

# 동다짐 공법의 개량심도 및 진동영향 예측을 위한 수치해석적 연구

## Numerical Study on the Prediction of the Depth of Improvement and Vibration Effect in Dynamic Compaction Method

이 중 휘<sup>1</sup> Lee, Jong-Hwi  
임 대 성<sup>2</sup> Lim, Dae-Sung  
천 병 식<sup>3</sup> Chun, Byung-Sik

### Abstract

In this study, an applicability by using the FEM was investigated for the prediction of both the depth of improvement and the vibration effect when dynamic compaction method is applied. The region was modelled by the field conditions applying dynamic compaction method and the rigid body force was applied to the dynamic load model. Predicted depth of improvement calculated by the vertical peak particle acceleration was compared and analyzed with an existing empirical equation, and the effect of groundwave by deducing the peak particle velocity from vibration sources was compared and analyzed with the results of another existing empirical equation. The results showed that the prediction of the depth of improvement has similar tendency to practice, and the vibration effect has some differences in a particular section from existing equation, but it could predict the safety distance to some degree. The analyzed results are expected to be basic data for the development of reliability of dynamic compaction design with existing empirical method.

### 요 지

본 연구에서는 동다짐 공법을 적용할 시 개량심도와 진동영향 예측을 유한요소해석을 통해 그 적용성을 규명하였다. 동다짐 공법이 적용된 기존 현장 조건에 따라 지반을 모델링하였으며, 동적하중 모델은 rigid body force를 적용하였다. 개량심도는 심도별 최대 연직 입자 가속도로 예측을 하여 기존 경험식과 비교·분석하였으며, 진동영향은 진동원으로부터 거리별 연직 최대 입자 속도를 도출하여 기존 경험식에 의한 값과 비교·분석하였다. 수치해석 결과, 개량심도의 경우 기존의 경험식과 비슷한 양상을 띄고 있으며, 진동영향의 경우는 기존 식과 특정 구간에서 차이를 보이고 있으나, 어느 정도 소요이격거리를 예측 할 수 있었다. 이들 해석결과는 경험적인 방법과 더불어 동다짐 설계의 신뢰도 향상을 위한 기초적인 자료가 될 것으로 보인다.

**Keywords :** Dynamic compaction method, ADINA, Depth of improvement, Vibration effect, Peak particle velocity

### 1. 서 론

동다짐 공법은 대상 지반에 동적인 하중을 가하여 지

반의 액상화 현상을 유발시킴으로써 지반내 입자의 재 배열에 의한 다짐효과를 이용하는 공법으로 시공성 및 경제성이 우수하여 비교적 널리 쓰이는 지반개량공법

1 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

2 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

3 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

중의 하나이다(천병식, 2001). 이에 액상화 유발이 쉬운 포화된 느슨한 사질토 지반을 개량하는데 효과적이며 (Greenwood, 1983), 많은 양의 즉시침하를 일으킬 수 있는 쓰레기 매립지반과 느슨한 잡석 성토지반에도 이용된다(김영목 등, 1992; Moseley, 1984). 현재까지 수행된 대규모의 동다짐은 200t의 중추를 사용하여 40m 높이에서 낙하시킨 예가 있으며, 이보다 적은 규모의 동다짐 공법이 도처에서 수행되었고 성공사례가 많이 보고되고 있다(건설교통부, 1999).

동다짐 공법의 설계에 있어서 지반개량심도의 결정은 중요한 요소이나 지반의 동적인 특성을 완전히 이해하기 어렵고 불확실 요소도 상당히 많으므로 시뮬레이션 하여 예측하기에는 많은 어려움이 따른다. 이에 사실상 현재까지 주로 Menard(1975)가 제안한 경험식에 의존하고 있으며 반복되는 시험시공을 통해 수정·보완하여 개량심도를 결정하는 실정이다. 또한, 공법 특성상 지반에 큰 충격을 가하게 되므로 작업 지역 주변에 소음과 진동을 유발하여 주변 구조물 등에 큰 손상을 줄 수 있어 진동영향에 따른 검토가 필요하다.

한편, 국내에서는 이승원 등(1996)이 동다짐 시공을 위한 원지반 상태의 분석, 설계, 동다짐 효과의 검증 등의 데이터베이스를 구축한 전문가시스템을 개발하였고, 나영목(1997)은 동다짐 시공 사례를 이용하여 중추의 동적 거동 및 충격시 과잉간극수압 변화를 규명하였다. 또한 천병식(2001)은 동다짐 공법을 적용한 매립지반에서 발생하는 진동을 측정·분석하여 동다짐 시공이 주변 구조물에 미치는 영향을 검토한 바가 있다. 국외에서는 Chow 등(1992, 1994)에 의해 1차원 진동 방정식에 기초하여 현장데이터와 반복적으로 비교를 한 동다짐 수학적 모델이 연구된 바가 있으며, Pan 등(2002)은 동하중 모델링을 비교·분석하여 동다짐의 개량심도와 진동영향을 예측한 바 있다. Ali 등(2010)은 포화입상토 지반에 적용된 동다짐 공법에 대해 완전 연동 수리-역학 유한 요소 코드(fully coupled hydro-mechanical finite element code)를 이용하여 포화도가 증가할 때에 개량구역이 줄어드는 것을 수치학적으로 연구하였다.

