

실측에 의한 표준관입시험 함마의 낙하속도 분석

Evaluation of the Falling Velocity of SPT Hammer via Actual Measurement

이 명 환*¹

Lee, Myung-Whan

이 원 제*²

Lee, Won-Je

강 인 탁*²

Kang, In-Tak

김 영 진*²

Kim, Young-Jin

Abstract

The SPT N value has been known to be influenced by various factors, among which the actually delivered energy level of the falling ram has the most significant effect. If N values of different energy levels are to be applied in the general analysis which is based on N values of standard energy level, the safety of the foundation might be in danger or the design might be overestimated. In this study the actual falling velocity of the ram has been measured so that the energy level could be estimated.

The results indicated that the energy level should be considered in the analysis or the design in this country, since the measured values are different from the internationally accepted standard value, N_{60} .

요 지

표준관입시험 결과인 N값은 여러가지 요소들에 영향을 받으며 그 중 함마의 낙하에너지는 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 에너지 수준이 상이한 상태에서 측정된 N값을 표준값을 기준으로 한 일반적인 해석에 적용할 경우에는 기초의 안전을 위협하거나 과잉설계를 유발할 수 있다.

본 연구에서는 SPT 함마의 낙하속도를 측정함으로써 함마의 낙하에너지를 간접적으로 계산하였다. 분석결과 우리나라의 N값은 국제적인 표준값으로 인정되는 N_{60} 과는 차이가 있는 것으로 나타나 해석 또는 설계시 필수적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

1. 서 론

표준관입시험 결과인 N값은 여러가지 요소들

에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 이들 다양한 요소들 중 상당부분은 외국의 수정계수를 적용함으로써 해소할 수 있으나,⁽³⁾ 각종 영향 요소들 중 가장 중요한 요소인 함마의 낙하 에너

*¹ 정회원, 고려대학교 부설 생산기술연구소

*² 정회원, 한국건설기술연구원 토질 및 기초연구실 연구원

지 부분은 각국의 특성, 사용장비, 시추기능공의 자질 등과 관련되어 실제 측정 이외에는 고려할 수 있는 방안이 없는 실정이다.

국제 토질기초 공학회에서도 1989년 제12차 국제 토질기초 공학 학술대회에서 채택한 국제표준시험법(IRTP, international reference est procedure)에 함마의 낙하에너지는 실측에 의한 보정을 할 것을 규정하고 있다.⁽⁵⁾

우리나라의 경우 표준관입시험은 거의 대부분의 지반조사에서 채택되고 있으며, 많은 경우 별도의 시료 채취나 실내 시험에 의한 토질정수 결정 과정없이 측정된 N값으로부터 기초의 설계가 이루어지고 있다. 따라서 국내에서 실시되고 있는 N값의 객관적인 평가, 즉 지역특성이 가장 중요한 변수인 낙하에너지에 대한 평가가 없는 상태에서의 N값의 적용은 심각한 문제가 아닐 수 없다.

1970년대 이후에 집중된 표준관입시험의 낙하에너지의 영향 연구결과에 의하면 N값은 에너지 효율과 반비례 관계에 있는 것으로 알려져 있다. 즉 국제적으로 표준값으로 인정받는 에너지 효율60%(이때의 N값을 N_{60} 이라 한다)인 경우의 $N_{60}=50$ 은 지역에 따라 $N_{40}=75$ (에너지 효율이 40%인 경우) 또는 $N_{75}=40$ (에너지 효율이 75%인 경우)으로 측정되며 따라서 거의 100%에 가까운 오차를 유발할 수 있다.⁽⁶⁾

함마의 낙하에너지 효율은 동적 측정장치를 이용하여 직접 측정하거나, 속도에너지와 동적 에너지로 분리하여 측정할 수 있다. 그러나 낙하에너지 또는 속도에너지의 측정은 상당히 복잡한 측정장치를 이용하여야 하는 어려움이 있어, 실제 지반조사 현장에서의 실측은 거의 찾아볼 수 없는 실정이다. 본 연구에서는 비디오 촬영 결과를 화면 정지 장치가 내장된 분석기를 이용하여 분석하였다.

