

SPT 모형 룯드에서 응력파의 전파 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study about the Properties of Stress Wave in SPT Model Rod

권 기 철* ¹	Kweon, Gi-Chul	서 원 석* ²	Seo, Won-Seok
김 범 상* ³	Kim, Bum-Sang	김 동 수* ⁴	Kim, Dong-Soo
이 병 식* ⁵	Lee, Byung-Sik		

Abstract

The theoretical and analytical studies on dynamic signals(force and acceleration signals) measured at SPT rod are actively made. In this paper, the characteristics of stress wave(force signals) in SPT rod were studied experimentally using model rod system. It was noted that the amplitude ratios of reflected wave over incident wave in different end conditions were well matched with theoretical results. The impedance of soil could be determined if the characteristics of incident and reflected waves could be evaluated quantitatively in situ SPT test. On the other hand, the results of model tests showed that the effect of reflected wave caused by side friction was negligible, and therefore, the analysis model considering only end resistance of sampler could be applicable in dynamic analysis of SPT.

요 지

최근, SPT 룯드에서 측정되는 동적신호(힘 및 가속도신호)에 대한 이론적·해석적 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 SPT시험에서 룯드(rod)를 통해 전파되는 탄성파에 대한 동적신호(힘 신호)의 특성을 모형 룯드-지반 시스템에 대하여 실험적으로 검토하였다. 시험결과, 단부조건에 따른 입사파와 반사파의 크기는 이론적으로 알려진 것과 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 따라서, 만일 SPT 시험에서 측정된 하중신호에서 입사파와 반사파의 특성이 정량적으로 평가된다면, 지반의 임피던스를 결정할 수 있을 것으로 예상된다. 한편, 주면저항에 의한 반사파의 영향은 대단히 작은 것으로 나타나, SPT 동적하중의 해석에서는 샘플러 주면의 마찰저항은 무시하고, 샘플러 선단의 단부저항만을 고려하는 해석모델의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : End conditions, Impedance, Rod-ground system, SPT, Stress wave

1. 서 론

표준관입시험(SPT: Standard Penetration Test)은 시험에서 결정되는 관입저항치(N값)의 신뢰성에 대한 많은

의문에도 불구하고 N값으로부터 지반의 지지력, 흙의 점착력, 내부마찰각 등의 강도정수를 추정하는 경험적 상관관계가 많이 제안되어 있고, 장비가 비교적 간단하며, 현장시험과 동시에 시료를 채취할 수 있는 등 활

*1 정회원, 동의대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongeui Univ., gckweon@dongeui.ac.kr)
 *2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Research Assistant, Dept. of Civil Engrg., Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))
 *3 정회원, SK 건설연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, SK Engrg. & Construction)
 *4 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))
 *5 정회원, 공주대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Kongju National Univ.)

용도가 많아 우리나라뿐만 아니라 전세계적으로 널리 사용되고 있다.

최근에는 동적신호 측정 및 해석 기술이 발달하여 말뚝 항타 과정의 동적신호 해석과 유사하게 SPT 시험과정에서의 동적신호로부터 지반의 동적물성치(damping factor, quake)를 결정하는 연구가 활발히 진행되고 있다 (Goble 등, 1992). 특히, SPT 시험에서는 햄머의 항타에 대한 저항이 룯드(rod)의 선단에 부착되어 있는 샘플러에서 대부분 발생하여, 말뚝 항타 과정에서의 저항조건보다 간단하기 때문에, SPT 시험의 룯드 선단으로부터 측정된 동적신호(힘 신호 및 가속도 신호)에 대한 이론적이고 해석적인 연구가 활발히 진행되고 있다(Clayton, 1990; Robertson 등, 1991).

본 연구에서는, SPT 시험에서 에너지비(energy ratio) 측정의 경우와 같이, 룯드 선단에서 측정되는 탄성파에 대한 동적신호(힘 신호)의 특성을 모형 실험을 통하여 검토하였다. SPT 시험에서의 기본 룯드는 밀도 $1.17t/m^3$, 재질의 P파 속도 $1856m/s$, 탄성계수가 대략 $4000MPa$ 인 비교적 강성이 큰 MC(mono cast) 재질로 제작하고, 여러 지반조건을 모사하기 위해 폴리우레탄 재질을 사용하여 강성과 단면적이 다른 다양한 단부와 주면조건을 형성하여 SPT 시험과 유사한 형태의 모형 룯드-지반 시스템에 대한 모형시험을 수행하였다.

시험에 적용된 여러 강성의 모형 룯드는 자유단-자유단 공진주시험(FF-RC: free-free resonant column test)을 통하여 동적 물성치를 평가하였다. SPT 동적신호의 신뢰성 있는 계측시스템 구성을 위하여 변형률 게이지를 룯드의 표면에 부착하여 하중계(load cell)를 제작하였

으며, 정적하중을 이용하여 보정(calibration)하였다. 시험결과로부터 i) 단부조건(단부의 강성, 단면적) 변화에 따른 파의 전파특성, ii) 주면조건(주면의 강성, 구속압)에 따른 파의 전파 특성을 검토하였다.

2. SPT 동적신호에 대한 이론적 특성

2.1 룯드에서 단부조건 및 주면조건에 따른 파의 전파

그림 1은 음향임피던스(acoustic impedance, EA/c)가 서로 다른 이질 룯드의 불연속 접합부를 나타낸 것이다. 음향임피던스는 매질의 단면적과 탄성계수의 곱을 매질의 전파속도로 나눈 값으로 정의할 수 있다. 그림 1은 SPT 시험에서 룯드와 지반의 1차원적인 접촉상황과 매우 유사하다. 룯드 1의 접합부에 도달한 파형은 룯드 1의 반대방향으로 전파되는 반사파와 룯드 2를 향하여 전파되는 투과파를 생성한다(그림 1 참조).

