

論 文

파랑에너지 집적 및 연안해역 제어를 위한 해저구조물의 설계

이 중 우* · 한스 크록

Design of a Submerged Coastal Structure for Concentration of Wave Energy and Control of a Coastal Area

J. W. Lee · H. J. Krock**

Key Words : 파랑에너지(Wave Energy), 연안해역제어(Control of a Coastal Area), 복합요소법 (Hybrid Element Method), 확장완경사방정식(Extended Mild Slope Equation), 수리모델(Hydraulic Model), 해저구조물(Submerged Structure), 광학이론(Optical Theory), 초승달형(Crescent Type), 급경사(Steep Slope), 회절 및 굴절(Diffraction and Refraction), 해저마찰(Bottom Friction)

Abstract

The effects of wave energy focusing by a submerged berm type of structure is examined. The fundamental idea is based on the phenomenon of refraction by a lens-shaped crescent structure which results in the focusing of wave energy on the center line of the structure. The shape of the submerged structure is a complex curve combining circular with elliptical elements. Based on the design procedure, a special configuration of structure(termed herein as a triple crescent structure) is introduced. Next, some hydraulic model tests are performed to confirm the wave focusing effect in laboratory. In addition, in order to interpret the wave focusing performance behind the structure, a numerical procedure by the hybrid element method is used on the basis of the conventional mild slope equation but modified and extended to allow for steeper bottom slopes and higher curvature. The modified refraction and diffraction provide additional mechanism for wave height amplification and the maximum amplification for a triple crescent structure is presented. It also allows for the possibility of wave energy scattering with the change of the incident wave direction. Comparisons with previous theoretical results involving a submerged crescent shape structure are described.

1. 서론

지구표면적의 약 70% 정도를 차지하고 있는

바다는 광대한 지질적, 화학적, 생물적 자원으로 포하고 있다. 이중 지질적 자원으로 해저에 매장되어 있는 천연가스, 석유, 구리, 철, 티타늄, 망간

* 한국해양대학교 이공대학 항만·운송공학과 교수.

** 미국 하와이주립대학교 해양지구과학기술대학 해양공학과 교수.

등과 화학적 자원으로 염, 마그네슘, 요소등 약 60종의 원소가 용해되어 있으며 핵융합발전예 에너지원으로 중수소도 풍부하게 존재하는 곳이 바다이다. 해저 또는 해중에서 해양이 갖는 거대한 자연에너지원을 어떠한 형태로 추출하고 이용하려는 인류의 꿈이 있음에도 불구하고 거의 유효하게 사용하지 못하고 있는 실정이다. 다만 외해로부터 밀어 닥치는 자연의 힘에 대해 해안의 침식이나 항만의 구조물의 손상을 막고, 인명, 선박의 손실을 줄이는 등 무한한 바다의 에너지로 인한 피해를 줄이는데 급급했다고 할 수 있다. 다행히 최근에 들어서서 과학기술의 급속한 진보와 경제발전에 필요한 에너지수요가 급격해지고 또 전세계적으로 1960년대에서부터 해양개발의 붐에 따라 생물자원, 광물자원, 에너지, 해수담수화 등의 기술개발이 추진되었는데 해저석유관련기술과 일부군사기술을 제외하면 거의 모두가 산업형성수준에 까지 발전하지 못하였다. 그러나, 파력발전은 1973년도의 석유파동에 자극을 받은 제반국가들의 관심이 되었고, 영국, 프랑스, 노르웨이, 포르투갈, 미국, 캐나다, 일본, 호주 및 인도등에서 체계적으로 연구개발이 수행되어 파력발전의 기술적 가능성을 나타내어 보였으며 현재에는 효율을 향상시키거나 주변기술을 결합하는 단계에 와 있다. 이들 국가에서는 파력의 추출을 위해 우선 해양파의 특성을 파악하고 이를 변형시킬 방안을 찾는 데 국가적인 지원과 노력을 다하고 있다.

일반적으로 파랑에너지는 태양에너지를 지구에 유입될 때 파생되는 것으로 바람의 활동에 의해 개방해역표면에 포함되어 있는 것을 나타낸다. 따라서 세계적으로 파랑에너지의 잠재력은 바람의 분포에 의해 좌우된다고 할 수 있는데 지역적으로 위도 10° 정도의 차이가 있지만 대개 남, 북반구의 위도 40°에서 60°의 대역이 최강풍이 불어오는 것으로 알려져 있다. 우리나라의 경우 일본과 대륙으로 풍역이 다소 차단되어 있지만 여전히 남쪽으로 개방된 해역이 존재하고 태풍으로 항상 노출되어 있기 때문에 해면이 거칠게 발달되는 경우가 많으며 이것이 구조나 재료에 상당

한 영향을 미치고 있다. 파랑에너지가 처음으로 이용하게 된 기록으로는 1799년 Girards라고 하는 두사람의 프랑수아 (부자간)이 치차펌프 (ratchet pump)를 구동시키기 위한 파랑에너지시스템을 고안하여 특허를 신청한 것이 있다 (Gorden Senior, 1990). 이들 부자는 해안의 곳(headland)에 지지대를 두고 보(beam)를 해면위에 있는 부체에 연결하여 펌프를 구동하기 위한 각운동을 파랑으로 부터 구하도록 제안하였다. 이는 수립자의 회전운동과 위치에너지를 기계적 변환장치를 통해 다른 에너지의 형태로 바꾼 이용시스템에 속한다. 영국의 특허국에 따르면 1855년을 시작으로 하여 1973년까지의 자료만으로 파력발전장치 340건이나 특허를 받은 것으로 기록되었다 (Shaw, 1982).

일반적으로 파랑에너지의 변환방식으로는 수립자의 상하 및 수평 방향운동을 직접 이용하거나 이를 결합한 회전운동의 이용, 동압 (dynamic pressure)의 이용, 수압의 이용, 쇄파 (breaking wave)의 이용, 파랑에너지의 증폭 및 집중 등이 있는데, 그 이용법에 따라 여러가지 이론 및 그 구조가 다양하게 제안되고 있다. 이 중에서 파랑에너지의 추출에 매우 중요한 것으로는 1) 진행파의 구배 및 파고의 변화, 2) 내부압력의 변화, 3) 내부유체입자의 운동 등 해양파가 가진 특성을 파악하는 것에 있다. 본 연구에서는 전술한 파랑에너지의 변환방식중 파랑에너지의 증폭 및 집중을 연구의 대상으로 하여 파랑에너지의 추출에 중요한 파랑의 변환특성을 파악하기 위한 노력과 아울러 설계한 파랑 집중구조물을 효과를 검토하기로 한다. 파랑에너지의 집중법은 다른 방법에 비해 비교적 좁은 공간을 점유하므로 실현가능성이 높다고 볼 수 있다.

보통 파랑에너지를 집중시키는데는 1) 안테나식 (antenna)-방사법 (radiation), 2) 섬식 (island)-환초식 (atoll), 3) 렌즈식 (lens)-굴절법 (refraction)의 3가지 방법을 이용한다. 1)의 방법으로는 해면에 부분적 또는 완전히 잠기도록 여러개의 구조물을 두고 파랑에 따라 상하운동, 횡요 및 종요로부터 입사파, 산란파, 회절파 등을

구하여 시스템에 유입되는 파력은 전체 구조물에서 수면하 부분의 표면에 대해 (압력)×(면적)×(구조표면에 수직방향의 유속)의 합으로 나타낸다. 이 때 구조물의 간격이 개개의 직경보다 비교적 떨어진 곳에 위치시켜도 공진(resonant)으로 구조물에 의한 산란파가 입사파를 제지하는 안테나 효과로, 가능하면 모든 파랑에너지를 유입시키도록 제안하고 있다 (Budal,1979).

2)의 방법은 환형의 등수심선을 갖게 되는 이상적인 섬을 이용하여 파랑을 굴절시키는 방법이다. 수심을 적절히 선택한 섬에 의해 바로 굴절된 파랑이 나선형으로 중심에 집적되도록 하여 날개를 이용해 터빈을 돌려서 파력으로 전환하고자 하는 방법으로 Arthur (1946)가 제안하여 미국의 Lockheed 社 (1979)가 이를 DAM-ATOLL 변환장치라고 하여 구체화하였다. 섬식은 후에 조석의 영향을 고려하여 부유구조로 하고 이를 길이를 조정할 수 있는 묘박법을 도입하였는데 기본은 3)의 굴절법을 이용하나 부유하여 이동이 용이하도록 계획된 점이 다르다. 마지막의 렌즈식은 잠수식으로 해저에 고정되거나 부유구조로 광학렌즈모양의 구조물에 대한 굴절이 구조물의 후방 쏠집위치로 이루어지도록 하는 점이 2)와 차이가 있다. 이 McCormick (1979)가 블록렌즈형 단면의 수직구조물에 의한 집중방법이 시초가 되었고, 이후 여러개의 파이프형 튜브(Helstad, 1980), 또는 판막(Stamnes, 1986)으로 구성된 부유형 렌즈, 工藤君明 등 (1986)과 Imai 등 (1988)의 수면아래의 일정한 깊이에서 블록렌즈나 초승달형의 판막을 사용한 굴절방법을 소개되었다.

여기서는 해저고정식이지만 초승달형의 수심조건을 가진 잠재(submerged breakwater)형식의 구조물을 광학이론에 기초한 구조를 기하학적으로 설계하여 굴절과 회절 및 반사효과를 고려한 파랑집중법을 다루기로 한다. 특히 이러한 구조는 해양에서 경관을 해치지 않으면서 고정구조물의 단점인 흐름의 차단을 해결하는 형태로 개발될 수 있으므로 연안역에서도 그 이용의 가치가 높다고 본다. 이것을 출발로 국내에서는 전무한 해수면하 구조물에 의한 파랑집중 기술을 통해 파

의 에너지를 유효하게 이용하는 것은 물론 특히 연안해역 제어기술을 연구, 개발하기 위한 길을 열어 갈 수 있기를 희망한다. 아울러 본 연구를 통해 부수적으로 개발된 수치모델과 이와 관련하여 습득한 이론적인 배경 및 기법은 추후 학술연구나 기술개발에 기초가 되어 그 파급효과가 매우 클 것으로 기대된다.

2. 해저구조물의 설계

구조물 설계 및 수리실험의 관점에서 구해진 자료의 분석을 분석해본 결과 현재까지 본 연구에서 계획되고 있는 설계와 동일한 실험자료는 없었지만 검토하기 위한 수단으로 다루고 있는 기본형(원형 또는 타원형 shoal, 잠재, 박판형 구조물 등)에 대한 실험치는 다른 연구에서 제시되고 있으므로 수리모델에서 새로 도입하지 않아도 본 연구에서 수립하게 될 수치모델과의 비교가 가능하다. 특히, 자료의 분석에서 파랑에너지를 집적시켜 이용하기 위한 시도는 다양한 것을 알 수 있었지만 부유구조, 방파제 또는 암벽 등을 이용한 고정구조물에 국한되어 있고 수중구조물은 몇몇 기본형에 대한 실험뿐으로 더구나 이에 대한 변형의 시도도 없었다. 따라서 본 연구에서는 Fig.2.1과 같은 단계로 복합구조물의 설계를 Fig.2.2에서 정의된 형식으로 구상하게 된 것이다.

