

# 浮動防波堤

## Floating Breakwater

어떠한 방파제이든 간에 그 기본적인 목적(기능)은 과도하게 입사하는 파에너지로부터 해안선의 일부, 항만, 정박한 선박 등을 보호하는 데 있다. 그러나 최근에는 시민들의 휴식·위락공간으로서의 기능이 점차 인식되어 가며, 또 방파제 주변의 수역환경 특히 수질문제에 커다란 역할을 하고 있음도 인식되어 가고 있다.

이러한 방파제는 크게 고정형(Fixed Structures : 사석 구조체, 콘크리트 구조체, 판형철강 구조체 등)과 이동형(Transpotable Structures : 현장 잠강식 구조체, 케이슨 구조체), 그리고 사슬 고정형(Tethered Structures : 부동식 구조체) 혹은 자유 부동형 구조체(폰툰, 유연막 구조체, 다공성 구조체, 엮은 페타이어 구조체 등)으로 구분할 수 있다.

趙 元 喆 (延世大學校土木工學科 助敎授·工博)

어떠한 방파제이든 간에 그 기본적인 목적(기능)은 과도하게 입사하는 파에너지로부터 해안선의 일부, 항만, 정박한 선박 등을 보호하는 데 있다. 그러나 최근에는 시민들의 휴식·위락공간으로서의 기능이 점차 인식되어 가며, 또 방파제 주변의 수역환경 특히 수질문제에 커다란 역할을 하고 있음도 인식되어 가고 있다.

이러한 방파제는 크게 고정형(Fixed Structures : 사석 구조체,



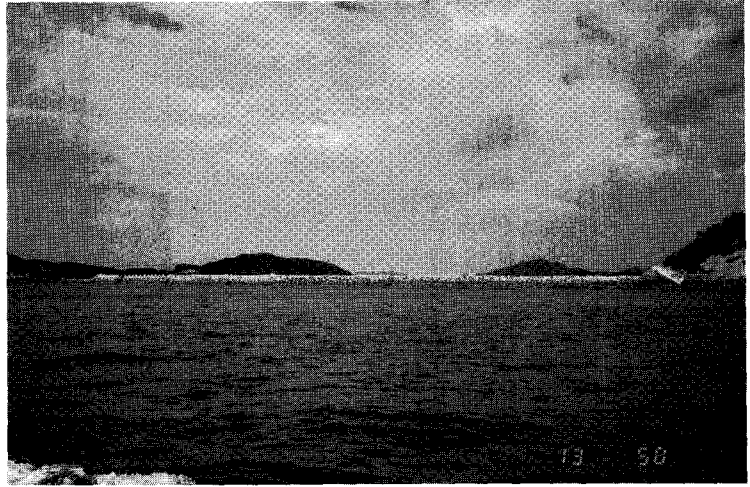
콘크리트 구조체, 판형철강 구조체 등)과 이동형(Transpotable Structures : 현장 잠강식 구조체, 케이슨 구조

체), 그리고 사슬 고정형(Tethered Structures : 부동식 구조체) 혹은 자유 부동형 구조체(폰툰, 유연막 구조체, 다공성 구조체, 엮은 페타이어 구조체 등)으로 구분할 수 있다. 고정형이든 부동형이든 간에 대부분의 방파제는 수동적 구조(passive system)이다. 즉 파에너지를 감쇄시키기 위해서 필요한 에너지는 방파제 구조체로 부터는 얻을 수 없다. 입사파 에너지는 반사되거나 소멸되며, 혹은 전달되기도 한다. 또는 이

러한 물리적 과정의 복합과정으로 입사파 에너지가 감소된다. 파에너지를 동력이 생산될 수 있는 진동형 운동(Oscillatory Motion)으로 전환하는 것이 해파로부터 동력을 구하고자 하는 파력발전의 기본개념이다. 이것은 수력 방파제의 또 다른 형태이기도 하다.

