

표준관입시험 N값의 올바른 보정 및 사용

Energy Correction and Use of Standard Penetration Test N Value

이우진¹⁾, Woo-Jin Lee, 유재명²⁾, Jae-Myung Yu, 류동헌³⁾, Dong-Heon Ryu

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea University

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea University

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

SYNOPSIS: Due to the variation of equipments and test procedure, level of energy transferred to split spoon sampler varies and thus measured N value. Since the properties and parameters are estimated from empirical correlations related to N value, the correction of N value with respect to specific energy level is essential. Factors affecting N value are discussed and the results of previous studies on energy correction of SPT N value is reviewed. Part of results from joint research works with KHC are presented and the range of energy levels for the hammer and release system typically used in Korea is suggested.

Key words: SPT, N value, Energy correction, N_{60}

1. 서론

표준관입시험(Standard Penetration Test)은 현재까지 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 지반조사 방법의 하나로, 국내에서도 사질토 및 점성토 지반의 구조물 기초, 굴착, 연약지반, 사면 등 지반공학 분야 설계에 필요한 대부분의 지반물성치를 측정된 N값에 의해 추정하여 활용하고 있는 실정이다. 그러나 각종 설계 경험식이나 물성치 추정을 위한 경험식 또는 설계도표 이용시 N값에 대한 적절한 보정이 이루어지지 않고 있는 경우가 대부분인 것으로 파악되고 있다.

표준관입시험은 사용성 또는 적용성에 있어서 지반특성 파악에 기여하는 바가 상당히 크지만, 시험장비 및 시험방법에 대해 명확한 기준이 설정되어 있지 않고 기술의 발전으로 인한 장비의 개량 등이 지속적으로 이루어짐에 따라 현장에서 얻어진 N값이 지반조건을 일관성 있게 대변하는 것으로 볼 수 없다. 따라서 표준관입시험의 전반적인 이해와 측정된 N값의 올바른 보정 및 사용에 대해 논의하고자 하며, 특히 N값 산정의 영향요인 중에서 영향이 상대적으로 큰 시험장비의 에너지 전달효율에 대한 에너지 전달 매카니즘, 옹력과의 거동 특성, 에너지 전달율의 산정법, 일반적으로 널리 사용되는 해머의 종류별 에너지 전달효율 등을 기존의 국내의 연구성과 및 현재 수행중인 시험성과를 중심으로 비교 분석하였다.

2. 표준관입시험

2.1 N값의 정의

표준관입시험은 1902년 미국인 Charles Gow가 당시에 일반적으로 시행되고 있던 수세식 보링에 따른 지질 조사를 대신하여 임의 깊이의 시추공저에 1인치 직경의 튜브샘플을 넣고, 시료를 채취함과 동시에 이 튜브샘플을 110파운드의 해머로 타격하면서 관입저항을 측정하여 지질주상도에 기록한 것에서 시작되었으며, 1927년 Ramond Concrete pile社에서 140파운드(63.5kg)의 해머와 30인치(약 76cm)의 낙하높이를 기준화하여 spoon sampler를 착안하였다. 그 후 Terzaghi와 Peck은 1948년에 그들의 저서 "Soil Mechanics in

Engineering Practice"에서 이전의 관입시험형태를 표준화하여 현재의 형태와 같은 표준관입시험을 제안하였다. 또한 Parsons는 1954년 매 15cm 마다 타격수를 측정하도록 제안하였다.

ASTM의 N값의 측정을 위한 규정 D 1586에서는 "중량 63.5kg의 해머를 76cm 높이에서 자유 낙하시켜 split barrel sampler가 15cm 관입되는데 필요한 타격수를 측정하고 이를 3회 반복하여 두 번째와 세 번째 15cm의 관입타격수를 합하여 N값으로 한다"고 규정하고 있으나 해머의 종류와 낙하시스템을 따로 정하지 않고 있다. 또한 표준관입시험시의 타격에너지 측정을 위한 D 4633에서는 룯드에 전달되는 힘을 로드셀에 의해 측정하여 F2방법으로 에너지를 계산하는 방법을 규정하고 있었으나 최근 측정기기의 발전으로 D 4633은 폐기되었다.

국내에서는 1966년 KS F2318에 「스플릿 배럴 샘플러에 의한 현장 관입 시험 및 시료 채취 방법」으로 규정되었으며, ASTM, JIS, ICSMFE의 규정과는 다소 규격상에 차이가 있으나 실용적으로 동일한 결과를 얻을 수 있을 정도의 근소한 차이를 나타낸다. 현재는 한국산업규격 KS F2307(1997년)에 「흙의 표준 관입 시험 방법」이라 규정되어 있으며, N값은 "중량 63.5kg의 해머를 75cm 자유 낙하 시켜서 로드 꼭대기에 부착된 노킹헤드를 타격하여 로드앞 끝에 부착된 표준관입시험용 샘플러를 지반에 30cm 박아 넣는 데 필요한 타격수"라 정의되어 있다.

2.2 표준관입시험 장비

위에서 언급한 바와 같이 ASTM과 한국공업규격에는 해머무게 ($63.5 \pm 1\text{kg}$), 낙하높이 ($0.76\text{m} \pm 25\text{mm}$)는 명시되어 있으나, 해머의 모양에 대한 구체적인 언급은 없으며 낙하방식은 수동, 반자동, 자동 등을 사용할 수 있다고 규정하고 있다. 그림 1은 로프-캐트헤드 시스템으로 도넛해머를 상승 및 낙하시켜 표준관입시험을 실시하는 모식도이며, 회전하는 캐트헤드에 마닐라로프를 감아 마찰력으로 해머를 들어 올린 후 로프를 풀어 마찰을 제거함으로써 76cm 높이에서 해머를 낙하시켜 룯드의 상부에 연결된 앤빌(anvil)을 타격하여 샘플러를 지반에 관입시킨다.

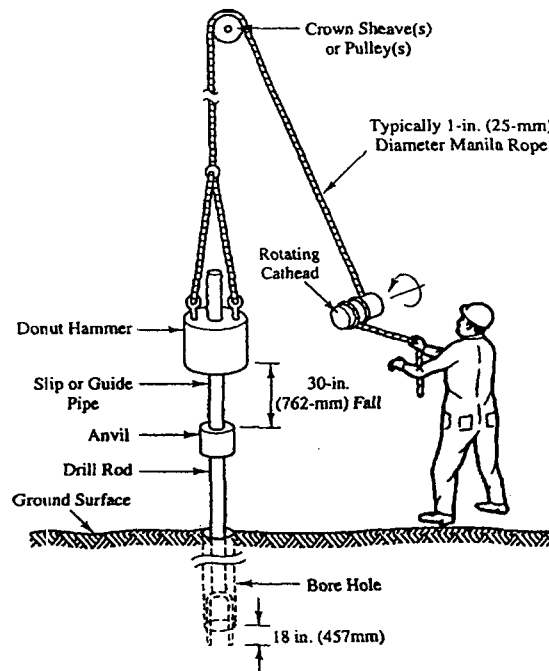


그림 1. 표준관입시험 (Kovacs, 1982)

표준관입시험시 룯드에 전달되는 에너지는 해머의 종류와 낙하방식에 의해 가장 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 따라서 측정된 N값도 이들에 의해 가장 크게 영향을 받는다. 국내외에서 널리 사용되는 해머종류는 그림 2에 보이는 바와 같이 핀해머(pin hammer), 구형표준(old standard), 도넛해머(donut hammer), 안전해머(safty hammer), 트립해머(trip hammer), 자동해머(automatic hammer)등의 있으며, 해머의 낙하 방식은 일반적으로 수동형(로프-켓해드-폴리형), 반자동형, 자동형 방식 등 3가지 방식이 가장 많이 사용된다.

핀해머와 구형표준해머는 국내에서는 사용되지 않으며 유럽에서 오래 전에 사용된 해머로 중남미나 아프리카 등의 후진국에서 현재까지도 일부 사용되는 것으로 알려져 있다. 도넛해머와 안전해머는 일반적으로 마닐라로프-켓해드-폴리 시스템을 이용하여 해머를 상승시키고 76cm의 낙하고를 목측으로 측정한다. 수동형 낙하방식은 작업인부가 로프를 느슨하게 하여 로프와 켓해드간의 마찰을 제거함으로써 해머가 낙하되며 로프-켓해드, 로프-폴리, 룯드-해머 사이에서 발생한 마찰 그리고 해머-앤빌 타격시 에너지의 손실 등으로 인해 룯드에 실제 전달되는 에너지는 이론적인 위치에너지보다 작다. 안전해머는 작업자의 안전을 위해 앤빌을 원통형 모양의 해머 안에 설치한 것이다.

일부지역에서는 작업의 효율성 증대와 일정한 낙하고의 유지를 위해 도넛해머나 안전해머를 반자동 낙하방식과 함께 사용하기도 하는데, 이는 해머를 로프-폴리로 수동으로 들어 올리고 낙하고는 자동으로 조절하는 방식을 말한다. 트립해머, 톱비해머, 자동해머 등은 모두 자동으로 해머를 들어 올리고 낙하높이도 자동으로 조절되는 방식이며 일반적으로 효율이 좋은 것으로 알려져 있다. 그러나 일부 트립해머는 작업속도가 너무 느리며 자동해머 중 일부는 작업속도에 의해 전달에너지가 달라지는 문제점이 있다.

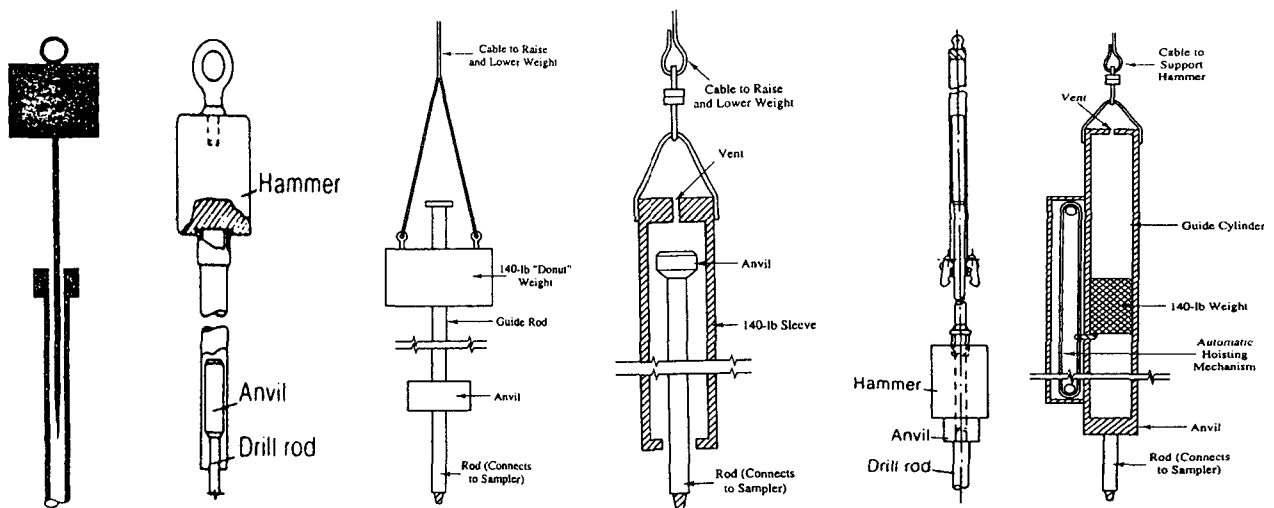


그림 2. SPT해머의 종류 (pin, old standard, donut, safety, trip, automatic)

3. N값에 대한 에너지 보정

표준관입시험에 의한 지반조사의 목적은 기술적, 경제적 이유로 샘플링이 어려운 지반의 N값을 측정하여 지반의 층서를 예상하고 각 지층의 대표적인 물성치, 상태변수, 강도정수 등을 구하는 것이다. 이를 위해 과거 여러 연구자의 연구결과와 데이터베이스로부터 이러한 물성치, 상태변수, 강도정수를 N값과 연관짓는 경험적 상관관계 또는 상관도표, 그리고 N치를 직접 설계에 적용하는 설계경험식 등이 제안되어 왔다. 그러나 현장에서 측정된 N값이 데이터베이스의 N값과 시험장비, 시험과정, 시험자의 작업능력의 관점에서 동등한 수준이어야 이러한 경험적 관계들을 통한 추정치의 신뢰도가 확보되는 것으로 볼 수 있다.

현재 사용되는 경험식의 대부분은 1950-60년대부터 개발된 것으로 당시의 표준관입시험 장비에 의한 타격 에너지는 현재의 장비에 의한 에너지와 상당히 다르다. 따라서 현재의 장비로 측정된 N값은 경험식이 형성될 당시의 에너지에 상응하는 N값으로 환산되어야 한다. 이를 위해 타격에너지의 측정방법과 N값의 에너지 보정방법을 알아보고자 한다.

