

## 하구항의 폭풍해일 저감방안

### Mitigation of Storm Surges in an Estuary Harbor in Orissa, India

우찬조<sup>1</sup>, 민현성<sup>2</sup>, 강규영<sup>2</sup>, 조용식<sup>3</sup>

Chan-Jo Woo<sup>1</sup>, Hyun-Seong Min<sup>2</sup>, Gyu-Young Kang<sup>2</sup> and Yong-Sik Cho<sup>3</sup>

#### 1. 서 론

폭풍해일은 저기압 기상요인에 의하여 발생하는 해면의 진동현상이다. 발생된 사이클론은 중심기압이 낮고 풍속이 클수록 증가하며 이동해역의 지형과 수심에 많은 영향을 받는다. 특히, 항 입구가 사이클론이 불어오는 방향으로 개방되어 있는 경우와 항만시설의 수역이 장방향으로 배치되어 항내의 진동과 과도한 해수의 해면퇴적이 예상되는 경우 이상고조위는 더욱 증폭되기도 한다.

본 연구에서는 벵골만의 오리사주 해안지역에 하구항으로 계획된 제철소 전용항만시설의 사이클론에 의한 폭풍해일 영향을 검토하고 항내 세부역 모형에 의한 폭풍해일고를 산정하여 저감방안을 제시하였다.

인도양 벵골만에서 사이클론의 발생에 따른 영향과 이에 의한 폭풍해일의 예측 등에 대한 연구는 그 피해정도가 심한 벵골만 북부에 위치한 방글라데시 지역을 중심으로 이루어졌다. Murty (1992)와 Flather(1976)에 의하여 과거발생 사이클론에 대한 발생기록 및 피해 조사와 이에 근거한 폭풍해일 특성분석 및 예측모델에 대한 연구가 이루어졌다.

본 연구에서는 항만시설이 계획된 하구항의 수심 및 지형을 고려한 상세역 모형을 이용한 수치해석을 실시하여 폭풍해일고를 추산하였다.

오리사주 해역에 영향을 끼친 사이클론을 검토하여 최대피해를 유발하였던 1999년 사이클론에 대하여 인도 기상청에서 관측한 이동경로 및 기압장에 대한 관측기록을 이용하여 바람장 및 기압장을

생성하였다. 사이클론을 이용한 바람장 및 기압장의 생성은 DHI (Danish Hydraulic Institute)에서 개발한 MIKE21 CYWIND모형을 적용하였다. 생성된 바람장을 이용한 폭풍해일고의 추산은 MIKE21 HD모형을 적용하여 해수유동 수치해석을 실시하였다.

#### 2. MIKE21 지배방정식

##### 2.1 MIKE21 CYWIND 지배방정식

MIKE21 CYWIND은 사이클론 관측기록을 이용한 바람장 및 기압장을 생성하기 위한 수치모델로 사이클론의 이동경로에 따른 관측기록과 수심지형모형을 이용하여 이동경로에 따른 시계열별 바람장 및 기압장을 생성한다.

사이클론에 의하여 생성되는 바람장은 회전성분 속도와 이동성분 속도로 구분되어 산정되며, 사이클론 중심점에서 거리 R에서

$$V_r = V_{max} \cdot \exp\left(0.0025 \cdot R_m + 0.05\right) \left(1 - \frac{R}{R_m}\right) \quad (1)$$

for  $R \geq R_m$

$$V_r = V_{max} \cdot \left(\frac{R}{R_m}\right)^7 \cdot \exp\left(7\left(1 - \frac{R}{R_m}\right)\right) \quad \text{for } R < R_m \quad (2)$$

$$V_t = -0.5 \cdot V_f \cdot (-\cos(\phi)) \quad (3)$$

$$V = V_r + V_t \quad (4)$$

1 ㈜세광종합기술단 설계본부 상무이사

2 한양대학교 토목공학과 석사과정

3 교신저자, 한양대학교 토목공학과 교수 (E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

$$V = V_r + V_t \quad (5)$$

로 산정된다 (DHI, 2002).

여기서,  $R_m$ 은 사이클론 최대바람 반경(km),  $R$ 은 사이클론 중심으로부터 반경(km),  $V_f$ 는 사이클론 이동속도(m/sec),  $V_{max}$ 는 사이클론 내부 최대바람속도(m/sec),  $V_r$ 는 사이클론 반경  $R$ 의 회전성분 속도(m/sec),  $V_t$ 는 사이클론 중심반경  $R$ 의 이동성분 속도(m/sec),  $P$ 는 사이클론 반경  $R$ 의 기압(hPa),  $P_c$ ,  $P_n$ 는 각각 중심 기압 및 외부 기압(hPa),  $\phi$ 는 최대바람선과 사이클론 중심이 이루는 각을 나타낸다.