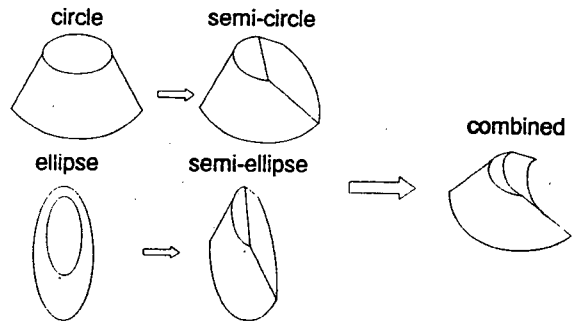


Fig. 2.1 Considered structures and final form of design

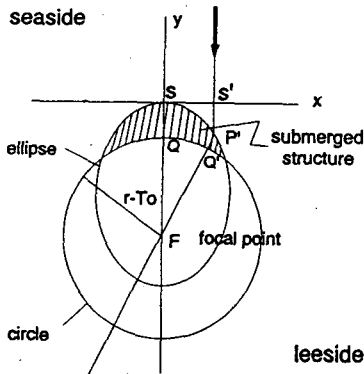


Fig.2.2 Schematic design of a submerged structures for wave energy concentration by wave refraction theory

2.1 기본 이론

기본적으로 선형파이론을 적용할 수 있도록 입사파의 진폭이 작으면 어떠한 입사파라도 여러가지 방향 및 주파수대로 중첩시켜 처리할 수 있을 것이다. 파의 집적에 관해서 이상적인 형태는 단일의 입사파가 그지역에 현저할 경우이다. 주파수대와 입사방향이 넓어질수록 위에서 기술한 구조물의 효과는 떨어질 것이다. 따라서 주어진 해안에서 최적조건을 찾아내기 위해서는 이 해역에 대한 파의 주파수 및 입사방향에 대한 측정이 뒤따라야 한다. 이러한 과정이 있는 다음에야 대상해역에 적합한 최적설계가 이루어질 것이다. 구조물이 최대의 효과를 얻기 위해서도 적절한 경계조건에 구성된 지배방정식을 풀어갈 때 도입한 구조물의 형상, 입사파에 대한 상대적인 크기, 수심 및 수면하의 깊이 등 정도를 높이기 위한 여러가지 노력이 있어야 한다.

파를 집중시키기에 최적한 평면형상은 국과이 (1992)의 이전 연구에서 소개한 바와 같이 광학이론의 해석을 통하여 구한 것으로, Fig.2.2 및 Fig.2.3과 같이 중심이 동일한 타원과 원이 교차한 볼록렌즈와 유사한 형상에 투과된 빛은 초점거리에 집중이 되고 구조물 특성상 투과되지 못한 입사파는 산란시키도록 한다. 그리하여 정온을 요

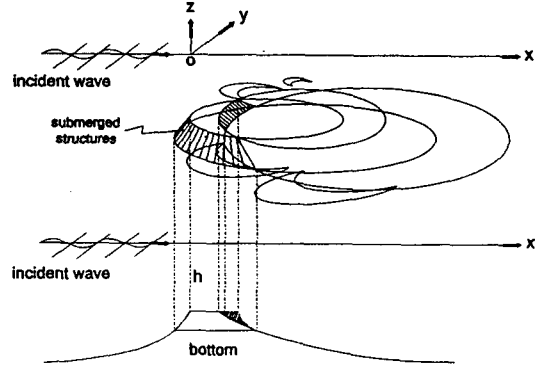


Fig.2.3 Shape of a submerged structure

하는 해역에서는 파의 침입을 막고, 초점에 해당하는 영역에서는 소파구조물이나 파의 에너지를 흡수하는 장치를 둬으로써 정온을 유지하거나 파랑에너지원으로 이용할 수 있을 것이다. Fig.2.2의 구조물을 만족시키기 위한 조건은 식 (2.1) 및 (2.2)과 같다.

$$\angle FQ'R' = \frac{\pi}{2}, \frac{\overline{Q'F}}{c} = \frac{r - T_0}{c} = constant \quad (2.1)$$

$$\frac{\overline{S'P'}}{c_0} + \frac{\overline{P'Q'}}{c} + \frac{\overline{Q'F}}{c_0} = \frac{T_0}{c} + \frac{\overline{QF}}{c_0} = constant \quad (2.2)$$

여기서 r 은 초점거리, T_0 는 구조물중앙에서 기준선의 폭, c, c_0 는 각각 구조물 상단 및 구조물의외측에서의 파속을 나타낸다. 식 (2.1)은 구조물의 내측단을 통과한 파향선은 수직으로 향하고 내측단을 떠난 파는 초점 F 에 같은 시각에 도착함을 나타내며, 식 (2.2)는 기본선 $y=0$ 을 떠난 파는 점 F 에 같은 시각에 도착하는 조건을 나타낸다. 식 (2.1)과 (2.2)를 (x, y) 좌표계로 정리하면 내측단의 원과 외측단의 타원을 해석적인 표현으로 다음 식 (2.3) 및 (2.4)와 같이 된다.

$$x^2 + (y+r)^2 = (r-T_0)^2 \quad (2.3)$$

$$\left\{ \frac{x}{r\sqrt{(1-p)/(1+p)}} \right\}^2 + \left\{ \frac{y+r/(1+p)}{r/(1+p)} \right\}^2 = 1 \quad (2.4)$$

이때 ρ 는 파속비 ($=c/c_0$)를 나타내며 이 두식으로 만들어진 형상은 초승달형 (crescent type)이 된다. 그런데 이와 같이 설계된 구조물은 파의 굴절이론 (Snell's law)에 의해서도 파의 수면하 구조물외로 집적시키기에 적합한 형상임을 입증할 수 있다. 구조물 전방 또는 후방으로부터 파랑이 입사될 경우 특히 타원과 반대측 단인 원의 가장자리로 구성된 부분에서는 굴절파, 반사파가 원과 유사한 형태의 파봉선을 이루면서 촛점에 집적되어 파랑에너지를 증가시킬 것이다. 다루게 될 구조물은 Fig.2.4와 같이 그 평면형상이 초승달형 단일구조 (single crescent type)를 기본형으로 하고, 기본형을 3개 결합한 형식인 복합구조 (triple crescent type)로 확장하였다. 여기서 제안한 복합구조는 결합시에 추가되는 파랑의 방향에 대해 중심선축이 38° 정도로 경사되도록 하였고 그 규모도 주방향의 구조의 1/4 수준으로 하고 내측단이 같은 원주상에 놓이도록 계획함으로써 통과한 파향이 변하지 않도록 피하였다. 이러한 이론적인 배경에서 파랑의 굴절, 회절, 반사, 산란, 마찰 등이 혼합되어 나타나는 대상에 대해 개발한 수치모델을 이용하여 파랑변화에 대한 시뮬레이션을 행하고 Fig.2.5처럼 수리모형실험을 통해 비교 분석할 수 있을 것이다.

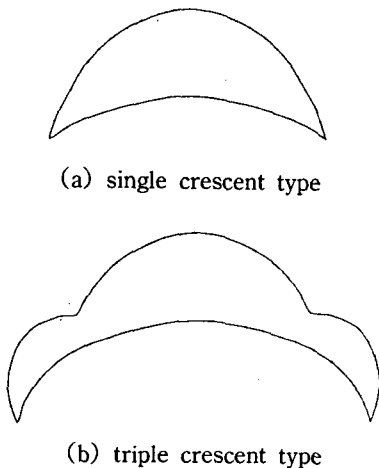


Fig.2.4 Plan form of designed structure

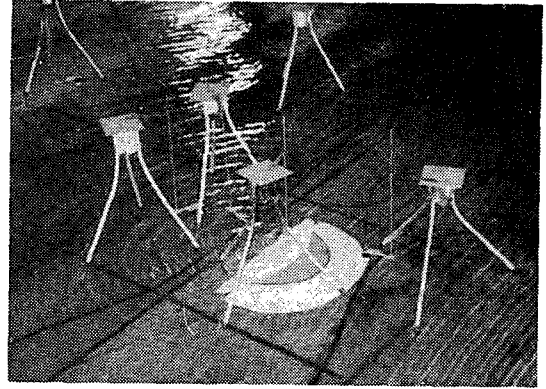


Fig.2.5 Wave field pattern around a submerged structure

연구의 목표로는 입사파에 대한 구조물의 방향을 여러가지로 변화시켜 파랑의 굴절이론에 따라 제작한 초승달형 수평구조물이 파랑을 쇄파시키지 않으면서 구조물 전후 촛점지역에서 파랑에너지의 집적시키거나, 설계한 구조물의 형상을 변형하고, 여러가지 입사파의 방향에 대한 굴절 및 반사를 통해 최대증폭비를 찾아내기로 한다.

이전에는 파랑제어에 방파제를 사용한 것은 연안해역을 보호한다고 하는 방재적 견지가 중시된 수동적인 것에 비하여, 여기서 기술하는 해저잠재는 연안해역에 내습하는 파랑을 제어하여 재해를 방지하는 것은 물론 나아가서 이를 유효하게 이용한다고 하는 능동적인 기능도 가지고 있다. 특히 여기서는 빛의 굴절이나 평판으로부터 파랑의 굴절현상에 착안하여 해저구조물의 형상을 변형하여 해수파의 파향 및 파고를 제어하고자 한다. 수면하에 구조물이 축조되므로 연안역의 경관이 손상되지 않으며 그만큼 구조물 건설비가 줄어든다. 또한, 수면아래에 있으므로 해수의 교환을 제약받지 않아 수상구조물이 갖는 해수순환의 차단으로 인한 오염증가와 같은 문제는 배제되리라 본다.

2.2 파랑에너지의 이용

여기서는 선형화된 이론으로 설계가 이루어진 구조물에 대하여 에너지의 집적과 이의 이용방법

에 대해 기술한다. 개념적인 구조물의 효과는 Fig. 2.6에서와 같이 파랑집적해역 (concentrated area)에서 Fig.2.7의 파랑에너지추출장치를 투입하므로써 이를 이용할 수 있는 단계로 옮겨갈 수 있을 것이다. 본 연구에서는 기본 목표를 해저구조물을 통한 파랑에너지의 집적과 에너지 추출장치의 투입점을 찾아내는 것으로 정하였으나, 부수적으로는 복합구조를 설치할 경우의 효과 검토, 나아가서는 해안침식해역에서 구조물을 파랑과 반대방향으로 설치함으로써 얻을 수 있게 될 파랑의 분산효과를 분석해보기로 하였다. 일단 파고를 증폭시킨 형태로 좁은 구간에 집적시킨 경우에는 그 다음의 단계가 이를 전기와 같은 에너지로 변환시키는 문제가 남게된다. 다소 개념적이긴 하나 Fig.2.8(a)에서와 같이 집중된 파랑에너지는 초점역에서 부유형으로 곧장 파력변환장치를 통해 전기력으로 변환한후 전송한다. 다른 방법으로는 Fig.2.8(b)처럼 해안역에 저수역을 만들고, 파의 집적점에서 부터 점차 좁아지는 형태의 긴 수로 (tapered channel)를 만들어 연결한다. 좁은 수로 내에서 전통적인 수력발전의 원리를 이용해서 전기에너지로 변환도 시도해볼 수 있다. 집적된 파는 폭이 넓은 입구측에서 차츰 좁아지는 수로를 진행함에 따라 점차 파고는 증폭되고 마침내 파봉은 수로에 설치된 벽을 넘어가게 된다. 따라서 차츰 좁아진 수로에서 서서히 파랑에너지가 저수부에서 위치에너지로 변환된다.

