

# 유압식 진동 향타 시스템의 성능 향상을 위한 연구

정해권\*, 성원준\*\*, 송창섭\*\*\*

## A Study on the Performance Improvement of a Hydraulic Vibro-hammer System

Hae-Kwon Jeung\*, Won-Joon Sung\*\*, and Chang-Scop Song\*\*\*

### ABSTRACT

In this study, the hydraulic vibro-hammer system was analyzed and the analysis tool using GUI was developed. From the parametric analysis, the effects of each factor were revealed. Through the simulation with varying parameters, the method to improve the performance of the hydraulic vibro-hammer system was presented. The analysis tool will help an unskilled programmer analyze the hydraulic vibro-hammer system. The result of this study will help improve the performance of the hydraulic vibro-hammer systems.

**Key Words** : Hydraulic vibro-hammer system(유압식 진동 향타기), Anaysis tool(해석용 툴), Parametric analysis (인자분석), GUI(그래픽 작업 환경), Eccentrical force(기진력)

### 1. 서론

구조물의 기초 공사를 할 때, 파일(pile)을 지반에 관입(penetration)하는 작업을 하게 된다. 이러한 작업을 향타 작업이라 한다.<sup>[1][2]</sup> 이러한 향타 작업을 위해 기존에는 임팩트 해머들이 쓰여 왔다. 하지만 이는 임팩트 시의 소음과 진동 등이 발생하여 문제가 되고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 소음 및 충격 진동이 적은 진동 향타기(Vibrohammer)가 개발되었다. 이 진동 향타기는 편심추의 회전을 이용하여, 이 때 발생하는 기진력으로 파일을 관입시킨다.<sup>[3]</sup> 본 연구에서는 이 진동 향타기를 해석하였으며, 프로그램에 대한 전문 지식이 없는 사람도 쉽게 진동 향타기를 해석할 수 있도록

GUI를 이용한 해석용 툴을 개발하였다.

### 2. 작동 원리 및 구조

#### 2.1 작동 원리

본 연구의 대상은 유압식 진동 향타기이다. 진동향타기는 유압모터의 구동축에 수직으로 편심추를 장착하여, 축을 구동기어와 중동기어로 맞붙여서 Fig.1과 같이 반대 방향으로 두 축을 고속으로 회전시킨다. 이 때, 발생하는 수평력은 서로 상쇄되고 수직력은 서로 더해지는 특성이 발생하는데 상하 방향으로 발생하는 힘을 기진력이라 한다. 진동향타기는 기진력과 향타기의 중량, 파일의 자중, 그리고 신축 리더내의 실린더 신축력에 의해

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과  
\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과  
\*\*\* 한양대학교 기계공학부

파일을 지반에 관입시키는 데 이용되는 장치이다.

이때 기진력은 회전축에서 일정거리 떨어진 곳에 질량이 회전축을 중심으로 회전을 할 때 발생하는 원심력과 같다<sup>[4]</sup>. 여기서 원심력은 편심 모멘트(Eccentric moment)에 각속도의 제곱을 곱한 값으로서 기진력은 편심추의 편심 모멘트의 크기에 비례한다. 그러므로 편심추의 편심 모멘트와 최대 회전속도는 진동항타기의 성능을 결정하는 중요한 인자임을 알 수 있다.

그리고 파일(pile)의 관입 시에 가해지는 힘은 기진력과, 진동항타기의 무게와 파일의 자중의 합으로 구해진다. 여기서 진동항타기의 무게와 파일의 자중의 합을 구동무게(dynamic weight)라고 한다.

