

온도변화가 모래 및 화강풍화토의 입자구조 및 강도 특성에 미치는 영향

Effect of Temperature on Particle Structure and Strength Characteristic of Sand and Weathered Granite Soil

유충식¹, 신승민^{2*}

Chung-Sik Yoo¹, Seung-Min Shin^{2*}

¹Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ. Natural Sciences Campus, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

²Member, the master's course, School of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ. Natural Sciences Campus, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

ABSTRACT

This paper presents the results of an investigation into the effect of forced temperature change cycles on physical and mechanical properties of sand and weathered granite soil. The effect of forced temperature change cycles on the particle arrangement and the thermal conductivity was first investigated. A series of triaxial compression tests on the soils were also performed to look into the effect of temperature change cycles on the stress-strain-strength behavior. The results indicated that the forced temperature change cycle does not significantly affect the particle arrangement and thermal conductivity. It is shown however that the heating duration showed some effect on the deviatoric stress at failure while no significant effect due to the number of heating-cooling cycle was observed.

요 지

가 - - 가 N_{hc}
가 $H_d = 2 \sim 8hrs$ 15% 가 -

Keywords : Thermally active geotechnical structure, Heating-cooling, Stress-strain-strength behavior, Undrained condition

1. 서 론

최근 들어 지구온난화로 인해 우리나라 뿐만 아니라 전 세계적으로 여름철 및 겨울철에 발생하는 피크부하 및 전력대란 등이 우리 일상생활에 영향을 미치는 중요한 이슈

가 되었으며 따라서 전기에너지를 저감할 수 있는 신재생 에너지원의 필요성이 날이 증대되고 있다. 이러한 요구로 인해 지열을 활용하고자 하는 시도가 꾸준히 이어지고 있으며 현재 에너지 파이프나 지열활용 터널 라이닝 시스템 등이 활용되고 있다(Brandl, 2006; Ooka et al., 2007; McCarteny et al., 2010). 이러한 지중 열교환 시스템은 초기투자비가 높다는 단점이 있지만 운영비의 절감, 에너지 사용량의 절감과 환경보호라는 면에서 안전하고 효율적인

Received 17 Apr. 2015, Revised 23 Jun. 2015, Accepted 24 Jun. 2015

*Corresponding author

Tel: +82-31-290-7537; Fax: +82-31-290-7549

E-mail address: ssm9595@naver.com (S. Shin)

청정 신재생에너지로서의 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 장점으로 지열 활용 지반구조물의 사용은 점차 증가하고 있다. 따라서 지반내 지중 열교환 시스템 설치로 인해 지반에 부과되는 온도변화를 고려한 설계·시공·유지 관리 기술의 정립이 요구되고 있다.

이러한 관점에서 필요한 연구는 먼저 지열활용 지반구조물에 의한 지반내 온도변화가 흙의 물리적 역학적 특성 등 지반공학적 특성에 미치는 영향에 관한 종합적인 연구라고 할 수 있다. 이러한 관점에서 다양한 연구가 수행되어 왔는데 Laloui et al.(2003; 2006)은 에너지 파일 적용 관점에서 실험적 및 수치해석적 연구를 통해 에너지 파일 적용시 지반 거동에 관한 연구를 수행한 바 있으며 McCarty et al.(2010)은 에너지 파일과 지열활용 지반구조물 적용시 지반의 거동에 관한 연구결과를 발표한 바 있다.

이와 아울러 Cekerevac and Lauoi (2004)는 온도변화가 점토의 역학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 바 있으며 Abuel-Naga et al.(2006; 2007)은 방콕 점토를 대상으로 온도변화로 인한 점토의 체적변화 및 간극수압 거동에 관한 연구를 수행하고 온도상승시 점토의 간극수압 증가 경향에 대한 구체적인 결과를 제시한 바 있다. 국내에서는 관련연구로서 Choi et al.(2008)이 열교환기에 적용되는 그라우트재의 역학적 특성에 관한 연구를 수행한 바 있으며 Park et al. (2010)은 열교환기 설치로 인한 지반내 열변화 현상에 대한 수치해석을 수행한 바 있다. 한편, 최근에 Yoon et al.(2012)는 코일형 열교환기를 이용한 흙의 열전도특성 평가에 관한 연구를 수행하고 그 결과를 보고한 바 있다.

이와 같이 관련된 많은 연구가 수행된 바 있으나 지열활용 지반구조물 적용을 위해 필수적인 지반내 온도변화가 흙의 물리적·역학적 특성에 미치는 영향에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 관련연구의 일환으로 모래와 화강풍화토를 대상으로 다양한 온도변화 조건을 구현하고 이에 따른 흙의 입자구조 및 열전도특성 변화 경향을 고찰하였다. 아울러 다양한 온도변화에 노출된 시료를 이용하여 시편을 조성한 후 비배수 삼축압축시험을 수행하고 그 결과를 토대로 온도변화가 시편의 응력-변형률-강도 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 시료 및 시험 방법

본 연구에서는 모래와 화강풍화토를 대상으로 하였으

며 다양한 온도변화 사이클 환경에 노출된 시편을 제작하여 주사전자현미경(SEM) 촬영과, 열전도도시험, 그리고 비배수 삼축압축시험을 수행하였다. 시편에 온도변화 작용을 가하기 위하여 200℃까지 설정이 가능한 건조로를 사용하여 시료를 가열 하였으며 냉각은 실험실 실내온도 20℃로 설정하여 본 연구의 목적에 부합하도록 가열 및 냉각을 반복하여 각각의 시편을 제작하였다.

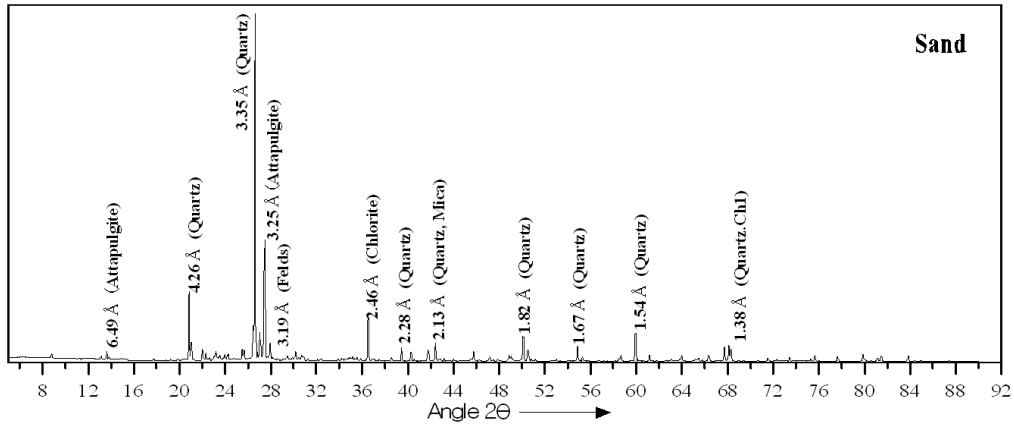
2.1 사용 시료

본 연구에서는 우리나라 건설 환경을 고려하여 모래와 화강풍화토(weathered granite soil; WGS)를 대상 시료로 선정하였다. 실험에 사용된 시료에 대한 X-Ray 회절 시험 결과 모래는 석영(quartz), 규산염(silicate), 장석(feldspar), 녹니석(chlorite) 등의 광물을 포함하는 것으로 검토되었으며(Fig. 1(a)) 화강풍화토는 석영, 장석과 아울러 운모(mica) 등의 광물을 포함하는 것으로 검토되었다(Fig. 1(b)).

