

## 대형진동햄마다짐의 수치해석적 연구

### A Study on the Characteristics of Mammoth Vibro Tamper by Numerical Analysis

박 양 수<sup>\*1</sup>

Park, Yang-Soo

박 인 준<sup>\*2</sup>

Park, Inn-Joon

김 수 일<sup>\*3</sup>

Kim, Soo-Il

#### Abstract

Effective range of Mammoth Vibro Tamper was studied by numerical analysis instead of empirical method. Numerical analyses were carried out with commercial FEM code, ABAQUS, and verified by comparing the numerical results with field tests of Mammoth Vibro Tamper. Most material properties were evaluated by data from laboratory and in-situ tests. Vertical effective range was estimated by distribution curve of plastic strain energy dissipated through soil layers under dynamic load and these results were in good agreement with field tests. Based on verification, the effects of governing properties of Mammoth Vibro Tamper, such as weight of rotor and size of tamper, and horizontal effective range considered in construction print spacing can be determined by numerical analyses. In addition, vertical effective range can also be determined by Menard's empirical equation using the external work at converging time of plastic strain energy in numerical analysis. This implies that the minimum energy of Mammoth Vibro Tamper for improvement can be determined by Menard's equation.

#### 요    지

경험적 방법에 의존해온 대형 진동햄마다짐의 영향심도를 평가하고자 수치해석적인 기법을 사용하였다. 수치해석에 사용한 프로그램은 범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS이며, 인천 신공항 매립지에서 시험시공한 대형 진동햄마다짐의 자료와 수치해석한 결과의 비교를 통해 검증하였다. 수치해석에 사용한 물성은 현장시험과 실내시험을 통해 구하였으며 영향깊이의 지반이 동적 하중에 의해 변형할 때 소산하는 소성변형율에너지량의 분포를 통해 판정하였다. 수치해석 결과 소성변형율에너지 소산량의 시간에 따른 변화로부터 다짐의 영향깊이 및 수평영향거리를 추정할 수 있었다. 소성변형율에너지 수렴시의 외부에너지를 Menard의 경험식에 적용할 경우 영향깊이를 판정할 수 있음을 알았다. 따라서 Menard식으로부터 영향깊이를 다짐하는데 필요한 최소한의 에너지를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords :** Mammoth vibro tamper, Dynamic load, Plastic strain energy dissipated, Vertical effective range, Horizontal effective range

#### 1. 서 론

대형 진동햄마다짐 공법은 과거부터 일본에서 소규모로 시행되어 오다 근래에 이르러 장비의 대형화와 함께 그 적용이 확대되고 있다. 이 공법은 그림 1.과 같이 대형 진

동기(vibro hammer)와 다짐판(tamper)을 이용한 조합장비로서 큰 진동 에너지에 의하여 사질토 지반을 효과적으로 다질 수 있는 것으로 알려져 있다.

그러나 그 영향심도는 이론적으로 도출되며 보다는 경험적인 방법이 사용되고 있는 실정이며 일반적으로 사용

\*1 동아건설산업(주) 토목기술팀

\*2 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사후 연구과정 (Post Doc)

\*3 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

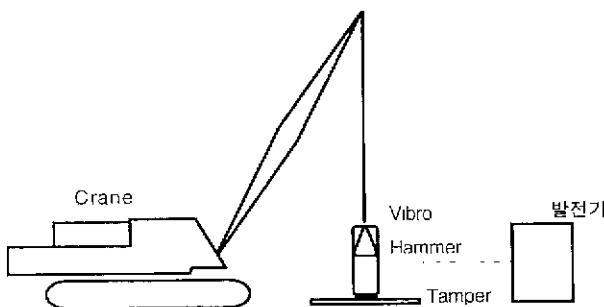


그림 1. 대형 진동햄머다짐의 개요도

되는 영향심도는 1.5m~5.0m 정도이다. 본 공법의 국외 시공사례는 일본의 Kansai (關西)국제공항의 매립지반 다짐시공과 能大南 현장의 지반개량 실시현장 정도이며, 국내 시공사례는 수도권 신공항(신공항건설공단, 1996; 한영철, 1997) 시험 다짐시공이 유일한 예이다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 일차적으로 국내외 연약지반 개량공사에 적용한 대형 진동햄머다짐 공법의 시공사례를 통해 지반개량효과에 미치는 요소들의 특성을 규명하고자 한다. 또한 다양한 요소들의 변화에 대한 개량정도를 평가하기 위하여 동적 유한요소 프로그램을 이용하여 수치해석을 실시하며, 최종적으로 대형 진동햄머다짐 공법의 영향심도 평가 및 수치해석적 적용가능성 여부를 평가하고자 한다.

## 2. 대형 진동햄머다짐의 수치해석

기존 대형 진동햄머다짐에 대한 연구는 주로 현장시험 후의 영향심도에 중점을 두고 경험적인 해석을 하여왔다. 또한 사질토에 대한 개량공법인 대형 진동햄머다짐 공법은 일반적으로 1.5 ~ 5 m 심도까지 개량이 가능하며, 신속하고 효과적인 특징을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.

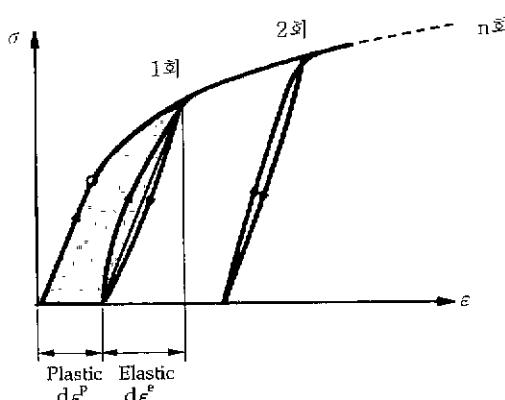


그림 2. 다짐횟수에 따른 소성변형 에너지

이 공법은 그 특성상 다음 3가지 요인 즉, 진동원의 진동크기(amplitude), 다짐판의 크기(plate size), 진동지속시간(duration)에 지배되는 것으로 판단되며, 동일 공법 내에서도 지반조건, 다짐에너지, 지하수위, 준설 매립토 두께 등에 따라 그 개량효과가 달라질 수 있다. 그러나 국내외 자료를 통하여 이러한 여러 인자들에 의한 연약지반의 개량 정도에 대한 일반적인 경향을 체계적으로 규명하지는 못하고 있다. 이는 각각의 대형 진동햄머다짐 공법들이 지역의 특수한 지반조건, 시공목적, 수행능력과 같은 서로 다른 설계기준에 따라 시행되어 개량효과의 유무가 판별되어 왔기 때문이다.

