

1. 표 지

(뒷면) (옆면)

(앞면)

10CC TI-C 05423 3-02 P V D F 와 바이오 계면활성제를 이용한 준설토의 탈수 / 정화기술개발 연구보고서 2011 국 토 해 양 부 한국건설교통기술평가원	Land Transport and Maritime R&D Report	건설기술혁신사업 제2차년도 최종보고서 R&D / 10CCTI-C054233-02 PVDF와 바이오 계면활성제를 이용한 준설토의 탈수/ 정화기술개발 연구보고서 2011 . 12 . 28 주관연구기관 / 명지대학교 협동연구기관 / (주)삼현피에프 위탁연구기관 / 고려대학교 국 토 해 양 부 한국건설교통기술평가원
--	--	--

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

이 보고서를 "PVDF와 바이오 계면활성제를 이용한 준설토의 탈수 / 정화기술 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2011 . 12 . 28

주관연구기관명 : 명지대학교
주관연구책임자 : 김 영 옥
협동연구기관명 : (주)삼현피에프
협동연구책임자 : 김 충 언
위탁연구기관명 : 고려대학교
위탁연구책임자 : 최 향 석

보고서 요약서

과제고유번호	09CCTI-C 054233-01	해 당 단 계 연 구 기 간	2010.12.29~ 2011.12.28	단 계 구 분	2차년도/ 2차년도
연 구 사 업 명	중 사 업 명	건설기술혁신사업			
	세부사업명	-			
연 구 과 제 명	대 과 제 명	PVDF와 바이오 계면활성제를 이용한 준설토의 탈수 / 정화기술개발			
	세부과제명				
연 구 책 임 자	김 영 욱	해당단계 참 여 연구원수	총 : 21명 내부 : 3명 외부 : 18명	해당단계 연 구 비	정부 : 259,000천원 기업 : 125,000천원 계 : 495,000천원
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 22명 내부 : 3명 외부 : 19명	총연구비	정부 : 629,000천원 기업 : 250,000천원 계 : 879,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	명지대학교 토목환경공학과		참여기업명	(주) 삼현피에프	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 : 고려대학교		연구책임자 : 최 항 석		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	
PVDF 필름에서 발생하는 초음파 에너지를 이용하여 사질토와 사질점토 그리고 화강풍화토에 대한 탈수효율을 분석하였다. 실험결과로 PVDF 필름을 적용하였을 경우에 그렇지 않은 경우보다 모든 경우에서 탈수 효율이 증가하였다. 이에 따라 PVDF 필름을 이용한 탈수는 자연탈수보다 효과가 매우 크게 나타났으며, 준설토의 탈수처리에 효과적일 것으로 판단된다. 준설토가 오염이 되었을 경우에는 음용가능한 계면활성제를 이용하여 오염을 제거할 수 있는데 이 연구에서는 준설토의 상태에 따라 효율적으로 제거할 수 있는 계면활성제의 종류를 결정하고 제시하였다. 준설토의 효율적인 탈수와 오염제거를 위한 장치개발은 자동제어가 가능하고 효율적인 처리가 가능한 시스템을 구축하였으며, 이에 대한 설계단계를 완성하고 장치를 개발완료하였다.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	진동, 자동제어시스템, 준설토, 폴리비닐리덴 플루오라이드, 탈수, 음용가능계면활성제			
	영 어	Vibration, Auto Control System, Sediment, Polyvinylidene Fluoride, Dewaterability, Edible Surfactant			

요 약 문

I. 제 목

“PVDF와 바이오 계면활성제를 이용한 준설토의 탈수 / 정화기술개발”

II. 연구개발의 목적 및 필요성

4대강 정비사업, 경인운하사업, 해안 및 항만을 건설, 인공습지, 매립지, 서식지 및 인공섬 개발 사업 등에 준설토사의 처리 및 활용 문제가 대두되고 있다. 또한, 항만을 포함한 연안개발, 항로, 정박지의 조성 및 개량, 매립공사를 위한 토사채취, 해저의 퇴적된 오염물질 제거에 의한 환경유지 및 개선, 하천의 개수 및 수로 조성 등으로 준설토공사가 점차 증가하고 있는 추세이다. 보통 매년 수천 톤의 준설토 발생하고 2001~2008년까지 전국적으로 약 729백만 m^3 의 준설토공사가 시행되고 있으며, 점차 준설토량 증가하는 추세이다. 특히 현재 4대강 마스터플랜에서 하천준설토 처리계획에 의하면, 준설토량은 남산 부피의 11.5배 수준인 5.7억 m^3 으로 이중 모래가 43.9%인 2.5억 m^3 , 세립토가 56.1%인 3.2억 m^3 으로 전망되고 있어 이에 따른 처리비용이 막대할 것으로 판단되어 효과적인 처리 및 처리비용을 절감할 수 있는 연구 및 기술 절실 하다. 이에 이 연구에서는 준설토의 활용가치의 증대 및 효과적인 처리를 위하여 PVDF(polyvinylidene fluoride) 시스템, 음용가능 및 식품등급의 계면활성제 이용하여 준설토의 재활용 및 처리 뿐 만 아니라 화학약품 전무한 정화법(chemical free zone)으로 2차적 환경영향을 최소화 시킬 수 있는 경제적이고 지속가능한 친환경적 통합탈수정화법 및 장치개발에 목표가 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

연구개발의 내용 및 범위를 다음과 같이 정리 할 수 있다.

- (1) PVDF를 이용한 준설토 및 복합오염토 탈수 및 정화기술
 - 연구관련 자료 수집 및 분석
 - PVDF 적용 시 탈수 및 세척효율 검토
 - 탈수 및 세척 최적 조건 도출
 - PVDF에 전달하는 전압크기변화 → 최적 처리강도 도출
 - 처리 전 후 준설토의 기본 토성시험

- 효율적 운영 및 관리를 위한 방안 연구
- 효율적인 에너지 사용을 위한 공정시스템제어연구

(2) 음용가능한 계면활성제를 이용한 준설토 및 복합오염토 정화기술

- 연구관련 자료 수집 및 분석
- 토양미세입자 존재여부에 따른 음용가능 계면활성제 및 효소기반살포제의 결정을 위한 연구

(3) 오염 준설토 처리 장치 모델의 개발

- 기존 점토광물 선별기 및 혼합기의 구성 분석 조사 등
- 실험실 규모의 파일롯 스케일 장비의 설계 및 모형 제작

IV. 연구개발결과

(1) PVDF 필름을 이용한 탈수실험으로 최적조건 도출

- 음파에 의한 탈수 효율 증대효과 모든 시료에 대하여 확인
- PVDF 필름은 음압(acoustic pressure)음압을 측정하여 초음파의 경우와 비교하여 필름의 사용 가능성을 판단함.
- 준설토의 침강 특성파악
- 초음파를 적용한 침강증대 효과 판명
- 다수의 국내외 논문 및 포스터 발표
- 탈수 관련 특허 출원(2) 계면활성제를 이용한 TPH저감 및 효능평가
- 무독성 계면활성제의 종류를 파악하고 사용 가능성을 판단
- 계면활성제를 이용하여 인공오염토 및 자연오염토 계면활성제를 사용하여 TPH 감소량을 판단한 결과 TPH 감소효율 크게 보임
- 계면활성제를 사용할 경우 오염물질 제거에 탁월한 효과가 있어 정화 목적을 위한 사용이 가능할 것으로 판단
- 초음파를 동시에 적용한 경우 제거효율이 더욱 증가됨.

(3) 장비의 구동 시스템 구축

- 주파수 별 저항치를 측정하여 필름의 특성을 파악하고 증폭기를 제작하는데 기본 데이터를 수집
- 증폭기 제작관련 특허 출원
- 중앙처리시스템과 모니터링 시스템 구축

(4) 장비제작

- 회전식탈수장치 관련 디자인 특허 출원
- 개별적인 장비 설계 및 전반적인 장비 구축을 위한 소형 시제품 제작

V. 연구개발결과의 활용계획

이 연구개발의 성공으로 창의적인 세척관련 기술개발을 이룰 수 있고 환경 친화적이며 경제적 이점을 동시에 만족할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이 연구로 원천 기술이 확보되고 추후 실/대형 및 현장적용을 위한 연구가 진행된다면 이를 이용한 기업화 또는 해당 기업으로의 기술이전에 상당히 유리한 위치를 확보할 수 있을 것이며 녹색기술을 주안점으로 국제적 위상확립에 기여할 수 있을 것이라 판단되며, 이 기술을 통해 사업화할 경우에는 오염부지 진단 및 평가, 평가예측, 지하수 복원 설계 및 오염복원, 사후관리 등 환경관련 전문 기업으로 도약할 수 있을 것으로 기대된다. 활용주체로는 기술이전에 따라 토양 정화업 및 준설 등록업체, 소규모 오염토양 자체처리가 가능한 군부대, 토지 및 주택개발사업 중 발생한 오염토양 정화 및 처리사업단에 활용될 수 있을 것이고, 활용 대상 지역으로는 해안 및 항만건설/개발시 인공습지, 매립지, 서식지 및 인공섬 개발사업, 미군군부대 이전 계획지역의 환경복원사업, 공장 및 공단지역, 매립지 등 오염이 의심되는 지역, 토지 및 주택개발사업 등 토양정화가 시급한 지역, 군부대, 주유소, 유해물질 저장탱크 주변 등 다양한 분야에 활용이 가능하다고 판단된다.

목 차

제1장 연구개발과제의 개요	10
제1절 연구개발의 목적 및 필요성	10
1. 연구개발 목적	10
2. 연구개발의 중요성	13
제2절 연구개발의 내용 및 범위	15
제2장 국내외 기술개발 현황	17
제1절 기술 및 산업 동향	17
1. 국내 기술 및 산업 동향	17
2. 국외 기술 및 산업 동향	17
3. 특허 동향	18
4. 정부지원정책 현황	20
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	22
제1절 PVDF를 이용한 탈수실험 I	22
1. 기본 방정식	22
2. 가정	24
3. 새로운 방정식 유도	25
4. 새로운 방정식 해석	26
5. PVDF(polyvinylidene fluoride) 정의	27
6. PVDF를 이용한 실내실험I	28
7. PVDF를 적용한 사질토의 탈수실험	33
8. PVDF를 적용한 사질점토의 탈수실험	36

9. PVDF를 적용한 화강풍화토의 탈수실험	39
10. PVDF를 적용한 OO지역 준설토의 탈수시험	42
11. PVDF 필름을 이용한 실내실험II	43
12. 연구결과	45
 제2절 초음파 장치를 이용한 탈수	46
1. 초음파	46
2. 초음파 장치를 이용한 탈수 실험	48
3. PVDF 필름과 초음파 장치의 음압측정(acoustic pressure test)	53
4. 연구결과	56
 제3절 준설토의 물리적 특성 평가 및 활용방안 연구	58
1. 녹색정화 처리 전후의 준설토의 물리적 특성평가 및 처리된 준설토의 활용방안 연구	58
2. 결론	97
 제4절 바이오 계면활성제를 이용한 토양정화	99
1. 토양 정화	99
2. 토양정화기술	99
3. 계면활성제	105
4. 계면활성제 선정	115
5. 계면활성제 이용한 오염토 정화에 관한 실험적 연구	119
 제5절 공정운영시스템개발연구	130
1. 공정 운영 시스템 사양	130
2. 공정 운영 시스템 구성	130

제6절 PVDF film 구동용 증폭기 개발	152
1. PVDF film 전기적 특성 조사	152
2. PVDF film 구동용 증폭기 개발	168
3. PVDF film의 준선토 파동 전달 실험	196
제7절 공정 제어 통신 시스템 개발	203
1. CAN 통신 시스템 개발	203
제8절 공정제어 시스템 개발	209
1. 센서 모듈 개발	209
2. 준선토 탈수 처리 공정 제어 시스템 개발	217
제9절 오염 준선토 처리 장치 모델 개발	228
1. 개요	228
2. 처리장치 모델	228
제10절 결론	233
제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	235
1. 목표달성도	235
2. 관련분야에의 기여도	236
제5장 연구개발결과의 활용계획	237
1. 연구결과의 활용방안	237

2. 연구결과의 활용주체 및 활용 대상지역	240
3. 기대효과 및 파급효과	240
 제6장 참고문헌	 242

제1장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발 목적

최근 항만을 포함한 연안개발, 항로, 정박지의 조성 및 개량, 매립공사를 위한 토사채취, 해저의 퇴적된 오염물질 제거에 의한 환경유지 및 개선, 하천의 개수 및 수로 조성 등으로 준설품사가 활발히 진행되고 있으며, 특히 4대강 정비사업, 경인운하사업, 해안 및 항만건설/개발시 인공습지, 매립지, 서식지 및 인공섬 개발 사업 등에 준설품사의 처리 및 활용문제가 대두되고 있다. 보통 매년 수천 톤의 준설품 발생하며, 2001~2008년까지 전국적으로 약 729백만 m^3 의 준설품사가 시행되고 점차 준설품량 증가하는 추세를 보이고 있다. 4대강 마스터플랜에서 하천준설품 처리계획에 의하면, 준설품량은 남산 부피의 11.5배 수준인 5.7억 m^3 으로 이중 모래가 43.9%인 2.5억 m^3 , 세립토가 56.1%인 3.2억 m^3 으로 전망되고 있어 이에 따른 처리비용이 막대할 것으로 판단되어 효과적인 처리 및 처리비용을 절감할 수 있는 연구 및 기술 절실하다. 현행 해양관련 법규상 모든 준설품사는 오염도와 무관하게 해양폐기물로 분류되어 효과적인 활용이 불가능하다. 현재 준설품 처리는 해양투기 30~40%, 단순매립 50~60%, 소각 및 기타 10% 로 처리되고 있다. 그러나 런던협약(PIANC, 1996) 등 국제조약의 비준으로 해양투기가 불가능하고 매립장의 경우에 기존매립지의 용량부족 및 탈수/건조 등의 중간처리에 대한 비용문제와 대규모 매립시설부지확보의 문제, 주변 환경 오염문제, 소각시 2차 대기오염물질 발생 등에 따른 준설품의 효과적인 처리 및 재활용 어려워 친환경적인 기술 개발 시급한 실정이다. 또한, 오염준설품사의 처리기술 개발이 미비하고, 육상 매립장을 제외한 오염준설품사 처분시설을 구비하지 않은 우리나라는 체계적인 신기술개발을 통하여 국내 적용 방안을 정립할 필요가 대두되고 있다. 이에 따라 이 연구는 준설품의 활용가치의 증대 및 효과적인 처리를 위하여 PVDF(polyvinylidene fluoride) 시스템과 음용가능 및 식품등급의 계면활성제를 이용하여 준설품의 재활용 및 처리 뿐 만 아니라 화학약품 전무한 정화법(chemical free zone)으로 2차적 환경영향을 최소화 시킬 수 있는 경제적이고 지속가능한 친환경적 통합탈수정화법 및 장치개발에 목표가 있다.

PVDF는 세룰리관 형태이며, 제작(성형)이 용이한 환경 친화적이고 녹색기술인 순수 물리력(음파) 발생장치로써 현재 국내에 널리 응용되고 있는 초음파(ultrasound)와는 달리 광대역 주파수(multi frequency)와 광범위 진폭(wide amplitude) 가용이 가능하여 사용자의 목적과 사용 대상에 따라 초음파에 비하여 효율성 및 활용도가 높아 초음파와 차별(초음파 트랜스듀서 대비 초저가 재료비)성을 지니고 있다. PVDF 적용으로 매립 또는 투기방법으로 처리되는 준설품을 양질토로 전환하여 재활용하거나 그렇지 않을 경우 처리량을 줄여 비용을 감소할 수 있을 것으로 기대되며, 녹색기술인 바이오 살포제 및 음용가능한 계면활성제의 사용으로 준설품의 오염물질(유류 등)에 대한 탈착효율을 높임에 따라 기존 토양정화기술에 비하여 약품사용량을 줄일 수 있으며, 이에 따른 비용부담 및 오염 부하량의 감소로 후처리 문제 해결이 가능할 것으로 판단된다.

즉, 이 연구의 최종목표는 매년 증가하고 있는 준설토 및 복합오염토의 처리문제를 해결할 친환경적 통합탈수정화법 및 장치를 개발하여 준설토 및 복합오염토의 재활용을 활성화하고 국내 현실에 적합한 재활용 기술을 중점적으로 확보하고 특히 주변 해양환경복원에 필요한 선진 활용기술을 연구하여 국제적 기술 지위 확보에 있으며, 최종목표를 정리하면 다음과 같다.

- ▶ 준설토사처리 및 재활용기준 개발로 합리적인 방안 제시
- ▶ 준설토 초기 함수비 낮춤(500% → 100%)
- ▶ 공정개발에 중요한 인자를 구분하여 토양에 따른 최적운전조건을 도출하고, 연속운전이 가능 할 수 있도록 공정을 설계하여 창의적이고 선진화된 복합 탈수·정화법 개발(그림 1.2)
- ▶ 토양정화 및 PVDF 장치의 설계자료
- ▶ 실험실 규모 파일럿 공정 제작 및 운전
- ▶ 실오염현장에서 파일럿 공정설계 및 가능성 검토(그림 1.3)
- ▶ 오염준설토사의 재활용을 위한 획기적인 처리 기술 체계화
- ▶ 준설토의 토양보존법상 ‘나’지역에 적용 → 유류(TPH) 에 대하여 우려지역 기준 이하로 낮춤.
- ▶ 녹색정화 처리에 따른 준설토의 물리적 특성에 대한 DB화
- ▶ 정화된 준설토 성상에 따른 구체적인 재활용 방안 제시
- ▶ 해외기술과 차별성을 구체화한 후에 논문 및 특허 제출
- ▶ 통합 공정시스템 개발 → 준설토사가 PVDF를 응용한 컨베이어벨트에서 각각 다른 영향인자(음파의 주파수, 강도, 시간 등을 최적화한 조건)를 가진 구간을 지나게 되고 이 과정으로 준설토사의 탈수처리가 되는 개념
- ▶ 이 후 특히 유류 등으로 오염되어 재활용이 불가능 할 경우에 음용가능 계면활성제를 첨가하고 최종 처리된 토양 및 처리수에 효소기반 바이오 살포제를 이용함으로써 토양을 정화시켜 처리비용 등을 감소시키거나 양질의 흙으로 만들어 이를 재활용 할 수 있게 됨으로써 효과적인 준설토사의 활용을 기대



그림 1.1 연구개발의 최종목표

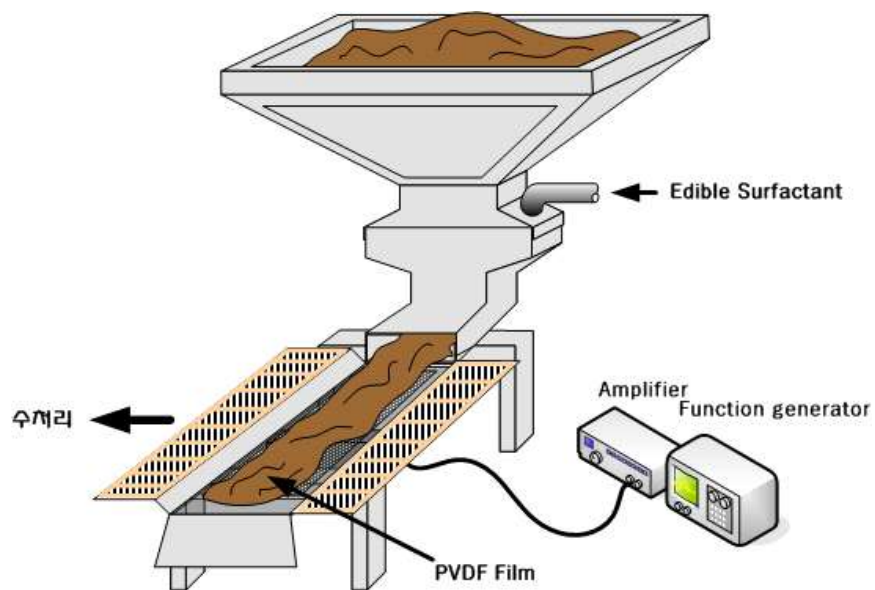


그림 1.2 대형 복합오염토 및 준설토 통합정화시스템

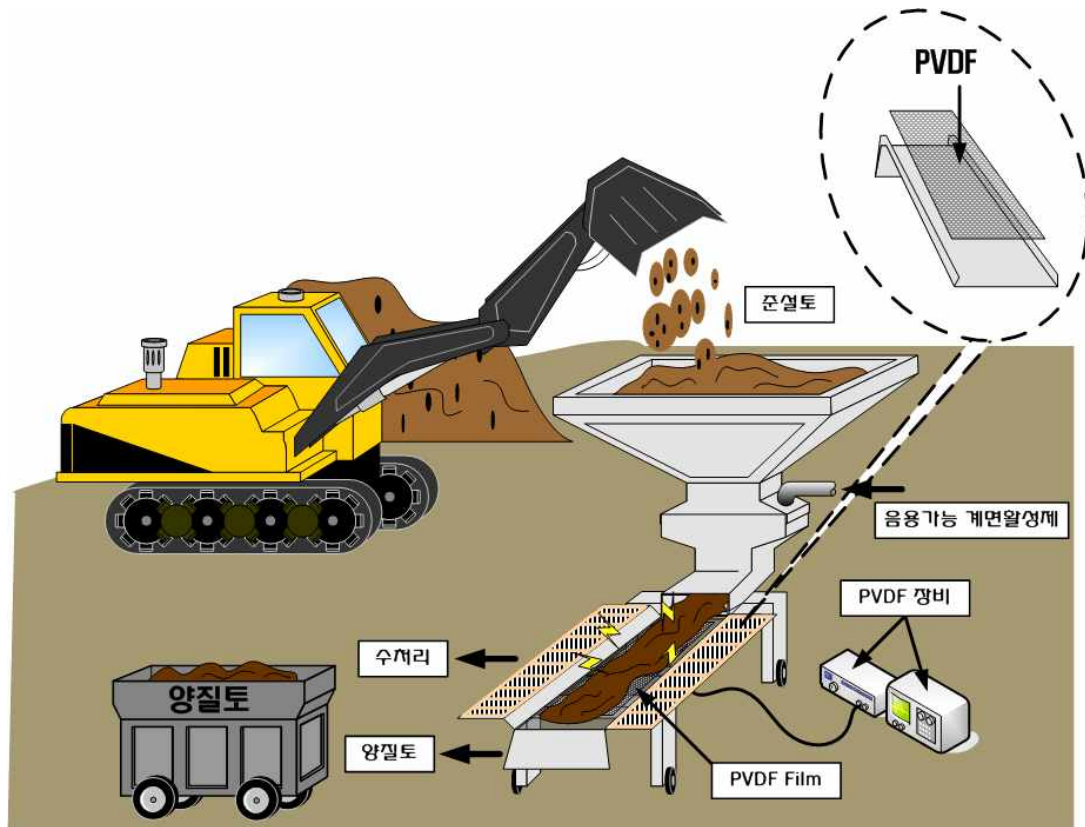


그림 1.3 복합오염토 또는 준설토 통합처리 개념도

2. 연구개발의 중요성

(1) 기술적측면

- 현재 준설토의 효과적인 처리 및 재활용방안에 대한 기초적인 연구 및 기술 필요
- 특히 선진국 대비 오염도가 낮은 준설토 방파제 및 안벽 등 건설용 구조 재료로 재활용하는 연구 및 기술 부족
- 준설토 투기 및 매립으로 인한 영향 및 저감방안 기술 미흡
- 국내 현실에 맞는 선진 기술 개발 및 환경복원에 필요한 요소 및 종합기술 개발 필요

(2) 경제·산업적측면

- 인공습지, 매립지, 및 인공섬 개발 사업 등에 준설토사의 활용가치 증대
- 매립공사를 위한 토사 채취, 해저의 퇴적된 오염물질 제거에 의한 환경유지 및 개선, 하천의 개수 및 수로 조성 등으로 인한 준설토량 증가
- 매립장의 경우 기존매립지의 용량부족 및 탈수/건조 등의 중간처리 시 막대한 비용문제해결 시급
- 대규모 매립시설부지확보의 문제
- 현재 국내의 준설토사 활용을 위한 명확한 기준이 제시되지 않아 무차별적으로

버려지는 준설토사를 재활용 할 수 있는 효과적이고 경제적인 기술 필요

- 준설토 투기장 조성시 토지이용계획 수립이나 용도지역 지정 등의 관리 미흡으로 인한 문제

(3) 사회문화적측면

- 선진국 대비 준설토 처리 및 활용에 대한 인식부족, 법규 및 관련 기술 부족
- 런던협약(PIANC, 1996) 등 국제조약의 비준으로 해양투기 불가능
- 불가피하게 영해 내 배타적 경제수역(EEZ)등으로 배출될 경우 연근해 어장과 수산자원에 미치는 영향에 대해 합리적인 평가와 대책수립 필요
- 또한, 해류 등에 의해 이동 확산될 수 있는 준설토는 상황에 따라 인접국가와의 환경문제 유발 가능성 내포
- 매립 또는 소각 시 주변환경오염 및 2차 대기오염물질 발생 등 환경오염유발
- 준설토의 비효율적처리 또는 방치시 민원발생 문제해결

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ PVDF를 이용한 준설토 및 복합오염토 탈수 및 정화기술	▪ 자료 수집 및 분석 ▪ PVDF 적용 시 탈수 및 세척효율 검토 → 주파수, 강도, 처리시간, 오염원 종류, 흙의 종류, 처리시료의 양, 세척수의 종류, 온도, pH 등 ▪ 탈수 및 세척 최적 조건 도출 ▪ PVDF에 전달하는 전압크기변화 → 최적 처리강도 도출 ▪ 효율적 운영 및 관리를 위한 방안 연구 ▪ 효율적인 에너지 사용을 위한 공정시스템제어연구 ▪ 공정 운영 안정성 분석 및 최적화 설계
	▪ 음용가능한 계면활성제를 이용한 준설토 및 복합오염토 정화기술	▪ 자료 수집 및 분석 ▪ 토양미세입자 존재여부에 따른 음용가능 계면활성제 및 효소기반살포제의 분해능력 평가 ▪ 인공 지하수환경(pH, 유기물 함량 등) 조성을 통한 토양 미세입자 존재여부에 따른 바 음용가능 계면활성제의 분해능정량적 평가
	▪ 녹색정화 처리 전후의 준설토의 물리적 특성 평가 및 처리된 준설토 활용방안 연구	▪ 처리 전후 준설토의 기본 토성시험 ▪ 처리 효율에 따른 준설토의 침강 및 자중압밀 특성 등의 압축성 변화 평가 ▪ CPT와 베인시험을 통한 비배수전단강도 강도 평가 및 DB 구축

연 차	연구목표	주요 연구내용
2차년도	▪ PVDF를 이용한 준설토(오니토) 탈수 및 정화기술	▪ Scale up을 통한 현장 적용성 검토(처리 기기 제작) ▪ 실규모 장치의 사양, 성능, 규모, 기능 등 결정 및 설계 ▪ 개발될 장치의 최적화 설계 ▪ 개발될 장치의 최대효율 파악 ▪ 개발될 장치설계 효율성 및 경제성 연구 ▪ 실오염현장에서 파일럿(pilot) 공정설계 및 가능성 검토 ▪ 처리 전 후 준설토의 기본 토성시험 ▪ 효율적 운영 및 관리를 위한 방안 연구 ▪ 효율적인 에너지 사용을 위한 공정시스템제어연구 ▪ 공정 운영 안정성 분석 및 최적화 설계
	▪ 음용가능한 계면활성제를 이용한 준설토(오니토) 정화기술	▪ 음용가능한 계면활성제를 활용한 유류 (TPH) 탈착 ▪ Scale up을 통한 현장 적용성 검토 ▪ 개발될 장치의 최적화 설계
	▪ 정화 처리 전후의 준설토(오니토)의 물리적 특성 평가 및 처리된 준설토(오니토) 활용방안 연구	▪ 초연약 준설토의 자중압밀에 따른 흡착된 잔류 오염원의 외부 유출에 대한 시험적 평가와 해석적 검증 ▪ 점착력이 큰 세립 준설토에 대한 처리방안 제시 : 탈수에 의한 체적감소로 인한 매립효율 증대, PSDDF 활용을 통한 준설토매립장(인공섬포함)매립 시나리오제시 ▪ 사질토성 준설토의 재활용 방안 제시 : 준설토의 전열특성(열전도도) 평가를 통해 지중열교환기 및 송배전관로의 뒤편재로서 가능성 평가, 기타 포장재료, 경량 혼합재 및 지반구조물 뒤편재로서 활용법 제시

제2장 국내외 기술개발 현황

제1절 기술 및 산업 동향

1. 국내 기술 및 산업 동향

최근 4대강사업, 경인운하 및 항만공사 등으로 인한 준설토의 활용도가 높아짐에 따라 다양한 연구 및 기술이 진행되고 있으나 기초적인 수준이며 아직까지 준설토의 오염현황 파악과 준설토 재활용을 위한 정책 및 오염준설토의 유효한 관리 및 처리 방안이 미흡한 실정이다. 현재 국내에서는 준설퇴적물을 그대로 육상에 단순매립 또는 해양투기하거나 오염퇴적물에 대해서 준설물 전량에 응집제를 투입 응집·침전에 의한 처리 후 탈수하여 처리되고 있다. 준설토는 일반적으로 함수비가 높고 입자가 미세하고 준설후 매립토의 거동에 대한 해석이 난해하며, 안정화되는데 오랜 시간이 소요됨에 따라 매립지반의 활용 측면에서 어려운 존재이다. 준설토 처리 기술로 광대한 처리지에서 오랜 기간 햇볕에 말려 탈수 하는 방법을 주로 사용되는데 처리 후에는 농경지의 독썩기 재료나 표토로 이용하는 것이 일반적이며, 필터 프레스로 대표되는 기계적인 탈수 방법이 있지만 경제성과 처리 능력의 문제로 적용사례가 미미하다. 또한, 법규강화와 환경오염문제로 해양투기가 어려워지고 매립장의 경우 기존매립지의 용량부족 및 탈수/건조 등의 막대한 중간처리 비용문제, 대규모 매립시설부지확보의 문제, 주변 환경오염문제, 소각시 2차 대기오염물질 발생 등에 따른 준설토의 효과적인 처리 및 재활용이 어렵다. 우리나라 오염준설토 처리기술은 거의 전무하고, 과다한 처리비용, 효과에 대한 불확실 및 인근 주민의 반대여론 등으로 인한 기술개발이 제한되어 있다. 이에 대한 대책 방법 및 처리 또는 재활용 기술개발이 시급한 실정에 녹색기술이면서 화학약품 전무한 정화법(chemical free zone)인 PVDF의 압전특성과 바이오 살포제 및 음용가능 계면활성제로 준설토를 친환경적으로 재활용 및 처리가 가능할 것으로 판단하여 PVDF 적용과 바이오 살포제 및 계면활성제로 처리 전후의 준설토의 물리/화학적 특성 평가를 통하여 준설토의 재활용 방안을 체계적으로 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 종합기술을 확보 또는 보유하고 있는 국내외 회사는 전무한 실정이고 특히, 초음파를 이용한 원천 기술만 소수 학자만 보유하고 있으며, 앞서 기술한 바와 같이 PVDF는 단순히 고정된 주파수의 초음파와는 차별된 기술로서 한 단계 향상된 순수 물리적인 녹색에너지라 할 수 있다.

2. 국외 기술 및 산업 동향

선진국에서는 연안매립 및 육상의 매립지 조성이 제한되고, 준설토의 투기에 의한 환경영향평가가 강화되고 있기 때문에 준설토의 오염도 평가에 의한 투기방법, 투기시설, 경제적 이용 등에 국한된 주체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

가. 미국

미국에서는 연안, 하천 및 호소의 준설퇴적물 처리를 위한 물리적, 화학적 및 생물학적 처리의 다양한 공법들이 개발되고 있으며, 대부분 재활용하는 방안을 모색하고 적용하고 있다. 미국에서 준설토의 재활용은 세부적으로 육상, 연안, 해상지역으로 구분하여 육상의 경우에 제방 및 복토재로 활용하고 인공토 개발에 의한 공원 및 농업용 재료로 사용하고 있다. 연안의 경우에는 저습지 개발, 지오텍스타일 재료, 침식조절용 재료 및 방파제 안정용 재료 등으로 활용되고 있으며 해상의 경우 조류 및 어류의 서식지 조성, 모래가 유실되는 해안의 모래공급 등에 준설토를 활용하고 있다. 특히, 버지니아주의 Craney Island와 같은 인공섬을 축조하여 항로준설이나 하천준설을 통해 발생한 준설토를 체계적으로 매립하여 부지가 안정화된 이후에 Craney Island Marine Terminal (CIMT)를 계획하고 있다.

나. 일본

일본에서는 준설토사의 처리방법은 매립이 가장 경제적인다는 것이 기본적인 시각이다. 즉, 퇴적물에 중금속이 다량 함유되어 있을 경우 폐기물로 간주하고 이를 매립 후 고화시켜 복토를 하여 토양으로 스며들지 않게 하고 있으며, 준설토를 재활용하는 것은 경제성이 없는 것으로 판단하고 있다(재활용 처리비 10,000엔/톤 소요). 현재 일본에서 준설토할 수 있는 장비는 최대용량이 227m³/day 이며 일본은 바다와 호소 등에서의 퇴적물 오염의 심각성을 인식시키기 위해 퇴적물의 일부를 시험 준설하여 주민들에게 직접 확인시킴으로서 주민들이 적극적으로 준설을 요구하고 있는 실정이다. 또한, 농업용수나 상수원 등이 오염되었다고 판단되면 준설을 우선적으로 고려하고 있다.

다. 유럽

런던협약에 의하여 해양투기가 금지되고 육상에 매립장을 확보하기가 점점 어려워지게 되자 준설토를 재활용하는 방안을 모색하고 있다. 준설토와 기존 토양을 혼합하여 영양분이 풍부한 표토(top soil)로 이용하거나, 축구장이나 골프장 조성에도 필요한 복토재로 쓰거나 해안침식에 의하여 백사장이 유실되는 곳에 해빈조성용으로 준설토를 이용하고 있으며, 고형화에 의한 골재생산 등 다양한 활용방안을 모색하고 있다. 북유럽에서는 준설토를 건설시의 성토재료로 활용하여 석탄회, 고로슬래그, 부수발생재료 등을 경량화재료와 연약지반 대책공법으로 보급하여 재이용하고 있다.

3. 특허 동향

가. 준설토의 처리·처분 논문 및 연구보고서

- 연안준설 및 준설토 해양투기 해양환경평가 개선방안(이대인 외 7명, 2009)
- 준설토 유효활용을 위한 한국형 환경기준 개발(윤길림 외 2명, 2008)
- 해상 오염준설토사의 처리, 처분 및 재활용 방안(김세종, 박준범, 2007)

- 하상재료를 이용한 하천제방 축조기술 연구(한국건설기술연구원, 2007)
- 해상 오염준설토사의 처리, 처분 및 재활용 방안(김세종, 박준범, 2007)
- 식재지반용토로서 준설토의 이화학적 특성(김원태, 윤용한, 2005)
- 저수지 준설 환경기준 정립 및 준설토 활용방안 연구(농업기반공사, 2004)
- 준설토 재활용 방안 연구(한국해양연구원, 2003)
- 준설토의 고화처리 공법(송광섭, 2003)
- 준설토 재활용 방안 및 적용사례분석(윤길립, 조홍연, 2002)
- 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적특성 연구(김주철, 이종규, 2002)
- 전국 준설토투기장 활용방안 연구(해양수산부, 2001)
- 해저 준설토의 처분기술(김규한, 2001)
- 토목재료로서의 하수 준설토 재활용 연구(이송 외3명, 2001)
- 준설토를 이용한 E.P.S. 경량혼합처리토의 활용성에 관한 연구(신영현외 3명, 2000)
- 준설토를 이용한 지하구조물 뒷채움 다짐특성에 관한연구(김영웅외 3명, 1999)
- 준설토를 이용한 작물재배 시험연구(손재권 외 2명, 1998)

나. 준설기술관련 신기술

- 와이드 그레브 버킷 준설공법 (동아시아건설,2009)
- 환경준설공법(END 공법) (고요건설(주), 2003)
- 아지데이터식 오토준설공법(현대건설(주), 1994, 1997)
- 혼기젯트펌프를 이용한 고심도준설공법(덕천기공(주), 1997)
- 유수지 슬러지 준설공법(민성건설(주), 1994, 1996)

다. 준설토의 처리·처분 관련 신기술

- 수로식 연속 분급 시스템(토아 건설공업,2007)
- Squa - Separate 공법(제니타카건설, 2006)
- FT 매드킬러 공법((주)후지타, 2006)
- Mixer 및 2단 구조의 cyclone과 부대 장치를 이용한 하천오니준설토의 분리 방법 ((주)엔바이오솔루션, 2001)
- 부유물질 제거장치 및 세척용분사장치가 장착된 모래분급기(sandunit)를 이용한 하수준설토의 세척선별 방법(산양환경산업(주), 2001)
- 칼슘설포알루미네이트계 첨가제를 이용한 자연 친환경 흙 포장 재료의 제조기술 ((주)지오시스, 1999)
- 모래의 염분 및 토분제거 공법(영동기업사, 1996)

라. 준설토의 처리·처분 관련 특허

- 하천 오염 준설토를 이용한 친환경 보도 블록으로의 재활용 처리방법((주)한국종합기술, 2009) - 등록
- 지오텍스타일 컨테이너와 이를 이용한 준설토 처리 방법((주)지오마린,2008) - 출원
- 지오텍스타일 튜브와 이를 이용한 준설토 처리 방법((주)지오마린, 2008) - 출원
- 준설토의 처리 장치 및 방법((주)케이디에스, 2008) - 결정

- 분산세척 및 자기 충돌에 의한 준설토 처리 장치 및 방법((주)케이디에스, 2008) - 결정
- 수중 준설토 운반 및 처리방법((주)씨엔텍, 2008) - 결정
- 준설토를 적재하기 위한 컨테이너를 구비한 토운선 및 이를 이용한 준설토 처리방법((주)트라이맥스피케이, 2007) - 결정
- 준설토 표층 배수 건조 공법((주)효광건설, 2006) - 결정
- 준설토의 슬러지제거와 오탉수 처리장치 및 그 방법(남선개발(주), 2006) - 결정
- 준설토 고화처리 방법(오재웅, 2006) - 결정
- 이동형 하수도 준설토 일괄 처리장치((주)신정뉴테크, 2006) - 결정
- 준설토의 재활용 처리방법 한동준 외 1명, 2005) - 결정
- 준설토 처리기(손태영, 2003) - 출원
- 퇴적 준설토의 경량화에 의한 난분해성 물질의 처리장치 및 지하방법(서해건설주식회사, 2002) - 결정
- 벌룬매트를 이용한 준설토 연약지반의 조기개량 시공법 및 표층개량 구조(송기현, 2002) - 결정
- 준설토로부터 골재를 생산하는 방법 및 장치((주)천보이티티, 2002) - 출원
- 준설토의 모래 선별 및 세척수 정수시스템(산양환경산업주식회사(2001)) - 결정
- 퇴적 준설토 처리 장치 및 방법(GS건설, 2001) - 결정

→ Chemical free 및 녹색 기술 적용 사례 찾기 힘들.

4. 정부지원정책 현황

가. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

- ▶ 현행 ‘폐기물관리법’
 - 우리나라 수저에 준설토된 퇴적물은 폐기물로 분류
 - 즉, 일반 사업장 폐기물로 취급되어 오염정도에 관계없이 일반폐기물 관리 규정에 따라 운반, 처리, 처분
- ▶ 해양오염방지법 시행규칙 개정('96. 5)
 - 육상에서 발생하는 오염준설토사 및 하수오니의 외해투기 금지

나. 정부지원 정책사업 종류와 현황

- ▶ 우리나라의 준설토 관련 연구 및 기술개발사업 등은 특정 사업의 일환으로 수행되어 일회적이며, 필요에 따라 한시적으로 이루어지고 있는 실정
- ▶ 정부(해양수산부)는 종합적이고 체계적인 해양오염퇴적물을 관리하고 준설토사의 재활용을 위한 기준안을 마련하기에 분주

▶ 최근 국토개발사업이 확장되며 다음과 같은 사업들이 진행

- “4대강 살리기“ 국토해양부(2009)

- 4대강 살리기는 범 정부차원에서 강별 종합계획을 수립, 단기간에 예산을 집중 투입함으로써 ‘물’ 문제를 해결함은 물론 강 중심으로 국토를 재창조하는 종합 프로젝트

- “경인운하“ 국토해양부(2009)

- 방수로를 운하로 활용하여 홍수예방, 물류비 절감, 교통난해소, 문화·관광·레저 활성화 및 지역경제 발전 도모하는 프로젝트

- “북항 준설토 투기장 개발 사업” 국토해양부(2007)

- 인천 북항 개발사업에 맞추어 항만 배후 부지를 적기에 공급하고자 인천 투기장 부지에 기반시설 조성

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 PVDF를 이용한 탈수실험 I

1. 기본 방정식

가. 베르누이 방정식

유체동역학에서 베르누이 법칙은 가장 중요한 법칙 중 하나이다. 유체의 속도가 증가함에 따라 압력은 감소하거나 유체의 고유에너지는 감소하게 된다. 베르누이 법칙은 독일-스위스 수학자 Daniel Bernoulli에 의해 1738년 Hydrodynamics라는 책에 처음으로 소개가 되었다.

베르누이 법칙은 여러 종류의 유체에 적용이 가능하며 각각 다른 종류의 유체에 다른 형식의 방정식으로 적용이 되게 된다. 가장 간단한 형식의 베르누이 방정식은 비압축성의 유체조건에 적용된다. 다음 식 3.1은 유체역학에서의 일반적인 베르누이 방정식이다. 그림 3.1은 유체가 흐름을 통과할 경우에 압력 위치와 속도 수두를 나타낸 그림이다.

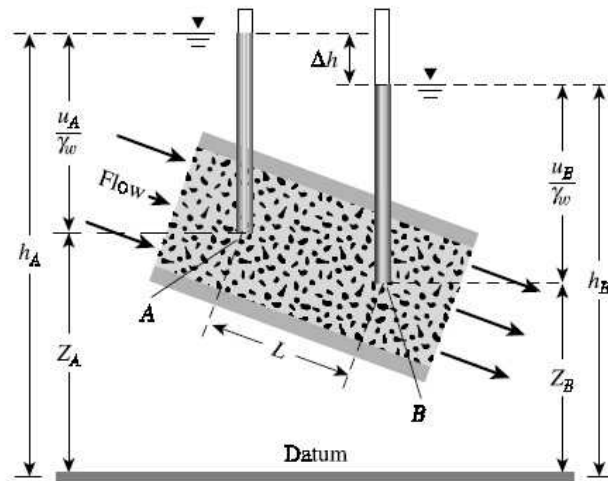


그림 3.1 유체가 흐름을 통과할 때 압력 위치 속도 수두

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad (3.1)$$

여기서, u : 압력

v : 속도

g : 중력가속도

γ_w : 물의 단위중량

만약 베르누이 방정식이 누수성 토질에 적용이 되는 경우 침투속도는 매우 작기 때문에 속도수두를 고려하지 않은 식 3.2가 된다.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + Z \quad (3.2)$$

그림 3.1에서 A점과 B점의 수두차를 동수경사로 나타내면 다음 식 3.3과 같다.

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3.3)$$

여기서, i : 동수경사

L : A점과 B점 사이의 거리

일반적으로 동수경사와 속도의 구별은 층류구간(zone I)과 전이구간(zone II) 그리고 난류구간(zone III)로 나타낼 수 있으며 이를 그림 3.2에 정리하였다. 또한, 흙에서의 물의 흐름은 공극을 통한 층류흐름으로 고려된다.

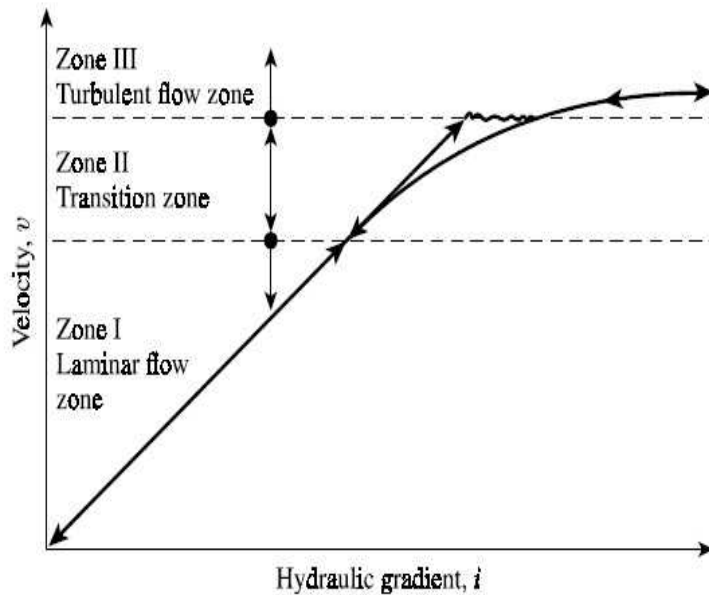


그림 3.2 자연 상태에서 속도변화와 동수경사

나. Darcy의 법칙

1856년 Darcy는 포화된 흙에서의 유출속도 방정식을 다음 식 3.5와 같이 정의 하였다.

$$v = ki \quad (3.4)$$

여기서, v : 유출속도

k : 투수계수

i : 동수경사

이 법칙은 Henry Darcy가 모래층과 물의 흐름에 관련된 실험을 통하여 정립한 법칙으로 이 법칙은 층류의 조건에서 적용된다. 유출속도(v)는 물의 유출속도이며 실제 공극을 통한 물의 투수속도는 유출속도보다 크다. 실제로 흙속에서의 공극을 통과하는 물의 속도를 알기에는 매우 복잡하다. 따라서 식 3.4는 유출속도를 구하는 경우에 사용한다.

2. 가정

실험을 통한 압력에 따른 유출량 공식을 유도하기 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다. 이 가정은 이번 실험에만 적용된다.

가. 속도수두와 위치수두는 무시한다.

만약 베르누이 방정식이 물의 흐름이 공극이 많은 흙에 적용된다면 침투속도가 매우 작기 때문에 속도수두는 제거 될 수 있다. 실험에서 쓰이는 모형토조의 경우 매우 작기 때문에 위치수두 또한 제거 될 수 있다.

나. 투수성 밀도의 변화는 무시한다.

실제의 흙의 경우 탈수를 할 경우 흙의 투수성과 밀도는 달라진다. 하지만 단순한 계산의 경우 이러한 조건을 무시 할 수 있으므로 무시한다.

다. 사질토의 물의 흐름의 경우 층류 흐름이다.

베르누이 방정식은 비압축성 유체, Darcy의 법칙은 층류 흐름 해석에 적용이 된다.

라. 실험에 쓰이는 흙은 완전 포화상태이다.

실제 실험에서 흙을 완전포화 시키기 어렵다. 하지만 Darcy의 법칙은 완전 포화상태의 경우 성립을 하기 때문에 실험에서 쓰이는 흙은 완전 포화상태로 가정한다.

3. 새로운 방정식 유도

그림 3.3은 다공체에서의 일차원 유체흐름을 나타내고 있으며, 기본적인 이론 방정식과 새로운 가정을 통해 새로운 방정식을 유도한다. 베르누이 방정식에서 전수두는 식 3.5과 같다.

$$h = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (3.5)$$

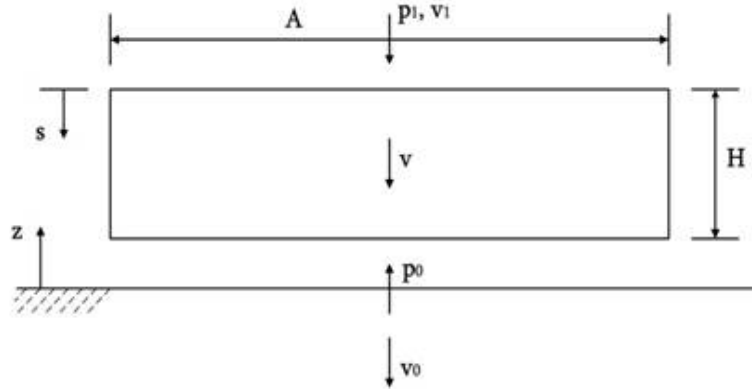


그림 3.3 다공체에서의 일차원 유체 흐름

침투속도는 매우 작기 때문에 속도수두는 무시한다. 또한 이 실험의 규모가 매우 작기 때문에 위치수두 또한 무시할 수 있어 식 3.6과 같이 정리할 수 있다.

$$h = \frac{p}{\gamma} = \frac{p}{\rho g} \quad (3.6)$$

Darcy 법칙에서 “-”의 의미는 동수경사가 속도방향과 반대임을 의미한다. 또한 k는 투수계수이며 i는 동수경사를 의미하며 식 3.7과 같고 이를 Darcy 법칙에 대입하면 식 3.8와 같이 정리할 수 있다.

$$i = \frac{\Delta h}{s} \quad (3.7)$$

$$v = -k \frac{\Delta h}{s} \quad (3.8)$$

식 3.9은 새로운 방정식으로 흙의 두께에 따른 유출량을 구할 수 있는 새로운 방정식이다. 만일 유체의 압이 증가하게 되면 유출량은 증가하게 된다. 따라서 이 방정식으로 유출에 영향을 주는 인자들을 나타낼 수 있으며, 식 3.10은 주파수를 고려하지 않은 방정식이다.

$$v = -k \frac{p/\rho g}{s} = -k \frac{p}{\rho g s} \quad (3.9)$$

$$Q = vA = -kA \frac{P_1 - P_0}{\rho g H} \quad (3.10)$$

낮은 주파수를 고려할 경우 유체의 압력의 경계조건은 상부 표면의 경우 $p(x=0, t) = p_0 + \Delta p \sin(\omega t)$ 이고 하부 표면의 경우 $p(s=H, t)$ 라 할 수 있다. 식 3.10에 대입을 하게 되면 최종적으로 식 3.11로 정리 할 수 있다.

$$Q = -kA \frac{(P_1 + \Delta p \sin \omega t - p_0)}{\rho g H} \quad (3.11)$$

4. 새로운 방정식 해석

식 3.10과 식 3.11를 살펴보면 $\Delta p \sin(\omega t)$ 가 다르다는 것을 알 수 있는데 진동을 가하게 되면 한 부분만 다르게 된다. 또한, 진동을 가하게 되면 주파수의 값의 변화와 진폭의 변화가 일어나게 되고 유출량은 다르게 된다. 유출량과 압력은 비례관계에 있으며 흡의 두께와 반비례 관계에 있다. 이를 통하여 유출량에 영향을 미치는 요인을 알 수 있다. 그림 3.4는 진동을 가하지 않은 상태와 가한 상태에 따른 유출량을 나타낸 그래프이며, PVDF 필름을 이용하지 않은 탈수보다 PVDF 필름을 이용한 탈수가 보다 효과적인 것으로 나타났다.

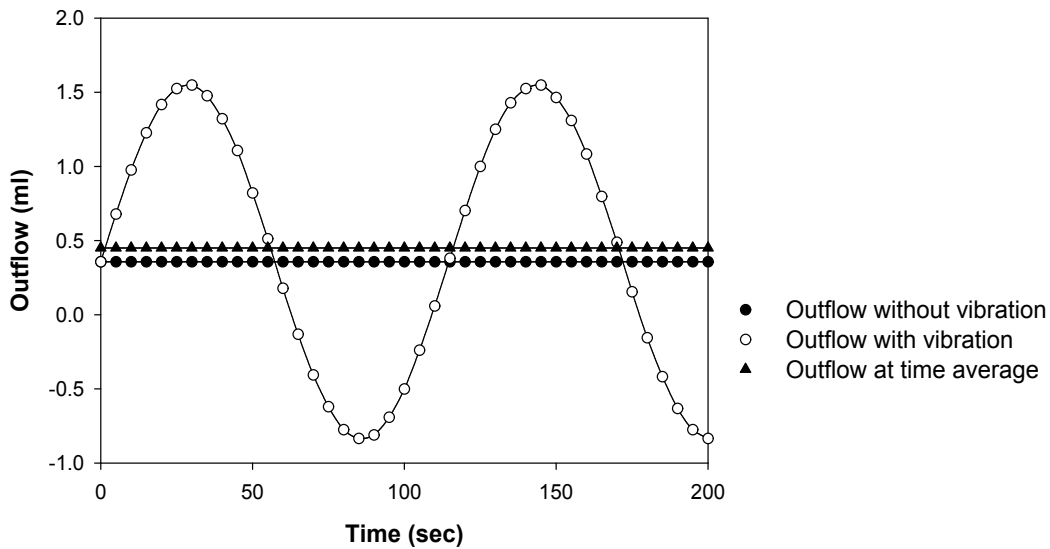


그림 3.4 흡에서의 진동에 대한 일차원 흐름

5. PVDF(polyvinylidene fluoride) 정의

PVDF(polyvinylidene fluoride)는 특별한 불소중합체(fluoropolymer)군에 속하는 플라스틱 재료이다. 인장력이나 충격에 의한 힘을 견디는데 가장 적합하며 다른 열가소성 물질과 비교하였을 경우에 PVDF가 가장 탁월한 크리프(creep), 피로(fatigue)에 대한 저항을 갖는다. PVDF는 다른 불소중합체(fluoropolymer)보다 낮은 밀도(1.78)와 낮은 가격 때문에 많은 분야에서 사용되고 있다. PVDF는 필터(filters), 진동판(diaphragms), 릴리즈 필름(release films), 압전 필름(piezoelectric films), 연료전지용섬유(fuel cell seals), 의료 가방(medical bags) 등의 재료로 많이 사용이 되고 있으며 여러 다른 분야에도 새롭게 도입이 되어 많이 사용되어지고 있는 추세이다. PVDF의 특성과 사용 예를 표 3.1과 그림 3.5에 정리하였다.

표 3.1 PVDF(polyvinylidene fluoride)의 특성

	Units	ASTM Test	Result
Tensile Strength @yield	psi	D882	7,550
Elongation @break	%	D882	160
Tear Strength - prop.	g/mil	D1004	735
Continuous Use Temp. -UL	°F	-	265
Surface Resistivity	Ohms	D257	$>10^{16}$
Dielectric Constant	1KHz	D150	8.15 - 10.46
Specific Gravity	-	D792	1.78
Water Absorption	%/24 hr	D570	0.01
Area Factor	in ² /lb/mil	-	15,480



(a) 필터(filters)



(b) 압전필름(piezoelectric films)

그림 3.5 PVDF의 사용 예

6. PVDF를 이용한 실내실험I

가. 실험개요

이 연구에 사용된 실험장비는 PVDF 필름, 신호발생기(function generator), 증폭기(amplifier), 지반모형용기로 구성된다. PVDF 필름은 28kHz로 고정된 다른 초음파와는 달리 1Hz~100MHz까지의 넓은 주파수 대역과 쉽게 전압을 변화시키며 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변화시키는 장점을 지니고 있다(그림 3.6). 이 연구에서는 PVDF 필름이 발생하는 음압의 영향에 인한 포화된 사질토, 사질점토, 화강풍화토의 함수비 감소효과를 입증하고자 한다.

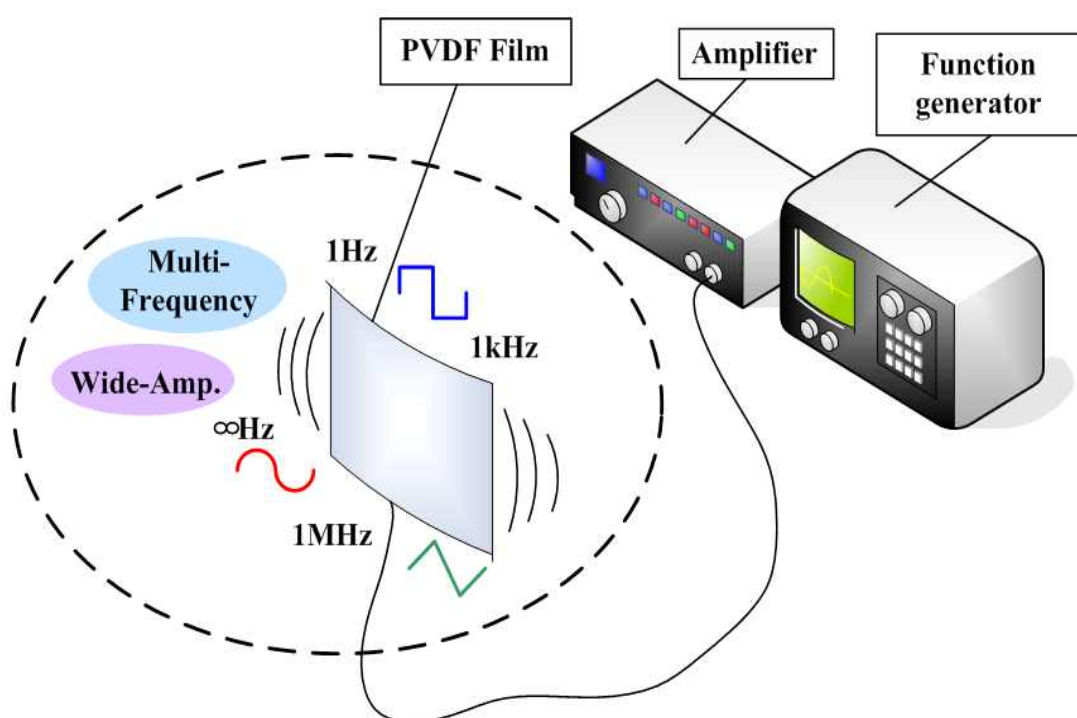


그림 3.6 PVDF system

나. 실험장비

이 실험에 사용된 신호발생장치(Tabor-8020)는 삼각파(triangle wave), 대칭 사각파(symmetrical square wave), 양사각파(positive square wave), 음사각파(negative square wave), 직류(DC) 등으로 총 6가지의 다른 파형의 변환이 가능한 것으로 출력단자의 경우에 4자리의 숫자로 표기되며 주파수와 전류의 세밀한 조정이 가능하다. 신호발생장치의 제원을 표 3.3에 정리하였다. 실험실 사용을 위해 설계된 범용 선형 증폭기(A800DI)로 최대 1,600V까지 출력이 가능하다. 2채널로 구성되어 있으며, 낮은 출력의 저항은 0.1보다 작다. 입력 신호의 경우 $\pm 4V$ 범위 내에 설정하여 사용하며 앰프의 경우 전원 공급장치를 공유하는 동일한 앰프가 포함되어 있다. 실험장비에 대한 제원 및 사진을 표 3.2와 그림 3.7에 정리하였다.

표 3.2 실험장비의 제원

실험장비	사용주파수	출력전압
신호발생기(Tabor-8020)	2mHz ~ 20MHz	0V ~ 30V
증폭기(A800DI)	$\pm 4V$	1600V _{pp} 60mA



(a) 신호발생기(Tabor-8020)



(b) 증폭기(A800DI)

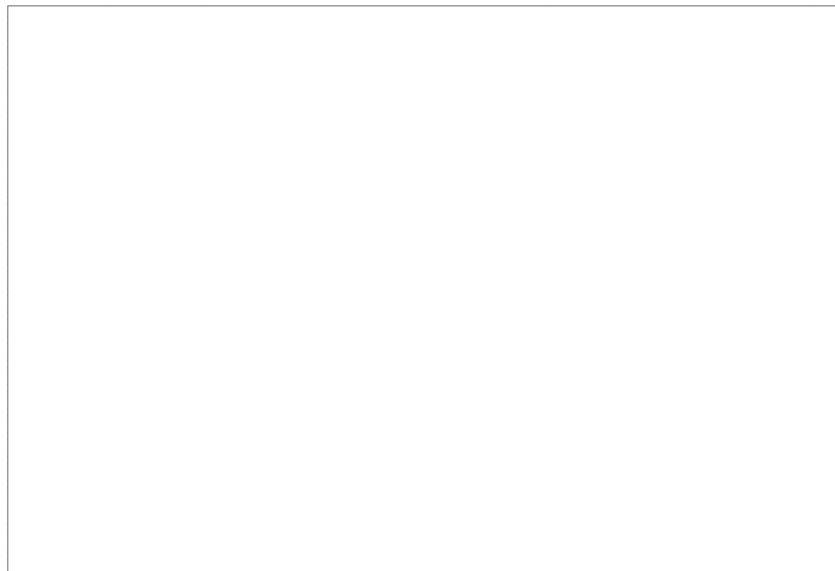
그림 3.7 실험 장비

다. 실험에 사용된 흙의 물성치

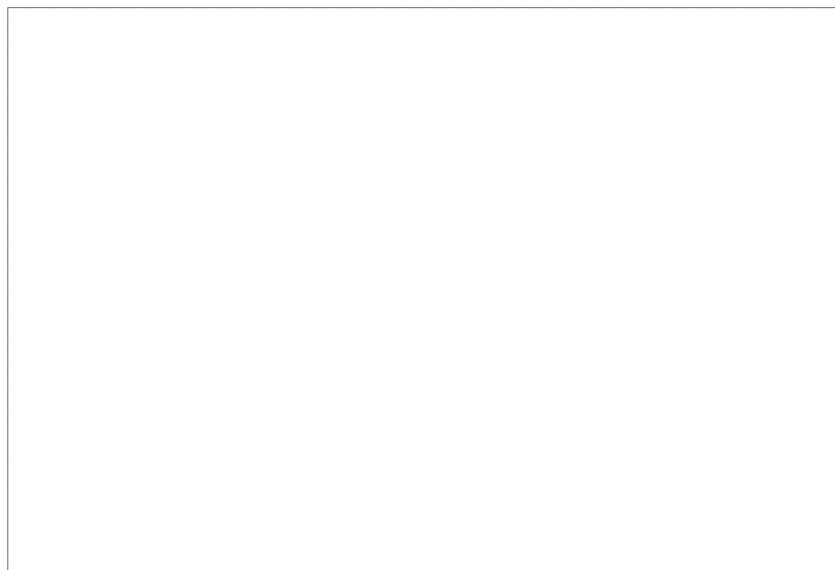
탈수 실험은 사질토, 사질점토, 화강풍화토 3 가지 종류의 흙을 사용하여 실험을 하였으며, 실험에 앞서 흙을 분류하기 위해 체분석 및 비중시험을 하였다. 흙 종류에 따른 물성치와 입도분포곡선을 표 3.3과 그림 3.8에 정리하였다.

표 3.3 흙 종류에 따른 기본 물성치

구분	사질토	사질점토	화강풍화토
비중(G_s)	2.767	2.677	2.739
공극비(e)	0.77	0.75	0.98
D ₁₀	0.28	0.43	0.16
균등계수(C_u)	2.2	1.47	6.88
흙분류	SP	SP	SW



(a) 사질토의 입도분포 곡선



(b) 사질점토(Case1)의 입도분포 곡선

그림 3.8 탈수 실험에 사용된 흙의 입도분포 곡선(계속)



(c) 화강풍화토의 입도분포 곡선

그림 3.8 탈수 실험에 사용된 흙의 입도분포 곡선

라. 실험방법

실험은 주파수를 고정하고 전압을 달리한 경우와 전압을 고정하고 주파수를 달리한 두 가지 조건으로 구성된다. 실험에 사용된 모형지반은 사질토, 사질점토, 화강풍화토를 이용하였으며, 이에 사용된 시료무게와 물의 양을 표 3.4에 정리하였다. 실험에 사용된 모형지반은 모형상자에 자갈로 배수층을 조성하고 조건에 따라 지반층을 성토하였다. 이때 배수층과 사질토층 사이에 다공질판을 설치하여 사질토층의 토사가 유실되지 않도록 조성하고 포화시켰다. 포화된 사질토층 상부에 PVDF 필름을 설치하고 주어진 조건에 따라 음파에너지를 달리하여 포화된 사질토의 탈수 촉진 여부를 모형상자에 설치되어 있는 밸브를 열어 유출되는 간극수의 양을 측정하고 조건에 따라 비교·분석하였다. 실험방법을 다음 그림 3.9에 나타내었다.

표 3.4 모형지반에 사용된 무게 및 물의 양

흙의 종류	사질토(g)	점토(g)	화강 풍화토(g)	물의 양(ml)
사질토	550	0	0	500
사질토+점토	500	50	0	500
화강 풍화토	0	0	500	500



(a) 모형토조 준비



(b) 배수층설치



(c) 다공질판 설치



(d) 모형지반 성토



(e) 모형지반 포화



(f) PVDF 필름 설치



(g) 신호발생기와 증폭기 연결



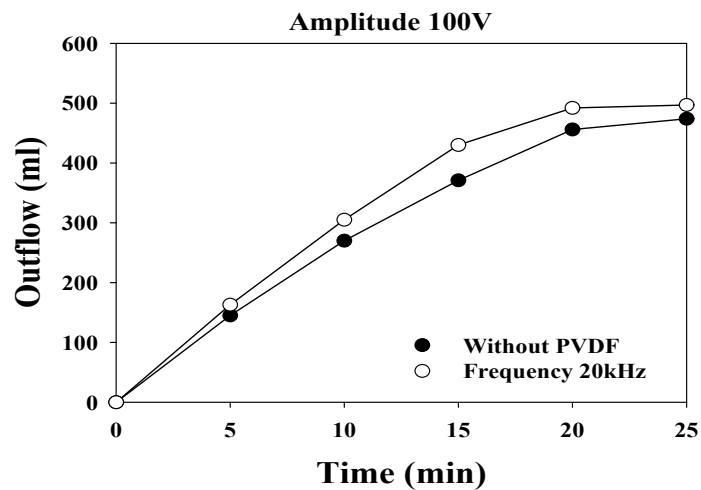
(h) 유출량 측정

그림 3.9 PVDF 필름을 이용한 탈수 실험방법

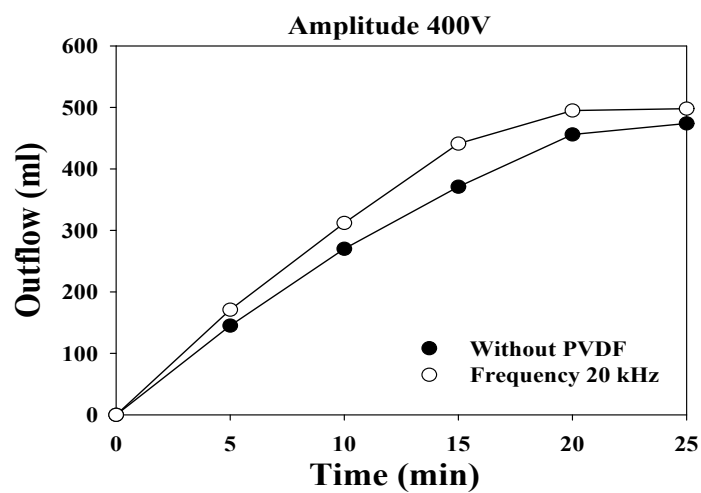
7. PVDF를 적용한 사질토의 탈수실험

가. 예비실험

예비실험은 본 실험에 앞서 PVDF 필름을 적용한 사질토의 탈수실험에서 어느 전압에서 효율이 최대인지를 파악하기 위하여 수행되었다. 이에 주파수를 20kHz로 고정시키고 전압을 100V와 400V로 변화시켜 전압의 증가에 따른 사질토의 탈수량을 측정하였다. 실험 결과, 전압 증가와 탈수량의 증가는 비례하는 것을 알 수 있었으며, 그림 3.10에 정리하였다.



(a) 20kHz-100V



(b) 20kHz-400V

그림 3.10 예비실험을 통한 사질토의 시간-유출량 그래프

나. 사질토의 탈수실험

예비실험으로부터 PVDF 필름을 적용한 사질토의 탈수 시 전압의 증가와 유출량의 증가는 비례하는 것을 알 수 있었다. 사질토의 탈수 실험에서는 예비실험결과를 바탕으로 표 3.5의 조건에 따라 전압과 주파수를 변화시켜 사질토의 탈수율을 측정하였다. 실험 결과, 주파수를 고정시키고 전압을 변경할 경우, 400V일 때 10~20분이 경과된 시점에서 탈수율이 가장 높았으며, 이 때 주파수는 20kHz로 나타났다(그림 3.11). 이를 정량적인 값을 도출하기 위하여 식 3.12을 이용하여 탈수량 증가비를 계산하였으며, 전압 400V와 주파수 20kHz로 15분이 경과된 시점에서 가장 최적의 값을 나타내었다. 이 때 약 15.8%의 탈수증가량을 나타내었다(그림 3.12과 그림 3.13).

