

# 표준관입시험의 동적효율 측정

## Rod Energy Ratio Measurement of SPT

이 호 춘\*1  
Lee, Ho-Choon  
김 병 일\*2  
Kim, Byoung-Il  
박 용 원\*3  
Park, Yong-Won

---

---

### Abstract

It is known that some amount of loss in impact energy takes place due to some limitations and problems during the performance of the field SPT. Actual energy level transferred to the rod should be measured to correct the SPT-N values tested in the field.

In this paper, the ratio of energy transferred to the rod through the anvil to impact energy is measured by using Charpy impact test equipment and also analyzed by using GRL-WEAP. This result is certified and compared with that of field SPT.

As the results of this study, the average rod energy ratio of the R-P hammer and the Trip hammer is calculated at 0.726 and 0.728 respectively, but it is suggested that 0.72 should be used. By using the hammer energy ratio 64.2% and 75.0% obtained from field measurement, the average energy ratio of the SPT for the R-P hammer is calculated at 46.7% and 54.5% for the Trip hammer.

### 요 지

표준관입시험에서 해머가 낙하하여 발생한 충격에너지가 샘플러에 전달되는 과정에 여러 가지 제한 및 문제점 때문에 에너지 손실이 일어나게 마련이다. 시험결과인 N치를 보정하기 위해서는 로드 에 전달되는 에너지 수준이 측정되어야 한다.

이 연구에서는 충격에너지와 모루를 통하여 로드 에 전달되면서 손실된 에너지가 반영된 로드 에너지의 비율 즉, 표준관입시험의 동적효율을 Charpy 충격시험장치를 이용하여 측정하고, 향타 분석 프로그램인 GRL-WEAP 해석과 현장시험으로 비교 및 확인 하였다.

연구결과 R-P해머와 자동해머의 동적효율이 0.726과 0.728로 각각 산정되었으나 0.72로 함께 제시하였다. 이 값에 현장측정한 해머에너지 수준 64.2%(R-P) 및 75.0%(자동)를 적용하여 측정

---

\*1 정희원, 명지전문대학 토목과 교수

\*2 정희원, 명지대학교 공과대학 토목·환경공학과 조교수

\*3 정희원, 명지대학교 공과대학 토목·환경공학과 교수

N치를 보정할 수 있는 SPT의 평균에너지비를 46.7% 및 54.5%로 산정하였다.

Keywords : Rod energy ratio, Average energy ratio, R-P Hammer, Trip hammer

## 1. 서 론

표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)은 지반의 지지력을 예측할 수 있는 N치를 측정하여 흙의 점착강도, 내부마찰각 등의 강도정수를 산정할 수 있을 뿐만 아니라 시험 방법이나 장비조작이 비교적 간단하고 원위치 시험과 동시에 시료를 채취할 수 있는 등 장점이 많아 그 활용도가 다양하여 전세계적으로 널리 사용되고 있는 실정이다. 그러나 Gibbs and Holtz(1957), Fletcher(1966), deMello(1971), Sanglerat(1972) 등이 보고한 바와 같이 거의 같은 여건의 지반에 대하여 같은 장비로 반복시험한 결과의 변화폭이 크고 장비의 형태 및 규격, 시험자의 차이 등의 특성 때문에 오차가 다양하게 발생하는 시험으로 알려져 있다. 각국에서는 표준화를 위한 노력을 계속하고 있으나 정보의 공유 및 국제화 추세에 비추어 다른 시험자에 의하여 다른 지역에서 시험한 결과를 보정하여 효과적으로 사용할 수 있는 대책이 요구되고 있다. 시험결과의 신뢰성을 제고할 수 있는 시험장비와 시험관리에 대한 세부적인 규격의 표준화가 단기간에 이루어질 수 없기 때문에 측정된 N치를 보정하기 위하여 에너지손실이 반영된 에너지수준의 확인이 필요하다.

이에 대한 연구로 Schmertmann(1975, 1978), Kovacs and Salomone(1982), Seed et al.(1985), Riggs(1986), Skempton(1986), Bowles(1988), Clayton(1990), Robertson and Woeller(1991) 등이 미국 등지에서 시행하는 보편적인 표준관입시험에 대하여 로드셀 등을 이용하여 표준에너지비 및 평균에너지비, 동적효율, 보정방법 등을 측정 또는 제안함으로써 N치의 보정에 기여하고 있다.

국내에서는 이 외 3인(1992), 박 외 3인

(1993), 박 외 2인(1994), (1996) 등이 정전기 변환 초음파 송수신장치 및 비디오 화면 분석장치 등을 이용하여 해머의 낙하에너지수준을 측정 보고하여 국내현장의 해머에너지수준은 어느정도 확인하였으나 해머에너지가 모루를 통하여 로드 에 전달되는 로드에너지의 효율 즉 동적효율은 확인되지 않은 실정이다. 국내현장의 표준관입시험(KSF 2318)에 대한 평균에너지비를 확인하기 위해서는 시험결과에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 장비의 규격과 시험관리 등이 같은 시험을 통하여 에너지수준의 대표값을 측정하여 우리나라의 여건이 반영된 평균에너지비 즉 해머가 낙하하여 모루를 타격한 에너지가 샘플러에 전달되는 실제의 에너지수준을 확인해야 할 것이다.

이 연구에서는 모루와 로드를 통하여 에너지가 전달되는 도중의 손실 즉 동적효율을 충격시험과 WEAP 프로그램을 이용한 해석적인 방법으로 산정하였으며, 측정회수는 적었으나 현장시험을 통하여 비교 및 확인하였다.

