건설핵심기술연구개발사업 최종보고서

R&D/05건설핵심C13

지속 가능한 연약 지반 역학적 특성 평가를 위한 Piezoelectronics의 실용화 연구 보고서

2007. 7. 31.

주관연구기관 / (주)다이크이앤씨
협동연구기관 / 경 희 대 학 교
한국해양연구원

KICTEP
RPO3382

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 "지속 가능한 연약지반 역학적 특성 평가를 위한 Piezoelectronics의 실용화 연구"의 최종보고서로 제출합니다.

2007. 7. 31.

주관연구기관 : (주)다이크이앤씨
대표이사 장 현 삼
협동연구기관 : 경희대학교 산학협력단
단장 이 광 재
협동연구기관 : 한국해양연구원
원장 염 기 대

■ 총괄연구책임자	/ 부사장 이창수	연구 총괄
■ 주관연구기관 참여연구원	/ 대표이사 장현삼	현장지원
	/ 차장 김교홍	현장지원
	/ 차장 조동기	현장지원
	/ 과장 박경준	현장지원
	/ 과장 신동근	현장지원
	/ 과장 임경학	현장지원
■ 협동연구기관 참여연구원	/ 교수 목영진	매설형 장비 개발
	/ 연구원 박철수	매설형 장비 개발
	/ 연구원 정재우	매설형 장비 개발
	/ 연구원 한만진	매설형 장비 개발
	/ 연구원 오상훈	매설형 장비 개발
	/ 연구원 김학성	매설형 장비 개발
	/ 연구원 장운필	매설형 장비 개발
	/ 연구원 최장규	매설형 장비 개발
	/ 연구원 권오순	인홀형 장비 개발
	/ 연구원 장인성	인홀형 장비 개발
	/ 연구원 오명학	인홀형 장비 개발
	/ 연구원 이진학	인홀형 장비 개발

요 약 문

Ⅰ. 제 목

지속 가능한 연약지반 역학적 특성 평가를 위한 Piezoelectronics의 실용화 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

피에조 액츄에이터 및 센서 제작 기술을 바탕으로, 연약지반 의 역학적 특성(전단강도, 강성도, 밀도 등)을 실시간과 지속적으로 측정할 수 있는 기술의 실용화가 연구개발 최종목표이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

효율적인 벤더 엘리먼트의 제작을 위해 벤더 엘리먼트의 기본원리와 구조, 제작과정과 최적 사양 결정을 위한 시험을 수행하였다.

실내 환경에서 제작되고 검증된 벤더 엘리먼트가 열악한 현장에서도 잘 작동하는지 시험하고자 갯벌에 매설하여 전단파를 발진하고 수진하였다. 벤더 엘리먼트를 발진자와 감지기로 사용하여 매설형 크로스홀(crosshole) 계측과 인홀형(inhole) 탄성파콘 계측을 하였다. 크로스홀 형 시험에서는 전단파 도달시간 만큼 계측 깊이별 전파거리 측정도 중요하여 거리 보정 방안을 모색하였다. 인홀 형 시험은 실내에서 시행착오를 통하여 최적의 인홀 장치를 개발하여 갯벌에 삽입하여 전단파 계측에 성공하였다.

현장의 깊은 심도까지 계측하려면, 기계적인 관입 장치의 개발이 반드시 수반되어야 한다. 또한 벤더 엘리먼트의 관입시 벤더 엘리먼트가 설치된 롯드를 보호할 수 있는 외관(mandrel)과 함께 지정 심도까지 관입한 후 외관을 인발하는 방안으로 이러한 문제를 해결할 수 있다. 이를 위하여 벤더 엘리멘트가 설치된 롯드와 맨드렐을 함께 목표 심도까지 관입 한 후 외관을 인발하여 벤더 엘리먼트 손상을 방지하고자 하였다.

Ⅳ. 연구개발결과

본 시험에서는 벤더 엘리먼트가 쉽게 P파와 S파의 발생과 수신이 가능한 점을 이용하여 여러 가지 재질에서 센서로서의 적합성을 검증하고자 하였다. 실내 모형 토조 시험을 통하여 매설형 크로스 홀 시험과 인홀 형 탄성파콘 시험에 사용될 최적의 벤더 엘리먼트의 크기 및 전파 거리 등을 결정하였다.

실내 환경에서 제작되고 검증된 벤더 엘리먼트가 열악한 현장에서도 잘 작동하는지 시험하고자 갯벌에 매설하여 전단파를 발진하고 수진하였다. 벤더 엘리먼트를 발진자와 감지기로 사용하여 기존의 크로스홀(crosshole)과 인홀(inhole) 탄성파 기법을 적용하였다.

현장에서 적용성을 입증하는 연구를 수행하기위하여 두 개의 rod에 한쪽은 발진자용 벤더 엘리먼트를 다른 쪽은 수진기를 약 20cm의 간격으로 설치하여 충남 보령 ○○지역 갯벌현장에서 관입시험을 수행하였다. 크로스홀 시험에서는 전단파 도달시간 만큼 계측 깊이별 전파거리 측정도 중요하여 거리 보정 방안을 모색하였다. 기하학적인 배치를 통하여 전단파 도달 시간차를 이용하여 정확한 전파거리를 환산하는 방법을 제안하였다.

인홀형 탄성파콘 시험은 한 개의 롯드에 발진자와 수진기를 모두 설치하여 전단파를 발생하고 계측하는 원리로 발진자와 감지기 사이의 전파거리는 고정되고 지반에 롯드 하나만 관입한다는 장점이 있다. 그러나 이러한 장점에 대하여 치러야 할 대가는 롯드를 통하여 감지기에 전달되는 진동(noise)이다. 실내 시험을 통해 노이즈를 제거할 수 있는 최적의 엘리먼트 장착 장치를 고안 하였다

인홀 시험은 실내에서 시행착오를 통하여 최적의 인홀 장치를 개발하여 갯벌에 삽입하여 전단파 계측에 성공하였다

결정된 최종 사양에 의거하여 인홀형 탄성파콘의 모형을 제작하였다. 표준콘관입시험기의 로드와 동일한 단면에서 콘관입에 따른 교란 영역을 회피하기 위해 10cm 돌출하는 형태로 제작하여야 했기 때문에, 다양한 형태의 모형을 도안하고 제작을 시도하였으나, 최종적으로 swing arm 형태로 결정하였으며, 원활한 작동여부를 확인하기 위한 모형을 제작하여 검증을 수행하였다.

벤더 엘리먼트를 이용한 크로스홀 형 시험이나 인홀 형 시험을 현장에서 약 2m까지 인력으로 관입하여 수행하였다. 현장의 깊은 심도까지 계측하려면, 기계적인 관입 장치의 개발이 반드시 수반되어야 한다. 또한 조개 껍질이나 자갈이 혼재된

갯벌에 관입 할 때 벤더 엘리먼트가 손상될 가능성도 있다. 벤더 엘리먼트가 설치된 롯드를 보호할 수 있는 외관(mandrel)과 함께 지정 심도까지 관입한 후 외관을 인발하는 방안으로 이러한 문제를 해결할 수 있다.

이를 위하여 벤더 엘리먼트가 설치된 롯드와 맨드렐을 함께 목표 심도까지 관입한 후 외관을 인발하여 벤더 엘리먼트 손상을 방지하였다. 벤더 엘리먼트가 외관의 외경 밖에 위치하게 되어 지반과 밀실한 접촉이 가능하도록 하여 양질의 전단파 신호를 획득할 수 있었다.

현장 적용성 평가에서는 벤더의 내해수성 평가와 노이즈 제거를 위한 케이블 시스템의 평가, 센서 배치에 대한 고찰 등을 통하여 최적 센서의 형태를 도출하였다. 현장 설치를 위하여 수직배수재의 설치 장비인 맨드럴과 시추기를 활용하여 정밀한 시공이 가능함을 확인하였다.

인홀형 탄성파 콘은 기존 콘에 장착할 수 있는 모듈을 개발하였으며, 현장 검증 시험을 통해 그 성능을 평가하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

최종적으로 연구가 완료된다면, 매설형 크로스홀 시험장치는 다른 센서에 비해 저렴하고, 신속한 설치와 미세한 범위까지 정밀한 측정이 장점이기 때문에 연약지반(특히, 준설매립지반)의 강도 및 특성 변화 계측분야에 적용할 예정이며, 인홀형 탄성파 콘은 기존 탄성파 콘 시험에 비하여 매우 정밀한 시험 결과를 얻을 수 있으며 사용하기 편리하고 매우 경제적이기 때문에 실제 현장에 많은 현장에서 활용될 것으로 확신한다.

S U M M A R Y

Ⅰ. Title

Practical Application of Piezoelectronics for Sustainable Measurements of Properties of Soft Ground

Ⅱ. Objectives and necessities

A goal of this research is a practical technique which can measure mechanical properties continuously such as shear strength, stiffness and density in real time based on the manufacture technology of piezo-actuator and sensor.

Ⅲ. Contents and scope

The test to determine basic principal, mechanism, making procedure and optimal setting are executed for producing effective vender element. Whether the vender elements made and verified indoors good work in a field, shear wave measurement test is operated in soft clay beach. Laying cross-hole and in-hole elastic wave cone measurement are operated using a transmitter and receiver made by vender element. Distance revision method is considered because measurements of each transmission distance are important as travel time of shear wave in cress-hole test. In the in-hole test, shear wave is measured successfully in soft clay beach because optimal in-hole equipment is developed through a lot of indoor tests. Cross-hole test and in-hole test using vender element are operated on condition that those equipments are situated by human power under two meters from the surface. For measurement of high deep in fields, mechanical penetrating equipment has to be developed. Moreover, vender element can sometimes be damaged with insertion in the soft clay beach containing shells or gravels.

As a method of pushing scheme using a mandrel was developed for protection of bender elements and deeper penetration, these problems can be solved. Because of this problem, for protecting vender elements, first of all, lot installing vender elements is settled to the target depth simultaneously with mandrel and then mandrel is removed.

Ⅳ. Results and Discussions

In this test, whether bender element which occur and receive P-wave and S-wave easily is adequate for a sensor in a variety of materials verified. As a method of pushing scheme using a mandrel was developed for protection of bender elements and deeper penetration, these problems can be solved. Two types of in-hole and cross-hole seismic techniques have been implemented, as a using bender elements as source and source and receiver. The source and receiver rods were pushed 2 meters deep into coastal mud near BoRyung-city with bare hands. The distance between source and receiver rods was 20cm. To cross-hole testing, travel distance should be as accurate as travel time to calculate shear were velocity at each measurement depth. So, A pair of extra bender elements was mounted each measurement depth to measure shear wave along inclined travel path. This research propose a converting exact wave travel distance using reaching time gap of shear wave through a geometrically arrangement. Pairs of source and receiver benders were mounted on one rod. It has advantages over crosshole such as the use of one rod only and the fixed distance between source and receiver. However, the noise through the rod is formidable price for using one rod. Several installation schemes of bender elements were attempted in the laboratory and the final version was adapted for field testing. In the in-hole test, shear wave is measured successfully in soft clay beach because optimal in-hole equipment is developed through a lot of indoor tests. In-hole elastic wave cone is manufactured based on determined final settings. Because it is manufactured with protruding model about ten centimeters to avoiding disturbed area produced by cone penetration at the

same cross section of SPT's rod, many kind of shapes are attempted. Finally, 'swing arm' shape is determined and the model verification is operated to certify whether it work smoothly. Crosshole and In-hole prototype instrumented rods were pushed two meters deep into the field with human efforts. The instrumented rod requires additional penetration device to protect the bender elements during deep penetration. It is possible that bender elements were damaged during, where it can encounter shells and gravels scattered in the mud. This problem can be solved by the method that mandrel is removed after lot installing vender element is settled to the target depth simultaneously with mandrel. Because of this problem, for protecting vender elements, first of all, lot installing vender elements is settled to the target depth simultaneously with mandrel and then mandrel is removed. Reliable shear wave signal could be detected because the vender elements located out of mandrel can closely contact with the clay.

Ⅴ. Practical Application of the Results

If the research finalization, laying cross-hole equipment will be applied at measurement division of strength and character alteration in soft clays(especially, dredged and reclaimed Clay) because it is cheaper than any other sensors, it can be installed quickly and it can measure precisely with minute range. In-hole elastic wave cone is more accurate and cheaper than normal seismic cone, so it will be widely used in dynamic field test.

목 차

제 1 장 서 론 1

제 2 장 국내·외 기술개발 현황 7

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 15

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 99

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 105

제 6 장 참고문헌 107

Contents

Chapter 1 Introduction ····· 1

Chapter 2 State of the art ····· 7

Chapter 3 Research content and results ····· 15

Chapter 4 Degree of achievement and contribution ····· 99

Chapter 5 Practical application plan ····· 105

Chapter 6 Reference ····· 107

제 1 장 서 론

제1절 연구개발의 필요성

현재 계획 또는 건설 중인 부산 신항만, 광양항, 아산항, 인천북항, 울산신항, 포항 영일만 신항, 새만금 신항, 보령 신항, 목포신외항 등 9대 신항만의 입지를 보면 매우 열악하다. 그림 1.1에 제시된 바와 같이 대부분 주요 연약지반 분포지역에 위치하기 때문에 항만 건설에 많은 어려움이 있다.

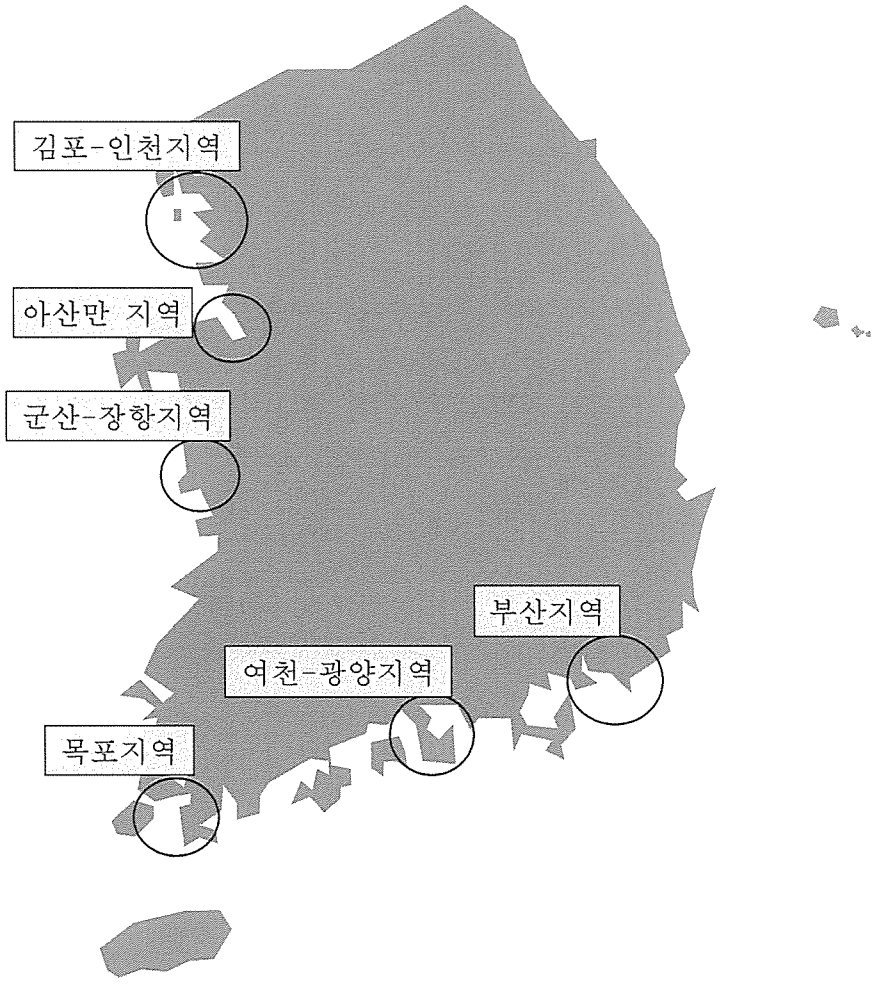


그림 1.1.1 우리나라 연약지반의 분포

대부분의 항만이 준설매립으로 부지가 조성되고 있는 현실에서 점성토 성분이 주로 함유되어 있는 준설토를 장기적으로 안정화시켜 공용하기에는 많은 시간이 소요된다. 현탁액과 같은 초연약지반에 차량의 기동이 가능하도록 하기 위하여, 공기가 충분한 경우에는 표층이 굳어질 때까지 자연 방치하고, 공기가 충분하지 않을 경우에는 PTM(progressive trench method), 대나무매트 공법, 토목섬유 포설, 모래살포 등 다양한 방법으로 표층처리공법을 시행하여 연약지반을 조기 안정화시키고 있다. 표층이 어느 정도의 강도를 가지게 되면, 전체 연약지반에 대한 지반개량을 위하여 다양한 장비가 투입되어 연직배수공법과 같은 여러 가지 지반개량공법을 시행하게 된다. 연직배수공법과 같이 연약지반 속에 있는 과잉간극수를 배출시키는 방식의 공법에서는 간극수 배출을 위하여 상재하중을 가하게 되는데, 이때 너무 과도한 하중을 가하게 되면 지반이 파괴에 도달하기 때문에 지반의 견딜 수 있을 정도의 하중을 점증적으로 가하게 된다. 단계 성토를 통하여 해당 단계에서 압밀이 완료되면 다음 단계의 하중을 성토하게 된다. 연약지반개량 공법에서는 공기를 단축하기 위하여 최적의 성토 관리를 하기 위하여 다양한 기법을 도입하고 있는데, 현실적으로 지반의 압밀이 어느 정도 진행되었는지 정확한 압밀도를 직접적으로 측정하기 어렵고 배출된 간극수의 양을 측정하여 부피변화를 고찰하기 어렵기 때문에 지표면 침하량을 계측하여 그 상관관계를 이용하는 간접적인 방법을 사용하고 있다. 실제 지반의 강도를 직접적으로 측정할 수 있다면 단계 성토의 시공에 효율을 극대화 할 수 있겠지만, 강도 측정을 콘관입시험 등은 고가의 시험 비용과 일회적인 측정이기 때문에 장기적으로 적용하기에 현실적이지 못하다.

최근 IT, NT, BT 기술의 발달 인해 새로운 신물질이 개발되고 다양한 장비가 속속 출연하고 있는 현실을 감안한다면, 이러한 분야의 기술을 연약지반 시공관리에 접목하면 지반의 압밀도 변화를 직접적으로 계측할 수 있으며, 이렇게 된다면 현재 사용하고 있는 간접적인 방법의 연약지반 성토시공관리의 효율성을 높일 수 있을 뿐만 아니라 안전하면서도 경제적이고 정밀한 시공이 가능하다.

Piezoelectronics(압전소자)는 IT, 로봇, 자동차, 메카트로닉스 등 첨단 산업에 다양하게 응용되는 신소재로, 이 산업의 급격한 성장에 발맞춰 세라믹, film(plastic), 섬유 형태로, 다양하게 개발되고 있다. Piezoelectronics 신소재는 전기장(electric field)에 의해 변형이 일어나고, 반대로 응력(stress)을 가하면 전하(electric charge)

가 발생하는 즉, 기계적-전기적 에너지의 상호 변환이 가능한 재료이다. 이 신소재를 활용하여 기존의 기계식을 대체하는 초정밀 초소형 액츄에이터(actuators)와 센서(sensors)를 개발하여 IT, 로봇, 자동차, 메카트로닉스, 의공학 등 첨단 산업에 다양하게 응용하고 있다.

토목공학 분야에서는 IT, 메카트로닉스 등 타 산업에 비해 이 소재의 활용도는 극히 미미한 실정이다. 얇은 피에조 세라믹판과 금속판을 겹쳐서 만든 벤더 엘리먼트(bender element)를 실내 삼축 압축 셀에 설치하여 흙 공시체의 강성 측정에 액츄에이터와 센서로 활용하고 있다(목영진 등, 2005). 또한 디스크 형이나 원주형의 두께 팽창모드를 이용한 공대공 초음파 시험(crosshole sonic logging)(Uchino, 1997; Vives, 2004), 현장 탄성파 장비에 활용되고 있으나(Stokoe, et al, 1972; Hoar, 1982), 최근 개발되고 있는 신소재의 발전 속도에 비해, 토목공학 응용은 거대한 미개척 분야로 남아있다. 토목공학도 이러한 신소재와 IT와 NT를 접목한 첨단산업으로 변신을 꾀할 단계에 있다.

제2절 연구개발의 목적

이 연구는 Piezoelectonics를 이용한 소형 액츄에이터와 센서를 개발하여 연약지반의 역학적 특성(전단강도, 강성도, 밀도 등)을 실시간과 지속적으로 측정할 수 있는 기술을 실용화 하고자 한다. 연구의 내용은 다음과 같이 두 가지로 이루어져있다.

① 매설형 크로스홀(cross-hole) 계측

피에조 액츄에이터와 센서를 부착한 알루미늄 채널(channel)을 관입장치(연약지반의 압밀을 촉진하는 수직배수용 섬유를 단시간에 관입시키는 맨드럴과 같은 장치)를 이용하여 지반에 관입시킨다. 같은 깊이에 쌍을 이루는 액츄에이터와 센서를 이용하여 전단파를 발생시키고 계측하여 깊이별 전단파속도 주상도를 얻고, 간접적으로 전단강도나 밀도를 추정한다(그림 1.2.1).

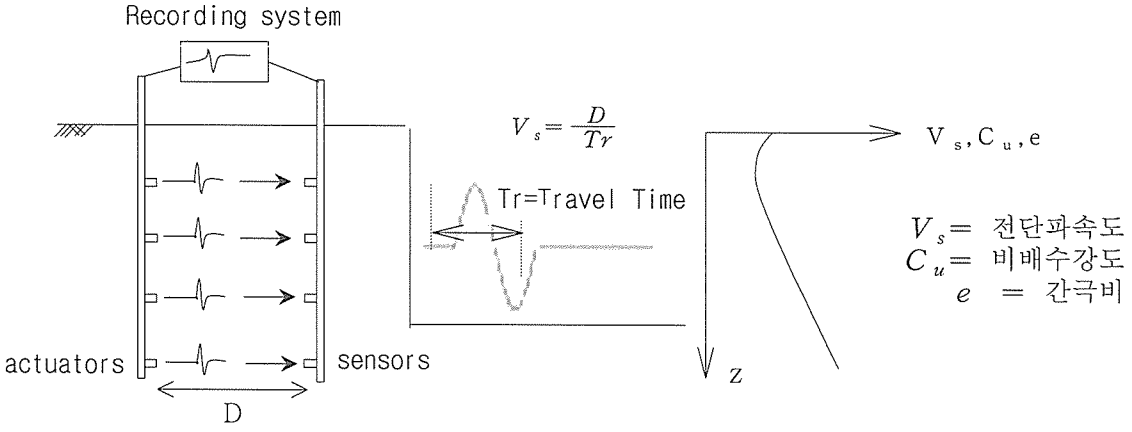


그림 1.2.1 매설형 크로스홀 계측의 개념도

매설형 크로스홀 계측장치는 다른 센서에 비해 저렴하고, 아주 짧은 시간에 배수보드를 관입하는 맨드럴과 같은 관입장치를 이용하여 설치가 가능하기 때문에 쉽게 투입이 가능하며, 피조세라믹의 특징인 정밀 계측이 가능하다.

매설형 크로스홀 계측장치를 설치하면 연약지반의 강도 증가 효과를 즉각적으로 정밀하게 계측할 수 있기 때문에 적용한 공법의 효과를 검증할 수 있으며 또한 다음 공정을 신속하고 안전하게 진행할 수 있어 공기 단축의 효과가 있다.

상시 설치되어 있는 매설형 장비는 필요할 때 전류를 흘려주는 것만으로 지

반의 강도변화를 측정할 수 있다는 장점이 있어 장기적으로 유지관리 비용이 절약된다.

최근 준설토 투기장과 같이 초연약지반을 짧은 시간 내에 사용할 수 있게 하기 위하여 다양한 공법을 적용하여 지반의 강도를 증진시키려는 노력을 기울이고 있으나, 현실적으로 초기 상태에서는 장비의 기동이 어렵고 지반의 과도한 침하 발생으로 인해 각종 계측장비의 운영이 어려운 것이 현실이다. 이러한 경우에도 매설형 장비를 적용한다면 설치가 가능할 뿐만 아니라 매우 연약한 지반의 미세한 강도 변화도 측정할 수 있기 때문에 추가 재하나 장비의 기동 가능 시점을 명확하게 판단할 수 있다.

② 인홀(in-hole) 탄성파 콘 계측

액츄에이터와 센서를 일반 콘에 장착하여 콘을 관입시켜가며 전단파를 계측하여 연약지반의 역학적 특성을 깊이에 따라 실시간으로 평가한다(그림 1.2.2).

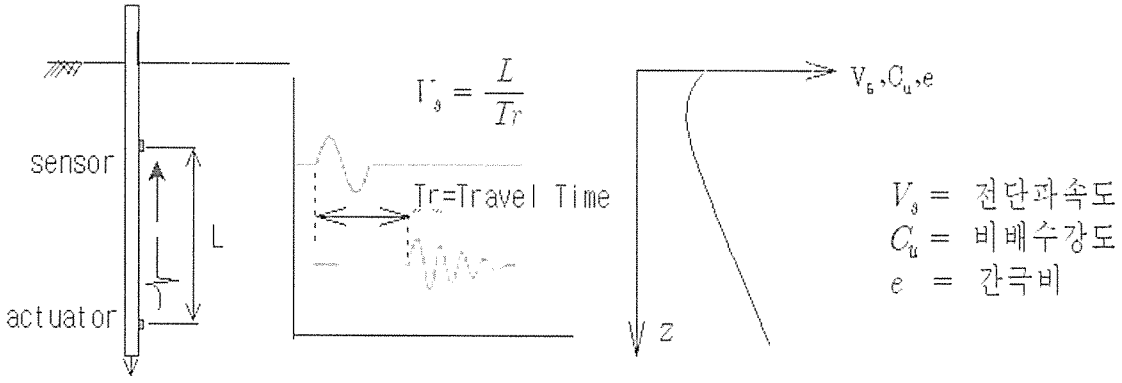


그림 1.2.2 인홀(In-hole) 탄성파 탐사의 개념도

인홀 탄성파콘 계측장치는 지반에 관입되는 순간마다 지반의 동적인 특성인 전단파 전파속도를 측정할 수 있어 연속적으로 변화하는 지반의 특징을 정밀하게 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 지반의 물성치는 콘관입시험에서 얻어지는 지층의 분포와 다양한 강도 변수들과 조합할 경우 더욱 정밀한 지반의 구조와 강도, 동적 특성 값들을 얻을 수 있다.

제3절 연구개발의 범위

기존의 피에조 액츄에이터 및 센서 제작 기술을 바탕으로, 연약지반의 역학적 특성(전단강도, 강성도, 밀도 등)을 실시간과 지속적으로 측정할 수 있는 기술의 실용화가 연구개발 최종목표이다.

매설형 크로스홀 계측 분야에서는 1차 년도에 점성토 모형 토조를 제작하고 토조에서 액츄에이터와 센서를 관입시켜 현장 적용에 예상되는 문제점을 도출하여 시험기기와 시험방법을 확정하며, 2차 년도에는 현장 관입장치에 부착시켜서 현장 관입과 시험에 수반되는 제반 문제점을 도출하여 해결하고, 3차 년도에서는 여러 현장에 적용하고 시험 가이드라인을 제시한다. 최종적으로 현장에서 적용할 수 있는 상용화 모델을 개발하는 것이다.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제1절 국내 기술개발 현황

지반공학 분야에서 Piezoelectronis 관련된 연구는 그리 많지 않다. 실내 시험에서는 벤더 엘리먼트(bender element :얇은 피에조 세라믹판과 금속판을 겹쳐서 제작)를 실내 삼축 압축 셀에 설치하여 흙 공시체의 강성을 측정하고 있다(Vincenzo Fioravante and Roerto Capoferri, 2001). 또한 디스크형이나 원주형의 피에조 세라믹의 두께 팽창모드를 이용한 공대공 초음파 시험(crosshole sonic logging), 현장 탄성파 장비 개발 정도로 아직은 거대한 미개척 분야로 남아있다.

벤더 엘리먼트는 액츄에이터와 센서로 동시에 사용할 수 있는데, 그림 2.1.1과 같이 두 개의 피에조 세라믹을 내부의 금속판(shim)에 접착시켜 제작하며, 실제 제작한 벤더 엘리먼트가 다음 그림 2.1.2와 같다.

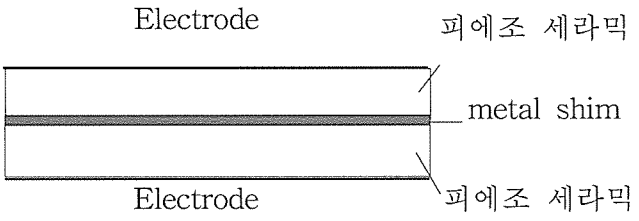


그림 2.1.1 벤더 엘리먼트의 구조

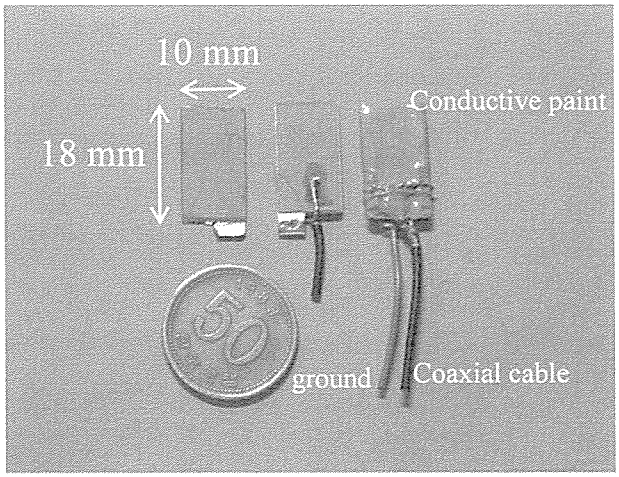


그림2.1.2 제작된 벤더 엘리먼트

벤더 엘리먼트를 이용한 시험은 1978년 Shirley에 의해 시험실에서 전단파 측정으로 처음 소개된 이래 NGI(The Norwegian Geotechnical Institute, 1984)에서 삼축 압축 시험의 공시체에 벤더 엘리먼트를 장착하여 전단파를 측정하였다. NGI에서는 벤더 엘리먼트가 전단파를 발생시키는 좋은 발진원이라고 소개하고 시험에 사용할 것을 제안하였다.

그림 2.1.3은 벤더 엘리먼트의 원리와 전압을 가하였을 때 벤더 엘리먼트의 변형 양상을 나타낸 것이다. 전압이 가해질 때 한쪽 세라믹 엘리먼트가 신장하는 동안 반대편 세라믹 엘리먼트는 수축하게 됨으로써 만곡 형태의 변형이 발생하게 된다. 즉 전압을 가하면 벤더 엘리먼트가 외팔보(cantilever) 변형형태로 진동하므로 actuator의 역할을 할 수 있다. 또 이와는 반대로 외부로부터 벤더 엘리먼트에 휨 변형이 생기면 각 피에조 세라믹 판에 각각 압축 및 신장 변형이 발생하여 벤더 엘리먼트 내부에 전하가 일어난다. 즉 진동을 전압으로 변환할 수 있어 진동 센서로 사용할 수 있다. 이와 같은 원리로 벤더 엘리먼트를 이용하여 간단하게 진동을 발생하고 및 진동을 측정하는 것이 가능하다.

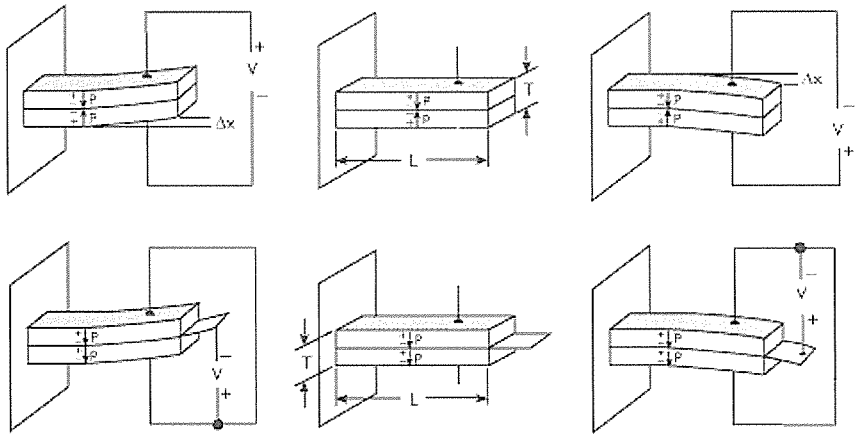


그림 2.1.3 벤더 엘리먼트의 작동 원리 및 거동 형태

벤더 엘리먼트는 정해진 표준 단면이나 제작법이 있는 것이 아니므로 그 모양이나 단면, 제작 방법은 다양하다. 각 시험 조건이나 시험 대상 매질에 따라 가장 잘 반응할 수 있도록 그 단면을 제작하여야 한다. 벤더 엘리먼트는 피에조 세라믹과 shim과의 접합 방식이나 단자 연결 방법에 따라 직렬(series)과 병렬(parallel)의 두 가지 방법이 있다(그림 2.1.4 참조). 두 피에조 세라믹 판의 직렬 연결은 가장 간단한 연결 방법으로 두 개의 세라믹 판 사이 shim을 넣어 접합한 뒤 얇은

coaxial cable을 납땜으로 세라믹의 외부에 연결한다. 병렬연결은 한 가닥의 선을 내부 금속판에 연결하고, 다른 나머지를 외부 세라믹 판에 연결하는 것으로 직렬연결보다 좀 더 까다롭다.

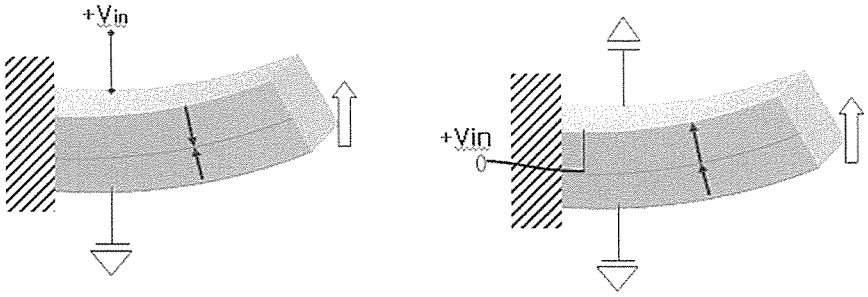


그림 2.1.4 벤더 엘리먼트의 직렬연결(좌)과 병렬연결(우)

같은 변위를 발생하는데 병렬이 직렬보다 더 적은 전압이 소요되므로(즉, 같은 전압을 가하였을 때 병렬연결에서 더 많은 변위가 발생하므로),병렬연결 벤더 엘리먼트는 액츄에이터(source)로 사용하고, 직렬 연결 벤더 엘리먼트는 압전 특성상 작은 변위에서 높은 전압이 발생 하므로 센서(receive)로 사용한다. 그림 2.1.5와 같이 Bender Element는 케이블 접합 후 폴리우레탄(polyurethane)으로 얇게 4~5번 코팅하여 케이블이 젖은 흙이나 습기로부터 보호되도록 한다. 코팅 후 전도성 페인트(conductive paint)로 cross-talk과 전기적 노이즈를 방지하기 위한 쉴드(shield)층을 형성하여 그라운드 케이블에 연결한다. Bender Element의 공진주파수는 시료에 가해지는 구속력이나 응력 상태, 밀도, 강성뿐만 아니라, 벤더 엘리먼트의 크기와 두께, 길이에 따라 다르므로, 이러한 변수를 조정하여 용도에 따라 최상의 엘리먼트를 제작할 수 있다.

