

## 항주파를 고려한 수로 사면의 안정성 해석 방안 고찰

임은상<sup>1</sup> · 정해근<sup>2</sup> · 류정아<sup>1</sup> · 김규범<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>한국수자원공사 K-water 연구원

<sup>2</sup>한국지질자원연구원

### 요 약

선박이 운행되는 수로 주변의 사면에서는 항주파가 지속적으로 작용하므로, 파고의 높이를 사면내 지하수위 조건으로 고려하는 것이 안정성 해석에 어떤 영향을 미치는지 검토하였다. 2개소의 암반 사면의 해석 결과에 의하면, 항주파를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비하여 평면파괴는 19.6~20.3%, 쉐기파괴는 12.0~21.3% 정도 안전율이 낮은 것으로 나타났으며, 2개소의 토사사면의 해석 결과는 5.8% 및 8.5% 감소하는 것으로 나타났다. 항주파를 고려한 해석이 연구지역 사면의 암 탈락 및 토사 유실 상태를 상대적으로 잘 설명하고 있어 지속적인 항주파가 작용하는 경우에는 지하수위 조건이 조정될 필요가 있음을 보여준다. 아울러, 파압, 사면 포화 및 용해동결 작용 등도 사면 현상을 고려할 때 안정성에 영향을 미칠 수 있으므로 함께 고려될 필요가 있다.

**주요어:** 항주파, 암반 사면, 토사 사면, 지하수위, 한계평형해석

**Eun-Sang Im, Hae-Geun Jeong, Jeong-Ah Ryu and Gyoo-Bum Kim, 2015, Considerations on the stability analysis of the waterway slope reflecting ship-wave effect. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 3, p. 303-311**

**ABSTRACT:** The levee or natural slope of a waterway can be influenced by ship wave during a vessel operation and it is examined how the wave height can affect the slope stability analysis in this study. The result for two rock slopes indicates that the safety factors for planar and wedge failures are reduced by 19.6~20.3% and 12.0~21.3%, respectively. In case of two soil slopes, they are reduced by 5.8% and 8.5%. This interpretation considering a ship wave reflects the actual field condition better, which there exist some of rock falls and soil erosions. Therefore, wave height needs to be used as groundwater level at the slope stability analysis considering continuous ship wave effect. Slope stability analysis along the waterway should also be done by reflecting wave pressure, slope saturation condition, and freezing and thawing action judging from the slope phenomenon.

**Key words:** ship wave, rock slope, soil slope, groundwater level, limit equilibrium method

(Eun-Sang Im, Jeong-Ah Ryu and Gyoo-Bum Kim, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Republic of Korea; Hae-Geun Jeong, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea)

### 1. 서 론

사면 재해 발생은 인명피해 및 경제적 손실 등 사회 비용 손실을 유발시키고 경우에 따라서는 설치 비용보다 큰 규모의 보수 비용을 필요로 한다. 사면 재해에 대한 피해를 방지하기 위해서는 사면에 대한 정성적 및 정량적 해석을 통한 안전성 평가가 선행되어야 한다. 사면의 안전성 평가를 위해서는 암중, 암질, 토질 및 지형 등의 내적 요인과 강우, 침투수,

지진 등과 같은 외적 요인이 고려되어야 한다. 특히, 지하수 수두의 분포가 해석에 중요한 영향을 미치고 있어 정확한 현장 값을 고려하여 사면 평가가 이루어져야 한다. 사면의 붕괴 유형은 파괴면의 기하학적 형상, 물질의 이동형태와 이동 물질의 종류 등에 따라 분류되는데, Varnes (1978)는 지반 구성 물질의 종류에 따라 암석과 흙, 사면의 붕괴 유형에 따라 붕락(fall), 전도(topple), 활동(slide), 퍼짐(spread) 및 유동(flow)으로 분류한 바 있다. 그 동안 사면 안정성

\* Corresponding author: +82-42-870-7600, E-mail: gbkim@kwater.or.kr

해석은 매우 다양하게 이루어 졌는데, 최근에는 물에 의한 사면안정성 영향 연구와 통계학적 접근에 의한 해석 등이 활발히 진행되고 있다(Lee and Kim, 2009; Choi *et al.*, 2010; Jeong *et al.*, 2011; Chae *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2012). Lee and Kim (2009)은 과거 36년간의 기상청 강우 자료를 토대로 강우 강도와 사면 안정성의 상관성을 평가하여 누적강우량보다는 강우 강도가 사면안정성에 더 큰 영향을 미치는 것을 검토한 바 있다. Choi *et al.* (2010)은 사면내 불연속면의 지질학적 특성뿐 아니라 기하학적인 특성이 사면의 안정성을 판단하는 중요한 요소로 작용함을 수치해석적 접근으로 평가한 바 있다. Jeong *et al.* (2011)은 확률론적 해석기법인 몬테카를로 시뮬레이션을 적용한 사면 안정성을 평가하였으며 본 방법이 자료의 불확실성을 감쇠시키는 효과를 갖는 것으로 평가한 바 있다. Chae *et al.* (2012)는 불포화토내 강우 침투시 지표로부터 시간에 따른 토층의 포화깊이비를 새로운 변수로 삽입하여 무한사면 안정 해석 및 수정식을 제시한 바 있다. Kim *et al.* (2012)는 국내 10,461개의 국도변 절토사면 현황조사(일반현황, 절토사면특성, 조사자 소견 등) 자료를 이용한 위험도 점수를 계산하고 실제 붕괴된 절토사면의 위험도 점수와 비교하여 그 효용성을 평가한 바 있다. 현재 사면의 안전율 기준을 보면, 건설교통부 구조물 설계 기준에서는 절토사면의 기준 안전율은 토사사면의 경우에는 건기시 1.5, 우기시 1.2~1.3 및 지진시 1.1을 기준으로 하며, 암사면의 경우에는 1.3을 기준으로 제시하고 있다(MLTM, 2011). 또한, Hoek and Bray는 도로사면이 아닌 경우의 사면 안전율을 1.0~1.3으로 정한 바 있다(Lim *et al.*, 2001).

