개선을 위한 해류제어 구조물의 설계기술은 해수유동의 수치적 모델링과 이를 활용한 해수축진 구조물의 설계가 핵심을 이룬다. 해수유동에 의해 발생하는 지반의 침식과 변형, 해역 해수유동의 부분적인 정체에 의한 생태적 환경변화 분석, 시설물에 의해 배출되는 온수 및 오염물질의 확산예측 및 환경영향 평가는 해수유동에 의해 구조물에 작용하는 하중의 계산과 함께 해상구조물 설계시 필수적이다. 파랑과 해수유동의 상호간섭에 의한 파랑변형의 해석은 비선형 제한상의 고찰에서 중요하다. 한편 제어구조물의 설계를 위해서는 설치대상 해역의 설계조건(수심, 파고, 조류속도, 풍속)의 설정이 필요하며 설계 반복주기의 선정을 위해 구조물의 수명이 주어져야 한다.

우리나라는 오래 전부터 수산 및 해운활동이 용이한 내해역 및 폐쇄성 내만을 이용해 왔고, 최근 이를 중심으로 임해도시 및 공업단지 등이 조성되어 공간자원으로 이용되고 있다. 이는 내해역 및 폐쇄성 내만의 해양외력환경이 개방성 내만이나 외해에 비해 해상상태가 비교적 정온하였기 때문이다. 그러나, 천연형 정온수역인 내해역 및 폐쇄성 내만은 대부분 개발되어 이용되고 있으며, 무분별한 연안개발로 인한 해역오염도가 자정능력을 상회하고 있어 보호가 시급한 실정이다. 이에 따라 해양공간의 유효이용이라는 관점에서 지금까지 비교적 이용도가 낮았던 개방형 내만역이나 외해역을 적극적인 활용이 중요한 의의를 가지게 되었다. 선진 해양국에서는 연안역의 고도 이용 및 개발을 위한 각종 정책 및 방안들이 제시되고 있으며, 그 대표적인 것이 연안역 통합관리(Integrated Coastal Zone Management), Mitigation 등이다[1]. 이러한 연안역 이용/개발 방안은 연안자

원의 활용에 있어서 환경과 조화를 이루는 지속가능한 이용 및 개발을 목표로 한 것으로서 그 실현을 위한 각종 요소기술의 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 이에 따라 해양구조물의 설계는 종래의 설계 개념인 경제성과 안전성에 부가하여 경관성과 생태 환경적 건전성을 요구받고 있다[2]. 따라서, 해양공간의 고도이용 방안의 하나로서 고려되고 있는 대형 복합플랜트의 개발도 이러한 측면에서 부유체 설계 및 제작기술, 계류기술, 현지시공기술 뿐만 아니라 해역정온기술, 환경영향평가 및 완화기술, 생태계 창조 및 복구기술 등의 연구가 필수적이다.

본 고에서는 대형 복합플랜트에 대한 외력작용의 극소화와 구조물 주변해역의 환경개선 및 친수공간 기능 극대화를 위한 해역정온화기술에 대해 소개하고자 한다. 해역제어구조물의 종류와 각각의 기능적 특성을 정리하고, 국내외의 개발현황을 살펴보면, 핵심 요소기술을 고찰함으로써 대형 복합플랜트 개발을 비롯한 새로운 해역 이용 및 개발에 필요한 해역정온화를 위한 제어구조물의 개발 방향을 논의하고자 한다.

2. 해역정온화 구조물의 분류 및 개발현황

(1) 해역정온화 구조물의 종류 및 특성

해역정온화의 주요관심은 대상시설을 주요외력인 해양파로부터 보호하고, 파랑의 영향을 감소시켜 작

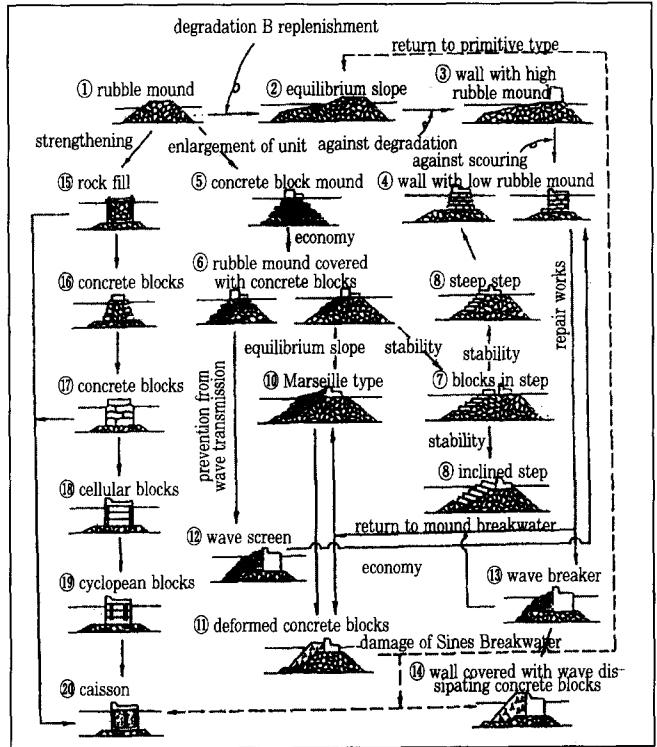
〈표 1〉 파랑제어구조물의 종류

고정형	경사제	1) 사석제	2) 소파블록 경사제
	직립제	1) 케이슨식 직립제 3) 셀형 블록 직립제	2) 블록식 직립제 4) 콘크리트 단괴 직립제
	혼성제	1) 케이슨식 혼성제 3) 셀형 블록 혼성제	2) 블록식 혼성제 4) 콘크리트 단괴 혼성제
	특수방파제	1) 말뚝식 방파제 4) 해중 평판형 방파제	2) 커튼제 5) 인공해조 방파제
	잠제 및 인공 reef	1) 사석 잠제 4) 사석 reef	2) 블록 잠제 5) 소파블록 reef
부유형	해상부유식	1) 상자형 부방파제 (항계류식 부방파제 포함) 2) 암기형 부방파제 3) 유연막 수하식 4) 활절관형 부방파제 5) 표층시트형 방파제	
	해중설치식	1) 중층 에어백 방파제 3) 중층 시트형 방파제	2) 공기주머니내 방파제 4) 중층 암기형 방파제
특수형	1) 공기방파제	2) 수류방파제	3) 인공해조제

