

## 표준관입 시험 해머의 에너지비와 동적효율

### Ratio of Hammer Energy and Dynamic Efficiency of Standard Penetration Test

이 창 호<sup>1</sup> Lee, Changho

이 우 진<sup>2</sup> Lee, Woojin

#### Abstract

SPT hammer energy and its delivery are known to influence the N value. The SPT hammer energy is classified into theoretical energy, velocity energy, rod energy and dynamic efficiency. In this study, the rod energy and the velocity energy are measured directly by PDA and Digital Line-Scan Camera which are most widely used type of SPT apparatus in Korea. The Dynamic efficiency is calculated through measured data. As the results of this study, the averages of rod energy ratio of donut, safety and automatic hammer are measured at 49.57, 61.60, and at 87.04% by FV method. The averages of hammer velocity of donut, safety and automatic hammer are measured at  $3.177 \pm 0.872$ ,  $3.385 \pm 0.681$ , and at  $3.651 \pm 0.550$  m/s by Digital Line-Scan Camera, with the dynamic efficiencies at 0.732, 0.801, and 0.973 respectively.

#### 요 지

해머에 의해 발생한 에너지와 그의 전달은 표준관입시험의 N치에 영향을 주며 이러한 SPT 해머에너지는 이론적 에너지, 속도 에너지, 룯드 에너지, 그리고 동적효율 등으로 나누어진다. 본 연구에서는 향타 분석기(Pile Driving Analyzer, PDA)와 디지털 라인-스캔카메라(Digital Line-Scan Camera)를 이용하여 국내에서 널리 사용 중인 시험 장비들에 대해 룯드 에너지와 속도에너지를 직접 측정하여 각 시험 장비의 동적효율(Dynamic Efficiency)을 계산하였다. 시험 결과 FV 방법에 의해 산정된 각 장비의 평균 룯드 에너지 전달율은 도넛해머, 안전해머, 자동해머의 경우 각각 49.57, 61.60, 87.04%로 측정되었다. 해머의 타격직전의 낙하 속도는 도넛해머, 안전해머, 자동해머의 경우 각각  $3.177 \pm 0.872$ ,  $3.385 \pm 0.681$ ,  $3.651 \pm 0.550$  m/s로 측정되었고 이에 따라 동적 효율은 각각 0.732, 0.801, 0.973으로 계산되었다.

**Keywords :** Digital line-scan camera, Dynamic efficiency, PDA, SPT hammer energy, Standard penetration test

#### 1. 서 론

국내외로 널리 실시하고 있는 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)은 다양한 지반정수와 강도정수

를 결정하기 위한 지반조사법 중 작업의 용이성, 시료의 획득 등 많은 장점을 가지고 있어 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 전 세계적으로 표준화 되지 못한 다양한 장비와 시험법 등으로 동일한 지반에서도 다른

1 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Korea Univ., shinesky@korea.ac.kr)

2 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Korea Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 5월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

N치를 얻는 등 많은 문제점 역시 내포하고 있으며 이러한 장비 및 시험법을 정규화하기 위한 많은 노력이 계속되고 있다. 동일한 지반에서 다른 N치의 획득은 SPT 해머에서 발생하는 다양한 에너지와 그의 전달 때문이며 이러한 에너지를 규명하기 위해 몇몇의 연구자들의 노력이 있었다(Schmertmann and Palacios 1979; Kovacs and Salomone 1982). 본 연구에서는 국내에서 널리 사용 중인 시험 장비들에 대해 항타 분석기(Pile Driving Analyzer, PDA)와 디지털 라인-스캔 카메라(Digital Line-Scan Camera)를 이용하여 다양한 SPT 해머에너지를 직접 측정하여 각 시험 장비의 동적효율(Dynamic Efficiency)을 계산하였다.

## 2. SPT 해머에너지

표준관입시험의 N값을 구하기 위한 타격 관입 시의 해머 에너지에는 이론적 에너지(Theoretical Energy,  $E^*$ ), 속도 에너지 비(Velocity Energy Ratio,  $ER_v$ ), 룯드 에너지 비(Rod Energy Ratio,  $ER_r$ ), 그리고 동적 효율(Dynamic Efficiency,  $\eta_D$ ) 등이 있다. 이들에 관하여 상세히 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1 이론적 에너지( $E^*$ )

해머의 이론적 에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$E^* = W \cdot h \quad (1)$$

여기서,  $E^*$  = 해머의 이론적 에너지(Theoretical Energy)  
 $W$  = 해머의 중량(Weight of Hammer)  
 $h$  = 해머의 낙하고(Falling Height)