한편, 배의 운항에 의하여 발생하는 항주파에 대한 연구는 주로 Boussinesq 방정식을 이용한 가변수심역에서의 항주파 재현에 관한 연구나 좁은 수로나 연안역에서 발생하는 항주파의 수치모델에 관한 연구와 같이 항주파의 파고 계산 등 선박공학적인 관점에서 이루어져 왔으며, 호안 마루 높이나 피복재의 안정성 검토 등과 같이 호안의 보강과 관련한 수리학적 연구가 수행되어 왔다(Jiang *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2003; Kang *et al.*, 2007). Kim *et al.* (2008a)은 한강을 운행하는 선박에서 발생하는 항주파의 파력과 호안 재료에 따른 지지력을 비교·분석하였으며, Kim *et al.* (2008b)은 한강의 호안에 대하여 항주

파에 의하여 발생한 파력으로부터 허용 소류력을 제시하였다. Yun *et al.* (2011)은 파압에 의해서 방파제에서 발생하는 침하 거동에 대해 연구를 수행하였는데, 파랑에 의해 파압이 크게 발생할 수 있고 이 파압으로 인하여 지반침하가 발생할 수 있다고 제시한 바 있다. 한편, 댐 및 제방과 같이 물과 접하고 있는 사면에 대해서는 수위 급강하 조건을 반영하여 사면 활동에 대한 안정성을 검토하도록 하천설계기준이나 댐설계기준에서 규정하고 있으며, Kim *et al.* (2014)은 하천수위의 상승, 유지, 하강의 수위특성을 고려한 수위파형곡선을 반영하여 수위 급강하시 사면활동에 대한 안전율이 약 10%정도 저하된다고 평가한 바 있다.

한편, 선박 운영 시 발생하는 항주파의 경우에는 상기의 수위강하조건과 마찬가지로 사면의 전면부에 습윤대가 형성되어 사면의 안정성에 악영향을 미침에도 불구하고 사면의 안정성 해석에서 그 영향이 거의 반영되지 않고 있어 안전관리에 불합리적인 면이 있다. 따라서 본 연구에서는 선박이 운항되는 구간에 대한 안정적인 시설물 관리를 위하여 항주파에 의한 상승 수두를 반영한 사면의 안정성 해석 방안을 검토해 보았다.

## 2. 연구 방법

본 연구를 위하여 선박이 운행되는 수로구간의 암반사면과 토사사면의 표본 지점(각각 2개소)을 선정하고, 이들 지역에 대한 3차래 현장 지질조사(2014년 4월 23일 ~ 5월 28일)를 실시한 후 취득된 자료와 기존의 실내 분석 등의 자료를 토대로 사면에 대한 안정성 해석을 수행하였다. 사면 해석은 현장 지질조사를 통하여 취득된 정보를 활용한 평사투영법(Stereographic projection method)에 의한 해석, 사면의 기하학적 형상과 물리적 특성을 활용한 한계평형법(Limit equilibrium analysis)에 의한 해석 등이 사용되었다. 암반사면의 해석을 위하여 절토사면 높이와 경사방향 등의 정보, 활동 암괴를 형성하는 주 절리의 경사와 경사방향, 점착력 마찰각, 지하수위 등을 입력하여 안전율을 도출할 수 있는 정역학적인 평형방정식의 원리를 이용한 프로그램인 Rocplane 2.0과 Swedge 5.0을 사용하였으며, 토사사면의 해석을 위하여 GEO-SLOPE사의 Slope/W

2007을 사용하였다. 아울러, 선박 운항에 의하여 발생하는 항주파의 영향을 고려하는 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 사면 해석을 수행함으로써 항주파에 의하여 높아지는 파고가 사면 안정성 해석에 어떻게 영향을 미치는지 분석하고 입력 자료로 고려해야 할 필요성에 대하여 검토하였다.

### 3. 항주파 및 파고 산정

#### 3.1 항주파의 발생

선박의 항해로 인해 발생하는 항주파는 선박의 제원, 속도 및 수심 조건 등에 따라서 달라지는데, 항내 폭이 좁고 긴 방수로에서는 이 항주파의 영향으로 제방손실 및 호안사석 결괴 등의 피해가 발생할 수 있기 때문에 이를 고려하여 사면의 안정성을 검토할 필요가 있다. 선박의 항행으로 발생하는 항주파는 선박이 크고 속도가 빠를수록 파고가 커지며, 선박 선수의 한 점에서부터 종으로 퍼져나가는 발산파와 선박의 선미 뒤에서 파봉이 선박 주행 축에 수직하게 발생하는 횡단파로 구성된다(그림 1).