## 2.2 MIKE21 HD 지배방정식

해수유동 모델인 MIKE21 HD은 하구, 만 및 연안지역에서 수위와 흐름을 모의하기 위하여 비정상 상태의 수심 평균된 2차원 흐름을 재현하는 수치모형으로, 비압축성 유체의 수심 적분된 연속 방정식과 운동량방정식으로 흐름과 수위의 변화를 나타내며, 이를 근간으로 수치 차분하여 해를 얻는다.

먼저, 연속방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

운동량방정식중에서  $x$  방향의 운동방정식은 다음과 같으며,

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] \quad (7)$$

$$- \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (P_a) = 0$$

또한,  $y$  방향의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] \quad (8)$$

$$- \Omega p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (P_a) = 0$$

여기서  $h(x,y,t)$ 는 수심,  $\zeta(x,y,t)$ 는 수면변위,  $p,q(x,y,t)$ 는  $x$  축 및  $y$  축 방향의 흐름(flux) 밀도,  $C(x,y)$ 는 Chezy 저항계수(resistance),  $g$ 는 중력가속도,  $f(V)$ 는 바람마찰계수,  $V, V_x, V_y(x,y,t)$ 는  $x, y$ 방향의 풍속,  $\Omega(x,y)$ 는 지구 편향력계수

(coriolis parameter),  $P_a(x,y,t)$ 는 대기압,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $x,y,t$ 는 공간좌표 및 시간,  $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ 는 각 방향의 전단응력을 나타낸다.

## 3. 하구항의 폭풍해일 검토

### 3.1 사이클론 관측기록

오리사주 해역에 심각한 피해를 유발하였던 1999년 사이클론은 북위 15도 전후의 벵골만에서 발생하여 그 세력을 확장하면서 북서쪽으로 이동하며, 북반부에서 coriolis효과에 의한 회전력에 의하여 인도 동북부해안 지역에 높은 파고 및 폭풍해일을 유발하면서 내륙지역에 상륙한 것으로 조사되었다.

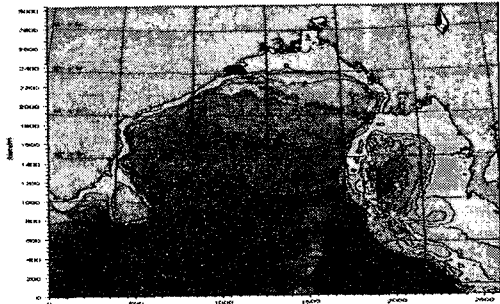


Fig. 1. 1999년 사이클론 이동경로 (DHI-india, 2005)

인도 기상청의 관측기록에 의하면, 사이클론은 벵골만 동북쪽 북위 15도 해상에서 발생당시 중심저기압 991 hPa, 중심반경 30km 및 최대풍속 23.13 m/sec로 기록되었으며, 이 사이클론은 벵골만의 서북서방향으로 이동하면서 그 세력을 더욱 확장하여 발생 후 약 3일 후 그 최대세력을 형성하면서 내륙지역에 높은 파고와 폭풍해일을 일으키면서 상륙하였다. 내륙지역에 상륙한 사이클론은 약 4~5일간의 정체를 형성하면서 집중적 호우를 유발하여 해안지역 및 저지대의 침수피해를 일으키고 그 세력이 점차 약화되면서 남하한 것으로 조사되었다.

### 3.2 바람장 및 기압장 생성

사이클론은 하구항의 항만시설 예정지역 남측 해안을 따라 내륙지역에 상륙하면서 가장 큰 풍속을 유발하는 것으로 검토되었다 (Fig. 2. ~ Fig. 4.). 특히, 북반부에서는 사이클론의 이동경로의 우측에 형성된 항입구를 통한 해수 유입은 매우 클 것으로 예측되며, 이에 따른 하구항내 해수퇴적에 의한 해일 고도 증가할 것으로 예측된다.

