

인천국제공항에서의 SASW, SPT, CPT 시험결과 비교연구 Comparison of the Results from SASW Measurements, SPT and CPT at InChon International Airport Site

송 명준¹⁾, Myung-Jun Song, 조 성호²⁾, Sung-Ho Joh

¹⁾ 현대건설 기술연구소 연구원, Research Engineer, Hyundai Institute of Construction Technology

²⁾ 중앙대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Chung-Ang University

SYNOPSIS : SASW method, which evaluates subsurface stiffness nondestructively and nonintrusively, is a new technology adopted for site investigation. This study investigated how the results of SASW measurements are correlated with the results of SPT and CPT. At the InChon international airport site, SASW measurements, SPT and CPT were performed. The shear wave velocities and shear modulus from SASW measurements were compared with SPT-N value and the skin friction(f_s) and cone resistance(q_c) of CPT. Empirical correlations developed by several researches were employed for the comparisons. The comparisons showed that the empirical correlations of V_s -N by Imai(1977), G_{max} -N by Ohsaki & Iwasaki(1973), and V_s - f_s by Mayne & Burns(1995) worked well for the InChon international airport site.

주요어(Key words) : SASW, shear wave velocity, shear modulus, SPT, CPT, q_c , f_s

1. 서 론

지반의 전단파 속도(V_s)와 전단탄성계수(G_{max})를 측정하기 위해서는 시추공을 이용하는 downhole 시험, crosshole 시험 또는 지표에서 수행되는 SASW 실험을 수행하여야 한다. SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Waves, 주파수영역 표면파해석) 기법은 지반이나 구조물의 표면에서 표면파의 측정을 통해 표면 아래의 전단 강성도의 주상도(profile of shear stiffness)를 추정하는 비관입, 비파괴적 원위치 시험이다. SASW 실험은 지표면 또는 구조물의 표면에서 작은 변형을 범위에서 수행되기 때문에 SASW 실험은 비파괴적으로 행해지며 또한 다른 현장 조사 시험에 비해 현저히 단시간에 그리고 경제적으로 행해질 수 있다. SASW 실험결과로 얻는 지반의 전단파속도(V_s)와 전단탄성계수(G_{max})는 지반의 강성도(stiffness) 해석, 동하중을 받는 기초의 설계(Wood, 1986), 모래, 자갈 등과 같이 시료채취가 힘든 지역의 탄성특성 계산(Stokoe et al, 1988), 지반 침하해석(Matthews et al, 1996) 또는 액상화 가능성 평가(Stokoe and Nazarian, 1985) 및 터널 벽체의 건전도 시험(조성호, 1998; 송 명준 외, 1998)등에 사용되어왔다.

지반의 전단파 속도(V_s)와 전단탄성계수(G_{max})가 동적하중에 관계된 중요한 변수들이나 기존의 시추공을 이용한 탄성과 시험법들의 고비용 등의 이유로 많은 학자들(Ohsaki and Iwasaki, 1973; Imai, 1977; Schmertmann, 1977; Imai and Tonouchi, 1982)이 표준관입시험(SPT)의 N치를 이용해서 전단파 속도(V_s)와 전단탄성계수(G_{max})를 추정하려는 노력들이 있었다. 또한 Mayne and Rix(1993), Hegazy and Mayne(1995) 그리고 Mayne and Burns(1995)들은 콘관입시험의 q_c 및 f_s 값들을 이용하여 전단파 속도(V_s)와 전단탄성계수(G_{max})를 추정하였었다.

본 연구에서는 이러한 기존의 관계식들을 이용하여 SASW 실험으로부터 SPT의 N의 추정 및 SPT, CPT 시험결과들을 이용하여 전단탄성계수의 추정 가능성을 확인하고자한다. 또한, 기존의 학자들의 연구결과를 인천국제공항 현장에 직접 적용하여 동 부지에서 가장 적합한 관계식을 확인하고자한다.

2. 현장개요 및 현장실험

본 연구에서 전단파 속도와 전단탄성계수의 측정을 위해서 SASW 실험과 표준관입시험(SPT) 및 콘관입시험(CPT)을 인천 국제공항 활주로현장에서 수행하였다. 서로 약 1.5km 떨어진 활주로나 유도로에서 실험이 수행되었다. 시험 위치도는 그림 1의 (a)에 도시되어있다. 간척지 상부에 연안에서 준설한 실트질 사질토로 매립되어 있는 지역이라서 수평으로 지층은 상당히 균질한 지반이다. 원지반은 실트질 점토와 실트질 모래로 구성되어있으며, 점토지반의 압밀축진을 위해 샌드드레인을 시공하고 약 5~6m가량 실트질 모래로 압성토를 하였다. 따라서, 본 현장의 점성토층은 순수한 점성토층이 아니라 대부분이 샌드드레인 공법으로 치환되어있다. 각 위치에서의 시추주상도는 그림 1의 (b), (c)에 도시되어있다.