그러나 국내에서는 지반의 종류에 따른 개량효과, 실측을 통한 진동영향 등 경험적인 결과만을 제시하는 동다짐에 대한 수치해석 연구는 아직 진행된 바가 없다. 따라서 경험적인 설계와 더불어 수치해석으로 동다짐의 신뢰도 향상을 정립시키기 위한 기초적인 연구가 필요하며, 이러한 수치해석적 연구를 통해 지반의 다짐을

진동에 의한 응답으로 더 정확한 이해를 제공해 줄 것이라 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 유한요소 범용해석 프로그램인 ADINA ver.8.3을 사용하여 첫째, 현장 조건에 따라 지반을 모델링하고 낙하 높이별로 동적하중을 적용하였으며, 둘째, 개량심도는 수치해석 지반의 연직 최대 입자 가속도를 도출하여 기존의 Menard(1975)의 경험식과 비교·분석을 하였고 셋째, 진동영향 평가를 위해 진동원으로부터 거리별 최대 입자 속도를 도출하여 Mayne(1985)식과 비교·분석을 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 동다짐의 개량원리

동다짐 공법은 액상화지반, 연약지반 등 충격을 가하여 지반을 소정의 심도까지 강제 다짐시키는 개량공법이다. 지반의 종류에 따른 충격하중이 적용되면, 점성토와 같은 지반의 경우 과잉간극수압이 발생하여 순간 지반이 연약화되나 간극수압의 소산으로 유효응력이 증가하여 전단강도, 탄성계수가 증가하게 되며, 사질토와 같은 지반의 경우 충격에 의해 한계간극비 이하로 다져진동 시 유동화 및 액상화를 방지 할 수 있다.

동다짐에 의한 진동은 그림 1과 같이 P파, S파, R파가 복합적으로 발생한다. 첫 번째로 도달되는 파인 P파(primary wave ; 압축파)는 간극수압이 증가되어 입자를 이완 시키며, 두 번째로 도달되는 파인 S파(secondary wave ; 전단파)는 입자를 조밀한 상태로 재배열 한다. 그리고 세 번째로 도달되는 파인 R파(rayleigh wave ; 표면파)는 일종의 전단파와 비슷하나 지표부근에서 전파되는 표면파이다.

### 2.2 개량심도결정

개량심도와 1회 타격당 에너지의 관계식은 Menard

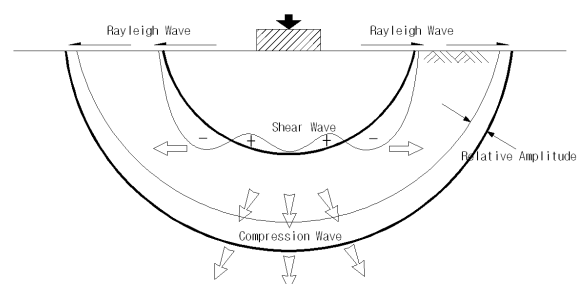


그림 1. 동다짐에 의한 충격파의 전파형태(Gambin, 1984)

(1975)가 제안한 것으로 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$D = \alpha \sqrt{WH} \quad (1)$$

여기서,  $D$  : 개량심도(m)  
 $W$  : 중추의 무게(ton)  
 $H$  : 중추의 낙하고(m)  
 $\alpha$  : 개량심도 계수

개량심도 계수  $\alpha$ 는 지반의 종류 및 경험적인 자료에 따라 0.3~1.0 사이의 값을 가진다. 일반적으로 사질토 지반에서는 0.4~0.6, 쇄석 및 자갈 지반에서는 0.5~0.7, 폐기물 지반에서는 0.3~0.5 정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있으며, 각각의 계수는 포화지반보다는 건조지반이 비교적 일치하는 경향을 보인다(이봉직 외, 2005).

### 2.3 진동영향 평가

일반적으로 동다짐 시에 발생하는 진동은 말뚝 향타 및 암반 발파의 진동과는 다르게 진동수가 약 10Hz 정도로 알려져 있다(Mayne, 1985). 이러한 낮은 진동수는 보통 구조물의 공진 진동수와 유사한 범위이다. 공진상태에서 구조물은 동일한 진동에너지에 대하여 그렇지 않은 경우보다 훨씬 큰 진폭으로 운동을 하게 되므로 구조물이 위험하게 될 수 있다.

