

배수갑문 유입수류의 에너지 감쇠에 따른 암석 침식 가능성 추정

Estimation of Rock Erodibility due to Energy Dissipation of Inflow Passing through the Sluice Gate of Seadike

조진훈* / 박영진** / 박상현***

Jo, Jin Hoon / Park, Young Jin / Park, Sang Hyun

Abstract

Sihwa seadike is originally designed to control the water level in lake Sihwa. However the sluice gate is being operated everyday to preserve the water quality of lake. Due to the frequent operation of gates the bottom of drainage canal which is composed of weathered rock and soft rock is being scoured. Recently the bottom in the front area of apron was protected by putting underwater concrete. This study is carried out to understand the hydraulic situation for protection, and to estimate the trend of scouring by comparing between energy dissipation and resistance of bottom rock. Annandale(1995) introduced the erodibility index theory, and suggested a criteria to judge the erodibility of rock through the relation between the erodibility index and energy dissipation. Determination of erodibility index of rock is based on the results of sample core analysis, and the energy dissipation of flow is calculated from the estimation of total head on the scale model. These two values are plotted on the criteria, and the erodibility of rock is determined.

Keywords: sluice gate, rock erodibility, energy dissipation, erodibility Index

요 지

시화배수갑문은 당초 내측 담수호의 수위관리를 위하여 설계되었으나 호수의 수질 악화를 방지하기 위하여 배수갑문을 당초 계획보다 잦은 빈도로 자동시키고 있다. 이에 따라 강한 유입 흐름의 영향을 받는 내측 배수로의 바닥이 상당히 넓은 범위에 걸쳐 침식되고 있다. 최근에 침식이 진행되는 것을 막기위하여 에이프런 전면부 일부 구간을 수중콘크리트로 타설하여 바닥보강을 시행하였다. 본 연구는 수리모형실험을 통하여 바닥보강 시행 이전과 이후에 대하여 수리현상을 파악하고 유입흐름의 에너지 변화와 바닥 암석의 저항력 등을 파악하여 향후 침식의 추이를 예측하기 위하여 실시하였다. Annandale(1995)은 침식지수 이론을 도입하여 많은 실험을 통하여 침식지수와 흐름의 에너지 감쇠 간의 관계를 파악하였으며 암석의 침식여부를 판단할 수 있는 기준을 제시하였다. 암석의 침식지수는 지질조사에서 시추한 시편의 분석결과를 토대로 결정하였으며 수류의 에너지 감쇠는 수리모형실험 결과로부터 전수두의 감쇠량의 추정을 통하여 계산하였다. 이와 같이 결정된 두 값을 주어진 기준도상에 도시하여 그 위치에 따라 침식가능성을 판단하였다.

핵심용어 : 배수갑문, 암석의 침식, 에너지 감쇠, 침식지수

* 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원
Senior Researcher, Rural Research Ins., KORICO, Anyang, Kyonggi 430-600, Korea
(jjhjo@karico.co.kr)

** 농업기반공사 농어촌연구원 연구원
Researcher, Rural Research Ins., KORICO, Anyang, Kyonggi 430-600, Korea

*** 농업기반공사 농어촌연구원 수리시험장장
Director of Hydraulic Lab., Rural Research Ins., KORICO, Anyang, Kyonggi 430-600, Korea

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.

최근에 배수갑문 내측 에이프런의 하류단에 침식현상이 발견되어 에이프런 전 구간에 약 30m 폭의 범위에 대하여 수중콘크리트로 에이프런과 동일한 높이로 바다보강을 하였다. 본 수리모형실험은 바다보강 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. 수리모형 실험

2.1 수리모형 개요

실험의 정확성 측면에서 볼 때 수리모형의 축척은

가능한 한 크게 하는 것이 바람직하나 실험시설의 공간과 유량규모 등이 제한적인 인자로 작용하게 되어 축척을 크게 하는 데는 한계가 있다. 그러나 축척이 너무 작아지게 되면 scale effect로 인하여 흐름의 현상이 실제와 다른 형태로 나타나게 되며 또한 계측오차가 모형유속에 비하여 상대적으로 커지게 되어 측정결과와의 정확성이 낮아지게 된다.