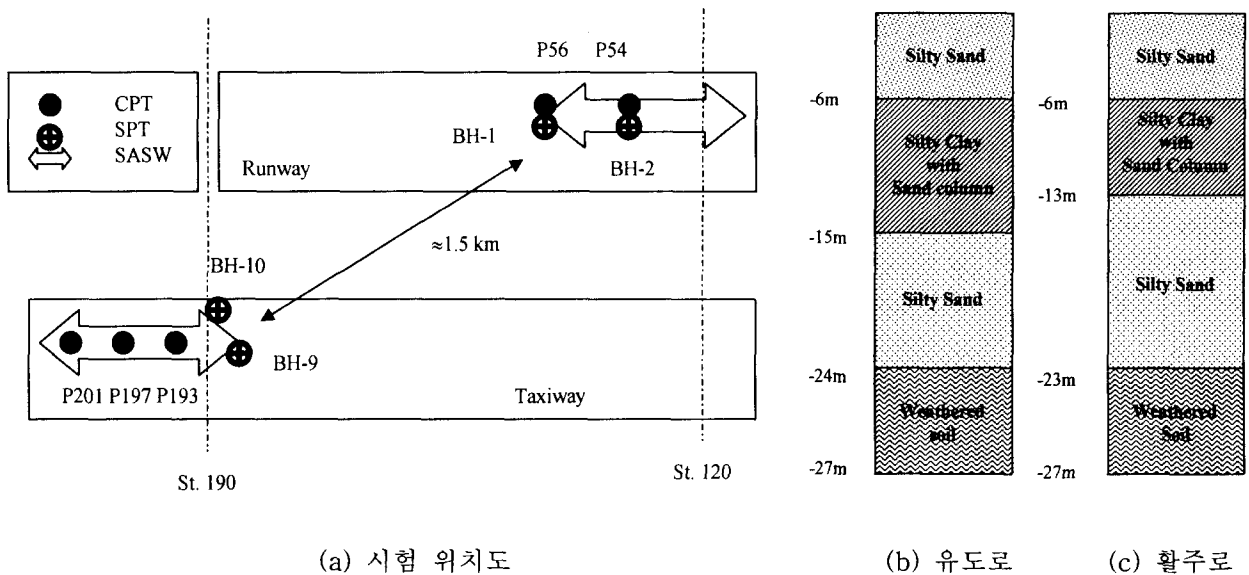


그림 1 인천국제공항의 시험위치도 및 시추주상도.

3. SASW기법

SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Waves, 주파수 영역 표면파 해석) 기법은 여러 지반공학적인 환경에서 깊이별 전단 강성도(shear stiffness)의 변화를 비파괴적으로 평가하기 위하여 성공적으로 적용이 되어왔다. SASW 실험을 간략하게 정의하면 두 개 위치에서 기록된 응력과 진동 간의 위상각 차이(phase difference)를 여러 감지기간 거리를 이용하여 측정하는 것이라고 할 수 있다.

현장에서 측정된 위상각 차이로부터 일련의 파장(wavelength)에 대해서 응력파의 위상 속도(phase velocity)를 결정하는데, 이러한 파장에 대한 위상속도의 관계를 분산곡선(dispersion curve)이라고 한다. 이 분산곡선은 평가 대상인 부지의 서명(signature)과도 같은 것인데, 이는 특정 부지에 대해서 분산곡선은 유일하게 결정되어진다는 것을 의미한다. 현장에서 실험에 의해 결정된 분산곡선은 실험분산곡선(experimental dispersion curve)이라고 하며, 각 감지기간 거리에 대한 실험분산곡선들을 모두 합친 곡선을 복합실험분산곡선(composite experimental dispersion curve)이라고 한다. 이 복합실험분산곡선은 부지의 전단파 속도 주상도를 도출하는데 사용이 된다. 영종도 유도로 지반에서 구한 각 감지기간 거리에 대한 복합실험분산곡선은 그림 3에 도시되어있다. 전단파 속도 주상도의 도출은 역산해석(inversion analysis)이나 반복적 정모델링 해석(iterative forward modeling analysis)에 의해서 가능하다. 이는 근본