이 연구의 결과인 동적효율을 이용하면 표준관입시험의 평균에너지비를 산출할 수 있으며, 이 값과 표준에너지비를 비교하여 현장에서 측정된 N치를 수정할 수 있는 보정계수를 구할 수 있다. 즉, 국제 표준치인  $N_{60}$ 에 대응하는 국내 현장의 특수성이 반영된 보정계수를 구할 수 있기 때문에 N치의 신뢰성을 높일 수 있을 것이며, 안전하고 경제적인 기초의 설계 및 시공에 기여할 것으로 본다.

## 2. 동적효율 측정 및 산정

### 2.1 충격시험에 의한 측정

#### 2.1.1 측정방법

SPT 해머가 모루를 타격한 후 로드 에 전달

되는 에너지를 로드에너지라 정하고 로드에너지를 측정하기 위하여 Charpy 충격시험기를 이용하였다. 측정에 사용한 장비의 구성 및 제원은 그림 1과 같으며, 해머는 표준관입시험 해머에너지의 50%인 24kg·m로 제작하여 충격시험기의 낙하장치에 장착하였다. 모루와 로드는 표준관입시험에 사용되고 있는 중량 4.5kg의 모루에 길이 1m인 로드를 연결하여 사용하였다. 측정방법은 그림 1에 나타난 바와 같이 해머(A)와 로드의 중앙부(B, l=0.5m 지점)

및 끝부분(C, l=0.9m 지점)에 변형률 게이지형 로드셀을 부착하여 250kHz의 속도로 자료를 수신 및 처리할 수 있는 동적변형률 측정장치로 낙하장치에 장착한 해머가 모루를 타격할 때의 충격하중과 로드에서 전달되는 충격하중을 측정하였다. 해머가 타격한 충격하중과 로드의 중앙 및 끝부분에 전달된 충격하중의 측정결과를 파동이론에 의한 식(1) 및 ASTM D4633에 반영하고 있는 식(2), 식(3), 식(4)에 대입하여 동적효율을 산정하였다.

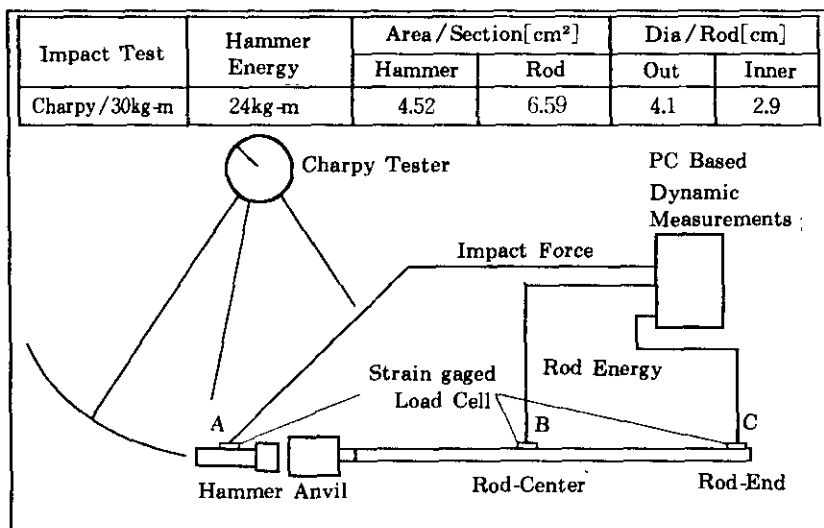


그림 1. 충격시험장치의 구성 및 제원

$$E_0 = \frac{EAL}{2} \dot{\epsilon}^2 = \frac{L}{2EA} \int_0^{\Delta t} F(t)^2 dt \quad (1)$$

$$E_0 = \frac{cK_1K_2K_c}{EA} \int_0^{\Delta t} [F(t)]^2 dt \quad (2)$$

$$e_c = \frac{E_c}{E_h} = \frac{\frac{cK_1K_2K_c}{EA_c} \int_{t_1}^{t_2} [F_c(t)]^2 dt}{\frac{cK_1K_2K_c}{EA_h} \int_{t_1}^{t_2} [F_h(t)]^2 dt} = \frac{A_h \int_{t_1}^{t_2} [F_c(t)]^2 dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} [F_h(t)]^2 dt} \quad (3)$$

$$e_c = \frac{E_c}{E_h} = \frac{A_h \int_{t_1}^{t_2} [F_c(t)]^2 dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} [F_h(t)]^2 dt} \quad (4)$$

여기서,

- $E_0$  : 로드셀로 측정된 충격에너지(kg·cm)
- $E_h, E_c, E_e$  : 해머, 로드중앙, 끝부분에서 측정된 에너지(kg·cm)
- $F_h(t), F_c(t), F_e(t)$  : 시간에 따라 해머, 로드 중앙, 끝부분에서 측정된 충격하중(kg)

$e_s, e_e$ : 로드(또는 해머)의 중앙부( $l=0.5m$ ) 및 끝부분( $l=0.9m$ )에서 측정된 동적효율

$c$ : 로드(또는 해머)에 전파되는 압축파의 속도( $5100m/sec$  for steel)

$L$ : 로드(또는 해머)의 길이(cm)

$E$ : 로드(또는 해머)의 탄성계수( $2.07 \times 10^6 kg/cm^2$ )

$A$ : 로드(또는 해머)의 단면적( $cm^2$ )

$K_1, K_2, K_c$ : 수정계수

$\varepsilon$ : 변형률

$\Delta t$ : 최초 압축파의 주기( $t_2 - t_1, 2L/c$ )(sec)

