

## 중동지역 철도설계 시 지반공학적 고려사항

### Geotechnical Considerations for Railway Design in the Middle East

문 준 식<sup>1</sup> Moon, Joon-Shik

#### Abstract

The plan for major design-build projects of railway link among countries in gulf area (GCC) and freight rail construction is recently announced, but Korean companies have a hard time tendering due to special geotechnical condition in the Middle East. The major geotechnical risks during railway construction in the Middle East are related to ground improvement of soft Sabkha ground, wind-blown sand mitigation measure, dune sand compaction, and construction of large-scale cut and embankment. In this study, the characteristics of special geotechnical condition and potential geotechnical risks during railway construction in the Middle East are discussed on the basis of field observation, literature review, and field and laboratory test results.

#### 요 지

걸프지역 국가의 철도연계사업과 화물철도의 건설 등으로 인해 대형 철도사업의 발주가 이어지고 있지만, 중동지역 철도 시공 시 타 지역에서는 접하지 못한 특수한 지반조건으로 인한 리스크로 인하여 국내 업체들이 입찰에 어려움을 겪고 있다. 중동지역의 특수한 지반조건에 따른 주요 공학적 문제는 사브카 지반의 지반개량, 사막지역 모래바람 저감대책, 사막모래 다짐, 대규모 쌓기 및 깎기 등과 관련되어 있다. 본 논문에서는 현장조사 및 문헌조사, 현장시험 및 실내시험 결과 등을 토대로 중동지역에서 접할 수 있는 특수한 지반특성과 시공 상 리스크를 분석하고 대책을 논의하고자 한다.

**Keywords :** Railway construction in the Middle East, Ground improvement of Sabkha ground, Wind-blown sand mitigation measure, Dune sand compaction

#### 1. 서 론

최근 석유생산 및 석유화학제품 등 물류수송을 위한 사막지역 내 철도건설과 GCC(Gulf Cooperation Council) 6개국을 연결하는 약 2,200km의 화물 및 여객철도 건설 등과 관련된 대형철도 프로젝트가 발주되었거나 발주 예정에 있다. 하지만, 걸프지역, 특히 사막지역을 통과 하는 철도시공은 토공작업이 매우 큰 비중을(20% 내외) 차지하며, 특수한 지반문제로 인해 일반적인 철도시공

과는 다른 여러 지반공학적 리스크를 내포하고 있다. 이 지역에서의 주요 지반공학적 문제는 사브카(Sabkha)라 불리는 염분도가 매우 높고 지하수위가 높은 지반의 개량문제, 철도운영에 큰 영향을 줄 수 있는 사막 내 사구의 이동과 모래바람을 저감하는 대책, 대형 사구가 있는 사막 내 철도노반 시공 시 필요한 대규모 성토 및 절토, 대규모 토공작업에 필요한 사막모래의 다짐문제 등이 있다. 본 연구에서는 각각의 지반공학적 현황과 관련 리스크를 문헌조사와 현장답사 등을 통하여 파악하고, 리

<sup>1</sup> 정회원, 경북대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., School of Architecture and civil Engrg., Kyungpook National Univ., Tel: +82-53-950-7563, Fax: +82-53-950-6564, [orangedreamer@gmail.com](mailto:orangedreamer@gmail.com), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

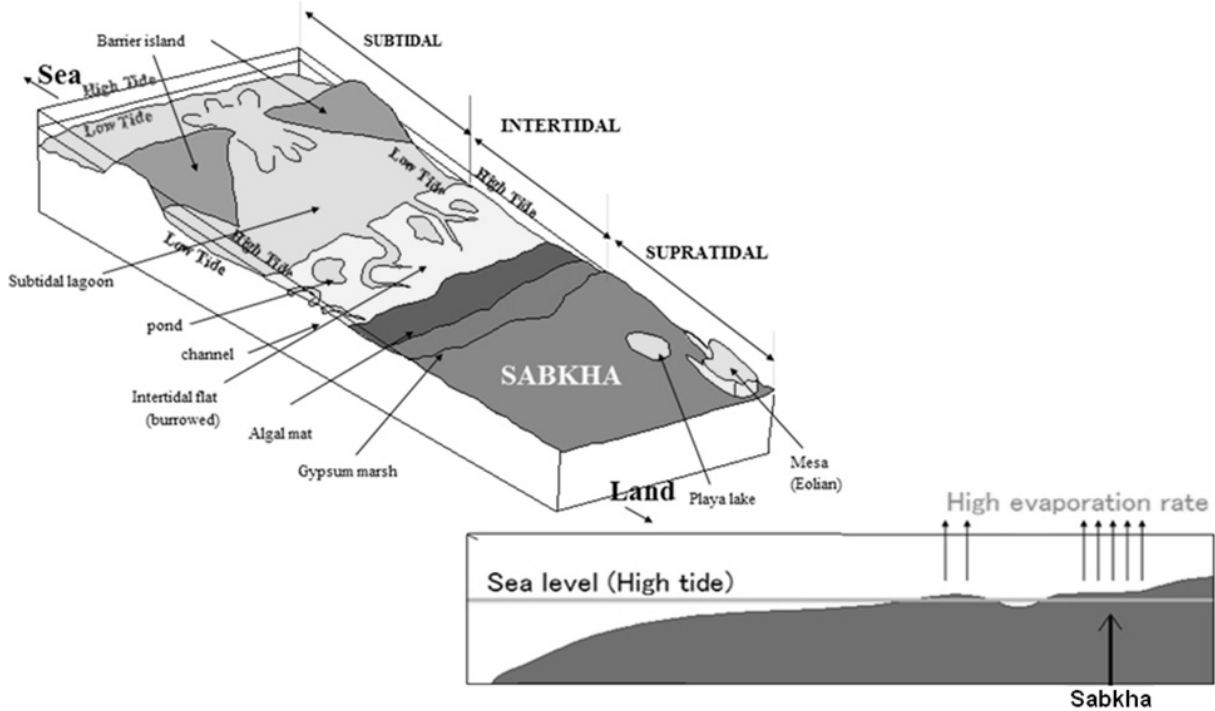


Fig. 1. Location of Sabkha area and Sabkha formation process

스크를 최소화할 수 있는 대책을 문헌조사, 실내시험 및 현장시험 등을 통해 논의하고자 한다.

## 2. 사브카 (Sabkha)

### 2.1 사브카 지반의 지반공학적 특성 및 주요 고려사항

사브카는 아라비아어로 소금평지의 의미로서 염도 높은 지하수가 모세관 현상으로 지표로 올라오고 증발을 반복하면서, 염분이 지반에 섞여있거나 결정화되어 있는 지반이다. 사브카 지반은 대체적으로 지하수위가 GL-1m보다 높고, 느슨 또는 중간조밀의 실트질 사질토층이며, 일부구간에서 장기침하가 발생할 가능성이 있는 점토 사질토층이 존재한다. Anhydrite나 gypsum이 포함되어 있는 사질토층의 두께는 약 2~10m이고 N값은 2~30이상의 넓은 범위를 보이며 지하수위가 높고 N값이 10 미만인 일부 느슨한 사질토 구간에서 지반개량이 요구된다. Fig. 1은 사브카 지반이 형성되는 위치와 형성과정을 보여주고 있으며, Fig. 2는 UAE 아부다비 지역의 위성사진으로 푸른색으로 나타나있는 지역이 사브카 지반이다.

