

서울주변에 분포한 화강암류 풍화토층의 물리적 성질

Physical properties of granitic weathered soil on natural terrain around Seoul city

김경수¹⁾, Kyeong-Su Kim

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원, Principal Researcher, Geologic Environmental Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

SYNOPSIS : Various soil tests were performed in the laboratory after soil samples were obtained from natural terrains distributed on the granitic rocks where are located in Mt. Bukhan, Mt. Surak and Mt. Gwanak around Seoul. Through the comparison of soil properties in each mountain, the difference of soil properties in a similar geological condition was investigated. According to the result of soil test, the soils were generally classified into calyey and silty sands with a well grade. Soil densities are ranged from 2.62kg/cm³ to 2.67kg/cm³, and water contents of soils are ranged from 3.77% to 31.12%. These values are not sorted locally. The wet unit weights of soils are ranged from 1.092kg/cm³ to 1.814kg/cm³. It has a big difference between the average values because that of Mt. Bukhan is 1.604kg/cm³ and those of Mt. Surak and Mt. Gwanak are 1.500kg/cm³ and 1.331kg/cm³, respectively. The internal friction angles are ranged from 31° to 39° and the cohesions are ranged from 1.57kPa to 8.63kPa. The shear strengths are too high and similar in all regions. The coefficients of permeability are ranged from 3.07×10⁻³cm/sec to 4.61×10⁻²cm/sec. So, these soils are evaluated as a middle to high permeable ground. On average, the value of Mt. Bukhan is 1.47×10⁻²cm/sec and the values of Mt. Surak and Mt. Kwanak are 1.29×10⁻²cm/sec and 1.66×10⁻²cm/sec, respectively.

Key words : around Seoul, natural terrain, weathered soil, physical properties

1. 서 론

자연사면에서 암반층 위에 존재하는 상부토층은 대부분 기반암의 풍화현상에 의해 형성된 것으로서 이들은 풍화정도 및 지질조건에 따라 물리적 및 공학적 특성이 달라진다(Hutchinson, 1988). 그리고 상부토층은 기반암 상부의 풍화잔류토와 퇴적물질 및 일부 풍화암편으로 구성되는데, 이들 물질들은 암석 풍화에 의하여 생성되므로 암석을 구성하고 있는 광물성분에 따라 토질특성이 다르게 나타난다(김원영 외, 1998; 김경수 외, 2000). 우리나라의 경우 여름철의 집중호우에 의해 발생하는 유동성산사태들은 대부분 암반층 위의 토층사면에서 발생하고 있으므로 토층의 특성을 파악하는 것은 사면의 안정성과 관련하여 매우 중요한 사항이다. 만약 내적으로 취약한 지질구조 및 상부토층을 가지고 있는 자연사면에 집중강우나 인위적 절개 등의 외적요인이 가해질 경우 사면의 불안정성은 증대될 것이다. 그리고 그 주변에 위치한 도로, 철도, 교량, 터널 및 항만시설 등 토목구조물의 안정성에도 직접적으로 영향을 미치게 된다. 이 연구는 이러한 관점에서 대부분 화강암류로 분포되어 있는 서울주변의 북한산, 수락산 및 관악산의 자연사면 토층을 대상으로 토층시료를 채취한 후 실내에서 여러 토질시험을 수행하여 각 지역별

토질특성을 비교분석함으로써 유사한 지질조건이더라도 토질특성이 어떻게 다른가를 고찰해 보고자 하였다. 연구지역은 일부 화강편마암과 편암류가 분포하기는 하나 대부분이 화강암류로 구성되어 있는 서울 인근의 3개 산지지역 즉, 북한산, 수락산 및 관악산지역의 자연사면을 대상으로 하였으며, 총 44개 지점으로부터 토층시료를 채취하여 실내에서 여러 토질시험을 수행하였다. 그리고 이들 시험결과를 토대로 자연사면 토층지반의 지역별 토질특성을 비교분석하였다.

2. 지질개요

북한산지역은 정상을 기준으로 북서방향 일부분의 낮은 구릉지대에서만 호상편마암이 발달하고 있을 뿐 대부분 회백색의 조립질 화강암이 분포하고 있다. 토층의 발달은 수 cm에서 수십 cm까지의 두께로 비교적 얇은 깊이로 분포하고 있으며 표토 바로 아래로 풍화말기암상이 발달하고 있다. 그리고 화강암이 분포하고 있는 전 지역은 거대한 암반으로 구성되어 있으며 계곡부까지도 노두를 형성하고 있거나 거대한 크기의 전석층이 쌓여 있으며 토층의 발달은 미미한 편이다.

