GOVP1200946247

'05년도 건설핵심기술연구사업 최종보고서

R&D/05건설핵심C06

건설공사의 경제성과 안전성 향상을 위한 첨단지반조사 장비개발 및 실용화 연구

2008. 11.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
위탁연구기관 / 인 하 대 학 교
참 여 기 업 / 한국건설관리공사
(주) 태 창 기 초

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 "건설공사의 경제성과 안전성 향상을 위한 첨단지반조사 장비개발 및 실용화 연구"의 최종보고서로 제출합니다.

2008. 11. 28.

주관연구기관 : 한국건설기술연구원
원 장 조 용 주

위탁연구기관 : 인하대학교
총 장 홍 승 용

참 여 기 업 : 한국건설관리공사
사 장 엄 대 호
참 여 기 업 : (주) 태창기초
대표이사 문 동 춘

■ 총 괄 연 구 책 임 자	/ 선임연구원	김 영 석	과제 총괄
■ 주관연구기관 참여연구원	/ 책임연구원	김 영 진	장비개발 및 실험분석
	/ 책임연구원	홍 성 완	장비개발 및 실험분석
	/ 연 구 원	홍 승 서	장비개발 및 실내외실험
	/ 연 구 원	강 재 모	장비개발 및 실내외실험
	/ 연 구 원	Martin Christ	장비개발 및 실내외실험
■ 위탁연구기관 참여연구원	/ 교 수	윤 여 원	채취시료 실험분석
■ 참 여 기 업 참여연구원	/ 상 무	박 병 로	분석 고찰
	/ 이 사	이 동 호	분석 고찰
	/ 대표 이사	문 동 춘	현장시험
	/ 이 사	문 동 권	현장시험

요 약 문

Ⅰ. 제 목

건설공사의 경제성과 안전성 향상을 위한 첨단지반조사 장비개발 및 실용화 연구

Ⅱ. 연구개발의 배경 및 목적

최근 산업의 급속한 발달과 국토 전역에 걸친 개발이 시작되면서 토목, 건축, 환경시설물 등에 대한 건설공사가 더 이상 양호한 지반에서만 이루어지기 어려운 상황에 직면하였다. 즉, 해안가, 산악 암반지대, 쓰레기 매립지, 도심지 기존구조물 근접부 등 종래 건설공사 입지 선정 시 제외되었던 난조건 현장에서도 공사를 수행해야만 되는 경우가 날로 늘어나고 있다. 게다가 토목, 건축구조물이 대형화, 대심도화 하는 추세에 있어 구조물의 안정성을 더욱 보강하는 설계, 시공기술이 요구되는 반면, 건설공사에서도 경제성을 추구해야 하는 (상반된 명제를 동시에 만족시켜야 하는) 딜레마에 부딪히고 있다. 구조물을 안전하고도 경제적으로 설계, 시공하기 위해서, 그리고 기존구조물의 유지보수 및 안전진단을 위해서 반드시 필요한 것이 정확한 지반조사를 통한 지반정보의 획득과 분석/평가이다.

지반조사 방법은 현장에서 직접 이루어지는 다양한 현장시험기법이 있고, 현장에서 채취된 시료를 실험실로 가져와 여러 가지 실험을 통하여 지반특성을 파악하는 실내시험기법이 있다. 일반적으로 현장시험 방법이 실내시험에 비하여 비교적 정확하지만, 현장지반에서는 굴착 등으로 인한 응력 이완으로 실제 지반의 강도 특성을 과소평가하기도 한다. 또한 현장시험 방법은 대상지반의 교란이 작고 현장 상태 그대로 실험할 수 있다는 장점이 있으나, 시험비용이 비싸고 향후 구조물 건설시 예상되는 다양한 응력조건 및 경계조건을 모사할 수 없다는 단점 때문에 실제로는 다양한 실내시험이 함께 수행되고 있다. 실내시험에서는 시료채취, 이동, 보관, 트리밍, 실내시험 작업 등에서 발생할 수 있는 시료의 교란으로 인하여 정확한 실험결과를 얻는데 많은 어려움이 있다. 따라서 실제 지반 특성을 정확히 묘사하기위해서는 이러한 교란

을 줄여야한다. 특히 초기 시료채취과정에서 시료의 교란이 발생하면 이후 과정에서 아무리 교란을 줄인다고 하더라도 양호한 실험결과를 얻을 수 없기 때문에 시료 채취과정에서 교란을 줄이고 양질의 시료를 얻기 위한 노력이 매우 다양하게 이루어지고 있다. 주로 북미, 유럽, 일본 등에서 불교란 시료를 채취하기 위한 연구가 많이 수행되고 있으며, 그에 따라 연구자들마다 다양한 시료 채취 장비를 개발하여 사용하고 있다. 국내에서는 주로 분리형 원통샘플러(split spoon sampler)와 얇은 관 샘플러(thin wall sampler), 2중관 피스톤 샘플러(double tube core barrel)를 이용하여 불교란 시료를 채취하고 있다. 그러나 아직 사질토지반에 대해서는 불교란 시료를 채취하지 못하고 있는 실정이며, 서로 다른 샘플러에 의해 얻어진 시료의 품질평가 방법이나 기준이 마련되어 있지 않고, 이를 토대로 한 설계, 시공법의 구축이 전혀 이루어지지 않고 있다. 아울러 국내에서는 그동안 여러 지역, 여러 기관, 여러 업체에서 실시한 지반조사 자료가 상당히 많으나 이들을 체계적으로 Data base화하지 못한 탓으로, 새로운 도시계획이나 건설공사 시 또는 기존 구조물의 안전진단 및 유지보수 시 이 자료들을 활용하지 못하고 있다.

또한 국내에서는 지반정수를 결정할 때, 다양한 현장 실험방법이 있음에도 불고하고 대부분 표준관입시험 (standard penetration test, SPT)에 의한 지반조사에만 의존하고 있다. 그러나 표준관입시험은 ⅰ)측정자의 관리정도와 개인차에 따라 시험결과의 오차가 매우 크고, ⅱ)자갈이 있는 지반에서는 시험결과인 N값이 과다하게 측정되며, ⅲ)자체자중만으로 관입되는 연약지반에서는 rod의 상태에 따라 N값이 달라지고, ⅳ)피압대수층에서는 N값이 과소 측정되는 등 여러 가지 문제점이 노출되고 있다. 선진 외국에서는 이러한 결점을 보완하기 위하여 대형관입시험(Large penetration test) 장비를 개발하여 설계에 이용하고자 현재 연구를 진행하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 건설공사의 경제성과 안전성 향상을 위하여 첨단지반조사 장비를 개발하고자 한다. 즉,

ⅰ) 가볍고 강한 FRP 신소재를 사용한 한국형 첨단지반 조사장비(대구경 샘플러)를 개발하여 점성토, 풍화토, 사질토지반의 시료를 교란시키지 않고 채취할 수 있는 기술 축적,

ⅱ) 채취한 시료를 합리적으로 시험 및 평가할 수 있는 기법을 연구하여 터널, 도로, 교량기초, 제방, 토공구조물, 산사태 평가 등 제반 건설공사를 경제적이면서도 안전성이 높게 설계·시공할 수 있는 토대 구축,

iii) 모래지반 이외에도 적용이 가능한 한국형 대형관입시험 장비를 개발하여, 전석층, 풍화토, 조밀한 사질토 등과 같은 난조건 지반의 역학특성을 파악할 수 있도록 지반정수 제공,

iv) 개발한 첨단지반조사 장비 및 그 활용기법을 건설업계에 널리 보급하여 건설기술을 획기적으로 발전하게 함을 그 목적으로 한다.

경제적이고도 정확한 지반조사 장비의 개발 및 이의 적용기술 개발이 이루어질 경우 지금까지 외국으로부터 수입에 의존하던 지반조사 장비의 국내생산에 따른 외화절감 효과와 관련 기계 및 장비산업의 활성화, 그리고 중소업체인 지반조사업체가 불황으로부터 탈피하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

아울러 지금까지 국내기술로 불가능했던 사질지반이나 쓰레기 매립장, 퇴적연암지대의 정확한 지반물성 파악이 가능해지고 이러한 지반에 건설되는 도로, 항만, 공항 등 사회간접시설 및 각종 토목, 건축구조물을 현재보다 훨씬 경제적이고 정확하게 설계, 시공함으로써 국가예산의 절감 효과를 얻게 될 것이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

첨단 지반조사 장비를 개발하여 지반의 정보를 보다 정확하게 수집, 분석, 활용하고 지반정보의 종합화 및 Data Base화를 통해 각종 건설공사의 안정적, 경제적 수행이 가능하도록 하기 위하여 다음과 같은 연구가 수행되었다.

- 난조건 지반 불교란 시료채취용 대구경 지반조사장비 개발 및 현장 적용성 평가
  - ㅇ 개발된 장비의 성능 평가 및 현장 적용성 평가
  - ㅇ 기존 샘플러와 비교 연구를 통한 성능 검증
  - ㅇ 사질토, 점성토 지반의 불교란 시료채취 및 실내 실험을 통한 역학특성 분석

- 한국형 대형관입시험 장비 (KICT-type Large Penetration Test) 개발 및 현장 적용성 평가
  - ㅇ 개발된 장비의 성능 평가 및 현장 적용성 평가

○ 개발 장비의 거동 평가

○ 지반 종류별 LPT와 SPT의 비교실험 및 평가

○ SPT와 LPT의 상관성 분석

■ 개발 장비에 대한 사용 매뉴얼 제시 및 활용방안 마련

○ 난조건 지반의 불교란 시료채취장비 및 LPT장비의 운용지침(매뉴얼) 작성

○ 개발된 첨단지반조사장비의 실험결과를 토목, 건축 구조물 설계 시 적용할 수 있도록 기초자료 축적

○ 첨단 장비의 특허 출원 및 등록등 실용화(업계 보급) 노력

Ⅳ. 연구개발결과

본 연구를 통해 도출된 주요 연구결과는 다음과 같다.

① 기존 KICT형 대구경 샘플러의 일부를 MC Nylon으로 재구성함으로써 샘플러의 전체 중량을 90kg에서 65kg으로 28%감소(저심도용은 39% 감소) 시켜 장비의 사용성 및 작업효율을 증대시켰다. 또한 강재로 구성된 샘플러 내부 부품을 스텐레스 합금으로 교체하고 샘플러의 선단부 측면에 간극수압계를 장착하여 장비의 기능성을 향상시켰다. 개발된 KICT형 대구경 샘플러를 이용하여 해상을 포함한 다양한 지반조건에서 현장적용성 평가를 실시한 결과, 점성토, 풍화토, 실트(사질토), 매립층 지반에서 직경 200 mm의 불교란 시료 채취가 가능함을 확인하였으며, 샘플러의 경량화로 인해 작업 효율성도 약 2배 증대되었다.

② 압밀시험결과 기존의 수압식 샘플러 시료보다 대구경 샘플러 시료가 초기간극비, 선행압밀하중, 압축지수가 모두 크고, 압밀계수역시 선행압밀하중 근처를 제외한 영역에서 대구경 샘플러 시료가 뚜렷이 크게 나타나 교란이 더 작은 것으로 나타났다.

③ 일축압축시험결과 기존의 수압식 샘플러보다 대구경 샘플러로 채취한 시료가

일축압축강도와 할선탄성계수가 모두 크게 나타났으며, 최대 강도가 발현되는 변형률도 더 작게 나타나 교란이 더 작은 것으로 나타났다. 특히, 일축강도는 기존의 수압식 샘플러 보다 대구경 샘플러 시료가 약 12~50%까지 크게 평가 되었다.

④ 삼축압축시험결과에서도 대구경 시료의 마찰각이 크게 나타나 교란이 작은 특징을 보였다. 즉, 기존의 수압식 샘플러 보다 마찰각이 38~43% 정도 크게 평가되었다.

⑤ 공진주 시험결과, 대구경 시료의 전단탄성계수는 기존의 수압식 샘플러 시료에서 획득한 전단탄성계수보다 크게 나타났다. 또한 비틂전단 시험에서도 전단탄성계수 및 감쇠비의 절대값은 대구경 시료쪽이 크게 나타났다. 이는 채취된 시료의 교란에 따른 영향으로 판단된다.

⑥ 이상의 결론을 종합해 보면 KICT형 대구경 샘플러로 채취한 시료의 질이 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료의 질보다 매우 우수함을 알 수가 있었다.

⑦ 정확한 지반조사를 위하여, 모래지반 이외에도 적용이 가능한 한국형 대형관입시험(KICT-type LPT) 장비를 개발하였다. 새롭게 개발된 KICT-type LPT 장비는 에너지비를 1.5로 일정하게 가정하여 해머중량을 150kg, 낙하 높이를 76cm로 설계하여 제작하였으며, 낙하시스템은 KS F2307 및 JI A1259S에서 제시하고 있는 반자동 낙하시스템을 도입하였다.

⑧ KICT-type LPT(이하 LPT) 장비의 현장 성능 평가를 실시하였으며, 계측결과를 기존 SPT 결과와 비교/분석하였다. LPT-N값은 타격에너지 증가로 인하여 기존의 SPT-N값보다 감소하여 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, LPT-N값과 SPT-N값의 상관관계를 분석 한 결과, 단위면적당 타격에너지는 1.5배로 일정함에도 불구하고 모래층에서는 약 3배, 자갈층에서는 1.5-2배의 차이를 나타내고 있었다.

⑨ LPT장비의 에너지 효율 및 거동을 검토하기 위하여 대형 Calibration Chamber를 이용하여 실내실험을 수행하였으며, 그 결과 LPT는 SPT N값과 상관관계를 갖을 수 있는 시스템으로 설계되었음을 확인하였다. 즉, LPT로 측정된 데이터는 SPT 시스템으로 변환해서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

⑩ 새롭게 개발한 첨단지반조사 장비를 건설업계에 널리 보급하고자 개발장비에 대한 사용 매뉴얼을 제시하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

제작된 KICT형 대구경 샘플러 장비와 한국형 대형관입시험 장비(LPT)를 이용하여 국내 각종 지반의 특성을 정확히 평가할 수 있고, 토목 및 건축 구조물 설계에 반영하는 한편, 개발한 첨단지반조사 장비를 업계에 보급, 실용화함으로써 국내 건설기술의 발전을 기대할 수 있을 것이다.

주요 활용계획을 요약하면 다음과 같다.

- Turn Key 등 각종 국가 주요 건설공사 지반조사 시 활용
  - ㅇ 사질토 지반, 풍화토 지반 평가기술 재정립
  - ㅇ SPT의 적용이 힘든 지반에서도 지반정수 도출이 가능 (LPT 활용)

- 지반조사 장비의 표준화 및 지반조사의 정확성 제고
  - ㅇ 경제적이고 안정적인 토목/건축 구조물 설계, 시공

- 첨단지반조사 장비의 개발 및 다량생산으로 제조업의 경기 활성화

Summary

1. Topic

Economically feasibility and safety of construction work from the point of geotechnical investigations

2. Research background

During the latest industrial development geotechnical, construction and environmental issues became an increasing concern. The construction and developments along seashores, in mountain ranges and already existing urban areas caused considerable adverse effects and requires the selection of suitable locations. Additionally the design, economical efficiency, selection of materials, safety and data acquisition and analysis are of great importance.

Geotechnical investigation in the field needs to consider a variety of tests involving the selection of appropriate experimental methods. The application of general field methods consider the strength of the materials and the stresses acting upon them. Additionally, field experimental methods need to meet the expectations in terms on economical suitability.

The movement, charge, trimming and experimental work need be applied to guarantee the extraction of undisturbed samples for testing. The extraction of an undisturbed sample from the field has been of concern of research in North America, Europe and Japan. Techniques that have been developed for this purpose is the split spoon sampler, thin wall sampler and double tube core barrel. However, still the extraction of undisturbed samples is difficult and other methods to guarantee sample quality need to be developed.

In addition, in Korea so far there is no data base available for new city

planning and development. The decision, variety of experimental methods are disregarded and instead the standard penetration test is used as reference.

Therefore a standard experimental procedure needs to involve: 1) measurement/survey of large experimental error, 2) measurement of excessive N values, 3) the difference in N values according to weak rods, 4) Accordingly, the economical efficiency needs to be considered for stable developments/

3. Research objectives and scope

The purpose of this study is to develop an advanced equipment for ground investigation and evaluate its practicality to improve the economy and stability of construction works.

The research objectives and scope of this study are given not only by the need for geotechnical investigation equipment and assessment techniques, but more importantly in terms of correct collection, analysis and application of generalized geotechnical information used in various construction industries for a feasible and economical performance.

- Assessment of adverse effects of larger sized investigation equipment and site for sample extraction
  - ○ Assessment of equipment developing efficiency
  - ○ Sample extraction and laboratory analysis of sandy and cohesive soils

- KICT-type Large Penetration Test (LPT) investigation
  - ○ Development of equipment efficiency and field application
  - ○ Comparison of LPT and SPT tests
  - ○ Correlation of SPT and LPT analysis

- Development of standard for investigation equipment and application

- ○ Averse effects of undisturbed sample size and LPT equipment application indicator preparation
- ○ Set-up of standard for experimental results and construction structure

4. Research results

Summary of research results in the project

① Development and application of a large caliber sampler and successfully extraction of a variety of undisturbed sample extraction. The weight of the sampler could be reduced significantly (2 times).

② From the test results, the samples taken by the developed KICT-type large diameter sampler showed higher quality than the traditional thin-walled tube samples.

③ Correct investigation of KICT large penetration LPT test type. The new test equipment weights 150kg, and has a falling height of 76cm. The Falling System is given by Korean standard KS F2307 and JI A1259S.

④ KICT-type LPT performance assessment, comparison of measurement results to SPT showed that LPT-N values are reduced compared to SPT-N values.

여 백

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

제 1 절 연구개발의 배경 및 목적 ····· 1

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위 ····· 3

제 3 절 기대효과 ····· 4

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 6

제 1 절 지반조사 방법 및 문제점 ····· 6

1. 지반조사법 ····· 6

2. 샘플링 장비의 특성 ····· 11

3. 기타 지반조사 장비의 특성 ····· 63

4. 시료의 교란과 대책 ····· 80

5. 국내 지반조사 기술의 문제점 ····· 109

제 2 절 대구경 샘플러 관련 연구 ····· 111

1. 개발배경 ····· 111

2. Sherbrooke 샘플러 개발 ····· 113

3. Larval Sampler의 개발 ····· 118

제 3 절 대형관입시험(LPT) 관련 연구 ····· 128

1. 개발배경 ····· 128

2. 기존 LPT 장비 ····· 128

3. LPT와 SPT의 구조 비교 ····· 131

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 ····· 138

제 1 절 첨단 대구경 샘플러의 개발 ····· 138

1. 개요 ····· 138

2. KICT-type 대구경 샘플러의 특성 ····· 138

3. KICT-type 대구경 샘플러의 구조 및 명칭 ····· 143

4. KICT-type 대구경 샘플러의 시료 채취 방법 ····· 145

5. 중/대심도 불교란 시료 채취를 위한 장비 및 방법 ····· 148
6. 현장 적용성 검토 (육상, 해상) ····· 150
제 2 절 KICT-type 대구경 샘플러의 현장 적용성 평가결과-채취시료의 평가 154
1. 개요 ····· 154
2. 시료의 기본물성 ····· 155
3. 압밀시험 결과 (표준압밀, 대형 Rowe cell 시험) ····· 155
4. 일축압축시험 결과 ····· 159
5. 삼축압축시험 결과 ····· 164
6. 공진주 및 비틂전단시험 결과 ····· 171
제 3 절 한국형 대형관입시험 장비 개발 ····· 215
1. 개요 ····· 215
2. KICT-type 대형관입시험 (KICT-type LPT) 장비 구성 ····· 215
3. KICT-type LPT 장비와 기존의 LPT 장비와의 비교 ····· 226
4. KICT-type LPT 시험방법 ····· 228
제 4 절 KICT-type LPT 장비의 성능평가 및 현장 적용성 평가결과 ····· 231
1. 개요 ····· 231
2. 현장적용성 평가 결과 ····· 231
3. SPT/KICT-type LPT 상관관계 연구 ····· 256
4. 계측장비를 활용한 KICT-type LPT 장비의 거동평가 ····· 257
제 5 절 개발장비의 사용 매뉴얼 ····· 313
1. KICT-type 대구경 샘플러 매뉴얼 ····· 313
2. KICT-type LPT 매뉴얼 ····· 326
제 6 절 연구결과 및 향후과제 ····· 336
1. 연구결과 ····· 336
2. 향후과제 ····· 339

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야의 기여도 ····· 340

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 342

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 343

참 고 문 헌 ····· 347

그림 목차

그림 2.1 보링조사 모습 예 ····· 6
그림 2.2 고정피스톤식 씬월샘플러 ····· 8
그림 2.3 고정피스톤식 씬월샘플러에의한 샘플링 방법 ····· 9
그림 2.4 고정피스톤식 씬월 샘플러의 구조 ····· 10
그림 2.5 일본식 씬월 튜브 고정 피스톤 샘플러 ····· 11
그림 2.6 엑스텐션 롯드식 샘플러 ····· 12
그림 2.7 수압식 샘플러 ····· 12
그림 2.8 Marine Auto Sampler의 개략도 ····· 13
그림 2.9 일반적인 시료채취방법과 MAS로 시료를 채취하여 얻은 시료의 전단강도 비교(Okumura와 Matsumoto, 1981) ····· 14
그림 2.10 Wire line-type boring(Kanda 등, 1991) ····· 15
그림 2.11 wire line 방식의 고정 피스톤 샘플러 ····· 16
그림 2.12 일반적인 방법과 wire line 방법으로 얻은 시료의 전단강도 비교 ····· 16
그림 2.13 Laval 샘플러의 개략도 ····· 17
그림 2.14 샘플러 안의 함수비 분포 ····· 18
그림 2.15 대구경 Laval형 샌드 샘플러 (단위 mm) ····· 19
그림 2.16 샘플링 방법 ····· 20
그림 2.17 샘플capping방법 ····· 20
그림 2.18 시료의 동결방법 ····· 21
그림 2.19 대구경 Laval형 샌드 샘플러 ····· 21
그림 2.20 현장에서 및 굴착용 튜브(외관)를 올리는 모습 ····· 22
그림 2.21 샘플링 튜브를 올린 모습 ····· 22
그림 2.22 채취된 시료의 모습 ····· 23
그림 2.23 소형 샘플러 장비 ····· 23
그림 2.24 소구경 샘플러에 의한 작업모습(이탈리아 피사의 탑) ····· 24
그림 2.25 소구경 배압형 수압 피스톤 샘플러의 구조 ····· 24
그림 2.26 HB공법에서의 발포 장치 ····· 25

그림 2.27 트리플 코아 튜브의 구조 ····· 26
그림 2.28 HB공법 개요도 ····· 26
그림 2.29 HB공법으로 채취한 사질층 지반 ····· 27
그림 2.30 통상의 다이아몬드 비트로 굴공할 경우, ····· 27
그림 2.31 콘샘플러의 구조 (단위 mm) ····· 28
그림 2.32 튜브 내경의 비교 ····· 29
그림 2.33 콘샘플러 ····· 30
그림 2.34 선단 콘 ····· 30
그림 2.35 샘플링튜브가 밀려나온 사진 ····· 30
그림 2.36 샘플링 튜브 ····· 30
그림 2.37 표면에서 샘플링하는 방법 ····· 31
그림 2.38 폴리머용액을 이용하여 채취한 시료 ····· 32
그림 2.39 프리 피스톤 방식의 선단플러그 ····· 32
그림 2.40 RPD에 의한 굴착과 SPT의 공정 ····· 33
그림 2.41 PtoN샘플러의 외관도 ····· 34
그림 2.42 PtoN샘플러의 구조 ····· 34
그림 2.43 RPD의 작업 상황 ····· 35
그림 2.44 Sherbrooke 샘플러 ····· 35
그림 2.45 대구경 Laval 샘플러와 영국 샘플러 ELE100 ····· 36
그림 2.46 일본의 샘플러 ····· 36
그림 2.47 캐나다 Louseville 점토의 일축압축시험 결과 ····· 37
그림 2.48 보스케나 점토에 대한 일축압축시험 결과 ····· 37
그림 2.49 보어홀 샘플링 장비의 일반적 분류 ····· 38
그림 2.50 블록 샘플링 방법 ····· 41
그림 2.51 U100 샘플러와 커팅 슈 ····· 44
그림 2.52 플라스틱 라이너를 이용한 BS U100샘플러로 채취한 점성토 시료에서 나타나는 전단 변형 형태 ····· 45
그림 2.53 표준관입시험 장비 ····· 46
그림 2.54 2가지 얇은벽 오픈 관입 샘플러 (from Hvorslev 1940) ····· 48
그림 2.55 씬월 오픈 관입 샘플러의 커팅엣지 형태 ····· 48

그림 2.56 free 피스톤 샘플러의 두 형태 (Ehrenberg 1933; Huizinga 1944) ····· 50
그림 2.57 씬월 강관 튜브 형 피스톤 샘플러 ····· 52
그림 2.58 Osterberg 복합식 수압 고정 피스톤 샘플러 (Osterberg 1973) ····· 53
그림 2.59 스웨덴식 호일 샘플러의 원리와 Mark V 샘플러 헤드의 형상 ····· 55
그림 2.60 직경 66mm의 Delft stocking 샘플러 (Begemann 1974). ····· 56
그림 2.61 연약지반에서 Delft 샘플러를 이용한 10m 길이의 연속 샘플링 ····· 57
그림 2.62 이중관 스위벨 타입의 코어베럴 ····· 59
그림 2.63 Denison 3중관 코어베럴 ····· 59
그림 2.64 피쳐 샘플러 ····· 60
그림 2.65 Mazier 코어 배럴 ····· 60
그림 2.66 Bishop 사질토 샘플러(Bishop 1948). ····· 62
그림 2.67 피에조콘 관입시험의 개요도 ····· 68
그림 2.68 Borehole Shear Device ····· 71
그림 2.69 자가굴착식 프레셔미터의 개략도 ····· 72
그림 2.70 Flat Dilatometer ····· 73
그림 2.71 지진파 tomography의 예 ····· 76
그림 2.72 동적 콘의 크기에 따른 Nd/N값의 변화 ····· 77
그림 2.73 재구성형 교란과 크랙형 교란 ····· 80
그림 2.74 샘플링에서부터 실내시험개시까지의 유효응력경로 ····· 81
그림 2.75 강도저하와 교란비의 관계 ····· 82
그림 2.76 시료 채취 과정에서의 유효응력경로 ····· 88
그림 2.77 압밀동안에 발생하는 체적변형율에 의한 시료의 질 평가 방법 ····· 90
그림 2.78 시료의 밀도를 나타내는 radiography film density ····· 91
그림 2.79 radiography를 이용한 시료의 교란 정도 산정 ····· 92
그림 2.80 상대밀도에 따른 불교란 시료와 재성형 시료의 내부마찰각 비교 ····· 93
그림 2.81 최소유효주응력에 따른 불교란 시료와 교란 시료의 다일러턴시 벡터 ··· 95
그림 2.82 재성형된 사질토시료의 액상화 응력비와 상대밀도의 관계 ····· 96
그림 2.83 불교란 사질토 시료의 액상화 응력비와 상대밀도의 상관관계 ····· 96
그림 2.84 채취방법에 따른 전단계수 비교 ····· 98
그림 2.85 실내시험으로부터 현장의 전단계수를 산정하는 방법 ····· 100

그림 2.86 동결시료와 튜브시료의 액상화 특성 비교 ····· 101
그림 2.87 동결시료와 튜브시료의 정적강도와 변형특성 비교 ····· 101
그림 2.88 인위적 시료 교란이 최대전단탄성계수에 미치는 영향 ····· 103
그림 2.89 불교란 시료와 교란 시료의 전단변형률에 따른 전단응력의 비교 ····· 105
그림 2.90 불교란 시료와 교란 시료의 전단변형율에 따른 전단계수의 비교 ····· 105
그림 2.91 다운홀시험과 공진주시험으로 얻은 전단계수 비교 ····· 106
그림 2.92 채취방법에 따른 실내시험과 현장시험의 결과 비교 ····· 107
그림 2.93 여러 가지 샘플러로 채취된 시료의 응력-변형 곡선 ····· 112
그림 2.94 Sherbrooke 샘플러를 이용한 시료 채취작업의 개략도 ····· 114
그림 2.95 Sherbrooke 샘플러의 작동 모습 ····· 115
그림 2.96 직경 200mm 라발 샘플러(La Rochelle et al., 1981) ····· 120
그림 2.97 Laval 샘플러를 이용한 시료 채취 과정(La Rochelle et al., 1981) ····· 122
그림 2.98 라발(Laval) 샘플러 ····· 123
그림 2.99 Saint-Louis Champlain clay의 유효 강도 파괴포락선 ····· 125
그림 2.100 블록 샘플과 Laval 샘플의 CIU 시험 결과 비교 ····· 126
그림 2.101 블록 샘플과 Laval 샘플의 한계상태곡선 ····· 126
그림 2.102 블록 샘플과 Laval 샘플의 압밀 곡선 비교 ····· 127
그림 2.103 SPT와 LPT 장비 비교(샘플러규격 및 위치에너지) ····· 131
그림 2.104 SPT 일정 관입률에서의 스플릿 샘플러와 표준 CPT의 선단 저항 비교 ····· 133
그림 2.105 파동방정식 해석에서의 전형적인 파일 또는 드릴로드 모델 ····· 135
그림 2.106 정적/동적 재하에 따른 이상적인 흙 반응 ····· 136
그림 3.1 지반조건에 따른 슈(shoe)와 비트(bit)의 위치 ····· 139
그림 3.2 대구경 샘플러 상단부 개요도 ····· 139
그림 3.3 커터 측면부(스텐레스강) ····· 140
그림 3.4 커터의 폐합된 모습 ····· 140
그림 3.5 간극수압계 장착 개요도 ····· 141
그림 3.6 간극수압계를 설치할 절단로드 ····· 141
그림 3.7 MC 나이론 ····· 141
그림 3.8 대구경 샘플러의 개요도 ····· 144

그림 3.9 백호를 이용한 지반굴착(원지반) ····· 145
그림 3.10 대구경 샘플러 설치 장면 ····· 145
그림 3.11 대구경 샘플러를 이용한 시료채취 ····· 146
그림 3.12 인너로드 장착 ····· 146
그림 3.13 시료채취 작업 완료 ····· 146
그림 3.14 대구경 샘플러를 이용한 시료 채취 절차 ····· 147
그림 3.15 절단로드 제거 장면 ····· 147
그림 3.16 샘플링 튜브 포장 장면 ····· 147
그림 3.17 대형샘플 운반용 특수상자 ····· 148
그림 3.18 중/대심도 굴착을 위한 오거 ····· 148
그림 3.19 공벽지지를 위한 특수제작 케이싱 ····· 149
그림 3.20 백호를 이용한 표토제거 ····· 149
그림 3.21 케이싱 관입 ····· 149
그림 3.22 오거에 의한 굴착 및 배토 ····· 150
그림 3.23 대구경 샘플러를 이용한 시료채취 ····· 151
그림 3.24 NX 사이즈 UD샘플러 채취 ····· 151
그림 3.25 대구경 샘플러 세척 작업 ····· 151
그림 3.26 소형 보트를 이용한 대구경 샘플러 운반 ····· 152
그림 3.27 해상 시추기에 샘플러 연결 ····· 152
그림 3.28 목표심도까지 샘플러 관입 ····· 152
그림 3.29 샘플러 인발 및 해상시료 채취 ····· 153
그림 3.30 간극비-연직유효응력 관계 (평택시료) ····· 156
그림 3.31 압밀계수 (평택시료) ····· 156
그림 3.32 지역별 압밀곡선 ····· 158
그림 3.33 압밀압력과 압축지수의 관계 ····· 159
그림 3.34 일축강도곡선(대구경 샘플러) ····· 160
그림 3.35 일축강도곡선(NX size 샘플러) ····· 160
그림 3.36 청라지역 시료의 응력-변형률 곡선 ····· 161
그림 3.37 광양만 시료의 응력-변형률 곡선 ····· 161
그림 3.38 인천남항 시료의 응력-변형률 곡선 ····· 161

그림 3.39 일축압축시험 결과 ····· 163
그림 3.40 교란도 분석결과 (Horiuchi, 1977) ····· 163
그림 3.41 삼축압축시험에서 축차응력-변형률 관계 ····· 165
그림 3.42 압밀압 200 kPa의 삼축시험 응력경로 ····· 166
그림 3.43 시료별 파괴포락선 ····· 166
그림 3.44 청라지역 Mohr-Coulomb 파괴포락선 ····· 167
그림 3.45 청라지역 간극수압 그래프 ····· 168
그림 3.46 청라지역 축차응력-변형률 그래프 ····· 169
그림 3.47 청라지역 응력경로 그래프 ····· 170
그림 3.48 지반의 비선형 동적변형특성 ····· 172
그림 3.49 공진주 시험 시스템의 개략도 ····· 173
그림 3.50 전형적인 주파수 응답곡선 ····· 173
그림 3.51 자유진동감쇠곡선을 이용한 감쇠비 결정법 ····· 177
그림 3.52 비틂전단 시험 시스템의 개략도 ····· 178
그림 3.53 전형적인 응력-변형률 이력곡선 ····· 178
그림 3.54 공진주/비틂전단시험 시스템의 개략도 ····· 182
그림 3.55 전자동 공진주/비틂전단시험 시스템의 구성도 ····· 182
그림 3.56 공진주/비틂전단시험 시스템 모습 ····· 183
그림 3.57 전자동 RC/TS시험 수행 프로그램의 초기화면 ····· 183
그림 3.58 대구경 시편 trimming 과정 ····· 184
그림 3.59 trimming이 완료된 후 모습 ····· 184
그림 3.60 RC/TS 시험 시스템 세팅 ····· 185
그림 3.61 구속응력 재하 ····· 185
그림 3.62 수압식 피스톤 샘프러로 채취한 시료의 공진주 시험 결과 ····· 190
그림 3.63 수압식 피스톤 샘프러로 채취한 시료의 비틂전단 시험 결과 ····· 192
그림 3.64 구속압별 하중주파수에 따른 전단탄성계수 변화(피스톤 샘플러 시료) 193
그림 3.65 최대전단탄성계수의 구속압 영향평가 (피스톤 샘플러 시료) ····· 194
그림 3.66 대구경 샘플러로 채취한 시료의 공진주 시험결과 ····· 197
그림 3.67 대구경 샘플러로 채취한 시료의 비틂전단 시험결과 ····· 199
그림 3.68 구속압별 하중주파수에 따른 전단탄성계수 변화 (대구경 샘플러 시료)200

그림 3.69 최대전단탄성계수의 구속압 영향평가 (대구경 샘플러 시료) ····· 201
그림 3.70 공진주 시험 결과 비교 (구속압=35kPa) ····· 204
그림 3.71 공진주 시험 결과 비교 (구속압=70kPa) ····· 206
그림 3.72 공진주 시험 결과 비교 (구속압=100kPa) ····· 208
그림 3.73 비틂전단 시험 결과 비교 (구속압=35kPa) ····· 210
그림 3.74 비틂전단 시험 결과 비교 (구속압=70kPa) ····· 212
그림 3.75 비틂전단 시험 결과 비교 (구속압=100kPa) ····· 214
그림 3.76 KICT-type LPT 장비의 기본 구성 ····· 216
그림 3.77 샘플러 규격 ····· 217
그림 3.78 샘플러 그림 및 분해모습 ····· 217
그림 3.79 SPT 장비와 LPT 장비의 샘플러 비교 ····· 218
그림 3.80 SPT 및 LPT로 채취한 시료 비교 ····· 219
그림 3.81 KICT-type LPT에 사용한 73mm 롯드 ····· 220
그림 3.82 SPT용 45mm 롯드와의 비교 ····· 220
그림 3.83 해머 및 엔빌의 규격 ····· 221
그림 3.84 SPT와 LPT 장비의 해머 비교 ····· 222
그림 3.85 KS F2037, JIS A1259에서 제시하고 있는 자동/반자동 낙하장치 ····· 223
그림 3.86 KICT-type LPT 장비의 반자동 낙하장치 ····· 224
그림 3.87 시추기에 탑재한 KICT-type LPT 장비 일체 ····· 225
그림 3.88 SPT와 LPT 장비 비교 (샘플러 규격 및 위치에너지) ····· 227
그림 3.89 KICT-type LPT 장비의 시험방법 ····· 230
그림 3.90 1차 적용성 평가 현장 모습 ····· 232
그림 3.91 SPT 결과 ····· 233
그림 3.92 LPT결과 ····· 233
그림 3.93 SPT, LPT 결과 비교 ····· 233
그림 3.94 예비타 결과 비교(15cm) ····· 234
그림 3.95 10cm 관입 결과 비교 ····· 234
그림 3.96 20cm 관입 결과 비교 ····· 234
그림 3.97 SPT/LPT 상관 관계 ····· 235
그림 3.98 2차 적용성 평가 현장 모습 ····· 236

그림 3.99 SPT, LPT 결과 (제 1지점) ····· 237
그림 3.100 SPT, LPT 결과 (제 2지점) ····· 237
그림 3.101 예비타 결과 비교(15cm) ····· 238
그림 3.102 10cm 관입 결과 비교 ····· 238
그림 3.103 20cm 관입 결과 비교 ····· 238
그림 3.104 예비타 결과 비교(15cm) ····· 239
그림 3.105 10cm 관입 결과 비교 ····· 239
그림 3.106 20cm 관입 결과 비교 ····· 239
그림 3.107 SPT/LPT 상관관계 ····· 240
그림 3.108 3차 적용성 평가 현장 모습 ····· 242
그림 3.109 SPT, LPT 결과 ····· 242
그림 3.110 예비타 결과 비교(15cm) ····· 243
그림 3.111 10cm 관입 결과 비교 ····· 243
그림 3.112 20cm 관입 결과 비교 ····· 243
그림 3.113 SPT/LPT 상관관계 ····· 244
그림 3.114 4차 적용성 평가 현장 모습 ····· 245
그림 3.115 SPT, LPT 결과 ····· 246
그림 3.116 예비타 결과 비교(15cm) ····· 246
그림 3.117 10cm 관입 결과 비교 ····· 246
그림 3.118 20cm 관입 결과 비교 ····· 247
그림 3.119 SPT/LPT 상관관계 ····· 247
그림 3.120 5차, 6차 적용성 평가 현장 모습 ····· 248
그림 3.121 SPT 결과 ····· 249
그림 3.122 LPT결과 ····· 249
그림 3.123 SPT, LPT 결과 비교 ····· 249
그림 3.124 SPT/LPT 상관관계 ····· 250
그림 3.125 SPT 결과 ····· 251
그림 3.126 LPT결과 ····· 251
그림 3.127 SPT, LPT 결과 비교 ····· 251
그림 3.128 SPT/LPT 상관관계 ····· 252

그림 3.129 7차 적용성 평가 현장 모습 ····· 253
그림 3.130 SPT 결과 ····· 253
그림 3.131 LPT결과 ····· 253
그림 3.132 SPT, LPT 결과 비교 ····· 254
그림 3.133 SPT/LPT 상관관계 ····· 255
그림 3.134 지층별 SPT/LPT 상관관계 ····· 256
그림 3.135 해머 시스템과 이론적 힘의 이력 ····· 261
그림 3.136 측정된 힘의 이력 ····· 261
그림 3.137 타격에너지 파형과 롯드에너지 비교 ····· 262
그림 3.138 롯드길이 10m 이하인 경우의 파형 ····· 265
그림 3.139 롯드길이 10m 이상인 경우의 파형 ····· 266
그림 3.140 Pile Driving Analyzer (PDA) ····· 267
그림 3.141 에너지 측정용 드릴 롯드 ····· 268
그림 3.142 LPT 에너지 측정용 드릴 롯드 ····· 269
그림 3.143 SPI 항타품질 분석 시스템의 구성도 ····· 271
그림 3.144 SP-13-02k40 ····· 271
그림 3.145 Meteor-2/Dig ····· 272
그림 3.146 변위측정용 마크 ····· 273
그림 3.147 마크의 라인 스캔 카메라를 이용한 계산방법 ····· 274
그림 3.148 1300 X 1030 해상도의 이차원 디지털 영상 ····· 278
그림 3.149 line scan image ····· 279
그림 3.150 PDA와 SPI로부터 구한 속도-시간이력 ····· 280
그림 3.151 PDA와 SPI로부터 구한 변위-시간이력 ····· 280
그림 3.152 Calibration chamber ····· 283
그림 3.153 챔버 레이닝 시스템 ····· 284
그림 3.154 K-7 시험시료의 입도분포 ····· 285
그림 3.155 주문지사의 입도분포곡선 ····· 285
그림 3.156 Top Plate 조립 ····· 286
그림 3.157 부압을 이용한 시료 자립 ····· 287
그림 3.158 챔버 셀 거치 ····· 287

그림 3.159 챔버 조립 완료 ····· 288
그림 3.160 챔버 SPT 실험 전경 ····· 289
그림 3.161 챔버 LPT 실험 전경 ····· 289
그림 3.162 에너지 전달율과 관입량과의 관계(Schmertmann and Palacios, 1979) 292
그림 3.163 정규화된 N값 분포 ····· 293
그림 3.164 PDA를 이용한 타격에너지 측정 예 ····· 295
그림 3.165 N값에 따른 에너지 전달율 ····· 296
그림 3.166 상대밀도에 따른 에너지 전달율 ····· 297
그림 3.167 Dr40% 응력-변형률 곡선 ····· 299
그림 3.168 Dr60% 응력-변형률 곡선 ····· 299
그림 3.169 Dr80% 응력-변형률 곡선 ····· 299
그림 3.170 변형률-간극수압곡선(Dr40%) ····· 300
그림 3.171 변형률-간극수압곡선(Dr60%) ····· 300
그림 3.172 변형률-간극수압곡선(Dr80%) ····· 301
그림 3.173 Mohr circle과 파괴포락선(Dr40%) ····· 301
그림 3.174 Mohr circle과 파괴포락선(Dr60%) ····· 301
그림 3.175 Mohr circle과 파괴포락선(Dr80%) ····· 302
그림 3.176 유효 파괴포락선 ····· 302
그림 3.177 내부마찰각 산정 (SPT값으로 환산하여 추정) ····· 303
그림 3.178 정규화 N값과 내부마찰각 ····· 304
그림 3.179 수정 전·후 내부마찰각 ····· 305
그림 3.180 SPI 계측용 마크설치 ····· 306
그림 3.181 스캔 카메라 와 계측용 PC ····· 306
그림 3.182 흑백띠의 파형 ····· 306
그림 3.183 SPI를 이용한 LPT 거동 분석 광경 ····· 306
그림 3.184 해머의 타격에너지 분석 (Test 1) ····· 307
그림 3.185 해머의 타격에너지 분석 (Test 2) ····· 308
그림 3.186 해머의 타격에너지 분석 (Test 3) ····· 308
그림 3.187 해머의 타격에너지 분석 (Test 4) ····· 309
그림 3.188 해머의 타격에너지 분석 (Test 5) ····· 309

그림 3.189 해머의 타격에너지 분석 (Test 6) ····· 310
그림 3.190 해머의 타격에너지 분석 (Test 7) ····· 310
그림 3.191 관입량 측정결과 (Test 1) ····· 311
그림 3.192 관입량 측정결과 (Test 3) ····· 311
그림 3.193 관입량 측정결과 (Test 5) ····· 312
그림 3.194 관입량 측정결과 (Test 7) ····· 312

표 목차

표 2.1 각종 샘플러의 규격 비교 ····· 29
표 2.2 RPD의 상세제원 ····· 33
표 2.3 두께 0.5in. 튜브의 오픈 관입 샘플러 특성 ····· 45
표 2.4 씬월 오픈 관입 샘플러 ····· 47
표 2.5 N값의 보정계수 ····· 64
표 2.6 평균 입경, aging 효과, 그리고 과압밀비에 대한 보정계수 ····· 65
표 2.7 SPT와 상대밀도의 관계 ····· 66
표 2.8 현장시험 방법 간의 신뢰성 비교(Wroth, 1984) ····· 78
표 2.9 체적변형율에 따른 시료의 질 평가 ····· 88
표 2.10 Lacasse와 Berre가 제안한 양질의 시료 기준 ····· 89
표 2.11 체적변형율과 유효 수직응력에 따른 시료교란의 분류 ····· 89
표 2.12 실험에 사용된 시료의 물리적 특성 ····· 97
표 2.13 전단시험동안 최대전단계수의 비교 ····· 104
표 2.14 현장시험방법별 지반정수의 신뢰성 비교(Wroth, 1984) ····· 110
표 2.15 일반적인 블록 샘플링 방법과 Sherbrooke 샘플러로부터 얻은 시료에 대한 일축압축시험 결과의 비교(Nicolet, Quebec) ····· 117
표 2.16 비배수 압축 시험의 결과 비교 ····· 124
표 2.17 SPT와 외국의 기존 LPT 장비의 상세 내용 ····· 130
표 3.1 MC 나이론의 물성표 ····· 142
표 3.2 MC 나이론의 기계적 물성 및 특징 ····· 142
표 3.3 수행된 시험 및 공시체 크기 ····· 154
표 3.4 채취 시료의 기본물성 ····· 155
표 3.5 압밀시험에서 평가된 시료특성 ····· 157
표 3.6 일축압축시험 결과 (샘플러 비교) ····· 160
표 3.7 삼축압축시험 결과 ····· 165
표 3.8 KICT-type LPT 장비의 주요 제원 ····· 216
표 3.9 외국의 대형관입시험 장비와 비교한 KICT-type LPT 장비의 제원표 ····· 226
표 3.10 롯드길이, 라이너, 보링공 직경에 대한 보정계수 (Skempton, 1986) ····· 266

표 3.11 절대영상에 대한 오차결과 ····· 279
표 3.12 KUCCS 특성 및 주요장치 ····· 282
표 3.13 시험모래 기본물성 ····· 285
표 3.14 K-7호사 시료에 대한 측정결과 ····· 290
표 3.15 주문진사에 시료에 대한 측정결과 ····· 291
표 3.16 삼축압축시험의 개요 ····· 298

<KICT 첨단 대구경 샘플러 메뉴얼>

그림 1. 대구경 샘플러 모식도 ····· 315
그림 2. 커터(cutter) ····· 316
그림 3. 절단로드 규격 ····· 316
그림 4. 커터와 절단로드 ····· 317
그림 5. 대구경 샘플러를 이용한 샘플링 순서도 ····· 318
그림 6. 대구경 샘플러 조립 순서도 ····· 319
그림 7. 굴착공 내 시료채취 과정 모식도 ····· 321
그림 8. 샘플러 튜브 포장 ····· 322
그림 9. 운반상자 ····· 322
그림 10. 공벽 유지방법의 종류와 표기 ····· 322
표 1. 드릴롯드의 종류 및 규격 ····· 314
표 2. 샘플러의 종류 및 규격 ····· 314
표 3. 대구경 시료를 이용한 여러 가지 시료의 제작과정 ····· 324

<KICT 대형관입시험 메뉴얼>

그림 1. 샘플러 규격 ····· 327
그림 2. 샘플러 그림 및 분해모습 ····· 327
그림 3. 보링롯드와 커플링 ····· 328
그림 4. 앤빌의 규격 ····· 328
그림 5. 해머의 규격 ····· 329
그림 6. 자동낙하장치 ····· 330
그림 7. 수동낙하장치(콘풀리법) ····· 330
그림 8. LPT 시험순서도 ····· 331
그림 9. 시료보관용기 ····· 333
그림 10. 낙하 방법의 표기 ····· 334

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 배경 및 목적

최근 산업의 급속한 발달과 국토 전역에 걸친 개발이 시작되면서 토목, 건축, 환경시설물 등에 대한 건설공사가 더 이상 양호한 지반에서만 이루어지기 어려운 상황에 직면하였다. 즉, 해안가, 산악 암반지대, 쓰레기 매립지, 도심지 기존구조물 근접부 등 종래 건설공사 입지 선정 시 제외되었던 난조건 현장에서도 공사를 수행해야만 되는 경우가 날로 늘어나고 있다. 게다가 토목, 건축구조물이 대형화, 대심도화 하는 추세에 있어 구조물의 안정성을 더욱 보강하는 설계, 시공기술이 요구되는 반면, 건설공사에서도 경제성을 추구해야 하는 (상반된 명제를 동시에 만족시켜야 하는) 딜레마에 부딪히고 있다. 구조물을 안전하고도 경제적으로 설계, 시공하기 위해서, 그리고 기존구조물의 유지보수 및 안전진단을 위해서 반드시 필요한 것이 정확한 지반조사를 통한 지반정보의 획득과 분석/평가이다.

지반조사 방법은 현장에서 직접 이루어지는 다양한 현장시험기법이 있고, 현장에서 채취된 시료를 실험실로 가져와 여러 가지 실험을 통하여 지반특성을 파악하는 실내시험기법이 있다. 일반적으로 현장시험 방법이 실내시험에 비하여 비교적 정확하지만, 현장지반에서는 굴착 등으로 인한 응력 이완으로 실제 지반의 강도 특성을 과소평가하기도 한다. 또한 현장시험 방법은 대상지반의 교란이 작고 현장 상태 그대로 실험할 수 있다는 장점이 있으나, 시험비용이 비싸고 향후 구조물 건설시 예상되는 다양한 응력조건 및 경계조건을 모사할 수 없다는 단점 때문에 실제로는 다양한 실내시험이 함께 수행되고 있다. 실내시험에서는 시료채취, 이동, 보관, 트리밍, 실내시험 작업 등에서 발생할 수 있는 시료의 교란으로 인하여 정확한 실험결과를 얻는데 많은 어려움이 있다. 따라서 실제 지반 특성을 정확히 묘사하기 위해서는 이러한 교란을 줄여야한다. 특히 초기 시료채취과정에서 시료의 교란이 발생하면 이후 과정에서 아무리 교란을 줄인다고 하더라도 양호한 실험결과를 얻을 수 없기 때문에 시료채취과정에서 교란을 줄이고 양질의 시료를 얻기 위한 노력이 매우 다양하게 이루어지고 있다. 주로 북미, 유럽, 일본 등에서 불교란 시료를 채취하기 위한 연구가 많이 수행되고 있으며, 그에 따라 연구자들마다 다양한 시료 채취 장비를 개발하여 사용하

고 있다. 국내에서는 주로 분리형 원통샘플러(split spoon sampler)와 얇은 관 샘플러(thin wall sampler), 2중관 피스톤 샘플러(double tube core barrel)를 이용하여 불교란 시료를 채취하고 있다. 그러나 아직 사질토지반에 대해서는 불교란 시료를 채취하지 못하고 있는 실정이며, 서로 다른 샘플러에 의해 얻어진 시료의 품질평가 방법이나 기준이 마련되어 있지 않고, 이를 토대로 한 설계, 시공법의 구축이 전혀 이루어지지 않고 있다. 아울러 국내에서는 그동안 여러 지역, 여러 기관, 여러 업체에서 실시한 지반조사 자료가 상당히 많으나 이들을 체계적으로 Data base화하지 못한 탓으로, 새로운 도시계획이나 건설공사 시 또는 기존 구조물의 안전진단 및 유지보수 시 이 자료들을 활용하지 못하고 있다.

또한 국내에서는 지반정수를 결정할 때, 다양한 현장 실험방법이 있음에도 불구하고 대부분 표준관입시험 (standard penetration test, SPT)에 의한 지반조사에만 의존하고 있다. 그러나 표준관입시험은 ⅰ)측정자의 관리정도와 개인차에 따라 시험결과의 오차가 매우 크고, ⅱ)자갈이 있는 지반에서는 시험결과인 N값이 과다하게 측정되며, ⅲ)자체자중만으로 관입되는 연약지반에서는 rod의 상태에 따라 N값이 달라지고, ⅳ)피압대수층에서는 N값이 과소 측정되는 등 여러 가지 문제점이 노출되고 있다. 선진 외국에서는 이러한 결점을 보완하기 위하여 대형관입시험(Large penetration test) 장비를 개발하여 설계에 이용하고자 현재 연구를 진행하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 건설공사의 경제성과 안전성 향상을 위하여 첨단지반조사 장비를 개발하고자 한다. 즉,

ⅰ) 가볍고 강한 FRP 신소재를 사용한 한국형 첨단지반 조사장비(대구경 샘플러)를 개발하여 점성토, 풍화토, 사질토지반의 시료를 교란시키지 않고 채취할 수 있는 기술 축적,

ⅱ) 채취한 시료를 합리적으로 시험 및 평가할 수 있는 기법을 연구하여 터널, 도로, 교량기초, 제방, 토공구조물, 산사태 평가 등 제반 건설공사를 경제적이면서도 안전성이 높게 설계·시공할 수 있는 토대 구축,

ⅲ) 모래지반 이외에도 적용이 가능한 한국형 대형관입시험 장비를 개발하여, 전석층, 풍화토, 조밀한 사질토 등과 같은 난조건 지반의 역학특성을 파악할 수 있도록 지반정수 제공,

ⅳ) 개발한 첨단지반조사 장비 및 그 활용기법을 건설업계에 널리 보급하여 건설기술을 획기적으로 발전하게 함을 그 목적으로 한다.

경제적이고도 정확한 지반조사 장비의 개발 및 이의 적용기술 개발이 이루어질 경우 지금까지 외국으로부터 수입에 의존하던 지반조사 장비의 국내생산에 따른 외화 절감 효과와 관련 기계 및 장비산업의 활성화, 그리고 중소업체인 지반조사업체가 불황으로부터 탈피하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

아울러 지금까지 국내기술로 불가능했던 사질지반이나 쓰레기 매립장, 풍화토, 퇴적연암지대의 정확한 지반물성 파악이 가능해지고 이러한 지반에 건설되는 도로, 항만, 공항 등 사회간접시설 및 각종 토목, 건축구조물을 현재보다 훨씬 경제적이고 정확하게 설계, 시공함으로써 국가예산의 절감 효과를 얻게 될 것이다.

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

첨단 지반조사 장비를 개발하여 지반의 정보를 보다 정확하게 수집, 분석, 활용하고 지반정보의 종합화 및 Data Base화를 통해 각종 건설공사의 안정적, 경제적 수행이 가능하도록 하기 위하여 다음과 같은 연구가 수행되었다.

- 난조건 지반 불교란 시료채취용 대구경 지반조사장비 개발 및 현장 적용성 평가
  - ㅇ 개발된 장비의 성능 평가 및 현장 적용성 평가
  - ㅇ 기존 샘플러와 비교 연구를 통한 성능 검증
  - ㅇ 사질토, 점성토 지반의 불교란 시료채취 및 실내 실험을 통한 역학특성 분석

- 한국형 대형관입시험 장비 (KICT-type Large Penetration Test) 개발 및 현장 적용성 평가
  - ㅇ 개발된 장비의 성능 평가 및 현장 적용성 평가
  - ㅇ 개발 장비의 거동 평가
  - ㅇ 지반 종류별 LPT와 SPT의 비교실험 및 평가
  - ㅇ SPT와 LPT의 상관성 분석

- 개발 장비에 대한 사용 매뉴얼 제시 및 활용방안 마련

- ㅇ 난조건 지반의 불교란 시료채취장비 및 LPT장비의 운용지침(매뉴얼) 작성
- ㅇ 개발된 첨단지반조사장비의 실험결과를 토목, 건축 구조물 설계 시 적용할 수 있도록 기초자료 축적
- ㅇ 첨단 장비의 특허 출원 및 등록등 실용화(업계 보급) 노력

제 3 절 기대효과

본 연구를 통하여 얻은 결과를 다음과 같이 활용하고자 한다.

- Turn Key 등 각종 국가 주요 건설공사 지반조사 시 활용
- 조밀한 사질토, 풍화토, 전석층 등의 평가기술 정립
- 지반조사 장비의 표준화 및 지반조사의 정확성 제고
- 경제적이고 안정적인 토목/건축 구조물 설계, 시공에 활용

본 연구 결과가 원활하게 보급되면 다음과 같은 효과들이 기대 된다.

- 기술적 측면

  - ㅇ 각종 토목구조물, 건축구조물의 안정적 설계·시공 가능
  - ㅇ 그동안 평가 및 해석이 곤란했던 풍화토, 자갈혼합토, 전석층의 해석가능
  - ㅇ 사질토 지반의 불교란 시료채취 가능 및 이에 대한 정확한 실내실험 분석가능
  - ㅇ 첨단장비개발 및 이를 활용한 지반평가기법의 지침화
  - ㅇ 각종 토목/건축 구조물의 합리적, 설계 시공

- 경제·산업적 측면

  - ㅇ 지반조사 표준화에 기여
  - ㅇ 정확한 지반평가로 각종 구조물기초, 연약지반, 사면공사의 경제성 제고
  - ㅇ 지반조사장비의 국산화에 기여

- 중소 지반조사업체의 경기활성화
- 첨단지반조사 장비의 개발 및 대량생산으로 제조업의 경기 활성화
- 본 장비의 활용을 통한 지하자원, 지하수개발 등으로 자원개발 산업의 활성화
- 지반조사 결과의 Data Base화를 통한 국가 건설산업의 기술고도화

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 지반조사방법 및 문제점

1. 지반조사법

(a) 보링과 샘플링 조사

샘플링이란, 설계정수 등을 구하기 위하여 시료를 채취하는 것으로 "교란이 적은시료"를 채취해서 실내시험을 하기 위해서 수행한다. 표준관입시험의 선단에 붙어 있는 시료채취기도 "샘플러"라고 부르고 있지만, 토질판별이외의 목적에 이것을 이용하는 것은 큰 의미가 없다. 그림 2.1은 고정피스톤식 씬월(thin wall)샘플러를 이용하여 연약점토의 교란되지 않은 시료를 채취하는 것을 목적으로 한 보링 조사의 모습을 나타내고 있다.

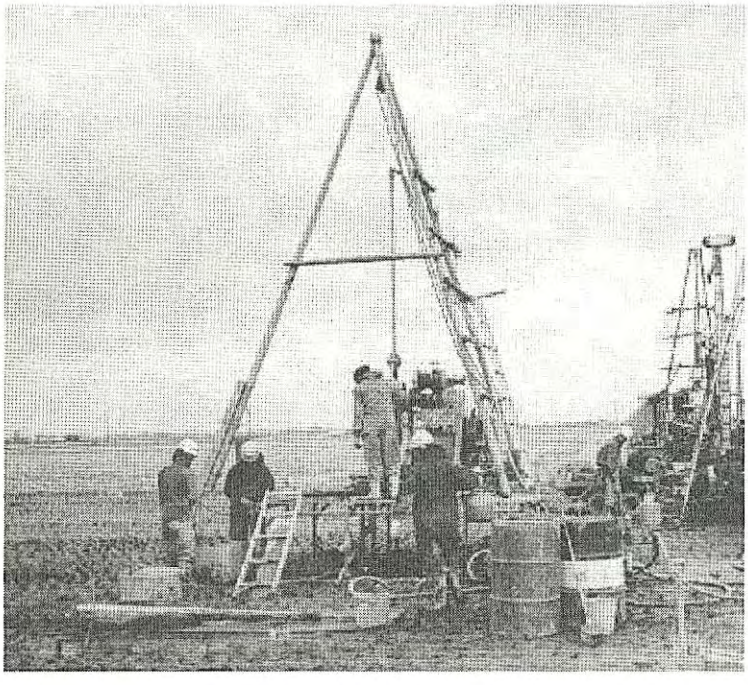


그림 2.1 보링조사 모습 예

연약한 점토의 샘플링에서는, "고정피스톤식 씬월 샘플러"가 주로 사용된다. 그 외, Sherbrooke 샘플러 (캐나다 쉐르부르대학, Lefebvre and Poulin, 1979) 또는 라발샘플러(캐나다 라발대학, La Rochelle, 1981)등이 이용되기도 한다. 이러한 샘플러로 시료를 채취한다고 해도 샘플링 튜브의 선단부근과 피스톤 근처에서는 교란이 많이 발생하므로 채취한 시료의 중앙부근에서 약간 선단의 교란이 적은 부분을 이용하여야 한다. 또한 약간 단단한 점토의 경우에는 씬월튜브와 점토와의 마찰로 인해 샘플러가 지반속으로 들어가지 않을 수 있다. 이런 경우에는 선행하는 피스톤에 의해 채취경보다 약간 두껍게 굴착하여 구속을 해방시켜 그곳에 샘플링 튜브를 넣어서 시료를 채취하는 방법이 사용되는 경우도 있다. 이것에는 로타리식 2중관샘플러가 사용되어, 통상 데니슨 샘플러라고 불린다. 느슨한 모래를 교란되지 않은 상태로 채취하는 것은 동결샘플러 이외의 방법으로는 거의 불가능하지만, 조밀한 모래의 경우에는 로타리식 3중관 샘플러를 이용하여 채취할 수 있다. 이 방법은 점토에 사용되는 로타리식 2중관샘플러의 샘플링튜브 내측에 인너튜브를 가진 구조로 되어 있어 트리플 샘플러라고 불린다. 그림 2.2는 고정 피스톤식 씬월샘플러를 나타내고 있다. 왼쪽 그림에서 길이 100cm의 스텐레스제 튜브를 씬월 샘플러라고 부르고, 선단의 피스톤으로부터는 피스톤롯드가 연결되어 있어 피스톤을 고정할 경우에는 이 피스톤롯드(인너롯드 또는 베이비롯드라고도 불림)를 간이구조물(삼각대 등) 꼭대기에 고정시킨다. 샘플러의 상부에는 샘플러 헤드라고 불리는 부분이 있어 볼콘 크램프가 내장되어 있다 (오른쪽 그림). 이 볼콘 크램프의 역할은 샘플러를 보링 구멍내로 넣을 때 보링 롯드내에 있는 피스톤 롯드의 자중으로 피스톤이 떨어지는 것을 방지하는것으로 피스톤 롯드가 아랫방향으로 떨어지려고 하면 볼콘 크램프가 조여주는 역할을 해 롯드가 움직이지 않게 하는 구조로 되어 있다.

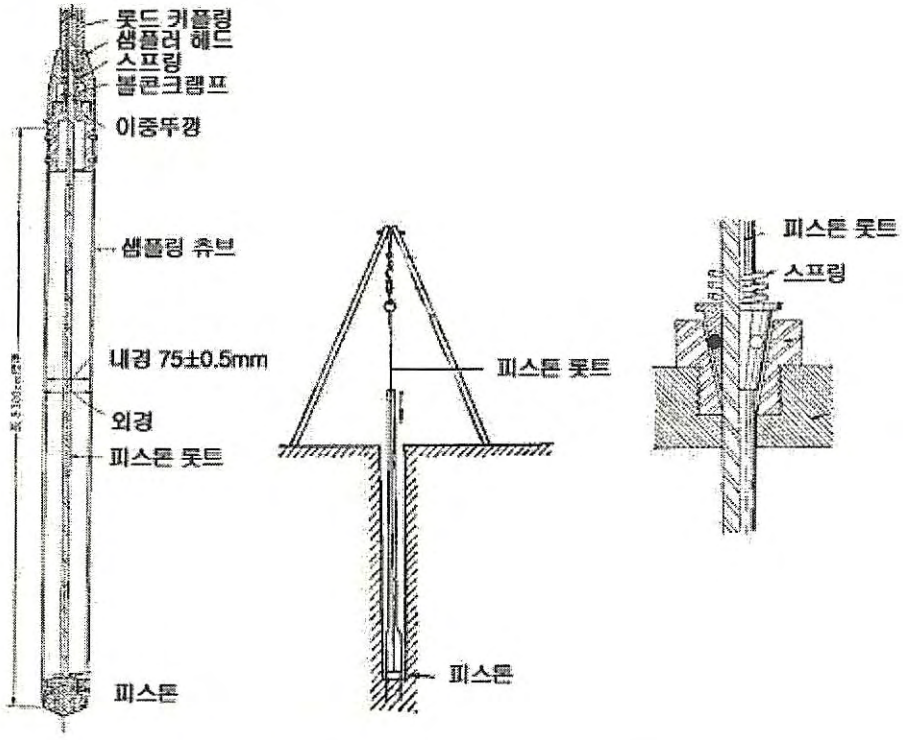


그림 2.2 고정피스톤식 씬월샘플러

그림 2.3은 고정피스톤식 씬월샘플러에 의한 샘플링 방법을 모식적으로 표시하고 있다. (a)는 보링 구멍을 굴착한 상태를 표시하고 있다. 오수를 흘려보내면서 소정의 깊이까지 로타리식 보링머신으로 보링 구멍을 뚫고, 바닥 슬라임을 제거한다. 굴착시 오수압이 너무 높으면 하이드릭 프릭쳐라고 하는 균열이 발생하거나, 굴착속도가 너무 빠르면 공저를 교란시키므로 신중한 작업이 필요하다. 또한 굴착에 오수를 이용하는 것은 공벽을 보호하기 위해서이고 (필요에 따라서는 케이싱이용), 굴착토를 운출하기 위함이다. (b)는 공저까지 샘플러를 하강 시킨 다음 피스톤롯드를 간이삼각대 정상부에 고정시킨 상태를 나태내고 있다. (c)는 피스톤을 고정시킨 상태에서 샘플링 롯드를 밀어넣음으로써 샘플러를 점토내에 넣은 상태를 나타내고 있다. 이때 공저는 고정피스톤으로 눌려 있기 때문에 샘플링튜브를 점토내에 들어갈때 주변점토의 변형은 구속되고, 점토시료의 변형에 의한 교란을 방지한다. 샘플링튜브를 밀어넣는 것은 연속적으로 빨리 하는 게 좋다고 한다. 파이프랜치를 사용하여 인력으로 밀어넣는 방법, 튜브롯으로 밀어넣는 방법, 보링 머신의 유압잭으로 밀어 넣는 방법 등이 있다.

최근에는 보링 머신의 유압잭을 사용하는 경우가 늘어 났지만, 통상 사용되는 보링 머신의 유압잭의 스트로크는 50cm밖에 되지 않아 밀어 넣는 걸 일단 중지하고 여러 번 장소를 바꾸어서 작업을 하지 않으면 충분한 길이의 시료를 채취할 수 없다. 일반적으로 100cm의 샘플러에 대해 80cm정도 밀어넣기를 한다. (d)는 샘플러를 뽑아올려 채취한 시료를 회수하는 모습을 나타내고 있다. 위로 꺼낸 샘플러로부터 공기구멍을 확인한 후에 피스톤을 제거하고, 채취장소, 일시, 시료번호, 채취깊이, 밀어넣은 길이에 대한 시료의 채취율 등을 튜브에 적어 상부 또는 하부를 양초로 3cm 이상의 두께로 봉하여 밀폐시켜 충격, 온도 등에 영향을 받지 않도록 주의해서 실험실(항온실)로 운반한다. 그림 2.4는 그림 2.3(b)와 (c)의 상태에 대한 설명이다. 또한, 씬월 튜브의 내부의 모습을 알 수 있도록 샘플러를 분해한 상태로 촬영한 것이다.

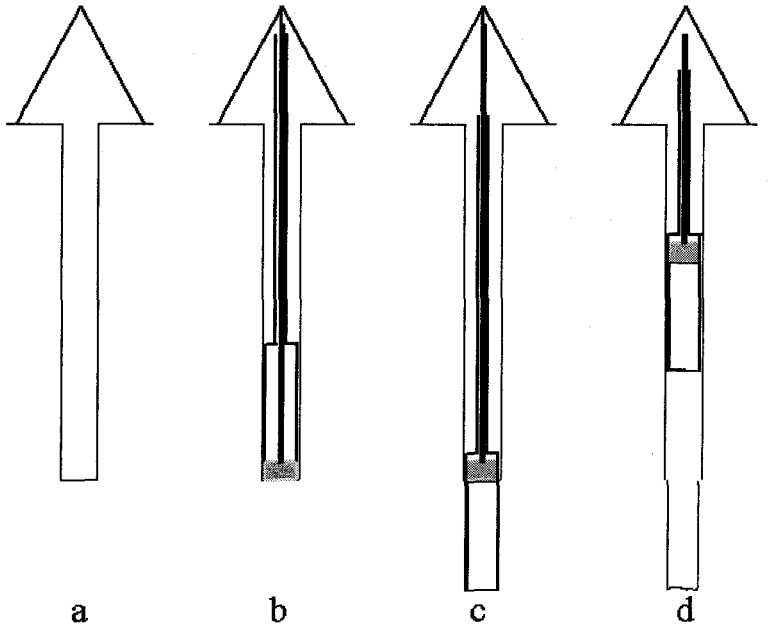


그림 2.3 고정피스톤식 씬월샘플러에의한 샘플링 방법

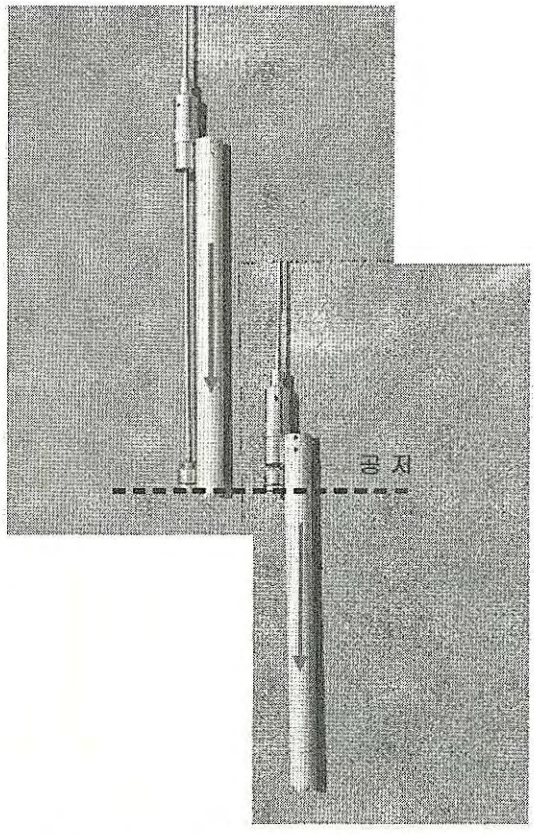


그림 2.4 고정피스톤식 씬월 샘플러의 구조

(b) 사운딩 조사

어떤 파라메터(N값, 선단저항, 간극수압 등)를 구해서, 이것과 토질정수를 연계시키는 관계식을 이용하여 토질정수를 간접적으로 추정하는 원위치 시험을 일반적으로 "사운딩"이라고 한다. 보링공을 이용하는 사운딩 방법으로 가장 많이 실무에서 사용되는 것이 표준관입시험(SPT)이다. 표준관입시험은 63.5kg의 추를 75cm 높이에서 자유낙하시켜 표준관입용 샘플러를 30cm 관입하는 타격횟수인 N값을 구하는 시험이다.

2. 샘플링 장비의 특징

(a) 일본의 장비

(1) 일본식 피스톤 샘플러

일본지반공학회(JGS)에서는 샘플링 튜브를 그림 2.5와 같이 정의하였다. 외경은 75mm이고 튜브의 길이는 1000mm이다. 스테인레스 스틸(stainless steel) 혹은 황동(brass)이 튜브재료로 사용될 수 있지만 현재는 스테인레스 스틸을 많이 쓰고 있다. 튜브의 두께는 스테인레스 스틸인 경우 1.5mm이고 황동인 경우는 2mm이다. 시료질에 큰 영향을 미치는 선단 모양은 그림 2.5와 같다. 선단의 뾰족한 각도는 6°이고 폭은 0.2mm이다.

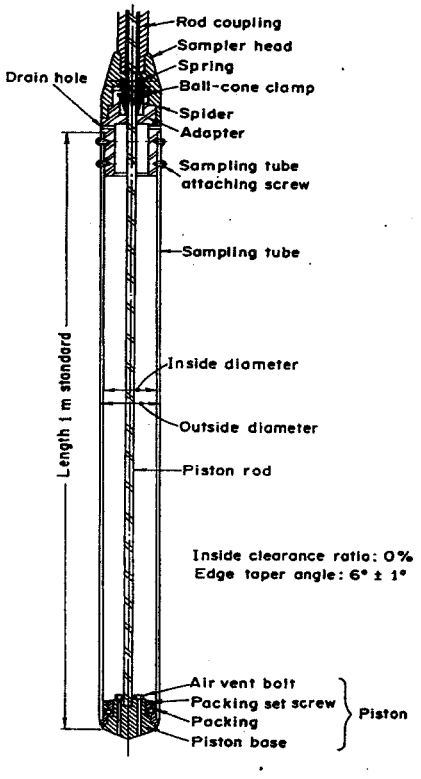


그림 2.5 일본식 씬월 튜브 고정 피스톤 샘플러

(Sub-Committee on Soil Sampling, 1981.)

샘플러에는 엑스텐션 롯드식 샘플러와 수압식 샘플러 2종류가 있다. 엑스텐션 롯드식 샘플러는 피스톤을 지상에서 고정하고, 보링롯드에서 샘플링 튜브를 지반에 밀어 넣는 방식이다. 반면, 수압식 샘플러는 피스톤을 샘플러 헤드에 고정하여 수압을 이용해서 샘플링 튜브를 지반에 밀어 넣는 방식이다.

적용범위는 보통 N값이 0-4이하 정도가 일반적이다. 구체적으로는 샘플링 튜브가 변형하지 않는 범위이다. 사질토에 대한 적용범위는 세립분이 적을수록 채취가 곤란하다.

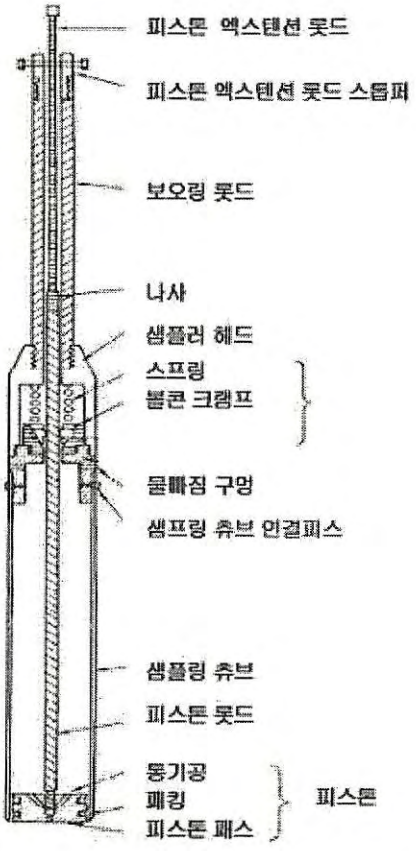


그림 2.6 엑스텐션 롯드식 샘플러

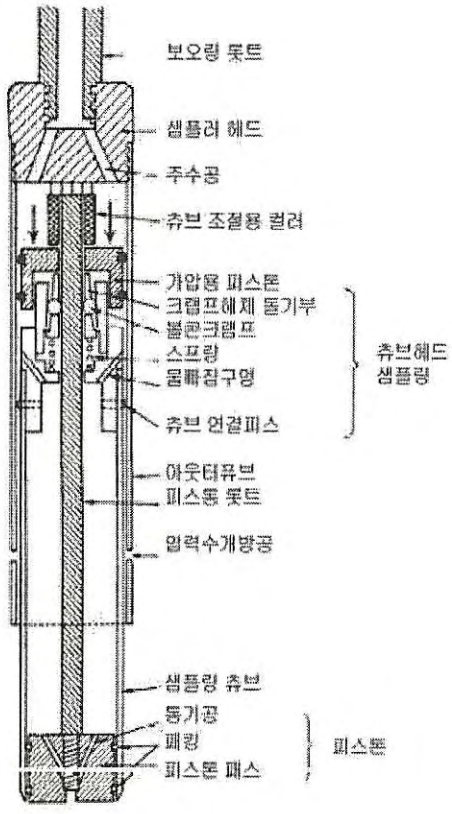


그림 2.7 수압식 샘플러

(2) Marine auto sampler

일본 국토교통성에 명시된 조사코드에 따르면 선박에 고정시키는 것과 같은 발판 정박은 바람과 파도가 발판을 움직이게 하여 시료의 질에 나쁜 영향을 주기 때문에 현장조사에 사용하지 않는다. 그래서, 수심 50m 아래의 흙을 조사하기 위해서는 바닷

가에 큰 규모의 부두 혹은 해상시설을 설치할 필요가 있다.

그래서, 국토교통성 산하 항만기술연구소에서는 해저의 흙을 채취할 수 있는 Marine Auto Sampler(MAS)를 개발하였다(Okumura & Matsumoto, 1981). 이 샘플러는 모선으로부터 원격 조정하여 불교란 시료를 얻을 수가 있다. MAS의 개략도를 그림 2.8에 나타냈다.

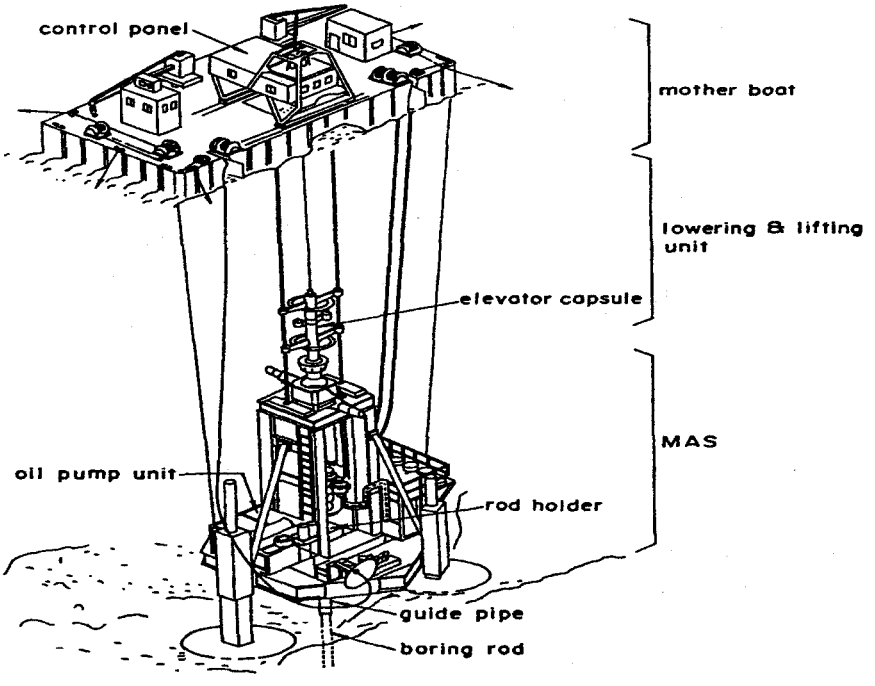


그림 2.8 Marine Auto Sampler의 개략도

이 샘플러는 다음 조건하에서 작동될 수 있다.

▷ 최대 조류 흐름: 0.5m/sec

▷ 최대 파도 높이: 1.5m

▷ 해저 바닥의 최대 경사: 15°

▷ MAS 기초의 접지 압력: 20kPa

▷ 최대 수심: 80m

▷ 최대 드릴링 깊이: 50m(해저로부터)

▷ 최소 시료 채취 간격: 1.0m

그림 2.9에 MAS 방법으로 채취한 시료의 질과 해저에 고정된 작업대를 이용하는 보통의 시료 채취 방법을 비교하여 나타내고 있다. 시험 현장은 일본 Kobe 항구로 이곳은 정규압밀점토 층으로 이루어져 있다(wn=100%, bulk density=1.5g/cm3, wL=100%, wp=30%). 일축압축강도 q_u로 시료의 질을 검토한 결과 이들 q_u값 사이에 주목할만한 차이가 없음을 알 수가 있었다. 또한, 두 가지 방법으로 채취한 시료들 사이에 파괴시 변형률 또는 영 계수(Young's modulus)의 차이도 없었다.

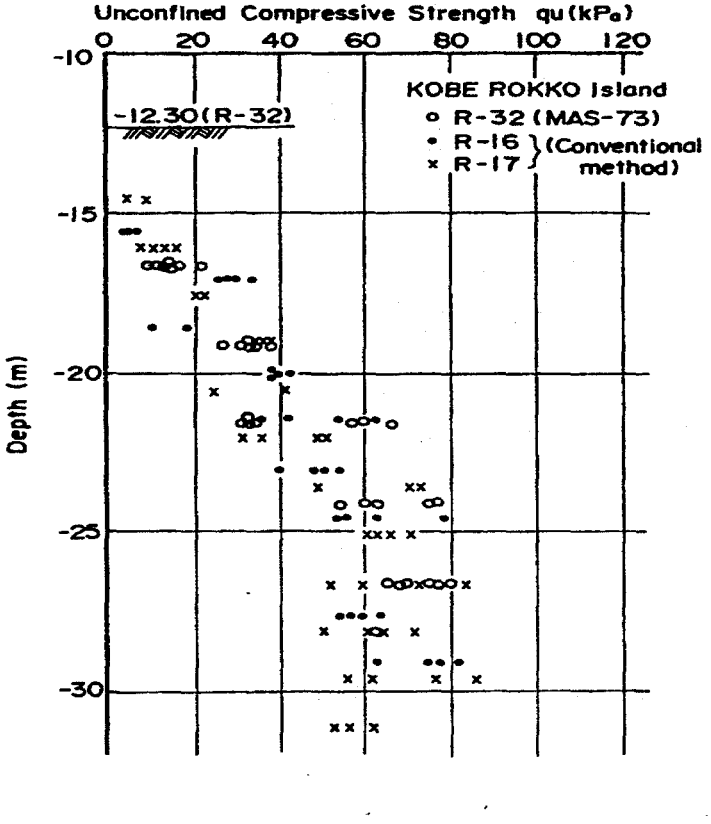


그림 2.9 일반적인 시료채취방법과 MAS로 시료를 채취하여 얻은 시료의 전단강도 비교(Okumura와 Matsumoto, 1981).

(3) Sampling with wire line-type sampler

일본 Kansai 국제공항은 수심이 깊은 곳에 건설된 첫 번째 대규모 해상 공항이다.

공사 중에 불교란 시료를 채취하기 위하여 수많은 보링 홀을 굴착하였다. 이 현장은 제4기(Holocene) 점토층뿐만(충적토) 아니라 압축성 있는 홍적세(pleistocene) 층(홍적토)이 깊이 400m이상 퇴적되었다. 그래서, 이 현장 조사에서는 깊은 암반을 코아링하는데 적당하도록 원래의 wire line type sampler를 개량하였다. wire rope를 이용하여 샘플러를 내리고 올릴 수 있기 때문에 일반적인 보링 로드(boring rod)를 이용하는 것보다 보링 작업능률이 훨씬 좋다. 특히, 시료채취 깊이가 깊어질수록 작업능률이 더 좋아진다.

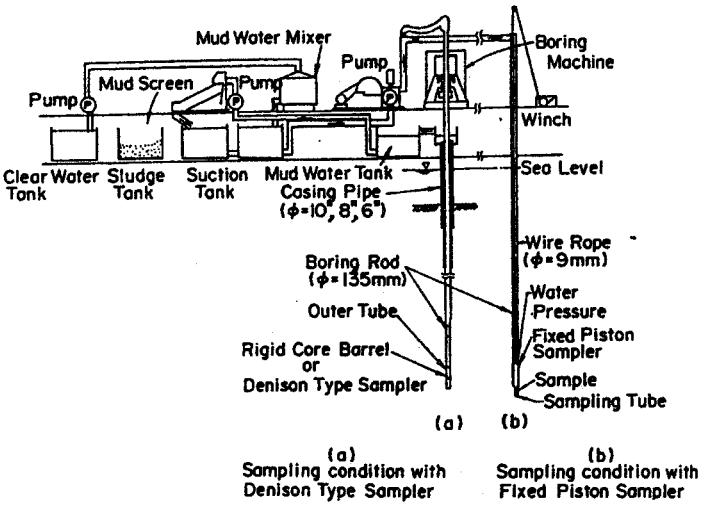


그림 2.10 Wire line-type boring(Kanda 등, 1991)

그림 2.12은 Kansai 국제공항의 현장조사에 적용된 보링 시스템의 배치를 보여 주고 있다. 시료 채취 깊이가 400m가 될 때 wire line의 자체 무게만 120kN이다. 그러므로, 이 현장은 일본에서 가장 큰 보링 기계를 도입하였다. 그림 2.10에 나타난 것과 같이 두 개의 다른 두께를 가진 유압식 고정 피스톤 샘플러를 사용하였다. 그 두께는 점착력이 있는 흙의 강도에 따라 결정된다. 만약, q_u<200kN/m^{2}인 연약한 점토의 경우라면 2mm 두께를 사용하고 200kN/m^2<q_u<2000kN/m^{2}인 약간 강한 점토의 경우라면 4mm 두께를 사용한다. 흙의 강도가 2000kN/m^{2}이상이거나 사질토의 경우에는 로터리 코아 보링 형식의 Denison 샘플러를 사용한다. 그림 2.12에 wire line과 보통의 방법으로 얻어진 q_u값을 비교하여 나타냈다. 그 결과 이들 방법 사이에 강도 차이가 없음을 알 수가 있다.

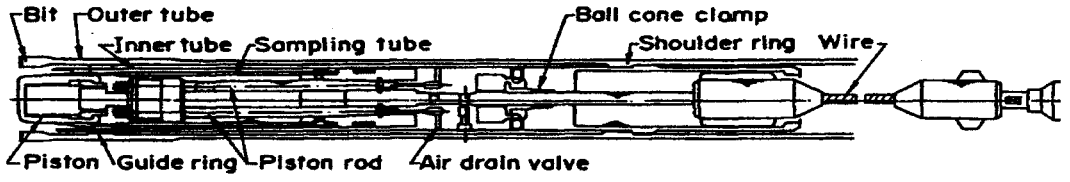


그림 2.11 wire line 방식의 고정 피스톤 샘플러

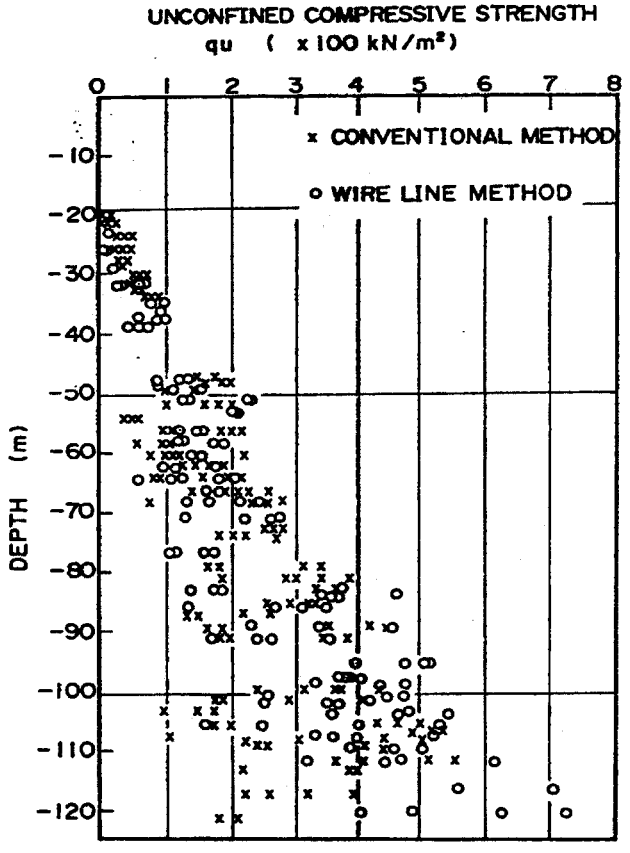


그림 2.12 일반적인 방법과 wire line 방법으로 얻은 시료의 전단강도 비교

(4) 직경 208mm 일본식 Laval 샘플러(점성토)

일본에서는 연약한 점토지반의 불교란 시료를 얻기 위하여 캐나다 Laval 대학의 지반공학부가 제안한 설계 원리를 기초로 하여 Laval 샘플러를 새롭게 설계하였다. 그 시료 채취기는 3가지 부분(sampling tube, sampler head, coring tube)으로 구성되었다. 그림 2.13에 이들 3가지의 구성부분을 나타내었다.

튜브의 내경은 208.3mm이고 외경은 216.3mm이다. 이 내경의 크기는 일축압축시험을 위하여 수평방향으로 12개의 직경 35mm 공시체를 만들 수 있도록 되어있다. 샘플링 튜브는 4개의 스크류(screw)로 샘플러 두부에 고정되어 있다. 샘플러 두부는 강철로 만들어 졌고, 중심에 있는 횡방향 구멍(lateral opening)은 흙 속에 관입되었을 때 물이 샘플링 튜브와 코아링 튜브로부터 빠져나가도록 한다. 홀은 직경이 35mm인 강철 공(steel ball)을 꽂을 수 있다. 이것은 물이 샘플러로 역류하는 것을 막아주고 샘플러를 표면으로 들어올렸을 때 튜브로부터 시료를 밀어내는 역할을 한다. 강철로 만들어진 코아링 튜브의 내경은 248.8mm이고 외경은 267.4mm이다. 이것은 샘플링 튜브를 조립하기 위하여 안쪽에 고정시킨 catcher 형태의 평평한 두부로 되어 있다. 더 낮은 선단에는 일종의 커터 비트(cutter bit)가 고정되어 있다. dents로 된 실린더 모양의 안전장치가 코아링 작업도중 샘플링과 코아링 튜브를 중심 위치에 유지하도록 샘플링 튜브와 코아링 튜브사이의 두 곳에 놓여 있다.

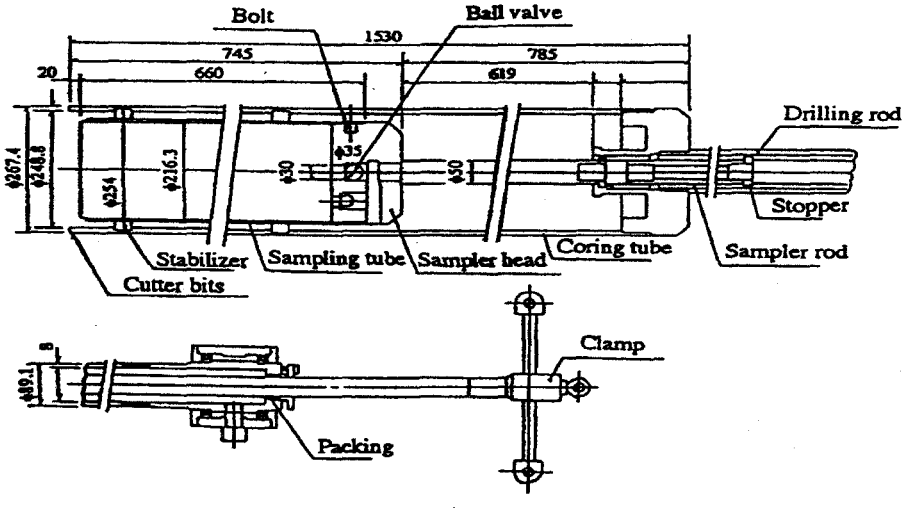


그림 2.13 Laval 샘플러의 개략도

샘플러의 일반적인 작용은 다음과 같이 정리된다. 코어 튜브를 이용하여 보어홀을 굴착하고, 보어홀 바닥에 있는 머드 슬라임(mud slime)은 샘플링을 하기 전에 제거한다. 코아 튜브에 고정되어 있는 샘플러를 두부 밸브를 연 상태로 안으로 내려 굴착수가 샘플러를 통하여 자유롭게 흐를 수 있게 한다. 코아 튜브의 선단이 보어홀의 바닥에 도달하면 코아링 튜브는 고정시키고 샘플러는 자유롭게 한다. 샘플링 튜브가 흙속에 관입되었을 때, 굴착수를 샘플러 두부의 홀을 통하여 튜브로 흘러 나가게 한다. 샘플러의 두부가 시료의 상부 위 약 50mm 높이에 도달하면 샘플링 튜브의 움직임을 멈춘다. 그리고, 굴착수를 압력으로 분사하며 코아링 튜브를 회전시켜 굴착작업을 수행한다. 이 때, 헤드 밸브 안에 있는 홀 밸브는 볼 베어링(ball bearing)에 의해 자동적으로 차단되어 샘플링 튜브 안으로는 굴착 액이 유입되지 않는다. 코아링 튜브의 관입속도는 약 2cm/min를 유지한다. 굴착수는 커터비트(cutterbit)에 의해 깎여 교란된 점토를 씻어내는 역할을 한다. 코아링 튜브가 샘플러의 끝이 약 20mm 아래 위치에 도달하면 코아링을 멈추고 샘플러를 2~5° 정도 회전시킨 후 서서히 끌어올린다.

직경 280mm Laval 샘플러를 이용하여 3곳의 해성 연약 점토지반에서 시료채취를 하였다. 이들 현장은 Osaka 동부, Osaka 서부, Hachirogata이다. 시료내의 함수비의 분포를 측정하여 시료의 함수비 분포를 그림 2.14에 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 3개의 연약점토시료의 함수비 분포가 일정한 것을 알 수 있었다. 따라서, Laval 대구경 샘플러는 샘플링 작업 동안에 시료 표면 주위의 교란을 줄일 수 있었다.

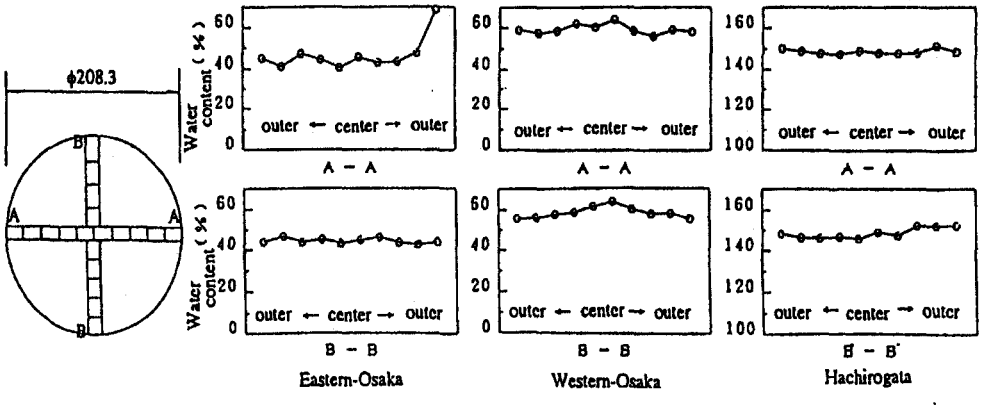


그림 2.14 샘플러 안의 함수비 분포

(5) 대구경 Laval형 샌드 샘플러

사질지반의 액상화 검토 등을 위해서는 고품질의 불교란 모래시료가 필요하다. 세립분이 적은 모래의 불교란 시료는 동결샘플링이 최적이지만, 경제성을 고려하면 다른 시료채취방법의 개발이 필요하다. 이에 교토대학의 Oka 등은 점성토의 샘플링용으로 개발된 Laval 형 대구경 샘플러를 개량하여 샌드 샘플러를 새롭게 개발하였다. (Oka 등, 1998)

① 샘플러의 구조 및 샘플링 방법

가) 대구경 Laval형 샌드 샘플러의 구조

대구경 Laval형 샌드 샘플러의 구조는 그림 2.15와 같다.

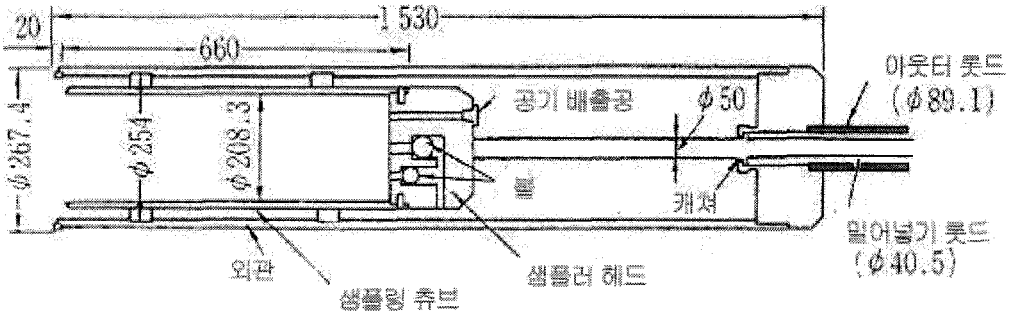


그림 2.15 대구경 Laval형 샌드 샘플러 (단위 mm)

본 샘플러는 시료채취용의 대구경샘플링 튜브와 굴착용의 튜브로 구성되었다. 이것으로 샘플링튜브를 정적으로 지반에 밀어 넣어 시료를 채취하는 작업과 굴착용 튜브로 굴공하는 작업을 교대로 할 수 있다. 샘플링튜브는 밀어 넣을 때 저항이 큰 것을 감안하여 스틸로 제조했다. 규격은 외경 216.3mm, 내경 208.3mm로 컷트 선단부 각도는 12°이다. 또한 샘플링튜브의 길이는 660mm와 360mm, 2종류를 채택했다.

나) 샘플링 및 시료동결방법

샘플링은 그림 2.16에 나타낸 순서로 하였다.

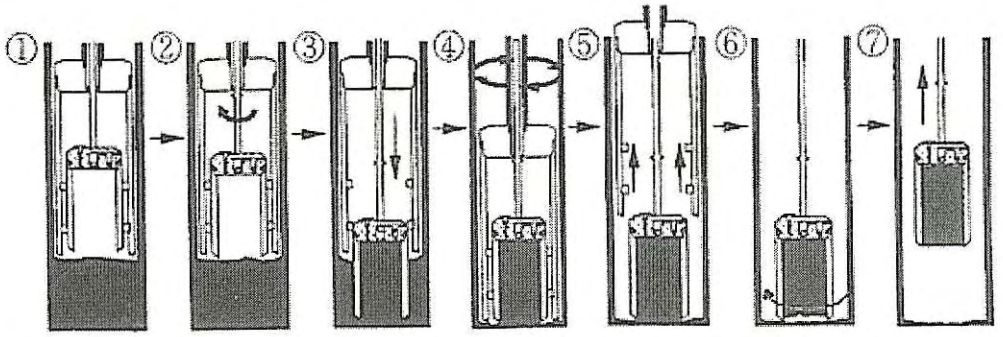


그림 2.16 샘플링 방법

① 샘플러를 천천히 공저에 넣는다.

② 밀어넣기 로드를 오른쪽으로 회전시킨다. (캐쳐가 분리되어 샘플링 튜브가 공저에 도달한다.)

③ 보링 머신을 이용하여 밀어넣기 로드를 전진시킨다.

④ 샘플링 직경을 계측하여 2cm정도 여유를 가지고 튜브로 굴공한다.

⑤ 튜브를 천천히 올린다.

⑥ 샘플을 잘라내기 위해서 밀어넣기 로드를 오른쪽으로 90°정도 회전시킨다.

⑦ 샘플링 튜브를 천천히 올린다.

또한, 채취시료가 대구경이기 때문에 시료가 떨어지지 않도록 오수의 비중을 통상 사용하는 1.03g/cm^3보다 높게 하여 1.3-1.4g/cm^3으로 관리함과 함께, 시료확보시에는 그림 2.17에 나타낸것처럼 capping을 하였다.

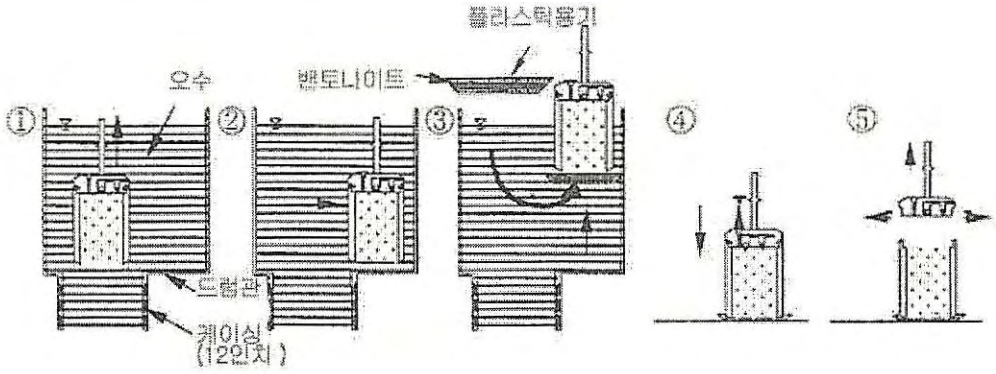


그림 2.17 샘플capping방법

채취한 모래시료는 운반시의 진동 등으로 교란을 피하기 위해서 일단 현장에서 동결시킬 필요가 있다. 그러나 시료동결에 따른 시료팽창으로 시료가 교란될 우려가 있다. 그러므로, 그림 2.18과 같이 샘플링 선단부를 배수상태로 하여, 물의 팽창을 구속하지 않고 비교적 느린 동결속도로 하부로부터 일차원적으로 동결시켰다. 또한 시료의 동결상태를 확인하기 위해 동결중의 배수량을 기록하여 체적변화를 측정하였다.

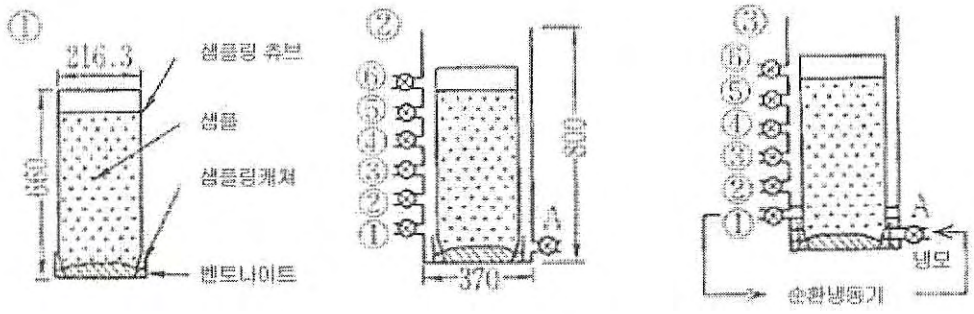


그림 2.18 시료의 동결방법

② 실제 지반의 적용 현황

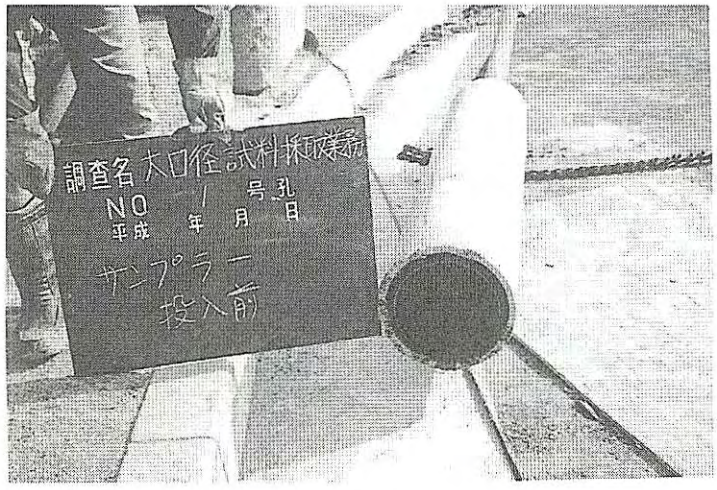


그림 2.19 대구경 Laval형 샌드 샘플러

(샘플링전에 외경 267.4mm의 굴착용튜브와 샘플링튜브의 사진)

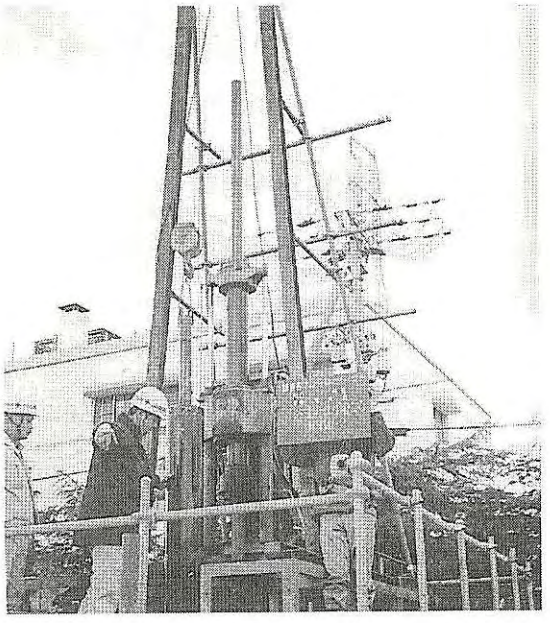


그림 2.20 현장에서 및 굴착용 튜브(외관)를 올리는 모습



그림 2.21 샘플링 튜브를 올린 모습

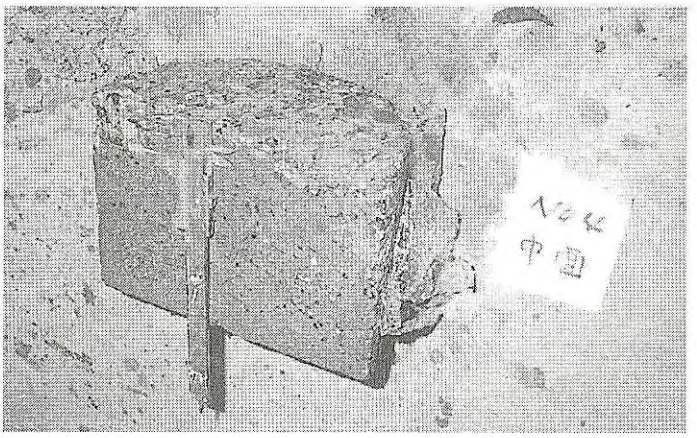


그림 2.22 채취된 시료의 모습
(동결시킨 시료의 절단면을 관찰하고 있는 모습)

(6) 기타 일본의 지반조사 장비

① 소형 샘플러

소구경 배압형 샘플러는 표준관입시험용의 보링공(보통 직경66mm)으로부터 교란이 적은 시료를 채취할 수 있는 샘플러이다. 이 샘플러는 질량이 종래의 샘플러의 절반이하로 취급하기 쉽다. 또한, 샘플링튜브를 밀어 넣기 위한 수압실을 2중으로 하고 있으므로 종래의 수압샘플러의 약 2배의 관입력을 얻을 수 있는 것이 특징이다. N값이 15정도의 점토까지 시료채취가 가능하다.

그 외 필요구경이 작기 때문에 굴착시간이 절약되고, 이산화탄소 배출량도 적은 등 친환경적인 샘플러라고 할 수 있다.

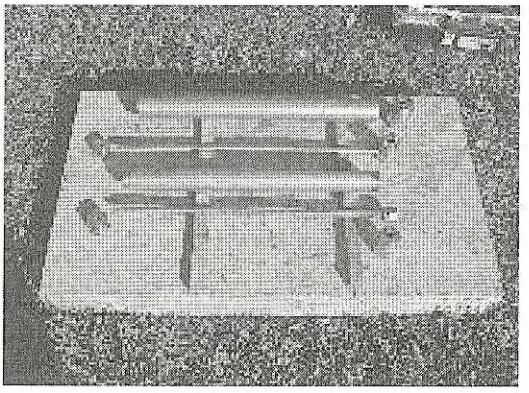


그림 2.23 소형 샘플러 장비

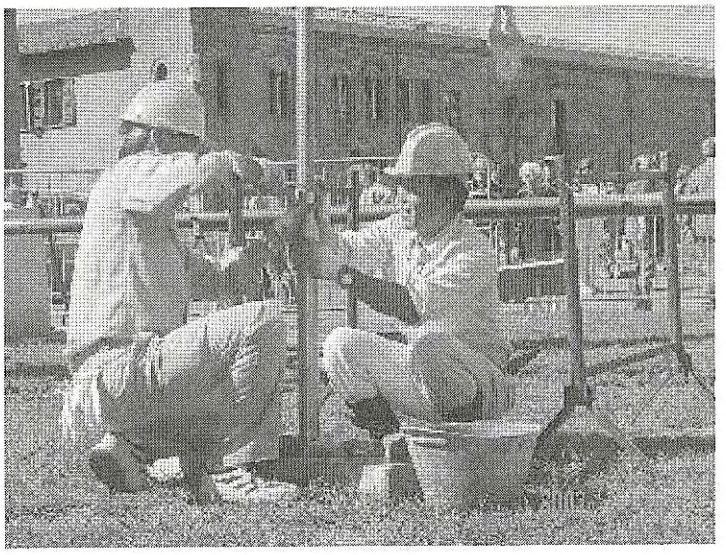


그림 2.24 소구경 샘플러에 의한 작업모습(이탈리아 피사의 탑)

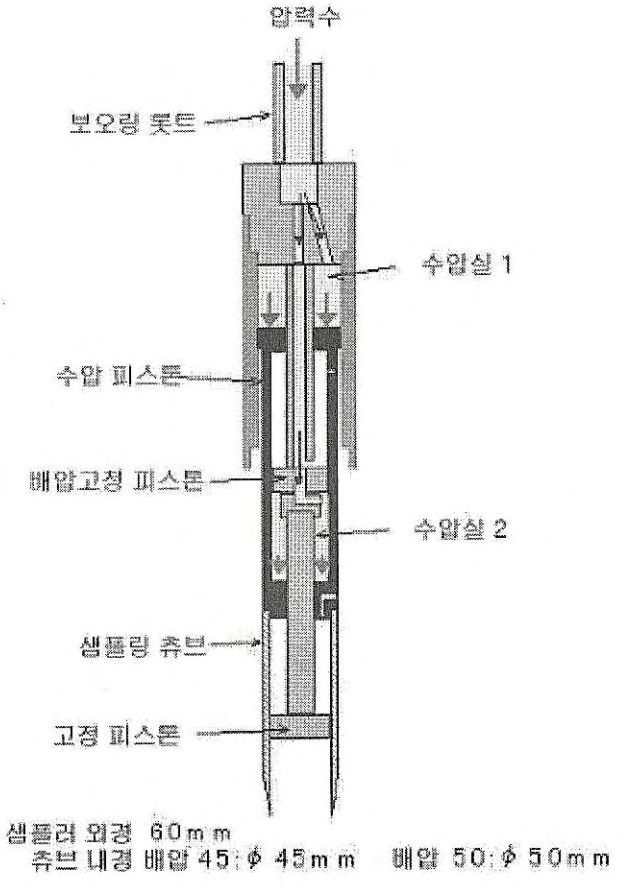


그림 2.25 소구경 배압형 수압 피스톤 샘플러의 구조

② 최신의 기포식 보링 공법에 의한 샘플링기술 (Air Bubble Boring- Hybird Method)

일반적인 코아 보링에서는 오수식 보링 공법이 통상 사용되고 있으나, 사질토 지반, 취약한 암반에 있어서는 매트리스가 유실되어 코아로부터 상세한 지질특성을 파악하지 못하는 경우가 있다. 이러한 배경에서 개발된 것이 기포식 보링 공법이다. 기포식 보링은 약 20년전부터 사용되고 있으며, 주로 기포를 발생하는 장치를 중심으로 연구개발이 진행되어 실용화 단계에 와 있다. 그 결과 사질지반(불포화)에서 시료를 채취할 때 효과가 있는 공법이라고 알려져 있다. 그러나, 그 적용성에 있어서 제약을 받고 있는 것으로 알려져 있고, 경제성 문제도 해결해야 할 과제이다. Takeda 등은 이러한 문제점들을 보완하여 새로운 기포식 보링인 Hybrid 보링공법(HB공법)을 개발하였다.

가) 기포식보링

기포식 보링 공법은 압축공기 속에 계면활성제를 주입, 발포시켜 굴착유체로 사용하는 방법이다.

새롭게 개발된 HB공법에서는 기포의 성형, 안정성, 제어의 용이 등에 중점을 두어 발포장치를 개발하였다. 액송 펌프를 이용하여 발포성 노즐에 의해 계면활성제를 바이패스관에 보내 기포를 발생시킨다. 그 장치의 특징은 고농도의 계면활성제로부터 발생되는 기포가 안정적으로 공급되어 압력조정이 간단하다고 할 수 있다.

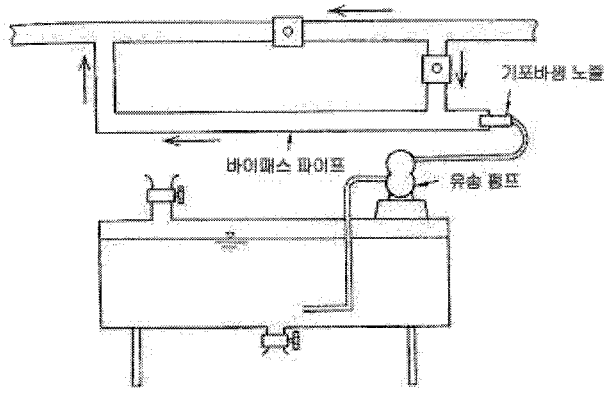


그림 2.26 HB공법에서의 발포 장치

또한 기존의 더블코아 튜브에서는 코아를 밀어서 시료를 추출하기 때문에 교란이 발생하는 경우가 있으므로 코아를 반으로 분리시켜 아크릴관과 함께 추출할 수 있는 트리플 코아튜브를 개발하였다.

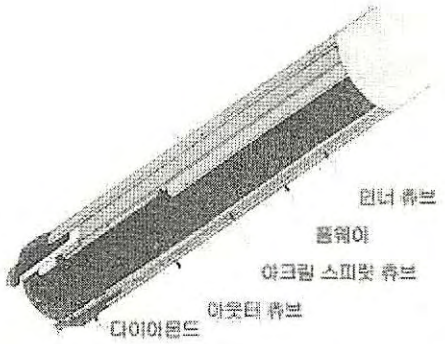


그림 2.27 트리플 코아 튜브의 구조

HB공법에서 사용되는 기기는 다음 그림에 나타낸것 처럼 기존의 공법에서 사용되는 기기 이외에 발포장치과 컴프레서가 추가되는 정도이다.

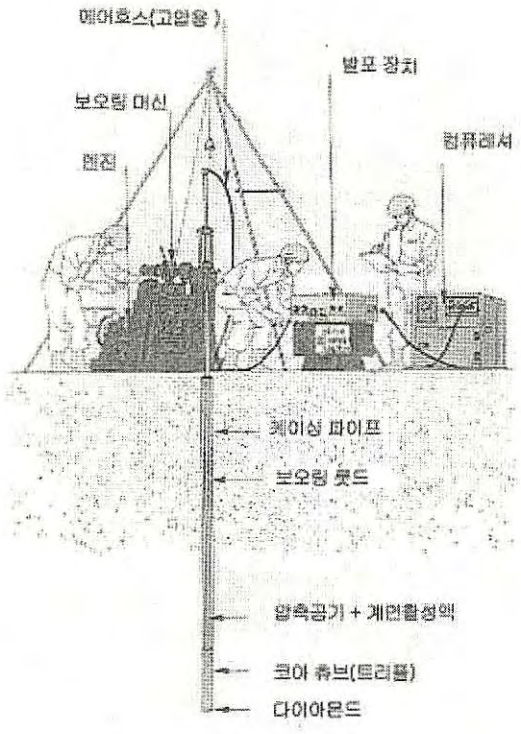


그림 2.28 HB공법 개요도

나) 현장 적용 사례

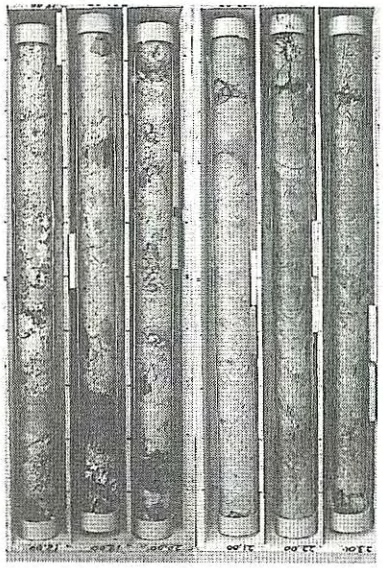


그림 2.29 HB공법으로 채취한 사질층 지반
(기존공법으로는 자갈만이 채취되는 경우가 많다.)

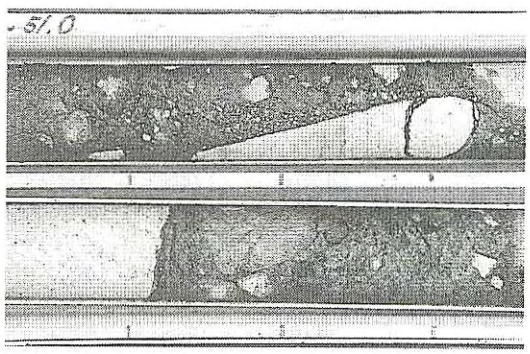


그림 2.30 통상의 다이아몬드 비트로 굴공할 경우,
고결도가 낮은 조립토는 굴공시 유출된다.

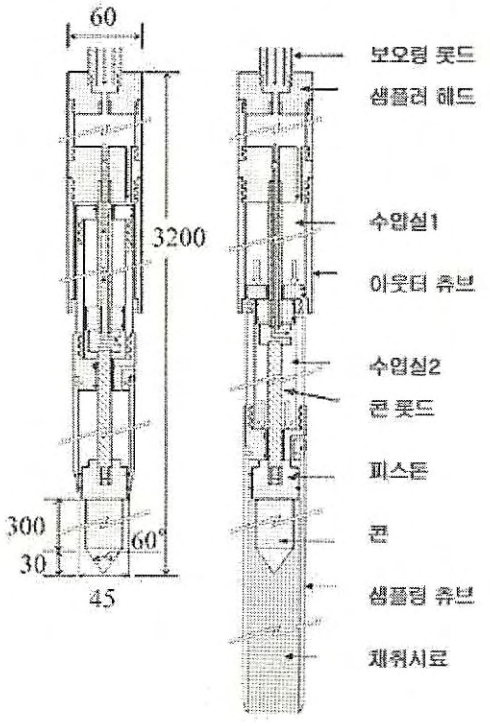
③ 콘 기능을 가지는 배압 샘플러의 개발

(Cone Sampler with a two-chambered Hydraulic Piston)

소형 배압형 수압 피스톤 샘플러 (시료 직경에 따라 45-mm, 50-mm)가 개발되어, 충적토와 홍적토, 유기질토, Nigata 모래에 대하여 적용성을 체계적으로 검토하였다.

그 결과, 통상 일본에서 사용되고 있는 수압식의 고정 피스톤식 씬월 튜브 샘플러 (75-mm), 로타리식 2중관 샘플러(75D), 로타리식 3중관 샘플러(84T), 그리고 Laval 샘플러와 동등이상의 품질로 시료가 채취된다고 한다. 이러한 소형 배압형 수압 피스톤 샘플러를 다기능화하여 고정피스톤을 콘형상으로 만들어 콘 관입시험의 기능을 할 수 있는 소형 배압형 수압 피스톤 샘플러 (통상, 콘 샘플러)를 개발하였으며, Osaka의 홍적점토인 Ma12점토, Ibaraki 점토, Nigata 점토에 대하여 적용성 검토를 하였다.

가) 콘샘플러의 구조와 시료 채취



(a) 콘관입시험 (b) 샘플링 시

그림 2.31 콘 샘플러의 구조 (단위 mm)

표 2.1 각종 샘플러의 규격 비교

샘플러 종류	Cone	45-mm	50-mm	75-mm	75D [1]	84T [2]
샘플러 외경 (mm)	60			89	96	89
샘플러 튜브 내경 (mm)	45		50	75		84
샘플러 중량 (N)	235	108	127	235	255	764
샘플러 전장 (mm)	3200	1350	1680	1155	1365	2040
샘플러 튜브 길이 (mm)	1115	600	800	1000		
시료최대 채취 길이(mm)	500		735	800		
샘플러 튜브 단면적비 C_a [3](%)	13		25	8.2		12

I : 75-mm 로터리식 2중관 샘플러
II : 84-mm 로터리식 3중관 샘플러

$$C_a = \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_1^2} \times 100(\%)$$

여기서 D_1 : 샘플러 튜브 내경
D_2 : 샘플러 튜브 최대외경

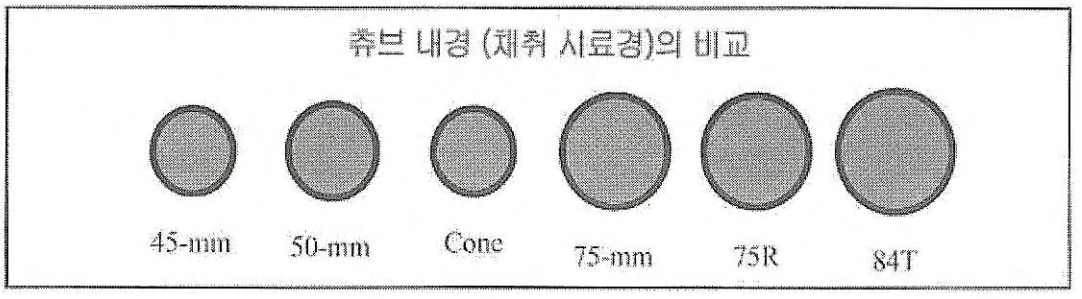


그림 2.32 튜브 내경의 비교

콘의 전장은 3200mm로 길지만 그 중량은 235N이며, 수압식의 고정피스톤식 씬월 튜브 샘플러 (75-mm)와 비슷하다. 콘의 선단은 선단각 60°, 저면적 1000mm^{2}이며, 콘 관입저항 q_u, 간극수압 u, 주변마찰력 fs의 측정이 가능하다. 또한 배압구조로 되어 있다. 콘은 지반조사의 효율화, 고정도화, 그리고 코스트 절감에 기여 가능한 특징을 가지고 있다.