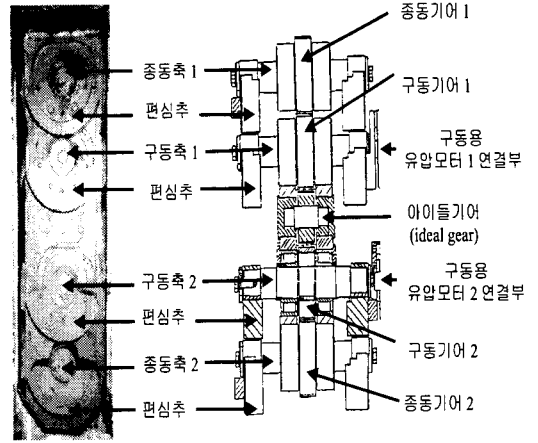


Fig. 2 The structure of the vibro-hammer

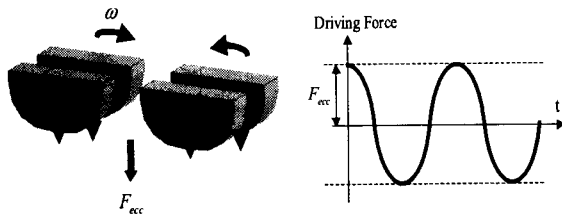


Fig. 1 The principle of the vibro-hammer

## 2.2 구조

Fig.2 는 진동항타기의 내부의 구조를 나타낸 것이다. 굴삭기의 2 개의 펌프로부터 공급된 유량은 각각 2 개의 유압모터로 공급되고, 각각의 모터는 연결되어 있는 2 개의 구동축을 회전시킨다. 이때 발생하는 두 축의 회전 속도는 구동기어와 중동기어의 기어비가 1:1 이므로 회전속도의 크기는 같고 위상이 180° 차이가 나게 전달되어진다. 각각의 구동축과 중동축에 2 개씩 총 8 개의 편심추가 같은 방향으로 양 끝단 지점에 채결되어 있다.

앞에서 설명한 바와 같이, 좌우방향의 진동은 서로 상쇄되고 상하방향의 최대 진폭을 가지는 진동만이 발생하게 된다. 하지만, 구동축 1 과 구동축 2 의 속도차에 의한 위상지연이 발생되면 진동 방향이 상하방향 이외에 좌우방향으로도 생성된다. 이로 인해 기진력의 변화가 생기고 기계장치에 예상치 못한 방향으로 심한 충격이 발생된다. 그래서 구동기어 1 과 구동기어 2 사이에 아이들 기어(idle gear)를 장착하여 두 축의 위상차가 발생하는 것을 방지한다.

## 3. 진동 항타기의 성능 해석

### 3.1 해석 모델

Fig.3 은 굴삭기로 진동항타기를 작동시킬 때의 유압 회로이다. 라인의 압력은 펌프의 공급 유량과 릴리프 유량, 밸브를 통과하는 유량에 의하여 결정된다.<sup>[5][6]</sup>

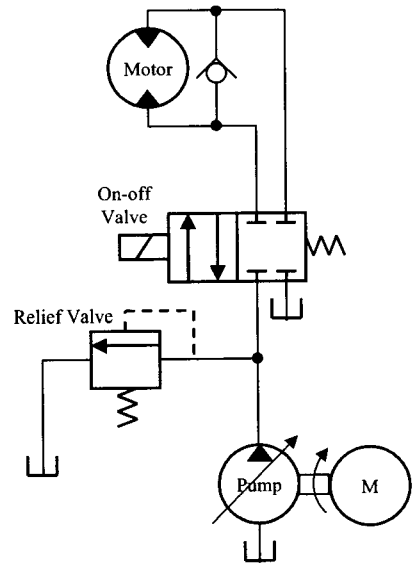


Fig. 3 The line pressure modeling

라인 압력은 식(3.1)의 연속 방정식에 의해 결정된다.

$$\frac{dP_{line}}{dt} = \frac{\beta}{V_{line}}(Q_{pump} - Q_{relief} - Q_{in}). \quad (3.1)$$

릴리프 유량은 릴리프 밸브의 특성 곡선으로부터 식(3.2)에 의해 결정된다.

$$Q_{relief} = \frac{(P_{line} - P_{crack})}{P_{set} - P_{crack}} Q_{max} \quad (3.2)$$

유압 모터에서 발생하는 토크는 모터의 입력 단과 출력단의 압력차이에 모터의 행정 체적을 곱해서 얻어진다. (Fig.4 참조)

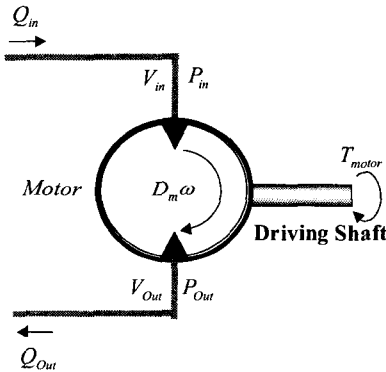


Fig. 4 Schematic diagram of a hydraulic motor

밸브를 통과한 유량은 식(3.3)에 의해 얻어지고,

$$Q_{in} = C_d A_{valve} \sqrt{\frac{2(P_{line} - P_{in})}{\rho}} \quad (3.3)$$

$$Q_{Out} = C_d A_{valve} \sqrt{\frac{2(P_{Out} - P_{tank})}{\rho}}$$

입출력 Port의 압력은 식(3.4)에 의하여 구해진다.

