

해파의 입사각, 주기 및 해저경사가 굴절과 회절에 미치는 영향

인하대학교 토목과 교수 강관원
인하대학교 토목과 대학원 함경재

1. 서론

해안공학적인 관점에서 볼 때 해파의 거동은 주로 해저지형과 항만시설물등에 의해 영향을 받는 천해수역을 대상으로 하여왔으며, 실제 대부분의 항만시설물은 수심이 작은 천해수역에 존재하고있다. 어떤 수역에서는 파고가 감소하면서 파향이 변하는 반면, 어떤 수역에서는 해파에 영향을 주는 여러 인자들의 복잡한 상호작용에 의하여 입사파의 파고가 커지는 경우가 발생하게 된다. 따라서 주어진 수역에서 발생될 수 있는 해파의 영향을 보다 정밀하게 추정하는 것은 중요한 문제이다.

본 연구에서는 해파의 회절과 굴절이 파의 변형에 미치는 영향을 동시에 고려한 파고 추정법을 이용하여 주기, 입사각, 해저지형등이 파의 변형에 미치는 영향에 관하여 다루었다. 해파의 굴절은 해저지형의 변화 즉, 수심의 변화에 의한 파의 변형으로써, 빛의 굴절현상을 해파에 적용한 Johnson에 의해 소개된 이후 계속 연구 발표되어 왔다. 또한 해파의 회절은 파에너지가 파봉선을 따라 수평방향으로 전달되는 현상으로서, 항내 혹은 만의 배후(shelter)에서의 파고분포는 주로 천연 혹은 인공장해물에 의한 회절 특성에 의해 결정된다는 점에서 공학적으로 중요한 의미를 갖게된다. 이러한 해파의 회절이론은 크게 두 가지로 구분할 수 있으며 그 중 하나가 빛의 회절현상에 관한 Sommerfeld의 해를 적용한 한개의 반무한 방파제에서의 해파의 회절로서, Putnam과 Arthur가 실험적으로 검증한 이후 Penney와 Price에 의해 구체화 되었으며 지금까지 계속 연구되고 있다. 또 다른 회절이론은 무한평면의 작은 틈 slit에서 음파 혹은 전자기파(electro-magnetic wave)의 회절에 관한 Morse와 Rubenstein의 해를 이용한 것으로, 이 경우 slit의 폭이 진행파장의 3배보다 작아야 한다는 제한이 있으며, 이 이론은 Carr와 Stelzriede에 의해 해파에 적용된 이후, Johnson이 방파제 개구부에서의 일반화된 회절도의 계산에 이용하였다. 그러나 이 이론들은 방파제 배후의 수심이 일정하여야 한다는 제한이 있으며, 이 기본 가정을 만족시키지 못하는 대부분의 실제 수역에서는 굴절과 회절을 동시에 고려하여야 한다.

따라서 대상수역에서, 수심의 불규칙으로 인하여 파향과 파고가 변하는 해파의 굴절현상과 해안 구조물로 인한 그 구조물과 파동과의 상호작용에 의하여 해파의 회절이 발생한다면, 파고의 추정은 해파의 회절과 굴절을 동시에 고려하여야하나 이는 수심이 불규칙하게 변하는 영역(domain)에서 Laplace 방정식의 해를 구하여야하는 난점이 있다. 이러한 문제

는 유한요소법을 이용한 Berkhoff의 발표이후, 근사식을 이용한 Liu 등의 접근등 지금까지 계속 연구되고 있다. 본 연구에서는 해안선과 방파제 사이의 굴절도에서 해안쪽으로 3개 혹은 4개의 연속되는 파봉선을 취하여 회절도를 구한다음 이 회절도에서 해안선쪽으로의 마지막 파봉선에 의해 주어지는 파봉과 파향을 가지고 방파제 배후에서의 새로운 회절도를 작성함으로써 굴절-회절도를 얻는 방법을 이용하였으며, 등심선이 해안선에 평행하면서 해저지형의 기울기가 일정한 각 구역에서 해저경사와 해파의 주기 및 입사각이 회절과 굴절 등 파의 변형에 미치는 영향에 대하여 다루었다.