3.1 표준관입시험의 해머 에너지

표준관입시험의 N값을 구하기 위해 해머로 split spoon sampler를 관입시키는 경우, 해머의 위치에너지를 이론에너지(Theoretical energy, E^*)라고 하며 다음의 식 1과 같이 정의한다.

$$E^* = W \cdot h = 63.5\text{kg} \times 76\text{cm} = 4826\text{ kg} \cdot \text{cm} \quad (1)$$

여기서, E^* =해머의 이론에너지, W =해머의 중량, h =해머의 낙하고이다. 위의 식에 의하면, 국내에서 사용되고 있는 63.5kg 해머와 76cm의 낙하고를 기준으로 이론에너지는 4826 kg·cm이다. 그러나 로프-켓헤드, 로프-폴리, 해머-롯데간의 마찰 또는 해머와 앤빌의 타격으로 인한 에너지 손실 등으로 인해 실제 롯데에 전달되는 에너지는 이론에너지의 일부분에 불과하다.

표준관입시험을 실시할 경우에는 각종 마찰에 의한 에너지 손실 때문에 이론적 에너지가 완전히 발휘되지 않는다. 해머의 이론에너지(E^*)와 해머가 앤빌을 타격하기 직전의 운동에너지의 비를 속도에너지비(Velocity energy ratio; ER_v)라고 정의한다.

$$ER_v = \frac{E_h}{E^*} \quad (2)$$

여기서, ER_v =속도에너지비, E^* =해머의 이론에너지, E_h =앤빌과 충돌하기 직전의 해머의 실제 에너지(Actual hammer energy immediately before impact)이다.

해머가 앤빌에 충돌하면 에너지 중 일부는 충격에너지 형태로 추가 손실되며, 시료채취기(sampler)를 관입시키는 에너지는 충돌하기 직전의 해머의 에너지보다 작다. 이론에너지와 실제로 롯데(rod)에 전달되는 에너지와의 비를 롯데에너지비(Rod energy ratio, ER_r)로 정의한다.

$$ER_r = \frac{E_r}{E^*} \quad (3)$$

여기서, ER_r =롯데에너지 비, E^* =해머의 이론적 에너지, E_r =롯데에 전달되는 에너지 (Energy delivered into the rod)이다.

동적효율(Dynamic efficiency, η_D)이란 해머의 앤빌타격을 통해 롯데에 전달된 에너지의 비율을 의미하며, 롯데에 전달된 에너지와 앤빌과 충돌하기 직전의 해머의 운동에너지의 비로 정의된다. 따라서 동적효율은 롯데에너지비와 속도에너지의 비율로도 표시할 수 있다.

$$\eta_D = \frac{E_r}{E_h} = \frac{ER_r \cdot E^*}{ER_v \cdot E^*} = \frac{ER_r}{ER_v} \quad (4)$$

여기서, η_D =해머의 동적효율, E_r =롯데에 전달되는 에너지, E_h =앤빌과 충돌하기 직전의 해머의 운동에너지, ER_r =롯데에너지비, ER_v =속도에너지비이다.

표준관입시험을 실시할 경우에 위에서 살펴본 바와 같이 시료채취기를 관입시키는 데 소요되는 실제에너지는 해머의 이론에너지와는 상당한 차이가 있다. 실제로 롯데에 전달되는 에너지는 마찰에 의한 에너지 손실과 해머와 앤빌의 충돌 시에 발생하는 에너지 손실을 고려하여야 추정이 가능하며, 위에서 정의한 식들을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$E_r = \eta_D \cdot E_h = \eta_D \cdot ER_v \cdot E^* \quad (5)$$

3.2 SPT 파형분석을 위한 파동역학이론

3.2.1 1차원 파동방정식

무한 길이의 롯데에 응력파가 전달되면서 발생하는 변위는 시간과 위치의 함수로 표현할 수 있으며 미소길이의 요소에 작용하는 힘과 inertia force의 평형방정식으로부터 지배방정식을 유도할 수 있다. 이러한 운동을 묘사하는 지배방정식을 1차원 파동방정식이라 하며 다음 식 6과 같이 표현한다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (6)$$

여기서, E = 룯드의 Young's modulus, ρ = 룯드의 mass density, u = 파동에 변위를 나타낸다. 여기서, 룯드를 따라 전달되는 응력파의 전달 속도는 다음 식 7로 표현되며 파의 전달속도 c 는 룯드 재료만의 함수(E, ρ)로서, 흙의 저항이나 외력 등이 있어도 항상 일정함을 알 수 있다.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

3.2.2 비례성의 원칙 (Proportionality)

Split spoon sampler에 연결된 룯드를 표준관입시험 해머로 타격하면, 룯드는 충격파가 전달된 위치까지만 변형이 발생하며 시간이 경과할수록 변형의 발생범위는 증가한다. 해머타격 후 일정시간 t 가 경과하면 그림 3의 좌측과 같이 파의 전면(wave front)이 A점에 도달하며, 이후 Δt 의 시간이 추가로 경과하면 그림 3의 우측과 같이 파의 전면이 $\Delta L = c \times \Delta t$ 만큼 추가로 이동한다.

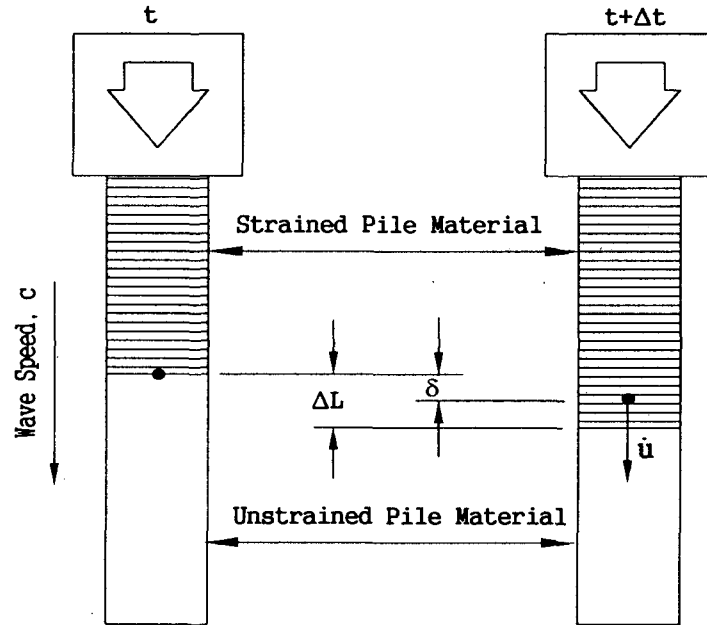


그림 3. 비례성의 원칙

따라서 Δt 동안 추가로 파동에 의해 영향을 받은 길이는 ΔL 이며 여기에 추가로 발생한 변위는 점 A의 이동거리인 δ 와 같다. 그러므로 점 A의 이동속도(particle velocity)와 길이 ΔL 의 룯드에 발생한 변형률(ϵ)은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\dot{u} = \frac{\delta}{\Delta t} \quad (8)$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{\Delta L} = \frac{\delta}{c \Delta t} = \frac{\dot{u}}{c} \quad (9)$$

위 식의 양변에 EA 를 곱하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F = \frac{AE}{c} \dot{u} \quad (10)$$

식 10은 룯드의 일정한 위치를 통과하는 응력파로 인해 룯드에 작용하는 힘(F)과 이로 인해 동일한 단면의 한 점에서 발생하는 입자속도(particle velocity)는 서로 비례함을 설명하며, 이식을 비례성의 원칙이라 한다. 비례상수(AE/c)는 임피던스(Z)라하며 단위는 $\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{cm}$ 이고 이는 순전히 파동전달매체 재료만의 함수이다.

비례성의 원칙은 흙의 저항으로 인한 반사파가 발생하지 않는 경우와 임피던스의 변화가 없는 경우에 성립하므로, 표준관입시험시 측정된 파형은 샘플러에서의 흙의 저항, 연결부위에서의 임피던스의 변화로 인해 힘과 입자속도의 차이가 발생한다.

3.2.3 경계조건에 의한 SPT 파형의 변화

롯데 임피던스의 변화로 표현되는 롯데의 단면적 변화나 샘플러 하단 지반의 압축성등은 식 10이 성립할 수 없는 조건으로 힘과 입자속도×임피던스의 차이가 발생하는 원인이 된다. 이러한 두 파형의 분리는 그 원인과 위치에 대한 정보를 제공한다. 한 롯데의 중간 길이에서 단면의 변화가 있을 경우, 단면에 따른 임피던스의 변화가 발생된다. 그림 4는 임피던스의 변화가 발생한 롯데 단면을 나타낸 것으로, 경계면의 위와 아래는 임피던스 Z_1 과 Z_2 를 각각 가지며, 부호는 힘은 압축(Compressive)을 정(+), 속도는 아랫 방향을 정(+)으로 정의한다

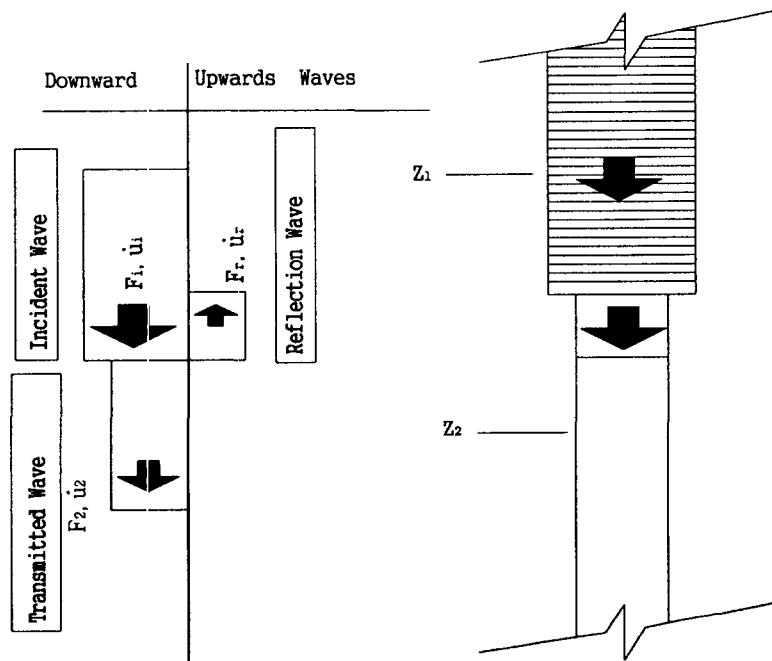


그림 4. 롯데 임피던스의 변화로 인한 파의 반사 및 전달

그림 4와 같은 임피던스의 변화시 incident파가 압축인 경우 반사파는 인장 상향파로 발생하며 힘은 부(-), 속도는 정(+)이다. 따라서 경계면에서의 연속조건과 평형조건으로부터 다음과 같은 식들을 얻을 수 있고

$$\dot{u}_1 = \dot{u}_i + \dot{u}_r = \dot{u}_2 \quad (11)$$

$$F_1 = Z_1 \dot{u}_i - Z_1 \dot{u}_r = Z_2 \dot{u}_2 \quad (12)$$

식 11과 12를 정리하면 경계면 아래에서의 힘과 속도를 임피던스(Z_1, Z_2)의 변화로 표현할 수 있는 다음 식을 얻는다.

$$\dot{u}_2 = \left(\frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) \cdot \dot{u}_i \quad (13)$$

$$F_2 = \left(\frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) \cdot F_i \quad (14)$$

위 식에서 볼수 있듯이, 두 부재의 단면적이 같은 경우 반사파가 생기지 않고 모든 파동이 그대로 매질을 통과하는 사실을 알 수 있다. 또한 임피던스가 작아지는 경계를 파동이 전파될 때 ($Z_1 > Z_2$) 반사파는 원래 파형과 반대부호의 파형을 갖게 된다. 즉 입사파가 압축파일 경우 반사파는 인장파이다.

이상적인 1차원 룯드에 운동방정식은 다음과 같은 1계 미분방정식으로 나타낼 수 있으며 (Timoshenko & Goodier, 1970)

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{Z}{M_h} \sigma = 0 \quad (15)$$

이식과 초기조건을 이용하면 해머타격 후 룯드에 발생하는 힘의 변화를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$F = F_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{M_h} t\right) \quad (16)$$

여기서, Z = 룯드의 임피던스, M_h = SPT해머의 질량을 의미한다. 위 식에서 알 수 있는 것처럼 이론적으로는 응력파의 최대값은 룯드의 임피던스와 타격시 해머의 속도에 의해 결정되고, 수렴경향은 룯드의 임피던스에만 영향을 받는다. SPT해머 타격시 룯드에서 측정될 힘-시간의 관계를 이론적으로 도시하면 그림 5와 같다. 표준관입시험의 경우 룯드의 임피던스에 비해 지반의 임피던스가 훨씬 작은 것이 일반적이므로 ($Z_1 \gg Z_2$) 해머의 타격으로 인한 압축파가 샘플러에서 반사되면 인장파로 상향 이동한다. 따라서 앤빌 타격후 $2L/c$ 의 시간이 경과하면 힘은 부(-)이고 속도는 정(+)인 파형이 발생한다.