Fig. 3은 사브카 지반 토사의 대표적인 입도분포 곡선이다. 입도분포시험은 철도노선이 시공되는 사브카 지

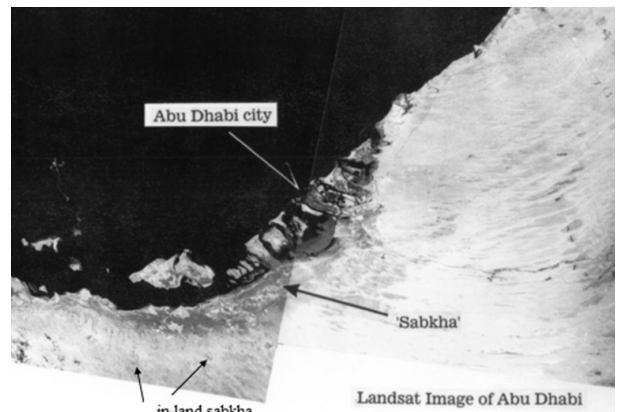


Fig. 2. Satellite picture of Abu Dhabi Sabkha area

반 약 130km에서 100~200m 간격으로 시추조사를 실시하여 채취한 시료를 이용하여 실시하였으며 시험은 각 2~3회 실시하였다. 대부분의 사브카 토사는 Fig. 3(a)와 같이 세립분이 15% 내외인 빈입도의 가는모래이며, 일부구간(약 10% 구간)에서 Fig. 3(b)와 같은 분포를 보이고 있다.

사브카 지반은 높은 지하수위와 수분에 매우 취약한 결정체로 인하여 시공 및 운영 중 다양한 문제를 발생시킬 가능성이 있으며 주요 지반공학적 문제는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 지반 내 강도가 낮은 결정체로 인한 지반강도 저하

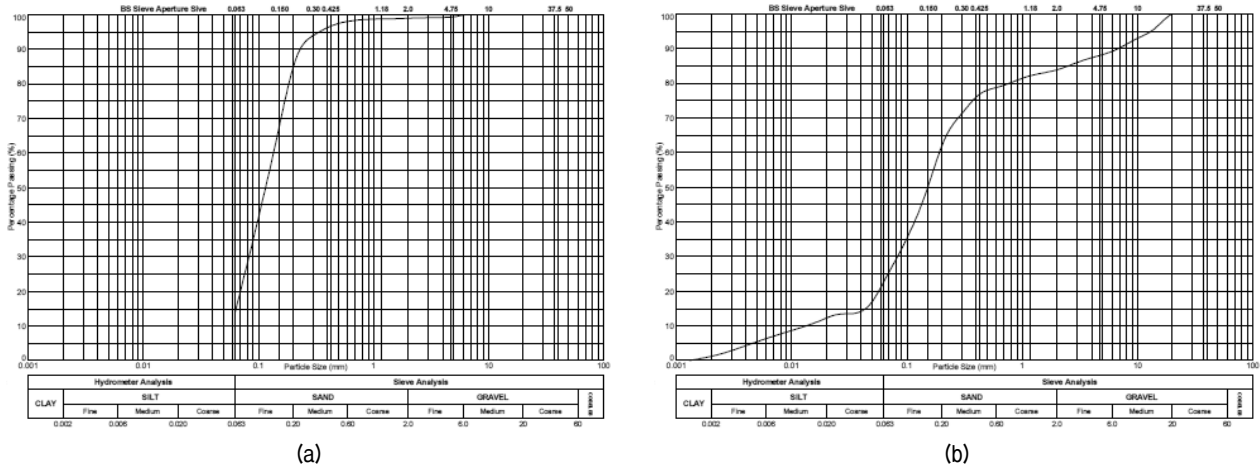
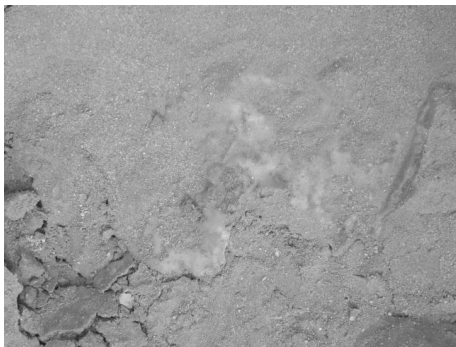
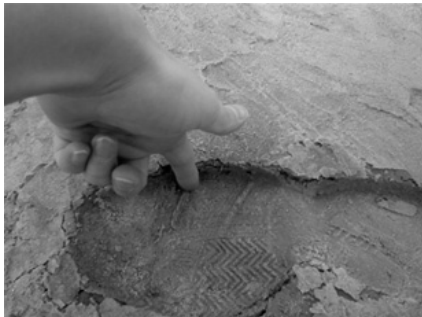
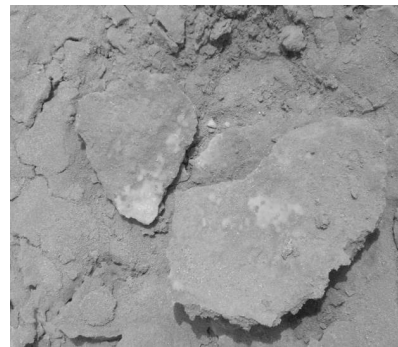


Fig. 3. Typical grain size distribution of Abu Dhabi Sabkha soil



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 4. Relationship between bearing capacity of Sabkha area and ground-water level

- 지하수위 상승 또는 침수로 결정체의 고결상실로 인한 붕괴성 침하 발생 가능성
- 장기침하 가능성
- 시공 시 trafficability 문제
- 염분도 높은 토사 및 지하수로 인한 콘크리트 침묵, 레일의 부식 문제

## 2.2 지하수위에 따른 사브카 지반의 지지력 특성

UAE 내 사브카지반의 강도는 지하수위와 밀접한 관

계가 있으며, 현장조사를 통하여 지하수위에 따라 크게 3가지 Case로 나누어 철도노반 시공방법을 선정하였다. 최고 지하수위가 약 GL-50cm~1m 정도인 경우(Case 1) 대체로 얇고(~10cm) 건조된 딱딱한 사브카 크러스트(Fig. 4(a))로 덮여 있으며, 현장조사 결과 비교적 높은 지지력을 보이고 있었다. 지면이 모세관 현상으로 약간 젖어있는 상태의 지하수위가 높은 구간(GL-30cm 내외, Case 2) 역시 사브카 크러스트로 덮여있지만 물러진 상태이며 성인이 걸었을 때 1~2cm깊이의 발자국이 생기는 정도이다(Fig. 4(b)). 지하수위가 지표면과 거의 동일

하거나 지표면에 물이 고여있는 경우(Fig. 4(c), Case 3) 성인 몸무게를 지지하지 못하고 무릎 위까지 빠질 정도의 매우 약한 지지력을 보였다. 따라서, Tomlinson(1978)은 사브카 지반이 포화되어 강도의 감소가 되는 것을 막기 위해 도로노반 embankment가 만조위보다 높게 축조되어야 함을 강조하였으며, Ellis & Russell(1974)는 사브카지반에 도로시공 시 포장면이 만조위보다 최소 1m위에 설치되어야 한다고 권고하였다.

