

## 서귀포 연안해역의 침식대책 수립을 위한 기초연구

전민수\* · 이종우\*\* · 이학승\* · 황호동\* · 안도경\*

\*한국해양대학교 대학원  
\*\*한국해양대학교 건설환경공학부 교수

### A Preliminary Study on Shore Protection from Erosion around Seoguipo Coastal Waters

Min-Su Jeon\* · Joong-Woo Lee\*\* · Hak-Seung Lee\* · Ho-Dong Hwang\* · Do-Kyung An\*

\* Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\* Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약 :** 제주도는 전통적으로 전년 내내 온화한 해양기후조건을 가지고 있으며 청정한 자연환경과 극적인 해안경관으로 세계적인 휴양지로 유명하다. 그러나 우리나라 곳곳의 해안지역에서처럼 제주도 역시 해안구조물 건설 및 항만 재개발에 자연환경의 변화에 따른 예측하지 못한 해안침식 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이들 지역에서는 섬의 남쪽 해안선에서 침식으로 인한 해안선의 급격한 변화를 보이는 것은 물론 해안선 절벽까지도 무너져 내리는 현상까지 나타나고 있다. 이미 선진국에서는 여러 해안공학자 및 연구자들이 해안침식에 대한 연구를 오랫동안 심도 있게 다루어 왔으나 우리나라에서는 아직 이 방면에 연구 활동이 미약하고 기초연구자료도 미흡하여 대책공법의 수립에 어려움이 존재하며, 무분별한 대책공법의 시행으로 인해 청정해안 환경에 복잡하고 치명적인 영향을 초래할 우려가 있다. 이에 본 연구에서는 외국에서의 여러 사례를 조사하고 해안선 침식방지는 물론 환경친화적이고 친수기능을 겸비한 종합적인 방재 대책공법으로 인공리프, 부유식 방파제 그리고 이중원통 케이슨식 방파제를 찾아내어 제안하고자 하였다. 제안된 방법은 수치모델을 통해 대상해역에 적용하여 그 결과를 비교하여 그 타당성을 평가해 보았다.

**핵심용어 :** 해안구조물, 침식, 해빈보존법, 절벽붕락, 인공리프, 부유식 방파제, 이중원통 케이슨식 방파제

**Abstract :** Traditionally Jeju island has a mild oceanic climate throughout the year and famous as worldwide resort area because of its pure natural environment and dramatic coastal scenery. But unpredicted coastal erosion problem, caused by variation of environmental conditions from construction of coastal structure and renovation of the existing ports, has raised its head above the water, and is becoming serious these days just like other coastal area in Korea. The phenomena happen here along the seaside of southern part of the island show that severe changes in coastal line from erosion and even witnessed the coastal cliff failure. In advanced countries, coastal engineers and researchers have studied deeply about this kind of problem for a long time. However, as it is not so active in Korea and lack of research data, there exists difficulties on building protection methods and thoughtless constructions might make it more complicated and fatal to the coastal environment. In this study, we investigated some case studies of other countries and intended to induce and propose some integral protection methods for coastline erosion, considering environmentally sound and water friendly way of development such as artificial reef, floating breakwater, and double cellblock breakwater. Finally, we made analysis on the proposed methods with numerical model test and evaluation on the feasibility of each method.

**Key words :** Coastal structure, Erosion, Beach preservation method, Cliff failure, Artificial reef, Floating breakwater, Double cellblock breakwater

## 1. 서 론

삼면이 바다인 우리나라에서 해안지역은 삶의 터전으로서 그 중요성이 다른 나라에 비해 아주 높다. 이러한 해안이 무분별한 해안구조물 건설과 일시적인 대책공법의 추진으로 현재 주변의 경관을 해침은 물론 2차적 침식이나 매몰이 주위 해역

에 발생하게 되어 고질적인 분쟁과 피해보상의 요구에 시달리고 있다. 우리나라 최대의 섬인 제주도 역시 현재 이러한 문제가 사회적으로 심각하게 대두되고 있는 실정이다.

제주도 남단 서귀포시 송산동에 위치한 서귀포항은 국토 최남단에 위치하는 어항이며, 제주도 남단의 중앙부에 위치하여 남쪽으로 해양을 끼고, 북쪽으로는 거울철의 북서계절풍을 가

\* 대표저자 : 전민수, minsuids@hotmail.com 051)410-4981

\*\* 중신회원, jwlee@mail.hhu.ac.kr 051)410-4461

\*\*\* 중신회원, y2kace2020@hanmail.net 051)410-4981

\*\*\*\* hodongvov@hanmail.net 051)410-4981

\*\*\*\*\* 중신회원, 1109130@hanmail.net 051)410-4981

로막는 높은 한라산을 등지고 있기 때문에 전국에서 가장 온화한 해양성 기후를 이루며, 기온의 연교차도 가장 작다. 문섬과 새섬 등이 천연의 방파제 구실을 하고 있고 해안은 대부분 조면암질 안산암 및 현무암의 단애가 수직으로 주상절리를 이루어 절경을 형성하고 있다. 이 지역은 제주도에에서도 가장 자연 경관이 뛰어난 지역 중 하나이며 해양생태계 보전지역으로 지정된 문섬 등 주변해역은 대단위 연산호 군락이 발달하고 아열대 생물군이 공존하는 등 수중경관이 뛰어나, 현재의 해안 침식을 방지할 경우 지반붕락에 따른 거주환경의 불안 초래, 관광자원 고갈, 또한 해양생태계 파괴 등을 불러올 수 있기 때문에 국가 차원에서의 보호·관리가 필요하다.

그러나 이 지역은 과거 태풍으로 인한 항만 피해가 잦아 방파제를 증축하게 되었고, 이 해역에 존재하던 연산호를 새섬 서남쪽으로 옮기는 등의 인공적인 공사로 인해 이 지역의 자연에 직간접적으로 영향을 미치고 있다. 또한 서귀포 항 동쪽 방파제 건설로 인해 소정방 폭포 주변에 영향을 미쳐 해역의 파랑조건에 변화를 가져오고 있는 실정이다. 따라서 현재 이 지역은 환경과 생태계에 미치는 영향을 최소화 하는 접근으로 친환경적인 침식 대책 공법의 적용에 관심이 증가되고 있다.