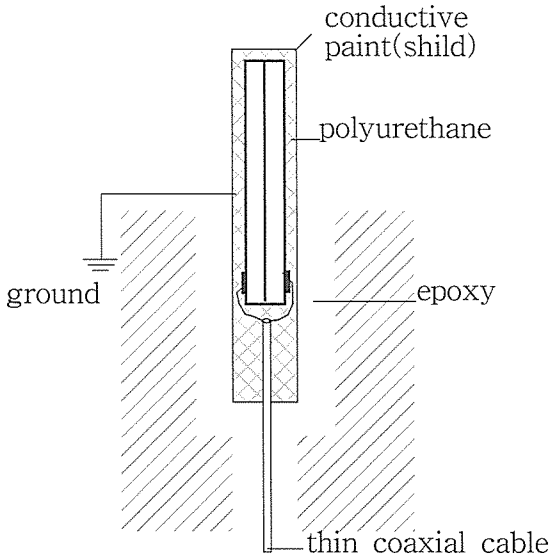


그림 2.1.5 케이블 연결과 코팅

연약지반에 적용성을 평가하기 위해 그림 2.1.6과 같이 카올리나이트 약 100kg에 물 72kg으로 교반을 하여 함수비 80%정도로 혼합한 카올리나이트를 지름이 50cm 높이가 60cm인 원통형 플라스틱 통에 채우고 깊이 50cm 에 벤더 엘리먼트를 설치하였다. 액츄에이터와 센서 벤더 엘리먼트 사이의 간격은 20cm하여 시험을 하였다. 70V의 전압으로 주파수를 30~500hz로 변경하여 가며 시험을 수행하였고, 그림 2.1.6은 카올리나이트에서 획득한 대표적인 전단파 도달 시간을 나타내었다. 70V의 전압과 주파수 70hz에서 S파는 5.91 m/s의 속도로 측정이 되어 초연약지반의 전단저항까지고 측정이 가능하게 되었다. 그림 2.1.7은 전압을 70V로 고정하고 주파수를 바꿔가며 측정한 신호로 도달 시점은 모든 주파수에서 동일하고, 70~100hz에서의 전단파 신호가 가장 양호한 것을 볼 수 있으며, 이는 이 주파수 범위 내에서 공진주파수가 있음을 알 수 있다. 카올리나이트는 시간이 경과함에 따라 그 입자가 침전이 되어 하부에서부터 그 강성이 증가하게 되는데 시간 간격을 두고 탄성파 측정을 하게 되면 시간 경과에 따른 강성의 증가를 알 수 있을 것이다. 이 연구에서 제작된 벤더 엘리먼트는 점성토 지반에서 놀랄만한 양질의 전단파를 발진하고 수진하는 우수한 액츄에이터와 센서의 기능이 있다는 것을 입증하였다. 또한 크기도 매우 작아 알루미늄 채널에 부착시켜 맨드렐을 이용하여 지반에 관입시키거나, 콘에 장착하는데 적합한 것으로 판단된다.

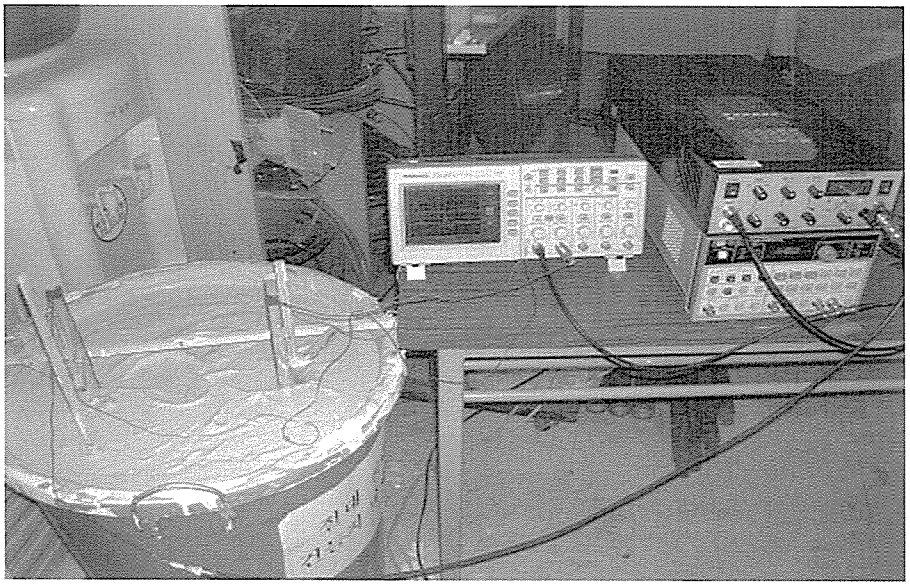


그림 2.1.6 카올리나이트의 시험전경(한국해양연구원, 2004)

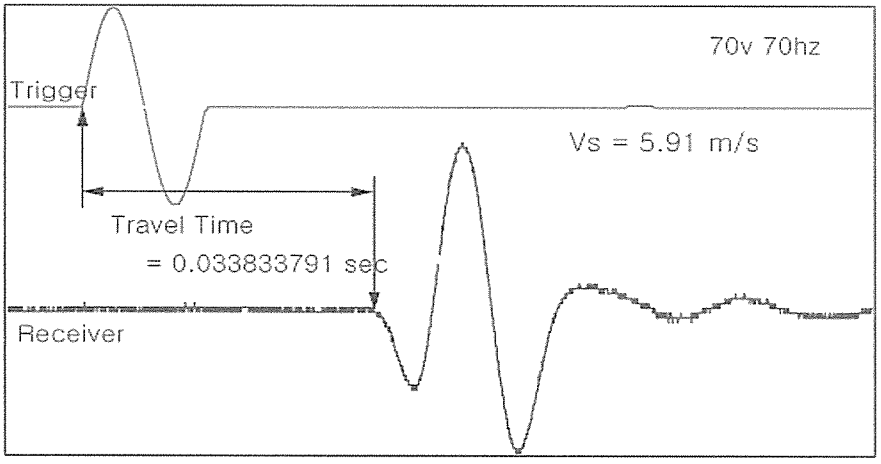


그림 2.1.7 카올리나이트에서의 전단파 신호

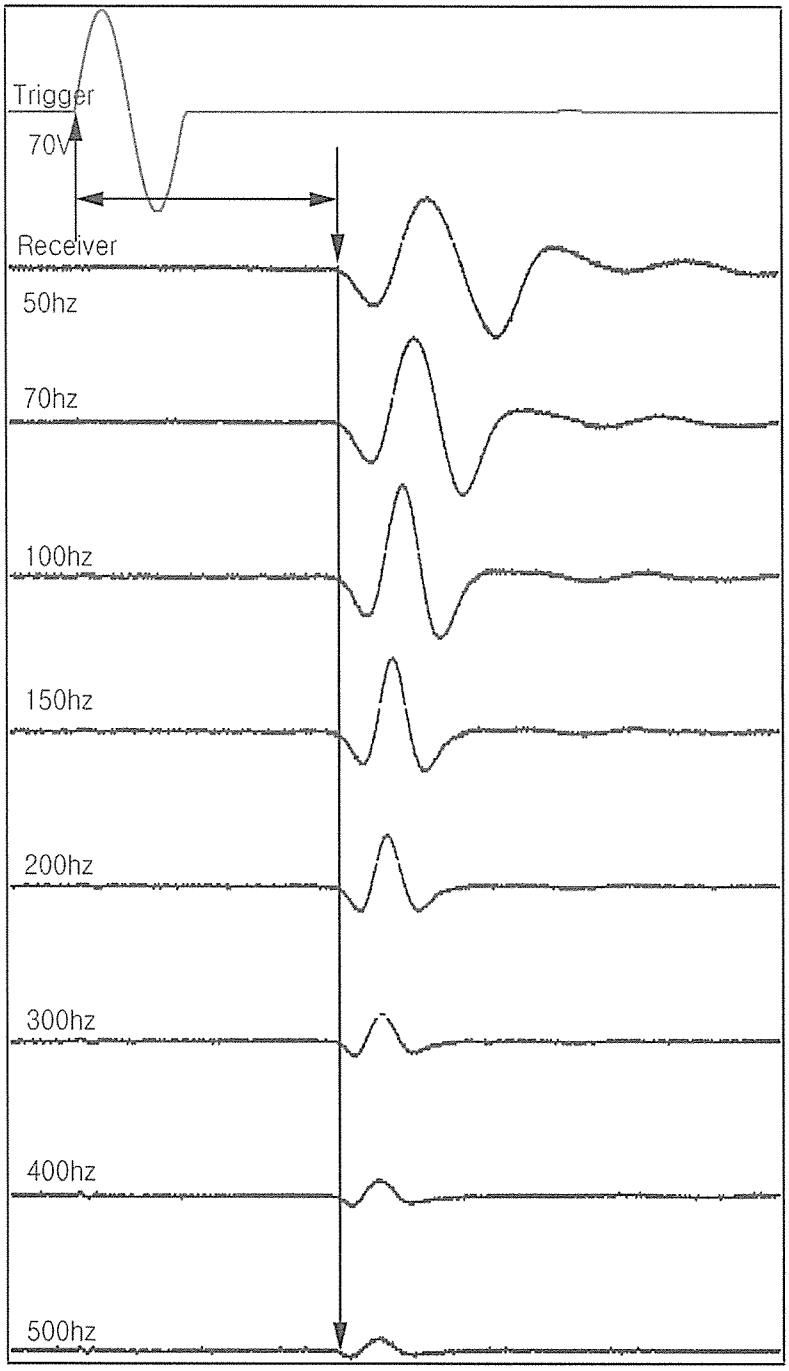


그림 2.1.8 주파수별 전단파 신호

제2절 국외 기술개발 현황

미국, 캐나다, 이태리 등 선진국에서는 그림 2.2.1과 같이 지오폰(geophone)이라고 불리우는 속도센서를 장착한 콘(cone)을 지반에 관입시키고, 지표면에서 충격하중을 가하여 지반으로 전파되는 전단파를 계측하고 있다(Campanella et al, 1986). 이 기법은 다운홀(down-hole) 탄성파 시험과 동일한 기법이다. UC Davis와 Stanford 대학의 지반 모델링 연구실에서 벤더 엘리멘트를 격자망으로 배열하여 토조시험에 사용하여 지반의 전단파 속도 변화를 고찰하여 지반의 밀도변화를 측정하는 연구가 최근 진행 중에 있으나, Piezoelectonics 전반적인 기술을 활용하여 현장에서 지반의 역학적 특성을 지속적으로 측정하려는 시도는 없는 것으로 파악 되었다.

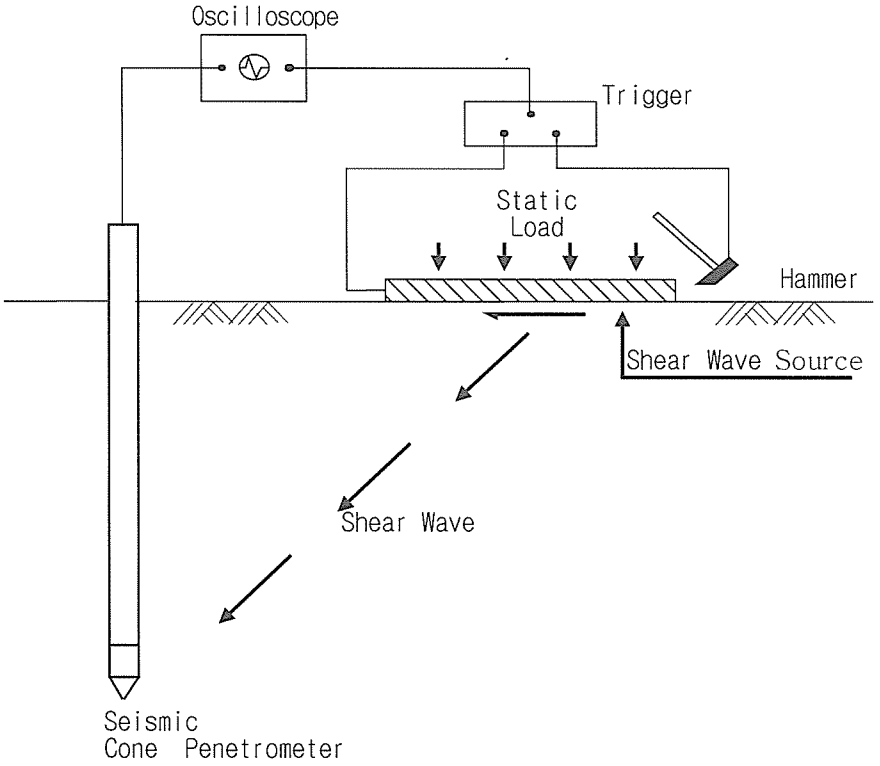


그림 2.2.1 다운홀 탐사콘 탄성파 시험의 모식도

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 벤더 엘리먼트

1. 사용 벤더 엘리먼트의 특징

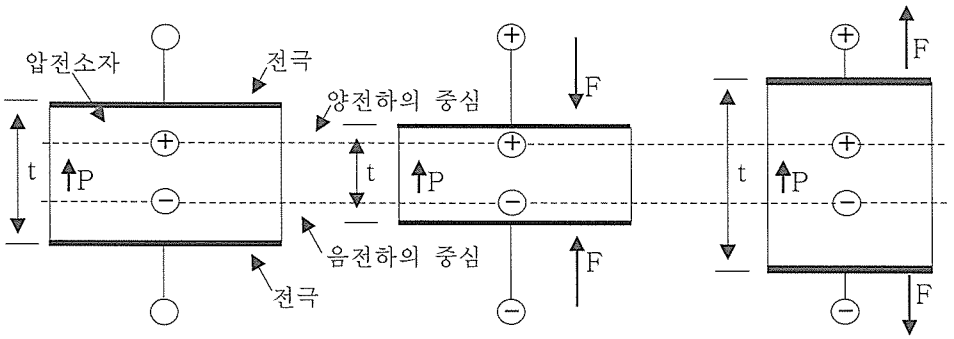
효율적인 벤더 엘리먼트의 제작을 위해 벤더 엘리먼트의 기본원리와 구조, 제작 과정과 최적 사양 결정을 위한 시험을 수행하였다.

가. 기본 원리

역학적 에너지가 가해지면 압전 소자에 전기적 에너지가 발생하는 현상을 압전 효과라 말하며 이러한 원리가 각종 센서에 응용되고 있다. 또 역압전 효과는 압전 소자에 외부로부터 전압을 걸어주면 이 소자가 역학적 변위를 일으키는 현상을 말하며 액추에이터에 이 원리가 적용된다. 보통 두 효과를 통합하여 압전 효과(Piezoelectric Effect)라고 부른다. 압전 현상을 보이는 물질에는 ZnO, CdS, PZT($Pb(Zr,Ti)O_3$, lead zirconate titanate 등이 있다.

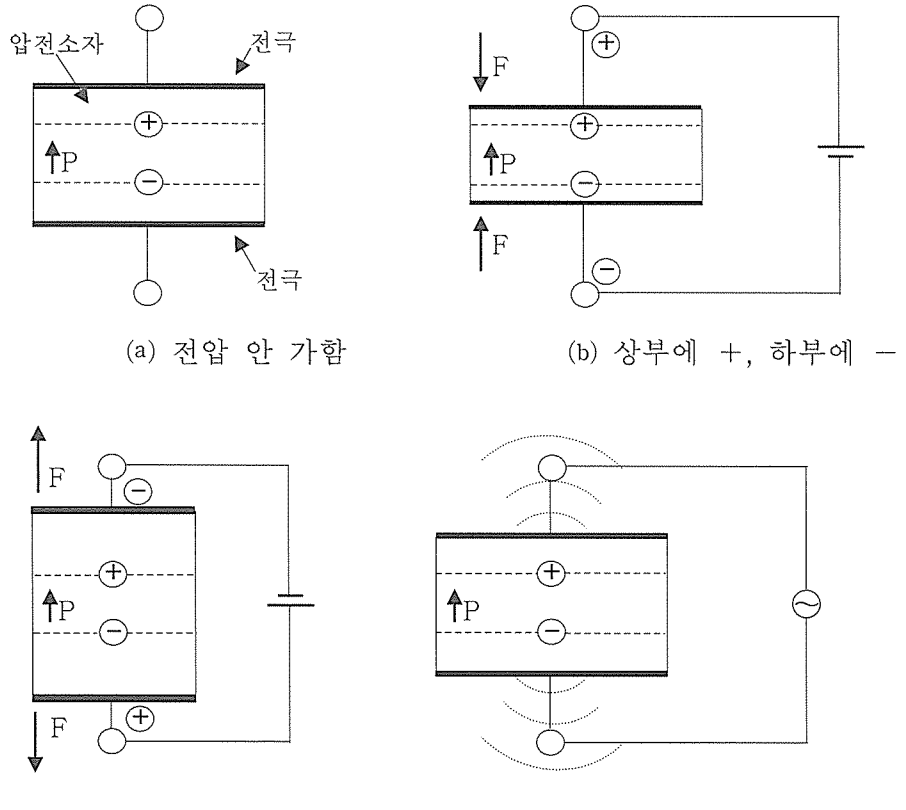
그림 3.1.1은 압전 효과의 설명으로 그림 3.1.1(a)와 같이 압전 소자에 외부 응력을 가하지 않은 상태에서는 전압이 발생하지 않는다. 그러나 그림 3.1.1(b)와 같이 압축력을 가하면 상하의 전극에 각각 (+), (−)의 전압이 발생하고 소자 두께는 감소되고, 반대로 그림 3.1.1(c)와 같이 신장력을 가하면 상하의 전극에 각각 (−), (+)의 전압이 발생하며, 이 때 소자의 두께는 초기 무응력 상태보다 증가한다. 그림 3.1.2는 역압전 효과를 설명한 것으로, 직류와 교류 전압을 가할 때 발생하는 기본 작동을 나타내고 있다. 그림 3.1.2(a)는 압전 소자에 외부로부터 전압을 가하지 않은 상태로 압전 소자에 변위가 발생하지 않고 있다. 그림 3.1.2(b)는 상부와 하부에 각각 (+)극과 (−)극을 가한 경우로, 압전 소자의 내부 전하와 외부 전압이 서로 반발하여 압전 소자는 압축된다. 이와 반대로 그림 3.1.2(c)는 상부에 (−)극을, 하부에 (+)극을 가하면, 압전 소자의 내부 전하와 가해진 전압의 인력으로 인해, 그림 3.1.2(b)와 달리 압전 소자가 늘어나는 현상을 나타낸

다. 이러한 효과를 응용하여 교류 전압을 가하면 그 주파수에 대응한 초음파 에너지가 방사되며 그림 3.1.2(d)는 이러한 현상을 활용한 초음파 진동자이다.



(a) 응력 없음 (b) 압축력 (c) 신장력

그림 3.1.1 압전 효과



(a) 전압 안 가함 (b) 상부에 +, 하부에 −

(c) 상부에 −, 하부에 + (d) 교류전압 가함

그림 3.1.2 역 압전 효과

나. 벤더 엘리먼트의 크기

본 연구에서 사용한 피에조 세라믹 판은 7.2×7.2cm 크기의 쉬트를 약 1.5×1.5cm의 크기로 잘라 사용하였으며 두께는 0.191mm를 사용하였다. 피에조 쉬트 사이의 금속 shim은 brass 재질이고, 두께는 소스로 사용할 경우 0.05mm, 리시버로 사용할 경우 0.03mm로 하였고, 피에조 쉬트의 제원은 아래와 같다.

- Nikel electrodes both sides
- Thickness : 0.127 ~ 0.267 mm
- Capacitance : 1250 ~ 610 nF(±10%)

다. 벤더 엘리먼트의 제작

그림 3.1.3은 본 연구에서 실제 제작한 벤더 엘리먼트의 모습이다. 피에조 쉬트를 알맞은 크기로 자른 후 Metal shim에 접착한다. 이렇게 접착된 벤더 엘리먼트는 케이블 접합 후 폴리우레탄(polyurethane)으로 얇게 4~5번 코팅하여 케이블이 젖은 흙이나 습기로부터 보호되도록 한다. 코팅 후 전도성 페인트(conductive paint)로 cross-talk과 전기적 노이즈를 방지하기 위한 쉴드(shield)층을 형성하여 그라운드 케이블에 연결한다. 벤더 엘리먼트의 공진 주파수는 시료에 가해지는 구속력이나 응력 상태, 밀도, 강성뿐만 아니라, 벤더 엘리먼트의 크기와 두께, 길이에 따라 다르다.

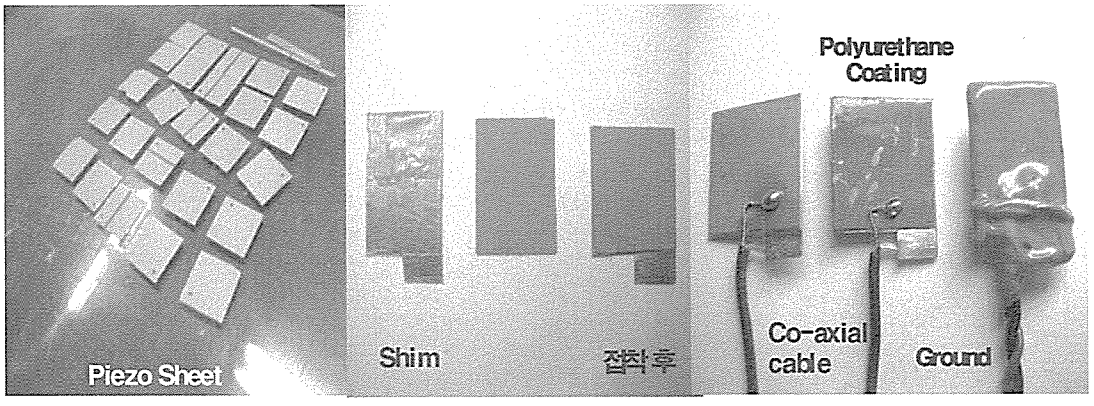


그림 3.1.3 벤더 엘리먼트의 제작 과정별 모습

라. 벤더 엘리먼트 시험

지금까지의 벤더 엘리먼트는 실내에서 삼축 시험장비 등에 장착하여 P파나 S파의 측정을 통한 지반 계수를 구하는데 사용되어 왔으나 본 시험에서는 벤더 엘리먼트가 쉽게 P파와 S파의 발생과 수신이 가능한 점을 이용하여 여러 가지 재질에서 센서로서의 적합성을 검증하고자 하였다.

벤더 엘리먼트 시험의 기본 구성요소로는 0.191mm 두께의 피에조 쉬트를 원하는 크기만큼 잘라서 만든 벤더 엘리먼트와 전단파 발생 장치인 Function generator로부터 발생된 전기적 신호(약 10V)가 Power Amplifier를 통하여 최대 200배(약 200V)까지 증폭되어 벤더 엘리먼트에 가해지게 된다. 이때 Function generator로부터 1mHz ~ 19.9MHz의 주파수로 조절하여 벤더 엘리먼트와 매질의 공진 주파수에서 측정을 하게 된다. 직접 제작한 벤더 엘리먼트는 주문 제작하여 만든 기성제품과는 달리 그 반응 주파수 대역이 1mHz에서부터 가능하므로 매질의 종류에 관계없이 그 매질의 공진 주파수를 찾는데 용이하다. 그 신호는 오실로스코프로 수신을 하며 발생 예상되는 전기적 노이즈는 리시버의 그라운드 케이블을 오실로스코프의 어스 단자에 접합하여 발생 노이즈를 최소화한다. 구성 장비의 구체적인 사양은 아래와 같다.

① 오실로스코프

도달파의 신호를 감지하기 위하여 Tektronix 사의 TDS2014모델의 오실로스코프를 사용하였다. 리시버에서 감지하는 도달파의 신호는 64~128회의 average 기능을 사용하여 측정하였으며 오실로스코프에서 감지한 신호는 직접 pc로 옮겨져 엑셀 파일 형식으로 저장이 된다. 사용한 오실로스코프의 제원은 아래와 같다.

- 채널수 : 4 채널
- Bandwidth : 100 MHz
- Sample Rate : 1 GS/s
- Record Length : 2.5 Kpoints
- SEC/DIV Range : 5 ns ~ 50 s

② Function Generator

실제로 벤더 엘리먼트에 탄성파를 발생시키는 장치로서 HP3014A를 사용하였으며, 장비의 주요 기능 및 재원은 아래와 같다.

- 1 mHz to 19.99MHz
- sine, square and triangle

③ Power Amplifier

Function generator로부터 발생된 신호는 power amplifier를 통하여 실제 시험에서 약 50~100volt로 증폭되어 벤더 엘리먼트로 전해진다.

- DC to 1MHz
- 282 Vrms, 34 Watts

제작된 벤더 엘리먼트를 시험하기 위해 그림 3.1.5와 같은 배열로 토조에서 전단파를 계측하였다. 약 50volt, 1000Hz에서 측정된 벤더 엘리먼트 시험으로 측정된 신호는 그림 3.1.6과 같이 전단파 식별이 탁월한 양질의 신호임이 입증되었다.

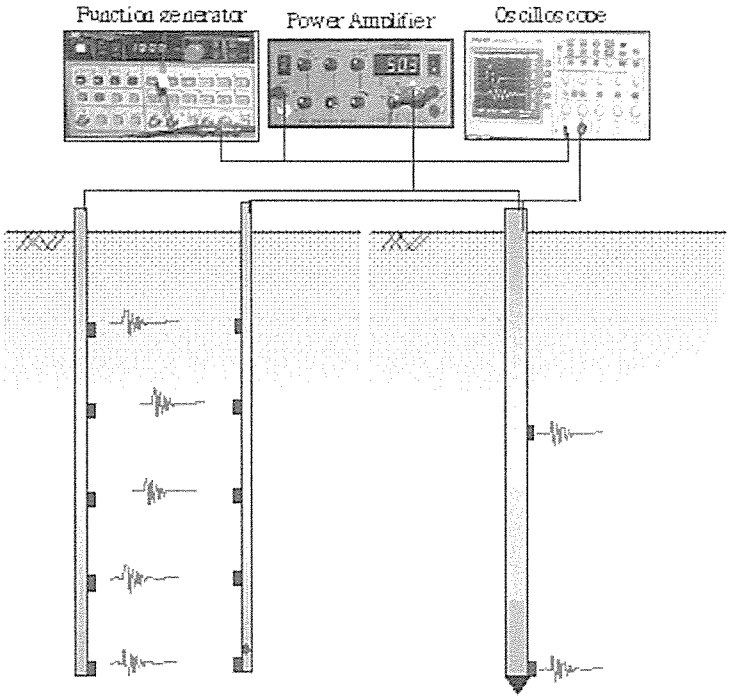


그림 3.1.4 벤더 엘리먼트 시험의 구성 및 모식도

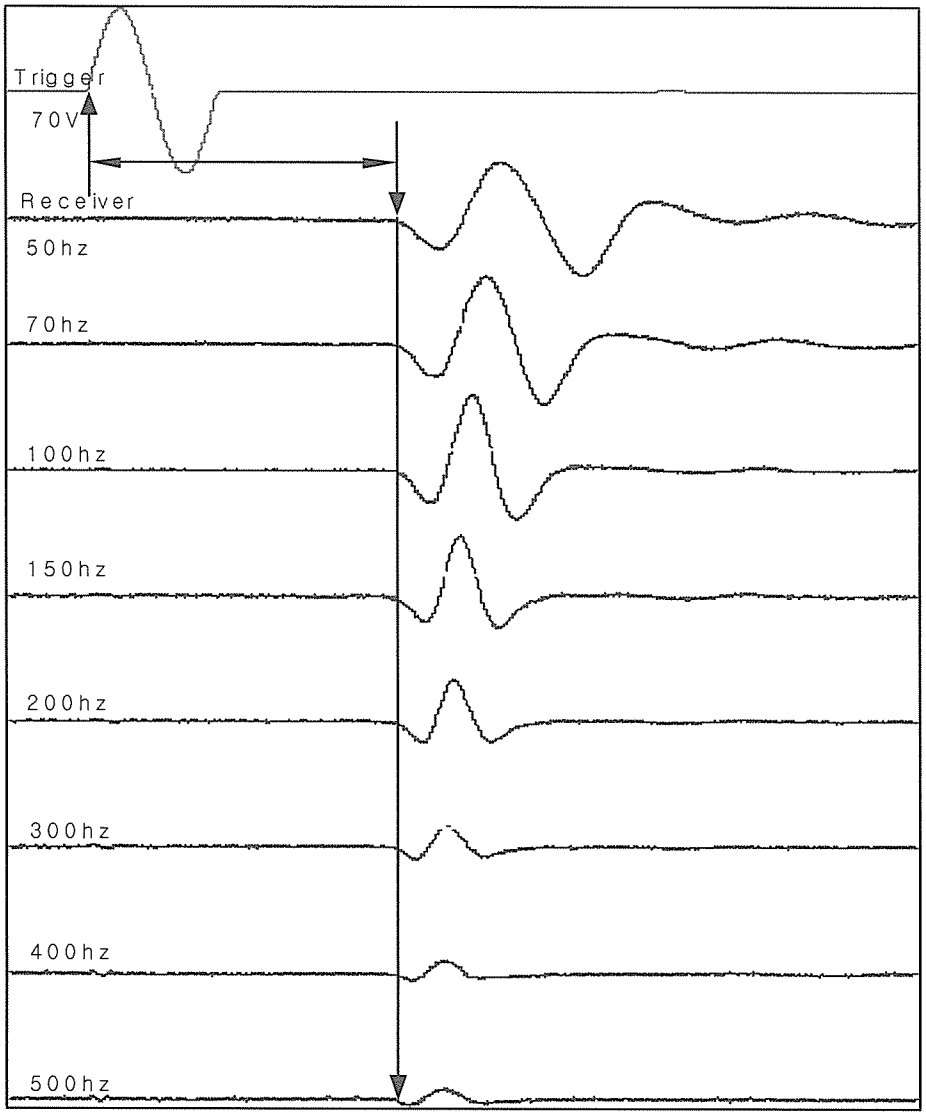


그림 3.1.5 벤더 엘리먼트로 측정한 전단파 신호

2. 사용 벤더 엘리먼트의 최적 전파 거리

사용 벤더 엘리먼트의 최적 배치를 결정하기 위하여 결정된 사양에서 벤더 엘리먼트에서 발생된 전단파가 전파거리에 따라 측정되는 신호의 특성을 고찰해 보았다. 그림 3.1.6과 그림 3.1.7은 벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파의 전파 가능 거리를 알아보기 위한 시험으로 한 쌍의 벤더 엘리먼트를 이용하여 거리를 23㎝에서 52㎝까지 약 10㎝ 간격으로 변화를 두어 전단파 신호를 획득한 것으로서 그림 3.1.7에서 보는 바와 같이 거리가 증가함에 따라 전단파의 신호가 약해지긴 하지만 전단파 도달시간을 확인하기에는 별 무리가 없으며 전단파 속도 또한 각 거리별로 거의 일치함을 보여주고 있다. 전단파 속도를 측정함에 있어서 50㎝보다 더 긴 거리에서도 입력 Voltage를 높여 준다면 충분히 긴 거리에서도 전단파 속도를 측정할 수 있을 것으로 보인다. 이번 연구에서는 제일 뚜렷한 신호를 보인 23cm 를 최적 전파거리로 결정하였다.

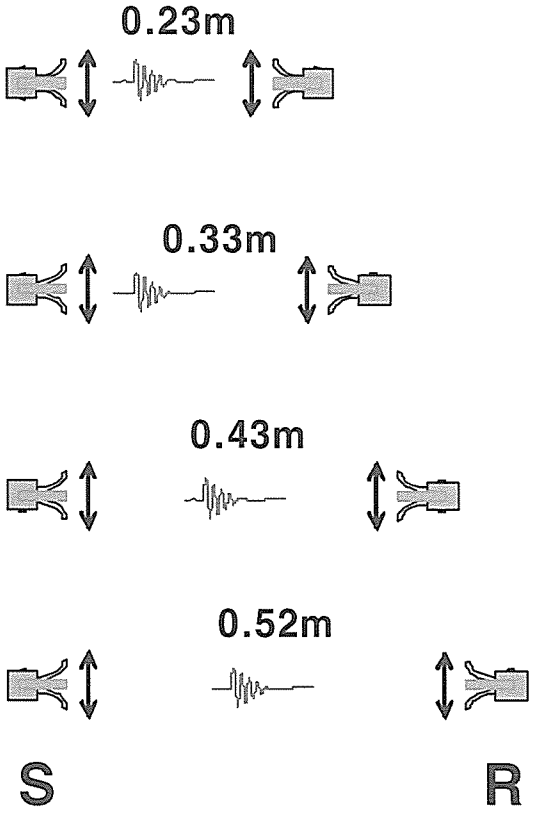


그림 3.1.6 벤더 엘리먼트 시험조건

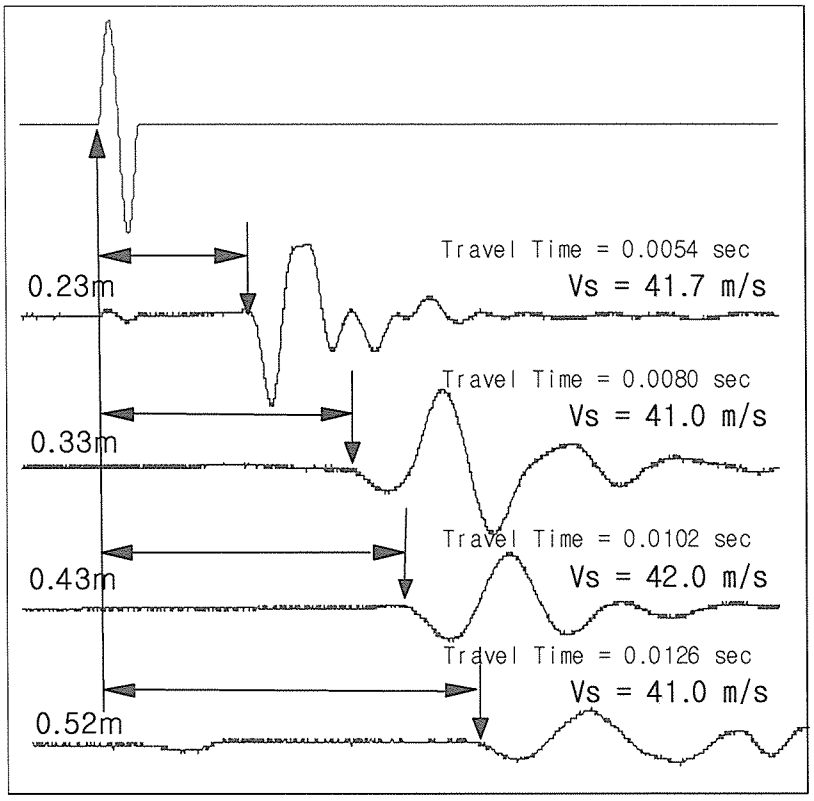


그림 3.1.7 벤더 엘리먼트의 전단파 전파 가능거리

3. 내해수성 코팅 실험

벤더 엘리먼트 센서가 설치되는 곳은 내륙의 연약지반 뿐만 아니라 해안 연약지반 및 준설 매립 지반을 대상으로 하기 때문에 해수에 대한 내구성이 벤더 엘리먼트를 이용한 센서의 내구성과 직결되는 점이다. 따라서 벤더 엘리먼트 제작에 필요한 코팅이 해수에 잘 견딜 수 있는지 확인 하는 작업이 필요하다. 표 1에서 보는 바와 같이 각기 다른 5가지 종류의 코팅제를 벤더 엘리먼트 제작과정에서 코팅을 하여 해수로 비벼진 소형 카올리나이트 토조에 설치하여 지속적으로 벤더 엘리먼트의 작동 여부를 체크하였다. 표 3.1.1과 그림 3.1.8에서 보는 바와 같이 우레탄(Urethane)코팅과 테프론(TFE) 코팅은 설치 후 268일 이상이 지난 현재까지도 작동하여 해수에 적당한 코팅제로 판단이 된다. 이러한 결과를 바탕으로 앞으로 제작되는 벤더 엘리먼트는 우레탄이나 테프론을 이용하여 코팅을 실시하였다.

