

# 고속철도 콘크리트궤도 흙쌓기재료의 Wetting Collapse에 관한 연구

## Wetting-Induced Collapse in Fill Materials for Concrete Slab Track of High Speed Railway

이 성 진<sup>1</sup> Lee, Sung-Jin

이 일 화<sup>2</sup> Lee, Il-Wha

임 은 상<sup>3</sup> Im, Eun-Sang

신 동 훈<sup>4</sup> Shin, Dong-Hoon

조 성 은<sup>5</sup> Cho, Sung-Eun

### Abstract

Recently, the high speed railway comes into the spotlight as the important and convenient traffic infrastructure. In Korea, Kyung-Bu high speed train service began in about 400 km section in 2004, and the Ho-Nam high speed railway will be constructed by 2017. The high speed train will run with a design maximum speed of 300-350 km/hr. Since the trains are operated at high speed, the differential settlement of subgrade under the rail is able to cause a fatal disaster. Therefore, the differential settlement of the embankment must be controlled with the greatest care. Furthermore, the characteristics and causes of settlements which occurred under construction and post-construction should be investigated. A considerable number of studies have been conducted on the settlement of the natural ground over the past several decades. But little attention has been given to the compression settlement of the embankment. The long-term settlement of compacted fills embankments is greatly influenced by the post-construction wetting. This is called 'hydro collapse' or 'wetting collapse'. In spite of little study for this wetting collapse problem, it has been recognized that the compressibility of compacted sands, gravels and rockfills exhibit low compressibility at low pressures, but there can be significant compression at high pressures due to grain crushing (Marachi et al. 1969, Nobari and Duncan 1972, Noorany et al. 1994, Houston et al. 1993, Wu 2004). The characteristics of compression of fill materials depend on a number of factors such as soil/rock type, as-compacted moisture, density, stress level and wetting condition. Because of the complexity of these factors, it is not easy to predict quantitatively the amount of compression without extensive tests. Therefore, in this research I carried out the wetting collapse tests, focusing on various soil/rock type, stress levels, wetting condition more closely.

### 요 지

고속철도는 300km/h 이상의 고속으로 운행되기 때문에 노반의 부등침하는 큰 사고를 야기시킬 수 있어 주의를 기울여 관리되어야 한다. 일반적으로 침하는 두 층(성토체, 하부 원지반)에서 발생할 수 있다. 이 중 원지반에 대한 연구는 많이 수행되어 왔으나, 성토체 자체의 압축침하에 대한 연구는 그 크기가 상대적으로 크지 않고 장기적으로 발생하는 특성으로 많은 연구가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 하지만 잔류침하량이 약 30mm까지 허용되는 콘크리트

1 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 궤도노반연구팀 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Track & Geotechnology Reserch Team, Korea Railroad Research Institute, geolsj@krii.re.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 궤도노반연구팀 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Track & Geotechnology Reserch Team, Korea Railroad Research Institute)

3 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dam Safety Research Center, KOWACO)

4 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Dam Safety Research Center, KOWACO)

5 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dam Safety Research Center, KOWACO)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

트래드의 고속철도 구간에서는 이로 인한 영향은 무시할 수 없으며 이에 대한 원인 규명이 필요하다.

성토체의 압축은 다양한 원인에 의해서 발생할 수 있을 것이다. 그 중에서도 성토체 자체의 장기적인 압축침하특성은 공사 완료 후에 지하수위 상승이나 강우로 인한 습윤화 과정(Wetting)에서 크게 발생될 수 있으며, 이는 'Hydro Collapse' 또는 'Wetting Collapse'라 할 수 있다. 이러한 Wetting Collapse 문제에 대한 연구가 많이 이루어지지 않고 있지만, 이로 인한 모래, 자갈, 암석 등의 다짐 성토체의 압축발생은 여러 연구자들에 의해 인지되어지고 있다. 본 연구에서는 4가지 종류의 지반/암석에 대해 응력수준과 습윤화 조건 등에 대한 Wetting Collapse 실험을 수행하여 그 영향 정도를 평가해 보았다. 대형 오이도미터를 이용하여 실험을 수행하였으며, 실험결과로 각 재료별 수직응력에 따라 발생하는 침하 변형률과 순수히 포화도 상승에 따른 침하 변형률을 평가할 수 있었다.

**Keywords** : Embankment, High speed railway slab track, Odometer test, Rockfill, Wetting-collapse

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 필요성

최근 고속철도는 전 세계적으로 중요한 교통기반시설로 주목을 받고 있으며, 국내에서도 경부고속철도 1단계와 2단계에 이어 호남고속철도를 2017년 완공을 목표로 준비 중에 있다. 이처럼 시공 및 이용이 증가추세에 있는 고속철도는 300km/h 이상의 고속으로 운행되기 때문에 일반철도 및 도로에서 허용되던 노반의 작은 부등침하도 큰 사고를 야기시킬 수 있어 주의를 기울여 관리되어야 한다.

일반적으로 침하는 두 층(성토체, 하부 원지반)에서 발생할 수 있다. 이 중 대부분의 침하가 원지반에서 발생되나 이에 대한 연구는 많이 수행되어 왔으며, 이에 대한 대책공법도 다양하게 개발되어 설계, 시공되고 있다. 하지만 성토체 자체의 압축침하에 대한 연구는 그 크기가 상대적으로 크지 않고 장기적으로 발생하는 특성으로 많은 연구가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 하지만 잔류침하량이 약 30mm까지 허용되는 콘크리트 궤도의 고속철도 구간에서는 이로 인한 영향은 무시할 수 없으며 성토체 자체 압축침하를 발생시키는 다양한 원인들에 대한 규명과 그 대책이 필요하다. 성토체의 압축은 많은 원인에 의해서 발생할 수 있을 것이다. 그 중에서도 성토체 자체의 장기적인 압축침하특성은 공사 완료 후에 지하수위 상승이나 강우로 인한 습윤화 과정(Wetting)에서 크게 발생될 수 있으며, 이는 'Hydro Collapse' 또는 'Wetting Collapse'라 할 수 있다(이하 Wetting Collapse). 이러한 Wetting Collapse 문제에 대

한 연구가 많이 이루어지지 않고 있지만, 이로 인한 모래, 자갈, 암석 등의 다짐 성토체의 압축발생은 여러 연구자들에 의해 인지되어지고 있다(Marachi et al. 1969, Nobari and Duncan 1972, Noorany et al. 1994, Houston et al. 1993, Wu 2004). 성토재료의 압축량은 지반/암석 종류, 다짐함수비, 밀도, 응력수준, 습윤화 조건 등과 같은 여러 인자들에 의해 영향을 받을 수 있지만, 본 연구에서는 4가지 종류의 지반/암석 재료에 대해 현장의 응력수준과 습윤화 조건 등에 대한 Wetting Collapse 실험을 수행하여 그 영향 정도를 평가해 보았다.

본 연구의 실험 재료가 암석을 포함하고 있어 지름 600mm의 대형 오이도미터를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험결과에서는 각 재료별로 수직응력에 따라 발생하는 침하 변형률과 순수히 포화도 상승에 따른 침하 변형률을 평가할 수 있었다. 본 연구에서 수행된 결과로 모든 성토재료에 대한 Wetting Collapse의 침하량을 정량적으로 평가할 수는 없지만 원지반과 성토체의 침하가 안정화된 이후 발생할 수 있는 침하의 중요한 원인을 파악하고 이에 대한 설계 및 시공 과정에서의 대책 마련 및 보강 방안에 대한 유용한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

### 1.2 암석/흙 성토체의 붕괴(Collapse) 메커니즘

붕괴성 토질(Collapsible soils)은 건조한 점토나 실트 등의 점성 재료와 조립재료가 느슨하게 결합되어 있는 것으로 설명되어 왔다. 이러한 흙의 구조는 Casagrande (1932)가 소개한 다음 그림 1과 같은 개념으로 설명될 수 있다. 다져진 성토체는 긴 시간동안 Wetting에 의해 침

하를 경험하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 특성이 붕괴성 침하로 인식되어오고 있지는 않다. 그러나 지난 10여년 동안 이런 종류의 여러 고성토체가 붕괴를 경험하였으며, 이러한 일련의 현상들은 붕괴성 토질의 정의에 대해 보다 넓은 해석이 가능하도록 했다.

