

# 도로지반의 공용성 평가를 위한 불포화지반역학의 역할



김 정 수 | 단국대학교 토목환경공학과 석사과정  
박 성 완 | 단국대학교 토목환경공학과 부교수

## 1. 개요

현재까지 국내 도로기초 혹은 하부 지지층으로 활용된 지반재료는 강도적인 측면에서 많은 연구가 활발히 진행된 반면 투수 및 함수특성에 대한 검토는 매우 미미한 실정이다. 일반적으로 도로의 기초 대부분이 불포화된 상태로 존재하는데 이러한 지반은 흙 입자와 물 - 공기 사이의 모세관현상으로 포화된 지반과는 매우 다른 거동특성을 나타낸다. 따라서 실제 지반에서의 강도 및 투수특성과 불포화적인 현실을 고려하기 위해서는 불포화상태 및 물성의 정량화가 필요하다.

한편 국토의 63.7% 이상이 산지로 되어 있어 여름철 집중강우 혹은 태풍의 영향으로 인한 도로주변 사면재해로 도로를 포함하여 관련 구조물들의 피해가 계속적으로 발생하고 있다(장범수, 2012). 또한 산지 및 하천 주변 도로인프라의 파손 복구비용 역시 증가되고 있는 실정이다. 이러한 파괴 사례들을 통하여 도로지반에서의 포화-불포화 상태 거동에 대한 이해가 필요한 바 본 기사에서는 기상 및 강우와 매우 밀접한 관련성이 있는 수리학적 개념들을 중심으로 불포화지반

역학에서 다루는 부분들을 간략하게 소개하고자 한다.

## 2. 강우패턴의 변화

최근 지구온난화의 영향으로 과거와는 다르게 집중호우가 다수 발생하고 있는데 그림 1은 금년 8월 말에 부산에서 발생한 강우로 인한 하천 상황이다. 우리의 집중호우 일수는 1980년대 연평균 60일에 불과했지만 90년대에는 70일, 2000년대에는 82일로 35%나 증가하는 추세에 있다(김지현, 2014). 이러한 현상으로 인하여 도로를 비롯한 배수관련 시설물에 대한 기존 설계기준을 넘기거나 혹은 통수용량을 초과하여 도로 주변에 침수가 빈번히 발생되고 있는 실정이고 최근 이슈가 되고 있는 서울 송파구를 비롯한 여러 도시부 도로의 싱크 홀(Sink-hole) 혹은 동공현상도 반복적인 지하수 상승 및 하강 그리고 급격한 지반배수로 인하여 발생하는 문제인 만큼 도로구조물 기반에서의 포화-불포화상태 변화에 대한 특성이해와 관련 이론의 적절한 적용이 필요한 시점이라고 할 수 있다.



그림 1. 부산지역 집중강우 (박창수, 2014)

### 3. 불포화지반역학

대부분 도로기반시설에서 흔히 접할 수 있는 대부분의 얇은 깊이의 지반은 그림 2와 같이 완전한 포화상태의 지반 또는 완전한 건조상태의 지반도 아닌 불포화상태로 존재한다. 그림에도 불구하고 대부분의 도로를 비롯한 얇은 깊이에서의 지반 및 사면설계 시 지반을 건조 또는 포화상태로 간주하는 것은 보수적이고 경험적인 해석방식에 대한 믿음과 시간적인 고려가 없는 결정론적 안정성 해석에 기인한다. 그러나 최근 강우를 비롯한 수리학적 특성의 고려와 수분의 변화에 따른 역학적인 변화상태의 시간적 고려 등 다양한 환경적인 요인들을 고려하기 위해서는 상태변화를 적절하게 반영할 수 있는 이론과 이를 적용할 수 있는 해석 및 관련 설계기술들이 필요하다.