$$\frac{dP_{in}}{dt} = \frac{\beta}{V_{in}}(Q_{in} - D_m \omega) \quad (3.4)$$

$$\frac{dP_{Out}}{dt} = \frac{\beta}{V_{Out}}(D_m \omega - Q_{Out})$$

이 때 발생하는 토크는 식(3.5)와 같다.

$$T_{motor} = D_m (P_{in} - P_{Out}) \quad (3.5)$$

부하토크는 모터 내부의 점성과 마찰에 의한 손실토크, 편심추의 무게에 의한 토크와 회전축의 진동에 의한 토크, 유체에서 회전하는 기어의 점성에 의한 토크, 베어링의 마찰에 의한 토크로 나눌 수 있다. 모터에서 발생하는 토크와 부하토크에 의해 편심체의 회전속도는 다음 식에 의해 구한 각속도를 적분하여 구할 수 있다.

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J_{eq}}(T_{motor} - T_{load}) \quad (3.6)$$

진동 향타기에서 발생하는 기진력은 관성 모멘트에 회전속도의 제곱을 곱한 값이며, 총 8 개의 편심추와 4 개의 덮개가 있으므로 식(3.7)과 같이 계산된다.

$$F_{ecc} = [8m_{ecc}r_{ecc} + 4m_{cover}r_{cover}] \omega^2 \quad (3.7)$$

진동 향타기는 방진 고무에 의해 신축 리더에 부착되어 있으므로, 진동 향타기의 거동은 방진 고무의 영향을 받게 된다. 진동 향타기의 거동은 Fig.5에 의해 식(3.8)과 같이 모델링할 수 있다.[7]

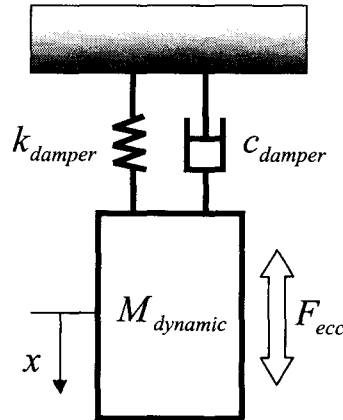


Fig. 5 Model of vibro-hammer

$$M_{dynamic} \ddot{x} + c_{damper} \dot{x} + k_{damper} x = F_{ecc} \quad (3.8)$$

### 3.2 해석용 프로그램

Fig.6에 본 연구에서 개발한 해석용 Tool의 구조를 간략히 나타내었다.[8] 그림에서 보는 바와 같이 사용자가 시스템 파라미터를 입력하게 되면, 프로그램은 입력 받은 데이터를 가지고 각각의 검사역의 체적 및 개로 면적, 편심체의 관성 모멘트 등의 값들의 초기치를 계산하고, 이를 바탕으로 유량 방정식, 압력 방정식, 운동 방정식들로 구성

된 루프를 돌며 해석을 수행한다.

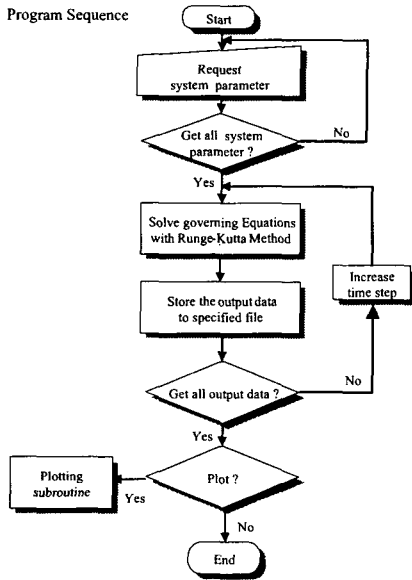


Fig. 6 Sequence of the analysis program

사용자가 원하는 시간까지 루프를 돌며 해석을 수행하다가 해석이 끝나면 이전에 계산된 데이터들을 처리한다. 해석 데이터를 파일로 출력하게 되며, 그래픽 모듈을 이용하여 그래프 형태로 나타낼 수 있다. Fig.7은 편심체의 각 치수를 입력하는 창을 나타낸 것이다.

