

베인 전단시험기를 이용한 낙동강모래의 마찰각에 관한 연구

박성식* · 쯔우안** · 김동락***

Park, Sung-Sik*, Zhou, An**, Kim, Dong-Rak***

Vane Shear Test on Nakdong River Sand

ABSTRACT

A vane shear test (VST) is a simple testing method for determining an undrained shear strength of cohesive soils by minimizing soil disturbance. In this study, the VST was used to determine a shear strength of sand. Dry Nakdong River sand was prepared for loose and dense conditions in a cell and then pressurized with 25, 50, 75 or 100 kPa from the surface of sand. A vane (5 cm in diameter and 10 cm in height) was rotated and a torque was measured within sand. When a torque moment by vane and friction resistance moment by sand is assumed to be equalized, a friction angle can be obtained. When a vane rotates within clay, a uniform undrained shear strength is assumed to be acting on cylindrical failure surface. On the other hand, when it is applied for sand, the failure shape can be assumed to be an octagonal or square column. The relationship between measured torque and resistant force along assumed failure shapes due to friction of sand was derived and the internal friction angle of sand was determined for loose and dense conditions. For the same soil condition, a series of direct shear test was carried out and compared with VST result. The friction angle from VST was between 24-42 degrees for loose sand and 33-53 degrees for dense sand. This is similar to those of direct shear tests.

Key words : Vane shear test, Friction angle, Sand, Failure surface

초록

베인 전단시험은 흙의 교란을 최소화하면서 점성토의 비배수전단강도를 측정하는 간단한 시험이다. 하지만, 본 논문에서는 베인 전단시험기를 이용하여 모래의 배수전단강도를 측정하기 위한 연구를 수행하였다. 건조한 낙동강모래를 원통형 셀에 느슨하거나 조밀한 상태로 재성형한 다음 상부에서 공기압 실린더로 상재하중(overburden pressure)을 25, 50, 75 또는 100kPa 가한 다음 베인(직경 5cm, 높이 10cm)을 회전시켜 회전 모멘트인 최대 토크를 구하였다. 베인 회전 모멘트와 모래 입자의 마찰 저항 모멘트가 평형을 이룬다는 조건을 이용하여 모래의 마찰각을 구하였다. 점토의 경우에는 베인 전단 시 원통형의 회전체 상하면과 주면에 균일한 비배수전단강도인 점착력이 작용한다고 가정하지만, 사질토를 사용한 본 연구에서는 베인 날 주면에서 형성되는 파괴면을 원기둥, 팔각기둥 또는 사각기둥 형태로 가정하여 각각에 대한 마찰각을 계산하였다. 한편, 본 연구에서 제안한 방법을 검증하기 위해 동일한 모래로 직접전단시험을 실시하여 마찰각을 구하였다. 베인 전단시험으로부터 구한 마찰각은 가정한 파괴면의 형태에 따라 느슨한 모래의 경우 24-42도, 조밀한 모래는 33-53도 사이이며, 직접전단시험 결과는 이 범위 내에 속하였다.

검색어 : 베인전단시험, 마찰각, 모래, 파괴면

* 종신회원 · 교신저자 · 경북대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · sungpark@knu.ac.kr)

** 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 석사과정 (Kyungpook National University · zhouan1112@hotmail.com)

*** 정회원 · 호산대학교 철도토목과 조교수 (Hosan University · kdr6324@naver.com)

Received November 3, 2015/ revised February 4, 2016/ accepted April 1, 2016

1. 서론

베인 전단시험(Vane shear test: VST)은 스웨덴 학자 Olsson이 1918년에 발명하였으며, 1918~1919년 사이 스톡홀름 근처에 있는 리딩거(Lidingo) 교량 거동 연구에 사용된 바 있지만 그 당시에는 적절한 계산법이나 배경이론이 없었다. 1930년에 독일 스톡홀름에서 열린 제3회 국제 응용역학회에서 베인 전단시험기가 전시되었으며, 공식적으로 대규모 현장에 적용된 것은 1947년 이후이다 (Young et al., 1988). 1950년에 Cadling and Odenstad (1950)가 베인 전단시험을 현장에 적용한 경험 및 연구성과를 전체적으로 정리하였다. 베인 전단시험기의 사용 초기에는 강도가 약하거나 중간 정도의 포화 점토와 유기질 실트에 사용하였다. Burmister (1956), Crawford and Eden (1965)은 과압밀 점토의 비배수 전단강도가 실제 전단강도보다 작기 때문에 베인 전단시험 적용 시에는 이를 반드시 고려해야 한다고 하였다.

한편, Wilson (1963)은 구속압을 가하지 않은 상태에서 다양한 크기와 재질의 용기에 Zircon 모래를 넣고 베인으로 전단강도를 측정하는 바 있다. 베인 전단시험을 실시하는 사이 배수로 인한 과잉간극수압은 발생하지 않았으며, 파괴면이 원기둥 모양이 아니고 원뿔 형태로 나타났다. 이와 같이 모래에 베인 전단시험을 적용할 경우에는 베인 회전 시 주면으로 형성되는 파괴면이 일정치 않아 저항모멘트를 정확하게 계산하는 것이 매우 어렵다. 한편, 베인 전단속도가 토크 크기에 미치는 영향은 없었으나, 용기의 강성과 베인의 관입 깊이에 따라 토크값에 차이를 보였다. 이와 같이 베인 전단시험을 모래에 적용한 사례는 매우 드물지만, 베인 전단시험은 여전히 간편하고 실용적인 흙의 전단시험법으로 모래와 같은 사질토에 대한 적용 가능성을 연구할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 원통형 플라스틱 셀에 건조한 낙동강모래를 퇴적시킨 후 상재하중을 가한 다음 베인 전단시험을 실시하여 베인 주면으로 형성되는 파괴면이 비교적 일정한 형태가 되도록 유도하였으며, 다양한 파괴면을 가정하여 모래의 마찰각과 같은 전단강도를 구하고자 하였다. 한편, 본 연구에 사용한 낙동강모래는 대구경북지역 인근에 넓게 퇴적되어 있으며, 이에 대한 강도시험 사례도 다수 존재한다(Kim and Kim, 2009; Park et al., 2012).

