

II. 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test

김동수*1, 김기석*2, 조성민*3, 황대진*4, 황성준*5

1. 머리말

최근 대형 토목구조물에 있어서 내진 설계가 필수 사항이 되고 있다. 구조물 내진 설계를 하기 위해서는 구조물에 가해지는 지진하중을 기본적으로 산정해야 하며 이것은 부지 고유의 지진응답해석(Site-Specific Response Analysis)을 통해 기반암 상부의 토사 지반으로 인한 증폭 혹은 감쇠된 지표면 가속도와 설계응답스펙트럼을 추정하는 방식으로 결정된다. 그러므로 신뢰성 있는 해석을 수행하기 위해서는 기반암 상부 지반의 동적 물성치를 정확히 획득하는 것이 매우 중요하게 된다. 내진설계와 관련된 지반의 동적 물성치에는 전단파 속도 주상도, 정규화전단탄성계수, 감쇠비, 액상화계수 등이 있으며 다양한 현장 및 실내 시험을 통해 이러한 내진설계 관련 변수들을 획득하고 있다. 최근 들어 턴키(Turn-Key)제도 등에 힘입어 동적 물성치 관련 시험 기법의 수요가 폭발적으로 증가하고 있으며 다양한 연구를 통해 새로운 기법들이 개발되고 있다.

전단파 속도 주상도를 도출하기 위해 다운홀(Downhole), Suspension-PS Logging, MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) 시험 등과 같은 현장 탄성과 탐사가 흔히 사용되고 있으며 정규화 전단탄성계수와 감쇠비는 공진주 시험(Resonant Column Test), 액상화계수는 진동삼축 시험(Cyclic Triaxial Test)을 통해 평가되고 있다. 이러한 시험들은 기법별 특성에 따라 도출되는 결과가 다를 수 있으며 같은 기법이라고 해도 사용되는 장비나 해석자에 따라 결과가 다를 수 있다. 토목 구조물 설계자는 필요한 변수를 결정할 때 실험기법 혹은 실험장비 차이 등으로 인해 발생한 서로 다른 결과 중에 어느 것을 설계에 적용할지 고민에 빠지게 되며 서로 다른 설계 변수를 사용하여 설계를 수행할 시에는 같은 부지에 건설되는 구조물일지라도 설계 결과가 달라질 수 있다. 따라서, 지반공학회 지반진동위원회에서는 지반의 동적 물성치를 획득하는 다양한 현장 및 실내 기법들에 대한 Round Robin Test의 수행을 통해 이러한 문제점들을 이해하고 해결할 수 있는 방안에 대해 연구하여 보고자 하였다.

Round Robin Test란 일종의 상호검증 시험으로 비교할 특정 물성치에 대해 동일한 시험 조건으로 여러 기관에서 다양한 장비를 가지고 물성치를 각각 도출하고 그 값을 비교, 검증하는 것을 말한다. 이런

*1 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수
(dskim@kaist.ac.kr)

*2 (주)회송지오테크 대표이사

*3 한국도로공사 민자도로처 수석 연구원

*4 삼성물산 건설부문 기술연구소

*5 경주대학교 건설환경공학부 사회기반공학 교수

II. 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test

시험들을 통해 특정 실험이 항상 옳은 값을 도출한 다거나 특정 기관에서 수행한 실험 결과가 잘못 되었다고 결정짓고자 하는 것이 목적이 아니며 시험기 법의 차이를 올바르게 이해하고 획득한 동적 물성치 를 설계에 올바르게 적용할 수 있도록 도움을 주는 데 그 목적이 있음을 밝힌다.

2. 참여기관 및 기관별 수행기법

Round Robin Test는 여러 기관의 참여가 있어야

지만 수행이 가능하므로 비교하고자 하는 동적 물성 치나 각각의 시험 기법에 대해 수행 가능한 기관들의 적극적인 참여가 필요하였다. 2004년 상반기에는 실내 시험에 대해 2004년 하반기에는 현장 시험에 대한 Round Robin Test를 진행하였다. 참여기관의 선정은 지반공학회 홈페이지 등을 통해 적극 홍보하 고 일정기간 신청 접수를 받는 방식으로 하였다.

동적 물성치를 결정하는 대표적인 실내 실험인 공 진주 및 진동삼축시험은 국내에서는 대학교를 중심 으로 연구 목적으로 많이 수행되고 있다. 본 Round Robin Test에는 국내에서 시험을 수행하는 대부분

표 1. 실내 시험에 대한 기관별 수행기법

참가기관 수행기법	경희대학교	동의대학교	서울대학교	연세대학교	중앙대학교	한국과학기술원	총 개수
공진주 시험	0	0	0	0	0	0	6
진동삼축시험			0	0			2

표 2. 현장 시험에 대한 기관별 수행기법

참가기관 수행기법	희송 지오텍(주)	지하정보 기술(주)	지오맥스 (주)	다이크 (주)	아시아 지오컨설턴트(주)	한국과학 기술원	중앙 대학교	경희 대학교	한국지질자원 연구원	총 개수
다운홀	0		0	0	0	0	0			6
크로스홀								0		1
인홀								0		1
SPT 업홀						0				1
S-PS		0	0	0	0					4
MASW	0	0	0	0						4
SASW						0	0			2
HWAW						0				1
REMI		0								1
VSP			0							1
굴절법	0								0	2
반사법									0	1
전기비저항	0									1
밀도 검층									0	1
공경 검층									0	1

* 현장 시험부지는 한국도로공사의 협조 아래 서해대교 평택측에 마련되었으며 부지 내 시추작업은 (주)희송지오텍에 의해 수행되었음.