침식 대책 공법으로는 단기적인 침식대책과 장기적인 침식 대책방법이 있다. 본 연구에서는 파랑을 대상 연안해역의 주된 침식원인으로 보고 이 파랑을 친환경적인 공법으로 제어하는 방법을 다루고자 하였다.

## 2. 대상지역 분석

### 2.1 지형적 특성

현재 제주도 서귀포 해안 절개지의 해변과 해안 절벽은 파랑과 바람으로 풍화작용은 물론 해식현상으로 절리 되어 사석 해변을 형성하고 있다. 현장의 붕락형태는 Fig. 1과 Fig. 2와 같으며, Fig. 3은 이러한 형태의 절벽이 해안에서 절리 되는 과정을 그림으로 나타낸 것이다. 인근의 보목항은 해저경사가 상대적으로 완만하고 저면에 Shoal이 형성되어 있으며 전면 에 섬이 파랑에너지를 흡수하고 있는 실정이나, 서귀포 해안 절개지는 해저경사가 상대적으로 급하고 서귀포항 방파제에서 반사파 및 전면 섬에서 회절파가 현장으로 입사되고 있는 것으로 분석되었다.



Fig. 1 Rugged cliff at south coast of Jeju Island

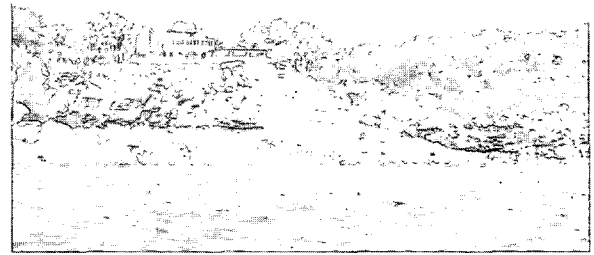


Fig. 2 Rugged cliff at south coast of Jeju Island

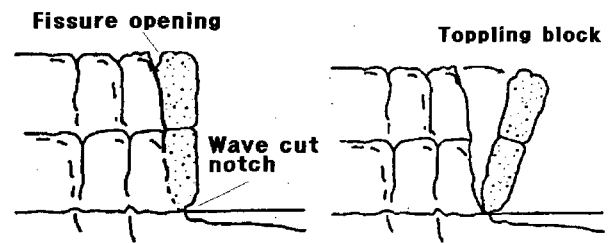


Fig. 3 Failure mechanism of toppling failure

### 2.2 기상 및 해상 특성

대상지역의 기후는 제주에서 가장 온화한 편이나 강풍과 돌발적 기상변화가 다발하고 한라산을 중심으로 동서남북간 차이가 크다. 연평균 기온은 16.6°C 이고 기온은 여름에는 무덥고 겨울에는 따뜻하며, 이는 도서적 환경과 관련한 온대의 성격에다 해양적 요소가 가미되고 있어 강수량에도 영향을 미친다. 1990년에서 1999년 사이 연평균 강수량은 2,054.1mm에 달하여 우리나라에서 강수량이 가장 많은 지역이며, 장마철에 강수량이 집중되고 가을철에는 극히 적어 계절적 차이가 크다. 이밖에 일조시간은 2,051hr, 적석량 3.5cm, 상대습도는 69%이다. 대상지역의 해상특성으로 연중 최대 조차는 3.45m, 평균 간만의 차는 3m이고 한국해역 중 울릉도, 독도를 제외하고 가장 투명도가 높으며, 평균수온은 여름철 25~27.4°C이고 겨울철인 1,2월도 13~14°C로 사계절 해중활동이 가능하다. 표1은 대상지역의 기상개황을 나타낸 표이다(서귀포시, 2003).

Table 1 General weather condition at Seogwipo

Year	Air Temperature (°C)			Precipitation	Ave. wind speed (m/s)
	Average	The highest	The lowest		
1993	15.8	31.2	-1.4	2,190	2.7
1994	17.1	35.5	-0.2	1,626	2.7
1995	16.0	31.9	-0.5	2,280	2.5
1996	16.3	34.1	-1.2	1,656	2.8
1997	16.8	34.7	-0.4	1,575	3.1
1998	17.5	32.3	-2.3	2,091	3.1
1999	16.3	31.4	-1.4	2,970	3.0
2000	17.2	33.8	-1.6	1,368	2.9
2001	17.4	34.2	-3.0	1,782	3.3
2002	17.3	34.0	1.2	1,877	3.3
Average	16.7	33.3	-1.0	1,941	2.9

### 2.3 침식원인 분석

제주도 서귀포 연안의 절벽해안은 대부분 조면암질 안산암 및 현무암의 단애가 수직으로 발달한 주상절리해안으로 이루어져 있다. 주상절리는 단면의 형태가 육각형 내지 삼각형으로 긴 기둥 모양을 이루고 있는 절리로서, 화산암 암맥이나 용암, 용결 응회암 등에서 생긴다. 대상지역의 침식원인은 1차적으로 전국 최대에 달하는 연평균 강수량에 의한 절리의 붕괴와 동절기의 간극수 결빙에 의한 암반의 파괴를 들 수가 있다. 특히 대상지역의 절벽해안은 지형적 특성상 내습하는 파랑의 직접적인 영향을 받는 해안으로서 2003년 중심부근 최대풍속 60m/s 와 12~13m의 파고를 동반하였던 태풍매미의 내습 시 결정적인 피해를 입어서 후차적인 인자로 파랑의 영향이 침식을 가속시키고 있는 것으로 판단된다. 이것은 절벽해안의 직접적이고 단기적인 강화방법 외에도 장기적인 대책 수립을 병행하여야 하는 중요한 이유가 된다.

이러한 절벽해안의 직접적이고 단기적인 강화방법에는 Fig. 5~7에서처럼 Rock bolting방법과, Draining방법 그리고 Netting방법 등이 있다(Peter, 2001).

## 3. 대상 해역에 대한 대책 및 사례

본 연구에서는, 외해로부터 내습하는 파랑의 저감과 파랑 및 조류에 의한 해안선의 침식을 방지하기 위해 먼저 직접적으로 해안을 강화하는 것과 간접적으로 해역제어 구조물을 설치하는 것으로 접근한다.