2. 베인 전단시험

베인 전단시험은 시료의 교란을 최소화하면서 점토의 비배수 전단강도를 구하기 위해 실내 또는 현장에서 많이 사용되고 있다. 지반 내로 베인을 압입한 다음 1분당 6도의 각속도로 회전시킬 때 지반이 가지고 있는 강도에 의한 저항 모멘트와 토크(Torque, T)로 측정되는 회전 모멘트가 평형을 이룬다는 조건 하에 지반의

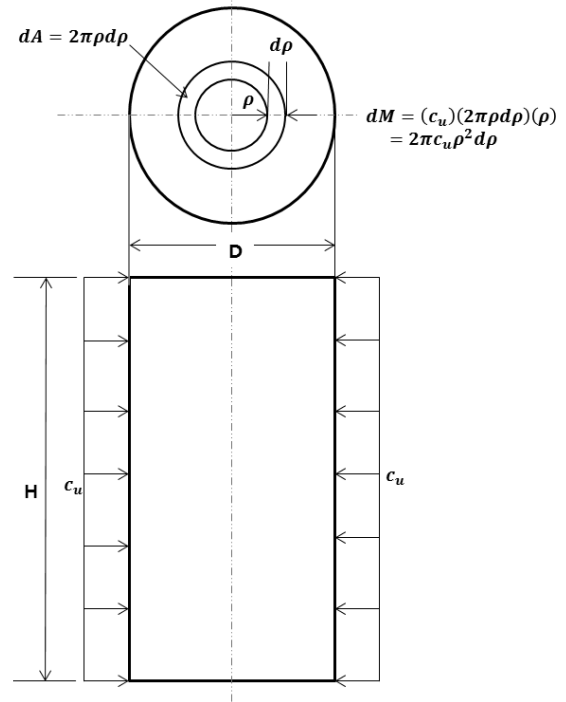


Fig. 1. Resistant Moments Due to Vane Rotation on Clay

강도(점착력 또는 마찰각)를 결정할 수 있다. 여기서 저항모멘트는 베인을 시계방향으로 회전시키면 파괴면이 Fig. 1과 같이 원기둥 모양으로 형성되며 파괴면에 작용하는 전단응력이 균등하게 분포하여 흙이 파괴될 경우 파괴면에 접하는 흙의 응력이 동시에 파괴강도에 도달한다고 가정한다. 즉 파괴 도달 시 점토의 저항 모멘트는 Eq. (1)과 같이 원기둥 주면의 저항모멘트 M_s 와 베인날 위 아래의 원형 저항모멘트 M_e 를 합한 값이 된다.

$$T = M_s + M_e \tag{1}$$

전단 시 점토는 일반적으로 비배수 거동을 보이므로 마찰각은 0이 되고 저항모멘트는 점착력(c_u)에 의해서만 발생하므로 M_s 와 M_e 는 Eq. (2)와 같이 구할 수 있다. Eq. (2)를 Eq. (1)에 대입하면 비배수전단강도 c_u 는 Eq. (3)과 같이 계산된다(높이 H 와 직경 D 의 비가 2일 때).

$$M_s = (\pi DH)c_u \left(\frac{D}{2} \right) = \frac{\pi D^2 H}{2} c_u \tag{2a}$$

$$M_e = 2 \int_0^{D/2} (2\pi\rho d\rho) c_u(\rho) = 2 \int_0^{D/2} 2\pi c_u \rho^2 d\rho = \frac{\pi D^3}{6} c_u \tag{2b}$$

$$T = \frac{\pi D^2 H}{2} c_u + \frac{\pi D^3}{6} c_u \quad (2c)$$

$$c_u = \frac{6}{7} \frac{T}{\pi D^3} \quad (H/D=2) \quad (3)$$

여기서, c_u = undrained shear strength (Pa); T = torque (N·m); D = diameter of the vane (m); H = height of the vane (m).

실제 베인으로 측정된 점토의 비배수 전단강도는 원지반의 전단강도 보다 큰 것으로 알려져 있다(Bjerrum, 1972). 그 원인으로는 현장에서 흙이 붕괴될 때의 전단속도보다 베인 전단시험 시 전단속도가 빠르기 때문이다. 그리고 각 방향의 저항강도가 다를 수도 있으며, 파괴면 각 점의 강도가 베인의 최대강도 도달 시 동시에 도달하지 않으며 점차적으로 현장 지반의 파괴가 일어나기 때문이다. 그래서 Bjerrum (1972)는 이러한 점을 고려하고자 계산된 점토의 비배수 전단강도에 수정계수를 곱한 수정 비배수 전단강도를 제시하였으며, 이 수정계수는 점토의 소성지수와 관련이 있다.