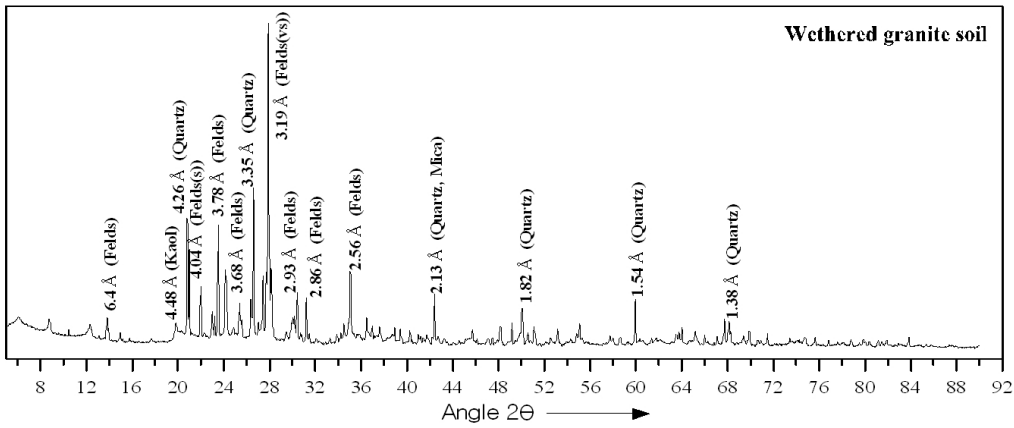
Fig. 2와 3에서는 해당 시료의 입도분포 곡선과 화강풍화토의 다짐곡선을 보여주고 있는데 Fig. 2의 경우 모래와 화강풍화토에 대한 체분석 시험을 수행하여 시료의 입경 누적곡선을 통해 모래와 화강풍화토의 균등계수(C_u)값과 곡률계수(C_c)값을 통해 모래 입자의 크기가 고르며 화강풍화토의 경우 입도분포가 양호하다는 것을 확인하였으며 통일분류법(USCS)에 근거할 때 모래의 경우 200번체 통과율이 5%미만에 빈입도 이므로 SP, 화강풍화토의 경우 세립분을 함유한 실트질의 모래 이므로 SM으로 분류되었다. 한편, 삼축압축시험에서는 모래와 화강풍화토를 이용하여 상대밀도 90%, 다짐도 90%를 갖는 시편을 제작하기 위하여 직경 5cm, 높이 8.5cm 몰드에 3층 다짐을 수행하여 모래의 건조단위중량(r_d)값이 15.6 kN/m^3 가 되도록 하였으며 화강풍화토의 경우 시편의 건조단위중량 값을 18.3 kN/m^3 , 함수비 10%가 되도록 시편을 제작하였다. 본 시험은 추후 보강토 옹벽에서 온도변화에 따른 지반의 거동 특성변화에 대한 분석에 기반으로 실제 보강토의 상대밀도와 다짐도가 90%가 되도록 시편을 제작하였다. Table 1은 실험에 사용된 흙의 입도분포 특성 및 전단강도 정수 등 지반공학적 특성을 나열하고 있다.

2.2 수행 시험

본 연구에서는 앞서 언급한 모래와 화강풍화토를 대상



(a) sand



(b) wethered granite soil

Fig. 1. Results of X-Ray diffraction analysis

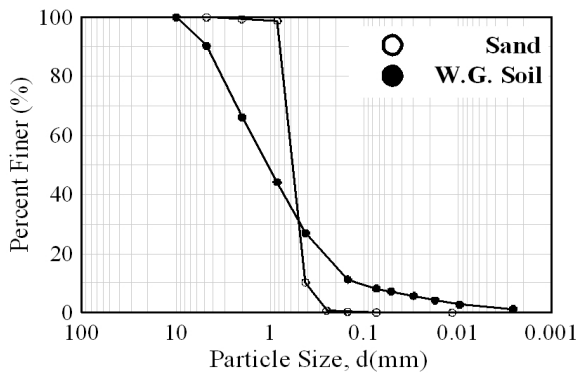


Fig. 2. Particle size distribution curves

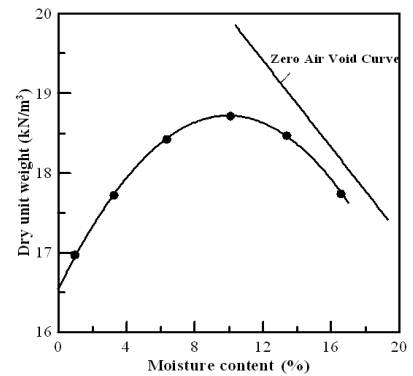


Fig. 3. Compaction curve for WGS

Table 1. Geotechnical properties of sand and wethered granite soil

soil	gradation	USCS	Max. dry unit weight $\gamma_{d_{max}}$ (kN/m^3)	Min. dry unit weight $\gamma_{d_{min}}$ (kN/m^3)	Opt. water content w_{opt} (%)	Cohesion c (kPa)	Int. friction angle ϕ ($^\circ$)
Wethered granite soil	$D_{10} = 0.13$ $C_u = 13.1$ $C_c = 1.13$	SM	19	14	11.3 %	8.0	40
sand	$D_{10} = 0.42$ $C_u = 1.45$ $C_c = 0.98$	SP	16	13	—	0	35

Table 2. Heating-cooling cases considered

Case	soil	H_d	C_d	N_{hc}		
$H_d2C_d2N_{hc}1$	sand & weathered granite soil	2	2	1		
$H_d2C_d2N_{hc}2$				2		
$H_d2C_d2N_{hc}3$				3		
$H_d4C_d2N_{hc}1$		4		2	1	
$H_d4C_d2N_{hc}2$					2	
$H_d4C_d2N_{hc}3$					3	
$H_d8C_d2N_{hc}1$		8			2	1
$H_d8C_d2N_{hc}2$						2
$H_d8C_d2N_{hc}3$						3

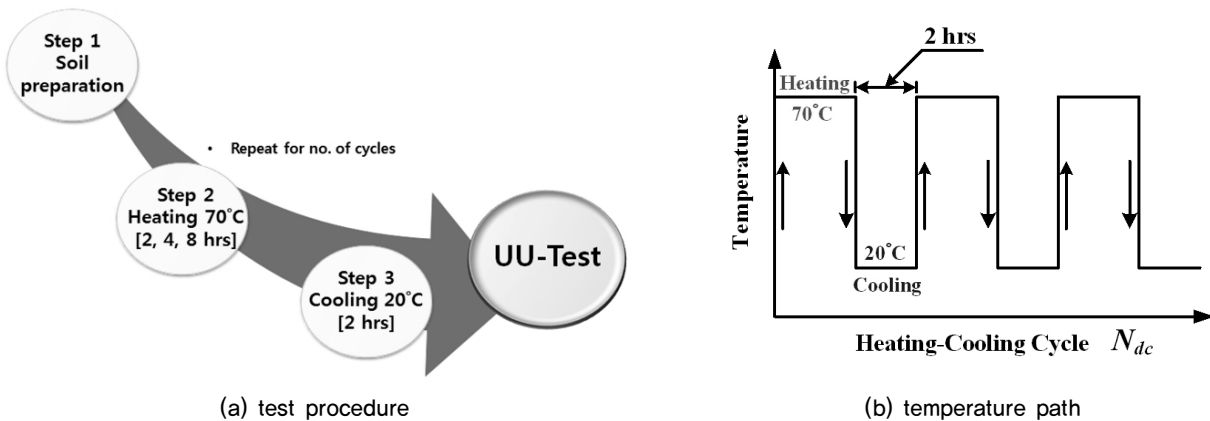


Fig. 4. Schematics of test procedure and temperature path

으로 다양한 온도변화 조건을 구현하고 이에 따른 흙의 입자구조 및 열전도특성 변화 경향을 고찰하였다. 수행된 시험은 다음과 같다.

2.2.1 SEM을 이용한 입자구조 분석 및 열전도도 시험

본 연구에서는 흙에 대한 온도변화, 즉 가열(heating)-냉각(cooling) 반복 작용이 흙의 입자 배열(구조)에 미치는 영향과 열전도도에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 검토를 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 시편의 입자구조를 관찰하였으며 QTM-500장비를 이용하여 열전도도를 측정하였다.

Table 2에서와 같이 각 시료에 대해 가열시간(H_d), 냉각 시간(C_d), 그리고 가열-냉각 사이클(N_{hc})을 변화시켜 다양한 환경의 가열-냉각 사이클에 노출된 시료에 대한 시험을 수행하였다. 이때 가열온도 및 냉각 온도는 각각 70°C 및 20°C로 설정하였다. 20°C는 시험 수행 시 실험실 내부의 상온의 온도이며 70°C는 추후 시험에 추가되는 지오텍스 타일 관련해서 주변의 열원이 70°C 수준에 머물 것으로

예상되어져서 범위를 산정하였다.

