

공진주/비틀전단 시험 및 벤더엘리먼트 시험을 이용한 사질토 지반의 최대전단탄성계수 평가

Measurement of G_{max} of Sands Using Bender Element in Resonant Column and Torsional Shear Equipment

김 동 수¹ Kim, Dong-Soo

윤 준 웅² Youn, Jun-Ung

이 세 현³ Lee, Sei-Hyun

추 연 옥⁴ Choo, Yun-Wook

Abstract

The bender element method is an experimental technique to determine very small strain ($<10^{-3}\%$), elastic shear modulus of a soil, G_{max} by measuring the velocity of shear wave propagation through a sample. Bender elements have been applied as versatile transducers to measure small strain modulus of wet or dry soils in various laboratory apparatus. In this paper, bender element (BE), resonant column (RC) and torsional shear (TS) tests were performed on Toyoura sand at various testing conditions using the modified Stokoe type RC/TS testing equipment capable of performing BE test. Based on the results, applicabilities of the testing method using bender element were evaluated by comparing the values of G_{max} obtained from RC/TS and BE testing methods. For more dependable evaluation, the loading frequency of each testing method was considered for the results obtained for samples in saturated condition by adapting Biot's theory.

요 지

벤더엘리먼트 시험은 시험시편의 전단파속도를 직접 측정함으로써 최대전단탄성계수를 평가하기 위한 시험법으로, 다양한 실내시험장비에 간단히 부착되어 다양한 시험조건에서 시편의 최대전단탄성계수를 평가할 수 있는 유용한 시험기법으로 현재 널리 이용되고 있는 추세다. 본 연구에서는 포화가 가능하도록 개조된 Stokoe식 공진주/비틀전단 시험장비에 벤더엘리먼트 시험장비를 부착하여 동일한 시험시편에 대하여 다양한 조건에서 벤더엘리먼트 시험, 공진주 시험, 비틀전단 시험의 세 가지 시험을 동시에 수행함으로써 각 시험법에 의하여 평가되는 최대전단탄성계수를 비교하였으며, 벤더엘리먼트 시험기법을 검증해보고자 하였다. 또한 포화조건에서 Biot의 이론을 적용하여 각 시험기법의 하중주파수를 고려함으로써 보다 타당한 비교를 수행할 수 있었다.

Keywords : Bender element testing, Resonant-column testing, Shear wave, Small strain stiffness, Torsional shear testing

1. 서 론

지반은 변형률이 증가함에 따라 탄성계수가 감소하

고 감쇠비는 증가하는 비선형 거동을 가진다. 탄성한계 변형률 이하에서 지반은 유사탄성(quasi-elastic)으로 고려되며, 전단탄성계수는 최대값을 가진다. 이때

1 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

2 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST, sayme43@kaist.ac.kr)

3 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

4 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연수연구원 (Member, Post-Doc. Fellow Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

의 전단탄성계수를 최대전단탄성계수(G_{max})라고 부르며, 이 값은 여러 동적해석에서 중요한 설계물성으로 사용되어 왔으며, 최근 변형해석과 관련되는 정적인 문제에서도 중요한 물성으로 부각되고 있다.

최대전단탄성계수를 포함한 저변형률 영역($10^{-4} \sim 10^{-1}\%$)에서 전단탄성계수 및 감쇠비를 평가하기 위한 실내시험법으로 공진주 시험 및 비틀전단 시험이 널리 이용되어 왔다. 이외에 시험시편의 최대전단탄성계수를 평가하기 위한 시험기법중 하나로 벤더엘리먼트 시험법이 개발되어 널리 이용되고 있는 추세다. 벤더엘리먼트는 전기적 에너지와 기계적 에너지의 상호변환이 가능한 압전센서로서, 한 쌍의 벤더엘리먼트를 여러 실내시험 장비의 양단에 캔틸레버(cantilever) 형식으로 부착하여 전단파의 가진 및 도달의 측정이 가능하도록 함으로써, 시험시편의 전단파 속도를 측정하기 위해 이용되고 있다. 벤더엘리먼트 시험을 통하여 평가된 전단파 속도는 식 (1)을 이용하여 최대전단탄성계수로 변환될 수 있다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도, V_s 는 전단파 속도이다.

벤더엘리먼트 시험은 공진주 시험과 비교하여 전단파 속도가 전파거리와 측정된 전파시간으로부터 직접 결정되므로 더 직접적인 방법이며, 삼축 시험, 압밀 시험 등 여러 시험기에 비교적 간단히 부착되어 시료의 교란없이 반복적으로 시험시편의 최대전단탄성계수를 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 아직까지 벤더엘리먼트의 설치 및 전단파의 정확한 전파시간 결정을 위한 시험기법 등에 있어 확립된 방법이 없으며, 다양한 연구결과가 제시되고 있다(Viggiani와 Atkinson, 1995; Arulnathan 등, 1998).

본 논문에서는 이러한 벤더엘리먼트 시험을 공진주/비틀전단 시험기에 부착하여 벤더엘리먼트 시험, 공진주 시험, 비틀전단 시험을 동일한 시험시편에 대하여 수행하였다. 시험시료로는 시편성형의 균질성이 우수한 사질토 시료를 이용하였고 건조 및 포화조건에서 구속응력을 달리하며 시험을 수행함으로써 다양한 조건에서 각 시험법으로 평가된 결과를 비교하였으며, 벤더엘리먼트 시험법에 대한 검증을 수행하였다.

