

삼축압축시험에 의한 국내 모래의 변형-강도 특성

박춘식* · 김종환** · 박철수***

Park, Choon Sik*, Kim, Jong Hwan**, Park, Cheol Soo***

A Characteristic of Deformation and Strength of Domestic Sands by Triaxial Compression Tests

ABSTRACT

This study conducted experiment for understanding engineering characteristics of domestic sands by examining standard sand and sand from Yokji Island and Nakdong River in terms of confining pressure, K_0 , over consolidation and relative density factors through triaxial compression test. The test showed that deviator stress by strain positively changed as confining pressure and relative density grow while K_0 and over consolidation factors do not directly correlated with it. Angle of internal friction decreases as confining pressure increases which strengthens contact force between particles, and declines as relative density drops, whereas K_0 and over consolidation factors hardly affect the results. When it comes to volumetric strain, volume expansion decreases as confining pressure increase due to crushability and rearrangement of particles while K_0 and over consolidation shows same movement unconditionally, and relative density appears compressed as it grows at the beginning however it expands as axial strain increases. Modulus of elasticity (E_{sec}) by strain has tendency into convergence resulting in initial secant modulus of elasticity (E_{im}) > secant modulus of elasticity (E_{sec}) > tangent modulus of elasticity (E_{tan}). On the other hand, it grows as confining pressure and relative density increase while indicating similar modulus of elasticity (E_{sec}) regarding on K_0 and over consolidation. Slope of critical line (M) tended to decrease as confining pressure increases, follow same line according to K_0 , confining pressure and relative density, and increase as relative density grows.

Key words : Triaxial compression test, Angle of internal friction, Modulus of elasticity, Strain, Slope of critical line M

초 록

본 연구에서는 국내 모래의 공학적 특성을 파악하기 위하여 표준사, 육지사, 낙동강사를 이용하여 구속압 조건, K_0 조건, 과압밀 조건, 상대밀도 조건을 다르게하여 삼축압축시험을 실시하였다. 삼축압축시험 결과, 변형률 ϵ_1 에 따른 축차응력 q 의 변화는 구속압 σ_3 와 상대밀도 D_r 이 클수록 크게 변화하였으나, K_0 조건과 과압밀 조건변화와 크게 상관없이 나타났다. 모래의 최대 내부마찰각(ϕ_{max})은 구속압이 클수록 입자간의 접촉력이 크게 되어 작아지는 경향을 나타내었고, K_0 조건과 과압밀 조건에 따라서는 거의 변화가 없는 것으로 나타났으며, 상대밀도에 따라서는 상대밀도가 감소함에 따라 내부마찰각도 작아지는 경향을 나타내었다. 체적변형률(ϵ_v)은 구속압이 클수록 입자의 과쇄성과 입자간의 재배열에 의해 체적 팽창이 작게 나타났으며, K_0 조건과 과압밀 조건에서는 조건에 상관없이 거의 같은 거동을 보였고, 상대밀도에 따라서는 상대밀도가 커질수록 초기에는 압축되다가 축변형률(ϵ_1)이 증가할수록 팽창하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 변형률 변화에 따른 탄성계수 E_{sec} 는 변형률이 커질수록 차츰 수렴하는 경향을 나타내었고, 축차응력(q)-변형률(ϵ_1) 관계에서 초기할선 탄성계수(E_{im}) > 할선 탄성계수(E_{sec}) > 접선 탄성계수(E_{tan}) 순으로 탄성계수의 크기가 산정되었으며, 구속압 및 상대밀도가 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 경향을 보였고, K_0 및 과압밀에 따라서는 거의 비슷한 탄성계수를 나타내었다. 접선 탄성계수에 의한 정규화에 대해서는 다양한 증가비로 증가하는 경향을 보였다. 한계상태선의 기울기 M 은 구속압이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, K_0 및 구속압, 상대밀도에 따라서는 동일선상에 표현되며, 상대밀도가 증가할수록 한계상태선의 기울기 M 도 증가하는 경향을 보였다.

검색어 : 삼축압축시험, 내부마찰각, 탄성계수, 변형률, 한계상태선의 기울기

* 정회원 · 창원대학교 토목공학과 교수 (pcs@changwon.ac.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 창원대학교 토목공학과 (Corresponding Author · Changwon National University · gypsis@nate.com)

*** 삼성물산 건설부문 부장 · 공학박사 (h12tpk@naver.com)

Received October 31, 2013/ revised January 16, 2014/ accepted February 5, 2014

1. 서론

모래에 대한 특성 연구는 다양한 시험방법에 의해 국내외에서 활발하게 진행되고 있으며, 특히 신뢰도가 높은 삼축압축시험 및 평면변형률시험을 통한 연구가 많이 이루어지고 있다. Park et al. (1994), Park (1997; 1998), Park and Jang (1998; 2001; 2002)은 평면변형률시험을 통한 각 종 모래의 특성에 대하여 연구하였고, Ju et al. (1998)은 주문진 표준사의 전단특성의 연구로 상대밀도에 따른 강도특성 연구를 하였다. Jung (2002)은 모래의 조밀한 정도와 구속응력의 변화, 부피변화를 허용한 경우와 허용하지 않는 일정 체적조건에서의 모래의 전단특성을 알아보기 위해 압밀배수 삼축압축시험을 실시하였고, Ahn (2002)은 주문진 표준사에 대한 압밀배수 삼축압축시험을 수행하여 한계상태선의 기울기 M 값에 대하여 연구하였다. 또한 Seok (2008)은 국내의 다양한 모래들에 대한 압밀배수 삼축압축시험을 통해 다양한 시험조건에 대하여 K 값 및 Stress-Dilatancy에 대하여 규명하였으며, Kim et al. (2005)은 주문진 표준사의 과압밀비와 함수비를 고려한 강도 및 변형특성을 연구하였다. Seong (2010)은 불포화 실트질모래의 삼축압축특성에 관한 연구에서 k_0 압밀 시 포화도와 불포화도가 비슷한 거동을 하는 것으로 보였고, 파괴시에는 포화도에 비해 불포화도의 강도가 강한 것으로 확인하였다. Song (2010)은 입도가 불량한 불포화 모래시료의 삼축압축특성에 관한 연구에서 k_0 압밀 단계에서 정지토압계수는 0.24~0.25이고, 파괴단계에서는 내부마찰각은 43.8°로 얻었다. Cha (2010)는 낙동강 실트질모래의 불포화 전단강도 특성 연구에서 배기비배수 조건에서의 흡인력과 실트함유율을 달리하여 모래지반의 내부마찰각과 접착력의 변화를

측정하였다. Raju (2008)는 삼축시험에 의한 주문진 표준사의 변형특성에 관한 연구에서 개발된 시험방법에 의해 변형특성을 연구하였다.

Hetter and Vardoulakis (1984)는 삼축압축시험에서의 Karlsruhe Sand의 ϕ_{max} 는 구속압이 크게 되면 내부마찰각 ϕ_{max} 가 감소하지만 구속압 $\sigma_3=400$ kPa 이하에서는 ϕ_{max} 는 일정하게 되는 것을 나타내었으며, Fukushima and Tatsuoka (1984)는 포화 Toyoura Sand 공시체를 사용하여 저구속압에서 삼축압축배수시험, 평면변형률압축시험을 실시하여 ϕ_{max} 의 구속압 의존성에 대하여 연구하였다. Tatsuoka et al. (1986)은 포화된 Toyoura Sand 공시체를 이용하여 평면변형률 압축시험을 실시하여 저구속압($\sigma_3 < 50$ kPa)에서는 ϕ_{max} 의 구속압 의존성은 크게 없다는 연구를 수행하였다.

