

## 중금속 및 유류로 오염된 토질의 성토재료로서의 안정성에 관한 연구

### The Research on The Stability as Fill Material of Soil Defiled by Oil Element and Heavy Metals

이충숙\* · 엄태규\*\* · 최용규\*\*\* · 이민희\*\*\*\*

Lee, Chung-Sook · Eom, Tae-Kyu · Choi, Yong-Kyu · Lee, Min-Hee

#### Abstract

In the site for apartment construction, the contaminated soils of the heavy metal and the oil were appeared. The representative soil samples were sampled at 7 sampling points. To confirm the geotechnical stability of the contaminated soils, the environmental checks for the heavy metal and the oil. The soils of 2 sampling points were contaminated heavily, so it was estimated that these soils must be disused. For 1 sampling point of the slightly contaminated soil, to confirm the re-applicability of fill material, the stability analysis was performed and it was concluded that this soil will be able to re-use

**Keywords** : The heavy metal, The oil, The contaminated soil, The environmental check, Fill material, Stability analysis.

#### 요 지

아파트 건설용 부지내에서 중금속 및 유류로 오염된 토사가 발견되었다. 7개 위치에서 대표적인 시료를 채취하였으며 이 오염된 토사의 지반공학적 안정성을 확인하기 위하여 중금속 및 유류에 대한 환경공학적 검토가 이루어졌다.

2개 위치의 토사는 유류로 심하게 오염되어 있어 현장의 특정지역으로 반출하여 폐기해야 하는 것으로 판단하였다. 토양오염우려수준인 1개 위치의 토사에 대하여 성토재료로서의 활용가능성을 확인하기 위하여 성토 안정성에 대한 해석을 수행하였으며 성토재로 사용할 수 있는 것으로 판단하였다.

**주요어** : 중금속, 유류, 오염된 토사, 환경공학적 검토, 성토재, 안정성 해석

\* 경성대학교 건설·환경공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., KyungSung Univ.

\*\* 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Assoc. Prof., Dept. of Civil & Envir. Eng., KyungSung Univ.

\*\*\* 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Assoc. Prof., Dept. of Civil & Envir. Eng., KyungSung Univ. (ykchoi@ksu.ac.kr)

\*\*\*\* 부산대학교 대학원 박사수료

## 1. 서 론

건설공사에 필요한 골재의 수요량이 증가함에 따라 부족한 골재를 다른 곳에서 구해야 하는 실정이다. 이에 원래 지반에서 과생되는 골재의 재활용에 대한 중요성이 대두되면서 점점 더 환경친화적인 건설의 필요성과 골재의 재활용에 대한 시각이 본격화되면서 아파트신축공사 부지에 사용될 골재를 재활용에 필요한 절차 및 기준 등에 대해 고찰하였다.

본 연구의 목적은 부산광역시 (주)D제강 부지의 지반에 대하여 주택지로서의 환경적 안정성과 부지에서 발생되는 토사의 환경적 위해요건의 정도에 대해 검토하고, 반출토사의 사용 방법에 대하여 검토하였다.

## 2. 현장 현황

본 부지는 (주)D제강이 20년 이상 부지로 사용하여 왔던 곳으로 설립이전에 부지의 남쪽방향으로 약 1/3 정도는 저지대로 늪을 형성하고 있었다. D제강은 부지의 이용에 따라 자체 발생하는 슬러지(sludge), 폐주물사, 일반 토사들과 함께 매립하여 사용하였다. 또한 부지의 2개소에 사용유류탱크를 설치하여 장기간 사용함으로써 토양오염의 가능성이 우려되었다.

매립된 토사는 D제강 자체에서 발생하는 폐주물사 및 슬러지와 일반 토사로 구성되어 있으므로 먼저 중금속에 의한 토양오염 가능성을 검토하여야 했다. 또한 매립기간이 10년 이상 경과되었음을 감안하여 인근 지하수의 오염여부도 아울러 분석, 검토하여 환경적 안정여부를 도출하였다. 그 다음으로 2개소의 유류탱크가 설치된 곳에 유류에 의한 오염가능성과 아울러 처리방법의 결정을 위한 분석을 행하였다. 시료채취의 현황을 표 1에 나타내었다.

## 3. 환경공학적 검토

토양오염현황을 파악하기 위하여 대상 부지내에 오염우려가 있는 지점, 일반 대표지점, 매립토를 재사용하기 위해 선별장치를 통한 시료 2곳, 전부 7개 시료채취 위치를 선정하였다. 선정된 지점의 위치는 그림 1과 같으며 이 중 위치 1, 위치 2 및 위치 3은 유류탱크가 있던 곳으로 유류오염이 심히 우려되는 지점이었다.