로드의 0.5m 및 0.9m 지점에 장착한 로드셀에서 측정된 동적효율 측정값(측정치)과 에너지가 전달되는 과정에서 로드길이의 차이(로드중량)를 제외한 에너지 손실은 없을 것으로 가정하는 이론적인 동적효율값을 비교하여 실제 에너지전달률( $C_{T(test)}$ )을 구하였다. 즉, 에너지전달률( $C_T$ )을 에너지보존 법칙에 따라 유도한 식(5)에 대입하여 로드(또는 해머)의 0.5m 및 0.9m 지점에서 구한 동적효율( $\eta_{d(0.5m)}, \eta_{d(0.9m)}$ )은 이론치로 가정하고, 충격시험결과 측정된 동적효율인  $e_s, e_e$ 의 평균값과 비교하여 충격시험결과에 의한 에너지전달률( $C_{T(test)}$ )을 식(6)을 사용하여 역산하였다. 이 값과 1.5m 간격으로 3~30m의 로드길이에 따른 중량( $W_{RL}$ )과 SPT 해머의 중량( $W$ )을 식(7)에 대입하여 로드 길이의 변화에 따른 동적효율 산정값을 평균하여 표준관입시험의 동적효율( $\eta_d$ )을 구하였다.

$$\eta_d(L) = \frac{4WW_{RL}}{(W+W_{RL})^2} C_T \quad (5)$$

$$C_{T(test)} = \frac{\text{측정치}}{\text{이론치}} = \frac{e_s + e_e}{\eta_{d(0.5m)} + \eta_{d(0.9m)}} \quad (6)$$

$$\eta_{d(Avg)} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{L=3m}^{30m} \frac{4WW_{RL}}{(W+W_{RL})^2} \right] C_{T(test)} \quad (7)$$

여기서,

$W$ : SPT 해머의 중량(64kg)

$W_{RL}$ : 리더+모루+로드길이(L) 변화에 따른 중량(모루=4.5kg, 리더 및 로드

=5.15kg/m, Coupling=0.75kg/개)

## 2.1.2 측정결과

그림 1의 A, B, C점에 장착한 변형률 게이지형 로드셀로 시간에 따른 해머의 충격하중과 로드(또는 해머)에 전달되는 충격하중을 측정된 결과는 그림 2와 같다. 충격회수 10회 마다 측정번호를

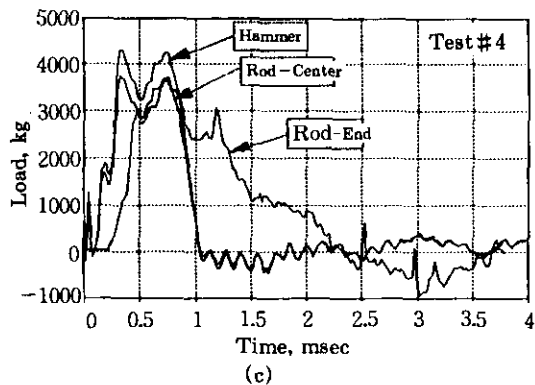
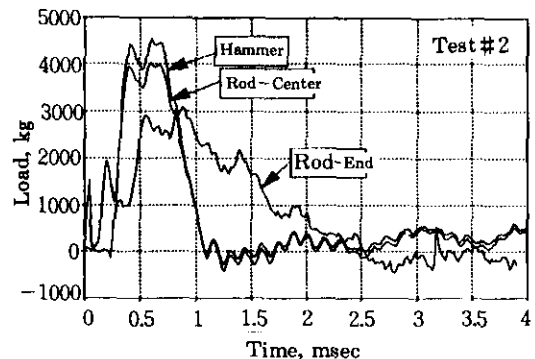
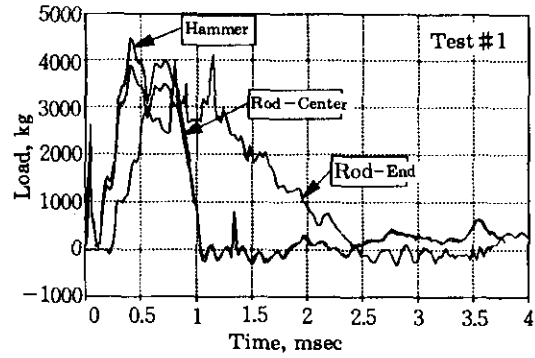


그림 2. Charpy 충격시험결과

표 1. 로드케에 전달된 에너지 측정 및 효율 산출결과

측정번호	$E_A(\text{kg-cm})$	$E_c(\text{kg-cm})$	$E_r(\text{kg-cm})$	$e_c$	$e_r$
1	1964.71	1047.61	1469.30	0.533	0.748
2	2088.51	1185.61	1047.42	0.568	0.502
3	1899.35	932.35	1533.19	0.491	0.807
4	2108.49	1105.66	1324.26	0.524	0.628
5	1469.96	709.48	1107.73	0.483	0.754
6	1937.11	918.32	1110.54	0.474	0.573
7	1758.81	855.57	1067.55	0.486	0.607
8	1859.27	907.89	1021.53	0.488	0.549
평균	1885.78	957.81	1210.19	0.506	0.622

불였으며, 측정결과가 유사한 경향을 보인 측정번호 #1, #2, #4에 대한 결과만 그림 2에 나타냈다. 식(2), (3), (4)로부터 로드길이 0.5m 및 0.9m 지점에 대한 동적 효율  $e_c$ 와  $e_r$ 를 산정한 결과는 표 1 및 그림 3, 그림 4와 같다. 또한, 로드케의 중량( $W_m$ )과 해머의 중량( $W$ )을 식(7)에 대입하여 로드케길이 변화(3~30m)에 따른 표준관입시험의 동적효율( $\eta_d$ )을 구하여 표 2 및 그림 5에 나타냈다.