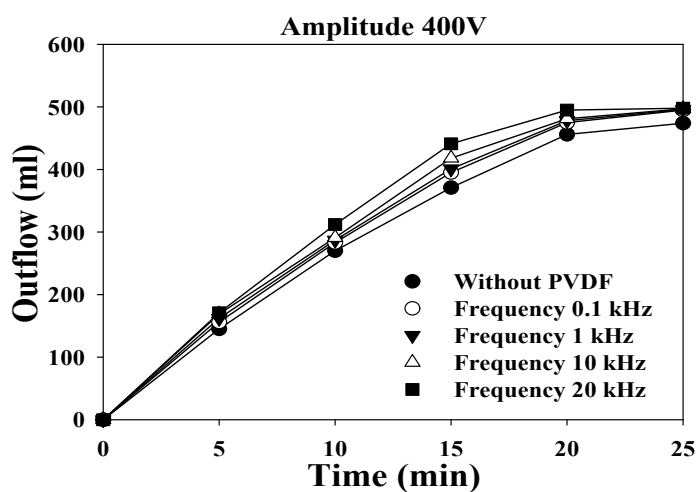
$$\frac{v_1 - v_0}{v_0} \times 100(\%) \quad (3.12)$$

여기서, v_0 : PVDF를 사용하지 않았을 경우의 유출량

v_1 : PVDF를 사용하였을 경우의 유출량

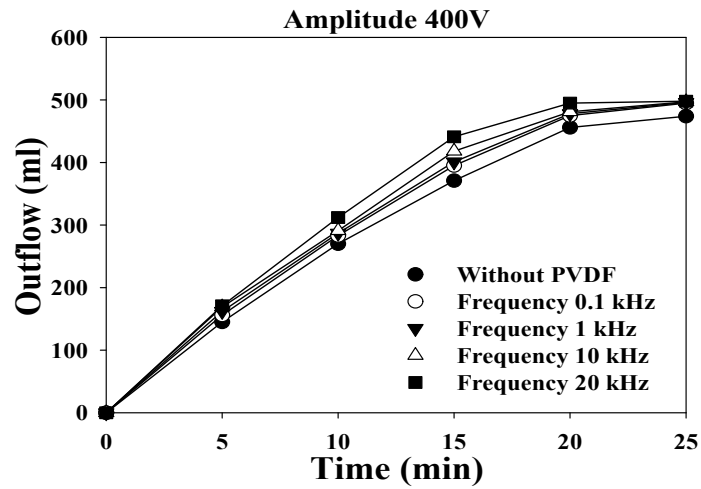
표 3.5 실험조건

구분	전압(V)	주파수(kHz)
Case 1	4, 10, 100, 400	20
Case 2	400	0.1, 1, 10, 20



(a) Case 1

그림 3.11 사질토의 시간-탈수량 그래프(계속)



(b) Case 2

그림 3.11 사질토의 시간-탈수량 그래프

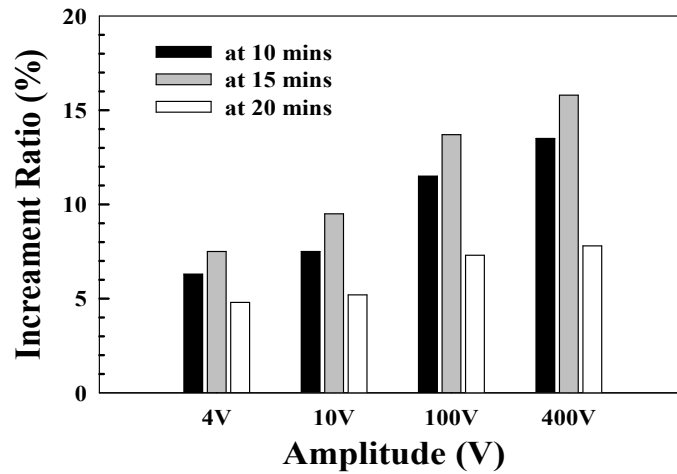


그림 3.12 전압 변화에 따른 유출량 증가비

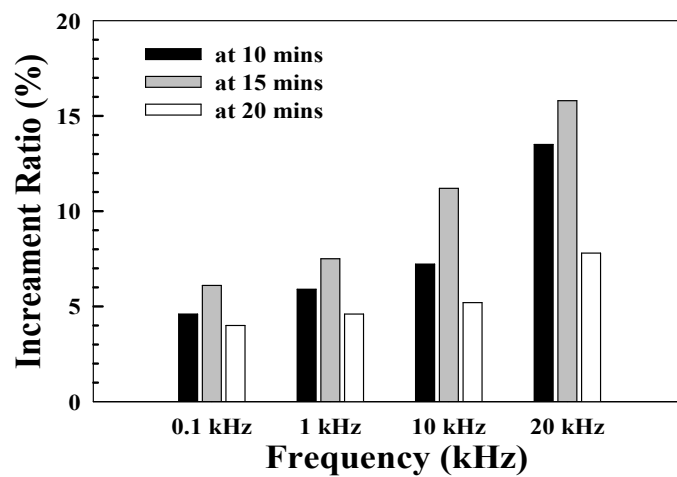
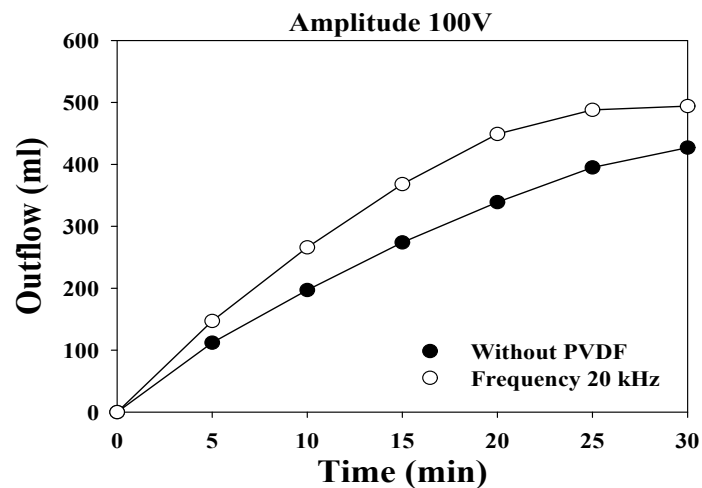


그림 3.13 주파수변화에 따른 탈수량 증가비

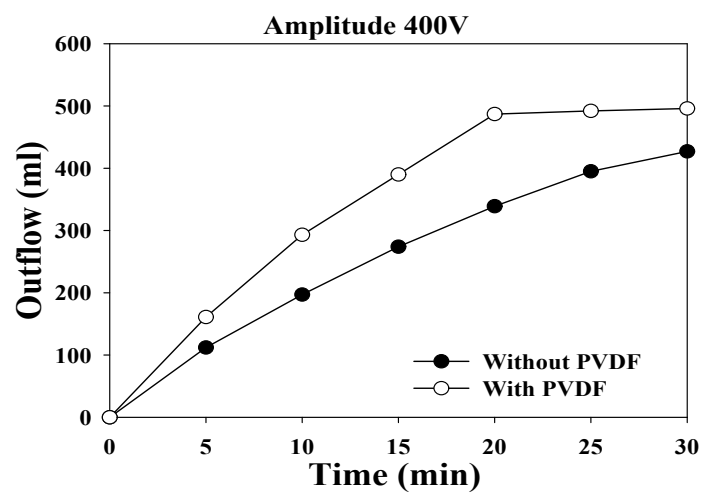
8. PVDF를 적용한 사질점토의 탈수실험

가. 예비실험

예비실험은 본 실험에 앞서 PVDF 필름을 적용한 사질점토의 탈수실험에서 어느 전압에서 효율이 최대인지를 파악하기 위하여 수행되었다. 이에 주파수를 20kHz로 고정시키고 전압을 100V와 400V로 변화시켜 전압의 증가에 따른 사질점토의 탈수량을 측정하였다. 실험 결과, 전압 증가와 탈수량의 증가는 비례하는 것을 알 수 있었으며, 그림 3.14에 정리하였다.



(a) 20kHz-100V



(b) 20kHz-400V

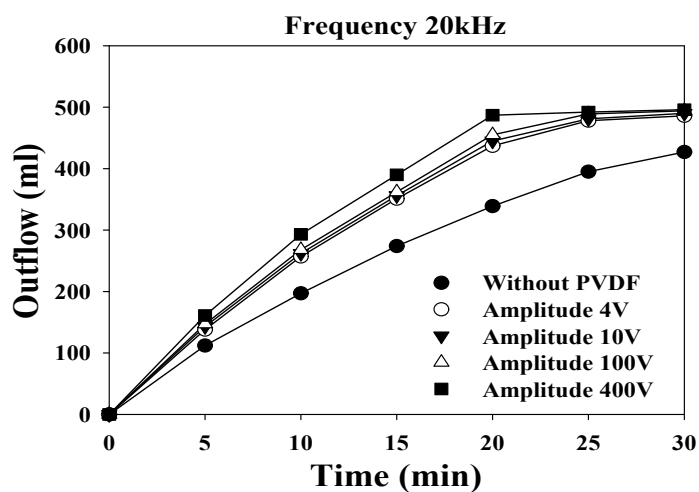
그림 3.14 예비실험을 통한 사질점토의 시간-유출량 그래프

나. 사질점토의 탈수실험

예비실험으로부터 PVDF 필름을 적용한 사질점토의 탈수 시 전압의 증가와 유출량의 증가는 비례하는 것을 알 수 있었다. 사질점토의 탈수 실험에서는 예비실험결과를 바탕으로 표 3.6의 조건에 따라 전압과 주파수를 변화시켜 사질점토의 탈수율을 측정하였으며, 이 때 사질점토는 사질토 90%와 점토 10%로 구성하였다. 실험 결과, 주파수를 고정시키고 전압을 변경할 경우, 400V일 때 15~25분이 경과된 시점에서 탈수율이 가장 높았으며, 이 때 주파수는 20kHz로 나타났다(그림 3.15). 이를 정량적인 값을 도출하기 위하여 식 3.12을 이용하여 탈수량 증가비를 계산하였으며, 전압 400V와 주파수 20kHz로 25분이 경과된 시점에서 가장 최적의 값을 나타내었다. 이 때 약 30%의 탈수증가량을 나타내었다(그림 3.16과 그림 3.17).

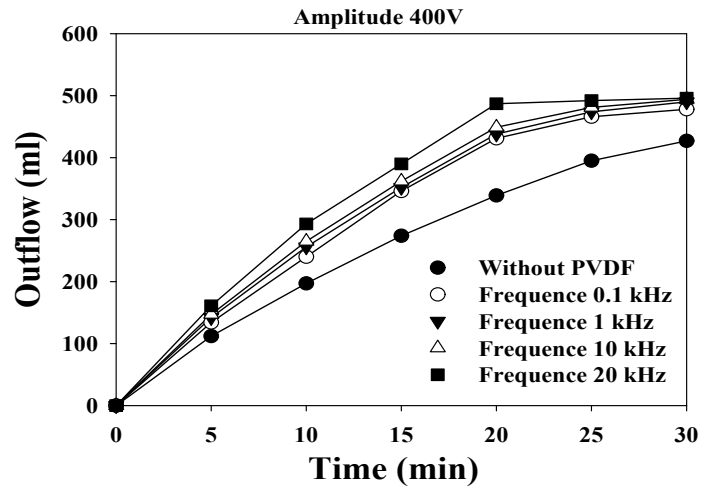
표 3.6 실험조건

구분	전압(V)	주파수(kHz)
Case 1	4, 10, 100, 400	20
Case 2	400	0.1, 1, 10, 20



(a) Case 1

그림 3.15 사질점토의 시간-탈수량 그래프(계속)



(b) Case 2

그림 3.15 사질점토의 시간-탈수량 그래프

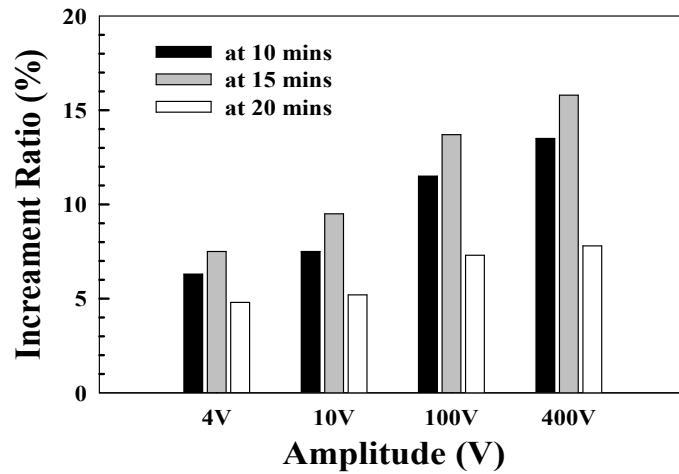


그림 3.16 전압 변화에 따른 유출량 증가비

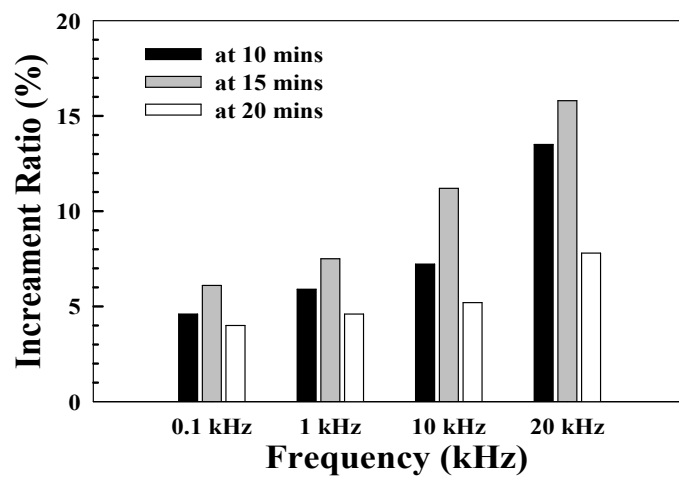
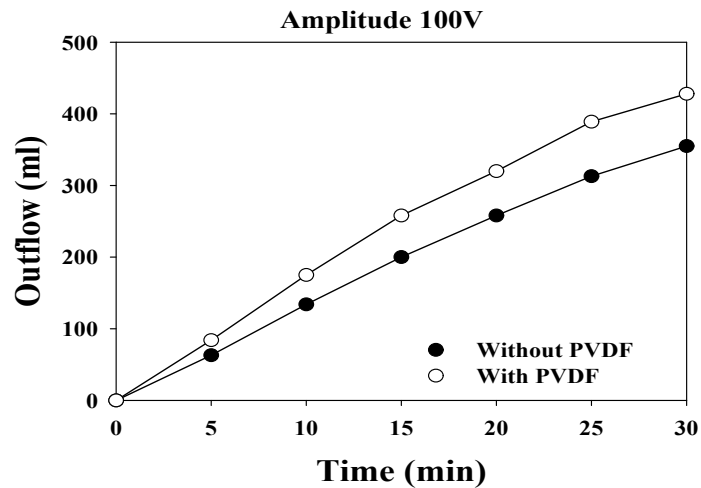


그림 3.17 주파수변화에 따른 탈수량 증가비

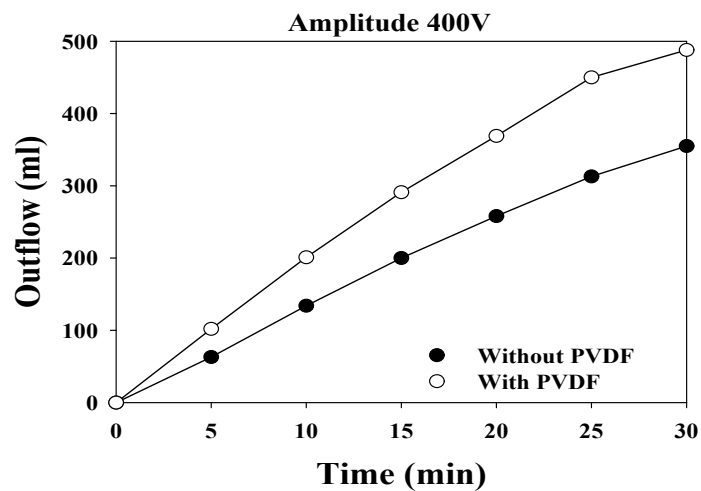
9. PVDF를 적용한 화강풍화토의 탈수실험

가. 예비실험

예비실험은 본 실험에 앞서 PVDF 필름을 적용한 화강풍화토의 탈수실험에서 어느 전압에서 효율이 최대인지를 파악하기 위하여 수행되었다. 이에 주파수를 20kHz로 고정시키고 전압을 100v와 400v로 변화시켜 전압의 증가에 따른 화강풍화토의 탈수량을 측정하였다. 실험 결과, 전압 증가와 탈수량의 증가는 비례하는 것을 알 수 있었으며, 그림 3.18에 정리하였다.



(a) 20kHz-100V



(b) 20kHz-400V

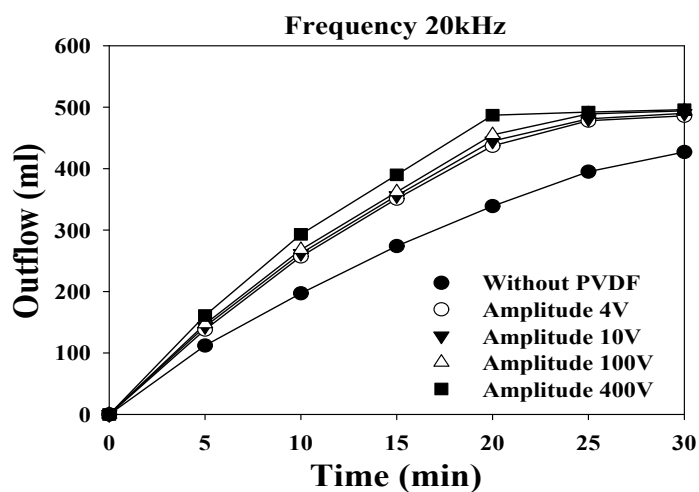
그림 3.18 예비실험을 통한 화강풍화토의 시간-유출량 그래프

나. 화강풍화토의 탈수실험

예비실험으로부터 PVDF 필름을 적용한 화강풍화토의 탈수 시 전압의 증가와 유출량의 증가는 비례하는 것을 알 수 있었다. 화강풍화토의 탈수 실험에서는 예비실험결과를 바탕으로 표 3.7의 조건에 따라 전압과 주파수를 변화시켜 화강풍화토의 탈수율을 측정하였으며, 이 때 화강풍화토는 사질토 90%와 점토 10%로 구성하였다. 실험 결과, 주파수를 고정시키고 전압을 변경할 경우, 400V일 때 20~30분이 경과된 시점에서 탈수율이 가장 높았으며, 이 때 주파수는 20kHz로 나타났다(그림 3.19). 이를 정량적인 값을 도출하기 위하여 식 3.12을 이용하여 탈수량 증가비를 계산하였으며, 전압 400V와 주파수 20kHz로 30분이 경과된 시점에서 가장 최적의 값을 나타내었다. 이 때 약 30%의 탈수증가량을 나타내었다(그림 3.20과 그림 3.21).

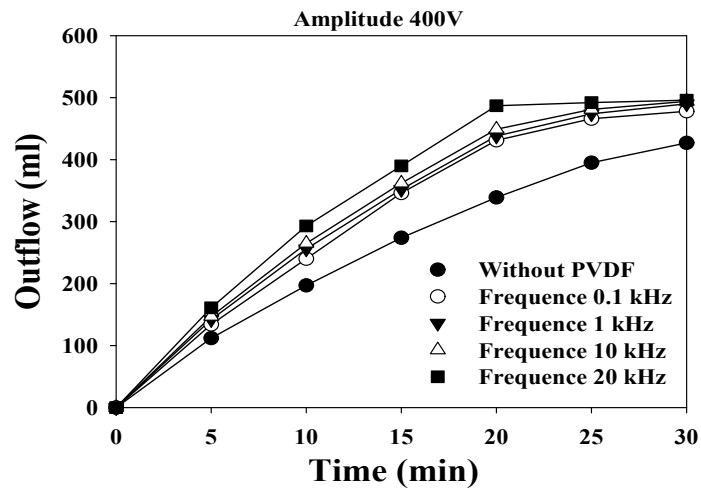
표 3.7 실험조건

구분	전압(V)	주파수(kHz)
Case 1	4, 10, 100, 400	20
Case 2	400	0.1, 1, 10, 20



(a) Case 1

그림 3.19 화강풍화토의 시간-탈수량 그래프(계속)



(b) Case 2

그림 3.19 화강풍화토의 시간-탈수량 그래프

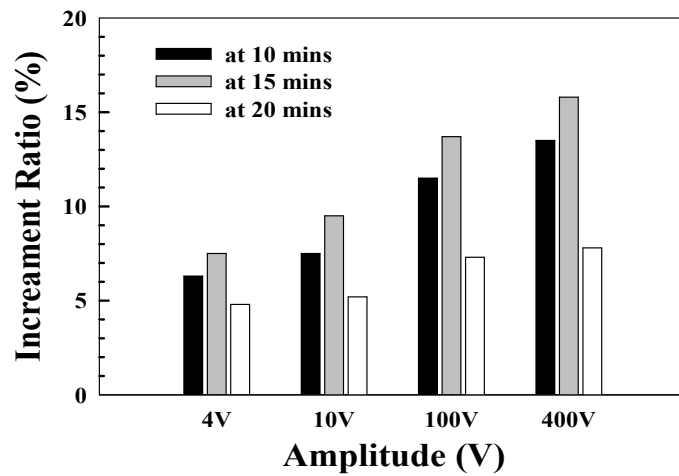


그림 3.20 전압 변화에 따른 유출량 증가비

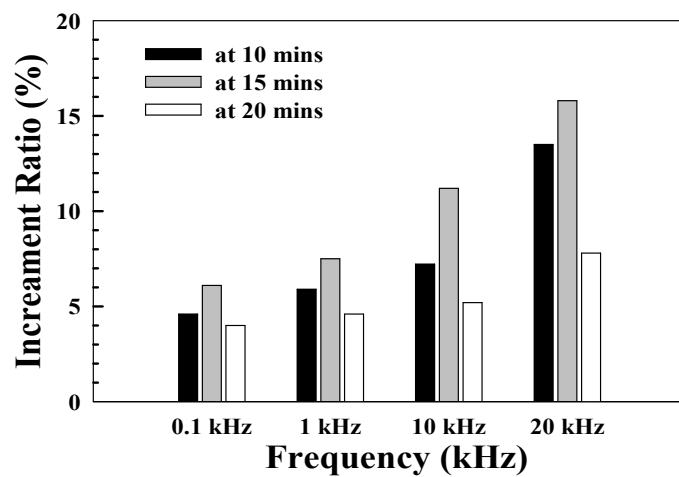
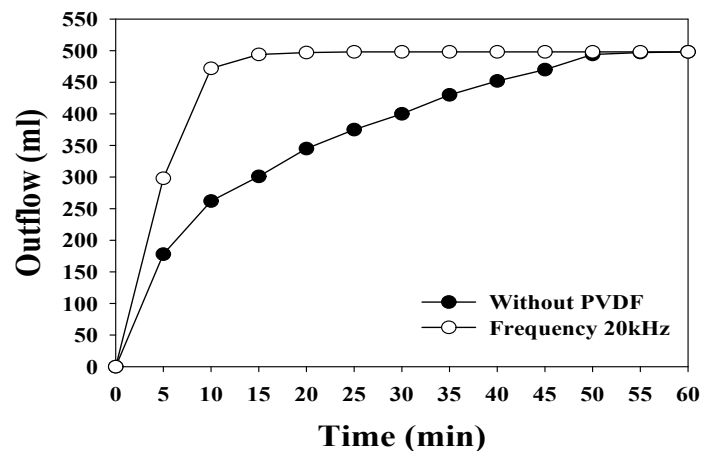


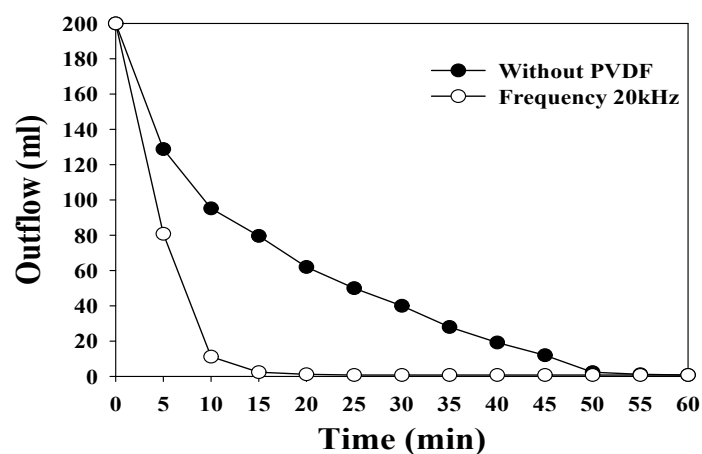
그림 3.21 주파수변화에 따른 탈수량 증가비

10. PVDF를 적용한 OO지역 준설토의 탈수시험

신호발생기와 증폭기를 사용하여 주파수는 20kHz로 고정하고 전압을 400V로 하여 PVDF 필름에 적용 한 후에 각각의 조건에서 배출되는 물의 양을 시간에 따라 측정하였다. 시간은 최초 PVDF 필름을 적용한 시점으로부터 60분 경과 시까지 측정하였으며, 5분 경과 때마다의 배출량을 측정하였다. 10분 경과되었을 때에 가장 많은 양의 간극수가 배출되었으며, 그 이후 배출량의 변화가 거의 없었다. 배출된 간극수의 양은 약 225ml이고 이는 무처리일 경우에 비하여 약 34.9%의 증가를 보였다. 이에 따라 같은 양의 간극수를 배출할 경우에 PVDF 필름의 적용으로 PVDF 필름을 적용하지 않았을 때보다 간극수의 배출 시간이 단축되어 PVDF필름 적용으로 사질토의 탈수축진이 향상됨을 알 수 있었다. 실험결과를 그림 3.22에 정리하였다.



(a) 20kHz - 400V 유출량



(b) 20kHz - 400V 함수비

그림 3.22 20kHz - 400V 유출량과 함수비

11. PVDF 필름을 이용한 실내실험II

가. 실험 조건 및 방법

이 실험은 준설토 통합 처리 장치를 제작시 사용하게 될 실제 사이즈의 PVDF 필름의 준설토 탈수 효과를 알아보기 위한 목적으로 진행되었다. 실험에 사용된 PVDF 필름의 크기는 30cm×30cm이며, 흙의 종류는 사질토와 준설토를 80:20으로 혼합하여 사용하였다. 실험장비는 앞서 수행한 탈수실험과 동일하며, 실험조건과 방법을 표 3.8과 그림 3.23에 정리하였다.

표 3.8 실험 조건

구분	흙의 종류	
	사질점토	
	사질토	점토
흙 무게(g)	2400	600
물의 양(ml)	2000	
필름크기(cm×cm)	30×30	



(a) 투수층 조성



(b) PVDF필름 설치

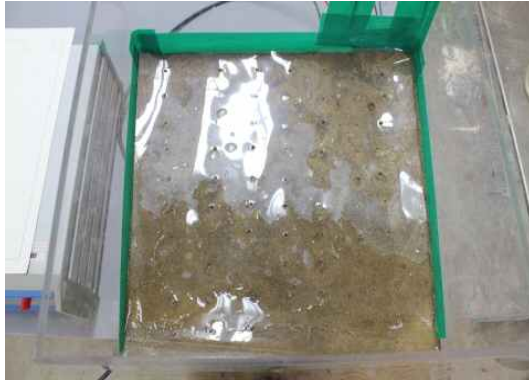


(c) 흙 성토



(d) 포화

그림 3.23 실험 방법(계속)



(e) 다공질 필름 설치



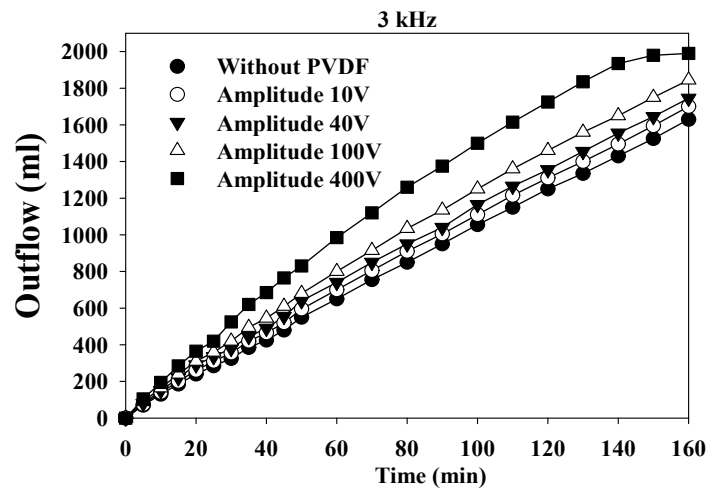
(f) 투수실험 실시

그림 3.23 실험 방법

나. 실험 결과

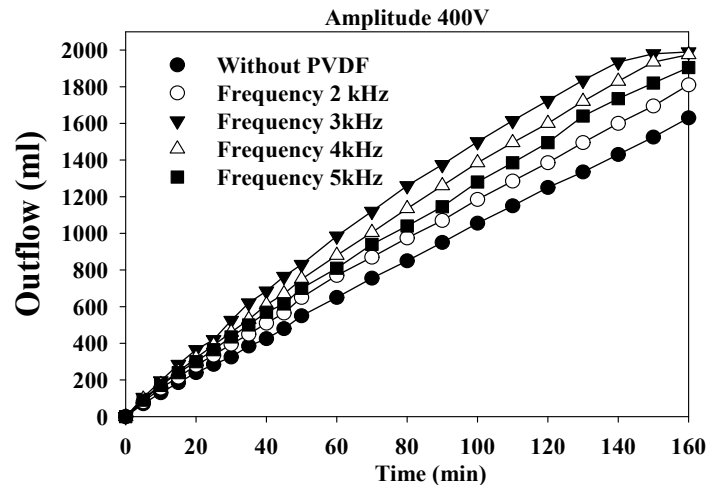
이 실험은 준설토 통합 처리 장치를 제작시 사용하게 될 실제 사이즈의 PVDF 필름의 준설토 탈수 효과를 알아보기 위한 목적으로 진행되었으며, 총 160분 시간동안의 유출량을 측정하였다.

실험결과, 모든 경우에서 탈수량이 PVDF 필름을 사용하여 탈수한 방법이 PVDF 필름을 사용하지 않고 탈수한 방법보다 상대적으로 크게 나타났다. 특히, 약 110분이 지난 시점에서 가장 큰 차이를 보였으며, 약 31%의 차이를 보였다. 즉, PVDF 필름을 사용하여 탈수한 방법이 PVDF 필름을 사용하지 않고 탈수한 방법보다 약 31% 크게 나타났다. 이때 전압과 주파수는 400v와 3kHz로 나타났으며, 이 실험에서 최적의 조건으로 나타났다. 이를 그림 3.24에 정리하였다.



(a) 전압을 변경하여 측정한 시간-유출량

그림 3.24 시간-탈수량 관계(계속)



(b) 주파수를 변경하여 측정한 시간-유출량

그림 3.24 시간-탈수량 관계

12. 연구결과

이 실험은 PVDF 필름을 이용하여 사질토, 사질점토, 화강풍화토 그리고 OO지역 준설토에 대한 탈수효율을 분석하고자 하였다. 실험결과로 PVDF 필름을 적용하였을 경우에 자연탈수방법보다 대상지반이 사질토일 경우에 약 15.8%의 탈수 효율이 증가하였으며, 사질점토, 화강암질토 그리고 OO지역 준설토의 경우에는 30% 이상의 탈수 효율이 증가하였다.

가. 모든 경우에서 탈수량이 PVDF 필름을 사용하여 탈수한 방법이 PVDF 필름을 사용하지 않고 탈수한 방법보다 상대적으로 크게 나타났다.

나. 사질토의 탈수 실험 결과, 주파수를 고정시키고 전압을 변경할 경우, 400v일 때 10~20분이 경과된 시점에서 탈수율이 가장 높았으며, 이 때 주파수는 20kHz로 나타났다. 이 때, 약 15.8%의 탈수증가량을 나타내었다.

다. 사질점토의 탈수 실험 결과, 주파수를 고정시키고 전압을 변경할 경우, 400v일 때 15~25분이 경과된 시점에서 탈수율이 가장 높았으며, 이 때 주파수는 20kHz로 나타났다. 이 때, 약 30%의 탈수증가량을 나타내었다.

라. 화강풍화토의 탈수 실험 결과, 주파수를 고정시키고 전압을 변경할 경우, 400v일 때 20~30분이 경과된 시점에서 탈수율이 가장 높았으며, 이 때 주파수는 20kHz로 나타났다. 이 때, 약 30%의 탈수증가량을 나타내었다.

마. 준설토 통합 처리 장치를 제작시 사용하게 될 실제 사이즈의 PVDF 필름의 준설토 탈수실험 결과, 모든 경우에서 탈수량이 PVDF 필름을 사용하여 탈수한 방법이 PVDF 필름을 사용하지 않고 탈수한 방법보다 상대적으로 크게 나타났다. 특히, 약

110분이 지난 시점에서 가장 큰 차이를 보였으며, 약 31%의 차이를 보였다. 이 때, 전압과 주파수는 400V와 3kHz로 나타났으며, 이 실험에서 최적의 조건으로 나타났다.

아. OO지역 준설토의 경우 주파수(20kHz)를 고정하고 전압(400V)으로 실험한 결과 10분 경과되었을 때에 가장 많은 양의 간극수가 배출되었으며, 배출된 간극수의 양은 약 225ml이고 34.9%의 증가율을 보였다.

탈수량을 비교·분석한 결과, 모든 경우에서 자연탈수방법의 경우보다 PVDF 필름을 적용할 경우에 탈수효율이 좋은 것으로 나타났다. 대상지반이 사질토일 경우에는 사질토의 특성(투수계수가 높음)으로 큰 효과를 보이지 않았으나 대부분의 경우에서 PVDF 필름을 이용한 유출량이 자연 탈수보다 효과적인 것을 알 수 있었으므로 PVDF 필름을 이용한 탈수가 효과적이라고 판단된다.

제2절 초음파 장치를 이용한 탈수

1. 초음파

가. 초음파의 정의

초음파(ultrasound)는 인간의 가청영역(20~20,000Hz)을 넘는 주파수가 높은 음파를 말한다. 여기서 음파(sound wave)는 공기나 물 또는 고체 등의 내부를 통해서 전파되는 소리의 파동을 뜻한다. 초음파는 전기나 빛과 같이 파동에너지에 갖지만 상대적으로 전파속도가 느리고 매질의 밀도(엄연한 의미로는 음향 임피던스)가 차이가 나는 곳에서는 쉽게 반사되거나 산란되는 특성을 갖는다. 또한, 초음파가 특정한 매질을 통과할 때에는 감쇠나 위상의 변화, 시간의 차이가 나는 특성을 나타내게 되므로, 이러한 초음파의 제반 특성을 활용한 각종 측정장비와 산업장비들이 다양하게 이용되고 있다. 대표적인 초음파의 응용분야로는 초음파 진단기, 초음파를 이용한 수중청음기(sonar), 초음파를 이용한 가습기나 세정기 등이 있다. 그림 3.25은 전자기파를 주파수별로 구분한 것으로 이는 사람이 들을 수 있는 가청음파 사람이 들을 수 없는 영역으로 나누어 볼 수 있다.

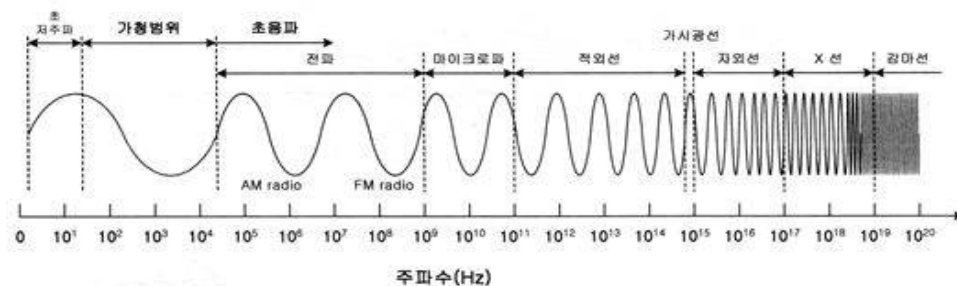


그림 3.25 전자기파의 주파수별 구분

나. 초음파의 기초적인 작동원리

초음파를 활용한 여러 가지 기술은 크게 초음파의 전파신호를 이용하는 방법과 초음파의 전달 에너지를 이용하는 방법으로 크게 분류된다. 먼저, 초음파의 전파신호를 이용하는 방법은 초음파의 전파속도가 매질의 밀도와 입자 속도에 따라서 일정한 값을 갖게 되며, 전파과정에서 매질의 밀도와 입자 속도에 따라서 일정한 값을 갖게 되며, 전파과정에서 매질이 상이한 물체나 경계면에서는 반사하는 원리를 계측용 신호로 이용하게 된다. 대표적인 초음파 전파신호의 응용사례는 비파괴 검사장비, 의료용 진단기 및 초음파 센서를 이용한 각종 측정기들이다. 둘째로, 초음파의 전달 에너지를 이용하는 방법은 초음파에 의한 고주파의 음압을 이용하여 매질 내부에서 공동(cavitation)현상을 이용하거나 진동 가속도를 유발시켜서 특정한 일을 수행하는 것을 뜻한다. 대표적인 초음파 전달 에너지의 응용사례로는 초음파 세정기, 초음파 용접기, 초음파 모터 등이 있다. 그림 3.26은 우리 주변에서 사용되는 초음파를 크게 3가지로 분류하여 각기 분야에서 널리 사용되고 있는 것을 요약하였다.

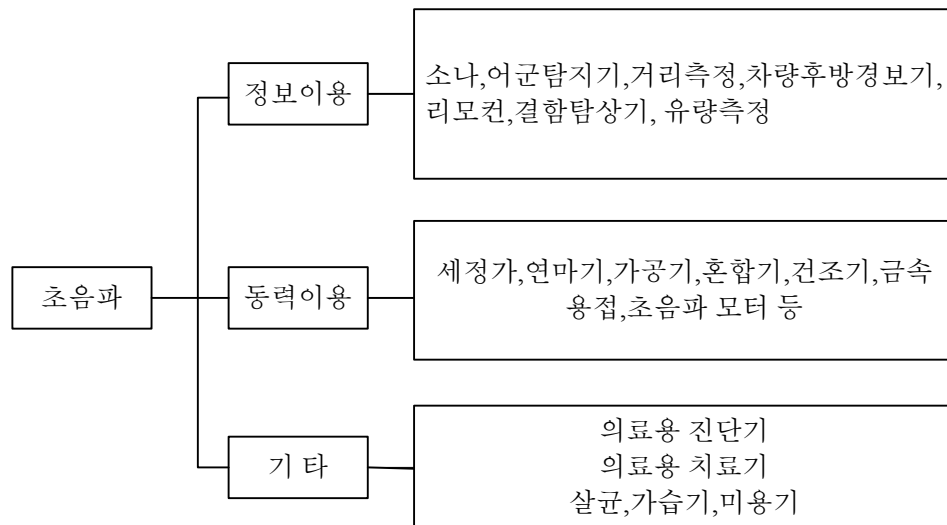


그림 3.26 생활 속의 초음파

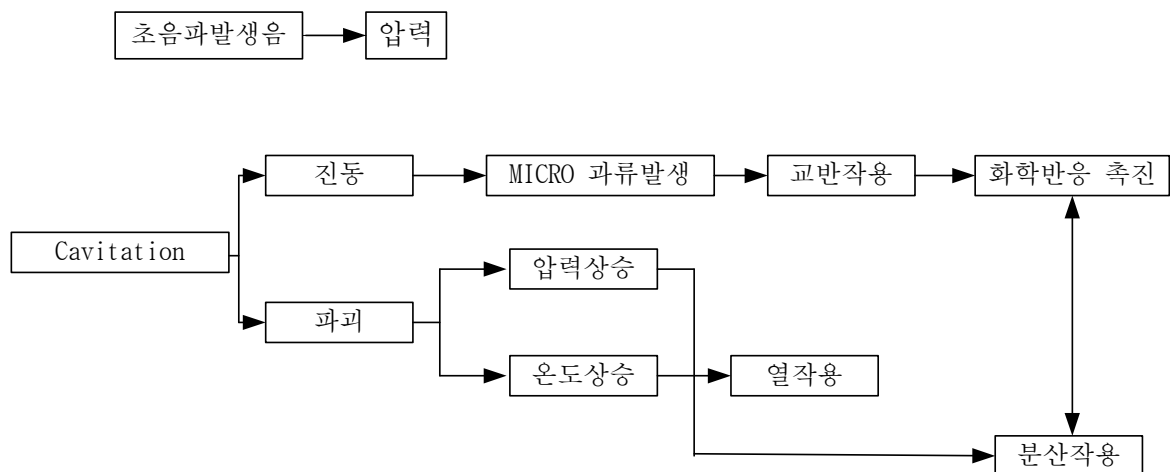


그림 3.27 초음파의 응용원리

초음파의 적용은 매우 광범위하게 이용되기 시작하였다. 압밀과 관련된 공법으로는 개

발되지 않았지만 토양오염물질을 제거하기 위하여 토양의 수분 및 오염물의 이동을 촉진시키는 방법으로도 초음파는 응용되기 시작하였다. 또한 생물학 분야에서는 매우 강한 초음파를 이용하여 세포를 파괴하는데 사용되기도 하였고, 효소세척에도 사용되고 있다(Frederick, 1965). 최근 들어 오염물질의 제거 분야에서 활발히 연구되어지고 있다. 몇몇 연구자는 토양오염 정화 및 복원법에 초음파의 적용성에 관한 연구를 하였는데 초음파를 토양에 투사하여 토양 매체 내에 압력수두를 유발시키며 유체 저항성을 감소시켜 간극수 및 오염물의 이동이 촉진되는 것을 보였다.

최근 환경공학 분야에서는 초음파의 이용사례가 급증하고 있는데 이는 초음파의 이용이 비교적 용이할 뿐만 아니라 시간의 단축 및 2차적 오염의 문제가 전혀 없기 때문이기도 한다. Berliner et al.(1984,1987)은 비교적 강도가 높은 초음파를 오염된 토양에 가하였을 때 입자의 세척율이 증가하였다고 발표하였고 Pogosyan et al.(1989)은 기름으로 오염된 후 물로 포화된 흙 시료에 초음파를 가하였을 때 기름과 물의 분리가 매우 빠르게 일어남을 보였다. Nikolayevskiy(1989)는 흙 입자사이에 막혀서 빠져나오지 못하는 기름 방울이 초음파에 의한 진동에 의해 기름방울이 빠져나올 수 있다고 하였다.

Cleveland & Garg(1993)는 투수계수가 비교적 낮은 토양이 오염된 경우 초음파의 적용으로 오염물이 흡착되어 있는 아주 미세한 입자가 쉽게 빠져나움을 보였다. 또한 Red야 et al.(1993), Reddi와 Challa(1994) 및 Reddi & Wu(1996)에 의하면 점토시료에 초음파를 가하면 시료의 투수계수가 급격히 증가함을 보였다. Lovenitti et al.(1995)도 초음파에 의한 점토시료의 투수계수 증가에 관하여 연구를 하였다. 그들은 다공매질(porous media)에서의 초음파의 영향을 크게 두 가지로 요약하였는데 초음파에 의한 다공매질의 골격구조의 변화와 간극액의 변화로 구분하였다. 구조에 대한 영향으로는 우선 초음파 에너지에 의해 흙 입자의 재배열이 일어나서 흐름에 대한 저항이 감소되며 흙입자들의 떨림으로 인하여 일시적인 간극비의 증가를 들고 있으며 간극을 막고 있는 이물질들이 떨림에 의하여 떨어져나가서 흐름을 용이하게 한다고 정리하였다. 간극액에 대한 영향으로 간극액의 온도와 압력이 증가하고 점도 및 표면장력이 감소하여 간극사이로 간극액이 더 쉽게 흘러갈 수 있도록 한다는 것이다. 이후 국내에서는 Kim et al.(2003)에 의하여 초음파 투사에 따른 흙 시료 내 투수속도의 증가와 그 영향인자의 변화에 대한 연구가 진행되었다.

2. 초음파 장치를 이용한 탈수 실험

가. 실험 재료 및 장비

이 실험은 PVDF 필름원리와 같이 초음파(ultrasound)를 발생시키는 소닉배스(sonnic bath)를 이용하여 준설토의 탈수 효과를 알아보고자 표 3.9에 나타난 시료를 사용하여 실험하였다. 초음파 장비는 최대 1500W의 강도로 조사할 수 있으며, 주파수 20kHz로 고정된 장비로 단조식 초음파 장치이다(그림 3.28).

표 3.9 실험 시 사용된 흙의 종류

	흙의 종류			
	사질토	사질점토		준설토
		사질토	점토	
흙 무게(g)	1500	1050	450	1500
물의 양(ml)	2000			
세척기 크기 (cm×cm)	19.5×19.5			



그림 3.28 초음파의 응용원리

나. 실험 방법

초음파 장치에 투수층을 조성하고 다공질 필름을 설치한 뒤 흙을 성토하였다. 흙을 성토한 후에 2000ml의 물로 완전포화 시키고 실험 조건에 따라 초음파를 조사하였다. 실험 방법을 그림 3.29에 정리하였다.



(a) 투수층 설치



(b) 다공질 필름 설치

그림 3.29 실험 방법(계속)



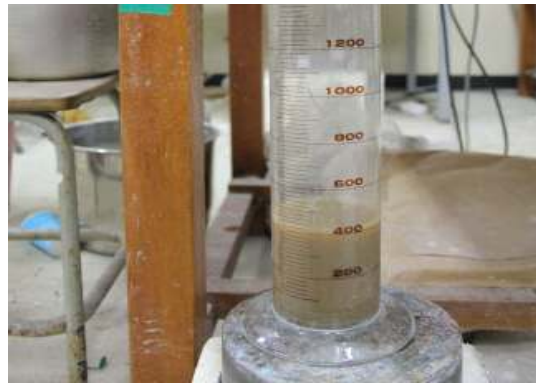
(c) 시료 준비



(d) 흙 포화



(e) 초음파 조사



(f) 유출량 측정

그림 3.29 실험 방법

다. 실험 결과

(1) 사질토

초음파를 조사하여 사질토를 탈수한 결과, 약 5~20분 동안 초음파를 조사한 경우에 탈수량이 최대였으며, 초음파 강도가 1500W일 때, 초음파를 조사하지 않은 경우보다 최대 약 30% 크게 나타났다. 이 때, 조사시간은 약 10분으로 나타났다. 10분이 경과한 후에는 초음파를 조사하지 않은 경우와 점진적으로 비슷한 탈수율을 나타내었다. 이 결과로부터 초음파 최적 조사시간을 알 수 있었다. 또한 초음파 강도가 클수록 탈수량이 크게 나타났으며, 이를 그림 3.30과 그림 3.31에 정리하였다.

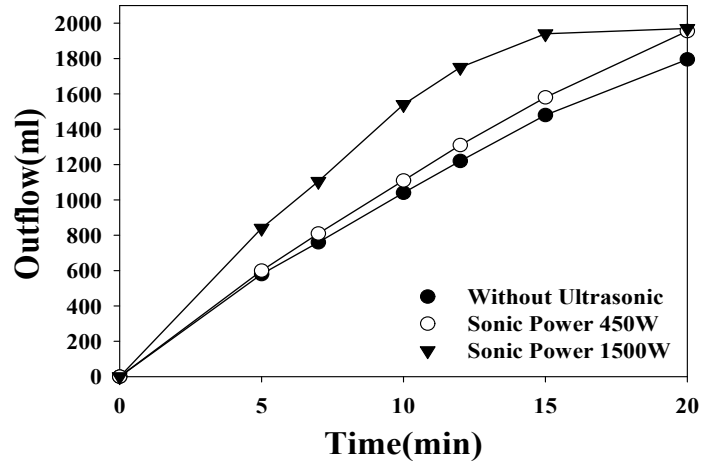


그림 3.30 사질토의 시간-유출량 그래프

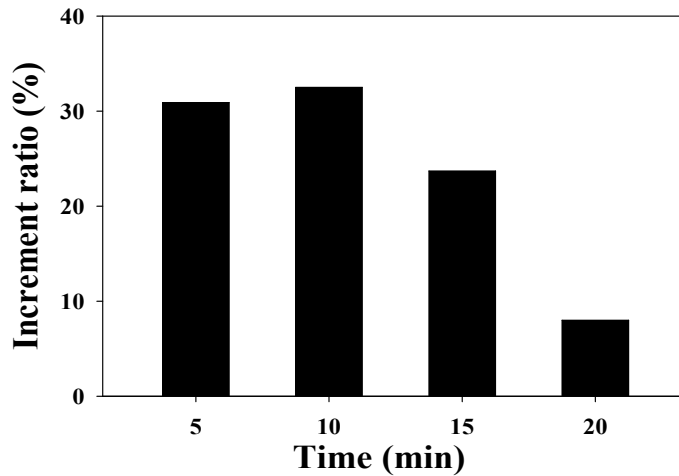


그림 3.31 사질토의 시간-유출증가량 그래프

(2) 사질점토

초음파를 조사하여 사질토를 탈수한 결과, 약 5~20분 동안 초음파를 조사한 경우에 탈수량이 최대였으며, 초음파 강도가 1500W일 때, 초음파를 조사하지 않은 경우보다 최대 약 38% 크게 나타났다. 이 때, 조사시간은 약 10분으로 나타났다. 10분이 경과한 후에는 초음파를 조사하지 않은 경우와 점진적으로 비슷한 탈수율을 나타내었다. 이 결과로부터 초음파 최적 조사시간을 알 수 있었다. 또한 초음파 강도가 클수록 탈수량이 크게 나타났으며, 이를 그림 3.32와 그림 3.33에 정리하였다.

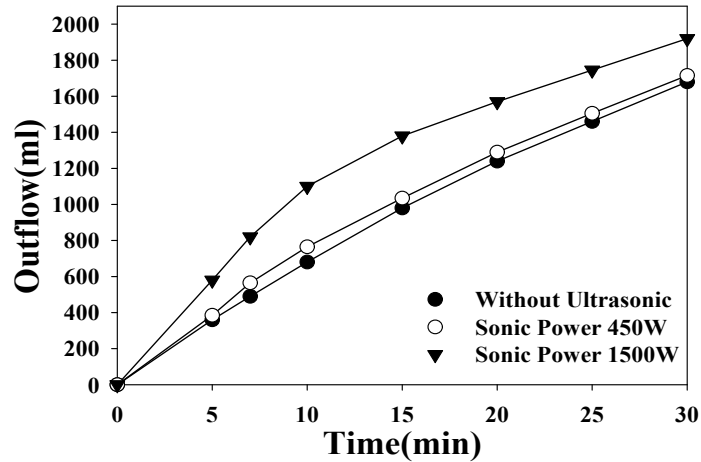


그림 3.32 사질토의 시간-유출량 관계

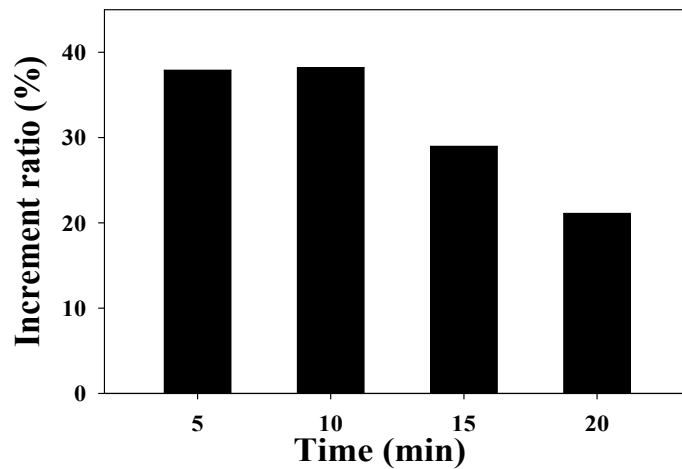


그림 3.33 사질토의 시간-유출증가량 관계

(3) 준설토

초음파를 조사하여 준설토를 탈수한 결과, 약 5~20분 동안 초음파를 조사한 경우에 탈수량이 최대였으며, 초음파 강도가 1500W일 때, 초음파를 조사하지 않은 경우보다 최대 약 35% 크게 나타났다. 이 때, 조사시간은 약 20분으로 나타났으며, 20분이 경과한 후에는 초음파를 조사하지 않은 경우와 점진적으로 비슷한 탈수율을 나타내었다. 이 결과로부터 초음파 최적 조사시간을 알 수 있었다. 또한 초음파 강도가 클수록 탈수량이 크게 나타났으며, 이를 그림 3.34와 그림 3.35에 정리하였다.

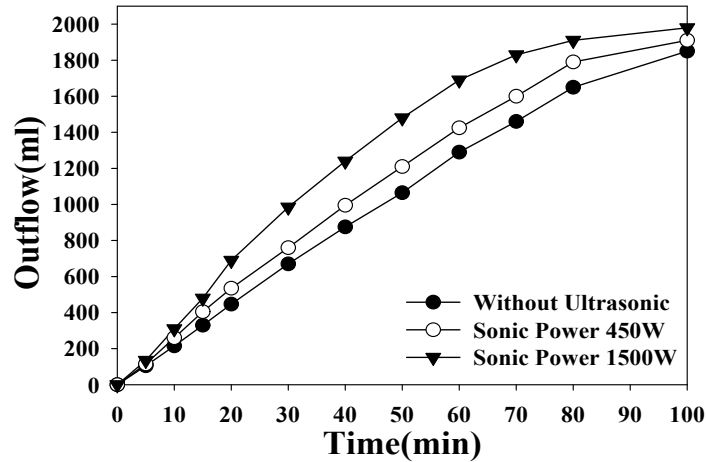


그림 3.34 준설토의 시간-유출량 관계

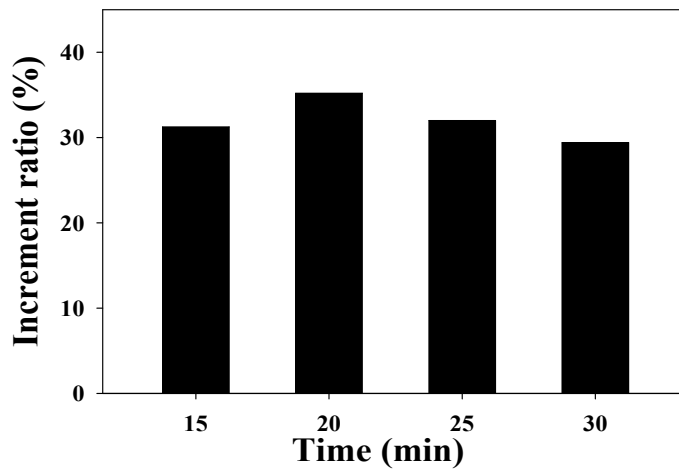


그림 3.35 준설토의 시간-유출증가량 그래프

3. PVDF 필름과 초음파 장치의 음압측정(acoustic pressure test)

가. 실험 개요

PVDF 필름과 초음파 장치는 음파에너지를 발생하고 이 원리를 이용하여 다양한 분야에 이용되고 있다. 이 실험은 PVDF 필름과 초음파 장치에서 발생하는 음파에너지의 음압(acoustic pressure)을 측정하기 위하여 실험 하였으며, 음압을 측정하기 위하여 특수장비를 사용하였다.

나. 실험 장비

PVDF 필름과 초음파의 음압을 측정하기 위해 사용된 장비는 어쿠스틱 측정장비로 하이드로폰(hydrophone)을 사용하여 특수 프로그램(NVGATE V6.00)을 사용하여 음압을 측정하였다. 각 장비의 제원과 사진을 표 3.10과 그림 3.36에 정리하였다.

표 3.10 하이드로폰(hydrophone)의 제원

품명	수신감도	주파수 범위	측정최대 깊이
Hydrophone (G.R.A.S Type 10CC)	-170dB $\pm$ 3dB	15Hz ~ 40kHz $\pm$ 2dB	600m



(a) 하이드로폰(hydrophone)



(b) 어쿠스틱(acoustic) 측정장비

그림 3.36 실험 장비

다. 실험 방법

하이드로폰(G.R.A.S Type 10CC)을 PVDF 필름의 중앙에 위치시키고 NVGATE V6.00 프로그램을 이용하여 음압을 측정하였고 초음파 장치의 경우, 초음파세척기 중앙에 하이드로폰을 고정하여 음압(acoustic pressure)을 측정하였다. PVDF 필름의 경우 10kHz를 기준으로 하여 전압을 변화시켜가면서 음압을 측정하였으며, 최대 전압인 400V 까지 발생시켜 주파수를 달리하여 음압을 측정하였다. 초음파 장치의 경우, 주파수가 고정되어있기 때문에 초음파 강도를 달리하여 음압을 측정하였다. 음압측정방법을 그림 3.37에 정리하였다.



(a) PVDF 음압측정



(b) 초음파 음압측정

그림 3.37 실험방법

라. 실험 결과

초음파 장치로 음압을 측정하기 전에 초음파조사시간과 온도의 변화의 상관관계를 확인하기 위하여 초음파 강도에 따른 시간별 온도를 측정하였다. 실험결과 시간이 경과될수록 온도가 상승하다가 어느 시점에서 일정한 온도를 유지하는 경향을 나타냈다. 또한, 초음파의 강도가 클수록 온도의 증가 속도는 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 큰 온도 차이를 보였다(그림 3.38). 그러나 초음파를 이용한 탈수 실험 시 조사시간은 30분 이전으로 초음파에 의한 온도변화의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다.

PVDF 필름을 사용하여 탈수한 경우와 초음파장비를 이용하여 탈수실험을 한 결과를 살펴보면 초음파를 이용하여 탈수한 경우에 PVDF 필름을 사용하여 탈수한 경우보다 상대적으로 탈수에 효과적이었으나 그 차이는 크지 않는 것으로 나타났다. 하지만 음압(acoustic pressure)측정 결과, 초음파의 음압보다 PVDF 필름의 음압이 크게 나타났다(그림 3.39). 또한, PVDF의 주파수를 달리하여 음압을 측정한 결과, 주파수가 증가함에 따라 음압이 점차 증가하는 것으로 나타났다(그림 3.40).

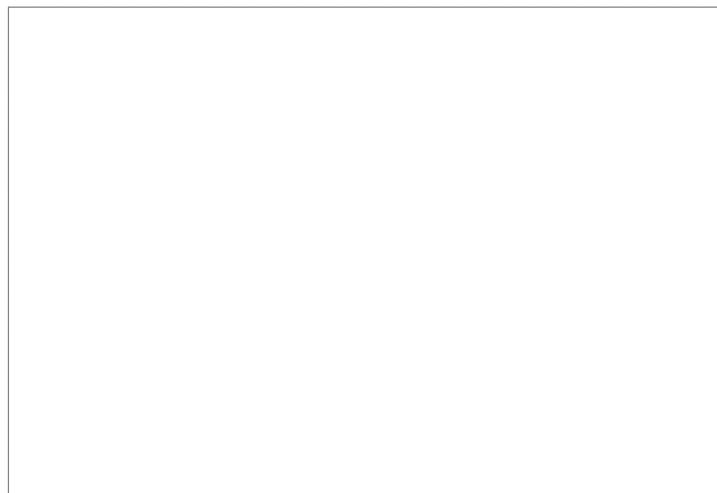
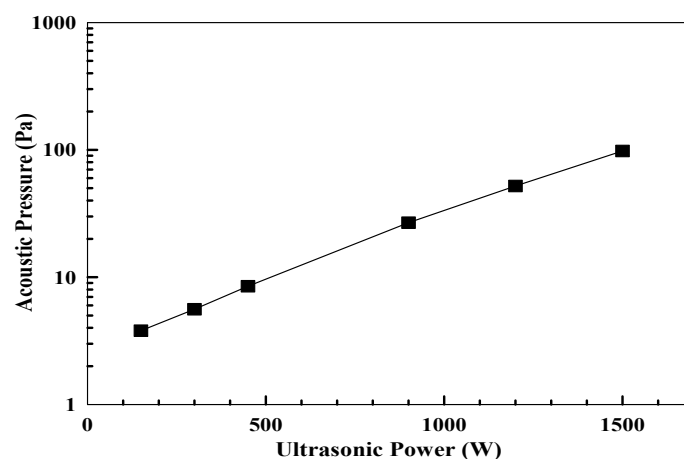


그림 3.38 시간-온도변화 그래프



(a) 초음파를 이용한 출력-음압 그래프

그림 3.39 초음파와 PVDF의 음압 그래프(계속)



(b) PVDF를 이용한 전압-음압 그래프(20kHz)

그림 3.39 초음파와 PVDF의 음압 그래프

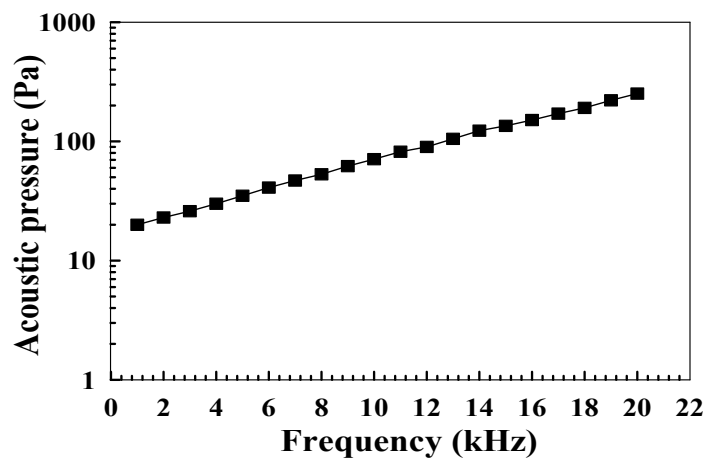


그림 3.40 PVDF를 이용한 주파수-음압 그래프(400v)

4. 연구결과

이 실험은 초음파의 진동에너지를 이용하여 사질토와 사질점토 그리고 준설토에 대한 탈수를 분석하고자 하였다. 실험결과로 초음파를 적용하였을 경우에 탈수 효율이 증가하였다.

가. 초음파를 조사하여 사질토를 탈수한 결과, 약 5~20분 동안 초음파를 조사한 경우에 탈수량이 최대였으며, 초음파 강도가 1500W일 때, 초음파를 조사하지 않은 경우보다 최대 약 30% 크게 나타났다. 이 때, 조사시간은 약 10분으로 나타났으며, 10분이 경과한 후에는 초음파를 조사하지 않은 경우와 점진적으로 비슷한 탈수율을 나타내었다.

나. 초음파를 조사하여 사질토를 탈수한 결과, 약 5~20분 동안 초음파를 조사한 경우에 탈수량이 최대였으며, 초음파 강도가 1500W일 때, 초음파를 조사하지 않은 경우보다 최대 약 38% 크게 나타났다. 이 때, 조사시간은 약 10분으로 나타났다.

- 다. 음파를 조사하여 사질토를 탈수한 결과, 약 5~20분 동안 초음파를 조사한 경우에 탈수량이 최대였으며, 초음파 강도가 1500W일 때, 초음파를 조사하지 않은 경우보다 최대 약 35% 크게 나타났다. 이 때, 조사시간은 약 20분으로 나타났다.
- 라. 초음파 장치로 음압을 측정하기 전에 초음파조사시간과 온도의 변화의 상관관계를 확인하기 위하여 초음파 강도에 따른 시간별 온도를 측정하였다. 실험결과 시간이 경과될수록 온도가 상승하다가 어느 시점에서 일정한 온도를 유지하는 경향을 나타냈다. 또한, 초음파의 강도가 클수록 온도의 증가 속도는 급격히 증가하는 것으로 나타났다으며, 큰 온도 차이를 보였다
- 마. PVDF 필름을 사용하여 탈수한 경우와 초음파장비를 이용하여 탈수실험을 한 결과를 살펴보면 초음파를 이용하여 탈수한 경우에 PVDF 필름을 사용하여 탈수한 경우보다 상대적으로 탈수에 효과적이었으나 그 차이는 크지 않는 것으로 나타났다. 하지만 음압(acoustic pressure)측정 결과, 초음파의 음압보다 PVDF 필름의 음압이 크게 나타났다.

제3절 준설토의 물리적 특성 평가 및 활용방안 연구

1. 녹색정화 처리 전후의 준설토의 물리적 특성평가 및 처리된 준설토의 활용방안 연구

가. 연구개발 개요

준설패립을 통해 조성된 지반은 고함수비이고 고압축성인 연약지반으로서 비선형성인 압축성과 투수성을 갖는다. 저응력 구간과 고응력 구간에서의 압축계수(C_c)가 다른 준설패립지반에 대한 비선형 유한변형 압밀해석을 위해서는 연약지반의 압밀특성에 대한 정확한 이해가 필요하다(Bo, 2002).

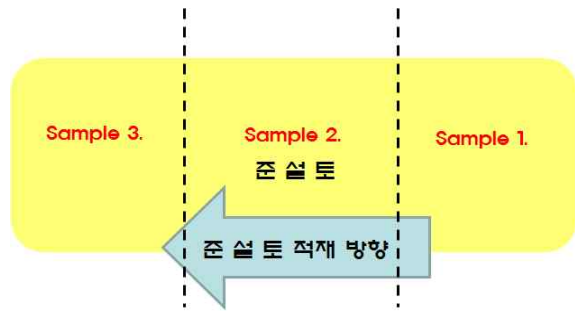
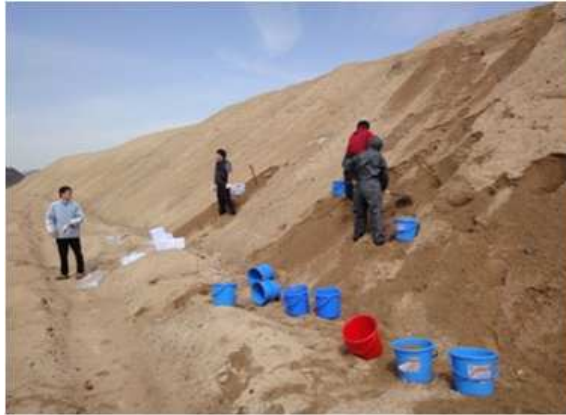
1923년 Terzaghi는 압밀시 미소변형이며, 압밀이 진행되는 동안 투수계수가 일정하고 응력-변형률의 관계가 선형이라고 가정한 일차원 압밀이론을 제시하였다. 이는 준설패립지반과 같은 초연약지반의 거동특성인 응력-변형률관계의 비선형성과 압밀이 진행되는 동안 투수계수의 감소를 고려하지 못한다. Gibson 등(1967)은 Terzaghi이론을 보완한 비선형 유한변형 압밀이론을 제시하였다. 편미분 방정식인 Gibson 등(1967)의 비선형 유한변형 압밀식은 이론해를 구하기 어렵기 때문에 Cargill(1983)은 수치해석을 위한 유한차분식을 제시하였으며, Stark 등(2005)은 준설패립지반 수치해석 프로그램인 PSDDF(primary consolidation secondary compression, and desiccation of dredged fill)을 개발하였다. 한편, Gibson 등(1967)은 비선형 유한변형 압밀식을 부분적으로 선형화시킨 이론식을 제안하였고, 이로부터 Morris(2002)는 경계조건을 적용하여 이론해를 제시하였다. PSDDF해석과 Morris(2002)의 이론해와 같은 비선형 유한변형 압밀이론을 기반으로 준설패립지반의 압밀거동의 예측을 위해서는 초기간극비와 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계의 산정이 필요하다.

이 연구에서는 침강 및 자중압밀시험, CRS 압밀 시험, 전기 비저항 탐침 시험 등 실내시험을 통해 준설토의 비선형 압밀 물성치를 구하는 실용적인 지침을 제시하고, 이 방법을 통하여 해상 준설토와 하상 준설토, 카올리나이트 시료의 비선형 압밀 물성치를 산정하였다.

나. 처리 전후 준설토의 기본 토성시험

(1) 시료의 조성

녹색정화 처리 전후의 준설토의 물리적 특성평가 및 처리된 준설토의 활용방안 연구의 대상이 되는 준설토의 특성을 평가하기 위해 인천 ○○지역 준설패립장의 해상준설토와 경상북도 ○○지역의 하상준설토, 카올리나이트의 3가지 시료를 조성하여 준설토의 기본 토성시료를 실시하였다. 인천 ○○지역의 해상준설토와 경상북도 ○○지역의 하상준설토는 사질 준설토와 점성 준설토로 구성되어 있으며, 그림 3.41은 경상북도 ○○지역의 하상준설토를 채취하는 모습이다. 사질토의 경우 준설토가 적재되어있는 곳을 3등분하여 시료를 채취하였다.



(a) 사질 준설토 채취



(b) 점성 준설토 채취

그림 3.41 경상북도 ○○지역의 하상준설토 채취

처리된 준설토의 활용방안 연구를 위해서는 처리 대상이 되는 준설토의 현장상태를 파악하고 현장 준설토의 특성에 따라 준설토의 처리방안을 결정하여야 하기에 준설 중인 시료의 현장함수비 측정하였고, 경상북도 ○○지역에서 준설 중인 하상준설토를 그림 3.42와 같이 채취하였다.



(a) 준설 중인 하상 준설토



(b) 시료채취

그림 3.42 현장 함수비 측정을 위한 시료채취

(2) 기본 토성시험 결과

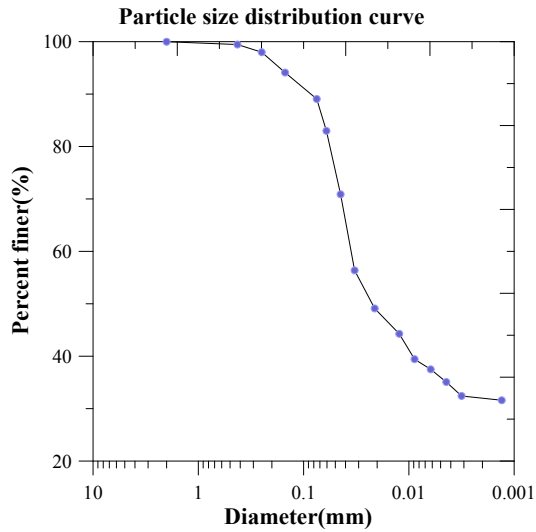
이 연구에 사용된 시료에 대한 기본 물성치는 표 3.11과 같으며 Casagrande의 소성도를 이용한 통일분류(USCS) 결과를 함께 나타내었다. 처리 대상 준설토의 현장상태를 파악하고자 측정된 경상북도 ○○지역 하상준설토의 현장함수비는 표 3.12에 나타내었다. 인천 ○○지역의 해상준설토의 경우는 채취한 해성점토를 그대로 사용한 후 염도 보정식에 의한 함수비 보정을 하였다(Imai et al., 1979). 그림 3.43은 인천 ○○지역의 점성 준설토와 사질 준설토 시료에 대한 입도분포 곡선을 그림 3.44는 경상북도 ○○지역의 점성 준설토와 사질 준설토 시료에 대한 입도분포 곡선을 나타내었다.