- 샘플링을 위한 보링 구멍을 굴착하지 않고 교란이 적은 흙시료가 채취가능하기 때문에 지반조사에 소요되는 시간, 경비의 절감이 가능하다.
- CPT정보의 취득과 CPT 중에 임의의 심도에서 교란이 적은 흙시료의 채취가 가능하다.

- 배압구조이기 때문에 45-mm/50-mm 모두 강도가 큰 지반에서도 교란이 적은 흙시료의 채취가 가능하다.

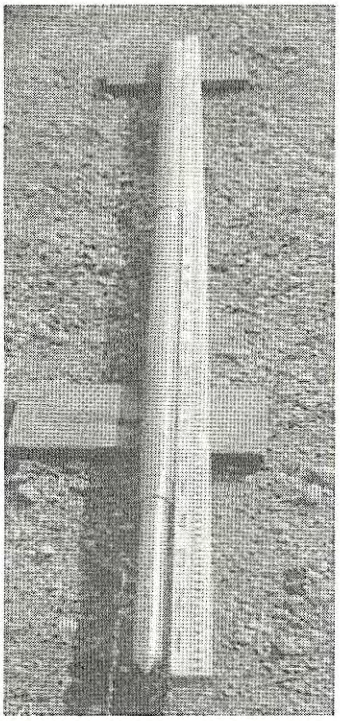


그림 2.33 콘샘플러

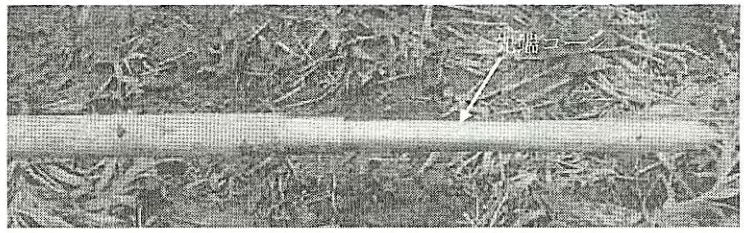


그림 2.34 선단 콘 (JGS 1435-2003에 근거하여 선단각 60도, 저면적 1000mm2)

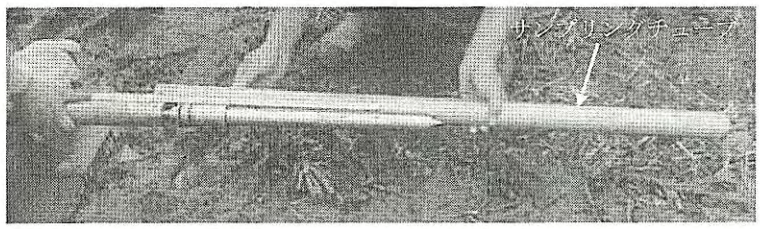


그림 2.35 샘플링튜브가 밀려나온 사진

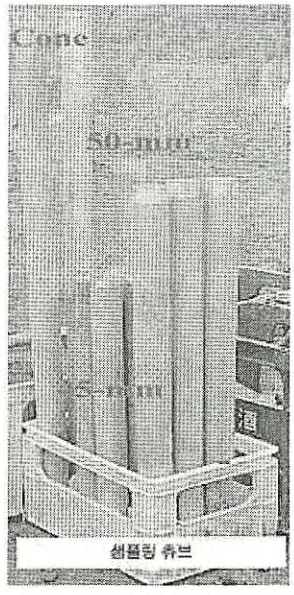


그림 2.36 샘플링 튜브

④ 수용성 폴리머의 농후용액을 이용한 불교란 시료의 샘플링

(Thick water-soluble polymer solution)

미고결 지반에서 rotary drilling에 의한 교란이 적은 시료를 낮은 비용으로 얻을 수 있는 새로운 샘플링 방법을 개발하였다. 개발한 샘플링 방법의 포인트는 굴착유체에 있으며 특징은 다음과 같다.

가) 입자가 씻겨 나가는 것을 방지하기 위해 비트에 공급되는 양은 최소한으로 한다.
나) 코아를 보호하는 성능이 우수한 수용성폴리머의 농후용액을 이용한다.

구체적으로는 굴착오수에 첨가하는 증점제로서 일반적으로 합성고분자의 일종을 이용한다. 통상 농도를 0.2-0.5%로 아주 얇게 이용하는 것을 수 %로 함으로써 특이한 기능을 발휘한다.

그림 2.37은 표면근처에서 시료를 샘플링하는 상황을 나타내고 있다.

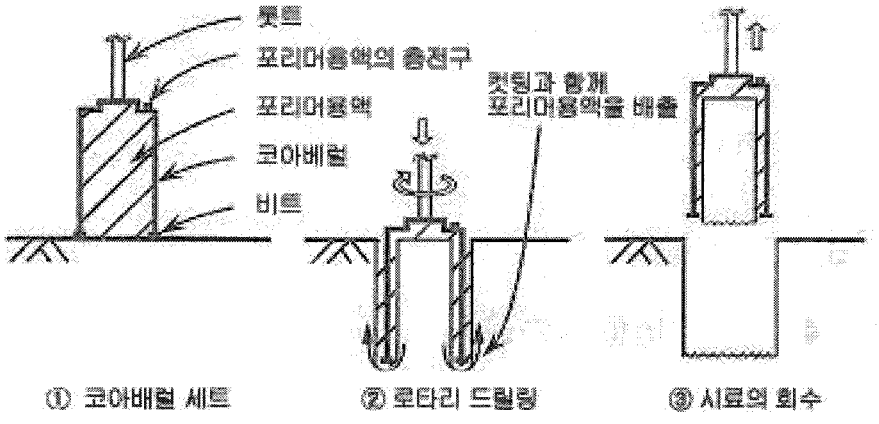


그림 2.37 표면에서 샘플링하는 방법

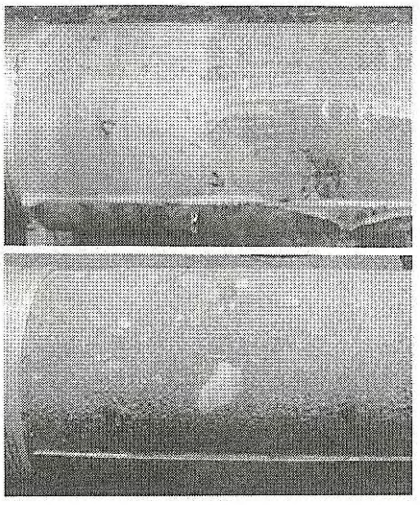


그림 2.38 폴리머용액을 이용하여 채취한 시료

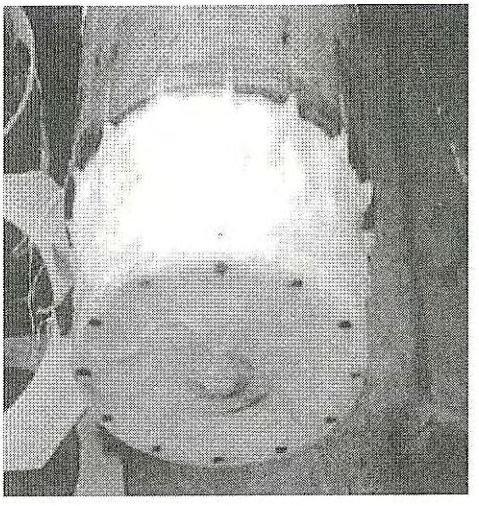


그림 2.39 프리 피스톤 방식의 선단 플러그 (폴리머 용액이 비트의 주변에 공급)

⑤ 효율화를 높인 로타리 퍼커션 드릴의 개발 (Rotary Percussion Drilling)

Rotary Percussion Drilling(RPD)은 굴암기를 1960년대에 타격력을 공기압에서 유압방식으로 전환하고 2중관 굴착기능을 부가하여 급속 굴공 기계로써 개발되었다. 지금까지는 주로 앵커 설치 공사 등에 사용되었다. 1990년대 후반부터 터널의 선진 보링, 토양오염 조사 등에도 사용되고 있다.

지반조사 보링에서는 스핀들형 로타리식 보링 머신(R-bor)가 널리 사용되고 있다. 그러나, 심층까지의 보링을 할 경우에는 굴공 심도의 제한 외에 롯드 승강에 의한 작업의 복잡함, 대규모 가설비의 필요 등 효율성이 떨어진다고 할 수 있다. 새롭게 개발한 로타리 퍼커션 드릴은 이러한 단점들을 보완하여 효율성을 높였다고 할 수 있다.

가) RPD에 의한 굴공 시스템의 개요

RPD는 회전력에 유압햄머의 충격력을 더하여 밀어 넣는 식의 굴착 및 코아 채취를 수행한다. 표 2.2에는 새롭게 개발된 RPD의 상세제원을 나타내고 있다.

표 2.2 RPD의 상세제원

전장	7,220mm	타격수	2,200bpm
전폭	2,400mm	타격력	750J
전고	2,550mm 수직식 5,900mm	토크	8,000N-m
회전수	max.80rpm	원동기	111kW/1,800rpm
급진력	0~60kN	급진속도	0~6.5m/min

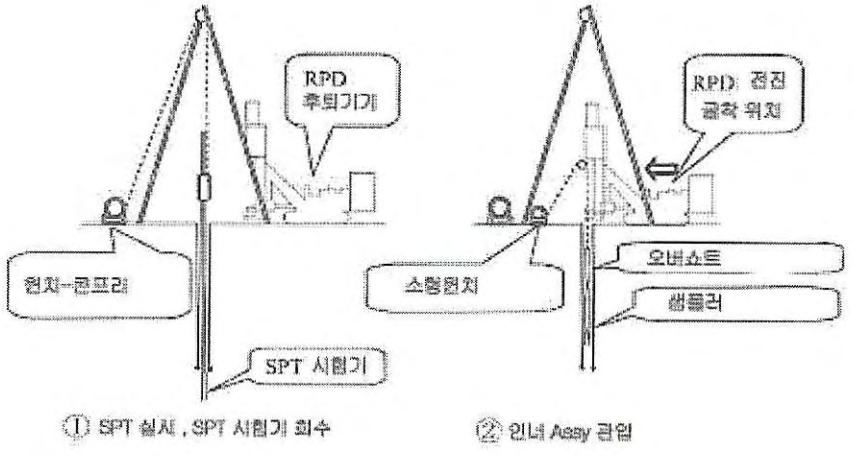


그림 2.40. RPD에 의한 굴착과 SPT의 공정

특징을 정리하면 다음과 같다.

- 굴착능력으로써 회전력과 함께 강력한 타격력을 겸비하고 있기 때문에 고속 굴공이 가능하다.
- 강력한 굴공능력을 가지고 있기 때문에 기본적인 공벽보호를 위한 케이싱 관입은 필요없다.
- 톱 드라이브 방식의 롯드를 사용하기 때문에 롯드 탈착 등의 작업성이 좋다.

나) PtoN 샘플러

RPD에 의한 굴공방법에는 Non 코아 보링 공법, 코아채취가 가능한 공법이 존재한다. 이번에 새롭게 개발한 샘플러는 코아 채취가 가능한 공법의 샘플러를 개량하여 코아 채취 이외에 선단의 돌출형 인너 슈를 이용한 RPD의 타격에 의한 50cm 관입할 때의 관입저항치(P값)의 측정이 가능하다. 샘플러의 제원은 아래의 그림과 같으며, 특징을 요약하면 다음과 같다.

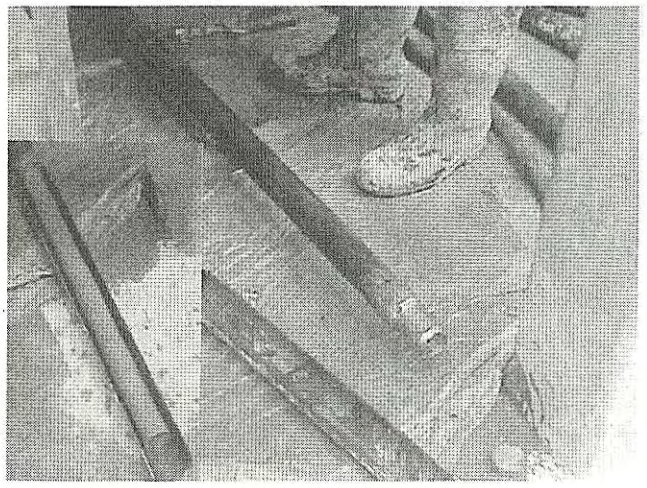


그림 2.41 PtoN샘플러의 외관도

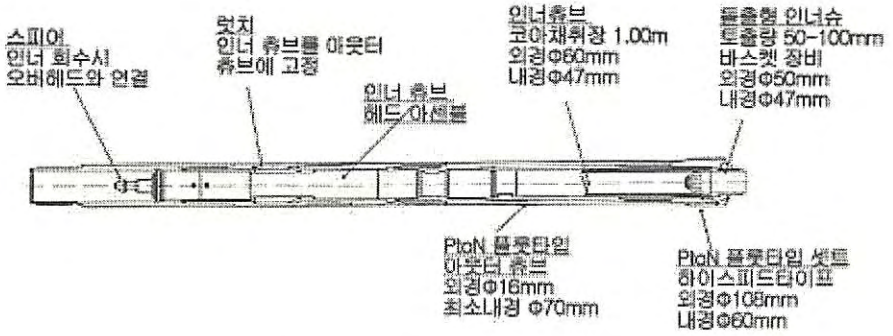


그림 2.42 PtoN샘플러의 구조

- 외경 96mm코아 보링 샘플러의 선단비트 내공경을 60mm까지 확대하여 SPT의 실시, 수압샘플러에 의한 불교란 시료의 채취가 가능하다.
- 선단부에 코아 캐쳐를 붙이는 것으로 느슨한 모래지반에서도 확실하게 시료 채취

가 가능하다.

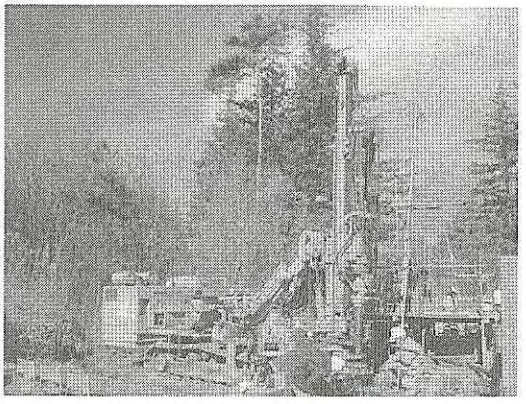


그림 2.43 RPD의 작업 상황

(6) 일본식 샘플러와 외국 샘플러의 비교

일본의 샘플러, 노르웨이 지반공학연구소가 개발한 샘플러 (NGI54, 구경 54mm), 세계에서 널리 사용되는 Shelby튜브 (ASTM D-1587), 영국의 샘플러 (ELE 100), 대구경 Laval 샘플러, Sherbrooke 샘플러 등을 비교 (Tanaka 등의 논문, Hight의 논문 (Geotechnique 1992, 42(2))) 하여 일본 샘플러의 성능을 평가 하였다.

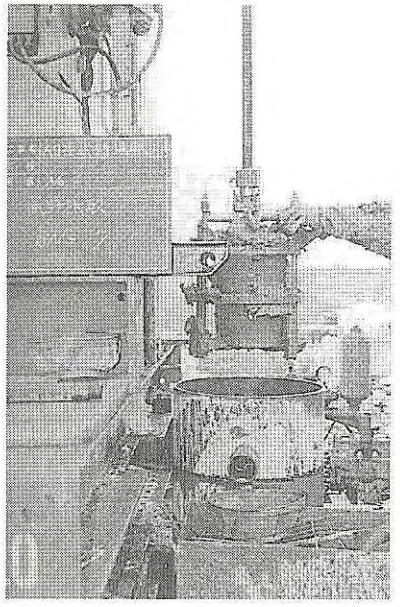
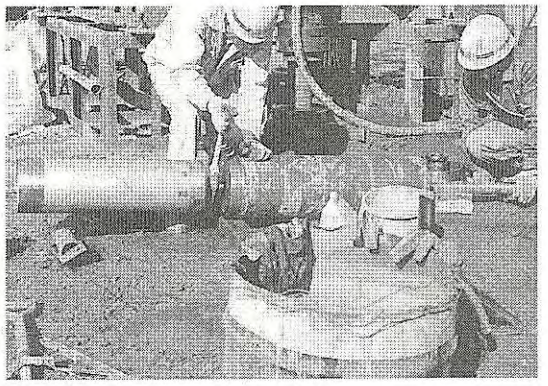


그림 2.44 Sherbrooke 샘플러



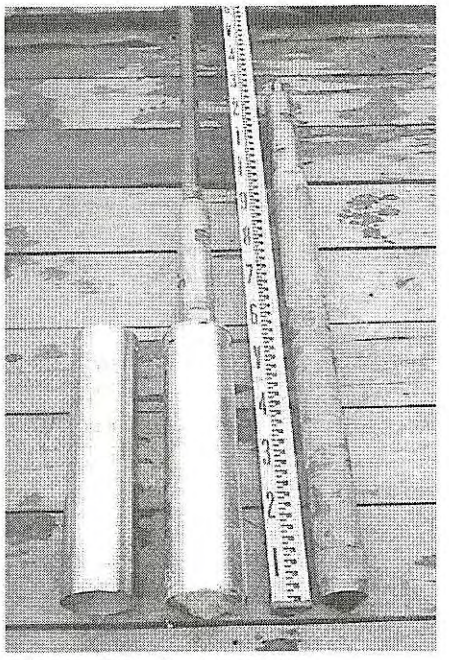
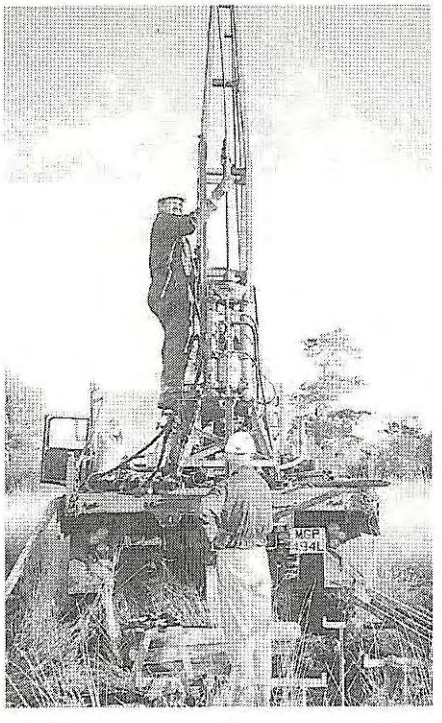


그림 2.45 대구경 Laval 샘플러와 영국 샘플러 ELE100



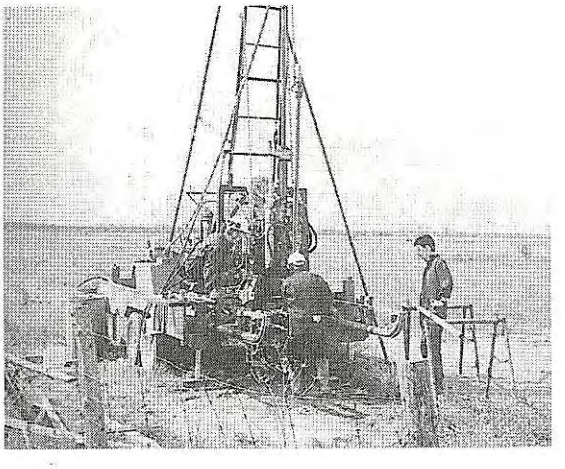


그림 2.46 일본의 샘플러

(고정피스톤식 씬월 샘플러)

다양한 지반에 적용한 결과 일본의 샘플러는 대구경 Laval형 샘플러와 동등한 성능을 가지는 것으로 나타났다.

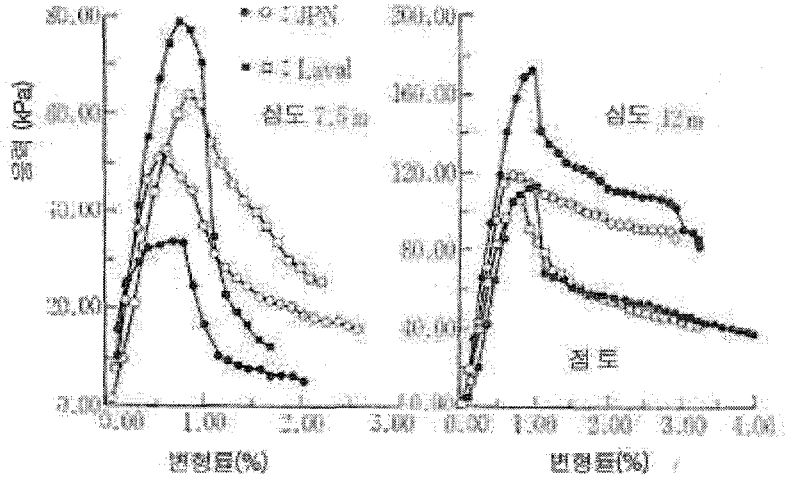


그림 2.47 캐나다 Louseville 점토의 일축압축시험 결과

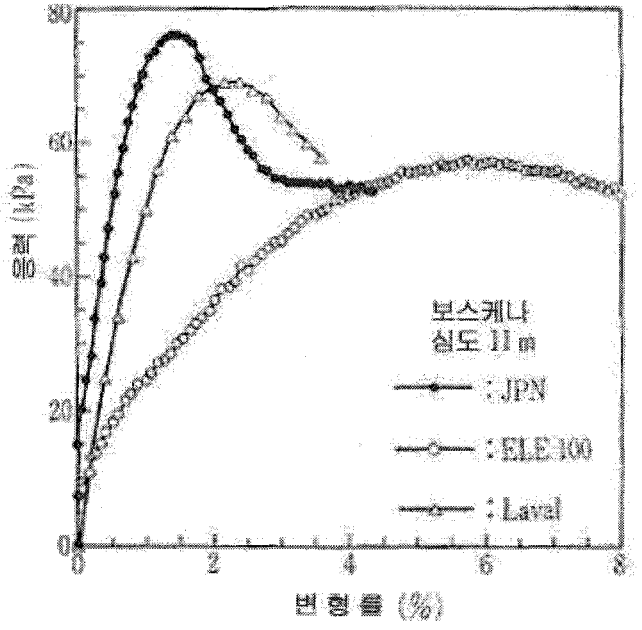


그림 2.48 보스케나 점토에 대한 일축압축시험 결과

(b) 미국과 유럽의 장비

(1) 점성토 시료채취용 장비

금세기들어 전세계에서 매우 여러 종류의 시료채취 기법이 개발되었지만, 실제로 활발히 사용되고 있는 시험기는 매우 적다. 그 중 영국에서 주로 사용되는 시료 채취 기구는 직경 100mm의 thick-walled 오픈 관입(open-drive) 샘플러, 직경 35mm의 표준관입 시험용 thick-walled 오픈 관입(open-drive) split barrel 샘플러, 직경 54mm 혹은 102mm의 thin-walled 고정 피스톤(fixed-piston) 샘플러와 이중관 회전고리(swivel) 형 코아 배럴(core barrel) 등이다. 세계 각지에서 사용되는 샘플러의 종류는 지역의 발전정도 및 경제 조건, 전통적 시료 채취방법 및 그 지역의 주된 흙의 종류 등에 따라 다르다. 개발이 많이 진행된 영국의 남서부 및 중부지역의 흙은 단단하거나(stiff) 매우 단단한 점성토와 연암으로 구성되어 있으며 계곡지역은 굵은 자갈로 구성된 충적층이 많이 나타난다. 따라서 시료채취는 대구경의 보어홀에서 모난 도구(rugged tools)를 사용하여 이루어진다.

관입(drive) 샘플러는 회전없이 흙 속으로 관입되며, 샘플러의 아래쪽에는 일반적으로 날카로운 절단날을 가지고 있다. 반면에 로터리(rotary) 샘플러는 상대적으로 두껍고 뭉툭한 절단면을 가지고 있으며 단단한 텅스텐이나 다이아몬드를 포함하고 있다. 샘플러는 회전하면서 아래쪽의 흙을 갈아내면서 관입된다. 일반적인 샘플러의 분류는 다음 그림 2.49와 같다.

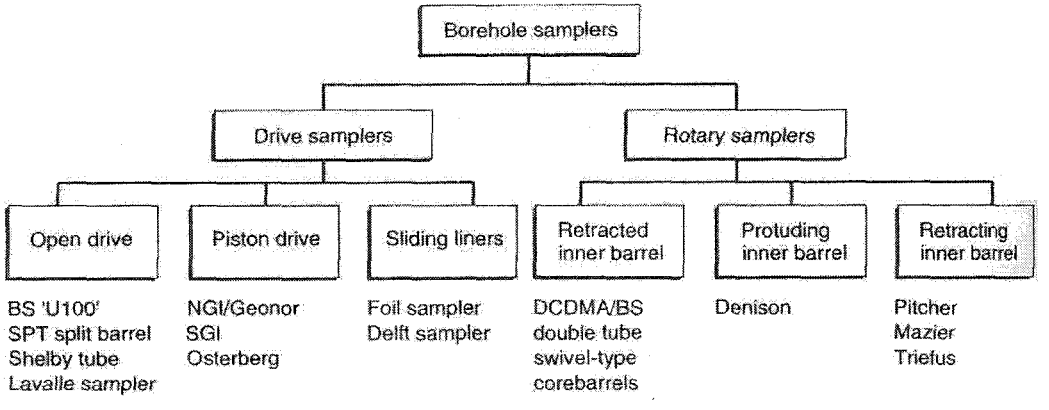


그림 2.49 보어홀 샘플링 장비의 일반적 분류

① 시험용 구덩이(trial pits)나 굴착면에서의 샘플링

시험용 구덩이(trial pits), 트렌치, 얕은 굴착은 지반조사에서 자주 이용된다. 특히 낮은 높이나 중간정도 높이의 구조물을 건설할 때 지표면 근처에 존재하는 복잡한 지반조건을 파악하는 경제적인 방법이 된다. 또한 시험용 구덩이(trial pits), 트렌치, 얕은 굴착은 현장 시험뿐만이 아니라 양질의 시료를 얻기 위해서도 이용될 수 있다.

입상시료인 경우 교란 시료가 보어홀에서 채취되는 시료보다 현장조건을 나타내는데 더 적합할 수 있다. 교란시료는 실험실에서 함수비나 액소성 등을 측정하는데 주로 이용되며 현장 밀도를 결정하는데도 이용된다.

불료란 시료는 관입 샘플링이나 블록 샘플링을 이용하여 채취되며 각각의 경우 모두 시험굴착 중 발생하는 교란에 유의하고 샘플링 시에는 샘플링 지점 주위에서 교란시료들을 주의깊게 제거하여야한다.

영국에서는 면적비가 크고 확인 밸브가 없으며 내벽 여유(clearance)도 없는 38mm 관입튜브를 시험구덩이 바닥면에서 타입하여 관입시킨다. 이 때 시료 유출을 막기위하여 종종 튜브를 파내는 작업이 필요하다. U100 튜브가 사용될 시에는 매우 큰 힘이 필요하며, 슈에서 흙의 교란이 심하기 때문에 rocking을 방지하기 위하여 조심해야한다.

단단한 점성토에서는 직경이 큰 샘플러(100-200mm)를 이용하여 더욱 질좋은 시료를 채취할 수 있다. 이 경우 슈 부근에서 흙의 이동으로 인한 교란은 피할 수 있지만 흙의 횡방향 팽창이 발생할 수 있다.

흙이 충분히 단단하여 자중 하에서 자립할 수 있을 때, 블록 샘플을 채취할 수 있다. 일반적으로 300mm의 육면체로 잘라내며, 각 면에서 10-20mm의 여유공간을 가지는 상자에 보관하도록 한다. 이 때 시료와 박스 사이에는 파라핀을 채운다. 블록 샘플은 완벽한 응력이완이 발생하므로 흙이 팽창할 수 있으나, 매우 단단한 점성토에서는 가장 좋은 시료를 채취할 수 있는 것으로 알려져있다.

가) 블록 샘플링(Block sampling)

블록샘플링은 시료 채취지점 주위를 수작업으로 주의깊게 개착하고 일정한 형태를 가지는 블록으로 시료를 자른다. 이 후 이 블록은 세겹으로 옥양목(muslin)으로 싸고 왁스나 파라핀으로 봉하여 강성 상자에 넣어 옮기게 된다. 시료채취 과정은 그림 2.50

에 나타나 있다. 그러나 이러한 시험 굴착은 얕은 깊이에서 이루어지며 깊이에 따라서 공사 가격이 급격히 증가하므로 일반적으로 깊은 깊이에서 점성토 시료를 채취하는 데는 사용되지 않는다.

블록 샘플링은 시료채취과정에서 응력 이완이 발생하므로 블록 시료는 채취과정 중 전응력이 0으로 감소하게된다. 이로 인하여 과잉간극수압이 음의 값을 가지게 되고 주변 개착지의 물이나 유체를 흡수하며 이 과정에서 시료의 유효응력이 감소하게 된다.

이에 더하여 공기 중에서 샘플링을 수행하면 시료내의 실트나 모래층에서 캐비테이션(cavitation)이 발생한다. 캐비테이션으로 인하여 실트나 모래층의 물은 유출되어 주변 점성토로 흡수되고 역시 평균 유효응력의 감소를 유발할 수 있다.

블록 샘플링은 시료채취 과정에서 시료에 전단변형을 발생시키지 않는 매우 훌륭한 방법이지만, 시료팽창(swelling) 등으로 인하여 유효응력이 실제 지반과 다를 수 있다. 따라서 강도와 압축성 등이 변할 수 있으며, 유효응력에 적합한 재압밀(reconsolidation)과정이나 강도와 강성의 정규화방법 등이 필요하다.

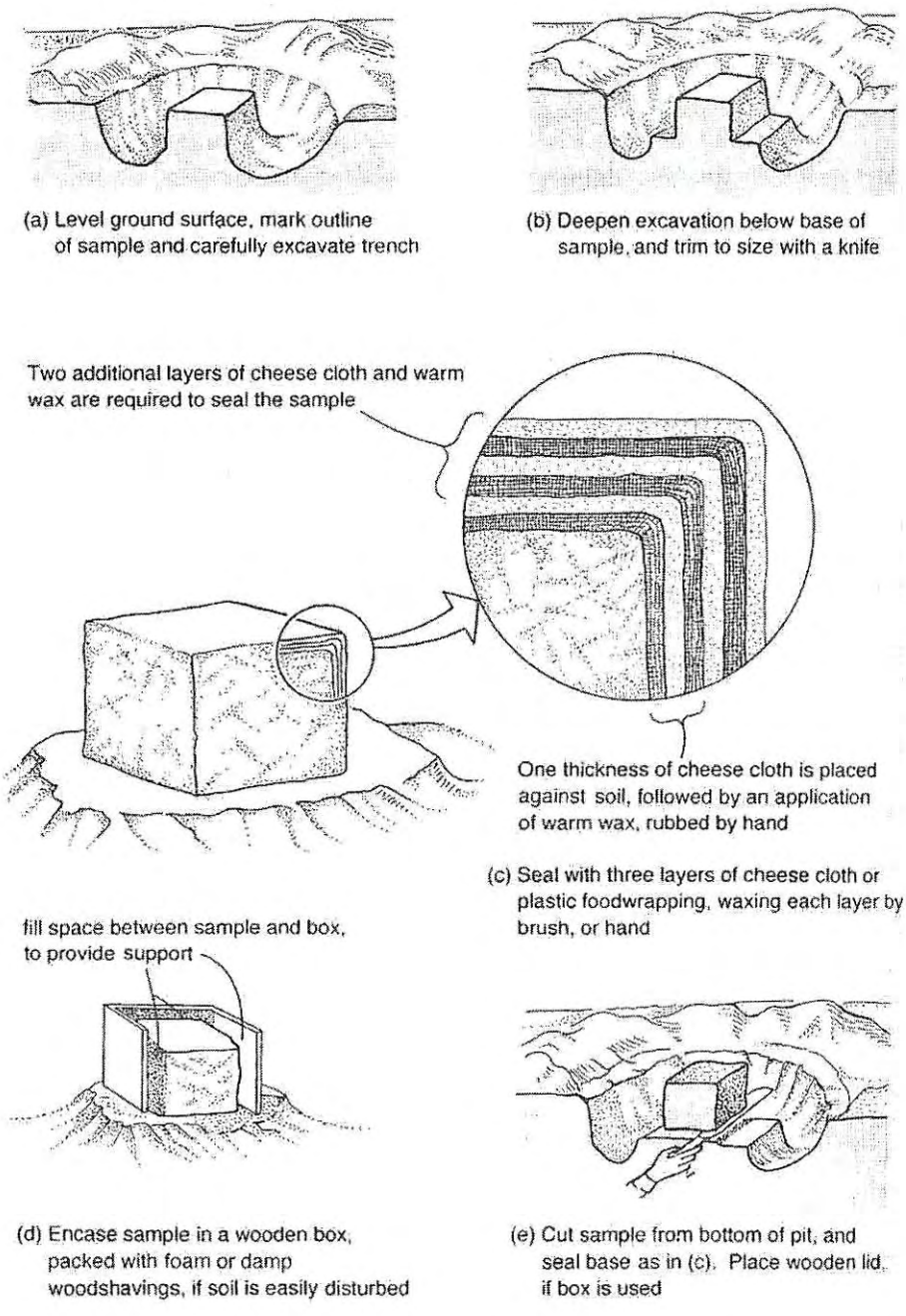


그림 2.50 블록 샘플링 방법

② 관입(Drive) 샘플러

관입샘플러는 회전없이 흙 속으로 관입되는 샘플러이다. 이 때 샘플러 벽면 두께에 상응하는 부피의 흙은 다짐 또는 압축되면서 주변으로 밀려난다.

관입샘플러는 크게 오픈 관입샘플러(Open-drive sampler)와 피스톤 관입샘플러 둘

로 나뉘어진다. 오픈 관입샘플러는 하단부 끝이 열려있는 튜브로 구성되어 있는 반면 피스톤 샘플러는 움직일 수 있는 피스톤이 튜브내부에 위치한다. 피스톤 샘플러는 원하는 채취 깊이까지 연약한 흙속으로 밀어넣게 되지만 오픈 관입샘플러는 보어홀 바닥면에서 시료에 닿는 순간부터 시료채취에 들어간다.

가) 오픈 관입 샘플러(Open-drive sampler)

오픈 관입 샘플러는 Hvorslev(1949)가 지적한 것과 같이 시료채취 전 보어홀 바닥면을 잘 정리해야하며, 정리가 되었다고 하더라도 벽면붕괴 등으로 채취된 시료가 크게 교란되거나 현장 흙에 대한 대표성을 갖지 못하는 문제점을 가지고 있다. 큰 면적비를 갖는 장비의 이용은 샘플러 관입과정에서 흙을 밀어내며 시료에 큰 교란을 발생시킨다. 또한 샘플러 관입 중 시료 상부의 압력 문제 및 시료 회수중 시료 빠짐 문제 등도 발생한다.

오픈 관입 샘플러의 장점은 값싸고 간편하다는 데 있다. 오픈 관입 샘플러는 씬월 샘플러와 두꺼운 벽 샘플러로 나눌 수 있다. Hvorslev는 면적비 10%를 기준으로 이를 나누었으나, 실제 시료 교란은 컷팅 슈의 각도, 현장 응력 상태 등에 따라서 영향을 받으므로 이는 좋은 분류 기준은 아니다. 여기서는 면적비 20%를 기준으로 이를 나누어 살펴보도록 하겠다.

i) 두꺼운 벽 오픈 관입 샘플러(Thick-walled open-drive sampler)

- BS general purpose sampler

영국 표준 100mm 샘플러(BS 5930:1981)는 보통 U100샘플러라고 불리며, 1930년대와 1940년대에 개발, 개량되었다. (Le Grand et al. 1934; Cooling and Smith 1936; Cooling 1942; Longsdon 1945; Rodin 1949).

그림 2.51에 전형적인 BS 표준 샘플러가 나타나 있다. 아래쪽 커팅 슈에서의 내경은 104mm이고, 면적비는 27%이다. 내측 직경을 106mm될 때까지 3경사지도록 하여 내측 여유(clearance) 1.4%를 갖도록 하였다. 외측 커팅 날의 각도는 두께 2.3mm까지는 20°로 하고 그 이후에는 7°가 되도록 하거나, 초기 30° 그리고 그 이후에는 두께 6.5mm까지 15°로 한다. 기본적인 샘플링 튜브의 길이는 457mm 이지만 굴착공의 하부에 있는 암편이나 흙이 상부 튜브로 들어가도록 하기 위하여 2개의 튜브를 연결하여 사용한다. 따라서 길이 대 직경비는 4.5에서 최대 9가 된다.

영국 표준 샘플러는 스웨덴 피스톤 샘플러와 같이 완전히 표준화 되어있지 않다. CP 2001:1957에서는 최대 면적비 25%, 내측 여유 1%와 3%로 되어있으며, BS 5930:1981에서는 면적비를 30%까지 허용한다. 공기배출구는 600mm^{2}이하로 규정되었으나 컷팅 슈의 경사각은 규정되지 않았고 내측 라이너는 사용할 수도 있었다.

1982년의 개정판에서는 라이너를 사용하지 않도록 규정하고 있으며 실제로 강성 튜브 안쪽의 플라스틱 라이너는 그림 2.52에 나타난 것과 같이 시료를 크게 교란시킬 수 있다. 또한 3mm 정도 두께의 라이너의 사용은 컷팅슈의 두께를 증가시켜 면적비를 27에서 41%로 증가시킬 수 있다. 미국의 제작 업체는 매우 다양한 크기의 샘플러를 공급하고 있으며, 각 크기별 내경과 면적비, 길이대 직경비가 다음 표 2.3에 정리되어 있다.

결론적으로 이러한 튜브는 과도한 직경비와 길이/직경비를 가지고 있으며, 실내시험에서 현장조건을 모사하기에 적당한 불교란 시료를 채취할 수 없다. 그러나 작은 직경의 보어홀이 매우 경제적인 경우의 지반 조건에서 유용하게 사용된다.

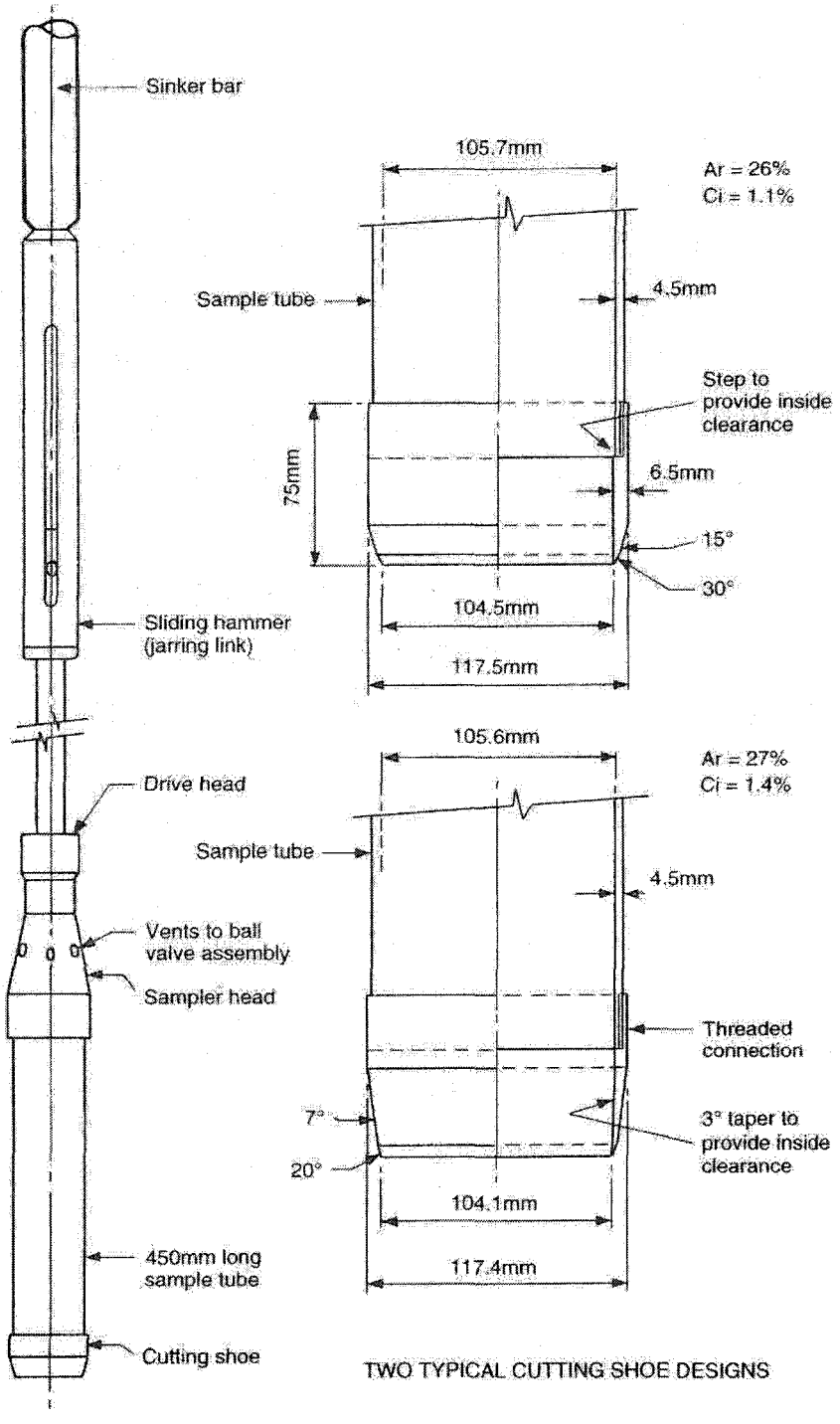


그림 2.51 U100 샘플러와 커팅 슈

표 2.3 두께 0.5in. 튜브의 오픈 관입 샘플러 특성

튜브 내경 (in.)	면적비 (%)	길이/직경 비	
		L=18in.	L=60in.
1½	78	12	40
2	56	9	30
2½	44	7.2	24
3	36	6	20
4	27	4.5	15
5	21	3.6	12

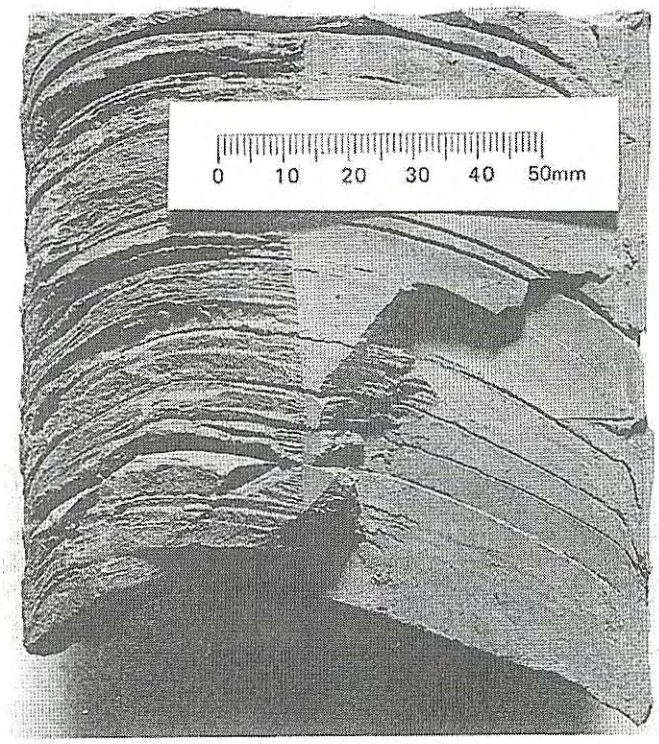


그림 2.52 플라스틱 라이너를 이용한 BS U100샘플러로
채취한 점성토 시료에서 나타나는 전단 변형 형태

-두꺼운 벽 split barrel 샘플러

두꺼운 벽 split barrel 샘플러는 더욱 광범위하게 사용되는 샘플러이다. 여기서 샘플러 본체는 세로방향으로 둘로 갈라지며, 슈와 상단부 덮개에 의하여 고정된다. 스

플릿 배럴은 시험이 쉽고 시료추출이 간편하지만 샘플러 자체가 약하기 때문에 이를 보완하기 위하여 길이가 짧고 면적비가 크게 샘플러를 제작한다.

두꺼운 벽 split barrel 샘플러는 표준 관입시험에서 가장 널리 사용된다.

그림 2.53은 영국에서 SPT시험에 사용되는 시험장비를 보여주고 있다. BS 1377:1975에 샘플러의 제원을 규정하고 있다. 이 샘플러의 면적비는 100%, 길이/직경비는 13이며 내측 여유는 없다.

굵은 입자의 시료는 타입과정에서 튜브내로 관입되지 못할 수 있으며 채취된 시료도 현장지반을 대표하지 못하므로 유럽관입시험 분과위원회의 보고서에서는 컷팅슈 대신에 60°의 각을 가지는 강성 콘을 설치하도록 하고 있다.

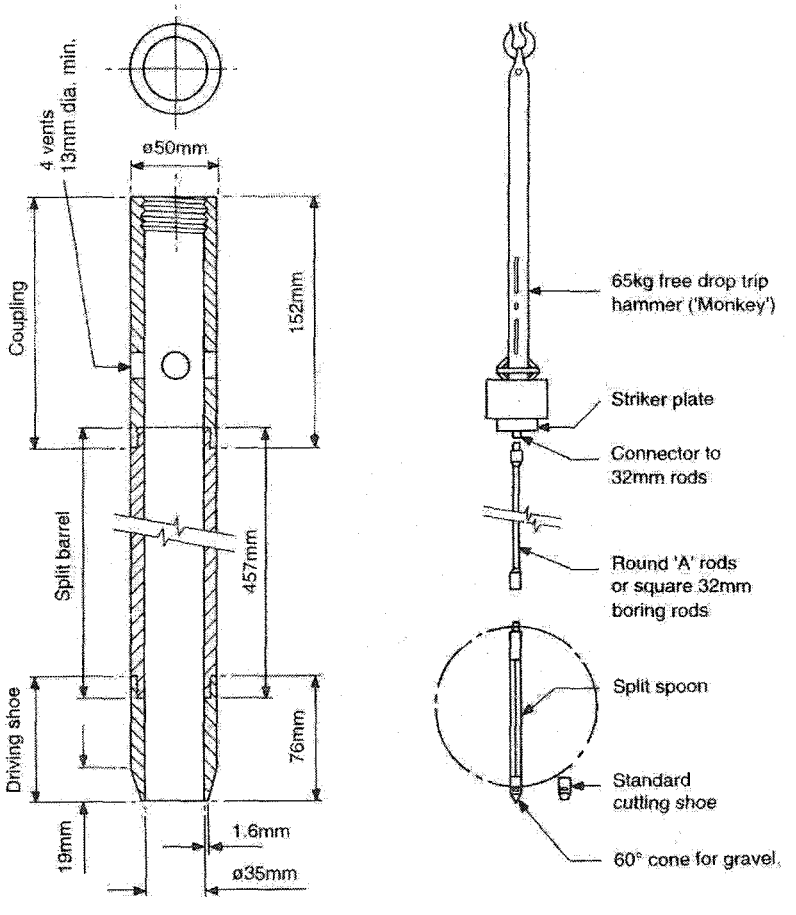


그림 2.53 표준관입시험 장비

ii) 씬월 오픈 관입 샘플러(Thin-walled open-drive sampler)

씬월 오픈 관입 샘플러는 'Shelby tubing' 샘플러라고도 하며 1930년대 후반 미국에서 개발되었다(Terzaghi 1939; Hvorslev 1940, 1949). 'Shelby tubing'은 미국의 National Tube Company의 상품명으로 초기의 장비는 그림 2.54와 같이 두 가지 형태를 가지고 있다. US Engineering Office의 보스턴 지구 샘플러는 씬월 튜브를 용접으로 짧고 두꺼운 튜브에 붙인 형태로 되어 있다. Mohr에 의하여 제안된 개량 형태는 샘플러 헤드의 하부에 Allen set screw를 이용하여 튜브를 고정시킨 것으로, 많은 샘플러에서 사용되었고 현재도 세계적으로 널리 쓰이고 있으며 ASTM에 표준으로 채택되었다(ASTM D1587-74).

그림 2.54의 샘플러는 상대적으로 작은 직경비를 가지고 있지만(10-14%), 길이 대 직경비가 15-20이며 내측 여유를 가지지 않는다. 샘플 튜브는 단단한 지반에 관입될 때, 버클링이나 컷팅 날의 찢김 등으로 인하여 쉽게 손상이 된다. 따라서 항타보다는 밀어넣는 것이 낫다.

영국에서는 씬월 오픈 관입 샘플러가 London clay와 같은 매우 단단한 점토 지반에서 교란이 적은 시료를 채취하는데 사용되고 있으며 이러한 샘플러의 이용은 Harrison(1991)에 의하여 잘 설명되어 있다. 이 샘플러는 전단강도가 5kN/m^2 정도인 매우 연약한 점토에서도 주의를 기울이면 불교란 시료를 채취할 수 있으나, 매우 연약한 예민 점토에서는 피스톤 샘플러와 같이 사용될 필요가 있다.

전형적인 씬월 오픈 관입 샘플러 튜브는 길이가 610-762mm정도이며 얻을 수 있는 최대 시료 길이는 이보다 50-70mm 정도 짧다. 내측 여유(inside clearance)는 1-1.5% 정도이며 다양한 직경에 대한 면적비는 다음 표 2.4와 같다.

표 2.4 씬월 오픈 관입 샘플러

튜브 내경 (mm)	면적비 (%)	길이/직경 비
48	15	11.5
60	13	9.1
73	12	7.5
86	10	6.4
121	8	4.9

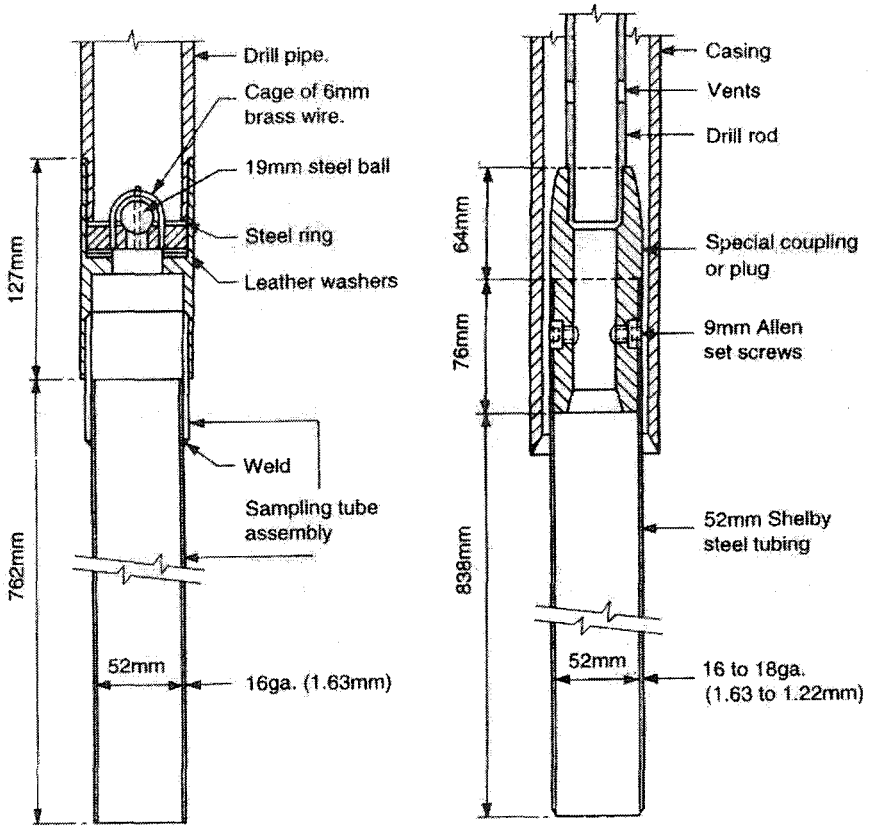


그림 2.54 2가지 씬월 오픈 관입 샘플러 (from Hvorslev 1940)

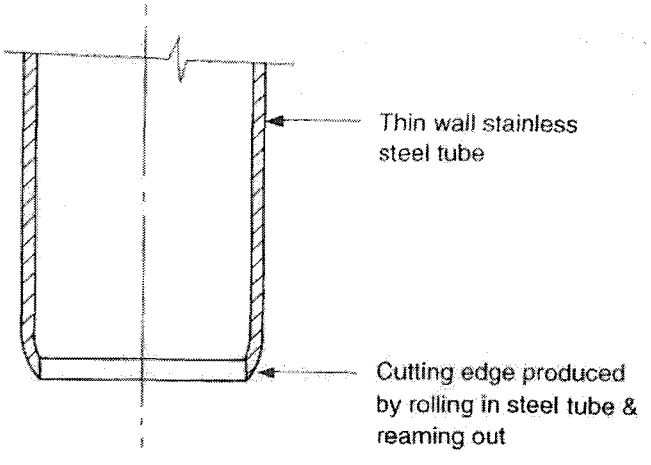


그림 2.55 씬월 오픈 관입 샘플러의 커팅엣지 형태

나) 피스톤 관입 샘플러

피스톤 샘플러는 유럽과 미국에서 1900년에서 1940년 사이에 개발되었다. 피스톤 샘플러는 샘플링 과정에서 상부로 움직일 수 있는 피스톤을 샘플 튜브 안쪽에 가지고 있다. 샘플 튜브 안쪽에 피스톤을 가지고 있는 이유는 다음과 같다.

- 샘플링 튜브가 적절한 위치에 도달할 때까지 시료가 튜브안으로 들어가지 않도록 하기 위하여 피스톤을 설치한다. 많은 피스톤 샘플러는 보어홀을 미리 굴착하지 않고 원하는 심도까지 피스톤을 관입하도록 설계되었다(Bastin and Davis 1909; Olsson 1925, 1936; Petterson 1933; Porter 1936, 1937, 1939; Stokstad 1939). 이 경우 시료의 상부는 매우 심하게 교란된다.
- 튜브의 인발 과정에서 흙 상부에 인위적인 밀봉을 하여 시료 유출 막기 위하여 피스톤을 설치한다. 시료가 미끄러져 나가려는 작용은 시료 상부의 부압으로 인하여 억제된다.
- 상대적으로 큰 면적비를 통하여 초기 샘플링 과정에서 추가적인 흙의 유입을 방지하고, 관입 마지막 단계에서 내부 마찰 증가로 너무 적은 흙이 유입되지 않도록 하기위하여 피스톤을 설치한다.
- 길이 대 직경비를 적절한 수준까지 증가시키기 위하여 피스톤을 설치한다. 길이/직경비가 증가하면 흙과 튜브 사이의 부착력 때문에 시료의 초기 상태로의 회복(recovery)을 감소시킬 수 있으나 상부의 피스톤을 제거할 때 생기는 진공압이 시료의 회복을 증가시킨다.

Davis peat 샘플러와 같은 미국에서 개발된 초기의 피스톤 샘플러(Bastin and Davis, 1909)는 관입전에 피스톤이 튜브위로 밀려들어가는 형태로서 지표와 동일한 높이에서 고정되는 스웨덴식 피스톤 샘플러(Olsson, 1925)와는 다르다. Hvorslev(1949)는 피스톤 샘플러를 크게 (i) Free 피스톤 샘플러, (ii) Retracted 피스톤 샘플러, (iii) 고정(fixed) 피스톤 샘플러로 나누었다.

i) Free 피스톤 샘플러

Free 피스톤 샘플러는 샘플러의 인발 시와 원하는 깊이까지의 관입 시에 고정되는 내부 피스톤을 가지고 있다. 내부 피스톤은 샘플링 시 튜브가 흙속으로 관입되는 동

안에는 자유롭게 움직일 수 있다. 그림 2.56은 Ehrenberg 샘플러와 Meijn 샘플러의 형태를 보여주고 있다.

Ehrenberg 샘플러의 피스톤은 시료채취과정에서 상부방향으로는 자유롭게 움직이지만 아래쪽으로는 움직이지 못한다. 따라서 연약 지반에서 원하는 심도까지 샘플러를 관입하는데는 적당하지 못하다. 반면에 Meijn 샘플러는 튜브 하부에서 피스톤을 고정시킬 수 있으며, 인발시에는 튜브 상부에서 피스톤을 고정하여 시료의 유출을 막게된다.

Free 피스톤 샘플러는 오픈 관입 샘플러의 단점을 상당부분 극복하였으며 사용이 편리하다. Free 피스톤 샘플러는 보어홀 안쪽에 싸인 흙부스러기를 밀어내면서 보어홀 바닥까지 도달할 수 있으며, 피스톤이 시료상부에서 sealing 역할을 하여 시료 손실을 최소화할 수 있다는 장점이 있다.

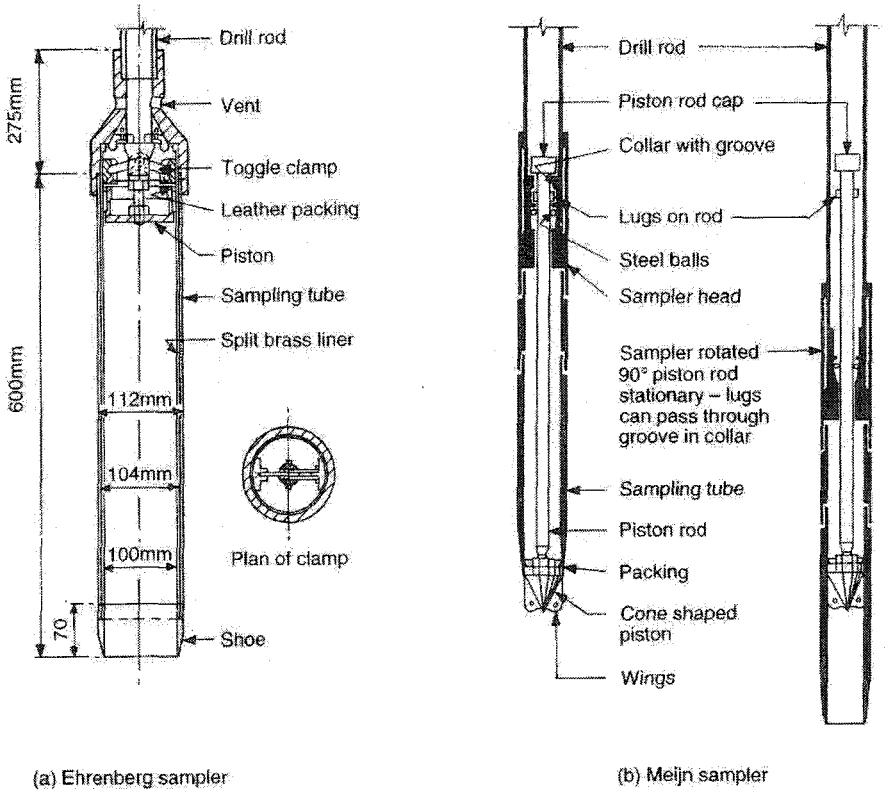


그림 2.56 free 피스톤 샘플러의 두 형태 (Ehrenberg 1933; Huizinga 1944)

ii) Retracted 피스톤 샘플러

Retracted 피스톤 샘플러는 샘플러를 원하는 시료채취 심도까지 관입시키는 동안 피스톤으로 시료의 유입을 막는 역할을 하며, 원하는 심도에 도달하면 피스톤을 튜브 상부까지 끌어올리고 튜브를 관입시킨다(Bastin과 Davis, 1909; Porter, 1936, 1937, 1939; Stokstad, 1939). 이 때 피스톤을 끌어올림으로 해서 연약한 흙은 튜브안으로 밀려들어올 수 있고 관입시에도 튜브안으로 추가적인 흙의 유입이 발생할 수 있다. 이 샘플러는 오픈 관입 샘플러의 단점을 그대로 가지고 있으며 사용하기도 어렵다.

iii) 고정(fixed) 피스톤 샘플러

고정 피스톤 샘플러는 보어홀이 있는 경우뿐만 아니라 보어홀이 없는 경우에도 사용될 수 있다.

샘플러가 원하는 시료채취 심도까지 관입되는 동안에는 피스톤은 고정되어 시료의 유입을 막는다. 이 후 피스톤은 샘플러 두부에서 자유롭게 움직이게 되지만 지표면에서 드릴링 rig나 적절한 frame을 이용하여 재고정되어 샘플링중에 연직방향으로 움직이지 않도록 한다. 그 다음 튜브가 흙 속으로 관입된다. 관입이 끝난 후 샘플러 두부에서 지표면까지 연결된 내측 로드가 제거되며 피스톤은 샘플러 두부에서 고정된다.

고정 피스톤 샘플러는 앞서 언급된 여러 장점을 가지고 있다. 즉, 샘플링 이전에 보어홀 안쪽에 쌓이는 흙부스러기의 유입을 막을 수 있으며, 샘플링과정에서도 추가적인 흙의 유입을 막을 수 있고, 시료의 유출을 방지할 수 있다. 반면에 비싼 가격과 사용하기에 복잡하다는 단점을 가지고 있다.

고정 피스톤 샘플러의 원형은 스웨덴의 엔지니어 John Olsson(Olsson, 1925, 1936)에 의하여 개발되었다. 이 후 여러 가지 면에서 개선이 이루어졌으며(Petterson 1933; Bretting 1936; Kjellman 1938; Fahlquist 1941; Hvorslev 1949; Osterberg 1952; Hong 1961), 1961년에는 Swedish Committee on Piston Sampling에서 이를 발표하였다(Swedish Geotechnical Institute Reoport No. 19). 그림 2.57에 Hvorslev(1949)에 의하여 발표된 씬월 강관 튜브 형태의 피스톤 샘플러가 나타나있다.

이 시험 장비를 이용하여 노르웨이에서도 매우 연약한 점토 또는 예민 점토에 대하여 시료채취 작업을 수행하였으며, Norwegian Geotechnical Institute의 직경 54mm 샘플러의 제원은 다음과 같다(Vold, 1956; Berre et al., 1969).

▷ 최대 튜브 길이 880 mm

▷ 최대 시료 길이 725 mm

▷ 외경 57mm

▷ 면적비 11-12%

▷ 내측 여유 1.0-1.3%

▷ 최대 길이/직경 비 13.4

▷ 외측 커팅 엣지 각도 12°

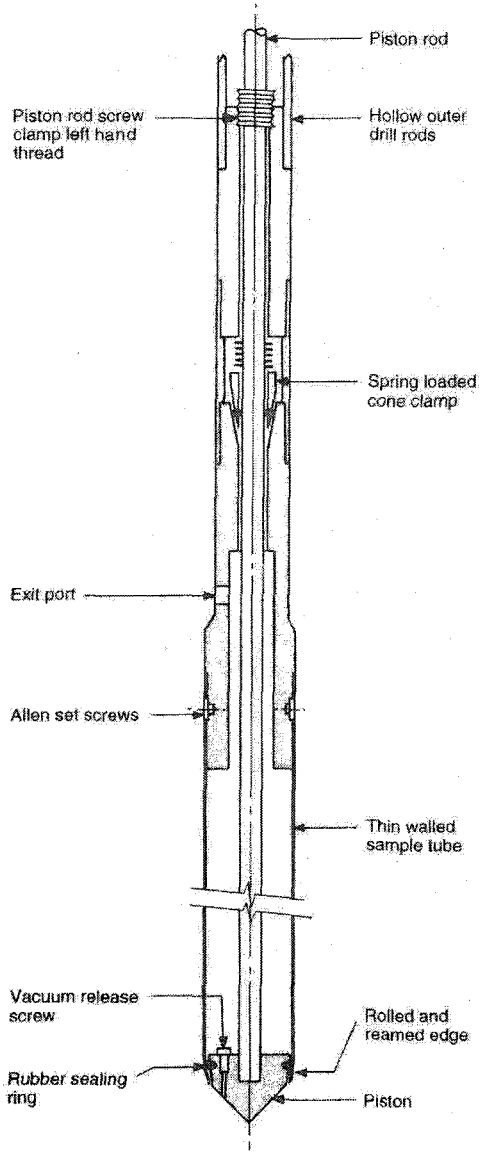


그림 2.57 씬월 강관 튜브 형 피스톤 샘플러

샘플링 속도를 증가시키기 위해서 많은 연구자들이 연구를 수행하였으며, 수압으로 가동되는 피스톤을 이용하여 샘플러가 개발되었다(Bretting, 1936). 이 후, Osterberg(1952, 1973)에 의하여 개량되었으며, 개발된 샘플러의 형태는 그림 2.58에 나타나 있다. Raymond는 Leda clay에 대하여 시료채취를 하였으며 이 샘플러가 블록 샘플링 다음으로 좋은 성능을 나타낸다고 발표하였다(Raymond 등, 1971; Raymond, 1977).

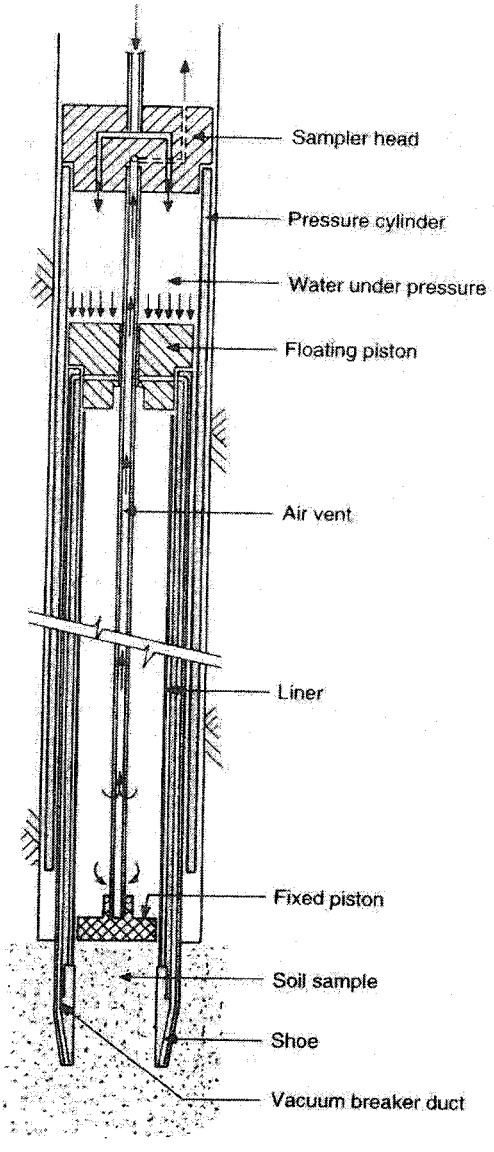


그림 2.58 Osterberg 복합식 수압 고정 피스톤 샘플러 (Osterberg 1973)

스웨덴식 복합 고정 피스톤 샘플러는 700mm의 stroke와 50mm의 직경을 가지며 외경은 60mm이고 자세한 제원은 다음과 같다(Kallstenius, 1961).

▷ 최대 시료 길이	700mm
▷ 컷팅 슈에서 내측 직경	50mm
▷ 면적비	44%
▷ 내측 여유	0.4%
▷ 길이 대 직경비	14

다) Sliding liner를 이용한 샘플러(Foil and stockinette sampler)

매우 긴 길이의 시료를 채취할 수 있는 여러 가지 장비들이 개발되었다. 이러한 장비는 연속적인 샘플링이 가능하기 때문에 다른 방법에서는 놓치기 쉬운 샌드 심 등을 정확하게 파악할 수 있다. 이 때 흙과 튜브사이의 내부 마찰을 줄이는 것이 중요한데 내측 여유를 두는 것은 시료에 큰 교란을 발생시킬 수 있다. 이에 대하여 sliding 라이너를 이용하여 횡방향 구속은 유지시키면서 마찰은 줄이는 방법이 제안되었다. Swedish Geotechnical Institute에서 개발한 알루미늄 호일을 이용한 방법(Kjellman 등, 1950)과 Delft Soil Mechanics Laboratory에서 흙을 나일론 스타킹으로 둘러싸는 방법(Begemann, 1961, 1971)의 두가지 방법이 있다.

두가지 장비의 형태는 그림 2.59와 2.60에 나타나 있다.

또한 네덜란드에서 66mm 직경을 갖는 샘플러를 이용하여 연속적으로 10m길이의 시료를 채취한 모습이 그림 2.61에 나타나있다.

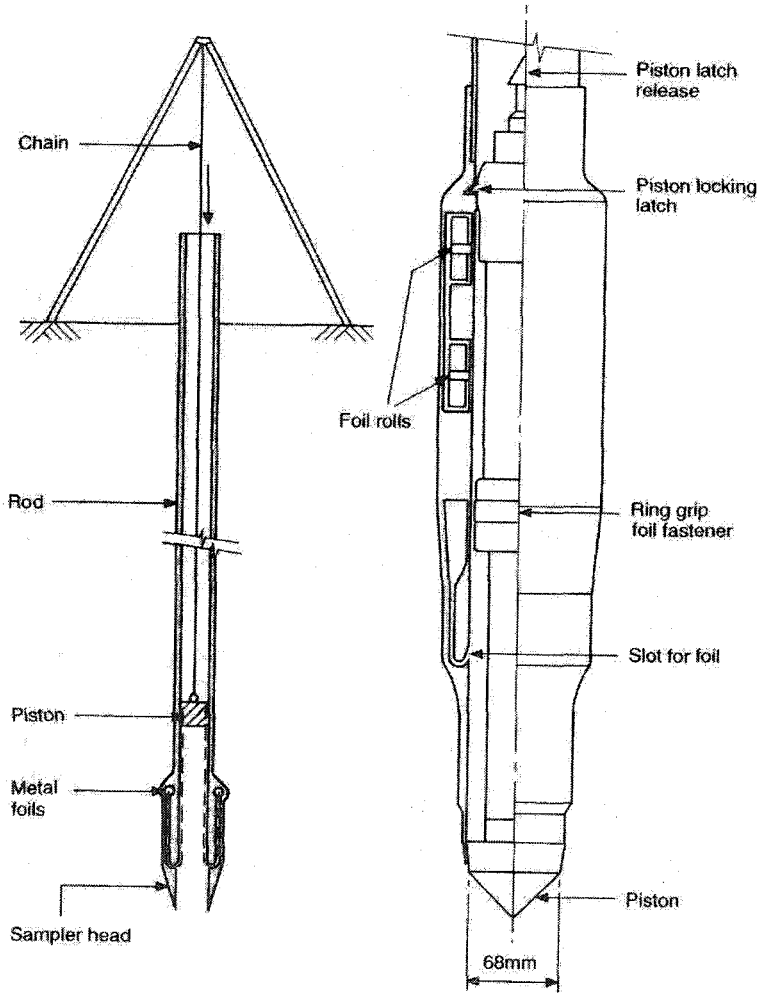


그림 2.59 스웨덴식 호일 샘플러의 원리와 Mark V 샘플러 해드의 형상 (Broms and Hallen 1971; Kjellman, Kallstenius and Wager 1950).

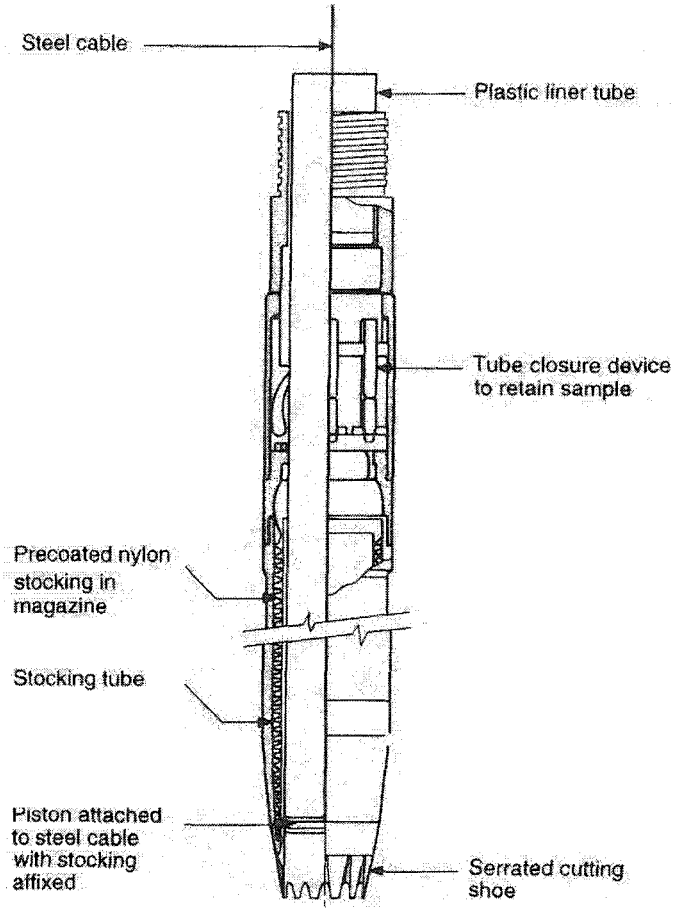


그림 2.60 직경 66mm의 Delft stocking 샘플러 (Begemann 1974).

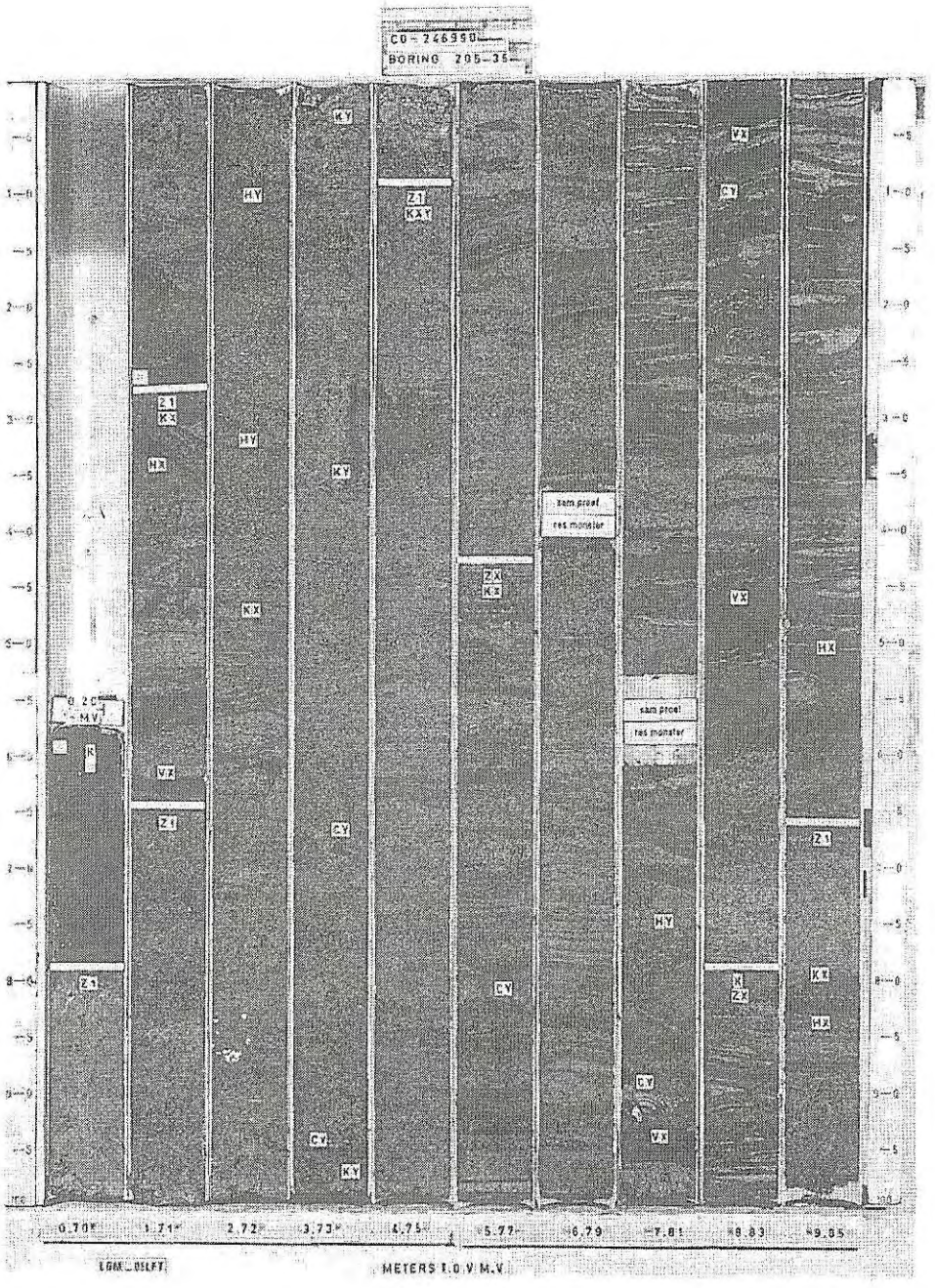


그림 2.61 연약지반에서 Delft 샘플러를 이용한 10m 길이의 연속 샘플링

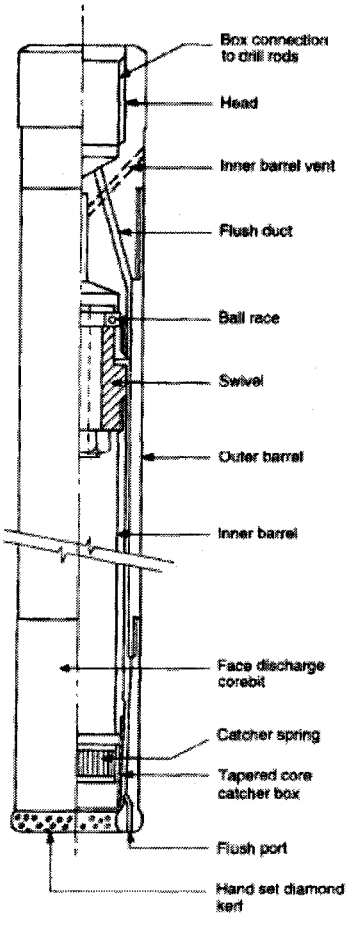
③ 로터리 샘플러

좀 더 단단한 지반에서 시료 채취를 위하여 개발된 로터리 샘플러는 크게 3개의 그룹으로 나누어 볼 수 있다.

가) retracted 내측 배럴(inner barrel)을 포함하는 일반적인 이중관 스위벨 타입의 코어배럴로 'retracted corebarrel'로 명명되며 그림 2.62에 그 형태가 나타나 있다.

나) 채취되는 시료를 공내수에 의한 교란으로부터 보호하기 위하여 내측 배럴이 외측 배럴 앞쪽으로 튀어나온 형태로 'protruding corebarrel'로 명명되며 대표적인 샘플러로 Denison 코어 배럴이 있다(Johnson 1940)(그림 2.63).

다) 내측 배럴에 스프링이 장착되어 연약지반에서는 앞으로 튀어나오고 보다 단단한 지반에서는 안으로 들어가는 형태로 'retractor barrel'로 명명되며 대표적인 샘플러로 피쳐 샘플러(Pitcher sampler)와 Mazier 코어 배럴이 있다(그림 2.64, 2.65).



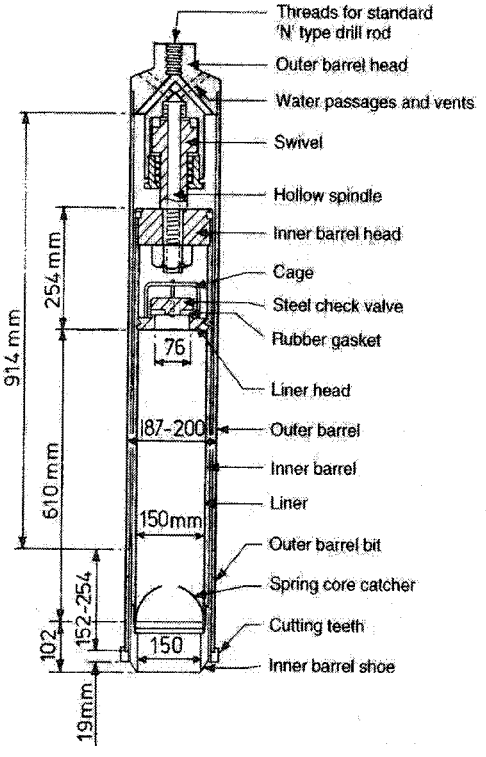


그림 2.62 이중관 스위벨 타입의 코어베럴 그림 2.63. Denison 3중관 코어베럴

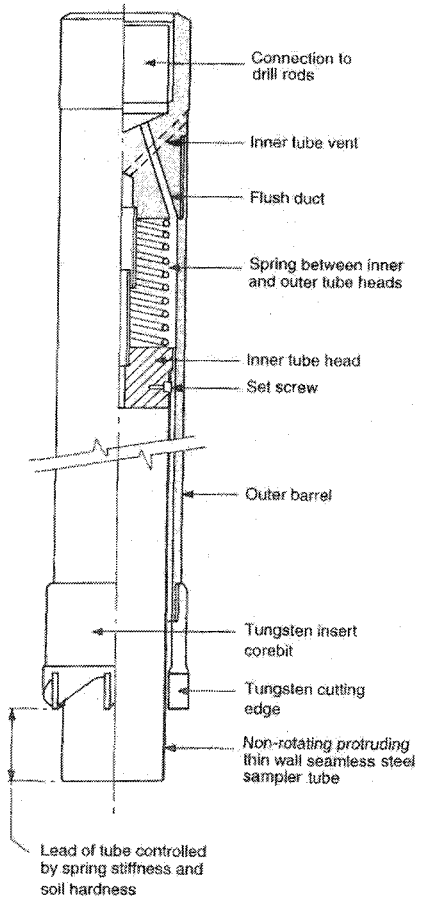


그림 2.64 피처 샘플러(Pitcher sampler)

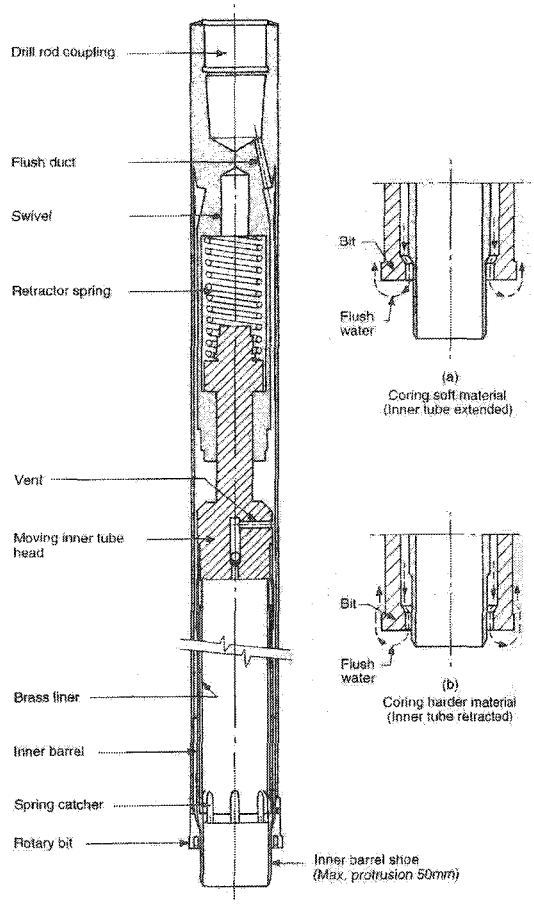


그림 2.65 Mazier 코어 배럴

(2) 사질토 시료채취용 장비

Hvorslev의 정의에 따르면 '실제적으로 불교란된 시료'를 사질토 지반에서 채취하는 것은 가능하다. 하지만 흙의 구조, 함수비, 간극비나 기타 다른 구성요소들이 변하지 않았음에도 불구하고 이 시료를 이용해서 압축 실험을 수행하기에는 적당하지 않다. Broms(1980)도 이러한 시료는 액상화 가능성을 판단하기에 적당하지 않다고 한 바 있다. 일반적으로 입상의 흙에서 전응력 감소는 유효응력의 큰 감소를 유발시키며, 이러한 흙은 응력이력과 현재 유효응력 수준에 그 특성이 크게 영향을 받는다. 또한 사질토에서 전단응력의 작은 변화 역시 선행 응력 효과를 소멸시켜, 강도의 감소를 유발시킨다.

불교란 사질토 시료는 채취에 비용이 많이 소요되며, 압축성이나 액상화 문제를 위하여 현장 밀도 등을 구하는 것과 같이 특별한 상황 하에서만 필요하다.

Hvorslev(1949)는 사질토 시료의 채취방법을 크게 다음의 5가지로 나누었다.

① 고정 피스톤 샘플링

씬월 고정 피스톤 샘플링의 적용성을 평가하기 위한 full-scale 실험이 Marsuson 등(1977)에 의하여 수행되었다. 직경 1.22m 높이 1.83m의 사질토 시료에 대하여 mud flush 로터리 드릴링으로 76.2mm 직경의 시료를 채취하였다. 이 때 피스톤 샘플러의 면적비는 11%였다. 샘플링 전, 후의 흙의 밀도를 비교하여 보았을 때, 조밀한 사질토는 약간 느슨해지고 느슨한 사질토는 약간 조밀해졌지만 그 차이는 ±3.5%였다. 완전히 균질한 시료의 성형이 어렵고 성형과정에서 나타난 오차가 약 +3.2%에서 -1.6% 정도가 된다는 것을 고려해보았을 때, 이는 상당히 좋은 결과라는 것을 알 수 있다.

샘플링 튜브 주위의 물을 제거하기 위하여 압축공기를 사용해서 시료 유출을 줄이는 방법이 Bishop(1948), Hvorslev(1949) 등에 의하여 제안되었다.

② Bishop 사질토 샘플러

Bishop 사질토 샘플러는 63.5mm의 씬월 오픈 관입 샘플러와 고무 다이아프램 체크 밸브와 벤트(vent)로 이루어져 있고 지상의 공기펌프와 연결되어 있다(Bishop 1948; Nixon 1954; Serota and Jennings 1957).

Bishop 사질토 샘플러는 시료의 탈락을 방지하기 위하여 모래와 공기사이에 형성되는 아칭과 작은 모관력을 이용하며, 시험기의 구조는 그림 2.66에 나타나있다.

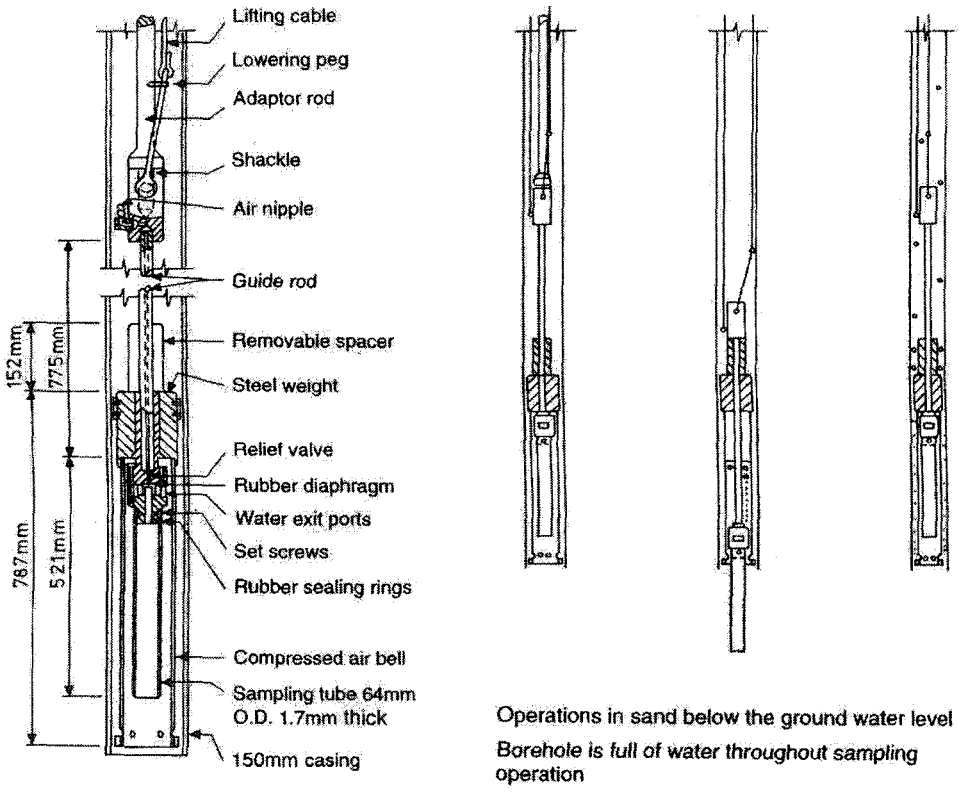


그림 2.66 Bishop 사질토 샘플러(Bishop 1948)

③ 약액주입(Soil impregnation)

Van Bruggen(1936)은 사질토에 점착력을 발생시키고 시료채취를 가능하게 하기위하여 아스팔트 희석액을 이용한 약액주입 방법을 발표하였다. 아스팔트는 이후 이황화 탄소(carbon disulphide)와 아세톤의 혼합액을 이용하여 제거된다. 하지만 이러한 과정은 흙의 성질을 변화시킬 수 있다. Hvorslev(1949)는 오픈관입 샘플러에서 컷팅슈 주위에 화학적 주입방법으로 시료를 고화시키고 입상 재료를 채취하는 방법을 제안하였다. 이후 Karol(1970)과 Borowicka(1973)는 샘플링 과정에서 흙의 교란을 막기 위하여 여러 가지 송진과 실리카 그라우트를 사용하였다.

약액주입 방법은 비싸며 사용하기 어렵다는 단점이 있다. 만약 주입되는 약액이 나중에 효과적으로 제거될 수 없다면 이 방법은 사용될 수 없으며, 또한 대부분의 그라우트나 약액들은 상대적으로 투수성이 작은 모래나 실트에는 잘 스며들지 못한다. 따라서 이 방법은 잘 사용되지 않는다.

3. 기타 지반조사 장비의 특징

(a) 표준관입시험 (Standard Penetration Test, SPT)

스플릿 샘플러를 지반에 관입하여 그 저항치를 기록하고, 동시에 토질 분류시험 및 실내시험을 위한 대표적인 시료채취 방법으로, 63.5kg의 추를 76cm높이에서 자유 낙하시켜 관입용 샘플러를 30cm 관입시키는데 필요한 타격횟수(N값)로 정의되어 있다.

수정된 값(N')을 이용하여 지반의 상대밀도를 산정하는 방법은 이미 여러 사람들에 의해 제안되어 있으며, SPT는 지반의 액상화 가능성을 판단하는데 있어 비교적 신뢰성이 있는 시험으로 알려져 있다.

표준관입시험의 N값을 이용한 사질토의 상대밀도 추정에 대한 연구는 Gibbs and Holtz(1957) 및 Terzaghi and Peck(1967)에 의해 처음으로 시도되었고, 이 후 N값에 큰 영향을 미치는 유효 수직응력을 고려한 상관관계가 연구되었다(Holtz and Gibbs, 1979). 한편, 수직응력 이외에도 응력이력, 입도분포, 그리고 사질토의 종류가 상관관계에 영향을 미친다는 연구 결과로 부터 식 2.1과 같은 N값과 상대밀도의 관계식이 제안되었다(Marcuson and Bieganousky, 1977).

$$D_r(\%) = 12.2 + 0.75\sqrt{222(N) + 2311 - 711(OCR) - 779(\bar{\sigma}_{vo}) - 50(C_u)^2} \quad \text{(식 2.1)}$$

여기서, N은 표준관입시험 결과, OCR은 과압밀비, $\bar{\sigma}_{vo}$는 유효 수직응력(bar 단위), 그리고 C_u는 균등계수이며 상관계수 r^2=0.77이다.

한편, 표준관입시험의 N값에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나가 해머의 낙하에너지 효율이다. 낙하에너지 효율에 영향을 주는 인자로는 해머의 종류, 시추공 직경, 샘플러 종류, 롯드의 길이, 캣헤드의 크기, 그리고 로프의 감은 횟수 등이 있다. 대형 캣헤드에 로프를 2회 감은 경우(미국 표준규격)에 에너지 효율을 고려하여 보정한 N값은 식 2.2와 같다.

$$N_{60} = C_{ER}C_BC_SC_RN \quad \text{(식 2.2)}$$

여기서, N_{60}은 현장시험을 통하여 평균한 에너지 효율 60%(Robertson et al., 1983)에 대하여 보정된 N값, N은 측정된 N값, C_{ER}, C_B, C_S, 그리고 C_R은 각각 해머의 종류, 시추공 직경, 샘플러 종류, 그리고 롯드 길이에 대한 보정계수로서 보정계수는 표 2.5와 같다(Skempton, 1986).

표 2.5 N값의 보정계수

영향인자	장치	보정계수	
		용어	값
헤머 종류	안전 해머	C_{ER}	0.9
	도우넛 해머		0.75
시추공 직경	65mm~115mm	C_B	1.0
	150mm		1.05
	200mm		1.15
샘플러 종류	표준 샘플러	C_S	1.0
	라이너 없는 샘플러		1.2
롯드 길이	> 10m	C_R	1.0
	6~10m		0.95
	4~6m		0.85
	3~4m		0.75

또한, N값은 유효 수직응력에 의해서도 영향을 받는데 유효 수직응력을 고려하면 N_{60}은 식 2.3과 같이 보정할 수 있다.

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60} \qquad \text{(식 2.3)}$$

여기서, $(N_1)_{60}$은 1기압의 유효수직응력을 받을 때의 N_{60}값이고 C_N은 유효 상재하중에 대한 보정계수로서 통상 식 2.4 (Liao and Whitmann, 1986)를 이용하며 입경이 작은 모래의 경우 식 2.5 (Skempton, 1986)를 이용한다.

$$C_N = \sqrt{1/\bar{\sigma}_{vo}} \qquad \text{(식 2.4)}$$

$$C_N = \frac{2}{1 + \bar{\sigma}_{vo}} \quad \text{(식 2.5)}$$

여기서, $\bar{\sigma}_{vo}$는 유효 수직응력으로서 단위는 bar이다.

미 수로국(Waterways Experiment Station, WES)에서는 이와 같이 보정된 $(N_1)_{60}$과 상대밀도와의 상관관계를 연구하여 정규압밀 된 모래의 경우에 적용할 수 있는 관계식을 식 2.6과 같이 제안하였다(Bieganousky and Marcuson, 1976, 1977).

$$\frac{(N_1)_{60}}{D_r^2} = 60 + 25 \log D_{50} \quad \text{(식 2.6)}$$

여기서, D_{50}은 모래의 평균 입경으로 단위는 mm이다. 한편, 과압밀된 모래의 경우 aging효과와 과압밀비의 영향을 받게 되는데(Barton et al., 1988), 이를 고려하면 $(N_1)_{60}$과 D_r의 관계는 식 2.7과 같이 된다.

$$D_r^2 = \frac{(N_1)_{60}}{C_P C_A C_{OCR}} \quad \text{(식 2.7)}$$

여기서, C_P,C_A, 그리고 C_{OCR}은 각각 평균 입경, aging 효과, 그리고 과압밀비에 대한 보정계수로서 표 2.6과 같다.

표 2.6 평균 입경, aging 효과, 그리고 과압밀비에 대한 보정계수

영향 인자	변수	보정계수	
		용어	값
입경	D_{50}	C_P	$60+25\log D_{50}$ (D_{50} in mm)
aging	t	C_A	$1.2+0.05\log(t/100)$ (t in year)
과압밀비	OCR	C_{OCR}	$OCR^{0.18}$

따라서, 에너지 효율 및 사질토의 특성에 따른 모든 보정계수를 고려하여 표준관입시험 결과인 N값을 이용하여 상대밀도를 추정하기 위해서는 아래의 식 2.8을 이

용하면 가능할 것이다.

$$D_r^2 = \frac{C_{ER}C_BC_SC_RC_NN}{C_PC_AC_{OCR}} \quad \text{(식 2.8)}$$

여기서, N은 측정된 N값이고 각 보정계수는 다음과 같다.

C_{ER} : 해머 종류 보정계수

C_B : 시추공 직경 보정계수

C_S : 샘플러 종류 보정계수

C_R : 롯드길이 보정계수

C_N : 유효 상재하중 보정계수

C_P : 입경 보정계수

C_A : aging 보정계수

C_{OCR} : 과압밀비 보정계수

표 2.7 SPT와 상대밀도의 관계

(J.E. Bowel, Foundation Analysis and Design 4th Edition)

항목 \ 상태		매우느슨		느슨		중간		조밀		매우조밀	
상대밀도 Dr		0		0.15		0.35		0.65		0.85	
SPT N′	입자가 작을때		1-2		3-6		7-15		16-30		?
	입자가 중간정도일 때		2-3		4-7		8-20		21-40		>40
	입자가 굵을 때		3-6		5-9		10-25		26-45		>45

(b) 콘관입시험 (Cone Penetration Test, CPT)

콘관입시험에 이용되는 대표적인 콘의 종류에는 기계식 콘, 전자식 콘, 피에조 콘 등이 있다. 기계식 콘은 일반적으로 마찰 맨틀콘이라고 불리는 것으로 원추와 마찰슬리브가 이중관으로 분리되어 있어 원추관입 저항력과 마찰저항력을 분리·측정하는 것이며, 전자식 콘은 콘 내부에 전기식 로드셀을 설치하여 원추관입 저항력과 마찰 저항력을 콘의 관입과 동시에 연속적으로 측정할 수 있는 장비이다. 그리고 피에조 콘은 전자식 콘의 일종으로 간극수압을 측정할 수 있는 장비로서, 기계식 콘에 비해 연속적이고 정확한 값을 얻을 수 있고 간극수압을 이용하여 보다 정확하게 지반의 특성을 추정할 수 있으며 투수특성 및 압밀특성을 추정할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 현재 북미 및 유럽 지역에서 가장 많이 사용되고 있는 지반조사 방법 중의 하나이다.

이외에 음파를 이용하는 음향콘과 탄성파를 이용하여 지반의 동적 특성을 파악하는 탄성파 콘, 전기전도율을 이용하여 흙에 포함된 간극수의 성분을 파악하는 전기 전도율 측정 콘, 그리고 방사능을 이용하여 지반의 밀도를 측정하는 방사능 콘 등이 개발되어 지반조사는 물론 지반환경 분야 등 기타의 특수목적을 위해 사용되고 있다.

(1) 피에조콘 관입시험 방법

피에조콘 관입시험은 피에조 콘, 롯드, 유압식 관입시스템, 데이터 측정 시스템, 그리고 장비를 운반하는 트럭 또는 트레일러로 구성되고, 아래의 그림 2.67과 같이 피에조 콘을 롯드에 연결하여 관입시키면서 피에조콘 선단에서의 저항력인 원추관입 저항력, 마찰슬리브에서의 저항력인 마찰저항력, 그리고 콘이 관입될 때의 간극수압을 측정하여 이 값들로부터 각종 지반 특성치를 추정할 수 있다.

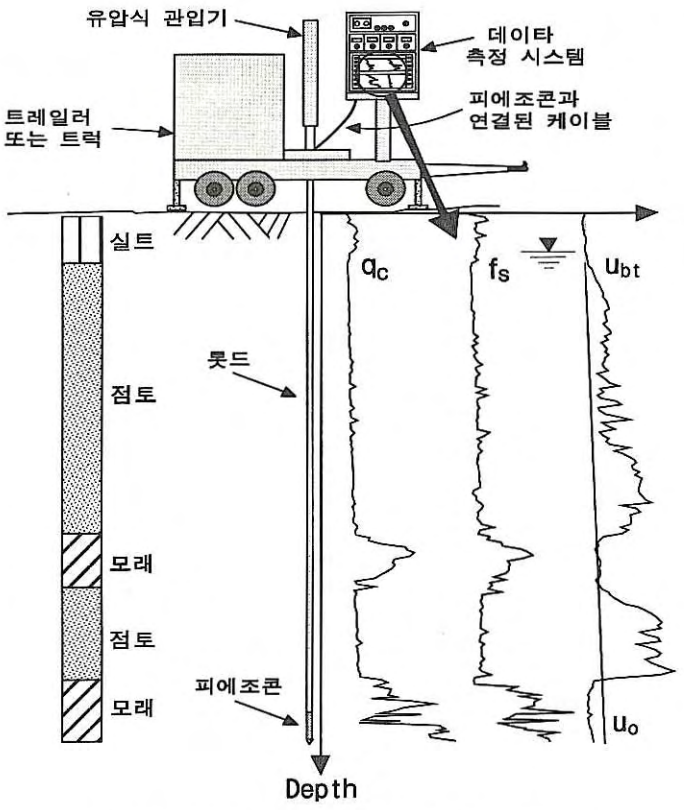


그림 2.67 피에조콘 관입시험의 개요도

(2) 피에조콘 관입시험의 결과 해석

① 흙의 분류

식 2.9와 식 2.10에서 구한 마찰율과 간극수압계수를 이용하여 흙을 분류할 수 있다.

$$FR = \frac{f_s}{q_c} \qquad \text{(식 2.9)} \qquad\qquad B_q = \frac{u - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} \qquad \text{(식 2.10)}$$

여기서, q_c : 원추관입 저항력, f_s : 마찰 저항력, u : 일정 심도에서의 간극수압

u_0 : 정수압 , q_T : 순 원추관입 저항력, σ_{v0} : 총 상재 하중

② 점성토의 비배수 전단강도

Schmertmann(1975)는 Vésic(1972)의 공동팽창이론에 의거하여 점토층에서 원추

관입저항력과 비배수 전단강도의 관계를 식 2.11과 같이 나타내었다.

$$N_{kT} = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{s_u} \qquad \text{(식 2.11)}$$

여기서, s_u : 비배수 전단강도,

N_{kT} : 말뚝의 지지력 공식에 사용되는 N_c와 유사한 개념의 콘 계수이다.

콘 계수는 일정한 흙에 대하여 같은 값을 가지며 시험방법이나 현장의 응력 상태 등에 의해 좌우되는 값이다. 이선재(1997)는 국내 여러 현장에서의 시험 결과를 바탕으로 구한 콘 계수가 평택 지역(20)과 영암 지역(12)을 제외하고는 거의 10정도라고 제안하였다.

③ 사질토의 내부 마찰각

Robertson과 Campanella(1983)는 석영질 모래에서의 시험 결과를 이용하여 내부마찰각과 원추관입 저항력과의 관계를 식 2.12와 같이 제안하였다.

$$\overline{\Phi_{tc}} = \tan^{-1}\left[0.1 + 0.38\log\left(\frac{q_c}{\sigma_{v0}}\right)\right] \qquad \text{(식 2.12)}$$

④ SPT의 N값과의 관계

Robertson 등(1983)은 표준관입시험의 에너지 효율이 55%~60%일 때를 기준으로 하여 원추관입 저항력과 N값과의 관계를 아래와 같은 식으로 제안하였다.

$$\frac{(q_c / \overline{\sigma_{v0}})}{N} = 5.44\,(D_{50})^{0.26} \qquad \text{(식 2.13)}$$

여기서, D_{50} : 입도분포 시험 시 50% 통과할 때의 흙의 입경

⑤ 사질토의 상대밀도

Robertson과 Campanella(1983)는 석영질 모래에서의 시험 결과를 이용하여 내부

마찰각과 원추관입 저항력과의 관계를 나타내었다. 흙의 압축성에 따른 상대밀도와 원추관입 저항력의 관계는 식 2.14 ~ 식 2.16과 같다.

압축성이 매우 큰 경우 : $$D_R = -85 + 66 \log_{10}\left[\frac{q_c}{[\sigma_{v0}]^{0.5}}\right]$$ (식 2.14)

압축성이 중간 정도인 경우 : $$D_R = -98 + 66 \log_{10}\left[\frac{q_c}{[\sigma_{v0}]^{0.5}}\right]$$ (식 2.15)

압축성이 매우 작은 경우 : $$D_R = -110 + 66 \log_{10}\left[\frac{q_c}{[\sigma_{v0}]^{0.5}}\right]$$ (식 2.16)

⑥ 기타

이외에 간극수압 소산시험을 통하여 점성토의 수평방향 압밀계수를 구할 수 있고, 점성토의 선행압밀하중 및 과압밀비를 경험적으로 산정할 수 있다.

(c) Borehole Shear Test (BST)

Shear Head를 76mm 직경의 시추공내에 삽입하여 원하는 위치에서 전단시험을 하는 것으로, 먼저 톱니모양의 실린더를 상부에 연결되어 있는 파이프를 통해 일정압을 가하게 되며, 이 실린더를 계속 팽창시켜 전단시키는 시험이다. 이 때, 측정된 팽창압(σ_n)과 변위를 도시하여 전단 강도(s)를 산정할 수 있으며, 또한 간극수압 측정도 가능하다. BST는 모든 세립토에 적용할 수 있으며, 부분적으로 자갈이 존재하는 지반에도 가능하나, 무엇보다도 만족할만한 결과를 얻기 위해서는 시추공의 품질이 가장 중요하다. BST의 일반적인 개요도는 다음 그림 2.68과 같다.

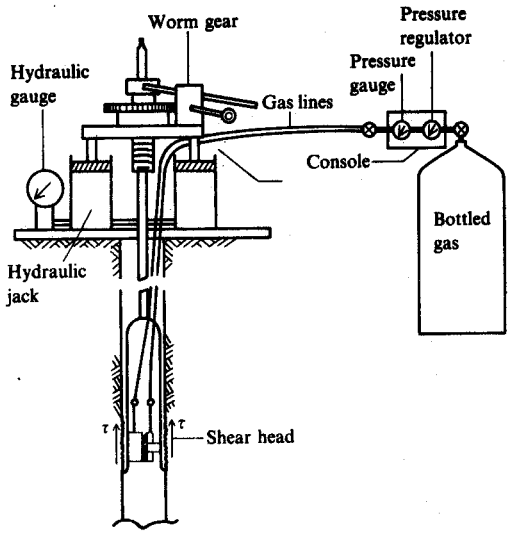


그림 2.68 Borehole Shear Device

(d) Pressuremeter Test

시험기 하부의 비트를 이용하여 시추공을 형성하면서, 시추공내에 멤브레인으로 구성된 프루브를 설치하고, 공벽면에 압력을 가하여 그때의 압력과 부피변화 또는 압력과 공벽변위를 측정하여 현장수평응력, 정지토압계수, 탄성계수, 비배수 전단강도, 내부마찰각 등의 공학적 특성을 직·간접적으로 산정할 수 있는 현장 시험 방법이다. 프레셔미터는 프루브의 설치방법에 따라 분류하며 종류는 다음과 같다.

① 자가굴착식 프레셔미터(Self-Boring Pressuremeter, SBP)

시험기 하부에 커터비트가 장착되어 있어 자체적으로 시추를 하면서 시험기를 지반에 설치한다.

② 선굴착식 프레셔미터 (Prebored Pressuremeter, PBP)

미리 시추공을 형성하고 시험기를 설치한다.

③ 압입식 프레셔미터(Push-In Pressuremeter, PIP)

주로 연약한 해양 지반에서 실시하는 시험으로서 시험기의 선단부분이 원추 형태로 되어 있으며, 지반에 압입하여 시험기를 설치한다.

가) SBP시험과 PBP시험의 비교

SBP시험은 PBP시험에 비해서 지반의 교란을 최소화하여 연약한 지반에서도 정확한 현장 수평 응력과 정지 토압 계수 등의 결과를 얻을 수 있으나, SBP시험은 PBP시험과는 달리 조밀한 사질토나 암반 등의 단단한 지반에서는 굴착 능력의 한계로 인해서 시험이 불가능할 수도 있다.

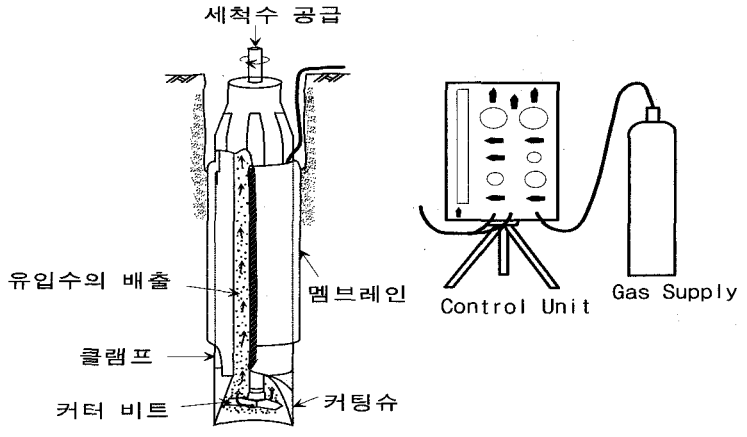


그림 2.69 자가굴착식 프레셔미터의 개략도

나) 사질토의 상대밀도 (D_r)

Nutt & Houlsby(1991)와 Schnaid & Houlsby (1990)는 모형 토조 시험을 이용하여 large strain인 PIP시험의 경우만에 대해서 경험적인 두 관계식을 제안하였다.

$$\frac{p_l - \sigma_h}{\sigma_h'} = 2.21 + 19.35 D_r \qquad \text{(식 2.17)}$$

$$\frac{q_c - \sigma_h}{p_l - \sigma_h} = 3.80 + 9.84 D_r \qquad \text{(식 2.18)}$$

여기서, D_r : 상대 밀도, σ_h : 현장 수평 전응력, p_l : 한계 압력

σ'_h : 현장 수평 유효응력 q_c : 원추관입 저항력

(e) Rock Dilatometer Test

Pressure Cell을 직경 101mm 정도로 대상 지반의 측정 깊이까지 미리 천공한 시추공내에 넣은 후, 공내에 하중을 천천히 가하여 하중-변위 관계를 구해 지반의 특성을 파악하는 방법이다. 최대 측정 깊이는 150m 정도이고, 최대 압력 하중은 6.0~10.0N/㎟ 까지 적용할 수 있는데, 기압이 아닌 유압을 사용하여 압력을 가하는 경우, 30N/㎟ 까지도 적용할 수 있다. Probe는 최대 25mm 의 변형까지 측정이 가능하고, 측정의 정밀도는 암·흙에 상관없이 2.5㎛ 정도이다. Rock dilatometer test는 대략적인 지층 분포를 파악하는 데에는 매우 유용하나 정확한 정보를 제공하지 못하는 단점이 있다.

(f) Flat Dilatometer Test (DMT)

"Flat Dilatometer"는 1980년 'Marchetti'에 의해 고안된 것으로, 두껍고 날카로운 쐐기형의 Probe를 CPT 장비로 대상 지반 내로 밀어 넣거나, N=35~40정도의 지반에 있어서는 SPT 기구로 미리 천공된 시추공내로 삽입하도록 한다.

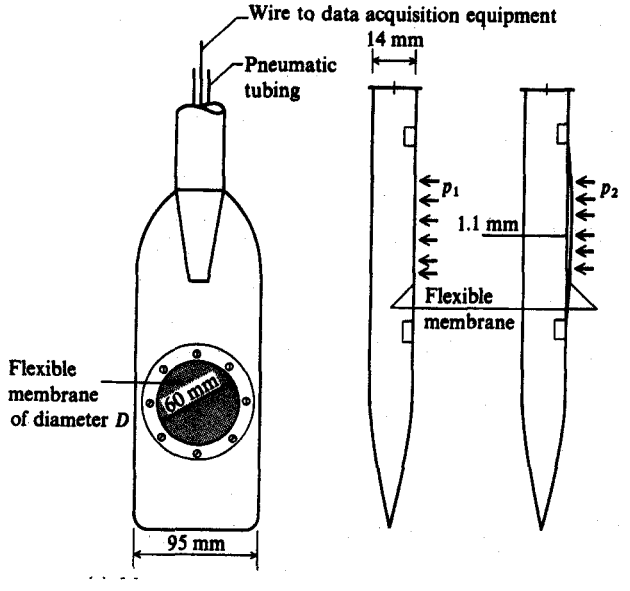


그림 2.70 Flat Dilatometer

지중내에 설치된 Probe의 한쪽면에 장착된 Steel Diaphragm을 팽창시키면서, 팽창변위에 대한 하중을 측정함으로써, E_d(Dilatometer Modulus), K_D(횡방향 응력지수), I_D(물성 지수) 등을 구한다. 일반적으로 1.5m~2.0m 깊이마다 한번씩 측정을 하며, 한번 측정에는 보통 2분 정도 소요된다.

$$E_D = \text{(Dilatometer Modulus)} = \frac{E_s}{1-\mu^2} = 34.7\times(P_2-P_1) \qquad \text{(식 2.19)}$$

여기서, P_1 : lift off 상태에서의 압력

P_2 : membrane의 변형이 1.1mm 가 일어났을 때의 압력

(g) Spectral Analysis of Surface Waves Method (SASW)

SASW는 연직으로 작용하는 충격으로 지반에 발생하는 여러 파장중에 표면으로 전달되는 Rayleigh 파를 측정함으로써 현장에서 효과적으로 전단파 속도를 구할 수 있는 방법이다.

각기 다른 주파수에 따른 Rayleigh 파의 속도변화를 충격원으로부터 일정 거리만큼 떨어져 있는 탐지장치를 통해 구한 후, 역추적을 통해 전단파 속도, 전단 변형계수, 지층의 구성 등을 파악하게 된다. 이 방법은 신속하고, 저렴하며, 별도의 천공작업이 필요 없는 비파괴 검사방법으로 전 작업이 자동화되어 표준화된 결과를 얻기가 용이하다.

SASW는 SPT와 함께 액상화 가능성을 판단하는데 유용하게 사용되나, 복잡한 지층에 대해서는 사용하기가 매우 어렵다. 많은 시험 결과, SASW을 통해 나타난 전단파 속도가 450 fps 이하이면, 대상지반의 액상화 가능성이 높은 것으로 나타났다.

(h) Nuclear Borehole Geophysics (RI Method)

지중 내에 전달되는 감마(γ)선이 대상지반의 밀도가 증가함에 따라, 반비례의 관계로 전달되는 성질을 이용하여, 인위적으로 지중 내로 방사성 동위원소의 붕괴

과정에서 발생하는 방사선을 방사하여 이를 별도의 탐지장치로 측정함으로써, 개량 지반에 대하여 신속하고 정확한 밀도측정을 할 수 있는 방법이다. 중성자선이 수소 원자와 비슷한 반응을 보임을 이용하여 마찬가지로 함수량 측정도 가능하다. 단, 시험에 들어가기에 앞서, 별도의 보정곡선을 준비해야 하는 등 준비 작업이 많이 필요하고, 시험자가 방사선에 노출된 위험이 있는 단점을 가지고 있다.

시험 방법으로는 하나의 탐침에 방사선원과 탐지장치가 모두 포함되어 선원으로부터 방출된 방사선이 토립자에 반사하여 탐지장치에 전달되는 'Backscatter법'과 약 30cm 정도 간격을 둔 두개의 구멍에 각각 선원봉과 탐지장치를 집어넣어 방출된 방사선이 직접적으로 탐지장치에 전달되는 'Direct-transmission법'등이 있다. 시험의 신뢰도는 후자가 높으나, 일정간격을 유지하는 한 쌍의 구멍을 정확하게 천공해야 하는 어려움이 있다.

(i) Borehole Sonic Logging

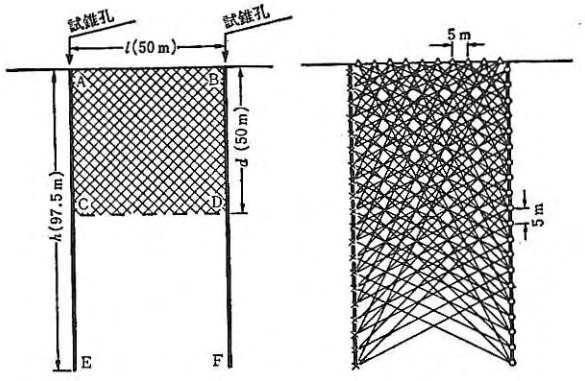
천공된 구멍내에 초음파에 반응하는 탐침을 삽입하고, 외부로부터 전달된 초음파를 분석하여 얻은 정보를 통해, 대상 지반 내에 존재하는 암의 종류나 그의 위치, 그리고 여러 역학적 성질 등을 파악하는 데 사용하는 방법이다. 초음파 이외에 밀도나 자연 방사선량 등을 함께 측정하게 되면, 기반암의 강도와 횡방향 암의 다양성 정도 등의 파악에 매우 용이하다.

그러나, 초음파를 이용하기 위해서는 대상 암반이 지하수위 아래에 존재해야 하는 한계를 가지고 있다.

(j) Seismic Tomography

Seismic Tomography는 지표, 시추공, 또는 갱도 등에 많은 기진점과 수진점을 설치하고, 기진점에서 인공 지진파를 발생시켜 수진점에서 관측된 지진 전파의 특성을 파악하고, 이를 바탕으로 지층 상태를 파악하는 것을 말한다.

일반적으로 Seismic Tomography는 시추조사를 줄이고 저렴하고 효과적으로 지반 상태 파악을 하기 위해 실시되며, 또한 많은 시추, 갱도 굴착 등으로 조사 대상을 교란하고 싶지 않은 경우에 사용된다.



(a) 조사범위 (b) 관측파 계측

그림 2.71 지진파 tomography의 예

(k) 동적 콘 관입시험

동적 콘 관입시험은 세계 각지에서 나름대로의 특성에 적합하도록 개발되었고, 시험방법 및 시험장치에 대한 표준규격이 정해져 있지 않기 때문에 매우 다양한 형태 및 시험 방법이 존재하고 있다. 그러나, 별도의 시추공을 형성하지 않아도 시험이 가능하기 때문에 표준관입시험에 비해서 매우 경제적인 장점이 있다.

보통 동적 콘 관입시험에 사용되는 콘은 직경 50mm의 원추형 강체(롯드직경 48mm)로서 표준관입시험과 마찬가지로 63kg의 해머를 97cm의 낙하고에서 자유낙하시켜 낙하에너지로서 콘을 관입시키고 일정 관입깊이에 대한 해머의 타격횟수인 N_d를 측정하는 방법이다. Douglas(1983)에 의하면 느슨한 모래의 경우 N_d값은 N값과 거의 같은 값을 가지지만 조밀한 모래나 자갈질 층에서는 N값에 비해 30-50% 정도 큰 값을 가지며, 이는 주로 롯드에 작용하는 마찰저항력이 그 원인인 것으로 알려져 있다.

Aggarwal(1982)은 마찰저항력을 배제시키기 위하여 롯드의 직경(4.13cm)에 비해 원추의 직경이 큰 콘을 이용하고 표준관입시험과 같은 방법으로 시추공을 형성한 후 동적 콘 관입시험을 실시하였는데, 이 결과에 의하면 N값에 대한 N_d값의 비는 그림 2.72와 같은 관계를 보인다. 그림과 같이 콘의 직경이 62.5mm인 경우에 지반 심도에 따른 N_d/N값이 가장 일정한 값을 가지는 것으로 나타났고, 이 때 N_d/N값은 다음과 같다.