시화배수갑문의 경우 유입유속에 대한 주 측정범위는 3m/s~10m/s정도로 간주할 수 있다. 속도와 길이 축척을 각각 V_R 과 L_R 이라 할 때 $V_R = L_R^{1/2}$ 이므로 길이축척을 1/80로 하면 속도축척은 약 1/9이 되어 모형유속의 범위는 0.33~1.1m/s이 된다. 대부분의 유속계의 경우 이 정도의 유속범위는 비교적 정확하게 측정이 가능하므로 모형의 축척을 1/80보다 큰 값으로 결정하는 것이 바람직하다. 본 실험에서는 실험시설의 공간과 펌프용량 등을 고려하여 1/50로 결정하였다.

모형은 내측 배수로를 중심으로 제작하였다. 외측배수로 구간 경계는 배수갑문 위치로부터 180m 떨어진 지점에 설정하였으며 내측의 경계는 취부배수로의 만곡부가 끝나는 지점부터 직선거리로 300m 떨어진 지점에 설정하였다(그림 1).

모형은 시멘트 모르타를 이용하여 고정상으로 제작하였으며 배수갑문과 에이프런 부분은 콘크리트 부분이므로 마찰을 줄이기 위하여 아크릴로 제작하였다. 바다보강부분은 수중콘크리트 부분이나 수중시공의 여건상 마찰상태를 고려하여 시멘트 모르타로 제작하였다. 내측 배수로상에 격자망을 구성하여 114개의 격자점을

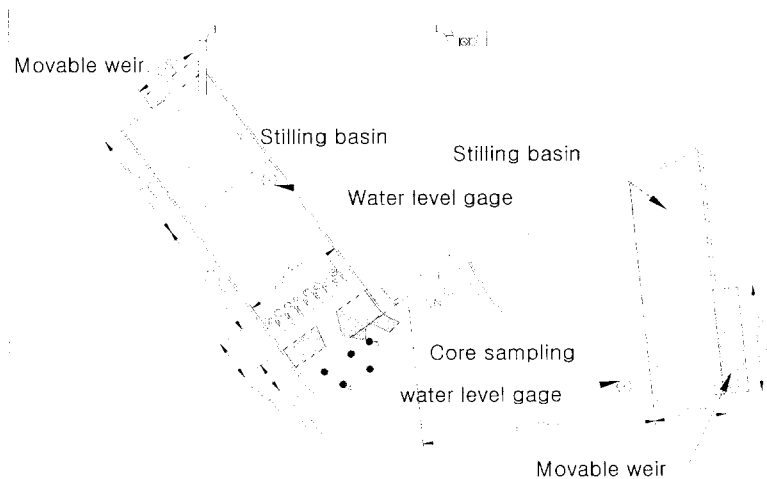


그림 1. 수리모형 평면도

설정하였으며 각 격자점에서 유속, 수위, 수심을 측정하였다. 모형유속은 x-y 2방향 디지털 유속계를 이용하여 수심평균유속으로서 바다에서 수심의 60%에 해당하는 위치에서 측정하였다.

2.2 모형의 검증

모형의 검증방법으로서 '99년 3월 20일 측정된 현장 유속과 동일한 문비개방조건하(문비 6, 7번 폐쇄)에서 여러 경우의 수위차에 대하여 실시한 모형실험결과를 비교하는 방법을 사용하였다. 특히 내외수위차가 큰 경우 현장에서의 최대유속이 모형에서 재현되는가에 중점을 두어 실행하였다. 표 1과 2는 서로 다른 내외수위차 조건하에서 에이프런상에서 측정된 현장유속을 나타낸다.