지반진동에서 피해정도를 규정하는 요소로서 진동속도를 기준으로 하며, Mayne(1984)이 진동시 다짐에너지

에 따라 입자속도( $V$ )를 다음 식 (2)와 같이 제안하여 대략적인 값을 추정할 수 있다.

$$V = 24.16 \times \left[ \frac{D}{\sqrt{E}} \right]^{-1.26} \quad (2)$$

여기서,  $V$  : 최대입자속도(mm/s)  
 $D$  : 진동원으로 부터의 거리(m)  
 $E$  : 1회 타격당 다짐에너지(t·m)

한편, 구조물에 미치는 영향을 진동허용기준으로 나타내고 있지만 각 나라와 여러 학자에 의해 상이한 차이가 있다. 그러나 현재 독일의 진동허용기준인 DIN4150이 진동속도와 진동수의 관계가 신뢰성이 가장 높은 관계로 우리나라 서울·부산 지하철 등 진동허용기준도 이를 근거로 마련하고 있는 실정이다. 표 1은 독일의 DIN4150 진동속도 및 진폭의 허용치이며, 동다짐에 의한 진동은 앞서 말하였듯이 저주파인 10Hz이하를 기준으로 하도록 한다.

## 3. 수치 해석

### 3.1 대상 지반 및 해석 조건

본 연구에서는 느슨한 매립지반의 동다짐 공법의 개량심도 및 진동영향에 대한 예측을 위하여 류용렬 등(2010)의 논문을 참고로 하여 대상 지반의 물성을 표 2와 같이 산정하였다.

해석 조건은 표 3에서 보는 바와 같이 20t의 중추를

표 1. 진동속도 및 진폭의 허용치(DIN4150, 1992)

구분	진동속도(mm/s)			최상층부의 천정
	<10Hz	10~50Hz	50~100Hz	모든 진동수
산업 시설용 구조물 등	20	20~40	40	40
주택, 아파트 상가	5	5~15	15~20	15
문화재	3	3~8	8~10	8

표 2. 해석에 사용된 지반의 물성치

단위중량 ( $kN/m^3$ )	마찰각( $^\circ$ )	팽창각( $^\circ$ )	점착력 (kPa)	탄성계수 (MPa)	포아송비
18.5	28	0	0	20	0.30

표 3. 해석 조건

흙의 종류	중추의 크기(D×H)	중추의 무게	낙하 높이
느슨한 사질토	4m×1m	20t	12, 14, 16, 18, 20m

사용하여 낙하높이 범위(12~20m)를 적용하였다. 또한 해석방법은 비교적 큰 step size와 해석에 있어서 정확도가 높은 장점을 지니며, 일반적으로 Mohr-Coulomb에 적용 가능한 시간함수로 해를 구하는 dynamic-implicit로 하였다.

### 3.2 지반모델링

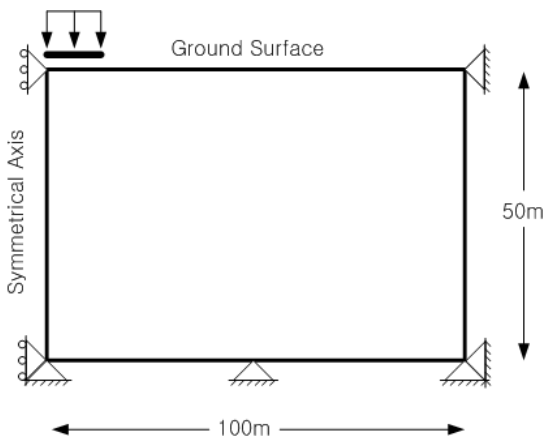
지반은 2D-Soild 요소로 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 비교적 해석수행이 빠르고 넓은 지반을 표현하는데 있어서 효율적인 axis-symmetrical를 사용하였으며, 경계조건은 축을 따라서는 수평방향에 대해서 구속하고 바닥 경계선과 우측 경계선은 수직, 수평방향에 대해서 구속을 시켰다. 모델링 지반이 연약하고 동다짐 충격이 비교적 커서 좁은 해석 영역에서는 수렴이 잘 되지 않는 경향을 보였는데, 이를 해결하기 위해 축 중심에서 표면을 따라 기존 10D(D=중추의 직경)에서 25D로 영역을 넓혀 모델링하였다. 또한, 심도가 낮을 시 동적하중에 의해 소정의 압축파가 흡수되지 않고 경계면으로부터 반사가 되는 경향을 나타냈는데, 이는 입자가속도 산정 시 큰 영향을 끼치는 것으로 판단되어 깊이  $12\frac{1}{2}D$ 까지 해석 영역을 확대하였다. 그림 2(b)는 해석에 사용된 유한 요소망으로 결과 값의 정밀도를 높이기 위해 중추의 0~2D 부근에서 조

밀하게 요소를 구성하였으며, 지반과 중추가 만나는 부분을 각각 flexible contact 요소와 rigid contact 요소로 각각 구성하여 낙하에 의해 지반에 crater가 생겨 최종 수렴에 의해 해석이 종료되도록 하였다.