2. 시험개요

2.1 시험장비

공진주/비틀전단 시험은 지반의 동적변형특성(탄성계수, 감쇠비)을 규명하기 위해 사용되어온 대표적인 시험법으로, 본 연구에서는 시험시편의 포화가 가능하도록 개조된 Stokoe식 공진주/비틀전단 시험기를 사용하였다(김동수와 추연욱, 2004). Stokoe식 공진주/비틀전단 시험장비는 동일한 공시체를 이용하여 공진주 시험과 비틀전단 시험의 수행이 가능하기 때문에 두 시험결과와의 비교에 있어 보다 합리적인 장점을 가진다.

본 연구에서는 위와 같이 개조된 공진주/비틀전단 시험기의 하부 좌대(base pedestal) 및 상부캡(top cap)을 수정하여 벤더엘리먼트 시험이 가능하도록 벤더엘리먼트를 부착하였다. 사용된 벤더(PZT 5H)는 가로 12.7mm, 세로 8mm, 두께 0.7mm의 크기를 가지며, 벤더엘리먼트의 두 피에조 세라믹 판의 극성이 반대 방향으로 유발되도록 전선을 벤더엘리먼트의 양전극면에 연결(직렬 연결)한 후, 폴리우레탄을 이용하여 약 0.5~1mm가량 코팅하였다. 이 후 에폭시를 이용하여 시험시스템의 하부 좌대 및 상부캡에 캔틸레버 형식으로 고정하였다. 또한, 포화시편에서의 크로스톡(cross-talk) 문제를 해결하기 위하여 벤더엘리먼트의 폴리우레탄 코팅 위에 전도성 물질을 다시 코팅하고 이를 그라운드에 연결함으로써 벤더엘리먼트 시험장치 구축을 완료하였다(Santamarina

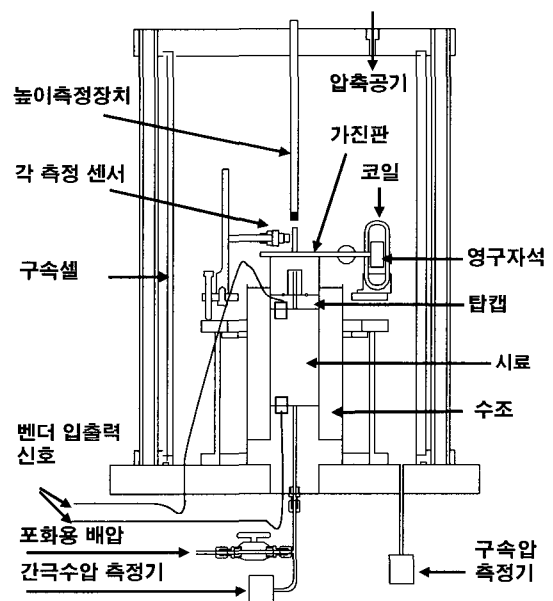


그림 1. 시험 시스템의 개략도

등, 2001).

또한, 전단파 속도 및 최대전단탄성계수 결정의 신뢰도를 증가시키기 위하여 시험 시스템에 시편의 높이변화 측정장치를 부착하였다. 높이변화 측정을 위한 감지기로는 Bently Nevada사의 프록시미터(Proximitor) 시스템을 이용하였으며, 이 시스템은 시편과의 접촉없이 시편의 높이변화를 측정할 수 있는 장점을 가진다.

본 연구에서 사용한 개조된 시험 시스템의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

2.2 시험시료

본 연구에서는 토요라 모래를 사용하였다. 시험시료에 대한 입도분포 및 기본물성치를 그림 2 및 표 1에 나타내었다. 토요라 모래는 깨끗한 모래(clean sand)로서 평균입경(D_{50})이 약 0.2mm, 균등계수가 1.29로 입자가 세립질이며 매우 균등한 모래이므로 시험시편 성형시의 균질성이 우수하다고 판단된다.

2.3 시험절차

본 연구에서 시료의 성형은 건조낙사법(air-pluviation

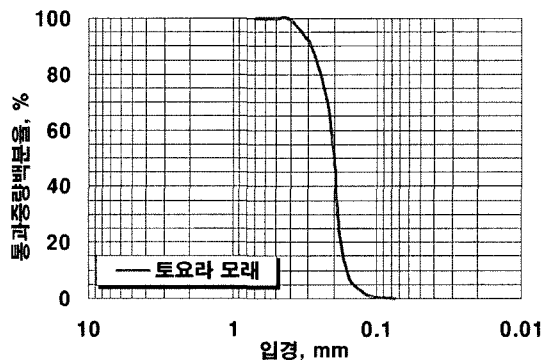


그림 2. 시험시료의 입도분포

표 1. 시험시료의 기본물성치

시료명	토요라 모래
통일분류(USCS)	SP
비중(G_s)	2.65
최대간극비(e_{max})	0.982
최소간극비(e_{min})	0.617
곡률계수(C_c)	1.00
균등계수(C_u)	1.29
평균입경(D_{50}), mm	0.199
소성지수(PI)	NP

