

해머 쿠션 재질에 따른 모형말뚝의 소음, 에너지 전달효율 및 지지력 분석

Model Tests on a Plastic Pipe Pile for the Analysis of Noise, Energy Transfer Effect and Bearing Capacity due to Hammer Cushion Materials

임 유 진¹ Lim, Yu-Jin

황 광 호² Hwang, Kwang-Ho

박 영 호³ Park, Young-Ho

이 진 곽⁴ Lee, Jin-Gul

Abstract

Driving tests using model plastic piles with different hammer cushion materials were performed in order to evaluate the efficiency of energy transfer ratio from the hammer, degree of vibration of the surrounding ground and noise due to impacting. A small pile driving analyzer (PDA) was composed using straingages and Hopkinson bar which is measuring force signal and pile-head velocity. The hammer cushion (cap block) materials used for the model driving tests were commercial Micarta, plywood, polyurethane, rubber (SBR) and silicone rubber. The highest energy transfer ratio was obtained from Micarta in the same soil and driving conditions. Micarta was followed by polyurethane, plywood, rubber and silicone in descending order. The more efficient energy transfer ratio of the hammer cushion materials became, the bigger average noisy (sound) level was found. In addition, Micarta and polyurethane provided bigger bearing capacities than other materials compared in the same soil and driving conditions in which the static loading tests were performed at the end of driving.

요 지

직항타공법에서 사용되는 해머 쿠션의 재질 차이가 항타시 주변 지반의 진동과 발생 소음 및 에너지 전달효율에 미치는 영향을 실내 모형시험을 통해 평가하였다. 항타 과정을 모사할 수 있는 모델 말뚝과 항타시스템 및 스트레인 게이지와 홉킨슨 바(Hopkinson bar)를 이용한 에너지 전달효율 측정장치를 제작, 구성하였다. 해머 쿠션 재질로는 상용의 해머 쿠션재인 Micarta 이외, 현장에서 다수 사용하는 Plywood, Polyurethane, Rubber(SBR), Silicone rubber 등의 5가지 재료를 선정하여 항타시험을 실시하였다. 항타시험결과 쿠션 재료별 에너지 전달효율은 ①Micarta, ②Polyurethane, ③Plywood, ④Rubber(SBR), ⑤Silicone rubber의 순이었다. 또한 에너지 전달효율이 높은 쿠션재료가 음압레벨의 평균치 또한 높은 비례관계를 보였다. 항타 종료후 말뚝 정재하시험을 실시하여 말뚝의 지지력과 축하중 이특성을 비교, 분석한 결과 Micarta와 Polyurethane이 다른 쿠션재료에 비해 높은 지지력 값을 보였다.

Keywords : Energy transfer ratio, Hammer cushion, Model pile, Pile driving

1 정희원, 배재대학교 건설환경·철도공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Env., and Railroad Engg., PaiChai Univ., yujin@pcu.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, (주)나우E&G 대리 (Member, Engineer, Nau E&G)

3 정희원, 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원 (Member, Research Director, Highway & Transportation Research Institute, Korea Highway Corporation)

4 배재대학교 공과대학 전자공학과 부교수 (Assoc. Prof., Electric. Eng., PaiChai Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

직항타공법에 의한 말뚝기초의 시공성 및 지지력 특성은 지반조건, 말뚝재료조건 및 항타장비조건 등의 복합적인 요인에 따라 결정되는 것으로 알려져 있다. 한편 말뚝 타격시 대부분의 말뚝 타입장비는 해머나 말뚝의 손상방지와 균일한 타입 거동 보장을 위하여 적당한 두께의 해머 쿠션 또는 말뚝쿠션 재료를 사용하여야 하며 상당한 내구성 및 내열성이 요구된다. 그러나 국내에서는 아직 충분한 에너지 전달효율, 시공성, 내구성 및 내열성 효과가 검증된 쿠션제품을 사용하지 않고 있는 실정이며 주로 현장에서 쉽게 구할 수 있는 재료를 쿠션재로 사용하고 있다. 이는 말뚝 시공목적상 해머 낙하에너지의 효율적인 전달 즉, 말뚝의 관입성에만 초점을 맞추는 관행에 의해 지반과 말뚝조건에 따른 적절한 해머의 선택이 주 관심사였기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 해머 쿠션재의 기능에 관심을 두고, 해머쿠션의 기본적인 소요조건(고효율의 에너지 전달율, 내열성 및 내구성)을 만족함과 동시에 소음과 진동을 효과적으로 제어할 수 있는 복합쿠션재의 개발 가능성을 고려하여 쿠션재질변화에 따른 말뚝의 거동차이(항타에너지 전달효율 중심)를 모형시험을 통해 분석하고자 하였다. 또한 직항타공법시 발생하는 소음과 쿠션재의 재질특성과의 상관도를 설정하기 위하여 쿠션재질변화에 따른 항타시 발생 소음수준을 측정, 분석하였다.

이와 같은 모형시험을 위해 말뚝 타입의 전체 시공과정을 모사할 수 있도록 소형의 모델 말뚝과 실내 항타시스템 및 에너지 전달효율과 발생소음 측정 장치를 제작, 구성하였다. 모델지반은 현장의 응력조건을 실내에서 근사 재현하기 위하여 가압형 모형토조와 건조된 모래를 이용하여 구성하였다.

말뚝에 전달되는 해머의 타격에너지 E_r 은 항타시스템의 거동평가를 위한 주요 척도이다. 항타에너지는 해머가 말뚝을 타격하는 데 필요한 물리적인 일(W)로 정의할 수 있으며 항타 에너지 산정방법에는 말뚝에 전달되는 힘만을 이용하는 F^2 적분법과 힘과 속도를 이용하는 FV 적분법이 있다. F^2 적분법(Schmertmann과 Palacios, 1979)은 속도와 힘이 비례한다는 비례성의 원리를 적용하여 식 (1)과 같이 힘의 시간 이력을 적분하여 에너지를 산정한다(이우진 등, 2001).

$$E_r(t) = \frac{c}{AE} \int_0^{\frac{2L}{c}} [F(t)]^2 dt \quad (1)$$

여기서, c =말뚝내 파속(wave speed), E =말뚝의 탄성계수, A =말뚝의 단면적, $F(t)$ =시간에 따른 힘의 이력. FV 적분법(Sy와 Campanella, 1991)은 말뚝에 하중계(또는 변형률계)와 가속도계를 설치하여 하중계로부터 시간에 따른 압축파의 힘을 측정하고, 가속도계로부터 시간에 따른 압축파의 속도를 측정하여 식 (2)와 같이 적분을 통해 에너지를 산정한다. 여기서 F , v 는 각각 힘 및 속도이며 t 는 경과시간이다.

$$E_r(t) = W = \int_0^{\max} F(t)v(t)dt \quad (2)$$

본 연구에서는 해머 타격시 발생하는 에너지 전달수준의 측정을 위해 Bruno와 Randolph(1999)에 의해 시도된 바 있는 스트레인게이지와 홉킨슨 바(Hopkinson bar)를 사용한 소형 동재하시험 시스템을 구성하였다.

