

국내 퇴적 지반의 전단파 속도 평가를 위한 탄성과 피에조콘 관입 시험의 종합적 활용

선창국^{1*} · 김홍종² · 정종홍² · 정경자²

¹한국지질자원연구원 지진연구센터

²한국도로공사 도로교통기술원

Synthetic Application of Seismic Piezo-cone Penetration Test for Evaluating Shear Wave Velocity in Korean Soil Deposits

Chang-Guk Sun^{1*}, Hong-Jong Kim², Jong-Hong Jung² and Gyungja Jung²

¹Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Highway and Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation

요약: 탄성과 피에조콘 관입 시험(Seismic Piezo-Cone Penetration Test, SCPTu)은 동적 및 정적 물성과 같은 지반의 공학적 특성 평가에 가장 유용한 조사 기법 중의 하나이다. 본 연구에서는 국내 지반에 대한 실질적 활용 연구로서, 국내 대표적 퇴적 지층 발달 지역인 부산과 인천을 대상으로 각각 두 부지와 네 부지에서 SCPTu를 수행하였다. 현장에서 SCPTu로부터 획득한 파형 신호에 대해 교차법을 이용한 신호 판독을 실시하여 깊이별 전단파의 초기 도달 시점 및 그에 따른 깊이별 도달 시차를 결정하였다. 이를 토대로 Snell의 법칙에 근간한 굴절 전파 경로법을 이용하여 전단파 속도(V_s)의 깊이별 분포를 도출하였다. 결정된 깊이별 V_s 분포를 콘 선단 저항력(q_t)과 비교해 본 결과, 깊이에 따른 두 값의 경향이 유사하게 나타났다. 일반적인 CPTu 자료의 지진공학적 활용을 목적으로 SCPTu로부터 측정된 결과를 토대로 V_s 와 콘 관입 특성값의 상관관계를 분석 도출하였다. 다중 회귀 분석을 수행하여 전단파 속도와 콘 관입 특성값 중 네 가지의 독립변수인 콘 관입 저항력(q_t), 주면 마찰력(f_s), 유효상재응력(σ'_{v0}) 및 간극수압계수(B_q) 간의 상호 관련성을 정량적으로 평가하였으며, 특히 흙 분류 지수인 I_c 값에 의하여 객관적으로 구분된 사질토 및 점토와 전체 토사에 대한 변수별 경험적 상관식을 제안하였다. SCPTu의 하향식 탄성과 시험과 일반적인 CPTu의 대상 변형률 수준이 다름에도 불구하고 본 연구에서 도출 제안된 V_s 와 CPTu 특성값의 상관관계는 국내 일부 퇴적 지반에 대한 V_s 의 예비적 평가에 매우 유용하였으며, 기존 해외 연구의 상관관계에 비해서도 높은 상관성을 보였다.

주요어: 전단파 속도, 탄성과 피에조콘 관입 시험, 전파 경로, 피에조콘 관입 시험, 퇴적 지층, 상관관계, 다중 회귀 분석

Abstract: It has been widely known that the seismic piezo-cone penetration test (SCPTu) is one of the most useful techniques for investigating the geotechnical characteristics such as static and dynamic soil properties. As practical applications in Korea, SCPTu was carried out at two sites in Busan and four sites in Incheon, which are mainly composed of alluvial or marine soil deposits. From the SCPTu waveform data obtained from the testing sites, the first arrival times of shear waves and the corresponding time differences with depth were determined using the cross-over method, and the shear wave velocity (V_s) profiles with depth were derived based on the refracted ray path method based on Snell's law. Comparing the determined V_s profile with the cone tip resistance (q_t) profile, both trends of profiles with depth were similar. For the application of the conventional CPTu to earthquake engineering practices, the correlations between V_s and CPTu data were deduced based on the SCPTu results. For the empirical evaluation of V_s for all soils together with clays and sands which are classified unambiguously in this study by the soil behavior type classification index (I_c), the authors suggested the V_s -CPTu data correlations expressed as a function of four parameters, q_t , f_s , σ'_{v0} and B_q , determined by multiple statistical regression modeling. Despite the incompatible strain levels of the downhole seismic test during SCPTu and the conventional CPTu, it is shown that the V_s -CPTu data correlations for all soils, clays and sands suggested in this study is applicable to the preliminary estimation of V_s for the soil deposits at a part in Korea and is more reliable than the previous correlations proposed by other researchers.

2006년 4월 3일 접수; 2006년 8월 23일 채택
한국물리탐사학회 제7회 특별 심포지엄 시추공 물리탐사에서(일부)발표
*Corresponding author

E-mail: pungsun@kigam.re.kr

Address: Earthquake Research Center,

Korea Intitute of Geoscience and Mineral Resources,

30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

Keywords: shear wave velocity, SCPTu, ray path, CPTu, soil deposit, correlation, multiple statistical regression

서 론

국가 기반 주요 시설물 뿐 만 아니라 일반 구조물에 대해서도 1990년대 중반 이후 내진 설계 및 내진 성능 평가가 요구되고 있다. 또한, 건축 및 사회 기반 시설물에 대한 실제 공용 상태에서의 변형 거동을 올바르게 평가함으로써 궁극적으로 설계의 합리화를 도모하려는 건설 관련 분야의 다양한 연구가 추진되고 있다. 여러 건설 관련 분야 중에서도 지반공학 측면에서는 이와 같은 내진 설계나 내진 성능 평가 그리고 공용 상태 거동 평가를 체계적으로 추진하기 위한 근본적 연구로서, 시설물의 구조적 토대인 지반을 대상으로 그 특성의 종합적이고 합리적인 측정을 위한 조사 기법 개발 및 검증이 활발하게 진행되고 있다. 특히, 내진 해석과 공용 상태 거동 예측의 관점에서 가장 중요하게 고려되는 지반의 초기 상태에 대한 정량적 특성 평가를 목적으로, 미소 변형률 수준의 변형 특성인 전단파 속도(shear wave velocity, V_s)와 압축파 속도(compressional wave velocity, V_p)를 신뢰성 높게 결정하기 위한 지반 및 지진공학적 연구가 근래에 전 세계적으로 집중 수행되고 있다. 일반적으로 고체와 더불어 유체를 통해서도 전파되는 압축파(compressional wave)에 비해 고체 매질 만을 통해 전파되는 전단파(shear wave)가 지표면 부근에서 횡방향의 지진동을 유발하므로 구조물에 주로 피해를 발생시키게 되며, 지반공학 관점에서는 다양한 시험 기법의 개발 및 활용을 통해 이러한 특성의 전단파의 매질 내 전달 속도를 우선적으로 결정하기 위한 노력을 지난 수십 년간 지속해 왔다(Sun, 2004). 지반공학 측면에서 전단파 속도를 평가하기 위해 현재까지 개발되어 온 주요 시험 기법 중에서도 탄성과 피에조콘 관입 시험(Seismic Piezo-cone Penetration Test, SCPTu)은 피에조콘 관입 시험(Piezo-cone Penetration Test, CPTu)과 하향식 탄성과 시험(downhole seismic test)의 병행을 통해 지반의 정적 특성과 더불어 지반의 동적 특성인 전단파 속도의 동시 평가가 가능함에 따라 지반의 종합적 특성 평가를 위한 실무적 활용 기법으로서의 유용성이 강조되어 왔다. SCPTu는 주로 강진 지역인 북미와 콘관입 시험(Cone Penetration Test, CPT)의 기원지인 유럽을 중심으로 활발하게 수행되어 왔으며, 최근 국내에서도 내진 설계나 내진 성능 평가의 일환으로 지반의 전단파 속도 결정을 위하여 그 활용 사례가 증가하고 있다(선창국 등, 2005).

지반의 전단파 속도는 이미 강조된 바와 같이 내진 목적의 다양한 설계 및 평가나 공용 상태 거동 평가에서 가장 중요한 기초 자료이므로, 근래에는 SCPTu 뿐만 아니라 시추공 탄성과 시험(borehole seismic tests)이나 비파괴 탄성과 시험(non-destructive seismic tests)과 같은 다양한 종류의 현장 탄성과 시험을 통해 효율적으로 평가하고 있으나(Sun, 2004), 1990년대 중반 이전의 기존 지반 조사에서는 탄성과 시험에 의한 지반의 전단파 속도의 측정이 거의 전무하였다. 특히, 기존 시설

물에 대한 내진 성능을 평가하고자 할 경우 CPTu 결과가 있음에도 그 성과를 지반의 동적 특성 산출에 활용하지 못하고, 별도로 수행한 탄성과 시험 결과만을 활용하고 있어 기존 조사 자료를 충분히 이용하지 못하는 일도 빈번하다. 이는 국내 지반을 대상으로 CPT (CPTu)로 구한 관입 특성값들과 지반의 전단파 속도간의 상관성에 대해 충분히 규명이 되지 못했던 것이 가장 큰 이유라 할 수 있다.

이 논문에서는 향후 활용성이 증가할 SCPTu에 대한 체계화의 일환으로 국내 주요 퇴적 지반을 대상으로 실제 시험을 수행하고, 다양한 분석 방법에 따라 지반의 깊이별 전단파 속도 분포를 평가하고 분석하였다. 또한, 합리적으로 평가된 전단파 속도와 CPTu의 특성 값들과의 다중회귀분석을 통해 상관관계를 도출하여 국내 지반에 대해 기존 CPTu 결과를 이용한 전단파 속도의 경험적 산정식을 제시코자 하였다.

탄성과 피에조콘 관입 시험

탄성과 피에조콘은 기존 피에조콘의 상단에 진동을 감지할 수 있는 수신기(receiver)를 설치하여 CPTu 도중 지표면의 발진자로부터 발생된 탄성과를 지중에서 획득할 수 있도록 고안된 현장 시험 장치이다. 즉, SCPTu는 CPTu와 하향식 탄성과 시험(downhole seismic test)을 접목한 현장 시험 기법(hybrid in-situ testing technique)으로서, Campanella *et al.* (1986)에 의해 고안된 이래로 현재까지 콘관입시험 결과인 선단 저항력(tip resistance; 수정 원추 관입 저항력, q_t), 주면 마찰력(sleeve friction, f_s) 그리고 간극 수압(pore pressure, u)과 함께 지반의 전단파 속도(V_s) 및 압축파 속도(V_p)를 획득하기 위해 폭넓게 이용되고 있다.

피에조콘 관입 시험의 개요

지반의 공학적 특성 평가를 위한 현장 조사 기법은 대상이 되는 지반에 대한 굴착이나 관입 여부에 따라 비파괴 조사 기법, 관입 조사 기법 그리고 시추 조사 기법으로 분류할 수 있다. 이들 중에서 사운드링(sounding)으로 일컫는 관입 조사에 해당하는 피에조콘 관입 시험(CPTu)은 시험이 간편하고 경제적인 뿐만 아니라 결과의 활용성이 뛰어나 세계적으로 널리 이용하고 있으며, 우리나라에서도 1990년대 후반부터 흙의 공학적 분류, 지반의 강도 및 변형 특성 평가를 위한 중요한 원위치 조사 기법(in-situ investigation method)으로 활발하게 적용하고 있다. 현재 보편적으로 이용하는 피에조콘으로는 내장된 전기저항식 변형률계로부터 선단 저항력(q_t)과 주면마찰력(f_s)을 측정하고, 압전소자 셀을 통해 관입 중 간극 수압(u)을 측정할 수 있다. Fig. 1에 묘사된 피에조콘은 일반적으로 활용되고 있는 단면적 10 cm^2 의 콘으로서 간극 수압을 콘 팁(conical tip)과 마찰 슬리브(friction sleeve) 사이에서 측정하는 방식이다(ASTM, 2000). 시험은 피에조콘 연결 로드(rod)를 지표면에

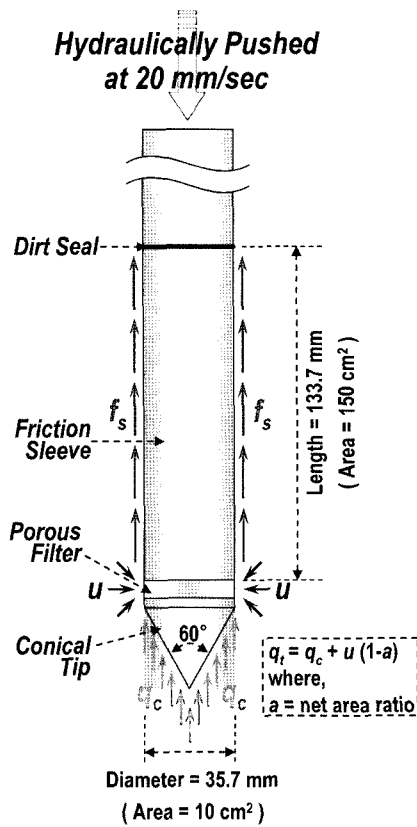


Fig. 1. Schematic diagram of piezo-cone and its testing parameters.

서 유압 관입 장치(hydraulic penetrometer)로 압입하면서 수행하게 되며, 관입 중에 연속적으로 선단 저항력, 마찰력 및 간극 수압을 측정하게 된다. 또한, 소정 심도에 대한 압밀(consolidation) 특성 평가를 목적으로 관입을 멈추고 간극 수압 소산 시험(pore pressure dissipation test)을 실시하기도 한다(장인성 등, 2002). 이와 같은 피에조콘 관입 시험으로부터 측정된 관입 특성 값들을 토대로 직간접적인 분석 방법을 통해 지반의 공학적 특성을 결정하게 된다.

최근의 기계, 전자 장비의 급속한 발전에 힘입어 콘 관입 시험 장비는 선단 저항력, 간극 수압 및 주변 마찰력을 측정하는 모듈의 상단부에 다양한 계측기와 센서를 추가하여 보다 다양한 목적으로 활용할 수 있는 복합 시험기로 발전하고 있다. 피에조콘의 개발 이후 현재까지 개발된 주요 콘으로는 탄성파콘(seismic cone), 비저항콘(resistivity cone), 다중 피에조콘(multi-element piezo-cone), 환경콘(environmental cone), 감마콘(gamma cone), 카메라콘(camera cone), 진동 피에조콘(vibro-piezocone) 등이 있으며, 그 외에도 특정 목적에 최적화된 콘들이 개발되고 있다. 또한, 최근에는 기존의 콘 프레스미터(cone pressuremeter)와 복합 기능 콘의 조합을 통한 차세대 현장 시험 장비에 대한 개념도 소개되고 있다(Mayne, 2000). 현재까지 개발된 여러 복합 기능 콘 중에서도 탄성파콘은 기존의 피에조콘 관입 시험(CPTu) 수행과 더불어 지반의 동적

특성 중 가장 중요한 변수중 하나인 실체파 속도(body wave velocity; V_s 와 V_p)를 평가하여 지반 및 구조물의 동적 거동 규명에 직접 활용 가능하다.

