

## 콘크리트 표면 차수벽형 사력댐의 구조적 안정성 평가 및 GPS 다짐 시공관리

### Stability Assessment of the Concrete Faced Gravel Dam and Construction Management for Soil Compaction using GPS system

인영길<sup>1)</sup>, Young-Gil IN, 유상화<sup>2)</sup>, Sang-Hwa Yoo, 채광석<sup>3)</sup>, Kwang-Seok Chae, 신동훈<sup>4)</sup>, Dong-Hoon Shin, 서승철<sup>5)</sup>, Seung-Cheol Seo, 구자덕<sup>6)</sup>, Ja-Duck Gu

<sup>1)</sup> GS건설(주) 토목사업부, 과장, Manager, GS Engineering & Construction

<sup>2)</sup> GS건설(주) 토목사업부, 대리, Assistant manager, GS Engineering & Construction

<sup>3)</sup> GS건설(주) 기술연구소 선임연구원, Researcher, GS Engineering & Construction

<sup>4)</sup> 한국수자원공사 지반구조연구소 책임연구원, Principal Researcher, KIWE, K-water

<sup>5)</sup> 한국수자원공사, 부항댐 사업단, 차장, Deputy general manager, K-water

<sup>6)</sup> (주)라이브라, 대표이사, CEO, Libra Consultants, Co. Ltd.

**SYNOPSIS** : To determine the effect of draining for the drainage layer in CFGD(Concrete Faced Gravel Dam) body, centrifuge model tests were performed. Also, soil compaction works are essential to construction of dams in order to avoid unexpected settlement of superstructures. Taking advantage of oscillating accelerometer, this research was made to complement existing methods for assessment of soil stiffness. In order to examine the validity of compaction-degree suggested in the study, tests on vibration characteristics using accelerometers was also performed.

**Keywords** : CFRD, Centrifuge Model Tests, Soil compaction, GPS, Accelerometer

## 1. 서 론

우리나라에서는 1985년 동북댐이 건설된 이후 현재까지 약 13개의 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD, Concrete Faced Rockfilled Dam)이 건설되었으며, 2010년 현재 3개의 CFRD가 건설 중 이며, 이들 3개의 CFRD중 2개 댐은 댐 사이트에 분포하는 하상 모래, 자갈 등의 Gravel material을 축조재료로 사용하는 CFGD로서, 석산개발을 적게 하여 환경훼손을 최소화하고, 인근에 분포되어 있는 재료를 사용하여 경제적이다는 측면에서 매우 유리한 댐 형식으로 주목 받고 있다. CFGD는 콘크리트 차수벽 및 차수벽 지지층의 차수효과로 인해 댐체 내부에 간극수압이 발생하지 않아 시공이 용이하며, 지진 시에도 매우 안정한 댐 형식이지만, 상시 또는 지진시 댐체의 변형거동에 의하여 차수벽 이음부가 벌어지거나 균열이 발생하여 누수가 발생할 때 차수벽 지지층을 포함한 록필부분에서 적절한 배수 또는 침투수의 조절이 이루어지지 않을 경우에는 누수량이 과다하게 발생하여 댐체의 안전에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 특히, CFRD의 경우 빈입도의 하상 사력재료를 사용하는 경우에 배수층의 설치시 댐체의 안전에 매우 크게 영향을 미칠 수 있다(1993년 8월 중국의 Gouhou댐(H=84m)은 부적절한 배수시스템으로 인해 완전 붕괴되어 많은 인명과 재산피해 발생).

본 논문에서는 국내 최초로 CFGD 형식의 댐 중 본체 내에 배수층이 설치되는 부항 다목적댐(GS건설 시공)을 대상으로 댐 배수층의 배수 효과 확인을 위하여 대형 원심모형시험을 통하여 배수기능 및 변형 특성 등의 댐 안정성을 사전에 확인함과 동시에, 본댐의 축조 시에는 GPS를 활용한 성토시공 다짐관리

를 적용하여 댐의 시공 전, 중, 후 안전성 확보를 위해 만전을 기하였다.

## 2. 부항댐의 설계 현황

부항댐은 감천의 제1지류인 부항천 하류부에 위치하며, 댐 지점은 댐 저면 길이가 긴 사다리꼴 지형으로 좌안은 완만한 경사의 넓은 사면이며, 우안은 소능선 단부로 폭이 비교적 좁고, 우안 상·하류에는 소협곡이 발달한 위치에 선정된 댐 길이 472m, 댐 높이 64m인 표면차수벽형 사력댐(CFGD)으로 설계되었으며, 상류사면은 1:1.5, 하류사면은 1:2.0의 구배를 가진다.

본 댐의 단면구성은 콘크리트 표면차수벽, 차수벽지지존, 선택존, 주축조존, 부축조존, 배수층으로 구성되어 있으며, 콘크리트 표면차수벽 전면 하부에는 프린스와 차수벽간의 주변이음을 보호하기 위한 불투수층이 설치되었고, 댐 배면부는 녹화를 통한 친환경공간 조성을 위하여 환경친화층이 설치되어 있다. 특히, 주 축조존은 댐 축조 후 담수시 물의 하중을 지반으로 전달하는 역할뿐만 아니라 차수벽 등의 누수시 자유배수 조건을 만족시켜야 되지만, 중국의 Gouhou댐 파괴사례에서와 같이 하상재료를 주 축조존으로 사용하는 경우에는 투수성이 저하되어 댐체의 안전에 심각한 문제가 발생할 수 있기 때문에 주 축조재료인 하상사력재를 #4체의 세립분을 제거한 선별존을 설치하여 이러한 위험성을 배제하도록 설계하였다.

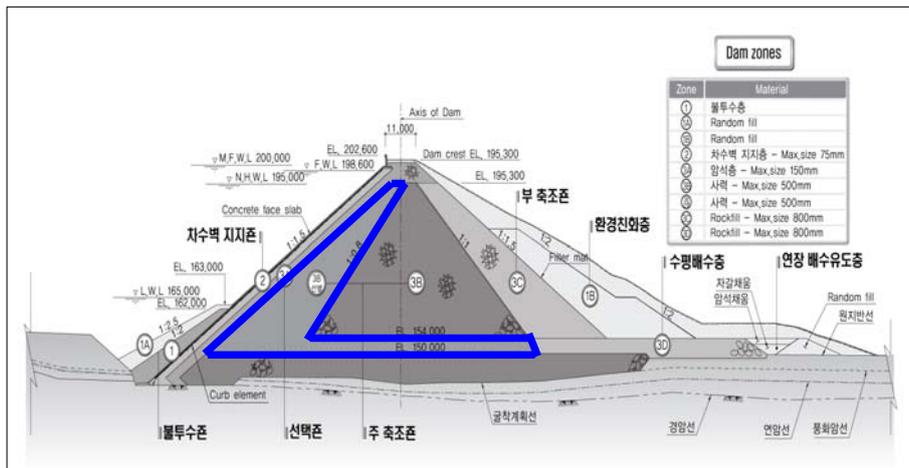


그림 1. 부항댐(C.F.G.D) 표준단면 단면도

## 3. 원심 모형시험 (Centrifuge Model Tests)

부항 다목적댐(CFGD)에 대하여 원심모형시험을 이용하여 차수벽균열 등에 의하여 발생할 수 있는 침투에 대한 안전성을 확보하기 위해 설계된 배수층(Zone-3Bs)의 배수효과 확인 및 대표단면의 변형 특성에 대한 안전성 확인을 목적으로 하였다.

### 3.1 원심모형 시험단면

본 시험에서는 모형용기의 제한된 크기(길이 1100mm, 폭 700mm, 높이 700mm)로 인하여 실제 댐 단면의 1/2 축소단면을 원심모형시험의 원형단면으로 선정하였다. CFGD의 구성요소 중 축소 모형에서 제대로 된 모사가 매우 어려운 프린스와 페러핏월 및 누수 발생 시 댐체의 거동에 큰 영향을 미치지 않

을 것으로 판단되는 불투수존과 친환경존 등을 제외한 원형단면은 그림 2와 같다.

