

PDA를 이용한 표준관입시험의 에너지전달효율 측정 The Measurement of SPT Rod Energy Transfer Ratio Using PDA

이우진¹⁾, Woo-Jin Lee, 이원제²⁾, Won-Je Lee, 안신환³⁾, Shin-Whan An

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

SYNOPSIS : Energy transfer ratio to the rod during Standard Penetration Test was measured with Pile Driving Analyzer. Uncertainty by considering velocity energy ratio and dynamic efficiency separately can be excluded by measuring transferred energy with PDA. Energy transfer ratio was obtained with various hammer type, rope condition, rope turns around cathead, respectively.

Key Words : SPT Rod Energy Transfer Ratio, PDA, N-value, Hammer Type, Rope Condition, Rope Turn

1. 서론

표준관입시험(SPT)은 시험과정의 간편성, 토질정수와의 유용한 상관성, 시료채취의 용이성 등 여러 가지 장점을 가지고 있어 현재 가장 널리 이용되고 있는 현장조사시험이다. 그러나 해머가 낙하하는 순간부터 앤빌을 타격하여 룯드에 에너지가 전달되는 과정에서 여러 가지 요인으로 에너지의 손실이 발생하므로, 그 측정결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 에너지 전달효율에 따른 표준화가 요구된다. 이와 관련하여 국내에서는 이명환 등(1992), 박용원 등(1993,1994), 이호춘 등(1996,1997)에 의해서 속도에너지 효율과 동적효율을 측정하기 위한 연구가 있었으나, 현장실무과정에서 순수하게 관입에 사용되는 에너지 수준을 측정 보고한 자료는 미진한 실정이다.

본 연구에서는 미국의 PDI(Pile Dynamic Inc.)사에서 개발·보급하여 국내의 말뚝기초 현장에서 사용이 활성화되어 있는 항타분석기(PDA, Pile Driving Analyzer)를 이용하여 국내 현장에서 실시되고 있는 표준관입시험에서 직접 에너지수준을 측정하였다. PDA는 해머에서 룯드에 전달되는 충격파를 분석하여 실제로 룯드에 가해지는 에너지값을 출력하므로 이론적인 에너지값과의 비율로부터 바로 에너지 전달효율을 산정할 수 있고, 동적효율과 속도에너지 효율을 따로 고려하는 불편과 부정확성을 제거할 수 있다. 에너지전달효율에 영향을 미치는 요소들 중 국내의 실정상 N값에 크게 영향을 미칠 수 있는 항목을 아래와 같이 대분하여 각 항목별로 현장시험을 실시하였다.

- 해머의 종류 : 도넛, 안전, 개량자동
- 로프 사용인 경우 로프의 조건 (납음정도, 회전수)

측정은 실제 지반조사현장과 시험목적으로 선정된 임의 지반조건을 갖는 현장으로 구분하여 수행하였으며 측정된 전달효율을 측정항목별로 통계적으로 분석·비교하였다.

2. 말뚝 향타시스템의 적용

Schmertmann과 Palacios(1979)는 그림 1과 같이 룯드의 상단에 로드셀을 부착하고 해머로 타격하여 힘과 시간의 이력을 구하여 룯드에 전달된 에너지를 측정하였다. 해머의 타격으로 발생된 압축파는 약 5120m/s의 속도로 룯드의 선단부에 도달하며, 선단부에서 인장파로 변환되어 룯드의 상단으로 파가 전달된다. 압축파를 양으로, 인장파를 음의 기호로 표시하면 그림 2와 같이 시간축 상에 힘의 이력이 나타난다. Schmertmann과 Palacios는 시간축 상의 힘의 이력을 다음 식(1)(F2적분법)으로 적분함으로써 룯드에 전달된 에너지수준을 측정하였다.