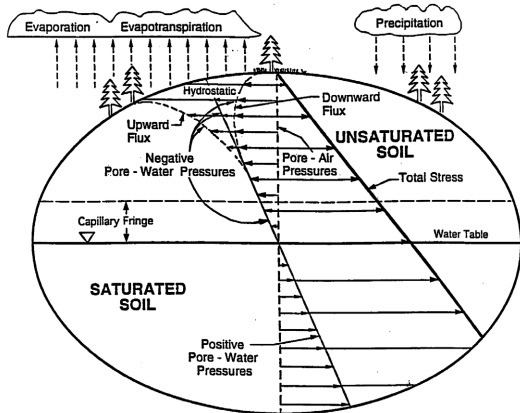


그림 2. 포화토와 불포화토에 대한 개념도 (After Fredlund, 1996)

### 3.1 포화와 불포화상태 지반의 특징

기존의 포화토와 불포화토의 거동 중 큰 차이는 불포화토는 포화토의 경우 보다 공기의 상(Air-phase)과 공기와 물의 경계면 등 두 개의 상태가 더 존재한다는 것이다. 기존 포화토 이론에서 공기를 제외하고 흙은 2상(흡입자, 수분) 구조이지만 불포화토에서는 공기와 물의 접촉면인 수축막이 생겨 4상(흡입자, 수분, 공기, 수축막)의 구조를 가진다. 여기에서 수축막(Contractile Skin)은 수압( $U_w$ )과 공기압( $U_a$ )의 평형상태를 유지하기 위한 역할로서 경계면에서 인장력을 발휘하게 되는데 불포화상태 수리-역학적인 지반거동에 매우 큰 영향을 미치게 된다.

### 3.2 불포화토의 거동특성

불포화토의 거동은 포화토와 다르게 흙 속의 공기를 고려하기 때문에 그 거동을 예측하기가 매우 어렵다. 일반적으로 포화토에서는 실내시험을 이용하여 대상현장의 토질정수들을 획득할 수 있고 이를 활용한 해석을 통하여 해당 지반의 응력상태와 지반의 거동을 예측하지만 불포화상태에서는 흙 속의 공기함량과 수압의 변화 또는 간극 크기의 영향으로 인하여 실내시험을 통해 필요한 지반정수의 획득이 상대적으로 용이하지 못하다. 또한 지반의 함수비나 포화도의 변화에 따라서 비선형적으로 변화하기 때문에 강우 또는 증발에 의해 변화하는 상태를 예측하여야 한다. 지난 40년간 실험을 통하여 함수비의 변화에 따른 불포화토의 상태정수를 구하고 적합한 모델을 찾기 위한 많은 연구들이 선행되어왔다. 현재는 불포화상태의 함수비 변화에 따른 지반 내 유효응력을 고려하기 위한 선행기술로 흡수력과 함수비의 관계를 정량화를 위한 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic curve, 이하 SWCC)의 획득과 적용이 공학적 적용성과 역학-경험적 설계 실용화 측면에서 적합성이 매우 높은 것으로 알려져 있다.

### 4. 불포화 함수특성곡선의 개념

함수특성곡선(SWCC)은 일반적으로 함수비(체적 함수비 :  $\theta$ )와 모관흡수력(Matric Suction)의 관계로 정의된다. 평형상태일 경우 흙 속의 물은 간극물, 간극의 크기 그리고 흡수력의 변화에 따라 변화한다. 즉 함수특성곡선(SWCC)은 기하학적 조건이 동일한 시료일 경우 흡수력에 대한 수분의 보유능력을 표현하므로 수분보유곡선(Soil-Water Retention Curve, SWRC)으로 표현되기도 한다.

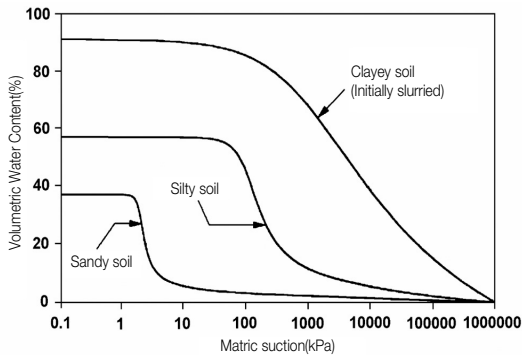
지반을 구성하는 대표적 흙으로 점토, 실트, 그리고 모래의 개략적인 함수특성곡선은 그림 3(a)와 같다. 또한 포화체적함수비( $\theta_s$ )와 공기가 물을 밀어내며 흙 입자의 간극을 통과하는 순간인 공기함입값

(Air Entry Value, AEV)은 대체적으로 흙의 소성이 증가함에 따라 증가함을 볼 수 있다. 즉 세립분이 많을수록 그림 3(a)와 같이 어떠한 특정 흡수력에서 수분보유량은 커지고 곡선의 경사는 완만하게 된다.