표 3.11 시료의 기본 물성치

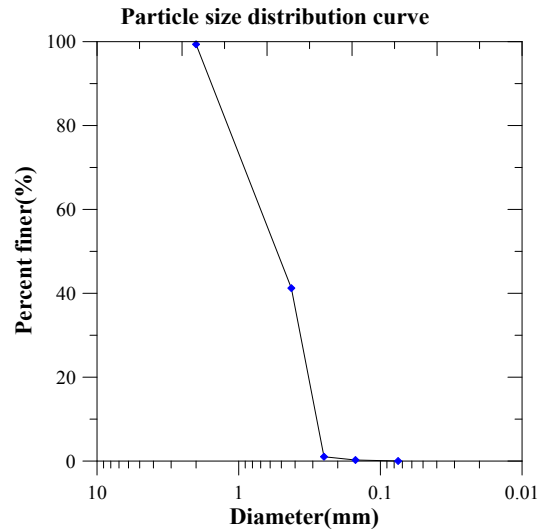
구분		흙의 분류	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI, %)	비중 (G_s)
해상 준설토	점성토	CL	38.9	20.1	18.8	2.71
	사질토	SP	NP	NP	NP	2.69
하상 준설토	점성토	CL	30.7	5.0	25.7	2.68
	사질토	SP	NP	NP	NP	2.65
카올리나이트		CH	61.2	30.4	30.8	2.65

표 3.12 경상북도 ○○지역 하상준설토의 현장 함수비

구분	1	2	3	4	평균
현장 함수비	157%	201%	219%	256%	208%

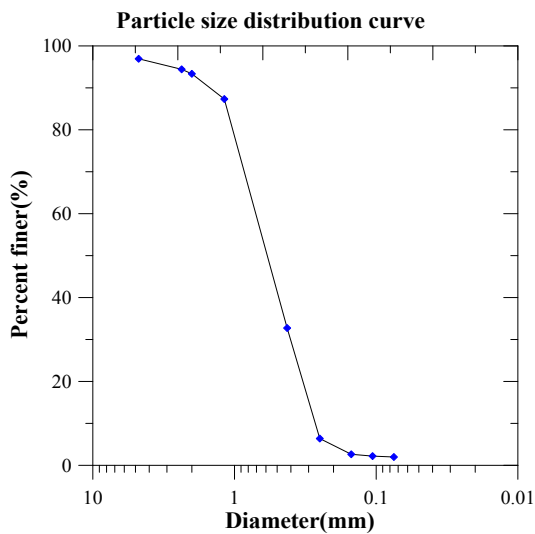


(a) 점성 준설토 입도분포 곡선

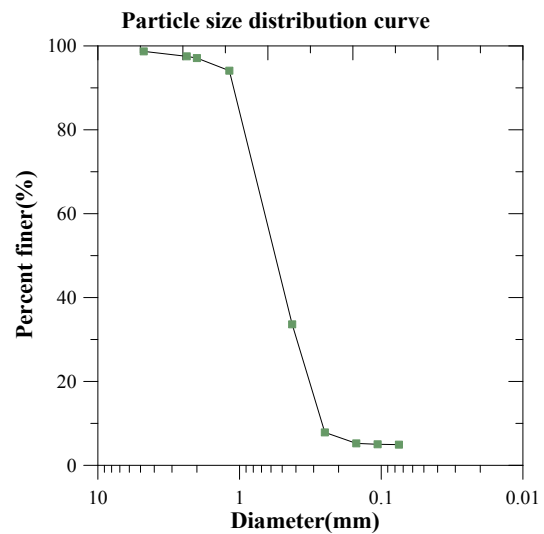


(b) 사질 준설토 입도분포 곡선

그림 3.43 인천 ○○지역 해상준설토의 입도분포 곡선

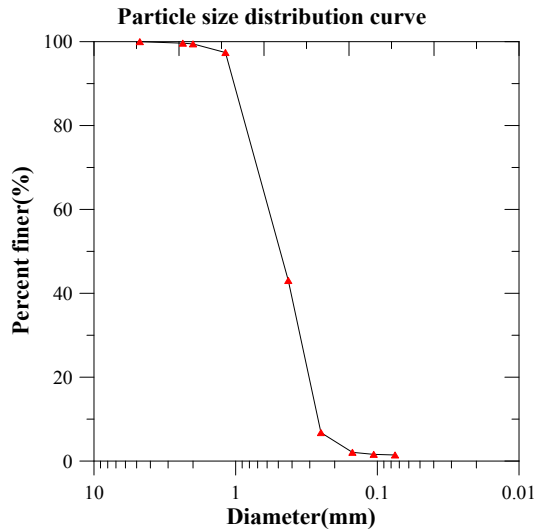


(a) 점성 준설토 입도분포 곡선(sample 1)

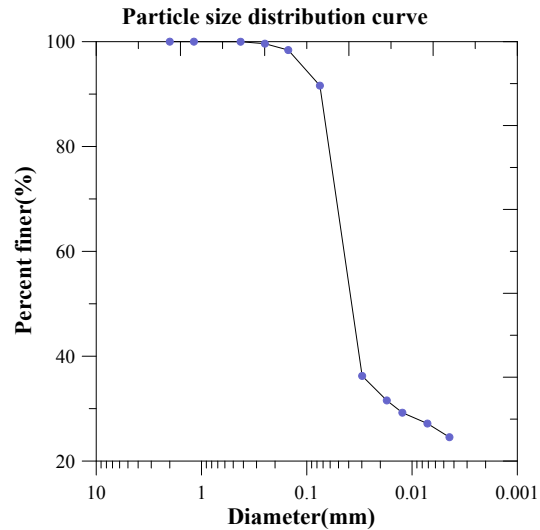


(b) 점성 준설토 입도분포 곡선(sample 2)

그림 3.44경상북도 ○○지역 하상준설토의 입도분포 곡선(계속)



(c) 점성 준설토 입도분포 곡선(sample 3)



(d) 사질 준설토 입도분포 곡선

그림 3.44 경상북도 ○○지역 하상준설토의 입도분포 곡선

다. 처리 효율에 따른 준설토의 침강 및 자중압밀 특성 등의 압축성 변화 평가

(1) 초기 간극비 측정

(가) 초기 간극비 정의

침강 및 자중압밀 시험을 통해서 산정하게 되는 초기 간극비(e_{00} ; void ratio at zero effective stress)는 침강압밀이 끝나고 자중압밀이 시작되는 초기 상태에서의 시료의 간극비를 의미한다. 일반적으로 초기 간극비는 시료의 초기 슬러리 간극비(e_0)에 해당하는 함수비(w_0)를 이용하여 침강 및 자중압밀 시험이 종료된 후 채취한 표층 시료의 함수비(w_{00})로부터 식 3.13를 이용하여 산정한다.

$$Se = wG_s \quad (3.13)$$

초기 간극비는 침강과정과 압밀과정 사이의 경계면에 해당하는 상태를 의미하며, 이는 시료 입자들이 서로 접촉하기 시작하여 입자간의 응력을 전이하는 순간의 간극비를 의미한다. 따라서 이론적으로 초기 간극비 상태에서의 유효응력은 영(zero)이다. 즉, 시료의 자중압밀은 초기 간극비부터 시작되며 자중에 의해 발생된 과잉간극수압이 시간에 따라 소산되면서 유효응력이 발생되어 자중압밀이 진행된다.

자중압밀 과정과 같은 낮은 유효응력구간(0~1kPa)에서는 초기 간극비에 따라 상이한 압밀거동 양상을 보이기 때문에 연약지반의 침하거동해석에서 초기 간극비를 정확히 산정하는 것은 매우 중요하다(Znidarcic, 1999). 또한, 초기 간극비에 따라 PSDDF 해석 결과에서 총 침하량에 차이가 발생하기 때문에 초기 간극비의 정확한 산정은 매우 중요하다고 할 수 있다.

(나) 초기 간극비 산정 방법

이론적으로 초기 간극비는 침강 및 자중압밀 시험이 종료된 후, 즉 시료의 침강 및 자중압밀이 완전히 완료되어 시료의 과잉간극수압이 모두 소산되었을 때 시료의 표면에서의 간극비라 할 수 있다. 이는 자중압밀이 완료된 시료의 표면에서는 유효응력이 영이고 임의의 깊이에서는 $\gamma'z$ 가 되는 유효응력분포를 보이기 때문이다(geostatic 조건).

초기 간극비를 산정하는 방법에는 시료 표면에서의 함수비를 측정하는 시료 표면 채취법과 시료 표면의 전기 비저항값을 통해 산정하는 전기 비저항 탐침법이 있다.

① 시료 표면 채취법

초기 간극비를 산정하기 위하여 침강·자중압밀이 종료된 후 시료의 표면위에 부유물과 상층액을 조심스럽게 제거하고 표면에서의 채취한 시료의 함수비를 측정함으로써 자중압밀이 시작하는 시점의 간극비를 산정할 수 있다. Znidarcic(1999)은 표면에서 시료를 채취하는 과정에서 세심한 주의를 당부했다. Znidarcic(1999)의 제안에 따라 표면에서 채취한 시료의 간극비를 유효응력이 존재하지 않고 자중압밀이 시작되는 초기 간극비로 보고 표면에서 채취한 함수비로부터 초기 간극비는 식 3.14를 통해 산정한다.

$$e_{00} = \frac{w_{00}G_s}{S} \quad (3.14)$$

여기서, e_{00} 는 초기 간극비, S 는 포화도(침강·자중압밀시험 시 시료는 완전 포화상태이므로 $S=1$), G_s 는 비중, w_{00} 는 초기 함수비를 의미한다.

② 전기 비저항 탐침법

침강 및 자중압밀이 완료된 시료의 상부에 있는 상층액과 시료의 전기 비저항을 비교해보면 거의 일정한 저항값을 갖는 상층액과 달리 시료에서의 저항값은 깊이에 따라 달라진다. 이러한 저항값의 차이 때문에 전기 비저항 탐침법은 상층액과 시료 표면의 경계면을 정확하게 읽어낼 수 있고, 경계면에서의 저항값을 통해 초기 간극비를 산정할 수 있다. 그림 3.45는 전기 비저항 탐침을 위한 전기 비저항 탐침과 전기 저항 측정 장비를 보여준다.



(a) 전기 저항 측정 장비(LCR Meter)



(b) 전기 비저항 탐침

그림 3.45 전기비저항 탐침장치

그림 3.46은 그림 3.45의 전기 비저항 탐침 장비를 이용하여 자중압밀이 완료된 시료에 대한 전기 비저항 탐침을 실시하는 모식도를 나타낸다.

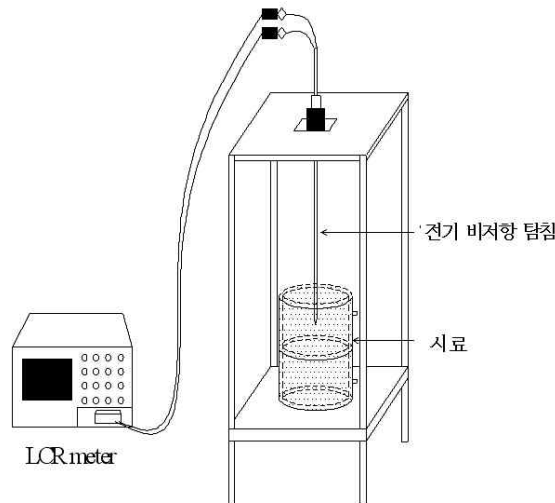


그림 3.46 전기비저항 탐침 시험 모식도

전기 비저항 탐침 시험은 지반에 전류를 흘려 발생하는 전위차를 측정하여 연속적으로 시료의 고유 비저항을 산출하고 이를 통해 시료의 재료적인 특성을 알아내는 방법이다. 흙의 특성인 고유 저항 ρ_{soil} 과 전극의 기하학적 형상에 따라 측정되는 저항 R_{soil} 은 식 3.15과 같이 표현할 수 있다(Lee, 2003).

$$R_{soil} = \alpha \rho_{soil} \quad (3.15)$$

여기서, 상수 α 는 간극수의 전기 전도도와 저항을 측정함으로서 얻어진다. 포화된 흙의 전기전도도는 입자 전도도와 전해질 전도도 그리고 입자의 비표면적 전도도로 구성되며, 식 3.16과 같이 표현된다(Lee, 2003).

$$\sigma_{mix} = (1-n)\sigma_p + n\sigma_{el} + (1-n)\frac{\gamma_p}{g}\lambda_{ddl}S_a \quad (3.16)$$

여기서, σ_{mix} 는 포화된 흙의 전체 전기전도도, σ_p 는 입자의 전기전도도, σ_{el} 는 전해질의 전도도, γ_p 는 단위중량, λ_{ddl} 는 입자의 표면 전도도, S_a 는 입자의 비표면적, n 은 간극률, g 는 중력가속도를 의미한다.

해성점토인 경우 전해질의 전도도가 입자의 전기전도도와 입자의 비표면적 전도도에 비해 매우 크므로 식 3.16은 식 3.17로 간략히 표현할 수 있다(Lee, 2003).

$$\sigma_{mix} = n\sigma_{el} \quad (3.17)$$

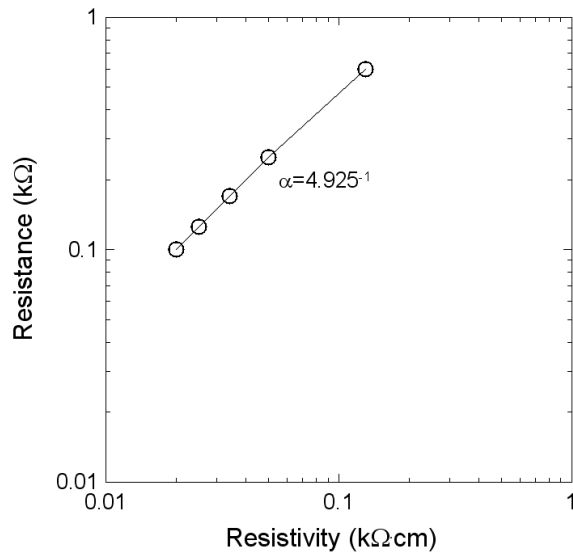
또한, Archie(1942)의 경험식은 흙 입자와 간극수의 고유저항 관계를 비선형으로 표현하여 식 3.18와 같다.

$$\rho_{soil} = \rho_{el} n^\theta \quad (3.18)$$

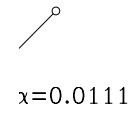
위 식에서 ρ_{soil} 과 ρ_{el} 은 각각 흙의 고유저항과 간극수의 고유 저항, θ 는 피팅 상수로 약 -1에서 -2.4의 범위의 값을 가진다. 초기 슬러리 간극비(e_0)와 초기 간극비(e_{00})관계를 산정하기 위하여 시료에 대한 전기 비저항 탐침의 보정이 필요하다. 자중압밀이 완료된 후 복합자중압밀 시험 장비에서 측정한 깊이별 간극률과 전기 비저항 탐침에 의해 측정된 전기 비저항 관계로부터 식 3.19를 이용하여 θ 를 산정한다. 산정된 θ 와 시료 표면에서 측정된 전기 비저항을 식 3.19에 대입하면 초기 간극비를 산정할 수 있다.

(나) 초기 간극비 산정 결과

침강압밀시험이 종료 된 후 직접 인천 ○○지역의 해상준설토 표면에서 채취하여 산정한 초기 함수비(혹은 초기 간극비)는 초기 슬러리 함수비 100%, 200%, 300% 500%, 900%, 1200%, 1500%에 대해서 평균적으로 약 101%, 206%, 231%, 278%, 289%, 301%, 303%로 나타났다. 그리고 카올리나이트는 시료 표면에서 직접 채취한 경우 초기 슬러리 함수비 100%, 200%, 300% 500%, 700%, 900%, 1100%, 1300%에 대해서 평균적으로 약 102%, 200%, 235%, 245%, 264%, 279%, 298%, 309%로 나타났다. 경상북도 ○○지역의 하상 준설토의 경우 표면에서 직접 채취한 경우 초기 슬러리 함수비 300%와 500%로 각각 2회에 걸쳐 실험한 결과 약 223%, 231%, 274%, 292%로 측정되었다. 전기 비저항 탐침법은 탐침의 기하학적인 특성, 재질, 전극의 길이 등에 따라 측정된 저항 값이 달라지므로 식 3을 이용하여 소금물의 전도도와 전기 비저항 탐침으로 측정한 저항 값의 관계로 산정하여 그림 3.47과 같이 인천 ○○지역의 해상준설토와 카올리나이트 시료의 경우 $\alpha = 4.925 cm^{-1}$, 경상북도 ○○지역 하상준설토 시료의 경우는 $\alpha = 0.0111 cm^{-1}$ 을 사용하였다.



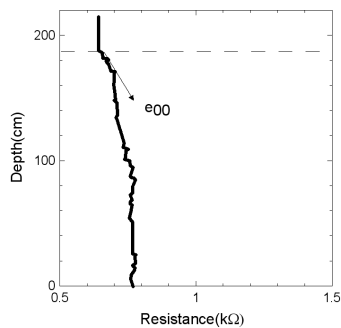
(a) 인천 ○○지역 해상 준설토, 카올리나이트



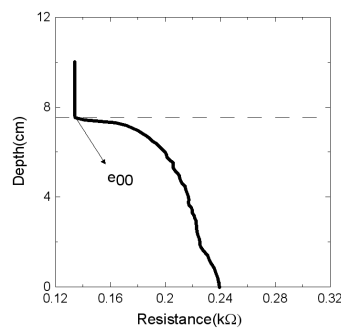
(b) 경상북도 ○○지역 하상 준설토

그림 3.47 전기 비저항 탐침의 보정(α)

전기 비저항 탐침 시험 장치로 침강 및 자중압밀이 완료된 시료의 저항값을 측정하여 그림 3.48과 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 상층액과 시료 표면의 경계면을 정확하게 구분할 수 있다.



(a) 인천 ○○지역 해상 준설토

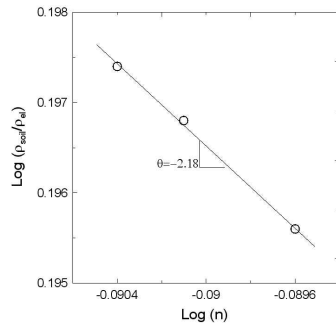


(b) 카올리나이트

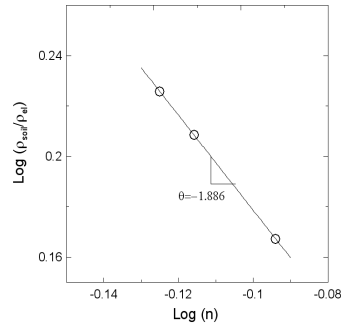
(c) 경상북도 ○○지역 하상 준설토

그림 3.48 깊이별 저항

링타입 자중압밀시험 장치에서 측정한 시료 하부에서의 깊이별 간극률과 전기 비저항 탐침에 의해 측정된 전기 비저항과의 관계를 통해 식 3.19를 이용하여 θ 를 산정하였다. 채취된 시료의 간극비는 식 3.19를 이용하여 계산하였으며, 시료는 충분히 포화된 상태이므로 포화도(S)는 1로 가정하였다.



(a) 인천 ○○지역 해상
준설토



(b) 카올리나이트

(c) 경상북도 ○○지역 하상
준설토

그림 3.49 깊이별 간극률-전기 비저항 관계

시료 표면 채취법 및 전기 비저항 탐침법으로 산정된 인천 ○○지역의 해상준설토 및 카올리나이트, 경상북도 ○○지역 하상 준설토 준설토의 초기 간극비-초기 슬러리 간극비 관계는 각각 그림 3.50과 그림 3.51과 같다. 초기 간극비는 시료에 대한 특정한 토질 정수가 아니며 초기 슬러리 간극비에 따라 달라짐을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 낮은 유효응력 상태일 때 초기 슬러리 함수비가 높아서 자유수의 양이 증가하면 확산 이중층이 팽창하여(즉, 확산 이중층이 두꺼워져) 슬러리 입자간의 거리가 늘어나기 때문에 초기 간극비가 다소 커진다고 추정할 수 있다(Znidarcic, 1999).

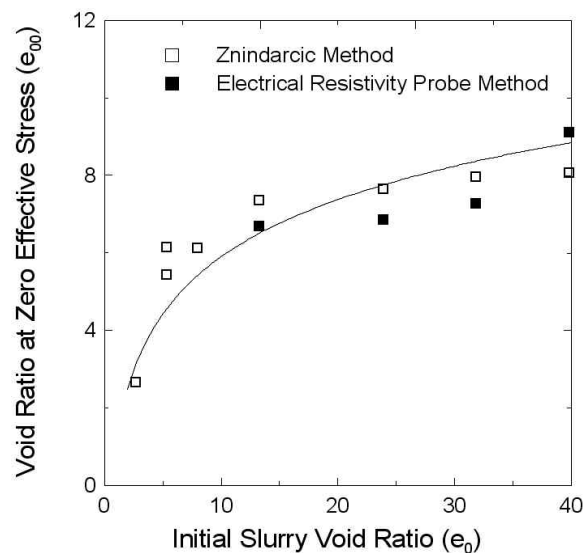


그림 3.50 초기 간극비-초기 슬러리 간극비 관계(인천 ○○지역의 해상준설토)

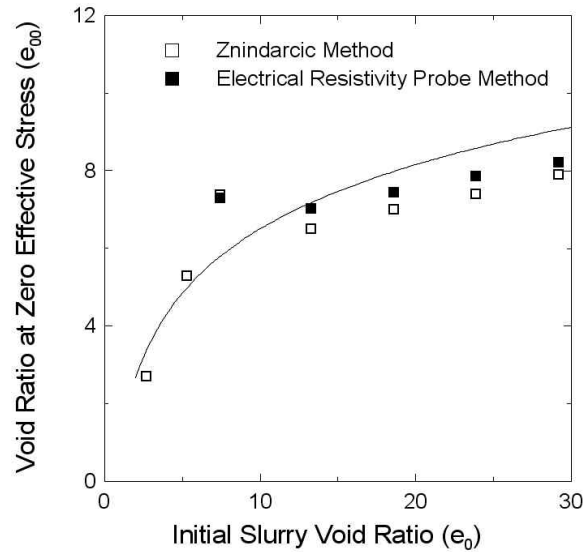


그림 3.51 초기 간극비-초기 슬러리 간극비 관계(카올리나이트)

(2) 간극비-유효응력 관계

(가) 간극비-유효응력 관계 정의

슬러리 상태와 같은 고함수비의 초연약지반에서의 압밀은 통상의 연약지반에서의 압밀과는 다른 특성을 보인다. 통상의 연약지반은 응력상태에 관계없이 하나의 평균 압축지수(C_c)를 적용할 수 있으나, 슬러리 상태인 고함수비의 연약지반은 저응력 구간과 고응력 구간에서 다른 압축지수를 보인다(Bo, 2002). 자중과 같은 저응력 상태에서 압밀이 발생하는 저응력 구간에서의 압축지수는 고응력 구간에서의 압축지수에 비해 큰 값을 갖는다. 대상 시료의 압밀특성을 파악하고 정확한 PSDDF 해석을 위한 입력 데이터의 확보를 위하여 저응력 및 고응력 구간에서의 간극비-유효응력 관계를 정확하게 규명할 필요가 있다.

(나) 간극비-유효응력 관계 산정 방법

저응력 구간의 간극비-유효응력 관계는 자중압밀 시험을 실시하여 산정하고, 고응력 상태의 간극비-유효응력 관계는 CRS 압밀 시험을 실시하여 산정한다. 자중압밀 시험과 CRS 압밀 시험 결과의 일관성을 유지하기 위하여 이 연구에서는 그림 3.62와 같은 복합 자중압밀 시험기를 사용하였다.

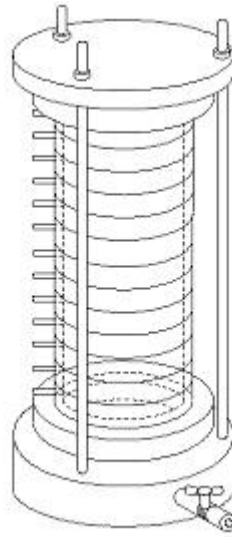


그림 3.52 복합자중압밀 시험기

CRS 압밀 시험은 자중압밀이 완료된 후 하부 시료를 이용하여 실시하게 되는데, 복합 자중압밀 시험기의 경우 이러한 과정에서 시료의 교란 없이 CRS 압밀 시험을 실시할 수 있다. 복합자중압밀 시험기를 이용하여 시료에 대한 자중압밀이 완료되면 CRS 압밀 시험을 위한 하부의 시료를 제외한 상부의 시료를 층별 분리하여 각 층에서의 시료의 함수비를 측정한다. 이렇게 측정된 함수비로부터 식 3.19을 이용하여 각 층에서의 간극비를 산정할 수 있고, 각 층의 간극비와 깊이로부터 식 3.20을 이용하여 유효응력을 산정할 수 있다.

$$e = \frac{G_s \times w}{S} \quad (3.19)$$

$$\sigma' = \sum_i \left(\frac{G_s - 1}{1 + e_i} \right) \Delta z_i \quad (3.20)$$

복합자중압밀 시험기의 각 층은 지름 8cm, 높이 2cm의 투명 아크릴로 제작이 되었고, 자중압밀이 진행되는 동안 각 층에서의 간극수압을 측정할 수 있다. 시험기의 하부는 자중압밀이 완료된 후 CRS 압밀 시험을 위한 셀의 일부이고, 하부의 밸브를 이용하여 일면 및 양면배수 조건을 모사하게 된다. 그림 3.53은 복합자중압밀 시험기의 하부 장비, 즉 CRS 압밀 시험을 위한 셀의 하부와 CRS 압밀 시험을 위한 셀의 상부를 나타낸다.



그림 3.53 CRS 압밀 시험용 셀

자중압밀이 완료된 후 CRS 압밀 시험을 위한 최하부의 시료를 제외한 상부의 시료를 이용하여 저응력 상태에서의 간극비-유효응력 관계를 산정하고, 고응력 상태에서의 간극비-유효응력 관계는 최하부의 시료를 이용한 CRS 압밀 시험을 통하여 산정하게 된다. CRS 압밀 시험은 1982년 ASTM에서 제시한 시료의 액성한계에 따른 변형속도를 이용하여 실시한다.

한편, Stark 등(2005)은 무기점토에 대한 소성지수에 따른 간극비-유효응력 관계를 그림 3.54와 같이 제시하였다.

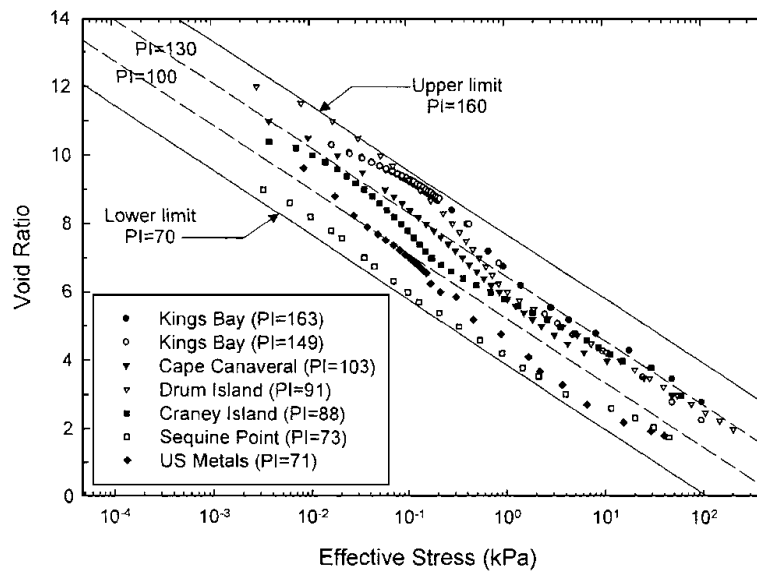


그림 3.54 소성지수에 따른 간극비-유효응력 관계

(다) 간극비-유효응력 관계 산정 결과

복합자중압밀 시험기를 이용하여 인천 ○○지역의 해상준설토와 카올리나이트, 경상북도 ○○지역에 하상준설토 대한 자중압밀 시험이 완료된 후 각 층에서의 함수비 측정값을 통해 식 3.19와 식 3.20을 이용하여 산정된 간극비와 유효응력은 인천 ○○지역 해상준설

토와 카올리나이트의 경우 그림 3.55와 같은 관계를 보였고 경상북도 ○○지역 하상준설토의 경우 그림 3.56과 같은 관계를 보였다. 시료 표면 채취법과 전기 비저항 탐침법을 이용하여 산정된 초기 간극비는 인천 ○○지역의 해상준설토와 카올리나이트, 경상북도 ○○지역에 하상준설토에서 각각 7.38과 7.29, 8.30을 적용하였고, 초기 간극비의 정의가 유효응력이 0일 때의 간극비를 나타내므로 시료의 초기 간극비 7.38에서의 유효응력은 0으로 표현하였다.

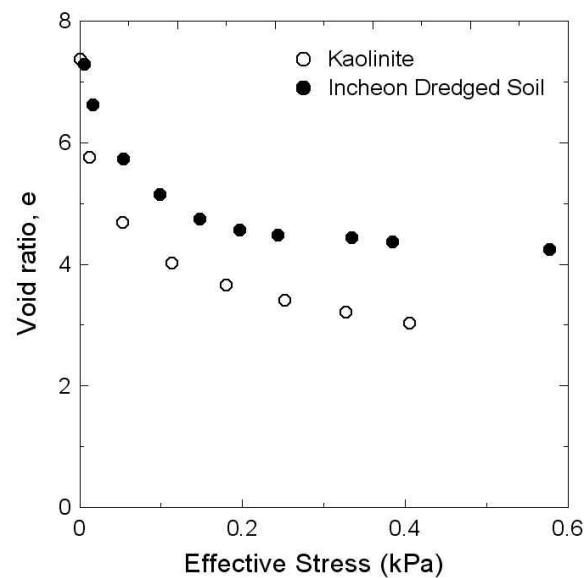


그림 3.55 인천 ○○지역의 해상준설토와 카올리나이트의 간극비-유효응력 관계 (자중압밀)

Effective Stress (kPa)

그림 3.56 경상북도 ○○지역 하상준설토의 간극비-유효응력 관계(자중압밀)

자중압밀이 완료된 후 복합자중압밀 시험기의 최하부 시료를 이용하여 CRS 압밀 시험을 실시하였다. 그림 3.57은 자중압밀 및 CRS 압밀 시험을 통해 산정된 간극비-유효응력 관계를 나타내는데, 저응력 구간인 자중압밀 시험 부분과 고응력 구간인 CRS 압밀 시험 부분이 선형이 아닌 비선형 관계를 보임을 알 수 있다. 초기 간극비에 대한 유효응력은 이론상 0이 되어야 하지만, 그림 3.57의 그래프에서 유효응력을 나타내는 축이 로그로 표현되기 때문에 초기 간극비에 해당하는 유효응력을 0.001kPa로 표현하였다. 실제 전기 비저항 탐침으로부터 초기 간극비를 평균값으로 산정할 때 적용된 시료의 두께 0.2cm의 평균 깊이 0.1cm에서의 유효응력은 0.0019kPa로 산정되었다. 이 관계식은 PSDDF를 이용한 수치해석 시 입력 데이터로 사용된다.

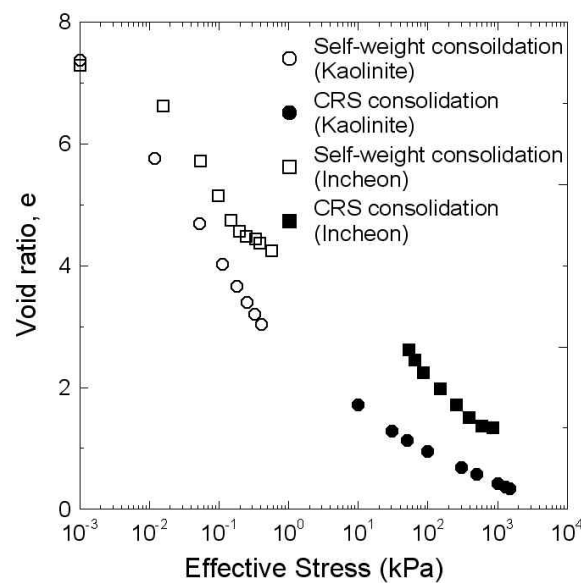


그림 3.57 간극비-유효응력 관계(자중압밀 및 CRS 압밀)

(3) 간극비-투수계수 관계

(가) 간극비-투수계수 관계 정의

압밀이 진행되는 동안 지반의 간극비가 감소하게 되고, 그에 따라 압밀 시 지반에서의 물의 이동이 제한을 받게 되어 연약지반의 투수계수도 감소한다. 이는 압밀 시 발생하는 배수량과 배수속도에 영향을 주고, 곧 연약지반의 전체적인 압밀 속도와 큰 관계가 있다. 따라서 간극비-유효응력 관계처럼 중요한 압밀 특성 중 하나가 간극비-투수계수 관계이다. 저응력 및 고응력 구간에서의 간극비-투수계수 관계 또한 대상 시료의 압밀특성을 파악하고 정확한 PSDDF 해석을 위한 입력 데이터의 확보를 위하여 정확하게 규명할 필요가 있다.

(나) 간극비-투수계수 관계 산정 방법

자중압밀 시험의 경우에는 간극 수압계를 이용하여 일정 시간 간격으로 압밀 침하량 및 각 층에서의 과잉간극수압을 측정한다. Been과 Sills(1981)는 자중압밀이 진행되는 동안 측정한 과잉간극수압과 계면고의 변화를 이용하여 임의의 간극비에서 투수계수를 산정하는 방법을 제시하였다.

투수계수는 Darcy 법칙과 연속성 법칙을 사용한 시험 결과로부터 산정할 수 있다. Darcy의 법칙은 다음의 식 3.21와 같다.

$$n(v_f - v_s) = -ki \quad (3.21)$$

여기서, v_s 는 흙 입자의 속도, v_f 는 간극수의 속도, i 는 동수경사, n 은 간극률, k 는 투수계수를 의미한다.

연속성 법칙은 다음의 식 3.22과 같다.

$$v_s(1-n) + v_f n = 0 \quad (3.22)$$

식 3.21로부터 흙 입자의 평균 속도와 평균 동수경사를 이용하며 제안된 투수계수 산정식은 다음의 식 3.23와 같다.

$$k = -v_s/i \quad (3.23)$$

여기서, v_s 는 흙 입자의 평균 속도, i 는 평균 동수경사를 의미한다.

흙 입자의 평균 속도는 자중압밀이 진행되는 동안 임의의 시간동안의 계면고의 변화로부터, 평균 동수경사는 간극수압 소산 그래프로부터 산정한다. 자중압밀이 진행되는 동안 배수가 발생하면서 전체 부피는 감소하지만 흙 입자만의 부피는 변하지 않는다. 따라서 임의의 시간에서, 즉 임의의 계면고의 간극비를 산정할 수 있고, 이로부터 해당 간극비의 투수계수 산정이 가능하다.

또한, Cargill(1986)은 자중압밀 시험 결과로부터 투수계수를 산정하는 방법을 제안하였다. 자중압밀이 완료된 후, 층별 분리하여 각 층에서의 시료의 함수비를 측정하고 식 3.24를 이용하여 각 층의 간극비를 산정한다.

$$e = \frac{G_s \times w}{S} \quad (3.24)$$

여기서, G_s 는 흙의 비중, S 는 포화도(완전포화상태로서 1의 값을 가짐), w 는 함수비, e 는 간극비를 의미한다. 자중압밀이 완료되면 상부의 물을 제거하고 상단의 아크릴부터 차례대로 제거하면서 각 층마다 시료의 함수비를 측정한다. 각 층마다 얻은 시료로 자중압밀 종료 후 각 층별 함수비를 얻을 수 있으며 이를 이용하여 각 층별 간극비(흙과 공

극의 부피비)를 계산할 수 있고, 계산된 각 층별 간극비를 이용하여 식 3.25에서 각 간극비에 따른 유효응력을 구할 수 있다.

$$\sigma' = \sum_i \left(\frac{G_s - 1}{1 + e_i} \right) \Delta z_i \quad (3.25)$$

여기서, σ' 는 임의의 깊이에서 유효응력, e_i 는 i 번째 층의 간극비, G_s 는 흙 시료의 비중, Δz_i 는 i 번째 시료 두께(본 연구의 경우 각 2cm)를 의미한다.

그림 3.38과 같이 자중압밀 시험으로부터 산정된 간극비-유효응력 관계와 식 3.26의 비교를 통해 가장 적합한 곡선을 찾고 그 때의 λ 값을 산정한다.

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma') + e_{\infty} \quad (3.26)$$

여기서, e_{00} 는 초기 간극비(void ratio at zero effective stress), e_{∞} 는 최종 간극비(자중압밀이 완료된 후 시료 최하부의 간극비)를 의미한다. 그림 3.58과 식 3.27을 통해 산정된 λ 를 다음의 식 3.27에 대입하여 N 값을 산정한다.

$$N = \lambda l (\gamma_s - \gamma_w) \quad (3.27)$$

여기서, l 은 흙 입자만의 높이, γ_s 은 흙 입자의 단위중량, γ_w 는 물의 단위중량을 의미한다. 이 연구에서 실시한 280% 함수비를 갖는 카올리나이트 시료의 30cm 높이 자중압밀 시험일 경우, 식 3.27에서 l 은 3.56cm이다. 또한, 카올리나이트의 비중(G_s)이 2.65이므로 γ_s 는 2.65t/m³이다.

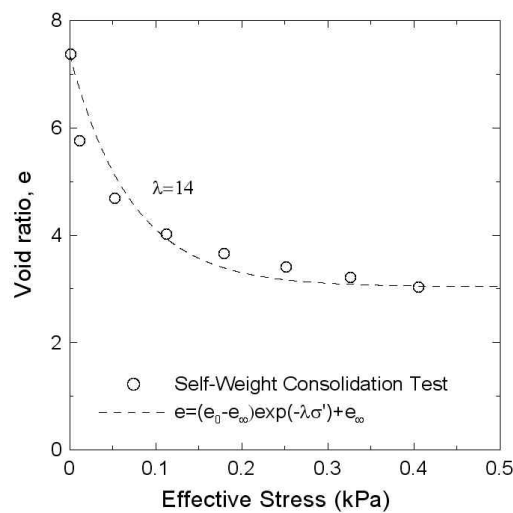


그림 3.58 간극비-유효응력 그래프와 매칭 곡선

그림 3.68로부터 구한 λ 값인 14를 식 3.27에 대입하면 $N=0.82$ 을 얻을 수 있다. 식 3.26을 통해 산정된 N 을 이용하여 Morris(2002)의 양면배수 조건에서의 압밀식에 대입하여, 그림 3.69와 같은 시간계수(T)에 따른 압밀도 그래프를 찾는다. 그래프에서 압밀도가 50%일 때의 시간계수(T_{50})를 산정한다. 그림 3.59를 통해 산정된 압밀도가 50%일 때의 시간계수(T_{50})는 0.054이다. 280%의 함수비로 배합된 카올리나이트 시료의 자중압밀 시험결과로부터 계면고의 변화가 총 압밀침하량의 50%일 때의 시간(t_{50})을 찾는다. 그림 3.68에서 압밀도가 50%일 때의 시간계수(T_{50})와 자중압밀 시험에서 계면고의 변화가 총 압밀침하량의 50%일 때의 시간(t_{50})을 식 3.28에 대입하여 유한변형 압밀계수(g)를 산정한다.

$$T_{50} = \frac{g \cdot t_{50}}{t^2} \quad (3.28)$$

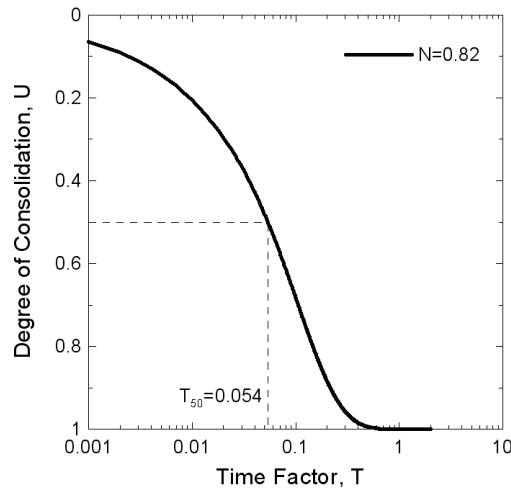


그림 3.59 시간계수에 따른 압밀도 ($N=0.82$)

식 3.29로부터 산정된 유한변형 압밀계수(g)를 식 3.29에 대입하여 자중압밀이 진행되는 동안의 평균 투수계수를 산정할 수 있다.

$$g = - \frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \quad (3.29)$$

여기서, k 는 평균 투수계수, $\frac{d\sigma'}{de}$ 는 평균 간극비에서 압축계수의 역수, e 는 평균 간극비를 의미한다. CRS 압밀 시험의 경우에는 변형률 계측기(LVDT)와 간극 수압계에서 시간에 따른 변위량과 간극수압을 측정하여 컴퓨터 프로그램을 통해 자동으로 저장된다. 저장된 데이터를 이용하여 Wissa 등(1971)이 제안한 투수계수 산정식으로 투수계수를 계산하였다. CRS 압밀 시험에 사용된 시료의 두께와 시간에 따른 수직 변위량을 이용하

여 시간에 따른 간극비의 변화를 산정하고, 시간에 따른 수직 변위량과 간극수압 및 변형률을 이용하여 식 3.30로부터 투수계수를 산정하였다.

$$k = \frac{1}{2} \frac{rH\gamma_w}{u_h} \quad (3.30)$$

여기서, r 은 응력변화율(CRS 압밀 시험 시 적용된 변형률을 적용), H 는 CRS 압밀 시험에 사용된 시료의 두께, γ_w 는 물의 단위중량, u_h 는 시료 하부에서 측정된 간극수압을 의미한다.

한편, Stark 등(2005)은 무기점토에 대한 소성지수에 따른 간극비-투수계수 관계를 그림 3.60과 같이 제시하였다.

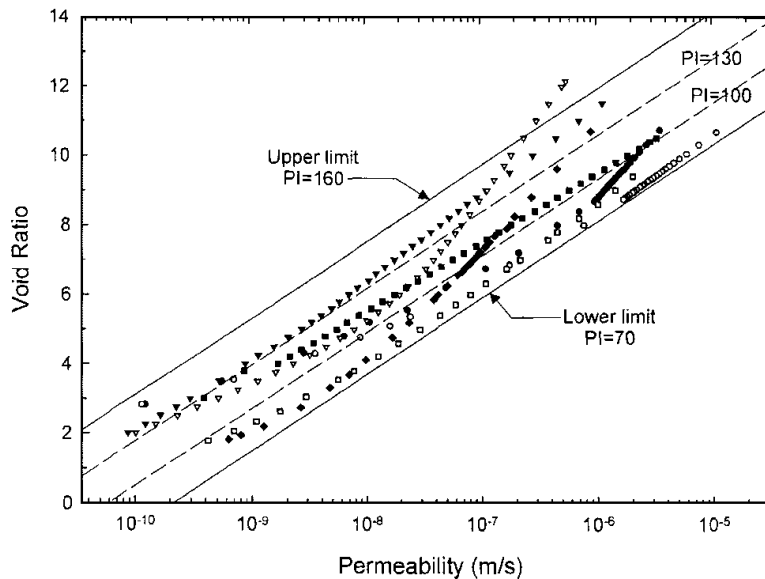


그림 3.60 소성지수에 따른 간극비-투수계수 관계

(다) 간극비-투수계수 관계 산정 결과

Been과 Sills(1981)이 제시한 투수계수 산정법을 적용하기 위하여 카울리나이트의 자중 압밀 시험 시 발생한 간극수압을 측정하였다. 측정된 간극수압은 그림 3.61과 같다. 시간에 따른 계면고의 변화로부터 시료 입자의 평균 속도(v_s)를 산정하고, 시간에 따른 간극수압의 변화로부터 평균 동수경사(i)를 산정한다. 평균 동수경사(i) 산정을 위하여 그림 3.70의 시간에 따른 깊이별 간극수압을 이용한다. 평균 동수경사(i)는 식 3.31로 산정하였다.

$$i = - \frac{dh}{dl} \quad (3.31)$$

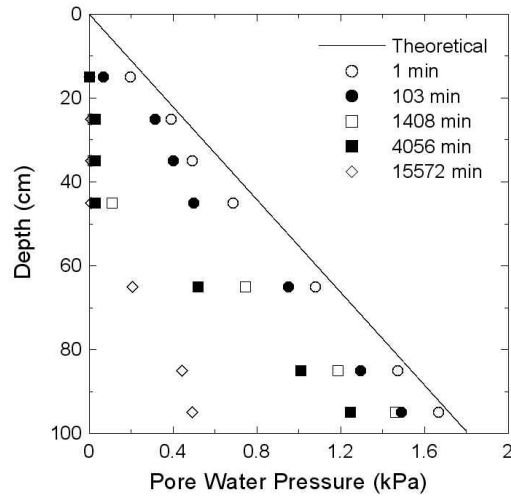


그림 3.61 시간에 따른 깊이별 간극수압

여기서, i 는 평균 동수경사, dh 는 두 점간의 전수두차(손실수두), dl 은 두 점간의 직선 거리를 의미한다. 그림 3.62는 Been과 Sills(1981)이 제안한 투수계수 산정 방법으로 산정한 카올리나이트의 저응력 구간에서의 투수계수이다.

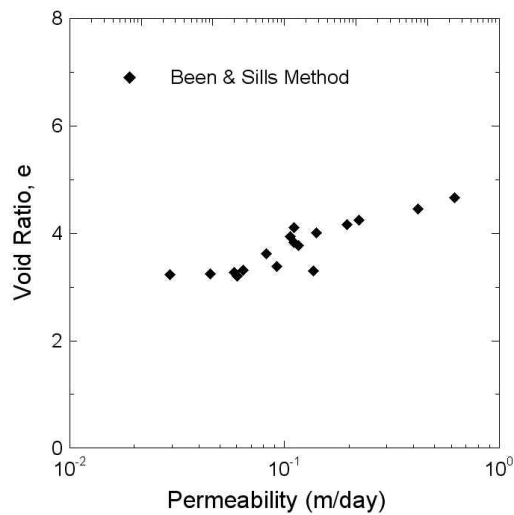


그림 3.62 저응력 구간에서의 투수계수 (Been 과 Sills(1981))

마지막으로 고응력 구간에서의 투수계수를 산정하기 위하여 CRS 압밀 시험으로부터 얻어진 데이터를 이용하였다. 식 3.30의 투수계수 산정식으로부터 산정된 고응력 구간에서의 투수계수는 다음의 그림 3.63과 같다.

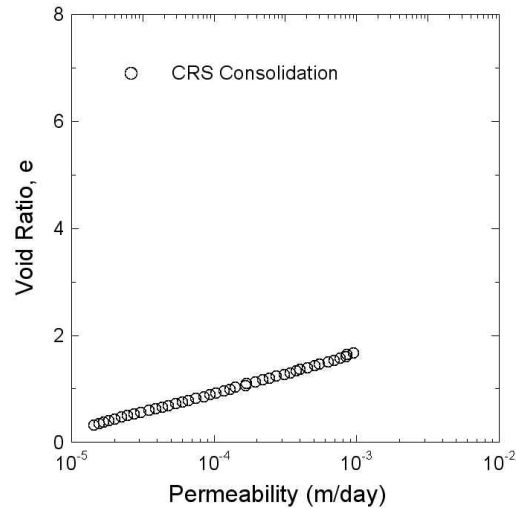


그림 3.63 고응력 구간에서의 투수계수(CRS 압밀 시험)

Been과 Sills(1981)이 제안한 저응력 구간에서의 투수계수와 CRS 압밀 시험으로부터 산정된 고응력 구간에서의 투수계수를 이용하여 PSDDF 해석에 필요한 입력 데이터인 간극비-투수계수 관계를 구할 수 있다. 그림 3.64는 카울리나이트와 인천 ○○지역의 해상준설토에 대한 저응력 및 고응력 구간에서의 투수계수 그래프이다.

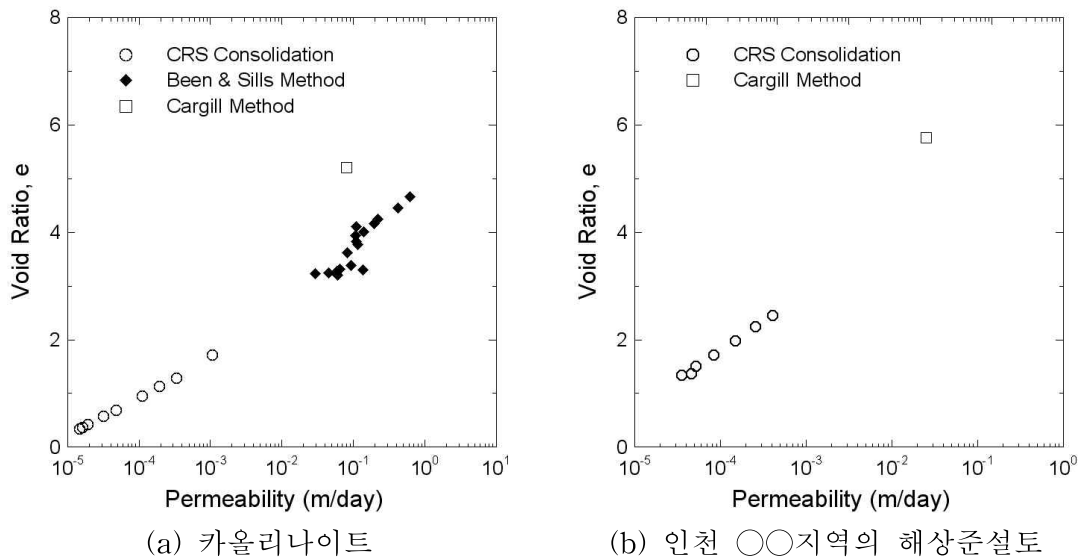


그림 3.64 저응력 및 고응력 구간에서의 투수계수

라. 처리 전후 준설토의 화학분석

4대강 정비사업, 경인운하사업 등에서 준설토의 성토재로서의 활용에 대하여 환경부는 준설토가 토양오염우려기준을 초과할 경우에는 4대강사업이 친환경사업임을 고려하여 우려기준 이내로 정화하여 성토재로 사용할 계획으로, 4대강 토양조사 및 정화지침('09.12)에 따라 표층과 심층토양의 오염정도, 오염범위, 정화물량 등을 조사하고 토양환경보전법에 따라 토양세척, 열탈착 등의 공법으로 토양정화 실시 및 정화여부를 검증할 위하여 예산을 확보하였고, 오염된 준설토는 토양환경보전법에 따라 토양오염대책기준 이내로 정화할 경우 농경지, 공단, 택지 등의 성토재로 사용이 가능하다는 지침이 나왔다. 이에 본 연구에서는 경상북도 ○○지역 하상 준설토를 토양환경보전법 규정에 의한 토양오염조사기관에 토양오염 우려기준을 적용하여 화학분석을 의뢰하였고 화학분석결과와 토양오염 우려기준은 표 3.13에 나타내었다.

표 3.13 토양오염 우려기준 및 화학분석 결과(단위: mg/kg)

구분	토양오염 우려기준			경상북도 ○○지역 준설토의 화학분석 결과	
	1지역	2지역	3지역	사질준설토	점성준설토
카드뮴	4	10	60	ND	ND
구리	150	500	2,000	3.02	15.3
비소	25	50	200	1.83	2.98
수은	4	10	20	ND	ND
납	200	400	700	2.45	16.6
6가크롬	5	15	40	ND	ND
아연	300	600	2,000	14.8	62.0
니켈	100	200	500	3.11	17.4
불소	400	400	800	472	ND
유기인화합물	10	10	30	ND	ND
폴리클로리네이티드비페닐	1	4	12	ND	ND
시안	2	2	120	ND	ND
페놀	4	4	20	ND	ND
벤젠	1	1	3	ND	ND
톨루엔	20	20	60	ND	ND
에틸벤젠	50	50	340	ND	ND
크실렌	15	15	45	ND	ND
석유계총탄화수소(TPH)	500	800	2,000	ND	ND
트리클로로에틸렌(TCE)	8	8	40	ND	ND
테트라클로로에틸렌(PCE)	4	4	25	ND	ND
벤조(a)피렌	0.7	2	7	ND	ND

화학분석결과의 지역구분은 1지역은 지적법에 따른 지목이 전, 답, 과수원, 목장용지, 광천지, 학교용지, 구거(溝渠), 양어장, 공원, 사적지, 묘지인 지역과, 어린이놀이시설 안전관리법 제2조제2호에 따른 어린이 놀이시설에 부지해당하고, 2지역은 지적법」에 따른 지목이 임야, 염전, 대, 창고용지, 하천, 유지, 수도용지, 체육용지, 유원지, 종교용지인 지역에 해당한다. 마지막으로 3지역은 지적법에 따른 지목이 공장용지, 주차장, 주유소용지, 도로, 철도용지, 제방, 잡종지인 지역과 국방·군사시설 사업에 관한 법률 제2조제1항제1호부터 제5호까지에서 규정한 국방·군사시설 부지에 해당한다. 이 연구의 경상북도 ○○지역 하상 준설토 경우 점성 준설토는 토양오염 우려기준에서 규정하는 전 지역의 조건을 만족하여 특별한 정화 처리 없이 활용이 가능하며, 사질 점성토의 경우는 불소 검출량이 1, 2지역의 기준치보다 높게 검출되었으나, 본 연구과제에서 사질점성토를 활용하고자하는 토목공사의 뒷채움재 및 경량혼합재 활용에는 특별한 정화처리없이 활용이 가능하다.

마. 토양의 열특성 기본개념

(1) 토양의 열저항

토양의 열저항(또는 열전도도)을 나타내는 단위는 [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{watt}$] 혹은 [$\text{K} \cdot \text{cm}/\text{watt}$]이며, 한 변의 길이가 1cm인 정육면체 내부를 통해 1watt의 열이 흐를 때 정육면체 전체에 1°C 의 온도상승을 일으키는 토양의 열특성을 나타내는 것으로 토양이 열원으로부터 받은 열을 얼마나 쉽게 또는 어렵게 소산시킬 수 있는가를 의미한다.

(2) 토양의 열확산을

흙 내부에 임의의 온도분포가 존재할 때 열적 평형상태가 되어 온도분포를 균일하게 되는 시간에 따른 온도 변화율을 나타내는 것으로 이는 흙이 열원으로부터 얼마나 신속하게 에너지를 흡수 또는 전도하는 가를 의미한다.

이론적으로 건조된 흙의 열확산율과 열저항율의 관계는 다음 식 3.32과 같다.

$$c = \frac{1}{\rho \delta \gamma} \quad (3.32)$$

여기서, c : 비열($J/kg-^{\circ}\text{C}$)

ρ : 열저항율($^{\circ}\text{C}-m/W$)

δ : 열확산율(m^2/sec)

γ : 밀도(kg/m^3)

(3) 토양의 열안정성

토양의 열저항과 열확산율을 바탕으로 열을 발산하는 열원(케이블)이 삽입된 토양의 열안정성을 평가할 수 있다. 이는 케이블의 발생열량, 토양의 특성, 시간 및 초기수분함량의 함수로 표현되며, 초기에 임계 수분함량 이상의 수분을 함유한 경우에는 열적으로 안정 상태이나 케이블에서 발생하는 열류에 의해 토양 내부의 수분이 이동함에 따라 열적으로 불안정한 상태에 이른다. 따라서 최소의 열저항과 최대의 열확산율을 보이는 토양의 임계함수비(한계함수비)를 규명하는 것이 중요하다.

토양의 열 안정성에 영향을 미치는 요소로는 초기수분함량, 밀도 및 입자크기 분포, 단위 길이 당 열전달률, 열원의 크기 등이 있다. 토양의 열안정성을 결정하기 위한 방법은 Hartley와 Black(1982)이 개발한 해석 모델에 근거하며, 이 해석 모델을 이해하는 것은 열안정성의 실험적 결정을 위해 주로 사용되는 방법들을 이해하는데 도움이 된다.

Hartley와 Black(1982)의 해석모델은 단위 길이 당 일정한 열전도율을 갖는 원통형 열원(heat source) 주위의 습윤 토양이 명확하게 두 단계를 거쳐 건조과정이 진행된다는 것이다. 첫 번째의 건조단계는 주변 토양의 함수비가 점진적인 감소하여 토양의 열저항이 서서히 증가하게 되지만, 이 단계는 아직 토양이 열적으로 안정한 상태이다. 두 번째의 건조단계는 열적으로 불안정한 상태로 열원과 접촉되어 있는 토양의 수분이 임계함수비에 도달할 때까지 급격히 감소하게 된다. 그리고 이러한 조건에 도달하는 시간을 초기 건조시간(initial drying time)이라 하며, 두 번째의 건조단계는 건조가 됨에 따라 더불어 급속한 열저항의 증가를 보이는 것이 특징이며, 최종적으로 열원과 접촉되어 있는 부분에 비교적 높은 열저항을 갖는 완전히 건조된 토양층을 형성하도록 한다. 이 해석 모델은 초기 함수비, 흙의 밀도, 미소한 입자들의 분포, 단위 길이 당 열전도율 및 열원의 크기 등이 열적 안정성의 양적인 측정에 사용되는 초기 건조시간에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 보여준다. 또한 이 모델은 토양이 계속적인 열적 안정상태로 유지하지 못하는 임계 열전달율이 존재하는 것을 예상할 수 있도록 한다.

한편, 열적으로 불안정한 조건이 시작되거나 그 후에 모델로 예측된 특성은 토양에 관입된 탐침을 이용한 실험을 통하여 관찰될 수 있는데 그림 3.45는 Shannon과 wells 시험방법을 통해 얻은 결과이다. 일반적으로 탐침으로부터 멀리 떨어진 곳에서 수분의 급격한 이동은 즉시 발생하지 않으며, 비교적 짧은 시간의 초기 과도주기(initial transient period) 후에 온도시간 응답특성을 반대수지에 표시하면 선형으로 나타난다. 그리고 이러한 직선의 기울기는 다음과 같은 해석적인 모델식 3.33로부터 습윤 토양의 열저항에 직접 비례하게 된다.

$$\rho = \frac{4\pi}{Q} \left[\frac{T_2 - T_1}{\log t_2 - t_1} \right] \quad (3.33)$$

식 (21)은 열저항의 측정에 사용되는 탐침법의 기본 이론식으로써 만일 단위길이 당 탐침에 주입되는 열이 어떤 임계치 이상이라면 열적 불안정상태가 발생하게 되며, 그림 3.65에서와 같이 직선적인 열적 응답으로부터 벗어나는 형태를 보이게 된다.

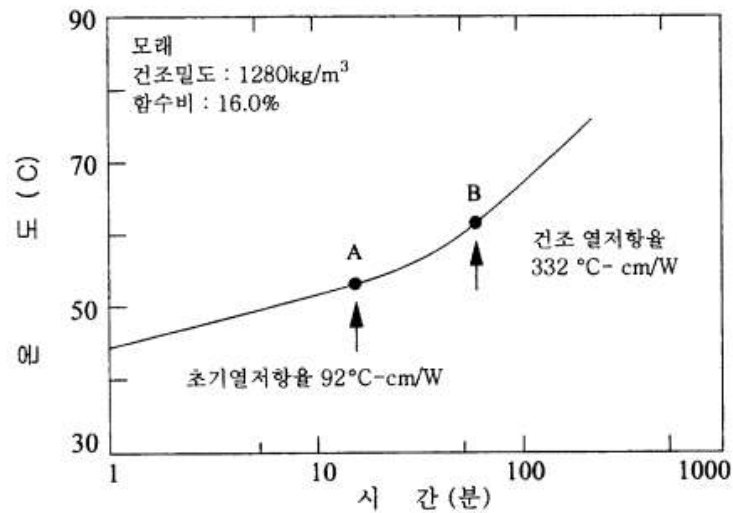


그림 3.65 건조시료의 열저항 측정의 예(Shannon and wells 방법)

한편, 그림 3.66로부터 토양의 열과 수분이동의 중요한 특성을 파악할 수 있는데, 첫째로 열 응답에서 초기 직선부분은 습윤토의 열저항에 비례하며, 둘째는 열적 불안정 상태의 시작점(A점)은 수분이 열원인 탐침으로부터 멀리 이동하기 때문에 토양의 열저항이 점진적으로 증가함으로서 발생되는데, 이때 A점을 초기 건조시간(또는 임계함수비(critical water content))이라 한다. 셋째로 B점은 탐침에 인접한 토양이 완전히 건조된 시점이며, 이 때 이 인접부분은 높은 열저항을 갖게 된다. 또한 열응답 곡선의 마지막 직선 구간은 탐침 주위에 건조한 흙의 열저항에 직접 비례하게 된다. 이러한 열과 수분이동 현상은 실험적으로 초기 건조시간을 정의하는데 사용되는 탐침의 열응답에 따라 다소 편차가 생기지만 실험적으로 열안정성 한계를 정의하는 효과적인 방법이다.

시험 데이터 값으로부터 초기건조시간을 정의하기 위한 다른 3가지 방법이 그림 3.66에 설명되었다.

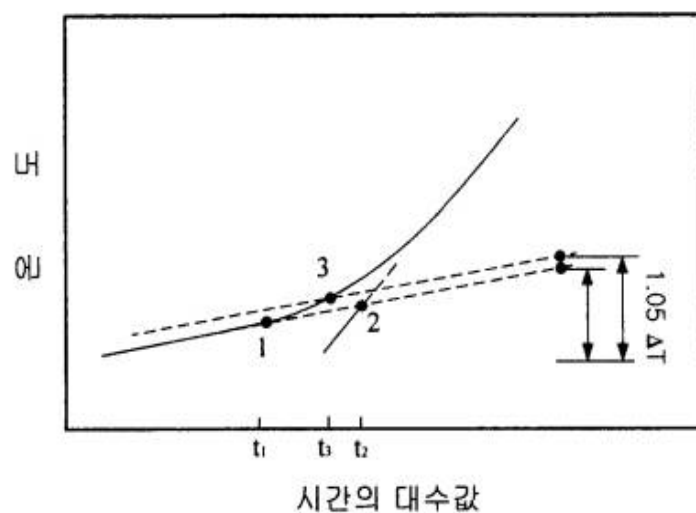


그림 3.66 초기 건조시간을 결정하기 위한 방법

먼저 이론적인 초기 건조시간 결정을 위해 가장 신뢰할 만한 방법은 탐침의 열응답을 이용하여 초기직선부분의 최소자승법으로 얻어진다. 또 탐침 인접부근의 토양이 임계함수비에 도달한 이후 점차로 추가 건조가 진행되어 열응답 기울기는 점점 증가하게 된다. 이러한 경향이 모든 습윤토양의 열-수리적 특성이므로 초기 건조시간은 탐침 응답시험시 초기 기울기로부터 기울기가 변화되는 시간으로 정의하며, 이 방법으로 얻어진 초기 건조시간이 그림 3.76의 1에 해당한다. 특히, 이 방법은 탐침시험 중 데이터 수집을 위해 편리하게 프로그램화 할 수 있다. Hartley와 Black(1982)은 이 방법의 허용오차가 일반적으로 약 0.7% 정도임을 보고하였다.

건조시간을 정량화하기 위한 두 번째 방법은 Black 등(1982)가 열안정성을 결정하기 위한 변수 중, 초기 건조시간을 정량화하기 위한 해석적 방법과 도표법을 제안하였다. 탐침 주변에 토양이 건조된 후 탐침의 열응답은 한 번 더 선형을 이루며, 두 번째의 직선부분이 흙의 열 저항에 비례하게 된다. Black 등(1982)은 탐침의 열응답에서 첫 번째와 두 번째 직선부분의 교차점 시간을 평균 건조시간(그림 3.66의 직선 2)이라고 하였다. 평균 건조시간을 사용하기 위해서는 탐침시험을 열응답의 두 번째 직선부분이 도달할 때까지 지속해야 한다. 하지만, 실제로 대부분의 경우에서 이 방법은 시험시간이 과도하게 소요되어 비현실적이며, 이러한 이유로 이 방법은 보편적으로 사용되지 못했다.

마지막 방법은 도표법을 이용하여 초기 건조시간을 산정하는 방법이다. 이 방법은 그림 3.66에서와 같이 직선이 탐침의 열응답과 온도상승(ΔT)을 합한 값(그림 3.66의 곡선 3)을 지나며, 탐침의 온도상승이 지속되면 초기 직선기울기를 갖고 3을 지나는 평행선을 통과하여 증가하게 된다. 따라서 탐침의 열응답과 평행하는 직선과의 교차점(그림 3.66의 곡선 3)을 초기 건조시간으로 정의한다. 이 방법은 Martin 등(1981)이 3개 탐침측정 결과를 열적 안정성과 상관관계를 도출하기 위해 제안되었다. 하지만, 이 방법은 많은 주의가 요구되므로 단순히 도표에만 의존하는 것보다 초기직선을 최소자승법으로 구하여 이로부터 일정 비율로 초기 건조시간을 계산하는 것이 바람직하다.

(4) 열저항 영향인자

토양의 열저항에 영향을 주는 인자는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 토양의 구성광물 : 다른 모든 조건이 같을 경우, 석영함량이 큰 토양이 운모함량이 큰 토양보다 낮은 열저항을 갖는다.
- ② 밀도 : 흙의 건조밀도가 클수록 토양 입자의 접촉면이 증가하고 입자 간의 간격도 감소하여 열저항은 감소한다.
- ③ 함수비 : 얇은 수막층은 입자 사이의 유효 접촉면을 증가시켜 함수비가 증가할수록 열저항이 감소한다. 특히, 동일한 건조밀도에서는 함수비의 증가는 낮은 열저항을 유발한다.
- ④ 입도 분포 및 입자의 크기와 형상 : 높은 건조밀도를 얻기 위해서는 큰 흙입자 사이의 간극에 작은 입자들이 들어가 치밀한 상태가 되어야 한다. 따라서 입도분포가 좋을수록 낮은

열저항이 예상된다.

- ⑤ 온도 : 흙의 모든 결정형 광물들은 온도가 증가하면 열저항이 증가하며, 물의 열저항은 온도가 증가하면 약간 감소하는 반면 포화된 간극의 공기의 열저항은 상당히 많이 감소한다. 따라서, 토양을 구성하는 모든 요소의 온도에 따른 열저항 특성을 단순화하기 어렵고, 일반적인 상온의 범위에서는 온도에 따른 토양의 열저항은 일정하다고 보는 것이 합리적이다.
- ⑥ 시간 : 규사나 탄산염, 또는 다른 광물들을 많이 함유하고 있는 모래의 경우, 또는 순 환골재와 같이 광물입자 주위에 시멘트 모르타르가 잔존하는 경우 입자 고결화(cementation) 발생해 시간에 따라 열저항이 감소할 수 있다. 하지만, 뚜렷한 열저항 감소를 위해서는 매우 긴 지질학적 시간이 요구된다.

표 3.14 광물 종류에 따른 입자의 밀도 및 열전도도(Horai, 1971)

Mineral	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$k(\text{W/mK})$	Mineral	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$k(\text{W/mK})$
1. Nesosilicates (single tetrahedron)			6. Tectosilicates (framework)		
Olivine			Feldspar		
Chrysolite	3.47	4.81	Celsian	3.09	1.44
Fayalite	4.36	3.16	Microcline	2.56	2.49
Forsterite	3.28	5.03	Orthoclase	2.58	2.32
Hyalosiderite	3.77	3.45	Sanidine	2.57	1.65
Garnet			Feldspathoid		
Almandine	3.93	3.31	Nepheline	2.62	1.73
Andradite	3.75	3.09	Sodalite	2.33	2.51
Grossularite	3.49	5.48	Plagioclase		
Pyrope	3.75	3.18	Albite	2.63	1.96
Spessartite	3.99	3.40	Anorthite	2.77	1.68
2. Sorosilicates (double tetrahedron)			Bytownite	2.70	1.56
Epidote			Labradorite	2.70	1.53
Clinozoisite	3.36	2.40	Oligoclase	2.64	1.98
Epidote	2.19	2.83	Silica		
Zoisite	3.27	2.15	Hyalite	2.08	1.21
Idocrase	3.34	2.41	Novaculite	2.66	7.21
3. Cyclosilicates (rings of tetrahedrons)			Quartz	2.65	7.69
Beryl	2.7	3.99	Vitreous silica	2.21	1.35
Cordierite	2.59	2.72	7. Carbonates		
Tourmaline	3.13	5.28	Calcite	2.71	3.59
4. Inosilicates (chains of tetrahedrons)			Dolomite	2.90	5.51
Amphibole (double chains)			Siderite	3.81	3.01
Actinolite	3.06	3.48	8. Oxides		
Grunerite	3.40	3.32	Hematite	5.14	11.28
Hornblende	3.18	2.81	Ilmenite	4.55	2.38
Tremolite	2.99	4.78	Magnetite	5.15	5.10
Pyroxene (single chains)			Magnesiochromite	4.23	2.54
Acmite	3.54	3.49	9. Hydroxides		
Augite	3.27	3.82	Brucite	2.39	8.44
Bronzite	3.36	4.16	Gibbsite	1.88	2.60
Diopside	3.33	4.93	10. Sulphates		
Enstatite	3.27	4.47	Anhydrite	2.98	4.76
Spodumene	3.16	5.65	Barite	4.41	1.34
5. Phyllosilicates (sheets)			Gypse	2.30	1.26
Chlorite	2.75	5.15	Selenite	2.32	1.26
Mica			11. Halides		
Biotite	2.98	2.02	Fluorite	3.10	9.51
Glauconite	2.85	1.63	Halite	2.10	6.11
Lepidomelane	2.86	1.57	12. Sulphides		
Muscovite	2.85	3.48	Chalcopyrite	4.09	8.20
Phlogopite	2.85	2.13	Pyrite	5.1	19.21
Pyrophyllite	2.83	8.14	Pyrrhotite	4.6	1.89
Serpentine			Sphalerite	4.00	12.73
Antigorite	2.66	2.95	13. Phosphates		
Chrysotile	2.60	5.30	Amblygonite	3.03	4.99
Lizardite	2.60	2.34	Chlorapatite	3.15	1.39
Talc	2.81	6.10	Fluorapatite	3.22	1.37

(5) 열저항 측정원리 및 방법

열저항 측정과 관련된 주요 시험규정으로는 IEEE Std. 442(IEEE Guide for soil Thermal Resistivity Measurements), ISO 8894-1(Refractory materials, Determination of thermal conductivity - Part 1 : Hot-wire method), ISO 8894-2(Refractory materials, Determination of thermal conductivity - Part 1 : Hot-wire method(parallel)), ASTM D5334(Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure) 등이 있다. 본 연구에서는 ASTM D5334-00, D5930-97 그리고 IEEE Std. 442-1981 기준에 준하는 시험기를 사용하여 실내다짐시험으로 성형된 사질 준설토의 열저항을 비정상 열선법을 적용한 QTM-500과 비정상 탐침법을 적용한 KD2Pro로 측정하였다.

① 비정상 탐침법 (Transient Hot Probe(Needle) Method)

비정상 탐침법은 시료에 삽입된 탐침에 열량을 일정하게 공급할 때, 시간과 열선의 온도상승 관계($\ln t - \Delta T$)에서 직선으로 나타나는 구간의 기울기와 공급 열량 등을 이용하여 열전도도(열저항)를 구하는 방법이다. 그림 3.67은 일반적인 비정상 탐침법의 모식도를 보여준다.

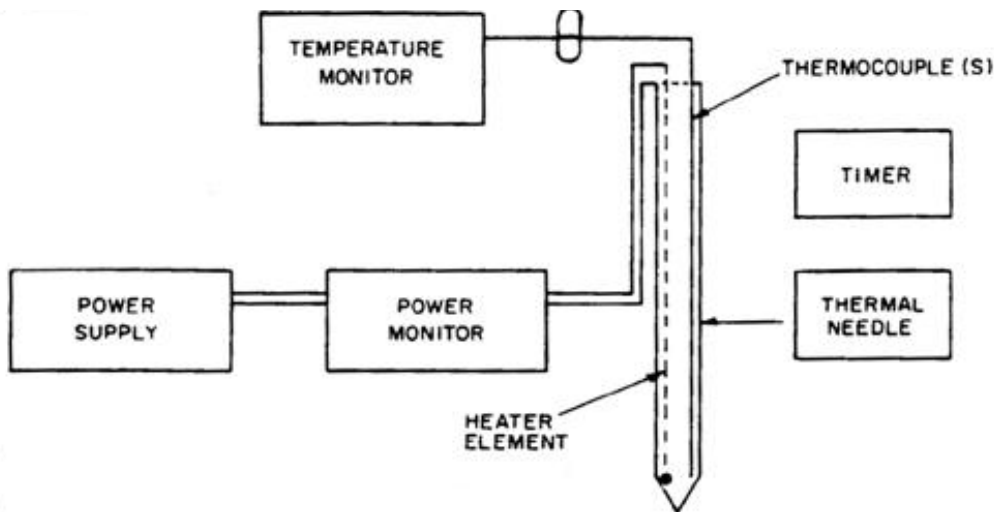


그림 3.67 비정상 탐침법 모식도

열확산율이 δ 인 매질 내에 길이가 무한히 긴 선형 열원이 존재할 때 선형 열원으로부터 반경 r 인 임의의 지점에서 온도 θ 는 발열 후 시간 t 에서 원통 좌표계에 대한 Fourier 방정식으로부터 식 3.34와 같은 열전도식으로 표현할 수 있다(Carslaw & Jaeger, 1959).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \delta \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (3.34)$$

식 3.34의 해는 식 3.35과 같이 표현된다.

$$\theta(t) = \frac{\rho Q}{4\pi} E_i(-x) \quad (3.35)$$

$$(x = \frac{r^2}{4\delta t}, \quad E_i(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du)$$

여기서, δ : 열확산율

Q : 단위시간/길이에서 발생한 열량

ρ : 열저항율

$\theta(t)$: 시간 t 에서의 온도

r : 열원으로부터 반경방향 거리

t : 시간

도출된 식 3.35를 전개하면 식 3.36과 같게 된다.

$$\theta(t) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln \frac{4\delta t}{r^2} - \gamma + \frac{1}{1!1} \frac{r^2}{4\delta t} - \frac{1}{2!2} \left(\frac{r^2}{4\delta t} \right)^2 + \frac{1}{3!3} \left(\frac{r^2}{4\delta t} \right)^3 - \frac{1}{4!4} \left(\frac{r^2}{4\delta t} \right)^4 + \dots \right] \quad (3.36)$$

여기서, γ : 오일러 상수(=0.5772)

식 3.36은 탐침의 길이가 무한히 길고 탐침이 삽입된 토양의 열전도 및 열확산 특성이 공간적으로 균일(homogeneous)한 매질로 가정하였으며, 탐침의 표면과 토양입자 사이에 접촉저항이 없고, 선형 열원의 직경이 무한소인 경우에 성립한다. 그러나 탐침의 직경과 길이가 유한한 경우에도 반경 r 과 열확산이 δ 인 매질 내에서 충분한 시간이 경과한 경우로 가정하여 근사화할 수 있다. 즉, $\frac{r^2}{4\delta t}$ 가 충분히 작다고 가정하면 식 3.36의 세 번째 항 이하를 무시할 수 있으며 따라서, 식 3.36은 식 3.37과 같이 단순화된다.

$$\theta(t) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln \frac{4\delta t}{r^2} - \gamma \right] \quad (3.37)$$

식 3.37에서 자연대수부분을 시간항과 상수항으로 분리하면 식 3.38와 같이 된다.

$$\theta(t) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln t + \ln \frac{4\delta}{r^2} - \gamma \right] \quad (3.38)$$

식 3.38를 사용하여 y축을 온도, x축을 $\ln t$ 로 하는 그래프를 그림 3.68과 같이 작도할 수 있다.