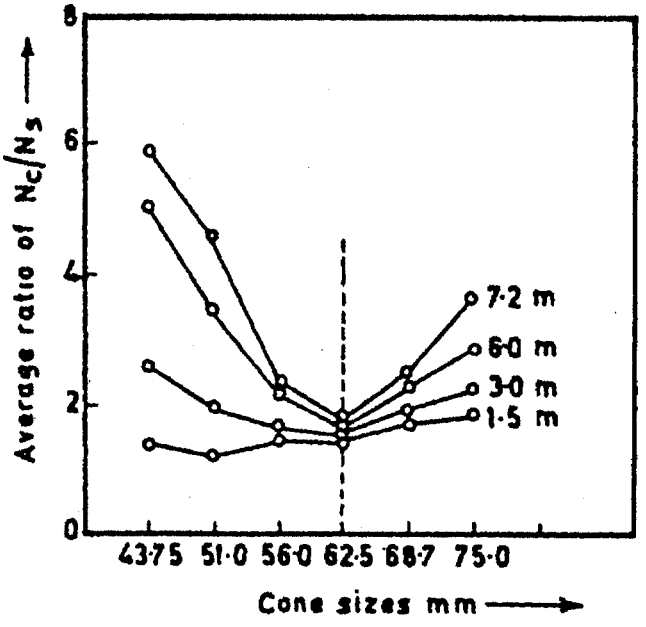


그림 2.72 동적 콘의 크기에 따른 N_d/N값의 변화

$\frac{N_d}{N} = 1.5$: 지반심도 4m 이하일 때

$\frac{N_d}{N} = 1.75$: 지반심도 4~9m일 때

$\frac{N_d}{N} = 1.0$: 시추공을 형성하고 벤토나이트 슬러리를 순환액으로 사용할 때

이 때, 지반심도 9m이상인 경우에 대하여 정량적으로 연구된 바는 없지만 심도가 깊어질수록 롯드에 발생하는 마찰저항으로 인하여 N_d/N값은 더 증가하게 된다 (Douglas, 1983).

(l) 제 방법들의 비교

Wroth(1984)는 여러 종류의 현장시험에 대한 지반 특성치 산정의 신뢰성에 대하여 연구하여 표 2.8과 같은 결과를 얻었다.

표 2.8 현장시험 방법 간의 신뢰성 비교(Wroth, 1984)

현장시험 \ 흙의 특성	흙의 종류	주상도	사질토의 상대밀도	마찰각	비배수 전단강도	간극수압	응력이력	탄성계수	압축성	압밀계수	투수계수	응력변형율 곡선	액상화 가능성
Dynamic cone	C	A	B	C	C	-	C	-	-	-	-	-	C
Static cone													
Mechanical	B	A	B	C	C	-	C	B	C	-	-	-	B
Electrical friction	B	A	B	C	C	-	C	B	C	-	-	-	B
Electrical piezo	A	A	B	B	B	A	A	B	B	A	B	B	A
Electrical piezo/friction	A	A	A	B	B	A	A	B	B	A	B	B	A
Acoustic probe	C	B	B	C	C	-	C	C	-	-	-	-	C
Dilatometer	B	A	B	C	C	-	B	B	C	-	-	C	B
Vane shear	B	C	-	-	-	-	B	-	-	-	-	-	-
Standard penetration test	B	B	B	C	C	-	-	-	C	-	-	-	A
Seismic cone penetration test downhole	C	C	C	-	-	-	-	A	-	-	-	B	B
Ko blade	-	-	-	-	-	-	B	-	-	-	-	-	-
Resistivity probe	B	B	A	B	C	-	C	C	C	-	-	C	A
Borehole permeability	C	-	-	-	-	A	-	-	-	B	A	-	-
Hydraulic fracture	-	-	-	-	-	B	B	-	-	C	C	-	-
Screw plate	C	C	B	C	B	-	B	A	B	C	C	B	B
Seismic downhole	C	C	C	-	-	-	-	A	-	-	-	B	B
Impact cone	C	B	C	C	C	-	C	C	C	-	-	-	C
Borehole shear	C	C	-	B	B	-	C	C	-	-	-	C	-
Ménard pressuremeter	B	B	C	B	B	-	C	B	B	-	-	C	C
Self-boring pressuremeter	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A
Self-boring devices													
Ko meter	-	-	-	-	-	-	A	-	-	-	-	-	-
Lateral penetrometer	C	C	B	B	B	-	B	B	C	-	-	-	-
Shear vane	B	C	-	-	A	-	B	-	-	-	-	-	-
Seismic cross-hole	C	C	B	-	-	-	-	A	-	-	-	B	B
Nuclear tests	-	-	A	B	-	-	-	C	-	-	-	-	C
Plate load tests	C	B	B	B	C	-	B	A	B	C	C	B	B

A : 우수, B : 보통, C : 불량

표 2.8에 나타난 바와 같이 사질토의 상대밀도 추정을 위한 현장시험으로 가장 우수한 방법은 피에조콘 관입시험(piezocone penetration test), self-boring 공내재하시험(self-boring pressuremeter test), 전기 전도율 시험(resistivity test), 그리고

핵 방사능시험(nuclear test)이 가장 우수한 방법이라고 할 수 있다. 표준관입시험과 동적 콘 관입시험은 이 방법들 다음으로 사질토 지반의 상대밀도 추정을 위해 유용한 방법이라고 할 수 있다.

4. 시료의 교란과 대책

(a) 시료의 교란

"교란이 적은 시료"를 샘플링하는 것이 이상적이지만, 다소의 교란은 피할 수 없다. 샘플링에 의한 교란은 보통 "응력해방에 의한 교란"과 "기계적인 교란"으로 분류된다. 이중에서 응력해방에 의한 교란은 지중에서 토피압력 등의 응력을 받은 것을 실험실의 대기압 조건으로 이동하였기 때문에 발생하는 것으로 불가피한 교란이다. 반면, 샘플링시에 발생하는 변형 또는 균열 등의 기계적인 교란은 샘플링 방법을 연구함으로써 줄여 갈 수 있다. 기계적인 교란은 "재구성형 교란"과 "크랙형 교란"으로 분류된다. 재구성형 교란은 전단변형으로 인하여 발생하는 교란으로 변형되기 쉬운 얕은 점토랑 연약점토의 경우에 생기기 쉽고, 크랙형의 교란은 변형이 생긴다고 하는 것 보다도 대심도 점토와 단단한 점토의 경우 생기기 쉬운 현상이다. 시료의 기계적인 교란, 즉 재구성형의 교란과 크랙형의 교란이 생겼을때, 일축압축시험에 있어서 관찰되는 응력-변형률 관계는 어떠한 영향을 받을지 그림 2.73에 모식적으로 표현하고 있다

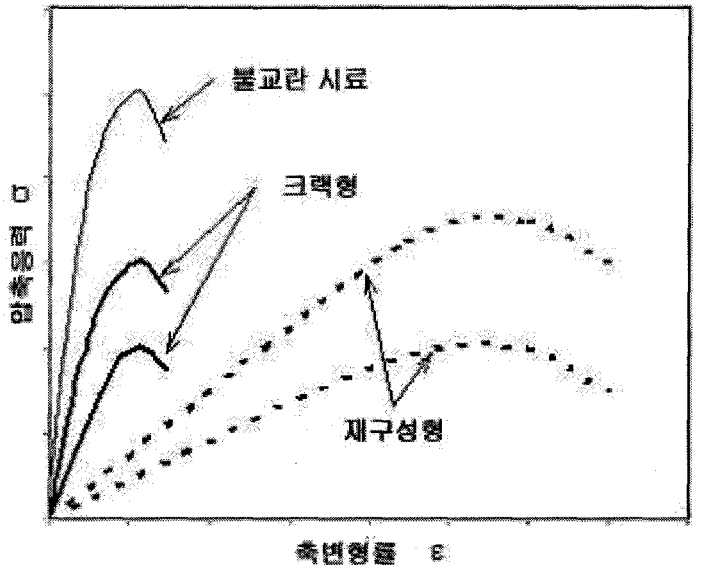


그림 2.73 재구성형 교란과 크랙형 교란

교란되지 않은 시료의 시험결과와 비교해서, 재구성형 교란의 경우에는 압축강도의 저하와 함께 파괴변형률이 커지는 경향이 보이지만, 크랙형 교란의 경우에는 압축강도는 저하하지만 파괴변형률에 대해서는 특별히 변화가 보이지 않는 것이 특징이다.

그림 2.74는 샘플링으로부터 실내시험 개시까지의 흙요소의 유효응력변화를 모식적으로 나타낸 것이다. (Ladd and Lambe, 1963) 이 그림은 해외의 점토특성을 근거로 그린 것이기 때문에 K_o값이 0.6으로 되어 있지만 동아시아(한국, 일본)의 점토는 대부분이 0.5정도이다. 원위치에서의 흙요소는 A의 응력상태이다. 만약, 이 상태의 시료를 채취할 수 있다면 전혀 교란이 없는 시료를 채취할 수 있기 때문에 "이상시료"라고 할 수 있다. 그러나, 실제로는 응력해방은 불가피하기 때문에 실제로는 실현불가능한 상태라고 말할 수 있다.

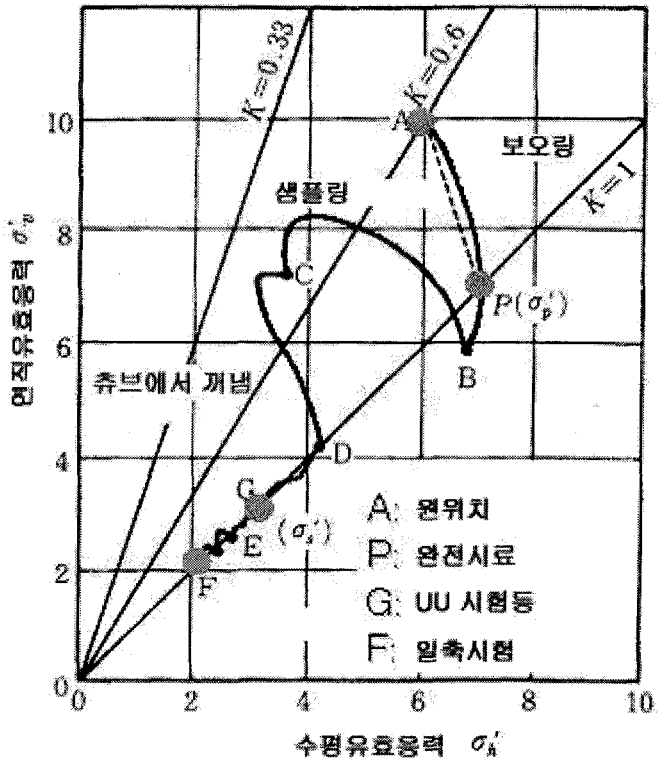


그림 2.74 샘플링에서부터 실내시험개시까지의 유효응력경로

원위치에서 A의 응력상태는 보링공의 굴착에 따른 상재토피압의 해방에 의해 P를 지나 B에 도달하여, 샘플링튜브를 밀어 넣어, 시료를 채취해서 꺼냄으로써 B에서 C

로, 시료를 샘플링튜브에서 꺼냄으로써 C에서 D로, 보존, 트리밍 등에 의해 F에 도달한다고 한다. 일축압축시험은 F의 응력상태의 공시체에 대해서 행해지지만, UU시험은 구속압을 작용시키므로 유효응력이 약간 회복되어 G의 응력상태가 된다.

기계적인 교란을 주지않고, A의 이방적인 응력상태를 등방상태까지 해방하면 P의 상태가 된다. 이 상태의 시료를 "완전시료"라고 하지만, 이상시료와 같이 실제로는 실현불가능한 상태이다. Okumura(1974)는, 완전시료의 유효응력 σ'_p와 시험중인 시료속에 잔류하고 있는 유효응력 σ'_r 의 비를 교란비 R이라고 정의하고 있다.

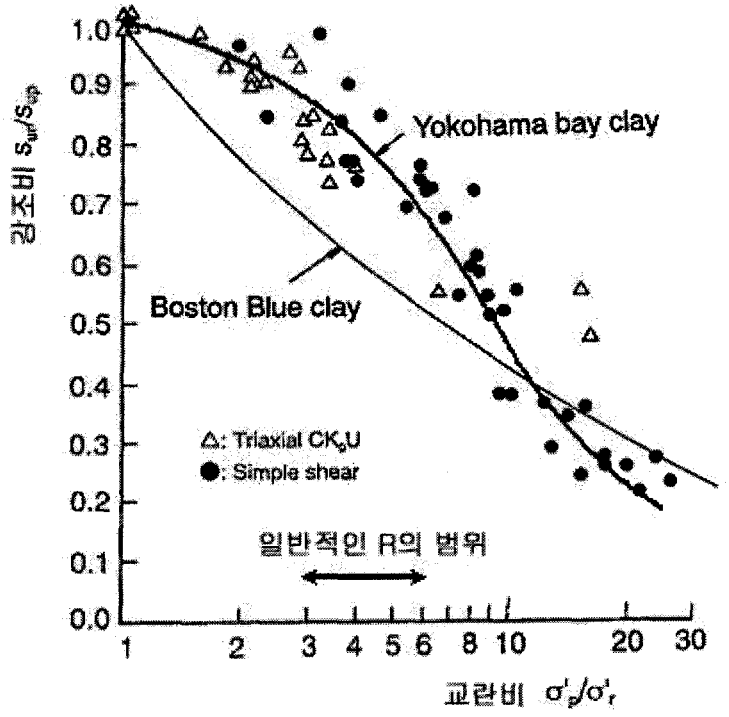


그림 2.75 강도저하와 교란비의 관계

교란비와 강도저하의 관계를 나타낸 것이 그림 2.75이다. 일본 점토의 대표로서 요코하마항 점토의 데이터를 표시하고 있다. 또한, 점토에는 지역성이 강하게 나타나므로, 보스톤 점토의 데이터도 참고로 표시하고 있다. 그림은 일축압축시험에 이용되는 공시체의 잔류유효응력의 계측을 통해서 구한 교란비 R과 완전시료의 비배수전단강도 Sup에 대한 일축압축시험으로부터 구한 전단강도 Sur의 비와의 관계를 나태내고 있다.

동아시아의 정규압밀상태에서 자연퇴적점토의 경우, 교란비 R은 3-6정도 범위이고, 평균적으로 5정도라고 할 수 있다 (Tanaka 등 1995). 그림에 의하면 교란비 5는 강도비 0.7에 대응한다.

(b) 시료교란 원인의 대책

(1) 슬라임(slime)의 침입에 의한 교란

샘플러로 시료를 채취할 때에 내부에 슬라임이 침입하여 교란이 일어날 수가 있으며 이러한 교란효과는 샘플러를 얇게 하거나 충격을 주지 않는 범위내에서 압입속도를 빠르게(30cm/sec) 하여 줄일 수 있다. 또한 고정피스톤을 사용하면 슬라임의 침입을 막을 수 있다. 슬라임의 침입에 의한 교란을 무시할 정도로 작게 할 수 있는 샘플러 두께는 다음의 식으로 결정한다.

$$C_a = \frac{D_a^2 - D_e^2}{D_e^2} \times 100 < 10\% \qquad \text{(식 2.20)}$$

De : 샘플러의 칼날부 내경

Da : 샘플러의 외경

여기에서 Ca는 샘플러의 직경과 비교하여 두꺼운 정도를 나타내며 그 값이 10% 미만이어야 한다.

(2) 샘플러 내벽의 마찰에 의한 시료의 교란

샘플러를 압입할 때에 하부지반을 압박하여 시료가 샘플러 내로 들어오기 전에 이미 교란될 뿐만 아니라 샘플러 내부벽과의 마찰로 인하여 샘플러에 들어온 흙이 교란된다. 이러한 교란이 발생하면 시료가 샘플러로 들어오는 것을 방해하므로 채취한 시료길이가 원상태보다 줄어든다.

이러한 교란은 샘플러 날부분의 직경을 원통부분의 직경보다 약간 작도록 내경비

(inside clearance ratio)를 조절하든지 샘플러의 장경비(length diameter ratio)를 조절하여 줄일 수 있다.

① 샘플러 내경비

샘플러 내경비 Ci는 샘플러 날부분의 직경과 샘플러 원통부분의 내경으로부터 다음과 같이 정의한다.

$$C_i = \frac{D_i - D_e}{D_e} \times 100 \qquad \text{(식 2.21)}$$

Di : 샘플러의 원통부 내경

De : 샘플러의 날부분의 직경

샘플러 내경비는 긴 샘플러에서는 0.75~1.5, 짧은 샘플러에서는 0~0.5가 일반적이다.

② 샘플러 장경비

샘플러의 장경비 LR은 샘플러의 길이 Li와 원통부의 내경 Di의 비로서 보통 10정도로 한다.

$$L_R = \frac{L_s}{D_i} \qquad \text{(식 2.22)}$$

③ 샘플러 회수시의 교란

샘플러를 회수할 때에 샘플러 끝이 진공상태가 되어 인장력이 발생되면서 시료가 교란된다. 일반적으로 샘플러의 끝에 피아노 선을 설치하여 시료를 절단하거나 샘플러 밑에 압축공기를 보내 진공을 방지할 수 있으나 이 경우 특수장치가 필요하므로 샘플러가 두꺼워진다. 이러한 특수장치가 없는 샘플러를 사용할 때에는 샘플러를 조심스럽게 180°회전하여 시료를 끊는다.

(c) 채취 시료의 교란정도 평가 방법

시료의 교란 정도는 교란이 발생하였을 때 변화하는 물리적 성질을 상호 비교하여 평가할 수 있으며, 교란의 영향으로 변하는 물리적 성질은 다음과 같다.

① 배수와 비배수 상태에서의 압축강도(q_u)
② 압축시험으로 얻어지는 탄성계수(E)
③ 전단계수(G)
④ 극한 강도일 때의 변형율(ε)
⑤ 압축지수(Cc)
⑥ 압밀계수(Cv)
⑦ 선행압밀응력(P_y)
⑧ 유효강도정수(C', Φ')

이러한 교란은 위에 열거된 모든 요소를 똑같은 정도로 시료에 영향을 주지 않으며, 시료의 부분에 따라 교란 정도가 다르게 나타난다.

이상과 같은 원리를 이용하여 수많은 연구자들은 다음과 같이 시료의 교란정도를 평가하였다.

(d) 점성토 시료의 평가 방법

(1) 유효잔류응력

Ladd와 Lambe(1964)은 시료의 질을 비배수 강도와 잔류간극수압(residual pore pressure)으로 산정하였다. 즉, 완벽한 시료 채취작업으로 얻어진 시료의 등방잔류응력(isotropic residual stress, σ_{ps}')과 실제 시료 채취작업으로 얻어진 유효잔류응력(residual effective stress, σ_r') 사이의 차이는 시료의 교란 정도를 나타낸다. 이러한 것을 이용하여 Nelson 등(1971)은 시료의 교란 정도를 식 2.23과 같이 정의하였다.

$$D_d = \frac{\sigma_{ps}' - \sigma_r'}{\sigma_{ps}'} \qquad \text{(식 2.23)}$$

여기서, $\sigma_{ps}' = \sigma_{vo}'[K_o + A_u(1-K_o)]$

σ_{vo}' : 현장의 유효상재응력

K_o : 정지토압계수

$$A_u = \frac{\Delta u - \Delta\sigma_h}{\Delta\sigma_v - \Delta\sigma_h}$$

A_u : 비배수상태에서 하중을 K_o-응력에서 등방응력으로 재하시켰을 때의 간극수압계수이다.

$\Delta u = u_o - u_{ps} = u_o + \sigma_{ps}'$

Δu : 현장상태(u_o)에서 완벽한 샘플링 후 잔류상태(u_{ps})로 변화했을 때의 값이다.

그러나, 이와 같은 시료 교란에 대한 정의의 단점은 완전시료의 유효응력 값을 결정할 때 가정하거나 측정되는 토압계수 Ko와 간극수압계수 Au값에 의존한다는 점이다. 이 값의 측정에는 어려움이 있고, 작은 잔류응력과 작은 잔류간극수압이 시료 교란의 신뢰할만한 지수인지도 잘 알려지지 않았다. 다만, 잔류간극수압은 교란이 증가함에 따라 감소한다는 사실만이 알려져 있을 뿐이다.

(2) 탄성계수

비배수 전단강도보다 비배수 탄성계수(Eu)가 교란에 더욱 민감하다는 Holtz 등의 연구를 토대로 Raymond 등은 파괴지수(FI)를 이용하여 시료의 질을 평가하였다. 즉, 시료의 질을 삼축시험시 파괴시의 축차응력과 임의의 변형률에서의 축차응력의 비로서 제안하였다(식 2.24 참조).

파괴지수(FI)= $(\sigma1-\sigma3)/(\sigma1-\sigma3)f$ (식 2.24)

여기서, $(\sigma1-\sigma3)$: 임의의 축차응력

$(\sigma1-\sigma3)f$: 파괴시의 축차응력

따라서, 시료가 교란이 되면 임의의 파괴지수에 대하여 압축성이 증가하는 것으로 시료의 질을 평가할 수 있다.

(3) 유효 응력 경로

Atkinson 등(1980)은 완전히 포화된 시료를 샘플링하고 준비하는 과정에서 물이 배수되지 않는다면 흙의 간극비 변화는 없다는 가정을 전제(前提)로 하여 시료의 유효응력 경로를 이용하여 교란정도를 나타내었다. 즉, 유효응력 원리에 따르면 변형은 유효응력이 변하여야 발생하므로 유효응력경로가 같지 않으면 시료의 응력-변형 거동은 같지 않다. 그러므로, 시료가 교란되면 그것들의 비배수 응력-변형 거동은 교란되지 않은 현장 상태의 유효응력경로와 같지 않다.

자연상태의 흙은 일차원 압밀을 받게 되어 그림 2.76과 같이 Ko-line을 따라 거동하게 된다. 이때 시료를 채취하기 위하여 굴착을 하고 샘플링을 하게 되면 흙은 p_v'에서 p_i'으로 이동을 하게 되며 교란이 증가할수록 p_s' 쪽으로 이동하게 된다. 따라서, 시료의 교란정도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = 1 - (p'/p_v') \qquad \text{(식 2.25)}$$

여기서, D : 교란정도

p_v' : p-q 평면상에서 V점에 있을 때의 p값

p_i' : p-q 평면상에서 I점에 있을 때의 p값

p_s' : p-q 평면상에서 S점에 있을 때의 p값

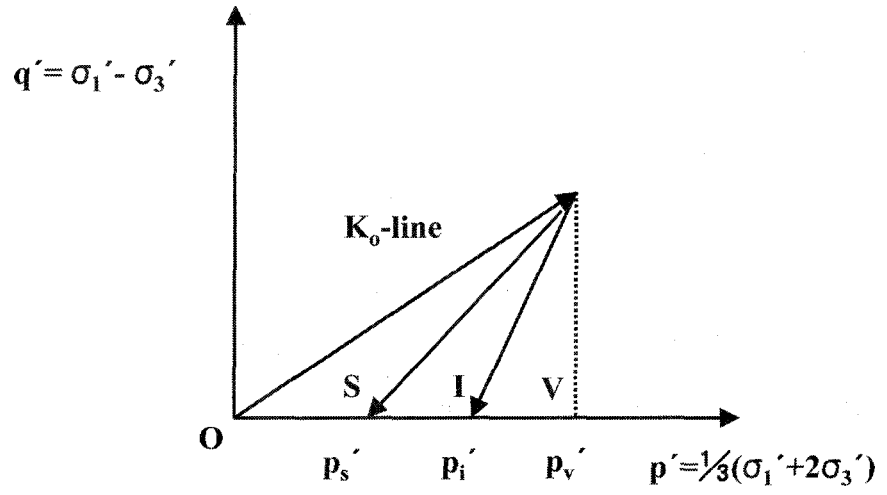


그림 2.76 시료 채취 과정에서의 유효응력경로

(4) 체적변형율

이 방법은 압축지수와 선행압밀응력이 교란에 따라 변화하는 성질을 이용한 것으로 현장의 유효응력으로 재압밀시킬 때 발생하는 체적변형률을 이용하여 시료의 질을 파악한 것이다. 즉, 현장의 유효응력으로 재압밀을 시킬 때 교란이 많이 일어난 시료일수록 점토의 조직이 파괴되어 원래 점토가 가지고 있는 응력이력(stress history)을 잃게 되어 선행압밀응력이 감소하게 되고 이에 따라 압축성이 커져 체적변형률이 증가하게 된다. 이러한 성질을 이용하여 NGI에서는 다음과 같이 시료의 질을 평가하고 있다.

표 2.9 체적변형율에 따른 시료의 질 평가

체적변형율(%)	시료의 질
<1	very good to excellent
1~2	good
2~4	fair
4~10	poor
>10	very poor

또한, Lacasse와 Berre(1988)는 체적변형율과 과압밀비가 표 2.10와 같을 때 양질의 시료로 평가하였으며, Kleven 등은 Berre의 연구결과에서 응력이력과 심도를 고려하여 연약 점성토의 시료의 질을 표 2.11과 같이 제안하였다.

표 2.10 Lacasse와 Berre가 제안한 양질의 시료 기준

체적변형율(%)	과압밀비
2.1~4.0	1.0~1.2
1.2~3.3	1.2~2.0
0.5~2.0	3.0~8.0

표 2.11 체적변형율과 유효 수직응력에 따른 시료교란의 분류

OCR	깊이(m)	아주 양호 ε_v (%)<	양호 < ε_v (%)<	불량 ε_v (%)>
1~1.1	0~10	3	3~5	5
	10~50	2	2~4	4
1.2~1.5	0~10	2	2~4	4
	10~50	1	1~3	3
1.5~2	0~10	1.5	1.5~3.5	3.5
	10~50	1	1.0~2.5	2.5
2~3	0~10	1	1~3	3
	10~50	0.75	0.75~2	2
3~8	0~10	0.5	0.5~1	1
	10~50	0.5	0.5~2	2
>8	0~10	0.25	0.25~0.5	0.5

(5) 일축압축강도와 탄성계수

Horiuchi, et al.(1987) Eiki와 Funehashi(1987)는 샘플러로 채취된 시료를 가지고 수많은 일축압축강도시험을 수행하여 시료의 질을 다음과 같이 평가하였다.

- E_{50}/q_u < 50이면 교란 시료
- E_{50}/q_u ≥ 50이면 불교란 시료

(6) 압밀곡선

시료의 교란을 압밀시험으로 얻어지는 압밀 곡선을 이용하여 시료의 교란정도를 평가할 수 있다. 즉, 시료가 교란되면 주어진 압밀응력상태에서 간극비가 감소하거나, 최소곡률반경점을 찾기가 어렵고, 선행압밀하중 값이 명확하지 않거나 낮은 값으로 나타나며, 재압축구간에서 압축성이 증가하여 압축지수 값이 커진다.

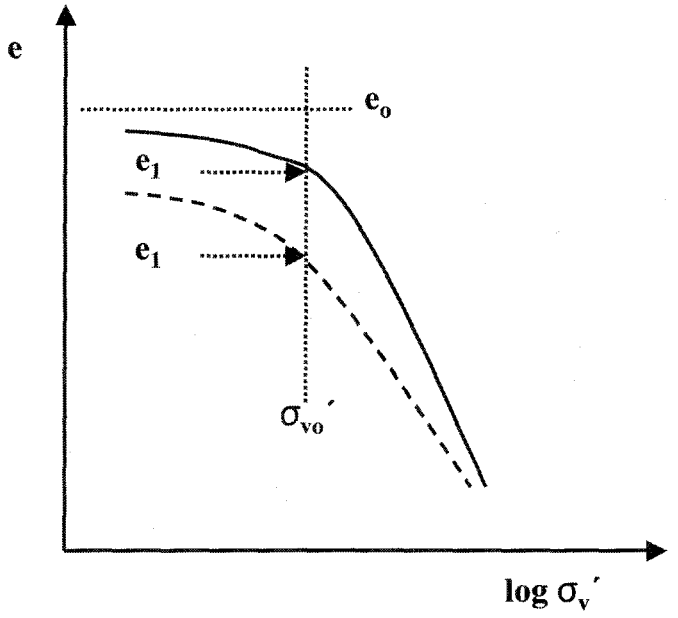


그림 2.77 압밀동안에 발생하는 체적변형율에 의한 시료의 질 평가 방법

이러한 성질 중 Shogaki 등(1996)은 압밀시험으로 얻어지는 체적변형율을 이용하여 시료의 질을 다음과 같이 평가하였다(그림 2.77 참조).

$$\varepsilon_{vo} = \frac{e_o - e_1}{1 + e_o} \times 100(\%) \qquad \text{(식 2.26)}$$

여기서, e_o는 초기 간극비, e_1은 현장에서의 유효상재하중일 때의 간극비이다.

(7) x-ray 분석

Krinitzsky(1970)는 x-radiography를 이용하여 시료의 질을 평가하였다. 샘플 튜브의 두께가 일정하고 시료의 두께가 일정하다면 광물학적 관점으로 균질하다고 볼 수 있다. 그러면, x-radiography에 나타나는 필름 밀도(film density)는 시료의 밀도이다. 그림 2.78은 Hvorslev 고정 피스톤 샘플러로 채취된 충적 사질토(alluvial sand)의 radiography를 나타내고 있으며 또한, 채취 시료의 중심선을 따라 측정된 필름 밀도를 나타내고 있다.

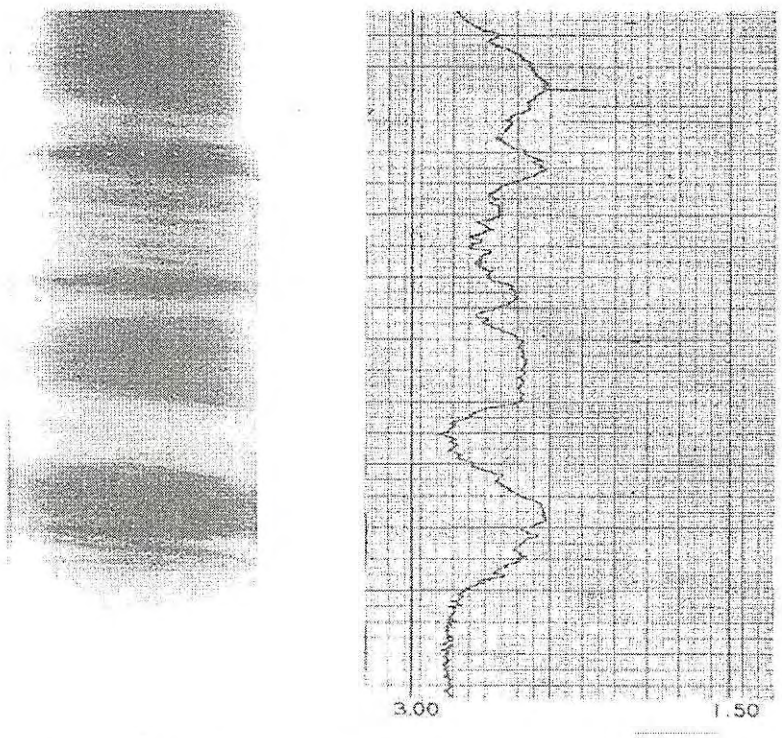


그림 2.78 시료의 밀도를 나타내는 radiography film density

Marcuson과 Gilbert(1972) 및 Marcuson과 Krinitzsky(1976)은 시료의 분산상태, 층상태와 교란을 정량적으로 산정하기 위하여 이 방법을 이용하였다.

그림 2.79에는 양질의 시료와 질이 나쁜 시료를 비교하여 나타내고 있다. 양질의 시료의 경우는 성층면(bedding plane)이 시료 전체에 걸쳐 잘 나타나 있으나, 시료의 질이 나쁜 경우는 교란이 일어난 부분에서 성층면이 일그러져 있다.

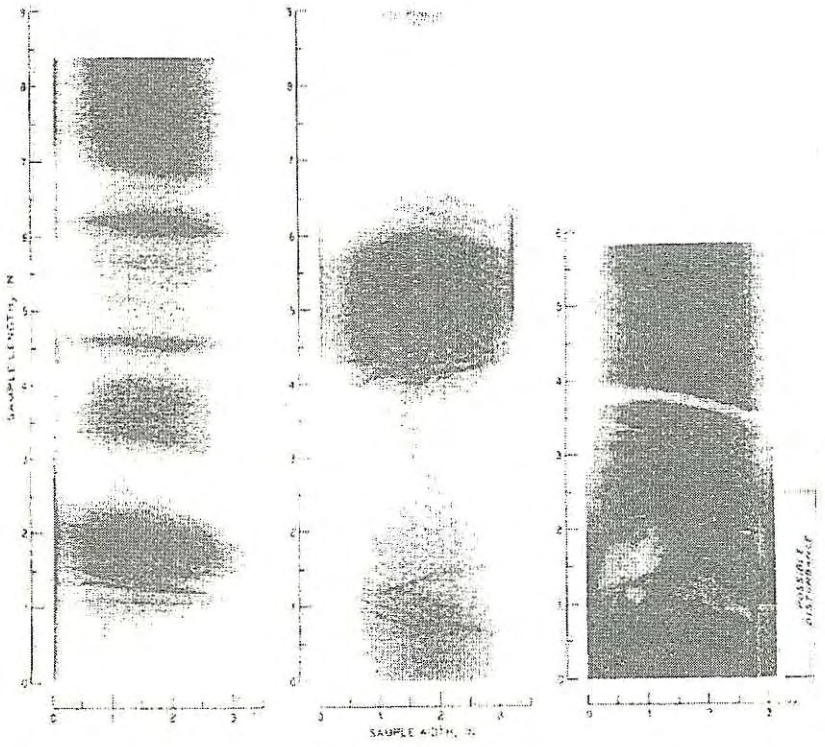


그림 2.79 radiography를 이용한 시료의 교란 정도 산정

(e) 사질토 시료 평가 방법

(1) 배수전단강도

Mori 등(1977)은 압밀배수시험으로 얻은 기존의 연구 결과를 이용하여 상대밀도에 따른 불교란 시료와 재성형 시료의 내부마찰각을 비교, 분석하였다.

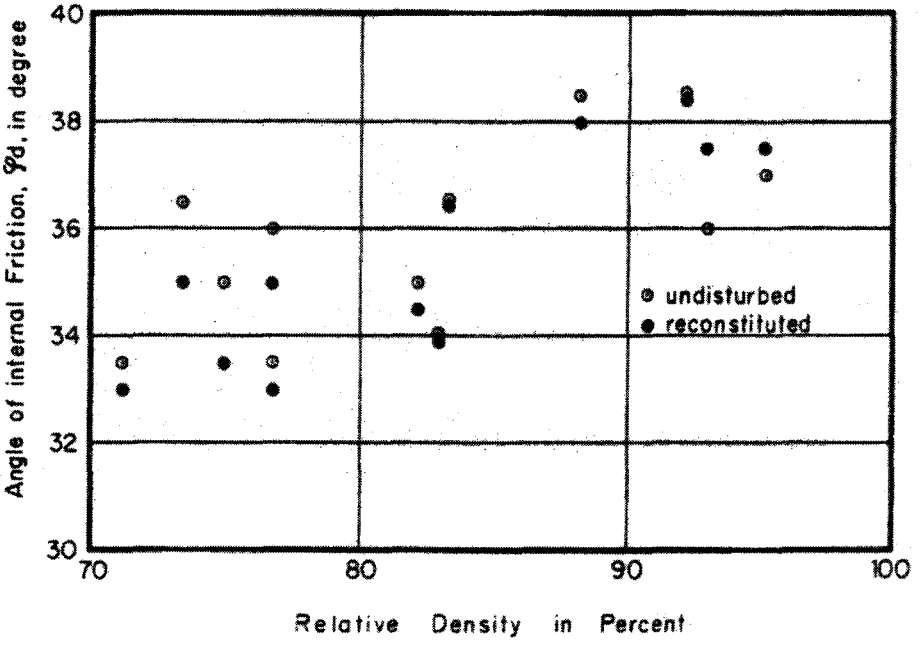


그림 2.80 상대밀도에 따른 불교란 시료와 재성형 시료의 내부마찰각 비교

그 결과, 몇 개의 데이터를 제외하면 불교란 시료와 재성형 시료의 내부마찰각의 차이는 10이하로 그 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 이러한 이유는 실험실에서 압밀배수시험을 수행할 때, 구속응력이 현장의 유효상재하중보다 더 크기 때문에 교란의 효과가 감소되기 때문으로 판단된다. 그러나, 구속응력이 현장의 유효상재하중보다 20% 작은 경우에서도 내부마찰각은 불교란 시료와 재성형 시료 사이에 큰 차이를 찾을 수가 없었다. 이것은 사질토의 내부마찰각은 시료의 교란보다 입도분포, 입자의 모양, 세립분의 함유량 등에 더 큰 영향을 받기 때문이다(Holtz 등, 1981).

그림 2.80에 상대밀도에 따른 불교란 시료와 재성형 시료의 내부마찰각의 변화를 나타내었다. 시험에 사용된 시료들은 지표면 아래 10m에서부터 23m사이에서 채취된 조밀한 사질토이며, 세립분 함유량은 9~16%로 대체적으로 일정하였다.

그림 2.80을 보면 알 수 있듯이 내부마찰각은 상대밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 내부마찰각의 값은 밀도보다 다른 요소에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 시료 교란의 영향은 다른 영향요소와 비교하여 볼 때 내부마찰각에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(2) 다일러턴시 벡터

Tohno(1977)는 시료 교란이 다일러턴시 경향에 미치는 영향을 알아보기 위하여 블록 샘플링으로 채취한 불교란 시료와 교란된 시료를 가지고 배수삼축시험(drained triaxial test)을 수행하였다.

불교란 시료의 경우 유효주응력비와 다일러턴시 벡터가 구속응력이 증가함에 따라 감소하고, 시료가 파괴될수록 구속응력에 관계없이 일정한 선으로 접근함을 알 수가 있다. 불교란 시료의 경우도 구속응력이 0.193kg/cm2보다 큰 경우에는 교란시료와 같은 경향을 보이지만, 구속응력이 0.1kg/cm2일 때는 약간 다른 경향을 보이고 있다.

또한, Tohno(1977)는 그림 2.81과 같이 최소유효주응력을 대수(logarithm)축으로 하여 파괴시 다일러턴시 벡터(κ_f)를 나타내었다. 여기서, 응력 다일러턴시 벡터(κ)는 식 2.27과 같이 정의된다.

$$\frac{\text{principal stress ratio}}{\text{dilatancy factor}} = \frac{\sigma_1'/\sigma_3'}{1+\varepsilon_v/\varepsilon_a} = \kappa \qquad \text{(식 2.27)}$$

여기서, σ_1' : 최대유효주응력

σ_3' : 최소유효주응력

ε_v : 체적변형율(%), 압축의 경우일 때 (+)

ε_a : 축변형율(%), 압축의 경우일 때 (+)

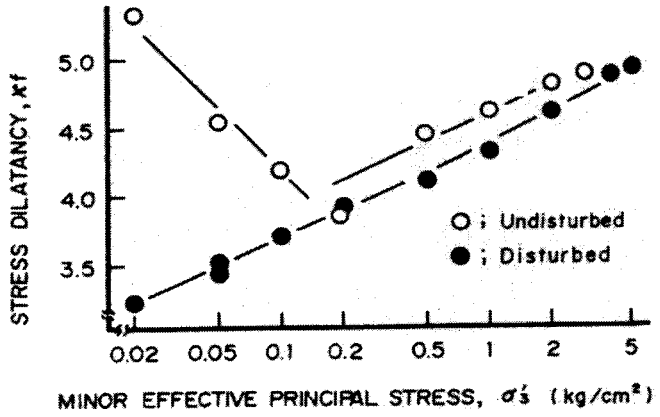


그림 2.81 최소유효주응력에 따른 불교란 시료와 교란 시료의 다일러턴시 벡터

그림 2.81에서 볼 수 있듯이 불교란 시료의 다일러턴시 벡터는 최소유효주응력이 약 0.2kg/cm2까지 선형적으로 감소하다가 증가하는 경향을 나타내지만, 교란 시료의 다일러턴시 벡터는 최소유효주응력이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

(3) 밀도 분산

Tatsuoka 등(1978)은 기존의 연구 결과를 종합하여 재성형된 사질토 시료의 액상화 응력비(Rι)와 상대밀도(Dr)의 상관관계를 연구하였으며, 액상화 응력비를 다음과 같이 정의하였다.

$$R\iota = \frac{\sigma_{dp}}{2\sigma_c'} \qquad \text{(식 2.28)}$$

여기서, σ_{dp} : 단주기(single amplitude)에서의 축방향 동적응력

σ_c' : 동적삼축시험동안의 초기유효구속응력

그림 2.82를 보면 알 수 있듯이 재성형된 사질토 시료의 액상화 응력비와 상대밀도 사이에는 선형적인 관계($R\iota = 0.0042D_r$)가 성립함을 알 수가 있다.

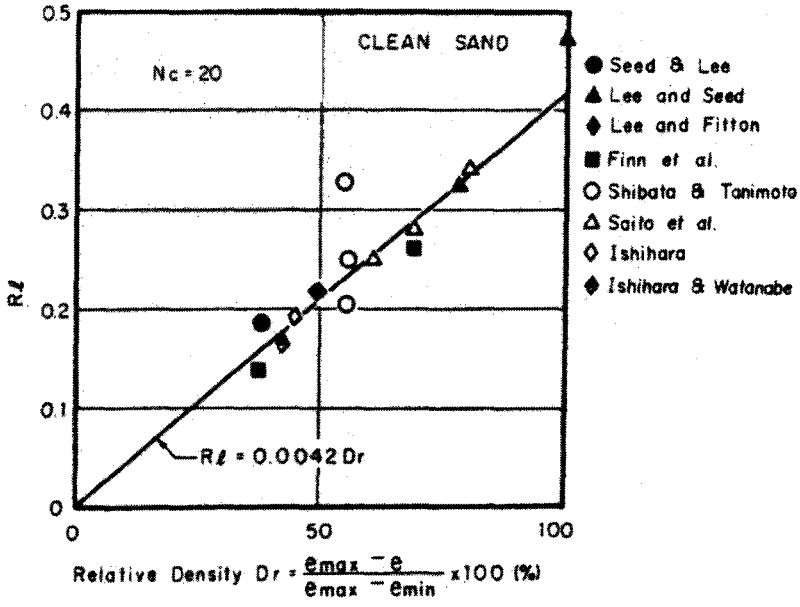


그림 2.82 재성형된 사질토시료의 액상화 응력비와 상대밀도의 관계

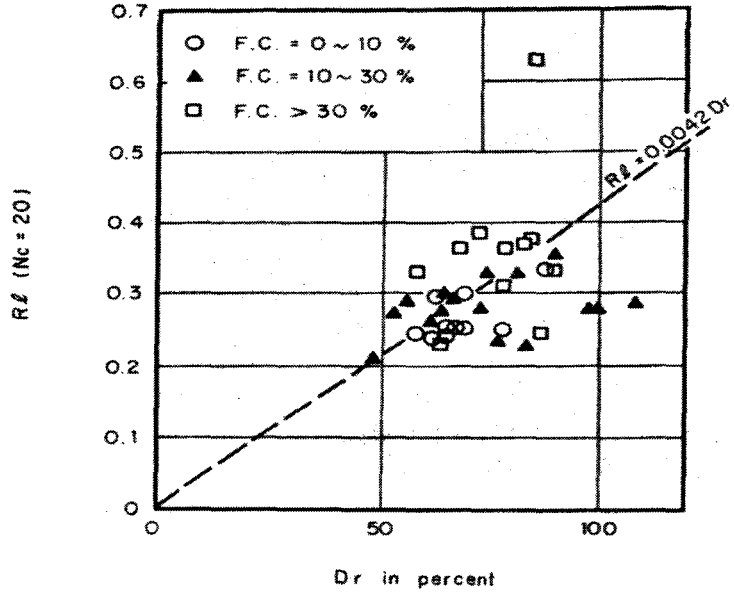


그림 2.83 불교란 사질토 시료의 액상화 응력비와 상대밀도의 상관관계

또한, Ishihara 등(1977)이 연구한 실험 결과를 가지고 액상화 응력비와 상대밀도의 상관관계식에 대입하여 그림 2.83에 나타내었다. 그 결과, 데이터들이 상관관계식과 다소 차이가 있는 것으로 나타나지만 상관관계식 근처에 조밀하게 분포하고 있음을

알 수가 있었다. 따라서, 채취된 시료가 완전한 불교란 시료라고 한다면 그림 2.83에 나타난 상관관계식을 만족해야한다는 것을 알 수 있으며, 이것을 이용하여 채취시료의 교란정도를 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

(4) 전단탄성계수와 액상화 응력비

Tokimatsu 등(1986)은 일본의 Niigata에서 두 가지 방법으로 채취한 사질토 시료를 가지고 실내시험을 수행하였다. 현장상태의 동적 특성을 유지하기 위하여 동결공법으로 채취한 동결시료(Frozen Sample, FS)와 실무에서 가장 많이 사용하고 있는 3중관 튜브 샘플러로 채취한 튜브시료(Tube Sample, TS) 그리고, 실험실에서 동결시료와 같은 밀도로 재성형한 재성형 시료(Air pluviation method, PA)를 가지고 실내시험을 수행하였다.

표 2.12에 나타난 시료의 물리적 특성 중 동결시료의 상대밀도가 튜브시료의 상대밀도보다 약 10%정도 크게 산정됨을 알 수 있다. 이것은 튜브시료를 채취하는 과정에서 체적 팽창이 일어났기 때문이다.

표 2.12 실험에 사용된 시료의 물리적 특성

	비중 (Gs)	입경(mm)		균등계수	세립분 함유량 (%)	최대 건조밀도 (g/cm^3)	최소 건조밀도 (g/cm^3)	상대밀도 (%)
		D_{50}	D_{10}					
동적하중시험								
FS	2.70	0.30	0.19	1.7	0	1.51	1.22	87
TS	2.71	0.31	0.20	1.7	0	1.51	1.18	72
PA	2.69	0.29	0.0.17	1.8	0	1.52	1.22	88
정적하중시험								
FS	2.73	0.29	0.17	1.8	0	1.52	1.22	82
TS	2.70	0.27	0.18	1.6	0	1.53	1.20	77

① 전단탄성계수

동결시료, 튜브시료 및 재성형 시료를 가지고 공진주시험을 수행하여 전단변형율에 따른 전단계수의 관계를 그림 2.84에 나타내었다.

그림 2.84(a)를 보면 알 수 있듯이 동결시료의 전단계수는 같은 전단변형율에서의 튜브시료의 전단계수보다 더 큰 값을 나타내고 있으며, 동결시료와 같은 밀도로 재성형한 시료의 전단계수보다도 더 큰 값을 나타내고 있다. 또한, 실내시험으로 얻은 동결시료의 최대전단계수는 현장시험으로 얻은 최대전단계수와 거의 같은 값을 나타내고 있다. 따라서, 동결시료는 시료 채취 과정 중 교란이 발생하지 않아 현장의 특성을 그대로 유지하고 있지만 튜브시료의 경우는 교란이 발생하여 작은 값을 나타내었다. 그러나, 그림 2.84(b)와 같이 현장시험으로 얻은 최대전단계수로 실내시험으로 얻은 전단계수를 정규화하면 동결시료와 재성형 시료의 거동이 거의 일치하게 나타남을 알 수가 있다. 그래서, 실무에서는 지반의 동적 특성을 결정하기 위하여 등가전단계수(equivalent shear modulus, Geq)와 단주기 전단변형율(single amplitude shear strain, γ_{SA}) 사이의 관계를 다음과 같은 방법으로 구한다.

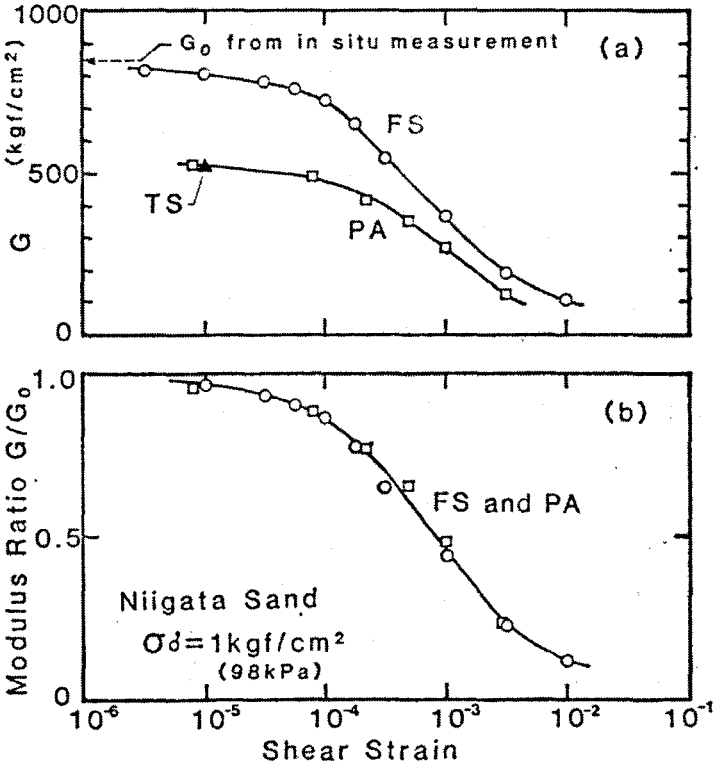


그림 2.84 채취방법에 따른 전단계수 비교

ⓐ 현장시험을 통하여 대상지반의 깊이별 전단파속도(Vs)를 결정한다. 이때, 크로스 홀 시험, 다운홀 시험, SASW 시험 등이 사용될 수 있다.

ⓑ 대상지반을 층으로 나누고 각 층의 질량밀도(ρ)를 추정하여 저변형율에서의 최대탄성계수를 다음과 같이 결정한다.

$$(G_{max})_{field} = G_f = \rho \cdot V_s^2 = \frac{\gamma_t}{g} \cdot V_s^2 \qquad \text{(식 2.29)}$$

여기서, γ_t : 습윤단위중량, g : 중력가속도

ⓒ 각 층의 중앙에서 불교란 시료를 채취한다.

ⓓ 실내 공진주/비틂전단시험을 저변형율 및 고변형율하에서 수행한다.

ⓔ 실내시험 결과로부터 구속압, 하중반복횟수, 하중주파수 등의 영향을 고려하여 각 층에 대표적인 변형율 크기에 따른 정규화전단계수(Geq/Gmax)laboratory 관계를 도출한다.

ⓕ 현장에서 구한 최대전단계수 (Gmax)feild와 실내시험에서 구한 비선형관계 (Geq/Gmax)laboratory-log γ_{SA}를 결합하여 각 층에서의 현장 비선형 전단계수 (Geq)field를 그림 2.85와 같이 결정한다.

$$(G_{eq})_{field} = (G_{eq}/G_{max})_{laboratory} \times G_f \qquad \text{(식 2.30)}$$

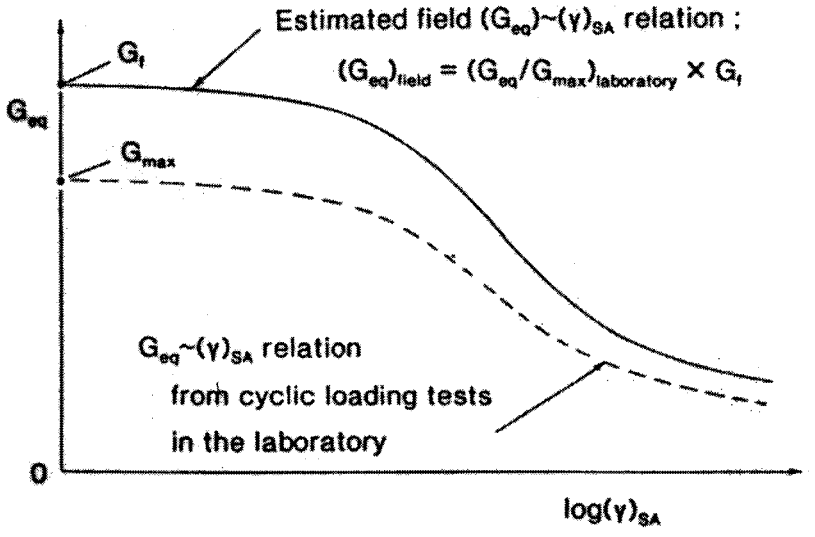


그림 2.85 실내시험으로부터 현장의 전단계수를 산정하는 방법

② 반복전단응력

Yoshimi 등(1984)은 동결시료와 튜브시료의 액상화 특성을 비교하였다. 액상화 특성을 분석하기 위하여 포화된 공시체를 비배수조건하에서 반복전단응력을 작용시켜 액상화 저항을 구하였다. 여기서, 액상화 저항이란 어느 횟수의 반복전단에 의해 유효응력이 0으로 되거나, 전단변형율 진폭이 어느 값(일반적으로 양진폭이 5%)에 도달하게 되는 반복전단응력을 말한다.

반복전단응력과 양진폭이 5%에 도달하는 반복횟수의 상관관계를 그림 2.86에 나타내었다.

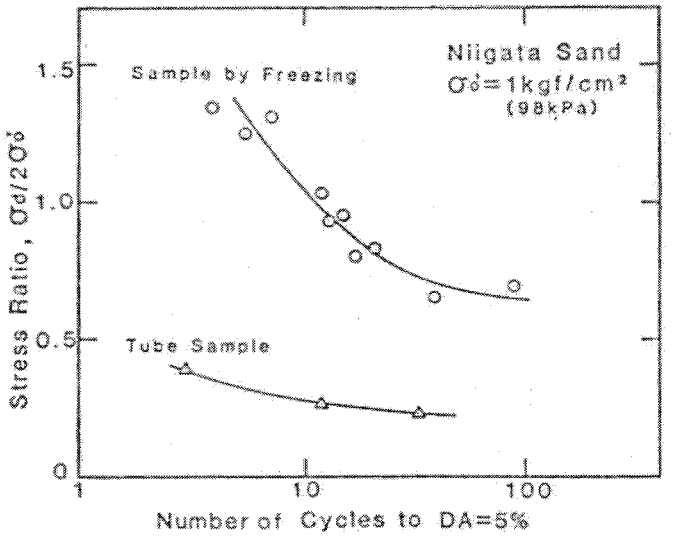


그림 2.86 동결시료와 튜브시료의 액상화 특성 비교

그 결과, 그림 2.86에서 볼 수 있듯이 튜브시료는 동결시료의 약 30%정도에 해당하는 전단강도를 나타내었다. 즉, 동결시료는 시료채취동안에 교란이 발생하지 않아 현장의 특성을 그대로 유지하는 반면, 튜브시료는 시료채취동안에 상대적으로 큰 교란이 발생하여 전단강도가 감소함을 알 수가 있다.

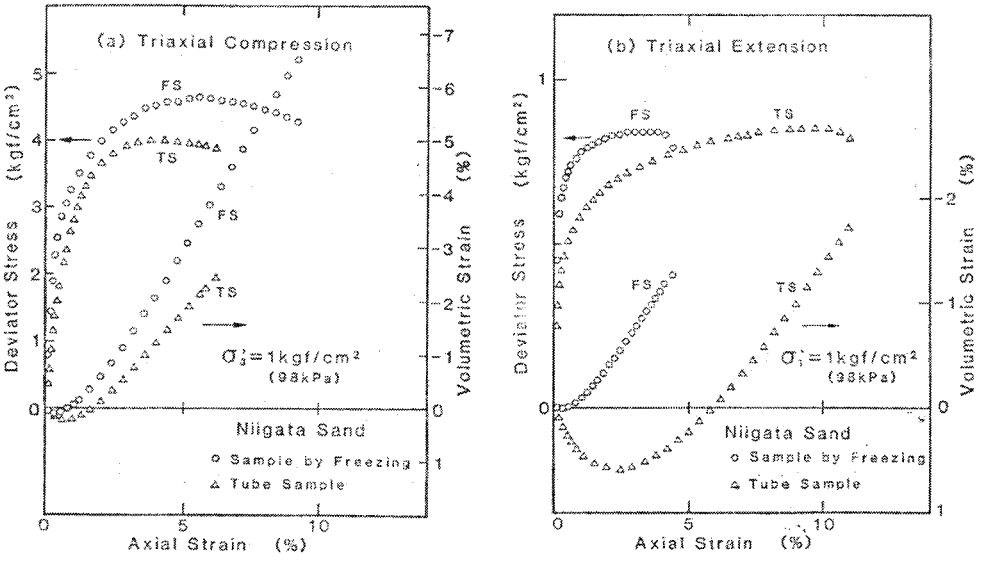


그림 2.87 동결시료와 튜브시료의 정적강도와 변형특성 비교

한편, 그림 2.87에 동결시료와 튜브시료의 정적삼축시험의 결과를 나타내었다. 그림 2.87(a)는 삼축압축시험의 결과이고, 그림 2.87(b)는 삼축인장시험의 결과이다.

그림 2.87에 나타난 삼축압축강도와 삼축인장강도는 그림 2.87에 나타난 반복전단강도에 비하여 동결시료와 튜브시료의 전단강도차이가 거의 없음을 알 수가 있다. 따라서, 점성이 없는 사질토의 정적전단강도는 주로 시료의 밀도만에 영향을 받으며 상대적으로 교란에 의한 흙 조직(soil fabric)의 변화에 영향을 받지 않음을 알 수가 있다.

그러나, 두 시료의 파괴이전 변형 특성은 두 가지 측면으로 대조적이다. 첫 번째로 튜브시료는 동결시료보다 훨씬 더 많이 수축된다는 것이다. 이러한 경향은 압축시험보다 인장시험에서 확연하게 나타나고 있다. 이러한 이유 때문에 튜브시료의 비배수 반복전단강도가 동결시료보다 작게 나타나는 것이다. 즉, 부(-)의 다일러턴시 현상으로 전단동안에 체적이 감소하고 이에 따라 간극수압이 증가하여 강도를 감소시키게 된다. 두 번째로 임의의 변형율에서 튜브시료의 할선전단계수(secant shear modulus)가 동결시료의 할선전단계수보다 더 작다는 것이다. 이 차이는 그림 2.87에 나타난 반복전단계수와 같은 경향을 나타내고 있다.

(5) 응력-변형 거동

시료의 교란 문제는 지반의 동적 거동을 분석하는데 있어서 상당히 중요하다. 왜냐하면, 지반의 응력-변형 거동은 거의 대부분 실내시험으로 얻어지지만 상당히 작은 전단변형율 범위(0.001%)에서도 시료의 교란영향을 받기 때문이다.

Drnevich 등(1979)은 인위적인 시료 교란이 최대전단계수의 변화를 알아보기 위하여 비틂전단시험을 수행하였다. 그림 2.88에서 전단변형율이 증가할수록 최대전단계수가 감소함을 보이고 있다(참조 점 ①~③). 인위적으로 발생하는 교란은 전단변형율이 0.1%로 매우 작다. 이러한 교란은 일반적인 실험 장치에서 발생되지 않으나, 시료 채취 작업이나 실험전 시료 준비과정에서 필연적으로 발생한다. 이 교란의 효과로 할선전단계수가 10.36MPa에서 3.26MPa로 감소하였으며, 최대전단계수는 교란 전 10.36MPa에서 교란 후 9.70Mpa로 감소하였다. 그러나, 최대전단계수는 이후에 수행하는 압밀현상으로 다시 증가하였다.

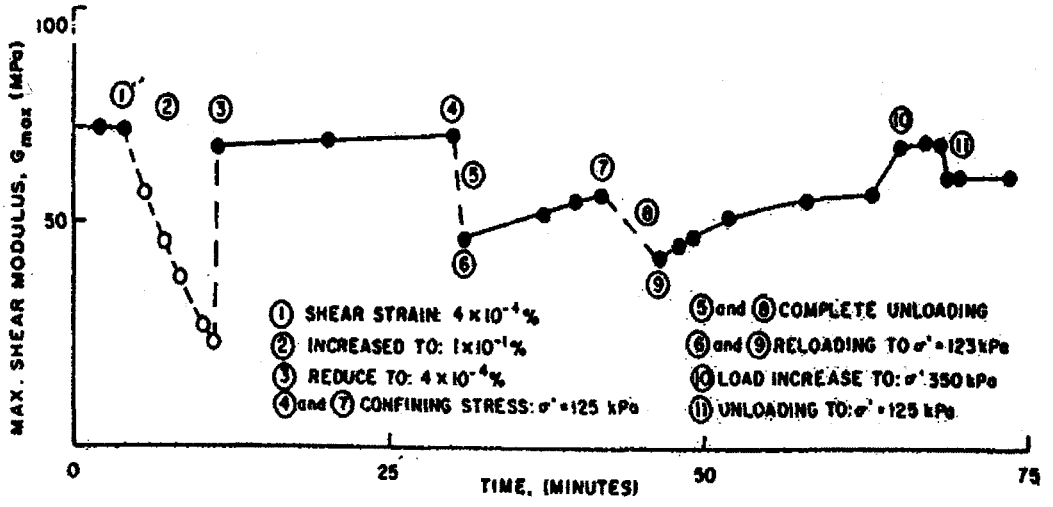


그림 2.88 인위적 시료 교란이 최대전단탄성계수에 미치는 영향

시료 채취 과정에서 발생하는 전응력 변화를 구현하기 위하여 시료에 하중을 제거한 다음, 다시 재하 하였다. 포화된 시료를 비배수 상태에 놓고 어떠한 물리적 교란이 발생하지 않도록 하였다. 그림 2.88을 보면 알 수 있듯이 전응력이 제거되자마자 시료에 반응이 발생하였다(참조 점 ④~⑥과 점 ⑦~⑨). 최대전단계수는 두 단계에서 각각 3.4MPa과 2.2MPa로 감소하였다. 이러한 사실로부터 어떠한 물리적 교란이 발생하지 않도록 완벽한 시료 채취작업을 하여도 전응력의 변화로 흙의 응력-변형 특성이 변화한다는 것을 알 수가 있다. 그러나, 이러한 지반 정수의 감소는 재압밀과정을 통하여 어느 정도 회복시킬 수 있음을 알 수 있다. 끝으로 셀의 구속응력을 선행압밀응력보다 약간 크게 증가시켰다. 비록 압밀동안에 배수를 시키지 않아도 최대전단계수가 증가함을 알 수가 있다(참조 점 ⑩~⑪). 구속응력을 이전에 주었던 값으로 감소시키면 최대전단계수는 이전에 하중 주었을 때의 값보다 약간 더 크게 된다.

또한, Drnevich 등(1979)은 예민비가 작은 흙은 점토질 사질토에 대하여 시료의 교란이 응력-거동에 미치는 효과를 알아보기 위하여 비틂전단 시험을 수행하였다. 불교란 시료는 점토질 사질토를 실험실에서 느슨하게 다진후 등방압밀시켜 얻었다. 하나의 공시체로서 두 번의 실험을 수행하여 불교란 시료와 교란시료의 응력-변형 거동을 분석하였다. 교란 시료는 첫 번째 시험이 끝난 후에 전단응력을 완전히 제거하고 공시체를 24시간동안 재압밀시켜 얻었다. 시료가 완전히 파괴되지 않게 하기 위하여 최대전단응력을 전단강도의 약 70%로 하였다. 전단응력은 공시체의 축으로부터

단부까지 선형적으로 분포한다는 가정으로 전단응력을 계산하였다. 이러한 가정은 엄격히 말하면 사실이 아니지만 실제와 가정 사이의 오차가 작으므로 무시할 수 있었다. 실험은 비배수상태에서 수행하였으며, 전단변형율이 0.033%/min가 되도록 응력을 제어하며 하중을 증가시켰다.

각각의 실험에서 구한 최대전단계수(초기 접선 전단계수)를 표 2.13에 나타내었다. 표 2.13을 보면 알 수 있듯이 첫 번째 실험 후에 시료의 교란 때문에 최대전단계수가 상당히 감소하였다. 비록 하중이 첫 번째와 두 번째 하중반복동안 파괴하중의 약 70% 에 도달하였지만, 최대전단계수는 54.4MPa에서 23.4MPa과 31.8MPa로 각각 감소하였다. 이러한 최대전단계수의 변화는 과잉간극수압과 흙의 물리적인 교란 때문에 유효구속응력이 변화하였기 때문이다. 재압밀후에는 최대전단계수가 첫 번째 하중재하전의 값과 거의 같게 되었다. 예민비가 큰 흙의 경우는 최대전단계수의 감소가 예민비가 작은 흙의 경우보다 더 클 것으로 판단된다.

표 2.13 전단시험동안 최대전단계수의 비교

시험조건	유효구속응력(kPa)	시간(min)	최대전단계수(MPa)	감쇠비(%)
1차 압밀	72	0	28.1	4.0
2차 압밀	190	25	41.8	6.6
	190	35	44.0	4.7
	190	80	46.4	3.7
	190	180	48.3	3.0
	190	1160	54.4	2.3
1차 전단 시험				
재압밀	95	0	23.4	6.4
	189	100	42.8	3.3
	190	1270	50.7	2.7
	190	1550	51.0	2.3
2차 전단 시험				
재압밀	122	0	31.8	5.0
	190	425	51.5	2.5
	190	3305	54.5	2.5

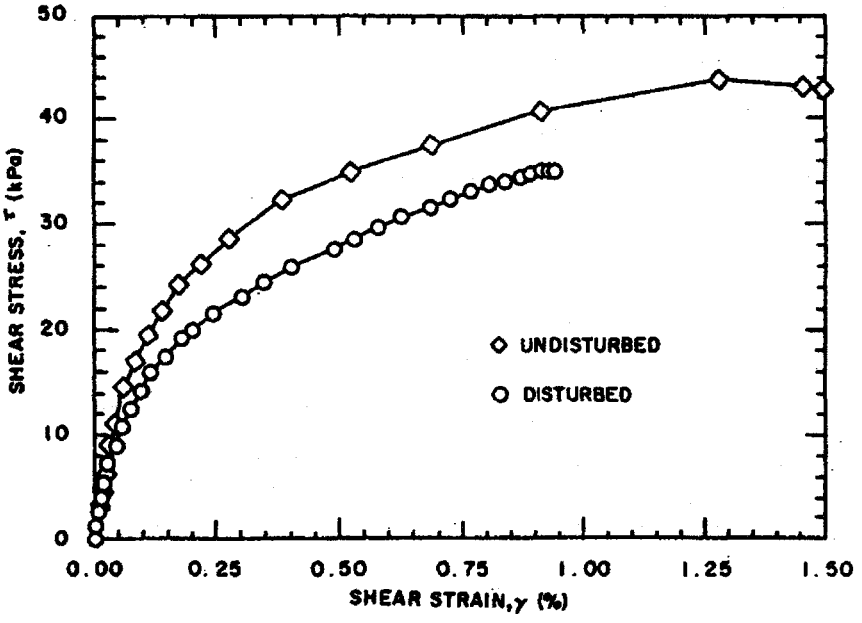


그림 2.89 불교란 시료와 교란 시료의 전단변형률에 따른 전단응력의 비교

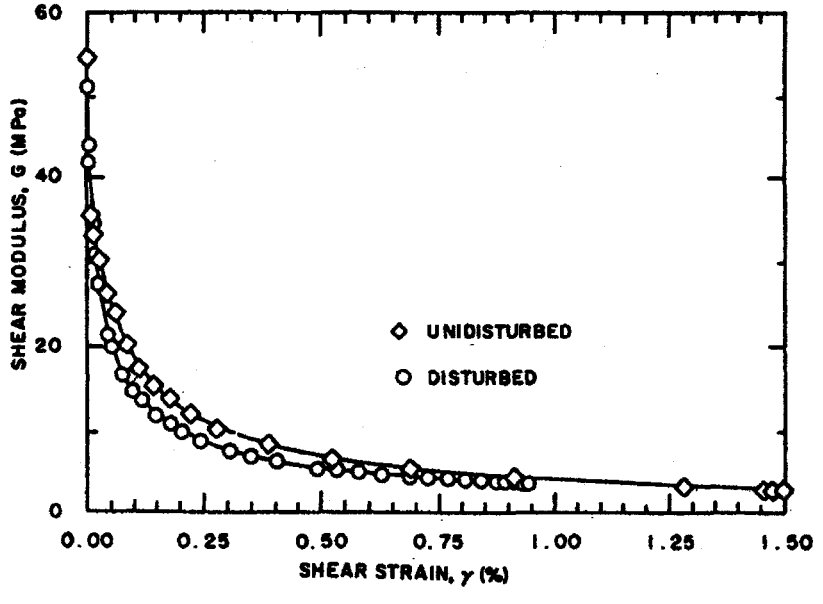


그림 2.90 불교란 시료와 교란 시료의 전단변형율에 따른 전단계수의 비교

그림 2.89에 두 시험에서 얻은 응력-변형 곡선을 나타내었으며, 그림 2.90에는 전단변형율에 대한 할선전단계수의 관계를 나타내었다. 그림 2.89과 그림 2.90에서 볼 수 있듯이 불교란 시료의 비배수 전단강도와 전단계수가 교란시료의 비배수 전단강도와

전단계수보다 큼을 알 수 있다. 즉, 시료의 교란 때문에 비배수 전단강도와 전단계수가 두 번째 시험동안에 더 작아졌다. 또한, 전단변형율이 0.25%일 때 할선전단계수는 초기 할선전단계수에 단지 20%에 불과하였다. 이러한 사실로부터 할선전단계수는 매우 작은 전단변형율의 변화에도 민감한 반응을 보임을 알 수가 있다.

(6) 실내시험과 현장시험 결과 비교

Onena 등(1984)은 완신세기(Holocene Era)의 연약한 층과 홍적세기(Pleistocene Era)의 단단한 층에서 실내시험과 현장시험으로 얻어진 최대전단계수를 비교하여 그림 2.91에 나타내었다. 실내시험은 신월 튜브를 이용하여 채취된 불교란 시료에 대하여 공진주 시험을 수행하였으며, 현장시험은 다운홀 방법(PS logging method)으로 하였다.

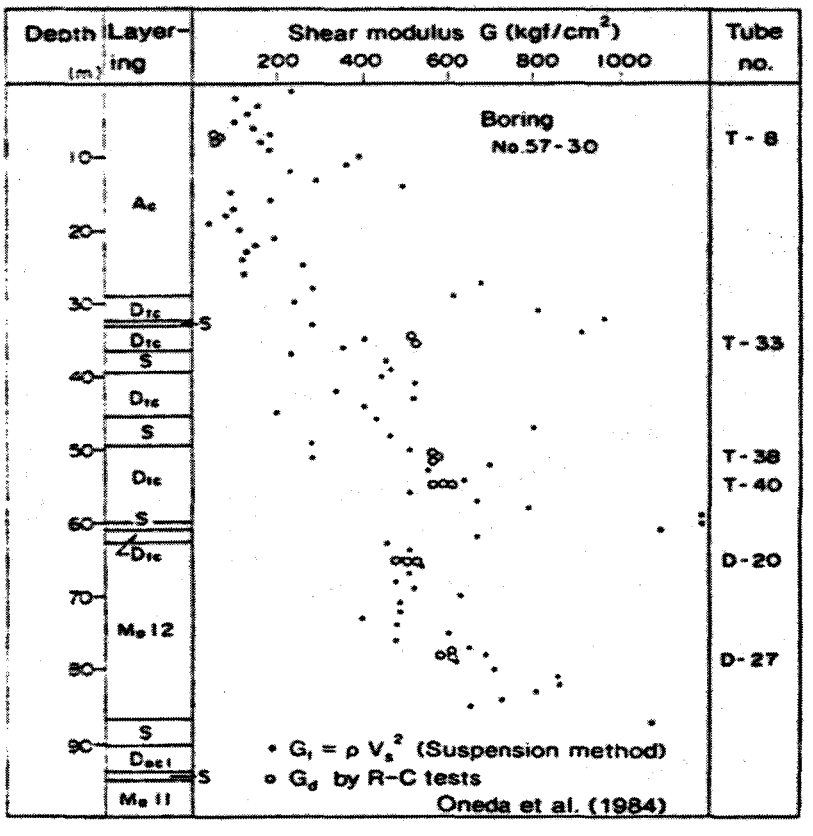


그림 2.91 다운홀시험과 공진주시험으로 얻은 전단계수 비교

그 결과, 연약한 층에서는 실내시험으로 얻어진 최대전단계수가 현장시험으로 얻어진 최대전단계수보다 상당히 작으나, 단단한 층의 경우는 그 두 값이 거의 같게 나타났다.

시료의 교란정도는 시료채취와 취급동안 시료에 발생하는 변형정도에 매우 밀접한 관계를 가진다. 즉, 시료의 교란 정도는 시료채취와 취급동안에 발생하는 전단응력의 비율에 따라 좌우된다.

그림 2.91로부터 알 수 있듯이 시료의 교란 효과는 사질토와 점성토에서 반대의 현상을 나타낸다. 즉, 샘플링으로 인한 교란 효과는 단단한 점성토보다 단단한 사질토에서 더 크게 나타난다. 이러한 현상은 사질토와 점성토의 투수성 차이로 판단되고 있다. 즉, 점성토의 경우 상대적으로 낮은 투수계수를 가지므로 현장상태의 유효응력, 다시 말하면 현장에서의 특성을 많이 유지하지만, 사질토의 경우는 투수계수가 크므로 현장의 특성을 많이 잃는다. 비록 단단한 점성토 지반에서 시료를 채취하는 것이 더 어렵지만 시료의 교란효과가 더 적게 일어나는 이유로 설명할 수 있다. 사질토의 경우는 샘플링으로 인해 시료가 쉽게 교란이 되며, 단단한 사질토와 느슨한 사질토는 샘플링으로 인하여 체적변화가 반대로 일어나므로 반대의 교란 효과가 일어난다.

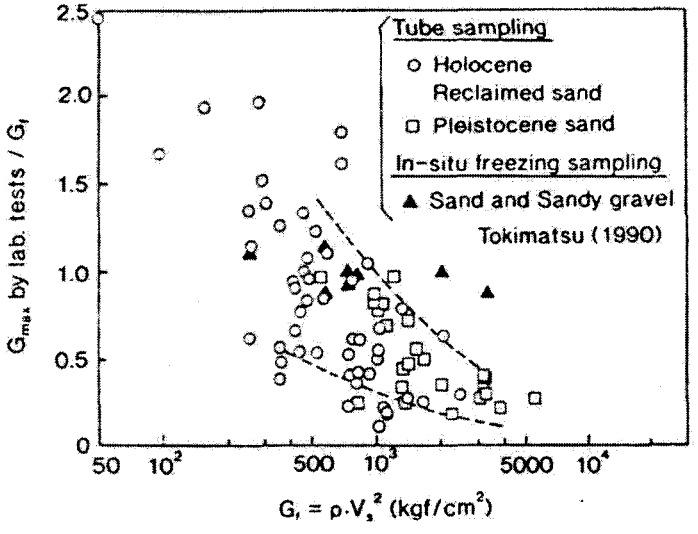


그림 2.92 채취방법에 따른 실내시험과 현장시험의 결과 비교

Tokimatsu(1990)도 점착력이 없는 흙에 대하여 실내시험과 현장시험으로 얻은 전단계수의 결과를 비교하였다. 그림 2.92와 같이 동결공법과 튜브샘플링 방법으로 채

취한 시료를 가지고 반복삼축시험을 수행하여 얻은 최대전단계수를 현장시험으로 얻은 최대전단계수로 정규화하여 나타내었다.

그 결과, 동결시료의 최대전단계수는 현장시험으로 구한 최대전단계수와 거의 비슷한 같을 나타내지만, 튜브시료의 경우는 현장시험으로 구한 값과 상당한 차이가 발생함을 알 수가 있다. 그러나, 여기서 주목할 만한 것은 완신세기의 연약한 사질토는 튜브샘플링 중 발생한 교란으로 인해 밀도가 증가하여 현장의 값보다 큰 값을 가질 수도 있다는 것이다.

5. 국내 지반조사 기술의 문제점

국내에서 지반조사의 연구가 본격적으로 시작된 것은 불과 수 년 전이며, 다른 선진국에 비하여 지반조사에 대한 연구가 활성화되어 있지 못한 실정이다. 국내에서 지반조사를 수행하는 업체들은 대부분 소규모의 영세 업체로서 지반조사에 관한 전문적인 기술을 가지고 있지 못한 업체가 다수 있으며, 장비 또한 굴착에 필요한 기본적인 굴착기와 air compressor 정도만 구비하고 있는 업체도 수많은 실정이다. 그렇지만, 몇몇 기업에서는 현장시험으로서 Standard Penetration Test(SPT), Cone Penetration Test(CPT), Pressuremeter Test(PMT), Field Vane Test(FV), Dilatometer Test(DMT) 등을 수행하여 비교적 수준 높은 지반조사 결과를 도출하고 있다.

정확한 통계는 없지만 아직도 국내 지반조사의 대부분은 시추와 병행되는 SPT에 90%이상 의존하여 설계정수를 도출하고 있는 것으로 추정되며, 특히 초연약지반에서도 SPT를 사용하기도 한다. SPT는 시험에 사용하는 장비 및 기술자의 숙련도에 따라 상당한 차이가 나타난다는 것이 수많은 연구를 통하여 증명되었다(Schmertmann, Kovacs 등). 또한 Wroth(1984)가 Campanella와 Robertson(1983)이 현장시험방법별 지반정수의 신뢰성을 평가하여 제시한 결과를 재인용한 표 2.14을 보아도 알 수 있듯이 SPT로부터 구해지는 지반의 정수보다 간극수압을 측정하는 콘관입시험(CPTu)이나 자가 천공형 프레셔미터(SB-PMT)로 구해지는 지반의 정수들이 더욱 더 정확하며 보다 많은 정보를 얻을 수 있음을 알 수가 있다. 따라서, SPT 결과를 설계에 직접 이용하는 것은 구조물의 안전성에 대한 신뢰성을 떨어뜨릴 가능성을 내포하고 있다. 이러한 점을 감안 외국에서는 SPT외에 다른 현장시험인 CPT, PMT, DMT 등의 사용이 점차 증가하고 있다.

CPT는 1932년 네덜란드의 P. Barensten가 최초의 네델란드식 콘관입시험(Dutch cone penetration test)을 수행한 이후 꾸준한 장비의 개선과 해석법의 개발로 이미 유럽 등의 선진국에서는 가장 보편적으로 사용되고 있는 시험법으로 정착되고 있다. 특히 1970년대 초반 간극수압의 측정이 가능한 피에조콘(piezcone)의 개발 이후 그 적용 범위가 급격히 확산되고 시험결과의 신뢰성도 크게 제고되어 현재 콘관입시험 결과는 거의 모든 토질 정수 해석에 적용되고 있다. 국내에 CPT가 처음으로 도입된

것은 1963년이며, 단지 연구 목적으로만 사용되다가 본격적으로 현장에 도입되기 시작한 것은 1990년대에 들어서이며 현재 그 적용범위가 확장되고 있는 추세이나 전체적인 장비 보유현황과 응용실적에 있어서는 아직 선진국과 격차가 크다고 할 수 있다. CPT의 장점은 콘 저항(qc), 슬리브 마찰(sleeve friction, fs)과 같은 변수를 연속적으로 빠르게 측정하여 지층을 연속적으로 묘사할 수 있으며, 시험방법과 도구를 쉽게 표준화할 수 있고, 시험방법이 간단하고 정확한 지반상수를 얻을 수 있다는 것이다. 하지만 실제 콘관입시험으로부터 비배수강도를 직접 측정할 수 있는 것은 아니며, 따라서 이러한 목적에서는 콘관입시험이 그다지 신뢰성이 높지 못함에도 불구하고 콘관입시험이 정교한 고가의 시험장비이기 때문에 매우 신뢰성이 높은 현장시험법으로 잘못 인식하여 최근까지 국내에서는 연약지반에서의 콘관입시험을 주로 강도특성, 즉 점성토의 비배수강도를 파악하는데 주력하고 있다. 또한 외국에서는 PMT 및 DMT에 대한 연구도 상당히 발전하여 구조물 설계에 직접 사용하고 있으며, 불교란 시료를 채취하는 기술도 눈부시게 발전하고 있지만 국내에서는 아직도 그에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

표 2.14 현장시험방법별 지반정수의 신뢰성 비교(Wroth, 1984)

	흙의 분류	지층 구성	상대 밀도	마찰각	비배수 전단 강도	간극 수압	응력 이력	탄성 계수	압축성	입밀 계수	투수 계수	응력-변형률 곡선	액상화 평가
CPT_u	A	A	A	B	B	A	A	B	B	A	B	B	A
SB-PMT	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A
DMT	B	A	B	C	B	-	B	B	C	-	-	C	B
FVT	B	C	-	-	A	-	B	-	-	-	-	-	-
SPT	B	B	B	C	C	-	-	-	C	-	-	-	A

(여기서, A : 우수, B : 보통, C : 불량)

제 2 절 대구경 샘플러 관련 연구

1. 대구경 샘플러의 개발 배경

La Rochelle와 Lefebvre(1970)는 두 가지 다른 방법 즉, 블록 샘플과 54mm NGI 피스톤 샘플러로 채취된 Saint Lawrence 점토의 물리적 특성을 비교하였다. 그 결과 튜브 샘플의 경우 상당한 교란이 발생하였다. 샘플러에 따른 겉보기 선행압밀응력의 차이는 그다지 크지 않은 반면, 일축압축시험을 수행하여 측정된 비배수 전단강도와 탄성계수는 튜브샘플의 경우가 블록 샘플보다 모두 50%정도 작게 측정되었다. 또한 튜브 샘플의 경우 압밀 배수 삼축압축시험과 간극 수압을 측정하는 압밀 비배수 삼축압축시험으로 얻어진 파괴포락선은 낮은 응력 범위에서 상당히 작게 측정되었다.

또한, Berre 등(1969)은 새로운 95mm NGI 샘플러와 일반적인 54mm NGI 샘플러를 이용하여 노르웨이의 해성 점토를 채취하였다. 압밀 시험을 수행한 결과 직경에 따른 선행압밀응력의 차이는 크지 않았으나, 시험결과의 분산은 54mm 샘플이 훨씬 크게 나타났다.

Bozozuk(1970)는 54mm NGI 샘플러와 124mm Osterberg 샘플러를 이용하여 Ottawa 지역의 해성점토를 채취하여 몇 가지 특성을 비교하였다. 그 결과 124mm 샘플에서 구한 평균 선행압밀응력이 54mm 샘플에서 구한 평균 선행압밀응력보다 약 40%정도 크게 얻어졌다. 반면, 현장의 응력으로 이방압밀을 시킨 후 비배수 삼축압축시험을 수행한 결과 124mm 샘플의 경우 파괴 변형이 더 작게 나타나지만 비배수전단강도는 거의 같았다.

이러한 연구로부터 직경이 큰 샘플러일수록 양질의 시료를 얻을 수 있다는 것을 알 수가 있다. 그러나, 직경이 큰 튜브 샘플러일지라도 블록 샘플러에 비교하면 상당히 교란된다고 볼 수 있다. Eden(1970)은 Swedish foil, NGI 54mm, Swedish 50mm, 124mm Osterberg와 블록 샘플을 이용하여 Ottawa 지역의 과압밀된 예민 점토를 채취하였다. 그 결과 압밀시험(oedometer test)으로 구한 선행압밀응력과 일축압축시험으로 구한 강도는 직경이 큰 튜브 샘플러로 얻은 시료일지라도 그 값이 크게 나타나지 않았다. 또한, 튜브 샘플러에서 얻은 시료의 일축압축강도는 블록 샘플러로 얻은 시료의 일축압축강도보다 약 50%정도 작게 나타났고, 선행압밀응력도 블록 샘플과

비교하면 튜브 샘플이 약 25% 정도 작게 나타났다.

또한, Raymond 등(1971)은 블록 샘플, Shelby tube, Swedish 50mm와 124mm Osterberg 샘플러를 이용하여 채취한 Ottawa 점토를 비교하였다. 그 결과를 그림 2.93에 나타내었다. 그림 2.93을 보면 알 수 있듯이 블록 샘플러로 채취한 시료의 일축압축강도가 가장 크게 나타났다. 이것은 튜브 샘플링이 부적절하며, 단지 블록 샘플로 얻어지는 값만이 적합함을 보여주고 있다.

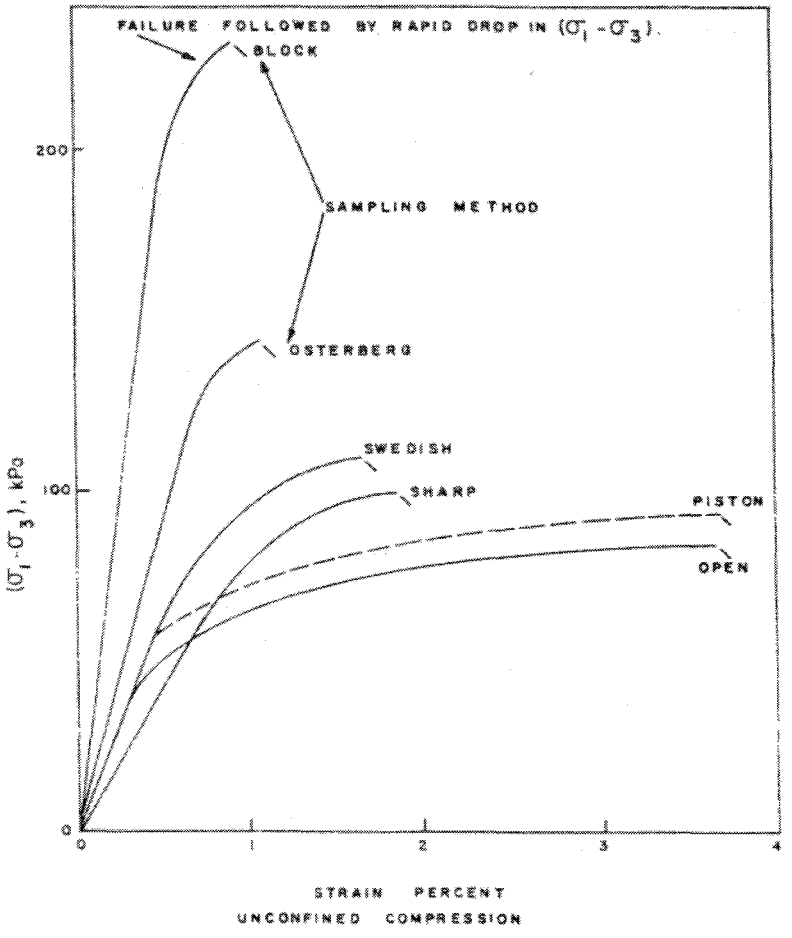


그림 2.93 여러 가지 샘플러로 채취된 시료의 응력-변형 곡선

이상의 연구 결과를 종합하면 가장 좋은 실험 결과는 블록 샘플로 채취하였을 때 얻어짐을 알 수 있다. 블록 샘플은 일반적으로 트렌치(trench)의 바닥에서 얻어지며, 절단기를 이용하여 블록으로 쉽게 성형할 수 있다. 이러한 방법은 튜브 샘플링 방법과 다르며 지반에 관입하기 위한 기구와 튜브가 필요 없다. 그러므로, 블록 샘플링은

변형과 파괴영역을 최소화한다.

그러나, 블록 샘플링은 굴착 깊이가 깊어짐에 따라 보호벽을 설치하기 위해서는 많은 비용이 들고 어렵기 때문에 깊이가 약 3~4m의 얕은 깊이로 제한된다. 많은 비용과 장비를 동원할 수 있는 큰 공사의 경우는 깊은 곳까지 굴착하고 보호벽을 설치할 수 있지만, 일반적인 경우 트렌치의 깊이는 히빙에 저항할 수 있는 점토의 능력으로 제한된다. 예를 들어 15kPa의 비배수전단강도를 갖는 점토의 경우, 히빙에 대한 안전계수를 2.0으로 하면 트렌치의 깊이를 약 4m까지 할 수 있다.

2. Sherbrooke 샘플러 개발

(a) Sherbrooke 샘플러의 개발 배경

일반적으로 매우 과압밀된 시료에서만 깊은 깊이에서 블록 샘플을 채취하는 것이 가능하며, 정규압밀 혹은 약간 과압밀된 점성토에서는 베이스 히브가 발생하기 때문에 수m 이상의 깊이에서는 시료채취가 불가능하다. Lefebvre and Poulin(1979)은 비배수 전단강도를 기준으로 안전율을 2로 유지하였을 때, 한계 깊이가 4m라는 것을 계산한 바 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 1975년 캐나다의 Sherbrooke 대학에서는 지표면에서 블록 샘플을 채취할 수 있는 새로운 샘플러를 개발하였다(Lefebvre and Poulin, 1979)

직경이 약 25cm인 원통형 시료를 3개의 절단기를 이용하여 얻을 수 있으며, 지표면으로부터 각각의 절단기로 물과 벤토나이트 액이 공급되어 쉽게 절단하도록 도와준다. 블록을 절단하는 방법은 채취 시료가 사각형대신에 원통형으로 얻어진다는 것을 제외하면 일반적인 블록 샘플링의 경우와 매우 비슷하다.

각각의 절단기에 고정된 수평방향의 가로막(diaphragm)을 연 상태에서 약 35cm 높이의 원통형 시료를 채취한 후, 가로막을 연속적으로 회전시켜 시료를 절단한다. 가로막 안쪽 끝에 고정된 작은 절단기는 시료 아래로 가로막이 관입하도록 도와준다. 가로막을 닫아 시료를 지반으로부터 분리하고, 보링 홀 밖으로 시료를 들어올린다. 가로막이 닫혀 있기 때문에 시료가 샘플러 아래로 빠지는 것을 막아준다. 가로막은

핀으로 고정시켜 열린 상태로 유지되며, 이 핀은 지표면에서 쉽게 제거할 수 있다. 핀이 제거되면 가로막은 스프링에 의해 닫혀진다. 샘플러를 이용한 시추작업의 개략도를 그림 2.94에 나타내었으며, 샘플러의 작동 사진을 그림 2.95에 나타내었다.

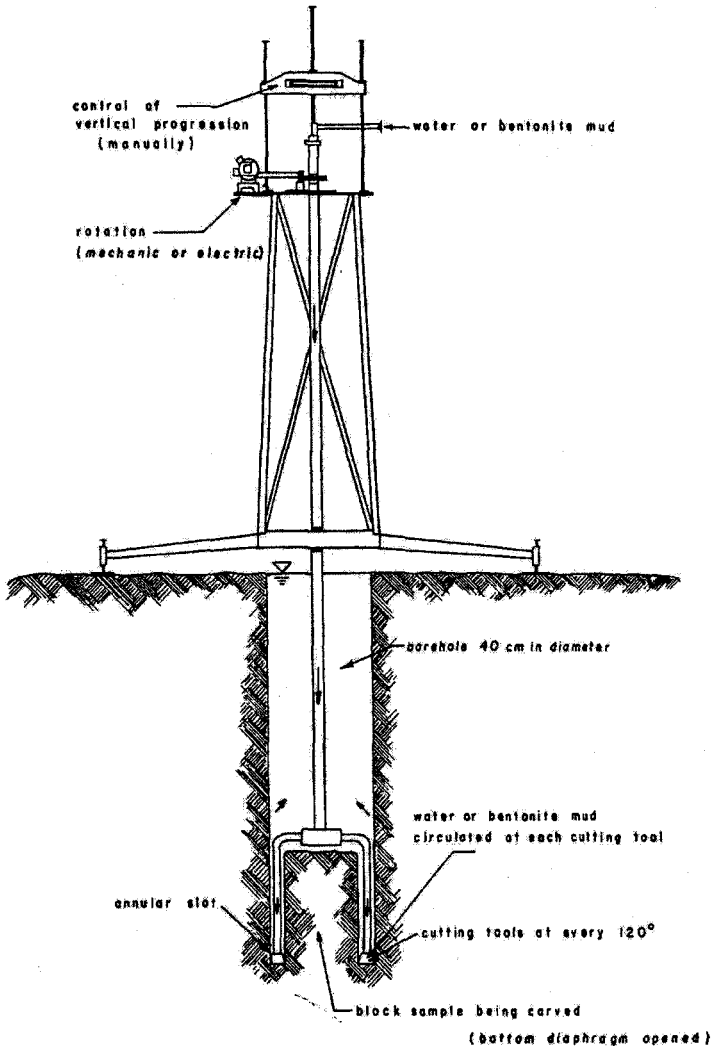


그림 2.94 Sherbrooke 샘플러를 이용한 시료 채취작업의 개략도

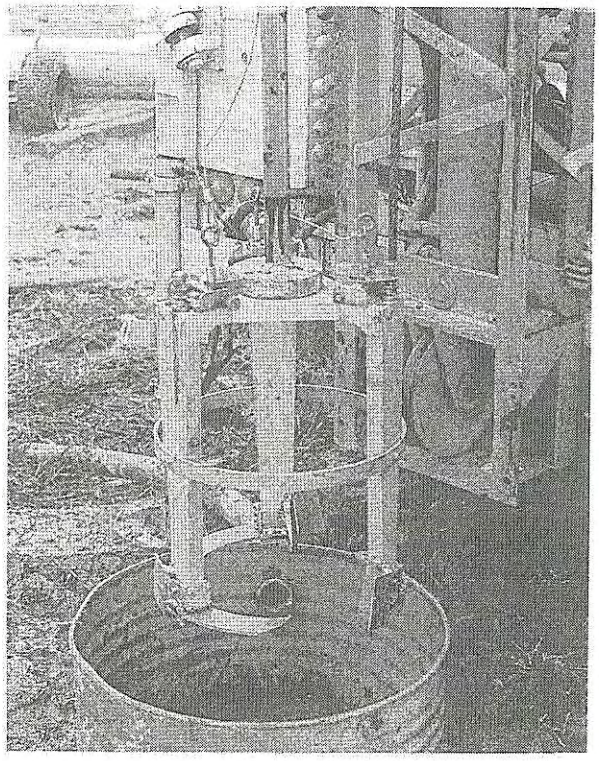


그림 2.95 Sherbrooke 샘플러의 작동 모습

시료를 지표면으로 들어 올린 후에 특별한 받침대 위에 놓고 다듬은 다음, 면 조각을 섞은 파라핀으로 코팅한다. 채취 시료는 특별한 보관상자에 젖은 톱밥 혹은 이끼와 함께 포장한다. 이렇게 포장한 시료는 단단한 튜브로 구속된 시료보다 충격이나 진동에 덜 영향을 받는다.

블록 샘플러는 직경이 약 40cm인 보링 홀이 필요하다. 지반 굴착은 케이싱을 사용하지 않고 물 또는 벤토나이트 액을 채워서 하던지 아니면, 기계적인 오거(auger)를 이용해서 하던지 어떤 장비와 방법을 사용하여도 관계가 없다.

샘플러는 분당 5회전을 한다. 관입속도는 점토에 따라 다르고, 시료 주위의 고리형 홈을 자르는데는 보통 25분이 걸린다. 시료의 하단을 가로막을 이용하여 자르는데는 5분이 추가적으로 걸린다. 채취시료는 매우 느린 속도로 지표면으로 들어올리며, 시료의 아래에 물을 순환시켜 인장력을 제거한다.

(b) Sherbrooke 샘플러의 현장 적용

1976년 캐나다 퀘벡(Quebec)의 6개 다른 현장에서 블록 샘플러를 이용하여 직경이 25cm이고 높이가 35cm인 시료를 20개 이상 채취하였다. 채취된 시료는 소성지수가 5~40의 범위로 연약 점토에 해당된다. 연약 점토층은 2~3m 두께의 사질토 층 혹은 풍화토 층으로 덮여있다. 대부분의 채취깊이는 6~9m 사이이며, 최대깊이는 9.5m이다.

여러 가지 실내실험을 통하여 블록 샘플러로 채취한 시료의 거동이 일반적인 블록 샘플로 채취한 시료의 거동과 같게 나타남을 알 수가 있었다. 일축압축시험의 경우 파괴 변형이 1% 혹은 그 보다 작게 나타났으며, 비배수 전단강도는 현장 베인으로 측정한 값보다 2배정도 크게 측정되었다.

1976년 봄 Nicolet(Quebec)에서 블록 샘플러를 이용하여 깊이 5m에서 시료를 채취하였다. 이 현장은 1974년에 4.5m 깊이에 있는 시료를 일반적인 블록 샘플 방법으로 채취한 곳에서 불과 몇 m밖에 떨어지지 않았다.

시료를 채취한 같은 높이에서 현장 베인 시험을 수행한 결과 강도가 약 25kPa 이었다. 점토의 소성지수는 40, 액성한계는 65%, 자연함수비는 약 70%이며 점토의 함유량은 75%이었다. 1974년에 일축압축시험을 수행했을 때와 같이 직경이 38mm인 공시체를 이용하여 일축압축시험을 수행하였다. 그 실험 결과들을 블록 샘플과 함께 표 2.15에 나타내었다. 일반적인 블록 샘플을 가지고 4번의 시험을 한 결과, 2번의 시험결과는 높은 압축강도를 나타내었으며, 그 값이 120kPa로 같았다. 이 값은 불교란 점토의 점착력이라고 생각된다. 다른 2번의 시험은 이전의 시험과 같은 변형계수를 나타내었지만 매우 낮은 강도에서 파괴되었다. 이것은 약한 면을 따라 파괴가 일어났거나, 응력 제거에 따른 균열발생 그리고, 트렌치 굴착동안에 높은 전단강도가 바닥에 작용했기 때문으로 볼 수 있다. 블록 샘플링동안에 굴착된 트렌치의 바닥에 미세균열이 발생하는 것은 다른 현장에서도 나타났다.

표 2.15 일반적인 블록 샘플링 방법과 Sherbrooke 샘플러로부터 얻은 시료에 대한 일축압축시험 결과의 비교(Nicolet, Quebec)

TestNo.	Depth (m)	w_n (1) (%)	$(P/A)_f$ (2) (kPa)	ε_f (3) (%)	E_u (4)
Conventional block					
N-74-U-10	4.5	-	120	0.9	170
N-74-U-12	4.5	-	121	1.15	129
N-74-U-11	4.5	-	71	0.65	120
N-74-U-13	4.5	-	49	0.65	133
Sampler block, exterior zone					
N-76-U-21	5.0	70.6	126	0.95	180
N-76-U-22	5.0	71.8	135	1.1	152
N-76-U-23	5.0	70.4	115	0.96	156
N-76-U-24	5.0	68.2	123	0.96	154
Sampler block, interior zone					
N-76-U-25	5.0	69.8	113	0.83	143
N-76-U-26	5.0	69.7	99	0.83	139
N-76-U-27	5.0	71.3	127	0.96	167

여기서, (1): 자연 함수비

(2): 파괴시 압축강도

(3): 파괴시 축 변형

(4): 압축계수

1976년에는 샘플링 작업동안 보링 홀을 물로 가득 채우고 작업을 하였다. 이러한 작업 방법을 통하여 응력완화를 단지 작은 범위의 트렌치 바닥에서 일어나게 할 수 있었다. Sherbrooke 샘플러로 채취한 블록 샘플을 가지고 압축시험을 7번 수행하였다. 단지 하나의 시험에서 압축강도가 99kPa로 얻어진 것만 제외하면 113~135kPa 사이의 압축강도 범위를 갖으며, 평균 압축강도는 120kPa이다. 이것은 일반적인 블록 샘플에서 구한 압축강도 값과 같다. 원래의 응력-변형 곡선에서 최대 값의 약 75%로부터 구한 변형계수는 모두 일정하고, 평균은 일반적인 블록 샘플보다 블록 샘플러로 구한 것이 더 컸다. 시료의 강도는 블록 샘플러로 채취한 샘플의 바깥부분보다 가운데부분이 평균적으로 더 작았다. 이러한 채취 시료 내에서의 작은 차이는 샘플링에

의한 교란보다 자연적인 차이 혹은 시험방법에 따른 것이라고 생각된다.

본 연구에서 사용한 실험장비는 일반적인 블록 샘플링 방법으로 채취된 시료를 가지고 실험한 장비를 사용하였다. 샘플링동안에 응력제거를 줄이기 위하여 보링 홀에 물 또는 벤토나이트 액을 채웠다. 이러한 방법으로 일반적인 블록 샘플링 방법으로 채취한 시료보다 질(質)이 같거나 더 좋은 시료를 얻을 수 있었다.

Sherbrooke 샘플러와 채취방법은 트렌치에서 일반적인 블록 샘플링 방법으로 시료를 채취하는 것 대신에 지표면에서 블록 샘플을 채취하기 위해서 개발된 것이다. 작업시간은 평균적으로 기술자가 3명의 보조원과 함께 샘플러를 가지고 블록 샘플을 얻고 포장하는데 3시간이 소요된다. 본 샘플러는 옥석이 포함된 지층에서는 작업하기가 힘든 단점이 있다.

3. Laval Sampler의 개발 (La Rochelle et al. 1981)

(a) 튜브 샘플러를 개발하기 위한 설계 조건

샘플링 튜브를 지반에 관입하면 체적변화가 발생하여 절단부 끝에 위치한 점토에 변형이 발생한다. 이것은 La Rochelle와 Lefebvre(1970)가 블록 샘플을 이용하여 증명하였다. 즉, 씬월 튜브 샘플러의 관입으로 발생하는 횡방향 변형은 체적변화를 일으키며, 이때 발생한 변형의 크기는 점토를 파괴시키는데 필요한 변형의 6배 정도로 매우 크다. 그러므로, 이 변위를 최소화하기 위해서는 얇은 튜브를 사용하여 면적비를 작게 하여야 한다는 사실을 알 수가 있다.

면적비는 튜브 속에 공간이 존재하면 증가되며, 이러한 공간은 튜브내의 시료가 횡방향으로 팽창을 하게 만든다. 따라서, 튜브의 안쪽 방향으로 커다란 체적변형이 발생하여 절단부 끝에 있는 시료가 빠져나가게 된다. 이러한 현상은 샘플링 과정에서 발생하는 주요 교란 원인의 하나로 튜브내의 공간을 제거함으로써 해결할 수 있다. 튜브와 시료사이의 발생하는 마찰을 제거하기 위해서 튜브 속에 여유 공간을 만드나, 연약 점토에서는 이러한 마찰이 크지 않을 것으로 판단된다. 또한 Kallstenius(1958)이 제안한 것과 같이 관입하는 절단부 끝의 각도를 작게 하면, 체적변화는 튜브의 바깥쪽으로 발생을 하고 튜브의 두께 영향을 최소화할 수 있다. 그러나, 튜브 내의 여유

공간을 제거하면 튜브가 완전한 원통형이 되지 않는다는 문제점이 있다.

(b) 채취된 시료의 위치에 따른 교란 정도

La Rochelle(1973)는 튜브의 중간 부분에 위치한 시료의 질이 끝 부분에 위치한 시료의 질보다 좋다는 것을 연구를 통하여 보여 주었다. 튜브의 상부는 지반으로 관입하는 피스톤 작용이나 튜브의 추출동안에 작용하는 인장력으로 교란이 발생하며, 하부는 튜브의 추출 시 발생하는 인장력으로 종종 교란이 발생한다.

이러한 연구로부터 튜브의 모양은 내부에 여유 공간이 없어야 하고 직경이 클수록 교란이 적다는 결론을 얻을 수 있다. 그러나 이것을 현실화하기 위해서는 경제성뿐만 아니라 기술적인 제한을 극복해야한다. 왜냐하면 피스톤 샘플러의 직경이 커질수록 인장력과 피스톤 효과가 커지기 때문이다. 양질의 시료를 얻기 위해서는 직경이 증가함에 따라 튜브의 길이도 증가되어야한다. 만약 그렇지 않다면 상부와 하부의 교란 범위가 시료 전체 길이에 걸쳐 영향을 미치게 되어 비용이 증가한 것에 비하여 양질의 시료를 조금밖에 얻지 못해 효율성이 떨어지기 때문이다.

(c) Laval Sampler의 개발

이상의 연구로부터 연약 점토를 채취하기 위한 Laval 대구경 샘플러 설계 시 다음과 같은 점을 고려하였다.

① 튜브 내부의 공간은 제거되어야 한다.
② 허용오차 범위 안에서 튜브 내부는 원통형을 정확하게 유지하여야 한다.
③ 절단부 끝날의 각도는 체적변형이 튜브 바깥쪽으로 일어날 수 있도록 날카로워야 한다.
④ 피스톤 효과가 제거되어야 한다.
⑤ 샘플링하는 전 과정에 걸쳐 흡입력 혹은 부(負)의 응력이 발생하지 않아야 한다.
⑥ 직경이 충분히 커서 불교란 시료 주위의 교란된 영역이 상대적으로 작아야 한다.

샘플링 동안에 인장력 또는 부의 응력이 발생하지 않게 하기 위해서는 샘플링 튜브의 주위를 오버 코아링(overcoring) 하고, 보링 홀을 항상 벤토나이트 액으로 채워야한다.

그림 2.96에 제작된 직경 200mm의 Laval 샘플러를 나타내었다.

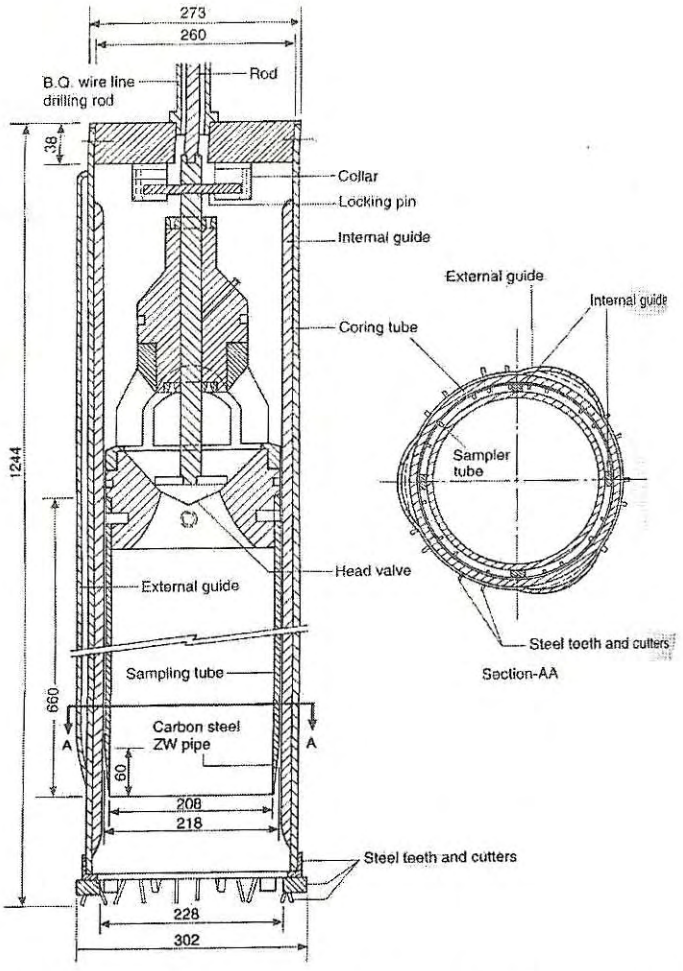


그림 2.96 직경 200mm 라발 샘플러(La Rochelle et al., 1981)

(1) 샘플링 튜브(sampling tube)

직경이 38mm인 삼축시험용 공시체를 수평방향으로 7개까지 만들 수 있게 하기 위하여 샘플링 튜브의 안지름을 약 200mm로 하였다. 튜브의 재질은 탄소강인 ZW-1035이며, 외경은 218mm이다. 또한 내부에 공간을 만들지 않았으며, 원통형을

유지하기 위하여 튜브의 내부를 허용오차 ±0.03mm가 되도록 내경을 208mm로 만들었다. 따라서, 면적비는 10%이다. 튜브는 두께가 약 5mm로 단단하며, 절단부 끝의 각도는 약 5°로 날카롭다.

(2) 샘플러 헤드(sampler head)

샘플링 튜브는 샘플러 헤드에 4개의 나사로 고정되어 있다. 샘플러 헤드의 재질은 알루미늄이고 가운데 부분에 직경이 75mm인 커다란 구멍이 있다. 여기에 횡방향 구멍이 연결되어 있어 샘플링 튜브와 코어링 튜브가 흙 속에 관입될 때 슬러리가 배출되도록 한다.

(3) 코아링 튜브(coring tube)

외경이 273mm인 코아링 튜브는 알루미늄으로 만들었고, B.Q. wire drill rod로 지표면에서 작업을 할 수 있다. 평평한 두부에는 칼라(collar)가 있어 샘플링 튜브를 고정시킬 수 있다. 하단부에는 톱니가 달려 있다. 길이 방향으로 내부와 외부에 보조장치가 있어 코아링 작업시 샘플링 튜브가 중심에 위치하도록 도와준다.

(d) Laval 샘플러를 이용한 일반적인 시료 채취 작업방법

보링 홀은 샘플링을 하기 전에 벤토나이트 슬러리로 채워 벽이 무너지지 않고 지탱하도록 한다. 상부층에 사질토층이 존재하거나 슬러리로 사질토층의 공벽을 유지하지 못하는 경우를 제외하곤 케이싱을 사용하지 않는다.

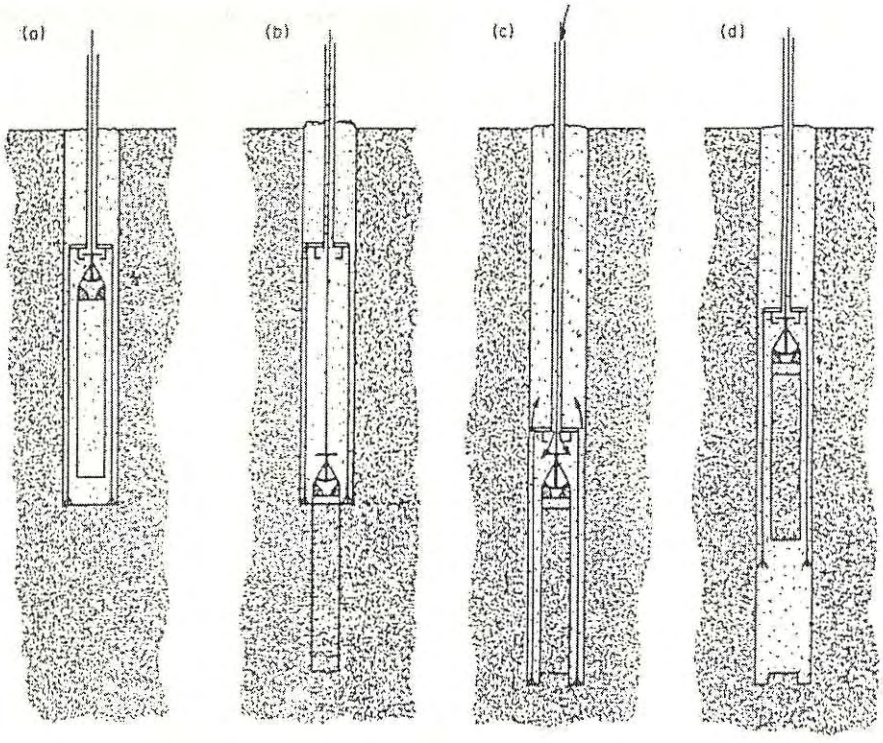


그림 2.97 Laval 샘플러를 이용한 시료 채취 과정(La Rochelle et al., 1981)

샘플러를 보링 홀 안으로 집어넣는다. 이 때 샘플러는 그림 2.97(a)과 같이 코아링 튜브 안쪽 고리에 고정되어 있으며, 두부 밸브는 슬러리가 샘플러를 통하여 배출될 수 있도록 열어 놓는다. 코아링 튜브의 하단이 보링 홀의 바닥에 닿게 되면 코아링 튜브를 지표면으로부터 고정시키고, 가운데 로드를 약간 회전시켜 고리에 고정된 샘플러를 풀어준다. 그런 다음 샘플러를 흙 속에 연속적으로 관입시키면 슬러리는 두부 밸브를 통하여 샘플러 밖으로 유출되고 시료가 채취된다. 이때 시료의 상부에 압력이 작용하지 않게 하기 위하여 샘플러의 두부가 시료의 상부 약 50mm 정도 위에 위치하게 되면 샘플러의 관입을 멈춘다(그림 2.97(b) 참조). 그런 다음 두부 밸브를 닫고 코아링 튜브를 회전시켜 코아링을 한다. 또한 동시에 벤토나이트 슬러리를 분사한다. 그러면 슬러리는 B.Q. wire line drill rod를 통하여 샘플링과 코아링 튜브 사이로 흐르게 된다(그림 2.97(c) 참조). 슬러리를 분사하는 이유는 재성형 링(remolding ring)의 절단기로 교란된 흙을 세척하기 위해서 분사하는 것이다. 코아링이 샘플러 하단 약 20mm 정도 아래에 도달하면 코아링을 멈추고 샘플러를 90° 회전시켜 코아링 튜브의 안쪽 고리에 고정시킨다. 그런 후 천천히 지표면으로 뽑아 올린다(그림 2.97(d)

참조).

시료는 샘플링 후 현장에서 즉시 추출하여 수행할 시험의 종류에 따라 130mm 혹은 200mm의 높이로 자른다. 이렇게 잘라낸 조각은 왁스칠이 된 합판 위에 놓고 Saran paper, 파라핀과 바셀린 혼합물로 포장한 후 즉시 운반하여 보관한다.

(e) Laval Sampler의 현장 적용

새로운 대구경 샘플러의 적용성을 알아보기 위하여 이전에 블록 샘플러로 시료를 채취한 적이 있는 Yamaska의 Saint-Louis 현장에서 시료를 채취하였다. 블록 샘플은 1968년에 작은 분화구(crater)의 중심부분 아래를 굴착하여 채취한 바 있다. 그림 2.98에 Laval 샘플러를 이용하여 현장에서 시료를 채취한 모습이 나타나 있다.

Laval 샘플러가 이 현장에서 사용된 것은 1975년이다. 그러므로, 분화구의 바닥은 7년 이상 하중이 제거되었기 때문에 Laval 샘플러로 채취한 점토의 특성이 블록 샘플과 비슷하다고 생각할 수 있다. 또한, Laval 샘플은 강둑에서 블록 샘플과 대체로 같은 거리만큼 떨어진 지점의 같은 심도에서 채취하였다. 그러나, 블록 샘플러와 Laval 샘플러로 채취한 시료의 시험 결과 약간의 차이가 발생하였는데, 그 이유로는 두 샘플러로 채취한 지점의 거리가 23m 떨어졌다는 점과 다른 응력 이력(stress history)을 받았기 때문으로 볼 수 있다.

대구경 샘플의 실내실험은 블록 샘플과 같은 장비와 방법으로 수행하여 대구경 샘플의 질을 평가하였다.



그림 2.98 라발(Laval) 샘플러

(1) 비배수 압축시험

블록 샘플과 Laval 샘플에 대한 일축압축시험과 비압밀 비배수 압축시험의 결과를 표 2.16에 나타내었다. 파괴시 강도 Cuf와 탄성계수를 나타내는 파괴시 변형 ε_f의 비교는 흥미롭다. 일축압축시험의 경우 Laval 샘플의 평균 강도는 60kPa로 블록 샘플의 65kPa보다 약간 작으며, 파괴시 변형도 1.03%로 블록 샘플의 1.06%보다 작다. 비압밀 비배수 압축시험을 실시한 결과 Laval 샘플의 강도와 Lefebvre(1970)가 블록 샘플을 가지고 측정한 강도가 거의 같았다. 그러나, 파괴시 변형은 일축압축시험에서처럼 Laval 샘플이 블록 샘플보다 약간 작았다.

표 2.16 비배수 압축 시험의 결과 비교

	Block(Lefebvre1970)	Laval
Unconfined compression tests		
No. of tests	9	7
C_{uf}(kPa)	65	60
ε_f(%)	1.06	1.03
Unconsolidation undrained compression tests		
No. of tests	11	6
C_{uf}(kPa)	61.5	62.75
ε_f(%)	1.07	1.02

이처럼 시험결과의 차이가 미소하고 블록 샘플과 Laval 샘플이 거의 같은 것을 고려하면 비배수 전단 강도와 탄성계수의 관점에서 Laval 샘플과 블록 샘플이 같다고 할 수 있다.

(2) 압밀 비배수 시험

La Rochelle와 Lefebvre(1971)은 압밀 비배수 시험을 통하여 얻은 응력-변형 곡선에서 유효응력의 파괴포락선은 샘플링의 교란에 매우 큰 영향을 받음을 보여 주었다.

이러한 사실은 54mm 표준 피스톤 튜브 샘플의 극한 강도와 블록 샘플의 강도와의 관계를 나타낸 그림 2.99를 보면 알 수가 있다. 블록 샘플과 튜브 샘플로 얻은 시료의 극한 강도를 비교하면 직경이 큰 튜브 샘플의 질을 평가할 수 있다는 것을 알 수 있다.

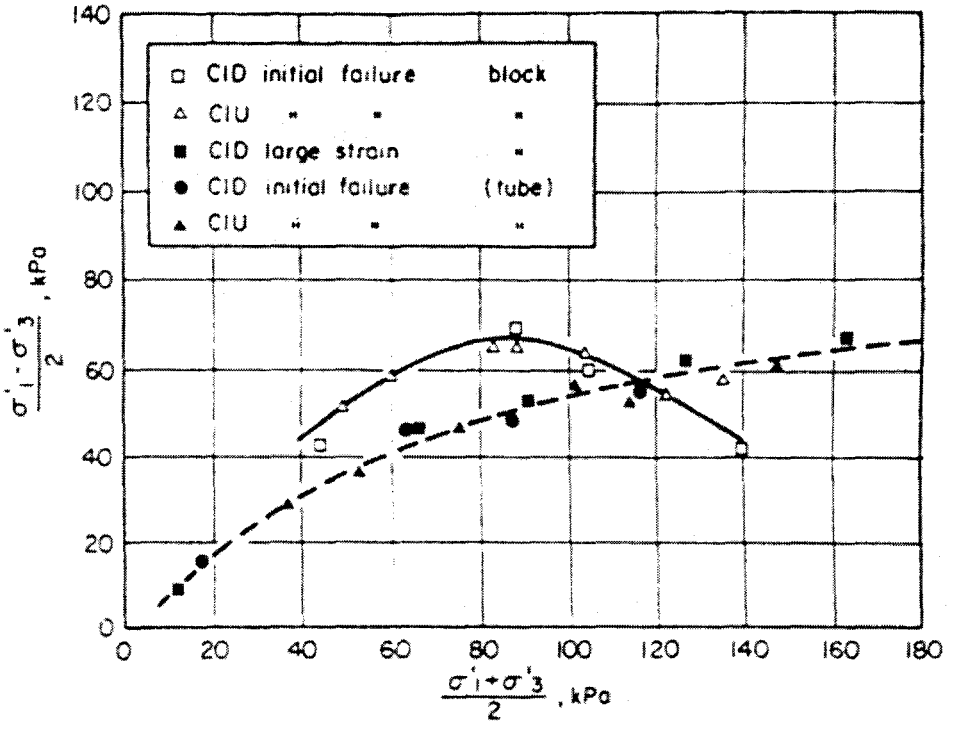


그림 2.99 Saint-Louis Champlain clay의 유효 강도 파괴포락선

Lefebvre(1970)가 Yamaska의 Saint-Louis 지역에서 채취한 블록 샘플에 대하여 CIU 삼축 시험을 한 것과 같은 조건으로 일련의 CIU 삼축 시험을 수행하였다. 응력-변형 곡선은 같은 구속응력에서 그림 2.100(a)와 같이 Laval 샘플의 강도가 작게 나타나기도 하였고, 그림 2.100(b)와 같이 Laval 샘플 쪽이 블록 샘플 쪽보다 더 크게 나타나기도 하였다. 그러나, 이 두 그림의 응력-변형 특성은 거의 같다. 파괴 변형은 Laval 샘플의 경우 0.96%이고 블록 샘플의 경우 0.99%로 평균적으로 비슷하다.