표 3과 4는 내외수위차가 각각 2.45m와 4.18m인 경우에 대하여 에이프런과 보강구간에서 측정된 모형 유속을 원형유속으로 환산한 값이며 그림 2와 3은 각각의 경우에 대하여 모형유속과 현장유속을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 모형유속과 현장유속은 대략 10%범위내에서 대체로 일치하는 경향을 나타낸다. 현장유속이 모형유속보다 약간 작게 나

타나 이는 2인이 측정된 값을 평균하는 과정에서 유속이 작아지는 점과 부자가 흐름에 적응하는 데 약간의 시간이 걸리는 점 등에 기인하는 것으로 판단된다. 결과적으로 모형유속은 현장유속과 최대 10% 범위내에서 대체로 잘 일치하며 따라서 본 모형을 이용하여 실행한 수리실험결과를 현장에 적용함에 있어 정량적인 분석이 가능하다고 판단된다.

2.3 실험조건

바닥보강 전후의 조건에 대하여 실험을 실시하여 바닥보강의 효과를 분석하였다. 담수호 내수위는 관리수위인 EL. -1.0m로 고정하였으며 외조위가 EL. 2.0m, 및 EL. 4.0m 경우로 구분하여 실험하였다. 문비의 작동조건은 실제적으로 문비의 일부가 정기적으로 보수됨을 고려하여 전체 8련중 6련만 작동하는 조건을 위주로 실험을 실시하였으며 7, 8련이 폐쇄된 경우와 1, 2련이 폐쇄된 경우로 구분하였다.

2.4 실험결과

가. 바닥 보강 전(조건 A)

이 경우는 그림 1에 표시한 보강부분이 없는 경우로

표 1. 현장유속(검정Case 1)

시간	측정거리 (m)	내수위 (m)	외수위 (m)	조차 (m)	문비 번호	T1(s)	T2(s)	평균 T (s)	유속 (m/s)
16:45	27.0	-1.20	1.25	2.45	4	2.66	2.57	2.615	10.325
16:46	27.0	-1.20	1.26	2.46	8	3.56	3.43	3.495	7.725

표 2. 현장유속(검정Case 2)

시간	측정거리 (m)	내수위 (m)	외수위 (m)	조차 (m)	문비 번호	T1(s)	T2(s)	T(s)	유속(m/s)
17:50	18.8	-1.03	3.00	4.03	4	1.46	1.77	1.62	11.641
17:56	18.8	-1.02	3.20	4.22	1	1.86	2.05	1.96	9.616

표 3. 원형환산유속(검정Case 1; ΔH=2.45m)

문비번호	1	2	3	4	5	6	7	8
에이프런구간유속(m/s)	10.11	10.36	10.47	11.06	10.18	0.35	0.0	8.85
보강구간유속(m/s)	7.63	7.60	8.32	8.19	7.25	1.35	5.69	6.67

표 4. 원형환산유속(검정Case 2; ΔH=4.18m)

문비번호	1	2	3	4	5	6	7	8
에이프런구간유속(m/s)	12.33	12.61	12.85	12.8	12.53	1.24	1.03	11.92
보강구간유속(m/s)	12.14	11.59	11.68	10.85	10.78	0.6	2.54	11.72

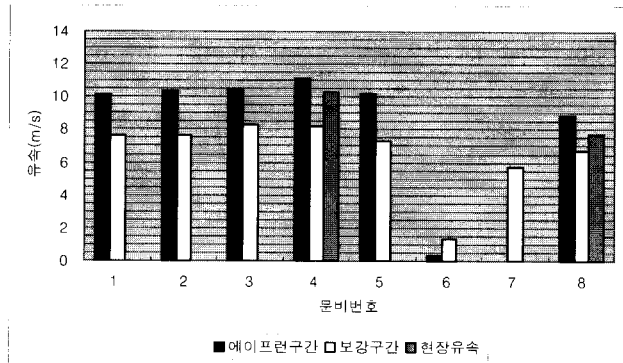


그림 2. 원형환산유속과 현장유속의 비교 (검정Case 1)