표 3.1.1. 코팅제 종류별 성분 및 작동 지속기간

구 분	성 분	지속기간	비고(제품)
M-coat A	polyurethane		기본 코팅제
Urethane Coat	Urethane, Toluene 10%	268일 이상 진행 중	Spray UC-100
TFE Coat	불소수지, 불소oil, HFC Solvent, Toluene 5%	268일 이상 진행 중	Spray TFE 코트
Acrylic Coat	Acryl resin, Toluene	165일	Spray AC-100
Silicone	Silicone, Toluene 15%	97일	Spray S-830

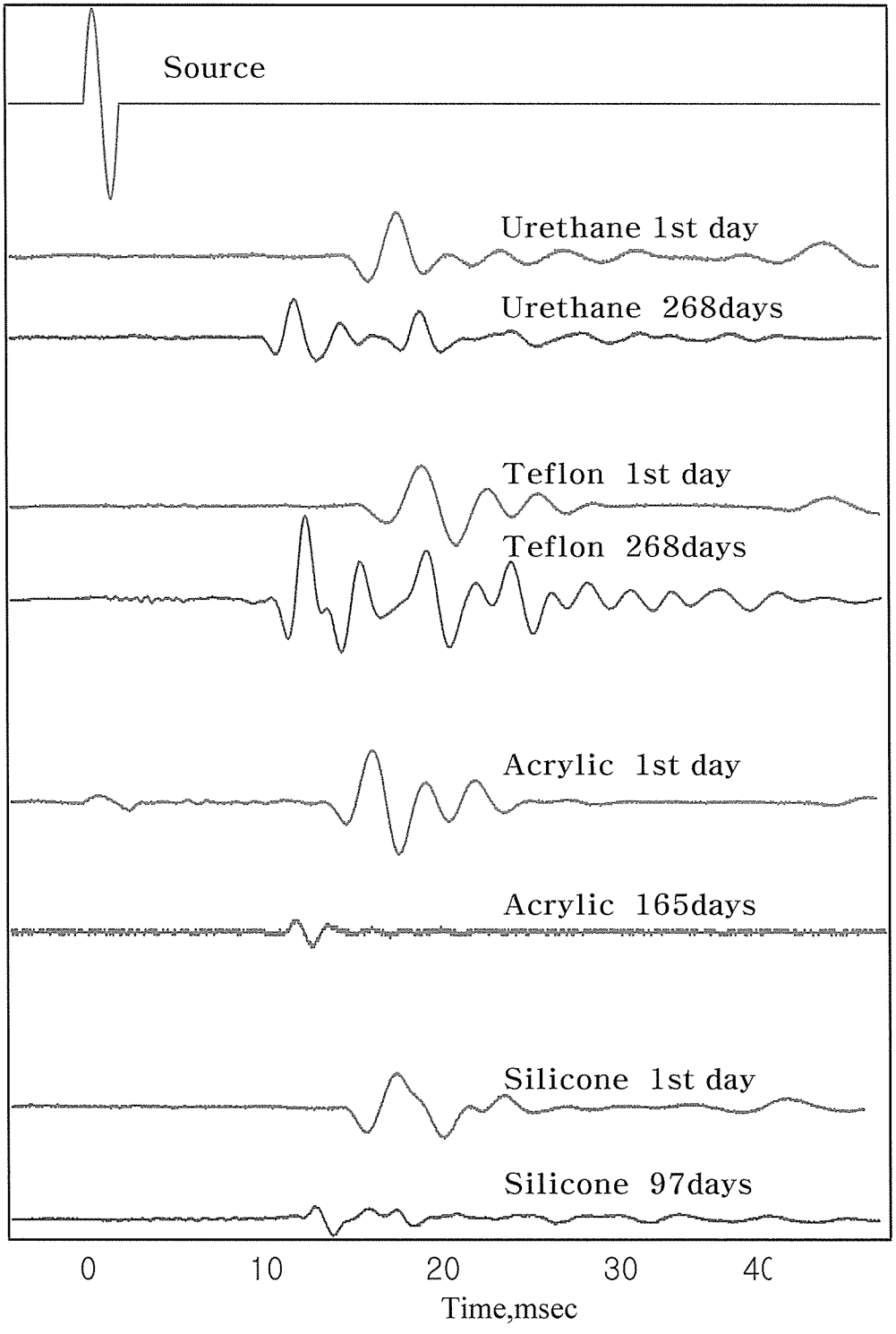
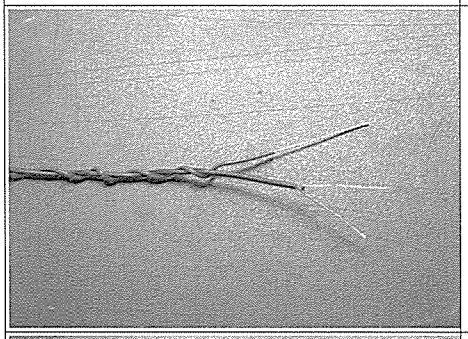
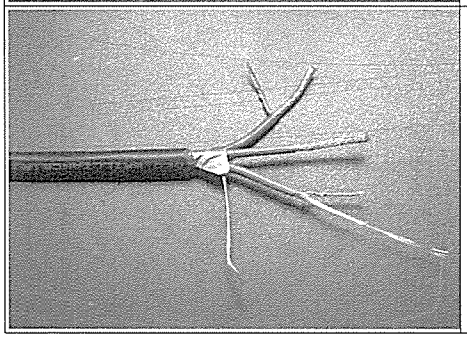


그림 3.1.8 코팅제 종류별 전단파 신호

4. 케이블

벤더 엘리먼트를 이용한 센서를 현장에 적용시, 실내 시험에서와는 다르게 깊은 심도까지 관입해야한다. 이러한 경우 케이블에 따라 계측되는 전단파 신호의 질이 차이가 날 수가 있으며, 심한 노이즈나 cross-talk의 발생 등으로 인하여 전단파의 도달 시점을 명확히 확인할 수 없는 경우가 발생하게 되어 신호분석에 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 깊은 심도까지 관입 시 케이블의 손상 방지를 위한 내구성을 확보함과 동시에 노이즈 발생을 최소화 할 수 있는 케이블의 선택이 중요하다. 다음 표 2와 같이 실제 여러 종류의 케이블을 사용하여 실내에서 전단파 계측을 실시하여 케이블별 신호 양상을 확인하였으며, 현장에 적용하기에 가장 적합한 케이블을 선택 할 수 있었다.

표 3.1.2 케이블 종류와 기본적인 사양

구 분	사 양
	• 기존 사용 co-axial cable + hook up wire • 신호 양호 • 100volt 이상 가능 • 굵기 가늘어 손상 쉬움
	• 3개의 co-axial cable로 구성, 두 개는 S와 R로 사용, 나머지 1개는 Ground용으로 사용 • 케이블의 중간 (+) 부분 비교적 약함 -> 연결 시 쉽게 손상 가능 • 30volt까지 가능함

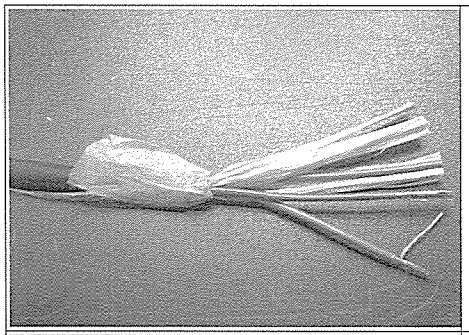
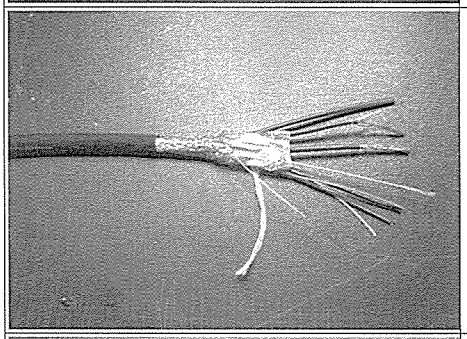
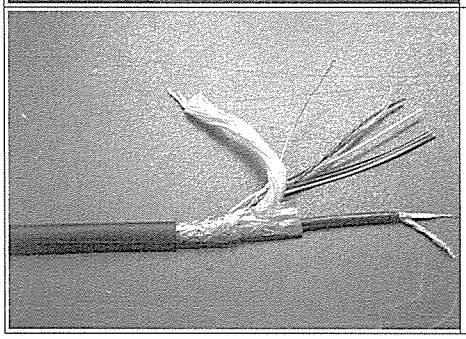
	• 3개의 co-axial cable로 구성, 두 개는 S와 R로 사용, 나머지 1개는 Ground용으로 사용 • 케이블의 중간 (+) 부분 1개의 단선으로 비교적 강함 • 20volt 이내로 사용 가능, 그 이상 전압 가할 시 심한 노이즈 발생
	• 3개의 co-axial cable과 6개의 cable로 구성, • S와 R로 2개의 co-axial 사용, • 6개의 케이블 중 두 개를 Ground용으로 사용 • 30volt 이상까지 사용 가능 • 신호 양호하지 않음
	• 1개의 co-axial cable과 6개의 cable로 구성, • S와 R에 각각 연결, • 6개의 케이블 중 한 개를 Ground용으로 사용 • 30volt 이상까지 사용 가능 • 비교적 양호한 신호 • shield부분과 인장철선을 Ground용으로 사용 가능하며 신호 양호함

그림 3.1.9는 실내에서 주로 사용하는 co-axial cable을 사용하여 계측한 전단파 신호로 노이즈나 cross-talk가 전혀 없는 상태로 계측된 신호이다. 그러나 케이블의 두께가 너무 얇고 내구성이 좋지 않아 실제 현장에 관입하여 적용하기에는 적합하지 않다.

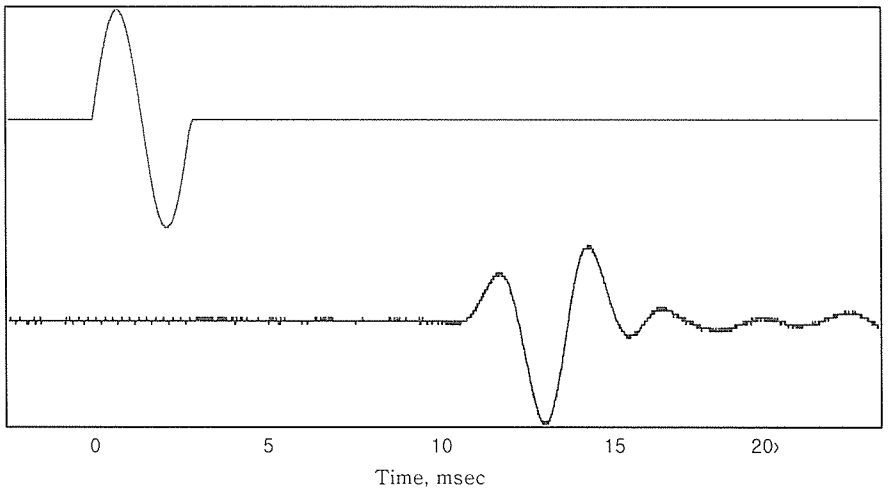


그림 31.9 co-axial cable

그림 3.1.10은 표 3.1.2에서 보는 것과 같이 다른 종류의 케이블을 사용하여 계측한 전단파 신호를 나타낸 것으로써 심한 노이즈와 cross-talk의 발생으로 인하여 전단파의 도달 시점을 확인 할 수 없는 신호를 보여주고 있다.

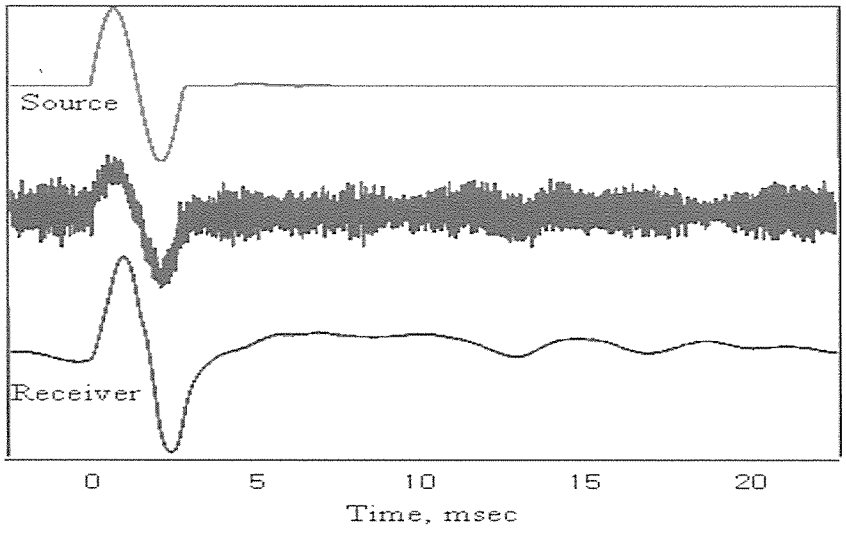


그림 3.1.10 심한 노이즈와 cross-talk 발생

그림 3.1.11은 여러 케이블 중에서 상대적으로 노이즈 발생이 적은 케이블을 사용하여 계측한 것으로서 접지(Ground)를 한 것과 하지 않은 것의 차이를 보여주는 그림이다. 접지를 한 것이 하지 않은 것보다 cross-talk의 발생이 현저히 줄어드

는 것을 볼 수 있다. 또한 현장에서 발전기를 사용하여 전단파 신호 계측 시 전압 등의 불안정으로 심한 노이즈가 발생할 수 있어 접지가 대단히 중요하다.

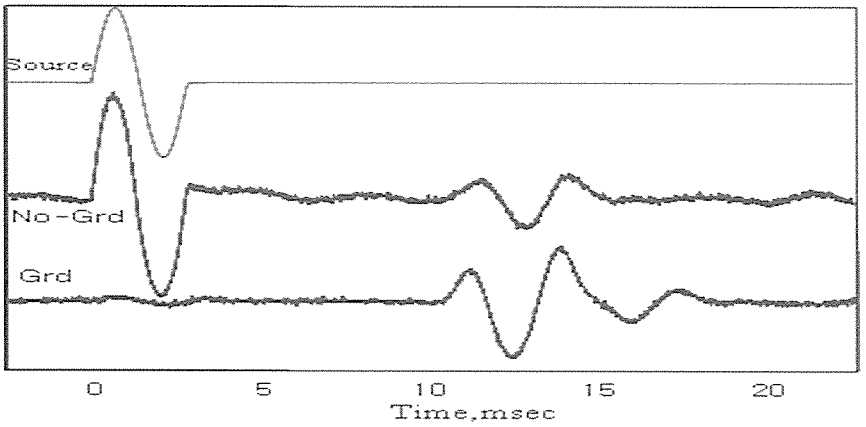


그림 3.1.11 접지(ground)를 한 경우와 하지 않은 경우

아래 그림 3.1.12는 source와 receive 케이블을 각각 분리하여 2개의 케이블을 사용한 것으로 아주 양질의 전단파 신호를 계측할 수 있었으며, 접지를 어떻게 하느냐에 따른 신호 양상을 확인 하고자 하였다.

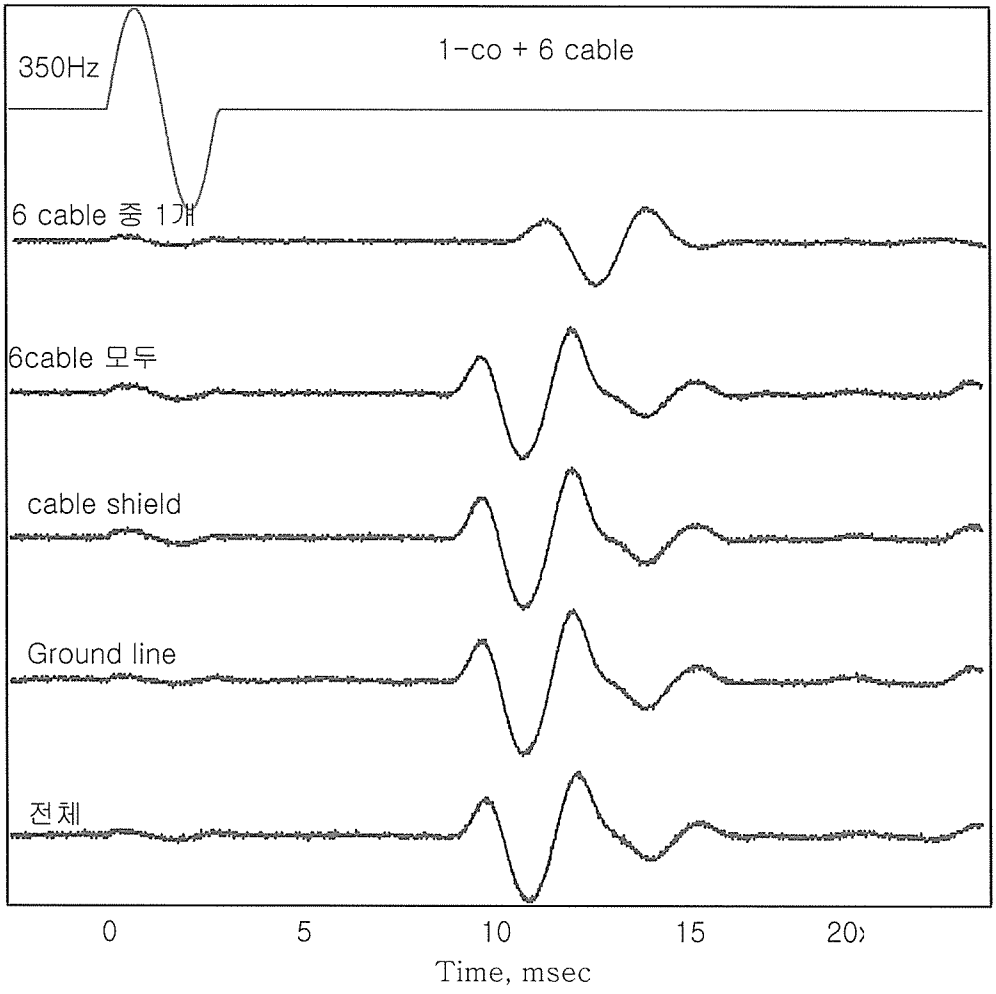


그림 3.1.12 케이블 분리

제2절 매설형 크로스홀 계측

1. 개요

지금까지의 벤더 엘리먼트는 실내에서 삼축 압축시험장비에 장착하여 공시체의 P파나 S파의 측정하는데 사용되어 왔으나, 본 연구에서는 현장시험에 활용하기 위하여 개념 설계된 장치를 실내 토조에서 기본 시험을 수행한 후 연약지반 현장에 직접 설치하여 해당 장치의 검증시험을 수행하였다.

전 단계 연구에서 크로스홀 형 시험을 실내 카올리나이트 토조를 이용하여 양질의 신호를 획득하였기 때문에, 이번 연구에서는 현장에서 적용성을 입증하는 연구를 수행하였다. 현장 검증을 위하여 두 개의 rod에 한쪽은 발진자용 벤더 엘리먼트를 다른 쪽은 수진기를 그림 3.2.1과 같이 약 20cm의 간격으로 설치하여 충남 보령 ○○지역 갯벌현장(그림 3.2.2)에서 관입시험을 수행하였다. 깊이 약 2m까지 인력으로 관입하여 그림 3.2.3과 그림 3.2.4와 같은 각 깊이별 양질의 전단파 신호를 획득할 수 있었다. 그림 3.2.1에서 벤더 엘리먼트의 아래에 위치한 금속판은 벤더 엘리먼트가 관입될 때 손상을 방지하기 위하여 설치한 것으로 벤더 엘리먼트의 두께보다 얇은 판을 사용하였다.

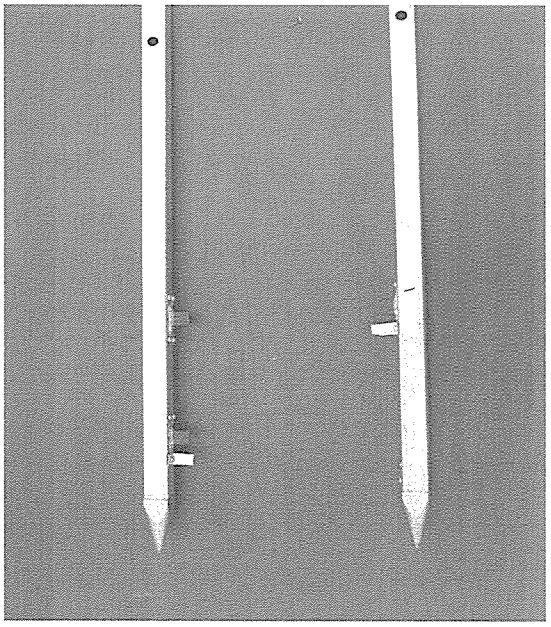


그림 3.2.1 크로스홀 벤더 엘리먼트

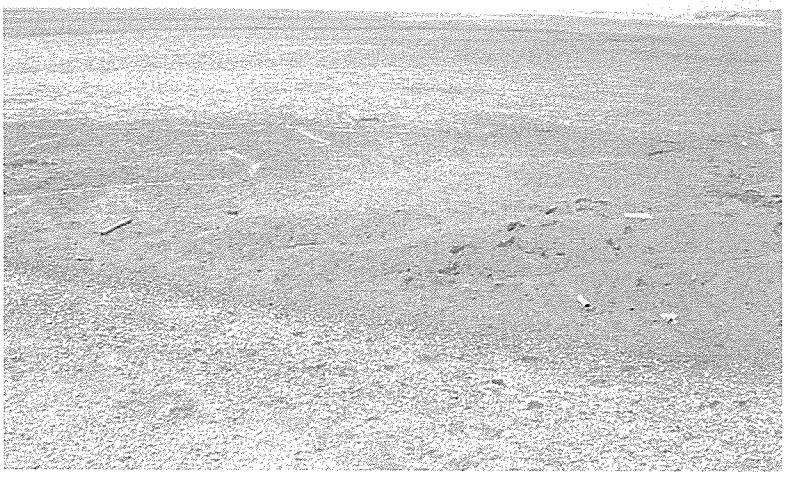


그림 3.2.2 충남 보령 ○○지역 갯벌현장

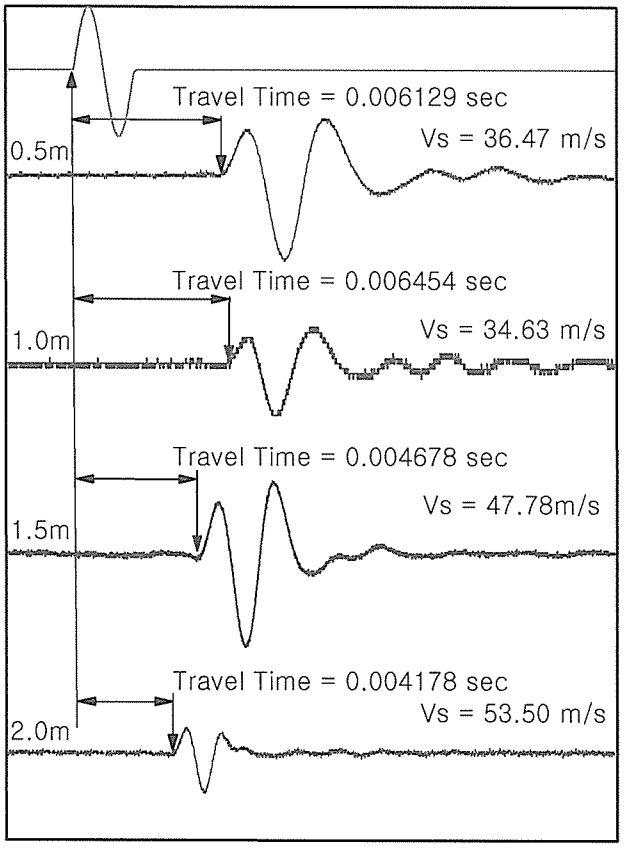


그림 3.2.3 깊이별 전단파 신호

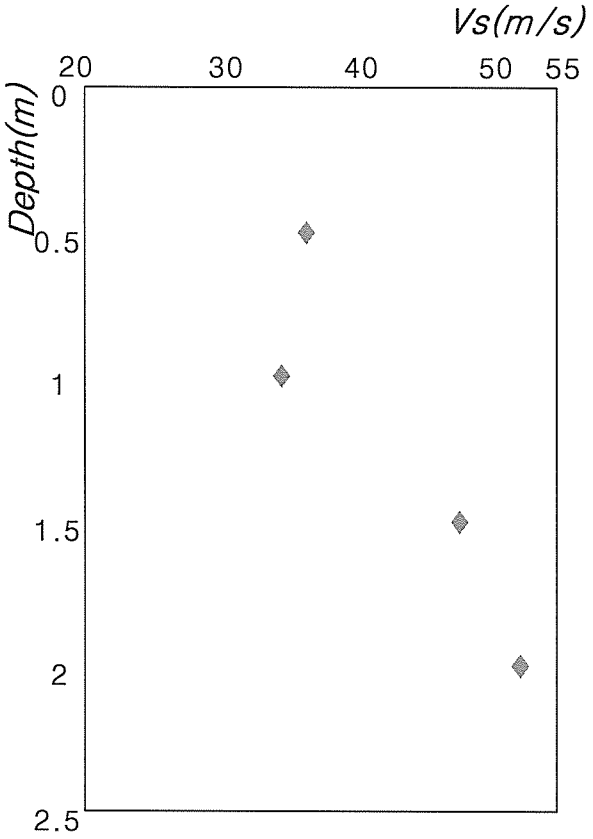


그림 3.2.4 깊이별 속도 주상도

2. 전파거리 환산 기법

크로스홀 시험에서 정확한 전파거리는 매우 중요하다. 전단파의 속도를 전단파의 출발과 도착 시간을 측정하여 거리와의 비율로 산정하는데, 전파거리가 정확하지 않다면 전단파 속도도 마찬가지로 정확하지 않게 된다.

크로스홀 시험의 경우에는 매설하면서 장치가 완전하게 연직으로 설치되지 않거나, 지반의 장기 거동에 의해 변형이 발생하면 벤더의 위치가 서로 달라져 원래의 전파거리에 변화가 발생한다. 현실적으로 고가의 센서를 이용하는 방법은 경제적이지 못하기 때문에 이번 연구에서는 기하학적인 배치를 통하여 전단파 도달 시간파를 이용하여 정확한 전파거리를 환산하는 방법을 제안하였다.

그림 3.2.5에서 보는 바와 같이 수진기의 벤더 엘리먼트를 높이 H(약 10cm)만큼 아래에 한 개를 더 설치하여 각 수진기에 도달하는 전단파의 시간차를 이용하여 식 (3)과 같이 전단파 속도를 구할 수 있다. 압밀상태가 균질하고 등방성의 매질이라고 가정한다면 수평 및 경사 방향의 전단파 속도가 같아야한다. 따라서 상대적으로 전파 간격이 더 긴 경사 방향의 도달시간이 수평 방향의 도달시간보다 길어야 하므로 수평 방향과 경사 방향은 아래 그림 3.2.6에서 보는 바와 같이 그 도달파의 시간차가 발생하게 되며 식(1), (2), (3)과 같이 전단파 속도를 구할 수 있다.

수평 방향의 전단파 속도는 식 (1)과 같이 수평 방향의 도달시간 t_1을 이용하여 획득하고, 경사 방향의 전단파 속도는 식 (2)와 같이 경사 방향의 도달시간 t_2를 이용하여 획득한다.

$$V_s = \frac{D}{t_1} \tag{1}$$

$$V_s = \frac{\sqrt{D^2 + H^2}}{t_2} \tag{2}$$

또한, 식 (1)과 식 (2)로부터 유도된 식 (3)을 이용하여 전단파 속도를 획득할 수 있다.

$$V_s = \sqrt{\frac{H^2}{t_2^2 - t_1^2}} \tag{3}$$

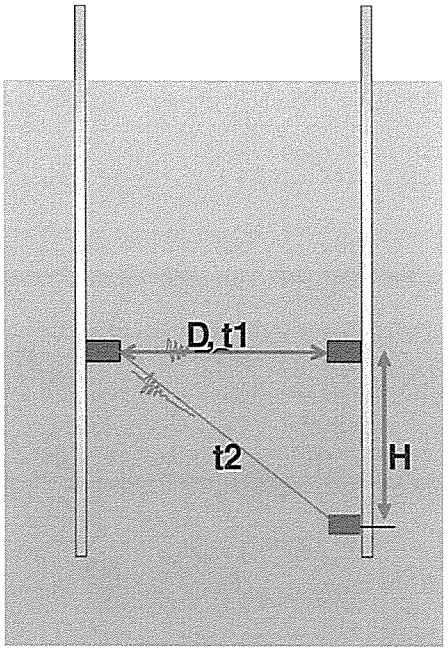


그림 3.2.5 벤더 엘리먼트의 배치

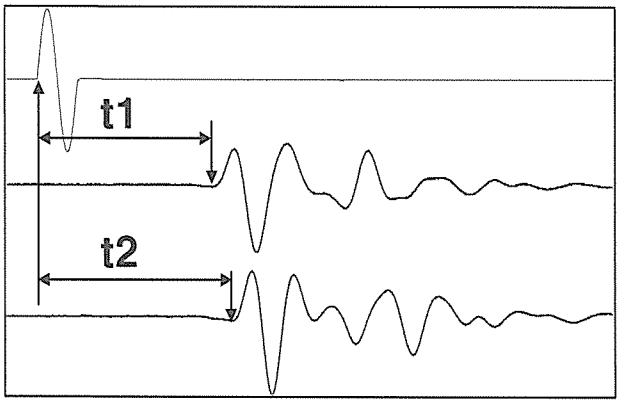


그림 3.2.6 배치에 따른 전단파 도달시간

그러나 실제 현장에 관입하여 여러 번 시험한 결과 수평방향의 도달시간 t_1이 경사방향의 도달시간 t_2보다 오히려 더 늦은 경우가 발생하게 되었다. 실제 지반이 완전히 균질하고 매질의 등방적이라면 위의 수식에 따라 정확한 전파거리 측정이 이론적으로 가능하지만 실제 연직방향의 전파속도와 수평방향의 전파속도가 다르기 때문에 다소 무리가 있는 방법으로 생각된다. 또한 벤더의 진동 방향과 수진 벤더의 배치가 두 쌍이 서로 다르기 때문에 기하학적인 배치에 따른 전파 특성을 고찰하기로 하였다.

위 카올리나이트 토조를 이용한 시험을 통해 검증한 장치를 실제 평택의 ○○지역 갯벌에 관입하여 현장 시험을 수행하였다. 정확한 수평 전파 거리를 모른다고 하고 수평 방향과 경사 방향의 전단파를 그림 3.2.9와 같이 측정하여 각 깊이별 전단파 속도를 구할 수 있었다.

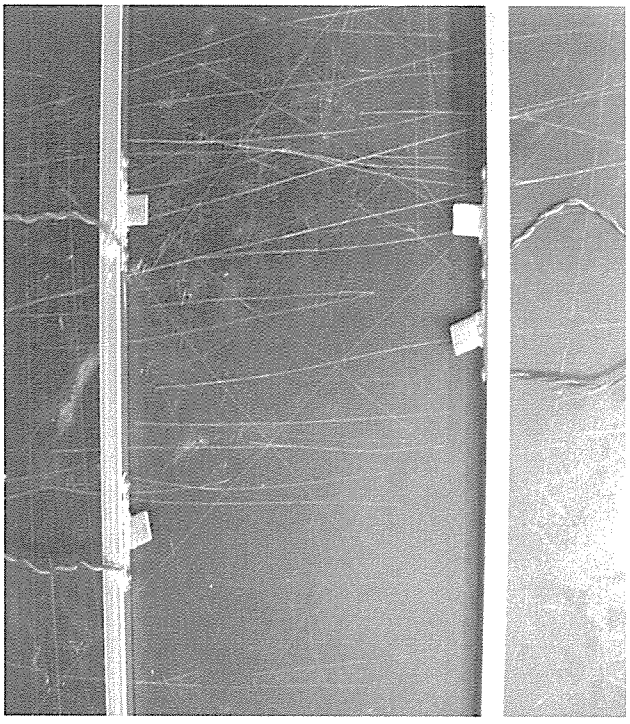


그림 3.2.7 벤더 엘리먼트 배치



그림 3.2.8 벤더 현장검증시험

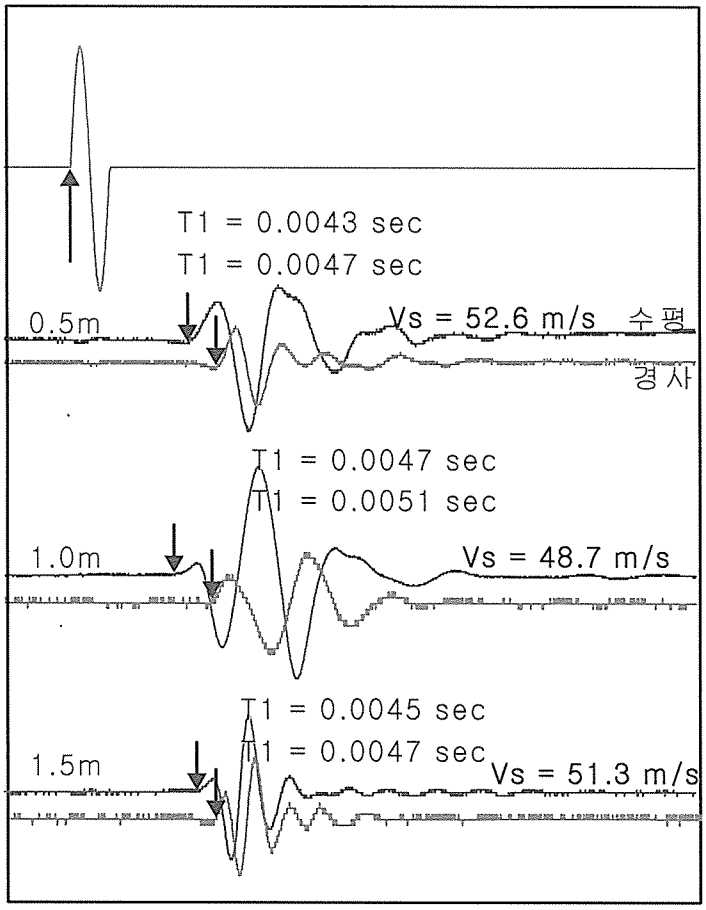


그림 3.2.9 깊이별 전단파 신호

3. 벤더의 기하학적 배치에 따른 특성

그림 3.2.10은 발진기와 수진기의 기하학적 배치를 이용한 것으로 실내 카올리나이트 토조에서 각도를 30°, 45°, 60°로 변화를 주어 각각 측정한 전단파 신호이다. 실제로 수평거리와 경사거리를 정확히 재어 카올리나이트 토조에 관입하여 시험한 것으로 수평 방향과 경사 방향은 각각 24.9 m/s와 25.7 m/s의 속도를 나타내었으며, 위 식 (3)을 이용하여 실제 수평 방향과 경사 방향의 전파 거리를 모른다고 가정하고 두 도달파의 시간차로 계산한 값이 26.2 m/s로 아주 근사한 값을 보여주고 있다. 그러나 그림 3.2.11에서 보는 바와 같이 경사각도 45°와 60°는 전단파가 매질을 통해 수진기로 도달하는 시간보다 수평거리의 rod에 먼저 도달하여 그 진동이 수진기 벤더 엘리먼트에 먼저 전달되고, 이후에 경사 방향으로 전단파가 수진기에 전달하고 있음을 알 수 있다. 따라서 45°와 60°의 경사각은 정확한 도달 시점을 확인 할 수 없으므로 벤더 엘리먼트를 배치할 때 45°이상의 과도한 경사는 피해야 할 것으로 보인다.

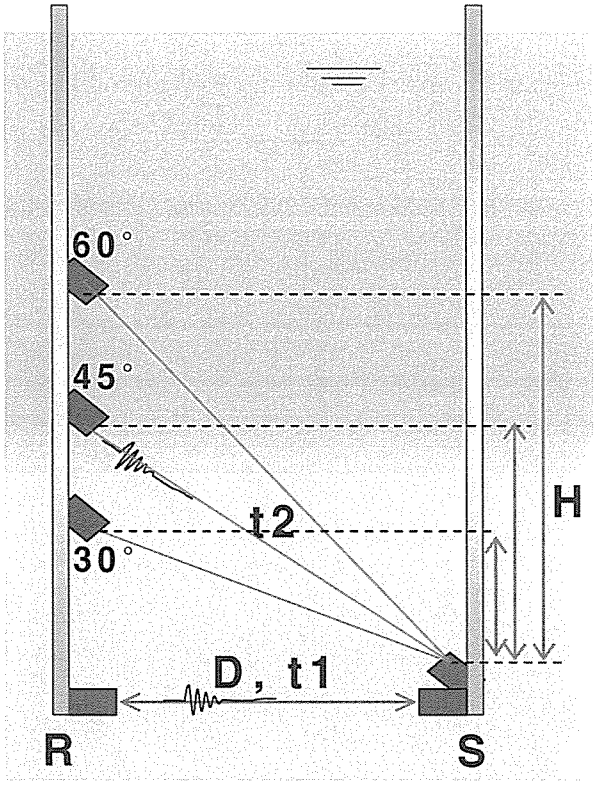


그림 3.2.10 벤더 엘리먼트의 각도별 배치

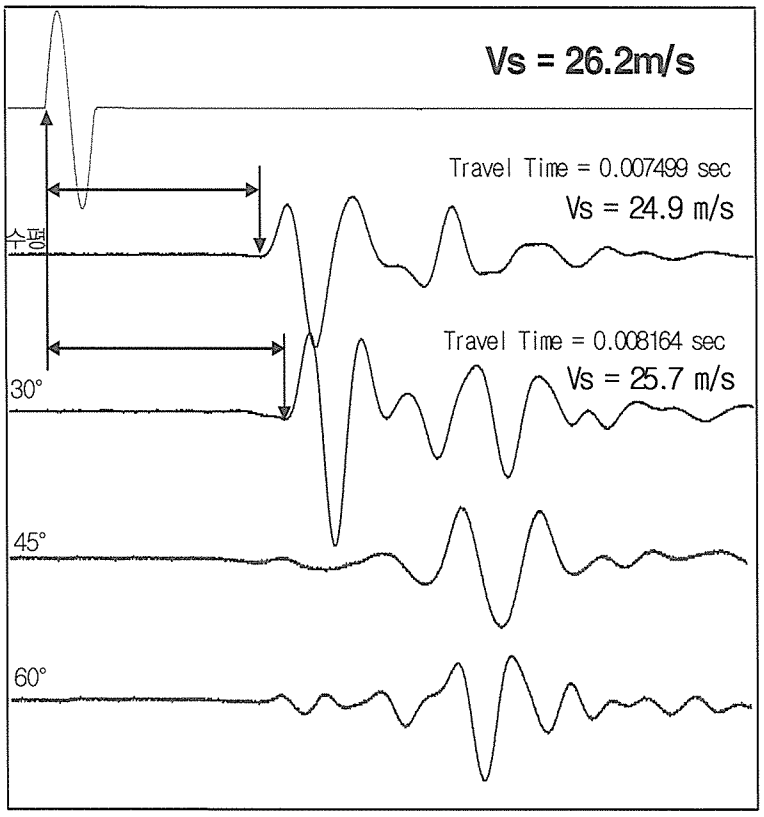


그림 3.2.11 벤더 설치 각도에 따른 전단파 속도

4. 관입장치를 이용한 시험

가. 맨드럴 Type-1

벤더 엘리먼트를 실제 연약지반 계측에 적용할 경우 깊이 수 십 미터까지의 계측을 요구하게 됨에 따라 기계적인 힘을 이용한 관입 장치의 개발이 반드시 수반되어야 한다. 그리고 갯벌과 같이 입자가 고운 지반이 아닌 곳에 관입할 때 벤더 엘리먼트가 손상될 가능성이 있다. 그러나 이는 벤더 엘리먼트가 설치된 봉에 이를 보호할 수 있는 외관(mandrel)을 함께 지정 심도까지 관입한 후 다시 외관을 인발하여 벤더 엘리먼트가 보호될 수 있게 하여 해결할 수 있고, 이에 대한 장치 개발의 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

아래 그림 3.2.12는 스테인레스 스틸 파이프(ID 38mm Mandrel)를 이용하여 벤더 엘리먼트를 보호하기 위한 장치의 모식도와 실제 제작된 모습이다. 그림 3.2.14는 실제 현장에 관입한 모습이며, 외관의 인발 직후 빈 공간이 보이는 것을 볼 수 있다. 실제로 이러한 공간으로 인하여 지반과 벤더 엘리먼트 사이가 밀실하게 접촉하지 못하여 정확한 전단파 계측이 이루어지지 못하였다.