표 1. 시료채취 위치별 개요

시료 채취 위치	개 요	비 고
1	매립층 3.2m, 암갈색, 암흑색 구성, 건축폐자재, 모래, 자갈 아래 실트질 점토층	유류탱크 설치장소
2, 3	매립층 2.3m, 실트·모래층 2m, 암갈색, 자갈 섞은 모래층.	유류탱크 설치장소
4	매립층 2.0m, 갈색, 자갈, 폐주물사, 모래 아래는 실트질 점토층	
5	매립층의 표피를 제외한 중간층을 진동스크린하여 통과된 시료, 작은 자갈, 모래 및 일반 토양, 암황갈색	야적
6	매립층의 표피지역을 폭 넓게 채취하여 진동스크린하여 통과된 시료, 작은 자갈, 모래 및 일반 토양 황색	"
7	슬래그 덩어리 야적	"

또한 위치 4는 폐주물사와 일반 토양이 혼재되어 있으나 불충분한 혼합으로 각각 뭉쳐 있어서 폐주물사가 집중적으로 매립되어 있었다.

폐주물사 등의 오염도가 비교적 많이 혼재된 곳으로 추측되는 위치 5는 폐기물과 함께, 원지반토가 혼재되어 있는 여러 지역의 흙을 진동 스크린에 의해 입도 크기 순으로 분류하였는데, 주로 잔자갈과 모래가 혼재되어 야적된 곳으로 일견 검은 회색을 나타내고 있어 오염의 우려가 있는 곳이다.

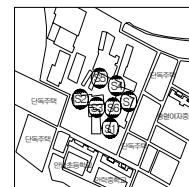


그림 1. 선정된 시료채취 위치도

위치 6은 대부분 원지반토 부분을 위치 5와 같이 처리하여 야적된 곳으로 토질 본래의 색깔인 황갈색을 띠고 있어서 오염우려가 거의 없는 곳이었다.

위치 7은 진동스크린에 의해 분리된 슬래그 덩어리를 야적한 곳이었다.

표 1에 각 위치별 매립층고 및 토양의 색깔 및 성분을

나타내었다. 또한 지하수 오염 여부를 확인하기 위하여 부지안 지하수정으로부터 채취된 수질분석의 필요성이 대두되었다.

### 3.1 토양오염 실험방법

표 2. 토양오염물질 측정방법

측정항목	분 석 방 법	측 정 방 법
Cu	흡광광도법 (디에틸디티오카르바민산법)	구리이온이 알칼리성에서 디에틸디티오카르바민산나트륨과 반응하여 생성하는 황갈색의 킬레이트 화합물을 초산부틸로 추출하여 흡광도를 440nm에서 측정
As	흡광광도법 (디에틸디티오카르바민산은법)	비소를 3가비소로 환원시킨 다음 아연을 넣어 발생하는 비화수소를 디에틸디티오카르바민산은의 피리딘 용액에 흡수시켜 이때 나타나는 적자색의 흡광도를 530nm에서 측정
Hg	흡광광도법 (디티존법)	황산산성에서 디티존 사염화탄소로 일차추출하고 브롬화 칼륨 존재하 황산산성에서 역추출하여 방해성분과 분리한 다음 인산-탄산염 완충액 존재하에서 디티존 사염화탄소로 수은을 추출하여 490nm에서 측정
Cr <sup>+6</sup>	흡광광도법 (디페닐 카르바지드법)	6가크롬에 디페닐 카르바지드를 작용시켜 생성하는 적자색의 착화합물의 흡광도를 540nm에서 측정
pH	pH Meter	pH는 수소이온농도를 그 역수의 상용대수로 나타낸 값을 말하며 보통 유리전극과 비교전극으로 된 pH Meter를 사용하는데 양 전극간에 생성되는 기전력의 차이를 이용하여 측정
CN	흡광광도법 (피리딘-피라졸론법)	pH2 이하의 산성에서 에틸렌디아민테트라초산나트륨을 넣고 가열증류하여 시안화물 및 시안착화합물의 대부분을 시안화수소로 유출시키고 수산화나트륨용액에 포집한다. 포집된 용액의 일부를 취하여 중화하고 클로라민 T를 넣어 염화시안으로 하여 피리딘-피라졸론 혼액을 넣어 나타나는 청색의 흡광도를 620nm에서 측정
Pb	흡광광도법 (디티존법)	납이온이 시안화칼륨 공존하에 알칼리성에서 디티존과 반응하여 생성하는 납 디티존 착염을 사염화탄소로 추출하고 과잉의 디티존을 시안화칼륨용액으로 씻은 다음 납착염의 흡광도를 520nm에서 측정
Cd	흡광광도법(디티존법)	카드뮴이온을 시안화칼륨이 존재하는 알칼리성에서 디티존과 반응시켜 생성하는 카드뮴 착염을 사염화탄소로 추출하고 추출한 카드뮴착염을 주석산용액으로 역추출한 다음 다시 수산화나트륨과 시안화칼륨을 넣어 디티존과 반응하여 생성하는 적색의 카드뮴착염을 시안화탄소로 추출하여 그 흡광도를 520nm에서 측정
Al	흡광광도법	ICP를 이용한 기기분석법에 의거 정량
Zn	"	ICP를 이용한 기기분석법에 의거 정량
유기인	가스크로마토그래프법	유기인 화합물중 이피엔, 파라티온, 메틸디메톤, 다이아지는 및 펜토에이트의 측정에 적용된다. 유기화합물을 가스크로마토그램을 작성하여 나타난 피이크의 유지시간에 따라 각 성분을 확인하고 피이크의 높이 또는 면적을 측정하여 유기인을 정량
TCE	"	ECD를 이용한 기기분석법에 의거 정량
PCE	"	ECD를 이용한 기기분석법에 의거 정량
휘발성저급 탄화수소류	가스크로마토그래프법 (용매추출법)	시료중의 트리클로로에틸렌 및 테트라클로로에틸렌을 헥산으로 추출하여 가스크로마토그래프법으로 정량하는 방법