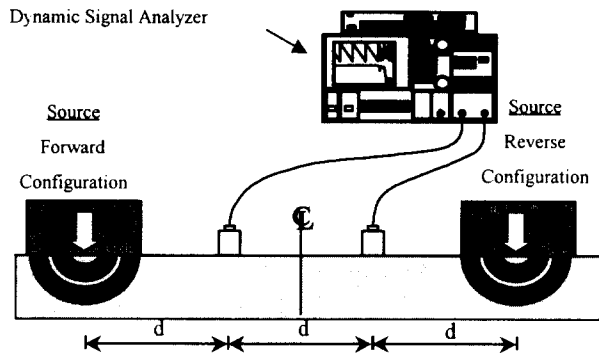


그림 2 일반적인 SASW 실험장비와 구성(Joh, 1996)

결정된 전단파속도 주상도와 N치와의 상관관계의 도출을 위해 평균화된 전단파속도 주상도는 그림 5에 N치와 함께 도시되어있다. 유도로에서의 실험결과는 그림 4에 도시되어있으며, 전반적인 유형은 활주로와 약 1km이상 떨어져 있음에도 불구하고 상당히 유사하다. 이로부터 영종도는 수평으로 상당히 균일한 분포를 가진 지반임을 알 수 있다. 또한 그림 4, 5의 전단파속도 주상도에서 점성토에 해당하는 약 5~10m 부분의 전단파 속도가 상부의 샌드층 유사하게 상당히 크게 나왔는데, 이는 본 지역의 점성토층에 타설된 샌드드레인의 효과를 반영하는 것임을 알 수 있다.

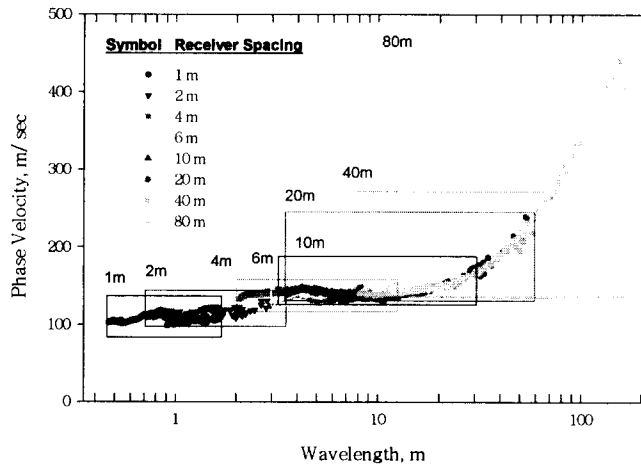


그림 3 인천국제공항 유도로 지반에서 SASW실험으로 구한 복합 실험분산곡선.

다. 본 현장의 점성토가 순수한 점성토가 아니라 샌드 드레인이 시공되어있기 때문에 점성토에서의 N치의 신뢰성문제 등으로 인하여 실트질 샌드에 해당하는 부분만의 데이터를 이용하였다.

본 연구에 사용된 다른학자들에 의한 $V_s - N$ 와 $G_{max} - N$ 의 경험적 상관관계식은 표 1, 2에 비교되어있으며 V_s 의 단위는 m/sec, G_{max} 의 단위는 kg/cm^2 이다.

전단 탄성계수(G_{max})는 다음 식과 같이 정의된다.

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

여기서 ρ 는 중량밀도이다. 중량밀도는 γ / g 와 같고, γ 는 재료의 총 단위중량이고 g 는 중력가속도이다. 즉, 지반의 단위중량을 알면 V_s 를 이용하여 G_{max} 를 쉽게 계산할 수 있다.

적으로 전단파 속도 주상도를 가정하고 그에 대하여 이론적으로 계산된 분산곡선, 즉, 이론분산곡선(theoretical dispersion curve)과 실험분산곡선이 일치될 때까지 반복적으로 가정한 전단파 속도 주상도를 변화시켜 나가는 것이다. 이러한 전단파 속도 주상도의 가정에 대한 수정이 최적화 이론에 의해서 수행이 되면 이를 역산해석이라고 하고, 인위적으로 인간의 판단에 의해서 수정이 되면 반복적 정모델링 해석이라고 한다. 영종도 활주로 현장에서 역산해석 프로그램 FIT7(Joh,1996)에 의한 역산해석에 의해서

4. V_s , G_{max} 와 SPT-N치의 비교 분석

SASW 실험과 SPT시험이 수행된 인천국제공항 지반은 그림 1의 시추 주상도에서 보듯이 실트질 모래를 함유한 풍화토 위에 실트질 모래와 실트질 점토로 구성되어있으며, 점토부분의 압밀축진을 위하여 약 5~6m 가량의 실트질 모래를 준설 매립하여 압성토를 한 후 일부구간은 샌드드레인 공법을 시공하였다. 즉, 실트질 점토의 일부분들은 샌드드레인 공법에 의해서 치환되었으며 이는 점토에 해당하는 깊이 약 6~14m 구간에서의 SASW 실험 결과 주상도(그림 4, 5)에서 확인할 수 있