선박으로부터 100 m 이격된 지점의 항주파의 파고( $H_0$ )는 조파 저항으로 소모되는 마력이 항주파의 전파에너지와 같다는 가정하에 아래 식에서 구한다(Han, 2004).

$$H_0 = \left( \frac{L_s}{100} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{E_{HPW}}{2.2L_s V_k}} \quad (1)$$

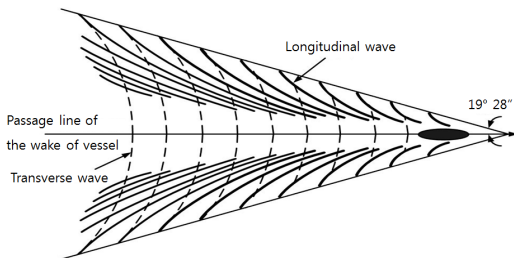


Fig. 1. General distribution of longitudinal and transverse ship-waves (Han, 2004).

여기에서  $L_s$ 는 선박의 길이(m),  $V_k$ 는 만재운항 속도(kt),  $E_{HPW}$ 는 조파마력(w)을 의미한다. 조파마력( $E_{HPW}$ )은 다음으로부터 구할 수 있다.

$$E_{HPW} = E_{HP} - E_{HPF} \quad (2)$$

$$E_{HPF} = \frac{1}{2} \rho_0 S V_0^3 C_F \quad (3)$$

$$S = 2.5 \sqrt{\nabla L_s} \quad (4)$$

$$C_F = 0.075 / \left( \log \frac{V_0 L_s}{\nu} - 2 \right)^2 \quad (5)$$

여기에서  $E_{HP}$ 는 유효마력(W),  $E_{HPF}$ 는 마찰마력(W),  $S_{HPm}$ 는 연속최대축마력(W),  $\rho_0$ 는 해수밀도(=1,030 kg/m<sup>3</sup>),  $S$ 는 침수표면적(m<sup>2</sup>),  $V_0$ 는 만재운항속도(kt),  $C_F$ 는 마찰저항계수(=0.0018),  $\nabla$ 는 선박의 만재시 배수량(m<sup>3</sup>),  $L_s$ 는 선박길이(m),  $\nu$ 는 물에 대한 동점성계수(m<sup>2</sup>/s)를 말한다. 한편, 유효마력( $E_{HP}$ )는 Holtrop/Mennen 방법에 의하여 제시된 그림에서 추정할 수 있다(그림 2).

#### 3.2 호안에서의 파고 산정

선박으로부터 일정 거리 만큼 떨어진 특정 관측 지점에서의 파고는 다음 식에 의하여 구한다(Han, 2004).

$$H_{max} = H_0 \left( \frac{100}{S} \right)^{1/3} \left( \frac{V_k}{V_K} \right)^3 \quad (6)$$

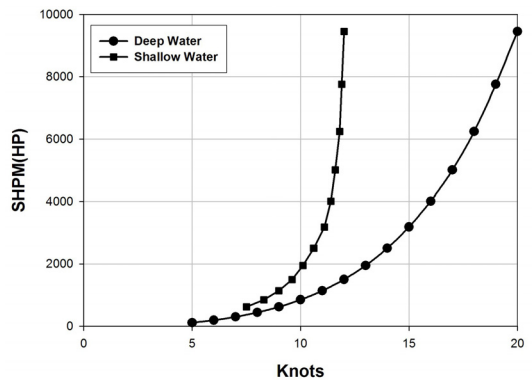
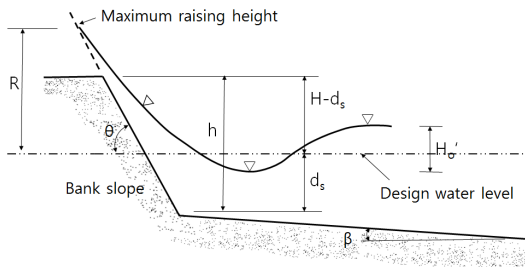


Fig. 2. Estimated effective horse power according to a ship sailing velocity (Park, 2010).

**Table 1.** Field survey result and geotechnical information for two rock slopes.

Classification of Slope		RS-1	RS-2
Slope length (m)		40	35
Height (m)		10.95	9.65
Slope orientation		50/170	50/015
Rock type		Biotite Gneiss, Acidic dyke	Biotite Gneiss
Strength of intact rock		Moderate ~ Strong	Moderate
Degree of weathering		Slightly ~ Moderately	Moderately ~ Highly
Major geology structure		Faults, Dyke, joints	Faults, joints
Joint and Fault	Type	Strike, Rectangular	Strike, Rectangular
	Dip/Dip direction	44/143, 74/247, 56/092, 43/258	55/340, 40/040, 29/247, 65/150
Friction angle (°)		26	
Unit weight (t/m <sup>3</sup> )		2.69	
Cohesion (t/m <sup>2</sup> )		1.0	
Waterway management level (El.m)		6.3	
Ship wave height (m)		1.68	

**Fig. 3.** Conceptual diagram of maximum wave height at the bank slope (MOF, 2005).

여기에서  $H_{max}$ 는 선택된 관측점에서 항주파의 최대 파고(m),  $H_0$ 는 항주파의 파고(m),  $S$ 는 관측점에서 항행선까지의 거리(m),  $V_k$ 는 실제선박 운항속도(m/s),  $V_k$ 는 만재항해속도(m/s)를 말한다.