2. 기본이론

본 연구에서는 지형특성인 해저경사 및 주기, 입사각등과 같은 해파의 특성에 대한 진행 파의 변형으로, 해파가 해안선으로 진행하면서 일어나는 파의 크기 및 형태의 변화를 굴절, 천수, 회절 세가지 현상으로서 해석하였다.

2.1 해파의 굴절 및 천수

해파가 해안선에 접근하면서 수심에 따라 파속 및 파장이 변하는데, 본 연구에서는 파의 진행방향 및 파고에 영향을 미치는 굴절과 천수현상을 다음과 같은 가정하에 다루었다.

- 1) 파향선 혹은 파봉선 사이의 파에너지는 새로 생성되거나 소멸되지 않는다.
- 2) 파의 진행방향은 파봉선에 직각이다.
- 3) 파속은 파의 주기가 주어진 경우 수심만의 함수이다.
- 4) 해저지형의 경사는 일정하다.
- 5) 조류 및 바람 그리고 해안에서의 반사파의 영향은 무시한다.

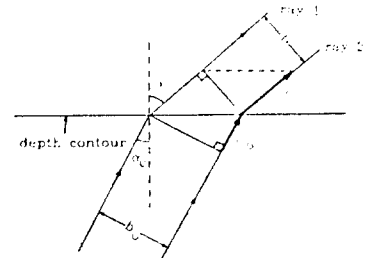


Fig. 1 Definition sketch for wave refraction.

미소진폭파 이론으로 부터 h 를 수심, L 을 파장, g 를 중력가속도라 하면 파속 c 는 다음과 같다.

$$c^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (1)$$

또한 ρ 를 해수의 밀도, H 를 파고라 할때, 파봉선 단위폭 한 파장이 갖는 위치에너지와 운동에너지의 합 E 는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (2)$$

그림 1에서와 같이 b 를 선택된 임의의 두 파향선 사이의 거리라 하면 두 파향선 사이로 전달되는 에너지량 P 는 다음과 같다.

$$D = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) c_b \bar{E} \quad (3)$$

여기서 \bar{E} 는 단위표면적(단위폭 \times 파장)당 평균 파에너지로 다음과 같다.

$$\bar{E} = \bar{E}_0 = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (4)$$

따라서 심해에서 두 파향선 사이로 전달되는 에너지량은, 심해에서는 $kh/L > 1/2$ 이므로 $(2kh)/\sinh(2kh) \hat{=} 0$ 인 조건을 이용하여, 식(3)으로부터 다음과 같이 된다.

$$D_0 = \frac{1}{2} c_b b_0 \bar{E}_0 \quad (5)$$

여기서 첨자 0는 심해의 값을 나타낸다.

그런데 앞에서 가정한 바와 같이 진행파의 에너지손실을 무시한다면 식(3)과 식(5)의 에너지 전달량은 서로 같아야 하므로, 이 두 식을 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{E}{E_0} = \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \frac{c_b b_0}{c_b} \quad (6)$$

따라서 파가 진행함에 따른 파고변화를 알아보기 위하여 식(6)과 식(4)를 이용하여 파고에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{H}{H_0} = \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \frac{c_b}{c} \right]^{1/2} \left[\frac{b_0}{b} \right]^{1/2} = K_S \cdot K_R \quad (7)$$

여기서 K_S 는 천수계수, K_R 는 굴절계수이며 Snell의 법칙을 그림 1에서와 같이 파봉선에 적용하여 정리하면 다음과 같이 파 진행각의 함수로 나타낼 수 있다.

$$K_S = \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha} \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$K_R = \left[\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right]^{1/2} \quad (9)$$

여기서 α_0 는 심해에서의 파의 입사각, α 는 진행파의 방향을 나타낸다.