특집

표 3. 협조해 주신 참가 기관별 대표자 및 실무자 명단

참가기관		대표자	실무자
학교	경희대학교	목영진	김영수, 박철수
	동의대학교	권기철	김성수
	서울대학교	정충기	최연수
	연세대학교	김수일	박성용
	중앙대학교	조성호	강태호, 박병선, 이양로
	한국과학기술원	김동수	방은석, 윤준웅, 김종태, 김승희, 박현준
지반조사업체	(주)다이크	장현삼	홍재호, 김봉찬
	(주)아시아지오컨설턴트	사카구 씨가스미	김영완, 신형욱
	(주)지오맥스	하희상	고광범, 박기태
	지하정보기술(주)	조철현	최재화, 차영호, 강종석
	(주)희송지오택	김기석	안희윤, 윤진성, 정래철
연구소	한국지질자원연구원	황세호	박권규, 신제현
	한국도로공사 도로교통기술원	조성민	김홍종, 정종홍, 정경자, 선창국, 김연수

표 4. 시험시료의 기본물성치

· 시료명	주문진 표준사
지반분류(USCS)	SP
비중(G_s)	2.66
최대간극비(e_{max})	0.914
최소간극비(e_{min})	0.622
곡률계수(C_c)	1.11
균등계수(C_u)	1.41
D_{50} , mm	0.492
소성지수(PI)	NP

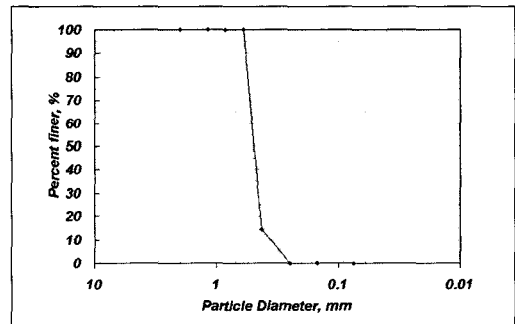


그림 1. 시험시료의 분포도

의 학교에서 참여하여 공진주 시험 6개소, 진동삼축 시험 2개소로 진행하였다. 전단파 속도 주상도 등의 현장의 동적 물성치를 결정하는 기법들은 국내에서 다양한 지반조사 전문 업체, 학교, 연구소 등에서 수행되고 있다. 접수를 받은 결과 지반조사 전문 업체 5곳, 학교 3곳, 연구소 1곳이 참여하기로 결정되었다. 실내 및 현장 시험에 대한 참가기관 및 기관별 수행기법은 표 1, 2와 같으며 협조해 주신 참가 기관별 대표자 및 실무자 명단을 표 3에 정리하였다.

3. 실내 Round Robin Test

공진주시험 및 반복삼축 시험은 지반의 동적물성 규명에 사용되는 대표적인 실내시험으로서, 국내에서 내진설계시 입력물성 산정을 위하여 가장 널리 이용되고 있다. 따라서 최근 내진설계의 중요성과 함께 시험의 신뢰도에 대한 고찰이 필요하다고 판단되며, 이를 위해 RRT가 수행되었다.

3.1 시험시료 및 성형방법

본 RRT에서는 시험시료로 주문진 표준사를 사용하였으며, 사전 협의에 의하여 참여기관 중 KAIST에서 준비한 동일하게 제작된 성형 노즐과 함께 각 참여기관에 배포되었다. 시험에 사용된 주문진 표준사에 대한 기본물성치 및 입도분포곡선을 표 4 및 그림 1에 나타내었다. 또한, 다음과 같은 시료의 성형방법을 공지하여 시험시료의 균일성을 높이고자 하였다.

시료의 성형은 건조낙사법(Air-Pluviation Method)을 적용하며, 자연건조된 시험시료를 제공된 내부 직경 6.4mm를 갖는 노즐을 통하여 몰드 안으로 자유 낙하시키면서 노즐의 끝부터 모래시료가 낙하하는 거리가 일정하게 유지되도록 성형하도록 하며, 또한 시편의 상대밀도를 조절하기 위하여 노즐로부터의 낙하고를 달리하도록 하였다.

3.2 공진주시험

3.2.1 공진주시험개요 및 해석방법

본 RRT에서는 모든 참여기관에서 Stokoe식 공진주/비틀전단 시험기를 이용하여 시험을 수행하였

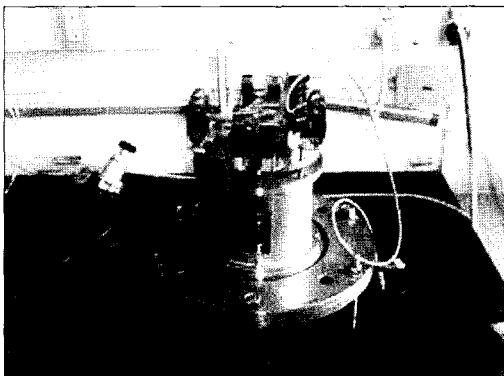


그림 2. 스토키 타입의 공진주 시험기

다. Stokoe식 공진주시험기는 가진시스템으로 코일-자석 시스템을 이용하며 동일한 시험기를 이용하여 공진주시험과 비틀전단 시험을 동시에 신뢰성 있게 수행할 수 있는 장점을 가진다(그림 2).

공진주시험은 시편의 바닥을 고정시키고 정현파 비틀력을 주파수를 변화시켜가며 시료의 윗단부에 작용시키고 주파수에 따른 시료의 변위를 가속도계를 이용하여 측정하여, 원통형 시료가 1차모드에서 공진이 유발될 때의 탄성과 전단이론을 바탕으로 하여 시료의 전단변형률에 따른 전단파 속도, 전단탄성계수 및 재료 재료 감쇠비와 같은 동적물성치를 결정하게 된다. 최근에, 조성호 등(2003)에 의해 공진주시험을 수행하며 동적증폭계수 곡선을 획득하여 고유주파수를 이용하여 전단탄성계수를 결정하는 방법과, 동적증폭계수와 위상각 스펙트럼을 사용하여 재료 감쇠비를 구하는 주파수 위상각법 등이 제안되어 이용되고 있다.

3.2.2 공진주시험 시험조건 및 시험방법

시험조건 및 방법을 공지하여 각 참여기관에서 RRT를 수행할 때 동일한 조건을 따라서 시험을 수행한 결과를 제출하도록 하였다. 공지된 시험방법을 정리하면 다음과 같다.