이러한 탄성파의 투과와 반사정도는 식 (1)과 같은 경계면에서의 힘평형조건과 식 (2)와 같은 경계면에서 변위의 연속성 조건을 적용하여 이론적으로 결정된다.

$$F_{\text{입}} - F_{\text{반}} = F_{\text{투}} \quad (1)$$

$$U_{\text{입}} - U_{\text{반}} = U_{\text{투}} \quad (2)$$

탄성론을 적용하여 변위를 나타내면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$U = \frac{c}{E} \sigma t_n = \frac{c}{EA} F t_n \quad (3)$$

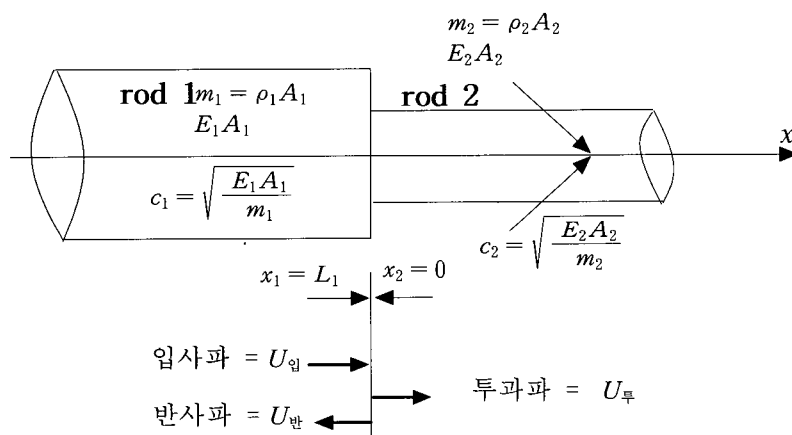


그림 1. 불연속면에서 파의 반사와 투과

여기서, U : 변위 (m)
 E : 룯드의 탄성계수 (kN/m²)
 A : 룯드의 단면적 (m²)
 c : 룯드내 파의 전달속도 (m/sec)
 σ : 룯드내의 응력 (kN/m²)
 F : 룯드내의 힘 (kN)
 t_n : 시간 (sec)

식 (3)을 식 (2)에 대입하면,

$$\frac{c_1}{E_1 A_1} F_{\text{입}} t_n - \frac{c_1}{E_1 A_1} F_{\text{반}} t_n = \frac{c_2}{E_2 A_2} F_{\text{투}} t_n \quad (4)$$

식 (4)를 정리하면,

$$\alpha(F_{\text{입}} - F_{\text{반}}) = F_{\text{투}} \quad (5)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{A_2}{A_1} \frac{c_1 E_2}{c_2 E_1} = \frac{A_2}{A_1} \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} = \frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{\rho_2 E_2}{\rho_1 E_1}} \quad [\text{무차원}]$$

ρ : 룯드의 밀도(kg/m³)

식 (1)과 식 (5)로부터, 투과파와 반사파의 크기(힘 신호)는 식 (6)과 같이 입사파의 크기와, α(임피던스 비)에 따라서 결정 할 수 있다.

$$F_{\text{투}} = \frac{2\alpha}{\alpha+1} F_{\text{입}} \quad (6)$$

$$F_{\text{반}} = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} F_{\text{입}}$$

이 관계로 부터 투과파는 항상 초기파와 같은 부호를 가지며, 투과파와 반사파의 크기는 임피던스 비(α)에 의존한다는 것을 알 수 있다. 만일, α=∞ 즉, 룯드가 완전 강체와 접합되었을 경우에서, 반사파는 입사파와 부호가 동일하게 결정된다. 즉, 압축파가 전달되면 동일한 크기의 압축파가, 인장파가 입사되면 동일한 크기의 인장파가 반사됨을 나타낸 것이다. 또한 α=0인 경우, 즉 룯드의 선단이 공기중에 노출된 경우에서 반사되는 입사파와 부호가 바뀌고, 크기는 같은 파형으로 되 돌아온다. 만일 α=1 인 경우, 즉 경계부분에서 두 매질의 임피던스 차이가 없는 경우에는 반사파가 발생하지 않고 입사파는 모두 투과된다.

임피던스 차이에 의해 이론적으로 결정되는 입사파와 반사파의 비를 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 입사파와 반사파의 크기를 측정할 수

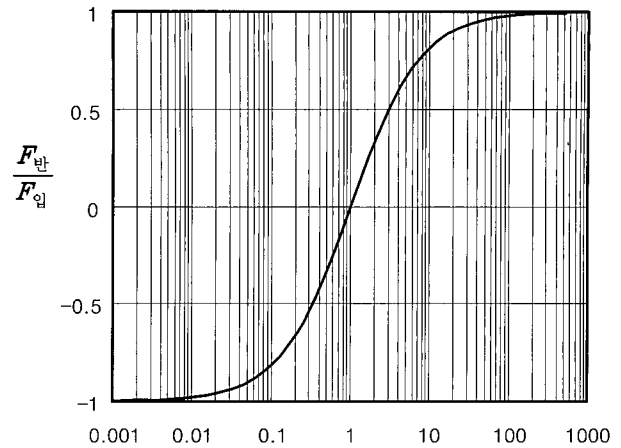


그림 2. 임피던스 비에 따른 F반/F입 의 이론적 관계

있고, 룯드의 임피던스를 알고 있다면(SPT 시험에서는 일정한 규격의 룯드를 사용하므로 룯드의 임피던스를 알고 있다) 경계면에서의 임피던스(지반의 임피던스)를 결정할 수 있음을 알 수 있다.

실제 SPT 시험에서는 지반과 접촉하면서 단부조건이 변화함과 동시에 룯드 선단에 부착된 샘플러의 일부가 지반에 관입되어 주면경계조건을 형성하게 된다. 주면 저항이나 룯드와 룯드 사이의 연결부에 의한 파동의 변화가 발생할 경우 정확한 발생위치를 파악하기 어려울 뿐더러 저항의 크기나 연결부의 특성을 알아내기 어렵기 때문에 이론적으로 모사하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 기존 SPT 연구나 분석장치에서는 주면저항의 경우 선단저항의 비로 나타내거나 선단저항과 함께 고려하고, 연결부는 별도로 가정하지 않고 분석하는 것이 일반적이다.

