

표준관입시험시 룯드에 전달되는 해머의 낙하에너지 평가 1

The Hammer Energy Delivered to the Drilling Rod in the SPT 1

조성민¹⁾, Sung-Min Cho, 정종홍²⁾, Jong-Hong Jung, 김동수³⁾, Dong-Soo Kim, 이우진⁴⁾, Woo-Jin Lee

1) 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, Chief Researcher, Korea Highway Corporation

2) 한국도로공사 도로연구소 연구원, Researcher, Korea Highway Corporation

3) 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Korea Advanced Institute of Science & Technology

4) 고려대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Korea University

SYNOPSIS : The N -value in the standard penetration test(SPT) is affected by the magnitude of the rod penetration energy transmitted from the falling hammer as well as the geotechnical characteristics of the ground. Understanding of the striking energy efficiency in the SPT equipment is getting important for that reason. The energy efficiencies of the doughnut hammer with the hydraulic lift system and the automatic trip hammer system were investigated through field tests using the instrumented rod and wave-signal acquisition systems including the pile driving analyzer(PDA) . The rod energy ratio, ER_r was defined as the ratio of the energy delivered to the drilling rod to the potential free-fall energy of the hammer. It appears that the type of the hammer and lift/drop system had a strong influence on the energy transfer mechanism and ER_r also varies according to the energy instrumentation system and the analysis methods.

Key words : standard penetration test, N -value, hammer, energy ratio(efficiency), rod

1. 서론

1902년 Gow가 원형을 고안하고, 1948년 Terzaghi가 지금의 이름을 붙인 표준관입시험(SPT)은 국내에서는 지반조사를 대표하는 시험법으로 자리하고 있고, N 값은 지반공학적 설계와 해석을 위한 거의 유일한 참조값으로 이용되고 있다. 그러나, 표준관입시험은 시험 자체의 근본적 한계와 시험 수행자의 자의적 판단, 시험장비의 비표준화, N 값과 다른 지반정수간 경험관계의 무리한 확대적용 등으로 시험 결과의 신뢰성에 대해 끊임없이 문제가 제기되고 있으며, 시험 결과의 오·남용으로 설계와 시공 품질에 적지 않게 악영향을 미친 사례들이 계속 보고되고 있다.

이 글에서는 지반의 고유한 특성 외에 N 값에 가장 큰 영향을 미치는 변수인 SPT 해머의 낙하에너지 효율에 대해서 현장에서 실측하여 분석한 내용의 일부를 정리하였다. 해머 에너지 효율에 대한 평가는 SPT와 관련된 문제 해결의 주요 관건이라고 할 수 있는데, 국내에서는 1990년대 들어 일부 연구자들이 이에 대한 연구를 시작하였으며, 지금까지는 로프를 이용하는 도넛형 해머(doughnut hammer)와 안전해머(safety hammer)를 중심으로 성과가 일부 도출되었다(이명환 등,1992; 박용원 등,1993,1994; 이호춘,1996; 이호춘 등,1997; 이우진 등 1998). 본 논문에서는 유압식 와이어 장치를 이용하는 도넛형 해머와 자동타격이 이루어지는 자동운행해머(automatic trip hammer)에 대한 에너지 효율을 다루었으며, 추후 국내에서 사용 중인 모든 방식의 장비에 대해 에너지효율을 포괄적으로 검증할 계획이다. 이 논

문은 표준관입시험과 관련하여 당면한 제반 문제들을 해결하기 위해 한국도로공사가 외부연구기관들과 협동으로 진행 중인 N 값 영향인자들의 체계적 평가, N 값 경험식 및 보정법 검증, SPT 장비 개량 및 시험환경 개선 방안 모색 등에 대한 1차년도 연구 성과의 일부로, 향후 고속도로 설계 및 시공을 위한 각종 시방, 기준, 지침 등에 즉각 반영하여 국내 지반조사 및 설계 관행을 획기적으로 개선하는 데에 활용 것이다(한국도로공사, 2000).

2. 표준관입시험과 해머 에너지

2.1. 샘플러 관입에 소요되는 에너지

표준관입시험은 63.5kg의 해머를 76cm 높이에서 낙하시켜 룯드(앤빌)를 타격하여 이와 연결된 샘플러를 관입시키는 과정으로 이루어진다. 이 과정에서 해머의 원래 위치에너지 $E_{n100\%}$ 는 낙하거리, 마찰 등에 의해 룯드 타격 직전에 E_h 로 바뀌고, 룯드를 타격하는 순간에는 E_r 로 변화되어 압축파의 형태로 샘플러에 전달된다. 따라서 실제 샘플러의 관입에 관여하는 에너지는 룯드에 직접 전달되는 E_r 이 되며, 이 때 발생하는 충격파는 이후 룯드 상단과 샘플러를 오가며 인장과 압축을 반복하며 감쇠되는 복잡한 과정을 거치게 된다. 그림 1에서 A 영역은 1차 압축파의 전달을 나타내며, B 점은 샘플러에서 반사된 인장파가 룯드 상부에 도달하는 시점(tension cutoff)이 된다. 1차 압축파의 첨두에서부터 B점까지 소요 시간은 해머 타격시 충격파가 룯드 상단에서 샘플러 하단까지 전파되었다가 다시 룯드 상단까지 돌아오는 데 걸리는 시간이며, 룯드 길이 L 과 룯드 내 파의 전달속도 c 를 이용하여 나타낼 수 있다.