이와 같이 모래에 대한 특성 연구는 삼축압축시험, 평면변형률 시험을 이용하여 다양한 연구들이 이루어지고 있지만, 사용된 재료에 대한 다양성으로 인해 기본 물성이나 역학적 특성을 직접 비교하기에는 상당한 어려움이 있다. 따라서 많은 재료들 중에 국내에서 표본이 될 수 있는 재료에 대한 정확한 특성 연구가 필요할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 삼축압축시험을 통하여 국내의 대표적인 모래시료인 주문진 표준사, 낙동강사, 육지사를 이용하여 비교적 간단한 식으로 지반재료의 특성을 명확히 기술할 수 있는 한계상태 이론의 특성 값인 M 값과 각 모래들의 물리적 특성과 응력-변형률, 전단강도, 탄성계수에 대한 특성에 대하여 연구하였고, 본 연구를 통해 연약지반의 트래픽커빌리티 증진을 위한 S.C.P 재료로서 모래의 강도-변형 특성 등 다양한 조건에 따른 재료특성 연구에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

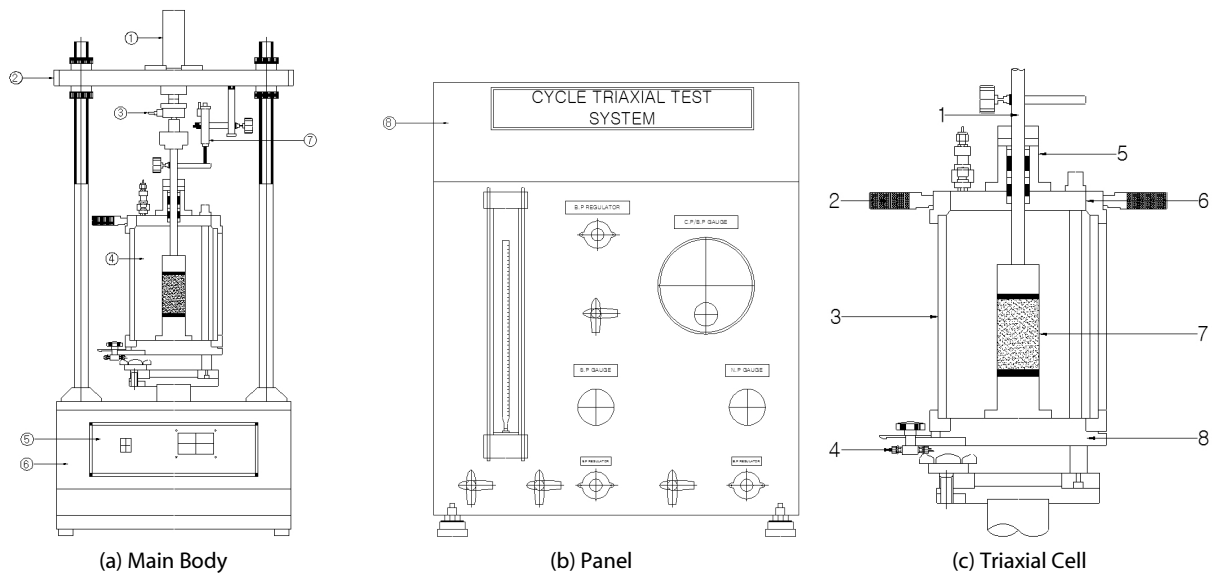


Fig. 1. Triaxial Compressive Tester

Table 1. Triaxial Compressive Tester

No	Main body, Panel				Triaxial cell			
	Description	Material	Quantity	Remarks	Description	Material	Quantity	Remarks
1	Cylinder Assembly		1		Dynamic Load	Stainless	1	
2	Frame Assembly	Steel	1		Handle Grip	Steel	2	
3	Load Cell		1	5kN	Main Tube	Acrylic	1	7000cc
4	Cell Ass'y		1	7000cc	2-Way Valve	Brass	3	
5	Controller		1	LCD	Bearing Housing	Aluminium	1	
6	Panel	Steel	1		Upper Disc	Aluminium	1	
7	Linear Potentiometer		1	30mm	Sample	Clay&Sand	1	30mm
8	Panel	Steel	1		Low Disc	Aluminium	1	50mm

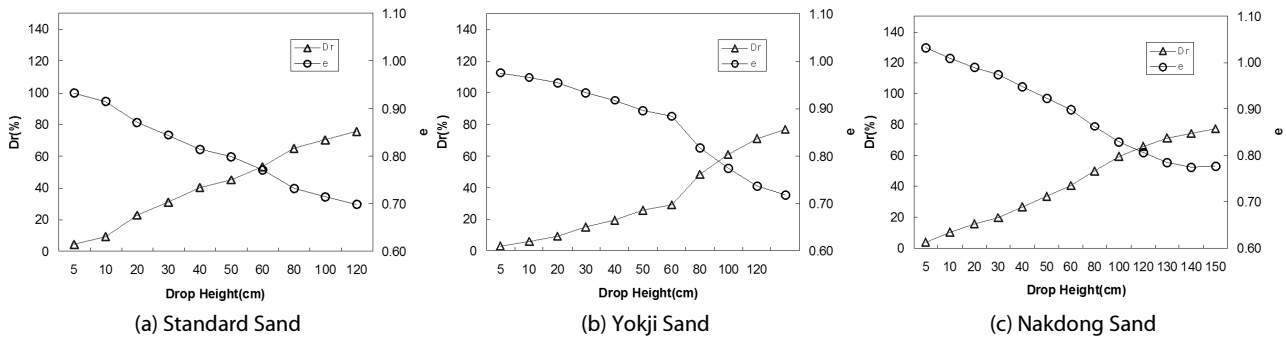


Fig. 2. e and Dr by Dropping Height

2. 삼축압축시험

2.1 삼축압축시험기

본 연구에서 사용된 삼축압축시험기는 가능한 시험종류로는 동적물성 산정을 위한 진동반복삼축시험, 전단강도 산정을 위한 비압밀비배수삼축시험(UU), 압밀비배수삼축압축시험(CU), 압밀 배수삼축압축시험(CD) 등이다. 또한 삼축압축시험기는 본체부와 판넬부, 프로그램 운영을 위한 PC로 구성되어 있으며, 다음 Fig. 1 and Table 1에 구성도 및 설명을 나타내었다.

2.2 공시체 제작

삼축압축시험을 시작하기 전에 공시체의 제작은 특히 사질토에 대해 일정한 상대밀도를 유지하는 것은 매우 중요한 사항이다. 그러므로 본 시험에서는 일정한 상대밀도를 유지하기 위해서 공중 낙하법으로 각각의 높이별로 모래를 낙하시켜 각 높이에 따른 간극비와 상대밀도를 Fig. 2와 같이 도출하여 삼축압축시험 시 일정 높이에서 모래를 자유 낙하시켜 직경 50 mm, 높이 100 mm의 크기의 조밀한 상태로 공시체를 제작하였다. 또한 제작한 공시체를 삼축셀 내부에 올려놓고 구속압과 배압의 차이를 5 kPa로 유지하면

서, B계수($B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma}$)가 0.95 이상이 되도록 공시체를 포하시켰다.

2.3 시료 특성

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 주문진 표준사(이후 표준사), 통영 옥지도 해안의 옥지사(이후 옥지사), 경남 창원시 동읍의 낙동강사(이후 낙동강사)의 입도분석 결과를 나타낸 것이다. 표준사, 옥지사, 낙동강사는 전체적으로 균등한 입도분포를 보이고 있으며, 옥지사의 경우 크고 작은 다량의 조개껍데기를 함유한 해사이기 때문에 No.10체에 걸려 조개껍데기 및 불순물을 제거한 후 시험을 수행하였다. 각 모래에 대한 물리적 특성은 Table 2에 나타내었다.

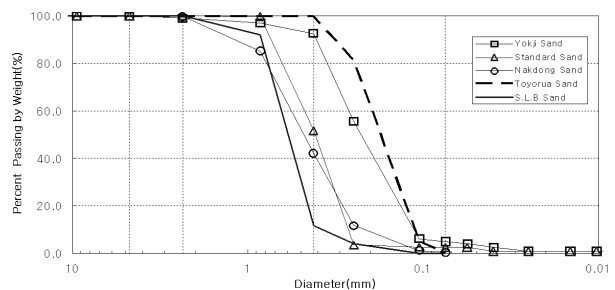


Fig. 3. Grading Curve of Sands

Table 2. Basic Properties of Sands

Division	Gs	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _g	e _{max}	e _{min}	USCS
Standard sand	2.626	0.274	0.346	0.499	1.82	0.88	0.947	0.617	SP
Yokjk sand	2.631	0.117	0.175	0.271	2.31	0.97	0.987	0.636	SP
Nakdong sand	2.644	0.228	0.356	0.603	2.64	0.92	1.047	0.680	SP

Table 3. Triaxial Compression Test Conditions

Division	Dr(%)	State of stress after consolidation		OCR	K ₀
		σ ₃ '(kPa)	σ ₁ '(kPa)		
Confining pressure	75	30	30	1	1
		50	50		
		80	80		
		200	200		
		350	350		
K ₀ consolidation	75	50	50	1	1
			143		0.35
			111		0.45
Over consolidation	75	50	50	1	1
				4	
				7	
Dr	40	200	200	1	1
	50				
	60				
	75				