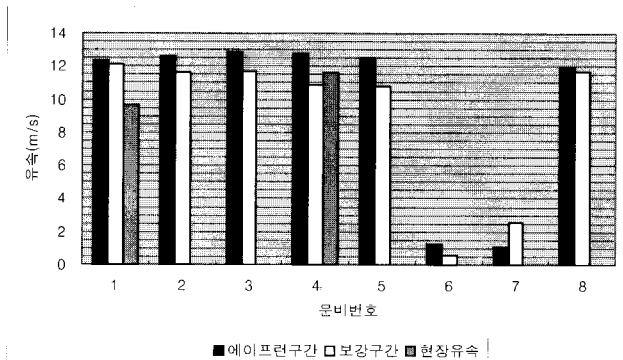


그림 3. 원형환산유속과 현장유속의 비교 (검정Case 2)

서 보강이전의 침식상태를 고정상모형에서 시멘트 모르타르로 재현한 상태에서 실험을 시행하였다. Case A-3-a는 문비 7, 8번을 폐쇄한 경우로서 내외 수위차가 5.0m인 경우이다. 이 경우 최대유속은 2, 3번 문비 앞에서 발생하며 13.0m/s를 초과한다(그림 4). 빠른 흐름은 에이프런 말단에서 40m 정도를 에너지 감쇄가 거의 없이 진행된 후 급격한 와류를 발생하며 에너지의 감쇄가 급속히 이루어 진다. 그림에서 횡방향으로 등유속선의 간격이 좁게 나타난 부분이 이러한 상황을 설명한다. 이에 따라 이 부분에서 침식작용이 발생할 가능성이 있다.

나. 바닥 보강 후(조건 B)

이 경우는 그림 1에 표시한 보강부분을 고정상모형에서 재현한 상태에서 실험을 시행하였다. Case B-3-a의 경우(그림 5), Case A-3-a와 비교하면 보강 후 에이프런 부분에서 최대유속이 2.0m/s 정도 감소하였다. 보강구간에서 유속의 평면적 분포가 비교적

균일하다. 이 구간에서 에너지의 감쇄는 작으며 넓은 구간에 걸쳐서 에너지의 감쇄가 발생하였다. 따라서 보강 후 흐름의 에너지가 어느 한 곳으로 집중하는 것을 방지하게 되어 바닥 침식을 완화시키는 조건을 제공하는 것을 알 수 있다.

3. 암석 침식 가능성 추정

3.1 암석의 침식지수 결정 기준

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 분석 방법은 그 이론적 근거를 Annandale(1995)의 연구결과에 기초하였다.

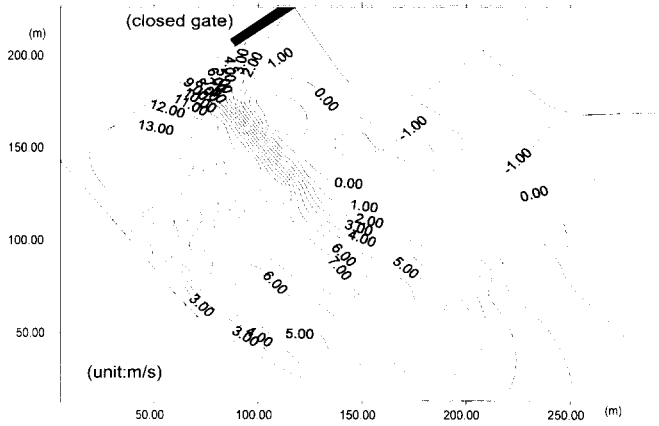


그림 4. Plane distribution of velocity(Case A-3-a)