상기 식은 하폭이 200 m를 넘지 않는 좁은 방수로와 같은 경우에 적용할 수 있으며, 좁은 수로의 가장 자리인 제방에서의 파고 높이 산정의 기초값을 제공하게 된다. 한편, 파고가 제방에 다다르게 되면 파랑의 차오름 현상이 발생하여 파고는 더 높은 값을 보이게 된다(그림 3).

이와 같이 항주파는 호안 구배 및 파장, 주기 등의 조건에 따라서 호안의 경사를 따라서 차오르게 되는데 이를 차오름 높이라 하며, 항만 및 어항 설계기준

에 의하여 아래의 식으로 산정된다(MOF, 2005).

$$R = H_0' \times \frac{R}{H_0} \times \gamma \times K \quad (7)$$

여기에서  $R$ 은 차오름 높이(m),  $\frac{R}{H_0}$ 은 상대차오름량,  $\gamma$ 와  $K$ 는 조도 및 축척 조정계수( $d_s/H_0' > 3$ 인 경우에는 무시)이다. 상대차오름량은 호안의 경사에 따른 상대차오름량과 상대깊이의 관계로부터 구하였다.

#### 4. 항주파를 고려한 사면안정 해석 비교

##### 4.1 암반 사면 해석

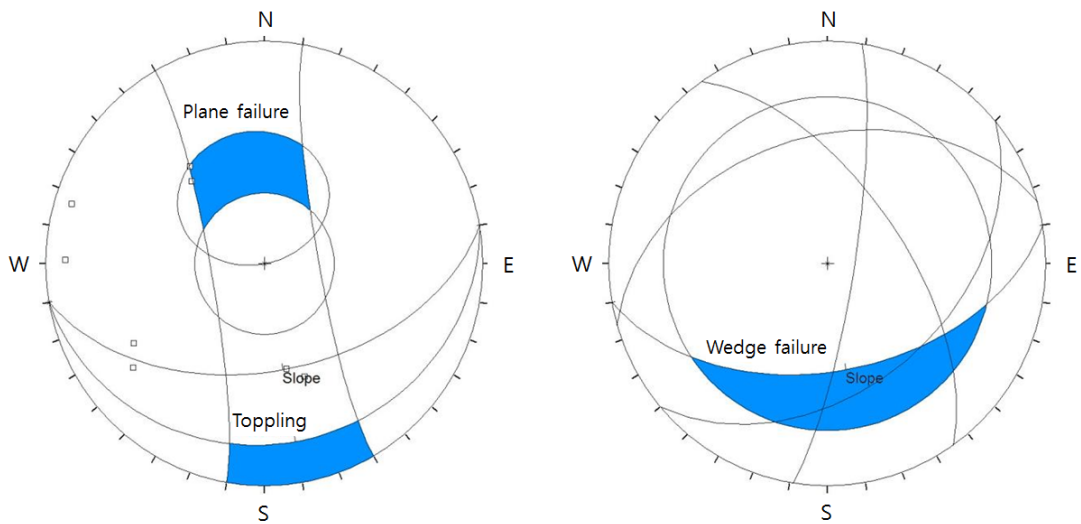
2개소의 암사면(RS-1, RS-2)에 대한 안정성 평가를 위하여, 불연속면의 방향, 간격, 연장성, 거칠기, 풍화도, 강도, 지하수 등 사면의 변형 거동 및 전단강도에 영향을 미치는 인자들에 대한 현장조사 및 실험 결과로 제시된 값들을 활용하였다(표 1; GS E&C, 2010).

항주파의 규모는 현재 운행 중인 1,000 톤급 여객선을 기준으로 검토하였으며, 수로의 크기 및 형상은 하폭 80 m, 수면폭 92.6 m, 수심 6.3 m에 해당한