주면저항은 파동이 지나가지 않을 때는 아무런 반력 성분이 없다가 파동이 지나가면서 변위나 속도가 발생했을 때 반력 성분을 생성한다. 따라서 원래 파동이 집중 하중(응력)에 의해 발생한 파동과 중첩되는 형태로 나타나게 된다. 이 힘은 파동의 입자속도방향과 반대 방향으로 작용하게 되므로 상향 압축파와 하향 인장파를 생성한다. 실제 SPT 시험에서 주면저항은 집중하중의 형태로 나타나는 것이 아니라 샘플러의 벽면에 걸쳐 나타나는 것이 일반적이다. 지금까지 수행된 대부분의 연구에서는 주면저항을 연속적으로 표현하지 않고 몇 개의 집중하중을 이산적으로 표현하고 있다.

3. 모형 룯드-지반 시스템에서 파의 전파특성

3.1 모형 룯드의 기초물성

모형 룯드는 강성이 서로 다른 5종의 재료를 사용하였다. 기본 룯드의 재질은 MC(mono cast) 이고 나머지 4종은 강성이 서로 다른 폴리우레탄(K60, K80, K90, K97)이다. 모형 룯드는 강성의 변화가 다양한 완전 탄성재료가 가장 합당하지만, 본 연구에서는 이러한 두 조건을 모두 충족시키는 재료를 발견하지 못하였다. 본 연구에서 룯드에 사용된 재료는 점탄성의 성질을 갖고 있어서 하중주파수(또는 하중 재하속도)에 따라서 탄성계수가 변화하는 단점을 가지고 있다. 따라서 동일한 재질이고 단면적이 변화하는 조건에서의 시험결과는 좋은 반면, 서로 다른 재질을 적용한 경우에는 시험결과의 오차가 다소 포함되어 있다.

모형 룯드의 탄성계수(E), 막대파 속도(V_c , rod wave velocity)는 자유단-자유단 공진주시험(FF-RC: free-free resonant column test)을 통하여 결정하였다(Kim 등, 1997). 자유단-자유단 공진주시험에서 결정된 모형 룯드의 기초물성을 정리하면 표 1과 같다. 기본 룯드인 MC 재료와 단부조건 및 주면조건 변화에 사용된 다른 룯드와의 막대파 속도(rod wave velocity)의 비는 0.0078~0.4972(막대파 속도 14.5~922.9m/sec)로 매우 폭넓게 설정하였다. 실제 SPT 시험에서 사용되는 쇠(steel) 룯드의 막대파 속도는 약 5,100m/sec로 모형 시험에 적용된 기본 룯드인 MC의 약 2.7배의 막대파 속도를 갖고 있으며, 지반은 약 100~300 m/sec의 전단파 속도(조건에 따라서 변화하기는 하지만, 약 100~450 m/sec의 막대파 속도) 범위를 갖는다. 따라서 모형 시험에 적용된 강성비는 실제 SPT 시험에서 사용되는 룯드와 지반의 일반적인 강성비 범위를 포함하는 범위이다.

3.2 계측시스템 구성

SPT 시험에서 측정하여야 하는 동적신호는 햄머의 항타 에너지가 룯드를 통하여 전파되는 힘(force)신호와 속도(particle velocity)신호이다. 힘신호는 룯드에 변형률 게이지(strain gauge)를 직접 부착하여 측정하게 된다. 만일 사용되는 룯드와 임피던스차이가 있는 하중계를 사용하면 룯드와 하중계 사이의 임피던스 차이로 인한 반사파가 발생하여 여기에서 측정된 신호는 햄머의 항타에 의해 룯드를 통하여 전파되는 힘신호로 간주할 수 없다. 따라서 SPT 시험에서 사용되는 룯드와 동일한 룯드(동일한 임피던스)에 변형률 게이지를 부착하여 하중신호를 측정하게 된다.

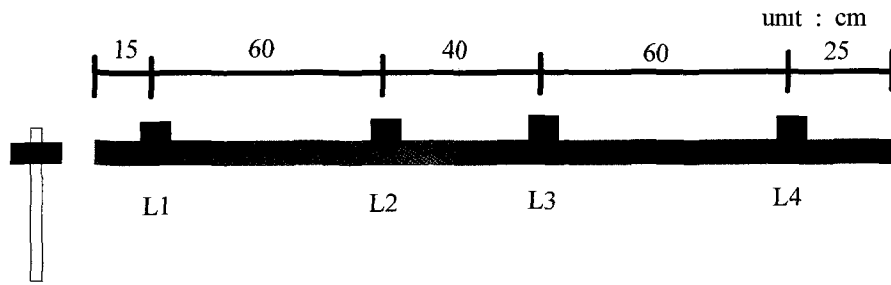
본 연구에서 제작된 하중계는 정적 하중을 적용하여 검정(calibration)하였다. 그러나 본 연구에서 적용한 모형 룯드는(MC 또는 폴리우레탄 재질) 하중재하속도(loading rate)에 따라서 재료의 탄성계수가 변화하는 점탄성의 성질을 갖고 있어서, 정적 하중으로 결정된 보정계수에 비하여 실제 동적 하중이 작용할 때의 보정계수는 훨씬 더 큰 값을 가질 것으로 예상된다. 따라서, 서로 다른 재질의 룯드에서 정적하중으로 결정된 보정계수와 실제 동적하중에 대한 보정계수의 차이의 정도는 룯드의 점탄성 정도에 따라 결정될 것으로 예상된다.