탄성과 피에조콘 관입 시험의 개요

SCPTu는 시험공 없이도 시추공내 탄성파시험과 같이 지중에서 직접 탄성과 조사가 가능하며(조성민 등, 2004), 콘과 지반이 양호하게 밀착되므로 일반적인 공내 탄성파시험에서 흔히 발생할 수 있는 문제점인 시험공과 주변 지반의 접촉 불량 및 이로 인한 수진 신호의 불량이 거의 없다. 동일 부지에 대한 시추공간(crosshole)과 하향식(downhole) 탄성파 시험의 깊이별 전단파 속도 분포와 SCPTu의 결과를 비교한 Maher *et al.* (2002)은 이러한 특성 덕분에 SCPTu가 지층 변화에 따른 전단파 속도 변화를 보다 정밀하게 반영함을 확인한 바 있다. SCPTu는 콘의 관입 능력 한계로 인해 매우 단단한 지층이나 내진 해석시 기반압으로 간주되는 연암이상의 암반층에 대한 적용은 현실적으로 어려우나, GeoDelf (2002)에서 개발한 윤활콘(lubricating cone)이나 Sacchetto *et al.* (2004)이 제안한 시추콘(drilling cone) 등을 복합 활용한 장비 개선을 통해 가탐 심도를 연장할 수 있을 것이다.

탄성파콘에는 콘의 상단 하우징 내에 동적 신호를 감지하는 수진기로서 속도계(geophone)나 가속도계(accelerometer)를 설치하게 된다. 수진기는 지반을 대상으로 하므로 일반적으로 속도계를 사용하고, 최근에는 1 m 간격으로 상하부 두 쌍의 3성분 속도계를 장착하기도 한다(Fig. 2의 우측 삽입 그림). 3성분 속도계는 수직방향 성분, 방사방향(또는 길이 방향) 성분, 그리고 횡방향 성분으로 구성된다. SCPTu와 같이 지표면에서 발진을 하고 지중에서 수진하는 경우에 수직방향 성분은 압축파 수진에 이용되고, 수평방향의 방사 및 횡방향 성분은 횡방향 전단파(SH-wave) 수진에 이용된다. 또한, 상부와 하부에 각각 3성분 속도계를 두고 각 속도계의 탄성과 도달 시간 차이를 측정하여 분석 방법 중 간접법(interval method)으로 쉽게 측정 심도의 전단파 속도를 결정할 수 있으며, 한쌍의 속도계만이 설치된 경우는 의사 간접법(pseudo interval method)으로 전단파 속도를 산정한다. 일반적으로 발진자는 가진판(plank)과 해머(hammer)로 구성되며, SCPTu 수행을 위해 콘 관입공에서 일정 거리(대개 3 m 정도) 이격된 지표면에 가진판을 수평으로 설치한 후, 방향성이 있는 전단파의 생성을 위하여 해머로 가진판의 양 옆면을 교차로 타격한다. 압축파를 발생시키고자 할 경우는 해머로 가진판을 수직 하향으로 타격한다. 발진자에는 트리거(trigger) 장치를 별도로 연결하거나 가진판에 추가적인 가속도계를 설치하여 발진 시점을 확인하며, 수진된 신호는 기록계(주로 오실로스코프를 사용)에서 확인하여 기록 저장한다. Fig. 2는 이 연구에 적용한 SCPTu 절차를 모식화한 것으로서, 가진판의 상부는 Fig. 2 내의 좌측 삽입 사진과 같이 상부에 차량 하중을 거치시켜 발진 효율을 극대화하였다.

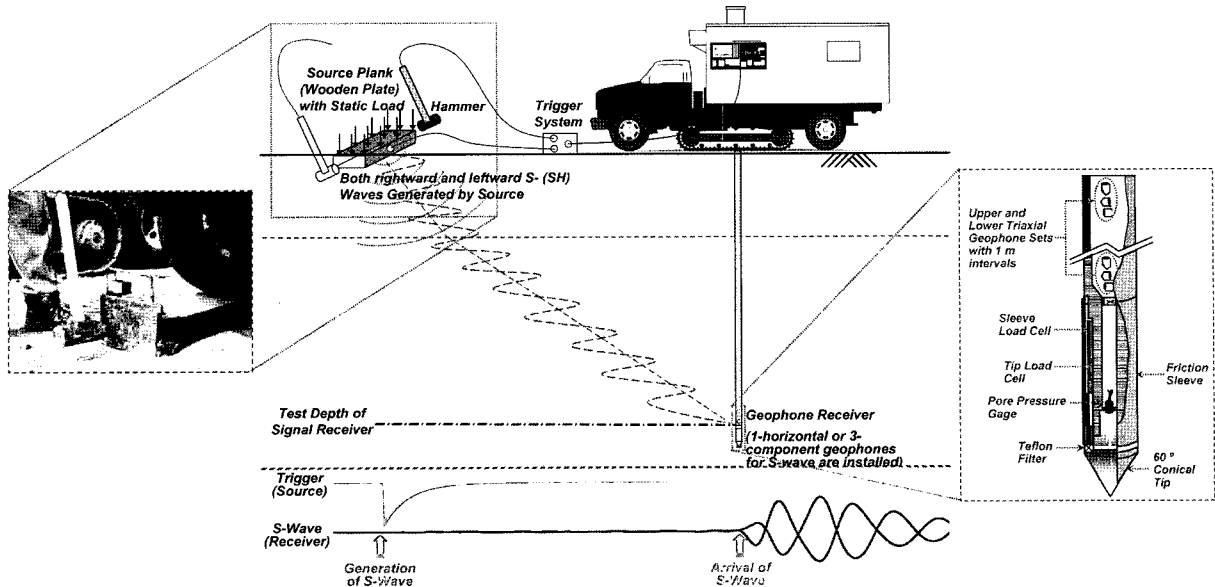


Fig. 2. Schematic diagram of seismic piezo-cone penetration test (SCPTu).

시험 대상 부지 및 시험 수행

본 연구에서는 우리나라의 대표적인 퇴적 지반 발달 지역인 부산과 인천을 대상으로 각각 2 개소(BS01, BS02)와 4 개소(IC01, IC02, IC03, IC04)의 시험 지점을 선정하여 SCPTu를 수행하였다. 또한, 인천 지역에서는 대상 부지 중 3 개소(IC01, IC02, IC03)에서 SCPTu와의 결과 비교를 목적으로 시추 조사 후 시험공을 형성하여 추가적인 하향식 탄성과 시험을 실시하였다. 부산의 BS01과 BS02 지점은 낙동강 하구 인근의 충적 평야지에 위치하며, 인천 지역의 4 개 지점(IC01 ~ IC04)은 연안의 바다를 매립하여 조성한 부지 내에 있다. 사용된 탄성과 콘은 미국 Hogentogler사에서 단일 성분의 횡방향 속도계만을 내장 설치하여 제작한 것이므로 연직 방향 가진을 통한 압축과 수진보다는 횡방향 가진을 통한 전단파 수진에 유리하도록 구성된 콘이다. 발전자는 Fig. 2의 상부 삽입 사진에 제시한 바와 같이 가진관의 양면에 트리거 장치를 별도로 설치하여 발전 시점 이후의 수진 신호만을 획득하도록 하였으며, 신호의 기록 및 저장을 위한 기록계는 SCPTu와 더불어 여러 현장 시험 자료 처리가 가능하도록 미국 Hogentogler사에서 설계 제작한 다기능 현장 컴퓨터를 활용하였다.

SCPTu 수행 지점 인근의 약 7 m 이격된 곳에서 사전 실시된 시추조사 결과들에 따르면, BS01부지는 약 27 m, 그리고 BS02 부지는 약 52 m까지 점성토 퇴적층이 발달되어 있고, 상부에는 지표면 매립층 아래로 6~7 m 두께의 실트질 모래층이 분포한다. BS01 부지에서는 퇴적층 아래로 매우 두꺼운 풍화대(풍화잔류토 및 풍화암)가 발달하여 79 m 깊이까지의 시추 조사에서도 기반암층이 확인되지 않았으며, BS02에서는 퇴적층 아래의 3 m 가량 두께의 자갈층 하부인 55 m 깊이에서 기반암으로 판단되는 연암층이 나타났다. 또한, 시추조사에서

인천 지역의 시험 부지들은 11~17 m 두께의 상부 매립층 아래로 시추 종료 깊이인 50 m에 이르기까지 다양한 층서를 갖는 퇴적층이 분포하는 것으로 확인되었다.

SCPTu에서 탄성과 탐사는 콘의 관입(貫入, push in)중 또는 인발(引拔, pull out)중 실시할 수 있다. 일반적으로 콘의 상단부와 관입 로드(rod)의 연결부 사이에는 마찰력 감소를 위한 돌출부(friction reducer)가 설치되어 있으므로, 관입으로 인한 원지반의 교란 이외에도 콘 상단부에서는 돌출부로 인한 추가 교란이 발생하게 된다. 따라서 인발 중 보다는 관입 중에 탄성과 획득을 위한 하향식 탄성과 시험을 수행함이 타당하다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 시험의 효율성을 재고한 상황에서 이러한 추가 교란이 비교적 원지반의 전단파 속도의 결정에는 미미한 영향을 줄 것으로 보고, 시험 깊이까지 CPTu를 마치고 콘을 인발하며 하향식 탄성과 시험을 수행하였다. 가진관은 지중에 관입되어 있는 속도계의 방향을 고려하여 설치하였는데, 단일성분(수평) 속도계의 진동 방향에 평행하게 가진관의 장축을 위치시켰다. 이를 위하여 실제 현장에서는 SCPTu의 하향식 탄성과 시험 수행 직전에 지표면의 다양한 위치에서의 발전 가진관 설치 및 예비 타격을 수행하여 양방향 전단파의 위상차가 180°가 되는 최종적인 가진관 설치 위치 및 각도를 결정하게 된다. 하향식 탄성과 탐사 깊이는 부산 지역의 경우 BS01 부지에서는 CPTu 종료 심도인 28 m부터 2 m 간격으로 지표면 아래 2 m까지이며, BS02에서는 CPTu 종료 심도인 52 m부터 1 m 간격으로 지표면 아래 1 m까지이다. 인천 지역의 경우 IC01 부지는 지표면부터 약 2 m 깊이 간격으로 39 m까지, IC02 부지는 깊이 4 m부터 4 m, 또는 2 m 간격으로 34 m까지, IC03 부지는 깊이 2 m부터 약 2 m 간격으로 36 m까지, 그리고 IC04 부지는 깊이 4 m부터 4 m 간격

으로 36 m 깊이까지 실시하였다.

깊이에 따른 전단파 속도 결정

현장에서의 SCPTu로부터 획득된 시험 심도별 신호는 실내에서의 자료 처리 과정을 통해 최종적으로 시험 부지의 깊이별 전단파 속도 주상도로 제시될 수 있다. 기본적으로 SCPTu의 탄성과 신호 획득 과정이 일반적인 하향식 탄성과 시험과 동일하므로 깊이에 따른 전단파 속도 분포 도출을 위한 자료 처리 과정 또한 하향식 탄성과 시험과 동일하다. 이러한 자료 처리 과정은 획득 신호로부터 전단파 도달 시점이나 각 신호별 전단파의 도달 시차를 결정하는 전단파 획득(picking) 과정과 그를 토대로 한 전단파 속도 연산 과정으로 구분된다. 본 연구에서는 SCPTu의 하향식 탄성과 시험 뿐만 아니라 인천 지역의 3 부지에서 시험공을 형성하여 추가적으로 병행된 하향식 탄성과 시험에 대해서도 동일한 전단파 획득 및 전단파 속도 연산 과정을 적용하였다.

전단파 도달 시점 및 도달 시차 결정 기법

SCPTu 결과로부터 지층의 깊이별 전단파 속도 분포를 구하기 위해서는 먼저 깊이별로 취득한 전단파 신호의 도달 시점을 판독해야 한다. SCPTu 또는 하향식 탄성과 시험시 기록하는 신호는 발진 신호(trigger signal)와 수신 신호(receiver signal)로서 Fig. 2의 하단부 삽입 신호와 같다. 발진 신호는 단지 신호의 발생 시점만을 확인하기 위한 것이므로, SCPTu 수행시 발진자의 트리거 시스템에 추가적인 전기 접촉 스위치를 설치하여 발진 신호는 기록하지 않고 타격을 통한 발진 시점부터 전단파 수신 신호만 저장하기도 한다. 전단파는 파의 진행 방향과 입자 운동 방향이 직교하므로 방향성을 보이게 되며, 시험 중 가진판의 양방향 타격을 통해 심도에서 극성(polarity)을 띠는 한 쌍의 전단파를 얻을 수 있다. 시험을 통해 기록한 한 쌍의 전단파를 중첩시키게 되면 이상적인 파형(waveform)에서는 두 파형의 위상이 달라짐에 따라 처음으로 전단파가 극성을 띠는 시점을 전단파의 도달 시점으로 결정할 수 있다. 이러한 과정에 의해 결정된 발진 시점과 전단파 도달 시점까지의 시간이 가진판으로부터 수신기까지의 전파 시간이 되고, 각 시험 심도의 도달 시간들을 토대로 전체 시험 지반에 대한 전단파 속도 분포를 산정할 수 있다(Areias and Impe, 2004; Kim et al., 2004).