특히 다짐대상인 연약지반은 외력을 받는 초기 동하중에 의해 흙의 거동이 상당히 복잡해진다. 따라서 이런 모든 경우를 고려한 유한요소 프로그램은 동하중의 효과를 모사(simulation)할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 다짐의 영향깊이 산정에 소성변형에 의해 소산된 에너지를 깊이별로 구하여 이를 다짐의 영향심도 판정에 이용하고자 한다. 그림 2는 수직응력의 재하와 제하를 반복하였을 경우 전형적인 응력-변형률 관계를 나타낸다. 이때 소성변형에 의해 소산된 에너지는 다음과 같다.

$$W_p = \int \sigma d\epsilon^p \quad (1)$$

식 (1)에 의해 소성변형으로 소산된 에너지는 그림 2의 체색된 면적과 같다. 동적 다짐공법의 경우 다짐횟수에 따라 증가하는 소성변형에 의해 소산된 에너지를 합하면 깊이별 소성변형의 추이를 알 수 있을 것이다. 즉, 더 이상 소성변형이 일어나지 않는 시점과 깊이를 알 수 있어 영향깊이 추정과 유효다짐시간 판정에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 다양한 실내시험을 통하여 수치해석에 필요한 변수들을 산정한 후 동역학적 유한요소 프로그램을 이용하여 각 영향 인자들이 대형 진동햄머다짐 공법의 영향심도에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 3. 현장시험

### 3.1 표준관입시험

대형 진동햄머다짐 공법을 적용한 영종도 시험시공현장에서 시공전후에 표준관입시험을 실시한 결과 그림 3과

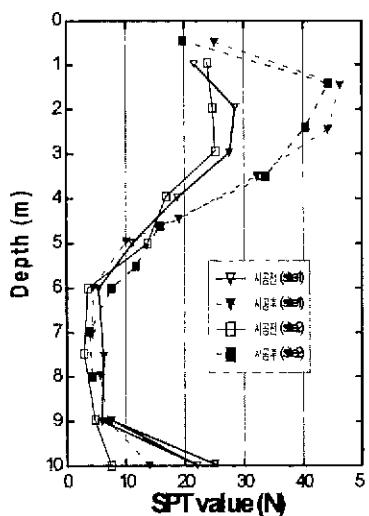


그림 3. 시공전후의 표준관입시험치의 변화

같은 결과를 얻었다. 그림 3의 결과는 시공전 현장 매립층의 표준관입시험치가 5m이내의 지반심도에서 평균 20 정도인 것을 보여주고 있다. 또한 대형 진동햄머다짐의 영향심도는 대략 5~6m로 추정할 수 있었다. 현장의 상태를 모사하기 위해 Dunham (한국지반공학회, 1997)이 제안한 식(2a) ~ 식(2d)를 이용하여 표준관입 시험치로부터 사질토의 내부마찰각을 구할 수 있다.

$$\phi = \sqrt{12N} + 15 : \text{입자가 둥글고 입도분포가 균일한 모래} \quad (2a)$$

$$\phi = \sqrt{12N} + 20 : \text{입자가 둥글고 입도분포가 좋은 모래} \quad (2b)$$

$$\phi = \sqrt{12N} + 20 : \text{입자가 모나고 입도분포가 균일한 모래} \quad (2c)$$

$$\phi = \sqrt{12N} + 25 : \text{입자가 모나고 입도분포가 좋은 모래} \quad (2d)$$

위의 식으로부터 구한 현장 사질토의 내부마찰각의 범위는  $30^\circ \sim 40^\circ$  이다.

### 3.2 체분석

영종도시료를 체분석한 결과 그림 4와 같은 분포를 얻을 수 있었다.

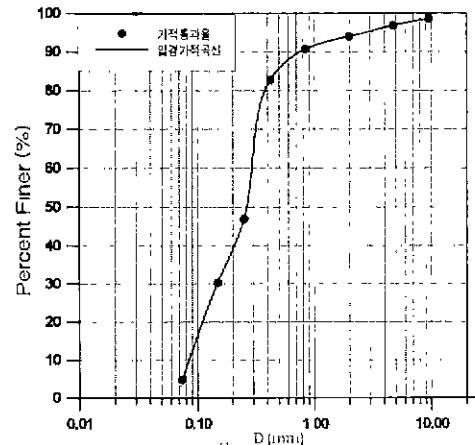


그림 4. 입도분포 시험결과

그림 4의 결과로부터 균등계수( $C_u$ )를 구하면 다음과 같은 결과를 얻게된다.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 3.4 \quad (3)$$

여기서,  $C_u$ 는 균등계수,  $D_{60}$ 은 통과중량백분율 60%일 때의 입경,  $D_{10}$ 은 통과중량백분율 10%일 때의 입경을 의미한다.

위의 결과로부터 유효입경이 3.4로 지반이 빙입도상태임을 알 수 있다. 따라서 Dunham 공식으로부터 구할 수 있는 현장 사질토의 내부마찰각의 범위는  $30^\circ \sim 35^\circ$  이다.