말뚝의 동재하시험시 말뚝 내 한 점에 작용하는 힘은 그 점의 입자 이동속도 (v)에 비례하므로 이를 비례상수 ($AE/c=Z$) 또는 임피던스(impedance)라 하며 이를 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 따라서 변형률과 가속도를 측정하면 독립적인 힘으로 변환시킬 수 있다.

$$F = \left(\frac{AE}{C}\right)v \quad (3)$$

에너지전달율(ETR; Energy Transfer Ratio)은 이론 낙하에너지($E_t = W(\text{램머무게}) \times H(\text{낙하고})$)에 대한 해머 낙하에너지(E_r) 또는 최대 전달에너지(E_{\max})비로 표현되며 아래 식 (4)와 같다.

$$ETR(\%) = \frac{E_r}{W \cdot H} \times 100 \quad (4)$$

말뚝 타격시 발생하는 소음의 크기는 항타시스템, 낙하고(또는 낙하에너지), 지반의 고유진동수, 해머 쿠션 등에 의해 크게 좌우되며 에너지 전달율(ETR)과 밀접한 관련을 갖는다. 따라서 해머쿠션의 재질 및 두께, 항타시스템 및 토질특성 차이에 의한 소음의 발생도와 에너지 전달효율의 차이를 본 연구를 통해 규명하고자 하였다.

2. 모형 항타시험장치의 구성

2.1 모형토조 및 지반의 구성

제작된 모형토조는 높이 1000mm, 직경 740mm의 크기로 토조내 수직압력과 수평압력을 일정크기로 조절할 수 있도록 레귤레이터를 부착하였다. 모형지반은 항타시험 직전 두 가지 크기의 압력수준(①수직압력(σ_v)=10kPa, 수평압력(σ_h)=10kPa, ② σ_v =20kPa, σ_h =20kPa)하에 있는 것으로 가정하여 강사 후 가압하여 조성하였다. 모형지반은 금강모래를 함수비 0.3%이하로 건조시킨 후 10번체를 통과하고 200번체에 남는 시료를 준비하여 조성하였다. 사용 모래는 통일분류법상 SP로 분류되었으며 비중(G_s) 2.64, 평균입경(D_{50}) 0.515mm, 유효입경(D_{10}) 0.163mm, 균등계수(C_u) 3.625, 곡률계수(C_c) 1.475, 전단시험에 의한 내부마찰각(ϕ) 39° 및 강사시 평균 15.4kN/m³의 건조단위중량을 보였다.

2.2 모형 말뚝 및 계측시스템의 구성

항타 대상인 모형 말뚝의 길이가 매우 짧아 항타시 반사파의 파 간섭을 피하기 어렵고 고가속도(high acceleration)를 측정하기가 곤란한 점을 고려하여 파속(wave speed)이 큰 강관($v=5100\text{m/sec}$) 대신 강관 파속의 30%정도($v=1652\text{m/sec}$)인 PVC 재질의 모형말뚝을 그림 1(a)와 같이 제작하여 모든 시험에 사용하였다. 모형말뚝의 크기는 직경(D) 60mm, 두께(t) 4mm, 총길이(L) 700mm로써 말뚝 길이방향으로 소정위치에 변형률 게이지를 7쌍씩 부착하였다.

모형 말뚝에는 그림 1(b)와 같이 Hopkinson bar와 스트레인게이지를 이용하여 가속도계를 대체할 수 있는 시험시스템을 구성·부착하였다. Hopkinson bar는 재질의 밀도가 작은 PVC관을 임의 크기(L=700mm, 폭 W=20mm, 단면두께 10mm인 얇은 직사각형 단면형상)로 잘라 사용하였다. 그림과 같은 Hopkinson bar는 말뚝 두부에 연한 재질의 PVC 띠를 고정하고 항타시 PVC 띠 내부에 발생하는 응력파를 측정함으로써 본 말뚝의 속도신호를 추정할 수 있다.

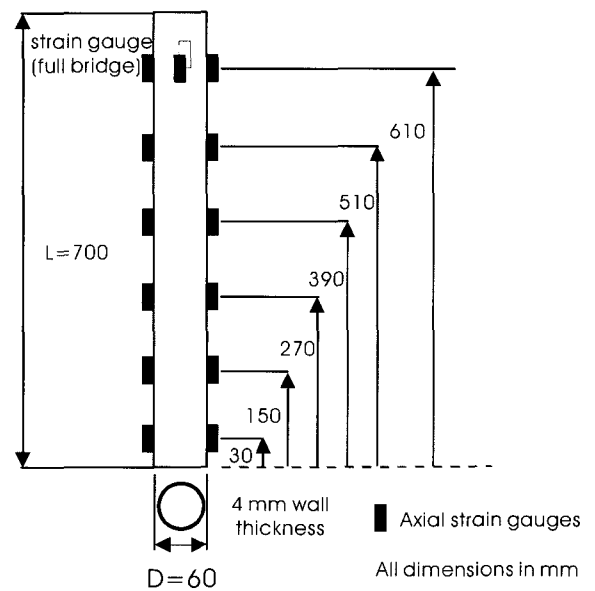
말뚝 항타시 발생하는 동적신호는 통상 힘(F) 신호와 속도(v) 신호로 구분하여 측정한다. 힘 신호를 측정하기 위해 말뚝표면에 폴더형 스트레인게이지(Tokyo Sokki FLA-5-11-1L)를 완전결선(full bridge)의 형태로 구성하

여 부착하였다(그림 1). 이는 모형말뚝과 실물 상용하중계 사이의 임피던스(impedance, AE/c) 차이를 크게 줄여 반사파의 간섭을 배제하기 위함이다.