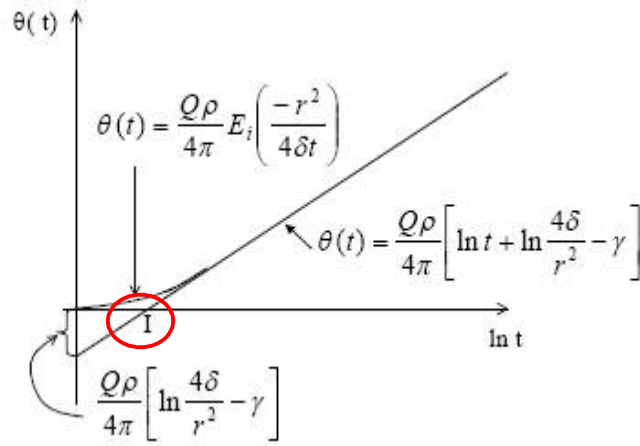


그림 3.68 온도와 시간 곡선

이 때, 열저항은 그래프의 기울기 ($Q\rho/4\pi$)로부터 구할 수 있다. 즉, 시간 t_1 과 t_2 에 대해 온도가 각각 θ_1 , θ_2 일 때 그 온도차($\Delta\theta$)는 식 3.39으로 정리 할 수 있다.

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln \frac{t_2}{t_1} \right] \quad (3.39)$$

따라서 열저항값은 식 3.40과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{4\pi}{Q} \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln \frac{t_2}{t_1}} \quad (3.40)$$

한편, Blackwell(1956)은 선형 열원에 대한 이론식과 유사한 유한 직경의 원통형 탐침을 고려할 수 있도록 식 3.41와 같이 근사해를 도출하였다.

$$\theta(t) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln t + \ln \frac{4\delta}{r^2} - \gamma + \frac{2}{\rho\gamma H} \right] \quad (3.41)$$

이 때, 열확산율은 절편법으로 구할 수 있는데, 그림 3.48의 시간과 기울기 직선이 만나는 점을 I 라 하면, 열확산율 δ 는 식 3.42으로 정리 할 수 있다.

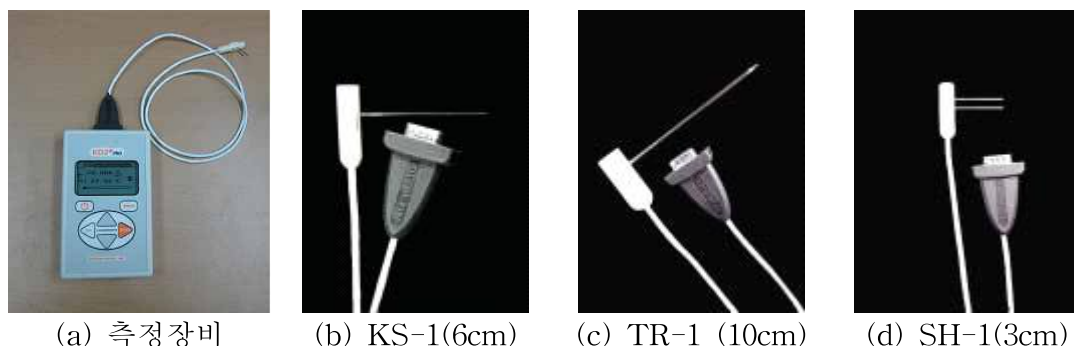
$$\delta = \frac{r^2}{4} \exp \left(\gamma - \frac{2}{\rho r H - I} \right) \quad (3.42)$$

탐침법에 의한 실측결과가 위에서 열거한 식들과 잘 일치하기 위해서는 실험절차가 다음과 같은 주요 가정과 일치하도록 주의를 기울여야 한다.

- ① 실험용 프로브는 연속적이며 열원은 일정
- ② 열은 방사상으로만 흐름
- ③ 토양입자와 탐침간의 접촉이 우수하고 탐침의 직경이 충분히 작음
- ④ 실측 데이터는 시료 외부의 경계효과에 영향을 받지 않음
- ⑤ 열전달은 전도에 의해서만 일어남
- ⑥ 시료의 재질은 균일하며, 수분 및 온도는 평형상태에 있음

● KD2 Pro

Decagon device사에서 개발한 KD2Pro는 비정상 탐침법(transient hot probe method 또는 needle probe method)을 적용하여 토양의 열적 특성을 측정한다. 측정 프로브는 3종류(그림 3.69)로 구성되어 있다. 휴대용 전원으로 작동되며 크기가 작아 휴대가 간편하고 측정시간이 90초 정도로 시험을 매우 신속하게 진행할 수 있다는 장점이 갖고 있다. 표 3.15는 KD2 Pro의 장비사양을 보여준다.



(a) 측정장비 (b) KS-1(6cm) (c) TR-1 (10cm) (d) SH-1(3cm)

그림 3.69 KD2Pro 열저항 측정기 및 3종류의 프로브(probe)

표 3.15 KD2Pro의 장비사양

항목	장비사양
측정방법	비정상 탐침법(needle probe method)
측정범위	열전도도(K): 0.02 ~ 2 W/mK 열저항(R): 0.5 ~ 50 mK/W 열확산도(D): 0.1 ~ 1.0 mm ² /s 비열(C): 0.5 ~ 4 MJ/m ³ K
정밀도	열전도도 및 열저항 : ±5%~±10% 열확산도 : ±5% 비열 : ±7%
측정 소요 시간	90초
소비 전력	4AA 전지

② 비정상 열선법(transient hot wire method)

이 연구에서는 그림 3.70의 비정상 열선법(transient hot wire method)을 적용하여 낙동강 사질 준설토의 열저항값 대표치를 산정하였다. 비정상 열선법의 열전도도 측정원리는 비정상 탐침법과 유사하다. 즉, 열선에 일정량의 열량을 공급할 때, 시간에 따라 열선의 온도가 상승하게 되며, 이 때, 자연 대수값으로 표현되는 시간과 온도차의 관계($\ln t - \Delta T$)가 직선 형태로 나타나고 이 직선의 기울기의 역수를 산정하여 시료의 열저항을 산정한다. 이를 열저항 관점으로 보면 열저항이 낮은 시료(매질)에서는 열선에서 발생한 열이 매질내로 비교적 빠르게 전달되기 때문에 열선의 온도 상승폭이 작은 반면 열저항이 큰 매질에서는 열선에 발생하는 열이 매질로 전달이 지연되기 때문에 열선의 온도 상승폭이 커지게 된다.

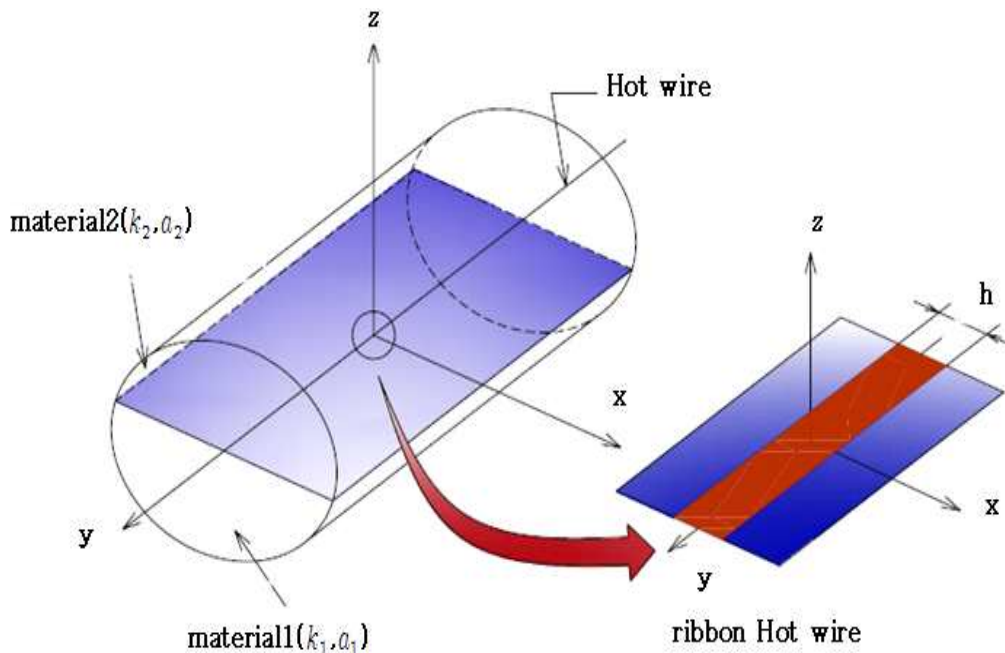
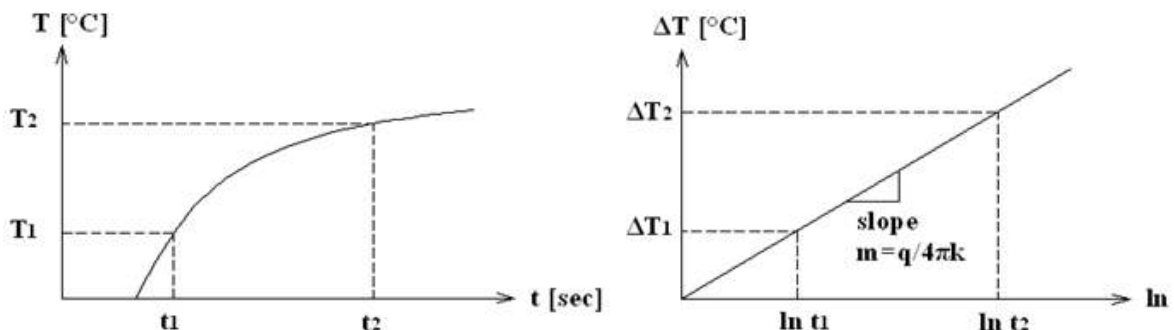


그림 3.70 비정상 열선법(transient hot wire method)



(a) 시간에 따른 온도변화

(b) $\ln t$ 대 온도상승

그림 3.71 비정상 열선법에서 시간과 온도차의 관계($\ln t - \Delta T$)

그림 3.71은 비정상 열선법에서 볼 수 있는 전형적인 측정결과 및 열선 내부의 온도상승 관계를 보여준다. 일반적인 비정상 열선법은 그림 3.70에서 매질 1(material 1)과 매질 2(material 2)가 동일한 경우로서, 초기온도가 균일한 매질 내에서 열선의 단위 길이 당 발열량이 q 일 때 반경 방향으로의 온도변화는 다음의 식 3.43와 같다(Carslaw와 Jaeger,1947).

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi k} \left\{ \ln \left(\frac{4at}{cr^2} \right) \right\}, c = e^r = 1.78 \quad (3.43)$$

식 3.43에서 $\ln t$ 와 온도상승 ΔT 간에 선형의 관계가 형성되며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{d \ln t}{d \Delta T} \quad (3.44)$$

반면 열선이 서로 다른 매질 사이에 삽입되어 있는 경우, Takegoshi 등(1982)은 통상의 비정상 열선법에 적용되는 열전도 방정식을 다음과 같이 수정하였다.

$$\Delta T = - \frac{q\lambda\sigma}{4\pi k_1} \int_0^1 \frac{E_i \left\{ -\lambda^2 x^2 / 4a_1 t (\lambda^2 u + 1 - u) \right\}}{(\lambda^2 u + 1 - u)^{1/2} (1 - u + \sigma^2 u)^{3/2}} du \quad (3.45)$$

식 3.45에서 λ 와 σ 는 각각 다음과 같이 정의 된다.

$$\lambda = \frac{a_1^{1/2}}{a_2^{1/2}} \quad (3.46)$$

$$\sigma = \frac{k_2 a_1^{1/2}}{k_1 a_2^{1/2}} \quad (3.47)$$

또한 무한소 반경(line source 가정)의 열선 대신 유한한 두께의 열선이 폭 h 인 리본(ribbon)의 폭으로 가정할 때, x 가 매우 작을 경우 Takegoshi 등(1982)은 해석해를 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{d\Delta T}{d \ln t} = \frac{q}{2\pi(k_1 + k_2)} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{h^2}{12x^2} \right) \frac{k_1 a_2 / a_1 + k_2}{k_1 + k_2} \frac{x^2}{4a_2 t} \right\} \quad (3.48)$$

식 3.49의 우변에서 $(k_1 a_2 / a_1 + k_2) / (k_1 + k_2)$ 의 값이 1이고 h 와 $x^2 / 4a_2 t$ 의 값이 매우 작다면, 식 3.49과 같이 정리할 수 있다.

$$k_1 = \frac{q}{2\pi} \frac{d \ln t}{d \Delta T} - k_2 \quad (3.49)$$

따라서 매질 2의 열전도도를 이미 알고 있을 때, 측정 시료인 매질1의 열전도도는 식 3.48 또는 식 3.49으로부터 산정된다. 여기서 두 매질이 동일할 경우 즉, $k_1 = k_2$ 인 경우에는 식 3.49은 통상의 비정상 열선법에 의한 열전도도 계산식인 식 3.44와 동일한 식이 된다.

● QTM-500

QTM-500(Kyoto Electronics)은 비정상 열선법(transient hot wire method)을 적용한다. 프로브는 PD-13 모델(그림 3.72(b))을 사용하였고, 프로브의 규격은 95mm×40mm이며 시료 표면과 직접 접촉하는 프로브 표면은 유리섬유로 도포되어 있다. 비정상 열선법에서는 두 매질 사이에 열선이 놓이기 때문에 열선과 두 매질의 접촉이 매우 중요하며, 프로브 PD-13의 경우 케이스 내부에서 용수철과 연결된 1kg의 가압추가 프로브 표면과 시료 표면의 부착성을 높여준다. QTM-500의 장비사양은 표 3.16과 같다.



(a) QTM-500 본체



(b) 프로브 PD-13

그림 3.72 QTM-500 열저항 측정장비

표 3.16 QTM-500의 장비사양

항목	장비 사양
측정방법	비정상 열선법(transient hot-wire method)
측정범위	0.023~12 W/m ² ℃
정밀도	표준 시편의 열전도도 값에 대하여 ±5%
재현성	표준 시편의 열전도도 값에 대하여 ±3%
열선 및 측정 센서	콘스탄탄 열선(constantan wire) 및 크로멜-알루멜 열전대(K-type thermocouple)
열선 인가전류의 정밀도	설정 값의 .05%
측정 소요 시간	60초
소비 전력	60W

(6) 다짐시험

이 연구에서는 낙동강 사질 준설토의 열적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 함수비에 변화를 주어 표준다짐시험을 수행하고 함수비와 건조단위중량에 따른 열저항값의 변화를 확인하고자 한다(그림 3.73). 실내에서 표준다짐시험을 수행하기 위해 그림 3.74(a)에 나타난 공압식 자동다짐기를 사용하였다.

1개의 다짐곡선을 도출하기 위해 함수비를 달리하여 최소한 4개 점에 대한 다짐시험값 및 열저항을 함께 도출하였다. 다짐시험 방법은 다음과 같은 순서로 진행되었다.

- ① 시료 건조 및 함수비 조절: 시험 시료를 건조로에서 1일 이상 완전 건조시킨 후, 공냉시켜 실험에 적용할 함수비를 맞추어 배합한다.
- ② 다짐 : 공압식 자동다짐기를 사용하여 규정에 따른 다짐층수와 층당 낙하횟수(3층 55회)를 정하고 다짐을 실시한다. 이 연구에서는 표준 B다짐방법으로 다짐시험을 수행하였다.

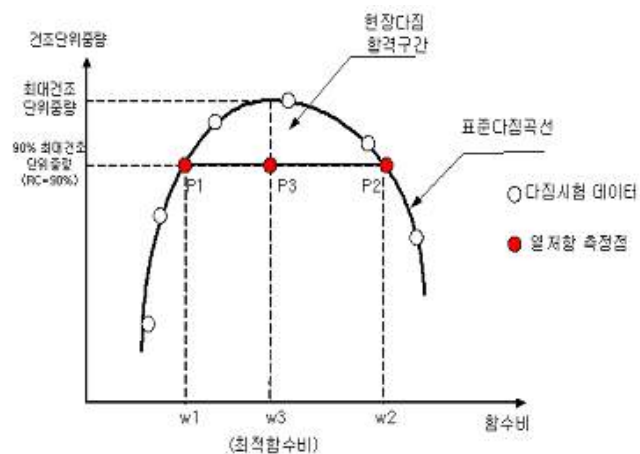


그림 3.73 다짐 및 함수비에 따른 열저항 측정



(a) 시료 다짐



(b) 시료 성형완료 및 열특성 측정모습

그림 3.74 시료 다짐 및 열특성 측정

바. 다짐 및 열저항 측정 시험

열저항 특성을 신뢰성 있게 평가하기 위하여 4가지의 서로 다른 다짐에너지를 비반복 법으로 적용하여 다짐시료를 성형하였고, 성형된 시료에 비정상 열선법을 적용한 QTM-500(KEM)과 비정상 탐침법을 적용한 KD2Pro(decagon device)를 이용하여 낙동강 사질 준설토의 열저항을 각각 측정하였다. 다짐방법은 표준 B다짐방법을 100%기준으로 하여 표준 B다짐방법에 대한 실제 다짐에너지가 100%, 95%, 90%, 85% 가 되도록 다져 주었으며 함수비에 따른 다짐정도의 결과를 그림 3.75에 나타내었다. 4가지 다짐방법 모두 최적함수비가 14% 정도 되었고, 이때의 건조단위중량은 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 정도를 나타내었다.

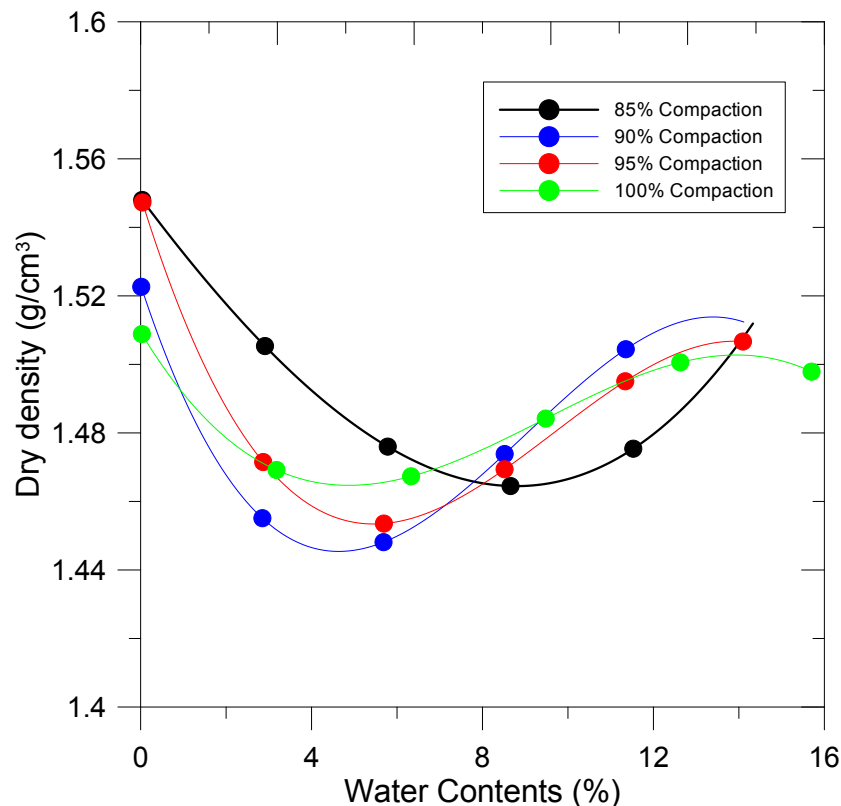


그림 3.75 낙동강 사질준설토의 다짐특성 곡선

다짐곡선 상 각 측정 함수비와 건조단위중량으로 구성된 다짐시료에 대해 상기의 두 가지 방법으로 열전도도를 측정한 결과를 다짐에너지의 정도에 따라 표 3.17~3.20에 나타내었고, 이를 정리하여 그림 3.76에 도시하였다.

표 3.17 100% 다짐시의 낙동강 사질 준설토의 열전도도

함수비 (%)	열전도도 (W/mk)	
	QTM-500	KD2PRO
0.03	0.2335	0.1112
2.89	0.3977	0.3852
5.07	0.6300	0.5487
9.75	0.8166	0.6315
15.70	0.9935	0.7896

표 3.18 95% 다짐시의 낙동강 사질 준설토의 열전도도

함수비 (%)	열전도도 (W/mk)	
	QTM-500	KD2PRO
0.043	0.2372	0.1112
2.731	0.3370	0.2709
4.892	0.5959	0.5594
9.522	0.7698	0.6952
14.095	0.8426	0.8529

표 3.19 90% 다짐시의 낙동강 사질 준설토의 열전도도

함수비 (%)	열전도도 (W/mk)	
	QTM-500	KD2PRO
0.014	0.2566	0.1256
2.899	0.3812	0.2588
5.000	0.5093	0.4438
8.684	0.6731	0.7803
14.117	0.7951	0.8929

표 3.20 85% 다짐시의 낙동강 사질 준설토의 열전도도

함수비 (%)	열전도도 (W/mk)	
	QTM-500	KD2PRO
0.037	0.2341	0.1193
2.873	0.3262	0.2979
5.074	0.5658	0.5573
9.471	0.8531	0.6983
14.330	0.8874	0.8684

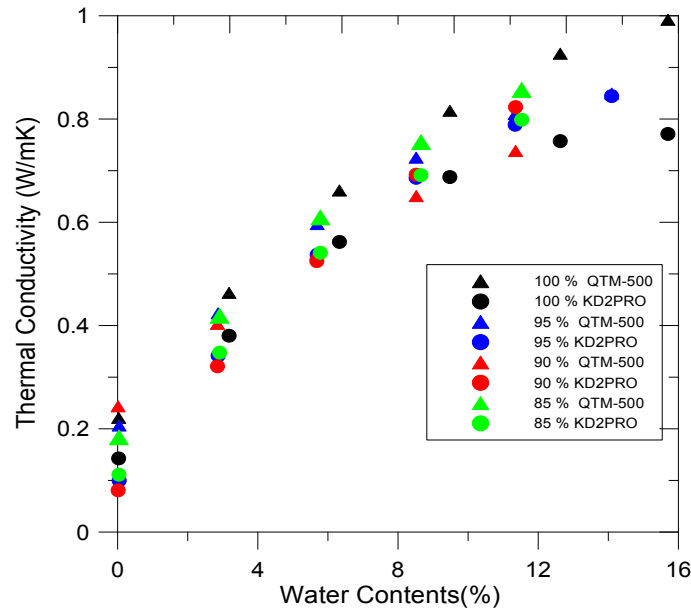


그림 3.76 열선법, 탐침법을 이용하여 측정한 함수비에 따른 열전도도

일반적으로 탐침 관입시에는 입상시료의 교란을 유발하여 탐침과 시료의 접촉이 불량하게 되고, 이러한 교란으로 인해 간극이 생기게 되어 다짐시료 내로 관입이 필요한 탐침법(KD2Pro)의 경우는 접촉에 의해 열저항을 측정하는 열선법(QTM-500)에 비하여 비교적 큰 열저항이 측정된다(위지혜 등 2011) 그러므로 열선법(QTM-500)으로 측정한 열전도도를 더욱 신뢰할 수 있다고 판단하여 그림 3.77에 열선법(QTM-500)을 이용한 열전도도를 따로 도시하였다.

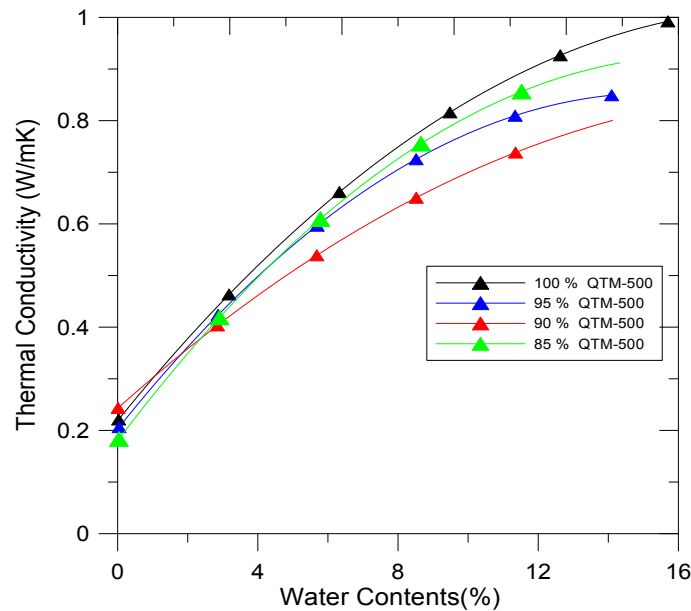


그림 3.77 열선법을 이용하여 측정한 함수비에 따른 열전도도

신뢰성이 높은 비정상 열선법(QTM-500) 기준으로 구한 그림 3.87의 그래프는 낙동강 사질 준설토의 경우 함수비가 높을수록, 다짐에너지가 클수록 해당 준설토의 열전도도가 높아진다는 것을 보여준다. 즉, 현장에서 사질 준설토를 되매움재로 사용시, 모래의 함수비를 충분히 높게 유지하면서 높은 다짐에너지로 다지는 것이 해당 준설토의 열특성 향상에 필요하다.

2. 결론

이 연구에서는 비선형 유한변형 압밀해석을 위한 비선형 압밀 물성치인 초기 간극비 및 간극비-유효응력 관계, 간극비-투수계수 관계를 구하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 사용하여 인천 ○○지역의 해상 준설토와 경상북도 ○○지역의 하상 준설토, 카울리 나이트의 비선형 압밀 물성치를 산정하였으며, 처리 전후 준설토의 활용을 위해 준설토의 오염물질에 대한 화학분성을 의뢰하였다. 또한, 다짐시험과 비정상 탐침법 그리고 비정상 열선법을 이용한 열전도도 측정 시험을 통하여 사질 준설토의 되매움재로서의 적용성을 평가 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 침강·자중압밀시험 결과 초기 간극비는 그 시료에 대한 토질정수가 아니라 초기 슬러리 간극비에 따라 달라지는 경향을 보이며, 이러한 경향은 초기 슬러리 함수비에 따른 확산 이중층 구조의 차이에서 발생한다. 또한 시료 표면 채취법 및 전기 비저항 탐침법을 통해 산정한 초기 간극비는 서로 비슷한 경향을 보였다. 향후 다른 흙의 특성에 관한 충분한 데이터가 축적된다면, 국내 시료에 대한 명확한 기본 물성치와 초기슬러리 간극비와 초기 간극비 상관관계를 얻을 수 있으며, 이 상관관계는 비선형 유한변형 압밀해석에 있어서 국내 준설토매립장 설계에 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.
- (2) 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계는 저응력 및 고응력 구간에서 서로 다른 경향을 보이며, 간극비가 큰 저응력 구간에서 그 변화폭이 큰 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 화학분석 결과 본 연구의 경상북도 ○○지역 하상 준설토 경우 점성 준설토의 경우 모든 지역의 조건에 만족하여 특별한 정화 처리 없이 활용이 가능하며, 사질 점성토의 경우는 불소 검출량이 1, 2지역의 기준치보다는 높게 검출되었으나, 본 연구과제에서 사질점성토를 활용하고자하는 토목공사의 뒷채움재 및 경량혼합재 활용에는 특별한 정화처리없이 활용이 가능하다.
- (4) 낙동강 사질 준설토의 경우 측정장비에 관계없이 함수비가 증가할수록 열전도도가 증가하였다.
- (5) 일반적으로 다짐시료내로 관입이 필요한 비정상 탐침법의 경우는 접촉에 의해 열저항을 측정하는 비정상 열선법(QTM-500)에 비해 비교적 큰 열저항(낮은 열전도도)이

측정된다. 이는 탐침 관입시 입상시료의 교란을 유발하여 탐침과 시료의 접촉이 불량하게 되고 교란으로 인해 간극이 생기게 되기 때문이다. 추가로 형성된 간극 사이 공기나 수분으로 인해 열저항이 실제보다 높게 평가되는 경향이 있다. 즉, 다짐 입상체의 열저항 측정은 탐침법보다 접촉에 의한 열선법이 측정에 신뢰성을 준다고 볼 수 있다.

- (6) 현장에서 사질 준설토를 되매움재로 사용시, 모래의 함수비를 충분히 높게 유지하면서 높은 다짐에너지로 다지는 것이 해당 준설토의 열특성 향상에 필요하다.

제4절 바이오 계면활성제를 이용한 토양정화

1. 토양 정화

최근 수십년간에 걸쳐 오염된 토양을 정화시키기 위하여 여러 가지 노력이 이루어져 왔다. 전통적으로는 오염된 토양을 현장으로부터 다른 곳으로 이동시키는 방법이 채택되어 왔지만, 이러한 방법은 단지 오염물의 위치를 변화시킬 뿐 궁극적으로 제거하는 것은 아니므로 오늘날 그러한 수단은 환영받지 못하고 있다. 따라서 이와는 달리 오염된 토양을 현장에서 제어하는 새로운 기술이 고안되고 있는데 주된 연구는 NAPLs(nonaqueous-phase liquids)의 제거에 초점이 맞추어져 있다. 이러한 오염 물질을 제거하기 위하여 계면활성제를 이용하는 방법에서는 계면활성제와 토양 간의 상호작용의 연구가 이루어져 왔다(조윤경, 1999).

2. 토양정화기술

토양오염 정화기술은 대상오염물질에 따라 크게 중금속($C_d, C_u, Z_n, P_b, A_s, H_g, C_r$)과 휘발성 유기화합물정화기술로 구분되고, 유기화합물질의 종류는 아래 표 3.21과 같다.

표 3.21 유기화합물질 종류

오염성분	특 성	유기화합물	종 류
휘발성 유기화합 물질	높은 증기압을 가지고 있어 대기 중으로 쉽게 휘발하는 성질이 있는 물질	비할로젠 휘발성 유기화합물질	Acetone, Ethanol, BTEX
		할로젠 휘발성 유기화합물질	PCE, TCE, Dichloromethane
준휘발성 유기화합 물질	준휘발성 유기화합물의 특징은 휘발성 유기화합물과 특성이 유사하나 휘발정도가 상대적으로 낮은 특징을 가지고 있다.	비할로젠 준휘발성 유기화합물질	PCB, Naphthalene, Phenanthrene
		할로젠 준휘발성 유기화합물질	Polychlorobiphenyls, Fluorene
		살충제	Aldrin, Chlordane Dieldrin
연료유	대부분의 경우 물보다 가볍기 때문에 지하수면에 부유상태로 존재하고 있다.	연료유	BTEX, Phenol, n-Decane, n-Hexane

또한 처리위치에 따라 오염토양 내에서 처리하는 In-situ와 오염토양 밖에서 처리하는 Ex-situ방법이 있다(표 3.22와 표 3.23). 이 연구에서는 토양세척법(soil washing)을 이용한다. 토양세척기법은 적절한 세척제를 사용하여 토양입자에 결합되어 있는 유해한 유기오염물질의 표면장력을 약화시키거나 중금속을 분리시켜 처리하는 기법이다. 토양세척기법에 이용되는 세척제는 오염물질을 토양으로부터 분리·용해시키는 역할을 하는 물질로, 계면의 자유에너지를 낮추고 계면의 성질을 현격히 변화시켜 물에 대해 용해성이 적은 물질을 열역학적으로 안정한 상태로 용해시킬 수 있는 중요한 화학물질이다. 그리고 이렇게 분리된 폐액은 농축·처분하거나 재래식 폐수처리방법으로 처리하며, 폐액 내의 중금속을 회수할 수도 있다. 이 기술로 광범위한 유기 및 무기오염물질을 제거할 수 있다(토양환경공학, 2007).

표 3.22 대상오염물질에 따른 처리기술(조현주, 2000)

대상오염물질	처리기술
중금속 처리기술	solidification
	thermal treatment
	soil washing
휘발성 유기물질 처리기술	solidification
	soil excavation
	soil vapor extraction
	PFIP
	bioremediation

표 3.23 In-situ방법과 Ex-situ방법에 따른 처리기술(조현주, 2000)

처리 지반	처리기술
In-Situ	(1) Soil Flushing
	(2) Biodegradation
	(3) Natural Attenuation
	(4) Solidification & Stabilization
	(5) Vitrification
	(6) Bioventing
	(7) Pneumatic Fracturing
	(8) Soil Vapor Extraction(in-situ)
	(9) Thermally Enhanced SVE
	(10) Hire Rot Fungus
Ex-Situ	(1) Chemical Reduction & Oxidation
	(2) Controlled Solid Phase Biological Treatment
	(3) Dehalogenation(Glycolate)
	(4) High Temperature Thermal Desorption
	(5) Incineration
	(6) Low Temperature Thermal Desorption
	(7) Soil Washing
	(8) Soil Vapor Extraction(ex-situ)
	(9) Solidification/Stabilization(ex-situ)
	(10) Vitrification(ex-situ)

가. 공정개요

토양세척법의 처리공정도는 그림 3.78과 같으며, 토양세척기술은 1970년대 후반 미국 EPA에서 기름누출사고로 오염된 해변을 정화하기 위해 처음 개발되었으나, 현재는 미국보다 유럽에서 더욱 발전시켜 사용되고 있다. 토양세척의 기본원리는 다음의 두 가지 가정에 근거를 두고 있다. 첫째는 오염물질이 입자가 작은 토양에 많이 분포되어 있어 이것만을 분리하여 부피를 감소시킨 후 처리할 수 있는 것이다. 둘째는 토양입자와 화학적으로 결합되지 않은 오염물질이 물리적인 방법으로 쉽게 토양과 분리할 수 있다는 것이다. 따라서 토양세척의 주된 목적은 완전한 토양재생이 아니고 오염된 토양의 부피를 감소시키는 것이라고 하겠다. 또한, 물에 첨가제를 사용하여 토양에 수착되어 있는 오염물질의 제거 효율을 높이기도 한다. 이 때 사용되는 첨가제로는 Triethylene Amine(TEA)과 같이 28℃ 이하에서는 물과 혼합되지만, 이 온도 이상에서는 두 층으로 분리되는 역혼화성 물질이 유리하다.

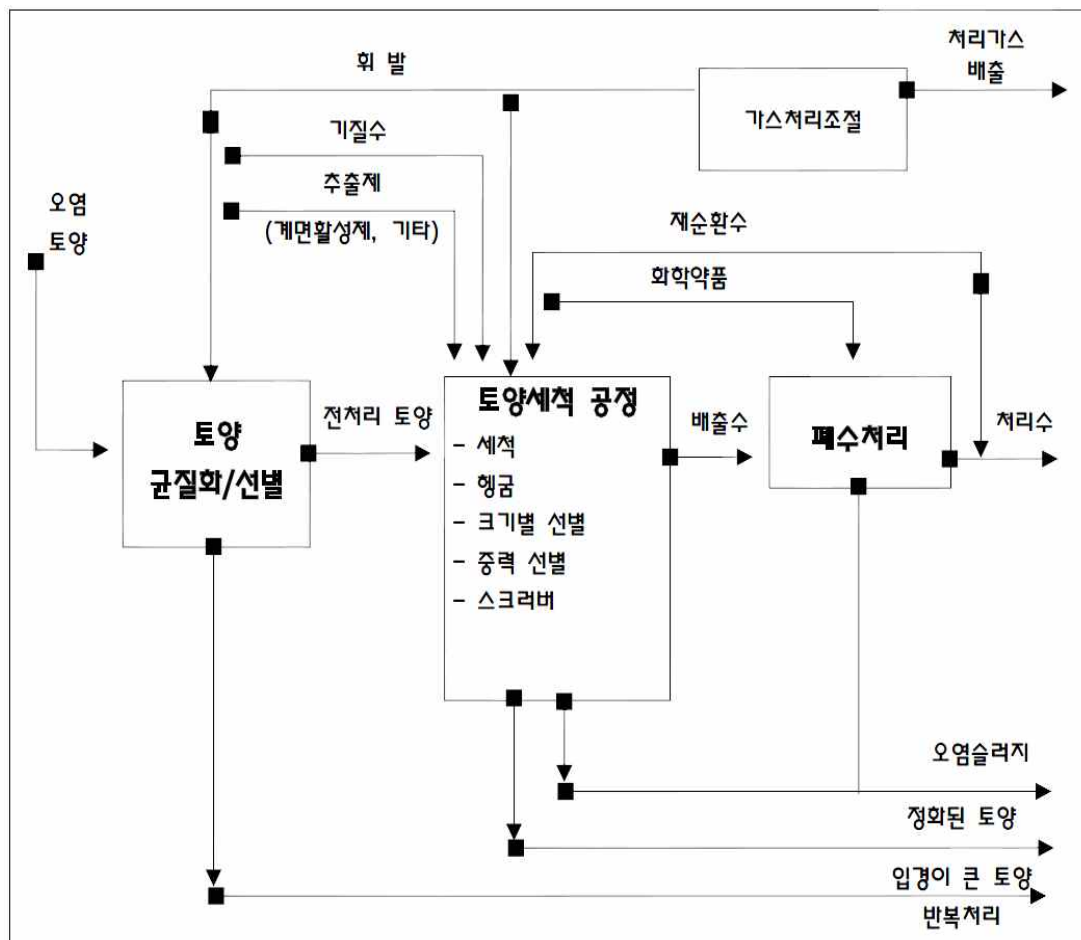


그림 3.78 토양세척법의 처리 공정도

나. 영향인자

- (1) 입경 분포(적정범위 0.24~2mm)
- (2) 토양의 종류
- (3) 토양의 물리적 형상
- (4) 수분함유량
- (5) 오염물질의 종류 및 농도
- (6) 유기물 함량
- (7) 양이온 치환능력
- (8) pH와 완충력

다. 처리효율

현재, 토양세척기법은 유럽에서는 일반적으로 사용되고 있지만 미국에서는 제한적으로 사용되고 있다. 1986에서 1989년 사이에 이 기술은 여덟 개의 superfund sites에서 오염물질 제거 방법 중 하나로 적용되었다. 토양세척기법은 일반적으로 생물학적 복원기술, 소각, 고형화/안정화와 같은 기술과 복합적으로 사용된다. 적용되는 기술에 따라 다르지만, 토양 세척제이나 미세 토양에 대해서는 후처리가 필요하다. 오염된 미세 입자를 분리하고 난 후 정화된 토양은 현장에 다시 되돌려 진다. 토양세척의 예로 18,200 m^3 (약 20,000ton)의 오염토양 부지를 세척하기 위해 3개월 미만의 기간이 소요된 경우가 있다.

라. 적용사례

토양세척기술은 제거성능, 제거시간, 경제성 등을 비교하고 평가하여 최적의 방법을 선택한다. 토양세척기술에 의한 오염물질의 제거효율은 다른 기술에 비해 높으며 어떤 성분은 99%이상 제거되기도 한다. 네덜란드에서는 이 기술을 이용하여 유기물과 중금속이 함께 오염되어 있는 토양을 재생하였으며, 이 결과를 표 3.24에 나타내었다. 시간당 토양의 처리용량은 설계용량에 따라 다르지만 대부분의 경우 1~10톤 정도가 경제적이다. 토양세척기술에 의한 처리비용은 전체 처리용량에 따라 다르지만 약 \$150~300/ton으로 비교적 높은 편이다. 토양세척기술을 새로운 부지 개발 시 병행하면 가격 경쟁력이 매우 높다. 또한 오염물질을 운반하여 매립할 때 경량화 기술로 효과적이며, 이 경우 오염된 토양의 부피가 10,000 m^3 이상일 때는 경제성이 있다.

표 3.24 네덜란드의 토양세척 결과

오염물질	네덜란드 규정(mg/kg)		오염물질 농도(mg/kg)	
	B Class	C Class	처리 전	처리 후
Cr	250	800	100~2500 100~320 184 43~45	70~120 3 64 11~15
Ni	100	500	25~890 100~600	40~70 50~80
Zn	500	3000	6040 460~720 160~170	150 140~200 50~80
Pb	150	600	11900 110~450 1450	110 20~70 <20
Hg	2	10	67 67	105 104
As	30	50	135 180	19 3
Cd	5	20	3000~18000 4~18	<20 0.5~1.4
Mineral oil	1000	5000	6000 273~933	<20 20
CN(Total)	50	5000	75~300 400~1000 250~500	7~10 6~10 10~15
PCBs	1	10	2~4	0.1~0.2
Oil			19600 233 3000~18000	334 <20 20
PCAs(Total)	20	200	250~400 79 19 638	0.5~10 7.9 0.34 7.8
Chlorinated	1	10	20~30	<1
Hydrocarbons			5.3	0.4

3. 계면활성제

계면활성제는 자동차 오일, 윤활제, 세제, 음식 첨가물, 약품 등 다양한 용도로 사용되고 있으며 대부분의 경우 수용액 상태로 이용되고 있다. 따라서 계면활성제의 종류 역시 수용액에서의 특성에 따라 구분된다.

가. 계면활성제 연구 동향

- (1) Exner 등(1984)은 Dioxine을 물 및 유기용매에 용해시키고 자외선 처리로 dionine을 분해하였다. 즉 자외선 처리법이라는 주 오염제거 방법에 대한 하나의 보조수단으로 계면활성제가 이용되었다. 방법도 주입식이 아닌 살포식이라는 것이 현재의 방법과는 다소 차이가 있다. 그러나 비록 실내 실험이기는 하나 31시간 동안에 Dioxine의 농도를 671ng/g에서 11ng/g으로 98%나 떨어뜨린 것은 매우 고무적인 사실로 계면활성제가 지반오염의 처리물질로서 주목을 받기에 충분한 결과였다.
- (2) Ellis 등(1985)은 중성계면활성제의 혼합액(1:1혼합액, Adsee 799[Witco Chemical Co] & Hyonic NP-90[Diamond shamrock]을 이용하여 탈착 실험을 수행한 결과, 물로 세척한 경우보다 2배정도 높은 탈착 효율을 나타내었다.
- (3) Mcdermott 등(1989)은 perchlorobenzene을 오염된 흙을 생분해와 계면활성제 추출법에 의해 정화하는 방법에 대해 연구하였다. 특히 음이온계면활성제(SDS:sodium dodecyl sulfate)가 본격적인 오염처리물질로 선택되어 오염정화에 성공적으로 사용됨으로써 음이온성 세제의 우수성이 나타난 실험이다.
- (4) Abdul 등 (1990)은 ATF(auromatic transmission fluid)로 오염된 모래질 대수층을 정화하기 위해 음이온 계면활성제와 중성계면활성제를 이용하여 회분식 탈착실험을 수행한 결과, 물로는 23%밖에 제거되지 않던 오염물질이 ethoxylated alcohol(nonionic surfactant)로는 80%까지 정화되었다. 이 연구에서 중요한 점은 계면활성제 선택 시에 종합적인 기준을 마련했다는 것이다. 즉 세제의 표면장력뿐만 아니라 세제용액에 의한 흙의 분산작용의 영향 및 오염물질 자체의 분산작용 등을 기준으로 계면활성제가 선택되었다. 이렇게 하여 통과된 계면활성제에 대하여 실험실에서 batch test를 행하고 실외의 현장 실험으로 이어졌다.
- (5) Thornton(1990)은 음이온성 계면활성제를 중성계면활성제와 혼합하여 가솔린(gasoline)으로 오염된 모래질 흙을 정화 처리 하였다. 그는 계면활성제 선정시 표면장력을 측정하여 그 값이 가장 작게 나타나는 것을 사용하였는데 이는 지반오염 처리물질로서 계면활성제를 사용할 경우 여러 종류에 대해 screen 방법을 제시했다는 데 의의가 있다. 물론 계면활성제를 사용할 경우 표면장력을 낮추는 것으로만 기준을 삼아 선택될 수는 없고 이외에도 마이셀을 형성하여 오염물질을 용해시키

는 과정이나 분산효과 등도 함께 고려하면 보다 정확한 선택이 될 수 있다.

- (6) Liu 등(1991)은 지반오염 처리제로 계면활성제가 사용될 경우 결국은 마이셀 작용과 그에 따른 용해도가 지반정화의 가장 중요한 핵심요소라고 보고 계면활성제의 농도를 조사하였다. 중성세제인 oxytol phenylethoxylate의 경우 0.1%(부피)인 CMC 이상의 농도에서 마이셀 작용이 시작되나 실제 오염 처리시 CMC농도보다 높은 1%(부피)정도의 농도를 사용해야 마이셀 작용이 충분히 일어나 흠에 흡착되었던 PAH가 70~90% 용해되었다. 즉, 1%의 농도로 anthracene의 soil-water partition coeff.를 100배이상 줄였다. 이것은 계면활성제의 지반오염처리에 대한 의미 있는 실험이며 오염물질의 흠에 대한 흡착성과 그것을 마이셀화, 용해시키는 계면활성제의 농도를 제시했다는 점에서 중요한 실험이라 하겠다.
- (7) Abdul 등(1991)은 소수성 유기화합물을 용해시키는데 있어 계면활성제의 효율성을 column을 이용한 연구에서 오염된 토양칼럼을 5~20g/L의 alcohol ethoxylate계 계면활성제 용액으로 간극부피의 20배 순환시켰을 때 55~85%의 PCB를 제거할 수 있었다. 비슷하게 Ellis 등은 토양칼럼을 15g/L의 계면활성제용액으로 세척한 결과 90%이상의 PCBs, chlorinated phenols, petroleum hydrocarbon들을 제거할 수 있다고 발표하였다.
- (8) Rixey 등(1991)은 계면활성제의 사용농도에 대하여 0.1~1%(무게)정도를 제시하였다. Burris와 Antworth(1992)는 지반을 양이온성 계면활성제로 처리하여 투수계수의 감소 없이 perchloroethylene의 흠에 대한 흡착능력을 100배 이상 증가시켰다.
- (9) Gabr 등(1995)은 나프탈렌이 Sank/kaolinite(80/20)흠에 오염되었을 때 이를 음이온성 세제인 SDS를 사용하여 정화하였는데 이때 대략 25 pore volume 이후부터 투수계수가 급격히 감소하여(10-4 cm/sec에서 10-6 cm/sec 정도로 감소) 총 49pore volume으로 정화작업을 마칠 때까지 2.5개월이 소요되었다. 정화율은 90%이상이었다. 이처럼 급격한 투수계수의 감소는 SDS가 분산효과가 커서 크기가 매우 작은 kaolinite입자를 분산시켜 간극을 막는 현상 때문일 수도 있으나 보다 자세한 연구가 요구된다.
- (10) Sheng 등(1996)은 hexadecyltrimethylamonium(HDTMA)과 같은 양이온성 계면활성제를 토양에 주입하여 토양의 성질을 바꿔주면 토양의 유기물 함량이 증가하여 소수성 유기오염물질이 더 잘 흡착됨을 확인하였고 HDTMA를 주입한 결과 오염물질의 흡착능력이 향상되어 오염물질의 확산을 막을 수 있었다.
- (11) Smith 등(1997) 비이온성 계면활성제인 Triton X-100을 이용하여 trichloroethene으로 오염된 토양을 정화실험을 실험실과 현장(35일 동안 26.5L/min으로 주입)에서 실시하였다. 실험결과 400mg/L의 농도 Triton X-100의 토양으로의 흡착기작은 이송 및 분산의 이동에 비해 느리게 일어남을 알 수 있었다.

(12) Herman 등(1997)은 계면활성제가 토양에 흡착된 오염물질의 유동성을 좋게하여 미생물이 이용하기 쉽게 함으로써 생분해도를 높임을 확인하였다. 양이온 계면활성제를 주입하여 토양의 흡착성능을 높인 뒤 비이온 계면활성제를 주입하여 오염물질의 용해도를 증가시키면 오염물질의 제거효율이 높아졌다. 계면활성제의 흡착 또는 침전에 의한 손실과 그에 따른 오염물질 제거효율에 대한 연구도 많이 이루어지고 있다. 처리한 계면활성제를 재이용하려는 연구도 있는데, 액상추출법이 air stripping과 계면활성제의 농도에 더 크게 영향을 받지만 효과적으로 오염물질과 분리가 가능하다고 한다. 계면활성제의 독성에 관련된 안전성에 대해서도 여러 연구가 진행되고 있다.

나. 계면활성제의 분류

계면활성제는 그림 3.80과 같이 친수성 및 소수성의 양면성의 구조를 가진 물질로서 물과 유지에 용해되는 성질을 가지고 있다. 일반적으로 친수성 부분(head group)은 이온성($-\text{COO}^-$, $-\text{SO}_4^{2-}$, $-\text{N}(\text{CH}_3)^3$) 또는 극성이고 소수성 부분(tail group)은 12개 혹은 그 이상의 원자를 포함하는 탄소고리이다. 계면활성제의 소수성부분($-\text{CH}_2-$ chain)은 물과 잘 친화되지 못하기 때문에 물 속에서 주변 물분자들의 구조를 뒤틀리게 하여 전체적인 자유에너지를 증가시키게 된다(Rosen, 1989). 계면활성제는 물에 용해되었을 때, 이온의 전하상태에 따라 이온형 계면활성제와 비이온형 계면활성제로 구분하고 다시 이온형 계면활성제는 친수기(head group)가 띠는 전하에 따라 음이온, 양이온, 양성이온 계면활성제로 구분된다. 일반적으로 계면활성제는 음이온 계면활성제가 전체 사용량 중 절반이상을 차지하고 있으며 비이온, 양이온 순으로 많이 사용되고 있다. 이중 양이온 계면활성제는 토양중의 점토와 같이 음이온을 띠는 입자들과 결합하여 토양 내에 공극을 폐쇄시켜 세척효율을 떨어뜨리는 역효과를 초래할 수도 있다. 또한, 양이온 계면활성제는 일반적으로 미생물에 독성이 있는 것으로 알려져 토양 내에 잔류할 경우, 유기오염물질에 대한 토양미생물에 의한 분해성이 저해될 것으로 추측된다(최상일 외, 1996).

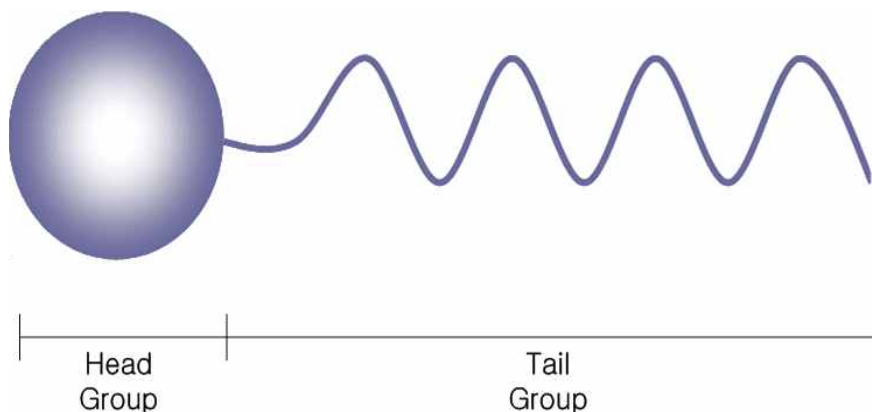


그림 3.80 계면활성제

(1) 양이온 계면활성제(cationic)

친수성 부분이 양전하를 띠고 있는 계면활성제로 표면이 음전하를 띠고 있는 토양입자에 오염물과 함께 흡착함으로써 고농도로 오염된 지중 내에서 많은 오염물을 흡착시켜 오염물의 확산 및 이동을 저지하는 효과가 있다. 그러나 궁극적으로는 토양의 표면입자에 흡착된 상태로 남아 있기 때문에 오염지반정화의 개념에 있어서는 그 사용에 주의가 필요하다. 즉, 양이온 계면활성제는 스스로 흙에 흡착하여 흙 입자 표면을 소수성화 시켜 보다 많은 유기화합물질이 흡착되게 함으로 오염물질의 이동을 저지하여 오염확산을 방지하는 효과가 있으므로 오염물질의 확산차폐물질로 사용이 가능하다(ex. $R_4N^+CL^-$ 를 가진 계면 활성제).

(2) 음이온 계면활성제(anionic)

친수성부분이 음전하를 띠고 있는 계면활성제로 토양입자의 표면에 흡착되어 있는 오염물질의 표면장력을 낮추어 흙입자로부터 분리/탈착시키고 오염물질과 마이셀을 형성하여 물에 용해시키는 성질이 있다. 또한, 무독성이기 때문에 토양오염정화에 널리 사용되고 있다(ex. $RCOO^-M^+$, $RSO_3^-M^+$, $ROSO_3^-M^+$ 을 가진 계면활성제).

(3) 비이온 계면활성제(nonionic)

친수성부분이 전하를 띠고 있지 않은 것으로 물에는 용해되지만 이온화되지는 않는다. 표면의 성질에 따라 표면을 친수성 혹은 소수성으로 만들 수 있으나 양성 계면활성제와는 달리 표면자체의 전기적 성질을 변화시키지는 않는다(ex. $-OCH_2CH_2O-$ 에 의해 용해도를 갖는 친수성 그룹을 가진 계면활성제).

(4) 양성계면활성제(amphoteric or zwitterionic)

분자의 계면활성부분이 양전하와 음전하를 동시에 띠고 있는 것으로 토양 입자자체의 전기적 성질을 바꿀 수 있고 pH에 대한 영향을 크게 받는다(ex. $RN^+(CH_3)_2CH_2SO_3^-$ 를 갖는 계면활성제).

(5) 소수성 부분에 따른 계면활성제

(가) 긴 사슬의 alkyl 그룹 (종말 치환된 $C_8 - C_{20}$)

(나) 가지형 alkyl 그룹 (내부 치환된 $C_8 - C_{20}$)

(다) alkylbenzene (다양한 치환의 $C_8 - C_{15}C_6C_4$)

(라) alkylnaphthalenes (C_3 이상의 alkyl)

(마) fluoroalkyl 그룹 (부분적으로 혹은 완전하게 플루오르화된)

(바) polydimethylsiloxanes ($-OSi[CH_3]_2O-$)

(사) 고분자량의 polyoxypropylene glycol 유도체

표 3.25 계면활성제의 이온성과 특성에 대한 분류

구 분	음이온 계면활성제	양이온 계면활성제	양성 계면활성제	비이온 계면활성제
계면활성제 종류	sulfonic acid salts, alcohol sulfates, alkylbenzene sulfonates, phosphoric acid esters	polyamines and their salts, quaternary ammonium salts, amine oxides	β -N-Alkylamino propionic acids, N-alkyl- β -imino dipropionic acids, N-alkylbetains	polyoxyethylenate d alkylphenols, alkylphenol ethoxylates, alkanolamides
독 성	비교적 독성이 없음	독성 있음	비교적 독성이 없음	비교적 독성이 없음
토양흡착	토양흡착 없음	강한 흡착	흡착됨	적은 흡착
적용성	가용화가 좋음, 넓은 범위 유류오염지역 복구 사용, 수리학적 오염물질 제거	좁은 범위의 환경적인 적용	다른 계면활성제와 용화성이 있으므로 보조계면활성제와 혼합하여 유류오염지역에 사용	가용화가 좋음, 보조 계면활성제와 혼합하여 유류오염지역에 사용

다. 계면활성제에 의한 오염물질 제거 메커니즘

토양 환경에서 물에 녹지 않는 소수성유기물질의 용해도를 증가시키고 유동성을 증가시킬 수 있는 계면활성제의 역할에 대한 연구들을 세 부류로 나누면 첫째로 계면활성제의 마이셀 형성과 용해도 증가의 메커니즘에 관한 이론적 연구이고 둘째는 오염물에 대한 각 계면활성제의 세척력에 관한 연구이며 셋째는 계면활성제 용액을 이용한 오염물의

토양으로부터 탈착 또는 NAPL의 용해에 관한 연구가 있다. 이외에도 유화작용(emulsification)이나 계면활성제가 표면장력에 미치는 영향 등에 관한 것 등이다.

(1) 마이셀(micelle)의 형성 메커니즘

계면활성제의 양수성 물질로 한 분자 내에 각각 소수성과 친수성을 띠고 있는 두 부분이 결합되어 있는 구조로 특징 지워진다. 서로 다른 phase간 경계면을 활성화시킬 수 있는 이유도 바로 이 양수성 분자구조에 기인하는데 계면활성제의 소수성부분($-CH_2$ -chain)은 물과 잘 친화하지 못하기 때문에 물속에서 주변 물분자들의 구조를 뒤틀리게 하여 전체적인 자유에너지를 증가시키게 된다(염익태외 1997). 소수성 부분과 물분자들의 접촉은 열역학적으로 불리하게 되어 두 부분이 서로 분리되려는 성향을 나타내는 반면, 친수성부분은 물과 접촉하고 소수성 부분은 물과 분리되는 형태로 존재하게 되는데 그러한 방법이 계면활성제 분자들이 물과 다른 상의 계면(공기-물, 물-기름, 물-고체)에 정렬하는 것이다. 이 경우, 계면활성제의 친수성 부분은 계면에서 물 쪽으로 정렬되고 소수성 부분은 물과 반대쪽으로 정렬되어 자유에너지가 최소화되고 용액은 안정화 된다. 또, 계면활성제의 소수성부분과 물과의 접촉은 최소화하는 또 하나의 방법은 계면활성제 분자들이 서로 집합체를 이루되 소수성부분은 이 집합체의 안쪽으로 정렬되어 물과 분리되고 친수성 부분은 바깥쪽으로 정렬되어 물분자들과 접하는 형태이다. 일반적으로 농도가 낮을 때는 계면활성제 분자들의 계면으로의 정렬형태가 열역학적으로 더 유리하나 농도가 높아져서 일단 계면이 계면활성제 분자들로 포화되면 그 이후로는 마이셀(micelle)의 형성이 시스템의 자유에너지를 줄이는 주요 메커니즘이 된다. 이 때, 마이셀이 형성되기 시작되는 농도를 CMC(critical micelle concentration)라고 한다(그림 3.81).

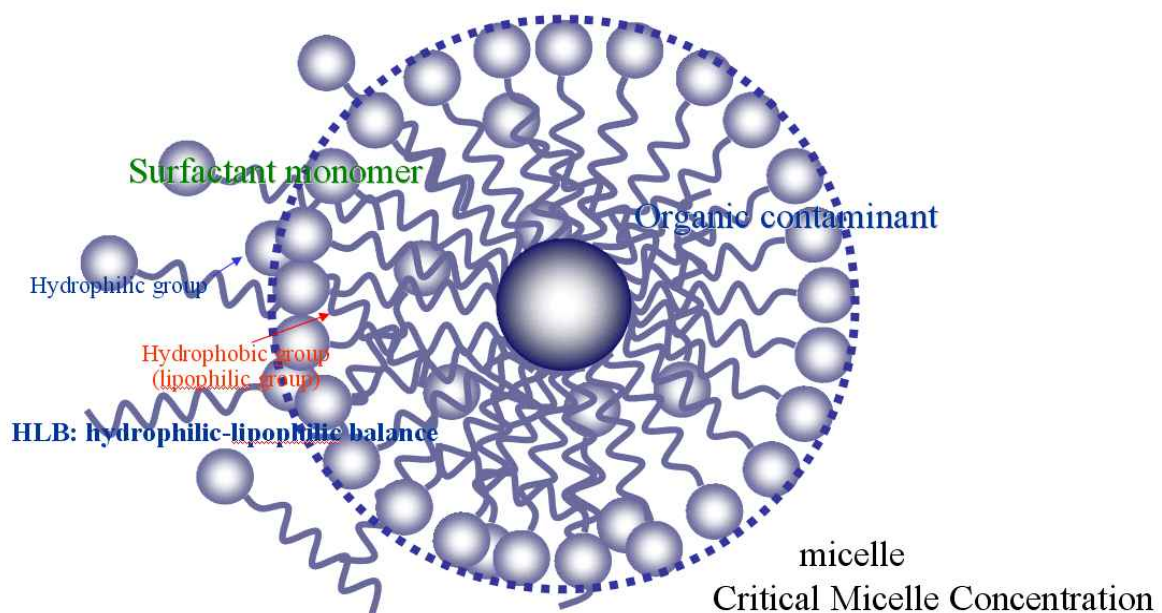


그림 3.81 마이셀(micelle) 형성

이 농도에서는 그림 3.82에 주어진 바와 같이 표면 장력, 전도도, 탁도 등 여러 가지 용액의 성질이 급격히 변화하기 시작한다.

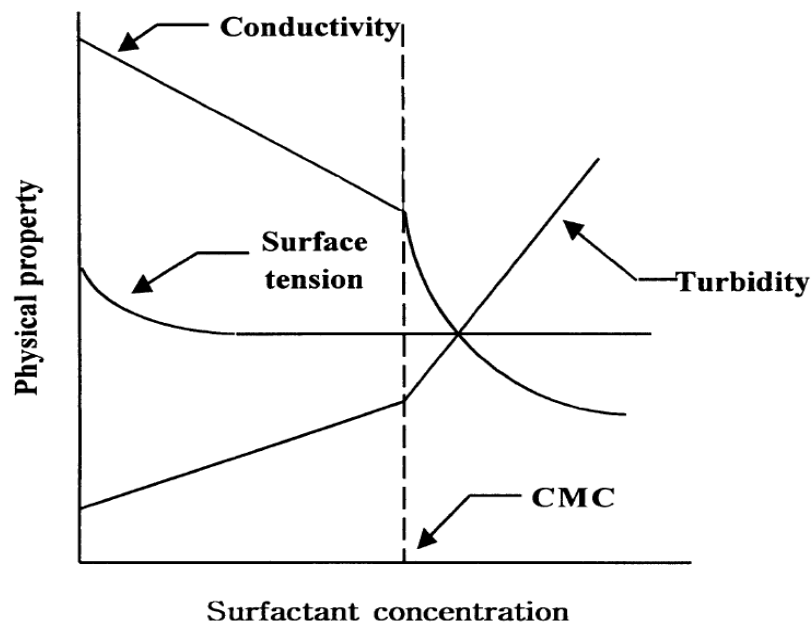


그림 3.82 마이셀 형성의 중요인자의 징후

마이셀의 크기는 직경이 약 3~4nm 정도이다. 유기오염물의 제거에서 마이셀 형성이 중요한 이유는 마이셀이 불용성 또는 난용성 물질들을 녹일 수 있기 때문이다. 소수성 유기물질들은 수소결합으로 연결되어 있는 물분자들과 친화되지 못하여 미량을 제외하고는 물에 녹지 못하고 분리된 형태(결정체 또는 NAPL)로 존재하게 된다. 소수성 물질과 물 사이의 이런 배타적인 상호작용을 소수성효과(hydrophobic effect)라고 한다. 하지만 물속에 마이셀이 존재할 때에는 소수성 물질들도 전체적인 자유에너지를 증가시키지 않고 물에 용해될 수 있다. 소수성 물질들은 마치 탄화수소 용매와 같은 상태인 마이셀의 중심 부분으로 녹아 들어갈 수 있기 때문이다. 마이셀이 형성되기 시작하는 농도인 CMC는 계면활성제의 종류, 온도, 경도 등에 대한 함수로 알려져 있다(Rosen, 1989). 계면활성제에서 소수성 부분이 증가할수록, 수용액상의 CMC값은 작아진다. 대체로 CMC값의 일반적인 범위는 0.1~10mM이며, CMC값이 작을수록 계면활성제가 오염물질의 용해도를 더 잘 향상시킨다. 비이온성 계면활성제는 CMC값이 작고 또한 오염물질의 용해도 향상제로 많이 사용되고 있다(염익태 외, 1997).

기존 연구(Park, 1993)에 따르면 마이셀의 특성을 바탕으로 기름방울 모델, 원판 모델, 원기둥 모델 등 여러 가지 모델이 제안되었는데 기하학적 구조의 차이와는 상관없이 공통적으로 마이셀은 친수성 head 부분의 껍질로 둘러싸인 소수성 내부를 갖는 구조라는 점을 지적하고 있다. 마이셀을 형성하는 원인이 소수성인 탄화수소 꼬리간의 상호작용이므로 마이셀 중심 내부에는 물 분자가 없다는 가정이 일반적이지만, 수용액상에서 마이셀은 주변에 물이 존재하므로 두 상 사이의 경계나 그 주변에서는 약간의 물과 중심부의 접촉이 있을 수밖에 없고 이때 이 접촉의 범위를 결정하는 것은 head 그룹의 표면적과

소수성 중심부의 반지름이다. 따라서 마이셀 중심부의 부피와 표면적의 상대적인 비율은 집합체를 이루는 기작에서 중요한 역할을 하게 된다. 마이셀이 형성되기 시작하는 CMC를 결정하는 주된 인자로 계면활성제의 소수성 꼬리를 들 수 있는데, 탄소의 수가 증가할수록 CMC는 감소하며 유기 물질의 첨가가 CMC에 미치는 영향은 그다지 크지 않고 온도가 증가함에 따라 CMC값이 감소한다(Neupane D, 1997). CMC에 따라 계면활성제가 마이셀을 형성하는 예는 그림 3.83과 같다. 즉 수용액에서 CMC 이하의 농도에서는 각 monomer로서 존재하다가 CMC 이상이 되면 마이셀을 형성하기 시작하여 monomer와 마이셀의 형태로 존재하고, 고액계면에서도 마찬가지로 CMC 이하에서는 고체 표면에 monomer로서 흡착하지만 CMC 이상의 농도가 되면 한 층의 hemimicelle 혹은 이중 층의 admicelle로서 존재하게 된다(조현주, 2000).

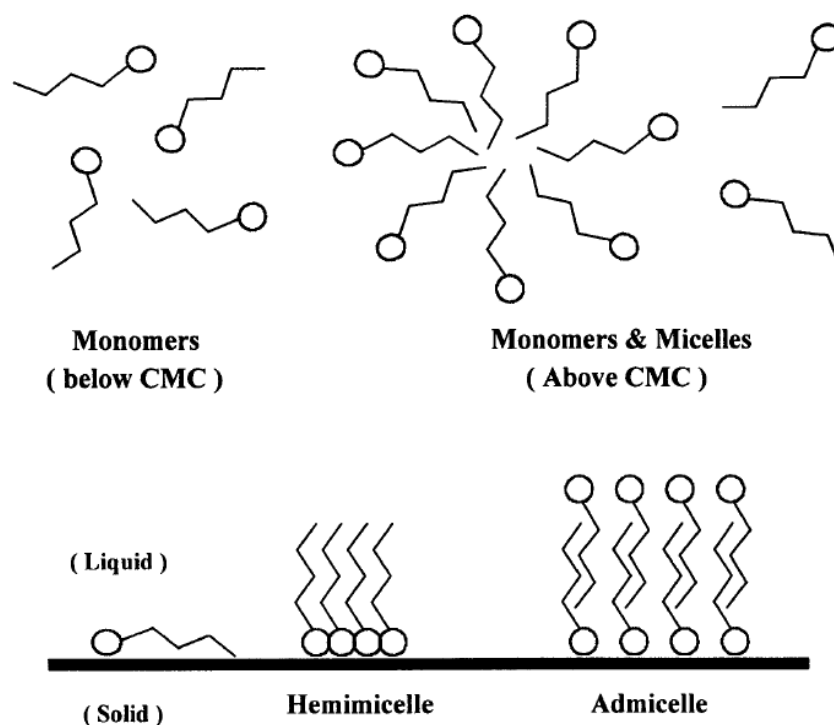


그림 3.83 마이셀(micelle)의 형태

(2) 소수성 유기물질, HOC(hydrophobic organic compound)의 용해도 증가

소수성을 띠는 마이셀의 핵은 조그만 부피의 탄화수소 용제로 간주되고 마이셀 안에서의 자유도는 사실상 탄화수소 용제와 거의 같은 수준으로 볼 수 있다. 따라서 마이셀에 의한 HOC의 용해는 물과 마이셀의 액체 탄화수소상 사이에서 HOC의 분배로 설명되어질 수 있다. 평형조건하에서 마이셀과 물에서의 HOC의 농도비는 보통 micelle-water partitioning coefficient, K_m 으로 정의되며 다음과 같이 주어진다. X_m 과 X_a 는 각각 물과 마이셀 상에서 HOC의 몰분율을 나타낸다. K_m 은 계면활성제나 HOC의 농도에 상관없이 특정 소수성 유기물질에 대해 상대적으로 일정한 값을 갖고 있는 것으로 알려져 있으며,

계면활성제가 특정한 HOC의 용해도에 미치는 정도를 정량화 하는데 사용되고 있다.

특정 HOC에 대한 계면활성제의 세척력과 관련하여 계면활성제 특성 중 가장 중요한 것은 계면활성제분자내의 소수성과 친수성을 띠는 그룹간의 상대적인 크기인데 일반적으로 계면활성제의 세척력은 계면활성제 분자의 소수성 그룹을 이루고 있는 Alkyl Chain의 길이가 길수록 증가하며 그룹이 클수록 감소한다. 이 두 가지 효과는 두 그룹 간의 상대적인 크기를 나타내는 hydrophilic lipophilic balance(HLB) 숫자의 영향으로 표현되는데 HLB가 작을수록 세척력은 증가한다. 계면활성제의 이온형태도 중요하다, 일반적으로 계면활성제의 HOC에 대한 세척력은 비이온계 계면활성제가 가장 높고 양이온, 음이온계 계면활성제 순이다. 계면활성제의 세척력에 영향을 끼치는 또 하나의 중요한 요인은 옥탄올 - 물 분배계수(octanol-water partitioning coefficient, K_{ow})로 대변되는 용매의 소수성이다. 보통 $\log K_m$ 과 $\log K_{ow}$ 에는 1:1의 선형관계가 있는 것으로 보고되었다. 이는 대상용해물질의 소수성이 클수록 동일 계면활성제에 의한 상대적인 용해도 증가는 크다는 것을 의미한다.