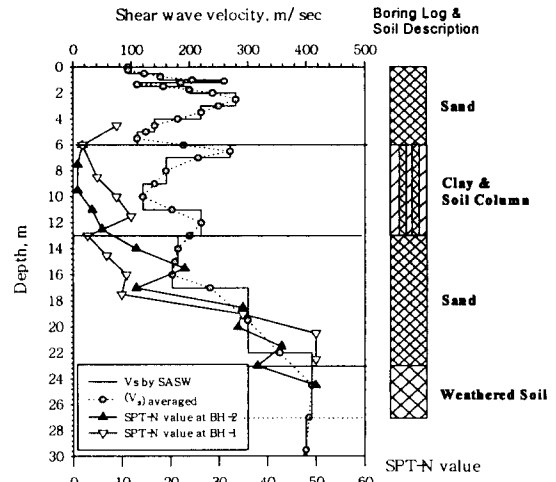
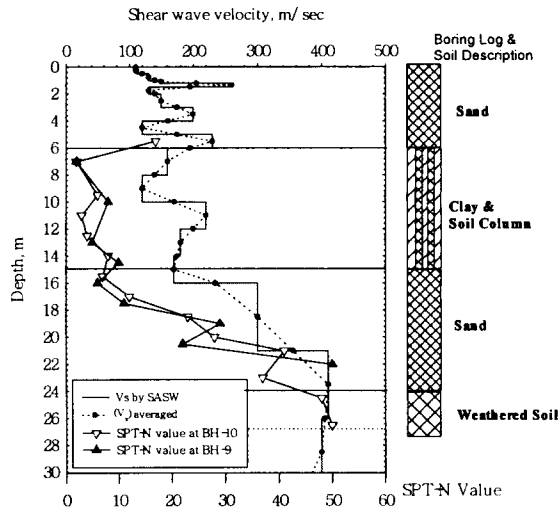


그림 4 인천국제공항의 유도로에서의 전단파속도 주상도와 N치

그림 5 인천국제공항 활주로에서의 전단파속도 주상도와 N치

표 1 $V_s - N$ 의 경험적 상관관계식

	Clay	Sand	All
Imai(1977)			$V_s=91N^{0.337}$
Imai & Tonouch(1977)			$V_s=97N^{0.314}$
일본 토질공학회(JGS) 및 일본 도로교시방서	$V_s=100N^{1/3}$ ($1 \leq N \leq 25$)	$V_s=80N^{1/3}$ ($1 \leq N \leq 50$)	
Schmertmann(1977)		$V_s=15.2N$	

표 2 $G_{max} - N$ 의 경험적 상관관계식

	Clay	Sand	All
Ohsaki & Iwasaki(1973)			$G_{max}=120N^{0.8}$
Imai & Tonouch(1982)			$G_{max}=144N^{0.68}$
Seed et al.(1983)		$G_{max}=63.5N$	

유도로 및 활주로에서의 각각의 N치에 대응하는 V_s 를 구하여 $V_s - N$ 의 관계곡선을 그림 6에 다른 학자들에 의한 상관관계식에 비교하였다. 여기서 r은 상관계수(correlation coefficient)이다.

그림 6에서와 같이 인천국제공항 사질토지반의 $V_s - N$ 의 관계는 표 1의 여러학자들에 의해서 구해진 상관관계식들의 평균값정도에 해당하며 경향이 상당히 일치함을 알 수 있다.

본 현장에 가장 적합한 $V_s - N$ 의 관계식은 표 1의 Imai(1977)식과 일본토질공학회의 점토지반에 적용할 수 있는 식($1 \leq N \leq 25$)을 사질토($1 \leq N \leq 50$)까지 확장시켰을 때의 관계식이다. 만약, Imai(1977)

식을 이용해서 인천국제공항에서의 전단파속도로 N치를 추정하면, 평균값보다 약간 큰값을 산정하게 되며, 반대로 N치를 이용하여 전단파속도를 추정하면 보수적인 값을 얻게됨을 알 수 있다.

식(1)을 이용하여 인천국제공항의 $G_{max} - N$ 의 관계곡선을 그림 7에 다른 학자들(표 2)에 의한 상관관계식에 비교하였다.

인천국제공항 사질토지반의 $G_{max} - N$ 의 관계는 표 1의 여러학자들에 의해서 구해진 상관관계식들과 경향이 일치함을 알 수 있다. 본 현장에 가장 적합한 $G_{max} - N$ 의 관계식은 표 2의 Seed et al.(1983)과 Ohsaki & Iwasaki(1973)의 관계식임을 알 수 있다.

