

UAE 내 철도프로젝트 수행을 위한 사막 사구의 지형학적 특성 연구

Geo-Morphological Study of Sand Dune for Railway Project in UAE

문 준 식¹ Moon, Joon-Shik

김 재 영² Kim, Jae-Young

이 승 복³ Lee, Seung-Bok

Abstract

Wind blown sand is expected to disrupt the operation of the railway as the presented railway project in this paper consists of large earthworks in extreme topography of the mega dune fields. For successful railway construction in sand dune area, effective mitigation measure is the most important factor to protect the track from wind blown sand. The effective mitigation measure requires an integrated consideration of the earthworks geometry and the direct control measures such as fence system. Basically there's no perfect measure protecting railway track from wind blown sand, and it would be more economical and effective to develop robust, deliberate maintenance program for track and direct control measure on the basis of geo-morphological study. The purpose of this study is to identify the large scale geo-morphological terrains and specific sand dune morphology in the project area in UAE and estimate the direction and migration rate for sand dunes with the local variations in prevailing wind directions by undertaking literature review, and aerial photographs, satellite images, and ground studies.

요 지

초대형 사구지역 내 철도공사를 위한 대단위 토공작업을 수행하는 경우, 공사 중 및 공사 후 모래바람에 의한 철도 선로의 침식 등으로 인해 철도운행에 큰 지장을 초래할 수 있기 때문에 모래바람에 의한 철도노선 내 모래퇴적 방지공의 계획수립이 매우 중요하다. 효과적인 모래퇴적 방지공을 위해서는 적절한 토공설계뿐만 아니라 펜스 시스템과 같은 직접적 모래바람 억제방법 등에 대한 통합적이고 신중한 고려가 필요하다. 하지만, 현재까지 사용된 여러 방법들을 조사해 본 바에 의하면 모래사막 내 철도건설 시 가장 일반적이고 효과적인 모래퇴적 방지공은 없으며, 모래사막의 사구의 지형학적 연구를 토대로 철도선로 및 모래바람으로부터의 철도선로 보호 구조물 등에 대한 철저한 유지보수 계획의 수립이 더 효과적이고 경제적인 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 UAE에서 수행되는 프로젝트 지역 내 사구 지역의 대단위 및 특정지역 지형에 대한 조사, 분석을 수행하고, 문헌고찰, 항공사진, 위성사진, 현장조사 등을 통해 프로젝트 지역 내 사구의 이동경로, 이동속도를 추정하여 모래바람에 의한 철도선로 침식방지 구조물의 설계 및 유지보수 계획 수립에 기여하는 것에 그 목적을 두었다.

Keywords : Wind-blown sand mitigation, Sand dune, Geo-morphological study, Sand dune migration rate

1 정희원, 경북대학교 토목공학과 조교수 (Assistant Professor, School of Architecture and civil Engineering, Kyungpook National University)

2 정희원, 삼성물산 건설부문 토목엔지니어링센터 과장 (Manager, Civil Engineering Center, Samsung C&T, Tel: +82-2-2145-7876, Fax: +82-2-2145-6050, jy.bond.kim@samsung.com, 교신저자)

3 정희원, 삼성물산 건설부문 토목엔지니어링센터 부장 (General Manager, Civil Engineering Center, Samsung C&T)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 3월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

본 논문에서 대상으로 하는 구간은 크게 해안지역(아랍에미레이트 서북부 지역)과 내륙 사구지역(아랍에미레이트 남부지역)으로 나눌 수 있다. 해안지역은 딱딱한 salt crust로 덮여진 평평한 사브카 지역으로서 현장조사 결과 모래바람으로 인한 영향은 크지 않을 것으로 판단되었다. 항공사진 검토결과 해안지역에서 내륙 쪽으로 약 150km 지역까지는 ridge형과 barchan형의 높은 사구가 주를 이루고 있었다.