Fig. 5는 사브카 지반에 시공될 예정인 철도노선을 따라 지반조사를 수행하여 예측된 철도 성토사면 하부 지반 상태를 보여주고 있다. 지반조사는 약 100~200m 간격으로 약 GL-10m까지 수행하였다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 지반개량이 필요한 그림에 표시된 “Sabkha Loose Sand” 구간은 다른 구간에 비해 상대적으로 지반고가 낮은 지역임을 알 수 있으며, 이 구간에서 철도노반 시공 시 충분한 지반고를 확보하고 염분 높은 지하수의 침투를 막을 수 있는 지오텍스타일 등을 설치한다면 침하가 크게 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.

### 2.3 사브카 지반 내 성토의 안정성 평가를 위한 시험시공

#### 2.3.1 Case 1 & 2: 지하수위가 GL-1m보다 높게 위치한 중간조밀 이상의 사질토 구간

Fig. 4(a)와 유사한 구간에서 embankment 시공 시 안정성 평가와 즉시침하 및 압밀 침하량을 측정하기 위해 약 4m 높이의 성토 시험시공을 실시하였다. 지하수위와 원지반상태를 파악하기 위해 Fig. 6(a)와 같이 test pit 시험을 하고, 성토의 침하량을 측정하기 위해 Fig. 6(b)와 같이 3개의 침하측정용 파이프를 설치한 후 각 층을 250mm로 하여 11톤 롤러로 다짐을 실시하였다(Fig. 6(c)). 원지반은 N값이 15~25 정도의 중간조밀 사질토 지반이며 지하수위는 지표면에서 약 50cm로 측정되었다. 하루에 250mm씩 2층으로 500mm층을 다짐하여 약 24시간 후 침하량을 측정하고, 최종적으로 길이 30m, 높이 4m의 embankment를 성토하여 침하량을 측정하였다. 성토재는 석회암질 또는 석고질의 풍화암(gatch)을 사용하였다.

Table 1은 시험성토 중 침하량 측정결과를 보여주고 있으며, 다짐 시공 시 안정성에는 문제가 발생하지 않았다. 최초 500mm층 다짐 후 즉시 침하량은 약 5mm 정도로 측정되었고 매 500mm 추가 성토 시 1~5mm의 추가

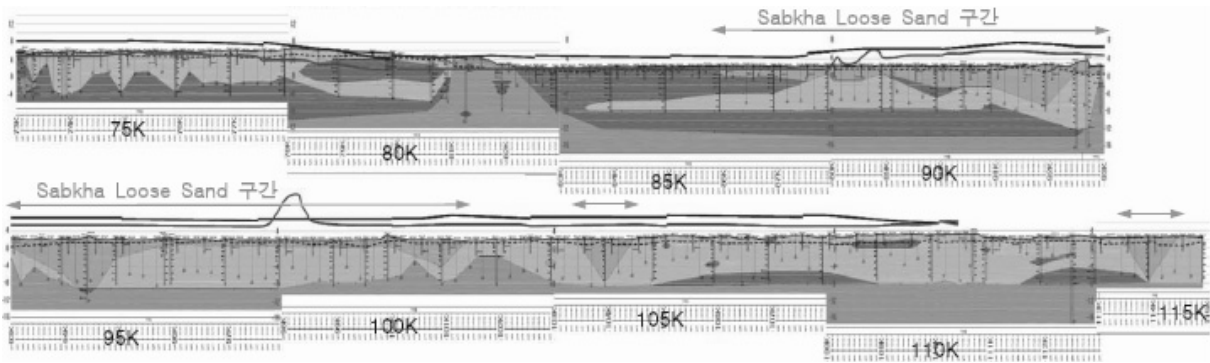


Fig. 5. Ground elevation of soft ground requiring soil improvement



Fig. 6. Test Embankment in Sabkha area with ground-water level of GL-0.5~-1 m

침하가 발생하였으며, 최종적으로 4m 성토 후 누적 침하량은 약 20mm 수준으로 측정되었다. 성토완료 후 약 3주 동안 침하량을 측정한 결과 약 2mm 정도의 추가침하가 발생하였고, 약 60일 후에도 추가 침하는 거의 발생하지 않았다.

지하수위가 GL-30cm~-1m 안에 위치한 Case 1과 Case 2의 경우 덤프트럭과 다짐용 장비가 진입하는 데는 큰 무리가 없었으며, 철도하중에 의한 침하에 대비하여 단기간 동안의 선행하중 공법 적용이 적절할 것으로 판단된다. 운영 중 발생하는 추가 침하에 대해서는 자갈도상의 보수 등으로 간단히 해결될 수 있을 것으로 사료된다.

### 2.3.2 Case 3: 지하수위가 지표면에 인접하여 위치한 느슨한 사질토 구간

Case 3의 조건을 모사하기 위해 사브카 크러스트 층과 함께 표층부 약 50cm를 제거하여 지하수위가 지표면과 동일하게 만든 후 성토시험을 수행하였다. 도우저를 이용하여 길이 10m, 폭 5m, 깊이 0.5m의 트렌치를 조성하였으며, 약 1시간 후 Fig. 7(a)와 같이 굴착면에 지하수가 올라오는 것을 관찰할 수 있었다. Fig 7(b)와 같이 침하 측정판과 파이프를 설치한 뒤 첫번째 시험과 동일하게 Fig 7(c)와 같이 최초 성토 다짐 층을 250mm로 다짐을 시도하였다. 하지만, 최초 250mm 층의 성토·다짐 시도 중 지하수가 다짐 표면까지 올라왔으며 히빙이 발생하여 침하 측정판은 오히려 135mm 상승하였고 점차

적으로 Fig. 4(c)의 상태와 유사한 연약한 조건이 형성되었다.

Fig. 7과 같이 지하수위가 지표면에 거의 인접한 느슨한 사질토 조건에서는 최초 성토 다짐 층을 보다 두껍게 500mm로 하여 다짐을 시도한 경우에도 다짐 중 embankment의 안정성에 문제가 발생하였다. 따라서, 지하수위가 높고 느슨한 사질토 구간에 대해서는 지반개량 후 성토가 필요할 것으로 판단된다.

지하수위가 높은 느슨한 실트질 사질토 지반의 개량을 위해 Fig. 8과 같은 공법의 적용성을 검토하였다. 스톤컬럼 공법은 사우디와 리비아 철도, 도로 시공 시 사브카 개량을 위해 적용된 사례가 있으며 지지력을 단기간에 향상시킬 수 있는 가장 효과적인 방법이라 할 수 있지만, 본 사례와 같이 골재조달이 어려운 지역에서는 공사비가 매우 고가라 적용하기 어렵다. 스톤컬럼 공법과 유사하게 지지력을 향상시킬 수 있는 공법으로 soil cement column 공법의 적용도 고려할 수 있다. 하지만 soil cement column 공법의 경우 염분높은 사브카 지반에서의 적용사례가 없어 그 효과가 검증되지 않은 문제가 있어 충분한 검토가 필요하다.