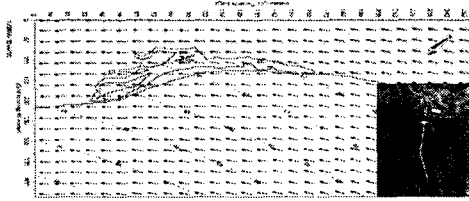


Fig. 2. 바람장 및 기압장 분포도 (1999/10/29 00:00)

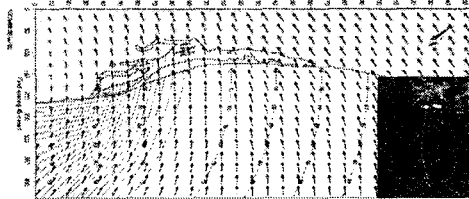


Fig. 3. 바람장 및 기압장 분포도 (1999/10/29 06:00)

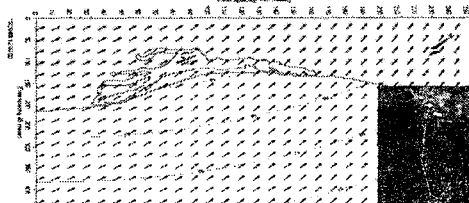


Fig. 4. 바람장 및 기압장 분포도 (1999/10/29 12:00)

### 3.3 상세역 모형의 폭풍해일 추산

1999년 사이클론의 관측기록을 이용하여 생성된 사이클론 이동에 따른 시계열의 바람장과 기압장을 적용하고, 항만시설이 계획된 Jatadhari 강 하구항의 상세지형을 반영한 상세역 모형을 이용하여 MIKE21 HD모형에 의한 해수유동 수치해석을 실시하였다.

상세역 모형을 이용한 결과에 의한 최대해일고의 발생시각의 시계열 분포는 다음 그림(Fig. 5. ~ Fig. 7.)과 같으며, 사이클론이 하구항의 남측연안에 상륙한 1999/10/29 06:00에 항만시설 예정지점의 수역에서 최대 폭풍해일고는 약 3.3m로 예측되었으며, 하구항내 Jatadhari강 상류측 폐쇄지역에서 최대 4.0m의 폭풍해일고가 예측되었다. 하구항의 외해에서 최대 폭풍해일고는 약 1.8m로 추산되었다.

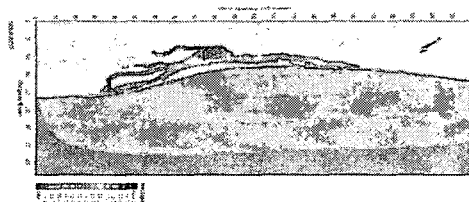


Fig. 5. 최대해수면 분포도 (1999/10/29 04:00)



Fig. 6. 최대해수면 분포도 (1999/10/29 06:00)

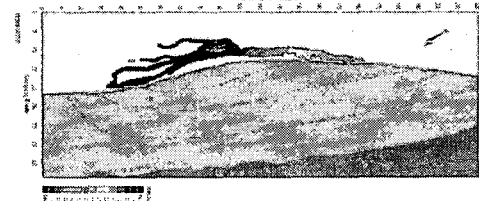


Fig. 7. 최대해수면 분포도 (1999/10/29 08:00)

### 3.4 폭풍해일 검토결과

항만시설 예정지역인 인도 오리사주 해역에 최대 폭풍해일 피해를 유발하였던 1999년 사이클론 관측기록을 적용하여 수행한 해수유동 수치해석에 의한 폭풍해일 검토 결과는 다음과 같다.

벵골만 해역을 포함한 광역 모형을 이용한 수치해석에서는 최대 폭풍해일고는 약 1.6m로 나타났으며, 이는 하구항의 상세 지형을 반영하지 못한 오리사주 전면 해역의 추산치로 Jatadhari하구항의 상세역 모형을 적용한 해석에서 추산된 하구항 외해의 수면상승고 1.8m와 유사하다.

또한, 최대 해일고 발생시각에서도 약 6시간의 위상차가 발생하는 것으로 분석되며, 이는 상세역 모형에서 고려된 하구항내로 해수유입과 하구항 수역내의 해수퇴적현상에 의하여 최대 폭풍해일고 발생시각이 지연되는 것으로 판단된다.