(3) 계면활성제에 의한 토양으로부터의 HOC의 세척

계면활성제를 이용해 토양을 세척할 때는 HOC의 마이셀-물 분배외에도 계면활성제의 토양의 흡착, 그리고 HOC의 토양-물 분배도 고려되어야 한다(그림 3.84). 용액 중 계면활성제의 일부가 토양에 흡착되면 용액 중 마이셀의 농도가 줄어들어 용액의 세척력은 그만큼 감소하게 된다. 뿐만 아니라, 흡착된 계면활성제는 토양의 유기물 농도를 증가시켜 HOC의 흡착성을 증가시키므로 세척 효과를 감소시킨다. 따라서 계면활성제의 토양에의 흡착정도는 계면활성제를 선택함에 있어 중요한 기준이 된다. 토양으로부터 HOC의 세척효율에 영향을 미치는 주요 요인들은 CMC, 계면활성제의 토양에의 흡착정도, 그리고 계면활성제의 세척력(K_m) 등이다. 처음 두 가지 요인은 일정량의 계면활성제를 더했을 때, HOC 용출에 쓰이는 용매 중에 마이셀의 농도를 결정하는 반면 세 번째 요인은 특정 마이셀의 세척효율을 나타낸다(윤현석, 1999).

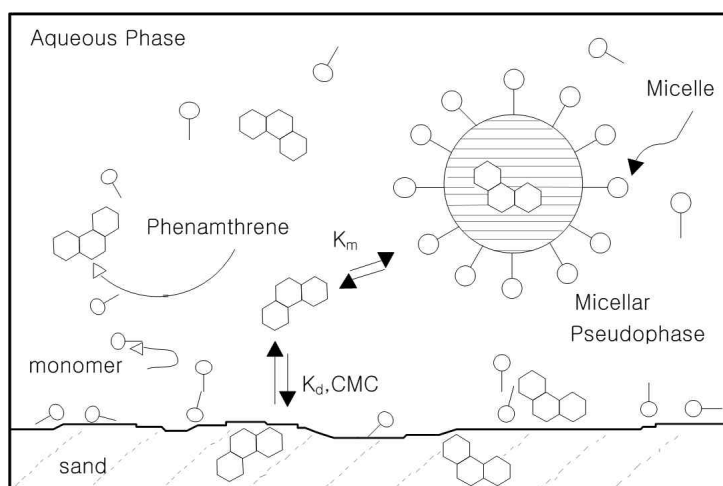


그림 3.84 마이셀과 토양 그리고 물 사이의 분배관계를 도시화(분배계수 이용)

(4) 유화작용(emulsification)

유화작용은 하나의 액체가 다른 액체에 방울형태로 분산되어 존재하는 현상으로 정의되며 마이셀에 의한 용해촉진작용(solubilization)과는 구별된다. 유화작용과 용해촉진작용이 근본적인 차이점은 마이셀에 의한 용해촉진이 용액에 용해된 것으로 간주되는 반면 유화된 방울들은 주변을 둘러싸고 있는 용액과는 분리된 상으로 간주된다는 점이다. 앞에서 언급한 바와 같이, 마이셀에 의한 용해도 증가는 열역학적으로 유리한 과정이나 유화작용은 두 개의 서로 섞이지 않은 액체사이의 계면을 증가시킨다는 점에서 열역학적으로 불리한 과정이다. 따라서 유화작용은 저절로는 생기지 않고 반드시 기계적인 에너지가 가해져야만 일어날 수 있다. 일단 기계적인 에너지의 공급이 끊어지면 열역학적으로 불안정하여 결국은 유화된 방울이 사라지고 두 액체가 완전 분리되는 방향으로 반응이 진행된다.

(5) 표면장력 저감

계면활성제를 오염지역에 주입하였을 때, 오염물질의 유동성과 관련하여 중요한 현상 중에 하나가 NAPL과 토양과의 표면장력의 감소에 의한 NAPL의 수직적 움직임의 촉진이다. 원래 오염물질이 지표면이나 지하저장탱크로부터 누출되는 경우 누출된 NAPL은 중력에 의해 천천히 지하로 이동하게 되는데, 이중 일부는 토양 매트릭스와의 표면장력에 의해 불포화층 토양 공극 중에 'ganglia'라고 하는 형태로 잔류하게 된다. 이러한 현상을 잔류성 포화라고 하는데 여기에 계면활성제용액을 주입하게 되면 토양 매트릭스와 NAPL사이의 표면장력이 낮아져 잔류성 NAPL의 수직적 움직임을 촉진시키게 된다. 이러한 현상은 불포화 토양 층 중의 오염물질을 제거한다는 측면에서는 긍정적인 면이 있지만, 오염물질을 이동만 시킬 뿐 회수에는 별 도움을 주지 못하기 때문에 용해도 촉진에 의해 오염물질의 효율적인 제거를 전제로 하여야만 한다.

4. 계면활성제 선정

가. 계면활성제 선정 요인

- (1) 저감효과, 비용, 생분해성과 오염물질 분해, 인간·동물·식물에의 독성, 재사용여부 등을 고려하여 선정한다.
- (2) 음이온 계면활성제인 SDS가 높은 저감효율을 보여주고 있지만 많은 양의 계면활성제가 필요하다. 그래서 동일량으로 비교했을 때 최상일 등(1996)은 농도 5%의 Tween 80, Triton X-100, SDS의 n-dodecane의 저감효율을 비교하였을 때 Tween 80>Triton X-100>SDS 순으로 저감효율이 증가하였다.
- (3) 비이온 계면활성제는 토양에 흡착 때문에 저감효율이 떨어지고 제거를 위한 비용과 시간이 더 드는 단점이 있다.
- (4) 음이온, 비이온 계면활성제를 혼합하여 사용하면 흡착된 비이온 계면활성제의 양이 감소하고 저감효율이 높아진다.

최상일 등(1996)에 의하면 음이온 계면활성제가 소수성 오염물질에 대한 용해력이 매우 뛰어난 것으로 나타났으며 다른 계면활성제에 비하여 독성이 작다고 하였다. 이를 확인하고자 본 연구에서는 타기관에 계면활성제의 특성 조사를 의뢰하였다. 분석결과 현재 가장 많이 사용되고 있는 계면활성제의 효율에 영향을 미치는 흙에 대한 흡착성은 이 연구에서 사용된 SDS가 가장 낮게 나타났고(SDS, SWA 1503, Triton X-100) 호기성 생분해 실험 결과 기존 계면활성제보다 최대 400% 이상 생분해도가 향상되는 것으로 나타나 토양층 하부의 환경조건에서 높은 분해도를 보이는 것으로 나타났다.(그림 3.85)

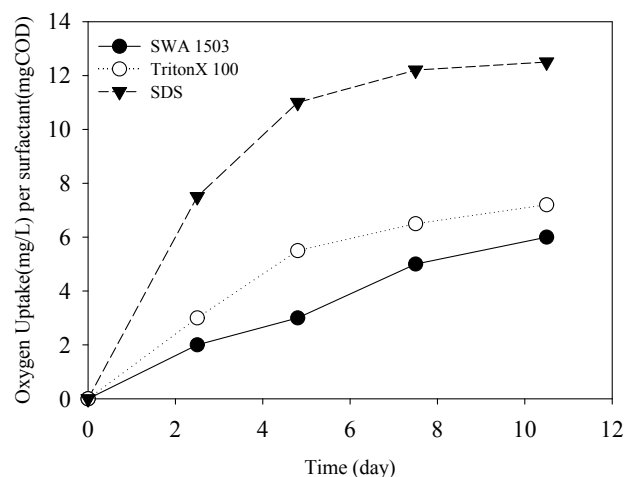


그림 3.85 토양하부 환경에서의 생분해도

표 3.26 계면활성제의 저감효율

오염물질	계면활성제	농도	저감효율	저자
Diesel	Brij 58(비이온)	0.7mM	45%	김종성 등, 1999
	Brij 78(비이온)	0.7mM	40%	
	Tween 20(비이온)	2mM	53%	
	Tween 60(비이온)	1mM	25%	
Diesel	SDS(비이온)	10mM	93%	김선미 등, 2006
	TX100(비이온)		72%	
Toluene	Dowfax8390(음이온)	4%	73%	Lee et al., 2002
	SDS(음이온)		70%	
Phenanthrene	Brij30(비이온)	4%	41%	Chang et al., 2000
	Triton X-100(비이온)		52%	
	Tergitol NP-10(비이온)		54%	
Phenanthrene	TW80(비이온)	500mg/L	55.5%	Zhao et al., 2005
	TX100(비이온)		42.5%	
	Brij35(비이온)		46.4%	
	SDBS(음이온)		14.7%	
	SDS(음이온)		12.3%	
Phenanthrene	TX100(비이온)	4mmol/L	49.5%	Zhou et al. 2007
	SDS-TX100(1:4)		62.5%	
	SDS-TX100(1:2)		72.5%	
	SDS-TX100(1:1)		78.5%	
	SDS-TX100(2:1)		87.5%	

나. 설계인자

(1) 선택인자

(가) 수송능력과 흐름의 조절, 세척제의 회수

(나) 투과성(수송과 흐름 제어) - 적절한 시간 내에 세척제가 통과하기 위하여 반드시 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 이상

(다) 복원 대상지역의 지리적 특성(세척제 회수 및 흐름제어) - 수리지질학적 체제 내에서 오염지역의 깊이와 오염물의 지리적 위치는 그것 자체로서는 제한요인이 되지 않으나 실질적인 적용이 어려움

(2) 단계별 토양세정 연구과정

(가) Batch test - 표 3.27을 이용하여 다양한 종류의 계면활성제의 세정효과 비교분석

(나) 칼럼실험 - Batch 실험으로 선정된 3개 종류의 세정제를 대상으로 연속 주입 실험

표 3.27 운영조건과 오염물 특성

현장조건	성공 가능성			기 초	필요한 데이터
	적음	최소적용범위	중음		
오염물의 상태	증기	액체	용해상태	오염물질이 추출용매의 부분을 더 선호한다.	토양과 세척제사이의 오염물 평형분할계수
수리전도도	낮다 ($<10^{-5}/\text{sec}$)	보통 ($10^{-5}-10^{-3} \text{ cm/sec}$)	높다 ($>10^{-3} \text{ cm/sec}$)	좋은 전도성이 세척액의 효율적인 수송을 가능하게 한다.	지질학적 특징 (수리전도도의 범위)
토립자 표면적	넓다 ($>1\text{m}^2/\text{kg}$)	보통 ($0.1-1\text{m}^2/\text{kg}$)	작다 ($<0.1\text{m}^2/\text{kg}$)	넓은 표면적은 흡에서의 흡착을 증가시킨다.	명확한 토립자의 표면적
탄소 함유량	많다 ($>10\%\text{wt.}$)	보통 ($1-10\%\text{wt.}$)	적다 ($<1\%\text{wt.}$)	세척은 일반적으로 유기물이 적게 함유된 토양에서 더 효과적이다.	토양의 전체 유기탄소량 (TOC)
토양의 pH와 완충도	NS	NS	NS	첨가되고 만들어질 토질의 선택은 세척에 영향을 준다.	토양의 pH와 완충도
양이온 교환능력(CEC)과 clay 함유량	높다 (NS)	보통 (NS)	낮다 (NS)	금속의 묶임의 증가는 흡착과 오염물질의 제거를 억제시킨다.	토양의 CEC, 조합, 구조
암반의 균열정도	존재	-	결여	이차적인 투과성은 세척액의 접촉을 더 어렵게 만든다.	지질학적 특징
수용해도	낮다 ($<100 \text{ mg/L}$)	보통 ($100-1000\text{mg/L}$)	높다 ($>1000\text{mg/L}$)	가용성의 혼합물은 세척으로 제거될 수 있다.	오염물의 용해도
토양 흡착	높다 ($>10000 \text{ L/kg}$)	보통 ($100-10000\text{L/kg}$)	낮다 ($<100\text{L/kg}$)	높은 토양 흡수도를 가진 오염물질은 세척효율을 저하시킨다.	토양 흡착 상수
증기압	높다 ($>100 \text{ mm Hg}$)	보통 ($10-100 \text{ mm Hg}$)	낮다 ($<10\text{mm Hg}$)	휘발성 혼합물은 증기로 변하려는 성질을 갖고 있다.	작용 온도하의 오염물의 증기압
액성 점도	높다 ($>20\text{cPoise}$)	보통 ($2-20\text{cPoise}$)	낮다 ($<2\text{cPoise}$)	액체는 낮은 점도에서 더 쉽게 토양을 통과한다.	작용 온도하의 액성 점도
액성 밀도	낮다 ($<1\text{g/cm}^3$)	보통 ($1-2\text{g/cm}^3$)	높다 ($>2\text{g/cm}^3$)	조밀하여 용해되지 않는 유기적 액체는 세척을 통해 밀려나가고 모아질 수 있다.	작용 온도하의 액성 밀도
옥탄올(Octanol)/물 구분계수	NS	NS	10-1000(dimensionless)	큰 친수성화합물은 물기반의 세척 흐름에 제거된다.	옥탄올/물 구분계수

* NS Indicates no action level specified

Ref) U. S. EPA(1993) and Mann, et al.(1993)

5. 계면활성제 이용한 오염토 정화에 관한 실험적 연구

가. 연구개요

건설공사에서 발생하는 건설잔토(준설토 포함)은 현재 폐기물로 분류하고 있으나 건설잔토에 함유된 오염원의 함량이 적고 성토재 등으로 활용할 수 있는 물리적 특성을 지니고 있어 건설잔토의 활용은 매우 중요하다. 그러나 오염원의 함량이 적더라도 장기적으로 2차 환경오염을 일으킬 수 있으므로 이에 대한 처리 방안이 요구 되고 있다. 따라서, 이 연구에서는 준설토가 유류로부터 오염되었을 경우, 오염원을 제거하고 준설토를 효율적으로 재활용할 목적으로 응용가능한 계면활성제를 이용하였다. 실험은 임의로 오염시킨 준설토에 실험 조건에 따라 선정된 계면활성제의 첨가율 및 세척시간, 초음파 조사 등 조건을 변화시켜 계면활성제의 효율을 판단하고 준설토의 오염제거율을 알아보았다.

나. 실험 재료 및 장비

(1) 실험에 사용된 시료

① 흙

이 연구에 사용된 흙은 국내에 널리 분포되어 있는 화강풍화토를 사용하였으며, 물리적 특성은 표 3.28과 같다. 비 표면적(surface area)과 공극직경(pore diameter) 그리고 공극부피(pore volume)는 BET방법을 사용하였으며, 흙을 증류수로 씻은 후 오븐에서 건조하여 체분석실험으로 실험에 적합한 입경 크기를 선별하여 실험하였다.

표 3.28 사용된 흙의 물리적 성질

흙 종류	흙의 표면적(m ² /g)	유기물 함량(%)	공극 직경(A°)	공극 부피(cm ³ /g)
화강풍화토	3.25	1.4	50.9	4.13×10 ⁻³

② 오염원

이 연구에 사용된 오염원은 디젤(diesel)로 국내 S 정유회사에서 공급된 것으로 별도의 처리 없이 사용하였으며, 인위적인 오염토를 얻기 위해 적량의 디젤과 토양을 충분히 교반한 후 6개월간 방치한 후 오염토를 만들었다. 초기 오염토의 TPH는 2590.03mg/kg으로 토양환경보전법에서 제시하고 있는 TPH 성분의 토양오염기준인 2,000mg/kg를 상회하는 수준으로 실험에 적합할 것으로 판단된다.

(2) 계면활성제

토양 세척에 적합한 계면활성제는 먼저 물에 잘 용해되어야 하고, 유류 분산능이 뛰어나야 한다. 또한, 점토 입자의 확산이 일어나면 토양 내 미세공극을 막히게 하여 세척용액의 흐름을 방해하므로 점토분산성이 낮아야 하며, 거품 발생으로 인하여 토양 입자와 세척 용액간의 원활하지 못한 접촉을 방지하기 위하여 거품 발생 정도가 낮은 계면활성제를 선택함이 바람직하다. 각각의 계면활성제에 대해 물에 대한 용해도, 점토분산성, 거품발생정도, 유화정도로 판단해야한다.

그 결과로 물에 대한 용해도는 음이온의 경우 상당히 잘 용해되었으나, 양이온 계면활성제의 경우는 대체적으로 잘 용해되지 않아 음이온 계면활성제가 양이온에 비해 토양 세척에 더 적합한 것으로 판단되었으며, 비이온의 경우는 계면활성제의 종류에 따라 차이가 있다. 점토분산성은 비이온의 경우는 대체적으로 분산 정도가 높았고, 양이온은 중간 정도였으며, 음이온 계면활성제의 종류에 따라 다르게 나타난다. 또한, 음이온 계면활성제가 다른 계면활성제에 비해 거품이 많이 발생하며, 등유, 경유에 대한 유화 정도는 계면활성제 특성에 따라 다르게 나타난다.

이상의 결과들을 토대로 본 연구에서는 최적 세정공정을 개발하기 위해 널리 사용되고 있는 음이온 계면활성제 SDS, 비이온 계면활성제 Brij 35, Triton X-100을 사용하였다 (표 3.29).

표 3.29 계면활성제

계면활성제	분자식	분자식	제조사
SDS	$C_{12}H_{25}O_4SNa$	288.38	SAMCHUN
Triton X-100	$C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$		SAMCHUN
Brij 35	$C_{12}H_{25}(CH_2CH_2)_{23}OH$	1199.54	JUNSEI

(3) 사용 장비

① 초음파 장치

실험에 사용한 초음파 장치는 최대 1500W의 출력으로 조사할 수 있으며, 주파수는 20kHz로 제작된 것으로 초음파 장비의 제원을 표 3.30에 정리하였다.

표 3.30 초음파 장치의 제원

품명	출력	전격전압	사용주파수
DSG-1528	1500W	220V 50/60Hz	20kHz

다. 실험 조건 및 방법

(1) 실험 조건

실험은 실험 조건에 따라 계면활성제만을 사용하여 오염토의 오염원을 제거하는 방법(표 3.30의 실험 방법 ①)과 계면화성제를 오염토에 적용한 후에 초음파를 조사하여 오염토의 오염원을 제거하는 방법(표 3.30의 실험 방법 ②)으로 구분되며, 초음파를 적용한 방법에서는 계면활성제의 종류, 초음파의 강도, 초음파의 시간 등을 변화시켜 실험하였다. 각 방법의 실험 조건을 표 3.31에 정리하였다.

표 3.31 실험 조건

계면활성제 종류	실험 방법	오염토 무게	초음파 조사강도	초음파 조사시간	계면활 성제	처리시 간	TPH초기농 도
S D S	①	20g	80%	20min	100ml	3h / 30min	1000mg/kg
	②		80%	20min			
	①		80%	40min			
	②		80%	40min			
	①		100%	20min			
	②		100%	20min			
	①		100%	40min			
	②		100%	40min			
	①		10%	2min			
	②		10%	2min			
	①		10%	5min			
	②		10%	5min			
	①		30%	2min			
	②		30%	2min			
	①		30%	5min			
	②		30%	5min			

(2) 실험 방법

실험은 계면활성제를 이용하여 오염토의 오염원을 제거하는 방법과 계면활성제와 초음파의 원리를 이용하여 오염토의 오염원을 제거하는 방법으로 구분되며, 각 방법으로 제거된 오염율을 TPH 측정으로 비교·분석하였다.

① 계면활성제를 이용한 오염원 제거 방법

계면활성제를 적용한 방법은 그림 3.86에 정리하였으며, 계면활성제를 준비한 뒤 미리 인위적으로 제작한 오염토를 계면활성제와 혼합시키고 셰이커(shaker)를 이용하여 교반한 후에 오염토를 추출한다.



(a) 사용될 계면활성제 준비



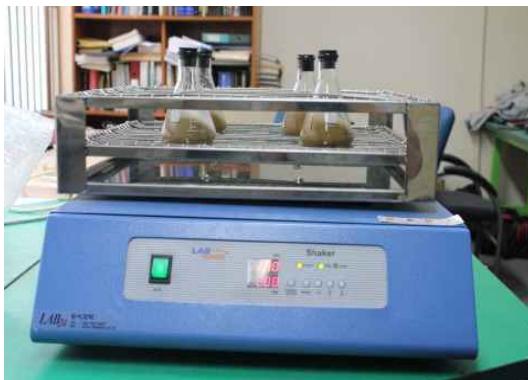
(b) 사용될 오염토 준비



(c) 계면활성제용액을 준비



(d) 오염토와 계면활성제를 혼합



(e) 교반



(f) 교반후의 오염토를 추출

그림 3.86 계면활성제를 이용한 실험 방법

② 계면활성제와 초음파의 원리를 이용한 오염원 제거 방법

계면활성제와 초음파의 원리를 이용한 방법은 그림 3.87과 같으며, 계면활성제와 오염토를 혼합하여 셰이커를 이용하여 혼합시키고 일정한 혼합시간이 지난 후에 초음파 장치를 이용하여 초음파를 실험 조건에 따라 조사 한 후에 시료를 채취한다.



(a) 사용될 계면활성제 준비



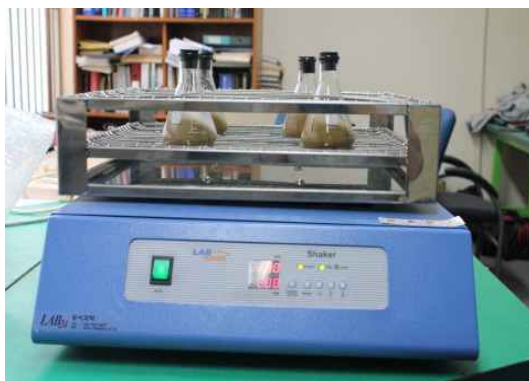
(b) 사용될 오염토 준비



(c) 계면활성제용액을 준비



(d) 오염토와 계면활성제를 혼합



(e) 교반



(f) 초음파 조사 후 시료 채취

그림 3.87 계면활성제와 초음파를 이용한 실험 방법

③ TPH 측정 방법

시료의 무게를 측정하고 시료에 MC(methylene chloride)를 100ml 넣어 초음파 추출을 2회 반복한다. MC용액을 여과지에 여과시킨 뒤 여과된 시료를 Turbo vapll를 사용하여 2ml 농축시킨다. GC/FID로 측정을 하고 시료의 수분함량을 측정하고 GC/FID로 측정한 값과 수분함량을 토대로 시료 결과값을 작성한다.



(f) 무게 측정



(g) MC를 넣어 초음파 추출



(h) MC용액 여과지에 여과



(i) Turbo vapll를 이용하여 농축



(j) GC/FID로 측정



(k) 시료의 수분함유량 측정

그림 3.88 TPH 측정 방법

라. 실험결과

실험에 사용된 계면활성제는 SDS이며, 초음파를 적용한 방법에서 초음파 강도는 실험 조건에 따라 450W, 1200W, 1500W의 강도와 2분, 5분, 20분, 40분의 조사시간으로 실험하였다. 계면활성제를 혼합하는 시간은 30분과 180분으로 정하여 실험을 하였다.

실험결과, 모든 경우에서 계면활성제만 사용하여 오염원을 제거한 방법으로 측정한 TPH 값과 계면활성제를 이용한 후에 초음파를 조사하여 오염원을 제거한 방법으로 측정한 TPH 값이 오염원을 제거하지 않은 오염토의 TPH 값보다 크게 감소하였다. 또한 계면활성제만을 이용한 경우와 계면활성제와 초음파를 이용하였을 때의 TPH 감소율을 비교한 결과, 거의 유사한 경향을 보였으나 대부분 계면활성제와 초음파를 이용한 경우에서 TPH값이 낮게 나타났다. 특히, 오염토의 초기 TPH농도(2590mg/kg)가 높은 조건인 Case 9와 Case 10의 경우에 계면활성제를 이용하고 초음파를 조사한 방법이 계면활성제만 이용한 방법보다 상대적으로 효과가 크게 나타났다(TPH 농도 감소율 약 65~68%). Case 1~8의 경우, TPH 농도 감소율이 계면활성제만을 사용한 경우와 계면활성제와 초음파를 사용한 경우의 TPH 농도 감소율이 유사한 이유는 초기농도(1050mg/kg)가 낮고 오염토와 계면활성제의 혼합시간이 충분히 길어서 오염토에 함유된 오염원이 계면활성제로부터 대부분 제거되어 초음파 조사에 대한 효과가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 이 결과로부터 오염토에 초음파의 적용은 오염토의 초기 TPH 농도가 높고 오염토와 계면활성제의 혼합시간이 충분치 않더라도 TPH의 농도를 토양환경보전법에서 제시하고 있는 TPH 성분의 토양오염기준인 2,000mg/kg 이하로 감소시킬 수 있는 효과적인 방법이라고 판단된다. 실험결과를 표 3.32와 그림 3.89에 정리하였다.

표 3.32 실험 결과

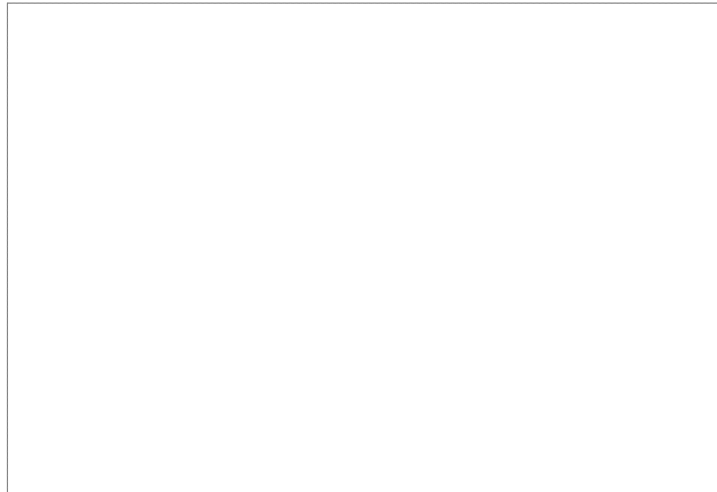
Case	계면활성제 종류	초음파		혼합시 간 (min)	초기농도 (mg/kg)	①	②
		강도 (W)	시간 (min)			TPH농도 (mg/kg)	TPH농도 (mg/kg)
1	SDS	1500	20	180	1050	877.36	636.62
2			40			633.17	647.84
3		1200	20			623.78	594.25
4			40			634.09	662.48
5		450	2			831.39	800.20
6			5			685.21	832.90
7		150	2			918.27	840.24
8			5			851.31	862.83
9		1500	40	30	2590.0	1256.47	894.47
10			40	180		978.77	815.45

※ ① : 계면활성제만 사용하여 오염원을 제거한 후 측정한 TPH 농도

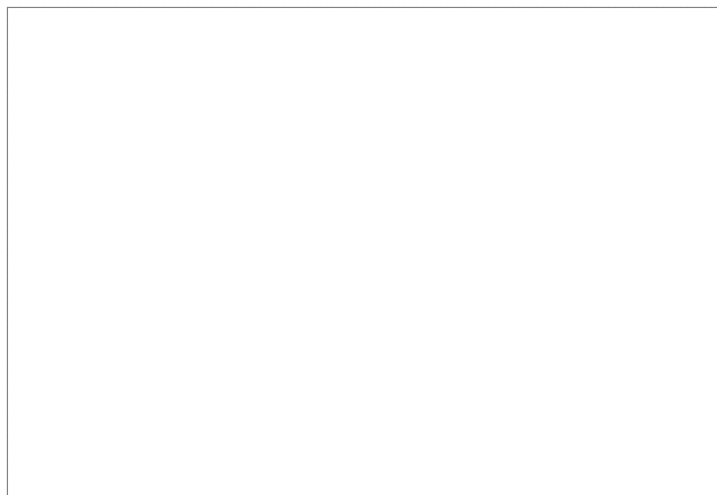
② : 계면활성제와 초음파를 적용하여 오염원을 제거한 후 측정한 TPH 농도



(a) Case 1



(b) Case 2

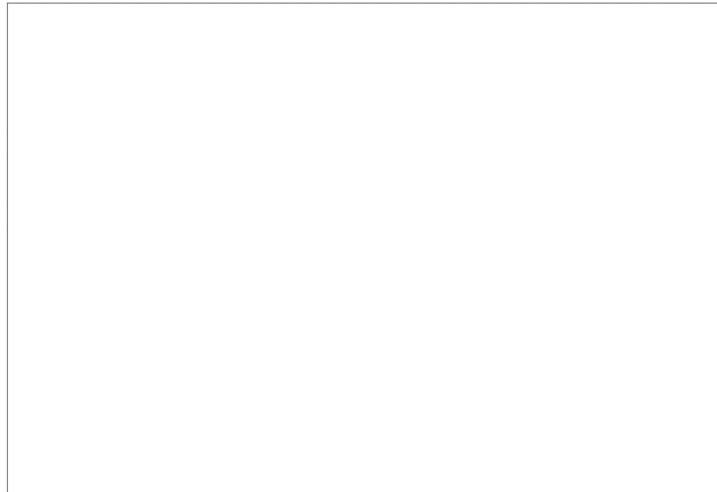


(c) Case 3

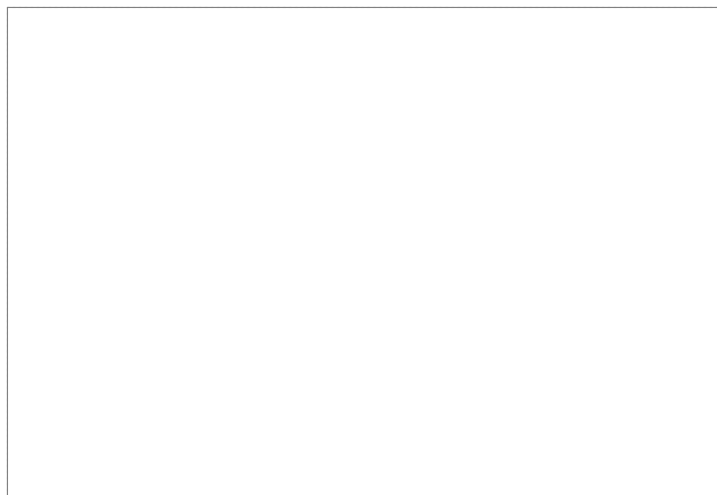
그림 3.89 실험 조건에 따른 TPH 농도(계속)



(d) Case 4



(e) Case 5

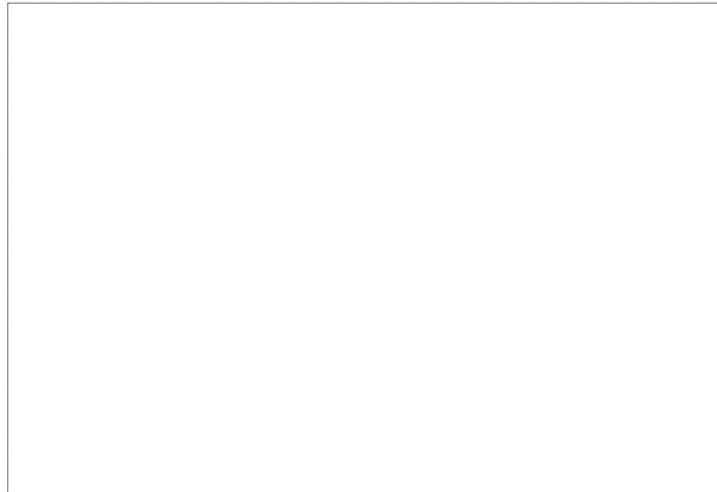


(f) Case 6

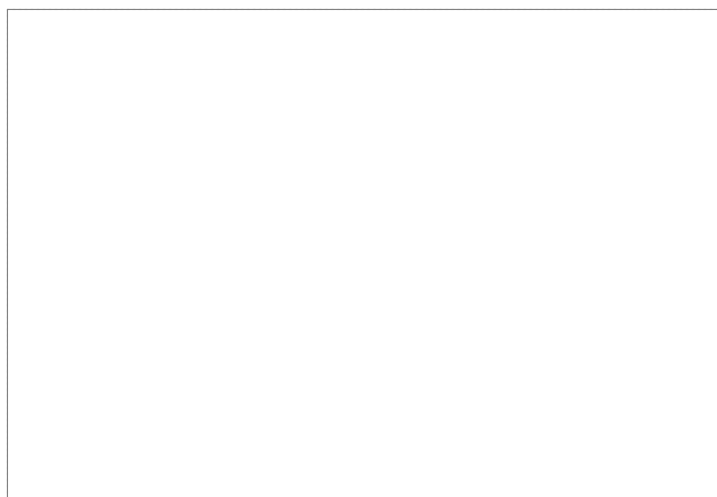
그림 3.89 실험 조건에 따른 TPH 농도(계속)



(g) Case 7



(h) Case 8



(i) Case 9

그림 3.89 실험 조건에 따른 TPH 농도(계속)



(j) Case 10

그림 3.89 실험 조건에 따른 TPH 농도

제5절 공정운영시스템개발연구

1. 공정 운영 시스템 사양

가. 시스템 특징

- (1) 자동으로 준설토 상태와 작업량 파악이 가능함.
- (2) 화학적 정화를 위한 공정 제어 가능함.
- (3) 공정 상황에 맞는 준설토 처리 속도 제어 가능함.
- (4) 자동으로 처리량 파악이 가능함.
- (5) 주변 잡음에 강한 특징을 갖는다.
- (6) 응급상황 처리 루틴을 가진다.

나. 시스템 기능

- (1) 공정 운영 전반에 대한 모니터링 기능 지원
- (2) 관리를 위한 담당자 로그인 시스템 기능 지원
- (3) 긴급 정지 기능 지원
- (4) 전력 공급 시스템 및 통신시스템 체크 기능 지원
- (5) 최적 제어 지원

2. 공정 운영 시스템 구성

가. 공정 운영 시스템 전체 구성도

그림 3.90에서 보이는 준설토 공정 운영 시스템은 크게 3단계의 공정 시스템으로 설계하였다. 1차 공정 시스템은 정화되지 않은 준설토의 투입량과 흙의 상태를 파악하는 목적을 가진다. 2차 공정 시스템은 PVDF를 이용하여 정화하는 부분으로 PVDF에서 발생하는 진동의 세기 조절 및 운반 속도 등을 제어하는 목적을 가진다. 마지막으로 3차 공정은 정화된 준설토의 처리량 및 양질토의 상태를 파악하는 목적을 가진다. 그림 3.91에서는 위에서 언급한 전 과정에 필요한 공정 제어 시스템 블록 다이어그램을 보인다. 본 시스템을 제어하는 방법으로 CAN 통신 방식을 사용하였다. CAN 통신 방식은 여러 공정 시스템간의 제어를 위한 케이블의 수를 줄여서 설치가 용이하게 하며, 빠르고 안정적인 데이터 전송 결과를 얻을 수 있게 할 것이다.

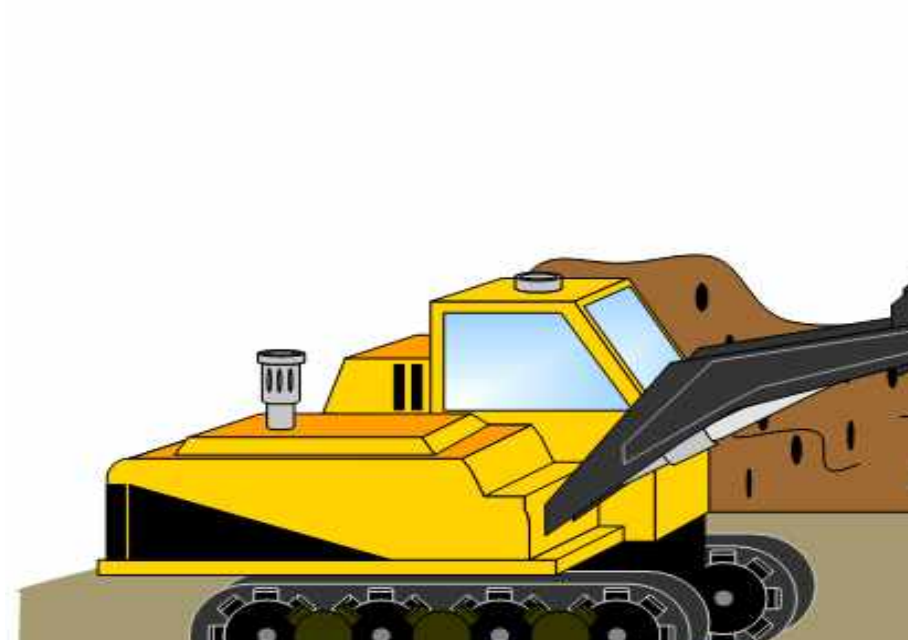


그림 3.90 공정 운영 시스템 전체 구성도

나. 공정 시스템 단계별 기능 설명

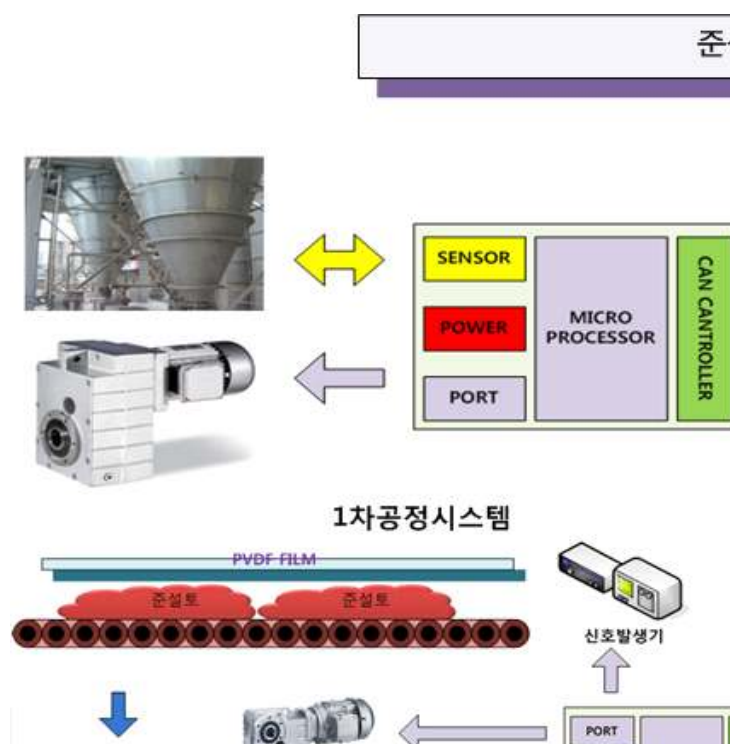


그림 3.91 공정 운영 시스템 블록 다이어그램

(1) 1차 공정 시스템

그림 3.92에서 보이는 1차 공정 시스템은 준설토의 투입량과 준설토 상태를 파악이 이루어지는 시스템으로 준설토가 투입되는 부분인 호퍼와 준설토의 상태를 파악하는 센서부, 모터를 제어하는 제어부로 구성된다.

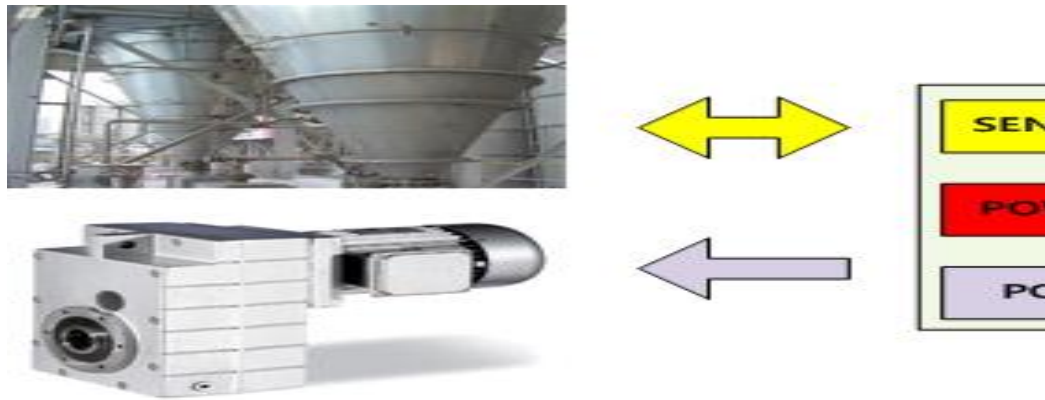


그림 3.92 1차 공정 시스템 블록도

(2) 2차 공정 시스템

그림 3.93에서 보이는 2차 공정 시스템은 준설토를 컨베이어를 통해서 이동시키면서 PVDF를 이용하여 준설토를 탈수하며 집수조를 통하여 탈수량을 측정하는 시스템으로 PVDF FILM과 POWER AMP로 구성된 PVDF 제어부와 준설토를 이동시키는 컨베이어 제어부, 마지막으로 탈수량을 확인 할 수 있는 집수조로 구성된다.

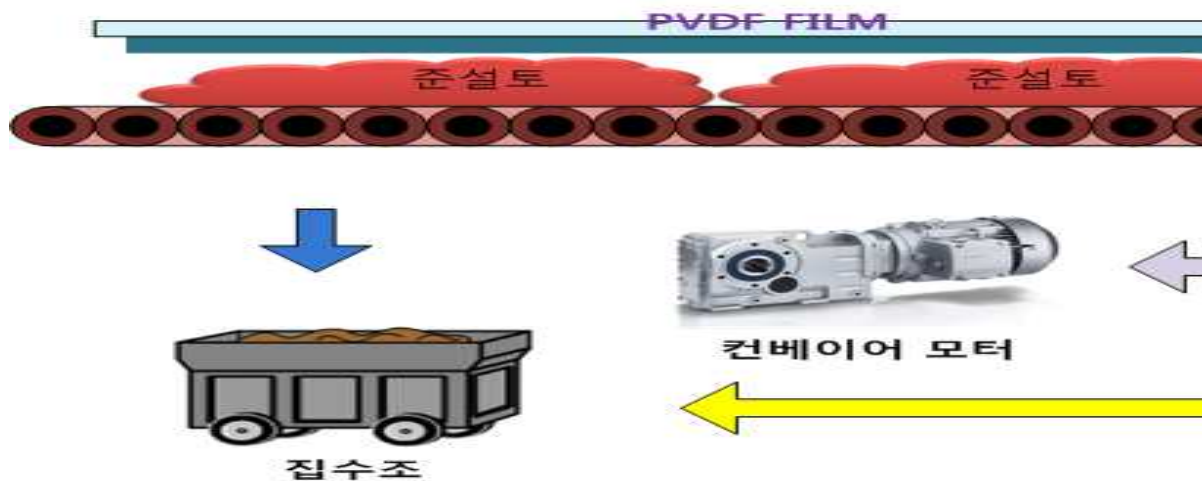


그림 3.93 2차 공정 시스템 블록도

(3) 3차 공정 시스템

그림 3.94에서 보이는 3차 공정 시스템은 정화 처리 공정이 끝난 뒤 배출되는 준설토 배출량을 파악하는 시스템으로 정화된 준설토를 모으는 배출조와 처리량을 파악하는 센서부로 구성된다.

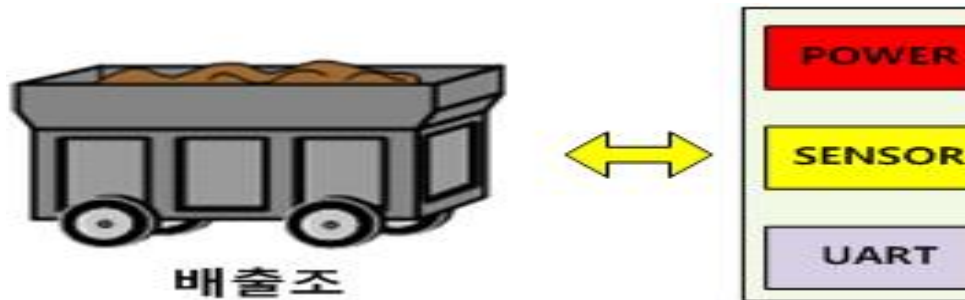


그림 3.94 3차 공정 시스템 블록도

(4) 전원 공급 장치

시스템에 안정적인 전원 공급을 목적으로 하는 장치로 전원 공급기로 구성한다.

(5) 자동 제어 및 시스템 모니터링

그림 3.95에서 보이는 자동 제어 및 시스템 모니터링 부분은 시스템에 투입되는 준설토의 투입량과 정화 및 탈수 처리부의 현재 탈수 처리상태 파악, 정화 처리된 준설토의 배출량을 판단하여 시스템의 전반적인 공정을 제어하고 상태를 모니터링하는 부분이다. 준설토 정화 시스템에서 3단계의 공정 시스템을 자동으로 제어하는 제어부와 전원 공급 장치의 전원 상태를 파악하는 센서부, 시스템의 현재 상태를 알려주는 모니터링부로 구성된다.



그림 3.95 자동 제어 및 시스템 모니터링

다. 공정 운영 시스템 상세 설계

(1) SYSTEM PROCEDURE

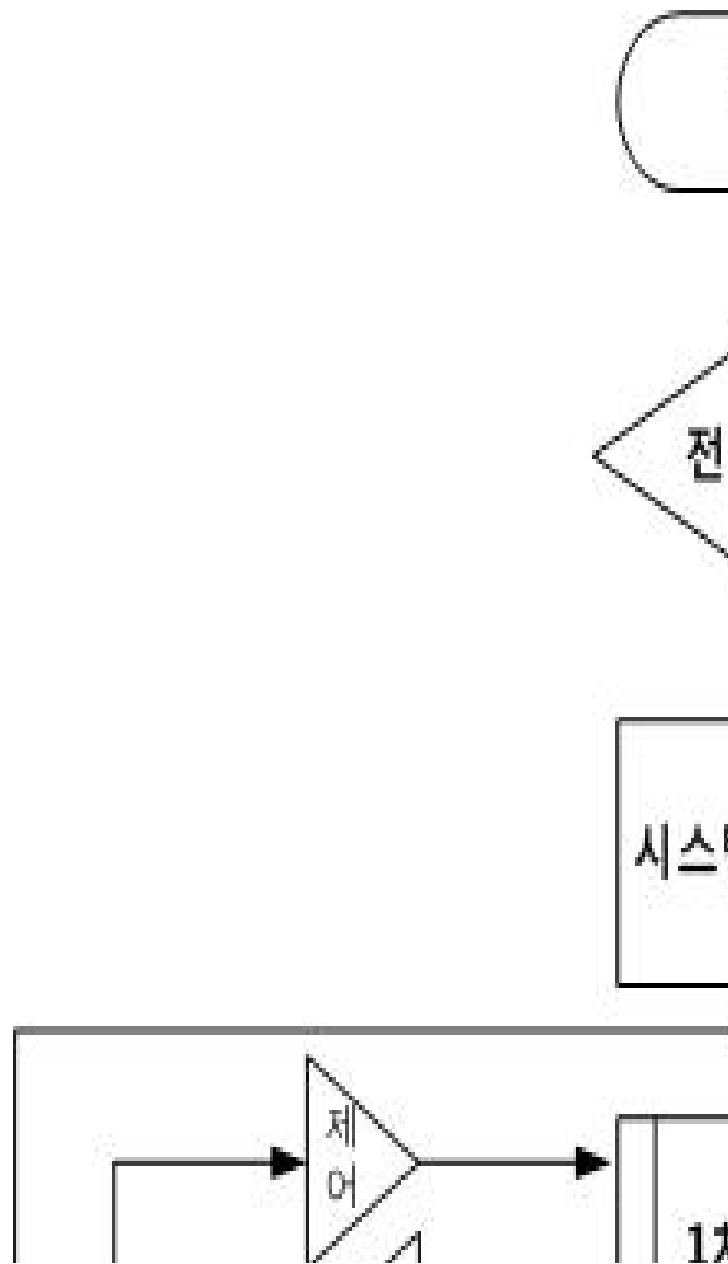


그림 3.96 공정 운영 시스템 순서도

(2) ECU(engine control unit)

준설토 공정 운영 시스템은 각 공정마다 공정을 제어하는 ECU(engine control unit)로 구성되어 있다(그림 3.97). 각 공정을 제어하는 ECU간의 데이터 송수신을 하는 통신 시스템은 CAN으로 구성된다.

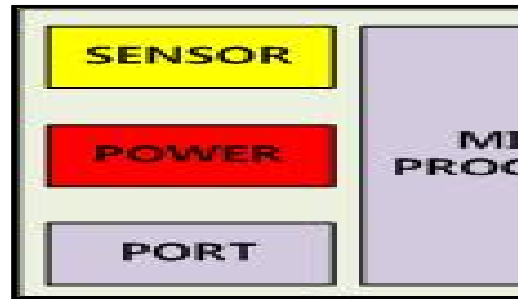


그림 3.97 ECU 블록 다이어그램

(가) ATMEGA128 (microprocessor/microcontroller)

Low-Power AVR 8-bit microcontroller이며, RISC (reduced instruction set computer) 구조를 갖는다. 128Kbytes의 In-system Reprogramming Flash를 갖추고 있다. CAN 통신을 위한 S/W를 탑재하고 CAN Controller를 제어하는 역할을 담당한다. 또한, Sensor를 통해서 입력되는 데이터를 전송하고 PORT를 통해서 자동 제어 장치부에서 내린 명령을 처리한다.

(나) SJA1000(CAN controller)

Stand alone 방식의 CAN controller이며, CAN Communication MODE인 CAN 2.0A와 CAN 2.0B를 모두 지원하며, 통신 Speed는 1Mbps까지 (100M 내에서) 지원한다.

- CAN Core Block: CAN 프레임의 전송과 수신을 제어하는 부분
- Interface Management Logic: 외부의 ATMEGA 128A와 연결되어 수행하는 부분
- Transmit Buffer: 하나의 완전한 메시지를 저장하는 부분
- Acceptance Filter : 프로그래밍된 필터로 실제적으로 Microcontroller에 전달되는 메시지
- Receive FIFO: 수신된 메시지를 저장하는 부분

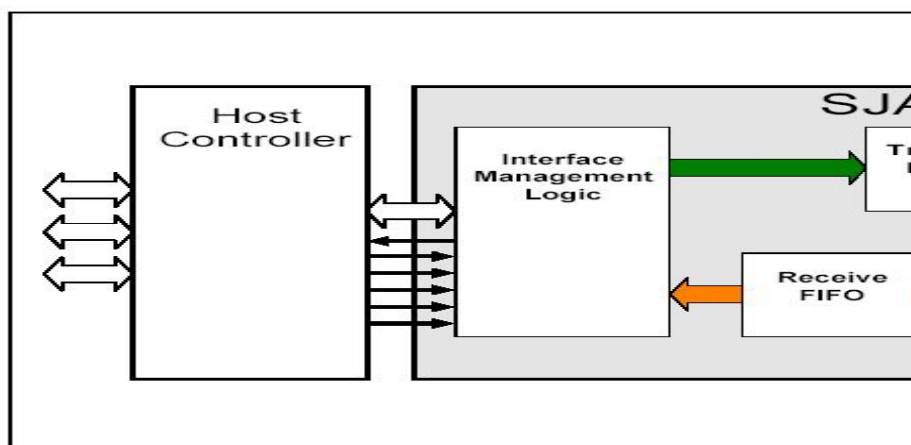


그림 3.98 SJA1000(CAN controller)

(다) PCA82C250(CAN transceivers)

PCA82C250은 CAN protocol controller와 Physical bus 사이에 있는 interface이다. Controller와 Bus 사이에 주고 받는 신호는 differential 신호를 주고 받는다. 특징은 다음과 같다.

- ① Full compatible the "ISO 11898" standard
- ② High speed (up to 1MB)
- ③ Bus lines protected against transients in an automotive environment
- ④ Slope control to reduce Radio Frequency Interference
- ⑤ Differential receiver with wide common-mode range for high immunity against Electromagnetic Interference(EMI).
- ⑥ Thermally protected
- ⑦ Short-circuit proof to battery and ground
- ⑧ Low-current Standby mode
- ⑨ An unpowered node does not disturb the bus lines
- ⑩ At least 110 nodes can be connected

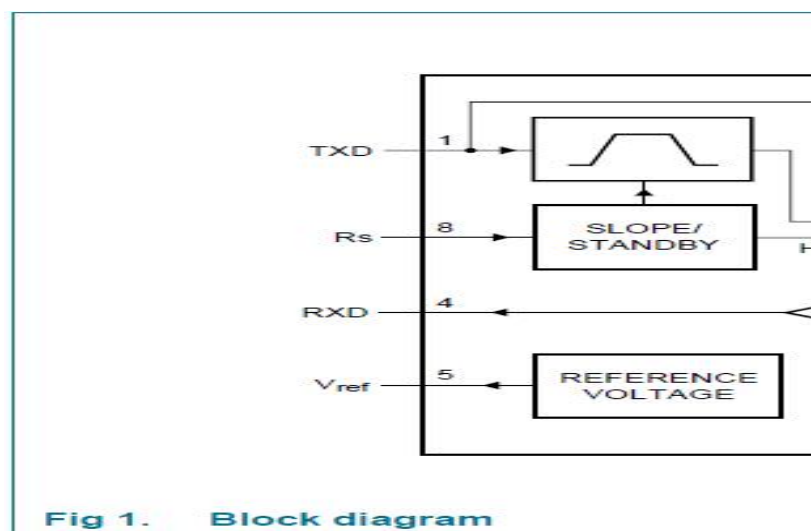


그림 3.99 PCA82C250(CAN transceivers)

(라) ECU 회로 설계

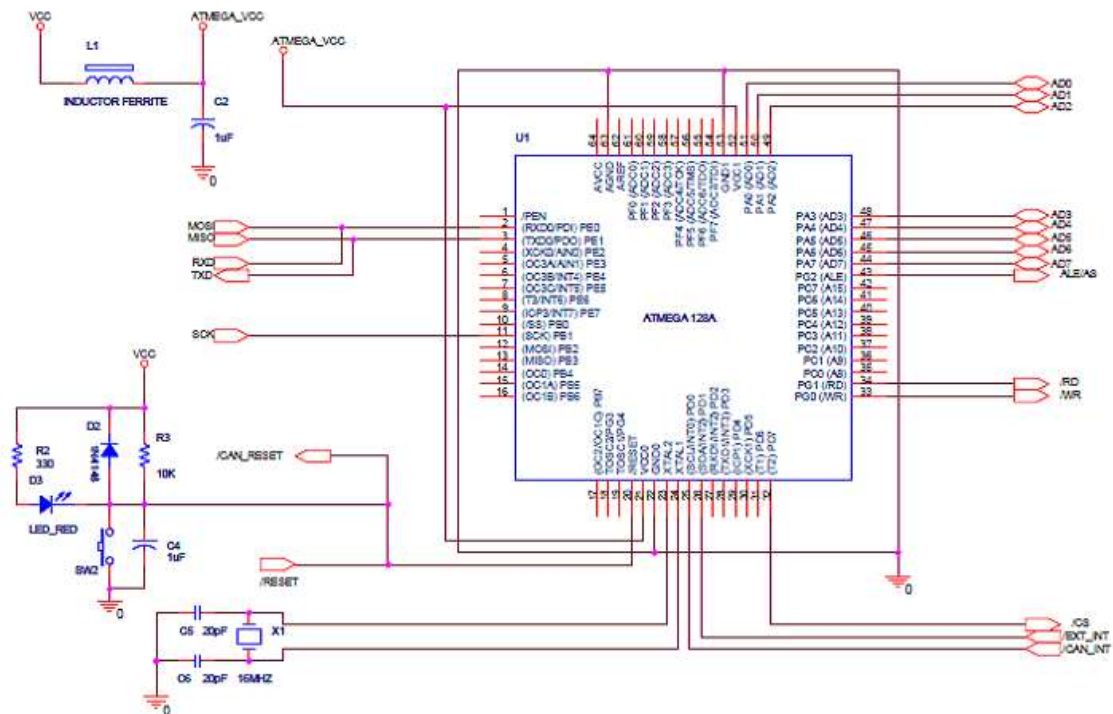


그림 3.100 Microcontroller 회로도

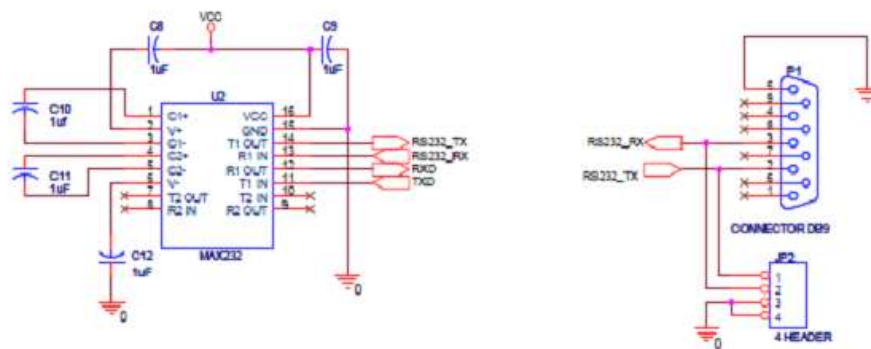


그림 3.101 UART 회로도

그림 3.102 CAN Controller 회로도

[illegible]

그림 3.103 CAN Transceiver 회로도

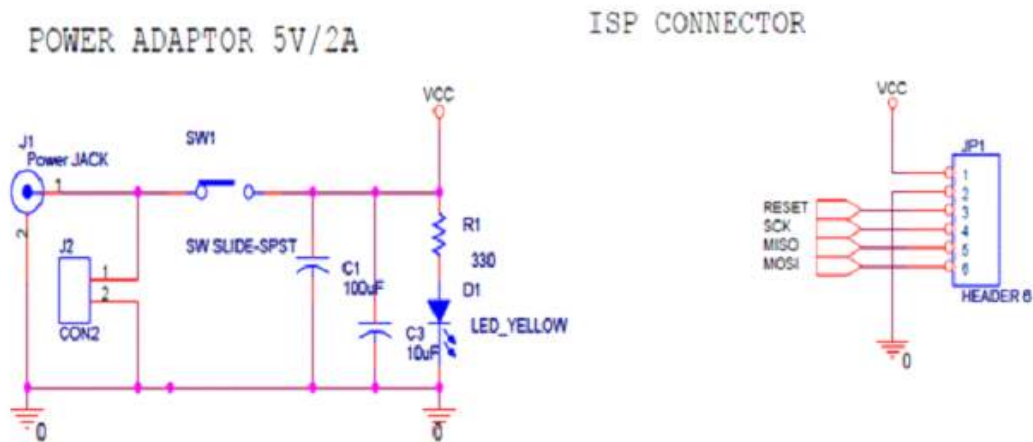


그림 3.104 POWER & ISP 회로도

(3) 1차 공정 시스템 모델링

1차 공정 시스템은 호퍼와 모터로 구성되어 있다. 그림 3.105에서는 호퍼에 투입된 준설토를 혼합할 때 사용하는 모터를 제어하기 위한 시스템 모델링으로 입력 레퍼런스 전압과 피드백된 출력 토크를 비교하여 모터의 움직임을 제어하는 것을 보인다. 여기서 피드백 되는 출력 토크는 위치 변위로 표현되어 입력 전압과 같은 차원이 아니므로 오차를 정의 할 수 없다. 따라서 오차를 같은 차원으로 변경하기 위해서 위치 변위를 전압으로 변경해주는 Tachometer를 사용해서 출력 토크의 차원을 같게 하고 시스템을 해석하였다.

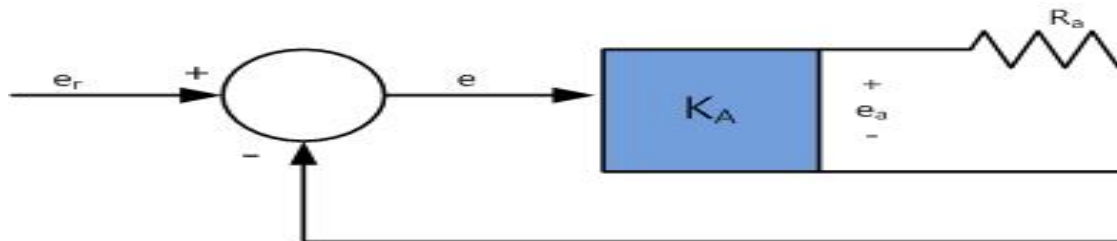


그림 3.105 1차 공정 시스템 모델링

(7) System parameters

R_a = armature resistance [ohm]

L_a = armature inductance [henry]

e_a = applied armature voltage [volt]

e_b = back emf [volt]

e_t = output voltage of tachometer [volt]

e_r = reference voltage [volt]

e = error voltage [volt]

i_a = armature current of motor

θ_m = angular displacement of the motor shaft [radian]

T_m = torque developed by the motor [N - m]

J_L = moment of inertia of the motor (motor shaft) [kg - m²]

T_L = external load torque considered as a disturbance [N - m]

J_m = moment of inertia of the motor (motor shaft) [kg - m²]

B_m = equivalent viscous friction coefficient of the motor
and load referred to the motor shaft [N - m / rad / sec]

B_L = viscous friction coefficient of the load [N - m / rad / sec]

K_b = back - emf constant

K_i = torque constant

K_t = speed sensor (tachometer) gain

K_A = amplifier gain

(ㄴ) Cause and Effect Equations

$$\begin{aligned}
 e(t) &= e_r(t) - e_t(t) \\
 e_t(t) &= K_t \frac{d\theta_L(t)}{dt} \\
 e_a(t) &= K_A e(t) \\
 e_a(t) &= R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \\
 e_b(t) &= K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} \\
 T_m &= K_i i_a(t) \\
 J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} &= T_m(t) - B_m \dot{\theta}_m(t) \\
 K_L (\theta_L(t) - \theta_m(t)) &= J_L \ddot{\theta}_L(t)
 \end{aligned}$$

(ㄷ) State equations

$$x_1 = i_a(t), \quad x_2 = \theta_m(t), \quad x_3 = \dot{\theta}_m(t)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_1(t)}{dt} &= -\frac{R_a}{L_a} x_1(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t) \\
 &= -\frac{R_a}{L_a} x_1(t) - \frac{K_b}{L_a} x_3(t) \\
 &= -\frac{R_a}{L_a} x_1(t) - \frac{K_b}{L_a} x_3(t)
 \end{aligned}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_3$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \frac{T_m(t)}{J_m} - \frac{B_m}{J_m} x_3(t) - \frac{K_L}{J_m} (x_2(t) - \theta_L(t))$$

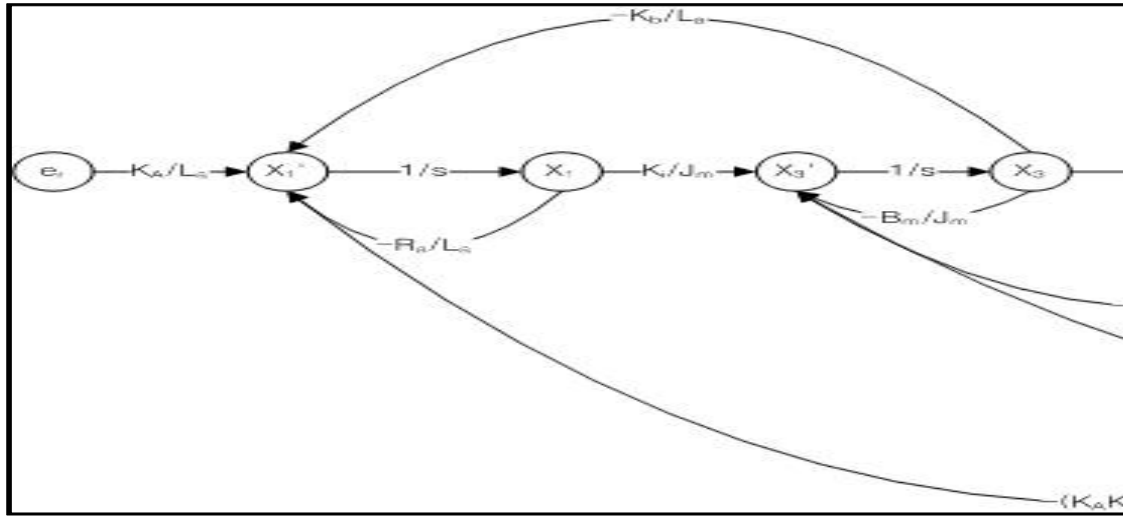


그림 3.106 1차 공정 시스템 신호 흐름선도(Signal-Flow Graph)

(라) Gain Formula

$$\begin{aligned}
 \Delta &= 1 - \left\{ \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) + \left(-\frac{B_m}{J_m} s^{-1} \right) + \left(-\frac{B_L}{J_L} s^{-1} \right) + \left(-\frac{K_L}{J_m} s^{-2} \right) + \left(-\frac{K_b K_i}{L_a J_m} s^{-2} \right) + \left(-\frac{K_L}{J_L} s^{-2} \right) + \left(-\frac{K_A K_i K_L}{L_a J_m J_L} s^{-4} \right) + \left(\frac{K_L^2}{J_m J_L} s^{-4} \right) \right\} \\
 &+ \left\{ \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) \left(-\frac{B_m}{J_m} s^{-1} \right) + \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) \left(-\frac{K_L}{J_m} s^{-2} \right) + \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) \left(-\frac{B_L}{J_L} s^{-1} \right) + \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) \left(-\frac{K_L}{J_L} s^{-2} \right) \right. \\
 &+ \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) \left(\frac{K_L^2}{J_m J_L} s^{-4} \right) + \left(-\frac{B_m}{J_m} s^{-1} \right) \left(-\frac{K_L}{J_L} s^{-2} \right) + \left(-\frac{B_m}{J_m} s^{-1} \right) \left(-\frac{B_L}{J_L} s^{-1} \right) + \left(-\frac{K_L}{J_m} s^{-2} \right) \left(-\frac{B_L}{J_L} s^{-1} \right) \\
 &+ \left(-\frac{K_L}{J_m} s^{-2} \right) \left(-\frac{K_L}{J_L} s^{-2} \right) + \left(-\frac{K_b K_i}{L_a J_m} s^{-2} \right) \left(-\frac{B_L}{J_L} s^{-1} \right) + \left(-\frac{K_b K_i}{L_a J_m} s^{-2} \right) \left(-\frac{K_L}{J_L} s^{-2} \right) \\
 &\left. - \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) \left(-\frac{B_m}{J_m} s^{-1} \right) \left(-\frac{B_L}{J_L} s^{-1} \right) + \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) \left(-\frac{B_m}{J_m} s^{-1} \right) \left(-\frac{K_L}{J_L} s^{-2} \right) + \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) \left(-\frac{K_L}{J_m} s^{-2} \right) \left(-\frac{B_L}{J_L} s^{-1} \right) \right\} \\
 &- \left\{ \left(-\frac{R_a}{L_a} s^{-1} \right) \left(-\frac{K_L}{J_m} s^{-2} \right) \left(-\frac{K_L}{J_L} s^{-2} \right) \right\} \\
 &= 1 + \frac{R_a}{L_a} s^{-1} + \frac{B_m}{J_m} s^{-1} + \frac{B_L}{J_L} s^{-1} + \frac{K_L}{J_m} s^{-2} + \frac{K_b K_i}{L_a J_m} s^{-2} + \frac{K_L}{J_L} s^{-2} + \frac{K_A K_i K_L}{L_a J_m J_L} s^{-4} - \frac{K_L^2}{J_m J_L} s^{-4} + \frac{R_a B_m}{L_a J_m} s^{-2} + \frac{R_a K_L}{L_a J_m} s^{-3} + \frac{R_a B_L}{L_a J_L} s^{-2} \\
 &+ \frac{R_a K_L}{L_a J_L} s^{-3} - \frac{R_a K_L^2}{L_a J_m J_L} s^{-5} + \frac{B_m K_L}{J_m J_L} s^{-3} + \frac{B_m B_L}{J_m J_L} s^{-2} + \frac{K_L B_L}{J_m J_L} s^{-3} + \frac{K_L^2}{J_m J_L} s^{-4} + \frac{K_b K_i B_L}{L_a J_m J_L} s^{-3} + \frac{K_b K_i K_L}{L_a J_m J_L} s^{-4} + \frac{R_a B_m B_L}{L_a J_m J_L} s^{-3} + \frac{R_a B_m K_L}{L_a J_m J_L} s^{-4} \\
 &+ \frac{R_a K_L B_L}{L_a J_m J_L} s^{-4} + \frac{R_a K_L^2}{L_a J_m J_L} s^{-5} \\
 &= 1 + \frac{R_a}{L_a} s^{-1} + \frac{B_m}{J_m} s^{-1} + \frac{B_L}{J_L} s^{-1} + \frac{K_L}{J_m} s^{-2} + \frac{K_b K_i}{L_a J_m} s^{-2} + \frac{K_L}{J_L} s^{-2} + \frac{K_A K_i K_L}{L_a J_m J_L} s^{-4} + \frac{R_a B_m}{L_a J_m} s^{-2} + \frac{R_a K_L}{L_a J_m} s^{-3} + \frac{R_a B_L}{L_a J_L} s^{-2} + \frac{R_a K_L}{L_a J_L} s^{-3} \\
 &+ \frac{B_m K_L}{J_m J_L} s^{-3} + \frac{B_m B_L}{J_m J_L} s^{-2} + \frac{K_L B_L}{J_m J_L} s^{-3} + \frac{K_b K_i B_L}{L_a J_m J_L} s^{-3} + \frac{K_b K_i K_L}{L_a J_m J_L} s^{-4} + \frac{R_a B_m B_L}{L_a J_m J_L} s^{-3} + \frac{R_a B_m K_L}{L_a J_m J_L} s^{-4} + \frac{R_a K_L B_L}{L_a J_m J_L} s^{-4} \\
 &= \frac{s^{-4}}{L_a J_m J_L} \left\{ L_a J_m J_L s^4 + (R_a J_m J_L + B_m L_a J_L + B_L L_a J_m) s^3 + (K_L L_a J_L + K_b K_i J_L + K_L L_a J_m + R_a B_m J_L + R_a B_L J_m + B_m B_L L_a) s^2 \right. \\
 &\left. + (R_a K_L J_L + R_a K_L J_m + B_m K_L L_a + K_L B_L L_a + K_b K_i B_L + R_a B_m B_L) s + K_A K_i K_L + K_b K_i K_L + R_a B_m K_L + R_a K_L B_L \right\}
 \end{aligned}$$

(마) Transfer Function

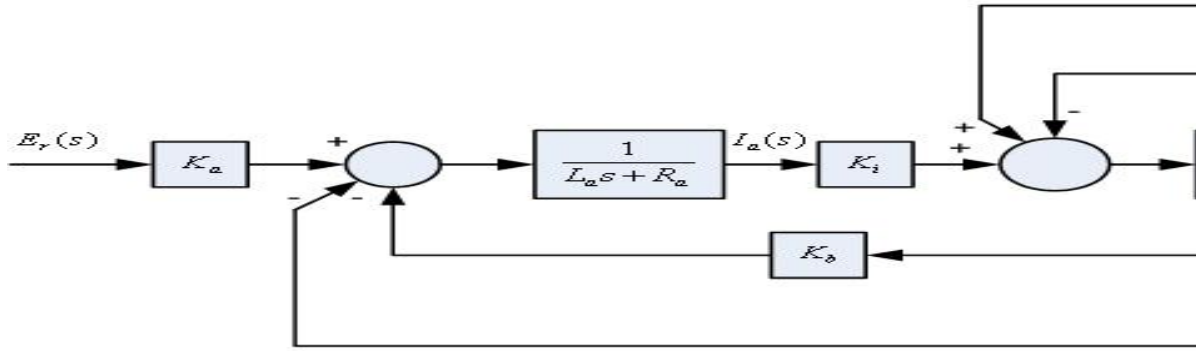


그림 3.107 1차 공정 시스템 블록 다이어그램

$$\begin{aligned}
 M(s) &= \frac{\Theta_L(s)}{E_r(s)} \\
 &= \frac{K_a K_i K_L}{L_a J_m J_L} s^{-5} \\
 &= \frac{K_a K_i K_L s^{-5}}{\Delta} \\
 &= \frac{\frac{K_a K_i K_L}{L_a J_m J_L} s^{-5}}{s^{-4} \left\{ L_a J_m J_L s^4 + (R_a J_m J_L + B_m L_a J_L + B_L L_a J_m) s^3 + (K_L L_a J_L + K_b K_i J_L + K_L L_a J_m + R_a B_m J_L + R_a B_L J_m + B_m B_L L_a) s^2 \right\} \\
 &\quad + (R_a K_L J_L + R_a K_L J_m + B_m K_L L_a + K_L B_L L_a + K_b K_i B_L + R_a B_m B_L) s + K_a K_i K_L + K_b K_i K_L + R_a B_m K_L + R_a K_L B_L \}} \\
 &= \frac{K_a K_i K_L}{s \left\{ L_a J_m J_L s^4 + (R_a J_m J_L + B_m L_a J_L + B_L L_a J_m) s^3 + (K_L L_a J_L + K_b K_i J_L + K_L L_a J_m + R_a B_m J_L + R_a B_L J_m + B_m B_L L_a) s^2 \right\} \\
 &\quad + (R_a K_L J_L + R_a K_L J_m + B_m K_L L_a + K_L B_L L_a + K_b K_i B_L + R_a B_m B_L) s + K_a K_i K_L + K_b K_i K_L + R_a B_m K_L + R_a K_L B_L \}}
 \end{aligned}$$

(4) 2차 공정 시스템 모델링

2차 공정 시스템은 준선틀로를 운반하는 컨베이어와 모터로 구성되어 있다. 그림 3.68에서는 1차 공정 시스템에서 투입된 준선틀로가 운반될 때 사용되는 컨베이어와 모터를 제어하기 위한 시스템 모델링으로 입력 레퍼런스 전압과 피드백된 출력 토크를 비교하여 모터의 움직임을 제어하는 것을 보인다. 여기서 피드백 되는 출력 토크는 위치 변위로 표현되어 입력 전압과 같은 차원이 아니므로 오차를 정의 할 수 없다. 따라서 오차를 같은 차원으로 변경하기 위해서 위치 변위를 전압으로 변경해주는 Tachometer를 사용해서 출력 토크의 차원을 같게 하고 시스템을 해석하였다.