현재 개발된 대부분의 파력변환장치는 보통 구동부(moving part)가 기계적으로 노출되어 있어서 유지비가 막대하다는 결함이 있으나 이 경우에는 변환장치자체에는 구동부가 없어 전적으로 수동적인 발전장치로 유리하다 하겠다. 물론 변환효과도 파고, 주기, 방향등의 변화에 그렇게 민감하지 않다는 특성도 지적할 수 있다.

파랑의 집적방법은 다르나 파력변환은 유사한 사실이 노르웨이의 서해안에서 시설된 바(Mehlum, 1986)가 있고 그 규모를 0.5~300MW로 발전비용은 kWh당 US\$5~6센트정도로 알려져 있다. 이들의 경우 수조실험에서 65~75% 정도의 변환효율이 기록되었다.

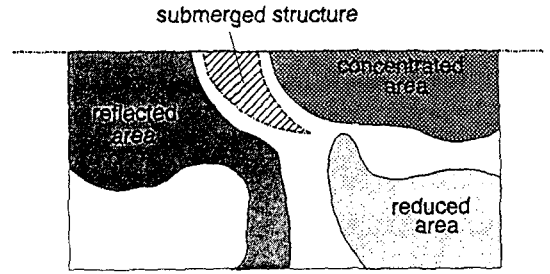


Fig.2.6 Schematic diagram for wave transformation

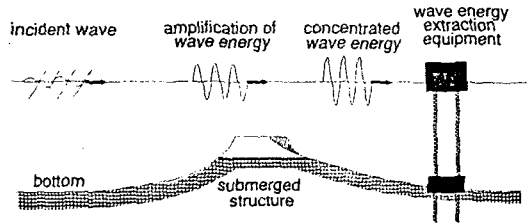
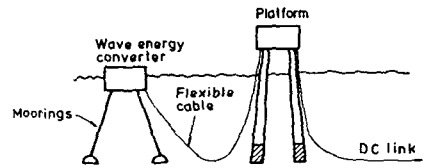
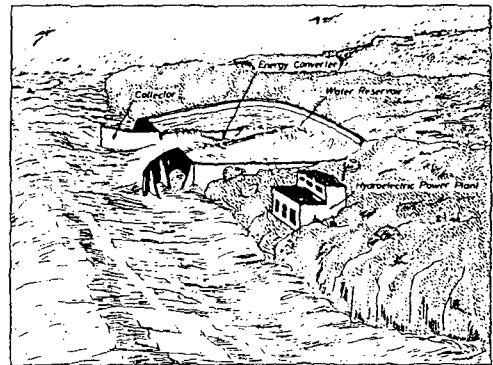


Fig.2.7 Scattered wave pattern for incident wave of opposite direction



(a) mooring type converter,



(b) tapered channel type converter

Fig.2.8 Principle of operation of wave energy conversion design

3. 문제의 정식화

일반적으로 해역에서의 파랑전파에 대한 연구 경향은 기본방정식을 parabolic equation이나 elliptic equation으로 변환하고 각종 물리적인 현상을 이론식이나 경험식으로 이에 부가하여 점진적인 발전을 꾀하는 방향으로 그중에는 선형이론과 비선형이론, 정상상태 및 비정상상태, 수치모델과 수리모델간의 비교가 주종을 이루고 있다. 그러나, parabolic equation으로 접근하는 경우 근사화 과정에서 반사파의 영향 등 물리적 현상의 일부를 무시하고 있어서 본 연구에서 시도하는 바와 같은 구조에서는 부적합하다고 하겠다.

따라서 본 연구에서의 수치모델에 대한 배경은 파랑의 굴절, 구조물에 의한 파랑의 회절 및 부분반사, 해저마찰에 의한 에너지손실 등을 고려한 확장완경사방정식 (extended mild slope equation)에서 찾기로 하고, 수치모델의 목적은 연구 과정에서 개발된 수치모델로부터 파랑을 집적하거나 파랑에너지추출을 위한 수중구조물의 다양한 실험 및 제작과 이에 관련된 기록 및 보고서를 통해 그 적용성을 검토하고 추후 다른 목적으로 활용할 수 있는 기반을 구축하는 것으로 하였다.

3.1 이론 해석

수심의 변화에 따른 파랑의 변화특성을 종래에는 수심이 완만하게 변화하는 것으로 가정하고 파랑에너지의 보존법칙을 적용하여 지배방정식을 수립하였는데 이와 같은 접근은 연안역을 파향선 추적 (ray tracing)으로 쉽게 3차원 파랑의 굴절 모델로 확장할 수 있어서 많이 사용되어 왔던 방법이다. 그러나 해저의 경사가 급해지면 이 방법은 파랑의 특성을 더이상 추정할 수 없게 되는데 특히 외해에 사주 (underwater sandbars)가 발달된 사빈역이나 산호초 등이 존재하는 해역에서는 특히 현저하다. 노르웨이의 해안, 호주의 대보초 지역 등은 이들의 대표적인 예이며 하천이 발달된 연안역에서도 이의 영향을 무시할 수 없게 된다. Massel (1989)은 이의 한계를 식 (3.1)과 같이 정의하고 있다.

$$\frac{\nabla h}{kh} \cdot \frac{\nabla a}{ka} \ll 1 \quad (3.1)$$

여기서 $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} \right)$ 로 수평방향 gradient 연산자이며, $h=h(x,y)$, k , a 는 각각 수심, 파수($2\pi/L$), 진폭을 나타낸다. 이와 같은 예에서는 파의 굴절과 회절이 현저한 영향을 미치게 되어 이를 무시할 수 없게 된다.

이를 해결하기 위해서 다른 대안으로 완경사방정식 (Berkhoff, 1972)에 기초를 둔 접근법이 범용화되고 있다. Booij (1983)는 해저경사가 1:3인 경우에도 완경사방정식으로 정확한 결과를 얻을 수 있다고 하였다. 해저지형이 임의적이고 사주들이 발달한 경우에는 해저면의 급한 경사 (steep slope)와 곡률 (curvature) 등을 고려하여야 하는데 Berkhoff (1972)가 제안한 완경사방정식에서는 이와 같은 것들이 제외되어 있어서 방정식의 적용범위가 제한될 수 밖에 없었다. Smith & Sprinks (1975), Dingemans (1985), Mei (1989) 등의 유도에서는 해저면의 급한 경사와 곡률에 대한 항은 정식화과정에 포함되어 있었으나 속도포텐셜의 변분보다 작다고 가정하고 이를 무시하여 완경사방정식에 이르게 되었다. 따라서 완경사방정식을 범용화하고 그 정도를 향상시키기 위해서는 수심을 임의의 지형에 대해 급격한 변화성분을 정의하여 수식에 도입하는 과정이 필요하다 하겠다. Kirby (1986)는 이에 대한 시도로 수심이 완만하게 변하는 평균수심에 대한 ripple과 같은 급격한 변분성분을 임의의 형태로 도입한 시간의 준 변형완경사방정식을 제안하였다. 여기서 그는 ripple을 표면파의 파장정도의 sine함수로 하고 파의 전파를 parabolic equation으로 정식화하여 해저면으로 부터의 반사를 포함시켰지만 여전히 해저경사와 곡률은 무시하였다.

또 다른 접근방법은 Fletcher (1984)의 Galerkin-Eigenfunction법에 기초한 Massel (1990, 1993)의 방법으로 완만한 수심의 변화 대신에 급경사해저면에 대해서도 적용이 가능하도록 가중함수 (weight function)을 도입하여 완경사방정식을 수정한 것이 있다.

본 연구에서는 전술한 바와 같이 파랑의 분석을 위해서는 타원방정식인 수정 완경사방정식(modified mild-slope equation)을 사용하기로 하고, 연구의 초기단계에서 얻은 결과(국 과 이, 1992)에서 부터 한 단계 나아가 경계조건을 개량하여 파랑의 변환이 해저형상에 따라 실제로 접근하도록 모델을 개량하였다.

먼저 직교좌표계의 원점 $O(x,y,z)$ 를 평균해면상에 두고 수평방향을 (x,y) 로, 수직상방향을 z 로 하여 각주파수가 $\omega(=2\pi/T)$ 인 비점성, 비압축성, 비회전성의 단일파가 $h(x,y)$ 의 수심에 전파되어 간다고 할 때, 식 (3.2)의 속도포텐셜 $\Phi(x,y,z,t)$ 은 해저마찰을 포함한 식 (3.3)의 수정 완경사방정식(Lee, 1989)으로 부터 구할 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re} \left\{ -i \frac{ag}{\omega} \phi(x,y) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \right\} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi = 0 \quad (3.3)$$

여기서 Re 는 복소값중 실수부를, g 중력가속도, λ 해저마찰 factor, C , C_g 파속 및 파의 군속도, ϕ 2차원 복소 속도포텐셜함수를 나타낸다. 유도한 2차원 복소 속도포텐셜로 부터 해면의 상하이동 η 는 식 (3.4)로 구할 수 있게 된다.

$$\eta(x,y,t) = i \frac{\omega}{g} \phi e^{-i\omega t} \quad (3.4)$$

이로부터 Massel (1993, 1994)과 같이 해저구배의 제곱 $(\nabla h)^2$ 에 비례한 항으로 해저의 급경사를 고려하고, 곡률 $\nabla^2 h$ 에 비례한 해저곡률을 고려하면 식 (3.3)의 좌측 제2항이 변형되어 식 (3.5)와 같은 확장 완경사방정식이 된다.

$$\nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \left\{ 1 + E_1(kh)(\nabla h)^2 + E_2(kh) \frac{g}{\omega^2} \nabla^2 h \right\} \phi = 0 \quad (3.5)$$

이를 다시 정리하여

$$\nabla^2 \phi + \frac{\nabla(C C_g)}{C C_g} \nabla \phi + \frac{k^2}{\lambda} \left\{ 1 + E_1(kh)(\nabla h)^2 \right.$$

$$\left. + E_2(kh) \frac{\nabla^2 h}{k_0} \right\} \phi = 0 \quad (3.6)$$

이 때 $k_0 = \frac{\omega^2}{g}$ 로 심해파의 파수를 나타내고, $E_1(kh)$ 및 $E_2(kh)$ 는 각각 해저경사의 제곱 및 구배에 비례하는 계수로, 파의 에너지 전달률 $n = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right\}$ 을 사용하여 식 (3.7) 및 식(3.8)과 같이 나타낼 수 있다.(Massel, 1994).

$$E_1(kh) = \frac{1}{n \tanh kh} \frac{1}{24(2kh + \sinh 2kh)^2 \cosh^3 kh} \cdot \{ kh[12 + 16(kh)^2] \cosh kh + 6kh[\cosh 3kh + \cosh 5kh] + [12 + 84(kh)^2] \sinh kh + 3[1 - 4(kh)^2] \sinh 3kh - 9 \sinh 5kh \} \quad (3.7)$$

$$E_2(kh) = \frac{1}{n} \left\{ \frac{-4kh \cosh kh + \sinh kh + 8(kh)^2 \sinh kh + \sinh 3kh}{8(2kh + \sinh 2kh) \cosh^3 kh} - \frac{kh \tanh kh}{2 \cosh^2 kh} \right\} \quad (3.8)$$

kh 에 대한 식 (3.7)과 식 (3.8)에 의한 계산결과를 그림으로 나타내면 Fig.3.1과 같다. 그러므로 수심이 아주 얇은 천해역 ($kh \rightarrow 0$)이거나 수심이 아주 깊어지면 ($kh \rightarrow \infty$), 이들 비례계수는 0이 되어 식 (3.5) 및 (3.6)의 부가항이 0이 되어 식 (3.3)과 같아진다.