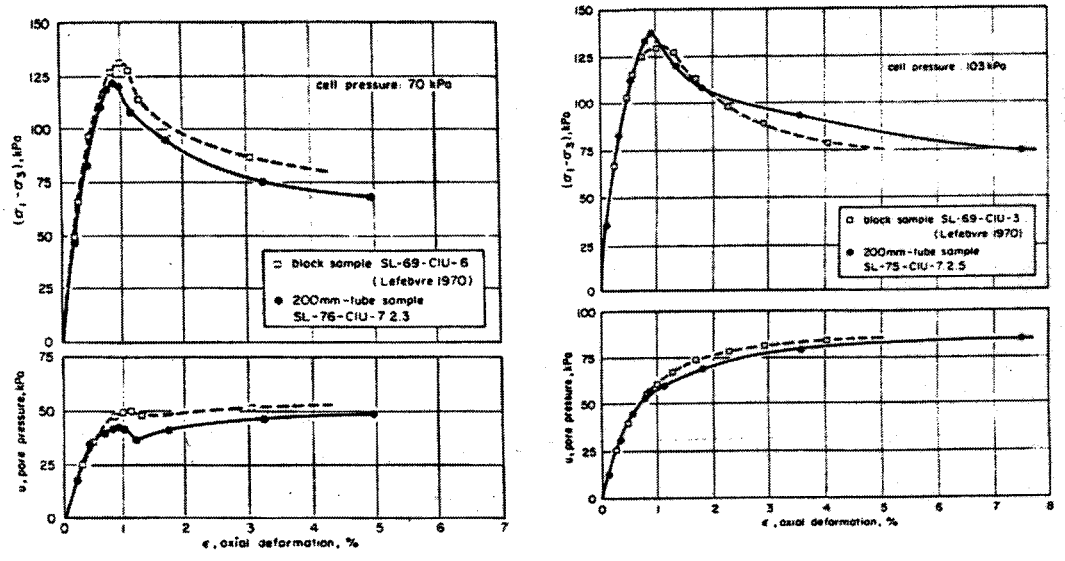


그림 2.100 블록 샘플과 Laval 샘플의 CIU 시험 결과 비교

Saint-Louis 점토에 대한 한계 상태곡선을 결정하기 위하여 Lefebvre(1970)과 Morin(1976)이 수행한 블록 샘플에 대한 모든 CIU 시험 결과를 그림 2.101에 나타내었다. CIU 시험으로 만들어진 Laval 샘플의 한계상태곡선은 블록 샘플의 한계상태곡선과 거의 비슷하게 나타나고 있다.

이상의 연구 결과로부터 Laval 샘플과 블록 샘플의 응력-변형특성과 한계상태상수는 매우 같다는 것을 알 수 있다.

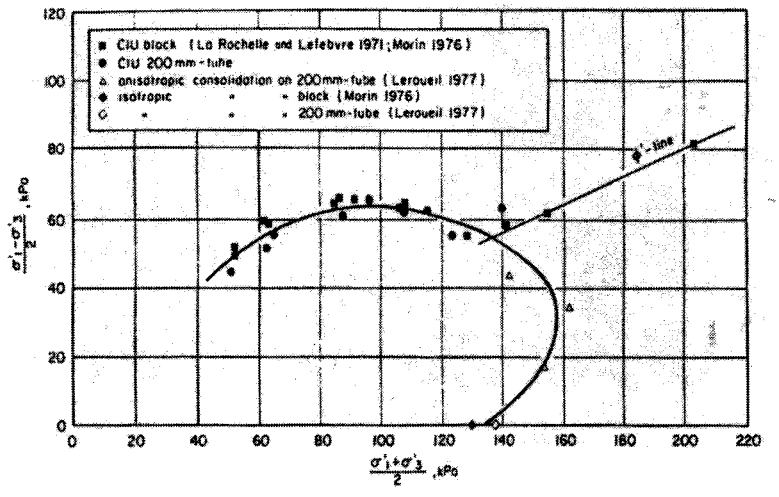


그림 2.101 블록 샘플과 Laval 샘플의 한계상태곡선

(3) 압축 특성

여러 연구 결과로부터 점토의 압축특성은 샘플링의 교란에 매우 민감하다는 것을 알 수 있다. Laval 샘플의 질을 평가하기 위하여 압밀 시험을 수행하였으며, 그 결과를 블록 샘플과 비교하여 그림 2.102에 나타내었다(Lefebvre, 1970). Laval 샘플의 압밀 곡선은 과압밀과 정규압밀상태 모두 블록 샘플과 같은 압축 특성을 나타내고 있다.

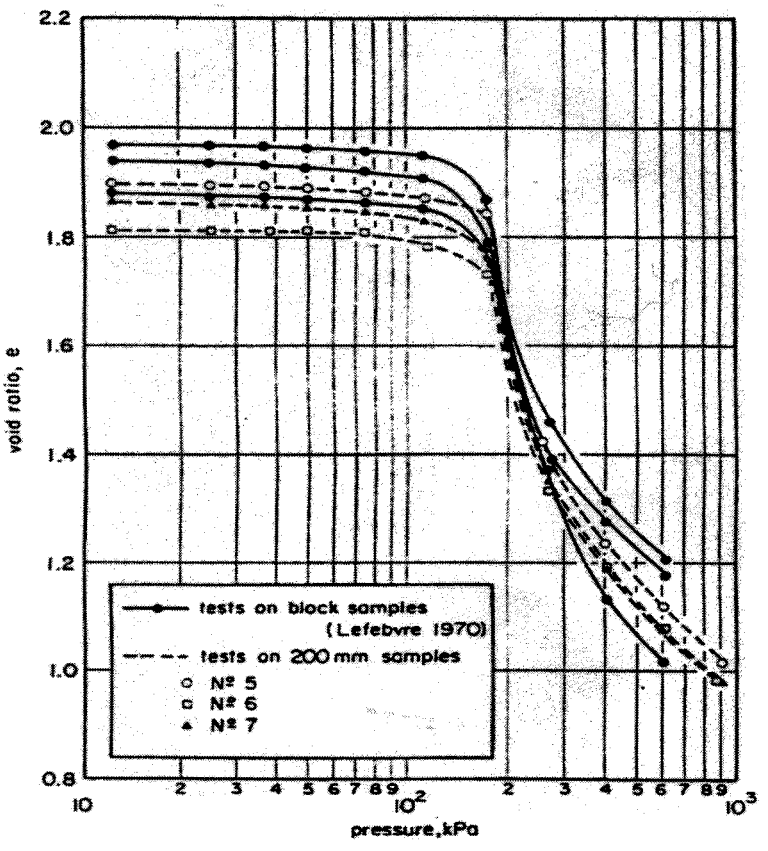


그림 2.102 블록 샘플과 Laval 샘플의 압밀 곡선 비교

제 3 절 대형관입시험(Large Penetration Test) 관련 연구

1. 대형관입시험 장비(LPT)의 개발배경

SPT 스플릿 샘플러는 자갈질 지반을 조사 할 때 너무 작은 경향이 있다. 이러한 이유로 여러 연구자들은 LPT(Large Penetration Tests)라고 불리는 SPT 보다 큰 구경 및 높은 위치에너지를 가지는 새로운 버전의 SPT를 개발하기 위한 연구를 진행 중이다. 자갈층에 관한 복잡한 지반 공학적 문제들이 많은 문헌들에 지적되어 있다. 몇몇 연구자들은 자갈의 높은 강도와 강성을 설계에 이용하고자 노력하는 반면 다른 몇몇의 연구자들은 반복된 지진하중 조건에서 자갈도 액상화 될 수 있다는 보고에 근거하여 기존의 자갈 기초에 대한 안정성에 대해 재판단이 필요함을 인식하기 시작하였다. 한국의 경우, 자갈 지반에 대한 명확한 설계기준(지반정수)이 없어, 자갈층에 대한 연구가 점점 요구 되고 있는 실정이다.

보통 사질토 지반에서 토질정수를 구할 때, 표준관입시험(SPT)을 주로 이용하고 있다. SPT에서 샘플러의 규격과 해머의 잠재적 에너지는 원래 사질토 지반에 대해서만 고려되어 있다. 하지만 실제 현장에서는 SPT의 간편성, 축적된 많은 데이터(N값) 때문에 사질토 지반뿐만 아니라 자갈층에서도 이용하고 있는 실정이다. 그러나, 자갈질 지반에서는 흙입자 크기에 대한 영향이나 충분치 못한 입력 에너지 등의 비현실적인 면 때문에 구해진 N값의 신뢰도는 떨어진다. 이러한 이유로 몇몇의 연구자들은 보통 LPT라 불려지는 큰 구경의 스플릿 샘플러와 무거운 해머를 이용하여 기록된 N값으로부터 등가의 SPT 타격치를 연계함으로써 이런 문제들을 해결하려고 노력해 왔다.

또 다른 몇몇의 연구자들은 LPT 타격치와 바로 연관될 수 있는 새로운 Data Base의 개발을 위해 연구 중이다. LPT는 SPT처럼 아직 세계규준이 확립되지 않아 여러 종류의 LPT가 세계 각처에서 독립적으로 개발되어 사용되고 있다.

2. 기존 LPT 장비

제작자에 따라 다양한 규격의 스플릿 샘플러의 제작이 가능하지만, 지반공학적으

로 적용된 것 만을 소개하면 다음과 같다 (이름들은 필요에 따라 국가/지역에 근거하여 표기하였다.)

(a) Japanese LPT (JLPT)

일본에서는 Kaito et al. (1971)이 최초로 제안하였으며, Yoshida et al.(1988)은 포화된 모래와 자갈의 캐리브레이션 테스트를 이용한 모래와 자갈에 대한 JLPT-SPT 상관관계 팩터들을 제시하였다. 평균입경 크기 1.13mm과 2.28mm의 자갈을 대상으로 실험되었다. 또한, "Tonbi" 타입의 해머가 사용되었으며 관입에너지(ENTHRU)는 측정되지 않았다. 샘플러는 외경이 73mm, 내경 50mm로 제작되었다.

(b) Burmister LPT (Burmister LPT)

Winterkorn and Fang (1975)은 사질토 지반에서 측정된 데이터를 기반으로 한 Burmister LPT-SPT 상관관계 팩터를 구하였다. 또한, 관입에너지(ENTHRU)는 측정되지 않았다.

(c) Italian LPT (ILPT)

Crova et al. (1993)은 이탈리아의 메시나 교량 지역의 사질층과 모래질 자갈층 지반에서 측정된 데이터를 기본으로 ILPT-SPT 상관관계 팩터를 구하였다. 모래질 자갈의 평균입경 크기는 0.5-44mm이며, 관입에너지(ENTHRU)는 force-squared (F^2)방법으로 측정되었다. SPT와 ILPT의 타격치는 이론적 해머에너지의 60%로 수정되었다.

(d) North American LPT (NALPT)

Koester et al. (2000)과 Daniel(2000)은 1964년 Good Friday 지진으로 액상화되었을 것으로 판단되는 알래스카 Seward 주변의 모래질의 자갈과 자갈질의 모래

에 관한 조사를 실시하였다. 시험으로는 SPT와 NASPT, 그리고 콘 관입시험이 실시되었다. 관입에너지(ENTHRU)는 force-squared방법과 force-velocity방법이 사용되었다. SPT와 NALPT의 타격횟수는 이론적 해머에너지의 60%에 대해 수정되었다.

표 2.17 SPT와 외국의 기존 LPT 장비의 상세 내용

	SPT[a]	JLPT[b]	Burmister LPT[c]	ILPT[d]	NALPT[e]
해머중량(kg)	63.5	100	113.4	570	136
낙하높이(cm)	75	150	50.8	50	76.2
샘플러 외경(cm)	5.08	7.3	9.21	14	7.62
샘플러 내경 Open shoe(cm)	3.49	5.0	7.44	10	6.1
샘플러 내경 Barrel(cm)	3.81	5.4	na	11	6.4
해머위치에너지(kgf cm)	4762.5	15000	5760.72	28500	10363.2
선단면적(전체)	20.268	41.854	66.621	153.938	45.604
선단면적(내경)	9.566	19.635	43.475	78.540	29.225
선단면적(두께)	10.702	22.219	23.146	75.398	16.379
에너지비(총에너지)		3.150	1.210	5.984	2.176
에너지비(전체면적)		1.525	0.368	0.788	0.967
에너지비(내경)		1.535	0.266	0.729	0.712
에너지비(두께)		1.517	0.559	0.849	1.422
타격회수비(SPT/LPT) 모래층 관찰		1.5	0.42	1.14	1.29
타격회수비(SPT/LPT) 자갈층 관찰		2.0	-	0.89~1.02	-

a: ASTM D 1586-84, b: Kaito et al. (1971), Yoshida et al. (1988)

c: Winterkorn and Fang (1975), d: Crova et al. (1993)

e: Koester et al. (2000), Daniel (2000)

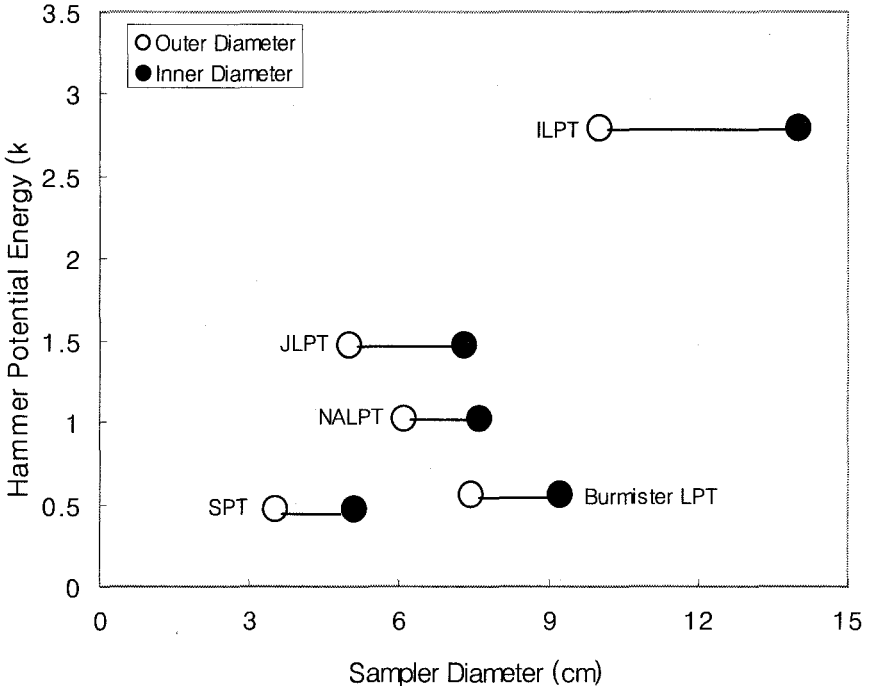


그림 2.103 SPT와 LPT 장비 비교(샘플러규격 및 위치에너지)

표 2.17에는 SPT와 외국의 기존 LPT 장비의 상세 내용을 정리하고 있다. 또한, 샘플러의 내경과 외경 그리고 해머에너지는 그림 2.103에 비교하였다. LPT-SPT 상관관계 연구를 위해서는 해머의 잠재적 에너지, 에너지 전달의 효율, 샘플러 관입 저항의 상대적 크기에 대한 변수들이 고려되어야 한다.

3. LPT와 SPT의 구조 비교

LPT와 SPT시험 동안 측정된 타격 횟수는 관입중 샘플러에 작용한 저항과 시험중 적용된 에너지에 관한 함수이다. 이러한 요소들은 파일 관입에 영향을 미치는 요인과 비슷하며 비교할 수 있다. 따라서 SPT와 LPT시험 중 사용 된 여러 종류의 샘플러와 로드, 그리고 해머시스템들 간의 관계는 파일관입을 위해 개발된 파동 방정식 모델 기법을 통해 얻는 것이 가능하다. 해머와 로드, 샘플러 그리고 측정된 흙의 파라메터에 기인한 타격횟수는 감쇠력을 고려한 파동 방정식 모델기법의 소프트웨어를 사용하여 예측가능하다.

(a) Penetration resistance considerations

1979년 Schmertmann는 천천히 그리고 일정한 속도로서 흙에 관입되는 SPT 샘플러에 작용하는 저항과 콘 관입시험에서 표준 10cm^{2}의 콘에 작용하는 저항을 비교하였다 (그림 2.103 참고). Schmertmann는 표준 콘 관입시험에서의 관입률 2cm/sec에 대한 SPT 샘플러의 정적(quasistatic) 관입을 위해 필요한 힘(F)은 같은 깊이에서의 CPT 측정값과 다음 식으로부터 구해 질 수 있다고 가정했다.

$$F=[C_1A_T+C_2(ID+OD)\pi LR_f]q_c-W \qquad \text{(식 2.31)}$$

여기서, C_1은 SPT-LPT 종단 상관관계 펙터,

A_T는 $\pi/4(OD^2-ID^2)$이며 지반과 접하는 면적,

C_2는 SPT-LPT 마찰 관계 펙터,

ID는 샘플러 내경 (cm),

OD는 샘플러 외경 (cm),

L은 스플릿 샘플러의 관입깊이,

$R_f=f_S/q_c$, f_S는 계측된 CPT 마찰 슬리브 응력(N/cm^2),

q_c는 계측된 CPT 선단 응력(N/cm^2),

W'는 드릴로드의 부양무게 (N) 이다.

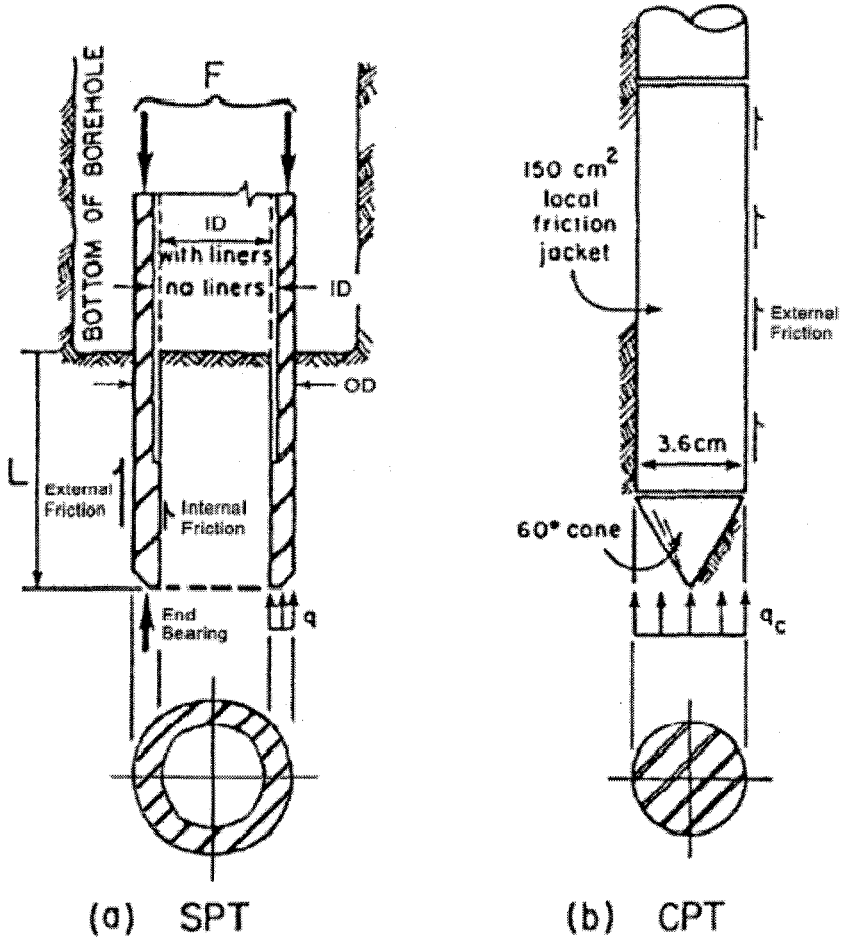


그림 2.104 SPT 일정 관입률에서의 스플릿 샘플러와 표준 CPT의 선단 저항 비교

Schmertmann는 Begemann mechanical 콘으로부터 얻은 CPT 데이터와 C_1과 C_2를 각각 1.0과 0.7로 가정하고 같은 깊이에서 얻은 F를 비교하였다. Schmertmann는 mechanical corn의 디자인 때문에 측정된 F_s가 너무 크다고 주장했으며 전기적 콘 데이터를 위한 C_1과 C_2가 거의 1.0과 같다고 예측하였다.

Sy와 Campanella(1991a)는 이러한 접근방법을 SPT 데이터의 파동방정식 분석을 위한 정적 관입 저항치를 산정하는데 사용하였다. 보편적으로 사용되고 있는 Bustamante와 Gianeselli (1982)가 제안한 LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussees) pile 디자인 방법 또한 CPT 데이터로부터 축방향 파일 관입의 능력을 예측하기 위해 비슷한 접근방법을 사용하고 있다.

(b) Energy Input

해머로부터 드릴 로드에 전달되는 에너지 효율은 로드 에너지 비 (ER_r)로 식 2.32로 부터 산정된다.

$$ER_r = \frac{ENTHRU}{WH} \times 100\% \qquad \text{(식 2.32)}$$

여기서, ENTHRU는 드릴 로드 위의 측정점을 통과하는 응력파 에너지,

W는 해머의 무게,

H는 해머의 낙하 높이이다.

ASTM D4633-86의 F^2방법과 Sy와 Campanella(1991)에 의해 처음 제안된 FV 방법을 통해 ENTHRU를 결정할 수 있다. Schmertmann과 Palacios(1979)는 50회보다 작은 타격횟수에 대한 에너지 비율은 측정된 SPT 타격회수에 대해 반비례함을 보였다. 또한, Seed at al.(1985)와 Skempton(1986)은 측정된 타격값이 표준 크기의 에너지가 로드에 전달되었을 때 측정된 값으로 교정되어야 함을 주장하였다. 현재까지는 대부분이 60%의 값을 해머의 잠재적 에너지의 표준값으로 사용하고 있다.

60%의 에너지로 교정된 SPT 타격치 $(N_{60})_{SPT}$ 는 아래와 같이 반비례를 이용하여 계산된다.

$$(N_{60})_{SPT} = (N)_{SPT} \frac{ER_r}{60\%} \qquad \text{(식 2.33)}$$

비슷하게 에너지에 의해 교정된 LPT의 타격횟수는 다음식으로 계산된다.

$$(N_{ER_s})_{LPT} = (N)_{LPT} \frac{ER_r}{ER_s} \qquad \text{(식 2.34)}$$

여기서, ER_s는 각각의 해머와 로드에 대해 선택된 표준 에너지 비이다.

여기서, 유념해야 할 점은 ENTHRU는 깊이에 따라 에너지비가 달라 질 수 있으므로 매 실험 시 마다 측정되어야 한다.

(c) 파동 방정식 모델 (Wave equation modeling)

앞 절에서 언급한대로, 측정된 타격 횟수는 우선적으로 관입저항과 가해지는 에너지에 대한 함수이다. 만약 흙이 탄성적이나 탄소성적으로 거동한다면 샘플러에 의해 유발된 것을 해머에 가해진 에너지에 관련시키는 것이 간단할 것이다. 하지만 감쇠력은 샘플러에 작용하는 전체적인 저항력에 대해 큰 영향을 끼치는 것은 잘 알려져 있다. 감쇠력은 샘플러의 관입률에 관한 함수이다. 곧 충격이 가해지는 면에서 샘플러-흙 간의 접촉면에 전달되는 에너지인 응력파의 특성에 대한 함수인 것이다. 널리 사용되고 있는 상업적 파동 방정식 프로그램 GRLWEAP는 동적하중을 받는 드릴로드를 그림 2.105와 같이 스프링과 대쉬포트(dashport)들로 연결된 분리된 요소들의 결합으로 모델링한다.

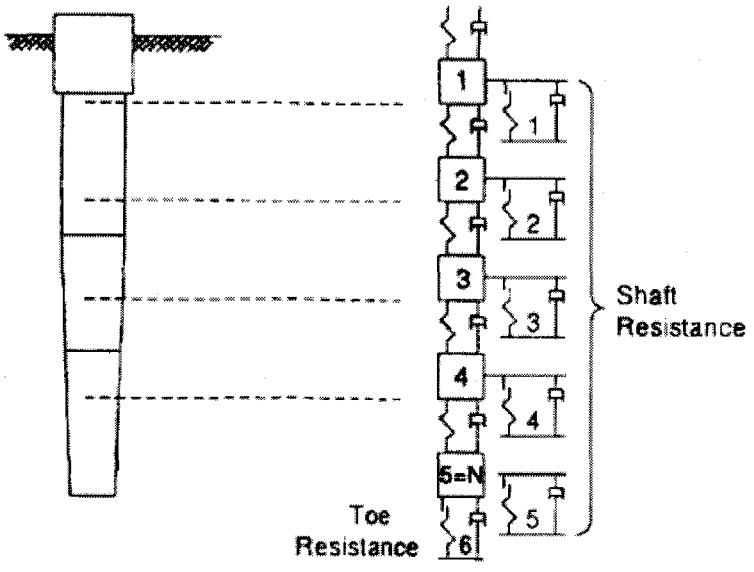


그림 2.105 파동방정식 해석에서의 전형적인 파일 또는 드릴로드 모델 (GRLWEAP 1997)

각 요소의 질량과 각 스프링의 강성은 드릴로드의 밀도와 탄성계수, 그리고 단면적으로부터 결정된다. 철제 로드의 감쇠력에는 보통 대쉬포트 파라메터가 사용된다. 이와 비슷한 접근법이 해머의 모델링에도 사용된다.

샘플러 관입에 대한 총 저항은 정적(S)과 동적(D)요소가 포함된다. 정적요소는 탄-소성 특징이며 관입시 또는 정적 하중 하에서 작용한다고 가정된다. 정적요소를 위해 입력되는 흙의 파라메터는 극한 정적저항(R_u), 흔들림(q)으로 그림 2.106에 나타내어져 있다.

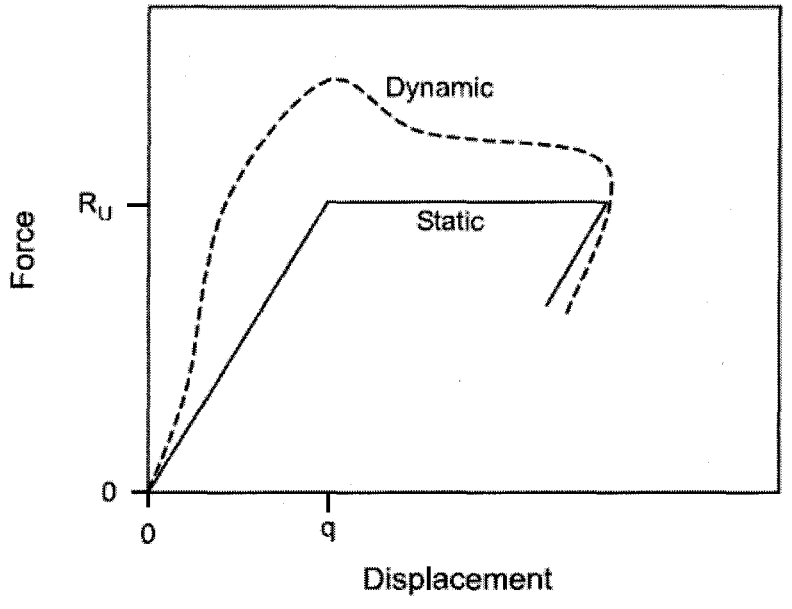


그림 2.106 정적/동적 재하에 따른 이상적인 흙 반응

동적요소는 속력과 정적 극한저항(스미스 감쇠)에 직접적으로 비례한다고 가정한다.

$$D=JVR_u \qquad \text{(식 2.35)}$$

여기서, J는 스미스 감쇠 펙터,

R_u는 극한 정적저항,

V는 속도이다.

개념적으로 해머의 타격이 시작될 때 모든 로드 요소는 정지하고 있으며 모든 해머요소는 주어진 속도로 움직이고 있다. 프로그램은 매우 짧은 시간동안의 대쉬포트의 저항과 스프링의 변위를 계산한다. 모든 요소에 작용하는 net force는 뉴톤 제2법칙에 의해 element-specific 가속도를 계산하는데 사용된다. 새로운 속도와 변위는 교정된 가속도를 통해 다음 시간 step에 대해 계산된다. 이 과정은 스프링의 힘과 요소의 속도가 0이 될 때 까지 계속된다. 마지막으로 타격 횟수를 계산하는데 샘플러의 최종 변위가 사용 된다 (305mm 변위에 대한 타격 횟수).

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 첨단 대구경 샘플러의 개발

1. 개요

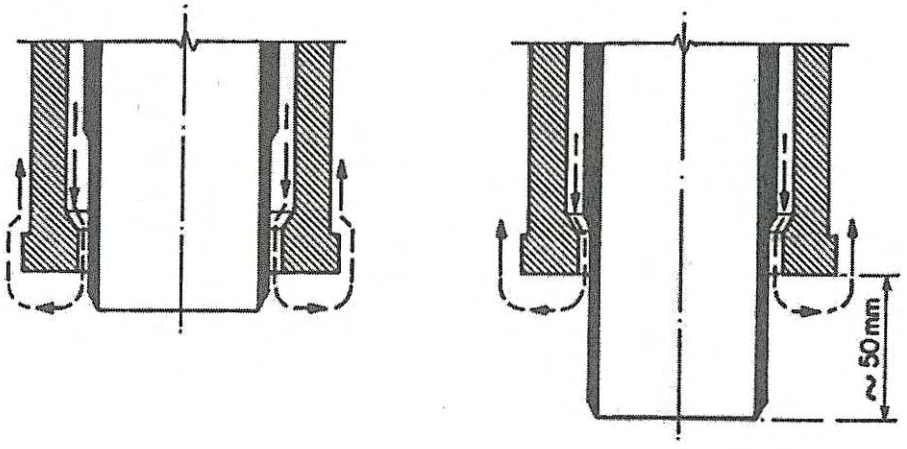
지금까지 국내의 연약지반 현장에서는 주로 NX 크기의 수압식 피스톤 샘플러를 이용하여 불교란 시료를 채취하고 있어 교란의 영향이 크며, 사질토 지반에 대해서는 불교란 시료를 채취하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 트리플 튜브 코아 바렐(triple tube core barrel)의 채취 원리를 이용하는 한편 추가적인 특수장치를 장착하여 직경이 200 mm인 불교란 시료 채취용 대구경 샘플러를 고안하였다. 이 샘플러는 점성토 지반뿐만 아니라 사질토 지반에서도 불교란 시료를 채취하는 것을 목적으로 하였으며, 선단부에 간극수압계를 장착하여 필요시 현장의 간극수압을 측정할 수 있도록 하였다.

2. 대구경 샘플러의 특성

대구경 샘플러는 직경 200 mm의 불교란 시료채취를 위하여 고안 되었으며, 효과적인 시료채취 및 작업의 효율성을 높이기 위한 여러 장치들을 고안 하였다.

샘플러 두부에는 스프링을 두어 그림 3.1과 같이 지반의 조건에 따라 샘플러의 슈(shoe)와 비트(bit) 사이의 거리가 변화하도록 하였다. 즉, 연약지반에서는 비트의 회전시 채취 시료에 교란이 발생할 가능성이 있으므로 날카로운 슈를 비트보다 50 mm 이상 아래에 있게 하여 먼저 샘플링 튜브(sampling tube)를 지반에 관입한 후 비트를 회전하여 코아링 튜브(coring tube)를 관입하게 하여 채취되는 시료에 교란이 발생하지 않게 하였다.

단단한 지반의 경우는 스프링이 압축되어 슈와 비트 사이의 거리가 가깝게 되므로 지반이 비트에 의해서 굴착될 수 있도록 하였다. 이때 스프링은 채취되는 시료가 교란되지 않도록 충분히 슈를 관입할 수 있는 스프링 계수를 가져야 한다. 따라서, 스프링을 지반의 상태에 따라 쉽게 바꿀 수 있도록 하였다.



(a) 단단한 지반 (b) 연약지반

그림 3.1 지반조건에 따른 슈(shoe)와 비트(bit)의 위치

또한, 스프링 상하에 스러스트 베이링(thrust bearing)을 두어 샘플러의 코아링 튜브는 회전을 하여도 샘플링 튜브는 회전을 하지 않도록 하여 시료를 교란시키지 않게 하였다.

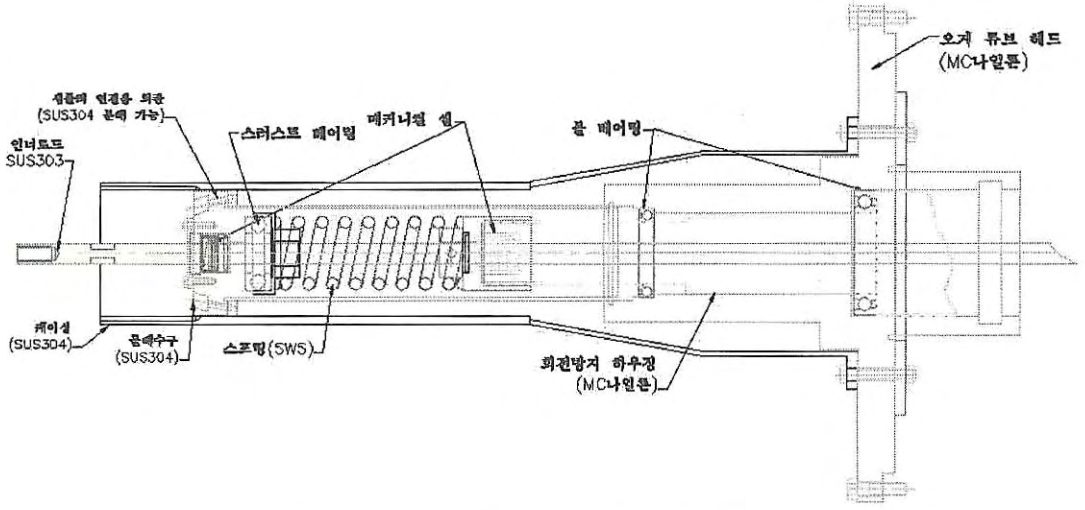


그림 3.2 대구경 샘플러 상단부 개요도

불교란 사질토 시료를 채취할 경우 가장 문제가 되는 것은 채취 시료가 점착력이

없어 샘플러를 인발할 때 시료가 밖으로 유출되는 것이다. 그래서, 지금까지 개발된 다른 샘플러에서는 샘플링 튜브 하단에 바스켓 리테이너(basket retainer)를 두어 시료의 유출을 방지하였다. 그러나, 이러한 방법을 적용할 경우 채취되는 시료가 바스켓 리테이너의 날을 밀고 올라가야 하므로 점토 및 느슨한 사질토 시료에서는 교란이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 특수한 장치를 대구경 샘플러에 장착하였다. 채취 시료가 샘플링 튜브 속으로 완전히 들어오면 확장 튜브(extension tube)와 가이드 튜브(guide tube) 사이에 숨어 있는 절단 날(cutter)이 샘플링 튜브 하단에 있는 채취 시료를 절단하면서 폐합하도록 하여 시료의 이탈을 방지하게 하였다.

본 연구에서 개발한 대구경 샘플러는 기존의 보링장비에 장착하여 사용할 수 있도록 하였으며, 작업방법도 기존의 시료 채취방법과 유사하여 작업자가 손쉽게 사용할 수 있도록 하였다.

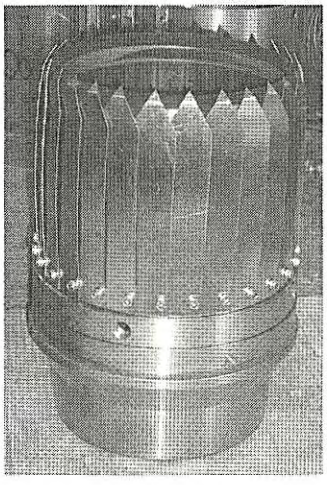


그림 3.3 커터 측면부(스텐레스강)

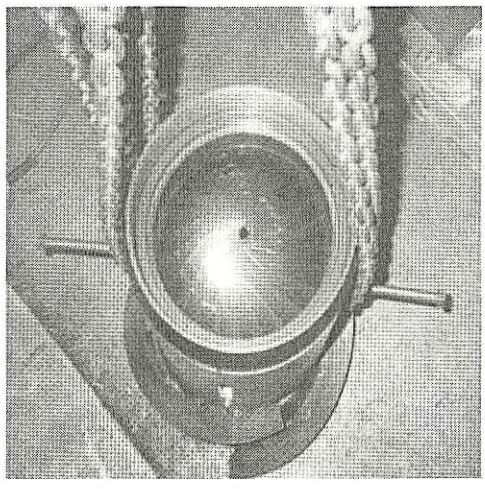


그림 3.4 커터의 폐합된 모습

새롭게 제작된 대구경 샘플러에는 간극수압계를 장착하여, 필요시 시료 채취와 함께 원지반의 간극수압을 측정할 수 있도록 하여, 효율성을 높였다.

간극수압계는 대구경 샘플러 조립시 커터와 내부 로드 사이를 연결하는 절단로드 내부에 설치하여 간단하게 간극 수압을 측정할 수 있도록 고안하였으며, 설치 방법은 그림 3.5와 같다.

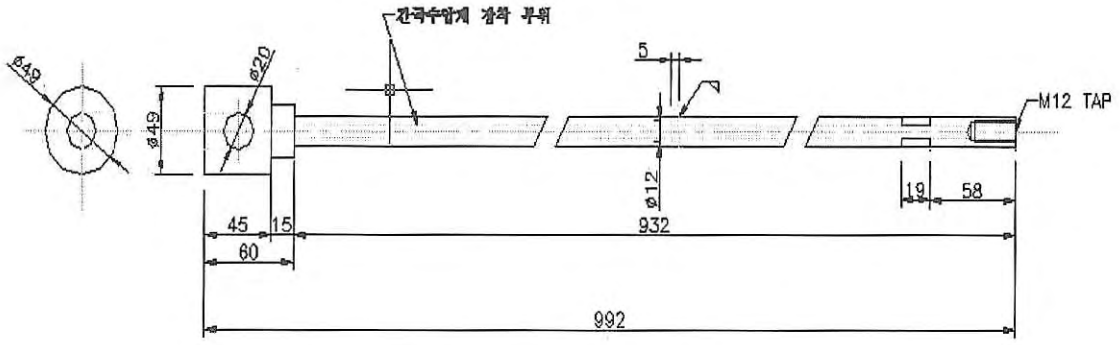


그림 3.5 간극수압계 장착 개요도

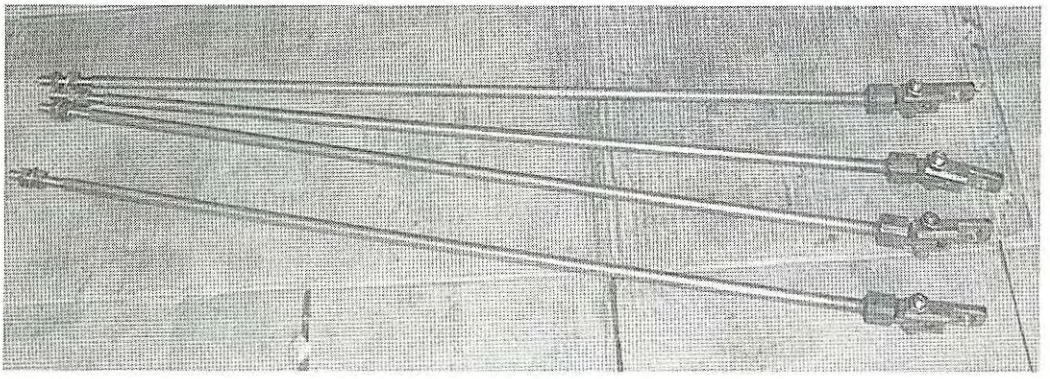


그림 3.6 간극수압계를 설치할 절단로드

샘플러의 헤드 및 일부 부품을 무게가 가벼운 MC 나이론(monomer cast nylon)으로 제작하여 샘플러의 경량화를 꾀하였으며(총 중량 65kg 정도, 저심도용은 55kg정도) 점성토 지반에서의 작업을 고려하여 대부분의 소재를 스텐레스강을 이용하였다.

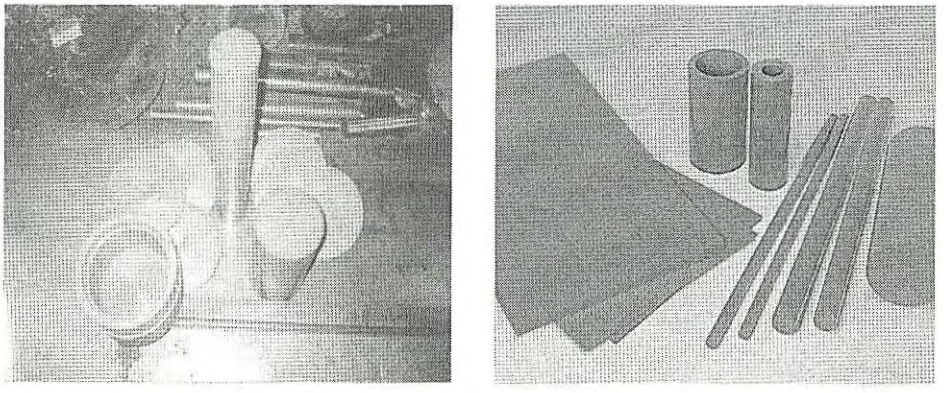


그림 3.7 MC 나이론

여기서, MC 나이론은 엔지니어링 플라스틱의 일종으로서 일반 nylon-6에 비하여 중합법과 성형법이 상이하나 카프로락탐(caprolactam)에 화학적 성분을 촉매로 하여 제조된 결정체의 고분자로서 기계적 강도와 자기윤활성이 뛰어나고 내열성 및 금속 대체용으로 각광받고 있다. 따라서, 고속회전 및 고온에서 연속사용이 가능하므로 탁월한 물성의 산업용 소재이다. 표 3.1과 표 3.2에 MC 나이론의 물성 및 특징을 나타내었다.

표 3.1 MC 나이론의 물성표

항 목	시험방법 ISO/(IEC)	단 위	물성치
밀도	1183	g/cm^3	1.15
인장강도	527	MPa	81
압축테스트 : 1/2/5% 변형 압축강도	604	MPa	24/47/86
Creep 테스트 : 1,000시간, 1% 변형응력	899	MPa	21
Rockwell 경도	2039-2		M 85

표 3.2 MC 나이론의 기계적 물성 및 특징

기계적 물성	내열성, 내마모성, 내피로성, 소음방지성, 내부식성, 경량성, 내약품성, 가공의 우수성, 자기윤활성, 충격흡수성 및 양호한 기계가공성, 내진동성, 내수성, 절연성, 내구성
특징	물리적 성형성형방법이 아닌 화학적 변화에 의한 성형방법이므로 일반 나이론에 비해 약 10배 이상의 분자량과 2배정도의 결정화도를 바탕으로 잔류응력의 발생소지가 적다.

3. 대구경 샘플러의 구조 및 명칭

대구경 샘플러의 구조 및 명칭을 정리하면 다음과 같다.

(1) 슈(shoe) : 샘플러의 자중으로 지반 속에 관입되는 장치로 비트보다 아래에 있어 채취되는 시료를 비트의 회전 굴착으로 발생하는 교란으로부터 보호한다.

(2) 비트(bit) : 코아링 튜브의 첨단부에 부착되어 샘플러를 지반에 관입시키기 위하여 회전 굴착하는 장치

(3) 가이드 튜브(guide tube) : 시료가 채취될 때 시료를 커터로부터 교란이 되지 않게 보호하고 시료를 절단할 때 커터를 지지하여 예정된 방향으로 나오도록 도와주는 튜브

(4) 커터(cutter) : 채취된 시료를 절단하고 샘플러를 인발할 때 시료 유출을 막아주는 장치로 24개의 커터가 튜브의 하부를 완전히 밀폐시킨다.

(5) 확장 튜브(extension tube) : 슈와 샘플링 튜브를 연결하여 주는 튜브로 채취시 시료를 절단하는 커터가 숨어 있을 수 있는 공간이 확보되어야 한다.

(6) 샘플링 튜브(sampling tube) : 아크릴로 만들어져 채취된 시료의 상태를 육안으로 확인 할 수 있도록 되어 있으며, 추출시 발생하는 교란을 제거하기 위하여 스플릿 튜브(split tube) 만들었다.

(7) 코아링 튜브(coring tube) : 가볍고 강도가 좋으며 녹슬지 않는 재질로 만들어져 작업성을 좋게 해야한다. 튜브의 외부 면을 나선으로 하여 샘플러 관입시 굴착으로 발생한 흙을 용이하게 배출시켜 주위 지반의 교란을 작게 하였다.

(8) 절단 로드(cutting rod) : 커터와 내부 로드 사이를 연결하는 로드로 시료 절단시 커터를 위로 끌어올리는 역할을 한다. 또한, 절단 로드의 중간부분에는 힌지(hinge)가 있어 시료가 완전히 채취된 후 지상에서 샘플러 해체할 때 샘플링 튜브를 쉽게 분리하여 얻을 수 있다.

(9) 샘플링 헤드(sampling head) : 절단 로드와 인너 로드를 연결하는 매개체 역할을 한다.

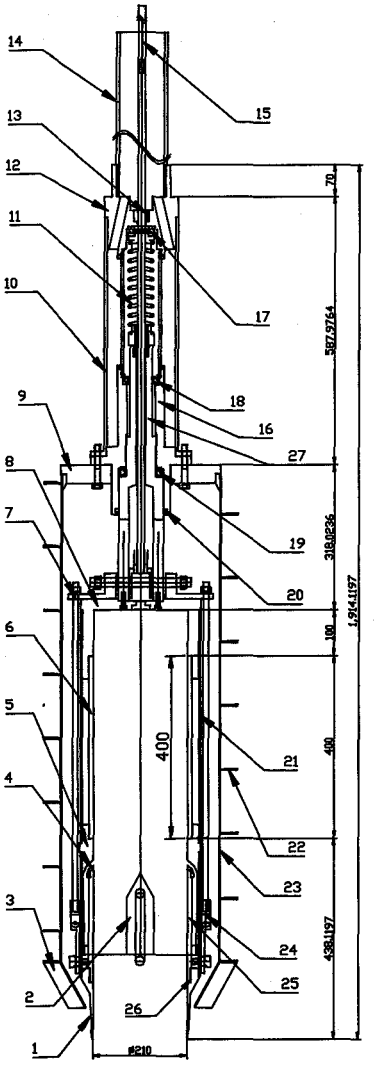
(10) 스러스트 베어링(thrust bearing) : 외부 튜브와 연결된 비트는 회전을 시키고 샘플링 튜브와 연결된 슈는 회전을 시키지 않게 하여 시료가 교란되지 않게

한다.

(11) 스프링(spring) : 스프링을 이용하여 지반의 강도에 따라 비트와 슈의 상대적인 위치를 조절하여 비트의 회전 굴착으로부터 채취되는 시료를 교란되지 않게 한다(지반의 상태에 따라 교환가능).

(12) 내부 로드(inner rod) : 시료를 절단하는 절단 로드를 지상에서 조작할 수 있도록 하는 연결한다.

(13) 외부 로드(outer rod) : 외부의 보링 장비와 샘플러의 코아링 튜브를 연결하는 로드로 보링 장비의 동력 및 수압을 샘플러로 전달한다.



번호	명칭
1	슈
2	커터
3	비트
4	커터안내가이드
5	확장 튜브
6	샘플링 튜브
7	절단 로드
8	샘플링 튜브 헤드
9	오거 튜브 헤드
10	샘플러 연결용 외관
11	스프링
12	케이싱연결용커플링
13	메카니칼실
14	케이싱
15	인너로드
16	회전방지 하우징
17	스러스트베어링
18	볼베어링
19	볼베이링
20	메카니칼실
21	샘플링튜브외관
22	코아링튜브 날
23	코아링튜브
24	커터연결조인트
25	가이드튜브
26	샘플링고정연결헤드
27	샘플러회전방지장치

그림 3.8 대구경 샘플러의 개요도

4. 대구경 샘플러의 시료 채취 방법

대구경 샘플러의 시료채취 방법은 크게 ①지반굴착 및 샘플러 설치→②불교란 시료채취→③샘플러 해체 및 시료확보(운반) 순으로 진행된다.

(a) 지반굴착 및 샘플러 설치

대구경 샘플러를 안착시키기 위해 오거나 백호 등을 이용하여 약 1.5m 정도 굴착한 다음, 미리 준비한 샘플러를 설치한다.



그림 3.9 백호를 이용한 지반굴착(원지반)



그림 3.10 대구경 샘플러 설치 장면

(b) 불교란 시료 채취

(1) 굴착이 완료되면 슬라임을 완전히 제거 한 후 외부 로드와 내부 로드를 번갈아 연결하며 샘플러를 시료를 채취하고자 하는 위치에 놓는다.

(2) 시료 채취 위치에 샘플러가 도달하면 샘플러의 코아링 튜브를 회전시키며 95cm 굴착하여 시료를 채취한다

(3) 시료 채취 작업이 끝나면 샘플러의 외부 로드를 고정시키고 내부 로드를 약

13cm 정도 잡아당겨 절단 날로 샘플링 튜브의 하단을 폐합시킨다.

(4) 샘플링 튜브의 하단을 완전히 폐합시킨 후 샘플러를 천천히 지표면으로 들어올린다.

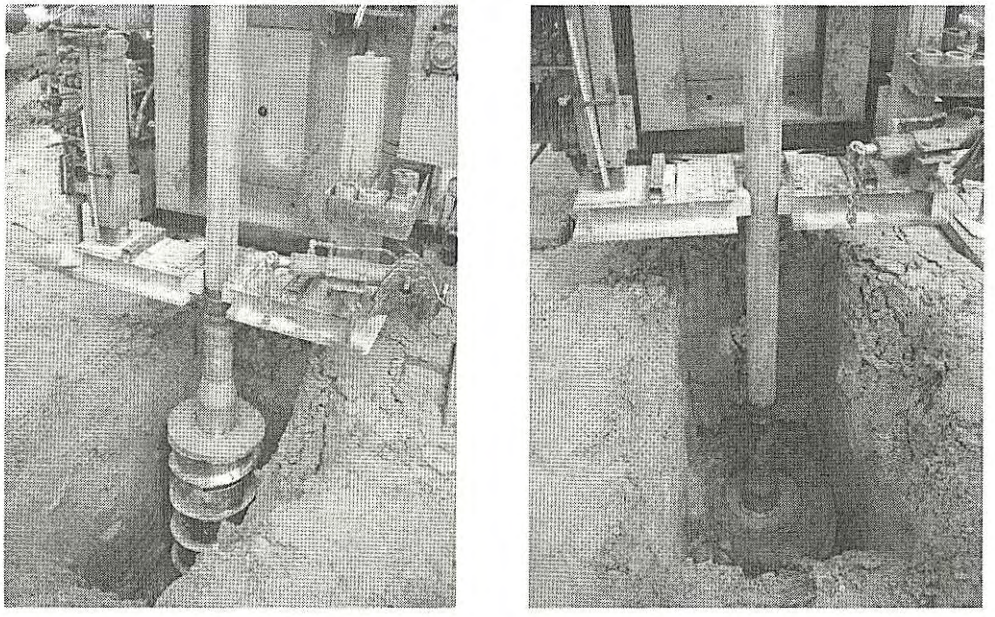


그림 3.11 대구경 샘플러를 이용한 시료채취

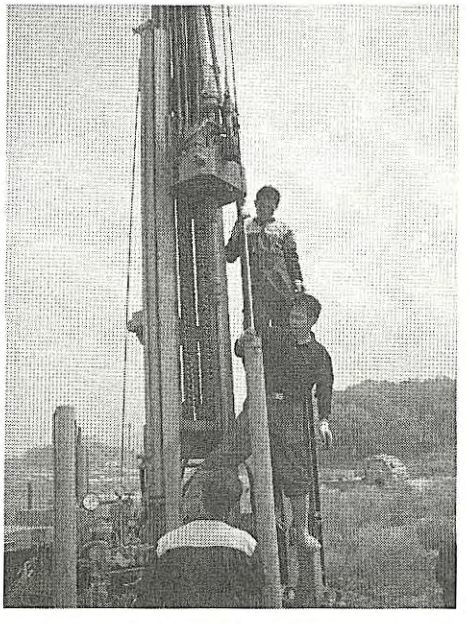


그림 3.12 인너로드 장착

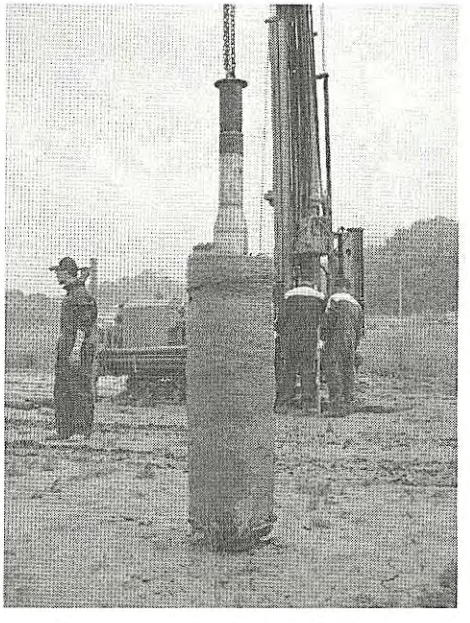
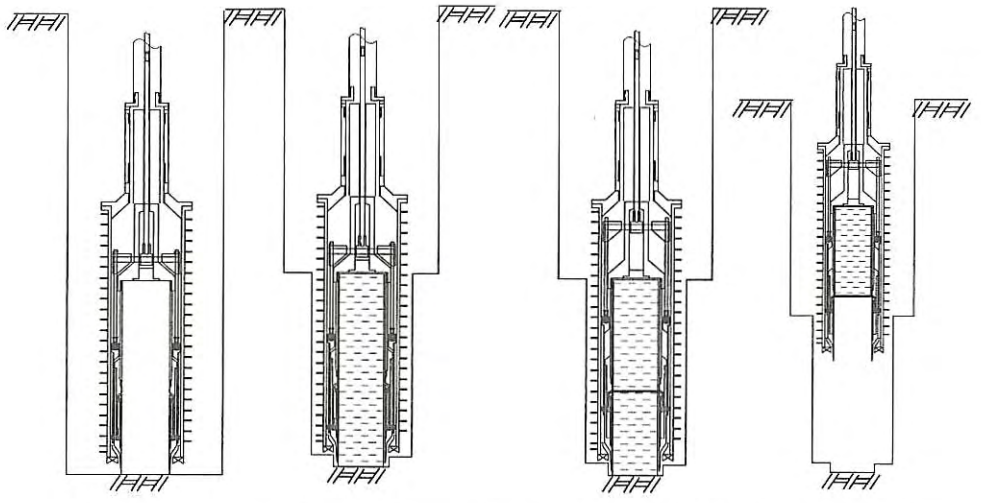


그림 3.13 시료채취 작업 완료



(a) 장착 (b) 관입 (c) 시료채취 및 컷팅 (d) 인발

그림 3.14 대구경 샘플러를 이용한 시료 채취 절차

(c) 샘플러 해체 및 시료확보(운반)

(1) 샘플러 헤드 상단의 볼트를 풀어 코아링 튜브를 샘플러 본체에서 해체한다.

(2) 절단 로드 상부에 있는 볼트를 풀어 절단 로드를 젖힌다.

(3) 샘플링 외관 튜브의 볼트를 풀어 샘플러 헤드를 분리한다.

(4) 샘플링 튜브의 상부와 하부를 덮개로 막고 운반상자에 넣는다.



그림 3.15 절단로드 제거 장면

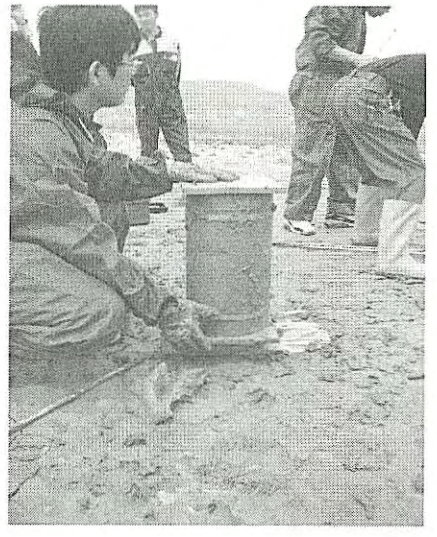


그림 3.16 샘플링 튜브 포장 장면

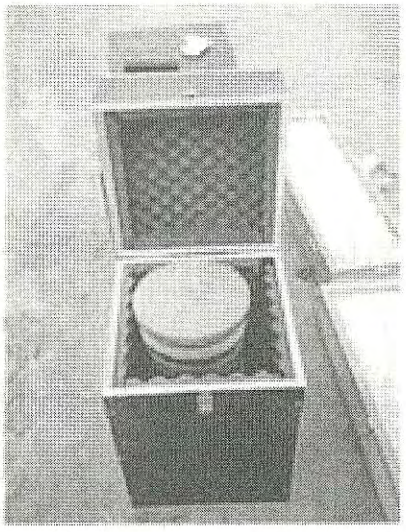


그림 3.17 대형샘플 운반용 특수상자

5. 중/대심도 불교란 시료 채취를 위한 장비 및 방법

대구경 샘플러를 이용한 시료채취는 주로 얕은 지반을 대상으로 많이 수행되며, 대심도에 대해서는 굴착에 따른 공벽의 지지여부 및 경제성 등을 검토하여 시료채취 여부를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 그림 3.18과 19와 같이 특수 제작한 오거와 케이싱을 이용하여 중/대심도에서의 불교란 시료의 채취가 가능하도록 하였다. 특수 제작 케이싱을 사용한 시료 채취 방법은 다음과 같다.

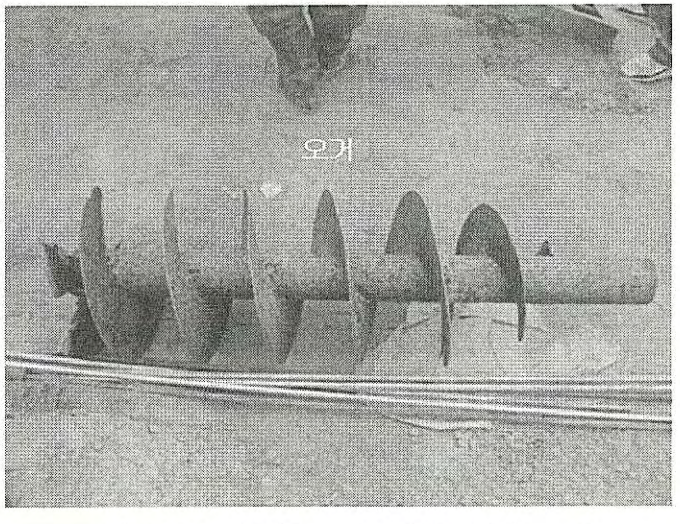


그림 3.18 중/대심도 굴착을 위한 오거

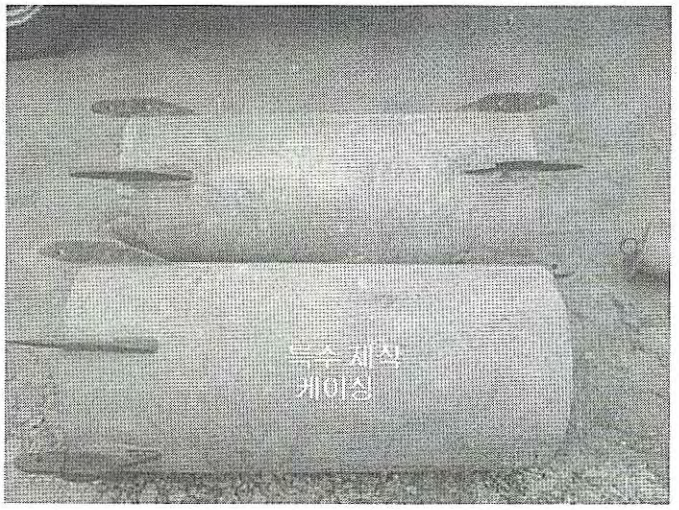


그림 3.19 공벽지지를 위한 특수제작 케이싱

(a) 지반굴착 및 케이싱 지중 관입

(1) 대구경 샘플러를 안착시키기 위해 오거나 백호 등을 이용하여 1.5m 정도 굴착한다.

(2) 직경이 43mm인 screw 형식의 오거를 이용하여 채취하고자 하는 지점까지 굴착을 한다. 이때 공벽이 자립을 하지 못할 경우 재질이 강 혹은 PVC인 케이싱을 이용한다. 케이싱은 백호 등을 이용하여 지중에 관입 시킨다.



그림 3.20 백호를 이용한 표토제거



그림 3.21 케이싱 관입

(b) 오거설치 및 배토 작업

특수 제작한 오거를 사용하여 채취하고자 하는 깊이까지 배토를 하면서 굴착한다.

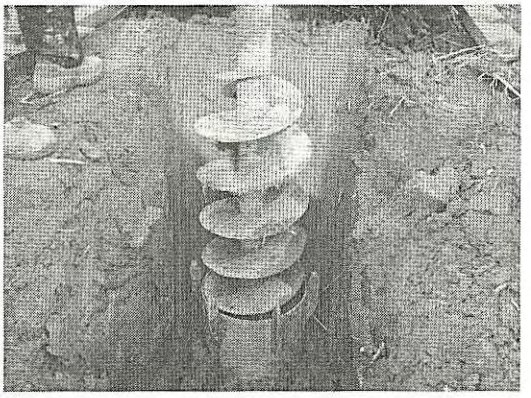


그림 3.22 오거에 의한 굴착 및 배토

(C) 오거 제거 및 대구경 샘플러 설치

오거를 제거하고 "4. 대구경 샘플러의 시료채취 방법" 에 설명한 순서와 방법대로 시료를 채취한다.

6. 현장 적용성 검토 (육상+해상)

개발된 KICT형 대구경 샘플러의 현장 적용성을 평가하기 위하여 인천 국제공항[ML], 영종도[ML], 평택[CL], 청라지구[CL], 김해[CL], 인천항(해상)[ML], 광양만[CL], 당진방조제[SW], 도심지 재개발 지역[SW] 등 다양한 지역, 다양한 지반을 대상으로 개발장비의 성능을 평가함과 동시에 불교란 시료를 채취하여 교란도 등 시료의 품질도 평가하였다 (제2절 참조). 단, 점착력이 전혀 없는 완전한 사질토에서는 인공동결 공법 등을 병용하여 시료를 채취/운반 할 필요가 있다.

대구경 샘플러의 전체 자중은 약 65 kg 정도(저심도 연약지반용은 약 55kg) 로 2인 정도의 인력으로 충분히 운반이 가능하도록 경량화 되었으며, 효율적인 작업이 가능해 졌다. 중요 부품들의 대부분을 스테인레스로 제작하여, 점성토 지반 시료채취

시 샘플러에 부식이 발생하는 것을 방지하였으며, 시료 채취 후 다음 작업을 위한 세척 작업도 더욱 간단해 졌다.

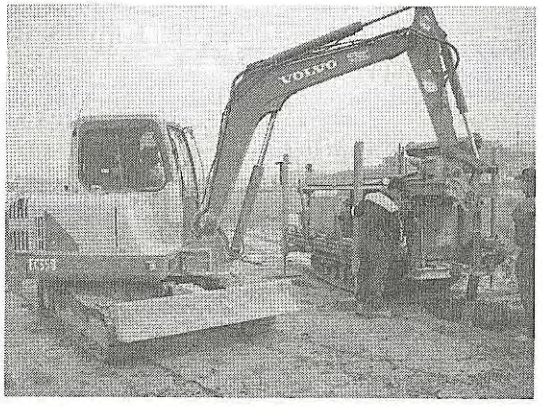


그림 3.23 대구경 샘플러를 이용한 시료채취

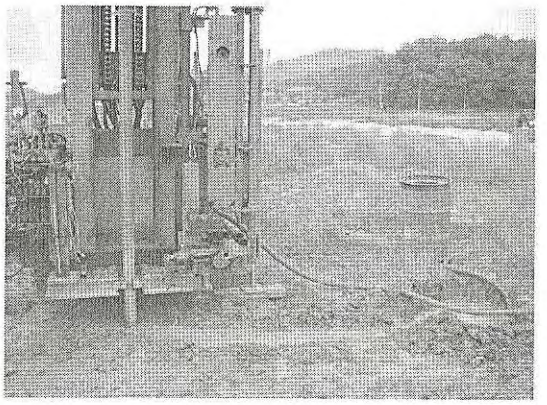


그림 3.24 NX 사이즈 UD샘플러 채취

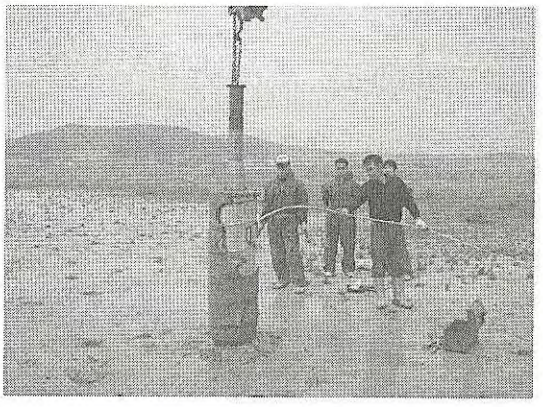




그림 3.25 대구경 샘플러 세척 작업

이번 현장 적용성 평가에서 작업의 효율성을 검토한 결과 (육상 3m 심도 기준), 조립, 시료채취, 해체 및 세척작업에 평균 1시간 정도가 소모되었다(sherbrooke 샘플러는 기술자 포함 3名의 보조원이 작업하여 3시간 소요). 인천항에서 실시 한 해상 평가에서도 구조적 결함 없이 해상시료의 채취가 가능함을 확인하였다.

또한, 채취시료의 교란 정도를 비교하기 위하여 KICT형 대구경 샘플러로 시료를 채취한 바로 인접한 지점에서 수압식 피스톤 샘플러로 NX 크기의 불교란 시료를 동시에 채취하였다. 교란도 분석 등 채취시료의 평가에 대해서는 다음절에 구체적으로 기술하고 있다.

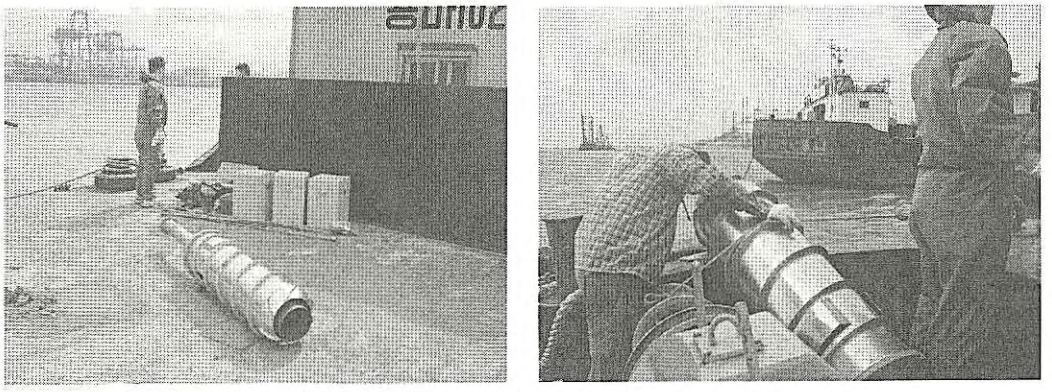


그림 3.26 소형 보트를 이용한 대구경 샘플러 운반

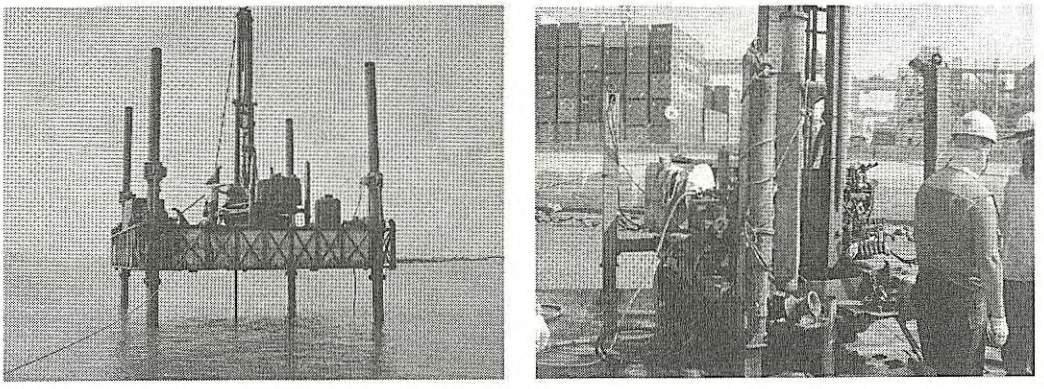


그림 3.27 해상 시추기에 샘플러 연결

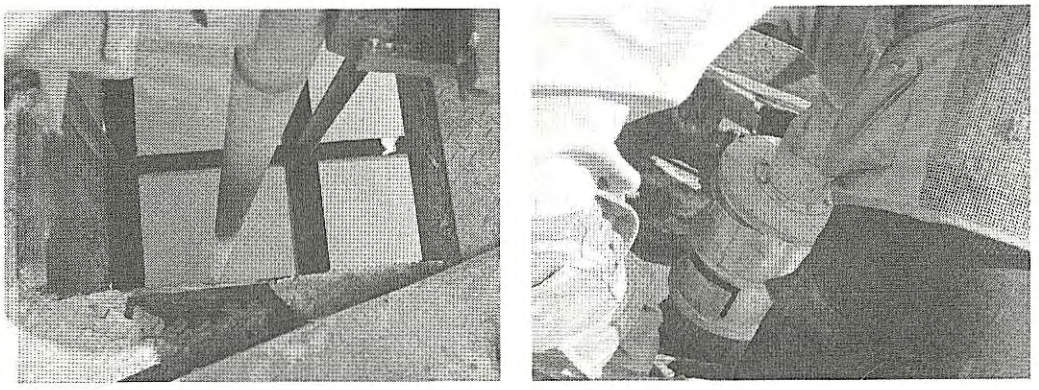


그림 3.28 목표심도까지 샘플러 관입

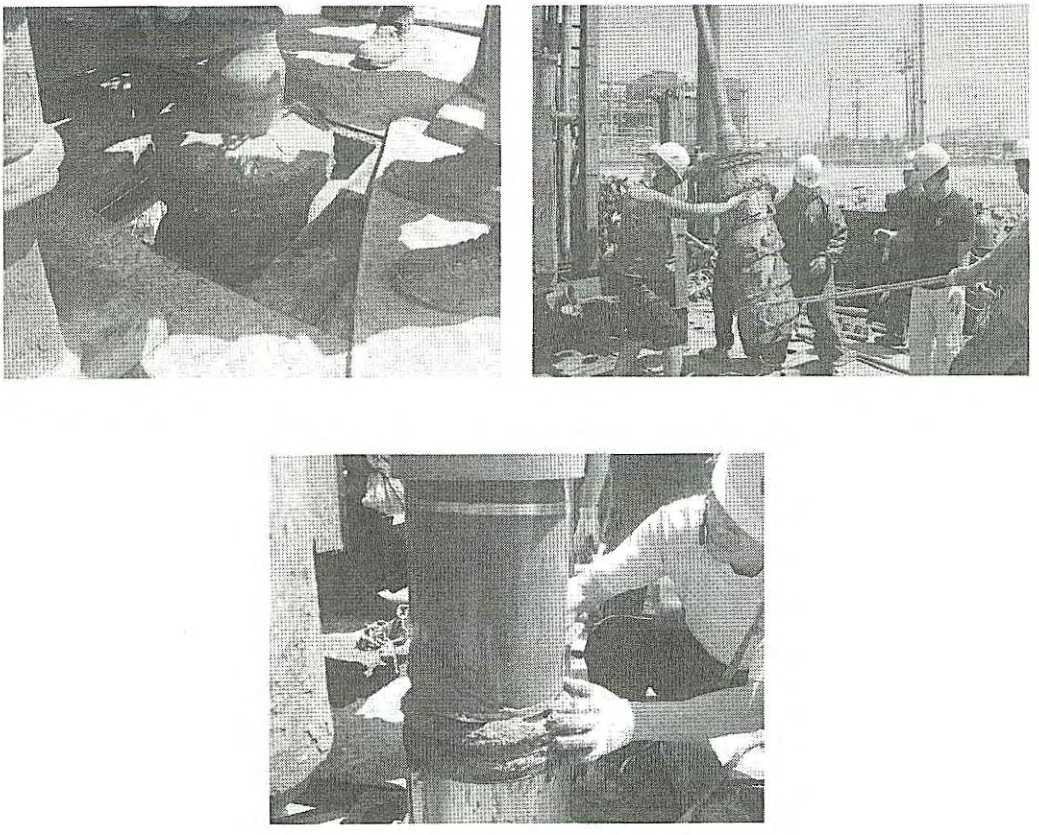


그림 3.29 샘플러 인발 및 해상시료 채취

제 2 절 대구경 샘플러의 현장 적용성 평가 결과 - 채취시료의 평가

1. 개요

KICT형 대구경 샘플러의 현장적용성 평가는 다양한 지반을 대상(인천 국제공항, 영종도, 평택, 청라지구, 김해, 인천항(해상), 광양만, 도심지 재개발 지역 등)으로 실시 되었으며, 기존의 수압식 피스톤 샘플러로도(75mm shelby tube) 동시에 불교란 시료를 채취하여 강도 시험 및 압밀시험과 같은 실내역학 실험을 실시하여 시료의 품질 등을 평가하였다. 강도시험은 크게 일축압축시험과 삼축압축시험을 실시하였다. 삼축압축시험의 경우 직경 50mm, 높이 100mm의 일반 삼축시험에 더하여 직경 100mm, 높이 200mm의 대형 삼축시험을 실시하였으며 등방압밀 비배수전단 시험으로 수행하였다. 압밀시험의 경우, 직경 60mm, 높이 20mm의 표준압밀시험과 더불어 직경 150mm, 높이 50mm의 대형 Rowe cell 압밀시험을 실시하였다. 이러한 실험들을 통하여 샘플러 종류에 따른 시료교란도의 평가뿐만 아니라 공시체의 크기가 실험결과에 미치는 영향도 파악하였다. 이 때, 대형 삼축시험과 대형 Rowe cell 압밀시험은 공시체의 크기로 인하여 대구경 시료로만 시험이 가능하였다. 마지막으로 공진주 시험 및 비틂전단 시험을 실시하여 교란에 따른 전단탄성계수 거동 및 감쇠비 거동 등을 파악하였다. 표 3.3에는 본 연구에서 실시된 시험을 정리하였다.

표 3.3 수행된 시험 및 공시체 크기

샘플러 종류	수행된 시험		공시체 크기(mm)	
			직경	높이
수압식 샘플러	강도시험	일축압축	50	100
		삼축압축(CU)	50	100
	압밀시험	표준압밀	60	20
	전단탄성 계수 및 감쇠비	공진주/비틂전단 시험	50	100
대구경 샘플러	강도시험	일축압축	50	100
		삼축압축(CU)	50	100
		대형삼축압축(CU)	100	200
	압밀시험	표준압밀	60	20
		대형 Rowe cell 압밀	150	50
	전단탄성 계수 및 감쇠비	공진주/비틂전단 시험	50	100

2. 시료의 기본물성

인천 국제공항, 청라지역, 인천남항(해상), 영종도, 김해, 평택, 광양만 지역에서 채취한 시료의 기본 물성값은 표 3.4에 나타내었다.

표 3.4 채취 시료의 기본물성

채취 지역	심도 (m)	비중 Gs	함수비 w_n (%)	액성한계 w_L (%)	소성 한계 w_P (%)	소성지수 I_P (%)	통일분류법
인천 국제공항	3	2.64	38	25	NP	NP	ML
	4	2.65	34	25	NP	NP	ML
	5	2.71	32	27	14	13	CL
김해	4.5	2.67	63	41	21	20	CL
	7	2.68	74	44	25	19	CL
평택	3	2.72	56.4	44.2	26.6	17.6	CL
인천청라	5	2.69	39.6	32.44	23.18	9.26	CL
영종도	3	2.72	45.3	30.69	24.33	6.36	CL
광양만	4	2.69	62.3	53.87	32.63	21.24	CL
인천남항 (해상)	2.5 (수심3)	2.73	-	NP	NP	NP	ML

3. 압밀시험 결과 (표준압밀시험, 대형 Rowe cell 시험)

평택 시료로 부터 정리된 압축곡선과 압밀계수(표준압밀시험, 대형 Rowe cell 시험)를 그림 3.30과 3.31에 도시하였다. 또한 압축곡선에서 평가된 선행압밀하중과 압축지수도 표 3.5와 같이 정리하였다. 그림 및 표 에서 확인할 수 있는 바와 같이 수압식 샘플러 시료보다 대구경 샘플러 시료가 초기 간극비, 선행압밀하중, 압축지수가 모두 커서 교란이 더 작은 것으로 나타났다. 그림 3.31의 압밀계수 역시 선행압밀하

중 근처를 제외한 과압밀 영역과 정규압밀 영역 모두에서 대구경 샘플러 시료가 더 크게 나타나 교란이 더 작은 것으로 판단된다.

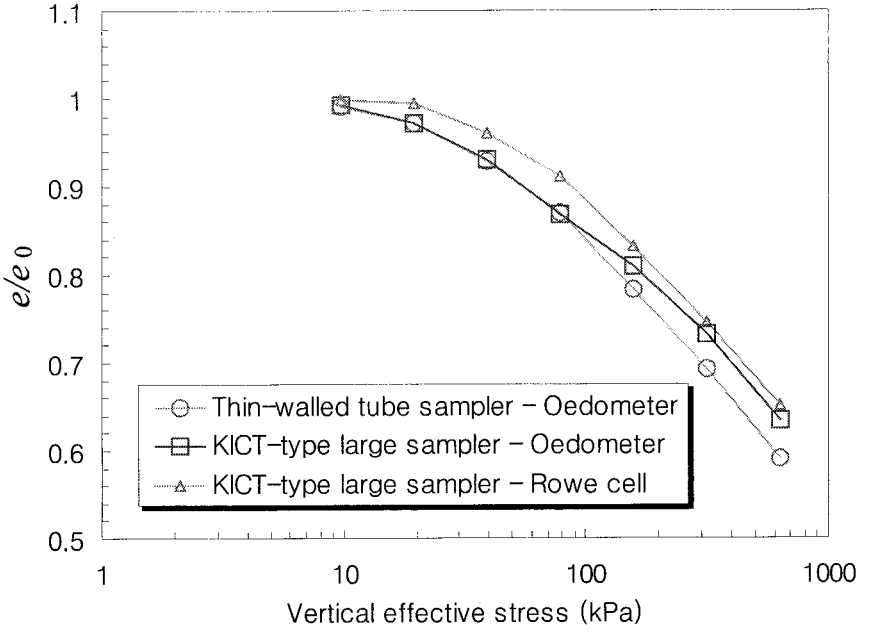


그림 3.30 간극비-연직유효응력 관계 (평택시료)

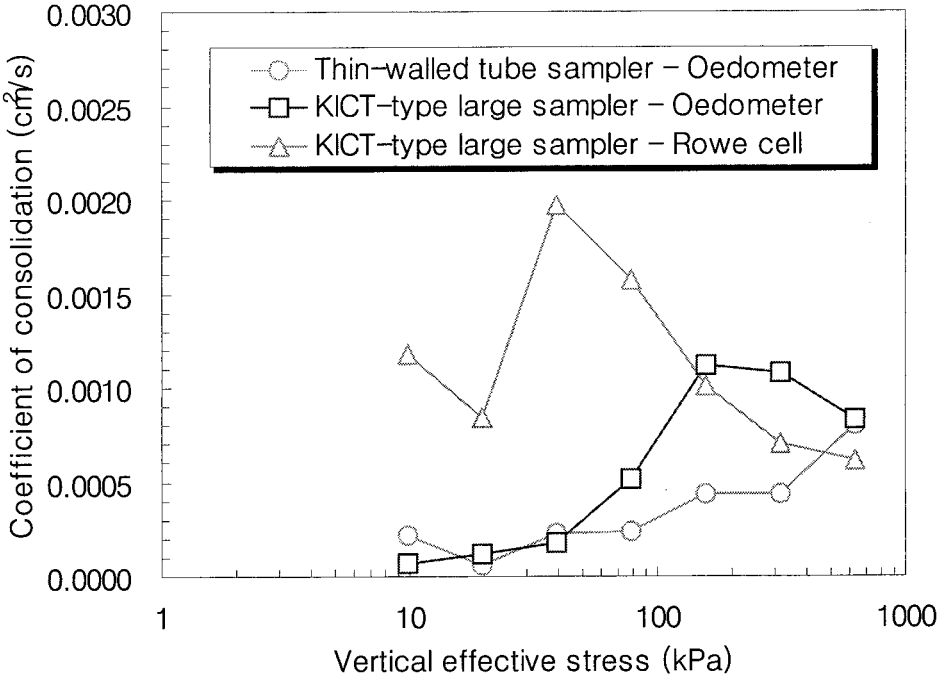
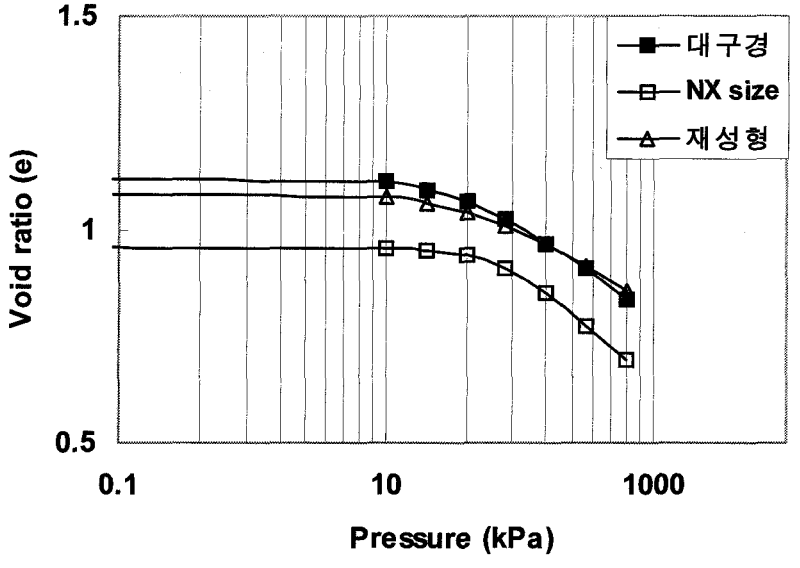


그림 3.31 압밀계수 (평택시료)

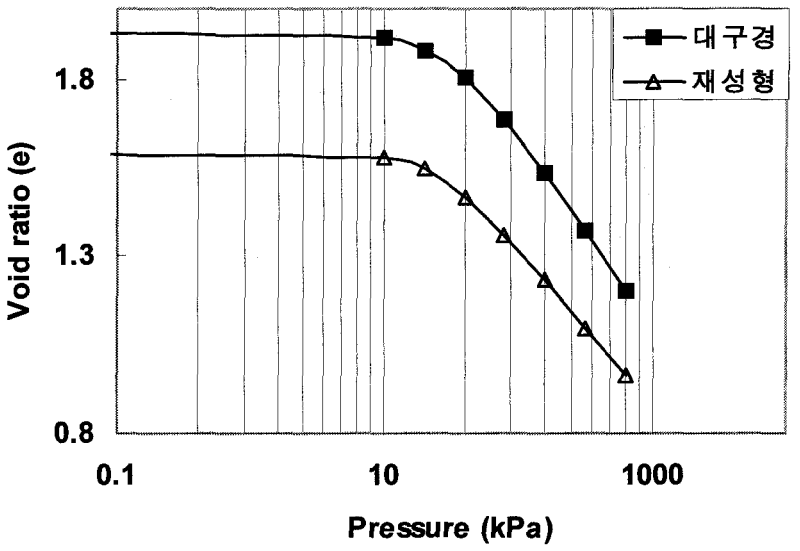
표 3.5 압밀시험에서 평가된 시료특성

Testing Method		Initial void ratio (e_0)	Preconsolidation pressure (p_C')	Compression index (Cc)
Oedometer test	Thin-walled tube	1.493	48 kPa	0.478
	KICT-type	1.661	54 kPa	0.473
Large Rowe cell	KICT-type	1.646	56 kPa	0.487

또한, 그림 3.32 - 3.33은 청라지역과 광양만 시료로부터 구한 표준압밀시험 결과(압밀곡선)를 나타내고 있다. 교란의 경향을 검토하기 위하여 그림 중에는 재성형 시료에 대한 결과도 함께 표시하였다.



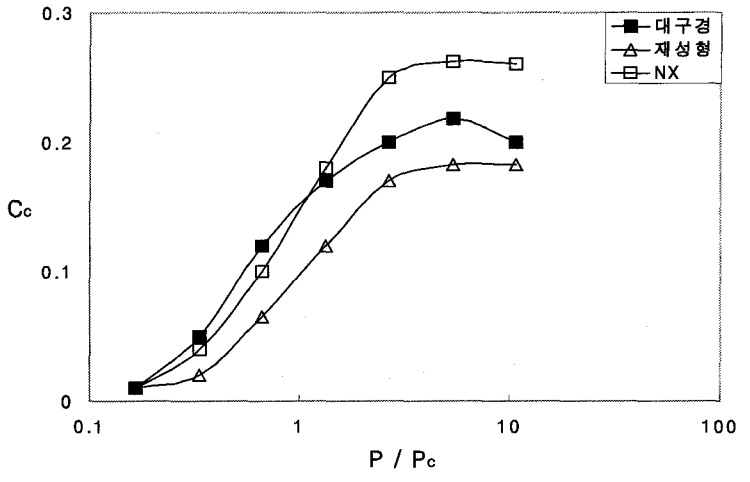
(a) 청라지구



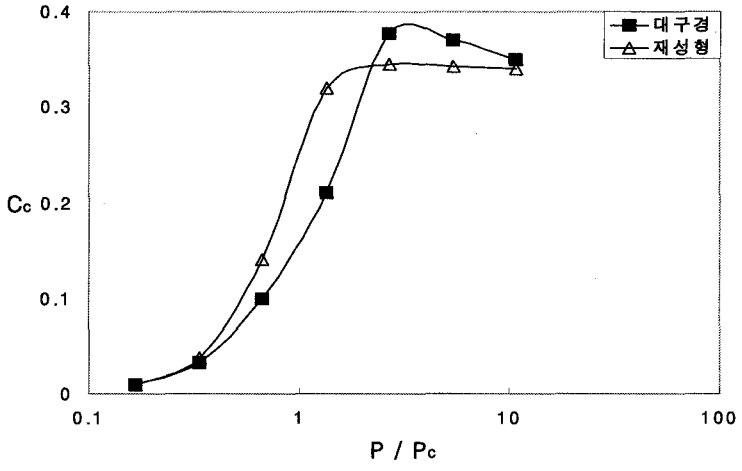
(b) 광양만

그림 3.32 지역별 압밀곡선

그림 3.32의 압밀곡선과 표준압밀시험의 결과에서 교란될수록 초기 간극비와 압축지수, 선행압밀응력이 작아짐을 알 수 있다.



(a) 청라지구



(b) 광양만

그림 3.33 압밀압력과 압축지수의 관계

그림 3.33은 Tsuchida 와 Kobayashi(1989)등이 제안한 압밀응력과 압축지수의 관계를 이용하여 교란도를 평가한 것이다. 교란이 될수록 압축지수 값이 작아지는 경향이 있으며 명확한 첨두점을 나타내지 않는다. 이상의 그림에서 보는 바와 같이 대구경 샘플러로 채취한 불교란 시료는 원 지반 상태를 잘 보존한다는 것을 알 수 있다.

4. 일축압축시험 결과

영종도, 평택, 청라지구, 광양만, 인천남항 시료에 대한 일축압축시험결과를 표 3.6 및 그림 3.34, 3.35에 정리하였다. 또한, 각 지역별 시험결과를 그림 3.36 - 3.38에 나타내고 있다.

변형율 증가에 따라 나타나는 피크강도를 시료의 일축압축강도로 나타내었고 15%변형에 이를 때까지 첨두 점을 명확히 나타내지 않을 경우 15% 변형을 파괴로 간주하여 일축압축강도 판단하였다. 일축압축강도는 광양만 시료에서 가장 큰 값이 나타났고 평택항, 인천항 순이었다. 모든 NX사이즈의 시료에서 대구경 샘플러 시료보다 작은 압축강도를 나타내어 상대적으로 교란되어 있음을 확인할 수 있다. (시료의 교란은 초기 퇴적과정 중에 형성된 점토입자구조의 파괴현상을 일으켜 일축압축

강도를 감소시킨다.)

표 3.6 일축압축시험 결과 (샘플러 비교)

일축강도	영종도	평택	청라지구	광양만	인천항
대구경	25 kPa	38 kPa	30 kPa	42 kPa	33 kPa
NX size	18 kPa	35 kPa	-	-	18 kPa

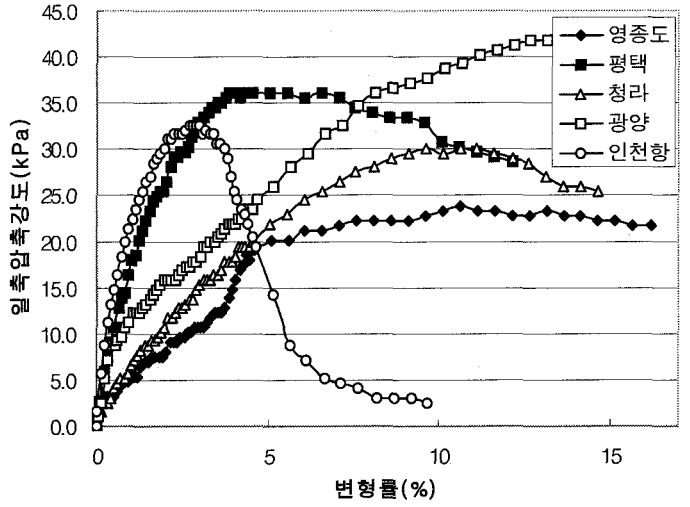


그림 3.34 일축강도곡선(대구경 샘플러)

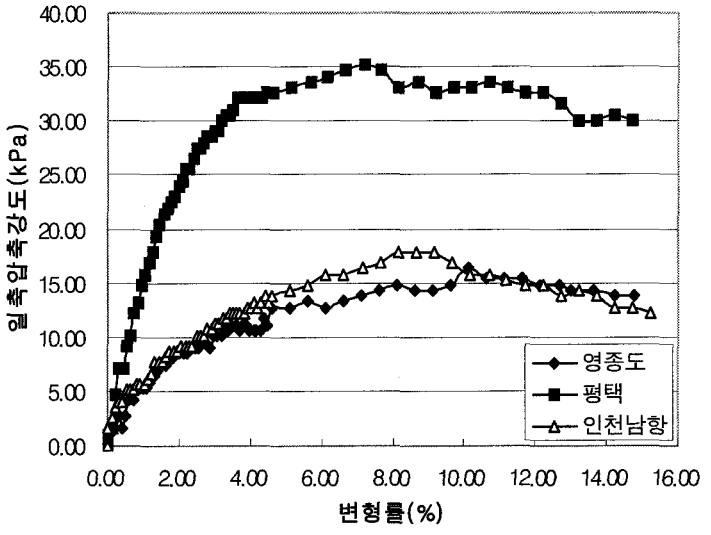


그림 3.35 일축강도곡선(NX size 샘플러)

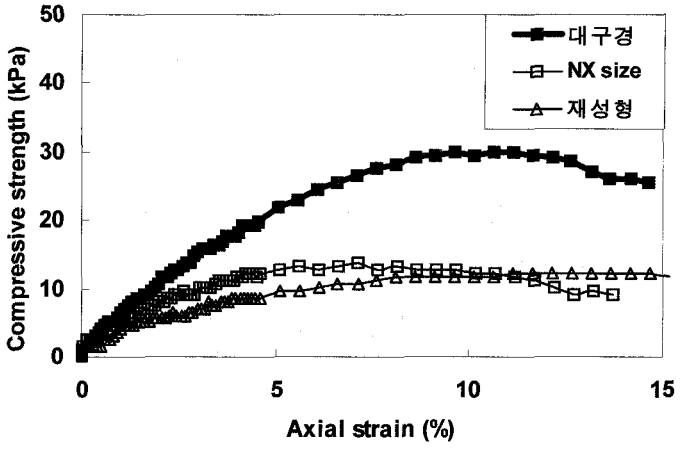


그림 3.36 청라지역 시료의 응력-변형률 곡선

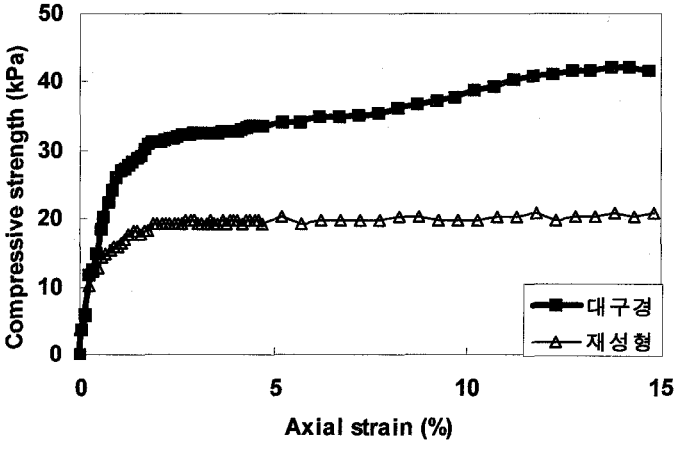


그림 3.37 광양만 시료의 응력-변형률 곡선

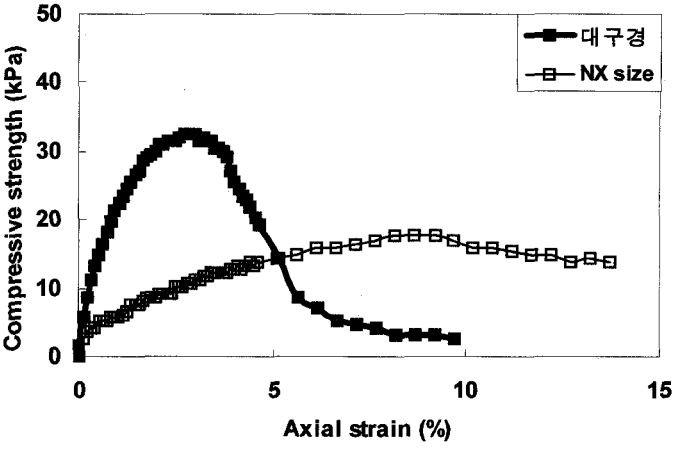


그림 3.38 인천남항 시료의 응력-변형률 곡선

일반적으로 시료가 교란될수록 일축압축강도(q_u)와 50%변형시의 탄성계수(E_{50})가 감소하고 극한강도 시의 변형률(ε_p)은 증가한다. 일축압축 실험에서 교란도의 평가는 정성적이기는 하지만 ε_p 값의 범위를 이용하는 경우가 많으며, Horiuchi (1987)등은 E_{50} / q_u 을 사용하여 교란도를 정의하고 있다. 즉, 이 값이 50 이하에서는 교란시료, 50 이상이면 불교란 시료로 평가하고 있다. 시료교란은 크게 체적변화와 강도변화 두 가지 측면에서 나타나는데 Horiuchi등의 평가방법은 이 두 가지 측면 모두를 이용하기 때문에 교란여부를 보다 뚜렷이 평가 할 수 있다.

일축압축실험은 콘크리트 공시체에 대한 압축실험처럼 축방향으로만 압축하여 흙을 파괴시키는 것이므로 $\sigma_3 = 0$ 일 때의 3축압축실험이라고 할 수 있다. 따라서, 이 실험으로부터는 Mohr 원이 하나밖에 그려지지 않으므로 ϕ 를 결정하지 못한다.

일축압축실험을 할 때에는 흙 시료가 자립할 수 있어야 하므로 점성토에 대해서만 실험이 가능하다. 또한 배수 조건을 조절할 수 없으므로 항상 비배수 조건에서의 실험 결과밖에 얻지 못한다. 시료가 파괴될 때의 축방향의 압력을 일축압축강도 (unconfined compression strength), q_u 라고 하며, 비배수 조건에서의 점착력은 편의상 이 값의 반으로 정한다.

즉,

$$s_u = c_u = \frac{q_u}{2} \qquad \text{(식 3.1)}$$

보통 일축압축 강도와 더불어 예민비를 측정하지만, 동일한 지역에서 채취한 샘플의 교란 시료는 동일한 값을 갖기 때문에 본 실험의 목적과 관련성을 찾기 힘들기 때문에 실시하지 않았다.

대구경 샘플러 및 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료를 직경 5cm, 높이 10cm인 공시체로 성형한 후 축변형률을 1%/min로 하여 일축압축시험을 수행한 결과는 다음과 같다. 그림 3.39의 결과를 보면 KICT 대구경 샘플러로 채취된 시료의 일축압축강도가 수압식 피스톤 샘플러로 채취된 시료의 일축압축강도보다 크게 나타났으며, 파괴시 변형률은 KICT 대구경 샘플러로 채취한 시료의 것이 작게 나타났다. 또한 할선 탄성계수 역시 대구경 샘플러의 시료가 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 G. Holm과

R. D. Holtz(1977)가 채취 시료에 대한 연구를 통하여 시료의 교란이 비배수 전단강도보다 할선탄성계수에 더 많은 영향을 미친다는 연구 결과와 동일한 경향성을 보여준다.

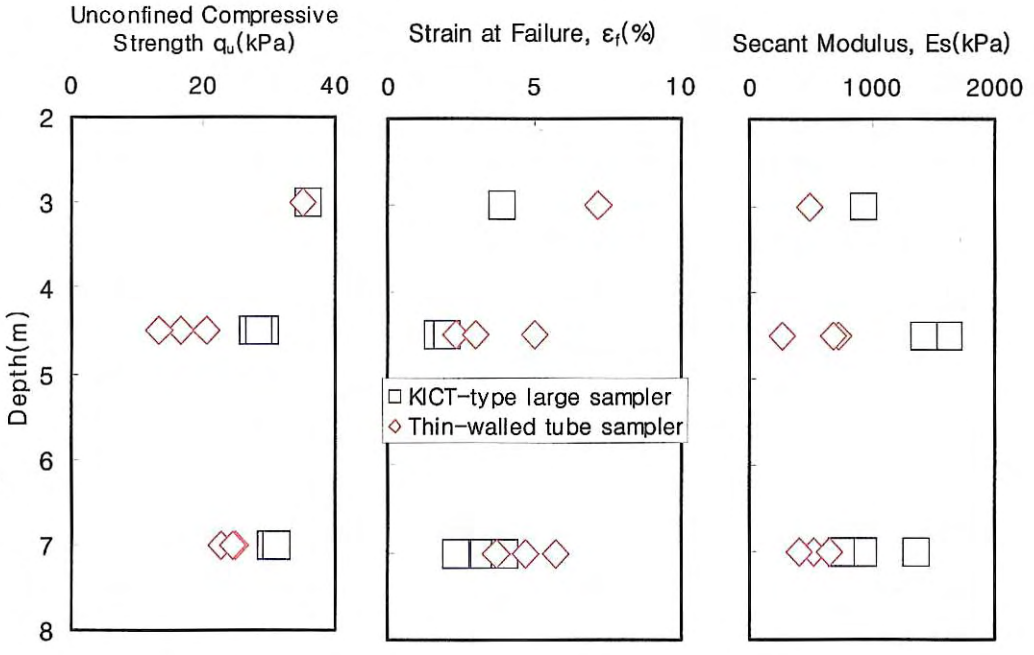


그림 3.39 일축압축시험 결과 (모든 시료의 시험결과)

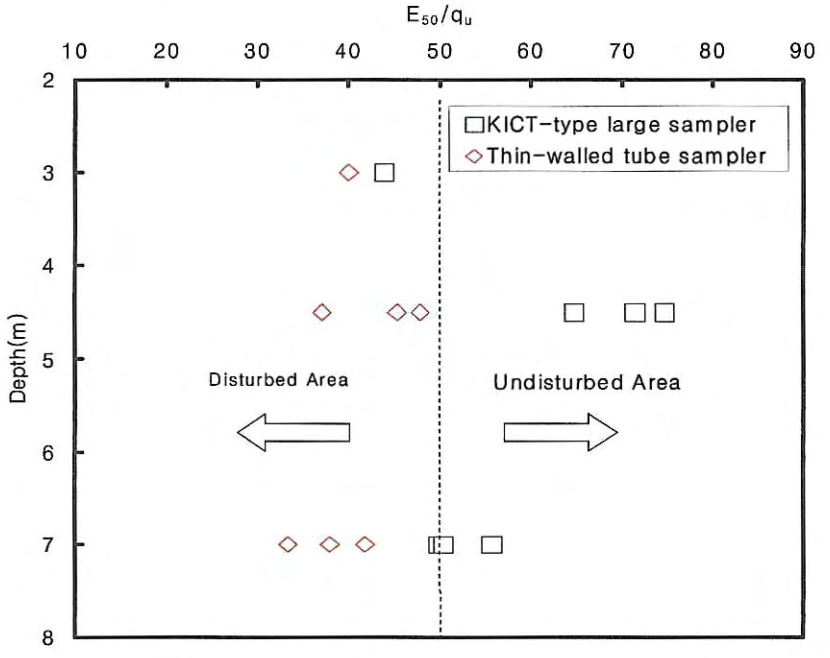


그림 3.40 교란도 분석결과 (Horiuchi, 1977) (모든 시료 결과)

또한, 그림 3.40은 Horiuchi 등(1987)이 제안한 방법을 이용하여 KICT형 대구경 샘플러와 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료의 교란 정도를 판정한 결과를 나타내고 있다. KICT형 대구경 샘플러로 채취한 시료는 모두 교란이 되지 않은 것으로 나타나며, 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료는 모두 교란이 발생한 것으로 나타났다. 이상의 결과를 종합해 보면 KICT형 대구경 샘플러로 채취한 시료가 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료보다 덜 교란된다는 것을 알 수가 있다.

5. 삼축압축시험 결과

시료의 크기 영향을 알아보기 위하여 평택시료에 대해서 일반 삼축시험과 대형 삼축시험을 실시하였다. 표 3.7 에 정리된 실험결과를 확인하여보면 수압식보다 대구경 시료의 마찰각이 커서 더 큰 강도 특성을 나타낸다는 사실을 알 수 있다. 또한 동일한 대구경 시료인 경우에는 일반 삼축시험에 비하여 공시체 크기가 큰 대형 삼축시험이 더 큰 강도 특성을 보이고 있다. 그림 3.41에 삼축시험에서의 축차응력-변형률 관계를 도시하였다. 이 때 축차응력은 압밀하중으로 정규화시켜서 나타내었다. 일반삼축시험의 경우 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이 수압식과 대구경 시료에서 비슷한 축차응력-변형률 관계를 보이고 있으나 대구경 시료가 수압식 시료보다 조금 더 큰 축차응력을 나타낸다. 한편 대구경 시료를 이용한 대형 삼축시험 결과는 축차응력도 가장 크게 나타나면서 축차응력-변형률 관계에서 그래프의 초기기울기도 가장 크게 나타났다. 또한 다른 시료와 달리 응력연화 거동을 나타내고 있어 기존의 연구결과(토질조사법 개정편집위원회, 2005)를 바탕으로 판단해볼 때 대구경 샘플러로 채취한 시료를 이용하여 대형 압밀시험을 실시하는 것이 가장 교란이 작은 시료특성을 나타낸다고 판단된다. 삼축압축시험 결과 중 압밀압 200kPa의 시험 자료를 이용하여 응력경로를 표시하면 그림 3.42와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 수압식 샘플러 시료의 삼축시험 응력경로와 대구경 샘플러 시료의 삼축시험 응력경로가 모두 초기 압축성(contractive) 거동 이후 팽창성(dilative) 거동을 보이는 반면 대구경 샘플러 시료의 대형삼축압축시험은 압축성 거동만을 보이고 있다. 이는 수압식 샘플러의 컷팅날 각도를 줄이거나(30°~5°) 대구경의 Sherbrooke 샘플러를 사용하여 교란을 줄인 시료와 기존 샘플러로 채취한 시료를 비교한 연구결과(Long, 2006)와도 유사한 것이다. 이상

의 결과로부터 대구경 샘플러를 사용하여 시료를 채취한 후 대형 삼축시험을 실시하였을 때 가장 교란이 작은 것으로 판단되지만 이러한 결과는 매우 제한된 수의 특정 흙의 실험에 대한 결과이기 때문에 여기서 나타난 결과를 일반화하기 위해서는 더욱 많은 실험자료의 축적과 분석이 이루어져야 할 것이다.

표 3.7 삼축압축시험 결과

Testing Method		Cohesion intercept c'(kPa)	Angle of shearing ϕ'
Typical triaxial test	Thin-walled tube	6.60	25.05°
	KICT-type	0.84	28.89°
Large triaxial test	KICT type	6.89	30.60°

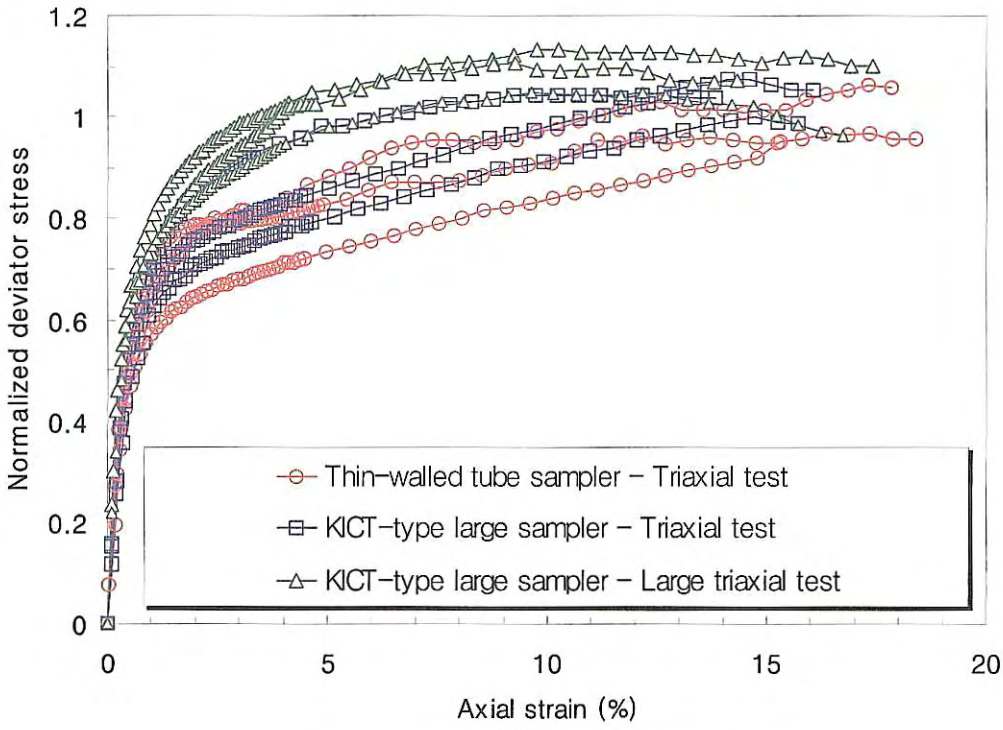


그림 3.41 삼축압축시험에서 축차응력-변형률 관계

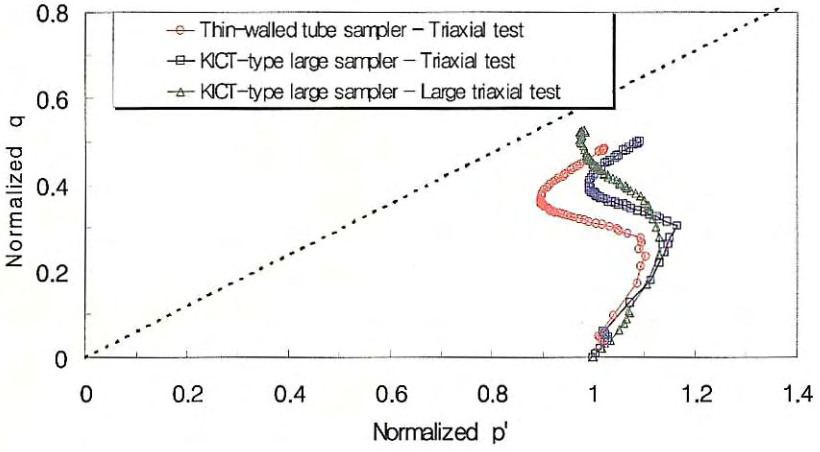
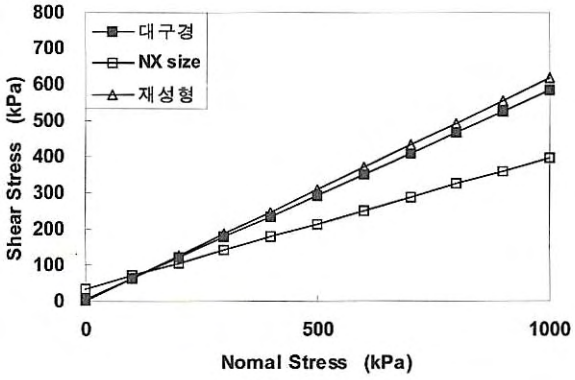
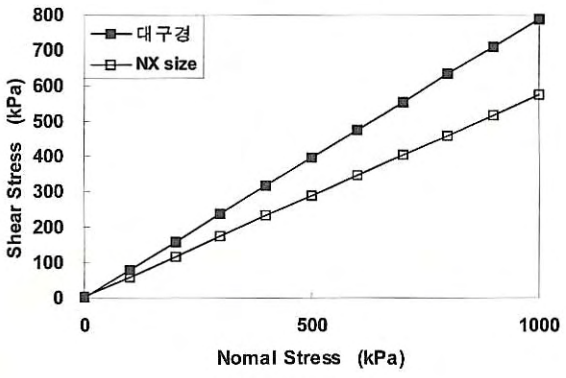


그림 3.42 압밀압 200 kPa의 삼축 시험 응력경로

또한, 청라지역과 인천남항 시료에 대한 삼축압축 거동을 그림 3.43 - 3.47에 나타내고 있다.

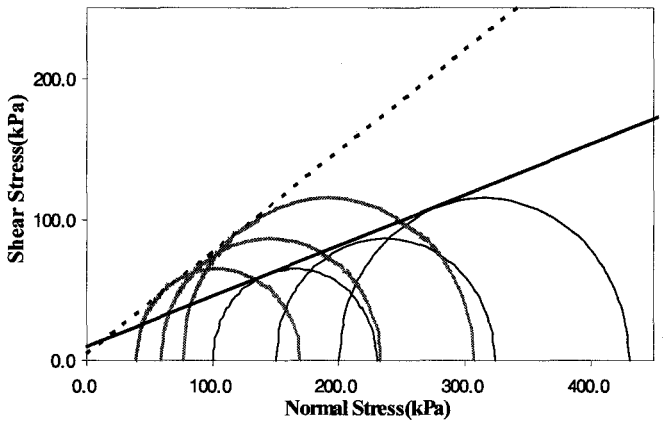


(a) 청라지역

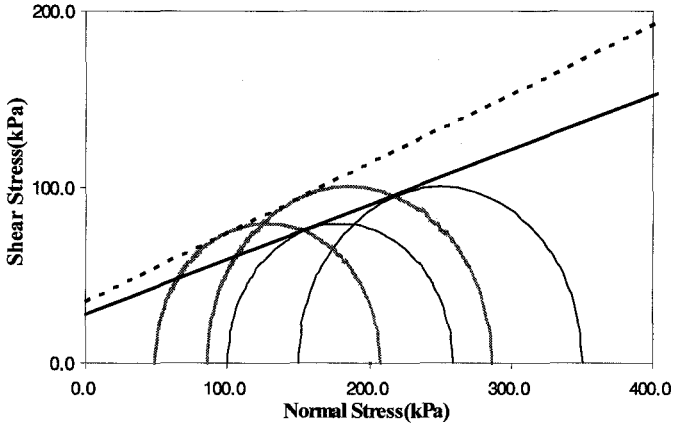


(b) 인천남항

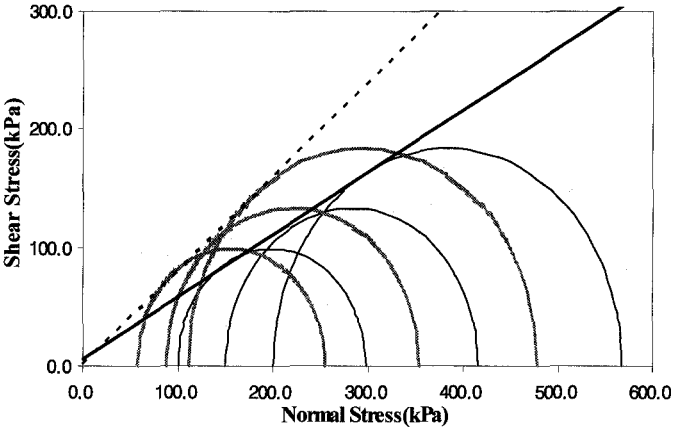
그림 3.43 시료별 파괴포락선



(a) 대구경 샘플러

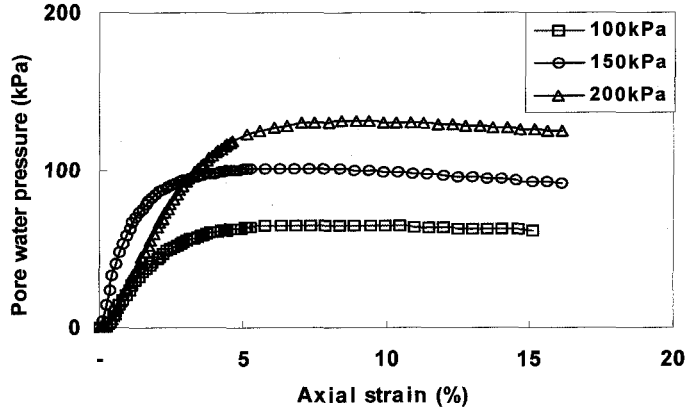


(b) NX size 샘플러

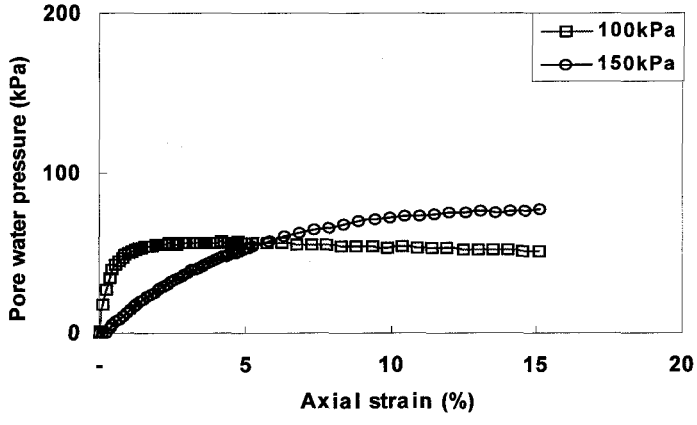


(c) 재성형 시료

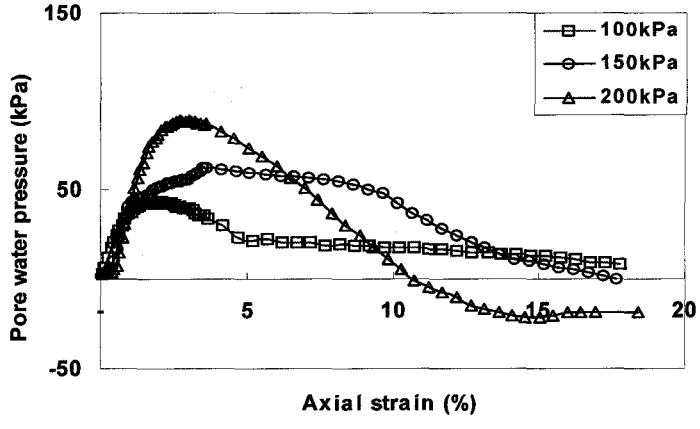
그림 3.44 청라지역 Mohr-Coulomb 파괴포락선



(a) 대구경 샘플러

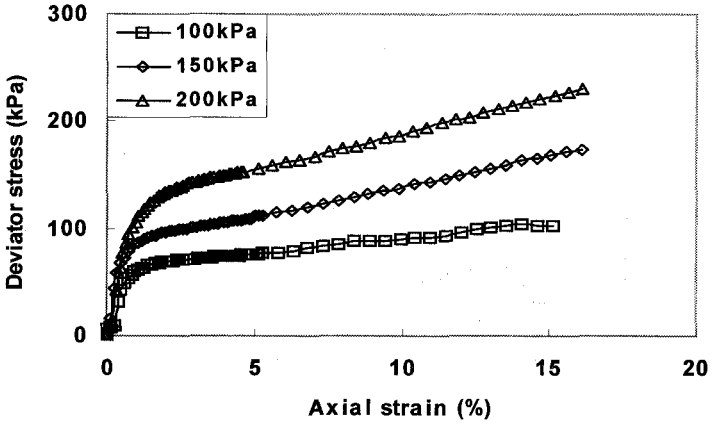


(b) NX size 샘플러

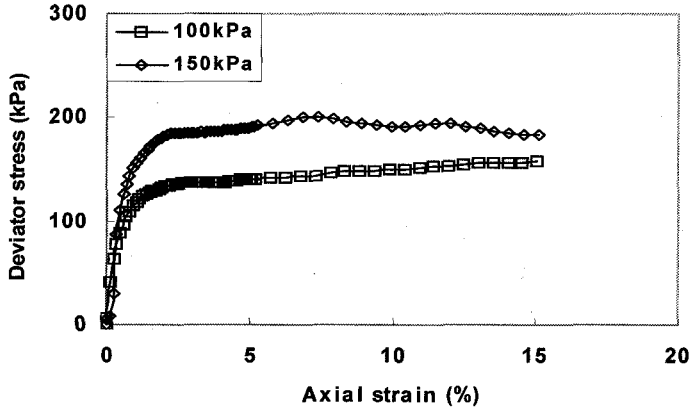


(c) 재성형 시료

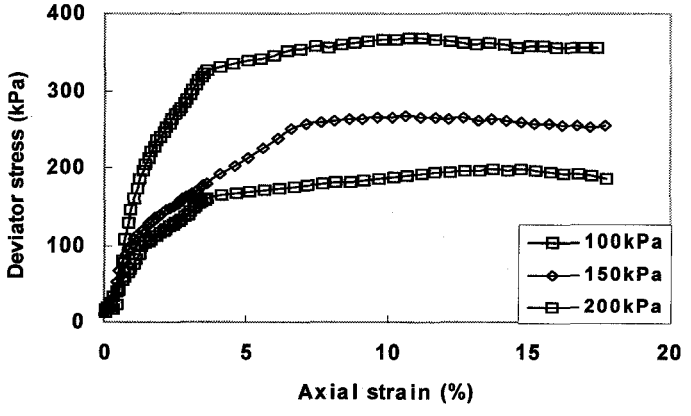
그림 3.45 청라지역 간극수압 그래프



(a) 대구경 샘플러

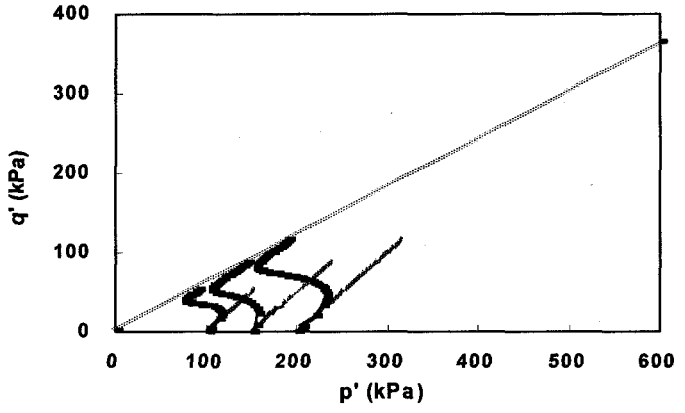


(b) NX size 샘플러

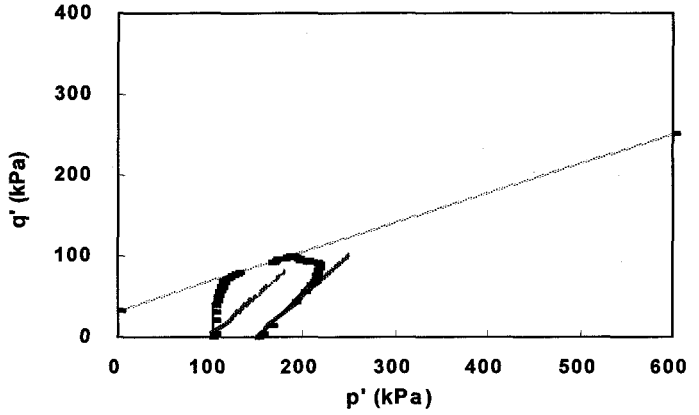


(c) 재성형 시료

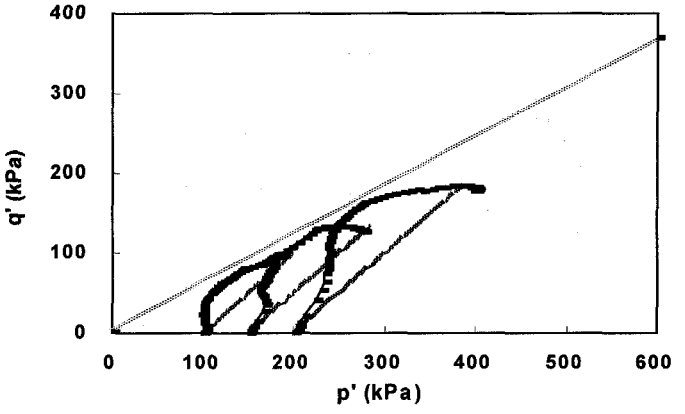
그림 3.46 청라지역 축차응력-변형률 그래프



(a) 대구경 샘플러



(b) NX size 샘플러



(c) 재성형 시료

그림 3.47 청라지역 응력경로 그래프

청라지역의 삼축압축시험 결과 그래프에서 불교란 시료 즉, 대구경 샘플러와 NX size 샘플러로 채취된 시료는 모두 정규압밀점토의 거동을 보였고 응력경로는 간극수압이 일정압력까지 올라간 후 파괴될 때까지 유지되어 ESP(Effective stress path)가 K_f선 쪽으로 이동하며 결국 파괴에 이르는 현상을 보이고 있다. 그에 반해 재성형 시료는 과압밀점토의 거동으로 간극수압이 파괴점까지 증가하다가 다시 감소하는 거동을 나타내었다. 따라서 ESP가 K_f선으로 향하다가 다시 음의 간극수압을 받아 유효응력의 증가를 보인다. 이는 재성형 과정에서 원지반이 받고 있던 상재하중이상의 압력이 가해졌기 때문으로 판단된다.

