

저진동 모래다짐말뚝(LVSCP)의 지반개량효과 분석

Analysis of Ground Improvement Effect of Low Vibration Sand Compaction Pile Method

김종국¹⁾, Jong-Kook Kim, 차준태²⁾, Jun-Tae Cha, 이재창³⁾, Jae-Chang Lee, 채영수⁴⁾, Young-Soo Chae

¹⁾ 한국건설품질시험원 지반공학센터 이사, Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.

²⁾ 한국건설품질시험원 지반공학센터 부장, Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.

³⁾ 한국건설품질시험원 지반공학센터 과장, Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.

⁴⁾ 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

SYNOPSIS : In this study, the effect of noise and vibration, and influence of ground improvement are evaluated and its application is analyzed through the example of SCP designed at ground improvement in Song-Do international city. consequently, it shows even comfortable result that it is about 5.0m of inner space, when the LVSCP method is applied, rather than that it is about 30m of inner space when the existing SCP is applied in vibration control standards 2.0mm/sec. In the noise, now that the many differences according to environmental factors like other equipment noise ,limited space and so on at the time of the construction by LVSCP method are coming out , so we think that appropriate measures are needed according to surroundings. By the way, when it comes to the estimation of the ground improvement work before and after an improvement of LVSCP method, its result shows that it is satisfaction to all the standards of compaction control in dredged and reclaimed ground and sedimentary clay layer.

Keywords : low vibration sand compaction pile, ground improvement effect

1. 서 론

대규모 건설공사와 도심지 대형 건설프로젝트가 늘어나면서 장비의 대형화 등으로 건설공사시 수반되는 진동과 소음발생이 점차 증가하고 있다. 주로 시설물 인접지역이나 도심지의 건물들이 밀집되어 있는 지역에서 실시되는 공사시에는 소음보다 진동의 영향이 지반변형이나 지반침하에 가장 큰 문제가 발생하고 있다. 그 예로 가시설공사의 경우, Sheet Pile, H-Pile 등의 항타나 인발, 중장비 및 차량의 주행, 발파 및 유압브레커 작업 등이 주원인이 되어 진동과 소음이 발생하게 된다. 진동으로 인해 인접시설물에 예기치 않은 손상을 입히거나 인근 주민에게 불쾌함을 주게 되며, 충격진동시에 발파, 말뚝 항타시에 진동이 발생하게 된다. 이로 인한 공기 지연 및 건물에 파손을 유발시키는 물적 피해와 인체에 대한 정신적 부담 등 민원이 급증하고 있다. 근래들어 연약지반개량공사에서도 샌드드레인(sand drain), 모래다짐말뚝(sand compaction pile), 쇄석말뚝(granular pile) 등의 개량공법에 사용하는 장비 즉, 바이브로 햄머(vibro hammer)의 진동력에 의해 Casing Pipe가 관입되어 기둥을 형성되기 때문에 이에 따른 진동 및 소음이 발생하게 되고, 이로 인한 시공 여건에 많은 제약이 따르고 있다(천병식 등, 2000). 이러한 진동에 의한 장애는 주변의 여건을 고려하여 최선의 작업방법을 선택해야 한다. 최근 이에 따른 진동 영향을 최소화하기 위한 새로운 장비 개발 및 신기술 개발 등의 많은 개선 방안이 증가하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 송도국제도시의 지반개량공사시 설계된 저진동 모래다짐말뚝(LVSCP)공법의 사례 분석을 통해 진동 및 소음 영향과 지반개량효과를 평가하여 적용성을 분석하였다.