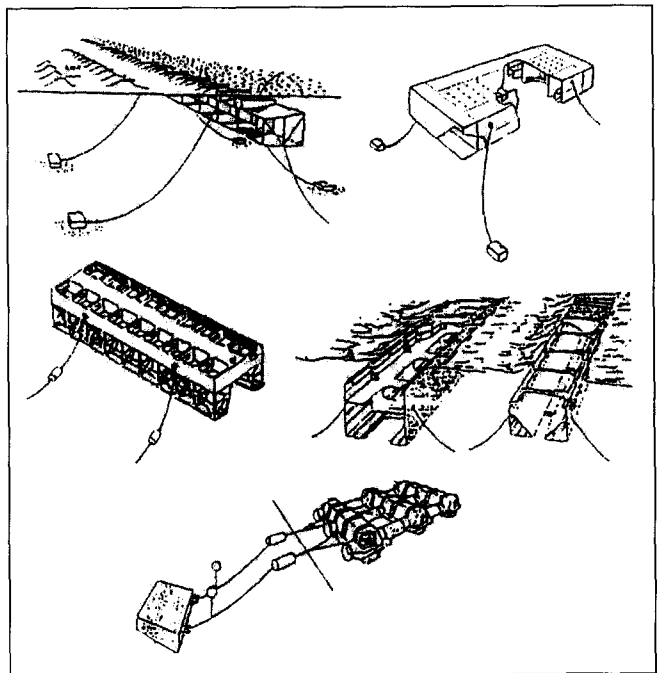
업성능을 향상시키에 있으며, 근래들어 환경 보전의 중요성이 대두하면서 구조물의 설치 시 발생하는 해수흐름의 변화에 기인한 환경 오염 문제에 대한 관심이 또한 증가하고 있다. 지금까지 해역정온화 구조물로 널리 사용되어 온 것은 사석제, 잠제 등의 방파제를 중심으로 한 파랑제어구조물이며, 부차적으로 해수유동 제어에 의한 환경개선을 목적으로 도류제, 작영공 등의 해수유동 제어구조물이 사용되고 있다.

파랑제어구조물은 고정식[3](그림 1), 부유식[4](그림 2), 기타 형식[5](그림 3)으로 대별된다. 파랑제어구조물의 분류는 구조 형식, 재료, 소파기구 등에 따라 달라질 수 있으며, 본 고에서는 구조물의 구조 형식을 중심으로 설계 해석의 관점, 소파기구 등을 고려하여 <표 1>과 같이 분류하였다. 표로부터 알 수 있듯이 고정식, 부유식, 특수형으로 대별할 수 있고, 고정형은 구조물의 형상 및 재료 등에 따라 경사제, 직립제, 혼성제, 특수방파제, 잠제 및 인공 reef로 분류할 수 있으며, 부유형은 소파 구조체의 위치에 따라 해상 부유식 및 해중 설치식으로 분류할 수 있다. 또한 수류나 기포에 의한 방파제 등이 있다. 재료에 따른 분류로는 철근 콘크리트, 강관 및 판, FRP, 유연막 구조물로 나눌 수 있으며, 사용목적에 따라서는 파랑에너지의 소산에 의한 배후의 정온 해역 확보와 파력 및 월파 등에 의한 재해 예방을 위한 방파용이나 선박 접안이 주목적이면서 월파방지와 해안침식의 보호를 목적으로 한 호안용, 기타 해양에너지 이용형, 해수유동제어형 등이 있다.

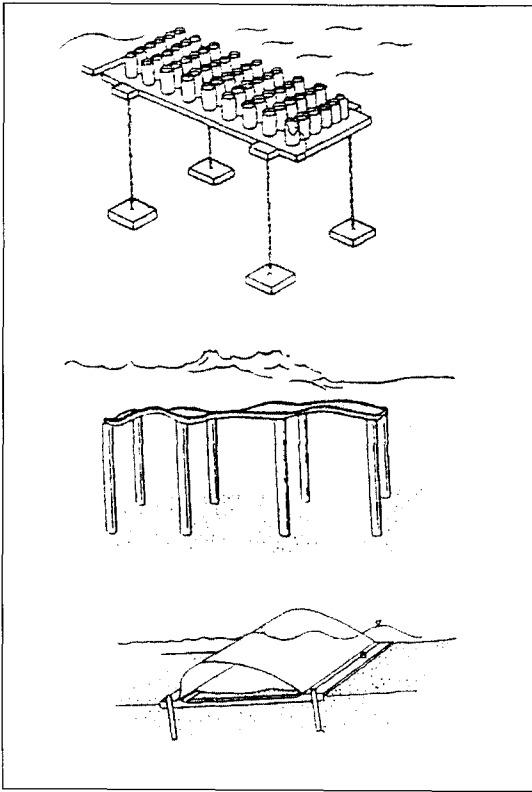
실해역에 설치되는 파랑제어 구조물은 해양의력환경, 설치수심 및 해양시설 및 배후 공간의 이용 계획 등을 검토하고, 구조물의 특징 및 장단점을 고려하여 신중히 개발 또는 선정하여야 한다. 구조물의 특성은 형식, 관점 등에 따라 다르나 고정식과 부유식으로



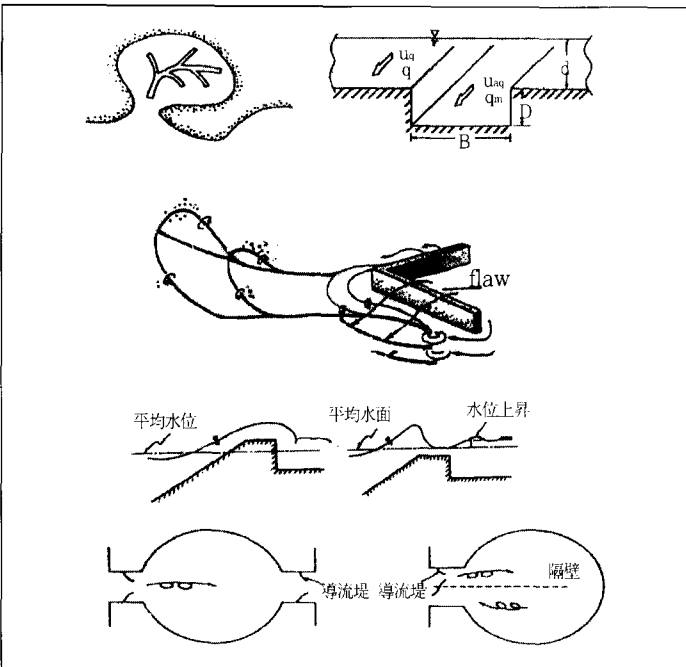
<그림 1> 고정식 파랑제어구조물의 종류와 변천과정 (3)



<그림 2> 부유식 파랑제어구조물 (4)



〈그림 3〉 특수한 투과제어구조물의 예 (5)



〈그림 4〉 해수유동제어구조물 (6)