대구경 샘플러 시료와 NX size 샘플러 시료의 응력경로를 비교하면 대구경 샘플러 시료는 ESP가 구속압에 따라 일정한 형상을 하는 반면 NX size 시료의 ESP는 형상이 구속압에 따라 상이하게 이동하는 거동을 보인다. 이는 시료추출과정 뿐만 아니라 시료의 운반, 시료의 성형에서도 대구경 샘플러로 채취한 시료가 교란에 더 안정적임을 보여준다.

6. 공진주 및 비틂전단시험 결과

(a) 시험개요

교란에 따른 동적물성치를 평가하기 위하여, 인천 청라지구에서 채취한 불교란 시료에 대하여 KAIST 건설 및 환경공학과 지반동역학 연구실(김동수 교수) 보유 장비를 이용하여 공진주 및 비틂전단시험을 실시하였다. 시험 시료는 현장지반의 5m 깊이에서 수압식 피스톤 샘플러 (75mm Shelby tube)와 직경 200mm 대구경 샘플러로 각각 채취되었고, 채취된 시료 각각에 대해 공진주/비틂전단시험을 수행하여 전단변형률 크기에 따른 전단탄성계수(Shear Modulus, G), 정규화 전단탄성계수(Nomalized Shear Modulus, G/G_{max}), 감쇠비(Damping Ratio, D) 변화를 평가하였다.

(b) 공진주/비틂전단 시험의 개요 및 원리

(1) 공진주/비틂전단시험의 개요

공진주/비틂전단 (Resonant Column & Torsional Shear, RC/TS)시험은 저변형률 (0.0001%<γ<0.001%) 및 중간변형률(0.001%<γ<0.5%)에서 전단탄성계수(G) 및 감쇠비(D)와 같은 지반의 비선형 동적변형특성을 가장 신뢰성 있게 평가할 수 있는 시험 기법으로 현재까지 널리 사용되고 있다.

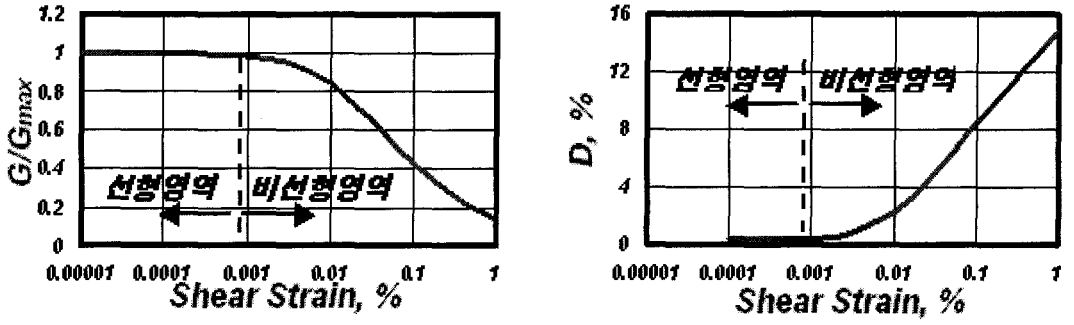


그림 3.48 지반의 비선형 동적변형특성

본 시험에서 사용한 Stokeo type RC/TS 시험 시스템은 동일한 시편에서 동적시험인 공진주 시험과 반복시험인 비틂전단시험을 수행하므로 두 시험 결과를 효과적으로 비교할 수 있는 장점과 더불어, 코일-자석 시스템을 이용하여 시료에 비틂력을 가함으로서 유압식이나 기계식으로 작동하는 대부분의 반복시험기와는 달리 시험 시스템의 순응도 문제없이 저변형률 영역에서 비틂전단시험을 수행할 수 있다. 또한 비틂전단시험에서 하중반복횟수와 하중주파수(0.01Hz~10Hz)를 자유롭게 조절이 가능하여 변형특성에 대한 하중반복회수, 하중주파수의 영향을 효과적으로 평가할 수 있고, 컴퓨터와 계측기의 상호호환을 이루어서 실험수행, 결과획득 및 분석까지 시험 방식의 효율성을 높였다.

(2) 공진주 시험

공진주 시험 시스템의 개략적인 형상은 그림 3.49와 같다. 공진주 시험은 시편의 바닥을 고정시키고 정현파 비틂력을 주파수를 변화시켜가며 시료의 윗 단부에 작용시키고 주파수에 따른 시료의 변위를 가속도계 (Accelerometer)를 통해 측정하여

그림 3.50과 같은 주파수 응답곡선을 획득하게 된다. 원통형 시료가 1차 모드에서 공진이 유발될 때의 탄성파 전달 이론을 바탕으로 하여 시료의 전단변형률에 따른 전단파속도, 전단탄성계수 및 감쇠비와 같은 동적 물성치를 결정하게 된다.

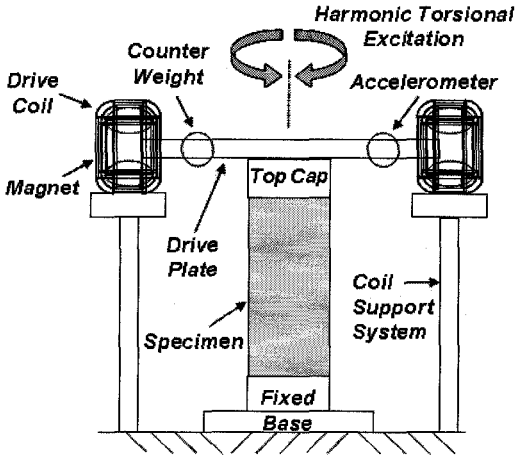


그림 3.49 공진주 시험 시스템의 개략도

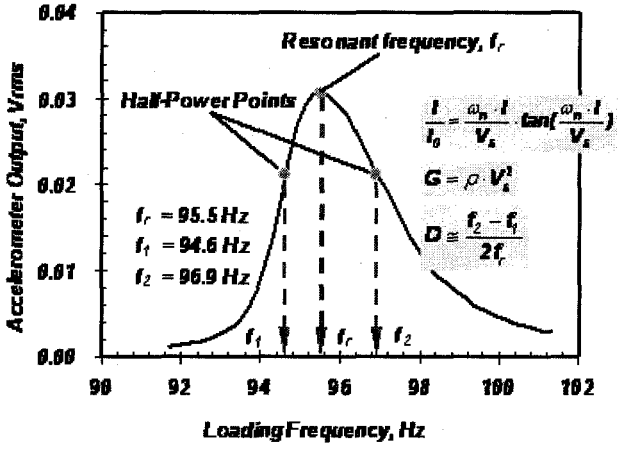


그림 3.50 전형적인 주파수 응답곡선

공진주 시험에서 전단탄성계수는 탄성파 전달 이론으로부터 유도된 1차원 파동방정식에 근거하여 계산되며, 공진주파수의 지배방정식은 식 3.2와 같다 (Richart et al., 1970).

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega_n l}{V_S} \cdot \tan(\frac{\omega_n l}{V_S}) \qquad \text{(식 3.2)}$$

여기서, I = 시료의 질량 관성모멘트

I_0 = 가진시스템의 질량 관성모멘트

l = 시료의 길이

V_S = 시료의 전단파 속도

ω_n = 고유 주파수(natural frequency)

실제 시험에서는 고유주파수(ω_n) 대신 공진주파수(ω_r)가 측정되므로 본 연구에서는 지배방정식을 통한 전단파 속도의 계산에 고유주파수 대신 공진주파수를 사용하였다. 시스템 감쇠비(D_{eq})가 없다고 가정할 때, 고유주파수와 공진주파수의 관계는 다음과 같다.

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1-2D^2} \qquad \text{(식 3.3)}$$

일반적으로 재료 감쇠비는 20% 미만이므로, 고유주파수와 공진주파수는 5%미만의 차이를 갖게 된다. 따라서 고유주파수 대신 공진주파수를 사용하여도 큰 오차는 주지 않음을 알 수 있다.

식 3.2를 통해 계산된 전단파 속도로부터 식 3.4를 이용하여 전단탄성계수를 구할 수 있다.

$$G = \rho V_s^2 \qquad \text{(식 3.4)}$$

여기서 ρ는 시료의 단위중량을 나타낸다.

전단변형률은 시료내부에서 중심축으로부터의 거리에 따라 변하게 되기 때문에, 등가반경을 이용하여 시료의 전단변형률 값을 대표 할 수 있는 대표 전단 변형률을 이용하게 된다. 본 실험에서는 ASTM의 규정에 의거하여 시료 반경의 0.8배를 사용하였다(ASTM D4015-92).

이와 같은 대표 전단변형률은 가속도계의 출력으로부터 결정되는 시편의 변위와 높이, 시편중심으로부터 가속도계가 설치된 곳까지의 거리에 관계되고, 식 3.5를 이

용하여 계산된다.

$$\gamma = r_{eq} \frac{A_c}{4\pi^2} \frac{T_r^2}{CF} \frac{1}{D_{ac}} \frac{1}{l} \qquad \text{(식 3.5)}$$

여기서, r_{eq} = 등가 반경

T_r = 공진 주기

A_C = 가속도계의 출력 전압

CF = 가속도 - 가속도계 출력전압 상관계수(calibration factor)

D_{ac} = 시편중심으로부터 가속도계가 설치된 곳까지의 거리

l = 시편의 높이

공진주 시험에서 감쇠비는 Half-power bandwidth법 또는 자유진동 감쇠법의 두 가지 방법을 통해 계산될 수 있다. Half-power bandwidth법은 그림 3.50에 나타낸 바와 같이 공진주파수 근처에서의 주파수 응답곡선의 폭을 통해 감쇠비를 결정하는 방법이다. 식 3.6을 이용하여 주파수 응답곡선에서의 로그편차를 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{\pi}{2} \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_r^2} \sqrt{\frac{A^2}{A_{max}^2 - A^2}} \frac{\sqrt{1-2D^2}}{1-D^2} \qquad \text{(식 3.6)}$$

여기서, f_1 = 가속도계 출력값이 A인 공진 전의 주파수

f_2 = 가속도계 출력값이 A인 공진 후의 주파수

f_r = 공진주파수

A가 $0.707A_{max}$ (그림 3.50의 half-power point)와 같고 감쇠비가 충분히 작다면 식 3.6은 동역학 이론에 의해 식 3.7과 같이 간략히 표현될 수 있다 (Richart et al., 1970).

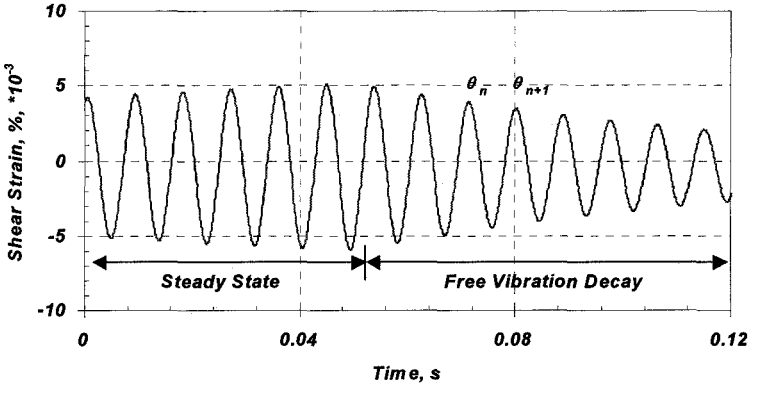
$$D=\frac{f_2-f_1}{2f_r} \quad \text{(식 3.7)}$$

자유진동 감쇠법은 시료에 공진 주파수로 가진력을 재하하다 차단하여, 그림 3.51과 같은 자유진동 감쇠곡선을 획득하여, 연속되는 두 개의 진폭의 자연 로그비를 이용하여 감쇠비를 구하는 방법이다(식 3.8과 식 3.9 ; Richart et al., 1970).

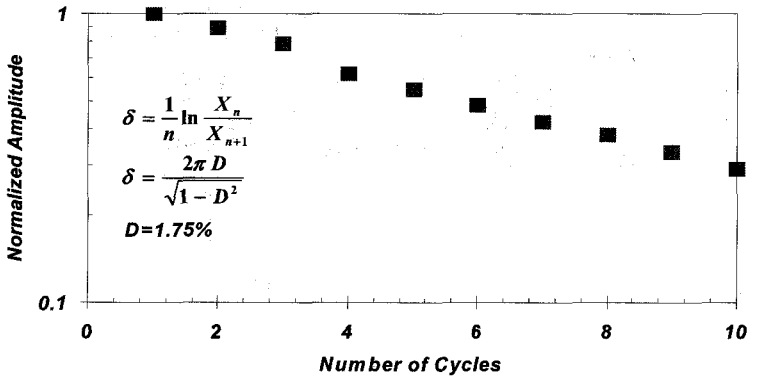
$$\delta=\ln\left(\frac{\Theta_1}{\Theta_2}\right)=\frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad \text{(식 3.8)}$$

$$D=\sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2+\delta^2}} \quad \text{(식 3.9)}$$

여기서, Θ_1, Θ_2 = 두개의 잇따른 변형률의 진폭, D = 감쇠비



(a) 자유진동감쇠곡선



(b) 자유진동감쇠곡선의 해석

그림 3.51 자유진동감쇠곡선을 이용한 감쇠비 결정법

(3) 비틂전단 시험

비틂전단 시험은 공진주 시험과 동일한 시험 시스템을 사용하여, 다른 시험방법에 의해 전단탄성계수 및 감쇠비를 결정하게 된다. 비틂전단 시험의 개략적인 현상은 그림 3.52와 같다. 10Hz 이하의 고정된 주파수의 반복 비틂력을 시료의 윗단부에 재하하며 간격측정기(Proximitor)를 이용하여 시료의 비틂각을 측정하고, 코일에 가해지는 전압으로부터 비틂력 환산계수를 적용하여 비틂력을 결정하여 그림 3.53과 같은 응력-변형률 이력곡선을 구성한다. 가진 전압의 크기를 바꾸어 가며 각 전단변형률에서의 응력-변형률 이력곡선의 기울기로부터 전단탄성계수를 결정하게 되고, 또한 응력-변형률 이력곡선의 면적으로부터 감쇠비를 결정하게 된다. 그리고 동일한 가진 전압을 사용하며 하중주파수를 변화시키며 비틂전단 시험을 수행하여 하중주파수에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 변화를 검토할 수 있다.

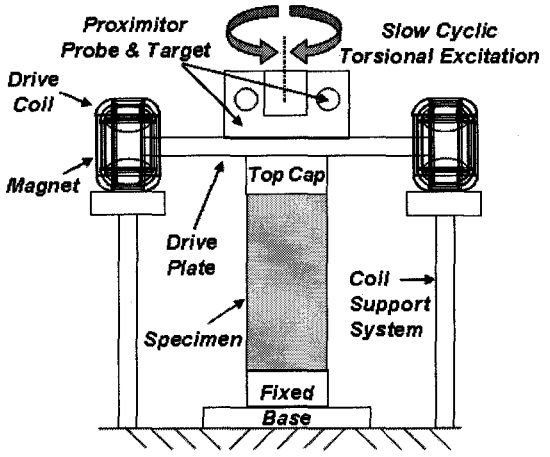


그림 3.52 비틂전단 시험 시스템의 개략도

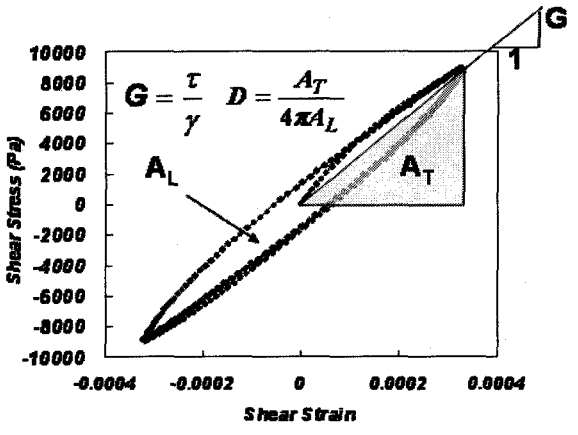


그림 3.53 전형적인 응력-변형률 이력곡선

비틂전단 시험의 전단응력과 전단변형률은 탄성이론을 바탕으로 정의된다. 전단응력이 반지름을 따라 선형으로 증가한다고 가정하면, 원통형 시료가 받는 순수 비틂력과 전단응력과의 관계는 식 3.10과 같다.

$$T = \int_{r_i}^{r_o} \tau_r (2\pi r) r dr = \frac{\tau_m}{r_0} \frac{\pi}{2} (r_0^4 - r_i^4) = \frac{\tau_m J_p}{r_0} \qquad \text{(식 3.10)}$$

여기서, r은 시료의 중심으로부터의 거리 r에서의 전단응력, τ_m은 시료 표면의 최대 전단응력, J_P는 관성모멘트, r_0와 r_i는 각각 시료의 외경과 내경을 나타낸다.

전단응력은 반지름 방향으로 선형적으로 변화하므로 대표 비틂전단응력(τ_{eq})은 식 3.11과 같이 정의된다.

$$\tau_{eq}=r_{eq}\frac{T}{J_p} \quad \text{(식 3.11)}$$

공진주 시험에서와 같은 등가반경(r_{eq})을 적용하고, 비틂력을 가진시스템에 가해진 입력전압(V_T, V)과 비틂력 환산계수(K_T, Nm/V)의 곱으로 나타내면 시료의 전단응력은 식 3.12로 표시된다.

$$\tau_{eq}=\frac{r_{eq}\cdot K_T\cdot V_T}{J_p} \quad \text{(식 3.12)}$$

전단변형률은 간격측정기를 이용한 변위 측정시스템을 통하여 측정되는 비틂각으로부터 환산된다. 전단변형률은 간격측정기의 출력전압(V_P, V), 비틂각 환산계수(K_P, rad/V)로부터 비틂각을 환산하여 식 3.13과 같이 계산 된다.

$$\gamma=\frac{r_{eq}\cdot K_p\cdot V_p}{l} \quad \text{(식 3.13)}$$

이와 같이 응력-변형률 이력곡선을 획득하면, 전단탄성계수는 그림 3.53과 같이 이력곡선의 양 끝점을 연결한 선의 기울기로부터 계산된다(식 3.14; Ishihara, 1996).

$$G=\frac{\tau}{\gamma} \quad \text{(식 3.14)}$$

비틂전단 시험에서의 감쇠비는 한 응력이력 단계에서 흡수된 에너지와 같은 단계에서 시료가 받는 최대 변형률 에너지로부터 결정할 수 있다. 그림 3.53에 나타낸 바와 같이 흡수된 에너지는 응력-변형 이력곡선의 면적(A_L)과 같으며 최대 변형률 에너지는 0부터 최대 변형률 사이에서 응력-변형 이력 곡선의 양 끝점을 연결한 직선 아래 부분의 면적(A_T)과 같다. 이와 같은 관계를 적용하여 감쇠비를 식

3.15와 같이 획득 할 수 있다.

$$D \cong \frac{A_L}{4\pi \cdot A_T} \qquad \text{(식 3.14)}$$

(c) 공진주/비틂전단시험 시스템

(1) 공진주/비틂전단시험 시스템의 구성

공진주/비틂전단시험 시스템은 크게 ①본체 및 압력조절부 ②하중재하부 ③변위 측정부 ④시험기 제어부로 구성된다. 시험기 제어부를 제외한 공진주/비틂전단시험 시스템의 개략도를 그림 3.54에, 전자동화를 위한 공진주/비틂전단시험 시스템의 구성 개요도를 그림 3.55에 각각 나타내었다. 또한 KAIST에서 현재 보유하고 있는 공진주/비틂전단 시험 시스템의 모습을 그림 3.56에 나타내었다.

① 본체(Main Body) 및 압력조절부

시험 시스템 몸체는 시편거치 및 압밀 중 배수를 위한 시편거치대, 시험시편과 자석시스템을 연결해주는 탑캡, 코일-자석시스템 및 프록시미터 지지를 위한 지지대, 시편에 구속압 재하를 위한 구속셀 등으로 구성되어 있다. 본 시험 시스템에서는 멤브레인으로 둘러싸인 시료 외부에 압축공기을 가하여 대기압과의 차이만큼이 구속압으로 재하되도록 한다. 본 기관에서는 압력조절기(Regulator)를 이용하여 최대 5 Bar 까지의 구속압 재하가 가능하며 이는 시험 시편의 현장 구속응력을 재현하기 위해 충분한 압력이다.

② 하중 재하부

하중 재하부는 코일-자석시스템, 신호발생기 및 증폭기로 구성되어 시험 시편에 비틂력을 가하는 역할을 한다. 비틂력은 신호발생기에서 유발된 정현파형의 전압이 코일에 가해져 자석과의 상호작용에 의해 생기는 전자기적 힘에 의해 유발된다. 또한 신호발생기의 최대 출력 전압이 10V로 제한되어 있으므로 증폭기를 사용하여 최대 60V의 전압을 출력할 수 있도록 구성하였다.

③ 변위 측정부

공진주시험과 비틂전단시험은 다른 주파수대역에서 시험이 이루어지기 때문에 각각 다른 변위측정 시스템을 구성하여야 한다. 공진주 시험에서는 수십 Hz에서 시험이 수행되므로 그 대역에서 신호 획득 능력이 좋은 가속도계를 사용하여 변위 및 시편의 공진주파수를 측정하고, 비틂전단시험에서는 10Hz미만의 낮은 주파수에서 시험이 수행되므로 간격측정기(Proximitor, Bently Nevada)를 사용하여 변위측정 시스템을 구성하였다.

또한 사질토와 달리 점성토 시편은 구속압이 가해지는 압밀 과정 동안 많은 양의 높이 변화가 발생하게 된다. 이를 측정하기 위해 그림 3.54에 나타낸 바와 같이 구속 셀에 간격측정기를 설치하여 시편과의 접촉 없이 시편의 높이 변화를 측정하도록 하였다. 시편의 높이는 공진주 시험의 결과 해석시 직접적으로 영향을 주는 요소이므로 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해 필수적으로 고려되어야 한다.

④ 시험기 제어부

시험기 제어부는 공진주/비틂전단시험 시스템을 자동으로 제어하는 장치로 자동수행의 중심이 되는 컴퓨터, 시스템 운용을 위한 프로그램, 컴퓨터와 전자장비들을 인터페이싱하는 도구로 구성된다. 자동화 프로그램은 National Instrument사의 상용 프로그램 LabVIEW라는 그래픽 언어를 사용하여 제작하였고, 이는 전자장비들을 조직적으로 운용하여 시험절차에 맞는 시험을 수행하게 하고, 수행된 시험결과를 분석하여 지반물성을 산정해내는 두 가지 역할을 하게 된다. 그림 3.57은 본 프로그램의 초기화면으로, 왼쪽 메뉴에서 사용자는 시험을 선택하여 수행하게 되고, 화면의 오른쪽에서 시험 시스템에 설치되어 있는 압력센서를 통해 획득한 시료의 응력상태를 정밀하게 모니터링 하게 된다. 컴퓨터와 계측시스템 사이의 인터페이싱은 계측시스템과 컴퓨터 사이에 통신선을 구성하기 위한 National Instrument사의 GPIB 보드와 신호발생기 및 계측시스템의 신호 획득 및 디지털화를 위한, A/D보드를 이용하여 구현하고 있다.

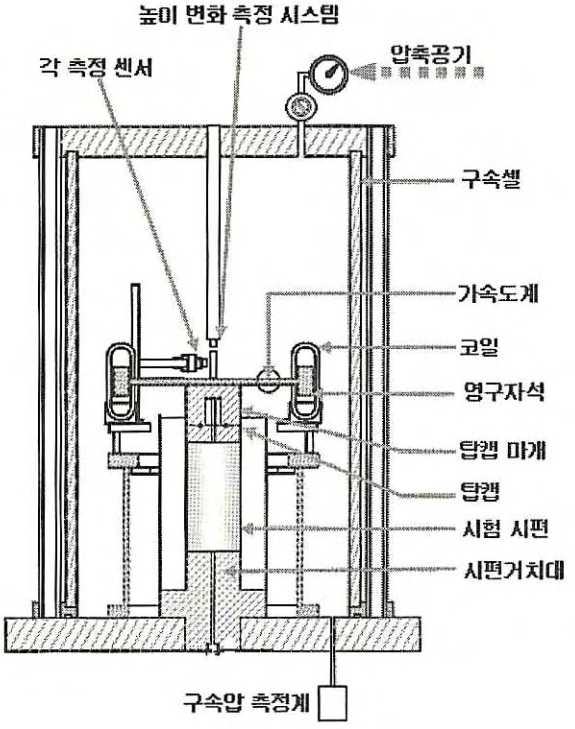


그림 3.54 공진주/비틂전단시험 시스템의 개략도

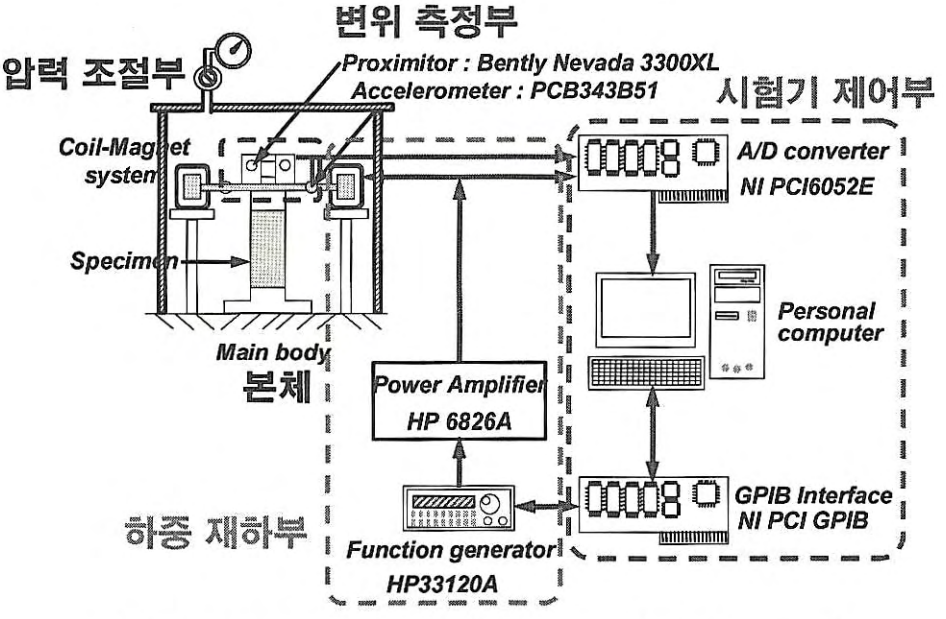


그림 3.55 전자동 공진주/비틂전단시험 시스템의 구성도

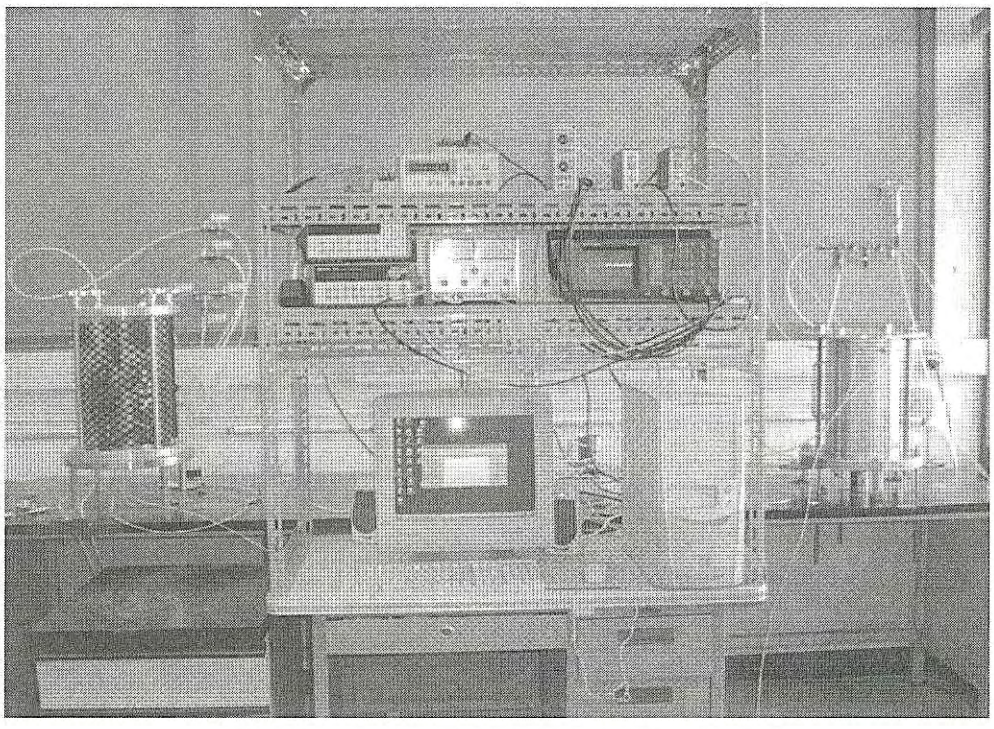


그림 3.56 공진주/비틂전단시험 시스템 모습

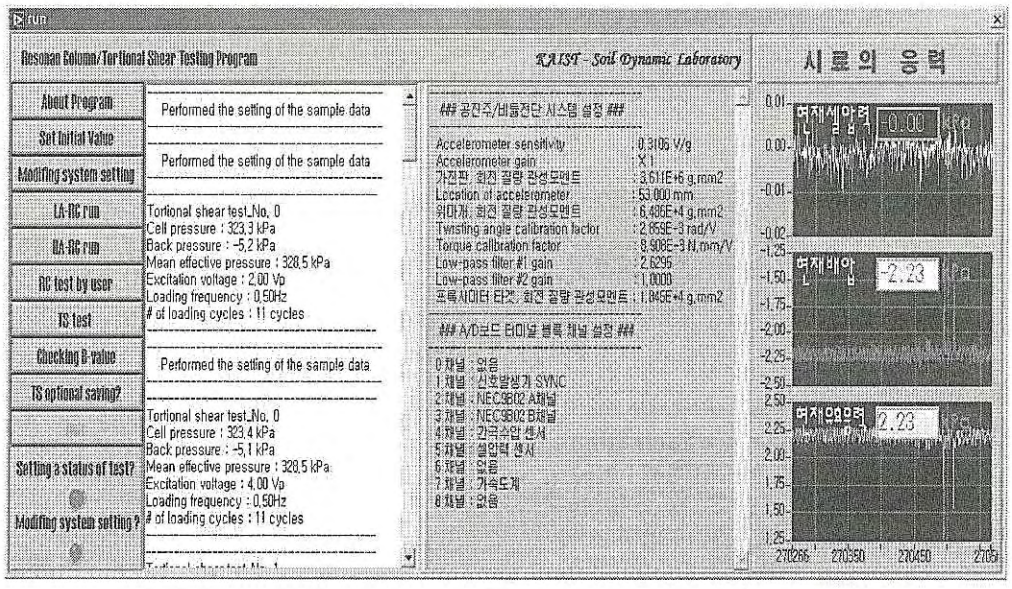


그림 3.57 전자동 RC/TS시험 수행 프로그램의 초기화면

(d) 공진주/비틂전단시험 수행 과정

공진주/비틂전단시험을 수행하기에 앞서, 본 시험에서 사용하는 시료를 공진주/비틂전단시험 시스템에 맞게 성형하기 위해 (직경, 50mm, 높이 100mm), trimming 기법을 적용하였다. 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 경우에는, 시료 추출기를 이용하여 적당한 길이만큼 추출한 후, trimming을 수행하였고, 대구경 샘플러로 채취한 경우에는, 교란 정도를 고려하여 그림 3.58과 같이 중심에 위치한 시료를 이용하여 trimming을 수행하였다. trimming이 완료된 후 시험 시편의 모습을 그림 3.59에 나타내었다.

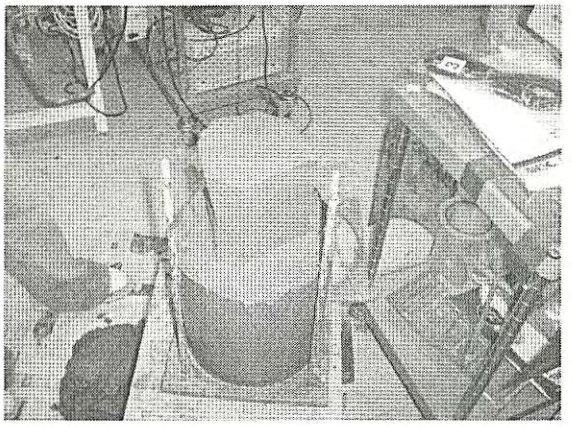


그림 3.58 대구경 시편 trimming 과정

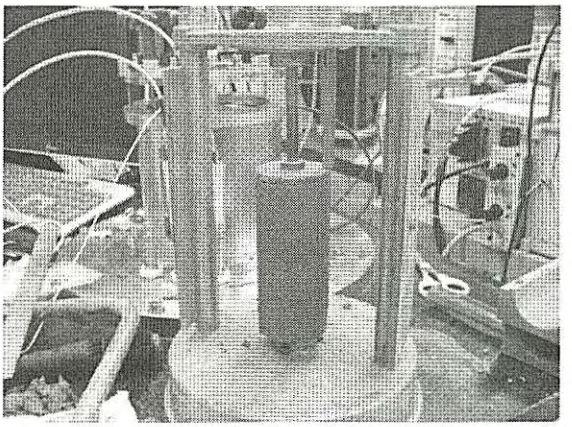


그림 3.59 trimming이 완료된 후 모습

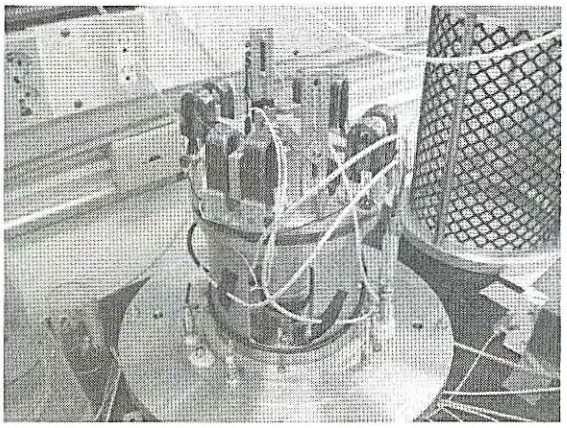


그림 3.60 RC/TS 시험 시스템 세팅

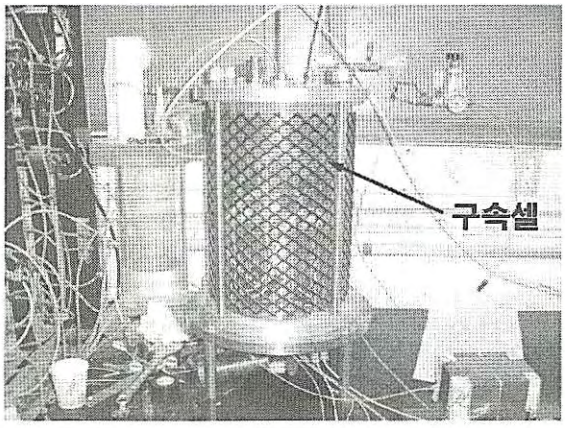


그림 3.61 구속응력 재하

제작된 시험 시편을 시험기 본체에 거치한 후 공진주/비틂전단시험 시스템을 세팅하고(그림 3.60), 압축공기를 사용하여 등방의 구속응력을 재하 하였다(그림 3.61). 다양한 구속응력에 대한 시험 시편의 변형특성을 평가하기 위해 현장지반에서 시료가 경험하는 유효평균주응력의 0.5배, 1배, 100kPa의 구속응력에서 시험을 반복적으로 수행하였다. 시료가 경험하는 유효평균주응력은 시료가 채취된 층의 중심 깊이를 기준으로 시료의 단위중량, 그리고 지하수위 자료로부터 식 3.15와 같이 계산하였다.

$$\sigma'_m = \frac{1}{3}\sigma'_v(1 + 2K_o) \qquad \text{(식 3.15)}$$

여기서, σ'_m = 유효평균주응력, σ'_v = 유효수직응력, K_o = 정지토압계수

식 3.15에서 정지토압계수(K_o)는 0.5로 가정하였고, 단위중량은 채취된 비교란 시료를 이용하여 결정하였다. 계산된 시료의 현장지반에서 경험하는 평균주응력과, 각 시료에 적용한 구속응력은 35, 70, 100 kPa이다.

각 구속응력 단계에서의 24시간 동안의 압밀과정을 완료한 후, 공진주/비틂전단 시험을 수행하였다. 먼저 비틂전단시험을 저변형률 단계부터 변형률 크기를 증가시키며 실시한다. 이때 하중재하횟수는 11회로 하였고, 하중주파수는 0.5Hz로 하였다. 또한 전단변형률 10^{-3}%와 10^{-2}% 근처에서는 시험 시편의 하중주파수에 따른 전단탄성계수의 영향을 평가하기 위해 하중주파수를 0.05Hz, 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 5Hz, 10Hz로 달리하여 비틂전단시험을 수행하였다. 비틂전단 시험이 완료된 후, 1시간 가량의 시편 강도 회복을 위한 휴지기간을 갖고 공진주시험을 저변형률에서 고변형률로 변형률 크기를 증가시키며 실시하였다. 공진주파수는 일정한 입력전압에서 하중주파수를 바꾸어가면서 시료의 반응을 측정한 주파수응답곡선으로부터 결정한다. 공진주시험이 완료되면 다음 구속압 단계로 올려서 위와 같은 과정을 반복하며 시험을 계속하였다. 위에서 설명하였듯이, 공진주/비틂전단시험은 다단계시험법(multi-stage testing method)을 이용하여 하나의 시료로 여러 구속압 상태에서의 변형특성을 효과적으로 평가할 수 있다.

(e) 공진주/비틂전단 시험결과

(1) 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료의 시험결과 (Test 1)

① 공진주 시험결과

공진주 시험을 통한 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료의 구속응력별 변형률 크기에 따른 전단탄성계수(Shear Modulus Reduction Curve, G-logγ) 감소곡선, 정규화 전단탄성계수 감소곡선(Normalized Shear Modulus Reduction Curve, G/G_{max}-logγ), 감쇠비 곡선(D-logγ)을 그림 3.62에 나타내었다. 그림 3.62에서 보듯이, 공진주 시험은 10^{-3}%~0.1%의 변형률 범위에서 신뢰성 있는 값을 제공하고 있다.

시험결과에서 나타난 바와 같이 전단탄성계수, 감쇠비와 같은 지반의 변형특성은 전단변형률의 크기에 큰 영향을 받는다. 전단변형률의 크기가 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하여 비선형 곡선을 형성하고 있다. 또한 구속응력이 증가함에 따라 전체 변형률 영역에서 전단탄성계수 감소곡선은 위쪽으로, 감쇠비 곡선은 아래편으로 이동하고 있다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선 역시 큰 변화는 아니지만, 구속응력이 증가함에 따라 오른쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 구속응력이 증가함에 따라 비선형성이 시작되는 변형률(선형한계 전단변형률)의 크기가 증가함을 의미한다.

② 비틂전단 시험결과

비틂전단 시험을 통한 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료의 구속응력별 변형률 크기에 따른 전단탄성계수(Shear Modulus Reduction Curve, G-logγ) 감소곡선, 정규화 전단탄성계수 감소곡선(Normalized Shear Modulus Reduction Curve, G/G_{max}-logγ), 감쇠비 곡선(D-logγ)을 그림 3.63에 나타내었다. 그림 3.63에 나타낸 시험 물성치 값들은 10회 하중재하 단계에서의 응력-변형률 이력곡선으로부터 획득하였다. 비틂전단 시험은 10^{-4}%~0.1%의 변형률 범위에서 신뢰성 있는 값을 제공하고 있고, 공진주 시험에서의 변형률 영역보다 좀 더 미소변형률에서의 변형특성 값을 획득할 수 있는 장점이 있다.

공진주 시험과 마찬가지로 전단탄성계수, 감쇠비와 같은 지반의 변형특성은 전단변형률의 크기에 큰 영향을 받는다. 전단변형률의 크기가 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하여 비선형 곡선을 형성하고 있다. 또한 구속응력이 증가함에 따라 전체 변형률 영역에서 전단탄성계수 감소곡선은 위쪽으로, 감쇠비 곡선은 아래편으로 이동하고 있다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선 역시 큰 변화는 아니지만, 구속응력이 증가함에 따라 오른쪽으로 이동하여 경향성이 공진주 시험과 일치함을 확인할 수 있다.

하중주파수가 변형특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 전단 변형률 영역 0.001%, 0.01%에 대해, 각 구속압 단계에서 하중주파수에 따른 전단탄성계수의 관계를 그림 3.64에 나타내었다. 하중주파수가 커짐에 따라 전단탄성계수는 하중주파수의 대수증가에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

③ 구속압 영향평가

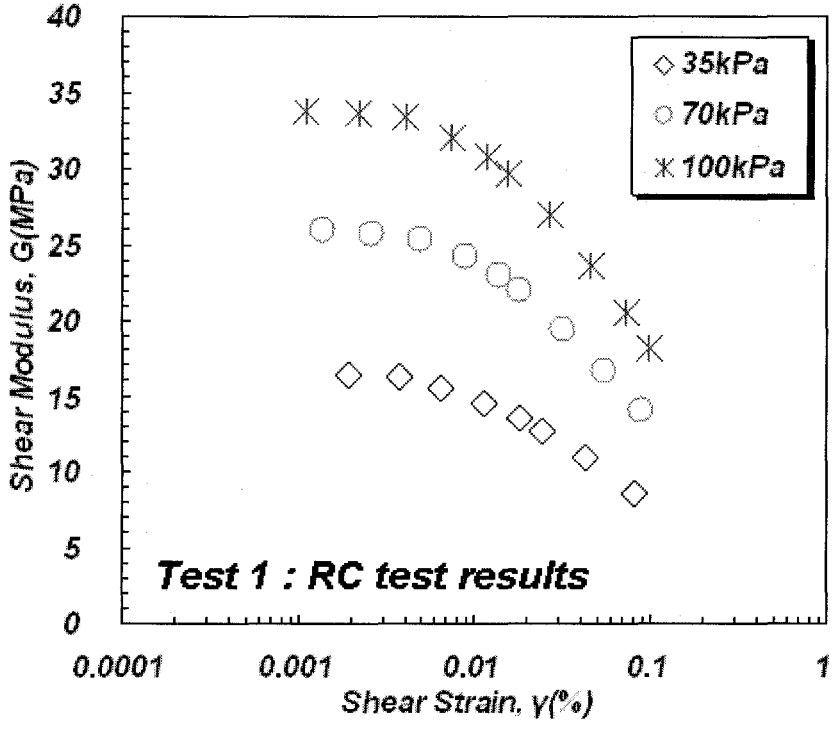
공진주/비틂전단 시험으로부터 획득한 최대 전단탄성계수 값을 이용하여 시험 시편의 구속압 영향 평가를 수행하였다. Hardin(1978)은 물질강성계수, 간극비 함수, 평균유효응력, 구속압 영향계수를 이용하여 다음과 같은 최대 전단탄성계수 실험식을 제안하였다.

$$\frac{G_{max}}{P_a} = F(e) \cdot S_m \cdot \left(\frac{\sigma_m'}{P_a}\right)^n \qquad \text{(식 3.16)}$$

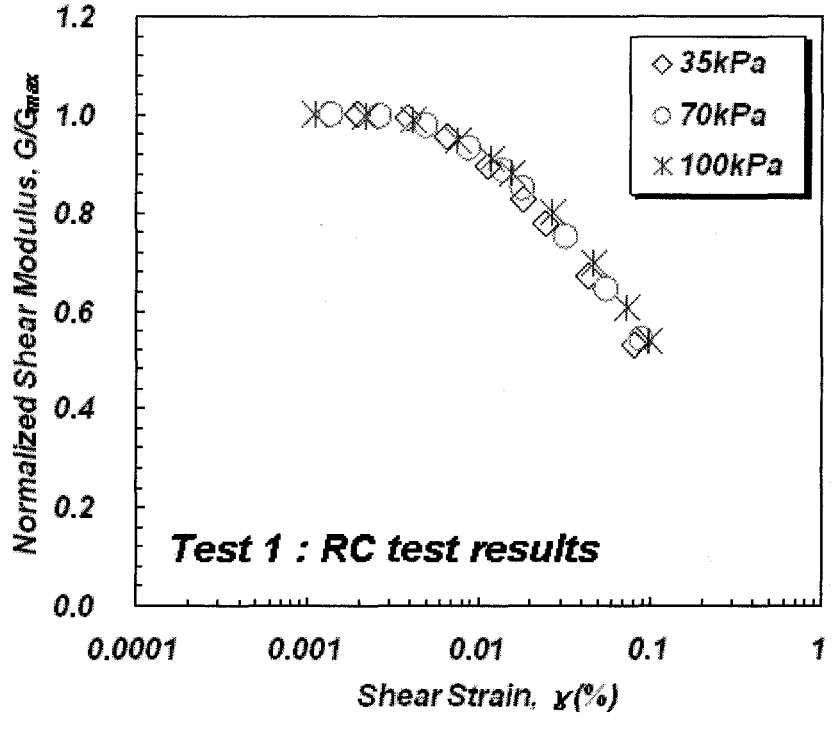
여기서, F(e)는 간극비 함수, S_m은 물질강성계수, P_a는 대기압(101 kPa), n은 구속압 영향계수를 의미한다.

점성토 지반에 대하여 시편의 구속압 영향 정도를 나타내는 구속압 영향계수 n값은 소성지수, 세립분 함유량 등 다양한 요소에 대하여 영향을 받지만 일반적으로 0.5~0.7의 범위를 나타낸다. 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료의 공진주 시험을 통해 획득한 n값은 0.6860, 비틂전단 시험을 통해 획득한 n값은 0.6417로 일반적인 점성토 지반의 n값 범위 안에 들어오는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 n값은 실내에서 시험이 수행되지 않은 구속압의 현장지반 전단탄성계수를 추정하거나, 현장시험 결과와 비교할 때, 유용하게 이용된다.

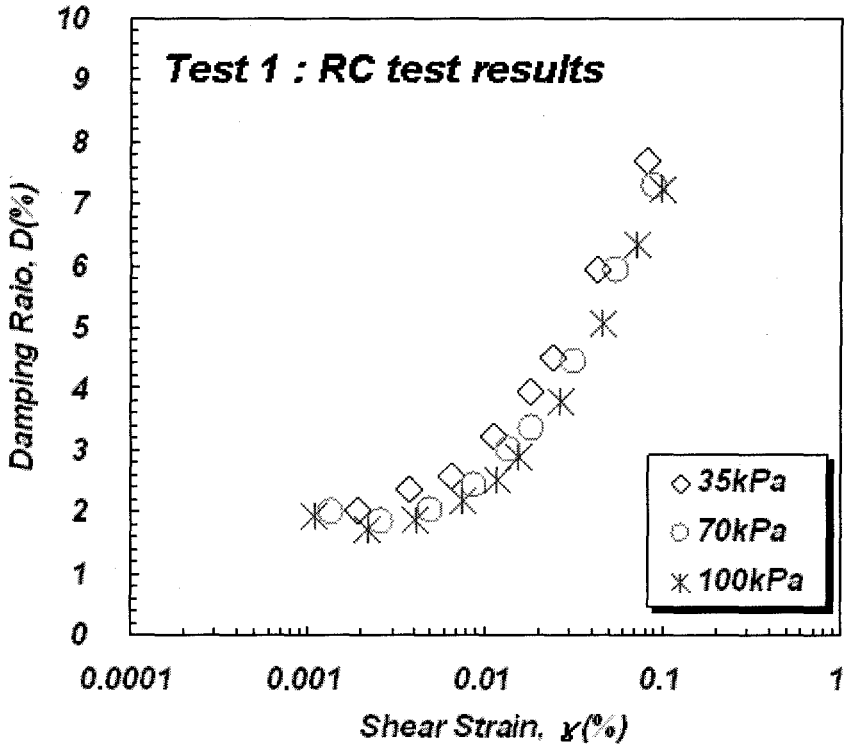
수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료의 공진주 시험과 비틂전단 시험으로부터 획득한 최대 전단탄성계수의 구속압 영향평가를 그림 3.65에 나타내었다.



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화

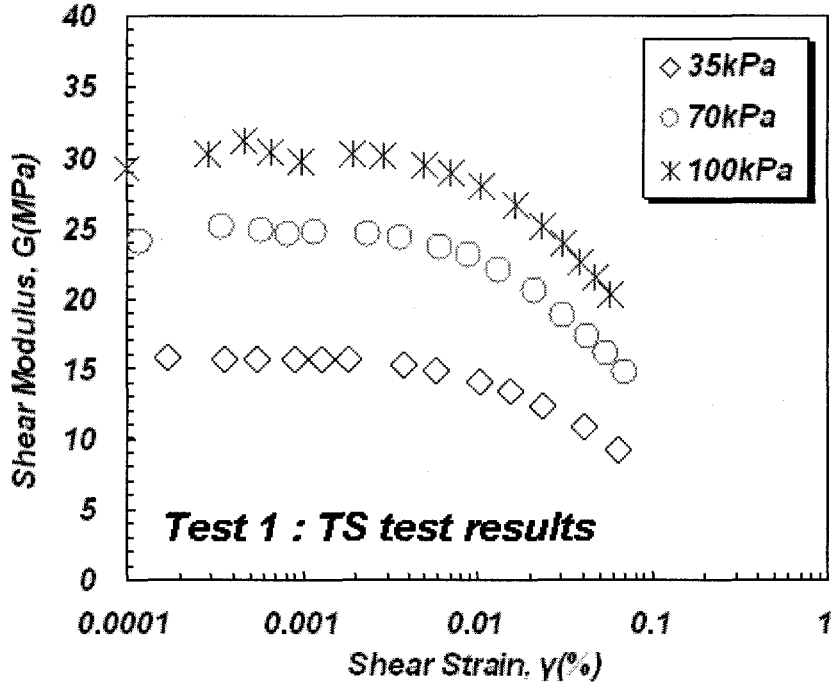


(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

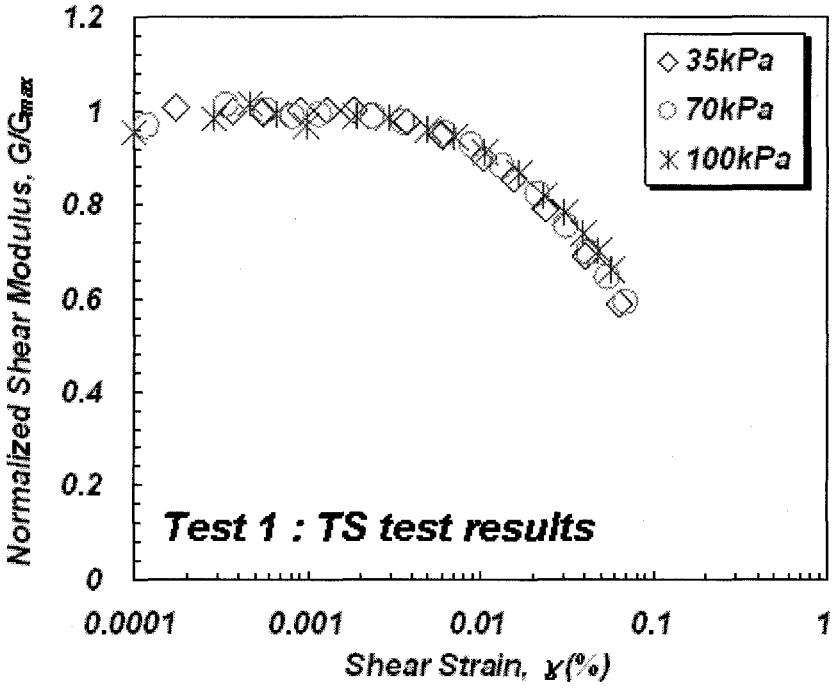


(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

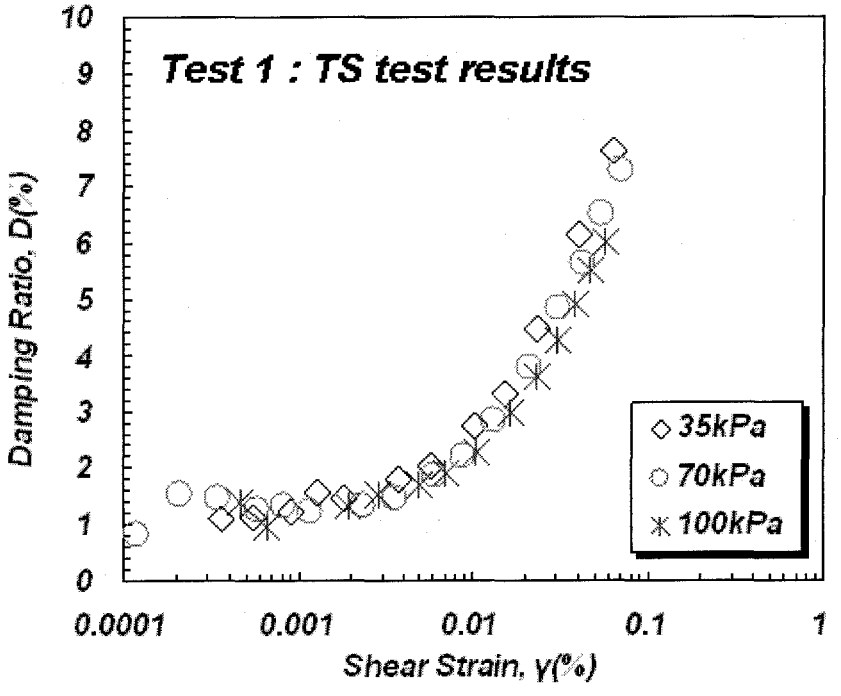
그림 3.62 수압식 피스톤 샘프러로 채취한 시료의 공진주 시험 결과



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화

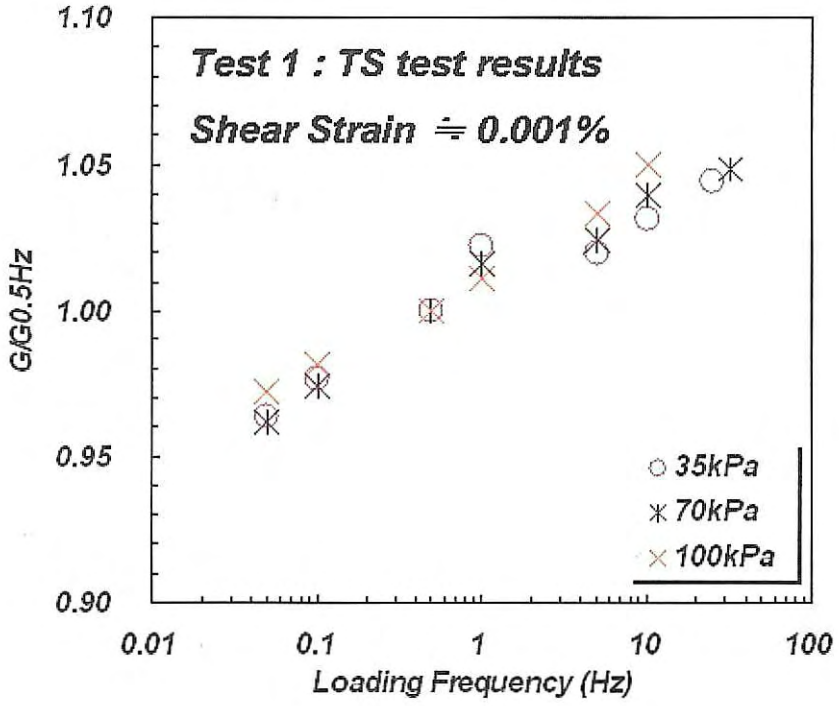


(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

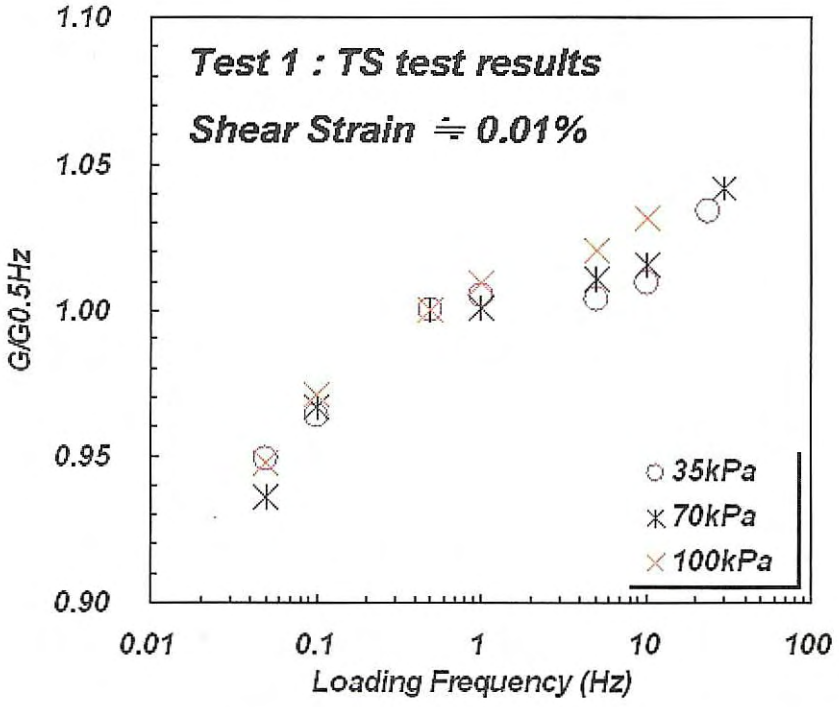


(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

그림 3.63 수압식 피스톤 샘프러로 채취한 시료의 비틂전단 시험 결과



(a) 전단변형률 0.001%에서의 하중주파수 영향



(b) 전단변형률 0.01%에서의 하중주파수 영향

그림 3.64 구속압별 하중주파수에 따른 전단탄성계수 변화 (피스톤 샘플러 시료)

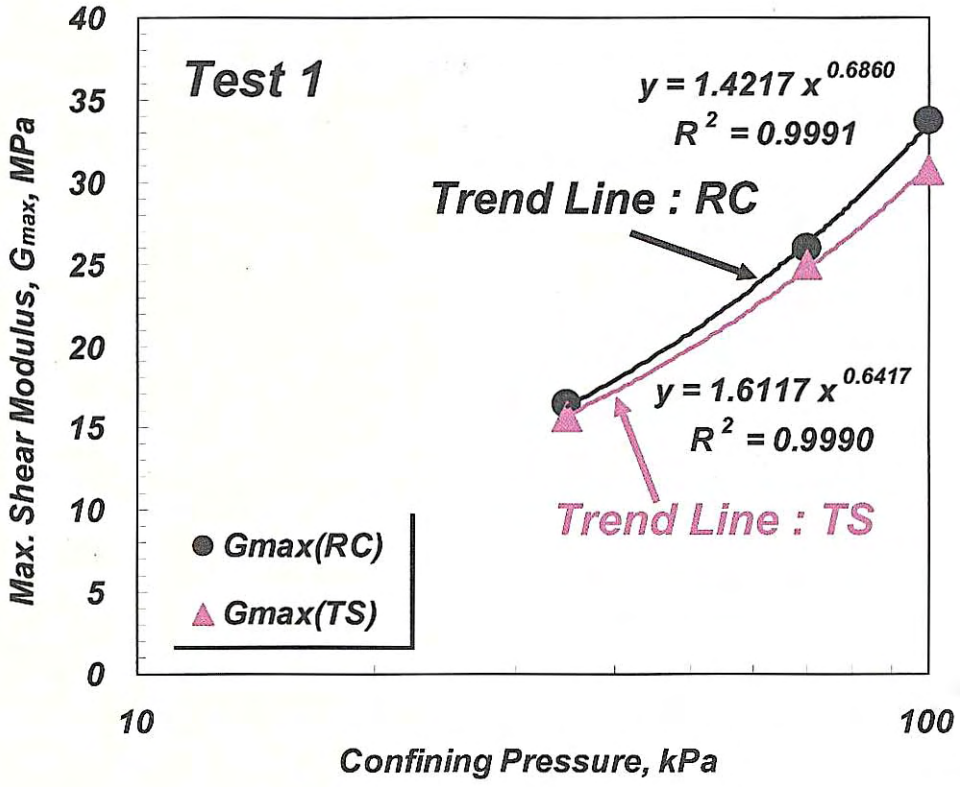


그림 3.65 최대전단탄성계수의 구속압 영향평가 (피스톤 샘플러 시료)

(2) 대구경 샘플러로 채취한 시료의 시험결과 (Test 2)

① 공진주 시험결과

공진주 시험을 통한 대구경 샘플링 시료의 구속응력별 변형률 크기에 따른 전단탄성계수(Shear Modulus Reduction Curve, G-logγ) 감소곡선, 정규화 전단탄성계수 감소곡선(Normalized Shear Modulus Reduction Curve, G/G_{max}-logγ), 감쇠비 곡선(D-logγ)을 그림 3.66에 나타내었다.

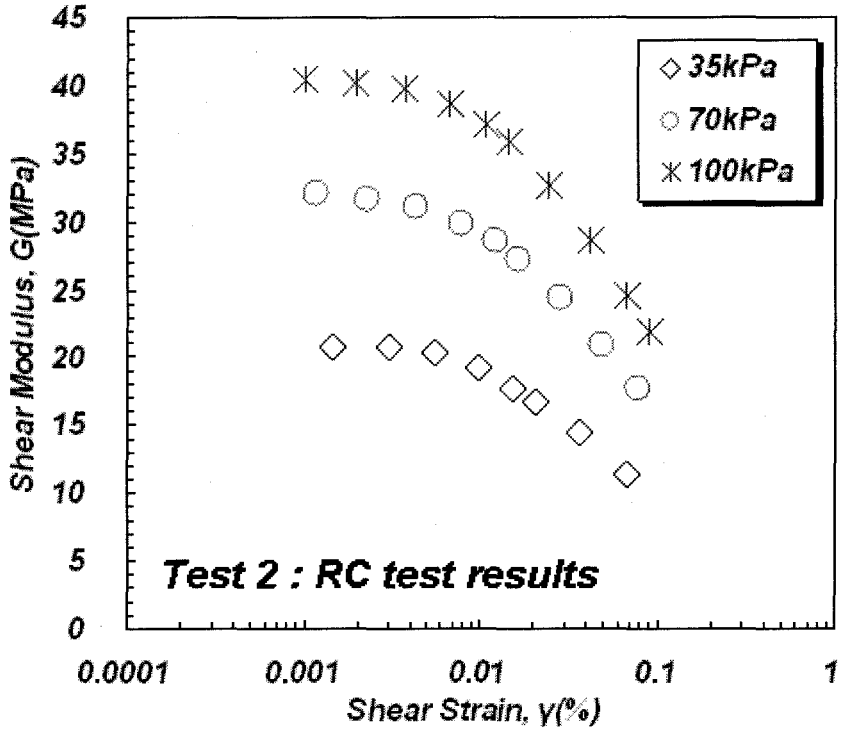
시험결과에서 보듯이 비선형성에 대한 전체적인 경향성은 수압식 피스톤 샘플링 시료의 공진주 시험 결과와 유사하다. 그러나 변형률에 따른 전단탄성계수의 절대값에 대해서는 대구경 시료에서 획득한 결과 값들이 수압식 피스톤 시료에서의 결과 값보다 큰 것을 확인 할 수 있다. 이는 교란 정도의 영향으로 평가되고, 뒤에서 자세하게 비교·분석 할 것이다.

② 비틂전단 시험 결과

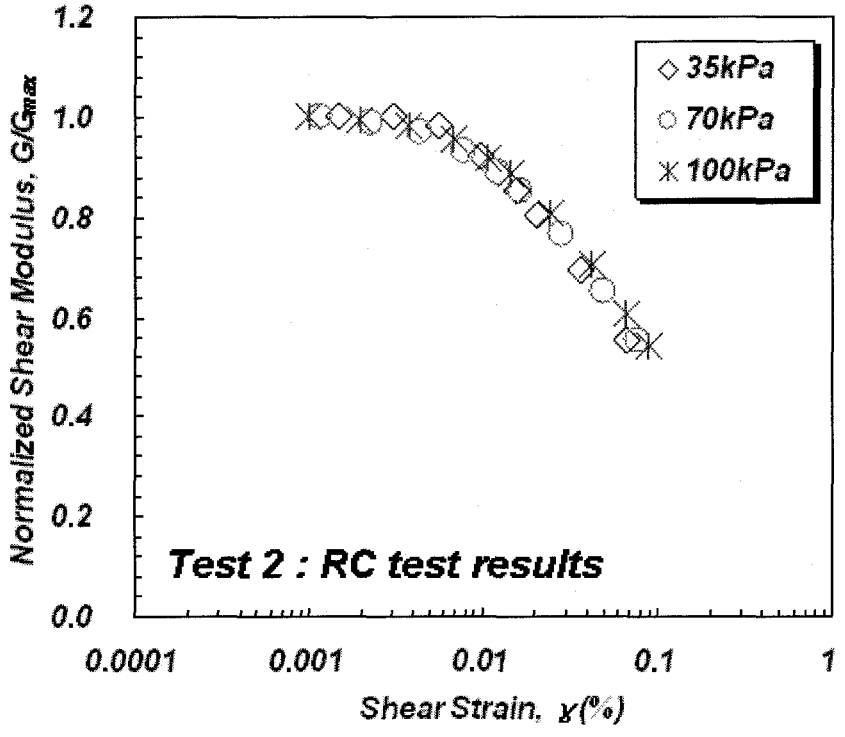
비틂전단 시험을 통한 대구경 샘플링 시료의 구속응력별 변형률 크기에 따른 전단탄성계수(Shear Modulus Reduction Curve, G-logγ) 감소곡선, 정규화 전단탄성계수 감소곡선(Normalized Shear Modulus Reduction Curve, G/G_{max}-logγ), 감쇠비 곡선(D-logγ)을 그림 3.67에 나타내었고, 하중주파수 영향에 대한 결과를 그림 3.68에 나타내었다. 그림 3.67, 3.68에 나타낸 시험 물성치 값들은 10회 하중재하 단계에서의 응력-변형률 이력곡선으로부터 획득하였다. 비틂전단 시험은 10^{-4}%~0.1%의 변형률 범위에서 신뢰성 있는 값을 제공하고 있고, 공진주 시험에서의 변형률 영역보다 좀 더 미소변형률에서의 변형특성 값을 획득할 수 있는 장점이 있다.

③ 구속압 영향 평가

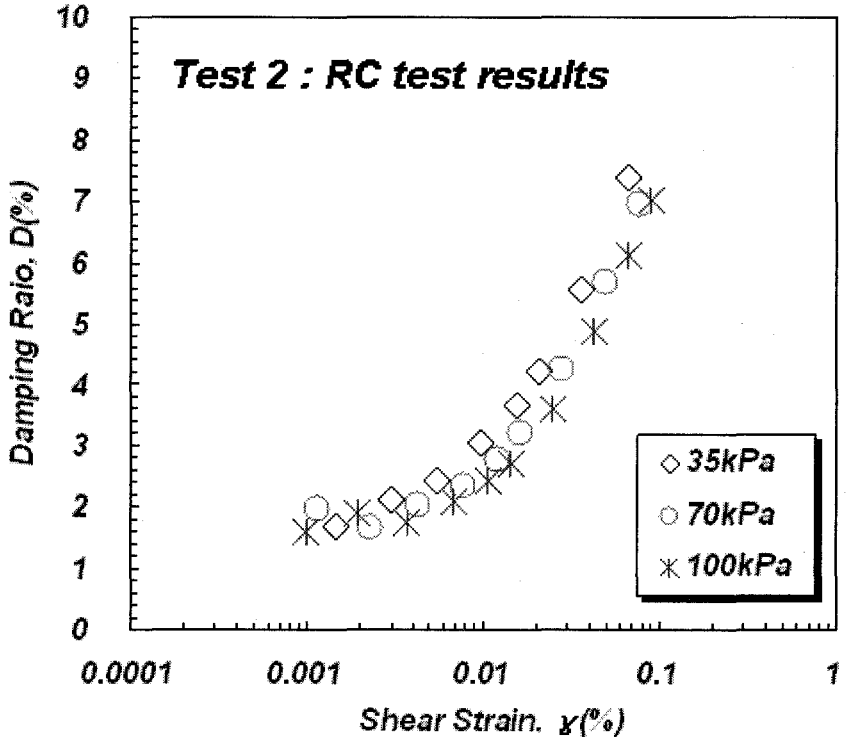
공진주/비틂전단 시험으로부터 획득한 대구경 샘플링 시료의 최대 전단탄성계수 값을 이용하여 시험 시편의 구속압 영향 평가를 수행하였다. 식 3.16에 의해 획득한 구속압 영향계수는 공진주 시험의 경우, 0.6318, 비틂전단 시험의 경우, 0.5659로 나타났다. 또한, 최대전단탄성계수의 구속압 영향평가를 그림 3.69에 나타내었다.



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화

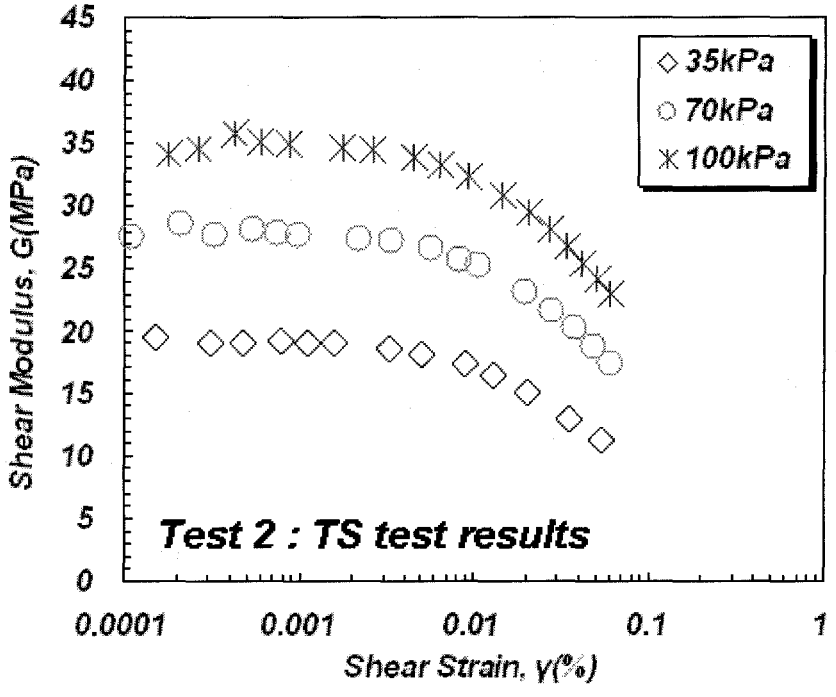


(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

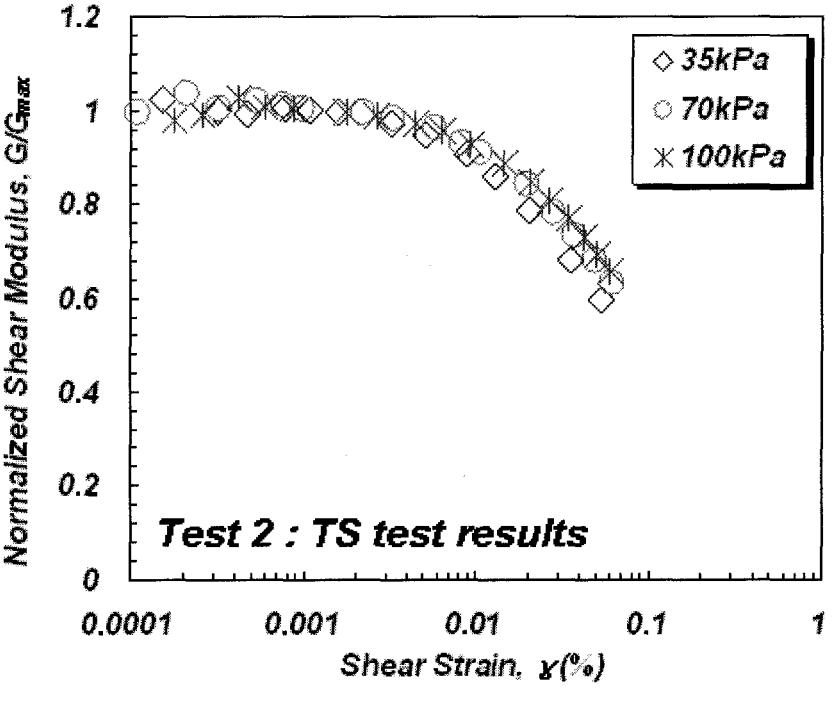


(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

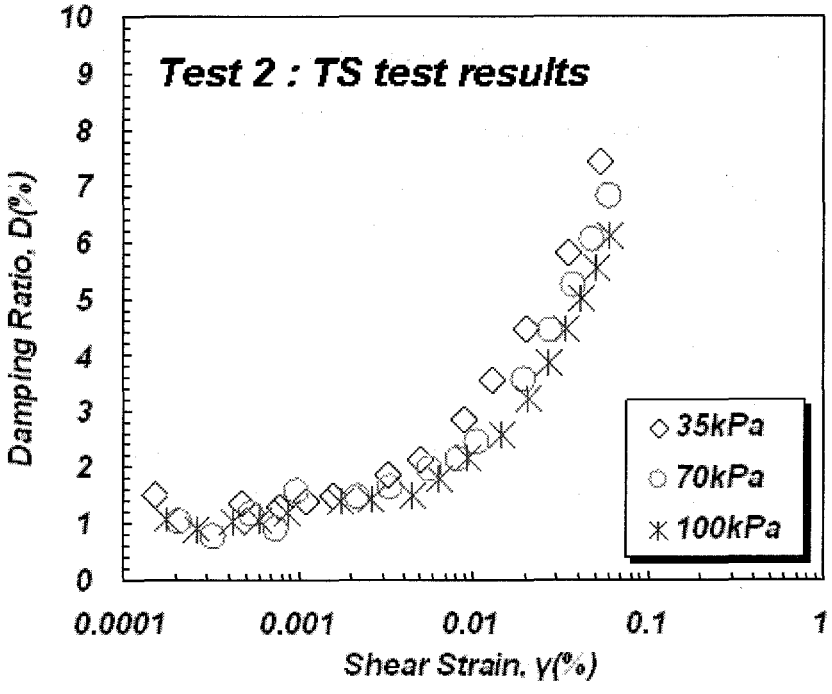
그림 3.66 대구경 샘플러로 채취한 시료의 공진주 시험결과



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화

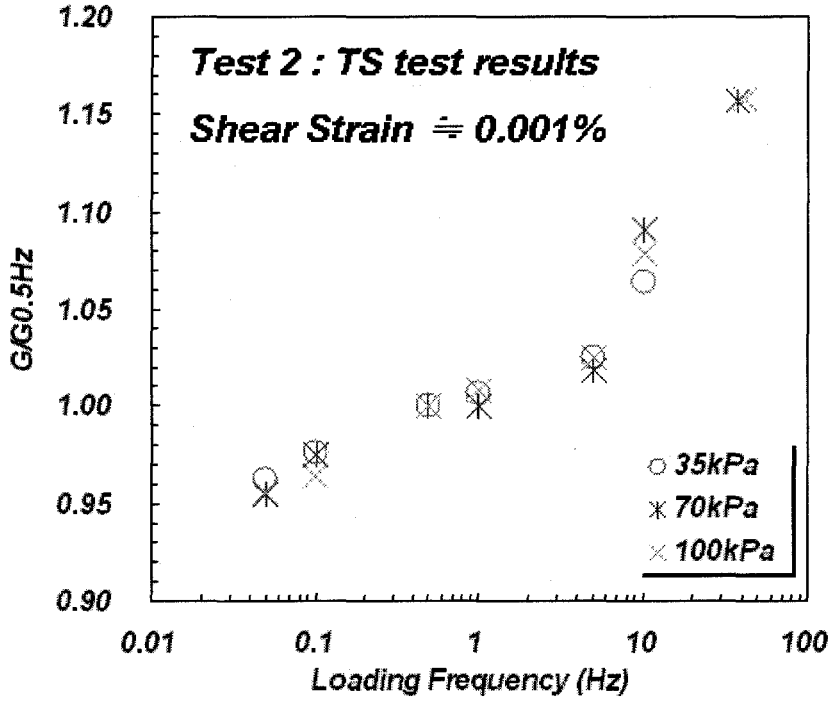


(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

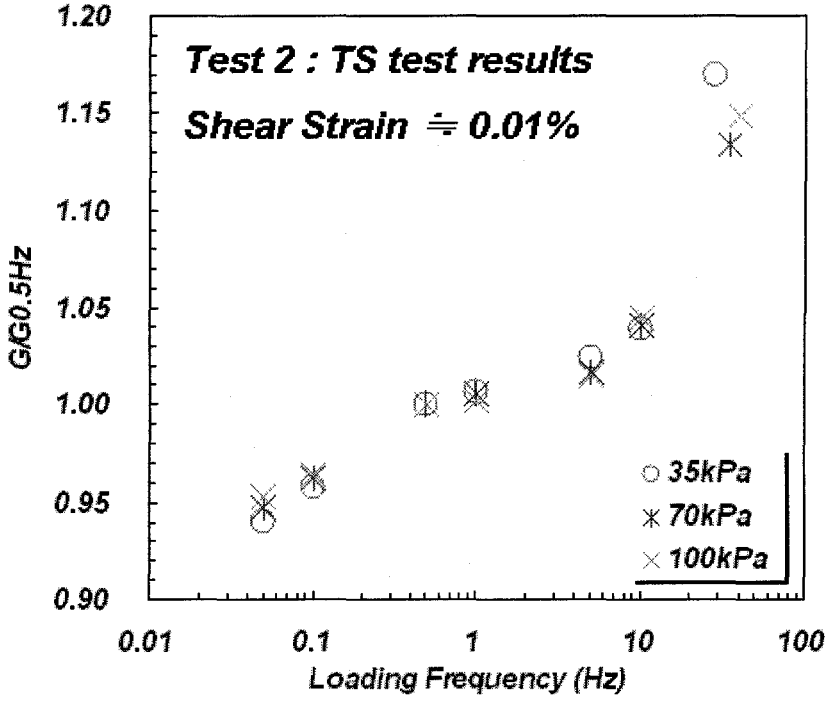


(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

그림 3.67 대구경 샘플러로 채취한 시료의 비틂전단 시험결과



(a) 전단변형률 0.001%에서의 하중주파수 영향



(b) 전단변형률 0.01%에서의 하중주파수 영향

그림 3.68 구속압별 하중주파수에 따른 전단탄성계수 변화 (대구경 샘플러 시료)

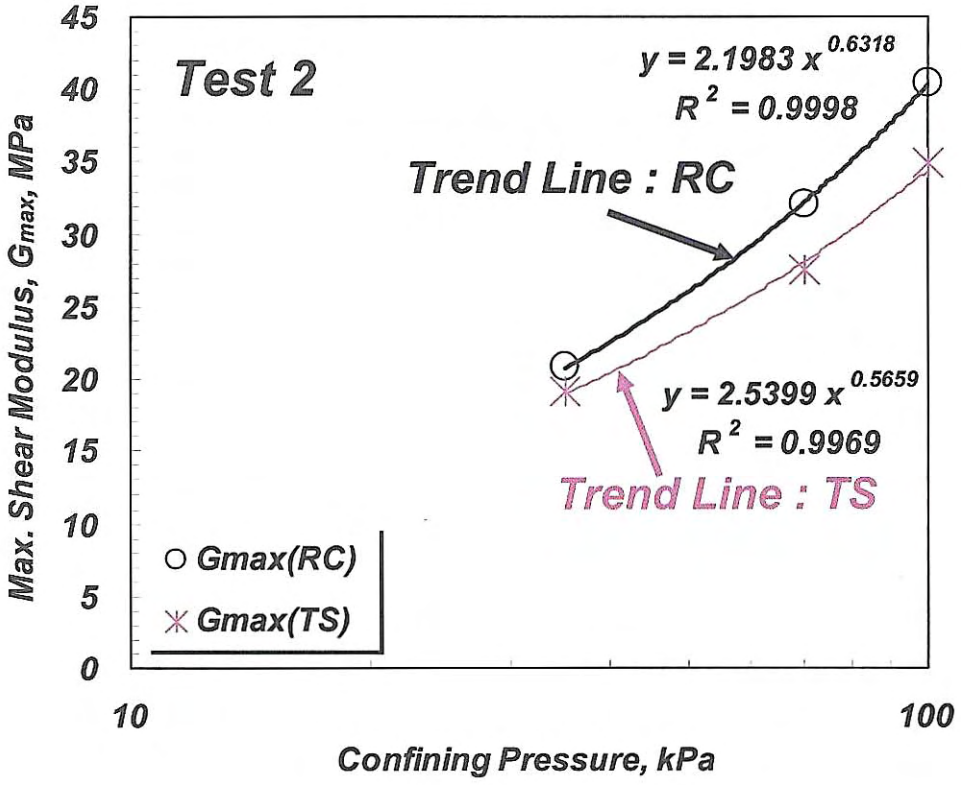


그림 3.69 최대전단탄성계수의 구속압 영향평가 (대구경 샘플러 시료)

(3) 채취시료 크기에 대한 영향

① 공진주 시험 결과 비교

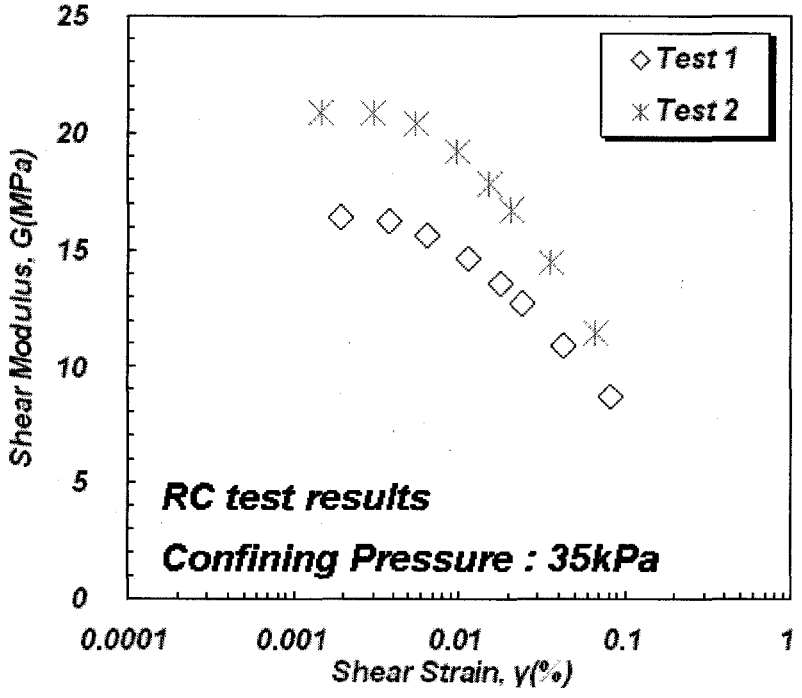
공진주 시험으로부터 획득한 수압식 피스톤 샘플링 시료(Test 1)와 대구경 샘플링 시료(Test 2)의 비선형 변형특성을 시험이 수행된 구속압에 따라 (35kPa, 70kPa, 100kPa) 각각 비교하여 그림 3.70 - 3.72에 나타내었다.

대구경 샘플링 시료에서 획득한 전단탄성계수 값은 전체 변형률 영역에서 수압식 피스톤 샘플링 시료에서 획득한 전단탄성계수 값보다 크게 나타나고 있다. 이는 채취된 시편의 단면적 차이에 의한 교란 정도의 영향으로 판단된다. 그러나 전체 변형률 영역의 전단탄성계수 값을 최대 전단탄성계수 값으로 정규화한 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 경우에는 모든 시험 구속압에서 교란의 영향을 받지 않고 두 시험 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다. 감쇠비 역시 마찬가지로 교란의 영향을 크게 받지 않았다.

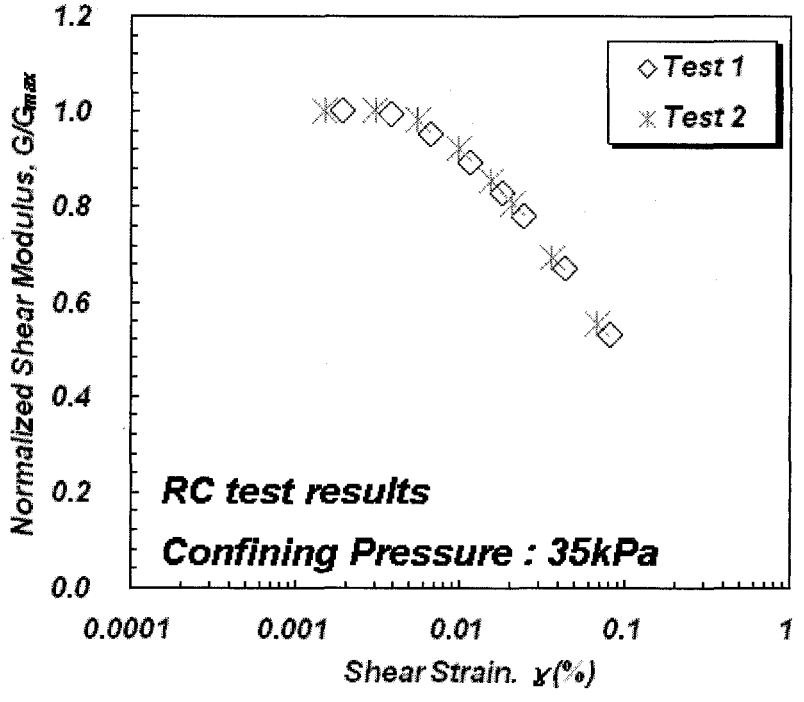
② 비틂전단 시험 결과 비교

비틂전단 시험으로부터 획득한 수압식 피스톤 샘플링 시료(Test 1)와 대구경 샘플링 시료(Test 2)의 비선형 변형특성을 시험이 수행된 구속압에 따라 (35kPa, 70kPa, 100kPa) 각각 비교하여 그림 3.73 - 3.75에 나타내었다.

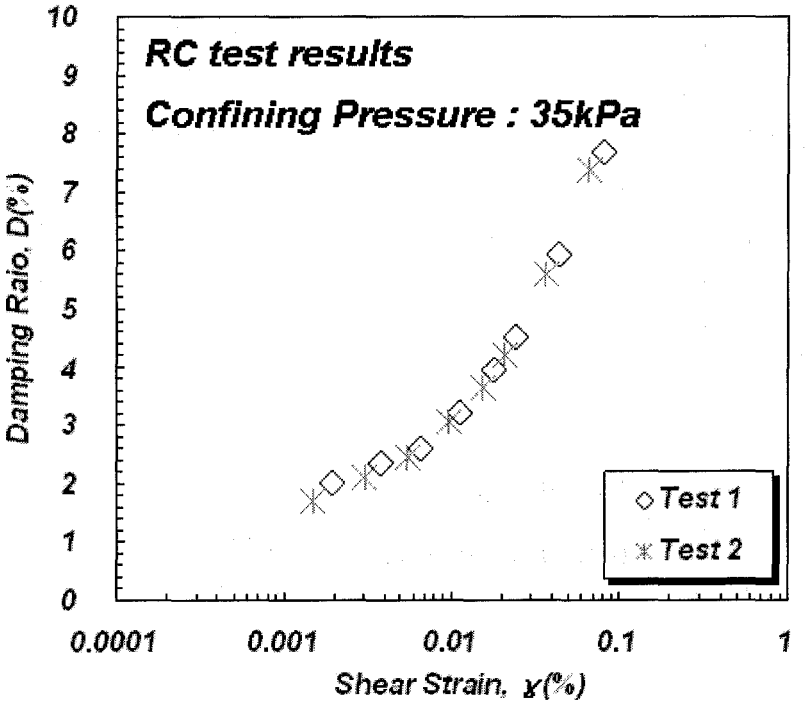
비틂전단 시험으로부터 획득한 전단탄성계수 및 감쇠비의 절대값은 시험 방법의 차이에 의해 공진주 시험으로부터 획득한 결과와 차이가 있지만, 위에서 설명한 경향성은 일치하였다. 즉, 전단탄성계수는 교란도의 영향을 받아 대구경 샘플링 시료의 결과가 수압식 피스톤 샘플링 시료의 결과보다 크게 평가되었지만, 정규화 전단탄성계수와 감쇠비의 경우에는 미소변형률 영역($\gamma<10^{-3}\%$)에서 약간의 차이를 보일 뿐, 전체 변형률 영역에서 거의 일치함을 확인할 수 있었다.



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화

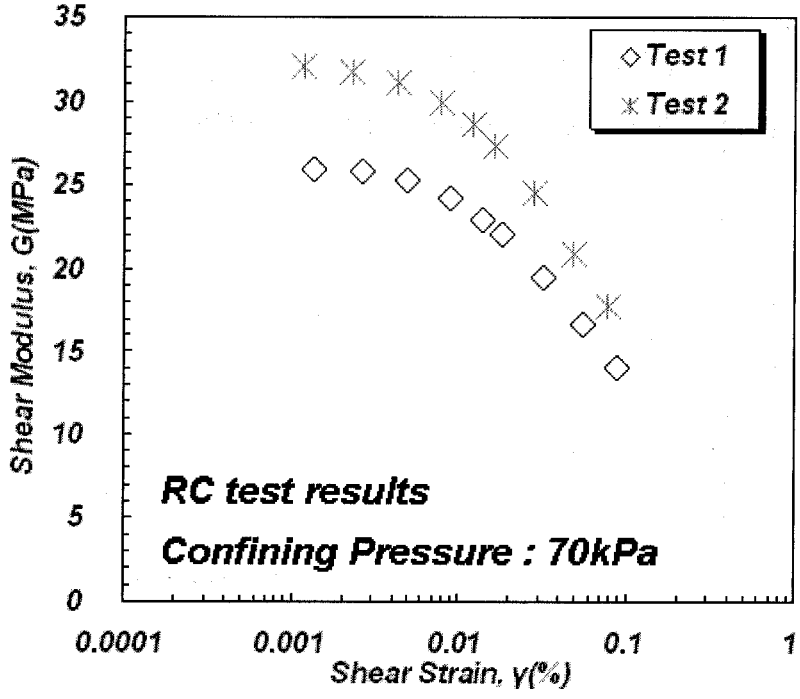


(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

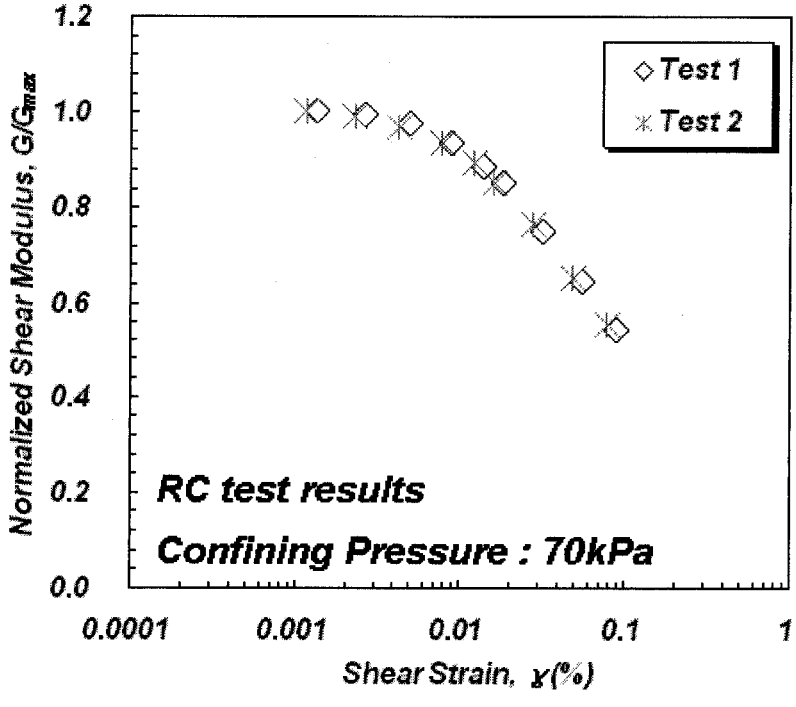


(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

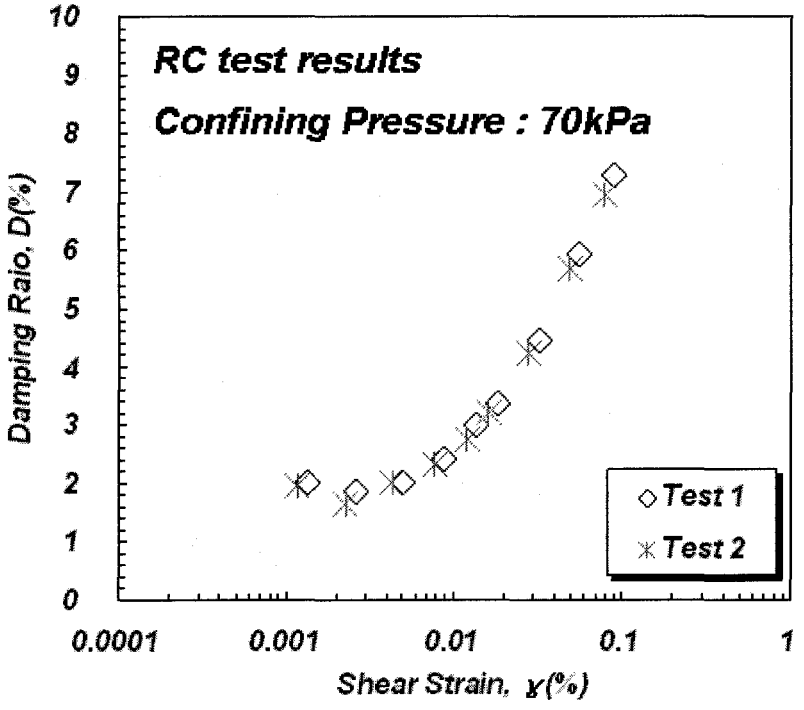
그림 3.70 공진주 시험 결과 비교 (구속압=35kPa)



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화

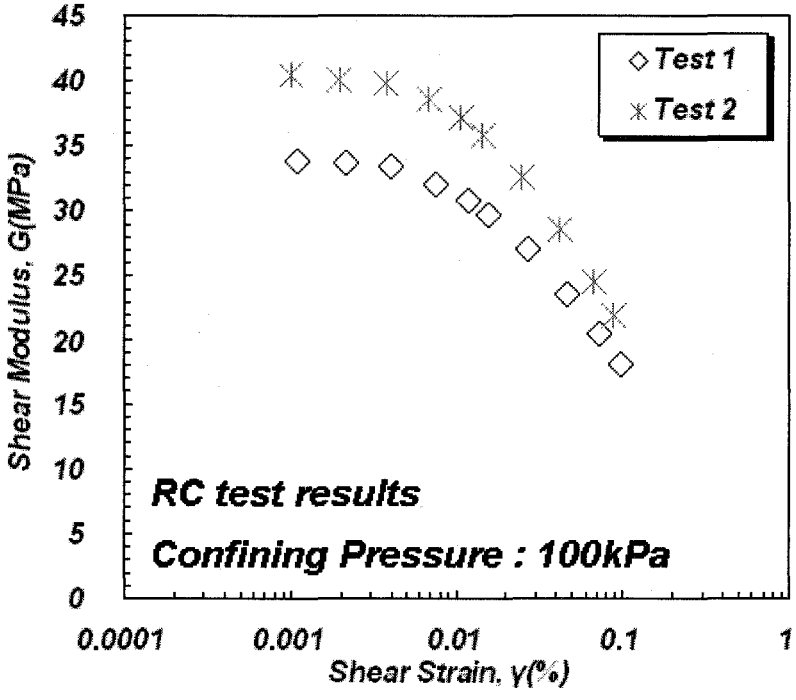


(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

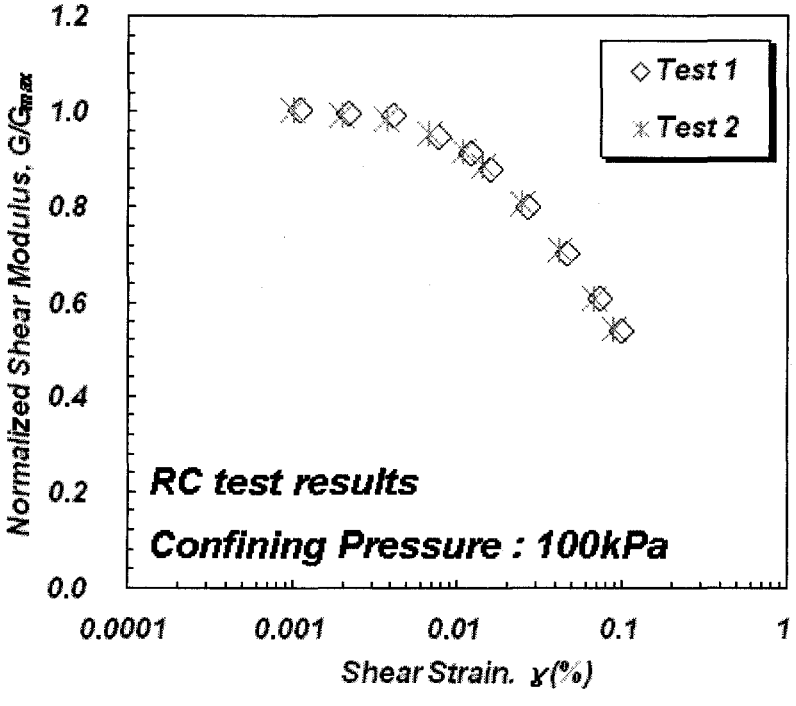


(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

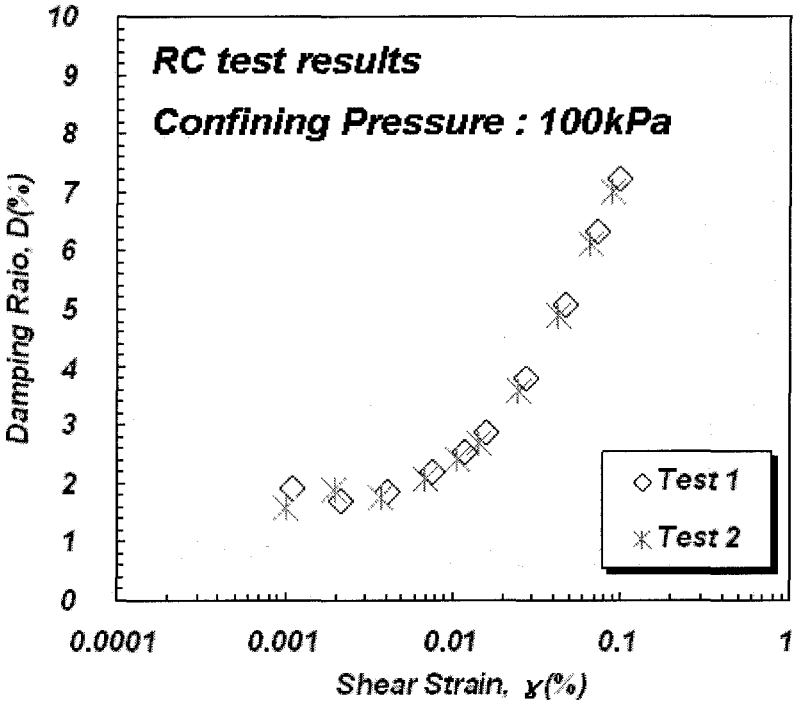
그림 3.71 공진주 시험 결과 비교 (구속압=70kPa)



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화

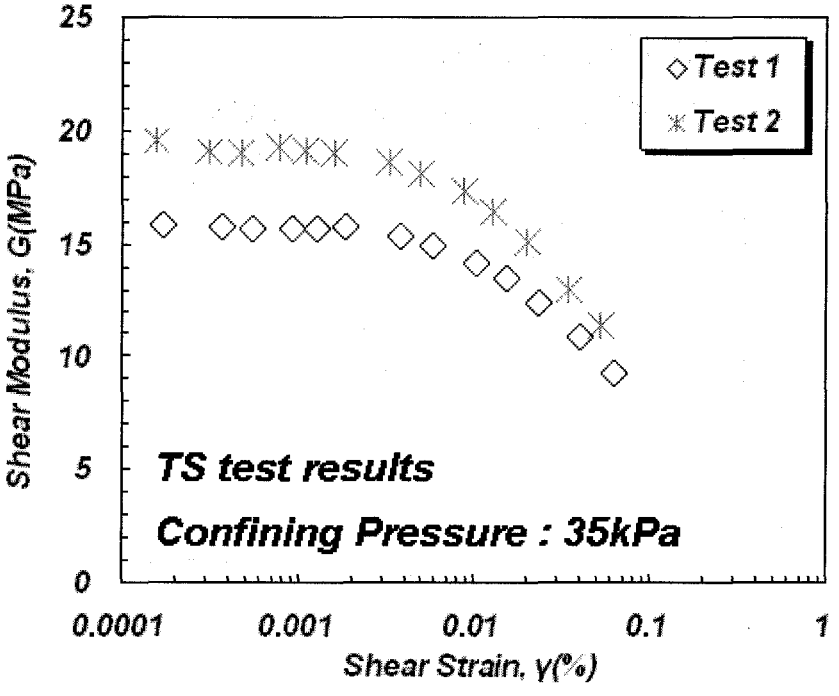


(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

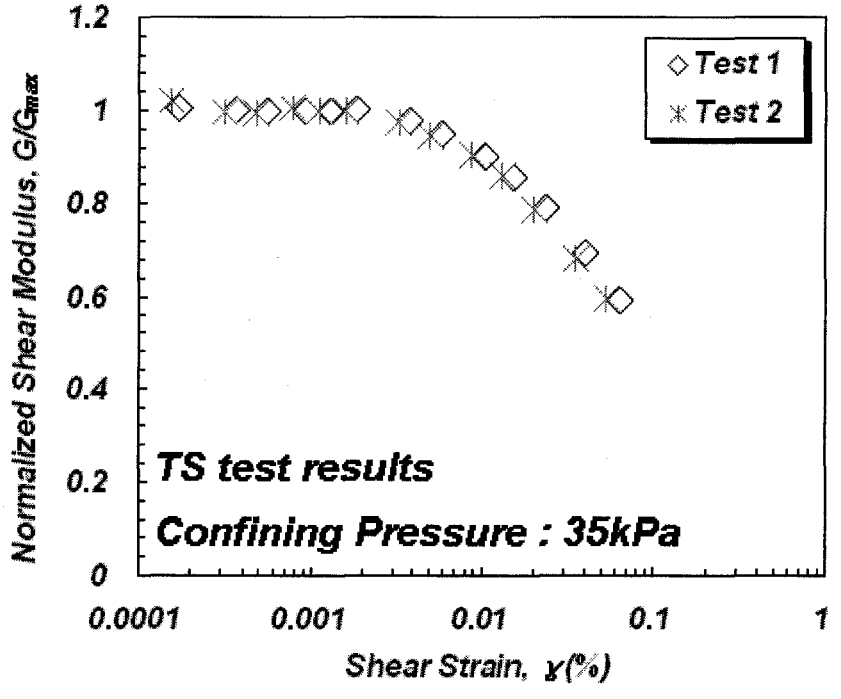


(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

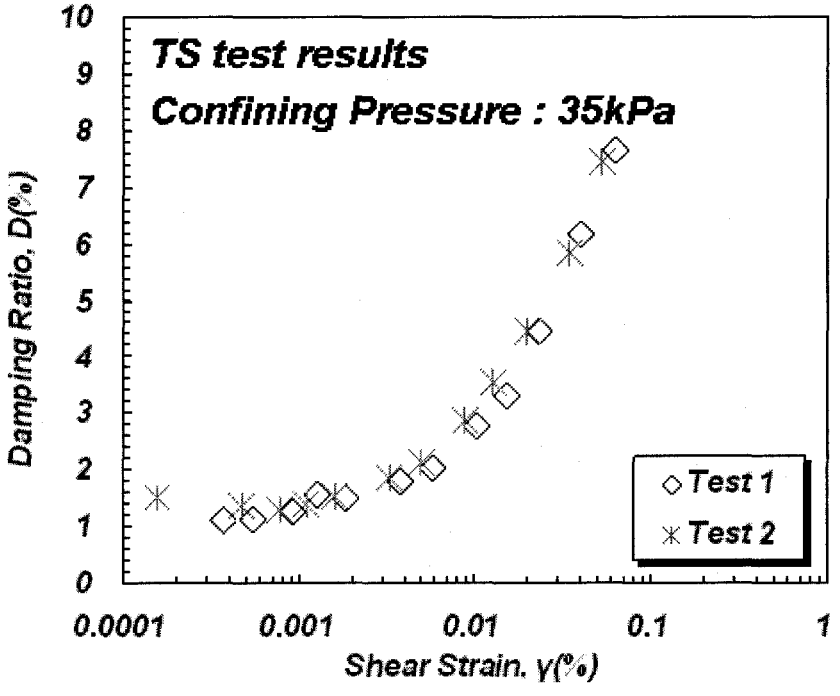
그림 3.72 공진주 시험 결과 비교 (구속압=100kPa)



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화

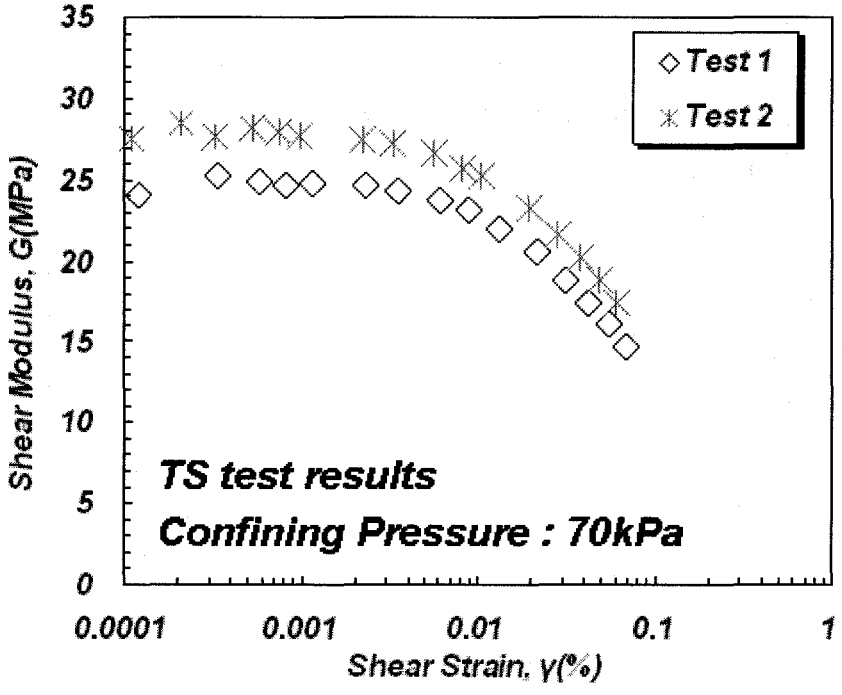


(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

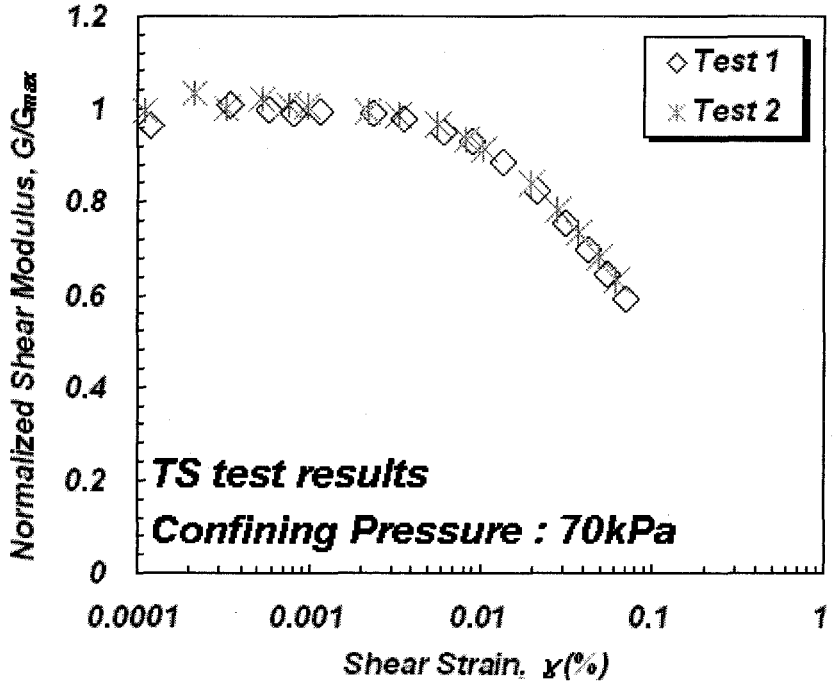


(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

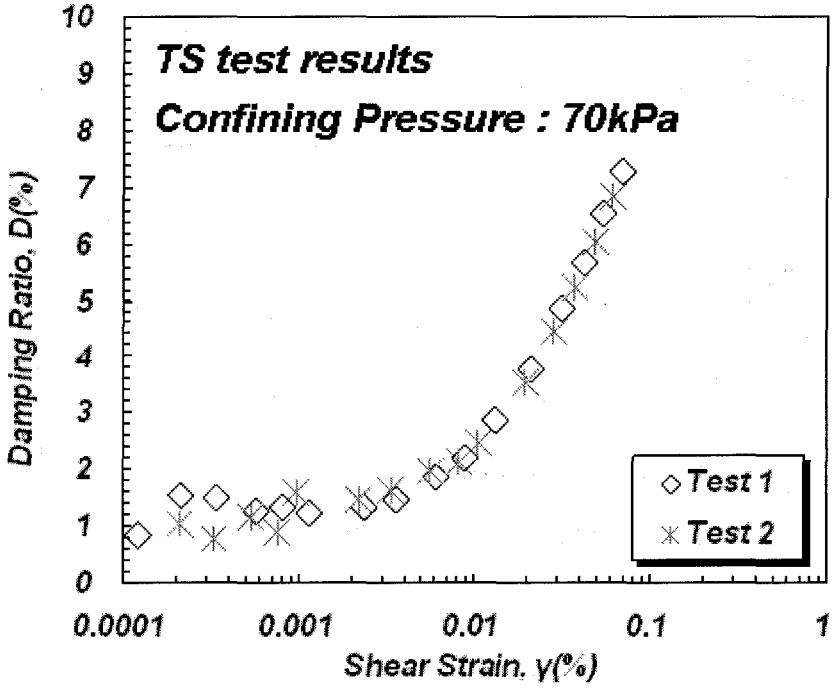
그림 3.73 비틂전단 시험 결과 비교 (구속압=35kPa)



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화

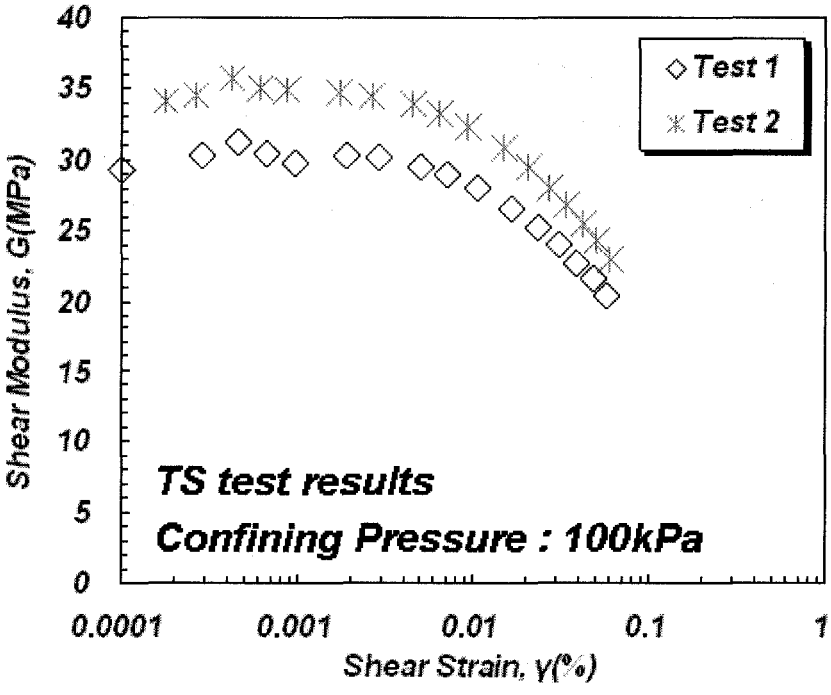


(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

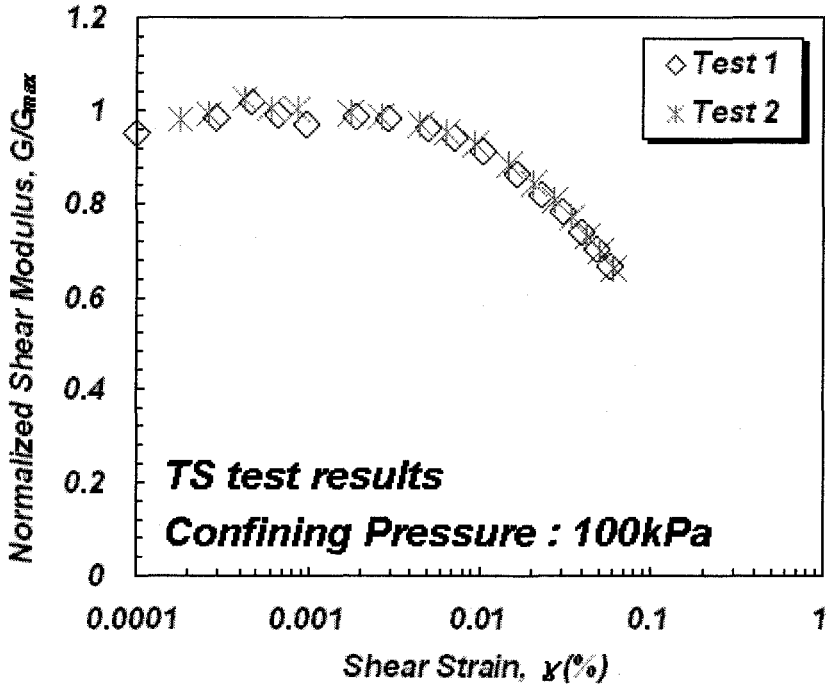


(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

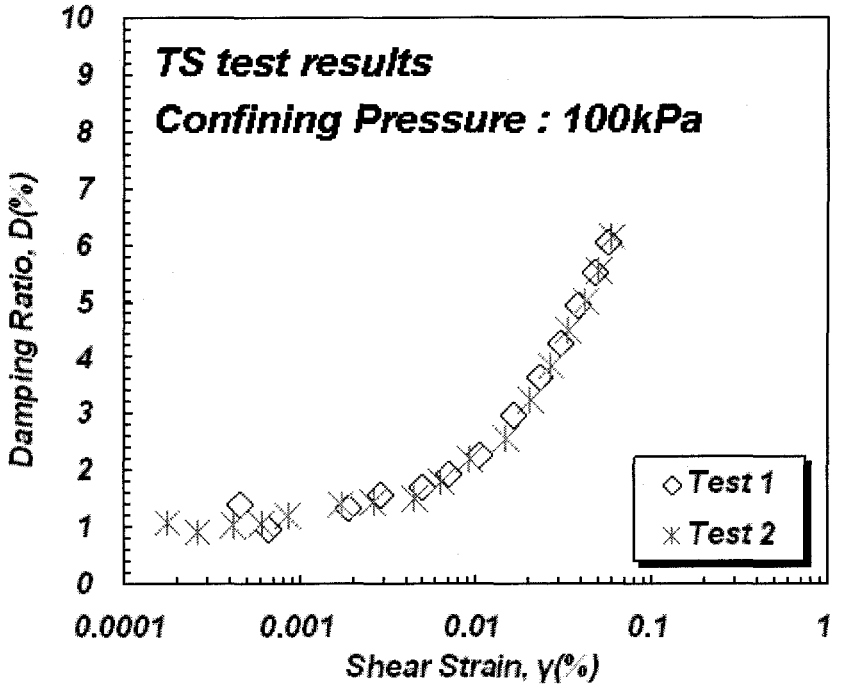
그림 3.74 비틂전단 시험 결과 비교 (구속압=70kPa)



(a) 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화



(b) 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 변화



(c) 변형률 크기에 따른 감쇠비 변화

그림 3.75 비틂전단 시험 결과 비교 (구속압=100kPa)

제 3 절 한국형 대형관입시험 장비 개발

1. 개요

종래 모래지반을 대상으로 하는 지반조사 기법으로 표준관입시험(SPT)이 널리 이용되고 있다. 북미와 남미의 경우 일반적인 기초설계의 85-90% 가량이 표준관입시험(SPT)에 의존하여 수행되고 있으며, 일본과 우리나라에서도 대부분의 지반공학적 설계가 SPT의 결과로 얻어진 N값에 좌우되고 있는 실정이다. 이와 같은 시험은 원칙적으로 사질토에 한정하여 사용되는 방법이지만 국내에서는 다양한 흙에서 이 시험법이 사용되고 있다. 그러나, SPT에서는 샘플러의 직경, 타격에너지 등의 많은 제약으로 인하여 조밀한 모래층, 자갈층, 연암층 등에서는 샘플러의 관입이 어려우며 신뢰성 있는 N값의 산정에도 많은 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여 선진 외국에서는 SPT의 해머직경, 낙하높이 등 타격에너지를 조절하여 지반조사에 활용할 수 있도록 연구를 진행하고 있다.