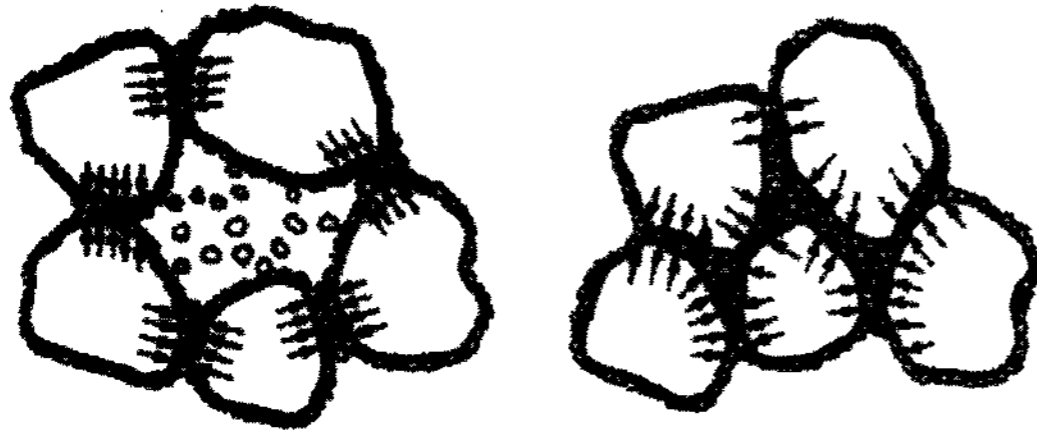


그림 1. 침수 전후의 흙입자 구조

다짐모래, 자갈 암성토체의 압축성에 대한 연구는 Marachi 등(1969), Nobari & Duncan(1972) 등의 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 비점성토와 암성토체가 낮은 응력수준에서 낮은 압축성을 보이지만 높은 응력수준에서는 입자파쇄에 의해 상당한 압축성을 보일 수 있다는 것을 지적하고 있다. 점성의 성토체의 경우 wetting에 의한 부피변화가 응력수준에 따라 팽창이나 압축이 모두 발생할 수 있다. Burland(1965)와 Mitchell(1993) 등이 지적한 바와 같이 부분 포화된 점성의 토질은 다른 조립재의 접촉점 사이에 세립분의 "packets"을 갖게 되며, 이러한 packets은 음의 간극수압을 갖고 있어 낮은 응력수준에서 물을 흡수했을 때 팽창할 수도 있다. 하지만 높은 응력수준에서는 미끄러짐이나 변형이 발생하여 조립재료의 전체적인 부피 감소(Collapse or hydrocompression)가 발생할 수 있다. 따라서 wetting에 의한 유효응력의 감소가 세립분의 미시적인 팽창과 함께 조립재료의 접촉점의 미끄러짐으로 거시적 부피감소로 이어지게 된다. 이러한 팽창/붕괴의 메커니즘은 단단한 퇴적암으로 구성된 성토체에서 강조될 수 있다. 즉 이러한 종류의 암석과 단단한 흙덩어리는 현장의 다짐상태에서 적절하게 부서지지 않고 시공 완료 이후 Wetting에 의해 약화되고 붕괴될 수 있는 것이다(Sherard 1963, Rogers 1992).

## 2. 실험 과정

### 2.1 실험 재료

#### 2.1.1 시료의 입도분포

본 실험에 사용된 재료로는 암석 종류와 세립분 함량

정도가 다른 4개의 성토현장에서 실제 사용되고 있는 암석 및 흙을 활용하여 실험을 수행하였다.

실험 재료들은 현장에서 각각 경암(A재료), 보통암(B재료), 연암(C재료), 화강풍화토(D재료)으로 분류되어 시공되고 있는 재료로써 그림 3과 같은 입도를 나타내고 있었다.

#### 2.1.2 시료의 상대밀도(A, B, C재료)

고속철도 설계기준에 의하면 다짐도의 품질기준으로 상부노반은 최대건조밀도의 95% 이상, 하부노반은 최대건조밀도의 90% 이상으로 제시되어 있다. 따라서 본 연구의 실험에서도 재료에 따른 상대밀도 실험을 다음 표 1에 나타낸 바와 같이 다짐몰드에 기건상태의 시료를 투입한 후 소정의 다짐층수와 다짐횟수를 변화시키면서 밀도를 측정하여 최소/최대건조밀도를 표 2와 같