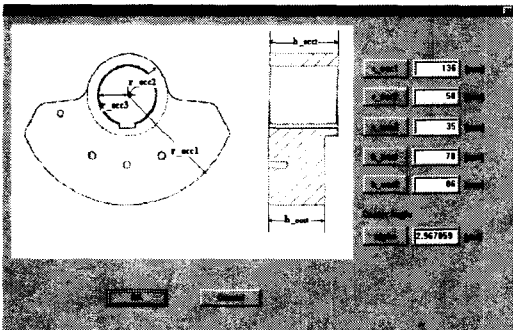


Fig. 7 Input window of the eccentric weight parameters

#### 4. 주요 변수의 영향 분석

본 연구에서는 실제 사용하고 있는 VRZ600

이란 모델 (모터의 행정체적 80 [cm<sup>3</sup>/rev], 편심추의 관성모멘트 7.2[ kg · m ], 공급유량 360 [l/min], 릴리프밸브 설정압 300[bar])에 대해서 시뮬레이션을 수행하여 시스템의 특성을 살펴 보았고, 주요 변수를 설정하여 각 변수를 변화시키며 시뮬레이션을 수행하여 각 변수의 변화가 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 본 장에서 사용된 값들은 시스템이 정상 상태에 도달하였을 때의 값들로써, 본 진동 향타 시스템은 과도 응답 영역보다는 정상 상태의 영역이 시스템의 성능을 결정하는 요소가 된다.

#### 4.1 공급 유량에 의한 영향

진동향타기는 굴삭기에 부착되어 굴삭기의 동력을 사용하게 되므로 굴삭기의 펌프에 따라서 그 성능에 차이를 보이게 된다. 여기서는 굴삭기 펌프의 공급유량에 의한 영향을 살펴보기로 한다.

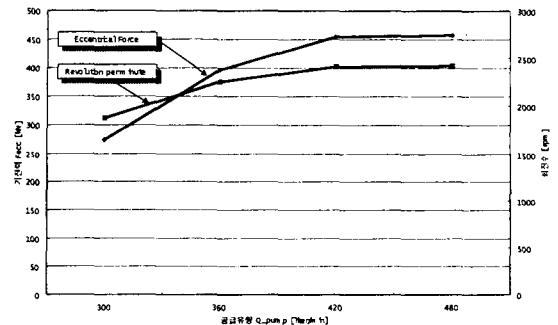


Fig. 8 The effect of supply flow rate variation

Fig.8 에서와 같이 공급유량 즉 펌프에서 토출 유량이 많아짐에 따라서 회전속도와 기진력이 증가하는 것을 알 수 있다. 공급유량이 증가할수록 모터의 회전속도가 증가하여, 기진력이 증가함을 알 수 있다. 그러나 공급유량이 420[l/min]보다 많아지면, 회전속도와 기진력의 증가 추세가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 라인의 릴리프 밸브의 설정압력을 초과하여 릴리프 유량이 발생하기 때문이다. 이러한 경우에는 모터에 공급되는 유량이 감소하기 때문에 회전속도가 감소하게 되어 기진력이 줄어들게 된다.

#### 4.2 릴리프밸브 설정 압력에 의한 영향

Fig.9 에서와 같이 릴리프 밸브 설정압력을 높

여주는 것만으로는 회전속도와 기진력에 직접 영향을 주지 않는다. 릴리프 설정압력은 라인의 압력이 상승할 때 모터에 공급되는 유량을 제한하게 된다. 따라서 일반적으로 라인의 압력이 높지 않을 때에는 설정압을 증가하여도 큰 영향이 없다.

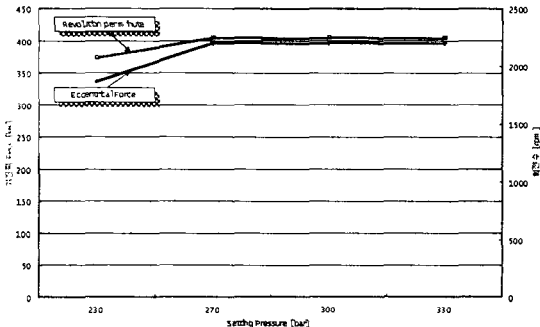


Fig. 9 The effect of relief valve setting pressure

라인의 압력이 충분히 높을 때를 고려해보자. 아래의 Fig.10 에서와 같이 공급 유량이 증가하게 되면 공급라인의 압력이 상승하게 된다. 이 때에 낮은 유량에서는 라인의 압력이 설정압력보다 낮게 형성되어 릴리프 유량이 없이 공급유량이 모터로 공급되므로, 기진력이 일정하게 된다. 하지만, 공급유량이 커서 라인의 압력이 설정압보다 높아지면 릴리프 유량이 발생하게 되고, 이에 따라서 회전속도가 줄어들어, 기진력이 그림에서 보이는 바와 같이 제한되게 된다. 즉 공급유량이 많아서 라인의 릴리프 유량이 발생되었을 때에 설정압을 올림으로써 회전속도와 기진력을 높일 수 있다.

