

강널말뚝의 횡방향 진동모델에 대한 매개변수 연구

이승현^{1*}, 김병일², 김주철³, 김정환³

¹선문대학교 토목공학과, ²명지대학교 토목환경공학과, ³삼성물산

Parametric Study on Lateral Vibration Model of Steel Sheet Pile

Seung-Hyun Lee^{1*}, Byung-Il Kim², Zu-Cheol Kim³ and Jeong-Hwan Kim³

¹Dept. Of Civil Engineering, Sun Moon Univ.

²Dept. Of Civil & Environmental Engineering, Myongji Univ.

³Samsung C&T corporation

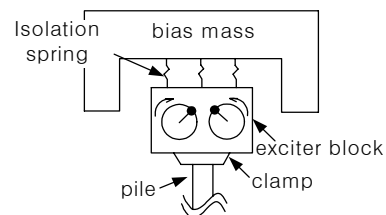
요약 이 연구에서는 진동타입기에 의해 시공되는 강널말뚝의 횡방향진동모델에 대해 횡방향스프링상수를 달리하여 횡방향진동에 따른 에너지손실 및 하중감소계수에 미치는 영향을 살펴보았다. 강널말뚝의 자유길이에 따른 에너지손실과 하중감소계수는 계산에서 고려한 횡방향스프링상수의 크기에 관계없이 강널말뚝의 휨강성보다는 편심거리의 크기에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 그리고 계산에서 고려한 횡방향 스프링상수값, 10000N/m 이상일 경우 말뚝의 자유길이에 따른 하중감소계수가 수렴함을 알 수 있었다.

Abstract Influence of lateral spring constant on energy dissipation and load reduction factor with respect to lateral vibration of steel sheet pile installed by vibratory pile driver. Energy dissipation and load reduction factor varying with free length of steel sheet pile are more affected by eccentricity than flexural rigidity of steel sheet pile regardless of the magnitudes of lateral spring constants. Load reduction factors were converged when lateral spring constant was equal or larger than 10000N/m.

Key Words : Lateral Vibration Model, Lateral Spring Constant, Energy Dissipation, Load Reduction Factor

1. 서론

강널말뚝의 시공에 주로 사용되는 진동타입기의 기본적인 구조는 그림 1에서와 같다. 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 진동타입기는 크게 사하중(bias mass)과 기진블럭(exciter block)으로 구성되어 있으며 기진블럭 내부에 있고 서로 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 편심질량체의 회전운동에 의해 진동타입기의 연직운동이 가능하게 되고 말뚝이 지중에 관입되게 된다. 진동타입기에 의해 시공되는 강널말뚝과 관련해서 주된 관심사는 관입속도(rate of penetration)가 되는데 현재까지 몇몇 예측기법이 개발된 바 있다[1-3]. 이러한 기존의 예측기법에



[그림 1] 진동타입기의 구조

의해 강널말뚝의 관입속도를 예측할 경우 얇은 관입깊이에 대해서 관입속도를 과대하게 예측하게 되는데 Viking[4]은 그 이유를 말뚝의 초기 관입시 지표면 위로의 말뚝부분의 횡방향진동에 의해 진동타입기에 전달되는

본 논문은 선문대학교의 연구년 연구과제로 수행되었음.

*교신저자 : 이승현(shlee02@sunmoon.ac.kr)

접수일 10년 01월 06일

수정일 10년 02월 04일

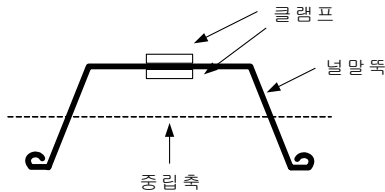
게재확정일 10년 03월 18일

에너지의 상당부분이 손실되기 때문에 설명하고 있다.

이 연구에서는 진동타입기에 의해 시공되는 강널말뚝의 횡방향진동을 모사할 수 있는 모델에 대해 에너지손실에 미치는 인자의 매개변수 연구를 수행하여 그 결과를 관입속도 예측기법에 반영할 방안을 모색하고자 하였다.