3.3 모형 룯드-지반 시스템의 구성

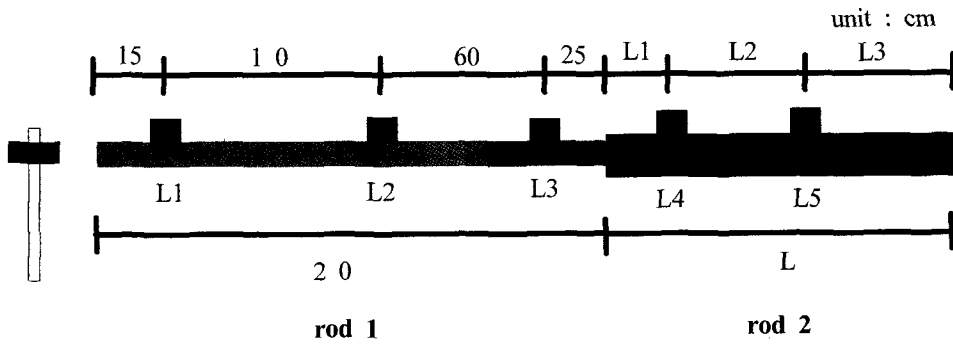
모형 룯드-지반 시스템은 크게 4가지 형태의 조건에 대하여 시험을 수행하였다. 첫 번째는 기본 MC 룯드를 특별한 단부조건이나 주면조건을 주지 않고 공기중에서 시험을 수행하였다(그림 3(a)). 본 조건은 룯드의 끝단이 공기중에 노출되어 있어서 강성이 전혀 없는 극단적인 단부조건에 해당한다. 이 시험의 목적은 파의 거리에 따른 감쇠정도를 검토하기 위함이다. 경계부위에서는 입사파와 반사파가 동시에 측정되어 이 둘의 구별이

표 1. 모형 룯드의 기초 물성

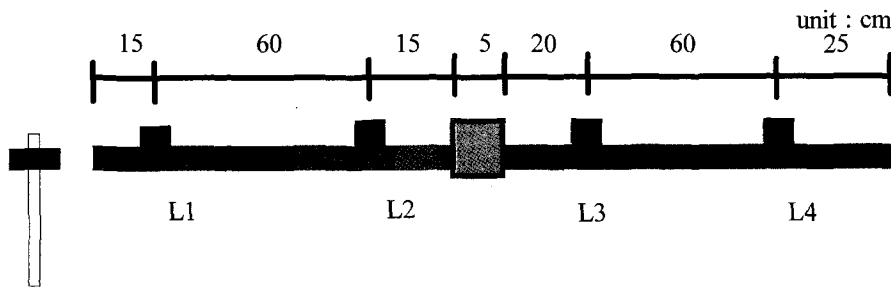
구분	밀도(kg/m ³)	공진주파수(Hz, FF-RC)	V _c (m/sec)	E(MPa)
MC	1170.0	6400	1856.0	4030.47
K60	1241.5	43	14.5	0.262
K80	1252.4	1000	298.6	111.67
K90	1134.7	864	535.7	325.62
K97	1163.7	3056	922.9	991.19



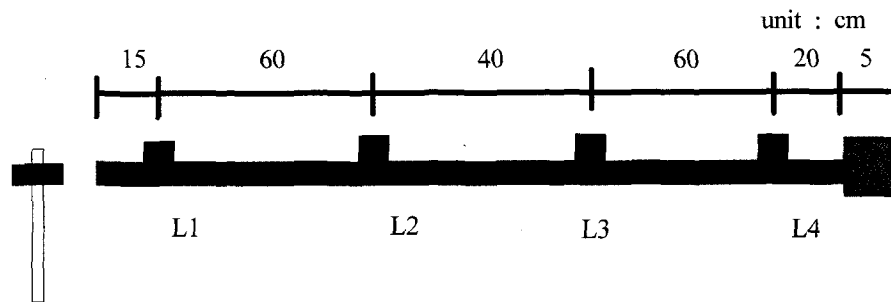
(a) 기본 MC 로드시스템



(b) 단부조건 변화에 따른 모형 로드 시스템



(c) 중앙에서의 주면조건 변화에 따른 모형 rod 시스템



(d) 끝 부분에서의 주면조건 변화에 따른 모형 rod 시스템

그림 3. 모형 로드-지반 시스템의 구성

어렵다. 따라서 경계에서 어느 정도 거리를 둔 측정위치에서 획득된 입사파와 반사파의 구별이 명확한 신호로부터 파의 거리에 따른 감쇠정도를 고려하여 경계면에서의 신호를 추정하고자 하였다.

두 번째는 기본 MC 로드의 단부에 단면적 또는 강성이 다른 단부조건을 형성한 경우이다(그림 3(b)). 단부

조건의 변화는 동일한 MC 재질에 단면적을 변화시킨 경우와 단면적과 재질을 동시에 변화시킨 두 가지의 경우로 하였으며, 시험결과로부터 단부조건에 따른 입사파, 반사파, 그리고 투과파의 특성을 검토하였다.

세 번째는 기본 MC 로드의 중간위치에 주면조건을 변화시킨 경우이다(그림 3(c)). 주면조건의 변화 실험은 현

장 SPT 샘플러의 주면구속조건을 모사하기 위함인데, 실제 현장 지반의 종류, 동적 타격에 의한 샘플러 주면 지반의 교란정도의 분산이 상당히 클 것이라 판단되기 때문에 모형 룯드 실내시험에서 주면구속조건을 모사하기가 매우 까다롭다. 따라서 본 연구에서는 강성의 차이가 나는 3종의 우레탄(K60, K80, K97)으로 기본 룯드에 접촉면적 및 완벽한 접촉상태는 확보하면서 구속압을 임의의 3단계 크기(구속압 소, 중, 대)로 기계적인 조임을 설정하여 실험을 수행하였다. 본 실험에서 매우 큰 구속압을 줄 수는 없었지만 SPT 샘플러가 실제 현장에

서 받는 구속압 역시 교란 및 룯드 길이에 대한 접촉면적비를 고려할 때 큰 영향은 없으리라 판단된다. 각각의 경우에 대해 입사파, 반사파 그리고 투과파의 변화를 검토하였다.