수락산지역은 모두 담홍색의 조립질 화강암으로 이루어져 있다. 대상지역은 대부분이 암반으로 분포되어 있으며 토층은 수 cm에서 수십 cm까지의 두께로서 비교적 얇은 깊이로 분포하고 있다.

한편, 관악산지역은 대부분 주라기 화강암이 분포하고 있으나 산정을 중심으로 남동측과 서측은 선캠브리아기 흑운모 편마암으로 구성되어 있다. 이 지역에는 노두가 잘 발달되어 있는데 이들은 능선부와 계곡부에서도 잘 관찰되고 있다. 한편, 산사면에는 집괴상의 전석이 상당히 넓은 범위에 걸쳐 발달하고 있으며 노두분포지 주변 뿐 아니라 2~3부 능선까지 분포하고 있다. 토층은 그 두께가 매우 얇아 평균 30cm 정도이며 일부 계곡부에는 계곡 봉적층(valley colluvium)이 소규모로 분포하고 있지만 두께가 수십 cm로서 상당히 얇은 편이다.

그림 1은 연구대상인 서울주변 주요 산지지역의 지질도를 나타낸 것이다.

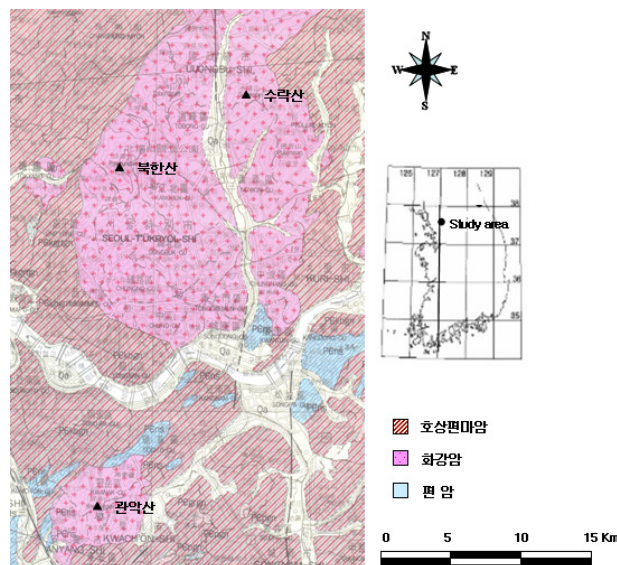


그림 1. 연구대상 및 주변 지역의 지질도(이병주 외, 1999).

3. 시료채취 및 토질시험

자연사면에 분포한 기반암 상부토층의 토질특성을 파악하기 위하여 연구지역인 북한산, 수락산 및 관악산지역 자연사면 토층지반의 총 44개 지점으로부터 교란 및 불교란시료를 채취하였다. 시료채취는 지역별로 분포 면적비율을 고려하여 비교적 일정한 빈도로 채취함으로써 토질특성이 균등하게 평가될 수 있도록 하였다. 채취한 시료는 북한산, 수락산 및 관악산지역이 각각 17개, 13개 및 14개로 구분된다.

시료는 표토를 제거한 후 40~60cm 깊이의 토층에서 교란시료와 불교란시료로 구분하여 채취하였다. 불교란시료는 스테인리스로 제작한 직경 10cm, 높이 6cm 크기의 원통형몰드를 이용하였다. 특히, 투수 시험용 불교란시료는 직경 10cm, 높이 13cm 크기의 원통형몰드를 사용하였다. 그리고 채취된 시료는 현장조건이 최대한 유지되도록 밀봉한 상태로 실험실에 운반하였다. 교란시료로는 밀도, 함수비, 액성한계, 소성한계 및 입도 등의 물성시험을 실시하고 입도시험 결과로부터 유효경, 균등계수 및 곡률계수 등을 산정하여 토층이 지니고 있는 물리적 성질을 파악하였다. 그리고 불교란시료로는 간극비, 간극률, 포화도, 단위중량, 전단강도 및 투수계수 등의 공학적 특성을 평가하였다.

