

## 중심코아형 록필댐 제체의 물리적 및 역학적 특성 조사

### Investigation of Physical and Mechanical Properties for a Central Core Rockfill Dam

신동훈\*, Dong-Hoon, Shin

\*수자원연구소 지반구조연구팀 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Eng. Team, WTRI

**개요(SYNOPSIS)** : In this study the results of investigation on the physical and mechanical properties of a rockfill dam body were provided. On the crest of the old Namgang dam to be excavated partially, various in-situ tests(boring with SPT, sampling of undisturbed sample, field density test, field permeability test) and geophysical investigation works were performed. Rock materials, i.e., shale and sandstone, were collected, and their slake durability was evaluated using slaking durability testing method which is suggested by ISRM.

**주요어(Key Words)** : 필댐, 역학적 특성, 현장조사, 지구물리탐사

#### 1. 서론

필댐(fill dam)은 흙댐(earth dam), 록필댐(rockfill dam) 및 토석댐(earth-rock dam)으로 나누며, 불투수성 부분의 형식에 따라서 균일형(homogeneous type), 존형(zoned type) 및 표면차수벽형(face slab type)으로 구분한다. 전세계적으로는 지금까지 축조된 댐의 형식 중 약 60~70%가 록필댐으로서 우리나라의 경우에도 대부분이 록필댐으로 축조되었다.(표 1. 참조)

록필댐은 제체 재료의 50% 이상이 암석재료로 이루어진 댐으로서 점토심벽 재료의 선정과 설계에 신중을 기하여야 하며, 기초지반은 콘크리트 중력식댐 보다는 덜하나 흙댐 보다는 더 높은 지내력을 필요로 한다. 특히 점토심벽은 록필댐의 핵심 부분으로서 투수계수가 작아 불투수성인 것이 첫 번째 조건이나 전단강도나 압축성, 균질성의 점에서도 충분히 신뢰성이 있게 설계 및 시공되어야 한다.

한편, 최근에는 표 1.에서 보는 바와 같이 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)이 주류를 이루고 있는데 이는 경제성과 시공성, 그리고 내지진성이 뛰어난 특성 때문으로 인식되고 있다.

남강구댐은 1920년 이후 낙동강 개수계획의 일환으로 검토되기 시작하여 수차례의 우여곡절 끝에 1970년에 준공되었으나 1980년대에 들어오면서 각종 용수수요가 증대하였고, 홍수가 빈발하여 댐의 안전측면에서도 기능 증대의 필요성이 대두되기 시작하였다. 이에 남강댐의 홍수조절능력 및 용수공급능력의 증대를 위하여 기존댐(이하 남강구댐, 댐높이 21m)의 직하류부에 댐높이 34 m의 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐을 건설하게 되었다. 보강댐이 건설됨으로써 기존댐은 수리수문학적 영향, 토질 및 구조적 영향, 친환경적 영향 등의 제반 여건을 고려하여 부분 철거하기에 이르렀다.

표 1. 우리나라 주요댐의 형식 및 설계지진계수 적용 현황

| 댐 명 | 형 식    | 설계지진계수( $\alpha$ ) |      |
|-----|--------|--------------------|------|
| 기존댐 | 소양강댐   | RF                 | 0.05 |
|     | 충주댐    | CG                 | 0.05 |
|     | 안동댐    | RF                 | 0.05 |
|     | 합천댐    | CG                 | 0.10 |
|     | 임하댐    | RF                 | 0.10 |
|     | 대청댐    | CG & RF            | 0.05 |
|     | 섬진강댐   | CG                 | 0.05 |
|     | 주암댐    | RF                 | 0.10 |
|     | 부안댐    | CFRD               | 0.10 |
|     | 보령댐    | RF                 | 0.10 |
|     | 남강댐    | CFRD               | 0.10 |
| 신설댐 | 낙동강하구둑 | CG & RF            | 0.08 |
|     | 용담댐    | CFRD               | 0.12 |
|     | 횡성댐    | CFRD               | 0.10 |
|     | 밀양댐    | CFRD               | 0.10 |
|     | 탐진댐    | CFRD               | 0.08 |
| 영월댐 | CFRD   | 0.20               |      |

주) CFRD : 콘크리트 표면차수식 석괴댐  
 CG : 콘크리트 중력식댐  
 RF : 중심코아형 록필댐

었다. 여수로는 콘크리트 일류제로서 연장 97 m, 표고 31 m, 문비는 총 8문으로서 10m×6.6 m 5문, 6m×12 m 1문과 9m×9.2 m 2문으로 구성되었다.