현장에서 획득한 전단파 신호는 이상적인 상황과는 달리 발진 조건, 원지반 주변의 잡음, 전체 시스템상의 전기 잡음 등과 같은 부정적 영향 요인으로 인해 도달 시점의 판독이 어려운 경우가 매우 많다. 특히, 양방향 타격 대신 단방향 가진판으로 신호를 획득한 경우는 전단파 도달 시점의 판독이 더욱 어려울 수 있다. SCPTu에서는 단순히 한 심도의 전단파 도달 시점만을 판독하는 것이 아니라, 심도 증가에 따른 각 시험 심

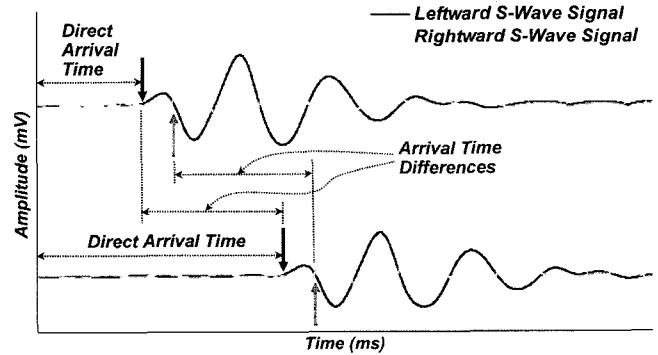


Fig. 3. Cross-over method for picking first arrival time of shear wave.

도별 전단파의 도달 시점이나 상대적인 도달 시간 차이를 결정함으로써 모든 시험 심도의 전단파 속도를 깊이별 주상 형태로 산정할 수 있다. 깊이별 전단파의 도달 시점 및 도달 시차를 결정하기 위한 기법들은 오랜 동안의 물리 탐사 분야에서 다양한 연구를 통해 제시되어 왔으며, 그 중에서도 지반공학 분야에서는 주로 교차법(cross-over method), 극간법(peak-to-peak method), 그리고 상호상관법(cross-correlation method)이 도입 활용되고 있다(선창국 등, 2005). Fig. 3에서 묘사한 전단파 신호 분석 방법은 본 연구에서 적용한 교차법으로서, 전단파의 방향성에 따른 극성 특성이 발현되는 발진자를 이용한 시험에서만 적용할 수 있다. SCPTu에 사용하는 일반적인 발진자의 경우 가진판을 사용하므로 양방향 가진을 통해 쉽게 180° 위상차를 보이는 한 쌍의 전단파를 발생시킬 수 있다. 전단파의 도달 시점은 앞서 언급한 바와 같이 양방향의 전단파가 극성에 따라 급격하게 나뉘는 시점으로 확인할 수 있으며, 상부 심도의 전단파 신호와 하부 신호의 도달 시간 차이는 도달 시점간 차이뿐만 아니라 두 방향의 전단파가 교차하는 지점들 간의 차이로도 결정할 수 있다. 본 논문에서는 전단파의 도달 시점과 상하부간 도달 시차를 모두 초기 도달 시점을 확인함으로써 결정하였다.

교차법 외에도 극간법이나 상호상관법이 활용될 수 있지만, 기본적으로 전단파의 극성을 배제한 일방향 성분을 토대로 전단파 도달 시차의 분석 과정이 적용되므로 현장 발진시의 다양한 상황을 고려하기 어렵다. 이 연구에서 수행한 6곳의 부지중 대표적으로 가장 깊은 심도(52 m)까지 SCPTu를 실시한 BS02 부지의 깊이별 신호 분포를 Fig. 4에 나타내었으며, 각 부지의 전단파 분포는 좌향과 우향의 한 쌍(심도 7 m 제외)의 신호로 구성되어 있다. 각 신호 분포에는 교차법을 이용한 전단파 도달 시점을 표시하였으며, 대부분 심도에서 교차법에 의한 전단파 도달 시점의 결정이 용이하였다.

깊이별 전단파 속도 분포 결정 기법

지반공학적 관점에서 SCPTu와 같은 지층 탄성과 시험의 궁극적인 목적은 전단파 속도(V_s) 및 압축파 속도(V_p)와 같은 탄

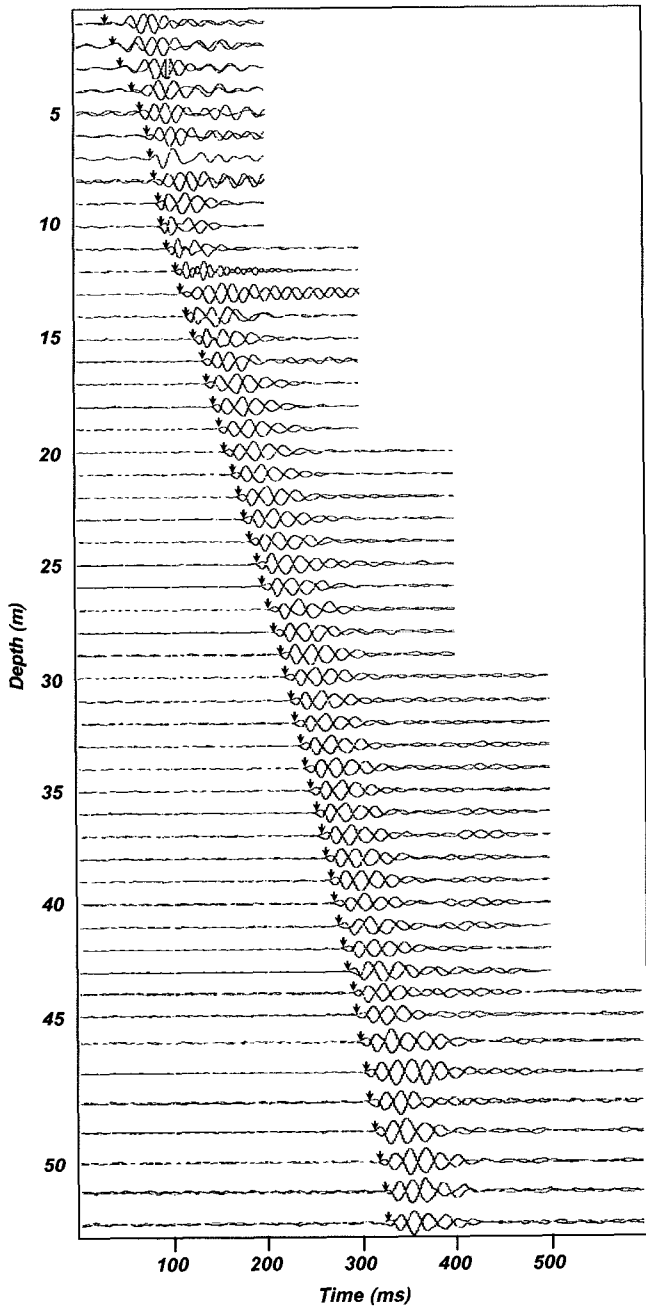


Fig. 4. Representative shear wave signals with depth in BS01 site. Arrow marks were also plotted to indicate the first arrivals of shear waves.

성과 속도의 깊이별 분포를 결정하는 것이며, 이를 위하여 수평 층상 지반의 수직 공내 수신 조건에 대한 다양한 분석 기법이 도입 적용되고 있다. 탄성파 도달 시점의 관측시에는 전단파와 압축파의 특성상 서로가 다소 차이를 가지나, 깊이별 전파속도 분포를 구할 때에는 실제파인 전단파와 압축파의 종류에 무관하게 같은 조건의 분석 기법을 적용할 수 있다. 여기서는 지반공학적인 관점에서 상대적 중요성이 크고, 기존의 연구가 집중되어 온 전단파 전달 속도만을 분석 대상으로 한정하였다. SCPTu나 일반적인 하향식 탄성파 시험과 같은 하향 방

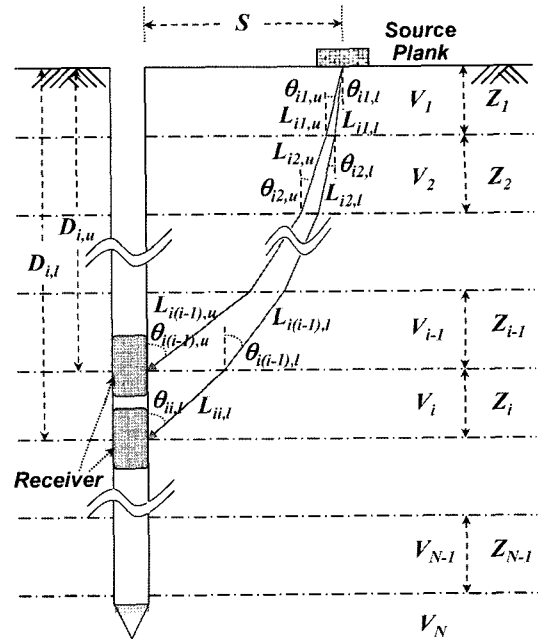


Fig. 5. Refracted ray path method for determining shear wave velocity profile.

식의 탄성파 분석 기법에는 결정된 신호 도달 시점 및 시차를 토대로 직접 계산이 가능하여 실무적 편의성이 높은 직접법 (direct method)과 간접법(interval method)이 보편화되어 있다 (Howie and Amini, 2004). 근래에는 SCPTu로부터 깊이별 전단파 속도를 산정하기 위하여 간접법을 개선한 수정 간접법(modified interval method)이나 실제 전파 경로를 기하학적으로 고려하는 역산해석(inversion analysis) 기법을 적용하기도 한다(Joh and Mok, 1998; Baziw, 2002). 역산해석 기법은 전파경로 형상에 대한 기하학적 가정 조건에 따라 직선경로 및 굴절경로 가정 분석법으로 구분할 수 있는데, 본 연구에서는 역산해석 기법으로서 Snell의 법칙을 이용한 굴절 전파 경로법(refracted ray path method)을 기존의 직접법 및 간접법, 그리고 수정간접법과 함께 적용하여 시험부지의 깊이별 전단파 속도를 도출하였다.

최종적으로 시험 대상 부지에 대해 깊이별 전단파 속도 분포 제시한 결과는 지표면 아래 지반을 통과하는 전단파의 현실성을 비교적 잘 묘사하는 굴절 전파 경로법(선창국 등, 2005; Kim et al., 2004)의 결과를 깊이별 전단파 속도 분포로 제시하고, 이를 토대로 SCPTu의 종합적 활용을 위한 큰 관입 특성값과의 상관관계 분석을 수행하였다. Fig. 5는 이러한 굴절 전파 경로법을 개요적으로 도시한 것이다. 근본적으로 지중의 임의 위치에서 상부와 하부의 탄성파 도달 시차는 상하부 두 위치에 속도계(가속도계)가 설치된 수신기를 탑재한 탄성파관을 활용해야 하지만, 한 위치에 속도계가 설치된 탄성파관도 발전자의 반복성이 확보된다면 상부 심도의 시험 결과를 활용하여 마치 두 위치의 시험 결과를 동시에 획득한 것처럼