룰드에 전달되는 해머의 낙하에너지 E_r 은 장비의 종류, 특성, 작동 방식은 물론이고, 시험자의 숙련도, 신체상태, 작업 환경 등에 따라서 달라지게 되며, E_r 이 커질수록 N 값은 선형적으로 감소하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 원래의 이론적 에너지($E_{n100\%}$)에 대한 룯드 전달에너지(E_r)의 비로 표현되는 에너지 효율 ER_r 은 N 값의 합리적 산정을 위해 매우 중요한 고려사항이 된다(식(1)).

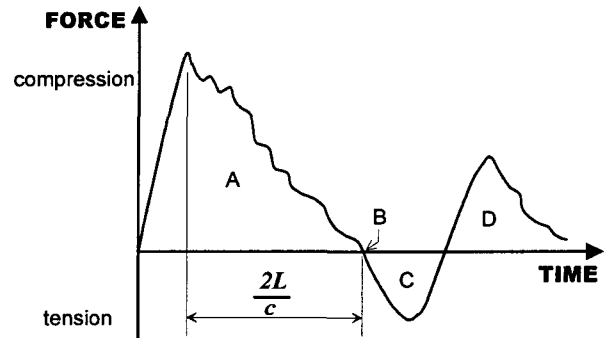


그림 1. 해머 타격시 하중-시간 파형(ASTM D4633)

$$ER_r = \frac{E_r}{E_{n100\%}} = \frac{E_r}{W \cdot h} = \frac{E_r}{63.5\text{kg} \times 76\text{cm}} (\times 100\%) \quad (1)$$

2.2. 낙하에너지 산정 방법

해머 에너지는 해머가 룯드를 타격하는 데 필요한 물리적인 일(W)로 정의할 수 있으며, 이는 식(2)와 같이 표현된다. 여기서, F , V 는 각각 힘, 속도이며, x 와 t 는 변위와 시간이다.

$$E_n(t) = W = \int F_1 dx = \int F(t) V(t) dt \quad (2)$$

식(2)는 힘과 속도 사이의 관계를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(E , A : 룯드탄성계수, 단면적).

$$E_n(t) = \frac{EA}{c} \int V^2(t) dt = \frac{c}{EA} \int F^2(t) dt \quad (3)$$

따라서, 룯드에 변형률계, 로드셀, 가속도계 등을 단독, 또는 조합으로 설치하여 해머 타격시 시간에 따른 속도, 또는 힘의 크기를 측정하고 응력파를 적분하여 식(2), 또는 식(3)의 관계를 이용해서 에너지를 산정할 수 있다. 힘과 속도를 모두 측정하는 식(2)의 방법을 힘-속도 적분방법(*FV method*)라 하고, 힘, 또는 속도만을 이용하는 식(3)의 방법을 힘 적분방법(F^2 method), 또는 속도 적분방법(V^2 method)이라 한다. *FV* 방법을 이용할 경우 그림 1의 B점(tension cutoff 시점)을 결정할 필요 없이 힘-속도 적분값의 최대값을 구한다. F^2 방법으로 산정한 에너지는 실제 룯드에 전달된 값과는 다소 차이가 있는 것으로 알려져 있다.

2.3. 연구 동향

외국에서는 이미 1970년대 후반부터 표준관입시험의 에너지 효율에 대한 연구가 집중적으로 시작되었는데, Schmertmann(1978), Kovacs와 Salomone(1982), Seed 등(1985), Riggs(1986), Skempton(1986), Clayton(1990), Robertson과 Woeller(1991) 등이 많은 성과를 이루어냈다. 이에 반해 국내에서는 1990년대에 이르러 에너지 효율에 대한 연구가 개시되었으며, 시험 규모, 해석 방법의 합리성, 연구의 연속성과 실용성 등의 차원에서 많은 보완이 필요한 단계이다.