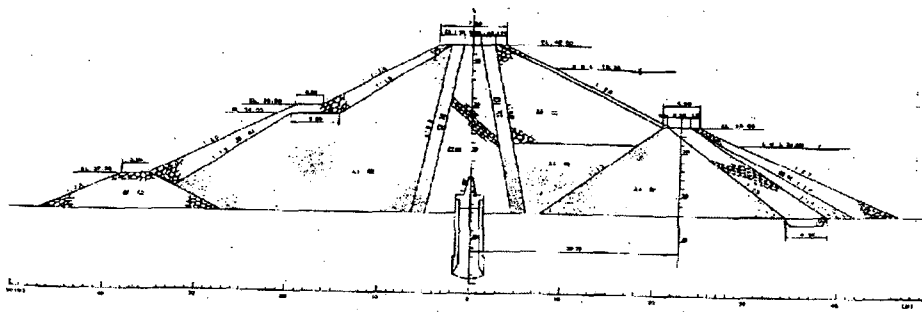


그림 1. 남강구댐의 표준단면도

한편, 남강구댐은 댐마루(crest of dam)의 길이가 약 1,000m로서 다른 댐에 비하여 매우 길 뿐만 아니라 그림-1에서 보는 바와 같이 댐기초지반이 암반이 아닌 미고결 사력층이고, 그 사력층에 콘크리트 우물통기초를 설치한 후 그 위에 댐체를 축조하여 국내에서는 매우 특이한 구조를 갖추고 있다. 즉, 남강댐은 기초지반(미고결 사력층), 우물통 기초(콘크리트), 점토심벽 및 사력 등의 매우 이질적인 재료(non-homogeneous materials)로 구성되어 있어 담수 후 시간경과에 따라서 댐의 거동이 일반적인 필댐과 매우 다를 것으로 예상되었다. 본 연구에서도 이러한 점에 착안하여 조사를 실시하였다.

본 연구에서는 이러한 배경하에 남강구댐을 대상으로 하여 국내외적으로 드문 필댐의 철거공사와 수반한 제체재료 및 구조에 대한 물리적·역학적 특성을 실측·조사하여 필댐의 거동과 관련된 자료를 취득하였다. 특히 축조재료로 사용된 혈암의 물리적 특성 및 풍화특성 등을 조사하여 축조후 약 30년이 경과된 현 시점에서의 내구성 등을 평가함으로써 향후 댐축조재료로서의 활용가능성을 검토하였다.

## 2. 남강구댐의 위치 및 제원

남강구댐은 진주시로부터 낙동강의 지류인 남강을 따라서 약 6 km 상류에 위치하고 있다. 댐의 형식 및 규모는 그림 1.과 같이 중심코아형 록필댐으로서 댐높이는 21.0 m이고, 댐마루의 길이는 974.8 m, 댐마루 폭은 7.5 m이다. 댐체의 상하류 사면의 기울기는 각각 1:2.0~2.2와 1:1.8~2.2가 되도록 하였고, 댐체의 체적은 약 75만 $m^3$ 이며, 댐마루에는 흉벽(parapet wall)을 1 m 높이로 설치하였다.

남강구댐은 크게 Rock Zone, Filter Zone 그리고 Core Zone으로 구성된다. Rock Zone의 재료는 건설당시에 혈암(shale)과 사암(sandstone) 등을 주로 사용하였으며, 본 조사에서도 댐체의 상하류 사면의 위아래에서 쉽게 발견할 수 있

### 3. 조사내용 및 방법

조사내용 및 방법은 표 2.에 나타난 바와 같다. 단, 조사와 시험이 진행되면서 제체의 상태 및 현장여건에 따라서 일부의 조사항목 및 세부내용이 변경 또는 수정되었는데 그 이유는 제체의 변형조사의 경우 건설당시 및 그 이후의 측량 자료가 전무하였고, 본 조사를 착수하였을 때는 이미 제체의 상당부분이 굴착되어 손상이 심한 상태이었으므로 조사항목에서 제외되었다.