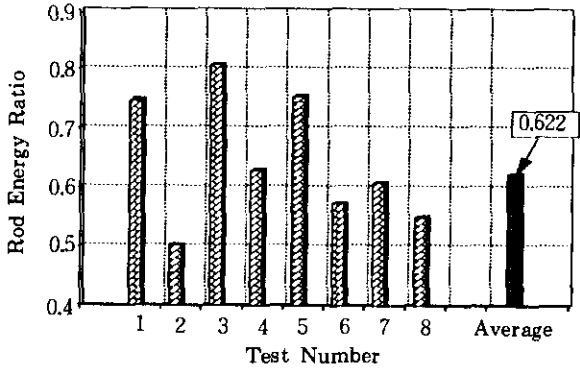


그림 4. 로드케끝에 전달된 에너지효율

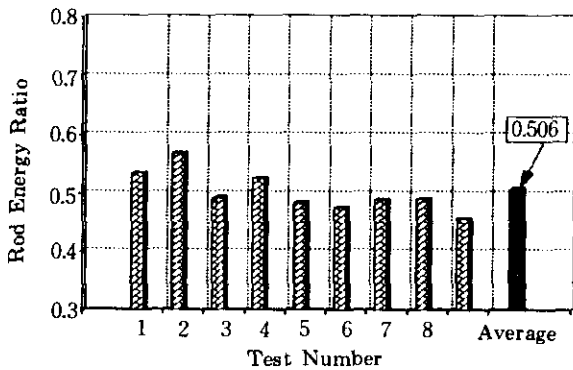


그림 3. 로드중앙에 전달된 에너지효율

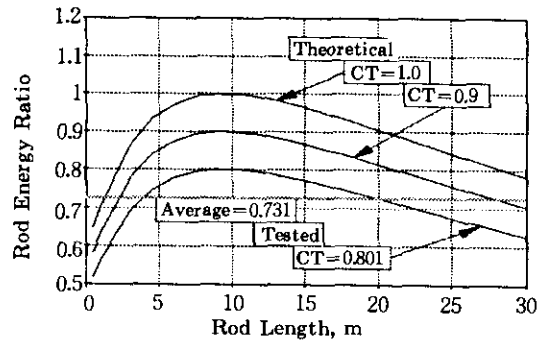


그림 5. 동적효율 산정결과(Charpy)

표 2. 로드길이에 따른 동적효율

로드길이(m)	$W_{RL}$ kg	동적효율( $\eta_d$ ) $C_T=0.801$
0.5	16.30	0.519
0.9	18.88	0.564
3	29.18	0.689
4.5	37.65	0.748
6	45.38	0.778
7.5	53.85	0.796
9	61.58	0.801
10.5	70.05	0.800
12	77.78	0.794
13.5	86.25	0.784
15	93.98	0.773
16.5	102.45	0.759
18	110.18	0.745
19.5	118.65	0.730
21	126.38	0.715
22.5	134.85	0.700
24	142.58	0.685
25.5	151.05	0.670
27	158.78	0.656
28.5	167.25	0.642
30	175.73	0.627
Avg $\eta_d$		0.731

## 2.2 파동이론에 의한 해석

### 2.2.1 WEAP 고찰 및 이용

Smith(1960)와 McLean et al.(1975) 등은 표준관입시험과 말뚝항타의 유사성에 착안하여 말뚝에 대한 가정과 흙의 하중-변형 특성을 그대로 사용하고 표준관입시험장비의 컴퓨터 모델을 정하여 항타분석용 프로그램을 표준관입시험의 에너지 해석에 적용하였다. 표준관입시험에 항타분석용 프로그램을 적용하는 경우 해머의 쿠션장치, 로드 및 샘플러의 관입거동, 지반의 특성 등에 대한 파라미터가 말뚝과는 다를 것이다. 그러나 해머가 자유낙하하여 발생한 에너지가 로드 또는 말뚝에 전달되는 도중에 손실되는 거동은 충격시험의 경우와 같이 식(1) 및 식(3) 등을 이용하여 해석할 수 있다.

이 연구에서는 로드와 말뚝의 타입거동 및 에너지가 전달되는 과정은 같은 것으로 가정하고 파동방정식을 이용한 항타분석용 프로그램인 GRL-WEAP을 사용하여 표준관입시험의 동적효율을 산정하고, Charpy 충격시험에 의한 측정결과와 비교, 고찰하였다.

### 2.2.2 산정방법

충격에너지에 대한 로드에서 전달되는 에너지의 비인 동적효율을 해석하기 위한 GRL-WEAP 입력자료는 그림 6 및 표 3에 나타낸 바와 같다. 로드길이 31.16m(커프링 및 샘플러

표 3. WEAP 해석을 위해 사용한 입력자료

equipments and soil parameter		input data	remarks
hammer (ram)	weight(kN)	0.64	
	length(mm)	230	
	diameter(mm)	230	
	efficiency, R-P/Trip	0.684/0.779	measured
	fall height(stroke), Max/actual(m)	0.76/0.717	theoretical/ measured
	type	3	ECH (external combustion hammer)

anvil(cap)	weight(kN)		0.13	including a leader and a coupling
	stiffness(kN/mm)		10989.7	helmet
rod and coupling	out diameter(cm)		4.1	non-uniform pile
	inner dia./rod(cm)		2.9	
	in.dia./coupling(cm)		1.5	
	total length(m)		30.55	
	elastic modulus(MPa)		$2.07 \times 10^5$	
sampler	out diameter(cm)		5.08	default value based on Smith case
	inner diameter(cm)		3.5	
	length(cm)		61	
soil parameter	quake	skin(mm)	2.54	default value based on Smith case
		toe(mm)	2.54	
	damp	skin	0.0	
		toe	0.16	

포함)를 로드 10개, 커플링(coupling) 11개, 그리고 샘플러 1개 등 22개의 부재로 나누고 R-P(rope-pulley)해머의 제원을 사용하였다. Smith(1960)의 제안 등에 따라 프로그램이 사용하고 있는 파라미터를 그대로 이용하였으며, N치는 20정도에서 해석하였다. 해머효율은 기 보고된[박 외 3인(1993), 박 외 2인(1994), 이·박(1996)] R-P해머의 효율 68.4%와 자동(trip)해머의 효율 77.9%를 사용하였다.