4. 토질특성 분석

4.1 토질분류

그림 2는 연구지역의 토층을 통일분류법(USCS)에 의하여 구분한 것이다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 연구지역의 토층은 SW-SC, SW, SC 및 SP-SC 등으로 전반적으로는 점토질모래지반이 우세하고 일부는 SW-SM 및 SP-SM으로서 실트질모래지반으로 분류된다. 이를 지역별로 살펴보면, 북한산지역은 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 58% 정도가 SW-SC와 SW로서 입도가 양호한 모래 및 점토질모래이고 21% 정도는 SP-SM과 SP로서 입도가 불량한 모래이거나 실트질모래로 구성되어 있다. 수락산지역은 그림 2(c)에서와 같이 38%정도는 SW-SC와 SW로서 입도가 양호한 모래 및 점토질모래이고 나머지 62% 정도는 SP-SC 및 SP로서 입도가 불량한 모래질지반으로 분류되었다. 그리고 관악산지역은 그림 2(d)에서와 같이 SW-SC, SW 및 SW-SM은 52% 정도이고 SP-SC, SP 및 SP-SM은 48% 정도인 것으로 나타났다.

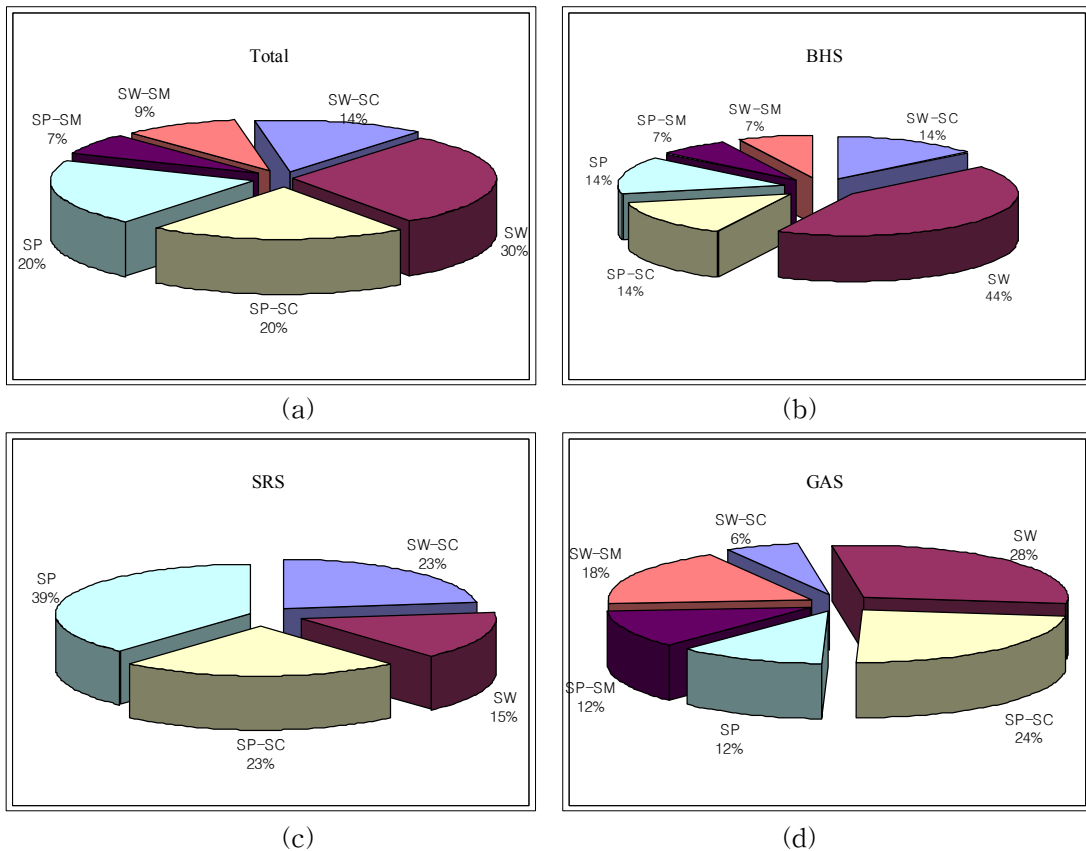


그림 2. 통일분류법에 의한 지역별 토질분류 : (a), 전지역; (b), 북한산지역; (c), 수락산지역; (d), 관악산지역

4.2 기본물성

그림 3은 연구지역 토층에 대한 물리적 성질을 지역별로 대비한 결과이다. 밀도는 흙입자에 포함된 광물들의 종류와 함유비율에 직접적으로 기인되는 물성인데, 전체적으로는 2.62~2.67kg/cm³의 범위로서 평균 2.65kg/cm³이다. 그리고 지역별로 특별히 대비되지 않는다(그림 3(a)). 