차수벽의 균열을 통한 누수 발생시 주축조준(이하 Zone 3B)과 선별 주축조준(이하 Zone 3Bs)의 단면 구획이 댐체의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 그림 3과 같이 두 개의 실험단면을 선정하였다. CASE I은 Zone 3Bs를 포함하지 않은 경우의 실험단면, CASE II는 Zone 3Bs를 포함한 경우의 실험단면이다. 불투수 흐름의 특성과 모형댐 축조를 위한 재료의 크기를 고려하여 실험단면을 원형의 1/60 축소단면으로 제작하였다. 공간의 제약으로 CFGD의 침투 거동에 큰 영향을 미치는 콘크리트 차수벽 및 상류측 사면을 중심으로 구성하였다. 따라서 원형단면의 부축조준(이하 Zone 3C) 일부분과 수평배수준(이하 Zone 3D)은 실험단면에서 제외되었다. 축소모형에서 제작의 어려움을 피하기 위하여 두 실험단면 모두에서 선택존(이하 Zone 3A)은 필터재인 토목섬유(Geo-textile)로 대체하였다. 차수벽 균열을 통한 침투수의 관찰을 용이하게 하기 위하여 균열의 위치는 1/2단면의 EL171.25m로 설정하였다.

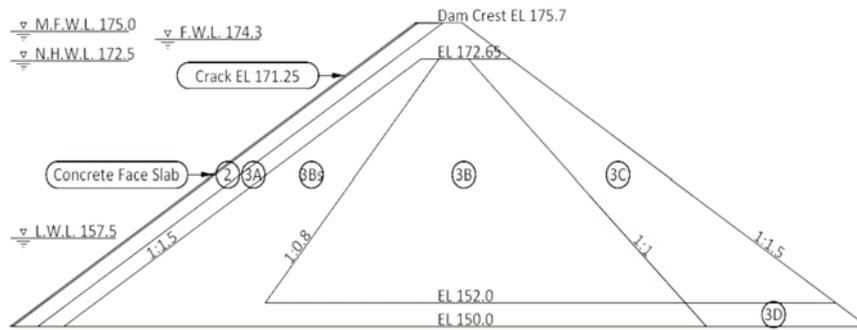


그림 2. 침투거동 원심모형 시험의 원형단면

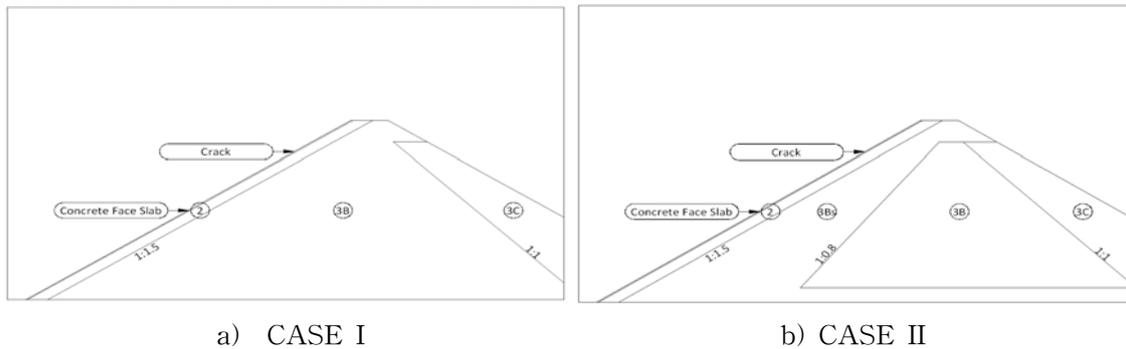


그림 3. 원심모형 실험단면

### 3.2 모형댐 축조재료

콘크리트 표면차수벽형 사력댐의 댐체는 기본적으로 차수벽으로 인해 건조 또는 불포화 상태에 있게 되고, 우발적인 누수로 인한 침투수의 거동은 불포화 흐름의 특성을 보이게 된다. 따라서 본 실험에서는 원재료의 특성을 그대로 살리기 위하여 상사입도법과 일정양 치환법을 결합하여 시료를 제작하였다. 원형의 입자 크기를 전체적으로 1/60배로 축소시키되 최대 입자 크기는 19mm로 제한하여 시료를 조성하였다. 또한, 존간의 역할을 대비하기 위하여, 원단면의 설계 투수계수의 비를 유지하도록 원심모형 실험 단면을 위한 재료를 구성하였다. 원형과 모형의 시료의 입도 분포를 그림 4에 비교하였다.

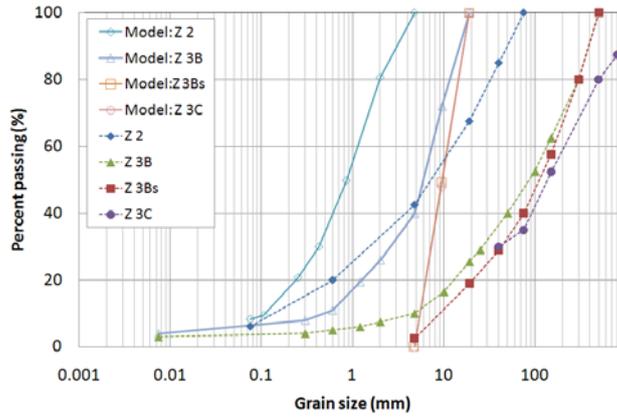


그림 4. 원형 시료와 모형 시료의 입도분포곡선

모형댐의 각 존은 상대밀도 75%를 목표로 축조하였고, 각 다짐밀도는 정수위 투수실험을 통하여 투수계수를 선정하여, 각 존간의 상대적인 투수계수비가 설계의 투수계수비에 근접함을 확인하였다. 모형 댐의 제작을 위하여 8층의 다짐용 틀을 제작하여, 모형 댐은 다짐용 틀을 이용하여 모형용기 내의 공간을 채운 후 비어있는 나머지 공간에 시료를 채워 다지는 방법으로 제작하였다. 원활한 다짐을 위해 함수비는 3%로 유지하였으며 각 구역마다 빈 공간의 부피와 목표 다짐밀도로부터 무게를 계산하여 이를 모두 채워 넣고자 하였으나 불가피한 경우 남는 부분을 털어내었다. 이로 인하여 생기는 간극률( $e$ )의 변화는 투수계수( $k$ )의 변화를 유발하므로 다음의 식을 사용하여 보정하였다.

$$k \propto \frac{e^3}{1+e} \quad (1)$$

CASE II에 대한 설계 투수계수 및 본 실험을 위하여 조성된 시료의 투수계수 그리고 위 식을 사용하여 보정된 투수계수를 비교하여 표 1에 나타내었다.

표 1. 설계 투수계수와 보정 투수계수

항 목	설계 투수계수 (m/s)	시료 투수계수 (m/s)	보정 투수계수 (m/s)
Zone 2	$1.00 \times 10^{-6}$	$9.85 \times 10^{-8}$	$9.85 \times 10^{-8}$
Zone 3Bs	$1.10 \times 10^{-4}$	$2.32 \times 10^{-5}$	$1.34 \times 10^{-4}$
Zone 3B	$5.70 \times 10^{-5}$	$4.60 \times 10^{-6}$	$6.44 \times 10^{-6}$
Zone 3C	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.67 \times 10^{-5}$	$8.25 \times 10^{-5}$

### 3.3 모형 표면차수벽 제작

본 실험에서는 알루미늄 합금인 두랄루민을 이용하여 모형 차수벽을 제작하였다. 콘크리트의 탄성계수를  $E_p$ , 두랄루민의 탄성계수를  $E_m$ 이라 할 때 원형 콘크리트 차수벽의 단면 2차 모멘트  $I_p$ 와 두랄루민 모형 차수벽의 단면 2차 모멘트  $I_m$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$E_m I_m = \frac{1}{N^3} E_p I_p \quad (2)$$

본 실험은 60g 상태에서 수행하였으므로  $E_p$ 를 28GPa,  $E_m$ 을 70GPa으로, 두께 150 mm의 원형 콘크리트 차수벽을 모사하기 위하여 약 1.84 mm 두께의 두랄루민을 사용하여야 한다. 본 실험에서는 2 mm 두께의 두랄루민을 사용하여 차수벽을 모사하였다. 모형 높이 EL171.25 m에 상응하는 모형 차수벽 위치에 지름 5 mm의 구멍을 10 mm 간격으로 뚫어 차수벽 균열을 모사하였다.

### 3.4 모형댐의 축조

각 층별로 댐사면을 모사하기 위하여 다짐틀을 이용하여, 사면의 경사를 유지하였다. 차수벽의 아랫부분은 모형용기와 실리콘으로 접착하여 차수하였으며 원심가속도 및 수위 상승으로 인한 변형을 억제하였다. 모형 차수벽의 양 옆과 모형용기의 접착 부위에는 고무 멤브레인을 덧댄 후 모형 차수벽과 고무 멤브레인, 모형 용기와 고무 멤브레인을 각각 실리콘으로 접착하여 차수는 하되 변형은 자유롭게 일어날 수 있도록 하였다.