장기적이고 간접적인 해안선의 침식 방지법으로는 해안구조물의 설치를 들 수가 있다. 현재 알려진 친환경 공법의 구조적인 종류에는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 대표적인 친환경 파랑저감 및 정지 대책인 리프(Reef)를 사용하는 방법과 우리나라 마산시 원진어항에 설치된(최,2004) 부유식 방파제(Floating breakwater) 그리고 일본의 Shibayama항에 설치된 이중원통 케이슨 방파제(Cellblock caisson breakwater)를 이용하는 것으로 한다(과학기술, 1999).

이들 공법들은 모두 바다생태계와 자연 환경에 영향을 최소화 하면서 방파현상이 일반 방파제에 비해 크게 뒤떨어지지 않고, 또한 시설물 자체를 관광시설로 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

### 3.1 단기적인 해안침식 방지대책

단기적인 해안침식 방지대책은 신속히 해안침식의 진행을 막기 위해서 일시적으로 해안절벽에 직접적인 구조물 시공을 통해서 해안선의 붕괴를 막는 방법으로서, 해안침식 방지 대책으로는 간접적인 대책과 함께 시공된다는 전제하에 상당한 효과가 있을 것으로 예상된다. 대상해역의 절벽해안은 절벽이 해면과 맞닿는 부분의 침식방지가 가장 중요한데 이 부분의 보호를 위해서는 Fig. 4과 같은 Toe Protection의 시설이 필수적이다. 파괴형상에 대한 직접적인 대책과 간접적인 대책에 대한 적용범위를 Table 1에 정리하였고, 현재 제주도 대상영역에 직접적

인 대책으로 적용 가능한 공법들은 다음과 같다(Peter, 2001).

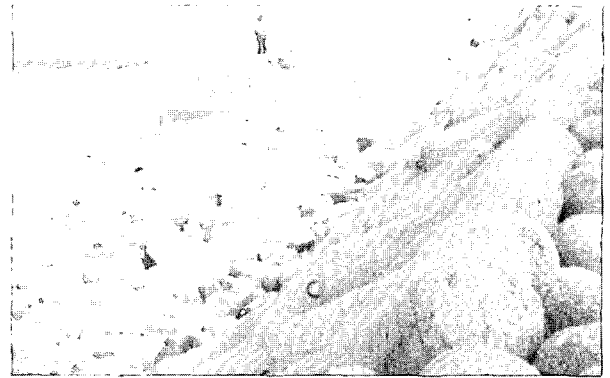


Fig. 4 Toe Protection

#### 1) Pinning(Rock bolting)

해안절벽의 파괴사면이 바다를 향하고 있을 경우 외력에 의해 사면이 바다 쪽으로 미끄러짐을 방지하기 위한 방법으로서 Fig. 5와 같이 강철핀을 암반에 설치하여 못과 같은 역할을 하게하고 절리 된 부분에 그라우팅을 시공하는 공법으로서 대상해역에 적절한 것으로 판단된다. 미국의 New Jersey, Bouley지역에 시공된 예가 있다.

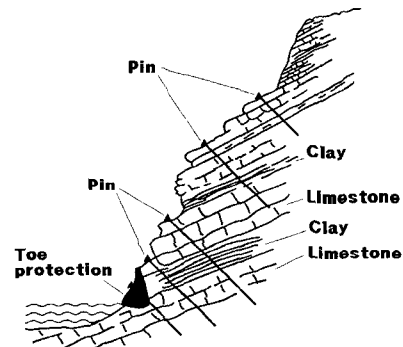


Fig. 5 Rock bolting to clamp rock layers

#### 2) Drainage(Cliff Draining)

절벽사이에 물이 흐를 경우, 이 물이 절벽사이의 틈에 침투하게 되고 이 물들이 간극수압을 발생시켜, 절리사이에서 암석층들의 마찰을 감소시키는 역할을 한다. 그리고 특히 겨울에는 이 간극수가 얼면서 부피가 팽창하여, 암반을 치명적으로 파괴한다.

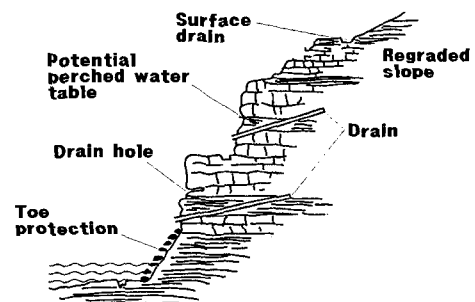


Fig. 6 Cliff draining to reduce water content and pore water pressure

3) Netting

암반층의 상부에 굴러 떨어질 수 있는 암석층이 존재할 경우 이들 암석들이 낙하하는 것을 막기 위해 Fig. 7과 같이 암석에 망을 설치하는 공법이다. 이는 Pinning과 병행하여 설치하고 잔디, 넝쿨 등 식생을 조성하였을 때 효과가 커지는 이점이 있다.

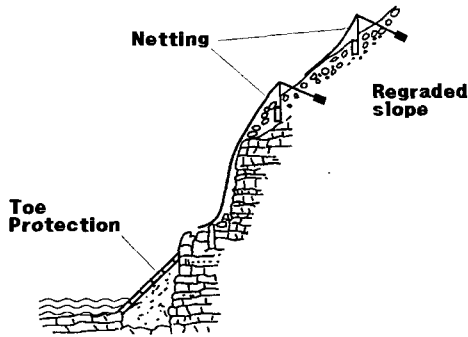


Fig. 7 Netting to reduce impact of falling blocks

Table 2 Applicability of different cliff stabilization methods to cliff failure mechanism

Method	Failure	Rock fall	Toppling failure	Wedge failure	Slide	Rotational slump	Flow
Cliff Strengthening	Pinning	✓	✓	✓	✓	✓	✗
	Grading	✓	✗	✓	✓	✓	✗
	Drainage	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	Vegetation	✗	✗	✓	✗	✗	✓
Wave impact reduction	Sea walls	✓	✗	✗	✓	✓	✗
	Toe protection	✓	✗	✗	✓	✓	✗
	Beach feeding	✓	✗	✗	✓	✗	✗
Retreat		✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ : Recommended approach ✗ : Not recommended approach

3.2 장기적인 해안침식 방지대책

전술한 단기적인 해안침식 방지시설은 보다 직접적이고 신속한 효과를 노릴 수 있지만 오랜 시간 서서히 진행되는 침식을 완전히 막는 것에는 부족하고 미관상 좋지 않은 단점이 있다. 특히, 해안절벽과 같은 침식의 진행은 Fig. 8과 같이 25년, 50년 등 장기간을 통해 진행되므로(Bray and Hooke, 1997) 단기적인 방지대책과 병행하여 해안에 장기적인 대책시설을 마련하는 것이 해안침식 방지에 효과적이다.