역사적으로 보면 표면중력파의 에너지감쇄를 위한 부동 방파구조체의 이용은 Joly(1905)에 의한 것이 처음이다. 그후 2차 대전중 Normandy 상륙 작전에 상륙병과 군수품을 상륙시키는 데 필요하게 될 때까지는 거의 발전을 이루지 못했다. Normandy 상륙 작전을 위해서 2가지 형태의 방파구조체가 영국에서 성안되었다. 그 하나는 "불사조(Phoenix)"로 명명된 L 200 ft × W 60 ft × H 60 ft의 구조체였다. 이러한 이동식 바지선형 구조물을 필요한 위치까지 예인하여 해수를 채워 가라앉힌 것으로 설정한 파에너지를 매우 효과적으로 차단하였다. 다른 형태로는 십자형 단면(L 200 ft × W 25 ft × D 25 ft)의 진정한 부동 방파제였다. "Bombardon"이란 이름의 이 구조체는 파고 10 ft, 파장 150 ft의 파에 맞설 수 있도록 설계되었으며 상륙작전 동안에 매우 성공적으로 그 역할을 다했다. 그러나, 예기치 않은 폭풍우가 발생하여 파고 15 ft, 파장 300 ft의 파에 의해서 파괴되고 말았다. 이러한 예기치 않은 파고는 설계강도보다 8배 이상 큰 응력을 발생시켰던 것이다.

Normandy 상륙 이후 미 해군 토목공학연구원(U.S. Navy Civil Engineering Laboratory : NCEL)가 소형 계류항공기와 화물수송을 위한 작업대를 보호하



기 위해 수송가능한 부동식 구조체를 연구할 때까지는 관심이 줄어들었다. 그후 군용목적으로 파고 10 ft, 주기 7초까지의 입사파에 대항할 수 있는 구조체를 연구하였다. 또한 미 육해 공병단(U.S - COE)도 연안역과 노출된 해안에서의 구조물 건설과 관련된 준설과 작업선을 부분적으로나마 보호하기 위해 부동식 방파제를 연구할 필요가 있게 되어 앞의 해군용 목적으로 설정한 파규모와 같은 규모의 파에 대항할 수 있는 부동식 방파제를 연구중이다.

외국의 경우 개인위락용 선박 및 수육양용 비행기의 보급에 따라 정박공간이 줄어들고 있다. 항만개발을 위한 건설경비의 급등과 환경제약으로 인해서 전통적인 고정형 사석 구조체를 대체할 수 있는 기법에 대한 요구가 날로 늘고 있다. 소규모로 작은 수의 선박을 보호하기 위해 막대한 경비를 지출할 수 없는 것이다. 더욱이 이러한 요구가 발생하는 곳은 깊은 수심, 또는 바닥 조건과 같이 현장조건이 바람직하지 못해서 부동식 구조체를 필

요로 하는 곳이다. 따라서 최근에 이러한 부동식 구조체에 대한 많은 연구가 이루어지고 있어서 다양한 개념모형의 평가를 위한 물리적(수리학적)모형의 기초와 함께 동적인 환경조건에 대한 부동식 구조체의 이론적 분석을 가능하게 하고 있다. 최근에 개발된 전산화된 수학적 모형들은 모형실험 결과와 실물에서의 측정 결과에 매우 근접하는 이론결과를 보이고 있다.

## ■ 부동방파제의 응용

영구 고정형 방파제(사석 구조체 혹은 콘크리트 구조체)는 부동식 방파제보다도 보호력이 높으나 건설경비가 많이 든다. 수심이 10 ft 이상인 수역에서는 입사파의 주기에 따라 다르기는 하지만 건설경비면에서 볼때 고정형은 부동형에 비할 바가 못된다. 부동형 방파제는 보호력이 다소 뒤떨어지지만 경비는 훨씬 적게 들며 필요에 따라 다른 곳으로의 이동이 가능하다. 동력식 구조물을 설치해야 하지만 바닥

이 견고하지 못한 곳에서는 부동식 방파제의 조립이 상대적으로 용이하다(특히 수심이 30 ft ~ 40 ft 이상이거나 해저기초가 불량한 경우).

부동식 방파제를 설치하려고 할 때에는 몇가지 고려해야 할 점이 있다. 그 첫째는 건설경비가 수심과 기초조건에 거의 무관하다는 점이다(단, 고정장치는 수심에 따라 건설비가 다르다). 이와는 달리 고정형 사석체는 건설경비가 수심에 비례하여 증가한다. 부동식 방파제와 해안선 변화과정, 생태학적 변화, 그리고 수질보존을 위한 물의 순환 등과의 상호작용은 극히 적다. 그러나 입사파의 주기에는 절대적인 영향을 받는다. 평면적인 구조는 계절이나 장기적인 확장 계획에 따라 수시로 변화시킬 수 있어서 고정형구조체 보다도 훨씬 다양한 목적으로 사용될 수 있다.