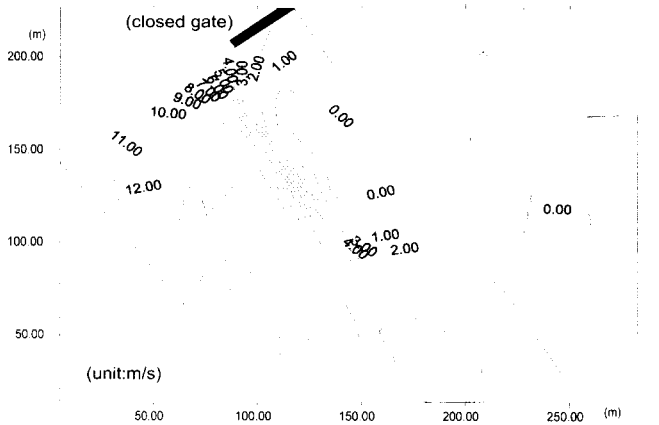


그림 5. Plane distribution of velocity(Case B-3-a)

물의 흐름에 저항하는 암편이 저항력을 상실하고 본래의 위치에서 이탈하는 과정은 대체로 그림 6과 같이 조임(jacking), 이동(dislodgment), 이탈(displacement)

의 3단계 과정을 거치는 것으로 이해할 수 있다 (Annandale(1995)). 에너지 감소율(P)과 재료의 세굴에 대한 저항력

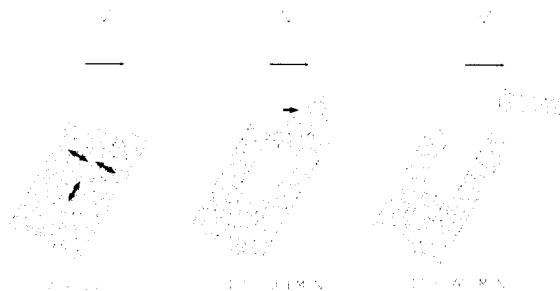


그림 6. 바닥 암석재료의 침식과정 개념도

$f(K_b)$ 은 다음과 같은 관계식으로 표현된다:

$$P = f(K_b) \tag{1}$$

이 식은 세굴력에 저항할 수 있는 한계점에서 성립한다. 만약, $P > f(K_b)$ 이면, 세굴력이 우세하여 세굴이 발생되며, 반대로 $P < f(K_b)$ 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 압력 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:

$$P = \gamma q \Delta E \tag{2}$$

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

$$P = \gamma q s_j L \tag{3}$$

식 (1)의 침식지수 K_b 는 세굴에 대한 재료의 저항 크기를 나타낸다. 이 지수를 계산하는 데 사용되는 주요 지질인자로서 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):

$$K_b = M_s K_b K_d J_s \tag{4}$$

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:

$$K_b = \frac{RQD}{J_n} \tag{5}$$

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 7은 Annandale(1995)이 암석에 대하여 많은 실험을 통하여 침식지수와 에너지감쇠량을 축으로 하는 로그표상에 침식한계를 설정한 것이다. 그림에서 경

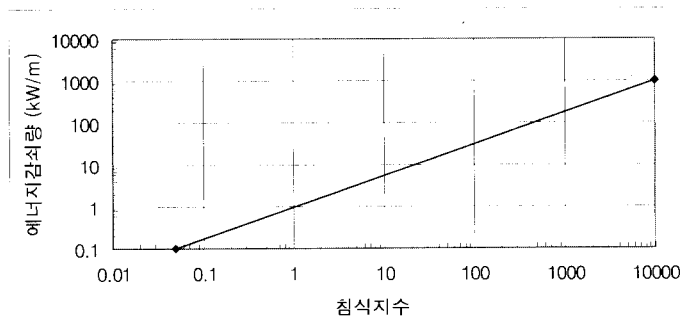


그림 7. 암석의 침식판별을 위한 기준

계선의 위쪽 구역은 침식이 발생할 가능성이 큰 범위이며 아래쪽은 침식에 대하여 안정한 구역이다. 이 기준은 암석의 침식을 판별하는 하나의 가이드라인으로서 침식지수와 에너지감쇠량의 추정과정에서부터 상당한 오차의 가능성을 내포하고 있으므로 절대적인 기준이 아니며 경계선에서 가까운 지점에 위치하는 경우 정확한 판별은 곤란하다고 판단된다.