$$E_i = \frac{c}{EA} \int [F(t)]^2 dt \quad (13)$$

여기서, EA/c : 룯드의 임피던스

한편, SPT는 해머로 세장비가 큰 룯드를 타격함으로써 압축응력파를 발생시킨다는 점에서 말뚝의 향타시스템과 유사한 메커니즘을 갖고 있다. 말뚝에 전달된 에너지를 계산하는 방법은 말뚝 두부에서 측정된 힘과 가속도를 이용해서 다음 식(2)(FV적분법)으로 적분해서 구할 수 있다.

$$E_i = \int F(t) \cdot V(t) dt \quad (14)$$

위의 식은 말뚝 뿐 아니라, 타격에너지를 이용한 관입메커니즘에 널리 적용할 수 있으며, 기존의 F2적분법이 가지고 있는 단점을 보완할 수 있다. F2적분법에서는 힘의 이력만으로 에너지를 구하고 이상적인 무한길이의 룯드로 보정하므로, 실제 룯드에 전달된 에너지와는 다소 오차가 있는 것으로 알려져 있다. 또한 SPT 룯드는 이음새 부분이 많고 길이방향으로 임피던스가 일정하지 않기 때문에, 1차 압축파 부분에서 힘과 입자속도가 일치하지 않는 경우가 많으므로 F2적분법으로 구한 에너지는 신뢰도가 떨어지게 된다. 그림 3은 이음새 부분으로 인한 파형과 F2적분법과 FV적분법으로 구한

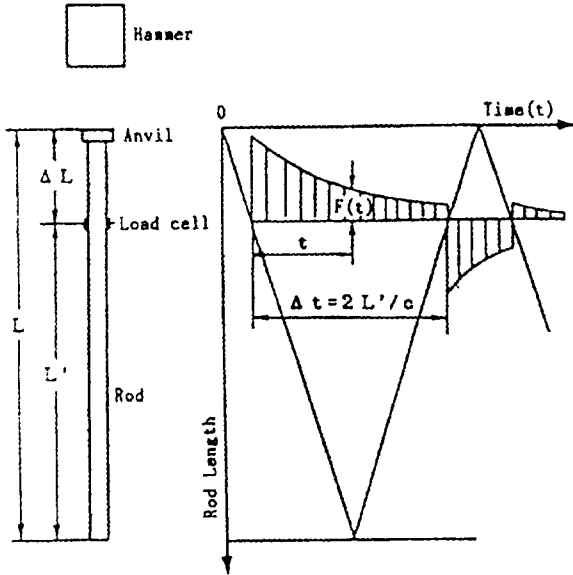


그림 1 해머 시스템과 이론적 힘의 이력

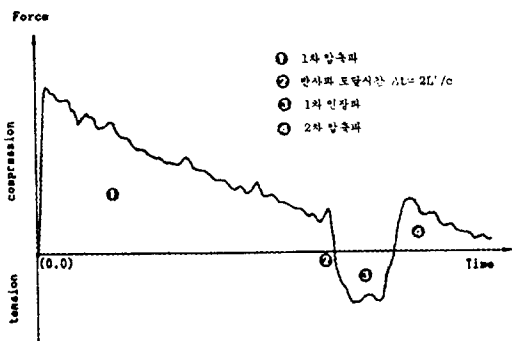


그림 2 측정된 힘의 이력

룯드에너지의 차이를 나타내고 있다.

본 연구에 사용된 PDA에서는 F2적분법과 FV적분법으로 계산된 에너지 값이 각각 출력이 가능하며 (EF2, EMX), 본 연구에서는 FV적분법으로 구한 데이터를 기본으로 정리하였으며, F2적분법으로 구한 데이터를 참고하였다.

