

## 방파제 전면에 설치된 원유부이 주변해역의 파랑분포에 관한 연구

손창배\* · 김창제\*\* · 강성진\*\*\*

A Study on the Wave Height Distribution around Oil-Buoy  
in front of Detached Breakwater

*Chang-Bae Son\** · *Chang-Je Kim\*\** · *Song-Jin Gang\*\*\**

Abstract		〈목 차〉
1. 서 론	2. 파랑장 계산을 위한 이론적 검토	3. 파랑장 계산 4. 고찰 및 결론 참고문헌

### Abstract

As a part of the development program of Ulsan Port, construction of detached breakwater is planned. In Ulsan Port, several oil-buoys exist. If the detached breakwaters have been constructed, these oil-buoys will be located within 1 km from the planned breakwaters. Construction of the breakwaters gives rise to changes of wave conditions on the sea areas, especially in front of the breakwater and it affects mooring of tankers, which supply oil to the oil-buoy.

In this study, in order to calculate standing wave distribution after construction of a breakwater, numerical model is proposed based on unsteady mild slope equation. Calculation is performed by testing different wave heights, directions and reflection coefficients of breakwater. In addition, the influence to working condition of tanker moored at the oil-buoy is evaluated by using measured wave conditions and calculated results.

\* 한국해양대학교 해양과학기술연구소

\*\* 한국해양대학교 해사대학

\*\*\* 한국해양수산연수원

## 1. 서 론

1998년 확정된 해양수산부의 울산항 신항만건설 계획은 1995~2006년의 1단계 및 2006~2011년의 2단계 신항만건설공사로 계획되어 있는데<sup>1)</sup> 울산 지역에는 정유회사가 집중되어 있어 신항만 예정지에 다수의 원유부이가 설치되어 있다. 신항만건설계획의 1단계 기간에 북방파제가, 2단계 기간에 남방파제가 항내정온도 유지를 위해 이안방파제 (detached breakwater)로 건설될 예정인데 이를 방파제 건설위치는 기존의 원유부이 설치위치에서 약 1Km 이내로 계획되어 있다. 이에 따라 원유부이에 접안한 원유공급선박과 방파제 사이의 거리가 짧아지는 점, 방파제 설치에 따른 중복파랑장 발생으로 고파랑이 형성되어 원유부이에 접안하는 선박에 영향을 주는 점 등 선박의 안전성에 대한 여러가지 문제가 제기되고 있다. 이에 대한 기본적인 대응책으로 원유부이를 이설하는 방법이 있는데 항로와의 상호관계를 고려하여 이설위치를 결정해야 한다. 원유부이를 이설하지 않는 경우에는 원유부이에 계류된 선체를 방파제 반대방향으로 암류시켜서 방파제와의 거리를 이격시켜줌으로써 안전확보에 도움을 주는 방법 등도 고려되고 있다.

이 연구에서는 선박과 방파제 사이의 거리 및 원유부이와 항로 사이의 거리 등 제반 문제와는 별개로, 방파제 건설에 따라 발생하게 되는 반사파로 인한 방파제 전면의 파랑특성변화를 검토한다.

검토대상수역은 2단계 공사기간에 설치 예정인 남방파제 전면이며, 특히 남방파제 남쪽선단을 중심으로 파랑특성 변화를 검토하였다.

## 2. 파랑장 계산을 위한 이론적 검토

일반적으로 파랑장의 계산방법은 파랑을 에너지 차원에서 취급하는 에너지 평형방정식과 파향선법 및 파랑을 운동량 차원에서 취급하는 수치파동해석법과 완구배방정식으로 대별된다.<sup>2)</sup>

전자의 방법은 후자의 방법에 비해 간편하며 해저지형이 복잡한 경우나 흐름이 존재하는 경우, 유한진폭파의 경우에도 비교적 취급이 용이하지만

단일 진행파를 전재로 하고 있으므로 구조물에 의한 반사 및 회절에 의한 파랑의 중복현상을 재현하기가 어렵다. 한편 후자의 방법은 중복파가 형성되는 파랑장에도 적용이 가능하다. 특히, 후자의 방법 중 완구배방정식(mild slope equation)은 굴절, 회절, 반사, 천수변형 등을 실용상 충분한 정도로 계산할 수 있어 많은 연구자에 의해 이용되고 있으며, 이 연구에서도 완구배방정식을 기초로 한 수치모델을 구축하여 파랑장을 계산한다.

### 2.1 기초 방정식

완구배방정식은 Berkhoff(1972)에 의해 유도되었는데<sup>3)</sup> 이 연구에서는 Berkhoff의 방정식과 등가인 비정상 완구배방정식<sup>4)</sup>을 기초방정식으로 이용하였으며 식(1) 및 식(2)에 표시하였다. 좌표계는 정수면을 포함한 수평면상에  $x$ 축 및  $y$ 축을, 정수면으로부터 연직상방향으로  $z$ 축을 설정하였다.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{n} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (n Q_x) + \frac{\partial}{\partial y} (n Q_y) \right\} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

여기서  $Q_x$  및  $Q_y$ 는 각각  $x$  및  $y$ 방향의 선유량,  $\zeta$ 는 수면변동량,  $c$ 는 파속,  $n$ 은 군속도와 진행파의 파속비를 나타내며 식(3) 및 식(4)로 주어진다.