침윤선의 전파를 관찰하기 위하여 모형 댐 완성 후 약 2L의 물을 염료와 함께 첨가하였다. 염료로는 착색제로 널리 사용되는 메틸렌블루(methylene blue trihydrate)를 이용하였다. CASE I의 실험 결과 메틸렌블루는 착색력이 매우 강하였으나 Zone 3B의 세립분에 모두 흡착되어 댐체 내부로 스며들지 못하였다. 따라서 CASE II의 실험에서는 메틸렌블루와 함께 수성페인트를 혼합하여 사용하여 침투수의 경로를 최대한 포착하고자 하였다. 그림 5는 CASE I과 CASE II의 모형 댐체 축조 후 모습을 나타내었다.

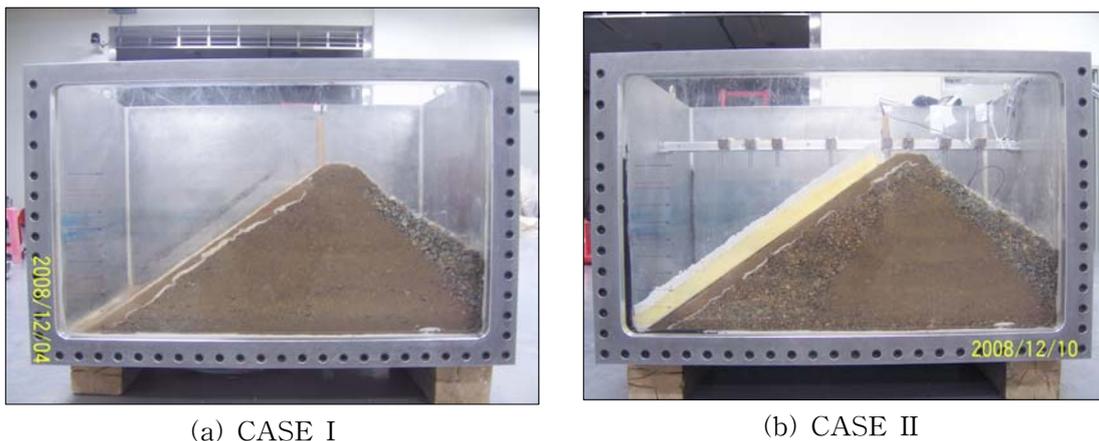


그림 5. 모형 댐체

### 3.5 모형 댐의 계측 및 실험

모형 차수벽 및 모형 댐체의 수직 변위를 계측하기 위한 접촉식 변위계 (linear variable differential transducer, 이하 LVDT), 모형 차수벽의 축 및 휨 변형률을 계측하기 위한 변형률계 (strain gage), 댐체 내의 간극수압 분포를 계측하기 위한 간극수압계(pore water pressure meter) 등 총 3가지 종류의 계측기를 사용하였다.

그림 6은 CASE II의 계측기의 설치 위치를 나타내었다( CASE I도 동일한 셋업이며, L은 LVDT이고, S는 변형률계, P는 간극수압계). 여기에서, LVDT에서 측정된 모형 댐체의 수직변위는 60배하여 원형의 수직변위로 환산하였으며, 수압 및 변형률은 원형과 모형에서 같은 크기를 가진다.

실험순서는

- ① 모형 댐의 축조 및 계측기 매설

- ② 3g/min의 속도로 60g까지 원심모형기 가속
- ③ 60g 상태에서 40분간 비행하며 댐체 안정화
- ④ 원심가속중 수위를 상승시키며 초기 담수 시 댐체의 거동 측정
- ⑤ 균열 위로 수위를 상승시킨 후 유지시키며 누수 발생 시 댐체의 거동 측정

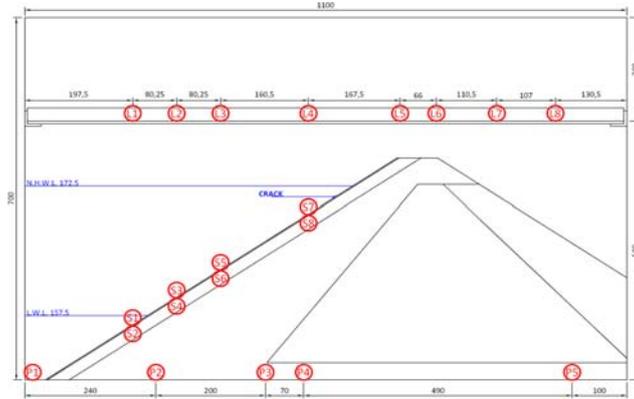


그림 6. 계측기 설치 위치

### 3.6 모형실험 결과

#### 3.6.1 초기 담수 시 댐체의 변형 거동

최고 수위에서의 댐체 침하량을 바탕으로 변형된 단면을 원단면과 비교하면 그림 7과 같다. 담수로 인한 댐의 변형, 특히, 차수벽측의 변형형상이 기존 문헌들에서 보고되는 형상과 유사하게 나타나고 있으며, 1/3 높이 부근에서 가장 큰 침하량을 보이고 있다.

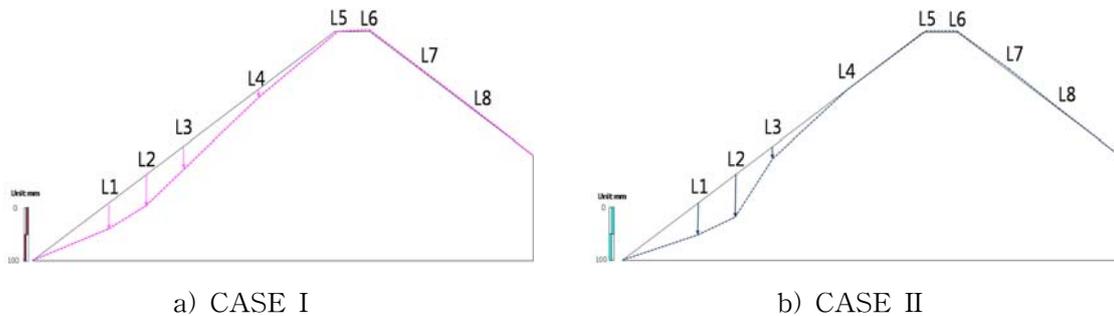
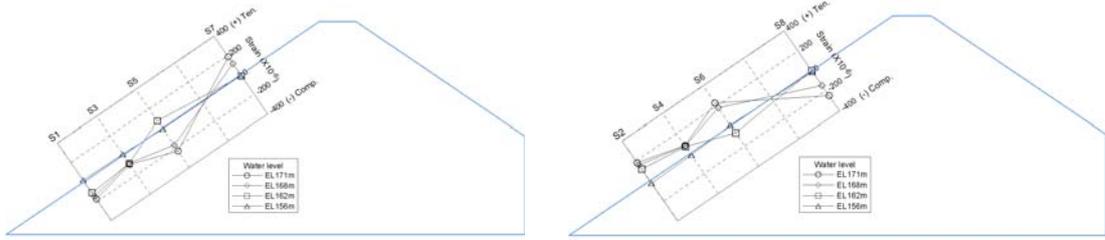


그림 7. 최고 담수위에서의 모형댐의 변형

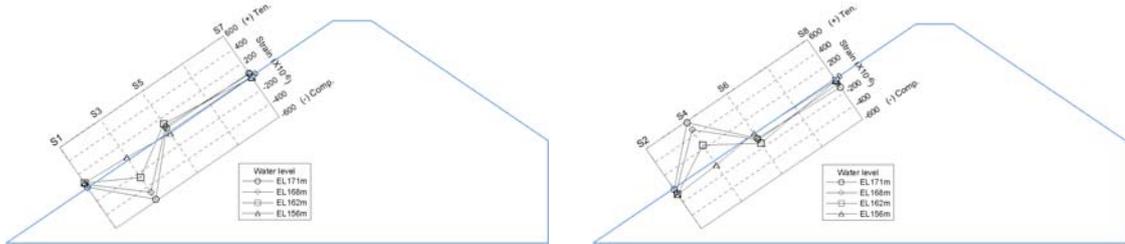
그림 8과 그림 9에 나타난 차수벽의 휨 변형률은 차수벽 수직 변위와 같은 경향을 보인다. 또한, CASE I과 CASE II의 초기 담수 시 변형 거동은 비슷한 경향을 보이고 있어, 이는 침투가 발생하기 전 댐체는 단면 구획(zoning)에 큰 영향을 받지 않는 것으로 보인다. CASE I, II의 댐높이의 약 1/3 부근에서 차수벽의 변형량이 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다.