본 논문의 대상지역 내 사브카 지반의 특성을 고려할 때 가장 경제적인 지반개량 공법은 선행하중 공법이라 할 수 있는 데, 본 사례와 같이 공사기간이 매우 짧은 경우 90% 이상의 압밀 소요시간을 정확히 예측하고 그에 따라 세심한 시공계획의 수립이 중요하다. Fig. 3의 사브카 지반의 입도분포 고려 시 열차하중 Cooper E-80

Table 1. Settlement Reading

Plate No.	0.5 m high embankment	1.0 m high embankment	2.0 m high embankment	3.0 m high embankment	4.0 m high embankment	After 3 weeks
1	4 mm	6 mm	8 mm	13 mm	17 mm	19 mm
2	6 mm	7 mm	11 mm	14 mm	15 mm	17 mm
3	12 mm	12 mm	17 mm	19 mm	22 mm	24 mm



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Test Embankment in Sabkha area with gound-water level at the ground surface

에 대하여 압밀 침하량은 약 7.9~12.5cm로 예측되었으며, 90% 압밀 소요시간은 평균 약 70일 정도이나 일부 점토 사브카 지반에서 최대 300일 정도가 소요될 것으로 예상되었다. 본 사례의 경우, Fig. 5와 같이 지반개량이 필요한 구간이 집중되어 있어 착공 직후 대상구간에 선형하중을 위한 embankment를 우선적으로 축조하고 타 구간의 성토 및 철도레일 시공 중 선형하중을 완료시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

Case 3와 같이 지하수위가 매우 높은 느슨한 실트질 또는 점토질 사질토 지반의 개량을 위해서 먼저 쇄석을 포설하여 trackability를 높인 후 성토를 수행하여야 한다. 1회 다짐층 두께를 얇게하여 다짐을 시도할 경우 연약한 층에 과도한 에너지가 갑작스럽게 전달되어 지반의 불안정을 초래할 수 있으므로, 최초 성토로 약 1m두께의 성토재 포설 후 지반을 안정화시킨 후 고중량의 롤러를 이용한 다짐을 수행하여야 한다. 지반조건에 따

라 선형하중 높이를 달리하여 재하하면 철도하중을 지지하는데 필요한 지지력을 확보하는 것이 가능할 것으로 판단되었다.

### 3. Wind Blown Sand Mitigation

#### 3.1 Introduction

사막지역 내 철도 시공 시 모래바람에 의한 철도선로의 침식 등의 문제로 인해 철도운영에 큰 지장을 초래할 수 있기 때문에 모래바람에 의한 철도노선 내 모래퇴적을 저감시킬 수 있는 방지공의 계획수립이 매우 중요하다. 사막 내 철도운영 중 발생할 수 있는 문제로는 모래바람으로 인해 철도 도상에 모래가 쌓이는 문제(Fig. 9(a))와 사구의 이동(dune migration)으로 사구가 철도노선에 침범하는 문제(Fig. 9(b)) 등 크게 두 가지로 나눌

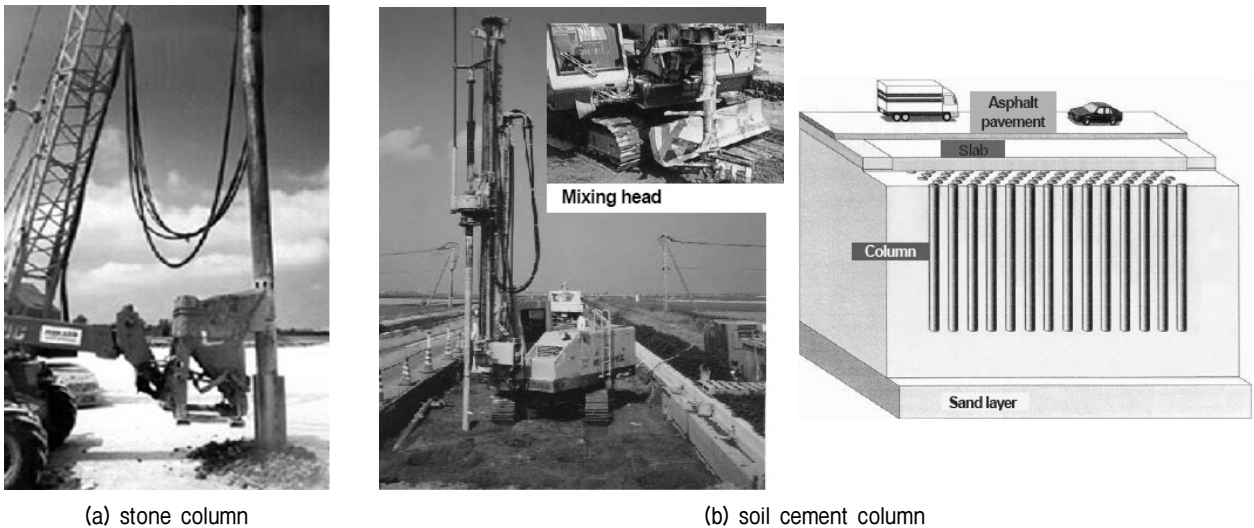


Fig. 8. Alternative ground improvement methods

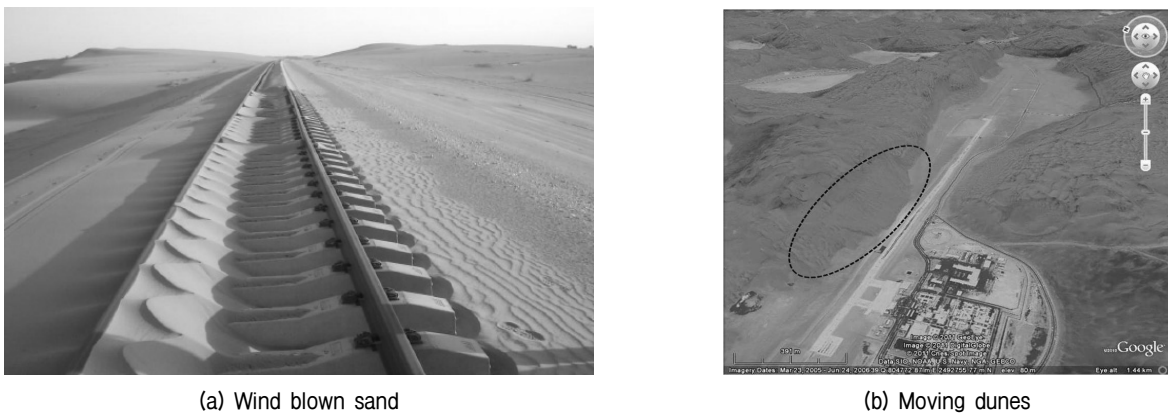


Fig. 9. Wind blown sand and moving dunes

수 있다.

사구의 이동성은 사구의 가장 현저하고 중요한 특성이다(Livingstone & Warran, 1996). 하지만, 사구의 이동으로 인한 철도노선 침범 문제는 모래바람에 의한 트랙 내 모래축적문제에 비해 지형학적 특성연구를 통해 대책강구가 비교적 수월하다고 할 수 있다(Moon et al., 2012). 대상지역의 경우 사구의 이동속도와 방향이 비교적 일정하여 사구의 이동을 저감시키는 특정한 대책공법(mitigation method)을 적용한다기 보다는 사구의 이동속도를 정확히 파악하여 사구가 철도노선을 침범하기 전 대규모의 “정리작업”을 위한 인력 및 장비투입 계획(maintenance plan)을 세우는 것이 더욱 효과적이라 할 수 있다.