국내외의 표준 관입시험 규정에 의해 사용되고 있는 63.5kg 해머와 76cm의 낙하고를 기준으로 이론적 에너지를 산정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E^* &= W \cdot h \\ &= 63.5\text{kg} \times 76\text{cm} = 4826 \text{ kg} \cdot \text{cm} \end{aligned} \quad (2)$$

### 2.2 속도 에너지 비( $ER_v$ )

실제 표준관입시험을 실시할 경우에는 Cathead와 로프, 도르래와 로프, 룯드와 해머 간의 마찰 등에 의한

에너지 손실 때문에 이론적 에너지가 완전히 발휘되지 않는다. 따라서 속도에너지 비는 이론적 에너지( $E^*$ )와 해머가 앤빌(Anvil)과 충돌하기 직전의 해머의 운동 에너지 비로 정의된다.

$$ER_v = \frac{E_h}{E^*} \quad (3)$$

여기서,  $ER_v$  = 속도에너지 비

$E^*$  = 해머의 이론적 에너지

$E_h$  = 앤빌(Anvil)과 충돌하기 직전의 해머의 실제 에너지

### 2.3 룯드 에너지 비( $ER_r$ )

해머가 앤빌(Anvil)에 충돌하기 전 뿐만 아니라 충돌한 후에도 충격에 의해서 에너지의 손실이 발생한다. 따라서 시료 채취기(Sampler)를 관입시키는 에너지는 충돌하기 직전의 해머 에너지보다 작다. 이론적 에너지와 실제로 룯드(Rod)에 전달되는 에너지와의 비를 룯드 에너지 비(Rod Energy Ratio,  $ER_r$ )로 정의한다.

$$ER_r = \frac{E_r}{E^*} \quad (4)$$

여기서,  $ER_r$  = 룯드 에너지 비

$E^*$  = 해머의 이론적 에너지

$E_r$  = 룯드(Rod)에 전달되는 에너지(Energy Delivered into the Rod)

### 2.4 동적 효율( $\eta_D$ )

동적 효율(Dynamic Efficiency,  $\eta_D$ )이란 룯드(Rod)에 전달되는 에너지(Energy Delivered into the Rod)와 앤빌(Anvil)과 충돌하기 직전의 해머의 실제 에너지와의 비로 정의된다.

$$\eta_D = \frac{E_r}{E_h} = \frac{ER_r \cdot E^*}{ER_v \cdot E^*} = \frac{ER_r}{ER_v} \quad (5)$$

여기서,  $\eta_D$  = 해머의 동적효율(Dynamic Efficiency)

$E_r$  = 룯드(Rod)에 전달되는 에너지(Energy Delivered into the Rod)

$E_h$  = 앤빌(Anvil)과 충돌하기 직전의 해머의

실제 에너지

$ER_r =$  룯드에너지 비(Rod Energy Ratio)

$ER_v =$  속도에너지 비(Velocity Energy Ratio)

표준관입시험을 실시할 경우에 위에서 살펴본 바와 같이 시료 채취기(Sampler)를 관입시키는 데 소요되는 실제의 에너지는 해머의 이론적 에너지와는 상당한 차이가 있다. 실제로 룯드에 전달되는 에너지는 마찰에 의한 에너지 손실과 해머와 앤빌(Anvil)의 충돌 시에 발생하는 에너지 손실을 고려하여 위에서 정의한 식들을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$E_r = \eta_D \cdot E_h = \eta_D \cdot ER_v \cdot E^* \quad (6)$$

### 3. 낙하에너지 산정방법

해머의 타격에 의해 룯드에 전달되는 에너지의 산정 방법에는 룯드에 전달되는 힘만을 이용하는 힘적분법과 힘과 속도를 이용하는 힘-속도적분법이 있다. 힘적분법(F2 method, Schmertmann & Palacios, 1979)은 룯드의 상단과 하단에 로드셀(Load Cell)을 부착하고 해머로 타격하여 시간이력에 따른 힘을 구하고 룯드의 탄성계수, 룯드에 전달되는 파속, 룯드의 단면적 등으로 이루어진 임피던스를 이용하여 룯드에 전달된 에너지를 계산한다.

$$E_r = \frac{c}{AE} \int_0^{2L/c} [F(t)^2] dt \quad (7)$$

여기서,  $c$  = 룯드에 전달되는 파속

$E$  = 룯드의 탄성계수

$A$  = 룯드의 단면적

$F(t)$  = 시간에 따른 힘의 이력

힘-속도 적분법(FV method, Sy & Campanella, 1991)은 룯드에 로드셀(Load Cell)과 가속도계(Accelerometer)를 설치하여 로드셀에서는 시간에 따른 응력파의 힘을 측정하고 가속도계에서는 시간에 따른 응력파의 속도를 측정하여 적분을 통해 룯드에 전달되는 에너지를 결정하는 방법이다.