이명환 등(1992)은 SPT 해머의 낙하속도를 측정하여 낙하에너지를 간접적으로 계산하여 우리나라에서 사용 중인 *N* 값을 분석하였고, 국내 *N* 값은 국제적인 표준 값으로 인정되는 N_{60} 과 다소 차이가 있으며 에너지 효율이 미국이나 일본의 80~85% 수준에 불과하므로, 측정된 *N* 값을 에너지 효율별로 보정해야 한다고 하였다. 이호춘 등(1996)은 초음파 송수신장치와 PC를 이용하여 국내 현장에서 시행되는 SPT 해머의 타격에너지를 측정하여 로프-폴리형 해머(도넛해머)와 자동해머의 에너지가 이론적 에너지의 64%, 75% 정도라고 하였다. 또한, 이호춘 등(1997)은 앤빌과 룯드를 통하여 전달되는 도중에 발생하는 손실을 고려한 표준관입시험의 동적효율을 Charpy 충격시험과 파동이론에 의한 해석 프로그램인 WEAP을 적용하고, 현장시험을 통하여 검증된 결과로부터 국내 SPT의 동적효율로 0.72를 제시하였다. 이우진 등(1998)은 해머 타격으로 룯드에 응력파가 전달되는 현상이 말뚝 타입시 발생하는 현상과 동일하다고 보고, 향타분석기(PDA, pile driving analyzer)를 이용하여 도넛해머, 안전해머, 개량자동해머에 대해 관입에너지를 측정하였다.

3. 현장 검증시험

현재 국내에서 사용 중인 다양한 시험장비에 대해 대표적인 지층에서 룯드에 전달되는 해머 에너지를 집중적으로 측정 중에 있으며, 이 논문에서는 유압식 도넛해머 방식과 자동운행해머 방식에 대한 시험 결과를 분석하였다. 해머의 에너지 효율에 영향을 주는 요인 중 객관적으로 정량화할 수 없는 요인들은 실제 평가가 매우 어려우므로, 검증시험은 KS F2307에서 규정한 낙하고 및 시험 절차를 준수하는 것을 전제로 하여 인적인 오차를 가급적 배제하도록 하였다. 시험 장소는 풍화잔적토층, 또는 실트질 점성토 퇴적층이 약 10~15m 두께로 형성된 전라북도 김제 지역으로, 사질토, 점성토층 각각 동일 장소에서 모두 12개의 시험공을 10~17m 깊이로 굴착하여 SPT를 총 107회 반복 실시하였으며, 매번 에너지 효율을 측정하였다(표 1).

도넛해머의 경우, 과거에는 사람이 직접 로프를 당겨 인양하는 로프-폴리(R-P) 방식을 많이 사용하였으나, 근래에는 유압식 기구를 널리 사용하고 있는데, 본 시험시에는 유압펌프를 이용하여 강선(steel wire)을 윈치에 걸어 스위치로 작동하는 반자동 방식의 국산 장비를 이용하였다(표 2).

표 1. 2000년 1차 현장검증시험 수행 현황

장비종류	시험지층	시험공번	시험횟수
반자동 도넛해머	사질토	BH-1~2	26회
	점성토	BH-3~4	17회
자동운행 해머	사질토	BH-B~E	35회
	점성토	BH-F~H	29회

자동운행해머는 국내에서는 드문 장치로서, 균일한 낙하고를 유지하며 자동 타격하는 CME-750 시추기(미국)를 사용하였다(표 2). 시험 전 측정된 도넛 해머의 중량이 규격에 약간 미달하였으나, 이 또한 통상적인 시험 오차 요인으로 보았다.

롯드에 전달되는 해머의 낙하에너지는 타격 순간 롯드에서 발생하는 응력과 신호를 측정하여 F^2 방법과 FV 방법에 의한 적분을 통해 산정하였다. 응력파의 크기와 속도는 계기가 부착된 별도의 롯드를 앤빌과 기존의 상단 롯드 사이에 연결하여 측정하여 신호분석기에서 처리하였다. 이를 위해 사용한 측정 장비는 두 종류로서, 각각의 조합은 표 3과 같다.

표 2. 현장검증시험에 사용한 SPT 장치의 개요

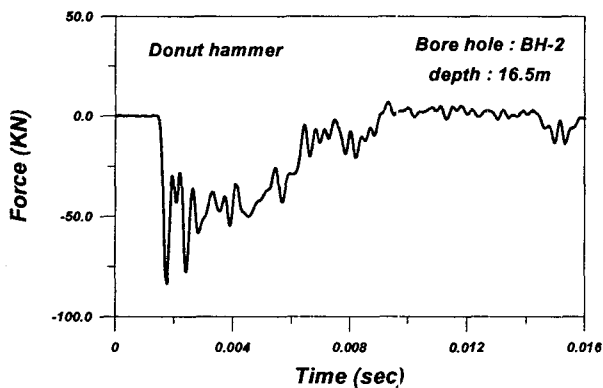
구분	유압식 도넛해머 (국내 제작)	자동운행해머 (CME750)
굴착 방법	수세식 로터리 보링	중공관 오거 보링
시추공 규격	BX	φ 180mm
해머 규격	φ 20cm×126cm 중량 61.6kg	내장(미확인)
타격 속도	20~30회/분	25회/분, 60회/분
앤빌 크기	φ 90mm×110mm	내장(미확인)
해머인양방식	강선(φ 3mm) 및 윈치(φ 100mm)로 구성된 반자동식	유압으로 작동하는 체인구동방식 (자동 인양/타격)