### 3.2 토양오염 분석

토양의 오염정도를 나타내기 위해 토양환경보전법에 토양오염우려기준이 지정되어 있으며 이를 표 3에 나타내었다. 본 대상 지역에서 채취한 시료를 전술한 시험방법에 의거 분석한 결과를 표 4에 나타내었다.

표 3. 토양오염우려 및 대책기준(단위 : mg/kg)  
(환경부 토양환경보전법, 환경부(1999))

구 분	토양오염 우려기준		토양오염 대책기준	
	“가” 지역	“나” 지역	“가” 지역	“나” 지역
Cd	1.5	12	4	30
Cu	50	200	125	500
As	6	20	15	50
Hg	4	16	10	40
Pb	100	400	300	1000
Cr <sup>+6</sup>	4	12	10	30
Zn	300	800	700	2000
Ni	40	160	100	400
F	400	800	800	2000
유기인화합물	10	30	-	-
PCB	-	12	-	30
CN	2	120	5	300
페놀	4	20	10	50
유류(동·식물성 제외) -벤젠,톨루엔,에틸벤젠, 크실렌 -석유계총탄화수소	- -	80 2000	- -	200 5000
트리클로로에틸렌(TCE)	8	40	20	100
테트라클로로에틸렌(PCE)	4	24	10	60

- 비 고 : 1. “가”지역 : 지적법 제5조 제1항의 규정에 의한 전·답·과수원·목장용지·임야·학교용지·하천·수도용지·공원·체육용지(수목·잔디 식생지에 한한다)·유원지·종교용지 및 사적지  
2. “나”지역 : 지적법 제5조 제1항의 규정에 의한 공장용지·도로·철도용지 및 잡종지  
3. 다음 각 항목의 1에 해당하는 경우에는 지목 구분에 관계없이 “나”지역의 토양오염우려기준을 적용한다.

- 가. 특정토양오염 유발시설이 설치된 경우  
나. “가”지역에서 PCB 또는 유류에 의한 토양오염사고가 발생한 경우  
다. “가”지역을 제외한 지역에서 토양오염사고가 발생한 경우

표 4. 각 위치에서 중금속 검출농도

site 항목	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Pb	ND	0.026	0.060	ND	0.030	ND	0.008
Cu	0.063	0.862	ND	ND	ND	ND	0.122
As	0.010	ND	ND	ND	ND	0.071	0.032
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cd	ND	0.001	ND	ND	ND	ND	ND
Cr <sup>+6</sup>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
CN	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Al	1.317	0.482	0.026	0.041	0.941	0.204	0.039
Zn	ND	0.041	ND	ND	ND	ND	ND