$$E_r = \int_0^{\max} F(t) \cdot V(t) dt \quad (8)$$

여기서,  $F(t)$  = 시간에 따른 응력파의 힘

$V(t)$  = 시간에 따른 응력파의 속도

힘적분법은 시간에 따른 힘의 이력만으로 에너지를 계산하며 이는 룯드의 일정한 위치를 통과하는 응력파로 인해 룯드에 작용하는 힘(F)과 이로 인해 동일한 단면의 한 점에서 발생하는 입자속도(Particle Velocity)는 서로 비례함을 설명하는 비례성의 원칙을 이용한다. 그러나 비례성의 원칙은 흙의 저항으로 인한 반사파가 발생하지 않는 경우와 임피던스의 변화가 없는 경우에 성립하므로, 실제 표준관입시험 시에 룯드에 전달된 에너지와는 다소의 차이가 있는 것으로 알려져 있으며, 룯드에 전달된 에너지를 측정하기 위해서는 힘과 속도의 측정 모두가 필요한 것으로 판단되며, 본 연구에서도 힘, 속도의 측정을 실시하여 힘-속도적분법에 의하여 에너지를 산정하였다.

### 4. 국내의 연구 동향

#### 4.1 이명환 등의 연구(1992)

이명환 등(1992)은 SPT 해머의 낙하속도를 측정하여 속도에너지효율을 제시하고 동적효율을 가정하여 해머의 에너지 효율을 간접적으로 계산하였다. 계산결과 우리나라의 N 값은 국제적인 표준 값으로 인정되는  $N_{60}$ 과는 다소 차이가 있으며, 국내 장비의 속도에너지효율은 미국이나 일본에 비하여 80~85% 수준에 불과하므로 국제 표준값  $N_{60}$ 을 얻기 위해서는 측정된 값에 0.86~0.89의 값을 곱해서 사용해야 하며, 일본의 평균치  $N_{78}$ 을 얻기 위해서는 0.66~0.68을 곱해야 한다고 주장한 바 있다.

#### 4.2 이호춘 등의 연구(1996, 1997)

이호춘 등(1996, 1997)은 초음파 송수신장치와 PC를 이용하여 해머의 충격에너지를 측정하였고, 그 결과 Rope-Pulley형 해머와 자동해머의 해머에너지 비는 이론적 에너지에 대하여 각각 64.2% 및 75.0%로 측정하였고, 표준관입시험의 동적효율을 Charpy 충격시험과 해석 프로그램인 WEAP을 적용하여 측정 및 산정하여 현장시험을 통하여 검증된 결과로부터 국내의 동적효율로 0.72라는 값을 제시하고, 동적효율을 0.72로 적용하여 Rope-Pulley 해머 및 자동해머에 대하여 산출한 평균 에너지 비( $E_r$ )을 각각 46.2%, 54%로 제시하였다. 또한 평균 에너지 비를 이용하여 현장 측정 N치를 국제표

준치인  $N_{60}$ 으로 보정하기 위한 계수로 Rope-Pulley형 해머의 경우에는 0.77, 자동해머의 경우에는 0.9를 제안한 바 있다.

#### 4.3 이우진 등의 연구(1998, 2001, 2002)

최근 이우진 등(1998, 2001, 2002)은 해머의 타격에 의해서 룯드로 응력파(stress wave)가 전달되는 현상은 말뚝 항타 시에 발생하는 현상과 동일하다고 보고 PDA 장비를 표준관입시험에 적용하여 관입에너지를 측정하였다. 그리고 PDA를 이용한 방법은 해머에서 룯드에 전달되는 충격파를 분석하여 실제로 룯드에 가해지는 에너지 값을 출력하므로 이론적인 에너지 값과의 비율로부터 바로 에너지 전달효율을 산정 할 수 있어 비교적 정확하게 관입에너지를 측정할 수 있다고 보고하였다.

### 5. 현장 시험 계획, 장비 및 결과

시험은 편마암을 모암으로 하는 풍화잔류토층이 주를 이루는 대전 유성지역에서 시행되었으며 현장의 N 값은 약 25~50정도의 값을 보였다. 시험 장비의 해머 모식도는 그림 1의 (a), (b), (c)와 같으며 주요 제원은 표 1과 같다. 공간적인 오차를 줄이기 위해 동일지역에서 시추공 사이 간격을 3m 이내로 시행하였으며 장비의 오차 영향을 줄이기 위해 동일한 시험 장비에 해머만 교체하면서 시험을 수행하였다.