조사에 있어서는 시험굴 조사를 통하여 점토심벽의 시공상태 및 치수를 측정하였으며, 심벽 점토재료에 대한 물성 및 강도특성을 조사하기 위하여 현장Vane시험이 계획되었으나 표준관입시험 결과 N=30~50 정도이고 약 150 mm 정도의 강자갈이 끼여 있어 시험이 불가능하였다. 또한, 제체 및 기초암반의 지구물리특성을 파악하기 위한 지구물리 로깅 및 시추공 탄성과 탐사 및 시험이 실시되었다.

한편, 남강구댐에는 현재 국내외의 거의 모든 댐에 설치되어 있는 매설계기가 설치되어 있지 않은데 그 이유는 댐의 규모가 작고 안정성에 큰 문제가 없을 것으로 판단되어 건설당시 설치하지 않았기 때문이라 전해지고 있다. 근래에 축조되는 댐들에 있어서는 매설계기가 기본적으로 설치되어 향후의 안정성 평가를 용이하게 해주고 있는 것을 생각할 때 다소 안타까운 부분이다.

표 2. 남강구댐 조사내용

| 조사항목             | 조사내용                     | 조사방법  |
|------------------|--------------------------|---|
| □제체의 변형조사        | ○ 제체의 침하량                | - 정밀측량  |
|                  | ○ 제체의 수평이동량(변위량)         | - 정밀측량  |
|                  | ○ 제체의 단면변화               | - 정밀측량 및 Test Pit조사시 각 zone의 치수 측정  |
| □제체 재료의 물리적 특성조사 | ○ 토질재료의 물성 및 강도특성        | - 들림도시험, 함수비, 비중, 입도분석, Atterberg한계 시험 등<br>- 시추조사 및 SPT시험<br>- 교란 및 불교란 시료의 채취<br>- 삼축압축시험 및 현장 Vane전단시험<br>- 지구물리 로깅 및 시추공 탄성과 탐사 |
|                  | ○ 토질재료의 압밀특성             | - 코아 점토의 압밀시험   |
|                  | ○ 토질재료의 현장 투수특성          | - Lugeon Test   |
|                  | ○ 암석시료의 물성 및 강도특성        | - 비중, 점하중강도 시험  |
|                  | ○ 암석의 풍화 관찰              | - Slaking시험   |
| □제체 기초 지반의 특성조사  | ○ Curtain Grout부의 투수성 평가 | - Lugeon Test   |
|                  | ○ 암반의 강도특성               | - 코아시료의 일축압축강도 시험   |
|                  | ○ 균열·절리·층리 등의 이상 유무 관찰   | - 코아시료의 채취 및 관찰   |
| ○ 암반의 지구물리 특성    | - 지구물리 로깅 및 시추공 탄성과 조사   |   |
| □여수로 구조물 상태조사    | ○ 콘크리트의 강도특성             | - 코아시료의 일축압축강도 시험   |
|                  | ○ 콘크리트의 열화 및 변상상태        | - Schmidt Hammer시험, 중성화시험   |
|                  | ○ 철근의 강도특성 및 부화상태        | - 철근의 인장강도시험 및 부화강도시험   |
| □기타              | ○ Riprap의 손상상태           | - 육안관찰  |
|                  | ○ 제체의 균열, 합몰 상태          | - 육안관찰  |
|                  | ○ 사면의 식생상태               | - 육안관찰  |
|                  | ○ 사면의 침식, 세굴 및 활동상태      | - 육안관찰  |
|                  | ○ 용수 발생 여부               | - 육안관찰  |
|                  | ○ 구멍의 형상에 대한 기록보존        | - 사진촬영 및 비디오 촬영   |

### 4. 시추조사 결과

시추공은 총12공이 천공되었으며, 그중 3공은 지구물리 탐사를 위한 시추공으로 사용하였다. 그림 2.는 시추조사시 수행한 표준관입시험 결과를 나타낸 것으로서 댐 전체 길이 중에 우안부와 중간 부근에서 수행한 B-1과 B-3지점의 일부 지점을 제외하고 대부분 아래로 내려갈수록 N값이 증가되어 50이상 되는 것으로 나타났다.