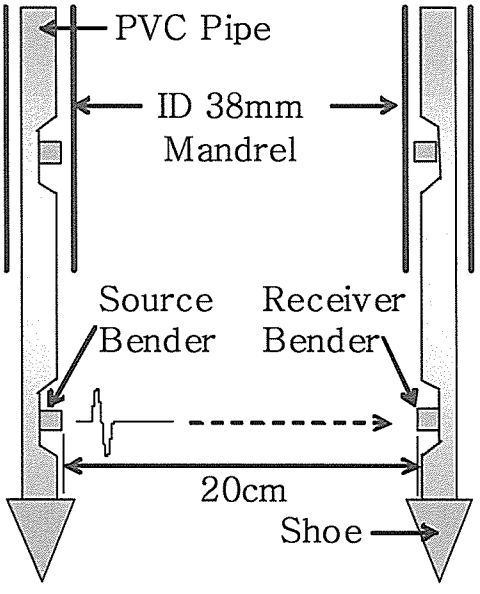


그림 3.2.12 매설형 크로스홀 형
맨드럴 Type-1의 모식도

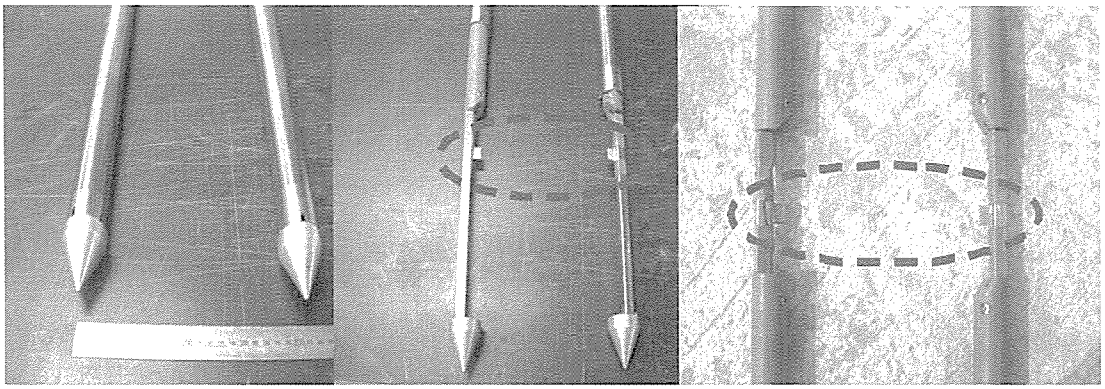


그림 3.2.13 제작된 벤더 엘리먼트 시험기



그림 3.2.14 관입 전후 장면

나. 맨드럴 Type-2

맨드럴 Type-1에서 벤더 엘리먼트와 지반의 접촉이 불량하여 전단파 획득에 실패한 이유는 벤더가 설치된 로드에서 벤더와 로드가 가까웠기 때문에 그 부분이 시간이 지나도 메워지지 않았기 때문이다. 따라서 이러한 점을 개선하기 위하여 그림 3.2.15와 같이 벤더 엘리먼트 측면이 완전하게 노출되도록 맨드럴을 제작하였다.

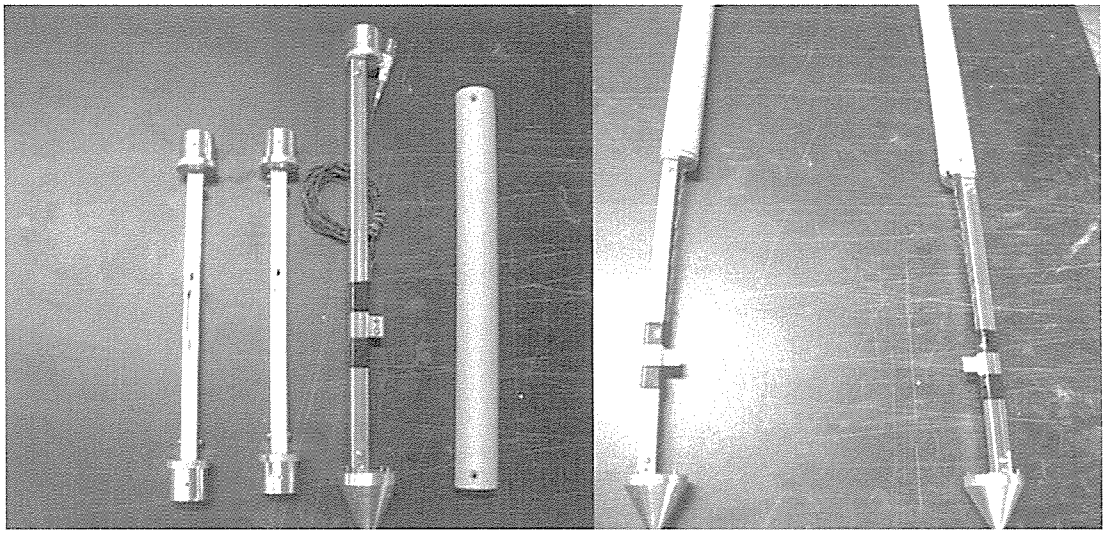


그림 3.2.15 맨드럴 Type-2

지반에 관입하여 외관을 인발한 후 벤더 엘리먼트와 지반이 원활한 접촉이 이루어지는지를 확인하기 위하여 아무런 장치 없이 관입과 동시에 지반과 충분히 잘 접촉 할 수 있는 장치를 동시에 같은 깊이로 설치를 하여 전단파 속도 변화를 비교하였다. 아래 그림 3.2.16은 간격을 넓게 하여 제작한 장비와 카올리나이트 토조에 삽입한 모습을 보여주고 있다.

그림 3.2.17은 그림 3.2.16에서 이중관을 이용한 장치의 시간 경과별 전단파 속도 변화를 나타낸 것이다. 그림 3.2.18에서 두 장치에 대한 삽입 후 1일, 3일, 10일, 15일, 20일의 5번에 걸쳐 전단파 속도 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 관입 후 3일 이내에 큰 속도 변화를 보이며, 그 이후로는 서서히 변화하는 것을 볼 수 있으며, 이중관을 사용하여 관입한 장치가 인발 한 후 공간이 발

생함에도 불구하고 관입시 카올리나이트의 압축 등으로 인해 초기 속도가 더 크게 나오는 것을 볼 수 있으며, 두 경우 모두 비슷한 전단파 속도를 보이고 있다. 이는 벤더 엘리먼트가 지반과의 밀실한 접촉만 이루어진다면 벤더 엘리먼트를 보호할 목적으로 사용하는 맨드럴을 사용하여 관입하여도 충분한 전단파 속도를 구 할 수 있을 것이다.



그림 3.2.16 검증시험

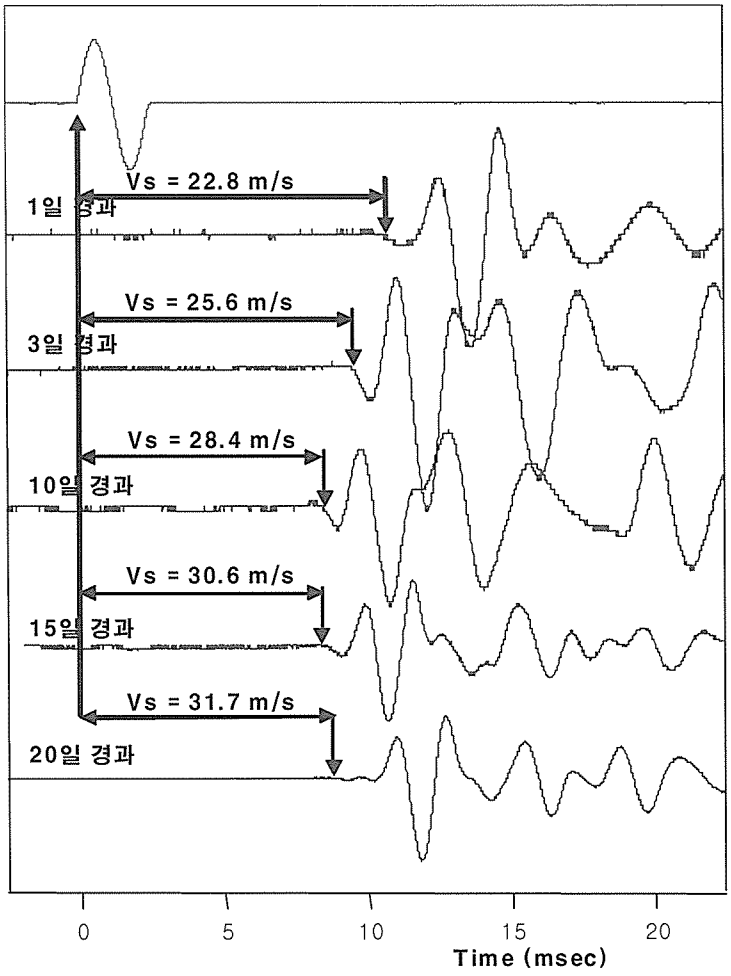


그림 3.2.17 관입 후 시간별 전단파 속도(맨드릴 Type-2)

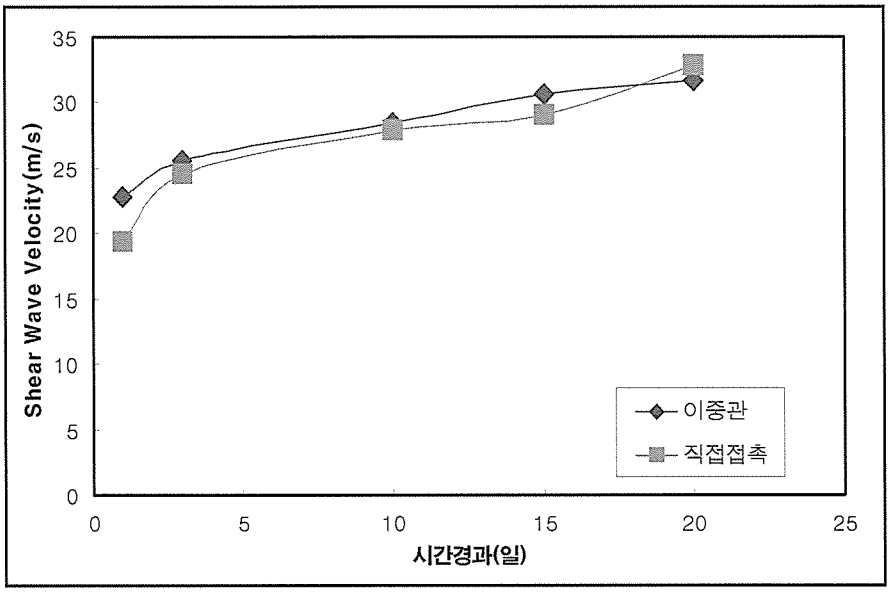


그림 3.2.18 관입 후 시간 경과별 전단파 속도 변화

맨드럴 Type-2 시험 장치를 실제 현장에서 깊이 2m가량 관입하여 전단파를 측정할 수 있도록 준비한 다음 관입을 하였다. 아래 그림 3.2.20은 관입 후 맨드럴을 인발한 직후의 모습으로, 벤더 엘리먼트와 지반이 직접적으로 밀착이 되지 않고 있는 모습을 볼 수 가 있다. 이는 실험실 시험과 비슷하지만, 장기적으로 틈새가 메워지는 지 검토해 볼 필요가 있다. 만약 지반의 종류에 따라 틈새가 메워지는 정도가 다르다면 최종적으로 적용하기 어려운 형태로 판단된다.

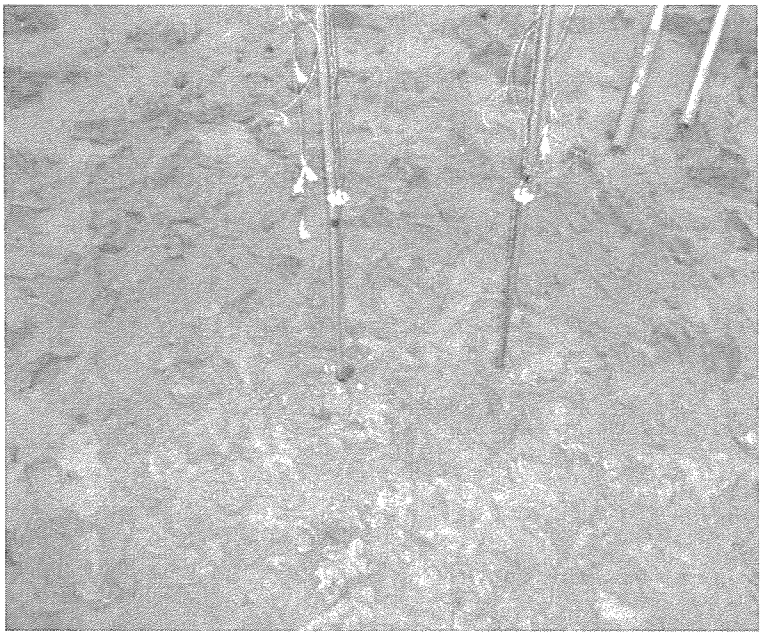


그림 3.2.19 Type-2의 현장 시험 장면



그림 3.2.20 Type-2의 파이프 제거 후

다. 맨드럴 Type-3

전술한 바와 같이 벤더 엘리먼트와 지반이 완전하게 결합하지 않을 수 있기 때문에 다음 그림 3.2.21과 같은 장치를 고안하게 되었다. 맨드럴이 시험 깊이까지 같이 관입된 후 외관만 인발하면, 그림처럼 벤더가 회전하여(swing arm으로 명칭) 지반과 완전히 결합하는 형태로 고안하였다. 그림 3.2.22와 그림 3.2.23과 같이 스테인레스 스틸 파이프(ID 38mm Mandrel)를 이용하여 목표 심도까지 관입한 후 외관은 인발히고 강선으로 연결된 swing arm을 회전시켜 설치된 벤더 엘리먼트가 직각이 되도록 하였다. 이는 벤더 엘리먼트가 맨드럴의 외경보다 밖에 위치하게 되어 지반과의 확실한 밀착이 이루어지게 되어 그림 3.2.24와 같이 아주 양질의 깊이별 전단파 신호를 획득 할 수 있었다.

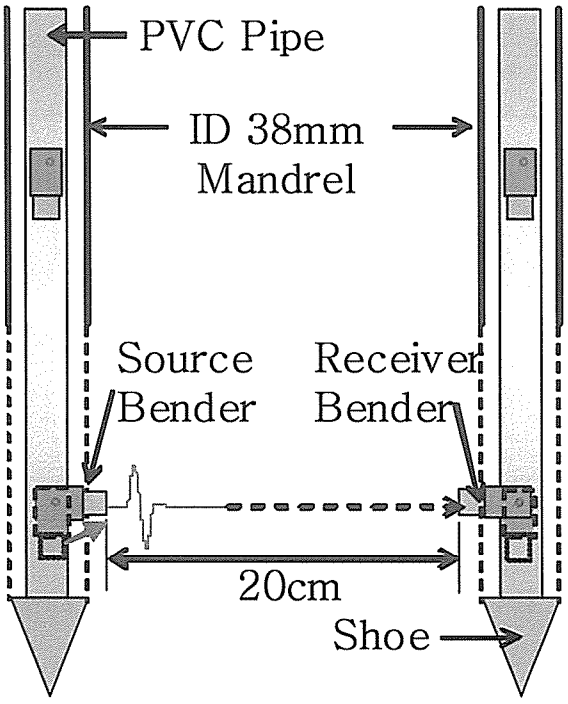


그림 3.2.21 맨드럴 Type-3 모식도

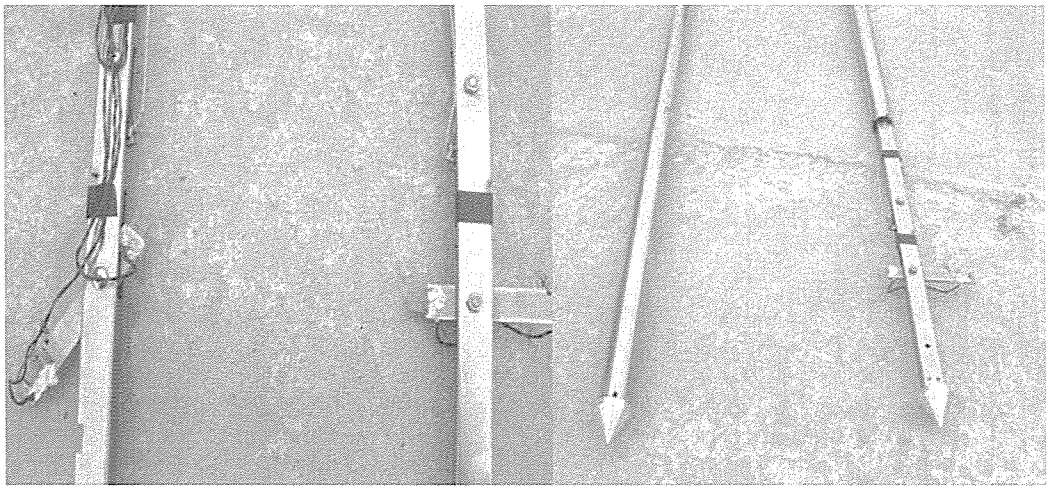


그림 3.2.22 현장 적용용 맨드럴 Type-3

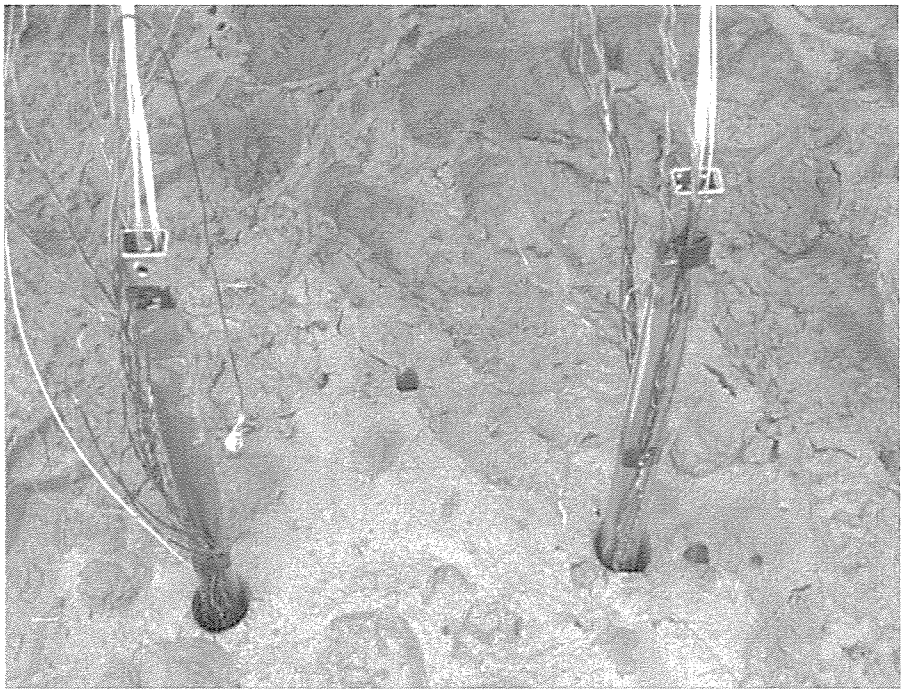


그림 3.2.23 현장 적용시험

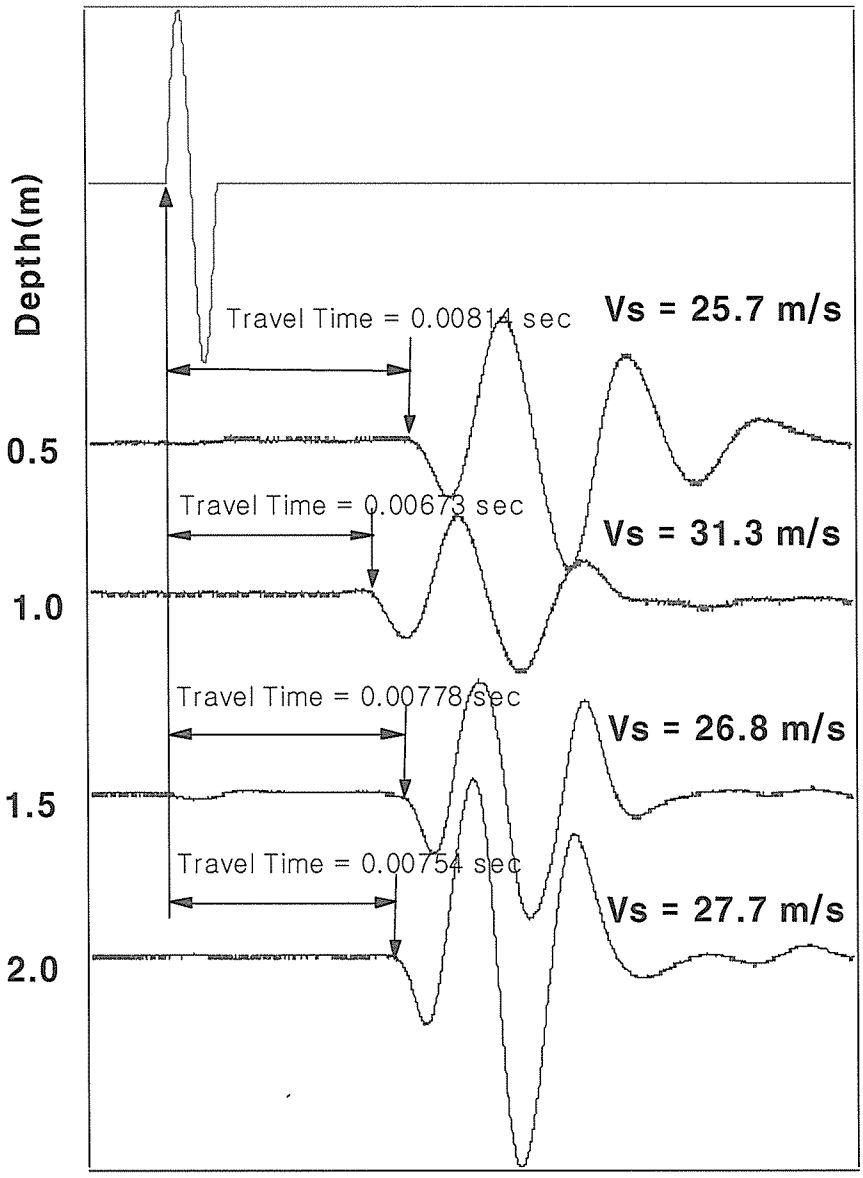


그림 3.2.24 현장 계측 전단파 신호(Type-3)

5. 전단파 계측 시스템

그림 3.2.25의 벤더 엘리먼트 센서를 연약 지반에 관입하여 전단파 신호를 계측하고자 한다. source와 receiver 벤더 엘리먼트를 한 개의 몸체에 설치하여 연약지반의 목표 심도까지 관입 장치를 이용하여 관입 후 지속적인 계측을 실시하게 된다. 아래 그림은 벤더 엘리먼트가 설치된 센서의 개략적인 모식도를 나타낸 것으로 한 개의 몸체에 source와 receiver를 약 10cm 간격으로 동시에 설치한 모습니다.

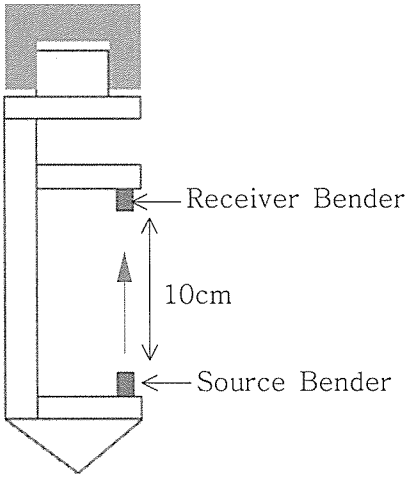
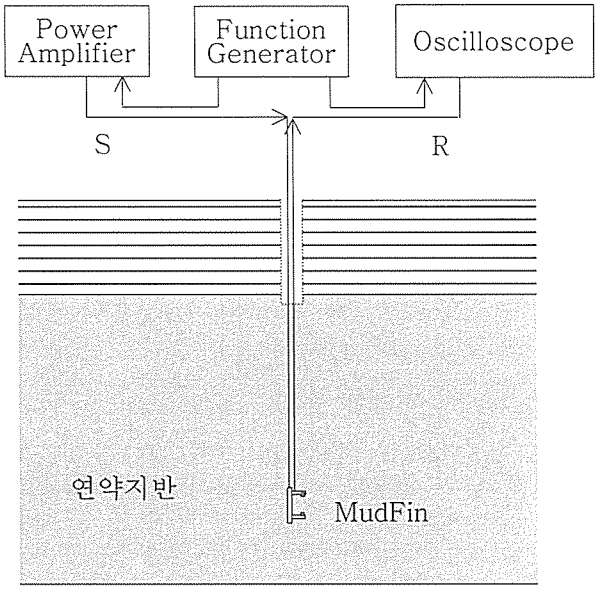


그림 3.2.25 벤더 엘리먼트 센서 모식도

그림 3.2.26의 시험 과정 모식도에서 보는 바와 같이 센서를 목표 심도까지 관입 후 신호발생기(Function generator)로 발생한 전기적 신호(약 10V)를 전압증폭기(Power Amplifier)로 최대 200배(약 200V)까지 증폭하여 벤더 엘리먼트를 가동하여 진동을 발생한다. 이때 신호발생기(Function generator)로부터 1mHz ~ 19.9MHz의 주파수를 조절하여 벤더 엘리먼트와 매질의 공진 주파수에서 측정을 하게 된다. 본 실험에서는 30 ~ 50V, 200 ~ 2500Hz의 정현파를 벤더 엘리먼트의 발진원으로 사용하였다. 또한 그림 3.2.26의 아래에서 보는 바와 같이 한 위치의 site에서 여러 깊이에 센서를 설치하여 깊이별 전단파 속도를 측정 할 수 있다.



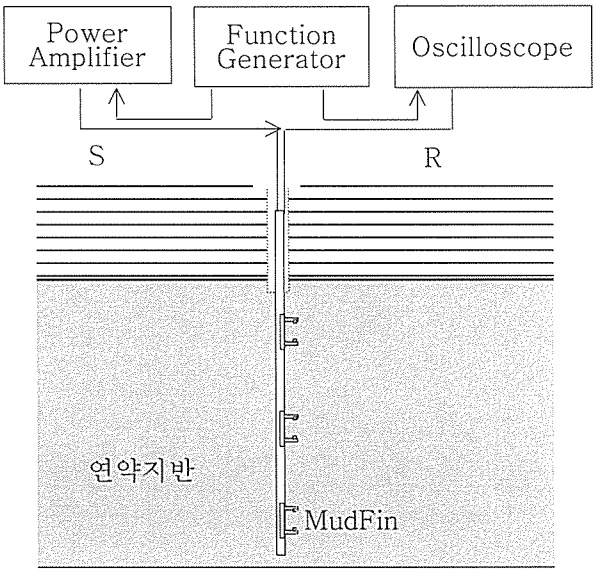


그림 3.2.26 현장 시험 개요도

6. 센서 최적화

여러 번의 시행착오를 거친 후 한 개의 rod에 source와 receiver 벤더 엘리먼트를 방향성을 고려하여 그림 3.2.27과 같이 배치하였으며, 실내 시험을 통하여 그림 9와 같은 전단파 신호를 측정 할 수 있었다. 그림 3.2.28에서 보는 봐와 같이 receiver의 신호가 source의 영향을 받지만 지반을 통해 수신되는 전단파의 신호와 확실히 구별이 되어 신호 분석이 가능하게 되어 한 개의 rod를 이용한 인홀 방식의 벤더 엘리먼트 신호 측정을 현장에 적용할 수 있는 기반을 마련하였다.

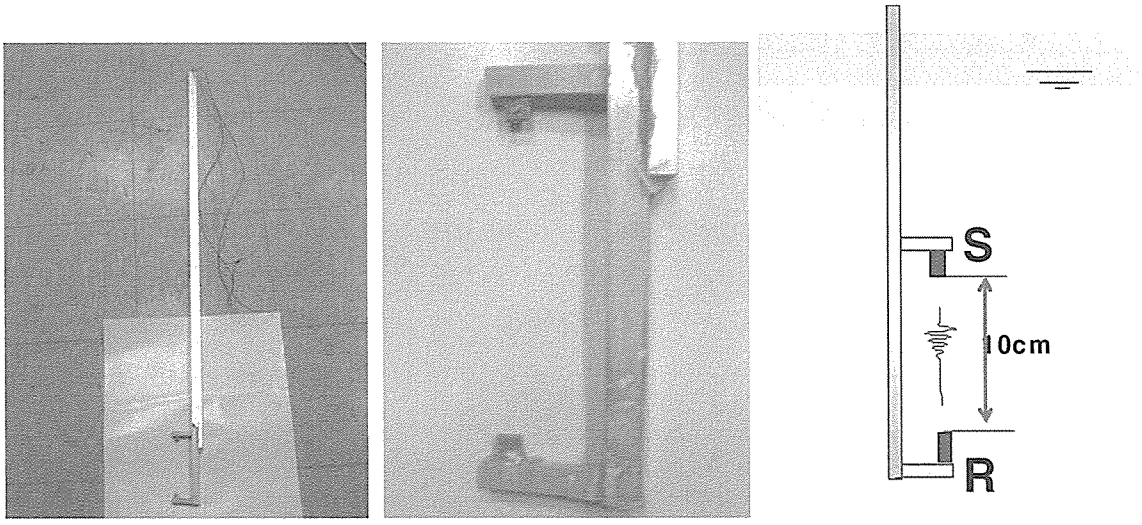


그림 3.2.27 기본적인 장치 개념도

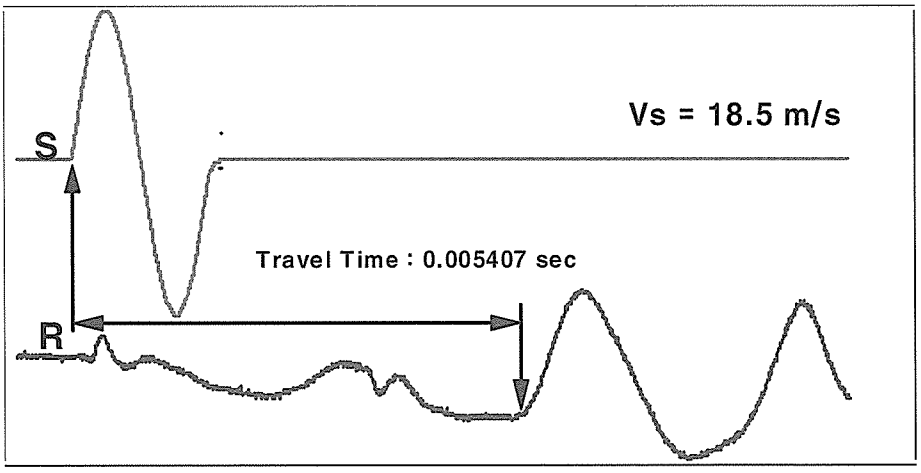


그림 3.2.28 계측된 전단파 신호

시험된 내용을 토대로 좀 더 구체적이고 최적화할 수 있는 모형을 만들기 위하여 그림 3.2.29와 같이 여러 가지 변화 인자를 둔 장비를 제작하여 실내 시험을 통한 전단파 신호를 측정하고자 하였다. 기본적으로 한 개의 rod에 source와 receiver 벤더 엘리먼트를 판상형의 arm에 설치를 하였다. arm이 설치된 몸체의 단면은 두께를 10mm로 고정하고 폭(B)을 30~50mm로 변화를 주었고, 벤더 엘리먼트가 설치된 arm은 5mm두께의 판상형에 길이(L)와 폭(W)을 바꾸어서 장비를 제작하였다. 벤더 엘리먼트 사이의 거리는 100mm로 고정시켰다. 그리고 벤더 엘리먼트가 설치된 몸체의 단면을 "T" 모양의 앵글을 사용하기도 하였다. 표 3.2.1은 9가지 경우의 단면의 크기를 나타낸 것이다.

표 3.2.1 단면의 크기(단위는 mm)

구 분 (CASE)	몸 체 (B * 10)	ARM(외팔보)		비 고
		폭(W)	길이(L)	
1	30 * 10	20	50	
2	30 * 10	20	70	
3	30 * 10	40	50	
4	30 * 10	40	70	
5	30 * 10	40	100	
6	50 * 10	30	50	
7	50 * 10	60	50	
8	50 * 10	60	70	
9	30*30(t=5)	40	50	T 앵글

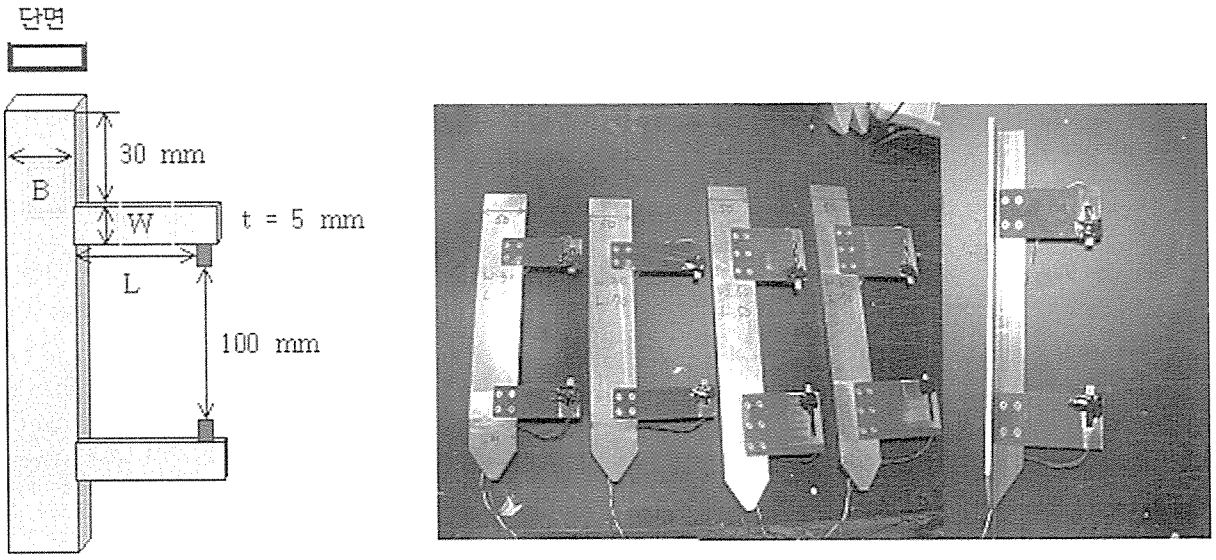


그림 3.2.29 변화 인자를 둔 arm 형태의 벤더 엘리먼트 배치와 제작된 센서

표 3.2.1의 구성으로 실내 카올리나이트 토조를 이용한 시험을 통해 그림 3.2.30과 같은 각 경우별 전단파 속도를 계측할 수 있었다.