자연함수비는 3.77~31.12%의 범위로서 전체적인 평균은 15.82%이다. 지역별로는 북한산지역의 토층이 평균 17.22%로서 가장 높고 수락산지역은 15.63%이며, 관악산지역이 14.65%로서 가장 낮은 결과를 나타내었다(그림 3(b)). 흙입자들의 구조 및 배열상태에 기인되는 간극률은 평균치를 기준으로 할 때 관악산지역의 토층이 86.61%로서 수락산지역의 81.02% 및 북한산지역의 74.22%에 비해 가장 큰 것으로 나타났다(그림 3(c)). 이에 반해 포화도는 간극률과는 반대적으로 평균치를 기준으로 할 때 관악산지역의 토층이 30.09%로서 수락산지역의 39.01% 및 북한산지역의 49.35%에 비해 가장 낮은 것으로 나타났다(그림 3(d)).

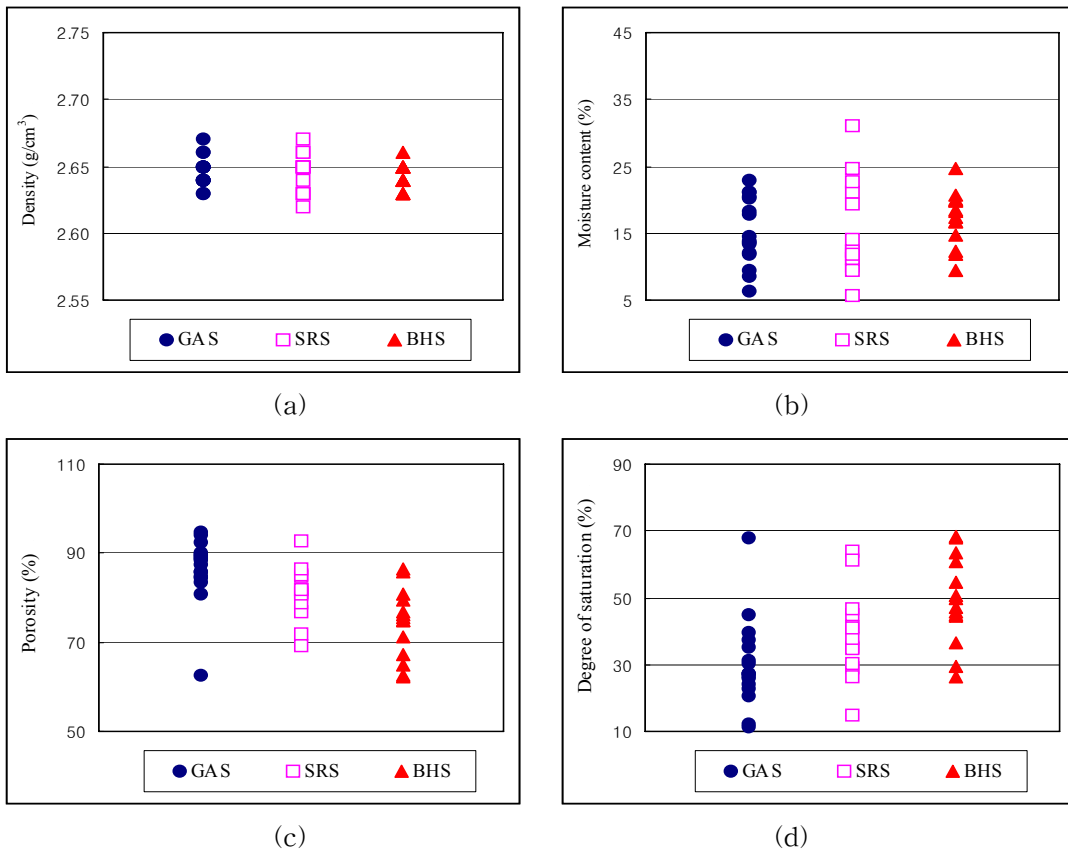


그림 3. 지역별 토층시료의 물리적 성질: (a), 밀도; (b), 함수비; (c), 간극률; (d), 포화도

흙입자에 함유된 점토광물 등의 함유비는 X-ray 회절분석법 등으로 알 수 있으나 토질시험에 의하여 액성한계와 소성지수를 소성도에 도시함으로써 점성토에 포함된 우세한 점토광물을 개략적으로 판단할 수도 있다. 이에 개략적 활동가능성의 판별을 위해 연구지역의 토층시료에 대한 시험결과를 지질별로 구분하여 그림 4와 같이 소성도에 도시하였다. 총 44개 토층시료 모두 활성점토인 몬모릴로나이트(montmorillonite) 영역에는 속하지 않음을 알 수 있다. 그리고 대부분 비활성점토인 카올리나이트(kaolinite)이거나 비교적 활성도가 낮은 일라이트(illites)의 영역으로 점시되는 것으로 보아 연구지역은 비교적 활성도가 낮은 토층지반인 것으로 평가된다.