예로서 선박의 접안시설물, 정박시설물, 또는 수상보도로도 사용될 수 있다. 그러나 부동식 방파제도 반드시 고려해야 할 단점이 있다. 그 하나가 설계시 큰 폭풍우로 인해 발생하는 장파에 대한 고려이다. 파장이 긴 파에 의한 구조적 실패는 지금까지의 조사연구에서 가장 중요한 것으로 요약되고 있다. 또 구조체에 부가되는 적용하중의 크기와 형태에 대한 불확실성과 유지관리비에 대한 불명확성 때문에 초기의 건설경비가 많이 드는 과다설계를 하게 하고 있다.

또 다른 중요한 결점으로는 부동방파제는 파의 거동에 따라 움직이는 데 따른 구조적인 실패문제가 발생할 수 있다는 점이다.

## 부동방파제의 분류

Jones (1971)와 Richey and Nece (1974)는 최소한 60가지의 다른 형태의 부동방파제를 정리하고 있다. 이들은 기하학적 특성과 기능적 특성(상사성)을 기준으로 하여 다음과 같이 분류할 수 있다.

### 가) 폰툰식(Pontoon)

가장 단순한 형태의 부동방파제로 단일폰툰식, 이중폰툰식 그리고 다른 변형 등이 있으며 많은 실험가들과 이론연구자들의 연구대상이 되었던 형태이나 일정한 단면적을 가진 이 폰툰식은 수상보도, 저장창고, 선박계류, 그리고 어선부두시설로 가장 많이 이용되어 오고 있다.

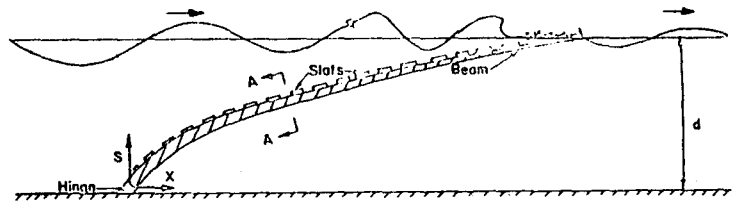
폰툰형 방파제의 성능발휘에는

여러가지 중요한 점이 있다. 즉, 선회반경, 롤링방지시설, 그리고 홀수 등이 파의 감쇄특성에 절대적인 영향을 끼친다. 더욱이 파장에 대한 방파제폭의 비가 클수록 폰툰은 파에너지를 흡수하여 변형을 일으켜 구조체가 휘어지게 된다.

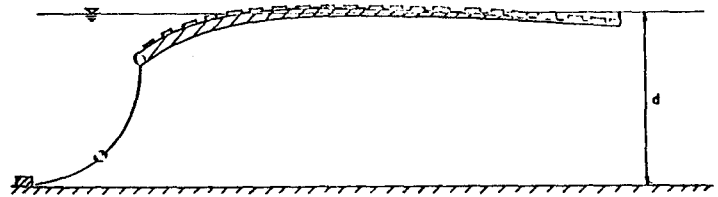
이중폰툰 구조체의 설계는 상대적으로 큰 규모를 가지게 되어 선회반경이 크게 되며, 이러한 형태의 폰툰 구조체는 화물을 하역할 수 있는 부동형접안시설 기능을 할 수 있게 된다. 이럴 경우에는 우선적으로 여러가지 하중상태에 대해서 구조적 안정성과 성능을 우선적으로 검토하여 설계해야 한다.