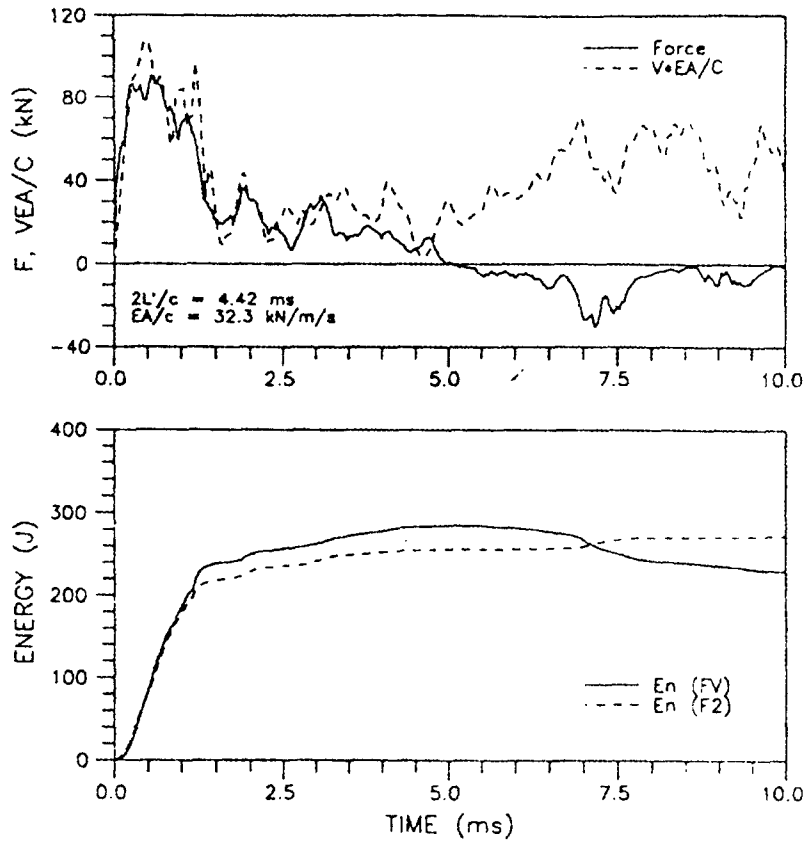


그림 12 타격에너지 파형과 룯드에너지 비교

3. 룯드 에너지전달율의 측정

해머의 에너지는 크게 낙하전의 이론에너지, 타격직전의 낙하에너지, 타격직후에 룯드에 실제로 전달되는 룯드에너지로 나눌 수 있다. 이 중에서 룯드에너지는 샘플러의 관입에 직접 사용되는 에너지로 낙하전의 이론에너지와의 비가 룯드에너지 전달율이 된다.

Kovacs(1917)는 룯드에 전달되는 에너지가 이론에너지의 30~80%가량 되며, 장비의 특성, 시험절차, 시험자의 숙련도, 낙하고, 해머의 종류, 앤빌시스템, 로프의 회전수 등에 전달율에 영향을 받는다고 분류하였다. 또한 시험자에 따른 오차를 최소화하기 위해서 도넛해머로 자아틀(cathead)에 로프를 2회 감는 시스템을 제안하였고, 50~80%의 전달율을 측정하였다.

Schmertmann(1938)은 SPT의 결과에 영향을 줄 수 있는 요소를 보링홀의 크기, 로프의 회전수, 룯드의 길이, 케이싱의 사용여부, 샘플링 튜브의 표준화여부, 샘플러의 관입량 등으로 분류하고, 미주지역의 평균에너지 전달율을 55%로 측정하였다.

본 연구에서는 각 요인별로 전달율에 미치는 영향을 파악하기 위해서 국내 실정상 전달율에 많은 영향을 미치는 항목을 중심으로 현장실험을 실시하였다.

변형율계와 가속도계가 부착된 SPT룰드는 그림 4와 같이 룯드의 상단에 연결되어 해머가 앤빌을 타격할 동안 변형율과 가속도를 측정한다. 변형율계를 통한 변형율의 측정과 가속도계를 통한 가속도의 측정은 말뚝의 향타시 변형율과 가속도를 측정하는 절차와 거의 유사하다. 그러나 SPT의 경우 해머와 앤빌이 모두 강재로 되어있기 때문에 타격시 높은 주파수의 파가 발생하므로 20kHz이상의 데이터 샘플링