2. 낙하속도의 실측 방법

표준관입시험의 낙하에너지에 대한 연구는 1970년대 이후에 집중적으로 행하여졌다. Kovacs는 함마에 흰 띠와 검은 띠를 교대로 부착하고

광선 측정장치를 이용하여 반사된 신호를 자동 기록기에 기록, 이를 분석하는 방법으로 거의 이론적인 자유 낙하속도에 가까운 충격직전의 함마의 낙하속도를 실측하였다.⁽²⁾ 그러나 국내의 경우 함마의 낙하속도 및 에너지 효율의 결정에 관하여서는 실측 또는 연구된 실적이 거의 전무한 형편이다.

본 연구에서는 충격직전의 함마의 낙하속도를 측정하기 위하여 실제 지반에서 도넛 함마와 유압식 자동함마를 사용하여 표준관입시험을 수행하고 함마의 낙하과정을 비디오 카메라로 촬영하여 이를 일정한 시간간격(1/30초)으로 정지화면을 설정 할 수 있는 장치가 내장된 분석기를 이용하여 분석하였다. 표 1과 사진 1은 표준관입시험에 사용된 기기의 제원과 자료해석에 사용된 비디오 분석 장치이다.

표 1. 제 원

| 구 분 | 야마도-75형 | THS-2형 |
|------------|---------|----------|
| 함마의 형태 | 도넛함마 | 유압식 자동함마 |
| 함마의 무게 | 63.5kg | 63.7kg |
| 함마의 길이 | 23.0cm | 38.5cm |
| 롯드의 직경 | 4.1cm | 4.1cm |
| cathead 직경 | 10.1cm | - |
| rope의 상태 | 중 고 | - |
| rope 감는 횟수 | 2 회 | - |