### 2.2.3 산정결과

표 3 및 그림 6의 자료를 GRL-WEAP 프로그램에 입력하여 로드에서 전달되는 에너지를 해석한 결과는 표 4 및 그림 7과 같다. 해석된 에너지로 이론치에 대한 동적효율을 산정하였으며, 표준관입시험의 경우 로드의 최소길이가 3m 이상인 점을 고려하여 3m~30m에 대하여 평균값을 산정하였다. WEAP으로 해석한 에너지를 사용하여 에너지비와( $E_{i(WEAP)}$ ) 동적효율( $\eta_{d(WEAP)}$ )을 산정한 결과는 표 4 및 그림 8, 그림 9에 나타나 있다.

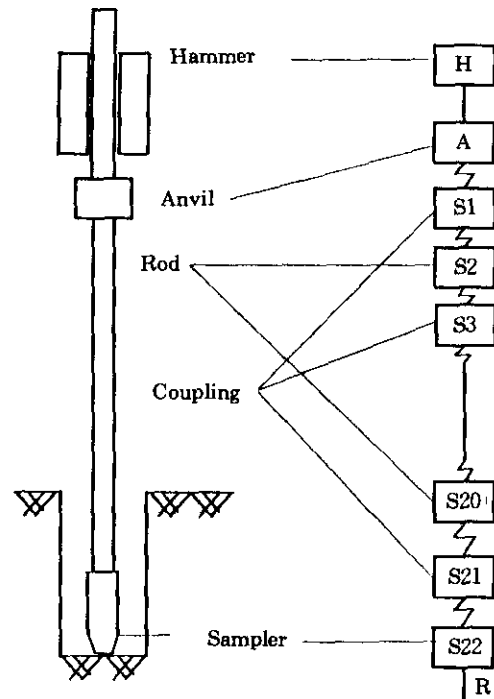


그림 6. WEAP 해석을 위한 개요도

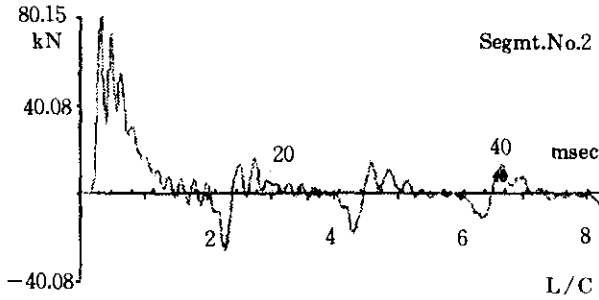


그림 7. 시간에 따른 충격하중 해석결과(WEAP)

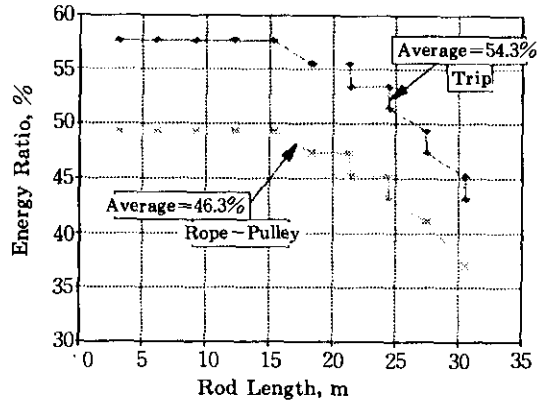


그림 8. 에너지비 산정결과(WEAP)

표 4. WEAP 해석에 의한 동적효율 산정결과

Seg. No	로드길이(m)	Energy, kJ		$E_{fWEAP}, \%$		$\eta_{dWEAP}$	
		R-P	자동	R-P	자동	R-P	자동
1	0	-	-	-	-	-	-
2	0.05	-	-	-	-	-	-
3	3.05	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
4	3.1	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
5	6.1	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
6	6.15	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
7	9.15	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
8	9.2	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
9	12.2	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
10	12.25	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
11	15.25	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
12	15.3	0.24	0.28	49.3	57.6	0.769	0.768
13	18.3	0.23	0.27	47.3	55.5	0.737	0.740
14	18.35	0.23	0.27	47.3	55.5	0.737	0.740
15	21.35	0.23	0.27	47.3	55.5	0.737	0.740
16	21.4	0.22	0.26	45.2	53.5	0.705	0.713
17	24.4	0.22	0.26	45.2	53.5	0.705	0.713
18	24.45	0.21	0.25	43.2	51.4	0.672	0.685
19	27.45	0.20	0.24	41.1	49.3	0.640	0.658
20	27.5	0.20	0.23	41.1	47.3	0.640	0.630
21	30.5	0.18	0.20	37.0	45.2	0.576	0.603
22	30.55	0.18	0.21	37.0	43.2	0.576	0.576
Average				46.3	54.3	0.721	0.724



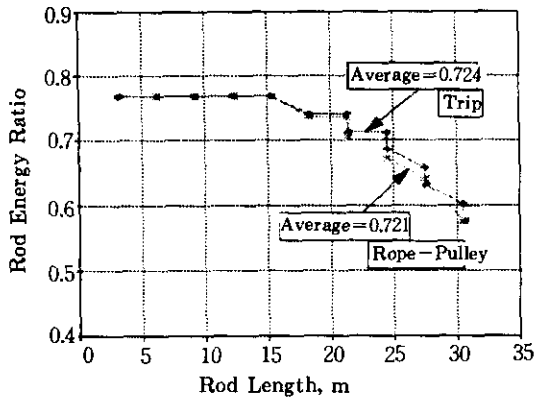


그림 9. 동적효율 산정결과(WEAP)