2. 저진동 모래다짐말뚝(LVSCP) 공법

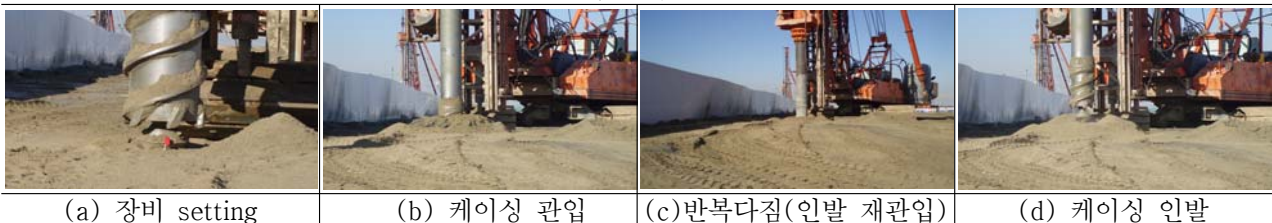
2.1 공법의 개요 및 특징

이 공법은 오거의 회전력과 자중(오거+케이싱)으로 지반을 굴착후 케이싱내 재료를 인발 및 재관입을 통해 다짐하여 말뚝을 조성하는 공법으로 기존의 다짐모래말뚝(SCP)공법 시공시에 큰 진동 및 소음이 발생하여 주변의 민원, 구조물의 손상, 지반침하 및 균열, 붕괴 등으로 인한 비용손실 및 연속적인 작업의 어려움이 발생된다. 이러한 문제점을 보완하며 연약지반의 액상화 방지, 수평저항력 증가, 지반의 압밀저감 및 축진, 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위 억제 등의 효과를 목적으로 한 개량된 다짐말뚝공법이다. 이 공법의 특징은 표 1에서와 같이 선단부 개폐가 용이한 원추형 슈의 장착으로 모래배출이 용이하며, 선단부 슈는 원추형 Type으로 지반관입이 용이하다. 그리고, 케이싱하단 오거비트로 인해 관입이 용이하여 다양한 지반에 적용 가능하고, 로터리 조인트 장착으로 케이싱 회전과 동시에 에어(air)주입이 가능하여 정밀한 계측이 가능하며, 기존 장비보다 시공속도도 빠르다. 표 2에서는 기존 SCP 공법과 저진동 SCP공법의 특징을 비교하였다.

표 1. 저진동 모래다짐말뚝(LVSCP)공법의 특징

모식도	공법의 특징
	친환경적인 공법 ·진동, 소음도가 환경규제 기준값 이하로 주변지역에 영향을 거의 미치지 않음. ·소음 기준 : 70.0 db(A)이하* ·진동 기준 : 0.2 cm/sec(Kine)이하**
	활용재료의 다양성 ·사용재료의 선택이 자유로우며, 현장여건 용도 - 모래, 쇄석, 재생골재 등을 사용
	품질관리 용이성 ·자동화 시스템에 의한 실시간 모니터링 시공 - 고품질의 다짐말뚝 조성 용이.
	적용지반의 다양성 ·오거천공으로 인한 관입이 이루어짐 ·사질토, 점성토, 풍화토등에 적용 우수 ·시가지, 주거밀집지역, 구조물 인접시공 양호.

시공 과정



(a) 장비 setting

(b) 케이싱 관입

(c)반복다짐(인발 재관입)

(d) 케이싱 인발

* ; 신기술 제 150호 인용,

표 2. 모래다짐말뚝의 비교

구분	기존 모래다짐말뚝(SCP) 공법	저진동 모래다짐말뚝(LVSCP) 공법	
장비	크레인	70 tonf	80 tonf
	케이싱관입	Vibro Hammer	오거+케이싱 -오거의 회전력과 자중
다짐방법	·압축공기와 Vibro Hammer에 의한 Casing 내부 모래다짐 ·케이싱인발높이: 3.0m /재관입깊이 : 2.0m	·오거의 자중(케이싱, 호퍼, 감속기)에 의한 모래다짐 ·케이싱 인발높이 : 2.5m /재관입 깊이 : 1.0m	
사용재료	·모래	·모래, 쇄석, 슬래그, 재생골재 등	
장단점	·시공단가가 상대적으로 낮음 ·시공실적이 많음 ·소음, 진동 민원발생 ·인접구조물 피해발생 ·지반침하 및 측방유동 발생	·소음 진동 민원 발생 구간 작업가능 ·지반 측방 유동 감소 ·지반교란 발생 작음 /시공실적 적음 ·장비 중량이 상대적으로 큼	
천공능력	·N치 : 0~15	·N치 : 0~30	

3. 시 협

3.1 진동 및 소음 측정

연약지반 처리시 장비사용(SCP, 멤브레인 SCP등)에 의한 진동영향에 대한 연구 자료(천병식 외, 2001)를 보면, 그림 1과 같이 바이브로 햄머(vibro hammer) 장비를 이용하여 시공할 경우 시공위치(진동원)로부터 약 70m까지 진동에 의한 영향이 있는 것으로 나타났으며, 연약지반처리시 이격거리에 따라 진동영향이 미치는 값이 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 인천국제공항의 구조물 배면의 준설매립층을 유압해머로 다질때에도 구조물의 진동영향(0.5Kine 기준)을 고려하여 구조물 외곽에서 20m 까지는 층다짐, 20m 이후에는 유압해머다짐을 시행한 사례가 있다(김중국의 2009).

