

배수갑문 유입수류의 에너지 감쇠에 따른 암석 침식 가능성 추정

○조진훈*, 박영진*, 박상현*, 전건영**

1. 서론

시화배수갑문은 당초 내측 담수호의 수위관리를 위하여 홍수시 담수의 배제를 주목적으로 하여 설계되었으나 시화호의 오염문제가 부각되면서 현재는 당초의 기능을 발휘하지 못한 채 담수의 배제는 물론 해수를 유입시켜서 호수의 수질을 적정선에서 유지하고 있다. 이로 인하여 배수갑문의 가동횟수가 당초 계획보다 크게 증가함으로써 구조물 자체의 장기적인 안전성에 우려가 되고 있으며 내측 취부 배수로의 바닥이 상당히 넓은 범위에 걸쳐 침식되고 있다. 이 지역은 풍화암과 연암으로 이루어져 있으나 암질이 매우 불량하여 수류에 대한 저항력이 약할 것으로 추정되므로 침식의 범위와 진행속도 등에 대한 면밀한 검토가 요구된다.

'98년 12월에는 이러한 침식이 진행되어 구조물 자체에까지 영향을 미치지 않도록 하기 위해 에이프런 전면부에 너비 30m 범위를 수중콘크리트로 타설하여 바닥보강을 시행하였다. 본 수리모형실험은 바닥보강 시행 이전과 이후에 대하여 수리현상을 파악하고 수류의 에너지 변화와 바닥 암석의 저항력 등을 파악하여 향후 침식의 추이를 예측하며 이로 인한 구조물의 안전성을 판단하기 위하여 실시하였다.

2. 암석의 침식지수

수류에 의한 암석의 침식은 암석 자체의 강도보다는 암석의 절리의 정도와 방향에 의하여 좌우된다. 따라서 암석 절리의 특성을 정확히 파악하여 여러 기준에 의하여 정량화하는 것이 중요하다. 현재까지 암석의 침식에 대한 연구는 드물게 수행되었으며 이에 대한 기준화가 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서 적용한 분석방법은 그 이론적 근거를 Annandale(1995)의 연구결과에 기초하였다.

물의 흐름에 저항하는 암편이 저항력을 상실하고 본래의 위치에서 이탈하는 과정은 대체로 다음의 3단계 과정을 거치는 것으로 이해할 수 있다 (그림 1).

- 조임(jacking), - 이동(dislodgment), - 이탈(displacement)

에너지 감쇠율(P)과 재료의 세굴에 대한 저항력 $f(K_h)$ 은 다음과 같은 관계식으로 표현된다:

$$P = f(K_h) \quad (1)$$

이 식은 세굴력에 저항할 수 있는 한계점에서 성립한다. 만약, $P > f(K_h)$ 이면, 세굴력이 우세하여 세굴이 발생되며, 반대로 $P < f(K_h)$ 이면, 저항력이 우세하여 세굴이 발생하지 않게 된다

수류의 세굴력을 판단하기 위한 기준으로서 에너지 감쇠율을 선택한 이유는 다음과 같다. 난류흐름은 압력의 변화와 에너지 감쇠를 유발한다. 난류강도의 증가는 에너지 감쇠율과 압

* 농어촌진흥공사 농어촌연구원, ** 농어촌진흥공사 농어촌용수사업처

력 변화율을 증가시킨다. 따라서 에너지 감쇠율은 압력 변화율의 상대적인 크기를 나타내며 동시에 수류의 세굴력을 나타낸다.