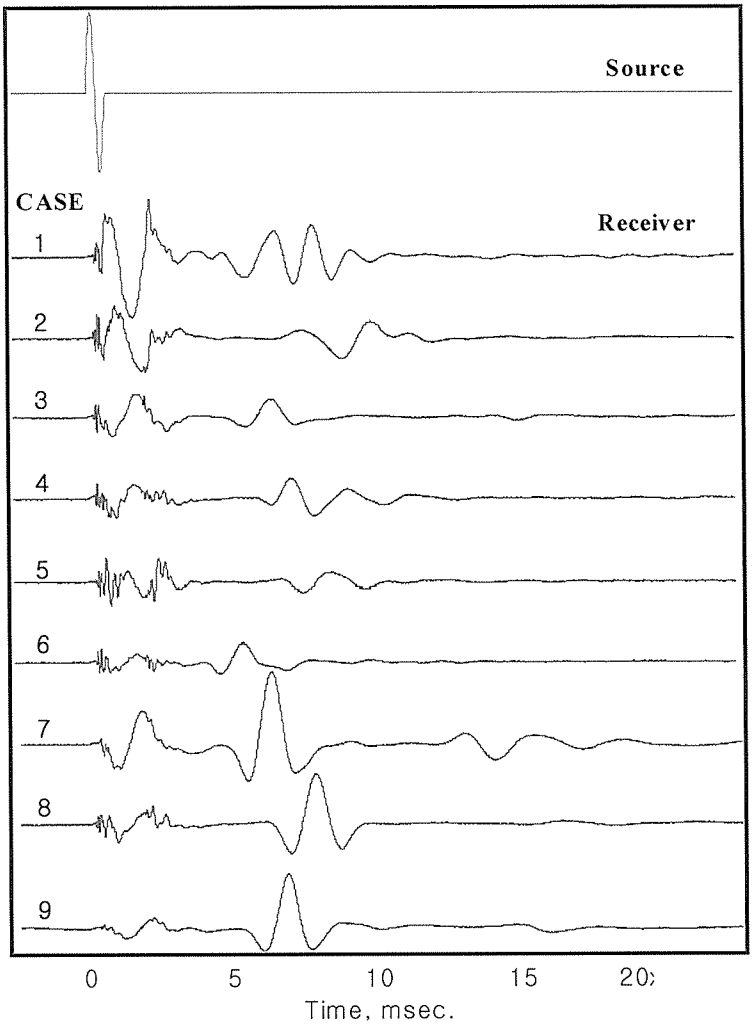


그림 3.2.30 실내 시험을 통한 각 단면별 전단파 신호

그림 3.2.31은 표 3.2.1에서의 각기 단면을 달리하여 시험한 전단파 신호 측정으로 모든 경우에서 벤더 엘리먼트에서 발생된 전단파가 몸체를 타고 들어오는 모습을 보이고 있다. 그러나 1~7의 경우는 매질을 통해 전달되는 전단파 신호가 감지가 되나 아주 연약한 매질에서나 확인 가능하며, 좀 더 강성이 큰 매질이나 삽입 후 지속적인 강성 증가를 확인 할 경우 몸체를 타고 들어오는 신호와 중첩이 되어 그 도달 시점을 확인하기가 쉽지가 않을 것으로 생각된다. 그러나 8과 9(case)의 경우는 상대적으로 몸체를 타고 들어오는 신호가 작아서 매질의 전단파 속도를 측정하는데 적합하다. 위 시험을 통하여 "T"형의 앵글을 이용한 장치가 매설형 센서로 적당할 것으로 판단된다.

7. 노이즈 제거

① Platy Arm(판상형)

그림 3.2.31은 한 개의 Rod에 Source와 Receiver Bender elements를 배치하여 벤더 엘리먼가 설치되어 있는 arm의 형상에 따라 전단파가 어떻게 계측이 되는가를 알아보기 위한 실험으로 외팔보의 형태를 정사각형 모양과 직사각형의 판상형으로 제작을 하여 전단파 계측을 실시하였다. 그림 3.2.32에서 보는 바와 같이 정사각형의 arm에서는 rod를 통해 전달되는 진동이 너무 커서 지반을 타고 전달되는 신호가 상대적으로 작게 나타나 정확한 전단파 신호의 도달시점을 찾기가 곤란하며, 이에 반해 판상형 모양의 장비에서는 매우 양호한 전단파 신호를 측정할 수 있다. 이는 판상형이 주변 흙과의 접촉이 좋아 벤더 엘리먼트에서 발생하는 진동이 주변 흙으로 많이 전파되어 더 양호한 전단파 신호를 계측할 수 있다.

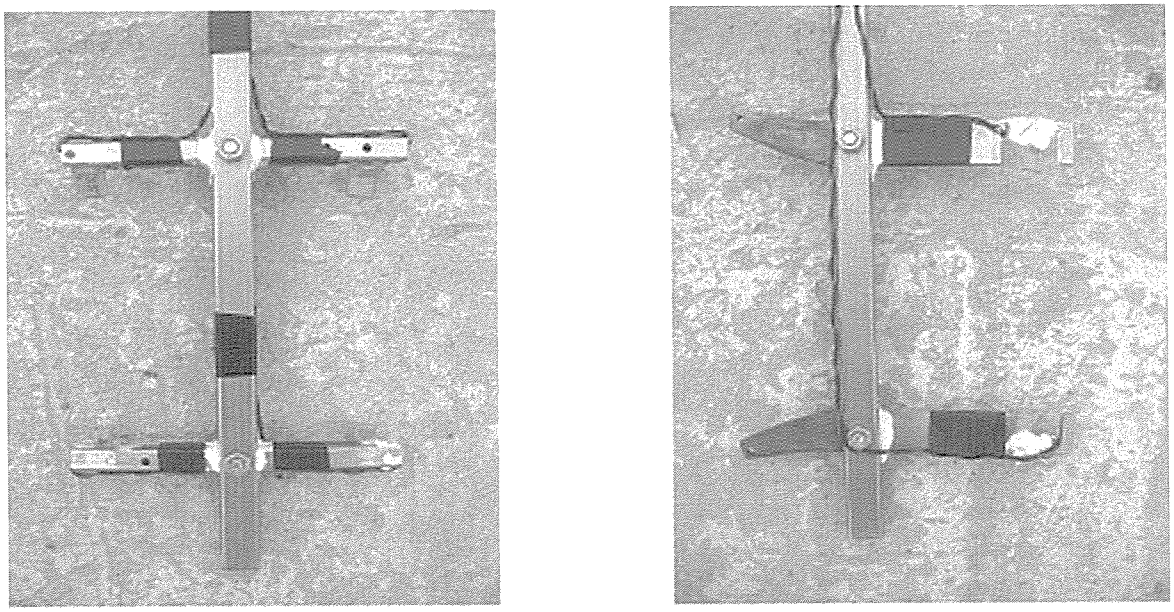


그림 3.2.31 Arm의 형상에 따른 장비(좌-정사각형, 우-판상형)

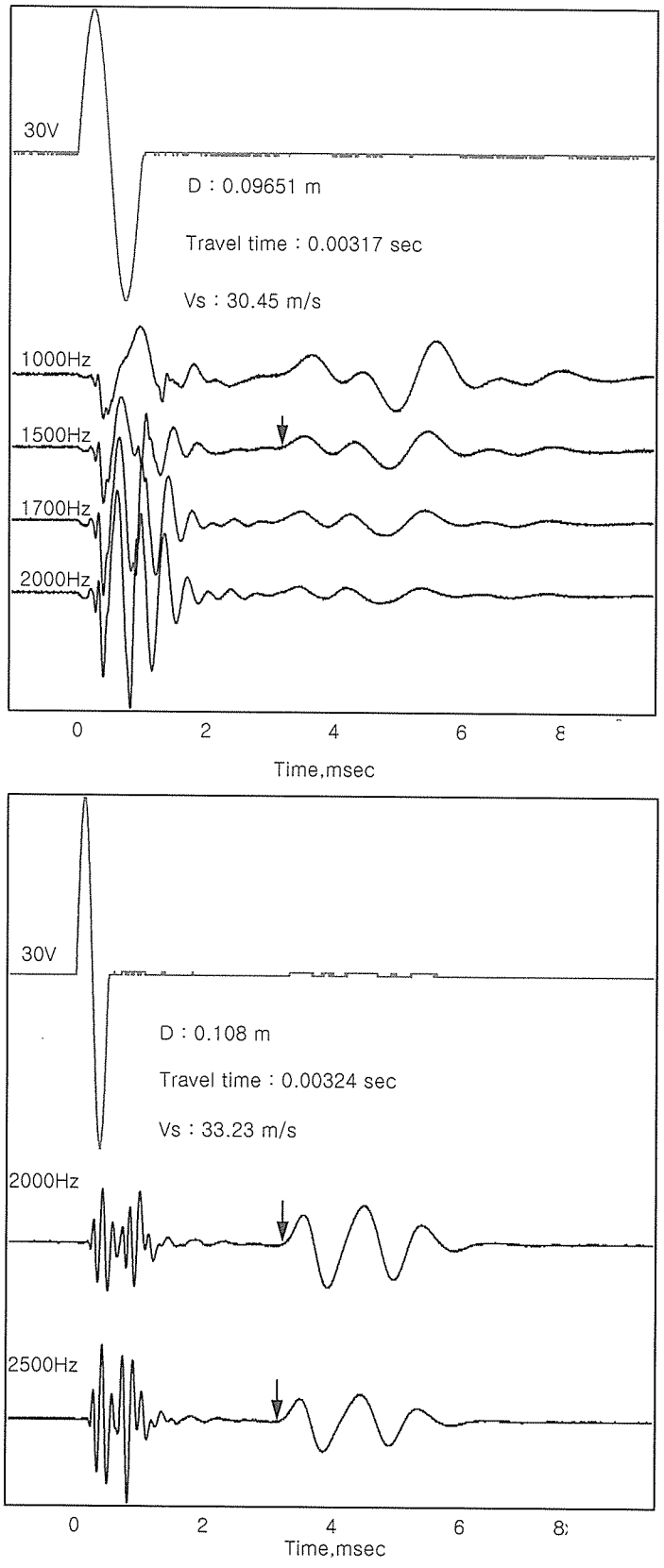


그림 3.2.32 Arm의 형상에 따른 전단파 신호(좌-정사각형, 우-판상형)

② Hinge Connection

그림 3.2.33은 벤더 엘리먼트가 설치된 arm이 몸체와 완전히 고정이 되어 있을 경우와 벤더 엘리먼트 사이의 거리의 변화를 주지 않는 범위에서 몸체와 arm의 연결부를 한 개의 볼트를 사용하여 약간의 움직임이 있도록 유격을 준 억제된 힌지로 연결하여 측정한 전단파 신호로, 완전히 고정이 되어 있는 경우보다 힌지로 연결한 경우가 몸체를 타고 들어오는 신호가 현격히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 몸체와 arm 사이의 힌지 연결에 의한 유격으로 생긴 틈이 몸체를 타고 들어가는 전단파를 줄여주는 역할을 하는 것으로 보인다. 따라서 센서를 삽입할 때 문제가 되지 않는 범위 내에서 몸체와 arm사이의 연결부에 한 개의 볼트를 사용한 힌지 연결은 좀 더 나은 전단파 신호를 계측할 수 있는 좋은 방법이 될 수 있다.

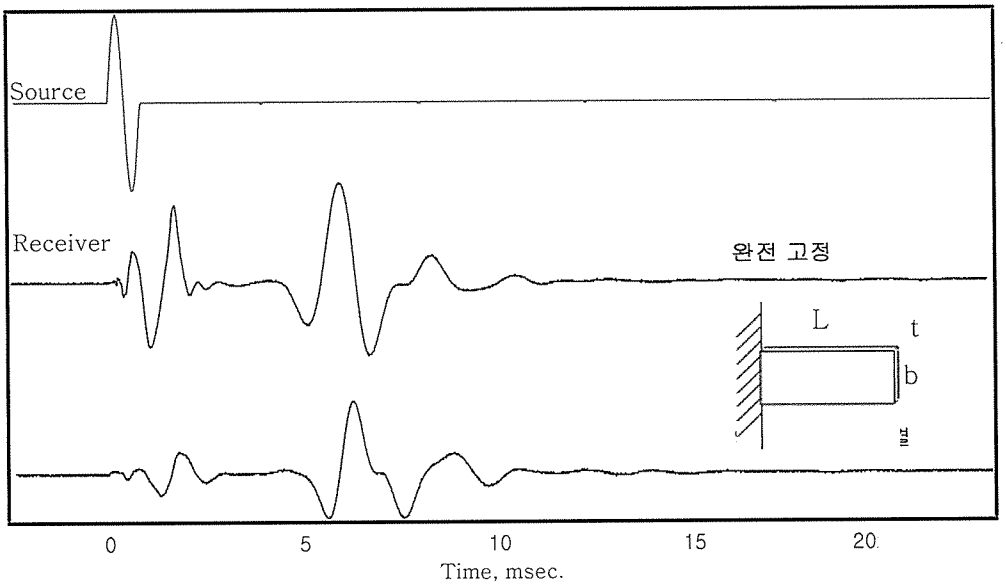


그림 3.2.33 Arm을 억제된 힌지로 연결했을 때와의 전단파 신호 비교

③ Resonant Fins

Source에서 발생된 진동이 몸체를 타고 Receiver에 도달하는 에너지를 줄이기 위하여 벤더 엘리먼트가 설치된 arm에 공진이 일어나게 외팔보 형식의 damper를

설치하여 에너지를 분산시키고자 하였다. 일반적인 지반에서 약 1000Hz에서 가장 좋은 전단파 신호가 계측된다고 할 때 1000Hz에서 공진이 일어날 수 있도록 그림 15와 같이 arm에 damper 역할을 할 수 있는 핀을 부착하였다. 부착된 핀은 1000Hz에서 공진이 일어날 수 있도록 아래 식으로 단면(t = 0.25mm, L = 14mm, b = 5mm)을 결정하였다.

$$L = \sqrt[4]{\frac{140EI}{11m(2\pi f)^2}}$$

여기서, m = mass density per unit length($m = \frac{L \times b \times t \times \gamma}{g}$, L=1)

f = frequency(1000Hz)

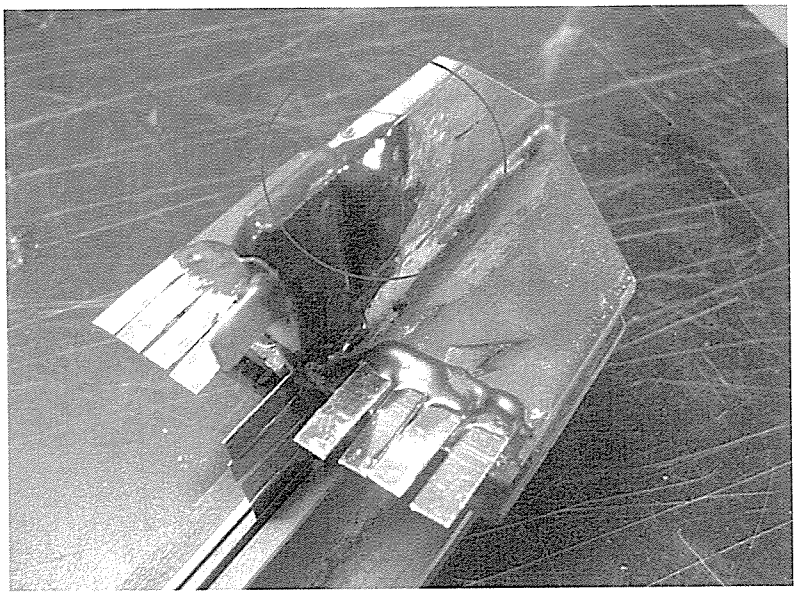


그림 3.2.34 Damper가 설치된 arm

8. 매설형 센서의 개발 및 현장 관입 시험

1) MudFin

지금까지 센서의 최적화를 위한 여러 가지 실험을 통하여 아래 그림 3.2.35과 같이 T형의 앵글을 이용한 plate arm형의 장치를 제작하였으며 이를 "MudFin"으로 명명하였다. 벤더 엘리먼트가 설치된 plate(판상)형 arm의 크기는 50×30×5mm(가로×세로×두께)이다. 또한 source와 receiver 벤더 엘리먼트 사이의 거리는 10cm이다.

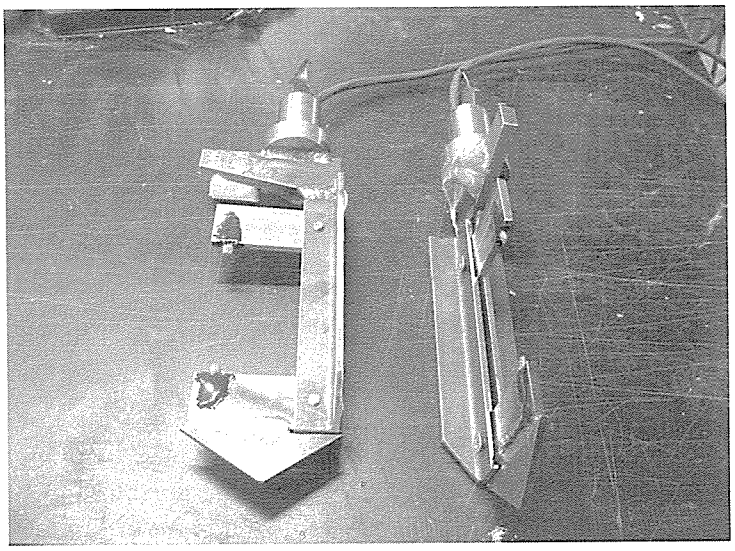


그림 3.2.35 현장 매설형 센서-MudFin

그림 3.2.36은 실내 카올리나이트 토조에서 MudFin을 설치후 Frequency별로 전단파 속도를 계측한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 low freq. 에서는 나타나지 않으나 high freq. 에서는 source에서 발생된 진동이 몸체를 타고 receiver로 전달되는 노이즈가 발생하는 것을 볼 수 있다.

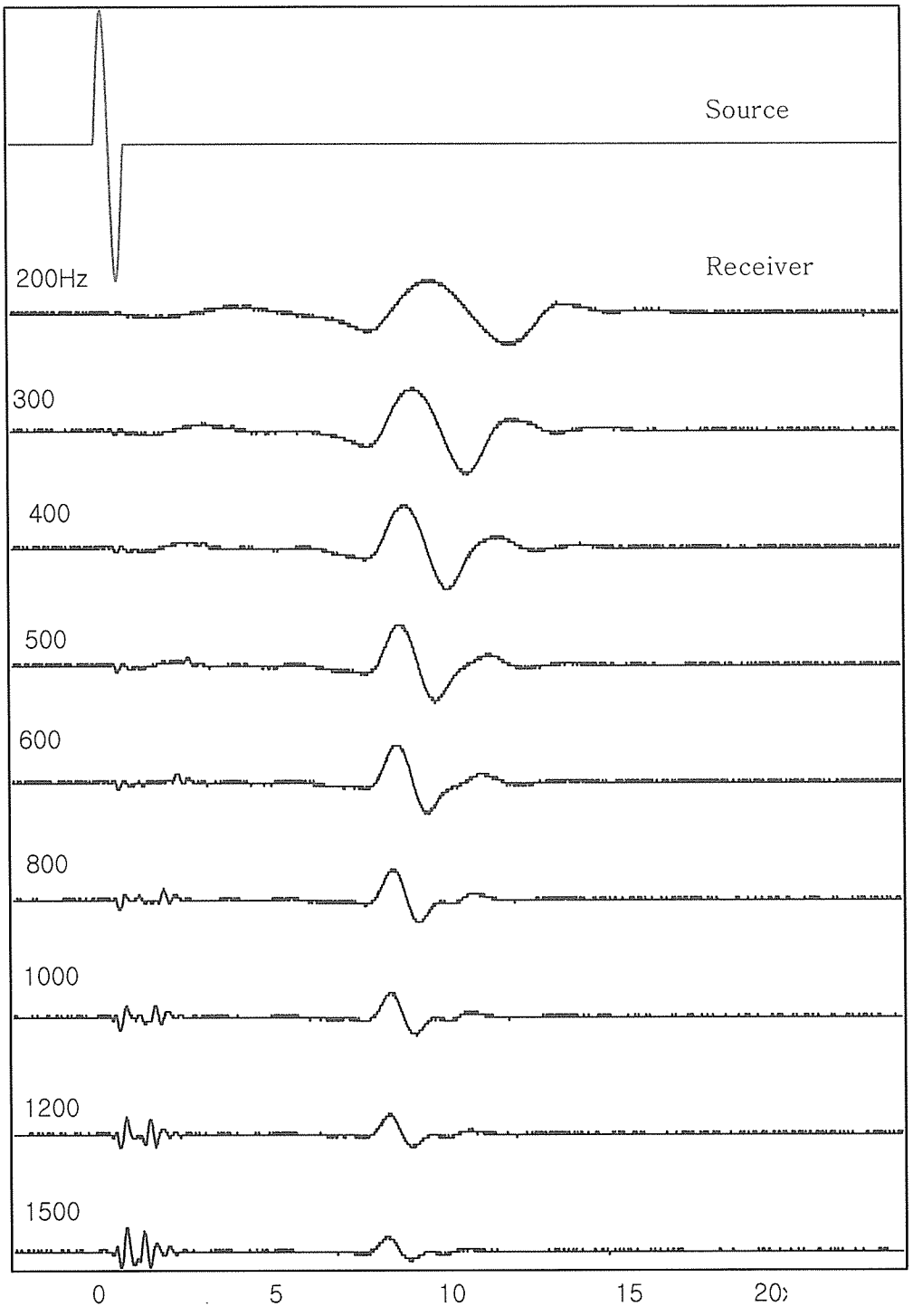


그림 3.2.36 카올리나이트 토조에서 계측한 전단파 신호

① 맨드렐(Mandrel)을 이용한 현장 관입

위에서 제작된 센서(MudFind)를 지중에 관입하기 위하여 보통 연약지반 개량공법으로 많이 사용하고 있는 연직 배수공법장비의 맨드렐을 관입 장치로 이용하고자 하였다. 그림 3.2.37은 PBD(Plastic Board Drain)장비의 맨드렐에 연결하여 실제 연약지반에 관입하는 모습을 나타낸 것이다. 아래 그림은 맨드렐 내의 수직 배수재와 센서를 연결한 것으로 수직 배수재와 센서가 완전히 연결 되지 못하여 관입 중 센서와 맨드렐이 분리되어 관입 실패 하였고, 케이블이 맨드렐 밖으로 나오게 되어 관입도중 케이블이 끊어지는 현상이 발생하였다.



그림 3.2.37 맨드렐과 센서의 연결



그림 3.2.38 현장 전경

맨드렐과 센서의 연결을 확실히 하기 위하여 맨드렐 내의 수직 배수재와 센서를 연결하여 맨드렐이 확실히 센서를 관입할 수 있게 하였으며, 관입 중 케이블이 끊어지는 현상을 방지하기 위하여 케이블을 수직 배수재 내로 설치하는 장치를 고안하여 그림 3.2.39과 같이 맨드렐 내 수직 배수재 안으로 케이블이 위치하게 하여 센서와 맨드렐을 연결하여 관입 하였다. 그림 3.2.40에서 보는 바와 같이 수직 배수재 안으로 케이블이 위치해 있는 모습을 볼 수 있다.



그림 3.2.39 맨드렐과 센서의 연결 - 케이블 수직 배수재 안으로 설치

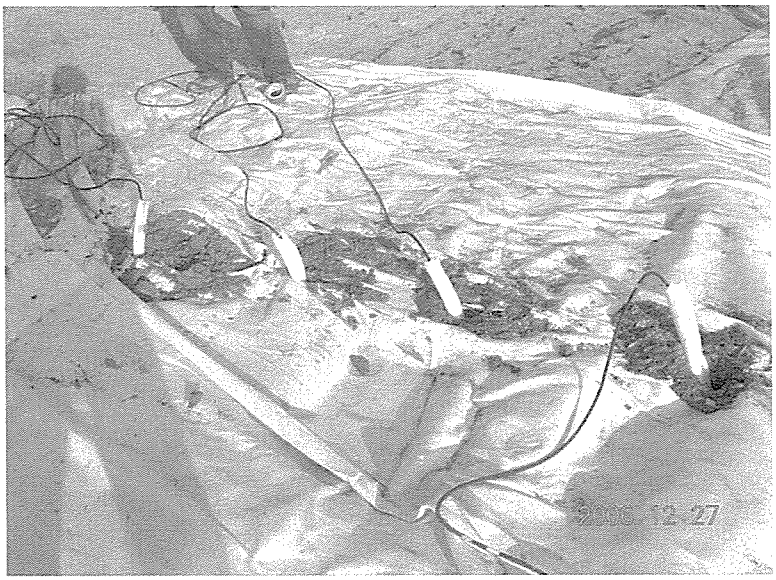


그림 3.2.40 센서 관입 후 모습

그러나 케이블을 수직 배수재 안으로 설치하여 케이블이 끊어지거나 손상되는 것은 방지 하였으나 해당 현장은 그림 3.2.41과 같이 연약지반 위에 모래층을 설치 후 성토가 일부 진행된 상황이었다. 또한 성토재로 사용한 지반은 입자가 고르지 못하고 굵은 입자가 상당히 많이 포함된 상태였다. 이러한 이유로 센서의 관입 시 성토층과 모래층을 관입 중 벤더 엘리먼트의 손상이 발생하여 맨드렐을 이용한 관입 시험의 데이터를 계측할 수 없었다.



그림 3.2.41 현장 전경

위와 같은 현장 여건을 고려하여 향후 맨드렐을 이용한 관입 시 현장 상황을 좀 더 일찍 파악하여 모래층 위 성토를 시작하기 전에 센서를 관입 할 수 있다면 입자가 거친 성토 층에서 벤더 엘리먼트가 손상되는 것을 방지할 수 있을 것으로 생각된다.

② 시추기를 이용한 현장 관입

PBD 장비를 이용하는 것보다 일반 지반 조사현장에서 가장 흔히 볼 수 있는 시추기를 이용하는 것이 장비의 운용 등에서 더 용이하다. 일반적인 시추기의 SPT rod에 센서(MudFin)를 연결하여 현장에 관입하고자 한다. 그림 3.2.42에서 보는 바와 같이 연약지반 개량 구간이 아닌 곳에서 실시하였으며 개량 구간내의 성토층 관입 시 벤더 엘리먼트의 손상 등의 문제는 고려하지 않아도 되었다. 아래 그림 24는 시추기의 SPT rod에 센서를 연결하여 관입하기 직전의 사진이다.



그림 3.2.42 연약지반 위 시추기로 센서 관입 전경



그림 3.2.43 시추기의 SPT rod에 센서 연결

아래 그림 3.2.44는 rod를 관입하기 위한 유압부와 rod의 연결을 원활이 하고, 케이블 손상을 방지하기 위하여 케이블을 rod안으로 설치하기 위하여 제작된 어댑터이다. 이 어댑터는 rod의 연결 시 회전으로 인하여 케이블이 꼬이는 것을 방지하는 기능도 가지고 있다.

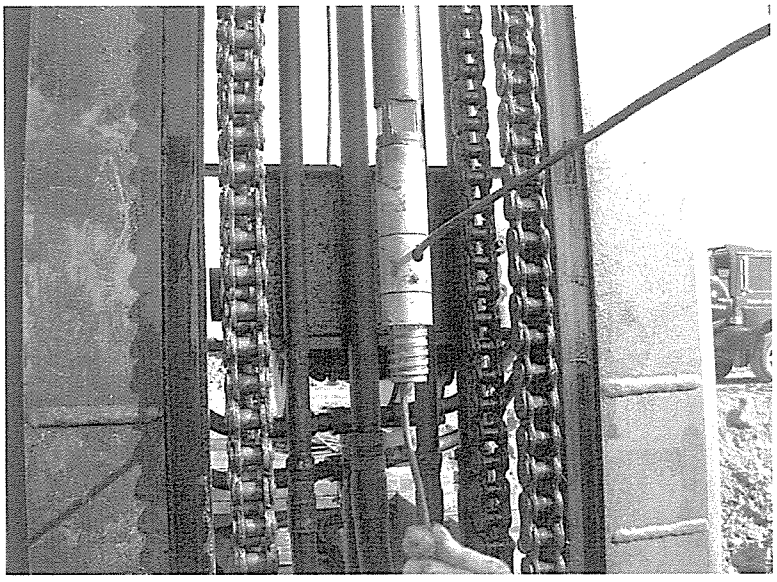


그림 3.2.44 유압 장치와 rod 연결 어댑터

그림 3.2.45는 관입된 센서(MudFin)로 계측한 전단파 신호로 관입 직후 측정한 전단파 신호이다. 그림 27은 최초 관입 후 약 일주일 후에 측정한 전단파 신호로서 관입 직후 교란 등으로 인하여 센서와 지반이 잘 접촉하지 않았으나 며칠의 시간이 지난 후 계측된 전단파 신호는 벤더 엘리먼트가 설치된 arm과 지반이 잘 접촉하여 노이즈가 많이 줄어든 것을 볼 수 있었다.

센서의 관입 후 지반이 압밀되어 가는 장기적인 기간 동안 지속적으로 계측을 실시하므로, 관입 시 센서나 관입용 rod로 인해 야기되는 지반의 교란은 별로 문제가 되지 않는다.

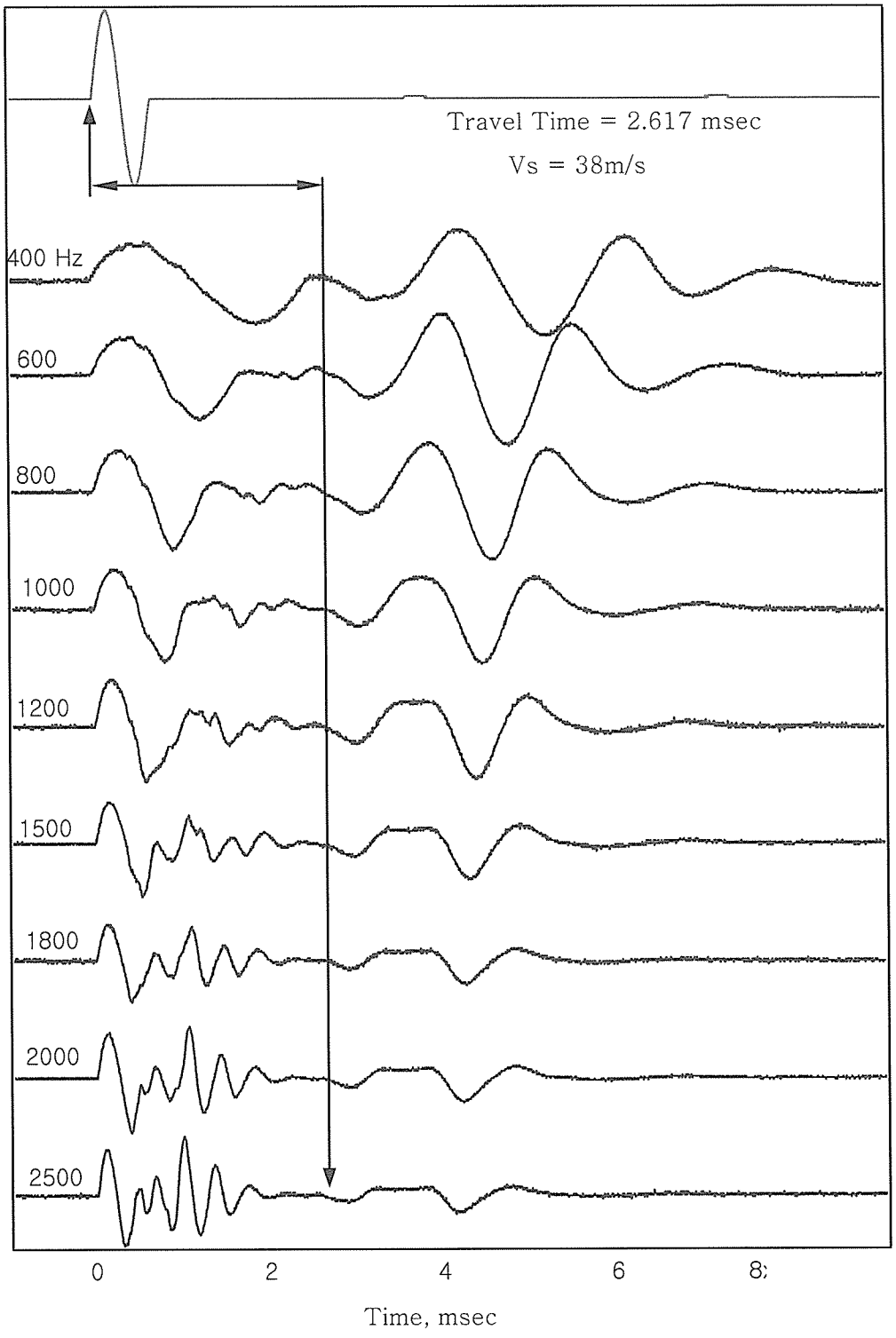


그림 3.2.45 센서의 관입 직후 계측한 전단파 신호

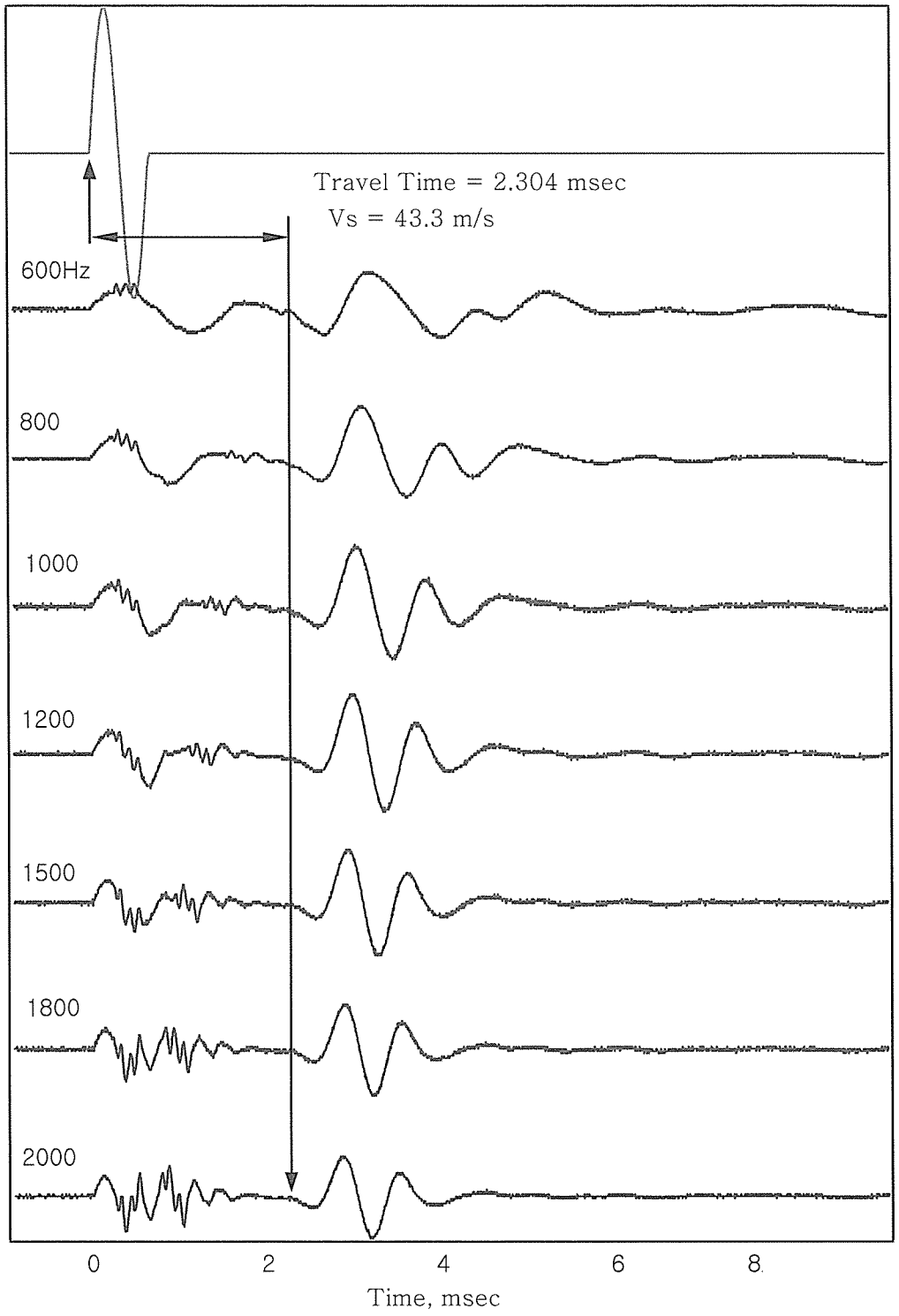


그림 3.2.46 센서 관입 후 7일 후 계측한 전단파 신호

연직 배수재가 설치된 연약지반 구간내 센서를 설치하기 위하여 시추기를 이용

한 관입을 시도하였다. 그림 3.2.47은 PBD 설치 후 약 1.5~2m 정도의 성토 하중을 가한 현장의 전경으로 성토층까지 센서가 들어갈 충분한 크기의 스틸 케이싱으로 연약지반이 나올 때 까지 보링 후 센서를 관입하였다. 금번 실험에서는 흔히 사용하는 물 보링을 하지 않고 무수(無水) 보링을 연약지반이 시작되는 지점까지 보링을 실시하였다. 그림 3.2.48은 시추기를 이용하여 연약지반이 나올 때까지 성토층 내 케이싱을 설치 후 센서를 관입하는 모습이다.