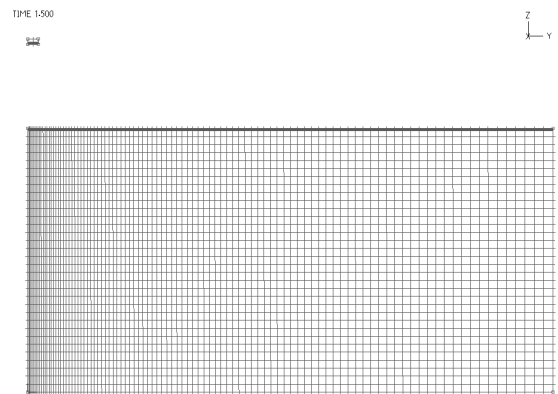
### 3.3 동적하중 모델링

Pan 등(2002)이 제안한 동적하중 모델링인 force-time plot load는 실제 동다짐에 의한 매질에서의 탄성파의 전달이 감쇠 반 sin파(Scott 등, 1975) 또는 정규분포곡선(Krogh 등, 1997)과 흡사한 모델링으로, 해석에 있어서 비교적 효율적인 동적하중의 방법임에도 불구하고 질량체의 충격속도에 기인한 rigid body force와 비교하였을 때, crater의 크기는 실측보다 작은 경향을 나타내나 개량심도는 경험식(Menard식, 1975)보다 과대하게 예측되어 rigid body force보다 적용성이 떨어지는 것으로 나타났다. 다음 표 4는 Pan 등(2002)에 의한 force-time plot load와 rigid body force의 동적하중 모델링 비교를 나타내었다. 본 해석에 사용된 동적하중은 실측 및 경험식에 비슷한 경향을 나타낸 기존의 연구 결과에 따라 질량체의 충격속도에 기인한 rigid body force를 사용하였다.

본 해석에서 중추는 동다짐을 모사하기 위하여 지반과 동일하게 axis-symmetrical로 모델링하였으며 탄성체



(a) 모델링 개요



(b) 유한 요소망

그림 2. Axis-Symmetrical 유한 요소 모델

표 4. 동적하중 모델링 비교

동적하중 모델링	crater 깊이	개량심도	진동영향 평가
force-time plot load	실측보다 과소예측	경험식보다 과대예측	실측과 비슷
rigid body force	실측보다 과소예측	경험식과 비슷	실측과 비슷

로 해석을 하였다. 표 5는 중추에 입력된 물성치로, 초기 조건으로써 낙하높이에 따른 속도와 중력가속도를 입력하였다.

#### 4. 수치해석 결과 및 분석

##### 4.1 개량심도

Pan 등(2002)이 연구한 바와 같이 진동에 의해 발생

한 P파의 확산과 감쇠에 따라 입자 교란의 큰 징후가 2g 영역의 상부에서 일어나는 것으로 이 구역이 유효개량심도로 판단하였다. 따라서, 그림 3은 본 해석의 대표적인 예로 무게 20t, 낙하높이 12m일 때 time step별 연직 입자 가속도의 확산 분포도를 보여주고 있으며, 진동 원으로부터 축을 따라 타원형 방사상으로 퍼져 나가는 것으로 나타났다. 한편, 지표면방향보다 깊이방향으로 더 조밀하고 빠른 확산을 보이는 것으로 나타났는데, 이

표 5. 해석에 사용된 중추의 물성치

단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (GPa)	포아송비	초기 조건	
			중력가속도(m/s <sup>2</sup> )	중추의 속도(m/s)
100	200	0.15	9.81	15.3~19.8