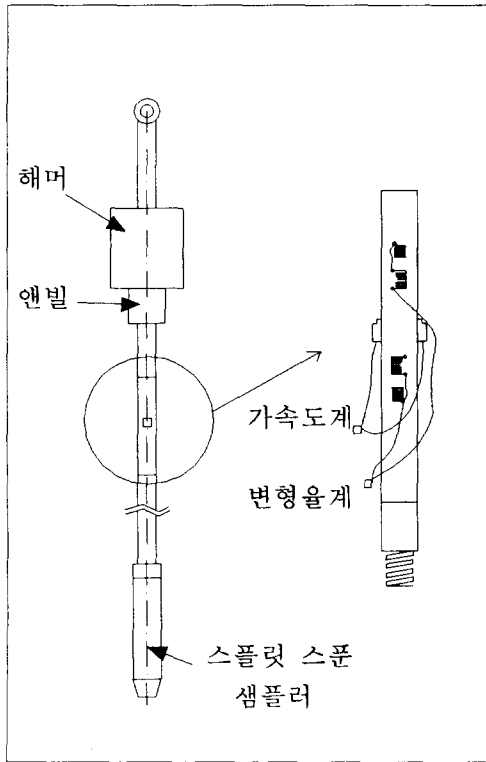


그림 4 로드에너지 측정시스템

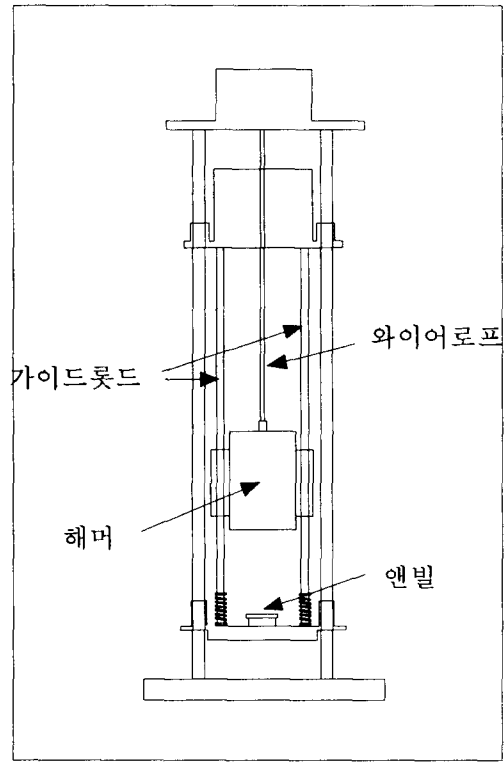


그림 14 개량 자동도넛해머

속도가 요구된다. 변형율계와 가속도계에서 얻어진 아날로그 신호는 PDA를 통해서 디지털화 되어 힘과 입자속도로 변환되고, 위에서 언급한 F2적분법과 FV적분법으로 로드에너지로 계산되어 출력된다.

에너지전달율은 많은 요인에 의해서 영향을 받기 때문에, 한가지 요인에 의한 영향을 고려하기 위해서는 다른 모든 조건은 동일해야 하며, 이를 위해서 본 연구에서는 같은 공내의 한 지점에서 조건을 바꿔가며 여러 번 실험을 실시하였다.

4. 요인별 에너지전달효율 분석

4.1 해머별 에너지전달효율

P. K. Robertson과 R. G. Campanella(1983)은 실험을 통하여 도넛해머의 에너지전달효율은 약 43%, 안전해머의 전달효율은 약 62%로 측정·보고하였으며, 전달효율의 범위는 19~89%로 편차가 상당히 큰 것으로 나타났다.

국내에서는 도넛해머가 가장 많이 쓰이고 있고, 안전해머와 편의상 개량된 자동해머가 종종 쓰이고 있다. 본 연구에서는 같은 지반조건 하에서 이 세가지 해머의 에너지전달효율을 측정하였다. 도넛과 안전해머는 중고 로프로 자아틀에 두 번 감는 시스템으로 측정하였으며, 자동해머는 그림 5와 같이 개량된 자동도넛해머로 사용하였다. 해머의 무게는 모두 63.5kg이며 해머별 에너지전달효율은 그림 6과 표 1에 나타나 있다.