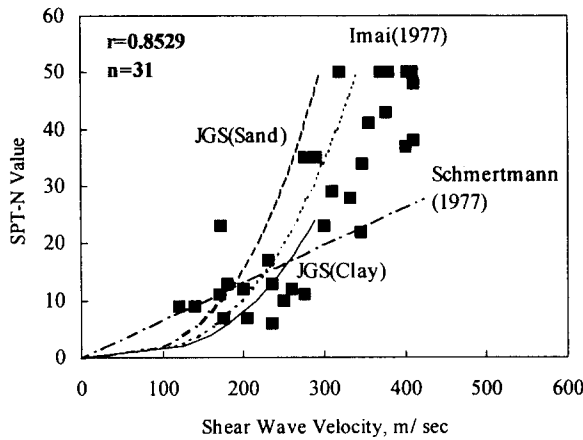


그림 6 인천국제공항 사질토지반의 V_s - N의 상관관계

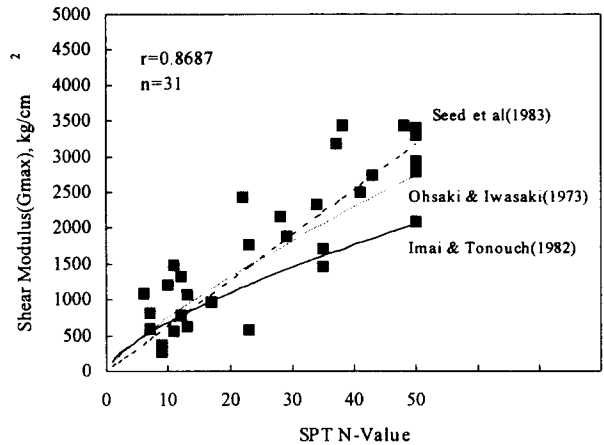


그림 7 인천국제공항 사질토지반의 G_{max} - N의 상관관계

5. V_s , G_{max} 와 CPT결과의 비교분석

SASW 실험과 CPT 시험이 실시된 인천국제공항 현장의 시험 위치도는 그림 1에 도시되어있다. CPT시험은 유도로에서 3공, 활주로에서 2공이 실시되었다. CPT시험으로 구한 유도로와 활주로에서의 q_c 와 f_s 값을 이동평균법(moving average method)을 이용하여 평균값(mean value)을 취하였으며 그 결과는 그림 8, 9에 전단파 속도 주상도와 함께 도시되어있다.

