

論 文

海底構造物 設置에 따른 波浪에너지 集積에 관한 研究

鞠 承 淇* · 李 重 雨**

A Study on the Concentration of Wave Energy by Construction of a Submerged Coastal Structure

S. G. Gug · J. W. Lee

Abstract

A new type of horizontal submerged break water or fixed structure to control waves near coastal area is introduced to focus wave energy before or behind it. Intentionally, the water depth near the structure is changed gradually to get a refraction and diffraction effect. The concentration of wave energy due to the structure was analyzed for the selected design of structure.

The shape of the submerged structure in consideration is a circular combined with elliptical curve not to cause reflection of waves at the extreme edges of the structure but cause wave scattering. The direction of the structure against the incident wave is changed easily in the model. Applying a regular wave train, the followings were examined.

- 1) Whether a crescent plain submerged structure designed by the wave refraction theory can concentrate wave energy at a focal zone behind and before it without wave breaking phenomenon.
- 2) Location of maximum wave amplification factor in terms of the incident wave direction, wave period, etc.

In any event, the study would contribute to control waves near coastal area and to protect a beach from erosion without interruption of ocean view. It is an useful study for the concentration of wave energy efficiently with the increase of wave height.

제1장 서 론

바다는 전체 지구표면의 약 70%를 차지하며, 그 면적은 약 3억 6천만 km²에 달한다. 이렇게 지구표면의 상당부분을 차지하는 해양은 태고 이

래로 인류에 많은 영향을 주어왔으며, 과학이 점차로 발전해감에 따라 바다에 대한 관심도 높아져 1960년대 중반부터 세계는 소위 해양의 시대라고 하여 해양개발은 붐을 이루게 되었다. 이때에는 생물자원, 광물자원, 에너지, 해수의 담수

* 正會員, 韓國海洋大學校 大學院

** 正會員, 韓國海洋大學校 理工大學 港灣運送工學科 教授

화 등의 기술개발이 추진되었다. 그러나 해저 석유관련 기술과 일부 군사기술을 제외하면 거의 모두가 산업형성 수준에 까지 발전하지 못하였고 당시의 기술이 미흡하다는 이유로 관심을 다른 곳으로 돌려버렸다. 파력발전을 예로 들면, 일본, 미국, 영국, 노르웨이 등에서 본격적인 연구개발이 이루어진 결과, 파력발전 그 자체의 기술적 가능성이 이미 실증되어 현재에는 효율을 보다 향상시키는 것 및 주변기술을 개발하는 단계로 옮겨가고 있는 것이다. 오히려 필요성보다는 장래 전망이 선행되어, 이것이 기술개발의 중요한 역할을 하게 되었다고 볼 수 있다. 파력과 같은 자연 에너지는 석유나 석탄처럼 당장의 연료로써 직접 산업에 투입되는 것이 아니라 보완적인 국부(局部) 에너지로 하여 이용되는 것이 의미있기 때문이다.

파력발전이 산업분야에서 활용되기 위해서는

1) 각 분야에서 이용할 수 있는 기술이 개발되고, 2) 개개의 개발된 기술을 합치시켜 종합화하기 위한 시스템을 구성하는 것이 급선무이다.

우리나라에서 지금까지 연안역 이용은 주로 정온의 폐쇄적 천해역을 대상으로 하여 도시부근에서는 임해공업용지를 위한 매립으로, 지방에서는 고급 어패류의 양식 등 단일목적으로 되어왔다. 사회경제의 고도한 성장에 따라 이들 산업이 급격히 발전한 결과 바다가 가진 자연정화 능력을 넘어서 폐기물이 투입되고 수질 오염 등의 해양오염이 발생하고 있으며, 또 이용이 다양해짐과 동시에 과밀화 방향으로 이용형태간의 경합이 이루어져 여러가지 문제가 대두되고 있는 상황이다.

더구나 방재 등의 해안보전도 지금까지는 바다에서 인명 및 재산을 보호하는 기술이 주체로 되었기 때문에 바다와 친해질 수 있는 기회가 적어지고 있는 것이 현재에 이르러서 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 해양개발에 있어서 제반문제를 극복하는 것, 또는 그와 같은 기술을 개발하는 것이 요구되고 있는 것이다.

이와 같은 실정은 해역 제어를 선두로 하여 해양개발전반에 전파되도록 하는 것이 바람직하다고 본다. 파랑 및 흐름을 포함한 해양환경을 제

어하여 보다 바람직한 것으로 하는 것을 목적으로 하는 것이 해역제어이다. 구체적으로는 해역의 실태 및 특성을 파악하는 관측기술, 외해소파제(Offshore Wave Absorber) 등의 해역제어구조물, 각종의 해양구조물의 기능예측 및 주변환경에의 영향에 관하여 시뮬레이션하는 기술등의 개발이 당면과제로 되고 있다.

해역제어에는 좁은 의미로 연안해역의 파나 흐름 등을 제어하는 것에, 보다 바람직한 해양공간을 창출하기 위한 기술개발이라 할 수 있으나, 해양환경의 보전과 달리 나아가서 해역 경관과 조화한 연안역의 이용, 개발을 수행하고 지역사회의 발전에 공헌하는 것이 기대되고 있다.

해양의 개발 이용은 폐쇄성만 내역에서 외양에 면한 연안역으로 옮겨가고 있다. 우리나라의 주변해안선은 약 70% 이상이 개방성 해안 및 개구성 만역으로 점유되고 있고 아직 많은 부분이 이용되지 않고 있다. 그러나 이와 같은 연안역은 파랑 등 해상조건이 격해져 표사이동이 심한 곳이 나타나고 여기에 개발과 이용이 진전됨에 따라 표사의 균형이 깨어지고 지금까지 완만하게 시간적으로 진행되어 온 해안침식이 급속하게 진행하여 전국적으로 확대되어 가고 있다. 1960년대 사라호 태풍이 한반도를 강타하여 재해를 발생시킨 것에 그치지 않고 1960년대 중반 이후부터는 해안 침식에 의한 제방 및 호안의 결괴 등에 의해 재해가 증대하고 있으며, 침식대책은 호안보전에 중요한 과제로 되고 있다.

해안보전의 가장 바람직한 길을 흑자는 풍부히 넓은 모래사장을 확보하는 길이라고 했다. 모래사장은 내습파의 에너지를 쇄파에 의해 소모시키고 제방 및 호안의 전면에 있어서 해안 형상의 변동을 적게하고 세굴 등에 의한 재해로부터 구조물을 보호하는 역할을 담당하기 때문이다. 또 푸른 숲으로 싸인 해변은 조망하기에 아름답고, 수영 등의 레크레이션의 장소로서 유용한 것 외에 수질정화 정책이라고 하는 환경보전의 기능도 지니칠 수 없는 것이다.

침식해안에서 사장을 유지하기 위해서는 인공적으로 모래를 보급하는 양빈공 만으로는 불충분

하고 돌제, 이안제 등의 침식대책 공법을 병행하여 실시할 필요가 있다고 하겠다. 한편 사빈이 유실된 후 해안 정비를 시작한다면 많은 경비를 요하는 것으로 되기 때문에 사빈의 보전 육성을 위한 시설에 관해서 가능하다면 예방적 정비가 필요하다. 해안정비의 기본적인 방향은 종래와 같이 제방 등의 시설본체에 의한 선(Line)적인 방호방식에서 해안의 정비를 중시하는 면(Area)적인 방호방식으로 옮겨가는 것이다. 이안제 및 양빈에 의해 소파효과가 큰 해변의 보존, 육성을 도모하며 이들과 일체적인 방재효과를 발휘시키는 것과 동시에 쾌적한 해안환경을 창출하도록 하는 것이다.

최근 이러한 해안 방재와 연안해역을 종합적으로 이용하기 위하여 새로운 형태의 파랑제어 구조물에 관해서 여러연구(谷木, 1985; 工藤 등, 1986, 1987)가 행해지고 종래 사용되어온 파랑제어 구조물의 다수는 각종 방파제를 대표하여 벽 모양의 구조물로 파랑을 통과시키지 않도록 하는 형식으로 되어왔다. 이것에 대하여 노르웨이에서는 파의 굴절현상을 이용하는 것에 의해 파향을 변화시켜서 파랑을 제어한다고 하는 물수평판(수중에 해면과 나란하게 설치시킨 얇은 판)이라고 하는 신형 구조물(Helstad, 1980)을 고려하였다. 이 수중평판은 수심변화에 의한 파속(Wave Velocity)의 변화를 이용하고 있다.

한편, 해양파는 수심이 깊은 장소에서는 빠르게 진행하나 역으로 수심이 얇은 장소에서는 늦어지는 성질이 있다. 이 성질을 이용하여 수면하에 가라앉은 해저구조물을 축조하여 인공적으로 천수역(Bank, Shoal)을 구성하면 파가 구조물의 상단에서는 주위보다 느리게 진행하는 것으로 된다. 즉, 평판 대신에 수평잠재(Horizontal Submerged Breakwater)를 설치하고 이 구조물 주위의 수심을 완만하게 변화시켜 구조물위와 구조물주위에서의 파가 위상차(Phase Different)를 갖도록 하여 파향을 변화시키는 제어기술을 도입하는 것이다. 또한 구조물의 폭을 중앙에는 넓고 양단에서는 좁게하면, 빛이 블록렌즈의 초점에 집중하는 것과 같이 파향이 변화하고 수중구조물의 초점에

해수파를 집중시키는 것이 가능할 것이다. 즉, 수중구조물의 평판 형상을 변화시키는 것이 가능할 것이고 이와 같이 하여 연안에서 파랑을 제어하는 것이 가능할 것으로 본다.

과거부터 파랑제어에 사용되어져 온 방파제는 연안역을 보호한다고 하는 방재적 견지가 중시된 수동적인 것에 비하여, 여기서 기술하는 해저잠재는 연안해역에 내습하는 파랑을 제어하고 나아가서는 이를 유효하게 이용한다고 하는 능동적인 기능을 가지도록 하는데 있다. 특히 본 연구는 빛의 굴절현상 및 물수평판에서의 연구 등에 착안하여 기존 방파제의 형상을 변형하고 또한 해저수심을 인위적으로 완만하게 변화시켜서 해수파의 파향및 파고를 제어하고자 한다. 한편 파랑에너지를 집적시키는 기본적인 아이디어를 제공하고 이를 통해 연안해역 개발에 기여하고자 한다.

또한 구조물의 평면적 형상은 회절과 이론에 기초를 둔 수치해석을 통하여 다룰수 있지만 이중효과를 고려하여 구조물 주위의 수심을 인위적으로 변경해 굴절효과까지 취급이 다루어 지도록 종합화한 수치모델을 구성하고자 한다. 그리고 여기서 사용하는 수치해석 기법은 복합요소법(Hybrid Element Method; HEM, Lee, 1989)을 사용한다.

본 연구의 필요성 및 그 기대효과는 다음과 같은 것으로 분류할 수 있다.

- 1) 수면하에 구조물이 축조되므로 연안역의 경관이 손상되지 않는다.
- 2) 해수순환이 제약받지 않는 수중 구조물을 고려한다면, 해수순환의 차단으로 인한 오염은 염려하지 않아도 될 것이다.
- 3) 파향을 변화시킴으로 정온한 해역을 확보할 수 있고 동시에 정온해역과는 별도로 파의 집중이 일어나도록 하여 파랑에너지를 유효하게 이용할 수 있는 방안을 제시할 수 있다.
- 4) 해저구조물의 지지방식을 변경하여 계류방식을 사용하면 비교적 심해지역에서도 적용이 가능하다.
- 5) 직립벽이 아닌 구조를 취할 경우 기초 주위

에 세굴(Scour) 등의 문제는 작아진다.

6) 사빈 해안에서 이러한 구조물을 설치할 경우 외해로 모래가 유실되는 것을 부분적으로 차단하는 효과를 기대할 수 있다.

제2장 파랑제어구조물의 설계

2.1 파랑제어구조물의 설계

파랑제어구조물은 그 평면의 형상을 변화시킴으로서 임의의 방향으로 파향을 변화시킬 수가 있다. 본장에서는 어떤 조건의 파를 구조물의 평면으로부터 떨어진 안측 영역에서 모으는 것에 적용한 구조물의 형상을 해석적으로 구하는 방법을 다룬다.

파랑제어구조물의 형상설계에 대하여는, 회절파이론에 기초한 수리 해석 또는 실험으로부터, 각종의 형상에 대하여 현상해석을 행하고 그 가운데서 최적의 것을 선택하는 방법이 생각될 수 있지만, 이것은 합리적인 방법이라고는 말하기 어렵다.