method)을 적용하여 성형하였다. 자연건조된 모래시료를 1.5mm×10mm의 직사각형 내부단면을 갖는 노즐을 통하여 몰드 안으로 자유 낙하시키면서 노즐의 끝부터 모래시료가 낙하하는 거리가 일정하게 유지되도록 성형하였으며, 노즐로부터의 낙하고를 달리하며 시편의 상대밀도를 조정하였다. 시편의 성형 후 몰드를 제거하기 전에 10kPa의 진공압을 가하였으며, 몰드를 제거한 후 진공압 25kPa을 가하여 시편을 자립시켰다. 건조 시료의 경우에는 몰드 제거 후 시료의 초기 높이 및 직경을 측정하고, 가진시스템을 체결하였으며 구속셀을 설치하였다. 포화 시료의 경우에는 몰드 제거 후 시료의 포화를 위하여 CO₂ 순환 및 물 순환 과정을 차례대로 거친 후 시료의 초기 높이 및 직경을 측정하고, 가진시스템을 체결하고 구속셀을 설치하였다. 이후 포화시료의 경우에는 배압을 100kPa까지 증가시켜 간극수압계수(B-value)를 측정하였으며, 건조시료 및 포화 시료 모두 평균유효 구속응력 50kPa, 100kPa, 200kPa, 400kPa의 단계로 높여가며 각 구속단계에서 시험을 수행하였다. 구속응력은 각 구속응력 단계에서 10분간 재하하였으며 건조시료의 경우 10분 후의 높이변화만을 측정하였으며 포화시료의 경우에는 시편의 높이 및 부피변화를 측정하였고, 벤더엘리먼트 시험, 비틀전단 시험, 공진주 시험의 순서로 시험을 수행하였다.

벤더엘리먼트 시험의 경우에는 정현파(Sin. wave) 및 사각파(Rect. wave)를 입력신호로 이용하여 시편의 전단파 속도값을 측정하였다. 비틀전단 시험의 경우에는 하중주파수 0.5Hz, 반복회수 10회를 갖는 입력하중을 시편에 가해지는 입력전압의 크기를 조절하여 대략 0.0005%~0.0015%의 크기의 전단변형률에서 시편의 전단탄성계수를 측정하였다. 이는 전단탄성계수가 탄성한계변형률 이하에서 변형률에 무관하게 일정하게 나오는 것을 확인하고 탄성한계변형률 이후에서는 감소하는 것을 확인함으로써, 비틀전단 시험의 경우 0.001%이하에서의 감지기 민감도 문제로 인한 최대전단탄성계수 결정의 신뢰도 문제를 해결하기 위한 것이다. 공진주 시험의 경우에는 입력전압을 조절하여 0.0005~0.001% 정도의 전단변형률에서 시편의 최대전단탄성계수를 측정하였다. 위와 같은 일련의 시험과정을 거친 후 시료의 하중주파수에 따른 최대전단탄성계수의 변화를 살펴보기 위하여 하중주파수를 0.05Hz, 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 3Hz, 5Hz로 달리하며 비틀전단시험을 수행하였다.

상대밀도에 따른 최대전단탄성계수의 변화를 확인하

표 2. 성형조건, 시험조건 및 시험절차

시료명	시험형태	초기성형시 상대밀도, %	높이변화 측정여부	부피변화 측정여부	평균유효구속응력, kPa
토요라 모래	건조시험	52.8/79.5	○	×	50kPa→100kPa→200kPa →400kPa
	포화시험	50.5/81.2	○	○	

BE 시험 → TS 시험 → RC 시험 → TS 시험(Frequency effect)

TS 시험과 RC 시험은 각각 0.0005%~0.0015%, 0.0005%~0.001%의 전단변형을 범위에서 수행됨

기 위하여 상대밀도 50%, 80% 정도의 시편을 각각 성형하여 시험을 실시하였다. 시편의 성형조건 및 위의 시험절차를 표 2에 정리하였다.

3. 시험결과 및 분석

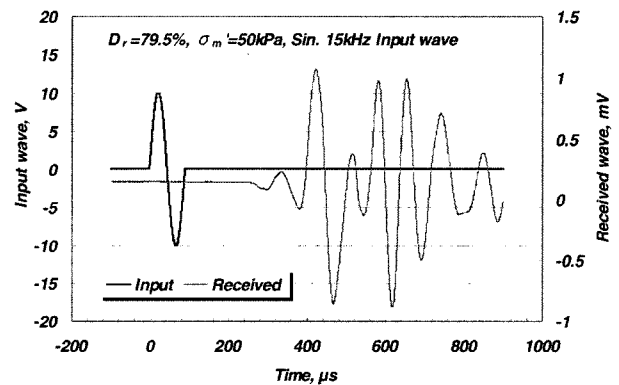
3.1 벤더엘리먼트 시험에서의 전단파 속도 결정

벤더엘리먼트 시험은 시험의 간편성 및 전단파 속도 측정의 직접성 때문에 널리 이용되고 있으나, 전단파 속도를 결정하는데 있어 확립된 방법이 없이 다양한 방법들이 보고되고 있다. 전단파 속도를 측정하기 위한 전파거리에 있어서는 벤더의 양단 끝(tip) 사이의 거리를 적용하는 것이 일반화 되어 있으며, 전파시간을 결정하는데 있어서는 가진신호로 사용되는 파형이 sin. 파 및 rect. 파 등의 다양한 파형이 이용되며 전단파의 가진 시작점과 도달 시작점의 시간차로 결정하는 방법, Cross-Correlation 기법을 이용하는 방법 등 다양한 방법이 이용되고 있다(Dyvik와 Madshus, 1985; Arulnathan 등, 1998). 본 연구에서는 파형 등에 따라 결정되는 전단파 도달시간을 비교하기 위하여 다양한 파형을 이용하여 벤더엘리먼트 시험을 수행하였다.