a) 차수벽 윗면 (상류 접촉면)

b) 차수벽 아래면 (담체 접촉면)

그림 8. 초기 담수 시 차수벽의 휨 변형률 (CASE I)



a) 차수벽 윗면 (상류 접촉면)

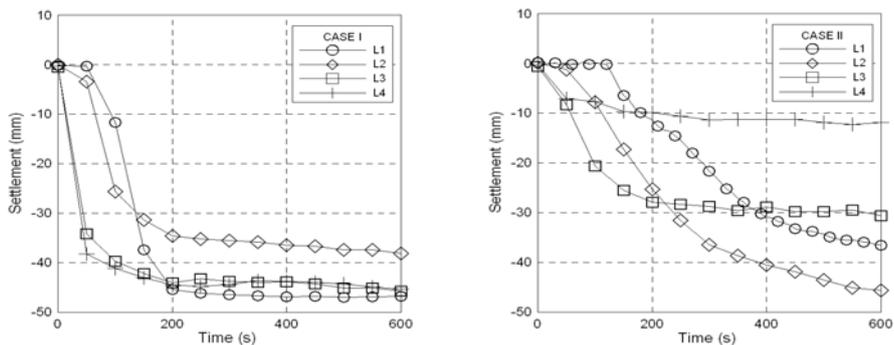
b) 차수벽 아래면 (담체 접촉면)

그림 9. 초기 담수 시 차수벽의 휨 변형률 (CASE II)

### 3.6.2 댐체의 변형 거동 (차수벽을 통한 누수 발생 시)

그림 10에 나타난 차수벽의 수직 변위는 CASE I과 CASE II에서 모두 침투 발생 후, 하강하는 모습을 보인다. 이는 Zone 2가 포화 되어가는 과정에서 체적이 감소하는 ‘흡수에 의한 체적 압축(wetting collapse)’ 현상이 발생한 것으로 판단된다.

CASE I이 CASE II에 비해 빠른 침하를 보이는 것은 Zone 2와 접한 주축조준의 구획 때문인 것으로 보인다. 즉 CASE I에서는 투수계수가 느린 Zone 3B가 접하고 있어 침투수가 Zone 2를 따라 주로 흐르는 반면, CASE II의 침투수는 Zone 2보다 투수성이 월등히 좋은 Zone 3Bs를 통해 주로 흘렀기 때문에 L4에서 L1 방향으로 전파되는 차수벽의 침하가 CASE I에 비하여 느린 속도로 진행되었다.

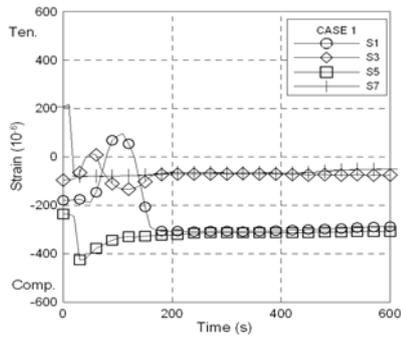


(a) CASE I

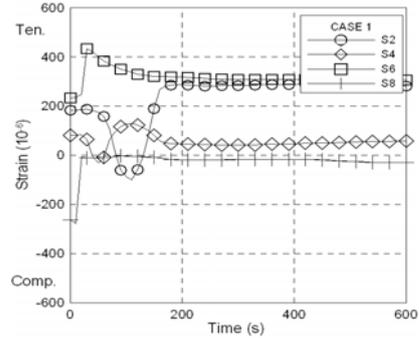
(b) CASE II

그림 10. 차수벽 균열을 통한 누수 발생 시 차수벽의 수직 변위

그림 11과 그림 12의 차수벽 휨 변형률 변화는 차수벽 수직 변위 결과(그림 10)의 경향과 일치한다. 각 위치의 차수벽의 침하 발생 시간과 때를 맞추어 아랫방향으로의 휨 변형이 발생하며 이는 다른 위치의 차수벽에는 윗방향의 휨 변형을 유발한다. 침투수가 아래쪽으로 전파되어감에 따라 유발되었던 윗방향의 휨 변형은 점차 아랫방향으로의 휨 변형으로 바뀌어 나간다.

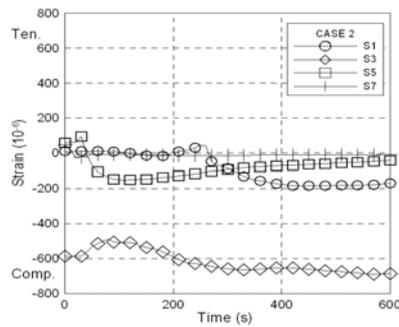


a) 차수벽 윗면 (상류 접촉면)

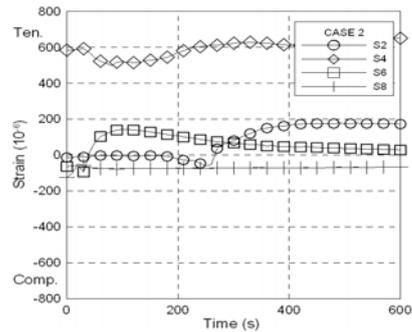


b) 차수벽 아래면 (담체 접촉면)

그림 11. 차수벽 균열을 통한 누수 발생 시 차수벽의 휨 변형률 (CASE I)



a) 차수벽 윗면 (상류 접촉면)

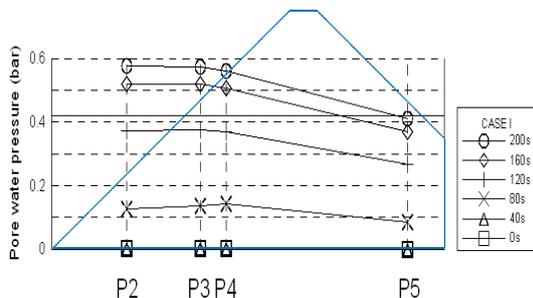


b) 차수벽 아래면 (담체 접촉면)

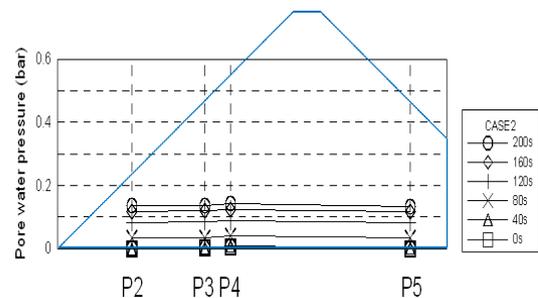
그림 12. 차수벽 균열을 통한 누수 발생 시 차수벽의 휨 변형률 (CASE II)

### 3.6.3 담체의 투수 거동 (차수벽을 통한 누수 발생 시)

그림 13은 누수 발생 후 담체 내에 발생하는 수압을 간극수압계의 위치에 따라 도시하였다. CASE II의 간극수압은 약 200초 후 일정 값으로 수렴하는 반면 CASE I의 간극수압은 계속해서 증가하였다. 이는 CASE II에서는 Zone 3Bs의 높은 배수성으로 인하여 침투수의 배수가 원활이 일어난 반면 CASE I의 Zone 3B는 투수계수가 낮으므로 원활한 배수가 일어나지 못하여 담체 내에 간극수압이 유발된 것이다. Zone 3Bs와 Zone 3B의 투수성의 차이는 CASE I과 CASE II의 간극수압 분포 모양에도 영향을 끼친다. CASE I의 간극수압 분포는 Zone 3B의 낮은 투수계수로 인하여 가운데가 볼록한 산모양으로 계속해서 증가한다. 반면 CASE II의 침투수는 Zone 3Bs의 높은 투수계수로 인하여 모형용기 바닥에 도달한 후 빠른 속도로 좌우로 퍼진다. CASE II에서 간극수압은 약 0.15bar 이상으로 증가하지 않는데 이는 모형용기의 배수구 높이인 25mm가 반영된 것이다.