$$Q_x = \int_{-h}^0 u dz \quad \dots \dots \dots \quad (3-1)$$

$$Q_y = \int_{-h}^0 v dz \quad \dots \dots \dots \quad (3-2)$$

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

식(1)로 주어진 기초방정식은 쇄파로 인한 파랑의 감쇄를 고려하지 않은 것으로 쇄파대외의 파랑장 계산에 적용되며, 쇄파대에 접어들면 감쇄항을 도입한 식(5)를 적용한다.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f_{Dx} Q_x = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (5-1)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + f_{Dy} Q_y = 0 \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

여기서,  $f_{Dx}$ ,  $f_{Dy}$ 는 각각  $x$  및  $y$ 방향의 감쇄계수로 식(6)으로 주어진다.

$$f_D = \alpha_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h} \left( \frac{\hat{Q}}{Q_r} - 1 \right)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\hat{Q} = \sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_r = 0.25 \sqrt{gh^3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

윗식에서  $\tan \beta$ 는 쇄파점 근방의 해저기울기이고  $\alpha_D=2.5$ ,  $\hat{Q}_x$ ,  $\hat{Q}_y$ 는 각각 선유량  $Q_x$  및  $Q_y$ 의 진폭을 나타낸다.  $Q_r$ 은 쇄파후 수심변화 등으로 파가 재생되는 경우의 한계선유량 진폭을 나타내며  $\hat{Q} < Q_r$  이면 파가 재생과 영역에 들어온 것으로 보고  $f_D=0$  으로 둔다.

쇄파조건식은 구조물에 의한 반사파나 회절파가 입사파와 겹쳐져 중복파를 형성하는 경우에도 적용될 수 있는 渡辺<sup>5)</sup>의 쇄파지표를 이용하였다. 渡辺의 쇄파지표는 파봉에서의 수평유속이 파속보다 커지면 파형이 불안정해져 쇄파가 발생한다는 사실에 기초한 식이다.

방파제 전면에서 발생하는 반사파는 파고, 주기, 파향 등의 파랑조건, 수심분포, 설치 방파제의 형식에 따른 반사율 변화에 크게 영향을 받을 것으로 판단되며 이를 검토하기 위해 파랑분포예측을 위한 파랑장 계산 수치모델을 구축하였다. 수치모델의 적용성은 실험결과와 비교하여 검증하였으며, 대상지역의 파랑조건, 수심분포 및 방파제의 반사율 등 입력치를 설정하여 각 입력치에 대한 수치시뮬레이션을 통해 현지에서의 파랑특성변화를 검토하였다.

## 2.2 기초 방정식의 차분화

2. 1절의 기초 방정식을 수치모델화하기 위해 유한차분법(Finite Difference Method: FDM)을 이용하였다. 파랑장 계산은 정수면을 포함하는 평면상에  $x$ ,  $y$ 축을 설정하고 평면상의 각점에 대한 수면변동량을 계산하므로  $x$ ,  $y$ 방향으로 차분을 위한 격

자(grid)를 설정하였다.  $x$ 축을 외해에서 해안방향으로,  $y$ 축을 해안선에 평행한 연안방향으로 설정하였으며, 계산영역의 차분간격은 공간상으로  $\Delta x$  및  $\Delta y$ , 시간상으로  $\Delta t$ 로 표시하였다.

계산은 수면변동량  $\zeta$ 의 계산점 및 선유량  $Q_x$ ,  $Q_y$ 의 계산점이 서로 반격자씩 어긋나 있는 Leap Frog법을 이용하였으며  $i$ ,  $j$ 는 공간상의 점,  $m$ 은 시간스텝을 나타낸다.

식(9) 및 (10)은 각각 식(1) 및 식(2)를 차분화한 것이다.

$$Q_x^{m+1} = Q_x^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} (c_x i, j)^2 (\zeta^m i, j - \zeta^m i-1, j) \quad \dots\dots\dots (9-1)$$

$$Q_y^{m+1} = Q_y^m - \frac{\Delta t}{\Delta x} (c_y i, j)^2 (\zeta^m i, j - \zeta^m i, j-1) \quad \dots\dots\dots (9-2)$$

$$\begin{aligned} \zeta^m i, j &= \zeta^m i, j \\ &- \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{n_{i,j}} (n_{x,i+1,j} Q_x^{m+1} i+1,j - n_{x,i,j} Q_x^{m+1} i,j) \\ &- \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{1}{n_{i,j}} (n_{y,i+1,j} Q_y^{m+1} i+1,j - n_{y,i,j} Q_y^{m+1} i,j) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

## 2.3 초기조건 및 경계조건의 설정

### 2.3.1 초기조건

비정상 완구배방정식을 이용하여 평면파랑장을 계산하기 위해서는 계산영역의 모든 점에 대하여 수위변동량  $\zeta$  및 선유량  $Q_x$ ,  $Q_y$ 의 초기치를 가정하여야 한다. 이 연구에서는 계산영역의 모든점에 대해  $\zeta$ ,  $Q_x$ ,  $Q_y$ 를 0 으로 가정하는 정수상태를 초기조건으로 이용한다.

### 2.3.2 경계조건

경계조건은 계산영역의 모든 경계 및 계산영역 내부에 존재하는 구조물 주변에 설정하여야 하며, 이 연구에서는 선유량으로 경계값을 부여한 谷本·小丹<sup>6)</sup>의 수법을 이용하여 경계조건을 설정하였으며 개략은 다음과 같다.

#### 가. 임의반사율경계

파가 구조물을 향해서 입사하면 구조물 전면에서 파의 일부는 소멸되고 일부는 반사되어 다시 외

해로 향하며 입사파와 겹쳐져 중복파를 형성한다. 그러므로 구조물과 해역의 경계에서는 구조물의 재질, 구조, 사면의 기울기, 소파제의 유무 등 구조물과 파랑의 관계를 고려하여 적당한 반사율을 설정하여 경계조건을 부여하여야 한다.