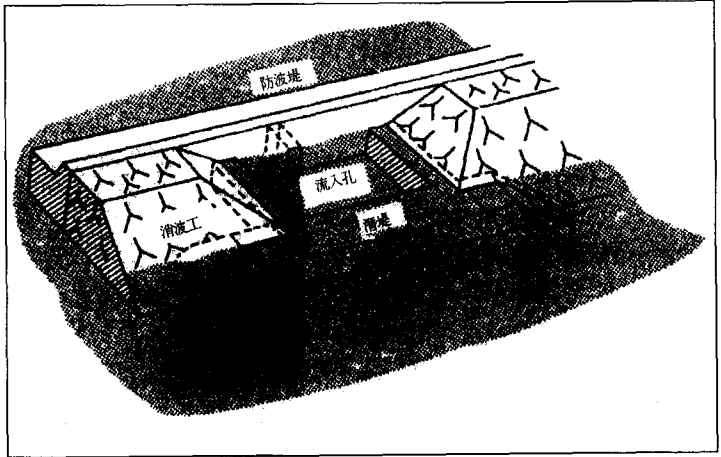
대별해 볼 때 각각의 장 단점은 다음과 같다. 일반적으로 고정식은 ① 투과도가 적고, ② 장파의 소파도 가능하며, ③ 설계 및 시공기술이 비교적 정립되어 있고, ④ 내구성이 좋으며, ⑤ 유지관리가 비교적 용이하다. 반면, 부유식은 ① 대수심 및 연약지반에도 적용성이 좋고, ② 해수교환이 양호하며, ③ 현장작업이 적고, ④ 이동 이용이 가능하며, ⑤ 조차가 큰 지역에서의 접안 및 계선이 용이한 장점이 있다.

한편, 해수유동 제어구조물[6]에는 도류제, 유연막벽, 수로공, 순환류공, 인공용승구조물, 인공해조, 동력을 이용한 해수교환촉진구조물 등이 있다. 이들은 그림 4에 나타낸 것과 같이, 구조물이나 동력을 이용하여 강제적으로 해수유동을 제어함으로써 특정해역의 해수교환 촉진에 의한 수질 개선을 주목적으로 하며, 특정 구조물에 대한 유체력 작용을 완화시킴으로서 해역정온화 기능을 부가적으로 가진다.

수로공법(작영공)은 평탄한 지반을 굴착하여 '수로'를 만들어 국부적으로 유속을 증대시켜 해수의 교환을 촉진시키는 방법으로 외해 파랑의 영향이 작고 수심이 작은 지역에 적당한 방법이다. 이 공법을 효과적으로 이용하기 위해서 수로의 유속을 주변부

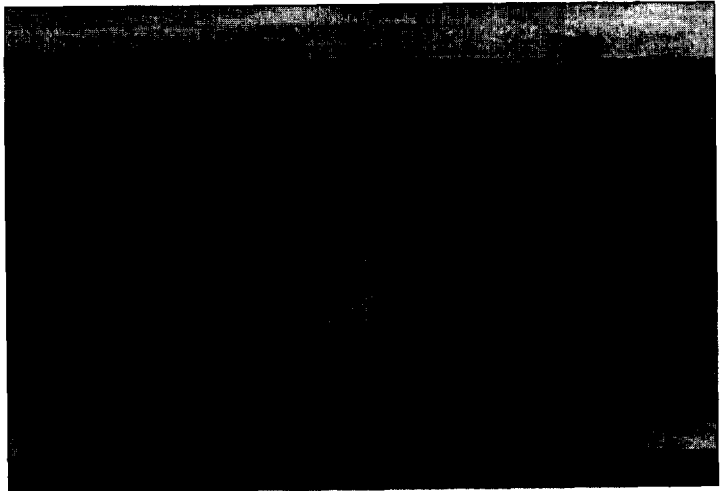
보다 크게 해야하는데 유속은 저면마찰에 의해서 감소되므로 굴착깊이를 크게 하면 유속을 증가시킬 수 있다. 인공용승구조물은 인공구조물을 해수유동에 연직한 방향으로 설치하여 수심방향의 해수흐름을 유발하여 부분적인 해수정체를 해소하는 방법이다. Asaeda et. al[7]은 V자형의 용승구조물에 관한 실험을 통하여 V형상의 각도가 수심방향 속도변화에 미치는 영향을 체계적으로 분석하여 90°일 때 가장 강한 흐름이 얻어짐을 보였다. 도류제 공법은 도류제를 배치하여 흐름의 일방성분을 증대시키는 것으로 만 입구의 유량계수를 조류왕복에 따라 변화시키는 방법이다. 만 입구가 두 방향인 경우에 밀물때는 외해수가 양쪽 만의 입구로 유입하나 좌측에서 많이 유입되며 역으로 썰물시

에는 우측면에서의 유출이 크다. 좌측 만입구의 흐름이 우측보다 쉬워지기 때문에 해수가 좌측보다 많이 상승한다. 이러한 결과 전체적으로 좌측의 만입구에는 항류가 발생한다. 만입구가 하나인 경우에는 만내부에 격벽을 설치하여 항류 성분의 증대를 도모한다. 波에너지를 평균수위의 상승에 이용하는 공법은 波 에너지를 집중시켜 파고를 증대시키거나 潛堤를 이용하여 파랑을 강제쇄파시켜 발생하는 평균수위 상승을 이용하여 흐름을 발생시켜 해수 교환을 촉진시키는 방법이다.



〈그림5〉 해수교환형 케이슨방파제 (6)

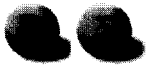
(2) 해역정온화 구조물의 개발현황
해역정온화를 위한 제어구조물은 전술한 여러형태의 방파제 개발을 중심으로 진행되어 왔다. 방파제 개발에서 최근의 관심은 소파성능의 개선과 함께 환경조건이 거친 지역에 적용가능한 방파제의 개발에 집중되고 있다. 이용가능한 연안공간이 포화 상태에 도달함에 따라 보다 수심이 깊고 환경외력이 거친 지역의 개발이 요구되기 때문이다. 또한 연안에서 떨어진 해상에 설치되는 대형 해양구조물이 증가함에 따라 해안에서 분리된 형태의 방파제에 대한 연구개발이 활발하다.