2.1 사질토에 적용한 기존 연구사례

소성역학 중에 Hencky 원리로 마찰각 $\phi = 0$ 인 흙의 토크 T 는 베인 날개수 n 과 상관없으나, $\phi \neq 0$ 인 흙의 토크 T 는 베인 날개수 n 이 감소함에 따라 증가한다. Farrent (1960)는 Hencky 원리로 다음 식을 유도하였다.

$$T = \frac{1}{6} \pi D^3 S_v + \frac{n D^2 H}{8 \tan \phi} S_v \left(e^{\frac{4\pi \tan \phi}{n}} - 1 \right) \quad (4)$$

여기서, T = torque (N·m); D = diameter of the vane (m); H = height of the vane (m); S_v = the shear strength at maximum torque (Pa); ϕ = angle of internal friction; n = the number of vane blade이다. 만약 $n=3$, 6인 베인 날개를 사용하여 측정된 토크를 Eq. (4)에 대입하여 연립방정식 통해서 S_v 와 ϕ 를 계산할 수 있다.

Evans and Sherratt (1948)는 베인이 시계방향으로 회전할 때 파괴면이 원기둥 형태로 파괴되며, 수평방향의 응력이 베인 날개 붕괴 직각방향이 된다는 조건 하에 아래 식을 유도하였다.

$$T = \frac{1}{2} \pi D^2 c \left(H + \frac{D}{3} \right) - D^2 H c \left\{ \frac{1}{\tan \phi} \log \left(1 - \tan \phi \cdot \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \right\} \quad (5)$$

여기서, T = torque (N·m); D = diameter of the vane (m); H = height of the vane (m); ϕ = angle of internal friction; c = cohesion

(Pa).

만약에 베인 직경(D)이 같고 높이(H)가 다른 베인 날개를 사용해서 구한 값을 Eq. (5)에 대입해서 연립방정식을 통해 c , ϕ 값을 구할 수 있다.

2.2 사질토 적용을 위해 본 연구에서 제안한 해석방법

점착력이 없는 모래의 경우, 저항모멘트는 모래 입자끼리의 마찰에 의해서만 발생하므로 M_s 와 M_c , 그리고 토크 T 는 다음 Eq. (6)과 같이 계산할 수 있다. 본 연구에서는 건조한 사질토에 베인 전단시험을 적용하기 위해 베인 주면에 발생하는 파괴면을 모래의 상대밀도(Dr)나 상재하중 등에 따라 원기둥, 팔각기둥 또는 사각기둥 형태로 형성될 수 있다고 가정하였다. 이러한 가정은 상재하중을 가하지 않고 모래지반에 베인을 회전시킬 때 발생하는 파괴면을 표면에서 관찰한 실험에 기초하고 있다. 먼저, 측면 마찰 저항력이 원기둥 형태로 발달한다고 가정하여 마찰각을 계산하면 Eq. (7)과 같다.

$$M_s = (\pi D H) \sigma \tan \phi \left(\frac{D}{2} \right) = \frac{\pi D^2 H}{2} \sigma \tan \phi \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} M_c &= 2 \int_0^{D/2} (2\pi \rho d \rho) \sigma \tan \phi (\rho) \\ &= 2 \int_0^{D/2} 2\pi \sigma \tan \phi \rho^2 d \rho = \frac{\pi D^3}{6} \sigma \tan \phi \end{aligned} \quad (6b)$$

$$T = \frac{\pi D^2 H}{2} \sigma \tan \phi + \frac{\pi D^3}{6} \sigma \tan \phi \quad (6c)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{6T}{3\sigma \pi D^2 H + \sigma \pi D^3} \right) \quad (7)$$

여기서, σ = confining pressure (Pa); T = torque (N·m); D = diameter of the vane (m); H = height of the vane (m); ϕ = angle of internal friction.

다음은 측면 마찰 저항력이 모래의 상대밀도나 상재하중 등에 따라 팔각기둥 또는 사각기둥 형태로 발달한다고 가정하였다. 즉, Fig. 2와 같이 최대 토크값 도달시 베인 주면의 파괴면이 팔각기둥 또는 사각기둥 형태로 형성될 때 이를 팔등분 또는 사등분으로 나누어 팔각기둥일 때 토크 T_{oct} 와 사각기둥일 때 토크 T_{squ} 를 구하였다. Eq. (8)에서 $M_{s(oct)}$ 와 $M_{s(squ)}$ 는 각각의 파괴기둥 주면에 마찰로 발달하는 모멘트이며, $M_{c(oct)}$ 와 $M_{c(squ)}$ 는 위 아래 파괴면을 팔등분 또는 사등분으로 나눈 삼각형에 대한 적분으로 모멘트를 구한 식이다.