2.2 해파의 회절

방파제나 섬등과 같은 장애물이 파의 진행 경로중에 존재하는 경우 파봉선은 원형을 이루면서 그 장애물의 배후로 진행한다. 이러한 회절현상은 다음과 같은 조건을 만족하는 비교적 제한된 지형조건에 대하여 해석적인 해를 얻을 수 있다.

- 1) 수심은 전 수역에서 일정하다.
- 2) 해파는 미소진폭파이다.
- 3) 파동은 비회전성이며, 따라서 포텐샬이론이 성립한다.
- 4) 해수는 비점성, 비압축성인 이상유체이다.

해파가 방파제를 향하여 비스듬하게 입사하는 경우 전체수역은 그림 2와 같이 진행파가

방파제의 영향을 받지않는 수역, 입사파의 직접적인 영향을 받지않는 방파제 배후수역, 그리고 입사파가 방파제에 의해 반사되는 수역의 세 부분으로 구분할 수 있다. 이들 수역 중 방파제 배후수역에서 회절이 발생하며, 이때 방파제선단 ($x=0, y=0$)은 일종의 에너지 생성원으로 생각할 수 있으며 해파의 파봉선은 이곳을 중심으로 원형을 이루며 진행한다. z 축을 수심의 역방향으로 취할 때 속도포텐셜이 존재한다면 다음과 같은

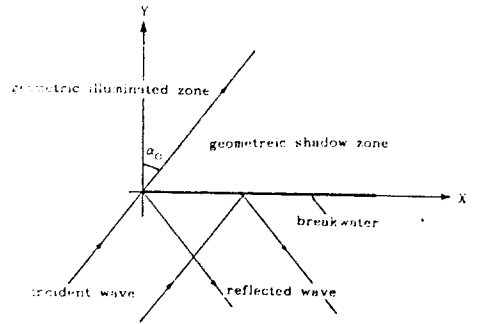


Fig. 2 Definition sketch for wave diffraction.

Laplace방정식이 성립하게 된다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (10)$$

식(10)의 해를 구하기 위하여, 파속은 시간에 대하여 주기성을 가지며 수심 방향에 대하여 hyperbolic cosine 분포형을 갖는다는 것을 이용하여 대상수역 바닥의 경계조건(bottom boundary condition)을 고려하면, ϕ 는 미지의 함수 $F(x, y)$ 를 포함하는 다음과 같은 식으로 가정할 수 있다.

$$\phi(x, y, z, t) = A \cdot F(x, y) \cdot \cosh k(h+z) \cdot e^{ikct} \quad (11)$$

그리고 식(11)을 식(10)에 대입하면 다음과 같은 Helmholtz 식으로 된다.

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + k^2 F = 0 \quad (12)$$

여기서 F 는 x 와 y 의 복소함수이며, A 는 파고 H 에 비례하는 상수이고, 수면 ζ 는 자유수면의 경계조건(dynamic free surface boundary condition)에 의해 다음과 같이 된다.

$$\zeta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\frac{iAkC}{g} \cdot F(x, y) \cdot \cosh kh \cdot e^{ikct} \quad (13)$$

이상의 조건을 이용하여 파고가 방파제에 직각으로 입사하는 경우의 회절문제를 다룬 Sommerfeld의 해는 다음과 같다.

$$F(x, y) = \frac{1+i}{2} \left[e^{iky} \int_{-\infty}^{\mathcal{F}} e^{-\pi i u^2/4} du + e^{-iky} \int_{-\infty}^{-\mathcal{F}'} e^{-\pi i u^2/4} du \right] \quad (14)$$

이때 \mathcal{F} 와 \mathcal{F}' 는 식(15)와 같으며 $r^2 = x^2 + y^2$ 이다.

$$\mathcal{F}^2 = \frac{4}{\pi} (r-y), \quad \mathcal{F}'^2 = \frac{4}{\pi} (r+y) \quad (15)$$

그리고 식(14)를 이용하여 해파가 방파제에 비스듬하게 입사하는 경우의 F 값을 극좌표 값으로 나타내면 다음과 같다.