임의반사율경계조건은 반사율  $K_R$ 의 경계에서 입사파와 반사파가 중복파를 형성하는 경우에 해당되며, 경계조건식은 입사파 및 반사파의 선유량의 합으로 표시한다.

#### 나. 투파가상경계

수치계산상 설정하는 가상경계로 경계의 존재가 계산영역의 해에 영향을 주지 않도록 설정되는 경우에 이용된다. 예를 들어 파랑이 해안 혹은 구조물에 대해 주직하게 입사하는 경우에 계산영역의 측방경계 혹은 반사를 무시할 수 있는 해안경계 등에 적용될 수 있으며, 앞에서 설명한 임의반사율경계조건에서  $K_R=0$ 으로 설정한 경우에 해당한다.

#### 다. 입사가상경계

일반적으로 외해측 경계에는 계산영역 내부에 존재하는 구조물이나 해안사면으로부터의 반사파가 존재하므로 단순히 입사파의 선유량만으로 경계치를 설정함은 옳지 않다. 만약 입사파만 고려하면 내부에서 발생한 반사파를 외해측 경계에서 재반사시키는 결과가 된다. 그러므로 파랑이 입사하는 외해측 경계에서는 입사파 및 반사파의 조건을 모두 고려하여야 하며, 내부에서 발생한 반사파는 그대로 외해로 투파시키면 된다.

입사가상경계에서의 선유량도 입사파 및 반사파의 선유량의 합으로 나타낼 수 있으며 앞에서 설명한 투파가상경계 및 임의반사율경계조건을 이용하여 표시할 수 있다.

#### 라. 측방가상경계

파랑이 대상영역의 외해측 경계에 대해 경사져서 입사하는 경우에는 외해측 경계뿐만 아니라 입사파측의 측방경계를 통해서도 파가 입사하므로 측방입사가상경계로 취급하여야 한다. 한편, 입사측의 측방경계와 반대측의 측방경계에서는 입사파 성분이 영역내를 굴절변형하면서 경계로 입사하는 동시에 영역내부로부터의 반사파도 존재하므로 측방투파가상경계로 취급한다. 두 경우 모두 경계에

서의 선유량은 입사파 및 반사파에 의한 선유량의 합으로 표시될 수 있으며 파랑의 굴절 및 천수변형을 고려하여 설정하여야 한다..

### 3. 파랑장 계산

#### 3.1 파랑장 계산 프로그램의 검증

프로그램을 현장에 적용하여 검증하기 위해서는 동일 시간대에 측정한 여러 지점의 파랑자료 및 수심, 경계조건 등이 필요하지만 이런 조건을 만족하는 현지관측자료는 흔치 않다. 이 연구에서는 평면수조 실험결과와 이 연구에서 제안된 시뮬레이션 프로그램을 비교함으로써 프로그램의 적용성을 검토하였다.

실험자료로서는 1998년 일본 烏取大學에서 실시된 평면수조 실험결과를 이용하였다.

##### 3.1.1. 실험의 개요 및 방법

Fig. 3-1은 실험수조의 형상 및 좌표계를 나타낸다. 실험은 길이 12m 폭 3m, 깊이 0.6m의 평면수조를 이용하였다. 수조의 한쪽 끝에는 조파기가 설치되어 파랑을 발생시키며, 다른 한쪽에는 기울기 1/10의 사면을 만들고 일정수심부의 수심이 30cm가 되도록 물을 공급하였다. 또 사면상의 수심이 15cm인 지점에 그림과 같이 이안제를 설치하고 이안제 전면의 반사율이 0.5정도가 되도록 소파제를 설치하였다.

실험조건은  $H_0=6.9\text{cm}$ ,  $T=1.0\text{s}$ ,  $\alpha_0=0^\circ$ 였다.

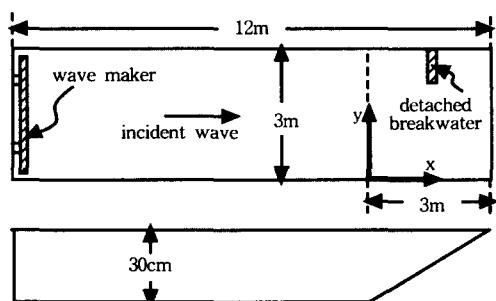


Fig. 3-1. Sketch of the wave tank and coordinate system

### 3.1.2. 실험결과 및 계산결과의 비교

수치계산은 그림에 표시된  $x$ ,  $y$ 축을 따라 각각 3m 범위로 설정하였으며, 격자간격  $\Delta x = \Delta y = 2.5\text{cm}$  로, 시간간격  $\Delta t = 0.01\text{s}$ 로 설정하였다. Fig. 3-2 는 이상의 조건으로 수면변동이 정상상태가 될 때까지 계산한 파고분포이다. 그림으로부터 알 수 있듯 이 이안제 전면에 반사파로 인한 중복파랑장이 잘 재현되어 있으며, 이안제 배후의 회절파도 잘 재현되어 있다.