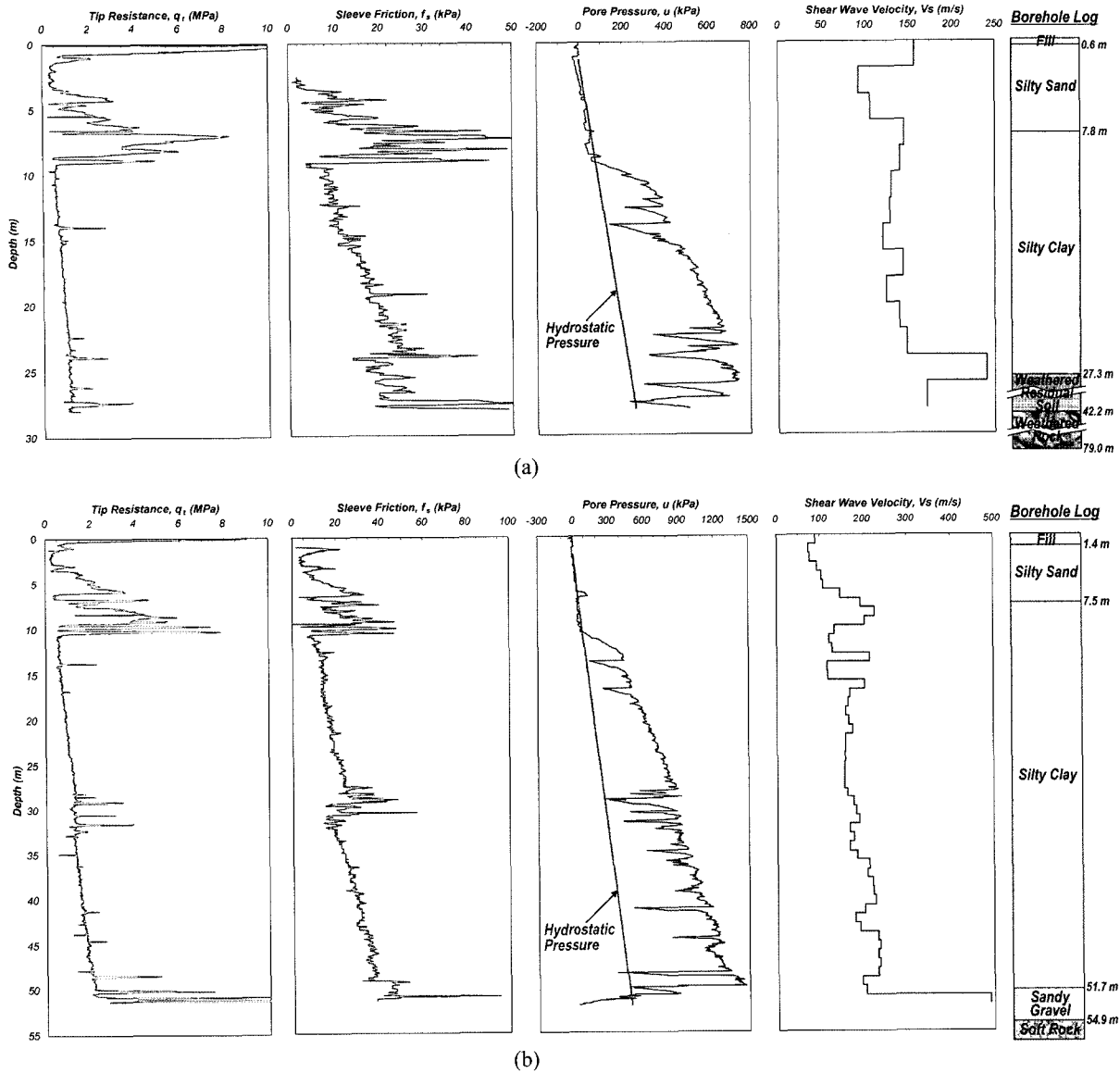


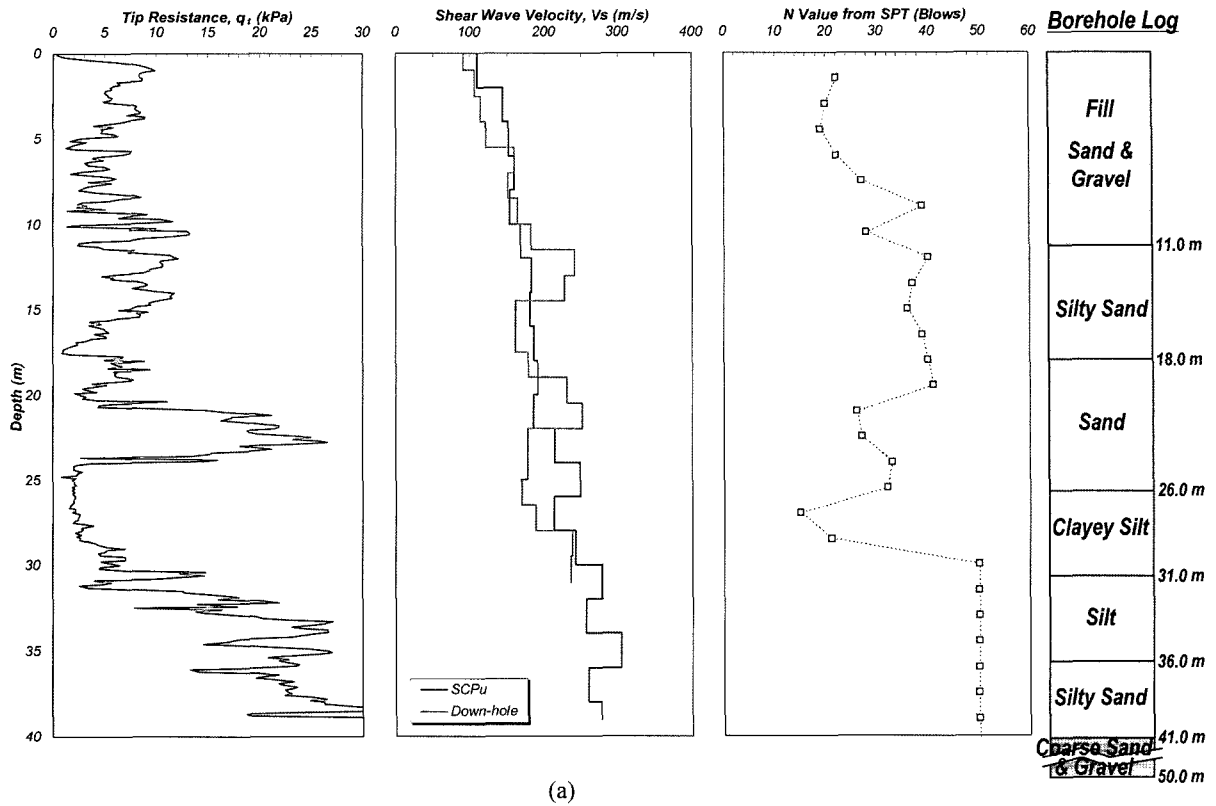
Fig. 6. Shear wave velocity (V_s) profiles and other results (q_t, f_s, u) from SCPTu in Busan area: (a) at BS01 site and (b) at BS02 site. The geologic layers observed from boring investigations were also plotted for the purpose of comparisons.

분석을 수행하는 의사 간접법(pseudo interval method)을 적용할 수 있다. 굴절 전파 경로법은 지반 매질의 깊이에 따른 불균질성을 고려하여 탄성과 속도를 산출할 수 있는 기법이며, 그 적용을 위해서는 지반을 시험 심도가 경계면이고 층별 특성은 균질한 조건의 다층 매질로 모델링해야 한다. 굴절 전파 경로법(Fig. 5)에서는 탄성파가 지표면에서 지반으로 전파되어 하부 매질로 입사하는 경로를 Snell의 법칙에 따라 굴절하는 전파경로에 대해 탄성과 속도 도출을 위한 역산해석을 수행한다.

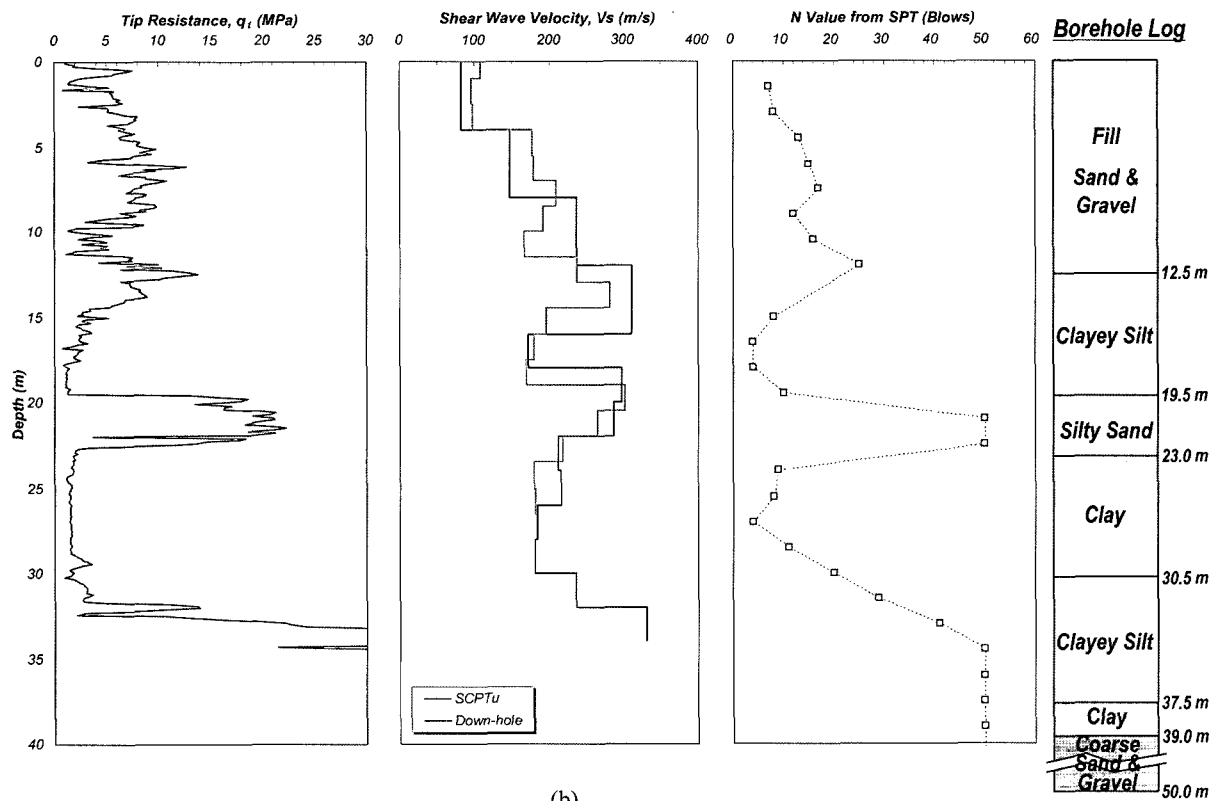
대상 부지의 깊이에 따른 전단파 속도 분포

각 시험지점에서는 SCPTu 실시 이전에 지반의 공학적 특성 평가를 위해 다양한 현장조사와 실내시험을 수행하였으며, 여

기서는 주로 SCPTu의 콘 관입 특성 결과 및 시추 조사 결과와 SCPTu로부터 결정된 전단파 속도 분포를 비교하였으며, Fig. 6과 Fig. 7은 각각 부산과 인천 대상 지역의 조사 부지에서 깊이별 지반 특성을 도시한 것이다. Fig. 6은 부산 지역의 BS01과 BS02 지점에서 SCPTu를 통해 얻은 수정 원추 관입 저항력(q_t), 주면 마찰력(f_s)과 간극 수압(u), 그리고 취득한 탄성과 신호를 분석해서 산정한 전단파 속도의 깊이 분포를 지층 분포와 함께 도시한 것이다. SCPTu 수행 중의 하향식 탄성과 시험은 앞서 언급한 바와 같이 BS01 부지(Fig. 6(a))의 경우 콘 관입 종료 심도인 28 m부터 2 m 간격으로 실시하였으며, BS02 부지(Fig. 6(b))의 경우 깊이 52 m부터 1 m 간격으로 지표면 아래 1 m까지 전단파 속도의 깊이 분포 결정을 위한 탄성과 신호를 획득하였다. SCPTu의 전단파 속도는 교



(a)



(b)

Fig. 7. Shear wave velocity (V_s) profiles and other result (q_t) from SCPTu in Busan area: (a) at IC01 site, (b) at IC02 site, (c) at IC03 site and (d) at IC04 site. The geologic layers observed from boring investigations were also plotted for the purpose of comparisons, and particularly the V_s profiles determined from downhole seismic tests were compared with those from SCPTu in (a), (b) and (c).

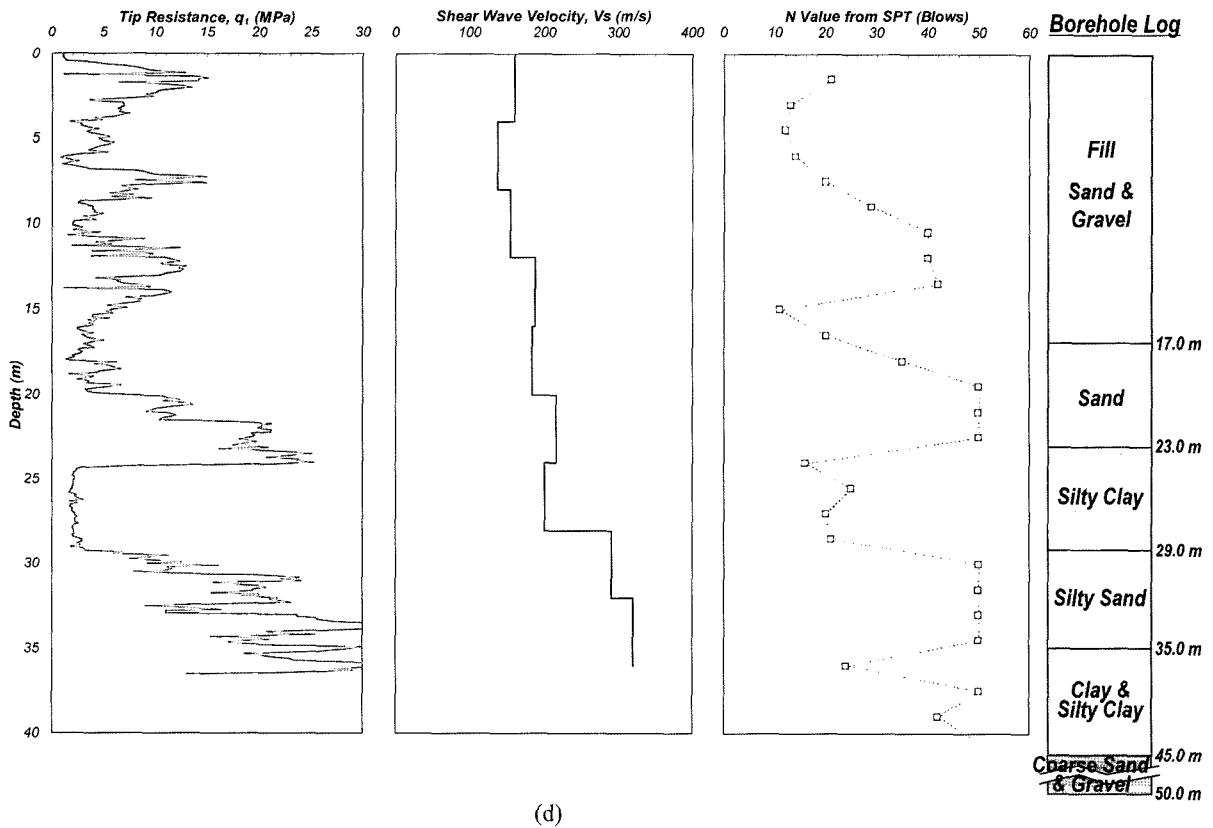
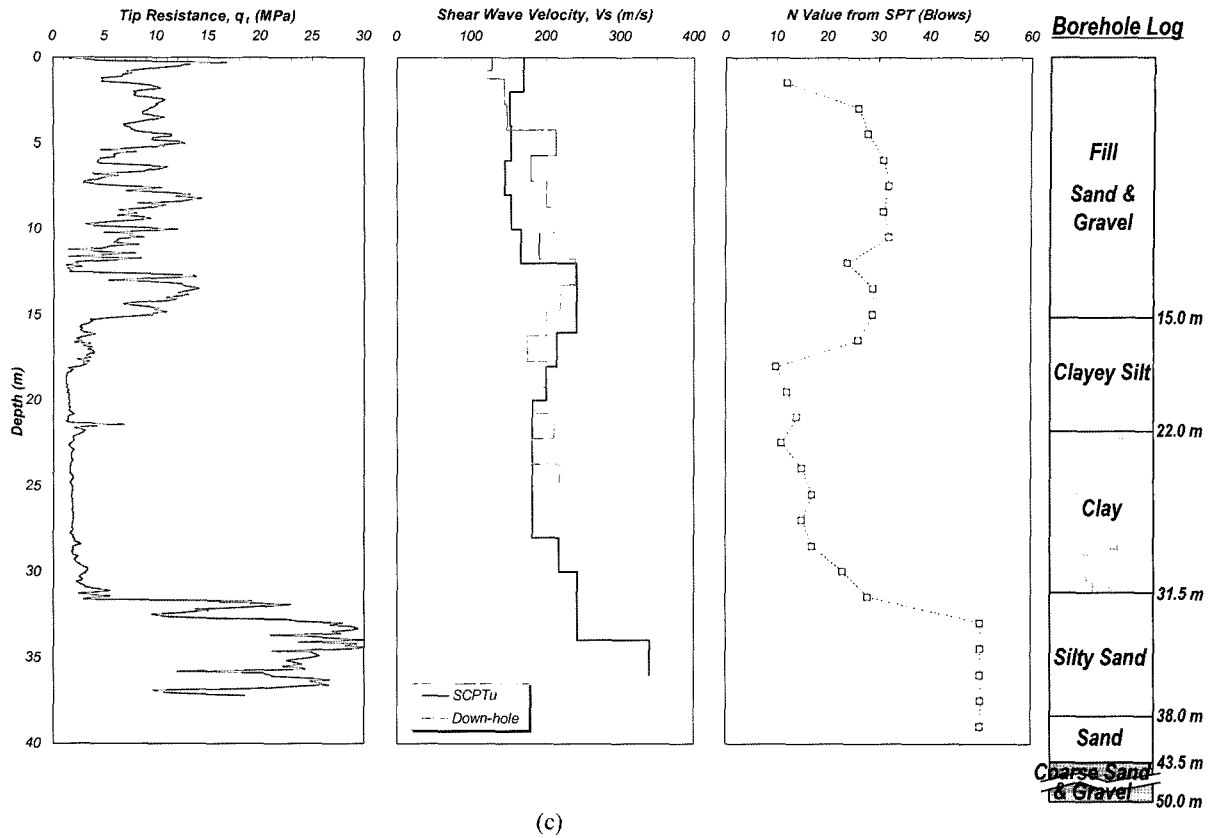


Fig. 7. Continued.