표 3. 타격 에너지 측정 장치의 재원

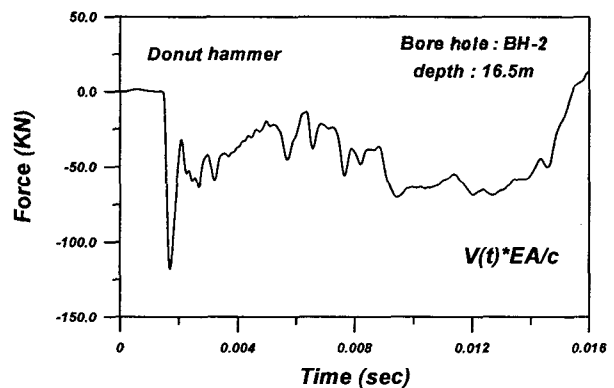
구분	제원
장비 A	1. 측정용 롯드 : 자체 제작 롯드 (변형률계를 풀브릿지 형식으로 연결하여 구성된 로드셀과 50,000g까지 측정 가능한 가속도계를 부착) 2. 신호분석 : 변형률증폭기, 저주파통과필터, 동적신호분석기 + MATLAB(수치적분)
장비 B	1. 측정용 롯드 : 전용 롯드 (미국 PDI사 제작, 포일식 변형률계 내장형, 가속도계 부착형) 2. 신호분석 : 향타분석기 (PDA, PDI사 제작 : A/D 변환 및 인식기, 단말기, 조정판으로 구성)

4. 시험결과 분석 및 토의

현장에서 측정된 롯드에 발생한 응력파에 대해서 시간에 따른 힘의 크기를 로드셀 및 가속도계 신호로부터 구하고, 사용한 해머 종류별로 그림 2, 3에 나타내었다. 힘의 크기는 로드셀과 가속도계 신호를 통해 각각 구할 수 있는데, 가속도로부터 구한 힘의 크기가 다소 큰 경향을 보였으며, 이 때문에 힘-속도 방법으로 구한 에너지가 힘 적분 방법으로 구한 값보다 크게 된다. 그림들에서 도넛해머와 자동운행해머 간의 신호 차이를 확인할 수 있다.

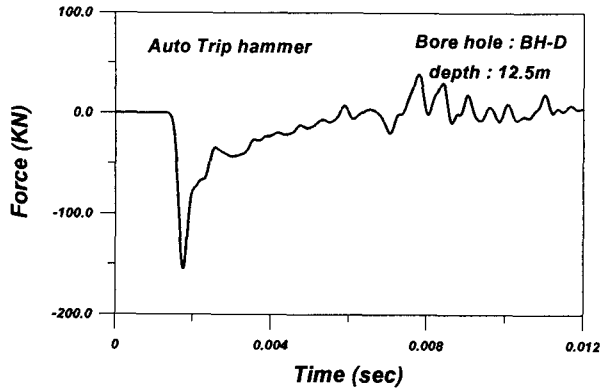


(a) 응력파 힘의 크기 (로드셀)

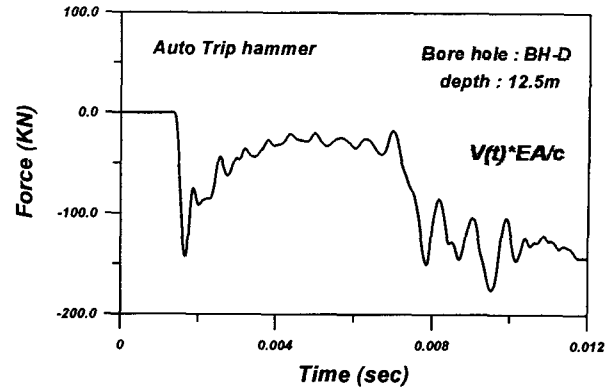


(b) 응력파 힘의 크기 (가속도계)

그림 2. 해머 타격 순간 롯드에서 측정된 응력파 신호 1 : 유압식 도넛해머 (BH-2, 16.5m 깊이)