### 2.3 현장시험에 대한 측정

#### 2.3.1 측정방법

그림 10 및 사진 1에 나타난 바와 같이 로드 에 가속도계와 변형률 게이지형 로드셀을 장착하여 해머에너지가 로드를 통하여 샘플러에 전

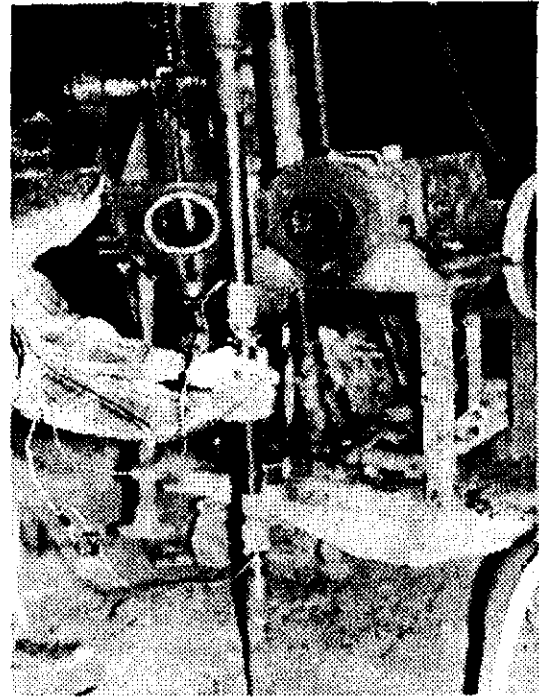


사진 1. 에너지 측정 장면

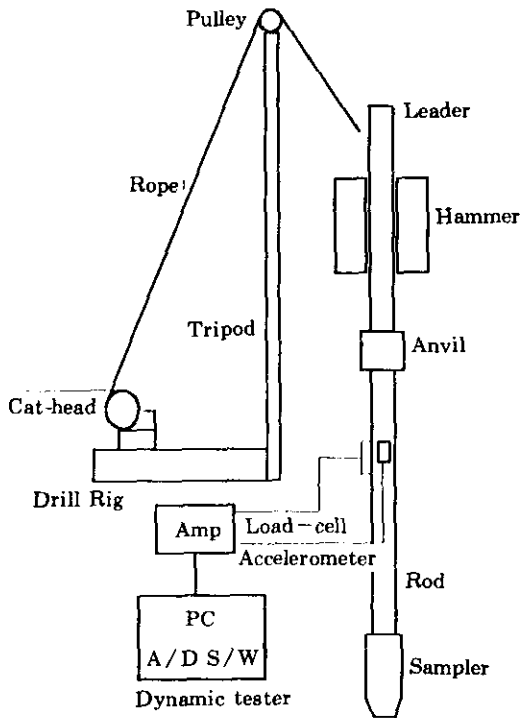


그림 10. 현장시험에 사용한 측정장치 및 개요도

달되는 에너지 수준을 현장기술자가 시행하는 표준관입시험에서 직접 측정하였다. 측정장비는 신호처리장치, 데이터 로거, 30kHz의 속도로 자료를 처리할 수 있는 A/D(analog/digital) 변환기 등을 개인용 컴퓨터에 연결한 동적 변형률 측정장치를 이용하였다.

#### 2.3.2 측정결과

그림 10에 나타난 장비 등을 사용하여 1995년 9월 의정부 지역에서 해머가 낙하하여 모루를 타격한 에너지가 로드 에 전달되는 에너지 수준을 측정하였다. 해머가 낙하하는 시간에 따른 에너지 전달거동을 10kHz/ch 속도로 측정하여 평균값을 산정하였으며, 1개 시험공(의정부지역 시험번호 EJ1-2)에 대한 해머 타격순간을 포함하는 타격 전후의 가속도 및 충격하중 측정결과를 그림 11에 나타냈다. 충격에너지 측정 및 산정결과는 표 5와 같으며, 규정 낙하고 76cm로 산출한 이론치에 대한 비율인

에너지비를 감지장치별로 표 5에 나타냈다. 에너지비 평균값에 이·박(1996)이 보고한 R-P 해머의 해머에너지 수준 64.2%를 적용하여 역산한 동적효율은 0.77이었으며, 표 5에 나타나 있다.

표 5. 에너지비 측정결과

측정방법	가속도계	로드셀	
		L=0.5m	L=0.9m
측정회수(회)	32	6	15
측정에너지 평균(kg-cm)	2476.1	2213.5	2470.5
규정에너지(kg-cm)	4864	4864	4864
에너지비(%)	50.9	45.5	50.8
에너지비 평균(%)	49.5		
동적효율	0.77		

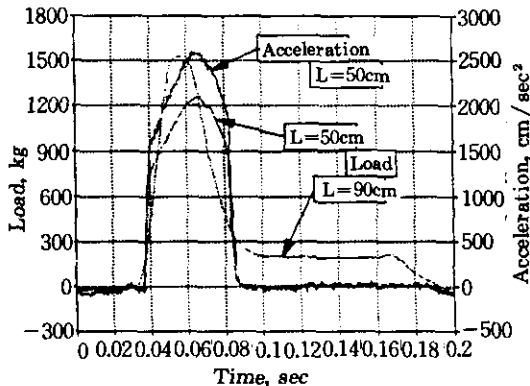


그림 11. 가속도 및 충격하중 측정결과

### 3. 고 찰

표준관입시험용 로드를 모루와 연결하여 Charpy 충격시험기를 사용한 실내시험을 실시하여 시간 변화에 따라 충격하중이 로드에서 전달되는 에너지효율을 측정하였다. 충격하중은 250kHz의 속도로 신호를 처리할 수 있는 DSP(digital signal processor) 등의 첨단장치를 사용하여 측정되었으나 측정값으로 해머 및