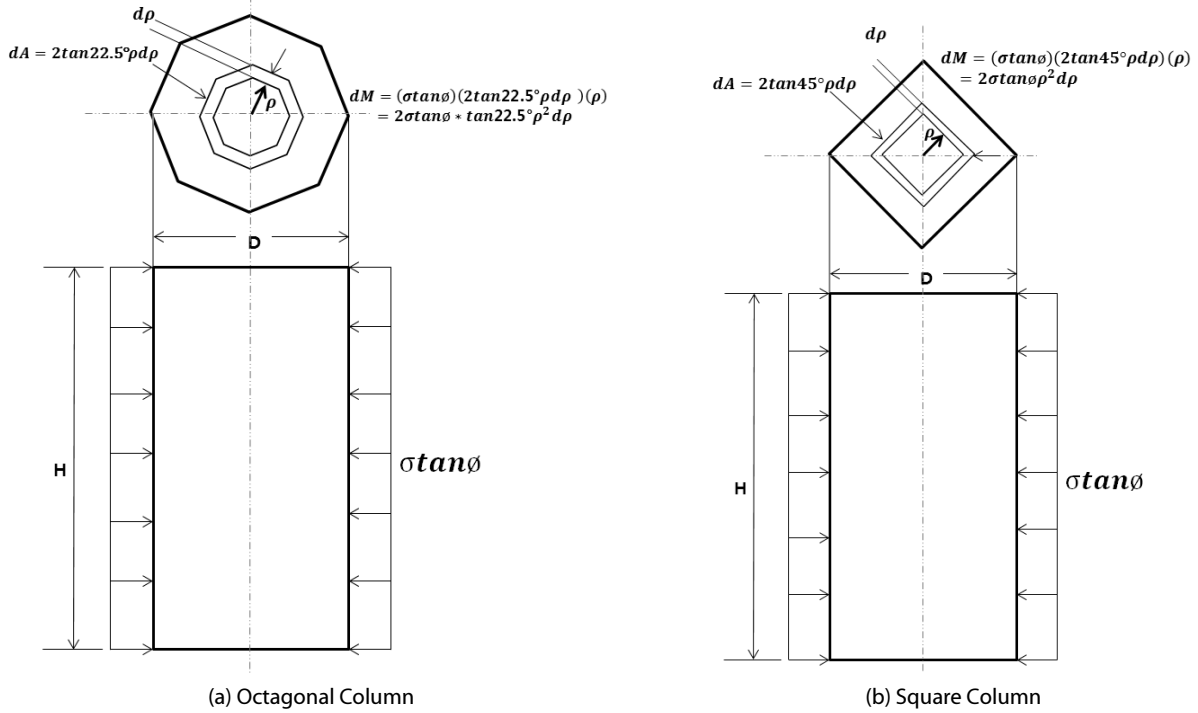


Fig. 2. Failure Surfaces Developed Along the Vane

$$T_{oct} = M_{s(oct)} + M_{e(oct)} \quad (8a)$$

$$T_{squ} = M_{s(squ)} + M_{e(squ)} \quad (8b)$$

$$\phi_{(oct)} = \tan^{-1} \left\{ \frac{T_{(oct)}}{\left(\sigma \left(4HD^2 \sin 22.5^\circ \cos 22.5^\circ + \frac{4}{3} \tan 22.5^\circ D^3 (\cos 22.5^\circ)^3 \right) \right)} \right\} \quad (9a)$$

여기서,

$$M_{s(oct)} = 8 \left(\cos 22.5^\circ \times \frac{D}{2} \right) \sigma \tan \phi \left(\sin 22.5^\circ \times \frac{D}{2} \times 2 \times H \right) = 4HD^2 \sin 22.5^\circ \cos 22.5^\circ \sigma \tan \phi$$

$$M_{s(squ)} = 4 \left(\cos 45^\circ \times \frac{D}{2} \right) \sigma \tan \phi \left(\sin 45^\circ \times \frac{D}{2} \times 2 \times H \right) = HD^2 \sigma \tan \phi$$

$$M_{e(oct)} = 16 \int_0^{D/2 \times \cos 22.5^\circ} (2 \tan 22.5^\circ \rho d\rho)(\rho) \sigma \tan \phi = \frac{4}{3} \tan 22.5^\circ D^3 (\cos 22.5^\circ)^3 \sigma \tan \phi$$

$$M_{e(squ)} = 8 \int_0^{D/2 \times \cos 45^\circ} (2 \tan 45^\circ \rho d\rho)(\rho) \sigma \tan \phi = \sigma \tan \phi \times \frac{\sqrt{2} D^3}{6}$$

팔각기둥과 사각기둥에 대한 T 를 이용하여 아래 Eq. (9)와 같이 마찰각을 구할 수 있다.

$$\phi_{(squ)} = \tan^{-1} \left\{ \frac{T_{(squ)}}{\left(\sigma \left(2HD^2 + \frac{\sqrt{2}}{6} D^3 \right) \right)} \right\} \quad (9b)$$

여기서,

$$T_{(oct)} = 4HD^2 \sin 22.5^\circ \cos 22.5^\circ \sigma \tan \phi + \frac{4}{3} \tan 22.5^\circ D^3 (\cos 22.5^\circ)^3 \sigma \tan \phi$$

$$T_{(squ)} = HD^2 \sigma \tan \phi + \sigma \tan \phi \times \frac{\sqrt{2} \times D^3}{6}$$

3. 모래에 대한 베인 전단시험

ASTM D2573-08 (2008)에서는 점토나 실트와 같은 포화된 점성토를 대상으로 실시하는 베인 전단시험에 대하여 규정하고 있으며, 사질토 지반에 대해서는 특별히 규정하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 실험을 실시하였다.

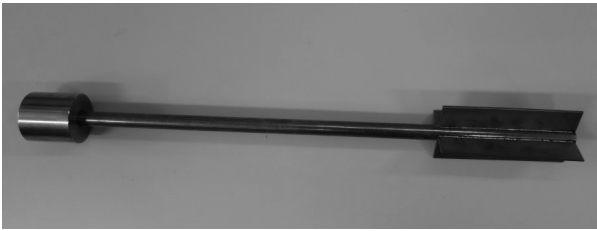
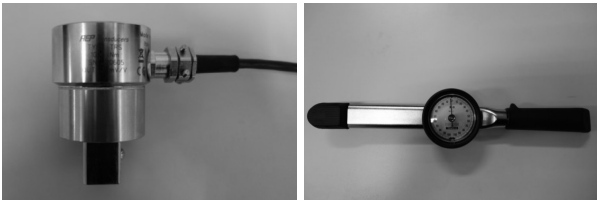