해안지역은 계절풍의 영향으로 풍향과 풍속이 연중 일정하지는 않지만, 전반적으로 내륙 쪽 사막 내 사구는 매년 거의 일정한 방향과 속도로 움직이고 있다. 현장 조사와 항공 및 위성사진 검토결과, 본 대상지역 내 사구들은 약 320~352도 방향, 즉 철도노선과 거의 평행한 북서~북북서 방향으로 움직이고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 대상지역의 경우 내 연중 2~3달 동안 모래입자를 움직이게 하는 풍속(약 18km/hr) 이상의 우세풍(prevaling wind)이 북북서 방향으로 일정하게 불고 있는 것으로 가정할 수 있다. 반면, 해안지역에서는 10~20km/hr(봄, 가을)과 17km/hr(여름)의 풍속으로 불고, 매우 제한된 시간동안 모래폭풍이 발생한다.

본 연구는 대상지역 내 철도노선의 모래퇴적 방지공 계획수립을 위해 수행한 아랍 에미레이트 사막지역의 지형학적 특성연구이며, 다음과 같은 내용이 포함하고 있다.

- 아랍 에미레이트 내 사구지형 특성에 관한 연구문헌 고찰
- 사구의 이동 역학에 관한 연구문헌 고찰
- 대규모 지형학적 지역 분류
- 각 지역 내 사구 형상 정리
- 각 지역 내 사구의 이동경로 검토
- 각 지역 내 사구의 이동속도 검토

2. 대규모 지형학적 구간 분류 및 사구형상

이동성이 큰 사구 밑에 존재하는 고대 사막지역은 기후변화 동안 사구의 이동, 퇴적, 압축 등 매우 복잡한 과정을 거치며 형성되었다. 현재의 사막지역은 고대의 이동이 없는 단단한 모래층 위를 이동성이 큰 사구가 비교적 얇게(약 5~15m 두께) 덮고 있는 형상이다. 해안지역으로부터 약 150km의 내륙지역은 크게 5개의 이

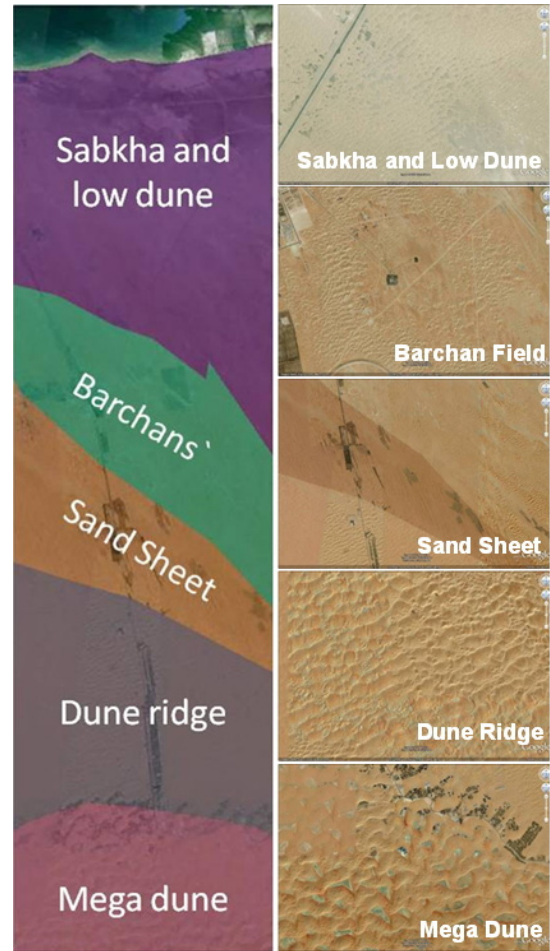


Fig. 1. Geo-morphological terrains and typical mobile dune forms

동성이 큰 사구지역으로 나눌 수 있으며, 각 지역의 사구형상 및 특성이 Figure 1에 정리되어 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 / 내륙 사브카 - 일반적 사구높이 5 to 15m (이동성 적은 45m 이하의 고대 대형사구 위에서 이동)

각 지역의 사구 지형특성과 사구 이동방향과의 관계가 Figure 2에 정리되어 있다. Figure 3은 내륙 사브카 평지 위에 형성된 이동성 없는 대형사구와, 대형사구 위를 이동하는 최근 형성된 이동성 높은 사구를 보여주는 항공사진이다.