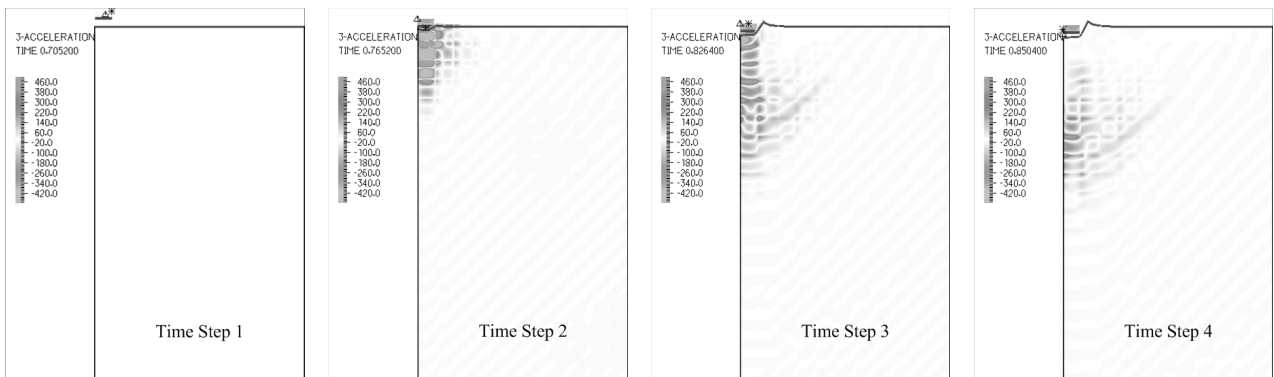


그림 3. 최대 연직 입자 가속도의 time step별 확산 분포도(무게 20t, 낙하높이 12m)

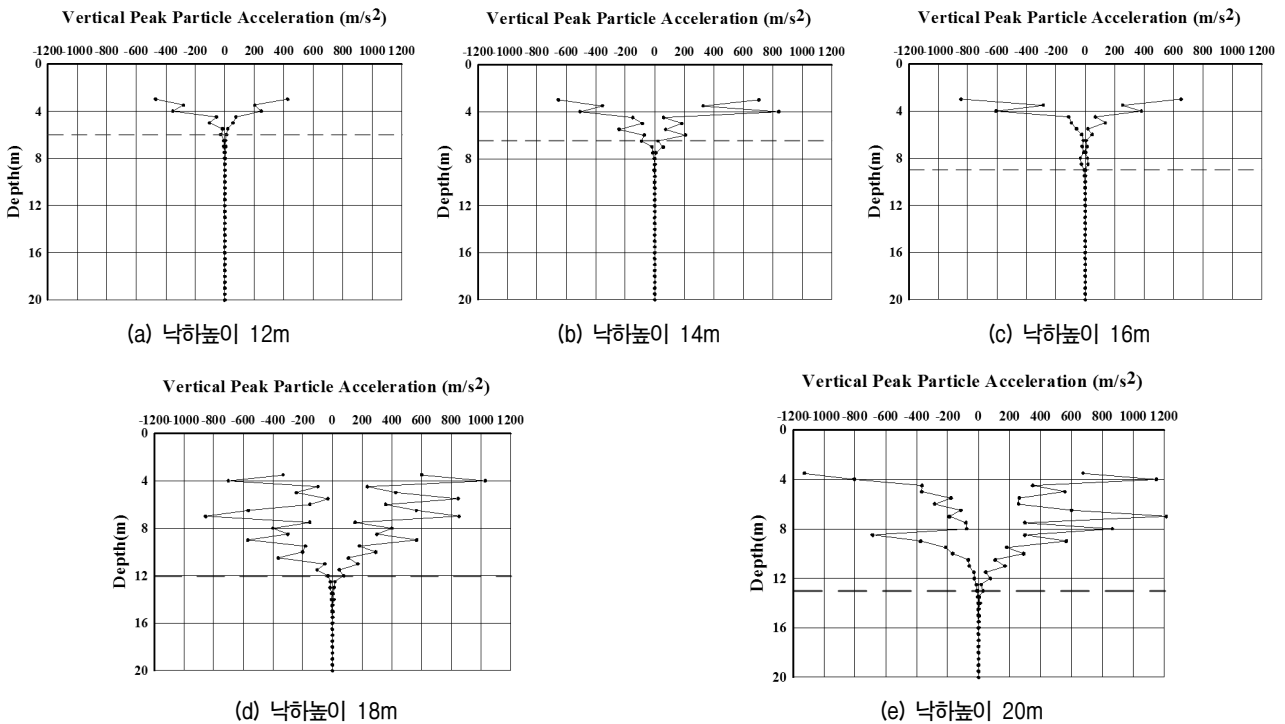


그림 4. 낙하높이별 최대 입자 가속도

것은 동다짐에 의해 발생한 다짐에너지는 진동원으로 부터 수직축 방향으로 최대가 일어나는 것으로 판단할 수 있다. 또한 이러한 연직 입자 가속도의 확산 분포도를 통해 유효개량심도(2g, 중력가속도) 분포 구역을 수치로 나타내어 원형상의 개량구역을 예상할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 4는 모델링된 지반의 수직축을 따라 낙하높이별 연직 최대 입자 가속도이다. 낙하높이가 높아질수록 최대 입자 속도의 분포가 깊어짐을 알 수가 있었는데, 낙하높이가 12m일 때는 약 6m, 14m일 때 7m, 16m일 때 8.5m, 또한 18m일 때 12m, 20m일 때, 13m까지 2g(중력 가속도의 두배)이상의 입자 가속도를 가지는 것을 알 수 있었다.