2. 횡방향진동모델

강널말뚝의 시공에 주로 사용되는 진동타입기의 기본적인 구조는 그림 1에서와 같다. 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 진동타입기에 의한 강널말뚝 시공시에는 그림 2와 같이 기진블럭 하부에 부착된 클램프로 널말뚝의 복부(web)를 물어 말뚝을 진동시키게 된다.

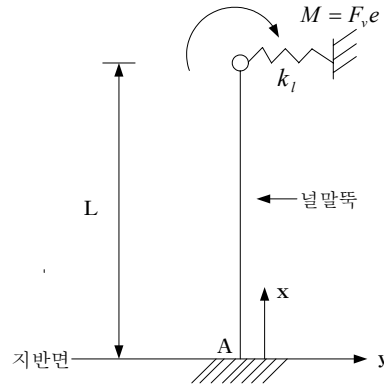


[그림 2] 널말뚝에 대한 진동하중 작용위치

그림 2에서 보는 것처럼 클램프에 의해 연직방향의 진동하중이 가해지는 위치가 널말뚝 단면의 중립축으로부터 편심되어 있으므로 널말뚝 단면에는 연직하중과 더불어 편심모멘트가 작용하게 되고 이 편심모멘트에 의해 널말뚝의 횡방향 진동이 발생하게 된다. 이렇게 널말뚝의 횡방향 진동이 발생하면 진동타입기 일률의 일정부분이 횡방향 진동에너지로 소모되게 된다. 말뚝의 횡방향진동에 따른 에너지소모량을 계산하기 위해 이승현 등[5]은 그림 3과 같은 횡방향진동 모델을 제안한 바 있다. 그림 3에는 널말뚝 시공시 지표면으로부터 널말뚝 머리까지의 자유길이에 해당하는 널말뚝에 작용하는 힘들이 나타나 있다. 그림 3에서 말뚝머리에 있는 횡방향 스프링은 횡방향 진동시 말뚝머리의 횡방향진폭을 제어하기 위한 것이다.

그림 3에서 e 는 널말뚝 단면의 중립축에서 진동타입기력이 가해지는 지점까지의 편심거리를 나타낸다. 그림 3으로부터 강널말뚝의 횡방향진동에 따른 힘에 의해 소모되는 에너지를 일률(work)로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$P_U = \frac{M_e^2 \omega^4 e^2 L}{4EI} \frac{1}{2k_i L^3 + 6EI} (6EI + \frac{k_i^2 L^6 + k_i L^3 (3EI)}{2k_i L^3 + 6EI}) \quad (1)$$



[그림 3] 자유길이를 고려한 강널말뚝의 진동모델

식 (1)을 통해 알 수 있듯이 강널말뚝의 횡방향진동에 소모되는 일률에 영향을 미치는 인자는 진동타입기 및 강널말뚝의 물성값과 말뚝머리에서의 횡방향 스프링상수, k_i 이다.

3. 매개변수 연구

말뚝의 횡방향 진동에 따른 에너지손실을 산정하기 위해 제안된 모델에 대해서 횡방향 스프링상수, 강널말뚝 그리고 진동타입기 종류에 따른 횡방향 에너지손실을 분석해 보고자 하였다.

횡방향 에너지손실에 미치는 횡방향 스프링상수의 영향을 알아보기 위해 4종류의 진동타입기와 3종류의 강널말뚝을 고려해 보았다. 해석에 고려한 강널말뚝은 KS F 4604에 규정되어 있는 3종류인데 그 제원은 표 1과 같으며 길이는 양산길이인 12m로 가정하였다.

또한 해석에 고려한 진동타입기는 표 2에 나타난 4종류를 고려하였다. 그리고 횡방향 스프링정수는 0N/m, 1000N/m, 10000N/m 그리고 100000N/m를 고려하여 강널말뚝 및 진동타입기 조합에 따라 횡방향 스프링정수가 강널말뚝의 에너지손실에 미치는 영향을 살펴보았다.

먼저 진동타입기 CM2-120에 대해서 3종류의 강널말뚝에 대한 횡방향 스프링정수가 에너지손실에 미치는 영향을 살펴보았는데 말뚝의 자유길이 1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 7m, 8m, 9m, 10m 그리고 11m에 대한 계산결과는 그림 4와 같다. 그림 4에서 점선은 표 2에 나타난 모터출력값을 의미하고 K는 횡방향스프링상수를 의미한다.