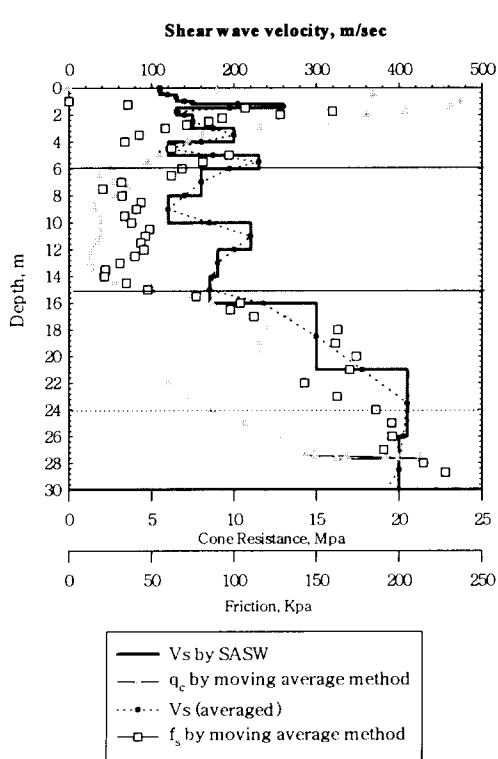


그림 8 인천국제공항 유도로에서의 전단파속도 주상도와 이동평균법으로 계산된 q_c , f_s 값

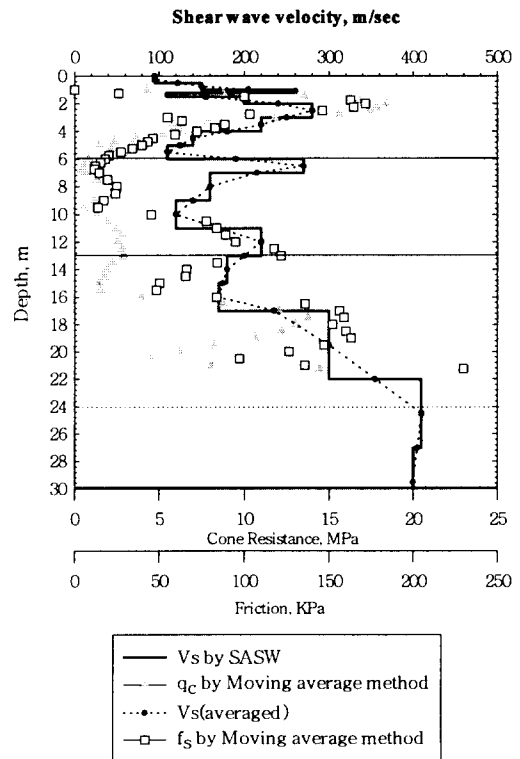


그림 9 인천국제공항 활주로에서의 전단파속도 주상도와 이동평균법으로 계산된 q_c , f_s 값

그림 1의 시추주상도에서와 같이 유도로의 6m~15m, 활주로의 6m~13m사이의 샌드드레인이 타설된 점성토부분은 본 연구에서 제외하며 나머지 실트질 사질토층을 대상으로 SASW 실험결과인 전단파속도와 CPT의 q_c 와 f_s 값을 비교한다.

Robertson et al.(1995)은 전단파속도는 간극비와 유효응력의 함수이나 흙의 풍화도(cementation), 연대(age) 및 입자성분(fabric)에도 영향을 받으므로 풍화되지 않고(uncemented) 오래되지 않은(young) 모래의 전단파속도는 간극비와 유효응력에 지배됨을 실내실험을 통해 검증하였다. 따라서, 전단파속도를 이용하여 모래의 cementation과 aged여부를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

Robertson & Fear(1995)는 실내실험과 SCPT 시험을 통해 모래의 압축성은 콘관입저항(q_c)에 많은 영향을 미치나 전단파속도에는 영향을 미치지 않기때문에 q_c 와 V_s 의 비교를 통하여 모래의 압축성여부를 판단 할 수 있음을 확인하였다.

따라서, 압축성이 큰 모래는 콘관입저항은 감소하나 전단파속도는 일정하며, 풍화되고(cemented) 오래된(aged) 모래에서는 전단파속도는 콘관입저항보다 더 빨리 증가한다. 이런 압축성에 의한 사질토에서의 콘관입저항(q_c)의 영향등으로 인하여, 그동안 많은 학자들이 콘관입저항(q_c)과 상대밀도와의 상관관계를 연구하였음에도 불구하고 상대밀도, 유효응력과 콘관입저항(q_c) 사이의 하나의 특이한 상관관계가 없음을 보여준다(Roberson & Campanella, 1988).

이러한 연구를 토대로 그림 8, 9의 인천국제공항 현장의 전단파속도 주상도와 콘관입저항(q_c)을 비교하여보면 약 18~22m 부근의 모래지반은 압축성이 큰 지반으로 판단할 수 있다.

Mayne & Rix(1993), Hegazy & Mayne(1995)등 기존의 학자들에 의해 연구된 q_c , f_s - V_s 의 상관관계는 표 3에 정리되어있다. 표 3에서 G_{max} , q_c , f_s 는 kPa, V_s 는 m/sec이다.

표 3 V_s , G_{max} - CPT 결과와의 경험적 상관관계식

	Clay	Sand	All
Mayne & Rix(1993)	$G_{max}=406(q_c)^{0.695}/e_o^{1.130}$		
Hegazy & Mayne(1995)	$V_s=14.13 q_c^{0.359} e_o^{-0.473}$ $V_s=3.18 q_c^{0.549} f_s^{-0.025}$	$V_s=13.18 q_c^{0.192} \sigma'_{vo}{}^{0.17}$ $V_s=12.02 q_c^{0.319} f_s^{-0.046}$	$V_s=(10.1 \text{ Log}q_c-11.4)^{1.69} (f_s/q_c *100)^{0.3}$
Mayne & Burns(1995)			$V_s=117+1.33f_s$

Mayne & Rix(1993)는 전세계 31개 점성토 현장의 CPT시험과 Downhole, Crosshole, SCPT, SASW 실험결과를 비교연구하여 G_{max} 가 간극비(e_o), 유효응력(σ'_{vo}), 응력이력(OCR)과 밀접한 관계가 있음을 검증하였다. 또, q_c 가 G_{max} , V_s 의 σ'_{vo} 와 OCR의 영향을 반영하나 점성토에서는 q_c 는 e_o 에 영향을 받지 않음을 검증하고 표 3에서와 같이 q_c 와 e_o 를 독립변수로 사용한 G_{max} - q_c 의 상관관계식을 제안하였다.

Hegazy & Mayne(1995)는 Mayne & Rix(1993)의 31개 점성토 현장 데이터에 61개 현장 데이터를 추가하여 간극비(e_o)에 무관한, q_c 와 f_s 값에만 관계된 상관관계식을 표 3과 같이 제안하였다.