표 6은 낙하높이별 최대 입자 가속도에서 2g에 대한 심도로 예측된 유효개량심도를 보여주며, 낙하높이가 높아질수록 유효개량심도는 더 깊어지는 경향을 나타낸다. 또한 전체적으로는 느슨한 사질토지반을 동다짐 공법을 적용하여 개량함에 있어서 해당 낙하높이별(12m~20m) 심도 6~13m 분포로 예측할 수가 있었다.

앞서 말한 바와 같이 낙하높이가 높아짐에 따라 유효개량심도가 깊어지는 선형적인 추세를 보 이는데, 그림

표 6. 높이별 예측된 유효개량심도

낙하높이(m)	유효개량심도(m)
12	6
14	7
16	8.5
18	12
20	13

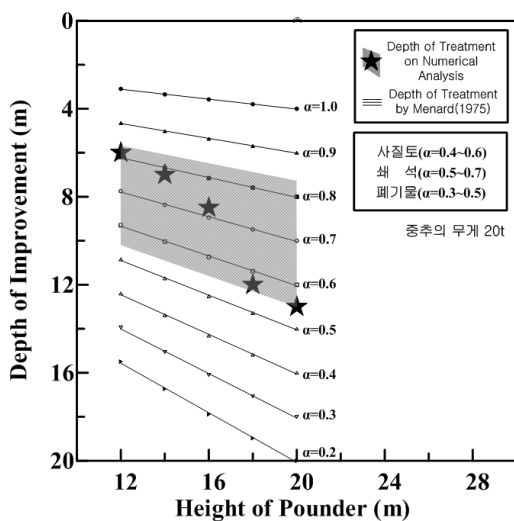


그림 5. 개량심도 비교

5에서 보는 바와 같이 타격에너지가 높아짐에 따라 개량심도가 증가하는 기존의 경험식인 식 (1)로 산정하는 구간 내에 분포하는 것으로 나타났다. 이에 개량심도계수 추정을 위해  $\alpha$ 를 0.2~1.0까지 다양한 값으로 나타냈으며, 보는 바와 같이 동다짐 공법이 시공된 느슨한 사질토지반의 경우  $\alpha$ 는 0.55~0.85의 분포를 보였다. 일반적인 사질토가 0.4~0.6인 것을 고려할 때 이보다 넓은 분포의 계수로 표현되고 있으며, 12m~16m 낙하높이에서  $\alpha$ 는 0.7~0.9로 일반적인 사질토 범위를 벗어나는 경향을 보인다. 이에 지반조건에 따른 더 많은 사례를 연구함으로써 하나의 유사성을 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 진동영향 평가

최대 입자 속도의 경우 진동속도의 종방향성분과 연직성분, 횡방향의 합력, 즉 가장 큰 값인 최대벡터속도로 산출되나 그 차이가 미미하고 진동영향을 평가하는데 큰 변수가 되지 않으므로 본 연구에서는 일반적으로 가장 크며 진동피해를 가장 많이 수반할 수 있는 연직성분으로 최대 입자 속도를 산출하였다.

그림 6은 수치해석을 이용한 낙하높이별 최대 입자 속도로, 낙하높이가 높아짐에 따라 최대 입자 속도는 증가하며, 낙하지점으로부터 이격거리별로 감소하는 경향은 뚜렷하다. 이 그림으로부터 DIN4150 진동허용기준에 따른 공법적용 소요이격거리를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 소요이격거리는 낙하높이가 12~20m일 때 일반적인 산업구조물은 최대 27m 이상 이격해야 안전하며, 주택, 아파트의 경우는 약 최대 45m 이상 이격해야 안전한 것으로 나타났고, 문화재의 경우 약 최대 50m 이상 이격해야 안전한 것으로 나타났다.