건조낙사법을 통하여 시편을 성형한 후, 몰드를 제거하기 전에 25kPa의 진공압을 가하여 시료를 자립하도록 하며, 몰드를 제거 한 후 시료의 초기 높이 및 직경을 측정한다. 시험은 건조상태에서 수행하며, 평균 유효구속응력 50kPa, 100kPa, 200kPa, 400kPa의 단계로 높여가며 각 구속단계에서 시험을 수행하도록 한다. 구속응력은 각 구속응력 단계에서 30분간 재하하도록 하며, 가능한 경우 시험 전 높이 변화를 측정하도록 한다. 각 구속응력 단계에서 입력 전압을 증가시키며 전단변형률을 0.0001%

특집

표 5. 공진주 시험시료의 성형조건 및 시험절차

시료 시료성형법	주요진 표준사		
	건조 낙사법(air-pluviation method)		
시험조건	상대밀도, D_r	배수조건	평균유효 구속응력(kPa)
	40%	건조	50/100/200/400
	70%		

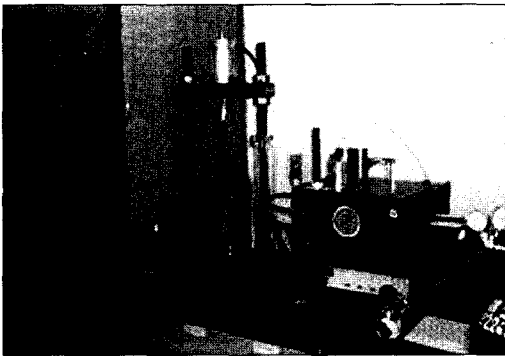


그림 3. C.K. Chan 반복삼축시험장비

~0.1%의 범위로 변화시켜가며 시험을 수행하여 주파수 응답곡선과 자유진동 감쇠곡선을 획득하고 전단탄성계수와 재료 감쇠비를 측정하며, 50, 100, 200, 400kPa 순으로 구속응력을 순차적으로 증가시켜 가며 다음 단계의 시험을 수행한다.

상대밀도에 따른 전단탄성계수 및 재료 감쇠비의 변화를 살펴보기 위하여 상대밀도 40%, 70%(건조 단위중량 1.481과 1.556 g/cm³으로 공지)의 두 가지 상대밀도에서 시편을 성형하여 시험을 실시하도록 하였으며 공지된 시료의 성형조건 및 시험절차를 정리하면 표 5와 같다.

3.3 반복삼축시험

3.3.1 반복삼축시험 개요

반복삼축 시험은 동적인 반복하중을 받는 지반의 액상화 가능성을 평가하기 위해 일반적으로 수행되

며, 본 RRT에서는 모든 참여기관에서 C. K. Chan 장비를 사용하여(그림 3) 시험을 수행하였다. 반복삼축 시험에서는 실제 지반에 반복하중이 가해졌을 때, 지반요소가 받는 반복전단응력을 묘사하기 위하여 반복 축차응력을 재하하며 배압을 조절하는 방법을 이용한다. 반복삼축 시험에서의 반복전단응력비(CSR)는 식 (1)로 표현되며, CSR을 달리하며 시험을 수행하여 CSR과 액상화 발생시의 반복재하횟수의 상관관계, 곧 액상화 가능성 곡선을 획득하여 내진설계시 액상화 가능성 평가에 이용하게 된다.

$$\text{반복전단응력비(CSR)} = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_c} \quad (1)$$

3.3.2 반복삼축 시험 시험조건 및 시험방법

반복삼축 시험시에도 공진주시험과 동일하게 물드를 제거하기 전에 25kPa의 진공압을 가하여 시료를 자립하도록 하며, 물드를 제거 한 후 시료의 초기 높이 및 직경을 측정한다. 물 순환 과정 또는 배압을 가하여 시료를 포화시킨 후 배압과 간극수압계수 B를 기록한다. 시험시 유효구속응력(σ'_0)은 100kPa의 조건에서 시험을 수행하며, 정현파 형태의 반복 축차응력을 10초의 주기를 유지하여 가하면서, 이에 따른 축차응력, 축변형률, 간극수압을 계속 측정하도록 한다. 동일한 유효 구속응력에서 반복전단응력비를 변화시켜 하중재하횟수 1~100사이에 3~4개의 결과를 나타내도록 시험을 수행하여 그 결과를 제출

하며, 액상화 발생 판단 기준(과잉간극수압비 기준 또는 축변형률 기준)에 대하여 명시토록 하였다.

4. 현장 Round Robin Test

현장 Round Robin Test는 내진설계시 수행되고 있는 지반 조사기법을 비교하여, 지반조사의 결과 값에 대한 신뢰성을 평가한 후, 내진설계에 필요한 지반 정수 제공의 기반을 마련하는데 목적이 있다. 따라서 다양한 현장 시험을 실시하여 지반의 전단파 속도(V_s) 추정도를 산정하고자 하였다. 또한 물리 탐사와 시추조사를 비롯한 시추공에서의 시험을 실시하여 동적물성치와의 관련성을 살펴보았다.

먼저, 시추조사를 통해 획득된 시추코아로부터 지층 구성상태 등을 확인하였으며, 시추조사시 지하수위 측정, 표준관입시험 등을 병행하여 각 지층의 역학적 특성을 파악하였다. 그리고 시험 시추공을 가로지르는 축선에서 전기비저항 탐사, 굴절법 탄성파 탐사 및 표면파 탐사를 실시하여 현장 지반 상태와 물성변화를 파악하였다. 또한 각각의 시추공내에서 시험을 수행하여 그 결과값을 비교·분석하여 신뢰성 높은 지반정수 산정을 도출하고자 하였다.

4.1 조사지역 현황

현장 Round Robin Test를 수행하기 위한 시험부지는 서해안 고속도로 서해대교 하부 27번 교각과 28번 교각사이에 조성되었다. 좌측으로는 공장부지, 우측으로는 평택항을 오고가는 컨테이너 트럭이 지나는 도로가 위치하고 있다. 한편, 축선진행방향으로 인접하여 서해가 위치하고 있으므로, 낮은 지하수위와 해수 침투의 가능성이 있는 지역이다. 그림4는 현장 시험부지의 전경을 나타낸 그림이다.