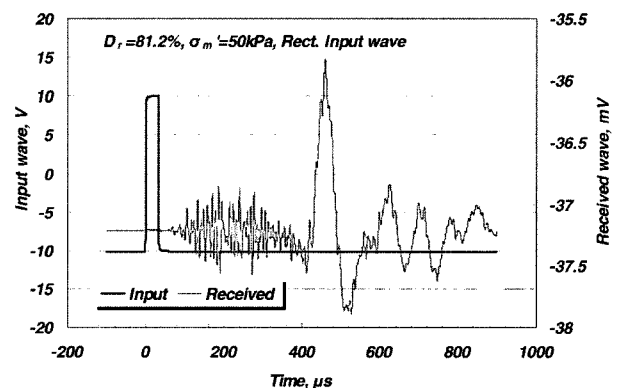
본 시험에 앞서 가진 벤더엘리먼트와 수신 벤더엘리먼트를 직접 맞붙여 신호를 획득함으로써 가진 및 수신 의 두 벤더엘리먼트의 신호가 동일한 극성을 갖는지 방향성을 확인하였다. 벤더 엘리먼트 시험시 반사되어 도달하는 압축파 및 근접장 효과 등의 영향으로 실제 전단파 도달 신호 이전에 유사한 신호가 획득되므로 시험 이전에 방향성을 확인함으로써 실제 전단파의 도달을 보다 명확히 결정할 수 있다.

본 연구에서 획득한 전단파의 가진 및 도달 신호의 대표적인 예를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a) 및 그림 3(b)는 각각 건조조건과 포화조건 시험결과의 일례로 포화조건에서는 전단파의 도달 이전에 물을 타고 전파되는 압축파의 영향을 확인할 수 있다.

본 연구에서 전단파의 전파시간을 결정하기 위하여 사용한 방법을 그림 4(a)에 나타내었다. 수신신호의 초기부분에서 시편의 옆면에서 반사되어 전달되는 압축파 및 근접장 효과 등의 영향을 받지 않는 부분의 전압값을 평균하여 그 값을 연장하는 선을 긋고, 그 선과 실제 전단파가 교차하는 지점을 전단파의 도달시점으로 결정하였다. 이러한 방법으로 결정된 전단파의 도달시점과 가진신호의 초기시점의 차이로 전단파의 전파시간을 결정하였다. 그림 4(b)에 Sin. 파 및 Rect. 파를 사용하여 도달시간을 결정할 일례를 나타내었다. 각 시험 조건에서 주파수 600Hz를 갖는 Rect. 파(Rect. 600Hz)의 가진신호를 사용하여 결정된 전단파 속도와 다른 가진



(a) 건조 조건



(b) 포화 조건

그림 3. 벤더엘리먼트 시험시의 전형적인 입력 및 가진신호에

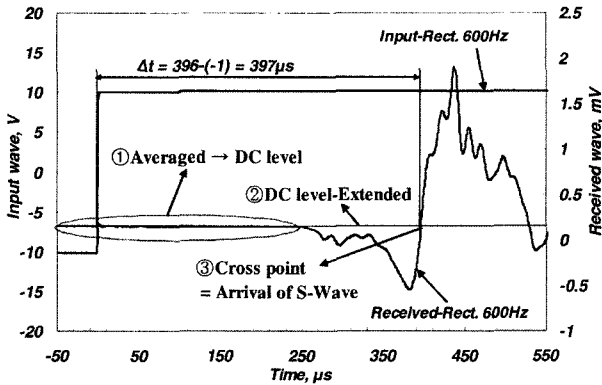
파형을 사용하여 결정된 전단파 속도의 관계를 그림 5에 모두 도시하였다. 동일 시험조건에서 각각의 파형을 사용하여 결정된 전단파속도 값들은 동일조건에서의 여러 파형들을 사용하여 결정된 전단파 속도의 평균값

과 비교하여 최대 $\pm 1.5\%$ 이내의 차이를 나타내었으며, 본 연구에서 적용한 방법을 이용시 본 시험시료에 대해서 거의 동일하게 나타났다.

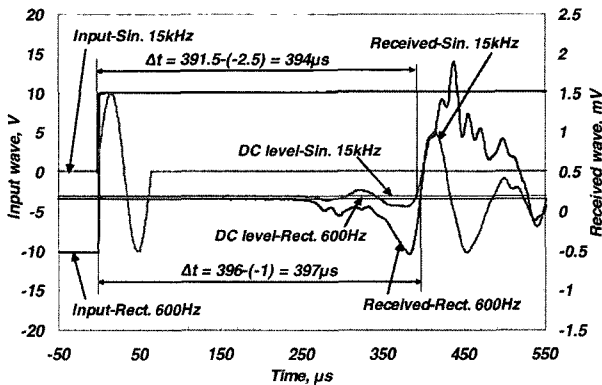
3.2 건조조건 시험결과

건조조건에서 벤더엘리먼트 시험(BE)과 공진주 시험(RC)을 수행하여 획득한 전단파 속도를 시험 구속압에 따라 그림 6에 함께 도시하였다. 본 연구에서 다른 입력 파형을 사용한 경우의 벤더엘리먼트 시험결과는 거의 동일하게 나타났으므로 Sin. 15kHz 및 Rect. 600Hz의 입력파형을 사용한 경우만 함께 나타내었다. 공진주 시험 및 벤더엘리먼트 시험을 통하여 결정된 전단파 속도는 상대밀도 52.8% 및 79.5% 조건에서 각각 최대 $\pm 2\%$ 및 $\pm 1\%$ 의 차이를 나타내어 잘 일치하게 나타났다.