Fig. 3-3은 실험중에 계측한 파고와 수치계산에 의

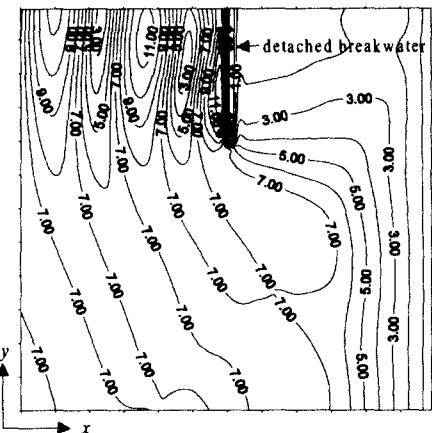


Fig. 3-2. Wave height distribution around the detached breakwater

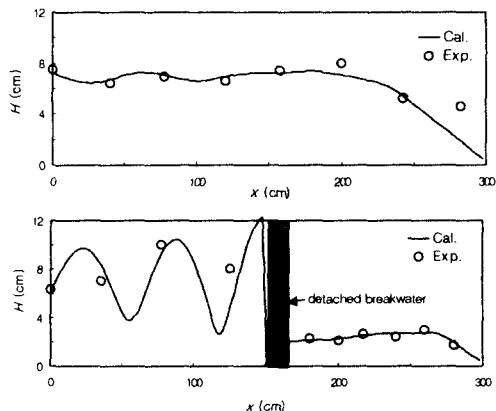


Fig. 3-3. Comparison of wave height distribution between the experiment and the calculation

한 결과를 비교한 것이다. Fig. 3-3의 상단 그래프는  $y=60\text{cm}$  지점에서  $x$ 방향으로 실측 및 계산한 결과로 파랑이 이안제가 없는 수역을 통과하는 경우이며, 하단 그래프는  $y=240\text{cm}$  지점의 결과로 이 안제 전면의 중복파고와 후면의 회절파고를 나타낸 것이다.

현지 관측자료의 부재로 현지 데이터에 의한 검증은 이루어지지 않았으나 평면수조를 이용한 실험결과와는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

### 3.2 울산항에 대한 적용

#### 3.2.1 계산영역의 설정

Fig. 3-4는 울산신항만 개발계획 평면도<sup>1)</sup>를 나타내며 검토대상지역은 Fig. 3-4에 표시한 울산항 만개발계획 2단계 공사기간(2006~2011)에 건설 예정인 남방파제 전면해역이다. 여기서는 특히 남방파제 남쪽선단에서 동쪽으로 약 500m 떨어져 있는 S-OiL부이 설치해역 및 원유공급선박 접안해역의 파랑분포특성을 검토한다.

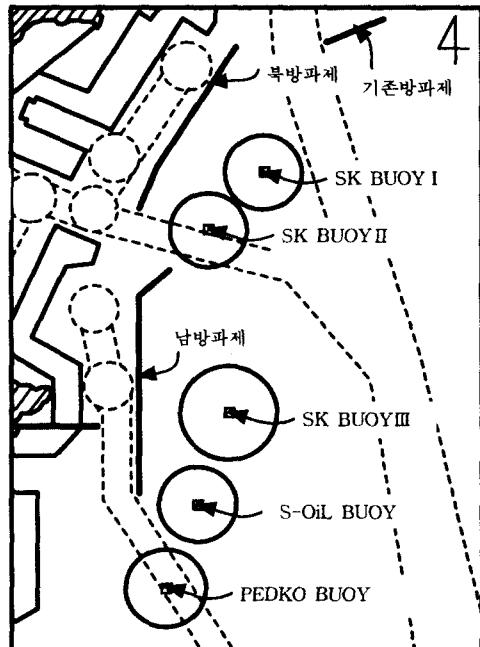


Fig. 3-4. Development plan of Ulsan Port

남방파제는 남북방향으로 길이가 약 2.1Km에 달하며 북쪽선단에서 북동쪽으로 400m 길이의 연장방파제가 연결되어 있다. 남방파제의 설치위치는 남쪽선단이  $35^{\circ}25' 12''$  N,  $129^{\circ}22' 51''$  E에 위치하고 북쪽선단의 절점(연장방파제 연결지점)이  $35^{\circ}26' 20''$  N,  $129^{\circ}22' 52''$  E에 위치하며, 북동방향의 연장방파제 선단이  $35^{\circ}26' 30''$  N,  $129^{\circ}23' 04''$  E에 위치하고 있다.

Fig. 3-4로부터 알 수 있듯이 방파제로부터의 반사파가 검토대상해역에 영향을 미칠 수 있는 조건은 입사파가 동쪽과 북쪽 사이에서 입사하는 경우로 볼 수 있다. 이 연구에서는 방파제에 수직한 방향(E)을  $0^{\circ}$ 로 정하고 반시계방향을 양의 방향으로 설정하였다. 즉, 북쪽에서 입사하는 경우의 입사각은  $90^{\circ}$ 이다. 계산의 입력자료인 심해파 파향각은 반사파의 영향이 클 것으로 예상되는  $0^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$ 로 설정하였다.

Fig. 3-5는 남방파제 전면을 표시한 것이다. 계산영역은 PC에서 계산 가능한 용량을 고려하여 점선으로 표시한 부분으로 선택하였으며, 외해에서 방파제에 수직한 방향으로(x방향) 1000m, 연안방향으로(y방향) 2400m에 해당한다. 공간상의 격자간격은 수면파형을 충분한 정도로 표시할 수 있는 조건을 고려하여  $\Delta x = \Delta y = 3.33m$ 로 설정하였다.

한편, 시간적 계산간격은 수치계산의 안정성을 고려하여 입사파의 한주기를 50등분하여 한 파당 50회의 반복계산을 수행하도록 하였다.

계산대상지역의 수심분포는 비교적 깊은 23.5~29.0m 범위이며, 일반적인 파랑조건하에서는 쇄파가 발생하지 않는 조건이다.