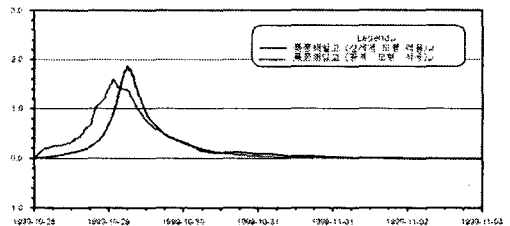


Fig. 8. 하구항 외부 해역의 폭풍해일 분포

상세역 모형을 적용한 해석에 의하면, 하구항내 전면수역에서 약 3.3m 수위상승이 예측되며, 이는 사이클론의 접근에 따라 상세역 모형에 반영된 하구항 유출구를 통한 해수 유입과 하구항 자체수역내 해수 퇴적현상에 의한 수위상승 등에 의하여 해수면이 더욱 상승한 것으로 판단된다.

하구항의 상류측에 하구유도수로를 설치할 경우에는 항내매물 및 수리변화를 최소화하고 하천수를 동시에 배출함으로써 해수면 상승고를 약 2.5m 정도로 0.8m 이상 저감시킬 수 있으며, 이는 하구항 수역의 양단에 배치된 유출구를 통하여 하구항내 수위상승에 따른 퇴적된 해수를 위해로 동시에 배출함으로써 해수면 상승 저감효과를 증대시키는 것으로 판단된다.

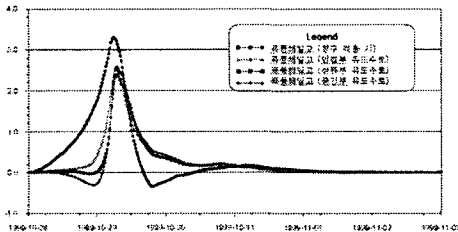


Fig. 9. 하구유도수로 적용에 따른 폭풍해일 분포도

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존에 발생한 사이클론에 대한 관측자료와 피해현황 자료를 조사하여 사이클론과 폭풍해일의 발생특성을 조사하고, 오리사주 인근해역에 영향을 끼친 사이클론을 분석하여 최대피해를 유발하였던 1999년 사이클론의 관측기록을 이용하여 하구항내 폭풍해일 영향을 연구하였다

첫째, 벵골만에서 발생하였던 사이클론과 폭풍해일 관측자료의 조사 및 분석에 의하면, 벵골만 지역의 삼각형태의 수역특성에 의한 Funneling 효과와 해안선을 따라 발달한 얇은 천해역의 지형적 특성에 의하여 폭풍해일이 높게 나타나며, 사이클론의 이동경로에 위치한 인도 북동부 해안지역과 방글라데시 해안지역에 많은 피해가 발생하고 있다.

둘째, 오리사주 지역에 최대피해를 유발하였던 1999년 사이클론 관측기록을 적용하여 Jatadhari강 하구항의 항만시설에 대한 폭풍해일 영향을 검토하였다. 광역 모형 수치해석에서 하구항 외측 수역의 폭풍해일고는 1.6m로 Jatadhari강 하구항의 상세역 모형을 적용 시의 외부해역의 폭풍해일고 1.8m와 유사하지만, 하구항내 수역에서는 항내 해수유입과 해수퇴적에 의하여 폭풍해일고는 약 3.3m로 증대되었다.

셋째, Jatadhari강 전면에 형성된 연안사주를 통한 하구유도수로를 계획하여 폭풍 및 홍수 시 하천수를 동시에 배출할 경우에는 하구항내 최대 폭풍해일고가 약 2.5m로써 0.8m정도의 폭풍해일고를 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 하구항의 수심 및 지형에 대한 세부 조사자료가 미미하여 지형도의 현 지형을 모형화 하였으므로 계획된 하구항의 지형 및 수심과는 다소 차이가 있을 것으로 예상되며, 추후 실시될 하구항 상세설계에서는 세부적 지형조사자료를 적용하여 폭풍해일고의 재추정과 하구유도수로의 위치에 따른 폭풍해일고의 저감효과에 대한 보다 상세한 연구가 이루어져야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 중소기업청의 산학연 공동기술개발 컨소시엄 과제로부터 재정적 지원을 받았습니다.

#### 참고문헌

DHI (2002). "MIKE21 - User Guide and Reference Manual: CYWIMD Module, Hydrodynamic Module."

DHI-India (2005). "Numerical Wave Modeling for Wave Agitation and Storm Surge Assessment of the Proposed Steel Plant of Posco-India."

Flather, R.A and Davies, A.M. (1976). "Note on a preliminary scheme for storm surge prediction using numerical models." Q.J.R. Meteorol. Soc., Vol. 102, pp. 123~132.

Murty, T.S and Mohammed, I EL-SHBH (1992). "Mitigating the effects of storm surges generated by tropical cyclones." Natural Hazards Vol. 6, pp. 251~273.