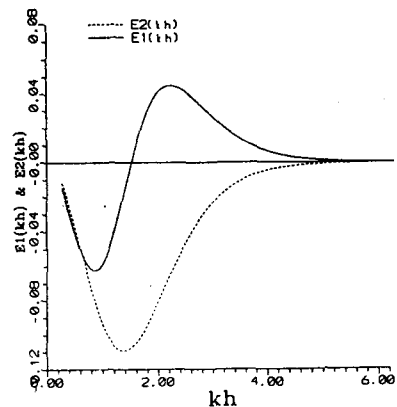


Fig.3.1 Functions E_1 and $E_2(kh)$ with respect to kh .

한편, 해저마찰 Factor λ 는 해저면에서 Shear Stress 성분을 수평방향의 최대속도에 비례한다고 가정하여 식(3.9)와 같이 정리하는데

$$\lambda = 1 / \left\{ 1 + i \frac{\beta \alpha_0 e^{\gamma r}}{h \sinh kh} \right\} \quad (3.9)$$

여기서 $\beta(x,y)$ 는 무차원의 해저마찰계수, γ 는 유체입자의 속도방향성분과의 위상차(Phase Difference), α_0 는 입사파의 진폭이다. 식 (3.9)에서 $\beta = 0$ 으로 하면 $\gamma = 1$ 이 되어 결과적으로 식 (3.6)은 해저마찰이 고려되지 않은 확장 환경사방정식으로 정리되고 Massel (1994)의 수식과 같아진다. 최후에 식 (3.6)과 같이 정리된 확장 환경사방정식은 파랑의 굴절, 구조물에 의한 파랑의 회절 및 부분반사, 해저마찰에 의한 에너지손실, 해저면의 급격한 경사 및 곡률을 고려한 종합적인 파의 변형식이 된다. 여기에서 수치모델의 구성은 식 (3.6)을 이용하기로 한다.

식(3.6)의 해를 결정하기 위해서는 대상으로 하는 영역의 경계상에서 경계조건이 부과되지 않으면 안된다. 경계조건으로는 Fig.3.2와 같이 유한해역구간 (A)에서의 해안 또는 구조물의 경계 (∂B)에서는 목적에 따라 파랑에너지를 부분흡수하는 고정경계조건을, 무한해역구간 (C)에서의 개방경계면 (∂C) 외측 무한원방에서는 산란파에

대하여 방사조건(radiation condition)을 적용하기로 한다.

고정경계조건은 파랑에너지를 부분적으로 흡수하도록 다음과 같이 반사계수 (K_r)를 사용하여 2차 부분흡수조건으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = i \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \left\{ k\phi + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} \right\} \quad (3.10)$$

여기서, 식 (3.10)의 제 2항 이하를 생략하면 보통 사용하는 1차 부분흡수조건이 되는데, 경계에 대한 반사율은 입사파의 파장과 진폭과는 독립하여 입사각의 크기에 따라 변한다. 이 경우 입사각이 경계면에 대해 35° 이상이 되면 실제로 발생하지 않는 반사파가 나타나게 되어 불안정하게 되는 반면, 2차 부분흡수조건을 사용할 경우에는 그 영역이 60° 까지로 확대되므로 (Behrendt, 1985) 수치모델 수립시 그만큼 정도가 높아진다.

또한, 개방경계면에서는 산란된 파 ϕ^s 에 대해서 Sommerfeld의 방사조건을 적용하기로 한다.

$$\lim \sqrt{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} - ik \right\} \phi^s = 0 \quad (3.11)$$

이 때 r 은 원점으로부터의 수평거리로서 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 이다.

3.2 수치해석 방법

본 연구에서는 기본방정식을 해석하기 위한 수치해석방법으로 유한요소법과 경계적분법을 복합한 복합요소법(Lee, 1989)을 이용하기로 한다. 대상 해역의 파랑 지배방정식에 전술의 경계조건식을 도입하여 최종적으로 대수방정식으로 변환하기 위하여 변분법(Variational Method)을 사용하였다. 이 때 유도된 범함수(Functional) $F(\phi)$ 가 일정하도록 즉, 경계조건식들을 지배방정식에 더해 범함수를 구하고 이를 최소로 하기 위하여 미분 변환한다. 적분방정식의 형태로 변환된 최소화할 범함수는 다음 식과 같다.

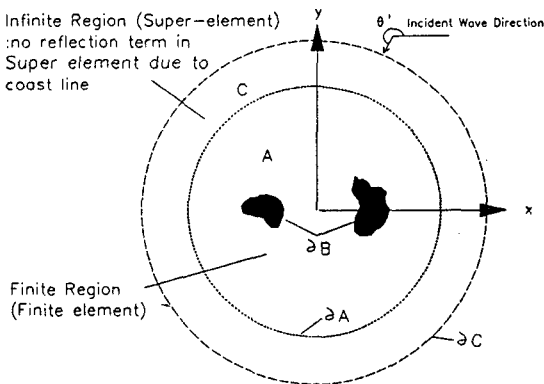


Fig.3.2 Defined regions and boundaries for numerical scheme

$$\begin{aligned}
F(\phi) = & \iint_A \frac{1}{2} \lambda C C_g \left[(\nabla \phi)^2 - \frac{k^2}{\lambda} \left\{ 1 + E_1(kh) (\nabla h)^2 \right. \right. \\
& \left. \left. + E_2(kh) \frac{\nabla^2 h}{k_0} \right\} \phi^2 \right] dA \\
& + \int_A \frac{1}{2} \lambda C C_g (\phi_c - \phi') \frac{\partial (\phi_c - \phi')}{\partial n_A} ds \\
& + \int_{ab} \frac{1}{2} \lambda C C_g i \left(\frac{1-K_r}{1+K_r} \right) \left\{ k \phi^2 + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} \right\} ds \\
& - \int_{aA} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial (\phi_c - \phi')}{\partial n_A} ds \\
& - \int_{aA} \lambda C C_g \phi_A \frac{\partial \phi'}{\partial n_A} ds \\
& + \int_{aA} \lambda C C_g \phi' \frac{\partial (\phi_c - \phi')}{\partial n_A} ds \\
& + \int_{aA} \lambda C C_g \phi' \frac{\partial \phi'}{\partial n_A} ds \quad (3.12)
\end{aligned}$$

여기서, ϕ_A , ϕ_c 는 각각 A 및 C 구간에서의 복소속도포텐셜을 나타낸다.

범함수 $F(\phi)$ 의 적분은 유한구간 A 에서의 면적분인 범함수 $F(\phi)$ 의 우측 첫항을 보간함수 (interpolation function)인 N 을 도입하여 식 (3.12)과 같이 근사화한 속도포텐셜과 우측 2항이하의 선적분형태의 경계조건식에서 속도포텐셜을 해석해와 수치적분기법의 결합으로 변환한다 (Lee, 1989).

$$\phi^*(x,y) = N_1^* \phi_1^* + N_2^* \phi_2^* + N_3^* \phi_3^* + \dots = \{N^*\}^T \{\phi^*\} \quad (3.13)$$

식 (3.12)의 우측 면적분항을 유한요소 근사식으로 나타내면 식 (3.14)와 같다.

$$\begin{aligned}
\iint_A \frac{1}{2} (\lambda C C_g)^* \left[\nabla N_i \cdot \nabla N_j - \frac{k^2}{\lambda} \left\{ 1 - E_1(kh) (\nabla h)^2 \right. \right. \\
\left. \left. + E_2(kh) \frac{\nabla^2 h}{k_0} \right\} \phi_i \phi_j \right] dA \quad (3.14)
\end{aligned}$$

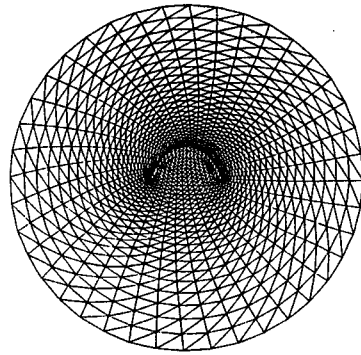
식 (3.12)를 복합요소법에 의한 변환과정을 거치면 식 (3.13)과 같이 일반적인 형태의 대수방정식 (Algebraic Equation)으로 간략화하여 해를 구할 수 있다.

$$[K] \{\phi\} = \{Q\} \quad (3.13)$$

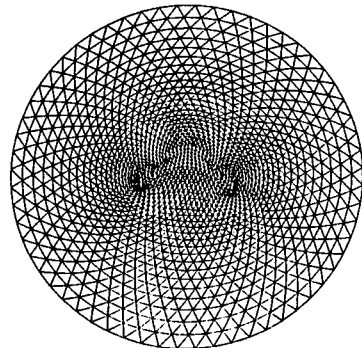
4. 실험방법

4.1 수치모델 (Numerical Model)의 구성

설계한 구조물을 실험하기 위해 유한구간에서 초승달형 해저구조물에 대해 Fig.4.1과 같이 단일구조(a)와 복합구조(b)로 나누어 전술한 복합요소법을 적용하기 위해 mesh를 구성하였다. 이미 기초연구 (국 과 이, 1992)을 통해 수정모델을 검증하였고, Kirby (1986), Massel (1990, 1993, 1994) 등의 연구로 추가항에 대한 검토가 충분한 것으로 사료되므로, 여기서는 설계한 해저구조물에 대한 파랑에너지의 집적상태를 비교 분석하도



(a)



(b)

Fig.4.1 Discretization of the wave field with single crescent (a) and triple crescent structure (b).