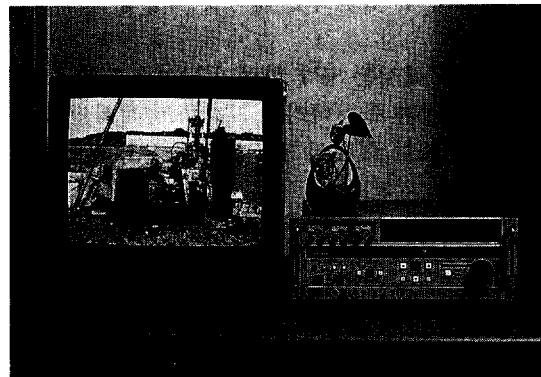


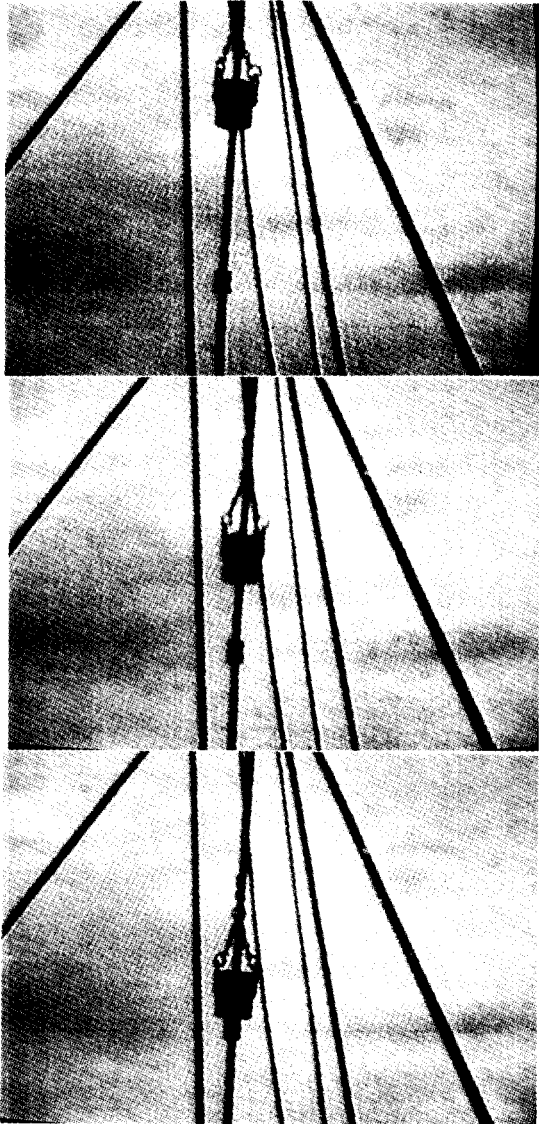
사진 1 비디오 분석 장치

낙하속도의 측정은 정지 화면상에서 anvil과

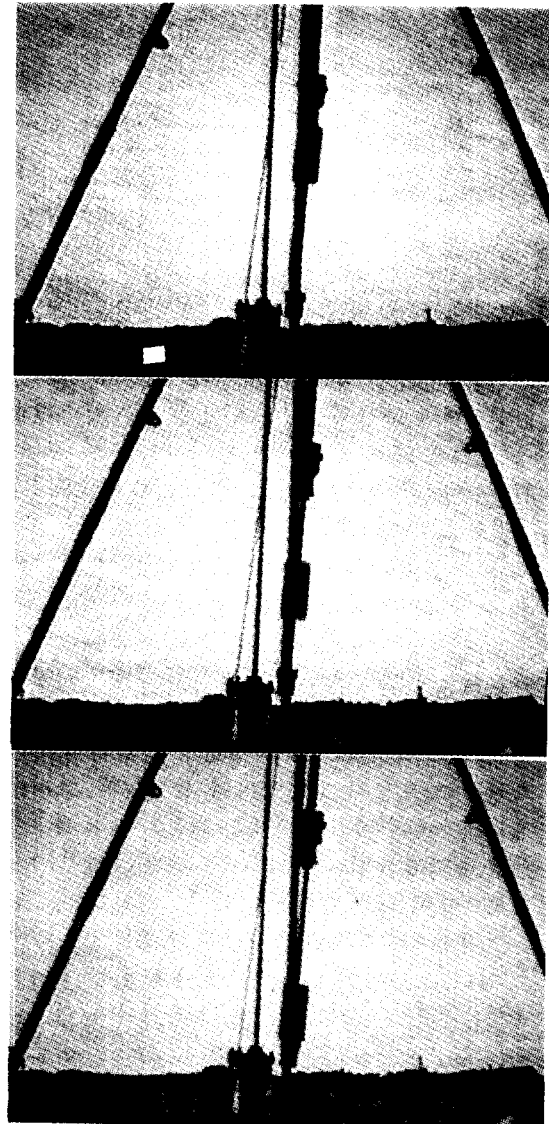
함마의 이격 거리를 자를 이용하여 측정하고 (사진 2 참조) 이를 이론적인 낙하높이 76cm로 환산하여 그림 1과 같이 도식화 한 후 그 곡선식으로부터 각각의 타격에 대한 충격직전의 함마의 낙하속도를 계산하였다.

현장에서는 anvil의 상단부로부터 760mm 되는 곳을 흰색으로 표시하여 함마의 낙하고를 일정하

게 유지하도록 노력하였으며, 이를 비디오로 확인 할 수 있도록 계획하였으나 비디오 화상으로 760mm의 확인은 불가능하였다. 따라서 실제 분석시에는 최초의 낙하고가 760mm인 것으로 가정하여 실측된 높이를 비례 배분하는 방법을 택하였다.



(a) 도넛함마



(b) 자동함마

사진 2 속도측정에 이용된 함마의 낙하광경
(비디오 화면)