〈그림6〉 해수교환형 반원형방파제(8)

한편 제어구조물의 효율적 이용관점에서 복합 기능을 갖는 여러 형태의 해역정온화 구조물에 관한 관심이 증가하고 있다. 특히 환경보전에 관한 관심이 급증하면서 방파제에 의한 국부적 해수흐름의 정체가 연안 생산활동에 심각한 위협이 됨에 따라 다양한 해수교환형 방파제의 개발이 수행되고 있으며, 전형적인 예가 그림 5[6]과 6[8]에 보여진다. 그림 5은 방파제 케이슨에 도수관을 만들거나, 일부를 절개하여 통수로를 만들어 해수 유입에 의한 해수교환을 촉진하는 경우이며, 그림 6의 반원형방파제는 반원형의 전면 또는 전후면 전체에 해수의 출입을 위

한 원형공을 만들어 소파효율을 높이는 동시에 해수 교환을 촉진하는 경우이다. 또한 해양공간의 효율적 개발과 해양시설의 고도이용 관점에서 해역제어 이외의 기능을 갖는 복합 해양구조물의 연구개발이 증가하고 있으며, 그 예가 그림 7과 8에 보여진다. 파랑제어기능을 겸한 부유식 파력발전장치[9](그림 7)는 부유식 구조물의 체체를 파력발전 공기실로 이용하는 경우이고, 양식가두리형 방파제 케이슨[10](그림 8)은 방파제 케이슨 내부를 어류 양식을 위한 가두리 시설로 활용하는 경우이다. 이러한, 파랑제어 구조물의 다기능화는 투자효율의 증진에 의한 경제

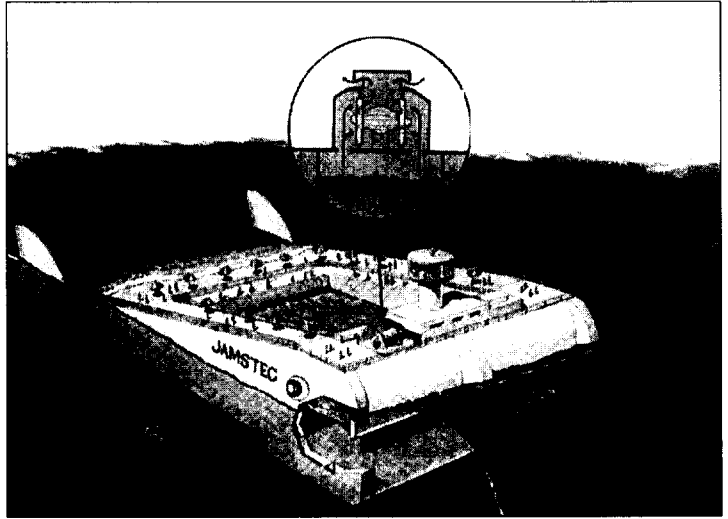


성 확보, 각종 해양자원의 효율적인 이용, 환경과의 조화를 고려한 개발 방안으로서 매우 중요한 연구테마가 되고 있다.

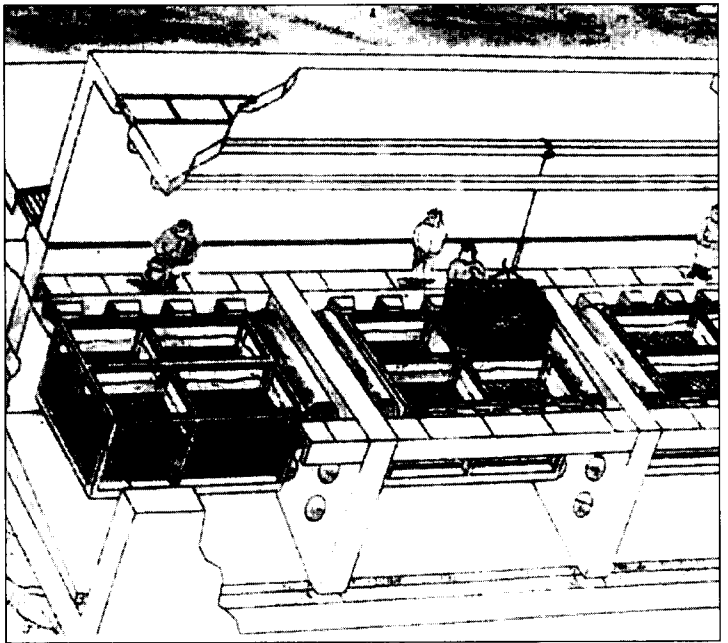
우리나라에서의 현재 확인할 수 있는 가장 오래된 파랑제어 구조물은 신라시대에 축조되었다고 하는 경주 울포의 방파제이다. 이는 연안에서 8간 (12m) 안쪽에 사석 잠제 형태로 만들어진 것으로 전해지는데, 지금도 흔적을 찾아 볼 수 있다. 따라서 우리나라의 파랑제어 기술의 역사는 결코 짧지 않음을 짐작할 수 있다. 그러나, 근래에 들어 파랑제어 구조물에 대한 연구는 많지 않은 편이며, 사석제의 안정성 평가 및 설계 기술[9]과 직립제의 해수교환형 케이스 개발[11] 등의 연구실적이 있으나, 개발 현장의 직립제나 혼성제의 설계에는 도입된 외국기술을 적용하거나 개량하여 사용하고 있다. 한편, 부유식 방파제에 대한 연구는 유연막 방파제[12]를 중심으로 연구가 이루어지고 있으나 현장실험 등을 통한 실증이나 현장에 실용화된 경우는 거의 없는 실정이다. 한편, 파랑제어 구조물의 복합기능화와 관련한 연구로는 해수유동제어 기능을 고려하여 어항 방파제의 일정부분에 유수부를 설계하여 해수교환을 향상시키는 기법이 수치실험에 의해 수행되었고[13], 상술한 해수교환형 케이스가 개발된 바 있다. 그러나, 이에 의한 해수교환기능과 항내정온화기능은 상충되는 부분이 있으므로, 이들을 최적화하는 방안이 연구되어야 한다.

3. 해역정온화 요소기술

(1) 파랑 제어기술

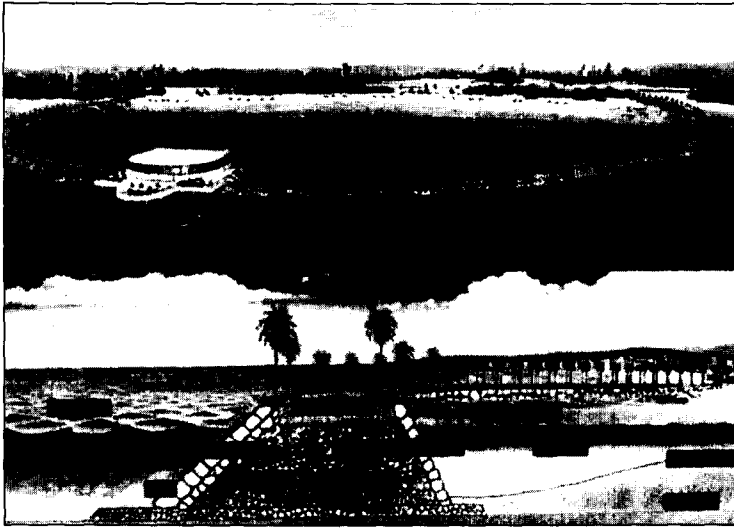


〈그림 7〉 파랑제어기능을 겸한 부유식 파력발전 장치 (9)