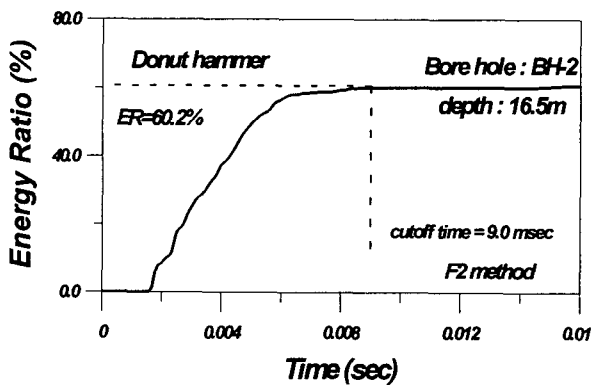
(a) 응력파 힘의 크기 (로드셀)



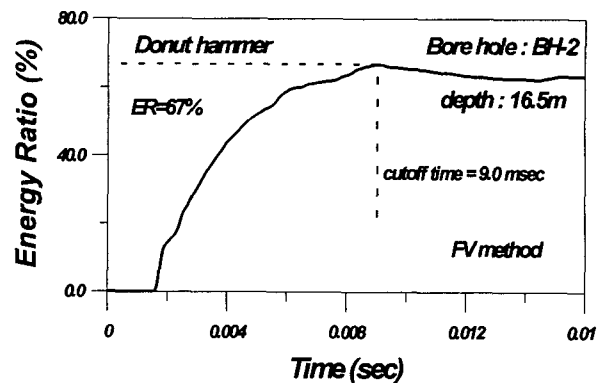
(b) 응력파 힘의 크기 (가속도계)

그림 3. 해머 타격 순간 룯드에서 측정된 응력파 신호 2 : 자동운행해머 (BH-D, 12.5m 깊이)

그림 4, 5는 그림 2, 3과 같은 각 시간까지의 힘, 또는 힘과 가속도 신호를 각각 F^2 방법, FV 방법에 따라 적분하여 얻은 에너지 E_t 를 해머의 이론적 낙하에너지 $E_{n100\%}$ 로 나눈 값, 즉, 해머의 낙하에너지 비 ER_t 를 유압식 도넛해머를 사용한 BH-2 시추공과 자동운행해머를 사용한 BH-D 시추공에 대하여 나타낸 것이다. 시험 지점들은 모두 반경 10m 이내의 거의 동일한 지점이라고 할 수 있음에도 표준관입시험에 사용하는 장비, 에너지 산정 방법에 따라 에너지 효율이 상이하게 평가되는 것을 알 수 있다.

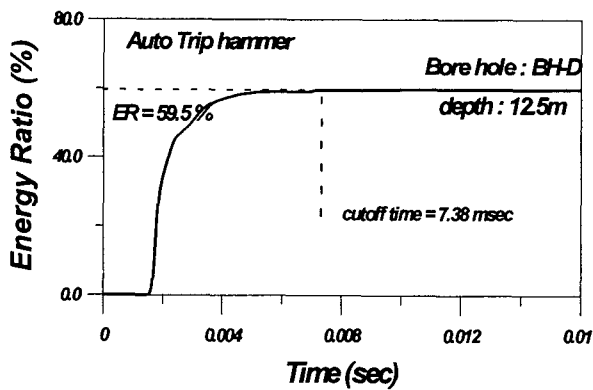


(a) 힘 적분 방법(F^2 method)

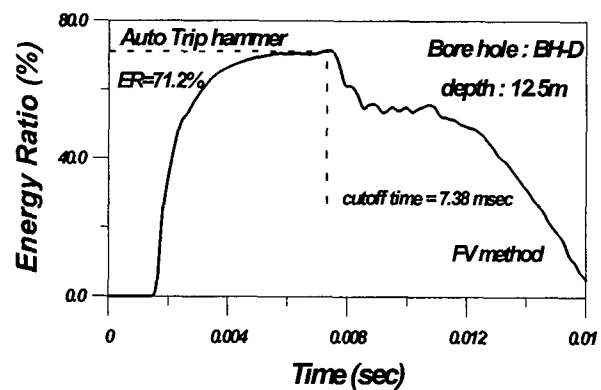


(b) 힘-속도 적분 방법(FV method)

그림 4. 룯드에 전달되는 해머의 낙하에너지 비 1 : 유압식 도넛해머 (BH-2, 16.5m 깊이)

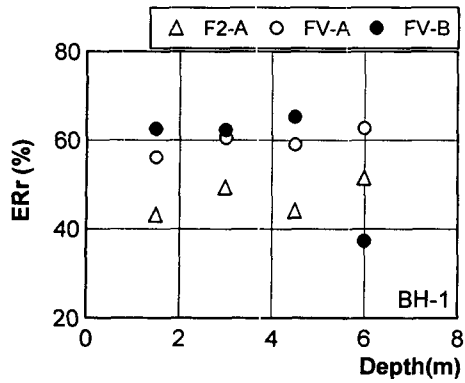


(a) 힘 적분 방법(F^2 method)