Fig. 3. Vane Blade Used in Vane Shear Test



(a) (b)

Fig. 4. Torque Sensor and Torque Wrench

3.1 베인 전단시험기

본 연구에 사용한 베인은 Fig. 3와 같이 직경 $D=5\text{cm}$, 높이 $H=10\text{cm}$ 인 일반 베인으로 날개수는 4개이며, 각 날개 사이 각도는 90° 이다. 토크 측정을 위해 스프링이 아닌 Fig. 4(a)와 같은 토크센서를 사용하여 직접 토크를 측정하였다. 토크센서는 Italy AEP transducers 사에서 제작한 TRS 토크센서로 용량은 1000Nm , 출력은 2mV/V , 그리고 오차는 $\pm 0.1\%$ 이다. 토크센서 검증은 Fig. 4(b)와 같은 일본 Tohnichi사에서 생산하는 검사용 토크렌치 DB100N-S를 사용하였다. 검증 범위는 $10\text{--}80\text{Nm}$ 사이이며, 검증 결과는 Fig. 5와 같이 보정계수(기울기) 0.975 이다.

모래를 대상으로 베인 전단시험을 실시할 경우 발생할 수 있는 파괴면에 영향을 미치는 요소로는 베인 날의 수, 베인 관입깊이(상재하중), 회전속도, 상대밀도, 흙의 종류, 세립분 함유량, 함수비 등을 고려해 볼 수 있다. 하지만, 본 연구는 베인 전단시험기를 사질토에 적용하기 위한 기초 연구로서 상대밀도와 상재하중에 따른 영향을 고려하였다. 또한, 현장 적용시 발생할 수 있는 시료 교란을 배제하기 위해 베인을 먼저 설치한 다음 모래를 낙하시켜 지반을 성형하였다. 구체적인 실험방법과 결과는 다음과 같다.

3.2 실험 방법

베인 전단시험에 사용한 모래는 대구경북 하천지역에 넓게 퇴적되어 있는 낙동강모래로 대구광역시 달성군 낙동강 인근에서 채취하여 모래의 균질성을 유지하기 위해서 $0.85\text{--}0.075\text{mm}$ 사이의 모래를 사용하였다. 낙동강모래에 관한 삼축시험 결과를 비롯한 각종 실험 자료(Kim and Kim, 2009; Park et al., 2012)가 풍부하므로 본 실험 결과 분석에도 크게 도움이 될 것으로 판단된다. 본

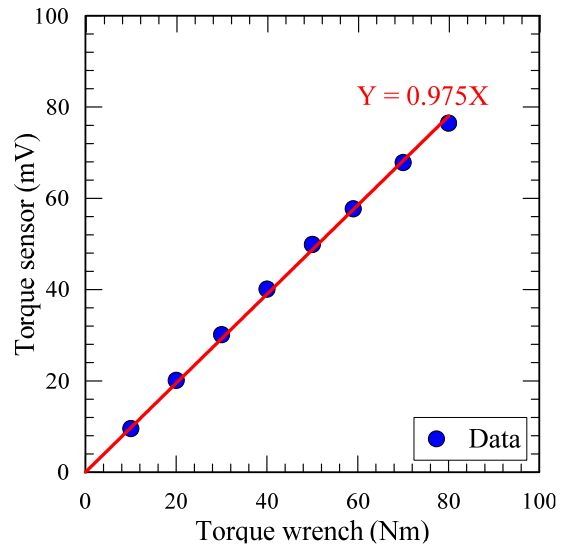


Fig. 5. Result of Torque Sensor Calibration

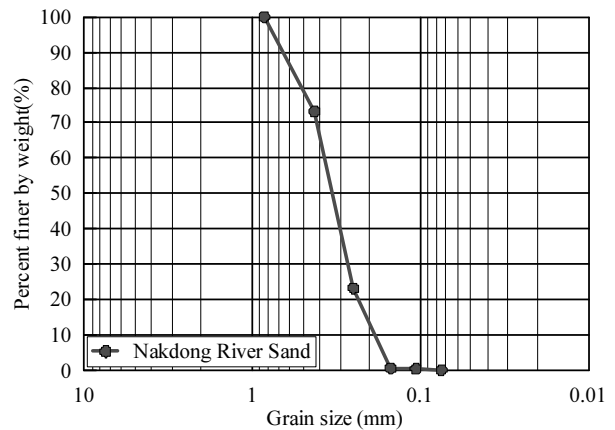


Fig. 6. Grain Size Distribution Curves of Nakdong River Sand

연구에 사용한 낙동강모래의 입도분포곡선은 Fig. 6과 같으며, 비중 $G_s=2.59$, 최대간극비 $e_{\max}=0.93$, 최소간극비는 $e_{\min}=0.66$ 이다. 모래에 상재하중(25, 50, 75, 100kPa)을 가한 후 느슨한 상태($D_r=34, 37, 39, 41\%$)와 조밀한 상태($D_r=76, 79, 81, 83\%$)로 공시체를 제작하였다.