$$F(r, \theta) = \frac{1+i}{2} \left[e^{-ikr \cos(\theta-\theta_0)} \int_{-\infty}^{\mathcal{F}} e^{-\pi i u^2/4} du + e^{-ikr \cos(\theta+\theta_0)} \int_{-\infty}^{-\mathcal{F}'} e^{-\pi i u^2/4} du \right] \quad (16)$$

여기서의 \mathcal{F} 와 \mathcal{F}' 는 다음과 같다.

$$\mathcal{F} = 2\sqrt{\frac{kr}{\pi}} \sin \frac{1}{2}(\theta-\theta_0), \quad \mathcal{F}' = -2\sqrt{\frac{kr}{\pi}} \sin \frac{1}{2}(\theta+\theta_0) \quad (17)$$

식(14)혹은 식(16)에서의 F 는 회절파의 특성을 나타내는데 $\arg F$ 는 진행방향, $\text{mod } F$ 는

파고특성을 나타낸다. 따라서 회절에 의한 파고변화를 나타내는 회절계수는 입사파의 파고를 H_i , 회절파의 파고를 H 라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{H}{H_i} = \text{mod } F(x, y) = K_D \quad (18)$$

3. 계산 및 결과

본 연구에서의 파고 추정법은 그림 3에 나타낸바와 같이 회절과 굴절을 동시에 고려한 일종의 도해법으로서 다음의 순서에 의해 회절-굴절도를 얻는 방법으로 파의 특성을 계산하였다.

- (1) 심해로부터 배후수역을 제외한 방파제 선단까지의 굴절도를 작성한다.
- (2) 방파제 배후수역에서, 방파제 선단으로부터 해안선쪽으로 연속되는 3개 혹은 4개의 파봉선을 취하여 식(16)을 이용한 회절도를 작성한다.
- (3) 위에서 구한 회절도중 해안선쪽의 마지막 파봉선에서의 파향과 파봉을 가지고 방파제 배후에서의 굴절도를 작성 함으로써 전 수역에 대한 회절-굴절도를 얻는다. 여기서 방파제 배후수역의 각 파향선은, 그림 3에서와 같이 방파제 선단에서 회절도의 마지막 파봉선까지는 직선이 되며 파가 진행함에 따라 굴절하게 된다.

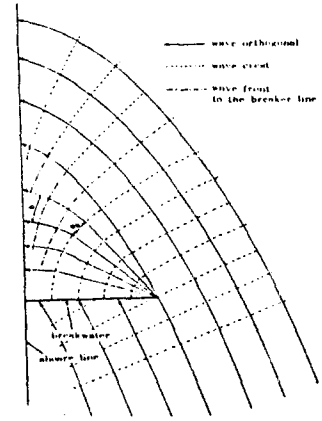


Fig. 3 Definition sketch for refraction and diffraction combined.

그림 4는 본 연구에서의 회절-굴절에 의한 진행파의 굴절, 방파제 배후수역에서의 파향

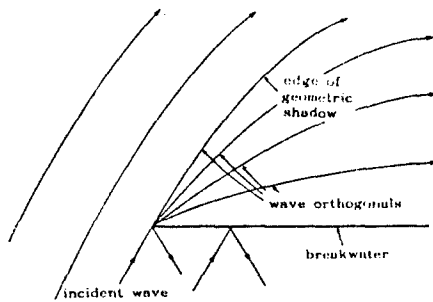


Fig. 4 Definition sketch for wave refraction and diffraction.

선, 그리고 해파의 진행수역과 방파제 배후수역과의 경계선(the edge of geometric shadow)을 나타내고 있다. 여기서 그림 4와 그림 2에서의 파의 진행수역과 방파제 배후수역의 경계선을 비교하면 각각 곡선과 직선임을 알 수 있는데 이는 그림 4에서 방파제 선단 부근의 3 내지 4파장 이내의 수역을 그림 2와 같이 고려하였기 때문이며, 따라서 그림 4의 방파제 선단 부근수역을 확

대한 것이 그림 2임을 알 수 있다. 또한 파고는 식(7)과 식(18)을 이용하여 파의 굴절, 천수, 회절의 영향을 모두 고려한 식(19)를 사용 하였으며 방파제 배후수역 에서 회절의 계산은 그림 3에서의 b_0 를 사용 하였다.

$$\frac{H}{H_i} = K_S \cdot K_R \cdot K_D \quad (19)$$

여기서 회절계수는 Fresnel 적분을 이용하여 식(16)으로부터 계산 하였다.