2.2.2 비배수 삼축압축시험

본 연구에서는 흙에 대한 온도변화가 흙의 응력-변형률-강도 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 Table 2에 요약된 가열-냉각 환경에 노출된 시료를 이용하여 모래는 상대 밀도 90%, 그리고 화강풍화토는 다짐도 90%로 시편을 조성하고 비압밀 비배수시험(unconsolidated-undrained test)을 수행하였다. 가열의 경우 내부온도가 70°C 인 건조로 내부에 시료를 노출시켜 가열을 수행하였으며 냉각 시 실험실 내부 온도가 20°C 인 곳에서 상온 노출시켜 시료를 냉각하였다. 삼축압축시험을 위해 가열-냉각 되어진 모래 및 화강풍화토를 직경 5cm 몰드를 이용하여 3층다짐을 통해 상대밀도 90%, 다짐도 90%가 되도록 시편을 성형하였다. 삼축압축시험시 내부 구속압은 100kPa을 유지하였으며 전단 속도는 0.05mm/sec인 상태로 변형률이 16%가 되는 지점까지 전단을 가하여 시험을 진행하였다. Fig. 4는 시료조성 과정과 가열-냉각 경로를 도식화하여 보여주고 있다.

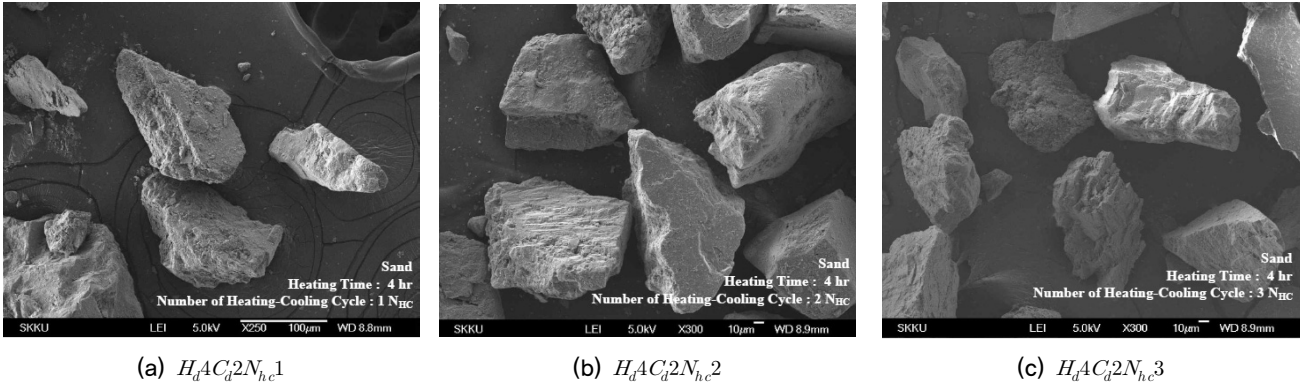


Fig. 5. Grain size distribution curve

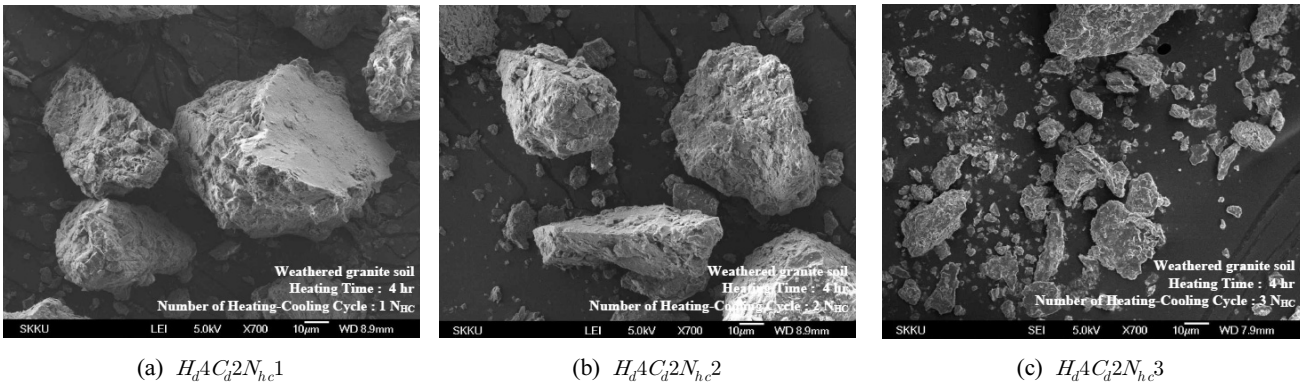


Fig. 6. SEM results for specimens with different N_{hc} - WGS

3. 온도변화 반복작용이 흙의 입자구조와 열전도 특성에 미치는 영향

3.1 SEM을 이용한 입자구조 분석

Fig. 5와 6은 각각 모래와 화강풍화토에 대한 SEM 촬영 결과를 보여주고 있다. 각 사진은 4시간의 가열시간 ($H_d = 4hrs$), 2시간의 냉각시간($C_d = 2hrs$)을 가지며 반복 횟수(N_{hc})가 1회, 2회, 3회를 가지는 시료에 대해 촬영한 것이며 가열-냉각 반복횟수(N_{hc})에 따른 시료의 입자모습을 보여주고 있다. Fig. 5에서는 모래의 입자 구조모습을 보여주고 있지만 가열-냉각 반복작용 횟수(N_{hc})가 증가함에 있어 별다른 변화가 발생하지 않는 것으로 검토되었다. 반면 화강풍화토에 대한 결과를 보여주고 있는 Fig. 6에서는 모래와는 다소 다르게 3번의 가열-냉각 반복작용 횟수(N_{hc})를 가지는 Fig. 6(c)에서 SEM 측정 결과 가장 입자가 가장 작게 측정 되었으며 이는 가열-냉각 반복 횟수가 증가할수록 입자가 비교적 세립화 되는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 이러한 결과를 감안할 때 추가 연구가 필요하다고 판단되기는 하나 200번체 통과 세립분이 20%가량

포함되어 있는 화강풍화토에 대한 가열-냉각 반복작용은 입자구조에 변화를 가져올 수 있으나 비교적 화강풍화토 보다는 큰 입자들로 이루어진 모래의 경우에는 입자구조에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 결론지을 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 가열-냉각 반복작용에 따른 흙의 열전도율 변화 경향

주사전자현미경(SEM) 촬영 결과 분석과 마찬가지로 가열-냉각 사이클 반복횟수(N_{hc})와 가열시간(H_d)이 모래와 화강풍화토의 열전도율에 미치는 영향을 분석하기 위해 각 가열-냉각 조건별 시료에 대해 QTM-500 장비를 이용하여 열전도율을 측정하고 그 결과를 비교 분석 하였다. Table 5와 6은 그 결과를 보여주고 있는데 모래에 대한 결과를 보여주고 있는 Table 5에서는 가열시간(H_d)과 가열-냉각 반복 사이클 횟수(N_{hc})에 상관없이 거의 일정한 열전도율 값(0.28 W/mK)을 보이는 것으로 검토되었다. 한편, Table 6에 제시되어 있는 화강풍화토의 경우 또한 모래 보다는 10% 큰 열전도율을 보이는 것으로 나타났으

Table 3. Summary of thermal conductivity measurements – sand

No	soil	H_d	C_d	N_{hc}	Thermal conductivity (W/mk)
1	sand	4	2	2	0.2828
2		4	2	3	0.2854
3		8	2	3	0.2727

Table 4. Summary of thermal conductivity measurements – sand

No	soil	H_d	C_d	N_{hc}	Thermal conductivity (W/mk)
1	Weathered granite soil	4	2	2	0.3067
2		4	2	3	0.2862
3		8	2	3	0.3041

나 가열-냉각 반복사이클 횟수에 관계없이 0.30 W/mK 정도의 값을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 모래 및 화강풍화토 열전도율은 가열-냉각 반복 사이클 횟수 (N_{hc})와 가열시간(H_d)에 큰 영향을 받지 않음을 나타낸다고 하겠다.