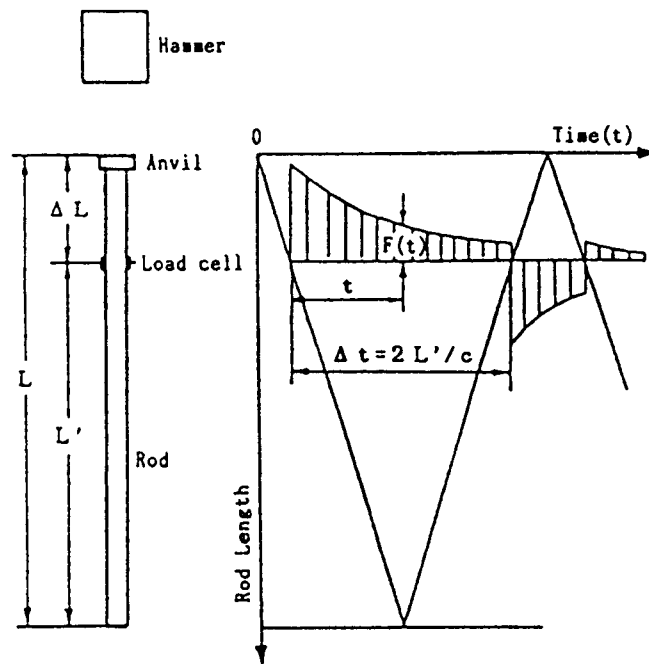


그림 5. SPT시험시의 이론적인 하중-시간 파형

그러나 실제 파형의 측정에서는 많은 변수들로 인해 지수함수 형태의 파형을 변형시키는데, 그 원인은 불완전한 축방향 타격, 스트레인 게이지 자체의 관성 및 노이즈에 따른 오차, 센서와 룯드의 상대변위 발생, 룯드 연결부위 또는 샘플러의 관입저항으로 인한 반사파 발생 등이다. 그림 6은 현장에서 자동해머로 표준관입시험을 수행하면서 측정한 힘과 속도의 파형을 보이고 있다. 이 그림에 의하면 타격 직후에는 그림 5에 보이는 음의 지수함수 형태를 보이거나 시간이 경과 할수록 이론적인 파형과 상이함을 알 수 있다.

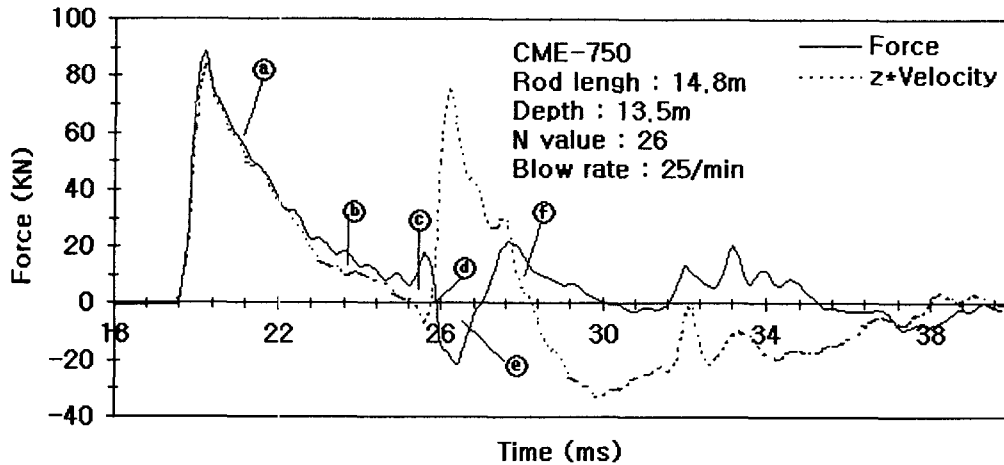


그림 6. SPT 룯드의 힘과 속도 파형 측정에 (CME-750)

SPT타격으로 인한 시간에 따른 파동 전달 과정을 살펴보면 다음과 같다.

- Ⓐ 타격으로 입사파가 발생하고 지수함수의 형태를 보이며, 힘과 속도파가 비례거동을 한다.
- Ⓑ 연결부에서 반사된 상향 인장파와 단면적 증가로 인한 하향 압축파 등으로 힘과 속도 응력파의 비례성이 파괴되기 시작한다.
- Ⓒ 샘플러에서의 주면 저항에 의한 상향 압축파 발생으로 힘 응력파의 크기가 커졌다.
- Ⓓ 파형이 측정된 후 다시 측정 위치로 되돌아온 시간 즉 $2L/c$ 이고, 여기까지를 1차 압축파라 한다.
- Ⓔ $2L/c$ 시간 이후 인장파가 측정되기 시작한다.
- Ⓕ 앤빌로부터 반사된 두 번째 압축파가 발생한다.
- Ⓖ 연결부에서 시간차를 두고 투과된 파동과 주면 저항에서 반사와 투과 과정을 반복하여 돌아온 파동이 혼합되어 초기 입력파를 불규칙적으로 만들고, 이후의 파형은 위와 같은 현상이 반복된다.

3.3 표준관입시험의 에너지 평가

룯드에 전달되는 에너지를 정확하게 측정하기 위한 많은 방법들이 제시되었다. 표준관입시험이 실시된 초기에는 단지 해머가 앤빌과 충돌하기 직전의 에너지를 측정하는 노력이 있어왔다. 그러나 이러한 방법들은 해머 시스템의 동적효율을 고려하지 못하므로 실제로 룯드에 전달되는 에너지를 정확하게 측정하지는 못한다. 따라서 룯드에 직접적으로 룯드셀이나 스트레인 게이지와 가속도계를 부착하여 룯드에 전달되는 에너지를 측정하고자 하는 방법과 이론들이 제안되었다.

3.3.1 F2 적분방법(F2 Integration Method)

Schmertmann과 Palacios(1979)는 룯드의 상단과 하단에 룯드셀(load cell)을 부착하고 해머로 타격하여 힘의 시간이력을 구하고 식 17을 이용하여 룯드에 전달된 에너지를 측정하였다. F2적분법은 완전한 1차원 파동 방정식과 힘과 속도의 비례성을 가정하여 구한 것이다. 해머 타격에 의한 관입은 드릴 룯드 내에서 발생한 첫 번째 압축파 내에서 파의 크기와 직접적인 관계가 있는데, F2적분법은 1차 압축파의 힘에 대한 시간범위 내의 적분 값이 대략적으로 실제 관입에 적용된 힘을 나타낸다고 볼 수 있다.

$$E_i = \frac{c K_1 K_2 K_c}{EA} \int_0^{\frac{2L}{c}} [F(t)]^2 dt \quad (17)$$

여기서, c =롯드의 파속, E =롯드의 Young's modulus, A =롯드의 단면적, $F(t)$ =시간에 따른 힘의 이력, K_1 =연결 롯드와 해머 타격면 사이의 거리에서 감지되지 않은 압축파 에너지에 대한 보정계수, K_2 =롯드의 길이가 14m 이하일 때 인장파의 영향으로 첫 번째 압축파 영역을 초기에 결정할 오류에 대한 보정, K_c =실제 압축파 속도에 대한 보정을 의미한다.

F2적분법은 인장파의 도달시간까지만 적분을 실시하여야 하며, 편심등으로 인해 힘의 파형이 정확치 않은 경우 신뢰성 있는 타격에너지의 추정이 힘들다는 문제가 있다. 만약 롯드의 길이가 14m 이상이면 인장파의 도달 이전에 초기압축파가 모두 온전히 샘플러까지 전달 될 것이나, 롯드의 길이가 14m 이하이면, $2L/c$ 안에 완전한 파형을 이루지 않는다. 실제 측정자료인 그림 6에 의하면 해머의 접촉에서 인장파의 도달까지 약 5.6 msec의 시간이 소요되었으며 파속 5120m/sec와 왕복거리임을 감안하여 계산하면 롯드의 길이가 약 14m 이면 tension cutoff에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Kovacs(1985)는 실제 인장전달 시간은 이론적인 시간보다 길다는 것을 발견하고 K_c 보정계수를 제시하였다.

3.3.2 FV 적분법(FV Integration Method)

첫 번째 압축파 내의 힘 적분방법 이외에 또 다른 대안 방법으로 힘-속도 적분법(Sy & Campanella, 1991)이 있다. 이는 표준관입시험 연결 롯드에 로드셀과 가속도계를 설치하여 로드셀로부터는 힘을 측정하고, 가속도계로부터는 속도를 측정하여 식 18과 같은 적분을 통해 에너지를 구하는 방법이다.

$$E_i = \int_0^{\max} F(t) \cdot V(t) dt \quad (18)$$

여기서 E_i =말뚝에 전달되는 에너지, $F(t)$ =시간에 따른 힘의 이력, $V(t)$ =시간에 따른 속도의 이력이다. 이 방법은 인장파가 롯드의 측정위치에 도달하면 FV는 음의 값을 가져 에너지가 점차 감소하므로 tension cutoff에 대한 보정이 필요치 않다는 장점이 있다.

3.4 롯드에너지비와 N값의 관계

표준관입시험에 있어서 해머의 이상적 자유낙하 시에는 에너지의 감소가 일어나지 않아야 하나 일반적으로 널리 사용되고 있는 시험장비들은 해머의 낙하시스템 및 해머의 종류 등이 표준화되어 있지 않기 때문에 에너지 효율에 차이가 발생하고 있으며, 이론적인 에너지의 약 30~80%가 롯드에 전달된다. 따라서 이러한 효율 차이의 영향으로 측정된 N값은 상당히 큰 차이가 발생할 수 있다. Schmertmann (1976)과 Kovacs와 Salomone(1982)은 N값에 영향을 미치는 많은 요인들 중에서 롯드에 전달되는 에너지가 가장 큰 영향을 미치는 요인이라 하였다. Schmertmann (1976)은 북미지역에서 실시한 N값 상관시험의 자료를 기본으로 에너지 효율은 약 55%정도로 제안하였고, Kovacs와 Salomone (1982)은 도넛해머를 캐헤드에 로프를 2번 감은 표준적인 방법으로 시험하였을 때, 이론적인 에너지의 약50~60%의 에너지가 롯드를 통해 전달된다고 하였다. 따라서, 현재까지 진행되어온 연구와 설계 등의 축적된 경험을 계속 유지, 활용하기 위해서 표준에너지효율(60%)로 보정하여 사용하는 것이 현실적이다.

Schmertmann과 Palacios (1979)는 동일한 깊이에서 여러 번의 해머 타격으로 측정된 관입량을 30cm 관입량에 상응하는 N값으로 환산하고 이를 측정된 에너지와 함께 도시하여 그림 7(a)의 결과를 얻었다. 그림에 의하면 롯드에너지가 증가하면 측정된 N값(N_m)은 선형적으로 감소한다는 사실을 밝혔다. 이들은 이 결과를 토대로 N값의 에너지보정을 위한 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$N_{60} = N_m \times \frac{E_m}{E_{60}} \quad (19)$$

국내 현장에서도 1/N값과 에너지 관계를 검증하기 위해 안전해머를 동일심도에서 낙하높이(76cm, 50cm, 25cm)를 다르게 하여 롯드에너지를 측정하였다. 측정된 관입량을 30cm관입에 필요한 N값으로 환산하고 롯드 에너지와 관계를 살펴보면 그림 7(b)와 같이 1/N과 에너지는 비례한다는 것을 검증할 수 있었다.