한편, 그림에서 보는 바와 같이 B-3공의 최하단부(콘크리트 우물통의 직상부위)에서는 N=16~18로 나타났고, 시추Rod가 자중에 의하여 낙하하는 등 Weak Zone의 존재 가능성을 시사하고 있어 주목된다. 이와 같은 Weak Zone의 발생원인은 대개 다음과 같이 생각할 수 있다. 즉, ①콘크리트 우물통 덮개의 위쪽에 발생하는 침투류에 의한 영향, ②유기물질의 함량이 과다하여 담수 후 장기간 포화에 따른 국부적 연화, ③콘크리트 우물통에 접속되는 점토심벽의 시공 불량, ④콘크리트 우물통의 강성(stiffness)과 점토심벽의 강성 차이에 의하여 댐체와 기초지반의 침하가 발생할 때 콘크리트와의 접속부 부근의 부등침하 등을 원인으로 생각할 수 있으나 여기서는 ④번제의 원인이 가장 유력한 것으로 추정된다.

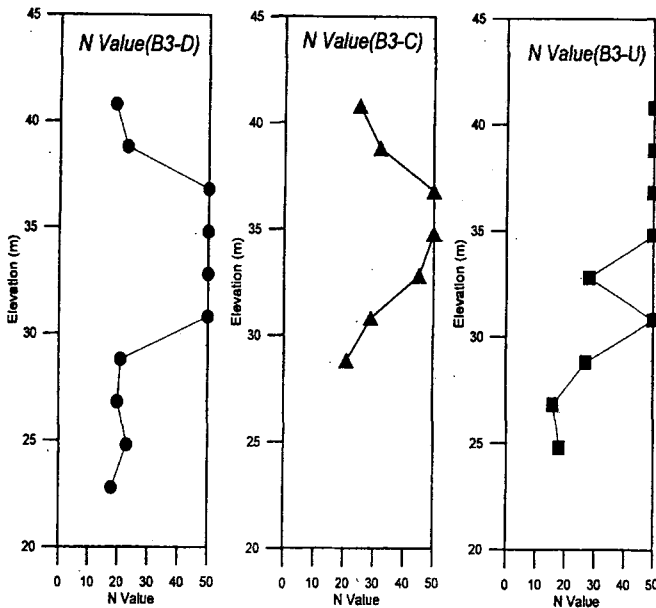


그림 2. 시추공 B-3에서의 표준관입시험 결과

그림 3은 점토심벽 재료의 입도분포를 나타낸 것으로서 전체적으로 NO.200체 통과량 및  $5\mu\text{m}$ 이하의 점토분이 많은 특징을 나타내고 있다.

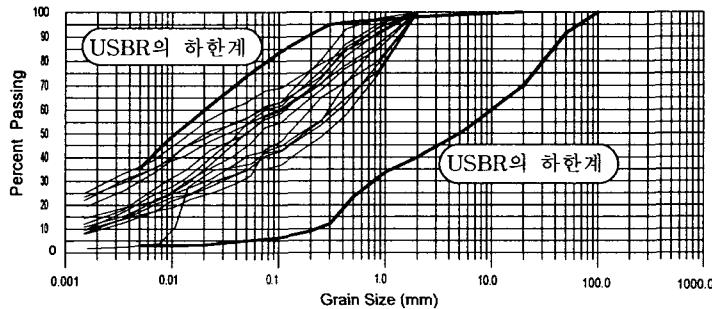


그림 3. 점토심벽 재료의 입도분포곡선

천공된 시추공 내에서 온도검층, 자연전위검층, 전기비저항 검층, 자연감마검층 감마-감마 검층 등을 실시하였으며, 여러 가지 결과 중에서 표준관입시험 결과치 및 불교란 시료에 대한 단위중량 등을 비교할 때 상호 연관성이 깊게 나타났다.(그림 4. 참조)