사구의 이동속도와 방향은 우세풍 풍향의 함수지만, 평지 또는 넓은 골짜기 등과 같은 거시적 지형특성에 따른 지역적 풍향변화에도 어느정도 영향을 받는다.

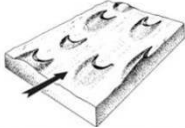
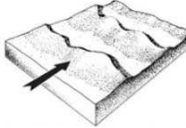
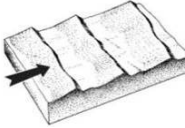
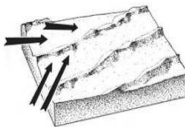
				
Sabkha and low dune	The sabkha surface provides a flat plain similar to that in the sketch. Low dunes and dune ridges are present overlying the plain.		-	
Barchan field	Individual barchan dunes (left) coalesce to form barchanoid ridges (right)		-	
Sand Sheets	-		-	Sand Sheets
Dune ridge	-	A shallow zone of sand forms barchanoid ridges - reshaping ancient transverse dune ridges	Dune ridge	-
Mega Dune	100m high immobile mega barchanoid dunes were formed in ancient and different climates	The upper surface is reshaped barchanoid ridges into mobile barchanoid ridges by the modern prevailing winds	Mega Dune	100m high immobile mega barchanoid dunes were formed in ancient and different climates

Fig. 2. Dune morphology and relation to direction of migration and wind (E. McKee, 1979)

매우 거대한 대형사구는 고대에 형성되었고 이동성이 없다는 것을 주목해야 한다. 이동성이 큰 사구는 일반적으로 높이가 5~15m 정도이며 대형사구를 타고 이동한다.

대형사구지역 내 사구사이에 위치하는 사브카 평지 위에는 이동성이 크고 높이가 낮은 바르칸 사구형태로 이동한다(Figure 4). 사구가 평지 위를 이동하므로 매우 간단한 지형학적 구성을 보여주고 있다. 이러한 간단한 지형학적 특성으로 인해 사구의 이동경로, 속도를 쉽게 계산할 수 있고, 사구의 높이, 길이, 경사, 이동속도의 기본적 상관관계 등을 도출할 수가 있다.

사구의 지형학적 특성을 보다 자세히 정의하기 위해 사구지역 사구형상 연구와 현장조사를 수행하였다. 연구결과 사구지역에 관계없이 모든 사구들이 매우 일정한 기하학적 형태를 가지고 있음을 알 수 있었다. 바람을 맞는 사구 사면은 약 12~20도의 경사각을 가지고

있다. 사브카 평지 내 사구는 경사각이 12도로 일정하며, 사구가 고대에 형성된 이동성 없는 사구 위를 타고 오르는 경우 경사각이 대체적으로 20도를 나타내고 있다. 바람 반대편 사구 사면의 경사각은 약 30도를 나타내는데 이는 느슨한 모래의 안식각(angle of repose) 임을 알 수 있다(Figure 5).