#### 5.1 PDA 및 룯드에너지 측정용 룯드

룰드 에너지를 계산하기 위한 힘과 속도의 측정은 편타를 줄이기 위해 180° 방향으로 2개의 스트레인 게이지(Foil Type)와 2개의 가속도계(Piezoresistive Type)가 장

착된 60cm 길이의 드릴 룯드에서 이루어지며 측정된 변형율은 PDA로 연결되어 단면적과 룯드 재료의 계수를 곱하여 힘으로 계산되며 측정된 가속도는 수치적분에 의해 Particle Velocity로 변환시킨다. PDA는 각 타격 당 축력과 속도를 측정하고, 최대 압축파, 최대 인장파, 룯드 전달 에너지, 전달속도 등을 포함하는 40개의 Parameter를 즉시 계산한다(Pile Dynamics Inc. 2000). 또한 PDA는 샘플러가 관입 되는 동안 힘과 속도의 이력을 알 수 있으며 전달된 에너지를 F2 적분법과 FV적분법으로 계산한다. 이는 PDA를 이용한 말뚝동적지지력 시험 시와 비슷한 형태의 힘과 속도의 거동을 보인다. 표준관입시험 에너지 측정 시 사용된 측정용 룯드는 PDA 제작 회사인 PDI에서 주문 제작된 룯드이다. 이 룯드는 표준관입시험 시 룯드에 직접 연결하여 사용하기 위해 AW 제원(1¼ inch)으로 제작되었으며 룯드 모식도는 그림 2와 같다.

#### 5.2 디지털 라인-스캔 카메라(Digital Line-Scan Camera)

낙하하는 해머의 속도를 측정하기 위하여 디지털 라

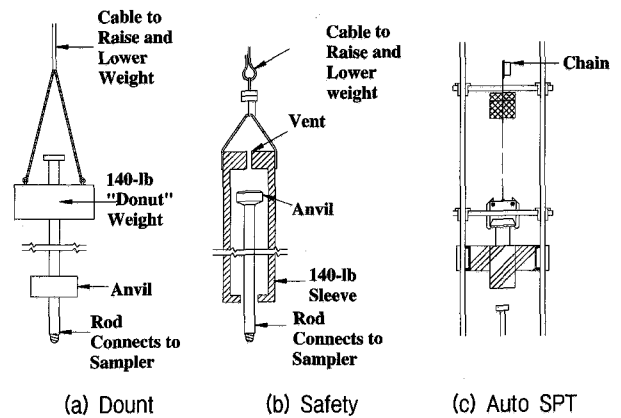


그림 1. 해머 모식도

표 1. 현장 시험 장비 제원

구 분	도넛해머	안전해머	자동해머
굴착 방법	수세 로터리보링	수세 로터리보링	수세 로터리보링
해머 (지름×높이, cm)	21.33×23.5	15.82×118.5	21.33×23.5
앵빌 (지름×높이, cm)	7.64×11	8.0 (지름)	4.5×2.5
로프 (지름, cm)	마닐라 삼 (3)		-
로프 감은수	2¼		-
켓헤드 (지름, cm)	10	10	-
해머 인양 방식	수동 로프 풀리식	수동 로프 풀리식	유압
낙하 높이 조절	수동식	자동식	자동조절
시험 공수	1	1	1