그림 6의 벤더엘리먼트 시험 및 공진주 시험을 통하여 획득한 전단파 속도를 식 (1)을 이용하여 전단탄성계수로 변환 후 비틀전단 시험(TS)을 수행하여 결정된 전단탄성계수와 함께 그림 7에 도시하였다. 두 가지 상대밀도 조건에서 벤더엘리먼트 시험결과와 공진주 시험결과는 거의 유사하게 평가되었으며 상대밀도 79.5%의 결과에서는 비틀전단 시험결과가 최대 10% 가량 작게 평가되었으나, 상대밀도 52.8%에서는 세 가지 시험결과가 거의 유사하게 나타났다. 본 연구에서는 최대전단탄성계수의 하중주파수에 따른 영향정도를 평가하기 위하여 0.1Hz~5Hz까지 하중주파수를 변화시키며 비틀전단 시험을 수행하였다. 그림 8은 각 하중주파수에서의 전단탄성계수를 하중주파수 0.5Hz에서의 전단탄성계수 값으로 정규화하여 나타낸 대표적인 결과로, 모든



(a) 전단파 전파시간의 결정방법



(b) 전형적인 예(건조조건, $D_r=79.5\%$)

그림 4. 벤더엘리먼트 시험시의 전단파 전파 시간의 결정방법

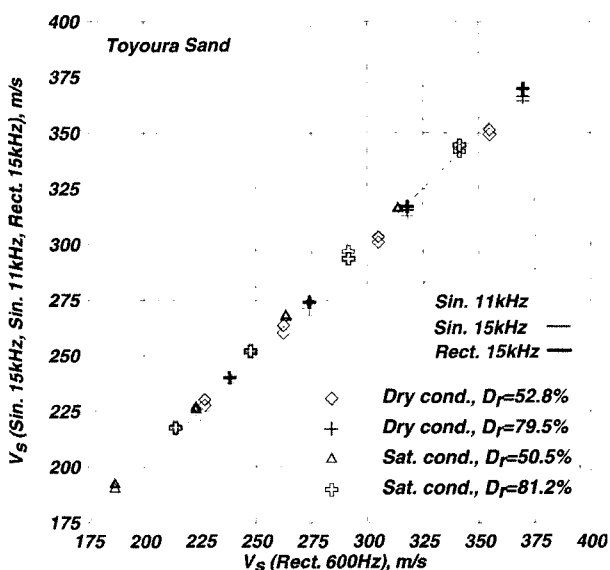


그림 5. 각 시험조건에서 벤더엘리먼트 시험을 통하여 결정된 전단파 속도

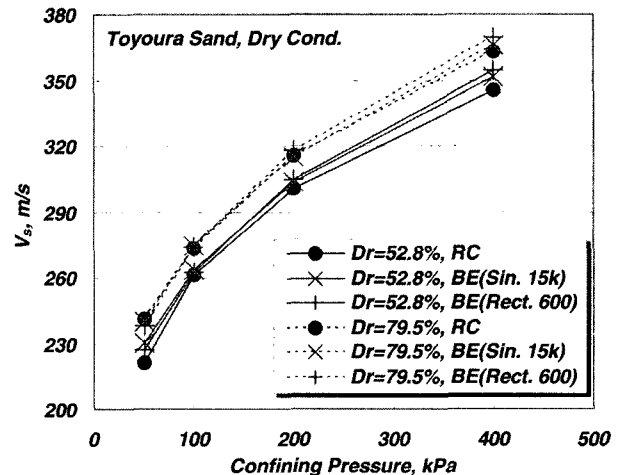


그림 6. 전단파속도-구속응력 관계(건조조건)

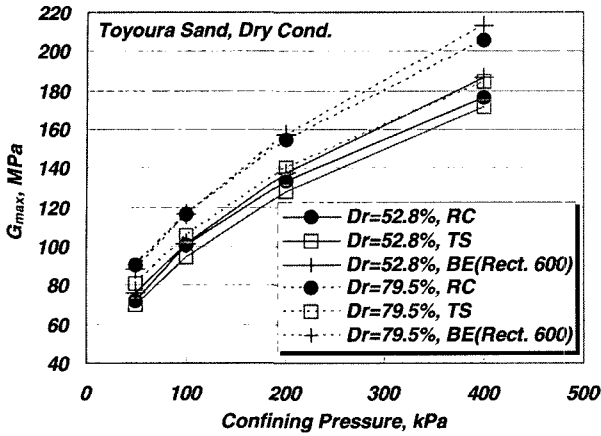


그림 7. 최대전단탄성계수-구속응력 관계(건조조건)

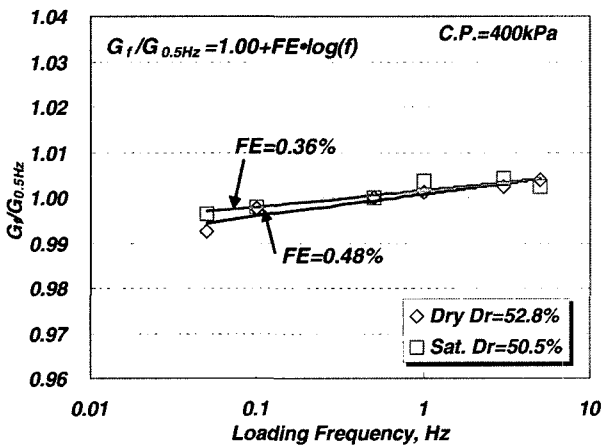


그림 8. 비틀전단 시험을 이용한 하중주파수 영향 평가

조건에서 비틀전단 시험을 통하여 평가된 하중주파수 영향계수(FE)는 최대 0.5% 이내로 본 시험자료는 하중 주파수에 의해 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 상대밀도 79.5%의 시험결과에서 나타나는 비틀전단 시험 결과의 과소한 값은 일부 하중주파수 영향 이외에도 시험시편의 강성증가에 따른 시험시스템의 순응도 문제 등으로 인한 오차인 것으로 판단된다.