〈그림8〉 양식가두리형 방파제 케이스(10)

해양파의 역학적 특성에 대한 연구는 해양공학 분야의 가장 오랜 주제의 하나였고, 수많은 연구가 있어왔음에도 불구하고 해양파의 불규칙성과 비선형적 특성에 기인하는 해석의 어려움 때문에 일정한 조건하에 선형 규칙파를 가정한 근사해법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 파랑제어구조물의 설치지역이 수심이 비교적 얇은 천해지역이고 해양파가 해안에



〈그림 9〉 생태학적 해수정화 기능의 방파제

접근할때 쇄파가 발생하므로 지형변화에 따른 천해파의 비선형적 파랑변형 특성을 고려한 해석법의 개발이 요구된다. 또한 해양구조물에 입사하는 해양파는 구조물 주위에서 반사, 회절, 굴절 등의 간섭을 일으키므로 이들 현상에 대한 정확한 이해없이 효율적인 파랑제어구조물의 설계가 어렵다. 특히 부유식의 경우에는 구조물에 의한 입사파의 산란뿐 아니라 구조물 자체의 운동에 기인하는 방사파의 발생으로 인해 해석이 더욱 복잡하게 된다. 대부분의 실험역에는 파랑과 해수유동이 함께 존재하므로 해수유동에 의한 파랑변형과 구조물의 운동특성 변화를 함께 고려한 해석법의 개발이 필요하다.

효율적인 파랑제어구조물의 설계는 파랑특성의 정확한 이해와 이에 기초한 효율적인 파랑제어기술 개발에 의존한다. 해양파는 파고, 파향, 주기, 위상차의 네가지 물리적 특성에 의해 정의되므로 파랑제어는 이들 물리량의 제어를 통해 달성된다. 이중 파주기의 제어는 현실적으로 어렵지만, 파향, 위상차, 파고의 제어는 가능하다. 지금까지 파의 제어는 주로 파고를 얼마나 효율적으로 감소시키는가 하는 관점에서 행해져 왔으나, 최근에는 파랑에너지 이용, 연안해역의 다목적이용, 해양패크리에이션이 강조됨에 따라 파랑에너지를 특정지점에 집약시켜 파고를 증대시키거나 특정 구역에서 강제쇄파시키는 등

파를 어떻게 잘 이용하는가 하는 면에서의 파랑제어가 행해지고 있다.

파랑제어는 크게 ①파에너지의 소산에 의한 제어기법, ②위상간섭에 의한 제어기법, ③반사에 의한 제어기법, ④파향변화에 의한 제어기법으로 구분할 수 있다. ①은 파의 에너지가 파고에 제공에 비해하므로 파에너지를 다른 에너지로 변환시킴으로서 파고를 감소시키는 방법이다. 파에너지는 구조물에 의한 마찰, 와류의 생성과 박리, 강제쇄파, 바람에 의한 작용 등에 의해 감소되며, 특히 강제쇄파에 의

한 파에너지의 소산이 현저하나 상대적으로 구조물에 작용하는 하중이 매우 큰 약점을 지닌다. 파랑제어구조물의 종류에 따라 주요 파에너지 소산 메커니즘이 달라지며, 커튼형 방파제는 와류와 박리, 경사형 방파제는 쇄파와 마찰, 광폭잡제형 방파제는 마찰 및 투과파의 감쇠 등이 주로 파에너지를 감소시킨다. ②는 입사파, 반사파, 전달파의 위상차를 이용해 파를 제어하는 방법으로서, 입사파의 전면부에서 입사파와 반사파의 위상차가 180° 가 되도록 구조물을 설계하면 두파의 간섭에 의해 효과적으로 전면부의 파를 감소시킬수 있다[14]. ③은 구조물에 입사하는 파를 구조물에 의해 반사시킴으로서 파고와 파향을 제어하는 방법으로 구조물 전면부의 각도, 재질의 조도와 공극율, 설치수심과 파랑조건에 따라 상이한 반사율을 갖는다. ④는 굴절, 회절, 반사현상 등을 이용하여 파향과 파고를 제어하는 방법이다. 파의 굴절은 수심변화에 따라 발생하며, 회절은 구조물 또는 섬 등에 파가 접근할 때 발생한다. 실험역에 설치되는 파랑제어구조물은 위와 같은 다양한 파랑제어기법의 복합적 응용에 의해 효과적인 설계가 가능하며, 이를 위해서는 복합적인 파랑제어 현상의 해석법 개발이 필수적이다.

설계의 관점에서 해역정온도의 해석 및 평가기술은 중요하다. 해역정온도의 해석은 전술한 파랑변형



및 구조물의 파랑중 운동해석법을 기초로 파랑제어 구조물의 안정성 및 기능 극대화를 위한 설계기준의 정립과 이의 적용성 평가, 최적배치 계획 수립 등을 포함한다. 이를 위해 다양한 이론해석, 수리실험, 수치실험 기법들이 개발되고 있으며, 파랑제어구조물의 개발과 해석정온도 해석과정에 이러한 기법들이 적용되고 있다. 해역의 이용 및 개발 계획에 따라 적정 정온도가 설정되면, 해역 환경조건의 조사와 대상구조물에 대한 해양외력환경의 영향을 추정하고 적합한 파랑제어 구조물을 개발 또는 선정하여 건설 및 배치한 후 대상해역의 적정 정온도를 만족하는지를 평가한다. 이때, 적용성 평가 뿐 아니라 이용 개발 계획단계에서부터 시공에 이르기까지 해역의 안전한 이용, 환경 보전, 경제성 및 경관 등을 종합적으로 고려한 해석 및 고려를 염두에 둔 계획, 조사, 실시 및 평가 절차가 필요하다.

해역정온화를 위해서는 대상 해역의 해양외력환경과 지형적 특성을 고려하여 인공적인 지형변화 및 구조물 설치를 통한 효과적인 파랑제어가 필요하다. 따라서, 해역정온화기술은 파랑제어구조물의 단면형상 및 규모, 재료 등에 의한 소파 성능 해석기술과 구조물의 배열에 따른 정온도 해석기술로 대별되며 이들 요소기술의 정립과 응용이 필요하다. 또한, 해조류 및 파랑에 의한 흐름과 관련한 해양물리환경의 변화 등을 종합적으로 고려하여 설계 및 배치를 최적화기술이 필요하다[6].