### 3.3 최대건조단위중량 및 최소건조단위중량 결정

본 해석에 사용되는 영종도 매립토의 최대건조단위중량( $\gamma_{dm\max}$ )과 최소건조단위중량( $\gamma_{dmn}$ )을 구하기 위해 ASTM D 4254-91, D 4253-93 규정에 따른 실내시험을 실시하였다. 이 시험은 3회 실시하였으며 각 시험 결과치를 산술 평균하여 구하였다.

시험을 통해 구한 값은 다음 표1과 같으며, 본 연구에서는 성토시 일반적인 상대밀도인 50%를 수치해석에 적용하였다.

표 1. 영종도 매립토의 기본물성

물성	값
최대건조단위중량	1.621 gf/cm <sup>3</sup>
최소건조단위중량	1.358 gf/cm <sup>3</sup>
상대밀도 50%일 때의 건조단위중량	1.478 gf/cm <sup>3</sup>

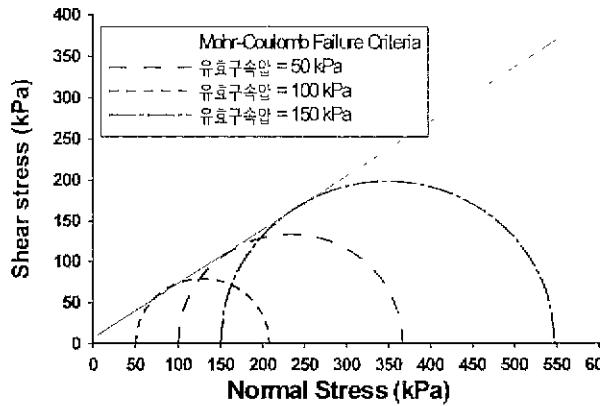


그림 5. Mohr-Coulomb의 파괴 규준

### 3.4 정적 삼축시험

수치해석에 필요한 강도정수를 구하기 위해 정적 삼축 압축시험을 실시하였다. 구속응력을 50 kPa, 100kPa, 150kPa로 서로 다르게 하여 얻은 p-q diagram으로부터  $K_3$  선을 통해 강도정수를 구하였다. 본 시험의 결과인 그림 5.를 이용하여 구한 내부마찰각은  $32^\circ$ 이며 배립토의 점착력은 7kPa이다.

삼축시험에서 구한 내부마찰각은 현장실험으로부터 Dunham공식을 이용하여 구한 값인  $30^\circ \sim 35^\circ$  사이 값으로 이 범위가 타당함을 알 수 있다. 따라서 수치해석에 내부마찰각  $32^\circ$ 와 점착력 7kPa을 적용하여 현장을 모사할 것이다.

## 4. 프로그램의 적용성 검증

본 연구에서는 동적다짐공법의 현장결과를 이용하여 지반의 영향을 파악하기 위한 수치해석 기법을 마련하고자 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 영종도에서 시공한 대형 진동햄머다짐을 모사하였으며 시간영역에서 수행한 수치해석을 현장결과와 비교하였다.

수치해석은 동적 유한요소해석중 직접적분법을 이용하였으며 해석에 사용한 프로그램은 ABAQUS를 이용하였다. ABAQUS (1997)는 미국의 Hibbit, Karlsson & Sorensen사에서 개발한 범용 유한요소 해석 프로그램으로 정해석 및 시간과 주파수 영역에서의 동해석을 제공한다.

본 연구에 사용된 유한요소는 동적해석의 정확도를 높이기 위하여 등매개변수 8절점 사각형요소를 사용하였다.

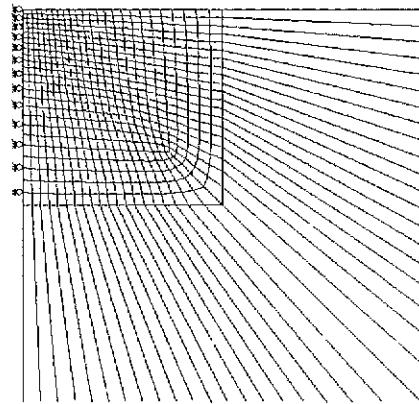


그림 6. 해석에 사용된 축대칭 유한-무한요소망

8절점 요소의 해석시간을 줄이기 위하여 요소의 강성 행렬 계산시 적분차수보다 낮은 차수를 사용하는 감차적분을 행하는 요소를 사용하였다. 또한 유한요소 경계면에 무한요소를 사용하여 경계면에서 파의 반사가 없는, 즉 파의 원거리영역까지의 전파를 모사하였다.

그림 6.은 수치해석에 적용한 2차원 축대칭 유한-무한요소망이다. 요소망 구축시에는 해석관심영역인 표층중심부를 보다 조밀하게 하고 요소가 이루는 내부각도가 가능한  $30^\circ$ 를 넘지 않도록 하였다. 요소대칭축에서의 경계조건은 축의 직각방향으로의 자유도를 구속시켰으며 나머지 경계에는 경계에서 에너지가 반사되어 들어오는 현상을 감소시키기 위해 무한요소를 가진 원에서 방사방향으로 적용시켰다. 구성된 요소망 중 유한요소부분은  $10m \times 10m$ , 무한요소부분은 유한요소영역 선분의 2배가 되도록 하였다. 구성방정식은 Mohr-Coulomb을 이용하여 지반의 소성변형을 구현하였고 지반은 건조한 사질토로 가정하여 지하수에 의한 영향을 배제하였다.

### 4.1 입력물성 결정

수치해석시 지반은 영종도 시공현장과 같은 건조한 실트질 모래지반으로 가정하였고 하중과 다짐판의 크기를 달리 하여 30초 다짐을 해석하였다. 해석시의 지반물성은 삼축시험으로부터 구한 값과 일반적인 사질토 물성치를 적용하였다.

유압식 햄머다짐에 사용된 실트질 사질토의 물성은 표 2와 같다. 탄성계수는 실트질 사질토의 정적탄성계수를 사용하였다.