반면 모래바람에 의해 철도 운행에 영향을 주는 것을 최소화하기 위한 대책은 설계단계에서부터 여러 대책공법의 적용성 등을 검토하여야 하며 이러한 대책공법 시설물의 유지관리 계획을 세우는 것 또한 중요하다. 모래바람과 관련된 주요 engineering issue들은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 트랙 내 모래축적으로 인한 열차탈선
- 모래바람에 의한 embankment의 침식
- 발라스트 오염: 강성도 저하, 레일 파상마멸(corrugation), 침하
- 분기기 기능장애
- 신호시스템 기능장애

### 3.2 Sand dune migration

대상지역의 지형학적 특성연구를 통한 사구의 이동경로와 이동속도의 산정에 관한 연구내용은 저자가 집필한 Moon et al.(2012)의 논문에 정리되어 있으며 본 절에서는 그 내용 중 일부를 발췌하였다. 대상지역 내 해안 사브카 구간으로부터 약 150km의 내륙지역은 크게 5개의 이동성이 큰 사구지역으로 나눌 수 있다.

- 내륙 사브카 위 낮은 사구 - 일반적 사구높이 5 to 10m
- 초승달 모양(바르칸, Barchan)의 사구지역 - 일반적 사구높이 5 to 10m
- 얇은 모래층(Sand Sheets) - 일반적 사구높이 5 to 10m
- ridge형 사구(Dune Ridge) - 일반적 사구높이 10 to 30m

- 대형사구 - 일반적 사구높이 5 to 15m(이동성 적은 45m 이하의 고대 대형사구를 타고 이동)

사구의 이동속도를 산출하기 위해 많은 연구가 이루어졌다(Bagnold, 1941; Liu, 1960; Zhu et al., 1981). 대부분의 현장계측은 이동성이 큰 높이가 낮은 사구에 대해서만 이루어졌고, 대형사구의 이동성은 항공사진 분석을 통해 측정될 수 있다. 본 연구 대상지역 내 사구의 이동경로와 속도는 최근 10년간의 항공사진을 비교·분석하여 산정하였다. 대상지역 내 사구들은 일정한 우세풍의 풍향에 의해 거의 일정하게 남동쪽 방향으로 이동하는 것으로 관찰되었으나 해안인접 구간의 경우 지역적으로 약간의 변화는 관찰되었다. 대형사구들은 사실상 움직임이 거의 없고 낮은 사구들은 년 1.5~8m 정도 이동함을 볼 수 있었다. 사구 높이(dune height, H)와 이동속도(mitigation rate, M)의 개략적 반비례 관계에 있으며 사구 모래의 이동량은 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$\text{Volume} \approx M \cdot H \text{ (m}^3 \text{ / year / linear meter)} \quad (1)$$

사구의 이동속도와 사구높이의 반비례 관계는 지역에 따라 큰 편차를 나타내지만, Bagnold(1941)은 대상지역의 사구들이 동일한 바람상태 및 사구가 이동하는 바닥이 편평한 이상적인 상태에서는 사구의 이동속도와 높이가 서로 상관관계에 있다고 하였으며 Finket(1959)와 Long & Sharp(1964)의 연구에서 증명되었다. Fig. 10은 Taklimakan 사막 사구의 이동속도와 사구높이의 관계의 예이다(Wang et al., 2002).

본 연구 대상지역에서 사구의 높이가 4m 이상인 경우, 사구모래의 이동량은 약 20m<sup>3</sup>/year/m로 관찰되었고, 사

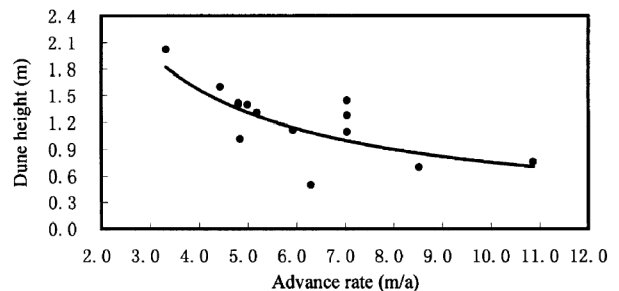


Fig. 10. Relationship between dune height and advance rate for simple crescent dunes in Taklimakan Desert (Wang et al., 2002)

구의 높이가 4m 이하인 경우, 이동량은 약 22m<sup>3</sup>/year/m로 산정되었다(Moon et al. 2012). 사우디아라비아에서 측정된 사구 이동량은 30m<sup>3</sup>/year/m까지 측정되었고 25m

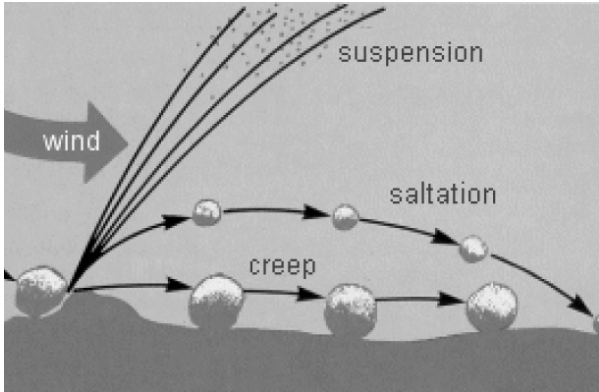


Fig. 11. Different manner of particle movements depending on weight of particle

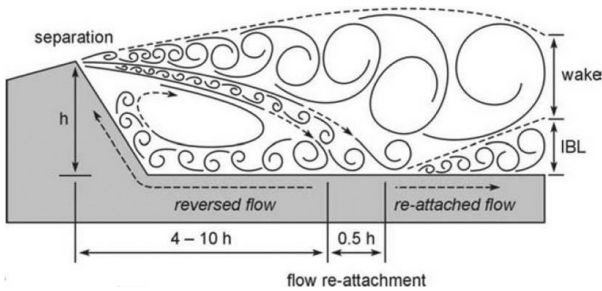


Fig. 12. Lee Side Flow Patterns (I. Walker, 2002)

미만의 바르칸 사구의 평균이동 속도는 연간 15m로 측정되었다(Watson, 1985). 사구의 이동속도는 최소모래 이동모델(minimal sand transport models)에 근거하여 한계풍속 이상의 바람 지속시간, 한계풍속 이상이 발생하였을 때의 평균풍속에 대한 바람 전단속도의 분포 등을 고려하여 이론적으로도 평가되었으며 매우 유사한 결과가 얻어졌다.

### 3.3 철도노선 내 모래퇴적 저감공법

바람이 임계풍속 이상이 되면 모래입자는 크기에 따라 Fig. 11에 표현된 것과 같이 도약(saltation, bouncing and jumping), 계류(suspension), 크리프(creep) 형태로 이동하게 된다(Bagnold, 1941). 일반적으로 모래입자의 약 75%가 도약과 계류의 복합 거동으로 이동하고, 나머지 25%는 바람 반대편 사구 사면을 타고 사구 꼭대기에서 creeping으로 무너지며 이동하는 것으로 알려져 있다.