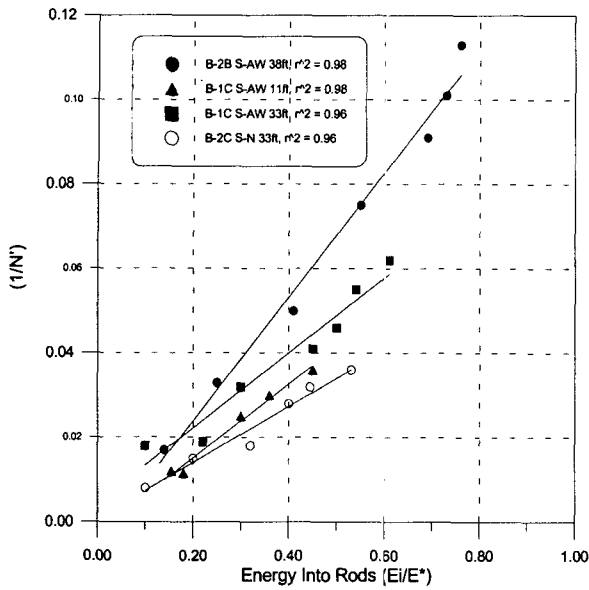


그림 7(a) Schmertmann & Palacios (1979)

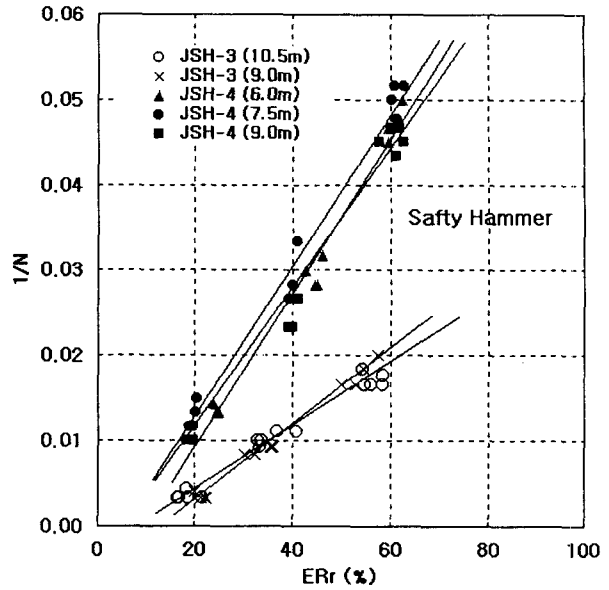


그림 7(b) 이우진 등 (2001)

4. SPT 타격에너지에 영향을 미치는 요소

표준관입시험시 룯드에 실제 전달되는 에너지는 여러 가지 요인에 의해 해머의 이론적인 위치에너지에 비해 작은 것이 일반적이다. 이는 해머가 앤빌에 타격되기 전에는 해머의 자유낙하를 방해하는 요인들에 의해 타격직전의 속도가 감소하여 속도에너지비가 작아진다. 여러 연구자들의 연구결과에 의하면 속도에너지는 해머 및 타격 시스템, 로프의 종류 및 상태, 캐트드에 로프 감은 수, 캐트드 직경, 드릴 룯드의 사이즈 및 길이, 해머의 타격 속도, 작업자의 숙련도 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 타격 후에는 타격시의 에너지 손실에 의해 추가적인 에너지의 감소가 발생하여 룯드에너지비가 변화하게 된다. 동적효율은 주로 해머시스템과 앤빌의 크기에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이외에도 N값의 에너지 보정에는 룯드의 길이, 샘플러의 제원, 보링공의 크기 등에 의해 영향을 고려해야 한다.

(1) 해머 타격 시스템(Hammer drop system)

외국의 경우에는 일반적으로 수동식(로프-폴리형), 반자동식, 그리고 자동식의 3 가지 방식의 해머타격 시스템이 사용되고 있다. 국내의 경우에는 로프-폴리형이 가장 많이 사용되고 있지만 이 방법은 다른 방법에 비하여 효율이 낮은 특성이 있다. 수동식은 캐트드의 직경, 로프의 굵기, 로프의 낚음 정도, 로프의 회전수, 작업자의 숙련정도 등에 따라서 직접적으로 에너지에 영향을 미친다.

자동해머나 트립해머의 경우에는 해머의 낙하고를 일정하게 유지할 수 있으므로 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있으며, 3가지 방식의 시스템중 가장 에너지 효율이 좋은 것으로 알려져 있다. Kovacs(1979)는 Dando 해머와 유사한 Boros trip 해머의 속도에너지 비를 구한 결과 0.99라는 값을 보고한 바 있다. 속도에너지 비가 0.99라는 것은 자유낙하시의 속도와 동일한 결과라고 할 수 있으며, 해머의 낙하 시에 에너지 손실이 거의 없다는 것을 의미한다. 표 1은 전세계에서 사용되는 여러 가지의 해머와 낙하시스템에 대한 연구결과를 요약한 것으로, 자유낙하에 가까운 trip해머나 hand drop이 캐트드를 사용하는 경우보다 룯드에너지비가 큼을 알 수 있다.

표 1. 해머 및 낙하시스템에 의한 룯드에너지비 (Clayton, 1990)

Country	Hammer type	Release Mechanism	Average rod energy ratio (ERr,%)	Reference
Argentina	Donut	cathead	45	Seed et al (1985)
Brazil	pin weight	hand dropped	72	Decourt (1989)
China	Automatic	trip	60	Seed et al (1985)
	Donut	hand dropped	55	Skempton (1986)
	Donut	cathead	50	Seed et al (1985)
Colombia	Donut	cathead	50	Decourt (1989)
Japan	Donut	Tombi trigger	78-85	Seed et al (1985) Riggs (1986)
	Donut	cathead-2 turns + special release	65, 67	Seed et al (1985) Skempton (1986)
UK	Automatic	trip	73	Clayton (1990)
US	Safety	2 turn on cathead	55-60	Seed et al (1985) Skempton (1986)
	Donut	2 turns on cathead	45	Seed et al (1985)
Venezuela	Donut	cathead	43	Decourt (1989)

(2) 로프의 종류 및 상태

로프-폴리방식의 경우 주로 마닐라 삼 로프를 사용하나, 국내의 경우 강선 와이어 로프를 사용하기도 한다. 마닐라 로프는 로프의 낡음정도에 따른 직경의 변화, 로프에 낀 기름때의 정도에 의한 마찰계수의 변화, 로프의 젖음정도에 따른 마찰계수의 변화 등에 의해 캐트헤드나 도르래와의 마찰력이 변화하므로 타격에너지도 변화한다. 또한 와이어로프는 마닐라로프에 비해 직경이 상당히 작고 마찰계수도 작아 룯드에너지비가 상대적으로 크게 측정된다. 그림 8은 마닐라로프의 상태와 캐트헤드에 감은 로프의 회전수가 룯드에너지비에 미치는 영향을 알아보기 위해 도넛해머와 마닐라로프+캐트헤드 시스템으로 시험한 결과를 보이고 있다. 마닐라삼 로프의 경우 새 로프 사용 시 현 로프보다 에너지가 작게 측정되었다. 캐트헤드에 로프 회전수는 2.25번을 표준으로 하지만, 회전수가 1회 증감함에 따라 룯드에너지가 약 7~11% 정도 감소 또는 증가함을 알 수 있다.

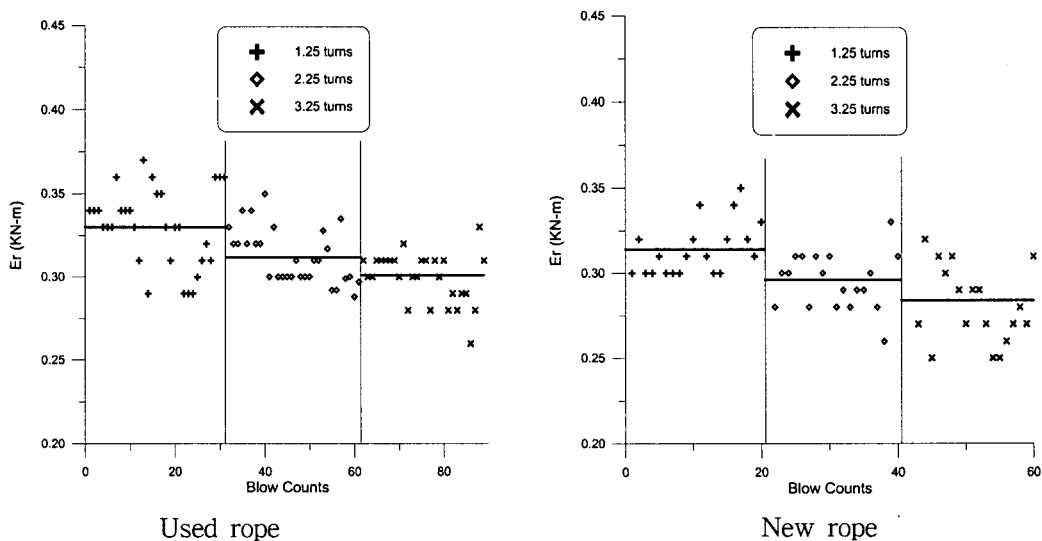


그림 8. 로프상태 및 캐트헤드에 감은 수에 의한 룯드에너지비의 변화

(3) 캣헤드 및 로프 회전수

캣헤드의 지름이 증가하면 마찰면이 증가하기 때문에 로프와 캣헤드 사이의 마찰이 증가하게 된다. 또한 회전방향에 따라 캣헤드에 로프 감은 수가 달라지므로 캣헤드의 회전방향 역시 중요하다. 따라서 일반적으로 150~250mm 정도의 크기를 사용하도록 추천하고 있고, 회전속도는 100rpm 이상, 시계방향의 회전을 유지하도록 추천하고 있다. 그림 9는 캣헤드의 크기와 로프회전수가 속도에너지에 미치는 영향을 도시한 것으로, 작은 캣헤드(직경 5인치)가 큰 캣헤드(직경 8인치)보다 10~30%정도 많은 에너지를 전달하며 로프회전수의 증가시 속도에너지는 감소함을 알 수 있다.

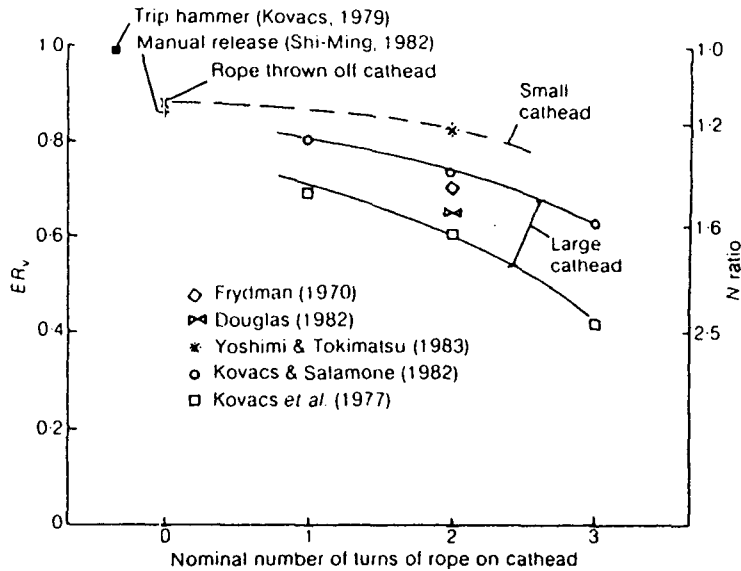


그림 9. 캣헤드 크기의 영향 (Skempton, 1986)

(4) 앤빌

앤빌은 해머의 타격에 의해서 에너지를 최초로 하부로 전달하는 장치이며, 그 크기는 룯드에 비하여 상당히 크다. 따라서 동적효율은 앤빌의 크기와 모양에 의해서 많은 영향을 받는다. Skempton(1986)에 의하면 작은 앤빌(2~3kg)은 0.7~0.8, 큰 앤빌(12~19kg)은 0.6~0.7 정도의 동적효율을 제안하였다. 앤빌에 변형이 발생하였을 경우에는 해머가 앤빌에 완전하게 에너지를 전달시킬 수 없기 때문에 에너지 손실이 발생하여 동적효율에 영향을 미치게 된다. 따라서 적절한 앤빌 시스템의 선택과 관리는 일정한 에너지 유지를 위해서 필수적이다.

국내에서 주로 사용하는 앤빌의 크기는 9cm×11cm(지름×높이)이며, 이보다 작은 7cm×10cm(지름×높이) 크기의 앤빌도 조사되었다. 표 2는 도넛해머를 사용하여 동일 장비, 동일 심도에서 앤빌만 교체하여 룯드 전달 에너지를 측정된 결과를 보이고 있다. 이 표에 의하면 작은 앤빌이 큰 앤빌 대비 약 12% 정도 더 큰 에너지를 전달하는 것으로 나타났다.

표 2. 앤빌크기에 의한 영향

앤빌 모양	앤빌 크기 (지름×높이,cm)	해머 (지름×높이,cm)	로프 감은수	캣헤드 (지름,cm)	에너지 전달효율	에너지 증감을 큰 앤빌 대비
큰 앤빌	∅ 10 × 11	도넛 해머 (∅20×27)	2회	12	45.3 %	1
작은 앤빌	∅ 7 × 10.5				50.6 %	1.12

(5) 드릴롯드

표준관입시험시 앤빌에 전달된 에너지는 롯데를 따라 샘플러에 전달되므로 롯데의 제원과 길이에 의해 영향을 받게 된다. 특히 롯데의 연결부에서 휨 현상이 발생하고 실험이 진행되는 동안에는 연결 부분이 느슨하게 되어 에너지 손실이 발생할 가능성이 있다. Aboumatar와 Goble(1997)은 롯데의 단면적에 따른 에너지의 변화를 관찰한 결과 그림 10과 같이 동일 심도에서 AW롯데의 N값이 NW롯데의 N값보다 작게 측정됨을 밝혔다. 이는 AW롯데가 NW롯데보다 더 큰 에너지를 전달하는 것을 나타낸다.