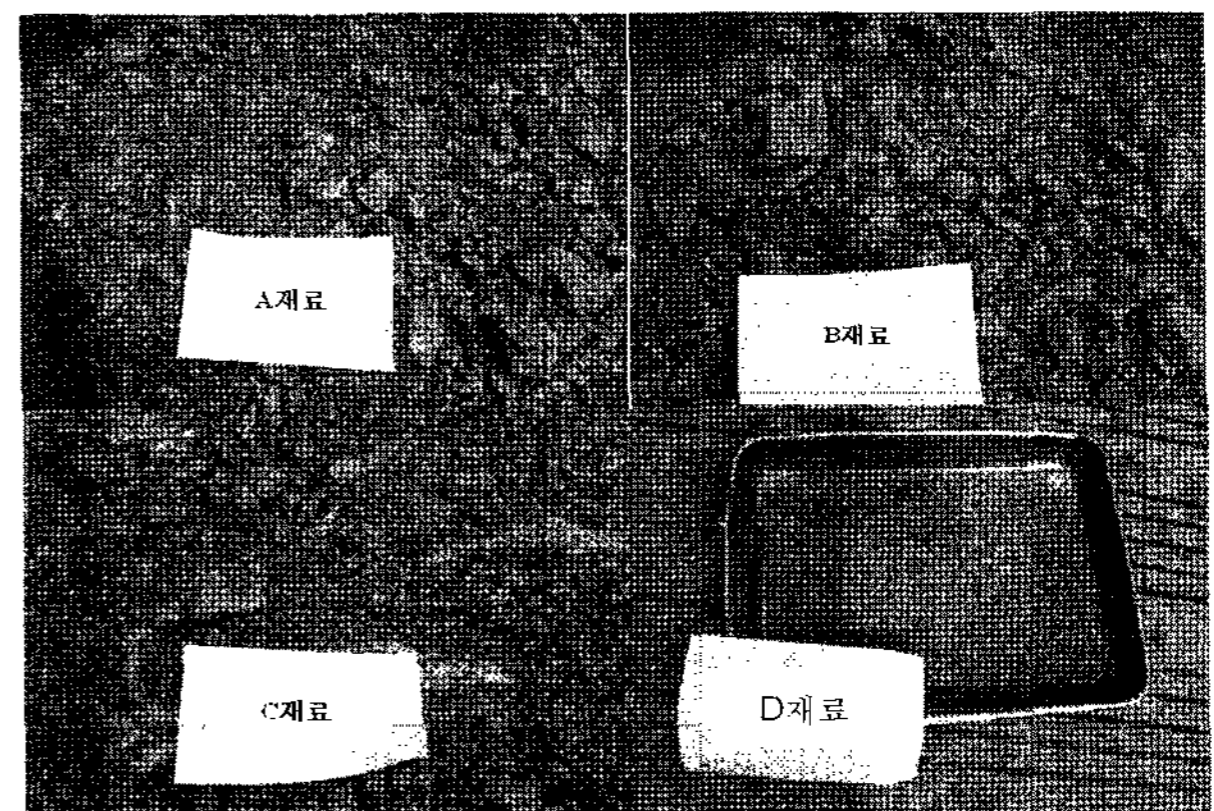


그림 2. 4종류(경암, 보통암, 연암, 화강풍화토)의 실험 재료

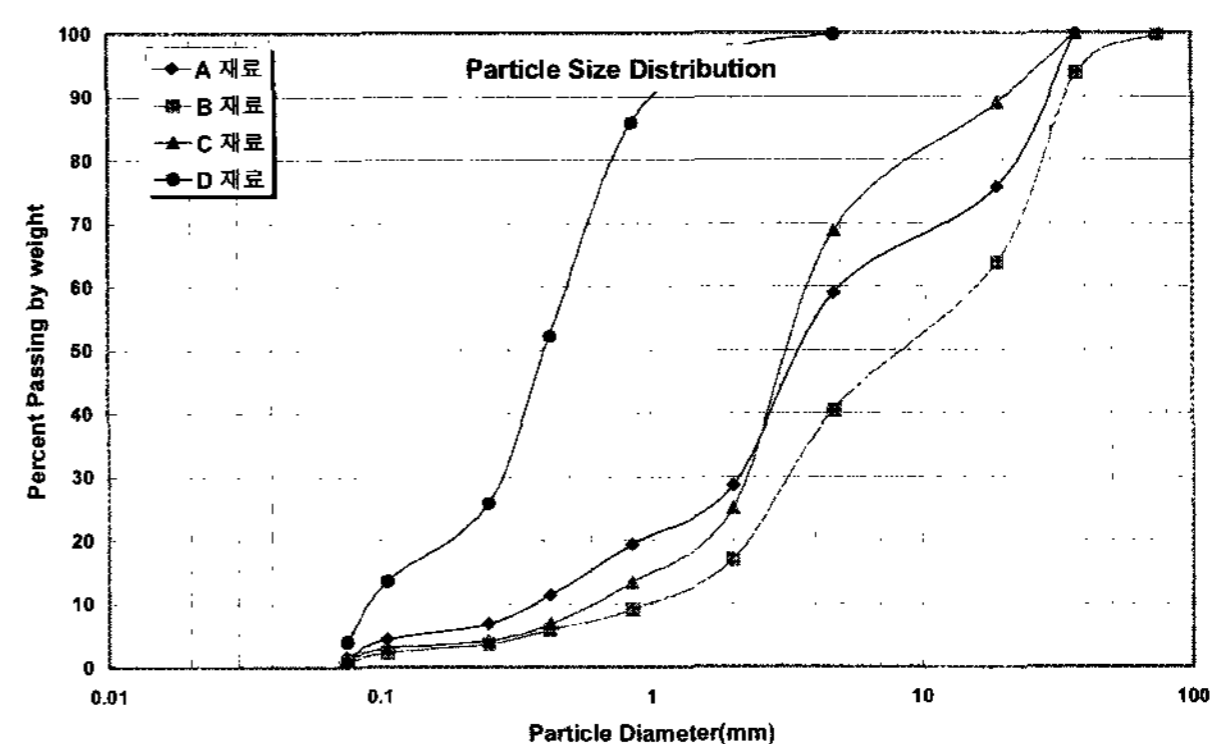


그림 3. 실험 재료별 입도분포곡선

표 1. 다짐시험 조건

공시체의 크기	직경 60cm, 높이 45cm
다짐층수	3층 (1층당 시료의 높이 15cm)
다짐횟수	비다짐 72회
공시체의 높이 측정방법	4개 지점에서 측정하여 평균치 사용

표 2. 상대밀도 결과

재료 \ 밀도	최소건조단위중량(tf/m <sup>3</sup> )	최대건조단위중량(tf/m <sup>3</sup> )
A재료	1.30	2.06
B재료	1.49	2.19
C재료	1.46	2.13

이 얻었다. 각 시료의 최대건조밀도는 2.06(tf/m<sup>3</sup>)~2.13(tf/m<sup>3</sup>)이었으며, 본 실험에서는 재료 최대건조밀도의 95% 수준으로 2.0(tf/m<sup>3</sup>)을 선정하여 재료별로 일관된 밀도로 실험을 수행하였다.

### 2.1.3 화강풍화토의 다짐시험(D재료)

D재료는 화강풍화토로, 상대밀도시험 대신 표준다짐 시험(A-1다짐)을 수행하여, 표 3에서와 같은 결과를 얻었다. 다만, 본 다짐시험은 A-1다짐으로 수행하였기 때문에 현장의 다짐에너지보다 적은 에너지로 다짐이 수행되어 실제 현장 조건을 고려하여 본 실험의 시료 조성 시에는 보다 큰 에너지를 이용하여 암석재료시험(A, B, C 재료)에 근접한 1.95(tf/m<sup>3</sup>)으로 시료를 조성하여 실험을 수행하였다.

### 2.1.4 비중, 골재 마모시험 및 흡수량 시험

각 재료에 대한 비중과 암석재료(A,B,C재료)의 흡수량 및 골재마모시험을 수행하여 그 결과를 표 4에 나타냈다.