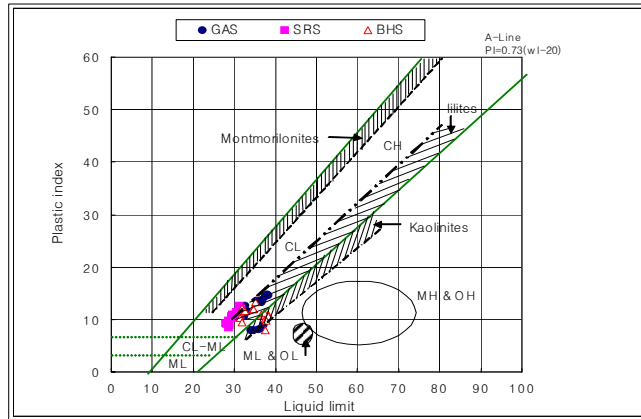


그림 4. 소성도에 의한 지역별 토층시료의 액성한계와 소성지수의 관계(modified Casagrande, 1948; Mitchell, 1976).

입도분포는 다른 지역과 비교하여 퇴적물이 쌓인 과정이나 역사를 추정할 수 있으며, 흙의 조직에 의한 물성을 파악하는데 이용되는 매우 중요한 성질로서 입도 분포곡선은 입자의 크기 및 분포형태를 알 수 있다. 총 44개 토층시료에 대한 입도분석을 실시한 결과 입도분포곡선은 대체로 완만한 기울기를 보이고 양호한 입도분포를 보이는 것으로 나타났다. 입도분포곡선과 함께 유효경, 균등계수 및 곡률계수 등은 기본적인 토질 파라미터를 결정하는 중요 요소의 하나인데, 통일분류법에서는 입도분포곡선으로부터 구한 균등계수가 4내지 6보다 크고 곡률계수가 1에서 3의 범위에 존재할 경우 입도분포가 양호한 것으로 평가한다. 시험결과 수락산지역의 1개를 제외한 모든 시료가 균등계수는 4~18의 범위를 보인 반면, 곡률계수는 10개 시료가 1 미만인 것으로 나타나 불량한 입도조건을 가지는 것으로 나타났다.

그림 5는 모든 토층시료를 지역별로 구분하여 삼각좌표로 나타낸 것이다. 대부분 모래크기 입자들의 구성비가 높고 실트나 점토크기의 세립들의 함유비율은 6% 이내로서 비교적 낮은 편이다. 지역별로는 특별히 대비되지 않으나 수락산지역이 다른 두 지역에 비해 자갈을 포함한 조립질이 우세하고 관악산지역은 다른 두 지역에 비해 세립질의 함유비율이 더 높은 것으로 나타났다.