a) CASE I



b) CASE II

그림 13. 차수벽 균열을 통한 누수 발생 시 담체 내의 수압 분포

그림 14와 같이, 실험종료 후 단면 절개를 통하여 Zone 3Bs 댐체 내 침투수의 흐름 경로를 확인하고자 하였다. CASE I의 경우 Zone 3B에 포함된 세립분의 양이 많아 착색제인 메틸렌블루가 댐체 내부로 깊숙이 전파되지 못한 것으로 예상된다. 착색 정도로부터 침투수의 흐름 경로를 추정할 수는 없지만 실험 종료 후 댐체 내의 함수비가 매우 높은 것으로 미루어 보아모형 댐체 대부분이 침투수에 의하여 잠식되었음을 추정할 수 있다. 그러나 CASE II의 경우 착색 정도로 침투수의 흐름 경로를 쉽게 파악할 수 있었다. 침투수는 차수벽 균열과 가까운 일정 부분을 통하여 댐체 내로 침투되었으며 침투수는 Zone 3Bs에서는 중력의 영향을 받아 수직으로 떨어짐을 확인할 수 있다. 그러나 수직으로 하강하던 침투수가 Zone 3Bs와 Zone 3B의 경계면을 만나면 Zone 3Bs쪽으로 방향을 트는 현상을 확인할 수 있는데 이는 Zone 3Bs와 Zone 3B의 큰 투수계수 차이에서 기인하는 것으로 Zone 3Bs의 설계 목적과 부합한다.



a) CASE I



b) CASE II

그림 14. 차수벽 균열을 통한 누수 발생 시 댐체 내 침투수의 흐름 경로

## 4. GPS를 활용한 성토다짐 관리 시스템

지반위에 새로운 흙을 쌓아올리는 성토작업은 성토체 및 구조물의 재하에 따른 침하가 발생하지 않도록 하기 위하여 다짐작업이 필수적이며, 다짐작업이 불량할 경우에는 성토체의 강도 약화, 투수성 증가, 지지력 약화, 과도한 침하 등이 발생할 수 있다.

기존의 다짐시공 관리방법에 보완 및 대체할 수 있도록, GPS장비를 이용하여 다짐작업을 수행하는 다짐롤러의 위치정보를 기반으로 해서, 진동가속도 센서에서 얻어지는 데이터에 의하여 다짐지반의 강성을 판단한다. 이와 같이 얻어지는 정보를 진동롤러의 작업자가 모니터로 실시간으로 확인을 하며 작업을 수행할 수 있으며, 또한 무선인터넷기술에 의해 관리사무실에 전송되어 다짐작업 상황 및 품질관리를 수행하게 된다.

### 4.1 실내 다짐실험

#### 4.1.1 진동가속도 센서를 활용한 다짐실험

진동시험을 수행하기 위하여 그림 15에서와 같이 직경 600mm, 높이 600mm의 원통형 Container를 사용하여 모래 등의 세립재료뿐만 아니라 자갈, 쇄석 등의 60mm이하의 조립재료에 대한 다짐시험이 가능하도록 하였다.

소정의 상대밀도로 다져진 성토재료에 대한 진동시험을 수행하기 위하여 현장의 진동롤러의 가진주파수인 30Hz을 재현할 수 있는 해머드릴을 진동다짐기로서 이용하였으며, 또한, 성토지반에 진동을 전달하기 위하여 진동시험기의 로드에서 보는 것과 같이 접지면적을 달리하는 직경 15cm, 26cm인 재하판을 설치하여 실험을 수행하였다.



그림 15. 원통형 Container

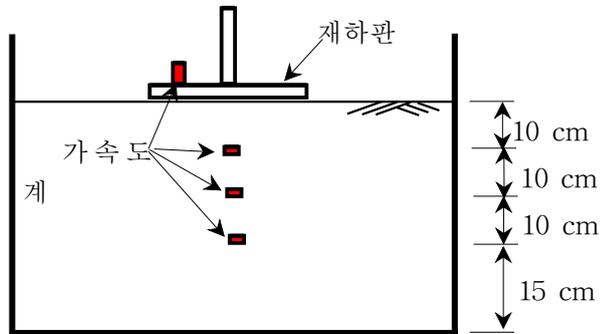


그림 16. 진동다짐기

진동다짐시험 중의 각층에 전달되는 진동가속도를 측정하기 위하여 가속도계를 재하판 및 심도 10, 20, 30 cm 총 4개소에 설치하여 진동을 측정하였으며, 재하판에 설치한 가속도계 1은 재하판에 직접 부착이 가능한 종류를 선정하였으며, 지중에 설치된 가속도계 2~4는 설치 및 다짐중 가속도계의 회전을 방지하기 위하여 직경 8 cm의 알루미늄 원판 부착하여 지중에 설치하였다(그림 17).



(a) 진동가속도계



(b) 진동가속도계의 설치위치

그림 17. 심도별로 설치된 진동가속도계

(a) 진동파의 반사를 줄이기 위하여 원형컨테이너 바닥 및 벽면에 멤브레인 부착한 후에, 지반을 3층으로 나누어 각 층을 소정의 상대밀도로 성토한 후, 컨테이너 중앙 위치에 가속도계를 설치하였다.

(b, c) 상대밀도를 증가시키기 위하여 지반 전체를 다지기 위하여 두께 10cm의 철판을 설치한 후, 다짐기로 소정을 높이까지 다짐을 수행하였다.

(d, e) 지반의 밀도를 산정하기 위하여 지반 높이를 측정한 후에 진동도달속도를 측정하였다.



a) 멤브레인 부착



b) 다짐용 철판설치



c) 다짐 수행



d) 지반 높이 측정



e) 진동 도달속도 측정

그림 18. 실내 진동실험

#### 4.1.2 실험재료의 물성치

조립 성토재료인 쇄석재료에 대한 상대밀도 시험을 수행하였으며, 기본물성시험 결과는 표 2에 나타냈다. 쇄석재료는 일반적으로 댐의 축조재료로서 사용될 경우에는 최대입경 1500mm이하를 사용하게 되지만, 본 실험에서는 최대 입경이 60mm가 되도록 상사한 재료를 사용하였으며 실험재료 샘플과 입도분포곡선을 그림 19에 나타냈다.

표 2. 기본 물성시험 결과

	비중	마모율(%)	최대밀도( $t/m^3$ )	최소밀도( $t/m^3$ )	비 고
쇄석재료	2.690	29.6	2.249	1.636	

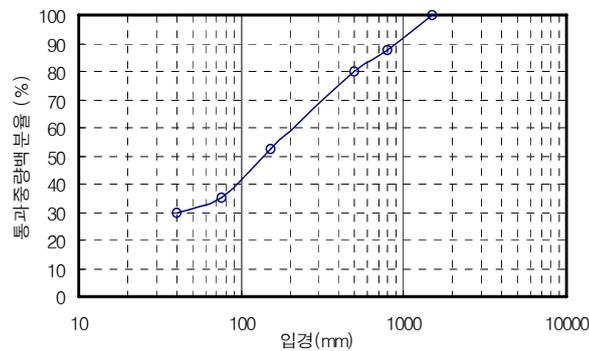
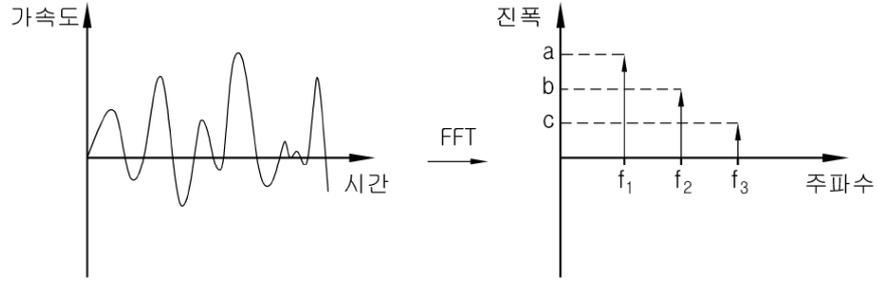


그림 19. 쇄석재료의 입도분포곡선

#### 4.1.3 다짐재료의 응답특성 분석

진동다짐에 의해서 지반에 설치된 진동가속도계에서 얻어지는 가속도 값은 다짐횟수가 증가함에 따라 변화가 발생한다. 다짐횟수가 작을 경우에는 지반상태의 강성이 작아서 기본주파수와 유사하지만, 다짐이 진행되어 지반강성이 커지면 주파수의 파형이 기본주파수 파형과 다른 형상으로 변화하게 된다. 그 원인으로는 지반의 진동다짐이 진행됨에 따라서 지반내의 강성이 증가하여, 다양한 주파수가 발생하여 기본주파수에 합성되어 지기 때문이다.