2.4 단면마찰경감층

입상체를 사용하여 삼축압축시험이나 평면변형률입축시험 등 실내요소시험을 실시할 경우, 정확한 강도·변형특성을 구하기 위해서는 공시체가 요소로써 거동해야 한다. 즉, 공시체 내의 응력과 변형률 분포가 일률적이어야 할 필요가 있다. 단면마찰을 최소화시키기 위하여 Rowe and Barden (1964) 및 Arthur and Dalili (1979)가 제안한 실리콘그리스와 고무막(membrane)으로 구성된 단면마찰경감층(lubrication layer)이 사용되어져왔다. 또한 Tatsuoka et al. (1984)에 의해 입상체와 강성인 면 사이에 발생하는 마찰경감층의 메커니즘에 대하여 연구하였고, 국내에서는 Park and Jang (1998)이 단면마찰경감층에 대하여 연구하였다. Tatsuoka et al. (1984)의 연구는 Toyoura 모래에 대해 초기 그리스 두께 50 μm, 고무막, 두 개 종류의 그리스 : 실리콘 그리스 KS63G (이하 KS63G 그리스), 고진공 실리콘 그리스(이하 Dow 그리스)로 구성된 단면마찰경감층에 대하여 최초 재하시의 낮은 압력에서는 KS63G 그리스가, 높은 압력에서는 Dow 그리스 좋은 성능을 발휘한다는 결과를 얻었다. 또한 Park and Jang (1998)의 연구에서는 S.L.B 모래의 실내요소시험에 사용될 공시체 상하단면에서의 마찰경감층은 파괴시의 σ₁ 즉, (σ₁)_f가 30 kPa 정도 이하로 되는 구속압 σ₃가 5 kPa

일 때는 KS6G 그리스를, 그 이상일 때는 Dow 그리스를 사용하는 것이 유리하다고 결론지었다. 따라서 본 연구에서는 단면마찰경감층을 본 연구에서 사용된 모래와 기존 연구자료를 비교한 Fig. 3의 입도분포결과를 바탕으로 하여, 모든 시험과정에서 σ_v이 30 kPa 이상에서 파괴되므로 Dow 그리스와 고무막(membrane)을 이용하여 구성하였다.

2.5 시험 조건

본 연구는 구속압력, 압밀조건 및 상대밀도에 따른 한계상태의 기울기 M 값, 변형률에 따른 모래의 강도 및 탄성계수 특성을 연구하기 위하여 Table 3과 같은 다양한 조건에 대하여 압밀배수 삼축압축시험을 실시하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 축변형률(ε₁)에 따른 축차응력(q) 및 체적변형률(ε_v)의 관계

상대밀도 75%일 때 초기 구속압이 30 kPa, 50 kPa, 80 kPa, 200 kPa, 350 kPa로 구속된 조건에 대한 삼축압축시험 결과,

구속압이 큰 공시체에 있어서는 전단띠(shear band)가 집중해서 전단띠에 의해 분할된 2개의 부분이 강체와 같은 취성거동을 하는데 반해 저구속압일 때는 입자끼리 결합력이 약하기 때문에 전단띠가 한 방향으로 생겨도 거기에 변형이 집중되지 않고 다른 방향으로 변형이 형성되면서 파괴가 이루어진다. 따라서 구속압이 클수록 q' 이 크게 나타나는 경향을 보였고, 체적변화는 구속압이 클수록 체적 팽창이 작게 발생하였다. Fig. 4에는 각 모래의 구속압 조건에

대하여 축변형률(ϵ_1)에 따른 축차응력(q'), 체적변형률(ϵ_v) 관계를 나타내었다.

Figs. 5 and 6의 K_0 압밀 조건과 과압밀 조건에 따른 삼축시험 결과, K_0 압밀 및 과압밀비의 영향에 관계없이 축변형률(ϵ_1)에 따른 축차응력(q')과 체적변형률(ϵ_v)은 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 이는 Park (1997; 1998)의 평면변형률시험 결과와도 동일한 결과로 나타났다. 따라서 모래의 경우 K_0 압밀 및 과압밀비