### 3.2.2 파랑자료의 설정

<Table 3-1>은 1995년 4월에서 8월까지 5개월 간 SK 원유부이 매설위치(Fig. 3-4 참고)에서 실측한 평균유의파고 및 주기의 계급별 분포이다.<sup>7)</sup>

울산항은 수심이 상당히 깊은 항만으로 심해파의 파랑이 원유부이 설치 해역에 입사할 경우 천수변형을 크게 겪지 않으며, 파랑조건이 크게 변하지 않을 것으로 판단되어 <Table 3-1>의 자료를 참고로 심해파 파고 및 주기 ( $H_0(m)$ ,  $T(s)$ )를 (1.0, 7.3), (1.5, 7.1), (2.0, 7.0)으로 설정하여 계산에 이용하였다.

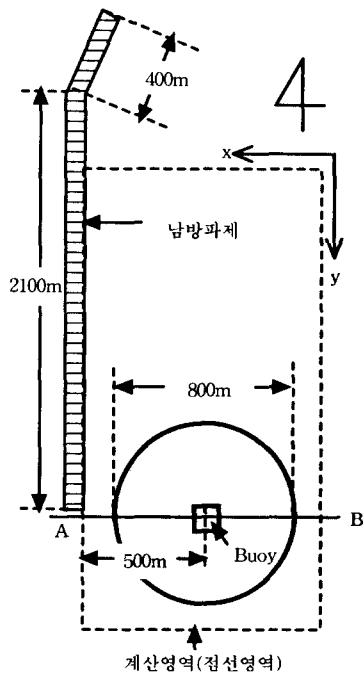


Fig. 3-5. Study area

한편 해운항만청에서 제공한 울산항 외해( $35^{\circ}2' N, 129^{\circ}54' E$ )의 10년간(1986~1995)의 월별평균파고(<Table 3-2>) 및 평균주기분포(<Table 3-3>)에 의하면 평균유의파고가 1.10m, 평균주기가 4~6s 범위임을 알 수 있다.<sup>8)</sup> 참고로 <Table 3-2> 및 <Table 3-3>의 자료는 울산항에서 다소 떨어진 외해의 자료로써 <Table 3-1>의 자료와는 다소 차이가 있으므로 평균적인 파랑조건하에서 방파제 전면의 파고분포를 알아보기 위해 ( $H_0(m)$ ,  $T(s)$ )=(1.10, 5.0)도 계산자료로 이용하였다.

### 3.2.3 반사율 설정

파랑조건과 함께 반사파의 크기를 결정하는 중요한 요인은 방파제에서 파가 반사되는 정도를 나

<Table 3-1> Significant wave height and period around the buoy

유의파고 (m)	0.2	0.5	0.8	1.0	2.0
유의파 주기(sec)	8.3	7.8	7.5	7.3	7.0

〈Table 3-2〉 Monthly mean significant wave heights (35°24' N, 129°54' E)

$H(m)$	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Avg.
Avg.( $H$ )	1.14	1.21	1.16	0.98	0.91	1.06	1.21	1.14	1.22	1.07	1.03	1.07	1.10

〈Table 3-3〉 Wave and period distribution (35°24' N, 129°54' E)

$T(s)$	~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~
%	31.1	17.9	15.9	13.3	10.7	8.7	1.5	0.7	0.2	0.0

타내는 반사율이다. 일반적으로 반사율은 방파제의 형식에 크게 좌우된다. 방파제의 투과성, 사면각도(경사제), 방파제 전면에 설치하는 소파제의 유무, 소파제의 종류 등이 반사율에 영향을 준다. 〈Table 3-4〉는 주로 이용되는 방파제 형식과 그에 따른 반사율을 나타낸다.<sup>9)</sup> 이 연구에서는 소파제를 설치하여 파랑에너지를 많이 감쇄시키는 경우를 가상하여  $K_R=0.4$ 인 경우와 비교적 반사율이 큰  $K_R=0.7$ 인 경우를 가상하여 계산에 이용하였다.

### 3.3 파랑장 계산결과

〈Table 3-4〉 Reflection coefficient of the breakwater

구조형식	반사율 (KR)
직립제 (천단이 정수면보다 높음)	0.7~1.0
직립제 (천단이 정수면보다 낮음)	0.5~0.7
사석사면(2~3할 경사면)	0.3~0.6
이형소파블록사면	0.3~0.5
직립소파구조물	0.3~0.8
천연해안	0.05~0.2

〈Table 3-5〉 Input variables of the numerical tests

변수값	설정치
반사율 (KR)	0.4 0.7
심해파 파고( $H_0$ ) / 주기( $T$ )	1.0m/7.3s 1.5m/7.1s 2.0m/7.0s 1.1m/5.0s
심해파 파향 ( $\alpha_0$ )	0° 30° 45° 60°
방파제 길이 (남북방향)	기존설계 (2.1Km) 남쪽선단을 400m 축소 무한방파제

파랑장의 계산은 앞절에서 기술한 파랑자료, 반사율 등을 입력치로 하고 2절에서 기술한 방법으로 파랑장 계산 프로그램을 구축하여 계산에 이용하였다.

계산에 사용된 입력변수를 요약하면 〈Table 3-5〉와 같으며, 앞절에서 설명한 변수 이외에 방파제 길이변화에 따른 영향을 알아보기 위해 남방파제의 남쪽 선단을 400m 축소하는 경우 및 방파제의 길이가 무한히 긴 경우를 입력변수로 도입하여 각 경우에 대한 계산을 수행하였다.