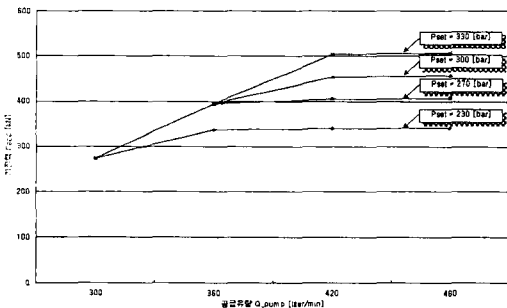


Fig. 10 The effect of variation of supply pressure and setting pressure

### 4.3 구동 모터의 행정 체적에 의한 영향

모터의 회전속도와 발생 토크는 모터의 행정 체적(Volumetric displacement)에 의하여 결정된다.

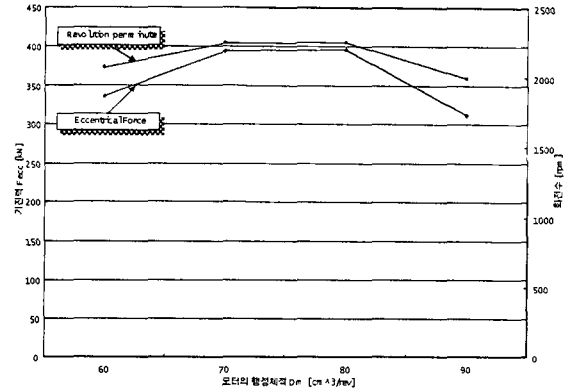


Fig. 11 The effect of motor volumetric displacement variation

위의 Fig.11 에서 보이는 바와 같이 행정체적이 작아지면 일반적으로 회전 속도는 커진다. 하지만, 발생 토크도 작아지므로 점성 마찰력을 이겨 내지 못하고 회전 속도가 작아지는 경향을 보이게 된다.

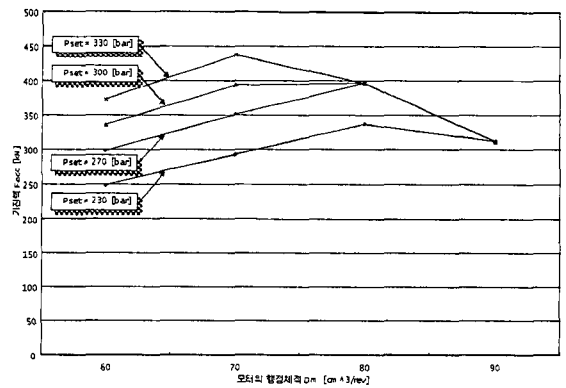


Fig. 12 The effect of variation of setting pressure and motor volumetric displacement

일반적으로 모터의 용적이 작게 되면, 토크가 작게 되므로, 라인 압력에 고압이 형성된다. 이 때에 릴리프 설정압이 이 라인의 압력보다 작을 경우 릴리프 유량이 발생하여, 회전속도를 떨어뜨려 기진력을 감소시킨다. Fig.12 에서 보이는 바와 같이 모터의 용적이 작을 경우에, 릴리프 설정압에 따라서 기진력이 다를 수 있다.

#### 4.4 편심체의 관성 모멘트에 의한 영향

편심추의 관성모멘트(Static Moment)는 편심추의 질량에 편심거리를 곱한 값으로 구해지는데, 편심추의 관성 모멘트는 편심추의 두께에 비례한다.

일반적으로 편심추의 두께를 증가시켜 관성 모멘트를 크게 하는 경우, 기진력은 관성모멘트에 회전속도의 제곱을 곱한 값이므로, 기진력을 크게 할 수 있다. 하지만, 편심추의 가속 회전에 더 큰 토크가 필요하게 되므로, 라인의 압력이 상승하게 된다. 따라서 릴리프 유량이 발생하여 회전속도가 떨어뜨리기도 한다.