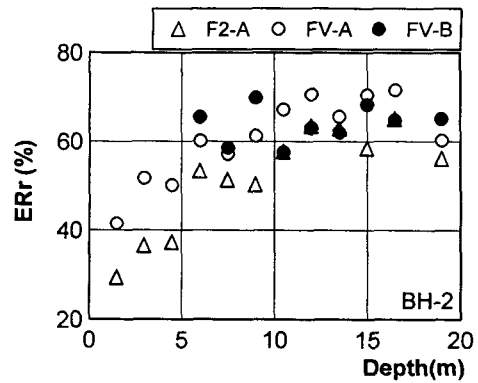


(b) 힘-속도 적분 방법(FV method)

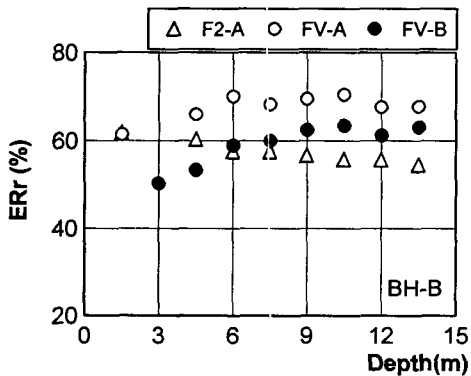
그림 5. 룯드에 전달되는 해머의 낙하에너지 비 2 : 자동운행해머 (BH-D, 12.5m 깊이)



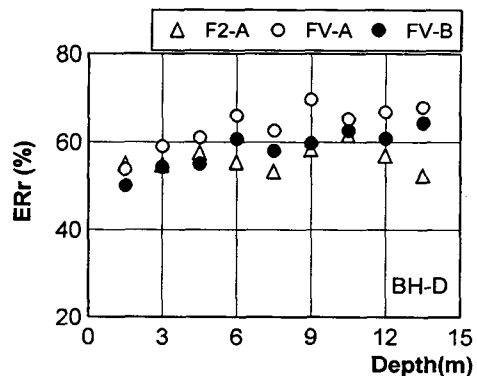
(a) 도넛해머 : BH-1



(b) 도넛해머 : BH-2



(c) 자동운행해머 : BH-B

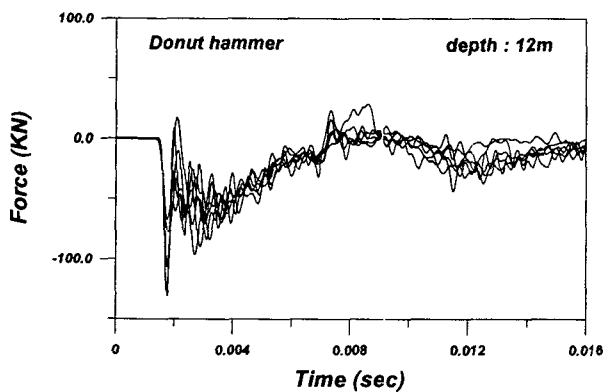


(d) 자동운행해머 : BH-D

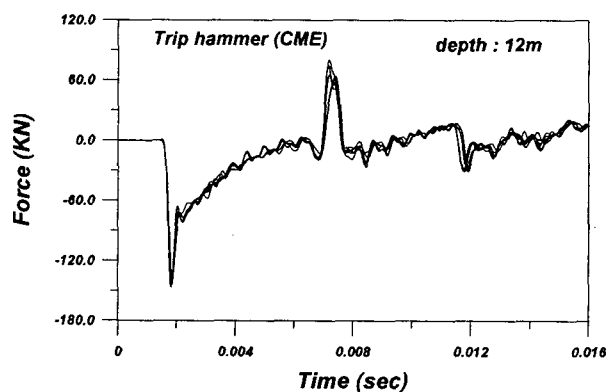
그림 6. 해머 종류, 산정방법별 룯드 에너지효율(ER_r) 차이
(F2: F^2 방법, FV:FV방법, -A:신호측정장비A(표3), -B:신호측정장비B(표3))

그림 6은 각 시추공, 사용한 해머의 종류, 에너지 산정방법별로 해머의 낙하에너지 비 ER_r 를 깊이에 따라 정리한 것이다. 그림에서 FV 방법으로 산정한 에너지가 F^2 방법으로 구한 값보다 다소 크며, 도넛해머 방식이 자동운행해머 방식에 비해 에너지 비의 산포 정도가 다소 크다는 사실을 알 수 있다. 후자의 경우 자동운행해머 타격의 반복성이 상대적으로 우수하기 때문인데, 이는 그림 7에서도 확인된다. 또한 특이한 현상으로, 이번 시험에 사용한 자동운행해머의 경우 그림 8과 같이 타격 속도에 따라 에너지 비에 10% 이상의 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

그림 6, 8의 결과는 표 4에 다시 정리하였다.