손실에너지가 ΔE , 단위유량이 q 이면 단위폭당 에너지 감쇠율은 다음 식으로 표현된다:

$$P = \gamma q \Delta E \quad (2)$$

여기서 γ = 물의 단위중량 이다. 개수로의 경우 에너지감쇠율은 에너지선의 경사와 같으므로 식 (2)를 에너지경사로 표현하면 다음과 같다:

$$P = \gamma q s_f L = \gamma q \Delta E \quad (3)$$

식 (1)의 침식지수 K_b 는 세굴에 대한 재료의 저항크기를 나타낸다. 이 지수를 계산하는데 사용되는 주요 지질인자들로써 질량강도수(mass strength number), 블록 또는 입자의 크기, 절리 또는 입자간 결속력에 대한 전단응력, 그리고 블록의 형상과 흐름에 대한 절리방향 등이 있다. 침식지수는 이들 구성인자를 표현하는 지표값들의 곱으로 표현되며 다음 식과 같다(Kirsten, 1982):

$$K_b = M_s K_b K_d J_s \quad (4)$$

여기서 M_s = 암반강도(mass strength number), K_b = 블록 또는 입자의 크기수, K_d = 절리 또는 입자간 결속력에 대한 전단응력, 그리고 J_s = 상대적 지반구조등급(relative ground structure number) 이다. Kirsten(1982)은 이들 지표값을 구분할 수 있도록 기준을 제시하였다.

암석의 경우, 블록 또는 입자의 크기수 K_b 는 다음 식으로 표현된다:

$$K_b = \frac{RQD}{J_n} \quad (5)$$

여기서 RQD = 암질등급(Rock Quality Designation)(Deere, 1998) 이며 J_n = 절리계등급(joint set number)이다. K_b 값은 암석의 경우 1과 100의 값을 갖는다.

절리 또는 입자간 결속력에 대한 전단응력 $K_d = J_r / J_a$ 로 표시되며, 여기서 J_r = 절리의 거칠기이며 J_a = 절리의 변질도를 나타낸다. 절리의 거칠기는 절리면의 거친정도를 나타낸다. 절리의 변질도는 절리면의 풍화조건을 나타낸다.

상대적 지반구조등급 J_s 는 수류가 절리면으로 침투하여 지반조직의 일부를 이탈시키기에 수월한 조건여부를 반영한다.

그림 2는 암석에 대하여 많은 실험을 통하여 침식한계를 설정한 것이다. 그림에서 경계선의 위쪽 구역은 침식이 발생할 가능성이 큰 범위이며 아래쪽은 침식에 대하여 안정한 구역이다.

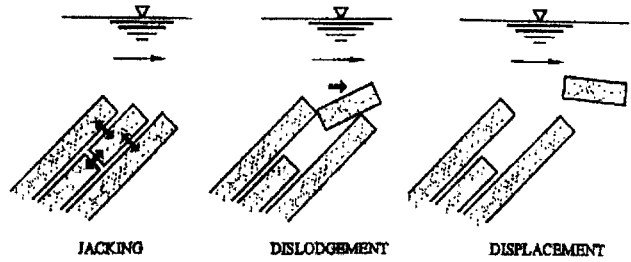


그림 1 바닥암석재료의 세굴과정 개념도

3. 수리모형 실험

(1) 수리모형 개요

본 모형실험에서는 실험시설의 공간과 유량 규모 등을 고려하여 모형의 축척을 1/50으로 하였다. 이 정도의 축척은 모형의 크기가 과대하지 않으며 현장의 수리현상을 재현하는 데 적절할 것으로 판단된다.

모형은 내측 취부배수로를 중심으로 설계하였다. 외측배수로 구간 경계는 배수갑문 위치로부터 180m 떨어진 지점에 설정하였으며 내측의 경계는 취부배수로의 회전구간이 끝나는 지점부터 직선거리로 300m 떨어진 지점에 설정하였다 (그림 3).