표 2. 수치해석에 사용한 물성치

물 성	값	물 성	값
단위중량	1.478 ton/m <sup>3</sup>	포아송비	0.3
탄성계수	15 MPa	강도정수	32°, 7kPa

표 3. 대형 진동햄머의 장비사양

장비명	규격
Vibro Hammer	10 ton
Tamper	3 <sup>m</sup> ×3 <sup>m</sup>
주파수	11Hz
가속도	12 6g

#### 4.2 대형 진동햄머의 입력하중 결정

영종도에서 수행한 진동햄마다짐의 시공장비는 회전하는 편심질량체의 우력에 의해 다짐판을 진동시키는 장비로 Kansai공항의 연약사질지반의 다짐에 사용한 장비와 동일사양이다. 표3.은 대형 진동햄머의 장비사양이다.

표3의 장비사양으로부터 대형 진동햄머의 수치해석시에 입력하중을 126ton의 주파수 11Hz인 정현하중으로 모사할 수 있다.

#### 4.3 수치해석 프로그램의 검증

그림 7은 소성변형에 의해 소산된 에너지량의 깊이별 분포변화이다. 그림 7.에서 대형 진동다짐시에 깊이에 따른 소성변형율에너지의 소산량을 보면 깊이 약 5m 까지 영향을 주는 것을 볼 수 있다. 또한 다짐시간 약 12초 이후부터는 다짐이 깊이 약 2m 이내의 표층에만 영향을 미친다.

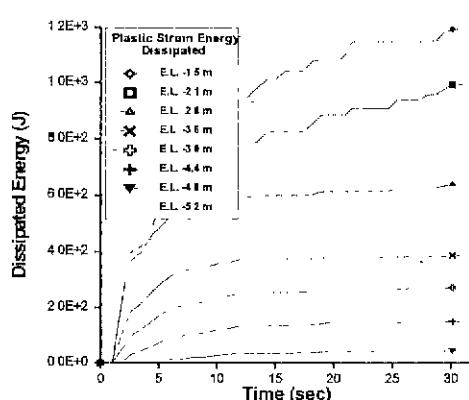


그림 7. 소성변형율에너지의 깊이별 소산량

뿐 2m 이후부터는 더 이상의 소성변형율에너지소산이 없는 것으로 나타났다. 따라서 가진추의 무게가 10ton인 경우 영향깊이가 약 5m이며 3.1절에서 현장시험으로 추정한 영향심도와 비교적 유사한 결과를 보여준다.

수치해석적인 검증을 통해 진동햄마다짐의 영향심도를 평가하는 수단으로서 수치해석적 방법의 적용이 가능함을 알았다. 따라서 이와 같은 결과를 토대로 대형 진동 햄마다짐에 의한 다짐효과를 각 조건별로 모사(simulation)하고자 한다.

#### 5. 대형 진동햄마다짐의 수치해석

##### 5.1 해석 조건

지금까지 현장에 적용된 대형 진동햄머의 사양은 다짐판의 크기 3<sup>m</sup>×3<sup>m</sup>와 10ton의 가진추에 11Hz의 주파수로 30~60초간 대상지역의 다짐을 1회 이상 실시한 것이었다. 따라서 가진력의 크기, 가진시간의 변화 그리고 다짐판의 크기에 따른 영향을 알아보기에는 보다 많은 적용사례가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이러한 영향을 수치해석으로 추정해 보고자 한다.

따라서 본 연구에서는 다짐판의 크기를 3<sup>m</sup>×3<sup>m</sup>, 2<sup>m</sup>×2<sup>m</sup>로 다짐판의 크기에 의한 영향을 고려하였고, 가진추의 무게를 10ton, 15ton, 20ton, 25ton으로 가진력의 영향을 고려하였다. 수치해석에 이용된 입력 값은 표 4.와 같다.

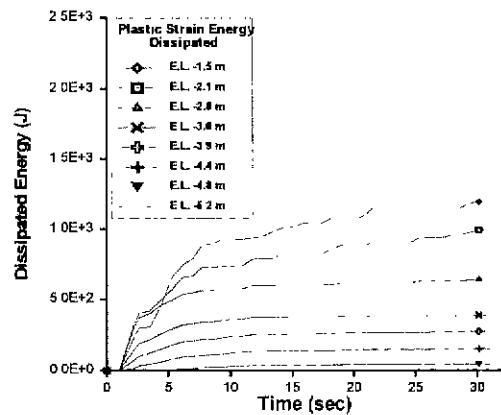
##### 5.2 가진추의 무게에 따른 영향

그림 8은 소성변형에 의해 소산된 에너지량의 깊이별 분포이다.

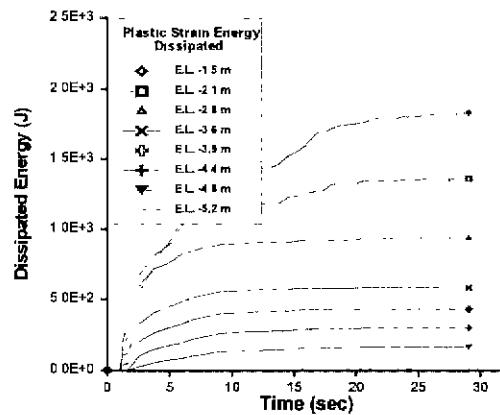
그림 8에서 대형 진동다짐시에 깊이에 따른 소성변형율에너지의 소산량을 보면 다짐에너지가 증가할수록 소성변형율에너지 소산량의 크기가 점차 증가함을 볼 수 있다. 즉 동일 깊이에서의 소성변형이 다짐에너지의 증가에 따라 더 많이 발생하며 이는 다짐효과가 우수한 것으로 볼

