

항타공법에 의한 발생 소음 특성 분석 및 축소 모형 실험을 이용한 저소음 말뚝 캡의 설계

°이중화*, 이정권**, 이기홍§, 정승창§

Investigation on Noise Characteristics of Pile Driving Operation and Design of a Low-noise Pile Cap Based on the Scale Model Experiment

°Jong-Hwa Lee*, Jeong-Guon Ih**, Ki-Hong Lee§, Seung-Chang Jeong§

ABSTRACT

Noise radiated from pile driving operation is one of major sources of community noise pollution and thus its operation method is strictly restricted by regulations. Although the drilling method is now used been commonly used in urban areas because of its activity, the benefit of low noise decreases due to high working cost. In the present work, noise characteristics of pile driving operation are carried out. Based on the study result, a low-noise pile cap for driven piles is developed in order to satisfy both the noise level restriction and the economical efficiency. Effects of pile cap are investigated by a scale model experiment, which is focused on the variation of impact force and sound pressure level. The results show a good possibility of noise reduction by an appropriately designed pile cap.

1. 서론

최근 국내 건설업체의 말뚝시공 (pile driving operation)과 관련하여, 강화된 환경기준과 높아진 환경요구문제로 인해 시공에 많은 제약이 따르고 있다. 특히 항타공법은 소음 및 진동에 의한 환경공해의 대표적인 공법으로 생각되어 엄격한 규제가 이루어지고 있다. 이로 인해 비교적 저소음, 저진동 공법인 매입공법 (선굴착공법)을 통해 강관 말뚝 (steel pile)을 시공하고 있으나, 항타공법에 비해 시공 단가가 매우 높고, 토질에 따라 큰 영향을 받는 문제점이 있다. 건설작업 소음 규제 기준에 의하면 항타기의 경우 작업용지 경계로부터 30 m 떨어진 지점에서 85 dB(A)이하의 소음레벨을 요구하고 있는데, 현재 항타공법별 소음레벨의 범위는 표1에 나타난 바와 같다. 최고 소음레벨을 기준으로 유압해머를 사용한 경우 2~3 dB(A), 디

젤해머를 사용한 경우에는 최대 18 dB(A)의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 선굴착공법의 경우 규제치보다 15~22 dB(A) 낮은 소음레벨을 나타내고 있지만, 시공 단가는 항타공법에 비해 15배 이상인 문제점을 안고있다. 따라서, 저비용 공법인 항타공법시 발생하는 소음을 줄일 수 있는 방안이 요구되며, 본 연구에서는 현재의 발생 소음 수준을 측정/분석하고, 이를 통해 항타기용 말뚝캡 (pile cap)을 개발하여 저소음화의 가능성을 확인하고자 한다.

Table 1. Noise level of various operation methods (dBA).

	Diesel Hammer	Hydraulic Hammer	Drop Hammer	Vibro. Hammer	Pre-drilling method
Power	> 4 ton	8 ton	-	>40 kw	-
7 m	115~ 95	105~ 85	93~87	99~ 90	77~72
15 m	110~ 95	98~ 80	90~85	95~81	73~68
30 m	100~ 85	87~ 72	88~82	85~70	70~63

2. 발생 소음 특성 분석

본 연구의 대상인 항타공법에 있어서의 소음원은 크게 항타기의 타격에 의한 충격소음, 강관말

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과 교수

§ ㈜승진강업

뚝의 진동에 의한 방사소음, 항타기소음, 그리고 항타기를 구동하는 구동기에 의한 소음으로 나누어 볼 수 있다. 공법자체의 소음저감을 위해서는 각 소음원의 기여도를 분석하고, 그에 따른 저소음설계가 이루어져야 하지만, 본 연구에서는 항타기의 타격에 의한 충격소음에만 국한하여 이를 말뚝캡에 의해 제어하는 방법을 모색하고자 한다. 이를 위해 실제 작업시 발생하는 소음을 측정/분석하고, 말뚝캡에 의한 소음특성 변화를 분석한다.

2.1. 기준 위치에서의 소음 레벨 및 주파수 특성

그림 1은 기준위치 (말뚝으로부터 30 m)에서 측정된 음압 레벨 (피크 레벨 및 등가 레벨)의 굴착률(%)에 따른 변화를 보여주고 있다. 여기서 굴착률은 최초 강관말뚝의 길이에 대해 지면에 박힌 길이의 비를 나타낸다.