그림 5는 Round Robin Test 시험시추공의 위치, 지표탐사를 위한 축선을 나타낸 조사 위치도이다. Dist. 0m는 27번 교각 중심에서 28번 교각 중심 방향으로 8m 이격된 곳에 위치하고 있으며, 시험시추공 BH-1, BH-2와 BH-3은 축선상에서 각각 Dist. 10m, 17m 그리고 20m에 위치하고 있다.

현장 Round Robin Test 수행을 위한 시험시추공 3공을 2004년도 10월에 조성하였다. BH-1은 27번 교각에서 28번 교각 방향으로 18m 이격된 곳에 위치하고 있으며, BH-2와 BH-3은 각각 BH-1에서 7m, 10m 이격되어 있다. BH-1과 BH-3은 PVC 시추관이 삽입되어 있으며, BH-2는 Steel 관이 삽입되어 있다. 각각의 시추공 입구는 덮개를 씌워 이물질이 삽입되는 것을 방지 하였다. 지하수위는 3공 모두 지표하부 4m로 동일하였다. 지하수위는 1994년도에 측정된 값과 거의 변화가 없다. 표준관입시험은 기존의 시추조사에서 이용하는 표준관입시험



그림 4. 현장 Round Robin Test 시험부지 전경

특집

보다 신뢰성이 높은 것으로 알려진 자동표준관입시험(Automatic Standard Penetration Test, Auto S.P.T)을 시추 중에 실시하였다(조성민 등, 2003). 그림 6의 윗 그림은 현장 Round Robin Test 수행을 위한 시추공에 대한 현황 및 시추결과 조사된 각 지층에 대한 주상도를 나타낸 것이고, 아래 그림은 기존(1994년도)에 시추한 시추공(P-26, P-27와 P-28)의 시추단면도이다.

전반적으로 암층은 화강편마암이며, 기존 시추자료를 토대로 시추심도는 35m 내외로 계획하였다. 설계 시추조사 결과와 비교했을 때, 매립토의 심도와 지하수위가 거의 일치하고 있으며, 전반적으로 풍화암이 상대적으로 발달하고 있는 양상을 나타낸다.

Round Robin Test 시험시추조사 결과, 매립토 및 풍화토가 지표하부 15m 내외에서 발달하고 있으며, 습윤한 실트질 모래로 구성되어있다. BH-1과

BH-3에서는 풍화암층의 두께가 1.5m로 상대적으로 얇은데 반하여, BH-2에서는 층후가 9m로 풍화암층이 발달한 것으로 확인되었다.

한편 획득된 풍화암 및 연암층의 시추 코어에서는 다수의 절리 및 산화철이 관찰되고 있다. 한편, PVC 관을 삽입한 BH-1 및 BH-3에서는 시추공 주위에 시멘트 밀크를 주입하여 시추공과 밀착하였다.

그림 7은 시추전경 및 완성된 시추공 사진이다. 표 6은 각각의 시추공내에서 수행한 표준관입시험 결과이다.

4.2 참여 기관 및 시험항목

현장 Round Robin Test 수행을 위하여, 2004년 9월경 지반조사 업체, 대학 및 연구소로부터 참가 신청서를 받았다. 최종 결과물이 전단파속도 주상도