본 연구에서는 해저경사 $S = 5/200, 10/200, 15/200, 20/200$, 주기 $T = 2, 4, 6, 8, 10, 14$ 초, 입사각 $\alpha = 15, 30, 45, 60, 75$ 도인 각각의 경우 수신에 대한 천수계수, 굴절계수, 회절계수의 변화와 대상수역에서의 굴절-회절도 및 파고계수를 알아 보았다. 또한 계산은 경과시간을 5초 간격으로 하여 독립변수로 사용하였으며, 각 진행점(wave ray)에서의 파의 특성을 구하였다. 그림 5에서 그림 24까지는 각각의 주어진 조건에서, 수신에 대한 천수, 굴절, 회절계수, 회절도 및 회절-굴절도를 나타낸 것이다. 여기서 천수, 굴절, 회절계수는 진행파의 진행점에서 동시에 구한 것으로, 각 계수들은 선형으로 연결되어 있는데 이는 각 계수들이 동일 파향선에서 계산된 것임을 나타내고 있다.

해저경사가 일정한 수역에서 굴절과 회절을 동시에 고려한 경우 진행파의 경로는 그림 4와 같이 나타날 것이며, 방파제 배후수역과 방파제의 영향을 받지 않는 수역의 경계선은, 방파제 배후수역에서의 파향선중 가장 바깥쪽인 것이라 생각할 수 있을 것이다. 그림 25, 26, 27, 28은 주어진 입사각 및 주기조건에 대한 이들 경계선을 각 해저경사별로 나타낸 것이다.

표 1, 2, 3, 4는 이들 경계선을 포물선으로 가정하여 최소자승법을 사용하여 구한 계수들을 나타낸 것이며, 여기서 좌표의 원점은 방파제의 선단이다. 그림 29, 30, 31, 32는 표 1, 2, 3, 4의 계수 c_0, c_1, c_2 를 이용하여, 포물선화한 경계선을 각 해저경사별로 나타낸 것으로 그림 25, 26, 27, 28과 거의 일치함을 알 수 있다.

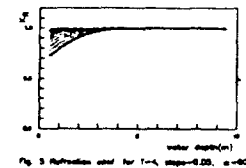


Fig. 5 Refraction coef for T=4, slope=0.05, $\alpha=0$.

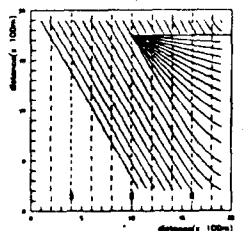


Fig. 6 Wave orthogonals for T=4, slope=0.05, $\alpha=0$.

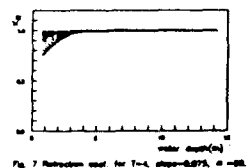


Fig. 7 Refraction coef for T=4, slope=0.075, $\alpha=0$.

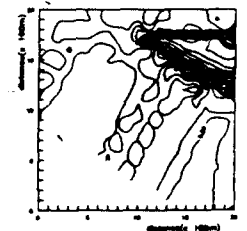


Fig. 8 Diffraction diagram for T=4, slope=0.1, $\alpha=30$.

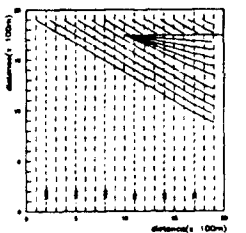


Fig. 9 Wave orthogonals for T=4, slope=0.1, $\alpha=30$.

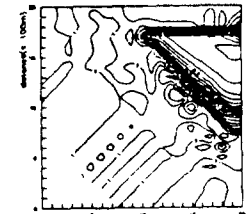


Fig. 10 Diffraction diagram for T=4, slope=0.1, $\alpha=45$.