3.3 포화조건 시험결과

공진주 시험 및 벤더엘리먼트 시험의 경우 전단파 속도를 측정하여 식 (1)을 이용하여 최대전단탄성계수를 산정하게 되는데, 이 경우 관성항인 흙의 밀도를 적용시 포화조건에서는 흙입자와 물이 함께 존재하므로 유의할 필요가 있다. 그리고 공진주 시험에서는 전단파 속도 평가시 시험시편의 질량관성모멘트가 이용되므로 이 경우에도 물이 관성항에 미치는 영향정도를 고려시 유의할

필요가 있으며, 본 연구에서는 Biot의 이론을 이용하여 하중주파수에 따라 물의 관성항을 달리 고려하였다.

3.3.1 Biot의 이론

흙과 같은 입자로 구성된 물질은 포화시 고체상(흙입자)과 유체상(물)이 함께 존재하기 때문에 더욱 복잡한 거동을 갖게 되며, 동적하중적용조건에서는 관성, 전단강성, 압축강성 등의 차이가 포화시의 흙의 거동에 복잡성을 더하게 된다. 거동의 하중주파수가 충분히 작은 경우 유체상과 고체상은 함께 움직이게 되며, 따라서 유체상의 관성항이 고체상의 관성항에 더해져 전단파 속도는 식 (2)와 같이 전단탄성계수와와의 관계시 유체의 질량이 포함된 전체밀도가 이용된다(Santamarina 등, 2001).

$$V_{s0} = \sqrt{\frac{G_{sk}}{(1-n)\rho_g + n\rho_f}} \quad (2)$$

여기서, V_{s0} 는 흙의 저주파수 전단파 속도, G_{sk} 은 흙구조의 전단강성, n 은 간극률, ρ_g 및 ρ_f 는 각각 흙입자 및 유체의 밀도이다.

그러나 시험시의 하중주파수가 증가하게 되면 다른 상사이의 관성효과 차이로 인하여 다른 상사이에 상대적인 변위가 발생하게 된다. 이러한 경우 Biot의 식 (Biot, 1956a,b)을 이용하여 이를 고려할 수 있으며, Biot의 식은 식 (3)으로 정의되는 특성주파수(characteristic frequency)를 포함한다.

$$f_c = \frac{n\eta}{2\pi\rho_f K} \quad (3)$$

여기서, η 는 유체의 점도(Pa·s), K 는 절대투수계수(m²)이다.

그림 9는 Biot의 식을 적용하여 주파수에 따른 전단파 속도의 변화(Velocity spectra)를 도시한 일례로 Biot의 식은 특성주파수, 저주파수 전단파 속도, 고주파수 전단파 속도의 세 가지 특성화 된 값으로 단순화 시켜 나타내어질 수 있다. 이러한 값들은 흙구조의 체적강성(B_{sk})이 흙을 구성하는 광물의 체적강성(B_g)보다 매우 작은 경우, 곧 $B_{sk} \ll B_g$ 인 대부분의 지반의 경우에 식 (2), 식 (4) 및 식 (5)를 이용하여 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$f_c = \frac{n\eta}{2\pi\rho_f K} = \frac{n\eta}{2\pi k_h} \quad (4)$$

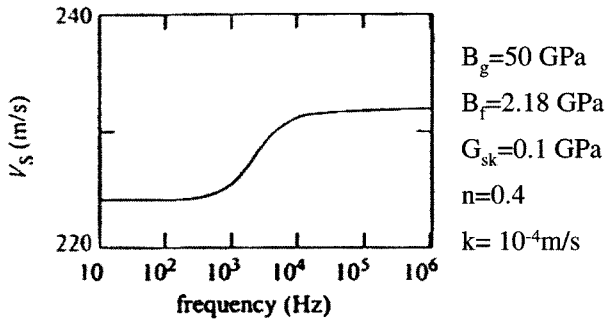


그림 9. 전단파의 속도 스펙트럼 일례(Santamarina 등, 2001)

여기서, k_h 는 투수계수(m/s), g 는 중력가속도($=9.81\text{m/s}^2$), η 는 상온에서 물의 점도($=10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$)이다.

시험하중주파수가, f 가 $0.1f_c$ 보다 작은 경우 평가되는 전단파 속도, V_s 는 식 (2)와 같은 V_{s0} 의 값을 갖게 된다. $f > f_c$ 에 해당하는 주파수 영역에서 시험이 수행될 경우 평가되는 전단파 속도는 고주파수 전단파 속도($V_{s\infty}$)를 갖게 되며 이는 저주파수 전단파 속도(V_{s0})와의 관계로 표현되는 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{V_{s\infty}}{V_{s0}} = \sqrt{\frac{(1-n)\frac{\rho_g}{\rho_f} + n}{(1-n)\frac{\rho_g}{\rho_f} + n(1-\frac{1}{\alpha})}} \quad (5)$$