로드에 전달된 에너지와 전달된 효율을 산정한 결과 식(2), (3), (4)에서 ASTM D4633-86에 있는 수정계수를 로드길이 1m 이하에 대하여는 정하기 곤란한 문제가 있었다. 그러나 이 연구에서 사용한 1m길이 로드 중양부분과 끝부분의 수정계수값의 차이는 크지 않다고 보면 식(3)에 보는 바와 같이 상쇄되어 구할 수 있다.

한편, 로드 0.5m 지점 및 0.9m 지점에 장착한 로드셀에서 측정된 동적효율의 측정값과 에너지가 전달되는 도중에 로드길이의 차이를 제외한 에너지 손실은 없는 것으로 가정한 이론치를 비교하여 실제 에너지전달률( $C_{T(test)}$ )을

$$C_{T(test)} = \frac{\text{측정치}}{\text{이론치}} = \frac{e_c + e_e}{\eta_{d(L=1m)}} = \frac{0.506 + 0.622}{0.704} = 0.801$$

로 구하고, 이 값을 30m길이의 로드에서 적용하였는데, 이것도 약간의 무리가 있다고 본다. 그러나 에너지 보존 원리로부터 얻을 수 있는 이론적인 식(1)에서 보는 바와 같이 변위와 압축파의 전파속도를 정밀하게 측정할 수 있다면 같은 로드길이의 경우에는 큰 차이가 없을 것으로 가정할 수 있다.

실내시험결과 매회 측정된 시험결과가 그림 2에 나타난 바와 같이 유사한 경향을 나타냈으며, 로드 중양에서 측정된 효율의 표준편차 및 분산은 0.03과 0.0009로 비교적 작게 나타나 측정결과는 신뢰성이 있다고 본다. 표 2 및 그림 5에 나타난 바와 같이 Charpy 충격시험 결과를 이용하여 산출한 동적효율( $\eta_d$ )은 0.731로서 표 6에서 Skempton(1986)이 보고한 동적효율과 비교하면 미국 경우의 상계치 0.71보다는 약간 더 크게 나타났으나 거의 근접하고, 일본에서 사용하는 0.78 보다는 작게 나타나 이 값에 측정된 해머에너지를 적용하여 에너지비를 산출할 수 있다고 판단된다. 그러나 파동이론에 의한 항타 분석 프로그램인 GRL-WEAP을 이용하여 해석한 동적효율이 더 보수적으로 나타나 충격시험결과와 WEAP에 의

한 결과를 평균하여 표준관입시험의 동적효율을 산정하였다.

표 6. 동적효율 측정결과 비교

국명	산정방법	동적효율		비고
		R-P	자동	
한국	충격시험	0.731		이 연구
	WEAP	0.721	0.724	
	충격/WEAP	0.726	0.728	
	선정	0.72		
	현장시험	0.77		
미국		0.64~0.71	0.79	Skempton (1986)
일본		0.78		

GRL-WEAP으로 로드예 전달되는 에너지를 해석하기 위하여 그림 6과 같이 로드길이 30m에 대하여 연결부인 각 컵프링과 로드 및 샘플러를 22개의 부재로 나누어 해석하였다. 나사의 결합부분과 훼손정도의 차이 등을 반영할 수 없고 선단지지력의 정도를 가정하기가 어려운 점 등의 문제점과 해머의 낙하고를 일정하게 보고 해머효율을 입력해야 하는 등 말뚝인 경우와의 차이점을 고려하여 측정된 낙하고로 산출한 해머효율을 입력자료로 사용하였다. WEAP 해석결과 산출된 에너지를 이용하여 에너지비( $E_d$ )와 동적효율( $\eta_d$ )의 관계 즉,

$$E_{d(WEAP)} =$$

측정한 해머효율을 입력하여  
WEPA 해석결과 산출된 에너지

규정낙하고 76cm에 대한 이론적인 에너지

$$\eta_{d(WEAP)} = \frac{E_{d(WEAP)}}{e}$$

에서 에너지비 및 동적효율을 산정한 결과는 R-P해머의 경우 46.3% 및 0.721로 동적효율이 충격시험으로 측정된 값에 근접하면서 약간 낮은 값으로 나타나 측정값의 신뢰성은 크다고 판단된다. 그러나 현장시험에서 측정된 에너지 수준으로 역산한 동적효율은 측정과정에서 해머의 큰 충격 등으로 인해 감지장치의 빈번한 파손을 일으켜 측정회수가 적었으며, 측정값의

변화폭도 크게 나타나 신뢰성이 적다. 반면에 WEAP에 의한 해석결과는 보수적인 값으로 알려져 있으며, WEAP 해석결과인 그림 7과 충격시험 결과인 그림 2의 경향이 거의 유사하여 두 방법에서 측정 및 산정된 결과만으로 표준관입시험의 동적효율을 구하였다. 또한, 충격시험에 의한 측정값 0.731과 그림 9에 나타난 바와 같이 R-P해머와 자동해머에 대하여 WEAP 해석결과인 0.721 및 0.724를 평균하여 산정한 값이 0.726과 0.728로 큰 차이가 나지 않으므로 보수적인 값 0.72를 국내 표준관입시험의 동적효율로 제시하며 표 5에 같이 나타냈다.