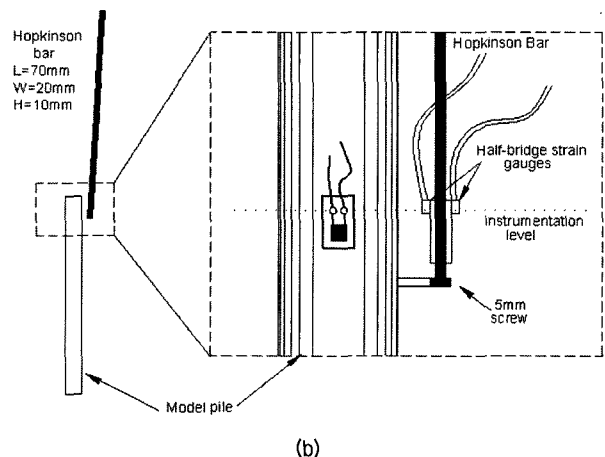
항타 완료후 정재하 시험시 말뚝의 지지력분포를 확인하기 위해 스트레인게이지를 말뚝의 종방향으로 일정 위치에 쌍으로 부착하였다.

사용된 신호수집용 계측시스템은 동적 변형률 증폭기(ST-AM202), A/D 컨버터 및 IO tech사의 동적 신호분석기(WinBook 512 모델-sampling rate=1 μ s) 등으로 구성되며 획득된 신호는 MATLAB 프로그램과 DASYLAB 신호처리용 프로그램을 이용하여 분석하였다. 모형말뚝 및 PVC 띠의 재료특성 및 재원은 표 1과 같다.

Hopkinson bar의 앞·뒤 표면에 쌍으로 부착된 스트레인 게이지로부터 측정된 변형률은 식 (5)의 관계에 의해



(a)



(b)

그림 1. 모형말뚝 및 항타시 가속도 측정을 위한 시험장치의 구성

표 1. 모형말뚝 및 가속도 측정용 PVC 띠의 재료특성 및 제원

	Model Pile	Hopkinson bar
Young's modulus, E(Mpa)	3,870	3,870
Cross-sectional area, A(mm ²)	704	200
Impedance, Z(kNs/m)	1.65	0.47
Wave speed, c(m/s)	1,652	1,652
Return time, t(μs)	740	740

말뚝입자의 속도로 전환된다.

$$v = \varepsilon \cdot c \quad (5)$$

여기서 ε = 측정된 변형률, c = PVC 내 파의 속도로서 $c = \sqrt{E/\rho}$ 이고 ρ = 말뚝의 밀도.

3. 향타시험 및 소음측정

3.1 말뚝 타입시험장치의 구성

토조내 균질한 모래지반을 구성하기 위해 일정 낙하 고를 유지하면서 강사한 후 구속압을 가하였다. 제작된 모형말뚝을 원형토조의 중앙위치에 거치한 후 그림 2와

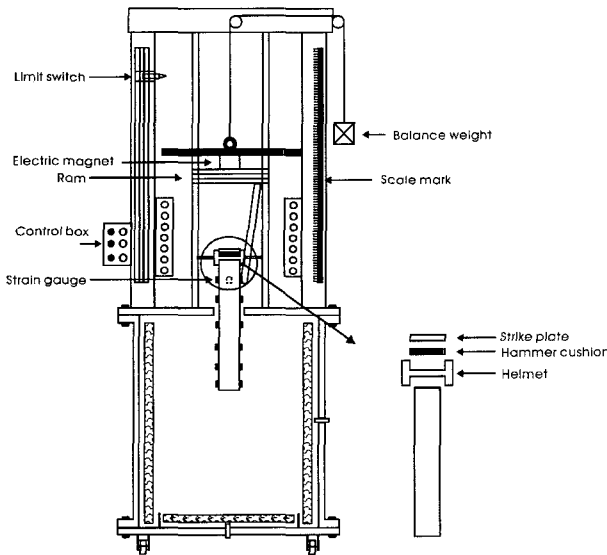


그림 2. 말뚝 타입시험기, 말뚝 및 토조의 구성

표 2. 해머쿠션재료의 특성

Model Name	E(MPa)	Hardness	Layout(Top to Bottom)
Micarta	1,551	-	Steel plate(30mm) + Micarta(20mm)
Plywood	206	-	Steel plate(30mm) + Plywood(20mm)
Polyurethane	138	70°	Steel plate(30mm) + PU-foam(20mm)
Rubber(SBR)	10~100	70°	Steel plate(30mm) + Rubber(20mm)
Silicone Rubber	2.05	50°	Steel plate(30mm) + Silicone(20mm)

같은 향타시험기를 제작하여 말뚝을 타입하였다. 향타는 일정높이에서 램머의 자유낙하 형식을 취하였으며 전자석과 릴레이를 이용하여 일정높이를 항상 유지하면서 반복향타 할 수 있는 컨트롤러를 부착하였다. 낙하시 램머의 무게는 20kgf, 낙하고는 0.3m를 유지하였다. 향타시 관입량과 타격소요횟수를 관입완료시까지 연속 측정하였으며 총 관입목표치는 560mm로 하였다.

3.2 해머쿠션재료

모형 향타시험기를 이용한 향타시험으로부터 해머 쿠션의 재질에 따른 에너지 전달수준, 지지력 특성 및 소음발생 차이를 분석하기 위해 다섯 가지의 해머 쿠션 재료를 선정하였다. 쿠션재료의 재료특성은 표 2(Goble Rausche Likins and Associates Inc., 1998)와 같다. 그림 2의 상세도와 같이 해머쿠션은 strike plate와 말뚝헬멧 사이에 위치한다.

3.3 소음측정 방법

소음(noise)은 공기의 진동에 의한 음파 가운데 가청(20~20,000 Hz)음파이되 바람직하지 못한 소리로 정의할 수 있다(한국건설기술연구원, 1995). 소음의 세기는 dB(decibel)로 나타내며 특정 기준음에 대한 측정음의 상대적 차이로 표시한다. 측정된 음압(P)과 기준음압($P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$)의 상관성은 음압(SPL; Sound Pressure Level)으로 환산하여 식 (6)으로 표시된다.