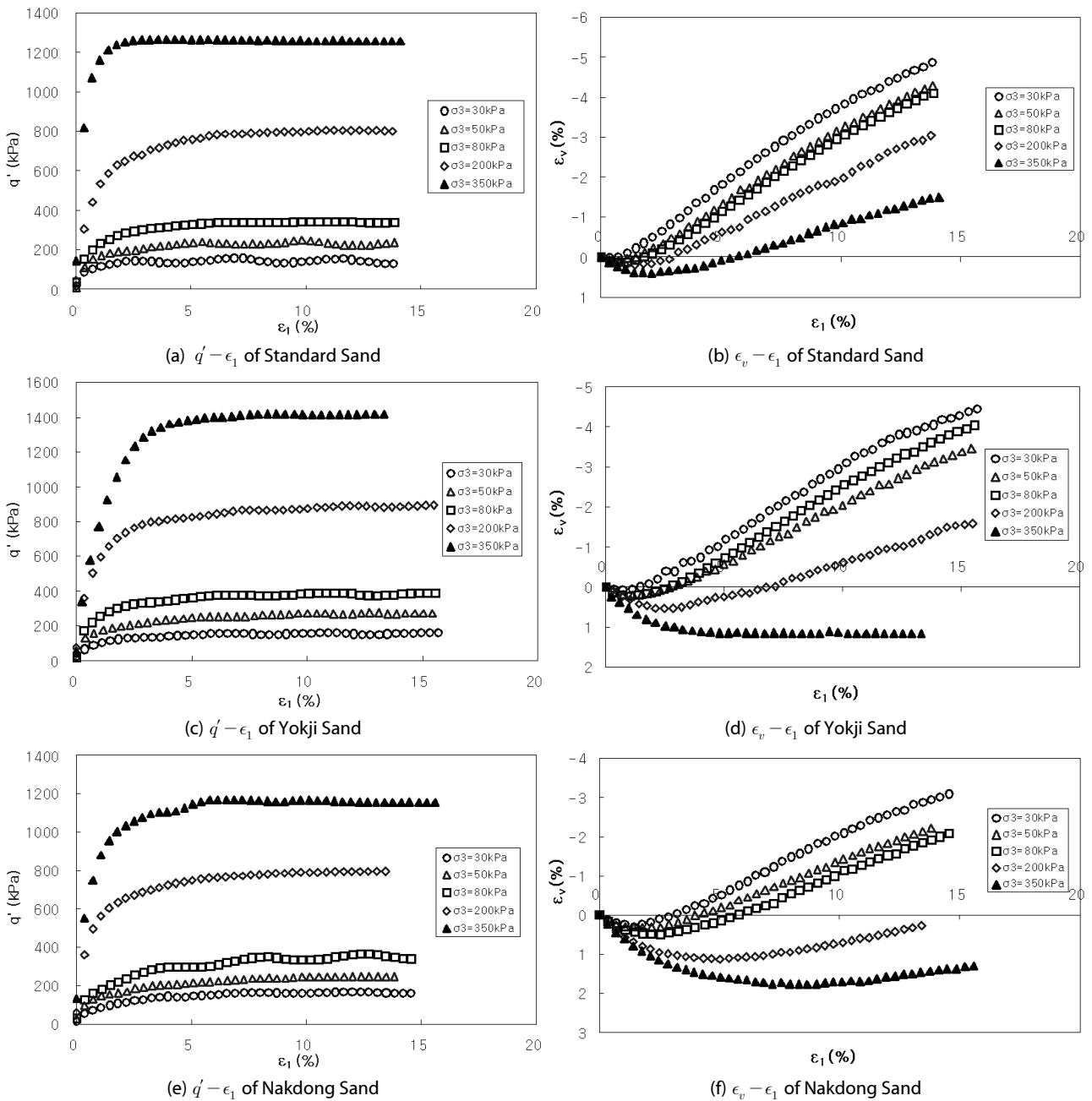


Fig. 4. Results by Confining Pressure Conditions

삼축압축시험에 의한 국내 모래의 변형-강도 특성

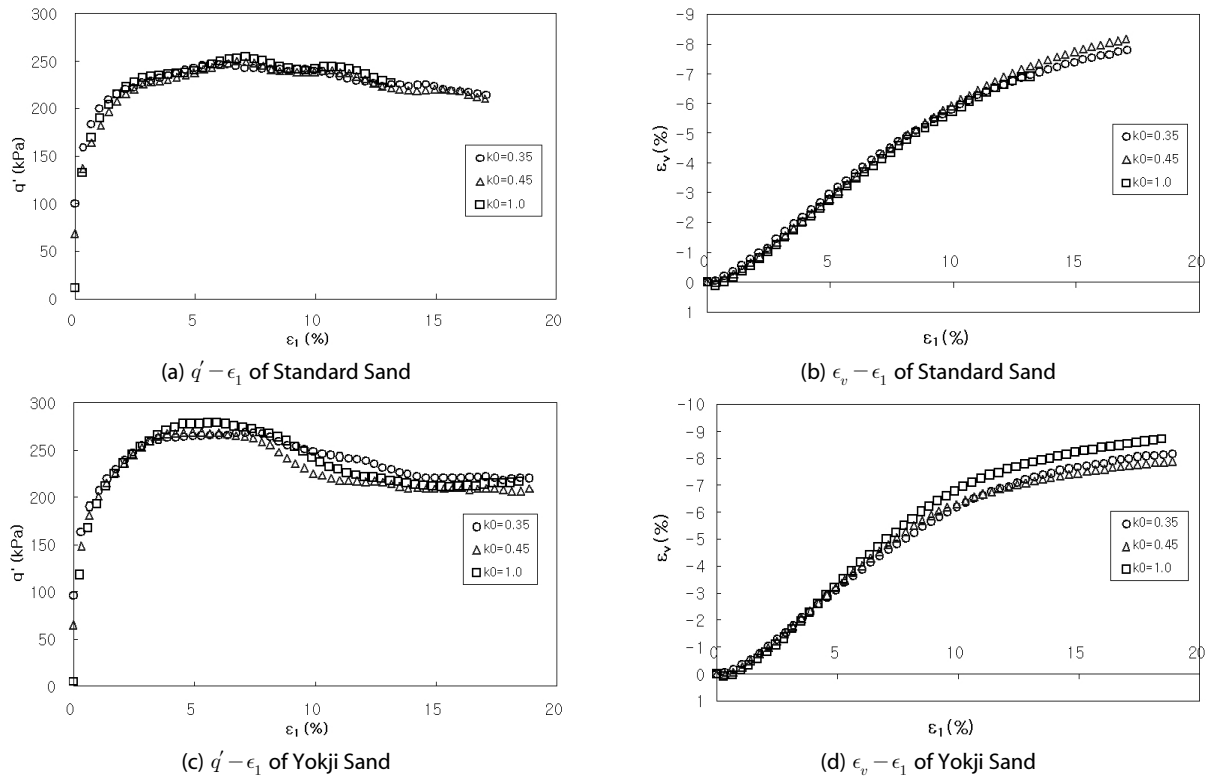


Fig. 5. Results by K_0 Conditions

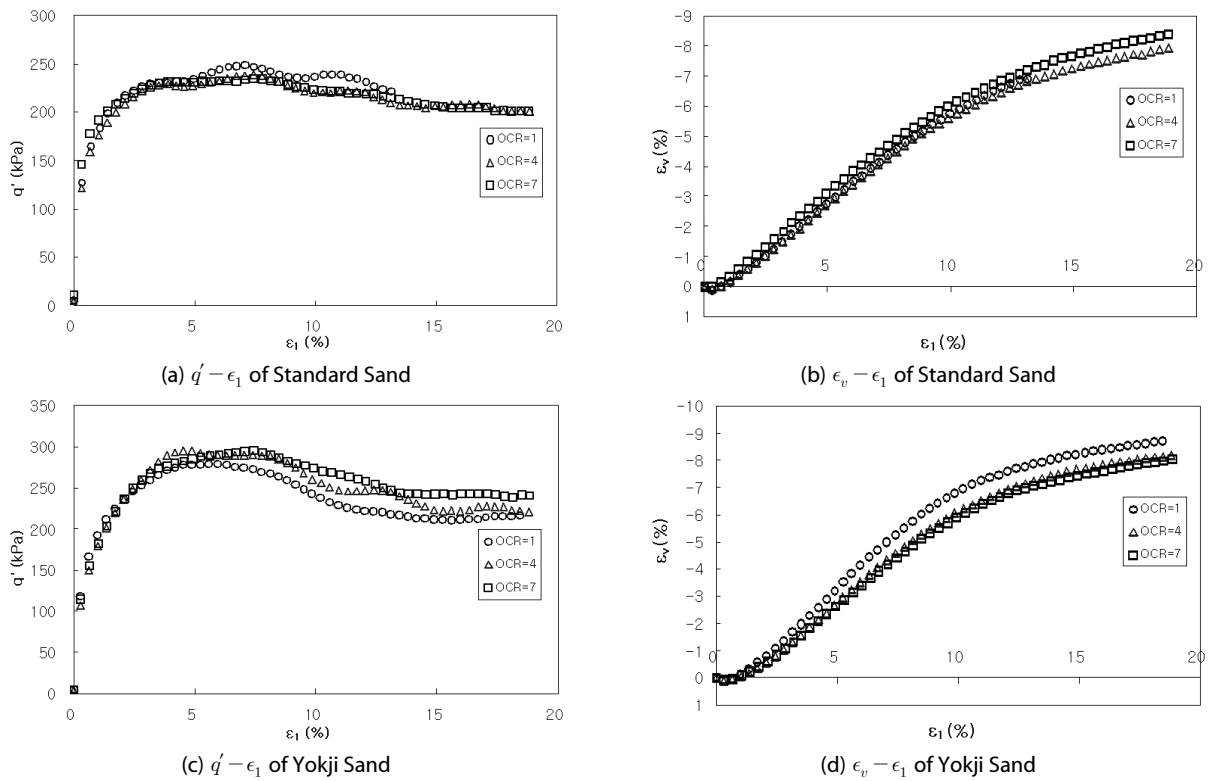


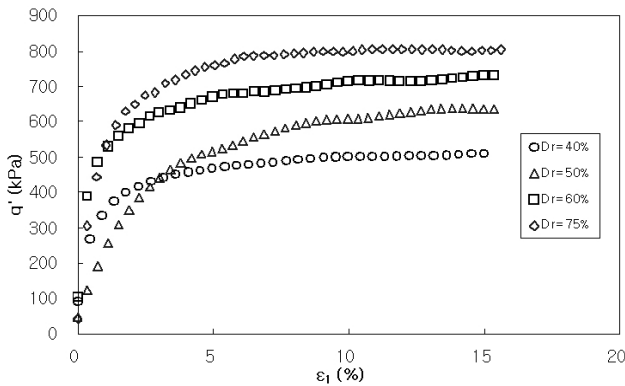
Fig. 6. Results by OCR Conditions

가 달라도 변형 및 강도 특성에는 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 평가된다.

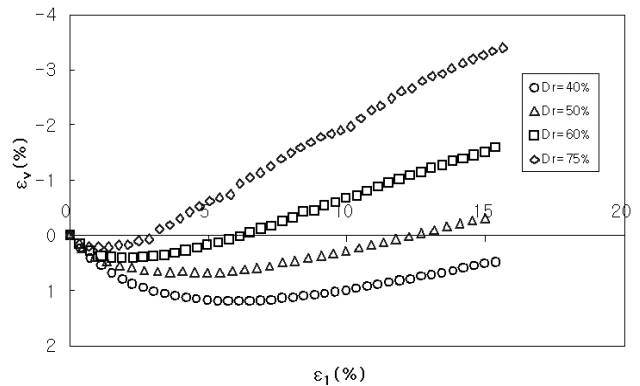
상대밀도에 따른 삼축압축시험 결과, 전체적으로 상대밀도가 40%, 50%, 60%, 75%로 커질수록 축차응력 q' 이 크게 나타나는 경향을 보였고, 체적변화는 초기에는 압축되어 작아지다가 점차 팽창하는 경향을 나타내었고, 상대밀도가 클수록 그러한 경향은 뚜렷하였다. Fig. 7에 각 모래에 대한 상대밀도에 따른 시험결과를 나타내었다.

3.2 전단강도 특성

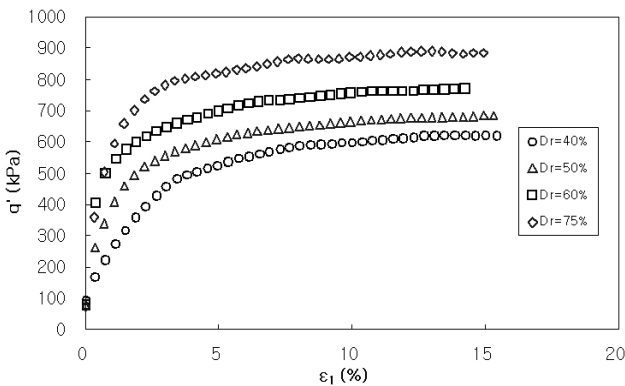
각 시험조건에 따른 국내 모래의 전단강도 특성을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)는 구속압 조건에 따른 국내 모래의 전단강도를 산정하여 하기 위하여 다른 조건을 동일하게 한 후 구속압을 30 kPa~350 kPa로 변화시키며 삼축압축시험을 실시한 후 등방압 밀에 대한 최대 전단강도(ϕ_{max})의 변화를 나타내었다. 구속압이 클수록 내부마찰각이 감소하는 경향을 보인다. 이러한 구속압 의존성은 구속압이 작은 경우 입자간의 접촉력이 작아 파쇄하기 힘들기