한편, 굴절이론은 상기방법에 비하여 간단하므로, 파랑제어구조물의 형상이 다름에 따라 파향변화를 해석적으로 표현할 수 있다. 이 때문에 의도하는 바에 따라 파랑변형현상이 생기도록 구조물의 형상 결정 즉, 형상설계에 있어서 유효하게 이용할 수 있다고 본다.

굴절이론은 회절파이론과 비교하여 구조물에 의한 회절이나 반사의 효과를 무시하고 있으므로, 구조물에 의한 파랑변형현상을 모두 표현할 수 있는 것은 아니지만, 파랑제어구조물에 의한 파향제어는 수심 변화에 따라 속도의 변화를 이용할 수 있으므로 기본적인 제어효과를 표현할 수 있다고 생각할 수 있다.

굴절이론에 의하면 파랑제어구조물을 통과하는 파향선은 구조물에 파가 들어오는 심해측 및 구조물로부터 파가 나오는 안측의 외면에서 2회 굴절한다. 工藤君明 등(1986)의 연구에서 나타난 凸렌즈형 몰수평판 수치 해석 및 실험의 결과에

의하면, 몰수평판으로부터 나오는 안측 외면에서 생기는 현저한 반사때문에 평판위에서 집파도중의 진행파와 안측 외면으로부터 반사파가 충돌하고, 중복파가 생겨 파고가 증대함이 확인되었다. 또, 일반적으로도 몰수평판에서 파가 나올때 파향이 굴절하는 것은 몰수평판에 파가 들어올때 파가 굴절하는 것에 비하여 반사가 크고, 투과율이 작아지는 경향이 있는 것이 지적되고 있다.

여기서는 구조물에 의한 반사의 영향을 경감시키고, 집파효율을 증대시킴으로서, 파향은 파랑제어구조물에 파가 들어올때 즉, 심해외면에서 굴절하는 것으로 하고, 반사가 큰 안측 외면에서는 굴절하지 않는다고 가정하였다.

Fig. 2.1에 나타난 바와 같이 파랑제어구조물을 통과한 파향선이 점 F에서 교차하여 집선을 형성하는 구조물 형상을 구한다. 입사파의 파향선을 y축 양의 방향에서 들어오는 것으로 한다.

파랑제어구조물의 안측 외면형상은 파향이 굴절하지 않는다고 가정하여, 통과하는 파향선에 대하여 수직으로 교차할 필요가 있다. 또, 파가 동위상에서 점 F에 도달하기 위하여, 구조물을 나와서 점 F까지의 도착시간이 같다고 하는 조건을 만족할 필요가 있다. 따라서 파랑제어구조물의 안측 외면형상이 만족되어야할 조건은 다음과 같이 된다.

$$\angle FQR' = \frac{\pi}{2}, \frac{Q'F}{c} = \frac{r-T_0}{c} = \text{Const.} \dots (2.1)$$

여기서, r을 초점거리, T₀는 구조물 기준폭이다. 윗식이 만족해야 할 궤적을 x, y 좌표로 기술하고 정리하면, 식(2.2)와 같은 반경(r-T₀), 중심(0, -r)의 원의 식이 된다.

$$x^2 + (y+r)^2 = (r-T_0)^2 \dots \dots \dots (2.2)$$

한편, 파랑제어구조물의 심해측 외면형상은 동위상으로 파가 점 F에 도달하는 조건, 즉 기준선 x축상의 S점 및 S'으로부터 점 F까지의 파의 도달시간이 같다고 하고, 다음 식으로 나타내는 조건을 만족할 필요가 있다.

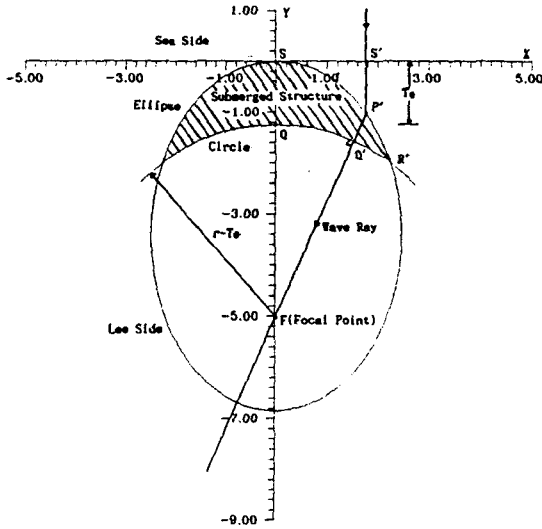


Fig. 2.1 Shape Design by the Wave Refraction Theory

$$\frac{S'P'}{c_0} + \frac{P'Q'}{c} + \frac{Q'F}{c_0} = \frac{T_0}{c} + \frac{r-T_0}{c_0} = \text{Const.} \quad (2.3)$$

여기서, c 는 구조물 위에서의 파속, c_0 는 구조물 외에서의 파속이다. 여기서 안측 외연에서는 파향이 변하지 않고, 위상차도 생기지 않으므로 구조물에 파가 들어올 경우 초점 F에 도착할 때까지의 동일 파속 c 로 파가 진행한다고 가정하면 (2.3)식은 간단하게 되어, 다음식으로 된다.

$$\frac{S'P'}{c_0} + \frac{P'F}{c} = \frac{r}{c} = \text{Const.} \quad (2.4)$$

위식을 만족하는 궤적을, x, y 좌표로 기술하면, 점 F를 하나로 가지는 다음식과 같은 타원으로 된다.

$$\frac{x^2}{\{r\sqrt{(c_0-c)/(c_0+c)}\}^2} + \frac{\{y-r c_0/(c_0+c)\}^2}{\{r c_0/(c_0+c)\}^2} = 1 \quad (2.5)$$

따라서, 설계조건으로서 집적하고 싶은 파의 입사파 주기, 수심, 잠수심도, 파랑제어구조물 기

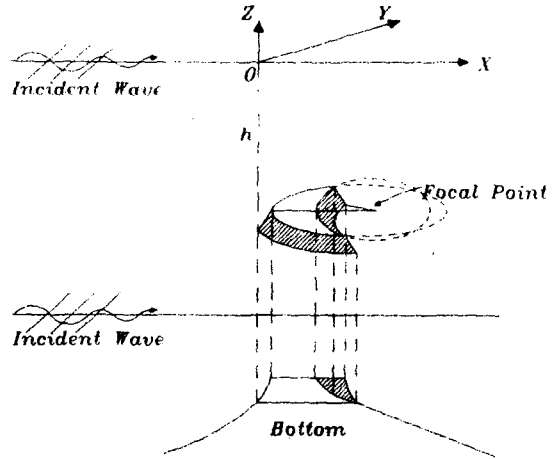


Fig. 2.2 Shape of a Submerged Semi-Circle Structure

준족 4개의 조건을 주어서 집파에 적용한 파랑제어구조물형상은 식(2.2)와 식(2.5)로 결정되고, 그 형상은 심해외연은 타원형, 안측외연은 원형으로 구성되는 초승달 형으로 한다.

2.2 파랑제어구조물의 구성

파를 집중시키기에 최적한 평면현상을 수치실험(Numerical Experiment) 및 이론해석을 통하여 구하는데 기하학적 광학적으로 Fig. 2.2과 같이 중심이 동일한 타원과 원이 교차한 볼록렌즈와 유사한 형상에 투과된 파는 초점거리에 집중되고 구조물 특성상 투과되지 못한 입사파는 산란시키도록 하여 정온을 요하는 해역에 파의 침입을 막고 초점에 해당하는 영역에는 소파구조물이나 파의 에너지를 흡수하는 장치를 둬으로써 정온을 유지하거나 파랑에너지원으로 이용할 수 있을 것이다.

파랑제어구조물 주위의 파랑변형 형태는 Fig. 2.3과 같이 일반적으로 반사역, 감쇠역, 집적역으로 나타낼 수 있다. 한편, 파랑은 Fig. 2.4와 같이

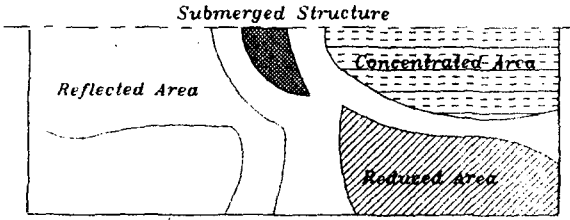


Fig. 2.3 Wave Transform Pattern around a Submerged Structure

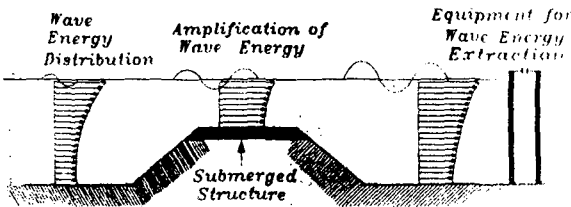


Fig. 2.4 Schematic Diagram for Wave Transformation

구조물 상단 및 주위로 부터 파랑의 굴절, 회절 및 반사작용으로 인해 파랑제어 구조물의 배후에서 증폭되어 파랑에너지 변천장치를 통해 에너지를 집적하는 것으로 한다.

또한 파랑에너지의 추출을 위해서는 이와 같은 구조물의 방향을 입사파의 방향과 반대방향으로 위치시킴으로 파의 집적을 증대시킬 수도 있을 것이다. 구조물의 전방 또는 후방으로 파랑이 입사될 경우, 특히 타원과 반대측 단인 원의 가장 자리로 구성된 부분에서는 굴절과, 반사파가 원과 유사한 형태의 파봉선을 이루면서 초점거리에 집적되어 파랑에너지를 증가 시킬 것이다.

이러한 이론적인 배경에서 파랑의 굴절, 회절, 반사, 산란 등이 혼합되어 나타나는 제반현상을 포함한 파이론을 도입하여 수치모델(Lee, 1989)을 구성하고 이를 위주로 하여 파향변화 및 파랑에너지 분포 및 집적에 대한 연구를 실행하고자 한다.

제3장 수치모델의 구성

3.1 적용방정식

파랑의 분석을 위해 환경사방정식을 많이 사용

하고 있는데, 환경사방정식은 일반 선형파 이론의 한 분야로 Berkhoff(1972)에 의해 개발된 이후 Chen과 Mei(1974, 1975)에 의해 유한요소법(Finite Element Method)과 하이브리드 요소법(Hybrid Element Method)으로 방법이 제안되어 여러학자들에 의해서 개량되어 왔다. 이 방정식은 천수효과(Shoaling Effect), 회절 및 굴절과 반사 등의 물리현상을 포함하므로 수치해석에 빈번하게 사용되어 왔으나, 해저마찰, 경계면 흡수, 반사파의 방사(Scattering) 등을 고려한 경우는 최근에 들어서 이고, 더구나 이들 조건을 종합화한 시도는 Chen(1985, 1986)과 Lee(1987, 1989) 등이 있었다.

항만이나 해안특정지역에 대한 시뮬레이션에 수반되는 문제는 방파제나 수로 등에서 연구영역을 한정할 때 경계면에 대한 처리는 수치해석의 결과에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있어서 적절한 처리 방법의 사용이 중요하다 하겠다. 그래서 본 연구에서는 수치해석의 정도를 높이기 위하여 유한요소법과 해석적인 방법을 접목한 하이브리드 요소법을 사용하여 기본방정식과 경계조건을 처리하고 유도된 모델을 통해 시뮬레이션하여 문제점을 도출해 보고자 한다.