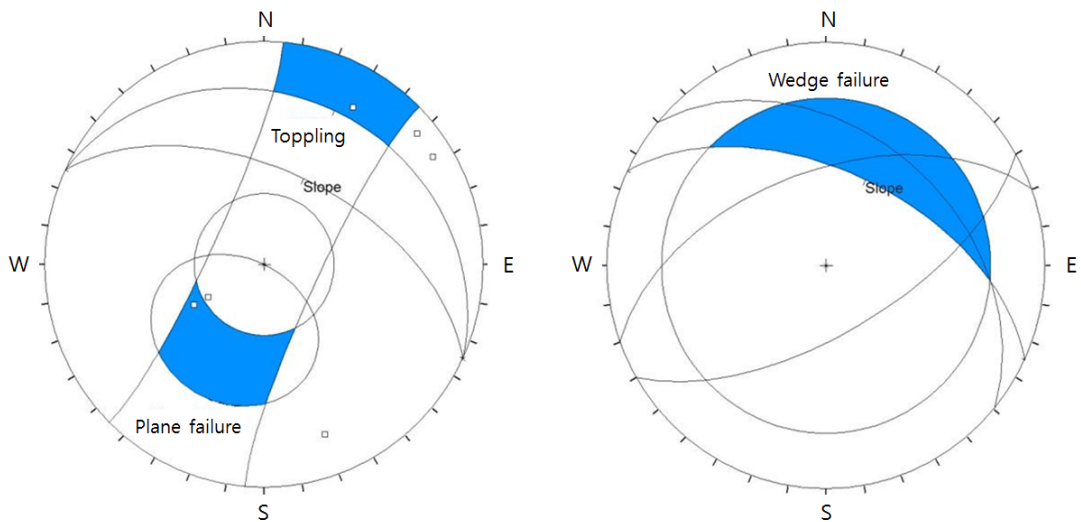
다. 선박의 최대 운항속도는 5.5 m/sec (약 10.5 kt) 로 적용하였다. 방수로 사면이 중앙부에서 약 40 m 이격되어 있는 점을 고려하면, 40 m 이격 지점에서의 호안 항주파 파고는 식 (6)에 의하여 1.05 m, 호안에서의 처오름 높이는 식 (7)에 의하여 1.68 m로 산정 된다.

그림 1에서 보는 바와 같이, 선박 운항시 배면에서는 파랑이 수 십 회 이상 발생하며, 수 분 내지 십 여 분 이상 연속적으로 발생하는데, 이와 같이 연속

성을 갖고 지속적으로 유지되는 파고는 사면내 파쇄 구간 및 절리 등을 통하여 내부로 유입되어 지하수위를 상승시키는 효과를 발생하게 되며, 사면내 포화대의 증가 및 습윤화를 가속화 시킨다. 이와 같은 작용은 현장 조사시 항주파의 높이만큼 사면이 습윤 포화된 상태로 나타나고 있는 것으로 확인된다(아래의 손상상태평가 결과 참고). 따라서, 본 연구에서는 항주파의 상승이 사면내 포화대의 상승을 유도하는 것으로 고려하여 항주파의 처오름 높이를 사면 안정



(a) Site RS-1 (Sta. 361.15 ~ 362.30)



(b) Site RS-2 (Left: Sta. 381.10~382.20, Right: Sta. 382.20~383.00)

Fig. 4. Result of rock slope stability analysis using DIPS program.



해석 모형의 지하수위값으로 적용해 보았다.

Dips 프로그램을 활용하여 2개 암반사면에 대한 파괴 유형을 분석한 결과, 두 사면 공히 평면파괴와 썩기파괴의 발생 가능성이 존재하는 것으로 나타났으며(그림 4), 건기시의 조건으로 두 파괴 조건에 대한 한계평형해석을 수행하였다(표 2). RS-1과 RS-2 각각에 대하여 평면파괴에 대한 해석 결과, 항주파를 고려하지 않은 경우의 안전율은 0.911과 0.847이었으나 항주파를 고려하게 되면 0.726과 0.681로서 0.185~0.166의 차이를 보여 19.6~20.3% 정도 낮아졌다. 또한, 두 사면에 대한 썩기 파괴 해석 결과에서도, 항주파를 고려하지 않은 경우의 안전율은 1.479과 1.026이었으나 항주파를 고려하게 되면 1.301과 0.807로서 0.178~0.219의 차이를 보여 12.0~21.3% 정도 낮

아진 것으로 나타났다.

상기 안정성 분석 결과를 실제 현장의 사면 상태와 비교하면 다음과 같다(그림 5). RS-1 사면 구간 중 STA. 361+15 ~ 362+07 m 사이는 평면파괴가 나타났으며, 사면과 동일한 방향으로 발달한 불연속면에 의한 것으로 보인다(그림 5a). 실제 해석을 통한 평면파괴의 안전율은 매우 낮게 나타났으며, 항주파의 영향을 반영하면 더욱 불안한 것으로 해석되었다(표 2). 또한, RS-1 사면 전반적으로 암맥 경계부와 다수의 교차되는 불연속면에 의한 썩기 파괴가 부분적으로 발달하고 있으나 활동 블록의 크기가 상대적으로 소규모이며 활동면의 경사는 사면과 유사하여 국부적인 암 탈락이 존재하고 있다(그림 5a). 이와 같이 암사면의 기준 안전율 1.3을 거의 충족하는 해석 결

Table 2. Comparison of the stability analysis for two rock slopes.

Site		Safety factor without wave effect	Safety factor with wave effect	Decreasing rate of safety factor (%)
RS-1	Planar	0.911	0.726	20.3
	Wedge	1.479	1.301	12.0
RS-2	Planar	0.847	0.681	19.6
	Wedge	1.026	0.807	21.3