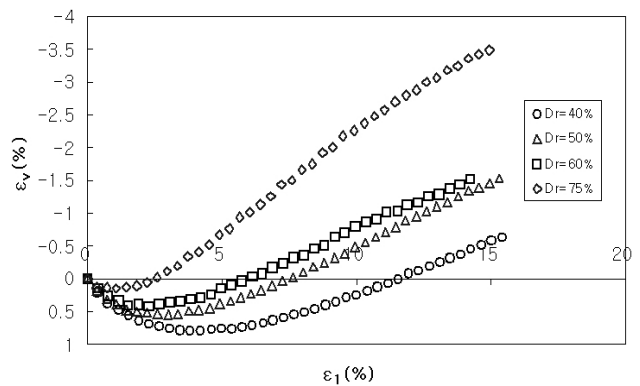
(a) $q' - \epsilon_1$ of Standard Sand



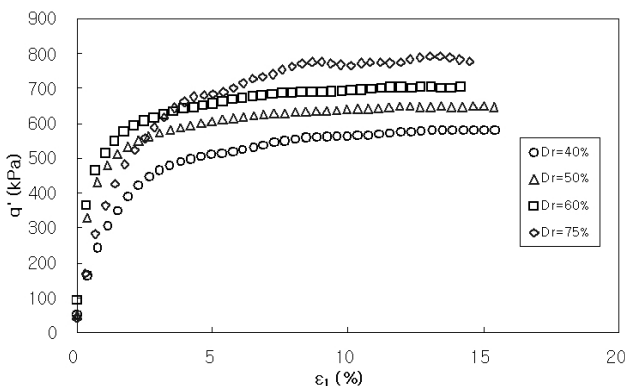
(b) $\epsilon_v - \epsilon_1$ of Standard Sand



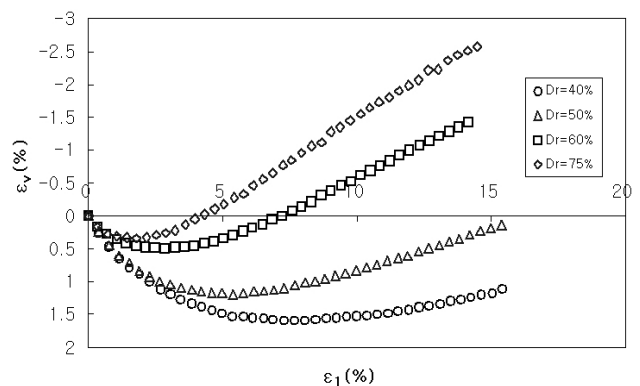
(a) $q' - \epsilon_1$ of Yokji Sand



(b) $\epsilon_v - \epsilon_1$ of Yokji Sand



(a) $q' - \epsilon_1$ of Nakdong Sand



(b) $\epsilon_v - \epsilon_1$ of Nakdong Sand

Fig. 7. Results by Dr Conditions

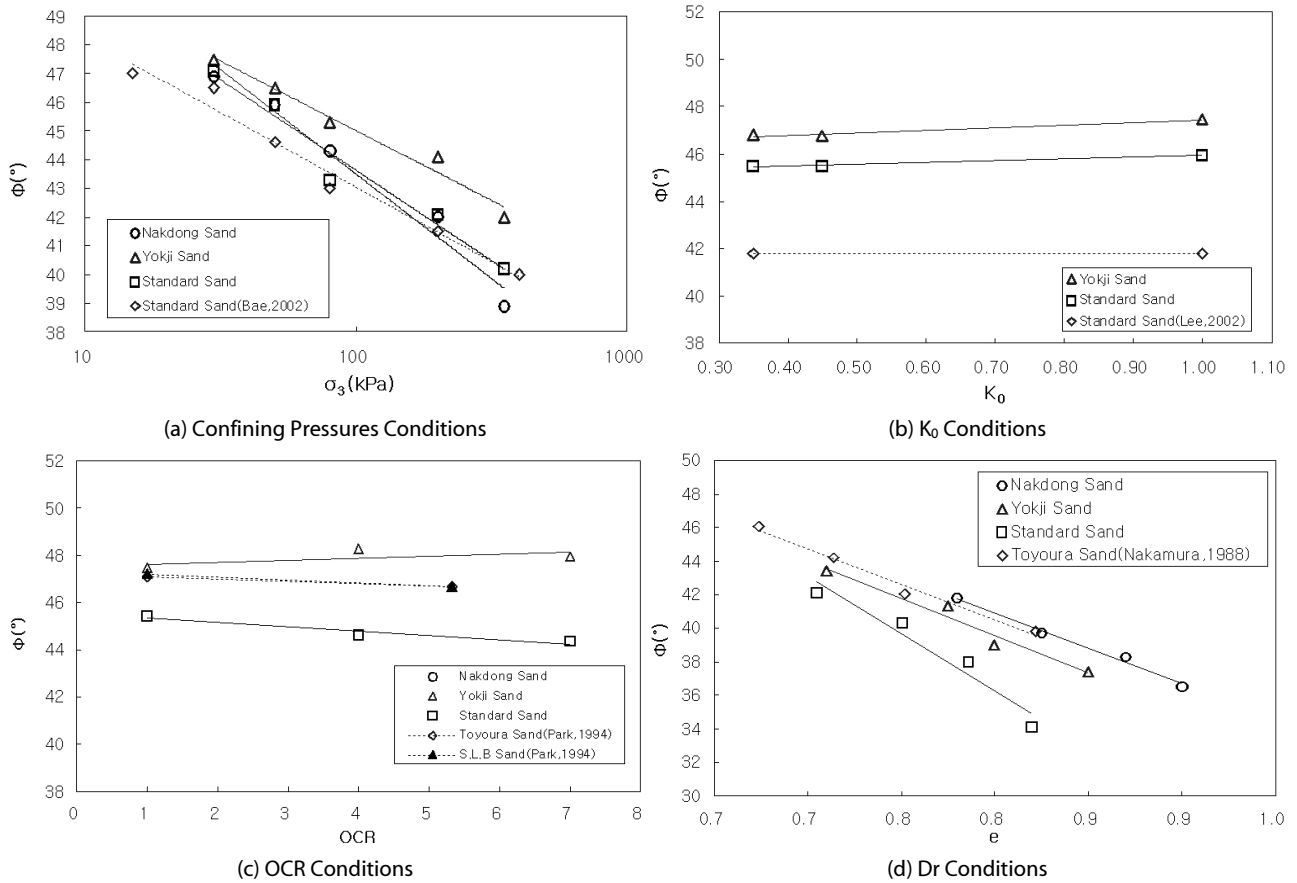


Fig. 8. Change of Friction Angle by Conditions

때문이다. 따라서 전단강도와 체적 팽창성은 크게 되지만, 구속압이 커지면 구속압이 작을 때보다 입자간의 접촉력이 크게 되므로 입자의 파쇄성이 크게 되어 내부마찰각과 체적팽창성이 작아지게 된다(Bolton, 1986; Park et al., 1994; Bae, 2002).

Figs. 8(b) and 8(c) 같이 K_0 및 과압밀 조건에 따른 최대 내부마찰각(ϕ_{max}) 산정결과, 다른 조건이 동일하고 K_0 및 과압밀 조건이 다를 경우에는 내부마찰각의 미세한 차이는 있으나 거의 변화가 없다고 판단되었으며, 이는 K_0 조건에 대한 Lee (2002)과 과압밀비에 대한 Park (1994)의 기존 연구결과와도 잘 맞아 떨어진다.

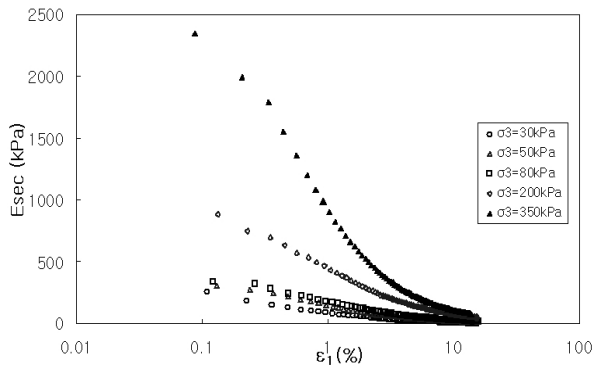
또한 Fig. 8(d)와 같이 상대밀도에 따른 모래별 최대 내부마찰각의 관계에서 상대밀도가 감소함에 따라 내부마찰각은 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 모래의 종류에 따라서는 상대밀도에 따라 내부마찰각의 변화가 가장 크게 발생한 표준사가 가장 상대밀도의 의존성이 크다고 할 수 있으며 옥지사와 낙동강사는 거의 유사한 상대밀도 의존성을 나타내었다. 이는 표준사가 비교적 균등한 입도로 구성되어있기 때문인 것으로 판단되나 모래 3 종류만으로 결론짓기에는 미흡하므로 보다 더 구체적인 연구 필요하다고 사료된다.

하지만 상대밀도에 따른 최대내부마찰각의 변화는 모래의 종류에 따라 약간의 차이가 있다고 판단된다.