서 -20m까지 변하는 가변수심에 해저마찰계수 $\beta=0.05$ 를 적용하였다. 모델에서 사용한 구조물의 규모는 구조물 상단에서 중심선상폭을 25.5m, 길이는 단일구조를 80m, 복합구조를 108m로 하였으므로 구조물의 경사를 $\cot\theta=3.64$ 로 설계할 경우 하단의 길이는 단일구조에서 239m 정도가 된다. 모델수립시 사용된 격자망의 특성은 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 Characteristics of model setup

Type of structure design	Single crescent(a)	Triple crescent(b)
Number of Node	1,073	1,603
Number of Element	2,104	3,144
Number of boundary element	40	60
Band width of matrix	111	149

4.2 수리모델 (Hydraulic Model)의 구성

수리모델실험은 앞에서 설계한 단일구조와 복합구조에 대하여 Hawaii대학속의 James K. K. Look Laboratory of Oceanographic Engineering의 3차원 수리실험소에서 행하였다. 수리모델의 목적은 설계한 구조물에 대한 효과를 재현하여 그 가능성을 타진하고, 수치모델과 비교를 하기 위한 것이다.

수리모델의 개괄은 Fig.2.6과 같다. 그림에서는 파랑이 우측하단에서 입사되고 있다. 해저구조물에 의해 굴절 및 회절된 파는 그 파봉선이 원호 모양으로 변형되어 구조물 후부측에서 집적되는 것이 확인되고 있다. 해저구조물의 모형재료는 아크릴판으로 하고 수치실험에서 중간정도의 해저경사 (구조물의 앞측 경사면과 저면이 이루는 각을 θ 라고 하였을 때 $\cos\theta=3.64$)로 설계하여 바닥에 고정시킨 후 주위에는 사석과 모래 등으로 채워서 단면이 연속적으로 변하도록 하였다. 모형의 전면수심은 15cm, 구조물의 초승달형 상단은 일률적으로 수면에서 3cm정도를 유지하였다. 모형의 상단에서 촛점거리 (r)는 95cm, 기준선상의 폭 (T_0)을 23.8cm, 길이는 단일구조가 76.5cm,

복합구조가 103.3cm가 되도록 하였다.

구조물의 전방(St.1, ○), 구조물의 중앙상단직후 (St.2, □), 촛점 (St.3, △) 및 후방 (St.4, ■) 등 4곳을 선정하여 초음파측정기를 설치하고 100Hz 간격으로 수면변화를 digit화하여 중앙의 자료기록장치에 기록하였다. 측정된 자료의 analog식 출력은 물론 digit화한 자료를 분석하여 정확한 입력파고 및 주기와 반응특성을 파악하도록 하였다. 수리모델실험에 사용된 실험조건은 Table 4.2와 같으며 입사파고 및 주기를 달리하여 수위변화를 관측한 예는 Fig.4.2에 나타내었다

Table 4.2 Experimental conditions

Water depth(cm)	15
Submerged water depth(cm)	3
Wave period (T_i , sec)	0.4, 0.5, 0.6
Wave height (H_i , cm)	0.8, 1.0, 1.2
Incident angle(α , degree)	0, 45, 180
$\overline{SQ}/\text{wave length}(T_0/L)$	1.025, 0.670, 0.485

5. 결과 및 고찰

구조물의 사면과 해저면이 이루는 각을 θ 라 할 때, $\cot\theta=3.64$ 로 계획한 경우의 집파효과를 2차원 및 3차원으로 나타내면 Fig.5.1~Fig.5.4와 같다. 2차원 특성도에서 수치는 무차원화 시킨 등중폭비선 (H/H_i)을 나타낸다. Fig.5.1 및 Fig.5.2는 단일구조를 취하여 2절에서 기술한 바와 같이 입사각이 각각 90° 및 45°에 대해 구조물의 급경사와 곡률을 도입하여 계산한 것이고, Fig.5.3 및 Fig.5.4는 복합구조에 대한 것이다. 전반적으로 실험을 통해 알 수 있는 것은 의도한 바대로 구조물의 후부에서는 중심축측 (y 축)에 가까운 영역에서 파의 집적이, 중심축측으로부터 먼 곳은 정온역이 형성되었다. 구조물의 전면 선단부에서 경사면에 반사의 효과로 중부파의 영향이 많을 것으로 예상되었지만 구조물이 수면아래에 놓여있어서 투과하여 구조물 상단이나 후부에 집적되는 효과를 증가시켰다. 직각으로 입사하는 경우에 구조물의 직후에서 촛점에 이르는 부분에 굴절, 반사 및

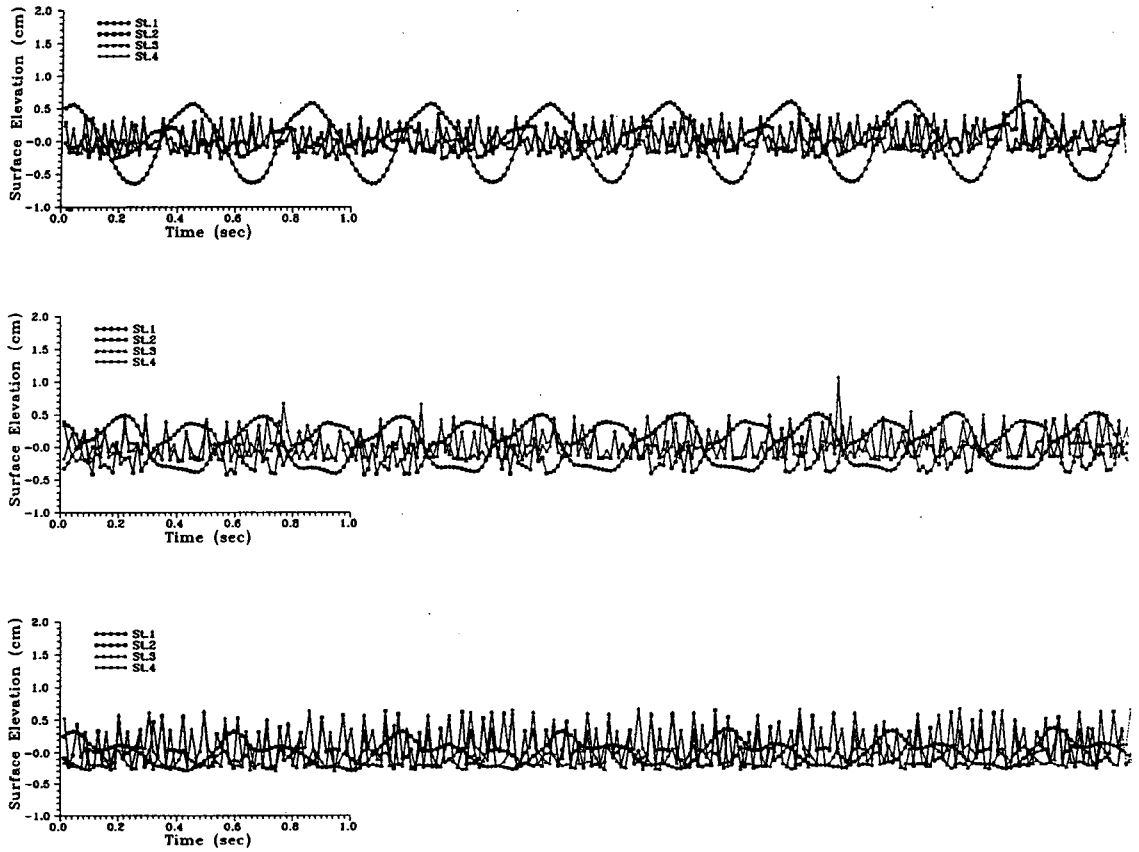


Fig.4.2 Example for measurement of surface elevation in time series.

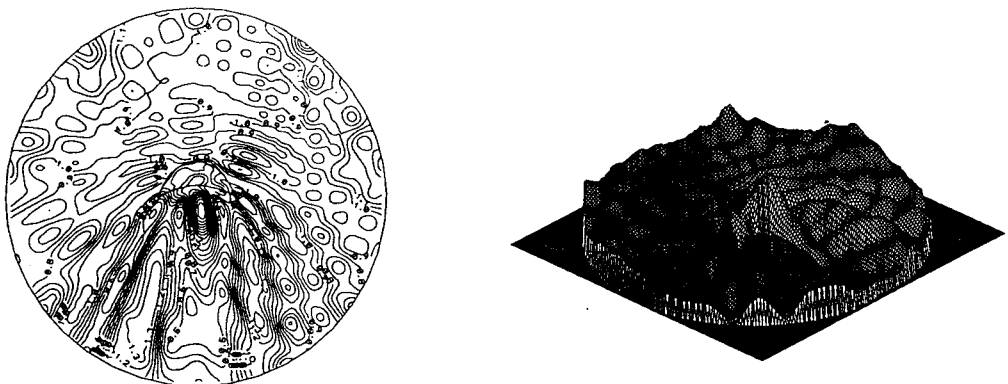


Fig.5.1 Wave height distribution around a submerged single structure ($kh=2.13646$, $\alpha=90^\circ$)

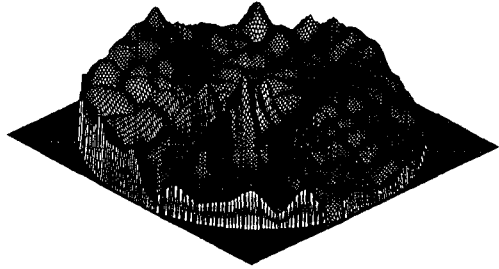


Fig.5.2 Wave height distribution around a submerged single structure
($kh=2.13646$, $\alpha=45^\circ$)

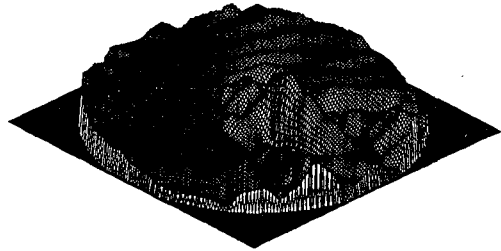
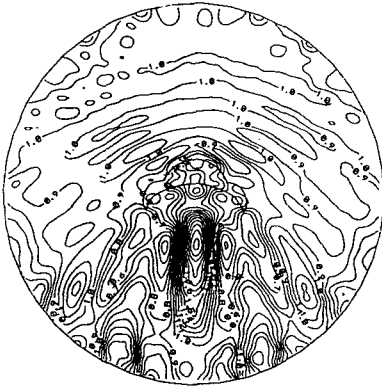


Fig.5.3 Wave height distribution around a submerged triple structure
($kh=2.13646$, $\alpha=90^\circ$)