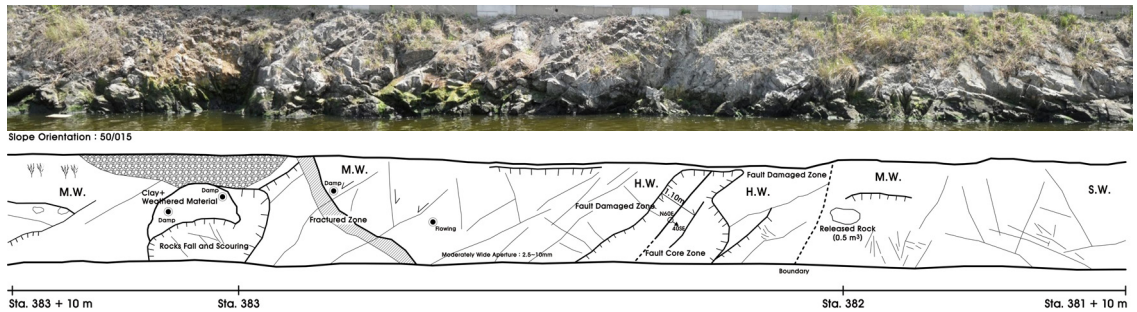
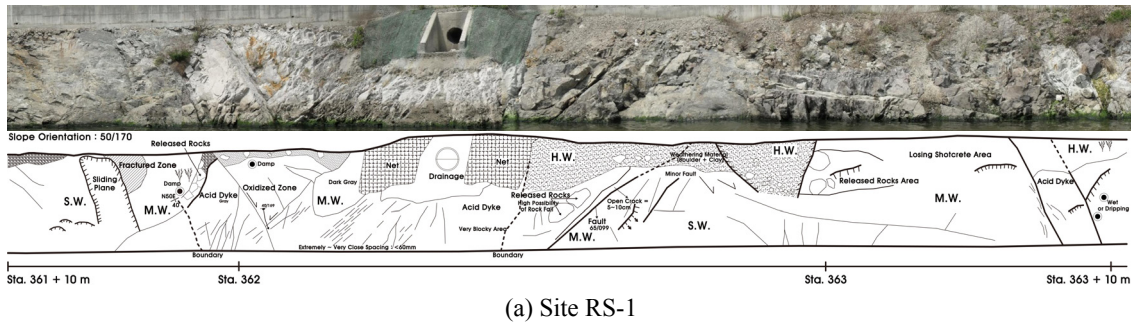


Fig. 5. Photographs and face maps for two rock slopes.

과와 달리, RS-1에서 소규모 썩기 파괴 유형이 존재하는 것은 파압에 의한 사면 강도의 저하 및 절리내 물의 유입 등이 영향을 미치는 것으로 추정된다. 이상을 종합해 보면, 실제 사면 상태는 항주파를 고려한 해석 결과에 가까운 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

RS-2 사면은 전반적으로 중간 정도의 풍화상태를 보이고 있으나, 단층이 발달하는 STA. 381+15 ~ 382+10 m 구간과 다수 파쇄대와 축축한 상태를 보이는 STA. 382+15 ~ 383+05 m 구간은 심한 풍화에 해당한다(그림 5b). 다수의 유사방향의 절리들이 반복적으로 발달하고 있어 수직방향 절리와와의 조합에 의하여 평면 및 썩기 파괴가 잘 나타나고 있다. 한계 평형 해석에 의하면 평면 및 썩기 파괴의 기준 안전율에 크게 미치지 못하여 항주파에 의한 사면의 불안정성을 보여주고 있다. 아울러, RS-2 사면의 수면 접합부는 파도의 영향으로 세굴이 상당히 진행되어 있는데, 이는 항주파 발생시 다수의 절리면대로 파괴에 의한 물이 유입되어 나타난 현상으로 해석된다. 이와 같은 특성은 항주파가 사면의 구조적인 안정성 해석에 영향을 미칠 뿐 아니라, 다수의 절리가 발달하는 구간에서는 파압에 의한 사면 손상 현상도 추가적으로 고려되어야 함을 보여준다.

한편, 사면의 손상상태지수( $f_1$ )와 사면 파괴요인 지수( $f_2$ ) 점수의 산술평균으로 계산되는 사면의 손상상태평가(MLTM, 2012)를 실시하였다. RS-1 사면의 경우, 지속적인 파괴 발생 가능성을 내포하고 사면 내 발달하는 불연속면은 간격이 조밀하고 경사가 불리하며, 강우 및 지하수에 매우 취약한 자연적 요건을 가진 "D" 등급으로서 사면의 손상과 결함

진행되어 파괴 잠재성을 가진 사면으로 해석되었다. RS-2 사면의 경우, 단층에 의한 파쇄대 형성으로 연약한 지반상태를 보이며 유수의 집중 유입으로 세굴 및 침식이 지속 발생하는 "C" 등급의 취약한 상태로 파악되었다. 특히, 사면에서의 지하수 상태는, RS-1에서는 파괴요인지수( $f_2$ )의 자연요인 항목중 "강우 및 지하수" 조건이 완전건조(a 등급, 0점) 내지 완전포화(e 등급, 7~8점)의 상태를 보이고 있으나 상당한 포화 상태가 다수 나타나며, RS-2에서는 c 등급(3~4점) 내지 완전포화(e 등급, 7~8점)로서 대부분이 완전포화 상태를 보인다. 이와 같이 불안정한 것으로 평가된 사면의 현재 손상상태는 자연적인 절리의 붕락에 의하기 보다는 항주파의 파고에 의한 습윤 포화 현상, 항주파의 파압에 의한 파손 영향 등이 복합적으로 고려된 것으로 보인다. 따라서, 수로 사면의 안정성에 대한 해석시 항주파를 고려한 지하수 위 포화 조건을 반영하는 것은 의미가 있을 것으로 보인다.