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (6)$$

측정시 반사음 등 주위의 영향을 배제 즉, 암소음을 제거하기 위해 흡음재가 들어간 격벽을 향타시험기의 전후 좌우 및 시험실 천정의 일정 이격거리에 설치하였다. 다만 완전 또는 반무향실의 조성은 시험소요비용 및 목적상 배제하였다. 소음은 말뚝의 타입초기부터 종료

시점까지 연속으로 측정하였으며 소음계(Ono Sokki사의 적분소음계)는 말뚝두부에 대한 최초 타격위치와 동일한 높이인 지상고 1.78m, 말뚝으로부터의 수평 이격거리 3.0m 위치에 설치하였다.

4. 시험결과 및 분석

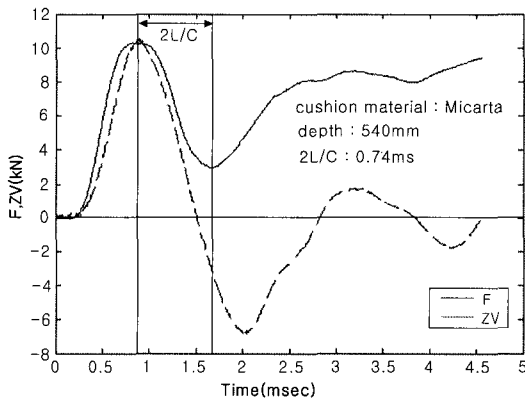
4.1 에너지 전달효율 분석

항타에너지 전달효율(ETR; Energy Transfer Ratio)은 목표 근입깊이 560mm 도달직전 최종 3회 타격시의 평균값을 측정하였다. 따라서 제작된 말뚝 타입시험기와 Hopkinson bar 등의 신호측정시험기를 사용한 말뚝 타입시 측정대상은 ①에너지전달수준, ②최종관입량(set value), ③총타격횟수, ④총관입량, ⑤항타소음 등이다. 항타시, 말뚝에 전달된 충격력에 의해 발생된 힘과 속도 신호를 말뚝머리에 부착한 변형률게이지와 Hopkinson

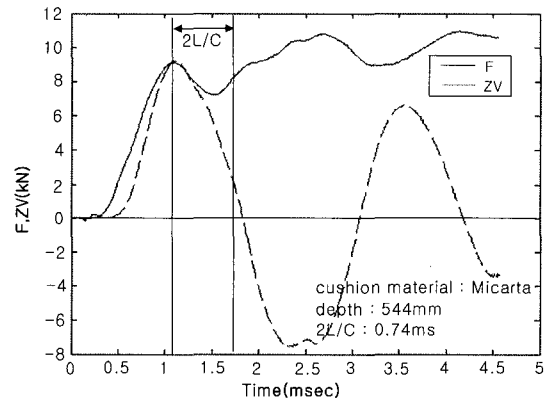
bar로부터 각각 구하고, 이를 FV 적분법 및 F²적분법을 사용하여 에너지 전달효율을 계산함으로써 해머 쿠션재질에 따른 에너지 전달수준의 차이를 비교, 분석하였다. 그림 3은 쿠션재가 Micarta일 경우 구속압에 따른 전형적인 응력과 신호를 도시한 것이다. 그림 4는 Micarta 쿠션재료에 대한 위의 응력과 신호를 피크지점부터 2L/c 지점까지 적분한 총에너지로 표시한 것으로서 적분법(FV 및 F²)에 따라 상이한 에너지효율이 계산된다(토조의 구속압 = 수평, 수직 각 10kPa).

각 적분법에 의한 에너지 전달효율의 측정결과를 표 3에 정리하였다. FV방법의 경우 ETR이 높은 쿠션부터 순서대로 정리하면 ①Micarta, ②폴리우레탄(PU), ③합판, ④Rubber(SBR), ⑤Silicone rubber의 순이었으며 구속압의 크기에 상관없이 동일한 경향을 보였다.

그림 5는 쿠션재료별 에너지 전달효율과 최종관입량(set value)의 관계이며 쿠션재료별 차이가 크지는 않으나 미소하게나마 에너지 전달효율(ETR)이 클수록 최종

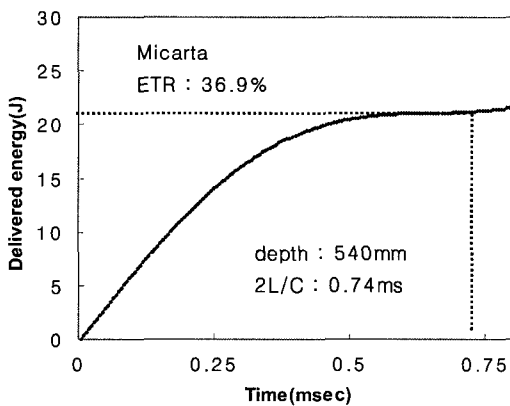


(a) 수평, 수직 구속압 = 10kPa

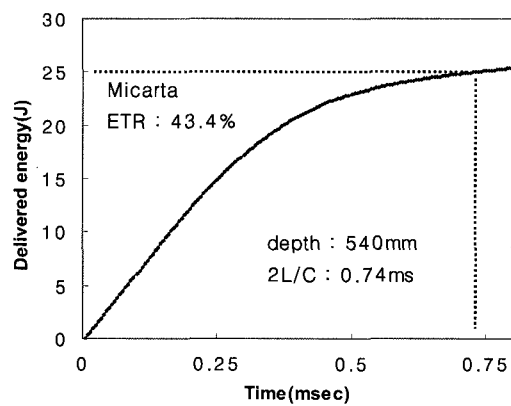


(b) 수평, 수직 구속압 = 20kPa

그림 3. 타격시 응력과 신호(관입깊이 540mm)-Micarta



(a) FV적분법



(b) F²적분법

그림 4. 말뚝에 전달되는 해머의 낙하에너지 비-Micarta(수평, 수직 구속압 각 10kPa)

관입량도 커지는 비례성을 확인할 수 있다. 또한 동일 쿠션재료에서 구속압이 클수록 ETR이 크고 최종관입량(set value)은 감소됨을 확인할 수 있다. 구속압이 10kPa 일 경우 ETR은 최대 37.1%(micarta)~최소 16.9%(실리콘러버)의 분포를 보여 재료에 따라 최대 200%의 차이