1) 인공 reef

인공리프는 Fig 9, 10과 같이 기능적으로는 이안제와 유사한 기능을 갖고 있지만 눈에 띄는 해안선의 변화를 유발하지 않고, 내습파랑을 1/3에서 1/2까지 저감시킬 수가 있다(CERC, 1984).

설치 방법으로는 해면에 노출형과海中 잠제형으로 나뉘는데, 노출형은 경관의 관점, 잠제형은 안전의 관점에서 각각 단점을 가지고 있으나, 대상해역에 통항이 빈번하지 않는 해역이라는 점에서 잠제형 인공리프를 설치하는 것이 합리적이다.

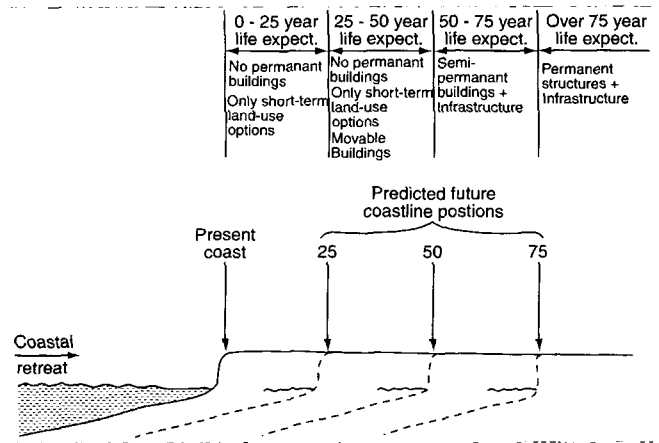


Fig. 8 Erosion zone classification on eroding coastlines and zones of permitted development

Fig. 9는 일본 Niigata해안에 시공된 2기의 인공리프의 2년에 걸친 배후지의 해안선 변화를 나타내는 것이고 Fig. 10은 그 현장 사진으로서, 인접한 이안제의 배후에는 현저한 톱블로를 형성하고 있는데 반하여 인공리프의 배후에는 톱블로는 형성되지 않고 전체적으로 약간의 해안의 전진을 나타내주 테고 있다(과학기술, 1999).

특히, 인공리프를 설치하는 의도는 파랑의 저감과 동시에 산호초의 아름다움과 환경의 다양성을 재현하는데 있으나 심해역이 아닌 쇄파대역에서는 인공리프에 다음의 몇 가지 격한 제약조건이 따르게 된다.

① 구조적 인자 - 쇄파대에서 쇄파는 심해역에 비해 구조물에 거대한 파력을 가지므로 적절한 강도를 확신하기 위해서는 건설비용이 높아진다.

② 기초 - 단순히 중력기초만으로는 구조물을 고정시키기에는 부족하며, 파일기초가 적절하나 시공을 위해서는 중장비가 동원되어야 한다.

③ 해저 모래층 - 단단한 구조물주위에는 저면 침식이 발생하며 규모가 크게 할지라도 쉽게 저면에 매몰되며 나중에 폭풍이나 태풍이 오면 구조물을 파헤쳐서 해안 쪽 또는 외해 쪽으로 이동시키게 된다.

④ 표사 - 저면의 구조물이 연안표사 또는 외해표사를 차단하여 또 다른 해안선의 침식을 야기할 수 있다.

⑤ 의도하지 않은 영향 - 해안에서 아주 작은 파랑에도 수중활동을 하는 인간에게는 파랑의 움직임에 따라 진동하여 해저구조물에의 접촉을 피할 수 없으며 다칠 수 있는 여건을 가지게 된다.

본 논문에서 적용한 reef의 형태는 Fig. 11과 같으며, reef의 폭은 80m, 길이는 700m를 적용하였고 그 단면의 현상은 Fig. 12에 나타내었다.

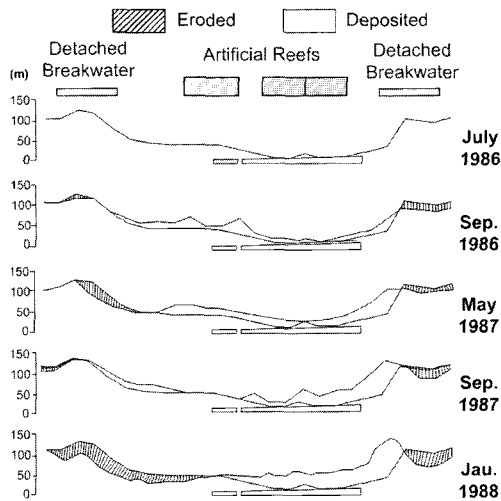


Fig. 9 Beach profile changes due to artificial submerged reefs and detached breakwaters at Nigata Beach, Japan



Fig. 10 Aerial view of artificial submerged reefs and detached breakwaters at Nigata Beach

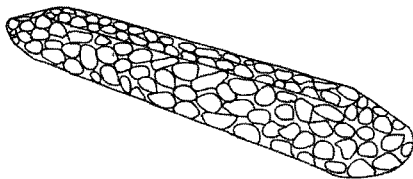


Fig. 11 Sketch of rubble mound reef

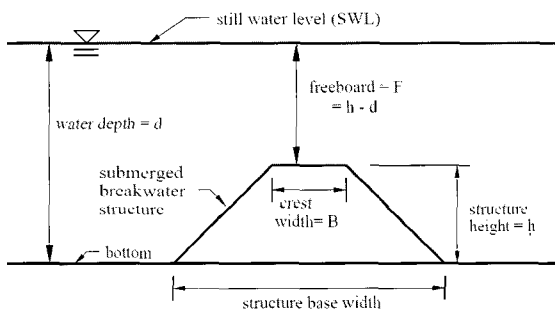


Fig. 12 Definition sketch for artificial reef

2) 부유식 방파제

부유식 방파제는 파랑에너지가 집중되는 자유수면하 20% 정도에 부체를 띄워 입사파랑을 제어한다는 측면에서 해수나 표

사의 움직임을 방해하지 않는 점, 대수심 해역에 적합하다는 점, 조위차나 지반상태에 영향을 받지 않는 점, 지진의 피해를 최소화 한다는 점, 이동가능한 점 등의 이점이 있다. 단점으로는 파의 특성에 따라 그 효과가 현저하게 다른 점, 내파력에서의 한계점 그리고, 앵커 계통의 충격적인 반복하중에 대한 저항의 구조 등이 충분히 해명되지 않았다는 점이 있다.