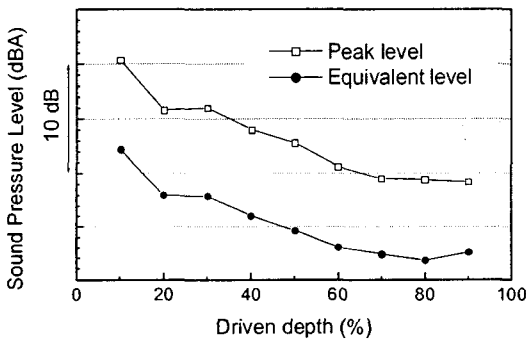


Fig. 1. Measured peak and equivalent overall sound pressure level along the increase of driven depth.

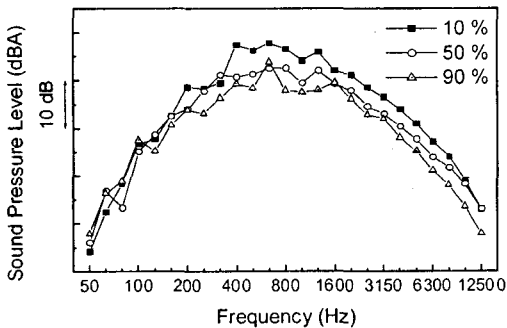


Fig. 2. Variation of 1/3-octave band frequency spectrum of sound pressure level with the increase of driven depth.

한편, 그림 2는 굴착률에 따른 음압 레벨의 주파

수특성을 보여주고 있는데, 특히 400 Hz 이상의 대역에서 그 감소가 뚜렷하다. 이는 충격소음의 일반적인 주파수 특성상 구조물의 방사소음의 기여도가 큰 부분으로⁽¹⁾ 굴착에 따른 말뚝의 표면적의 감소에 기인한다. 400 Hz미만의 영역에서도 약간의 감소를 확인할 수 있지만, 비교적 적은 양이다. 이는 타격 초기에 발생하는 타격음에 해당하며 작업 시 거의 일정한 수준을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 1600 Hz 대역에서는 비교적 소음의 감쇠가 적는데 이는 강관말뚝의 음향방사 효율이 최대인 주파수에 해당한다⁽²⁾. 따라서, 1600 Hz이후의 성분들은 주로 말뚝의 표면진동에 의한 방사소음 성분으로 파악된다.

3. 항타기의 축소 모형 실험

발생 소음의 원인 분석과 그에 따른 대처방안 수립을 위해서는 다양한 작업 조건에서의 발생 소음을 측정/분석하여야 하지만, 작업 공정 및 환경 등을 고려할 때 실제 작업시의 소음 측정은 용이하지 않다. 따라서, 일정 비율의 축소 모형을 이용하여 발생 소음의 특성을 살펴보는 것이 바람직하고, 이를 이용하여 다양한 작업 조건을 설정하고 그에 따른 특성 변화를 관찰함으로써 보다 효과적인 저소음화 대책을 수립할 수 있다. 본 연구에서는 축소모형의 실험 결과를 통해 말뚝 캡 (pile cap)에 의한 소음저감 효과와 이에 따른 항타력의 변화를 주로 관찰해 보았다.

3.1. 모형 제작

본 연구에서는 실제 항타기의 1/10-축소 모형을 이용하여 그 특성을 파악하였다. 그림 3은 축소 모형의 개략도이며 그림 4는 실제 제작된 축소모형 실험장치를 나타낸다. 실제 구조와 비교한 각각의 제원은 표 2와 같다. 측정 조건중 타격수는 단타를 기준으로 반복 측정을 하였고, 낙하 높이 (stroke)는 계측기 및 측정 센서의 유효 범위를 고려하여 20 mm로 하였다. 한편, 실제 작업시에는 말뚝 (pile)과 램 (Ram) 사이에 돌리캡(Dolly cap)과 보조캡을 삽입하여 타격을 하지만, 모형에서는 소음 특성에 관여하는 인자의 자유도를 줄이기 위해 이들을 제외하고 램이 직접 말뚝을 타격하는 것으

로 하였다.