4. 온도변화가 비배수 응력-변형률-강도 특성 거동에 미치는 영향

를 이용하여 최대 축차응력($\Delta\sigma_d$) 및 파괴시 변형률(ϵ_{aj})의 50%에 해당하는 변형률에 대한 할선탄성계수(secant modulus, E_{50})를 이용하여 가열시간 H_d 와 반복횟수(N_{hc})에 따른 응력-변형률-강도 특성을 검토하였다. 할선탄성계수는 원점과 최대강도의 50%정도의 응력을 잇는 직선의 기울기로 응력-변형률 변화에 대한 강성도를 비교하였다.

앞서 기술한 바와 같이 온도변화 사이클에 노출된 시료

4.1 가열-냉각 반복사이클 횟수(N_{hc})에 따른 변화경향

Fig. 7와 8은 각각 모래와 화강풍화토에 대해 가열-냉각

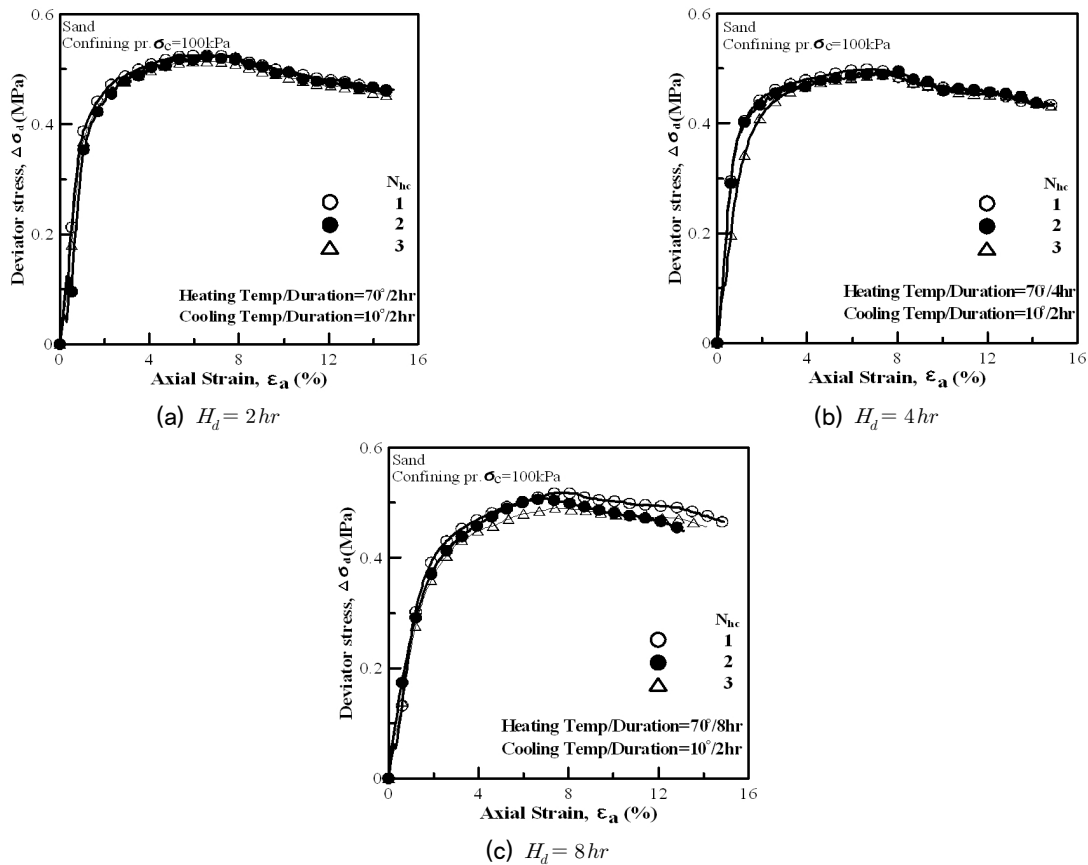


Fig. 7. Variation of $\Delta\sigma_d - \epsilon_a$ curves with No. of heating-cooling cycle N_{hc} (sand)

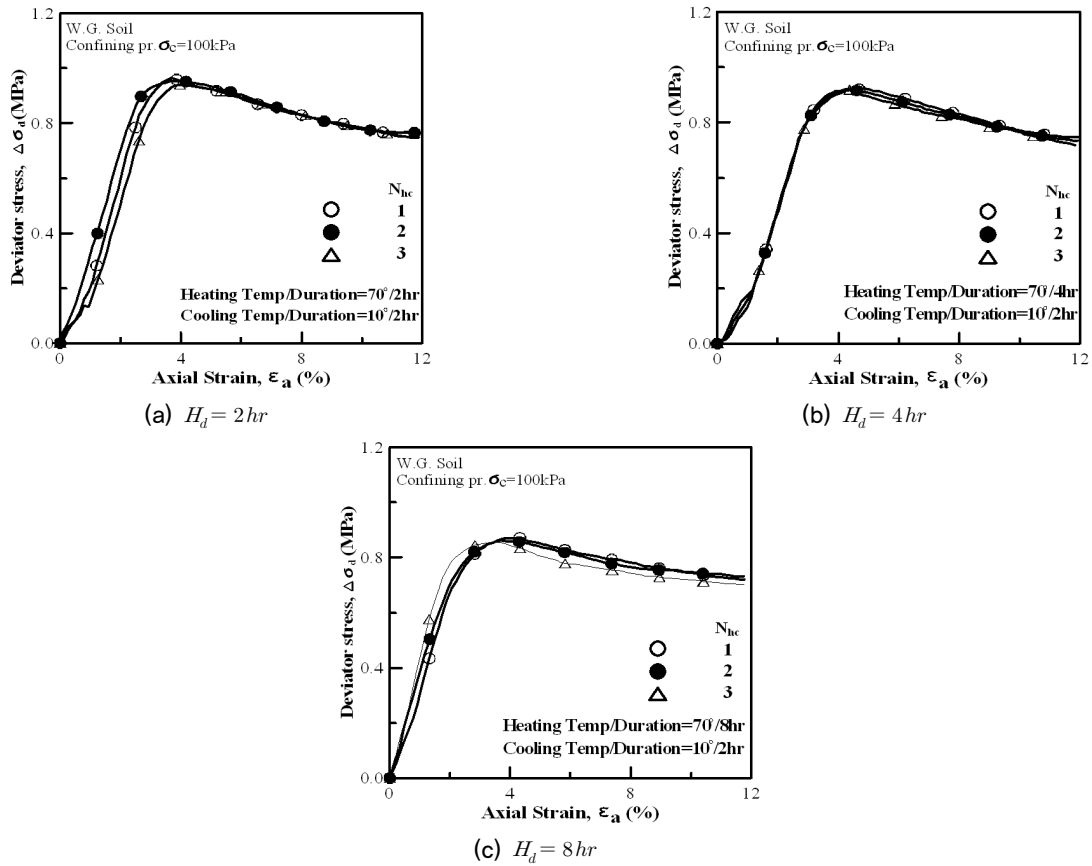


Fig. 8. Variation of $\Delta\sigma_d - \epsilon_a$ curves with No. of heating-cooling cycle N_{hc} (WGS)

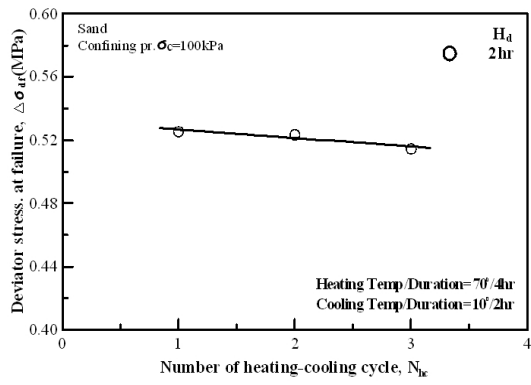
반복사이클 횟수(N_{hc})에 따른 축차응력-축방향변형률($\Delta\sigma_d - \epsilon_a$) 곡선을 보여주고 있다. 이 그림에서 보이는 바와 같이 모래 및 화강풍화토 임의의 가열시간(H_d)에서 반복사이클(N_{hc}) 따라 최대축차응력($\Delta\sigma_{d_f}$)과 $\Delta\sigma_d - \epsilon_a$ 곡선의 기울기가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 검토되었다.