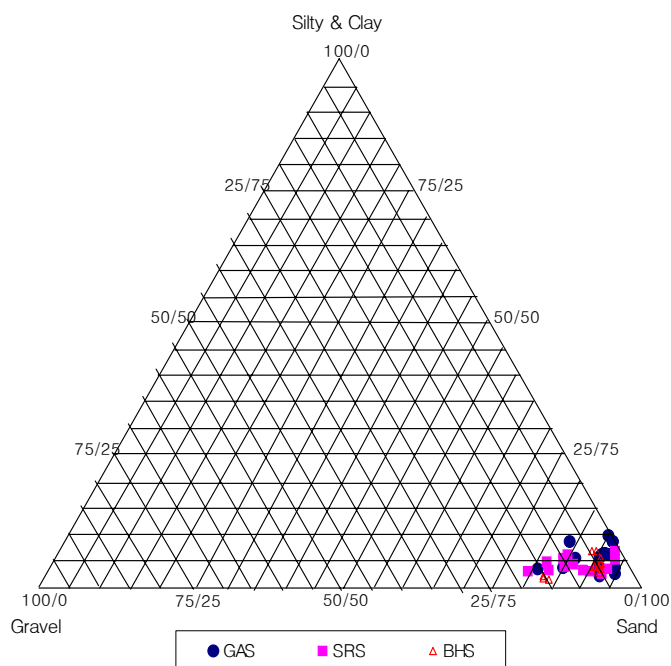


그림 5. 삼각다이어그램에 의한 지역별 토층시료의 입도분포

4.3 간극비 및 단위중량

그림 6은 간극비 및 건조단위중량을 지역별로 대비하여 나타낸 것이다. 토층에서 간극비와 건조단위중량은 상호 반비례적 관계를 가지는 것으로 알려져 있는데, 그림 6에서 보는 바와 같이 평균치를 기준할 경우에도 간극비가 큰 관악산지역의 토층은 가장 작은 건조단위중량을, 그리고 간극비가 가장 작은 북한산지역의 토층은 가장 큰 건조단위중량으로써 서로 반비례적인 관계를 보였다. 그리고 이러한 양상은 습윤단위중량 및 포화단위중량에서도 거의 유사한 경향성을 보였다. 한편, 지질조건이 동일한 토층에서는 간극비가 크면 느슨한 지반상태이고 단위중량이 크면 조밀한 지반상태를 의미하는데, 이러한 기준으로만 볼 때 북한산지역의 토층지반은 수락산지역 및 관악산지역에 비해 상대적으로 조밀한 상태의 토층지반으로 분포하고 있음을 알 수 있다.

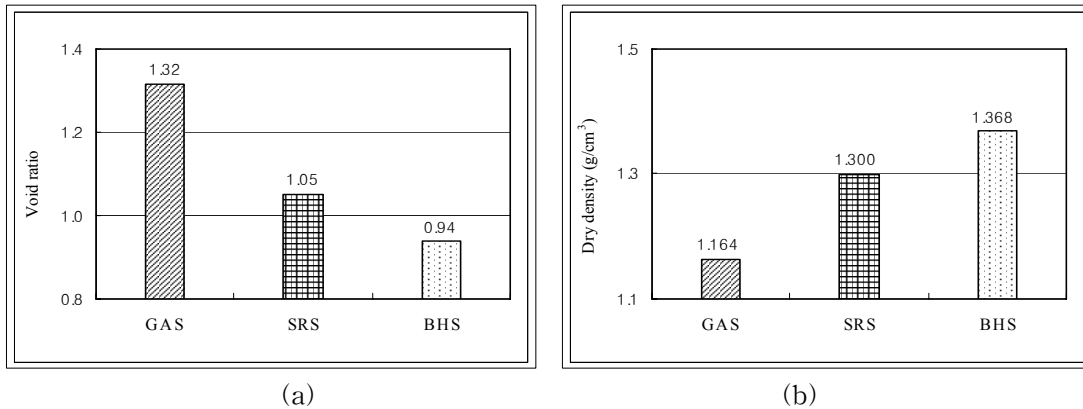


그림 6. 지역별 토층시료의 간극비 및 건조단위중량: (a), 간극비; (b), 건조단위중량.

4.4 전단강도

직접전단시험결과 점착력은 1.57~8.63kPa의 범위로서 평균은 4.08kPa인 것으로 나타났는데, 이는 Holtz and Gibbs(1956)에 의하면 대체로 다짐도가 중간정도인 모래질지반에 해당하며 실트와 점토를 함유한 혼합토로서 대체로 적은 점착성분을 지니고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 시험결과를 지역별로 구분하여 점착력과 전단저항각을 나타낸 것이다. 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 점착력은 평균치를 기준으로 할 경우 북한산지역의 토층이 가장 크고 관악산지역 및 수락산지역의 순으로 나타났다. 한편, 전단저항각은 31~39°의 범위로서 평균 35° 정도로서 비교적 큰 토층지반으로 분류되는데, 그림 7(b)에서와 같이 평균치를 기준으로 할 경우 점착력과는 다르게 북한산지역의 토층이 가장 작고 관악산지역 및 수락산지역의 순으로 큰 것으로 나타났다.