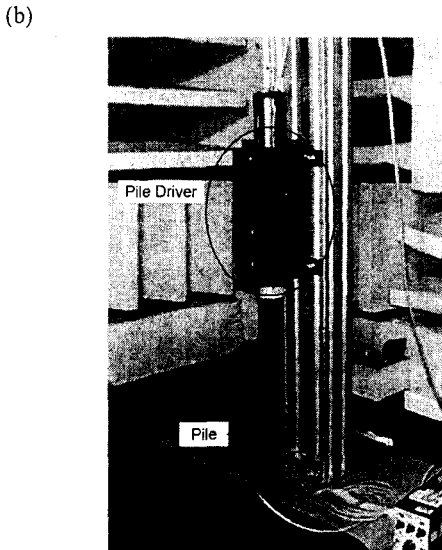
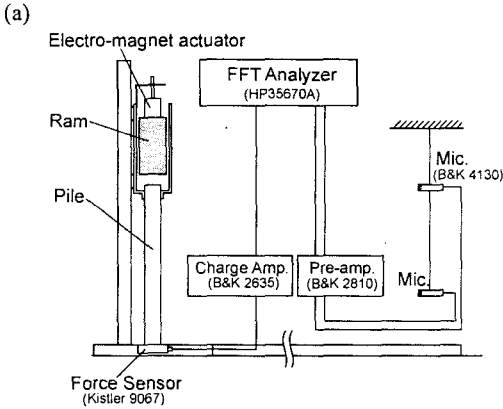


Fig. 4. (a) Schematics and (b) photo of the scale model for a pile driving system.

Table 2. Specifications of 1/10-scale model.

Specification	Actual	Model
Pile Outer dia. (mm)	50.8	5.08
Pile Length (m)	-	0.045
Ram Weight (kg)	7,000	7
Drop Height (mm)	200 ~ 1200	20
No. of Impacts (bpm)	38 ~ 65	-

3.2. 말뚝 캡 (pile cap)

항타기 모형 실험시 말뚝 캡에 의한 소음 저감 효과를 살펴보기 위해 6가지의 모델을 제안하고 이에 따른 소음저감 효과와 항타력의 변화를 살펴

보았다. 제안된 캡의 모델은 크게 세가지 종류로 제진재료/공극재료/강판이 있으며 각 구성은 표 3에 나타나 있다. 한편, 실험에 사용된 모형 중 우레탄 폼이나 고무등은 가장 일반적인 재질의 재료를 사용하였다.

Table 3. Specifications of pile.

Model	Material	Layout (Top to Bottom)
A1	Damping Material	Damping Sheet + Steel Plate (1t)
A2		Damping Sheet×2 + Steel plate(1t)
A3		Rubber (5t) + Steel Plate (1t)
A4	Porous	Felt (5t) + Steel Plate (1t)
A5	Material	PU-foam (6t) + Steel Plate (1t)
A6	Steel	Steel Cap

3.3. 실험 방법

실험은 전무향실에서 수행하였다. 항타력은 그림 3(a)와 같이 말뚝의 하단부에 힘감지기 (Force sensor)를 장착하여 측정하였고, 이때 사용된 감지기의 (Kistler 9067)의 유효 측정 범위는 40 kN이다. 음압의 측정은 1/2" 마이크로폰 (B&K 4130)을 사용하였고, 지표면에서 0.12 m 높이의 지점과 타격점과 같은 높이인 0.41 m의 두 지점에서 측정하였고, 전자의 위치를 기준위치로 하였다. 거리는 측정 공간을 고려하여 말뚝으로부터 1.5 m 위치로 하였는데, 건설 작업 소음 규제에는 '작업 용지 경계로부터 30 m 떨어진 지점'에서 측정하도록 되어 있다. 한편, 실제 항타기는 유압으로 작동되지만, 본 연구에서는 드롭해머를 모사하였고, 램은 전자석을 이용하여 낙하시킴으로써 반복 타격 시 일정한 타격위치와 타격력을 유지하도록 하였다. 항타 모형 실험은 앞서 언급한 바와 같이 단타를 기준으로 각 말뚝 캡에 대해 10회 반복 측정을 하여 이를 평균하는 것으로 하였다.

4. 실험 결과 및 결론

그림 4는 최고 타격력과 기준위치에서의 음압의 변화를 나타내고 있고, 표 4는 이를 말뚝 캡이 없는 경우와 비교하여 타격력의 변화는 백분율로, 음압의 변화는 데시벨 (dBA)로 나타낸다. 여기서 음압은 A-청감 보정 레벨이다. 표 4에서 우레탄 폼이나 Felt등의 공극재료(A4, A5)에 의한 레벨 감소 효과가 가장 크게 나타났다. 하지만, 타격력의 감소도 크게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 항타기

의 본래 용도에 비추어 볼 때 바람직 하지 않다. 실제 말뚝의 굴착은 항타시의 충격량 (타격력×충격시간)에 비례하므로 시간에 따른 타격력의 변화를 함께 고려해야 한다. 그림 5(b)는 공극재료를 사용했을 경우의 타격력을 보여주고 있는데, 타격력의 감소량에 비해 타격시간의 증가가 그리 크지 않고 이는 전달된 충격량이 그만큼 감소함을 의미한다. 또한, 사용된 공극재료의 두께가 모두 5 mm 이상이기 때문에 실제 항타기에 그대로 적용하기는 어렵지만, 강성을 가진 공극재료에 의한 소음 저감 가능성은 확인 할 수 있다.