Fig. 3-6은 방파제 전면 파랑분포 계산결과로 지면의 관계상 일부를 나타낸 것이다. 그림중 상단 그래프는 Fig. 3-5에 표시된 부이를 중심으로 한 1000m×1000m의 수역을 나타낸 것이고 그림의 하단 그래프는 상단 그래프에 표시한 직사각형 해역을 확대한 것으로 부이를 중심으로 200m×200m의 영역을 나타내었다. Fig. 3-6의 곡선은 수면변동의 크기가 같은 지점을 연결한 등고선으로 두꺼울수록 수면변동이 큰 부분이고 얇을수록 작은 부분을 나타낸다. 〈Table 3-6〉은 전체 계산결과를 정리한 것으로 Fig. 3-5에 표시된 부이를 중심으로 한 1000m×1000m의 수역에서 발생하는 파고분포 및 반사파분포를 나타낸 것이다. KR은 반사율,  $H_0$ 는 심해파 파고, T는 파의 주기,  $\alpha_0$ 는 심해파 파향, HI는 임사파고, HR은 반사파고, HI+HR은 임사파와 반사파가 함께 존재하는 중복파랑장의 파고분포를 나타내며  $(HI+HR)_{max}/H_0$ 는 발생하는 최대파고를 심해파 파고로 나눈 값이다.

계산결과로부터 임사각이 0~60°에 해당하는 경우, 부이를 중심으로 한 1000m×1000m의 수역은 반사파의 영향권에 있음을 알 수 있다. 또  $K_R=0.4$

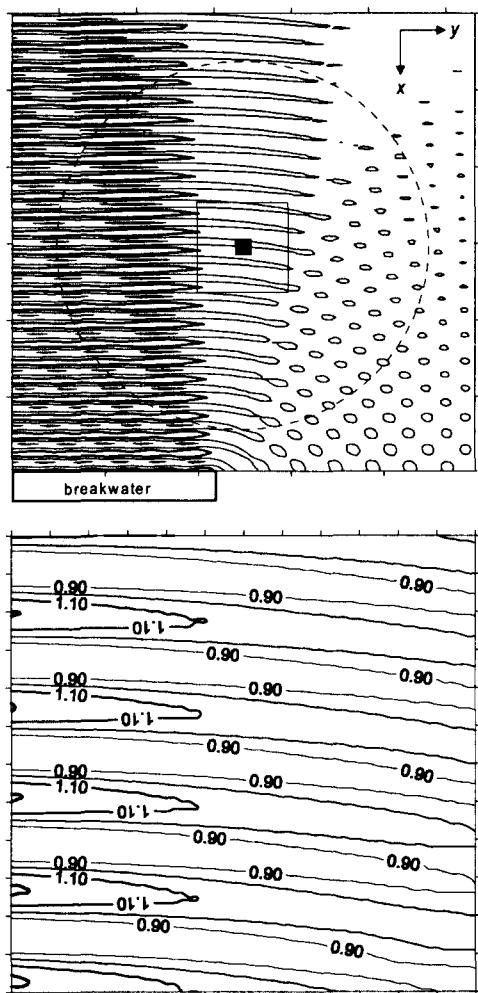


Fig. 3-6. Wave height( $H_I+H_R$ ) distribution ( $H_0=1.0m$ ,  $T=7.3s$ ,  $K_R=0.4$ ,  $\alpha_0=0^\circ$ )

인 조건에서  $H_0$ 가 1m, 1.5m, 2.0m일 때,  $H_R$ 의 최대치는 0.4m, 0.6m, 0.8m 정도이며,  $K_R=0.7$  인 조건에서  $H_0$ 가 1m, 1.5m, 2.0m 일 때,  $H_R$ 의 최대치는 0.7m, 1.1m, 1.4m 정도의 분포를 보인다.

$K_R=0.4$  인 경우, 방파제 전면에서 발생하는 최대파고는 심해파고  $H_0$ 의 1.3~1.4배 정도이며,  $K_R=0.7$  인 경우는 1.6~1.7배에 이르는 것을 알 수 있다.