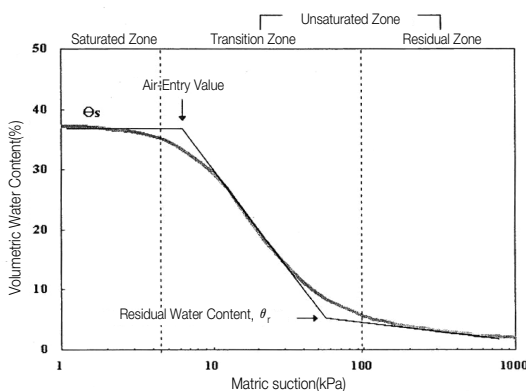
그림 3(b)는 전형적인 함수특성곡선의 형태로 포화영역은 초기치인 공기함입값을 초과할 때까지는 흙 속의 간극 밖으로 물이 유출되지 않는다. 또한 전이영역은 흙 속의 간극으로 공기가 계속 유입되면서 물이 유출되어 지반의 모관흡수력은 증가한다. 여기서 함수특성곡선의 가장 중요한 요소이며, 지반의 고유한 특징인 곡선의 경사가 정해진다. 여기에 나타나는 공기함입값은 포화된 지반에 처음으로 공기가 간극으로 유입되기 시작하는 흡수력이다. 곡선의 변곡점은 AEV와 잔류함수비를 결정하는 중요한 요소가 된다.

마지막으로, 잔류영역은 흙 속으로 공기의 흡입이 계속되면 모관흡수력이 지속적으로 증가한다. 그러나 어느 정도의 모관흡수력이 증가하여도 더 이상의 물이 추출되지 않는 함수비가 존재하게 되며 이때의 함수비를 잔류함수비라 한다.

그림 4와 같이 지반의 불포화 함수특성은 매우 비선형적이며 건조와 습윤과정이 다른 현상과 내부적인 작은 범위의 반복적인 스캐닝커브(Scanning Curve)를 포함하고 있어 잠재적인 내부 복잡성을 내포하고 있다. 함수특성곡선 상에서 건조와 습윤과정에서의 경로가 서로 다르게 나타나는 현상을 이력현상(Hysteresis)이라 한다. 여기서 동일한 함수비를



(a) 토질별 함수특성곡선



(b) 포화대별 함수특성곡선

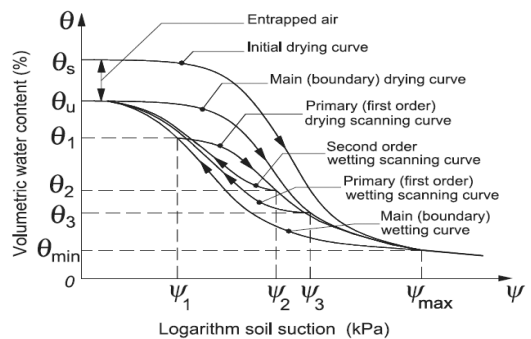


그림 4. 함수특성곡선의 이력현상 (Pham et al, 2003)

그림 3. 불포화 함수특성곡선 예 (Fredlund and Xing, 1994)

기준으로 함유할 수 있는 흡수력이 건조과정보다는 습윤과정일 때 더 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

이력현상의 원인들은 주로 흙 내부 간극에서의 잉크병효과와 물과 흡입자간 접촉각의 변화 등에 기인한 것으로 알려져 있다. 잉크병효과는 물의 배수에 해당되는 함수특성곡선의 건조과정에서 작은 간극이 영향을 미치지만 반대로 습윤과정에서는 상대적으로 큰 간극들이 영향을 많이 미쳐 수분들이 들어가고 나가는 물리적인 과정이 다르게 나타나고 있다.