## 6.2 시추공 탄성파 탐사

시추공 탄성파 탐사는 남강구댐 댐체의 정량적인 제반 탄성계수 즉, Lamé의 상수  $\lambda$ , 전단탄성계수 (shear modulus)  $\mu$ , 체적탄성계수(bulk modulus)  $K$ , Young계수  $E$  및 Poisson비  $\nu$ 등을 구하기 위하여 실시하였으며, 그림 5는 그중 B-3공에서 측정된 값을 나타낸 것으로서 향후 수치해석을 이용한 댐체의

## 5. 실내시험 결과

토질시험은 불교란 시료에 대하여 기본 물성시험으로서 자연함수비, 비중, 액·소성한계, 유기물함량시험 및 입도분석(체분석 및 비중계분석)을 실시하였으며, 역학적 거동특성 시험으로서 삼축압축시험 및 압밀시험을 실시하였다. 다음은 각 시험항목에 대한 범위를 나타낸 것이다.

- 자연함수비 : 14.31 ~ 31.85 %
- 비중 : 2.60 ~ 2.77
- 액성한계 : 23.62 ~ 50.15 %
- 소성지수 : 6.23 ~ 32.73 %
- NO.200체 통과량 : 35.14 ~ 68.10 %
- $2\mu\text{m}$  이하 : 3 ~ 24 %
- 통일분류 : CL, CL-ML
- 유기물 함량 : 4.37 ~ 8.09 %
- Bulk Density : 2.076~2.273 t/m<sup>3</sup>

## 6. 지구물리 검층 및 시추공 탄성파 탐사 결과

### 6.1 지구물리검층

지구물리검층은 댐체의 물성을 원위차에서 정량적으로 파악하기 위하여 수행되었으며, 사용한 장비는 영국 Geologging사의 Portalog Geologging System으로서 NX로