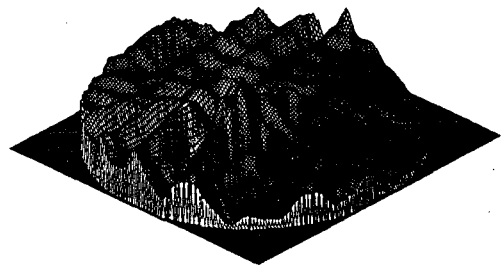
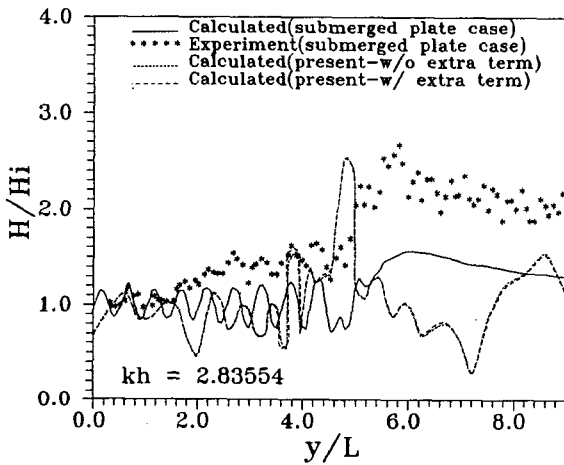


Fig.5.4 Wave height distribution around a submerged triple structure
($kh=2.13646$, $\alpha=45^\circ$)

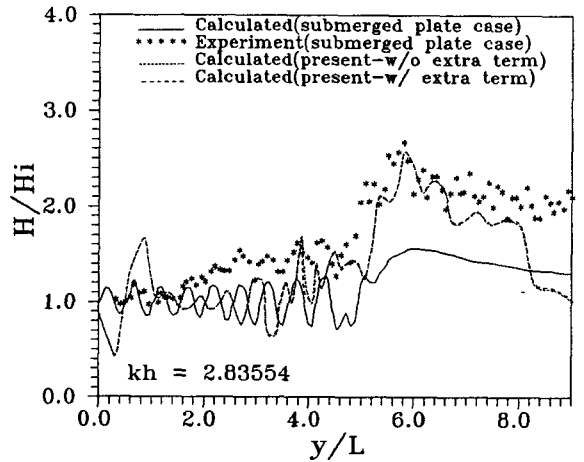
회절로 인해 상당한 크기로 입사파가 증폭되는 것을 알 수 있으며, 경사되어 입사되는 경우에는 집적점이 구조물의 배후측으로 또한 중심으로 입사파의 반대측으로 이동되는 것을 알 수 있다.

해저구조물의 효과를 검토하기 위하여 몰수평판을 이용한 파랑의 집적현상을 다룬 선행연구(工藤 등, 1987)와 비교하여 보았다. Fig.5.5 및 Fig.5.6은 각각 단일구조와 복합구조를 나타내며 각 그림에서 (a)는 $kh=2.83554$, (b)는 $kh=2.136$

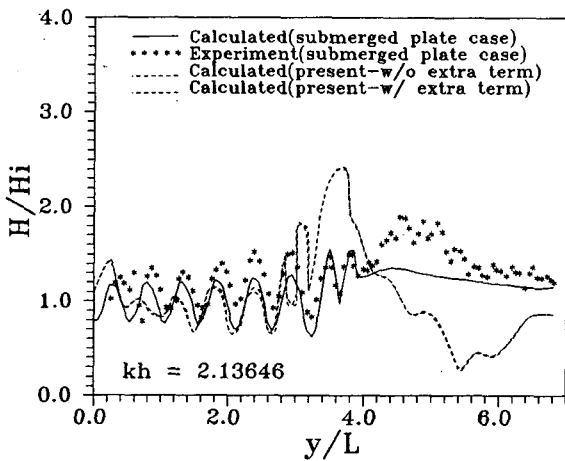
46일 때 몰수평판에 대한 계산치(—) 및 실험치(***) 그리고 본 연구에서 설계한 구조물에 대한 수정모델계산치(.....) 및 확장모델계산치(----)를 각각 나타낸다. 가로축은 y 축방향의 거리를 입사파의 파장으로 나누어 무차원화 (y/L) 하였으며 세로축은 증폭비를 나타낸다. 구조물상단 전단 및 후단과 촛점의 위치는 (a)에서 각각 3.7, 4.2, 6.0이고, (b)에서는 각각 2.8, 3.2, 4.5이다.



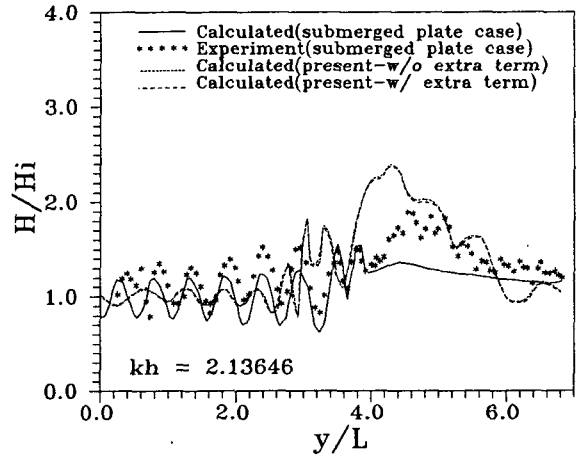
(a) $kh=2.83554, \alpha=90^\circ$



(a) $kh=2.83554, \alpha=90^\circ$



(b) $kh=2.13646, \alpha=90^\circ$



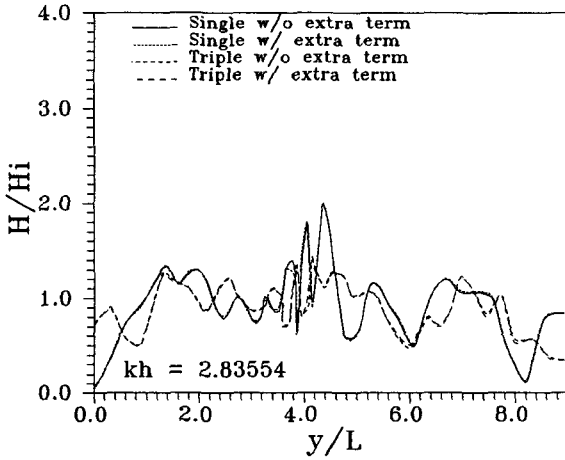
(b) $kh=2.13646, \alpha=90^\circ$

Fig.5.5 Wave height distribution along the center line of the single structure

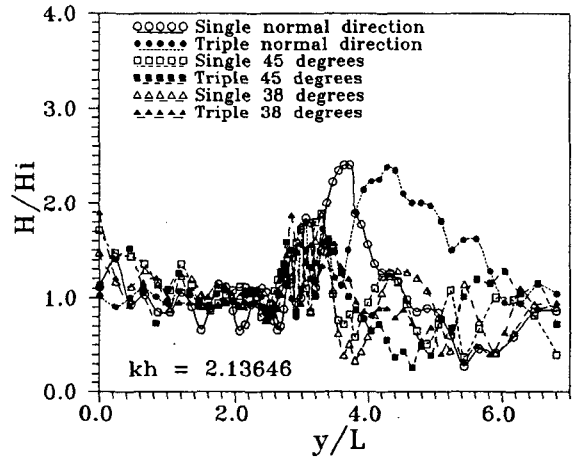
Fig.5.6 Wave height distribution along the center line of the triple structure

구조물의 앞에서는 실험치와는 본 연구의 단일구조, 복합구조 공히 결과가 잘 접근하고 있으나 뒤에서는 각기 다른 양상을 나타낸다. 工藤 등의 수치모델을 통한 계산치도 구조물뒤에서의 실험치와 상당히 차이를 보이며 여기서 도입한 단일구조의 해석결과와는 더욱 차이가 있다. 단일구

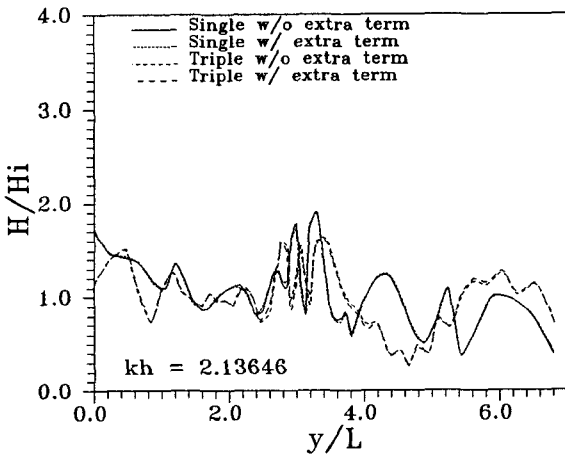
조의 경우 구조물의 직후에서 증폭비 2.5이상의 집적점이 존재하고 촛점부근에서는 오히려 낮은 반응을 나타내었다. 그러나 복합구조로는 실험치에 더욱 접근하여 촛점부근에서 극치를 가지고 그 효과는 넓은 범위에 걸쳐있다.



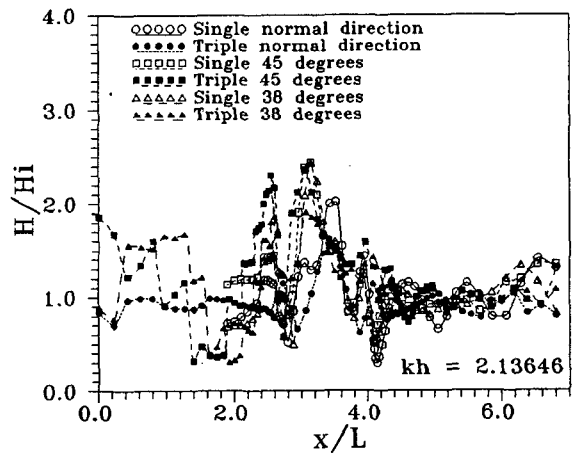
(a) $kh=2.83554, \alpha=45^\circ$



(a) along the center line of the structures



(b) $kh=2.13646, \alpha=45^\circ$



(b) across the structures

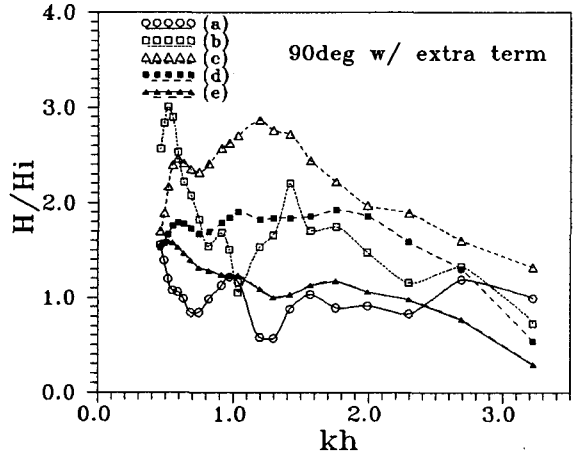
Fig.5.7 Wave height distribution along the center line of the structure

Fig.5.8 Wave height distribution for different incident wave direction($kh=2.13646$)