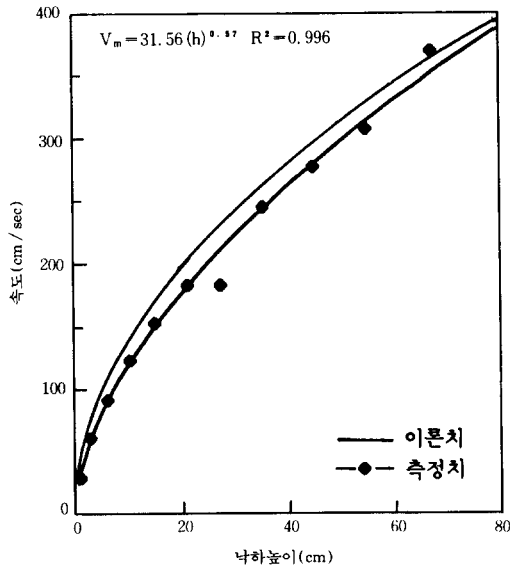


그림 1 낙하속도의 계산

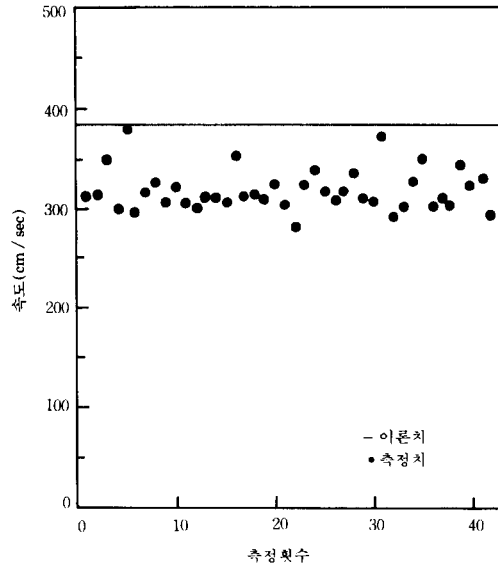
이론적 자유 낙하속도는 $V_t=386\text{cm/sec}$ 인 반면 1개의 측정예로서 그림 1과 같은 실측결과를 분석해 보면 충격직전의 낙하속도는 $V_m=372.6\text{cm/sec}$ 로 나타나고 있어 이론치의 96.5%인것을 알 수 있다.

3. 실측 결과 및 분석

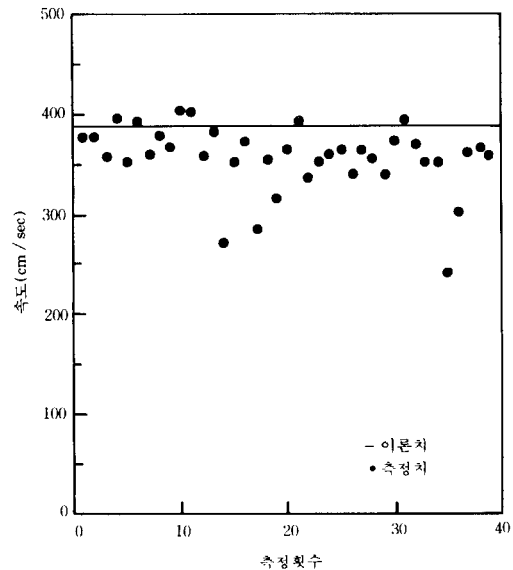
그림 2는 실제 지반에서 표준관입시험을 행하여 얻은 충격직전의 함마의 낙하속도를 나타낸 것이다. 충격시의 속도는 전술한 방법에 의하여 측정된 값으로서 도넛함마에서는 42회, 그리고 유압식 자동함마의 경우에는 39회의 타격 횟수에 대한 충격직전 함마의 낙하속도를 이론적인 자유 낙하속도에 대하여 나타내었다.

그림 3에는 측정된 속도값의 분포를 나타내주고 있다. 도넛함마에 있어서 실측한 함마의 낙하속도는 281.0~380.1cm/sec의 범위이며, 평균낙하 속도 318.3cm/sec, 표준편차 5.2cm/sec로서 이론적인 물체의 자유 낙하속도에 비하여 82.5%의 값을 갖는다. 그리고 자동함마의 속도 분포는 240.7~403.4cm/sec이며 평균 낙하속도는 354.7cm/sec, 표준편차 8.7cm/sec로서 이론적

인 자유 낙하속도의 92%에 해당하는 낙하속도를 나타내고 있다.