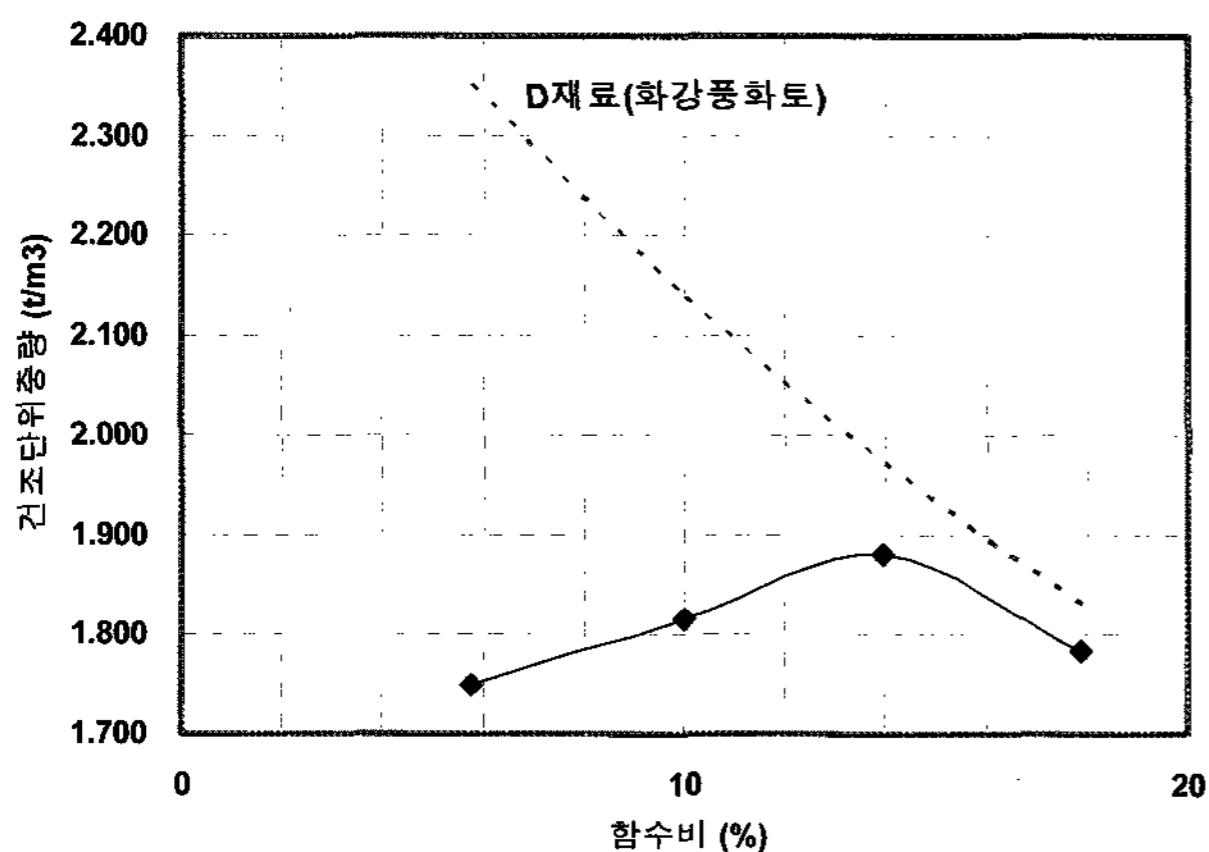


그림 4. D재료(화강풍화토)의 표준다짐시험

표 3. 표준다짐시험 결과

재료	최적 함수비(%)	최대건조단위중량(tf/m <sup>3</sup> )
화강풍화토 (D재료)	14.5	1.882

## 2.2 실험 장비

약 120-130mm이하의 골재를 대상으로 한 본 실험을 위해 한국수자원공사 수자원연구원의 대형오이도미터 시험기(Large Scale Oedometer Testing Apparatus)를 이용하였다. 이 장비는 직경 60cm, 높이 60cm의 오이도미터셀을 사용하며, 모래, 자갈 및 사석재료 등의 조립재료에 대한 압축변형계수 산정에 적합한 장비로 주요 제원은 표 5와 같다.

## 2.3 실험 방법

본 연구에서는 실험 대상의 조건에 따라 하중에 따른 침하가 완료된 후 살수장치를 통해 물을 침투시켜 시료를 포화시킴으로써 물의 침투(혹은 포화)가 재료의 변형에 미치는 영향(Wetting Collapse)을 관찰하고자 하였다. 포화로 인한 영향 검토 후에도 마지막 하중단계까지 하중에 의한 영향을 검토하여 침수 유무에 따른 각 하중단계에서의 재료 압축성을 파악하였다.

이를 위한 실험은 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- (1) 시료셀 안에 다공판과 여과지를 넣고 시험재료를 셀 안에 투입한 후 소정의 밀도에 따라 다짐을 실시하여 시료를 형성
- (2) 다음으로 시료가 들어있는 시료셀을 크레인을 이용하여 이동대차에 실은 후 이동레일을 따라 하중재 하장치가 있는 곳으로 이동시켜 시료셀 내의 시료

표 4. 재료의 비중, 흡수량, 마모율 시험결과

	A재료	B재료	C재료	D재료	비고
비 중	2.67	2.61	2.60	2.68	
흡수량	1.16	1.27	1.56	-	
마모율 (%)	18.1	21.4	25.2	-	

표 5. 대형오이도미터 시험기의 주요제원

주요구성	규 격
Loading frame	- 2,750(L)×1,940(W)×3,580(H)mm
시료 Cell	- 1,000(D)×600(H)mm - 600(D)×600(H)mm
Hydraulic Servo Actuator	- 560(D)×2,220(L)mm - 최대 가압하중 ±200ton(로드셀 부하하중) - 400mm Stroke
Hydraulic Servo Control unit	- 32bit 60MHz DSP 프로세서 - 서보밸브, 서보모터 하중/변위 제어
운영 및 데이터 획득 프로그램	- SACT ver.2 Actuator 운영 프로그램