Fig. 3.1에서와 같은 문제영역에서 파랑장은 선형이고 시간으로 보아 주기적이라 가정하여 외해에서 내해로 파가 입사해 들어올 때 해역은 유한해역 구간 A와 무한구간 C로 구분하고 이들 영역은 반원모양의 개방경계면 aA로 연결되는 것으로 한다. 이때 해안선 경계를 aB로 하고 반무한구간은 직선형 해안경계로 부터 수평방향 $y \geq 0$ 으로 무한대까지 확장되어 있는 것으로 하며, 구간 C에는 수심이 일정하고, 해저마찰을 입사파에 대해 존재하지 않는 것으로 둔다. 이 해역에서의 기본 방정식은 해저마찰을 고려하여 식(3.1)과같이 정리된다.

$$\nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi = 0 \dots\dots\dots (3.1)$$

여기서 ∇ : 수평방향 Gradient 연산자

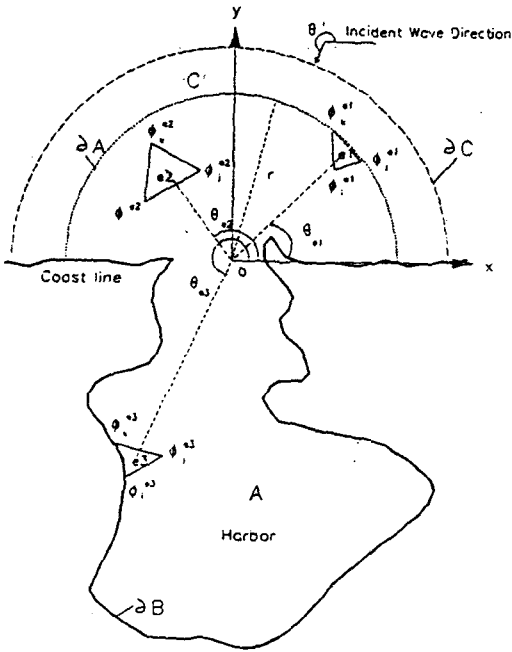


Fig. 3.1 A Classification of Different Regions for Numerical Scheme

C_g : 파의 군속도

$$C_g = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

C : 파속

h : 수심 $h(x, y)$

k : 파수 $(2\pi/L)$

ω : 파의 각주파수 $(2\omega/T)$

ϕ : 2차원 복소속도 포텐셜 함수 $\phi(x, y)$

해저마찰 Factor λ 는 해저면에서 Shear Stress 성분을 수평방향의 최대속도에 비례한다고 가정하면 식(3.2)와 같이 정리할 수 있다.

$$\lambda = \frac{1}{1+i} \frac{\beta \alpha \omega e^{ir}}{h \sinh kh} \dots\dots\dots (3.2)$$

여기서 $\beta(x, y)$ 는 무차원 해저 마찰계수, r 은

파와 해저마찰사이의 위상차(Phase Difference), α_0 는 입사파의 파진폭이다.

식(3.2)에서 $\beta=0$ 이면 $\lambda=1$ 로써 방정식 (3.1)에서 해저마찰이 고려되지 않은 환경사 방정식이다.

x, y 방향의 좌표계에서 수평방향 유속 u, v 와 자유표면의 상하이동 η , 동수압(Hydrodynamic Pressure) P_a 는 시간함수를 분리한 공간속도 포텐셜 ϕ 및 해수밀도 ρ 를 사용하면 식(3.3) - (3.6)으로 표시된다.(Chen, 1986, Lee, 1989)

$$u(x, y, z, t) = \lambda f \frac{\partial \phi}{\partial x} e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$v(x, y, z, t) = \lambda f \frac{\partial \phi}{\partial y} e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\eta(x, y, t) = \frac{i\omega}{g} \phi e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$P_a(x, y, z, t) = \rho \omega f \phi e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (3.6)$$

여기서 f 는 $\cosh(z+h)/\cosh kh$ 로 파랑장의 수직방향변화율을 가리킨다.

해안경계면에서의 경계조건은 반사계수(Reflection Coefficient, k_r)을 사용하였으며 불완전반사와 산란을 고려하여 경계면을 따라 다음식(3.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \Gamma \phi \dots\dots\dots (3.7)$$

여기서 $\Gamma = ik(1-k_r)/(1+k_r)$ 이다. 계수 $\Gamma=0$ 일 때, $k_r=1$ 로 경계면에서 완전반사할 경우, 식(3.7)이 일반적으로 수치모델에서의 경계조건처럼 경계면에서 유체속도의 수직성분 $\partial \phi / \partial n$ 은 0이 됨을 알 수 있다. 본연구에서는 개방경계면의 도입시 내부유한구간(A)와 외부무한구간(C)의 두부분으로 나누어 개방경계면에서는 Sommerfeld의 방사조건(Radition Condition)을 적용하기로 한다.

$$\lim_{\Gamma \rightarrow \infty} \sqrt{\Gamma} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \phi^s = 0 \dots\dots (3.8)$$

여기서 n 은 경계면에서 외부로 수직방향, ϕ^s 는 외부로 향하는 파(Scattered Wave, ϕ^s)의 속도포

텐셜이다.

3.2 수치해석방법

경계조건식을 만족시키기 위하여 여기서는 유한요소법의 변분법(Variational Method)을 사용하여 그 범함수(Functional) $F(\phi)$ 가 일정하도록 경계조건식들을 범함수에 더해서 이 범함수를 최소로 하는 형태로 변환한다.

최종적으로 최소화할 범함수는 Green의 제1동일성의 원리 및 Gauss정리에 의해서 경계조건식을 포함시키면 적분방정식의 형태로 된다.

$$\begin{aligned}
 F(\phi) &= \iint_A \frac{1}{2} \{ \lambda C C_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi^2 \} dA \quad I1 \\
 &+ \int_{\partial A} \frac{1}{2} \lambda C C_g (\phi_c - \phi') \frac{\partial(\phi_c - \phi')}{\partial n_A} ds \quad I2 \\
 &- \int_{\partial B} \frac{1}{2} \lambda C C_g \Gamma \phi^2 ds \quad I3 \\
 &- \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial(\phi_c - \phi')}{\partial n_A} ds \quad I4 \\
 &- \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial \phi'}{\partial n_A} ds \quad I5 \\
 &- \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi' \frac{\partial(\phi_c - \phi')}{\partial n_A} ds \quad I6 \\
 &- \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi' \frac{\partial \phi'}{\partial n_A} ds \quad I7 \\
 &\dots\dots\dots (3.9)
 \end{aligned}$$

여기서 ϕ' 는 입사파의 복소속도 포텐셜이고, ϕ_A , ϕ_c 는 각각 A 및 C구간에서의 복소속도 포텐셜을 나타낸다.

식(3.9)에 HEM(Hybrid Element Method)에 의한 변환과정을 거치면 일반적인 형태의 대수방정식(Algebraic Equation)로 간략화하여 표현할 수 있다. 각 적분항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \iint_A \frac{1}{2} \{ \lambda C C_g (\nabla \phi)^2 - \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi^2 \} \\
 &= \iint_A \frac{1}{2} (\lambda C C_g) \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\nabla N_i \cdot \nabla N_j - \frac{\omega^2}{\lambda C^2} N_i N_j) \\
 &\phi_i^e \phi_j^e dA \quad \dots\dots\dots (3.10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \int_{\partial A} \frac{1}{2} \lambda C C_g (\phi_c - \phi') \frac{\partial(\phi_c - \phi')}{\partial n_A} ds \\
 &= \frac{1}{2} K_{rA} \lambda C C_g \int_0^\pi [\{ \alpha_0 \frac{H_0'(K_{rA})}{H_0(K_{rA})} \\
 &+ \sum_{n=1}^m \alpha_n \frac{H_n'(K_{rA})}{H_n(K_{rA})} \} \cos n\theta] \\
 &[\{ \alpha_0 + \sum_{n=1}^m \alpha_n \} \cos n\theta] d\theta \quad \dots\dots\dots (3.11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_4 &= - \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial(\phi_c - \phi')}{\partial n_A} ds \\
 &= -K \lambda C C_g \sum_{nR=1}^{R-1} \frac{1}{2} (\phi_{nR}^* + \phi_{nR+1}^*) \\
 &[\alpha_0 \frac{H_0'}{H_0} + \sum_{n=1}^m \alpha_n \frac{H_n'}{H_n} \cos n\theta_{nR}] \quad \dots\dots\dots (3.12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_5 &= - \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial \phi'}{\partial n_A} ds \\
 &= -\lambda C C_g \left(\frac{-ig\alpha_0}{\omega} \right) \sum_{nR=1}^{R-1} \frac{1}{2} (\phi_{nR}^* + \phi_{nR+1}^*) \\
 &(ik) \{ \cos(\theta_{nR} - \theta') \exp(ikr_A \cos(\theta_{nR} - \theta')) + k_r \cos \\
 &(\theta_{nR} + \theta') \exp(ikr_A \cos(\theta_{nR} + \theta')) \} \quad \dots\dots\dots (3.13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_6 &= \int_{\partial A} \lambda C C_g \phi' \frac{\partial(\phi_c - \phi')}{\partial n_A} ds \\
 &= kr_A \lambda C C_g \left(\frac{-ig\alpha_0}{\omega} \right) \int_0^\pi \{ (1+k_r) \\
 &\sum_{n=0}^m \epsilon_n (i)^n J_n \cos n\theta \cos n\theta' + (1-k_r) \sum_{n=0}^m \epsilon_n (i)^n \\
 &J_n \sin n\theta \sin n\theta' \} \{ \alpha_0 \frac{H_0'}{H_0} - \sum_{n=1}^m \frac{H_n'}{H_n} \\
 &(\alpha_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta') \} d\theta \\
 &= \pi kr_A \lambda C C_g \left(\frac{-ig\alpha_0}{\omega} \right) [(1+k_r) J_0 \alpha_0 \frac{H_0'}{H_0} \\
 &+ \sum_{n=1}^m (i)^n J_n \frac{H_n'}{H_n} \{ \alpha_n (1+k_r) \cos n\theta' + \beta_n (1-k_r) \\
 &\sin n\theta' \}] \quad \dots\dots\dots (3.14)
 \end{aligned}$$

각 적분항을 매트릭스로 나타내면,

$$I_1 = \frac{1}{2} \{ \phi \}^T [K_1] \{ \phi \} \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \{\mu\}^T [K_2] \{\mu\} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$\{\mu\}^T = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots\dots\dots, \alpha_m\}$$

$$I_4 = \{\phi^*\}^T [K_4] \{\mu\}$$

$$= \frac{1}{2} \{\phi^*\}^T [K_4] \{\mu\} + \frac{1}{2} \{\mu\}^T [K_4] \{\phi^*\} \dots (3.17)$$

범함수(3.9)를 두개의 미지계수 ϕ 와 μ 에 대한 미분을 구하고, 이를 각각 0으로 두면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_i} = 0 \quad i=1, 2, \dots\dots\dots, E \dots (3.18)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \mu_j} = 0 \quad j=1, 2, \dots\dots\dots, m \dots (3.19)$$

여기서 E는 전체 Nodal Point의 수를 가리키고, m은 Hankel 함수의 계수에 대한 차수를 나타낸다.

미분한 결과를 연립하여 계수항 { }를 제거하면 다음식과 같이 정리할 수 있다.

$$([K_1] - [K_4][K_2]^{-1}[K_4]^T) \{\phi\} = \{Q_1\} - [K_4][K_2]^{-1} \{Q_2\} \dots\dots\dots (3.20)$$

여기서 $[K_1]$, $[K_2]$, $[K_4]$ 는 범함수 (3.9)에서 각 적분항(I_1, I_2, I_4)에 대한 매트릭스를 나타내고, Q_1, Q_2 는 미분후의 Load Vector를 나타낸다.

대수방정식형태로 요약하면 다음식과 같이 된다.

$$[K] \phi = \{Q\} \dots\dots\dots (3.21)$$

여기서 $[K]$ 는 강성매트릭스(Stiffness Matrix)로 대칭밴드형 매트릭스(Banded Symmetric Matrix)이기 때문에 Fig. 3.2와 같이 상위만 부분을 계산하여 기억용량을 줄일 수 있는데, 여기서 $\{Q\}$ 는 Load Vector를 나타내고, 식(3.21)는 Gauss소거법(Gaussian Elimination)에 의해 그 해를 구할 수 있다. 이 복소속도 포텐셜의 해는 증폭율과 대응하는 주기로 2, 3차원적인 표현으로 나타낼 수 있다. 이 복소포텐셜의 해는 파고로 전환되어 대응하는 주기에 대한 증폭율을 2, 3차원적인 그래픽 및 반응곡선으로 나타낼 수 있다.

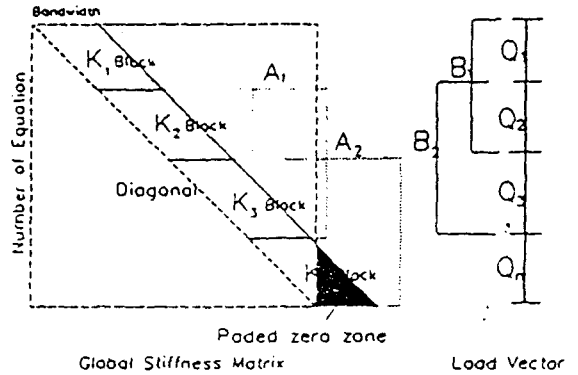


Fig. 3.2 Dynamic Block Gauss Algorithm for the Upper Banded Matrix $[K]$ and $[Q]$

제4장 파랑 전파모델의 수립

4.1 파랑 전파모델의 검증

본 모델을 검증하기 위하여 수면상에 돌출된 파랑제어구조물과 같은 형태의 초승달형 구조물을 대상으로 하여 검증용 모델을 수립하여 모델 검증을 실시하였는데, 검증용 모델의 제원은 다음과 같다.