Fig. 12에서 보면 모래입자가 사구의 최고점을 지나 날아가 바닥에 떨어지고 다시 바닥 면을 따라 도약과 계류의 복합거동으로 이동(re-attached flow)하기 시작하는 지점이 새로운 사구가 만들어지는 위치이고 두 인접한 사구의 거리이며, 그 거리는 사구의 높이에 비례한다고 알려져있다(Walker, 2002). 본 논문의 연구 대상지역 내 사구의 최고점부터 우세풍 방향 쪽에 인접한 사구가

주요영향	방 지 공 법	
모래바람 침식	Reduce Speed or Deflect Wind	Barriers → Open Fences, Berm, Trench, Earthworks, Dissipation Cone
		Vegetation → Grass, Bushes, Trees, Vetmer, Low water demand species, Existing vegetation
	Protect Surface	Soil Capping → Gravel Single Layer, Soil
		Artificial Surface Treatment <ul style="list-style-type: none"> <li>Paving → Precast, Mix-in-place</li> <li>Sprays → Crude Oil, Bitumen, Polymer</li> <li>Matting → Brushwood, Geocell, Artificial grass</li> </ul>
트랙 내 모래 퇴적	Maintain (For Increase) Wind Speed → Streamline all vertical & horizontal profiles, Avoid constructions & wind shadows, Keep surface smooth, Specialist sleepers, Ballast treatment, Slab track	
	Reduce Sand Load of Arriving Wind → Use methods highlighted in windward area, Remove upwind dunes	

Fig. 13. Wind blown sand mitigation methods



시작하는 지점(toe of slope) 사이의 거리를 위성사진으로부터 측정한 값은 약 7H(H = 이동성 높은 사구의 높이)로 비교적 일정하였으며 문헌에 나와있는 값의 평균치 정도 되는 것을 파악할 수 있었다(Walker, 2002).

이러한 측정치는 철도노선에 인접한 사구 꼭대기로부터 날려오는 모래가 철도노선 내에 쌓이는 것을 막을 수 있도록 설치하는 모래퇴적 방지공의 크기를 결정하는 데 사용된다. 본 연구 대상구역 내 사구의 높이(H)는 약 5~15m이므로, 모래퇴적 방지공의 폭은 앞에 설명한 것처럼 약 35~105m(7H) 정도 되어 할 것으로 추정할 수 있다.

Fig. 13에 철도 트랙 내 모래퇴적을 최소화하기 위한 여러 종류의 모래바람 저감공법이 정리되어 있다. 모래바람 저감대책은 크게 펜스 등을 이용하여 모래바람을 막는 방법, 공기흐름을 유도하여 모래바람이 철도노반을 지나치게 하는 방법, 철도노반 인접 모래표면을 덮어 바람에 의한 모래이동량을 줄이는 방법 등으로 나눌 수 있다(Watson, 1985). 하지만 현재까지 사용된 여러 방법들을 조사해 본 바에 의하면 사막 내 철도건설 시 모든 조건에서 가장 효과적인 모래바람 저감공법은 없으며, 모래사막의 사구의 지형학적 연구를 토대로 철도선로 및 분기기, 모래바람 저감을 위한 구조물, 신호 시스템 등에 대한 철저한 유지보수 및 관리 계획의 수립이 더욱 중요하고 경제적인 것으로 판단된다. 유지보수 및 관리

는 정기검사 및 보수, 모래폭풍 발생시 응급보수 계획, 철도노선에 인접하여 접근하는 사구의 정기적인 제거 작업을 위한 대단위 인력투입 및 장비운용계획 수립 등이 필요하다.

#### 4. 대규모 성·절토 Engineering Issue

##### 4.1 사막모래 입도 및 다짐특성

이동성이 작은 대규모의 사구 구간(Fig. 14)에서는 높이 30m 이상의 대규모 성토 또는 절토가 필요할 수 있다. 하지만 본 사례와 같이 양질의 성토재를 조달하기 어려운 경우 부득이하게 사막 모래를 성토재로 사용하여야 한다. 사막모래를 성토재로 유용 시 반드시 입도 및 다짐특성을 파악할 필요가 있다.

본 대상구간 내 사구에서 채취한 사막모래의 입도를 분석 한 결과 대부분 Fig. 15와 같이 5~10%의 세립분(실트), 60~70%의 가는모래(fine sand), 25~30%의 중간굵기의 모래로 구성되어 있으며, 균등계수가 약 3~4 정도의 빈입도(poorly graded)를 보였다. 지하수위 아래 약 1.5m 이하에서 자연 함수비는 약 13~16% 정도이며 깊이에 따라 약간씩 증가하는 경향을 보였다. 표층부 모래의 함수비는 측정되지 않았지만 1~2% 수준으로 낮을 수 있을것으로 예측된다.