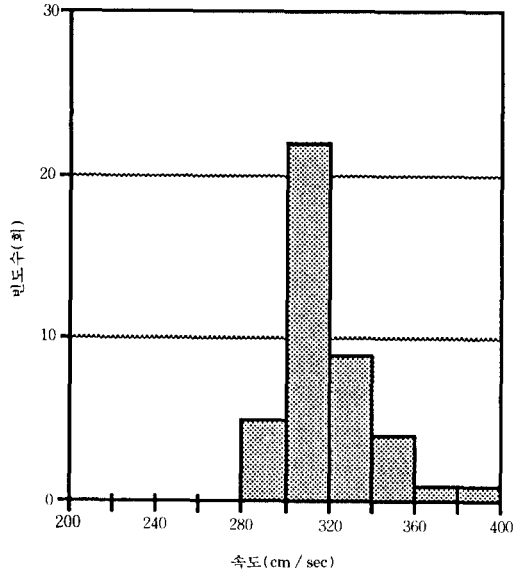


(a) 도넛함마

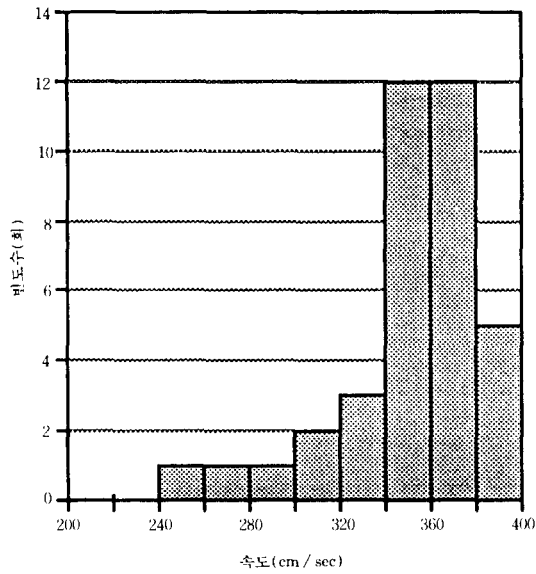


(b) 자동함마

그림 2 충격직전 낙하속도의 비교



(a) 도넛함마



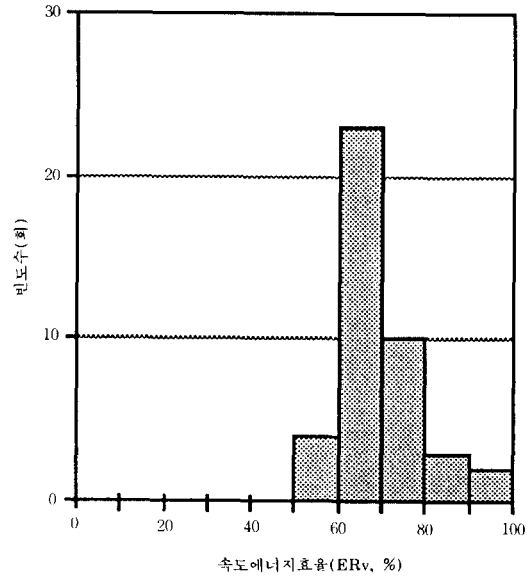
(b) 자동함마

그림 3 실측속도의 분포

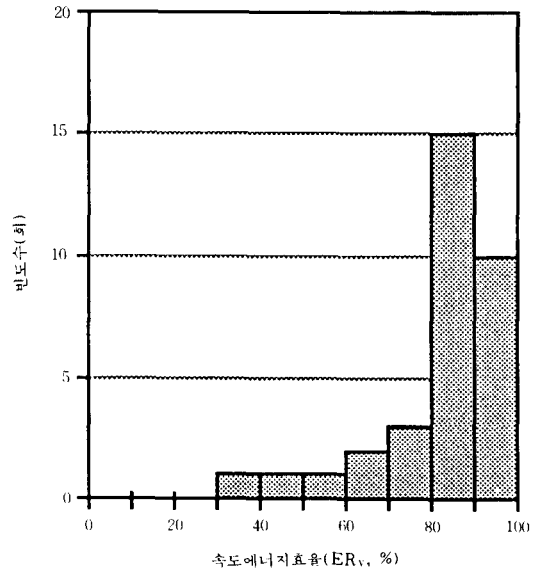
측정된 속도값으로부터 속도에너지 효율 (ERv)은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{ERv}{100} = \frac{\frac{1}{2}mV_m^2}{\frac{1}{2}mV_t^2} = \frac{V_m^2}{2gh}$$