그림 20에 나타낸 것과 같이, 기본 진동주파수를 포함한 몇 가지의 주파수에 대응하도록 되어 있는 BPF(Band-Pass Filter)에 의한 필터링을 한 후에, 각 주파수에 해당하는 진폭을 검출한다.



(a) 계측에 의한 가속도 곡선 (b) FFT변환에 의한 응답값  
그림 20. BPF에 의한 연산처리법

여기에서 정해진 검출되어진 진폭값에 근거하여 연산처리하는 방법은 아래의 식을 이용하여 지반다짐도(지반의 강성)를 결정한다.

$$CCV = ((A_1 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) / (A_1 + A_2)) \quad (3)$$

$$PWIR = \sqrt{A_3^2 + A_4^2 + A_5^2 + A_6^2} / \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \quad (4)$$

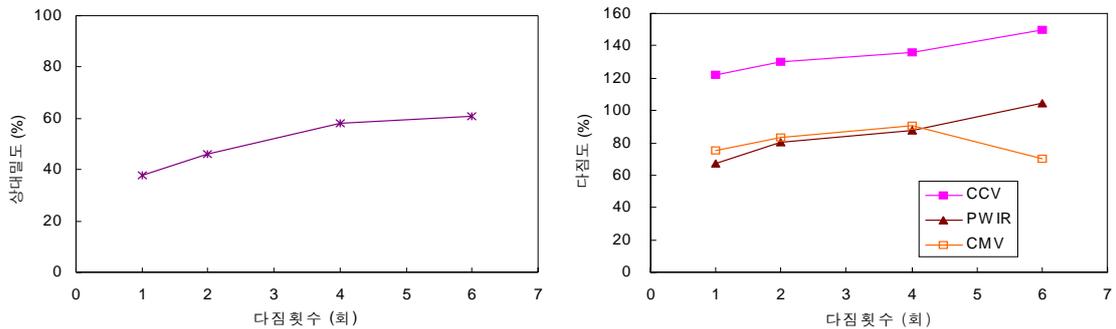
$$CMV = A_4 / A_2 \quad (5)$$

여기서,  $A_1 = \frac{1}{2}F_0$ ,  $A_2 = F_0$ ,  $A_3 = \frac{3}{2}F_0$ ,  $A_4 = 2F_0$ ,

$A_5 = \frac{5}{2}F_0$ ,  $A_6 = 3F_0$ ,  $F_0$  : 진동장치의 가진주파수 또는 기본진동수

#### 4.1.4 다짐실험 결과 및 분석

그림 21에서는 앞에서 제안된 CCV, PWIR, CMV의 연산처리방법을 이용하여 지반의 다짐도를 구하였다. 또한 실제 실내다짐시험에서 얻어진 값(a)과 연산처리식에서 얻어진 값(b)을 비교하여 각 식의 정확도를 비교하여 보았다. (b)에서 CCV와 PWIR의 값은 전체적으로 실내다짐 시험값에 비례하여 증가하는 반면, CMV의 경우에는 다짐횟수 4회에서 시험값과 달리 감소하는 경향을 나타내는데, 이것은 FFT의 응답값에서 A6(기본주파수의 3배수 값)을 고려하지 않은 것으로 판단된다.

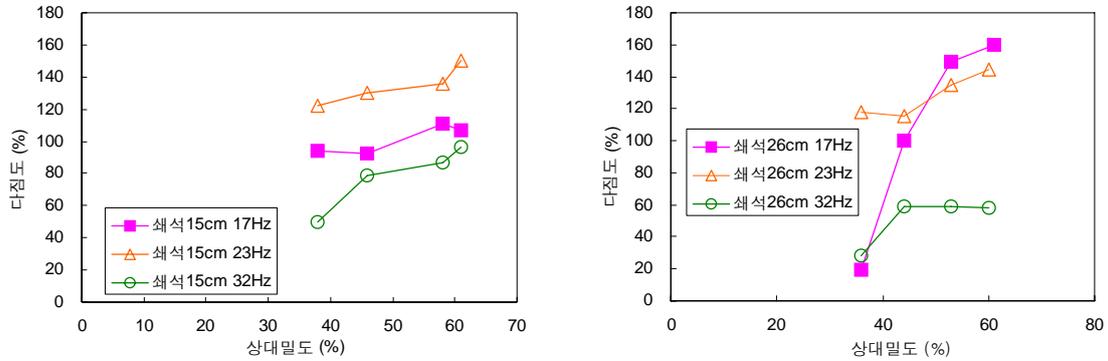


(a) 실내다짐시험의 실험값 (b) FFT응답값에 의한 각 연산값

그림 21. 다짐횟수와 상대밀도(다짐도)의 비교

가진주파수와 재하판의 크기를 달리하여 다짐도(다짐판에서 측정된 진동값)에 미치는 영향을 그림 22에 나타냈다. 상대밀도가 증가함에 따라 다짐도는 전체적으로 증가하는 경향을 나타내었고, 재하판의 크기(접지면적)에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 (a) 재하판크기 15cm 에서는 가진주파수

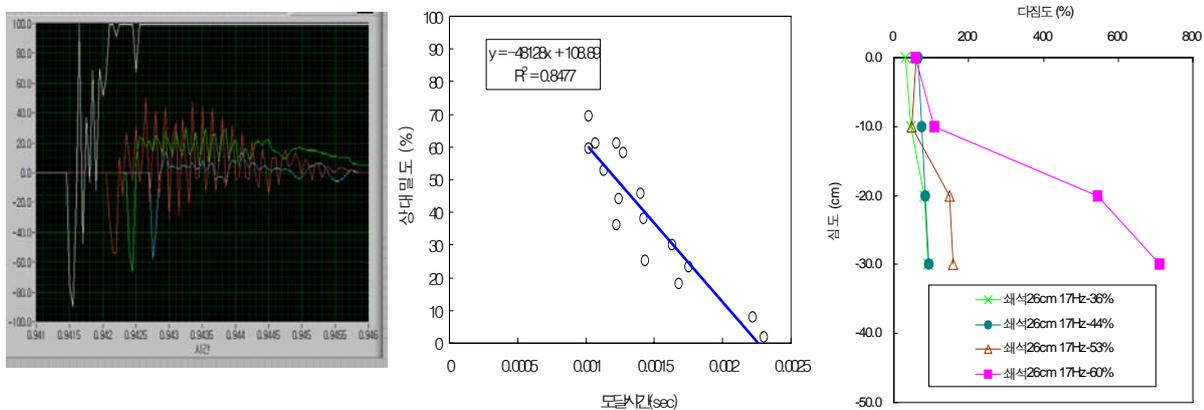
가 23Hz에서 가장 큰 다짐도를 나타내었고, (b) 재하판크기 26cm에서는 상대밀도가 낮은 단계에서는 23Hz에서 큰 값을 나타내었지만 상대밀도가 증가함에 따라서 보다 낮은 가진주파수인 17Hz에서 다짐도가 높은 값을 나타내었다. 이것은 지반의 종류 및 접지면적에 따라서 적절한 크기의 진동을 가하는 것이 효과적인 다짐을 수행할 수 있는 것으로 판단된다.



(a) 재하판 15cm (b) 재하판 26cm

그림 22. 가진주파수 및 재하판에 따른 다짐도의 변화

그림 23은 상대밀도에 따른 진동 도달시간과 심도별 다짐도의 관계를 나타내었다. (a) 가속도계의 계측에서 얻어진 도달시간을 (b)와 같이 도달속도와 상대밀도의 관계로 나타내면 상대밀도가 증가함에 따라서 진동 도달시간도 빨라지는 상관관계를 보였다. 또한, (c)의 심도별 다짐도에서 알 수 있듯이 상대밀도가 높을수록(지반의 강성이 클수록) 다짐도가 증가하는 경향을 보였으며, 지반강성이 큰 지반(상대밀도 60%)의 경우에는 진동다짐의 영향이 심도 30cm인 시험체의 하단까지 다짐도를 증가시키는 경향을 나타내었다.



(a) 도달속도 계측값 (b) 도달속도-상대밀도 (c) 심도별 다짐도

그림 23. 상대밀도에 따른 도달시간과 심도별 다짐도의 관계

## 4.2 현장 시험성토 실험

본 시험성토의 목적은 부항 다목적댐건설공사(시방서 C10510 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD) 중 본댐 체체 축조재료에 대하여 사전 시험축조를 통하여 물리적, 역학적 특성을 파악하며, 시방에 적합한 관리기준을 설정하고, 시공방법을 결정하여 우한 품질 확보를 위한 관리기준을 결정함에 있다.