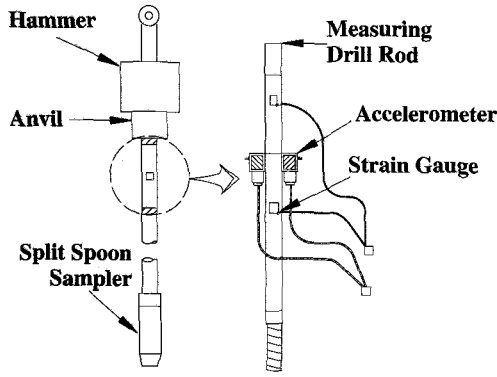


그림 2. 에너지측정용 룯드

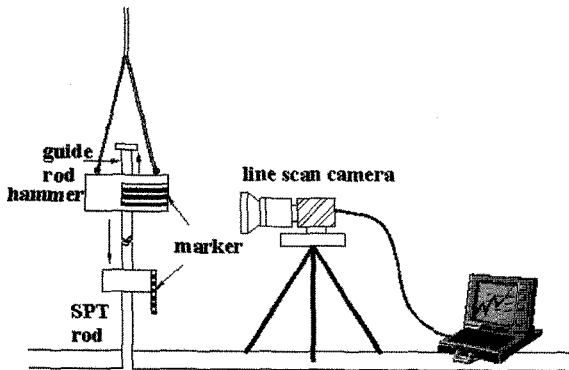


그림 3. 디지털 라인-스캔 카메라

인-스캔 카메라(Digital Line-Scan Camera)와 특수영상 마크를 이용하여 고속촬영하고 영상처리를 통해 대상체의 운동을 측정하는 DPRM 시스템을 이용하였다. 라인-스캔 카메라는 일반적인 카메라에서 사용되는 사각 평면 형태와는 달리 이미지를 획득하는 전하집적장치(Charge Coupled Device, CCD)센서가 한 줄로 되어 있어 고속의 영상촬영이 가능하다. 두께 2cm의 흑·백색의 수평띠가 수직으로 쌓여있는 형상의 마크를 부착한 진동체의 움직임을 연속적으로 촬영하면 수직선 형태의 영상을 얻을 수 있고 이것을 시간대별로 나열하면 그림 4와 같은 흑·백의 물결무늬를 볼 수 있다. 이것으로부터 2cm두께의 마크선을 기준으로 흑백의 경계선의 움직임을 추적하여 변위를 파악하고 속도를 계산할 수 있다. 그림 5는 낙하 시 시간에 따른 해머 이동거리와 낙하속도의 변화를 나타낸 것이다. 변위는 앤빌까지의 거리를 말하며 76cm에서 낙하를 시작하여 해머 타격 후 0이 되는 것을 알 수 있다. 해머 낙하 속도는 중력 가속도에 의해 일정하게 증가하다 해머와 앤빌의 충돌이 후 급격하게 줄어든다. 타격 시 해머의 낙하 속도는 앤빌과 충돌 직전의 값이며  $v^*$ 는 이론적인 자유낙하 속도이다.



그림 4. 시간에 따른 마크선의 움직임

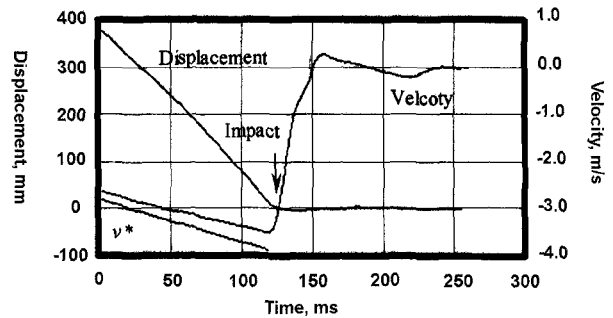


그림 5. 해머의 낙하속도 이력

### 5.3 장비별 해머에너지 및 동적효율

룯드 에너지의 산정은 힘-속도 적분법(FV method)을 이용하였으며, 측정결과는 표 2와 같다. 일반적으로 룯드 에너지 비는 룯드 길이(심도)가 증가할수록 증가하는 경향을 보이나 룯드 길이 10m 이상에서는 일정한 값으로 수렴되는 경향을 보인다. 깊이 10m 이하에서 지반의 N치가 깊이에 따라 증가 할 가능성과 룯드 길이가 10m 이하인 경우 반사파로 인한 타격에너지가 감소하는 현상으로 N치가 과대 평가되는 점을 고려하여 본 연구에서도 룯드 길이 10m이상의 룯드 에너지를 장비의 평균에너지로 판단하였다(이우진, 2001). 표 3은 시험 대상해머 종류에 대해 심도별로 측정된 최종낙하 속도와 계산된  $ER_v$ ,  $ER_r$ ,  $\eta_D$ 를 정리한 것이다.

표 3을 보면 Rope-Pulley 방식의 해머 낙하 및 인양 방식을 가지는 도넛해머와 안전해머는 Rope-Pulley에서의 마찰저항, 가이드 룯드와 해머사이의 마찰 등 여러 가지 기계적 특성 때문에 속도에너지 비는 이러한 영향을 줄인 자동해머에 비해 현저히 떨어진다. 그림 6에 나타난 바와 같이 낙하속도 측정값 역시 도넛해머와 안전해머는 높은 산포도를 보이며 이는 Rope-Pulley 방식의 낙하고 조절에서 일관성이 없기 때문이며 낙하고를 자동으로 유지하는 자동해머는 상대적으로 적은 낙하 속

도의 산포도를 보인다. 동적 효율에 영향을 미치는 인자는 룯드의 상태, 앤빌 시스템, 해머 모양 등이라 알려져 있으며 그 중 앤빌에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 앤빌은 해머의 낙하에너지를 가장 먼저 받는 곳이고 낙하에너지를 룯드에 전달하는 매개체이다. 또한 상대적으로 룯드에 비해 큰 단면적을 가진다. 표 4에서 자동해머의 동적 효율이 도넛해머와 안전해머에 비해 상대적으로 큰 것은 도넛해머와 안전해머의 앤빌 직경이 각각 7cm와 8cm 정도로 룯드의 직경에 비해 약 2배정도 큰 것이

지만 자동해머의 경우 룯드 직경과 동일한 AW사이즈의 앤빌을 사용했기 때문이라 판단된다.