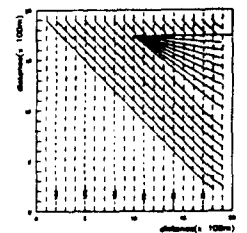


Fig. 11 Wave orthogonals for T=4, slope=0.1, $\alpha=60$.

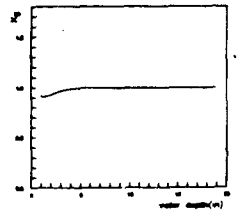


Fig. 12 Shadow coef for T=4, slope=0.1, $\alpha=60$.

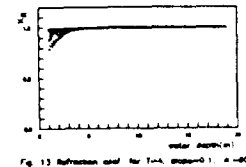


Fig. 13 Refraction coef for T=4, slope=0.1, $\alpha=75$.

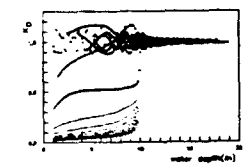


Fig. 14 Diffraction coef for T=4, slope=0.1, $\alpha=90$.

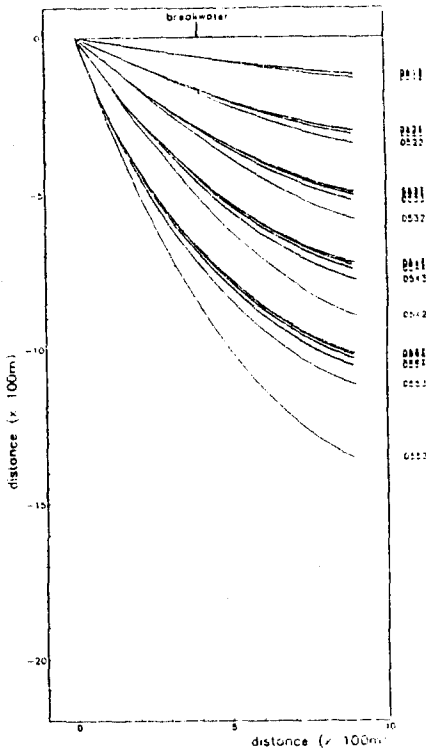


Fig. 25 The edge of geometric shadow in case of bottom slope=0.025

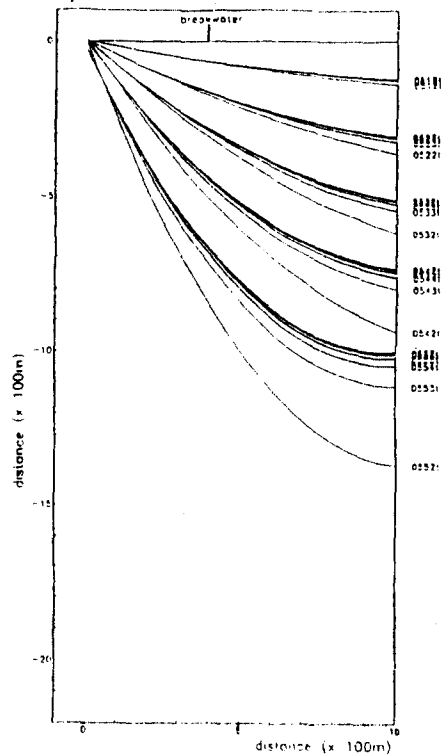


Fig. 29 Parabolic representations of the edge of geometric shadow in case of slope=0.025

Table 1 The coefficients of parabolic representation of the edge of geometric shadows in case of bottom slope is 0.025.