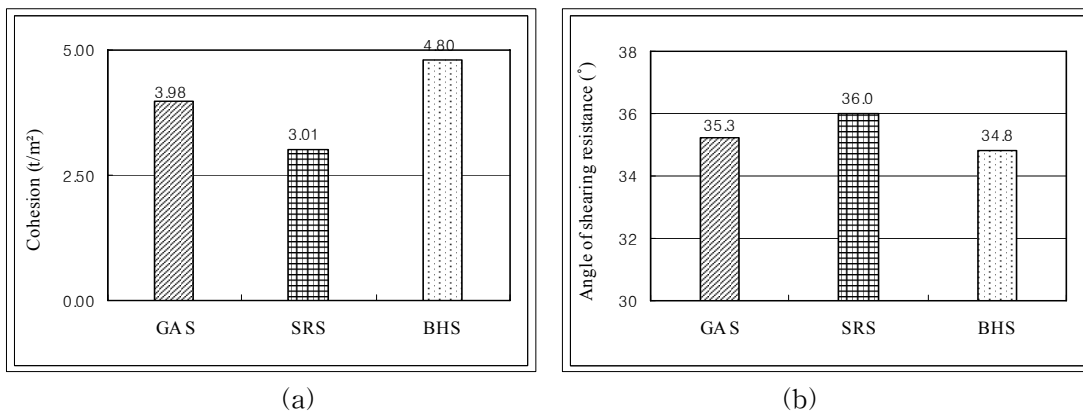


그림 7. 지역별 토층시료의 전단강도: (a), 점착력; (b), 전단저항각.

4.5 투수계수

투수시험결과로부터 산정된 연구지역 44개 토층시료의 투수계수는 $3.07 \times 10^{-3} \sim 4.61 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 범위로서 평균은 $1.49 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 정도인데 이는 Darcy(1856)에 의하면 대부분 세립질모래~점토질실트 정도의 투수계수에 해당하는 것으로서, 연구지역의 투수성은 보통~빠른 정도의 지반인 것으로 평가되었다. 이처럼 빠른 투수성지반은 강우가 얇은 토층을 통과하여 토층과 암반의 경계부에 빠르게 도달할 수 있음을 의미하는 것으로 토층과 암반의 경계부에 내재하는 사면을 보다 불안정하게 하는 요인으로 작용될 수 있을 것이다. 그림 8은 토층의 투수계수, 그리고 입도요소로서 투수계수와 상관성이 높은 균등계수를 지역별로 구분하여 나타낸 것이다. 그림 8(a)에서와 같이 투수계수는 평균치를 기준으로 할 경우 관악산지역이 $1.66 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로서 가장 크고 북한산지역 및 수락산지역이 각각 $1.47 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 및 $1.29 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로서 작은 것으로 나타났다. 한편, 균등계수는 투수계수와 비교적 높은 상관성이 있는 것으로 알려졌는데, 이러한 상관성은 이 연구를 통해서도 확인되었다. 즉, 그림 8(b)에서와 같이 균등계수는 투수계수와는 반대로 수락산지역이 9.62로서 가장 크고 관악산지역 및 북한산지역이 각각 8.08 및 7.70로서 작게 나타남으로써 균등계수가 크면 투수성이 낮고 균등계수가 작으면 높은 투수성을 갖는 반비례적인 경향성을 보였다.

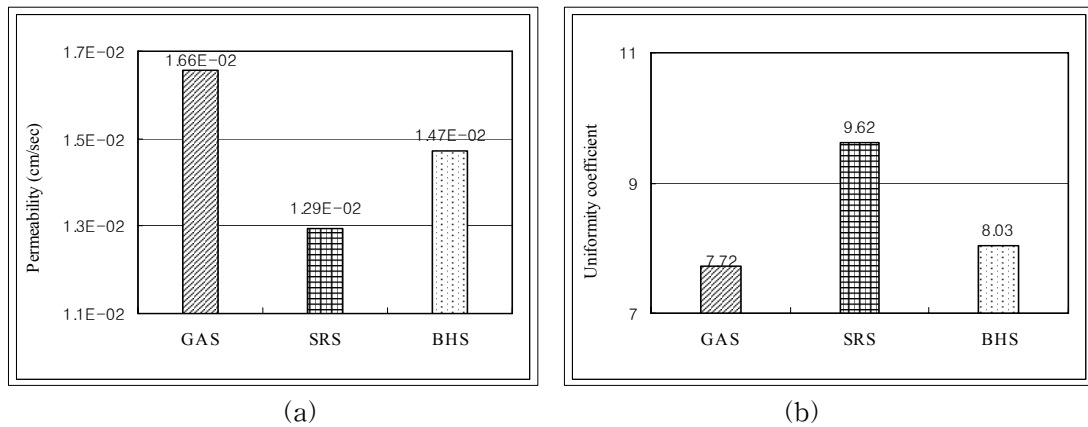


그림 8. 지역별 토층시료의 균등계수 및 투수계수: (a), 투수계수; (b), 균등계수.