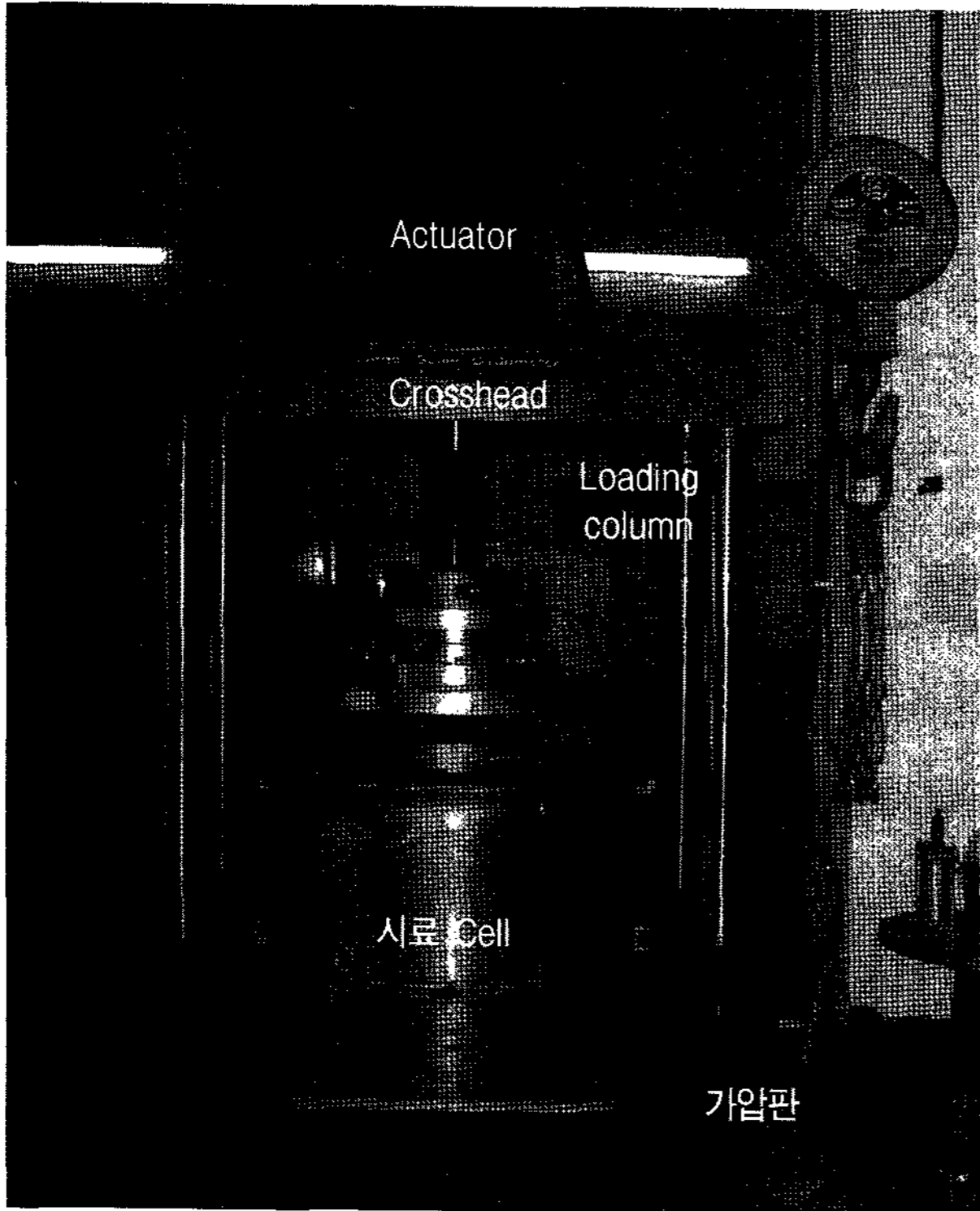


그림 5. 대형오이도미터 실험 장비 전경

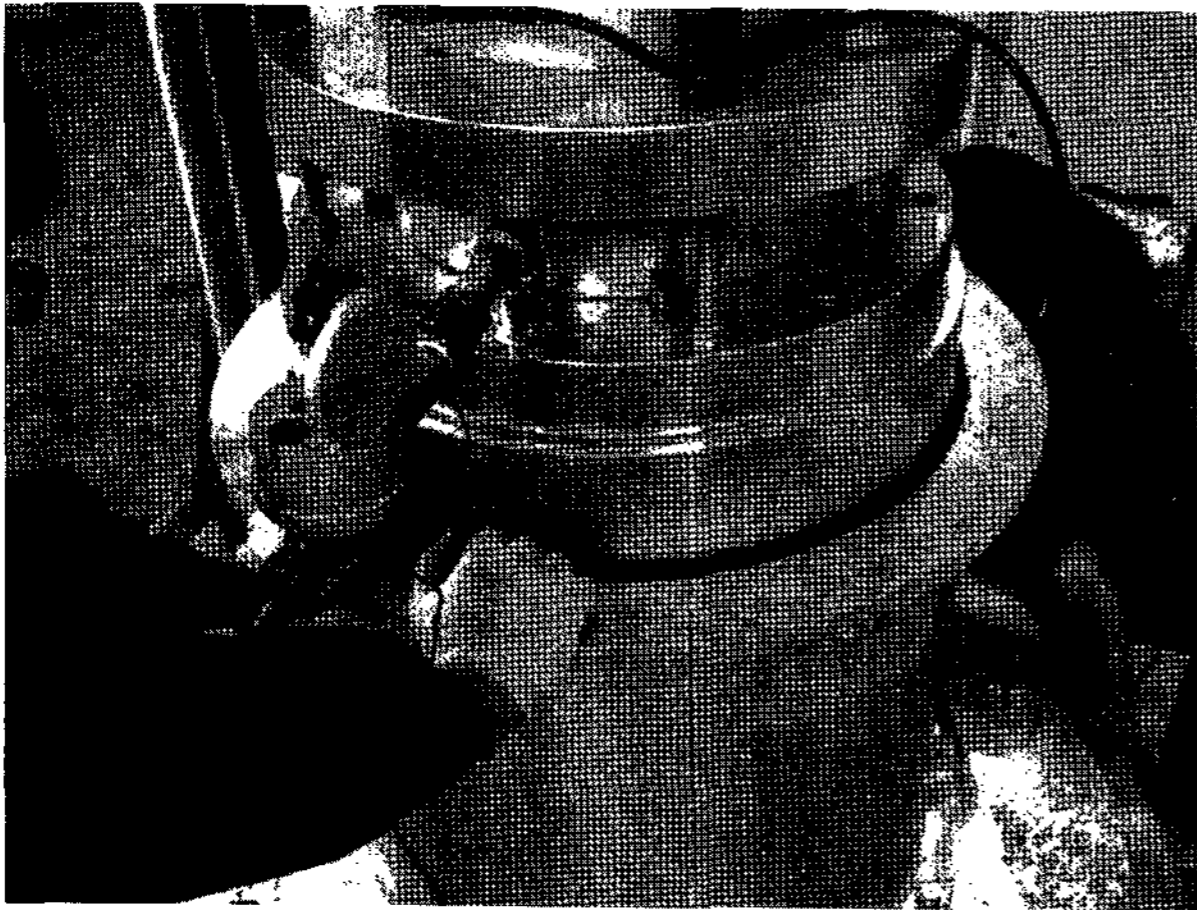


그림 6. 살수 장치

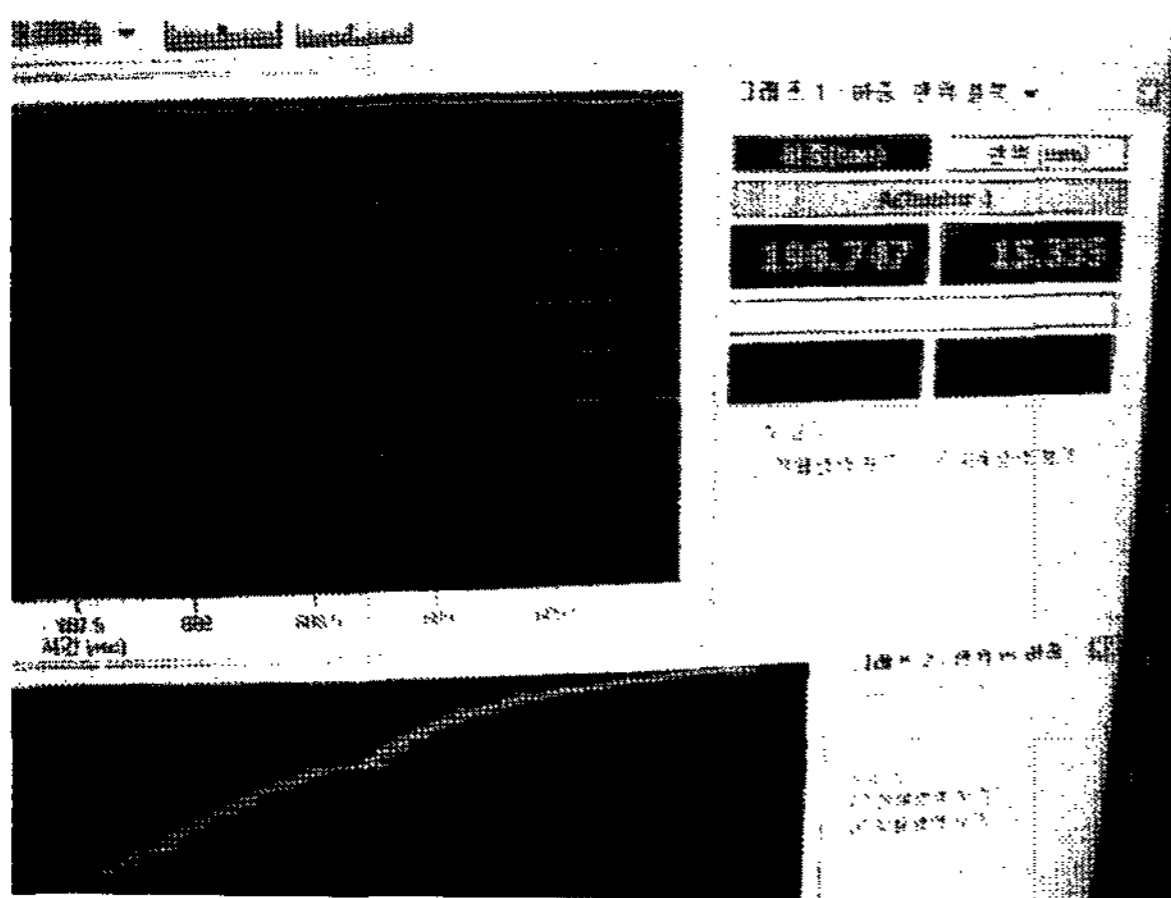


그림 7. 제어 및 계측시스템

단면과 가압관의 중심이 정확히 일치하도록 시료셀의 위치를 조정

- (3) 시료세팅 후, 로드셀의 부하하중을 단계적으로, 즉  $10(\text{tonf/m}^2)$ ,  $20(\text{tonf/m}^2)$ ,  $30(\text{tonf/m}^2)$ ,  $40(\text{tonf/m}^2)$ ,  $50(\text{tonf/m}^2)$ 의 5단계로 재하
- (4) 이 때, 한 하중단계에서 시료의 압축침하거동이 완료될 때까지 일정한 하중이 유지되도록 한 후 다음 단계의 하중을 가하였다.
- (5) Wetting하고자 하는 수직응력 단계에서 하중에 의한 변위 수렴 후 살수(Wetting)
- (6) Wetting에 의한 압축 침하 발생량 측정
- (7) Wetting에 의한 압축 침하 수렴 후 다음 단계 응력 수준 실험 진행(포화상태에서 응력의 증가에 따른 압축침하량 측정)

### 3. 실험 결과 및 분석

본 연구의 주된 관심사는 Wetting Collapse에 의한 암성토체의 압축침하특성에 관한 내용이다. 이러한 Wetting Collapse를 발생시키는 요인으로는 강우 시 침투에 의해 부분포화상태에서 함수비가 증가하거나 완전 포화상태에 이르는 경우와 지하수위가 상승하여 완전 침수 포화되는 경우가 포함된다. 즉 강우 시 침투에 의해서는 성토체의 투수특성에 따라 함수비 증가가 불균일하게 발생되고 이에 따른 Collapse의 불균일성에 의한 종방향 및 횡방향에서의 부등침하가 발생될 수 있으며, 지하수위 상승에 따라 침수된 성토체 단면의 침하발생으로 부등침하가 발생될 수 있을 것이다.