이들 경험식을 인천국제공항의 유도로와 활주로에 적용하여 실제 SASW실험결과에서 구한 전단파속도 주상도와 비교하였다. 그림 10, 11에서 보듯이 인천국제공항에서는 Mayne & Burns(1995)와 Hegazy & Mayne(1995)의 경험식을 이용해서 구한 전단파속도가 실제 전단파속도와 가장 잘 일치함을 할 수 있다. 특히 f_s 만을 이용한 Mayne & Burns(1995)는 실제 SASW 실험에서 구한 전단파속도와 거의 일치함을 알 수 있다. 이로써, 밀도를 지배하는 개념에서는 q_c 보다 f_s 가 더욱 지배적임을 알 수 있다. 즉, q_c 는 전체적인 강도에 지배되는 요소이고, f_s 는 입자의 마찰력에 지배되는 요소이기 때문에, 밀도에 지배되는 전단파속도와 전단탄성계수는 q_c 보다 f_s 에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 이는 그림 8, 9의 인천국제공항 현장의 SASW시험결과인 전단파속도와 f_s 의 유형을 비교함으로써 확인 가능하다.

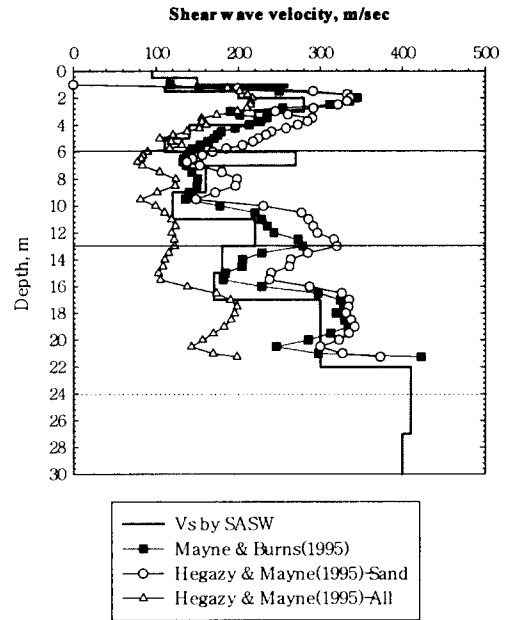
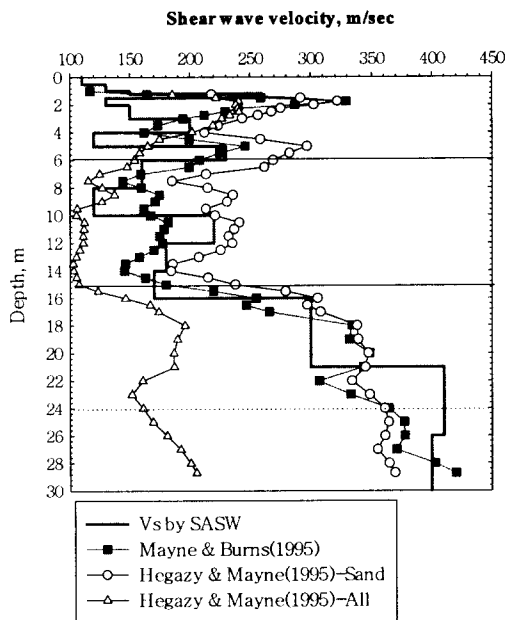


그림 10 표3의 경험식을 인천국제공항 유도로에 적용하여 SASW 실험결과인 전단파속도 주상도와와의 비교

그림 11 표3의 경험식을 인천국제공항 활주로에 적용하여 SASW 실험결과인 전단파속도 주상도와와의 비교

6. 결론

본 연구에서는 인천국제공항의 활주로와 유도로의 사질토 지반에 대하여 SASW시험과 SPT, CPT 시험을 수행한 후 전단파속도와 N치 및 q_c , f_s 의 관계를 외국에서 개발된 경험적 상관관계식과 비교하여 인천국제공항 현장에 가장 적합한 관계식을 판단하였다. 현장의 전단탄성계수(G_{max}), 전단파속도(V_s)를 구하는 가장 좋은 방법은 SASW, crosshole, downhole, SCPT시험등 현장 탄성파시험을 실시하는 것이다. 하지만, 여건상 현장 탄성파시험이 불가능한 경우도 있으므로 이런 경우, 외국의 많은 상관관계식 중 우리나라 현장에 적합한 경험식을 사용하는 것이 대안이 될 수 있다. 따라서, 인천국제공항 현장에 대하여 수행된 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 인천국제공항 현장에 가장 적합한 V_s -N 의 관계식은 Imai(1977)식이며, G_{max} -N 의 관계식은 Ohsaki & Iwasaki(1973)식과 Seed et al.(1983)식으로 판단된다.
2. 인천국제공항 현장에 가장 적합한 V_s - q_c , f_s 의 관계식은 Mayne & Burns(1995)식으로 판단된다. 인천국제공항 현장의 비교연구를 통하여, q_c 보다 f_s 가 V_s 에 더욱 밀접한 관계에 있음을 알 수 있었다.
3. 외국에서 개발된 경험적 상관관계식의 직접적인 사용보다는 우리나라 지반에 적합한 상관관계식의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. 송명준, 조성호, 정연문, 이영남(1998), SASW기법을 이용한 터널벽체의 건전도평가, 한국지반공학회 98 봄 학술발표회, pp257-264.
2. 조성호(1998), SASW기법에 의한 터널라이닝의 방수막확인파 위치추정에 관한 연구, 대한토목학회