(2) 해수유동 제어기술

한국근해는 매우 빠른 조류속도를 가지며, 대형 해양구조물의 설치시 과도한 하중을 유발하여 불리한 조건으로 작용한다. 한편 해양환경 보전의 관점에서는 빠른 해수유동은 해역의 자연정화 기능을 부여함으로써 유리한 조건이 되기도 한다. 이와 같이 상충되는 두가지 특성을 효율적으로 제어하기 위해서는 구조물의 설치해역 선정시 안정성의 관점에서 해역의 해수흐름이 적정한계 내에 속하는 지역을 선정하고 해역의 유동장을 효과적으로 이용할 수 있는 해수교환 촉진형 구조물의 설계가 이루어져야 한다. 대형구조물 및 각종 부대시설의 해상 설치시에는 구조물 주위의 부분적인 해수정체가 흔히 발생하여 오

염문제를 야기하므로, 정체지점의 해수흐름을 원활히 하기위한 구조물의 형상설계가 필요하며 경우에 따라서는 인공구조물의 설치가 필요하다. 해상시설에서는 흔히 온수 및 각종 오염유발 물질의 배출이 피할 수 없으므로 이의 생태적 환경영향 평가를 통하여 허용기준을 설정하고 필요시 대응책을 강구해야 한다.

해수유동의 수치적 시뮬레이션은 해수유동 제어기술의 핵심이라 할 수 있다. 제어구조물은 기본적으로 3차원적 형상을 지니므로 이를 고려한 해석법의 개발이 요구되나, 계산시간과 기억용량의 제약을 가지며 형상변화에 따른 해수흐름 변화 특성은 2차원적기법의 적용에 의해서도 대부분의 경우에 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. 해수유동 모델은 배출구 주위의 온배수 확산이나 구조물 주위의 압력분포처럼 국지적 유동현상이 중요한 경우에는 체트적분 모델[15]이나 난류모델[16][17]이 흔히 사용되며, 오염물질의 확산처럼 광역 유동현상이 중요한 경우에는 다층구조(multi-level) 모델[18]이나 marker and cell 기법, 유한차분법[19], 유한요소법[20] 등이 흔히 사용된다. 연직방향의 좌표계로는 흔히 σ 좌표계가 이용되며 연직방향 변수는 다층모델을 주로 사용한다. 시간적분은 양해법, ADI 기법, 음해법 등이 쓰이고, 모드분리 기법이 흔히 적용된다.

(3) 해역정온화 제어구조물의 설계기술

전통적인 파랑제어구조물의 설계는 크게 단면설계와 배치설계로 구분할 수 있다. 단면설계의 경우, 반사파 및 월파 제어와 소파 등의 파랑제어 기능과 해양외력에 대한 안정성 해석에 의한 최적 단면의 도출이 주요 설계기술이다. 배치설계는 지형적 조건 및 구조물의 배치에 따른 파랑제어 특성의 변화를 파랑에너지 집중에 대한 안정성, 특정 주변해역에 대한 반사파 영향 등을 고려한 배치기술이다. 한편, 이러한 설계에는 전술한 바와 같이 경관성 및 생태계 환경과의 조화를 고려하여야 한다. 그러나, 이들 설계요소는 상충되는 경우가 발생할 수도 있으므로, 종합적으로 고려하고 평가하여 설계 및 배치를 최적화하는 기술 체계의 확립이 요망되고 있다.

고정식 파랑제어구조물의 단면설계는 크게 경사

제 및 직립제(또는 혼성제의 직립부)로 나뉘어 고려되어 왔다. 직립제 및 혼성제의 직립부의 안정성 평가 및 설계에 대한 연구는 규칙파 실험결과에 의해 쇄파압에 대한 Hiroi 및 Minikin의 설계식, 중복파압에 대한 Sainflou의 설계식이 있었으나, Goda에 의해 해양파의 불규칙성을 고려한 설계기술로 정립되어 있다. 최근 이 설계식은 Tanimoto & Goda에 의해 입사파향 효과가 도입되어 정립된 단계에 있다. 경사식 파랑제어구조물의 경우 Hudson식이 주로 이용되어 왔으나 해양파랑의 불규칙성, 파군현상, 사면상의 공진현상, 파랑의 지속시간 등의 효과를 고려하지 못하는 것이 문제점으로 지적되어 왔다. 이를 해결하기 위한 대표적인 연구가 Ryu & Sawaragi(1986)와 van der Meer(1987)에 의해 이루어졌다. 그러나, 이들 두 연구는 상호 불규칙 해양에서의 사석구조물의 안정성 평가에 있어서 불규칙파의 파군형성과 사면상의 공진효과, 고파의 지속시간과 투수성 등을 복합적으로 고려하지 못하였다. 이러한 문제를 해결한 안정성 평가 및 설계기법이 Ryu & Kim(1994)에 의해 제시되어 있다.

부유식 파랑제어구조물은 해수교환에 의한 환경보전성, 경제성, 가동성 등에 의해 연구 검토가 이루어져 왔다. 부유식 파랑제어구조물의 안정성 및 기능성은 부체부와 계류삭 및 닻으로 이루어진 계류시스템에 밀접하며, 이에 대한 해석적 연구가 Iijima(1972), Nakamura(1976) 등에 의해 이루어진 바 있다. 일반적으로 부유식 파랑제어구조물의 설계를 위한 해석은 파랑제어 효과와 소요 계류력 평가에 의한 안정성 해석이 중요한 해석기술이다. 주로 그 해석은 포텐셜이론에 의한 포텐셜 접속법이나 경계요소법으로 많이 연구되어 왔다. 그러나, 소파기구의 복잡화에 따른 해석기법의 정립이 요구되고 있다[4],[5]. 부유식 파랑제어구조물은 장주기파에 대한 소파효율이 떨어지며, 거친 해양환경하에서는 안정성에 약점을 지닌다. 최근에는 이러한 문제를 극복하기 위하여 장주기파에 대한 효율개선을 목적으로 신형 소파 메커니즘의 개발, 조합배열에 의한 시스템 설계가 이루어지고 있으며, 안정성 향상을 위해 다양한 계류방식이 적용되고 있다.

4. 해역정온화 구조물의 개발전망

해역정온화구조물은 ① 파랑제어구조물의 개발, ② 해수유동제어에 의한 해수교환 촉진, ③ 파랑 유동 환경을 고려한 최적설계 과정을 통해 개발될 수 있으며, 실용화를 위해서는 ① 소파효과 및 환경조건 목표설정, ② 적정 소파기구의 선정 또는 조합, ③ 안정성 및 기능성 평가, ④ 경제성 및 시공성 평가단계를 거쳐야 한다. 이러한 과정을 통하여 환경과 조화를 이루는 해역개발 구조물이 개발될 수 있으며, 개발가능한 해역정온화 구조물 및 연구방향에 대해 간략히 논하면 다음과 같다.