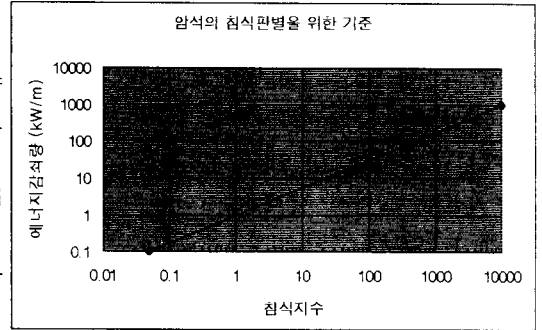


그림 2 암석의 침식판별을 위한 기준

(2) 수리모형의 검정

모형의 검정방법으로서 '99년 3월 20일 측정된 현장유속과 동일한 문비개방 조건하(문비 6, 7번 폐쇄)에서 여러 경우의 수위차에 대하여 실시한 모형실험결과를 비교하는 방법을 사용하였다. 특히 내외수위차가 큰 경우 현장에서의 최대 유속이 모형에서 재현되는가에 중점을 두어 실행하였다. 모형유속은 현장유속과 최대 10% 범위내에서 대체로 잘 일치

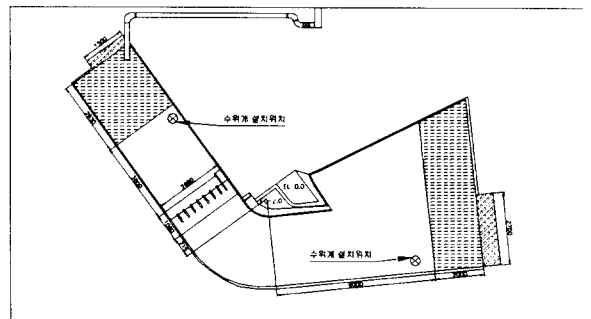


그림 3 수리모형 평면도

하며 따라서 본 모형을 이용하여 실행한 수리실험결과를 현장에 적용함에 있어 정량적인 분석이 가능하다고 판단된다.

4. 수치모형 실험

(1) 모델의 구성

2차원 해수 유동 수치모형을 이용하였으며 모델의 경계는 인천 남측해역을 해측경계로 하여 시화호 전체를 포함하는 범위로 하였다. 격자망은 배수갑문 부근을 세밀하게 구성하여 구체적인 분석이 가능토록 하였다. 그림 4와 5는 각각 모델의 범위와 지형 및 전체 격자망을 나타낸다.

(2) 모델의 보정 및 검증

모델은 현장조사를 기준으로 하여 보정하였다. 현장조사에서 얻어진 수위차에 대한 최대유입속도가 재현되도록 조도계수의 값과 범위를 여러 차례에 걸쳐 조정하였다.

현장 관측유속과 모델링 결과를 비교하면 내외 수위차가 2.0 m일 때 모델에서 발생한 유속은 관측유속의 범위내에 있으며, 내외 수위차가 4.0 m일 때 현장 관측 유속보다 모형에서 발생하는 유속이 작은 값을 보이고 있으나, 현장에서의 측정오차를 감안할 때 실제 현상과 비슷하게 재현되었다.



그림 4 모델의 범위 및 지형

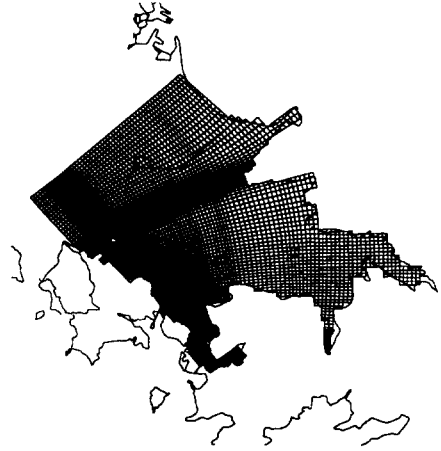


그림 5 전체 격자망

5. 암석 침식 가능성 추정

(1) 침식지수

배수갑문 내측에서 5개공을 시추하여 그 시편을 분석한 결과를 토대로 암석의 특성을 결정하였다. 또한 암석의 일반적인 특성을 파악함과 아울러 암석의 세굴여부를 판단할 수 있도록 위에서 논의한 침식지수(K_h)를 결정하였다(표 1).