ray near	incident angle(deg.)	wave period(sec.)	Y = c ₀ + c ₁ X + c ₂ X ²			absolute error	r.m.s error
			c ₀	c ₁	c ₂		
0512	15	4	1.503325e+000	-1.945788e-001	5.128743e-005	6.477605e-001	7.464201e-001
0513	15	6	1.066880e+000	-1.874162e-001	5.990982e-005	4.514108e-001	5.191537e-001
0514	15	8	9.771395e-001	-1.876263e-001	6.237441e-005	3.994504e-001	4.586593e-001
0515	15	10	6.740000e-001	-1.864703e-001	6.300463e-005	3.552738e-001	4.070925e-001
0516	15	12	8.127319e-001	-1.862607e-001	6.380338e-005	3.514661e-001	4.029150e-001
0517	15	14	8.938589e-001	-1.860404e-001	6.418857e-005	3.483675e-001	3.994241e-001
0522	30	4	1.903416e+000	-5.147068e-001	1.451022e-004	1.654976e+000	1.908714e+000
0523	30	6	2.377784e+000	-4.965194e-001	1.649302e-004	1.008549e+000	1.161464e+000
0524	30	8	1.903334e+000	-4.905926e-001	1.712619e-004	8.581508e-001	9.888579e-001
0525	30	10	1.903334e+000	-4.889950e-001	1.740151e-004	8.345584e-001	9.617282e-001
0526	30	12	1.903334e+000	-4.884287e-001	1.744707e-004	7.385607e-001	8.505763e-001
0527	30	14	1.903334e+000	-4.885777e-001	1.744707e-004	7.268800e-001	8.373327e-001
0532	45	4	6.417014e+000	-9.720211e-001	2.927000e-004	2.606750e+000	3.001212e+000
0533	45	6	3.780902e+000	-8.727219e-001	3.011406e-004	1.217387e+000	1.402096e+000
0534	45	8	1.025411e+000	-6.589291e-001	3.011406e-004	9.120354e-001	1.062115e+000
0535	45	10	1.025411e+000	-6.517113e-001	3.011406e-004	7.271800e-001	8.520771e-001
0536	45	12	1.025411e+000	-6.486224e-001	3.011406e-004	6.859457e-001	8.112590e-001
0537	45	14	1.025411e+000	-6.481277e-001	3.011406e-004	6.735744e-001	7.980052e-001
0542	60	4	2.616250e+000	-1.524410e+000	1.001882e-004	2.860799e+000	3.228960e+000
0543	60	6	1.477274e+000	-1.270711e+000	1.001882e-004	5.541118e-001	6.416358e-001
0544	60	8	3.920165e+000	-1.254822e+000	1.001882e-004	4.902154e-001	1.220801e+000
0545	60	10	4.878896e+000	-1.250074e+000	1.001882e-004	1.237918e+000	1.514777e+000
0546	60	12	5.368073e+000	-1.250024e+000	1.001882e-004	1.258041e+000	1.668701e+000
0547	60	14	5.643799e+000	-1.251235e+000	1.001882e-004	1.429345e+000	1.756582e+000
0552	75	4	8.519616e+000	-2.625666e+000	2.614600e-004	4.256334e+000	6.688517e+000
0553	75	6	2.794601e+000	-2.154750e+000	2.614600e-004	1.951165e+000	9.214420e-001
0554	75	8	1.116000e+000	-1.004439e+000	2.614600e-004	1.127712e+000	1.070311e+000
0555	75	10	1.116000e+000	-9.941079e-001	2.614600e-004	8.028419e+000	1.075920e+000
0556	75	12	1.116000e+000	-9.949447e-001	2.614600e-004	9.127852e+000	1.070311e+000
0557	75	14	1.116000e+000	-9.949447e-001	2.614600e-004	9.246907e+000	1.116000e+000

4. 결론

본 연구에서 다룬 회절도의 일반적인 형태는 진행파의 주기에 큰 영향을 받으며, 입사각은 방파제 배후수역의 범위에 영향을 미친다. 또한 회절을 고려한 굴절도는 지형특성인 해저경사보다 진행파의 특성에 의해 결정됨을 확인하였으며 특히 파향선의 형태는 주로 진행파의 주기에 의하여 결정된다. 그리고 해파의 변형으로서 회절만을 고려할 경우 직선으로 다루어졌던 방파제 배후수역과 해파의 진행수역과의 경계는 회절과 굴절을 동시에 고려할 경우 포물선으로 나타낼 수 있을 것이다.