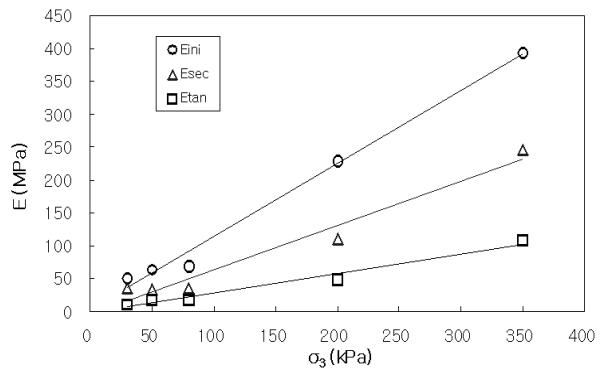
3.3 탄성계수 특성

표준사, 옥지사 낙동강사의 탄성계수 특성은 비슷한 변화특성을 나타내어 Fig. 9에 표준사에 대한 탄성계수 특성을 대표적으로 나타내었다. Figs. 9(a) and 9(b)는 구속압 조건에 따른 시험결과로 구속압(σ_3)이 클수록 탄성계수(E_{sec})는 초기에는 크게 차이를 보이다가 변형률이 커질수록 그 차이가 감소하여 수렴하는 경향을 보였다. 또한 구속압이 30 kPa, 50 kPa, 80 kPa로 작을 경우는 표준사, 옥지사, 낙동강사의 탄성계수(E_{sec})가 비슷한 거동양상을 보이고, 구속압이 200 kPa, 350 kPa로 구속압이 클 경우는 변형률 변화에 따른 탄성계수의 변화가 크게 나타났다. 특히 이러한 경향은 표준사 및 낙동강사에서 비교적 뚜렷하게 나타났고, 증가량은 초기 할선 탄성계수(E_{ini}) > 할선 탄성계수(E_{sec}) > 접선탄성계수(E_{tan}) 순으로 증가하였다.

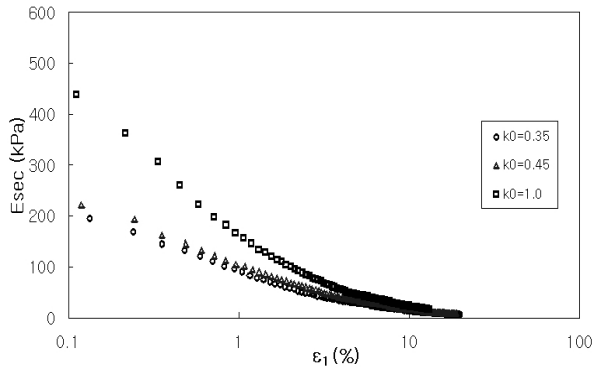
K_0 및 과압밀 조건에 따른 시험결과인 Figs. 9(c) ~ 9(f)에서



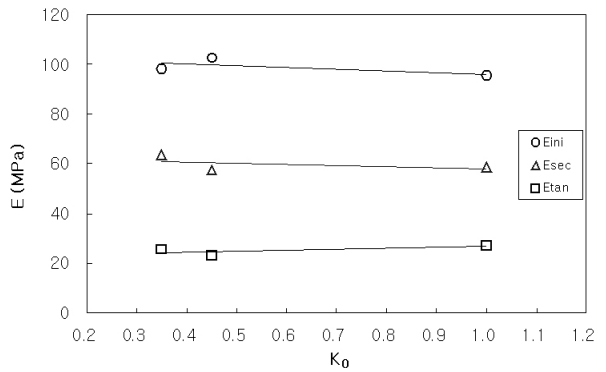
(a) $\epsilon_1 - E_{sec}$ by Confining Pressure



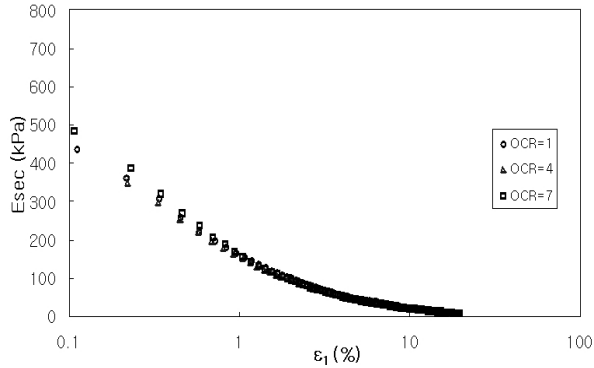
(b) Change of Elastic Modulus by Confining Pressure