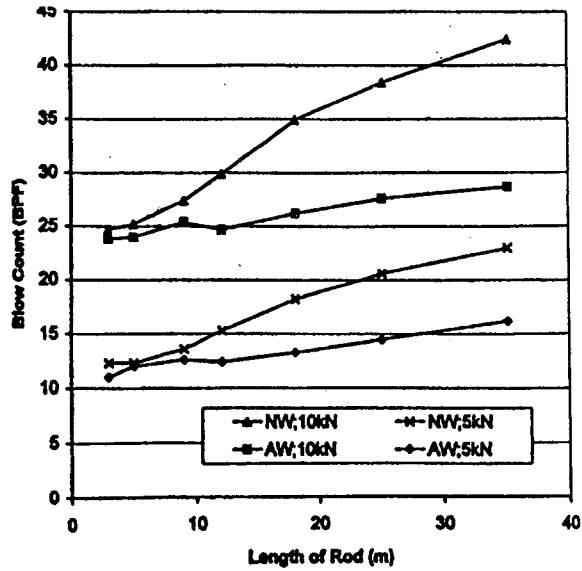


그림 10. 롯데제원에 의한 영향

롯데의 길이가 짧은 경우에는 해머의 타격으로 인한 압축파가 샘플러에 충분히 전달되기 전에 인장파와 중첩되므로 샘플러에 완전한 에너지가 전달되지 못한다. 따라서 상대적으로 N값이 과대 평가되는 경우가 발생한다. 그림 11은 국내의 현장에서 측정된 파형으로 롯데길이 5.8m, 7.3m, 8.8m에서의 파형의 변화를 보이고 있다. 이 그림에 보이는 파형을 식 17로 적분하면 tension cut-off의 위치가 다르므로 롯데길이가 짧을수록 에너지가 적음을 알 수 있다. Skempton(1986)은 롯데길이가 10m 이내인 경우 N값에 보정계수를 직접 곱하여 과대 평가된 N값을 보정하도록 제안한 바 있다.

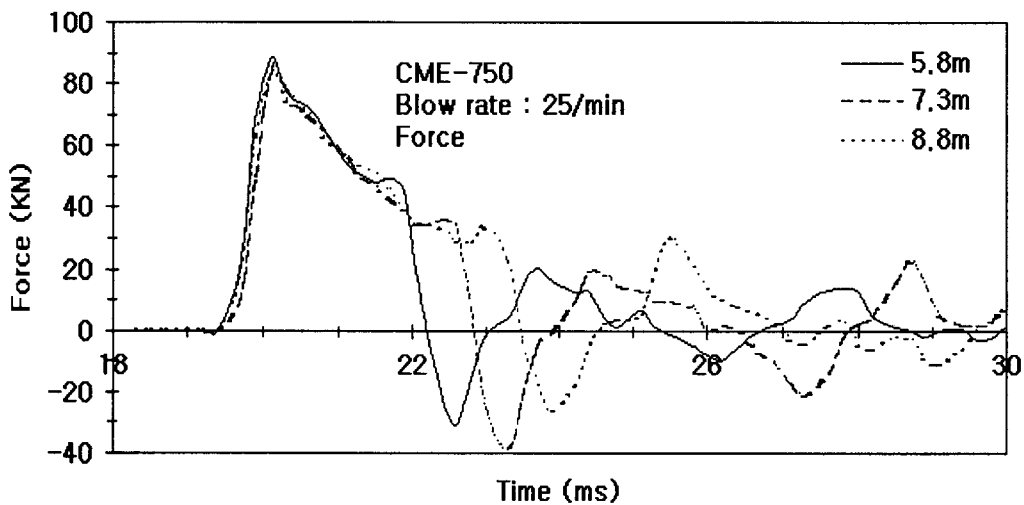


그림 11. 롯데길이에 의한 파형의 변화

(6) 자동식 해머의 타격속도

자동방식의 장비는 분당 타격수를 빠르게 또는 느리게 조절하며 작업을 할 수 있다. 자동해머를 동일 장비, 동일 방식으로 표준관입시험을 실시하더라도 분당 타격수가 증가하면 해머를 들어올리는 체인의 속도가 빨라진다. 따라서 해머의 관성에 의해 낙하고가 증가하고 이에 따라 에너지전달율이 증가하는 현상이 발생한다. 그림 12는 Kovacs(1979)가 관찰한 결과로 Borros 자동해머의 타격수가 15타/분 이상이면 낙하고가 증가함을 알 수 있다. 그림 13은 국내에서 측정된 것으로 자동해머인 CME-750 장비를 25타/분과 60타/분으로 타격하면서 룯드에너지비를 측정한 결과로 타격이 빠른 경우가 더 큰 에너지를 전달함을 알 수 있다. 따라서 동일한 자동해머라도 타격속도에 따라 다른 에너지로 보정하여야 함을 알 수 있다.

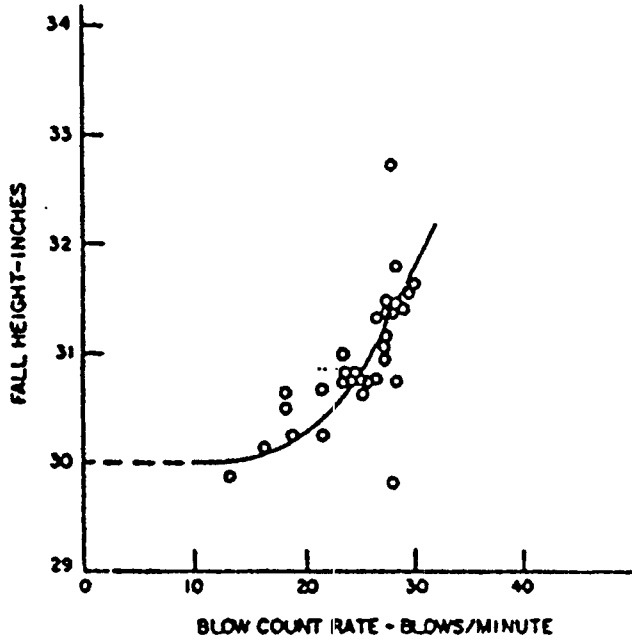


그림 12. 분당 타격수와 낙하고 (Kovacs, 1979)

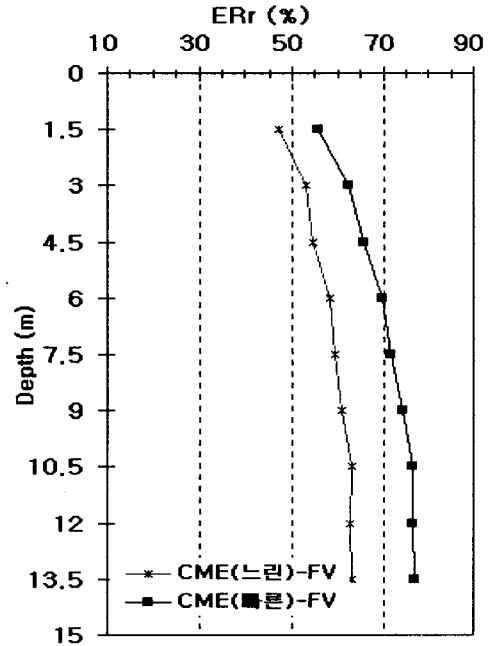


그림 13. 분당 타격수와 룯드에너지

5. N값의 에너지 보정

표준관입시험 장비 및 시험절차의 다양한 변화로 인해 다른 타격에너지로 측정된 N값의 보정이 필요함을 인식하고 이를 위한 방법들이 여러 연구자에 의해 구체적으로 제시되어 왔다. SPT에너지의 평가는 시험시 직접적으로 에너지를 측정하는 방법과 과거의 데이터베이스를 통해 형성된 자료를 이용하는 방법이 있다. 전자의 경우는 정확한 에너지의 평가가 가능하지만 에너지 측정장비의 가용성, 시간 및 비용상의 불리함이 있다. 또한 데이터베이스를 이용하는 방법은 간편하기는 하나 시험장비 및 작업과정을 정확하게 파악하여 적용하지 않으면 상당한 오차를 유발할 수 있다. 그러나 모든 표준관입시험시 에너지를 측정하는 것은 시간 및 비용상 불가능하므로, 실무에서 주로 사용하는 시험장비들에 대한 SPT에너지를 측정하여 간편하게 에너지보정을 실시할 수 있는 도표를 제공하는 방법이 일반적으로 시도되어 왔다. N값의 에너지 보정과 관련하여 국내외에서 현재까지 수행된 관련 연구성과를 요약 정리하면 다음과 같다.

5.1 국외의 연구결과

de Mello(1971)는 표준관입시험의 에너지에 관련된 이전의 연구결과를 종합적으로 집대성한 최초의 논문으로 발표하였으나 N값의 에너지 보정에 대한 구체적인 방법을 제시하지는 못했다. Skempton(1986)은 70년대와 80년대의 연구결과를 인용하여 SPT에너지에 영향을 미치는 요소를 체계적으로 분석한 후 해머 및 낙하시스템, 룯드길이, 보링공 직경 등에 의한 속도에너지비, 룯드에너지비 또는 동적효율의 변화를 다음의 표 3과 표 4로 제시하였다.

표 3. 해머종류 및 낙하시스템의 에너지에 대한 영향 (Skempton, 1986)

	Release mechanism			Hammer system			ER _r (%)
	Type	Cathead	ER _v (%)	Hammer	Anvil (kg)	η_d	
WES	Trip	-	100	Vicksburg	0	0.83	83
Japan	Tombi	-	100	Donut	2	0.78	78
Japan	Slip-rope(2 turns)	small(130mm)	83	Donut	2	0.78	65
USA	Slip-rope(2 turns)	large(200mm)	70	Safety	2.5	0.79	55
UK	Slip-rope(1 turn)	small(100mm)	85	Old standard	3	0.71	60
USA	Slip-rope(2turns)	large	70	Donut	12	0.64	45
UK	Trip	-	100	Pilcon	19	0.60	60

표 4. 룯드길이, 라이너, 보링공 직경에 대한 보정계수 (Skempton, 1986)

Factors	Condition	Correction factor
Rod length	> 10 m	1.0
	6-10 m	0.95
	4-6 m	0.85
	3-4 m	0.75
Liner	Standard sampler	1.0
	US sampler without liners	1.2
Borehole diameter	65-115 mm	1.0
	150 mm	1.05
	200 mm	1.15

5.2 국내의 연구결과

국내의 경우 현장에서 사용하는 시험장비의 세부형태나 시험여건이 외국의 경우와는 다름에도 세부적인 표준화 및 에너지 수준에 대한 국내 고유의 자료가 없어 국제적으로 적용하고 있는 기준을 적용하거나 외국의 경우를 원용하여 N 치를 보정하고 있는 실정이다. 국내에서는 이와 같은 문제를 인식한 연구자들에 의해 90년대 초반부터 표준관입시험의 에너지 문제에 관한 연구가 진행되고 있다. 특히 90년대 후반부터 발주방식의 변화로 턴키설계가 보편화되면서 대규모 설계를 위한 표준관입시험시 에너지의 측정과 N값의 에너지보정이 일반화되고 있는 추세이다. 그러나 대부분의 일반설계에서는 이러한 보정이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

이명환 등(1992)은 표준관입시험 결과인 N값은 여러 가지 요소들에 영향을 받으며 그 중 해머의 낙하에너지가 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단하고, SPT 해머의 낙하속도를 측정함으로써 해머의 낙하에너지를 간접적으로 계산하여 우리나라에서 사용되고 있는 N값을 낙하에너지 관점에서 분석하였다. 해석 결과 우리나라의 N값은 미국이나 일본에 비하여 80~85% 수준에 불과하며, N₆₀을 얻기 위해서는 측정된 N값에 0.86~0.89

의 값을 곱해서 사용해야 한다고 주장하였다.

박용원 등(1993)은 표준관입시험 시에 발생하는 에너지 손실 때문에 실제의 해머 타격에너지는 이론적 타격 에너지와는 크게 다르다고 지적하면서 국내의 현장에서 시행되고 있는 타격에너지를 측정하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 초음파 송수신장치와 PC를 이용하여 타격에너지를 측정하였고, 그 결과 Rope-Pully형 해머와 자동해머의 해머에너지 비는 이론적 에너지에 대하여 각각 64.2% 및 75.0%로 측정되었다. 국내 현장에서 측정한 N값을 국제 표준치인 N_{60} 으로 보정하기 위한 계수로 Rope-Pully형 해머의 경우에는 0.77, 자동해머의 경우에는 0.9를 제안한 바 있다. 또한 이호춘 등(1997)은 앤빌(anvil)과 룯드(rod)를 통하여 전달되는 도중에 발생하는 손실을 고려한 표준관입시험의 동적효율을 Charpy 충격시험과 WEAP으로 산정하여 동적효율을 0.72로 제시하였다.

이우진 등(1998)은 향타분석기(PDA)를 이용하여 도넛해머, 안전해머, 개량형 자동도넛해머에 대한 룯드에너지를 국내의 3개 현장에서 측정하였다. 향타분석기는 해머의 타격으로 인해 룯드에 전달되는 하중과 속도를 측정하므로 FV적분법으로 에너지를 산정하여 이론적인 에너지 값과의 비율로부터 바로 에너지 전달효율을 산정 할 수 있고, 동적효율과 속도에너지 효율을 따로 고려하는 불편과 부정확성을 제거할 수 있으므로 비교적 정확하게 룯드에너지를 측정할 수 있다고 보고하였다.