이력현상의 또 하나의 원인으로 기체와 액체의 접촉면을 기준으로 접촉각의 변화로 알려져 있는데 고체-액체-기체의 접촉면에서 습윤상태 접촉각이 건조상태 접촉각에 비해 항상 큰 값을 가진다. 경사진 고체 표면에 물방울이 떨어지면 중력에 의해 물방울이 정상상태에 도달할 때 물방울의 흐름방향으로 생기는 습윤대(Wetting Front)는 상대적으로 큰 접촉각으로 특징지어지지만 흐름방향의 뒤쪽에 존재하는 건조대(Drying Front)는 습윤상태보다 작은 접촉각을 가지게 된다.

### 5. 함수특성실험

불포화상태 지반 내부의 간극에는 물과 공기가 함께 존재하며 간극 속 수분이 빠져나갈수록 흡수력이 증가하고 간극 속에 물이 찰수록 흡수력은 감소한다. 이러한 이유로 물과 공기 그리고 흙 입자간의 에너지 평형이 이루어지게 된다. 여러 방식의 실험이 가능하지만 현재 가장 일반적으로 적용되고 있는 방식은 축전환 기술로 실험기 개요도는 그림 5와 같다 (Fredlund, 2012).

실험기는 공기압을 제어하는 외부장치인 패널과 대상 시료를 공기압으로 구속시키는 셀 부분으로 구분할 수 있다. 셀의 상부를 통하여 공기압이 대상 시료에 직접 가해짐으로서 시료 내부의 간극수는 세라믹 디스크를 통하여 배출된다. 이때 배출된 간극수의 양을 측정하여 공기압의 증가 또는 감소에 따른

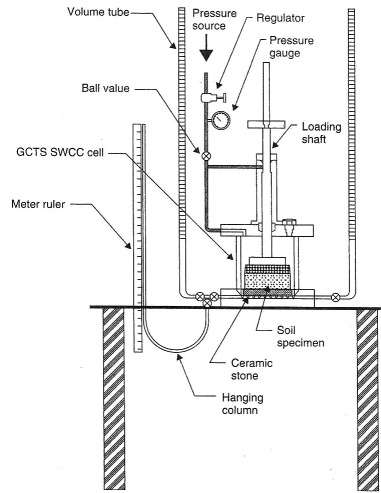


그림 5. 함수특성곡선 시험장치 개요도 (Fredlund et al. 2012)

대상 시료의 함수량을 측정할 수 있다. 각 흡수력의 단계에 따라 수두의 변화를 통한 해당 체적함수비를 측정함으로써 하나의 함수특성곡선을 획득할 수 있게 된다.

실험기는 일반적으로 세라믹 디스크의 공기함입치의 크기에 따라 최대 1500KPa의 범위까지 압력제어가 가능하며 특수하게 제작된 경우 그 이상 범위의 실험도 가능하다. 또한 압력을 점증적으로 증가시켜 건조경로에 대한 시험을 실시한 후 압력을 감소시킴으로서 습윤경로에 대한 함수비-흡수력 관계를 연속적으로 획득할 수 있다. 이후 적정 비선형 모형들을 통하여 연속적인 관계를 구성하고 이를 수식화하여 구성방정식으로 표현하며 이후 모델링이나 해석적인 방식에 활용하게 된다.

### 6. 강우시 도로구조물에 대한 침투해석 사례

도로구조물과 사면지반을 구성하는 지반재료들은 불포화상태로 존재하며 반복적인 강우로 인하여 공용 중인 도로구조물의 경우 기 존재하는 균열과 조인트로 유입되는 침투수에 의해 지반내 함수비가 변화함에 따라 도로표면에서 소성변형, 균열, 침하, 그

리고 동결/융해 등의 문제점들이 일어날 가능성을 내포하게 된다.

예로 도로구조물 주위 성토 및 절도사면내로 유입되는 침투수는 사면내 유효응력을 감소시키며 침투수에 의한 간극수압의 증가로 재료강도가 감소하게 된다. 간극수압의 증가는 도로구조물내의 점진적인 균열과 침하 그리고 포트홀을 유발시키기도 한다. 한편 편질/편성부에서 성토 다짐된 하부포장층이 지하수의 흐름을 막아 인위적인 피압대수층 역할을 하기도 하는데 그림 6과 같다.