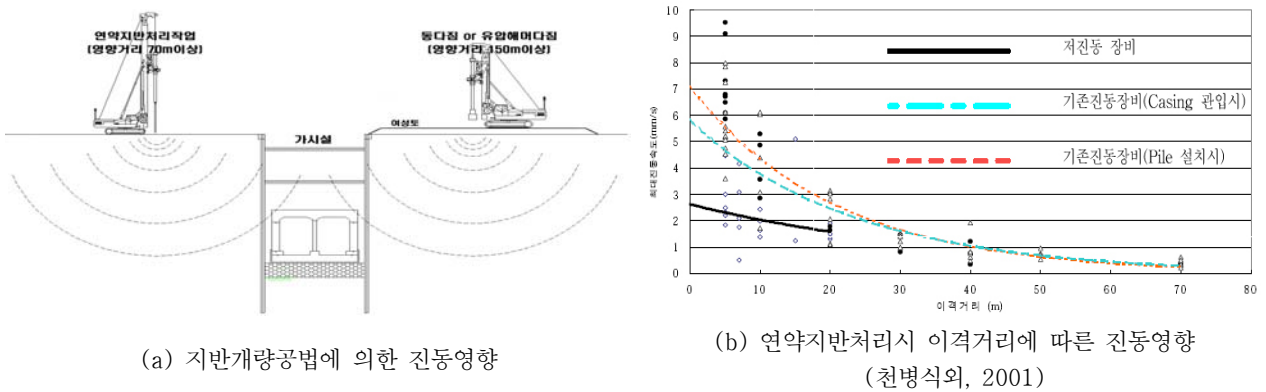


그림 1. 지반개량공법에 따른 진동영향

저진동 SCP공법의 진동, 소음은 발생원으로부터 이격거리를 5m, 10m, 20m, 30m, 40, 50m지점에서 측정하였으며, 기존 SCP공법과도 비교하였다.

3.1.1 진동 분석법

Wiss(1981)의 다짐에너지를 기준으로 진동지반을 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 항타원의 에너지 및 항타원으로 부터의 거리를 주요변수로 하여 다음 식 1과 같은 유형으로 표현할 수 있다. 진동 계측결과를 통하여 얻어진 자료 등을 로그스케일로 도시한 후 상부 천정 벽체의 계측자료를 이용하여 Wiss의 방법으로 식을 유도하고 99%의 신뢰구간을 나타내는 식으로 표현하면 식 2와 같다.

$$PV = KD^a W^c \quad (\text{식 1})$$

$$PV = k \times \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (\text{식 2})$$

여기서, PV는 최대진동입자속도(cm/sec)이고, D는 항타원으로 부터의 거리(m)이며, W : 항타원의 에너지, k, a, c : 항타원의 종류에 따라 결정되는 상수이다. 진동은 거리에 따른 감쇠는 두가지 형태로 발생한다. 그 중 하나는 기하감쇠이며 다른 하나는 재료감쇠이다. 기하감쇠는 진동원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 진동의 에너지 밀도가 감소하기 때문에 일어나게 된다. 이로 인하여 기하감쇠는 완전탄성체에서도 발생하게 된다. 반면에 지반은 완전탄성체가 아니므로 진동의 에너지는 주로 흙 입자간의 마찰

로 인하여 감소하게 된다. 이를 재료감쇠라 한다. Bornitz(1931)는 진동의 기하감쇠와 재료감쇠를 동시에 포함하는 진동감쇠식을 다음 식 3과 같이 제안하였다.

$$A = A_1 \left(\frac{r_1}{r} \right)^n \exp[-a(r-r_1)] \quad (\text{식 3})$$

여기서, A는 진동원으로 부터 거리 r에서의 진동입자 속도이고, A₁는 진동원으로 부터 거리 r₁에서의 진동입자 속도이며, n는 기하감쇠 상수와 a는 재료감쇠 계수이다. 세계 각국에서 규제하고 있는 진동 수준을 분석하면, 주거지역의 통상적인 구조물에 대해 대략 1.0 cm/sec (kine) 정도의 허용기준치를 설정하고 있으나, 그중 독일의 기준치가 건물의 형태를 세분화 하여 허용진동치를 좀더 엄격하게 적용하고 있어 안전율이 높은 편이며, 우리나라에서도 서울 지하철공사나 주택공사의 택지조성 공사에서의 진동허용기준을 이와 유사하게 적용하고 있는 실정이다.

3.1.2 소음 분석법

인간은 각자의 심신상태·환경조건에 따라 임의의 소리, 즉 음악·자동차 소리 등 모든 소리가 주관적인 판단에 의해 소음이 될 수 있다. 일반적으로 소리는 공기 압력의 변화가 인간의 고막에 가해질 때 느끼게 된다. 소리로서 느끼게 되는 최소음압(最小音壓)은 2×10⁻⁵N/m²이다. 따라서 소리의 크기는 이 음압의 크기에 비례하여 들리게 되며, 인간의 소리에 대한 감각은 로그 척도에 대응하므로 소리의 크기는 최소음압을 기준값으로 한 로그 척도, 즉 음압 레벨로써 나타낸다. 음압 레벨=20log₁₀(P/P₀). P는 임의의 음압, P₀는 기준값 2×10⁻⁵N/m²이다. 음압 레벨의 단위는 데시벨(decibel)이며, 일반적으로 dB로 표시한다. 소음의 크기를 나타낼 때는 인간을 기준으로 하기 때문에 인간의 청각작용을 고려하여야 한다. 우리 귀는 같은 크기의 소리라도 저음과 중음과 고음을 비교하면, 중음(1,000Hz 내외)이 가장 크게 들리고, 다음이 고음, 그리고 저음(100 Hz 내외)은 가장 작게 들린다. 이러한 조건을 보완하는 것을 청감보정회로(聽感補正回路)를 사용한다고 하며, 일반적으로 A특성을 사용한다. 즉, 소음계에서 청감보정회로 A특성을 사용하여 소음을 측정할 후 단위로서 dB(A)라고 표시한다. 특히, 건설현장에서 발생하는 소음은 저진동 SCP 타설장비 이외도 타 장비뿐만아니라 주변환경의 다양한 여건에서 복합적으로 발생하기도 한다.