표 4. 수치해석시 이용된 입력 값

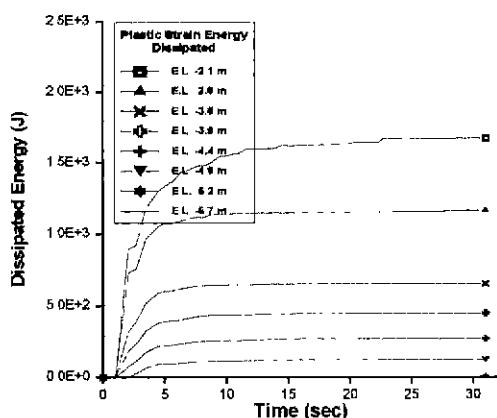
입력조건	입력 값
수직가속도	12 6 g
가진추의 무게	10, 15, 20, 25 ton
가진주파수	11 Hz



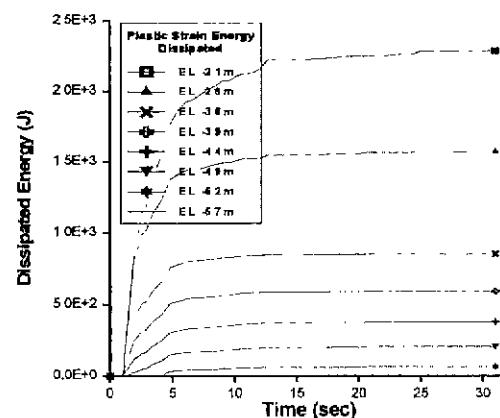
(a) 추 무게 10ton인 경우



(b) 추 무게 15ton인 경우



(c) 추 무게 20ton인 경우



(d) 추 무게 25ton인 경우

그림 8. 소성변형율에너지의 깊이별 소산량

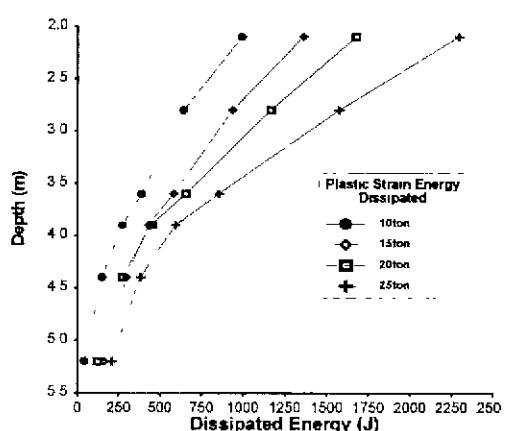


그림 9. 추의 중량에 따른 깊이별 최종 소성변형율에너지 소산량

수 있다. 또한 다짐시간 약 8초 ~ 12초 이후부터는 다짐이 표층에만 영향을 미칠뿐 더 이상의 소성변형율에너지 소산이 없는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 추의 무게가

무거울수록 수렴시간이 빨라지는 경향을 보였다. 즉 다짐 시 영향깊이에 영향을 주는 한계에너지가 존재하며 한계 에너지 이후부터는 영향깊이 내에서 표층부에 집중적으로 다짐이 발생할 것이라고 예상할 수 있다. 영향깊이의 경우 추무게 10ton보다 25ton이 약 0.5m 증가하여 추의 무게증가에 의한 영향깊이 증가효과는 크지 않았다.

그림 9.는 수치해석으로 구한 대상지반의 최종 소성변형율에너지 소산량으로 추의 무게가 클 경우 동일깊이에서의 소성변형율에너지 소산량이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과로 볼 때 가능한 높은 하중의 진동 추를 사용하는 것이 지반개량에 효과적임을 알 수 있다.

그림 10은 수평거리별 소성변형율에너지량의 변화를 추의 중량별로 나타낸 것이다. 이로부터 대형 진동햄퍼의 수평영향거리를 추정할 수 있다. 수평영향거리는 추의 중량과 관계없이 다짐판의 크기  $3^m \times 3^m$ 의 등가원반경인 1.7m정도에서 형성되는 것을 알 수 있다.