국내에서 발표된 연구결과의 해머 에너지비와 동적 효율을 비교하면 표 4와 같다. 표 4에 나타난 것처럼 기존의 많은 연구들은 해머의 낙하속도를 측정하여 속도 에너지를 계산하고 동적효율을 Skempton(1986)이 제시한 값으로 가정(이명환 외 1992; 박용원 외 1993, 1994)하거나 수치해석(WEAP) 및 실내시험을 통해 얻은 값을 적용(이호춘 외 1997)하여 룯드에너지를 계산하였으며,

표 2. 해머별 룯드 에너지 비

심도 (m)	도넛 해머 (룯드길이, m)	안전해머 (룯드길이, m)	자동해머 (룯드길이, m)
1.5	-	32.14 (4.0)	-
3.0	43.08 (5.0)	-	62.37 (6.0)
4.5	-	44.14 (6.3)	76.96 (7.5)
6.0	46.78 (7.9)	-	80.65 (8.8)
7.5	-	54.18 (9.4)	87.48 (11.4)
9.0	48.90 (11.0)	-	-
10.5	-	58.99 (12.3)	-
12.0	48.84 (13.9)	-	90.28 (15.3)
13.5	-	60.26 (15.4)	-
15.0	50.96 (16.9)	-	-
16.5	-	65.55 (18.7)	83.37 (17.6)
룯드길이 10m 이상 평균	49.57	61.60	87.04

표 3. 속도 에너지 비 및 동적효율

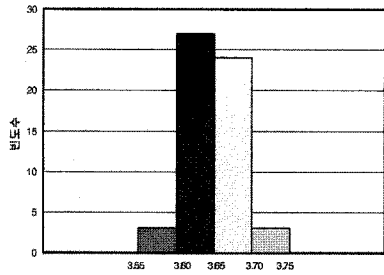
해머종류	최종낙하속도와 속도에너지 비				ER <sub>v</sub>	ER <sub>r</sub>	η <sub>D</sub>
	심도 (m)	v <sub>avg</sub> , m/s (95% 신뢰수준)	표준편차	측정수			
자동해머	3.0	3.613±1.964	0.023	87.6	169	62.37	0.712
	6.0	3.627±1.298	0.020	88.3		76.96	0.872
	9.0	3.652±0.895	0.017	89.5		80.65	0.901
	12.0	3.669±0.970	0.017	90.4		87.48	0.968
	16.0	3.669±0.550	0.011	90.3		90.28	0.999
	Avg	3.651±0.550	0.023	89.5		87.04	0.973
안전해머	1.5	3.272±1.400	0.029	71.9	95	32.14	0.447
	4.5	3.451±2.040	0.056	80.0		44.14	0.551
	7.5	3.411±0.842	0.061	78.1		54.18	0.694
	12.0	-	-	-		58.99	-
	13.5	-	-	-		60.26	-
	16.5	-	-	-		65.26	-
Avg	3.385±0.681	0.083	76.9	61.60	0.801		
도넛해머	3.0	3.139±1.589	0.069	66.2	51	43.08	0.662
	6.0	3.192±1.043	0.153	68.4		46.78	0.684
	9.0	-	-	-		48.90	-
	12.0	-	-	-		48.84	-
	15.0	-	-	-		50.96	-
	Avg	3.177±0.872	0.136	67.7		49.57	0.732