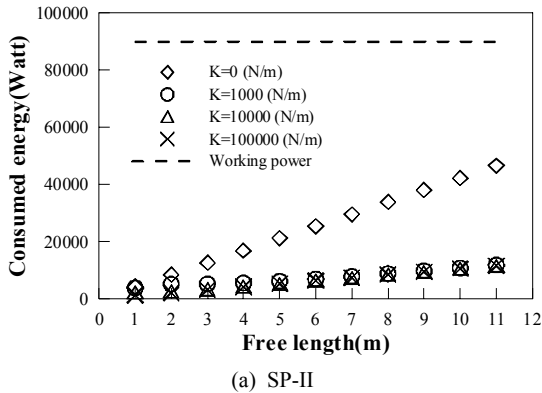
[표 1] 강널말뚝의 제원

Section	Sectional area(cm ²)	Unit weight(kg/m)	Moment of inertia(cm ⁴)	Perimeter(m)	Eccentricity(m)
SP-II	61.2	48.0	1.24	1.14	0.010
SP-III A	74.4	58.4	2.79	1.30	0.023
SP-VL	133.8	105.0	7.96	1.67	0.032

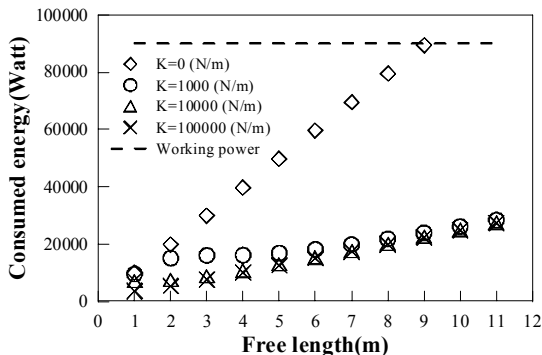
[표 2] 진동타입기의 제원

Model	Eccentric Moment (kg · m)	Driving frequency(Hz)	Dynamic mass of vibrator(kg)	Static mass of vibrator(kg)	Motor output(kW)
CM2-120	49	18.3	5550	1050	90
CM2-160	60	16.3	700	7700	120
EP-120	40	18.3	5100	1200	90
EP-180	57	16.7	9400	1600	135

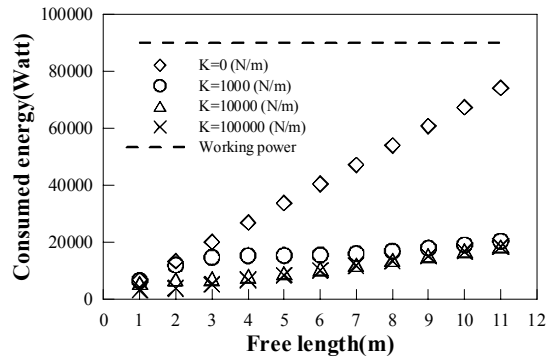
그림 4를 통해 알 수 있듯이 말뚝의 자유길이가 클수록 에너지손실량이 큼을 알 수 있으며 횡방향 스프링정수가 작을수록 에너지손실이 큼을 알 수 있다. 또한 계산에서 고려한 횡방향 스프링정수값이 10000N/m 이상일 경우 말뚝의 자유길이에 따른 에너지손실의 경향이 수렴함을 알 수 있다.



(a) SP-II



(b) SP-III A



(c) SP-VL

[그림 4] CM2-120에 대한 횡방향 에너지손실

세 종류의 강널말뚝에 가해지는 기진력의 크기가 같음을 고려해 볼 때 횡방향 에너지 손실은 말뚝의 휨강성보다는 편심거리의 크기에 영향을 많이 받는다고 볼 수 있다. 강널말뚝 SP-II를 기준으로 하였을 때 SP-III A의 경우 휨강성은 2.25배이고 SP-VL의 경우 휨강성은 6.42배임을 알 수 있고 편심량에 있어서는 각각 2.3배, 3.2배임을 알 수 있다. 강널말뚝 SP-II와 SP-III A를 비교해 볼 때 휨강성 및 편심량의 상대적 비율은 거의 같으나 에너지손실이 SP-III A의 경우에 SP-II의 경우보다 크므로 휨강성의 영향보다는 편심량의 영향을 크게 받는 것으로 보인다. SP-III A와 SP-VL의 경우를 비교해 볼 때 에너지손실량은 SP-VL의 경우가 SP-III A의 경우보다 작음을 알 수 있는데 이 경우 편심량은 SP-VL의 경우 SP-III A에 비해 1.39배 크지만 휨강성은 2.85배로 크므로 편심량의 영향보다는 휨강성의 영향을 크게 받을 때문으로 볼 수 있다. 그림 4(b)에서 횡방향 스프링정수가 0N/m인 경우 자유길이