도넛해머는 평균 약 39.2%, 안전해머는 65.8%, 개량 자동해머는 54.7%의 에너지를 전달하는 것으로 나타났다. 한국 공업규격이 규정한 도넛해머를 기준으로 안전해머는 약 68.0%, 개량 자동해머는 39.8%가량 과대하게 에너지가 전달되는 것으로 나타났다.

표 4 해머별 평균 에너지전달율

해머	해석 타격수	평균 에너지 전달율 (%)	E / E_{donut}
DONUT	233	39.2	1.0
SAFETY	24	65.8	1.680
Modified Auto-Donut	168	54.7	1.398

개량 자동해머는 낙하고가 거의 일정하게 유지되고 가이드 룯드가 고정되어 속도에너지 효율이 거의 일정하지만, 완전한 자유낙하를 고려하지 않고 설계되어 있고, 해머의 형태가 도넛해머와 비슷하여 도넛해머와 유사한 동적효율을 갖기 때문에 안전해머보다 낮은 에너지전달율을 갖는 것으로 분석되었다.

안전해머의 경우 도넛해머보다 속도에너지 효율과 동적효율이 모두 우수하기 때문에 에너지전달율이 월등하게 큰 것으로 나타났다.

위의 두가지 해머는 한국 공업규격에서 사용하고 있는 도넛해머보다 에너지 전달효율이 좋기 때문에 N값을 과소평가하게 되므로 표준화가 필요하다.

$$N_I = N_{II} \cdot \frac{E_{II}}{E_I} \quad (15)$$

Schmertmann(1979)이 제안한 위의 식(3)에 의해서 안전해머와 개량 자동해머로 구해진 N값을 도넛해머를 기준으로 표준화시키면 다음 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} N_d' &= 1.680 \cdot (N_{safety}) \\ N_d' &= 1.398 \cdot (N_{auto}) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, N_d' : 도넛해머로 변환된 N값
 N_{safety} : 안전해머로 측정된 N값
 N_{auto} : 자동해머로 측정된 N값

4.2 로프의 낚음 정도에 따른 에너지전달효율

로프는 해머에 포텐셜에너지를 가하는 매개체일 뿐 아니라, 해머의 자유낙하를 방해하는 요소가 되기도 한다. 따라서 로프의 습윤정도, 낚음 정도 등 로프 자체의 상태만으로도 속도에너지 효율에 크게 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 같은 지반조건하에서 1년 이상 사용한 로프와 새 로프를 번갈아 사용하면서 실험을 실시하였고, 표 2에 그 결과가 나타나 있다.