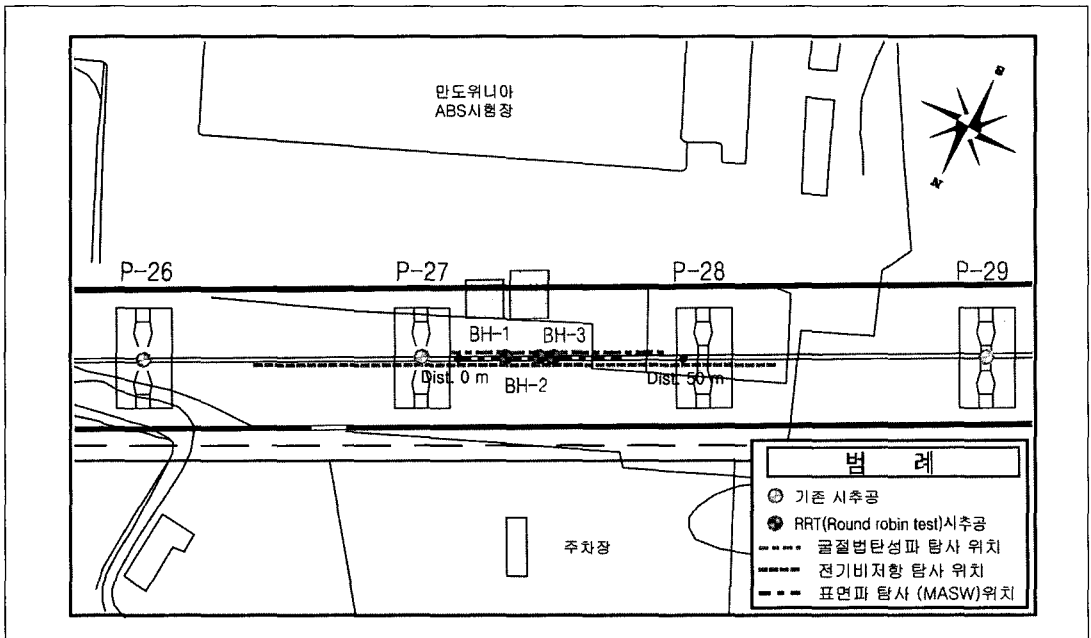


그림 5. 현장 Round Robin Test 시험부지 및 물리탐사측선 위치도

II. 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test

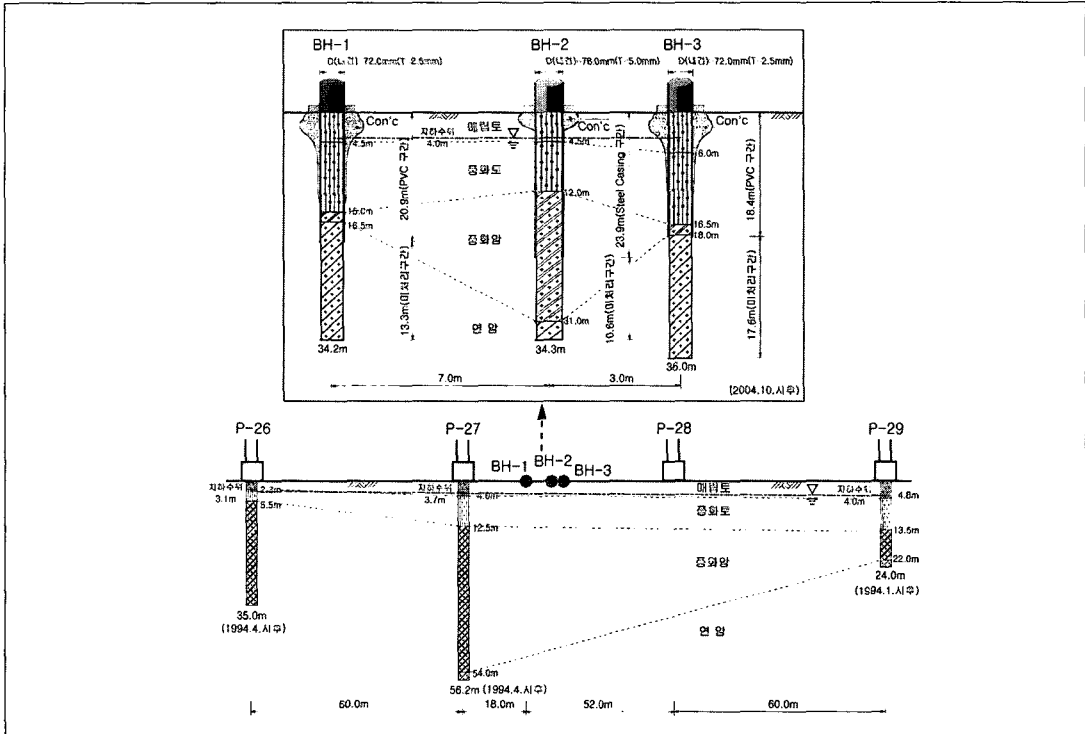


그림 6. 시험용 시추공 모식도와 시추결과 단면도(위) 및 기존 시추결과 단면도(아래)



그림 7. 시추작업 전경(좌)과 완성된 시추공(우)

특집

표 6. 시추공별 표준관입시험(S.P.T) 결과

시추공번 실도(m)P-26	1994. 4. 시험		2004. 10. 시험			1994. 1. 시험
	P-27	BH-1	BH-2	BH-3	P-29	
1.5	4/30	5/30	8/30	8/30	6/30	3/30
3.0	50/28	6/30	5/30	4/30	6/30	3/30
4.5	50/17	31/30	50/28	16/30	17/30	12/30
6.0	50/8	50/30	50/17	22/30	50/19	33/30
7.5	50/4	50/30	50/18	50/19	50/15	45/30
9.0		50/20	50/27	50/22	50/15	50/30
10.5		50/18	38/30	50/18	50/14	50/25
12.0		50/15	50/11	50/16	50/11	50/16
13.5		50/7	50/12		50/11	50/15
15.0		50/5	50/9		50/13	50/4
16.5		50/4	50/8	50/12	50/10	50/3
18.0		50/3		50/10		50/2

인 탄성파실험으로 시험항목을 한정하였고, 참여기관별로 원하는 탐사법을 수행하도록 하였다. 단, 동적물성치 산정을 위한 밀도값을 제공하기 위하여, 밀도검층은 한국지질자원연구원에서 실시하였고, 지하매질에 대한 전반적인 물성변화를 파악하기 위하여 희송지오텍에서 전기비저항 탐사를 수행하였다. 앞서 표 2에서 나타난 바와 같이 시험항목으로는 6개의 기관들이 하향식 탄성과 탐사(Downhole Test)을 가장 많이 수행하였으며, 다채널 표면파 탐사(MASW), 부유식 음파검층(S-PS)의 순으로 나타났다. 그 외의 조사항목은 1~2개의 기관에서만 수행하였다. 조사에 사용한 장비, 해석소프트웨어 및 세부적인 수행방법 등은 참여업체가 자율적으로 수행하도록 하였다. 다만, 시험항목에 따라 지표탐사의 경우 축선의 방향을 시추공 시험의 경우 가진원과 감지기의 위치가 일치되도록 하였다.

시험항목의 정량적 또는 정성적인 결과를 도출하기 위해서는 여러 기관이 참여한 탐사 결과를 토대로 비교·분석해야한다. 따라서 4개 이상의 기관에서 참여하여 수행한 하향식 탄성과 탐사, 표면파 탐

사와 부유식 음파검층의 값을 비교·분석하여 비교적 신뢰할 수 있는 지반정수를 산정하도록 하였다. 그러나 일반적으로 탄성과 탐사의 경우 초동 발체를 위한 해석자의 주관적인 관점에 의해 해석이 좌우되는 경향이 크다. 만약 획득된 신호가 이론해에 가까운 경우, 해석자 능력에 따른 결과 값의 차이가 거의 없지만, 반대의 경우는 해석자에 의한 결과 값의 차이가 많이 발생할 것으로 예상된다.

한편, 본 조사 지역은 지층 변화가 크며, 풍화암이 발달한 지역이다. 연암에서도 다수 절리가 관찰되는 바 이론해에 가까운 탄성과 신호 획득이 용이하지 않을 것으로 예상된다. 따라서 정확한 비교·분석을 위해서는 이를 고려해야 할 것으로 판단되었다.

다음은 하향식 탄성과 탐사법, 표면파 탐사법(MASW, SASW)과 부유식 음파검층법에 사용한 장비 및 해석 프로그램에 대하여 간략히 소개하였다.