3.2 지반개량효과 평가시험

본 연구 대상지역인 송도국제도시의 시설물 인접지역에 적용된 저진동 SCP공법에 대한 연약지반 개량 단면도 예는 그림 2와 같고, 저진동 SCP공법 지반개량효과를 평가하기 위하여 송도 ○공구 NISC지역의 대로 3-82지점의 2개소에서 확인조사를 수행하였다.

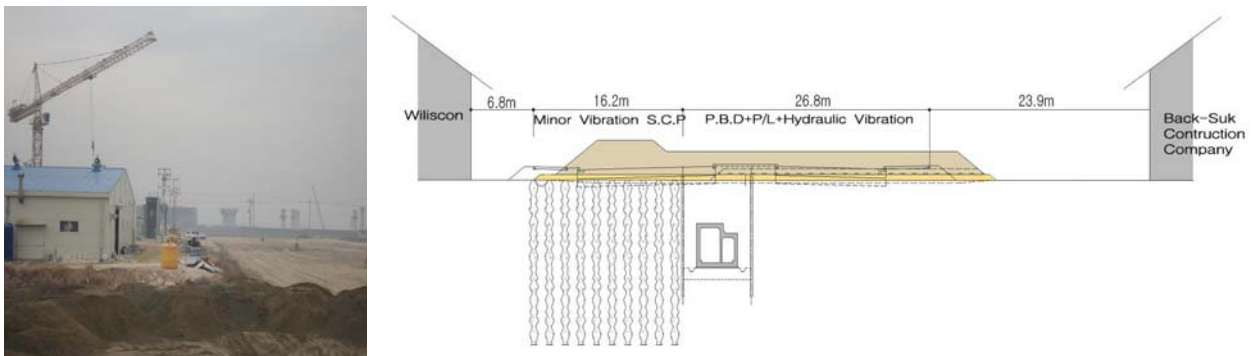


그림 2. 저진동 SCP공법의 연약지반개량 단면도

저진동 SCP공법의 지반개량효과는 개량 전·후에 실시한 현장시험으로 평가하는데, 표 3의 다짐관리기준과 같이 정적콘관입시험(CPT)은 주 관리시험방법, 표준관입시험(SPT)는 보조시험방법으로 적용하였다.

표 3. 준설패립지반에서의 SCP공법의 다짐관리기준

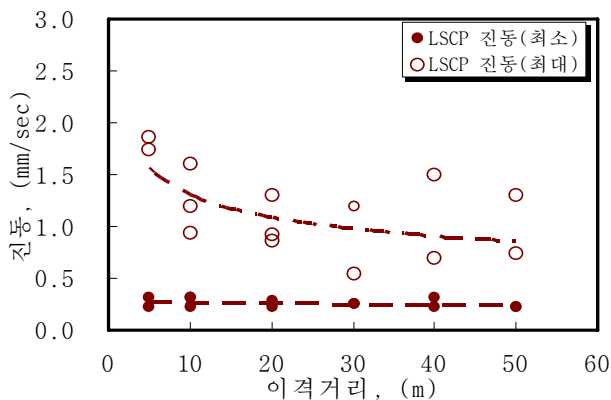
구 분	심도 (m)	다짐 관리 기준	
		CPT- q_c (평균)	SPT- λ 치 (평균)
매립층	0~8	8 MPa	12
원지반 허용 잔류침하량		10 cm이하	