함수비 증가에 따른 암성토체의 압축침하 특성에 미치는 영향인자로는 실험 재료, 다짐 함수비, Wetting 조건, 응력 수준 등이 있을 것이며, Wetting Collapse에 대

표 6. 실험 재료별 Wetting 응력 조건

실험 종류	시료 종류	Wetting 단계 수직응력	비고
Wetting Collapse Settlement Test	A재료	(1) $20(\text{ton/m}^2)$	경암
	B재료	(2) $10(\text{ton/m}^2)$	보통암
		(3) $20(\text{ton/m}^2)$	
	C재료	(4) $10(\text{ton/m}^2)$	연암
		(5) $20(\text{ton/m}^2)$	
		(6) $40(\text{ton/m}^2)$	
	D재료	(7) $10(\text{ton/m}^2)$	화강풍화토
		(8) $20(\text{ton/m}^2)$	

한 정량적 평가를 위해서는 이러한 영향인자들에 대한 다양한 조합의 연구가 필요할 것이지만 본 연구에서는 이에 대한 발생정도를 파악하고 그 대책을 검토할 수 있는 기초연구자료로 활용하는 결과 도출까지를 그 연구범위로 설정하였다.

즉 앞서 언급한 바와 같이 경암, 보통암, 연암으로 분류되는 암석재료와 화강풍화토를 대상으로 암중 및 입도분포에 따른 특성, Wetting이 이루어지는 응력수준에 따른 특성, 그리고 전체적으로 암석재료를 활용한 성토체에서 발생될 수 있는 함수비증가에 따른 압축침하 변형률의 범위를 파악해보았으며, 이에 대한 결과는 그림 8, 그림 9 및 표 7과 같다.

실험 결과의 그림과 표에서 볼 수 있는 바와 같이 실험 대상 재료와 Wetting 응력 수준에 따라 Wetting Collapse에 의한 압축침하량은 약 0.2-0.8%의 범위에서 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 변형률은 20m 성토 시, 약 40mm-160mm에 이르는 허용 잔류침하량을 30mm까지 엄격하게 제한하는 콘크리트궤도의 고속철도에서는 상대적으로 매우 큰 침하를 유발시킬 수 있는 크기이다. 그러나 본 실험 결과는 완전 수침 상태의 최종 포화 시의 Wetting Collapse 양을 평가한 결과로 실제 현장에서는 하부노반의 지하수위 상승 등의 조건에서 발생될 수 있는 극한 상태의 결과일 수 있다. 따라서, 실제 현장에서 지하수위 상승과 강우 등의 요인으로 발생하는 노반의 포화상태 정도에 따라 침하량을 평가하기 위해서는 완전 침수 대비 부분 포화 정도에 따른 침하특성을 분석하여 압축침하특성을 예상하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다. 또한 부분 포화 정도에 따른 성토체의 투수특성 결과와 성토체 내부로의 침투 결과를 통해 성

토체의 압축 침하정도를 예측하여 성토 과정 및 방치 기간 동안 강우에 노출되어 침하되는 양을 파악하여 잔류침하량 고려 시 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

본 실험 결과에서 로그축 하중 증분에 대한 수직변형률의 비를 다음 식 (1)과 같이 압축지수(Cc)로 계산하였으며, 이에 대한 결과(표 8)로 Wetting 전후의 하중 증가에 따른 압축침하 경향을 비교하였다.

$$C_c = \frac{\epsilon_{v2} - \epsilon_{v1}}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} \quad (1)$$

같은 재료에 있어서는 Wetting Collapse에 의한 압축 침하량이 클수록 Wetting후의 각 하중단계에서의 압축 지수가 크게 나타나 Wetting상태에서의 하중 증가에 의한 압축량이 건조 상태에서의 압축량보다 커지는 결과를 확인할 수 있었다.

본 연구의 실험결과에서 낮은 응력수준(상재하중 10tonf/m<sup>2</sup>)에서의 침하량이 클수록 함수비 상승에 의한 Wetting Collapse와 최종 하중단계 즉 높은 응력수준에서의 침하량이 크게 발생되고 있음을 확인할 수 있었다. 즉 성토체의 다짐은 상부의 성토높이가 증가함에 따라 작은 응력부터 최종적인 높은 응력상태까지 경험하게 되는데 이때 시공 시 다짐상태에 따라 작은 응력 조건에서 침하발생이 크게 나타나는 구간에서는 최종적인 성토에 따른 응력상승에 의한 침하발생 뿐만 아니라 Wetting에 의한 압축침하발생도 크게 나타날 것으로 예상된다.

같은 재료의 성토재료일 경우에도 다짐 응력 및 입도, 함수비에 따른 밀도 등의 불균일성에 따라 위치별로 부등침하가 발생할 수 있다. 본 실험에서도 같은 재료에서