- 논문집, 제 18권 제 III-3호, pp. 435-443.
3. Hegazy, Y. A. and Mayne, P. W.(1995), *Statistical correlations between Vs and cone penetration data for different soil types*, International Symposium on CPT, Linkoping, Sweden, Oct. 4-5, Vol. 2, pp. 173-178.
 4. Imai, T.(1977), *Velocities of P- and S-waves in Subsurface Layers of Ground in Japan*, Proceedings 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, Tokyo, Japn, pp. 257-260.
 5. Imai, T and Tonouchi. K. (1982), *Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus*, Proceedings of 2nd European Symposium of Penetrating Testing, Amsterdam, pp.67-72.
 6. Joh, Sung-Ho(1996), *Advances in the Data Interpretation Technique for Spectral Analysis of Surface Wave(SASW) Measurements*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
 7. Joh, Sung-Ho(1996), *FIT7 : Program for Forward Modeling Analysis, Inversion Analysis and Timw Trace Generation*, The University of Texas at Austin.
 8. Matthews, M. C., Hope, V. S. and Clayton, C. R. I. (1996), *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*, Proc. Instn . Geotech. Eng. 119, Apr., 84-95.
 9. Mayne, P. W. and Burns, S. E.(1995), *Geotechnical Report of piezocone and seismic piezocone tests at San Manuel, AZ*, to Agra Earth & Environmental, Inc., Georgia Tech.
 10. Mayne, P. W. and Rix, G. J.(1993), *G_{max}-q_c relationships for clays*, geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol 16, nr 1, 54-60
 11. Ohsaki, Y. and Iwasaki, R.(1973), *On Dynamic Shear Modulus and Poissons Ratios of Soil Deposits*, JSSMFE, 13(4), pp.59-73.
 12. Robertson, P. K. and Campanella, R. G.(1988), *Guidelines for geotechnical design using CPT and CPTU*, University of British Columbia, Vancouver, Department of Civil Eng., Soil Mechanics Series 120.
 13. Robertson, P. K. and Fear, C. E.(1995) *Liquefaction of sands and its evaluation. IS TOKYO' 95*, First Internatinal Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Keynote Lecture, November.
 14. Robertson, P.K., Sasitharan, S., Cunning, J. C. and Segs, D. C.(1995), *Shear wave velocity to evaluate flow liquefaction*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(3), 262-73.
 15. Schmertmann, J. H.(1977), *Use the SPT to Measure Dynamic Soil Properties? Yes, But*, Dynamic Geotech. Testing, ASTM Spec. Tech. Pub. 654, Denver June, pp.341-355.
 16. Seed, H. B., Idriss, I. M. and Arango, I.(1983), *Evaluation of Liquefaction Potential using Field Performance Data*, Proceedings of Geotechnical Engineering Division , ASCE, 111(8), pp.971-986.
 17. Stokoe, K. H. II and Nazarian, S. (1985), *Use of Rayleigh Waves in Liquefaction Studies, Measurement and Use of Shear Wave Velocity for Evaluating Dynamic Soil Properties*, Proceedings of Geotechnical Engineering Division Session at ASCE Convention, Denver, Colorado, May 1, pp. 1-17.
 18. Stokoe, K. H. II, Nazarian, S., Ricks, G. J., Sanchez-Salinerro, I., Sheu, J. C., and Mok, Y. J. (1988), *In Situ Seismic Tesing of Hard-to-Sample Soils by Surface Wave Method, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II-Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, Proceedings of Geotechnical Engineering Division Session at ASCE, Park City, Utah, June 27-30, pp.264-278.
 19. Woods, R. D. (1986), *In Situ Tests for Foundation Vibrations*, Geotechnical Special Publication NO. 6, Proc. of an ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, June 23-25, pp.336-375.