### 나) 경사식(Sloping)

경사식 부동방파제는 구조체의 질량분포에 있어서 한쪽 끝은 정수면 아래의 바닥에 놓여있으며



a. Hinged parabolic beach



b. Freely floating parabolic beach

포물선형 부동방파제 개념도

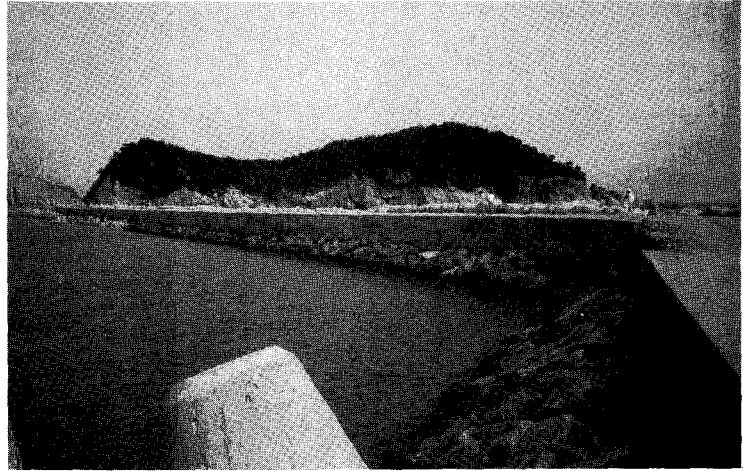
다른 한쪽 끝은 정수면 위에 솟아올라 있는 계류된 슬래브판형의 연속으로 된 형태이다. 지금까지의 연구결과에 의하면 구조체의 하류부(파의 진행방향을 기준으로)에 큰 파가 있게 된다. 이는 관성력과 증력, 그리고 계류장치에 의해 저항을 받은 부체의 감쇄된 운동 때문이다. 미해군에서는 현재 hollow steel barge를 연구하고 있는 데 이는 크기와 중량이 사용조건에 맞기 때문이다. 또 미육군공병단 수리시험소(U.S. - COE - WES)도 경사식 부동방파제를 준설과 근해에서의 작업선을 보호할 수 있는 지의 여부에 대한 실험적 연구를 진행중이다.

#### 다) Scrap-Tire 식

사용한 자동차 타이어를 이용하여 파동에너지 흡수체를 구성하는 것으로 30년째 연구가 이루어지고 있다. Stitt and Noble (1963)은 "Wave-Maze"라고 이름 붙여진, 특이한 기하학적 구성체를 개발하여 특허를 받았으며, Goodyear 타이어 회사도 패타이어를 엮어서 모듈라 구조체로 하여 파동에너지 흡수체로 이용하고자 많은 연구를 하고 있다. Harms(1979)는 "Wave-Guard" (현재는 Pipe-Tire로 통용됨)로 알려진 통나무를 타이어 열결체 부품으로 사용한 구조체를 실험적으로 조사연구 하였다. 이상과 같은 세 가지 기본구조체가 실험조사연구의 대상으로 계속되고 있다.

#### 라) A자식(A-Frame Arrangement)

목재구조체로 목재공급이 원활



한 미국과 캐나다에서 주로 발달되고 있다. A 자식 이부동방파제는 선회반경을 증가시키기에 따라 그 효과가 크게 증가하고 있다. 이 형식에서 특이한 점은 대량의 질량체에 대한 필요를 관성모멘트를 증가시키는 구조체를 이용함으로써 그 효과를 대체할 수 있다는 점이다.

#### 마) 고정식(Tethered)

설계파고와 같은 크기의 부체들로 구성된 부동방파제로 각 부체는 개별적으로 수면 혹은 수면 아래에 고정시킨다. 초기에는 부체직경의 몇 배되는 수심에 설치하는 것이었으나 최근에는 천해에서 바다 고정식이 개발되고 있다. 파압력경사의 주기성 때문에 부체는 움직이며 가장 우세한 감쇄기구는 부체의 운동으로 인한 항력에 있다. 고정된 부체는 주기적인 추진력에 관계하는 유한 위상을 갖는 주기적 거동을 나타낸다. 동적인 반응으로 인해서 부체는 파의 패도성 운동에 의한 위상을 벗어나는 진동을 한다. 이러한 부동운동은 파에너지를

난류로 전환한다.

#### 바) 다공벽식(Porous-Walled)

구멍이 없는 수직벽이나 경사벽면의 구조체는 쇠파되지 않은 파를 일부 반사시킨다. 반사율을 낮추기 위해서 부동방파제는 상대적으로 운동이 없는 상태로 되어야 한다. 이렇게 하기 위해서는 구조체의 길이가 상당히 길어야 하며, 따라서 엄청난 크기의 힘을 계류설비에 가해야 한다. 부동방파제에 의해 소멸되는 에너지는 다른 곳으로 전달되지 않기 때문에 계류설비에 가해지는 힘도 줄일 수 있다. 최대의 파에너지가 내부적으로 소멸되기 때문에 부동구조체로 부터는 최소의 반사가 이루어 지는 점에 착안하여 다공성의 벽면을 가진 부동방파제는 실험적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

#### 사) 기포식과 수리식(Pneumatic and Hydraulic)

파에너지를 소멸을 위한 가장 효과적인 자연적인 방법은 비로 쇠파현상이다.