본 연구에서 부유식 방파제는 Fig. 13에 나타난 것과 같고, 방파제의 폭은 30m 길이는 80m로 총 8개의 방파제를 3m간격으로 일렬로 설치하는 것으로 하였다. 부유식 방파제의 설치 크기와 위치는 파랑의 제어에 기본적인 고려사항으로서 최(2004)를 참고로 하여  $L/B=6.4$  ( $L$ :파장  $B$ :방파제의 폭)로 설계하였다.

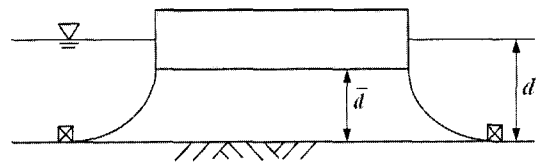


Fig. 13 Definition sketch for floating breakwater

3) 이중원통 케이슨식 방파제

이중원통 케이슨식 방파제는 대수심 고평랑 해역에 있어서 보다 경제적인 시공이 가능하다. 구조적으로는 외원통과 내원통의 이중의 원통구조로서, Fig. 13과 같이 외원통에 슬리트를 설치하여 입사하는 파를 내원통의 내부에서 서로 부딪혀 파의 에너지를 소산시키는 구조로 되어 있다.

본 논문에서 이중원통 케이슨은 Fig. 14의 형식으로 하고 입사파고가 10.9m로 다른 지역에 비해 상대적으로 높아서 케이슨의 설치수심 18m, 케이슨의 직경29.6m, 케이슨높이 26.5m, 사면경사 1:2로 계획하였다.

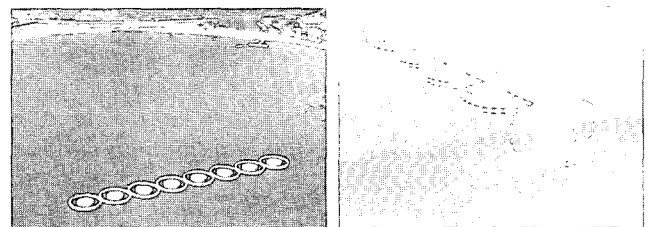


Fig. 14 Aerial view and definition sketch for Cellblock breakwater

이 구조의 특징은 1) 파를 곡면으로 받기 때문에 파압에 위상차가 생겨 전 작용파력을 저감할 수 있으며, 2) 원통구조이기 때문에, 면내력을 이용하므로 부재의 절약과 경량화가 도모된다. 3) 바깥 원통벽의 전면 및 후면의 개구부를 적절하게 선정하면 소파기능이나 해수교환기능을 부가 할 수 있으며, 4) 다수의 개구부를 가진 원통구조이기 때문에, Fig. 14과 같이 실제 현장에 적용 시 미관상 뛰어나고, 방파제 범선을 곡선으로 처리할 수 있는 장점이 있다.

#### 4. 개념설계에 대한 수치실험

본 연구의 수치실험에는 해안침식방지에 가장 중요한 요소 중의 하나인 파랑인자에 대하여 수행하였다. 물론 해빈류와 조석 및 조류, 바람의 영향을 고려할 수 있지만 우선 단계적인 접근을 위해 자연해변과 인공리프, 부유식 방파제 그리고 이중원통 케이슨식 방파제 설치 후의 해변에 대한 파랑의 변화를 분석하여 개념설계에 대한 타당성을 수치모델을 통해 평가하였다. 이를 위해서 파랑의 친수효과, 굴절, 회절, 부분반사, 해저마찰, 쇄파의 영향까지를 고려한 파랑모델을 도입하고 파랑변환과정에서 복잡한 연안역의 해저변화 및 해안선 변화의 제 조건을 반영하였다.

##### 4.1 지배 방정식

식 (1)과 같이 2차원 타원형 환경사 파랑방정식에 해저면의 마찰 및 쇄파 조건을 고려한 식 (2)의 확장환경사방정식을 사용한다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \left( -\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma \right) \hat{\eta} = 0 \quad (2)$$

여기서  $\hat{\eta}(x, y)$  = 복소해면면동함수,  $\sigma$  = 각주파수 (radians/sec),  $C(x, y)$  = 위상속도(phase velocity) =  $\sigma/k$ ,  $C_g(x, y)$  = 군속도 (group velocity) =  $\frac{\partial \sigma}{\partial k} = nC$ ,  $n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$ ,  $k(x, y)$  = 수심  $d(x, y)$ 에서 선형분산관계식  $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$ 를 만족하는 파수 ( $= 2\pi/L$ )를 나타낸다. 또한,  $w$ 는 마찰항이고, 식 (3)과 같이 진폭감쇄계수를 사용한 Dalrymple et al.(1984)의 식을 적용한다.  $\gamma$ 는 쇄파파라메타 ( $= \frac{0.15}{d} \left( 1 - \frac{0.16d^2}{4a^2} \right)$ )이다. 한편,  $a(= H/2)$ 는 파랑의 진폭,  $f$ , 은 마찰계수이다.

$$w = \left( \frac{2n\sigma}{k} \right) \left[ \frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right] \quad (3)$$

비선형파의 시뮬레이션은 진폭의존 파랑분산을 고려한 비선형 산란관계식으로 정리하여 적용한다.

$$\sigma^2 = gk [ 1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kd ] \tanh \{ kd + kaF_2 \} \quad (4)$$

$$\text{이 때 } F_1 = \frac{\cosh(4kd) - 2 \tanh^2(kd)}{8 \sinh^4(kd)},$$

$$F_2 = \left( \frac{kd}{\sinh(kd)} \right)^4 \text{ 이다.}$$

지배방정식과 경계조건을 고려한 수치모델의 기법, 수치모델의 구성, 제반 식의 유도, 모델의 검증은 황(2004)을 참조한다.

##### 4.2 복합요소법에 의한 모델의 구성

모델의 대상영역으로는 서귀포항 부근으로, 외돌개 부근에서 서귀포항, 소정방 폭포 그리고 보복동 부근을 포함한 면적 8,600,000m<sup>2</sup>의 해역이다.