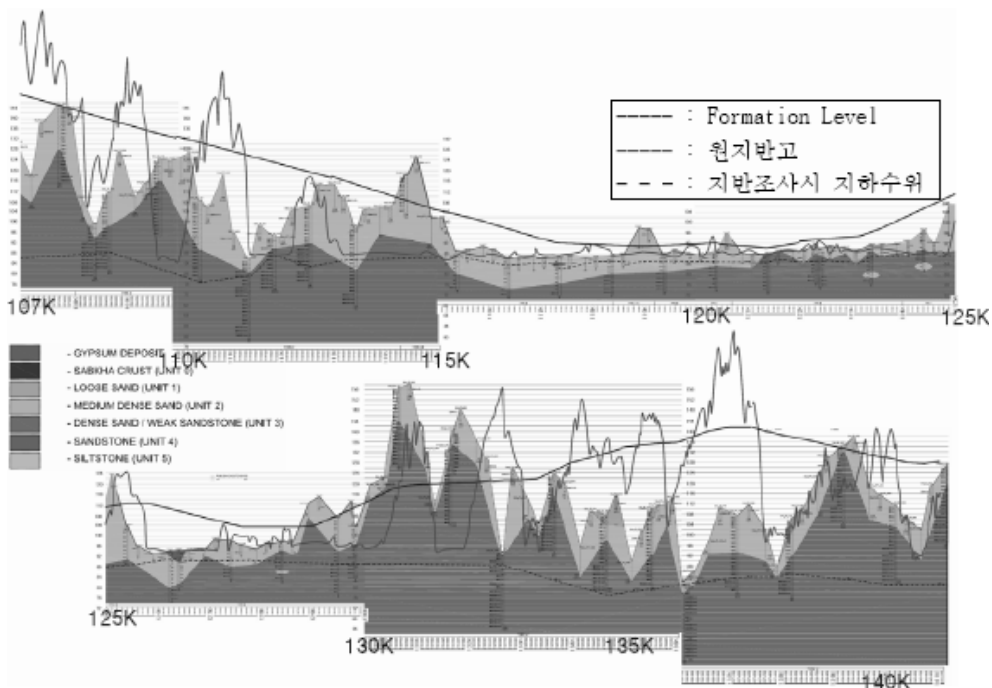


Fig. 14. Ground elevation in mega dune area

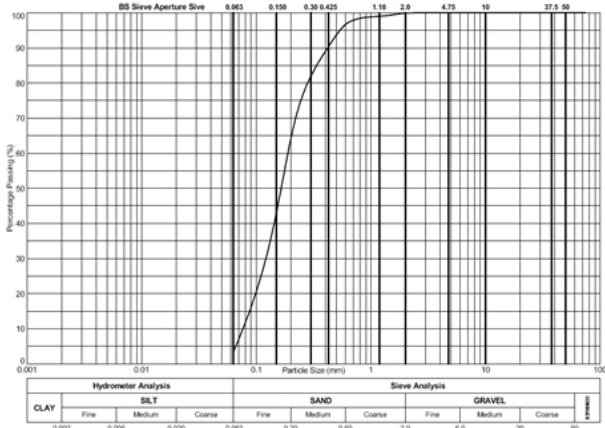


Fig. 15. Typical grain size distribution of dune sand

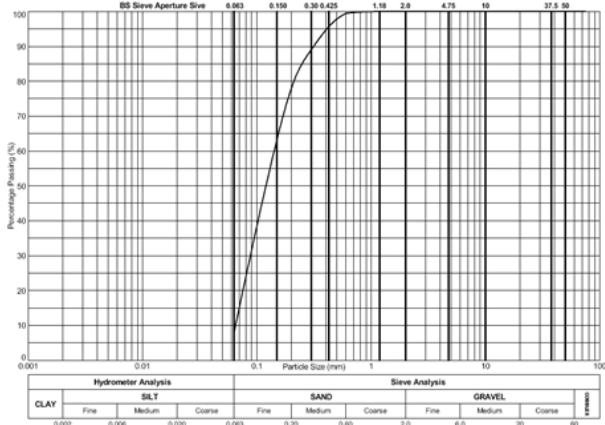
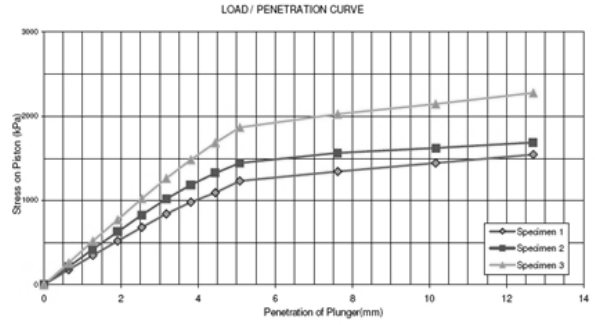


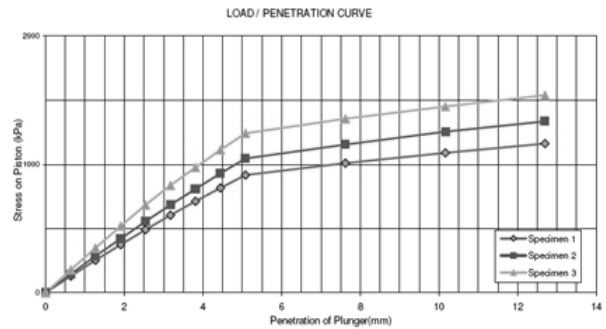
Fig. 16. Compaction curves for dune sand

Fig. 16은 현장에서 채취한 사막모래의 대표적인 표준 프록터 및 수정 프록터 시험 다짐곡선을 보여주고 있다. 최대 건조 단위중량(MDD)은 표준 프록터 시험과 수정 프록터 시험 시 각각 1.69~1.71Mg/m<sup>3</sup>과 1.74~1.75Mg/m<sup>3</sup>로 다짐에너지 증가에 따른 밀도의 증가가 매우 적음(약 3%)을 알 수 있었다. 또한 함수비 변화에 따른 건조 단위중량의 변화가 매우 적으며, 최적함수비



**Results :**

	Specimen 1 (10 Blows)	Specimen 2 (25 Blows)	Specimen 3 (56 Blows)
CBR at 2.54mm Penetration, %	10	12	15
CBR at 5.08mm Penetration, %	12	14	18



**Results :**

	Specimen 1 (10 Blows)	Specimen 2 (25 Blows)	Specimen 3 (56 Blows)
CBR at 2.54mm Penetration, %	7	8	10
CBR at 5.08mm Penetration, %	9	10	12

Fig. 17. CBR test results of dune sand compaction

가 표준 프록터 시험과 수정 프록터 시험에서 15~16%로 거의 동일함을 알 수 있다.

Fig. 17은 사막모래의 실내 CBR 시험값을 보여주고 있다. 실내 CBR 값은 대체로 10~15%의 범위를 보이고 있으며, 다짐 에너지를 증가하여도 CBR 값의 증가를 기대하기 어려운 것으로 나타났다. 이는 다짐 시험 시 표준 프록터 시험과 수정 프록터 시험에서 최대 건조 단위중량의 차이가 적은 것과 관련이 있다고 할 수 있다. 또한 현지 도로시공 중 현장 및 실내시험 자료와 현지 시공경험자의 자문을 참조한 결과 유사한 결론을 얻었으며 사막 모래로 15% 이상의 현장 CBR 값을 얻기는 어려운 것으로 판단된다.

#### 4.2 성토방법

Fig. 18은 본 사례의 철도노반 구성과 각 층의 다짐 및 강도 최소조건을 보여주고 있다. 실내시험 결과를 분석하였을 때 지하수위 1.5m 아래의 토사의 자연함수비가 최적함수비보다 약 1~2% 정도 낮으므로 굴착 후 단시간 내에 다짐을 수행할 경우 다량의 가수없이 MDD

95% 다짐 수준이 얻어질 수 있을 것으로 사료된다. 다짐 중 쉽게 건조되는 기후특성과 매우 균질한 가는모래 특성을 고려할 때 다짐 시 한 층의 두께를 1m 수준으로 크게 하고 polygonal type 등의 고중량의 물러를 이용한 다짐이 더욱 효과적일 것으로 판단된다. 하지만, 사막모래를 이용하여 현장 다짐시험을 수행한 결과 한 층을 1m로 다짐하였을 때 상부 2/3(67cm)은 MDD 95% 수준의 다짐이 이루어졌지만 하부 1/3(33cm)은 MDD 90~95% 수준의 다짐이 됨을 확인할 수 있었다. 따라서, MDD 90% 다짐이 요구되는 general fill의 대단위 성토를 위해 사막모래의 사용이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

법면보호와 사막모래 다짐 시 구속효과를 얻기 위한 bank-grade와 상대적으로 높은 다짐수준을 요하는 sub-grade는 인접 토취장에서 채취할 수 있는 gatch를 사용할 수 있다. Gatch재는 석회암질 또는 석고질 사암으로서 UAE, 사우디아라비아를 포함한 여러 중동지역에서도 시공 시 매우 흔하게 쓰이는 다짐 재료이며 북미 등 건조지역에서 다짐재료로 흔히 쓰이고 있는 caliche (calcrete)와 유사한 공학적 특성을 가지고 있다고 알려져 있다. Fig. 19는 연구 대상지역 인근 토취장에서 채취된 gatch 토사와 이를 이용하여 다져진 비포장 도로를 보여주고 있다.