이 연구에서 제시한 동적효율( $\eta_d$ ) 0.72를 기 보고된[박 등(1993, 1994), 이·박(1996)] 해머 에너지 수준 64.2%(R-P)와 75.0%(자동)에 적용하면 표준관입시험의 평균에너지비가 각각 46.7%(R-P)와 54.5%로 산정된다. 또한, 평균 에너지비와 국제 표준치(60%)를 비교하여 보정계수를 구함으로써 시험결과 측정된 N치를 수정할 수 있는  $N_{60}$  등도 산정할 수 있다.

#### 4. 결론

모루와 로드를 통하여 에너지가 전달되는 도중에 발생하는 손실을 고려한 표준관입시험의 동적효율을 Charpy 충격시험과 파동이론에 의한 해석 프로그램인 WEAP을 적용하여 측정 및 산정하였으며 현장시험을 통하여 검증한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 해머가 모루를 타격한 후에 샘플러에 도달되는 도중에 발생하는 에너지 손실을 고려한 평균 동적효율( $\eta_d$ )은 충격시험에 의한 측정값과 WEAP에 의한 해석결과, 평균값 0.726(R-P해머)과 0.728(자동해머)을 얻었으며, 이에 따라 동적효율로 0.72를 제안한다.
- (2) 이 연구에서 제시한 동적효율 0.72를 기 보고된 해머에너지 수준 64.2%(R-P해머) 및 75.0%(자동해머)에 적용하면 표준관입시험의 평균에너지비( $E_d$ )는 46.7%

(R-P해머)와 54.5%(자동해머)로 산정된다. 또한, 표준관입시험에서 해머에너지 수준이 측정되면 이 연구에서 제시한 동적효율을 적용하여 평균에너지비와 시험결과 측정된 N치를 수정할 수 있는 보정계수를 산출함으로써 국제 표준치인  $N_{60}$ 값도 구할 수 있다.

- (3) 이 연구에서는 충격시험과 WEAP을 이용하여 동적효율을 산정하였으나, 더 많은 현장시험과 더 정밀한 방법에 의한 측정 및 확인이 계속되어야 할 것이며, 시험장비의 개선 및 표준화가 이루어지는 경우 동적효율 및 에너지 수준 등의 측정이 뒤따라야 한다.

### 참 고 문 헌

1. 박용원, 이호춘, 박종호, 김석훈(1993), "표준관입시험의 해머에너지 측정", 1993 학술발표회 개요집, 대한토목학회, 제(1)권, pp.573-576.
2. 박용원, 이호춘, 박종호(1994), "표준관입시험의 해머별 에너지 비교", 1994 학술발표회 논문집, 대한토목학회, 제(1)권, pp.821-824.
3. 이명환, 강원탁, 이원제, 김영진(1992), "실측에 의한 표준관입시험 함마의 낙하속도분석", 지반공학회지, 한국지반공학회, 제8권, 제1호, pp.60-64.
4. 이호춘(1996), "국내 표준관입시험의 에너지 수준 측정 및 고찰", 박사학위논문, 명지대학교.
5. 한국산업규격 KS F 2318(1991), "스플릿 배럴 샘플러에 의한 현장 관입시험 및 시료 채취 방법".
6. ASTM D 4633-86, "Standard Test Method for Stress Wave Energy Measurement for Dynamic Penetrometer Testing Systems".
7. Bowles, J. E.(1988), Foundation analysis and design, 4th edition, McGraw Hill Book Company, New York, pp.131-143.
8. Clayton, C. R. I.(1990), "SPT Energy Transmission : Theory, Measurement and Significance", Ground Engineering, pp.35-43.
9. Fletcher, G. F. A.(1965), "Standard Penetration Test : Its Uses and Abuses", Journal of SMFED, ASCE, Vol.91, No.SM4, pp.67-75.
10. Gibbs, H. J., and Holtz, W. G.(1957), "Res-

earch on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing", Proc. of the 4th ICSMFE, London, UK, Vol.1, pp.35-39.

11. Kovacs, W. D. and Salomone, L. A.(1982), "SPT Hammer Energy Measurement", Journal of the GED, ASCE, Vol.108, No.GT4, pp.599-620.
12. McLean, F. G., Franklin, A. G. and Dahlstrand, T. K.(1975), "Influence of Mechanical Variables on the SPT", Proc. of the 7th Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Vol.1, pp.287-318.
13. de Mello, V. F.(1971), "The Standard Penetration Test, A State-of-the-Art Report", 4th PanAm Conf. on SMFE, San Juan, Puerto Rico, Vol.1, pp.1-86.
14. Riggs, C. O.(1986), "North American Standard Penetration Test Practice", Proc. of the 14th Specialty Conf. on Use of In Situ Tests in GED, ASCE, pp.949-967.
15. Robertson, P. K. and Woeller, D. J.(1991), "SPT Energy Measurements Using a PC Based System", 44th Canadian Geo. Conf., Vol.1, Paper No.8, pp.1-10.
16. Sanglerat, G.(1972), The Penetrometer and Soil Exploration, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 487pp.
17. Schmertmann, J. H.(1975), "Measurement of in Situ Shear Strength", Proc. of the 7th Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Vol.2, pp.57-138.
18. Schmertmann, J. H.(1978), "Use of the SPT to Measure Dynamic Soil Properties -Yes But...", ASTM, STP, NO.654, pp.341-355.
19. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Hard, 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.1425-1445.
20. Skempton, A. W.(1986), "SPT Procedures and the Effects in Sands Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation", Geotechnique, Vol. 36, No.3, pp.425-447.
21. Smith, E. A. L.(1960), "Pile Driving Analysis by the Wave Equation", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol.86, No.SM4, pp.35-61.

(접수일자 1996. 12. 20)