여기서, α 는 비틀림 정도 상수(tortuosity factor)로 튜브의 경우 $\alpha=1$, 입자로 구성된 통상적인 물질의 경우 $\alpha=2\sim 3$ 의 값을 가지며(Stoll, 1979), 구형 입자로 구성된 물질의 경우 Berryman(1981)이 제안한 식 (6)을 이용하여 계산될 수 있다.

$$\alpha = \frac{1+n}{2n} \quad (6)$$

표 3. 시험시편에 대한 특성주파수 및 비틀림 정도 상수

시편 구분	구속응력, kPa	간극비(e)	간극률(n)	투수계수(k_h), cm/s	특성주파수(f_c), Hz	비틀림 정도 상수, α
$D_r=50.5\%$	50	0.800	0.444	0.028	2444	1.625
	100	0.791	0.442	0.028	2500	1.632
	200	0.777	0.437	0.026	2591	1.644
	400	0.771	0.435	0.026	2631	1.649
$D_r=81.2\%$	50	0.695	0.410	0.020	3238	1.719
	100	0.682	0.405	0.019	3363	1.733
	200	0.679	0.404	0.019	3393	1.736
	400	0.674	0.403	0.018	3443	1.742

※ $D_r=50.5\%$ 및 $D_r=81.2\%$ 로 초기성형된 토요라 모래 시편의 투수계수는 $D_r=100\%$, $e=0.617$ 에서의 $k=0.0145\text{cm/s}$ 값(Kamon 등, 2004)을 이용

하여 $k_1 : k_2 = \frac{e_1^3}{1+e_1} : \frac{e_2^3}{1+e_2}$ 의 관계(Kozeny-Carman equation)로부터 구한 값임

식 (5)를 식 (2)를 이용하여 단순화 시키면, 고주파수 전단파 속도($V_{s\infty}$)를 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$V_{s\infty} = \sqrt{\frac{G_{sk}}{(1-n)\rho_g + n(1-\frac{1}{\alpha})\rho_f}} \quad (7)$$

3.3.2 포화조건 시험결과

본 연구에서 이용한 토요라 모래의 경우 매우 좁은 범위의 입도를 가지게 되므로 투수계수가 비교적 큰 편이며, 따라서 일반적인 흙의 경우에 비하여 작은 특성주파수 값을 갖게 된다. 본 시험시의 각 시험조건에서의 특성 주파수를 식 (4)를 이용하여 계산한 결과를 표 3에 나타내었다. 시험시편의 특성주파수는 초기 상대밀도 및 구속응력에 따라 2400Hz~3500Hz의 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

따라서, 공진주 시험의 경우에는 시험시편의 공진주파수가 구속압에 따라 상대밀도 50% 시편의 경우 48.5Hz~78.7Hz, 상대밀도 80% 시편의 경우 58.0Hz~91.4Hz의 범위로 평가되었으므로 하중주파수가 $0.1f_c$ ($\approx 240\text{Hz} \sim 350\text{Hz}$)보다 작은 값을 갖고, 곧 저주파수 전단파 속도(V_{s0})의 값을 평가하게 됨을 알 수 있다. 또한 흙입자와 물이 함께 움직이는 하중주파수 영역이므로 시험시편의 질량관성모멘트를 고려시 물의 질량을 포함하여 고려해야 함을 알 수 있다.

한편, 벤더엘리먼트 시험의 경우 대략 11kHz 이상의 고주파수 대역에서 전단파 속도가 측정되었으므로($f > f_c$) 고주파수 전단파 속도의 값($V_{s\infty}$)을 가질 것으로 판단된다.

포화조건에서 벤더엘리먼트 시험으로 평가된 전단파 속도와 물을 질량을 포함한 질량관성모멘트를 적용하

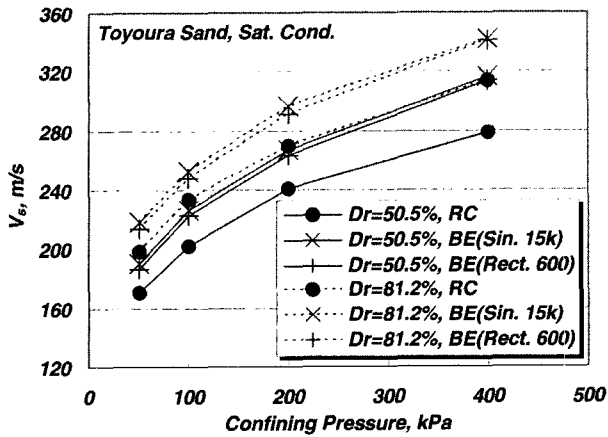


그림 10. 전단파속도-구속응력 관계(포화조건)

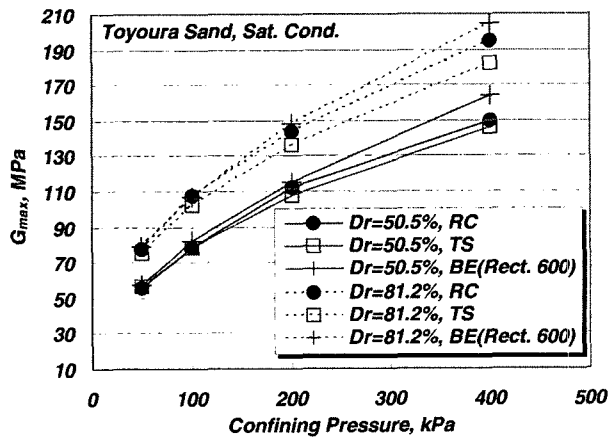


그림 11. 최대전단탄성계수-구속응력 관계(포화조건)

여 공진주 시험으로부터 전단파 속도를 평가한 결과를 그림 10에 함께 도시하였다. 두 시험에서 이용된 하중주파수의 차이로 인하여 벤더엘리먼트 시험을 이용하여 전단파 속도를 평가한 결과가 공진주 시험의 결과에 비해 더 큰 값을 갖는 것으로 판단된다.