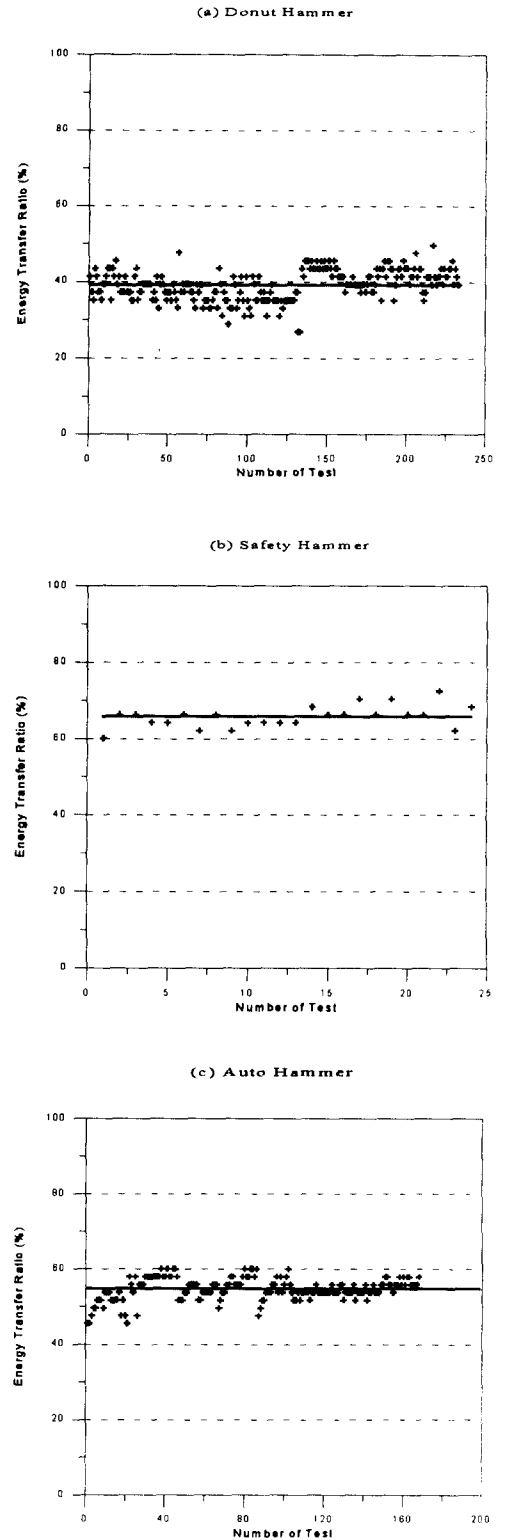


그림 6 해머별 에너지전달율

표 5 로프의 낚음 정도에 따른 에너지전달효율

Hammer/회전수		E_{used}	E_{new}	E_{new}/E_{used}
Donut	1회	37.81	36.88	0.975
	2회	36.02	33.39	0.927
	3회	32.03	30.77	0.961
E_{ave}		35.283	33.68	0.954
Safety	1회	71.01	67.66	0.953
	2회	68.53	64.11	0.936
	3회	64.67	61.15	0.946
E_{ave}		68.07	64.31	0.945

위 실험의 결과로 새 로프를 사용한 도넛해머의 경우 약4.6%, 안전해머의 경우 약 5.5%내외의 전달을 저하현상을 발견하였다. 새 로프의 경우 해머의 낙하시 자아틀과의 마찰이 크고 뺏뺏해서 속도에너지 효율을 저하시키는 것으로 보여지며, 일반적으로 쓰여지는 중고 로프의 N값으로 변환하면 다음 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 N_{u(donut)}' &= 0.954 \cdot N_{new} \\
 N_{u(safety)}' &= 0.945 \cdot N_{new}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

4.3 로프의 회전수에 따른 에너지전달효율

자아틀에 감겨진 로프는 자아틀과 로프의 마찰에 의해 해머에 포텐셜에너지를 가하게 된다. 그러나 자아틀과 로프의 마찰은 해머의 자유낙하를 방해하는 요소로 작용하게 되며, 에너지전달효율을 떨어뜨린다. 특히 로프를 자아틀에 감는 회수가 많아질수록, 자아틀의 직경이 클수록 마찰면적이 커지므로 에너지전달효율이 떨어진다. 표 3은 로프의 회전수에 따른 에너지 전달효율을 나타내고 있다. 실험결과에 따르면 안전해머보다 도넛해머가 로프회전수에 의해서 영향을 더 크게 받음을 알 수 있고, 1회와 2회의 차이보다 2회와 3회의 차이가 더 커짐을 알 수 있다.