여기서 V_m : 함마의 측정속도
 V_t : 자유낙하하는 물체의 이론속도
 $(V_t = \sqrt{2gh})$

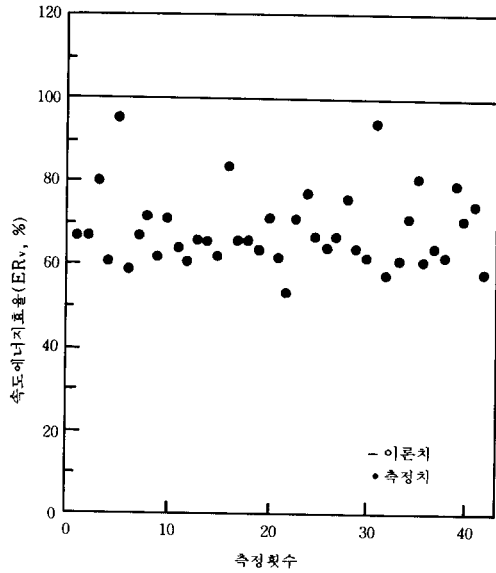


(a) 도넛함마

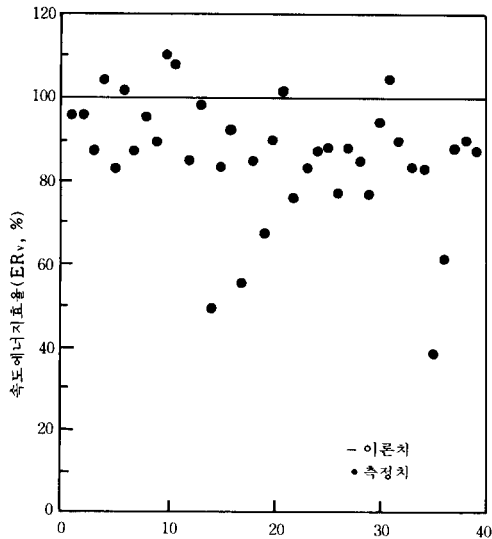


(b) 자동함마

그림 4 속도에너지 효율의 분포



(a) 도넛함마



(b) 자동함마

그림 5 속도에너지 효율에 대한 이론치~실측치의 비교

- g : 중력 가속도
- h : 낙하 높이
- m : 물체의 질량

위의 식을 이용하여 속도에너지 효율을 계산하였으며 실측값의 분포는 그림 4와 같다. 그림

5에는 실측된 전자료를 이론치와 비교하여 표시하였다.

실측한 낙하속도에 대한 속도에너지 효율은 이론적인 효율에 비해 도넛함마는 68.3%(53~96%) 자동함마는 85.7%(38~110%)의 평균치를 보여준다.

그림 6에는 본 연구에서 실측한 값들과 외국에서 측정한 값들을 비교하고 있다. 본 연구에서 측정한 값은 도넛함마의 경우 큰 cathead 사용시 측정한 값들과 비슷한 수준으로 나타나고 있다. 그러나 우리나라에서는 작은 cathead가 사용되고 있음을 감안할 때 외국에서의 시험과정보다는 상대적으로 에너지 수준이 낮은 것으로 평가된다. 유압식 자동함마의 경우에는 외국에서의 측정값들과 큰 차이는 없는 것으로 나타나고 있다.

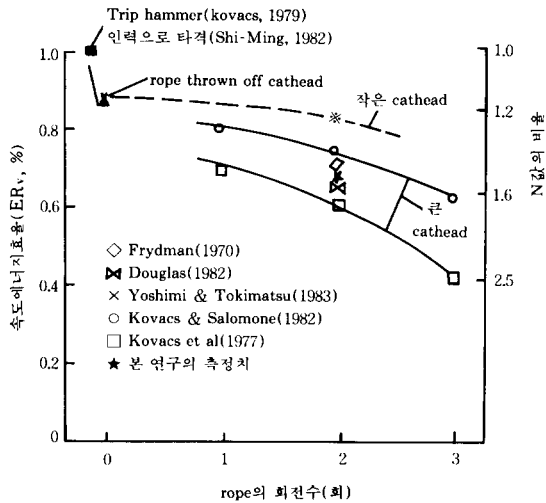


그림 6 속도에너지 효율의 비교

그러나 최근 Skempton이 조사한 각국의 평균 속도에너지 효율(표 2)과 본 연구의 실측값을 비교하여 보면,

1. 도넛함마의 경우 일본의 83%와 비교하면 일본효율의 82%정도이며, 미국의 소형 cathead 사용시 85%에 비교할 때 미국효율의 80%에 불과한 것으로 나타나고 있다.

2. 유압식 자동함마의 경우에도 일본이나 영국의 100%에 비하여 약 86% 수준에 머물고 있음을 알 수 있다.

이상을 종합하여 보면 우리나라에서의 함마의 낙하 속도에너지 비율은 외국의 80~85% 정도인 것으로 결론 지을 수 있겠다.

표 2. 각국의 평균 속도에너지 효율 (Skempton)

| 구 분 | cathead와 인장력 제거방법 | | |
|--------|-------------------|------------|---------------------|
| | 형 식 | cathead 규격 | ER _v (%) |
| 미국 수로국 | 자 동 | — | 100 |
| 일 본 | t o m b i | — | 100 |
| 일 본 | rope(2회전) | 소 형 | 83 |
| 미 국 | rope(2회전) | 대 형 | 70 |
| 미 국 | rope(1회전) | 소 형 | 85 |
| 미 국 | rope(2회전) | 대 형 | 70 |
| 영 국 | 자 동 | — | 100 |

실제로 표준관입시험 결과 N값을 결정하는 데는 속도에너지 효율 외에 함마가 룯드의 상단부(anvil)를 타격할 때 발생하는 동적효율(η_d)이 고려되어야 한다. 동적효율은 실제로 측정하기에는 곤란한 값으로, 룯드에 동적 strain gauge를 부착하여 함마의 에너지효율(ER_r)을 구한 후 속도에너지 효율값으로부터 $ER_r = \eta_d \cdot ER_v$ 의 관계식을 사용하여 역산하여 구한다.