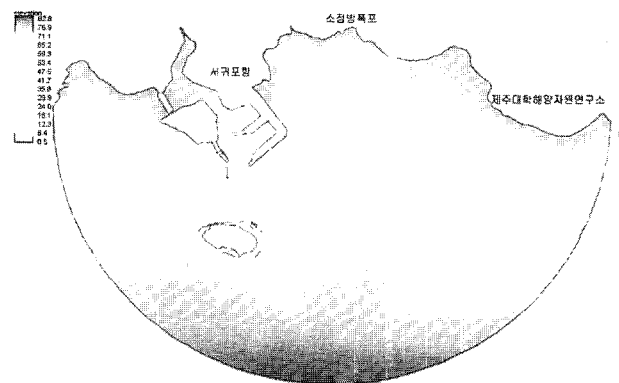


Fig. 15 Depth profile around Seguiipo water

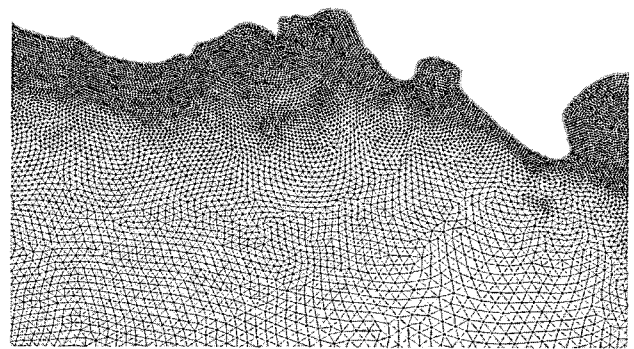


Fig. 16 Finite element mesh around So-Jeong-Bang

수치모델실험에 적용한 입사파의 조건은 Table 3과 같이 기존의 태풍자료에 의한 심해설계파랑으로 파고 10.9m, 주기 15초, 파향 S이다. Fig. 15는 대상영역의 수심을 나타내고 있으며 해양조사원 간행 수치해도(Char NO. 244)를 이용하였다. 최대수심은 녹도 남단의 76m이고, 구조물 설치 지점의 수심은 10~13m로 분포되어 있다. Fig. 16은 대상영역인 서귀포 해변 소정방 폭포주변으로 수치실험 시 사용될 격자망을 나타내고 있으며, 수심에 따라 요소의 크기가 다르게 구성되는 가변격자를 적용하였다. Table 4와 같이 수치실험 시 사용

린 절점은 34,029개이고, 유한요소는 66,146개이며, 각 경우별 소요된 계산시간은 2시간이다.

수치실험에 적용된 구조물은 인공리프, 부유식 방파제 그리고 이중원통 케이슨 방파제로서, 각 경우에 쇄파조건 및 비선형 조건으로 구분하여 Table 5에서와 같이 수치실험을 수행하였다.

Table 3 Incident wave condition for extreme wave calculation

Wave			
Direction	Height	Period	Remark
S	10.9m	15.0 sec	Deep water Design Wave

Table 4 Characteristics of numerical model and simulation

Number of Nodes	Number of Elements	Calculation Time (P4 2.8Gh 512Mb)
34,029	66,146	2 Hours

Table 5 Incident waves and reef types for model simulation

Case	Case Type	Wave Direction	Height(m)/Period(sec)
CASE1	Current Configuration	S	10.9 / 15
CASE2	Artificial Reef		
CASE3	Floating breakwater		
CASE4	Cellblock caisson breakwater		

### 5. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 확장 환경사 방정식을 기초로 하는 파랑모형을 적용하여 서귀포 해변 일원에 현재 그리고 인공 reef와 부유식 방파제 그리고 이중 원통형 케이슨 방파제를 설치하였을 시의 파랑을 추산하고자 한다. Fig. 17은 이 실험에서 적용한 Station들을 나타내고 Table 3에서와 같이 각각의 케이스별 구조물의 형식을 달리하여 수치실험을 하였으며 이때 가장 온도 확보에 유리하고 주변 환경에 영향을 작게 미치며, 시공이 가능한 경우를 찾는 것을 목표로 한다.

제주도 서귀포항 우측 소정방 폭포 부근 대상해역에서 인공 구조물을 설치하기 전 현재의 외해에서 심해 설계과 조건으로 수치 실험한 결과 CASE 1에서는 Fig. 18과 같이 파고가 종단선 1~3에 걸쳐서 7.87m~9.49m에서 4.03m~3.36m(35~50%)로 감소되는 것으로 나타났다. 현재 이 부근은 전면 해역에서 태풍 및 폭풍시기에 외해에서 상당한 파랑에너지가 해저마찰로 상쇄되지 않은 상태에서 해안 절벽까지 도달하여 쇄굴 및 절개를 가중시키는 것으로 판단되며, 특히 전면 해역에서의 회절과, 반사파가 지형적 영향으로 에너지가 집적되는 양상을 보이는 것으로 판단된다. Fig. 19는 CASE 2 인공 reef설치시의 파랑의 변화를 나타내는 그림으로 reef 전면에 7.26m~8.35m의 파고가 reef를 통과하여1.21m~2.17m(15~25%)까지 저감되는 것으로 나타났다. Fig. 20은 CASE 3 부유식 방파제

설치 시 파랑을 나타내는 그림으로 파고는 9.56m~11.36m의 파고가 부유식 방파제 통과 후 2.70m~2.27m(20~25%)까지 저감되는 것으로 나타났다. Fig. 21은 CASE 4인 이중 원통형 케이슨식 방파제를 설치하였을 때의 파고를 나타내는 그림으로서 파고는 8.43m~10.9m에서 1.02m~3.36m (20~30%)까지 저감되는 것으로 나타났다. 이 파랑 수치실험 결과데이터를 입사파로 나누어 Fig. 22에서 Fig. 24에 파랑비로서 종단선을 따라 25포인트 별 파고비를 나타내었다.