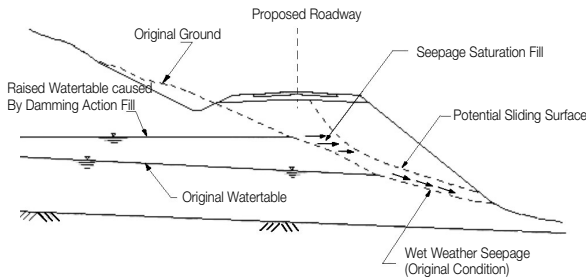


그림 6. 다짐된 성토체 내 유입된 침투수에 따른 불안정성 (After Cedergren, 1977)

이때 다짐된 성토체는 절도부에서 유입되는 지하수의 흐름을 막아 결국 지하수의 상승을 초래하며 이는 성토체의 전단강도를 감소시키기도 한다. 또한 강우 시 유입된 침투수는 도로하부인 기층, 보조기층, 노상 등으로 침투하기도 하고 도로표층의 균열, 조인트, 길어깨 등을 통해 침투하기도 한다. 이로 인하여 입상재료는 과도한 함수비 상태를 유지하여 포장층 피로손상을 촉진시킬 가능성이 높아진다.

이후에서는 앞서 언급한 불포화지반역학 이론과 현상들을 도로지반에 적용한 사례를 소개하고자 한다. 도로구조물의 주변지반 및 균열 등으로 유입되는 침투수를 해석으로 적용한 사례이다(성열정, 2009).

해석은 노상재료 SW와 SM에 대하여 표층균열을 통한 침투와 성토부 사면을 통한 침투로 적용하였으며 보조기층재료는 GW재료를 적용하였다.

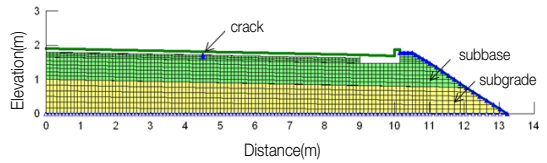
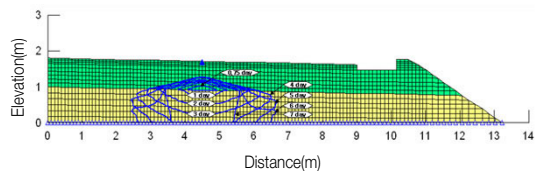


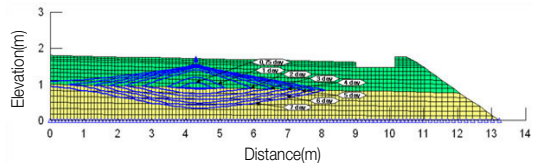
그림 7. 도로구조물의 2차원 유한요소해석 모델망 (성열정, 2009)

침투해석조건은 함수특성곡선시험을 통하여 획득한 습윤경로 함수특성곡선과 구속압력이 고려된 불포화투수계수를 적용하였다. 지하수위는 강우 시 침투거동에 영향을 최대한 배제하기 위해 노상저면에서 지하 2m 하부에 존재하는 것으로 가정하였다. 균열은 횡방향으로 4.5m 지점에 존재하며 균열의 폭은 유한요소망의 한 점을 통해서 유입되는 것으로 가정하였다.

그림 8은 강우 시 균열을 통한 침투수의 시간별 포화대 형성과정을 보여준다. 그림 8(a)는 3일 강우 지속시간일 때 입상재료 두 층의 경계면에서 최대범위의 포화대가 형성되었다. 반면 그림 8(b)는 지속시간에 따라 두 층의 경계면에서 포화대 형성범위가 증가함을 보였으며 7일 경과 후에도 보다 큰 범위의 포화대를 형성할 것으로 예측되었다.