이러한 경향은 Fig. 7와 8에서 얻어진 최대 축차응력($\Delta\sigma_{d_f}$)과 할선탄성계수(E_{50}) 값을 가열-냉각 반복 횟수 N_{hc} 에 대해 도시한 Fig. 9~12에서 보다 구체적으로 관찰할 수 있다. 즉, 모래 및 화강풍화토의 최대축차응력을 가열-냉각 반복횟수에 대해 도시하고 있는 Fig. 9과 10에서 임의의 가열시간에서 반복 사이클이 $N_{hc} = 1 \sim 3$ 범위에서 변화할 때 최대 축차응력 $\Delta\sigma_{d_f}$ 은 최대 10% 내외의 차이만을 보이는 것으로 나타나 임의의 가열시간에서 N_{hc} 이 $\Delta\sigma_{d_f}$ 에 미치는 영향은 미미한 것으로 검토되었다. 한편, 할선탄성계수 E_{50} 에 대해 도시하고 있는 Fig. 11과 12에서도 임의의 가열시간에서 할선탄성계수 E_{50} 는 N_{hc} 에 따라 거의 일정한 값을 보이고 있어 N_{hc} 이 E_{50} 에 미치는 영향 또한 미미한 것으로 검토되었다.

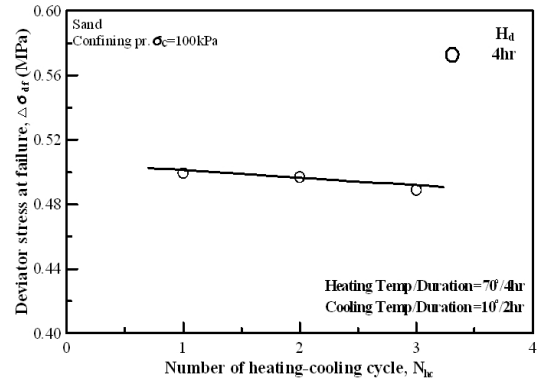
4.2 가열 시간(H_d)에 따른 영향

모래와 화강풍화토에 대해 가열-냉각 반복사이클 부가시 가열시간(H_d)에 따른 축차응력-축방향변형률($\Delta\sigma_d - \epsilon_a$) 곡선이 Fig. 13와 14에 제시되어 있다. 이 그림에서는 반복회수 N_{hc} 의 영향과는 달리 화강풍화토 및 모래 공히 임의의 반복회수(N_{hc})에서 가열시간(H_d) 따라 최대축차응력($\Delta\sigma_{d_f}$)과 $\Delta\sigma_d - \epsilon_a$ 곡선의 기울기가 다소의 차이를 보이는 것으로 검토되었다. 즉, 전반적으로 최대 축차응력에 도달하기 이전까지 $\Delta\sigma_d - \epsilon_a$ 곡선의 기울기는 큰 차이를 보이지는 않으나 최대 축차응력에 있어 가열시간 H_d 이 증가할수록 최대 축차응력 $\Delta\sigma_{d_f}$ 이 감소하는 것으로 검토되었다.

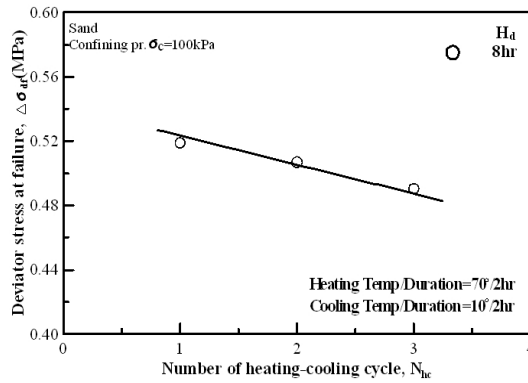
이러한 경향은 가열시간(H_d)에 따른 $\Delta\sigma_{d_f}$ 과 E_{50} 의 변화 추이를 보여주고 있는 Fig. 15~18에서 관찰할 수 있다. 즉, Fig. 15에서와 같이 임의의 반복 사이클 N_{hc} 에 있어 모래의 경우에는 H_d 이 증가함에 따라 $\Delta\sigma_{d_f}$ 이 다소 감소하는 추세를 보이고 있음에도 불구하고 큰 차이를 보이지 않고 있는 것으로 검토되었으나 화강풍화토에 대한 결과를



(a) $H_d = 2\text{ hr}$

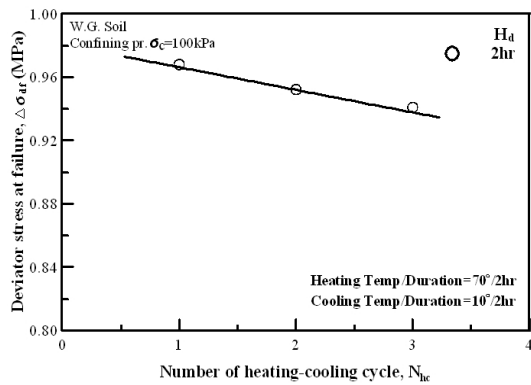


(b) $H_d = 4\text{ hr}$

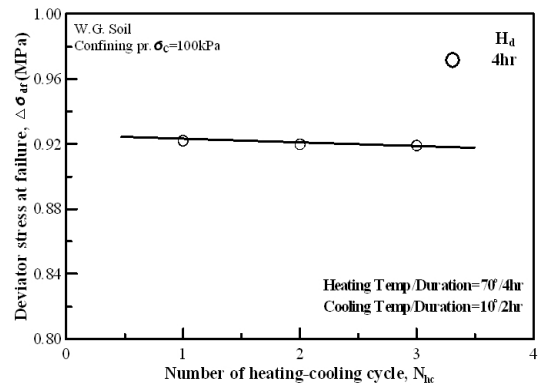


(c) $H_d = 8\text{ hr}$

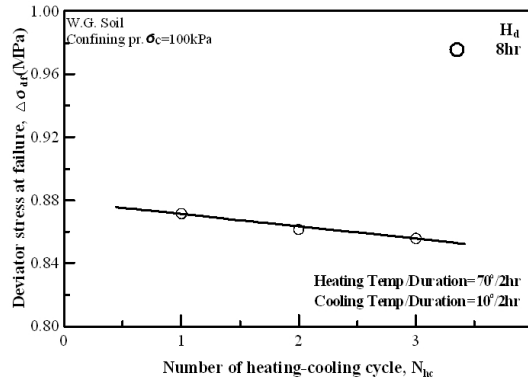
Fig. 9. Variation of $\Delta\sigma_{d_f}$ with N_{hc} for various H_d (sand)



(a) $H_d = 2\text{ hr}$

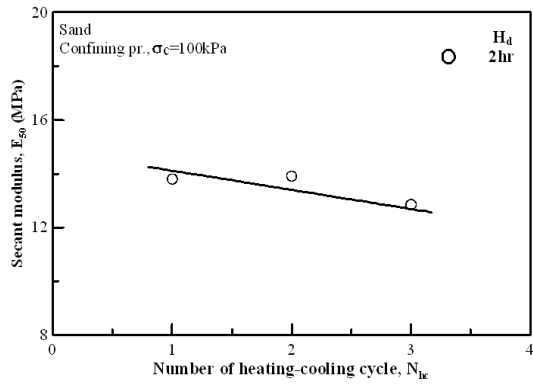


(b) $H_d = 4\text{ hr}$

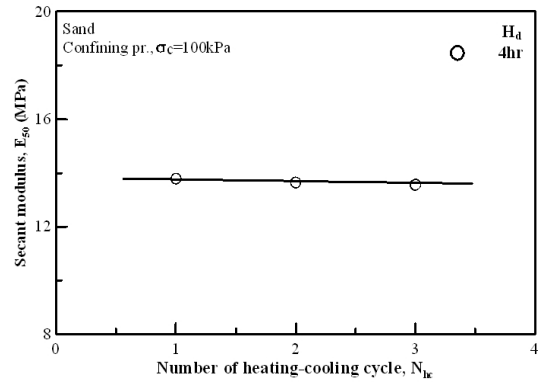


(c) $H_d = 8\text{ hr}$

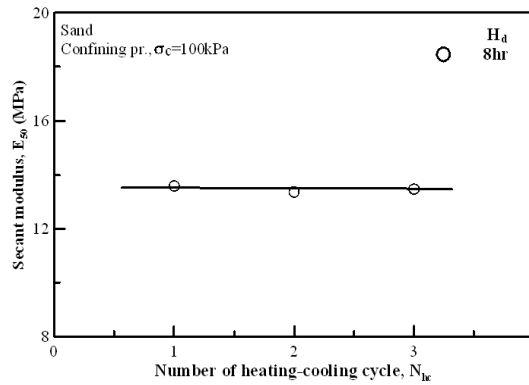
Fig. 10. Variation of $\Delta\sigma_{d_f}$ with N_{hc} for various H_d (WGS)