표 5. 각 위치에서의 유기인, TCE, PCE, 유분, 유기물 및 pH

항목 Site	유분 (mg/kg)	유기물 (VS/TS%)	pH	유기인	TCE	PCE
S1 <유류탱크 I, 2m>	2,013	12.6	9.04	ND	ND	ND
S2 <유류탱크 II, 2m>	4,732	4.2	9.44	ND	ND	ND
S3 <유류탱크 II, 4m>	12,970	5.0	7.7	ND	ND	ND
S4 폐주물사	1353	4.7	7.98	ND	ND	ND
S5 야적<검은색>	304	6.4	9.6	ND	ND	ND
S6 야적<황토색>	92	8.5	8.68	ND	ND	ND
S7 <Slag>	137	8.7	8.69	ND	ND	ND

비 고 : VS = Volatile Solid, TS = Total Solid

D제강에서 배출된 것으로 추측되는 폐주물사, 슬래그 등이 산재해 있어서 중금속농도를 측정하였으며 그 결과를 표 4에 나타내었다. 측정결과 Pb, Cu 및 As가 미량 분석되었고 그 외 Hg, Cd, Cr<sup>6+</sup>, CN 등은 전혀 검출되지 않았다. 또한 Al, Zn도 일부 검출되었으나 이런 저농도는 토양에 거의 영향을 끼치지 않으므로 중금속으로 인한 토양오염은 전혀 문제가 없는 것으로 나타났다.

표 5는 유기인, TCE, PCE, 유기물(VS/TS), pH 및 유분을 측정된 자료를 나타내었다. 여기서, 유기인, TCE, PCE는 전혀 검출되지 않았고 pH가 7.7~9.6으로 약알칼리성을 나타내고 있다.

유기물질의 함유율은 토양의 비옥도를 나타내는 지표로 일반적으로 20% 이하이면 빈영양 상태로 식물이 잘 자라지 않는 상태이고, 공장지역에 유기물 함유율이 클수록(특히 지하수에) 오염상태가 심각함을 나타낸다. 따라서 본 지역의 유기물질 함유율이 4.2% ~ 12.6%로 유기물질에 의한 오염정도는 미미한 것으로 판단된다. 단 위치 2 및 3은 유기물질로 측정되지 않은 유류에 의한 별도의 오염인자로 인한 것으로 따로 분석, 검토하였다.

유분의 농도는 위치 4~7에서는 92~1,353mg/kg으로 나타나 토양오염 우려 수준인 2,000mg/kg 이하이므로 별 문제가 없었으나 위치 1에서 2,013mg/kg, 위치 2에서 4,732mg/kg, 위치 3에서 12,970mg/kg으로 매우 크게 나타남으로 인해 유류에 의해 심각하게 토양오염이 된 것으로 판단된다.

이는 위치 1 및 위치 2에서 토양오염우려수준을 초과하였으며 특히 위치 3에서는 토양오염기준인 5,000mg/kg을 훨씬 초과하는 12,970mg/kg으로 약 2.5배 이상으로 나타났다. 위치 1의 경우, 부분적으로 유분이 산재하고 있고 유분농도도 토양오염우려수준을 약간 상회하여 주위의 토양오염이 우려되었던 폐주물사가 포함된 토양과 혼합되어진다 하더라도 별 문제점이 없는 것으로 예측되었다. 그러나 위치 2, 3의 경우 고농도 유분을 함유하고 있으므로 분리 수거하여 폐기시켜야 할 것이다. 위치 2는 유류탱크가 있는 지하 2m지점, 위치 3은 지하 4m지점에서 채취된 시료의 분석 결과로 이 부근은 유분에 의해 심하게 토양오염이 된 것으로 판단되는 바, 유분농도가 토양오염우려기준이 되는 지점까지 사방으로 또한 지하의 오염되지 않는 지반이 나타날 때까지 오염토양을 제거하여야 할 것이다.

### 3.3 토양의 오염결과

- (1) 각 위치에서의 중금속 오염여부를 조사한 결과 일부 위치에서 미량의 Pb, Cu, As가 검출되었으나, 중금속으로 인한 토양오염의 우려는 전혀 없는 것으로 나타났다.
- (2) 유분오염여부를 조사한 결과 위치 1, 위치 2 및 위치 3에서 유분농도가 2,013, 4,732 및 12,970mg/kg으로 나타나 위치 1 및 2는 토양오염우려수준, 위치 3은 심각한 토양오염이 있는 것으로 판단된다. 따라서 위치 2 및 3의 지점은 분리 굴착하여 폐기시켜야 할 것으로 판단된다.