Node수	1,000개
Element수	1,920개
경계요소수	40개
밴드폭	106

대상해역을 삼각요소로 나누어 모델을 구성하면 Fig. 4.1과 같으며 수심은 $h = -20m$ 로 균일하게 분포하도록 하였다. 그리고 대상 파랑영역에 대해서는 해저면으로부터 마찰이 없는것으로 하여 마찰계수 $\beta = 0.0$ 으로 하였다.

검증을 위해 이미 잘 알려진 경계적분법에 의한 해를 도출하였으며 이를 비교 분석하였다.

검증용 모델에서는 실제해양에서 빈번하게 관측되는 단주기와 영역인 주기 6sec~15sec의 입사파가 구조물의 전면 및 45° 방향에서 들어오는 것으로 하여 시뮬레이션을 실시하였는데, 이중 입사파의 주기가 9sec인 파가 구조물의 전면에서 들어오는 경우 구조물 주위에서의 파고의 증폭양

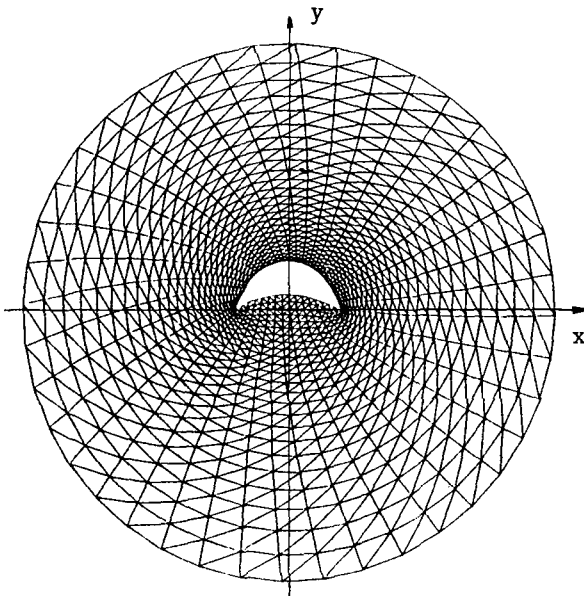


Fig. 4.1 Discretization of an Emerged Semi-Circle Structure with Triangular Elements

KC0990.DAT, 9sec, 90 deg, Const. Surface, No-friction



Fig. 4.2 Contour Wave Height Amplification Factor around an Emerged Semi-Circle Structure(9sec, 90° Direction, $\beta=0.0$)

상을 2차원으로 나타내면 Fig. 4.2와 같으며 수치는 파고의 증폭비를 가리킨다. 이 그림에서는 구

조물을 향해서 진행해온 입사파는 구조물 전면에서 파고가 1.6정도 까지 증폭되고 또한 구조물로부터 반사 및 회전하여 양첨단 및 그 바로 뒤에서는 약 1.4정도로 감쇄되어 구조물 중앙부 후면에서는 비교적 정온한 것으로 나타났다.

또한 선행연구 申等(1991)에서 사용되어 수치실험과 해석해가 비교적 잘 일치되었던 BIM (Boundary Integration Method)를 이용한 수치실험의 결과를 나타내면 Fig. 4.3과 같다.

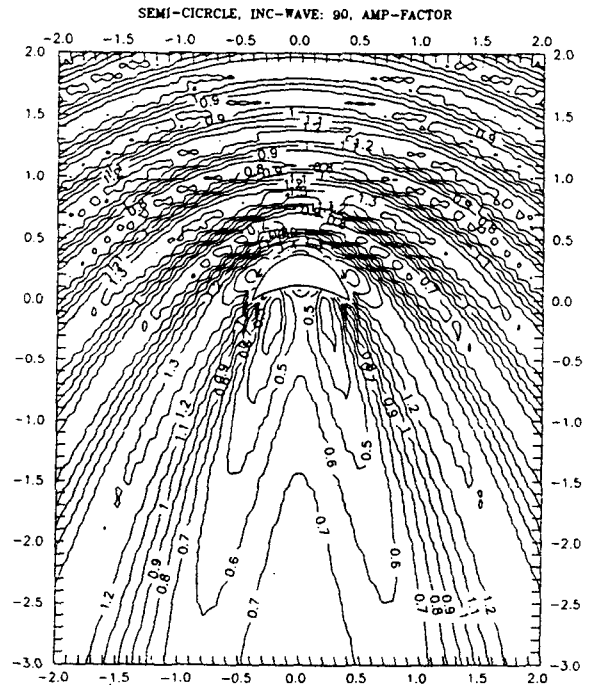


Fig. 4.3 Contour Wave Height Length(L) Amplification Factor around an Emerged Semi-Circle Structure by BIM(90° Direction, $\beta=0.0$)

Fig. 4.4와 Fig. 4.5는 HEM에 의한 수치실험의 결과와 BIM에 의한 x축 방향 및 y축 방향에서의 파고증폭계수의 분포를 각각 구하여 비교하였다. 나타난 바와 같이 두 모델이 서로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

주기 9sec인 입사파가 구조물에 대하여 45°방향에서 구조물을 향하여 들어오는 경우 구조물

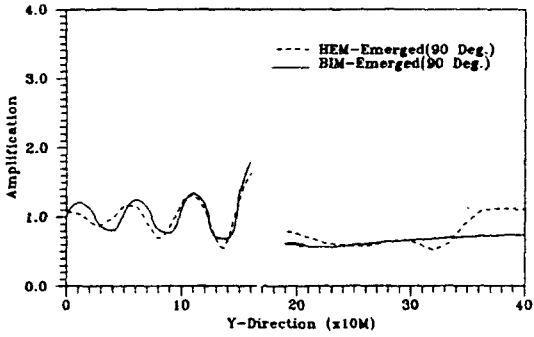


Fig. 4.4 Wave Height Distribution along the Center Line of an Emerged Semi-Circle Structure(9sec, 90° Direction, $\beta=0.0$)

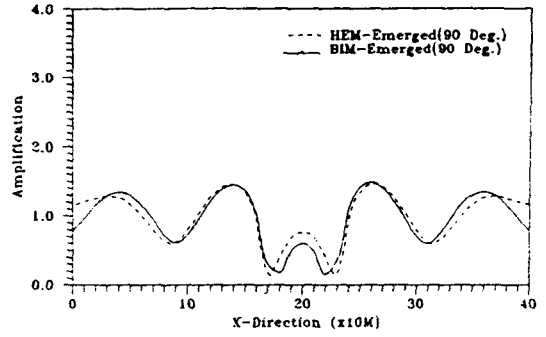


Fig. 4.5 Wave Height Distribution along the Base Line of an Emerged Semi-Circle Structure (9sec, 90° Direction, $\beta=0.0$)

KC0645.DAT. 9sec. 45deg. Const. Surface. NO-friction



Fig. 4.6 Contour Wave Height Amplification Factor around an Emerged Semi-Circle Structure(9sec, 45° Direction, $\beta=0.0$)

주위에서의 파고 증폭양상을 나타내면 Fig. 4.6과 같이 표현된다.

Fig. 4.7은 BIM에 의하여 구조물에 대하여 45° 방향에서 입사파가 들어오는 경우 구조물 주위에서의 파고 증폭양상을 나타낸다.

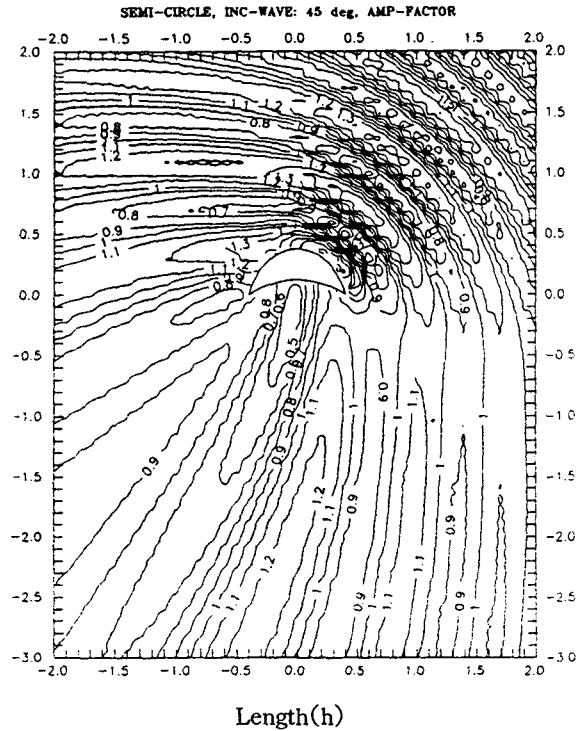


Fig. 4.7 Contour Wave Height Amplification Factor around an Emerged Semi-Circle Structure by BIM(45° Direction, $\beta=0.0$)

마찬가지로 동일 구조물에 대하여 45° 방향의 입사파에 대해 HEM과 BIM을 사용하여 x축방향

및 y축방향에서의 파고증폭비를 비교하면 Fig. 4.8과 Fig. 4.9와 같이 나타나는데, 여기서도 두 모델이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

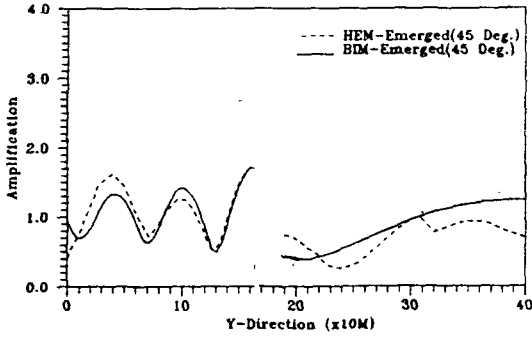


Fig. 4.8 Wave Height Distribution along the Center Line of an Emerged Semi-Circle Structure(9sec, 45° Direction, $\beta=0.0$)

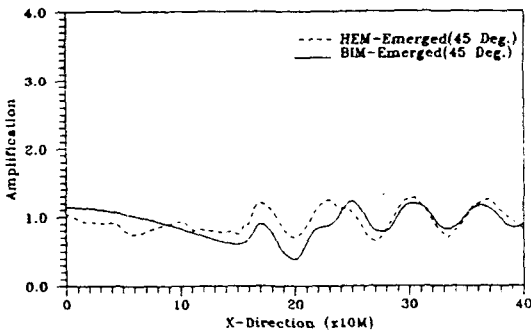


Fig. 4.9 Wave Height Distribution along the Base Line of an Emerged Semi-Circle Structure (9sec, 45° Direction, $\beta=0.0$)

4.2 파랑전파모델의 수립

수치계산 이론을 기초로한 복합요소(HEM)모델의 유효성은 이미 여러 기존 모델이나 실험결과와 비교를 통해 입증되었고(Lee, 1989, 1990), 본연구에서는 BIM모델과 비교함으로써 모델을 검증하였다. 특히 여기서는 Lee(1989)에서 설명된 바와 같이 해저마찰계수 $\beta=0.05$ 로 하고, 수심은 -20m에서 -2m까지 변하는 가변수심을 적용

하였다.

본모델에 사용된 유한요소망의 구성은 다음과 같다.

NODE 수	1,073개
Element 수	2,104개
경계요소수	40개
밴드폭	112

대상해역을 삼각요소로 나누어 모델을 구성하면 Fig. 4.10와 같으며 구조물 상단 및 인접주위역을 미세한 요소로 분할하고 구조물에서 방사상으로 멀어짐에 따라 요소의 크기가 증가하도록 하였다. 이는 구조물 주위에서 파랑변환의 복잡한 형상을 재현하기 위한 것이다. Fig. 4.11은 가변수심을 모델에 적용하여 해저에 설치된 파랑제어 구조물 주변 대상해역을 3차원적으로 나타낸 것이다.