베인 전단시험 장치의 구성은 Fig. 7(a)와 같이 하부에 베인을 작동시키는 모터와 감속기 그리고 토크센서가 부착되어 있으며, 상부에는 내부 직경 28cm 의 대형 압밀셀과 실린더가 결합되어 있다. 상부에 위치한 공압 실린더에 공기압을 가하면 가압판을 통해 모래에 상재하중이 전달된다. 실린더와 연결된 가압판에는 공시체 내 시료의 배수를 위해 다수의 구멍이 뚫려 있다. 실험방법은 Fig. 7과 같이 압밀셀 아래에 베인 전단시험기를 먼저 결합한 다음 압밀셀 상부 적절한 높이에서 모래를 낙하시켜 셀 내부에

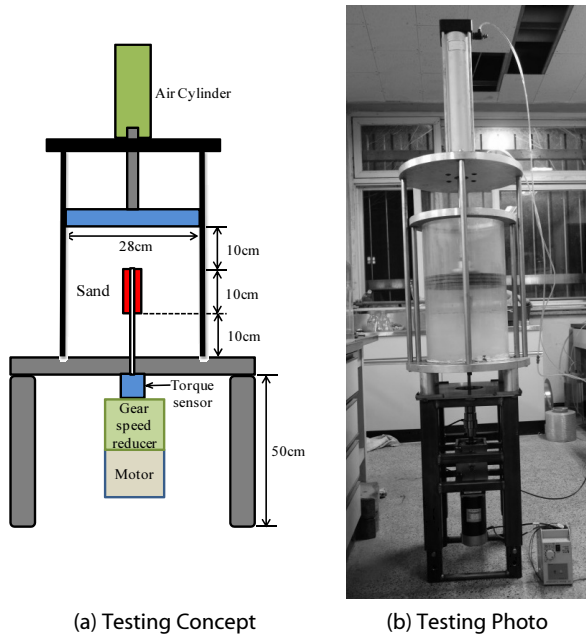


Fig. 7. Testing Setup of Vane Shear Test on Sand

모래를 퇴적시켰다. 그리고 압밀셀 상부에 실린더를 결합하여 요구되는 상재하중을 30분 정도 지속적으로 가하였다. 공시체의 높이 변화가 발생하지 않는 것을 확인한 다음 상재하중을 가한 상태에서 베인 전단시험을 실시하였다. 베인의 날개 끝부분부터 지표면까지의 거리는 관입 깊이라고 한다. 점토의 비배수 전단거동은 구속압의 영향받지 않기 때문에 점토에 적용된 경우 관입깊이는 ASTM D4648-00 (2000)에 의하면 일반적으로 베인날개 직경의 2배 이상 되어야 한다. 본 연구와 같이 모래에 적용할 경우 구속압이 모래의 전단거동에 영향을 미칠 수 있으므로 베인을 공시체높이(30cm)의 중앙에 위치시킨 다음 상재하중을 가하여 공시체 내부의 응력을 일정하게 유지시켰다.

4. 모래에 대한 베인 전단시험 결과 및 마찰각 비교

4.1 베인 전단시험 결과

느슨한 상태로 성형한 낙동강모래의 건조단위중량은 13.73kN/m^3 이고 초기 상대밀도 29%이다. 조밀한 상태로 성형한 모래의 건조단위중량은 14.72kN/m^3 이고 초기 상대밀도 75%이다. 각각의 모래에 25, 50, 75 또는 100kPa 네 종류의 상재하중을 가한 다음 베인을 $0.5^\circ/\text{sec}$ 의 속도로 일정하게 회전시켜 모래를 전단하였다. 점토와 달리 건조한 모래의 경우에는 전단속도에 따라 토크값은 크게 차이나지 않아 비교적 빠른 속도로 전단하였다. Table 1은 실험조건 및 결과를 비교하고 있다. 한편 본 연구에서는 베인에 작용하는 응력은 상재하중과 동일하다고 가정하였다.

모래 상태가 느슨한 경우, 상재하중이 25kPa에서 100kPa로 증가함에 따라 토크값은 6.20Nm에서 최대 23.62Nm까지 선형적으로 증가하였다. 측정된 토크값을 이용하여 모래의 전단강도인 마찰각을 Eqs. (7), (9a) or (9b)를 이용하여 계산하였다. 즉, 측정된 토크값을 전부 모래의 마찰각에 의한 저항으로 보았으며, 마찰로 인해 형성되는 파괴면을 원기둥, 팔각기둥 또는 사각기둥으로 가정하여 계산하였다. 그 결과, 느슨한 모래의 마찰각은 파괴면의 형태에 따라 Fig. 8(a)와 같이 각각 24-29도(cylindrical, 원기둥), 26-31도(octagonal, 팔각기둥), 36-42도(square, 사각기둥)로 계산되었다. 가정된 파괴면이 원기둥에서 사각기둥으로 변할 경우 저항하는 면적이 감소하면서 동일한 토크에 저항하기 위해 계산된 마찰각은 증가하였다.

모래 상태가 조밀한 경우, 상재하중이 25kPa에서 100kPa로 증가함에 따라 토크값은 8.46Nm에서 최대 39.64Nm까지 선형적으로 증가하였다. 느슨한 경우와 마찬가지로 Eqs. (7), (9a) or (9b)로 산정된 내부 마찰각은 Fig. 8(b)와 같이 33-40도(원기둥), 35-42도(팔각기둥), 46-53도(사각기둥)이다. 한편, 모래의 상태에 관계없이 모래에 작용하는 상재하중이 증가함에 따라 마찰각이

Table 1. Summary of Vane Shear Test on Nakdong River Sand

Case	Soil condition	Dry Unit Weight (kN/m^3)	Overburden pressure (kPa)	Torque (Nm)	Friction angle (degree)			DST
					VST(circular cylinder failure)	VST(octagon column failure)	VST(square column failure)	
L-1	Loose	13.83	25	6.20	28.91	31.29	41.59	32.63
L-2		13.88	50	11.26	26.64	28.9	38.87	
L-3		13.92	75	15.20	24.29	26.41	35.95	
L-4		13.97	100	23.62	27.75	30.07	40.21	
D-1	Dense	14.74	25	8.46	37.01	39.68	50.45	38.82
D-2		14.79	50	15.41	34.47	37.07	47.80	
D-3		14.84	75	21.73	32.83	35.38	46.03	
D-4		14.89	100	39.64	39.64	42.36	53.09	