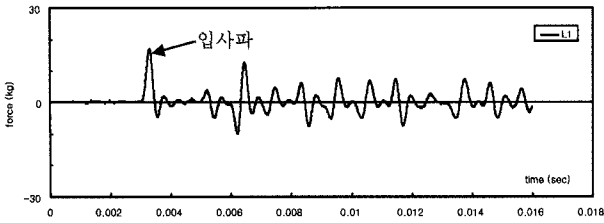
마지막으로 기본 MC 룯드의 끝 부분에 주면조건을 변화시켰다(그림 3(d)). 이것은 실제 SPT 시험의 주면조건과 가장 유사한 경우이다. 주면조건은 앞선 경우와 같은 방법으로 변화시켰다. 이상의 조건을 정리하면 표 2 및 표 3과 같다.

표 2. 단부조건에 따른 모형 룯드 시스템의 구성

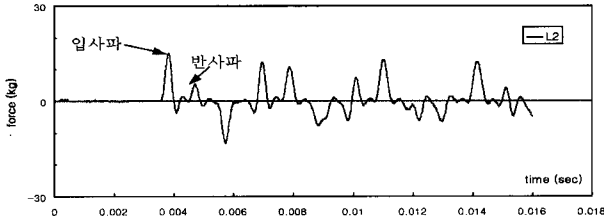
구분	rod 1	rod 2						
		재질	단면적비, (A2/A1)	임피던스 비 (rod2/rod1)	길이(cm)	L1(cm)	L2(cm)	L3(cm)
E-I-1	MC rod (L=200cm) (D=45mm)	MC	자유단 (기본 MC rod)					
E-I-2			2.23	2.23	100	5	40	55
E-I-3			4.13	4.13	70	5	40	25
E-I-4			7.79	7.79	70	5	40	25
E-II		K-60	2.5	0.021	61	5	30	26
E-III		K-80	2.5	0.431	61	5	30	26
E-IV		K-90	3.93	1.092	31	5	-	-
E-V		K-97	2.5	1.236	61	5	30	26

표 3. 주면조건에 따른 모형 룯드 시스템의 구성

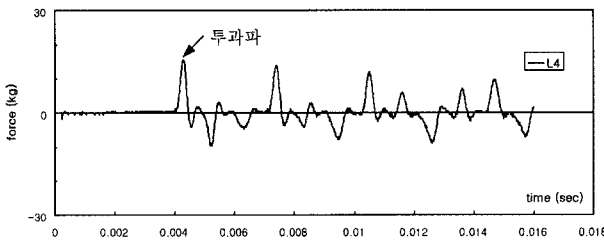
구분	rod 1	주면조건			
		재질	길이(cm)	위치	구속압
S-I	MC rod (L=200cm) (D=45mm)	공기중 (기본 MC rod)			
S-II-M-1		K-60	5	중간	소
S-II-M-2					중
S-II-M-3					대
S-II-E-1				끝	소
S-II-E-2					중
S-II-E-3					대
S-III-M-1		K-80	10	중간	소
S-III-M-2					중
S-III-M-3					대
S-III-E-1				끝	소
S-III-E-2					중
S-III-E-3					대
S-IV-M-1		K-97	10	중간	소
S-IV-M-2					중
S-IV-M-3					대
S-IV-E-1				끝	소
S-IV-E-2					중
S-IV-E-3	대				



(a) L1 위치에서 측정된 하중신호



(b) L2 위치에서 측정된 하중신호

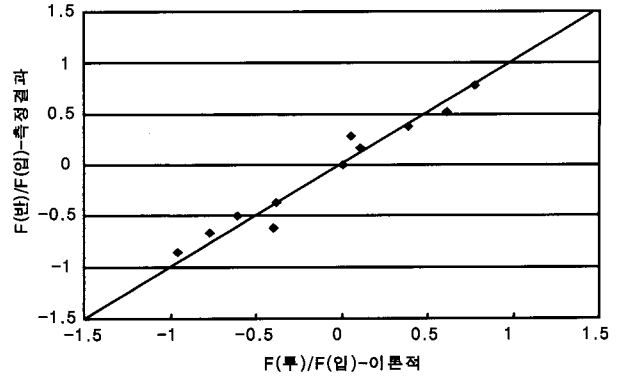


(c) L4 위치에서 측정된 하중신호

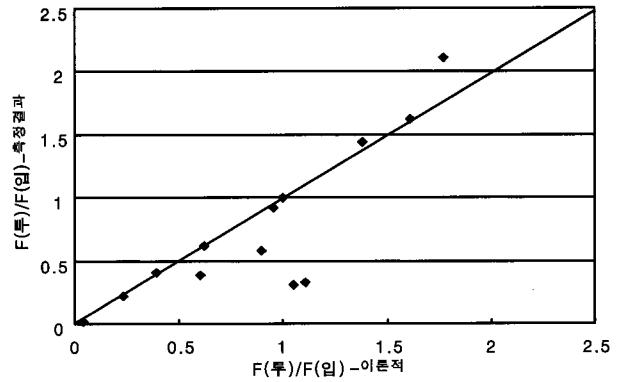
그림 4. 이질의 단부조건에서 측정위치에 따른 하중 신호 일례 (E-1-2)

3.4 단부조건에 따른 파의 전파특성

경계부위 바로 옆에서 측정된 신호는 입사파와 경계에서의 반사파가 짧은 시간에 겹쳐서 나타나므로, 측정된 시간영역의 신호에서 입사파와 반사파를 구별하는 것은 거의 불가능하다. 경계에서 일정한 거리(입사파의 하중 재하시간 이상의 파의 도달시간이 필요한 거리) 이상에서 측정된 신호는 입사파와 반사파가 시간 간격을 두고 나타나므로, 측정된 신호에서 입사파와 반사파를 구별하는 것이 용이하다. 그러나, 경계에서 어느 정도의 거리를 두고 측정된 신호이므로 거리에 따른 감쇠가 크다면 경계면에서의 신호와 동일한 것으로 보기 어렵다. 따라서 거리에 따른 하중신호의 감쇠정도를 평가한 결과, 하중신호의 크기가 2L(4m, L:주 룯드의 길이(=2m))의 거리를 이동하면서 약 8% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 경계위치와 측정된 위치의 거리는 0.5L(1m) 이하이므로 경계위치에서의 하중 크기는 측정된 값에 비해서 약 2% 정도의 미소한 감쇠가 예상되어,