### 3.4 지하수 오염

본 대상지점이 폐주물사, 슬래그 등의 오염우려물질이 장기간 매립되어 있었음을 감안하여 주위의 지하수 오염여부의 확인이 필요하였다. 지하수의 시험 성적서에 의하면 중금속인 Cd, As, Hg, CN, Pb, Cr<sup>6+</sup>은 전혀 검출되지 않았고 또한 다른 오염기준물질인 유기인, TCE 및 PCE도 검출되지 않아 오염의 확산은 없는 것으로 판단되었다. 단지 대장균군수가 240MPN/100ml로 나타나 음용수로서의 사용은 자제함이 좋을 것으로 판단된다.

## 4. 반출토사의 사용성 검토

환경공학적 문제가 없는 것으로 판단되는 시료를 선별하여 성토재료로서의 사용성을 검토하였다. 모든 위치별로 시료를 채취하여 토양오염에 대한 실험을 실시한 결과 심각한 오염을 보인 위치 2와 3의 토양은 폐기시키고 지반공학적 분석을 위해 일반적인 토질인 위치 5에서 채취한 시료 A와 약간 오염된 위치 1과 그다지 오염이 되지 않은 위치 5에서 채취된 시료를 같은 비율로 혼합한 시료 B를 시험시료로 선정하였다.

위와 같은 시험시료를 바탕으로 재활용할 수 있는 토사에 대한 성토재료로서의 판정을 위해 다음 기준과 연계하여 분석을 실시하였다.

#### 4.1 성토재료의 판정기준

성토재료는 현장 내의 절토부나 토취장 등에서 발생하는 흙이나 암석을 그대로 이용하는 것이 가장 경제적이고, 실제로 그렇게 하는 것이 많다. 성토재료의 성질은 지형, 지질의 복잡함으로 인해 다종다양하고, 재질에 따라서는 시공시에 여러 가지 제약을 받는다.

성토재료는 성토구조물을 구성하는 주요재료이므로, 재료의 좋고 나쁨이 성토시공의 난이 및 완성 후의 성토의 품질을 크게 좌우한다. 고함수비의 연약 점성토나 유기질토 등 성토재료로서 좋지 않은 성질의 흙을 성토할 때는, 주행성이 충분하지 않기 때문에 시공기계가 한정되고 시공능률도 낮아져 공기가 길어진다. 그리고, 흙의 전단강도가 적기 때문에, 시공 중의 법면 안정이나 시공 후의 지지력에 불안이 남고, 더욱이 성토의 압축침하가 장기에 걸치기 때문에 성토 상에 설치되는 구조물이나 제 시설에 악영향을 주게 된다.

대부분의 흙은 성토재료로서 사용하는 것이 가능하지만, 온천여토, 산성백토, 유기질토 등의 압축성이 큰 흙, 사문암이나 이암 등과 같은 흡수팽창에 의한 풍화가 현저한 암 등은 시공상 문제가 많으므로 특히 주의를 요한다.

각종의 성토에 이용하는 성토재료는 현장내 또는 토취장 등에서 발생하는 재료를 적극적으로 사용하도록 한다. 그러나, 성토재료로서는 소요의 다짐도가 구해지기 쉬운 양질의 재료를 선정하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 성토재료의 기준으로 표 6에 나타난 내용을 채택하여 반출토사의 사용성을 검토하였다.

표 6에 대한 기준을 분석하기 위해 필요한 물성시험을 실시하였고, 성토재료의 사면에 대한 안정성을 분석하기 위하여 사면안정 해석의 변수를 구하기 위해 각각 필요한 역학시험을 병행하여 실시하였다.

#### 4.2 물성시험 결과분석

시료 A, B에 대하여 액·소성시험을 실시하였고, 그 결과를 요약하면 표 7과 같다. 그림 2는 시료 A, B에 대한 입도분포시험 결과를 나타내고 있다. 시료 A, B 모두 입도분포가 양호하였다. 표 7과 같이 시료 A, B에 대한 액·소성시험 결과는 비소성(N.P)으로 나왔으며, 비중은 각각 2.82, 2.71 이었다.

표 6. 쌓기 및 되메우기 재료의 용도별 기준  
(대한토목학회, 1996)