본 연구의 목적은 함마의 실제 낙하 속도를 실측하여 속도에너지 효율을 알아보기 위함인바, 함마의 에너지효율은 실측하지 못하였다. 그러나 본 연구 결과를 실무에 적용하기 위해서는 동적효율을 가정하여 에너지효율을 추정할 필요가 있다.

동적효율의 값은 표 3의 Skempton이 제안한 값들을 검토하여, 도넛함마의 경우에는 우리나라와 조건이 유사한 일본의 평균값인 0.78을 사용하였고, 유압식 자동함마의 경우에는 영국에서 적용하는 0.60을 적용하기로 하였다. 이 값들을 적용하여 함마의 에너지효율(ER_r)을 계산하면,

$$\begin{aligned} \text{○ 도넛함마 : } ER_r &= \eta_d \cdot ER_v = 0.78 \times 0.683 \\ &= 53.3\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{○ 유압식 자동함마 : } ER_r &= \eta_d \cdot ER_v = 0.60 \times \\ &0.857 = 51.4\% \end{aligned}$$

표 3. 여러가지 함마 사용시의 동적효율 및 에너지 효율 (Skempton)

| 구 분 | anvil과 함마의 종류 | | | ER _r (%) |
|--------|---------------|---------------|----------|---------------------|
| | 형 식 | anvil의 중량(kg) | η_d | |
| 미국 수로국 | Vicksburg | 0 | 0.83 | 83 |
| 일 본 | 도넛함마 | 2 | 0.78 | 78 |
| 일 본 | 도넛함마 | 2 | 0.78 | 65 |
| 미 국 | 안전함마 | 2.5 | 0.79 | 55 |
| 미 국 | 규형표준 | 3 | 0.71 | 60 |
| 미 국 | 도넛함마 | ~12 | 0.64 | 45 |
| 영 국 | Pilcon | 19 | 0.60 | 60 |

위의 값들을 국제적으로 기준값으로 인정되는 $ER_r = 60\%$ 인 N_{60} 과 비교하면, 도넛함마의 경우에는 실측된 N값에 0.89를 유압식 자동함마의 경우에는 0.86을 곱하여 구할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 일본에서의 평균 에너지효율인 N_{78} 과 비교하면 도넛함마의 경우에는 실측된 N값에 0.68을 유압식 자동함마의 경우에는 0.66을 곱하여 각종 설계도표 및 공식에 적용하여야 할 것이다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 표준관입시험 함마의 낙하속도를 실측하였다. 실측결과 속도에너지효율은 미국이나 일본에 비하여 80~85% 수준인 것으로 나타났다. 여기에 문헌자료로부터 추정된 동적효율을 적용하면, 국제 표준값 N_{60} 을 얻기 위해서는 측정된 값에 0.86~0.89의 값을 곱하여야 하며, 일본의 평균치 N_{78} 을 얻기 위해서는 0.66~0.68을 곱하여야 한다.

그러나 본 연구 결과는 특정한 조건에서 단기간에 측정되었으므로 우리나라의 평균값을 구하기 위해서는 더욱 많은 측정이 이루어져야 할 것이며 특히 동적 strain gauge를 이용하여 에너지 효율을 직접 측정하는 연구가 시급히 요청된다.

참고문헌

1. 이명환(1991). "표준관입시험 결과의 표준화," 대한토질공학회지, 제7권 제1호, pp. 69-85.
2. Kovacs, W.D.(1979), "Velocity measurement of free-fall SPT hammer," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 105, GT1, pp. 1-10.
3. Robertson, P.K.(1988), "Discussion on Paper 1-9," *Proceedings of Penetration Testing in the U.K.*, ICE, Birmingham, pp. 95-96.
4. Skempton, A.W.(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.
5. Technical Committee on Penetration Testing of Soils-TC16.(1989), "International Reference Test Procedure," 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro.

(접수일자 1991. 8. 29)