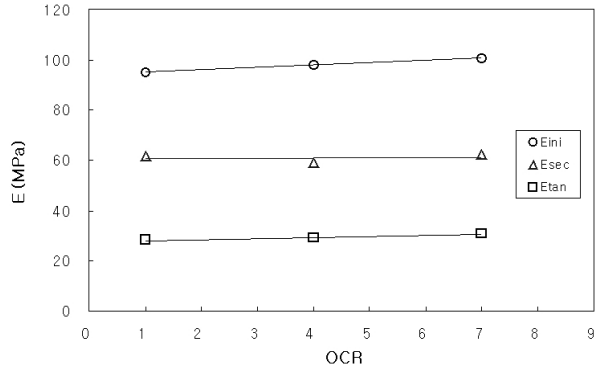
(c) $\epsilon_1 - E_{sec}$ by K_0



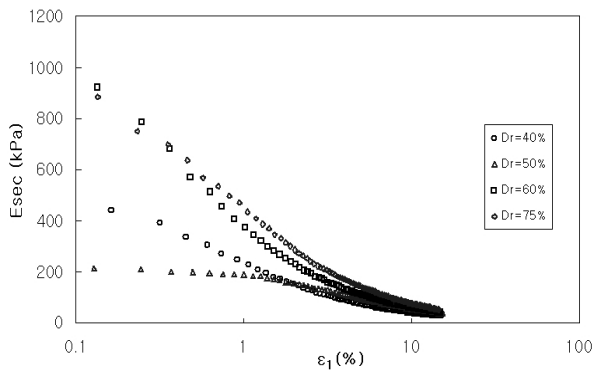
(d) Change of Elastic Modulus by K_0



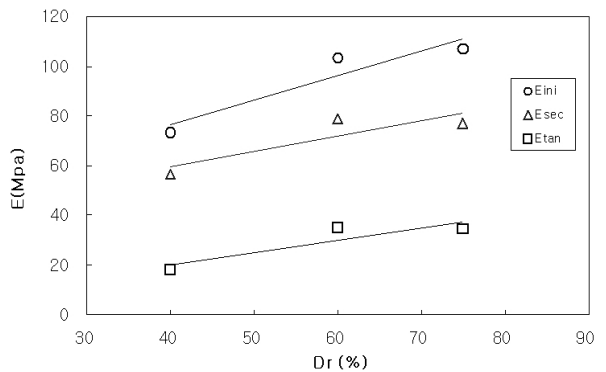
(e) $\epsilon_1 - E_{sec}$ by OCR



(f) Change of Elastic Modulus by OCR



(g) $\epsilon_1 - E_{sec}$ by D_r



(h) Change of Elastic Modulus by D_r

Fig. 9. Elastic Modulus of Standard Sand by Conditions

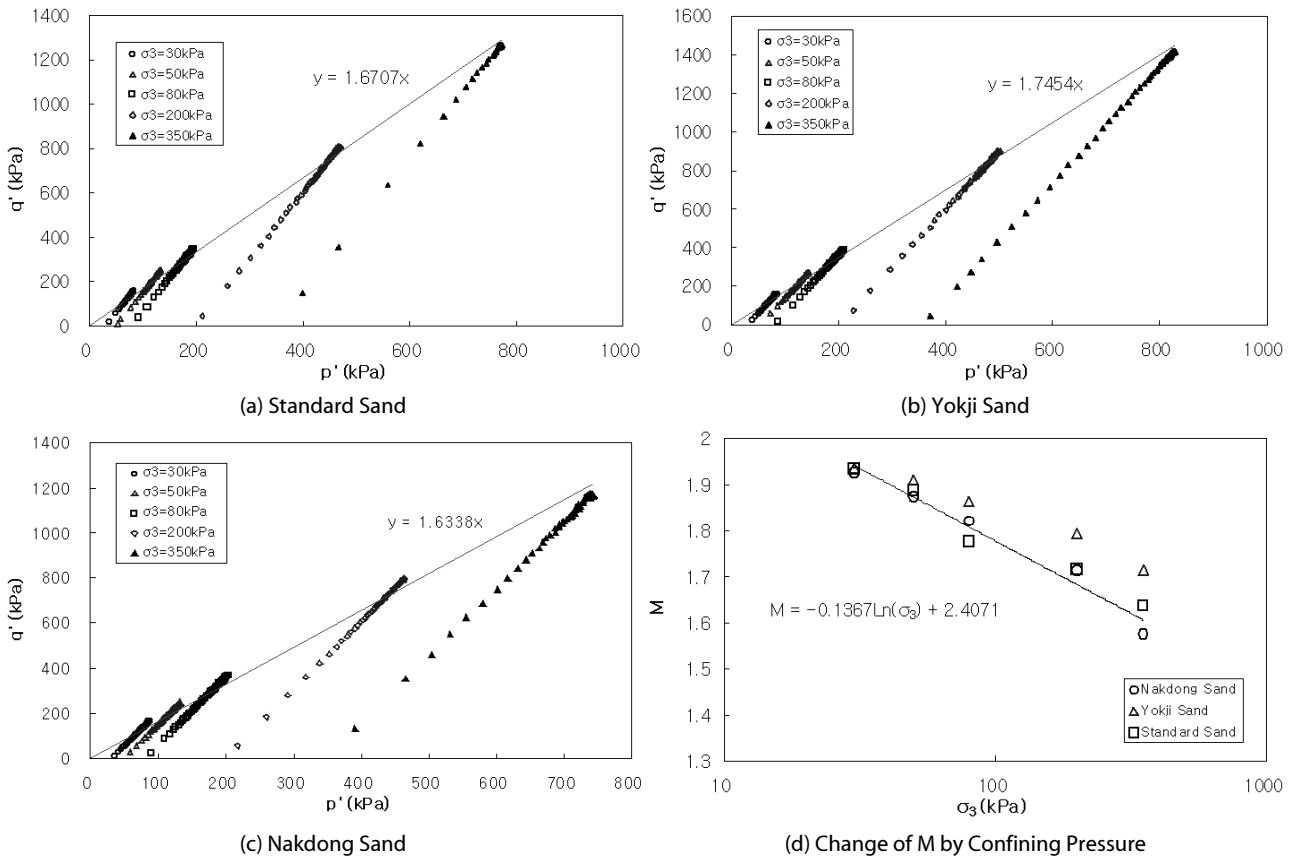


Fig. 10. Stress Path in $p' : q'$ by Confining Pressures Conditions

변형률에 따른 탄성계수(E_{sec})는 조건에 따라 초기에는 약간의 차이가 발생하지만 점차 수렴하는 경향으로 보였고, 구속압 조건에 따른 결과와는 다르게 축차응력(q')-변형률(ϵ_1) 관계에서 초기할선 탄성계수(E_{ini}), 할선 탄성계수(E_{sec}), 접선 탄성계수(E_{tan})는 조건에 따라 거의 비슷한 경향을 나타내었다.

Figs. 9(g) and 9(h)의 상대밀도에 따른 초기할선 탄성계수(E_{ini}), 할선 탄성계수(E_{sec}), 접선 탄성계수(E_{tan})는 초기할선 탄성계수(E_{ini}) > 할선 탄성계수(E_{sec}) > 접선 탄성계수(E_{tan})의 순으로 크게 나타났다. 이는 모래는 비선형 파괴곡선을 이루기 때문인 것으로 판단된다. 또한 당연한 결과이지만 전반적으로 상대밀도가 클수록 탄성계수가 커지는 결과를 나타내었다.

3.4 $p' - q'$ 의 관계

배수삼축압축시험에 대한 응력경로는 $p' : q'$ 공간에서 모두 직선이고 유효연직응력은 p_0' 으로부터 기울기 3으로 올라간다. 그리고 각 시료는 $p' : q'$ 공간에서 하나의 직선을 정의하는 q' 과 p' 값에서 파괴된다. 즉 이것은 전단이 발생함에 따라 더 이상의 축차응력의 변화가 없다는 것을 의미한다. 이들의 관계를 한계상태선 $q' = Mp'$

으로 나타낼 수 있는 한계상태선의 기울기 M 은 구속압력이 커질수록 작아지는 경향을 보였고, 등방압밀에 따른 구속응력에 따른 M 은 표준사는 1.67, 옥지사는 1.75, 낙동강사는 1.63으로 산정되었다. Fig. 10에 각 모래종류별 구속응력에 따른 $p' : q'$ 공간의 응력경로와 구속응력에 따른 기울기 M 의 변화양상을 나타내었다.

K_0 조건에 따른 한계상태선의 기울기 M 은 동일선 상에 형성되고 표준사보다는 옥지사가 크게 산정되었다. 표준사의 M 은 1.89, 옥지사는 1.95로 산정되었다. 이는 Fig. 8(b)의 내부마찰각이 옥지사가 표준사보다 약간 큰 것과 연관지어진다. 즉, 축변형률(ϵ_1) 값이 표준사보다 옥지사가 조금 크게 나타났기 때문이다. 한편 과압밀 조건에 따른 한계상태선의 기울기 M 은 K_0 조건과 동일하게 동일선 상에 형성되었으며, 표준사는 1.87, 옥지사는 1.96으로 산정되었다. 그 결과는 Fig. 11에 나타내었다.

상대밀도에 따른 $p' : q'$ 공간에서의 응력경로에 대한 산정결과는 Table 4 and Fig. 12에 나타내었다. 표준사의 경우 M 은 1.38~1.72, 옥지사는 1.52~1.78, 낙동강사는 1.48~1.71의 범위로 상대밀도가 증가할수록 한계상태선의 기울기 M 도 증가하는 경향을 보였다.