4. 시험결과 분석

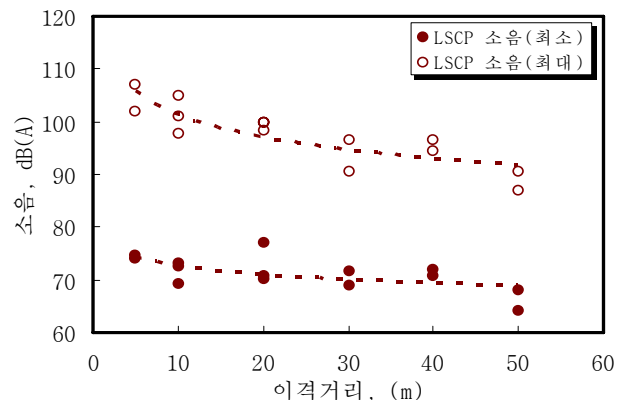
4.1 진동 및 소음 측정결과 분석

4.1.1 저진동 SCP공법의 진동 및 소음 측정 결과 분석

저진동 SCP공법의 거리별 측정 진동치와 소음치 측정결과를 토대로 최대값과 최소값의 범위를 그림 3과 같이 나타내었다. 그림 3(a)의 진동의 경우, 최대값은 0.54mm/sec~1.87mm/sec의 범위를, 최소값은 0.22mm/sec~0.31mm/sec의 범위를 보이고 있으며, 전반적으로 발생원으로부터 5.0~10.0m 지점이 진동 면에서 가장 크게 나타났고, 이후 이격거리가 멀어남에 따라 진동영향은 점차 감소되는 경향을 보이고 있다. 그림 3(b)의 소음의 경우, 최대값은 86.9dB(A)~107.0dB(A)의 범위를, 최소값은 64.1dB(A)~74.6dB(A)의 범위를 보이고 있으며, 현장여건에 따라 많은 차이를 보이고 있다.



(a) 진동측정 결과(최대, 최소)



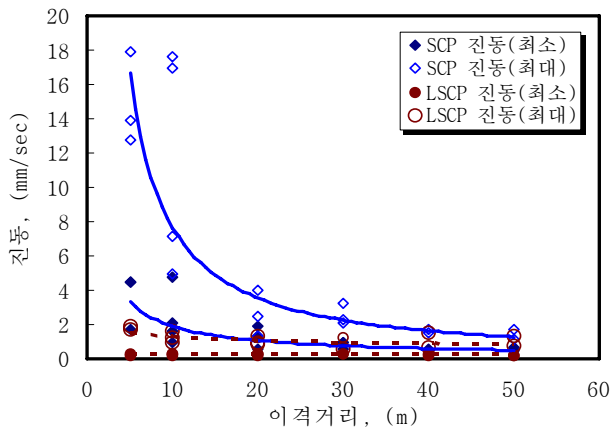
(b) 소음측정 결과(최대, 최소)

그림 3. 저진동 SCP에 의한 진동 및 소음 측정결과 비교

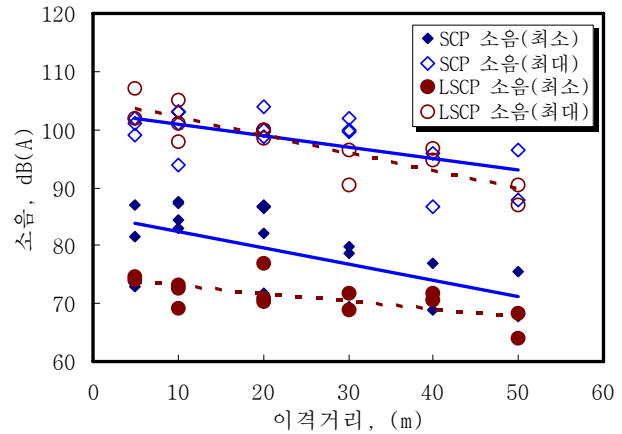
이에 따라 기존 SCP공법과 저진동 SCP공법의 거리별 진동 및 소음을 측정하여 평균 측정치를 비교하

여 그림 4와 그림 5와 같이 나타내었다. 그림 4의 기존 SCP공법의 시공시 진동의 경우, 진동원으로부터 거리별 평균 측정 진동치를 산출한 결과, 진동은 0.771mm/sec~11.638mm/sec로 나타났으며, 저진동 SCP공법 시공시 진동치는 0.338mm/sec~0.657mm/sec로 나타나 발생 진동면에서는 관리기준치를 모두 만족한 상태를 보여준다.

그림 5의 기존 SCP공법의 시공시 거리별 평균 측정 소음치를 산출한 결과, 소음은 76.8dB(A)~92.0dB(A), 저진동 SCP공법 시공시 소음 진동원으로부터 거리별 평균 측정 소음치는 소음은 73.0dB(A)~83.5dB(A) 로 나타나, 각각의 투입현장의 여건을 고려하여 부분적으로 저감대책이 보완되어야 할 것으로 판단된다.

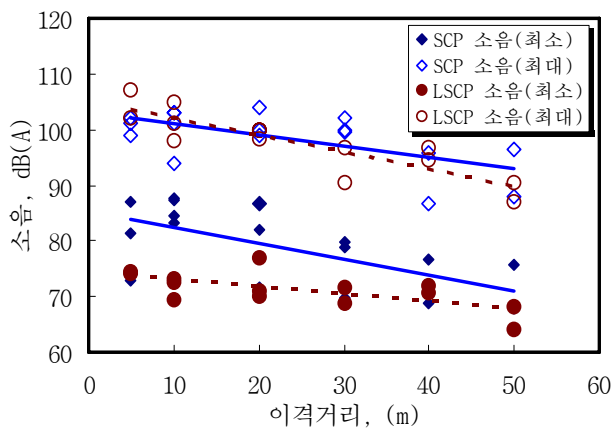


(a) 진동측정 결과(최대, 최소)