물을 이용한 보링시 케이싱 삽입시 공급되는 물을 통해 흙이 위로 다 나오는 것과 달리 무수보링을 할 경우 일정 깊이 케이싱 관입 후 다시 인발하여 케이싱 내 흙을 제거 후 다시 케이싱을 삽입하여 원하는 깊이까지 보링하는 작업을 반복하게 된다. 이때 케이싱 인발시 주변 흙이 완전히 자립하지 못하여 케이싱내로 다시 들어가는 현상이 발생하고, 연약지반 직 상부의 모래층은 케이싱 인발시 완전히 무너지는 현상 등으로 인하여 케이싱이 연약지반까지 설치가 되더라도 케이싱 안에 굵은 입자의 흙이 다량 포함되는 경우가 많았다. 이러한 경우 그 위로 벤더 엘리먼트 센서를 관입할 때 코팅이 긁히거나 굵은 입자에 걸려 손상되는 경우가 발생하여 연약지반 내 관입 후 전단파 계측을 할 수 없었다.

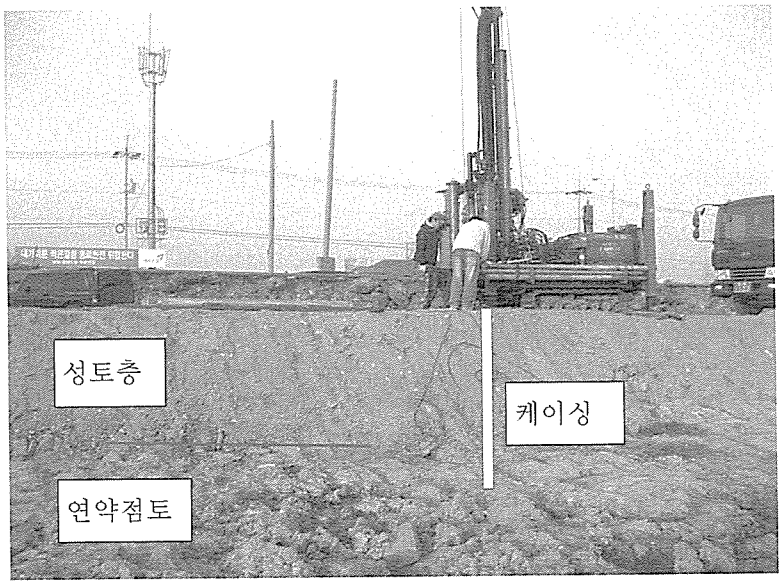


그림 3.2.47 연약지반 개량 구간 현장 전경(성토층 1.5-2m)

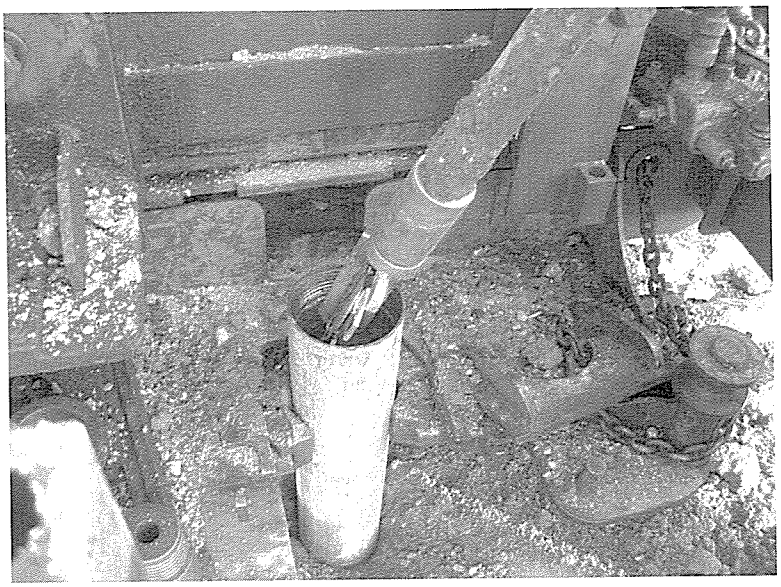


그림 3.2.48 케이싱 설치 후 센서 관입

위의 경우에서처럼 벤더 엘리먼트 센서 관입을 좀 더 확실하게 하기 위하여 연약지반까지 케이싱 설치시 물을 이용하여 보링을 실시하였다. 이 경우는 케이싱 내의 굵은 입자의 흙이나 모래들이 물을 통하여 다 제거가 되므로 연약지반까지 케이싱 설치 후 센서 관입 시 전혀 지장물이 없게 된다. 아래 그림 3.2.49는 물을 이용하여 보링 후 케이싱을 설치하는 모습이다.



그림 3.2.49 물 보링 후 케이싱 설치



그림 3.2.50 센서 관입 직후

아래 그림 3.2.51은 관입 직후 계측한 전단파 신호로서 센서와 지반이 잘 접촉하지 못하여 상대적으로 지반을 통해 계측되는 전단파 신호의 크기가 노이즈에 비해 작게 계측이 되고 있다. 그러나 그림 3.2.52는 관입 일주일 후 계측한 전단파 신호로 센서와 지반이 비교적 접촉이 잘 되어 관입 직 후 보다 지반을 통해 계측되는 전단파 신호가 크게 나타나고 있다. 그러나 여전히 몸체를 타고 들어오는 노이즈나 cross-talk가 발생하는 것을 볼 수 있다.

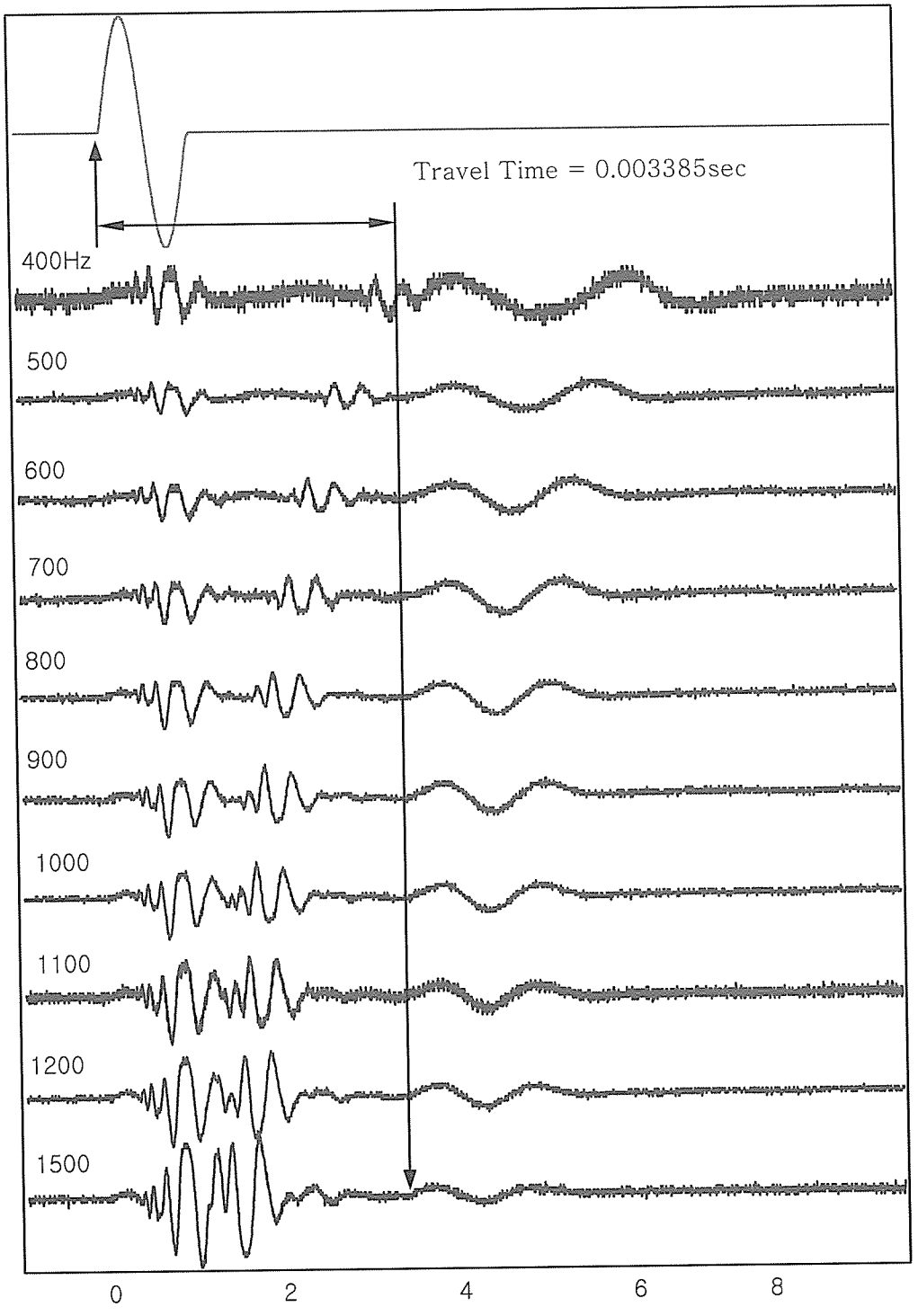


그림 3.2.51 센서의 관입 직후 계측한 전단파 신호

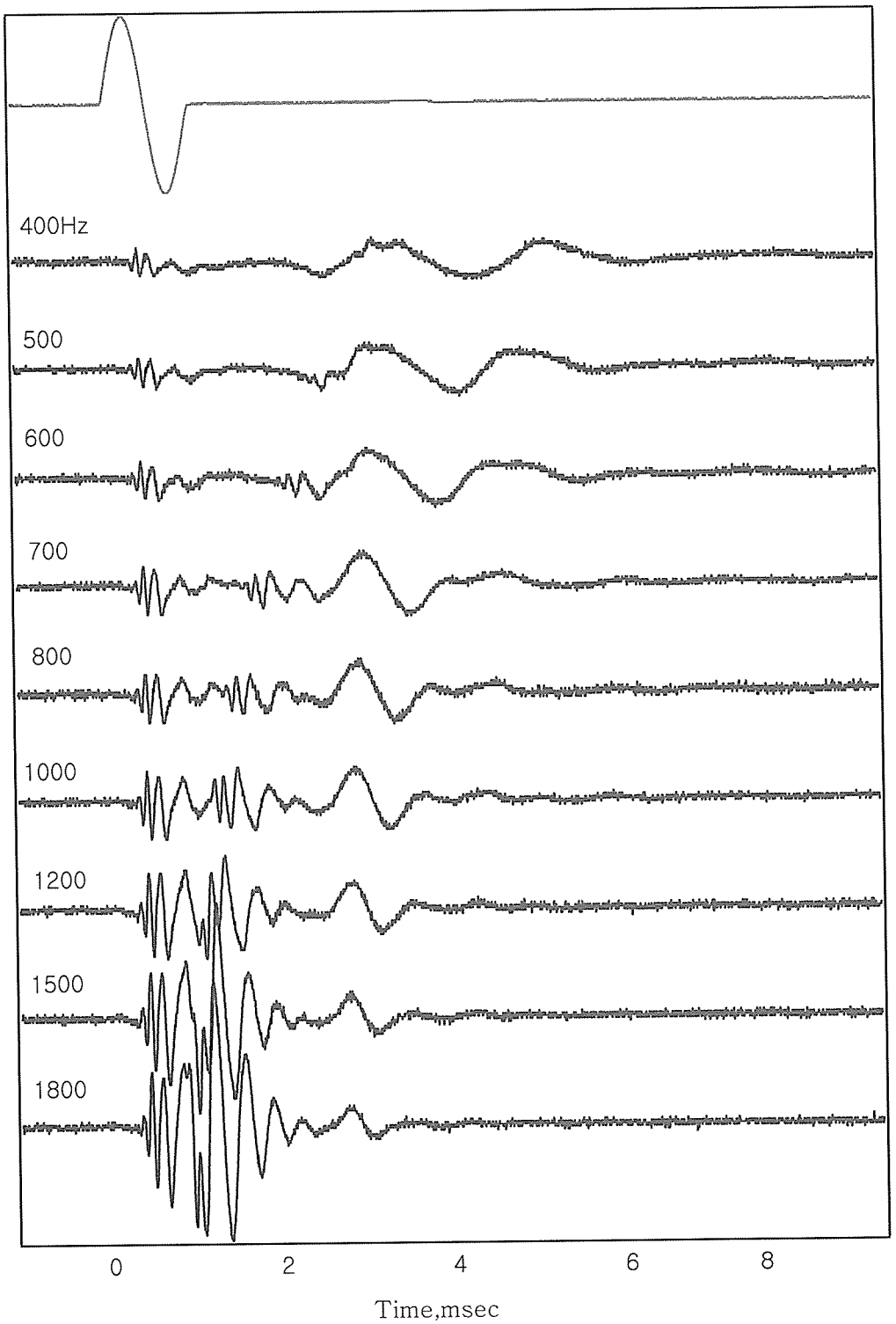
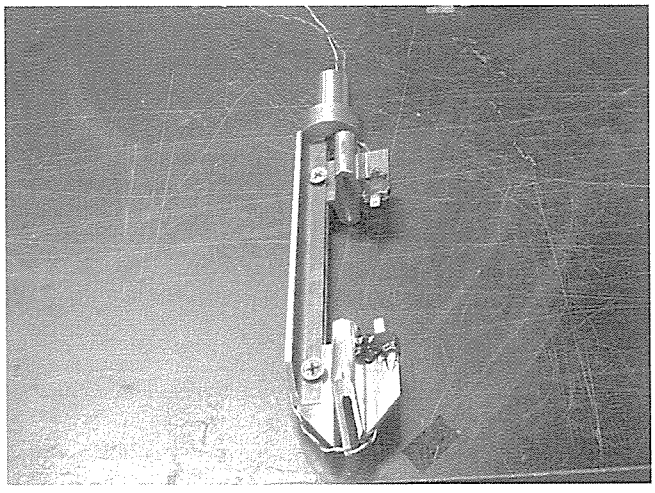
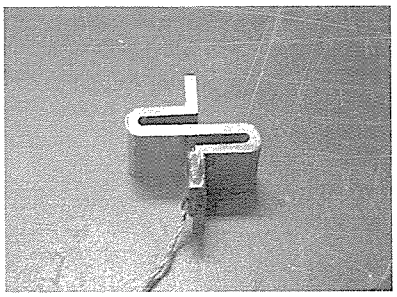


그림 3.2.52 센서 관입 후 7일 후 계측한 전단파 신호

지금까지 제작된 센서(MudFin)는 벤더 엘리먼트가 설치된 arm이 지반과 접촉이 잘 되게 하기 위하여 판상형을 사용하였다. 크기 또한 전체 폭이 약 12cm 정도로 비교적 큰 것이었다. 이 정도의 크기는 시추기를 이용하여 관입 시 별도의 케이싱을 제작하여야 하는 번거로움이 있었다. 이러한 점을 고려하여 벤더 엘리먼트가 설치된 arm이 흙과 접촉하는 면적을 기존 제작된 것과 거의 차이를 두지 않고 전체적인 크기를 줄이고자 그림 3.2.53과 같이 arm의 형상을 S형과 arm의 길이를 줄이고 대신 접촉면적을 늘리게 날개를 부착하는 형태로 제작하게 되었다. 두 장치 모두 전체적인 크기를 65mm 정도로 줄였으며 벤더 엘리먼트가 설치된 arm이 흙과 접촉하는 면적은 기존 장치보다 부족함이 없게 제작되었다. 이렇게 줄여진 크기는 시추기에서 가장 흔히 사용하는 케이싱인 NX(76mm) 크기의 케이싱 속으로 센서를 관입 할 수 있는 장점이 있어 장비 운용이 훨씬 더 수월하게 되었다. 그러나 S형의 arm은 제작과 장치의 가공의 어려움 등으로 인하여 수직된 날개를 부착한 arm형을 현장에 적용하고자 한다.





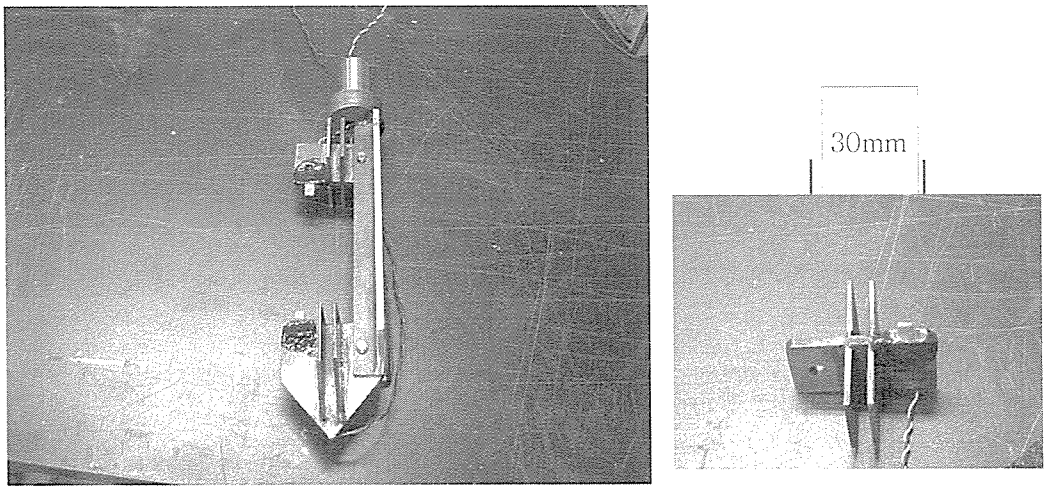


그림 3.2.53 MudFin(상-S자 형, 우-날개 부착형)

그림 3.2.54는 S형의 arm과 날개형의 arm을 실내 카올리나이트 토조에 설치하였을 때 벤더 엘리먼트가 설치된 S형 arm과 날개형 arm이 지반과 잘 접촉하였는지를 확인한 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 arm의 빈틈으로 지반(카올리나이트)이 잘 접촉하고 있는 것을 확인 할 수 있었다.

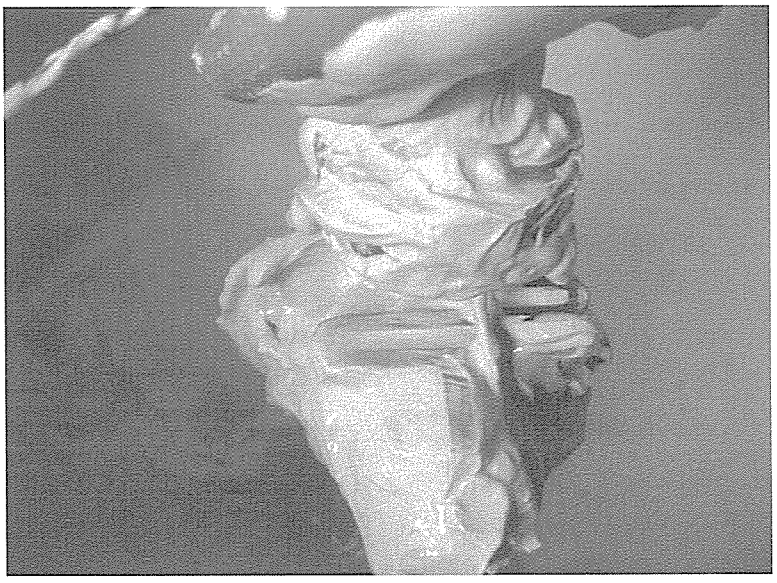




그림 3.2.54 벤더 엘리먼트가 설치된 arm의 지반과의 밀착(상-S형, 하-날개형)

그림 3.2.55와 같이 S형과 날개형 arm으로 제작된 센서를 카올리나이트 토조에서 전단파 신호 계측을 실시하여 그림 3.2.55와 그림 3.2.56과 같은 전단파 신호를 frequency별로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 두 가지 모두 high freq.에서 몸체를 타고 들어오는 노이즈가 발생하나 전체적으로 아주 양질의 전단파 신호를 계측 할 수 있었다. 이렇게 확인 된 사항을 바탕으로 S형이나 날개형의 매설형 센서 센서를 현장에 적용할 수 있게 되었다.

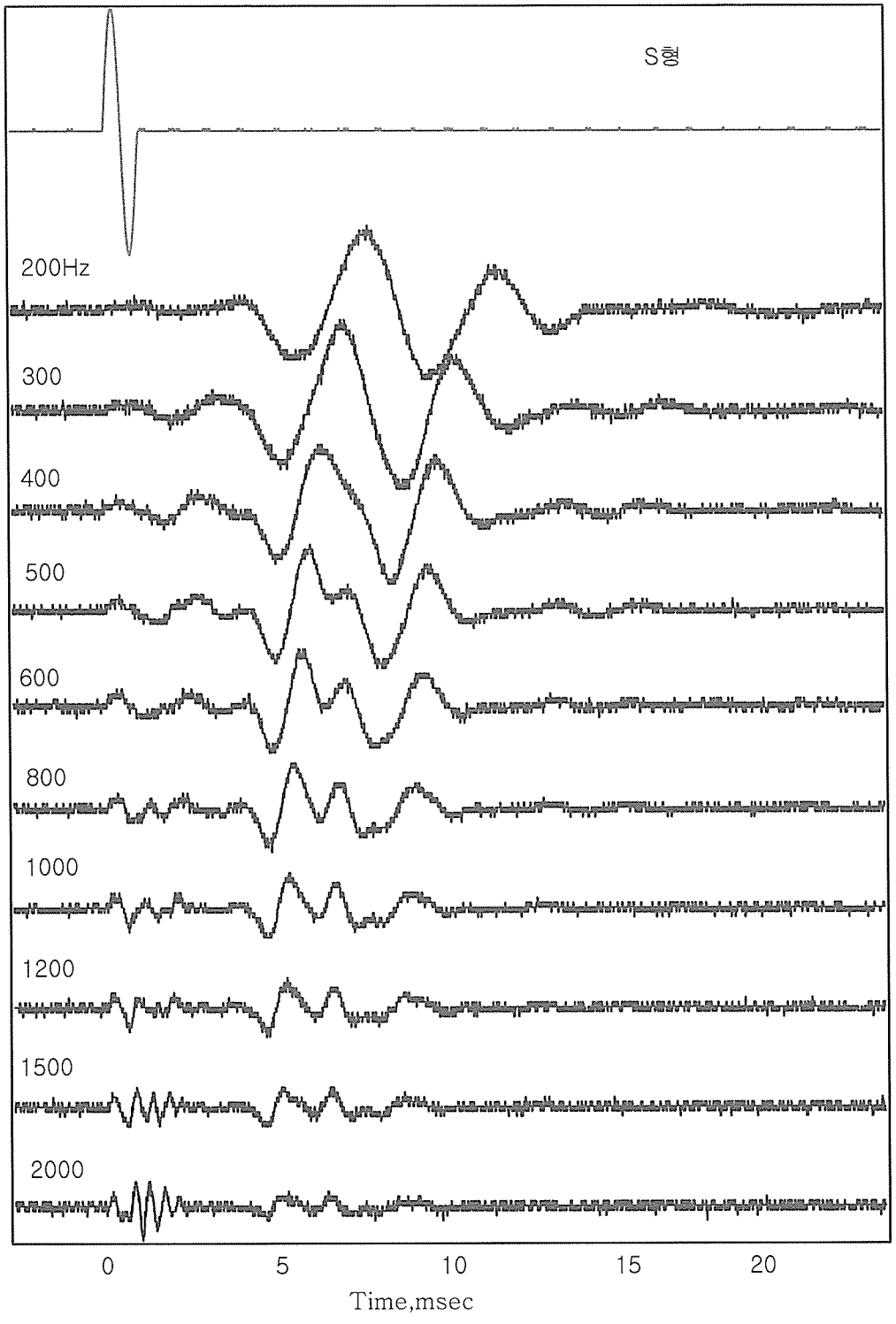


그림 3.2.55 S형 arm의 전단파 신호

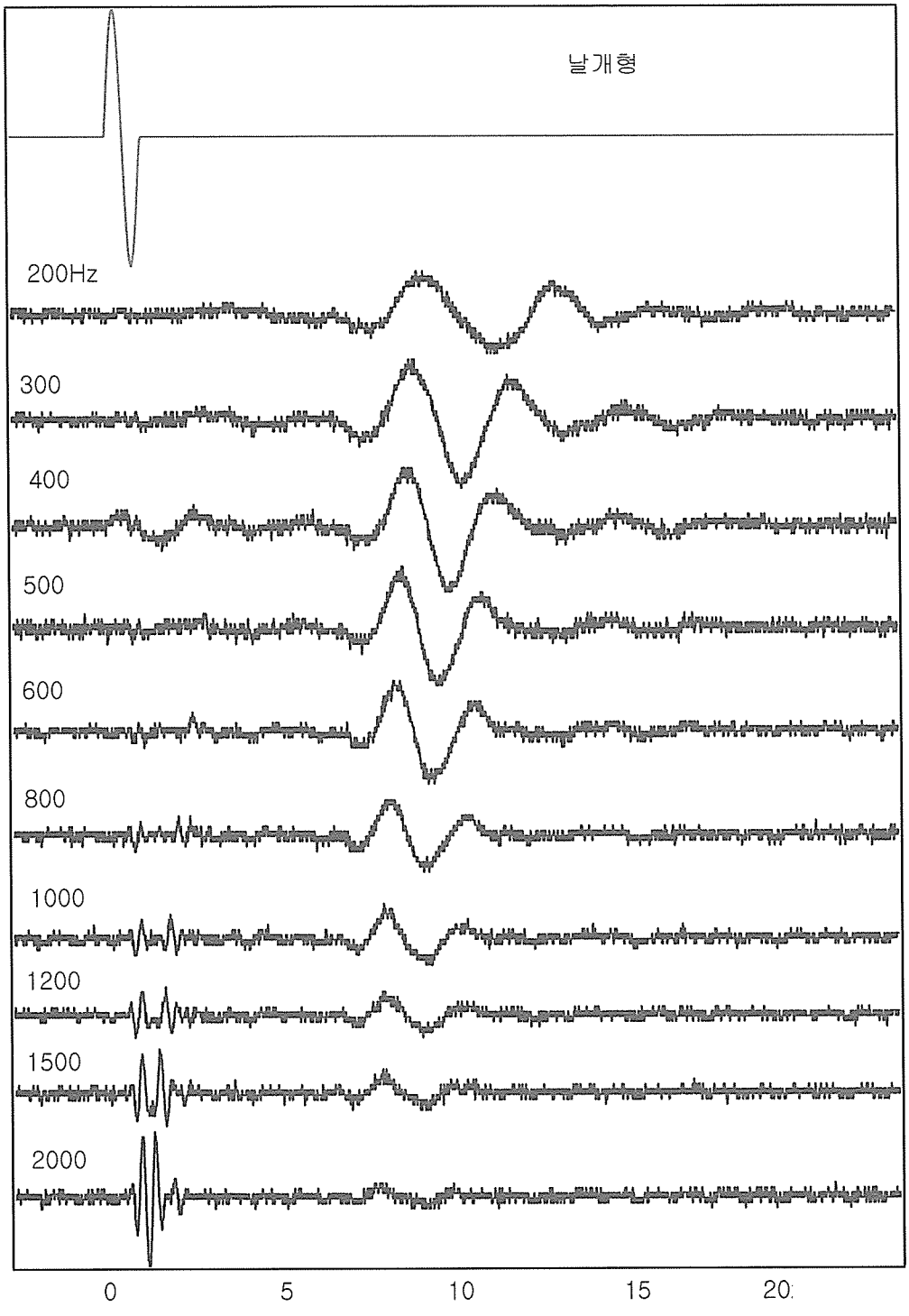


그림 3.2.56 날개형 arm의 전단파 신호

2) MudFork

벤더 엘리먼트가 수직방향으로 설치된 MudFin과 달리 그림 3.2.57에서 보는 바와 같이 source와 receiver 벤더 엘리먼트를 횡방향으로 설치한 장치를 제작하였으며, 이를 "MudFork"로 명명하였다. MudFin과 마찬가지로 벤더 엘리먼트가 설치된 arm의 형상은 직사각형의 판상으로 제작을 하였으며 몸체와 연결되는 부분 또한 완전히 고정시키지 않고 힌지로 연결을 하였다.

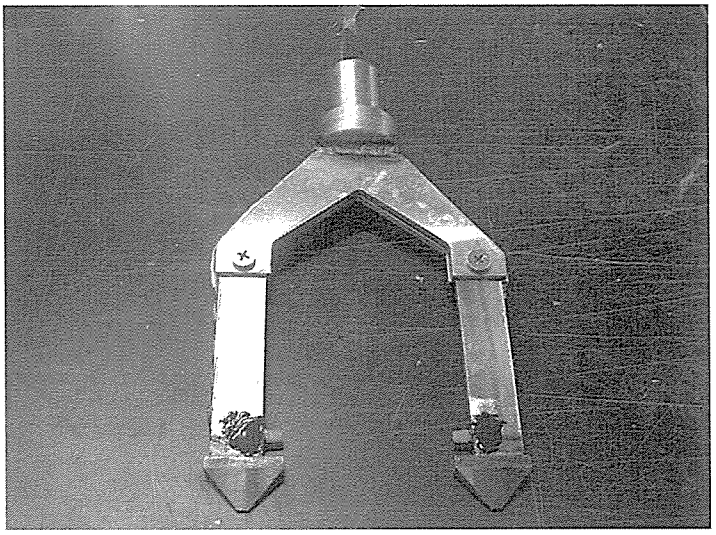


그림 3.2.57 MudFork

그림 3.2.58과 같이 맨드렐을 이용하여 관입을 시도 하였으며, 관입 중 벤더 엘리먼트나 케이블 손상 등으로 전단파 신호 계측에는 실패하였다.

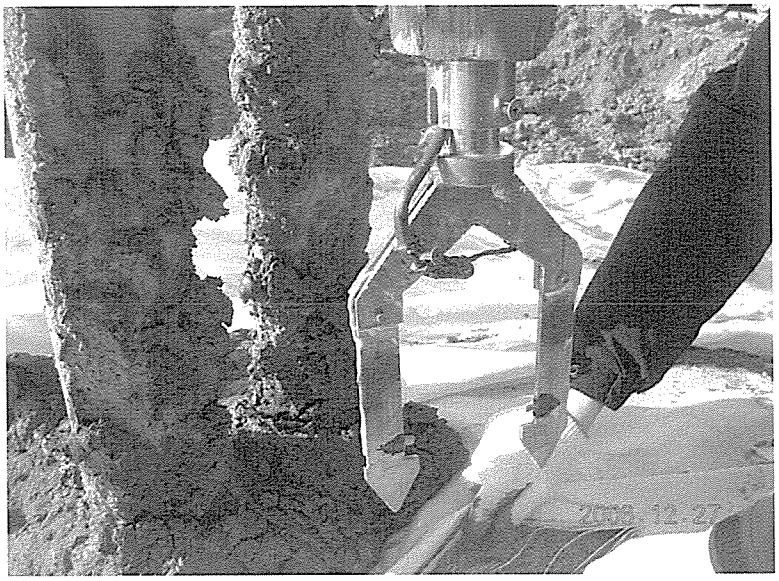


그림 3.2.58 MudFork의 맨드렐을 이용한 관입

아래 그림 3.2.59는 MudFin과 마찬가지로 성토재가 없는 곳에 시추기를 이용하여 관입하는 모습을 나타낸 것이다. 시추기의 SPT rod에 연결하여 유압으로 천천히 관입하였다. 깊이 약 5m정도 까지 관입하였으며, 관입 후 전단파 신호를 계측할 수 있었다.



그림 3.2.59 시추기의 SPT rod로 연약지반 관입

그림 3.2.60은 연약지반 관입 후 계측한 전단파 신호로cross-talk와 high freq.의 노이즈가 몸체를 타고 들어오는 것을 볼 수 있다.

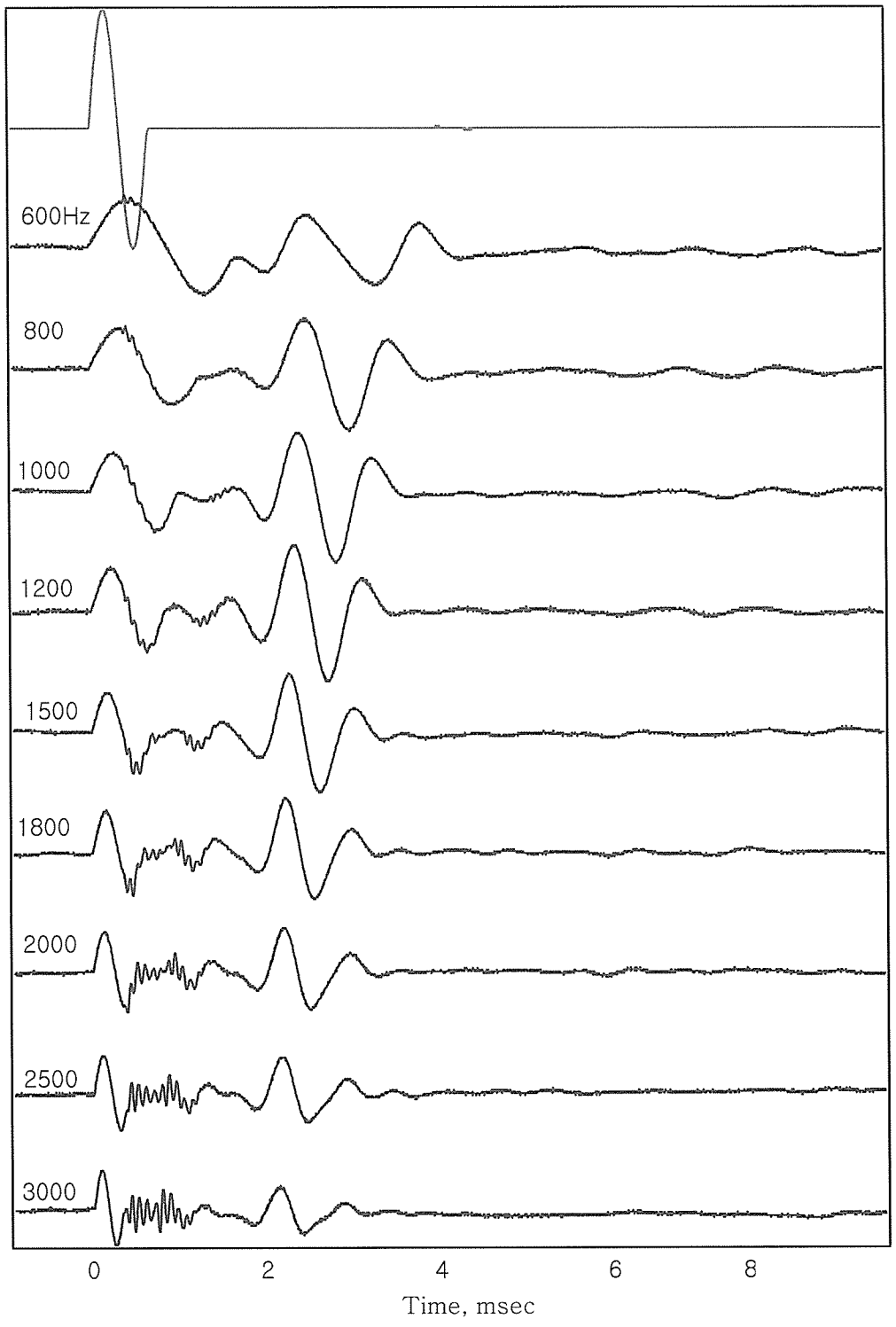


그림 3.2.60 MudFork로 계측된 전단파 신호

제3절 인홀 탄성파콘 계측

1. 최적 배치 형상

이번 연구에서는 콘관입시험기에 인홀 탄성파 장치를 장착하기 위하여 기본적으로 1개의 봉에 발진자와 수진기를 설치한 인홀 시험 형태의 여러 모형 시험을 실시하여 최적의 장착 가능한 모형을 개발하고자 하였다.

가. Type 1

Type 1은 한 개의 라드로 지중에 간단히 삽입해야 한다는 점을 고려하여 고안한 방식으로, 그림 3.3.1과 같이 발진자와 수진기가 일직선상으로 설치가 되어 발진자에서 발생된 신호를 아래에 위치한 수진기가 획득하게 된다. 그림 3.3.2와 같이 제작된 형태는 지중에 관입할 때 벤더 엘리먼트의 손상이 비교적 적을 것이라는 장점이 있다. 그러나 발진자에서 발생된 S파가 실제로는 수평 방향이기 때문에 수직으로 위치된 수진기에 도달하지 못하고 오히려 발진자에서 발생된 진동이 봉을 타고 수진기에 전달될 우려가 있으며, 실제로 계측한 결과 그림 3.3.3와 같이 신호 판독에 어려움이 있었다.