본 연구에서는 보다 정확한 지반조사 기술 개발의 일환으로, 모래지반 이외에도 적용이 가능하도록 해머중량 및 샘플러 등의 사이즈를 조절하여 한국형 대형관입시험 (KICT-type Large Penetration Test, LPT) 장비를 개발하였다.

2. KICT-type Large Penetration Test 장비 구성

새롭게 개발한 KICT-type LPT 장비는 크게 지반에 관입되어 교란시료를 채취하는 "샘플러", 샘플러와 엔빌을 연결하는 "롯드", 타격에너지를 제공하는 "해머와 엔빌", 그리고 150kg 해머를 움직이는 "반자동 낙하장치"로 구성되어 있다. 그림 3.76은 KICT-type LPT장비의 기본구성을 나타내고 있다. LPT 장비의 제원, 특히 해머중량, 낙하높이, 샘플러 사이즈는 샘플러 선단부의 두께를 고려한 면적 에너지비를 일정하게 가정하여 결정하였다. 즉, SPT에 대한 LPT 샘플러의 에너지를 1.5배로 가정하여 해머중량은 150kg, 낙하 높이는 760mm로 결정하였으며, 이렇게 결정된 LPT 장비의 주요 제원은 표 3.8과 같다.

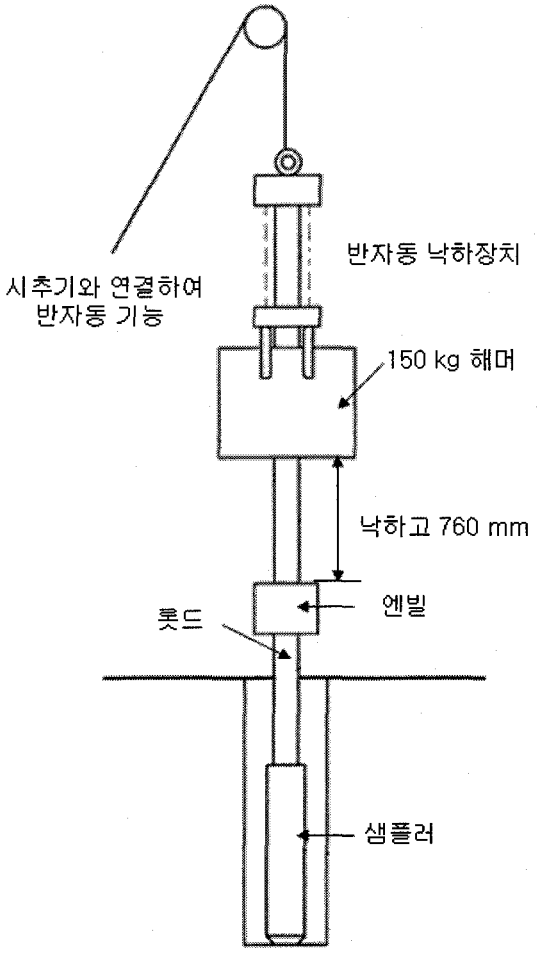


그림 3.76 KICT-type LPT 장비의 기본 구성

표 3.8 KICT-type LPT 장비의 주요 제원

제원 \ 장비명	KICT-LPT
해머중량(kg)	150
낙하높이(mm)	760
외경(mm)	76
샘플러 내경 open shoe(mm)	60
샘플러 내경 barrel(mm)	63
샘플러 선단면적(두께) (cm^2)	17.1
에너지비(두께)	1.5

(a) 샘플러

그림 3.77과 같이 KICT-LPT 장비의 선단부에는 현장의 시료를 채취할 수 있는 2중관 대형샘플러를 장착하여 대상지반의 종류, 지반의 물성치 실험을 수행 할 수 있도록 하였다. 그림 3.78에는 준교란 시료 채취가 가능한 KICT-type LPT 장비의 샘플러를 나타내고 있다.

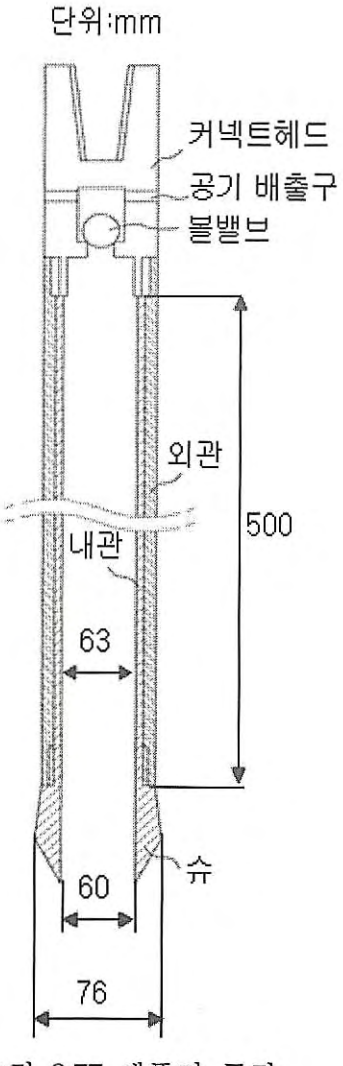


그림 3.77 샘플러 규격

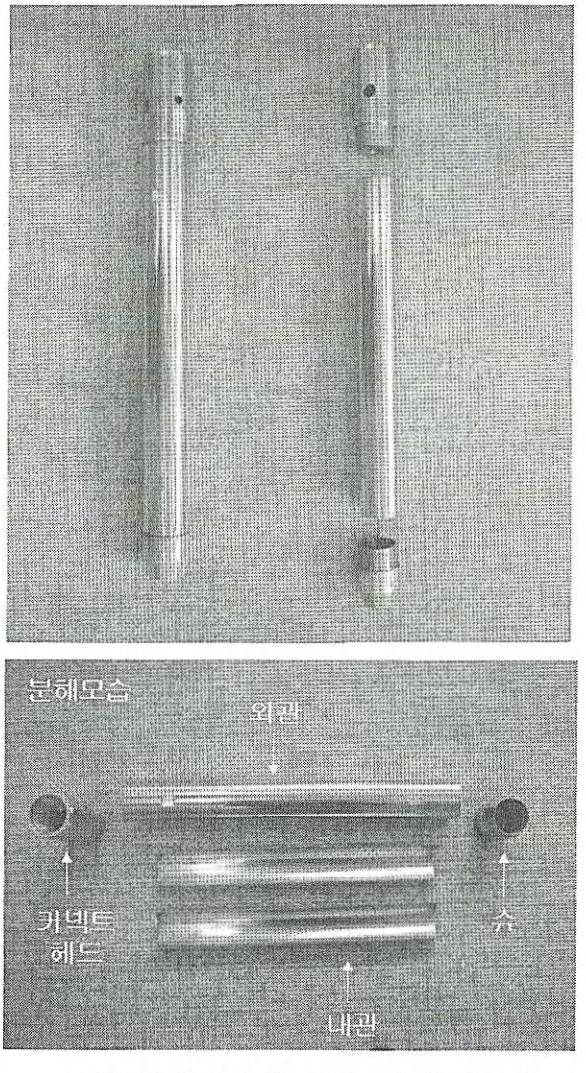


그림 3.78 샘플러 그림 및 분해모습

슈의 재질은 SCM 4종, 이중 관(튜브)은 S45C로 제작되었으며, 모든 부품은 강화 열처리로 끝마무리를 하여 높은 타격에너지에도 견딜 수 있도록 내구성면에서도 많은 고려를 하여 제작하였다. 또한, 기존의 SPT 샘플러의 경우, 직경이 35-40mm정도로 작아 완전히 교란된 시료만 채취할 수 있으나, 본 연구에서 개발한 샘플러는 직경은 63mm 비교적 커, 준교란 정도의 시료 채취가 가능하다고 판단된다 (그림 3.79, 3.80 참조).

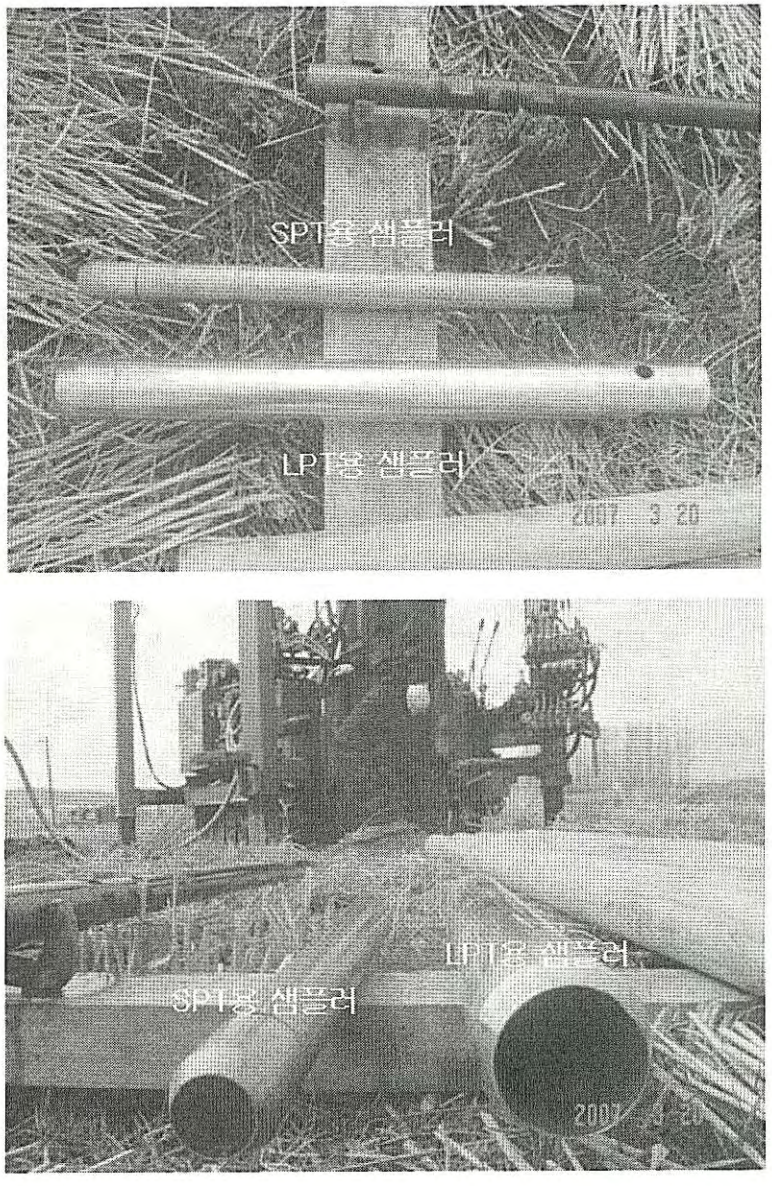


그림 3.79 SPT 장비와 LPT 장비의 샘플러 비교

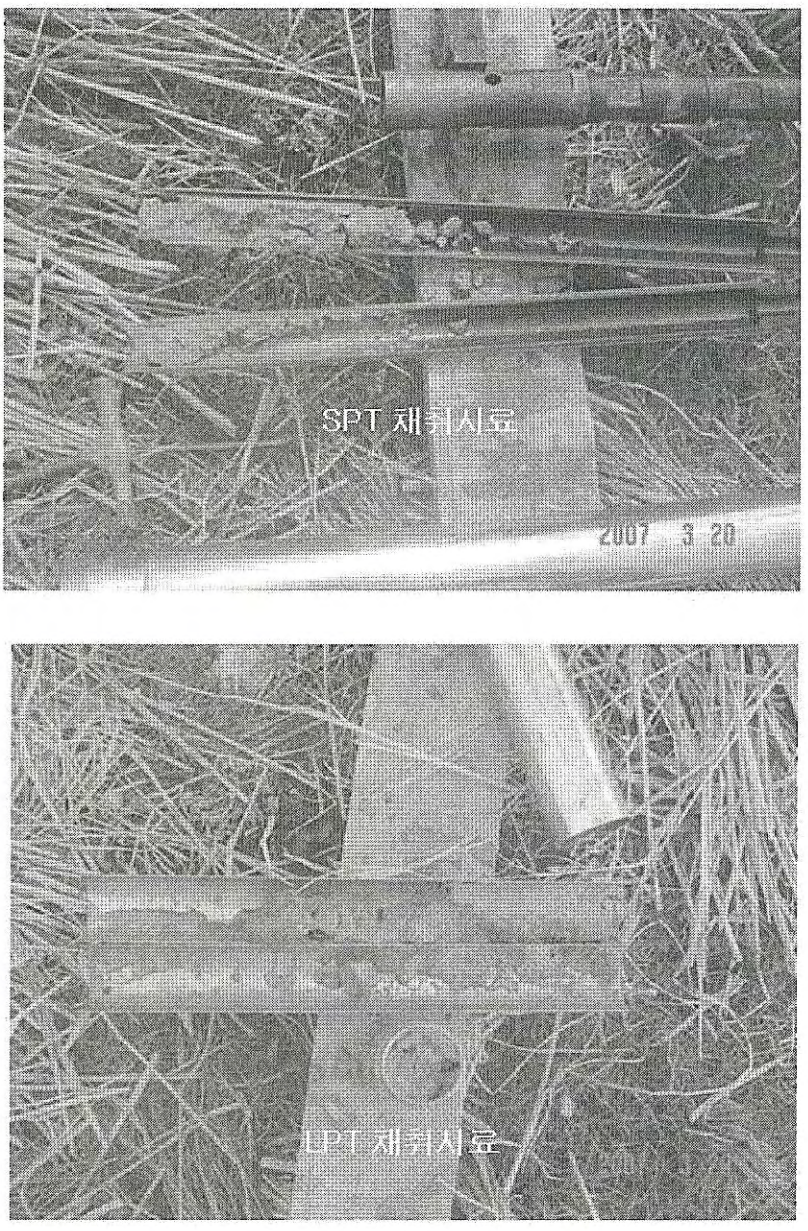


그림 3.80 SPT 및 LPT로 채취한 시료 비교

(b) 롯드

롯드는 샘플러와 엔빌을 연결하는 중요한 부재이며, 엔빌을 통해 전달되는 해머의 타격에너지가 손실되지 않고 샘플러에 전달되어야 한다. KICT-type LPT 장비의 롯

드는 NX 구경에 맞추어 사이즈를 결정하였으며, 시판중인 73mm 의 롯드를 사용하였다. 샘플러와 같이 강화 열처리로 끝마무리를 한 제품을 선택하여 높은 타격에너지에도 견딜 수 있도록 하였다. 그림 3.81에는 KICT-type LPT 장비에 사용된 73mm 롯드이며, 그림 3.82에는 SPT에 사용되는 45mm 롯드와 비교한 모습을 나타내고 있다.

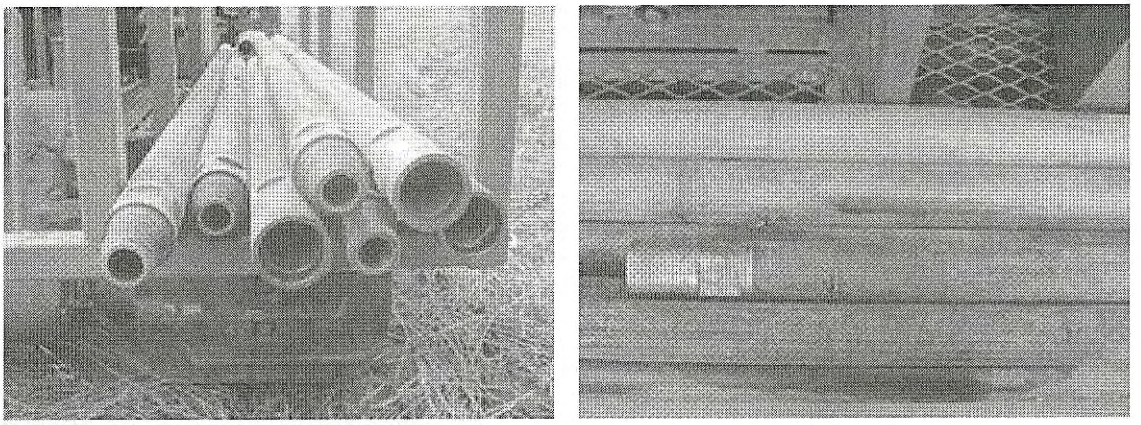


그림 3.81 KICT-type LPT에 사용한 73mm 롯드



그림 3.82 SPT용 45mm 롯드와의 비교

(c) 해머와 엔빌

선단 에너지를 SPT의 1.5배로 가정하여 해머중량은 150kg, 낙하 높이는 760mm

로 결정하였다. 해머의 타격에너지를 직접적으로 받는 엔빌도 직경 150mm, 높이 138mm로 제작하여 높은 타격에너지에 견딜 수 있도록 하였다. 그림 3.83에는 KICT-type LPT 장비의 해머와 엔빌을 나타내고 있다. 또한 그림 3.84는 SPT 해머와 LPT 해머를 비교한 사진이다.

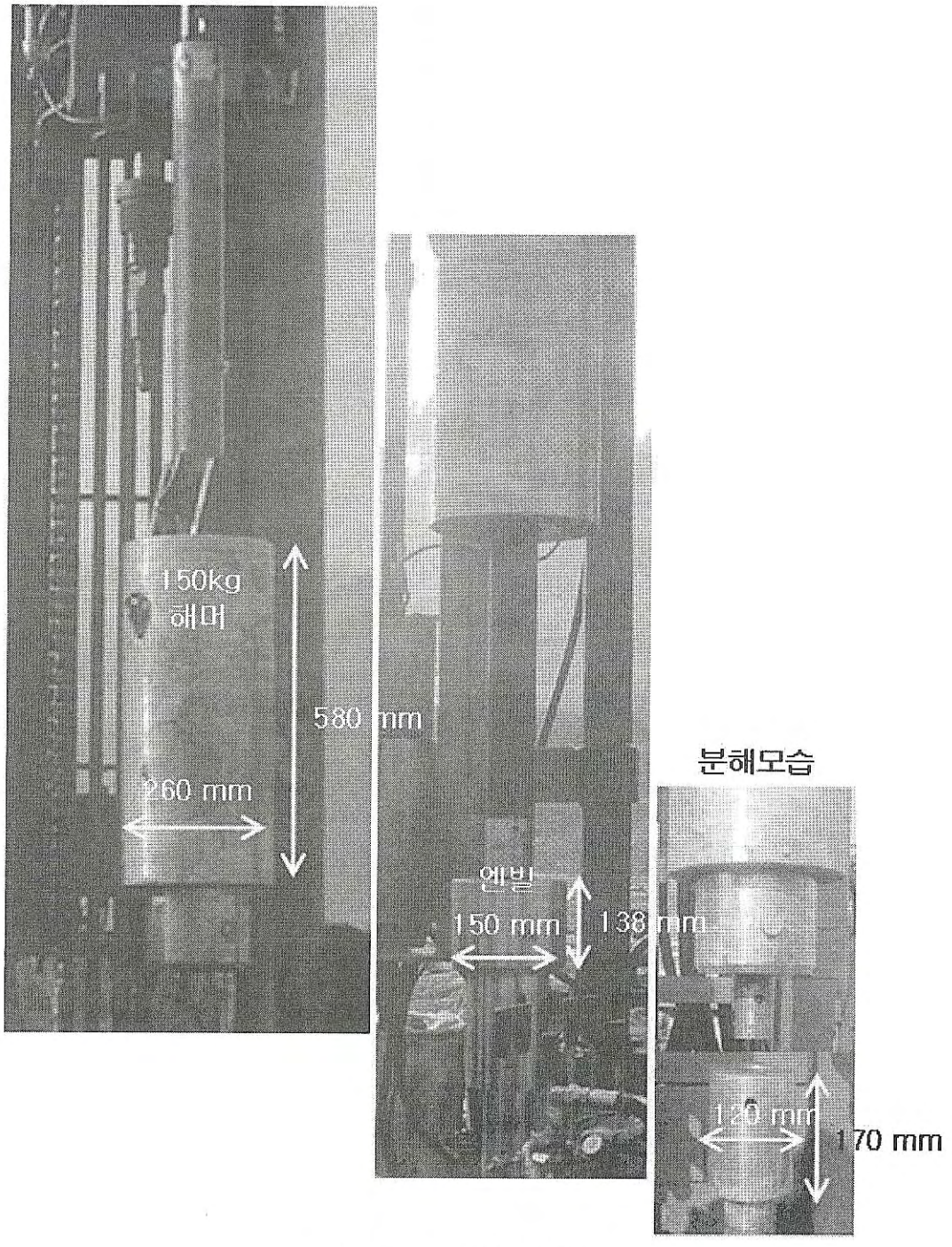


그림 3.83 해머 및 엔빌의 규격

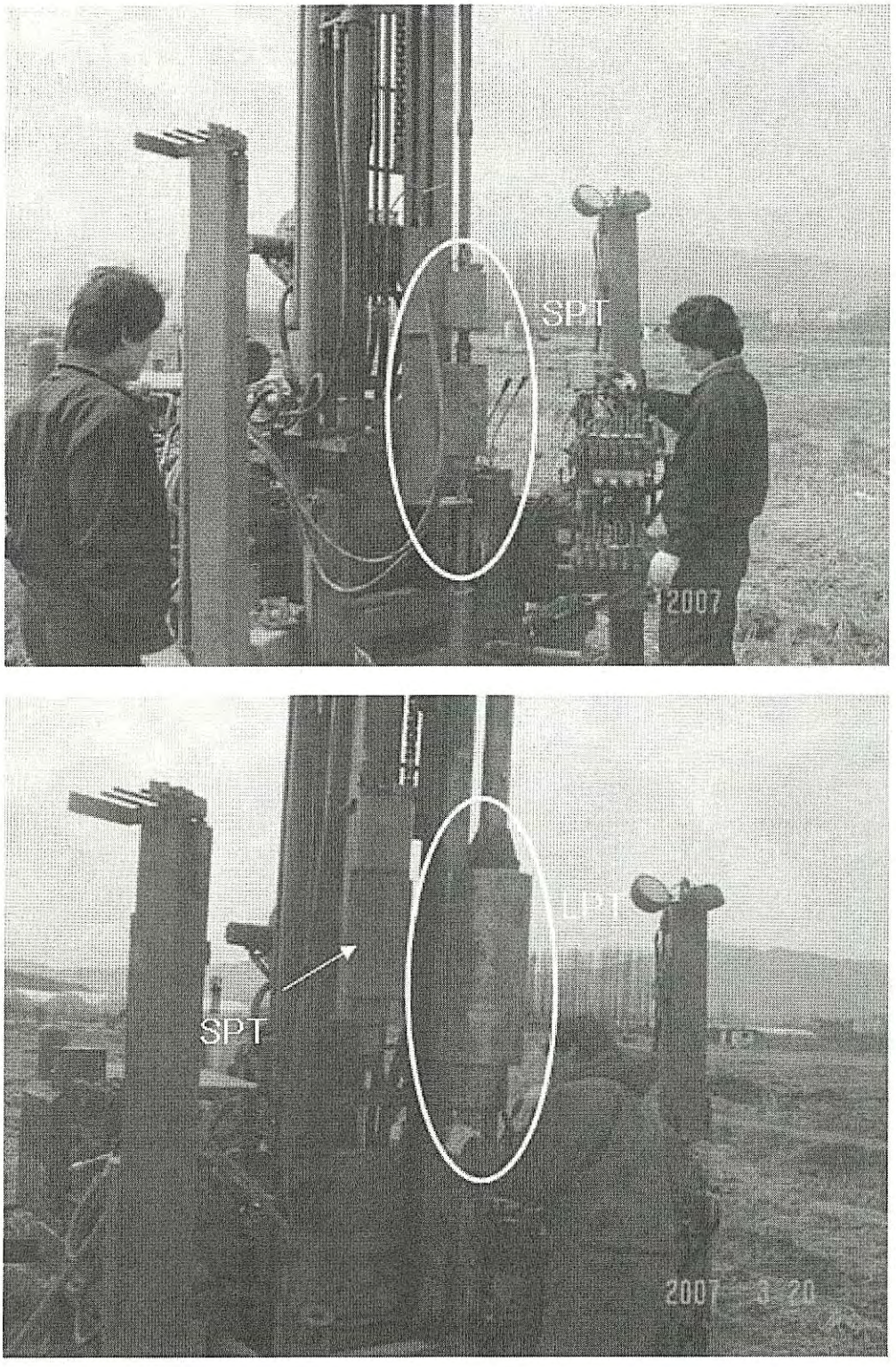


그림 3.84 SPT와 LPT 장비의 해머 비교

(d) 반자동 낙하장치

기존 SPT 장비에서 에너지 효율 등의 많은 문제점이 지적되었던 낙하시스템은 KS F2307 및 JI A1259S에서 제시하고 있는 자동/반자동 낙하시스템을 도입하였다 (그림 3.85 참조).

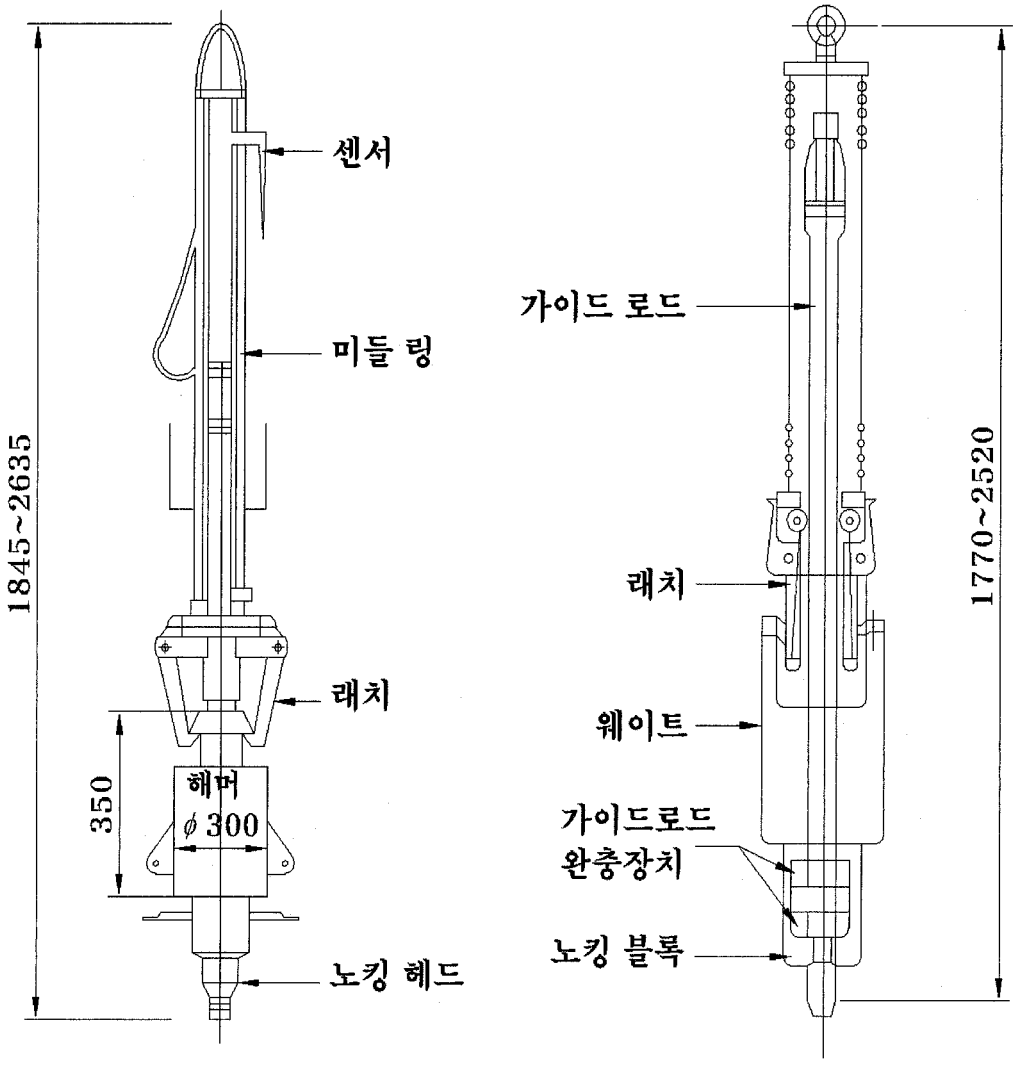
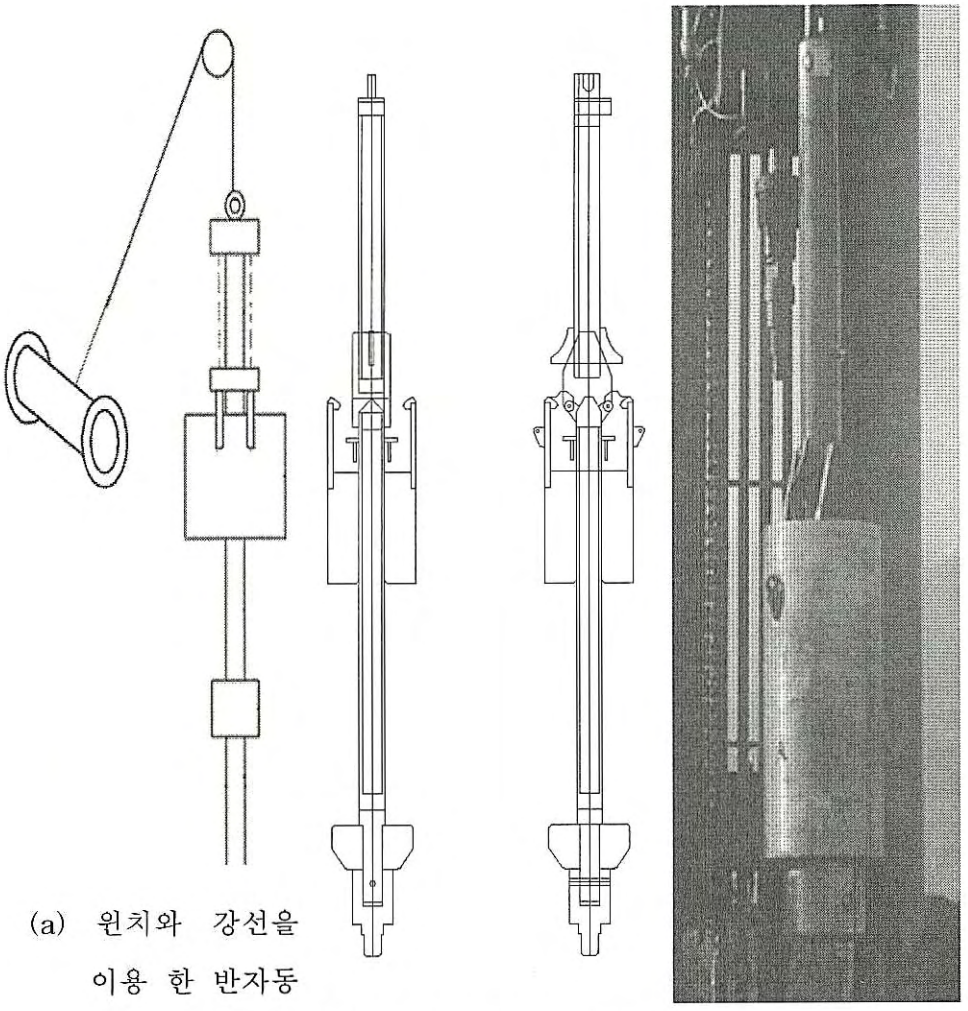


그림 3.85 KS F2037, JIS A1259에서 제시하고 있는 자동/반자동 낙하장치

본 연구에서 도입한 시스템은 그림 3.86과 같이 윈치와 강선을 이용한 반자동식 도넛 해머 시스템이다. 이 시스템은 기존 시추장비의 유압을 이용하여 정해진 낙하고(760mm)까지 해머를 상승시키고 자동으로 낙하시키는 시스템이다.



(a) 윈치와 강선을 이용 한 반자동식 도넛해머

(b) 반자동 낙하장치 구조

(c) 실제모습

그림 3.86 KICT-type LPT 장비의 반자동 낙하장치

마지막으로 그림 3.87은 기존 시추기에 탑재시킨 KICT-type LPT 장비 일체를 나타내고 있다.



그림 3.87 시추기에 탑재한 KICT-type LPT 장비 일체

3. KICT-type LPT 장비와 기존의 LPT 장비와의 비교

외국에서 개발된 대표적인 장비와 비교한 KICT-type LPT장비의 제원을 표 3.9에 나타내었다. 또한 그림 3.88에는 샘플러 규격 및 위치에너지를 비교하고 있다.

표 3.9 외국의 대형관입시험 장비와 비교한 KICT-type LPT 장비의 제원표

	SPT	JLPT[1]	Burmister LPT[2]	ILPT[3]	NALPT[4]	KICT-LPT
해머중량(kg)	63.5	100	113.4	570	136	150
낙하높이(cm)	75	150	50.8	50	76.2	76
외경(cm)	5.08	7.3	9.21	14	7.62	7.6
내경open shoe(cm)	3.49	5	7.44	10	6.1	6.0
내경barrel(cm)	3.81	5.4	na	11	6.4	6.3
해머위치에너지(kgf cm)	4762.5	15000	5760.72	28500	10363.2	11400
선단면적(전체)	20.268	41.854	66.621	153.938	45.604	45.365
선단면적(내경)	9.566	19.635	43.475	78.540	29.225	28.274
선단면적(두께)	10.702	22.219	23.146	75.398	16.379	17.090
에너지비(총에너지)		3.150	1.210	5.984	2.176	2.394
에너지비(전체면적)		1.525	0.368	0.788	0.967	1.069
에너지비(내경)		1.535	0.266	0.729	0.712	0.810
에너지비(두께)		1.517	0.559	0.849	1.422	1.499
타격회수비(SPT/LPT)		1.5~2.0	0.42	0.89~1.14	1.29	

[1] : Japanese LPT, [2] : Burmister LPT

[3] : Italian LPT, [4] : North American LPT

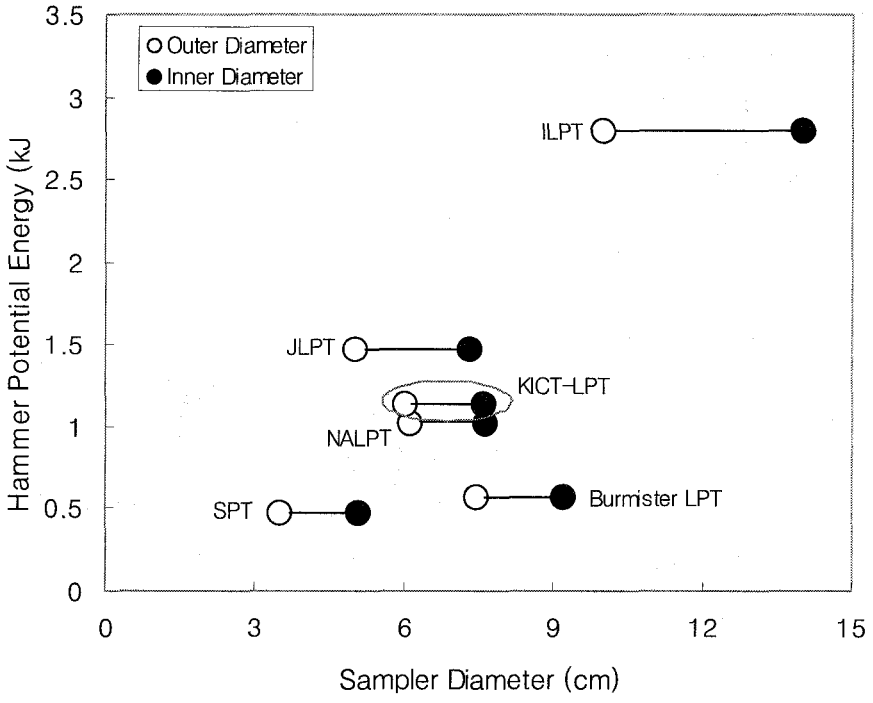


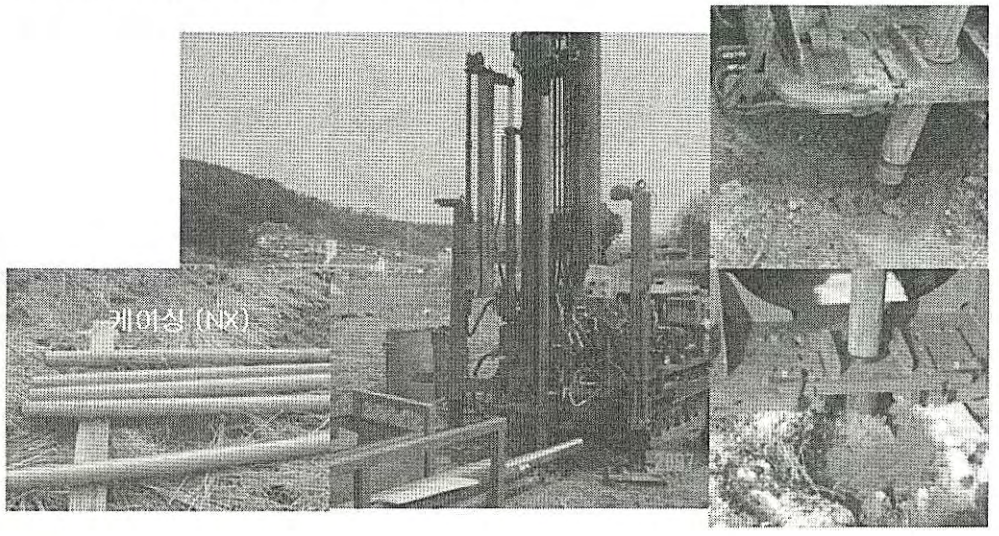
그림 3.88 SPT와 LPT 장비 비교 (샘플러 규격 및 위치에너지)

4. KICT-type LPT 시험방법

시험방법은 그림 3.89에 나타낸 것과 같이 기존의 SPT와 동일하며, 300mm 깊이까지 샘플러가 관입될 때의 타격횟수를 LPT의 N값이라고 정의하였다.

예비타를 포함한 보다 구체적인 시험방법은 향후 다양한 지반조건에서 현장 적용성 평가를 실시하여 검토할 필요가 있다.

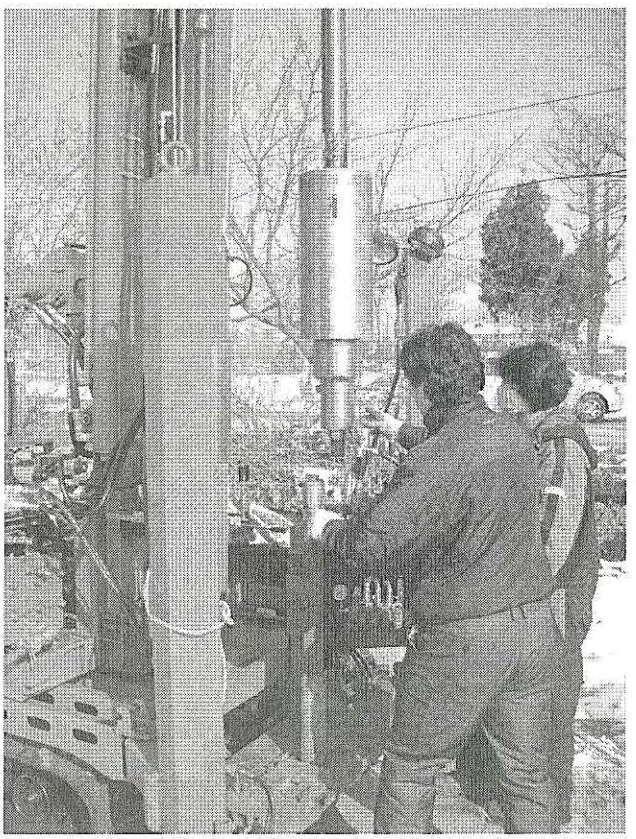
① 시추기 등을 이용하여 목표심도까지 굴착



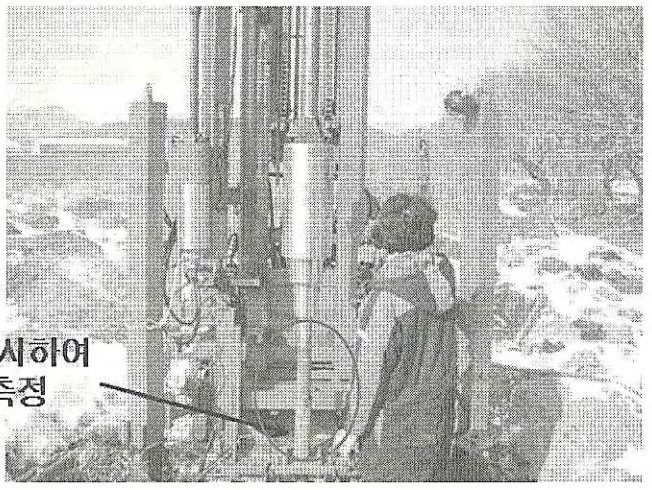
② LPT 장비 설치 (기존 시추기에 탑재가능) - 샘플러 및 롯드 설치



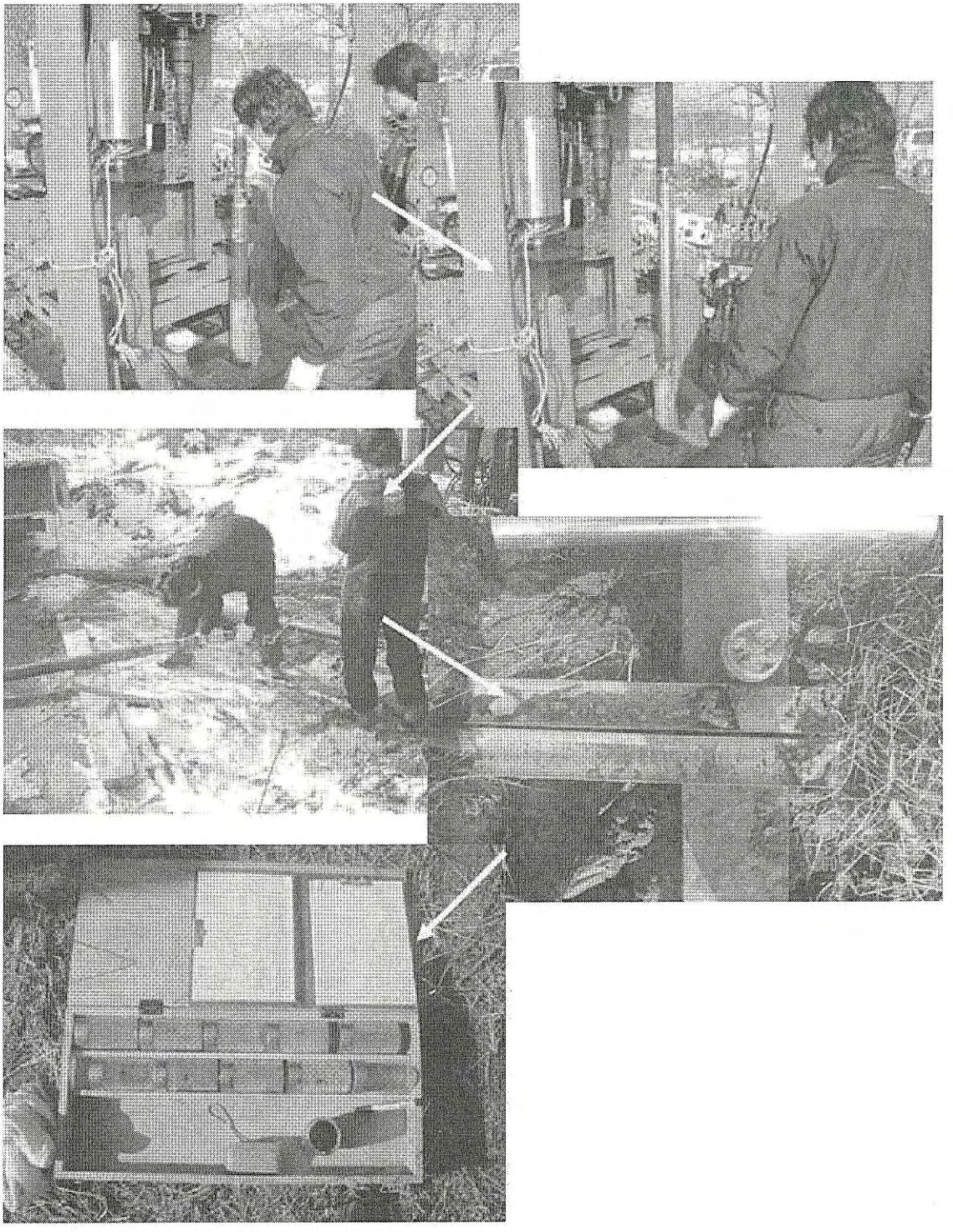
③ LPT 장비 설치 (기존 시추기에 탑재가능)-해머 및 낙하장치 설치



④ LPT 실시



⑤ 샘플러 회수 및 시료 채취



⑥ ①부터 반복

그림 3.89 KICT-type LPT 장비의 시험방법

제 4 절 한국형 대형관입시험 장비의 성능평가 및 현장 적용성 평가 결과

1. 개요

본 연구에서는 기존의 SPT가 적용될 수 있는 지반뿐만 아니라 SPT가 적용될 수 없는 조밀한 모래, 자갈층, 연암 등에서도 활용할 수 있는 KICT-type LPT 시험장비를 개발하였다. 또한 개발 장비의 성능평가 및 현장 적용성 평가를 실시하였다.

다양한 현장에서 LPT를 실시하여 개발 장비의 현장 적용 가능성을 검토하였으며, SPT 결과와 비교하여 SPT-LPT 상관관계 도출을 위한 연구도 수행하였다.

그리고, LPT 장비의 에너지 효율 및 거동을 정확하게 검토하기 위하여 대형 Calibration Chamber System을 이용하여 실내시험을 수행하였으며, 말뚝항타시험에서 사용되고 있는 PDA와 삼성건설이 자체적으로 개발한 SPI를 활용하여 개발장비의 거동을 실내외에서 측정/검토하였다. 또한, 실내 역학시험을 수행하여 LPT N값으로부터 지반정수(내부마찰각)를 도출할 수 있도록 기초연구도 실시하였다.

2. 현장 적용성 평가 결과

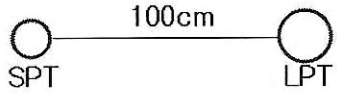
시작품으로 제작된 KICT-type LPT장비의 성능평가를 실시한 결과, 반자동해머의 작동여부, 구조적인 결함 등 특별한 문제점은 발견되지 않았다. 따라서 다양한 현장 및 지반조건에서 개발 장비의 적용성 평가 및 SPT와의 상관관계를 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

(a) 1차 현장 적용성 평가

(1) 개요 및 현장사진

◎ 장소: OO호텔 신축공사부지 내 지반조사
◎ 주소: 대전시 서구 둔산동

◎ 내용: LPT, SPT 실시 (SPT 및 LPT 시험 1회 실시)
◎ LPT, SPT 거리: 약 100cm



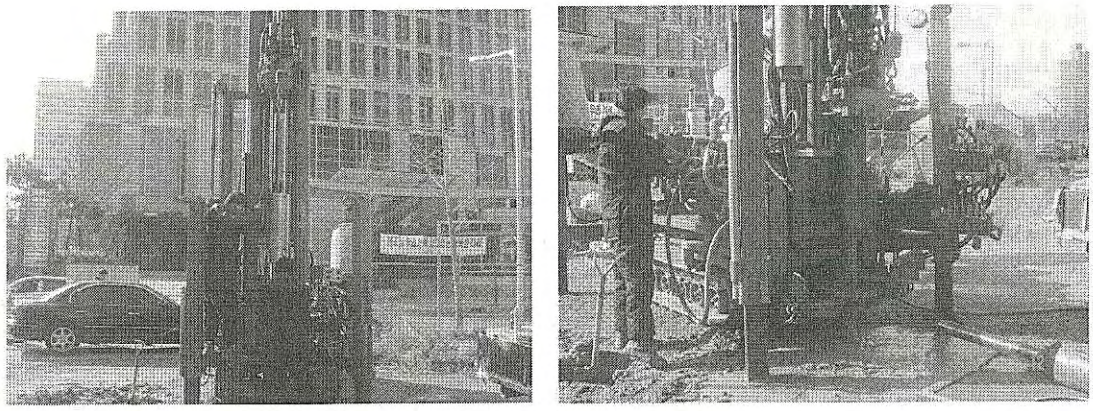


그림 3.90 1차 적용성 평가 현장 모습

(2) 실험결과 및 분석

① SPT/LPT 결과 비교

그림 3.91 - 3.93은 SPT 결과, LPT 결과에서 얻은 N값을 나타내고 있다. 근입깊이가 깊지 않은 1.5m와 3.0m에서는 양자간의 차이가 발생하지 않았다. 이러한 결과는 샘플러의 사이즈 및 구조의 차이로 인한 마찰력 등의 영향 때문이라고 판단되며, 향후 문헌조사 및 많은 현장실험을 통해 확인 할 필요가 있다가 본다. 4.5m부터는 LPT 시험의 N값이 타격에너지 증가로 인하여 기존의 SPT 시험의 N값보다 감소하여 나타나는 것을 확인할 수 있다.

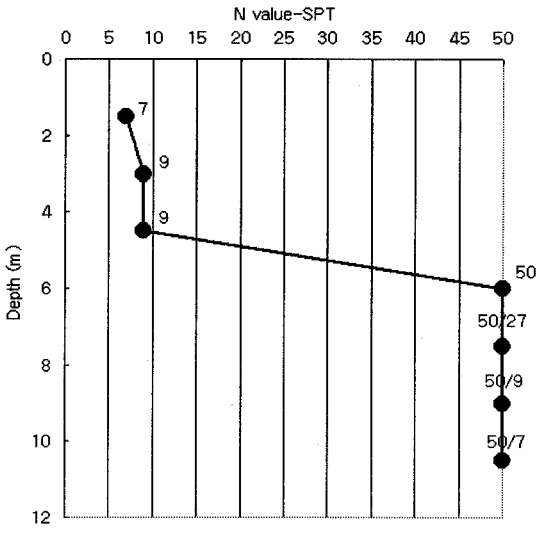


그림 3.91 SPT 결과

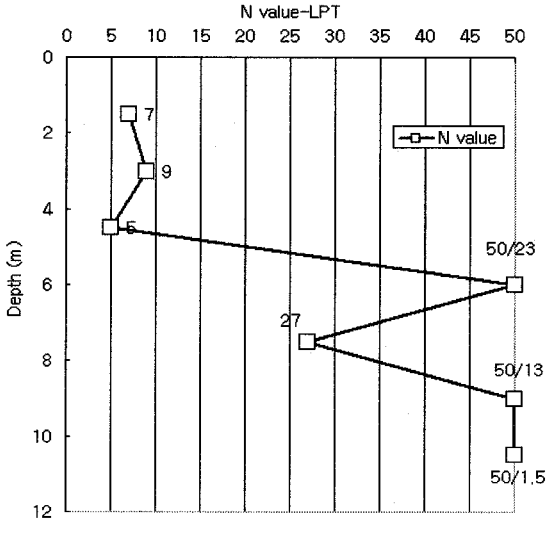


그림 3.92 LPT결과

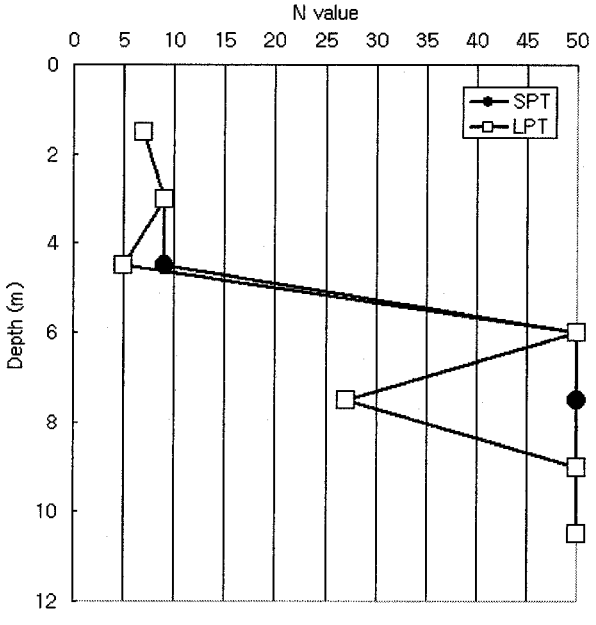


그림 3.93 SPT, LPT 결과 비교

② 각 단계별 실험결과 분석

LPT 장비의 성능 확인 및 SPT와의 상관관계 연구를 위하여 각 단계별 실험결과를 그림 3.94 - 3.96에 나타내었다. 타격에너지 증가로 LPT 장비로부터 얻어진 N 값

이 작게 나타남을 알 수 있다.

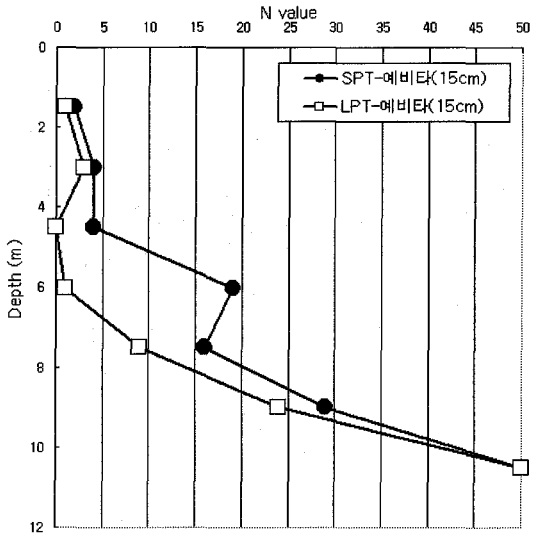


그림 3.94 예비타 결과 비교(15cm)

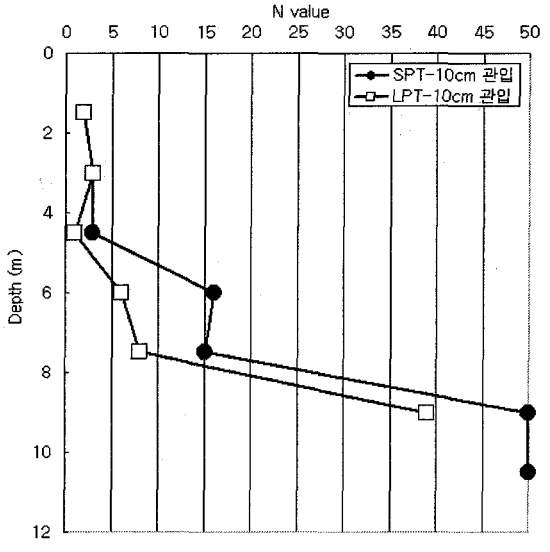


그림 3.95 10cm 관입 결과 비교

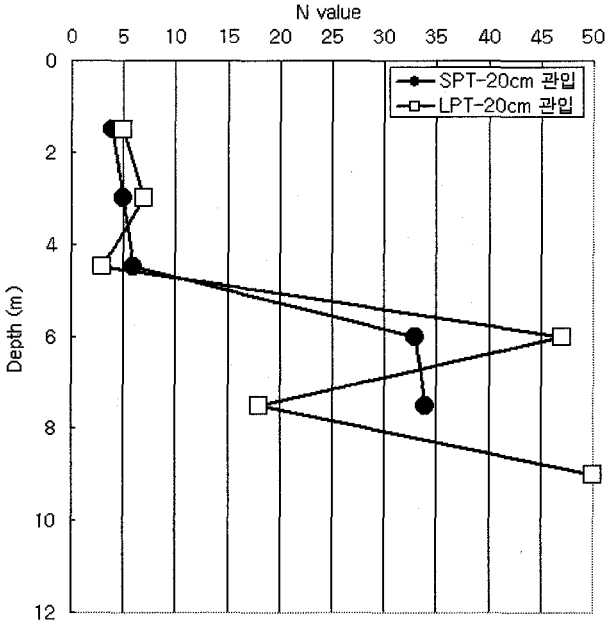


그림 3.96 20cm 관입 결과 비교

③ SPT/LPT 상관관계

LPT 시험의 N값과 SPT 시험의 N값의 상관관계를 분석하기 위하여 정리된 결과를 그림 3.97에 나타내었다. x축이 SPT로부터 얻어진 N값이며, y축이 LPT 시험으로

부터 얻어진 N값을 나타내고 있다. 보다 명확한 결과를 도출하기 위해서는 많은 현장 시험결과가 필요 할 것으로 판단된다.

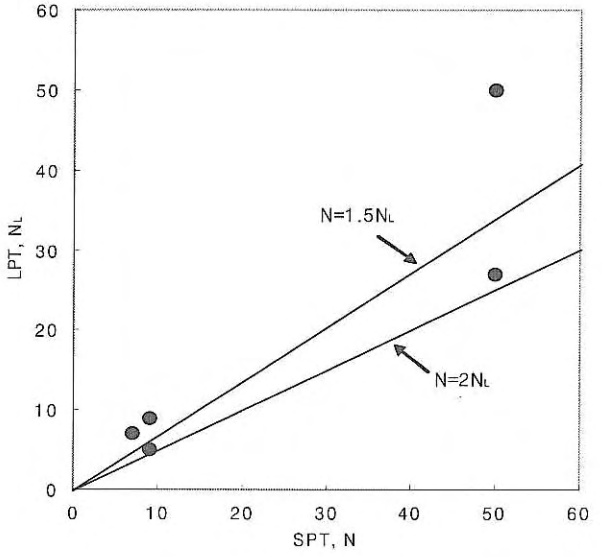
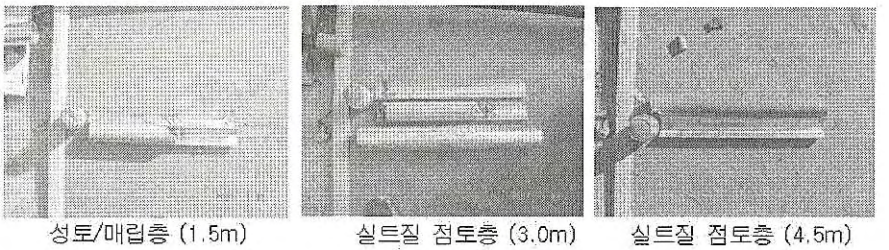
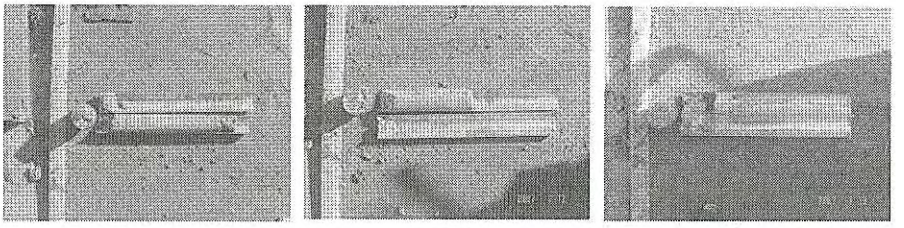


그림 3.97 SPT/LPT 상관 관계

④ 채취한 준교란 시료 및 지층설명

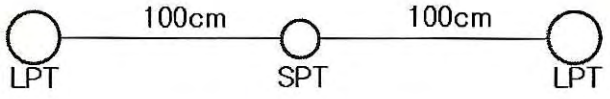




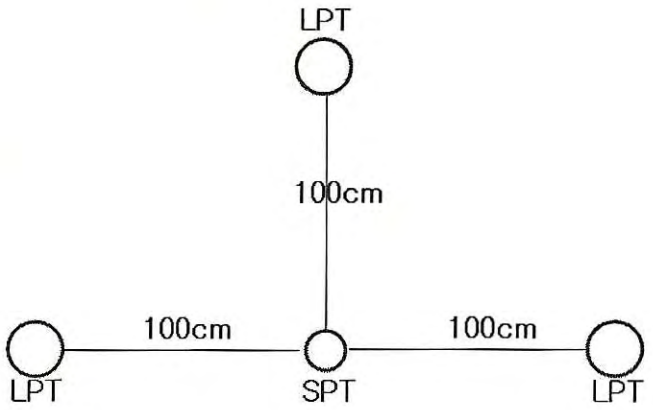
(b) 2차 현장 적용성 평가

(1) 개요 및 현장사진

◎ 장소: OO 마을회관 지반조사
◎ 주소: 대전광역시 대덕구 장동
◎ 내용: LPT, SPT 실시 (2지점에 대해 SPT 및 LPT 각 2-3회 실시)
◎ LPT, SPT 거리: 약 100cm



(제 1지점)



(제 2지점)

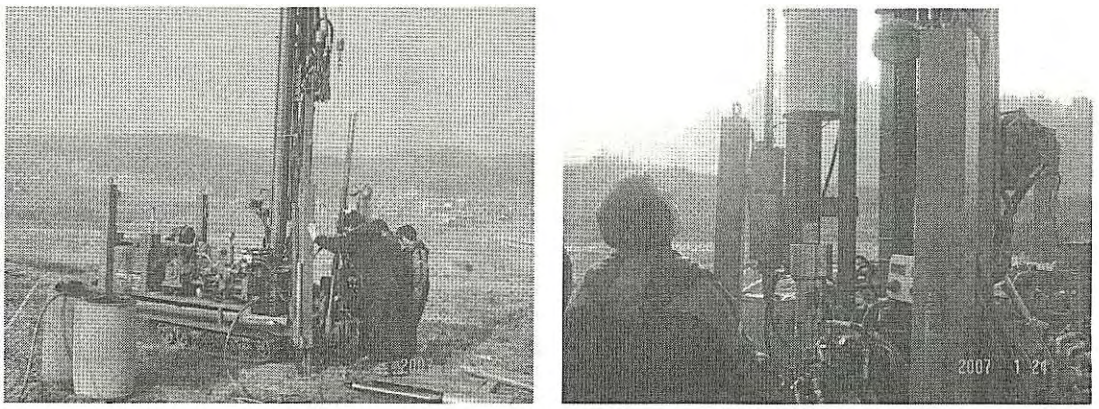


그림 3.98 2차 적용성 평가 현장 모습

(2) 실험결과 및 분석

① SPT/LPT 결과 비교

그림 3.99와 3.100은 SPT 결과, LPT 결과에서 얻은 N값을 나타내고 있다. LPT 시험의 N값은 타격에너지 증가로 인하여 기존의 SPT 시험의 N값보다 감소하고 있다.

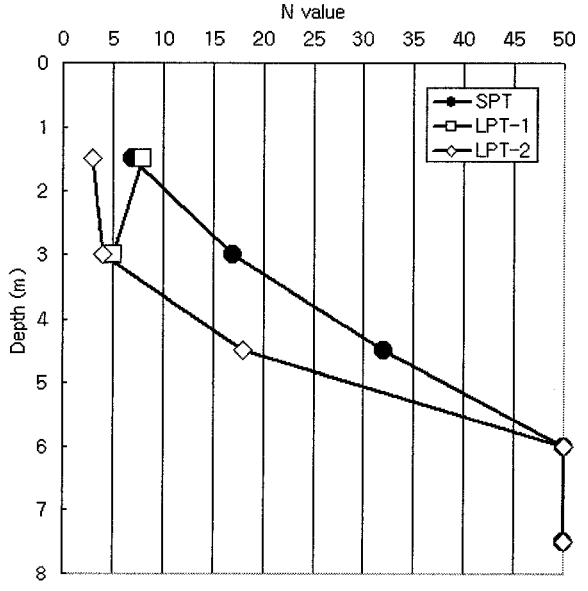


그림 3.99 SPT, LPT 결과 (제 1지점)

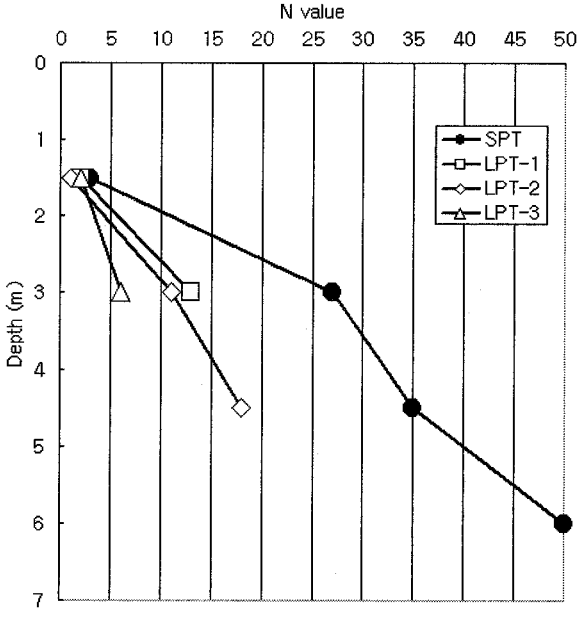


그림 3.100 SPT, LPT 결과 (제 2지점)

② 각 단계별 실험결과 분석

각 단계별 실험결과를 그림 3.101 - 3.103에 나타내었다. 타격에너지의 증가로 LPT 시험의 N값과 SPT 시험의 N값의 차이가 발생함을 알 수 있다.

- 제 1지점 결과 -

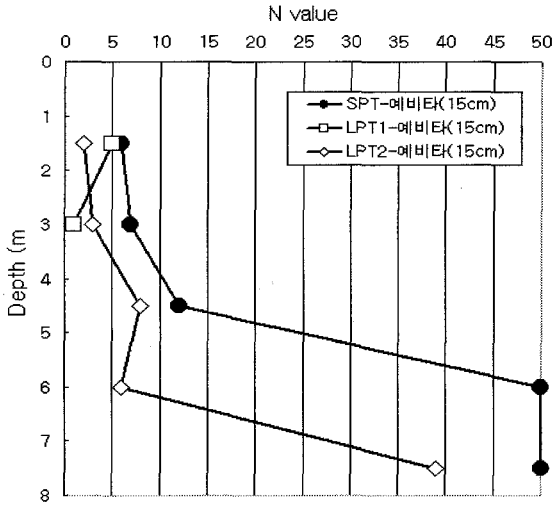


그림 3.101 예비타 결과 비교(15cm)

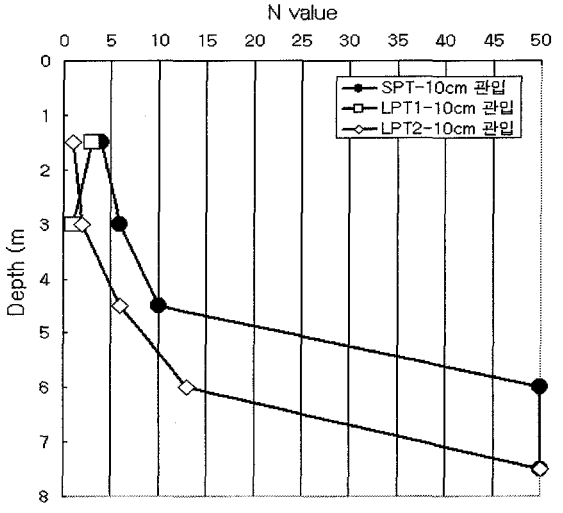


그림 3.102 10cm 관입 결과 비교

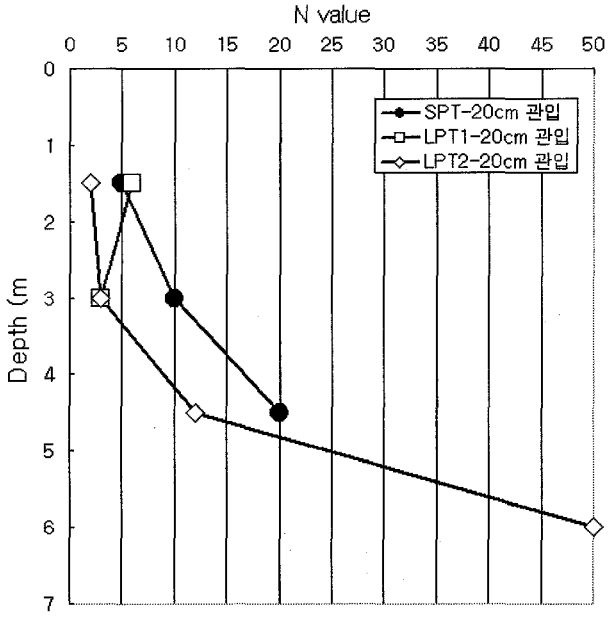


그림 3.103 20cm 관입 결과 비교

- 제 2지점 결과 -

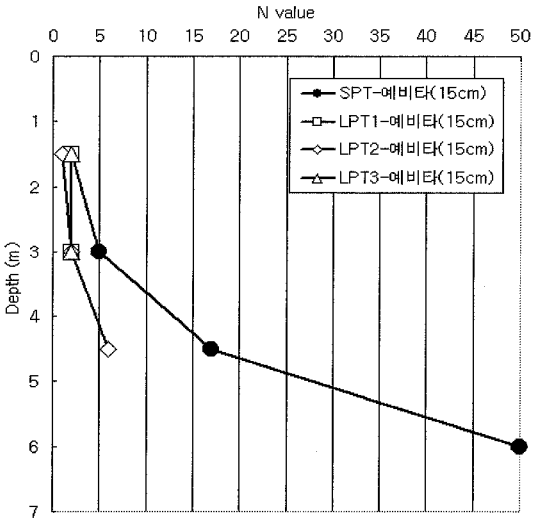


그림 3.104 예비타 결과 비교(15cm)

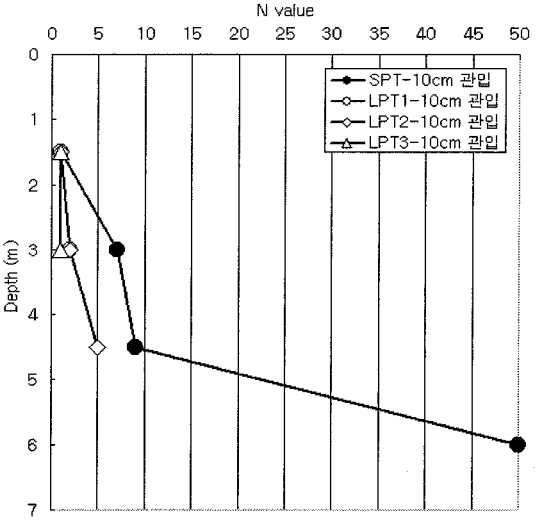


그림 3.105 10cm 관입 결과 비교

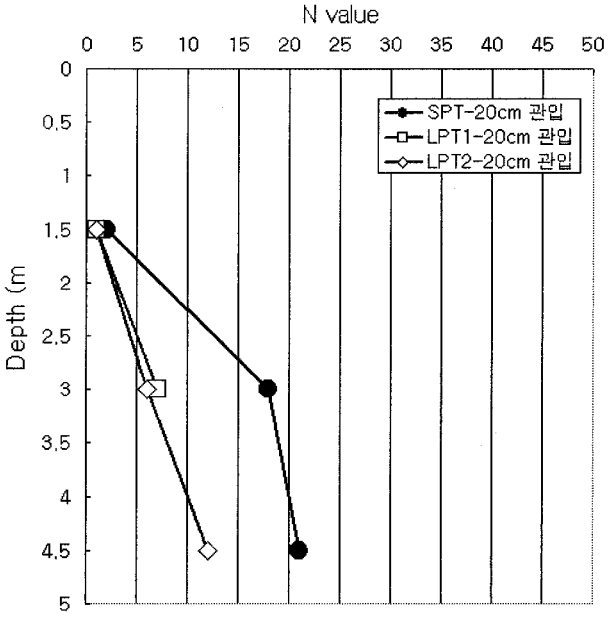


그림 3.106 20cm 관입 결과 비교

③ SPT/LPT 상관관계 (누적데이터)

그림 3.107에는 SPT/LPT 상관관계를 분석하기 1차 현장 적용성 평가결과를 포함하여 정리하였다.

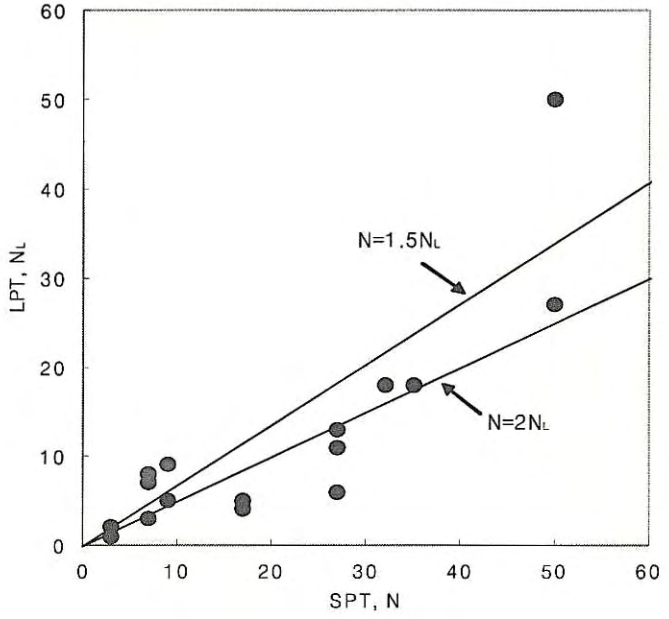
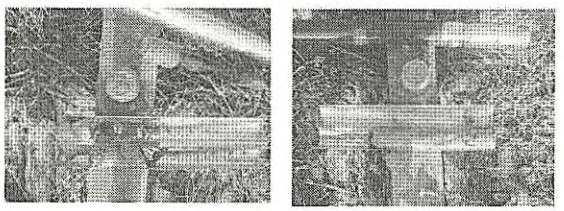


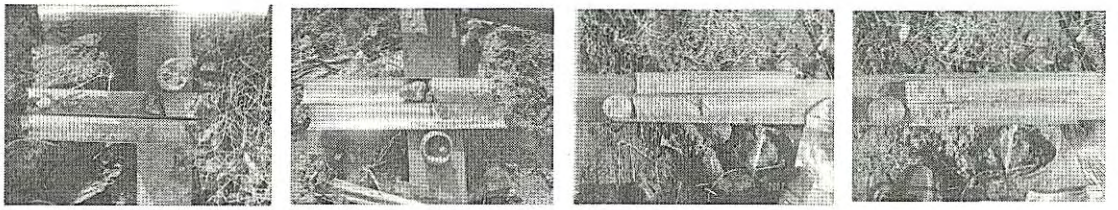
그림 3.107 SPT/LPT 상관관계

④ 채취한 준교란 시료 및 지층설명

- 제 1지점 -

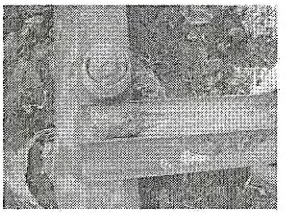


실트질모래층~모래질자갈층(1.5m) 실트질 모래층 (3.0m)

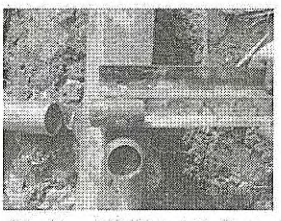


실트질모래층~모래질자갈층(1.5m) 실트질 모래층 (3.0m) 모래질 자갈층 (4.5m) 풍화토 (6.0m)

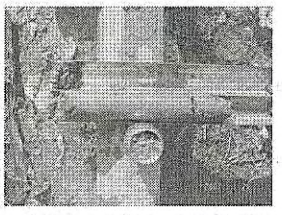
- 제 2지점 -



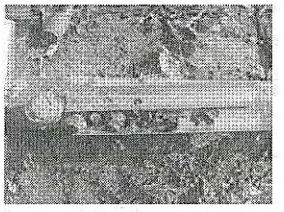
자갈질~모래질 자갈층 (3.0m)



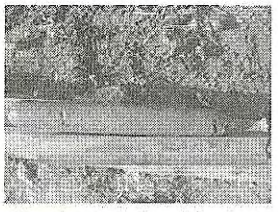
실트질~자갈질모래층 (1.5m)



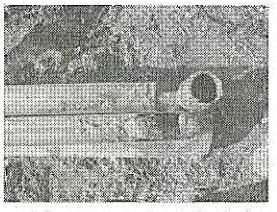
자갈질~모래질 자갈층 (3.0m)



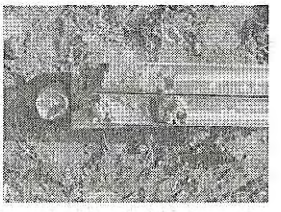
모래질 자갈층 (4.5m)



실트질~자갈질모래층 (1.5m)



자갈질~모래질 자갈층 (3.0m)

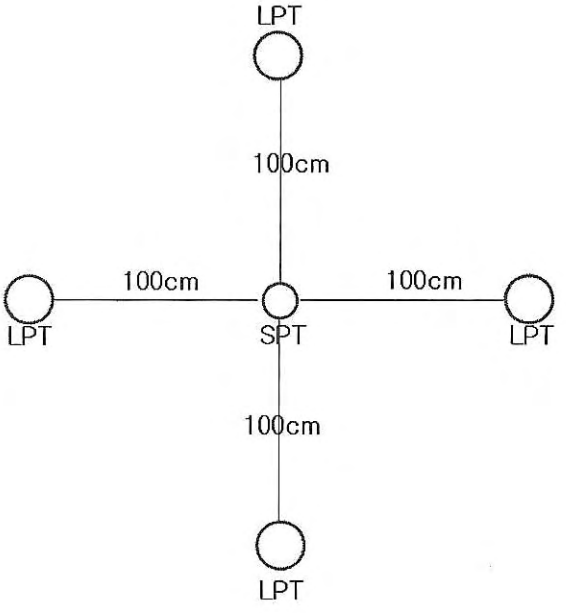


모래질 자갈층 (4.5m)

(c) 3차 현장 적용성 평가

(1) 개요 및 현장사진

◎ 장소: OO 마을회관 지반조사
◎ 주소: 대전광역시 대덕구 장동
◎ 내용: LPT, SPT 실시 (1지점)
◎ LPT, SPT 거리: 약 100 cm



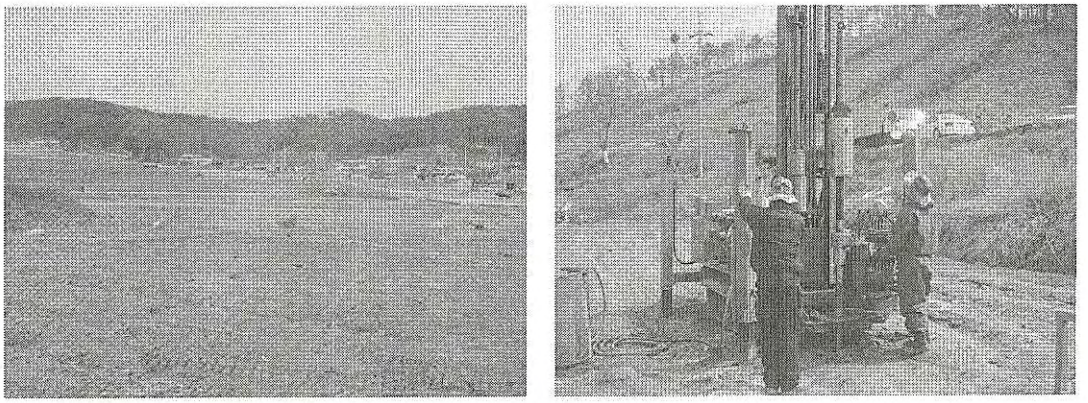


그림 3.108 3차 적용성 평가 현장 모습

(2) 실험결과 및 분석

① SPT/LPT 결과 비교

그림 3.109는 SPT 결과, LPT 결과에서 얻은 N값을 나타내고 있다. LPT 시험의 N값은 타격에너지 증가로 인하여 기존의 SPT 시험의 N값보다 감소하고 있다.

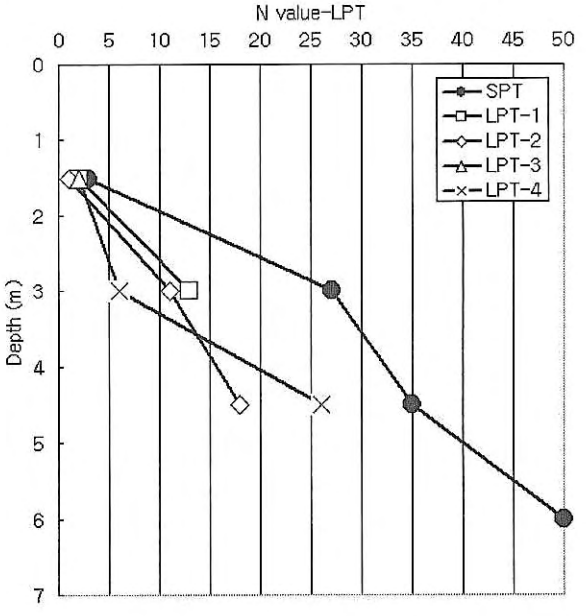


그림 3.109 SPT, LPT 결과

② 각 단계별 실험결과 분석

각 단계별 실험결과를 그림 3.110 - 3.112에 나타내었다. 타격에너지의 증가로 LPT 시험의 N값과 SPT 시험의 N값의 차이가 발생함을 알 수 있다.

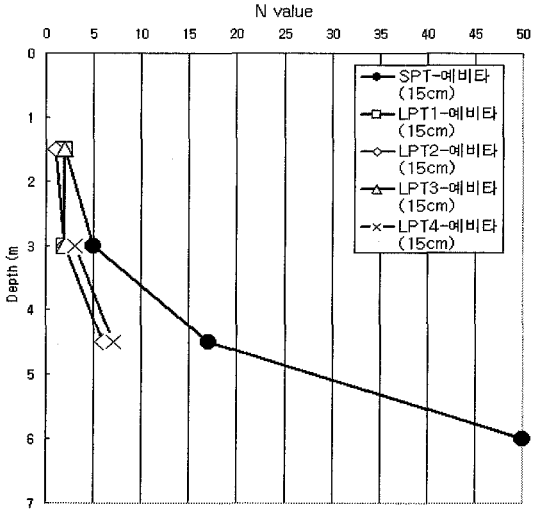


그림 3.110 예비타 결과 비교(15cm)

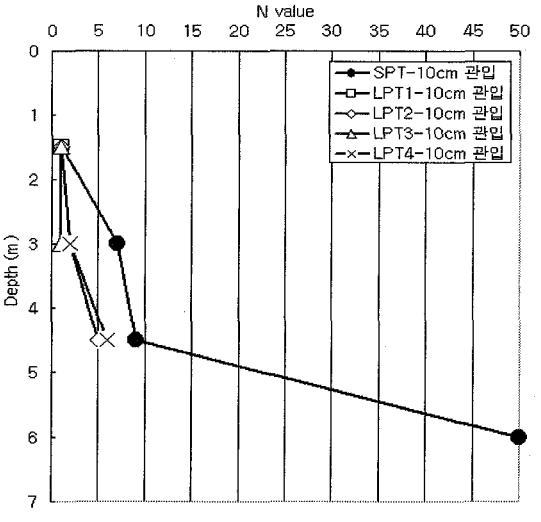


그림 3.111 10cm 관입 결과 비교

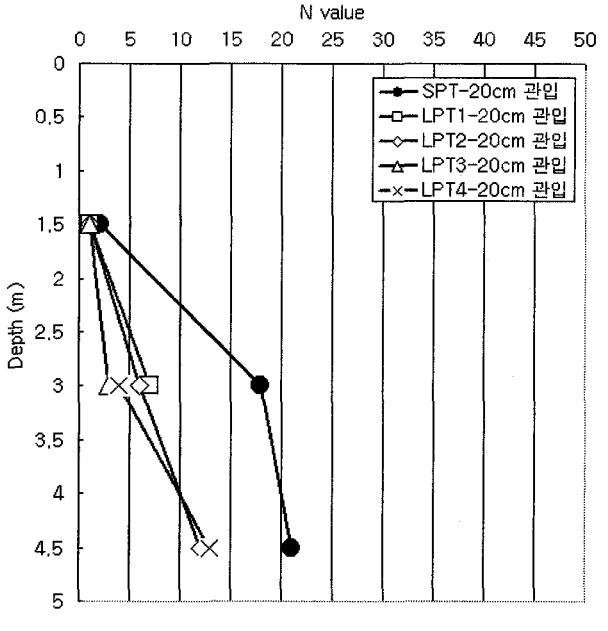


그림 3.112 20cm 관입 결과 비교

③ SPT/LPT 상관관계 (누적데이터)

그림 3.113에는 SPT/LPT 상관관계를 분석하기 1, 2차 현장 적용성 평가결과를 포함하여 정리하였다.

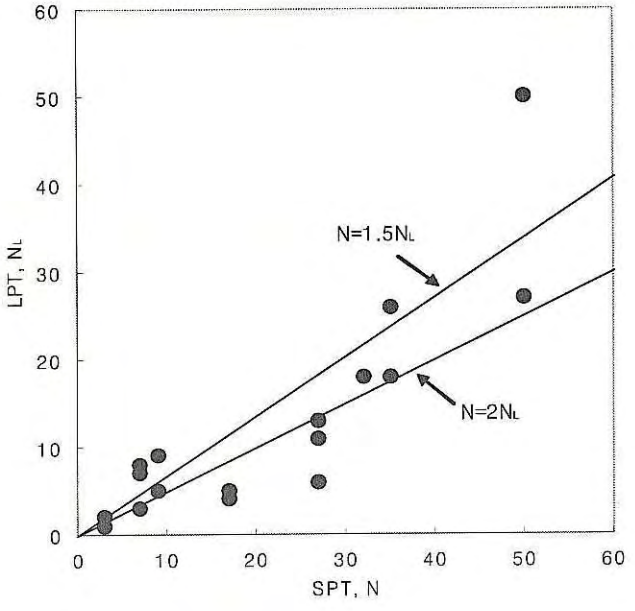
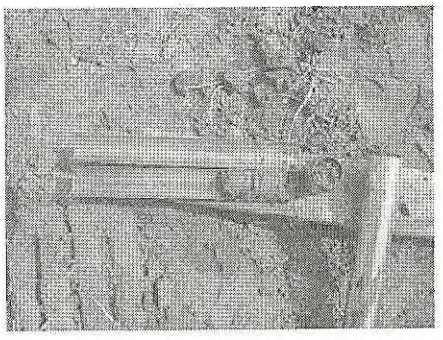
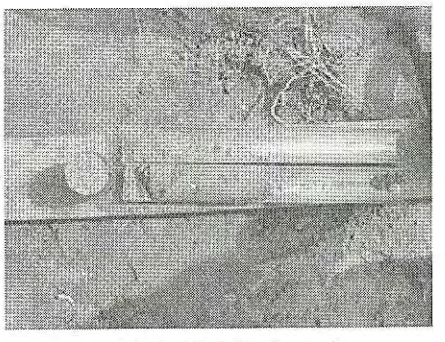


그림 3.113 SPT/LPT 상관관계

④ 채취한 준교란 시료 및 지층설명



자갈질~모래질 자갈층 (3.0m)



모래질 자갈층 (4.5m)

(d) 4차 현장 적용성 평가

(1) 개요 및 현장사진

◎ 장소: 대전광역시 도시개발공사 서남부 개발지구
◎ 주소: 대전광역시 유성구 상대동
◎ 내용: LPT, SPT 실시 (1지점 LPT 2회실시)
◎ LPT, SPT 거리: 약 150cm



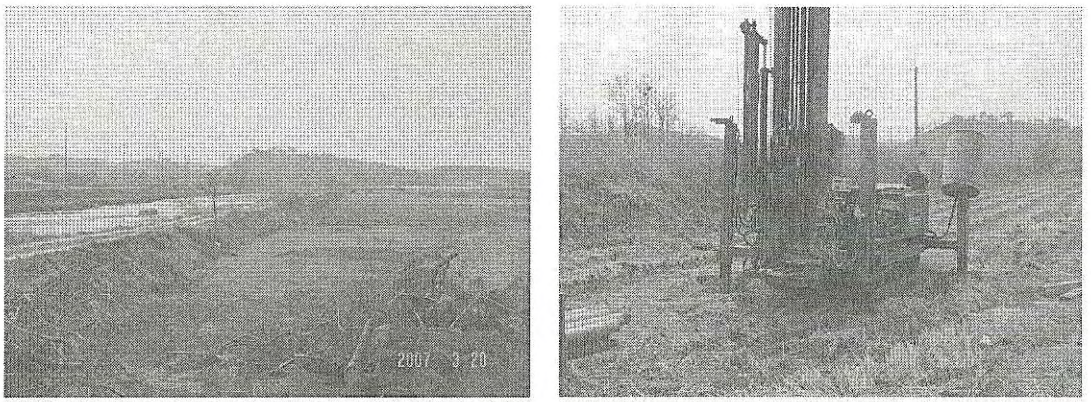


그림 3.114 4차 적용성 평가 현장 모습

(2) 실험결과 및 분석

① SPT/LPT 결과 비교

그림 3.115는 SPT 결과, LPT 결과에서 얻은 N값을 나타내고 있다. LPT 시험의 N값은 타격에너지 증가로 인하여 기존의 SPT 시험의 N값보다 감소하고 있다.

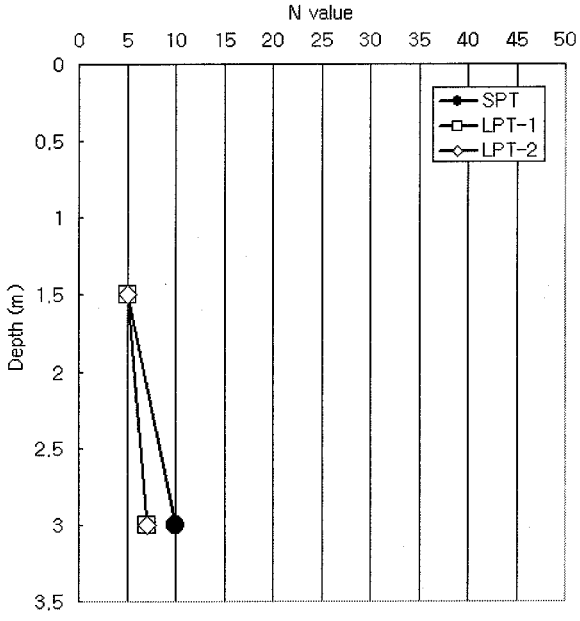


그림 3.115 SPT, LPT 결과

② 각 단계별 실험결과 분석

각 단계별 실험결과를 그림 3.116 - 3.118에 나타내었다. 타격에너지의 증가로 LPT 시험의 N값과 SPT 시험의 N값의 차이가 발생함을 알 수 있다.

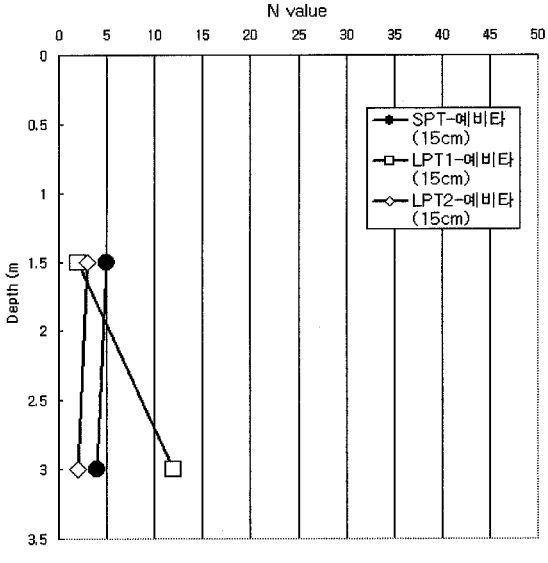


그림 3.116 예비타 결과 비교(15cm)

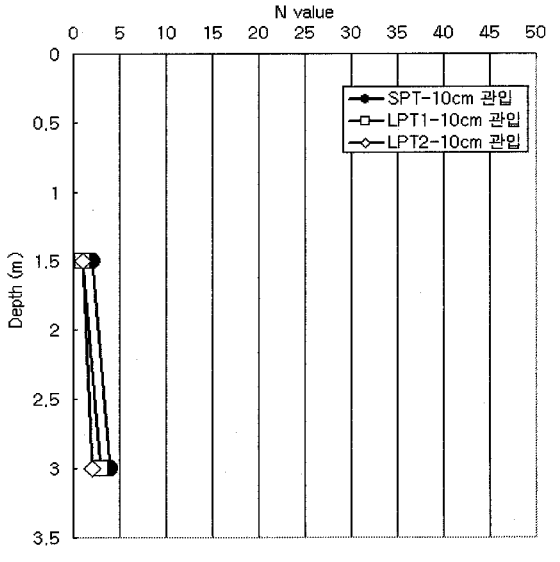


그림 3.117 10cm 관입 결과 비교

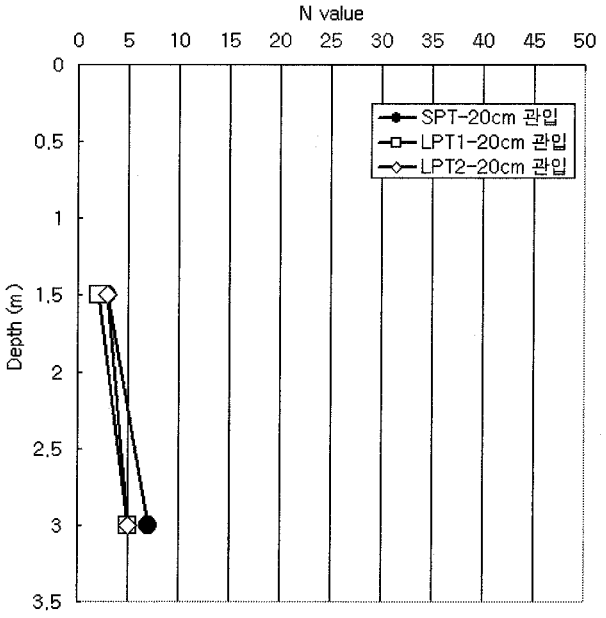


그림 3.118 20cm 관입 결과 비교

③ SPT/LPT 상관관계 (누적데이터)

그림 3.119에는 SPT/LPT 상관관계를 분석하기 1, 2, 3차 현장 적용성 평가결과를 포함하여 정리하였다.

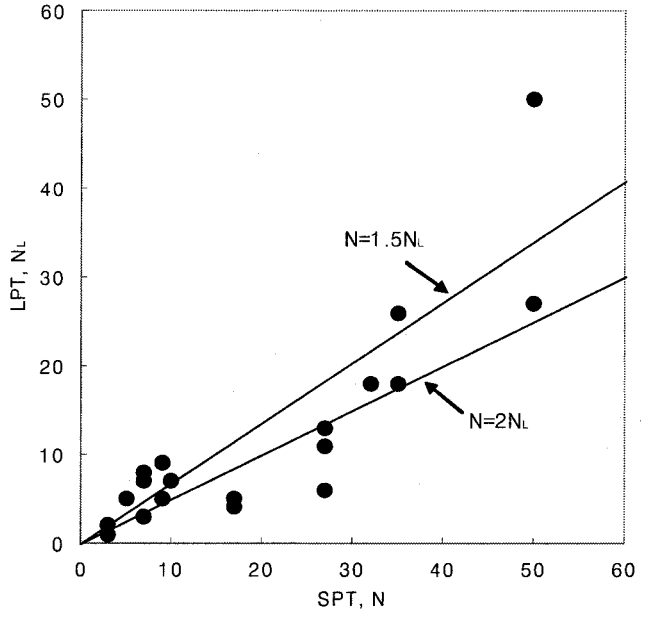
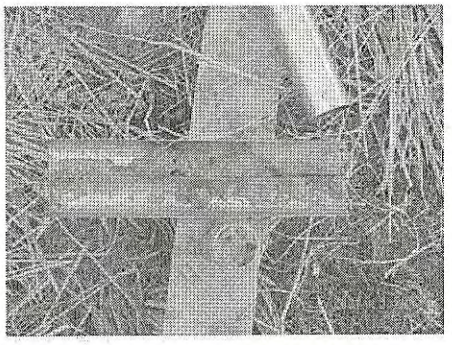
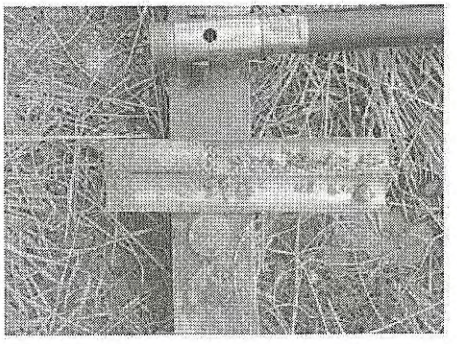


그림 3.119 SPT/LPT 상관관계

④ 채취한 준교란 시료 및 지층설명



자갈질 모래층 (1.5m LPT)



풍화토 (3.0m LPT)

(e) 5차, 6차 현장 적용성 평가

(1) 개요 및 현장사진

◎ 장소: 대덕 테크노밸리 공장 신축공사 부지 내 지반조사
◎ 주소: 대전광역시 유성구 관평동
◎ 내용: LPT, SPT 실시 (2개 지점에서 SPT 및 LPT 시험 1회 실시)
◎ LPT, SPT 거리: 약 150cm

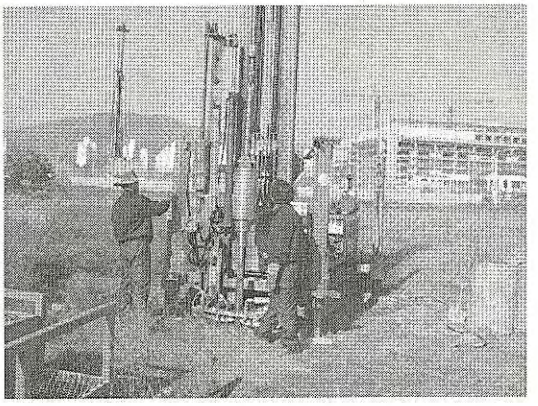


그림 3.120 5차, 6차 적용성 평가 현장 모습

(2) 실험결과 및 분석

- 제 1지점 결과 -

① SPT/LPT 결과 비교

그림 3.121 - 3.123은 SPT 결과, LPT 결과에서 얻은 N값을 나타내고 있다. 심도 7.5m-10m값을 제외하면 LPT 시험의 N값은 타격에너지 증가로 인하여 기존의 SPT 시험의 N값보다 감소하고 있다. 채취한 준교란 시료를 눈으로 확인 한 결과, 심도 7.5, 9, 10m의 LPT에서는 직경이 큰 전석층이 존재하여 N값이 다소 크게 계측되었다.

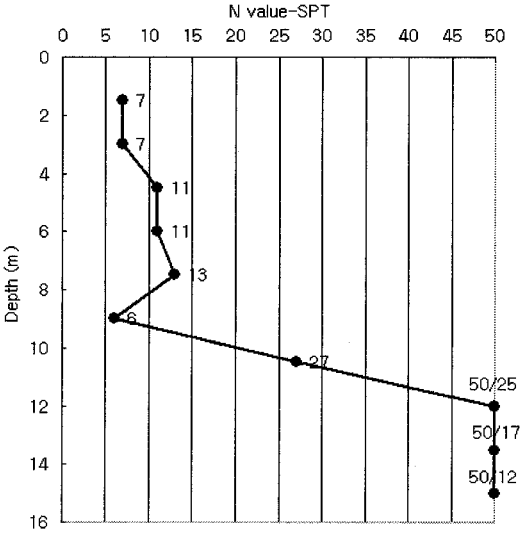


그림 3.121 SPT 결과

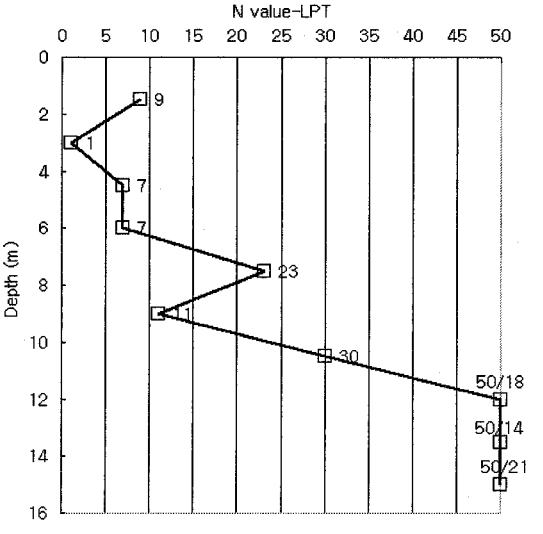


그림 3.122 LPT결과

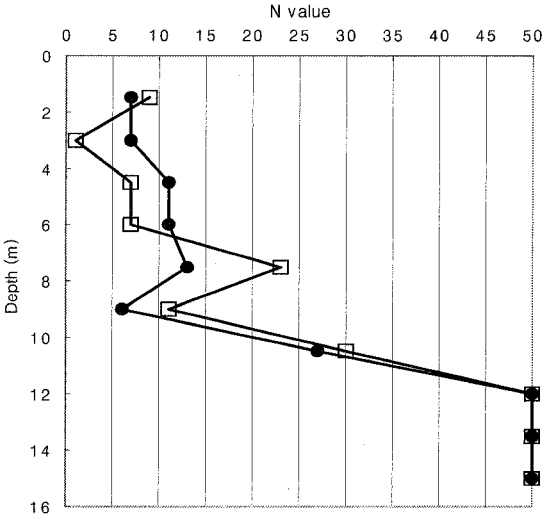


그림 3.123 SPT, LPT 결과 비교

② SPT/LPT 상관관계 (누적데이터)

그림 3.124에는 SPT/LPT 상관관계를 분석하기 1, 2, 3, 4차 현장 적용성 평가결과를 포함하여 정리하였다.

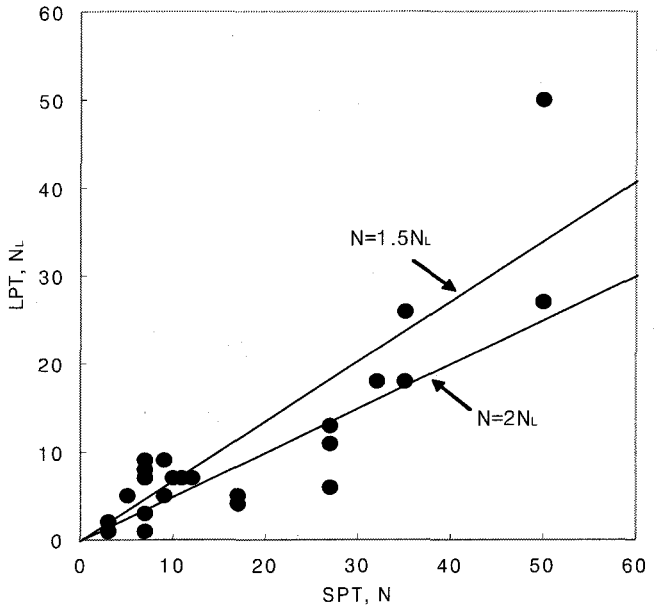


그림 3.124 SPT/LPT 상관관계

- 제 2지점 결과 -

① SPT/LPT 결과 비교

그림 3.125 - 3.127은 SPT 결과, LPT 결과에서 얻은 N값을 나타내고 있다. LPT 시험의 N값은 타격에너지 증가로 인하여 기존의 SPT 시험의 N값보다 감소하고 있다.

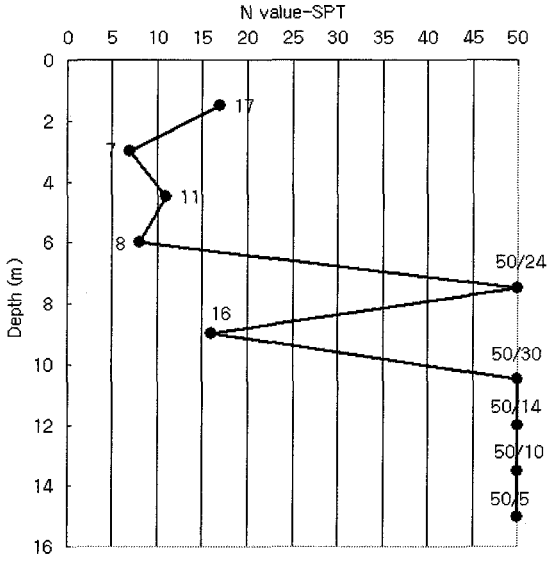


그림 3.125 SPT 결과

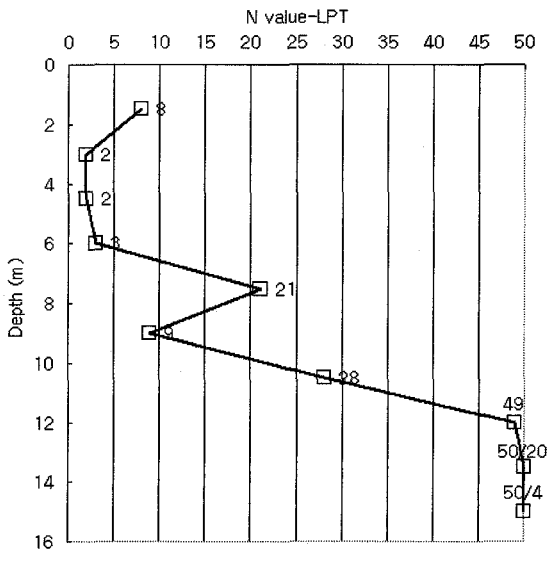


그림 3.126 LPT결과

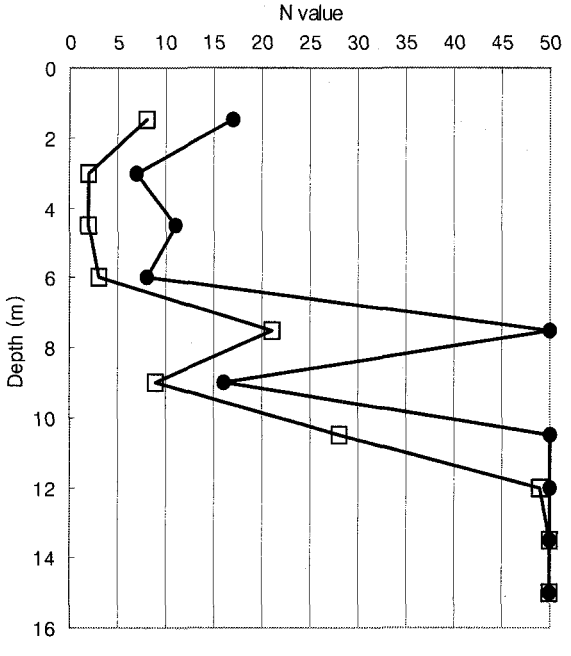


그림 3.127 SPT, LPT 결과 비교

② SPT/LPT 상관관계 (누적데이터)

그림 3.128에는 SPT/LPT 상관관계를 분석하기 1, 2, 3, 4차 현장 적용성 평가결과를 포함하여 정리하였다.

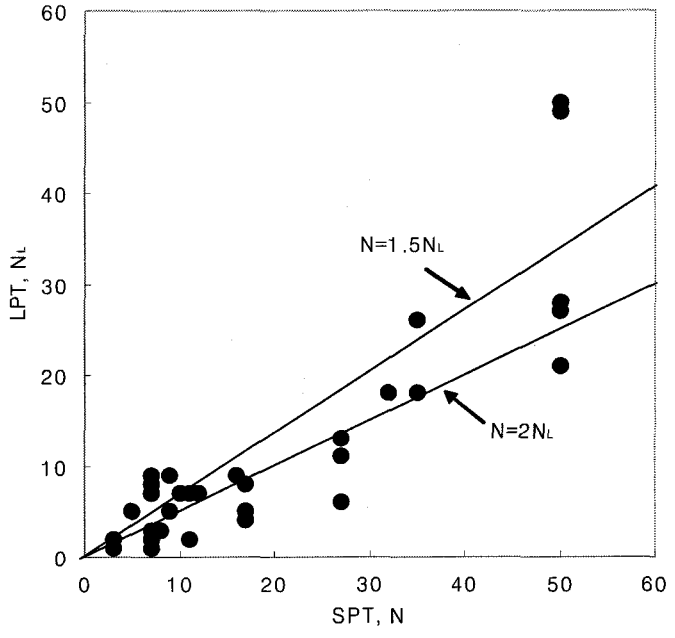


그림 3.128 SPT/LPT 상관관계

(f) 7차 현장 적용성 평가

(1) 개요 및 현장사진

◎ 장소: OO건설 기술연구소 신축부지 내 지반조사
◎ 주소: 경기도 용인시 동백
◎ 내용: LPT, SPT 실시
◎ LPT, SPT 거리: 약 150cm

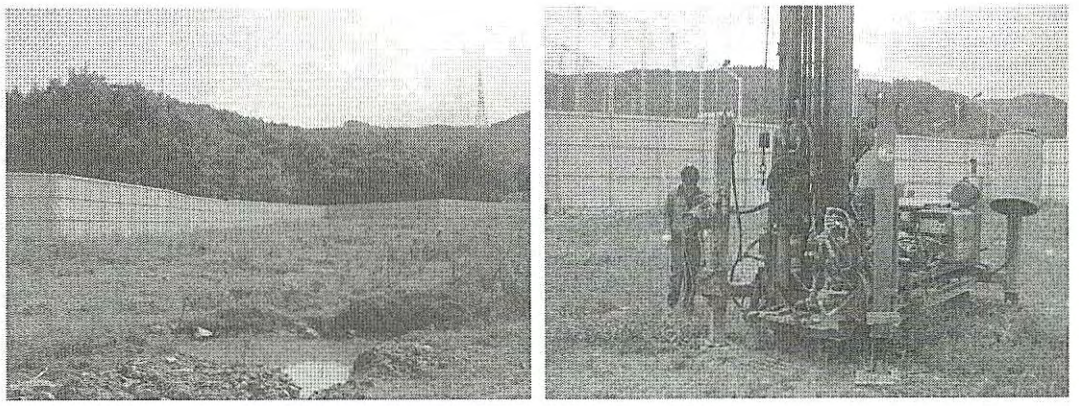


그림 3.129 7차 적용성 평가 현장 모습

(2) 실험결과 및 분석

① SPT/LPT 결과 비교

그림 3.130 - 3.132는 SPT 결과, LPT 결과에서 얻은 N값을 나타내고 있다. LPT 시험의 N값은 타격에너지 증가로 인하여 기존의 SPT 시험의 N값보다 감소하고 있다.

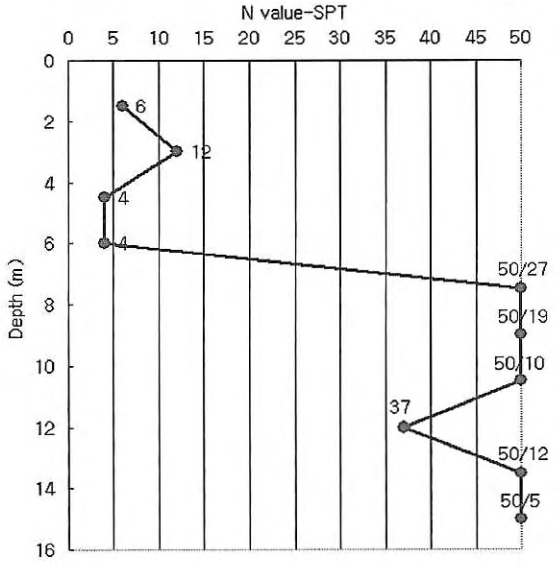


그림 3.130 SPT 결과

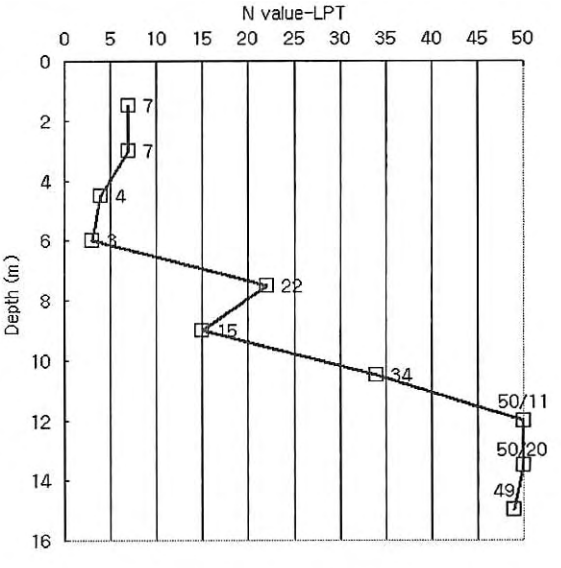


그림 3.131 LPT결과

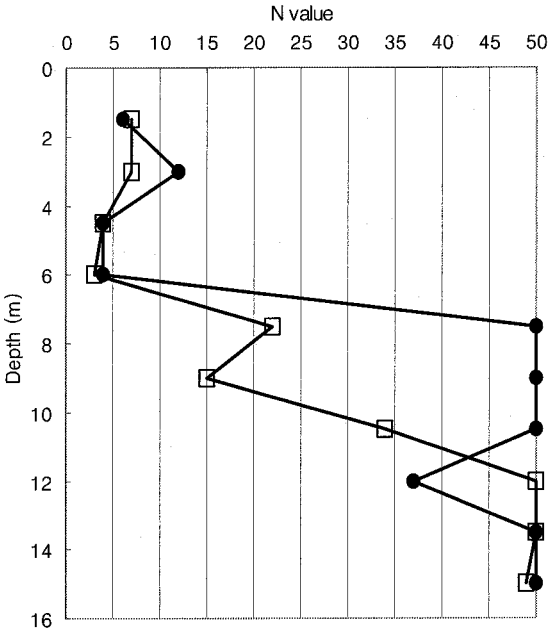


그림 3.132 SPT, LPT 결과 비교

② SPT/LPT 상관관계 (누적데이터)

그림 3.133에는 SPT/LPT 상관관계를 분석하기 1, 2, 3, 4, 5, 6차 현장 적용성 평가결과를 포함하여 정리하였다.

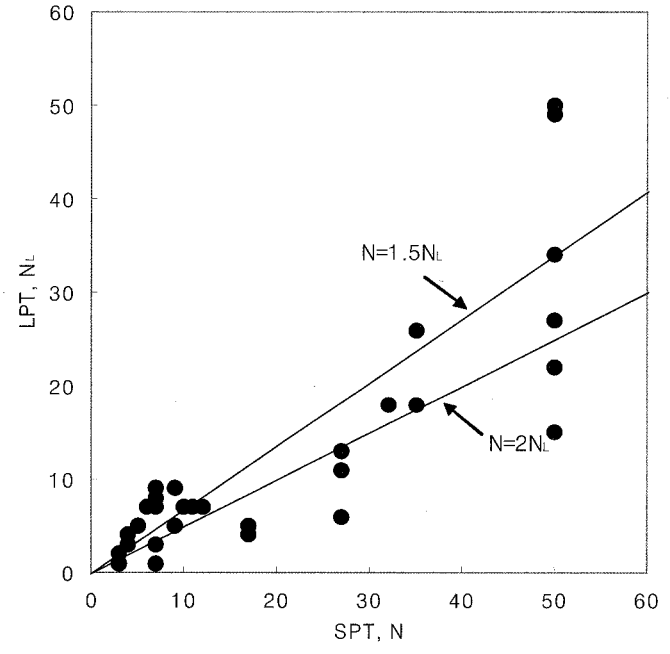


그림 3.133 SPT/LPT 상관관계

3. SPT/LPT 상관관계 연구

SPT/LPT 상관관계를 연구하기 위하여 현장 적용성 평가에서 얻은 결과 중 유효한 데이터만을 지층별(모래층, 자갈층)로 구분하여 정리해 보았다. 그림 3.134는 그 결과를 나타내고 있다.

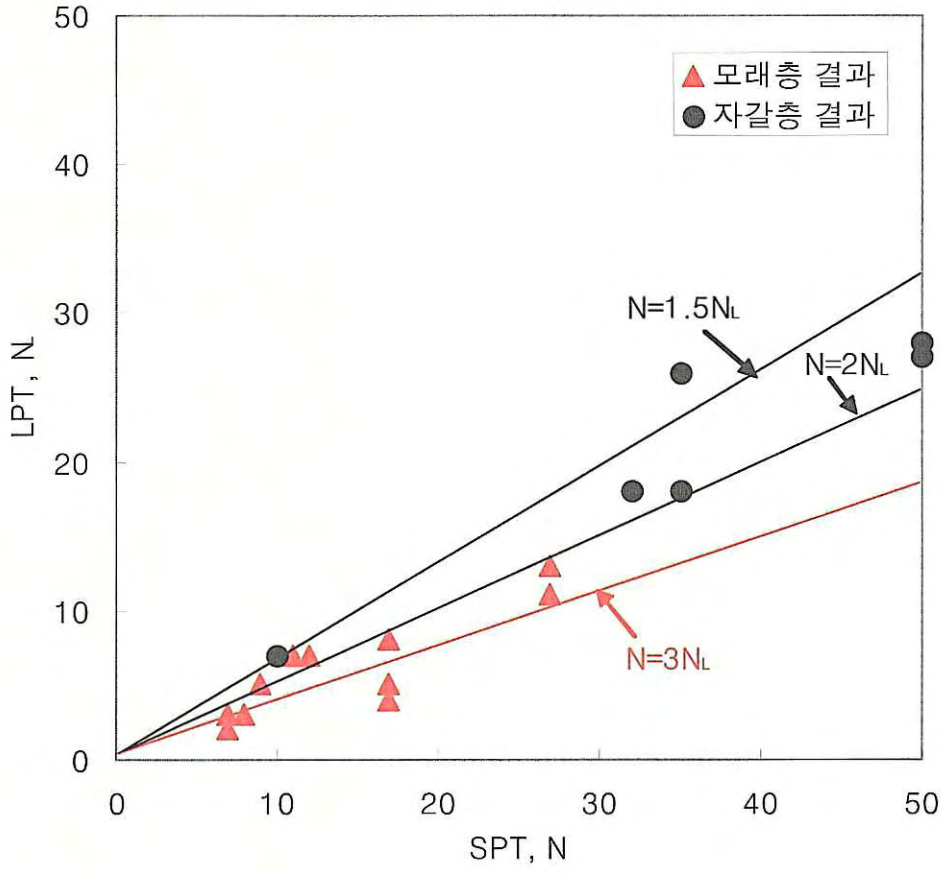


그림 3.134 지층별 SPT/LPT 상관관계

단위면적당 타격에너지는 1.5배로 일정함에도 불구하고 모래층에서는 약 3배-4배, 자갈층에서는 1.5-2배의 차이를 나타내고 있다. 두 관계를 정식화하기 위해서는 보다 많은 현장데이터를 확보 할 필요가 있다.

4. 계측장비를 활용한 KICT-type LPT 장비의 거동평가 (현장, 실내 챔버)

표준관입시험을 포함한 모든 관입시험을 수행 할 때는 해머의 에너지 효율 및 거동을 분석하여 N값에 영향을 미치지 않도록 반드시 정량적인 평가와 보완이 이루어져야 한다. 표준관입시험 과정에서는 여러 가지 요인에 의하여 롯드를 타격하는 해머의 에너지 손실이 발생하여 결과적으로 샘플러의 관입에 사용되는 에너지는 이론적인 상태의 에너지 보다 작게 된다. 현재까지 수많은 연구자에 의해 롯드를 통해 전달되는 해머의 타격에너지가 복잡한 과정을 거쳐 최종적으로 하부 지반에 가해지면서 스필릿 스푼 샘플러의 관입이 이루어지며, 해머의 낙하방법과 롯드의 길이, 그리고 엔빌의 형태와 크기 등이 롯드에 전달되는 에너지의 크기에 직접적인 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 이에 따라 국제적으로 표준관입시험시에는 매회 타격시마다 실제 발현되는 해머 에너지의 수준에 대하여 에너지비 60%를 기준으로 타격횟수를 보정하도록 하고 있다. 반면 대형관입시험은 아직도 국제적인 기준이 없으며, SPT와의 연관성도 연구단계에 있다. 관입시험 결과의 신뢰성을 유지하는 최선의 대안은 항상 균일한 타격이 보장되는 자동화 된 시험장비를 사용하여 시험시 인적, 기계적인 요인에 의한 오류를 근본적으로 방지하는 것이다. 본 연구에서 새롭게 개발한 KICT-type LPT 장비는 윈치와 강선을 이용한 자동화된 해머 시스템으로 해머의 타격에너지는 수동식에 비해 균등하다고 판단된다.