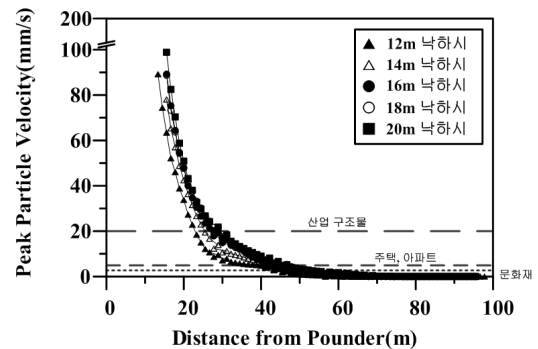


그림 6. 낙하높이별 최대 입자 속도

표 7. Mayne(1985)식에 의한 낙하높이별 진동원으로부터 최대 입자 속도(중추의 무게 20t)

(mm/s)

진동원으로부터 거리	낙하높이				
	12m	14m	16m	18m	20m
10m	41.94	46.22	50.27	54.15	57.86
20m	17.51	19.30	20.99	22.61	24.16
30m	10.51	11.58	12.59	13.56	14.50
40m	7.31	8.06	8.76	9.44	10.09
50m	5.52	6.08	6.62	7.13	7.62

한편, 표 7은 Mayne(1985)이 제안한 식으로 해석조건에 대한 최대 입자 속도를 추정하였으며, DIN4150 진동허용기준에 따라 낙하높이별 상이한 차이가 있으나, 일반적인 산업 구조물의 경우 30m 이격하면 안전한 것으로 나타났고 주택, 아파트, 문화재의 경우는 대부분 50m 이상 이격하여야만 안전한 것으로 나타났다. 단, Mayne 식의 경우 일반 토사 지반, 자갈 지반, 다짐 지반 등 120곳의 현장 사례 분석을 통하여 다짐에너지에 따른 경향을 나타낸 것으로 어느 정도 차이는 있다.

수치해석 결과와 Mayne식에 의해 산정한 최대 입자 속도를 비교하면, 진동원으로부터 0~20m 구간에서는 50mm/s 이상 많은 차이를 보이는 것으로 나타나는데, 이는 균질한 매질로 모델링 된 지반의 경우 현장의 실측값과 비교하여 최대 입자 속도의 저감요소(자갈, 잡석, 기타 지하 매설물 등)가 없기 때문에 이러한 결과가 나타나는 것으로 판단된다. 단, 진동원으로부터 20~50m 구간에서는 약 2~9mm/s 정도 근소한 차이로 보아 소요이격거리는 어느 정도 판단할 수 있을 것이라 생각된다.

이를 종합해 볼 때, Mayne(1985)식의 경우 지반의 종류와 관계없이 다짐에너지에 의해 산정하므로 수치해석 결과와 상이한 차이가 있는 것으로 판단된다. 하지만 동다짐 시 발생하는 진동에 의한 인접구조물의 피해를 방지하기 위해서 수치해석 결과로도 최소한의 소요이격거리를 추정할 수 있다고 볼 수 있다. 이는 천병식(2001)의 기존 현장의 진동측정과 관련된 연구를 보면 Mayne식이 현장측정과 근소한 차이를 보인다고 한 바와 같이, 본 연구에서 수치해석과 Mayne식의 비교에서 값의 근소한 차이는 추후 진동영향 평가를 실제 입자 속도를 측정하기 힘든 시공현장에서 적용할 수 있을 것이라 생각된다. 다만, 이는 더 많은 진동 실측 사례를 연구함으로써 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 보인다.

## 5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용해 기존 현장 조건을 적용하여 동다짐 공법의 개량심도와 진동영향 평가에 대한 내용을 다루었으며, 수치해석 결과를 기존의 경험식과 비교를 하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 동다짐 충격에 의해 지반의 최대 연직 입자 가속도의 확산 분포도를 보면 진동원으로부터 타원형 방사상으로 퍼져 나가며, 수평방향보다 연직방향으로 빠른 확산과 조밀한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 이를 통해 동다짐에 의해 발생한 에너지는 진동원으로부터 수직축 방향으로 최대가 일어남을 알 수 있었다.
- (2) 현장조건에 따른 수치해석 결과에 따라 낙하높이별 연직 최대 입자 가속도를 도출 한 결과, 낙하높이가 증가됨에 따라 연직 최대 입자 가속도의 크기가 증가되며 2g이상의 가속도 분포를 갖는 영역도 깊어짐으로서 유효개량심도를 예측 할 수 있었다.
- (3) 수치해석에 의해 예측된 개량심도를 기존 경험식과 비교 결과, 느슨한 사질토지반은 개량심도계수  $\alpha$ 가 0.55~0.85로 추정할 수 있었다. 이는 기존의 사질토 지반의 계수가 0.4~0.6인 것을 감안할 때, 기존의 연구보다 넓은 계수로 표현되고 있으며, 수치해석만으로 개량심도를 예측하기에는 아직까지 신뢰성이 부족한 것으로 보인다. 이에 다수의 사례분석이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 진동영향 평가의 기준이 되는 진동 시 최대 입자 속도를 현장 조건에 따라 도출한 결과, 낙하높이가 증가됨에 따라 진동원으로부터 최대 입자 속도는 증가하는 경향을 보이며, 이를 DIN4150 진동허용기준에 의해 구조물의 피해에 대한 소요이격거리를 추

정할 수 있었다. 또한 이는 Mayne식에 의한 소요이격거리와 비슷한 것으로 나타났다.