표 1 시추지점 암반에 대한 침식지수

시추공 번호	지층	층두께 (m)	암반강도 (M_s)	암질등급 (RQD)	절리계등급 (J_n)	지반구조 등급 (J_s)	절리의 거칠기 (J_r)	변질도 (J_a)	침식지수 (K_h)
1	연암	4.2	70	40	2.24	0.68	1.0	6	141.6
2	풍화암	2.5	3.95	5	5	0.49	0.5	10	0.096
	연암	2.0	70	50	1.83	0.72	1.5	3	688
3	풍화암	1.7	3.95	5	5	0.49	0.5	10	0.096
	연암	2.0	35	10	3.34	0.67	1.5	6	17.4
4	풍화암	1.2	3.95	5	5	0.49	0.5	10	0.096
	연암	4.3	70	30	2.24	0.56	1.0	6	88
5	풍화암	1.8	3.95	5	5	0.49	0.5	10	0.096
	연암	4.3	70	30	2.24	0.56	1.0	6	88

(2) 침식가능성 추정

1) 수류의 에너지 감쇠량 추정

모형실험에서 측정된 수류의 유속과 수위 및 수심을 이용하여 에너지의 변화를 계산하였다. 수류의 에너지는 전수두의 형태로 계산하고 평균 에너지 감쇠율을 단위 폭당 평균 에너지 감소 (kW)로 나타내었으며 그림 6에 나타내었다. 그림 6은 배수갑문 내측 바닥보호공 보강 후의 지형 조건에서 문비 7, 8번을 폐쇄하고 나머지 6련의 문비들을 개방한 조건으로 실험한 결과이다.

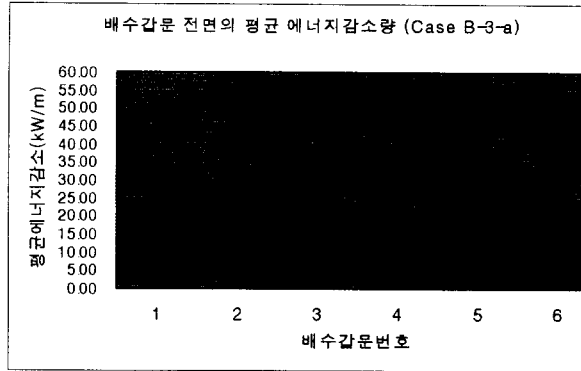


그림 6 배수갑문 전면의 평균에너지감소량

2) 침식가능성 검토

그림 7은 위의 조건에 대하여 각 시추공별로 침식 가능성을 판단한 것이다. 그림에서 한 개의 침식지수만 나타낸 경우는 하나의 지층만에 대하여 판단한 것을 나타내며, 두 개의 침식지수에 대하여 여러 개의 에너지 감소량이 고려된 경우는 두 개의 지층에 대하여 각 시추공에 영향을 미치는 문비의 에너지감소량을 고려한 것을 나타낸다.