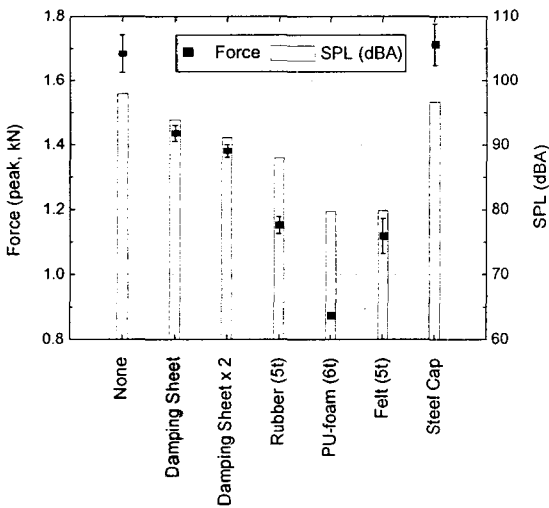


Fig. 4. Variation of impact force and sound pressure level varying the pile cap.

Table 4. Variation of force and sound pressure level.

Model No.	Avg. Impact Force (kN)	Change of Impact Force (%)	SPL (dBA)	Δ SPL (dB)
None	1.684	-	98.0	-
A1	1.437	-14.65	93.9	-4.1
A2	1.381	-17.94	91.2	-6.8
A3	1.152	-31.58	87.9	-10.1
A4	0.874	-33.55	79.8	-18.2
A5	1.119	-48.09	79.9	-18.1
A6	1.713	+1.77	96.7	-1.3

한편, 제진재료의 경우 소음 저감 효과는 공극재료보다 작지만, 타격력의 감소가 크지 않기 때문에 실제 적용시 보다 효과적이라 기대된다. 특히,

A1과 A2를 비교할 때 같은 재료라 하더라도 다중적층 구조를 사용하면 보다 큰 효과를 얻을 수 있다. A1과 A3를 비교했을 경우에 A3 즉, 고무를 사용했을 경우에는 소음 저감 효과 보다는 오히려 타격력의 감소 효과가 더 크게 나타났는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 항타기의 본래 목적에 반하므로 바람직하지 않다. 반면에 강철캡을 사용한 A6의 경우에는 타격력은 증가하였지만, 소음은 오히려 감소함을 나타냈는데, 이는 현재 실 항타기 사용되고 있는 돌리 및 보조캡에 의해 추가적인 소음저감을 얻을 수 있음을 나타낸다.

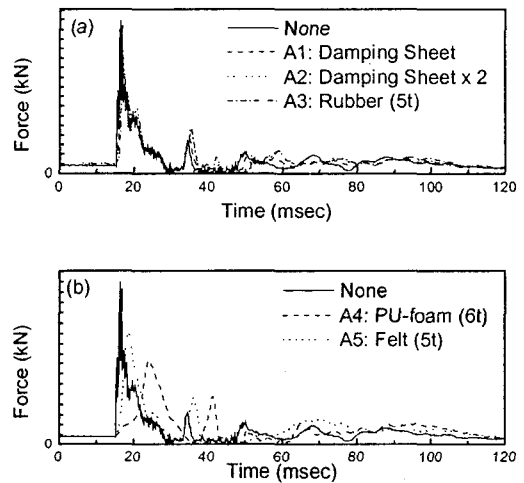


Fig. 5. Variation of force signals by changing cap. (a) Damping materials, (b) porous materials.

후 기

본 연구는 (주)승진강업 및 BK21 Project의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) E. J. Richards, "On the prediction of impact noise, III: energy accountancy in industrial machines," J. Sound Vib. **76**, 187–232 (1981).
- (2) E. J. Richards, "On the prediction of impact noise, II: ringing noise," J. Sound Vib. **65**, 419–451 (1979).