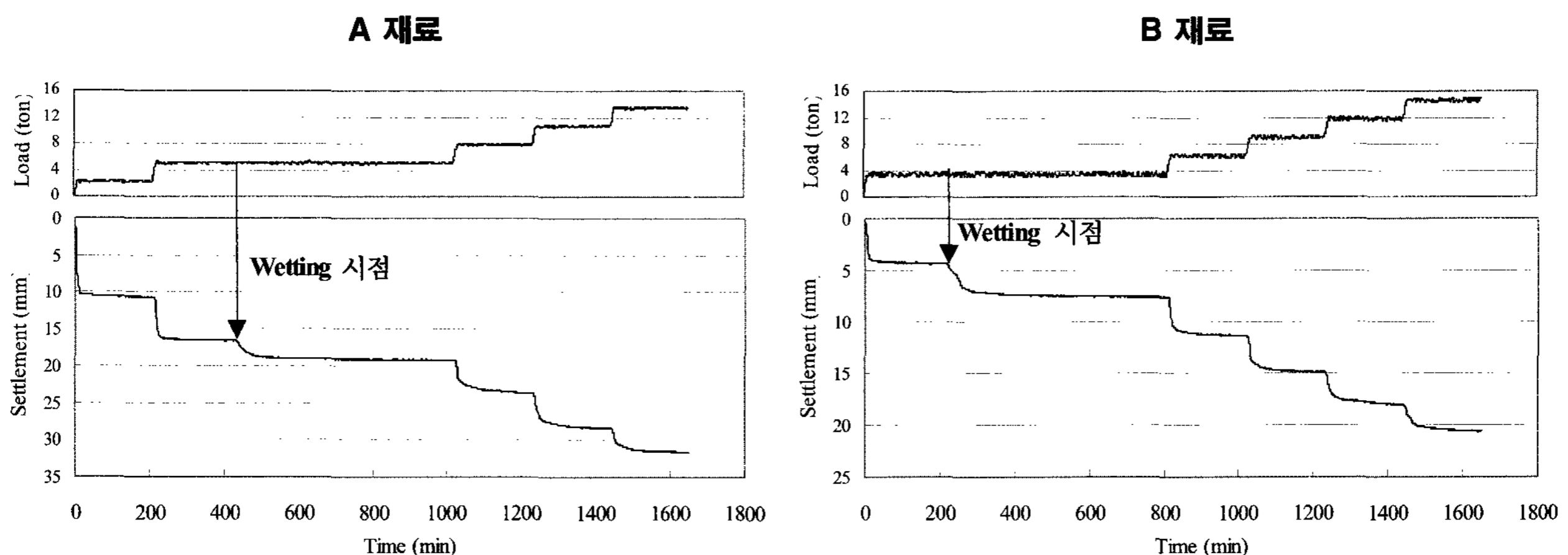


그림 8. 하중 및 침하 변화 특성

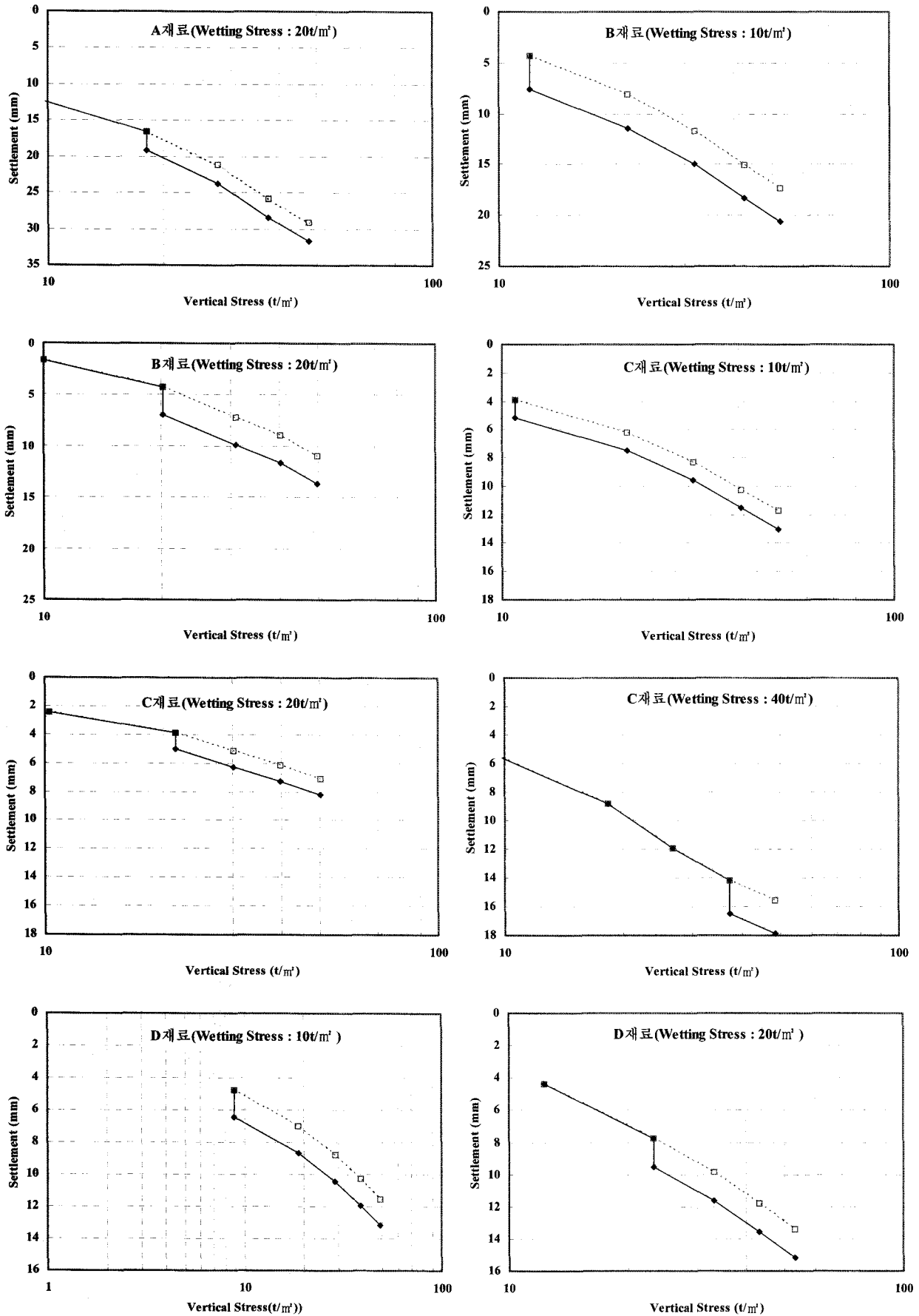


그림 9. 응력 침하곡선

표 7. 실험 결과 정리

Wetting Collapse Test Results						Wetting Collapse에 의한 수직변형률
재료	wetting 하중단계 (tf/m <sup>2</sup> )	wetting 침하량 (mm)	하중단계 (tf/m <sup>2</sup> )	wetting침하 무시 (mm)	wetting침하 고려 (mm)	
A재료	20	2.58	10	10.66	10.66	0.57%
			20	16.6	19.18	
			30	21.16	23.74	
			40	25.81	28.39	
			50	29.1	31.68	
B재료	10	3.28	10	4.31	7.59	0.73%
			20	8.13	11.41	
			30	11.67	14.95	
			40	15.05	18.33	
			50	17.34	20.62	
	20	2.71	10	1.65	1.65	0.60%
			20	4.28	6.99	
			30	7.21	9.92	
			40	9	11.71	
			50	10.99	13.7	
C재료	10	1.29	10	3.88	5.17	0.29%
			20	6.23	7.52	
			30	8.3	9.59	
			40	10.24	11.53	
			50	11.71	13	
	20	1.14	10	2.45	2.45	0.25%
			20	3.89	5.03	
			30	5.12	6.26	
			40	6.14	7.28	
			50	7.08	8.22	
	40	2.32	10	4.46	4.46	0.51%
			20	8.83	8.83	
			30	11.91	11.91	
			40	14.18	16.5	
			50	15.58	17.9	
D재료	10	1.65	10	4.78	6.43	0.37%
			20	7.01	8.66	
			30	8.8	10.45	
			40	10.27	11.92	
			50	11.54	13.19	
	20	1.78	10	4.36	4.36	0.40%
			20	7.75	9.53	
			30	9.84	11.62	
			40	11.77	13.55	
			50	13.38	15.16	

같은 목표 다짐밀도를 갖고 시료를 만들어 실험을 수행 하였으나 동일한 조건의 낮은 응력수준에서부터 다른 침하량이 발생됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 실 내에 비해 다짐관리가 더욱 어려운 현장에서는 더 크게

발생될 수 있는 요인으로 판단된다. 따라서 고속철도 노 반에서 토공구간의 다짐관리가 매우 엄격히 이루어져 야 할 것으로 사료된다.

Wetting Collapse에 의한 부피감소와 침하발생은 크



표 8. 재료별 Wetting 전후 압축지수

재료	wetting 하중단계 (tf/m <sup>2</sup> )	wetting 침하량 (mm)	wetting 전		wetting 후	
			하중구간	압축지수	하중구간	압축지수
A재료	20	2.58	10-20	0.44	30-50	0.80
B재료	10	3.28	1-10	0.10	20-50	0.51
	20	2.71	10-20	0.19	30-50	0.38
C재료	10	1.29	1-10	0.09	20-50	0.30
	20	1.14	10-20	0.11	30-50	0.20
	40	2.32	10-40	0.36	40-50	0.32
D재료	10	1.65	1-10	0.11	20-50	0.25
	20	1.78	10-20	0.25	30-50	0.35

계 세립분의 포함정도에 따른 조립재의 미끌림이나 재배열과 암석의 종류에 따른 접촉점에서의 입자변형에 의해 영향을 받는 것으로 예상할 수 있었다. 따라서 입도분포에서 큰 차이가 없는 3가지 암석/흙 혼합재료(A, B, C재료)의 실험에서 상대적으로 암석의 종류 즉 암석 자체의 강도가 큰 경암에서 침하발생량이 적고, 연암의 침하발생량이 클 것으로 예상되었으나, 본 연구의 실험에서는 그러한 경향은 확인할 수 없었다. 이에 대한 원인으로서는 연암의 경우 다짐 과정이나 실험이 수행된 상재하중 하에서 이미 암석 접촉점의 파쇄가 발생하여 Wetting과정에서의 강도감소로 인한 파쇄율을 감소시켰을 가능성이 가장 큰 것으로 파악된다.