3.2 현장 시료의 침식지수 결정

배수갑문 내측에서 5개공을 시추하여 그 시편을 분석한 결과를 토대로 암석의 특성을 결정하였다. 5개 시추공의 위치와 번호는 그림 1에 표시되어 있다. 또한 암석의 일반적인 특성을 파악함과 아울러 암석의 세굴여부를 판단할 수 있도록 위에서 논의한 침식지수 (K_h)를 결정하였다(표 5).

3.3 침식가능성 추정

3.3.1 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 나타내었다. 그림 8은 배수갑문 내측 바다보호공 보강 후의 지형조건에서 문비 7, 8번을 폐쇄하고 나머지 6련의 문비들을 개방한 조건으로 실험한 결과이다.

3.3.2 침식가능성 검토

그림 9는 위의 조건에 대하여 각 시추공별로 침식가능성을 판단한 것이다. 그림에서 한 개의 침식지수만 나타낸 경우는 하나의 지층만에 대하여 판단한 것을 나타내며, 두 개의 침식지수에 대하여 여러 개의 에너지 감쇠량이 고려된 경우는 두 개의 지층에 대하여 각

표 5. 시추지점 암반에 대한 침식지수

시추공 번호	지 층	층두께 (m)	암반강도 (M_s)	암질등급 (RQD)	절리계등급 (J_n)	지반구조등급 (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

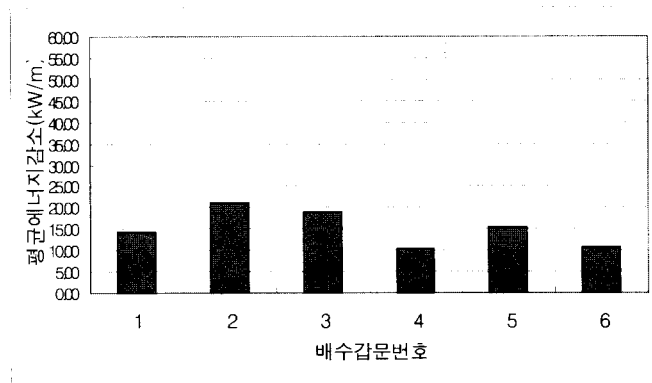


그림 8. 배수갑문 전면의 평균에너지감소량(Case B-3-a)