(a) F반/F입의 비교

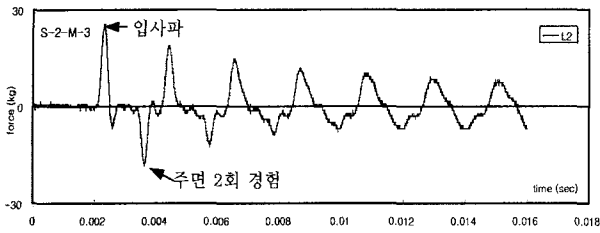


(b) F투/F입의 비교

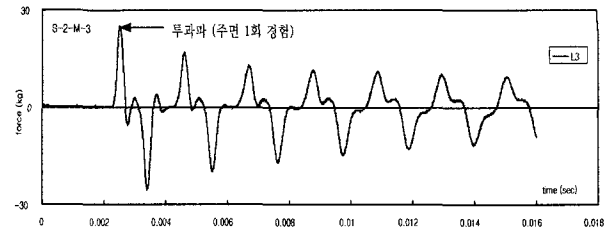
그림 5. $F_{\text{반}}/F_{\text{입}}$ 및 $F_{\text{투}}/F_{\text{입}}$ 의 이론적인 값과 실측된 값의 비교

경계위치에서 1m 이내에서 측정된 입사파의 크기를 경계부위에서의 입사파의 크기로 고려해도 오차는 매우 작을 것으로 판단된다.

그림 3(b)에 나타난 이질의 단부조건이 있을 때 측정된 하중신호의 일례를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 살펴보면 왼쪽편의 단부의 경계에서 거리가 가까운 L1 신호(그림 4(a))는, 초기의 입사파는 구분이 명확히 되지만 경계면에서 돌아오는 반사파와 이것이 왼쪽의 자유단 경계에서 반사되는 신호가 혼합되어 측정되므로 입사파와 반사파를 구별하기 매우 어렵다. 이에 반하여 왼쪽의 자유단 경계와 오른쪽의 이질의 단부 경계의 중간 정도에 위치한 L2 신호(그림 4(b))는 입사파와 반사파를 명확히 구분하여 결정할 수 있다. 이질의 경계면에서 일부분은 반사되고 일부분은 투과되어 오른쪽의 룯드로 전파되어 가는데, 투과파의 신호는 L4 위치에서 측정된 신호(그림 4(c))에서 명확히 구분되고, 이 투과파가 오른쪽의 자유단 경계에서 반사되어 인장파로 돌아오는데, 이것은 이질의 경계에서의 반사파와 혼합이 되어 구별

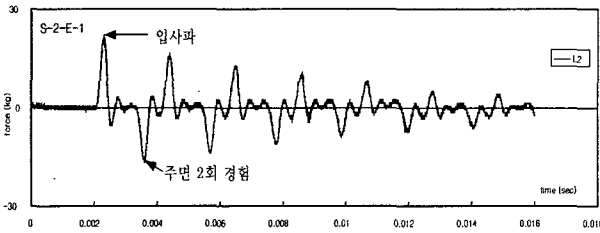


(a) L2 위치(주면조건외의 좌측)에서 측정된 하중파

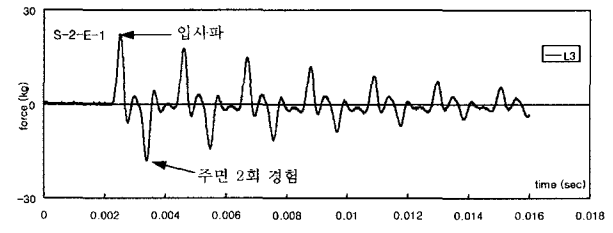


(b) L3 위치(주면조건외의 우측)에서 측정된 하중파

그림 6. 주면조건이 중간에 위치한 경우 측정된 하중파의 일례 (K60)



(a) L2 위치에서 측정된 하중파



(b) L3 위치에서 측정된 하중파

그림 7. 주면조건이 끝에 위치한 경우 측정된 하중파의 일례 (K60)

하기 어려운 상황이다.

이와 같은 방법으로 결정된 단부조건에 따른 입사파, 반사파, 투과파의 측정결과를 임피던스가 서로 다른 단부의 경계조건에서 이론적으로 계산된 $F_{\text{투}}/F_{\text{입}}$ 및 $F_{\text{투}}/F_{\text{입}}$ 와 시험에서 실측된 결과를 비교하면 그림 5와 같다.

그림 5에 나타낸 바와 같이 이론적인 값과 실측된 값은 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 특히, 동일한 재질에 설치된 하중계로부터 측정된 입사파와 반사파의 비(그림 5(a))가 서로 다른 룯드에서 설치된 하중계로부터 얻은 입사파와 투과파의 비(그림 5(b)) 결과에 비하여 이론적인 값과 더욱 잘 일치하고 있다. 이러한 원인은 재질에 따른 하중재하속도의 영향정도가 틀린데도 불구하고, 하중계의 보정계수를 모두 정적인 하중에 대하여 결정된 값으로 적용했기 때문으로 판단된다.

이상의 단부조건에 따른 결과를 정리해 보면 실제 SPT 시험에서 입사파와 반사파를 구분하여 측정하고자 하면 햄머가 룯드를 타격하는 모루(anvil)로부터 일정한 거리 이상 떨어진 위치에서 측정하는 것이 가장 합리적이다. 그러나 대부분의 현장조건이 이러한 조건을 만족시키기 어려울 것으로 예상되므로, 입사파의 형태를 명확히 모델하고, 중첩의 원리를 사용하여 룯드의 선단(지반)에서의 반사파와 이 반사파가 다시 모루에서 되돌아가는 반사파를 분해하는 작업이 필요할 것으로 판단된다.