표 5. SPT에너지에 관한 국내의 연구결과

연구자	해머	룯드에너지비(%)	비고
이명환 등 (1992)	Donut	53.3	낙하속도 실측, 동적효율(η_d) 가정, $\eta_d = 0.78$
	Auto	51.4	낙하속도 실측, 동적효율(η_d)가정, $\eta_d = 0.6$ Auto trip hammer
박용원 등 (1993)	Donut	52	낙하속도 실측, 동적효율(η_d)가정, $\eta_d = 0.78$
박용원 등 (1994)	Donut	50	낙하속도 실측, 동적효율(η_d)가정, $\eta_d = 0.78$
	Auto	59	낙하속도 실측, 동적효율(η_d)가정, $\eta_d = 0.78$ Auto trip hammer
이호춘 등 (1997)	Donut	46.2	낙하속도 실측, 동적효율(η_d) 실내실험·수치해석, $\eta_d = 0.72$
	Auto	54	낙하속도 실측, 동적효율(η_d)실내실험·수치해석, $\eta_d = 0.72$, Auto trip hammer
이우진 등 (1998)	Donut	39.2	PDA이용, 룯드에너지 비(ERr) 직접측정
	Safety	65.8	PDA이용, 룯드에너지 비(ERr) 직접측정
	Auto	54.7	PDA이용, 룯드에너지 비(ERr) 직접측정, Modified auto donut hammer

6. 도로공사/고려대/KAIST/SK건설 협동연구

위에서 살펴본 국내의 연구는 지속적인 연구에 의한 결과보다는 제한된 지역에서 한정된 장비로 실시된 수차례의 시험결과를 해석하여 표 5와 같은 결과를 얻었다. 따라서 현장관입시험의 신뢰성을 높이기 위해서는 체계적이고 장기적인 연구의 필요성이 제기되어 2000년부터 한국도로공사, 고려대학교, 한국과학기술원, SK건설이 참여하는 협동연구가 시작되었다.

6.1 시험현장의 지반조건

협동연구를 위한 현장조사 및 시험은 한국도로공사에서 지원하는 장비 실시하였으며, 조사 및 시험은 서해안 고속도로 건설공사가 진행 중인 전라북도 김제 지역과 중부내륙고속도로 가남 JCT 인근의 시험도로 구간에서 실시되었다. 김제 지역은 중생대 쥐라기 대보화강암이 저반 형태로 폭 넓게 관입하여 기반암을 구성하고 있으며, 그 상부에 오랜 기간 동안 퇴적된 실트질 점토층 또는 모암인 화강암이 완전풍화되어 잔적된 풍화토층이 광범위하게 분포하고 있다. 가남 JCT 지역은 시추조사 결과에 의하면 매립토층, 잔류토층, 풍화암층의 순으로 비교적 단순한 성층구조를 보인다. 대부분의 표준관입시험은 풍화토층에서 실시하였으며, 시험공 위치는 인접한 거리에 배치하여 지반조건의 공간적인 변화에 의한 영향을 배제하려고 노력하였다. 시험장소의 대표적인 N값의 분포는 그림 14에 보이는 바와 같다.

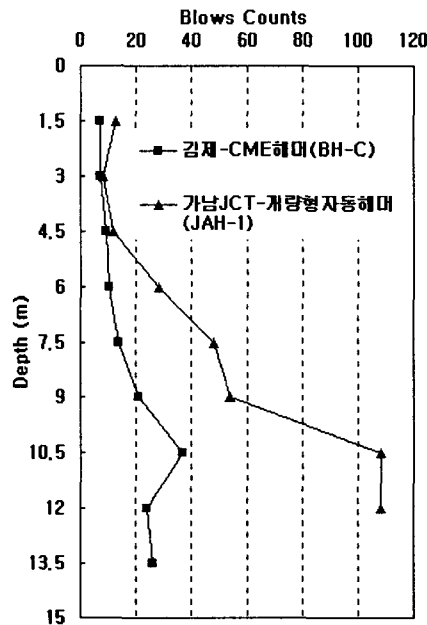


그림 14. 시험장소의 지반조건

6.2 현장시험 장비

표준관입시험은 전북 김제 서해안 고속도로 건설현장 제14공구에서 개량형 도넛해머(반자동식), 도넛해머(수동식), 트립해머(반자동식), CME자동해머(자동식)의 4가지 종류와 중부내륙고속도로 가남JCT에서는 도넛해머(수동식), 안전해머(반자동식), 개량형 자동도넛해머(자동식)의 3가지 종류의 SPT장비로 실시되었으며 장비의 제원은 표 6에 요약된 바와 같다. 표준관입시험은 각 보링공에서 심도 1.5m간격으로 실시하여 N값을 측정하고, 매년 타격시마다 룯드에 전달되는 에너지는 향타분석기와 측정용 룯드를 이용하여 측정하였다. 표준관입시험 결과는 해머의 종류, 낙하 시스템, 앤빌의 크기, 로프의 종류, 로프 감은 수, 캐트드의 크기 등에 영향을 받으나, 본 시험에서는 각 영향을 주는 요소를 변화시키지 않고 장비시스템 전체에 대한 효율을 측정하는 시험을 실시하였다. 그림 15에서 20은 본 시험에 사용된 장비의 설명도이다.

표준관입시험 중 룯드에너지를 측정하기 위해 에너지 측정용 룯드(AW)를 앤빌 하부나 룯드의 상단에 연결하였다. 에너지를 계산하기 위한 힘과 속도는 룯드에 부착된 2개의 변형률계와 2개의 가속도계로 측정되며 향타분석기에 의해 필요한 계산치를 관찰할 수 있다. 변형률계는 룯드에 고정된 2지점 사이의 변형률을 측정하고, 단면적과 룯드의 재료의 계수를 곱하여 힘을 계산한다. 가속도계에 의해 측정된 가속도는 시간에 대해 적분하여 측정지점의 입자속도로 변환시킨다. 편타에 의한 오차를 줄이기 위해 룯드 표면에 마주보게 2개의 가속도계를 설치하였다. 또한 전달된 측정된 힘과 속도의 파형에 FV적분법을 적용하여 에너지를 계산한다.

표 6. 협동연구에 사용된 표준관입시험 장비의 제원

시험장소	김제 서해안 14공구				가남 JCT		
해머 및 낙하시스템	개량형 도넛해머 (반자동)	도넛해머 (수동)	트립해머 (반자동)	CME 자동해머 (자동)	도넛해머 (수동)	안전해머 (반자동)	개량형 자동도넛해머 (자동)
굴착 방법	수세 로터리보링	회전 수동 레바식	수세 로터리보링	중공관 오거 보링	수세 로터리보링	회전 수동 레바식	수세 로터리보링
시추공 규격	BX			NX	BX		
해머(지름×높이,cm)	20×26	20×27	-	-	20×27	-	-
앵빌(지름×높이,cm)	9×11	10×12	-	-	7×9	-	-
로프(지름,cm)	강선 (0.3)	마닐라 삼 (2.5)		-	마닐라 삼 (2.5)		-
로프 감은수	-	2¼		-	2¼		-
캐트헤드 (지름,cm)	10	10.2	10.9	-	12	12	-
해머 인양 방식	수동 원치 유압식	수동 로프 풀리식	수동 로프 풀리식	자동 체인 회전식	수동 로프 풀리식	수동 로프 풀리식	자동인양식
낙하 높이 조절	수동식	수동식	자동조절	자동조절	수동식	수동식	자동조절
가이드 로드	있음	있음	있음	없음	있음	있음	있음
시험 공수	1	2	2	2	2	3	2
시험 심도 (m)	13.5	13.5	12	13.5	12	12	12
시험 방법	각 공별 1.5m 간격으로 N값 및 타격 에너지 측정						

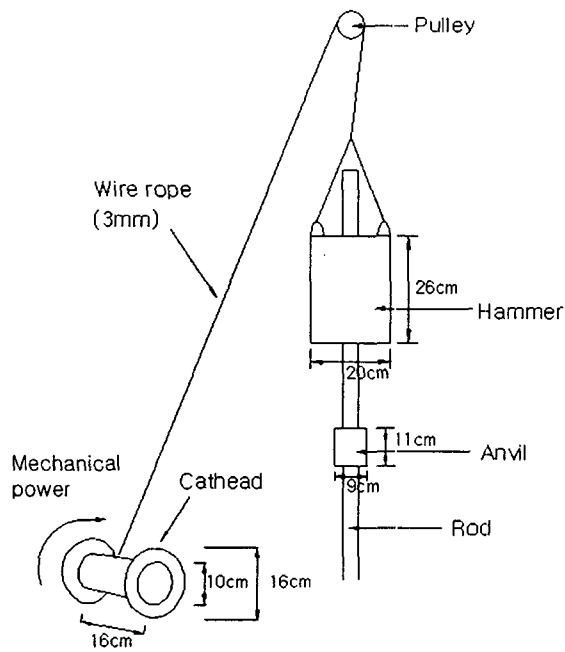


그림 15. 개량형 도넛해머 (반자동식)

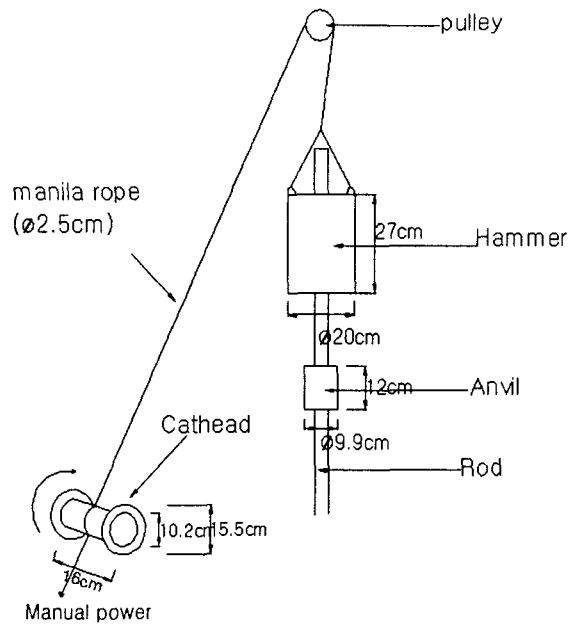


그림 16. 도넛해머 (수동식)

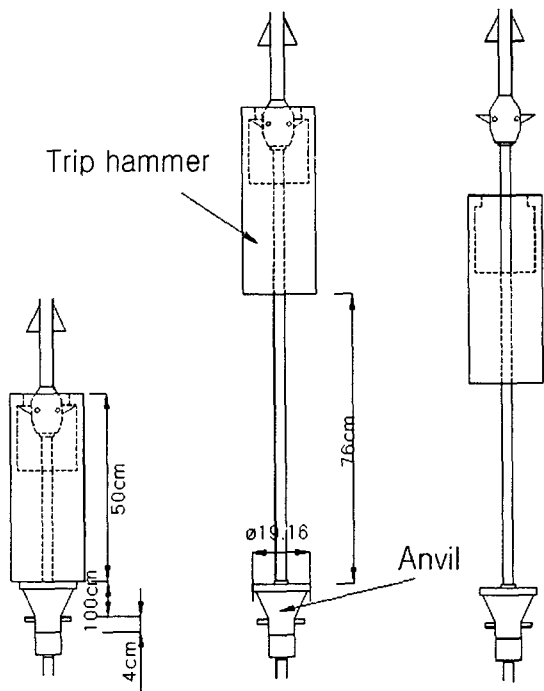


그림 17. 트립해머 (반자동식)

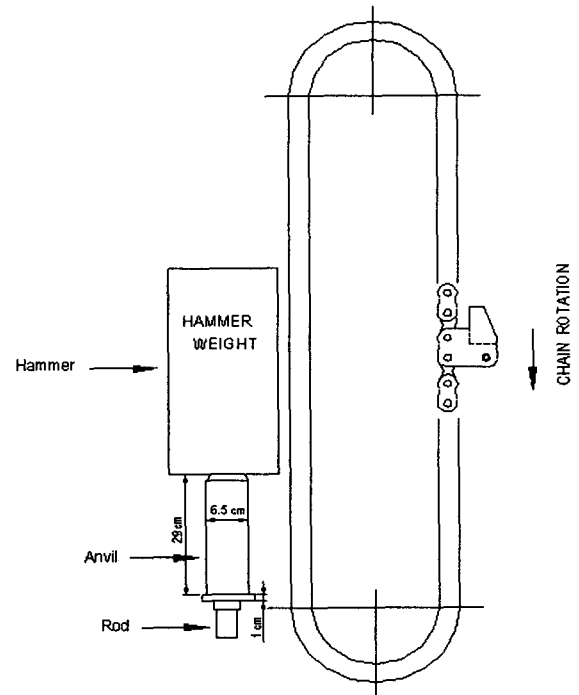


그림 18. CME자동해머 (자동식)