5. 결 론

이 연구에서는 화강암류가 주로 분포하고 있는 서울주변 주요 산지의 자연사면을 대상으로 토층시료를 채취하여 실내에서 여러 토질시험을 실시하였다. 그리고 이들 시험결과를 토대로 자연사면 토층지반의 토질특성을 파악하였으며 각 지역별로 그 차이점을 비교분석하였다.

1) 연구지역의 토층지반은 SW-SC, SW, SC 및 SP-SC 등으로 전반적으로는 점토질모래지반이 우세하고 일부는 SW-SM 및 SP-SM으로서 실트질모래지반으로 분류되었으며, 활성도가 비교적 낮은 것으로 분석되었다. 대부분의 시료가 완만한 입도분포곡선을 보이고 균등계수는 4내지 6보다 크고 곡률계수가 1에서 3의 범위에 존재함으로써 입도분포가 양호한 것으로 평가되었다.

2) 밀도는 $2.62 \sim 2.67 \text{kg/cm}^3$ 의 범위로서 지역별로 특별히 대비되지 않는다. 자연함수비는 북한산지역의 토층이 평균 17.22%로서 가장 높고 수락산지역은 15.63%이며, 관악산지역이 14.65%로서 가장 낮은 것으로 나타났다. 반면, 포화도는 관악산지역의 토층이 30.09%로서 수락산지역의 39.01% 및 북한산지역의 49.35%에 비해 가장 낮은 것으로 분석되었다.

3) 간극비가 큰 관악산지역의 토층은 가장 작은 건조단위중량을, 그리고 간극비가 가장 작은 북한산지역의 토층은 가장 큰 건조단위중량을 나타내 서로 반비례적인 관계를 보임으로써 이 연구에서도 두 물성은 서로 반비례적 관계임을 확인할 수 있었다. 그리고 이러한 결과들로 볼 때 북한산지역의 토층지반은 수락산지역 및 관악산지역에 비해 상대적으로 조밀한 상태의 토층지반인 것으로 평가되었다.

4) 점착력은 1.57~8.63kPa의 범위로서 전반적으로 다짐도가 중간정도인 모래질지반에 해당하며 대체로 적은 점착성분을 지니고, 전단저항각은 31~39°의 범위로서 비교적 큰 것으로 나타나 전단강도가 대체로 양호한 토층지반으로 평가되었다. 점착력의 경우 북한산지역의 토층이 가장 크고 관악산지역 및 수락산지역의 순으로 작은 반면, 전단저항각은 북한산지역이 가장 작고 관악산지역 및 수락산지역의 순으로 큰 결과를 보였다.

5) 투수계수는 $3.07 \times 10^{-3} \sim 4.61 \times 10^{-2}$ cm/sec의 범위로서 세립질모래~점토질실트 정도의 투수계수에 해당하며 보통~빠른 정도의 토층지반인 것으로 평가되었다. 지역별로는 관악산지역이 가장 크고 북한산지역 및 수락산지역의 순으로 작게 나타났다. 한편, 균등계수는 수락산지역이 가장 크고 북한산지역 및 관악산지역의 순으로 작게 나타남으로써 균등계수가 크면 투수성이 낮고 균등계수가 작으면 높은 투수성을 갖는 반비례적인 경향성을 보였다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 “토질 및 골재시험” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬(2000), “강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-”, **대한지질공학회지**, 제 10권, 제 2호, pp.163~174.
2. 김원영, 이사로, 김경수, 채병곤(1998), “지형특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성, -연천-철원지역을 대상으로-”, **대한지질공학회지**, 제 8권, 제 2호, pp.115~130.
3. 이병주, 김유봉, 이승렬, 김정찬, 강필종, 최현일, 진명식(1999), **1:250,000 서울-남천점 지질도폭 설명서**, 과학기술부, 64p.
4. Casagrande, A.(1948), “Classification and Identification of Soils”, *Transactions*, ASCE, Vol. 113, pp.901-930.
5. Darcy, H.(1856), *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Dalmont, Paris.
6. Holtz, W. G. and Gibbs, H. J.(1956), “Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils”, *Journal, Soil Mechanics and Foundation. Div.*, ASCE, Vol. 82(SM 1), 867p.
7. Hutchinson, J. N.(1988), “Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology”, *In Landslides Proc. 5th Int. Symp. on Landslides*, Vol. 1, pp.3~35.
8. Mitchell, J. K.(1976), *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 422p.