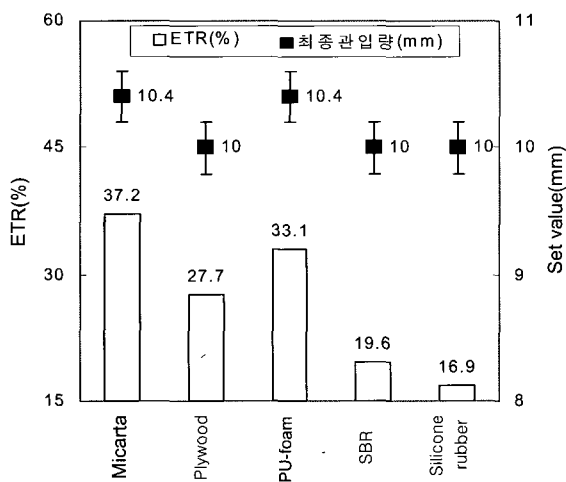
를 보였다. 이와 같은 차이는 구속압을 20kPa로 늘릴 경우에도 동일한 경향을 띠었으나 ETR의 크기에 따른 최종관입량의 상관성은 구속압 10kPa일 때보다 뚜렷이 확인되었다. 최종관입량은 타격 종료시점 최종 5회 연속 타격시의 관입량 평균치를 계산한 것이다. 표 4는 그림

표 3. 말뚝에 전달된 낙하에너지 측정 결과

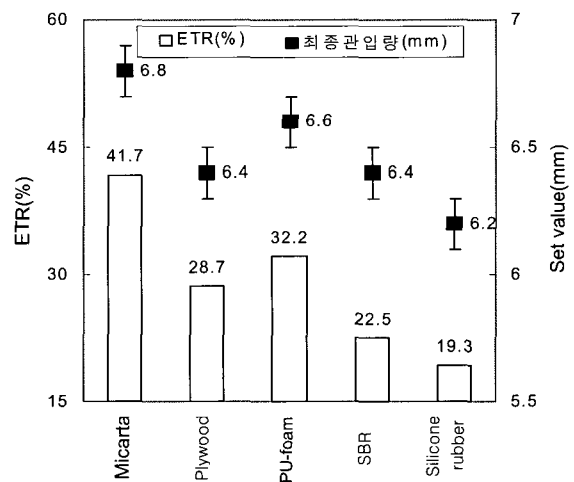
구속압력 (kPa)	쿠션재료	평균에너지 비(ETR), %, ()은 분포범위		측정 횟수
		FV 방법	F ² 방법	
$\sigma_v, \sigma_h = 10$	Micarta	37.2(32.6~42.1)	42.0(36.8~45.7)	3
	Plywood	27.7	31.2	1
	Polyurethane	33.1(29.6~37.8)	30.9(28.3~34.1)	3
	Rubber(SBR)	19.6(17.2~23.8)	27.4(23.5~31.2)	3
	Silicone rubber	16.9(15.1~18.6)	19.4(16.8~21.3)	3
$\sigma_v, \sigma_h = 20$	Micarta	41.7(35.4~49)	63.1(51.4~73.3)	3
	Plywood	28.7(21~33.8)	34.9(23.3~44.1)	3
	Polyurethane	32.2(28.5~37.5)	70.2(61.8~84.5)	3
	Rubber(SBR)	22.5(21.7~23.2)	52.2(50.7~55)	3
	Silicone rubber	19.3(11~24.9)	26.6(14.4~33.1)	3

표 4. 동재하시험 측정결과

구속압력(kPa)	쿠션재료	ETR(%) (FV 방법)	최종관입량(mm)	총타격 횟수	총관입량(mm)
$\sigma_v, \sigma_h = 10$	Micarta	37.2	10.4	33	559
	Polyurethane	33.1	10.4	34	561
	Plywood	27.7	10	34	557
	Rubber(SBR)	19.6	10	34	557
	Silicone rubber	16.9	10	34	556
$\sigma_v, \sigma_h = 20$	Micarta	41.7	6.8	50	558
	Polyurethane	32.2	6.6	48	559
	Plywood	28.7	6.4	50	558
	Rubber(SBR)	22.5	6.4	50	557
	Silicone rubber	19.3	6.2	50	556



(a) 구속압력 $\sigma_v=10\text{kPa}$, $\sigma_h=10\text{kPa}$



(b) 구속압력 $\sigma_v=20\text{kPa}$, $\sigma_h=20\text{kPa}$

그림 5. 쿠션재료별 에너지 전달효율과 최종관입량의 상관성

5의 결과를 정리한 것으로서 최종 항타깊이에 도달하기 전 총타격 횟수는 쿠션재에 상관없이 대동소이함을 알 수 있다. 다만 구속압이 증가함에 따라 총타격 횟수가 증가하였고 최종관입량은 감소함을 알 수 있다.

4.2 지지력

4.2.1 CASE방법에 의한 추정 정적 지지력 비교

본 연구에서 시험에 사용한 모형말뚝은 현장 실대형 말뚝에 비해 크기가 매우 소형이고 제한된 토조 안에서 항타된 것이므로 CASE방법(Rausche 등, 1985; Pile Dynamics Inc., 1996)에 의한 지지력 추정은 정확한 비례성을 구현하지 못하는 한계가 있다. 즉, 신뢰성 있는 지지력 예측은 정확한 F, v파가 측정되었다는 가정 하에서만 추정 가능하지만 본 모형시험의 특성상 말뚝의 초소형화 및 시험데이터의 수집과 해석의 한계로 인한 오차를 감안

하여 CASE 방법에 의한 추정 지지력 분석결과를 표 5에 정리하였다. 모형말뚝의 동재하시험시 CASE 방법으로 계산한 추정 정적 지지력값의 계산시 CASE Damping Factor(j_c)는 0.1로 가정하였다. 분석결과 구속압 10kPa 일 때 Polyurethane을 사용한 말뚝의 정적지지력이 가장 컸으며 Silicone rubber를 사용한 말뚝의 지지력이 가장 작게 계산되었다. 반면 ETR이 가장 컸었던 Micarta의 정적 지지력은 의외로 중간 정도의 값을 보였다. 이와 같은 경향은 구속압이 증가(20kPa)할 때도 동일하게 발견되었으나 재료간 차이는 크게 줄어들었다. 즉, Silicone rubber의 지지력은, 구속압의 배증에 따라 평균 6.32kN에서 두 배 가까운 11.66kN까지 증가하였으나 Polyurethane과 Micarta 및 Plywood등의 지지력은 구속압의 증가에 따른 지지력의 증가비율이 매우 미미하였다.