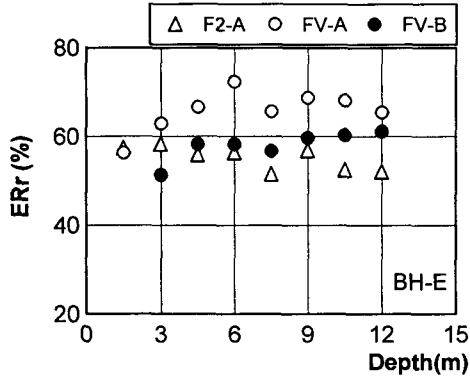


(a) 유압식 도넛해머

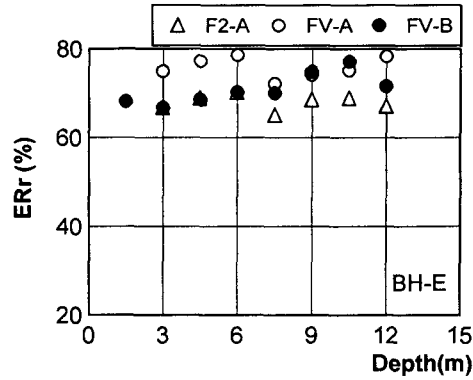


(b) 자동운행해머

그림 7. 동일 지점에서 연속 측정된 SPT 해머 종류별 타격시 룯드 응력과 힘의 크기 비교



(a) 타격 속도 : 25타/분



(b) 타격 속도 : 60타/분

그림 8. 자동운행해머 이용시 타격 속도별 에너지효율 차이 : BH-E

표 4. 룯드에 전달되는 해머의 낙하에너지 측정 결과 († A, B : 표 3의 측정장치 'A'와 'B')

지층 구분	해머 종류	낙하 방식	타격 속도	평균 에너지 비 ER_r , %† ()은 분포범위		
				F ² 방법 - A	FV 방법 - A	FV 방법 - B
사질토	도넛해머	반자동식(유압식 인양)		51 (29~65)	60 (42~72)	64 (58~67)
	자동운행 해머	자동식	25타/분	56 (52~62)	66 (54~72)	59 (50~64)
			60타/분	71 (65~84)	77 (69~88)	72 (51~79)
점성토	도넛해머	반자동식(유압식 인양)		51 (29~63)	64 (48~79)	62 (61~65)
	자동운행 해머	자동식	25타/분	59 (54~70)	67 (59~79)	55 (51~66)
			60타/분	67 (64~70)	80 (77~83)	59 (-)

이러한 해머 에너지 효율의 차이는 궁극적으로 N 값에 직접적인 영향을 미치게 된다. 본 시험의 경우 다수의 감독자가 현장에 계속 상주하며 KS에 규정된 각종 규격과 절차를 준수하도록 관리하였음에도 불구하고 시험장치에 따라 극단적인 경우는 매 타격시마다 에너지 효율이 상이하게 관찰되었고, 이는 결과적으로 그림 9처럼 같은 지역에서 깊이에 따른 N 값 분포가 달라지는 현상을 낳았다. 같은 지역이라도 지층이 완전하게 같을 수 없다는 점을 감안하더라도 그림 9의 결과는 시사하는 바가 크다. 따라서 실질적인 감독이 거의 이루어지지 못하는 일반 조사 현장의 경우 그 심각성이 어느 정도일 지는 미루어 짐작할 수 있다. 이는 해머 종류 등 장비별로 대표적인 에너지 효율을 산정하여 N 값 보정에 일률적으로 적용한다는 대안의 실효성이 낮으며, SPT 관련 문제들의 근본적 해결을 위해서는 시험장비의 개량과 함께 인적 요건을 포함한 작업(시험) 환경의 개선이 필수적임을 말해준다.

5. 결론 및 이후 계획

표준관입시험의 정상적 활용을 목표로 추진 중인 연구의 일환으로 진행하고 있는 국내 SPT 장치의 해머 에너지 효율 평가와 관련하여, 유압식 도넛해머와 자동운행해머에 대한 현장시험 결과의 일부를 분석하고 토의하였다.