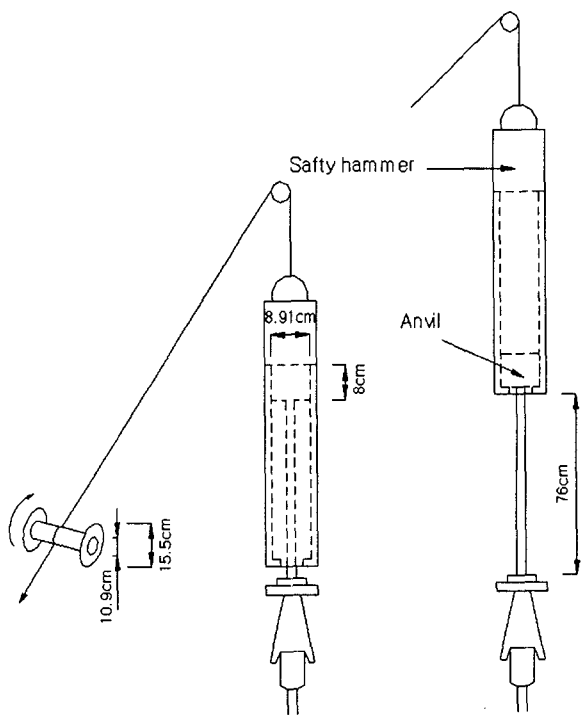


그림 19. 안전해머 (반자동식)

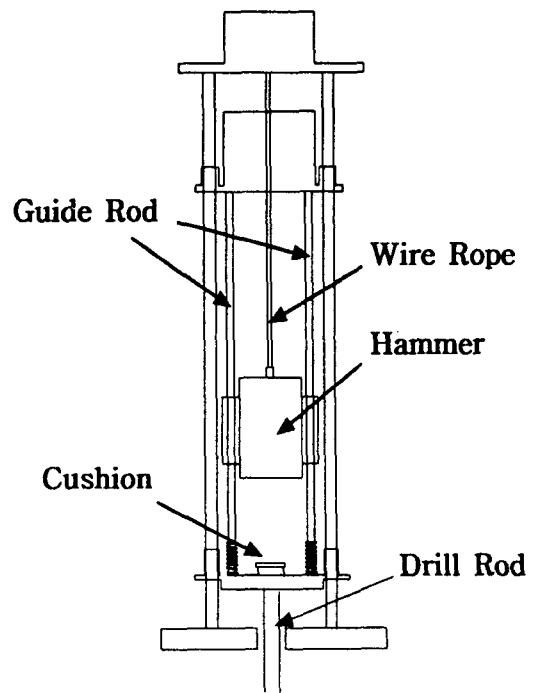


그림 20. 개량형 자동도넛해머 (자동식)

6.3 현장시험 결과

6.3.1 해머의 종류에 의한 파형의 변화

그림 21은 동일한 깊이에서 3가지의 다른 해머로 표준관입시험을 실시하면서 측정된 F파를 중첩하여 도시한 것이다. 이 결과에 의하면 룯드가 전달되는 최대응력은 CME, 유압식 도넛, 수동 도넛 해머의 순서로 크며 파형의 적분으로 계산되는 룯드에너지도 위의 순서와 동일하게 클 것임을 예상할 수 있다. 또한 그림 21에 의하면 해머의 종류가 달라지더라도 인장파가 샘플러에서 반사되어 측정지점에 도달하는데 까지 걸리는 시간은 거의 동일함을 알 수 있다. 식16과 그림 5에 의하면 최대에 도달한 힘은 이론적으로 지수함수적인 감소를 보여야 하며, 그림 21에 의하면 최대의 힘으로부터 지수함수적 감소를 보이는 시간은 약 5.5 msec임을 알 수 있다. 강철에서 $c=5120$ m/s임을 알고 $2L/c=5.5$ msec라는 식을 이용하면, 룯드길이는 약 14m 임을 알 수 있다. 따라서 표준관입시험에 사용되는 해머는 그 종류에 상관없이 룯드길이 14 m에 해당하는 동일한 파장의 압축파를 생성하지만, 룯드에 작용하는 최대응력이 다르므로 인해 룯드에너지에 차이가 발생한다.

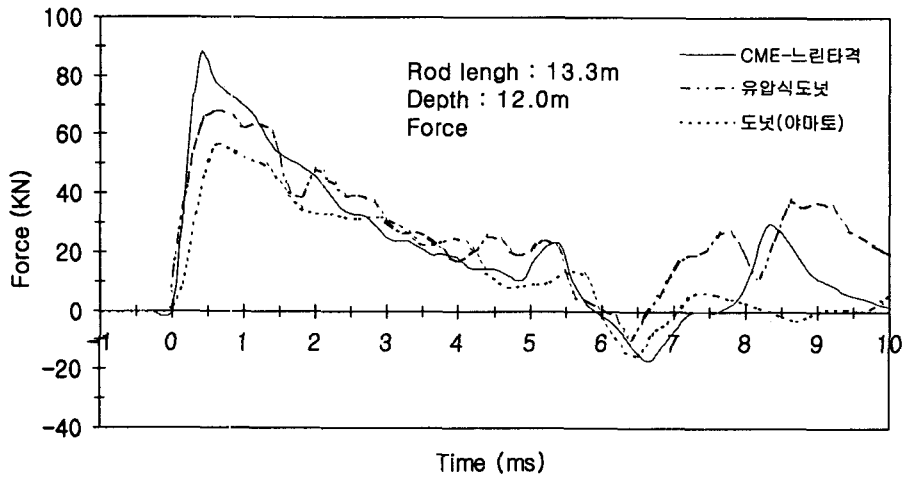


그림 21. 다른 종류의 해머에 의한 SPT파형

6.3.2 룯드길이에 의한 에너지의 변화

현장 시험 장비 중 CME-750은 자동해머로서 해머의 인양방식과 낙하높이의 조절이 자동으로 이루어지므로, 작업자의 작업태도, 로프, 캐헤드, 가이드 룯드에 의한 영향을 배제시킬 수 있다. 따라서 수동 또는 반자동인 장비에 비해 상대적으로 양호한 측정결과를 보이므로 CME장비의 응력파를 예시로 사용하였다. 그림 22(a)에 보이는 바와 같이 룯드가 길어질수록 인장파 도달시간도 증가하지만, 1차 압축파 면적의 증가량은 점점 감소한다는 것을 알 수 있다. 룯드길이가 10m 이상인 그림 22(b)에 의하면 룯드의 길이가 길어져도 1차 압축파 면적의 증가량이 룯드길이 10m 이하인 경우에 비해 상당히 작음을 알 수 있다.

일반적으로는 룯드 길이가 길어질수록 인장파(-부분)가 발생하는 시간이 길어지면서, 1차 압축파 면적이 증가하므로 FV 및 F2적분법으로 산정된 값이 모두 증가한다. 그러나 그림 22에 보인 바와 같이 룯드의 길이가 길어지면 적분될 면적의 증가량이 감소하므로 룯드가 어느 길이 이상이 되면 압축파의 파장이 룯드길이보다 길어 생기는 에너지의 감소현상에 의한 영향이 상당히 작아진다. SPT파형의 파장이 약 14m 이므로 룯드가 14m 보다 짧으면 보정해야 하지만 그림 22에서 보이는 바와 같이 10-14m에서는 영향이 작으므로 10m 이하의 룯드길이에서 보정을 추천한 Skempton (1986)의 제안은 타당하다.

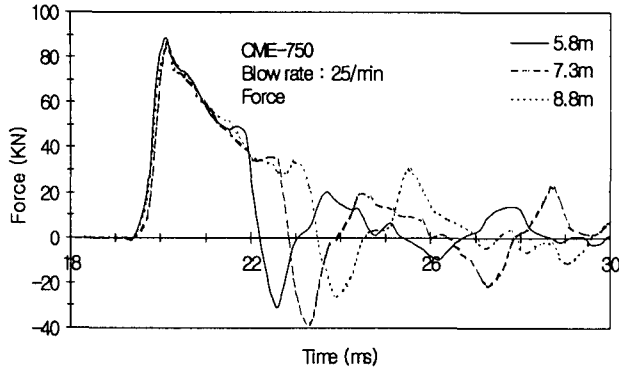


그림 22(a) 롯데길이 10m 이하인 경우의 파형

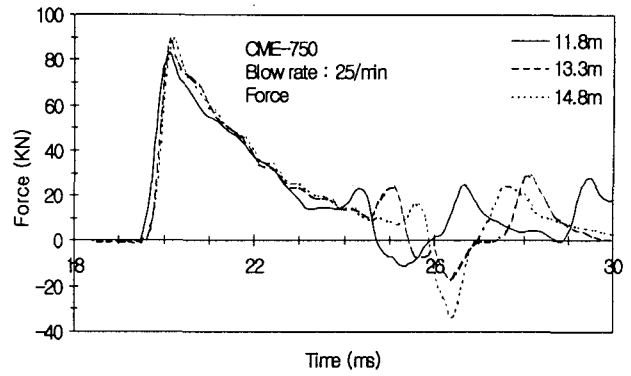


그림 22(b) 롯데길이 10m 이상인 경우의 파형

그림 23(a)은 롯데길이 4.3m인 경우에 대해 측정된 F와 V의 파형과 F2방법과 FV방법으로 계산된 롯데 에너지를 도시하고 있다. 그림에 의하면, 압축파(Ⓐ부분,+)가 충분히 전달되기 전인 약 2ms후 인장파(Ⓑ부분,-)가 발생되기 때문에, 1차압축파(Ⓐ부분,+) 영역이 작다. 또한 F2적분법으로 에너지 산정시 인장과 도달시간까지인 1차압축파 범위만 적분하기 때문에 적분시간이 작아 에너지가 작게 산정 된다. FV적분법으로 에너지 산정시 최대값을 에너지로 산정하기 때문에, 인장파(-)발생부분에서 에너지가 감소(Ⓒ부분)하였다가 2차압축파(Ⓒ부분)에서 다시 에너지가 증가하기 때문에 FV적분에 의한 값은 1차압축파 범위를 지나 발생하므로 F2적분에 의한 값보다 크게 산정 되었으며, F2적분법은 1차압축파 영역에 국한되어 계산하므로, 2차압축파에 의한 에너지 증가를 고려하지 못하는 문제점이 있다.

그림 23(b)와 같이 롯데 길이가 14.3m일 경우, 압축파가 충분히 전달된 약 6ms후 인장파가 발생하여 FV적분법으로 에너지 산정시 2차압축파에 의한 에너지 증가가 없으며, 힘과 속도의 비례성이 좋아져 비교적 양호한 측정결과를 나타내나, 롯데의 느슨한 연결에서 발생하는 상향 인장파와 롯데 연결구와 선단에서 발생하는 압축파에 의해 힘과 속도 응력파가 서로 일치하지 않게 되므로(Ⓓ부분), 그림 23(b)와 같이 F2적분법의 값이 FV적분법 값보다 크게 산정되었다.

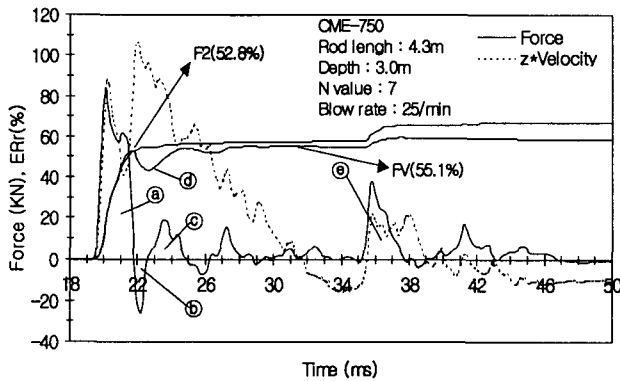


그림 23(a) SPT파형과 롯데에너지 (길이 4.3m)

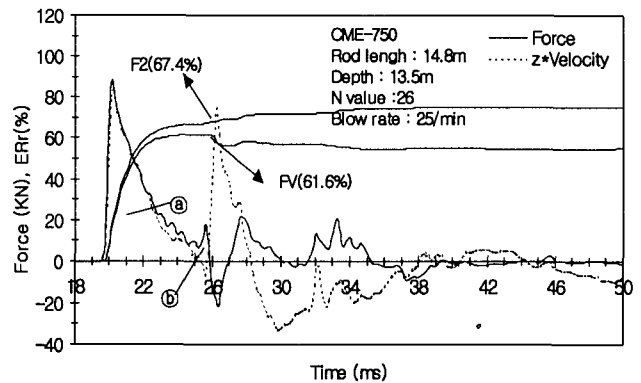


그림 23(b) SPT파형과 롯데에너지 (길이 14.8m)

6.3.3 장비별 롯데에너지비

위에서 설명한 바와 같이 각 장비별 심도에 따른 롯데에너지 비를 보면 롯데길이 10m(심도9m) 이하에서는 점점 에너지가 증가하나, 롯데길이 10m이상에서는 에너지 증가량 상당히 작다. 따라서 SPT장비의 평균 에너지 산정 시, 타격에너지가 충분히 전달되고 롯데길이의 에너지에 대한 영향이 작은 롯데길이 10m이상에서 측정된 값을 시험장비의 평균 에너지로 평가하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 2개 현장에서 실시된 시험에 대해 F2적분법과 FV적분법에 의한 에너지 산정하여 장비별, 시험깊이별로 요약한 결과는 표 7 및 8과 같다.