Fig. 4. Lower height dunes migrating over the surface of a much larger, prehistoric dune

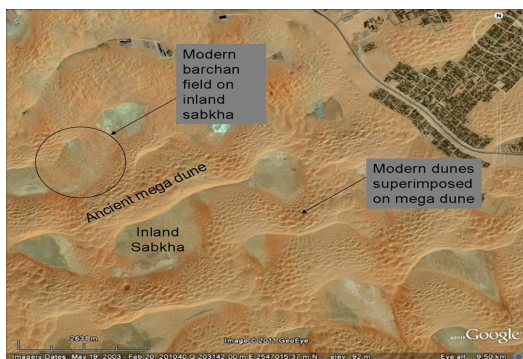


Fig. 3. Ancient mega dunes, modern mobile dunes, inland sabkha plains and mobile barchan dunes near Shah

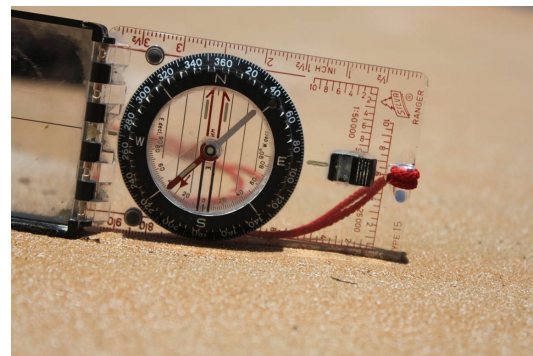


Fig. 5. Leeward dune face - 30°



Dune height \approx 3 m, Advance rate 8 m per year bearing 325°

Fig. 6. Estimation of migration rate and direction using historic satellite imagery

3. 사구 이동경로 및 속도

사구의 이동속도와 경로를 측정하기 위해 2002~2010년의 기간 동안의 항공사진을 비교하여 사브카 평지 위를 이동하는 바르칸 사구의 이동 속도 및 경로를 계산하였다. Figure 6은 2004년과 2010년의 같은 지역(Figure 3에서 원으로 표시된 지역) 항공사진을 비교한 것이다. Figure 6의 예와 같이 각 사구지역 내 여러 구간을 선정하여 각 사구지역 사구의 이동방식을 분석하였다.

과거의 항공사진 분석결과 프로젝트 지역 내 사구들은 일정하게 남동쪽 방향으로 이동함을 볼 수 있었다. 지형학적 영향으로 인해 우세풍 풍향이 지역적으로 약간의 변화는 관찰되었다. 대형사구들은 사실상 움직이지 않고 낮은 사구들은 년 1.5~8m 정도 이동함을 볼 수 있었으며, 사구 높이(H)와 이동속도(M)의 개략적 반비례 관계가 Table 1에 정리되어 있다.

실제로, 4m보다 큰 사구의 경우, 이동속도, M은 약 20/H(m/year)로 관찰되었고, 이와 같이 산정된 이동속도는 이론적으로도 평가되었다. 최소모래 이동모델(minimal

sand transport models)에 근거한 사구이동속도의 이론적 평가는 모래입자가 움직이기 시작하는 한계풍속 이상의 바람 지속시간, 한계풍속 이상이 발생하였을 때의 평균풍속에 대한 바람 전단속도의 분포 등을 고려하여 산정된다. 평가결과 이론적 접근방법과 항공사진으로부터 얻은 측정치와 매우 유사함을 알 수 있었다.

4. 사구 이동 메커니즘

표면 전단응력(풍속의 함수)이 모래입자가 도약(saltation, bouncing and jumping)이나 계류(suspension) 등으로 이동하기 충분할 때 모래바람이 사구 면을 타고 올라가게 된다. 모래바람이 사구의 최고점을 넘으면서 표면전단응력이 급격히 감소하고 모래거품이 발생하게 된다. 그에 따라 상대적으로 큰 모래입자는 바람 반대편 사구 사면에 쌓이게 되고, 입경이 작은 모래입자는 바람을 타고 날아간다. 일반적으로 모래입자의 약 75%가 도약과 계류의 복합 거동으로 이동하고, 나머지 25%는 바람 반대편 사구 사면을 타고 사구 꼭대기에서 creeping으로 무너지며 이동한다.