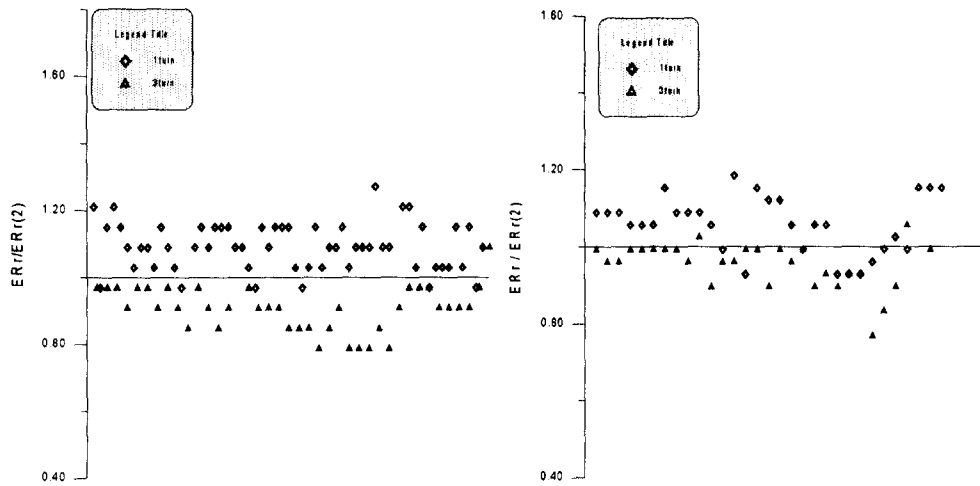
일반적으로 가장 많이 사용되는 로프회전수는 2회로, 이때의 N값으로 보정하면 다음 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 N_{d2}' &= 1.072 \cdot N_{d1} & , & & N_{d2}' &= 0.894 \cdot N_{d3} \\
 N_{s2}' &= 1.037 \cdot N_{s1} & , & & N_{s2}' &= 0.940 \cdot N_{s3}
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

그림 7은 평균에너지전달율의 비를 2회를 기준으로 나타낸 그림이다.

표 6 로프의 회전수에 따른 에너지전달효율

해머종류	로프회전수	평균 에너지전달율	2회 대비 에너지 증감율	에너지 증감율(%)
donut	1회	37.64	1.072	7.2
	2회	35.13	1.000	0
	3회	31.40	0.894	-10.6
safety	1회	69.26	1.037	3.7
	2회	66.80	1.000	0
	3회	62.80	0.940	-6.0



(a) Donut hammer

(b) Safety hammer

그림 7 평균 에너지전달율 비 (2회기준)

5. 토의 및 결론

해머의 종류, 로프의 상태, 로프의 회전수에 따른 에너지전달효율과 그 보정계수가 표 4에 나타나있다. 해머의 종류에 따라서 39.8~68%, 로프의 상태에 따라서 4.6~5.5%, 로프의 회전수에 따라서 3.7~-10%의 에너지전달율의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 한국 공업규격에 따라 도넛해머, 중고로프, 2회전의 시스템으로 에너지를 변환시키기 위한 식은 다음과 같다.

$$N' = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot N_{measured} \quad (19)$$

표 7 조건별 에너지전달율과 보정계수

조 건	종 류		에너지전달효율	보정계수	
해 머	Donut		39.17	α_1	1.0
	Safety		65.79		1.680
	Auto		54.74		1.398
로프상태	Donut	New	33.677	α_2	0.954
		Used	35.283		1.0
	Safety	New	64.31		0.945
		Used	68.07		1.0
로프 회전수	Donut	1	37.6425	α_3	1.072
		2	35.1275		1.000
		3	31.395		0.894
	Safety	1	69.257		1.037
		2	66.797		1.000
		3	62.797		0.940

위의 결과를 토대로 국제 표준규격인 N_{60} 과 비교해 보면, 도넛해머의 경우는 N 값을 과대평가하고, 안전해머의 경우 N 값을 약간 과소평가하는 경향이 있다. 위의 보정식으로 보정한 값을 N_{60} 으로 변환하면 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\begin{aligned}
 N_{60} &= 0.65 \cdot N_{donut} \\
 &= 1.10 \cdot N_{safety} \\
 &= 0.91 \cdot N_{auto}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

국내에서 발표된 연구결과와 비교하면 표 5와 같다. 표 5에 나타난 결과로부터 도넛해머의 경우 기존의 연구결과보다 더 작은 에너지를 전달하는 것으로 측정되어 N_{60} 대비 SPT N 값의 신뢰도가 저하되는 것으로 나타났다. 자동 도넛해머는 시험자의 숙련도에 의한 오차를 제거했을 뿐 아니라, 60%에 가까운 에너지를 전달하기 때문에 실무에서 사용하기에 양호한 결과를 주는 것으로 나타났으나, 편의상 임의로 개조하거나 관리에 소홀할 경우 전혀 다른 경향을 보일 가능성이 있으므로 사용전에 반드시 에너지전달율에 대해서 검증을 거친후에 사용해야할 것으로 판단된다. 안전해머의 경우 외국의 문헌과 거의 유사하게 측정되었을 뿐 아니라, 60%에 가까운 에너지를 전달하는 등 국내실정상 가장 바람직한 해머인 것