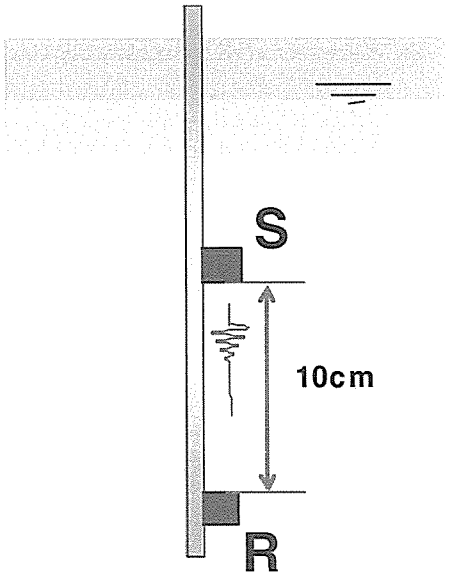


그림 3.3.1 Type 1 모식도

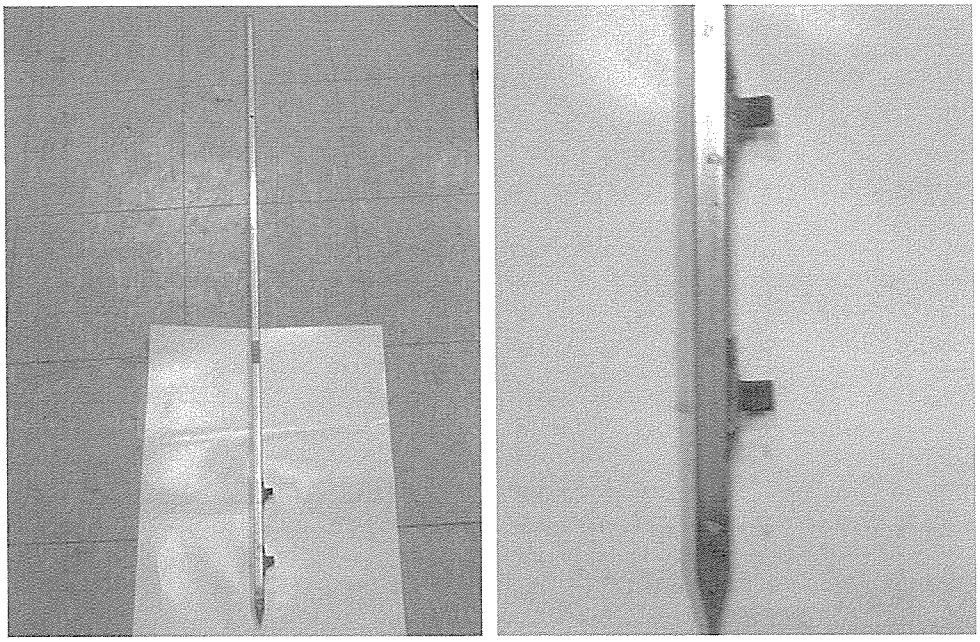


그림 3.3.2 Type 1 모형

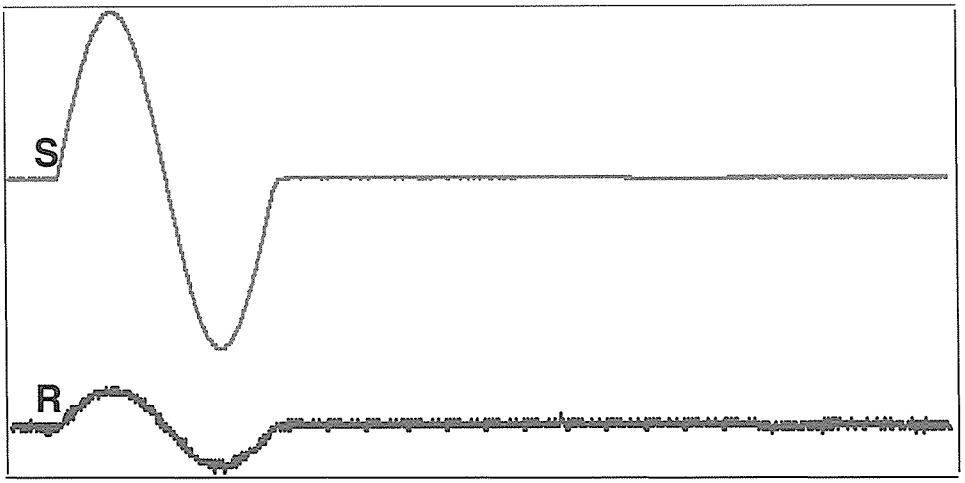


그림 3.3.3 Type 1에서 계측한 전단파 신호

나. Type 2

Type 2는 Type 1의 문제점을 극복하고자 그림 29와 같이 발진자와 수진기를 완전히 분리하였다. 발진자와 수진기의 설치간격을 0.1m로 하여 한 쌍의 나란한 봉에 각각 설치하였으며 실내 카올리나이트 토조에 두 쌍을 설치를 하였다. 그림 30은 type 2 probe로부터 계측한 전단파 신호이다. 이 경우에 신호 판독에는 어려움이 없었으나 한 개의 봉이 아닌 분리된 두 개의 봉을 사용해야하므로 실제 적용하기에는 어려움이 있을 것으로 생각된다.

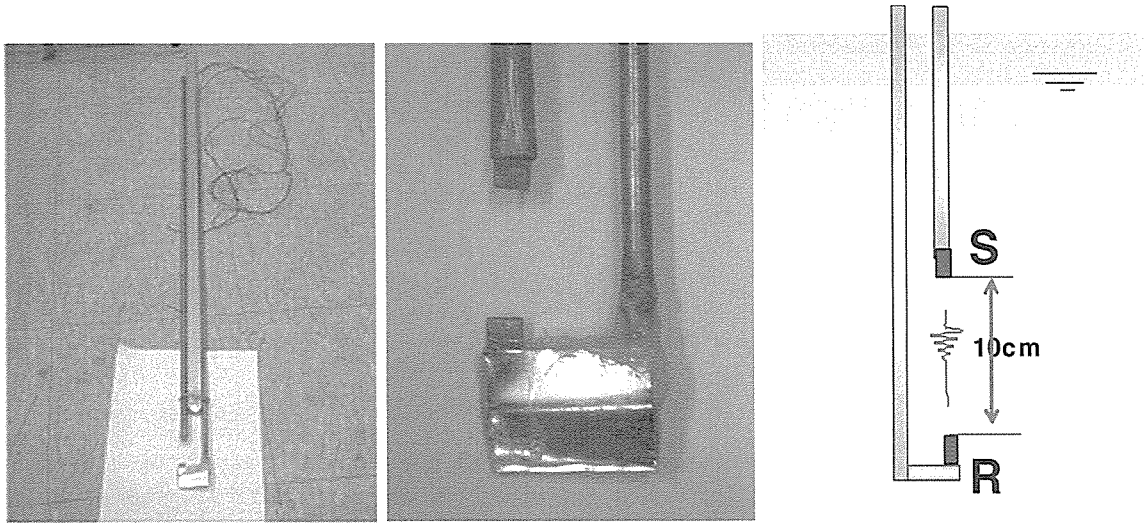


그림 3.3.4 Type 2의 설치 모형 사진 및 모식도

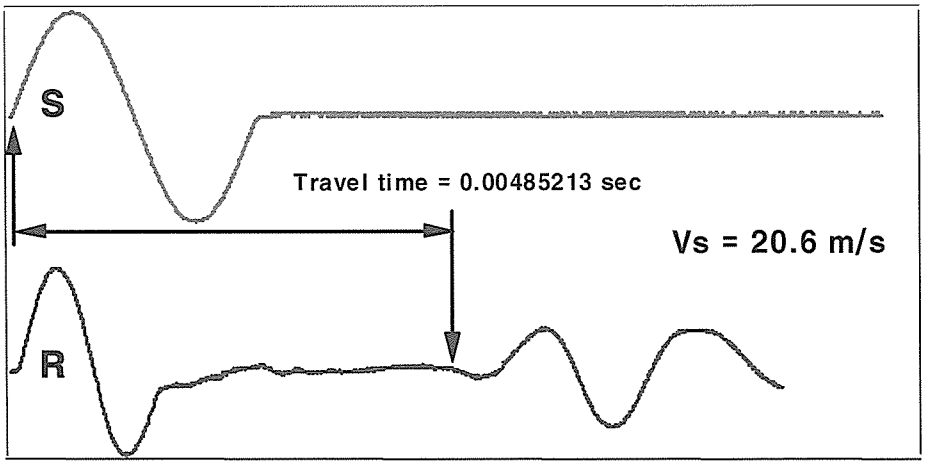


그림 3.3.5 Type 2에서 계측한 전단파 신호

다. Type 3

Type 3은 Type 2의 수진기 부분을 민감도가 높은 Piezo film을 사용하여 그림 31과 같이 설치하였다. 그러나 그림 3.3.7와 같이 노이즈 등으로 인해 신호 판독이 곤란하였다.

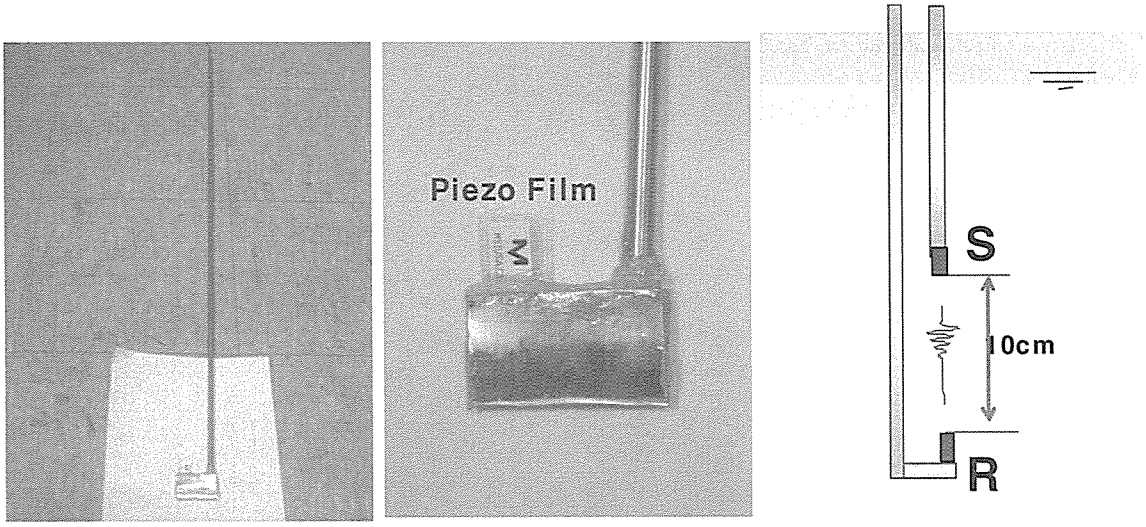


그림 3.3.6 Piezo film을 이용한 Type 3의 설치 모형 사진 및 모식도

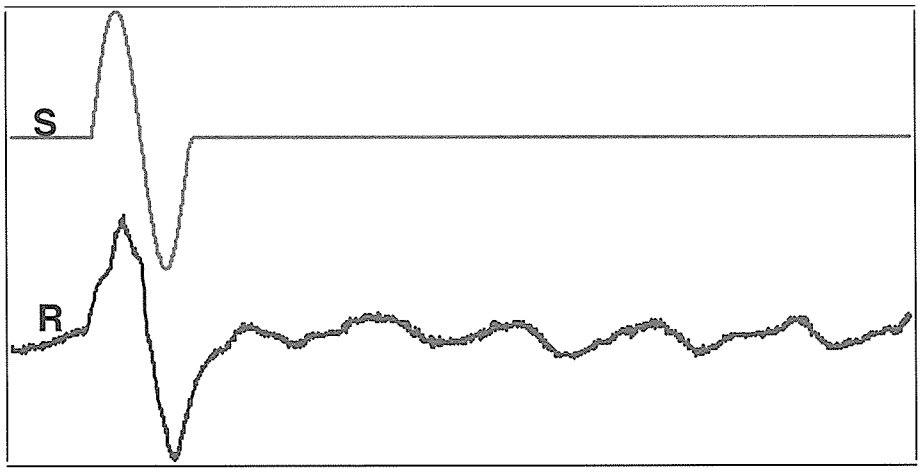


그림 3.3.7 Type 3에서 계측한 전단파 신호

라. Type 4

Type 4는 Type 2의 결과를 바탕으로 그림 3.3.8과 같이 발진자와 수진기 사이에 완충재(damper)를 두어 일체형이 되도록 하였다. 발진자와 수진기 각각의 봉 사이에 완충재로 스펀지나 고무막, 스티로폼, 이중관 등을 사용해 보았지만 특별한 해법을 발견하지 못하였다. 아래 그림 3.3.9는 Type 4의 모형으로 OO 갯벌에서 획득한 신호이다. 일반적인 갯벌의 전단파 속도를 상회하는 1000m/sec 이상의 전단파 속도를 보이는 것으로 보아 사용했던 완충재가 제 기능을 발휘하지 못한 것으로 판단된다.

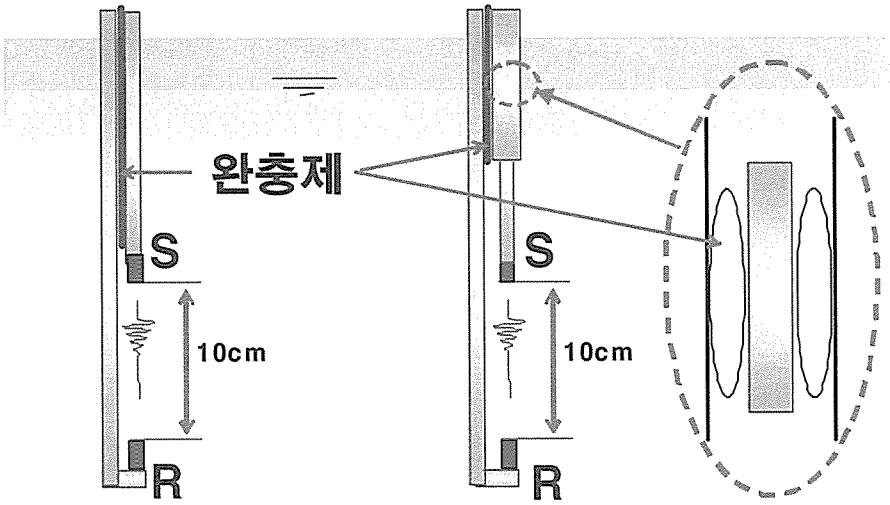


그림 3.3.8 Type 4의 설치 모식도

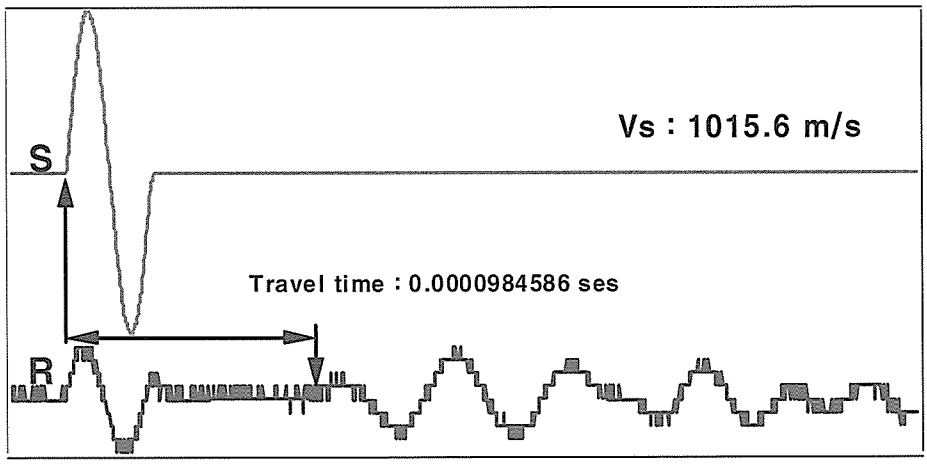


그림 3.3.9 Type 4에서 계측한 전단파 신호

마. Type 5

Type 1에서 Type 4의 연구결과를 토대로 각각의 특성 및 장단점을 고려하여 Type 5를 고안하였다. 두 개의 봉이 아닌 한 개의 봉에 발진자와 수진기를 설치하는 대신 방향성 문제를 개선하여 그림 3.3.10과 같이 발진자에서 발생된 진동의 전파 방향이 수진기와 같은 방향이 되도록 설치하였다. 그림 3.3.11은 Type 5로부터 계측된 전단파 신호이다. 수진기에서 획득한 전단파 신호가 하나로 연결된 봉의 영향을 받기는 하지만 매질을 통하여 전파되는 S파의 신호와 구별되어 신호분석이 Type 1보다는 양호하였다. 그러나 probe의 넓은 접촉면적은 지반 교란에 영향을 미칠 것으로 판단되며 지속적인 연구개발을 통해 개선해야 한다.

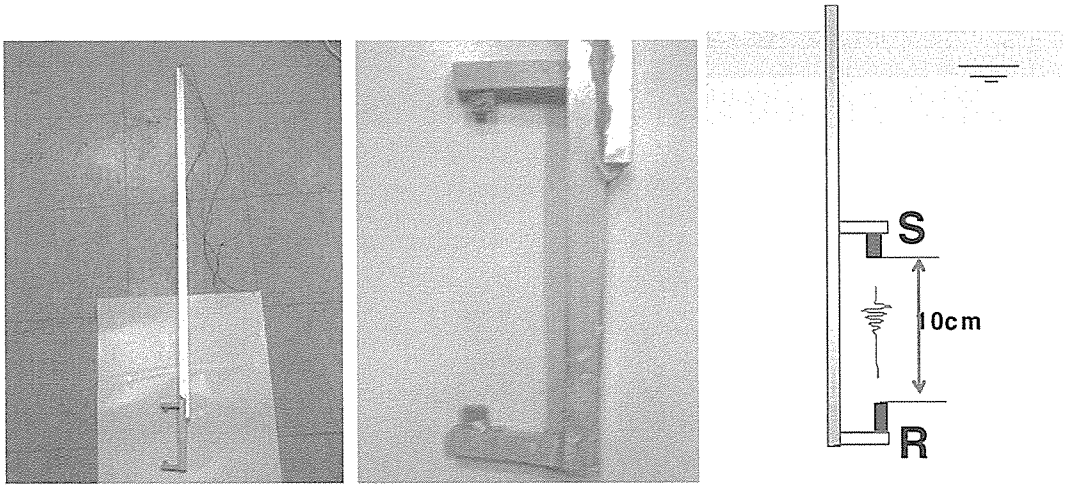


그림 3.3.10 Type 5 설치 모형 사진 및 모식도

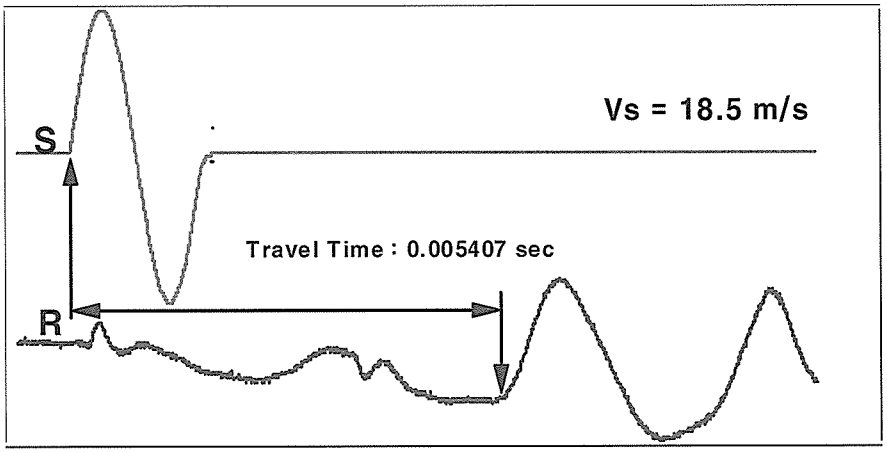


그림 3.3.11 Type 5에서 계측한 전단파 신호

바. Type 6

Type 6에서는 그림 3.3.12와 같이 인홀형에서 수진기의 부착이 발진기에 직각이어도 수진기로서의 기능을 수행 할 수 있는지에 대해서 알아보고자 하였고, 기존의 방식을 검증하기 위해서 고안되었다. 그림 3.3.12와 같이 제작된 모형 시험기를 이용하여 그림 3.3.13과 같은 양질의 전단파 신호를 획득할 수 있었다.

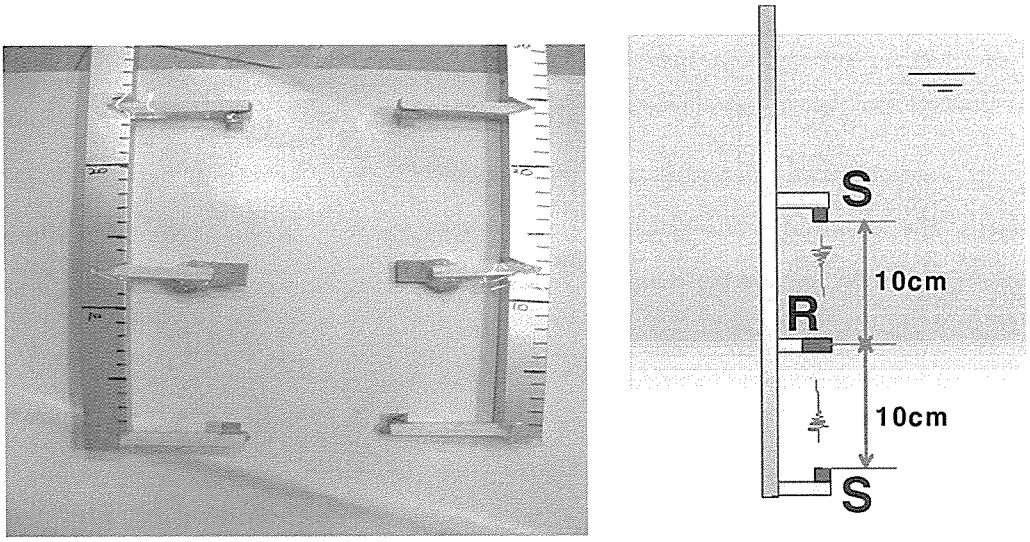


그림 3.3.12 Type 6 설치 모형 사진 및 모식도

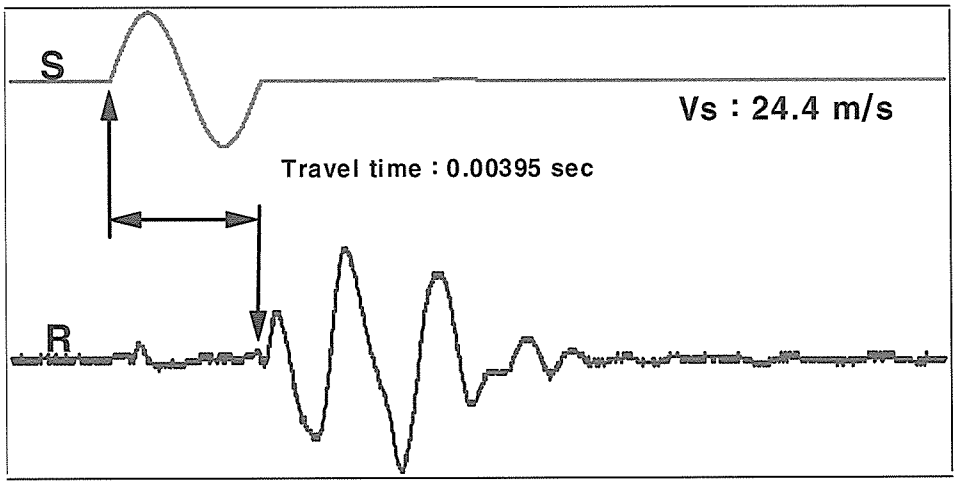


그림 3.3.13 Type 6에서 계측한 전단파 신호

2. 관입장치를 이용한 인홀형 시험

크로스홀형 시험과 마찬가지로 인홀형 시험에서도 그림 3.3.14의 모식도에서 보는 바와 같이 스테인레스 스틸 파이프(ID 38mm Mandrel)를 이용하여 목표 심도까지 관입한 후 다시 인발하는 장치를 사용하였다. 맨드럴을 인발한 후 케이블로 연결된 swing arm에 설치된 벤더 엘리먼트가 직각이 되게 위치하게 된다. 아래 그림 3.3.15는 스테인레스 스틸 파이프(ID 38mm Mandrel)를 이용하여 벤더 엘리먼트를 보호하기 위한 장치의 모식도와 실제 제작된 모습이다. 그림 3.3.16은 실제 현장에 관입한 모습으로 그림과 같이 직각 방향으로 위치하게 된다. 이는 앞에서 이미 실내 시험을 통해 확인한 Type 5의 형태로 제작한 것이다. 실험 결과를 나타낸 그림 3.3.17을 보면 아주 좋은 신호가 얻어진 것을 알 수 있다.

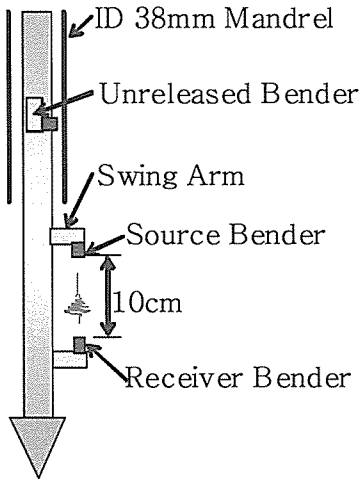


그림 3.3.14 인홀 콘의 모식도

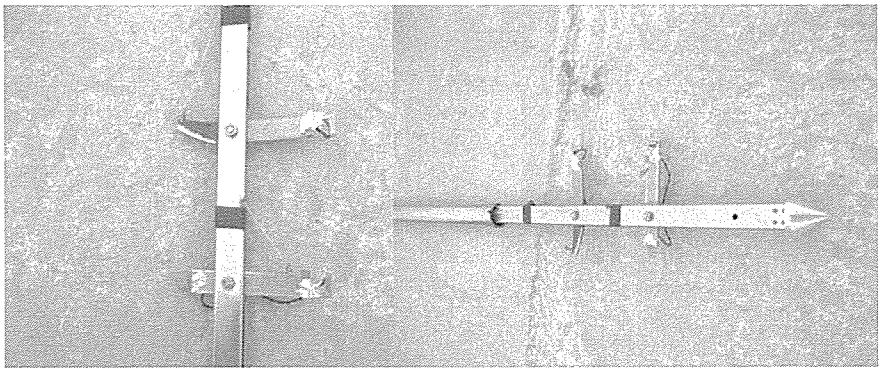


그림 3.3.15 제작된 인홀 콘 시험기의 모습

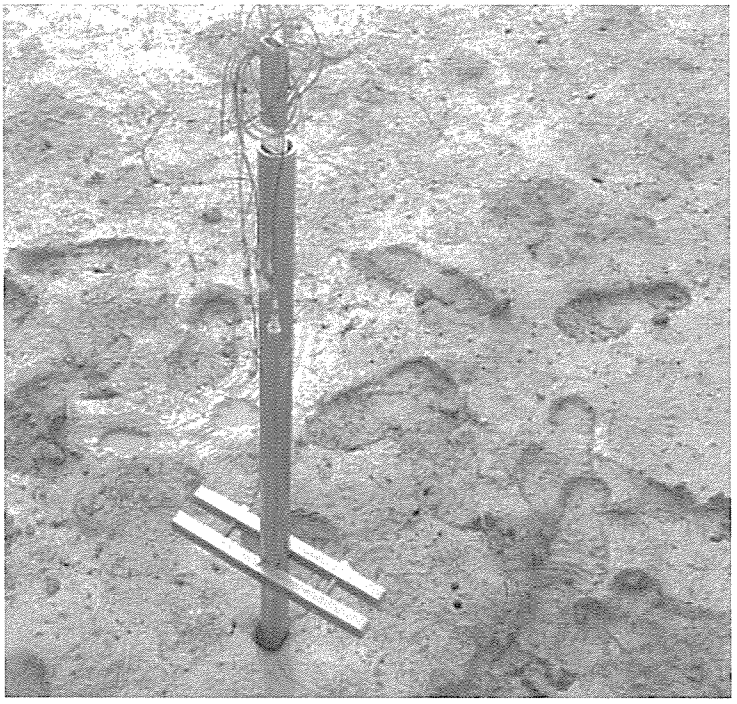


그림 3.3.16 인홀 콘의 현장 시험

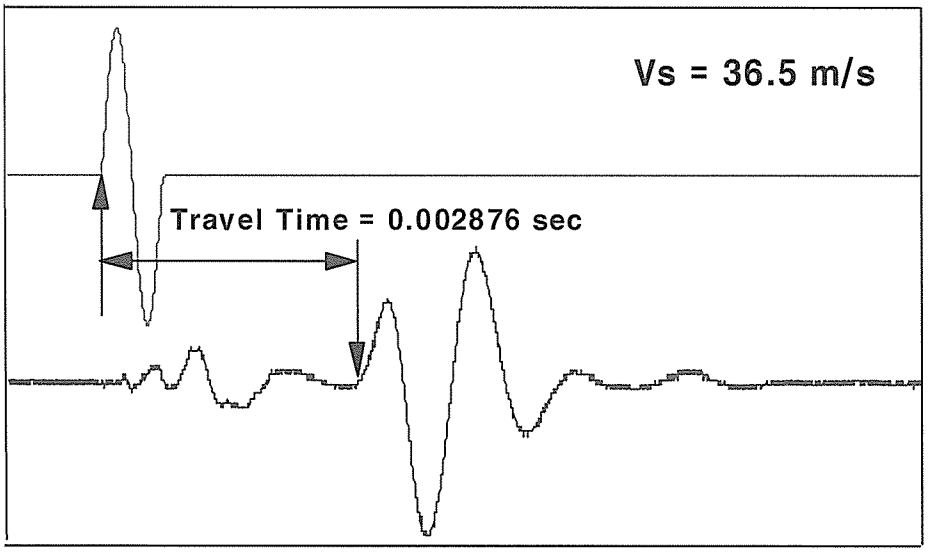


그림 3.3.17 인홀 콘의 현장 계측 전단파 신호

3. 최종 사양

다양한 시험 결과로부터 인홀형 탄성파콘은 다음과 같이 최종 사양을 결정하였다.

- 벤더 엘리먼트 크기 : 10mm
- S-R간 간격 : 10cm
- 벤더-지반 밀착을 위한 Motorized swing arm 적용
- Swing arm 길이 : 10cm

→ 콘 관입에 따른 교란 영역 회피 목적

- 입력전압 및 주파수 : 30V, 500-2000Hz

4. 인홀형 탄성파콘 시작품

앞 절에서 결정된 최종 사양에 의거하여 인홀형 탄성파콘의 모형을 제작하였다. 표준콘관입시험기의 로드와 동일한 단면에서 콘관입에 따른 교란 영역을 회피하기 위해 10cm 돌출하는 형태로 제작하여야 했기 때문에, 다양한 형태의 모형을 도안하고 제작을 시도하였으나, 최종적으로 swing arm 형태로 결정하였으며, 원활한 작동여부를 확인하기 위한 모형을 제작하여 검증을 수행하였다.

그림 3.3.18과 같이 처음에는 로드 측면에 부착되어 있다가 시험 위치까지 관입된 후 두 개의 swing arm이 반대로 회전하여 서로 마주 보게 되면 시험을 수행할 수 있는 상태가 된다. 그림 3.3.19는 이 장치를 이용하여 토조에서 시험을 수행한 결과를 나타낸 것이며, 그림에서 알 수 있듯이 양질의 신호를 얻을 수 있었다.

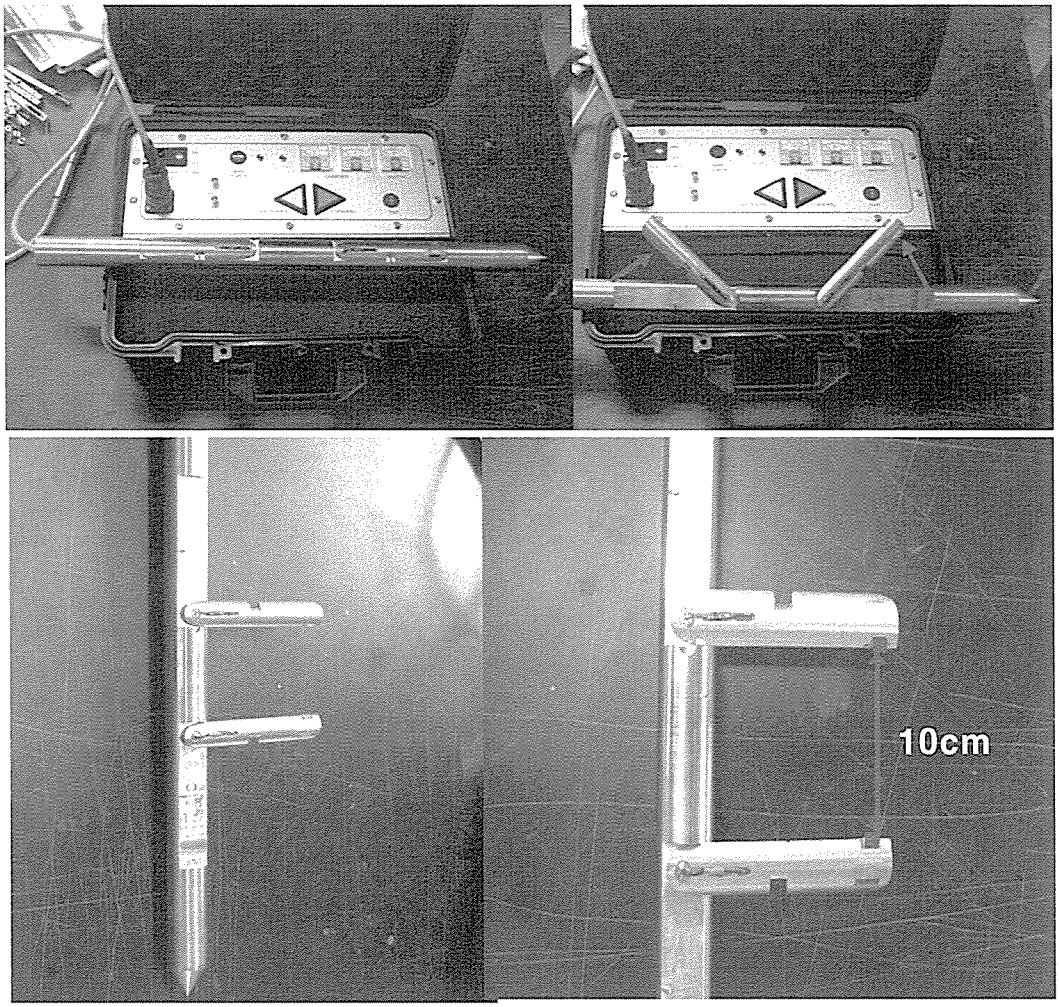


그림 3.3.18 인홀형 탄성파콘 시작품

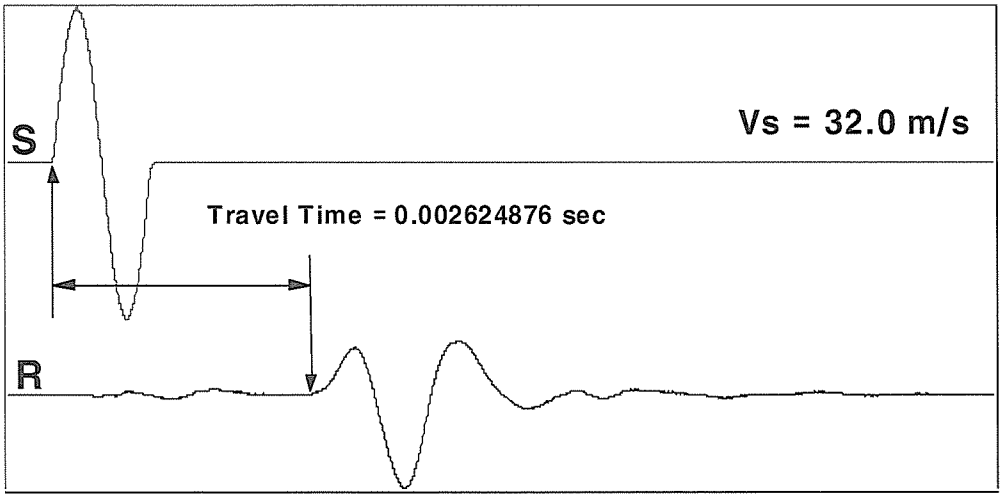


그림 3.3.19 인홀 콘 시험 결과

5. 기존 시제품의 문제점 해결

1차년도에 제작한 인홀형 탄성파콘은 다음 그림 3.3.20과 같다. 더미형태의 콘에 스윙암(swing arm) 형태로 제작된 인홀형 탄성파콘으로 암의 끝단에 벤더를 설치하여 실험을 수행하는 방식이었으나, 발진자로 사용되는 벤더는 원활하게 지반에 전단파를 전달하는 것으로 나타났으나, 수진자로 사용되는 벤더에서는 강성이 벤더에 비하여 매우 큰 스윙암의 절단부에 벤더가 위치하기 때문에 신호를 원활하게 측정할 수 없었다.

금년도에는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 3.3.21과 같이 스윙암 중반부터 끝단까지 벤더가 위치하게 되는 암의 단면크기를 줄여 벤더가 단독으로 돌출하여 원활한 신호 수진이 가능하도록 설계변경하였다.