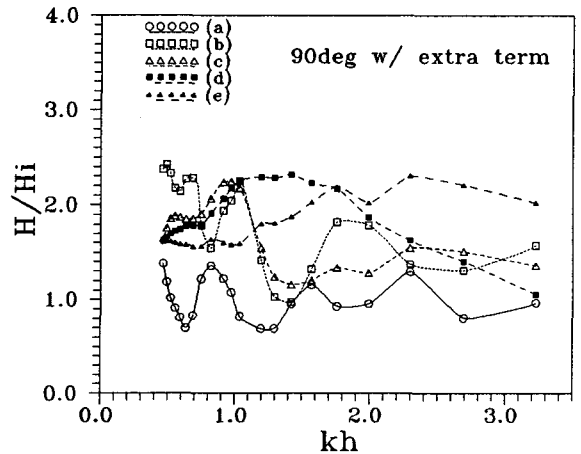
Fig.5.7은 파랑이 구조물에 대해 45°로 경사되어 입사되는 경우를 나타내며 중심선상에서 최고증폭의 효과가 다소 떨어지고 반응지점도 구조물 직후로 이동된 것을 알 수 있다. Fig.5.8은 입사파향이 각각 직각 (○, ●), 45° (□, ■), 38° (△, ▲) 방향으로 변화할 때 (a) 구조물 중심축방향(y) 및 (b) 길이방향 (x)으로의 반응특성을 단일구조와 복합구조로 나누어 비교해 본 것이다. 중심축방향에서는 직각으로 입사할 때 복합구조가 의도한 바대로 촛점부근에 파랑이 집적되나 경사하여 입사될 때에는 최대증폭점이 모두 구조물 직후쪽으로 이동하게 된다. 길이방향의 변화로는 중심선상을 기준으로 하여 입사파향의 반대측으로 최대증폭점이 이동하는 것을 알 수 있다. 따라서, 최고증폭점은 중심선에서 부터 입사파의 반대방향으로도 옮겨지기 때문에 증폭치가 감소된 것은 당연하다. 또한 $kh=2.13646$ 로 줄어드는 경우 (주기가 길어지는 경우)와 같이 물수평판은 입사파의 주기에 따라 민감하게 변화하면서 전반적으로 집적효과가 감소하지만 보다 여기서 설계한 구조물로는 별로 둔화함이 없이 그 효과가 큰 것을 알 수 있다. 이는 파력변환장치를 설치할 때 위치설정에 매우 중요한 문제이므로 파랑집적구조물을 설계할 때 복합구조와 같은 고려가 필요하다 하겠다.

한편, 구조물의 중심선을 따라 취한 5지점의 반응은 Fig.5.9와 Fig.5.10에 나타난 바와 같다. 선택한 입사파는 5sec ($kh \approx 3.225$)~20sec ($kh \approx 0.463$)의 주기를 구조물에 대해 90°와 45°의 입사각에 대하여 수치실험하였다. 선택지점은 구조물의 중심폭만큼 앞쪽 (a)(○), 중심폭의 중앙 (b)(□), 구조물 직후 가로교차선 (c)(△), 촛점 (e)(▲), (c)와 (e)의 중앙지점 (d)(■)등이며, 여기서 (1) 과 (2)는 각각 단일구조인 경우 와 복합구조인 경우를 나타낸다. 전술한 바와 같이 파랑이 직각방향으로 입사된 경우 단일구조에서는 구조물의 직후 (△)와 후반중앙 (■)에서 반응이 큰 반면, 복합구조에서는 후반중앙 (■)과 촛점 (▲)에서 반응이 높게 나타났다. 입사각이 경사됨에 따라 집적지역은 Fig.5.10에서 처럼 구조물

의 형상에 대해 특별한 차이가 없이 구조물의 상단 (□)이나 직후 (△)로, 즉 구조물측으로 이동됨을 알 수 있다. 전반적으로는 계획한 규모에 대해서는 6sec 이상의 주기를 가진 파랑에 대해 효과가 있으나 지나치게 장주기가 되면 반사 및 굴절 등 반응특성이 달라지므로 구조물의 규모를 달리하여야 할 것이다.

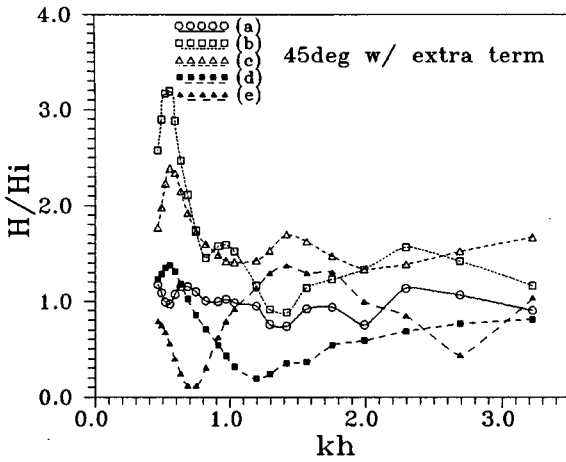


(a) single crescent structure,

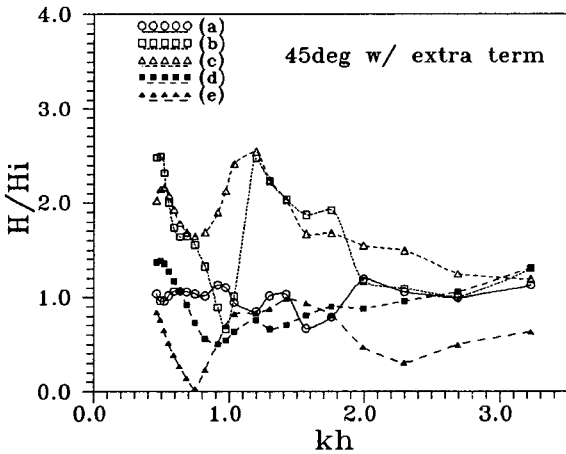


(b) triple crescent structure

Fig.5.9 Wave height distribution at the selected stations ($\alpha=90^\circ$)



(a) single crescent structure,

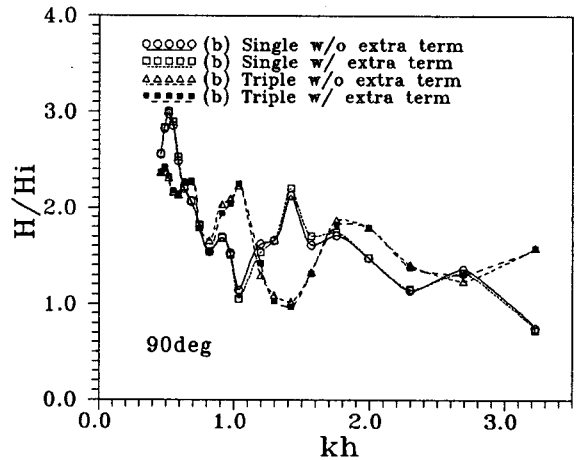


(b) triple crescent structure

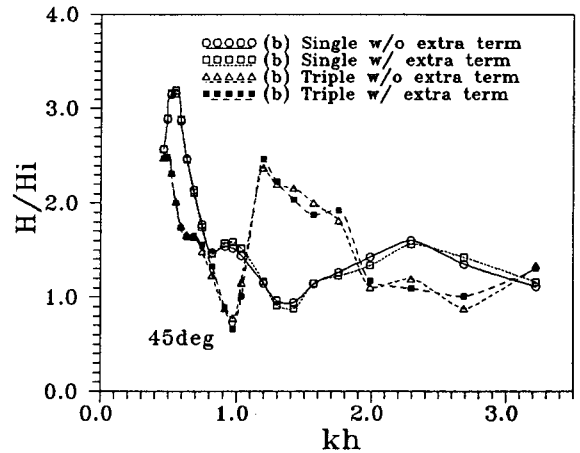
Fig.5.10 Wave height distribution at the selected stations($\alpha=45^\circ$)

Fig.5.11은 지배방정식에서 해저경사와 곡률을 고려한 항을 포함시킬 경우와 제외한 경우의 비교로, 입사파가 구조물 횡단선에 대해 (a) 직각 ($\alpha=90^\circ$)으로 오는 경우 (b) 경사 ($\alpha=45^\circ$) 되어 오는 경우로 나누어 구조물상단의 중앙에서 측정된 반응특성을 대비시킨 것이다. 여기서 선택한 수심특성은 1:3.64로 비교적 Booij (1983)가 기

술한 한계에 도달하지 않은 상태로 완경사방정식이 적용되는 범위이다. 그럼에도 $kh=1.0$ 이상(주기 10sec 이하)에서는 추가항의 도입에 따라 다소 차이가 남을 알 수 있으며, 실제 해역에 적용할 경우에는 이의 도입이 필연적임을 알아야 한다.



(a) $\alpha=90^\circ$



(b) $\alpha=45^\circ$

Fig.5.11 Wave height distribution from a modified mild slope solution and an extended mild slope solution

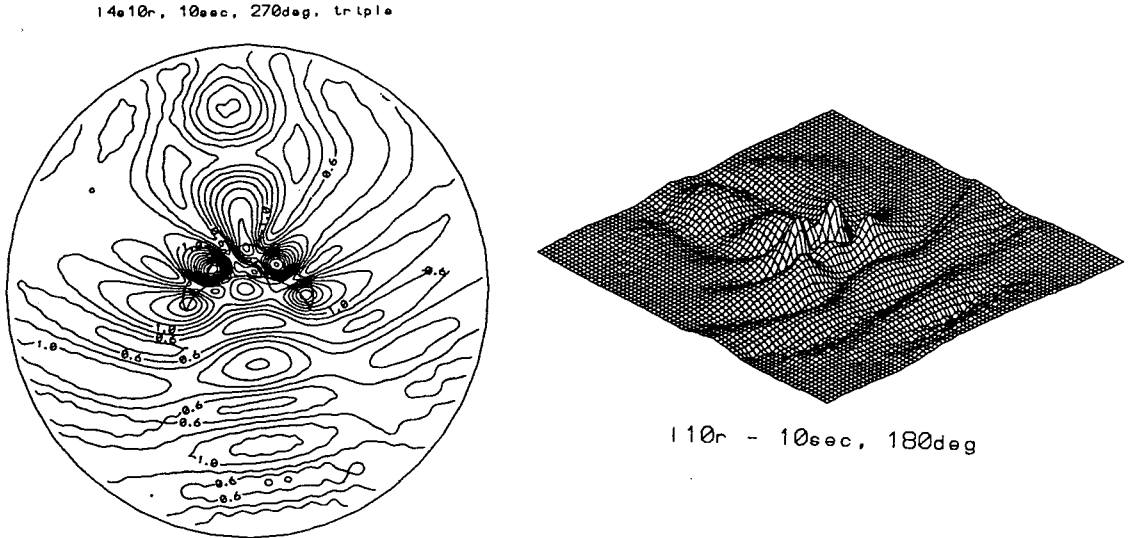


Fig.5.12 Wave height distribution around a submerged triple structure ($T=10\text{sec}$, $\alpha=270^\circ$)

수리실험에서는 4개의 관측지점에서 입사파의 조건에 따라 달라 반응이 달리 나타났는데, 스펙트럼분석으로 파고와 주기를 도출한 후 입사파에 대한 증폭비를 축적역과 구조물의 직후부에서는 1.3~2.1을 얻어서 수치실험으로 얻은 증폭비의 50~80%의 수준정도만 파악되었다. 전반적으로 수치실험의 경향에 따르지만 수치실험 결과와 차이를 보이는 것은, 모형제작후 해저면에 고정 시켜서 사석과 모래등으로 구조물 주위를 채워 연속저면을 구성할 때 저질의 상태로 인해 반응한 파랑의 상당한 양이 흡수되기 때문으로 본다. 또한, 실험조건에 따라 집적된 파랑이 구조물 후부에서 쇄파되는 현상이 발생하여 집적효과를 감쇄시키는 경우도 발생하였다. 수리모델의 경우에는 입사파의 파고나 구조물 상단의 잠수깊이에 따라 쇄파가 발생하고 이로 인한 증폭율의 감쇄가 현저함을 알았다. 따라서, 구조물의 경사와 규모에 대한 검토가 필요하며 수치모델을 수립할 때 추후 쇄파효과에 대한 모델의 배려가 필요하다. 관측장비의 한계로 지정된 측정에서만 자료를 도출하였기 때문에 수리실험을 통한 2차원 해수면을 대비할 수는 없었으나, 사진촬영을 통한 정성적인 비교는 가능하였음을 부언해둔다.