한편, 부이가 설치된 지점만의 파고분포를 살펴 보면 파의 입사각 및 방파제 길이의 영향을 받음을

〈Table 3-6〉 Wave height distribution in front of breakwater

$K_R$	$H_0$	$\alpha_0$	$H_I+H_R$	$H_R$	$(H_I+H_R)_{max}/H_0$	비고
0.4	1.0m	0°	0.6~1.3	0.1~0.4	1.3	
		30°	0.6~1.3	0.1~0.4	1.3	
		45°	0.6~1.3	0.1~0.4	1.3	
		60°	0.6~1.3	0.1~0.4	1.3	
	1.5m	0°	0.9~2.0	0.1~0.6	1.3	
		30°	0.9~2.0	0.2~0.6	1.3	
		45°	0.9~2.0	0.2~0.6	1.3	
		60°	0.8~2.0	0.2~0.6	1.3	
	2.0m	0°	1.1~2.8	0.2~0.8	1.4	
		30°	1.1~2.8	0.2~0.8	1.4	
		45°	1.1~2.7	0.2~0.8	1.35	
		60°	1.1~2.7	0.2~0.8	1.35	
0.7	1.1m	0°	0.7~1.4	0.1~0.4	1.35	
		30°	0.7~1.4	0.1~0.4	1.35	
		45°	0.7~1.4	0.1~0.4	1.35	
		60°	0.6~1.4	0.1~0.4	1.35	
	1.5m	0°	0.3~1.7	0.2~0.7	1.7	
		30°	0.3~1.7	0.2~0.7	1.7	
		45°	0.3~1.7	0.2~0.7	1.7	
		60°	0.3~1.6	0.2~0.7	1.6	
	2.0m	0°	0.5~2.5	0.2~1.1	1.7	
		30°	0.4~2.6	0.3~1.1	1.7	
		45°	0.4~2.5	0.4~1.1	1.7	
		60°	0.4~2.5	0.4~1.1	1.7	
0.4	1.0m	0°	0.5~3.4	0.3~1.4	1.7	
		30°	0.5~3.4	0.4~1.4	1.7	
		45°	0.5~3.4	0.4~1.4	1.7	
		60°	0.5~3.3	0.5~1.4	1.6	
	1.5m	0°	0.6~1.3	0.2~0.4	1.3	방파제 길이를 짧게 한 경우
		30°	0.6~1.3	0.1~0.4	1.3	
		45°	0.6~1.3	0.1~0.4	1.3	
		60°	0.5~1.3	0.1~0.4	1.3	
	2.0m	0°	1.0~1.9	0.2~0.6	1.3	
		30°	0.8~2.1	0.2~0.6	1.4	
		45°	0.9~2.0	0.2~0.6	1.3	
		60°	0.8~2.0	0.2~0.6	1.3	
0.7	1.0m	0°	0.3~1.7	0.1~0.7	1.7	무한 방파제
		30°	0.3~1.7	0.2~0.7	1.7	
		45°	0.3~1.7	0.2~0.7	1.7	
		60°	0.2~1.6	0.2~0.7	1.6	
	1.5m	0°	0.9~2.0	0.2~0.6	1.3	
		30°	0.9~2.1	0.2~0.6	1.3	
		45°	0.9~2.0	0.2~0.6	1.3	
		60°	0.8~2.0	0.2~0.6	1.3	

알 수 있는데 그 결과를 Fig. 3-7에 나타내었다. Fig. 3-7은 Fig. 3-5에 표시한 부이를 지나고 방파제에 수직한 이안방향(x방향)의 직선 AB 상의 파고분포를 나타낸 것이다. 위로부터 세 개의 그래프는 각각 방파제 길이를 400m 짧게 하여 계산한 경우, 기존설계대로 계산한 경우, 방파제 길이를 무한히 길게 연장한 경우의 계산결과이며, 각각의 경우에 대해 파랑의 입사각을  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 로 하여 계산하였다. 각 그래프의 횡축은 방파제로부터의 수직거리를 나타내며 부이의 위치는 500m지점에 해당한다. Fig. 3-7의 상단 그래프로부터 알 수 있듯이 방파제 길이를 짧게 한 경우, 입사각이  $0^\circ$  및  $30^\circ$ 일 때는 반사파가 미치지 않아 중복파가 형성되지 않으며, 거의 입사파의 파고와 동일한 1.5m 내외의 파고분포를 보이며, 입사각이  $45^\circ$  이상이 되면

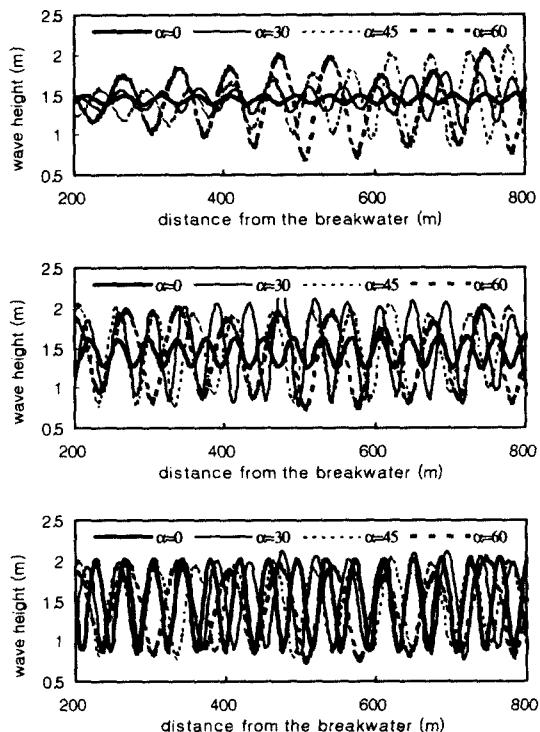


Fig. 3-7. Effect of the breakwater length and incident wave angle to wave height ( $H_I+H_R$ ) distribution( $H_0=1.5\text{m}$ ,  $T=7.1\text{s}$ ,  $K_R=0.4$ )

서 반사파의 영향이 나타난다. 중단의 그래프는 기존설계대로인 경우의 계산결과로 입사각이  $0^\circ$ 인 경우에 한해서 반사파의 영향을 거의 받지 않음을 나타내고 있다. 또한 하단의 그래프로부터 방파제 길이가 무한히 긴 경우는 입사각에 상관없이 거의 동일한 크기의 반사파가 발생함을 보여준다.

#### 4. 고찰 및 결론

##### 4.1 파향 및 파고분포에 따른 반사파의 영향

앞절에서 언급했듯이 방파제 설치로 인해 원유부이 주변해역의 파랑장이 변하는 것은 결국 방파제로 인한 반사파가 중복파를 형성하기 때문이다. 그러므로 실제 원유부이에 선박이 접안하여 작업이 가능한지 여부는 파향 및 파고분포와 밀접하게 관계된다. 그러므로 정확한 분석을 위해서는 울산항 원유부이 부근에서 실측한 장기적인 파고 및 파향 자료가 필요하지만 자료가 부족한 실정이다. 이 연구에서는 울산항 관련 기준보고서의 자료를 참고로 반사파 분포를 예측하였다.