(1) 신형 고정식 방파제의 개발

대형 복합플랜트의 설치해역 수심이 15m 이상일 경우 경제성 문제로 고려하기 힘든 면이 있으나 배후지의 중요도를 감안하여 검토할 수도 있다. 여기서 가용한 고정식 파랑제어구조물은 대수심용이어야 하므로, 대수심 방파제로서 개발하거나 소파기구를 달리한 인공 reef나 유연막 방파제가 고려 대상이 될 수 있다. 대수심 방파제의 경우, 혼성제에 소파효율이 우수하며 안전한 구조 형식의 케이슨이 개발되어야 하고, 마운드가 짧은 말뚝 상부에 이러한 케이슨을 고정시키는 방안도 고려할 만 하다. 또한, 선박이 운항되는 수로 주변이나, 접안시설 주변 해역에서는 유연막 마운드의 적용도 고려할 만 하다.

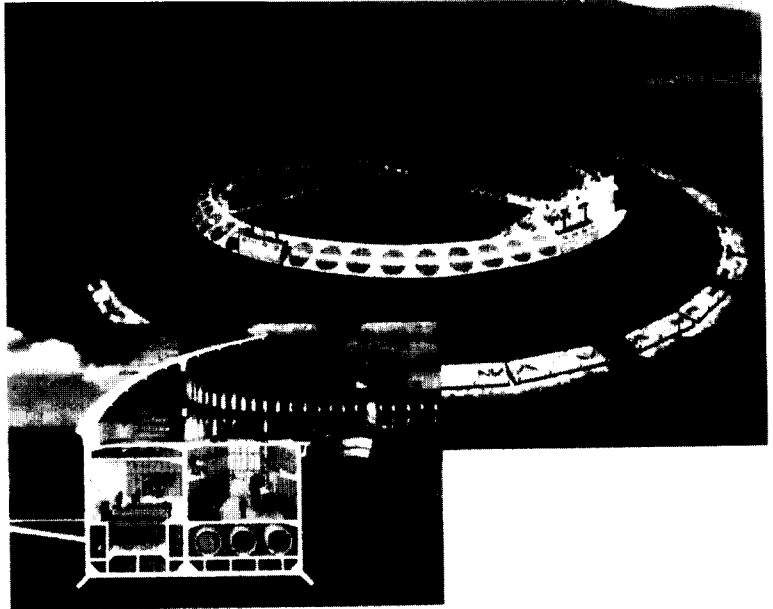
(2) 신형 부유식 방파제의 개발

부유식 방파제의 개발은 크게 소파기구를 이용한 부체 형상, 계류시스템, 배열 등으로 나누어 고려할 수 있다. 이들을 어떻게 고려하여 소파 성능을 높이고, 안전한 구조로 개발하는가가 관건이다. 加藤[4]은 투과계수 0.45 이하, 부체폭이 입사파장의 1/6 ~ 1/3 정도를 만족하는 부체 형상의 개발을 권장하고 있다. 계류시스템의 경우 고정(말뚝)계류, 긴장계류, 현수계류 등으로 검토될 수 있으며, 계류선의 재질 및 완충부이, 중간 침자 등에 따라 부체의 운동, 소파성능, 계류력 등이 달라지므로 이러한 문제를 종합적으로 고려하여 개발할 필요가 있다.

대형 복합플랜트의 보호 및 주변 공간이용이라는



점을 고려하면, 비교적 파장이 긴 장주기파에 대한 적용성이 중요한 문제로 고려되어야 한다. 따라서, 종래의 반사형은 적용상 문제가 있으며, 수주진동형(특히, 내부수류진동형)의 소파기구를 가진 형상이 고려될 수 있다. 그러나 이 형식의 경우 상부공간 활용 방안, 장주기파의 제어를 위한 적정 내부구조 등에 대한 연구 개발이 이루어져야 한다. 또한, 효율을 높이기 위한 방안으로서 복합 배열시스템이 고려될 수 있다. 이는 동일형식 방파제의 다중 배열이나 다른 형식과의 조합을 통해 소파효율을 향상시키는 방안이다.



〈그림 10〉 해상 수산기지 구상도

유연막 시트형 부유식 방파제의 개발도 주변 해역의 경관성 등을 고려하면 검토해 볼만 한 형식이다. 이는 표층 또는 얇은 중층에 가소성 재료의 긴장 설치에 의해 위상차형 소파기구로 활용하는 방안이다. 또한, 전술한 진동수주형 복합 배열 시스템 간의 해역에 시설하여 전체 소파시스템으로서 장주기파를 소파시키는 형식으로의 적용 등도 고려할 만 하다.

(2) 복합 기능형 해역정문화 구조물 개발

파랑제어구조물의 복합기능화는 투자효율을 높이기 위한 획기적인 방안이며, 연안역의 각종 문제들을 종합적으로 해결 또는 완화할 수 있는 방안으로서 아래에 예시한 것과 같이 검토할 수 있다.

파랑제어를 위한 방파제의 배열은 파랑변형 및 반사기능 뿐만 아니라 해수유동의 변화와도 밀접한 관계가 있다. 따라서 그 결과가 주변해역의 정온도 및 환경에 어떤 영향을 미치는지를 종합적으로 검토할 필요가 있다. 또한, 보다 적극적으로 유리한 환경이 조성되도록 파랑제어구조물을 개발하고, 해수흐름의 제어를 통한 환경개선을 추구할 필요가 있다. 그림 9는 방파제 내만의 자연정화를 목표로 사석제를 통해 해수의 이동이 가능하도록 설계한 해수정화 시스템의 경우를 보여준다.

수산자원의 보호 육성을 위한 인공 증 양식시설물의 개발은 연안에서의 생산활동에 매우 중요하다. 이들은 크게 고정식과 부유식으로 나누어지며, 고정식의 경우 수산자원 조성 효과를 지니는 인공어초형 잠제블록 방파제가 있으며, 부유식의 경우 집어형 및 해중림 육성형 중층 부유식 방파제 등이 있다. 또한, 방파제 체체의 양식시설화 이용도 고려할 수 있으며, 해안 양식용 고정식 방파제케이슨 개발, 해상 가두리식 부방파제체 개발 등을 검토해 볼 수 있다. 그림 10은 어항의 기능을 가지면서 동시에 해양레저 시설을 갖춘 복합기능 해양구조물의 개념도를 보여준다. 외곽의 부유식 방파제와 본체와의 사이공간은 양식시설을 설치하여 효율적인 공간활용이 가능토록 설계되고 있다.