용도	기준	
	입도	기타
보통 메우기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 100mm체 통과율 100%</li> <li>· 5mm체 통과율 70% 이상</li> <li>· 5mm체 통과율 60% 이하</li> </ul>	· 없음
보통 쌓기	· 보통 메우기와 동일	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 액성한계 40% 이하</li> <li>· 소성지수 15% 이하</li> </ul>
선별재료 쌓기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 25mm체 통과율 100%</li> <li>· 10mm체 통과율 75% 이상</li> <li>· 5mm체 통과율 20% 이상</li> <li>· 0.08mm체 통과율 35% 이하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 모래당량(KS F 2340) 10 이상</li> <li>· 소성지수 10% 이하</li> </ul>
흙구조물 쌓기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 80mm체 통과율 100%</li> <li>· 5mm체 통과율 35% 이상</li> <li>· 0.60mm체 통과율 20% 이상</li> <li>· 0.08mm체 통과율 25% 이하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 액성한계 25% 이하</li> <li>· 소성지수 6% 이하</li> <li>· 모래당량 20 이상</li> </ul>
투수성 되메우기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 50mm체 통과율 100%</li> <li>· 0.30mm체 통과율 0~100%</li> <li>· 0.15mm체 통과율 0~80%</li> <li>· 0.08mm체 통과율 0~40%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 깨끗하게 씻은 자갈이나 부순돌을 사용</li> <li>· 마모율(KS F 2508) 50 이하</li> <li>· 마모율로 나타난 연성질 15 이하</li> <li>· 석탄 및 갈탄 0.25 이하</li> <li>· 점토당어리 0.25 이하</li> <li>· 기타 유해한 재료 20 이하</li> </ul>

표 7. 실내 물성시험(액·소성, 비중) 결과 요약

시험종류	시료 A	시료 B
액성한계시험	N.P	N.P
소성한계시험	N.P	N.P
비중시험	2.82	2.71
통일분류기호	SW	SW

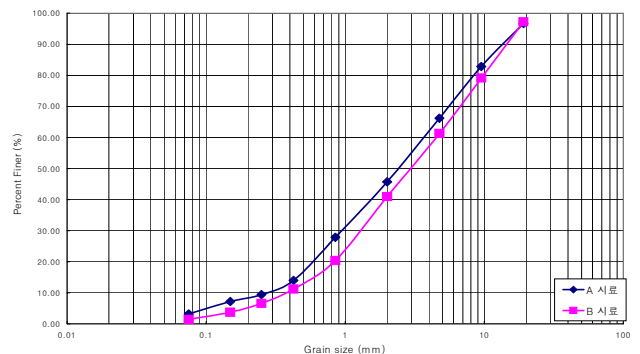


그림 2. 입도분포시험 결과

시료 A, B의 사용성에 대한 검토 결과를 표 8에 요약하였다. 표 8과 같이 시료 A, B는 선별재료 쌓기, 흙구조물 쌓기 및 투수성 되메우기의 재료의 기준을 만족한다는 것을 알 수 있었다.

표 8. 실내 물성시험(입도분석) 결과 요약

용도	기준				
	입도	일반시료 (SW)	결과	혼합시료 (SW)	결과
보통 메우기	· 100mm체 통과율 100% · 5mm체 통과율 70% 이상 · 5mm체 통과율 60% 이하	100 % 60.69 %	N.G	100 % 61.30 %	N.G
보통 쌓기	· 보통 메우기와 동일	-	N.G	-	N.G
선별재료 쌓기	· 25mm체 통과율 100% · 10mm체 통과율 75% 이상 · 5mm체 통과율 20% 이상 · 0.08mm체 통과율 35% 이하	100 % 77.60 % 60.69 % 27.34 %	O.K	100 % 79.16 % 61.30 % 20.38 %	O.K
흙구조물 쌓기	· 80mm체 통과율 100% · 5mm체 통과율 35% 이상 · 0.60mm체 통과율 20% 이상 · 0.08mm체 통과율 25% 이하	100 % 60.69 % - 2.85 %	O.K	100 % 61.30 % - 1.44 %	O.K
투수성 되메우기	· 50mm체 통과율 100% · 0.30mm체 통과율 0~100% · 0.15mm체 통과율 0~80% · 0.08mm체 통과율 0~40%	100 % 8.97 % 6.78 % 2.85 %	O.K	100 % 6.59 % 3.74 % 1.44 %	O.K

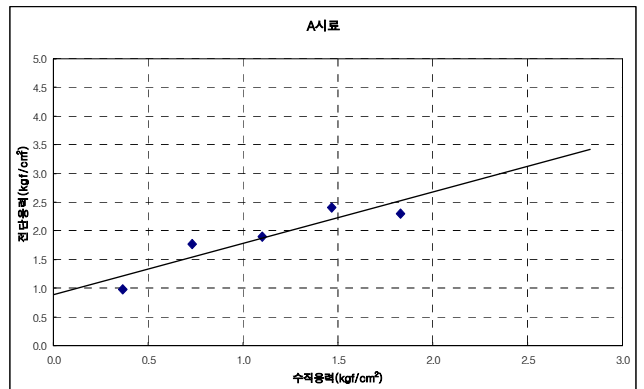
### 4.3 역학시험 결과

시료 A, B에 대하여 다짐시험을 수행하였으며 그 결과를 표 9에 요약하였다. 표 9와 같이 시료 A, B의 최대건조단위중량은 각각 2.01tf/m<sup>3</sup>, 1.95tf/m<sup>3</sup>이었으며, 최적함수비는 각각 13.2%, 15%이었다.