본 연구에서는 KICT-type LPT 장비의 에너지 효율 및 거동을 정확하게 검토하기 위하여 대형 Calibration Chamber System(고려대학교 지반공학연구실, 이우진 교수)을 이용하여 실내시험을 수행하였다. 가속도 및 관입량 등의 계측은 말뚝항타시험에서 사용되고 있는 PDA와 삼성건설이 자체적으로 개발한 SPI를 활용하여 측정/검토하였다. LPT와 SPT를 동일한 조건에서 수행하여 에너지 전달율과 관입량을 측정하고, LPT의 관입량 측정 결과와 SPT N값과의 상관관계를 도출하여 LPT 관입량 결과를 활용할 수 있는 방법을 연구하였다. 또한, 복수의 상대밀도와 구속압을 조합하여 지반조건에 따른 LPT 시험의 적용성 여부를 고찰하고, 이를 포함한 LPT 결과의 활용방안을 제시하였다.

(a) 이론적 배경

(1) 표준관입시험의 해머 에너지 (SPT Energy)

표준관입시험의 N값을 구하기 위한 타격관입시의 해머 에너지에는 이론적 에너지 (Theoretical Energy, E*), 속도에너지 비(Velocity Energy Ratio, ERv), 롯드에너지 비 (Rod Energy Ratio, ERr), 그리고 동적효율(Dynamic efficiency, η_D) 등이 있다. 이들에 관하여 상세히 살펴보면 다음과 같다.

① 이론적 에너지 (E^*)

해머의 이론적 에너지는 다음과 같이 정의되며, 해머의 중량과 낙하 높이에 따라 변한다.

$$E^* = Wh \tag{3.17}$$

여기서, E*=해머의 이론적 에너지(Theoretical energy)

W=해머의 중량(Weight of hammer)

h=해머의 낙하고(Falling height)

② 속도에너지 비 (ER_v)

실제 SPT 혹은 LPT를 실시할 경우에는 롯드와 해머의 마찰 등 여러 가지 요인에 의한 에너지 손실 때문에 이론적 에너지가 완전히 발휘되지 않는다. 따라서 속도에너지 비는 이론적 에너지(E^*)와 해머가 앤빌이 충돌하기 직전 실제 해머에 전달된 에너지 비로 정의된다.

$$ER_v = \frac{E_h}{E^*} \tag{3.18}$$

여기서, ER_v=속도에너지 비

E^*=해머의 이론적 에너지

E_h=앤빌과 충돌하기 직전의 해머의 실제 에너지

③ 롯드에너지 비 (ER_r)

해머가 앤빌에 충돌하기 전 뿐만 아니라, 충돌이후에도 충격에 의한 에너지 손실이 발생한다. 따라서 샘플러를 관입시키는 에너지는 충돌하기 직전의 해머 에너지보다 작다. 이론적 에너지와 실제로 롯드(Rod)에 전달되는 에너지와의 비를 롯드에너지 비(Rod Energy Ratio, ERr)로 정의한다.

$$ER_v = \frac{E_r}{E^*} \tag{3.19}$$

여기서, ER_r=롯드에너지 비

E^*=해머의 이론적 에너지

E_r=롯드(Rod)에 전달되는 에너지(Energy delivered into the rod)

④ 동적효율 (η_D)

동적효율(Dynamic efficiency, η_D)이란 롯드에 전달되는 에너지와 앤빌과 충돌하기 직전의 해머의 실제 에너지와의 비로 정의된다.

$$\eta_D = \frac{E_r}{E_h} = \frac{ER_r \cdot E^*}{ER_v \cdot E^*} = \frac{ER_r}{ER_v} \tag{3.20}$$

여기서, η_D=해머의 동적효율(Dynamic efficiency)

E_r=롯드(Rod)에 전달되는 에너지(Energy delivered into the rod)

E_h=앤빌(Anvil)과 충돌하기 직전의 해머의 실제 에너지

ER_r=롯드에너지 비(Rod energy ratio)

ER_v=속도에너지 비(Velocity energy ratio)

위에서 살펴본 바와 같이, 표준관입시험을 실시할 경우에 샘플러를 관입시키는데 소요되는 실제의 에너지는 해머의 이론적 에너지와는 상당한 차이가 있다. 실제로 롯드에 전달되는 에너지는 마찰에 의한 에너지 손실과 해머와 앤빌의 충돌 시에 발생하는 에너지 손실을 고려하여 식 3.21과 같이 표현된다.

$$E_r = \eta_D \cdot E_h = \eta_D \cdot ER_v \cdot E^* \tag{3.21}$$

(2) 표준관입시험의 에너지 계산이론

롯드에 전달되는 에너지를 적확하게 측정하는 것은 표준관입시험 결과해석에 상당한 영향을 미치므로 이것을 측정하기 위한 많은 방법들이 제시되었다. 표준관입시험이 실시된 초기에는 단지 해머가 앤빌과 충돌하기 직전의 에너지를 측정하는 노력이 있어왔다. 그러나 이러한 방법들은 해머 시스템의 동적효율을 고려하지 못하므로 실제로 롯드에 전달되는 에너지를 정확하게 측정하지는 못한다. 따라서 롯드에 직접적으로 로드셀(Load Cell)이나 스트레인 게이지(Strain Gauge)와 가속도계를 부착하여 롯드에 전달되는 에너지를 측정하고자 하는 방법과 이론들이 제안되었다.

① F2 적분법 (F2 Integration Method)

Schmertmann과 Palacios(1979)는 롯드의 상단에 로드셀을 부착하고 해머로 타격하여 힘과 시간의 이력을 구하여 롯드에 전달된 에너지를 측정하였다. 해머의 타격으로 발생된 압축파는 롯드의 선단부에 도달하며, 선단부에서 인장파로 변환되어 롯드의 상단으로 파가 전달된다. 압축파를 양으로, 인장파를 음의 기호로 그림 3.135와 같이 표시하면, 그림 3.136과 같이 시간축 상에 힘의 이력이 나타난다.
Schmertmann과 Palacios는 시간축 상의 힘의 이력을 다음 식으로 적분함으로써 롯드에 전달된 에너지수준을 측정하였다.

$$E_i = \frac{c}{EA}\int [F(t)]^2 dt \tag{3.22}$$

여기서, c=롯드로 전달되는 파속(Wave propagation velocity)

E=롯드의 탄성계수(Young's modulus of the rod)

A=롯드의 단면적(The cross-sectional area of the rod)

F(t)=시간에 따른 힘의 이력

위의 식에서 EA/c는 롯드의 임피던스(Impedance)로 롯드 재료 성질에만 관계된 항이다.

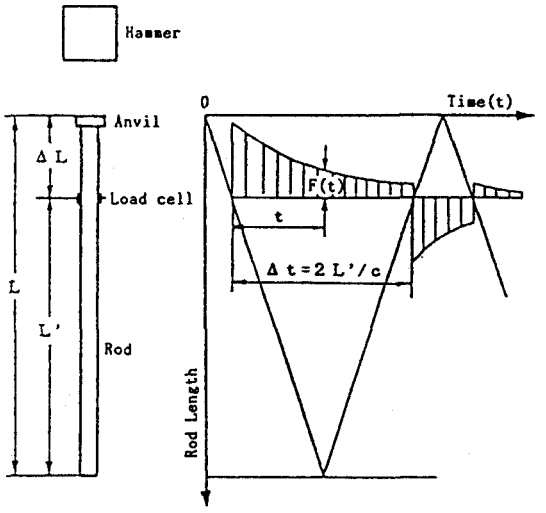


그림 3.135 해머 시스템과 이론적 힘의 이력

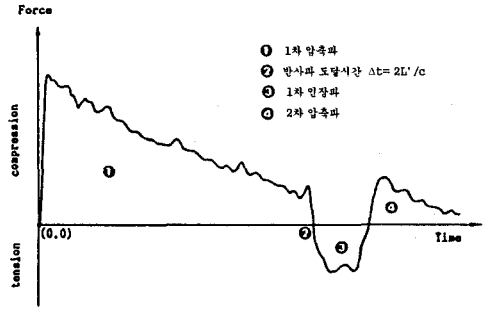


Fig. 2. Idealized force-time waveform recorded by load cell in SPT drill rods (from ISSMFE, 1988)

그림 3.136 측정된 힘의 이력

② FV 적분법 (FV Integration Method)

SPT와 LPT는 해머로 세장비(Slender ratio)가 큰 롯드를 타격함으로써 압축응력파를 발생시킨다는 점에서 말뚝 항타시스템의 매커니즘과 유사하다. 말뚝에 전달된 에너지는 말뚝 두부에서 측정된 힘과 가속도를 식 3.23과 같이 적분하여 구해진다.

$$E_i = \int F(t)\,V(t)dt \tag{3.23}$$

여기서, E_i=말뚝에 전달되는 에너지

F(t)=시간에 따른 힘의 이력

V(t)=시간에 따른 속도의 이력

식 3.23은 말뚝 뿐 아니라 타격에너지를 이용한 관입 메커니즘에 널리 적용할 수 있으며, 기존의 F2적분법이 가지고 있는 단점을 보완할 수 있다. F2적분법에서는 힘의 이력으로만 에너지를 구하고 이상적인 무한길이의 롯드로 보정하므로 실제 롯드에 전달된 에너지와는 다소 오차가 있는 것으로 알려져 있다. 또한 SPT나 LPT 롯드는 이음새 부분이 많고 길이방향으로 임피던스가 일정하지 않기 때문에 1차 압축파 부분에서 힘과 입자속도가 일치하지 않는 경우가 많아 F2적분법으로 구한 에너지는 신뢰도가 떨어지게 된다. 따라서 본 보고서에서도 FV방법에 의한 에너지를 제시한다. 그림 3.137은 이음새 부분으로 인한 파형과 F2적분법과 FV적분법으로 구한 롯드에너지의 차이를 나타내고 있다.

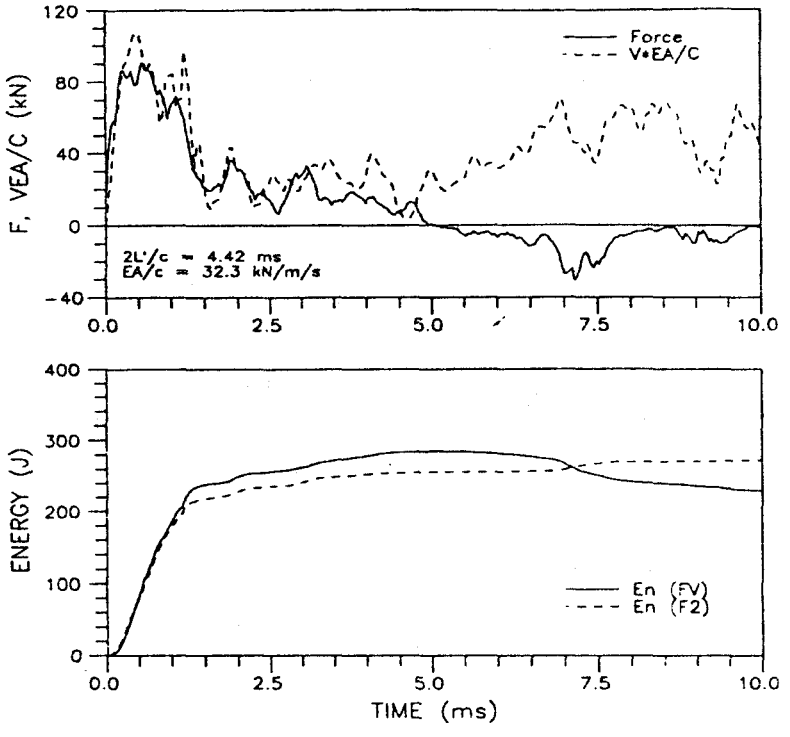


Fig. 6. Force, velocity times impedance and energy traces for SPT blow at 9.1 m depth

그림 3.137 타격에너지 파형과 롯드에너지 비교

(3) 표준관입시험 에너지의 영향인자

현장에서 표준관입시험을 실시할 경우에 롯드에 전달되는 에너지에 영향을 주는 많은 요소들이 있다. 롯드에너지에 영향을 주는 요소들은 개략적으로 정리하면 다음과 같다.

① 속도에너지 비의 영향인자

속도에너지 비는 전술한 바와 같이 해머가 앤빌을 타격하기 전에 어느 정도의 에너지가 감소할 것인가를 나타내준다. 대부분의 경우에는 실험과정에서 세심한 주의를 한다면 에너지 손실을 최소로 줄일 수 있다. 다음은 속도에너지 비에 영향을 주는 요소들이다.

가) 해머타격 시스템(Hammer drop system)

미국의 경우에는 일반적으로 로프-풀리(Rope-pulley)형, Trip형, 개량자동식(Semi-automatic), 그리고 자동식(Automatic)의 네 가지 형식의 해머타격 시스템을 사용하고 있다. 국내의 경우에는 로프-풀리(Rope-pulley)형이 가장 많이 사용되고 있지만 이 방법은 다른 방법에 비하여 효율이 낮은 특성이 있다. 로프-풀리 시스템은 캣해드(Cathead)의 직경, 로프의 굵기, 로프의 낡음 정도, 로프의 회전수, 작업자의 숙련정도 등에 따라서 직접적으로 에너지에 영향을 미친다.

Trip 해머나 자동해머의 경우에는 해머의 낙하고를 일정하게 유지할 수 있으므로 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. Kovacs(1979)는 Dando 해머와 유사한 Boros trip 해머의 속도에너지 비를 구한 결과 0.99라는 값을 보고한 바 있다. 속도에너지 비가 0.99라는 것은 자유낙하시의 속도와 동일한 결과라고 할 수 있으며, 해머의 낙하 시에 에너지 손실이 거의 없다는 것을 의미한다.

나) 가이드 롯드(Guide rod)

가이드 롯드는 해머가 앤빌의 중앙을 정확하게 타격하게 하는 역할을 한다. 해머와 가이드 롯드 사이의 마찰은 각각의 표면 거칠기에 따라서 영향을 받는다. 국내의 대부분의 현장에서는 로터리 워쉬 보링(Rotary wash boring)기를 사용하기 때문에 가이드 롯드의 표면이 쉽게 녹이 발생하여 마찰을 높이는 경우가 많다. 또한 실험이 진행되는 동안에 가이드 롯드가 기우는 경우가 발생하게 되어 마찰을 증가시키기도 한다.

다) 캣해드(Cathead)의 크기

캣해드의 지름이 증가하면 마찰면이 증가하기 때문에 로프와 캣해드 사이의 마찰이 증가하게 된다. 따라서 일반적으로 SPT의 경우 150~250mm 정도의 크기를 사용하도록 추천하고 있고, 회전속도는 100rpm 이상으로 유지하도록 추천하고 있다.

라) 작업자의 숙련도

도넛해머의 경우에는 해머의 낙하고가 작업자에 의해서 결정되므로 작업자의 숙련도가 N 치에 큰 영향을 미친다.

② 동적효율의 영향인자

동일한 속도에너지가 다른 롯드시스템에 전달되더라도 관입에너지는 롯드의 종류에 따라 다른 결과를 보이며, 동적효율에 미치는 영향인자를 살펴보면 다음과 같다.

가) 롯드의 상태

일반적인 표준관입시험 장비는 각각의 구성요소들이 나사로 연결되어 있다. 따라서 해머가 앤빌을 타격했을 시에는 불가피하게 에너지의 손실이 발생한다. 특히 롯드와 롯드를 연결한 부분에서는 다른 연결부분에 비하여 휨 현상이 많이 발생하기 때문에 큰 에너지 손실이 발생한다. 그리고 보링 심도가 깊어질수록 롯드의 연결 부분이 증가하고 롯드 시스템이 길어지기 때문에 에너지 손실은 증가하게 된다. 또한 실험이 진행되는 동안에는 연결 부분이 느슨하게 되어 롯드 연결 부분에서 추가적인 에너지 손실이 발생한다.

나) 앤빌 시스템

앤빌은 해머의 타격에 의해서 에너지를 최초로 하부로 전달하는 장치이고 그 크기는 롯드에 비하여 상당히 크다. 따라서 동적효율은 앤빌의 크기와 모양에 의해서 많은 영향을 받는다. 앤빌에 변형이 발생하였을 경우에는 해머가 앤빌에 완전하게 에너지를 전달시킬 수 없기 때문에 에너지 손실이 발생하여 동적효율에 영향을 미치게 된다. 따라서 적절한 앤빌 시스템의 선택과 관리는 일정한 에너지 유지를 위해서 필수적이다.

다) 해머 모양

여러 연구자들의 실험결과 해머의 종류는 롯드 에너지에 많은 영향을 미친다고 보고하고 있다. Kovacs 와 Salomone(1982)은 해머의 타격에너지를 앤빌을 통하여 롯드에 전달하는 에너지 면에서는 안전해머(Safety hammer)가 도넛해머(Donut hammer)보다 효율적이라고 주장하고 있다.

(4) 롯드 길이에 의한 에너지의 변화

현장 시험 장비 중 CME-750은 자동해머로서 해머의 인양방식과 낙하높이의 조절이 자동으로 이루어지므로, 작업자의 작업태도, 로프, 캣헤드, 가이드 롯드에 의한 영향을 배제시킬 수 있다. 따라서 수동 또는 반자동인 장비에 비해 상대적으로 양호한 측정결과를 보이므로 CME장비의 응력파를 예시로 사용하였다. 그림 3.138에 보이는 바와 같이 동일 장비에서 롯드가 길어질수록 인장파 도달시간도 점점 증가하지만, 힘응력파의 최대값은 거의 동일한 값을 가지고 있다. 그리고 1차 압축파 면적의 증가량은 점점 감소한다는 것을 알 수 있다. 롯드 길이가 10m 이상인 그림 3.139에 의하면 롯드의 길이가 길어져도 1차압축파 면적의 증가량이 롯드 길이 10m 이하인 경우에 비해 상당히 작음을 알 수 있다.

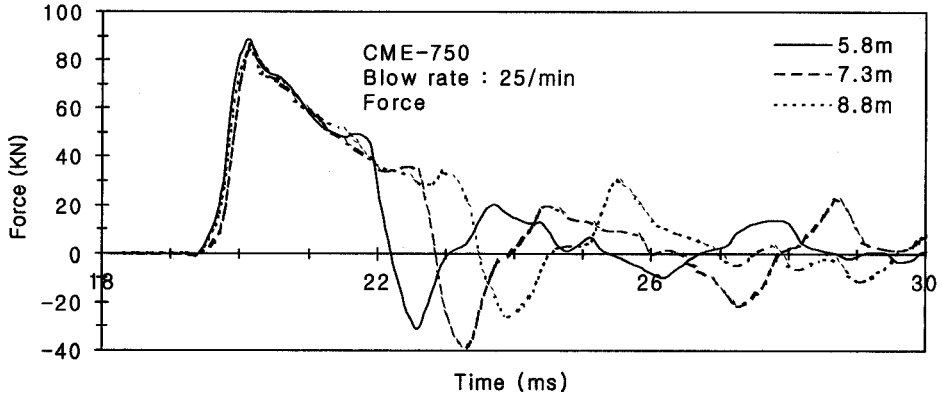


그림 3.138 롯드길이 10m 이하인 경우의 파형

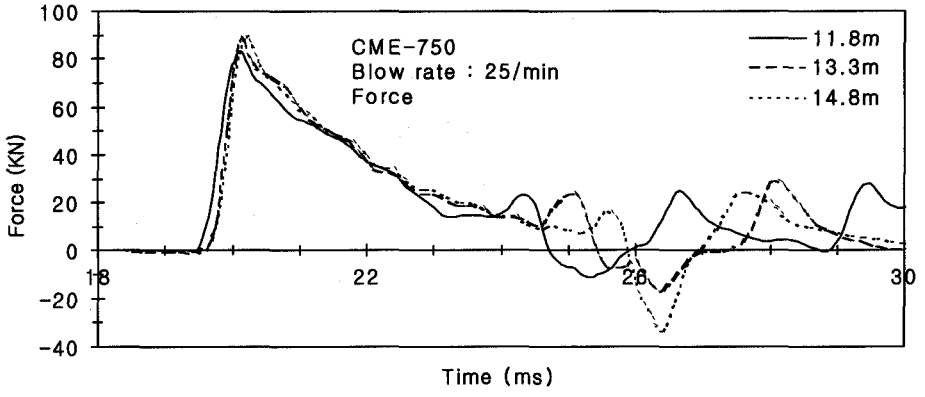


그림 3.139 롯드길이 10m 이상인 경우의 파형

일반적으로는 롯드 길이가 길어질수록 인장파(-부분)가 발생하는 시간이 길어지면서, 1차 압축파 면적이 증가하므로 FV 및 F2적분법으로 산정된 값이 모두 증가한다. 그러나 그림 3.138, 3.139에 보인 바와 같이 롯드의 길이가 길어지면 적분될 면적의 증가량이 감소하므로 롯드가 어느 길이 이상이 되면 압축파의 파장이 롯드길이보다 길어 생기는 에너지의 감소현상에 의한 영향이 상당히 작아진다. 그림 3.139에서 보이는 바와 같이 10~14m에서는 영향이 작으므로 10m 이하의 롯드 길이에서 보정을 추천한 Skempton (1986)의 제안은 타당하며 본 측정에서는 롯드 길이 10m이하도 측정을 실시하였으므로 롯드 길이의 보정은 불필요하다. 또한 롯드 길이 10m이상의 롯드에너지 전달율은 일정한 값을 보이므로 롯드 길이 10m 이상 값의 산술평균을 장비 전체의 효율로 한다.

표 3.10 롯드길이, 라이너, 보링공 직경에 대한 보정계수 (Skempton, 1986)

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

(b) 주요 시험장비의 특징

(1) Pile Driving Analyzer (PDA)

PDA는 1차원 파동방정식을 기본으로 하여 효과적인 항타를 위한 몇 가지 Parameter를 계산하고, 항타에 의해 발생하는 힘과 속도를 측정하고 분석한다. PDA에 사용되는 동재하 시험의 기본원리는 1970년대 Rausche에 의해 발달하게 되었고, 현재의 PDA 형태는 PDI (Pile Dynamics Inc.)회사에 의해 몇 번의 업그레이드를 통해 발달되어 왔다. PDA는 다른 말뚝 지지력 시험방법보다 시험법이 간편하고, 시간과 비용 면에서 경제적이기 때문에 1994년 우리나라에 도입된 이후로 국내 말뚝 공사 현장에서 많이 사용하고 있다. 에너지 측정장비는 그림 3.140의 PDA, 2개의 변형률 측정 게이지, 2개의 가속도 측정 게이지와 연결선으로 구성되어 있다. PDA 그 자체는 게이지로부터 받은 Analog신호를 Digital신호로 바꾸는 A/D, D/A를 가진 data 인식판, 단말기와 조정판으로 구성되어 컴퓨터이다. PDA는 각 타격 당 축력과 속도를 측정하고, 최대압축파, 최대인장파, 롯드전달에너지, 전달속도 등을 포함하는 40개의 Parameter를 즉시 계산한다. 또한 PDA는 샘플러가 관입 되는 동안 힘과 속도의 이력을 알 수 있으며 전달된 에너지를 F2 적분법과 FV적분법으로 에너지를 계산한다. 이는 PDA를 이용한 말뚝동적지지력 시험 시와 비슷한 형태의 힘과 속도의 거동을 보인다.



그림 3.140 Pile Driving Analyzer (PDA)

(2) 에너지 측정용 SPT/LPT 롯드

롯드 에너지를 계산하기 위한 힘과 속도의 측정은 편타를 줄이기 위해 180° 방향으로 2개의 스트레인 게이지(Foil Type)와 2개의 가속도계(Piezoresistive Type)가 장착된 드릴 롯드에서 이루어지며 측정된 변형율은 PDA로 연결되어 단면적과 롯드 재료의 계수를 곱하여 힘으로 계산되며 측정된 가속도는 수치적분에 의해 Particle Velocity로 변환시킨다. 표준관입시험 에너지 측정 시 사용된 측정용 롯드는 PDA 제작 회사인 PDI에서 주문 제작되었으며, 모식도는 그림 3.141과 같다. 또한 LPT 에너지 효율 측정을 위해 가속도계와 스트레인 게이지가 부착된 드릴 롯드는 그림 3.142와 같다.

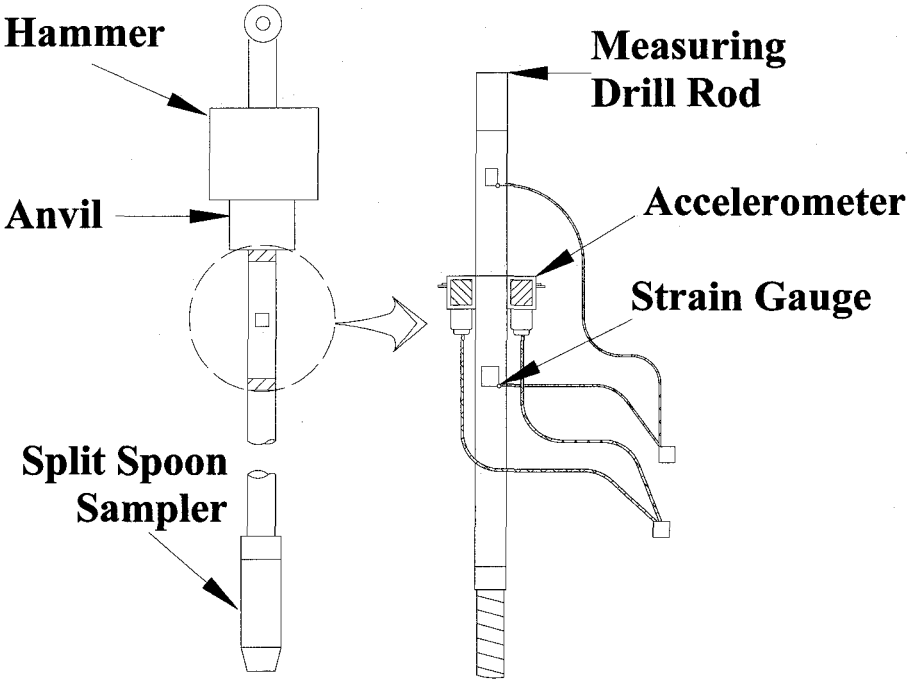


그림 3.141 에너지 측정용 드릴 롯드

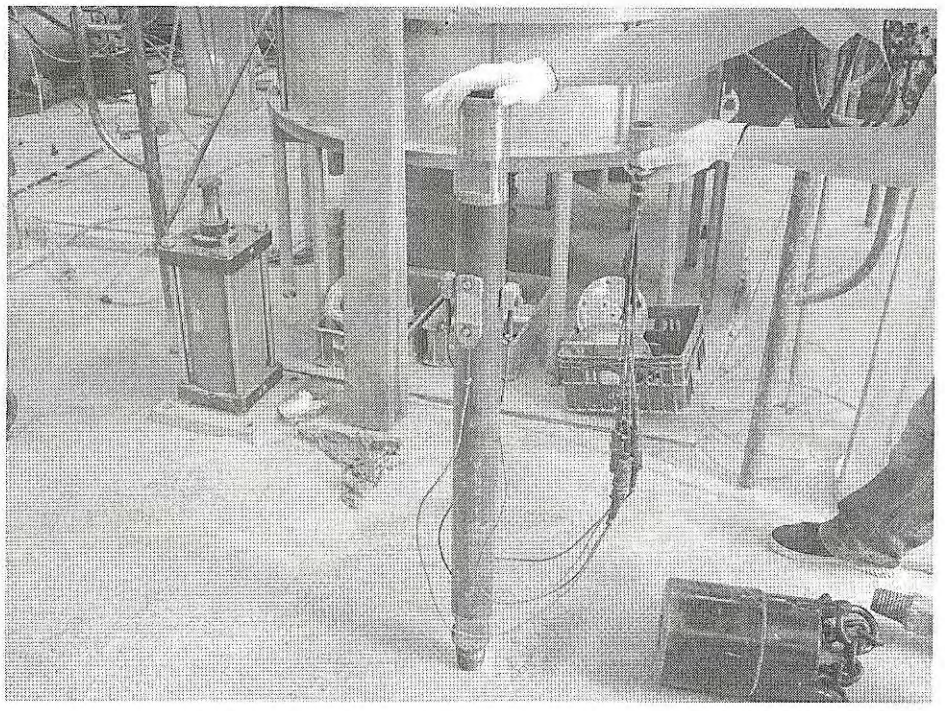


그림 3.142 LPT 에너지 측정용 드릴 롯드

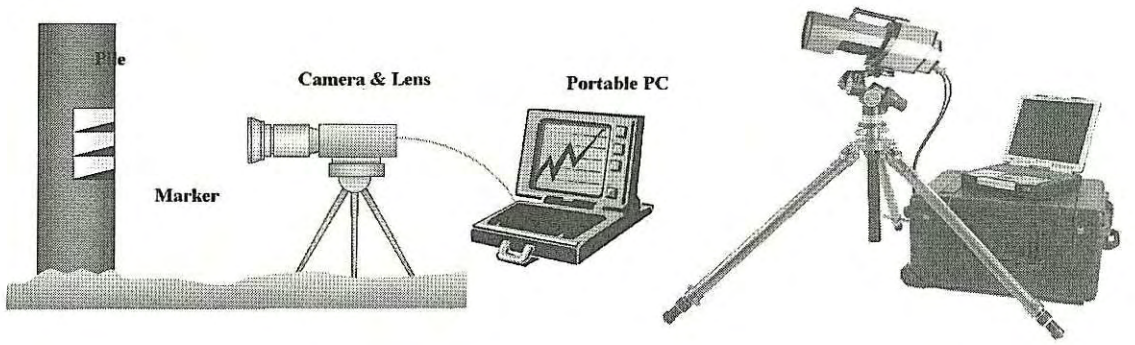
(3) Quality Control System for Driven Piles (SPI)

낙하하는 해머의 속도를 측정하기 위해 디지털 라인 스캔 카메라와 특수형상의 마크를 이용하여 고속촬영하고 영상처리를 통해 대상체의 운동을 측정하는 SPI(삼성건설 기술연구소 개발)라고 하는 시스템을 이용하였다. 라인 스캔 카메라는 일반적인 카메라에서 사용되는 사각평면 형태와는 달리 이미지를 획득하는 정하집적장치(CCD) 센서가 한 줄로 되어 있어 고속의 영상촬영이 가능한 특징이 있다. 흑색 및 백색의 띠의 마크를 부착한 진동체의 움직임을 연속적으로 촬영하면 수직선 형태의 영상을 얻을 수 있고, 이것을 시간대 별로 나열하면 흑과 백의 물결 무늬를 볼 수 있다. 이것으로부터 변위를 파악하고 속도를 계산 할 수 있다. 이러한 원리를 이용하면 말뚝의 항타시 최종 항타관리, 구조물의 진동 등의 다양한 영역에 활용이 가능하다.

SPI를 이용한 항타품질 분석시스템의 시스템의 구성요소, 측정 알고리즘, 현장적용성 평가를 통한 신뢰도 분석 및 본 연구에 적용한 결과는 다음과 같다.

① 시스템 구성요소 및 시스템 사양

영상 카메라를 사용하여 고속으로 운동하는 물체의 이동 변위를 측정하기 위해 기존의 이차원 카메라를 사용하여 영상을 읽어 들이는 경우 속도가 느려 영상의 번짐(Blurring) 현상이 발생하고 특히, 수평동기 및 수직동기 신호 구간에 발생하는 운동에 대한 정보를 잃어버리게 되어 정확한 측정이 어려워지는 단점이 있다. 또한, 판매되고 있는 Frame Grabber에서 제공하는 해상도가 정해져있어 원하는 정밀도의 측정데이터를 추출하는 것이 불가능하다. 반면에, 최근 성능이 급격하게 향상되고 있는 일차원 카메라(Line-scan Camera)는 한 라인을 읽어들이는 속도가 20 KHz 이상이 되어 고속 운동하는 물체의 운동해석을 가능케 하고 있다. 그에 따라, 고속의 영상획득이 가능한 Line-scan Camera, 개발된 마크(Mark) 및 개인용 컴퓨터로 구성되는 (그림 3.143)의 시스템을 구성한다. Line-scan 카메라는 영상 획득을 담당하고, 마크는 말뚝에 부착되어 운동정보를 제공하며, 개인용 컴퓨터는 Line-scan 카메라에서 얻어진 영상을 해석하여 말뚝의 운동에 대한 정확한 정보를 추출한다. 다만, Line-scan 카메라의 감도가 떨어져 실내, 그늘진 야외지역, 구름이 많은 흐린 날씨 등에서는 영상의 획득이 어려워지기 때문에 이에 대비한 조명장치가 필요하다.



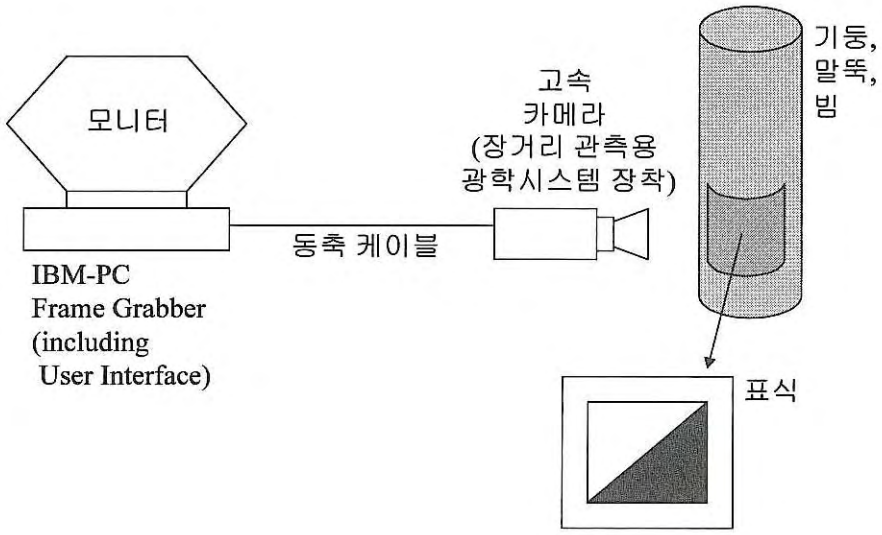


그림 3.143 SPI 항타품질 분석 시스템의 구성도

Line-scan 카메라는 DALSA사의 SPYDER SP-13-02k40 모델을 사용하였다. SPYDER SP-13-02k40 카메라는 2048 화소의 해상도를 가지고 있고 최고 18 KHz 의 Line Rate으로 데이터를 제공한다. 화소의 크기는 14 ㎛ x 14 ㎛ 이다.

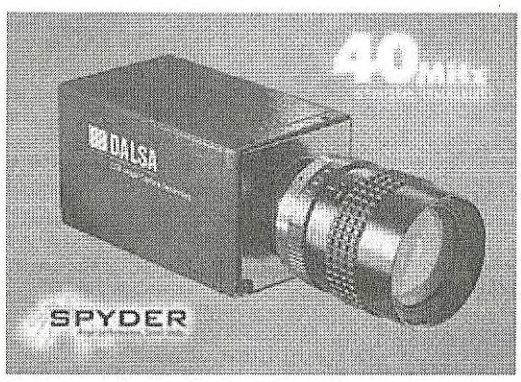


그림 3.144 SP-13-02k40

디지털 카메라에서 출력되는 영상 데이터를 개인용 컴퓨터에서 분석할 수 있도록 컴퓨터의 주 메모리로 옮겨주는 Frame Grabber는 그림 3.145에 보인 Matrox 사의

Meteor-2/Dig 모델을 사용하였다. 이 Frame Grabber는 Line-scan 카메라만이 아니라 디지털 출력을 갖는 이차원 카메라를 연결하여 사용할 수 있는 모델로 카메라의 전기적인 데이터 출력 사양에 따라 LVDS 혹은 RS-422 가운데 한 가지를 결정하여 사용할 수 있으며 특히, 보드 내에 최대 4 MB의 메모리를 장착할 수 있어 고속으로 전달되는 영상 데이터를 손실 없이 온전히 PCI-BUS의 DMA를 사용하여 개인용 컴퓨터의 메모리로 전달할 수 있다.

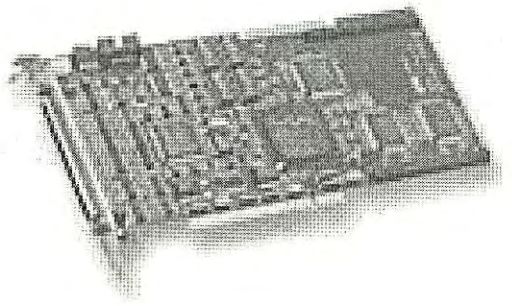


그림 3.145 Meteor-2/Dig

휴대용 PC로는 Pentium III 850 MHz, 1 GB 메모리의 사양을 갖는 모델로 Matrox 사의 Meteor-2/Dig Frame Grabber를 장착하여 사용하였다.

그림 3.146의 마크는 본 계측에서 사용한 마크로, 특정한 패턴을 갖는 무늬가 주기적으로 배열되어있는 특징을 갖고 있다. 그에 따라, 반복되는 패턴들 간의 길이의 비를 활용함으로써 동일한 평면상에서 일어나는 수직, 수평 및 회전에 대한 운동량을 측정할 수 있다. 그에 따라, 그림 3.146과 같이 간단한 삼각형이 반복되는 패턴을 사용할 수도 있지만 좌우 비대칭으로 반복되는 임의의 패턴을 사용하여도 측정이 가능하다. 또한, 중심으로부터 외곽으로 퍼져나가는 나선형과 같이 동일한 중심을 가지면서 비대칭으로 퍼져나가는 모양의 패턴을 사용하여도 운동량의 측정이 가능하다. 이와 같은 구조의 변위 측정용 마크는 운동하는 물체의 표면에 고정적으로 부착하여 라인스캔 카메라에 의하여 측정된다. 물체는 평면상에서 수직운동, 수평운동 또는 회전운동을 한다고 가정한다. 카메라와 마크간의 거리가 마크가 부착되는 면 자체의 굴곡량에 비해 크기 때문에 평면운동 가정은 유효하다. 변위 측정 마크의 수직한 방향 즉, 세로축 방향으로 디지털 라인 스캔 카메라가 변위 측

정 마크로부터 원거리에 이격되어 설치되고, 라인 스캔 카메라의 촬영에 의하여 변위 측정 마크의 영상을 촬영된다. 상세한 계측원리는 다음절에 설명되어 있다.

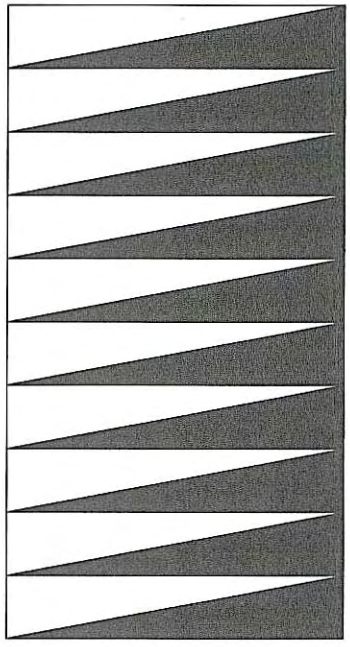
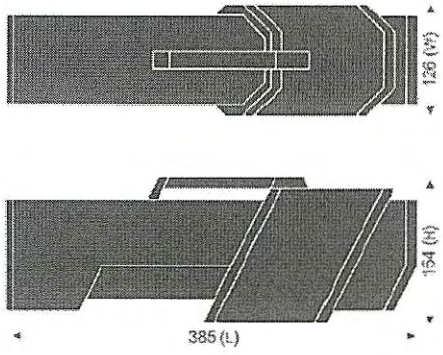


그림 3.146 변위측정용 마크

전체 시스템 사양은 다음과 같다.



항 목	사 양
크기	385(L)×126(W)×154(H)
무게	8.4 Kg
CCD센서	2048 Pixels (13kHz)
프레임 레이트	2 kHz
정밀도	10um
연결방식	100Mbps Ethernet 이상
외부전원	12 ~ 16 VDC
최소 시스템 요구사양	인텔 Centrino 1.4G 이상, 512MB 이상
호환 운영 체계	윈도우 XP Professional

② 측정 알고리즘

앞서 소개된 마크를 사용하여 상하좌우 변위량 측정 알고리즘은 다음과 같다. Line-scan 카메라가 데이터를 읽어 들이는 스캔라인과 마크간의 4개의 교차점을 사용한 측정 알고리즘을 제시한다. Line-scan 카메라의 스캔라인을 표현하는 직선 방정식

$$y = ax + b$$

과 그림 3.147에 표시된 마크를 구성하는 네 개의 직선 '가', '나', '다', '라'에 대한 직선 방정식을

$$y = cx + d$$

을 사용하여 네 개의 교점에 대한 좌표를 결정할 수 있다. 즉, 그림 3.147에서 스캔라인과 마크를 구성하는 네 개의 직선 간의 교점을 각각 '1', '2', '3', '4' 라 하면 각 점의 좌표는 다음과 같이 결정된다.

. 교점 '1' :

직선 '가'의 방정식 : $y=0$

교점 '1'의 좌표 : $(\frac{-b}{a}, 0)$

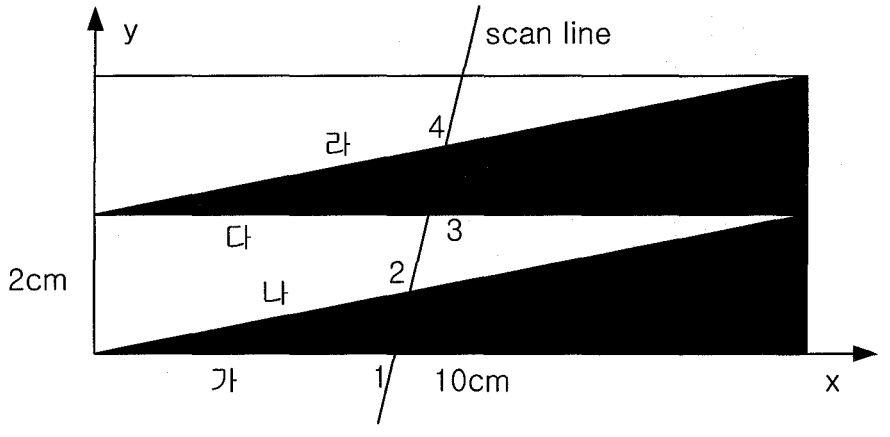


그림 3.147 마크의 라인 스캔 카메라를 이용한 계산방법

. 교점 '2' :

직선 '나'의 방정식 : $y=0.2x$

교점 '2'의 좌표 : $(\frac{-b}{a-0.2}, \frac{-0.2b}{a-0.2})$

. 교점 '3' :

직선 '다'의 방정식 : $y=2.0$

교점 '3'의 좌표 : $(\frac{2-b}{a}, 2.0)$

. 교점 '4' :

직선 '라'의 방정식 : $y=0.2x+2$

교점 '4'의 좌표 : $(\frac{2-b}{a-0.2}, 0.2 \cdot \frac{2-b}{a-0.2}+2)$

이상에서 결정된 교점들의 좌표를 사용하면 교점 '1'-교점 '2', 교점 '2'-교점 '3', 교점 '3'-교점 '4' 간의 거리를 구할 수 있다. 즉, 영상에서의 (x_i, y_i)과 (x_{i+1}, y_{i+1}) 간의 거리는

$$l_i \cdot k = \sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}$$

로 표현된다. 여기서 l_i는 실제 마크 상에서의 거리이고 k는 카메라에 의한 scale factor이다. 즉 $l_i \cdot k$ 가 실제 측정된 화소의 수이다. 각 교점간의 간격에 해당하는 화소의 수는 다음의 관계식으로 얻을 수 있다.

- 교점 '1'-교점 '2'간 거리의 제곱 :

$$0.2^2 b^2 \frac{a^2+1}{a^2(a-0.2)^2} = l_1^2 k^2 \qquad \text{(식 3.24)}$$

- 교점 '2'-교점 '3'간 거리의 제곱 :

$$(2a+0.2b-0.4)^2\frac{a^2+1}{a^2(a-0.2)^2}=l_2^2k^2 \qquad \text{(식 3.25)}$$

- 교점 '3'-교점 '4'간 거리의 제곱 :

$$0.2^2(b-2)^2\frac{a^2+1}{a^2(a-0.2)^2}=l_3^2k^2 \qquad \text{(식 3.26)}$$

절대값을 사용하지 않기 위해 제곱을 사용한다. 이들 교점간의 거리의 비(ratio)를 계산하면 다음과 같다. 먼저, 교점 '1'-교점 '2'간의 거리와 교점 '2'-교점 '3'간의 거리의 비는

$$\frac{0.2^2b^2}{a+0.2b-0.4^2}=\frac{l_1^2}{l_2^2} \qquad \text{(식 3.27)}$$

이고, 교점 '1'-교점 '2'간의 거리와 교점 '3'-교점 '4'간의 거리의 비는

$$\frac{0.2^2b^2}{0.2^2(b-2)^2}=\frac{l_1^2}{l_3^2} \qquad \text{(식 3.28)}$$

이다. 식 3.28에서,

$$m=\frac{l_1}{l_3}$$

라 하면, 식 3.28은

$$\frac{b^2}{(b-2)^2}=m^2,$$

로 표현된다. 따라서 근의 공식으로 적용하면 다음과 같은 2개의 y축 절편 b_1과 b_2가 구해진다.

$$b_1=\frac{2m}{m+1}, \qquad b_2=\frac{2m}{m-1}$$

또한,

$$n=\frac{l_1}{l_2}$$

라 하면 식 3.27은

$$\frac{b^2}{(10a+b-2)^2}=n^2$$

로 표현된다. 마찬가지로 근의 공식을 적용하면 두 개의 직선의 기울기 a_1과 a_2가 아래와 같이 결정된다.

$$a_1=\frac{-(b-2)n-b}{10n},\quad a_2=\frac{-(b-2)n-b}{10n}$$

이렇게 구해진 직선의 y축 절편과 기울기 b_1, b_2, a_1, a_2을 하나씩 식 3.17에 대입하면 l_1k를 결정할 수 있고, 실험 초기 단계에 결정된 k를 사용하면 마크 상의 실측 거리인 l_1을 구할 수 있다. 이때, 기울기 a에 대해

$$\Theta = atan(a)$$

이므로, 기울기 a와 실제 마크의 길이를 이용하면 실제의 이동 변위량 l은

$$l=k\cdot(l_1+l_2)\sin(\Theta)$$

이다. 여기서 l_1, l_2는 실제로 측정된 거리를 k로 나누어 구한다. 이때 대입하여 추출된 4개의 값 중 그 결과가 2cm 이하로 결정되는 두 개를 선택한다. 다음, 마크에 대하여 스캔라인의 기울기 Θ가 $\pm 45^o$이내인 하나를 선택함으로써 최종적으로 한 개의 해를 결정한다. 이 과정은 상하좌우 대칭인 Mirror Image에 대해 구해진 4개의 값들 가운데 하나를 선택하는 과정이다. 여기서 구해진 k가 실제 마크의 높이에 대한 화소의 수이다. 구해진 a, b를 이용하여 직선 '가' 와 스캔라인이 만나는

점 $(\frac{-b}{a},0)$에 대입하고, 다음 직선에 대하여 똑같이 구하면 이점의 상하좌우 변화량의 화소 수를 구하고 비례계수 k를 곱하면 실제로 움직인 양을 구할 수 있다. 본 방법의 정확성을 보이기 위해서는 절대기준 영상에 대한 Calibration이 필수적이다. 즉, 실측 데이터와 영상에서 얻어진 데이터간의 관계를 결정하는 비례계수 k 결정 시 필수적이다. 참고로 아래의 그림 3.148과 같이 해상도 1300 x 1030인 이차원 디지털 카메라로 촬영한 영상을 4096 화소로 확대한 후 표시된 다섯 개의 라인에 대해 각각 영상 처리한 결과를 그림 3.149에 보여주고 있다.

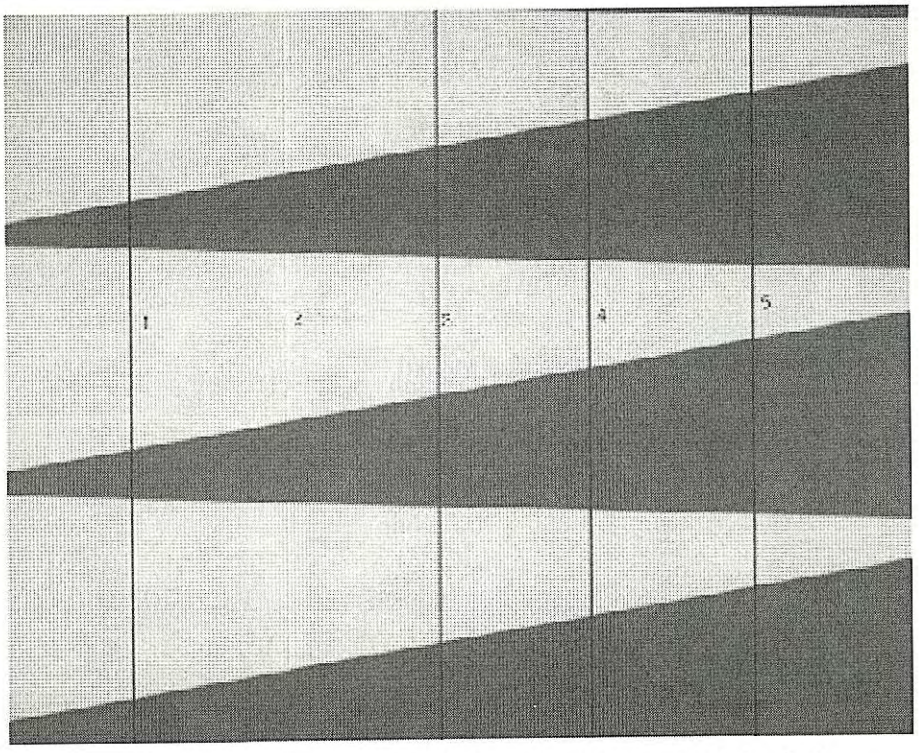


그림 3.148 1300 X 1030 해상도의 이차원 디지털 영상

표 3.11 절대영상에 대한 오차결과

	a	b	X 좌표	2cm 오차	k
1	-34.825000	69.750000	2.002872	0.000000	0.001428
2	-30.866667	100.888889	3.268539	0.000000	0.001431
3	-46.333333	208.333333	4.496403	0.000000	0.001433
4	-27.740000	159.800000	5.760634	0.000000	0.001433
5	-30.844444	219.333333	7.110951	0.000000	0.001432



그림 3.149 line scan image

③ 현장적용성 평가를 통한 신뢰도 분석

SPI의 성능을 평가하기 위하여 다양한 말뚝 현장에 적용하여 성능을 평가하였다. SPI 시스템으로부터 획득한 자료를 측정오차가 개입하기 쉬운 수작업 결과보다는 일반적으로 신뢰도를 인정받고 있는 PDA 결과자료와 비교하였다. PDA 장비를 통하여 직접적으로 얻는 자료는 가속도와 변형률이므로 가속도를 두 번 적분한 변위

의 경우에는 오차가 발생할 가능성이 높다. 그러므로 PDA장비로부터 직접 획득할 수 있는 속도이력을 SPI system을 이용하여 얻은 변위자료를 한 번 미분한 속도이력과 비교하여 System의 신뢰도를 살펴보았다.

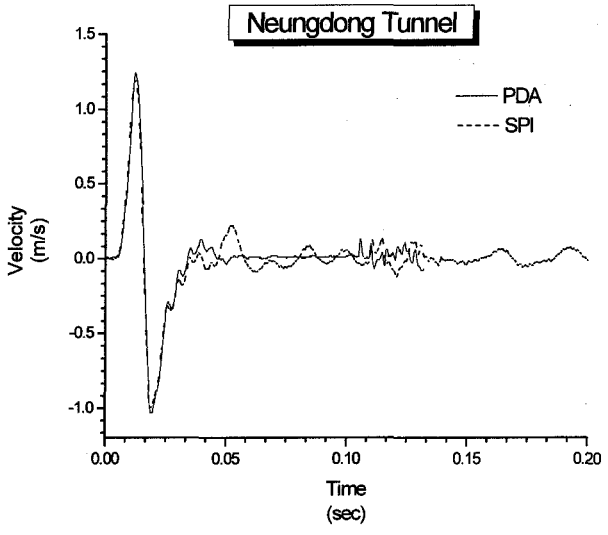


그림 3.150 PDA와 SPI로부터 구한 속도-시간이력

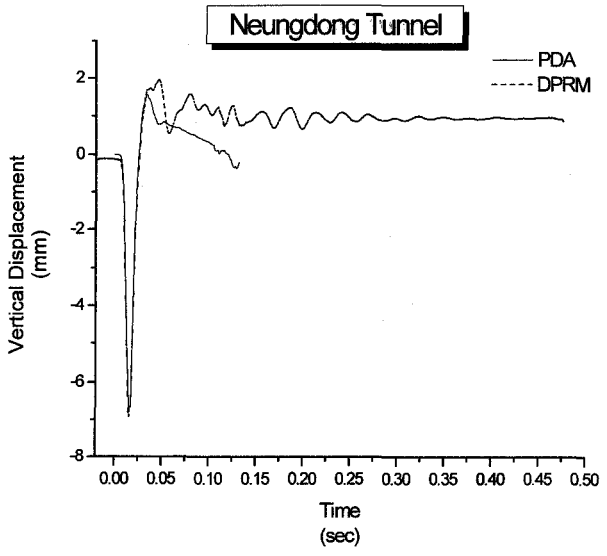


그림 3.151 PDA와 SPI로부터 구한 변위-시간이력

그림 3.150을 보면 PDA자료가 감쇠가 더 빨리 일어나는 것을 제외하고는 PDA를 통해 얻은 자료와 SPI로 얻은 자료가 거의 일치함을 알 수 있는 반면에 그림 3.151의 변위-시간 이력의 경우에는 후반부에서 차이가 나기 시작함을 알 수 있다. 이는 각각 적분과 미분에 의해 발생한 오차의 누적 때문인 것으로 판단된다.

이 두 가지 방법 중에서 응력 또는 힘을 측정하기 위해서는 PDA가, 정확한 변위 거동을 파악하기에는 직접적으로 자료를 얻는 SPI가 더 정확한 값을 측정할 수 있을 것이라고 판단된다.

(4) 대형 Calibration chamber system

① KUCCS의 특징 (Korea Univ. Calibration Chamber System)

본 연구에서 사용한 고려대학교 대형 Calibration Chamber System (Korea University Calibration Chamber System, 이하 KUCCS)은 직경 1.2m, 높이 1.0m 크기의 시료 조성이 가능한 세계 최대 규모의 장비로써 현장 시험에서 발생하는 많은 불확실성을 배제한 상태에서 각종 모의 현장시험의 수행이 가능하다. KUCCS는 국내 지반에서 채취된 각종 시료를 이용하여 시료를 조성한 후 표준관입시험은 물론, 콘관입시험, 딜라토미터 시험, 전단파 측정시험 등의 각종 시험을 수행함으로써, 기존 국외에서 제시된 각종 토질 상관관계식의 국내 지반 적용성을 평가하기 위해 주로 사용되고 있다. KUCCS의 주요 구성장치는 표 3.12와 같다.

표 3.12 KUCCS 특성 및 주요장치

구 분		KUCCS
특 성		● 세계최대규모(D1.2m× H1.0m)의 실시간 모니터링 System ● 현장의 응력이력을 구현한 양질의 시료 조성 ● 현장 원위치 응력하에 콘관입 시험 수행
주요 장치	Slurry consolidometer	● Slurry 상태에서 양질의 점토시료를 조성하기 위한 장치 ● 규격 : D 1.2m× H 2.0m
	Raining system	● 균일한 상대밀도의 사질토 시료 조성을 위한 장치 ● 규격 : D 1.2m× H 2.2m
	Chamber cell	● 조성된 시료에 연직/수평응력을 가할 수 있는 장치 ● Double wall system에 의해 K0 응력상태를 자동 조절 가능
	Top plate &Top lid	● 콘 관입을 위한 Adapter 설치 ● 유압식 관입장치 거치하고 현장시험장비 관입가능
	Bottom plate	● Plate 상하 이동으로 시료 연직응력 조절
	Penetration system	● 각종 현장시험장치(CPT, DMT)의 관입을 위한 유압하중장치 ● 최대 1.0m의 stroke이며, Strain rate 조절 가능
	data acquisition system	● 시료의 연직/수평응력 및 시료내 간극수압 측정기록 ● 측방향 응력(K0σv')을 자동적으로 측정하여 시료의 K0응력상태 유지

현재 개발된 KUCCS은 많은 장점들을 가지고 있으나, 가장 대표적인 특징들은 다음과 같다.

가. 장비의 대형화에 따른 Size effect와 Boundary effect의 최소화 및 시료 대형화에 따른 실험 결과의 양적인 증가

나. 시료 이동 중 시료 교란 및 손실 위험을 하부 Piston부를 수정 보완하여 제거하였으며, 이로 인해 실험의 효율성 및 안정성 증대

다. Inner cell과 Outer cell의 양 끝단을 일체화시켜, 실험상의 불안정 요소 제거

라. 시료 경계조건 조절을 위한 Control panel의 작동이 실험 과정에 따라 자동모드와 수동모드로 분리되어 수행가능

마. 각 실험 과정 중에 발생하는 센서로의 결과들을 그래픽 지원이 뛰어난 상용 프로그램인 LabView Program으로 저장하여 분석

Calibration Chamber는 Consolidometer 또는 Raining system으로 조성된 균질한 시료의 강성벽 효과를 제거함과 동시에, 1차적으로 조성된 시료를 우리가 원하는 경계조건인 등방 또는 K_0 상태로 재 성형 시켜주는 장비이다. Calibration Chamber는 크게 Piston Cell 부분과 Double Chamber Cell 부분으로 구성되어 있으며, Piston Cell 부분은 시료에 수직 하중을 재하하기 위한 부분이며, Chamber Cell 부분은 수평 하중을 재하하기 위한 부분이다.

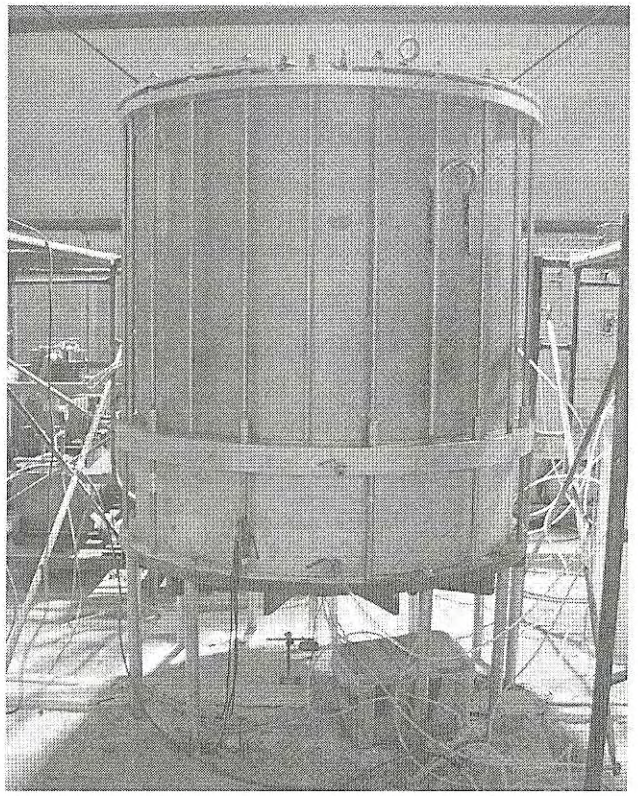


그림 3.152 Calibration chamber

② Chamber Raining System

사질토 시료 조성 방법의 일종인 raining 방법은 퇴적에 의한 원지반의 형성과정을 유사하게 모사할 수 있으며 대상 상대밀도 상의 균질한 시료의 반복 조성 가능성과 더불어 다양한 연구에 의한 영향요인 평가를 통한 조성시료의 신뢰성 확보라는 장점으로 현재 챔버 시험을 위한 시료조성 방법으로 널리 쓰이고 있다. Kuccs의 Raining system도 Calibration Chamber내에 특정 상대밀도의 시료를 균일하게 조성하기 위하여 개발되

어진 장비로써, 개발된 Chamber raining system은 Puppala 등(1995)에 의한 raining system을 기본으로 본 연구의 chamber system의 구조에 맞게 개량되었다. 그림 3.153과 같이 직경 1.2m에 높이 1.0m의 cylinder형 Extension tube와 1.2m 높이의 Sand storage 및 Shutter plate, 그리고 Cover plate로 구성되어 있다. 중간에 위치한 분산체는 시료의 균일한 낙하를 위한 분산 역할을 하며, Sand storage 내의 모래가 하강하여 Cover plate가 내려가게 되면 Cover plate와 줄로 연결된 분산체가 위로 올라가게 되므로, 분산체와 조성된 시료의 높이차는 항상 일정하게 유지된다.

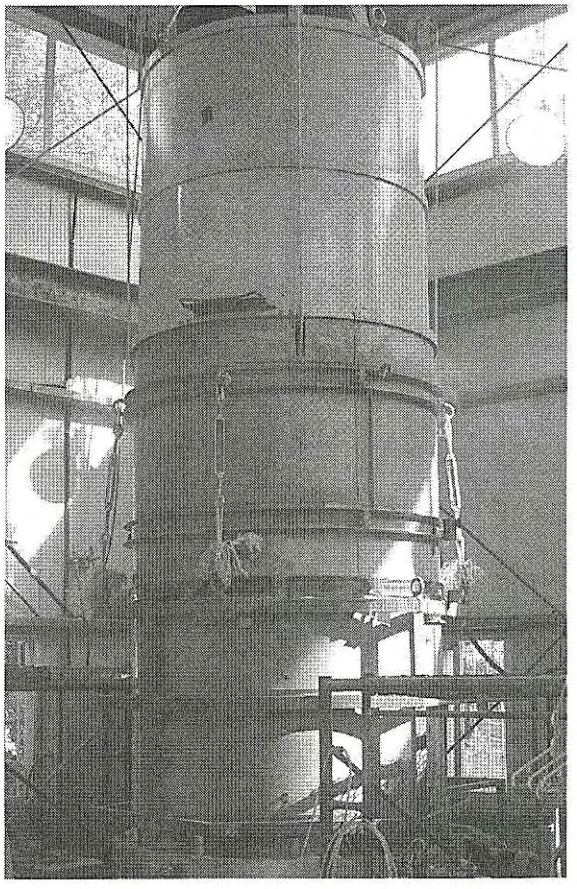


그림 3.153 챔버 레이닝 시스템

(c) 대형 Chamber 시험결과

(1) 시험방법

① 시료 기본물성

본 연구를 위에 입경이 다른 두 종류의 모래시료가 사용되었으며, 각 시료의 기본물성과 입도분포는 표 3.13, 그림 3.154, 3.155와 같다. K-7호사는 모암으로부터 인공적으로 파쇄된 평균입경 0.17mm의 세사로써, 조도는 중간모난 정도이며, SiO_2 98% 이상의 석영질 모래이다. 또한 주문진사는 K-7 보가 입경이 큰 재료로, No.4 체를 100% 통과하고 No.40 체에 모두 남는 모래(자갈)이다.

표 3.13 시험모래 기본물성

모래	Gs	D_{10}(㎜)	D_{50}(㎜)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	USCS	% SiO_2
K-7호사	2.647	0.09	0.17	2.111	0.988	1.054	0.719	SP	98
주문진사	2.628	0.863	1.398	1.87	0.94	0.870	0.423	SP	-

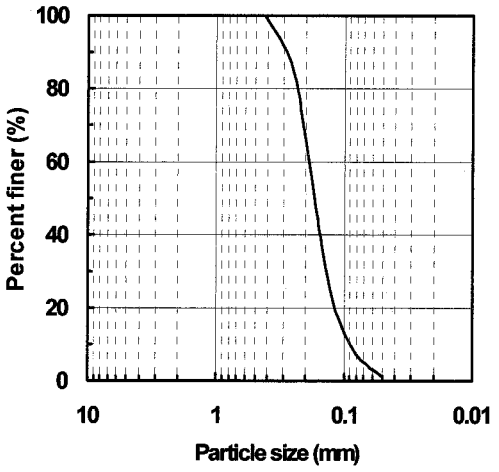


그림 3.154 K-7 시험시료의 입도분포

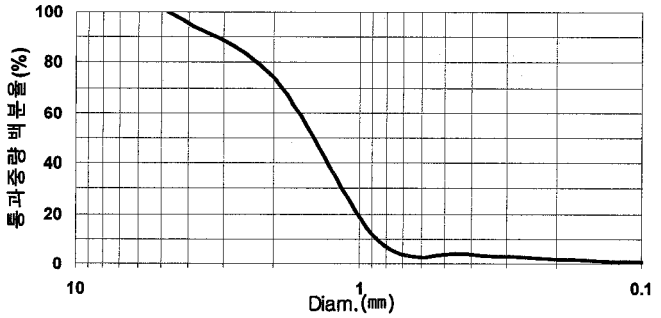


그림 3.155 주문지사의 입도분포곡선

② Chamber 시료조성

가) Raining System을 이용한 시료조성

Raining System을 통해 낙하된 사질토의 상대밀도는 체와 시료표면간의 높이, 체의 구성, 그리고 상부 개폐장치의 개폐 정도에 영향을 받는다. 모의실험으로부터 목표 상대밀도에 적합한 세 가지 영향 요소들의 조합을 결정하였다. 그림 3.153과 같이 Raining system을 조립하고 개폐구멍을 열어 시료를 낙사시켰으며, 몰드에 조성된 시료의 무게와 부피를 측정하여 조성된 시료의 상대밀도를 결정하였다.

나) Top plate 조립 및 시료자립

Raining System을 통해 조성된 specimen을 Calibration Chamber System으로 교체하기 위해 Raining System의 Sand storage와 Extension tube를 제거하고, 시료 상부를 고른 후 Chamber top plate를 덮고 O-ring으로 시료를 밀폐 시킨다 (그림 3.156). 시료의 하부에 30kPa의 부압을 가하여 시료를 자립시킨 후, Split molds를 제거 한다 (그림 3.157).

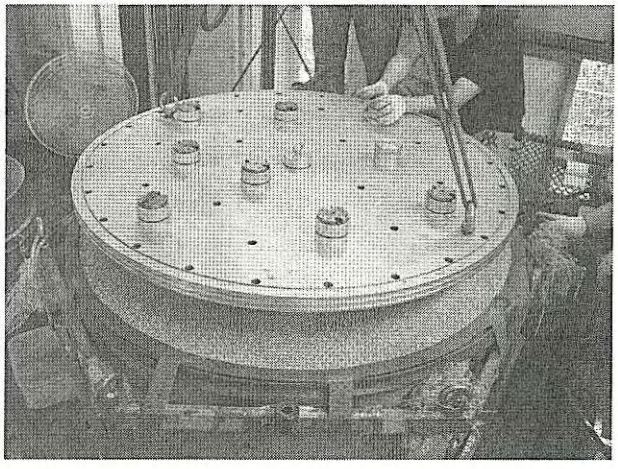


그림 3.156 Top Plate 조립

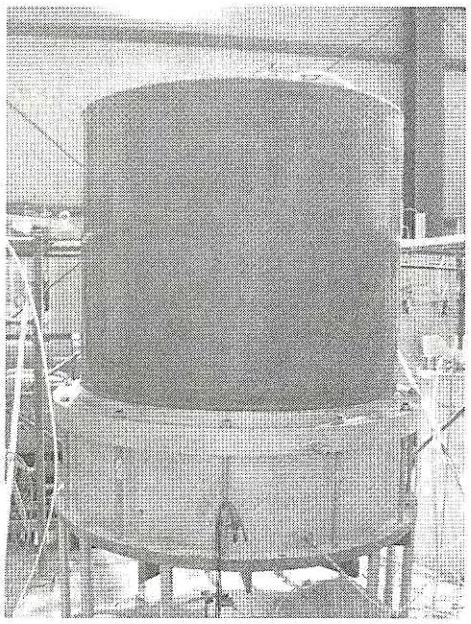


그림 3.157 부압을 이용한 시료 자립

다) 챔버 셀 조립

자립된 시료에 챔버 셀을 씌운 후 (그림 3.158), 24개의 롯드를 이용하여 Top lid와 챔버 하부 플레이트를 일체화시킨다 (그림 3.159). 조성된 시료에 목표 구속압을 가한 후, 안정화시킨다. 또한 구속압에 의한 시료의 수축량을 고려하여 상대밀도를 보정한다.

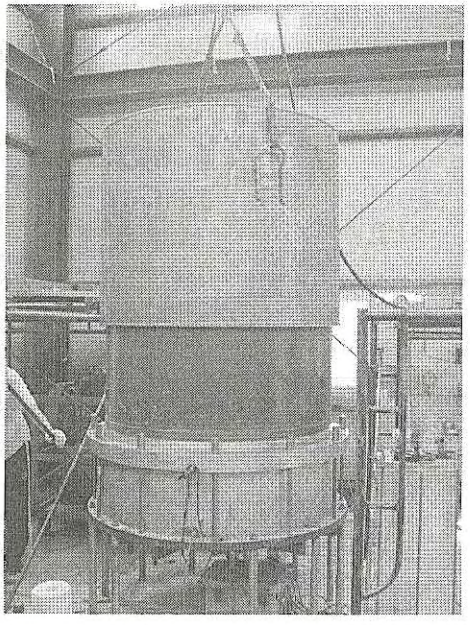


그림 3.158 챔버 셀 거치

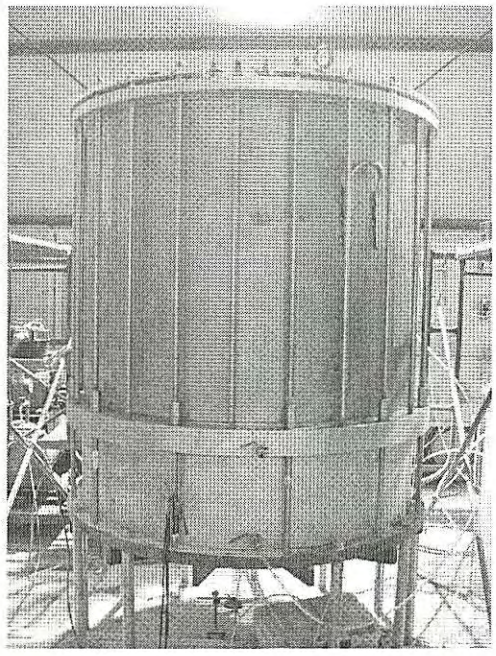


그림 3.159 챔버 조립 완료

라) SPT 및 LPT의 에너지 효율측정

변형율계와 가속도계가 부착된 LPT(SPT) 롯드의 상단에 연결되어 해머가 앤빌을 타격할 동안 변형율과 가속도를 측정한다. 변형율계를 통한 변형율의 측정과 가속도계를 통한 가속도의 측정은 말뚝의 항타 시 변형율과 가속도를 측정하는 절차와 거의 유사하다. 그러나 LPT(SPT)의 경우 해머와 앤빌이 모두 강재로 되어있기 때문에 타격시 높은 주파수의 응력파가 발생하므로 20 kHz이상의 데이터 샘플링속도가 요구된다. 변형율계와 가속도계에서 얻어진 아날로그 신호는 PDA를 통해서 디지털화되어 힘과 입자속도로 변환되고, 앞에서 언급한 F^2적분법과 FV적분법으로 롯드에 전달된 에너지로 계산되어 출력된다. 그림 3.160과 3.161은 챔버에 조성된 시료에 SPT 및 LPT 장비를 설치한 후 롯드 에너지 측정 장면이다. 또한, 실내실험에서는 실험실 제약상 SPT, LPT 모두 수동 해머 방식을 채택하여 실험을 수행하였다.

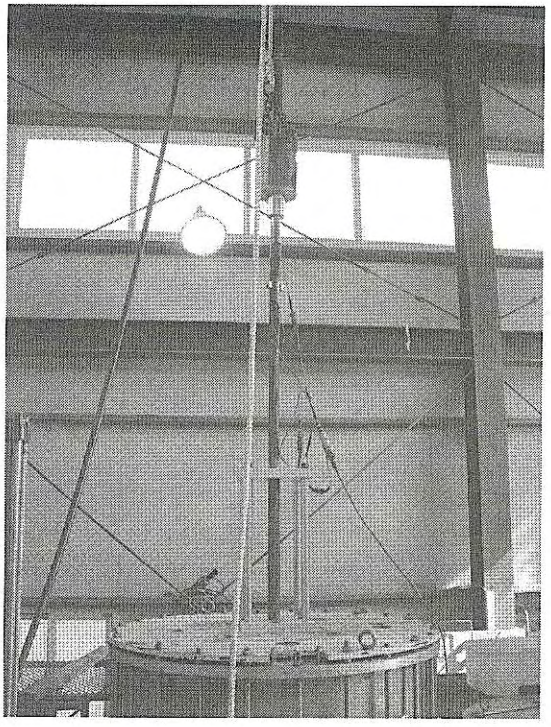


그림 3.160 챔버 SPT 실험 전경

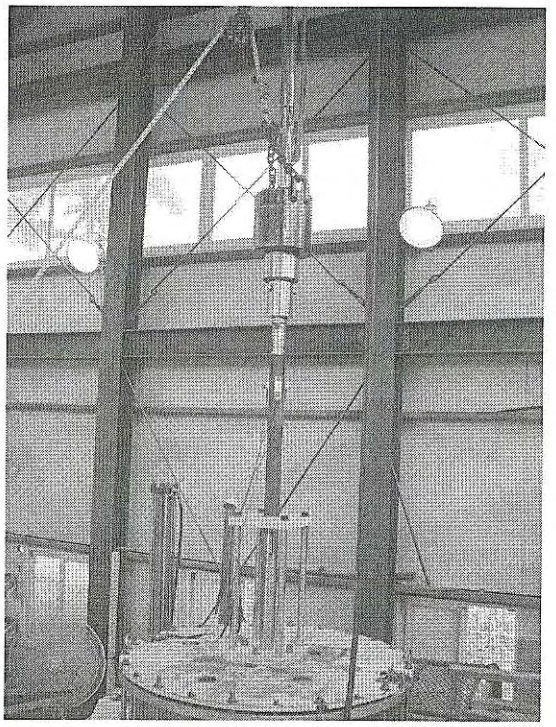


그림 3.161 챔버 LPT 실험 전경

(2) Chamber 시험결과

본 연구에서는 K-7호사와 주문진사로 약 80%와 40%의 상대밀도로 시료를 조성하여 실험을 실시하였다. 해머는 SPT 해머와 LPT 해머 두 가지 종류의 해머를 사용하였고, 구속압은 3 단계(100kPa, 200kPa, 300kPa)로 가압하여 단계별로 실험을 실시하였다. 해머의 타격에 대한 관입량을 측정하였고 동시에 말뚝항타분석기(PDA)를 이용하여 각 타격별 에너지 전달율을 측정하였다. 각 시료에 대한 측정결과는 표 3.14, 표 3.15에 나타나 있다. 여기서 환산 N값이란 높이 보정(76cm), 관입량 보정(30cm)만을 한 N값을 나타내고 있다.

표 3.14 K-7호사 시료에 대한 측정결과

시료 종류	상대 밀도 (%)	해머종류	롯드 단면적 (cm2)	구속압 (kPa)	낙하고 (cm)	에너지 전달율 (%)	관입량 (cm)	환산 N값
K-7	78.5	SPT	7.5	200	20	55.4	1.7	4.6
K-7	78.5	SPT	7.5	200	20	63.3	1.3	6.1
K-7	78.5	SPT	7.5	200	20	71.2	1.5	5.3
K-7	78.5	SPT	7.5	200	40	51.4	2.3	6.9
K-7	78.5	SPT	7.5	200	40	63.3	2.2	7.2
K-7	78.5	SPT	7.5	200	40	75.1	2.2	7.2
K-7	78.5	SPT	7.5	200	40	59.3	2.3	6.9
K-7	78.5	SPT	7.5	200	76	60.4	3.3	9.1
K-7	78.5	SPT	7.5	200	76	66.6	3.4	8.8
K-7	78.5	SPT	7.5	200	76	52.0	3.3	9.1
K-7	78.5	SPT	7.5	200	76	60.4	2.7	11.1
K-7	78.5	SPT	7.5	200	76	72.9	2.8	10.7
K-7	78.5	SPT	7.5	200	76	54.1	2.5	12.0
K-7	78.5	LPT	11.7	200	20	85.0	2.5	7.3
K-7	78.5	LPT	11.7	200	20	61.2	2.4	7.6
K-7	78.5	LPT	11.7	200	20	71.4	1.5	12.2
K-7	78.5	LPT	11.7	200	40		2.7	13.6
K-7	78.5	LPT	11.7	200	40		2.3	16.0
K-7	78.5	LPT	11.7	200	40	73.1	2.2	16.7
K-7	78.5	LPT	11.7	200	76		3.5	19.9
K-7	78.5	LPT	11.7	200	76	85.9	3.5	19.9
K-7	78.5	LPT	11.7	200	76		3.0	23.3
K-7	78.5	LPT	11.7	200	76	68.0	3.0	23.3
K-7	78.5	LPT	11.7	200	76	52.8	3.0	23.3
K-7	78.5	LPT	11.7	200	76	47.4	3.0	23.3
K-7	78.5	LPT	11.7	200	76	48.3	2.8	24.9

표 3.15 주문진사에 시료에 대한 측정결과

시료 종류	상대 밀도 (%)	해머종류	롯드 단면적 (cm2)	구속압 (kPa)	낙하고 (cm)	에너지 전달율 (%)	관입량 (cm)	환산 N값
주문진	40.9	LPT	11.7	100	20		4.2	4.4
주문진	40.9	LPT	11.7	100	40		7.5	4.9
주문진	40.9	LPT	11.7	100	76		10.0	7.0
주문진	40.9	LPT	11.7	100	76		8.5	8.2
주문진	43.6	LPT	11.7	300	20	54.4	1.0	18.4
주문진	43.6	LPT	11.7	300	20	74.8	1.0	18.4
주문진	43.6	LPT	11.7	300	40	71.4	2.0	18.4
주문진	43.6	LPT	11.7	300	40		2.1	17.5
주문진	43.6	LPT	11.7	300	76		3.8	18.4
주문진	43.6	LPT	11.7	300	76		3.8	18.4
주문진	43.6	LPT	11.7	300	76		3.6	19.4
주문진	43.6	LPT	11.7	300	76		3.5	19.9
주문진	81.5	LPT	11.7	100	20	71.4	2.6	7.1
주문진	81.5	LPT	11.7	100	40	73.1	3.2	11.5
주문진	81.5	LPT	11.7	100	40		2.8	13.1
주문진	81.5	LPT	11.7	100	76		6.2	11.3
주문진	81.5	LPT	11.7	100	76		4.6	15.2
주문진	81.5	LPT	11.7	100	76		4.2	16.6
주문진	82.1	LPT	11.7	200	20		1.0	18.4
주문진	82.1	LPT	11.7	200	20	71.4	1.5	12.2
주문진	82.1	LPT	11.7	200	40		1.5	24.5
주문진	82.1	LPT	11.7	200	40		2.5	14.7
주문진	82.1	LPT	11.7	200	76		1.8	38.8
주문진	82.1	LPT	11.7	200	76		2.4	29.1
주문진	82.1	LPT	11.7	200	76	94.9	2.0	34.9
주문진	82.3	LPT	11.7	300	20	64.6	0.5	36.7
주문진	82.3	LPT	11.7	300	20	68.0	0.5	36.7
주문진	82.3	LPT	11.7	300	20	68.0	0.5	36.7
주문진	82.3	LPT	11.7	300	40		0.9	40.8
주문진	82.3	LPT	11.7	300	40		0.9	40.8
주문진	82.3	LPT	11.7	300	40	78.2	1.0	36.7
주문진	82.3	LPT	11.7	300	76		1.7	41.0
주문진	82.3	LPT	11.7	300	76	88.6	1.5	46.5
주문진	82.3	LPT	11.7	300	76		1.6	43.6
주문진	82.3	LPT	11.7	300	76		1.4	49.8
주문진	82.3	LPT	11.7	300	76	93.1	1.3	53.7

① 관입량 분석

본 실험은 두 종류의 해머(63.5kg, 150kg)와 세 종류의 낙하고(20cm, 40cm, 76cm)를 조합하여 진행되었다. 이는 6종류의 타격에너지 조합으로 표현되며 서로의 결과를 비교하기 위해서는 일정한 수준의 에너지로 변환할 필요가 있다. Schmertmann and Palacios (1979)에 따르면, 에너지와 관입량이 정비례 하므로 각각의 에너지 수준에 따른 관입량을 표준에너지(63.5kg hammer + 76cm stroke)로 보정할 수 있다.

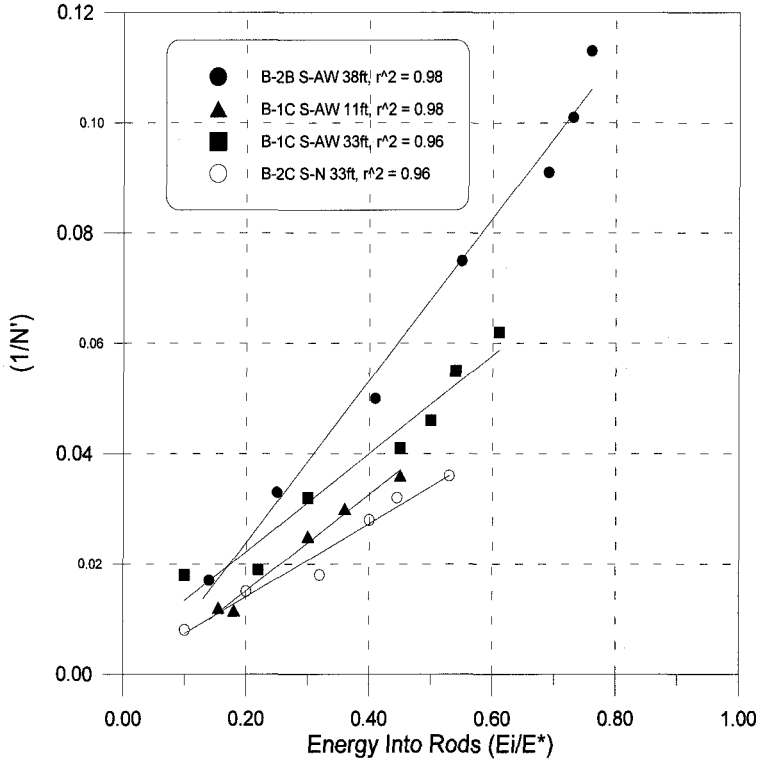


그림 3.162 에너지 전달율과 관입량과의 관계(Schmertmann and Palacios, 1979)

다음의 식 3.29 및 식 3.30과 같이 표준에너지에 대하여 보정된 관입량에 따라 N′(63.5kg hammer + 76cm stroke)를 산정할 수 있으며, 산정된 N′값을 시료의 상대밀도, 깊이, 구속압에 대하여 나타내면 그림 3.163과 같다.

$$P' = \frac{E'}{E} \cdot P \qquad \text{(식 3.29)}$$

$$N' = \frac{30}{E' \cdot P} \cdot E \qquad \text{(식 3.30)}$$

여기서, P′ : 표준에너지로 정규화된 타격당 관입량 (cm)

N′ : 표준에너지로 정규화된 타격 시 N값

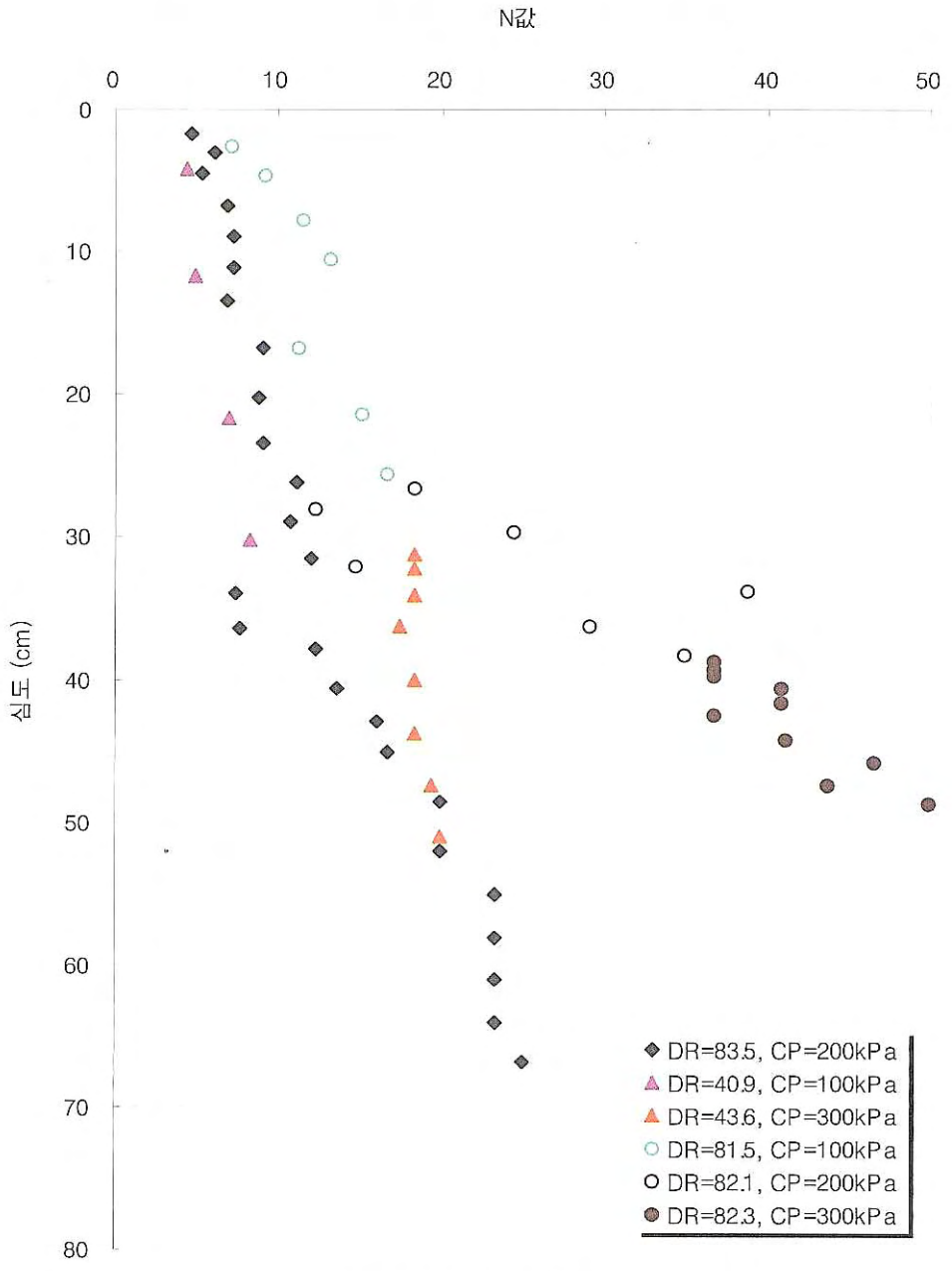


그림 3.163 정규화된 N값 분포

그림 3.163에 따르면 표준타격에너지로 정규화된 N값은 구속압에 대하여 비례하는 관계를 보이고 있으며, 깊이에 따라 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.

첫 번째 계열(◆모양, DR=83.5%, 구속압=200kPa)은 동일한 상대밀도와 동일한 구속압에 대한 N값을 보이고 있으며, 평균 12~13의 N값을 나타내고 있다. 두 번째 계열(▲모양, DR=40%초반, 구속압=100, 300kPa)은 비교적 낮은 상대밀도의 N값을 보이고 있고, 두 개의 구속압이 적용되어 N값이 산정되었다. 세 번째 계열(●모양, DR=80%초반, 구속압=100, 200, 300kPa)은 높은 상대밀도에서 세 종류의 구속압에 대하여 N값이 산정되었다.

위의 세 종류의 계열로 나타난 데이터를 각각 분석해 보면 산정된 N값은 해머의 무게나 낙하고에 대해서는 크게 영향을 받지 않으며, 심도에 따라서 다소 증가하는 것으로 나타났다. 즉 동일한 시료에 대해서는 해머의 무게와 낙하고에 대해서 표준에너지로 정규화하면 식 3.31과 같이 나타낼 수 있다.

$$N' = \frac{150}{63.5} \cdot \frac{stroke}{76cm} \cdot N \qquad \text{(식 3.31)}$$

여기서, N : 다른 에너지 수준에서 측정된 N값

이는 LPT 해머, 롯드, 샘플러 시스템이 에너지 변환을 통해서 기존의 SPT N값으로 쉽게 전환이 됨을 의미하며, 관입체(샘플러)가 SPT와의 scale effect를 적절히 반영할 수 있는 크기로 설계되었음을 의미한다.

심도에 따라 N값이 증가하는 경향은 시료가 조성된 chamber의 높이가 1m 내외 인 것을 감안하면 구속압의 영향 보다는 타격에 의한 dilation의 영향으로 보인다. 즉 높은 상대밀도에서 타격에 의한 dilation발생과 부피 구속으로 인한 강도의 증가가 누적되어 심도별 N값의 증가로 나타난 것으로 파악된다. 따라서 상대밀도가 작은 두 번째 계열(▲모양, DR=40%초반, 구속압=100, 300kPa)은 심도에 따른 N값의 증가가 상대적으로 미미하며 단지 구속압에 따른 N값의 차이가 뚜렷이 나타난다. 반면 상대밀도가 큰 첫 번째(◆모양, DR=83.5%, 구속압=200kPa)와 세 번째(●모양, DR=80%초반, 구속압=100, 200, 300kPa) 계열에서는 심도에 따른 N값의 증가가 현저하다. 특히 같은 조건하에서 입자강도와 입자크기가 크고 입자가 둥글어서 dilation이 큰 주문진사(세 번째 계열)에서는 심도에 따른 N값의 증가율이 더 크게 발생한다.

② 에너지 전달율

해머 타격시 타격별 관입량과 함께 말뚝항타분석기(PDA)를 이용하여 그림 3.164와 같이 타격 시 전달 에너지를 측정하였다. 해머의 역학적 에너지의 롯드 전달율은 관입량 및 N값의 산정에 중요한 요소이며, 에너지 전달율로 타격의 적정성 여부도 판단할 수 있다.

전달에너지는 총 65회 측정되었으나 약 절반정도의 데이터가 의미를 갖는 데이터로 회수되었다. 이중 SPT 해머 타격으로 인한 에너지 전달율은 100%(13/13) 회수 되었고 LPT 해머의 타격으로 인한 에너지 전달율은 44%(23/52) 회수 되었다.

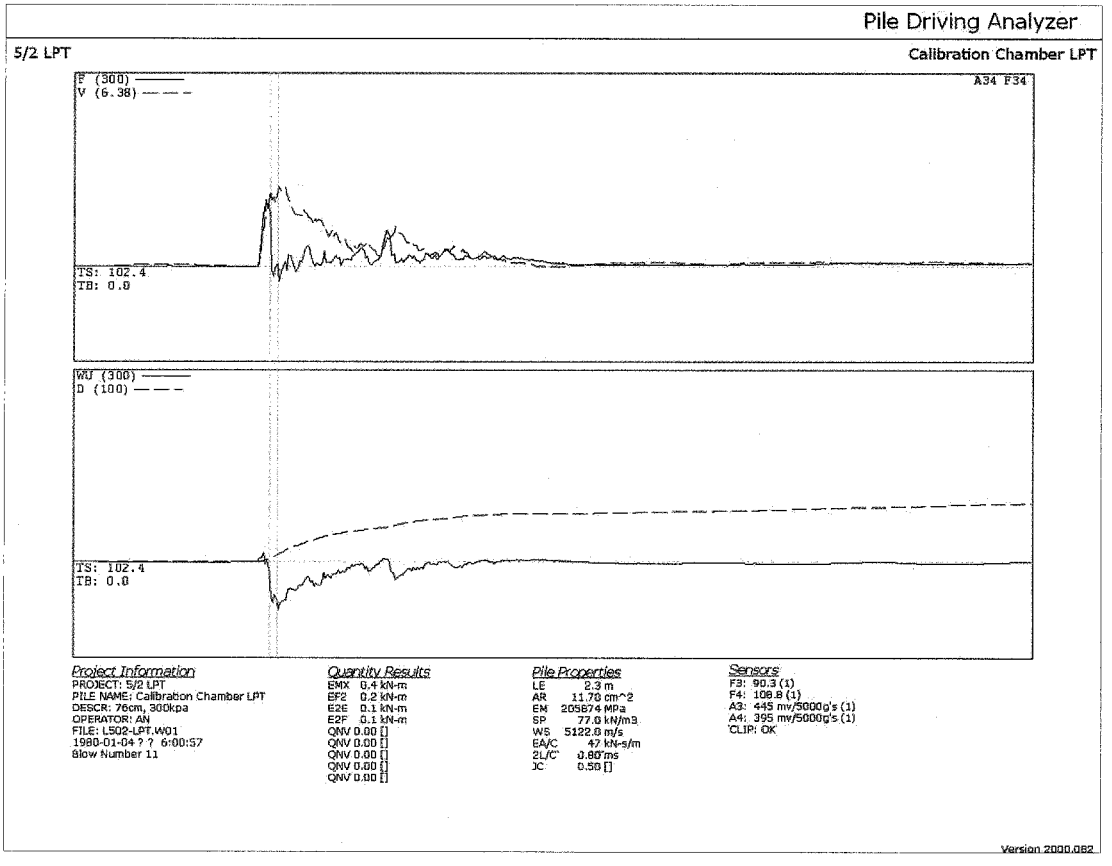


그림 3.164 PDA를 이용한 타격에너지 측정 예

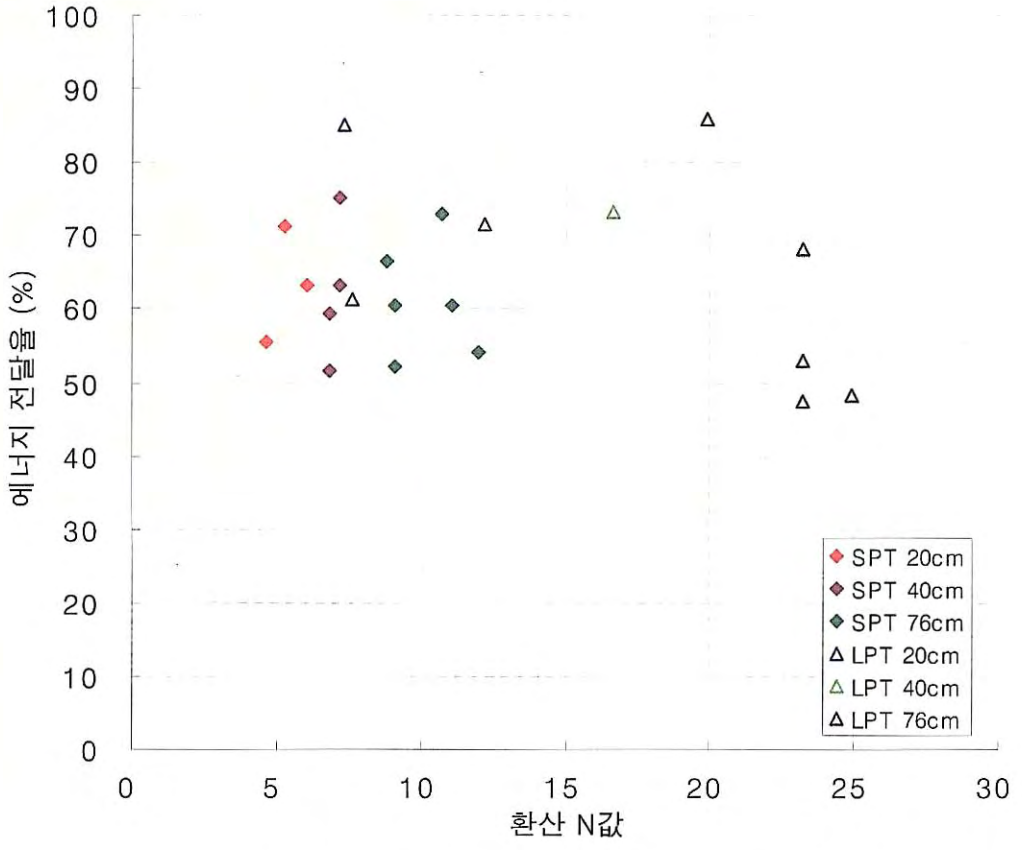


그림 3.165 N값에 따른 에너지 전달율

SPT 해머의 에너지 전달율은 대략 60% 내외로 측정 되었으며, LPT 해머(수동방식)의 에너지 전달율은 대략 70% 내외로 측정되었다. 또한 SPT와 LPT 모두 에너지 전달율이 낙하고와 구속압, 상대밀도 등에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 즉 에너지 전달율은 이와 같은 요소에 영향을 받는 것이 아니라 해머-롯드-샘플러 시스템의 고유 함수임을 의미한다. 다만 LPT의 경우 76cm의 낙하고로 타격하였을 때, 에너지 전달율이 경향없이 측정되었다.

그림 3.165는 SPT N값에 따른 에너지 전달율의 분포를 보이고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 SPT의 경우 안정적으로 좁은 지역에 분포하는 것으로 나타났다. 낙하고가 20cm, 40cm, 76cm일 경우 각각 SPT N값이 약 5, 7, 10 가량으로 측정되어, 낙하고가 증가함에 따라서 SPT N값이 큰 것으로 측정되었다. LPT의 경우 에너지 전달율과 SPT N값이 넓은 지역에 분포하는 것으로 측정되어 N값이 낙하고에 따라 약 9, 17, 23 가량으로 측정되었다.

시료의 상대밀도에 따른 에너지전달율의 분포는 그림 3.166에 나타나 있다. 에너지 전달율은 상대밀도와 관계없이 폭 넓게 분포하는 것으로 나타났으며 전술한 바와 같이 에너지 전달율은 해머 시스템의 함수임을 보이고 있다.

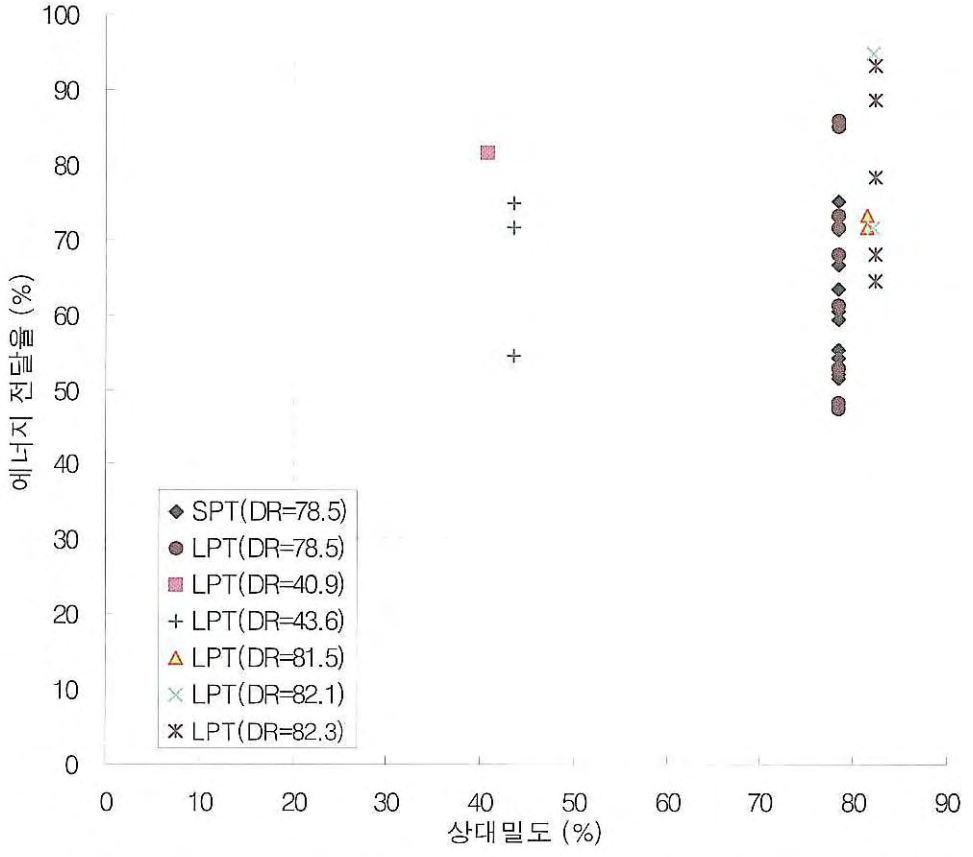


그림 3.166 상대밀도에 따른 에너지 전달율

③ 주문진사의 강도특성

LPT의 N값으로부터 주문진사의 강도정수를 예측하기 위하여, 실내에서 상대밀도를 40%, 60%, 80%로 변화시켜서 삼축압축시험을 수행하였다.

가) 시료성형방법 및 시험방법

본 연구에서는 직경 50mm, 높이 100mm인 공시체를 사용하였으며, 공시체를 성형하기 위한 방법으로는 습윤다짐방법(wet tamping)을 사용하였다. 습윤다짐방법은 노건조된 시료를 탈기수로서 함수비가 약 5%정도가 되도록 잘 혼합시킨 후, 삼축

셀 하단부와 함께 조립되어 있는 성형몰드 속에 성형하고자 하는 공시체의 간극비를 만족시키는 양의 시료를 5개의 층으로 나누어 살며시 뿌려 넣는 방법이다. 이 방법을 이용하면 시료의 표면에 묻어있는 물의 모관압력의 작용으로 인하여 매우 느슨한 상태인 상대밀도 40%의 시료를 보다 용이하게 성형할 수 있다. 좀 더 조밀한 상대밀도 60%, 80%의 공시체를 성형할 때에는 끝부분이 평평한 다짐봉(tamper)을 이용하여 각 층마다 원하는 높이까지 다짐으로서 시료를 제작할 수 있다.

시료가 상부캡(top cap)과 멤브레인(membrane)에 의해 싸여진 이후 공시체의 완전 포화를 위해 충분한 시간동안 시료내에 CO_2 가스를 5kPa 정도의 낮은 압력으로 충분히 순환시킨 뒤 탈기수를 자연동수경사를 이용하여 순환시켰다.

공시체를 삼축기에 안치시킨 후 cell pressure 와 back pressure 와의 차이를 약 2kPa로 유지하면서 back pressure를 100kPa까지 서서히 증가시켜 약 1~2시간동안 포화시켰다. 이후 Skempton의 간극수압계수B를 이용하여, B계수가 0.97 이상인 것을 포화된 것으로 간주하였다.

표 3.16 삼축압축시험의 개요

상대밀도	구속압	압축강도
Dr40%	100 kPa	697.60 kPa
	150 kPa	970.05 kPa
	200 kPa	983.28 kPa
	250 kPa	1,156.83 kPa
Dr60%	100 kPa	904.28 kPa
	150 kPa	1,201.61 kPa
	200 kPa	1,243.35 kPa
	250 kPa	1,334.96 kPa
Dr80%	100 kPa	955.33 kPa
	150 kPa	1,297.30 kPa
	250 kPa	1,554.82 kPa

나) 시험결과

각각의 상대밀도에서 구속압 100kPa, 150kPa, 200kPa, 250kPa에 대하여 삼축압축시험을 실시하였다. 변형률 증가에 따른 축차응력의 크기가 작아지는 순간의 응력을 파괴강도로 하였고 첨두점이 불분명한 경우 변형률 15%에서의 축차응력을

파괴강도로 결정하였으며 그 결과를 표 3.16과 그림 3.167 - 3.169에 나타내었다.

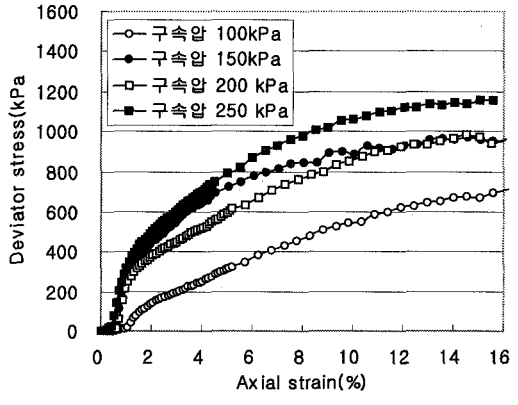


그림 3.167 Dr40% 응력-변형률 곡선

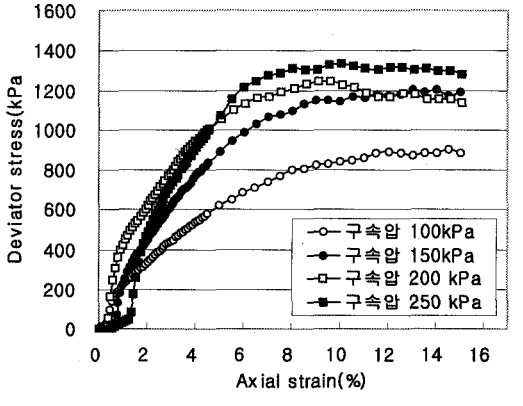


그림 3.168 Dr60% 응력-변형률 곡선

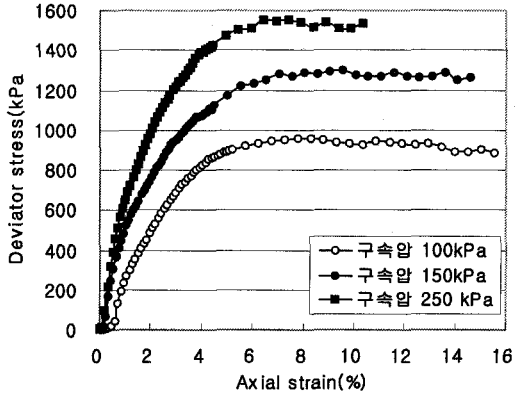


그림 3.169 Dr80% 응력-변형률 곡선

상대밀도가 증가할수록 응력-변형률 곡선은 첨두점을 띄었으며 파괴강도에 도달할 때까지 소요되는 변형률이 작아졌음을 확인할 수 있다. 간극수압의 경우 그림 3.170 - 3.172에서 나타난 바와 같이 모든 시료에서 파괴시 음의 간극수압을 나타내었는데 입경이 크고 입도분포가 고르기 때문에 다일러턴시 경향을 크게 나타냈기 때문으로 판단된다. 상대밀도가 증가할수록 전단시 체적팽창의 경향을 크게 나타내므로 음의 간극수압의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있었으며 이는 그림 3.173 - 3.175와 같이 유효 응력원을 우측으로 크게 이동시키는 결과로 나타났다.

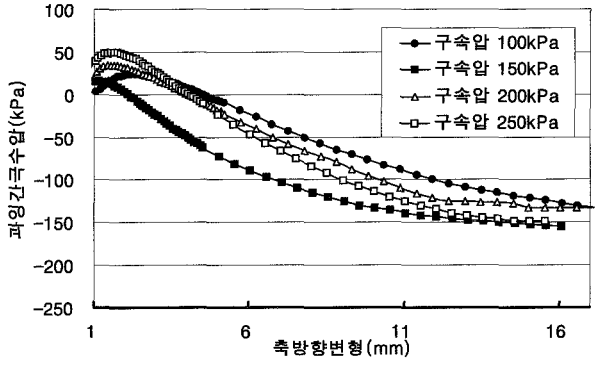


그림 3.170 변형률-간극수압곡선(Dr40%)

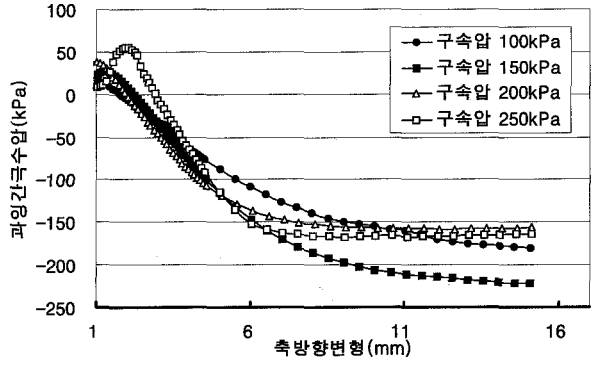


그림 3.171 변형률-간극수압곡선(Dr60%)

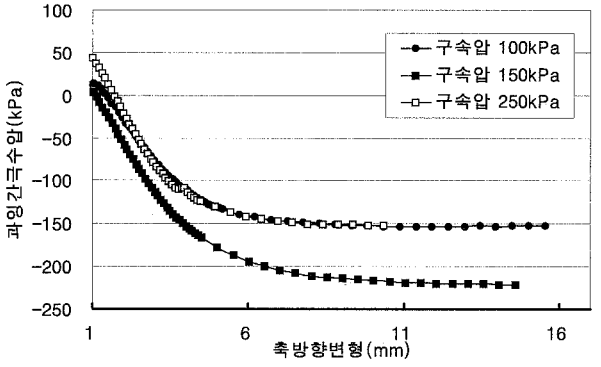


그림 3.172 변형률-간극수압곡선(Dr80%)

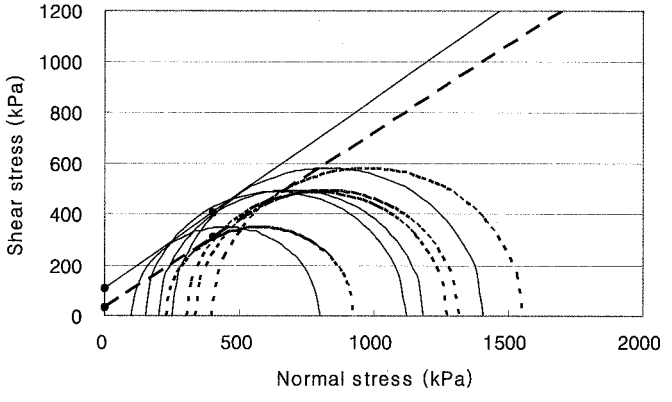


그림 3.173 Mohr circle과 파괴포락선(Dr40%)

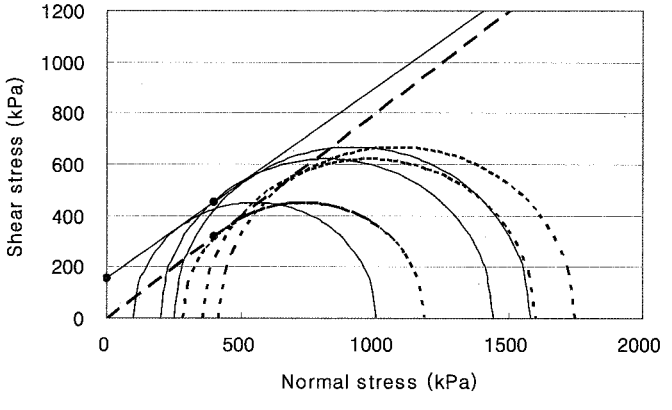


그림 3.174 Mohr circle과 파괴포락선(Dr60%)

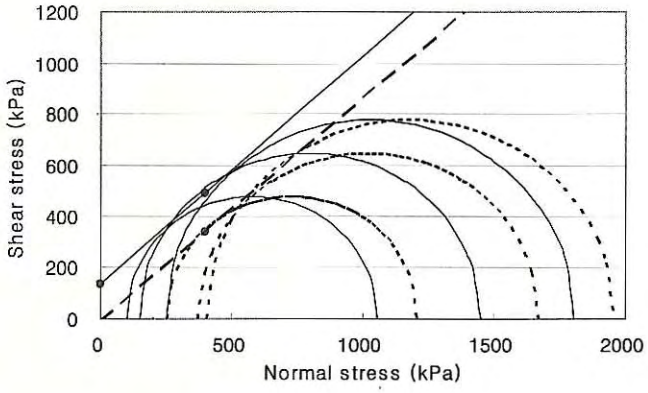


그림 3.175 Mohr circle과 파괴포락선(Dr80%)

각각의 상대밀도에 대한 유효모어원의 접선을 연결한 유효파괴포락선을 비교하여 그림 3.176에 나타내었다. 상대밀도가 40%, 60%, 80%로 증가함에 따라 곡선의 기울기인 내부마찰각 ϕ'값은 34.6°, 38.7°, 41.0°로 증가하는 것을 확인하였다.

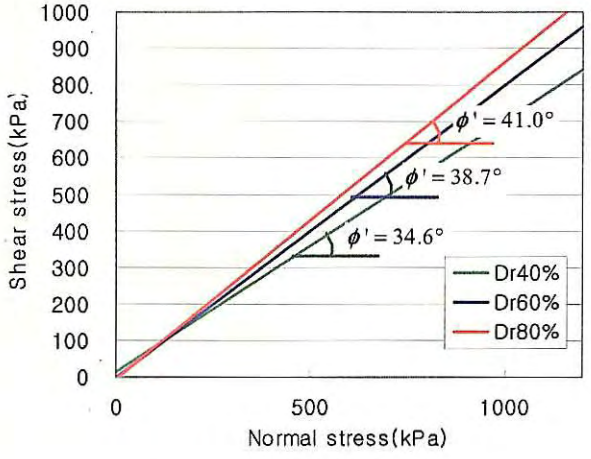


그림 3.176 유효 파괴포락선

④ 내부마찰각

시험에 사용된 주문진사에 대한 실내 역학시험 결과, 상대밀도가 40%, 60%, 80%일 경우 내부마찰각은 각각 34.6°, 38.7°, 41.0° 로 산정되었다. 입자가 모나고 입도분포가 균일한 모래에 대하여 Dunham은 식 3.32와 같이 제안하였으며, 주문진사에 대하여 LPT로부터 구한 환산 N(SPT 환산)값을 식 3.32에 적용하여 내부마찰각을 산정하고 그림 3.177에 나타내었다.

$$\phi = \sqrt{12N} + 20 \qquad \text{(식 3.32)}$$

여기서, N: SPT N값으로 환산한 N값

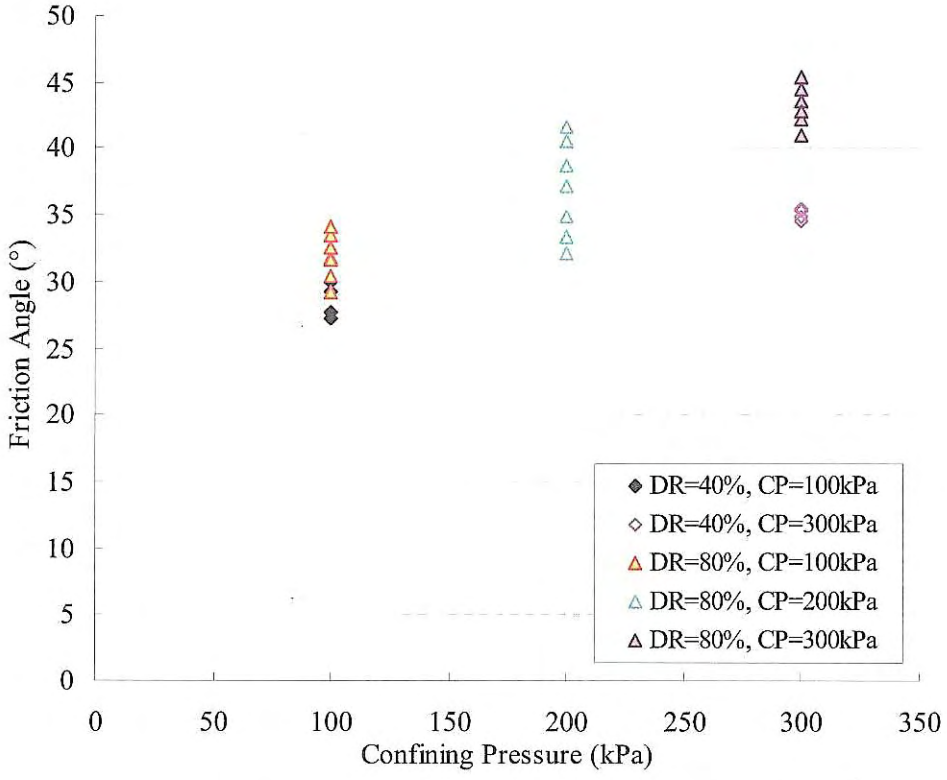


그림 3.177 내부마찰각 산정 (SPT값으로 환산하여 추정)

실험에서 조성된 시료의 상대밀도(40%, 80%)는 최소 및 최대 상대밀도에 가까운 값이다. 상대밀도가 40%의 시료인 경우 내부마찰각은 약 27° ~ 36°로 산정이 되었으며, 역학시험결과(34.6°)보다 다소 작게 산정되었다. 상대밀도가 80%의 시료인 경우 내부마찰각은 약 29° ~ 45°로 산정이 되었으며, 범위가 다소 넓게 분포하는 것으로 나타났다.

산정된 마찰각과 예측된 마찰각 사이에 다소 차이가 있다. 자연계에서는 구속압이 증가할수록 상대밀도도 증가하는 것이 일반적이나, 실험실에서 구속압(100, 300kPa)을 재하한 상태에서 인위적으로 상대밀도가 40%인 시료를 조성했기 때문에 차이가

발생하는 것으로 판단된다. 또한 구속압에 직접적인 영향을 받는 SPT N값으로 구속압에 영향이 적은 내부마찰각을 산정하는 것은 어느 정도 한계가 존재한다. 상대밀도와 구속압의 관계를 고려하여 비교하면 LPT N값은 SPT N값과 같은 수준의 정확도로 내부마찰각을 예측할 수 있다.