또한, 파력, 조석, 온도차 등 해양에너지 이용을 위한 요소시설물로서 방파제를 이용하는 방안도 검토해 볼 수 있다. 몇몇 개발 사례가 있었던 것처럼 방파제 케이슨이나 부방파제의 체체를 파랑에너지 흡수용으로 활용하는 방안이다. 이러한 에너지를 발전, 제염, 담수화 뿐 아니라 해역환경 개선, 양식장의 해수공급, 산송공급 등에 활용하는 방안을 적극 검토할 수 있다.

4. 결 언

해상시설물을 보호하고 효율적인 해양공간의 이용에 필수적인 해역정온화 제어구조물의 현황을 살펴보고 개발방향에 대해 논의하였다. 개발되어 사용되고 있거나 현재 연구가 진행중인 제어구조물의 종류와 특성을 고찰하고 최적설계에 필요한 요소기술들에 대해서도 살펴보았다. 해역정온화를 위한 구조물은 크게 주의외력인 해양파의 에너지를 소산시켜 주요 해상시설에 작용하는 파력을 최소화함으로써 안정성과 작업효율 향상을 목표로 하는 파랑제어구조물과, 해수유동의 국지적 정체 또는 해상시설로부터 해수에 유입되는 오염물질의 의한 환경악화를 극복하기 위한 해수유동 제어구조물로 대별된다.

해역정온화 구조물의 최적설계를 위해서는 환경조건에 대한 정확한 이해를 필요로 하며, 천해지역에서의 파랑변형 및 해수유동과 파의 상호간섭에 기인하는 변형특성에 관한 비선형 해석법의 개발이 필요하다. 또한 파와 구조물 그리고 해수유동과 구조물 간의 상호작용을 규명하기 위한 이론적 해석법, 수치적 기법에 관한 연구가 요구된다. 특히 파랑 구조물의 소파효율의 추정기법과 항내 정온도의 평가기술은 파랑제어구조물의 안정성 및 기능 극대화를 위한 설계기준 정립에 필수적이다. 한편 해수유동은 해역환경을 지배하며 해역흐름의 제어는 구조물 주위 유동의 수치적 시뮬레이션과 모형시험을 통해 환경개선에 적합한 최적구조물을 설계함으로써 달성될 수 있다.

향후 해역정온화 구조물의 개발방향은 파랑제어 및 해수유동제어 목적과 함께 파력발전, 증양식시설 등으로 동시 활용이 가능한 다기능 복합 구조물의 형태를 지닐 것으로 예상되어 해양공간의 고도이용 기술이 주요 관심이 될 전망이다. 또한 기능적 측면과 함께 수려한 미관과 환경친화적 특성이 강조될 것으로 예상된다. 기술적 측면에서는 비선형성과 3차원적 특성을 포함하는 환경외력 및 구조물의 운동 해석기법 개발이 이루어질 것으로 전망된다.

- [1] 木甚木亨, "ウォーターフロント開発と水環境創造", 技報堂, 1995.
- [2] Ryu C.R. and H.J. Kim, "A Design concept of artificial habitat considering the function of coastal defence", Proc. of Coastal Ocean Space, 1995.
- [3] 谷本勝利, "防波堤構造の歴史的變遷と展望", 第11回海洋工学シンポジウム, pp105-110, 1992.
- [4] 加藤重一, "浮き防波堤の開発と研究の現況", 土木學會誌, 5, pp65-71, 1974.
- [5] 木甚木亨, "波と漂砂と構造物", 技報堂, 1991.
- [6] 全國沿岸漁業振興開發協會, "沿岸漁場整備開發事業實施設計指針", 1992.
- [7] 賤枝, 隆, 其阿弓少喜嗣, 吉田一男, "V字形構造物による鉛直循環流と成層中での効率", 海洋開發論文集, Vol. 7, 1991.
- [8] 沿岸開發技術研究センター, "新形式 防波堤 技術マニュアル", 運輸 省監港灣局修監修, 1994.
- [9] 海洋科學技術センター, "魅せられて海", 1991.
- [10] 國土綜合建設株式會社, "多孔ケイソンを用いた蕃養施設", 1995.
- [11] Lee, D-S., W-S. Park and N. Kobayashi, "Circular channel breakwater to reduce wave overtopping and allow water exchange", Proc. ICCE '94, pp296-297, 1994.
- [12] 조일형, "파랑중 막구조 방파제의 거동 특성", 한국항만학회지 8(1), pp17-22, 1994.
- [13] 류청로, 김종화, 박종화, "어항의 정온도 향상과 수질개선을 위한 기초적 연구", 한국어업기술학회지 26(4), pp341-352, 1990.
- [14] Valembos, J., Etude de l' action d' ouvrages resonants sur lu propagation de la



- houle; Minnesota, International Hydraulic Convention, 1953.
- [15] Prych, E., "An analysis of a jet into a Turbulent Ambient Fluid", Water Research, 7:647-657, 1973.
- [16] McGuirk, J. J., and Rodi, W., "Mathematical modeling of three-dimensional heated surface jets," J. Fluid Mech, Vol. 95, No. 4, pp. 609-633, 1979.
- [17] Raithby, G. D., Elliot, R., V., and Hutchinson, B. R., "Prediction of three-dimensional thermal energy discharge flows", J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol.114, No. 7, pp. 720-737, 1987.
- [18] Waldrop, W. R., and R. C. Farmer. "Three-Dimensional Flow and Sediment Transport at River Mouths", Coastal Studies Institute, Louisiana State University, Rep. No. 150, 1973.
- [19] Wang, J. D. Finite Element Model of 2-D Stratified Flow. J. Hydraulics Div., 105(HY12), pp 1473-1485, 1979.
- [20] Kawahara, M., Kobayasji, N., Nakada, K., "Multiple level finite element analysis and its application to tidal current flow in Tokyo bay," Applied Math modeling, Vol. 7, No. 6, pp. 197-211, 1983.



홍 기 용

- 1960년 12월 5일생
- 1989-1993 Texas A&M University(박사)
- 1994.2.- 현재 한국기계연구원 선임연구원
- 관심분야: 해양파역학, 해양오염방지기술



김 현 주

- 1962년 12월 15일생
- 1988-1995 부산수산대학교 해양공학과(박사)
- 1995~현재 한국기계연구원 선임연구원
- 관심분야 : 연안생태환경 제어공학, 파랑제어기술



최 학 선

- 1949년 11월 25일생
- 1979-1981 인하대학교 조선공학과(석사)
- 1987. 8 기술사(조선공학)
- 1977~현재 한국기계연구원 선임연구원
- 관심분야 : 수중장비개발, 해역제어기술