(a) $H_d = 2\text{ hr}$

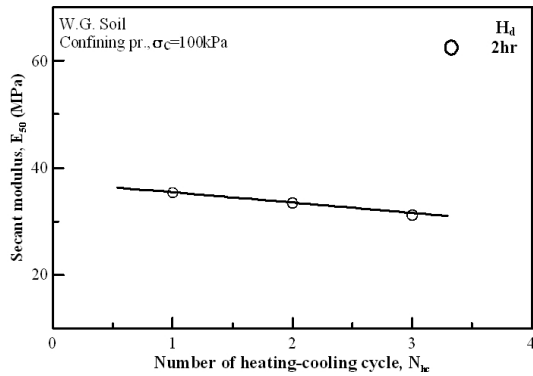


(b) $H_d = 4\text{ hr}$

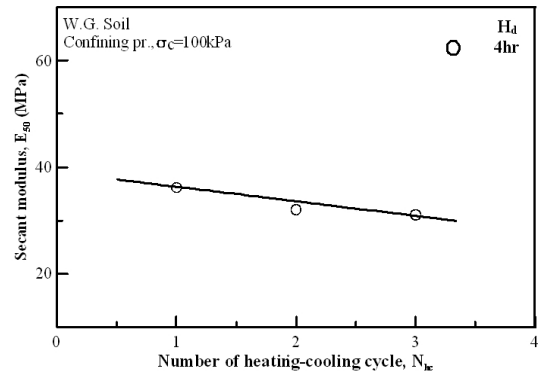


(c) $H_d = 8\text{ hr}$

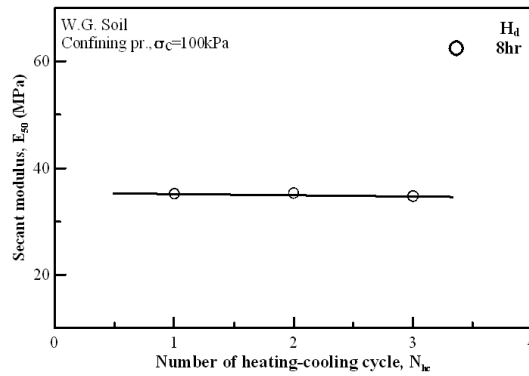
Fig. 11. Variation of E_{50} with N_{hc} for various H_d (sand)



(a) $H_d = 2\text{ hr}$



(b) $H_d = 4\text{ hr}$



(c) $H_d = 8\text{ hr}$

Fig. 12. Variation of E_{50} with N_{hc} for various H_d (WGS)

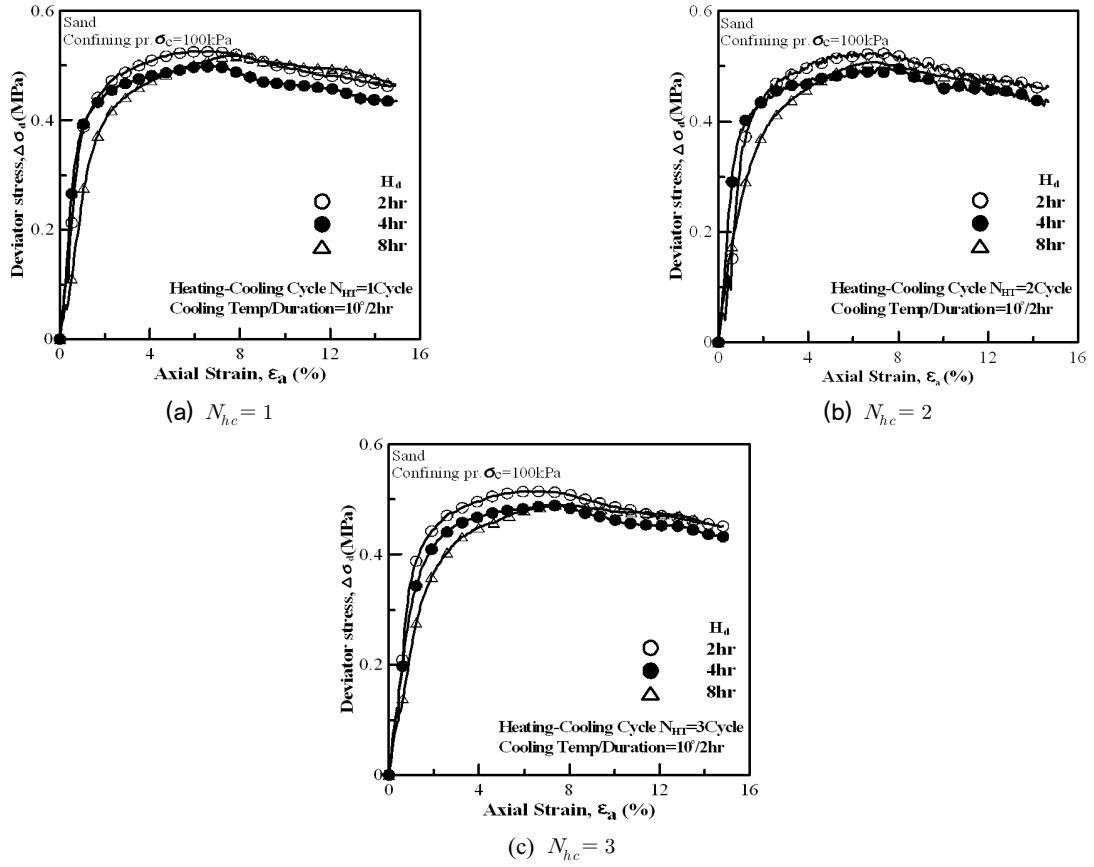


Fig. 13. Variation of $\Delta\sigma_d - \epsilon_a$ curves with heating duration H_d (sand)