동적, 정적 안정해석에 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

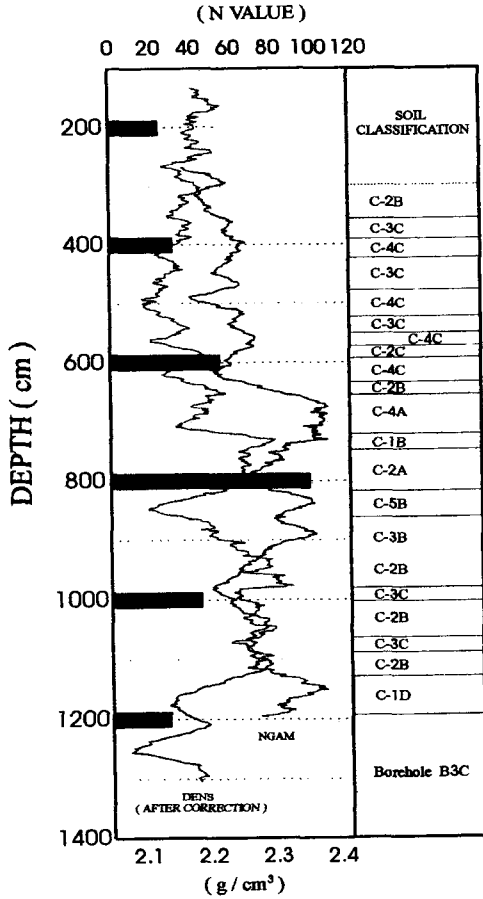


그림 4. 시추공내 지구물리검층 결과와 표준관입시험치의 비교

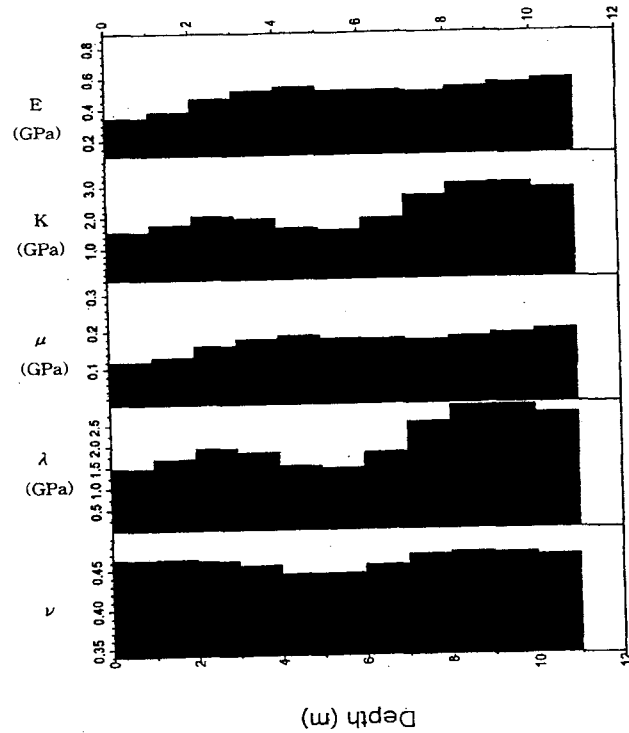


그림 5. 시추공 탄성파에서 구한 각종 탄성정수 분포

## 7. 암석재료로 사용된 혈암 및 사암의 역학적 특성

혈암(shale) 및 사암(sandstone)의 내구특성을 파악하기 위하여 전술한 바와 같이 상시만수위(EL.37.5 m)아래쪽에 있어서 물속에 잠겨 있던 암석재료를 채취하여 비중, 간극률, 흡수율 등을 구하기 위한 기본물성시험, 일축압축강도(탄성계수 및 Poisson비 포함), 암석시편의 P파 및 S파 속도 등의 강도 특성시험 등을 실시하였으며(표 3.참조), 슬레이킹 내구성 시험을 ISRM규격에 따라 실시하여 슬레이킹 내구성 지수를 구하였다.

그림 6.은 혈암 및 사암에 대한 슬레이킹 내구성 시험 결과를 Gambel의 지수와 비교하여 나타낸 것으로 축조된지 30여년이 경과한 이들 암석의 슬레이킹 내구성이 매우 양호한 것으로 나타나 향후 댐축조 재료로서의 활용가능성이 높은 것으로 사료된다. 그러나 이는 일반적으로 혈암은 공기중에 노출되어 있거나 건조습윤이 반복되는 환경하에서는 풍화와 침식 속도가 다른 암석에 비하여 현저히 빠른 특성이 있음을 감안할 때 Gambel의 지표가 나타내는 물리적 의미가 다소 의심스러운 것이 사실이므로 향후 이

부분에 대해서는 보다 다양한 시험을 실시하여 평가할 필요가 있다.