또한, 입사파와 반사파의 크기는 이론적으로 알려진

것과 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 따라서, 만일 SPT 시험에서 측정된 하중신호에서 입사파와 반사파의 특성이 정량적으로 평가된다면, SPT 시험에서 사용하는 룯드와 지반 사이의 임피던스 차이를 결정할 수 있다. 또한 SPT 시험에서 사용하는 룯드의 재질과 단면적을 알고 있으므로 지반의 임피던스를 결정할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나, 실제 지반과 SPT 시험의 룯드에서는 본 연구에서 적용된 모델과는 달리 지반의 면적이 반무한체로 접촉하고 있으므로 실제 적용을 위해서는 보다 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.5 주면조건에 따른 파의 전파특성

주면조건에 따른 시험은 크게 두 가지 형태로 시험을 수행하였다, 첫째는 기본 MC 룯드의 중간위치에 주면조건을 변화시킨 경우(그림 3(c))이고, 둘째는 실제 SPT 시험과 유사하게 기본 MC 룯드의 끝 부분에 주면조건을 변화시킨 경우이다(그림 3(d)). 각각의 경우에 주면조건을 형성하는 재질의 강성과 구속압을 변화시키며 시험을 수행하였다. 본 시험은 i) 주면에서 발생하는 마찰 저항력의 반은 반사되고, 나머지 반은 투과된다는 이론적 결과를 검증하는 것과, ii) 주면의 재료의 강성 변화와 구속압 변화에 따라서 발생하는 마찰저항의 정도가 어떻게 변화하는가를 검토하는데 시험의 목적이 있다.

주면의 조건이 중간에 위치하는 경우에 측정된 하중 신호의 일례를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 주면의 좌측에 위치한 감지기에서 측정된 신호(그림 6(a))의 첫 번째 피크 값은 입사파의 크기를 나타내는 것이고, 그 다음의 인장파 피크는 룯드의 오른쪽의 자유단에서 반사된 인장파로 주면의 조건을 두 번 경험한 하중 신호에 해당한다. 그 다음의 압축파 피크는 인장파가 좌측의 자유단에서 반사된 신호이다. 주면의 우측에 위치한 감지기에서 측정된 신호(그림 6(b))의 첫 번째 피크 값은 입사파가 주면조건을 한번 경험하고 전달되어온 입사파이고, 바로 다음의 인장파 피크는 우측의 자유단에서 반사된 하중파이다. 이와 같이 하중 파형의 정성적인 형태는 이론적인 해석과 매우 잘 일치하고 있다.

주면조건을 룯드의 끝에 설치한 경우는 모든 신호가 주면조건외 좌측에서 측정되었다. 측정된 하중 신호의 일례는 그림 7과 같다. 하중파형에서는 주면조건이 단부의 끝에 있어서 주면에서의 반사와 자유단에서의 반사를 구별할 수는 없었다. 그러나, 자유단에서 입사파가 모두 전반사되므로 첫 번째 압축의 입사파가 자유단에서 반사될 때 동일한 위치에서의 주면조건에서 발생한 마찰저항 또한 자유단에서 반사되어 첫 번째 인장의 반사파가 측정됨을 알 수 있다.

주면조건이 중간위치에 있는 경우에는, i) 입사파, ii) 주면조건을 한번 지난 투과파, iii) 주면조건을 지나서 왼편의 자유단에서 반사되어 오는 과정에서 주면조건을 다시 한번 지난 반사파의 크기를 측정하고, 주면조건이 끝 부분에 있는 경우에는 i) 입사파, ii) 주면조건을 지나서 왼편의 자유단에서 반사되어 오는 과정에서 주면조건을 다시 한번 경험한 반사파의 크기를 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 구속압 및 주면조건외 재

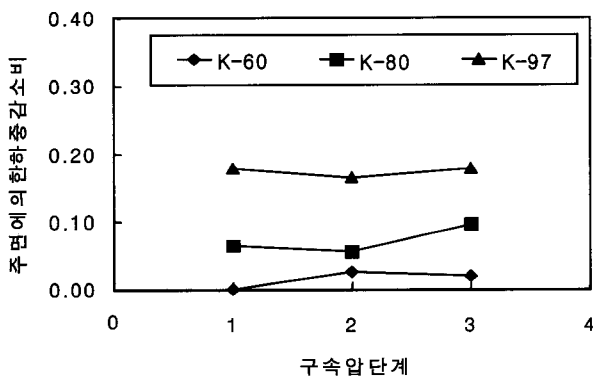


그림 8. 구속압 및 재료의 강성에 따른 주면조건외의 영향 (주면위치: 중간)

료(강성)에 대한 영향은 그림 8에, 주면의 위치에 따른 영향은 그림 9에 나타내었다.

그림 8에 나타낸 주면조건 전후에서 입사파와 투과파의 크기 감소정도를 살펴보면, 구속압의 영향은 거의 없는 것으로 판단되며, 주면조건외의 강성이 증가함에 따라 감소정도가 증가하고 있다. 이러한 감소는 주면에서의 마찰저항에 의한 것과 주면과 MC 룯드와의 강성변화에 의한 하나의 단부 경계로 작용하는 영향이 복합되어 나타난 것으로 판단된다. 그러나, 구속압의 변화에 거의 무관하게 주면조건외에 의한 하중감소가 결정되는 것을 고려한다면 주면에서의 마찰력 발생에 의한 하중감소보다는 주면과 MC 룯드와의 강성변화가 단부 경계로 작용하여 발생하는 하중감소의 영향이 지배적인 것으로 판단된다. 왜냐하면 주면 마찰력의 크기는 구속압의 영향을 받아야하고, 경계조건은 구속압에 무관한데(룰드 재료의 강성이 구속압에 무관한 재질이므로) 구속압의 변화에 무관하게 주면조건외에 의한 하중감소가 발생하고 있기 때문이다.

주면의 위치에 따른 결과(그림 9)에서 보면, 주면의 위치에 따른 영향이나, 주면 재료의 강성변화에 대한 영향에 대하여 일정한 경향성을 찾아보기 어렵다. 이러한 원인은, 앞에서 언급하였듯이, 반사파 하중크기의 평가에서 신뢰성이 다소 떨어지기 때문으로 생각된다.