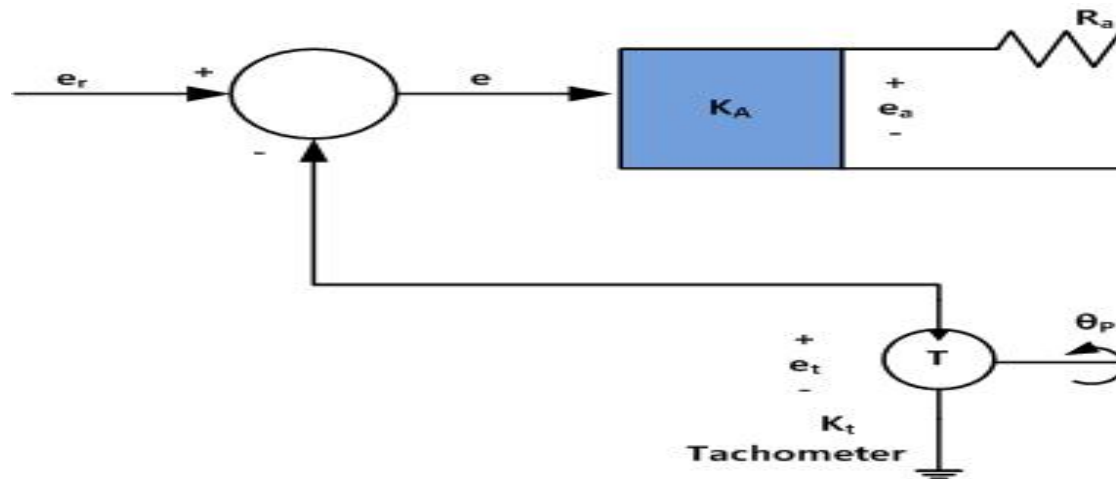


그림 3.108 2차 시스템 모델링

(7) System parameters

R_a = armature resistance [ohm]

L_a = armature inductance [henry]

e_a = applied armature voltage [volt]

e_b = back emf [volt]

e_t = output voltage of tachometer [volt]

e_r = reference voltage [volt]

e = error voltage [volt]

i_a = armature current of motor

θ_m = angular displacement of the motor shaft [radian]

T_m = torque developed by the motor [N - m]

J_L = moment of inertia of the motor (motor shaft) [kg - m²]

T_L = external load torque considered as a disturbance [N - m]

J_m = moment of inertia of the motor (motor shaft) [kg - m²]

B_m = equivalent viscous friction coefficient of the motor
and load referred to the motor shaft [N - m / rad / sec]

B_L = viscous friction coefficient of the load [N - m / rad / sec]

K_b = back - emf constant

K_i = torque constant

K_t = speed sensor (tachometer) gain

K_A = amplifier gain

θ_p = angular displacement of the conveyor end-point roller [radian]

J_p = moment of inertia of the conveyor end - point roller [kg - m²]

B_p = viscous friction coefficient of the conveyor end - point roller [N - m / rad / sec]

K_1 = spring constant of the upper side of the conveyor

K_2 = spring constant of the lower side of the conveyor

r = radius of the conveyor roller

(4) Cause and Effect Equations

$$e(t) = e_r(t) - e_t(t)$$

$$e_t(t) = K_t \frac{d\theta_P(t)}{dt}$$

$$e_a(t) = K_A e(t)$$

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt}$$

$$e_b(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

$$T_m = K_i i_a(t)$$

$$J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} = T_m(t) - B_n$$

$$T_L(t) = K_L (\theta_m(t) - \theta_L(t))$$

(다) State equations

$$x_1 = i_a(t) \quad , \quad x_2 = \theta_m(t) \quad , \quad x_3 = \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad ,$$

$$x_8 = \frac{d\theta_P(t)}{dt}$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= -\frac{R_a}{L_a} x_1(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t) + \frac{e_a(t)}{L_a} \\ &= -\frac{R_a}{L_a} x_1(t) - \frac{K_b}{L_a} \frac{d\theta_m(t)}{dt} + \frac{K_A}{L_a} e(t) \\ &= -\frac{R_a}{L_a} x_1(t) - \frac{K_b}{L_a} x_3(t) + \frac{K_A}{L_a} (e_r(t) - \\ &\quad R_a \quad \quad \quad K_b \quad \quad \quad K_A \left(\quad \quad \quad \right) \end{aligned}$$

(마) Transfer Function

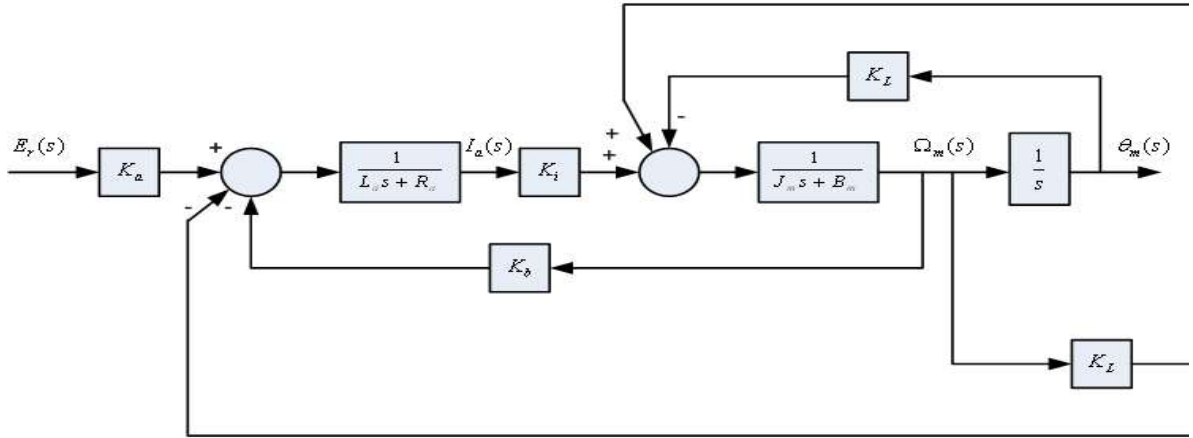


그림 3.110 1차 공정 시스템 블록 다이어그램

$$\begin{aligned}
 M(s) &= \frac{\Theta_p(s)}{T_L(s)} \\
 &= \frac{K_A K_i K_L r^2 (K_1 + K_2)}{L_a J_m J_L (J_p + Mr^2)} s^{-7} \\
 &= \frac{K_A K_i K_L r^2 (K_1 + K_2)}{\Delta} \\
 &= \frac{K_A K_i K_L r^2 (K_1 + K_2)}{L_a J_m J_L (J_p + Mr^2)^6 + (R_a J_m J_L (J_p + Mr^2) + B_m L_a J_L (J_p + Mr^2) + B_L L_a J_m (J_p + Mr^2) + B_p L_a J_m J_L) s^5} \\
 &\quad + \left(K_L L_a J_L (J_p + Mr^2) + K_b K_i J_L (J_p + Mr^2) + K_L L_a J_m (J_p + Mr^2) + r^2 (K_1 + K_2) L_a J_m (J_p + Mr^2) + r^2 (K_1 + K_2) L_a J_m J_L \right) s^4 \\
 &\quad + (R_a B_m J_L (J_p + Mr^2) + R_a B_L J_m (J_p + Mr^2) + R_a B_p J_m J_L + B_m B_L L_a (J_p + Mr^2) + B_m B_p L_a J_L + B_L B_p L_a J_m) s^3 \\
 &\quad + \left(R_a K_L (J_L - J_m) (J_p + Mr^2) + R_a r^2 (K_1 + K_2) J_m (J_p + Mr^2) + R_a r^2 (K_1 + K_2) J_m J_L + B_m K_L L_a (J_p + Mr^2) \right. \\
 &\quad + B_m r^2 (K_1 + K_2) L_a (J_p + Mr^2) + B_m r^2 (K_1 + K_2) L_a J_L + K_L B_L L_a (J_p + Mr^2) - K_L B_p L_a J_L + K_b K_i B_L (J_p + Mr^2) + K_b K_i B_p J_L \left. \right) s^2 \\
 &\quad + (K_L B_p L_a J_m + B_L r^2 (K_1 + K_2) L_a J_m + B_p r^2 (K_1 + K_2) L_a J_m + R_a B_m B_L (J_p + Mr^2) + R_a B_m B_p J_L + R_a B_L B_p J_m + B_m B_L B_p L_a) s \\
 &\quad + \left(L_a J_L K_L r^2 (K_1 + K_2) + (J_p + Mr^2) K_b K_i K_L + (J_p + Mr^2) K_b K_i r^2 (K_1 + K_2) + J_L K_b K_i r^2 (K_1 + K_2) \right. \\
 &\quad + L_a K_L (J_m - (J_p + Mr^2)) r^2 (K_1 + K_2) + (J_p + Mr^2) R_a B_m K_L + (J_p + Mr^2) R_a B_m r^2 (K_1 + K_2) + J_L R_a B_m r^2 (K_1 + K_2) + (J_p + Mr^2) R_a K_L B_L + J_L R_a K_L B_p \left. \right) s^2 \\
 &\quad + (J_m R_a K_L B_p + J_m R_a B_L r^2 (K_1 + K_2) + J_m R_a B_p r^2 (K_1 + K_2) + L_a B_m K_L B_p + L_a B_m B_L r^2 (K_1 + K_2) + L_a B_m B_p r^2 (K_1 + K_2) + L_a K_L B_L B_p \\
 &\quad + K_b K_i B_L B_p + R_a B_m B_L B_p) s \\
 &\quad + \left((J_p + Mr^2) R_a K_L r^2 (K_1 + K_2) + J_L R_a K_L r^2 (K_1 + K_2) + J_m R_a K_L r^2 (K_1 + K_2) + L_a B_m K_L r^2 (K_1 + K_2) + L_a K_L K_L B_p + L_a K_L B_L r^2 (K_1 + K_2) \right. \\
 &\quad + R_a K_L B_p (r^2 (K_1 + K_2) - K_L) + K_b K_i K_L B_p + K_b K_i B_L r^2 (K_1 + K_2) + K_b K_i B_p r^2 (K_1 + K_2) + R_a B_m K_L B_p + R_a B_m B_L r^2 (K_1 + K_2) + R_a B_m B_p r^2 (K_1 + K_2) \\
 &\quad + R_a K_L B_L B_p) s \\
 &\quad + (K_A K_i K_L r^2 (K_1 + K_2) + K_b K_i K_L r^2 (K_1 + K_2) + R_a B_m K_L r^2 (K_1 + K_2) + R_a K_L K_L B_p + R_a K_L B_L r^2 (K_1 + K_2) + R_a K_L B_p (r^2 (K_1 + K_2) - K_L))
 \end{aligned}$$

(5) 자동 제어 및 시스템 모니터링

(가) Prototype ECU 통신 제어 프로그램 (CVI)

각 공정의 ECU 간의 통신 제어 성능을 확인하는 프로그램으로 그림 3.111에서 보이는 화면은 현재 개발중인 프로그램으로 각 공정의 제어를 담당하는 ECU에 무작위로 시나리오를 발생시켜서 데이터를 CAN 통신망으로 보낼 때 ECU의 정보가 정확히 전달되는지 확인을 하는 제어 프로그램이다.

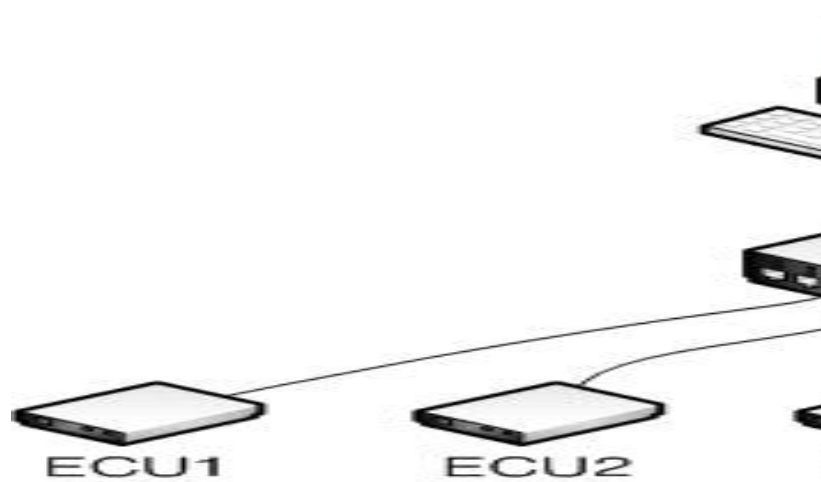


그림 3.111 ECU 통신 제어 시험 구성도

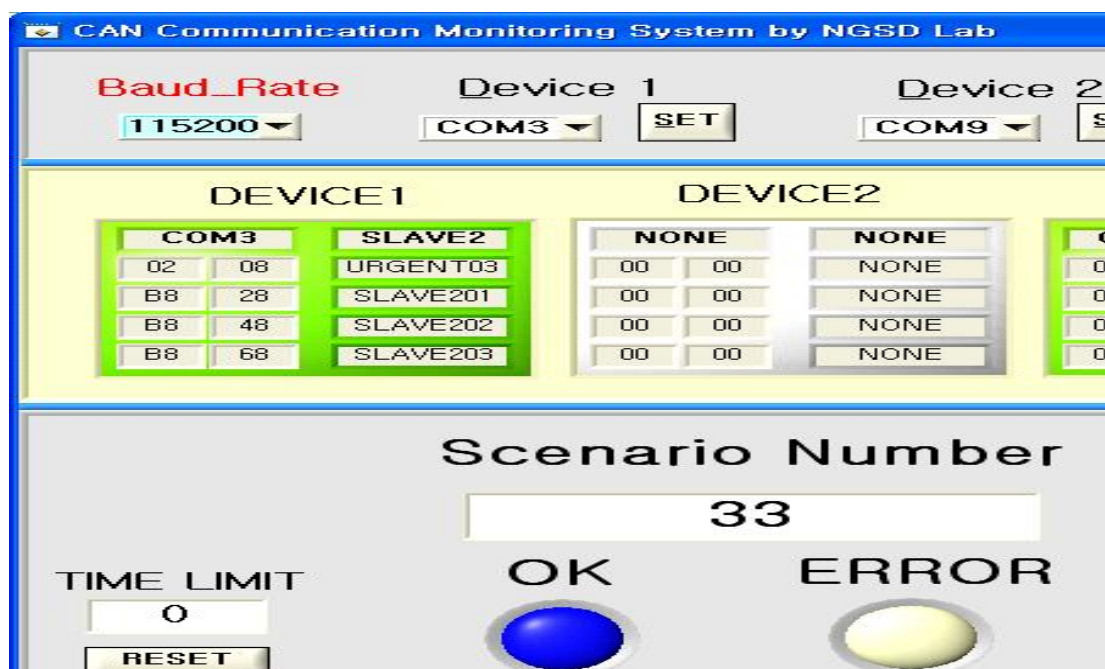


그림 3.112 ECU 통신 제어 프로그램

(나) Prototype 공정 자동 제어 프로그램(LabVIEW)

각 공정의 상태를 및 시스템 성능을 확인하는 프로그램으로 그림 3.113에서 보이는 화면은 현재 개발중인 프로그램이다. 각 공정의 제어를 담당하는 ECU에서 보낸 데이터를 MASTER ECU가 데이터를 분석하여 모니터링 시스템으로 데이터를 전달한다.

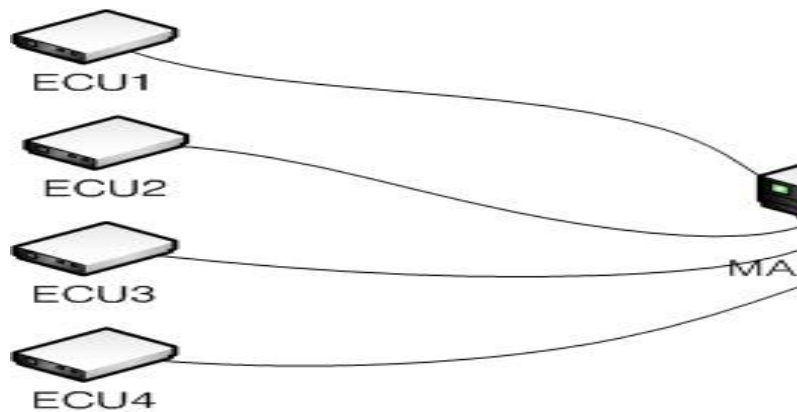


그림 3.113 공정 자동 제어 구성도

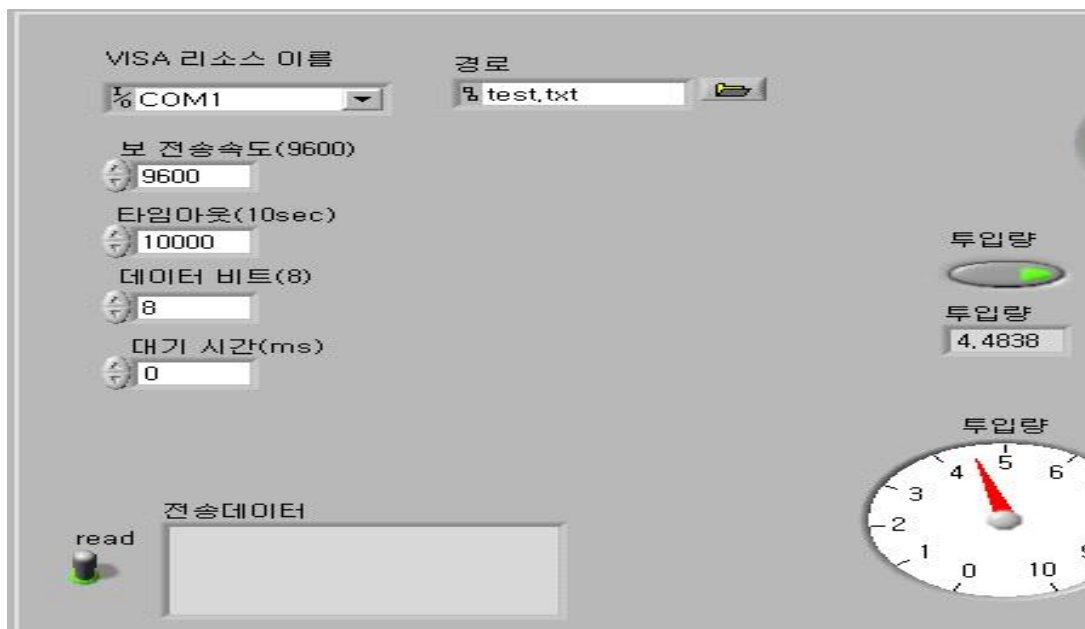


그림 3.114 공정 자동 제어 프로그램

제6절 PVDF film 구동용 증폭기 개발

1. PVDF film 전기적 특성 조사

가. PVDF film의 결정 구조

PVDF film은 고분자 유기 화합물이며 비정질과 결정체로 구성된 반 결정체이다. PVDF film의 결정구조는 현재까지 연구된 결과 α 형, β 형, γ 형, δ 형 등 총 4종류의 발견되었으며, 대표적인 결정 구조는 α 형과 β 형이다. α 형은 비 분극화형이며, β 형은 압전 현상을 발생할 수 있는 분극화형이다.

보통 PVDF의 결정 구조는 α 형이 대부분을 차지한다. α 형은 비 분극화 형이므로 압전 소재로 사용하기 어렵다. 따라서 압전 소재로 이용하기 위해서 α 형의 결정 구조에서 β 형의 결정 구조로의 형 전이를 필요로 한다. 결정 구조를 α 형에서 β 형으로 전이시키는 일반적인 방법으로 연신(elongation) 과정을 통해서 PVDF film의 길이를 늘린 후 분극(Poling) 과정을 통해서 결정 구조를 안정화시키는 방법을 사용한다. 연신 과정이란 PVDF를 60도에서 65도 사이로 가열하면서 본래 길이의 3배 내지 5배로 잡아당기는 것을 말한다. 이렇게 연신 과정이 적용된 PVDF film의 결정구조를 안정화하기 위해서 Poling과정을 진행한다. 분극 과정은 PVDF film 양단에 강한 전위를 인가해서 결정체들이 재배열하도록 하는 방법이다. 연신 과정과 분극 과정을 마친 α 형의 PVDF film은 β 형의 결정 구조를 갖는 PVDF film으로 형 전이를 하게 되며, 강한 압전 효과를 가질 수 있게 된다.

본 연구에서 사용한 PVDF film은 α 형의 PVDF film을 β 형의 결정 구조로 형 전이가 된 소재이며 제작 공정은 연신 과정 시 온도를 80-120도 적용하였으며, 4배 이상의 길이를 잡아당기는 과정을 거쳤다. 또한, 7kV에서 8kV의 분극 과정을 거쳐서 결정구조를 안정화시켜서 제작된 소재이다. 그림 3.124에서는 실험 소재로 사용한 PVDF film의 결정 구조를 보인다. 그림 3.115에서 보이는 바와 같이 실험에서 사용하는 PVDF film은 분극 과정 후에 여러 분역이 존재하는 것이 큰 특징이다.

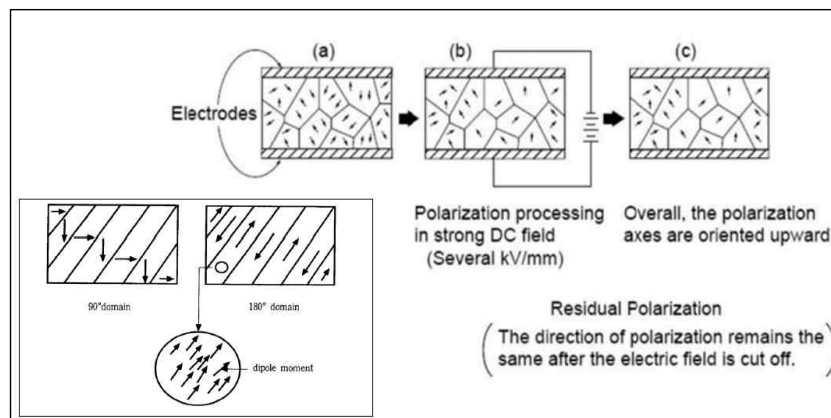


그림 3.115 분극 처리된 PVDF film 결정 구조 배열

나. PVDF film의 평형 회로 모델

PVDF film을 진동기로 사용하기 위해서는 적절한 인가전압과 주파수가 고려되어야 한다. 그 이유는 PVDF film은 주파수에 따라서 임피던스 변동이 매우 큰 특성을 가지고 있기 때문에 만약 고전압이 인가되는 상황에서 PVDF film이 매우 낮은 임피던스 상태가 되는 현상이 발생되면 과전류로 인한 PVDF film에 손상이 발생할 수 있다. 또한, 일반적으로 알려진 PVDF film의 변형온도는 70도에서 80도까지 이므로 그 이상의 열이 발생되게 되면 PVDF film은 변형을 발생되어 진동기로서의 성능을 발휘할 수 없게 된다. 따라서 평형 회로 모델링과 실험을 통해서 PVDF film의 특성 변화를 조사하는 연구를 다음과 같이 먼저 진행하였다.

일반적인 Piezoelectric 진동기의 평형 회로는 그림 3.116(a)에 보인 것처럼 R , L , C 그리고 평행으로 연결된 C_0 로 구성된다. 그림 3.116(b)는 Piezoelectric 진동기의 임피던스 (Z) 크기를 R_e 와 X_e 로 표현한 회로 모델이고, 그림 3.116(c)는 Piezoelectric 진동기의 어드미턴스 크기(Y)를 G 와 B 로 표현한 회로 모델이다.

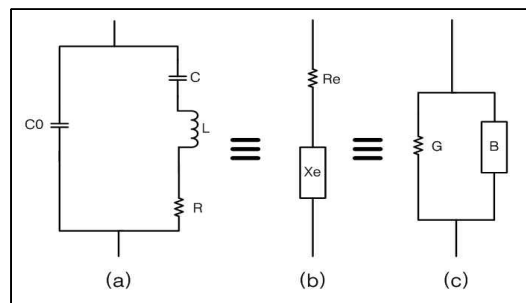


그림 3.116 Piezoelectric vibrator 평형 회로 모델

PVDF film은 전압을 인가하기 위한 은도선과 PVDF film으로 구성된다. 따라서 두 개의 평행한 도체판과 유전체로 구성된 커패시터와 그 구성이 같다고 볼 수 있다. 두 개의 평행한 도체 판은 은도선으로 표현될 수 있으며, 유전체는 PVDF film으로 표현될 수 있다. 그러므로 PVDF film을 진동기의 회로 모델로 표현할 때, PVDF film의 일반적인 모델링인 커패시터로 표현하고, PVDF film에 그려진 은도선을 저항성분으로 정의하여 그림 3.117에 보인바와 같이 R_s 와 C_s 로 구성된 평형 회로로 모델링하였다. 여기서 R_s 는 전압을 인가할 수 있도록 PVDF film 표면에 그려 넣어진 은도선과 PVDF film 내부에서 갖는 저항 성분이고 C_s 는 PVDF film의 커패시터 성분이다.

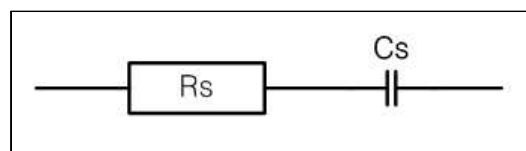


그림 3.117 PVDF film 평형 회로 모델

평형 회로 모델에 의한 PVDF film 특성 조사를 위하여 사용한 시편 제작 사양을 표

3.33에 정리하였다. 실험에서 사용한 PVDF film은 세 부분으로, 전압을 인가하기 위하여 PVDF film 표면에 그려진 은도선과 PVDF film, 그리고 은도선의 산화를 막고 PVDF film의 외부 표면의 손상을 막기 위한 래미네이트 코팅으로 이루어진다.

표 3.33 실험에 사용한 PVDF film

필름명	도선두께	PVDF film 두께	필름크기 가로	필름크기 세로	코팅크기 가로	코팅크기 세로
RT10	2 mm	80 μ m	128 mm	165 mm	129 mm	168 mm

먼저 제안한 평형 회로 모델이 PVDF film 특성에 적절한지 확인을 위하여 LCR 미터기 [LCR-8110G, GWInstek, Taiwan]를 이용하여 임피던스 값, R_s 값, C_s 값, D 값, 그리고 θ 값을 측정하였고, 그 결과를 다음 수식에 적용하여 비교하였다.

$$Z_s = R_s - \frac{j}{wC_s} \quad (3.50)$$

$$D = wC_sR_s \quad (3.51)$$

$$R_s = |Z_s| \cos\theta \quad (3.52)$$

$$C_s = \frac{D}{wR_s} \quad (3.53)$$

실험은 정현파를 1KHz에서 10KHz까지 1KHz씩 증가시키면서 진행하였다. 표 3.33는 LCR 미터기로 구한 PVDF film의 특성을 보인다. 측정 결과 주파수가 증가할수록 임피던스 값은 감소하며, 평형 회로를 구성하는 C_s 값과 R_s 값도 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 주파수가 증가할수록 소자 자체의 ESR에 의한 열 손실 비율을 의미하는 소산율(D)은 점차 증가하고 커패시터의 손실을 의미하는 Loss Angle(θ)은 점차 커지는 결과를 얻을 수 있었다.

표 3.34에 측정된 값들을 이용하여 수식(1)에서 수식(4)까지 주파수에 따라 대입하고 계산하였을 때 그 값이 모두 만족하였다. 따라서 PVDF film의 평형 회로 모델은 그림 3.126에 보인바와 같이 저항성분과 커패시터 성분으로 구성된 평형 회로 모델을 가지는 것을 확인 할 수 있었으며, Piezoelectric 진동기 회로 모델 중 그림 3.125(b)에 보인 회로 모델 구조와 유사하기 때문에 vibration actuator로 사용할 수 있다.

표 3.34 LCR 미터기를 이용한 PVDF film 특성 값 측정 결과

Freq(Hz)	C _s (nF)	D	Z(KΩ)	Θ(°)	R _s (Ω)
1000	30.78	0.040	5.17	-87.70	208.5
2000	30.60	0.068	2.60	-86.13	176.9
3000	30.45	0.096	1.75	-84.55	166.9
4000	30.40	0.135	1.32	-82.31	176.7
5000	29.88	0.147	1.08	-81.65	156.8
6000	29.85	0.174	0.90	-80.14	154.9
7000	29.21	0.191	0.79	-79.24	148.4
8000	29.09	0.213	0.70	-78.03	145.6
9000	28.90	0.231	0.63	-77.03	141.5
10000	28.69	0.251	0.57	-75.98	139.1
11000	28.49	0.269	0.53	-74.98	136.8
12000	28.28	0.288	0.49	-74.01	134.9
13000	28.05	0.307	0.46	-73.00	133.9
14000	27.80	0.324	0.43	-72.11	132.4
15000	27.48	0.339	0.41	-71.36	130.7
16000	27.25	0.352	0.39	-70.69	128.4
17000	27.04	0.365	0.37	-70.00	126.5
18000	26.81	0.378	0.35	-69.35	124.8
19000	26.61	0.392	0.34	-68.65	123.5
20000	26.32	0.404	0.33	-68.09	122.1

다. PVDF film의 주파수 특성 분석

PVDF film 의 기본적인 특성 조사에 이어서 크기에 따라 임피던스와 커패시터 값의 변화가 있는지를 확인하기 위해 추가적으로 PVDF film 특성 조사를 수행하였으며, 그에 따른 시편 제작 사양은 표 3.35에 보인다. 제작한 시편들의 모양은 사각형 타입으로 제작하였고, PVDF film 자체의 두께는 80[μm]를 사용하였다.

표 3.35 제작한 PVDF film 크기

(크기 단위(mm), 면적단위(mm^2))

구 분	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7	RT8
내경크기 (가로)	10	19	39	59	19	29	49	99
내경크기 (세로)	10	20	30	50	9.5	19.5	29.5	50
도선 두께	1	2	2	2	1	2	2	2
PVDF 크기(가로)	17	29	48	68	27	38	59	108
PVDF 크기(세로)	17	29	39	59	17	29.5	39	59
코팅크기 (가로)	21	35	55	73.5	31	43	64	114
코팅크기 (세로)	21	34	45	66	23	36	45	65
면적 (내경기준)	100	380	1170	2950	180.5	565.5	1445.5	4950
면적 (PVDF크기)	289	841	1872	4012	459	1121	2301	6372
면적 (코팅크기)	441	1190	2475	4851	713	1548	2880	7410



그림 3.118 실험에 사용한 PVDF film 시편

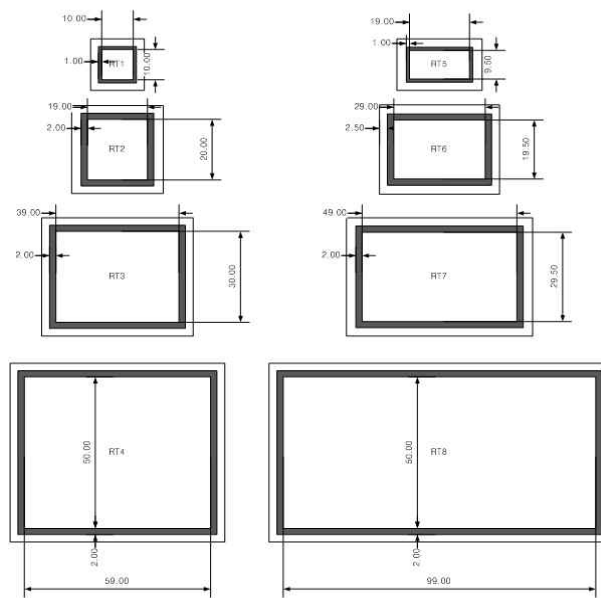


그림 3.119 실험에 사용된 PVDF film 제작도

PVDF film의 변화된 임피던스 측정값은 표 3.35에서 보이고 변화된 커패시터 측정값은 표 3.36에서 보인다. 측정한 데이터를 통해서 PVDF film의 크기에 따른 특성을 분석한 결과는 다음과 같다. PVDF film은 상대적으로 크기가 작은 PVDF film이 큰 PVDF film보다 높은 임피던스 값을 가지며, 크기가 큰 PVDF film은 작은 임피던스 값을 갖는다. 이와는 반대로 상대적으로 크기가 큰 PVDF film이 작은 PVDF film보다 높은 커패시터 값을 가지며, 크기가 작은 PVDF film은 작은 커패시터 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 측정된 데이터를 분석한 결과 PVDF film 크기에 따른 특성 변화 차이는 크게 보인다. 그러나 주파수 특성 실험 결과 모양에 따른 차이는 크게 없는 것으로 판단된다.

표 3.36 주파수 변동에 따른 임피던스 값 변화 측정 데이터

Freq.	Z (K Ω)	Z (K Ω)	Z (K Ω)	Z (K Ω)	Z (K Ω)	Z (K Ω)	Z (K Ω)	Z (K Ω)
Start	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz
End	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz
Points	100	100	100	100	100	100	100	100
Level	2V	2V	2V	2V	2V	2V	2V	2V
TYPE	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7	RT8
1KHz	375.75	129.87	57.39	27.13	240.23	99.72	47.23	17.29
2KHz	189.03	65.29	28.88	13.74	121.11	50.18	23.81	8.96
3KHz	126.51	43.72	19.35	9.29	81.43	33.61	16.00	6.26
4KHz	95.14	32.91	14.58	7.08	61.59	25.32	12.09	4.96
5KHz	76.34	26.42	11.72	5.77	49.71	20.34	9.76	4.18
6KHz	63.77	22.09	9.82	4.90	41.77	17.03	8.21	3.67
7KHz	54.81	19.00	8.45	4.28	36.12	14.66	7.10	3.41
8KHz	48.06	16.68	7.44	3.83	31.87	12.89	6.28	3.05
9KHz	42.81	14.87	6.64	3.47	28.57	11.51	5.64	2.82
10KHz	38.62	13.43	6.01	3.19	25.93	10.41	5.13	2.63
11KHz	35.18	12.25	5.49	2.98	23.76	9.51	4.71	2.48
12KHz	32.32	11.26	5.06	2.77	21.96	8.76	4.36	2.35
13KHz	29.89	10.43	4.69	2.60	20.43	8.13	4.18	2.24
14KHz	27.82	9.72	4.39	2.52	19.12	7.59	3.91	2.13
15KHz	26.01	9.10	4.17	2.37	17.98	7.12	3.68	2.03
16KHz	24.44	8.56	3.92	2.25	16.99	6.70	3.48	1.94
17KHz	23.05	8.08	3.71	2.15	16.10	6.34	3.31	1.86
18KHz	21.81	7.66	3.52	2.06	15.32	6.02	3.18	1.79
19KHz	20.71	7.27	3.36	1.98	14.62	5.79	3.05	1.72
20KHz	19.71	6.93	3.27	1.91	13.98	5.56	2.94	1.66
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
91KHz	5.14	1.93	1.03	0.62	4.07	1.65	0.96	0.54
92KHz	5.09	1.92	1.02	0.61	4.04	1.64	0.95	0.54
93KHz	5.05	1.90	1.01	0.61	4.01	1.62	0.94	0.53
94KHz	5.01	1.89	1.01	0.60	3.98	1.61	0.93	0.53
95KHz	4.97	1.87	1.00	0.60	3.95	1.59	0.92	0.52
96KHz	4.93	1.85	0.99	0.59	3.92	1.58	0.92	0.52
97KHz	4.89	1.84	0.98	0.59	3.89	1.57	0.91	0.52
98KHz	4.85	1.82	0.98	0.59	3.86	1.56	0.90	0.51
99KHz	4.81	1.81	0.97	0.58	3.83	1.54	0.90	0.51
100KHz	4.77	1.80	0.96	0.58	3.80	1.53	0.89	0.50

표 3.37 주파수 변동에 따른 커패시터 값 변화 측정 데이터

Freq.	C(nF)	C(nF)	C(nF)	C(nF)	C(nF)	C(nF)	C(nF)	C(nF)
Start	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz	1KHz
End	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz	100KHz
Points	100	100	100	100	100	100	100	100
Level	2V	2V	2V	2V	2V	2V	2V	2V
TYPE	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7	RT8
1 KHz	0.424	1.226	2.774	5.875	0.663	1.596	3.371	9.257
2 KHz	0.421	1.219	2.758	5.816	0.658	1.587	3.348	9.040
3KHz	0.420	1.214	2.746	5.755	0.653	1.580	3.326	8.768
4KHz	0.419	1.210	2.735	5.690	0.648	1.574	3.306	8.453
5KHz	0.418	1.207	2.724	5.615	0.643	1.569	3.286	8.132
6KHz	0.417	1.203	2.714	5.535	0.639	1.563	3.264	7.829
7KHz	0.416	1.200	2.705	5.455	0.634	1.557	3.242	7.329
8KHz	0.415	1.196	2.695	5.374	0.630	1.552	3.218	7.143
9KHz	0.414	1.193	2.686	5.298	0.625	1.546	3.194	6.906
10KHz	0.414	1.190	2.675	5.220	0.621	1.540	3.169	6.685
11KHz	0.413	1.187	2.665	5.091	0.617	1.534	3.149	6.466
12KHz	0.412	1.184	2.656	5.034	0.613	1.528	3.133	6.286
13KHz	0.411	1.180	2.650	4.986	0.609	1.522	3.037	6.064
14KHz	0.411	1.178	2.639	4.782	0.605	1.517	3.011	5.925
15KHz	0.410	1.175	2.596	4.744	0.601	1.512	2.995	5.795
16KHz	0.409	1.172	2.590	4.691	0.597	1.507	2.974	5.675
17KHz	0.409	1.169	2.582	4.632	0.593	1.503	2.950	5.564
18KHz	0.408	1.166	2.575	4.571	0.590	1.498	2.914	5.462
19KHz	0.408	1.163	2.566	4.510	0.587	1.477	2.881	5.370
20KHz	0.407	1.161	2.511	4.458	0.583	1.462	2.848	5.287
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
91KHz	0.360	0.952	1.828	3.078	0.458	1.119	1.969	3.510
92KHz	0.360	0.951	1.823	3.070	0.457	1.117	1.964	3.500
93KHz	0.359	0.949	1.819	3.061	0.455	1.115	1.960	3.490
94KHz	0.358	0.947	1.814	3.053	0.454	1.112	1.955	3.480
95KHz	0.358	0.945	1.809	3.046	0.452	1.110	1.951	3.471
96KHz	0.357	0.943	1.804	3.038	0.451	1.108	1.947	3.462
97KHz	0.357	0.941	1.800	3.030	0.450	1.106	1.942	3.453
98KHz	0.356	0.940	1.795	3.023	0.449	1.103	1.937	3.445
99KHz	0.356	0.938	1.790	3.016	0.448	1.101	1.932	3.438
100KHz	0.355	0.936	1.785	3.009	0.447	1.099	1.927	3.430

표 3.36와 표 3.37에서 측정된 데이터를 이용한 PVDF film의 주파수 변화에 따른 특성 분석 결과는 다음과 같다. 주파수가 낮은 주파수 대역에서 높은 주파수 대역으로 변동할 때 임피던스 값과 커패시터 값이 감소하는 경향을 보인다. 표 3.46와 표 3.47을 이용하여 만든 그림 3.120와 그림 3.121을 통하여 PVDF film의 특성 변화 추이를 쉽게 확인할 수 있다. 그림 3.121에서 보인 바와 같이 임피던스는 낮은 주파수 대역에서 급감한다. 그리고 커패시터 값의 변화는 낮은 주파수 대역에서는 크게 감소하다가 높은 주파수 대역으로 이동할 때 그 변화가 둔감해지는 것을 그림 3.121을 통해서 알 수 있다.

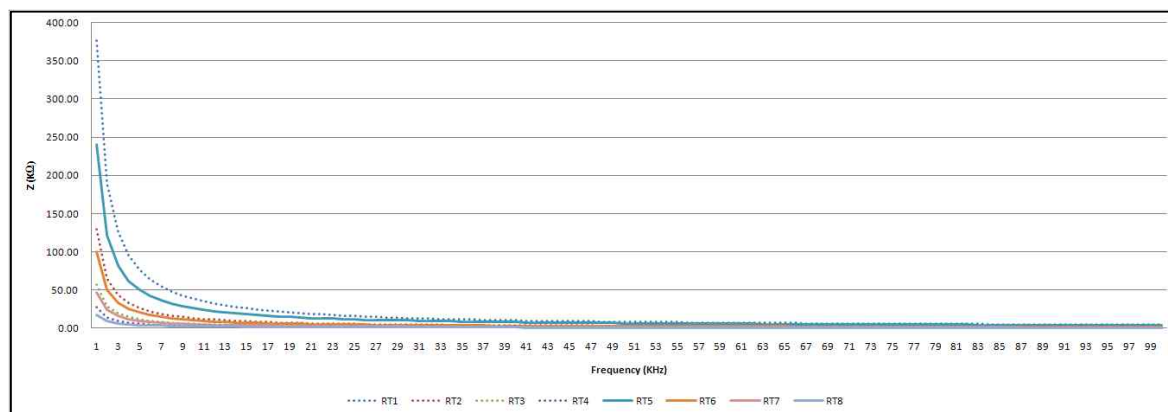


그림 3.120 주파수 변동에 따른 임피던스 값 변화 그래프

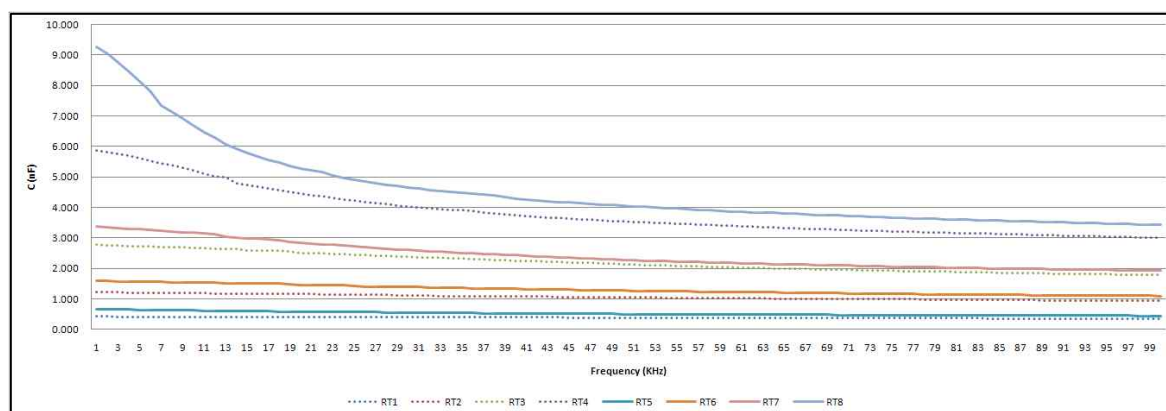


그림 3.121 주파수 변동에 따른 커패시터 값 변화 그래프

PVDF film의 주파수 변동에 따른 임피던스 값과 커패시터 값의 변화 기울기 분석 그래프는 그림 3.122과 그림 3.123에서 보인다. 임피던스 값의 변화 기울기는 낮은 주파수에 대역에서 변화 기울기가 매우 크게 나타나며 상대적으로 높은 주파수 대역으로 변동하면 그 변화 기울기는 작아진다. 커패시터 값의 변화 기울기의 경우 크기가 작은 PVDF film일수록 크기가 큰 PVDF film에 비해서 상대적으로 변화량이 일정한 기울기를 가지며, PVDF film 크기에 따라서 변화 기울기가 급격하게 증가하는 주파수가 존재하는 것을 그림 3.123를 통해서 볼 수 있다.

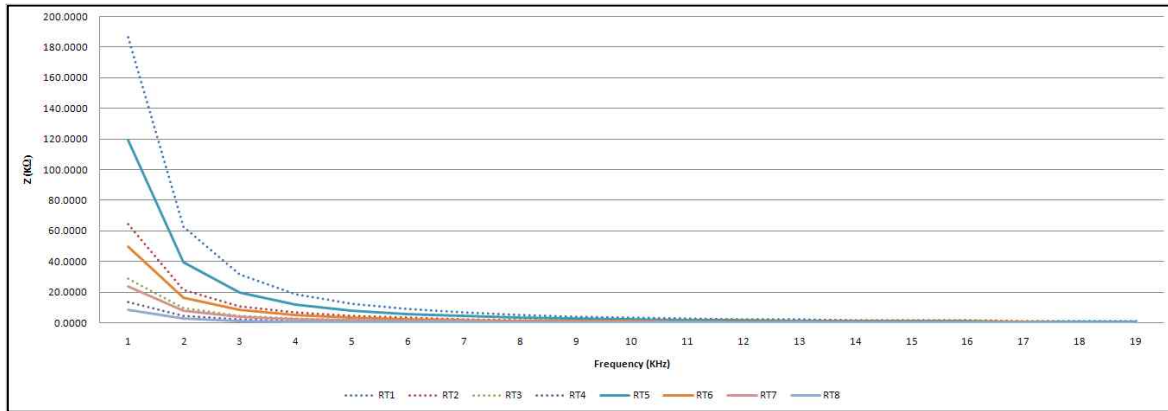


그림 3.122 주파수 변동에 따른 임피던스 값 변화 기울기 그래프

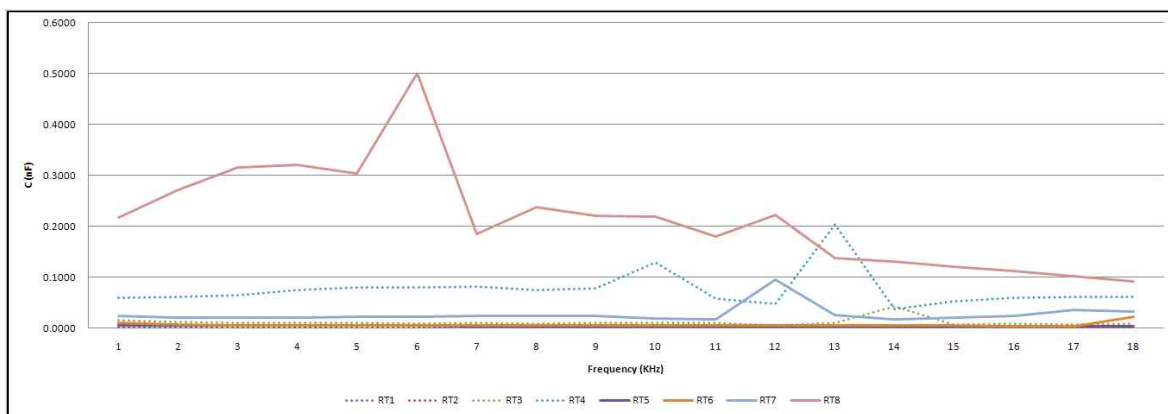


그림 3.123 주파수 변동에 따른 커패시터 값 변화 기울기 그래프

주파수 변화에 따른 특성 분석을 통해서 PVDF film은 기존에 연구된 PVDF film의 특성과 마찬가지로 주파수가 변동하게 될 때, 임피던스 값이 크게 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

라. PVDF film의 면적 특성 분석

PVDF film의 주파수 특성 조사에 이어서 면적에 따라 임피던스와 커패시터 값의 변화가 있는지를 확인하기 위해 추가적으로 PVDF film 면적 특성 조사를 수행하였으며, 사용한 시편 사양은 앞선 수행한 실험과 동일한 시편을 사용하였다.

표 3.38에서는 PVDF film의 면적을 임피던스 값이 큰 PVDF film을 기준으로 면적을 정규화한 값이다. 아래 표에서 정규화 값을 구할 때 PVDF film의 외형상의 형태가 같은 시편들로 분류하였다. 실험에 사용한 시편들은 정사각형(RT1~RT4)과 직사각형(RT5~RT8)으로 구분하여 정규화 값을 구하였다.

표 3.38 PVDF film의 면적에 따른 임피던스 값의 정규화

항목	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7	RT8
내경 크기 기준 면적	1.00	0.26	0.09	0.03	1.00	0.32	0.12	0.04
PVDF film 크기 기준 면적	1.00	0.34	0.15	0.07	1.00	0.41	0.20	0.07
코팅 크기 기준 면적	1.00	0.37	0.18	0.09	1.00	0.46	0.25	0.10

(RTx=RT1/RTx, RTy=RT5/RTy, x=1,2,3,4, y=5,6,7,8)

표 3.39 주파수와 PVDF film 면적에 따른 임피던스 값의 정규화 데이터

Freq.	RT1/RT1 (1.0)	RT2/RT1 (2.9)	RT3/RT1 (6.5)	RT4/RT1 (13.9)	RT5/RT5 (1.0)	RT6/RT5 (2.4)	RT7/RT5 (5.0)	RT8/RT5 (13.9)
1KHz	1.00	0.35	0.15	0.07	1.00	0.42	0.20	0.07
2KHz	1.00	0.35	0.15	0.07	1.00	0.41	0.20	0.07
3KHz	1.00	0.35	0.15	0.07	1.00	0.41	0.20	0.08
4KHz	1.00	0.35	0.15	0.07	1.00	0.41	0.20	0.08
5KHz	1.00	0.35	0.15	0.08	1.00	0.41	0.20	0.08
6KHz	1.00	0.35	0.15	0.08	1.00	0.41	0.20	0.09
7KHz	1.00	0.35	0.15	0.08	1.00	0.41	0.20	0.09
8KHz	1.00	0.35	0.15	0.08	1.00	0.40	0.20	0.10
9KHz	1.00	0.35	0.16	0.08	1.00	0.40	0.20	0.10
10KHz	1.00	0.35	0.16	0.08	1.00	0.40	0.20	0.10
11KHz	1.00	0.35	0.16	0.08	1.00	0.40	0.20	0.10
12KHz	1.00	0.35	0.16	0.09	1.00	0.40	0.20	0.11

표 3.39에서 보인바와 같이 표 3.48의 PVDF film의 크기를 기준으로 면적을 정규화한 값과 임피던스 값을 정규화한 값의 비율이 거의 같음을 알 수 있으며, 그림 3.124과 그림 3.125를 통해서 더욱 쉽게 알 수 있다.

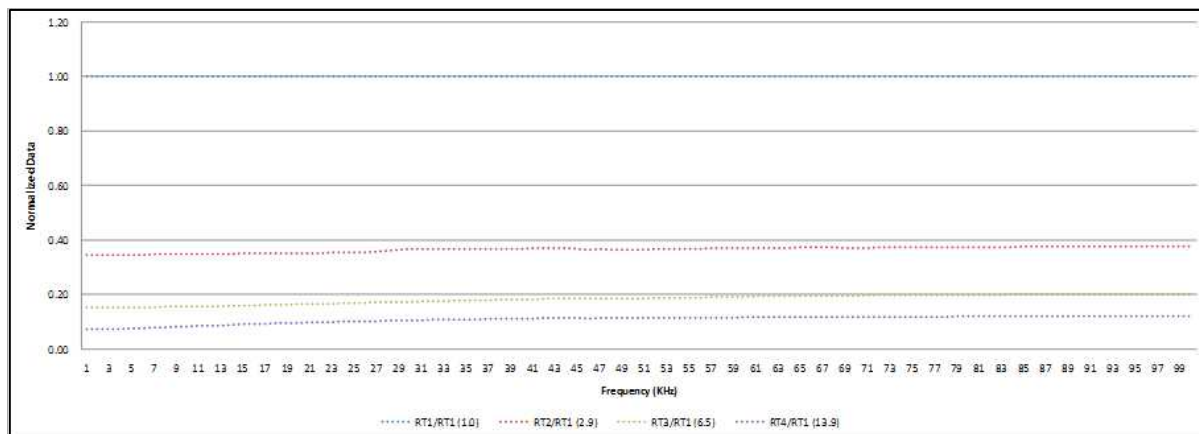


그림 3.124 주파수와 PVDF film 면적에 따른 임피던스 값의 정규화 그래프 (RT1-RT4)

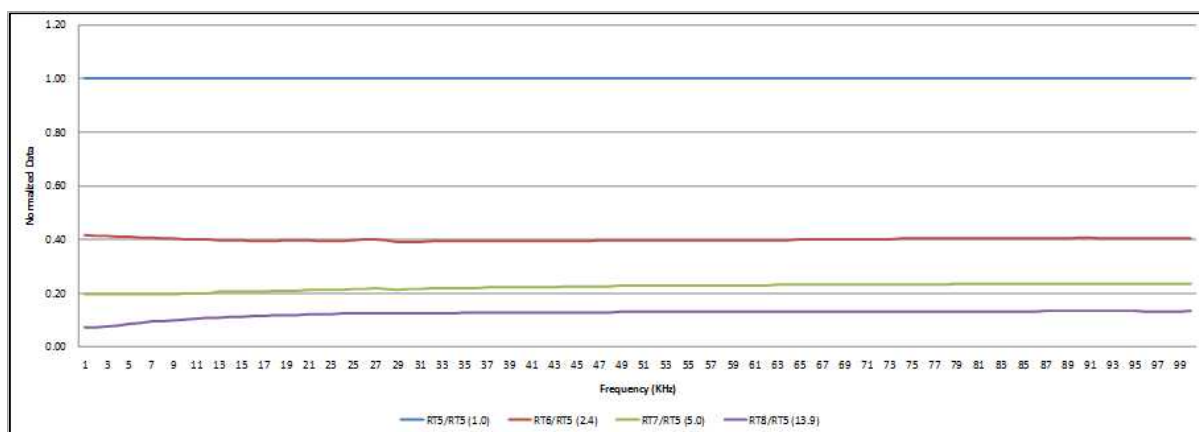


그림 3.125 주파수와 PVDF film 면적에 따른 임피던스 값의 정규화 그래프 (RT5-RT8)

표 3.40에서는 PVDF film의 면적을 커패시터 값이 큰 PVDF film을 기준으로 면적을 정규화한 값이다.

표 3.40 PVDF film의 면적에 따른 임피던스 값의 정규화

항목	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7	RT8
내경 크기 기준 면적	0.03	0.13	0.40	1.00	0.04	0.11	0.29	1.00
PVDF film 크기 기준 면적	0.07	0.21	0.47	1.00	0.07	0.18	0.36	1.00
코팅 크기 기준 면적	0.09	0.25	0.51	1.00	0.10	0.21	0.39	1.00

$$(RT_x = RT_x / RT_4, RT_y = RT_y / RT_8, x=1,2,3,4, y=5,6,7,8)$$

표 3.40에서 보인바와 같이 표 3.41의 PVDF film의 크기를 기준으로 면적을 정규화한 값과 커패시터 값을 정규화한 값의 비율이 거의 같음을 알 수 있으며, 그림 3.126와 그림 3.127을 통해서 더욱 쉽게 알 수 있다.

표 3.41 주파수와 PVDF film 면적에 따른 임피던스 값의 정규화 데이터

Freq.	RT1/RT4 (1.0)	RT2/RT4 (2.9)	RT3/RT4 (6.5)	RT4/RT4 (13.9)	RT5/RT8 (1.0)	RT6/RT8 (2.4)	RT5/RT8 (5.0)	RT7/RT8 (13.9)
1KHz	0.07	0.21	0.47	1.00	0.07	0.17	0.36	1.00
2KHz	0.07	0.21	0.47	1.00	0.07	0.18	0.37	1.00
3KHz	0.07	0.21	0.48	1.00	0.07	0.18	0.38	1.00
4KHz	0.07	0.21	0.48	1.00	0.08	0.19	0.39	1.00
5KHz	0.07	0.21	0.49	1.00	0.08	0.19	0.40	1.00
6KHz	0.08	0.22	0.49	1.00	0.08	0.20	0.42	1.00
7KHz	0.08	0.22	0.50	1.00	0.09	0.21	0.44	1.00
8KHz	0.08	0.22	0.50	1.00	0.09	0.22	0.45	1.00
9KHz	0.08	0.23	0.51	1.00	0.09	0.22	0.46	1.00
10KHz	0.08	0.23	0.51	1.00	0.09	0.23	0.47	1.00
11KHz	0.08	0.23	0.52	1.00	0.10	0.24	0.49	1.00
12KHz	0.08	0.24	0.53	1.00	0.10	0.24	0.50	1.00

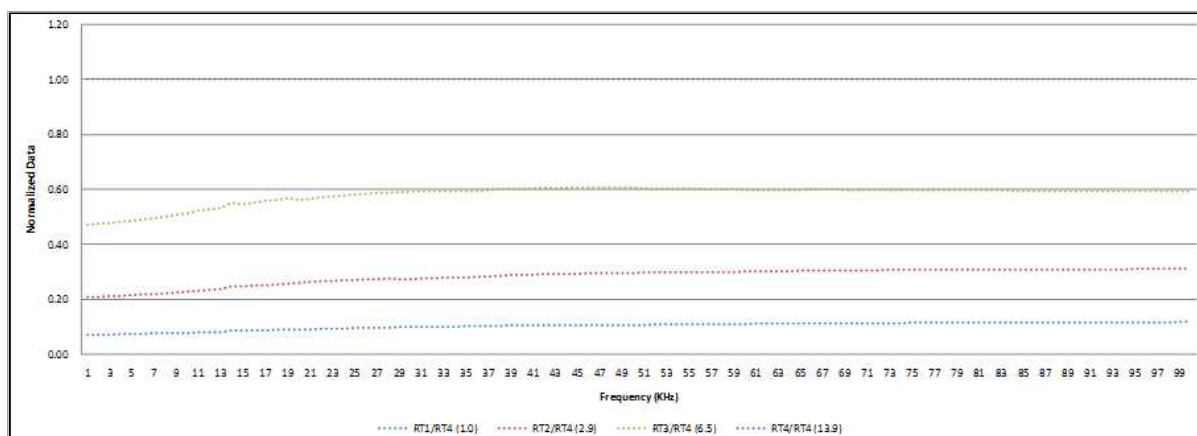


그림 3.126 주파수와 PVDF film 면적에 따른 커패시터 값의 정규화 그래프 (RT1-RT4)

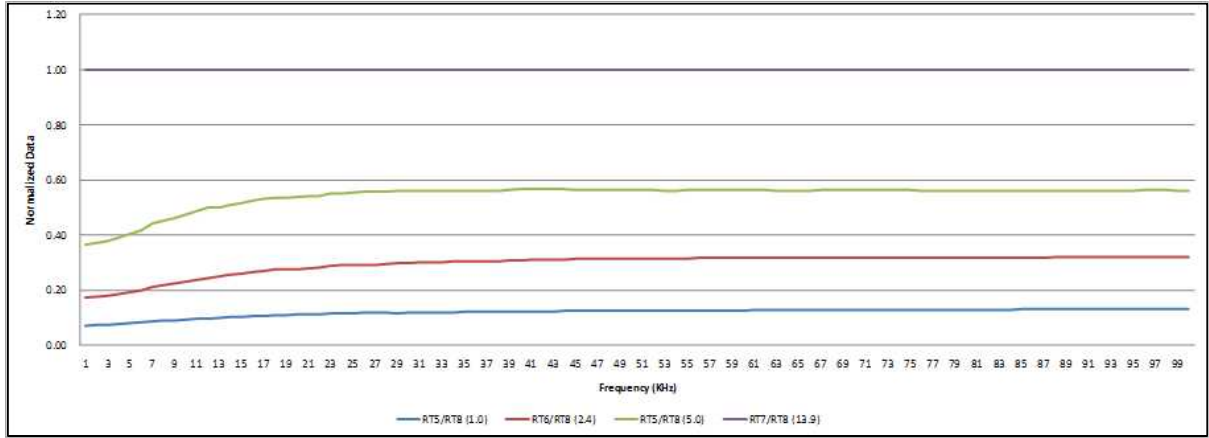


그림 3.127 주파수와 PVDF film 면적에 따른 커패시터 값의 정규화 그래프 (RT1-RT4)

PVDF film은 앞선 언급한대로 커패시터의 특성을 가지므로 PVDF film의 특성을 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (3.54)$$

식 3.54에 PVDF film을 적용하면 ϵ_0 는 유전상수로 그 값은 $8.8 \times 10^{-12} F/m$ 이며, A는 PVDF film의 면적, d는 PVDF film의 두께, 그리고 ϵ_r 은 PVDF film의 유전율이다. PVDF film은 면적과 주파수가 변동할 때 커패시터와 임피던스가 변화하므로 변화를 주는 인자를 k라 한다면 식 3.54는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{PVDF} = k \epsilon_0 \frac{A_{PVDF}}{d_{PVDF}} \quad (3.55)$$

실험에서 사용하는 PVDF film의 두께 d와 유전 상수 ϵ_0 는 고정 값이므로, 주파수가 변화할 때 PVDF film의 특성 값인 커패시터 성분에 영향을 주는 값은 k 와 단면적이다. 단면적은 이미 알고 있는 값이므로, 식 3.55을 정리하여 k인자를 구하는 식 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$k = \alpha \frac{C_{PVDF}}{A_{PVDF}} \quad (3.56)$$

$$\alpha = \frac{\epsilon_0}{d_{PVDF}} \quad (3.57)$$

식 3.56을 이용하여 k 값을 구하고, 구한 k값을 이용하여 PVDF film의 면적과 주파수가 변화할 때 k의 변화도를 그린 그래프는 그림 3.128에 보인다.

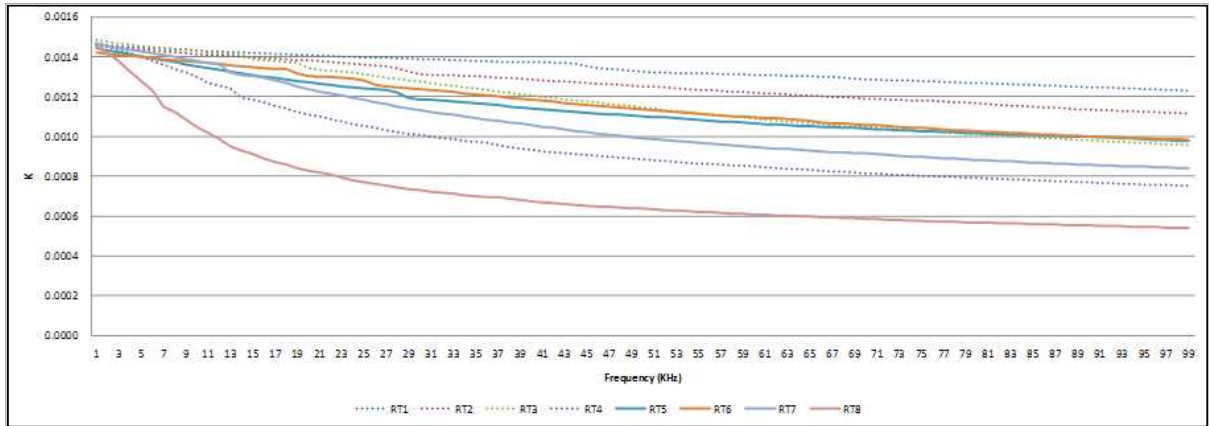


그림 3.128 PVDF film의 면적과 주파수에 따른 k 변화도

k 인자의 변화도 그래프는 PVDF film의 전체 면적과 커패시터 값을 나눈 값이므로 PVDF film의 크기에 따른 커패시터 값의 변화를 구별하기가 어렵다.

표 3.42 PVDF film의 전체 면적과 도선 면적 비교 데이터

항목	RT1	RT2	RT3	RT4	RT5	RT6	RT7	RT8
PVDF film 전체 면적	289.0	841.0	1872.0	4012.0	459.0	1121.0	2301.0	6372.0
은도선 면적	21.0	82.0	142.0	222.0	29.5	101.0	161.0	302.0
PVDF film/Lead 비율	13.8	10.3	13.2	18.1	15.6	11.1	14.3	21.1

따라서 표 3.42에서 보인 것처럼 PVDF film의 전체 면적과 PVDF film의 리드선인 은도선의 면적을 고려하여 식 3.58로 표현 할 수 있다.

$$k = \alpha \frac{C_{PVDF}}{A_k} \quad (3.58)$$

$$A_k = \frac{A_{PVDF}}{A_l} \quad (3.59)$$

식 3.59에서 α 는 식 3.57이며, A_{PVDF} 는 PVDF film의 전체 면적 그리고 A_l 는 PVDF film 위에 그려진 도선의 면적이다. 식 3.58를 이용하여 PVDF film의 크기와 주파수가 변화할 때 k 인자의 특성을 그린 그래프는 그림 3.139에 정리하였다.

그림 3.129에서 볼 수 있듯이 PVDF film에 은도선 면적을 고려해서 구한 PVDF film의 면적과 주파수에 변화에 따른 k 의 변화도는 커패시터 값의 변화도와 같은 경향을 띄는 것을 확인할 수 있었다.

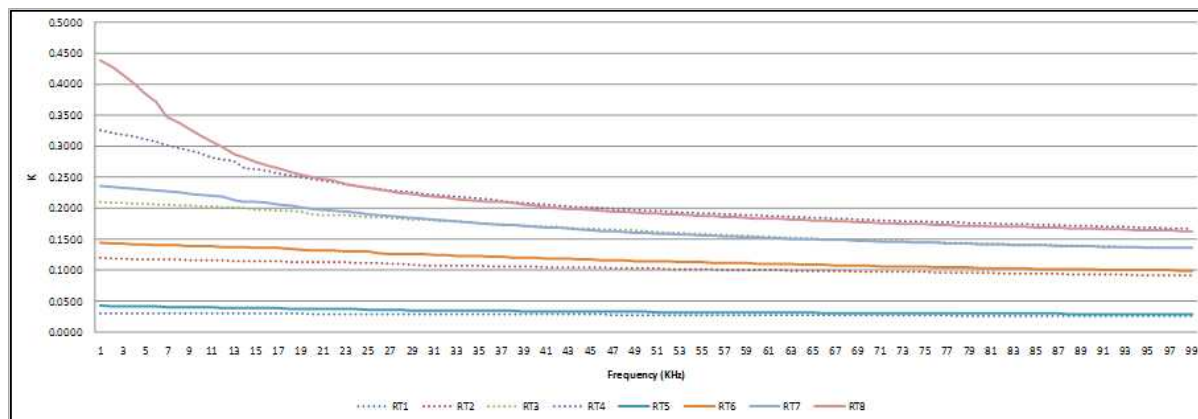


그림 3.129 은도선 면적을 적용하여 구한 PVDF film의 면적과 주파수에 따른 k 변화도

따라서 본 절에서 진행한 PVDF film의 특성 분석 실험을 최종 정리하면 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있다.

1. PVDF film 크기가 클수록 반비례하여 작아지는 반면에 커패시터 값은 PVDF film 크기에 비례하여 커진다.
2. 주파수 변화가 저주파수 대역에서 고주파수 대역으로 변동하게 될 때 임피던스 값은 급격히 감소하고 커패시터 값은 서서히 감소하는 특징을 보인다.
3. PVDF film의 임피던스 값과 커패시터 값은 PVDF film의 크기에 의존하는 특징을 갖는다.
4. PVDF film는 커패시터의 유전 특성인 k 인자를 가진다.

PVDF film의 주파수 특성 분석을 통해서 얻은 결과를 토대로 PVDF film를 진동기로 사용하기 위해서는 PVDF film의 크기에 따라서 임피던스 값이 다르므로 소자가 파손되지 않도록 적절한 바이어스 전압을 인가해주어야 한다. 또한, 주파수 변동 대역에 따라서 PVDF film의 임피던스 값이 달라지므로 임피던스 값의 변화를 고려한 고전압 증폭기를 개발해야 할 것으로 판단된다.

2. PVDF film 구동용 증폭기 개발

PVDF film 구동용 증폭기를 개발하기 위하여 우선 일반적인 BJT 증폭기 방식을 이용하여 PVDF film을 vibration actuator로 사용할 때 효과적으로 구동할 수 있는 BJT 증폭기를 개발하였으며, 또한 기존의 BJT 증폭기를 사용한 방식과는 다르게 IGBT로 구성된 Full-Bridge 회로에 R-L-PVDF film 직렬 임피던스 정합 회로를 적용하여 PVDF film이 진동기로 사용될 때 효과적으로 구동할 수 있는 PVDF film 구동용 파워 드라이버를 개발하였다.

PVDF film 구동용 BJT 증폭기는 기존에 연구된 방식대로 NPN 타입의 고전압 BJT를 사용하여 공통 이미터 증폭기를 설계하였다. PVDF film은 크기와 인가되는 주파수에 따라서 임피던스 값이 크게 변하는 특징을 갖기 때문에 BJT 증폭기를 설계 시에 PVDF film의 임피던스 값을 고려하여 주변 소자들을 선정하였다. PVDF film 구동용 BJT 증폭기는 큰 전압과 전류 이득을 얻을 수 있기 때문에 공통 이미터 증폭기로 설계하였으며 증폭기의 동작점과 전압이득을 안정시키기 위하여 이미터에 저항을 삽입하였다.

가. PVDF Film 구동용 BJT 증폭기

그림 3.130는 개발한 PVDF film 구동용 BJT 증폭기의 블록 다이어그램으로, 크게 전압 증폭부와 공통 이미터 증폭기로 구성된다.