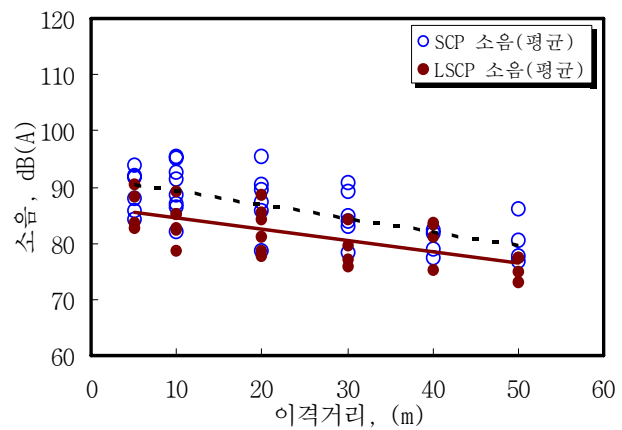


(b) 진동측정 결과(평균)

그림 4. 기존 SCP와 저진동 SCP에 의한 진동 측정결과 비교



(a) 소음측정 결과(최대, 최소)



(b) 소음측정 결과(평균)

그림 5. 기존 SCP와 저진동 SCP에 의한 소음 측정결과 비교

진동원으로부터 거리별 평균 측정 진동치와 소음치를 근거로 하여 진동 관리기준 2.0mm/sec, 소음 관리기준 70dB(A)에 해당하는 안전거리를 산정한 결과, 진동의 경우에는 거리별 평균측정치를 기준으로 SCP 공법 시공시 안전거리는 약 30m 이상전거리의 약 30m 이상전거리안전거리는 최소한 5m 이상으로 나타났으며, 소음의 경우에는 거리별 평균측정치를 기준으로 SCP 공법 시공시 안전거리는 약 81m 이상전거리의 약 30m 의 시공시 안전거리는 약 78m 이상으로 나타났다.

4.1.2 반복 다짐(인발 및 재관입)시의 진동 및 소음 측정결과 분석

저진동 SCP공법의 반복 다짐시 즉, 인발 및 재관입시의 진동 및 소음의 영향을 분석하기 위하여 그림 6과 그림 7과 같이 도시하였다. 그림 6은 저진동 SCP공법 시공시 이격거리 5m, 10m지점의 반복 인발 및 재관입시의 측정 기록지이며, 이때의 진동 및 소음의 영향을 측정한 결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)에서 보면, 진동치가 반복다짐시 뚜렷이 나타나는 5.0m 지점과 10m지점의 기록지를 분석한 결과, 인발 후 재관입시 진동측정치는 최소 0.730mm/sec 에서 최대 1.750 mm/sec으로 관리기준 2.0 mm/sec 이내로 나타난 것으로 분석되었다. 그림 7(b)의 반복다짐시의 소음의 경우 이격거리 5.0m 지점과 10m지점의 측정결과에 약간 차이를 보이며, 인발 후 재관입시 편차가 큰 것으로 나타나, 장비의 시공에 따른 발생소음과 인근지역 타 장비소음 등의 환경적인 요인에 따라 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