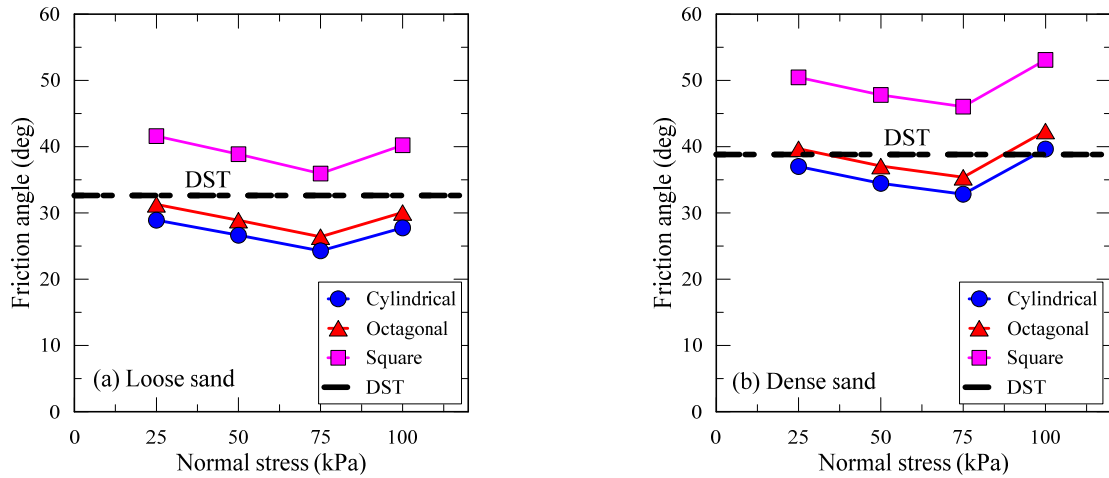


Fig. 8. Results of Vane Shear Test on Sand

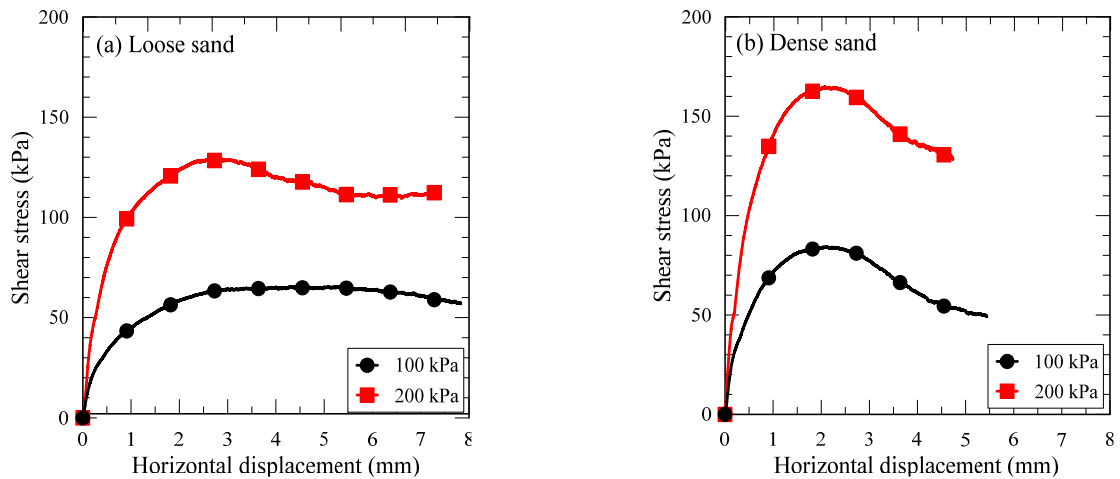


Fig. 9. Results of Direct Shear Test on Sand

다소 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이며, 조밀한 경우에는 상재하중 증가에 따라 25kPa보다 100kPa의 경우 마찰각이 3도 정도 더 높은 경향을 보였다. 이와 같이, 상재하중에 따른 마찰각의 변화는 10% 이내로 다소 높은 것으로 판단될 뿐 아니라, 응력 수준이나 상대밀도가 파괴면의 형상에 영향을 미칠 수 있으므로 베인에 작용하는 응력을 정확히 계측하여 이를 바탕으로 마찰각을 계산하는 것이 필요하다.

4.2 직접전단시험 결과 및 마찰각 비교

동일한 모래를 사용하여 느슨한(건조단위중량 13.73kN/m³) 및 조밀한 조건(건조단위중량 14.72kN/m³) 으로 공시체를 성형한 다음 수직응력 100kPa와 200kPa로 직접전단시험을 실시하였으며, 그 결과 각각의 시료에 대한 전단응력-변위 관계는 Fig. 9와 같다. 이로부터 계산된 마찰각은 느슨한 모래의 경우 33도, 조밀한