차법(Fig. 3 참조)으로 전단파의 초기 도달 시점을 판독하고 각 시험 심도별 전단파 도달 시차를 토대로 굴절 전파 경로법(Fig. 5 참조)을 이용하여 깊이별 분포로 산출한 것이다. Fig. 6에서 확인할 수 있는 것처럼 BS01 및 BS02 부지의 매립토(1 m 내외의 두께) 아래에 발달한 퇴적 지반에서 상부의 비교적 견고한 실트질 모래(silty sand; 심도 7.8 m 및 7.5 m까지 발달)를 제외한 하부의 두꺼운 실트질 점토(silty clay; 약 27 m 및 52 m 깊이까지 발달)는 q_t 분포로부터 알 수 있는 바와 같이 전체 깊이에 걸쳐 연약한 상태였으며, 이 연약한 퇴적층에서 전단파 속도는 심도 증가에 따른 두드러진 증가 없이 대체로 100~200 m/s 정도의 분포 범위를 나타냈다. 또한, 전단파 속도 분포와 q_t 값의 깊이별 분포 경향은 대체로 일치한다.

Fig. 7에 제시된 인천 지역의 결과 그래프에서는 SCPTu의 CPTu 결과 중 대표적으로 q_t 만을 제시하였다. 또한, 표준 관입 시험(Standard Penetration Test, SPT)을 통해 조사된 N 값을 비교 도시하였고, 그 중 3 부지(IC01, IC02, IC03)에 대해서는 시추공을 이용한 하향식 탄성과 시험으로부터 결정된 깊이별 전단파 속도 분포도 비교 도시하였다. 인천 지역의 시험 부지의 경우 2 m 또는 4 m의 시험 심도 간격으로 SCPTu의 하향식 탄성과 시험을 수행하여 IC01 부지(Fig. 7(a))에서는 39 m, IC02 부지(Fig. 7(b))에서는 34 m, IC03 부지(Fig. 7(c))에서는 36 m, 그리고 IC04 부지(Fig. 7(d))에서는 36 m 까지의 전단파 속도 분포를 Snell의 법칙을 가정한 굴절 전파 경로법으로 결정하였다. 이러한 전단파 속도의 최종 분포 심도는 대체로 SCPTu의 CPTu 수행 종료 심도이다. SPT로 구한 N 값의 깊이별 분포 경향은 IC01 부지의 20~25 m 구간 외에는 SCPTu로 얻은 q_t 의 분포와 매우 유사하였으며, 모든 부지에서 약 30 m 깊이 아래부터는 N 값이 50 이상으로 나타났다. 시추 조사에서 인천 지역의 시험 부지들은 11~17 m 두께의 상부 매립층 아래로 시추 종료 깊이인 50 m에 이르기까지 다양한 층서를 갖는 퇴적층이 분포하는 것으로 확인되었다. 전단파 속도는 IC02 부지 외에는 대체적으로 깊이에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 그 값은 부산 지역보다 넓은 범위인 100~300 m/s의 분포를 보였다. 인천 지역의 시험지점 역시 깊이에 따른 전단파 속도 분포의 경향이 q_t 값과 N 값의 깊이 분포와 유사하게 나타났다.

인천 지역에서 병행된 일반적인 하향식 탄성과 시험으로부터 결정된 전단파 속도와 SCPTu의 하향식 탄성과 시험을 통해 산출된 깊이별 전단파 속도 분포를 비교해 볼 때, 전반적으로 유사한 분포 경향을 나타냈다. 다만, 시험 기법 간에 부지 위치의 다소 이격 및 그에 따른 전파 경로의 불일치, 시험 심도의 불일치 등으로 인해 국부적으로 정량적인 전단파 속도의 차이를 보였으며, SCPTu와 하향식 탄성과 시험으로부터 결정된 전단파 속도의 상대적인 크기의 분포 경향에서 특정 기법의 일관되거나 주된 경향은 확인되지 않았다. 즉, SCPTu는 원 지반에 콘을 관입하므로 로드 주변 지반은 대변형을 상태에

놓일 뿐만 아니라 다짐 효과와 유사한 조밀(稠密)화 현상이 발생하게 되며, 조밀하게 변화된 지반을 수진기 주변의 전파 경로로 갖게 된다. 반면, 일반적인 하향식 탄성과 시험은 시추공 내에 시험용 케이싱(casing)을 설치하고 주변을 충전이나 그라우팅(grouting)을 하므로 교란된 지반에 설치된 시험공 내에 수진기를 위치시키게 된다. 따라서 SCPTu와 하향식 탄성과 시험 과정의 이상적인 조건 하에서는 탄성과의 전파 경로 상에 조밀화된 지반이 포함되는 SCPTu의 전단파 속도가 비교적 느슨하게 충전되거나 간극이 분포할 수 있는 전파 경로를 갖는 하향식 탄성과 시험에 비해 더 크게 나타날 수 있을 것이다. 그러나 이러한 영향은 본 연구의 비교 결과에 근거해 볼 때 시험 과정상 전단파 속도에 영향을 주는 여러 인자인 부지 이격에 따른 국부적 지층 특성 변화, 발전자 위치에 따른 전파 경로 차이, 발전 및 수진 시스템의 차이로 인한 신호 특성 차이 등에 비해 상대적으로 영향 정도가 작은 것으로 판단된다. 또한, 본 연구의 인천 지역을 대상으로 수행된 SCPTu 및 하향식 탄성과 시험의 깊이에 따른 전단파 속도 분포에 근거해 볼 때, SCPTu 결과와는 달리 병행된 하향식 탄성과 시험으로부터 결정된 전단파 속도 분포는 하부 심도에서 수진공과 주변 지반의 밀착된 결합(coupling)이 양호하지 못함에 따라 SCPTu의 전단파 속도 분포에 비해 약 10 m 정도씩 얕은 심도까지만 산출할 수 있었다. 그러므로 일반적인 하향식 탄성과 시험의 소요 심도까지의 성공적 결과 획득을 위해서는 시험공 주변 지반에 대한 충전이나 그라우팅의 체계적 수행을 통한 결합(coupling) 성능 확보가 필수적이며, SCPTu를 통해 관입 가능한 지층이 깊게 발달한 퇴적 토사 지반에서는 일반적으로 하향식 탄성과 시험에 비해 SCPTu로부터의 전단파 획득 및 그에 따른 전단파 속도 주상도 도출이 효율적인 것으로 판단된다.

SCPTu를 통한 전단파 속도와 CPTu 자료의 상관관계

본 연구에서는 국내 주요 퇴적 지반에 해당되는 연구 대상 6 곳의 시험 부지에서 얻은 SCPTu 결과를 바탕으로 CPTu 결과의 활용성을 극대화하기 위하여 전단파 속도와 콘관입 특성 값들의 복합적인 통계 분석을 통한 상호간의 관계를 도출하고자 하였다. 이러한 상관관계는 지반의 동역학적 특성으로서의 전단파 속도 뿐만 아니라 전단 변형률에 따른 비선형 거동을 보이는 대표적 변형 특성인 전단 계수의 종합적 활용에도 매우 유용한 관계로 제시될 수 있다.

전단파 속도 및 전단 계수

지반의 대표적 동적 특성인 전단파 속도(V_s)는 이미 지시한 바와 같이 지반의 지진시 거동뿐만 아니라 공용 하중 상태의 지반 거동의 평가에도 매우 중요한 변수로서, 동적 재하나 초

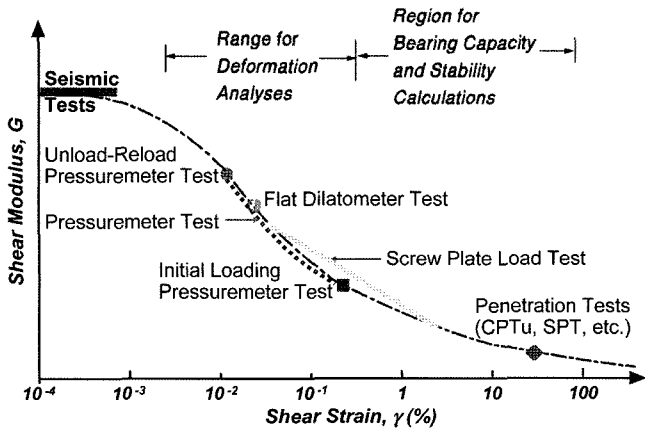


Fig. 8. Variation of shear modulus with strain level and relevance to in-situ tests (after Mayne and Schneider, 2001).

기 정적 재하 상태인 미소 전단 변형률($< 10^{-3}$ %)에서 지반의 변형 특성을 나타낸다. 즉, 전단파 속도를 통해 변형률에 따라 비선형적으로 변화하는 지반의 전단 계수(shear modulus, G) 중에서도 미소 변형률 (최대)전단계수((maximum) shear modulus at small strain, $G_0 (=G_{max})$)를 결정할 수 있다. 지반의 밀도(density, ρ)와 전단파 속도를 이용하여 식 (1)에서 제시한 바와 같이 미소 변형률 전단 계수, G_0 를 산정할 수 있다.

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (1)$$

지반의 변형계수들은 변형률 증가에 따라 점진적으로 감소하는 비선형 거동을 보이며, 이러한 경향은 흙의 전단 계수에서도 확인할 수 있다. 현재까지는 한 가지의 현장시험 기법을 통해 지반의 정량적인 변형계수를 초기의 미소 변형률 상태에서 항복이나 파괴시까지 연속적으로 명확하게 평가하는 것이 어려우나, 여러 시험 기법을 접목한 복합 기능의 시험 장비의 개발로 그 한계를 극복하려는 노력이 계속되고 있다(Mayne, 2000). Mayne and Schneider (2001)는 지반 조사에서 빈번히 이용되는 현장 시험 기법들로부터 결정된 전단계수들의 전단 변형률 수준을 제시한 바 있으며, Fig. 8은 기존의 제시된 변형률 수준별 시험 기법들을 재정리하여 도시한 것이다.

앞서 언급한 바와 같이 탄성과 시험은 미소 변형률 수준의 전단계수를 결정할 수 있는 반면, 중·대변형률 수준에서는 주로 현장 재하시험 기법들의 적용 경향이 뚜렷하다. 재하시험을 이용하면 시험시 재하 및 분석 방법에 따라 Fig. 8에 나타난 나사식 평판재하시험(screw plate load test)이나 프레스미터 시험처럼 일정 범위의 전단계수를 연속적으로 측정할 수도 있다(Kay and Avalue, 1982; 선창국, 1998). 항복 수준의 전단 계수는 CPTu나 SPT와 같은 사운딩을 통해 구할 수 있다. Fig. 8에서 제시한 단일 시험 기법들은 비교적 좁은 범위 내에서 특정 수준의 전단 계수만을 얻을 수 있는 제한성을 보이지만, 본 연구에서 수행한 탄성과 SCPTu는 미소 변형률 및 대변형률의 이원적 변형률 수준의 전단계수를 측정할 수 있는 진일보된

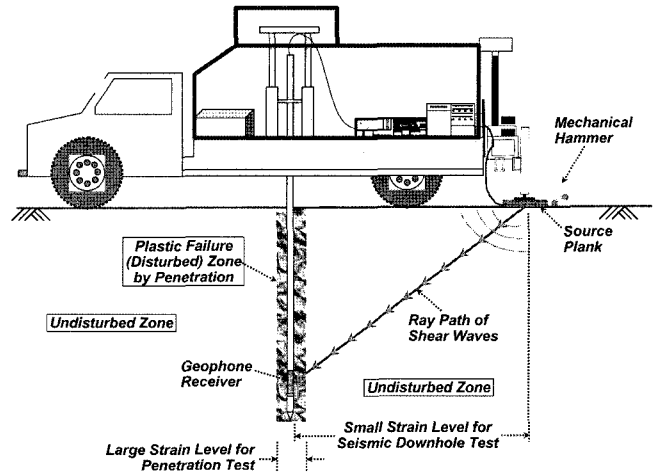


Fig. 9. Schematic diagram of SCPTu for both small and large strain levels.

시험 기법이라 할 수 있다. Fig. 9는 SCPTu의 이원적 변형률 수준을 기하학적으로 이상화한 개요도로서, SCPTu에서는 대 변형률 조건에서 큰 관입 저항력을 구할 수 있고, 하향식 탄성과 시험을 통하여 미소 변형률 조건에서 전단 속도를 구할 수 있다. 이처럼 SCPTu는 동일 부지에서 동시에 극단적인 두 수준의 변형 특성을 평가할 수 있으므로, 수행 시험으로부터 동시에 획득된 결과의 직접적인 통계 분석을 통한 상호 간의 상관성 파악을 토대로 기존 CPTu의 지반공학적 활용성을 극대화시킬 수 있는 매우 유용한 원위치 시험 기법이다.