4.2 토사사면 해석

연구 대상 사면은 당초 1:1의 경사로 조성되었으나, 방수로의 운영과정에서 일부 침식 부분이 존재

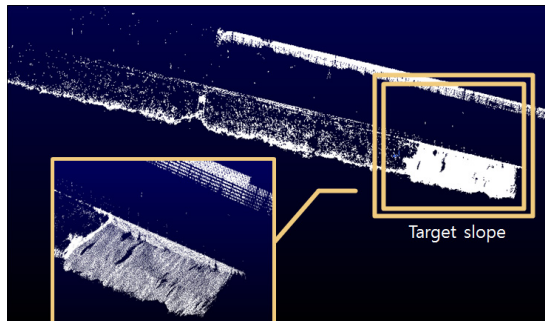
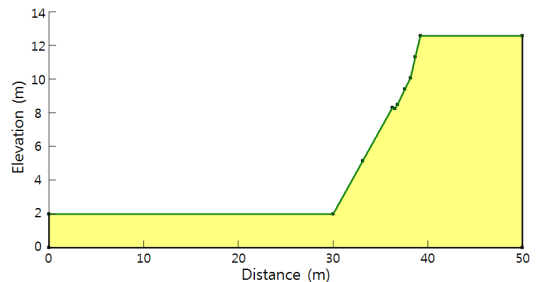
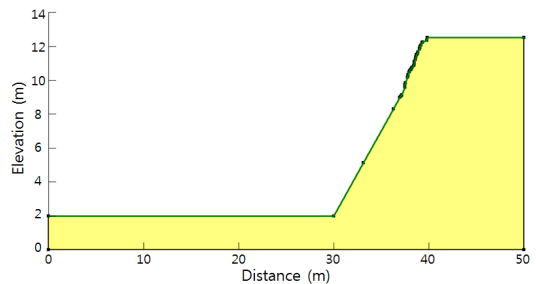


Fig. 6. 3D image of scanning survey at the target soil slope, SS-1.



(a) Site SS-1



(b) Site SS-2

Fig. 7. Cross sections of the target soil slopes for the stability analysis.

**Table 3.** Comparison of the stability analysis for two soil slopes.

Site	Safety factor without wave effect	Safety factor with wave effect	Decreasing rate of safety factor (%)
SS-1	1.542	1.453	5.8
SS-2	1.545	1.414	8.5



(a) Site SS-1



(b) Site SS-2

**Fig. 8.** Erosion features of soil slopes.

하여 보다 정확한 사면 단면을 추출하기 위하여 Trimble 사의 GS-200 모델을 활용하여 3D 스캐닝을 실시하였으며(그림 6), 최종적으로 안전성 해석을 위한 대표 단면을 작성하였다(그림 7).

토사 사면은 주로 풍화토로 구성되어 있으며, 기존의 보고서에서 제시된 습윤단위중량  $19.0 \text{ kN/m}^3$ , 점착력  $15 \text{ kPa}$ , 내부마찰각  $32^\circ$ 를 GEO-SLOPE사 Slope/W 2007 프로그램의 입력값으로 사용하였다(K-water, 2010). 암사면과 동일한 개념으로서 항주파를 고려한 경우(사면내 높은 지하수위 유지)와 고려하지 않은 경우로 구분하여 2개의 토사 사면에 대한 건기시의 안전율을 해석하였다. 항주파를 고려하지 않은 경우는 1.542와 1.545이었으나 항주파를 고려하게 되면 1.453과 1.414로 각각 5.8% 및 8.5% 감소하는 것으로 나타났다(표 3). 이 결과는 수로와 같이 선박에 의한 파랑이 발생하는 사면에서는 항주파를 고려하지 않고 안정성을 검토할 경우, 다소 과대 평가될 위험성이 있는 것으로 나타났다.

SS-1 및 SS-2 토사사면의 현장 상태를 보면 사면 하단부 일부 구간에서 토사 유실이 발생한 것을 알 수 있다(그림 8). 사면 유실은 항주파의 파고와 유사

한 높이까지 존재하고 있어 항주파를 고려한 사면해석 결과가 보다 적합한 것으로 나타난다. 일부 구간에서는 항주파고 이상의 높이에서도 사면유실이 발생하고 있는데, 이는 하부사면의 유실이 상부 사면의 지지력을 감소시켜 발생하는 2차적인 사면 유실로 보인다. 한편, 토사사면의 약한 강도 특성을 고려하면, 파랑의 파압에 의한 표면토사의 세굴, 파도 작용에 의한 사면표면 포화로 수반되는 슬라이딩 발생 모멘트의 증가, 강도 저하 및 동결용해작용 등이 사면 유실의 추가적인 메커니즘으로 고려될 수 있으므로 항주파에 의한 영향 뿐 아니라 타 요인도 함께 고려될 필요가 있다.