본 모델에서는 실제 해양에서 빈번하게 관측되는 단주기파 영역인 주기 6sec~15sec의 입사파가 구조물의 전면 및 각 방향에서 들어오는 것으로 하여 시뮬레이션을 실시했으며, 이 수치실험의

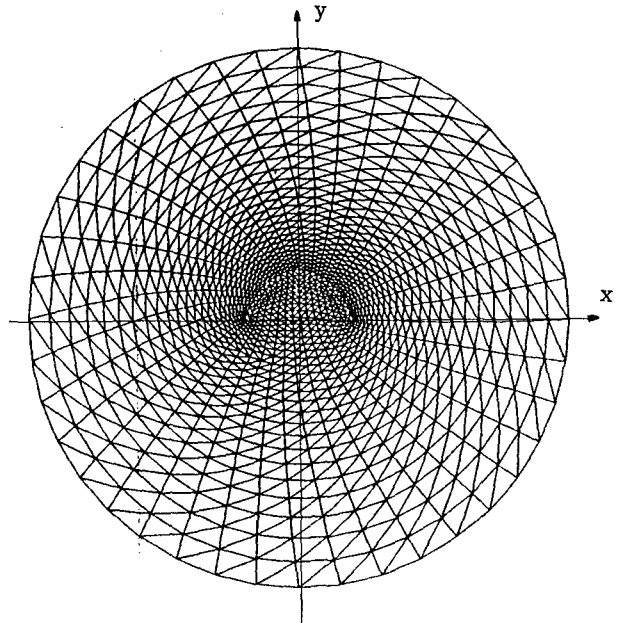


Fig. 4.10 Discretization of Submerged Semi-Circle Structure with Triangular Elements

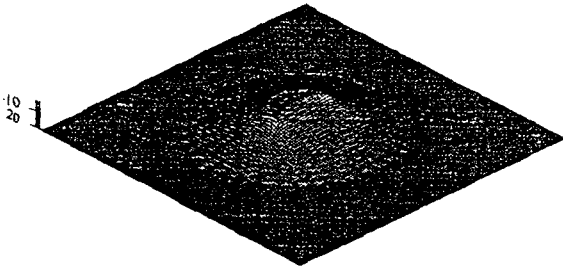


Fig. 4.11 3-Dimensional expression of Depth Around a Submerged Semi-Circle Structure

결과 및 분석에 대하여서는 제5장에 기술하기로 한다.

제5장 수치실험 및 분석

수치실험은 제4장 4.2절에서 설명한 바와 같이 -20m ~ -2m까지의 가변수심을 적용하기로 하고 구조물의 사면과 해저면이 이루는 각을 θ 라 할 때, $\cot\theta=7.27$ (수심 : 사면의 수평방향거리 = 1 : 7.27), $\cot\theta=3.64$ 및 $\cot\theta=2.02$ 로 계획한 파랑제어 구조물인 Submerged Semi-Circle Structure를 대상으로 실제 해양에서 빈번하게 관측되는 단주기 파 영역인 주기 6sec ~ 15sec인 파랑이 파랑제어 구조물에 대해 여러방향으로 입사되는 경우에 대하여 실시하였다. Fig. 5.1은 각 해저경사에 대한 파랑제어 구조물의 중앙선을 따라 전후방향의 종단면도를 비교한 것이다. 구조물의 상단은 일률적으로 수면하 2m인 것으로 하였다.

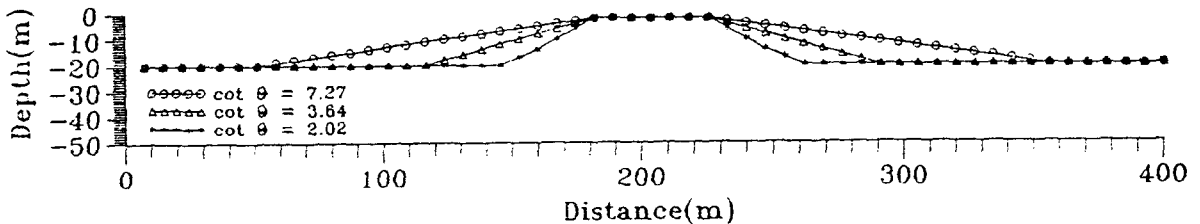


Fig. 5.1 Bottom Profiles of Submerged Structures

5.1 구조물의 경사가 극히 완만한 경우

본 절에서는 구조물의 경사가 극히 완만한 경우 ($\cot\theta=7.27$)의 파랑제어구조물에 대한 수치실험을 다루기로 한다. 이 경우의 파랑제어구조물 주위의 수심분포를 나타내면 Fig. 5.2와 같다.

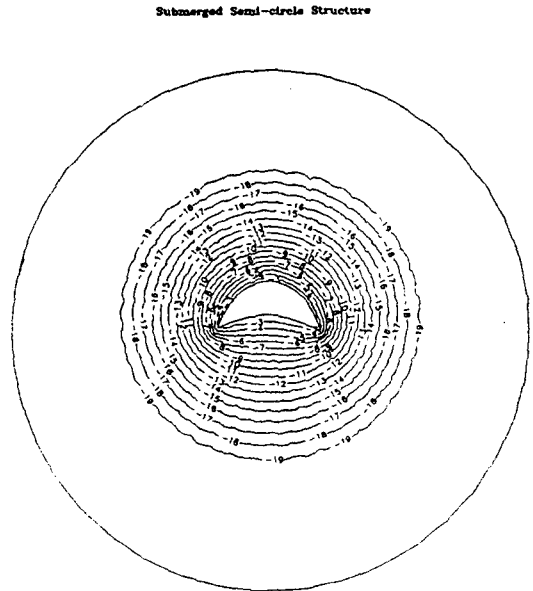


Fig. 5.2 Contour of Depth Around a Submerged Semi-Circle Structure

Fig. 5.3은 입사파의 주기가 9sec이고 파랑제어 구조물의 전면에서 입사하는 경우, 파랑의 변환 양상을 나타낸다.

전반적인 파랑변환 패턴은 emerged 구조물에서의 반응과 유사하나, 구조물 전면에서는 파랑의

kv0990.dat, 9sec, 90 deg, Varying, Submerged, Fric-Coeff. 0.05

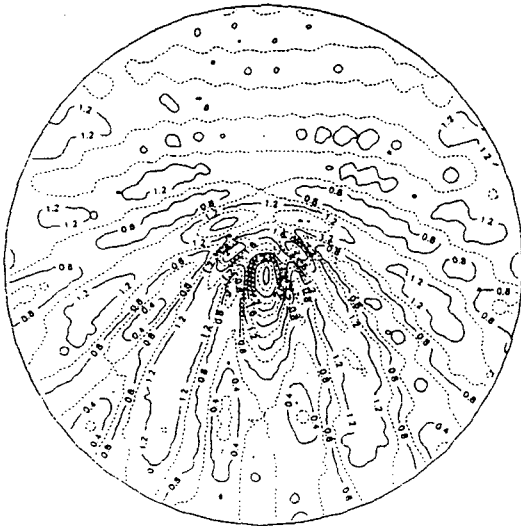


Fig. 5.3 Contour of Wave Height Amplification Factor Around a Submerged Semi-Circle Structure (9sec, 90° Direction, $\beta=0.05$)

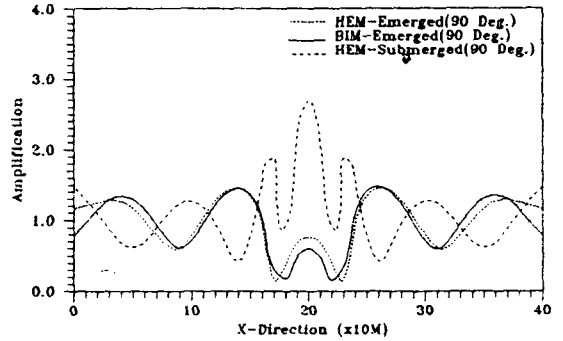


Fig. 5.5 Wave Height Distribution along the Base Line of a Submerged Semi-Circle Structure (9sec, 90° Direction, $\beta=0.05$)

kv0945.dat, 9sec, 45 deg, Varying, Submerged, Fric-Coeff. 0.05

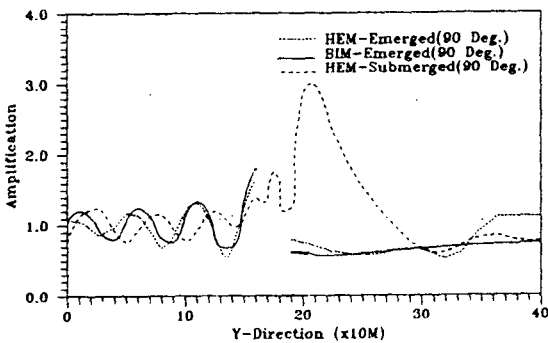


Fig. 5.4 Wave Height Distribution along the Center Line of a Submerged Semi-Circle Structure (9sec, 90° Direction, $\beta=0.05$)

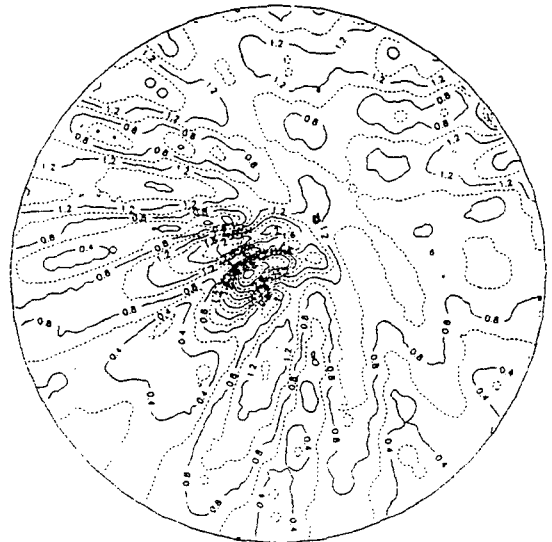


Fig. 5.6 Contour Wave Height Amplification Factor around a Submerged Semi-Circle Structure (9sec, 90° Direction, $\beta=0.05$)

반사가 감소하여 그 증폭이 미약하고 구조물 상단 또는 후단에서는 파랑의 굴절 및 회절, 투과 등으로 인해 증폭율이 훨씬 높게 나타나, 특히 구조물 후방 중앙에서 3.0정도 파고가 증폭하여 집적되고 있음을 알 수 있다.

파고의 증폭양상에 대한 x축방향 및 y축방향에

서의 파고증폭계수의 분포를 Fig. 5.4와 Fig. 5.5로 나타내었다.

입사파의 주기가 9 sec이고 파랑제어구조물에 대하여 45°방향에서 들어오는 경우 수치실험 결과는 Fig. 5.6에 나타냈었는데 이를 기준으로 하여 파고의 증폭양상에 대한 x축방향 및 y축방향

에서의 파고증폭계수의 분포를 Fig. 5.7과 Fig. 5.8에 나타내었다

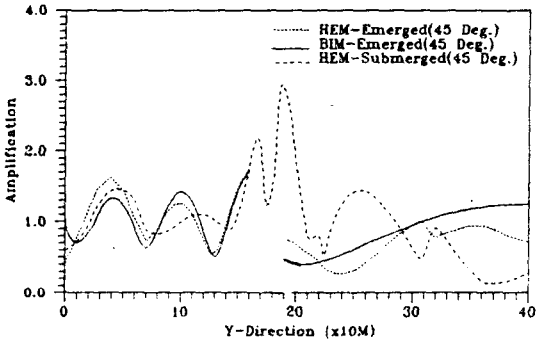


Fig. 5.7 Wave Height Distribution along the Center Line of a Submerged Semi-Circle Structure (9sec, 90° Direction, $\beta=0.05$)

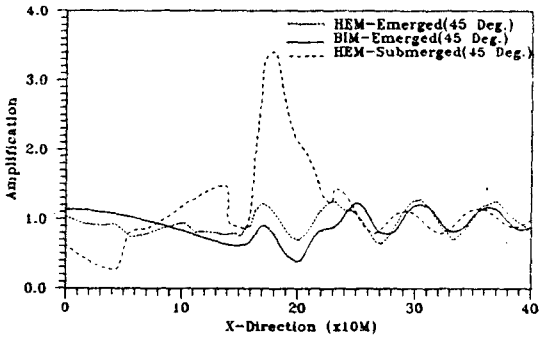


Fig. 5.8 Wave Height Distribution along the Base Line of a Submerged Semi-Circle Structure (9sec, 90° Direction, $\beta=0.05$)

한편, 대상해역의 y축을 따라 Fig. 5.9와 같이 구조물 전면, 상단, 배후면 및 설계초점으로 4지점을 선정하여 각 지점에서의 각 주기의 파랑이 구조물에 대해 정면 및 45° 방향에서 입사될 때 파고증폭계수의 분포를 구하여 도시하면 Fig. 5.10과 같다.