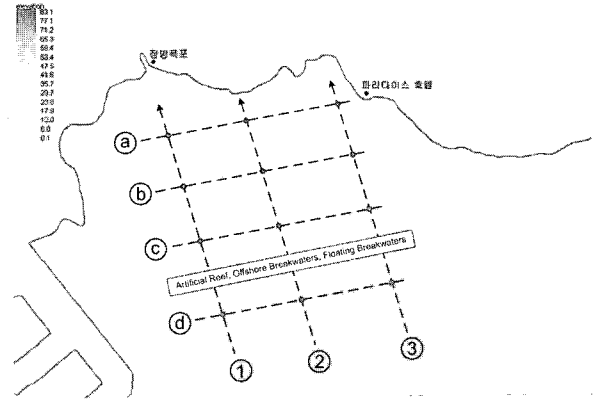


Fig. 17 Water Depth profile around Jeong-Bang waterfall

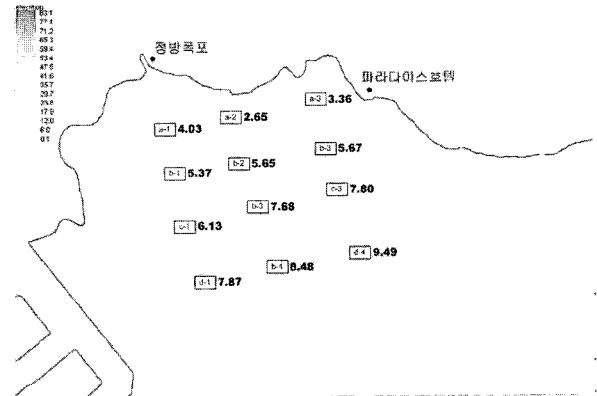


Fig. 18 wave height predictions for the present configuration with wave direction S

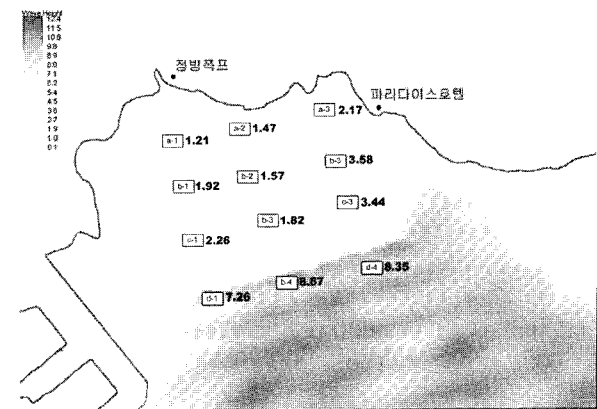


Fig. 19 Wave height predictions after the reef construction with wave direction S

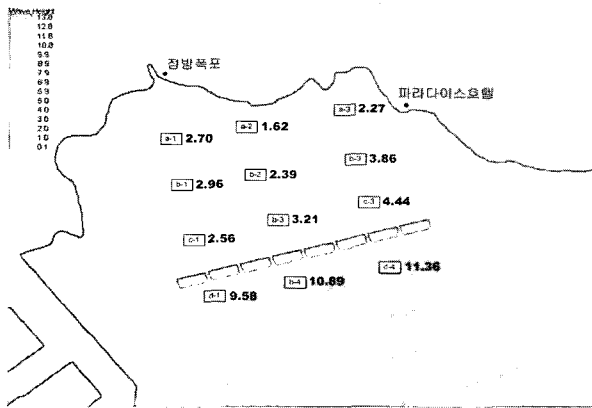


Fig. 20 Wave height predictions after the floating breakwater construction with wave direction S

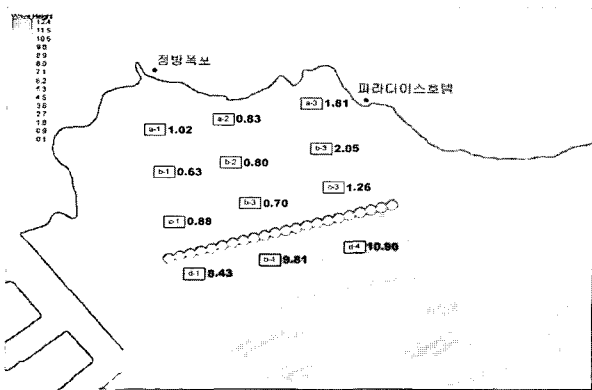


Fig. 21 Wave height predictions after the fellblock caisson breakwater construction with wave direction S

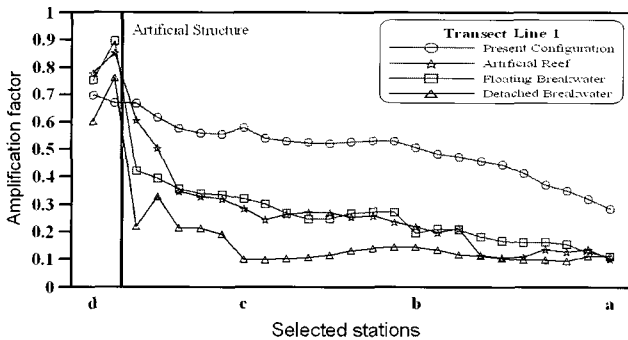


Fig. 22 Wave height along transect line #1

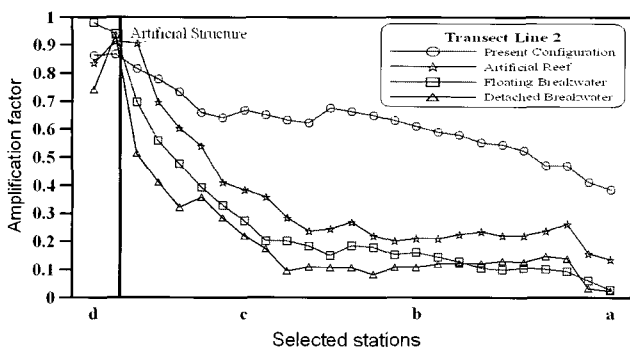


Fig. 23 Wave height along transect line #2

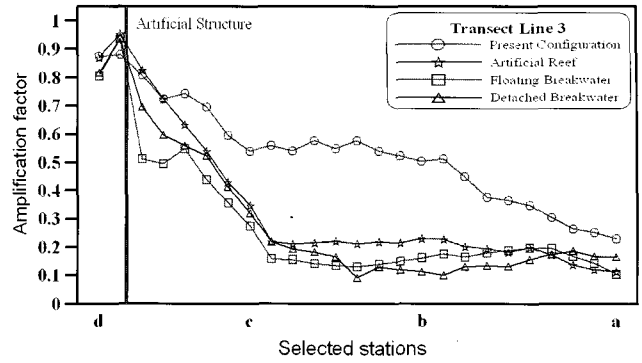


Fig. 24 Wave height along transect line #3

그 결과 네 가지 케이스에서 가장 과량의 정지효과가 큰 것은 CASE 4인 이중원통형 케이스인 방파제였으며 이는 앞의 다른 방식의 방파제와는 달리 Water Piercing 구조로서 다른 구조물들에 비해 5~10%의 과량저감의 효과를 더 기대할 수 있는 대신에 주변 환경에 회절과 반사파 등의 영향을 미칠 수도 있다는 점에서 고려해야 할 것이다.