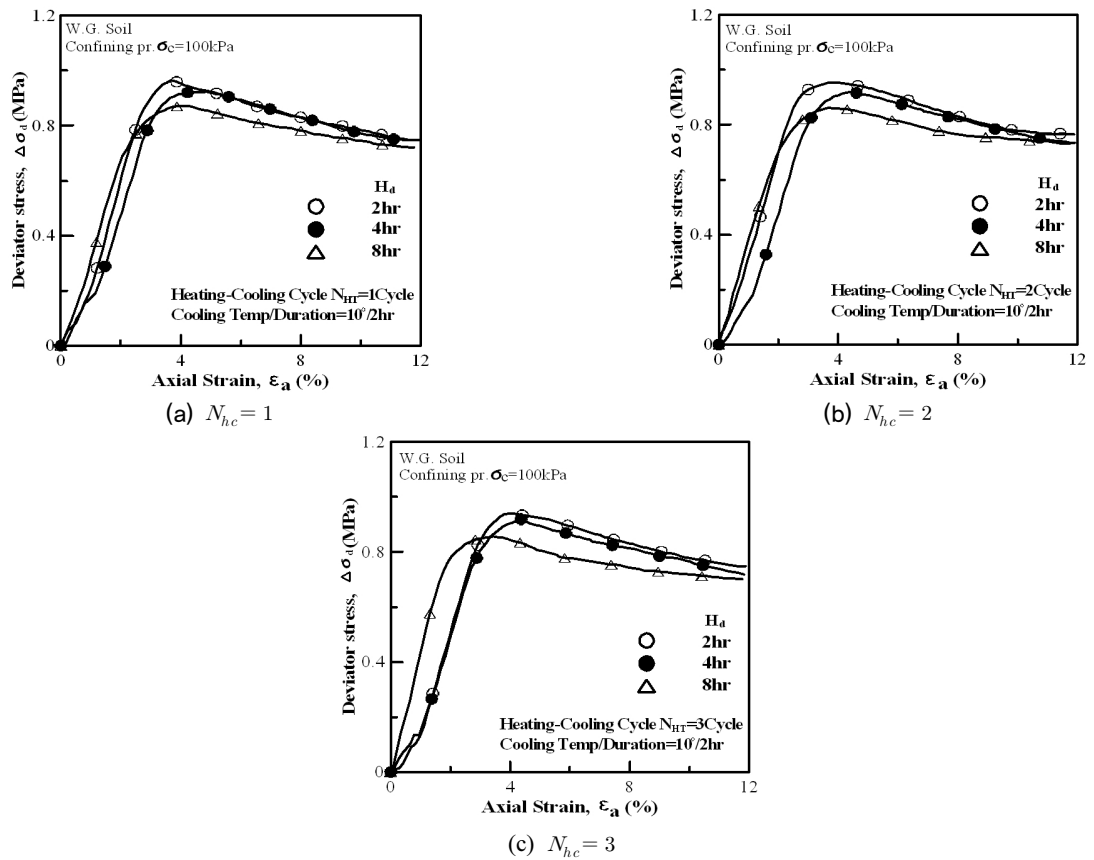
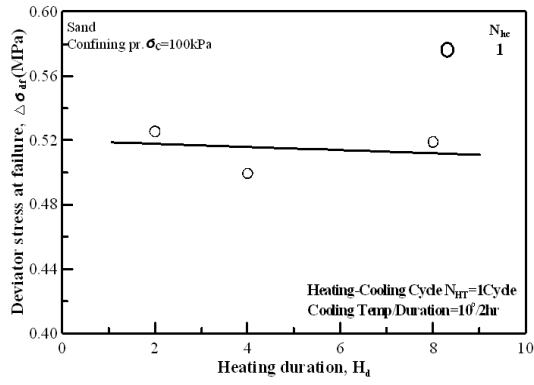
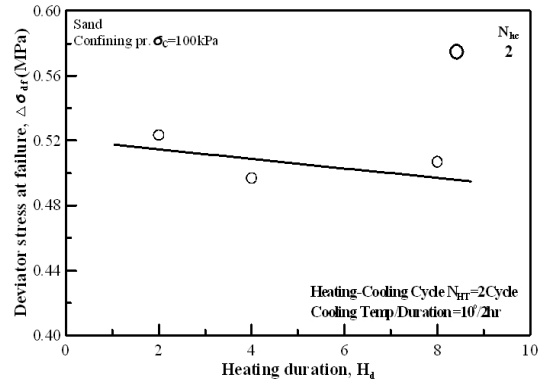


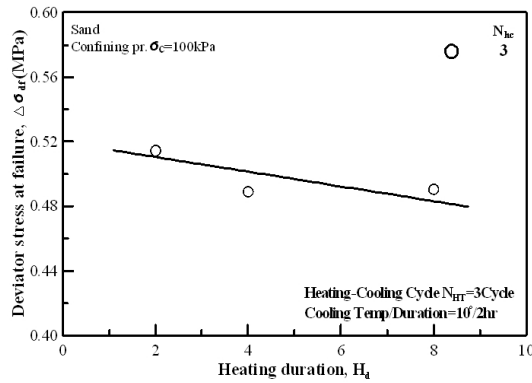
Fig. 14. Variation of $\Delta\sigma_d - \epsilon_a$ curves with heating duration H_d (weathered granite soil)



(a) $N_{hc} = 1$

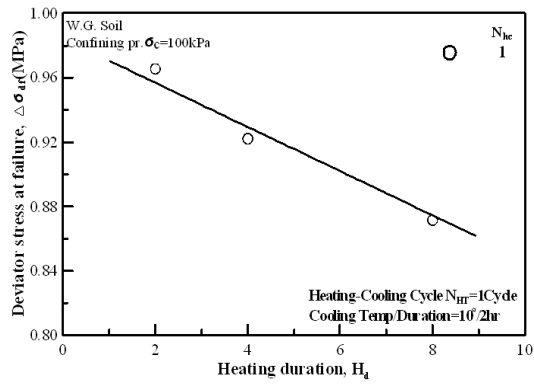


(b) $N_{hc} = 2$

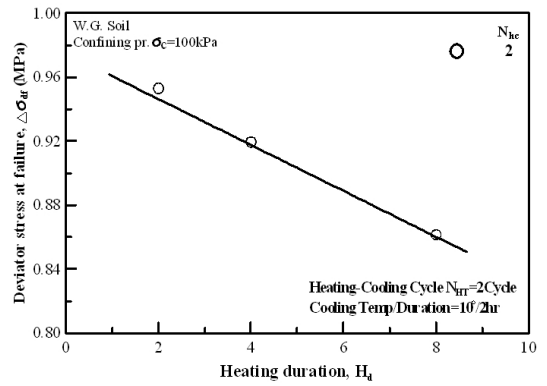


(c) $N_{hc} = 3$

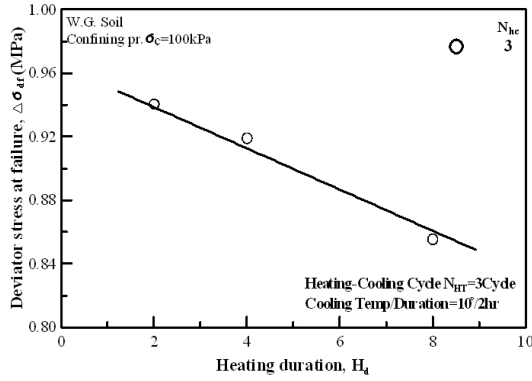
Fig. 15. Variation of $\Delta\sigma_{d_f}$ with N_{dc} for various H_d (sand)



(a) $N_{hc} = 1$

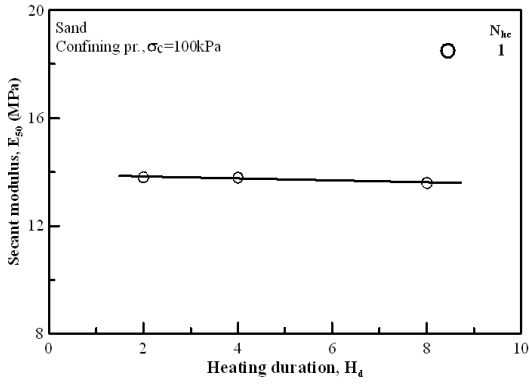


(b) $N_{hc} = 2$

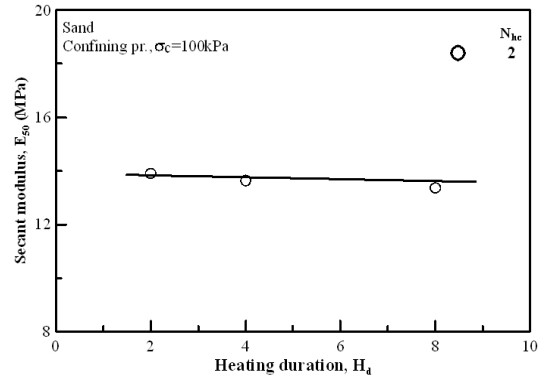


(c) $N_{hc} = 3$

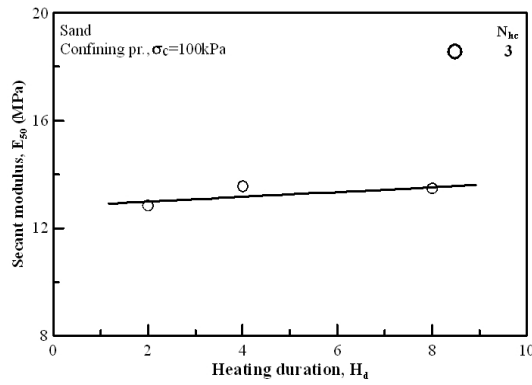
Fig. 16. Variation of $\Delta\sigma_{d_f}$ with N_{dc} for various H_d (WGS)