10m와 11m의 경우 손실에너지량이 모터출력량보다 크게 계산되어 나타나 있지 않다.

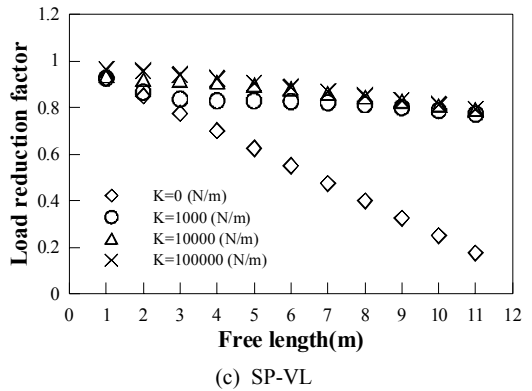
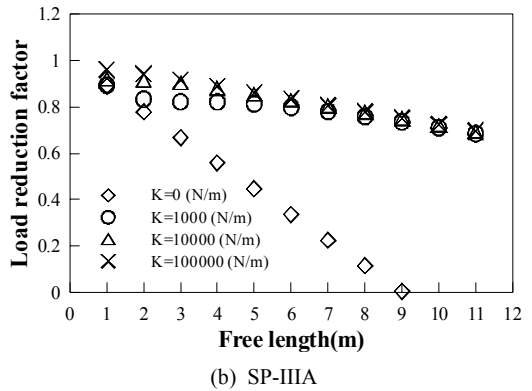
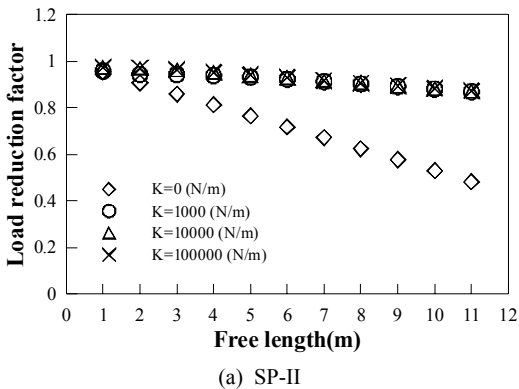
CM2-160, EP-120 그리고 EP-180에 대한 계산결과를 CM2-120의 계산결과와 비교해 볼 때 에너지손실의 경향은 동일하였으며 지면 제약상 그 결과는 나타내지 않았다.

이상에서 살펴본 바와 같이 계산에서 고려한 3종류의 강널말뚝과 4종류의 진동타입기에 대해서 횡방향의 횡방향 진동에 따른 에너지손실은 말뚝의 휨강성의 크기보다는 상대적으로 편심량의 크기에 영향을 많이 받는 것으로 보인다. 또한 진동타입기의 종류에 상관없이 횡방향 스프링상수가 10000N/m 보다 클 경우 말뚝의 자유길이에 따른 에너지손실이 일정값에 수렴하는 것으로 생각된다.

진동타입기에 의해 시공되는 말뚝의 관입속도 예측에 있어 횡방향진동에 따른 에너지손실을 반영하기 위한 방법으로 기진력을 보정해주는 하중감소계수 개념을 사용하였는데 이때 하중감소계수(μ)는 모터의 출력값(P_{motor})에 대해 모터 출력값에서 횡방향 진동에 따른 에너지손실량(P_L)을 감해준 값의 비로서 정의하였는데 다음의 식 (2)와 같다.

$$\mu = \frac{P_{motor} - P_L}{P_{motor}} \quad (2)$$

진동타입기 CM2-120에 대해서 3종류의 강널말뚝에 대한 횡방향 스프링정수가 하중감소계수에 미치는 영향을 살펴보았는데 말뚝의 자유길이가 1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 7m, 8m, 9m, 10m 그리고 11m에 대한 계산결과는 그림 5와 같다.