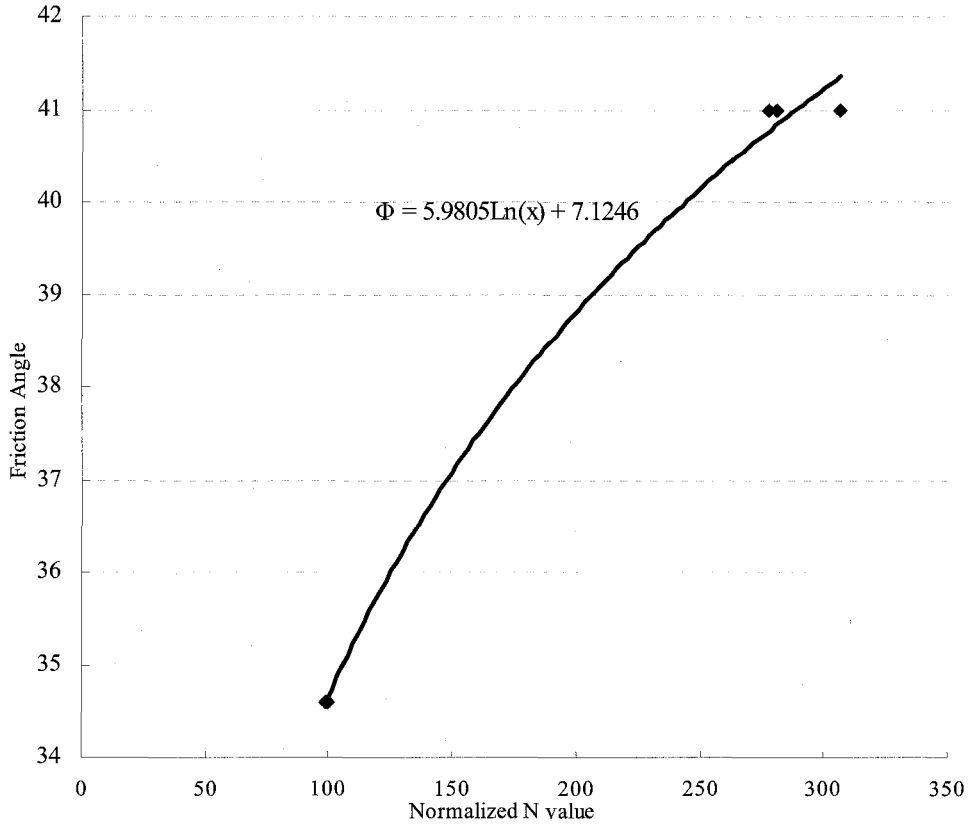


그림 3.178 정규화 N값과 내부마찰각

$$\phi = 6.0 \times \ln\left(\sqrt{\frac{N}{\sigma_v'} \cdot 236.2} \times Dr\right) + 7.1 \qquad \text{(식 3.33)}$$

여기서, σ_v' : MPa

Dr : %

본 연구에서는 N값을 구속압과 상대밀도에 대하여 정규화한 값과 마찰각 사이의 관계를 그림 3.178과 같이 도출하였으며, 이를 통하여 식 3.33과 같이 N값과 내부마찰각의 관계식을 제시하였다. N값을 통하여 내부마찰각을 산정하는 기존의 방법은 그림 3.177과 같이 상대밀도와 구속압에 대하여 크게 영향을 받는 반면에 식 3.33에

의해서 산정된 N값은 그림 3.179와 같이 구속압과 상대밀도에 의해 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

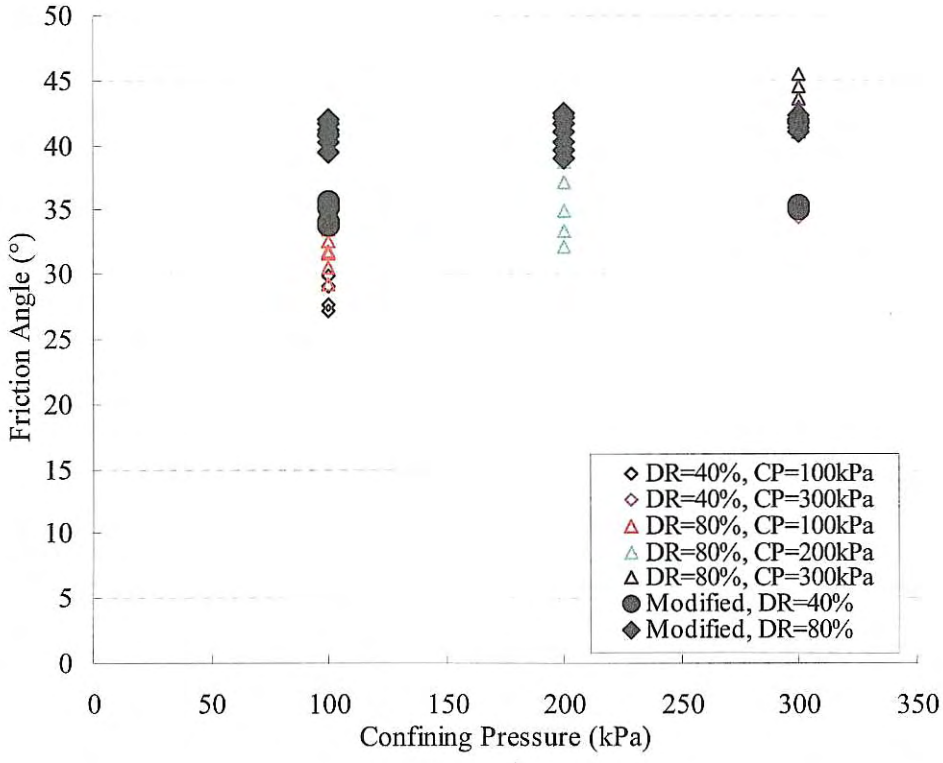


그림 3.179 수정 전·후 내부마찰각

(d) SPI를 이용한 LPT의 현장 거동 분석 (해머의 낙하속도 및 관입량 측정)

(1) SPI 장비를 이용한 KICT-type LPT 장치의 거동 평가

본 연구에서는 해머의 낙하속도를 감안하여 10kHz 속도로 촬영하였으며, 측정정밀도는 측정대상체와 카메라 사이의 거리, 렌즈의 사양 등에 따라 달라질 수 있으며 약 1mm 정도의 정밀도를 유지 할 수 있도록 하였다. 또한, 해머의 거동과 침하량을 보다 높은 정도로 분석하기 위하여 2대의 라인 스캔 카메라를 이용하였다. 그림 3.180 - 3.182는 해머 및 롯드에 부착한 마크, 디지털 라인 스캔 카메라 및 계측용 PC, 촬영되는 마크의 물결 무늬 등을 나타낸 것이고, 그림 3.183는 현장에서 계측하는 광경이다.



그림 3.180 SPI 계측용 마크설치



그림 3.181 스캔 카메라 와 계측용 PC

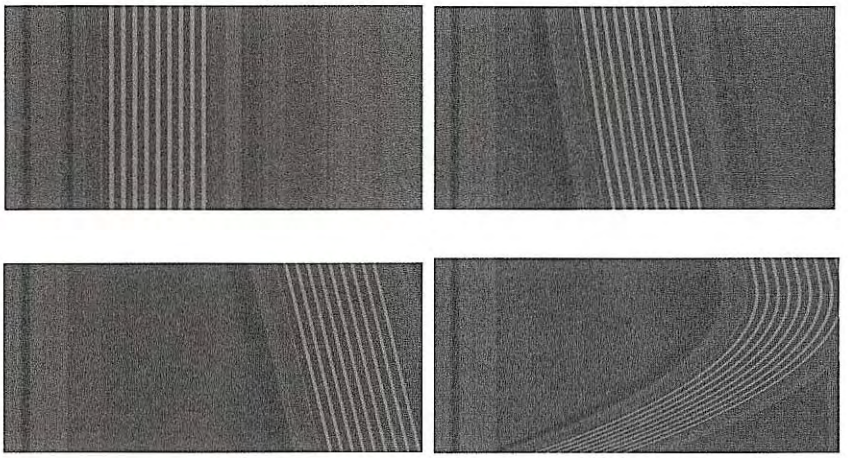


그림 3.182 흑백띠의 파형



그림 3.183 SPI를 이용한 LPT 거동 분석 광경

(2) 해머 거동 분석 결과 - 낙하 속도

그림 3.184 - 3.190에는 KICT-type LPT 해머의 상승속도 및 낙하속도를 SPI 장비를 이용하여 계측한 결과를 나타내고 있다. (+) 값의 속도는 매 타격시 윈치와 강선을 통하여 해머가 낙하고인 76cm 까지 상승할 때의 속도를 의미하며. (-) 값의 속도는 해머가 76cm 낙하고에서 자동낙하 할 때의 속도를 의미한다. 또한, 하나의 sine 곡선이 타격횟수를 의미한다. 다양한 지반에서 해머의 거동을 분석 한 결과, 파란색으로 표시한, 해머의 상승속도는 모든 케이스에서 거의 일정하였다. 또한, 빨간색으로 표시한, 해머의 낙하속도 (엔빌에 도달할 때의 순간속도) 역시 타격횟수, 지반조건에 관계없이 비교적 일정한 값 (0.0018-0.002 m/sec)을 나타내고 있다. 즉, 매 타격 시 마다 해머의 타격에너지 크기가 균등함을 확인 할 수 있다.

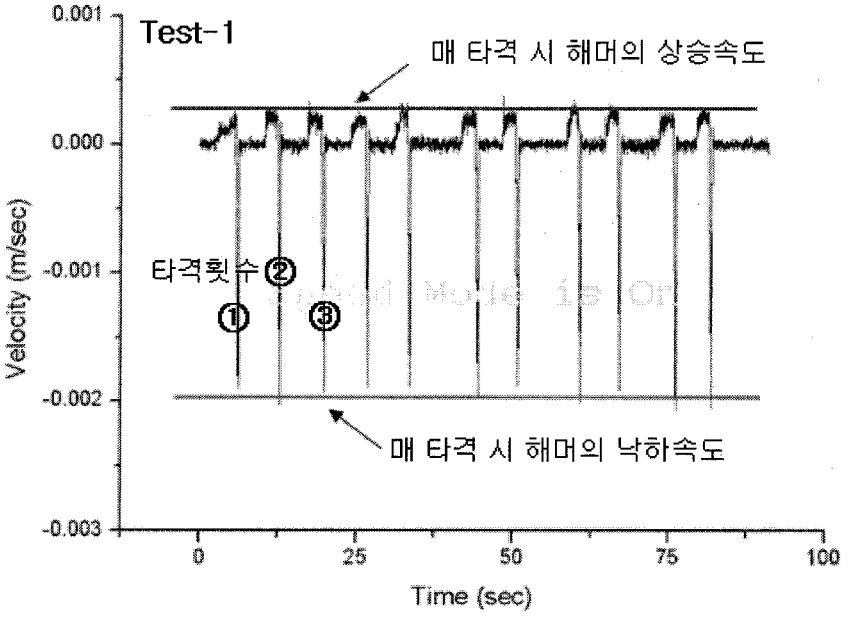


그림 3.184 해머의 타격에너지 분석 (Test 1)

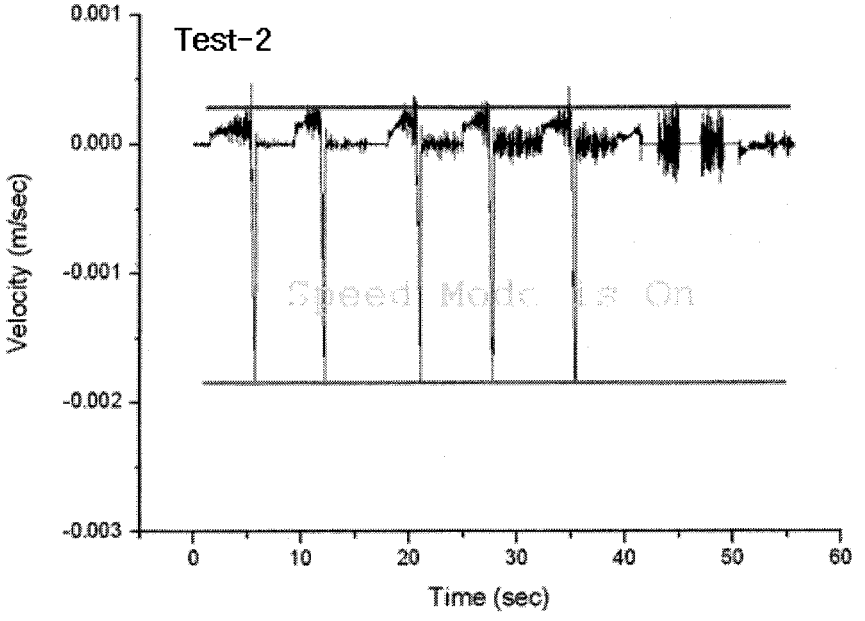


그림 3.185 해머의 타격에너지 분석 (Test 2)

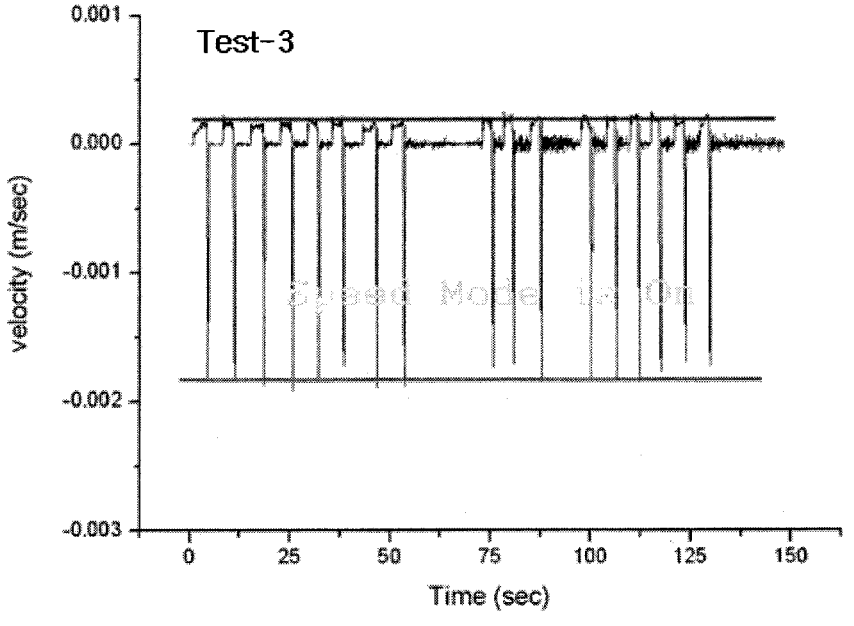


그림 3.186 해머의 타격에너지 분석 (Test 3)

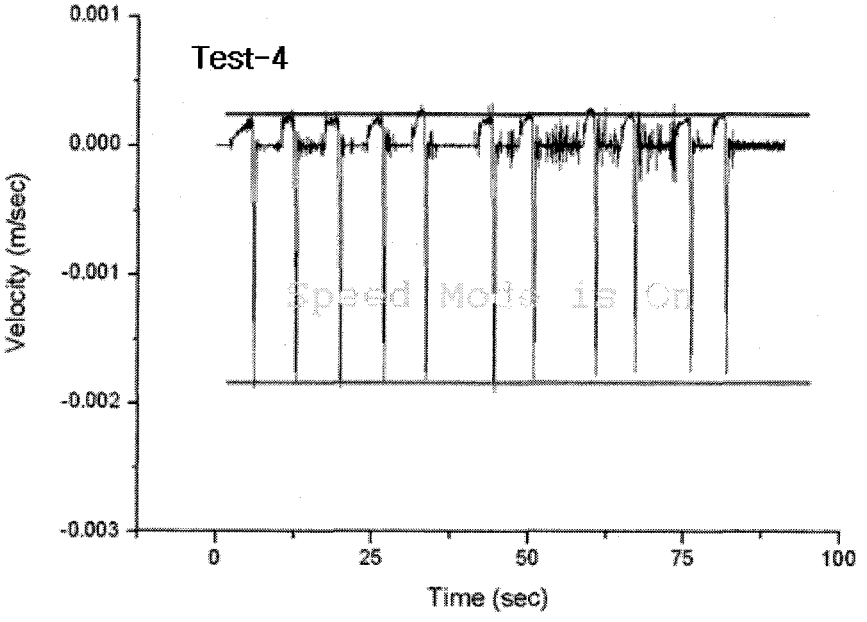


그림 3.187 해머의 타격에너지 분석 (Test 4)

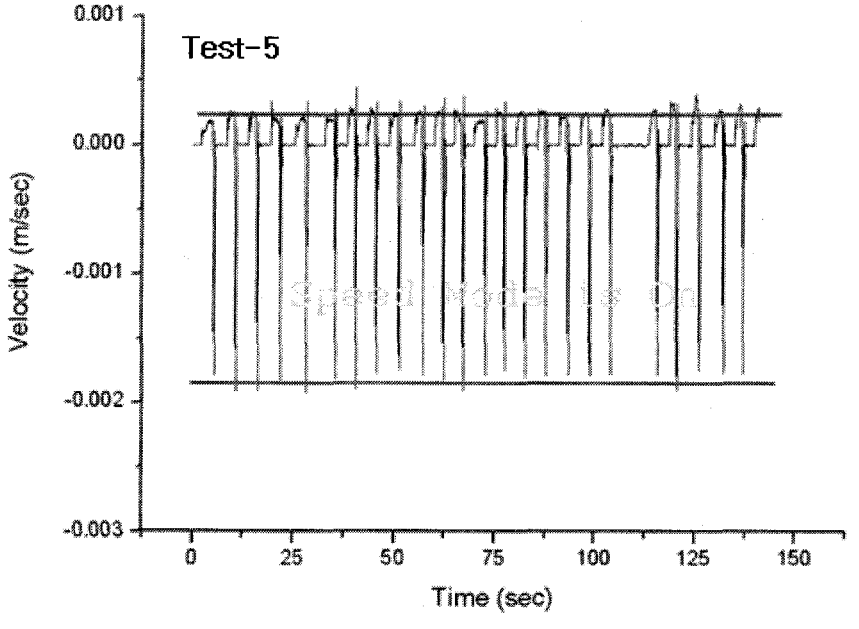


그림 3.188 해머의 타격에너지 분석 (Test 5)

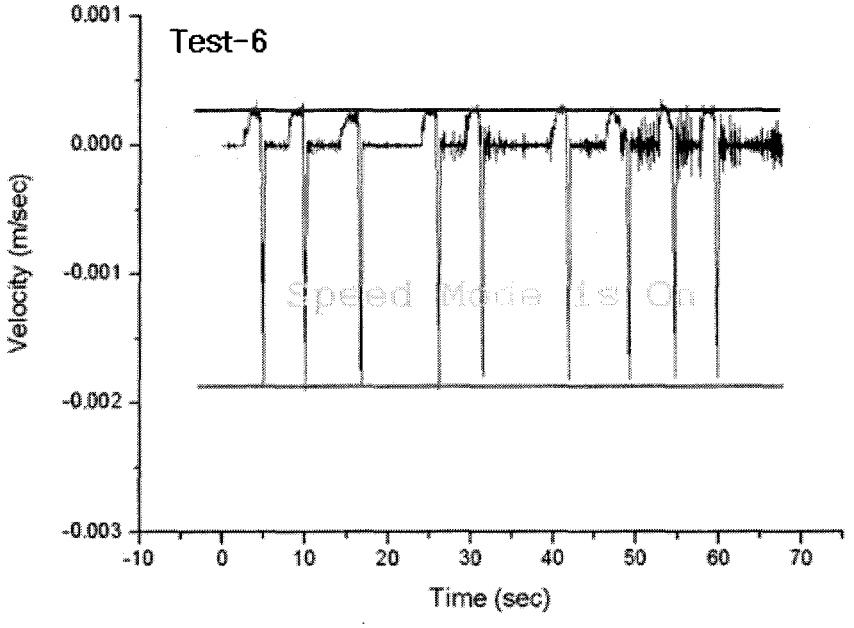


그림 3.189 해머의 타격에너지 분석 (Test 6)

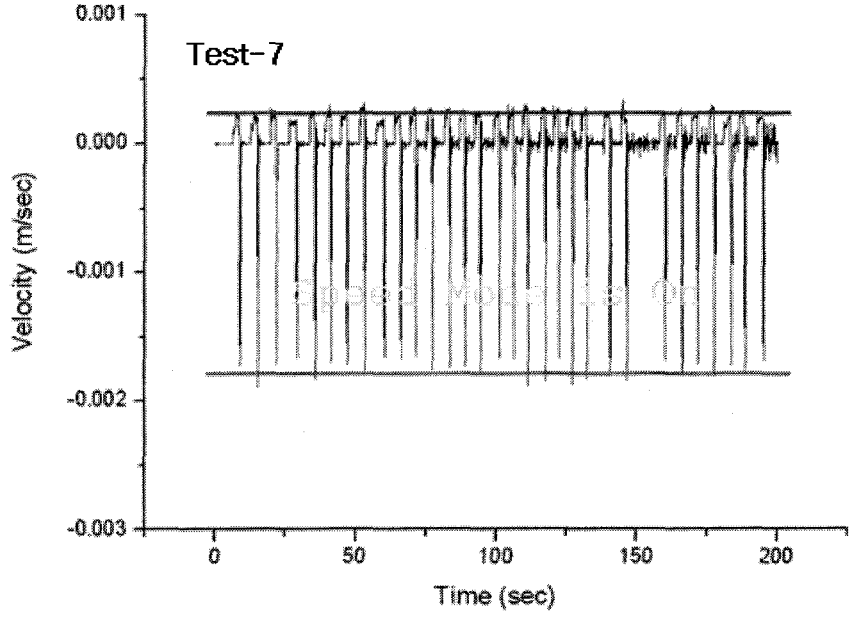


그림 3.190 해머의 타격에너지 분석 (Test 7)

(3) 해머 거동 분석 결과 - 관입량

그림 3.191 - 3.194에는 SPI로 계측한 매 타격 시 관입량을 나타내고 있다. 2차 타격에 의한 관입량은 무시 가능하며, 매 타격 시 일정한 관입량을 나타내고 있음을 알 수 있다.

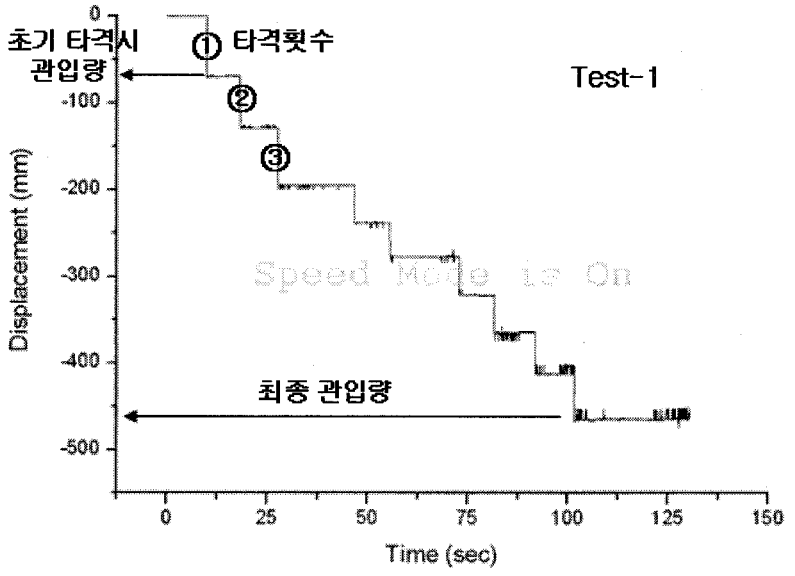


그림 3.191 관입량 측정결과 (Test 1)

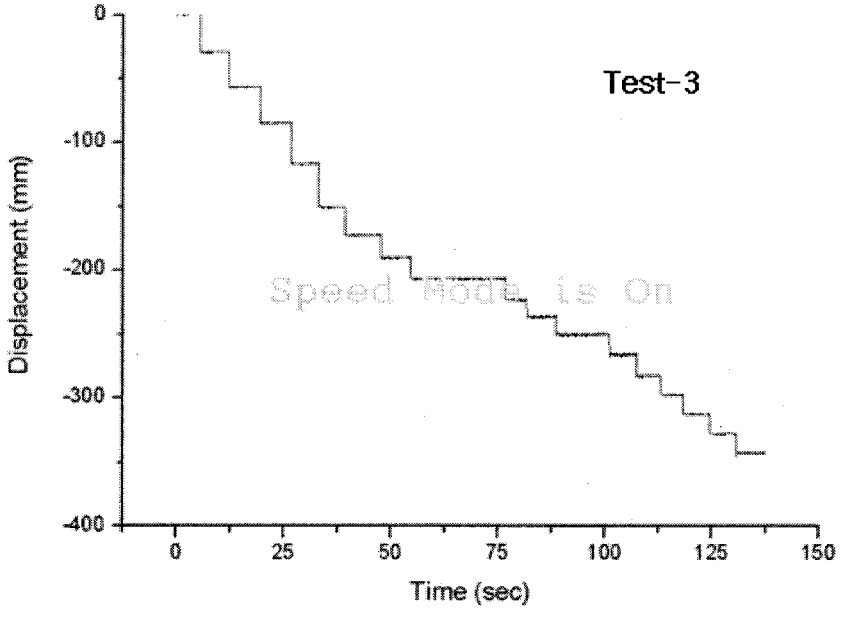


그림 3.192 관입량 측정결과 (Test 3)

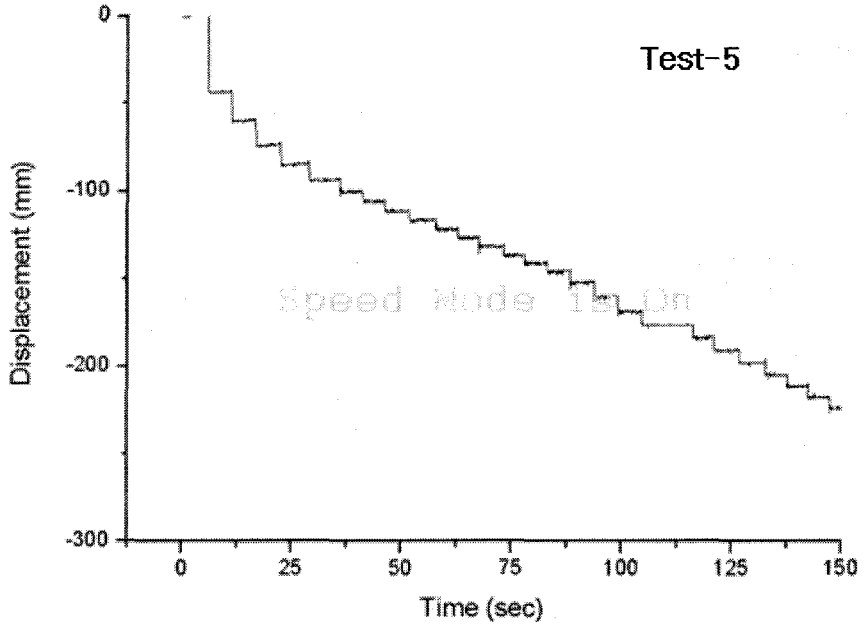


그림 3.193 관입량 측정결과 (Test 5)

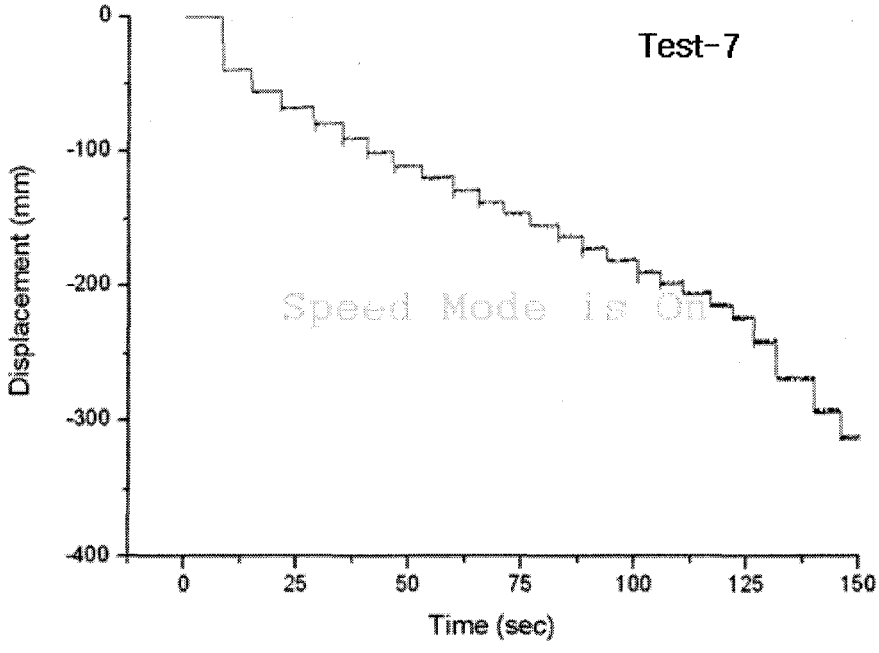


그림 3.194 관입량 측정결과 (Test 7)

제 5 절 개발장비의 사용 매뉴얼

1. KICT-type 대구경 샘플러 매뉴얼

KICT 첨단 대구경 샘플러의 매뉴얼

1. 명칭

본 이하의 장비를 "KICT 첨단 대구경 샘플러"라고 명칭한다.

2. 적용범위

일반적으로 점성토, 풍화토, 실트(사질토), 매립토에서 적용이 가능하며, 점착력이 0 이 아닌 지반재료에 사용 범위를 둔다.

3. 규격

다음에 나타내는 규격은 이 규격에 인용됨으로써 이 규격의 규정일부를 구성한다. 이러한 인용규격은 그 최신판을 적용한다.

4. 개요

지금까지 국내의 연약지반 현장에서 주로 NX 크기의 수압식 피스톤 샘플러를 이용하여 불교란 시료를 채취하고 있으며 사질토 지반에 대해서는 불교란 시료를 채취하지 못하고 있는 실정이다. KICT 첨단 대구경 샘플러는 트리플 코아 바렐의 채취 원리를 이용하는 한편 추가적인 특수장치를 장착하여 직경이 200mm인 불교란 시료 채취용 대구경 샘플러를 고안한 것이다. 본 KICT 첨단대구경 샘플러는 점성토 지반뿐만이 아니라 사질토 지반에서도 불교란 시료를 채취하는 것을 목적으로 하고 있다.

5. 정의

이 매뉴얼에 사용되는 주된 용어의 정의는 다음과 같다.

5.1 시료교란 : 시료를 채취하여 실내시험을 수행하기까지 시료를 취급하는 과정에서 외적인 작용에 의해 시료의 상태와 그 역학적 성질이 원위치에 있을 때와 달라지는 현상, 즉, 물리적 성질은 변하지 않고 흙의 구조, 밀도, 및 역학적 성질이 변하는 상태를 의미한다.

5.2 완전교란 시료 : 시료의 채취시 수압이나 오거링에 의해 혼합되어 흙 구조가 완전히 파괴된 상태의 시료를 의미한다.

5.3 대표 시료 : 부분적으로 교란된 시료로서 강도, 압축, 투수 특성 등이 변화를 받았

지만 입도분포, 함수비 등 흙의 물리적 특성은 여전히 유지하고 있는 시료를 의미한다.

5.4 불교란 시료 : 흐트러지지 않은 자연상태의 토질로서 역학적 특성까지 유지하고 있는 시료를 의미한다.

5.5 NX 사이즈 : 시추공직경 76.2mm, 코아직경 54mm의 샘플러를 의미한다.

비고 드릴롯드와 샘플러의 종류 및 기준 규격은 다음 표 1, 표 2와 같다.

표 1. 드릴롯드의 종류 및 규격

Size	O.D.		I.D.		Weight		Coupling O.D.	
	in	mm	in	mm	lb/ft	kg/m	in	mm
E	1 5/16	33.3	7/8	22.2	2.7	4.0	7/16	11.1
A	1 5/8	41.3	1 1/4	28.5	3.7	5.7	9/16	14.3
B	1 7/8	47.6	1 1/4	31.7	5.0	7.0	5/8	15.9
N	2 3/8	60.3	2	50.8	5.2	7.5	1	29.4
EW	1 3/8	34.9*	15/16	23.8	3.1	4.7	7/16	11.1
AW	1 3/4	44.4	1 1/4	31.8	4.2	6.5	5/8	15.9
BW	2 1/8	54.0	1 3/4	44.5	4.3	6.7	3/4	19.3
NW	2 5/8	66.7	2 1/4	57.1	5.5	8.4	1 3/8	34.9
HW	3 1/2	88.9	3 1/16	77.8	7.7	11.5	2 3/8	60.3

표 2. 샘플러의 종류 및 규격

SIZE	O.D.		I.D.		Weight		Coupling O.D.	
	in	mm	in	mm	lb/ft	kg/m	in	mm
EX	1 13/16	46.0	1 5/8	41.3	1.80	2.7	1 1/2	33.1
AX	2 1/4	57.2	2	50.8	2.90	4.4	1 29/32	48.4
BX	2 7/8	73.0	2 9/16	65.1	5.90	8.8	2 3/8	69.3
NX	3 1/2	83.9	5 3/16	81.0	7.80	11.8	3	76.2
HX	4 1/2	114.3	4 1/8	104.8	8.65	13.6	3 15/16	100.0

6. 샘플러의 부품 및 명칭

시험 장치의 구조와 명칭을 설명한다.

6.1 슈(shoe) : 샘플러의 자중으로 지반속에 관입되는 장치로 비트보다 아래에 있어 채취되는 시료를 비트의 회전 굴착으로 발생하는 교란으로부터 보호한다.

6.2 비트(bit) : 코아링 튜브의 첨단부에 부착되어 샘플러를 지반에 관입시키기 위하여 굴착하는 장치이다.

6.3 가이드 튜브(guide tube) : 시료가 채취될 때 시료를 커터로부터 교란이 되지 않게 보호하고 시료를 절단할 때 커터를 지지하여 예정된 방향으로 나오지 않도록 도와주는 튜브이다.

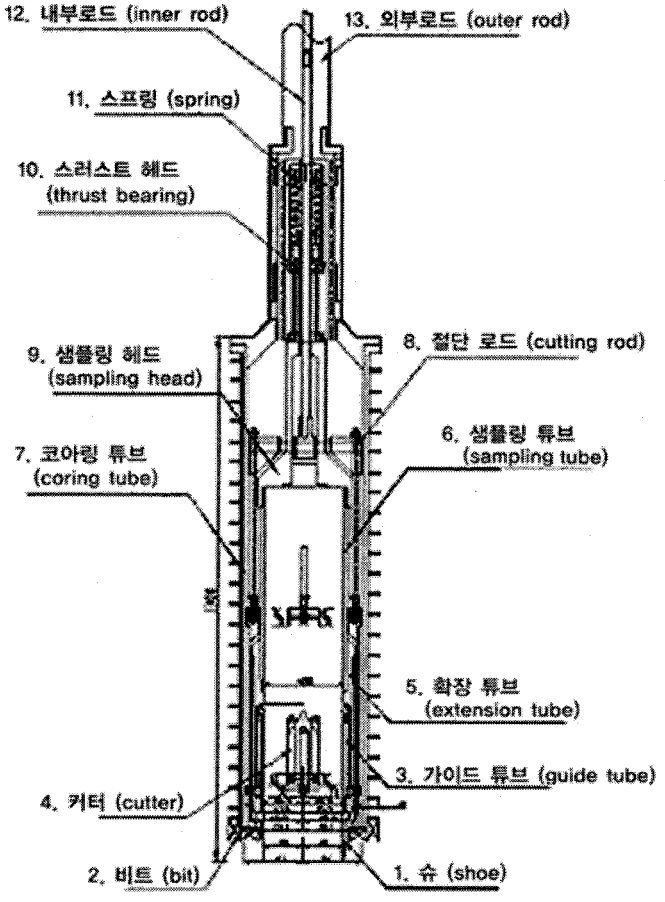


그림 1. 대구경 샘플러 모식도

6.4 커터(cutter) : 채취된 시료를 절단하고 샘플러를 인발할 때 시료 유출을 막아주는 장치로 24개의 커터가 튜브의 하부를 완전히 밀폐시킨다.

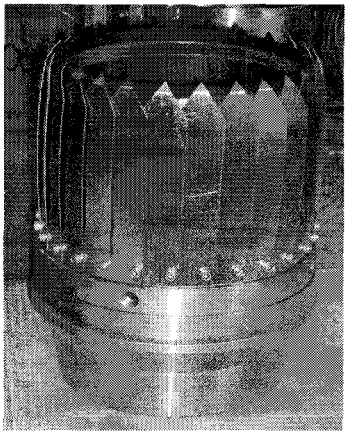


그림 2. 커터(cutter)

6.5 **확장 튜브(extension tube)** : 슈와 샘플링 튜브를 연결하여 주는 튜브로 채취시 시료를 절단하는 커터가 숨어 있을 수 있는 공간이 확보되어야 한다.

6.6 **샘플링 튜브(sampling)** : 아크릴로 만들어져 채취된 시료의 상태를 육안으로 확인할 수 있도록 되어 있으며 추출시 발생하는 교란을 제거하기 위하여 스플릿 튜브를 만들었다.

6.7 **코아링 튜브(coring tube)** : 가볍고 강도가 좋으며 녹슬지 않는 재질로 만들어져 작업성을 좋게 해야한다. 튜브의 외부 면을 나선으로 하여 샘플러 관입시 굴착으로 발생한 흙을 용이하게 배출시켜 주위 지반의 교란을 작게 하였다.

6.8 **절단 로드(cutting rod)** : 커터와 내부 로드사이를 연결하는 로드로 시료 절단시 커터를 위로 끌어 올리는 역할을 한다.

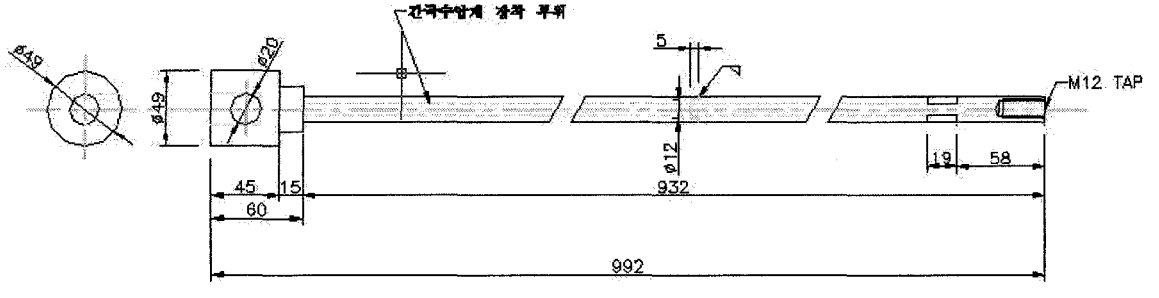


그림 3. 절단로드 규격

6.9 **샘플링 헤드(sampling head)** : 절단 로드와 인너로드를 연결하는 매개체 역할을 한다.

6.10 스러스트 헤드(thrust bearing) : 외부 튜브와 연결된 비트는회전을 시키고 샘플링 튜브와 연결된 슈는 회전을 시키지 않게 하여 시료가 교란되지 않게 한다.

6.11 스프링(spring) : 스프링을 이용하여 지반의 강도에 따라 비트와 슈의 상대적인 위치를 조절하여 비트의 회전굴착으로부터 채취되는 시료를 교란되지 않게 한다.(지반의 상태에 따라 교환가능)

6.12 내부로드(inner rod) : 시료를 절단하는 절단로드를 지상에서 조작할 수 있게 한다.

6.13 외부 로드(outer rod) : 외부의 보링 장비와 샘플러의 코아링튜브를 연결하는 로드로 보링 장비의 동력 및 수압을 샘플러로 전달한다.

참고 커터와 절단로드의 작동설명

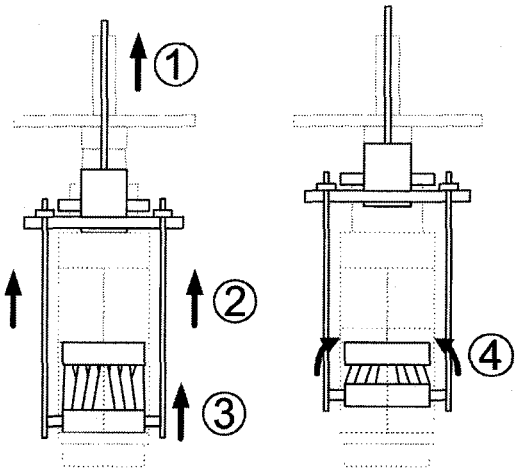


그림 4. 커터와 절단로드

내부로드를 인발(①)시키면 샘플러헤드 안의 장치를 따라 절단로드(②)가 확장튜브 안의 커터를 상승(③)시킨다. 이때 커터가 상승하면서 가이드튜브 안쪽으로 들어가면서(④) 시료 하단부를 절단, 폐합시키게 된다.

7.기본조작법

7.1 대구경샘플러 순서도

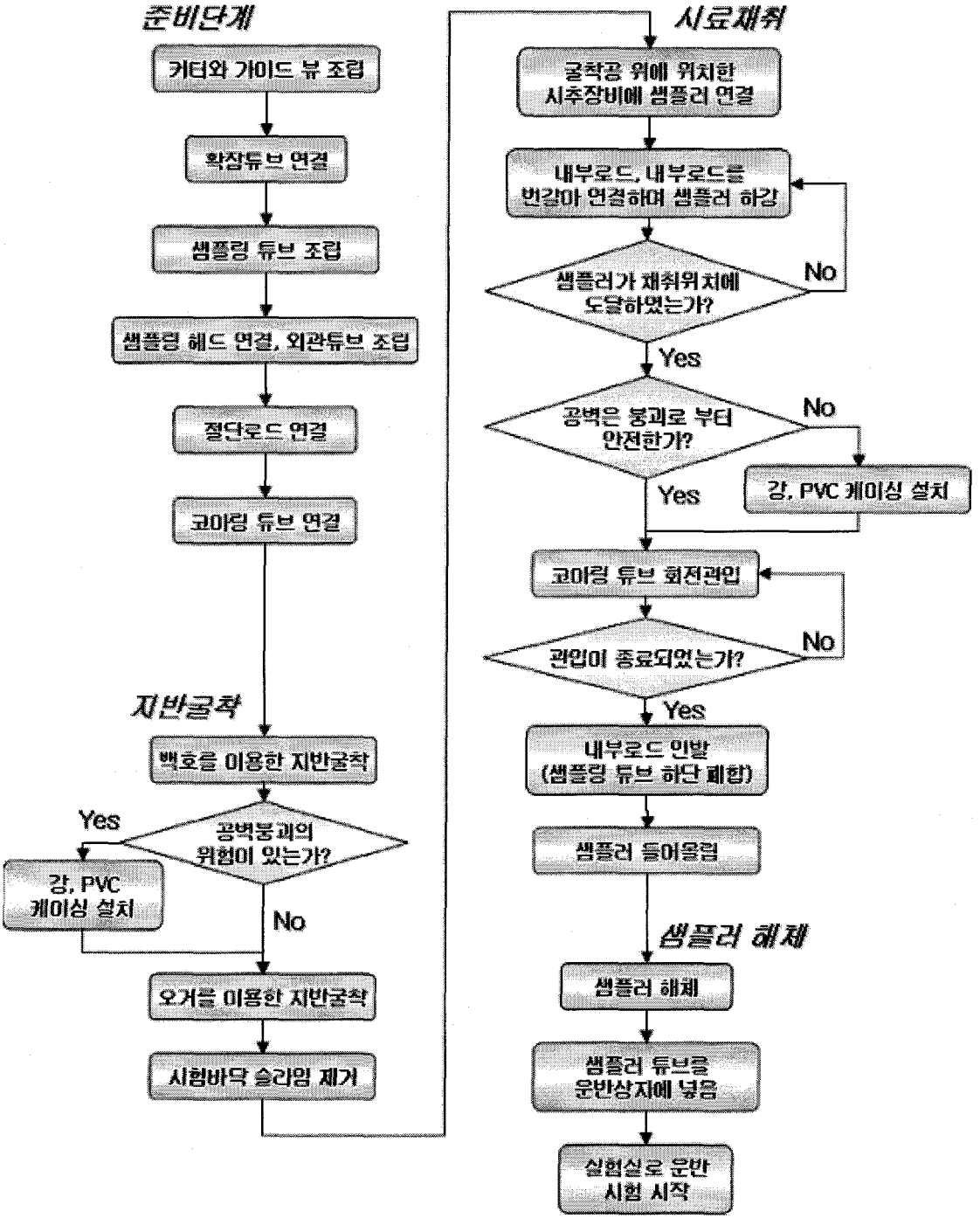


그림 5. 대구경 샘플러를 이용한 샘플링 순서도

비고 공벽의 붕괴위험이 있는 중, 대심도의 시료채취를 실시할 경우 적절한 공벽유지 방법을 강구한다. 강재 또는 PVC 재질의 케이싱을 공벽유지 목적으로 사용할 때에는 케이싱 설치 중 지반의 교란을 최소화할 수 있도록 관입속도를 조절하고 동적관입방법 보다는 정적 방법을 이용한다.

7.2 준비단계

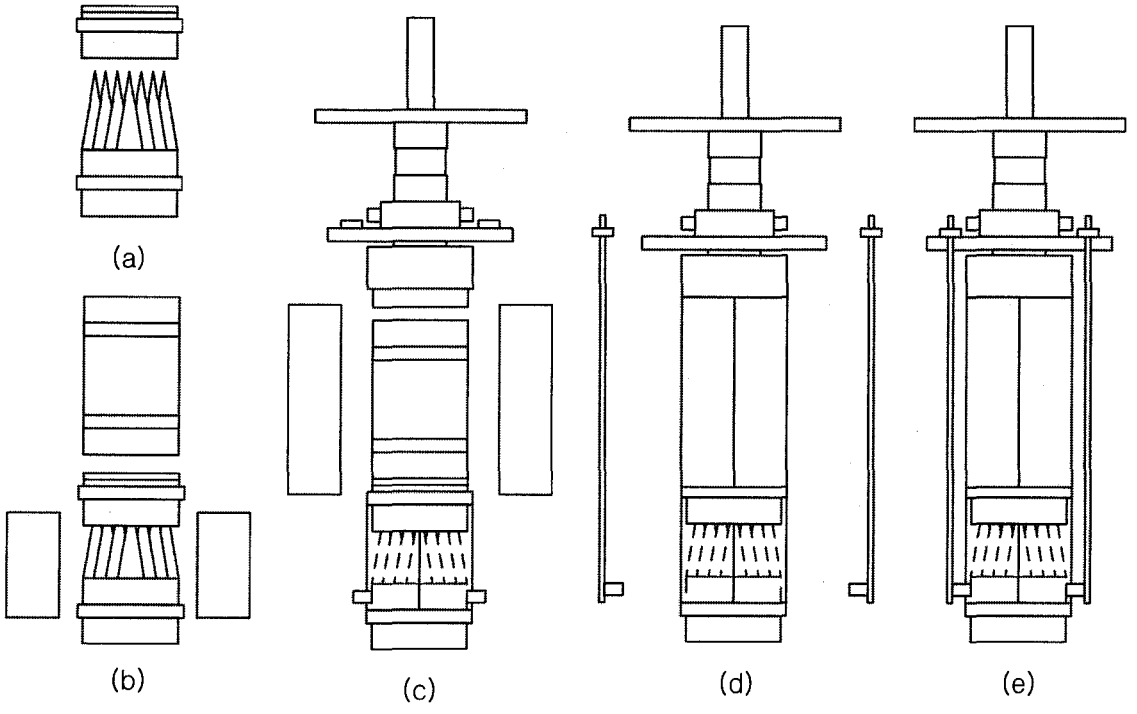


그림 6. 대구경 샘플러 조립 순서도

7.2.1 커터와 가이드튜브를 연결한다. (그림 6(a))

7.2.2 절단로드의 볼트를 연결할 수 있도록 공간을 확보하는데 주의하여 확장튜브를 연결하고 이어서 샘플링 튜브를 가이드튜브 상단에 조립한다. (그림 6(b))

7.2.3 샘플링 헤드를 연결하고 외관튜브를 부착시킨다. (그림 6(c))

7.2.4 4개의 절단로드를 연결하고 볼트를 단단히 조인다. 이때, 절단로드가 샘플러를 따라 수직을 유지할 수 있도록 주의한다. (그림 6(d))

7.2.5 코아링 튜브 안에 조립한 샘플링 튜브를 넣고 샘플링 헤드와 연결한다.

비고1. 지반내의 간극수압을 측정할 필요가 있다면 절단로드 내부에 간극수압계를 설치한다.

7.3 지반 굴착

7.3.1 계략조사된 지질주상도 및 시추 간격 등을 고려하여 계획된 시료 채취지점을

정확하게 표시한다.

7.3.2 대구경 샘플러를 안착시키기 위해 백호 등을 이용하여 1.5m 정도 굴착한다.

7.3.3 직경 43mm의 screw 형식의 오거를 이용하여 채취하고자 하는 지점까지 굴착한다. 중심도, 대심도와 같이 공벽이 자립하지 못할 것으로 예상되는 경우 강 혹은 PVC 재질의 케이싱을 지중에 관입하여 이용한다. 이때 케이싱의 연직성을 확보하고 지반 교란에 주의한다.

7.3.4 오거링 중에 발생한 굴착면 바닥의 슬라임을 제거한다.

7.4 시료 채취

7.4.1 백호를 이용하여 대구경 샘플러를 굴착공 위에 위치한 시추장비의 집게부분으로 이동시키고 단단히 조여 샘플러를 고정시킨다.

7.4.2 대구경 샘플러를 외부로드와 내부로드에 번갈아 접속하고 가만히 구멍 바닥으로 내린다. (그림 7(a))

7.4.3 채취 위치까지 샘플러가 도달하면 샘플러의 코아링 튜브를 회전시키며 95cm 정도를 굴착하여 시료를 채취한다. 이 과정에서 내부 샘플링튜브는 정지된 상태로 채취 지반에 관입되며, 코아링 튜브가 회전하며 샘플시료의 교란을 최소화한다. (그림 7(b))

7.4.4 시료 채취 작업이 끝나면 샘플러의 외부 로드를 고정시키고 내부 로드를 약 13cm 정도 잡아당겨 절단 날로 샘플링 튜브의 하단을 폐합시킨다. (그림 7(c))

7.4.5 샘플링 튜브의 하단을 완전히 폐합시킨 후 샘플러를 천천히 지표면으로 들어올린다. (그림 7(d))

비고 로드의 연직성을 확보함과 동시에 관입시 흔들림을 방지하기 위한 조치를 강구한다. 로드 접속부에 헐거움이 생기지 않도록 단단히 죈다.

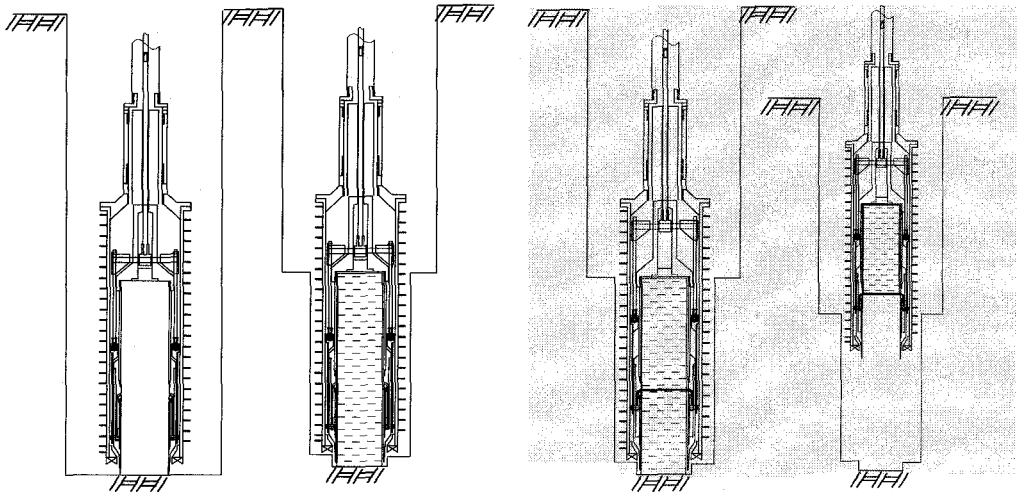


그림 7. 굴착공 내 시료채취 과정 모식도

7.5 샘플러 해체

7.5.1 샘플러 헤드 상단의 볼트를 풀어 코아링 튜브를 샘플러 본체에서 해체한다.
7.5.2 절단 로드 상부에 있는 볼트를 풀어 절단 로드를 젖힌다.
7.5.3 샘플링 외관 튜브의 볼트를 풀어 샘플러 헤드를 분리한다.
7.5.4 샘플링 튜브의 하단 부분을 분리한다.
7.5.5 샘플링 튜브의 상부와 하부를 덮개로 막고 운반상자에 넣는다.

비고 1. 추가적인 변형으로 인한 교란이 없도록 발생되는 흔들림에 주의하고, 기울여서 보관하지 않는다.
2. 박테리아의 성장을 최소화하기 위해 현장온도로 저장한다.
3. 샘플링 튜브와의 화학적 반응을 피한다.

7.6 운 반

7.6.1 샘플링 튜브 : 시료의 유출을 막기위해 밴딩으로 단단히 조인다. 아랫면, 윗면의 판은 특수 플라스틱 재질로 함수비 및 화학적 변형을 막을 수 있게 제작되어있고 볼트와 너트로 샘플링 튜브와 조립된다.
7.6.2 운반상자 : 외부 상자는 나무로 되어있으며 스펀지로 내부마감되어 외부 충격을 최소화 한다.

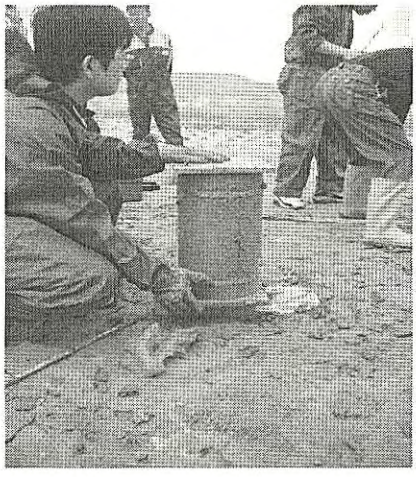


그림 8. 샘플러 튜브 포장



그림 9. 운반상자

8. 기록 및 시료의 이용

8.1 샘플링 관련사항 기록

샘플링 과정과 현장에 관한 내용을 다음과 같이 기재한다.

8.1.1 채취한 시료의 보관용기에 지점번호, 채취심도, 토질명 등의 기재를 한다.

8.1.2 사용한 공벽유지 방법을 기록한다.

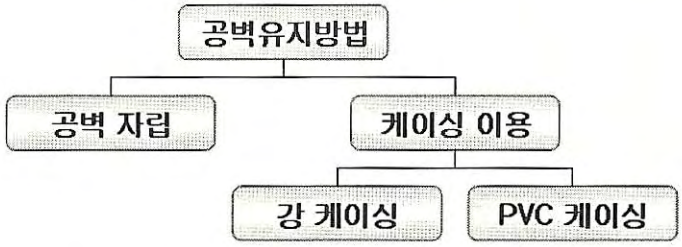


그림 10. 공벽 유지방법의 종류와 표기

8.1.3 타 시료채취시의 특이사항이 있으면 기록해두어 실험결과 분석시 고려한다.

8.1.4 한정된 시료로 다양한 시험결과를 얻기 위하여 표와 같이 시료를 분리하여 사용한다.

8.1.5 저장 시간이 장기화되면 간극수의 이동이 증가하므로 채취된 시료의 물성 및 역학시험은 최대한 빠른 시일 내에 실시한다. 분리한 시료의 보관은 파라핀과 랩 등을 이용하여 함수비의 변화가 생기지 않도록 주의하고 채취에서부터 실험을 실시할 때 까지의 보관기간을 기록한다.

8.1.6 입도분포 시험, 연경도 시험, 비중 시험 등 불교란시료의 기본물성 실험을 수행하여 정확한 토질정보를 기재한다.

8.2 채취시료의 형태 및 실내실험

8.2.1 샘플링 튜브로 채취된 시료의 효율적이고 다양한 실내시험을 위해서 다음의 표 3과 같이 시료를 분리하여 사용한다.

8.2.2 트리밍에 의한 공시체 제작과 측정방법은 다음과 같다.

① 트리머 위에 준비된 시료를 올려놓고 공시체의 측면이 직경 5cm의 원주가 되도록 와이어 톱으로 수직방향으로 깍아내며 성형한다.

② 계획된 직경의 원기둥이 완성되면 공시체를 마이터 박스에 옮겨 와이어 톱, 직나이프 등을 사용하여 높이 10cm로 성형한다.

③ 공시체의 직경을 공시체 중앙 부근 및 양단 부근에서 0.1mm 이하까지 측정하고 평균치를 공시체의 초기 직경으로 한다.

④ 공시체의 높이를 3개소 이상에서 0.1mm이하까지 측정하고 평균치를 공시체의 초기높이로 한다.

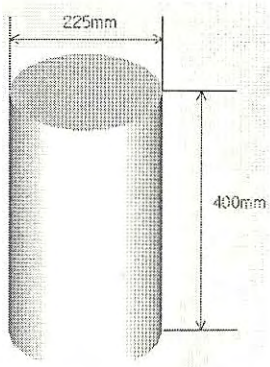
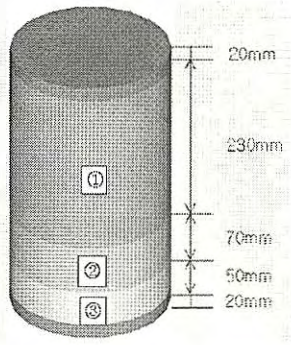
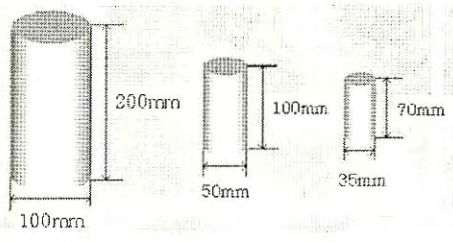
⑤ 마이터 박스와 함께 공시체의 질량을 0.1g 이하까지 측정하고 마이터 박스의 무게를 제외하여 공시체의 초기 질량으로 한다.

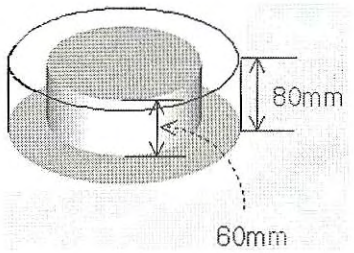
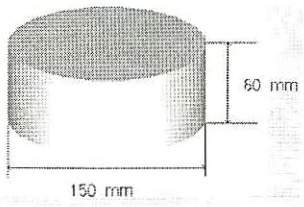
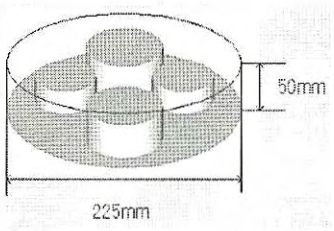
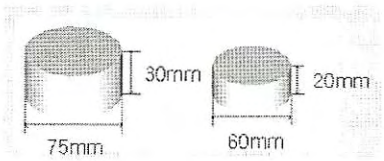
⑥ 공시체 성형에서 깎아낸 흙에서 대표적인 시료를 채취하고 함수비를 측정한다.

비고 일축 및 삼축압축강도 시험을 위한 공시체의 트리밍

1. 공시체로 사용되는 부분은 확실히 교란되었다고 판단되는 부분을 제거하고 사용한다.
2. 공시체의 트리밍 중에 함수비의 변화가 없도록 유의하며, 또 시료의 교란을 가하지 않게 충분히 유의해야 한다.
3. 트리밍에 사용할 시료는 완성된 공시체의 직경, 높이 보다 여유가 있는 크기로 준비한다. 또한 공시체의 성형, 치수측정 등의 작업은 신속하게 수행한다.

표 3. 대구경 시료를 이용한 여러 가지 시료의 제작과정

구 분	시료모형	설명
대구경 샘플러		• 직경 225mm • 길이 400mm • 상단과 하단은 일부 교란 • 표면은 마찰로 인한 교란
시료분리		• 아래, 위 20mm 및 외측 10mm는 교란가능 영역으로 실험에 사용하지 않음 • 위 230mm는 삼축시험 시료로 사용 • 다음 70mm는 대구경 Rowe Cell 실험에 사용 • 그 다음 50mm 는 표준 압밀 시험 및 Rowe Cell 시험에 사용
삼축시험	① 	• 상단 230mm • 삼축 시료로 이용할 부분
		• 대구경 샘플 하나를 이용해서 만들 수 있는 시료 • 100mm×200mm 시료 1개 • 50mm×100mm 시료 2개 • 35mm×70mm 시료 2개

	시료 모양	설 명
대구경 Rowe Cell 압밀시험	② 	• 높이 80mm • 대구경 Rowe 시료를 제작하기 위해 사용하는 부분
		• 성형으로 만들어진 Rowe Cell 시료모형 • 직경 150mm×높이60mm
표준압밀시험 및 Rowe Cell 압밀시험	③ 	• 높이 50mm 원 시료 사용 • 표준압밀시험 및 Rowe Cell 시험용 시료 제작
		• 성형 후 만들어진 시료 • 직경 75mm×30mm(Rowe Cell) 2개 • 직경 60mm×20mm(표준압밀시험) 2개

2. KICT-type LPT 매뉴얼

KICT 대형관입시험 메뉴얼

1. 명칭

본 이하의 장비를 "KICT 대형관입시험"이라 명칭한다.

2. 적용 범위

이 메뉴얼은 대형관입시험 장치를 사용하여 원위치에서의 지반의 단단한 정도와 다져짐 정도 또는 토층의 구성을 판정하기 위한 N값을 구함과 동시에 시료를 채취하는 관입시험 방법에 대하여 규정한다. 특히, SPT에서는 적용이 힘든 조밀한 모래층, 자갈층, 연암층등 에서도 활용이 가능하다.

3. 규격

다음에 나타내는 규격은 이 규격에 인용됨으로써 이 규격의 규정 일부를 구성한다. 이러한 인용 규격은 그 최신판을 적용한다.

4. 개요

SPT에서는 샘플러의 직경, 타격에너지 등의 많은 제약으로 인하여 조밀한 모래층, 자갈층, 연암층 등에서는 샘플러의 관입이 어려우며 신뢰성 있는 N값의 산정에도 많은 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여 해머중량 및 샘플러 등의 사이즈를 조절하여 한국형 대형관입시험 (KICT-type Large Penetration Test) 장비를 개발하였다.

5. 정의

이 규격에서 사용하는 주된 용어의 정의는 다음과 같다.

5.1 N값 : 질량 150kg 의 드라이브 해머를 760mm 자유 낙하시키고 보링로드 머리부에 부착한 노킹 블록을 타격하여 보링로드 앞 끝에 부착한 표준관입시험용 샘플러(표준, 대형)를 지반에 30cm 박아 넣는 데 필요한 타격 횟수를 의미한다.

5.2 자침 : 드라이브 해머의 낙하를 수반하지 않고 보링로드 혹은 드라이브 해머의 자중만으로 표준 관입하는 로드 자침, 드라이브 해머를 노킹블록에 살짝 얹은 상태에서 관입하는 해머 자침이 있다.

5.3 관입불능 : 예비타 및 본박기에서 50회의 타격에 대하여 누계 관입량이 1cm 미만

인 경우를 의미한다.

5.4 예비타 : 본박기 실시전에 지반교란의 영향을 제거하기 위해 미리 15cm를 관입하기위해 실시하는 타격이며 일반적으로 드라이브 해머 낙하 높이를 작게 하여 경타격에 의해 관입 저항을 확인하면서 관입한다.

6. 시험장치 및 기구

6.1 시험 구멍 굴착장치 : 시험구멍 굴착 장치는 원칙적으로 지름 7.8 ~15cm의 시험구멍을 굴착할 수 있는 보링 기계식으로 한다.

6.2 대형관입시험 장치 : 대형관입시험 장치는 지반의 N값을 구함과 동시에 시료를 채취할 수 있는 것으로 그 기구는 다음과 같다.

6.3 대형관입시험용 샘플러 : 대형관입시험용 샘플러는 슈, 2분할할 수 있는 스플릿 배럴 및 커넥터 헤드로 구성되는 강제의 것으로 그림 1에 나타나는 것과 같이 외경 76mm, 내경 63mm의 치수의 것. 특히 슈의 재질은 SCM 4종, 이중관 (튜브)은 S45C로제작 되었고 손상이 잘되지 않는 열처리를 한 구조용 합금 강제의 것으로 바깥면 및 내면은 마찰이 적은 다듬질 면을 가진 것. 또한 대형관입 샘플러는 직경이 63mm로 비교적 커 준교란 정도의 시료채취가 가능 하다.

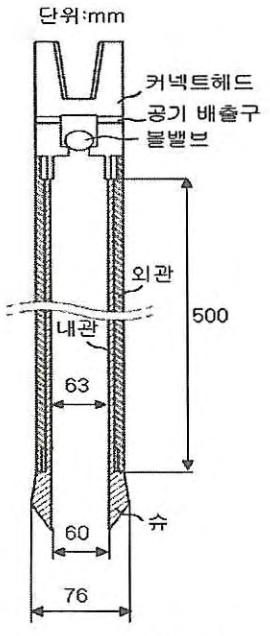


그림 1. 샘플러 규격

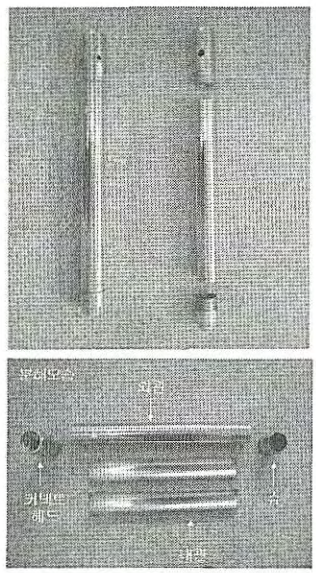


그림 2. 샘플러 그림 및 분해모습

비고 시험 전에는 슈가 손상되어 있지 않다는 것을 미리 점검하여 확인한다.

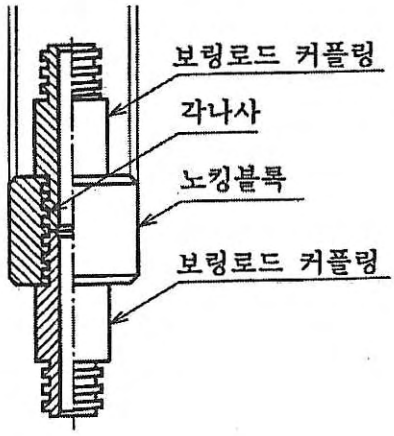


그림 3. 보링롯드와 커플링

6.4 보링롯드 및 보링롯드 커플링 : 보링롯드는 샘플러와 엔빌을 연결하는 중요한 부재로서 엔빌을 통해 전달되는 해머의 타격에너지가 손실되지 않고 샘플러에 전달될 수 있는 것이어야 하며, NX구경에 맞는 73mm 치수의 롯드와 그에 맞는 롯드 커플링을 사용 한다. 샘플러과 같이 강화 열처리로 끝마무리를 한 제품이여서 높은 타격에너지에도 견딜 수 있다.

6.5 엔빌 : 엔빌은 드라이브 해머의 타격을 직접 받는 강제로 된 것으로 표준은 그림 3에 나타내는 것과 같다.

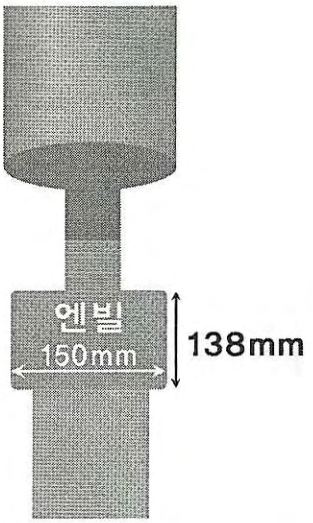


그림 4. 앤빌의 규격

비고 시험전에는 노킹블록 수압면의 평탄성을 미리 점검하여 확인한다.

6.6 드라이브 해머 : 드라이브 해머는 질량이 150kg의 강제로 된 것으로 표준은 그림 4에 나타내는 것과 같다.

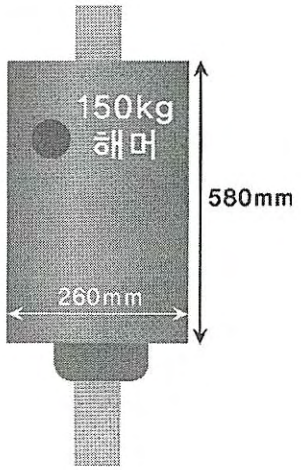


그림 5. 해머의 규격

비고 1. 드라이브 해머 질량에는 손잡이용 기구 질량을 포함한다.
2. 시험 전에는 드라이브 해머 밑면의 평탄성을 미리 점검하여 확인한다.

6.7 낙하 기구 및 장치 : 낙하 기구 및 장치는 드라이브 해머를 매달아서 자유 낙하시킬 수 있는 것으로, 시험의 목적에 따라 자동 낙하방법 및 수동 낙하방법 중에서 선택한다.

참고 1. 자동 낙하방법은 그림 5와 같이 가이드용 보링로드의 76cm의 위치에 돌기 또는 오목부를 만들고 훅이 슬라이드하여 그 돌기 또는 오목부를 통과 할 때에 훅이 열리거나 혹은 닫히는 것으로 훅에서 드라이브 해머가 떨어져서 자동 낙하하는 구조를 가진 장치로, 드라이브 해머를 매다는 방법에는 그림 5(a)와 같이 로프를 드럼에 감아서 매다는 수동형(이른바 반자동형)과 그림 5(b)의 완전히 자동으로 매다는 자동형(이른바 전자동형)의 두 가지 방법이 있다.

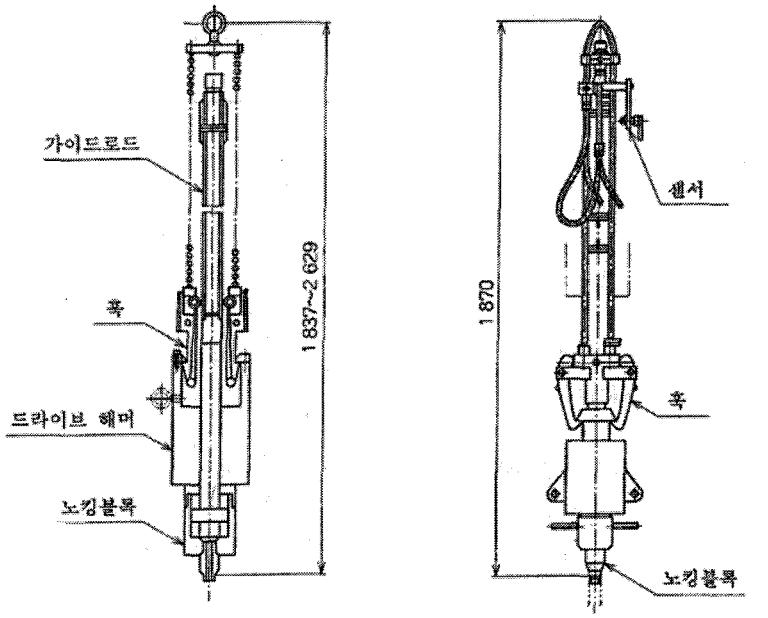


그림 6. 자동낙하장치

2. 수동 낙하방법에는 드라이브 해머의 낙하방법으로 콘풀리법과 통비법이 있다. 수동법은 드라이브 해머를 연결한 로프를 드럼에 감아서 매달고 드라이브 해머의 하부가 가이드용 보링로드의 76cm의 위치에 미리 붙인 표시의 지점까지 올라간 곳에서 신속하게 수동으로 로프를 드럼에서 떼서 드라이브 해머를 자유낙하시키는 방법이다. 한편, 통비법은 통비 모양의 기구로 로프에 드라이브 해머를 걸고 로프를 드럼에 감아서 매달아 드라이브 해머의 하부가 가이드용 보링로드의 76cm의 위치에 미리 표시한 지점까지 올린 곳에서 신속하게 수동으로 통비에 붙인 또 한 쪽의 로프를 당겨서 통비에서 드라이브 해머를 자유낙하시키는 방법이다.

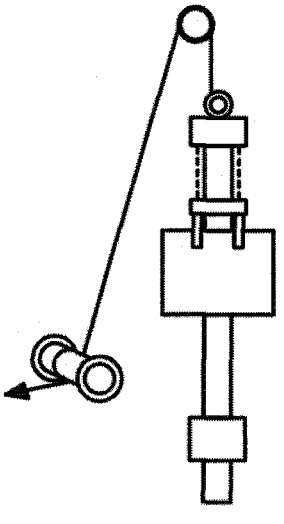


그림 7. 수동낙하장치(콘풀리법)

6.8 기록용구 또는 장치

기록용구 또는 장치는 시험의 목적에 따라 자동기록장치 및 야장 중에서 편리한 것을 선택하여 사용한다.

7. 시험방법

시험방법은 그림 8과 같다.

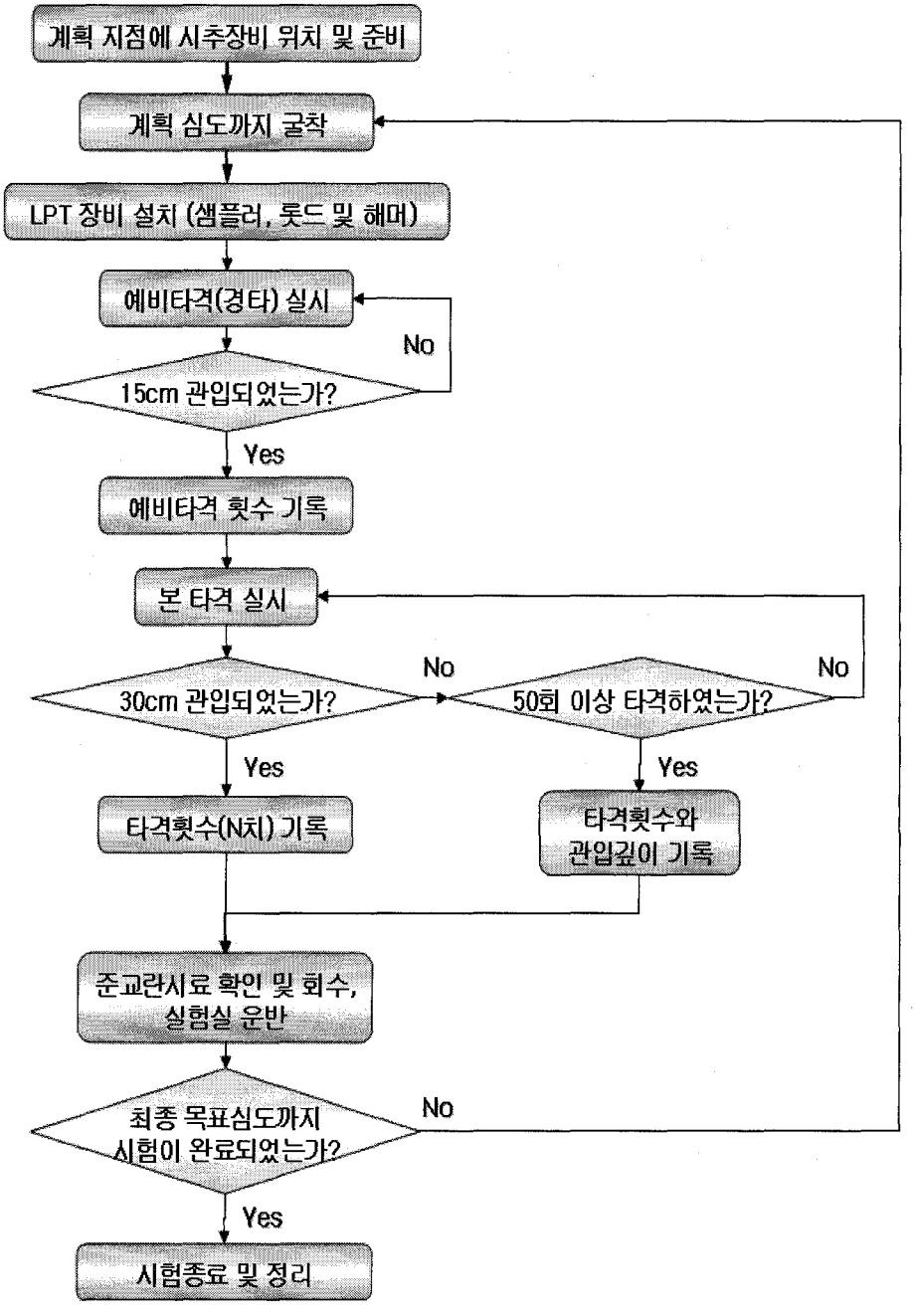


그림 8. LPT 시험순서도

7.1 시험구멍 굴착 : 시험구멍 굴착은 다음과 같이 한다.

7.1.1 대형관입시험을 위한 시험 구멍은 원칙적으로 지름 10~20cm로 한다.
7.1.2 소정의 깊이까지 시험 구멍을 굴착한다.
7.1.3 시험 구멍 바닥의 슬라임을 제거한다.
7.1.4 위의 작업 진행시에 구멍 바닥 이하의 지반을 흐트러뜨리지 않도록 주의하여야 한다. 특히 코어배럴을 끌어올릴 때에는 구멍 바닥에서 보일링을 일으키지 않도록 신중하게 천천히 한다.

7.2 대형관입시험 : 대형관입시험은 다음과 같이 실시 한다.

7.2.1 대형관입시험용 샘플러를 보링로드에 접속하고 가만히 구멍 바닥으로 내린다.
7.2.2 보링로드 상부에 노킹블록 및 가이드용 보링로드를 붙인다.
7.2.3 가이드용 보링로드 등의 연직성을 확보함과 동시에 타격시의 흔들림을 방지하기 위한 조치를 강구한다. 보링로드 접속부의 헐거움이 생기지 않도록 단단히 죈다. 만약 헐거워지면 신속하게 조인다.
7.2.4 드라이브 해머를 살짝 노킹블록에 세트한다.

비고 드라이브 해머의 밑면과 노킹블록의 윗면이 수평에 접하도록 세트한다.

7.2.5 드라이브 해머의 타격에 의해 원칙적으로 15cm의 예비박기, 30cm의 본박기를 한다. 이 때, 본박기 개시 깊이 및 본박기 종료 깊이를 측정한다.
7.2.6 예비타는 드라이브 해머 낙하 높이를 작게 하여 경타격에 의해 관입 저항을 확인하면서 관입한다. 다만, N값 50회 이상으로 상정되는 지반에서는 드라이브 해머 낙하높이를 76cm로 하여 드라이브 해머를 자유 낙하시키고 본박기를 대신할 수 있다.

비고 예비타 단계에서 자침한 경우는 해머 자침으로 하고 자침 깊이를 측정한다. 해머 자침으로 45cm에 도달한 경우는 본박기를 하지 않는다.

참고 자동 기록 장치를 사용하는 경우 등에서는 예비타 단계에서도 드라이브 해머 낙하 높이를 76cm로 하여 드라이브 해머를 자유 낙하시키고 기록 할 수 있다. 이 때, 드라이브 해머는 정지를 확인하고 나서 다음 타격으로 옮긴다. 다만 자침 혹은 N값이 매우 적다고 상정되는 지반은 제외한다.

7.2.7 본박기의 드라이브 해머 낙하높이는 76cm로 하고 드라이브 해머는 자유 낙하시킨다. 또한 드라이브 해머가 완전히 정지한 것을 확인하고 나서 다음 타격을 실시한다.
7.2.8 본박기에서는 타격 1회마다 누계 관입량을 측정한다. 다만, N값의 이용 목적에 따라 관입량 10cm마다의 타격 횟수를 측정하여도 좋다.

7.2.9 본박기의 타격 횟수는 특별히 필요가 없는 한 50회를 한도로 하고 그 때의 누계 관입량을 측정한다. 다만, 예비타 단계에서 50회에 도달한 경우는 그 때의 누계 관입량을 측정하여 N값으로 한다. 또한 예비박기 단계에서 관입 불능인 경우는 그 결과를 채용한다.

7.2.10 측정을 종료한 후 지표에 대형관입시험용 샘플러를 올리고 슈 및 커넥터 헤드를 떼고 스플릿 배럴을 두 개로 나누어 채취 시료를 관찰한다.

7.2.11 대표적인 시료를 그림 9와 같은 투명한 용기에 보관하여, 실내실험으로 이용한다.

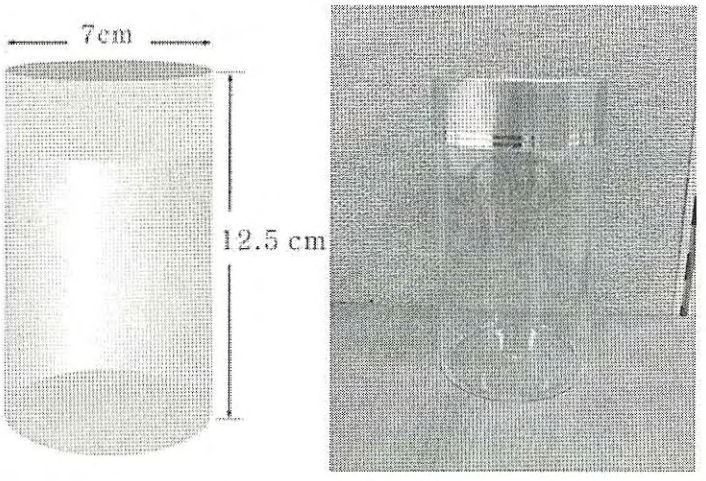


그림 9. 시료보관용기

비고 채취시료가 여러 지반층에 걸쳐서 실시되는 경우는 시료의 상하 관계를 유지한 채 시료 사이에 칸막이 판을 끼워서 시료를 보존한다.

8. 기록 및 정리

시험 결과의 기록 및 정리는 다음과 같이 한다.

8.1 시험 방법의 기록 : 낙하 방법의 호칭명, 즉 자동낙하법인지 수동낙하법인지를 기록한다. 수동낙하법에는 콘풀리법과 통비법이 있으므로 구체적 방법명도 기록한다. 그리고 자동 낙하법의 드라이브 해머의 매달아 올리는 방법에는 로프를 드럼에 감아서 올리는 반자동형과 완전히 자동적으로 매달아 올리는 전자동형이 있으므로 어느 쪽인지를 기록 한다 또한 기록방법의 호칭명, 즉 자동 기록장치인지 야장인지를 기록한다.

8.2 N값의 기록 : 타격 1회마다의 관입량을 측정한 경우는 필요에 따라 타격 횟수 -누계관입량도를 작성한다 N값은 본박기 30cm에 대한 타격 횟수에 가까운 정수값으로 한다.

참고 낙하방법의 표기를 그림 10에 나타내었다

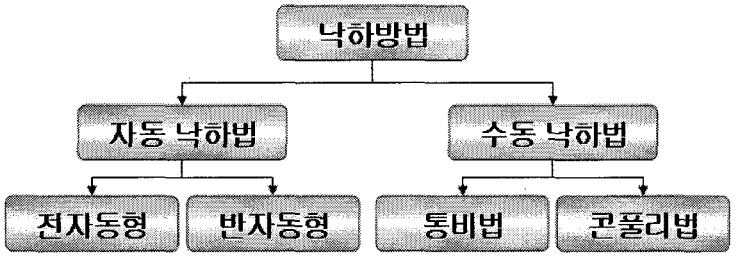


그림 10. 낙하 방법의 표기

8.3 N값의 기록 : N값의 기록은 다음과 같이 한다.

8.3.1 예비타 및 본박기의 시작 깊이와 종료 깊이를 기록 또는 출력한다.
8.3.2 타격 1회마다의 관입량을 측정한 경우는 필요에 따라 타격 횟수와 누계 관입량의 관계를 도시 또는 출력한다.
8.3.3 본박기 30cm에 대한 타격 횟수를 N값으로 기록한다.

비고 1. 자침의 경우, 로드 자침, 해머 자침의 구별을 기록한다.
2. 예비타 및 본박기에서 누계 관입량이 각각 15cm, 30cm 미만으로 타격 횟수가 50회에 도달한 경우, N값은 50 이상으로 하고 분자에 50, 분모에 누계 관입량의 분수형(타격 횟수/cm)으로 기록한다.
3. 예비타 및 본박기에서의 50회 타격에 대하여 누계 관입량이 1cm 미만인 경우는 관입불능이라고 기록한다.

8.4 채취시료의 관찰 결과를 기록 :

8.4.1 본박기 50회 한도에서의 누계관입량을 측정하여 기록한다. 예비박기 단계에서 50회에 도달한 경우나 관입불능인 경우에는 그 관찰 결과를 기록한다.
8.4.2 채취시료를 보존한 용기에 지점번호, 시험깊이, N값, 토질명 등의 기재를 한다.

9. 보 고

시험 결과에 대해서는 다음 사항을 참고하여 설계데이터에 반영한다.

9.1 시험결과 보고사항

① 지점 번호
② 지반 높이
③ 시험일
④ 시험자
⑤ 드라이브 해머 낙하 방법
⑥ 기록 방법
⑦ 예비타 및 본박기의 개시 깊이와 종료 깊이
⑧ 타격 1회 마다의 관입량을 측정한 경우는 필요에 따라 타격 횟수와 누계 관입량의 관계를 나타내는 그림(주상도)
⑨ N값
⑩ 채취 시료의 관찰결과
⑪ 기타 보고 사항

보 고 보고사항으로 드라이브 해머의 낙하 방법과 그 구체적인 방법 및 기록 방법의 호칭명을 새로 추가한다. 또한 종래의 규정에서는 "타격 횟수와 누계관입량의 관계를 나타내는 그림"을 보고 사항에 넣고 있었지만 "타격 1회마다의 관입량을 측정한 경우에는 필요에 따라 타격횟수와 누계 관입량의 관계를 나타내는 그림"을 보고하도록 한다. 또한 N값의 보고에서 자침 및 관입불능인 경우에는 그것을 기록해야한다.

제 6 절 연구결과 및 향후과제

1. 연구결과

본 연구에서는 건설공사의 경제성과 안정성 향상을 위한 첨단지반조사 장비개발 및 개발 장비의 실용화를 목적으로 연구가 수행되었다.

우선, 기존 샘플러의 문제점을 개선하여 새로운 한국형 대구경 샘플러(KICT형)를 개발하였고, 해상을 포함한 국내 여러 현장에 적용하여 그 성능을 검토하였다. 또한, KICT형 대구경 샘플러와 국내에서 주로 사용하고 있는 수압식 피스톤 샘플러로 (75mm shelby tube) 채취된 각각의 시료를 대상으로 압밀시험, 일축압축시험, 삼축압축시험, 공진주/비틂전단시험 등 다양한 역학시험을 수행하여, 시료의 품질 및 교란 정도를 상호 비교/분석하였다.

다음으로, 기존의 표준관입시험(SPT)이 적용될 수 있는 지반뿐만 아니라 SPT가 적용될 수 없는 전석층, 조밀한 모래, 자갈층, 연암 등에서도 활용할 수 있는 한국형 대형관입시험장비(KICT-type LPT)를 개발하였으며, 현장 성능평가를 실시하여 장비의 적용가능성을 검토하였다. 그리고, KICT형 LPT장비의 에너지 효율 및 거동을 검토하기 위하여 대형 Calibration Chamber System을 이용하여 실내시험을 수행하였으며, 말뚝 항타시험에서 사용되고 있는 PDA와 삼성건설이 자체적으로 개발한 SPI를 활용하여 개발장비의 거동을 실내외에서 측정/검토하였다. 또한, 다양한 실내실험을 수행하여 LPT N값으로부터 지반정수(내부마찰각)를 도출할 수 있도록 관계식을 제안하였다.

본 연구를 통해 도출된 주요한 결과는 다음과 같다.

① 기존 KICT형 대구경 샘플러의 일부를 MC Nylon으로 재구성함으로써 샘플러의 전체 중량을 90kg에서 65kg으로 28%감소(저심도용은 39% 감소) 시켜 장비의 사용성 및 작업효율을 증대시켰다. 또한 강재로 구성된 샘플러 내부 부품을 스텐레스 합금으로 교체하고 샘플러의 선단부 측면에 간극수압계를 장착하여 장비의 기능성을 향상시켰다. 개발된 KICT형 대구경 샘플러를 이용하여 해상을 포함한 다양한 지반조건에서 현장적용성 평가를 실시한 결과, 점성토, 풍화

토, 실트(사질토), 매립층 지반에서 직경 200 mm의 불교란 시료 채취가 가능함을 확인하였으며, 샘플러의 경량화로 인해 작업 효율성도 약 2배 증대되었다.

② 압밀시험결과 기존의 수압식 샘플러 시료보다 대구경 샘플러 시료가 초기간극비, 선행압밀하중, 압축지수가 모두 크고, 압밀계수역시 선행압밀하중 근처를 제외한 영역에서 대구경 샘플러 시료가 뚜렷이 크게 나타나 교란이 더 작은 것으로 나타났다.

③ 일축압축시험결과 기존의 수압식 샘플러보다 대구경 샘플러로 채취한 시료가 일축압축강도와 할선탄성계수가 모두 크게 나타났으며, 최대 강도가 발현되는 변형률도 더 작게 나타나 교란이 더 작은 것으로 나타났다. 특히, 일축강도는 기존의 수압식 샘플러 보다 대구경 샘플러 시료가 약 12~50%까지 크게 평가 되었다.

④ 삼축압축시험결과에서도 대구경 시료의 마찰각이 크게 나타나 교란이 작은 특징을 보였다. 즉, 기존의 수압식 샘플러 보다 마찰각이 38~43% 정도 크게 평가되었다.

⑤ 공진주 시험결과, 대구경 시료의 전단탄성계수는 기존의 수압식 샘플러 시료에서 획득한 전단탄성계수보다 크게 나타났다. 또한 비틂전단 시험에서도 전단탄성계수 및 감쇠비의 절대값은 대구경 시료쪽이 크게 나타났다. 이는 채취된 시료의 교란에 따른 영향으로 판단된다.

⑥ 교란이 작은 동일한 대구경 시료라고 하더라도 실험에서 사용하는 시료의 크기가 클수록 교란이 작은 시료의 특징을 보인다. 즉, 일반 삼축시험에 비하여 대형 삼축시험 결과는 동일한 연직변형률에 대한 축차응력도 크게 나타났고, 축차응력-변형률 관계에서 그래프의 초기기울기도 크게 나타나면서 응력연화 거동을 보이고 있다. 응력경로 역시 대형 삼축시험결과가 실트질 점성토를 대상으로 한 기존의 연구와 유사한 경향을 보이면서 교란이 작은 시료의 특성을 보여주었다.

⑦ 이상의 결론을 종합해 보면 KICT형 대구경 샘플러로 채취한 시료의 질이 수압식 피스톤 샘플러로 채취한 시료의 질보다 매우 우수함을 알 수가 있었다.

⑧ 정확한 지반조사를 위하여, 모래지반 이외에도 적용이 가능한 한국형 대형관입시험(KICT-type LPT) 장비를 개발하였다. 새롭게 개발된 KICT-type LPT 장비는 에너지비를 1.5로 일정하게 가정하여 해머중량을 150kg, 낙하 높이를 76cm로 설계하여 제작하였으며, 낙하시스템은 KS F2307 및 JI A1259S에서 제시하고 있는 반자동 낙하시스템을 도입하였다.

⑨ KICT-type LPT(이하 LPT) 장비의 현장 성능 평가를 실시하였으며, 계측결과를 기존 SPT 결과와 비교/분석하였다. LPT-N값은 타격에너지 증가로 인하여 기존의 SPT-N값보다 감소하여 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, LPT-N값과 SPT-N값의 상관관계를 분석 한 결과, 단위면적당 타격에너지는 1.5배로 일정함에도 불구하고 모래층에서는 약 3배, 자갈층에서는 1.5-2배의 차이를 나타내고 있었다.

⑩ LPT장비의 에너지 효율 및 거동을 검토하기 위하여 대형 Calibration Chamber를 이용하여 실내실험을 수행하였으며, 그 결과

- 롯드에 전달되는 에너지는 시료의 상대밀도, 해머 낙하고, 구속압 등의 영향이 적으며 에너지 전달율은 해머-앤빌-롯드-샘플러 시스템의 함수였다.
- LPT 시스템은 에너지-관입량 관계를 이용해 쉽게 SPT와 같은 에너지 수준으로 변환할 수 있으며, 이를 통해 SPT N값과의 상관관계를 도출할 수 있었다.
- SPT 시스템으로 환산된 N값은 시료의 dilation에 의해 무시할 수 없는 영향을 받는다. 즉 SPT N값은 지반의 종류와 상대밀도에 의해 영향을 받는다.

이상의 결과와 같이 LPT는 SPT N값과 상관관계를 갖을 수 있는 시스템으로 설계되었다. 따라서 LPT로 측정된 데이터는 SPT 시스템으로 변환해서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

⑪ 라인스캔 카메라를 이용(SPI)하여 LPT장비의 현장거동을 분석한 결과, LPT 장비는 해머의 타격에너지 크기가 균등하였으며, 2차 타격에 의한 관입량은 무시 가능하여 매 타격 시 일정한 관입량을 나타내고 있음을 확인하였다..

⑫ 새롭게 개발한 첨단지반조사 장비를 건설업계에 널리 보급하고자 개발장비에 대한 사용 매뉴얼을 제시하였다.

2. 향후과제

본 연구에서는 한국형 대구경 샘플러 및 대형관입시험장비를 새롭게 개발하여 성능평가 및 기초연구를 완료 하였다. 향후 보다 많은 현장적용성 평가를 실시하여 데이터를 확보 (데이터 베이스 구축) 할 필요가 있으며, 기존 장비와의 연계성 (실내실험 포함), 실용화 검증 등 추가적인 연구가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야의 기여도

1. 연구개발목표 달성도

연구 목표	달성도 (%)	내 용
난조건 지반 불교란 시료채취용 대구경 지반조사 장비 개발	100	- 한국형 대구경 샘플러 개발 - 경량화, 작업의 효율성 증대
개발된 대구경 샘플러의 현장 적용성 평가	100	- 점성도, 실트 적용 - 풍화토지반, 매립지반 적용 - 해상 작업 효율성 검증
개발된 첨단 지반조사 장비와 기존 장비에 의한 불교란 시료의 실내실험 및 평가	100	- 기존 piston sampler와 대구경 샘플러로 채취한 시료의 실내 비교 평가실험 실시 - 개발장비의 우수성 확인
한국형 대형 관입시험 장비 (Large Penetration Test, LPT) 장비 개발	100	- 한국형 대형관입시험 장비 개발(kict-type LPT)
LPT 장비의 성능 및 현장 적용성 평가	100	- LPT의 에너지 효율 측정 - LPT와 SPT의 상관성 도출 - 지반 종류별 LPT와 SPT의 비교실험 및 평가(풍화토 지반, 자갈혼합지반, 전석층, 매립지반)
개발 장비의 매뉴얼 작성	100	- 한국형 대구경 샘플러 매뉴얼 제시 - 한국형 대형관입시험장비 매뉴얼 제시

2. 연구성과 및 기여도

가. 연구성과

연구목표	성과지표	실적치	성과물 명칭
논 문	논문 일반 (국내)	2	
	학술회의 발표논문 (국내)	8	
	학술회의 발표논문 (국외)	4	
특 허	특허출원 (국내)	1	
연구성과 확산노력	기술료 징수	2	대구경샘플러
	홍보	2	

나. 기여도

(1) 기술적 측면

- ㅇ 각종 토목구조물, 건축구조물의 안정적 설계·시공 가능
- ㅇ 그동안 평가 및 해석이 곤란했던 풍화토, 자갈혼합토의 해석가능
- ㅇ 사질지반의 불교란 시료채취 가능 및 이에 대한 정확한 실내실험 분석가능
- ㅇ 전석층, 조밀한 모래, 자갈층, 연암 등의 난조건 지반에서도 N값 활용이 가능
- ㅇ 각종 토목/건축 구조물의 합리적, 설계 시공

(2) 사회·경제적 측면

- ㅇ 개발된 지반조사 장비의 업계 지원 : 실용화, 기술료 수입
- ㅇ 지반조사 표준화에 기여
- ㅇ 정확한 지반평가로 각종 구조물기초, 연약지반, 사면공사의 경제성 제고
- ㅇ 지반조사장비의 국산화에 기여
- ㅇ 중소 지반조사업체의 경기활성화에 기여

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 활용계획

(1) Turn Key 등 각종 국가 주요 건설공사 지반조사시 활용

○ 사질토 지반, 풍화토 지반 평가기술 재정립

(2) 지반조사 장비의 표준화 및 지반조사의 정확성 제고

○ 경제적이고 안정적인 토목/건축 구조물 설계, 시공

(3) 첨단지반조사 장비의 개발 및 다량생산으로 제조업의 경기 활성화

(4) 본 장비의 활용을 통한 지하자원, 지하수개발 등으로 자원개발산업의 활성화

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 일본 독립행정법인 항만공항기술연구소

일본의 항만공항기술연구소는 1946년 철도기술연구소 제 7부 항만연구실로서 창설되어 2001년 공공기관의 민영화 사업과 함께 독립행정법인이 되었다.

1. 국제화와 일본의 지반조사기술

지반조사법과 토질시험법에는 다양한 방법이 있고, 같은 지반을 대상으로 해도, 조사법과 시험법에 의해 다른 결과가 얻어진다. 이것은 잘 알려져 있듯이 지반을 형성하는 토질재료의 역학특성에 응력의존성(압밀압력에 의해 강도가 달라짐), 이방성(압축과 인장에서의 강도는 다름), 변형률 시간의존성(전단속도가 빠른 경우 큰 강도를 나타냄)등이 나타나기 때문이다. 더욱이, 시료채취 시 교란의 정도는 샘플링 방법에 의해 달라지기 때문에 샘플링 방법의 차이가 시험결과에 무시할 수 없을 정도의 영향을 미치는 걸로 알려져 있다.

시험결과를 올바르게 평가 가능한 환경을 마련하기 위해서는 샘플링방법과 시험방법 등의 평가를 규정하고 있는 규격(국제표준ISO, 일본공업규격JIS 등)과 기준(지반공학회기준 등)의 정비가 중요하다. 이러한 배경에서 일본은 우수한 규격, 기준 등이 연구되어져 왔다. 지반공학회 기준에서는, 기술동향과 국제규격제정을 위한 동향 등을 파악하여 약10년마다 기준 등을 보완하는 작업을 하고 있다.

최근에는 ISO(국제표준화기구)에 의한 규격 등의 국제통일 움직임도 조금씩 진행되고 있다. 그러나 토질재료의 역학특성에는 지역마다의 특성이 강하게 나타나는 사실을 무시할 수 없을 것이다. 일본 국내에서 경험을 바탕으로 정비되어진 기준 등은 세계의 어느 정도의 위치에 있는지?(ISO와의 관계) 세계에 어디까지 적용이 가능한지? (외국 흙에의 적용성)를 검토하는 것도 매우 중요한 일이다. 설계기준에는 신뢰성 설계와 성능 설계가 도입이 되어, 토질정수에 대한 신뢰성에 대해서도 명확하게 밝혀야 한다.

일본 독립행정법인 항만공항기술연구소에서는 이러한 관점에서 일본의 지반조사기

술(특히 샘플링)을 일본 뿐만 아니라 해외에서도 적용하여 미국과 유럽 주도형으로 발전해 온 조사기술과 비교를 하면서 일본의 조사기술의 국제적 위치, 또한 흙의 지역성에 대한 연구를 진행해 오고 있다. 초창기 연구에서는 유럽과 북아메리카에서 조사를 실시하여 일본 토질조사기술도 미국과 유럽에 뒤지지 않고 매우 우수한 사실을 증명하여 ISO의 전신인 CEN에 있어서 일본의 샘플링방법이 인정받았다.

최근에는 일본국내는 물론, 태국, 베트남, 이탈리아 피사시 등을 대상으로 지반조사를 실시하고 있다. 특히, 광범위하게 퇴적되어 있는 연약점토지반은 동남아시아, 일본 특유의 것으로 단단한 점토를 대상으로 하는 미국과 유럽의 기술이 어디까지 적용이 가능한지, 연약한 점토를 대상으로 한 일본의 기술은 동남아시아에서 적용이 가능한가 등, 향후 발전 가능성이 높은 태국과 베트남에서의 조사는 매우 가치가 있는 조사였다고 한다. 또한, 이탈리아 피사시는 유명한 피사의 탑의 복원공사와 관련하여 세계의 주목을 받고 있는 곳으로 일본의 기술을 중심으로 한 조사결과가 기존의 조사결과와 어느 정도 차이가 있는지 비교 할 수 있는 계기가 될 것으로 판단된다.

2. 조사내용

기본적으로는 일본식 샘플링, 현지의 방법에 의한 샘플링, 전기식 정적 콘관입시험(CPTU), DMT, HFT, SCPT의 6종류를 실시했다.

일본의 고정피스톤식 씬웰샘플러를 현지에 가지고 가서, 가능한 한 일본의 샘플러에 가까운 작업이 가능하도록 하였다.

외국에서는 쉐르비 츄브 샘플러에 의한 흙시료의 채취가 일반적으로 이용되고 있는 반면, 일본에서는 고정피스톤식 씬웰샘플러가 통상 사용되고 있다. 일본은 외국에서 개발되어진 각종 샘플러를 적용하여 각각의 샘플러에 의해 채취된 시료의 품질을 비교하였다. 그 결과, 일본의 고정피스톤식 씬월 샘플러에 의해 채취된 시료의 품질은, 고품질시료가 채취가능하다고 세계적으로 인정을 받은 라발샘플러(La Rochelle et al. 1981)랑 쉐르브룩샘플러(Lefebvre & Poulin, 1979)에 의한 결과와 거의 동일한 것을 알 수 있었다. (Tanaka &Tanaka, 1999)

제 2 절 스페인 토목연구소 (CEDEX)

1957년 창설된 스페인 토목연구소(Centro de Estudios y Experimentacion de Obras publicas)에서는 도로, 항만, 해안 등의 공사 수행시 자가굴착식 Pressuremeters와 일본 Oyo사의 Suspension Probe, Dilatometer를 비롯한 Cross hole test, Down hole test, Piezometer를 특히 많이 이용하고 있다.

흙의 sampling은 piston sampler를 사용하고 있으며, 최근 Texas Austine대학의 스토키 교수가 방문한 이래 SASW를 이용한 표면파탐사도 활발하게 실시하고 있다. 또한 Resonant Column Test, Ultrasonic Test, 진동삼축압축시험기를 비롯한 각종 삼축압축시험기, 일축압축시험기, 전단시험기를 이용하여 시료를 평가하고 있으며 이들 장치는 모두가 컴퓨터에 연결되어 있어 거동특성을 자동적으로 기록할 수 있게 되어 있다.

제 3 절 포루투갈 토목연구소(LNEC)

1947년에 창립한 포루투갈의 토목연구소 (Laboratorio Nacional De Engenharia Civil)지반연구실에서는 영국의 캠브리지대학에서 개발한 Self Boring Pressuremeter를 비롯한 Cell Pressure Controller, 그리고 일반적인 피스톤 샘플러를 이용하고 있다. 그리고 core boring시 diamond core bit를 이용하여 풍화암을 비롯한 각종 지반에서 보링작업을 수행하고 있다.

제 4 절 노르웨이 지반연구소(NGI)

노르웨이 지반연구소(Norwegian Geotechnical Institute)는 지반공학 관련 세계적인 연구소로서 중요한 구조물 설계시 흙 시료를 채취하고자 할 때는 Sherbrooke 샘플러를 이용하고 있으며, 기타 일반 시료는 직경 54mm NGI형 피스톤 샘플러 및 직경 95mm NGI형 샘플러를 이용하고 있다.

NGI에는 이외에도 Dilatometer를 비롯한 현장 지반조사장비를 다수 보유하고 있고, 채취한 흙시료의 평가시 Oedometer, 각종 삼축압축시험기, 진동하중을 가할 수

있는 직접전단시험기 등을 사용하여 흙의 강도정수 등을 평가하고 있다. 이 시험기들은 직접 컴퓨터에 연결되어 있어 손쉽게 측정결과를 얻고 있다.

또한 채취한 시료의 보관시 습기를 유지하기 위하여 시료보관실에 수분 분사장치를 설치하고 있으며, 시료 운반시 교란을 방지하기 위하여 다양한 종류의 파라핀들을 개발하였다.

한편, NGI의 Tom Lunne 박사와 S. Strandvik 박사는 노르웨이의 다양한 점토지반에서 Sherbrooke 샘플러와 NGI의 직경 54mm 피스톤 샘플러, NGI 직경 95mm 샘플러, 일본의 75mm 피스톤 샘플러를 사용하여 샘플링한 시료를 가지고 삼축압축시험과 Oedometer 시험을 실시하였다. 그 결과 Sherbrooke 대구경샘플러에 의한 결과가 가장 좋게 나타난 바 있다.

제 5 절 노르웨이 도로 연구 및 실험소(NRRL)

노르웨이 도로 연구 및 실험소(Norwegian Road Research Laboratory)는 노르웨이 지방자치단체와 공동으로 도로의 계획, 설계, 건설 및 유지관리를 담당하는 기관이다. 당초 명칭은 NRRL이었으나 최근 그 명칭이 Road Technology Department로 바뀌었다.

조직은 도로 포장부, 지반공학부, 콘크리트부, 지질 및 터널부 , 연구성과부, 국제부 등으로 구성되어 있다.

이곳에서는 NGI 54mm 피스톤샘플러에 투명플라스틱 튜브를 넣어 사용하고 있는 점이 이채로웠다.

그리고 채취한 시료가 운반도중 교란되는 것을 방지하기 위하여 시료운반상자 내부에 매우 두꺼운 스폰지를 넣어 사용하고 있는 것이 특색이었다.

시료의 평가방법으로서는 삼축압축시험기와 Oedometer 시험기를 사용하고 있었다.

참 고 문 헌

1. 김동수, 박재영, 이원택, (1997), "공내재하시험기를 이용한 미소변형 전단탄성계수 측정", 한국지반공학회지, Vol.13, No.4, pp109~110.
2. 김동수, 정순용, 권기철, 박재영, (1997), "실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형특성 평가", 한국지반공학회지, Vol. 13, No. 5, pp. 89~100.
3. 김동수, 방은석, 서원석, (2003), "표준관입시험을 이용한 업홀시험에서 전단파 속도 주상도의 도출", 한국지반공학회논문집, 제 19권 2호, pp. 135~146
4. 김범상, 김기영, 조성민, (2002a), "표준관입시험을 통한 파동방정식 지반정수 산정법", 한국지반공학회논문집, 제18권 4호, pp. 45~53
5. 김범상, 김기영, 조성민, (2002b), ",표준관입시험을 통한 파동방정식 지반정수 산정법", 한국지반공학회논문집, 제18권 4호, pp. 45~53
6. 김영상, 이승래, (1998), "콘 선단부 뒤에서 관측된 간극수압 소산곡선을 이용한 수평 압밀계수 결정", 한국지반공학회지, Vol.14, No.4, pp.141~149.
7. 김영진, 김현민, (2003), "피스톤 샘플러와 대구경 샘플러로 채취한 시료의 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제23권, 제2C호, pp. 71-77.
8. 김종수, 이규환, 이장덕, 이송, (1997), "공내재하시험을 이용한 화강풍화토의 전단계수 산정", 한국지반공학회지, Vol.13, No.6, pp.95~105.
9. 김주범, (1988), "연약지반의 조사방법", 한국건설기술연구원, 건설기술정보, No.55, pp.1~5.
10. 김주범, 차준형, (1968), "현장 기초지반 지지력 조사 및 실내실험", 한국농공학회지, Vol. 10, No.2, p.1485~1498.
11. 김주범, (1974), "하성퇴적층 지반조사 결과", 한국농공학회지, Vol.16, No.4, pp.3611~3616.
12. 나영목, (2004), "모래지반에서 콘 저항값의 정규화에 관한 연구", 한국지반공학회논문집 제20권 9호, pp. 33~45
13. 시공분과연구부, (1998), "지반조사(탄성조사)실무", 한국건설기술연구원, 건설기술지, Vol.15, No.1, p.19~27.
14. 송정락 역, (1995), 지반진동학, 엔지니어즈.

15. 유기송, (1989), "토질조사 보고서 작성 방법", 농공기술, Vol.6, No.2, p.118~129.
16. 윤건신, (1994), "지하공간 개발을 위한 지반조사의 현황과 문제점", 한국건설기술연구원, 건설기술정보, No.131, p.1~5.
17. 이병식, 김영수, (2002), "표준관입시험의 동적신호를 이용한 지반 물성치 추정의 해석적 연구", 한국지반공학회논문집, 제 18권 4호, pp. 167~177
18. 이상덕, (1996), 전문가를 위한 기초공학, 엔지니어즈, pp.43~109.
19. 이선재, (1997), 피에조콘을 이용한 국내 지반 공학적 특성연구, 박사학위 논문, 서울대학교
20. 이선재, 정충기, 김명모, (1998), "피에조 콘을 이용한 국내 지반 흙의 분류, 한국지반공학회지", Vol.14, No.4, pp. 163~175.
21. 이승래, 김영상, (1998), "피에조 콘 소산시험을 이용한 현장 간극수압 소산도 거동 예측", 대한토목공학논문집, Vol.18, No.Ⅲ-3, pp.353~359.
22. 이승래, 김윤태, 김준석, (1992), "Flat Diatometer 현장시험을 통한 점토지반의 공학적 성질 추정", 한국지반공학회지, p.24.
23. 이용길, 이영남, (1998), "채취된 시료의 교란도에 따른 토질 특성변화에 관한 연구", 한국지반공학회, '98 봄 학술발표회논문집, pp.67~74.
24. 이인모, 이명재, (1987), "Cone 관입시험을 이용한 해양 토질의 전단강도산정에 대한 신뢰성 연구", 대한토질공학회, Vol.13, No.2 pp.17~27.
25. 이주진, 이원제, 안신환, (1998), "PDA를 이용한 표준관입시험의 에너지전달효율 측정", 한국지반공학회, '98 봄 학술발표회논문집, pp.75~84.
26. 이창호, 이우진 (2005), "표준관입 시험 해머의 에너지비와 동적효율", 한국지반공학회논문집 제 21권 9호, pp. 5~12
27. 정구영, (1987), "나선탐사 시험에 의한 지반조사기법", 대한토질공학회, Vol.3. No.1, pp.31~39.
28. 조성민, 김홍종, (1998), "효율적 지반조사를 위한 차량 탑재형 시스템 구축", 한국지반공학회, '98 가을 학술발표회논문집.
29. 조성호, 목영진, (1998), "다운홀 시험과 Seismic CPT에 대한 역산해석의 개발", 한국지반공학회지, Vol.14, No.3, pp.95~108.

30. 최성근, 김상인, 이충호, 김동후, 이우진 (2005) "대형 Calibration chamber를 이용한 σv'-Dr-N 상관관계 연구", 한국지반공학회 2005 가을 학술발표회 논문집, pp.1175-1182
31. 최성근, 이문주, 김승한, 이우진 (2006) "평균입경을 고려한 상대밀도-콘저항치 상관관계 연구", 2006 대한토목학회 정기학술회의 논문집, pp.1336-1339
32. 최성근, 이문주, 추현욱, 홍성진, 이우진 (2007), "Porous plate를 이용한 개선된 레이닝 시스템", 한국지반공학회논문집, Vol.23, No.6, pp.67-76.
33. 최은호 (2008) "시료의 채취 방식에 따른 교란도 평가", 석사 학위 논문, 인하대학교
34. 한국건설기술연구원 (2001) "건설분야 첨단 지반조사 기술개발 및 지반조사 자료 구축", 과학기술부 보고서
35. 한국건설기술연구원 (2006) "건설공사의 경제성과 안전성 향상을 위한 첨단지반조사 장비개발 및 실용화 연구(1)", 국토해양부(한국건설교통기술평가원) 중간 보고서
36. 한국건설기술연구원 (2007) "건설공사의 경제성과 안전성 향상을 위한 첨단지반조사 장비개발 및 실용화 연구(2)", 국토해양부(한국건설교통기술평가원) 중간 보고서
37. 한국지반공학회, (1997), 지반공학시리즈 1-지반조사결과의 해석 및 이용, 구미서관, pp.52~87.
38. 한국지반공학회, (1997), 진동 및 내진설계, 구미서관.
39. 황대진, 김철웅, (1997), "피에조 콘의 간극수압소산시험에 관한 연구", 한국지반공학회지, Vol.13, No.6, pp.25~35.
40. 한영철, (1999), "대구경 sampler의 개발 및 적용성에 관한 연구", 한국지반공학회, '99 가을 학술발표회 논문집, pp. 331~336.
41. AGARWAL, K.B., (1968), "The influence of size and orientation of sample on the undrained strength of London Clay", PhD thesis, University of London.
42. Alex Sy and Ken K. Y. Lum, (1997), "Correlations of mud-injection Becker and standard penetration tests", Can. Geotech. J. 34, pp. 139~144.
43. Alex Sy, (1997), "Twentieth Canadian Geotechnical Colloquium: Recent

developments in the Becker penetration test: 1986-1996", Can. Geotech. J., 34, pp. 952~973.

44. Authier, J., and Fellenius, B.H. (1983), "Wave equation analysis and dynamic monitoring of pile driving", Civil engineering for Practicing and Design ngineers, 2(4), pp.387-407.
45. BISHOP, A.W. and LITTLE, A.L. (1967), "The influence of the size and orientation of the sample on the apparent strength of the London Clay at Maldon, Essex", Proc. Geot. Conf, Oslo, Volume 2, pp. 89-96.
46. BOROWICKA, H. (1973), "Rearrangement of grains by shear test with sand", Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Moscow, Volume 1.1, pp. 71-77.
47. BROMS, B. B. and HALLEN, A. (1971), "Sampling of sand and moraine with Swedish Foil Sampler", Proc. Speciality Session on Quality in Soil Sampling, 4th Asian Conf., Int. Soc. Soil Mech. and Found. Eng., Bangkok, pp. 49-53.
48. BROMS, B.B. (1980), "Soil sampling in Europe: State-of-the-art". Proc. ASCE, J. Geot. Eng. Div., 106 (GTI), pp. 65-98.
49. Bustamante, M., and Gianeselli, L. (1982), "Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT". In Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing ESOPT II, Amsterdam, 24-27 May. A.A. Balkema, Rotterdam. Vol. 2, pp. 493-500.
50. Chris R. Daniel, John A. Howie, and Alex Sy (2003), "A method for correlating large penetration test (LPT) to standard penetration test (SPT) blow counts", Can. Geotech. J., 40, pp.66-77.
51. CLAPHAM, H.G., (1978), "Personal communication on the failure of a temporary cut at Wraysbury Reservoir"
52. CLAYTON, C.R.I., HIGHT, D.W. and HOPPER, R.J. (1992), "Progressive destructuring of Bothkennar clay: implications for sampling and reconsolidation procedures", Geotechnique, Vol. 42, No. 2, pp.219-239.
53. Daniel, C.R. (2000), "Split spoon penetration testing in gravels. M.A.Sc.

thesis", "University of British Columbia", Vancouver, B.C.

54. Drnevich, V. P., Rainer Massarsch, P., (1979), "Sample disturbance and stress-strain behavior", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.105, No.9, pp. 1001~1016.

55. FAHLQUIST, F.E. (1941), "New methods and technique in subsurface explorations", J. Boston Soc. Civ. Eng., 28, pp. 144-160.

56. HANZAWA, H. and MATSUDA, E. (1977), "Density of alluvial sand deposits obtained from sand sampling", Proc. Speciality Session 2 on Soil Sampling, 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, pp. 7-14.

57. Hight, D. W. (1992), "Disturbance of the Bothkennar clay prior to laboratory testing", Geotechnique, Vol. 42, No.2, pp. 199-217.

58. HIGHT, D.W. (1986), "Laboratory testing: assessing BS5930", in A.B. Hawkins (ed.) Site Investigation Practice: Assessing BS5930, Eng. Geol,. Special Pub. No. 2, Geological Society, pp. 4351.

59. HONG, R.C. (1961), "The Hong Piston Sampler", Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Paris, Volume 1, Part 2, pp. 471-474.

60. Howie, J.A., Giacheti, H.L., Daniel, C.R., and Campanella, R.G. (1999), "Site characterization in sands - Implications of soil variability. In Proceedings", Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguassu, Brazil, 8-12 August. Vol. 1, pp. 387-394.

61. Hukue, M. (2006), "Review of geotechnical and geoenvironmental investigation methods for the last decade", "TSUCHI-TO-KISO", JGS, 54(4), pp. 1-3.

62. ISIHARA, K. and SILVER, ML. (1977), "Large diameter and sampling to provide specimens for liquefaction testing", Proc. Specialty Session 2 on Soil Sampling, 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, pp. 1-6.

63. Kaito, T., Sakaguchi, S., Nishigaka, Y., Miki, K., and Yukami. H. (1971), "Large penetration test". Tsuchi-to-Kiso, 19(7): 15-21. (In Japanese).

64. Koester, J.P., Daniel. C.R., and Anderson. M.L,(2000), "In situ investigation of liquefiable gravels". Journal of the Transportation Research Board, No.

1714, Paper No. 00-0875, pp. 75-82.

65. KAROL, R.H. (1970), "Use of chemical grouts to sample sands", Proc. ASTM Symp. on Sampling Soil and Rock', ASTM Spec. Tech. Pub. No. 483, ASTM, pp. 51-59.
66. LA ROCHELLE, P., SARRAILH J., TAVENAS, F., Roy, M. and LEROUEIL, S. (1981), "Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils", Can. Geotech. J. 18, No. 1, 5266.
67. LEFEBVRE, G. and POULIN, C. (1979), "A new method of sampling in sensitive clay", Can. Geotech. J., 16 (1), pp.226-233.
68. Oka, F. (1996), "Application of laval type large diameter sampler to soft clay in Japan", Soils and Foundations, Vol. 36, No. 3, pp. 99-111.
69. OSTERBERG, J.O. (1973), "An improved hydraulic piston sampler", Proc. 8th Int. Conf Soil Mech. and Found. Eng., Moscow, Volume 1.2, pp. 317-321.
70. RAYMOND, G.P. (1977), "Effect on soil sampling on the drained properties of Leda Clay", Proc. Speciality Session 2 on Soil Sampling, 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, pp. 47-55.
71. RAYMOND, G.P., TOWNSEND, D.L. and LOJKA5EK, M.J. (1971), "Evaluation of sample quality on undrained soil properties", Proc. Speciality Session on Quality in Soil Sampling, 4th Asian Regional Conf, Int. Soc. Soil Mech. and Found. Eng, Bangkok, pp. 88-92.
72. SEKO, R. and TOBE, K. (1977), "Research of stiff clay sampling", Proc. Speciality Session 2 on Soil Sampling, 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, pp. 44-45.
73. Shoagaki, T. and Nakano, Y. (2006), "The cone sampler with a two-chambered hydraulic piston and its applicability", "TSUCHI-TO-KISO", JGS, 54(4), pp. 13-15.
74. Shougaki, T. and Sakamoto, R. (2004), "The applicability of a small diameter sampler with a two-chambered hydraulic piston for Japanese clay deposits", Soils and Foundations, Vol. 44, No.2, pp. 113-124.
75. Shougaki, T. et al. (2004), "'Small diameter cone sampler and its

applicability for pleistcene Osaka Ma 13 clays", Soils and Foundations, Vol. 44, No. 1, pp. 113-124.

76. Sibata, A et al. (2006), "Applicability of the rotary percussion drilling based on its effciency", "TSUCHI-TO-KISO", JGS, 54(4), pp. 25-27.
77. Takeda, S., Komiya, K. and Takeuti I. (1998), "A new sampling technique using air bubble boring: the hybrid metho", "TSUCHI-TO-KISO", JGS, 46(5), pp. 28-30.
78. Tanaka, H. et al. (1996), "Comparative study on sample quality using several types of samplers", Soils and Foundations, Vol. 36, No. 2, pp. 57-68.
79. TOHNO, I. (1977), "Methods to evaluate quality of undisturbed samples of sand", Proc. Speciality Session 2 on Soil Sampling, 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, pp. 29-36.
80. YAMADA, G. and UEZAWA, J. (1969), "'Sampling of loose saturated sands", Proc. Speciality Session 1 on Soil Sampling, 7th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Mexico, pp. 39-42.
81. Yoshida, Y., Moronori, I., and Kokusho, T.(1988), "Empirical formu-las of SPT blow-counts for gravelly soils". In Preceedings of the 1st Inrernational Symposium in Penetration Testing (ISOPT-1, 1988), Orlando, Fla, A.A. Balkema, Rotterdam. PP. 381-387.
82. YOSHIMI, Y., HATANAKA, M. and OH-OKA, H. (1977), "A simple method for undisturbed sand sampling by freezing", Proc. Speciality Session 2 on Soil Sampling, 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, pp. 23-28.
83. 일본토질조사법 개정편집위원회, (2005), "地盤調査法", 일본지반공학회, pp. 143-151

감사의 글

본 연구가 진행될 수 있도록 현장 제공, 실험장비 제공, 계측 지원 등 많은 도움을 주신 대전광역시 도시개발공사 서남부사업단(LPT 현장적용성 평가), 삼성건설 기술연구소 (PDA, SPI), 동아지질 정경환 사장(해상샘플링), GS건설 (육상 샘플링), 카이스트 김동수 교수(실내시험), 고려대 이우진 교수(대형챔버, PDA) 등 관계자 여러분에게 깊은 감사를 드립니다.