표 4. 국내의 해머 에너지 비 및 동적효율 비교

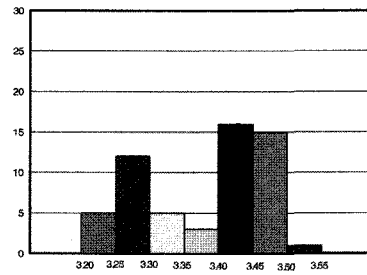
해머 종류	최종낙하속도와 속도에너지 비			$\eta_D$	ER <sub>r</sub> (%)	비 고	Reference
	$v_{avg}$ , m/s (평균낙하고, cm)	표준 편차	ER <sub>v</sub> (%)				
도넛해머	3.183	5.2	68.3	0.78	53.3	동적효율( $\eta_d$ )가정(Skempton, 1986)	이명환 등 (1992)
	3.152 (72.1)	-	67.2	0.78	52	동적효율( $\eta_d$ )가정(Skempton, 1986)	박용원 등 (1993)
	3.062 (71.6)	8.8	63.4	0.78	49.5	동적효율( $\eta_d$ )가정(Skempton, 1986)	박용원 등 (1994)
	3.08 (71.7)	-	64.2	0.72	46.2	동적효율( $\eta_d$ )가정	이호춘 등 (1996)
	-	-	-	0.72	-	동적효율( $\eta_d$ ) 실내실험, 수치해석(WEAP)	이호춘 등 (1997)
	-	-	-	-	39.2	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정	이우진 등 (1998)
	-	-	-	-	48.7	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정	도로공사, 이우진 등 (2002)
개량형 도넛해머	-	-	-	-	62.0	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정, Winch, 3mm와이어로프	도로공사, 이우진 등 (2002)
	-	-	-	-	68.5	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정, Modified Auto Donut Hammer	
Trip 해머	3.547	8.7	85.7	0.6	51.4	동적효율( $\eta_d$ )가정(Skempton, 1986)	이명환 등 (1992)
	3.335 (73.11)	2.7	75.0	0.78	59	동적효율( $\eta_d$ )가정(Skempton, 1986), Auto Trip Hammer	박용원 등 (1994)
	3.335 (73.1)	-	75.0	0.72	54	동적효율( $\eta_d$ )가정	이호춘 등 (1996)
	-	-	-	0.72	-	동적효율( $\eta_d$ ) 실내실험, 수치해석(WEAP), Auto Trip Hammer	이호춘 등 (1997)
	-	-	-	-	50.8	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정	도로공사, 이우진 등 (2002)
안전해머	-	-	-	-	65.8	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정	이우진 등 (1998)
	-	-	-	-	56.2	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정	도로공사, 이우진 등 (2002)
자동 (CME)	빠르게 타격	-	-	-	76.0	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정, CME-750장비사용, 60타/분 타격	도로공사, 이우진 등 (2002)
	천천히 타격	-	-	-	62.5	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정, CME-750장비사용, 25타/분 타격	
자동해머	3.651±0.550	0.025	89.5	0.973	87.04	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정 속도에너지 비(ER <sub>v</sub> ) 직접측정	본 연구
안전해머	3.385±0.681	0.083	76.9	0.801	61.60	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정 속도에너지 비(ER <sub>v</sub> ) 직접측정	
도넛해머	3.177±0.872	0.136	67.7	0.732	49.57	롯데에너지 비(ER <sub>r</sub> ) 직접측정 속도에너지 비(ER <sub>v</sub> ) 직접측정	

이우진 등(2001)은 롯데 에너지만을 직접 측정하여 제시하였다. 그러나 N치에 직접적인 영향을 미치는 SPT 해머에너지 및 동적효율을 정확히 평가하기 위해서는 롯데 에너지 및 속도에너지 모두를 측정해야 한다. 본 연구에서는 국내에서 널리 사용 중인 장비들의 롯데 에

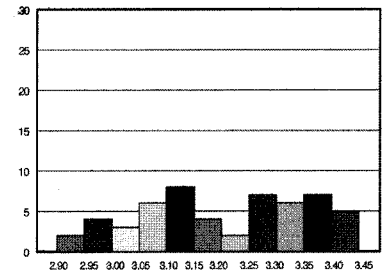
너지와 속도에너지를 모두 측정하여 도넛해머의 경우 49.57, 67.7%, 안전해머의 경우 61.60, 76.9%, 자동해머의 경우 87.04, 89.5%의 값을 얻었으며, 위 값을 이용하여 동적 효율을 산정한 결과 각 해머별로 0.732, 0.801, 0.973의 값을 얻었다.



(a) 자동해머의 낙하속도[m/sec]



(b) 안전해머의 낙하속도[m/sec]



(c) 도넛해머의 낙하속도[m/sec]

그림 6. 해머별 최종낙하 속도의 분포

## 6. 결론

SPT 해머 에너지는 N치의 산정 및 보정에 매우 중요한 영향을 미치며 정확한 룯드 에너지를 산정하기 위해서는 해머 타격 시 룯드에 전달되는 힘과 속도를 모두 측정하여야 하며 동적 효율을 산정하기 위해서는 룯드 에너지 뿐만 아니라 속도 에너지 역시 반드시 측정되어야 한다. 국내외의 이전의 연구에서는 해머의 낙하 속도를 측정하기 위하여 다양한 시도가 있었으나 그 결과가 많지 않으며, 룯드 에너지와 속도 에너지를 동시에 직접 측정하는 것은 본 연구가 최초이다.