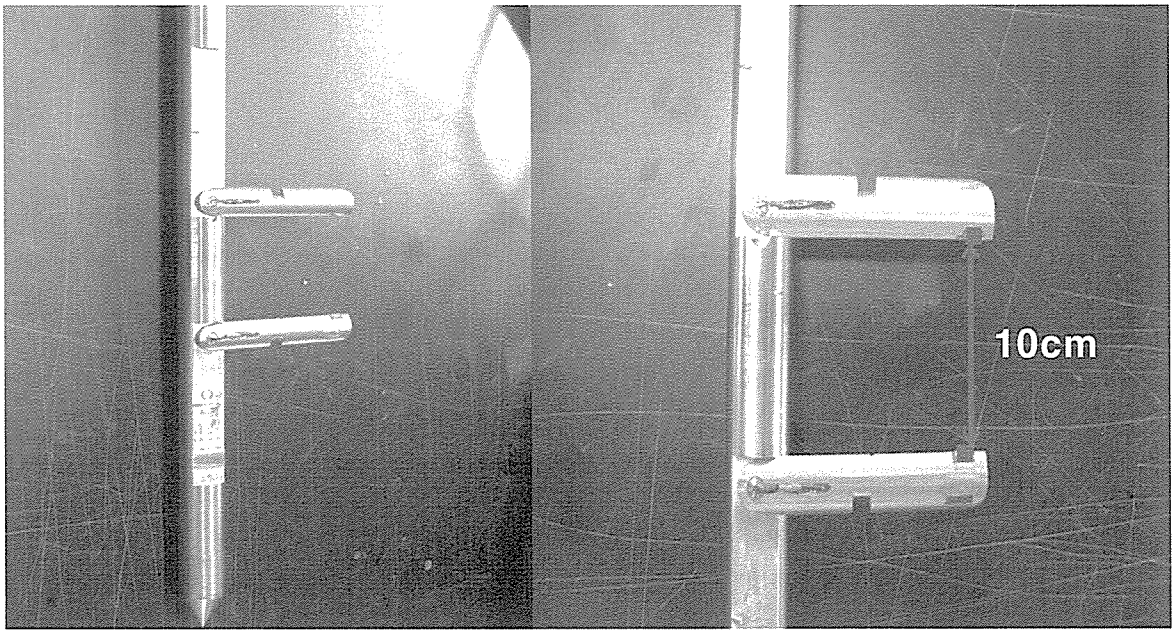


그림 3.3.20 기존 인홀형 탄성파콘(수정 전)

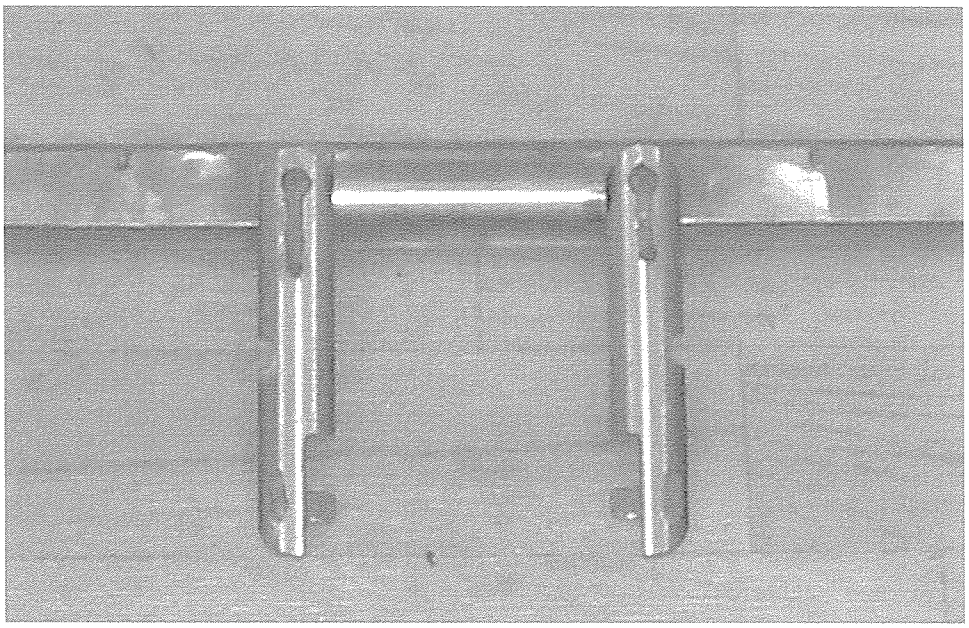


그림 3.3.21 벤더를 돌출시킨 인홀형 탄성파콘(수정 후)

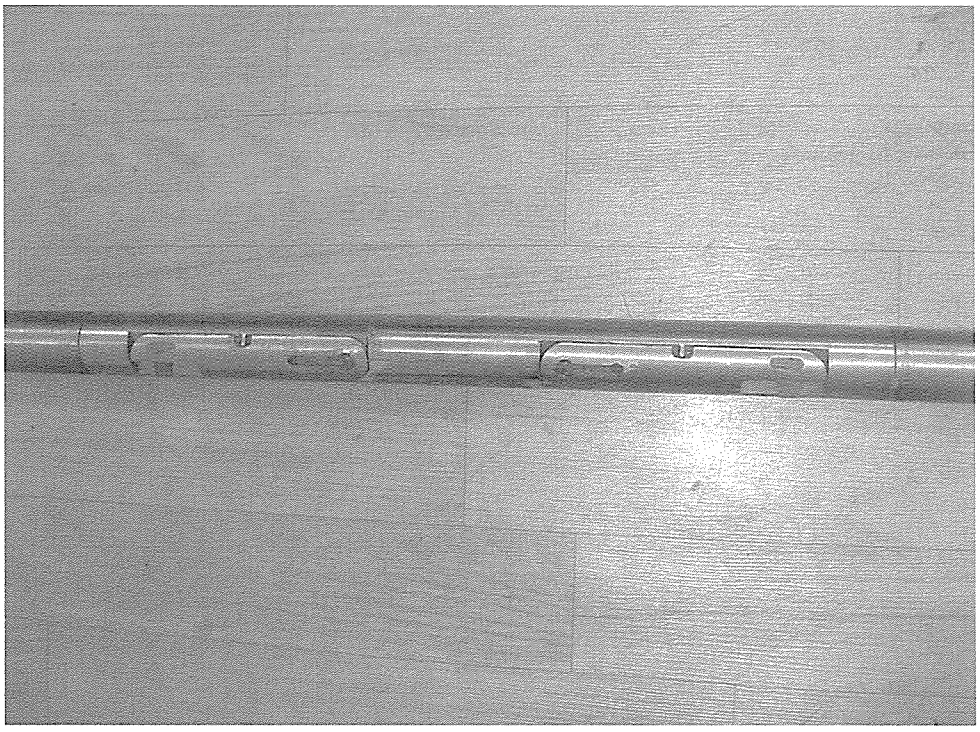


그림 3.3.22 스윙암을 접었을 때 장면

6. 기존 콘관입시험기에 탈부착이 가능한 모듈 제작

그림 3.3.23과 같이 1차년도에 제작된 더미형 인홀형 탄성파콘은 기존 콘관입시험기 장착하는 시스템이 아니라 금년도에는 기존 콘관입시험기에 탈부착이 가능한 형태로 설계하여 제작하였다. 이를 위하여 콘에서 나오는 시그널을 잡아서 제작한 인홀형 탄성파콘 모듈과 연결하고 이를 다시 기존 콘관입시험기의 시그널 케이블과 연결하는 작업을 수행하였다. 여기에서 사용한 A.P. vandenBerg 사의 콘은 커넥터가 13핀 시그널을 취급하며 따라서 1차 시그널 연결은 13핀 커넥터를 사용하였으며, 제작된 탄성파콘에서 사용하는 케이블은 동력선 2개, 시그널 선 5개 이므로 이를 포함하면 2차 시그널 연결은 20개 시그널 커넥터를 사용하여 연결하였다. 기존 콘관입시험기에서 사용하는 시그널 케이블을 그대로 사용하기 위하여 부가적으로 추가 시그널 케이블을 병렬 연결하여 사용하였다. 콘과 인홀형 탄성파콘, 그리고 다시 인홀형 탄성파콘과 롯드 사이에는 나사 체결로 인해 시그널 케이블의 절단을 방지하기 위하여 양단에서 동시에 체결되는 양방향 이중 나사형태의 취부를 제작하여 적용하였다.

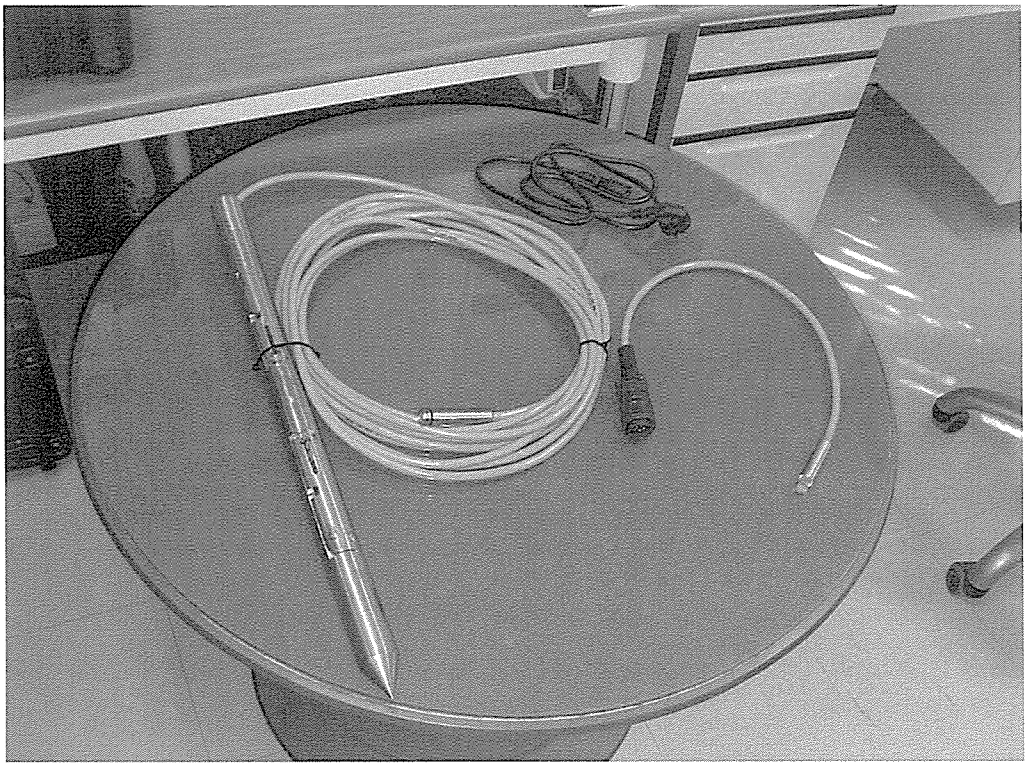


그림 3.3.23. 더미형 인홀형 탄성파콘 시험기

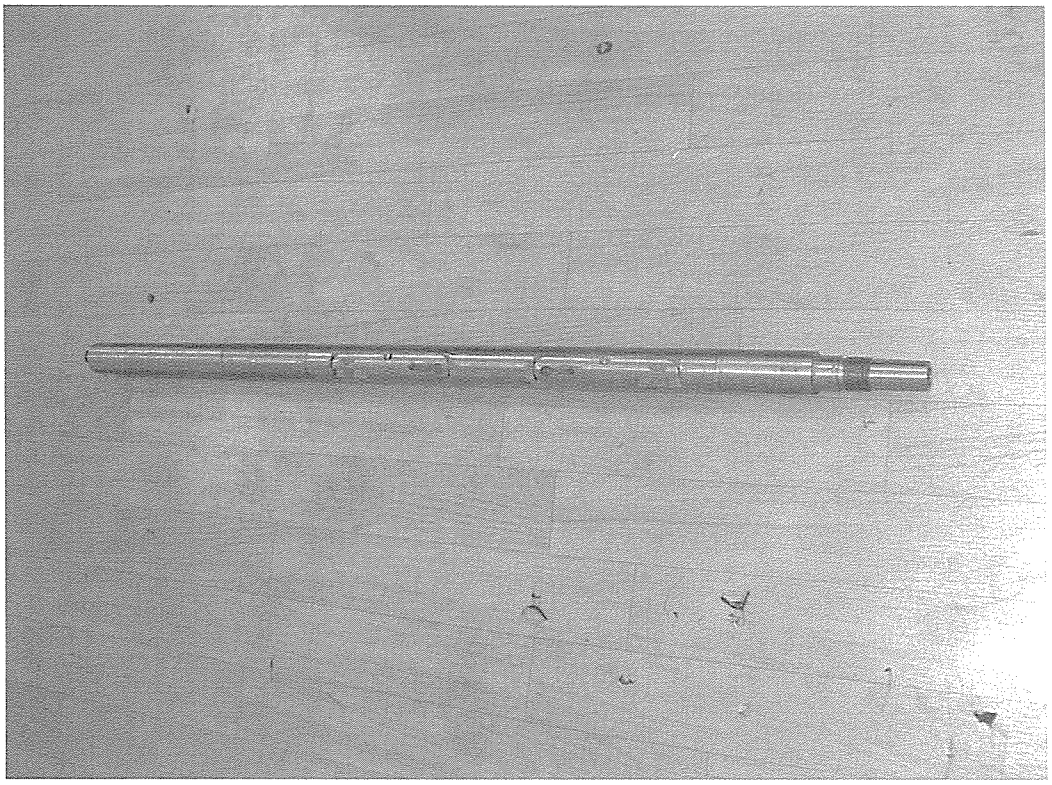


그림 3.3.24 기존 콘관입시험기 탈부착형 장착 모듈

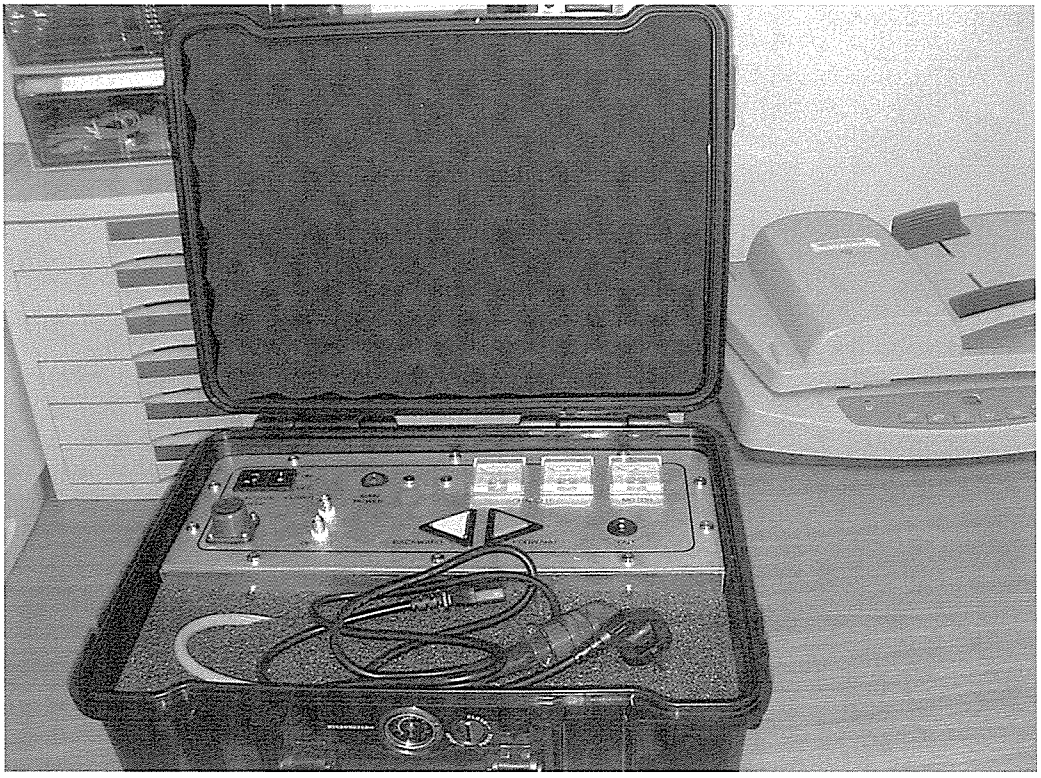


그림 3.3.25 제어 시스템

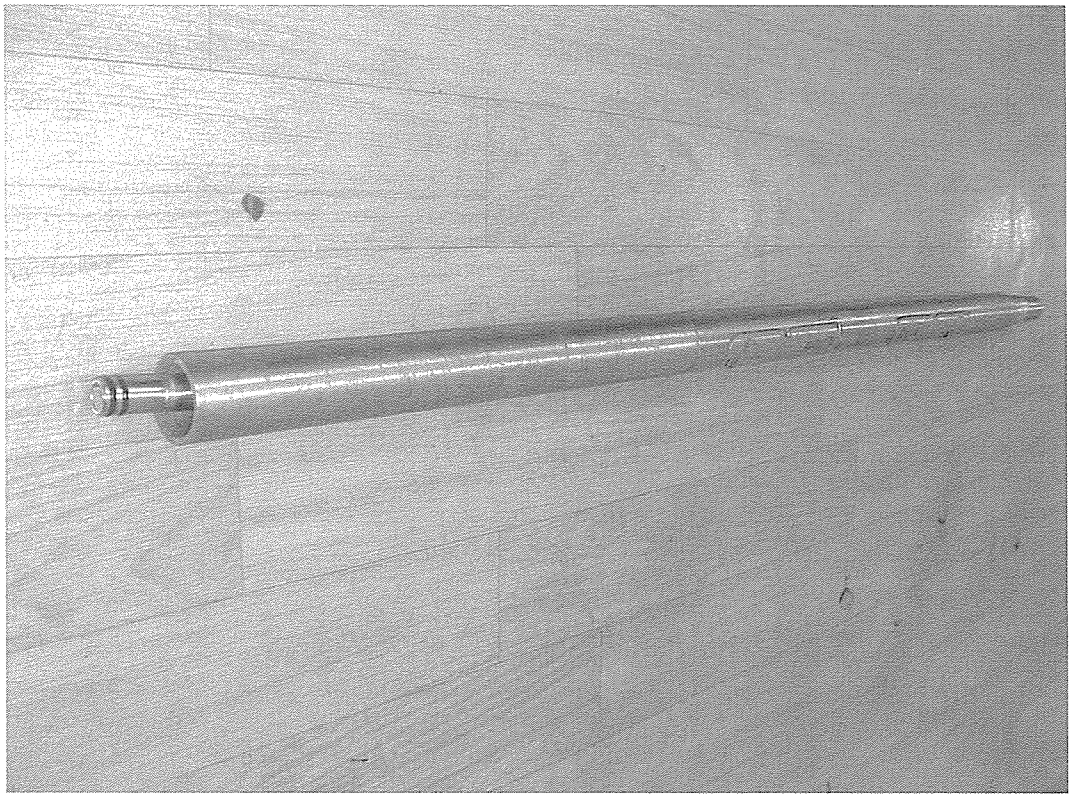




그림 3.3.26 콘 커넥터 시스템

7. 현장검증시험 수행

다음 그림과 같이 기존 콘관입시험기에 인홀형 탄성파콘을 장착하여 현장검증시험을 수행중이다.

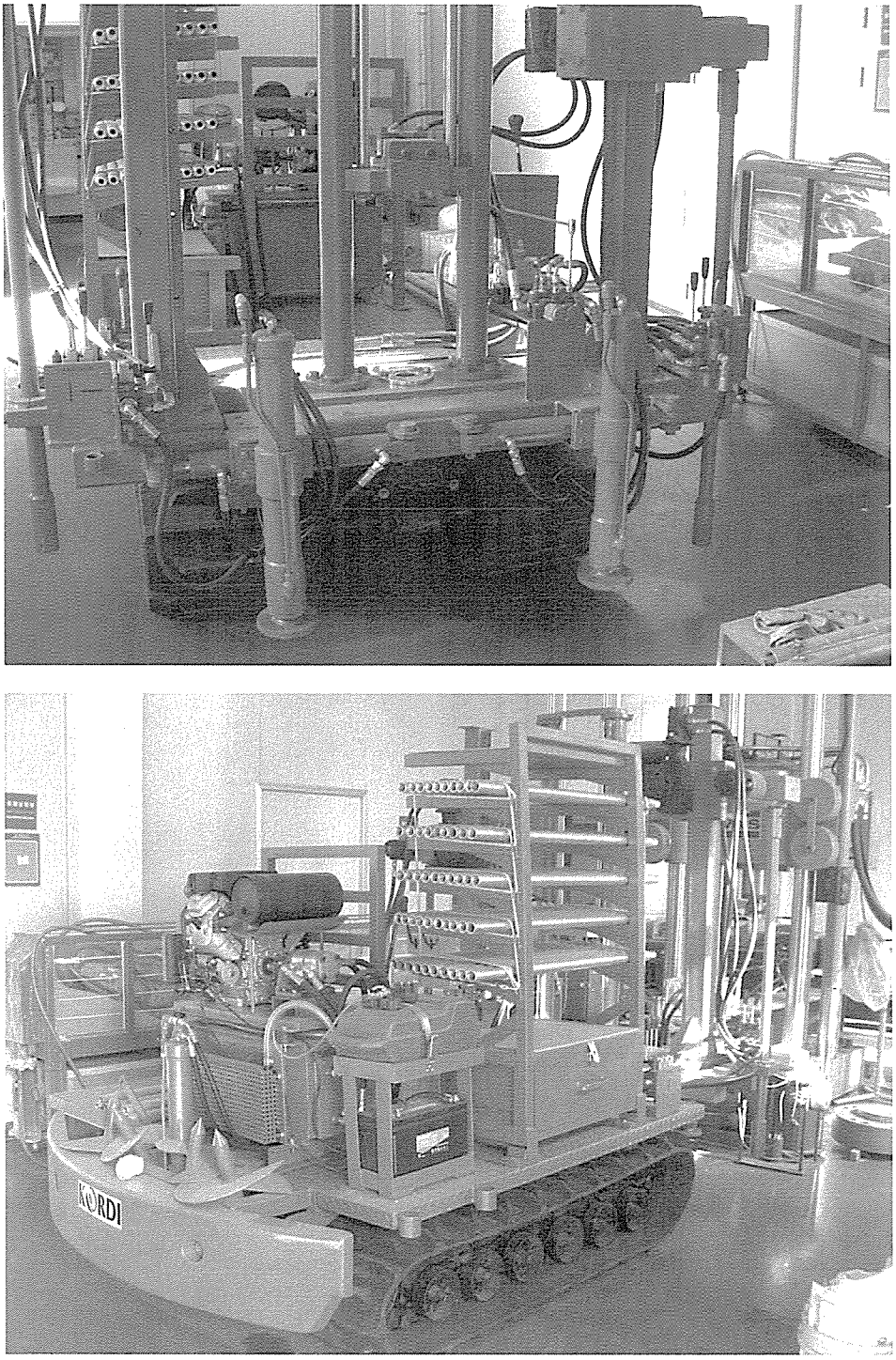


그림 3.3.27 기존 콘관입시험 장치

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제1절 연도별 연구목표 및 평가의 착안점

표 4.4.1 연차별 연구목표 및 연구내용

연 차	연구 목표	주요 내용 및 범위
1차 연도 (2005)	모형토조를 이용한 센서 개발 및 적용	1. 매설형 장비 - 점성토 모형 토조를 제작, 토조에 액츄에이터와 센서를 관입 시켜 현장 적용에서 예상되는 문제점 도출 및 시험기기와 시험방법 확정 2. 인홀 장비 - 부품개발과 콘 장착에 따른 문제점 해결
2차 연도 (2006)	현장 적용 및 문제점 도출	1. 매설형 장비 - 현장 관입이 가능한 장비에서 적용할 수 있는 장비 개발에 수반되는 문제점 도출 및 해결 - 현장시험시공을 통한 개발 장비의 성능 평가 2. 인홀 장비 - 기존 콘 장착용 모듈 개발 - 현장검증시험을 통한 개발 장비의 성능 평가 - 인홀 매설형 장치의 가능성 평가 - 매설형 크로스홀 장치와 매설형 인홀 장치의 성능 비교
3차 연도 (2007)	최종 현장용 기기 완성 및 콘 시작품 제작	1. 매설형 장비 - 현장 적용 결과 시험 가이드라인 제시 2. 인홀 장비 - 현장 적용 결과 시험 가이드라인 제시

제2절 연구개발목표의 달성도

연구과제는 1차년도 평가 결과와 자문회의에서현장 적용성을 가장 우선적으로 검증하여야 한다는 의견을 받아들여 개발된 장비를 현장에서 적용성에 중점을 두어 연구를 수행하였다.

연구목표에 대한 달성도는 100% 이상 달성하였으며, 연구개발 진도와 달성도는 다음 표 4.2.1과 표 4.2.2와 같다.

표 4.2.1 연구개발 진도

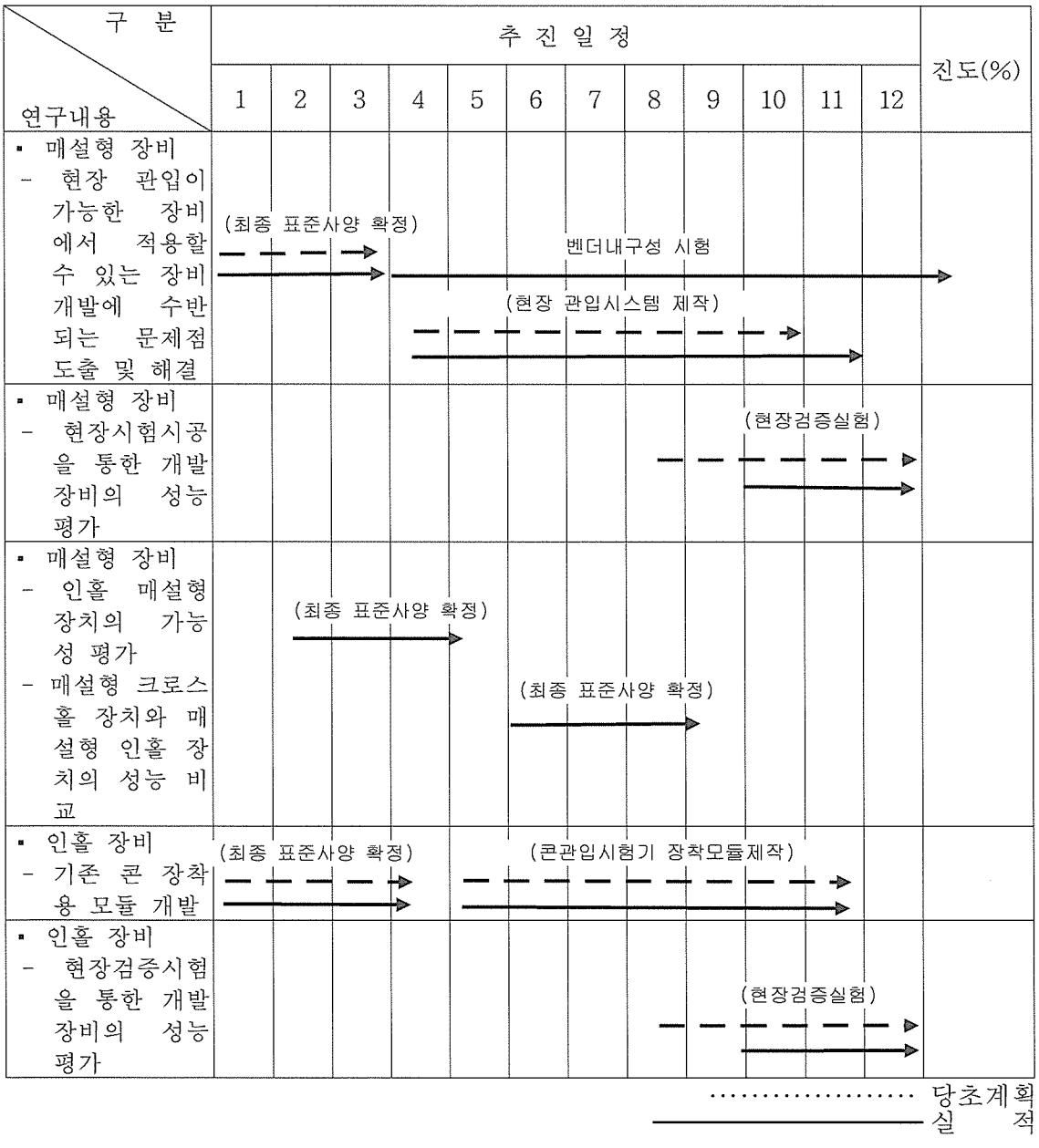


표 4.2.2 연구개발 목표의 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
○ 현장시험시공을 통한 매설형 장치의 성능 평가	100%	○ 벤더 코팅 및 케이블의 특성 평가 ○ 벤더 관입 기법 개발 ○ 현장검증시험 수행을 통한 성능검증
○ 현장검증시험을 통한 인홀형 탄성파콘 성능평가	100%	○ 개발 제품 문제점 보완 ○ 기존 콘관입시험기 장착모듈 개발 ○ 현장검증시험 수행을 통한 성능검증

제3절 연구성과

개발 장비의 실용화를 위하여 특허 출원과 연구 결과의 발표를 수행하였으며, 자문회의를 통하여 현장 기술자들로부터 기술의 실용화를 위한 다양한 의견을 수렴하여 연구에 반영하였다. 또한 개발된 기술의 실용화를 위하여 기술협력을 추진하였다.

① 특허 출원

- 출원번호 47757, 인홀형 탄성파 시험용 계측장치, 2006
- 출원번호 47759, 벤더를 이용한 크로스홀형 탄성파 시험, 2006
- 출원번호 57862, 벤더 엘리먼트를 이용한 연약지반 측정 장치, 2007

② 학술발표

- "연약지반의 강성 측정을 위한 벤더 엘리멘트의 현장 적용성 연구", 한국지반공학회 봄 학술 발표회
- "정규압밀점토의 강성도와 전단강도의 상관관계", 2006년 한국지반공학회 봄 학술 발표회
- "Implementation of Bender Elements to Measure In-situ Stiffness of Soft Clays", 4th ICEE (2006.10. 12-13), Taipei, Taiwan
- "벤더 엘리먼트를 이용한 연약지반 강성측정을 위한 매설형 계측기에 대한 연구", '07 한국지반공학회 봄 학술 발표회
- "Development of buried Sensors for Stiffness Measurements of Soft Clays Using Bender Elements", GEESD Ⅳ (2008. 5. 18-22), Sacramento, CA, USA 논문 제출

③ 논문 발표

- "연약지반의 강성 측정을 위한 벤더 엘리먼트의 현장 적용성 연구", 한국지반공학회 논문집, 제22권, 제11호, pp37~35

④ 자문회의 개최

- 'Piezoelctronics 실용화 관련 자문회의' 개최

  장소 : 르네상스호텔(서울) 세미나실

  일시 : 2006년 9월 1일

참석 : 산학연 관계자 20인

⑤ 기술협력 : 일본 진공압밀 협회 공동 연구 협의

- Dike 와 Maruyama co.
- 개발된 센서와 기술적용 협의

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

최종적으로 연구가 완료된다면, 매설형 크로스홀 시험장치는 다른 센서에 비해 저렴하고, 신속한 설치와 미세한 범위까지 정밀한 측정이 장점이기 때문에 연약지반(특히, 준설매립지반)의 강도 및 특성 변화 계측분야에 적용할 예정이며, 인홀형 탄성파 콘은 기존 콘에 부착할 수 있도록 제작할 예정이기 때문에 기존 콘관입시험기를 사용하고 있는 업체를 대상으로 판매할 예정이다.

연구가 성공적으로 마무리된다면, 다음과 같은 기대효과를 기대할 수 있다.

매설형 크로스홀 계측장치를 사용하면 연약지반의 강도변화를 지속적으로 계측할 수 있어 적용 공법의 효과를 계속적으로 검증할 수 있으며 또한 다음 공정을 신속하고 안전하게 진행할 수 있어 공기 단축의 효과와 안전한 시공을 보장할 수 있다.

인홀형 탄성파콘은 지반에 관입되는 순간마다 지반의 동적인 특성인 전단파 전파속도를 측정할 수 있어, 내진설계 및 내진 안전성 평가 분야에서도 크게 활용 가능하다.

제 6 장 참고문헌

1. 목영진(1992), "In Situ Measurement of Stiffness and Damping of Soils by Crosshole and Downhole Methods", **한국지반공학회 지반진동 위원회 제1회 학술논문집,** 제1권 제1호 pp. 1-18
2. 목영진(1994), "역산이론을 이용한 다운홀 시험 결과의 해석", **한국지반공학회 논문집**, 제 10권, 제4호, pp. 29-37
3. 목영진, 강병수, 김정한(2003a), "인홀 시험을 이용한 암반의 동적물성치 측정", **한국토목학회 논문집**, 제 23권, 제 2C호, pp. 119-125
4. 목영진, 정진훈, 김영수(2005), "지반의 동적물성치 측정을 위한 인홀탄성파시험의 최근 발전", **한국지반공학회 논문집,** 제21권 1호 pp.105-114
5. 목영진, 김영수(2005), "인홀 시험을 이용한 터널 막장의 암반강성 측정에 대한 적용성 연구", **한국지반공학회 봄학술발표회**
6. 백영식 외(1997), **지반구조의 영상화를 위한 Seismic Geotomography 개발**, 건설교통부
7. 임수빈 외(1997), "중앙고속도로 영주-제천간 10공구건설공사 - 두음교 기초지반의 확인조사 및 처리공법", 동부엔지니어링(주)
8. 유재영, 김기일, 손은화(2002), **압전 세라믹스** 한국과학기술정보연구원
9. 한국해양연구원(2004),**해양콘관입시험기 개발**, 해양수산부, p.190
10. Campanella, R.G., Robertson, P.K., and Gillespie,D.(1986), "Seismic Cone Penetration Test", "Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering", ***Geotechnical Special Publication***, No.6, Virginia Tech., Blacksburg, VA, pp. 116-130
11. Mok, Y,J., Kim, J,H., and Kang, B,S.(2003b), "A Pilot Study of In-Hole Seismic Method", ***Journal of the Korean Geotechnical Society***, Vol.19, No.3 June, 2003, pp. 23-31.
12. Hoar, J.R.(1982), ***Field Measurement Of Seismic Wave Velocity And Attenuation For Dynamic Analyses***, Ph.D Dissertation, University of Texas at Austin. pp. 37-447

13. Stokoe, K.H., II, and Woods, R.D.(1972), "In-Situ Shear Wave Velocity by Cross-Hole Method", ***Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division***, Proceedings, ASCE, Vol. 98, No. SM5, pp. 443-460
14. Richart, F. E., Hall, J. R., Wood, R. D.(1970), "Vibration of Soil and Foundation", Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jerrsey
15. J.C. Santamarina, in collaboration with K.A. Klein and M.A. Fam(2001), ***Soils and waves***, Chichester ; New York
16. Gautschi, G. (Gustav)(2002), ***Piezoelectric sensorics***, Berlin ; New York : Springer
17. Vives, Antonio A.(2004), ***Piezoelectric transducers and applications***, Berlin ; New York : Springer-Verlag
18. Uchino, Kenji(1997), ***Piezoelectric actuators and ultrasonic motors***, Boston, MA : Kluwer Academic Publishers
19. Arulnathan, R., Boulanger, R., and Reimer,M.F.(1998), "Analysis of Bender Element Test", ***Geotechnacal Testing Journal***, ASTM, vol.21, No.2, pp.42-53
20. Viggiani G. & J.H.Atkinson(1995), "Interpretation of bender element tests", ***Geotechnique***, vol.45, No.1, pp. 149-154
21. Vincenzo Fioravante and Roerto Capoferri(2001), "On the use of multi-diredctional piezoelectric transducers in triaxial testing", ***Geotechnical Testing Journal***, vol. 24, No. 3, pp. 243-255
22. G.M.Brignoli, Marino Gotti and Kenneth H. Stokoe,II(1996), "Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers", ***Geotechnical Testing Journal***, vol. 19, No. 4, pp. 384-397
23. Dyvik, R. and Madshus, C.(1985), "Laboratory Measurement of G_{max} Using Bender Elements", ***Proceedings ASCE Annual Convention, Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions***, Detroit, Michgan
24. Xiangwu Zeng and Bixian Ni(1998), "Application of bender element in measuring G_{max} of sand under K_o condition", ***Geotechnique***, vol. 45, No. 1, pp. 149-154

25. M. L. Ling and P. D. Greeding(2001), "A novel bender/extender element for soil testing", ***Geotechnique***, vol. 51, No. 8, pp. 713-717

주 의 사 항

1. 본 보고서는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술 연구개발사업의 최종(중간) 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)381-6311
(주) 다 이 크 이 앤 씨 TEL 031)777-3233
경희대학교 산학협력단 TEL 031)201-2927
한 국 해 양 연 구 원 TEL 031)400-6311

R&D / 05건설핵심C13

지속 가능한 연약지반 역학적 특성 평가를 위한 Piezoelectronics의 실용화 연구보고서

■ 발행일 / 2007. 7. 31.
■ 발행처 / (주)다이크이앤씨
경기도 성남시 중원구 상대원동 440 선일테크노피아 404호
TEL : 031-777-3233
■ 인쇄처 / 정인사