본 시험성토 실험은 주 축조존인 3B-Zone에는 IT를 접목한 최적화 다짐 시공관리를 위해서 진동롤러에 GPS 및 진동가속도 센서를 활용하여 주행궤적도, 다짐회수, 다짐속도, 지반반력, 다짐높이를 실측정

값과 비교 검토를 위하여 병행 실시한 측정결과를 기술하였다..

Zone-3B의 생산방법 및 혼합방법은 하상 골재 500mm이하를 직접 유용하는 Zone으로서 재료원 E지역에서 포크레인을 이용하여 굴착 후 재료분리가 없도록 1차 혼합하여 생산하며, 함수량 조절은 하상에서 굴착하여 24시간 방치한 후 사용하며, 포설 후 다짐전 체적의 10%를 살수 하여 입자의 표면에 수막을 형성하여 입자간의 마찰을 감소시킬 수 있도록 하여 최대의 다짐효과를 높일 수 있도록 조절한다.



a) 시험 성토 전경



b) 진동 롤러 내부의 모니터링

그림 24. GPS 다짐관리 시스템을 활용한 현장 시험성토

### 4.3 현장 시험성토 결과

본시험은 Zone3-B에 대해 1차 40cm, 60cm, 80cm의 3구간에 포설 후 다짐작업을 실시하고, 다시 2차로 80cm, 120cm, 160cm가 되도록 포설하여 다짐작업을 실시하였다. 다짐 방법은 성토구간 6m폭의 범위를 롤러 2.155m폭으로 3회에 걸쳐 다짐을 하는데, 다짐횟수는 진, 후진 왕복을 1회로 한다.

#### 4.3.1 침하율과 포설두께의 관계

그림 25에서 포설두께에 따른 다짐횟수와 침하율의 관계를 나타내었고, 다짐횟수가 많아질수록 침하율이 높아지며 포설두께가 클수록 침하율이 낮아짐을 알 수 있다.

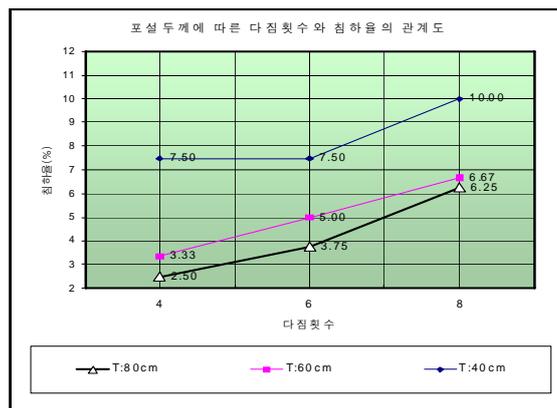


그림 25. 포설두께에 따른 다짐횟수와 침하율의 관계도

그림 26은 GPS 시스템에 의해 측정된 층두께 분포도이며, 4회, 6회, 8회의 다짐구간에서 각각 녹색과 파란색의 분포를 통해 그 다짐 횟수에 따른 침하량의 차이를 알 수 있다.

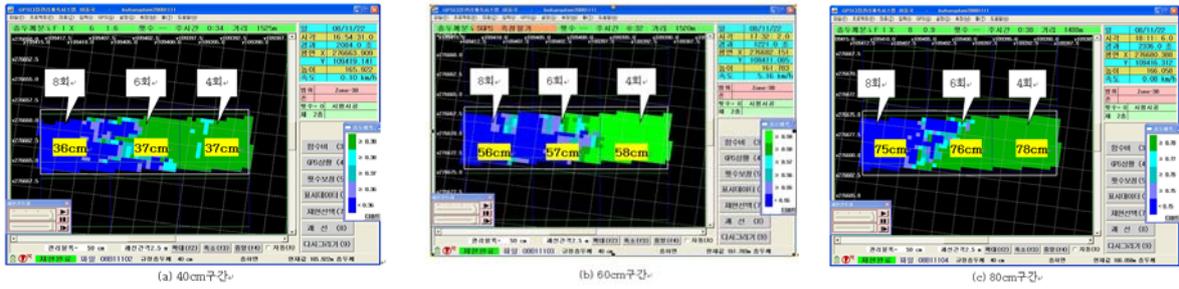


그림 26. 각 포설두께에 따른 다짐후의 층두께 분포도

### 4.3.2 지반반력도 분석 및 비교

진동롤러의 진동 축에 설치된 진동가속도센서에 의해 가속도를 측정하여 진동가속도 파형 분석을 통하여 기본 진동주파수와 추가적으로 발생하는 주파수를 이용하여 지반반력도를 결정하였다. 롤러에 장착된 진동가속도센서에 의해 취득한 지반반력도의 평균을 각 시험구간별로 산출한 결과 (그림 27), 지반반력도와 다짐밀도 관계의 결과 (그림 28)를 나타내었다.

현장 시험으로 취득한 건조밀도와 지반반력도를 각 시험구간별로 비교하여 건조밀도 관리기준(실시설계) 2.16 g/cm<sup>3</sup> 에 적합한 지반반력도 30.8을 산출하였다. 상이에서 산출된 지반반력도 30.8을 기준으로 하였을 때, 다짐횟수 4회에서 포설두께 40cm 구간이 기준에 적합하였고, 다짐횟수 6회에서 포설두께 40cm, 60cm 구간이 기준에 적합하였으며, 다짐횟수 8회에서 포설두께 전구간이 기준에 적합하였다.

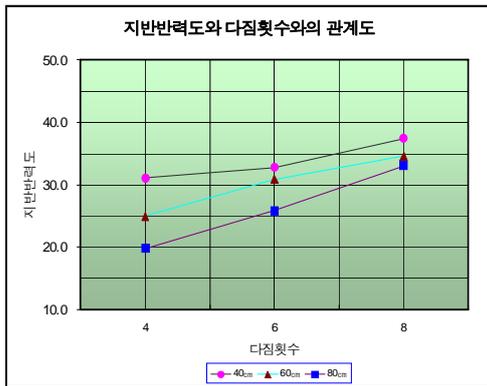


그림 27. 지반반력도와 다짐횟수의 관계

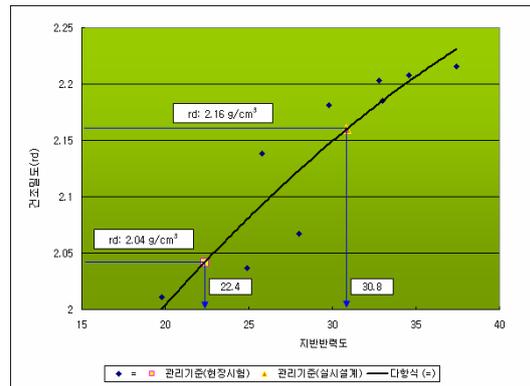


그림 28. 지반반력도와 다짐밀도의 관계

그림 29에서는 진동가속도 센서에서 검출된 데이터에 대하여 진동주파수 분석을 통하여 얻어진 지반반력도를 시험 구간의 전 영역에 표시하였다.

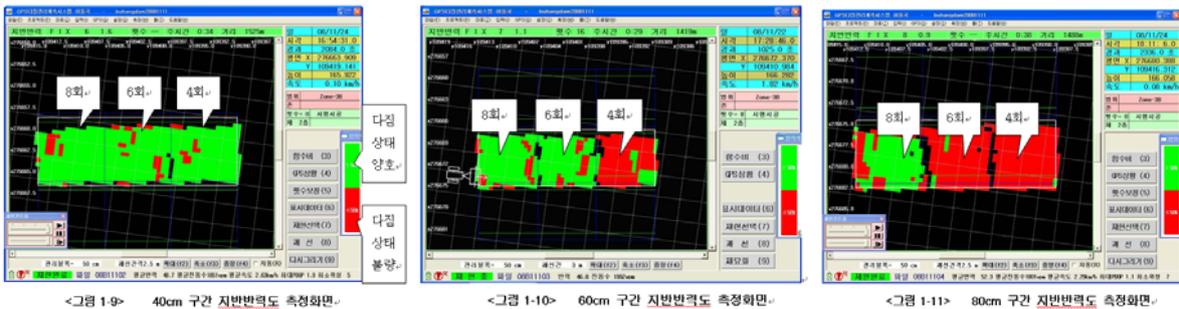
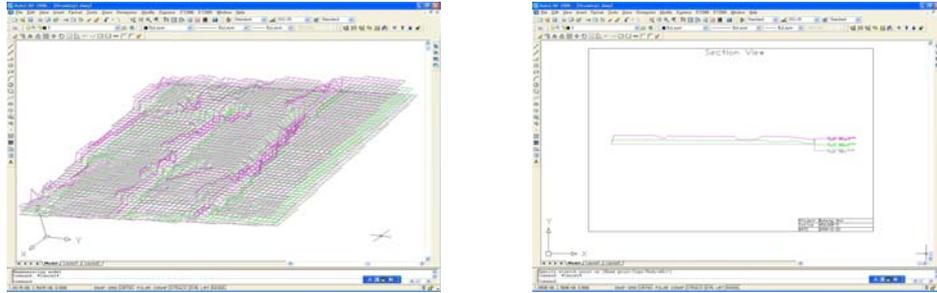