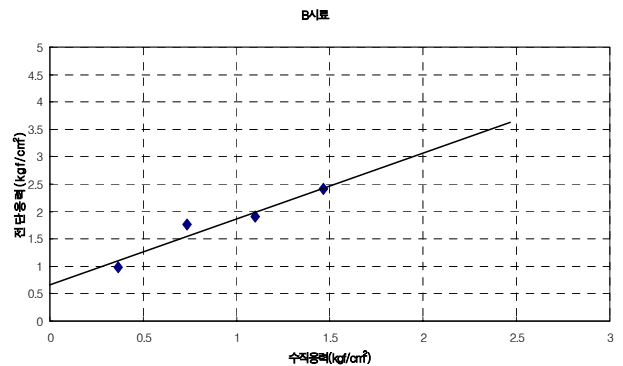
시료 A, B에 대하여 직접전단시험을 수행하였으며, 그 결과는 그림 3과 같으며, 전단강도정수를 표 10에 요약하였다. 표 10과 같이 시료 A의 점착력과 내부마찰각은 각각 0.84tf/m<sup>2</sup>, 41.8° 이었으며, 시료 B의 점착력과 내부마찰각은 각각 0.93tf/m<sup>2</sup>, 50.3° 이었다.

표 9. 다짐시험 결과 요약

시료종류	최대건조단위 중량 (tf/m <sup>3</sup> )	최적함수비 (OMC, %)	시공함수비범위 (0.9 <sub>v</sub> max 일 경우) (%)
A시료(S5)	2.01	13.2	6.25~18.5
B시료(S1+S5)	1.95	15	3~22.5



(a) 시료 A의 대형직접전단시험 결과



(b) 시료 B의 대형직접전단시험 결과  
그림 3. 대형직접전단시험 결과

표 10. 대형직접전단 시험 결과 요약

시료종류	점착력 (c, tf/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (Φ, deg)
A 시료(S1)	0.84	41.8°
B 시료(S1+S5)	0.93	50.3°

#### 4.4 성토재료로서의 안정성 검토

시료 A, B를 성토재료로서 사용할 경우 안정성을 검토하기 위하여 확보하는 성토 높이와 경사를 변화시켜 안정 해석을 수행하였다. 이때 성토 재료의 특성치는 시험 결과를 참고하였으며, 하부지반조건은 풍화토, 풍화암지반으로 가정하고, 일반적인 특성치를 사용하여 해석을 수행하였다. 사면 안정해석에서 성토의 단계별 경사를 표 11과 표 12를 참고하여 1:1.5로 하였으며, 해석단계별 성토높이는 2m로 하였다. 그리고, 성토고 6m마다 1m폭의 소단을 설치하여 해석을 수행하였다.

사면안정해석방법은 일반적인 사면파괴에 대한 안전율을 산정하기 위해 사면안정해석 프로그램 PCSTABL5를 사용하였으며, 사면 불안정에 대한 안전율 계산은 Bishop, Janbu 간편법 그리고 Spencer 절편법을 이용하여 구하였으며 이에 대한 이론은 ‘지반공학시리즈 5 ; 사면안정’을 참고하기 바란다. 본 프로그램의 가상활동면의 형상으로는 원호, 비원호, 블록 활동면들이 임의로 발생되며, 활동면의 안전율은 임의발생 활동면에서 최소안전율을 구하는 방법과 파괴면을 가정하여 안전율을 구하는 방법을 사용하여 성토고에 따른 안전율을 계산하였다.