Gatch 토사는 cavity를 포함한 약하게 결합된 부분이

많아 이를 분쇄하며 다시 견고하게 다지기 위해 중량의 다짐기계를 적용하여야 한다. 또한, 과도한 다짐으로 인해 입자가 세립질로 부수지는 것을 막기위해 2-3번의 다짐작업으로 마무리 지을 수 있도록 해야 한다(Tomlinson, 1978). 하지만, gatch토사의 다짐으로 sub-grade와 bank-grade는 형성할 수 있을 것으로 판단되지만, MDD 98%, CBR 25% 수준을 요하는 sub-ballast 시공은 시험다짐 결과로부터 판단하였을 때 어려울 것으로 사료된다. 또한, gatch재를 채취할 수 있는 토취장까지의 거리가 먼 경우 사막모래를 시멘트 안정처리 공법 등으로 강도를 증가시켜 sub-grade와 bank-grade를 시공하는 것이 보다 적절할 것으로 판단된다. 주의할 것은 위치에 따라 염분 높은 지하수가 존재할 수 있으므로 시멘트 안정처리 공법 적용 시에는 지하수위 상부의 건조된 사막모래를 사용해야 한다.

### 5. 결론

본 논문에서는 중동지역 철도시공 시 접하게 되는 특수한 지반조건에 따른 주요 공학적 문제와 관련하여 현장조사 및 문헌조사, 현장시험 및 실내시험 등을 통해 시공 상 문제점 등을 분석하고 대책을 논의하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

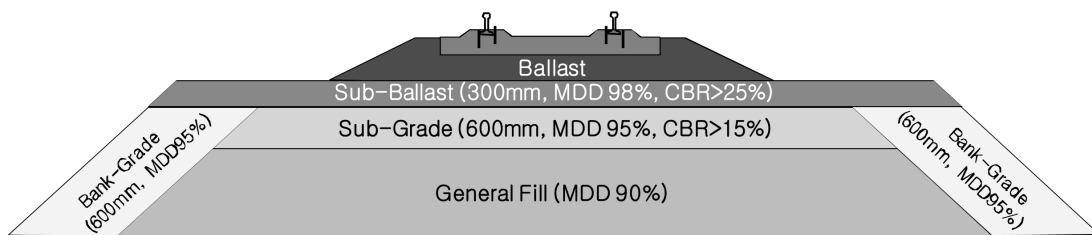


Fig. 18. Minimum Compaction Requirements for Railway Embankment



Fig. 19. Gatch soil

- (1) 사브카 지반은 일반적으로 지하수위가 1m미만인 높은 빈입도의 가는모래 지반이며, 염분의 결정체가 지반 내에 혼재되어 있어 강우 등으로 인해 지하수위가 높아져 물고임 현상이 발생하게 되면 붕괴성 침하가 발생될 우려가 있다. 지반의 지지력은 지하수위와 깊은 연관이 있으며 그에 따라 철도노반 시공방법을 결정하여야 한다. 현장시험결과 대부분의 사브카 지반에서 선행하중 공법으로 1~2달 이내에 지반을 안정화시킬 수 있었으며 철도하중에 대한 지지력을 확보할 수 있었다.
- (2) 사구의 이동성은 철도노선의 노선선정과 운영계획에 중요한 인자이다. 대상구간의 경우 이동방향과 이동속도가 비교적 일정하며 서로 선형 반비례관계에 있음을 알 수 있었다. 사구의 이동으로 인한 철도노선 침범 문제는 지형학적 특성연구를 통해 사구의 이동속도를 파악하고 그에 따른 노선구간 내 정리작업을 위한 장비 및 인력 운용계획 수립이 가능할 것으로 판단되었다.
- (3) 모래바람에 의한 철도도상 내 모래의 축적을 최소화하기 위한 여러가지의 모래바람 저감공법이 제안되었지만 모래바람을 생애주기 동안 충분히 차단할 수 있는 공법은 없었다. 모래사막의 사구의 지형학적 연구를 토대로 적절한 수준의 모래바람 저감공법 및 적용 구간을 설정하고, 철도선로 및 분기기, 모래바람 저감을 위한 구조물, 신호 시스템 등에 대한 철저한 유지보수 및 관리 계획의 수립이 더욱 중요하고 경제적인 것으로 판단되었다.
- (4) 사막모래는 세립분(실트)을 5~10% 정도를 포함한 빈입도의 가는모래(fine sand)이며, 다짐 시 다짐에너지 증가에 따른 밀도의 증가가 매우 적고 함수비 변화에 따른 건조 단위중량의 변화가 매우 적음을 알 수 있었다. 사막모래는 적절한 강도의 bank grade로 구축하여 다짐 경우 MDD 90% 다짐은 가능할 것으로 판단되었다. MDD 95%와 CBR 15%이상의 다짐이 필요한 bank grade와 sub-grade는 인접 토취장이 있을 경우 gatch라 불리우는 석회질 풍화토를 사용하거나 사막모래를 시멘트 안정처리 공법

으로 강도를 증가시켜 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

이 논문은 2013학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌 (References)

- Bagnold, R.A. (1941), *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Chapman & Hall, London, 265p.
- Ellis, C.I. and Russell, R.B.C. (1974), The use of salt-laden soils (Sabkha) for low cost roads. *Conference on Low-cost Roads*, Kuwait.
- Finkel, H.J. (1959), "The barchans of southern Peru", *J. Geol.*, Vol. 67, pp.614-617.
- Liu, Z. (1960), "Movement of dunes under the action of wind", *Acta Meteorologica Sinica*, Vol. 31, pp. 84-91.
- Livingstone, I. and Warran, A. (1996), *Aeolian Geomorphology—An Introduction*, Longman, Singapore, 211p.
- Long, J.T. and Sharp, R.P. (1964), "Barchan-dune movement in Imperial Valley, California", *Bull. Geol. Soc. Am.*, Vol.75, pp. 149-156.
- Moon, J.S., Kim, J.Y., and Lee, S.B. (2012), "Geo-morphological study of sand dune for railway project in UAE", *Journal of the Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.28, No.9, pp.17-22. (in Korean)
- Tomlinson, M.J. (1978), "Middle east-highway and airfield pavements", *Q. J. of Engng Geol. and Hydrogeol.*, Vol.11, pp.65-78.
- Walker, I.J. (2002), "Advanced in research on dune-airflow-sand transport dynamics: incorporating secondary flow and sand transport processes", *Proceedings of ICAR5GCTE-SEN Joint Conference, International Center for Arid and Semiarid Lands Studies*, pp. 458-462.
- Wang, X., Dong, Z., Zhang, J., and Chen, G. (2002), "Geomorphology of sand dunes in the Northeast Taklimakan Desert", *Geomorphology*, Vol.42, pp.183-195.
- Watson, A. (1985), "The control of wind blown sand and moving dunes: a review of the methods of sand control in deserts, with observations from Saudi Arabia", *Q. J. eng. Geol. London*, Vol. 18, pp.237-252.
- Zhu, Z., Chen, Y., Wu, Z., Li, Z., Li, B., and Wu, G. (1981), *Study on the Geomorphology of Wind-Drift Sands in the Taklamakan Desert*. Science Press, Beijing, 110p.

Received : June 11<sup>th</sup>, 2013

Revised : August 24<sup>th</sup>, 2013

Accepted : November 1<sup>st</sup>, 2013