SCPTu의 결과 분류 및 정리

연구 대상 지역에서 수행한 SCPTu로부터 일반적인 CPTu 측정값인 q_c , f_s 와 u 를 얻고, 일정 깊이별로 탄성과 시험을 통해 깊이별 전단파 속도를 구하였다. 2~10 cm 깊이 간격으로 측정된 CPTu 데이터와 1~4 m 깊이 간격으로 구한 전단파 속도를 일정 영역별로 비교하기 위하여 탄성과 시험 심도와 깊이 간격을 기준으로 CPTu 데이터를 평균하여 분석하였다. 따라서 전단파 속도와 CPTu 측정값 간의 상관관계 분석에 활용한 전체 자료의 수는 전단파 속도 측정 횟수에 의해 좌우된다. 종합적 지반 특성 평가 목적으로 수행되는 지반 조사와는 달리 최근에는 단순히 CPTu만을 실시하여 지반 특성을 신속하게 파악하기 위한 조사가 빈번해 지고 있음에 따라, 이 연구에서는 시추 조사의 지층 구분 대신 제한적인 CPTu 자료만으로도 지반을 체계적으로 분류함으로써 흙의 종류별 전단파 속도의 경험적 산정에 대한 효율성을 향상시키고자 하였다. 이를 위하여 지층은 Jefferies and Davies (1993)가 제안한 흙 거동에 따른 분류지수(soil behavior type classification index, I_c)에 따라 구분하였으며, 최종적으로 점토와 사질토 지반으로 이원화하였다. I_c 는 식 (2)와 같이 CPTu 측정값의 함수로 정의된다.

$$I_c = \sqrt{[3 - \log\{Q_c(1 - B_q)\}]^2 + [1.5 + 1.3\{\log F_s\}]^2} \quad (2)$$

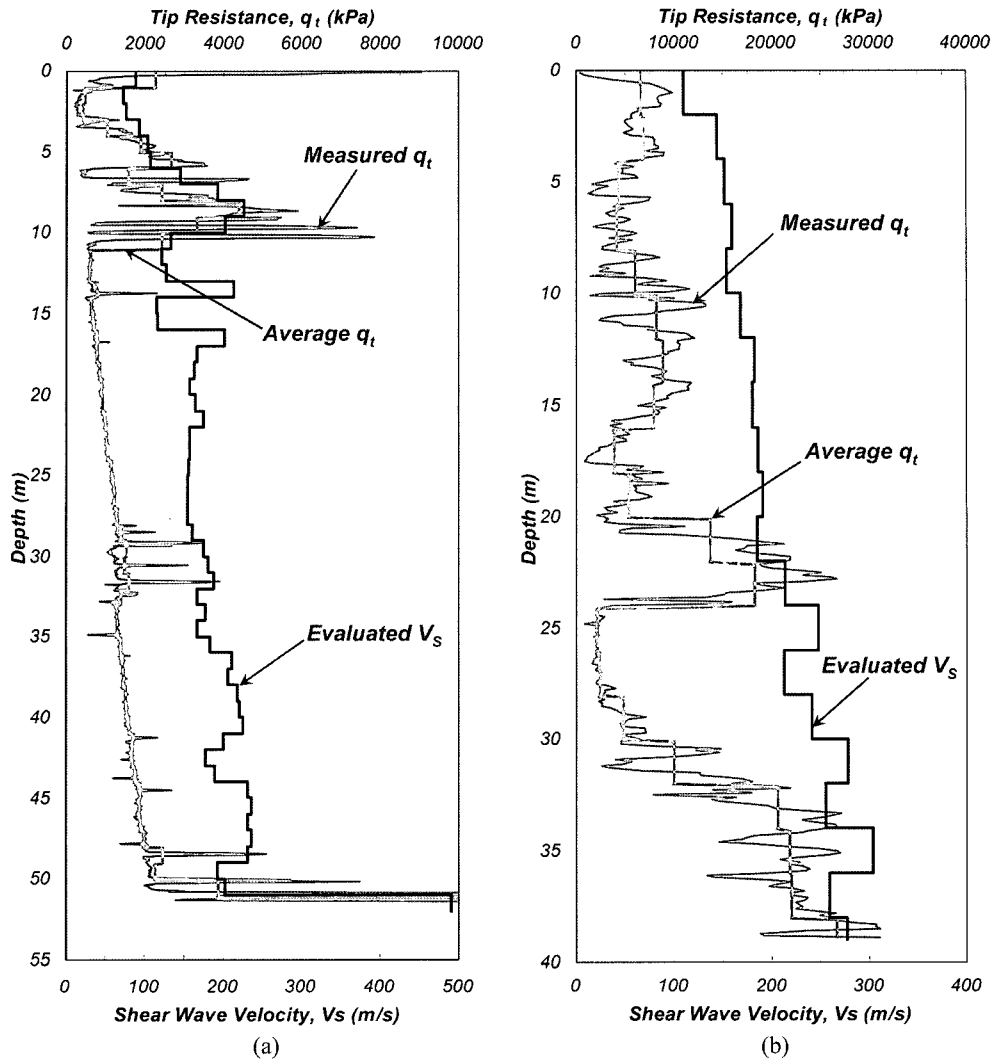


Fig. 10. Averaging scheme of CPTu data with respect to the depth intervals for downhole test from SCPTu: (a) at BS02 site in Busan area and (b) at IC01 site in Incheon area.

Table 1. Soil behavior type classification index, I_C (after Jefferis and Davies, 1993).

Classification index, I_C	Soil behavior type
< 1.25	Gravelly Sands
1.25 ~ 1.90	Sands - Clean Sand to Silty Sand
1.90 ~ 2.54	Sand Mixtures - Silty Sand to Sandy Silt
2.54 ~ 2.82	Silt Mixtures - Clayey Silt to Silty Clay
2.82 ~ 3.22	Clays

여기서, $Q_t = \frac{q_t - \sigma_w}{\sigma_w'}$ 이고, $F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_w} \times 100$,

σ_w 는 현장 상재 전 응력,

σ_w' 는 현장 상재 유효 응력

Table 1은 Jefferies and Davies (1993)가 제안한 I_C 범위별 흙 분류 도표이다. 이 연구에서는 Table 1에서 제시된 모래질 실트(sandy silt)와 실트 혼합물(silt mixtures)의 경계 값인 2.54

를 기준으로 사질토와 점토를 구분하였다. Fig. 10은 시험 부지들의 결과 중, q_t 값을 SCPTu의 하향식 탄성과 시험 심도 간격에 따라 깊이 영역별로 평균하는 과정을 개요적으로 제시한 그래프이며, 대표적으로 BS02 부지(Fig. 10(a))와 IC01 부지(Fig. 10(b))의 과정 결과를 나타냈다. 더불어 전단파 측정 심도 및 깊이별 분포 경향 비교를 위하여 SCPTu로부터 산정된 전단파 속도 분포도 함께 나타내었다. SCPTu의 탄성과 시험 결과와 대응시키기 위한 CPTu 결과의 영역별 평균화 과정은 이번 연구에서 변수로 활용할 특성 값들, 즉 q_t , f_s 와 u 외에도 간극수압계수인 B_q 와 해당 깊이의 유효상재응력인 σ'_{w0} 에 대해서 적용하였다. 또한, 시험지점별 분석 자료의 수와 I_C 값에 따라 분류된 흙 종류별 자료의 수를 Table 2에 정리하여 제시하였다.

전단파 속도와 CPTu 자료의 상관관계 도출

해상 퇴적으로 구성된 시험지점들의 SCPTu 결과를 이용하

Table 2. Number (*n*) of utilized data at each site and with soil classification.

Soils	Area or site								Total
	Busan			Incheon					
	BS01	BS02	Subtotal	IC01	IC02	IC03	IC04	Subtotal	
Clay	11	46	57	5	7	4	1	17	74
Sand	3	6	9	15	6	10	8	39	48
Subtotal	14	52	66	20	13	14	9	56	122

Table 3. Correlations between shear wave velocity (V_s) and CPTu data based on the results from SCPTu data. The units are m/s for V_s and kPa for q_t , f_s and σ'_{v0} .

Number of independent variable	Correlations between V_s and CPTu data	Symbol assigned to correlations
1	$V_s = \alpha (q_t)^{k1}$	Cor01
2	$V_s = \alpha (q_t)^{k1} (f_s)^{k2}$	Cor02
2	$V_s = \alpha (q_t)^{k1} (\sigma'_{v0})^{k2}$	Cor03
2	$V_s = \alpha (q_t)^{k1} (1+B_q)^{k2}$	Cor04
3	$V_s = \alpha (q_t)^{k1} (f_s)^{k2} (\sigma'_{v0})^{k3}$	Cor05
3	$V_s = \alpha (q_t)^{k1} (f_s)^{k2} (1+B_q)^{k3}$	Cor06
3	$V_s = \alpha (q_t)^{k1} (\sigma'_{v0})^{k2} (1+B_q)^{k3}$	Cor07
4	$V_s = \alpha (q_t)^{k1} (f_s)^{k2} (\sigma'_{v0})^{k3} (1+B_q)^{k4}$	Cor08

Table 4. Coefficient and exponent for correlation with an independent variable. Cor., coeff., and expon. represent correlation, coefficients, and exponents, respectively, continued through Table 7.

Cor.	Coeff. and expon.	Both areas			Busan			Incheon		
		All soils	Clay	Sand	All soils	Clay	Sand	All soils	Clay	Sand
Cor01	α	46.724	24.289	6.046	12.839	16.933	0.302	45.050	44.469	5.695
	$k1$	0.173	0.273	0.387	0.354	0.323	0.771	0.173	0.198	0.389
	r^2	0.314	0.511	0.478	0.435	0.409	0.918	0.209	0.454	0.517

여 전단파 속도와 CPTu 측정값 간의 상관관계를 평가하기 위하여 다중 통계 회귀분석(multiple statistical regression)을 실시하였다. 회귀분석의 종속변수는 전단파 속도(V_s)가 된다. 지반의 전단파 속도는 흙의 다양한 공학적 특성에 의해 영향을 받으나, Hegazy and Mayne (1995)은 주된 영향 인자로 초기 간극비 e_0 , 유효상재응력 σ'_{v0} , 과압밀비 OCR, 그리고 소성지수 PI를 제시한 바 있다. 이에 따라 이 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 비교적 간편하게 그 값을 구할 수 있으며, 측정 편차도 상대적으로 작은 유효상재응력 σ'_{v0} , CPTu 측정값 중 q_t 와 f_s , 그리고 간극 수압 계수 B_q 의 4개 값을 통계분석의 독립변수로 정하였다. 이 중에서 CPTu 데이터를 대표한다고 볼 수 있는 q_t 를 주요 독립변수로 하여 변수 상호간에 여러 형태의 조합을 만들어 회귀분석에 이용하였다.

이를 위하여 각 부지의 CPTu 결과를 토대로 계산한 I_c 를 기준으로 지층 영역을 점토와 사질토로 구분하였으며, 먼저 부산 및 인천의 지역 단위로 분석한 후, 지역을 통합하여 전체적으로 재분석하였다. 다양한 조건의 다중회귀분석을 통해 도출한 전단파 속도와 CPTu 자료간의 상관관계 중 대표적인 형태의 관계식을 Table 3에 제시하였다. 이 관계식들은 각 독립변수의 지수함수간 곱의 조합으로 구성하였으며, 이 논문에서 제시하

지 않은 변수간 합 및 차의 조합, 로그(log)함수, 곱의 조합 등은 상관성이 현저히 낮은 것으로 나타났다. Table 3에서 α 는 상관관계식의 계수이고 $k1$, $k2$, $k3$ 및 $k4$ 는 관계식의 지수로서, 흙의 종류와 지층 조건을 반영한다. 각 조건별 통계 분석으로부터 결정된 Table 3의 상관관계식의 계수 및 지수는 독립변수의 개수(1~4)에 따라 Table 4~Table 7에 제시하였으며, 각 관계식별 상관성의 정량적 비교를 위해 결정계수(coefficient of determination, r^2)도 함께 나타내었다.

이미 알려진 바와 같이 전단파 속도와 CPTu 측정값의 관계 중 가장 중요한 변수는 q_t 이지만, 'Cor01'과 같이 독립변수를 단지 한가지만으로 제한하여 불확실한 자료의 수가 많아지면 다중의 복합독립변수를 적용한 경우에 비하여 상관성의 척도인 r^2 가 작아지게 된다. Table 5 및 Table 6과 비교할 때 Table 4에서 r^2 가 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 q_t 외의 주요 측정값들도 함께 독립변수로 정하고 복합적인 회귀분석을 통해 변수 상호간의 관계를 정량적으로 비교하여 보다 합리적인 관계식을 제시하고자 하였다. 전체적으로는 독립변수의 개수가 증가할수록 r^2 가 증가하는 경향을 보였으며, 분석 대상 자료인 CPTu 측정값 및 σ'_{v0} 의 역학적 특성이 유사하여 자료의 수가 늘어남에도 r^2 가 증가하는 경우

Table 5. Coefficients and exponents for correlations with two independent variables.

Cor.	Coeff. and expon.	Both areas			Busan			Incheon		
		All soils	Clay	Sand	All soils	Clay	Sand	All soils	Clay	Sand
Cor02	α	71.775	28.332	7.860	10.801	47.439	0.441	214.01	65.843	24.746
	k_1	0.067	0.230	0.348	0.249	0.0016	0.639	-0.091	0.135	0.161
	k_2	0.123	0.0519	0.0223	0.310	0.413	0.237	0.195	0.0356	0.145
	r^2	0.379	0.522	0.456	0.596	0.583	0.919	0.380	0.463	0.580
Cor03	α	15.140	14.447	14.424	5.117	16.909	1.150	16.308	23.655	11.721
	k_1	0.131	0.161	0.135	0.310	0.124	0.519	0.114	0.184	0.178
	k_2	0.280	0.248	0.281	0.241	0.268	0.178	0.288	0.130	0.237
	r^2	0.660	0.706	0.626	0.761	0.678	0.935	0.639	0.467	0.680
Cor04	α	13.973	9.417	5.601	1.914	7.359	0.318	14.976	38.828	4.058
	k_1	0.302	0.376	0.395	0.565	0.396	0.763	0.289	0.213	0.424
	k_2	0.769	0.496	1.571	0.912	0.679	-1.732	1.607	0.120	3.582
	r^2	0.462	0.653	0.482	0.728	0.677	0.918	0.349	0.458	0.565

Table 6. Coefficients and exponents for correlations with three independent variables.