사구의 최고점을 넘은 후 공기흐름은 흐름특성에 따라 Figure 7과 같이 여러 구간으로 나눌 수 있다. 모래입자가 사구의 최고점을 지나 날아가 바닥에 떨어지고 다시 바닥 면을 따라 도약과 계류의 복합거동으로 이동(re-attached flow)하기 시작하는 지점이 다음 사구가 만들어지는 위치이며, 그 거리는 사구의 높이에 비례한다(Figure 7). 프로젝트 지역 내 사구의 최고점부터 우세풍 방향 쪽에 인접한 사구가 시작하는 지점(toe of slope) 사이의 거리를 위성사진으로부터 측정된 값은 약 7H(H=이동성 높은 사구의 높이)로 비교적 일정하였다.

Table 1. Relationship between Mobile Dune Height and Migration Rate

Mobile Dune Height H (m)	Migration Rate M (m/year)		Volume K = M · H (m ³ /year/linearm)
3	8	24/H	24
4	5.5	22/H	22
5	4	20/H	20
8	3	24/H	24
10	2	20/H	20
15	1.5	22.5/H	22.5

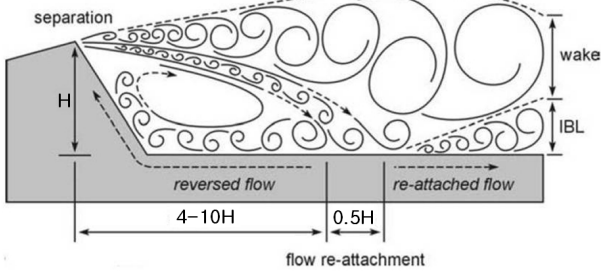


Fig. 7. Lee side flow patterns

이 값은 문헌에 나와있는 값 중 과도하게 작거나 크지 않은 한계치 이상의 풍속조건에서 모래입자가 사구의 최고점에서 날아가는 거리를 측정한 값의 평균치 정도 된다.

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 5~15m 이므로, 모래퇴적 방지공의 폭은 앞에 설명한 것처럼 약 35~105m($7H$) 정도 되어야 할 것으로 추정할 수 있다.

5. 모래 이동량 계산

모래바람 방향에 따라 모래의 이동량은 Figure 8과 같이 사구의 이동속도와 높이로부터 개략 산정할 수 있으며 현장 조사와 항공사진 분석을 통해 Table 1과 같이 계산되었다. 하지만 바람이 철도노선에 직각방향으로 불지 않는다면 실제 모래 침범량은 식 (1)과 같이 감소계수, μ 를 고려하여 산정하여야 한다.

$$\text{Volume} = K\mu \text{ (m}^3\text{/year/linear meter)} \quad (1)$$

여기서, K =우세풍 방향으로 모래 이동량($H \geq 4\text{m}$ 인 경우 $K=20$, $H < 4\text{m}$ 인 경우 $K=22$), μ =철도노선에 대한 우세풍(prevaling wind)의 방향을 고려한 지수이다.

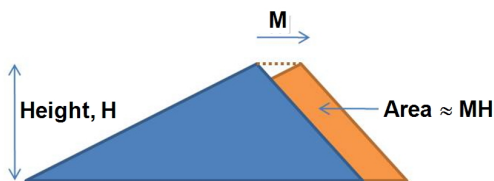


Fig. 8. Relationship between migration rate, dune height and volume of migrating sand