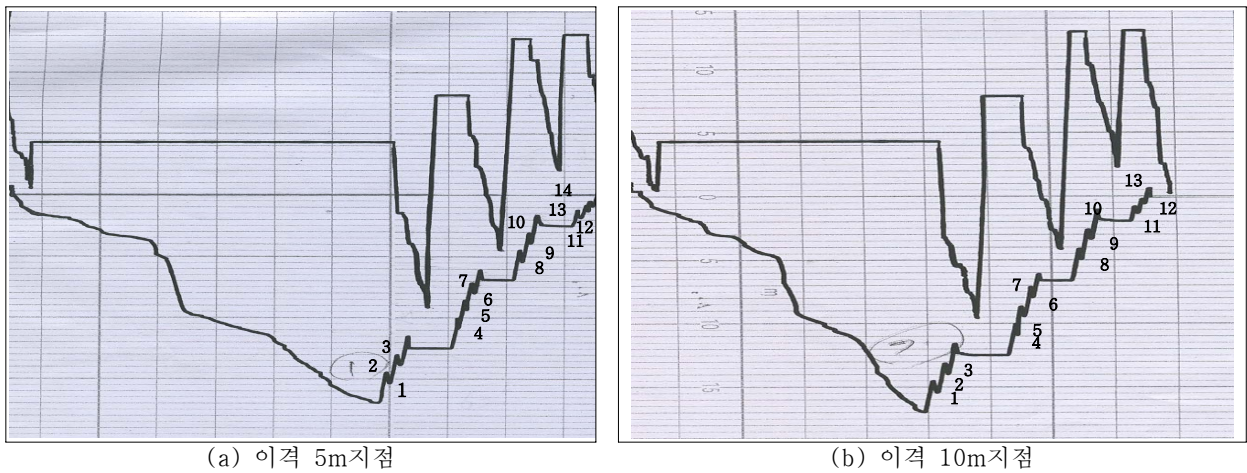


그림 6. 저진동 모래다짐말뚝의 측정 기록지 예

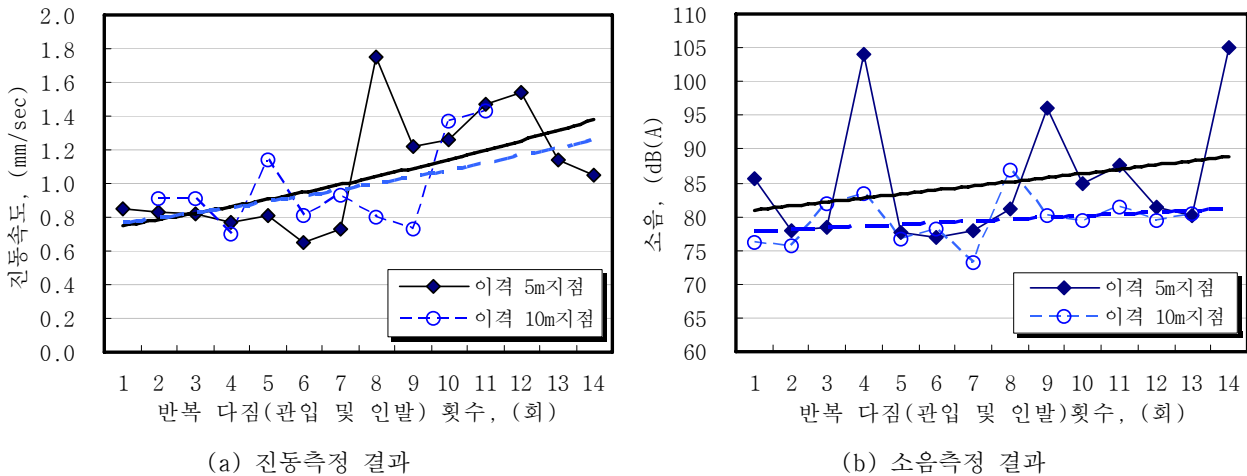
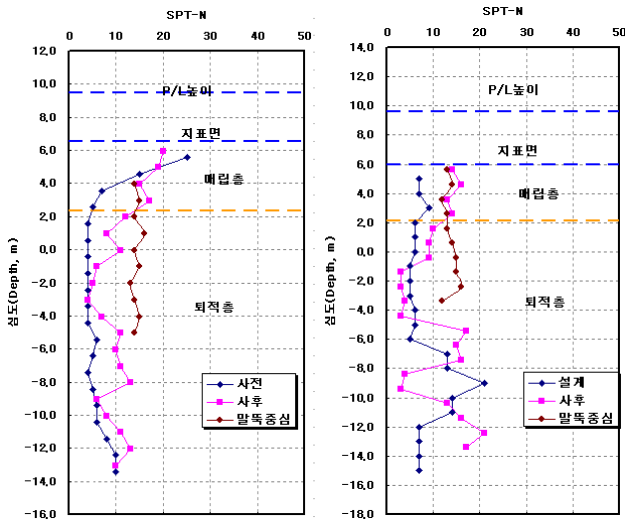


그림 7. 저진동 SCP의 반복다짐시의 진동 및 소음측정결과 분석

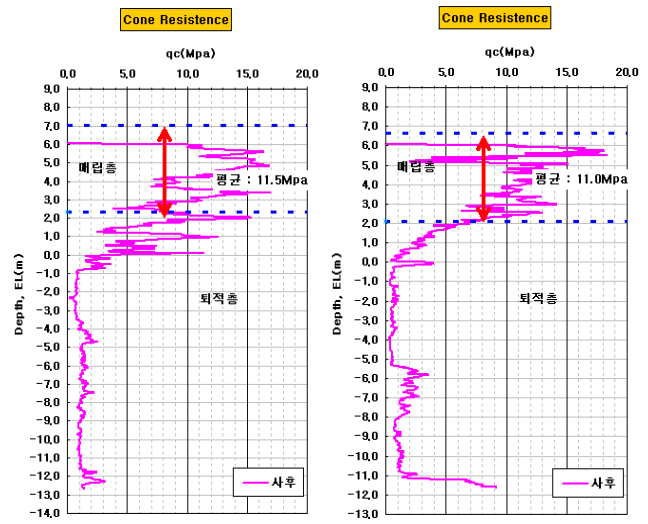
4.2 지반개량효과 분석

송도 ○공구 NISC지역의 저진동 SCP공법의 연약지반 개량 전·후의 확인조사로 SPT-N치, CPT- q_c 결과를 통해 그림 8과 그림 9와 같이 지반개량효과를 평가하였다. 그림 8(a) NBH-1공의 준설매립층에 대한 저진동 SCP공법에 의한 개량 전·후의 표준관입시험의 N치에 의한 지반개량효과를 보면, 개량 전,