표 7은 하향식 탄성과 탐사에 참여한 기관들이 사용한 장비와 초동 발체에 사용한 프로그램을 정리한 것이다. 일반적으로 업체는 상용화 된 장비를 사용하였고, 학교에서는 자체 제작한 장비를 사용하였

II. 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test

표 7. 하향식 탄성과 탐사에 사용한 참여기관별 측정장비

참여기관	장비	해석프로그램
A	BHG-3 (미국 Geostuff사), MK6 (스웨덴 ABEM사)	자체제작 프로그램
B	BHG-3 (미국 Geostuff사), McSeis (일본 OYO사)	자체제작 프로그램 (DownholeMax)
C	일본지하탐사 제작 3성분지오폰 McSeis (일본 OYO사)	SeisImager - PickWin95 Ver.2.40(일본 OYO사) 일본지하탐사 제작프로그램
D	BHG-3 (미국 Geostuff사) StrataVisor NZ (미국 Geometrics사)	SeisImager - PickWin95 Ver.2.40(일본 OYO사) SeisOptPicker Ver.1.5 (미국 OptSoftware사)
E	자체제작 3성분 감지기 set HP Dynamic Signal Analyzer 35670A	자체제작 프로그램 (DHinv 1.0)
F	자체제작 3성분 감지기 set DAQ장비 : Graphtec MA6000	자체제작 프로그램



그림 8. 하향식 탄성과 탐사 현장시험 전경

다. 업체에서 전반적으로 사용한 미국 Geostuff사의 BHG-3는 기계식 3성분 지오폰으로서 설치와 작동이 쉽고, 전자식 나침반이 내장되어있어서 쉽게 방향을 잡을 수 있는 장점이 있다. 참여한 기관은 가진 원으로 모두 햄머를 사용하였으나 플레이트는 각각 자체 제작한 것을 사용하였다. 초동 발체에 사용한 프로그램은 2곳의 업체가 상용프로그램을 사용하였고, 나머지 기관은 자체 제작한 프로그램을 사용하였다.

하향식 탄성과 탐사를 수행한 참여기관 모두 BH-1에서 하향식 탄성과 탐사를 수행하였고, 측정

간격은 1m이다. 따라서 현장 Round Robin Test를 위한 결과 값의 비교·분석은 BH-1에서 실시한 결과에 근거하여 수행하였다. 그림 8은 조사지역에서 하향식 탐사를 수행하고 있는 모습을 촬영한 것이다.

표 8은 표면과 탐사중 MASW 기법에 참여한 기관들이 사용한 장비를 정리한 것이다. E기관을 제외한 표면과 탐사를 수행한 업체들은 상용화된 장비 및 해석프로그램을 사용하였다. A, B, D 기관은 24채널, C와 D기관은 12채널을 사용하였고, 지오폰 간격은 참여기관 모두 1m로 설정하였다. 송신원은 전 참여기관이 햄머를 사용하였고, 측정방법은 전

표 8. MASW기법 수행에 사용한 참여기관별 측정장비

참여기관	장비	해석프로그램
A	4.5Hz 지오폰 (미국 Geospace사), MK6 (스웨덴 ABEM사)	Seislmager - WaveEq Ver.1.6 (일본 OYO사)
B	DAS1 (미국 Geospace사), McSeis (일본 OYO사)	Sufseis 1.5 (미국 KGS)
C	4.5Hz 지오폰 (미국 Geospace사), Geode (미국 Geometrics사)	Sufseis 1.5 (미국 KGS)
D	4.5Hz 지오폰 (미국 Geospace사) StrataVisor NZ (미국 Geometrics사)	Seislmager - WaveEq Ver.1.6 (일본 OYO사)
E	4.5Hz 지오폰 (Provolt사 OEM) Summit compact (독일 DMT사)	Sufseis 1.5 (미국 KGS)

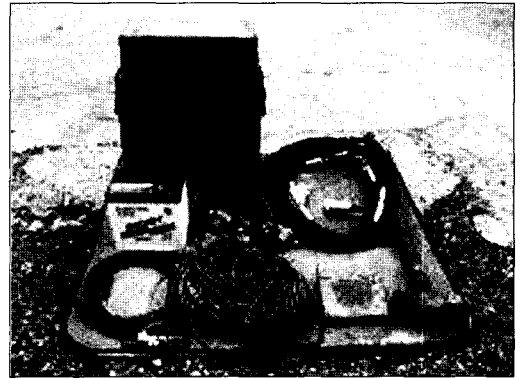


그림 9. MASW 기법 장비 및 현장시험 전경

기관이 KGS (Kansas Geological Survey) 제안한 방법을 적용하였다. KGS 방식은 최적의 송수신간격을 고려하여 수행하기 때문에 대부분의 업체에서 채택하고 있다(Park, C.B. et al; 2002). 해석프로그램은 일반적으로 많이 사용되고 있는 일본 OYO사의 WaveEq와 미국 KGS의 Surfseis를 이용하였다. 그림 9는 MASW 기법 장비 및 수행하고 있는 모습을 촬영한 것이다.

표 9는 표면파탐사 중 SASW, HWAW, REMI 기법에 사용된 장비를 정리한 것이다. A,B 기관 모두 같은 감지기와 해석장비를 사용하였으며 해석프로그램도 버전만 다른 같은 프로그램을 사용하였다. 다양한 무게의 가진원을 사용하여 시험을 수행하였으며 A 기관에서는 감지기를 고정시킨 후 발진원을

이동시키는 방법으로 시험을 수행하였고, B 기관에서는 감지기의 간격을 늘려가며 시험을 수행하였다. 그림 10은 SASW 표면파 탐사를 수행하고 있는 모습을 촬영한 것이다.

표 10은 부유식 음파 검층에 참여한 기관들이 사용한 장비 및 해석프로그램을 정리한 것이다. 측정 간격은 1m이고, PVC 케이싱으로 처리된 BH-1과 BH-3에서 측정하였다. 부유식 음파 검층을 수행한 기관의 Probe는 3개 기관이 일본 OYO사의 제품이고, 3개의 업체가 동일 해석프로그램을 사용하였다. 부유식 음파 검층은 시추로 인하여 교란된 지반의 영향을 작게 받으며 연속적인 측정이 가능하지만 측정규모가 작기 때문에 공내수, 공벽의 변화 등에 영향을 받으며 많은 장비의 측정원리 및 교정 등에 대