제2장 2.2절에서 언급한 파랑제어 구조물의 설

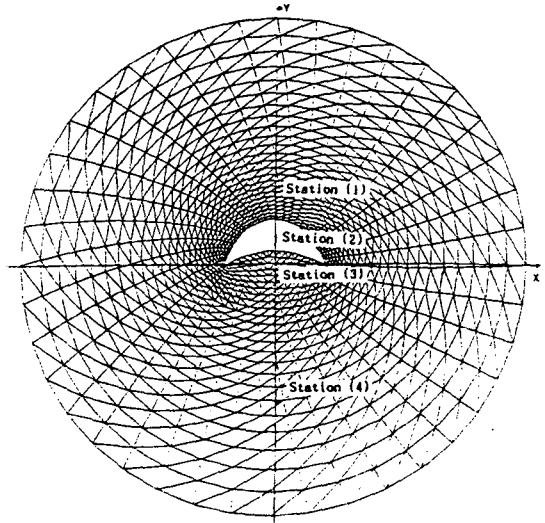


Fig. 5.9 Sketch of the Station Distribution along the Center Line of the Submerged Semi-Circle Structure

계 초점인 지점(4)보다 구조물 바로 후방인 지점(3)의 뒤쪽에서 파랑이 집적되는 것을 알 수 있는데, 이는 해저경사면에 따른 반사 등의 영향으로 구조물과 구조물의 설계 초점사이로 이동하여 파랑이 집적되는 것으로 본다. 또한 주기가 커짐에 따라 지점(4)에서의 파고증폭비는 점차 증가하는 양상을 나타내었으며, 최대 파고증폭비는 10sec 이상의 입사파 주기대에서 약 3.0정도로 높게 나타나는 것으로 기록되었다.

한편 Fig. 5.11은 입사파의 주기가 6sec, 9sec 그리고 12sec인 경우 y축방향에서의 파고증폭계수를 비교한 것으로 여기에서도 구조물의 설계 초점과 구조물 사이에서 파랑이 집적하는 것을 볼 수 있다. 입사파의 주기가 6sec인 경우 지점(3)보다 약 15m후방에서 2.6정도로 파고가 증폭되고, 입사파의 주기가 9sec인 경우 지점(3)보다 약 10m후방에서 3.0정도까지 증폭되는 것을 볼 수 있으며, 입사파의 주기가 12sec인 경우 지점

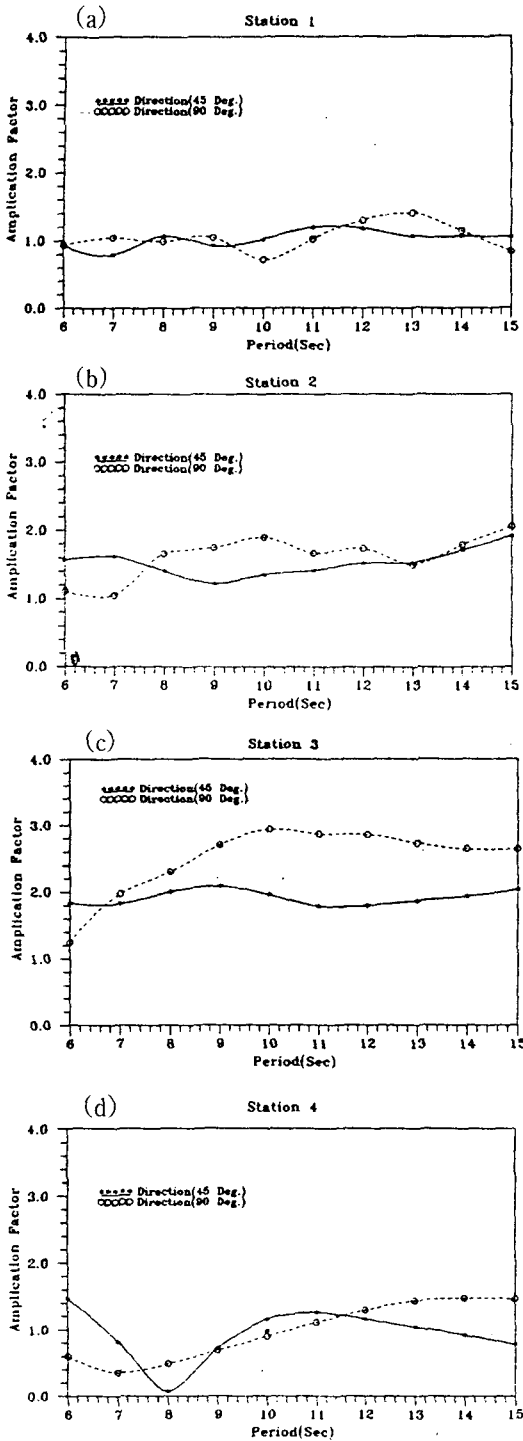


Fig. 5.10 Wave Height Distribution at the Selected Stations($\cot\theta=7.27$)

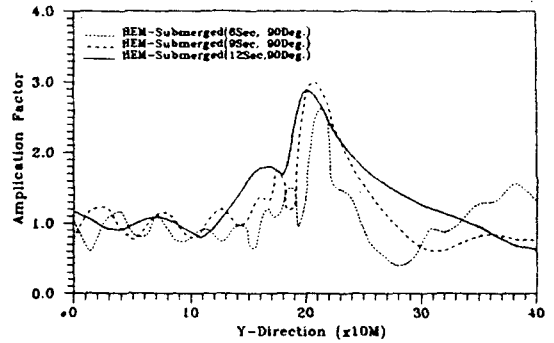


Fig. 5.11 Comparison of the Wave Height Distributions for the Wave Period 6Sec, 9Sec and 12Sec

(3)보다 약 5m후방에서 2.85정도까지 증폭되는 것으로 나타났다. 이는 해저경사면에 대해 파랑의 반사 및 마찰 등의 영향과 주기가 커지면 파장이 크게 되므로 파장에 대한 구조물의 상대적인 크기가 파랑집적점의 위치 및 증폭의 정도를 결정하게 됨을 나타낸다.

5.2 구조물의 경사를 변형한 경우

본 절에서는 구조물의 경사를 변경한 경우($\cot\theta=3.64$ 및 $\cot\theta=2.02$)의 파랑제어구조물에 대한 수치실험의 결과를 분석하였다. Fig. 5.2에 비하여 구조물의 경사가 급해진 반면 그 이외의 해역은 수심 20m로 균일하도록 하였다.

Fig. 5.12 및 Fig. 5.13은 주기 9sec인 파랑이 파랑제어구조물의 정면에서 입사되는 경우 해저경사가 각각 $\cot\theta=3.64$, $\cot\theta=2.02$ 에 대한 수치실험의 결과이다. 두가지 경우의 전반적인 파랑변환 양상은 유사하지만 경사가 급할 경우는 구조물 후부에서 증폭비가 높아지는 것으로 나타났으며, 전면에서는 이와 반대되는 양상을 보였다. 구조물의 단면변화에 따른 증폭비의 비교는 Fig. 5.14 및 Fig. 5.15에서와 같다. 9sec 파의 경우 구조물 후단 10m 지점에서 구조물의 경사가 가장 완만할 때 ($\cot\theta=7.27$)에 증폭비가 최고 3.0인 반면 초점 부근에서는 0.8정도로 최저를 기록하였으며 초점

kv0990.dat, 9sec, 90 deg, Varying, Fric-Coeff. 0.05

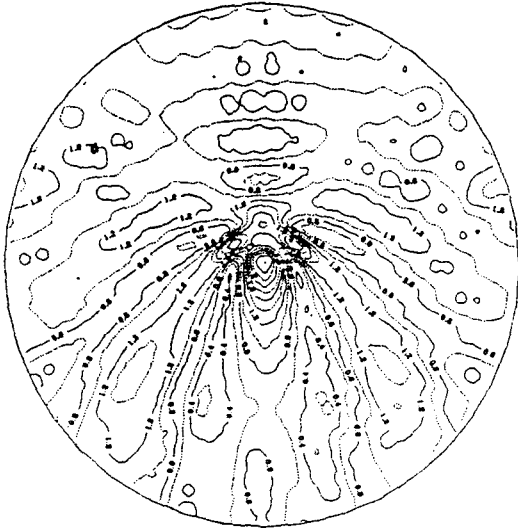


Fig. 5.12 Contour of Wave Height Amplification Factor Around a Submerged Semi-Circle Structure($\cot\theta=3.64$) (9sec, 90° Direction, $\beta=0.05$)

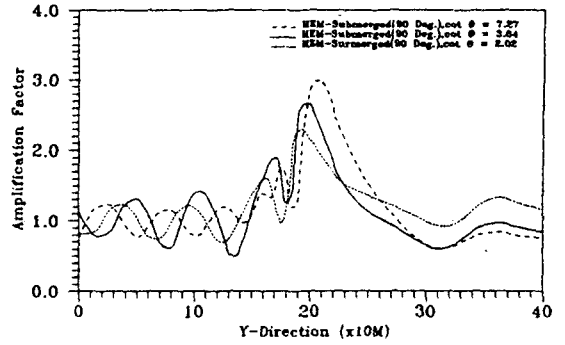


Fig. 5.14 Wave Height Distribution along the Center Line of a Submerged Semi-Circle Structure($9\text{sec}, 90^\circ$ Direction, $\beta=0.05$)

kv0990.dat, 9 sec, 90 deg, Varying, Fric-Coeff. 0.05

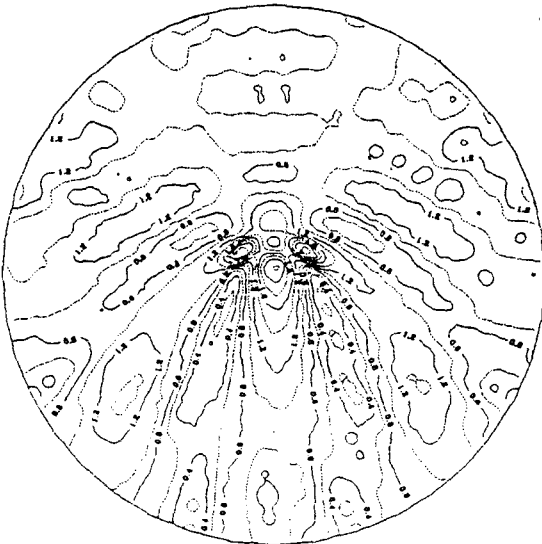


Fig. 5.13 Contour of Wave Height Amplification Factor Around a Submerged Semi-Circle Structure($\cot\theta=2.02$) (9sec, 90° Direction, $\beta=0.05$)

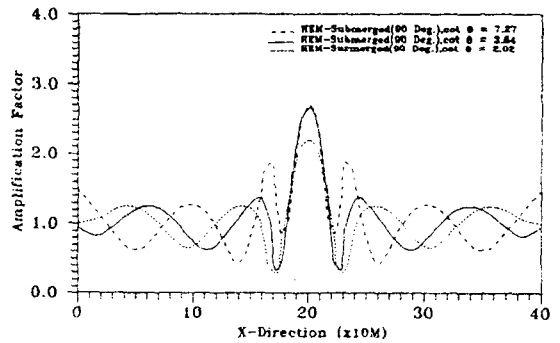


Fig. 5.15 Wave Height Distribution along the Base Line of a Submerged Semi-Circle Structure (9sec, 90° Direction, $\beta=0.05$)

부근에서 최고치는 구조물의 경사가 가장 급할때 ($\cot\theta=2.02$)에 1.4로 나타났다. 횡방향으로의 비교로는 위상에 다소 변화를 가져왔으나 증폭비는 구조물 상단을 제외하고 거의 유사한 증폭비를 나타내었다. Fig. 5.16~5.19는 9sec 파랑이 구조물에 대하여 45° 로 입사될 경우 구조물의 저면 경사를 달리했을 때의 반응특성을 나타낸 것으로 변화양상이 정면으로 입사한 경우와 유사한 것으로 볼수 있다. 대상해역의 y축을 따라 Fig. 5.9에

ku0046.dat, 9 sec, 45 deg, Varying, Submerged, Fric-Coeff. 0.05



Fig. 5.16 Contour of Wave Height Amplification Factor Around a Submerged Semi-Circle Structure($\cot\theta=3.64$) (9sec, 45° Direction, $\beta=0.05$)

ku0046.dat, 9 sec, 45 deg, Varying, Submerged, Fric-Coeff. 0.05

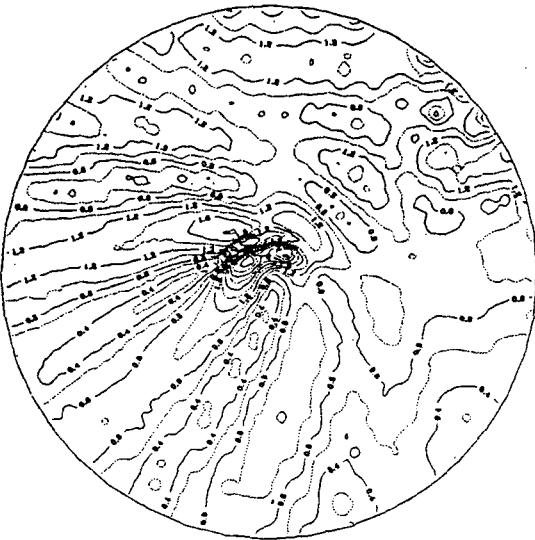


Fig. 5.17 Contour of Wave Height Amplification Factor Around a Submerged Semi-Circle Structure($\cot\theta=2.02$) (9sec, 45° Direction, $\beta=0.05$)

서 선정한 4지점에서 여러주기의 파랑이 45° 및 정면에서 입사될 경우의 각 주기별 파고증폭 계수를 비교하면 Fig. 5.20 및 Fig. 5.21과 같다.