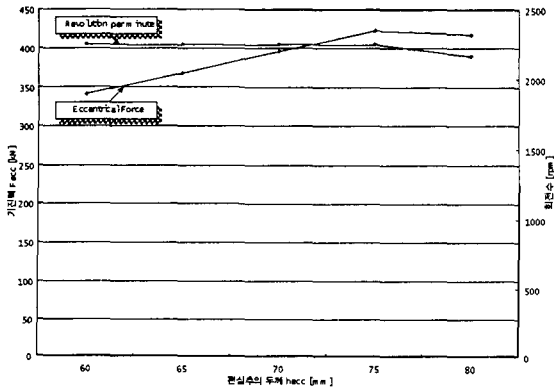


Fig. 13 The effect of variation of width of eccentric weight

Fig.13 에서 보이는 바와 같이 발생하는 토크가 충분히 커서 부하에 영향을 거의 받지 않을 경우, 즉 회전속도가 일정할 경우에는 편심추의 두께가 두꺼울수록 관성 모멘트가 커져서 편심추의 두께와 기진력은 비례하게 된다.

하지만 두께가 증가할수록 더 큰 토크를 요구한다. Fig.14 에 보이는 바와 같이 모터의 용적이 작아서 충분한 토크가 발생하지 못하면, 공급 라인의 압력이 상승하게 된다. 즉 릴리프 유량이 발생하여, 회전속도가 떨어져, 기진력이 떨어지게 된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 실제 사용되는 모델을 해석하였고, 실제 주어진 데이터와 사용압력, 공급압력 등을 바탕으로 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

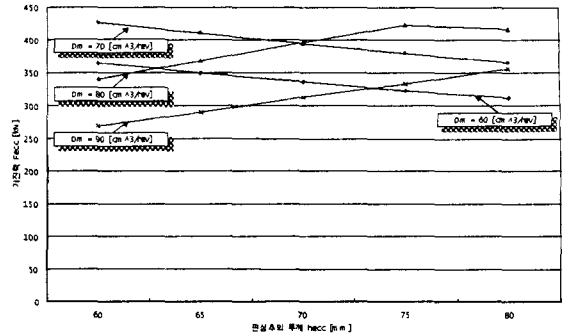


Fig. 14 The effect of variation of motor volumetric displacement and width of eccentric weight

여러 인자들을 변화시켜 가면서 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공급유량과 릴리프 설정압력(공급압력)은 서로 관련되어 있으며, 공급 유량이 증가될 때 이에 맞춰서 릴리프 설정압력을 증가시키면 성능의 증대효과를 보다 크게 할 수 있다.
2. 모터의 행정체적은 진동항타기의 성능에 큰 영향을 준다. 회전속도는 모터의 행정체적에 반비례하며, 모터에서 발생하는 토크는 행정체적에 비례하게 된다. 따라서 공급되는 유량과 설정압력에 따라 최적의 값이 존재한다.
3. 편심추의 관성 모멘트를 수정하기 위해서 편심추의 두께를 변경하면, 일정한 회전속도에서는 관성모멘트가 클수록 기진력이 증가하게 된다. 그러나, 관성모멘트가 너무 클 경우에는 부하가 증가하여 회전속도가 감소하게 되므로 기진력이 감소한다. 따라서 관성모멘트도 최적의 값이 존재한다.
4. 앞으로 수행해야 할 연구 과제로는 작업 시에 지반에서의 반력과, 그 영향에 대해서 해석하고, 진동항타기와 더불어 사용되고 있는 신축리더와의 관련성에 대한 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

1. 조셉 E.보울즈, "기초구조물의 설계와 해석," 도서출판 엔지니어즈, pp. 600-627, 1994.
2. T.W.Lambe & R.V.Whiteman, "토질역학," 도서출판 엔지니어즈, pp. 24-29, 861-887, 1993.
3. 千柄植, "建設 技術者を 위한 基礎工學," 建設研究社, pp. 77-84, 329- 330, 1994.

4. 坪井英夫, 小川充郎, 松井 保, "地盤中にされる抗休の振動特性の研究," 土木學會論文集, No. 582/III-41, pp. 163-172, 1997.12.
5. 이용주, "유압 시스템용 모듈화 해석 Tool 의 개발에 관한 연구," 한양대학교 박사학위논문, 1997.
6. Herbert E. Merritt, "Hydraulic Control Systems," John Wiley & Sons. , 1967.
7. Ferdinand P.Beer & E.Russell Johnston Jr., "Vector Mechanics for Engineers 2nd S.I. Metric Edition, Statics," Mc Graw-Hill Book Company, 1990.
8. 최귀현, "유압 브레이커의 성능 향상을 위한 연구," 한양대학교 석사 학위 논문, pp. 36-37, 1998.