- (5) Mayne식과 수치해석 비교 결과, 최대 입자 속도는 진동원로부터의 거리 0~20m 구간에서 많은 차이를 보였는데, 이는 균질한 매질로 모델링된 지반의 경우 실제와 달리 자갈, 잡석, 기타 지하 매설물 등의 진동 저감요소가 없기 때문에 이러한 현상을 보이는 것으로 생각된다.
- (6) 본 연구에서 수치해석을 이용한 동다짐 공법의 개량심도 및 진동영향예측은 앞서 말했듯이 수치해석만으로 단정하기에는 약간의 오차가 있다. 이에 다수의 사례분석을 통하여 하나의 경향을 정립할 수 있을 것이며, 이러한 노력은 차후 경험적인 방법과 더불어 동다짐 공법 설계의 신뢰도 향상을 위해 기초적인 연구가 될 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부 (1999), 건설부지로서 폐기물 매립지반의 활용 연구 보고서, 한국건설기술연구원, 서울, pp.207-240.
2. 김영목, 이상용, 김만구, 이충환, 신승철 (1992), “폐기물 지반에 대한 동다짐공법 적용의 타당성 분석 및 평가”, *대한토목학회 학술발표회 개요집(1)*, pp.481-484.
3. 나영목 (1997), “동다짐시 동적 계측”, *한국지반공학회 추계 국제 학술 대회*.
4. 이승원, 김명모 (1996), “동다짐공법 설계를 위한 전문가시스템”, *대한토목학회논문집*, 제16권, 3-2호, pp.181-191.
5. 이봉직, 윤준식, 이종규 (2005), “지반조건에 따른 동다짐의 개량심도 평가”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제6권, 제3호, pp.55-61.
6. 류웅렬, 변요셉, 이종범, 김경민, 천병식 (2010), “느슨한 준설 매립지에서 직접기초 설치를 위한 동다짐 공법 설계 사례”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제11권, 제4호, pp.51-59.
7. 천병식 (2001), “폐기물 매립지반에서 동다짐 공법에 의한 진동영향에 관한 연구”, *한국구조물진단학회*, 제5권, 제1호, pp.141-148.
8. Ali, G., Ali P., Hadi, S. (2010), “Numerical study of the coupled hydro-mechanical effects in dynamic compaction of saturated granular soils”, *Computers and Geotechnics*, Vol.110, pp.10-24.
9. Chow Y.K., Yong D.M., Yong K.Y., Lee S.L. (1992), “Dynamic compaction analysis”, *J Geotech Engng.*, Vol.118(8), pp.1141-1157.
10. Chow Y.K., Yong D.M., Yong K.Y., Lee S.L. (1994), “Dynamic compaction of loose granular soils : effects of print spacing”, *J Geotech Engng.*, Vol.120(7), pp.1115-1133.
11. DIN 4150 (1992), Teil 2, Ersschütterungen I, Bauwesen-Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.
12. Gambin, M.P. (1984), “Ten years of Dynamic Consolidation”, *Proceedings of the 8th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.363-370.
13. Greenwood, D.A. & Thomson, G.H. (1983), “Ground Stabilization : Deep Compaction and Grouting”, *ICE Works Construction Guides*, pp.5-19.
14. Krogh, P., Lindgren, A. (1997), “Field measurements during deep compaction at Changi Airport”, Royal Institute Technology(KTH), Stockholm.
15. Mayne, P.W. (1985), “Ground Vibration during Dynamic Compaction”, *Proceeding of a Symposium by the Geotechnical Engineering Div. in Conjunction with the ASCE Convention in Detroit. Michigan*, pp.247-265.
16. Mayne, P.W. & Jones, J.S. & Dumas J.C. (1984), “Ground Response to Dynamic Compaction”, *Geotechnique*, Vol.15, No.1, pp.3-8.
17. Menard, L. & Broise (1975), “Theoretical and practical aspects of dynamic compaction discussion of dynamic compaction”, *Geotechnique* 25, Vol.2, No.1, pp.797-800.
18. Moseley, M.P. (1984), “Ground Improvement”, *Blakie Academic & Professional*, pp.20-39.
19. Pan, J. F., Selby A.R. (2002), “Simulation of dynamic compaction of loose granular soils”, *Advances in Engineering Software*, Vol.33, pp.631-640.
20. Scott, R.A., Pearce, R.W. (1975), “Soil compaction by impact, Ground treatment by deep compaction”, *ICE*, pp.19-30.

(접수일자 2010. 5. 25. 심사완료일 2010. 8. 5)