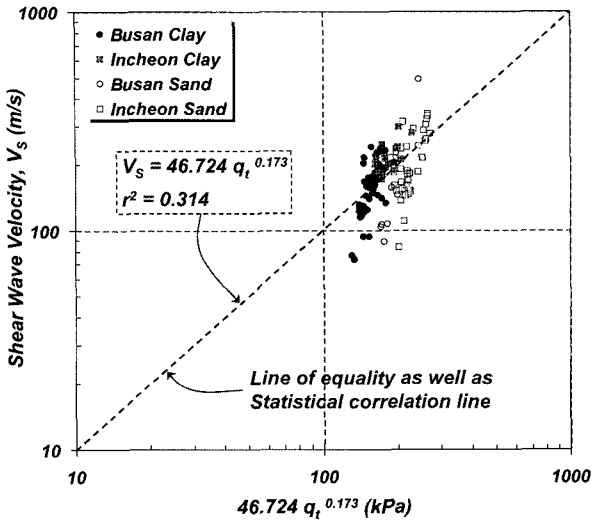
Cor.	Coeff. and expon.	Both areas			Busan			Incheon		
		All soils	Clay	Sand	All soils	Clay	Sand	All soils	Clay	Sand
Cor05	α	10.383	14.385	4.200	3.872	15.557	12.917	23.474	31.734	17.151
	k_1	0.174	0.162	0.275	0.374	0.139	-0.223	0.0668	0.159	0.128
	k_2	-0.055	-0.001	-0.141	-0.293	-0.031	0.591	0.0382	0.0155	0.0442
	k_3	0.321	0.249	0.384	0.377	0.281	0.588	0.270	0.105	0.216
	r^2	0.670	0.706	0.660	0.790	0.678	0.964	0.643	0.468	0.683
Cor06	α	18.670	6.327	6.798	1.761	9.841	1.624	75.034	57.624	15.238
	k_1	0.254	0.454	0.366	0.625	0.326	0.384	0.029	0.149	0.222
	k_2	0.0339	-0.070	0.0174	-0.122	0.0775	0.438	0.177	0.036	0.124
	k_3	0.666	0.598	1.550	0.987	0.607	-27.98	1.317	0.121	2.889
	r^2	0.460	0.666	0.461	0.747	0.680	0.923	0.470	0.467	0.610
Cor07	α	15.029	12.331	15.724	3.475	10.979	2.771	14.736	23.058	9.523
	k_1	0.132	0.204	0.120	0.395	0.254	0.369	0.133	0.194	0.210
	k_2	0.279	0.210	0.291	0.171	0.144	0.232	0.275	0.119	0.219
	k_3	0.0082	0.119	-1.032	0.311	0.349	-16.36	0.227	0.0705	1.716
	r^2	0.661	0.710	0.628	0.770	0.691	0.942	0.642	0.469	0.690

Table 7. Coefficients and exponents for correlations with four independent variables.

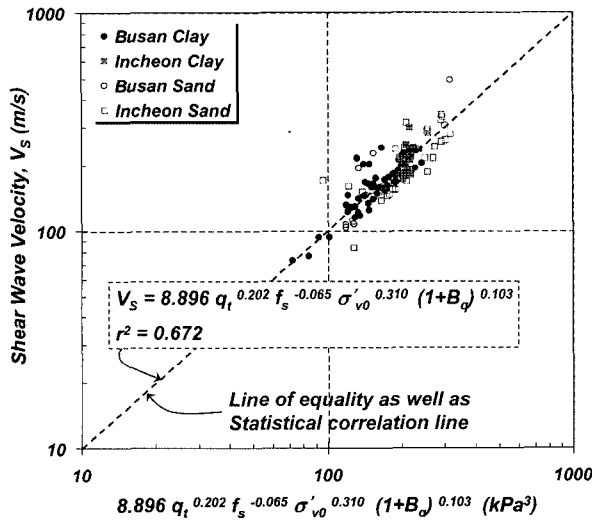
Cor.	Coeff. and expon.	Both areas			Busan			Incheon		
		All soils	Clay	Sand	All soils	Clay	Sand	All soils	Clay	Sand
Cor08	α	8.896	10.316	4.436	2.797	10.182	8.637	21.939	33.226	13.324
	k_1	0.202	0.246	0.268	0.461	0.268	-0.190	0.0814	0.165	0.166
	k_2	-0.065	-0.028	-0.140	-0.296	-0.028	0.513	0.0443	0.0196	0.0385
	k_3	0.310	0.197	0.386	0.297	0.156	0.706	0.252	0.0845	0.200
	k_4	0.103	0.184	-0.437	0.302	0.348	23.816	0.278	0.0856	1.654
	r^2	0.672	0.712	0.661	0.797	0.692	0.966	0.646	0.470	0.693

도 나타났다. 한편으로는 변수들이 유사한 역학적 특성을 보이면서 그 수가 상대적으로 적을 경우에는 부산 지역의 사질토 ($n=9$)에서와 같이 상관도의 r^2 가 0.9 이상으로 매우 높아지기도 하였다. 지역별로 볼 때, 부산 지역의 자료 수가 많음에도 불구하고 인천 지역에 비해 더 양호한 상관성을 보였는데, 이는 인천 지역의 시험공 수(4 공)가 부산 지역의 공 수(2 공)에

비해 많아 인천 지역의 자료에는 보다 많은 공간적 불확실성이 포함되어 있기 때문이다(Chilès and Delfiner, 1999). 흙의 종류를 기준으로 보면, 지역별로는 부산과 인천 모두에서 사질토의 r^2 가 크게 나타났으나, 이들을 통합하여 전체 지역에 대해 분석하면 점토층의 상관도가 사질토에 비해 상대적으로 높게 평가되었다. 즉, 다중통계회귀분석을 통해 도출된 각 상관



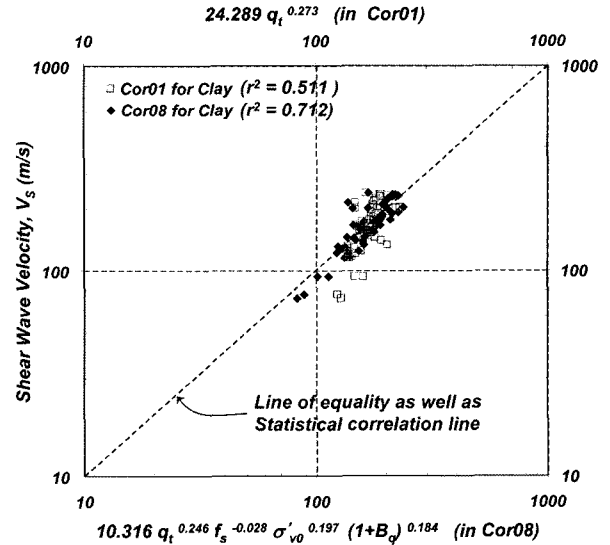
(a)



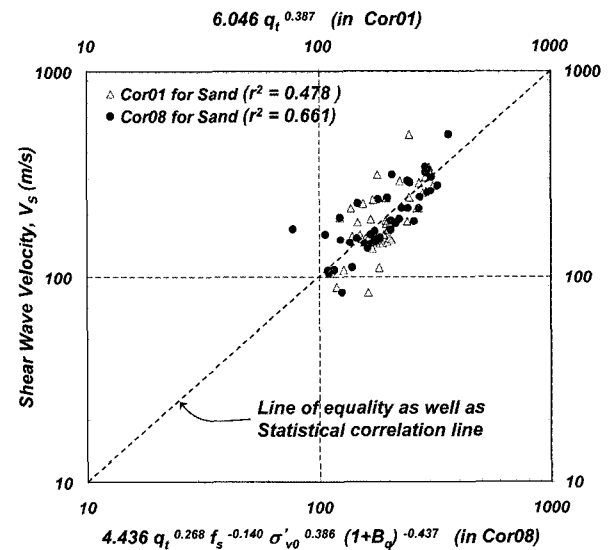
(b)

Fig. 11. Correlations with an variable of q_t (Cor01) and four variables (Cor08) using all soils: (a) Cor01 with an variable of q_t showing low coherence and (b) Cor08 with four variables showing high coherence.

관계식의 계수 및 지수를 비교하면, 사질토의 변수간 상관도는 두 지역 모두에서 점토에 비해 높게 나타나지만, 계수와 지수의 경향이 지역별로 크게 달랐으며, 점토의 경우는 r^2 값이 다소 작지만 계수와 지수 값의 경향이 사질토에 비해 상대적으로 유사한 범위 내에 있다. 이에 따라서 두 지역을 통합하여 지층별로 분석한 결과에서는 사질토층에 비하여 점토층의 변수간 상관도가 더 높게 나타났다. 지층 구분 없이 전체 자료를 대상으로 살펴보면, 모든 데이터간의 r^2 의 값은 독립변수의 개수가 작은 경우에는 상관도가 낮은 사질토보다도 작게 평가되었으나, 독립변수의 개수가 증가 할수록 그 값이 증가하여 세 개, 또는 네 개의 독립변수 조건의 사질토층에 대한 값보다는 다소 크고, 점토층 보다는 작게 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 12. Comparisons between correlations with an variable of q_t (Cor01) and four variables (Cor08) according to soil types: (a) for clay and (b) for sand.

전단파 속도의 경험적 결정을 위한 이번 연구에서 선정한 독립변수들의 영향 정도를 Table 3, 그리고 Table 5 및 Table 6을 토대로 확인한 결과, 동일 개수(2개 및 3개)의 독립변수 조건에서 상관도를 높이는 긍정적인 영향의 정도는 σ'_{v0} 변수가 가장 크고, B_q 변수가 가장 작다는 것을 상관도의 정량적 지표인 r^2 를 통해서 알 수 있었다. 즉, σ'_{v0} 가 변수인 상관관계식의 r^2 가 다른 관계식에 비해 크게 나타난다. 변수간 영향 정도에 근거해 볼 때, 'Cor03', 'Cor05', 'Cor07', 그리고 'Cor08'은 전단파 속도의 경험적 산정에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 보이며, 실용적 측면에서는 독립 변수의 개수가 적은 'Cor03'이 그리고 실용성과 신뢰성의 두 측면 모두에서는 B_q

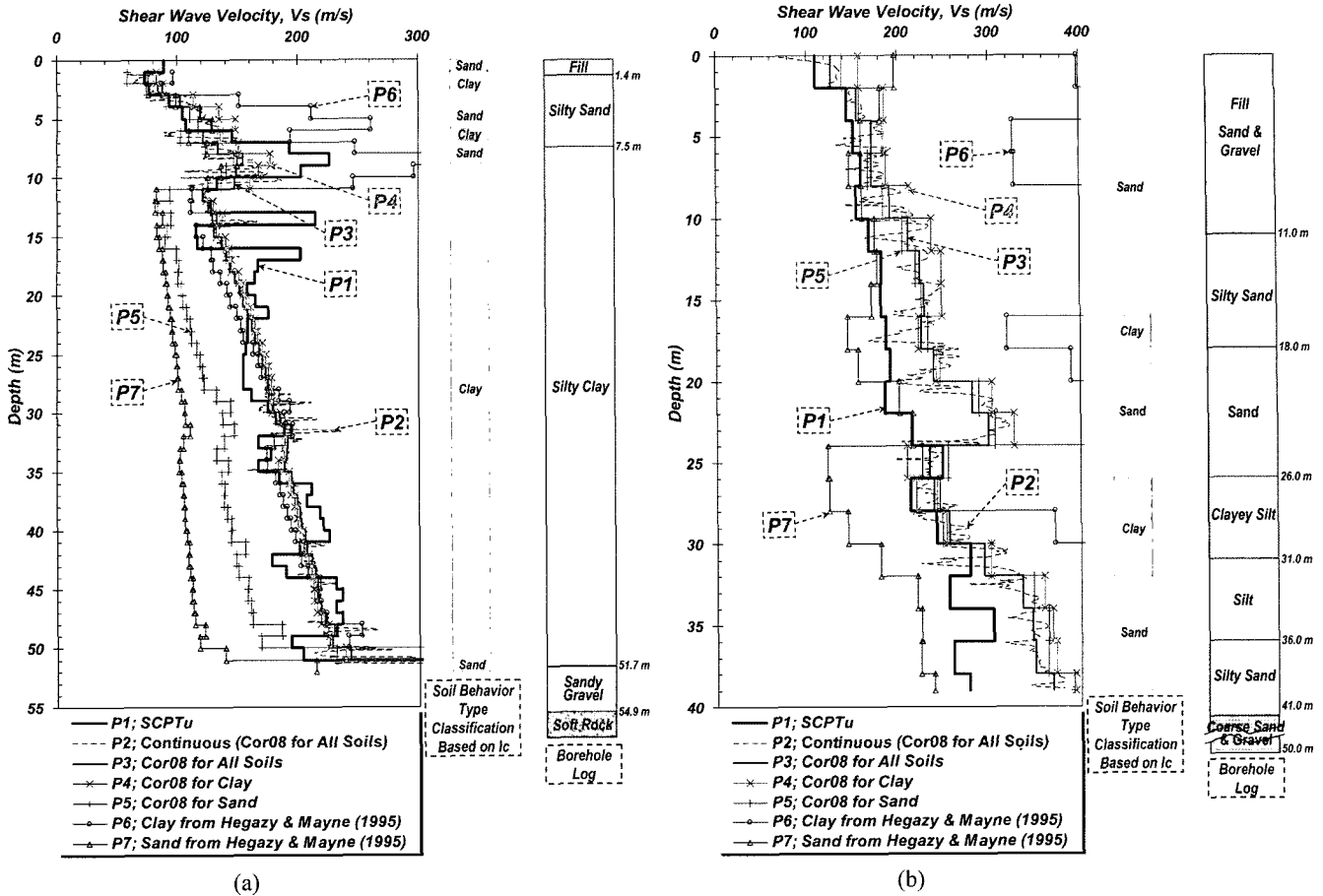


Fig. 13. Comparisons of shear wave velocity (V_s) profiles determined from SCPTu and empirical correlations: (a) at BS02 site in Busan and (b) at IC01 site in Incheon.