- (1) FV 방법에 의해 산정된 각 장비의 평균 룯드 에너지 전달율은 해머에 의해 발생한 압축파가 충분히 전달되는 룯드 길이 10m 이상의 값을 평균하였으며, 도넛해머, 안전해머, 자동해머의 경우 각각 49.57, 61.60, 87.04%이다.
- (2) 해머의 타격직전의 낙하 속도는 Cathead와 로프, 도르래와 로프, 룯드와 해머 간의 마찰 등에 의한 에너지 손실 때문에 이론적 자유낙하 속도(3.8595m/s)보다 작으며 도넛해머, 안전해머, 자동해머의 경우 각각  $3.177 \pm 0.872$ ,  $3.385 \pm 0.681$ ,  $3.651 \pm 0.550$ m/s로 측정되었다.
- (3) 해머 낙하 속도의 측정값은 도넛해머와 안전해머는 높은 산포도를 보이며 이는 Rope-Pulley 방식의 낙하고 조절에서 일관성이 없기 때문이며 낙하고를 자동으로 유지하는 자동해머는 상대적으로 적은 낙하 속도의 산포도를 보인다.
- (4) 각 장비의 평균 속도에너지 비는 해머 타격 직전의 해머 낙하 속도가 거의 일정한 값을 보이며 룯드 길이와는 무관하므로 해머별 측정값을 산술 평균하였으며 도넛해머, 안전해머, 자동해머 각각 67.7, 76.9, 89.5%로 계산되었다.
- (5) 동적효율은 해머의 낙하 에너지를 직접 받아 룯드

에 전달하는 매개체인 앤빌의 크기에 가장 큰 영향을 받으며 도넛해머, 안전해머 각각 0.732, 0.801로 계산되었으며 상대적으로 앤빌의 크기가 작은 자동해머는 0.973으로 계산되었다.

## 참고 문헌

1. 박용원, 이호춘, 박종호 (1993), "표준관입시험 해머에너지 측정", 1993년도 학술발표회개요집, 1, 대한토목학회, pp.573-576.
2. 박용원, 이호춘, 박종호 (1994), "표준관입시험의 해머별 에너지 비교", 1994년도 학술발표회논문집, 대한토목학회, pp.821-824.
3. 이명환, 강원탁, 이원제, 김영진 (1992), "실측에 의한 표준관입시험 합마의 낙하속도 분석", 한국지반공학지, 제8권 1호, pp.59-66.
4. 이우진 외 (1998), "PDA를 이용한 표준관입시험의 에너지전달효율 측정", 1998년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.75-84.
5. 이우진, 유재명, 류동현 (2001), "표준관입시험 룯드 길이에 따른 에너지 전달효율", 2001년 학술발표회 논문집, 지반환경공학회, pp. 193-198.
6. 이호춘, 박용원 (1996), "표준관입시험의 해머에너지 수준", 한국지반공학지, 제12권, 제5호, pp.117-125.
7. 이호춘, 김병일, 박용원 (1997), "표준관입시험의 동적효율 측정", 한국지반공학지, 제13권, 제1호, pp.169-180.
8. 조성민, 정중홍, 이우진, 김동수 (2002), "표준관입시험시 룯드에 전달되는 해머의 낙하에너지 평가", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp.71-78.
9. 한국도로공사 (2002), 표준관입시험 활용법 개선 연구, 한국도로공사 도로교통기술연구원, 2002년도 연구보고서, 도교기 GE-02-05.
10. Kovacs, W. D. and Salomone, L.A. (1982), "SPT hammer energy measurement", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.108, No.GT4, pp.599-620.
11. Pile Dynamics, Inc. (2000), *Pile Driving Analyzer. User's Manual*, PDI.
12. Schmertmann, J. H. and Palacios, A. (1979), "Energy dynamics of SPT", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.105, No.8, pp.909-926.
13. Skempton, A.W. (1986), "Standard penetration test procedures and the effects in sands overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation", *Geotechnique*, Vol.36, No.3, pp.425-447.
14. Sy, A. and Campanella, R. G. (1991), "An alternative method of measuring SPT energy", *The 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, S. Prakash, Ed., University of Missouri, Rolla, Mo., pp.499-505.

(접수일자 2005. 2. 21, 심사완료일 2005. 11. 14)