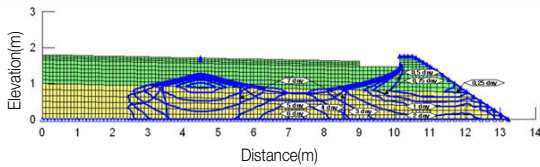
(a) SW 노상에서 상부균열에 의한 침투수 유입 시



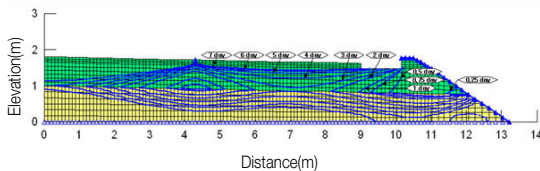
(b) SM 노상에서 상부균열에 의한 침투수 유입 시

그림 8. 균열을 통한 침투수의 시간별 포화대 형성 (성열정, 2009)

그림 9는 강우 시 균열과 사면에 통하여 유입되는 침투수의 시간별 포화대 형성과정을 보여준다. 그 결과 많은 양의 침투수가 사면과 균열을 통하여 유입되어 포화대를 형성함을 확인할 수 있었다. 이는 간극수압이 발생함을 간접적으로 보여주며 도로구조물의 소성변형, 균열 및 침하 등의 문제를 야기하고 도로구조물의 수명을 단축시킬 수 있음을 간접적으로 보여주고 있다.



(a) SW 노상에서 균열과 사면에 의한 침투수 유입 시



(b) SM 노상에서 균열과 사면에 의한 침투수 유입 시

그림 9. 균열과 사면을 통한 침투수의 시간별 포화대 형성 (성열정, 2009)

## 7. 결론

앞서 살펴본 바와 같이 최근 기상변화를 고려한 도로지반에 대한 대응적인 고려사항으로 환경하중을 시간에 따라 고려하기 위한 포화-불포화 함수상태에 따른 역학적 혹은 수리학적 검토가 적절하게 이루어지는 것들이 요구될 가능성이 높다. 특히 도로 및 공항과 같이 외부에 노출된 육상교통시설물의 경우 기반체를 구성하는 지반에 표면침투로 인하여 상대적으로 함수의 변동에 취약하고 측면침투에 대한 적절한 배수 등이 중요하여 설계자와 관련 엔지니어들의 관심과 교육이 필요하다.

우선적으로 검토되고 재고해야 할 부분은 과연 현

행 설계기준과 평가방법들이 적절한지 여부와 필요하다면 시간에 따른 도로지반의 수리-역학적 공용성을 예측하는데 다양한 해석기법과 이에 따르는 실험들이 요구된다. 마지막으로 이제는 기존의 개념에서 전환하여 역학적이고 수리학적인 고려가 동시에 이루어지는 보다 일관성 있고 효율적인 방식의 교통시설물 지반설계가 시급한 바 불포화지반역학의 적절한 수준에서의 적용이 필요하다고 하겠다.

## 참고 문헌

1. 김지현(2014) “갈수록 세지는 비... 도시홍수 무방비 노출”, 연합뉴스
2. 박창수(2014) “부산에 호우경보 시간당 100mm”, 연합뉴스
3. 성열정(2009) “불포화특성을 고려한 다층지반의 배수성능평가”, 단국대학교 석사학위논문
4. 장범수(2012) “비탈면 재해경감을 위한 사고의 전환”, 재난안전, 국립방재연구원, Vol. 14(4), pp. 16-21
5. Cedergren, H.R. (1977). Seepage, Drainage and Flow Nets, John-Wiley Inc. New York, US..
6. Fredlund, D.G and Xing, A. (1994). “Equations for the Soil-Water Characteristic Curve.” canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532.
7. Fredlund, D. (1996), “The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics.” The Fourth Spencer J. Buchanan Lecture, Texas A&M University, Texas, U.S.
8. Fredlund, D.G H Rahardjo, Fredlund, M.D. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. John-Wiley Inc..
9. Pham, H.Q., Fredlund, D.G., and Barbour, S.L. (2003), “A Practical Hysteresis Model for the Soil-water Characteristic Curve for Soils with Negligible Volume Change” Geotechnique, 53(2), pp. 293-298.