변수가 배제된 ‘Cor05’가 보다 유용할 것으로 판단된다. 변수의 종류에 따라 전단파 속도에 대한 영향의 정도는 다소 차이가 있으나 독립변수의 개수가 늘어나면 대체로 상관도 역시 높아지는 추세를 보였으며, 이에 따라 최고차 다중 통계 회귀 분석의 결과인 Table 3 및 Table 7의 네 가지 변수 조건의 상관관계식, ‘Cor08’이 CPTu 결과로부터 경험적인 전단파 속도를 가장 합리적으로 예측할 수 있는 방법으로 판단된다. 특히, Fig. 11에서 전체 자료를 종합하여 회귀분석한 결과 중 q_t 만을 이용하는 가장 간단한 형식인 동시에 최저의 상관도($r^2=0.314$)를 보이는 ‘Cor01’과 변수의 수가 4개로 가장 많으며 최고의 상관도($r^2=0.672$)를 보이는 ‘Cor08’ 간의 자료 집중도 차이가 매우 크다는 것을 r^2 값 뿐만 아니라 등가선(line of equality)과의 비교를 통해서도 알 수 있다. 또한, I_c 를 기준으로 흙을 점토와 사질토로 분류하여 분석한 지층별 상관관계 결과에서도 ‘Cor08’이 ‘Cor01’에 비해 상관도가 높음을 Fig. 12에서 확인할 수 있다. 이와 같은 분석 결과를 통하여 일반적인 CPTu가 대변형을 조건에서 진행됨에도 불구하고, 측정값 등의 조합을 통해 전단파 속도와 같은 미소변형을 조건의 동적 특성도 경험적으로 추정할 수 있다고 판단된다.

Fig. 13은 시험 부지중 두 지역을 대표할 수 있는 BS02와 IC01에 대하여 본 연구에서 제안된 흙 종류별 상관관계식으로

예측한 전단파 속도와 SCPTu를 통해 직접 구한 전단파 속도의 깊이에 대한 분포를 비교한 것이다. 또한, Hegazy and Mayne (1995)가 점토 및 사질토에 대해 각각 아래의 식 (3) 및 식 (4)와 같이 제안한 기존 상관관계식을 토대로 경험적으로 산정한 전단파 속도 분포도 비교 도시하였다.

$$V_s = 3.18 q_t^{0.549} f_s^{0.025} \quad ; \text{ for clay} \quad (3)$$

$$V_s = 12.02 q_t^{0.319} f_s^{-0.0466} \quad ; \text{ for sand} \quad (4)$$

여기서, V_s 의 단위는 m/s이고, q_t 와 f_s 의 단위는 kPa

Fig. 13에서 파선은 탄성파 시험 깊이 간격을 기준으로 영역별로 구한 값이 아니고, CPTu 측정값을 기준으로 연속적으로 계산한 전단파 속도 분포이다. 전단파 속도 분포 그래프의 우측에는 분류지수 I_c 에 따른 흙 분류 주상도와 시추조사를 통해 확인한 지층 주상도를 함께 나타내었다.

Fig. 13에서 Hegazy and Mayne (1995)가 제안한 기존 경험식의 적용 결과 중 점토에 대한 전단파 속도의 경험적 예측 결과(Fig. 13의 P6)는 두 부지 모두에서 이 연구의 점토에 대한 예측 결과(Fig. 13의 P4) 뿐만 아니라 전체 토사에 대한 예측 결과(Fig. 13의 P3) 보다도 SCPTu로부터 결정된 전단파 속도(Fig. 13의 P1)와 차이를 크게 보이고 있다. 반면, Hegazy and

Mayne (1995)의 사질토에 대한 예측 결과(Fig. 13의 P7)는 사질토가 상부 심도에 다소 분포하는 BS02 부지(Fig. 13(a))와는 달리 사질토가 지배적인 IC01 부지(Fig. 13(b))에서는 심도 4 ~ 24 m에서 오히려 이 연구의 사질토에 대한 예측 결과(Fig. 13의 P5) 보다 SCPTu의 결과(Fig. 13의 P1)와 유사하게 나타났으며, IC01 부지의 지표면 부근을 제외하고는 전체적으로 Hegazy and Mayne (1995)의 경험적 방법에 의한 전단파 속도가 작게 결정되었다. 앞서 기술한 바와 같이 국내 SCPTu로부터 도출된 사질토에 대한 경험적 관계식의 상관도가 점토에 비해 상대적으로 작음을 감안할 때, 사질토에 대한 자료 축적을 통해 상관관계식의 보완이 요구되며, 더불어 국내 지반에 대한 자료 축적의 병행을 지속적으로 실시하여 종합적인 상관관계식의 개선이 필요할 것으로 판단된다. 두 부지의 전반적인 전단파 속도 분포에서는 그렇다 할지라도 극히 일부 구간에서만 SCPTu의 결과와 유사한 Hegazy and Mayne (1995)의 경험적 예측 결과에 비해 이 연구의 경험적 예측 결과가 보다 합리적인 전단파 속도 분포를 보였다. 이 외에도 앞서 제시된 기존 경험적 상관관계들 역시 일부 심도 구간을 제외하고는 제안된 경험적 관계식과는 달리 전체적으로 SCPTu의 전단파 속도 분포와 큰 차이를 보였다.

현재까지의 자료를 토대로 제안된 경험적 관계식을 이용하여 산정한 전단파 속도는 Fig. 13과 상관성 분석에서 확인된 바와 같이 사질토에 비해 점토 조건에서 보다 유용하였다. 따라서 CPTu 결과를 이용하여 경험적으로 전단파 속도를 예측할 경우에는 해당 지층에 대하여 흙 분류를 선행하고, 그에 따라 구분 적용하는 것이 바람직할 것이다. 결과적으로, 본 연구에서 제안한 전단파 속도와 CPTu 자료 간의 상관관계식들은 기존의 경험적 관계식들이 일부 깊이에서만 유용하고 대체로 큰 오차를 나타내는 것에 비하여 전체 깊이별로 지층 조건에 따라 측정값과 예측값의 차이가 적으므로, 연구 대상인 부산 및 인천과 유사한 지반 구성 특성을 나타내는 국내의 일부 퇴적층에 대해 실무적으로 유용하게 활용 가능할 것으로 판단된다.

결론 및 제언

국내 도입 중에 있는 탄성과 피에조콘 관입 시험(SCPTu)의 체계화 및 활성화의 일환으로 본 연구에서는 국내의 대표적인 퇴적 부지 6 개소를 대상으로 시험을 수행하였다. 전단파의 방향 극성을 이용할 수 있는 교차법을 토대로 국내 주요 퇴적 지반의 SCPTu 시험 자료로부터 시험 깊이별 전단파 도달 시간과 도달 시차를 효율적으로 결정하고, 실제 지반의 전파 경로를 비교적 잘 모사할 수 있는 Snell의 법칙 기반의 굴절 전파 경로법을 적용하여 깊이별 전단파 속도 분포를 산출하였다. 특히, 국내의 대표적 퇴적 지반인 낙동강 하구의 충적 평야지에서는 매우 깊은 심도인 52 m까지 SCPTu를 수행하여 전단파

속도 주상도를 도출하였다.

대상 부지들에서 전단파 속도를 산정한 깊이별 구간을 기준으로 CPTu 측정값들의 영역별 평균을 구하고 흙의 거동에 따른 분류지수인 I_C 에 따라 각 영역을 점토와 사질토로 구분하여 전단파 속도와 각 독립변수들($q_t, f_s, \sigma'_{v0}, B_q$) 간의 다중통계회귀분석을 수행하였다. 대표적인 상관관계식은 각 독립변수의 지수함수간 곱의 조합으로 결정되었으며, 주요 독립변수인 q_t 만 이용되는 경우부터 q_t, f_s, σ'_{v0} 및 B_q 의 네 가지 변수를 모두 이용하는 경우를 대상으로 점토, 사질토, 그리고 전체 지층 조건에 대하여 상관관계를 평가하였다. 전단파 속도에 대한 상관성은 독립변수의 개수가 늘어날수록 증가하였으며, 변수의 개수가 동일할 경우에는 σ'_{v0} 이 변수로 설정된 관계식의 상관도가 가장 높으므로 σ'_{v0} 관련 경험적 관계식들은 실용적 측면에서 유용할 것으로 판단된다. 제시된 경험적 관계식들의 상관도가 높다는 점에서 일반적인 CPTu의 자료들이 대변형률 수준에서 측정되었음에도 불구하고 미소 변형률 수준인 전단파 속도의 예측에 매우 효과적으로 활용될 수 있음을 알 수 있다.

더불어 본 연구에서는 변수별 상관 분석을 통해 q_t, f_s, σ'_{v0} 및 B_q 의 네 가지 다중 독립변수를 사용하여 전단파 속도(V_s)를 결정할 수 있는 경험적 관계식을 의 일반적인 형태로 제안하였다. 이 식은 본 연구에서 제안한 지수와 계수 값을 토대로 본 연구 대상인 인천 및 부산과 유사한 지반 특성을 보이는 국내 일부 퇴적 부지들에서 사질토와 점토층, 또는 전체 흙에 대하여 모두 적용 가능할 것으로 판단된다. 그렇다 할지라도 국내 지반에 대한 경험적 상관관계의 신뢰성 및 실제 활용성 측면을 고려해 볼 때, 본 연구에서 제안된 상관 관계식은 활용 자료의 제한성으로 인해 예비적인 경험식이라고 할 수 있으며, 국내 다양한 퇴적 지반에 대한 SCPTu와 같은 현장 탄성과 시험의 전단파 속도와 CPTu의 결과 자료의 축적을 통해 보다 합리적인 전단파 속도의 경험적 산정식 도출이 가능할 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 산업자원부 출연사업인 '가스 시설물 지진 대응 시스템 기반 구축' 과제의 지원과 한국도로공사 도로교통기술원의 연구 과제인 '콘관입 시험을 이용한 지반공학설계 및 품질관리 기법 연구'의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

선창국, 1998, 자가굴착식 프레스미터 시험을 이용한 점성토 지반의 변형 특성 연구, 공학석사학위논문, 서울대학교.
 선창국, 정경자, 정중홍, 김홍중, 조성민, 2005, 탄성과 피에조콘 관입 시험을 통한 국내 퇴적 지반의 전단파 속도 결정, 제7회

- 특별심포지엄 논문집, 한국물리탐사학회, 전남대학교, 125-153.
- 장인성, 이선재, 정충기, 김명모, 2002, CPTu를 이용한 국내 점성토 지반의 압밀계수 산, 대한토목학회 논문집, **22**, 67-79.
- 조성민, 정경자, 김홍중, 정중홍, 선창국, 2004, 탄성파콘관입시험을 활용한 지반의 전단파 전달속도 산정, 대한토목학회 정기학술대회 논문집 CD-ROM, 1428-1433.
- Areias, L., and Impe, W. V., 2004, Interpretation of SCPT data using cross-over and cross-correlation methods, Lecture Notes in Earth Sciences, **104**, 110-116.
- ASTM, 2000, Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils (D 5778-95), *2000 Annual Book of ASTM Standards*, Sect. 4, Vol. 04.09, American Society of Testing and Materials, Philadelphia.
- Baziw, E. J., 2002, Derivation of seismic cone interval velocities utilizing forward modeling and the downhill simplex method, *Canadian Geotechnical Journal*, **39**, 1181-1192.
- Campanella, R. G., Robertson, P. K., and Gillespie, D. G. 1986, Seismic cone penetration test, *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, 116-130.
- Chilès, J. P. and Delfiner, P., 1999, *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*, John Wiley & Sons, New York, 201-210.
- GeoDelft, 2002, *Lubricating Cone*, http://www.geodelft.com/files/spoelsoonderen_eng.pdf.
- Hegazy, Y. A., and Mayne, P. W., 1995, Statistical correlations between VS and cone penetration data for different soil types, *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT '95*, Vol. 2, Linköping, 173-178.
- Howie, J. A., and Amini, A., 2004, Effect of ageing on shear wave velocity by seismic cone, *Proceedings of ICS-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, CD-ROM, Porto, 943-950.
- Jefferies, M. G., and Davies, M. P., 1993, Use of the CPTu to estimate equivalent SPT N60, *Geotechnical Testing Journal*, **16**, 458-468.
- Joh, S. H., and Mok, Y. J., 1998, Development of an inversion analysis technique for downhole seismic testing and continuous seismic CPT, *Journal of Korea Geotechnical Society*, **14**, 95-108.
- Kay, J. N., and Avalue, D. L. 1982, Application of screw plate to stiff clays, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **108**, 145-154.
- Kim, D. S., Bang, E. S., and Kim, W. C., 2004, Evaluation of various downhole data reduction methods for obtaining reliable VS profiles, *Geotechnical Testing Journal*, **27**, 334-341.
- Maher, A., Bennert, T., and Gucunski, N., 2002, *Evaluation of Geotechnical Design Parameters Using the Seismic Piezocone*, Final Report FHWA NJ 2001-032, New Jersey Department of Transportation and Federal Highway Administration of US Department of Transportation.
- Mayne, P. W., 2000, Enhanced geotechnical site characterization by seismic piezocone penetration tests, *Proceedings of the 4th International Geotechnical Conference*, Cairo University, 95-120.
- Mayne, P. W., and Schneider, J. A., 2001, Evaluating drilled shaft response by seismic cone, *Foundations and Ground Improvement*, Geotechnical Special Publication No. 113, ASCE, 655-669.
- Sacchetto, M., Trevisan, A., Elmgren, K., and Melander, K., 2004, CPTWD (Cone Penetration Test While Drilling) a new method for deep geotechnical surveys, *Proceedings of ICS-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, CD-ROM, Porto, 787-794.
- Sun, C. G., 2004, *Geotechnical Information System and Site Amplification Characteristics for Earthquake Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.