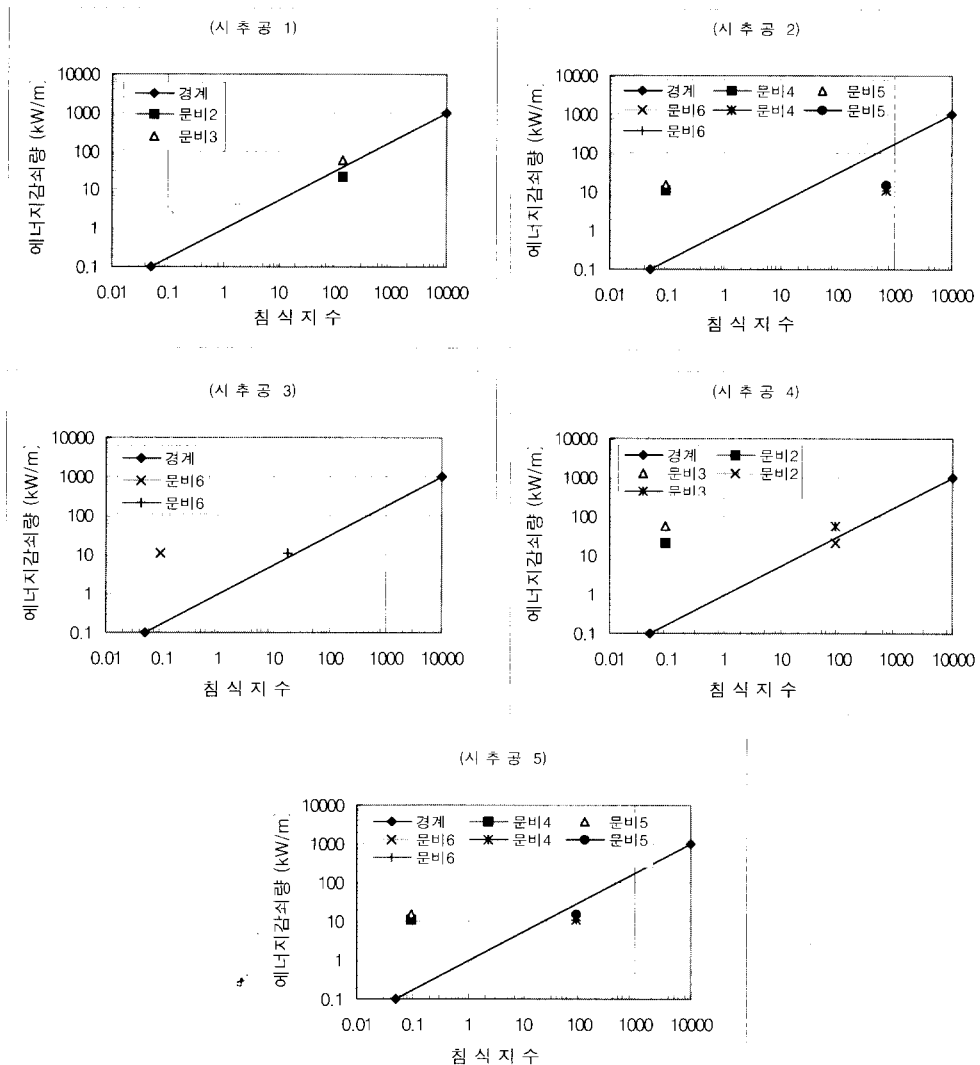


그림 9. 침식가능성 판별(B-3-a)

시추공에 영향을 미치는 문비의 에너지감쇠량을 고려한 것을 나타낸다. 시추공 1의 경우에는 연암층만 존재하므로 이에 대하여 부근의 문비 2와 문비 3의 전면의 에너지감쇠량에 대한 침식지수의 위치를 표시하였다.

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

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

4. 결 론

수류에 의한 암석의 침식은 암석 자체의 강도보다는 암석의 질리의 정도와 방향에 의하여 좌우된다. 따라서 암석 질리의 특성을 정확히 파악하여 여러 기준에 의하여 정량화하는 것이 중요하다. 현재까지 암석의 침식

에 대한 연구는 드물게 수행되었으며 이에 대한 기준화가 이루어지지 않고 있다. 본 논문은 Annandale (1995)의 침식지수 이론을 실제의 경우에 대하여 적용한 결과를 제시하였다.

암석의 침식지수는 지질조사에서 시추한 시편의 분석결과를 토대로 결정하였으며 수류의 에너지 감쇠는 수리모형실험 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.

참 고 문 헌

- 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.
- Annandale, G.W., (1995), "Erodibility." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 471~494.
- Bell, F.G., (1992), *Engineering properties of soils and rocks*, 3rd, ed. Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, Chapter 7.
- Deere, D.U., and Deere, D.W. (1988), "The rock quality designation (RQD) index in practice." *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*: ASTM STP-984, L. Kirkaldie (Ed.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 91-101.
- Fiorotto, V., and Rinaldo, A. (1992), "Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps" *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 499-520.
- 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.
- 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.
- Kirsten, H.A.D., (1988), "Case histories of groundmass characterization for excavatability." *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM, STP 984, L. Kirkaldie, (Ed.), pp. 102-120.

(논문번호:99-054/접수:2000.07.12/심사완료:2000.02.09)