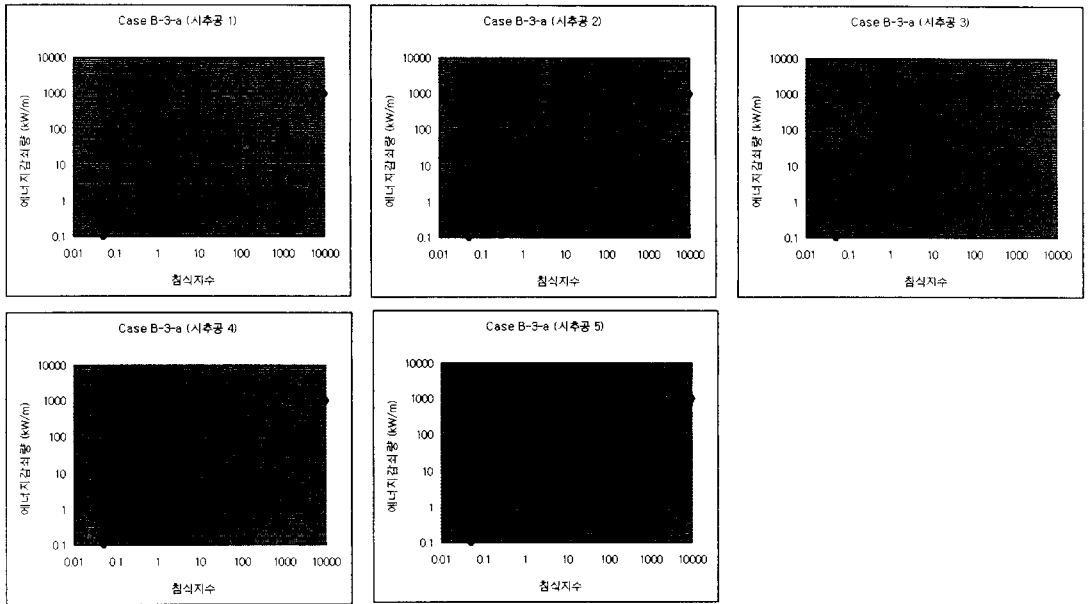


그림 7 침식가능성 판별

그림에서 보면 1번 시추공 지점은 침식에 대하여 비교적 안정한 범위에 위치한다. 2번 시추공 지점은 저층부의 연암층은 안정한 범위에 있으나 표층부 풍화암은 침식의 가능성이 매우 높다. 3번 시추공 지점은 표층부는 물론 저층부의 연암층도 침식의 가능성을 배제할 수

없다. 4번 시추공 지점은 표층부는 침식 가능성이 크나 저층부 연암은 유속에 따라 안정성여부가 달라지며 5번 시추공 지점은 비교적 안정한 범위에 위치한다.

6. 결론

수류에 의한 암석의 침식은 암석 자체의 강도보다는 암석의 절리의 정도와 방향에 의하여 좌우된다. 따라서 암석 절리의 특성을 정확히 파악하여 여러 기준에 의하여 정량화하는 것이 중요하다. 현재까지 암석의 침식에 대한 연구는 드물게 수행되었으며 이에 대한 기준화가 이루어지지 않고 있다. 본고는 Annandale(1995)의 침식지수 이론을 실제의 경우에 대하여 적용한 결과를 제시하였다.

암석의 침식지수는 지질조사에서 시추한 시편의 분석결과를 토대로 결정하였으며 수류의 에너지 감쇠는 수리 및 수치모형실험 결과로부터 전수두의 감쇠량의 추정을 통하여 계산하였다. 이와 같이 결정된 두 값을 주어진 기준도상에 도시하여 그 위치에 따라 침식가능성을 판단하였다.

총 5개 시추공 지점 부근의 암석에 대하여 침식가능성을 판단한 결과, 표층부 풍화암은 침식의 가능성이 매우 높으며 저층부의 연암층도 그 특성에 따라 침식의 가능성을 배제할 수 없는 것으로 나타났다.

7. 참고문헌

- (1) Annandale, G.W. and Kirsten, H.A.D., (1994), On the Erodibility of Rock and Other Earth Materials, Proc. *Hydraulic Engineering '94*, ASCE, Buffalo, New York, August, pp. 68-72.
- (2) Annandale, G.W., (1995), Erodibility, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 471~494.
- (3) Bell, F.G. (1992), *Engineering properties of soils and rocks*, 3rd, ed. Ch. 7, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 345p.
- (4) Deere, D.U., and D.W. Deere, 1988, The rock quality designation (RQD) index in practice: in *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*: ASTM STP-984, L. Kirkaldie (Ed.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 91-101.
- (5) Fiorotto, V. and A. Rinaldo, 1992, Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps: *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 30(4), pp.499-520.
- (5) Geological Society of London, (1997), The description of rock masses for engineering purposes, Report by the Geological Society Engineering Group Working Party: *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 10, Great Britain, pp. 355~388.
- (6) International Society of Rock Mechanics (Committee on Standardization of Laboratory and Field Tests), 1978, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, *International Journal of Rock Mechanics, Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 15, pp. 319~368.
- (7) Kirsten, H.A.D., 1988, Case histories of groundmass characterization for excavatability, in *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM, STP 984, L. Kirkaldie, (Ed.), pp. 102-120.