모래의 경우 39도로 나타났다. 동일한 낙동강모래로 배수삼축시험을 실시하여 구한 마찰각은 이와 동일한 값을 보였다(Park et al., 2012). 하지만, 다른 낙동강모래와 직접전단시험으로부터 구한 Kim and Kim (2009)의 결과는 느슨한 모래는 35도 조밀한 모래는 43도로 본 연구결과보다는 다소 높게 나타났다. Table 1과 Fig. 8은 베인 전단시험으로부터 구한 마찰각과 직접전단시험(Direct shear test, DST로 표시)으로부터 구한 마찰각을 비교하고 있다. 베인 전단시험으로부터 구한 마찰각의 경우 모래의 상태와 관계없이 팔각기둥(Octagonal로 표시)으로 가정하여 계산한 마찰각이 직접전단시험 결과와 가장 유사한 값을 보였다. 모래에 작용하는 응력과 모래 상태에 따라 베인 주면의 파괴면이 깊이에 따라 다양한 형태로 형성될 수 있으므로 직접전단시험으로부터 얻은 마찰각과는 다소 차이가 있었다. 하지만, 베인 상하 및 주면에서 발생하는 파괴면을 깊이에 따라 일정한 팔각기둥 형태로 가정한다면, 현장

사질토 지반에 베인 전단시험을 직접 적용하여 신속하고 빠르게 기존 시험법으로부터 얻은 마찰각과 유사한 마찰각을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 베인 전단시험기를 이용하여 모래의 배수전단강도를 측정하기 위한 실험연구를 수행하였다. 낙동강모래를 원통형 플라스틱 압밀셀에 느슨하거나 조밀한 상태로 재성형한 다음 상부에서 공기압 실린더를 이용해 상재하중(25, 50, 75, 100kPa)을 가한 다음 베인을 회전시켜 회전 모멘트인 최대 토크를 구하였다. 회전 모멘트와 저항 모멘트가 평형을 이룬다는 조건을 이용하여 모래의 마찰각을 구하였으며, 사질토를 사용한 본 연구에서는 베인 날 주변에서 형성되는 파괴면을 원기둥, 팔각기둥, 또는 사각기둥 형태로 가정하여 각각에 대한 마찰각을 계산하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 공시체의 횡방향 변위가 억제된 상태에서 상부에서 높은 상재 하중을 가할 경우 비록 모래지만 상당히 높은 토크가 요구되었으며, 투명한 원통형 압밀셀 외부에서 내부 모래의 전단 움직임은 관찰되지 않았다.
- (2) 베인 전단시험으로부터 구한 마찰각은 파괴형태에 따라 느슨한 모래의 경우 24-29도(원기둥), 26-31도(팔각기둥), 36-42도(사각기둥), 조밀한 모래는 33-40(원기둥), 35-42도(팔각기둥), 46-53도(사각기둥)로 계산되었다.
- (3) 직접전단시험으로부터 느슨한 모래의 마찰각은 33도, 조밀한 모래의 마찰각은 39도로 계산되었다. 베인 전단시험에서 느슨한 모래와 조밀한 모래 모두 팔각기둥 모양의 파괴면이 형성된다고 가정할 경우 직접전단시험 결과와 유사한 마찰각을 보였다. 하지만, 모래에 작용하는 응력과 모래의 조밀한 정도에 따라 베인 주변의 파괴면이 깊이에 따라 일정하지 않고 다소 복잡 다양한 형태로 형성된 것으로 판단된다.
- (4) 베인 전단시험 시 베인 상하 및 주변에서 발생하는 파괴면을 깊이에 따라 단순히 일정한 팔각기둥 형태로 가정한다면, 사질토 지반에 베인 전단시험을 직접 적용하여 현장에서 신속하고 빠르게 기존 시험법으로부터 얻은 마찰각과 유사한 마찰각을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 공공복지안전기술개발사업 지원을 받아 수행되었으며(No. 2012M3A2A1050982) 이에 감사드립니다.

References

- ASTM D2573-08 (2008). "Standard test method for field vane shear test in cohesive soil." *Section for construction*, Vol. 04.08, D2573-08.
- ASTM D4648-00 (2000). "Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil." *Section for construction*, Vol. 04.08, D4648-00.
- Bjerrum, L. (1972). "Embankments on soft ground." *ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structures*, Lafayette, Ind., Vol. 2, pp. 1-54.
- Burmister, D. M. (1956). "Discussion symposium on vane shear testing of soils." *ASTM Special Technical Publication*, No. 193.
- Cadling, L. and Odenstad, S. (1950). "The vane borer." *Proceedings*, No. 2, Royal Swedish Geotechnical Institute.
- Crawford, C. B. and Eden, W. J. (1965). "A comparison of laboratory results with in-situ. Properties of Leda Clay." *Proc. of 6th ICSMFE*, Vol. 1.
- Evans, I. and Sherratt, G. G. (1948). "A simple and convenient instrument for measuring the shearing resistance of clay soils." *Journal of Scientific Instruments and of Physics in Industry*, Vol. 25, No. 12, pp. 412-415.
- Farrent, T. A. (1960). "The interpretation of vane tests in soils having friction." *Proc. of 3rd Australia-New Zealand Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 81-88.
- Kim, Y. S. and Kim, D. M. (2009). "Characteristics of friction angles between the nak-dong river sand and construction materials by direct shear test." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 4, pp. 105-112 (in Korean).
- Park, S. S., Choi, S. G. and Kim, D. R. (2012). "Effect of specimen size on undrained and drained shear characteristics of granular soils." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 3, pp. 15-23 (in Korean).
- Wilson, N. E. (1963). "Laboratory vane shear tests and the influence of pore-water stresses." *ASTM Special Technical Publication*, No. 351, pp. 44-52.
- Young, A. G., McClelland, B. and Quiros, G. W. (1988), "In-situ vane shear testing at sea." *ASTM Special Technical Publication*, No. 1014, pp. 46-67.