울산항의 파랑기록자료로서 해운항만청의 5년간 자료(1975~1976, 1978~1980, <Table 4-1><sup>10)</sup> 및 울산항 외해에서 압력식 파고계를 이용하여 측정한 해양수산부 보고서 자료(1978~1980, <Table 4-2>, <Table 4-3>)를 이용하였다.<sup>11)</sup> 각각의 자료는 <Table 4-1>~<Table 4-3>에 수록하였다.

<Table 4-1>에 표시된 해운항만청 자료에 따르면 반사파의 영향을 받을 것으로 예상되는 파향은 NE 및 E 방향이며 전체 파랑의 약 20%이다. 이 해역의 평균유의파고를 <Table 4-2>에 수록된 0.51m로 가정하고, 3장의 결과를 참고로 하면  $K_R=0.4$ 인 경우, 부이설치해역에서 발생하는 유의

Table 4-1. Directional frequency of wave heights

관측기간	파향 (%)			
	NE	E	SE	기타
1975~1976	8.0	5.3	4.6	82.1
1978~1980	8.3	16.3	17.4	57.9
평균	8.1	10.9	11.0	70.0

Table 4-2 Monthly mean significant wave height

월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
유의파고(m)	0.62	0.55	0.56	0.55	0.42	0.40	0.47	0.48	0.57	0.60	0.41	0.49	0.51

Table 4-3. Wave height distribution(%)

파고 (m)	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	계
0.0~0.4	48.3	46.3	46.1	53.3	74.3	70.1	59.7	72.8	49.3	46.0	68.4	59.7	58.0
0.5~0.9	39.7	48.3	46.7	38.4	20.9	21.6	37.1	17.6	39.0	46.8	31.6	37.1	35.2
1.0~1.4	7.2	3.6	5.6	5.0	2.4	5.0	3.2	4.8	9.2	4.8	0.0	2.4	4.5
1.5~1.9	0.8	1.8	1.6	2.5	2.4	2.5	0.0	2.4	2.5	1.6	0.0	0.0	1.5
2.0~2.4	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
2.5~2.9	0.8	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3
3.0~3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1

파고는  $0.51 \times (1.3 \sim 1.4)m$  정도이며,  $K_R=0.7$  인 경우에도  $0.51 \times (1.5 \sim 1.7)m$  정도의 분포로써, 선박접안에 영향을 미치는 파고를 1.5m로 가정한 경우,<sup>7)</sup> 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

한편, <Table 4-3>에 표시된 파고계급분포를 참고하면 1.5m 이상의 반사파를 발생시킬 수 있는 1m 이상의 파고는 전체의 6.8% 정도이다. 이 결과는 파향을 고려하지 않은 것이므로 실제로 1.5m 이상의 반사파를 발생시킬 확률은 6.8% 이하로 생각할 수 있다.

#### 4.2 결 론

이 연구에서는 울산항 신항만건설계획 2단계 기간에 건설 예정인 남방파제가 주변 해역의 파랑분포특성에 미치는 영향을 방파제 전면 원유부이 주변해역을 대상으로 검토하였다.

방파제 전면에서의 파랑장 계산은 반사파에 의한 중복파 및 천수변형, 굴절변형을 포함하는 비정상 완구배방정식에 기초한 수치모델을 프로그램화하여 계산하였다.

결과를 요약하면 다음과 같다.

- 검토대상해역에 중복파를 발생시키는 경우는 방파제에 수직한 동쪽에서 북쪽에 걸친 방향

으로부터 파랑이 입사하는 경우이며, 파랑분포의 공간적 차이는 있지만 그 절대값은 파향각에 관계없이 거의 일정한 크기를 보인다.

- 반사율  $K_R = 0.4$ 인 경우, 방파제 전면 부이설 치해역에서 발생하는 최대파고는 심해파고  $H_0$ 의 1.3~1.4배 정도이며,  $K_R = 0.7$ 인 경우는 1.5~1.7배의 분포를 보인다.
- 방파제의 반사율  $K_R$ 은 반사파의 크기에 비례 하므로 안정된 접안을 위해서는 방파제 사면 기울기를 완만하게 설계하거나 소파제를 적절히 설치하여 방파제의 반사율을 작게 하여야 한다.

#### 참 고 문 헌

- 해양수산부, 울산신항만개발 기본계획 용역보고서, 1996
- 堀川清司 編, 海岸環境工學, 東京大學出版部, 1985
- Berkhoff, J. C. W., Computation of combined refraction-diffraction, Proc. Coastal Engineering, ASCE, pp. 471-490, 1972
- 西村仁嗣・丸山康樹・平口博丸, 直接數値積分法による波の計算, 第30回 海岸工學講演會論文

- 集, pp. 123-127, 1983
- 5) 渡辺 晃・堀川清司, 重合した波浪場における碎波について, 第30回 海岸工學講演會論文集, pp. 5-9, 1983
- 6) 谷本勝利・小丹浩治, 數値波動解釋法による港内波高分布の計算, 第22回 海岸工學講演會論文集, pp. 249-253, 1975
- 7) SK주식회사, 중앙방파제 건설에 따른 No.2, 3, Buoy 운용안정성 검토, pp. 20, 1999
- 8) 해운항만청, 장기파랑산출자료집, pp. 171, 1996
- 9) 服部昌太郎, 海岸工學, コロナ社, 1987
- 10) SK주식회사, 울산항 항로표식시설 설치조사연구, pp. 2-8, 1998
- 11) 해양수산부, 울산신항만개발 기본계획용역 보고서, 제3권, pp. 2-31, 1996