표 7. 평균 룯드에너지 비(%)-김제지역

심도,m (룯드길이)	개량 도넛해머		도넛해머		트립해머		CME (느린타격)		CME (빠른타격)	
	FV	F2	FV	F2	FV	F2	FV	F2	FV	F2
1.5 (2.8)	54.6	38.6	25.2	15.3	51.7	29.0	46.9	44.2	55.6	55.2
3.0 (4.3)	56.2	42.3	36.0	24.3	47.6	34.7	53.1	52.9	62.3	65.6
4.5 (5.8)	60.6	54.5	39.4	30.2	49.2	45.9	54.6	60.3	65.8	73.1
6.0 (7.3)	62.8	53.3	40.6	34.5	50.1	53.8	58.0	63.1	69.9	76.7
7.5 (8.8)	58.5	51.7	41.9	39.3	50.9	57.9	59.4	64.1	71.8	81.1
9.0 (10.3)	65.4	59.3	48.5	45.0	50.8	55.9	60.9	65.4	74.1	82.4
10.5 (11.3)	60.3	62.2	45.6	43.9	50.5	57.3	63.2	66.0	76.4	83.3
12.0 (13.3)	61.5	65.6	47.9	47.3	51.0	57.2	62.8	67.4	76.6	85.3
13.5 (14.8)	61.2	66.7	-	-	-	-	63.1	67.2	77.0	85.6
10m이상평균	62.0	63.5	47.3	45.4	50.8	56.8	62.5	66.5	76.0	84.2

표 8. 평균 룯드 에너지비(%)-가남JCT지역

심도,m (룯드길이)	도넛해머		안전해머 (낙하고81cm)		안전해머 (낙하고76cm)		개량 자동도넛해머	
	FV	F2	FV	F2	FV	F2	FV	F2
1.5 (2.8)	29.6	16.2	50.1	44.1	27.2	23.0	54.9	54.5
3.0 (4.3)	44.1	39.7	59.9	51.8	43.1	42.5	55.1	59.1
4.5 (5.8)	44.6	42.3	58.1	55.0	44.9	47.7	63.4	69.4
6.0 (7.3)	45.6	44.7	58.6	60.4	57.8	57.0	65.4	71.7
7.5 (8.8)	48.5	48.1	60.3	64.7	57.8	57.0	67.1	71.8
9.0 (10.3)	48.5	49.8	59.5	63.8	54.5	55.3	68.6	75.0
10.5 (11.3)	50.7	52.5	59.1	63.0	57.1	57.1	68.0	75.9
12.0 (13.3)	51.1	51.6	60.4	63.6	56.9	57.3	68.8	76.8
10m이상평균	50.1	51.3	59.6	63.5	56.2	56.5	68.5	75.9

시험수행을 통해 얻어진 룯드 에너지전달 특성을 요약하면, 도넛해머를 제외하고 FV적분법 보다 F2적분법의 값이 더 크게 산정 되었으며, 와이어로프를 사용한 개량형 도넛해머와 마날라 삼 로프를 사용한 도넛해머의 에너지 효율은 해머의 모양은 같으나 로프 종류에 따른 마찰에 의해 약 15%정도의 차이를 나타내었다. CME장비의 경우, 타격속도(25타/분, 55타/분)에 따라 에너지 전달율이 상이한 결과를 나타내었으며, 이는 타격속도가 빨라질수록 장비특성상 낙하높이가 높아져 전달되는 에너지가 증가하는 것으로 판단된다.

안전해머의 경우 낙하고는 해머를 끝까지 올렸을 때의 낙하높이가 76cm로 되어야한다. 그러나 본 시험에 사용된 안전해머의 경우 76cm 아닌 81cm였다. 두 낙하높이 모두 시험한 결과 10m이상 평균값이 약 7%정도 차이를 나타내었다. 따라서, 낙하높이가 일정하게 유지되는 안전해머나 자동해머의 경우에도 낙하고가 76cm인지 확인하고 사용하여야 한다. 두 지역에서 사용된 수동식 도넛해머의 경우, 거의 같은 제원의 장비이지만 룯드에너지는 가남 JCT지역에서 시험한 값이 더 크게 측정되었다. 이는 상이한 지반조건 때문 인 것으로 판단된다.

이상과 같은 시험의 결과를 종합하여 룯드길이 10m 이상에 대한 평균 룯드에너지비를 장비별로 요약하면 표 9와 같다. 그러나 룯드길이 10m이하에 대한 에너지 전달율은 Skempton(1986)이 제안한 방법에 의한 보정이 필요하며, 해머타입과 낙하시스템 종류의 조합에 따라 또는 본 시험에서 고려되지 않은 장비의 구조적 변경 등에 의해 룯드에너지의 변화가 있을 것이므로 적절한 판단이 필요하다.

표 9. 시험장비별 룯드에너지 비

해머종류	인양 및 낙하 방식	낙하높이 조절방식	로프타입	룯드에너지비 (ER _r , %)
개량형 도넛해머	로프+폴리+수동원치	수동	강선	62.0
도넛해머	로프+폴리	수동	마닐라	48.7
트립해머	로프+폴리	자동	마닐라	50.8
CME자동해머(25타/분)	회전체인	자동	-	62.5
CME자동해머(55타/분)	회전체인	자동	-	76.0
안전해머	로프+폴리	자동	마닐라	56.2
개량형 자동도넛해머	유압	자동	-	68.5

7. 결론

표준관입시험의 에너지 보정에 관한 기존의 연구자료와 현재 진행중인 현장시험의 결과를 종합한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 표준관입시험시 해머나 인양/낙하 시스템, 캐트드, 앤빌 등에 의해 실제 룯드에 전달되는 에너지는 상당히 다르며, 따라서 동일한 지반에서도 장비에 따라 측정된 N값이 다르다. 표준관입시험의 N값을 이용하여 경험식으로부터 설계정수 또는 물성치를 추정하거나 경험적인 설계식으로 구조물을 설계하는 경우, 이론적인 위치에너지의 60%에 해당하는 룯드에너지로 표준관입시험을 실시하여 얻는 N값(N₆₀)으로 에너지 보정을 실시하여야 한다.

2) 표준관입시험에 사용되는 해머는 형태가 다르더라도 그 중량과 낙하고는 일정하도록 규정되어 있다. 시험에 사용된 여러 종류의 해머는 그 종류에 상관없이 룯드길이 약 14 m에 해당하는 동일한 파장의 압축파를 생성한다. 그러나 해머의 낙하시 발생한 에너지의 손실로 앤빌에 타격되기 직전의 속도가 다르며 이로 인해 룯드에 작용하는 최대응력이 달라지고 따라서 룯드에 실제로 전달되는 에너지에 차이가 발생한다.

3) 룯드길이가 14m 이하이면 하향의 압축파가 샘플러에 완전히 전달되기 전에 상향으로 이동하는 인장파와 중첩되어 충분한 에너지를 샘플러에 전달하지 못하므로 측정된 N값은 과대 평가된다. 그러나 룯드의 길이가 10-14m 일 때 적분되는 F파와 V파의 면적이 상대적으로 적어 룯드길이 변화에 의한 에너지의 변화가 그리 크지 않으므로 Skempton(1986)이 룯드길이 10m 이하에 대해서 제안한 보정은 타당한 것으로 판단된다.

4) 표준관입시험시 측정된 F파와 V파를 이용한 에너지 산정시 F2적분법은 tension cut-off에 의해 영향을 받으므로 FV적분법에 의해 평가된 에너지가 타당한 것으로 판단된다. 현장에서 측정된 파형에 대한 에너지 평가에 의하면 대부분의 경우 F2적분법에 의한 에너지가 FV적분법에 의한 것보다 과대 평가되는 경향을 보인다.

5) 국내의 경우 효율적인 작업과 작업자의 편의를 위해 해머나 인양/낙하시스템을 변형한 사례가 많으며 이로 인한 SPT에너지의 변화를 적절히 보정할 수 있는 데이터베이스의 확보가 시급한 실정이다. 이를 위해 지속적인 연구가 필요하며, 확보된 데이터베이스에 의해 간접적으로 표준관입시험의 결과를 보정하거나 시험시 직접 룯드에너지를 측정하여 N값을 보정하여야 한다.

참 고 문 헌

1. 박용원, 이호춘, 김석훈 (1993), "표준관입시험의 해머에너지 추정", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2 권, 573-576.
2. 박용원, 이호춘, 박종호 (1994), "표준관입시험의 해머별 에너지 비교", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1 권, 821-824.
3. 이명환, 강인탁, 이원재, 김영진 (1992), "실측에 의한 표준관입시험 함마의 낙하속도 분석", 한국지반공학회

논문집, 8(1), 59-66.

4. 이호춘, 박용원 (1996), "표준관입시험의 해머에너지 수준", 한국지반공학회 논문집, 12(5), 117-125.
5. 이호춘, 김병일, 박용원 (1997), "표준관입시험의 동적효율 측정", 한국지반공학회 논문집, 13(1), 169-180.
6. 이우진, 이원제, 안신환 (1998), "PDA를 이용한 표준관입시험의 에너지전달효율 측정", 한국지반공학회 '98 봄 학술발표회 논문집, 75-84.
7. 이우진, 유재명, 류동현 (2001), "표준관입시험 로드길이에 따른 에너지 전달효율" 2001년 학술발표회 논문집, 한국지반환경공학회, 193-198.
8. 조성민, 정종홍, 김동수, 이우진 (2001), "표준관입시험시 로드에서 전달되는 해머의 낙하에너지 평가 1" 한국지반공학회 2001년 봄 학술발표회 논문집, 469-476.
9. 한국도로공사(2000), 표준관입시험 활용법 개선 연구(I), 도로연구소 2000년도 중간보고서, 도로연00-14, 97p.
10. 한국산업규격 KS-F 2307-1997 흙의 표준관입시험법.
11. "Standard Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils" ASTM Designation D 1586-99, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08.
12. "Standard Test Method for Stress Wave Energy Measurement for Dynamic Penetrometer Testing Systems" ASTM Designation D 4633-86, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08.
13. de Mello, V. F. B. (1971), "The Standard Penetration Test", Proc. of 4th Pan American Conf. on Soil Mech. and Fdn. Engrg., Puerto Rico, Vol. 1, 1-86.
14. Schmertmann, J. H. (1979), "Statics of the SPT", J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE, 105(5), 655-670.
15. Schmertmann, J. H., and Palacios, A. (1979), "Energy Dynamics of SPT", J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE, 105(8), 909-926.
16. Kovacs, W. D., and Salomone, L. A. (1982), "SPT Hammer Energy Measurements", J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE, 108(4), 599-620.
17. Skempton, A. W. (1986), "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation", Geotechnique, 36(3), 425-447.
18. Clayton, C. R. I., Hababa, M. B., and Simons, N. E. (1985), "Dynamic Penetration Resistance and the Prediction of the Compressibility of a Fine-Grained Sand - A Laboratory Study", Geotechnique, 35(1), 19-31.
19. An Shin-Whan et al. (2000) "SPT Rod Energy Ratios for Three Types of SPT Hammers", 'Journal of the Korean Geotechnical Society, 16(3), 119-130.
20. Abou-matar, H. and Goble, G. G. (1997), "SPT Dymnamic Analysis and Measuments", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(10), 921-928.
21. Sy, A. and Campanella, R. G. (1991), "An Alternative Method of Measurement SPT Energy." Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Recent Advances in Geotech. Engrg. and Soil Dynamics, 499-505.
22. Campanella, R. G. and Sy, A. (1986), "Recent Development in Energy Calibration of Penetration Tests at UBC", Proc. 13th ICSMFE, New Delhi, 151-156.
23. Clayton, C. R. I (1990), "SPT Energy Transmission : Theory, measurement and Significance", Ground Engineering, 35-43.
24. Kovacs, W. D., Evans, J. E. and Griffith, A. H. (1977), "Towards a More Standardized SPT", Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, 269-276.
25. Kovacs, W. D. and Salomone, L. A. (1982), "SPT hammer energy measurement", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108(4), 599-620.
26. Nixon, I. K. (1982), "Standard penetration test", state-of-report, Processing of the 2nd European Symposium on penetration testing, Amsterdam, Vol. 1, 3-24.
27. Palacios, A. (1977), "the Theory and Measurement of Energy Transfer During Standard Penetration Test sampling," Ph.D. thesis, University of Florida, Gainesville, Florida.
28. Yokel, F. Y. (1989), "Energy Transfer Mechanism in SPT", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 115(9), 1331-1336.