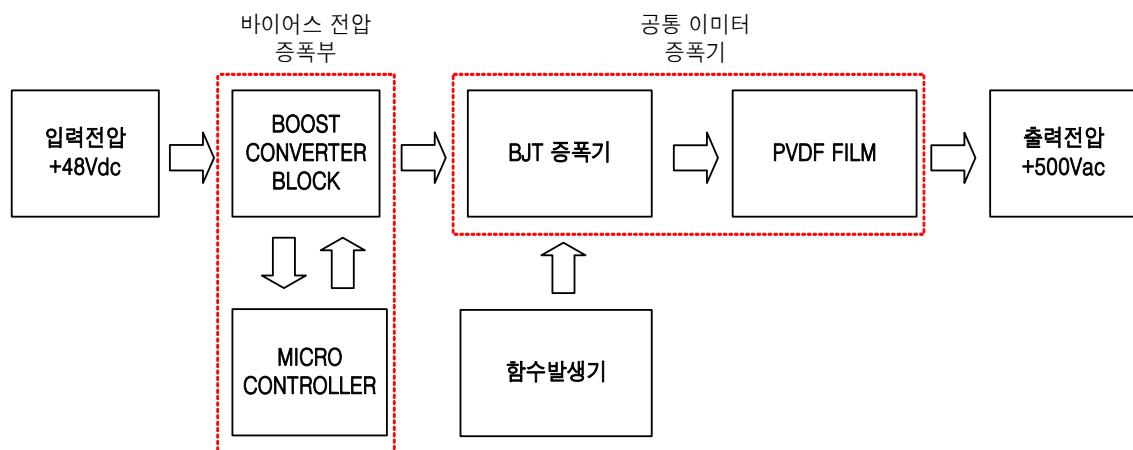


그림 3.130 BJT 증폭기 블록 다이어그램

바이어스 전압 증폭부는 Boost Converter 블록과 마이크로 컨트롤러로 구성되며 PWM(Pulse-Width Modulation) 스위칭 신호를 받아서 입력 +48Vdc 전압을 최대 +700Vdc 전압까지 증압하는 역할을 한다. 공통 이미터 증폭기는 함수발생기로부터 받은 입력 신호를 증폭시켜서 PVDF film으로 출력을 내보내는 역할을 한다.

(1) 바이어스 전압 증폭부 설계

그림 3.131은 바이어스 전압 증폭부 회로를 보인다. 그림에서 보인 것처럼 바이어스 전압 증폭부는 Boost Converter 방식을 사용하였으며 입력 +48Vdc 전압을 최대 +500Vdc 전압까지 상승시킬 수 있는 고전압 증폭기이다. 바이어스 전압 증폭부를 구성하고 있는 소자로는 1200V의 내압을 갖는 IGBT와 1000V의 내압을 갖는 FRD(Fast Recovery Diode) 그리고 인덕터 용량 값이 1000uH인 토로이달 인덕터를 선정하였다. 또한 +500Vdc까지 승압된 전압을 저장할 수 있도록 1200uF의 용량 값을 가지며 내압이 450V인 커패시터 2개를 직렬로 연결하여 충분한 내압을 갖도록 설계하였다.

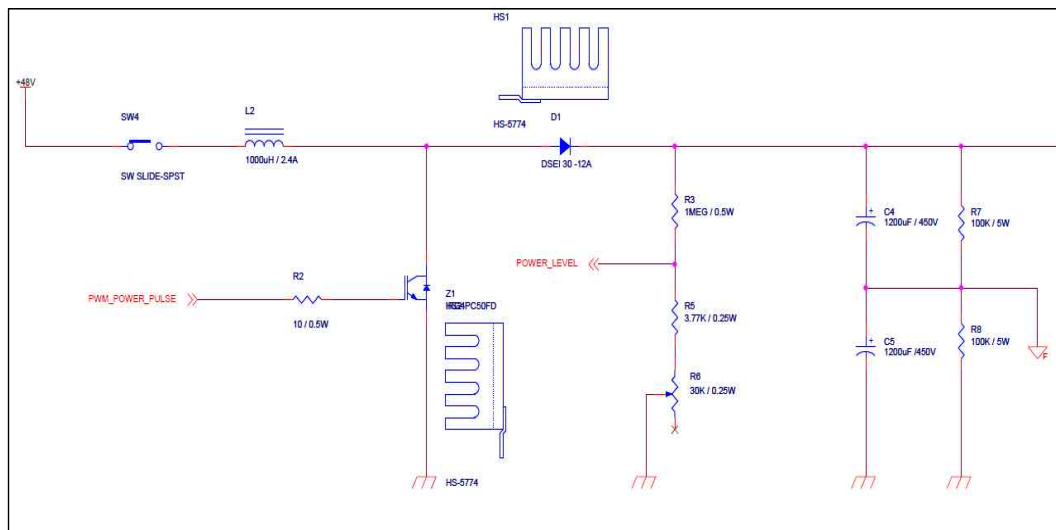


그림 3.131 바이어스 전압 증폭부 회로

마이크로 컨트롤러는 16MHz의 동작 주파수를 갖는 Atmega128을 사용하였으며, 마이크로 컨트롤러를 이용하여 Boost converter의 스위칭 주파수를 제어하였다. 또한, ADC 기능을 이용하여 바이어스 전압 증폭부가 전압을 승압시킬 때 +500Vdc를 넘지 않도록 과전압 제어 알고리즘을 이용하여 커패시터에 충전하는 전압을 제어하였다. 과전압 제어 알고리즘은 커패시터에 충전되는 전압이 설정치보다 높게 설정되면 IGBT에 인가되는 스위칭 주파수를 off하는 방식을 사용하였으며, 설정 전압에서 5%방전되면 다시 동작하도록 설계하였다.

(2) 공통 이미터 증폭기 설계

그림 3.132은 공통 이미터 증폭기 회로를 보인다. 공통 이미터 증폭기를 구성하는 BJT 소자로 BU508AW[STMicroelectronics, USA]를 선정하였다. 선정한 소자는 +500Vdc의 전압이 인가될 때 최대 전류 100mA의 성능을 내는 NPN 타입의 고전압 트랜지스터이다. 따라서 PVDF film을 vibration actuator로 구동시킬 때 필요한 높은 바이어스 전압을 공급하기에 적절한 소자이다.

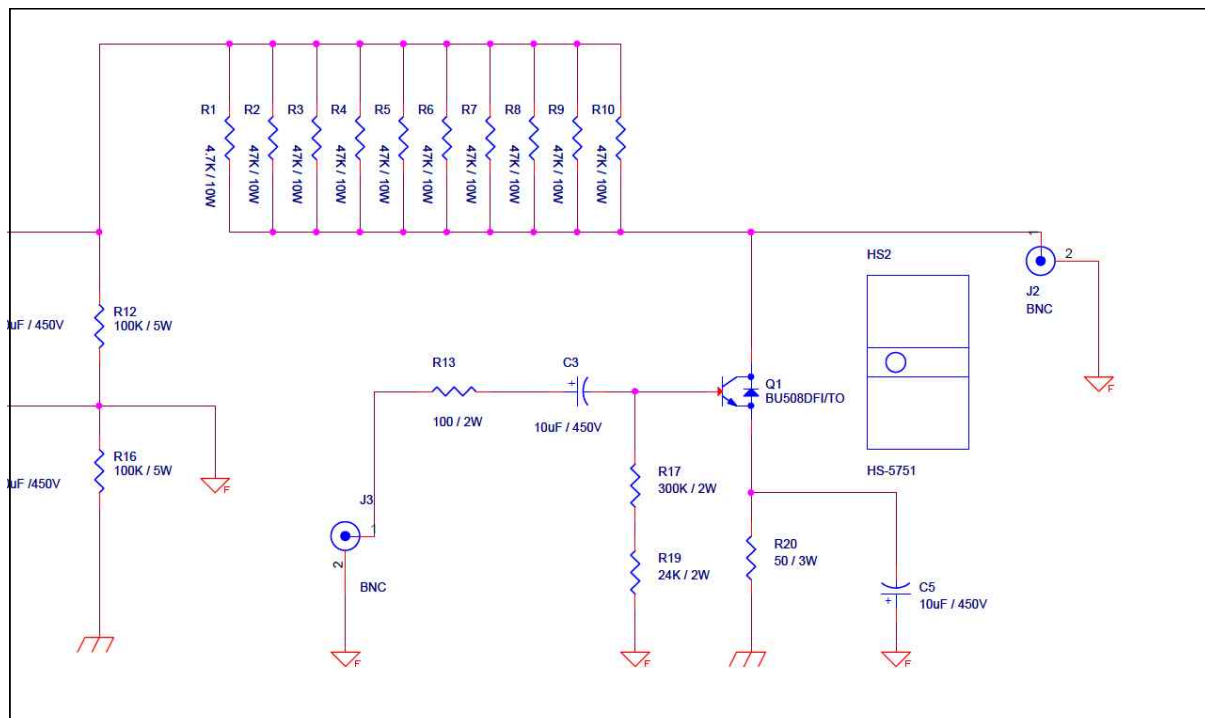


그림 3.132 공통 이미터 증폭기 회로

PVDF film은 임피던스 값이 주파수에 따라서 변화하기 때문에 공통 이미터 증폭기의 주변 소자를 수식을 이용하여 선정하고 시뮬레이션 툴을 통해서 검증하였다.

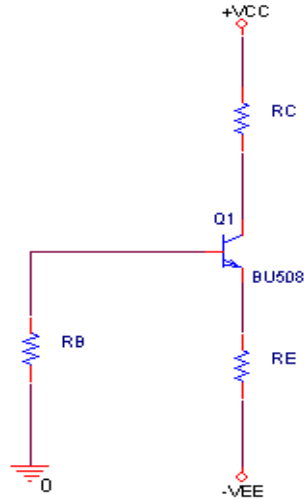


그림 3.133 공통 이미터 증폭기의 직류 해석 회로

그림 3.133는 공통 이미터 증폭 회로를 직류 해석한 회로로 식 3.60~3.62을 얻을 수 있다.

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E(\beta + 1) + R_B} \quad (3.60)$$

$$I_C = \beta I_B \quad (3.61)$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B \quad (3.62)$$

표 3.43 BU508AW의 최대 동작 조건

구분	β	V_{CC} (V)	V_{EE} (V)	V_{BE} (V)	I_C (A)
값	10 - 30	350	350	1.1	0.1

표 3.43를 이용하여 BU508AW소자의 최대 동작 조건을 만족하는 소자 값은 표3.44에서 볼 수 있다.

표 3.44 BU508AW의 최대 동작 조건을 만족하는 소자 값

구분	R_C (K Ω)	R_E (K Ω)	R_B (K Ω)
값	3.5	0.154	100

표 3.44을 통하여 BU508AW를 구동하기 위한 소자들의 최적 값을 이론적으로 계산할 수 있었다. 그러나 실제 동작하는 회로에서 공통 이미터 증폭기를 설계하였을 때 각 소자의 특성과 소자들이 가지고 있는 물리적인 한계성(발열, 전류한계치, 내압 등) 때문에

값의 변경을 필요로 한다. 따라서 개발한 PVDF film용 BJT 증폭기의 경우 표 3.43에서 보이는 값으로 소자를 선정하였다.

표 3.45 개발한 PVDF film용 BJT 증폭기에서 선정한 소자 값

구분	$R_C(K\Omega)$	$R_E(K\Omega)$	$R_B(K\Omega)$
값	4.7	0.050	324

그림 3.134은 표 3.45에서 선정한 값을 시뮬레이션 툴로 검증한 결과이다.

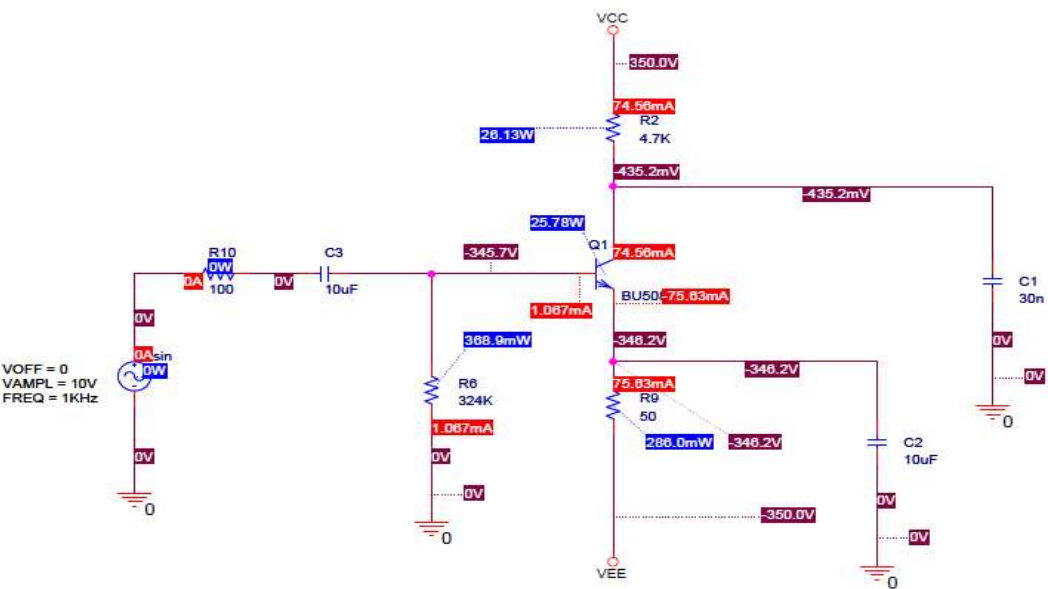


그림 3.134 공통 이미터 증폭기의 시뮬레이션 결과

그림 3.135는 주파수가 1KHz이고 전압이 20V_{P-P}인 정현파 신호를 공통 이미터 증폭기에 인가했을 때 PVDF film 양단에 인가되는 전압 파형과 전류 파형의 시뮬레이션 결과를 보인다. 그림에서 위쪽에 위치한 파형이 전압 파형이며, 아래쪽에 위치한 파형이 전류 파형이다. 그림 3.135에서 보이는 바와 같이 공통 이미터 증폭기에서 사용한 BJT의 증폭률에 한계로 인하여 출력 신호가 Cutoff 되는 현상을 보이지만 PVDF film에 최대 전압과 전류를 공급할 수 있다.

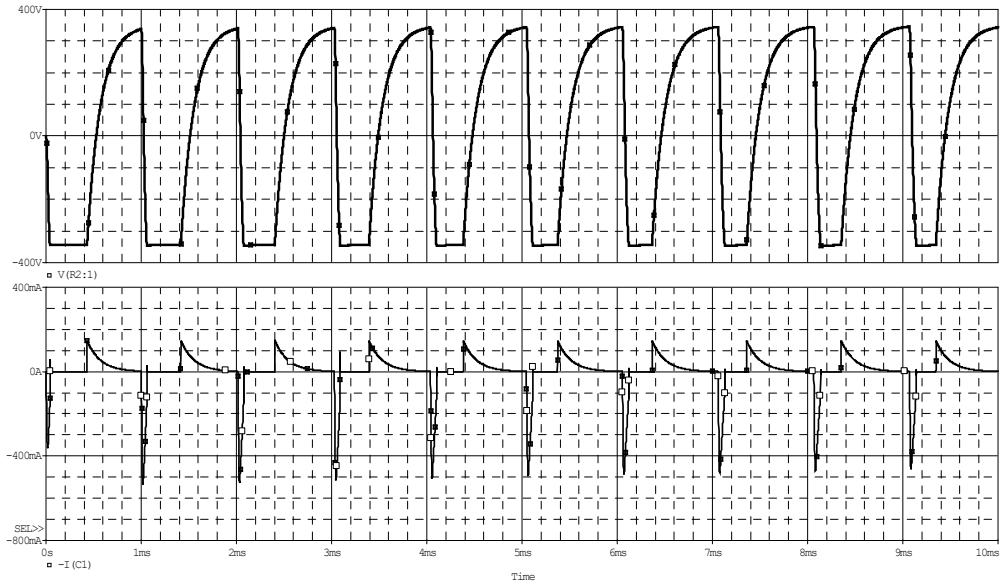


그림 3.135 공통 이미터 증폭기의 전압과 전류 파형 시뮬레이션 결과

(3) PVDF film 구동용 BJT 증폭기 제작

그림 3.136은 PVDF film actuator를 효과적으로 구동하기 위하여 개발한 BJT 증폭기이다. 개발한 BJT 증폭기는 앞에서 설명한대로 바이어스 전압 증폭부와 공통이미터 증폭기로 이루어져 있으며, 전원 분리를 위해서 포토커플러와 절연형 DC-DC 컨버터를 사용하였다. 그림 2-7에서 보인바와 같이 그림 중앙 하단부에는 ATmega128을 사용한 바이어스 전압 제어보드가 위치되며 좌측 상단부에는 입력 전압을 승압시키는 스위칭 회로부와 승압된 전압을 저장하는 커패시터 회로부로 구성된 바이어스 전압 증폭부가 위치한다. 그리고 우측 상단부에는 PVDF film에 전압을 인가하는 공통 이미터 증폭기의 주변 소자들이 위치하고 우측 하단부에는 BJT가 위치한다.

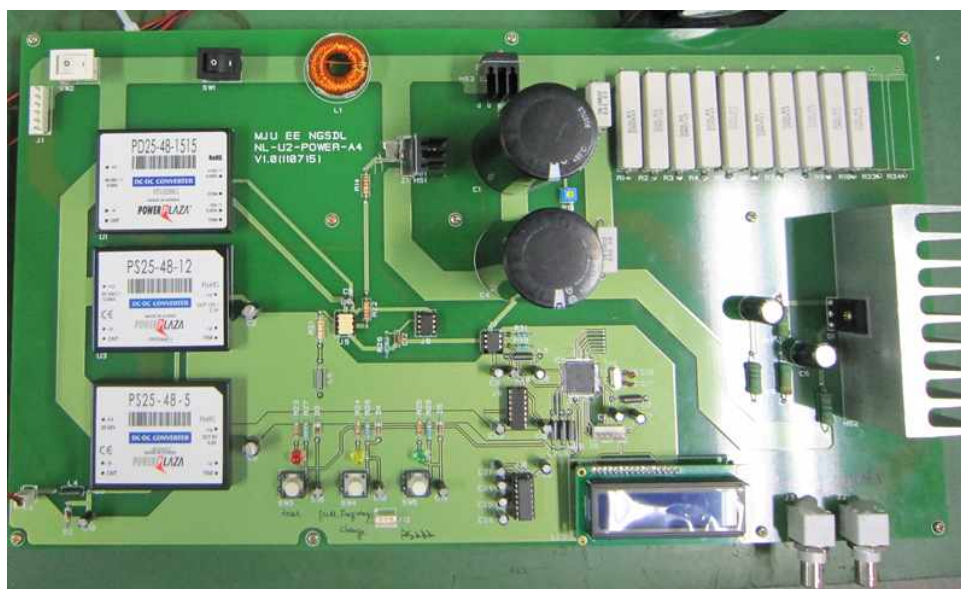


그림 3.136 PVDF film 구동용 BJT 증폭기

(4) PVDF film 구동용 BJT 증폭기 성능 실험

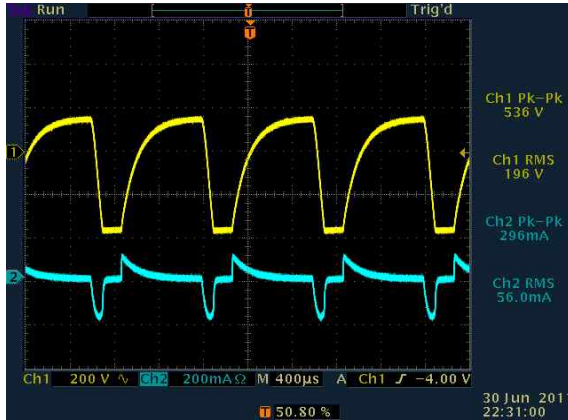
PVDF film을 구동하기 위하여 개발한 파워 드라이버의 성능 실험 구성은 그림 3.137에 보인다. 성능 실험에서 개발한 PVDF film 구동용 BJT 증폭기의 출력 전압 파형은 오실로스코프를 이용하여 측정하였고, PVDF film actuator에 흐르는 전류 측정은 전류 증폭기와 전류 프로브를 이용하여 측정하였다.



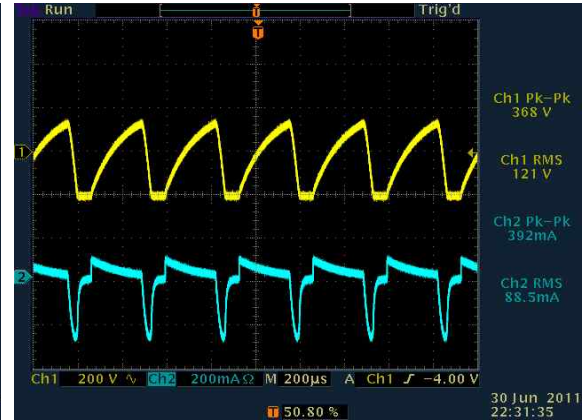
그림 3.137 PVDF film 구동용 BJT 증폭기 실험 환경

실험은 공통 이미터 증폭기에 입력 신호 주파수를 1KHz, 3KHz, 5KHz, 6KHz, 10KHz 까지 가변하면서 진행하였으며, 각 해당 주파수에 따라서 PVDF film의 출력 파형과 출력 전류를 측정하였다. 개발한 PVDF film actuator 구동용 BJT 전압 증폭기의 최대 출력은 70W까지 도달할 수 있으나 출력 부하로 사용되는 PVDF film이 인가되는 주파수에 따라 임피던스 값이 변하는 특성 때문에 최대 20W까지의 출력만을 내도록 설계하였다.

그림 3.138은 PVDF film 구동용 BJT 증폭기의 출력을 오실로스코프를 이용하여 측정한 파형이다. 입력 신호는 전압을 $20V_{P-P}$ 의 정현파로 인가하였으며 이때의 동작 주파수는 각각 1KHz와 3KHz를 인가하였다. 설계한 대로 PVDF film에서 소비하는 전력은 1KHz에서는 10.98W, 3KHz에서는 10.71W의 구동 전력으로 소비하고 있다.



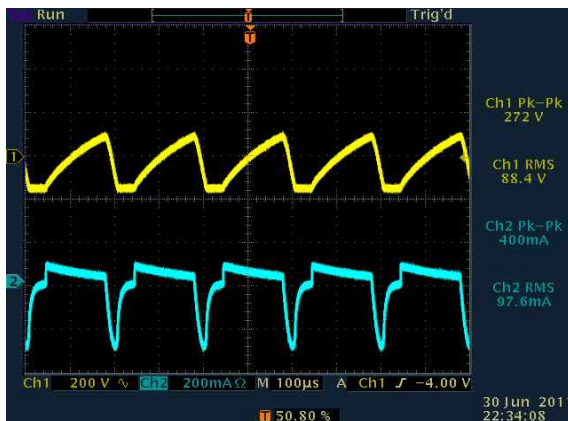
(a)



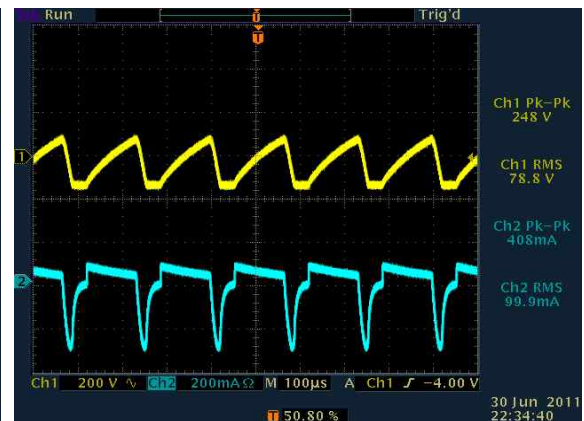
(b)

그림 3.138 1KHz(a)와 3KHz(b)에서 PVDF film의 출력 파형 측정

그림 3.139은 전압이 $20V_{P-P}$ 의 정현파이고 동작 주파수가 5KHz일 때와 6KHz일 때의 출력 파형을 보인다. 이 때 PVDF film에서 소비되는 구동 전력은 5KHz에서는 8.63W, 6KHz에서는 7.87W이다. 그림 3.139에서 볼 수 있듯이 PVDF film의 임피던스 값이 작아 지므로 양단에 인가되는 전압의 크기는 작아지고 전류의 크기는 커지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 전압 값이 더 작아지기 때문에 전체적으로 소비하는 전력은 작아지는 특징을 보인다.



(a)



(b)

그림 3.139 5KHz(a)와 6KHz(b)에서 PVDF film의 출력 파형 측정

그림 3.140은 전압이 $20V_{P-P}$ 의 정현파이고 동작 주파수가 10KHz일 때의 출력 파형을 보인다. 이때 PVDF film에서 소비되는 구동 전력은 5.88W이다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 PVDF film의 임피던스 값이 가장 작으므로 인가되는 전압의 크기는 앞서 측정된 파형보다 가장 작고, 전류의 크기는 큰 것을 확인 할 수 있다.

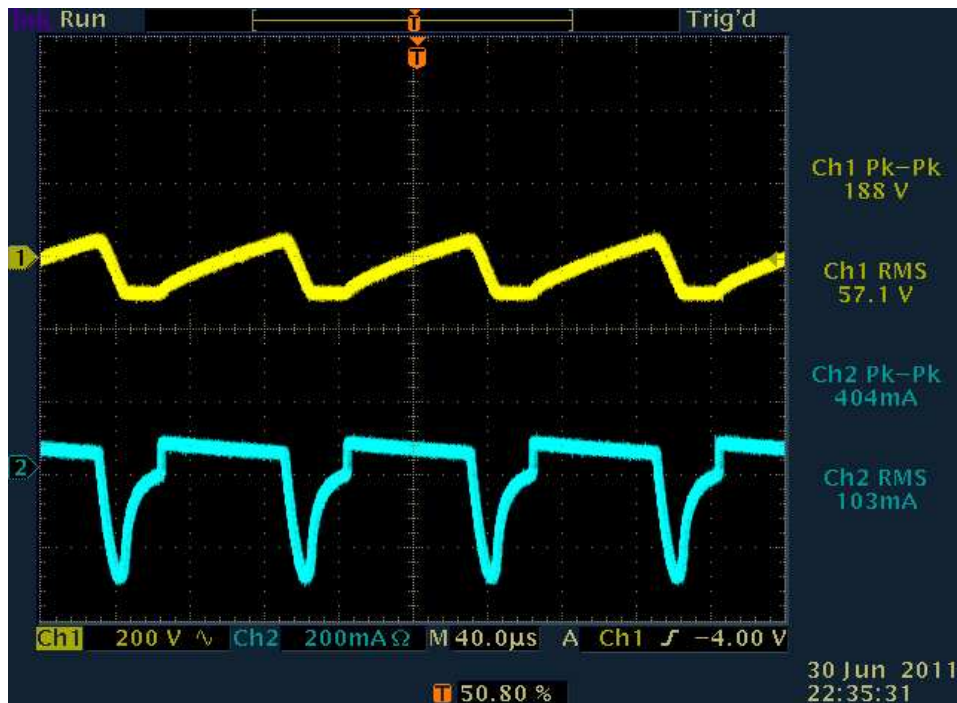


그림 3.140 10KHz에서 PVDF film의 출력 파형 측정

개발한 PVDF film 구동용 BJT 증폭기는 공통 이미터 증폭기에서 사용한 BJT의 증폭률에 한계로 인하여 출력 신호가 Cutoff 되는 현상을 보이지만 설계한 대로 PVDF film에 최대의 전압과 전류를 전달하는 성능을 보였다.

나. PVDF film 구동용 파워드라이버

개발한 파워 드라이버는 PVDF film을 진동기로 사용할 때 효과적으로 동작할 수 있도록 설계된 PVDF film 구동용 파워 드라이버로 주파수가 변화할 때 임피던스 값의 변화가 발생하여도 파워 드라이버가 PVDF film에 최대한 많은 전력을 공급할 수 있도록 설계하였다. 그림 3.141은 개발한 PVDF film 구동용 파워 드라이버의 블록 다이어그램으로, 크게 입력 전압 증폭부, 출력 전압 증폭부, 그리고 파워 드라이버 제어부로 구성된다.

입력 전압 증폭부는 Boost Converter 블록으로 구성되며 파워 드라이버 제어부로부터 PWM (Pulse-Width Modulation) 신호를 받아서 입력 전압 +48Vdc를 약+200Vdc까지 증압시킨다. 출력 전압 증폭부는 IGBT 4개를 이용한 Full-Bridge 회로와 R-L-PVDF film 직렬 임피던스 정합 회로로 구성되며 파워 드라이버 제어부로부터 PWM 신호를 받아서 구동한다. 발생하는 전압은 입력되는 PWM 신호 주기를 갖는 펄스 파형의 전압으로 약 400[VP-P]까지 발생되며, 출력 전압과 전류를 정현파로 변환하는 R-L-PVDF film 직렬 임피던스 정합 회로를 이용하여 PVDF film에 약 400[VP-P]의 정현파를 인가한다.

마지막으로 파워 드라이버 제어부는 마이크로컨트롤러와 파워 드라이버의 동작 상태를 표시할 수 있는 LCD (Liquid Crystal Display)로 구성되며 입력 전압 증폭부의 PWM 제어, 출력 전압 증폭부의 PWM 제어, 그리고 파워 드라이버의 과전압 충전을 제어한다.

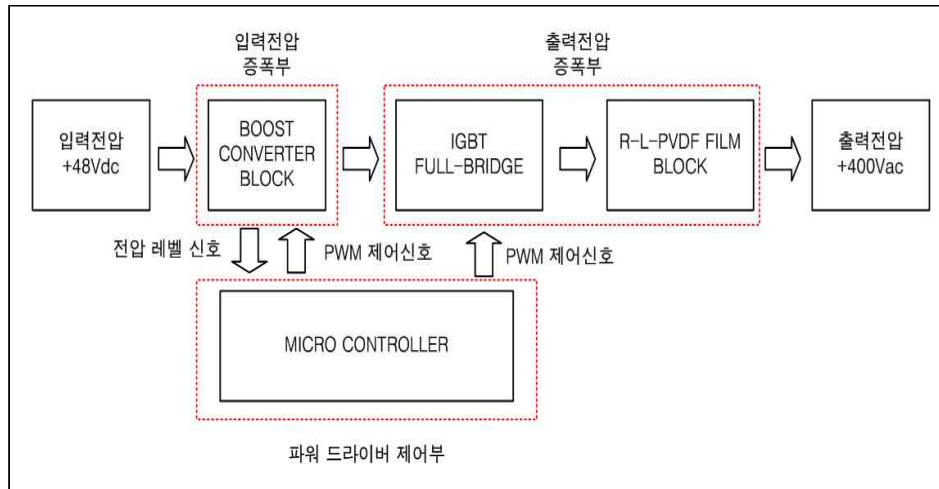


그림 3.141 PVDf film 구동용 파워 드라이버

(1) 입력 전압 증폭부

그림 3.142의 회로는 사용한 입력 전압 증폭부로 +48[Vdc]의 입력전압을 약 +200[Vdc]까지 승압시키는 비 절연형 부스트 컨버터 방식을 사용하였다.

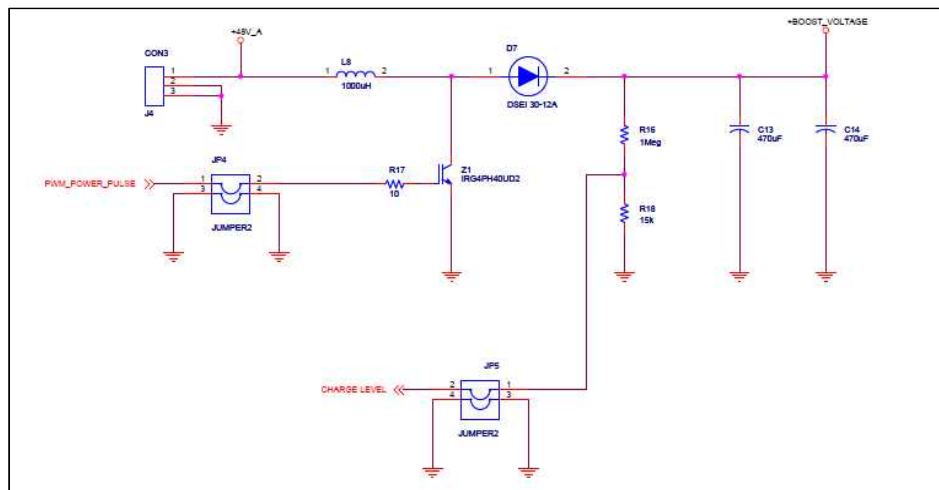


그림 3.142 입력 전압 증폭부 회로

부스트 컨버터는 DC-DC 컨버터의 한 종류로 입력 전압을 인덕터에 저장하였다가 스위치의 on/off 동작을 통해서 인덕터에 저장된 에너지를 출력으로 내보내는 방식으로, 항상 입력 전압보다 출력 전압이 높은 특징을 갖는다. 또한 입력 전압 증폭부는 인덕터, IGBT, FRD, 그리고 커패시터로 구성되어 있으며 파워 드라이버 제어부로부터 PWM 신호를 받아 IGBT를 스위칭 함으로써 인덕터의 저장된 전압을 커패시터로 저장하여 높은 출력 전압을 발생할 수 있도록 회로를 구현하였다. 입력 전압 증폭부에 사용한 소자들은 식 3.63와 식 3.64를 이용하여 L 값과 C값은 구하였다. 이 때 소자 선정 시 기준이 되는 스위칭 주파수는 50KHz, 출력 전압 리플은 200mV, 출력 전류의 범위는 전류는 0.1A에서 1A까지로 정하였다.

$$L = \frac{V_i}{2I_{omin}} D(1-D)T_s \quad (3.63)$$

$$C = \frac{I_{omax}}{\Delta v_o} DT_s \quad (3.64)$$

(2) 출력 전압 증폭부

출력 전압 증폭부는 IGBT 4개를 이용하여 제작한 Full-Bridge 회로와 PVDF film 임피던스 정합 회로로 구성되며 파워 드라이버 제어부로부터 PWM 신호를 받아서 구동한다. Full-Bridge 회로에서는 입력되는 PWM 신호 주기를 갖는 펄스 파형의 고전압 출력이 발생되며 이때 발생하는 출력은 약 400[Vp-p]까지 낼 수 있도록 설계하였다. 그림 3.143은 전형적인 Full-Bridge 회로를 보인다. Full-Bridge 회로는 Unipolar 전압 출력을 Bipolar의 전압으로 출력할 수 있기 때문에 입력 전압 증폭부에서 Unipolar 전압만 만들어도 되는 장점이 있다.

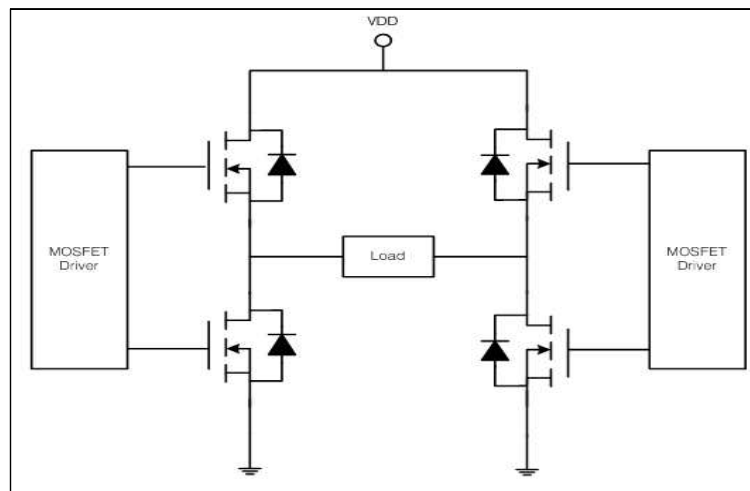


그림 3.143 Full-Bridge 회로

그림 3.154는 개발한 출력 전압 증폭부 회로를 보인 것으로 IGBT와 MOSFET Driver, R-L-PVDF film직렬 정합 회로를 보이며 Full-Bridge 회로에 입력 전압 증폭부에서 발생시킨 Unipolar 전압을 사용하도록 회로를 구현하였다.

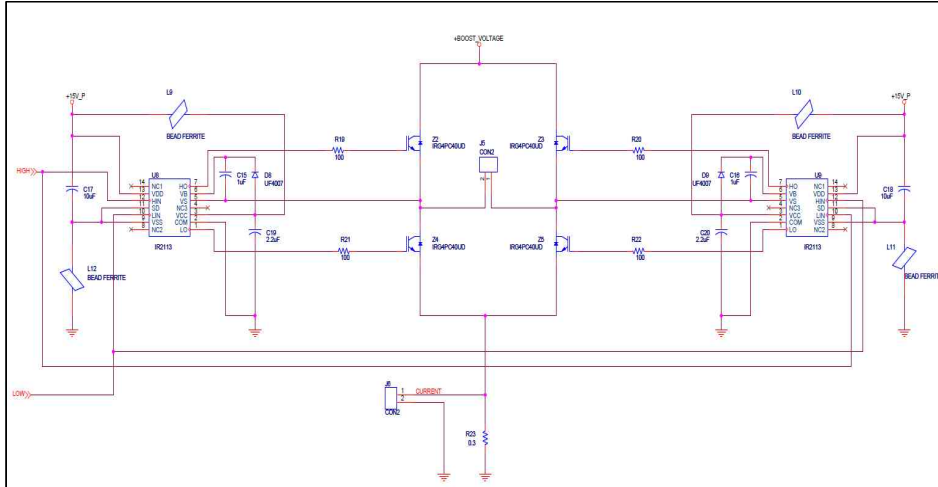


그림 3.144 출력 전압 증폭부 회로

(3) PVDF film 임피던스 정합 회로

그림 3.145에서 보인 바와 같이 PVDF film은 커패시터의 특성을 갖기 때문에 Full-Bridge에서 발생한 펄스 전압이 인가되면 전압 레벨이 바뀌는 시간에만 전류가 흐르는 현상이 발생한다. 또한, 순간적인 피크 치의 전류가 흐르기 때문에 과전류로 인하여 PVDF film이 손상될 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 PVDF film 양단에 인가되는 구형파의 전압을 정현파로 변화시키고 전류의 파형도 순간 피크 치만 발생하는 파형에서 정현파로 변경시키는 PVDF film 임피던스 정합 회로를 그림 3.146에 보인다.

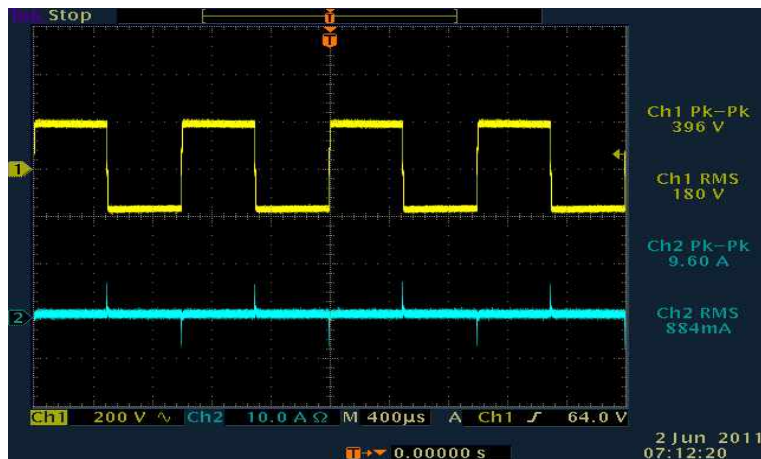


그림 3.145 PVDF Film 양단에 인가되는 전압

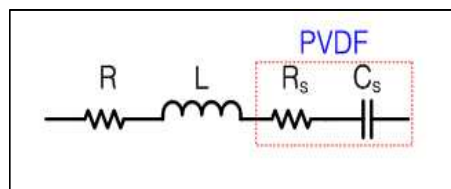


그림 3.146 R-L-PVDF film 직렬회로

PVDF film 임피던스 정합 회로로 R-L-PVDF film 직렬 회로를 이용하였기 때문에 R 값과 L 값 그리고 PVDF film의 크기에 따라서 전류가 불안정하게 흐를 수 있을 수 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 식 3.65에 보인 것처럼 R-L-C 직렬 회로 방정식을 세워 전류를 안정하게 공급할 수 있는 R 값과 L 값을 구하였다.

$$L \frac{di(t)}{dt} + (R + R_s)i(t) + \frac{1}{C_s} \int i(t)dt = V \quad (3.65)$$

$$\frac{d^2i(t)}{dt^2} + \frac{(R + R_s)}{L} \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC_s} i(t) = 0 \quad (3.66)$$

또한 전류 $i(t)$ 의 해를 구하기 위하여 특성 방정식을 세우고 해의 범위를 구하면 식 3.67과 식 3.68로 전류 $i(t)$ 가 가질 수 있는 해의 범위를 얻을 수 있었다.

$$\left(\frac{R + R_s}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC_s} < 0 \quad (3.67)$$

$$\left(\frac{R + R_s}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC_s} \geq 0 \quad (3.68)$$

식 3.67의 범위를 갖는 해의 경우를 Under damped라고 하며 시스템에 단위 계단 응답을 넣었을 때 출력 값이 감쇠 진동하는 경우로 R-L-PVDF film 직렬 회로에서 전류 $i(t)$ 가 감쇠한다. 식 3.68의 범위를 만족하는 해의 경우는 Critical damped와 Over damped 의 경우로 R-L-PVDF film 직렬 회로에서 안정적으로 전류 $i(t)$ 가 흐를 수 있다. 따라서 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로에 안정적인 전류를 흐를 수 있는 R 값과 L 값을 구하기 위하여 아래 식 3.69을 이용하였다.

$$f_{pdf} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}} \quad (3.69)$$

표 3.45는 PVDF film 임피던스 정합 회로의 최적 값을 찾기 위하여 주파수에 따라 변하는 PVDF film의 특성 값 중 PVDF film 평형 회로 모델을 구성하는 R_s 값과 C_s 값을 LCR 미터기로 측정한 결과이다. PVDF film을 진동기로 사용하기 때문에 인가해주는 주파수에서 PVDF film이 최대한 많은 진동 에너지를 발생할 수 있도록 공진 주파수를 만족하는 인덕터 값을 구하였다. 인가해주는 주파수를 공진 주파수(f_{pdf})로 정하고 표 3.46에서 보이는 C_s 값을 식 3.69에 대입하여 인덕터 값을 구한 결과는 표 3.47에 정리하였다.

표 3.46 PVDF film의 R_s 값과 C_s 값 측정 결과

Freq. [KHz]	R_s [Ω]	C_s [nF]
1	207.28905	30.776
3	166.07308	30.455
5	156.09496	29.881
6	154.29888	29.849
10	138.36564	28.690
15	130.03195	27.484
20	121.43095	26.317

표 3.47 PVDF film 임피던스 정합 회로의 최적 인덕터 값

인가 주파수 [KHz]	공진 주파수 [KHz]	Inductance [mH]
1	1	822.1
3	3	92.3
5	5	33.9
6	6	23.5
10	10	8.8
15	15	4.1
20	20	2.4

전류가 감쇠 진동하지 않고 일정하게 흐를 수 있는 저항 값을 구하기 위하여 R-L-PVDF film 직렬 회로에서 전류가 최대로 흐를 수 있는 조건인 식 3.70을 정리하면 다음과 같다.

$$R + R_s \geq \frac{2L}{\sqrt{LC_s}} \quad (3.70)$$

표 3.46와 표 3.47으로부터 인가 주파수에 해당하는 R_s 값과 C_s 값 그리고 인덕터(L) 값을 식 3.70에 대입하여 R-L-PVDF film 직렬 회로에서 전류의 감쇠 진동을 막기 위한 저항 값을 구한 결과는 표 3.48에 보인다. 표 3.49에서는 R-L-PVDF film 직렬 회로에서 전류가 감쇠 진동을 하지 않고 일정하게 전류를 흐르게 할 수 있는 최적 저항 값을 PVDF film에 인가되는 주파수 별로 보인다.

표 3.48 PVDF film 임피던스 정합 회로의 최적 저항 값

인가 주파수 [KHz]	공진 주파수 [KHz]	Resistance [$K\Omega$]
1	1	10.331
3	3	3.480
5	5	2.128
6	6	1.775
10	10	1.108
15	15	0.771
20	20	0.604

그림 3.147은 인가 주파수가 1KHz일 때 표3.48에서 구한 공진 주파수를 맞추기 위한 L값과 표 3.46에서 구한 전류 감쇠 진동을 막기 위하여 R 값을 구한 데이터로 최소 저항 값이 500[Ω]씩 증가하였을 때 PVDF film 임피던스 정합 회로부의 안정도를 보인 그래프이다. 그림 3.147에서 볼 수 있듯이 최소 필요 저항 값이 증가할수록 흐를 수 있는 전류 값은 점점 감소하게 되며, 아래 그림에서 볼 수 있듯이 R-L-PVDF film 회로부가 안정한 시스템을 유지하는 것을 볼 수 있다.

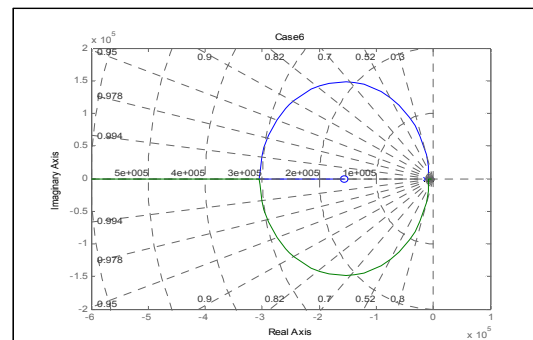
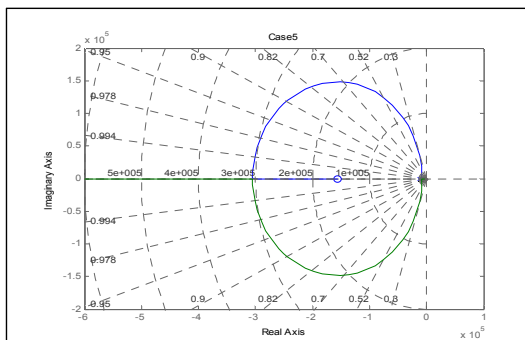
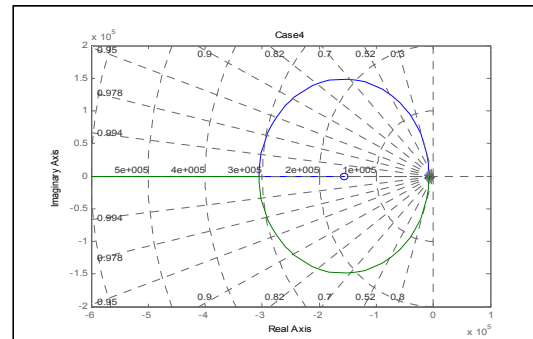
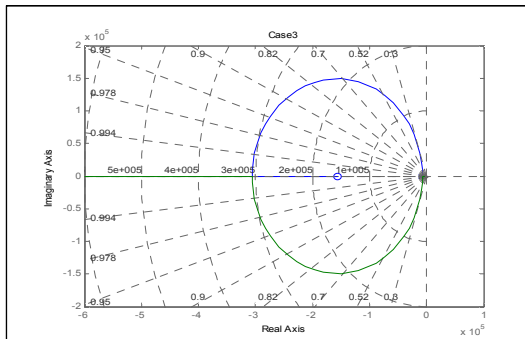
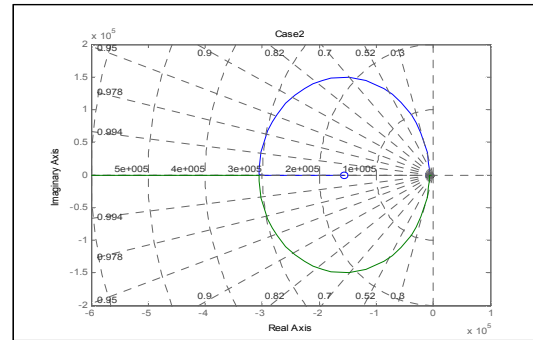
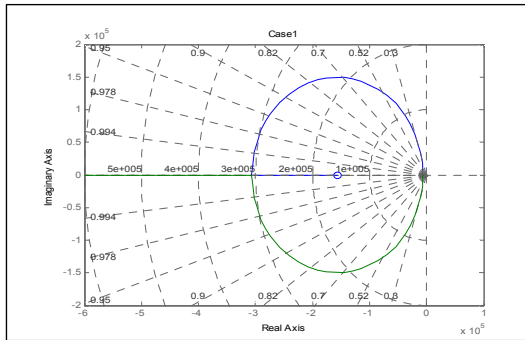
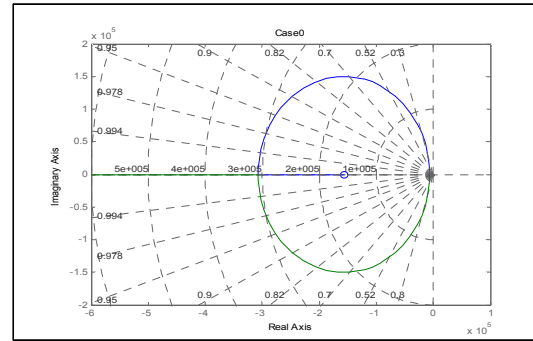
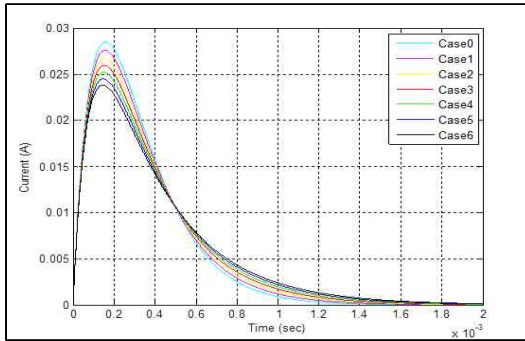


그림 3.147 인가 주파수 1KHz에서의PVDF film 임피던스 정합 회로부의 안정도

그림 3.148은 인가 주파수가 3KHz일 때 표 3.56에서 구한 공진 주파수를 맞추기 위한 L값과 표 3.56에서 구한 전류 감쇠 진동을 막기 위하여 R 값을 구한 데이터로 최소 저항 값이 500[Ω]씩 증가하였을 때 PVDF film 임피던스 정합 회로부의 안정도를 보인 그래프이다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 최소 필요 저항 값이 증가할수록 흐를 수 있는 전류 값은 점점 감소하게 되며, R-L-PVDF film 회로부가 안정한 시스템을 유지하는 것을 볼 수 있다.

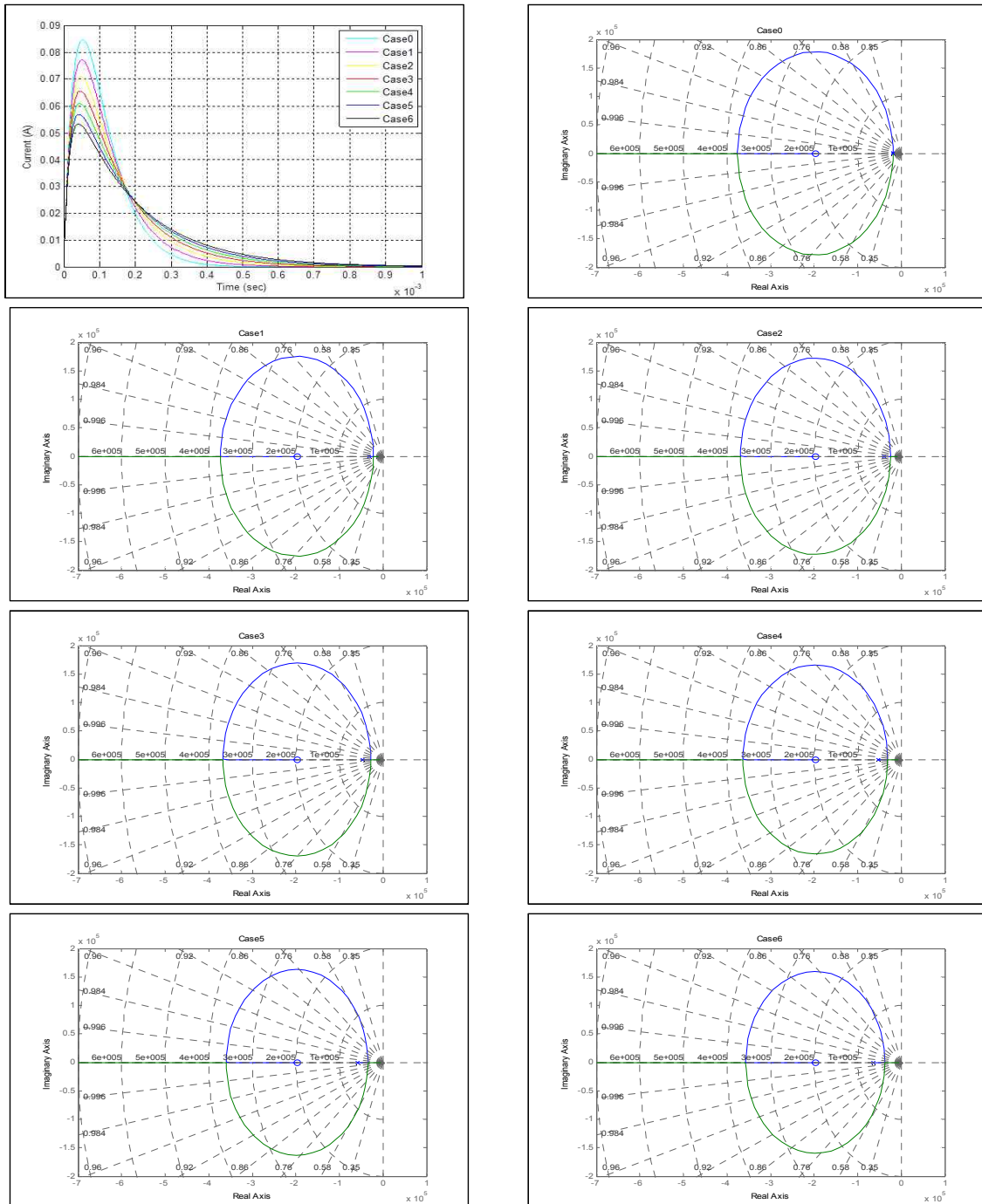


그림 3.148 인가 주파수 3KHz에서의 PVDF film 임피던스 정합 회로부의 안정도

그림 3.149는 인가 주파수가 5KHz일 때 표 3.56에서 구한 공진 주파수를 맞추기 위한 L값과 표 3.56에서 구한 전류 감쇠 진동을 막기 위하여 R 값을 구한 데이터로 최소 저항 값이 500[Ω]씩 증가하였을 때 PVDF film 임피던스 정합 회로부의 안정도를 보인 그래프이다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 최소 필요 저항 값이 증가할수록 흐를 수 있는 전류 값은 점점 감소하게 되며, R-L-PVDF film 회로부가 안정한 시스템을 유지하는 것을 볼 수 있다.

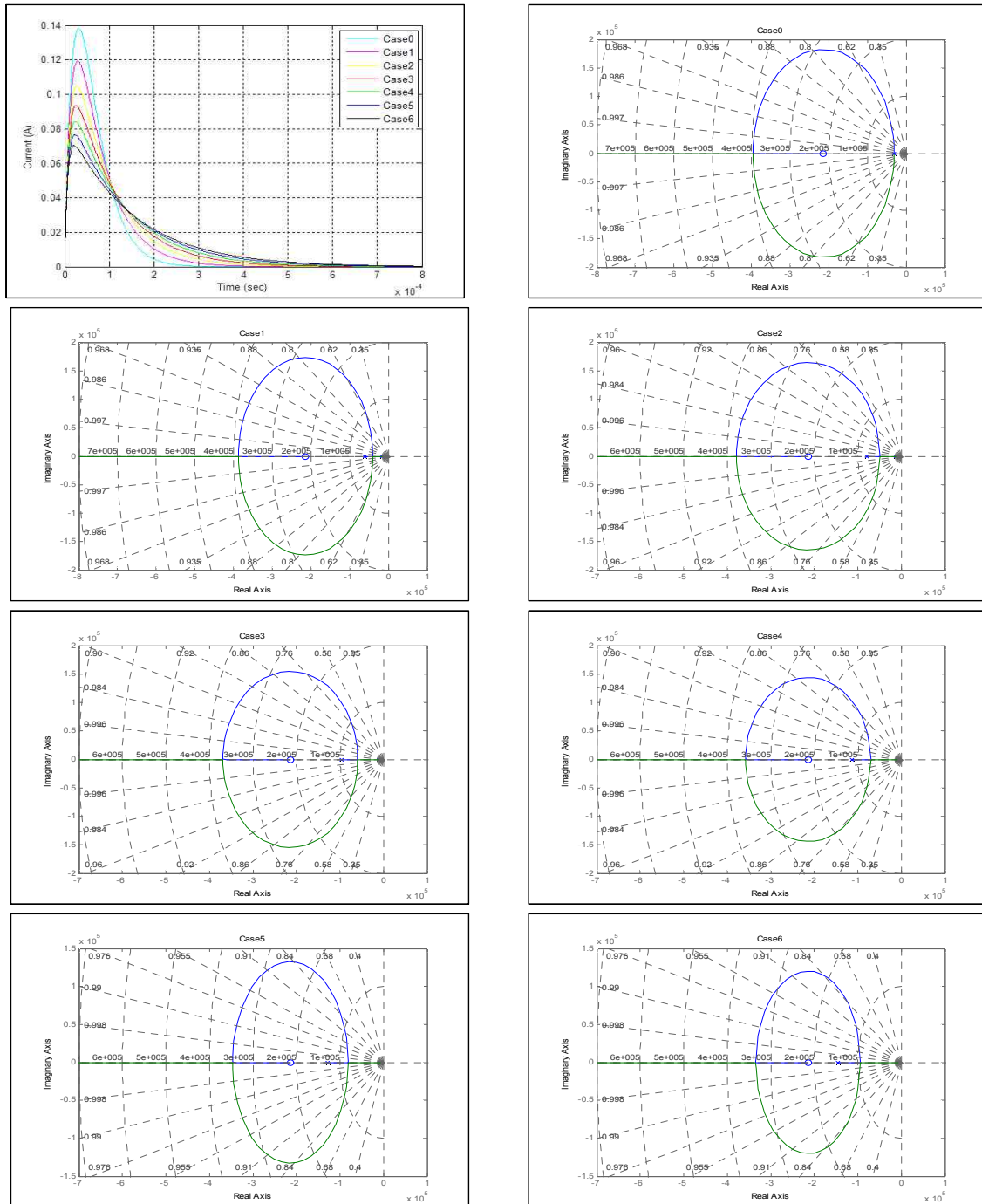


그림 3.149 인가 주파수가 5KHz일 때 PVDF film 임피던스 정합 회로부의 안정도

그림 3.150은 인가 주파수가 10KHz일 때 표 3.56에서 구한 공진 주파수를 맞추기 위한 L값과 표 3.56에서 구한 전류 감쇠 진동을 막기 위하여 R 값을 구한 데이터로 최소 저항 값이 500[Ω]씩 증가하였을 때 PVDF film 임피던스 정합 회로부의 안정도를 보인 그래프이다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 최소 필요 저항 값이 증가할수록 흐를 수 있는 전류 값은 점점 감소하게 되며, R-L-PVDF film 회로부가 안정한 시스템을 유지하는 것을 볼 수 있다.

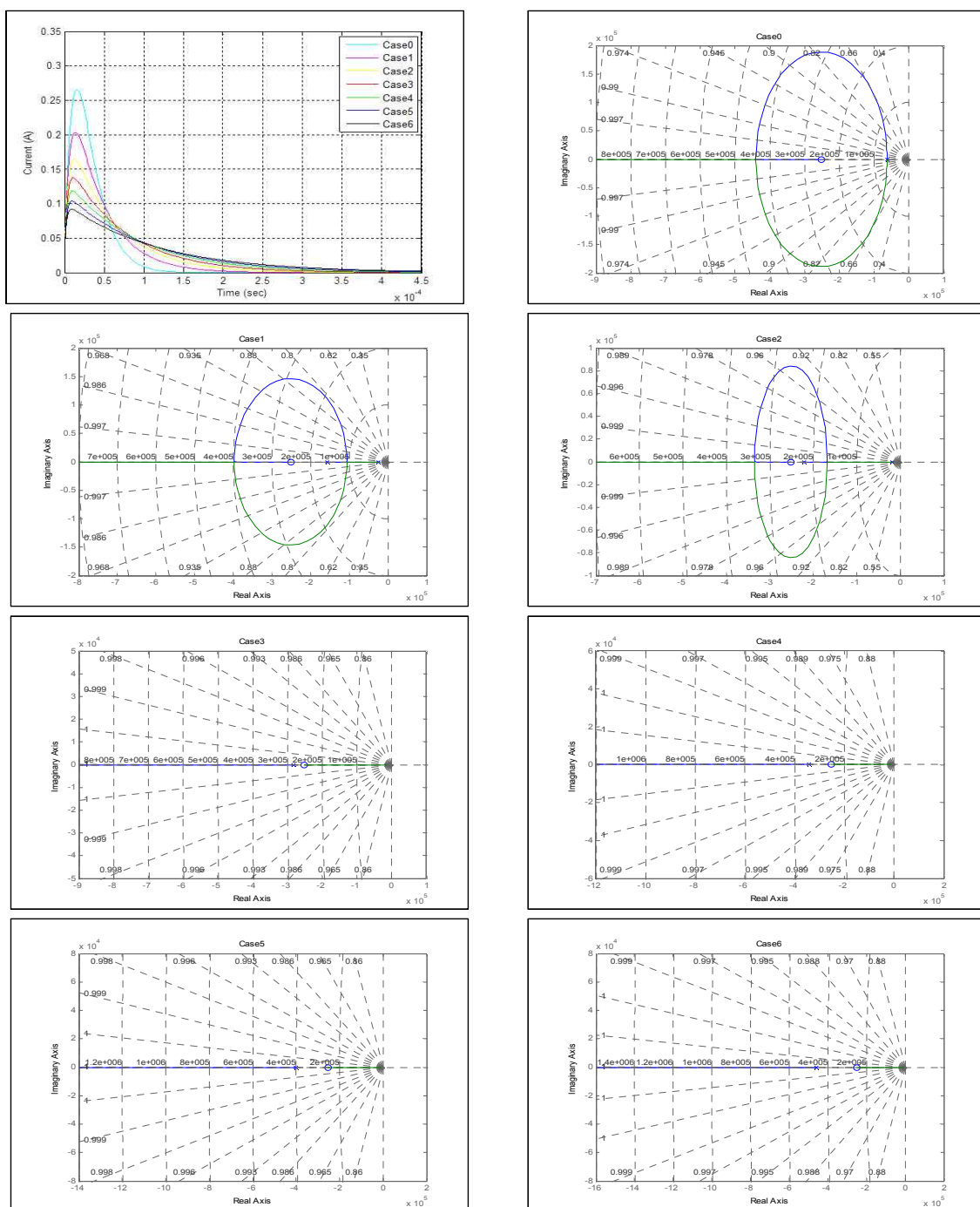


그림 3.150 인가 주파수가 10KHz일 때 PVDF film 임피던스 정합 회로부의 안정도

표 3.57에 보인 PVDF film 임피던스 정합회로의 최적 저항 값의 변화에 따라서 PVDF film 임피던스 정합 회로의 안정도 평가를 위하여 PVDF film 임피던스 정합 회로에 인가되는 주파수 중 1KHz, 3KHz, 5KHz 그리고 10KHz에 대하여 MATLAB을 이용하여 PVDF film 임피던스 정합 회로의 안정도를 구하였다. 그 결과 모든 극점과 영점이 좌측에 위치하기 때문에 설계한 PVDF film 임피던스 정합회로는 매우 안정하다고 판단할 수 있다.

(4) 파워 드라이버 제어부

그림 3.151에서 보인 파워 드라이버 제어부는 Micro controller와 파워 드라이버의 동작 상태를 표시할 수 있는 문자 LCD (Liquid Crystal Display)로 구성되며 입력 전압 증폭부의 PWM 제어, 출력 전압 증폭부의 PWM 제어, 그리고 파워 드라이버의 과전압 충전을 제어하는 역할을 한다.

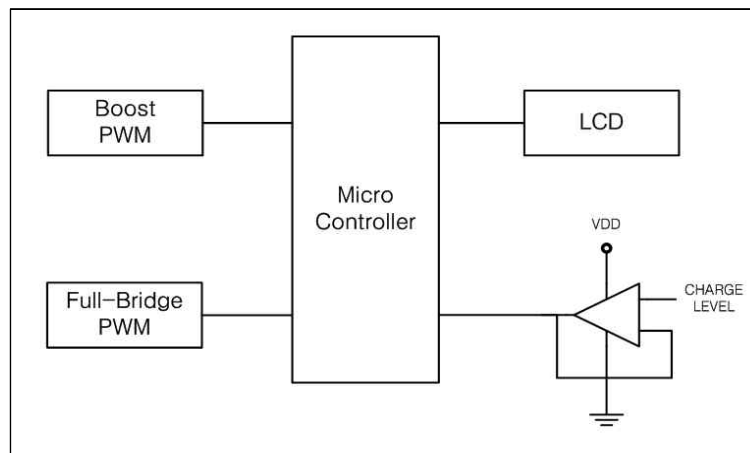


그림 3.151 파워 드라이버 제어부

(5) PVDF film 구동용 파워 드라이버 제작

그림 3.152는 PVDF film actuator를 효과적으로 구동하기 위하여 개발한 파워 드라이버의 구현을 보인다. 개발한 파워 드라이버는 앞서 설명한 바와 같이 입력 전압 증폭부, 출력 전압 증폭부, 드라이버 제어부로 이루어져 있으며, 전원 분리를 위해서 포토커플러와 절연형 DC-DC 컨버터를 사용하였다. 그림 3.152에서 보인 바와 같이 그림 좌측 상단부에는 ATmega128을 사용한 파워 드라이버 제어 보드가 위치하며, 좌측 하단부에는 PVDF film에 전압을 인가하는 출력 전압 증폭부 보드가 위치한다. 그리고 우측 하단부에는 입력 전압을 증압시키는 스위칭 보드와 증압된 전압을 저장하는 커패시터 보드로 구성된 입력 전압 증폭부가 위치하고 있다.

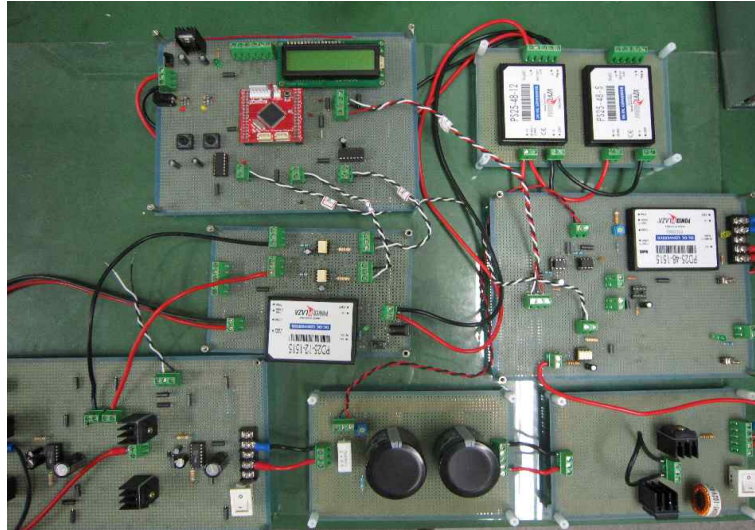


그림 3.152 PVDF film 구동용 파워 드라이버

(6) 개발한 파워 드라이버 성능 실험

PVDF film을 구동하기 위하여 개발한 파워 드라이버의 성능 실험 구성은 그림 3.153에 보인다. 성능 실험에서 개발한 파워 드라이버의 출력 전압 파형은 오실로스코프를 이용하여 측정하였고, PVDF film actuator에 흐르는 전류 측정은 전류 증폭기와 전류 프로브를 이용하여 측정하였다.



그림 3.153 PVDF film Actuator 구동용 파워 드라이버 실험 환경

실험은 전압 증폭부에 주파수가 1KHz, 3KHz, 그리고 6KHz인 입력 신호를 인가하였으며, 각 해당 주파수에 따라서 PVDF film의 출력 파형과 출력 전류를 측정하였다. PVDF film을 진동기로 동작시킬 때 효과적으로 PVDF film에 전압과 전류를 인가하기 위하여 R-L-PVDF film 직렬 회로를 구성하였으며, 이 때 전류를 일정하게 공급하기 위하여 공진 주파수를 맞춘 R값과 L값에 대한 소자 선정하였다. 실험에 사용한 임피던스

정합 회로 소자 값들은 출력 증폭부에서 사용한 각 파워 드라이버 소자들이 가진 특성의 한계점들을(발열, 전류, 소비전력, 크기 등) 고려하여 선정하였다.

표 3.49은 실험에 사용된 소자들의 값을 보인 것으로 내부 저항(R_s), 커패시터(C_s), 그리고 임피던스(Z)는 실험에서 사용한 PVDF film의 특성 값이다. L값과 R값은 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로를 구성하는 소자들로 전압 확대율 Q_C 의 값을 가능한 크게 하는 값으로 선정하였으며, 주파수가 증가할수록 그 값이 줄어드는 경향을 보이는 전압확대율 Q_C 와 Q_L 은 식 3.71와 식 3.72을 이용하여 구하였다.

$$Q_C = \frac{1}{2\pi f(R_s + R)C_s} \quad (3.71)$$

$$Q_L = \frac{2\pi fL}{(R_s + R)} \quad (3.72)$$

표 3.49 PVDF film 임피던스 정합 회로 선정 값

Freq.	Cs(nF)	Rs(Ω)	Z(K Ω)	L(mH)	R(Ω)	QC	QL
1KHz	30.78	207.3	5.17	800	4000	1.23	1.19
3KHz	30.45	166.1	1.75	100	1600	0.99	1.07
6KHz	29.85	154.3	0.90	20	1800	0.45	0.39

그림 3.154는 Full-Bridge 회로의 출력 파형으로 최대 출력은 약 400[Vp-p]이며 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로에 인가된다. 아래 파형 그림에서 채널 1은 회로에서 출력되는 전압 파형이며, 채널 2는 전류 파형이다.

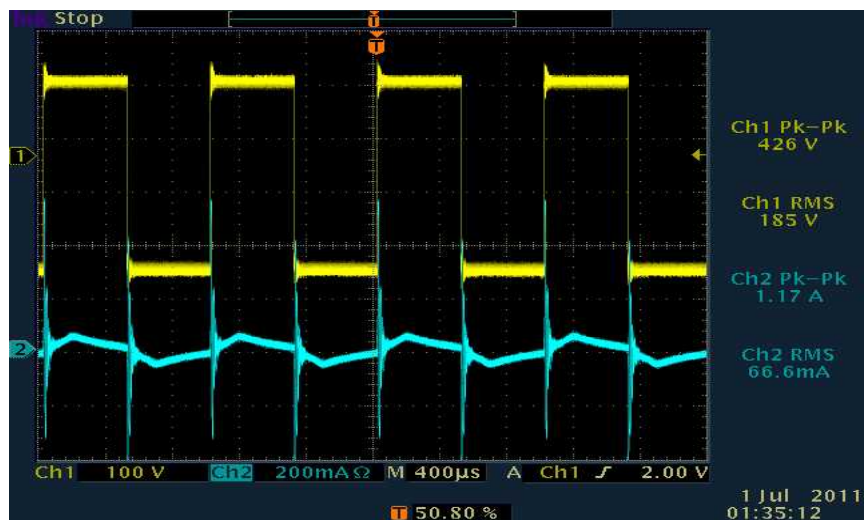


그림 3.154 Full-bridge 회로의 출력 전압

그림 3.155는 입력되는 주파수가 1KHz일 때 PVDF film 양단에 인가되는 전압이 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로를 통하여 구형파에서 정현파 형태로 전환되는 것을 보이며, 아래 그림에서 채널 1은 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로를 통해 PVDF film에 전달되는 전압 파형을 보이며, 채널 2는 R-L-PVDF film 임피던스 정합회로에 흐르는 전류 파형을 보인다.