II. 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test

표 9. SASW, HWAW, REMI 기법 수행에 사용한 참여기관별 측정장비

참여기관	기법	장비	해석프로그램
A	SASW	1, 4.5Hz 지오폰 (미국 Mark Products) HP35670A (미국 Agilent사)	WinSASW 2.3.2 (미국 UT)
B	SASW	1 Hz 지오폰 (미국 Mark Products) HP35670A (미국 Agilent사)	WinSASW 1.2.3 (미국 UT)
	HWAW	1 Hz 지오폰 (미국 Mark Products) HP35670A (미국 Agilent사)	WinSASW 1.2.3 (미국 UT)
C	REMI	4.5Hz 지오폰 (미국 Geospace사) Geode (미국 Geometrics사)	ReMi 2.0 (미국 SeisOpt)

표 10. 부유식 음파 검층에 사용한 참여기관별 측정장비

참여기관	장비	해석프로그램
A	Probe (일본 OYO사), Logger (일본 OYO사)	GLog-SUS 1.12 (영국 RG사)
B	Probe (영국 RG사), Logger (영국 RG사)	GLog-SUS 1.12 (영국 RG사)
C	Probe (일본 OYO사), Logger (영국 RG사)	GLog-SUS 1.12 (영국 RG사)
D	Probe (일본 OYO사), Logger (일본 OYO사)	일본지하탐사 제작프로그램



그림 10. SASW 기법 현장시험 전경

한 정확한 이해와 기술적인 숙련이 있어야 정량적인 자료의 획득이 가능하다(황세호 등, 1999).

그림 11은 부유식 음파 검층 장비 및 수행하고 있는 모습을 촬영한 것이다.

4.3 각 기법의 결과와 현장 시험 축선의 영향 요소

각 시험기법 간의 결과를 합리적으로 비교하고 분석하기 위해서는 시험이 수행된 현장에 대한 고찰이 필요하다. 본 조사지역은 교각으로부터의 진동의 영향이 있으며 시추조사 결과, 토사층 및 풍화암의 심도가 상대적으로 깊고 다수의 절리가 발달되어 있는바 양질의 신호를 획득하기 어려울 것으로 예상되었다.

본 조사지역 지하매질에 대한 전반적인 물성변화

특집



그림 11. 부유식 음파 검출 장비 및 현장시험 전경

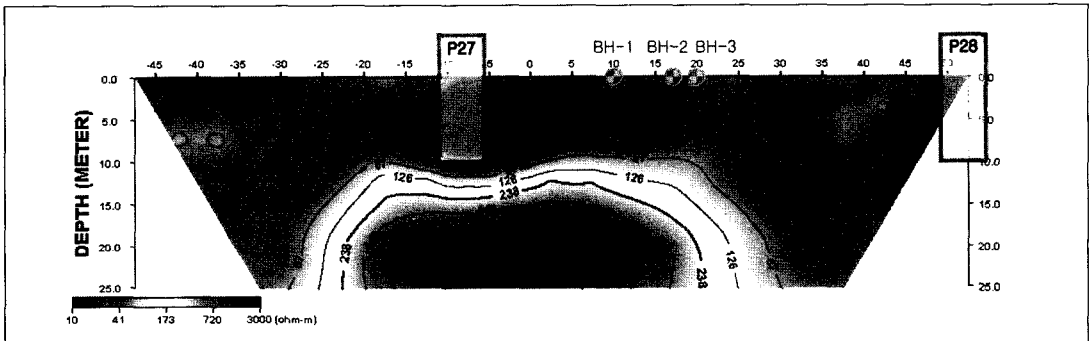


그림 12. 전기비저항 탐사 역산 결과

를 파악하기 위하여 전기비저항 탐사를 수행하였다. 자료처리 결과 RMS Error가 7%의 신뢰도 높은 결과를 나타냈으며 그림 12에 도시하였다. 본 조사지역은 교각 기초에 사용된 철근 및 주변 공장지역과 인접한 곳이며, 염수침투의 우려가 있는 지역으로 전기적 잡음이 심할 것으로 예상되는바 변형된 쌍극자 배열법으로 자료를 획득하였다. 전반적으로 지표 하부 14m 내의 천부에서 200ohm-m 이하의 저비저항대가 균질하게 나타나고 있다. 또한 하부의 고비저항대 양상도 균질한 모습을 보여주고 있다. 천부의 균질하게 분포된 50ohm-m 이하의 저비저항층은 매립토 및 풍화토층의 영향으로 판단되며, 하

부의 120ohm-m 이상의 고비저항층은 기반암의 영향으로 판단된다. 이는 시추조사 결과와 일치한다. 또한 Dist. -8m 와 52m 부근에서의 저비저항 이상대는 교각의 의한 영향으로 판단된다. 이는 전기비저항 탐사시 측선 하부에 전기적 전도체가 존재할 경우 전류전극에 의해 흘러준 전류가 접지봉과 같은 전도체 주위에서 전류집중 현상(Current Channeling)을 유발하여, 이에 의해 지하매질 및 지표의 전위분포에 왜곡이 발생하여 역산단면에 저비저항 이상대가 나타난 것으로 해석 시 이를 유의하여야 한다.

그림 13은 시추공 BH-1위치에서의 표면파기법들의 결과와 시추공탐사법의 결과를 간략하게 비교

II. 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test

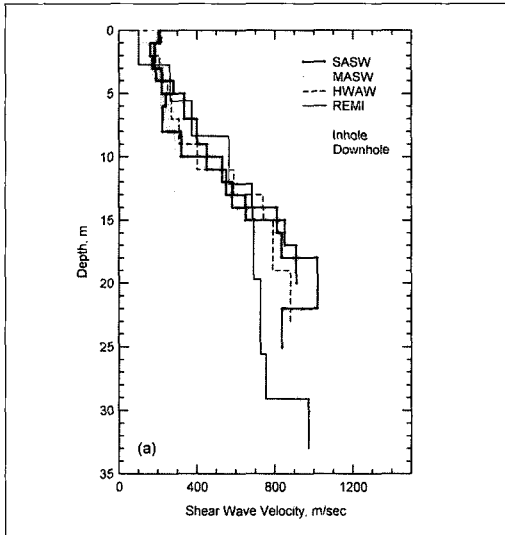


그림 13. 표면파 시험결과와 시추공시험 결과

한 그림이다. 그림 14는 시추공에서 물리검층법으로 측정된 지반의 횡파속도, 밀도 및 전단탄성계수를 나타낸 그림이다. 각 결과의 분산정도와 가탐심도 등 각 시험법간의 이해와 동적물성치의 현장적용에 대한 고찰이 필요하다고 판단된다.