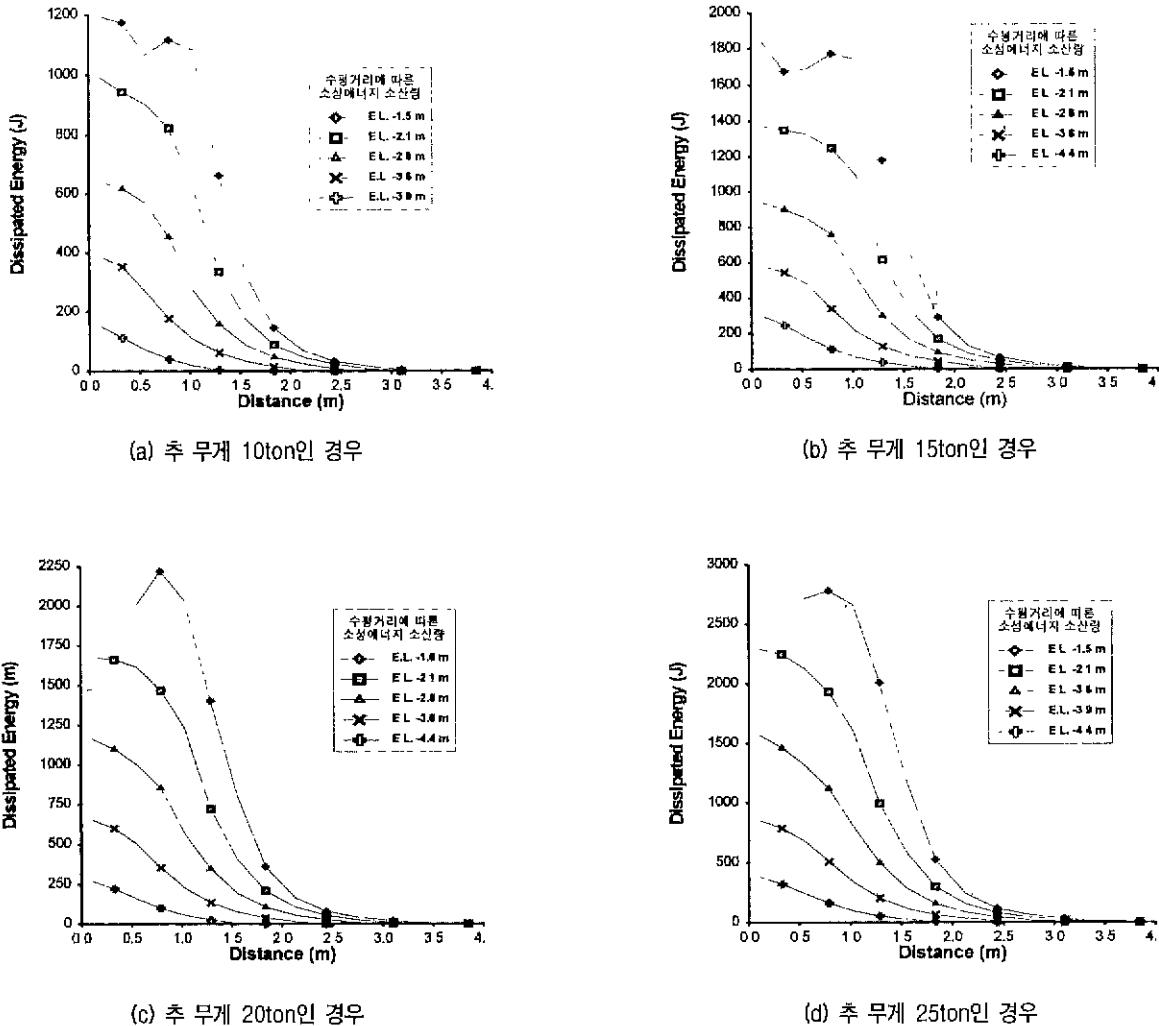


그림 10. 추의 중량별 소성변형율에너지 소산량의 수평거리별 변화 ( $3^m \times 3^m$ )

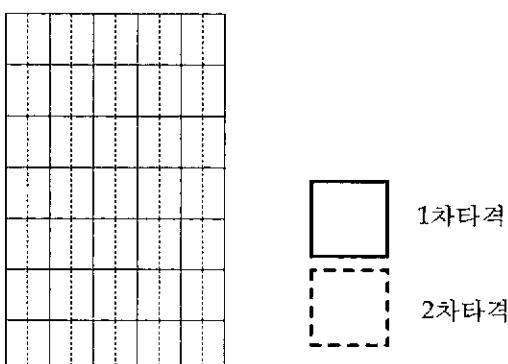


그림 11. 대형 진동햄머다짐의 시공격자망

그림 10으로부터 대형 진동햄머의 시공순서를 결정하는 격자망 구성시 일반적으로 적용하는 그림 11과 같이 1차 다짐 후 바로 인접하여 시공하는 것이 적합한 방법임을 알 수가 있다. 일반적으로 대형 진동햄머의 타격순서는 그림

11과 같은 격자망을 구성하여 시행하여 왔다.

### 5.3 다짐판의 크기에 따른 영향

다음의 그림 12는 추무게 10ton일 때 다짐판의 크기를  $2^m \times 2^m$ 와  $3^m \times 3^m$ 로 달리 하였을 경우의 소성변형율에너지 소산량으로 다짐판의 크기가 작을수록 영향깊이가 감소하는 것으로 나타났다.

그림 12에서 다짐판의 크기가  $2^m \times 2^m$ 인와  $3^m \times 3^m$ 인 경우 각각 다짐의 영향깊이가 4m와 5m로 약 1m정도 차이가 나는 것으로 나타났다. 따라서 대형 진동햄머다짐시 다짐판의 크기가 영향깊이에 영향을 주는 것으로 판단된다. 그림 12를 종합해 보면 수평거리별 최종 소성변형율에너지 소산량인 그림 13.을 구할 수 있다. 그림 13.의 결과로 볼 때 다짐판의 크기가 영향깊이를 결정하는 주요변수임을

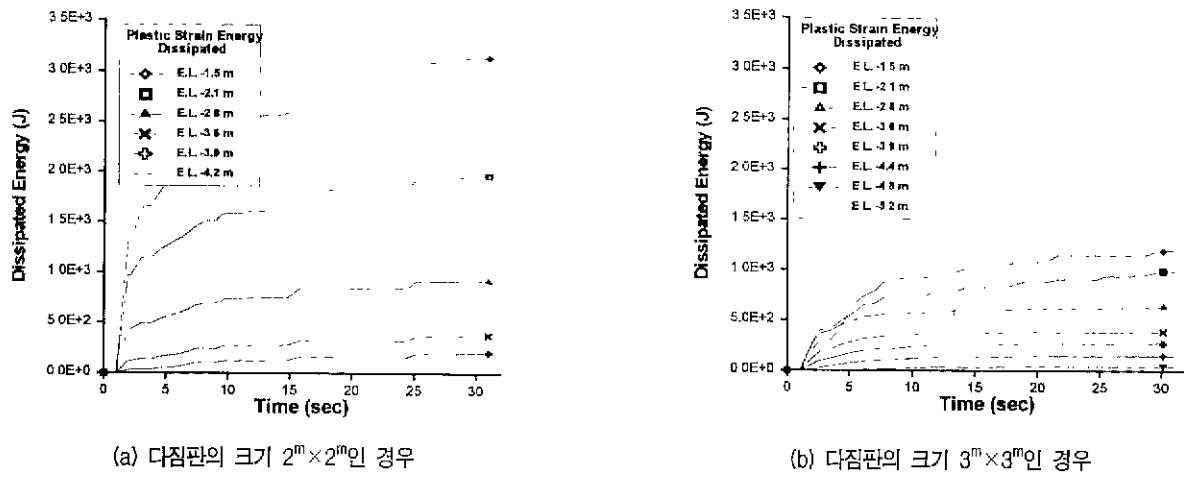


그림 12. 소성변형율에너지의 깊이별 소산량

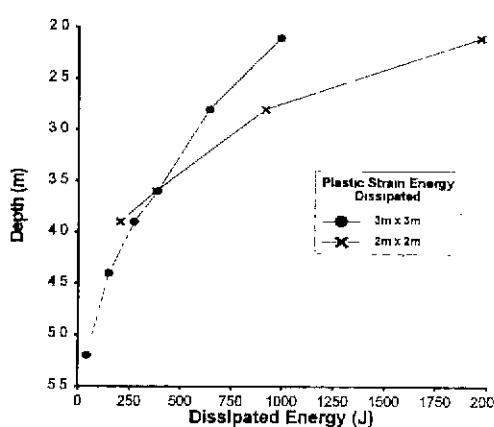


그림 13. 다짐판의 크기에 따른 깊이별 최종 소성변형율 에너지 소산량

알 수 있다.