한편, 그림 8과 그림 9의 하중감소비가 다른 이유는 그림 8은 주면의 전·후 측, 주면을 통과하기전의 입사파와 주면을 1회 통과후의 투과파(그림 6(b))와의 하중감소비(감지기 위치 L2와 L3값의 비교)를 나타낸 반면에 그림 9는 입사파와 주면을 2회 통과한 투과파(그림 6(a))와의 하중감소비(감지기 위치 L2와 L2(주면 2회 통과후)값의 비교)를 나타낸 그림이기 때문이다. 이와 같은 이유는 그

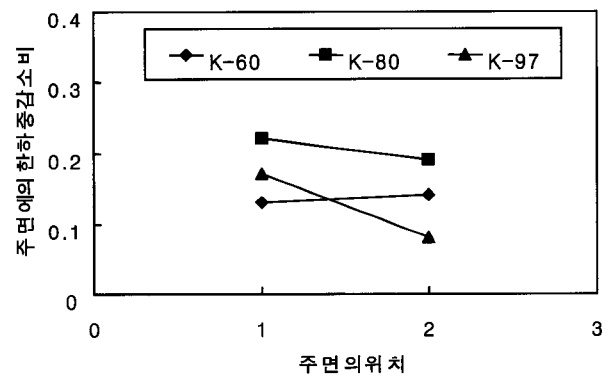


그림 9. 주면조건외의 위치에 따른 주면의 영향 (구속압단계 : 대)

림 9는 위치에 따른 변화를 보기 위한 그림인데, 구속주면조건이 끝인 경우에는 주면통과회수가 2회인 투과파만을 측정할 수밖에 없으므로 같은 조건으로 비교하기 위하여 주면조건이 중간위치의 경우에도 주면통과회수가 2회인 값을 이용하여 비교하였기 때문이다.

이상의 주면조건에 따른 시험결과를 정리해 보면, 주면의 마찰저항에 의한 하중신호의 감소정도는 대단히 작고, 즉, 주면저항에 의한 반사파의 영향은 대단히 작고, 그에 비해 주면과 MC 룯드와의 강성변화가 단부 경계로 작용하여 발생하는 하중감소의 영향이 지배적인 것으로 판단된다. 따라서, 실제 SPT 시험에서는 룯드 선단의 샘플러 주면에 작용하는 마찰저항력이 발생하여도, 발생된 마찰저항력에 의한 파의 반사보다는 샘플러 주면의 지반이 이질의 단부조건으로 작용하여 발생하는 반사파의 영향이 지배적일 것으로 생각된다. 그러므로 SPT 동적하중의 해석에서는 샘플러 주면의 마찰저항은 무시하고, 샘플러 선단의 단부저항만을 고려하는 해석모델의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

SPT 시험을 모사한 룯드-지반 시스템에서 단부조건, 주면조건을 변화시키며 측정된 동적신호를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 단부조건에 따른 입사파와 반사파의 크기는 이론적으로 알려진 것과 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 따라서, 만일 SPT 시험에서 측정된 하중신호에서 입사파와 반사파의 특성이 정량적으로 평가된다면, 지반의 임피던스를 결정할 수 있을 것으로 예상된다. 다만, 실제 지반과 SPT시험의 룯드와 본 연구에서 적용된 모델과는 달리 지반의 면적이 반무한체로 접촉하고 있으므로 실제 적용을 위해서는 보다 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 주면의 마찰저항에 의한 하중신호의 감소정도는 대단히 작고, 즉, 주면저항에 의한 반사파의 영향은 대단히 작고, 주면과 본 룯드와의 강성변화가 단부 경계로 작용하여 발생하는 하중감소의 영향이 지배적인 것으로 나타났다. 따라서, 실제 SPT 시험에서 룯드

선단의 샘플러 주면에 작용하는 마찰저항력이 발생하여도, 발생된 마찰저항력에 의한 파의 반사보다는 샘플러 주면의 지반이 이질의 단부조건으로 작용하여 발생하는 반사파의 영향이 보다 클 것으로 생각된다.

- (3) SPT 동적하중의 간편 해석에서는 샘플러 주면의 마찰저항은 무시하고, 주면지반의 강성변화만을 샘플러 선단의 단부저항에 포함시켜 고려하는 해석모델의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 SK건설(주)연구소의 연구비 지원으로 수행된 "SPT 동적데이터 분석에 관한 기초연구" 연구결과의 일부로 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. Abou-matar, H. and Goble, G. G.(1997), "SPT Dynamic Analysis and Measurements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.10, pp.921-928
2. Clayton, C. R. I.(1990), "SPT Energy Transmission: Theory, Measurement and Significance", *Ground Engineering*, pp.35~43.
3. Goble, G. G. and Abou-matar, H.(1992), "Determination of Wave Equation Soil Constants from the Standard Penetration Test", *Proceeding, Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Netherlands, pp.99-103.
4. Kim, D. S., Kweon, G. C. and Lee, K. H.(1997), "Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Using Free-Free Resonant Column Test", *Transportation Research Record No. 1557, 1997 Annual Meeting*, Washington, D. C., pp.62-69.
5. Kovacs, W. D. and Salomone, L. A.(1982), "SPT Hammer Energy Measurement", *Journal of the GED*, ASCE, Vol.108, No.GT4, pp.599-620.
6. Richart, F. E., Woods, R. D. and Hall, J. R.(1970), *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, pp.60-120.
7. Robertson, P. K. and Woeller, D. J.(1991), "SPT Energy Measurements Using a PC Based System", *44th Canadian Geotechnical Conference*, Vol.1, No.8, pp.1-10.
8. Schmertman, J. and Alejandro P.(1979), "Energy Dynamics of SPT", *Journal of the GED*, ASCE, No.105, pp.909-926.

(접수일자 2002. 1. 25, 심사완료일 2002. 6. 14)