N치 4/30~15/30정도에서 개량 후 N치는 8/30~19/30정도로 증가한 것으로 나타났으며, 그림 8(b) NBH-1공의 준설매립층에 대한 SPT-N치에 의한 지반개량효과를 보면, 개량 전, N치 5/30~7/30정도에서 개량 후 N치는 8/30~14/30정도로 증가한 것으로 나타났다. 이처럼 저진동 SCP공법의 지반개량효과는 SPT의 평균 N치는 약 13/30~16/30로 나타나, 표 3의 다짐관리기준에 만족한 것으로 판단된다. 또한, 그림 9의 저진동 SCP공법의 개량 후의 피조콘관입시험의 q_c 값에 의한 지반개량효과는 콘관입저항치(q_c)는 8.0~11.5 Mpa으로 나타나고 있어 매립층의 다짐관리 기준치인 8Mpa이상을 만족하는 것으로 나타났다.



(a) N치 비교(NBH-1) (b) N치 비교(NBH-2)
그림 8. 저진동 SCP의 개량 전·후의 SPT-N치 비교



(a) CPT결과 (NBH-1) (b) CPT결과 (NBH-2)
그림 9. 저진동 SCP의 개량 후의 CPT- q_c 결과

또한, 이들 지점의 퇴적점토층의 경우에도 토질의 지반정수 증감 등의 변화를 통해 지반개량정도를 확인할 수 있었다. 이때의 사전조사 설계시 비배수전단강도(C_{uu})는 20.3~45.1kN/m² 에서 압밀방치 후 비배수전단강도(C_{uu})는 51.4~87.0kN/m²으로 증가한 것으로 나타났으며, 압밀시험의 압축지수는 사전조사시의 0.090~0.145에서 확인조사 결과 약 0.084~0.205로 약간 유사하거나 감소한 것으로 나타났다. 특히, 계층자료에 의하면, 점성토에 대한 잔류침하량은 2.4~3.6cm로 산정되어 허용잔류침하량 기준인 10cm를 만족하는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구의 저진동 모래다짐말뚝(SCP)의 사례 분석을 통해 진동 및 소음 영향 분석과 지반개량효과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 발생원으로부터 거리별 평균 측정 진동치와 소음치를 산출한 결과, 발생 진동면에서는 관리기준치를 만족하나 소음의 경우 각각의 투입현장 여건을 고려하여 부분적으로 저감대책이 보완되어야 할 것으로 판단되며, 진동원으로부터의 이격거리별 평균측정 결과, 기존 SCP공법의 경우 발생원으로부터 5.0~10.0m 지점이 진동면에서 가장 크게 나타났고 이후 점차 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 저진동 SCP공법의 경우는 5.0m 지점에서도 안정적인 결과를 보이고 있다.
- 2) 진동 관리기준 2.0mm/sec를 기준으로 기존 SCP공법의 이격거리는 약 30m정도인 것에 비해 저진동 SCP공법의 진동 이격거리는 약 5.0m로 나타났다. 소음의 경우 저진동 SCP공법 시공시 타 장비소음 및 한정된 공간 등의 환경적 요인에 따라 많은 차이를 보이고 있어 현장여건에 따라 적절한 대책이

필요한 것으로 사료된다.

- 3) 저진동 SCP공법 시공시 5.0m 및 10.0m 지점의 시공측정 기록지를 진동 결과와 비교 분석하면 인발 후 재관입시 진동은 0.311~1.750mm/sec 으로 관리기준에 만족한 상태를 보이고 있다.
- 4) 저진동 SCP공법의 개량 전·후의 지반개량효과 평가결과, 준설매립지반과 퇴적 점토층에서의 다짐 관리기준에 모두 만족한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김종국, 최인걸, 채영수 (2009), "준설매립된 연약지반의 지반개량과 품질평가", 한국지반공학회 인천 특별학술발표회 논문집", pp. 199~229
2. 신민호, 전병승, 감상훈, 방윤경 (1996), "주면마찰력을 보강한 저진동,저소음말뚝에 관한 모형시험 연구(I)", 한국지반공학회 학술발표회 논문집", pp. 107-118
3. 석정건설(주) (2006), "어스오거와 유압장치를 이용한 저진동·저소음 다짐말뚝 공법(LVNCP공법), 신기술 510호
4. 천병식 (2001), "무소음 무진동 장비에 의한 Granular Pile 설치시 진동·소음 측정결과", 한양대학교 건설연구소, pp. 6-12
5. 천병식, 김백영 (2003), "민원발생지역에서의 저진동·저소음 Granular Pile의 시공사례", 한국철도학회 논문집, pp. 176-181
6. 천병식, 김백영, 정종홍 (2001), "연약지반 개량을 위한 저진동, 저소음 Granular Pile공법에 관한 연구 - Granular Pile시공장비 중심으로", 대한토목학회 논문집, pp. 1-4
7. 한국소음진동학회 (1995), "소음, 진동 편람", pp.407-408