그림 29. 시험 전영역에서의 지반반력도

### 4.3.3 작업후의 토공관리

그림 30에서 나타낸 것과 같이, 토공관리는 측정 데이터를 AutoCAD를 이용하여 3차원으로 나타내어, 색상표에서 구분이 힘든 부분을 3차원으로 생성하므로 보다 직관적인 검토가 가능하다. 또한, 2차원 단면도로 결과 데이터를 이용하여 전체 영역의 중간 단면부를 나타내고, 이때 층의 평균높이와 토공량을 계산된다.



a) 3차원 다짐결과도

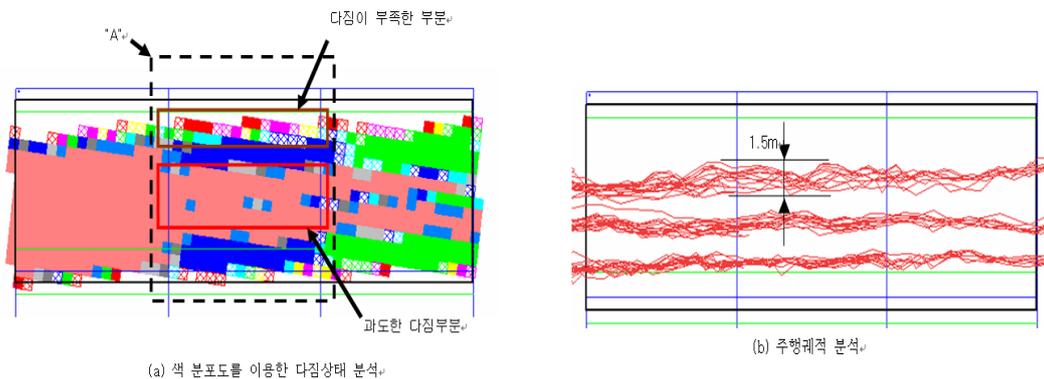
b) 2차원 토공단면도

그림 30. 작업후의 토공관리

### 4.3.4 지반 다짐의 중첩과 누락

본 시험시공과 같이 작은 영역에서 롤러 작업자가 안내표시를 보면서도 작업을 한 경우에도 경로를 벗어나는 경우가 발생한다. 따라서 광범위한 영역에서 작업을 할 경우에는 다짐의 중첩과 누락하는 영역이 상당히 발생 할 수 있다는 것을 의미한다.

그림 31은 40cm두께의 다짐 구간에서의 다짐작업 결과로서, 폭 6미터를 2.155m의 폭의 롤러를 이용하여 다짐작업을 하였다. (a)의 색분포도 상에서 "A"영역에서 다짐의 쏠림 현상이 발생한 것을 알 수 있다. (b)의 주행궤적 상에서 이동 경로가 1.5m가까이 벌어짐으로 (a)에서는 중간부위에서 중첩되는 부분이 많이 나타나며 가장자리 쪽은 누락되어 다짐이 부족한 부분이 발생한 것을 확인 할 수 있다. 이처럼 작업자의 임의적인 작업에 의해서는 누락과 중첩이 빈번히 발생하므로 실시간으로 모니터링을 하여 누락 없이 적절한 작업을 통해 다짐작업의 품질 향상을 도모 할 수 있다.



(a) 색 분포도를 이용한 다짐상태 분석

(b) 주행궤적 분석

그림 31. 다짐작업 중첩 및 누락

### 4.3 부항댐 본댐 다짐관리 평가

부항댐 본댐 축조는 2008년 10월부터 축조를 시작하여, 현재(2010년 2월)에 축조높이 EL 176m를 축조

를 진행 중이다. 그림 33과 같이 다짐 시공관리는 다짐횟수 분포도 및 주행 궤적을 1일 단위로 기록하며 시공관리를 수행하고 있다. 또한 토압계, 수평침하계, 간극수압계, 수평변위계, 층별침하계 등의 댐체 변위 및 변형 측정을 위하여 총 17종 484개의 계측기를 설치, 운영하고 있다.



그림 32. 부항댐 본댐 축조 전경



a) 다짐횟수 분포

b) 주행궤적도

그림 33. 다짐 시공관리

## 5. 결론

부항 다목적댐(CFGD)에 대하여 원심모형실험을 이용하여 차수벽균열 등에 의하여 발생할 수 있는 침투에 대한 안전성을 확보하기 위해 설계된 배수층(Zone-3Bs)의 배수효과 확인 및 대표단면의 변형 특성에 대한 안전성 확인을 목적으로 하였다.

1) 원심모형실험 결과 선별배수층(3BS) 설치로 인하여 ① 침투수의 주 흐름 경로가 확보되고, ② 침투수가 신속히 배출되는 효과를 얻을 수 있음이 확인되었다. 즉, 투수계수의 차이로 인하여 댐체 내로 유입된 침투수가 선별 주축조존과 주축조존의 경계를 만나게 되면 침투수는 그 경계면을 따라 흐르는 경향을 보였다. 이와 같이 선별 주축조 존의 구획은 침투수의 흐름 경로를 유도함으로써 주축조존을 침투수로부터 보호하는 기능을 하는 것으로 나타났다.

2) 선별 배수층이 설치되지 않은 경우에는 침투된 물의 배수가 원활히 이루어지지 않아 댐의 침투시의 안정성을 저해하는 것으로 나타났으나, 반면에 선별 배수층이 설치된 경우 유입된 침투수가 댐체 내 간극수압을 거의 유발하지 않고 바로 배수되어 침투에 대한 안정성이 우수한 것으로 나타났다.

성토다짐시공에 있어서 GPS와 진동가속도 센서를 이용하여 작업위치에서의 지반다짐도를 평가를 통하여 기존의 지반다짐도의 평가시험방법을 보완, 대체할 수 있는 방법을 검토하였다.

3) 진동가속도 센서로 측정된 지반다짐도는 지반강성에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다.

- 4) 진동 다짐롤러의 다짐횟수와 포설두께의 결과에 대해서는 현장실험(평판재하시험, 물치환시험)의 실험값과 상관관계성이 높은 것으로 나타났다.
- 5) 진동가속도 센서에 의한 지반다짐도 측정방법은 롤러의 다짐시공과 동시에 실시간으로 지반의 다짐 상태를 파악할 수 있는 것은 물론이고, 기존의 현장실험은 특정 위치에서 시험을 수행하여 전체면적에 대하여 대표값으로 추정하는 반면, 지반다짐도 측정방법은 작업면적에 대하여 연속적인 시공관리가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

## 참고문헌

1. 채광석, 장병희, 구자덕, 김유준(2008), "IT기술을 접목한 다짐시공관리 개발", **대한토목학회 학술대회**.
2. 채광석, 신동훈, 임은상, 구자덕(2008), "진동가속도계를 이용한 지반다짐 특성 연구", **한국지반공학회가을 학술대회**.
3. 김주형, 유완규, 김병일, 채광석(2008) "다양한 지반강성 평가장치를 이용한 현장 다짐도 예비평가", **한국지반공학회가 봄 학술대회**.
4. Anderegg, R. and Kaufmann, K.(2004), "Intelligent Compaction with Vibratory Rollers", *Transportation Research Record*. 1868, *Transportation Research Board, Washington, D.C.*, pp.124~134.
5. Mooney, M. and Rinehart, R.V. (2007), "Field Monitoring of Roller Vibration during Compaction of Subgrade Soil", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.133, No. 3, pp.257~265.
6. Yoo, T.S. and Selig, T.S.(1979), "Dynamics of Vibratory-Roller Compaction", *J. of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.105, No. GT10, pp.1211~1231.