Fig. 5.20에서 나타난 바와 같이 $\cot\theta=3.64$ 인 경우 구조물의 바로 후방인 지점(3)에서 각 주기별로 약 2배이상 파고가 증폭되며, 특히 입사파의 주기가 8sec에서 10sec 사이에서는 거의 3배에 육박하고 있다. 지점(4)에서 입사파의 주기가 6

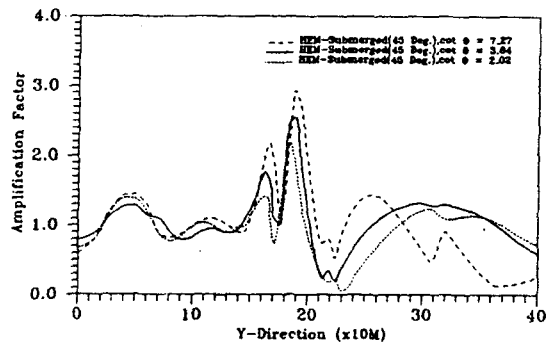


Fig. 5.18 Wave Height Distribution along the Center Line of a Submerged Semi-Circle Structure (9sec, 45° Direction, $\beta=0.05$)

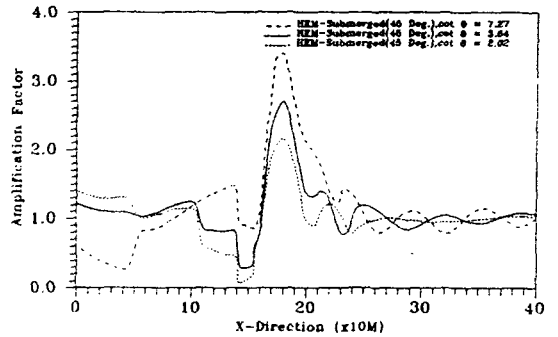


Fig. 5.19 Wave Height Distribution along the Base Line of a Submerged Semi-Circle Structure (9sec, 45° Direction, $\beta=0.05$)

sec에서 9sec까지는 1.0이하의 증폭비를 나타낸 반면, 주기가 10sec이상의 입사파에 대하여는 1.0 이상의 증폭비를 기록하였다.

$\cot\theta=2.02$ 인 경우는 Fig. 5.21에서 알 수 있는 바와 같이 지점(3)에서 각 주기별로 약 2배 정도 증폭되며, 특히 입사파의 주기가 11sec인 경우 증폭비는 3.0에 달하고 있다. 지점(4)에서는 입사파

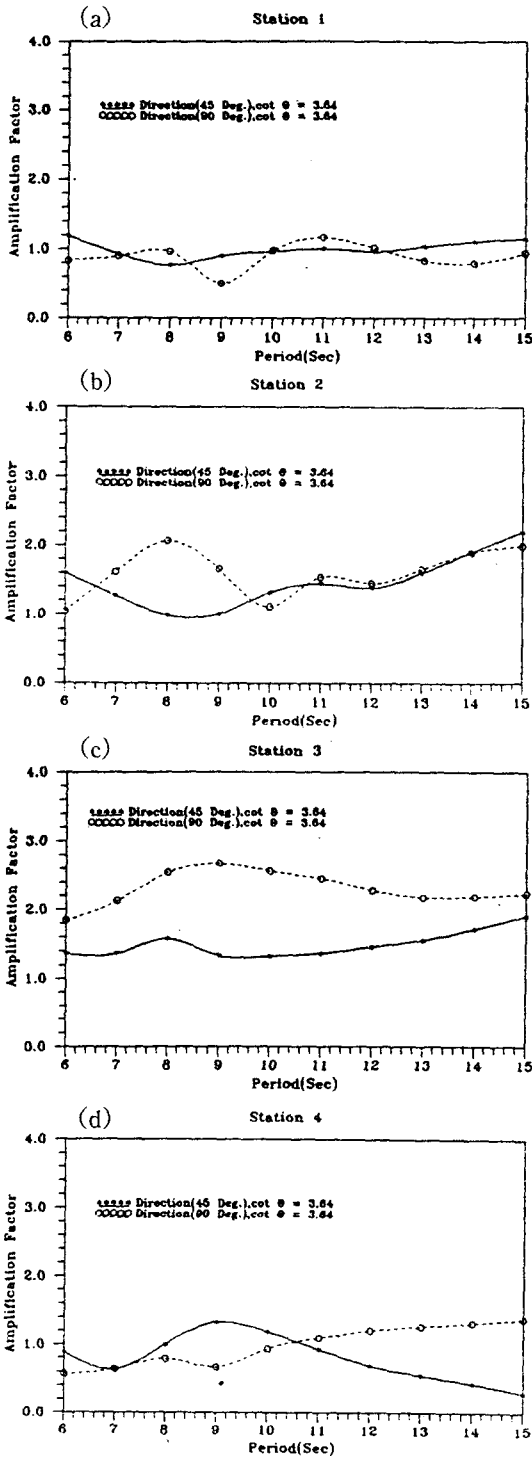


Fig. 5.20 Wave Height Distribution at the Selected Stations($\cot\theta=3.64$)

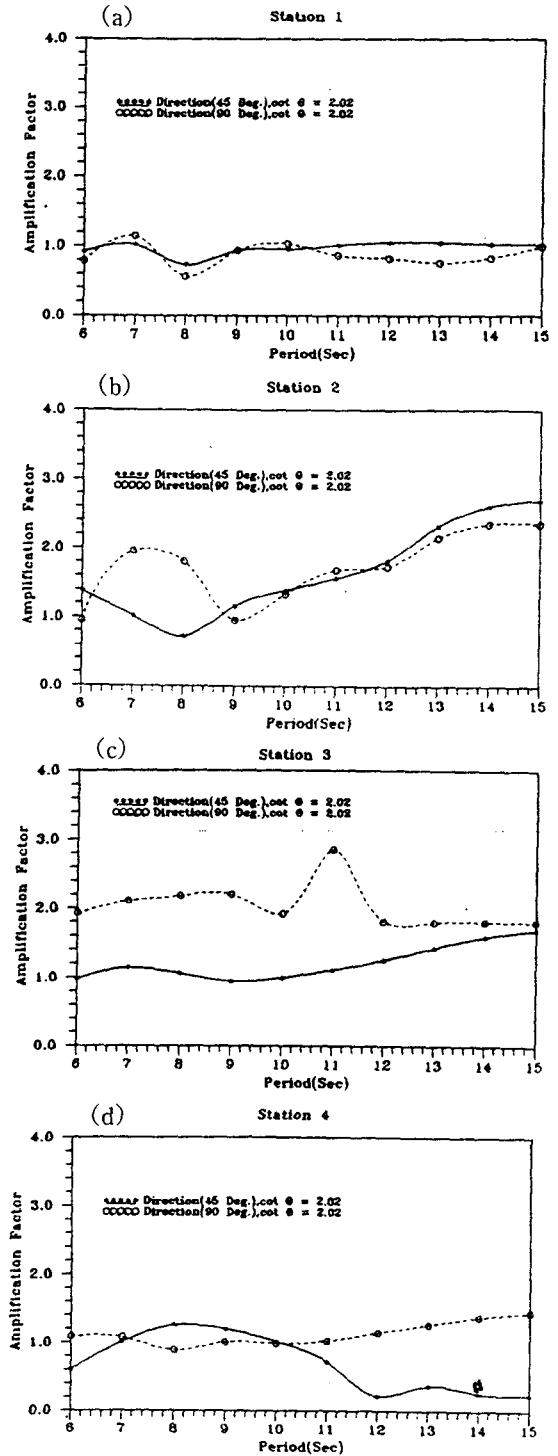


Fig. 5.21 Wave Height Distribution at the Selected Stations($\cot\theta=2.02$)

의 주기 6sec에서 11sec까지는 파고증폭계수가 1.0 정도로 나타나며 입사파의 주기가 12sec 이상인 경우 증폭계수가 점차 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편 입사파의 주기가 6sec, 9sec 그리고 12sec 인 경우의 y축방향에서의 파고증폭계수를 비교하면 Fig. 5.22 및 Fig. 5.23과 같이 나타난다.

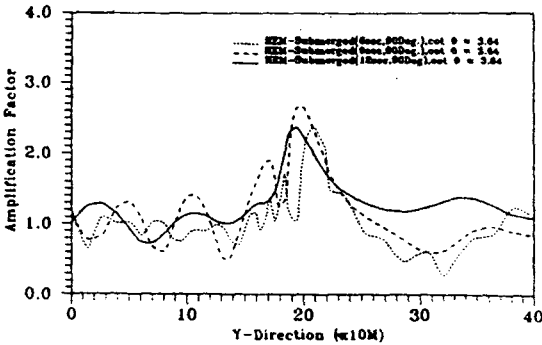


Fig. 5.22 Comparison of the Wave Height Distributions for the Wave Period 6Sec, 9Sec and 12Sec($\cot\theta=3.64$)

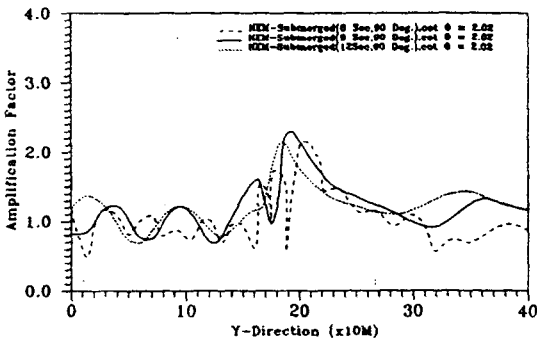


Fig. 5.23 Comparison of the Wave Height Distributions for the Wave Period 6Sec, 9Sec and 12Sec($\cot\theta=2.02$)

파랑제어 구조물의 경사를 변형하여 $\cot\theta=3.64$ 인 경우, 입사파의 주기가 6sec일 때 y축을 따라 파고증폭계수의 분포는 구조물의 전면에서 작은 변화를 나타내다가 구조물 후방인 지점(3) 보다 15m 후방에서 약 2.5정도까지 증폭하며, 지점(4)에서는 1미만으로 떨어졌다가 다시 증폭비가 증

가하는 양상을 보였다. 한편, 입사파의 주기가 9 sec인 경우 지점(3)에서 파고증폭계수가 2.7정도 까지 나타나며, 그 후 점차 감소하여 지점(4) 부근에서 증폭계수가 1미만으로 떨어졌다가 다시 증폭하는 양상을 보이고 있다. 입사파의 주기가 12sec인 경우 지점(3)에서 파고증폭계수가 약 2.5 정도로 나타나며, 그 후 1.2정도까지 감소하다가 지점(4) 부근에서 부터 다시 증폭비가 커져 약 1.5정도에 이르게 됨을 알 수 있다.

파랑제어구조물의 경사를 Fig. 5.23과 같이 좀 더 크게한 경우($\cot\theta=2.02$), 입사파의 주기가 6 sec일 때 y축을 따라 파고증폭계수의 분포는 구조물 전면에서 잦은 변화를 나타내다가, 지점(3) 후방 약 15m정도에서 약 2.2정도로 작은 굴곡을 보이면서 감소하다가 지점(4)에서 약 1.1정도의 증폭비를 나타내며 다시 감소하다가 증가하는 양상을 보이고 있다. 입사파의 주기가 9sec일 때에는 지점(3)에서 약 2.4정도 증폭비를 가지며 점차 감소하다가 지점(4)를 지나고 나서 증가하기 시작하여 1.4정도까지 증가하는 양상을 보인다. 입사파의 주기가 12sec인 경우 지점(3)보다 약간 전방에서 2.2정도의 증폭비를 가지며 점차 감소하여, 지점(4)에서 1.2정도 나타나며 다시 증가하는 양상을 보였다.