(a) $N_{hc} = 1$

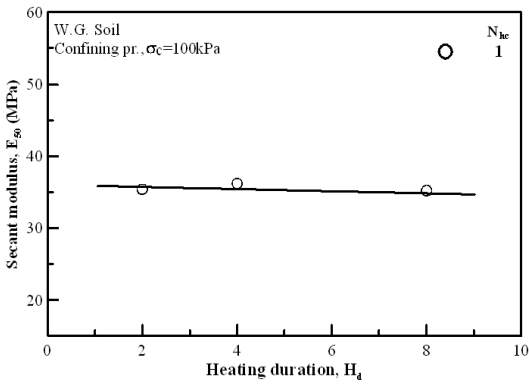


(b) $N_{hc} = 2$

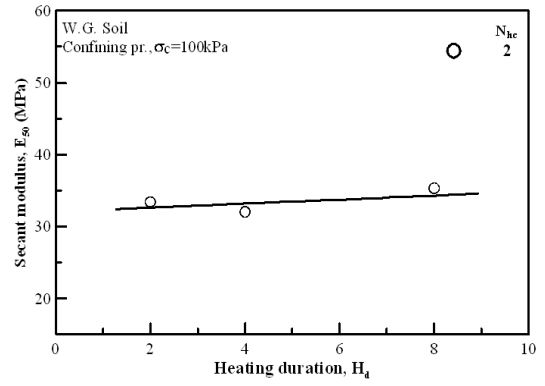


(c) $N_{hc} = 3$

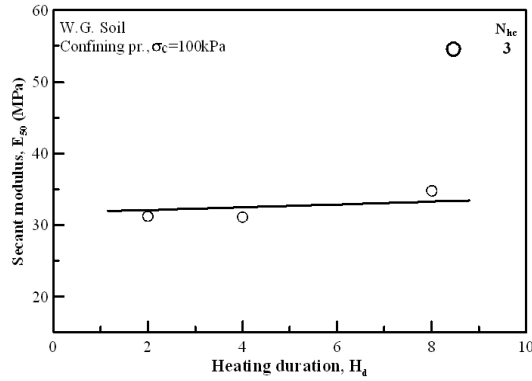
Fig. 17. Variation of E_{50} with N_{dc} for various H_d (sand)



(a) $N_{hc} = 1$



(b) $N_{hc} = 2$



(c) $N_{hc} = 3$

Fig. 18. Variation of E_{50} with N_{dc} for various H_d (WGS)

보여주고 있는 Fig. 16에서는 임의 반복 사이클 N_{hc} 에 있어 가열시간이 $H_d = 2 \sim 8hr$ 변화함에 따라 최대 축차응력이 15%이상 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 이러한 결과는 가열-냉각 반복작용에 의한 흙의 강도특성 변화는 흙의 종류에 따라 달라 질수 있음을 의미하는 것으로서 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 반면, 활선탄성계수 E_{50} 의 경우 앞서 $\Delta\sigma_d - \epsilon_a$ 곡선에서 관찰할 수 있었던 바와 같이 모래 및 화강풍화토 공히 H_d 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않아 가열시간 H_d 는 E_{50} 에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 검토되었다.

5. 결론

본 연구에서는 지반에 부과되는 온도변화가 흙의 물리적·역학적 특성에 미치는 영향에 대한 고찰을 위해 모래와 화강풍화토를 대상으로 다양한 온도변화 조건을 구현하고 이에 따른 흙의 입자구조 및 열전도특성, 그리고 응력-변형률-강도 특성 변화 경향을 고찰하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 다양한 가열-냉각 반복 사이클 환경에 노출된 모래 및 화강풍화토에 대해 주사전자현미경(SEM) 촬영결과를 이용한 입자구조 분석 결과 추가 연구가 필요하다고 판단되기는 하나 모래의 경우 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나 세립분이 다소 포함되어 있는 화강풍화토의 경우 가열-냉각 반복작용이 입자구조를 세립화하는 것으로 검토되었다.
- (2) 모래 및 화강풍화토를 가열-냉각 반복 회수와 가열시간(H_d) 등을 변화 시키며 다양한 가열-냉각 반복 사이클 환경에 노출 시킨 결과 열전도율에 있어서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타나 모래와 화강풍화토의 열 특성은 가열-냉각 반복 사이클에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다
- (3) 다양한 가열-냉각 반복 사이클 환경에 노출된 시료로 조성된 시편에 대한 비배수 삼축압축 시험 결과 최대 축차응력 $\Delta\sigma_d$ 과 E_{50} 은 임의 가열시간에 있어 본 연구에서 고려한 반복 사이클(1회~3회) 범위에서 최대 10% 내외의 차이만을 보이는 것으로 나타나 임의 가열시간에서 N_{hc} 이 $\Delta\sigma_d$ 과 E_{50} 에 미치는 영향은 미미한 것으로 검토되었다.
- (4) 임의 반복 사이클 N_{hc} 에 있어 가열시간이 최대축차응

력 및 활선탄성계수에 미치는 영향을 검토한 결과 모래의 경우에는 큰 차이를 보이지 않은 것으로 나타났으나 화강풍화토의 경우 임의 반복 사이클 N_{hc} 에 있어 가열시간이 $H_d = 2 \sim 8hrs$ 변화함에 따라 최대 축차응력이 15%이상 감소하는 것으로 나타나 가열-냉각 반복작용에 의한 흙의 강도특성 변화는 흙의 종류에 따라 달라 질수 있는 것으로 검토되었다. 반면, 활선탄성계수 E_{50} 의 경우 H_d 의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않아 가열시간 H_d 는 E_{50} 에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 검토되었다.

Acknowledgement

This research is supported by Grant No. 2014004636 from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering Foundation. The financial supports are gratefully acknowledged.

References

1. Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Bouazza, A. and Ramana. G.V. (2006), "Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay", *Engineering Geology*, Vol.89, Issues 1-2.
2. Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Bouazza, A. and Ramana. G.V. (2007), "Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44(8):942-956.
3. Brandl, H. (2006), "Energy Foundations and other Thermo-Active Ground Structures", *Geotechnique*, Vol.56(2): 81-122.
4. Cekerevac, C. and Laloui, L. (2004), "Experimental Study of Thermal Effects on the Mechanical Behaviour of a Clay", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.28, No.3, pp.209-228.
5. Choi, H.S., Lee, C.H., Choi, H.P. and Woo, S.B. (2008), "A study on the physical characteristics of grout material for backfilling ground heat exchanger", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.1, pp.37-49.
6. Laloui, L., Moreni, M. and Vulliet, L. (2003), "Comportement d'un Pieu Bi-Fonction, Fondation et Echangeur de Chaleur", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40, No.2, pp.388-402.
7. Laloui, L., Nuth, M. and Vulliet, L. (2006), "Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchange pile", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 30:763-781.

8. McCartney, J.S., HaHaise, D., LaHaise, T. and Rosenberg, J. (2010). "Application of Geoexchange Experience to Geothermal Foundations", *GeoFlorida*, 2010.
9. Ooka, R., Sekine, K., Mutsumi, Y., Yoshiro, S. and SuckHo, H. (2007), "Development of a Ground Source Heat Pump System with Ground heat Exchanger Utilizing the Cast-in Place Concrete Pile Foundations of a Building", *EcoStock* 2007, pp.8.
10. Park, D.H., Kim, K.G., K, D.Y., Jang, J.H. and Park, S.S. (2010), "Numerical Simulation of Standing Column Well Ground Heat Pump System Part 1: Validation of the Numerical Model", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No. 2, pp.33-43.
11. Yoon, S., Lee, S.R., Park, H. and Park, S. (2012), "Thermal Conductivity Estimation of Soils Using Coil Shaped Ground Heat Exchanger", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.32, No.5C, pp.177-183.