적극적인 파감쇄장치로는 운동 에너지를 파 속으로 주입시켜 전체 혹은 부분적인 쇄파열을 발생시키는 것이다. 이에 따른 파의 감쇄는 능동적인 쇄파기구에 의해 이루어지는 쇄파의 정도에 따른다. 기포방파제의 기본적인 개념은 연직흐름을 수면쪽으로 발생시켜서 수평으로 흩어지게 하는 것이다. 물 제트류를 발생시키는 수리식방파제는 수면부근의 수평층에 높은 유속의 제트류를 발생시켜 파에너지를 소멸시키려는 것이다. 어느 방법이든간에 운동량 교환의 결과로 주변의 수괴를 끌어들이게 되며 부분적 혹은 전체적인 쇄파를 일으키게 한다. 항만의 도크, 부이식 판 혹은 선박의 경우에는 낮은 압력의 공기 흐름을 발생시킬 공기압축기가 필요하다. 수리식 방파제는 수면보다 약간 아래에 설치 하여야 하기 때문에 적절하고도 효과적인 부체구조가 성공적인 파에너지 감쇄를 위한 결정적인 요소가 된다.

#### 아) 유연막식(Flexible-Membrane)

수면에 띄우는 유연막은 여러 가지 형태가 조사연구되고 있다. 이들 가운데 담요 형태의 것이 주머니 형태의 것보다 효과적임이 증명되고 있다. 파장이 짧은 파에 대해서는 깊은 흘수가 필요 없으나 파장이 긴 파에 대해서는 깊은 흘수가 필요하며 대규모의 계류설비가 필요하게 되어 어렵다. 따라서 파의 감쇄와 계류하중의 균형을 이루는 최적화가 필요하며 수심보다는 훨씬 얇은 흘수가 사용된다. 유연막 구조체는 경식구조체 보다도 운용에 있어

서 여러가지 유리한 점이 있다. 거친 해상조건에서 붕괴로 인한 피해 혹은 가능한 손실은 유연막 방파제에는 문제가 되지 않는 것이다. 따라서 계류설비는 중요한 문제가 되지 않는다. 반면에 재질의 강도는 제한적인 요소가 될 수 있다. 적절하게 설계된 유연막 방파제는 경식방파구조체의 침투계류하중을 증가시키는 공진과는 무관하게 된다. 유연막 구조체는 쉽게 접을 수 있어서 다른 어떤 구조체보다도 손쉽게 수송운반할 수 있다. 모든 종류의 수면 유연막 구조체의 단점으로는 필요한 파의 감쇄를 위해서는 파장보다도 훨씬 큰 폭의 막구조가 필요하다는 점에 있다.

#### 자) 난류발생식(Turbulence-Generator)

상대적으로 얇은 수평부막구조의 부동방파제는 구조체와 계류설비에 큰 동력을 유발하지 않고서도 파에너지를 소멸시킬 수 있도록 개발되어 왔다. 에너지 소멸기구를 보면 막 위에서 상당한 난류를 발생시켜 쇄파가 이루어진다. 해수가 방파구조체 사이로 들어가면서 에너지 손실을 가져오며, 따라서 대규모의 파(eddy)가 발달된다. 이러한 구조의 장점으로는 얇은 흡수와 중량의 가벼움 그리고 비교적 강한 조류가 있는 지점에서 계류하중이 그리 크지 않다는 점이다. 구조체의 단위는 연결장치가 특별히 설계된 긴 경식폰툰구조이다.