4.2.2 정재하 시험

항타 종료후 타입장치를 해제하고 정재하 시험장치를 장착하여 정재하시험을 실시하였다. 재하시험은 말뚝 두부에서의 수직 침하량이 말뚝직경(D)의 10%(D/10) 이상 발생할 때 까지 실시하였다. 구속압력 수준 차이와 쿠션 재질차이에 따른 말뚝머리 하중(P) - 침하량(S)관계를 분석하였다. 그림 6과 그림 7은 구속 압력 수준의 차이에 따른 쿠션 재질별 말뚝머리 하중 - 침하량 곡선이다.

쿠션의 재질차이와 이로 인해 관측된 ETR 값의 차이가 정적인 지지력값에도 영향을 미치는지를 재하시험을 통해 평가하였다. P-S 판정법과 Davisson 판정법을 이용해 항복 지지력을 산출하였고 침하량이 말뚝직경의 10%

표 5. 항타시험과 CASE 방법으로 구한 추정 정적 지지력

구속압력 (kPa)	쿠션재료	CASE 방법으로 구한 정적 지지력 (kN)	측정 횟수
$\sigma_v, \sigma_h = 10$	Micarta	11.63(10.3~12.34)	3
	Plywood	13.71	1
	Polyurethane	15.33(14.5~16.36)	3
	Rubber(SBR)	10.24(8.98~10.89)	3
	Silicone rubber	6.32(4.52~9.37)	3
$\sigma_v, \sigma_h = 20$	Micarta	15.08(13.31~16.57)	3
	Plywood	13.18(10.56~13.71)	3
	Polyurethane	15.95(15.12~17.5)	3
	Rubber(SBR)	13.69(13.33~14.1)	3
	Silicone rubber	11.66(9.48~13.01)	3

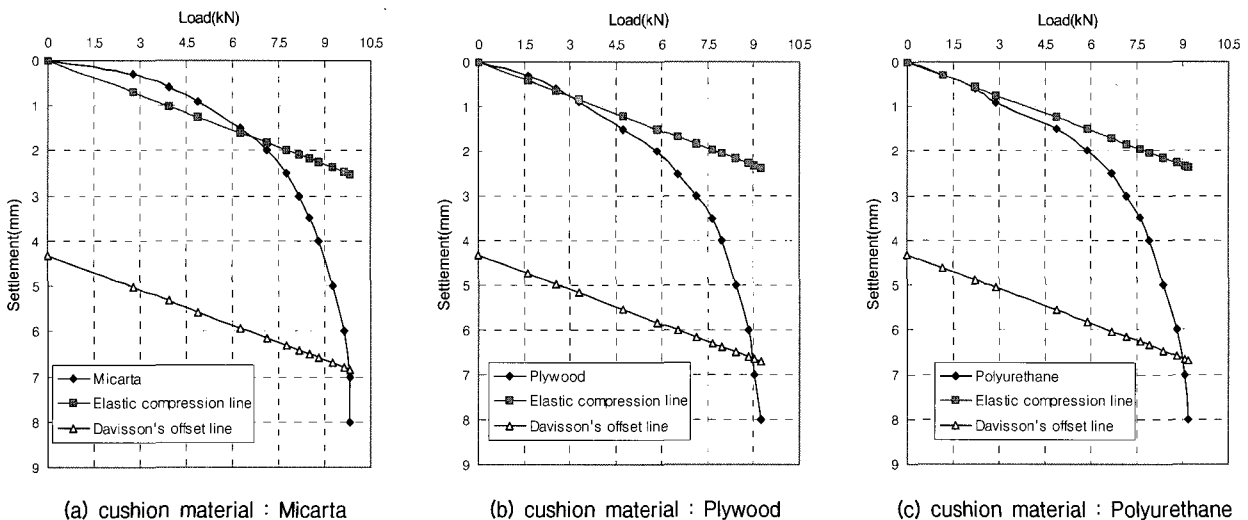
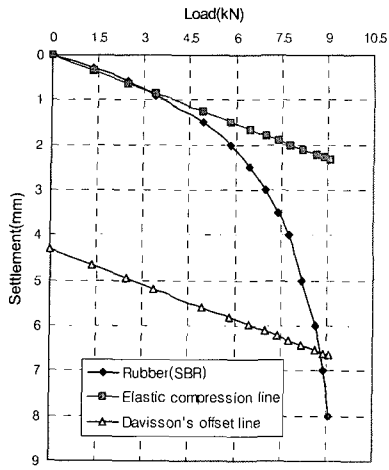
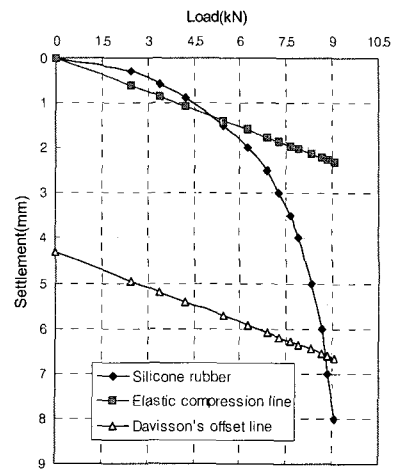


Fig. 6. 말뚝머리 하중 - 침하량 관계($\sigma_v=10kPa, \sigma_h=10kPa$)

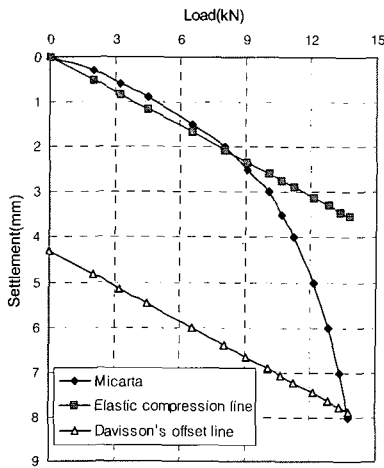


(d) cushion material : Rubber(SBR)