비록 시추공 시험과 지표 시험과의 자료를 비교하기 위하여 시험 시추공을 가로지르는 축선을 설계하였으나, 축선이 교각과 교차되고 해수 침투 우려가 있는 지역인바 인공적인 잡음의 영향에 의하여 데이터 오차의 한 요인이 될 수 있다. 그러나 현장 Round Robin Test 참가 기관들의 결과를 비교 분석함으로써 자료의 오류범위, 동적 물성치 등의 도출이 가능하며, 산정된 결과를 토대로 내진설계에 기초자료로 활용 가능성이 있을 것으로 판단된다.

5. 맺음말

본 Round Robin Test의 결과와 분석은 2005 지반공학회 봄학술발표회의 특별 세션을 통해 발표될 예정이며 4월중으로 별도의 보고서가 제출될 예정이다. 앞서 말한 바와 같이 Round Robin Test는 일종의 상호검증 시험으로 비교할 특정 물성치에 대해 동일한 시험 조건으로 여러 기관에서 다양한 장비를

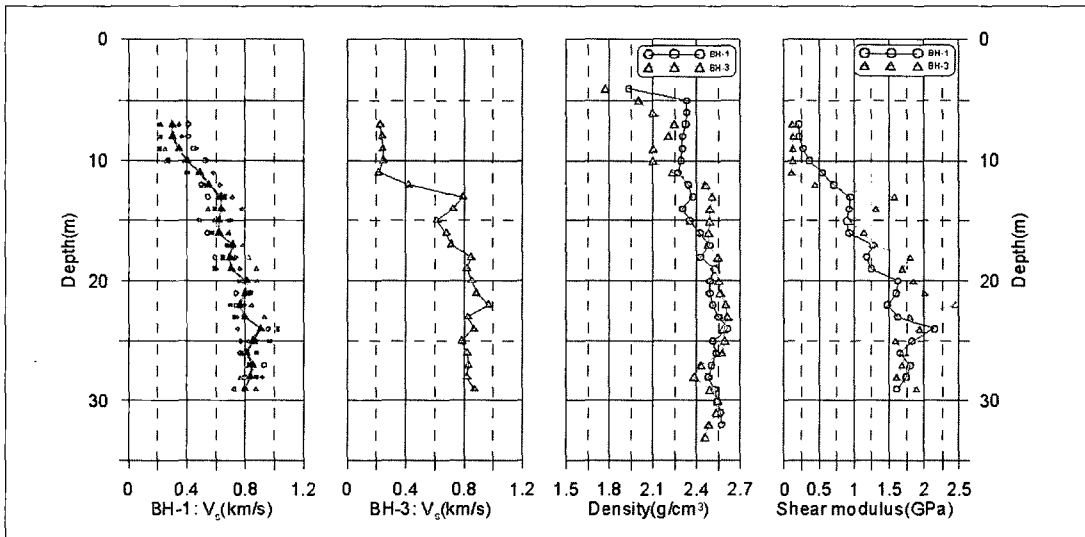


그림 14. 물리검층법으로 측정된 지반의 횡파속도, 밀도 및 전단탄성계수

특집

가지고 물성치를 각각 도출하고 그 값을 비교, 검증하는 것이다. 이런 시험들을 통해 특정 실험이 항상 옳은 값을 도출한다거나 특정 기관에서 수행한 실험 결과가 잘못 되었다고 결정짓고자 하는 것이 목적이 아니며 시험기법의 차이를 올바르게 이해하고 획득한 동적 물성치를 설계에 올바르게 적용할 수 있도록 도움을 주는데 그 목적이 있음을 다시 한번 밝힌다.

최근 들어 내진설계와 동적물성치 산정에 대한 관심이 커져가고 있으므로 본 연구 결과가 지반의 동적물성치를 연구하는 학계, 업계, 학생들에게 좋은 참고자료가 되기를 기대하며, 향후 지반조사에 대한 계획, 설계, 시행시 좋은 기술사례로 활용될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 Round Robin Test는 여러 기관의 적극적인 협조 속에 이루어진 것임을 밝히며 이에 깊이 감사드립니다. 우선 Round Robin Test 기획에서부터 수행하는데 있어 지속적인 도움을 주신 한국 지반공학회 지반진동위원회 간사님들을 포함한 여러 운영 위원님들께 진심으로 감사드립니다. Round Robin Test에 참여해주시고 많은 도움을 주신 연세대학교 김수일 교수님, 경희대학교 목영진 교수님, 서울대학교 정충기 교수님, 중앙대학교 조성호 교수님, 동의대학교 권기철 교수님께 감사드립니다. 또한 업무와 관련된 일로 바쁜신 가운데 본 과업에 참여해주

신 지반조사 전문 업체(지하정보기술(주), (주)희송 지오텍, (주)지오맥스, (주)다이크, (주)아시아지오 컨설턴트)의 대표이사님들, 담당 실무자님들께 깊이 감사드립니다. 그리고 지반공학과 물리탐사 분야의 협력적 발전을 위해 적극적인 참여를 해 주신 한국지질자원연구원의 황세호 박사님을 포함한 환경재해 연구실 연구원분들께도 감사의 말씀을 드립니다. 마지막으로 현장 시험을 위해 사용 허가, 부지 조성, 시추 등과 관련한 온갖 꾀은일을 맡아주신 한국도로공사 관계자 및 (주)희송지오텍 직원분들께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 조성호, 강태호(2003), "운동방정식에 기초한 공진주 실험의 자료분석 및 해석", 한국지반공학회 논문집, 제 19권, 제 4호, pp. 133~144.
2. 조성민, 김홍중, 정종홍(2003), "자동표준관입시험 장치의 개발", 대한토목학회 2003년 정기학술발표회 논문집(CD)
3. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J.(1999), "Multichannel analysis of surface waves (MASW)", Geophysics, Vol. 64, pp.800~808.
4. 황세호, 이상규(1999), "물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적 지반정수의 산출", 건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움.