#### 차) 첨두에너지 확산식(Peak Energy Dispersion)

부동방파제는 좁은 폭에서 발생하는 첨두에너지 밀도를 훨씬



낮은 에너지 밀도를 갖는 넓은 폭의 빈도스펙트럼으로 바꾸는 경우가 있다. 이러한 목적을 달성하기 위한 파의 간섭방법들이 개발되어 왔다. 파의 진행방향에 수직으로 반파장 차이로 변화를 일으키도록 하는 단면에 작용하는 순수압력분포가  $180^\circ$ 의 위상차를 일으키는 연직반사벽을 가진 방파구조는 부동방파제를 일정위치에 유지하도록 하는 계류력을 감소시킨다. 약간 다른 형태로는 입사파동장에 대해서 타원파를 방출하는 장치가 있어서 입사파를 불안정하게 하여 멈추게 하고 쇄파를 일으키게 하는 방식도 있다.



설"을 요구하게 되어 있는 인식이 경제성과 사용의 편의성을 고려한 최적의 방파구조체를 채택하는데 어려움을 주는 요소가 되고 있다. 사실 "설계규모"라는 개념은 항상 "위험(risk)"을 안고 있는 것이다. 자연현상에 대비한 설계에서 신뢰도(reliability)를 높이는 즉, 위험도를 낮추고자 할 때는 그 만큼 설계규모가 커져서 건설경비가 커지는 것이다. 반대의 경우는 신뢰도를 어느 정도 낮추어 위험부담을 증가시키면 경비가 적게 든다. 이렇듯이 설계규모를 결정하는 공학적 설계조건과 시공성 그리고 경제성을 고려하여 최적화할 수 밖에 없는 것이다.

우리나라의 연안 해역에는 영구 시설물 공사를 위한 임시보호 시설(방파제)이 필요하며 연안 양식시설의 보호를 위한 시설도 필요하다. 특히, 항만내의 수질 환경문제의 개선을 위해서는 물은 완전히 통과되면서도 파력을 감소시키는 방파구조물의 설치가 필수적이다. 이러한 목적을 가진 침수성케이슨, 예로서 넙툰형 등의 방파제에 대한 연구와 아울러

부동방파제에 대한 연구가 정책적으로 이루어 져야 하겠다. 특히 수질환경 문제와 관련지어 생각해 볼 때 페타이어를 이용한 부동방파제는 매우 큰 관심을 일으키고 있다. 왜냐하면 페타이어는 중금속 등의 수질오염 물질을 흡착하는 성질을 가지고 있기 때문이다. 4

### 〈참 고 문 헌〉

- Joy, J., "On Floating Breakwaters", Scientific Proceedings of the Royal Dublin Society, Vol. 10, 1905, pp. 378-383.
- Jones, D.B., "Transportable breakwaters - A Survey of Concepts", Technical Report R-727, U.S. Navy Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, Calif., May 1971.
- Richey, E.P. and Nece, R.E., "Floating Breakwaters: State of the Art", Proc. of the Floating Breakwaters Conference, Univ. of Rhode Island, Kingston, R.I., 1974, pp. 1-20.
- Harms, V.W., "Data and Procedures for the Design of Floating Tire Breakwaters", Water Resources and Environmental Engineering Research Report No. 79-1, State University of New York, Buffalo, N.Y., Jan. 1979
- Stitt, R.L. and Noble, H.M., "Introducing Wave-Maze Floating Breakwater", Unnumbered Report, Temple City, Calif., 1963.
- Raichlen, F., "Motions fo Small Boats Moored in Standing waves", Report No. KH-R-17, Calif. Inst. of Tech., Pasadena, Calif., Aug, 1968.

### 카) 저수식(Reservoir Application)

다목적 저수식 계선장(Multi-purpose reservoir marinas)은 다양한 수위조건에 대해서도 성능을 발휘할 수 있는 방파제를 필요로 한다. 적절하게 잘 설계된 방파제는 수위변동에 따른 필요 이상의 응력이 계류설비에 발생하지 않도록 해야 하며 모든 수위조건에서 그 기능을 다할 수 있어야 한다. Raichlen(1968)은 어떤 소형선박은 대형선박보다도 더 긴 자연적인 반응주기를 나타냄을 발견하였다. 이것은 대형선박의 계류선이 자동 때문에 소형선박의 그것보다도 더 가파르게 되는 데 그 원인이 있다. 이로부터 저수식 부동방파제의 설계에 있어서 계류설비가 상당히 중요함을 알 수 있다.

이상에서 부동방파제의 종류를 기하학적 특징과 지능적 특징에 근거하여 구분하였다. 우리나라의 경우 모든 계획에 있어서 무조건 "항구대책"이니 "완벽한 시