## 5. 결 언

이상 연구 결과에서 보듯이, 선박이 항해하면서 사면에 파도의 영향이 지속적으로 미치는 경우를 대상으로 항주파의 높이를 지하수위 조건으로 고려하여 해석한 결과, 암반사면의 경우는 12.0~21.3%, 토사사면의 경우는 5.8~8.5% 정도 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 안전율 감소는 안정 사면을 불안정 사면으로 해석되도록 하는 결과를 초래하였는데, 실제 현장에서 나타나는 항주파 파고 영역에 위치한 암반사면의 붕락 또는 토사사면의 유실 현상을 보면 항주파를 고려한 해석이 의미가 있는 것으로 보인다. 한편, 항주파의 사면에 미치는 영향은 수위 상승, 용해 동결 작용 및 파압 등으로 대표될 수 있으나, 본 연구에서는 수위 상승 요인만을 고려하였기 때문에 실제 사면 붕괴에 수위 상승이 미치는 영향을 정량적으로 평가하는데는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고, 파도 작용이 지속적으로 미치는 사면의 경우에는, 사면내 절리나 파쇄대를 통한 물의 유입이 포화대를 증가시키거나 습윤화를 가속화시켜 사면의 불안정성을 증가시키게 된다. 향후에는 파압에 의한 사면의 파손 및 유실, 수위의 반복적 상승 하강에 의한 용해 동결 작용의 영향 등도 함께 고



려할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 본다.

REFERENCES

Chae, B.G., Park, K.B., Park, H.J., Choi, J.H. and Kim, M.I., 2012, Analysis of slope stability considering the saturation depth ratio by rainfall infiltration in unsaturated soil. *The Journal of Engineering Geology*, 22(3), 343-351 (in Korean with English abstract).

Choi, J.Y., Kim, S.H. and Koo, H.B., 2010, A study on the stability evaluation and numerical simulation of toppling failure on a cut-slope. *The Journal of Engineering Geology*, 20(1), 13-23 (in Korean with English abstract).

GS E&C, 2010, Detailed Inspection Report on the Slope in the 2<sup>nd</sup> Stage Construction Project for the Gulpocheon Waterway. Seoul (in Korean).

Han, T.Y., 2004, A study on the effect of ship wave as operating vessels and decrease plans. Master's thesis, Yonsei University, Seoul (in Korean).

Jeong, N.S., You, K.H. and Park, H.J., 2011, Stability analysis of landslides using a probabilistic analysis method in the Boeun area. *The Journal of Engineering Geology*, 21(3), 247-257 (in Korean with English abstract).

Jiang, T., Henn, R. and Sharma, S.D., 2002, Wash waves generated by ship moving on fairways of varying topography. *Proceedings of 24<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics*, 41-457.

Kang, S.J., Kim, S.K., Son, C.B., Kim, J.S., Hong, J.H. and Kim, C.J., 2007, A study on the characteristics of ship waves. *Journal of Korean Navigation and Port Research*, 31(5), 339-344 (in Korean with English abstract).

Kim, C., Park, N.H., Kim, D.Y. and Kim, Y.H., 2008a, Stability analysis of low flow revetments on external forces. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 8(5), 147-153 (in Korean with English abstract).

Kim, D.Y., Kim, Y.H., Park, N.H. and Kim, C., 2008b, Influence on revetment by ship-waves generated by vessels in han river. *Proceedings of Korea Water Resources Association*, 1442-1446 (in Korean).

Kim, J., Baek, Y., Koo, H.B. and Park, K., 2012, Use of the risk score for the effective management of cut slopes. *The Journal of Engineering Geology*, 22(2), 223-231 (in Korean with English abstract).

Kim, J.M., Kim, J.S., Oh, E.H. and Cho, W.B., 2014, Numerical analysis of hydrograph determination for cohesive soil levee. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 30(4), 81-92 (in Korean).

K-water, 2010, Report on Detailed Inspection for Cut-slope of The Gulpocheon Tailrace Two-phase Construction. Daejeon (in Korean).

Lee, H.Y., Kwon, S.Y., Oh, B.C. and CHun, I.S., 2003, Numerical simulation of the ship-induced waves inside harbor. *Proceedings of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 270-275 (in Korean).

Lee, M.S. and Kim, G.W., 2009, Relationship between rainfall intensity and slope stability based on numerical analysis. *The Journal of Engineering Geology*, 19(1), 25-31 (in Korean with English abstract).

Lim, H.U., Kim, C.H. and Baek, H.J., 2001, Stability analysis of rock slope in limestone mine by numerical analysis. *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 11(3), 270-278 (in Korean with English abstract).

MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011, Design Standard for the Construction Slopes. Seoul (in Korean).

MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2012, Detailed Guidelines Manual of Safety Inspection and Precision Safety Diagnosis. Seoul, Korea (in Korean).

MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2005, Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities. Seoul, 91-129 (in Korean).

Park, S.H., 2010, The effect on water way due to ship waves. Master's thesis, University of Seoul (in Korean).

Varnes, D.J., 1978, Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) *Landslides, analysis and control*, special report 176: Transportation research board. National Academy of Sciences, Washington, DC., 11-33.

Yun, S.K., Kim, T.H., Lee, K.H. and Lee, K.Y., 2011, Settlement behavior of rubble mound breakwater and its surrounding seabed due to wave-loads. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 27(12), 85-96 (in Korean with English abstract).

---

Received : January 14, 2015  
 Revised : March 20, 2015  
 Accepted : March 25, 2015