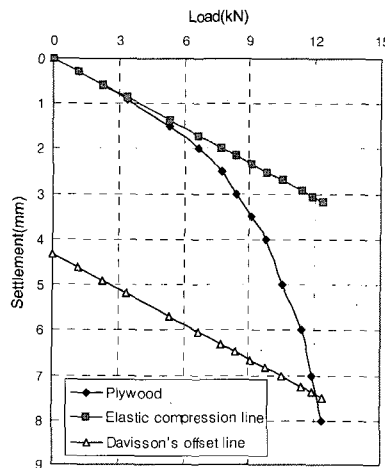


(e) cushion material : Silicone rubber

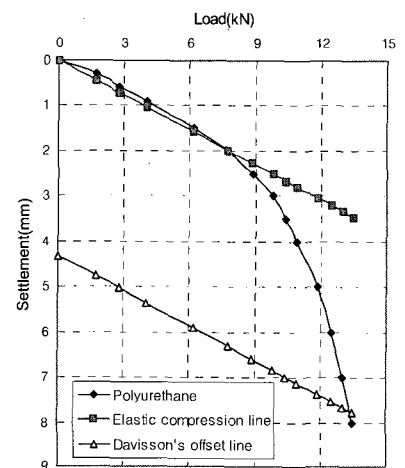
Fig. 6. 말뚝머리 하중 - 침하량 관계($\sigma_v=10\text{kPa}$, $\sigma_h=10\text{kPa}$) (계속)



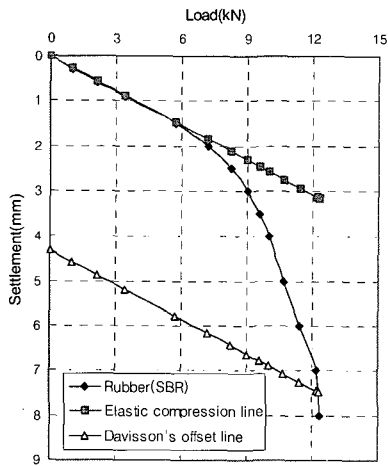
(a) cushion material : Micarta



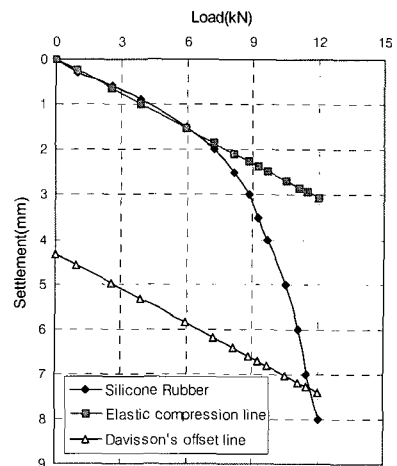
(b) cushion material : Plywood



(c) cushion material : Polyurethane



(d) cushion material : Rubber(SBR)



(e) cushion material : Silicone rubber

Fig. 7. 말뚝머리 하중 - 침하량 관계($\sigma_v=20\text{kPa}$, $\sigma_h=20\text{kPa}$)

에 해당할 때의 재하중을 이용해 극한지지력을 산출하였다. 그 결과는 표 6과 같다. 구속압력의 차이에 상관없이 Micarta, Plywood, Polyurethane의 쿠션재를 사용한 말뚝에서 비교적 항복지지력이 크게 유발되었으나 기타 Rubber(SBR)과 Silicone rubber에 비해 그 차이가 크지 않았다. 다만 말뚝머리의 직경대비 10% 침하에 해당하는 추정 극한지지력에서는 Micarta가 기타 재료에 비해 큰 값을 보였다. 구속압 20kPa에서 정적 재하시험에 의해 측정된 극한 지지력(말뚝머리의 침하량 직경 대비 10% 해당)은 CASE방법에 의해 추정된 지지력 값에 비해 작게는 4.5%(Silicone rubber)에서 크게는 19.4%(Polyurethane)까지 더 작게 평가되었으며 ETR값이 클수록 CASE방법에 의한 정적 지지력 값이 재하시험에 비하여 더 크게 산출되는 경향을 보였다. 이와 같이 쿠션재의 변화에 따라

최종관입량, 총타격횟수, 총관입량의 차이가 크게 차이가 나지 않음에도 불구하고 정재하시험에 의한 지지력의 차이가 나는 이유는 ETR 차이로 인한 토조내 모래의 densification이 상이하야 나타난 현상으로 판단된다. 이와 같은 이유로 인해 ETR이 큰 쿠션재로 항타된 말뚝의 지지력이 크게 나타났음을 알 수 있다.

4.3 소음도

통상 타입되는 말뚝은 근입깊이가 증가함에 따라 소음도가 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다. 이는 타입초기 말뚝의 대부분이 지상에 노출되어 항타시 강관의 울림에 따라 심한 소음이 발생하기 때문이다(한국건설기술연구원, 1995). 본 실험에서는 이와 같은 현상은 발견되

표 6. 정재하시험 결과를 통한 말뚝지지력 산정

구속압력(kPa)	쿠션재료	판정기준	항복하중(kN)	극한하중(kN)
$\sigma_{v,0h} = 10$	Micarta	log P - log S	7.40	-
		Davisson's offset	9.82	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	9.65
	Plywood	log P - log S	7.10	-
		Davisson's offset	8.93	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	8.82
	Polyurethane	log P - log S	7.00	-
		Davisson's offset	8.95	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	8.80
	Rubber(SBR)	log P - log S	6.90	-
		Davisson's offset	8.80	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	8.62
	Silicone rubber	log P - log S	7.00	-
		Davisson's offset	8.74	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	8.64
$\sigma_{v,0h} = 20$	Micarta	log P - log S	9.70	-
		Davisson's offset	13.71	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	12.84
	Plywood	log P - log S	8.30	-
		Davisson's offset	12.11	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	11.39
	Polyurethane	log P - log S	9.70	-
		Davisson's offset	13.35	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	12.51
	Rubber(SBR)	log P - log S	8.00	-
		Davisson's offset	12.30	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	11.42
	Silicone rubber	log P - log S	8.00	-
		Davisson's offset	11.63	-
		침하량이 말뚝직경의 10%인 점	-	11.13