그림 14는 수평거리별 소성변형율에너지량의 변화를 다짐판의 크기별로 나타낸 것으로 이로부터 대형 진동햄머의 수평영향거리를 추정할 수 있다. 그림 14로부터 수평영향거리는 다짐판의 크기  $2^m \times 2^m$ 인 경우 등가원반경인 1.2m정도에서  $3^m \times 3^m$ 인 경우 등가원반경인 1.7m정도에서 형성되는 것을 알 수 있다. 이로부터 대형 진동햄머 다짐시 수평영향거리는 다짐판의 크기가 주요한 변수임을 알 수 있다.

## 6. 수치해석결과 및 분석

### 6.1 대형 진동햄머다짐의 다짐효과

일반적으로 중추낙하 다짐시에 영향깊이를 산정할 때

Menard (1973)가 제안한 다음의 식(4)를 사용한다. 이 식은 많은 자료로부터 산정된 경험식으로서 여러 현장에서 비교적 안전측으로 적용되는 것으로 알려져 있다.

$$D = \alpha (W \cdot h)^{0.5} \quad (4)$$

여기서, D는 영향심도,  $\alpha$ 는 지반특성계수, W는 다짐추의 무게, h는 추의 낙하고를 의미한다. 지반특성계수의 경우 사질토에 일반적으로 적용하는 0.5를 사용하였다.

Menard의 영향깊이 추정식을 이용하여 대형 진동햄머 다짐의 영향심도를 평가해 보면 대형 진동햄머는 낙하에너지가 아닌 회전질량체의 회전에 의한 운동에너지를 다짐에너지로 사용하므로 Menard 식의 낙하에너지 항을 다음 식(5)와 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

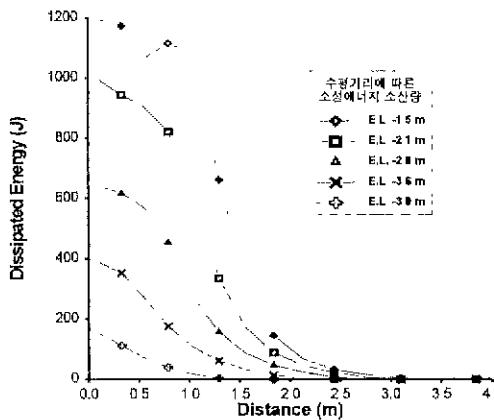
$$W \cdot h = mgh = \frac{1}{2} mv^2 \quad (5)$$

속도는 입력가속도를 적분하여 다음 식(6)의 관계로 나타낼 수 있다.

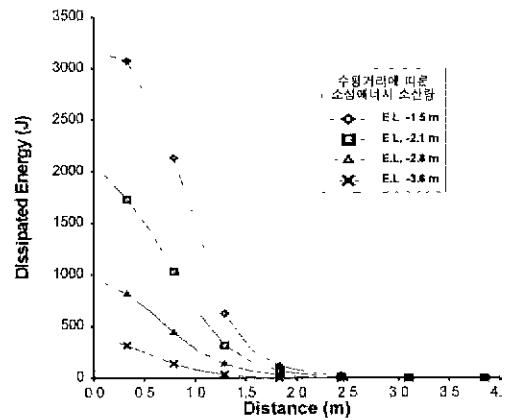
$$v = \frac{2}{\pi} a_{max} \Delta t = 1.78 \text{ (m/sec)} \quad (6)$$

따라서, 식(5)와 식(6)의 관계로부터 대형진동햄머의 계량심도를 구하면 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} mv^2 = 1.62 \text{ (ton-m)}$$



(a) 다짐판의 크기  $3^m \times 3^m$ 인 경우



(b) 다짐판의 크기  $2^m \times 2^m$ 인 경우

그림 14. 수평거리에 따른 소성변형율에너지 소산량

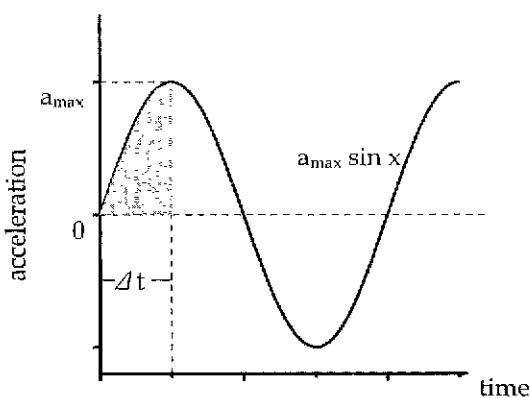


그림 15. 입력가속도

$$D = \alpha \cdot (W \cdot h)^{0.5} = 0.64 \text{ (m)}$$

위의 결과는 동일한 다짐기구를 가정한 상태에서 대형 진동햄머의 영향깊이가 0.64m에 불과하다는 것을 의미한다. 이는 실제 개량깊이인 4 ~ 5m에 비교하여 매우 작은 수치이다. 따라서 영향깊이의 증가가 거의 없었던 12초 다짐까지의 외부에너지를 적용하면 다음과 같은 영향심도를 얻을 수 있다. 그림 16은 수치해석에서 구한 외부에너지이다.