## 6. 결론

제주도는 우리나라에서 가장 유명한 관광지이지만 지금까지 해안구조물과 어항건설에 따른 주변해역의 영향을 평가하지 않았던 것이 사실이다. 이제라도 선진국에서의 경우와 같이 이러한 2차적인 영향들에 대해 심도 깊은 연구가 진행되어야 그에 대한 적합한 대책공법의 수립과 시행에 도움이 될 것이다. 사실 해안절벽의 침식문제가 지극히 자연적인 현상이라는 점에서 이를 막기 위한 방어대책은 'No Win Situation'이라고 할 수 있다. 일시적인 대책으로의 구조물 건설은 예상치 못한 곳에서의 또 다른 문제를 야기하게 될 것이나 본 연구에서의 대상지역은 관광자원으로서의 그 가치가 매우 높다는 점에서 이러한 시도가 필요하다고 본다. 특히 서귀포 해역은 관광지로서 이 지역의 해양공간은 일반적인 생산 활동이나 교통, 주거지로서의 역할 뿐만 아니라 해양스포츠, 레저 및 위락 시설로서 그 중요도가 다른 지역보다 훨씬 더 크다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 대상해역을 조사하여 단기적인 대책공법의 평가는 물론, 장기적인 대책으로 수치실험을 통해서 대상해역에 주요 외력인 파랑을 저감하는 방안에 대해 분석한 결과 종합적으로 다음과 같은 결론에 이르렀다.

1) Pinning 공법은 사면에 강철판과 그라우팅을 시공하는 공법으로 가능한 한 자연현상을 유지토록 배려하면서 암반사면의 붕괴를 막을 수 있는 현 상태에서 가장 확실한 공법이지만, 대상지역이 해안가라는 점에서 시공에 어려움과 부식과 풍화작용에 취약하다는 점에서 장기적인 대책으로는 부족한 것으로 판단된다.

2) Drainage 공법은 사면에 배수관을 설치하여 배수를 원활하게 함으로서 사면을 안정화하는 공법으로서 이 방법 역시 시공



의 어려움이 존재하고 현장의 파괴형상이 배수에 의한 영향은 그리 크지 않은 것으로 판단됨으로 적용에 그 한계가 있다.

3) Netting공법은 암반이 파괴되어 낙하하는 것을 막는데 가장 확실한 방법이지만 관광지에 시공하기에는 미관상 좋지 못하다는 점에 그 한계가 있다.

4) 인공reef 설치 시 현재상태(CASE 1)에 비하여 파랑이 약 25% 저감하는 것으로 나타났다. 인공리프는 친환경적인 구조물로서 해면아래에 설치하여 경관을 제약하지 않으면서 파랑의 역제로 해안선을 보호하는 것은 물론 그 구조물에 해조류의 성장을 가속화하여 해조류의 숲을 이루게 하고, 여기에 해양생태계를 유인하는 시도가 가능한 공법이다.

5) 부유식 방파제의 설치 시 현재상태에 비하여 파랑이 약 25~30%감소하는 것으로 나타났다. 마산 원전항 시공 사례에 서와 같이 부유식 방파제는 그 위치와 구조에 따라 파랑의 저감효과가 현저하게 다르게 나타난다. 부유식 방파제는 구조물 하단에서의 흐름이 자유롭고 구조물 자체를 자원화 할 수 있다는 장점이 있다.

6) 이중원통 케이스식 방파제의 경우 파랑이 약 30~35%까지 감쇄하는 것으로 나타났다. 이 방파제의 가장 큰 장점은 지금까지의 육지에서 바다를 바라보는 관광형태에서 한 단계 더 나아가, 주변의 관광지를 배경으로 시설물을 이용한 스킨스쿠버, 낚시 그리고 해양스포츠 등을 즐길 수 있는 공간의 자원화를 이룰 수 있다는 것이다.

따라서, 외해에 인공리프나 이안제를 설치한다는 전제하에 암반절벽에 대해 호안공이나 직접사면안정 대책시공을 수행할 경우 그 효과가 극대화 될 것으로 예상된다.

이러한 시도를 시작으로 장기간에 걸친 현장관측과 모니터링으로 이 지역의 해저 상태, 수심 변화, 파랑의 변환과정, 파의 초오름 및 월파규모, 유동 등의 자료를 확보할 때 상세한 평가를 할 수 있을 것이며, 이곳이 육상경유는 물론 해상으로의 관광객이 빈번하게 방문하는 해역이라는 점에서 더욱더 종합적이고 장기적인 조사, 계획의 추진과 투자를 통해 접근하여야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 과학기술 (1999), “해양토목기술”
- [2] 서귀포시 (2003), “제 22회 통계연보”
- [3] 최낙훈 (2004), “신형식부소파제에 의한 파랑저감 및 동적거동해석”, 한국해양대학교 대학원 석사학위논문.
- [4] 황호동 (2004), “만에서 대규모 항만건설로 인한 항만반응특성”, 한국해양대학교 대학원 석사학위논문.
- [5] 芳我幸雄 : 藻揚の 造成技術について 瀬戸内海研究 in 山口講演集, pp. 67-68, (1995)
- [6] Bray, M.J. and Hooke, J.M. (1997) 'Prediction of soft-cliff retreat with acceleration sea level rise', *Journal of Coastal Research* Vol. 13, No. 2, pp.453-67.
- [7] CERC (1984), “Shore Protection Manual”, US Army Corps of Engineers, WA, Vol. 1.
- [8] Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., and Hwang, P. A. (1984), “Wave Diffraction due to areas of high energy dissipation”, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 110, pp.67-79.
- [9] Peter, W. F. (2001), “Coastal Defences”, Routeledge Inc. London
- [10] Richard, S. and John, R. C. H. (1997), “Coastal Stabilization”

원고접수일 : 2005년 4월 29일

원고채택일 : 2005년 8월 25일