표 11. 도로성토의 표준 법면 경사(건설부, 1990; 1991)

성토 재료	성토 높이 (m)	법면 경사	흙의 분류
입도분포가 좋은 모래	0~6	1:1.5	GW, GP, SW, GM, GC
자갈 및 자갈 섞인 모래	6~15	1:1.8	
입도분포가 나쁜 모래	0~10	1:1.8	SP
암괴, 암버력	0~6	1:1.5	SW, GP, GM
	6 이상	1:1.8	
사질토, 굳은 점질토, 굳은 점토 (홍적층, 점성토, 점토 등)	0~6	1:1.5	SM, SC, CL
	6 이상	1:1.8	
연약한 점성토	0~6	1:1.8	CH, OH, ML, MH

표 12. 성토재료 및 성토조건에 대한 표준법면경사 (日本道路協會, 1986)

성토재료	성토고 (m)	경사	비 고
입도가 좋은 모래(SW) 사리 및 사리혼입모래 (GM, GC, GW, GP)	0~5	1:1.5~1:1.8	기초지반의 지지력이 충분하고, 투수의 영향이 없는 성토에 적용한다. ( )의 통일분류는 대표적인 것을 참고로 나타낸다.
	5~15	1:1.8~1:2.0	
입도가 나쁜 모래 (SP)	0~10	1:1.8~1:2.0	
암괴(버력을 포함)	0~10	1:1.5~1:1.8	
	10~20	1:1.8~1:2.0	
사질토(SM, SC) 경질점질토, 경질점토 (홍적층의 경질점질토, 점토, 관동로움 등)	0~5	1:1.5~1:1.8	
	5~10	1:1.8~1:2.0	
연약점질토 (CH)	0~5	1:1.8~1:2.0	

사면안정해석결과는 표 13에 나타내었다. 이때, 기준안전율은 해석 수행시 하부지반의 불확실한 특성치를 고려하여 일반적인 사면 안전율보다 높은 2.0으로 하여 해석 결과를 분석하였다.

표 13과 같이 A시료의 경우, 성토고가 18m 이하일 때 기준안전율 2.0을 만족하고 있는 것을 알 수 있었다. B시료의 경우, 성토고가 20m일 때 안전율이 2.0 이상이라는 것을 알 수 있었다.

표 13. 사면안정해석결과 요약

시료	성토고 (m)	안전율
A	6	2.521
	12	2.089
	18	2.011
	20	1.974
B	6	2.758
	12	2.356
	18	2.306
	20	2.309



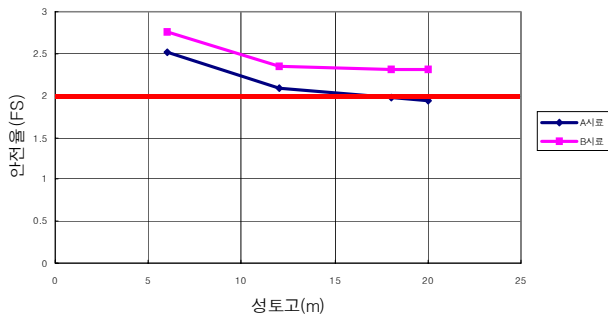


그림 3. 성토높이와 안전률 관계

(2) 일반토사 A(S5)와 혼합토사 B(S1+S5)를 성토재료로 사용할 경우 높이, 경사 기준은 다음과 같다. 성토최대 높이는 A 시료의 경우 16m, B 시료의 경우 20m로 하는 것이 타당하다고 판단되었다. 이때, B 시료의 경우 성토고가 20m이상으로 기준안전율을 만족하지만 해석시 사용한 하부지반의 특성치가 불확실하므로 성토고를 20m로 한정하였다. 시료 A, B의 성토 경사는 1 : 1.5, 소단은 성토높이 6m마다 폭 1m로 시공하는 것이 적합하다고 판단되었다.

## 5. 결 론

시료 A, B에 대한 검토 결과는 다음과 같다.

- (1) 일반토사 A(S5)와 혼합토사 B(S1+S5)의 성토재료로서의 사용성을 평가하였는데, 선별재료 쌓기, 흙구조물 쌓기, 투수성 되메우기 재료로 적합하였다.

## 감사의 글

이 논문은 SisTec 연구비에 의해 연구되었음.

(접속일자 : 2003년 7월 25일)

## 참 고 문 헌

1. 건설부(1990), 도로의 구조·시설기준에 관한 규정 해설 및 지침.
2. 대한토목학회(1996), 건설교통부 제정 토목공사 일반 표준시방서.
3. 엄태규, 최용규(2003), 부산시 안락(2)지구의 지반환경 안정성 검토 보고서, 한국지반환경공학회.
4. 日本道路協會(1986), 道路土工のり面工, 斜面安定工指針.
5. 한국지반공학회 (2001), 사면안정' 지반공학시리즈 5, 한국지반공학회.
6. 이상덕(1997), 토질시험 -원리와 방법, 도서출판 새론.
7. 이인모(1999), 토질역학의 원리, 도서출판 새론.
8. 동화기술(1996), 수질오염·폐기물·토양오염 공정 시험방법.
9. 환경부(1999), 환경부 토양환경보전법.