그림 16으로부터 12초에 해당하는 누적다짐에너지는 약 1.3MJ이다. 이를 ton-m 단위로 환산하면 137.5ton-m이다. 이를 Menard 식에 적용하면 영향깊이를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D = \alpha \cdot (W \cdot h)^{0.5} = 5.9 \text{ (m)}$$

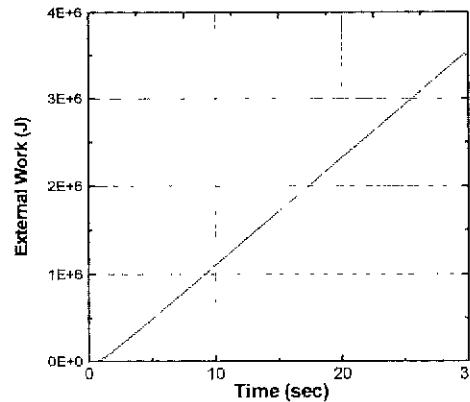


그림 16. 대형 진동햄머의 누적 다짐에너지  
(추무개 10ton, 다짐판의 크기  $3^m \times 3^m$ 인 경우)

위에서 구한 영향깊이는 수치해석에서 구한 영향깊이인 5m와 1m의 차이를 보이지만 Menard식이 경험공식이라는 점을 고려할 경우 적용성이 좋다고 볼 수 있다. 즉 대형 진동햄머의 경우 5m의 영향심도를 얻기 위해서는 최소한 137.5ton-m 이상의 에너지가 필요한 것으로 보여진다.

다짐판의 크기  $2^m \times 2^m$ 인 영향깊이 판정에 적용할 경우 소성변형율에너지가 수렴하는 시간이 약 10초이므로 수치해석으로부터 구한 다짐에너지는 약 950kJ이다. 이를 ton-m 단위로 환산하면 약 97ton-m 이므로 Menard 공식에 적용하면 영향깊이를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D = \alpha \cdot (W \cdot h)^{0.5} = 4.9 \text{ (m)}$$

역시 수치해석에서 구한 영향깊이인 4m와 비교했을 경우 적용성이 좋은 결과를 보인다.

이와 같은 방법으로 추의 무게가 15ton, 20ton, 25ton인 경우의 영향심도를 구하면 각각의 경우 6.1m, 6.6m, 6.8m로 영향심도를 구할 수 있다. 따라서 Menard 식을 이용할 경우 유압식 햄머다짐공법이나 대형 진동햄머다짐공법이 영향깊이를 다짐하는데 필요한 최소한의 에너지를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

## 7. 결론

본 연구에서는 연약지반 개량공사에 적용한 대형 진동 햄머다짐 공법이 지반개량효과에 미치는 요소들의 특성을 규명하였다. 개량정도를 평가하기 위하여 동역학적 유한요소 프로그램을 이용하여 수치해석을 실시하였으며, 현장자료와의 비교를 통해 적용성을 검증하였다. 수치해석에 사용한 프로그램은 동역학적 유한요소해석이 가능한 ABAQUS를 사용하였다. 수치해석을 통해 대형 진동 햄머의 다짐효과를 지배하는 요인으로 알려진 다짐판의 크기와 진동추의 무게에 따른 변화를 고찰하였으며 평가 기준으로 소성변형율에너지 소산량의 변화를 이용하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수치해석을 통한 소성변형율에너지 소산량의 시간에 따른 변화로부터 다짐의 영향깊이를 추정할 수 있었다. 특히 깊이 약 2m 이후부터는 소성변형율에너지의 소산이 8 ~ 12초 사이에서 수렴하여 다짐시 다짐에너지의 한계가 존재함을 알 수 있었다.
- (2) 대형 진동햄머다짐을 30초 실시했을 경우를 수치해석적으로 모사한 결과 영향심도는 약 5m 정도로 나타났으며 다짐시작 10초 경과 후 깊이 2m 이내의 표층에서만 다짐이 발생하는 것으로 나타났다.

- (3) 진동추의 무게가 증가함에 따라 영향깊이는 10ton의 경우 5m, 25ton의 경우 5.5m로 큰 증가는 없고 동일깊이에서의 에너지 소산량의 크기가 증가하는 것으로 나타나 추의 무게가 클수록 소성변형이 많이 발생하는 것으로 나타났다.
- (4) 다짐판의 크기가 클수록 영향심도가 큰 것으로 나타나 대형 진동햄머다짐의 경우 다짐판의 크기가 영향심도를 결정하는 중요한 변수인 것으로 판단된다. 또한 수평영향거리의 경우도 진동추의 무게와 관계없이 다짐판의 반경 내에서 형성되어 다짐판의 크기가 수평영향거리를 결정하는 중요 변수인 것으로 판단된다.
- (5) 소성변형율에너지 수렴시의 외부에너지와 Menard 경험식에 적용할 경우 영향깊이를 판정할 수 있음을 알았다. 따라서 수치해석을 통해 소성변형율에너지가 수렴하는 시간의 외부에너지를 알 경우 Menard 식으로부터 필요깊이를 다짐하는데 요구되는 최소한의 에너지를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 신공항건설공단 (1996), "수도권 신공항 다짐시험시공 용역 종합보고서".
2. 한영철 (1997), "인천국제공항 준설토 다짐 시험시공", 대우엔지니어링 기술보, 제14권, 제1호, pp.3~11.
3. 한국지반공학회 (1997). "지반조사결과의 해석 및 이용", 지반공학시리즈, 제1권, pp.59, 구미서판.
4. Hibbitt, H.D., Karlsson, B.I., and Sorensen (1997) "ABAQUS Theory Manual", Hibbitt, Karlsson, and Sorensen Inc.
5. Menard, L. and Broise, Y. (1975) "Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation", Geotechnique, Vol 25, No.1, pp.3~17.

(접수일자 2000. 2. 21)