지 않았으며 소음레벨이 말뚝 근입깊이와 재질에 상관없이 65~95dB(A)의 범위 내에서 무분별하게 분포하는 경향을 보였다. 이는 실험이 실내에서 시행되어 반사음과 암소음의 영향을 완전히 배제하기 어려웠기 때문이다. 다만 각 쿠션재료별로 계산된 음압레벨의 평균치는 재료별 차이를 보였으며 음압레벨의 평균치를 크기순서로 나열하면 아래와 같다: ①Micarta, ②Polyurethane, ③Plywood, ④Silicone rubber, ⑤Rubber(SBR)(이상 구속압력 10kPa); ①Micarta, ②Plywood, ③Polyurethane, ④Rubber(SBR), ⑤Silicone rubber의 순(이상 구속압력 20kPa)으로 나타났다. 따라서 대체로 에너지전달효율(ETR)이 큰 쿠션재료가 소음 또한 크게 발생시킴을 알 수 있었다. ETR이 큰 쿠션재료가 탄성계수(E)가 크므로 타격시의 발생 소음 또한 탄성계수에 비례하여 커짐을 알 수 있다. 다만 보다 신뢰성 있는 결과 값을 구하기 위해서는 음의 반사가 없는 자유 음장(free field)에서 측정해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 해머 쿠션의 역할에 초점을 맞추어 쿠션의 재질변화에 따른 항타 에너지의 전달수준차이를 측정하고 이로 인해 말뚝에 미치는 영향을 분석하였다. 가압장치가 부착된 실내 모형토조와 항타장치 및 건조 모래지반을 구성하고 해머쿠션의 재질을 바꾸면서 소형 모델말뚝에 대한 전 항타 시험과정을 모사하였다. 말뚝에 전달되는 항타 에너지는 변형률계와 Hopkinson Bar를 이용하여 동재하시험기에 준하는 측정 장치를 제작하여 구하였으며 CASE 방법에 의한 추정 정적 지지력 값을 산출하였다. 각 말뚝의 항타 종료후 정재하 시험을 실시하여 동일 조건하에서 타입된 말뚝의 쿠션재질 차이에 따른 말뚝의 정적 지지력을 비교·분석하였다. 또한 말뚝 타격시 발생하는 소음과 에너지 전달효율 및 해머 쿠션재료의 재질특성 사이의 상관성을 조사분석하였다. 이와 같은 시험 및 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 구할 수 있었다.

- (1) 모형토조의 수평·수직 구속압을 각 10kPa 및 20kPa으로 차별하여 쿠션재질에 따른 항타 에너지 전달수준을 측정하였다. FV분석법에 따른 쿠션별 에너지 전달효율(ETR)은 ①Micarta, ②Polyurethane, ③Plywood, ④Rubber(SBR), ⑤Silicone rubber의 순이었다. 쿠

션재료별 에너지 전달효율이 클수록 최종관입량(set value)도 커지는 비례 관계를 보였다.

- (2) 쿠션의 재질차이로 인해 발생된 ETR 값의 차이가 정적인 지지력값에도 영향을 미치는지를 재하시험을 통해 평가하였다. 항복 지지력에 있어서는 구속압력의 차이에 상관없이 Micarta, Plywood, Polyurethane의 쿠션재를 사용한 말뚝에서 비교적 정적지지력이 크게 유발되었으나 기타 Rubber(SBR)과 Silicone rubber에 비해 그 차이가 크지 않았다. 다만 말뚝머리의 직경대비 10% 침하에 해당하는 극한 지지력에서는 Micarta가 기타 재료에 비해 큰 값을 보였다. 구속압 20kPa에서 정적 재하시험에 의해 측정된 극한 지지력(말뚝머리의 침하량 직경 대비 10%해당)은 CASE 방법에 의해 추정된 지지력 값에 비해 작게는 4.5%(Silicone rubber)에서 크게는 19.4%(Polyurethane)까지 더 작게 산출되었으며 ETR값이 클수록 CASE방법에 의한 정적 지지력 값이 재하시험에 비하여 더 크게 계산되는 경향을 보였다.
- (3) 쿠션재료별로 계산된 음압레벨의 평균치는 재료별 차이를 보였으며 이를 크기순서로 나열하면 다음과 같다: ①Micarta, ②Polyurethane, ③Plywood, ④Silicone rubber, ⑤Rubber(SBR)(이상 구속압력 10kPa); ①Micarta, ②Plywood, ③Polyurethane, ④Rubber(SBR), ⑤Silicone rubber의 순(이상 구속압력 20kPa)으로 나타났다. 비교적 에너지전달효율(ETR)이 큰 쿠션재료가 음압레벨(SPL)의 평균치 또한 높은 비례관계를 보였다. 보다 신뢰성 있는 결과 값을 구하기 위해서는 음의 반사가 없는 자유 음장(free field)에서 측정해야 할 것으로 판단된다.
- (4) 해머 쿠션재의 변화에 따라 최종관입량, 총타격횟수, 총관입량의 차이가 크게 차이가 나지 않음에도 불구하고 정재하시험에 의한 지지력의 차이가 나는 이유는 ETR 차이로 인한 토조내 모래의 densification이 상이하여 나타난 현상으로 판단된다. 이와 같은 이유로 인해 ETR이 큰 쿠션재로 항타된 말뚝의 지지력이 크게 나타났음을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 이우진, 유재명, 조성민, 류동현 (2001), “표준관입시험의 에너지 전달율 산정방법 비교”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 4권, pp1-4.
2. 한국건설기술연구원 (1995), “경부고속철도 제3공구 교량기초 말

뚝 향타시의 소음 및 진동 영향 평가 연구”.

3. Bruno, D. and Randolph, M. F. (1999), “Dynamic and static load test of model piles driven into dense sand”, *J. of Geotech. And Geoenv. Eng.*, ASCE, Vol.125, No.11, pp.988-998.
4. Goble Rausche Likins and Associates Inc. (1998), *GRLWEAP Users Manual*.
5. Schmertmann, J.H. and Palacios, A. (1979), “Energy dynamics of SPT”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.105, GT5, pp.287-318.
6. Pile Dynamics Inc. (1996), *Pile Driving Analyzer Manual*.
7. Rausche, F., Goble, G. G., and Likins, G. E. (1985), “Dynamic Determination of Pile Capacity”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.3, pp.367-383.
8. Schmertmann, J.H. and Palacios, A. (1979), “Energy dynamics of SPT”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.105, GT5, pp.909-926.
9. Sy, A. and Campanella, R.G. (1991), “An Alternative Method of Measurement SPT Energy”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics*, pp.499-505.

(접수일자 2006. 5. 16, 심사완료일 2006. 11. 25)