또한 표 8에서 볼 수 있듯이 Wetting 이후의 하중 증분에 대한 압축지수가 Wetting 전 건조상태의 경우에 비해 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이는 암성토나 흙시료 모두 간극과 입자의 포화도가 상승할수록 앞서 언급된 재료 자체의 파쇄, 미끌림, 재배열 등으로 전체적인 부피의 감소가 크게 나타난 것으로 판단된다.

또한 전체 시료의 실험결과에서 Wetting 전의 하중의 증분, 즉 성토고가 높아짐에 따라 발생하는 침하량이 Wetting 후에 비해 작은 것을 확인할 수 있었다. 즉, 성토재료 입자와 구조의 강도가 보다 큰 건조상태에서 다짐이 이루어진 경우 향후 함수비가 상승할 때 잔류침하의 증가분으로 나타날 것으로 예상되므로 이에 대한 추가적인 실험으로 향후 다짐관리에 활용해야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

성토체의 압축침하량은 성토재료, 성토다짐밀도, 다짐함수비를 포함한 다양한 조건에 의해 영향을 받아 발

생된다. 따라서 본 연구에서 수행된 실험 결과로 모든 영향인자에 의한 성토체의 압축침하 영향 정도를 정량적으로 제시하기에는 부족하나, 함수비상승에 따른 Wetting Collapse의 경향과 그 문제점을 파악할 수 있었던 것으로 판단된다.

- (1) 실험 대상 재료와 Wetting 응력 수준에 따라 Wetting Collapse에 의한 압축침하량이 약 0.2-0.8%의 범위에서 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 변형률은 20m 성토 시, 약 40mm-160mm에 이르는 큰 침하량을 유발시킬 수 있는 크기이다.
- (2) 그러나 본 실험 결과는 완전 수침 상태의 최종 포화시의 Wetting Collapse 양을 평가한 결과로 실제 현장에서는 하부노반의 지하수위 상승 등의 조건에서 발생될 수 있는 극한 상태로 과대평가된 결과일 수 있다. 따라서, 실제 현장에서 지하수위 상승과 강우 등의 요인으로 발생하는 노반의 포화상태 정도에 따라 침하량을 평가하기 위해서는 완전 침수 대비 부분 포화 정도에 따른 침하특성을 분석하여 압축 침하특성을 예상하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다.
- (3) 또한 부분 포화 정도에 따른 성토체의 투수특성 결과와 성토체 내부로의 침투 결과를 통해 성토체의 압축 침하정도를 예측하여 성토 과정 및 방치 기간 동안 강우에 노출되어 침하되는 양을 파악하여 잔류침하량 고려 시 반영할 수 있을 것으로 사료된다.
- (4) 실험 재료, 응력수준, Wetting 단계의 응력수준 등이 다르게 수행된 실험결과에서 낮은 응력조건(상재하중 10tonf/m<sup>2</sup>)에서의 침하량이 클수록 함수비 상승에 의한 Wetting Collapse와 최종 하중단계에서의 침하량이 크게 발생되고 있음을 확인할 수 있었다.

- (5) 이러한 결과에서 노반 시공 후 방치 기간 동안 발생되는 침하량이 클수록 향후 함수비상승에 따른 침하량도 상대적으로 크게 발생될 것으로 예상할 수 있다. 즉 성토 노반의 시공 직후부터 원지반의 침하와 분리하여 성토체 자체의 압축침하량이 계측되는데, 여기서 계측된 성토체 자체의 압축침하량이 클수록 향후 함수비상승에 따른 침하량도 상대적으로 크게 발생될 것으로 예상할 수 있다.
- (6) 전체 시료의 실험결과에서 Wetting 전의 하중의 증분, 즉 성토고가 높아짐에 따라 발생하는 침하량이 Wetting 후에 비해 작은 것을 확인할 수 있었다. 즉, 성토재료 입자와 구조의 강도가 보다 큰 건조상태에서 다짐이 이루어진 경우 향후 함수비가 상승할 때 잔류침하의 증가분으로 나타날 것으로 예상되므로 이에 대한 추가적인 실험으로 향후 다짐관리에 활용해야할 것으로 판단된다.
- (7) 향후, 허용침하량이 매우 작은 범위에서 관리되는 고속철도의 토공노반 공사 시 주변에서 발생하는 압과 토사를 활용하게 되는 경우가 대부분이므로, 해당재료 즉 암석과 토사의 종류와 입도분포와 다짐함수비 등의 시공 조건에 따른 실험을 통해 향후 발생할 수 있는 Wetting에 의한 침하량을 예측하고 이를 고려한 시공과 대책마련 등이 필요할 것으로 사료된다.
- (8) 또한 잔류침하량을 보다 합리적으로 예측하기 위해서는 본 연구에서 수행된 결과에서 확인할 수 없었던

반복되는 수침과 건조 과정에서의 Wetting Collapse 발생 가능성과 그 경향에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 김범주, 김용성, 신동훈 (2005), “화강편마암 댐 축조재료의 전단 강도 및 일차원 압축특성”, *Journal of the KGS*, Vol.21, No.7, September 2005, pp.31-42.
2. Burland, J.B. (1965), “Some aspects of the mechanical behavior of partly saturated soils”, *Moisture Equilibria and Moisture Changes in the Soils beneath Covered Areas*, Butterworth, Sydney, Australia, pp.270-278.
3. Casagrande, A. (1932), “The structure of clay and its importance in foundation engineering”, *J. Boston Soc. of Civil Engrs.*, 19(4), pp.168-209.
4. Houston, W.N, Mahmoud, H.H, and Houston, S.L. (1993), “A Laboratory Procedure For Partial-Wetting Collapse Determination”, *Geotechnical Special Publication No.39*.
5. Marachi, N.D, Chan, C.K, Seed, H.B., and Duncan, J.M. (1969), “Strength and deformation characteristics of rockfill materials”, *Reports No. TE-69-5, Dept. of Civ. Engrg., Univ. of Calif. at Berkeley*, Berkeley, California.
6. Mitchell, J.K. (1993), “Fundamentals of Soil Behavior”, *2nd Edition*, John Wiley & Sons, New York.
7. Nobari, E.S. and Duncan, J.M. (1972), “Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams.” *Report No. TE-72-1, Dept. of Civl Engrg., Univ. of Calif. at Berkeley*, Berkeley, California.
8. Noorany, I. and Stanley, J.V. (1994), “Settlement of Compacted Fills Caused by Wetting”, *Geotechnical Special Publication No.40*, ASCE, pp.1516-1530.
9. Rogers, J.D. (1992), “Long-term behavior of urban fill embankments”, *Stability and Performance of Slopes and Embankments II*, *Geotechnical Special Publication No.31*, ASCE, New York, II, pp. 1258-1273.
10. Sherard, D.R., Woodward, R.J., Gizienski, S.F., and Clevenger, A.C. (1963), *Earth and Earth Rock Dams*, John Wiley and Sons, New York.
11. Wu, J.Y. (2004), “The settlement behaviors of granular backfill materials for high speed rail embankment”, *Geotrans 2004*, pp. 1584-1591.

(접수일자 2008. 1. 8, 심사완료일 2008. 3. 11)