Fig.5.12는 주기 10sec의 파랑을 복합구조에 대해 반대방향 (구조물의 후부측)으로 입사시킨 결과를 3차원으로 나타낸 것이다. 전반적으로 구조물상단에서부터 입사파쪽으로 가까운 해역에 전술한 바와 같이 2개의 집적점을 갖는 것을 제외하고는 반대쪽 해역을 정온하게 만들고 있다. 이와 같은 결과는 본 연구와 같이 진행한 해안침식에 대한 대책을 위한 실험 (Oceanit Laboratories, Inc., 1995)에서도 본 연구에서 의도하고 있는 구조물의 응용으로 파랑의 분산에 대한 효과를 검토할 수 있을 것으로 보아 설계한 구조물을 수리모델에 투입하여 침식대책의 한 방안으로 제시하도록 하였다.

6. 결 론

수중구조물을 이용하여 파랑을 제어하기 위한 연구의 연속으로 본 연구에서는 파랑에너지 집적과 산란을 위한 해저구조물을 설계하고 이것으로부터 파랑의 반응 특성을 조사하기 위해 수치실험 및 수리실험을 병행하였다. 파랑에너지를 집중시키기 위해 광학이론의 렌즈와 같은 원리로

파랑의 굴절과 회절 및 반사효과를 고려한 해저 고정형 잠수구조로 설계하고 이의 효과를 분석하였다. 설계한 구조물의 현지 적용가능성을 검토하기 위해서는 입사파의 조건과 설치조건에 따른 파랑의 변형을 파악하여야 한다. 특히 현지의 해저는 굴곡과 수심이 변화무상하므로 파랑변형특성을 파악할 때 해저면 및 구조물이 가진 특성으로 인한 변형분도 고려하여야 하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 이를 고려한 수치모델을 수립하고 결과를 이전의 연구들과 비교하였다. 한정된 실험의 결과이지만 이로 부터 얻어진 중요한 내용과 이와 관련된 의견을 요약하면 다음과 같다.

(1) 파랑에너지 집적에 적합한 해저구조물로 광학이론에 근거하여 설계한 구조물중 복합구조물이 파향을 변화시켜 구조물 후부에 집적하는 것이 가능함이 확인되었다.

(2) 여기서 설계된 구조물은 구조물의 경사 및 구조물의 규모, 잠수깊이에 따라 그 효과가 다르나 전술한 경우만으로도 파고 증폭율이 3배 정도가 되어 몰수평판(工藤 등, 1987)보다 집적율이 높은 것으로 나타났다.

(3) 계획한 집적점이외에 구조물의 특성상 구조물 중심부 직후면에서 집적점에 이르는 대역에서 반응이 높게 나타났으며 파향 및 주기에 따라 최고증폭점이 구조물측으로 이동하여 타원형의 분포를 이룸을 알았다.

(4) 집적한 파랑에너지를 추출하기 위한 설비는 이러한 타원형의 한계내에 위치시키게 하고 파력으로 변환한다면 그 이외의 해역에서는 의도한 바대로 정온함을 유지할 수 있음을 알았다.

(5) 수리실험의 경우 실험조건에 따라 집적된 파랑이 구조물 후부에서 쇄파되는 현상이 발생하여 집적효과를 감쇄시킬 수도 있으므로 구조물의 경사와 규모에 대한 검토가 필요하며 수치모델을 수립할 때 추후 쇄파효과에 대한 모델의 배려가 필요하다.

(6) 여기서 설계한 구조물, 특히 복합구조의 경우는 주기 및 파향 등 입사파의 조건에 변화를 주어도 반응특성은 비교적 고르다는 것을 확인하

였다. 그러나, 수리실험의 결과 입사파의 파고나 잠수심도에 따라 쇄파가 발생하고 이로 인한 영향이 현저함을 알았다.

(7) 이상의 실험결과에서 설계한 구조물에 의한 파고의 증폭비 검토를 통해 파력변환장치의 설치 위치점은, 본 연구에서 제안한 바와 같은 복합구조물의 경우 구조물의 중앙직후부에서 촛점에 해당하는 구간으로 하는 것이 합리적인 것으로 사료된다.

(8) 한편, 설계한 구조물을 파랑의 영향으로 침식 등, 그 피해가 심한 해역에 대해 수리모델로 적용해 본 결과로는 현지 입사파향에 따라 구조물의 방향을 변경하여 파랑을 제어하고 침식을 상당한 수준까지 저지할 수 있음을 알았다.

앞으로 본 연구와 관련하여 다루어야 할 과제로는 1) 쇄파에 의한 영향을 검토하기 위해 지배방정식을 이에 따라 확장하여 적용할 것과 2) 수면하구조물 또는 수상구조물을 다반사형 안테나의 구조와 같은 형상과 결합하여 배치함으로써 정체로 인한 오염해역에 순환을 향상시키도록 하는 것, 3) 또한 대부분의 연안해역이 파랑과 연안류, 조류 등 흐름이 공존하고 있어서 파랑과 흐름이 공존하는 경우의 에너지 집적구조물의 효과를 검토하는 것 등이 있다. 특히 3)은 본 연구의 후속과제로 하여 연구진행중에 있다.

감사의 글

본 연구는 교육부 한국학술진흥재단의 1993년도 국비해외과견연구(공동연구) 지원에 의한 University of Hawaii의 해양공학과에서 연구한 결과의 일부이며, 지원하여 주신 동 재단에 감사드립니다. 아울러 실험을 위해 동대학의 J.K.K. Look Lab 시설을 이용하도록 허락하여 주신 동 대학 수리실험소의 소장님께 사의를 표합니다.

참고문헌

국승기, 이중우 (1992), "해저구조물 설치에 따

른 파랑에너지 집적에 관한 연구,” 한국항만학회지, 제3권 제1호.

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-三日月型没水平板に波の變形現象-”, 日本造船學會論文集, 第162號, pp. 267-275.

Arthur, R.S. (1946), “Refraction of water waves by islands and shoals with circular bottom contours,” Trans. American Geophysical Union, Vol. 27, No.2, pp.168-177.

Behrendt, L. (1983), “A finite element model for water wave diffraction including boundary absorption and bottom friction,” Inst. Hydrodyn. and Hydraul. Engng., Tech. Univ. of Denmark, No.37, 188pp.

Berkhoff, J.C.W. (1972), “Computation of combined Refraction-Diffraction,” Proc. 13th. Coastal Engng. Conf., Vancouver 1972, ASCE, Vol. 1, pp. 471-490.

Booij, N. (1983), “A note on the accuracy of the mild-slope equation,” Coastal Eng., Vol.7, pp. 191-203.

Budal, K. (1977), “Theory for absorption of wave power by a system of interacting bodies,” J. Ship Research, Vol. 21, No.4, pp.248-253.

Dingemans, M.W. (1985), “Evolution of two-dimensional horizontal wave propagation models,” Delft Hydraulic Lab., Rep. W301, Part 5, 117pp.

Fletcher, C.A.J. (1984), Computational Galerkin Methods. Springer-Verlag, New York, 309pp.

Gorden Senior, A. (1990), “Renewable energy from the ocean,” in *Ocean Resources: Vol. 1: Assessment and utilization (D.A. Arduus and M.A. Champ, eds.)*. pp.171-181.

Helstad, J. (1980), “Power production based on focused ocean swell.” Norwegian Maritime Research, Vol.4, pp.34-42.

Imai, K., Akiyama, Y. and Kudo, K. (1988), “Wave focusing due to a submerged crescent plate.” Coastal Engineering in Japan, Vol.31, No.2, pp.231-243.

Kirby, J.T. (1986), “A general wave equation for waves over rippled beds,” J. Fluid Mech., Vol. 162, pp.171-186.

Lee, J. W. (1989), Hybrid Element Analysis of Water Waves for Harbor Design. Ph.D. Diss., Department of Ocean Engineering, Univ. of Hawaii, HI.

Lockhead-California Company (1979), Proposal for Dam-Atoll Ocean Wave Energy Extraction. Lockheed Report LR 28932.

Massel, S.R. (1989), Hydrodynamics of Coastal Zones. Elsevier, Amsterdam, 336pp.

Massel, S.R. (1990), “Galerkin’ type solution for waves propagated over sloping bottom,” Rozprawy Hydrotechniczne-Zeszyt 53, pp.167-186.

Massel, S.R. (1993), “Extended Refraction-Diffraction Equation for Surface Waves,” Coastal Engng., Vol. 19, pp. 97-126.

Massel, S.R. (1994), “Measurement and modeling of waves incident on steep islands or shoals,” *Proc. Int. Sym. : Waves-Physical and Numerical Modelling 1994, Vancouver, Canada*, Vol.2, pp.982-991.

McCormick, M.E. (1979), “Ocean wave energy conversion concepts,” *Proceedings, Oceans '79*, San Diego, pp.553-558.

Mehlum, E. (1986), “TAPCHAN,” in *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization (D.V. Evans and A.F. de O. Falcao, eds.)*, pp.51-55.

Mei, C.C. (1989), The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves. World Scientific, NJ, 740pp.

Oceanit Laboratories, Inc. (1995), “Hydraulic Model Experiment for Kualoa Regional Park,” in preparation, City and County of Honolulu, Hawaii.

Shaw, R. (1982), Wave Energy : A Design Challenge. Ellis Horwood Limited, UK.

Smith, R. and Sprinks, T. (1975), “Scattering of waves by a conical island,” J. Fluid Mech., Vol.72, pp.373-384.

Stamnes, J.J. (1986), Waves in Focal Regions. IOP Publishing Ltd., 599pp.