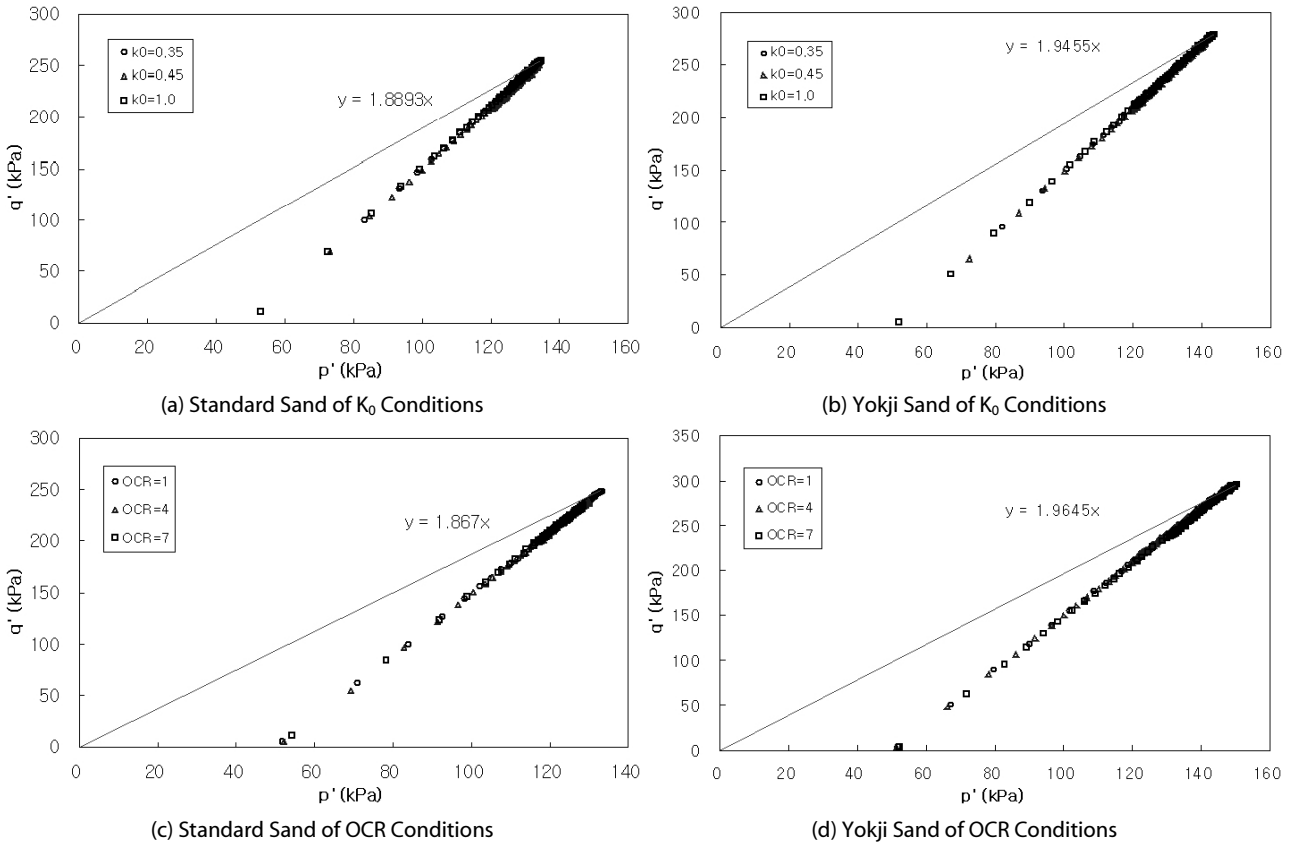


Fig. 11. Stress Path in $p' : q'$ by K_0 and OCR Conditions

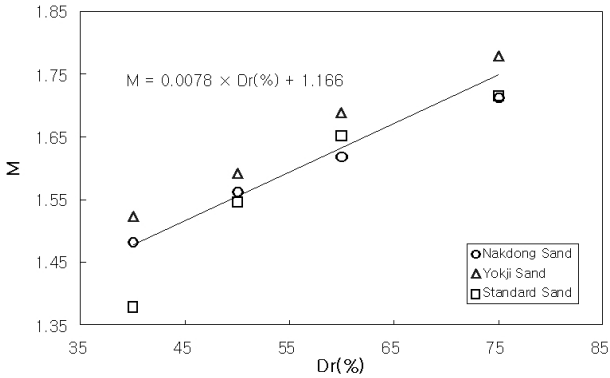


Fig. 12. Change of M by Dr

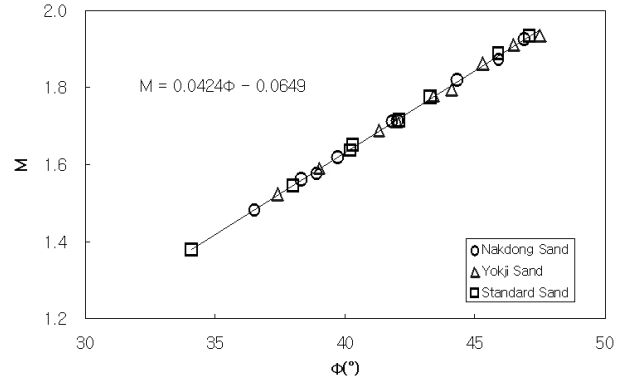


Fig. 13. Change of M by ϕ

Table 4. Slope of Critical Line M by Dr

Division	Dr (%)			
	40	50	60	75
Nakdong sand	1.48	1.56	1.62	1.71
Yokji sand	1.52	1.59	1.69	1.78
Standard sand	1.38	1.55	1.65	1.72

파괴가 한계상태선 상에서 발생한다면 한계상태의 기울기 M 과 내부마찰각 ϕ 는 $M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi}$ 의 관계를 가진다. 따라서 본 연구에서 상대밀도에 따라 산정된 각 모래의 M 과 산정된 전단강도, 즉 내부마찰각 ϕ_{max} 의 상관관계를 Fig. 13과 같이 정리할 수 있고 이 때 정리된 상관식은 기존의 상관식 $M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi}$ 과도 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 표준사, 육지사, 낙동강사의 3종류 국내 모래에 대하여 구속압, K_0 , 과압밀, 상대밀도 조건에 대하여 삼축압축시험을 실시하여 각 모래에 대한 특성연구를 수행하였다.

- (1) 변형률 ϵ_1 에 따른 축차응력 q' 의 변화는 구속압 σ_3 와 상대밀도 D_r 이 클수록 크게 변화하였으나, K_0 조건과 과압밀 조건변화와 크게 상관없이 비슷하게 변화되었다.
- (2) 각 모래의 최대 내부마찰각(ϕ_{max})은 구속압이 클수록 입자간의 접촉력이 크게 되어 작아지는 경향을 나타내었고, K_0 조건과 과압밀 조건에 따라서는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 상대밀도에 따라서는 상대밀도가 감소함에 따라 내부마찰 각도 작아지는 경향을 나타내었다.
- (3) 각 모래의 체적변형률(ϵ_v)은 구속압이 클수록 입자의 과쇄성과 입자간의 재배열에 의해 체적 팽창이 작게 나타났으며, K_0 조건과 과압밀 조건에서는 조건에 상관없이 거의 같은 체적 거동을 보였다. 또한 상대밀도에 따라서는 상대밀도가 커질수록 초기에는 압축되다가 축변형률(ϵ_1)이 증가할수록 팽창하는 경향이 뚜렷하게 나타났다.
- (4) 변형률 변화에 따른 탄성계수 E_{sec} 는 변형률이 커질수록 치층 수렴하는 경향을 나타내었고, 축차응력(q')-변형률(ϵ_1) 관계에서 초기할선 탄성계수(E_{mi}) > 할선 탄성계수(E_{sec}) > 접선 탄성계수(E_{tan}) 순으로 탄성계수의 크기가 산정되었으며, 구속압 및 상대밀도가 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 경향을 보였고, K_0 및 과압밀에 따라서는 거의 비슷한 탄성계수를 나타내었다.
- (5) 한계상태선의 기울기 M 은 구속압 조건에 대하여 표준사는 1.67, 육지사 1.75, 낙동강사는 1.63으로 산정되었고, 구속압이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 K_0 및 구속압, 상대밀도에 따라서는 동일선상에 표현되며, 상대밀도가 증가할수록 한계상태선의 기울기 M 도 증가하는 경향을 보였다.

References

Ahn, B. H. (2002). *A study on the characteristics of the jumunjin standard sand by triaxial compression tests*, M.Eng. Dissertation, Changwon University (in Korean).

Arthur, J. R. F. and Dalili, A. (1979). "On the lubrication of rubber surfaces." *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 96-98.

Bae, S. H. (2002). *Deformation and strength characteristics of jumunjin standard sand by triaxial tests*, M.Eng. Dissertation, Changwon University (in Korean).

Bolton, M. D. (1986). "The strength and dilatancy of sands."

Geotechnique, Vol. 36, No. 1, pp. 65-78.

Cha, B. G. (2010). *Unsaturated shear strength characteristics of Nak-Dong river silty sand*, M.Eng. Dissertation, Kyungpook University (in Korean).

Fukushima, S. and Tatsuoka, F. (1984). "Strength and deformation characteristics of saturated sand as extremely low pressures." *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 24, No. 4, pp. 30-48.

Hetter, A. and Vardoulakis, I. (1984). "Behaviour of dry sand tested in a large triaxial apparatus." *Geotechnique*, Vol. 34, No. 2, pp. 183-198.

Ju, J. W., Park, C. S. and Choi, H. N. (1998). "Triaxial test of Jumunjin standard sand according to the relative density." *Proceeding of 1998 Annual Conference*, Vol. 1998, No. 2, pp. 73-76 (in Korean).

Jung, K. J. (2002). *A study on the shear characteristics of a sand by constant volume triaxial compression test*, M.Eng. Dissertation, Honam University (in Korean).

Kim, H. J., Lee, K. S. and Lee, J. H. (2005). "Strength and stiffness of silty sands with different over consolidation ratios and water contents." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 21, No. 9, pp. 53-72 (in Korean).

Lee, Y. S. (2002). "An experimental study on the effect of stress path on the shear strength of sand." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 345-354 (in Korean).

Park, C. S. (1997). "Anisotropy in strength and deformation properties of a variety of sands by plane strain compression tests(I)." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 13, No. 5, pp. 5-18 (in Korean).

Park, C. S. (1998). "Anisotropy in strength and deformation properties of a variety of sands by plane strain compression tests(II)." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 14, No. 4, pp. 33-45 (in Korean).

Park, C. S. and Jang, J. W. (1998). "Lubrication of specimen ends for granular materials in element tests." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 18, No. 3-5, pp. 689-698 (in Korean).

Park, C. S. and Jang, J. W. (2001). "A study of a variety of sands in poisson's ratio by plane strain compression tests." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 21, No. 6-C, pp. 671-680 (in Korean).

Park, C. S. and Jang, J. W. (2002). "A study of a variety of sands in stress-dilatancy relationships." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No. 1, pp. 41-48 (in Korean).

Park, C. S., Tatsuoka, F., Jang, J. W. and Chung, S. G. (1994). "Confining pressure-dependency on deformation and strength properties of sands in plane strain compression." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 543-551 (in Korean).

Raju Baiju (2008). *A study on deformation characteristics of standard joomunjin sand in triaxial tests*, M.Eng. Dissertation, Chonbuk University.

Rowe, P. W. and Barden, L. (1964). "Importance of free ends in

- triaxial testing.” *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*, ASCE, Vol. 90, No. SM1, pp. 1-27.
- Seok, J. S. (2008). *A study on the stress-dilatancy of domestic sands by the triaxial compression test*, Ph.D. Dissertation, Changwon University (in Korean).
- Seong, Y. H. (2010). *Triaxial compression characteristics of unsaturated silty sands*, M.Eng. Dissertation, Yeungnam University (in Korean).
- Song, H. D. (2010). *Triaxial compression characteristics of unsaturated sands with particle size distribution*, M.Eng. Dissertation, Yeungnam University (in Korean).
- Tatsuoka, F., Molenkamp, F., Torii, T. and Hino, T. (1984). “Behaviour of lubrication layers of platens in element tests.” *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 24, No. 1, pp. 113-128.
- Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. and Fkushima, S. (1986). “Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures.” *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 26, No. 1, pp. 65-84.