으로 분석되었으나, 본 연구에서는 안전해머에 관한 데이터가 충분치 않아 데이터의 보완을 위한 시험이 진행 중이다.

표 8 국내의 연구결과 비교

연구자	해머	효율(%)	비고
박 등(1992)	Donut	52	동적효율(η_d)가정, $\eta_d = 0.78$
박 등(1993)	Donut	50	동적효율(η_d)가정, $\eta_d = 0.78$
	Auto	59	동적효율(η_d)가정, $\eta_d = 0.78$, auto trip hammer
이 등(1996)	Donut	46.2	동적효율(η_d) 실내실험·수치해석, $\eta_d = 0.72$
	Auto	54	동적효율(η_d) 실내실험·수치해석, $\eta_d = 0.72$, auto trip hammer
본 연구	Donut	39.2	롯데에너지 전달율(ERr) 직접측정
	Safety	65.8	롯데에너지 전달율(ERr) 직접측정
	Auto	54.7	롯데에너지 전달율(ERr) 직접측정, modified auto donut hammer

또한 본문에 포함된 내용외에 다른 여러 가지 요인이 에너지전달율에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 그중에서 롯데의 길이와 N값이 에너지전달율에 미치는 영향은 실험중에 있다. 또한 실제 말뚝의 시공현장에서 동·정재하 시험을 통하여 얻어진 데이터와 위에서 얻어진 식으로 보정한 N값을 비교하여 correlation을 제안하기 위한 연구를 진행중에 있다.

참고문헌

1. 이명환, 강인탁, 이원제, 김영진 (1992), "실측에 의한 표준관입시험 함마의 낙하속도 분석", 한국지반공학회지 제8권 제1호 별책, 한국지반공학회, pp 59-66
2. 박용원, 이호춘, 박종호, 김석훈 (1993), "표준관입시험의 해머에너지 측정". 1993년 학술발표회 개요집, (I)대한토목학회, pp 573-576.
3. 박용원, 이호춘, 박종호 (1994), "표준관입시험의 해머별 에너지 비교, 1994 학술발표회 논문집, 대한토목학회(I), pp 821-824.
4. 박용원, 이호춘 (1996), "표준관입시험의 해머에너지 수준", 한국지반공학회지 제12권 제5호, 한국지반공학회, pp 117-125.
5. 이호춘, 김병일, 박용원 (1997), "표준관입시험의 동적효율 측정", 한국지반공학회지 제13권 제1호, 한국지반공학회, pp 169-180.
6. Elliott E. Drumright, Charles W. Pflingsten, and Robert G. Lukas, "Influence of Hammer Type on SPT Results", *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 122, No.7.

7. C. R. I. Clayton, M. B. Hababa and N. E. Simons (1985), "Dynamic penetration resistance and the prediction of the compressibility of a fine-grained-a laboratory study", *Geotechnique*, vol.35, No. 1, pp. 19-31.
8. P. K. Robertson, R. G. Campanella, M. ASCE, and A. Wightman (1983). "SPT-CPT Correlations", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 109, No. 11, pp.1449-1459
9. A. W. Skempton (1986), "Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique*, Vol 36, No. 3, pp 425-447.
10. R. G. Campanella Alex Sy (1994), "Recent Developments in Energy Calibration of Penetration Tests at UBC", *Proc. 13th ICSMFE*, New Delhi, pp.151-156
11. John H. Schmertmann, ASCE and Alejandro Palacios, (1979), "Energy Dynamics of SPT", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 105, No. GT8, pp.909-926