[그림 5] CM2-120에 대한 하중감소계수

하중감소계수의 정의와 그림 4에 나타난 에너지손실량의 경향을 고려해 볼 때 어느 정도 유추가 가능하지만 그림 5를 통해 알 수 있듯이 말뚝의 자유길이가 클수록 횡방향 진동에 따른 에너지손실로 인해 하중감소계수가 감소함을 알 수 있으며 횡방향 스프링정수가 작을수록 하중감소계수가 작음을 알 수 있다. 계산에서 고려한 횡방향 스프링정수값이 10000N/m 이상일 경우 말뚝의 자유길이에 따른 하중감소계수가 수렴함을 알 수 있다. 또한 세 종류의 강널말뚝에 가해지는 기진력의 크기가 같음을 고려해 볼 때 횡방향 에너지 손실에서 살펴본 바와 같이 하중감소계수는 말뚝의 휨강성보다는 편심량의 크기에 영향을 많이 받는다고 볼 수 있다. 나머지 3종류의 진동타입기에 대해서도 CM2-120과 같은 경향을 나타내었기 때문에 그 결과를 나타내지는 않았다.

4. 결론

강널말뚝의 횡방향진동모델에 대해 3종류의 강널말뚝과 4종류의 진동타입기의 조합에 대해 횡방향스프링정수

를 달리하여 강널말뚝의 횡방향진동에 따른 에너지손실과 하중감소계수의 변화양상을 살펴보았다. 해석에 사용된 하중감소계수는 진동타입기에 의해 말뚝이 관입될 때 에너지손실량을 정량적으로 반영하는 것으로 이를 통해 말뚝의 관입에 소요되는 일률을 합리적으로 결정할 수 있을 것으로 기대된다. 강널말뚝의 자유길이에 따라 강널말뚝의 횡방향진동에 따른 에너지손실과 하중감소계수는 계산에서 고려한 횡방향스프링정수의 크기에 관계없이 강널말뚝의 휨강성보다는 편심량의 크기에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 그리고 계산에서 고려한 횡방향스프링정수값, 10000N/m 이상일 경우 말뚝의 자유길이에 따른 하중감소계수가 수렴함을 알 수 있었다. 진동타입기에 의한 말뚝관입속도 예측기법을 실제 현장시험결과와 관련지를 때 본 연구에서 살펴본 횡방향스프링정수에 따른 하중감소계수의 변화양상을 고려하여 적절한 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

[1] Holeyman, A., "An Analytical Model-Based Computer Program to Evaluate the Penetration Speed of Vibratory Driven Sheet Piles", Research report prepared for BBRI, HYPERVIB1, pp.23, 1993.

[2] Wong, D., O'Neill, M. W. and Vipulanandan, C., "Modelling of Vibratory Pile Driving in Sand", International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 16, No. 4, pp. 189-210, 1992.

[3] Vanden Berghe, J-F., Holeyman, A., "Comparison of two models to evaluate the behavior of a vibratory driven sheet pile", XIth Young Geotechnical Engineers Conference., Geotechnical Engineers and Computers., September 24-27, Madrid, Spain, pp. 60-72, 1997.

[4] Viking, K., "Vibro-Driveability -A Field Study of Vibratory Driven Sheet Piles in Non-Cohesive Soils", Ph.D thesis 1002, Department of Civil and Architectural Eng., Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, pp. 281, 2002.

[5] 이승현, 임남규, 김병일, "큰관입시험결과를 이용한 널말뚝의 관입속도 예측기법 개발", 한국지반공학회 논문집, 제 23권, 제 12호, pp. 53-60, 2007.

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학

김 병 일(Byoung-II Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교토목환경공학과 교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학

김 주 철(Zu-Cheol Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 단국대학교 토목공학과 (공학사)
- 1994년 8월 : 단국대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 단국대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2002년 7월 ~ 현재 : 삼성물산 건설부문 차장

<관심분야>
토질역학, 기초공학

김 정 환(Jeong-Hwan Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1997년 10월 ~ 현재 : 삼성물산 건설부문

<관심분야>

토질역학, 기초공학