한편, 파랑에너지의 집적 현상을 관측하기 위한 선행연구로써 물수평판을 이용하여 파랑의 집적 현상을 관측했던 工藤 등 (1986)은 그 결과를 Fig. 5.24와 같이 나타내었는데, 이 그림은 물수평판의 집파효과를 파악하기 위하여 y축상 파고분포의 실험치와 계산치를 비교하고 있다. 여기서 세로축은 파고증폭율이고 가로축은 y좌표를 나타낸다. 물수평판은 0.0m에서 1.25m에 위치하고, 입사파의 조건은 주기 1.0sec, 1.2sec, 1.4sec로 하고 있다. 최대파고증폭율은, 설계조건인 주기 1.2sec의 경우, 약 2.7로 기록되었으며, 실험결과와 계산결과를 비교해보면, 주기가 1.0sec인 경우, 결과가 잘 일치하나 주기가 1.2sec 및 1.4sec인 경우, 실험치로부터 평판 배후와 초점사이에서 파랑의 집적이 높게 일어나는 것을 알 수 있다.

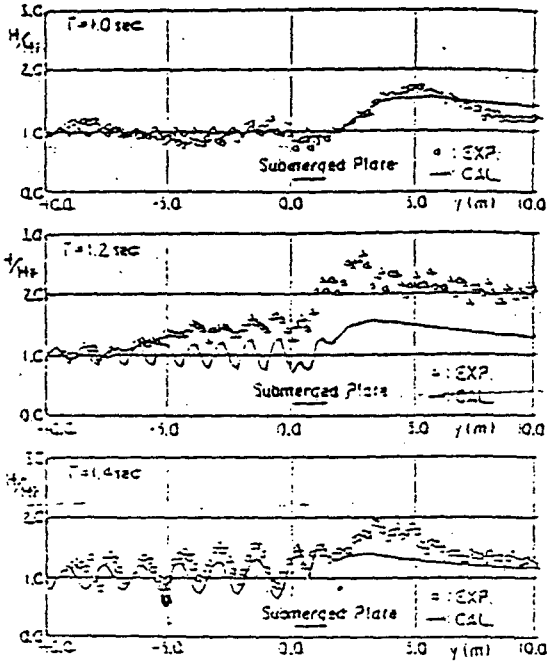


Fig. 5.24 Wave Height Distribution along the Center Line of a Submerged Plate(after Kudo, 1986)

위의 결과와 비교하기 위하여 본 연구의 결과인 입사파의 주기가 6sec, 9sec, 12sec인 파가 파랑제어구조물의 전면에서 파가 들어오는 경우 구조물의 각 경사에서의 수치실험 결과에 대한 y축 방향에서의 파고증폭계수를 Fig. 5.25에 나타내었다.

입사파에 대한 최대파고증폭율은, 구조물의 배후와 설계초점 사이에서 입사파의 주기가 9sec이고 구조물의 경사 $\cot\theta = 7.27$ 인 경우 약 3.0배이며, 다른 경우에도 거의 3.0배에 이르고 있음을 알 수 있다. 앞의 연구에서는 굴절이론만을 이용하여 구조물에 대한 회절이나 반사의 효과를 무시하고 있으므로, 구조물에 의한 파랑변형 현상을 모두 표현할 수 있는 것은 아니었을 것이다. 그렇지만, 본 연구에서는 구조물 주위 파랑의 굴절, 회절 및 반사작용을 고려했으며 또한 해저마찰까지 고려했기 때문에 보다 정도 높은 결과를 얻을 수 있었다.

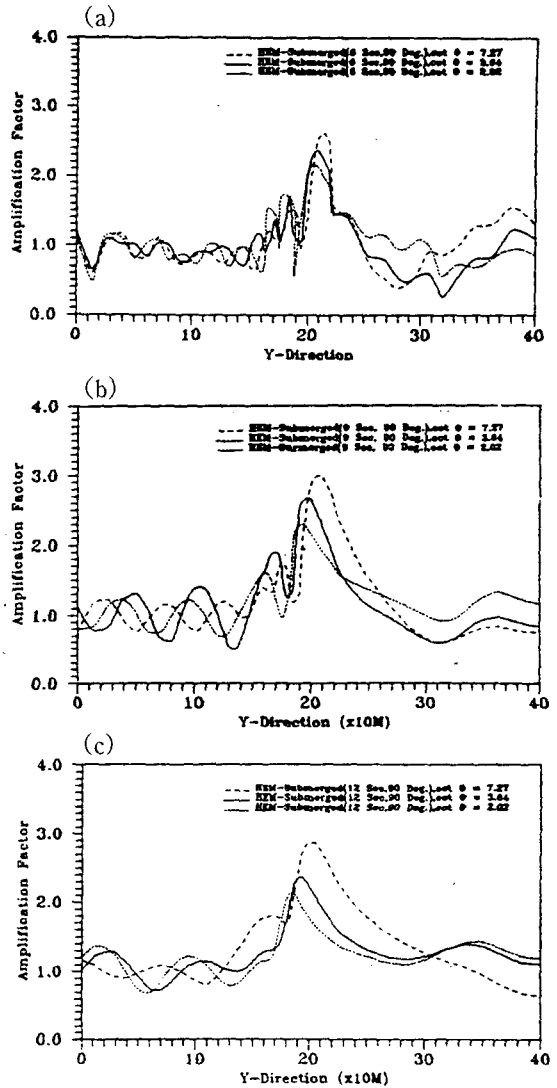


Fig. 5.25 Wave Height Distribution along the Center Line of a Submerged Semi-Circle Structure (6sec, 9sec, 12sec, 90° Direction, $\beta = 0.05$)

제6장 결론

파랑에너지 이용방법에 대한 연구는 70년대로 석유파동 이후 특히 선진해양국을 중심으로 대체 에너지 개발의 일환으로 활발히 연구되어 왔다.

최근에는 실제 해역 실험도 급격히 늘고 있어 연구하는 국가들도 점차 늘고 있어 기술개발면에서는 많은 진전을 이루고 있다.

3면이 바다이고 섬이 많은 우리나라에서는 파랑에너지 집적문제에 여러가지 난제가 있으나, 소규모 분산형을 개발하여 지역적으로 활용하는 것은 대단히 필요하다고 생각한다. 이러한 관점에서 본 연구는 파랑에너지 이용의 전단계로써 파랑제어구조물을 해저에 설치하여 외해로부터 연안역을 보호하면서 파랑에너지를 집적하기 위한 구조물의 설계에 관하여 다루었다. 파랑에너지 집적을 위한 구조는 기하학적·광학적으로 중심이 동일한 타원과 원이 교차한 볼록렌즈와 유사한 형상에 투과된 빛이 초점거리에 집중되는 점을 착안하여 설계하였고 수치모델을 통해 이를 분석하였다.

수치해석의 정도를 높이기 위하여 유한요소법과 해석적인 방법을 접목한 HEM(HYBRID ELEMENT METHOD)으로 기본방정식과 경계조건을 처리하고 유도된 모델을 통하여 시뮬레이션을 실시했다. 그리고 본 모델을 검증하기 위하여 다음과 같은 경우에 대해 수치실험을 실시·비교하였다.

1) 일정한 수심장($h = -20m$) 위에 설치된 Emerged Semi-Circle형 구조물에 대한 수치실험

2) BIM(Boundary Integration Method)를 사용한 Emerged Semi-Circle형 구조물에 대한 수치실험 결과와의 비교

검증된 모델을 이용하여 본연구에서 설계된 파랑제어용 해저구조물에 대해 적용하기로 하고, 실제 해양에서 빈번하게 관측되는 단주기파 영역인 주기 6sec~15sec인 입사파를 대상으로 파랑제어구조물의 전면 및 각 방향에서 진행할 때 파랑제어구조물의 경사를 달리하면서 파랑의 제어양상을 분석하였다. 본 모델로써 수치계산한 결과들은 대체로 의도한 바 대로 나타났으며, 특히 구조물 주위의 파랑을 분석하여 다음 사항을 발견하였다.

1) 입사파에 대한 최대파고 증폭율은, 구조물의 직후에서 약 3.0로 정도 높게 나타났다.

2) 입사파의 주기가 커짐에 따라 설계초점 부근에서 증폭비가 증가하는 양상을 보였다.

3) 구조물 단면의 경사를 변화시켰을 경우, 경사할수록 초점부근에서 파고증폭율이 증가함을 알 수 있었다.

4) 전반적으로 파랑의 집적은 구조물의 직후면에서 부터 초점사이에서 높게 일어나고 있음을 발견하였다.

5) 입사파의 주기에 따른 파랑의 집적현상을 분석해 본 결과, 입사파장에 따른 상대적인 구조물의 크기가 파랑의 집적에 상당한 영향을 미치고 있음을 발견하였다.

앞으로 계속되어야 할 연구과제로서 지점(4) 부근에서 보다 많은 파랑의 집적을 시키기 위한 보다 다양한 구조를 설계하고, 이를 수조실험 등을 통해 분석하여 실제해안에서 적용할 필요가 있으며, 또한 고정된 파랑제어 구조물이 아닌 유동 구조물을 설치하여 심해에 적용하는 방안, 고정구조물과 유동구조물을 혼합한 형태의 구조물의 개발, 심해로부터 들어오는 파를 먼저 예측하여 보다 큰 에너지를 증폭시킬 수 있는 방안 등이 강구되어야 할 것이다.

앞으로 이와 같은 원리에 따라 집적시킨 파랑 에너지를 이용하기 위한 구체적인 방안도 제시해야 할 것이며 또한 파랑에너지가 대체에너지로서의 지위를 가지기 위해서는 비용의 관점에서 타 에너지 보다 저렴하게 공급될 수 있어야 할 것으로 생각되는 바 이에 대한 지속적인 연구 검토가 필요할 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

- 1) 신승호, 국승기, 염원기, 이중우(1991), "직립 방파제 주위에서 파랑의 반사 및 회절의 혼합", 한국항만학회지 제5권, 제1호, pp.71~82.
- 2) 이중우(1989), "항만 설계에 있어서 하이브리드 요소법의 응용에 관한 연구-부산항 3단계 개발계획을 중심으로-", 한국항만학회지 제3권, 제1호, pp.57~75.

- 3) 工藤君明, 續辰之介 外(1986), “没水平板の集波效果に 關する 研究—凸レンズ型没水平板による波の變形解析—”, 日本造船學會論文集, 第160號, pp.217~225.
- 4) 工藤君明, 續辰之介 外(1987), “没水平板の集波效果に 關する 研究—三日月型没水平板の 波浪變形現象—”, 日本造船學會論文集, 第162號, pp.267~275.
- 5) 谷本勝利, 吉本靖俊, 岡 幸夫(1985), “大水深波浪制御構造物水理特性施設設計”, 第32回 海岸工學講演會論文集, pp.515~519.
- 6) Berkhoff, J. C. W.(1972), “Computation of Combined Refraction-Diffraction”, Proc. 13th. Coastal Engng. Conf., Vancouver, ASCE, Vol. 1, pp. 471-490.
- 7) Chen, H. S. and Mei, C. C. (1974), “Oscillations and Wave Forces in a Man-made Harbor in the Open Sea”, Proceeding of 10th Naval Hydrodynamics Symposium, pp. 573-596.
- 8) Chen, H. S. (1985), “Hybrid Element Modeling of Harbor Resonance”, 4th International Conference on Applied Numerical Modeling, pp. 312-316.
- 9) Chen, H. S. (1986), “Effects of Bottom Friction and Boundary Absorption on Water Wave Scattering”, Applied Ocean Research, Vol. 8, No. 2, pp. 90-104.
- 10) Helstad, J.(1980), “Power Production based on Focused Ocean Swell”, Norwegian Maritime Research, No.4, pp.34-42.
- 11) Lee, J. W.(1987), “A Finite Element Simulation of Waves approaching a Coastal Area”, Dept. of Ocean Engng., Univ. of Hawaii, HI, U.S.A.
- 12) Lee, J. W.(1989), “Hybrid Element Element Analysis of Water for Harbor Design”, Ph.D. Diss., Univ. of Hawaii, HI, U.S.A.
- 13) Lee, J. W.(1990a), “Hybrid Element Simulation of Surface Water Waves and Modification to Harbor Design”, The Proceedings of the Design, Construction and Operation of the Ports and Marine Structures on May 1990.
- 14) Lee, J. W.(1990b), “Open Channel Effects in a Mathematical Model and Modification of harbor”, The Proceedings of the PSCOMS '90, Int. Soc. of Offs. and Polar Engineers, Vol. II, pp.61-70.
- 15) Mei, C. C.(1983), “The Applied Dynamics of Ocean Surface Wave”, John Wiley & Sons, pp.59~108.
- 16) Milton Abramowitz and Irene A. Stegun(1970), “Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables”, Dover Publications, Inc., NEW YORK, pp.355-494