표 3. 암석의 기본물성 및 강도특성치

| NO.   | Diameter (cm) | Length (cm) | Specific Gravity | P/S Wave Velocity (m/sec) | Porosity (%) | Absorption (%) | Uni. Comp. Strength (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Young's Modulus (x10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> ) | Poisson's Ratio |      |
|-------|---------------|-------------|------------------|---------------------------|--------------|----------------|--|---|-----------------|------|
| 상시만수위 | 1-5           | 5.47        | 11.35            | 2.65                      | 1669 / 1084  | 2.31           | 0.87                                       | 1320  | 278,000         | 0.16 |
|       | 1-8           | 5.45        | 10.83            | 2.63                      | 4165 / 2536  | 1.74           | 0.66                                       | 1326  | 324,000         | 0.21 |
|       | 1-9           | 5.47        | 10.84            | 2.65                      | 3942 / 2606  | 2.00           | 0.75                                       | 1270  | 362,000         | 0.13 |
|       | 2-3           | 5.45        | 11.16            | 2.68                      | 4276 / 2811  | 1.20           | 0.45                                       | 1511  | 381,000         | 0.16 |
|       | 2-8           | 5.45        | 11.33            | 2.65                      | 3486 / 2365  | 3.41           | 1.29                                       | 1048  | 231,000         | 0.16 |
|       | 2-9           | 5.47        | 10.84            | 2.66                      | 1348 / 917   | 2.80           | 1.05                                       | 941   | 222,000         | 0.16 |
|       | 2-10          | 5.47        | 11.33            | 2.61                      | 1686 / 1163  | 3.77           | 1.44                                       | 487   | 162,000         | 0.11 |
| 아래쪽   | 3-1           | 5.45        | 11.01            | 2.59                      | 2647 / 1817  | 5.20           | 2.01                                       | 847   | 265,000         | 0.13 |
|       | 3-3           | 5.45        | 11.35            | 2.61                      | 2166 / 1379  | 4.97           | 1.91                                       | 425   | 267,000         | 0.34 |
|       | 3-4           | 5.45        | 11.14            | 2.61                      | 1709 / 1188  | 4.88           | 1.87                                       | 607   | 129,000         | 0.13 |
|       | 3-5           | 5.45        | 11.35            | 2.71                      | 4850 / 3011  | 0.42           | 0.15                                       | 2073  | 492,000         | 0.18 |
|       | 3-6           | 5.45        | 11.35            | 2.66                      | 1376 / 866   | 3.89           | 1.46                                       | 786   | 220,000         | 0.07 |
|       | 상시만수위<br>윗쪽   | 4-1         | -                | -                         | 2.70         | -              | 2.78                                       | 1.03  | -               | -    |
| 4-2   |               | 5.48        | 11.27            | 2.66                      | 2482 / 2272  | 2.77           | 1.04                                       | 762   | 545,000         | 0.12 |
| 4-3   |               | -           | -                | 2.64                      | -            | 4.05           | 1.53                                       | -   | -               | -    |
| 4-4   |               | 5.48        | 11.23            | 2.63                      | 4602 / 2713  | 3.13           | 1.19                                       | 524   | 307,000         | 0.12 |
| 4-5   |               | -           | -                | 2.66                      | -            | 3.68           | 1.38                                       | -   | -               | -    |
| 4-6   |               | -           | -                | 2.65                      | -            | 2.67           | 1.01                                       | -   | -               | -    |
| 4-7   |               | 5.49        | 11.27            | 2.64                      | 5054 / 2974  | 0.87           | 0.33                                       | 2163  | 523,000         | 0.25 |
| 4-8   |               | -           | -                | 2.63                      | -            | 2.85           | 1.08                                       | -   | -               | -    |

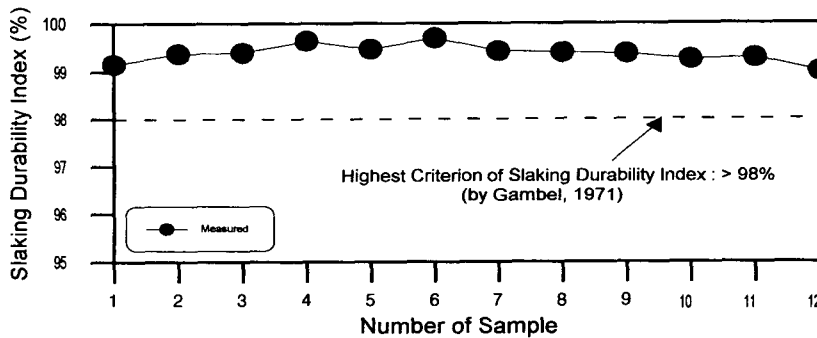


그림 6. 혈암과 사암의 슬레이킹 내구성시험 결과

### 8. 결론

남강 구덩의 철거와 수반하여 시추조사, 실내시험, 시험굴조사 및 각종 지구물리 검층과 탐사를 실시하였으며, 향후 필댐체의 거동특성 분석 및 조사방법 등에 활용가능한 기법 등에 대한 기초자료를 확보하였으며, 혈암 등의 연암도 댐축조재료로서 활용가능성이 높은 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. 한국수자원공사(1998), 남강구덩의 조사 및 활용방안 연구.
2. 한국수자원학회(1997), 한국의 수자원개발 30년, pp.97~138.