그림 10의 전단파 속도 결과로부터 공진주 시험의 경우 식 (2)를 적용하고 벤더엘리먼트 시험의 경우 식 (7)을 적용하여 최대전단탄성계수를 산정한 결과를 그림 11에 도시하였으며 비틀전단 시험을 이용하여 평가된 최대전단탄성계수 또한 함께 나타내었다. 이때, 벤더엘리먼트 시험의 경우 식 (7)의 적용시 비틀림 정도 상수 α 값은 Berryman(1981)이 보고한 식 (6)을 이용하여 적용하였으며, 각 시험조건에서 적용한 값은 표 3에 나타나 있다.

그림 11의 시험결과에서 시험 구속응력이 증가함에 따라 세 가지 다른 시험을 이용하여 결정된 최대전단탄성계수의 차이가 커지는 것을 볼 수 있으며, 구속응력 400kPa에서는 각 시험방법의 결과가 세 가지 시험결과

의 평균값과 비교하여 최대 $\pm 7\%$ 의 차이를 갖는 것으로 나타났다. 구속응력이 증가함에 따라 시험편의 강성 증가로 인한 각 시험방법의 순응도 문제 및 시험치수의 오차 등의 이유로 각 시험결과의 차이가 커지는 것으로 판단되며, 구속응력 100kPa 이하에서는 세 가지 다른 시험을 이용하여 결정된 최대전단탄성계수의 차이는 최대 $\pm 3\%$ 이내로 거의 동일하게 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 포화가 가능하도록 개조된 Stokoe식 공진주/비틀전단 시험기에 벤더엘리먼트를 부착하여 건조 및 포화조건에서 구속응력을 달리하며 벤더엘리먼트 시험, 공진주 시험, 비틀전단 시험을 실시하여 그 결과를 비교하였으며, 세 가지 시험결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다.

- (1) 벤더엘리먼트 시험시 전단파의 전파시간 결정을 위한 방법을 제안하였으며, 제안한 방법을 이용하여 건조 및 포화조건에서 다양한 파형을 사용하여 시험을 수행한 결과, 전단파 속도 측정결과가 거의 동일하게 나타남을 확인하였다.
- (2) 건조시료에 대한 시험결과 벤더엘리먼트 시험 및 공진주 시험결과는 매우 유사한 결과를 나타내었으며, 비틀전단 시험을 이용한 최대전단탄성계수값은 두 시험결과에 비하여 조금 과소하게 평가되거나 ($D_r=79.5\%$) 유사하게 평가되었다($D_r=52.8\%$). 하중주파수를 달리하며 비틀전단 시험을 수행한 결과 시험시편의 하중주파수 영향정도는 작은 것으로 나타났으며, 일부 하중주파수 영향 이외에 다른 요인으로 인해 비틀전단 시험값이 조금 과소하게 평가된 것으로 판단된다.
- (3) 포화시료에 대한 시험결과를 Biot의 이론을 적용하여 비교·분석하였다. 시험시료인 토요라 모래는 성형시험의 투수계수가 비교적 커 작은 특성주파수값을 가지며, 따라서 하중주파수의 차이로 인하여 벤더엘리먼트 시험을 통해 평가된 전단파 속도가 공진주 시험 결과에 비해 더 큰 값을 나타내었다. Biot의 이론을 적용하여 최대전단탄성계수와 전단파 속도의 관계에 관성항인 밀도를 적용시 물의 질량을 포함하는 정도를 달리하여 공진주 시험 및 벤더엘리먼트 시험으로 평가된 전단파 속도를 최대전단탄

성계수로 변환한 결과, 두 시험결과의 최대전단탄성계수는 유사한 값을 나타내었으며, 비틀전단 시험결과와도 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 스마트 사회기반시설연구센터(SISTeC)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김동수, 추연욱 (2004), “간극수압증가와 동적변형특성 변화에 근거한 사질토 지반의 반복한계 전단변형률”, *대한토목학회논문집*, Vol.24, No.3C, pp.193-203.
2. Arulnathan, R., Boulanger, R. W., and Riemer (1998), M. F., “Analysis of Bender Element Tests”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.21, No.2, pp.120-131.

3. Berryman, J. G. (1981), “Elastic Wave Propagation in Fluid-saturated Porous Media”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.69, pp.416-424.
4. Biot. M. (1956a), “Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, 168-178.
5. Biot. M. (1956b), “Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. II. High frequency range”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, 179-191.
6. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985), “Laboratory Measurements of Gmax using Bender Elements”, Engrs Convention, Detroit. New York: American Society of Civil Engineers. pp.186-196.
7. Kamon, M., Endo, K., Kawabata, J., Inui, T., and Katsumi, T. (2004), “Two-dimensional DNAPL migration affected by groundwater flow in unconfined aquifer”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.110, No.1, pp.1-12.
8. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves*, John Wiley & Sons, LTD, pp.238-282.
9. Stoll, R. D. (1979), “Experimental Studies of Attenuation in Sediments”, *Acoustical Society of America*, Vol.66, pp.1152-1160.
10. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995), “Interpretation of Bender Element Tests”, *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154.

(접수일자 2005. 4. 21, 심사완료일 2005. 12. 29)