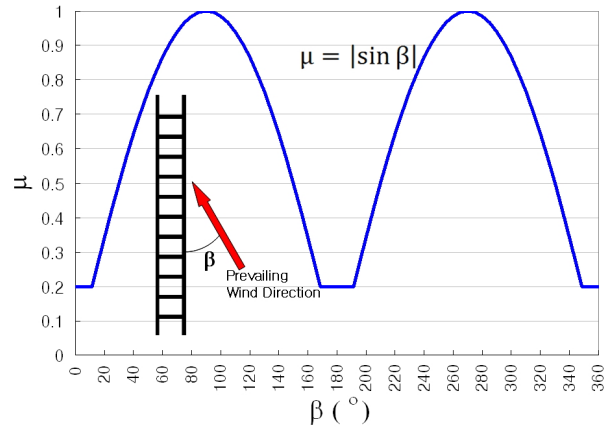


Fig. 9. Incidence factor versus the heading / bearing angle of the trackwork

우세풍과 철도노선 사이의 각도에 따른 모래 이동량 감소계수, μ 의 값은 Figure 9에 나타나 있다. 기본적으로 감소계수, μ 는 sine 함수의 절대치로 산정할 수 있다. 철도 노선이 사구 이동방향과 직각으로 만나는 경우는 μ 값은 1.0이고, 철도 노선과 사구 이동방향이 평행한 경우 모래퇴적 방지공 내에 걸리는 모래의 양은 이론적으로는 거의 없어 μ 값은 0이다. 하지만, 실제로는 지속시간은 길지 않지만 바람의 방향의 변화가 어느 정도 발생하여 방지공 내에 걸리는 모래의 양을 고려하여야 하며, μ 의 최소값을 0.2로 제안하였다.

사우디 아라비아의 경우 약 10~120톤/년의 모래가 침범했다고 알려져 있다(Watson, 1985). 따라서, 본 연구 대상지역에서 철도노선 내로 침범하는 모래의 양을 최대 20m³/년/m(철도 노선 1m 당 약 35톤/년)로 산정하는 것은 보수적인 값이긴 하지만 적절한 것으로 판단하였다.

6. 토론 및 결론

본 연구에서는 문헌조사, 항공사진, 위성사진, 현장답사 등을 통하여 아랍 에미레이트의 초대형사구 지역 내 사구의 이동방향과 이동 속도 산정에 관한 연구결과를 정리하였다.

- (1) 본 조사연구를 통해 초대형 사구지역내에 초대형 사구지역 내 철도공사를 위한 대단위 토공작업을 수행하는 경우, 철도 노선 내로 침범하는 모래의 양은 사구의 높이, 철도 노선과 우세풍 사이의 각도 등에 영향을 받음을 알 수 있었다.

- (2) 본 대상구역내 사구의 최고점부터 우세풍 방향 쪽에 인접한 사구가 시작하는 지점 사이의 거리를 위성사진으로부터 측정한 값은 약 $7H$ (H =이동성 높은 사구의 높이)로 비교적 일정하였다. 결과 값은 기존 결과값에 비해 한계치 이상의 풍속조건에서 모래입자가 사구의 최고점에서 날아가는 거리를 측정한 값의 평균값 정도로 나타났다.
- (3) 사우디 아라비아의 경우 약 10~120톤/년의 모래가 침범했다고 알려져 있으며(Watson, 1985), 대상지역에서 철도노선 내로 침범하는 모래의 양을 최대 $20\text{m}^3/\text{년}/\text{m}$ (철도 노선 1m 당 약 35톤/년)로 산정하는 것은 보수적인 값이긴 하지만 적절한 것으로 판단되었다.
- (4) 아울러 본 연구 대상지역에서 성공적인 철도노선 시공을 위해서는 시공중, 운행중 노선을 따라 추가

모니터링을 수행하여 결과의 Feed Back을 통한 평가가 중요할 것으로 판단되며, 추후 별도 보고할 예정이다.

참 고 문 헌

1. McKee, E. (1979). "Introduction to the study of global sand seas", *A Study of Global Sand Seas, U. S. Geological Survey, Paper 1052*, pp.1-20.
2. Walker, I. J. (2002). "Advances in research on dune-airflow-sand transport dynamics: incorporating secondary flow and sand transport processes", *Proceedings of ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference, International Center for Arid and Semiarid Lands Studies*, pp. 458-462.
3. 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", *J. Eng. Geology*, Vol.18, pp.237-252.

(접수일자 2011. 11. 17, 심사완료일 2012. 8. 28)