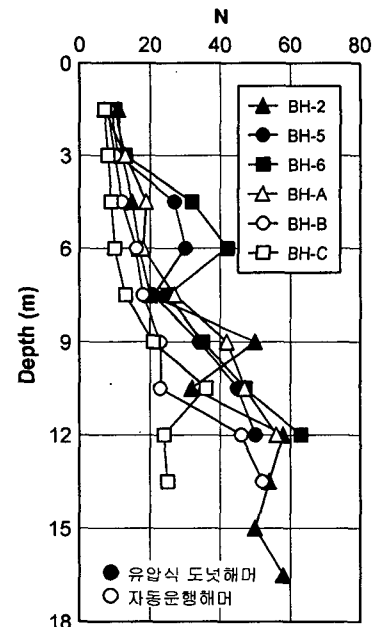


그림 9. 깊이별 N 값 분포 비교

유압을 이용하여 강선으로 해머를 인양하여 낙하시키는 '도넛해머' 방식의 SPT 장치와 일정한 낙하고를 항상 유지하며 자동으로 타격이 이루어지는 '자동운행해머' 방식의 SPT 장치에 대해서 자체 구성한 신호분석 장치와 PDA 장비를 각각 이용하여 해머가 룯드를 타격하는 순간에 발생하는 응력과 신호를 측정하여 힘 적분 방법과 힘-속도 적분 방법에 의해 룯드에 전달되는 낙하에너지를 산정하여 이론적인 낙하에너지와의 비를 구하였다. 이렇게 구한 에너지 비는 해머의 종류, 굴착 깊이, 해머 낙하고 차이, 작업 환경 외에도 응력과 신호 측정장비, 에너지 산정 방법, 타격 속도 등에 따라서도 많은 차이를 나타내었다. 사질토층의 경우 힘-속도 적분 방법으로 구한 유압식 도넛해머의 평균 룯드 에너지 비는 60% 안팎이며, 자동운행해머는 타격속도에 따라 평균 에너지 비가 60%에서 70% 정도를 나타내었다(표 4 참조). 힘 적분 방법으로 구한 에너지 비는 이들에 비하여 10~20% 가량 낮았다. 따라서 해머 종류별로 일률적인 에너지 비를 적용하는 것은 곤란하다고 판단된다.

자동운행해머의 룯드 에너지 비가 도넛해머의 것에 비하여 표준편차가 작아 상대적으로 타격 반복성이 우수한 것으로 평가되었다. 이는 같은 지점에서 두 종류의 해머를 상대로 반복측정한 응력과 신호의 비교에서도 확인되었다. 이는 자동화된 장치의 이용으로 인적 요인에 의한 시험 오차를 현저하게 줄일 수 있음을 의미한다.

SPT 장치의 에너지 비 차이는 결과적으로 N 값에 영향을 미치게 되는데, 거의 같은 지점으로 평가되는 지층에서 감독자 관리 아래 기록된 N 값이 100% 이상의 차이를 나타내는 경우가 빈발하였다. 이는 에너지 효율을 고려한 N 값 보정의 필요성을 반증하며, 이후 진행되는 연구를 통해 보정 전후의 N 값에 대한 면밀한 분석을 통해 구체적인 대안을 제시할 것이다.

현재 국내에서 사용 중인 다른 종류의 표준관입시험 장치들에 대한 현황 파악과 함께 대대적인 에너지 효율 평가를 지속적으로 진행하고 있으므로 이들에 대한 분석 및 토의 결과는 수시로 실용적인 관점에서 정리하여 그 성과를 보급할 계획이다.

참고문헌

- Clayton, C.R.I.(1990), "SPT energy transmission : Theory, Measurement and Significance", Ground Engineering, pp.35-43
- 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
- Riggs, C. O.(1986), "North American Standard Penetration Test Practice", proceeding. of the 14th Specialty conference, on Use of In Situ Tests in GED, ASCE, pp.949-967.
- Robertson, P.K. and Woller, D.J.(1991), "SPT energy measurements using a PC based system", 44th Canadian Geo. Conference, Vol.1, Paper No.3, pp.1-10
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M.(1985), "Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations", Journal of the GED, ASCE, Vol.111, No.GT12, pp.1425-1446
- Schmertmann, J.H.(1978), "Use of the SPT to measure dynamic soil properties-yes, but. . .!", Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STF 654, American Society for Testing and Materials, pp 341-355
- 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
- 박용원 외(1993), "표준관입시험의 해머에너지 측정", 학술발표회 개요집-2, 대한토목학회, pp.573-576
- 박용원 외(1994), "표준관입시험의 해머별 에너지 비교", 학술발표회 개요집-1, 대한토목학회, pp.821-824
- 이명환 외(1992), "실측에 의한 표준관입시험 함마의 낙하속도 분석", 한국지반공학회지, 제8권 1호, pp.59-66
- 이우진 외(1998), "PDA를 이용한 표준관입시험의 에너지전달효율 측정", 1998년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.75-84
- 이호춘(1996), 국내 표준관입시험의 에너지 수준 측정 및 고찰, 명지대학교 대학원 박사학위논문
- 이호춘, 김병일, 박용원(1997), "표준관입시험의 동적효율 측정", 한국지반공학회지, 제13권 1호, pp.169-180
- 이호춘, 박용원(1996), "표준관입시험의 해머에너지 수준", 한국지반공학회지, 제12권 5호, pp.117-125
- 한국도로공사(2000), 표준관입시험 활용법 개선 연구(I), 도로연구소 2000년도 중간보고서 도로연00-14