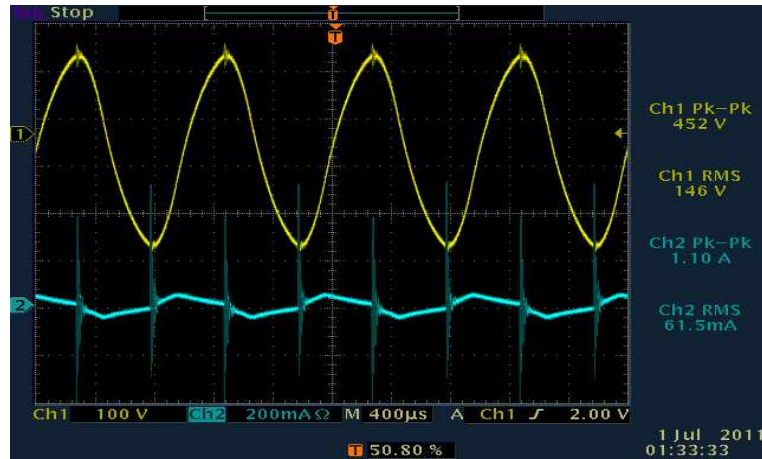


그림 3.155 PVDF film의 출력 파형 측정 (1KHz)

이 때, PVDF film에 전달되는 전력을 구하기 위하여 식 3.73를 이용하면 PVDF film에서 소비되는 전력은 8.98W임을 알 수 있다.

$$P_{pdf} = V_{rms} \times I_{rms} \quad (3.73)$$

그림 3.156과 그림 3.157은 파워 드라이버 제어부로부터 입력되는 PWM 스위칭 주파수가 변화될 때 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로를 통해서 PVDF film가 소비하는 전력의 변화를 보인다. 그림 3.156은 파형 측정기의 주기를 200[μs]로 설정하고 PWM 스위칭 주파수를 3KHz 인가할 때의 PVDF film에 전달되는 전압 파형(채널 1)과 전류 파형(채널 2)을 보인다. 그림 3.157은 파형 측정기의 주기를 100[μs]로 설정하고 PWM 스위칭 주파수를 6KHz를 인가하였을 때 PVDF film에 전달되는 전압 파형(채널 1)과 전류 파형(채널 2)을 보인다. 입력 주파수에 따라 PVDF film에 전달되는 전력을 식 3.73을 이용하여 구하면 3KHz에서는 16.64W 그리고 6KHz에서는 7.87W의 전력을 소비하고 있음을 알 수 있다.

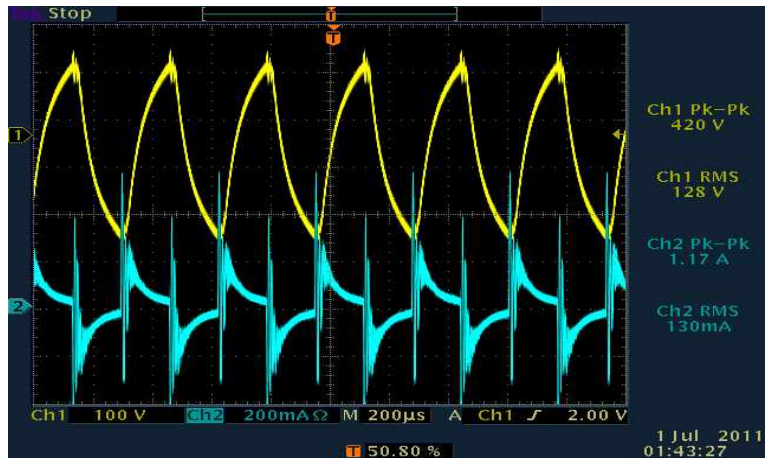


그림 3.156 3kHz에서의 PVDF film 출력 파형 측정

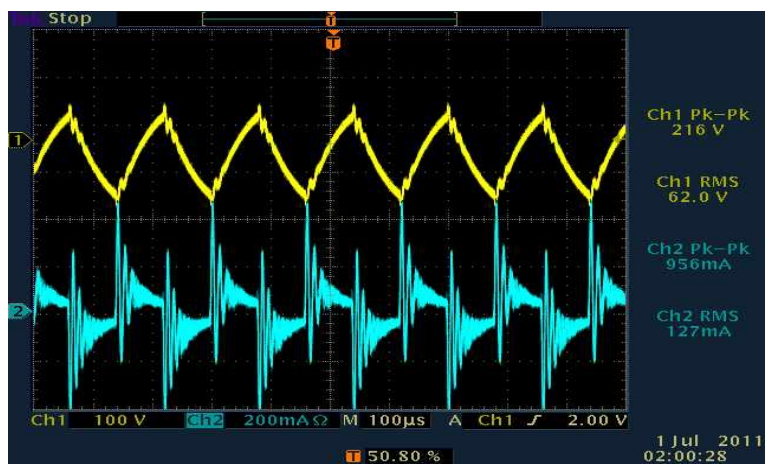


그림 3.157 6KHz에서의 PVDF film 출력 파형 측정

개발한 PVDF film 구동용 파워드라이버는 R-L-PVDF film 임피던스 회로를 통하여 PVDF film의 전기적 특성에 적합한 최대 출력을 전달하게 되었으며, 설계한 대로 PVDF film에 최대의 전력을 전달하는 성과를 보였다.

다. 개발한 PVDF film 증폭기를 이용한 준설토 탈수 실험

개발한 파워 드라이버는 PVDF film을 진동기로 사용할 때 효과적으로 동작할 수 있도록 설계된 PVDF film 구동용 파워 드라이버로 주파수가 변화할 때 임피던스 값의 변화가 발

개발한 PVDF film 증폭기를 이용하여 준설토의 함수비를 효과적으로 낮출 수 있는지를 확인하는 탈수 실험을 수행하였다. 그림 3.158은 준설토의 탈수 실험을 진행하기 위한 모형지반을 보인다. 실험에 사용한 모형지반은 모형상자에 자갈로 배수 층을 조성하여 탈수 실험 시에 준설토가 유실되지 않도록 하였다.



그림 3.158 준설토 탈수 실험을 위한 모형지반

실험에서 사용된 준설토의 무게와 물의 양은 표 3.50에서 보인 바와 같으며 준설토와 물의 함수비를 90%로 맞추기 위해서 준설토 550g을 모형 지반에 쌓고 500ml의 물을 부어 탈수량을 측정하였다.

표 3.50 실험에서 사용된 준설토의 무게와 물의 양

흙의 종류	준설토(g)	물의 양(ml)
준설토	550	500

실험 방법은 PVDF film 구동용 증폭기를 이용하지 않은 자연 탈수 실험과 개발한 PVDF film 구동용 증폭기를 이용한 탈수 실험 순으로 진행하였다. 또한, PVDF film 구동용 증폭기에 인가되는 입력 주파수를 출력이 가장 큰 3.68KHz와 출력이 낮은 6KHz 두 가지 주파수를 적용하여 실험을 진행하였다. 탈수량의 측정 방법으로는 5분 간격으로 60분 동안 메스실린더에 저장되는 물의 양을 측정하고 기록하였다. 실험은 3번 반복하였

으며 표 3.51과 표 3.52은 평균한 결과를 정리하였다. 그림 3.169는 표 3.52의 결과를 그래프로 보인 것으로 자연 탈수에 비해서 PVDF film 구동용 BJT 증폭기를 사용하였을 때 준설토의 탈수에 효과가 높은 것을 쉽게 알아 볼 수 있다. 그림 3.160은 표 5.53의 결과를 그래프로 도식화한 것으로 PVDF film 구동용 파워 드라이버를 사용하였을 때 자연 탈수에 비해 준설토의 탈수가 효과적으로 이루어지는 것을 알 수 있다.

실험 결과를 통해서 알 수 있듯이 자연 탈수를 할 때보다 PVDF film 구동용 증폭기를 사용할 때 탈수 시작 후 30분 동안 약 3배 빠른 탈수 효과를 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 3.68KHz의 주파수를 사용할 때 6KHz의 주파수를 사용할 때 보다 초기에 더욱 효과적이었으나 30분 이후에는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 따라서 개발한 PVDF film 구동용 증폭기들은 모두 준설토 탈수 장치에 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

표 3.51 자연 탈수와 PVDF film 구동용 BJT 증폭기를 이용한 탈수 실험 결과

시간	자연 탈수	BJT-3.68KHz	BJT-6KHz
5	20	150	60
10	40	265	145
15	60	320	210
20	80	330	280
25	95	333	325
30	115	335	335
35	130	336	340
40	145	336	342
45	160	336	344
50	180	337	345
55	195	337	346
60	210	338	346

표 3.52 자연 탈수와 PVDF film 구동용 파워 드라이버를 이용한 탈수 실험 결과

시간	자연 탈수	VA-3.68KHz	VA-6KHz
5	20	120	60
10	40	220	120
15	60	295	187
20	80	330	265
25	95	336	310
30	115	340	330
35	130	342	338
40	145	345	340
45	160	346	341
50	180	346	342
55	195	347	344
60	210	348	344

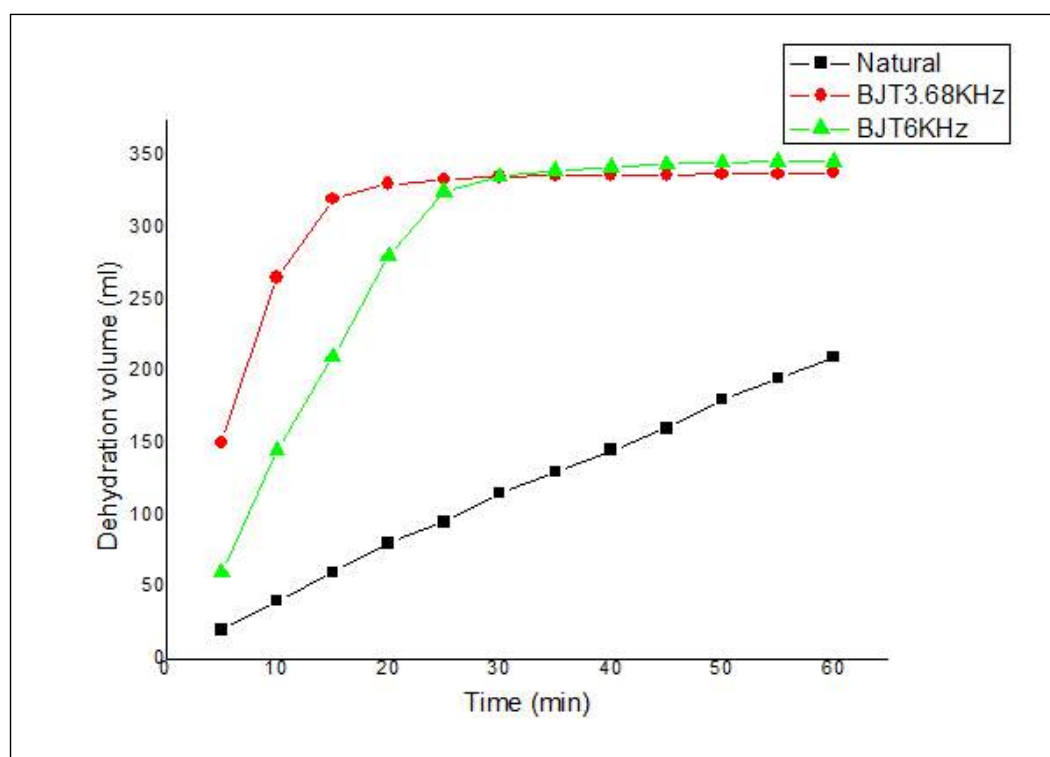


그림 3.159 PVDF film 구동용 BJT 증폭기를 이용한 탈수 실험 결과

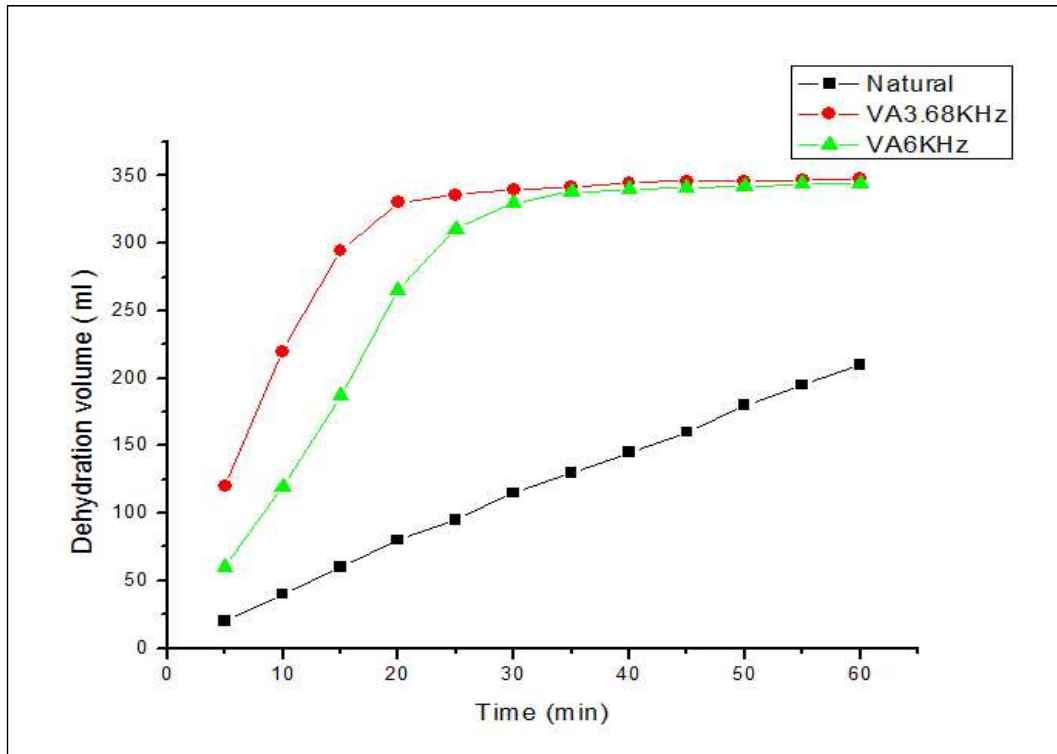
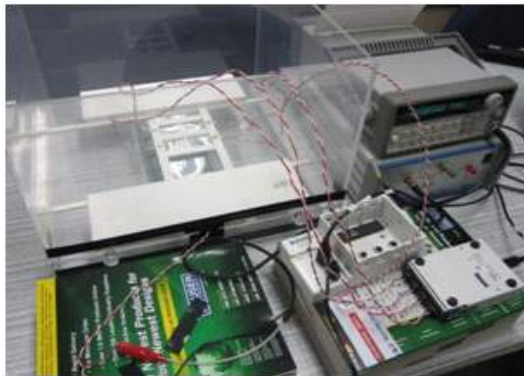


그림 3.160 PVDF film 구동용 파워 드라이버를 이용한 탈수 실험 결과

3. PVDF film의 준설토 파동 전달 실험

가. 파동 전달 특성 실험 방법

이 실험을 위하여 사용한 장비는 함수발생기(33120A, Agilent), 고전압증폭기(A800DI, FLC), ADC 데이터 수집기 (NI9239, NI), PVDF film 소형 센서를 사용하였다. 그림 3.161은 이 실험을 위해서 제작한 PVDF film 실험 환경을 보인다.



(a) 실험 환경



(b) 센서 배치

그림 3.161 PVDF film 파동 전달 실험을 위한 실험 환경(a) 와 (b) 센서 배치

이 실험을 위한 구성은 그림 3.162와 같이 함수 발생기의 교류 신호를 전압증폭기를 이용하여 100배 증폭하고, 증폭된 신호를 Actuator : PVDF Film 양단에 인가하여 음파를 발생시킨다. 그리고 매질을 통과한 음파 신호는 Sensor : PVDF Film을 이용하여 측정하고 PC에 저장하도록 하였다. 실험에서 사용한 고전압증폭기의 증폭률은 100배이며, 부하의 임피던스 변화에 의하여 출력전압을 조절하여 출력 파워를 일정하게 하는 특성을 가지고 있다.

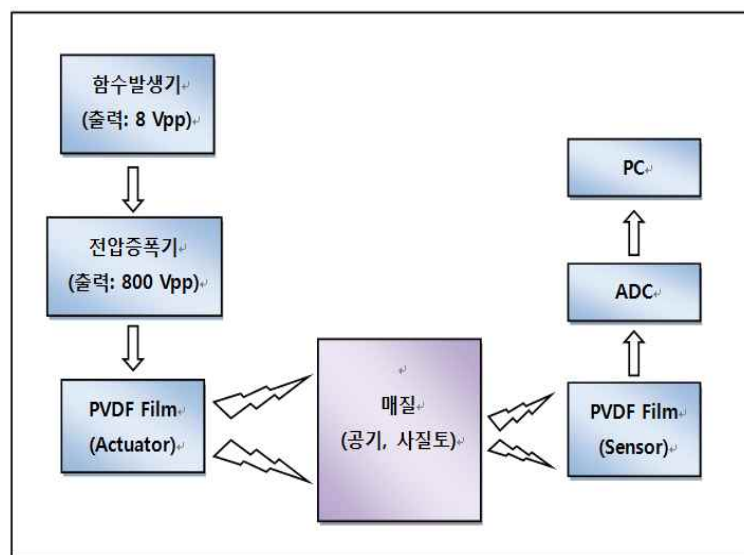


그림 3.162 실험 구성도

실험 방법으로 PVDF Film에 교류 전원을 인가하였을 때 발생하는 음파가 매질(사질토)을 통과하여 전달되는 파동에너지의 전달 특성을 확인하기 위하여 PVDF film에 사용한 주파수는 1KHz, 3KHz, 6KHz 그리고 9KHz를 사용하였으며, 인가하는 신호의 입력 파형은 정현파, 구형파 그리고 삼각파를 사용하였다.

그림 3.163은 매질과 PVDF film, PVDF film 센서의 배치도를 보인 것으로 PVDF Film이 동작할 때 준설토의 두께에 따라 전달 특성의 변화를 확인하기 위해 매질(사질토)의 두께를 총 4가지(0mm, 50mm, 150mm, 250mm)의 경우로 실험을 수행하였으며, 전달되는 파동에너지의 측정을 위하여 4개의 PVDF Film 센서를 서로 다른 위치에 배치하였다.

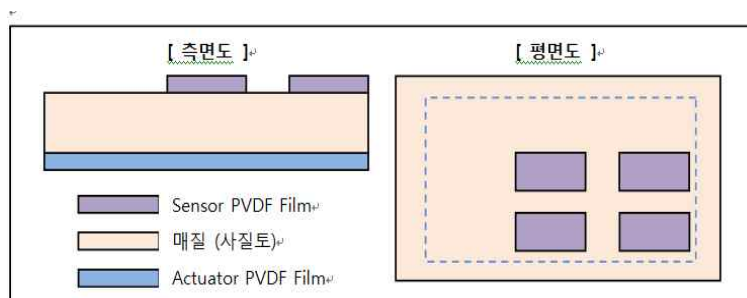


그림 3.163 PVDF Film, 매질(사질토), PVDF Film 센서의 배치도

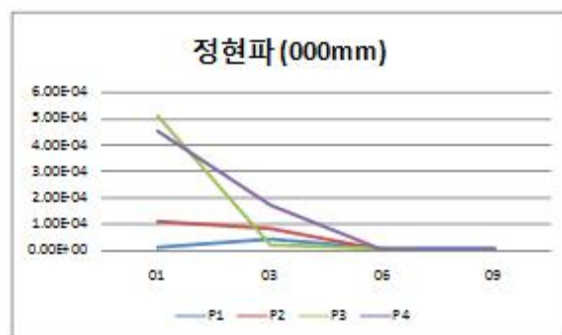
나. 정현파 실험 결과

표 3.53는 PVDF film에 인가되는 입력 신호가 정현파의 파형을 가진 경우 매질 두께와 PVDF film에 인가되는 구동 주파수에 따라서 매질에 전달되는 파동에너지를 측정한 실험 결과 값을 보인다. 표에서 보인 바와 같이 매질의 두께가 증가하여 PVDF film에 압력을 가하여도 PVDF 자체 전력 발생에는 영향을 미치지 않는다.

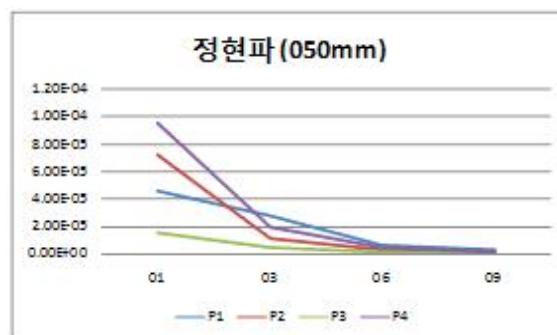
그림 3.164는 매질 두께가 증가하고 PVDF film Actuator에 인가되는 주파수가 변화하였을 때 PVDF film 센서에서 측정한 파동 에너지의 측정 결과를 보인 것으로 파동 에너지는 ADC를 통해서 입력되는 전압 값으로 명기하였다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 두께에 변화보다는 주파수가 증가할수록 파동 에너지의 크기는 작아지는 경향을 보인다.

표 3.53 입력 파형이 정현파일 경우의 매질 두께와 구동 주파수에 따른 PVDF film 파동 에너지 전달 특성

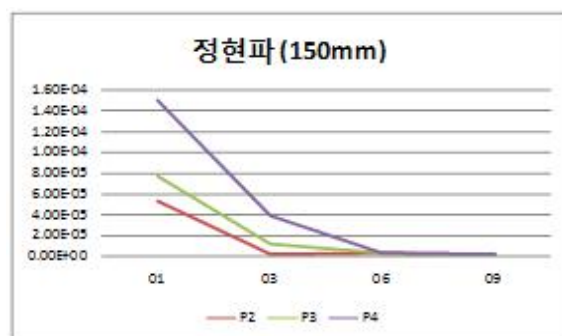
높이 (mm)	주파수 (Khz)	Vpp	Vrms	Ipp	Irms	Power
0	1	698	205	0.408	0.106	21.73
0	3	264	68.6	0.408	0.119	8.1634
0	6	152	35.4	0.408	0.118	4.1772
0	9	112	25.1	0.408	0.118	2.9618
50	1	672	196	0.416	0.109	21.364
50	3	256	65.5	0.416	0.121	7.9255
50	6	144	34.1	0.42	0.121	4.1261
50	9	112	24.4	0.42	0.12	2.928
150	1	676	198	0.416	0.109	21.582
150	3	256	65.8	0.42	0.121	7.9618
150	6	140	35.4	0.416	0.121	4.2834
150	9	112	24.2	0.412	0.12	2.904
250	1	668	197	0.416	0.109	21.473
250	3	256	65.8	0.416	0.12	7.896
250	6	144	35.5	0.408	0.12	4.26
250	9	108	25.4	0.424	0.119	3.0226



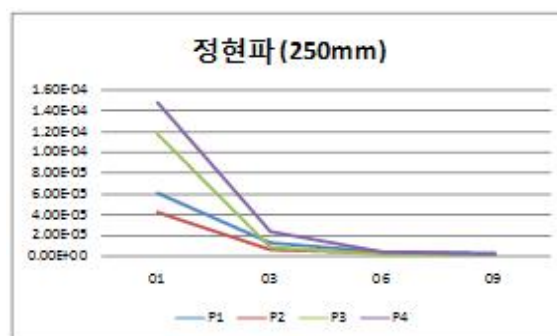
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.164 PVDF film 센서에서 측정된 매질의 두께와 인가 주파수에 따른 파동 전달 에너지 측정 결과

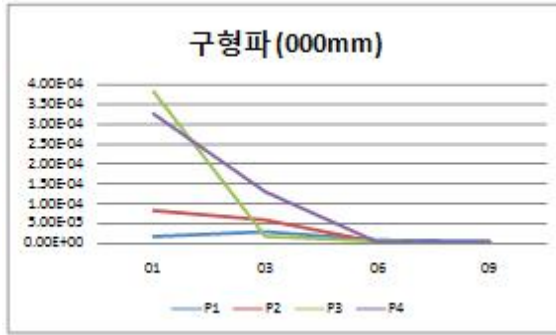
다. 구형파 실험 결과

표 3.54은 PVDF film에 인가되는 입력 신호가 구형파의 파형을 가진 경우 매질 두께와 PVDF film에 인가되는 구동 주파수에 따라서 매질에 전달되는 파동에너지를 측정한 실험 결과 값을 보인다. 표에서 보인 바와 같이 매질의 두께가 증가하여 PVDF film에 압력을 가하여도 PVDF 자체 전력 발생에는 영향을 미치지 않는다.

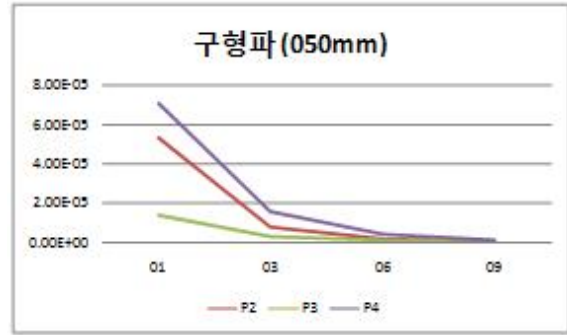
그림 3.165는 매질 두께가 증가하고 PVDF film Actuator에 인가되는 주파수가 변화하였을 때 PVDF film 센서에서 측정한 파동 에너지의 측정 결과를 보인 것으로 파동 에너지는 ADC를 통해서 입력되는 전압 값으로 명기하였다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 두께에 변화보다는 주파수가 증가할수록 파동 에너지의 크기는 작아지는 경향을 보인다.

표 3.54. 입력 파형이 구형파일 경우의 매질 두께와 구동 주파수에 따른 PVDF film 파동 에너지 전달 특성

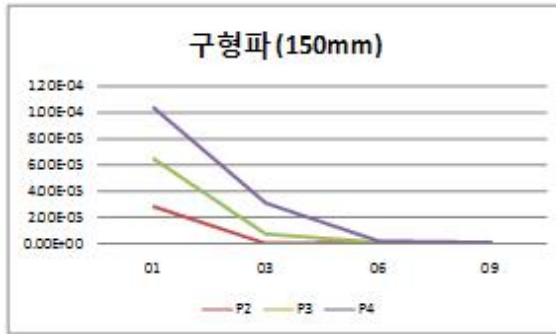
높이 (mm)	주파수 (Khz)	Vpp	Vrms	Ipp	Irms	Power
0	1	568	179	0.408	0.106	18.974
0	3	220	61.4	0.408	0.105	6.447
0	6	124	32.5	0.408	0.103	3.3475
0	9	96	22.7	0.408	0.102	2.3154
50	1	532	168	0.42	0.107	17.976
50	3	204	57.5	0.416	0.105	6.0375
50	6	116	29.9	0.408	0.104	3.1096
50	9	92	22.2	0.408	0.103	2.2866
150	1	540	169	0.416	0.107	18.083
150	3	204	57.7	0.408	0.105	6.0585
150	6	116	31	0.408	0.104	3.224
150	9	84	22.9	0.408	0.103	2.3587
250	1	536	169	0.412	0.106	17.914
250	3	204	58.7	0.416	0.105	6.1635
250	6	120	31.1	0.412	0.103	3.2033
250	9	88	23	0.408	0.102	2.346



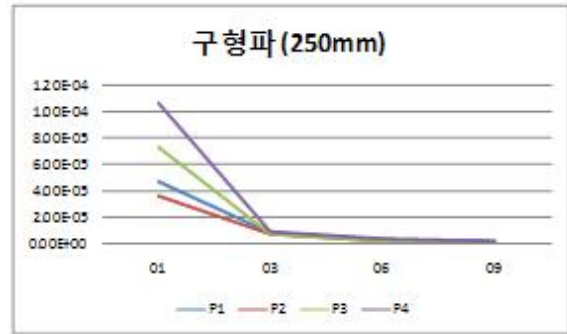
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.165 PVDF film 센서에서 측정된 매질의 두께와 인가 주파수에 따른 파동 전달 에너지 측정 결과

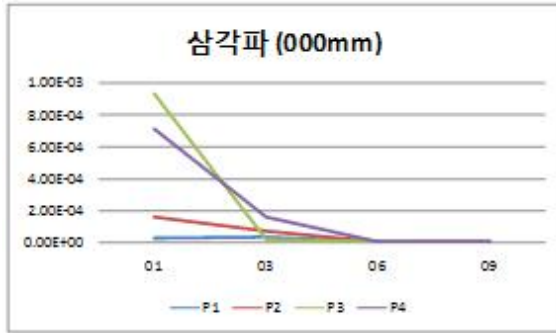
라. 삼각파 실험 결과

표 3.55는 PVDF film에 인가되는 입력 신호가 삼각파의 파형을 가진 경우 매질 두께와 PVDF film에 인가되는 구동 주파수에 따라서 매질에 전달되는 파동에너지를 측정한 실험 결과 값을 보인다. 표에서 보인 바와 같이 매질의 두께가 증가하여 PVDF film에 압력을 가하여도 PVDF 자체 전력 발생에는 영향을 미치지 않는다.

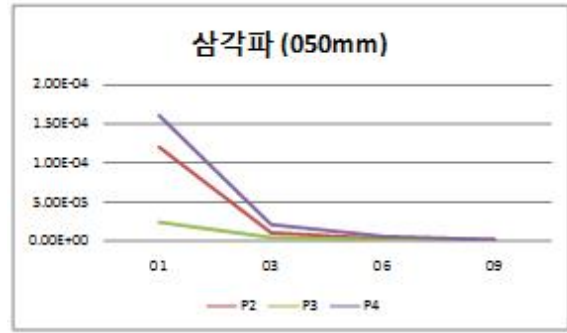
그림 3.166은 매질 두께가 증가하고 PVDF film Actuator에 인가되는 주파수가 변화하였을 때 PVDF film 센서에서 측정한 파동 에너지의 측정 결과를 보인 것으로 파동 에너지는 ADC를 통해서 입력되는 전압 값으로 명기하였다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 두께에 변화보다는 주파수가 증가할수록 파동 에너지의 크기는 작아지는 경향을 보인다.

표 3.55 입력 파형이 삼각파일 경우의 매질 두께와 구동 주파수에 따른 PVDF film 파동 에너지 전달 특성

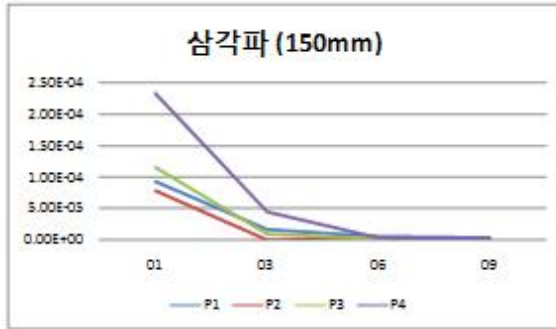
높이 (mm)	주파수 (Khz)	Vpp	Vrms	Ipp	Irms	Power
0	1	820	232	0.14	0.0521	12.0872
0	3	260	68.1	0.408	0.119	8.1039
0	6	152	35.2	0.408	0.118	4.1536
0	9	112	24.6	0.408	0.118	2.9028
50	1	820	232	0.14	0.0517	11.9944
50	3	256	65.2	0.42	0.121	7.8892
50	6	140	33.7	0.416	0.121	4.0777
50	9	104	24.2	0.416	0.12	2.904
150	1	816	231	0.14	0.0517	11.9427
150	3	256	65.9	0.42	0.121	7.9739
150	6	144	34.8	0.416	0.12	4.176
150	9	104	25.1	0.412	0.12	3.012
250	1	820	232	0.14	0.0515	11.948
250	3	252	66.1	0.416	0.12	7.932
250	6	144	34.7	0.412	0.12	4.164
250	9	108	24.6	0.42	0.119	2.9274



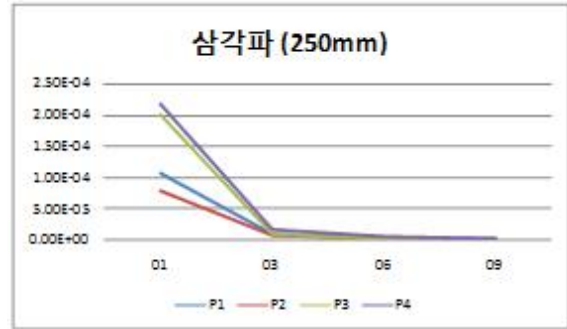
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.166 PVDF film 센서에서 측정된 매질의 두께와 인가 주파수에 따른
파동 전달 에너지 측정 결과

PVDF film을 진동기로 사용하였을 때 준설토의 탈수에 영향을 미치는 파동 전달 특성을 알아보기 위하여 본 실험을 실시한 결과 PVDF film에 인가해주는 파형 중 가장 파동 전달 특성이 좋은 파형은 삼각파형임을 알 수 있었으나 매질의 두께에 대한 파동 전달 특성은 두께에 따라서 비례적으로 나오지 않는 현상이 발생함에 따라 알 수가 없었다. 그러나 주파수가 증가하게 되면 파동 에너지는 PVDF film이 발생하는 파동 에너지 자체가 작아지므로 감소하게 되는 것을 알 수 있었다.

제7절 공정 제어 통신 시스템 개발

1. CAN 통신 시스템 개발

가. CAN 통신 모듈 설계

준설토 탈수 장치를 효율적으로 운영하기 위하여 공정 제어 통신 시스템을 개발하였으며, 통신 방식으로 통신 잡음과 주변 잡음에 강한 CAN 통신 모듈을 사용하였다.

그림 3.167은 개발한 CAN 통신 모듈의 회로도를 보인다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 CAN 통신 모듈은 마이크로 컨트롤러인 ATmega128과 CAN 통신 제어 프로세서인 SJA1000 그리고 CAN 통신 신호 앰프인 PCA82C250을 사용하였다.

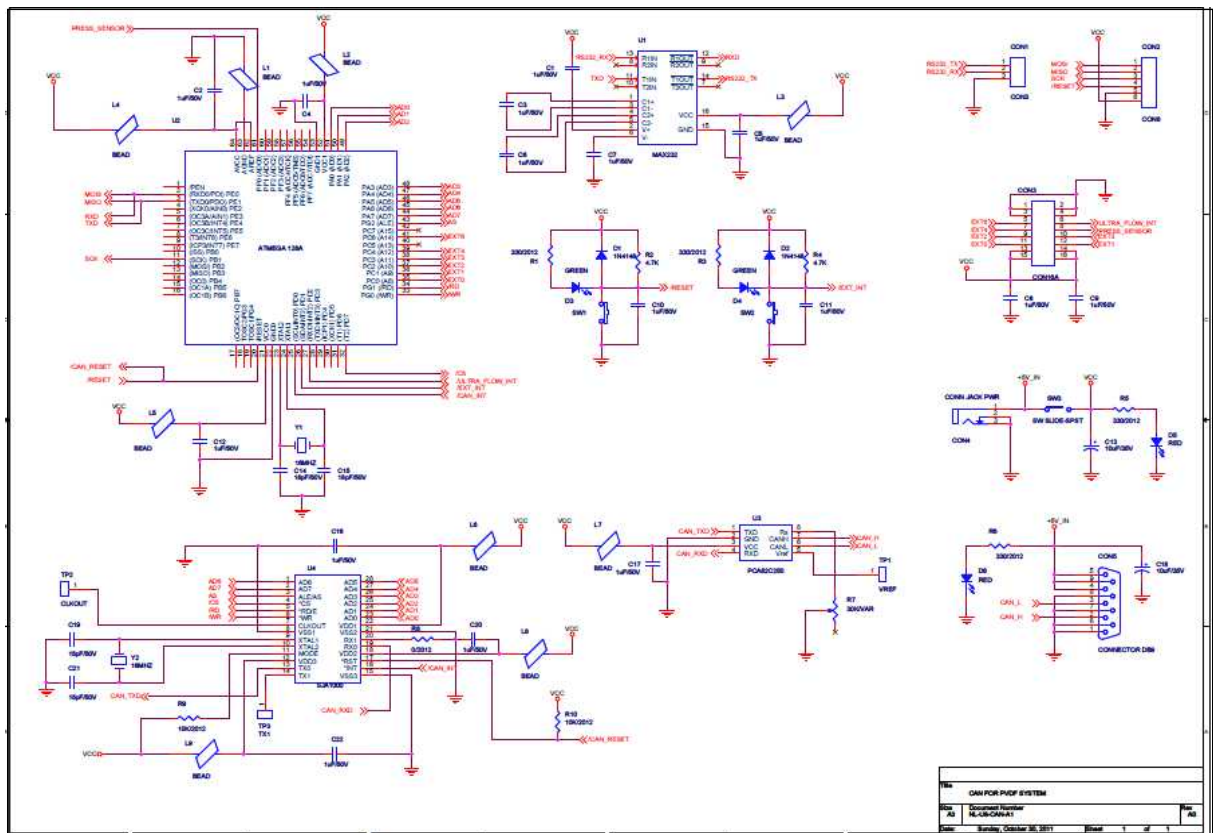


그림 3.167 CAN 통신 모듈 회로도

메인 전원은 +5V를 사용하며 외부 출력 신호로는 RS232 Console을 지원하며, 입출력 신호로는 CAN 통신 채널과 센서 채널을 지원한다. 센서 채널로는 초음파 센서, 압력 센서, 유량 센서를 사용할 수 있도록 인터페이스를 구성하였다.

나. CAN통신 모듈 제작

그림 3.168은 제작한 CAN 통신 모듈을 보인다. 앞서 설계한 대로 적층을 2 레이어로 하고 FR-4로 제작하였다. 그림 4-2(a)는 CAN 통신 모듈의 윗면이며, 그림 3.168(b)는 CAN 통신 모듈의 바닥면이다.

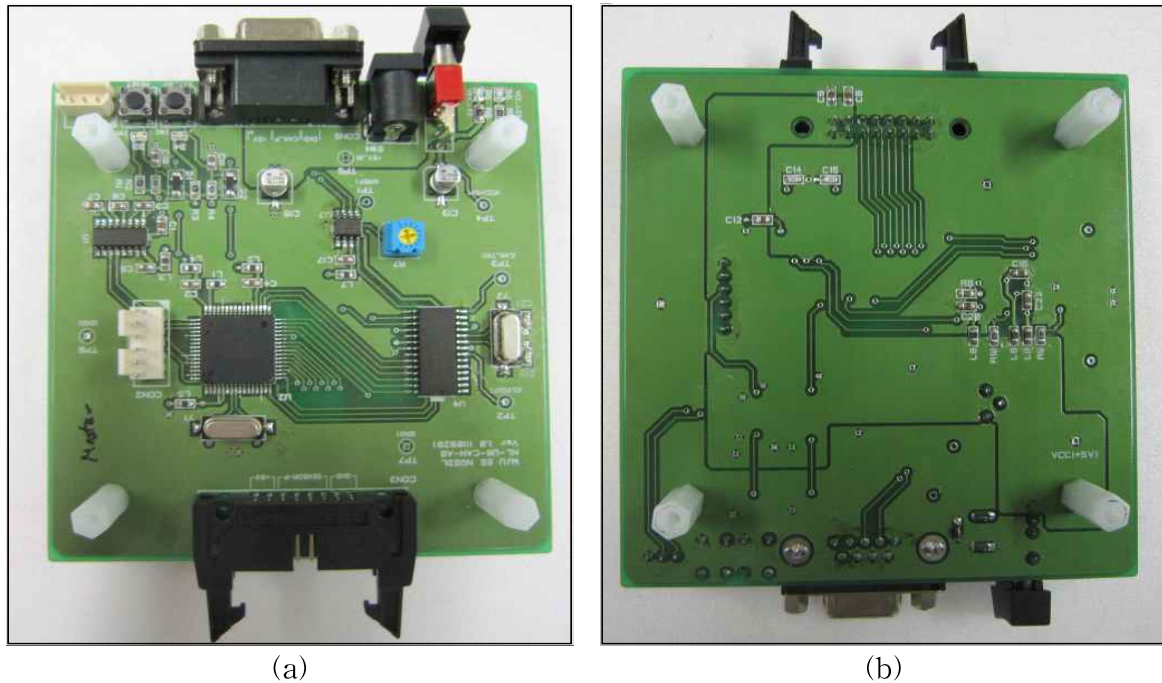


그림 3.168 제작한 CAN 통신 모듈

다. CAN 통신 모듈 프로그램

CAN 통신 모듈 프로그램은 CAN 통신을 동작할 수 있도록 마이크로 컨트롤러와 CAN 컨트롤러의 초기화 프로그램, 데이터의 송/수신 프로그램으로 이루어져있다.

표 3.55는 마이크로 컨트롤러 초기화 설정 프로그램의 일부분이다.

표 3.56은 CAN 컨트롤러의 초기화 설정 프로그램의 일부분이다.

표 3.57은 CAN 통신 데이터 송신 프로그램의 일부분이다.

표 3.58은 CAN 통신 데이터 수신 프로그램의 일부분이다.

표 3.56 마이크로 컨트롤러 초기화 설정 코드

```
void Hardware_Init()
{

//Port A : Data/Add , Port G0 : Write, Port G1 : Read, Port G2 : ALE, Port D7 : CS //

PORTA=0x00;
DDRA=0xff;

PORTB=0x00;
DDRB=0xff;

PORTC=0x00;
DDRC=0xff;

PORTD=0x8f;
DDRD=0xf0;

PORTE=0x00;
DDRE=0xff;

PORTF=0x00;
DDRF=0xff;

PORTG=0x00;
DDRG=0xff;

//Interrupt config
EICRA=0x0a;           // Interrupt Falling Edge
EICRB=0x00;
EIMSK=0x03;
EIFR=0x03;

//uart config
UCSR0A=0x00;
UCSR0B=0x18;
UCSR0C=0x06;
UBRR0H=0x00;
UBRR0L=0x67;          // USART0 Baud Rate: 9600(67), 115200 (08)

#asm("sei");

}
```

표 3.57 CAN 컨트롤러 초기화 설정 프로그램

```

void CAN_Init()
{
    // Reset Request bit configuration //

    ModeReg = Read_to_controller(0x00);
    while( (ModeReg&0x01) == 0x00)
    {
        ModeReg |=0x01;
        Write_to_controller(0x00, ModeReg);
        ModeReg = Read_to_controller(0x00);
    }

    // CAN Mode Select 0x00 , Tx1/Rx1 Select 0x40, ClockOut Select 0x08 //

    ClockDivideReg = (0x00 | 0x40 | 0x08);
    Write_to_controller(0x1f, ClockDivideReg);

    // Disable CAN interrupts//

    InterruptEnReg = (0x00 | 0x01);
    Write_to_controller(0x00, InterruptEnReg);

    // Define Acceptance code and mask //

    //master
    Write_to_controller(0x04,0x00); //code
    Write_to_controller(0x05,0xff); //mask

    // Bus Timing configuration //

    BusTiming0Reg = 0x00; // 4MHz Baud Rate CHECK POINT !!!!!!!!!!!!!
    BusTiming1Reg = 0x14; // Reconmmend method CHECK POINT !!!!!!!!!!!!!
    Write_to_controller(0x06, BusTiming0Reg);
    Write_to_controller(0x07, BusTiming1Reg);

    -----중
    -----

    Write_to_controller(0x01,CommandReg);
}

```

략

표 3.58 CAN 통신 송신 프로그램

```

void data_transmit(void)
{
    int c;
    Transmite_int = Read_to_controller(0x00);
    Transmite_int |= 0x04;
    Write_to_controller(0x00,Transmite_int);

    StatusReg = 0x00;
    StatusReg = Read_to_controller(0x02);

    if((StatusReg & 0x04) != 0x04)//buffer full
    {
        for(c=0; c<10; c++)
        {
            Trans_buffer[c] = Trans_Temp[c];
            Trans_Temp[c] = 0;
        }

        further_message_flag = 1;
    }

    else // buffer release
    {
        if(RTR_condition !=1)
        {
            Write_to_controller(0x0a,Trans_Temp[0]);
            Write_to_controller(0x0b,Trans_Temp[1]);
            Write_to_controller(0x0c,Trans_Temp[2]);
            Write_to_controller(0x0d,Trans_Temp[3]);
            Write_to_controller(0x0e,Trans_Temp[4]);
            Write_to_controller(0x0f,Trans_Temp[5]);
            Write_to_controller(0x10,Trans_Temp[6]);
            Write_to_controller(0x11,Trans_Temp[7]);
            Write_to_controller(0x12,Trans_Temp[8]);
            Write_to_controller(0x13,Trans_Temp[9]);

            Trans_Count++ ;

            CommandReg = 0x01;
            Write_to_controller(0x01,CommandReg);
        }
    }
}

```

표 3.59 CAN 통신 수신 프로그램

```
else
{
    for(i=2; i<10; i++)
    {
        ttt=0x14+i;
        Read_Temp[i]=Read_to_controller(ttt);
    }

    Rece_Count++;

    CommandReg=0x04;
    Write_to_controller(0x01,CommandReg);

}

} //Receive close
```

제8절 공정 제어 시스템 개발

1. 센서 모듈 개발

가. 초음파 센서

준설토 탈수 처리 장치의 준설토의 이동 경로 및 준설토 처리 상태 및 처리토의 위치를 감지하기 위하여 초음파 센서를 사용하였다. 그림 3.169는 초음파 센서의 동작 원리로 마이크로 컨트롤러에서 발생한 트리거 신호를 기준으로 초음파 센서를 통해서 전달되는 응답 신호를 시간으로 측정하여 거리를 표시해주는 방식을 사용한다. 사용한 센서의 측정 거리는 최소 2cm에서 최대 3m까지이며, 측정 거리의 오차는 $\pm 2\text{cm}$ 이다.

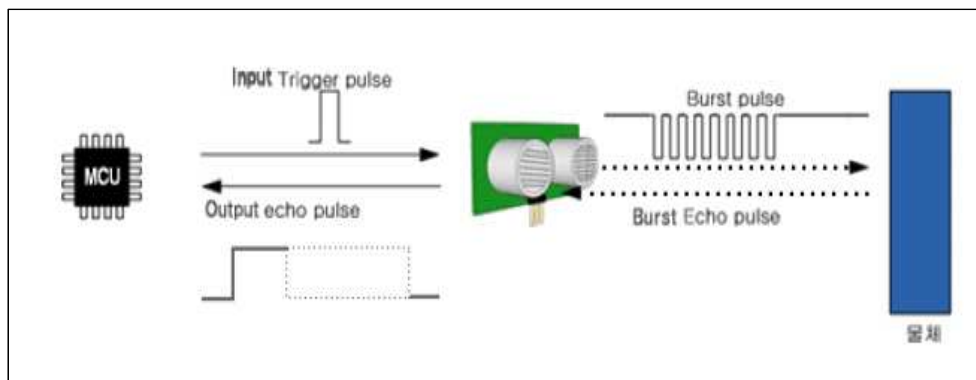


그림 3.169 초음파 센서 동작 원리

그림 3.170은 초음파 신호 발생을 보인 타이밍 그래프로 먼저 MCU의 출력 핀으로 초음파센서의 SIG 핀에 Input trigger pulse(t_1)를 보내고 Input trigger pulse를 받은 초음파센서는 40kHz로 Burst pulse를 발생시킨다.

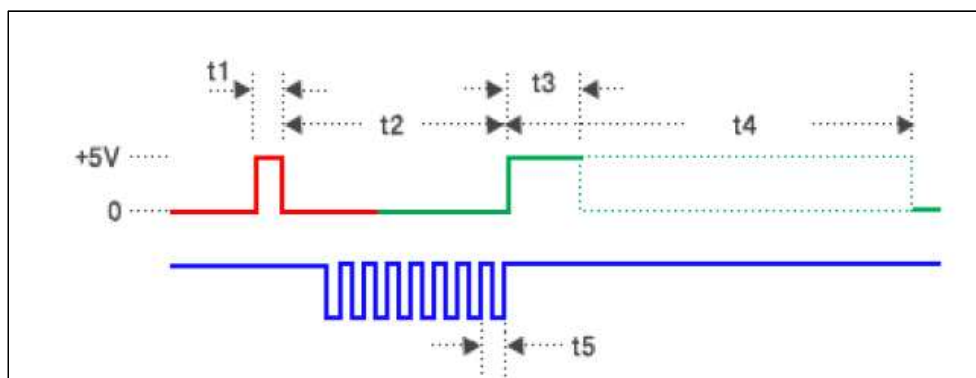


그림 3.170 초음파 신호 발생

초음파 센서는 Output echo pulse가 입력 될 때까지 Echo postpone(t_2)을 기다리고, Burst pulse가 물체에 반사되어 올 때까지 Output echo pulse를 확인한다. MCU는 응답

신호인 Output echo pulse의 폭을 시간으로 측정하여 거리로 표시하여 현재 준설토의 위치 및 준설토의 적재 높이 등을 확인 할 수 있다. 초음파로 거리를 다시 측정하기 위해서는 최소 200 μ s 이상 기다린 후에 Input trigger pulse를 보낼 수 있다. 그림 3.171에서는 사용한 초음파 센서의 규격을 보이고 표 3.61는 초음파 센서 모듈을 동작시키는 프로그램을 보인다.

	MCU I/O	PARAMETER	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
	Input	Input trigger pulse	t1	-	5	-	μ s
	Output	Echo postpone	t2	500	-	520	μ s
		Output echo pulse MIN.	t3	110	-	140	μ s
		Output echo pulse MAX.	t4	1.90	-	19.0	ms
	-	Burst pulse cycle	t5	-	25	-	μ s

그림 3.171 초음파 센서 규격

표 3.60 초음파 센서 동작 프로그램

```

interrupt [EXT_INT2] void ext_int2_isr(void)
{
    pulse_time = pulse_time_start;
    if(EICRA & 0x30)
    {
        EICRA &= 0xcf;
        pulse_time_start=0;
    }
    else
    {
        EICRA |= 0x30;
        pulse_time_end = pulse_time;
    }
}

//거리 = (331.5+ (0.60714*온도변수))*(거리왕복시간*0.00001/2)*1000
range = (331.5+ (0.60714*TEMPERATURE_VALUE))*(pulse_time_end*0.00001/2)*1000;

    test = (int)(range/10.0);
    d1 = (char)(test & 0x0ff);
    d2 = (char)((test>>8)& 0x00ff);
    test1 = (test1 & 0x0000) | d2;
    test1 = (test1 << 8) | d1;
    meter = range/1000;
    range = range - (meter * 1000.0);
    ten = range /100;
    range = range - (ten * 100.0);
    one = range/10;
    range = range - (one * 10.0);
    delay_ms(100);

```

나. 유량 센서

준설토 탈수 처리 장치를 통해서 준설토의 탈수 처리 상태를 확인하기 위하여 유량 센서를 사용하였다. 유량 센서를 통해서 준설토의 탈수량을 실시간으로 측정함으로써 공정 제어 장치를 효율적으로 운용할 수 있다.

그림 3.172는 사용한 유량 센서를 보인다. 탈수 처리 장치에 적용한 유량센서는 손쉽게 사용할 수 있으며, 비교적 저렴한 가격이고 기본 타입인 A타입을 사용하였으며, 일반적으로 개발기기 또는 시스템에 탑재되어 유량의 흐름을 감시하고 제어하는 용도로 많이 사용된다. 또한, 넓은 유량 범위 (1L-10L/분당)와 구조가 간단하고 경량(약 9.2그램)이며, 고감도 Pulse를 발생하는 것이 특징이다.



그림 3.172 유량 센서

그림 3.173은 탈수 처리 장치에 사용되는 유량 센서의 회로도를 보인다. 회로에서 U2A는 유량 센서 단자 부를 보이며, U1은 CAN 통신 모듈부의 센서 채널 부를 보인다.

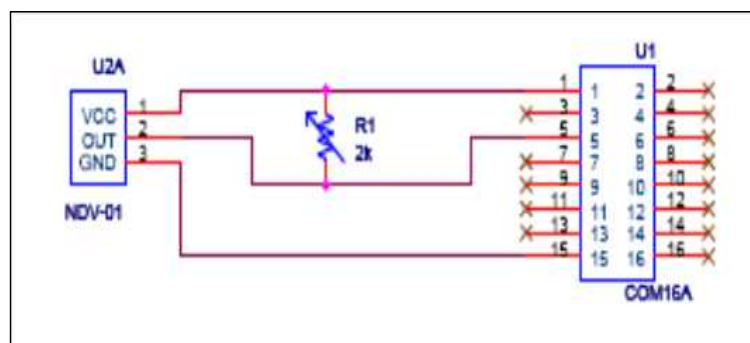


그림 3.173 유량 센서 동작 회로도

유량 센서는 펄스에서 보내는 인터럽트 신호로 유량의 흐름을 계산하도록 프로그램을 설계하였으며, 초당 몇 번의 인터럽트가 발생했는지를 마이크로 컨트롤러에서 연산하여 유량 정보를 표시하도록 프로그램 하였다. 표 3.62은 유량 센서를 구동하기 위하여 작성한 프로그램을 보인다.

표 3.61 유량 센서 동작 프로그램

```
#include <mega128.h>
#include <stdio.h>
int cnt;
int freq;
float water=0;
void conv_FreqToWater(int freq_in);
//센서에서 pulse가 발생할 때 마다 interrupt발생/count
interrupt [EXT_INT0] void ext_int0_isr(void)
{
    freq++;
}
//타이머/카운터를 이용하여 1초를 측정 한 후 그 동안 발생한 인터럽트 수를 측정
interrupt [TIM0_OVF] void timer0_ovf_isr(void)
{
    cnt++;
    if(cnt==250)
    {
        cnt=0;
        if(freq!=0)
        {
            conv_FreqToWater(freq);
            printf("input : %d Hz",freq);
            printf("\ttotal : %.2f mL (%.2f L)\r",water,water*0.001);
            freq=0;
        }
    }
    TCNT0=256-250;
}
void main(void)
{
    ASSR=0x00;
    TCCR0=0x06;
    TCNT0=256-250;

    EICRA=0x02;
    EICRB=0x00;
    EIMSK=0x01;
    EIFR=0x01;

    TIMSK=0x01;
    ETIMSK=0x00;

    #asm("sei")

    while (1)
    {
    }
}
void conv_FreqToWater(int freq_in)
{
    volatile float temp=0;
    if(freq_in>=23) temp=(float)freq_in*1.25;
    else if(freq_in>=19) temp=(float)freq_in*1.28;
    else if(freq_in>=17) temp=(float)freq_in*1.31;
    else if(freq_in>=14) temp=(float)freq_in*1.34;
    else if(freq_in>=10) temp=(float)freq_in*1.38;
    else if(freq_in>=7) temp=(float)freq_in*1.42;
    else if(freq_in>=1) temp=(float)freq_in*1.46;
    else temp=0;

    water+=temp;
}
```

개발한 유량 센서 모듈 프로그램과 모듈을 검증하기 위하여 테스트를 진행한 결과는 표 3.62에 보인다. 표에서 보인 것처럼 낮은 오차율로 유량 센서가 동작하는 것을 확인하였다.

표 3.62 유량 센서 모듈 테스트 결과

실험회수	데이터	오차율
1	<pre> input : 13 Hz total : 17.94 mL (0.02 L) input : 21 Hz total : 44.82 mL (0.04 L) input : 23 Hz total : 73.57 mL (0.07 L) input : 19 Hz total : 97.89 mL (0.10 L) input : 1 Hz total : 99.35 mL (0.10 L) </pre>	오차: -0.65mL 오차율: 0.65%
2	<pre> input : 20 Hz total : 25.60 mL (0.03 L) input : 22 Hz total : 53.76 mL (0.05 L) input : 22 Hz total : 81.92 mL (0.08 L) input : 14 Hz total : 100.68 mL (0.10 L) </pre>	오차: +0.68mL 오차율: 0.68%
3	<pre> input : 4 Hz total : 5.84 mL (0.01 L) input : 23 Hz total : 34.59 mL (0.03 L) input : 23 Hz total : 63.34 mL (0.06 L) input : 21 Hz total : 90.22 mL (0.09 L) input : 10 Hz total : 104.02 mL (0.10 L) </pre>	오차: +4.02mL 오차율: 4.02%
4	<pre> input : 15 Hz total : 20.10 mL (0.02 L) input : 23 Hz total : 48.85 mL (0.05 L) input : 23 Hz total : 77.60 mL (0.08 L) input : 17 Hz total : 99.87 mL (0.10 L) </pre>	오차: -0.13mL 오차율: 0.13%
5	<pre> input : 3 Hz total : 4.38 mL (0.00 L) input : 20 Hz total : 29.98 mL (0.03 L) input : 3 Hz total : 34.36 mL (0.03 L) input : 14 Hz total : 53.12 mL (0.05 L) input : 2 Hz total : 56.04 mL (0.06 L) input : 15 Hz total : 76.14 mL (0.08 L) input : 19 Hz total : 100.46 mL (0.10 L) input : 1 Hz total : 101.92 mL (0.10 L) </pre>	오차: +1.92mL 오차율: 1.92%

다. 압력 센서

준설토 탈수 처리 장치를 통해서 준설토의 탈수 처리 상태를 확인하기 위하여 압력 센서를 사용하였다. 압력 센서는 유량센서와 함께 준설토의 탈수량을 실시간으로 측정함으로써 공정 제어 장치를 효율적으로 운용할 수 있다.

그림 3.174는 사용한 압력 센서를 보인다. 탈수 처리 장치에 적용한 압력센서는 가해지는 압력에 따라 전기 저항 값이 변하는 것을 측정하는 방식을 사용하는 센서로 준설토의 처리량 또는 탈수된 물의 양을 측정하는 용도로 사용하였다. 압력 센서는 0Ω에서 120kΩ까지의 단위로 저항 값이 측정되며, 저항치가 높을수록 압력의 세기는 낮게 표시된다(그림 3.175). 압력에 따라서 선형을 유지하므로 마이크로 컨트롤러의 ADC를 이용하여 준설토의 처리량 및 탈수량을 계산하였다.



그림 3.174 압력 센서

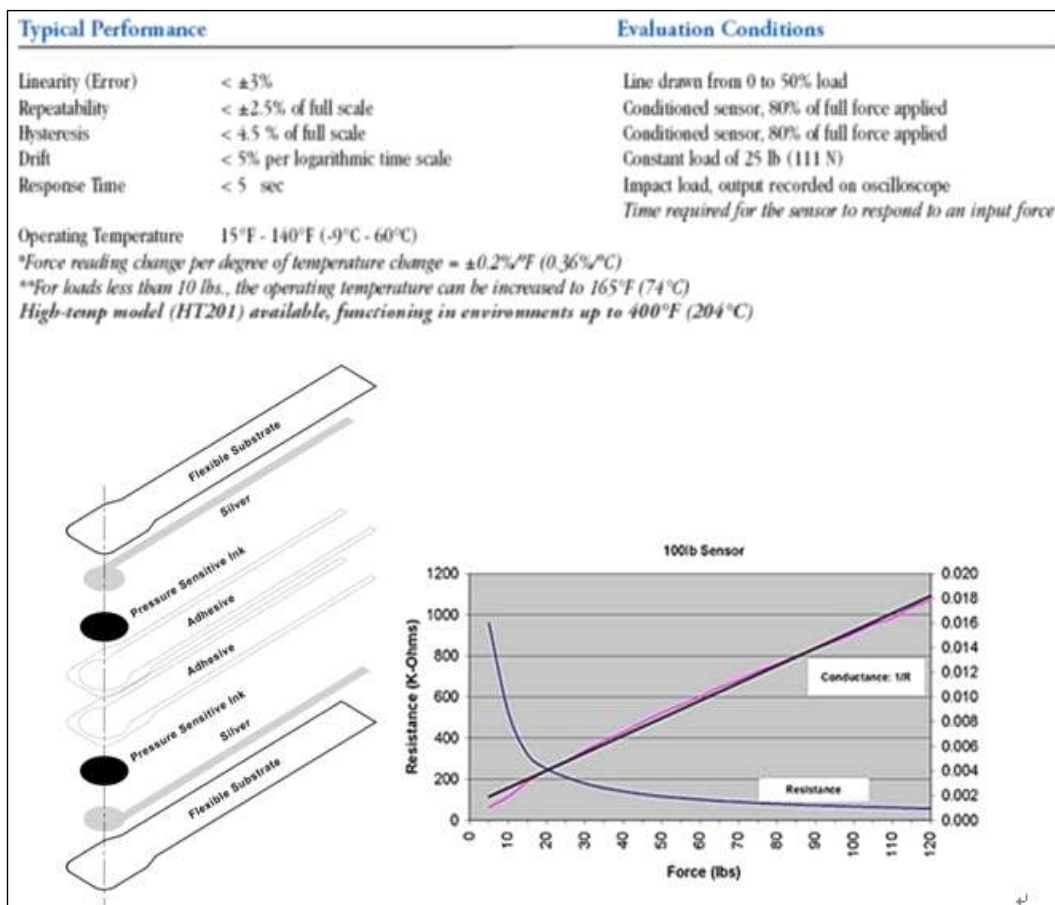


그림 3.175 압력 센서 규격

그림 3.176은 압력 센서 동작 회로를 보인 것으로 U2A는 압력 센서부이고, U1은 CAN 통신의 센서 채널부와 연결되어 있다. 가변 저항을 사용하여 회로에 변화되는 측정량을 조정하였다. 표 3.64는 압력 센서 동작 프로그램을 보인 것으로 마이크로 컨트롤러에서 ADC를 통해 변화 값을 받고 데이터 연산하게 프로그램 하였다.

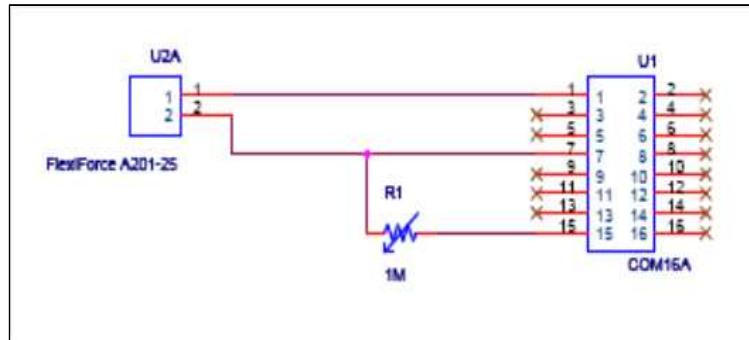


그림 3.176 압력 센서 동작 회로

표 3.63 압력 센서 동작 프로그램

```
#include <mega128.h>
#include <stdio.h>
#include <delay.h>
#define ADC_VREF_TYPE 0x40
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
    // Delay needed for the stabilization of the ADC input voltage
    delay_us(10);
    // Start the AD conversion
    ADCSRA|=0x40;
    // Wait for the AD conversion to complete
    while ((ADCSRA & 0x10)!=0);
    ADCSRA|=0x10;
    return ADCW;
}

void main(void)
{
    float adc_val;

    UCSR0A=0x00;
    UCSR0B=0x18;
    UCSR0C=0x06;
    UBRR0H=0x00;
    UBRR0L=0x67;

    ADMUX=ADC_VREF_TYPE;
    ADCSRA=0x86;

    while (1)
    {
        adc_val=read_adc(0)*0.0048828215;
        printf("%.2f [V]\r",adc_val);
        delay_ms(1000);
    }
}
```

그림 3.177은 압력 센서로 측정되는 무게에 대한 압력 센서의 출력 전압을 측정한 그래프로 압력이 증가할수록 전압이 거의 선형에 가깝게 상승하는 것을 확인하였다.

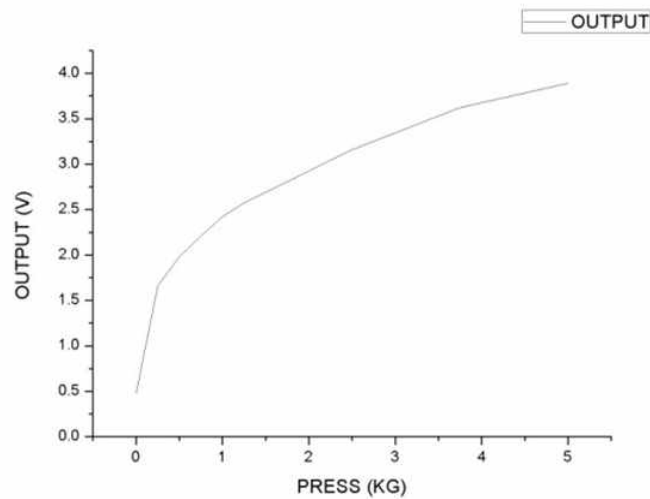


그림 3.177 압력 센서의 전압과 압력 결과

표 3.64은 압력 센서에 인가되는 무게에 따른 전압 출력 측정 결과를 보인 것으로 무게에 따라 전압 값이 차이를 보이며 잘 동작하는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 3.178은 표 3.64의 그래프를 알기 쉽도록 도식화 한 것이다.

표 3.64 압력 센서에 인가되는 무게에 따른 전압 출력 측정 결과

무게	최소값 (V)	평균값 (V)	최대값 (V)
0.25kg	1.616	1.660	1.724
0.50kg	1.929	1.977	2.026
0.75kg	2.168	2.208	2.241
1kg	2.388	2.423	2.456
1.25kg	2.539	2.570	2.600
2.5kg	3.101	3.159	3.208
3.75kg	3.564	3.625	3.657
5kg	3.872	3.889	3.911

본 실험을 통하여 준설토 탈수 처리 장치에 개발된 압력 센서 모듈을 적용하였을 때 정확하게 처리량을 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

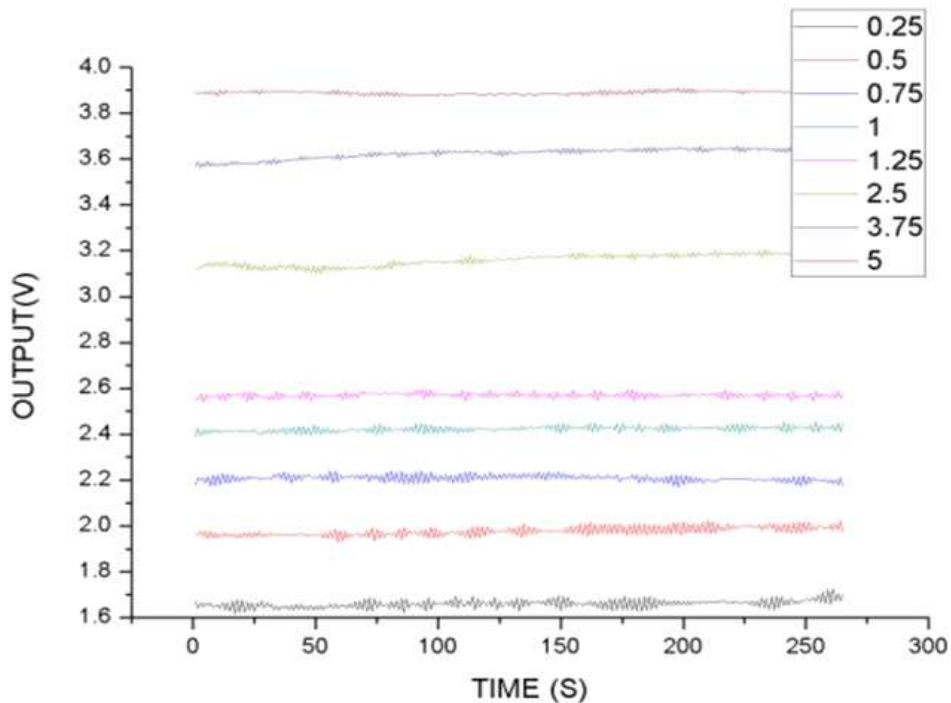


그림 3.178 압력 센서 측정 결과

2. 준설토 탈수 처리 공정 제어 시스템 개발

가. 공정 제어 프로그램

준설토 탈수 처리 장치를 효율적으로 구동하기 위하여 공정 제어 프로그램을 설계하였으며, 프로그램을 통하여 보다 효율적인 탈수 처리 장치를 운용할 수 있도록 하였다. 공정 제어 프로그램은 크게 매뉴얼 모드, 자동 모드, 최적화 모드로 동작하며 사용자의 선택에 따라서 준설토 처리 장비가 동작하게 설계하였다.

그림 3.179는 준설토 처리 공정 제어 시스템의 전체 시스템 블록도로 각 센서부와 모터는 CAN통신 모듈을 통해서 CAN통신 마스터 모듈로 측정 데이터가 수집되어 RS232 통신을 이용하여 PC로 전송된다. 함수발생기는 GPIB 인터페이스로 연결되어 PVDF film 구동용 고전압 증폭기를 PC에서 제어할 수 있도록 설계하였다.

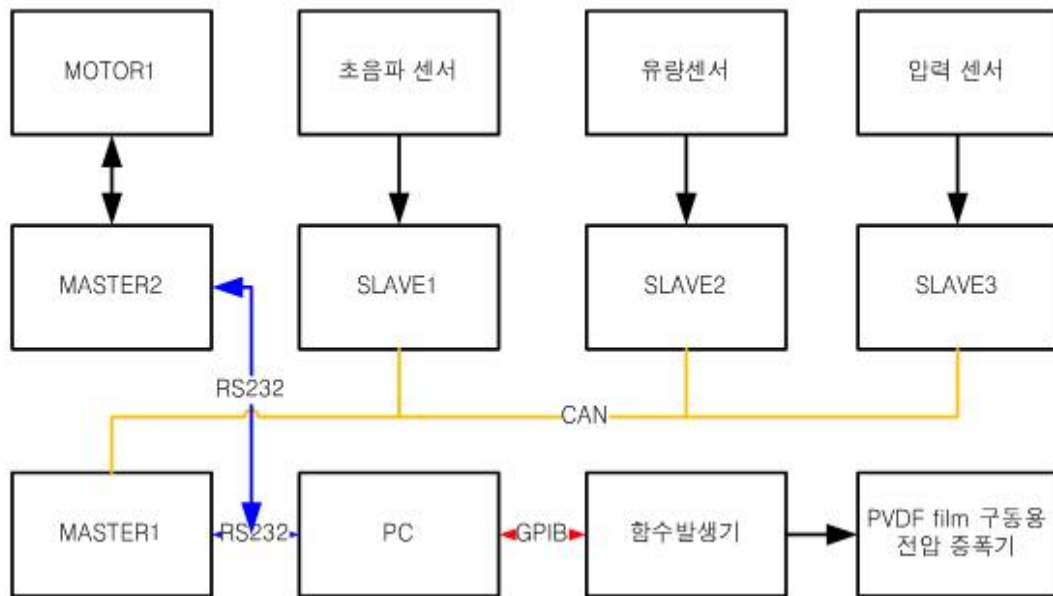


그림 3.179 준설토 처리 공정 제어 시스템 블록도

그림 3.180은 준설토 탈수 처리 공정 제어 시스템 프로그램으로 모드 제어를 통해서 공정 처리를 진행할 수 있다. 공정 제어 시스템은 준설토 처리 장비에 부착된 각 센서 모듈로부터 측정된 값들을 CAN 통신을 통하여 마스터 모듈로 데이터를 전송하고 전송된 데이터는 그림 3.180에 보이는 공정 제어 시스템 프로그램을 통하여 모니터링 할 수 있다. 또한, 전송된 데이터 값을 이용하여 준설토 탈수 처리 장비를 최적으로 제어 할 수 있도록 프로그래밍 되어있다.

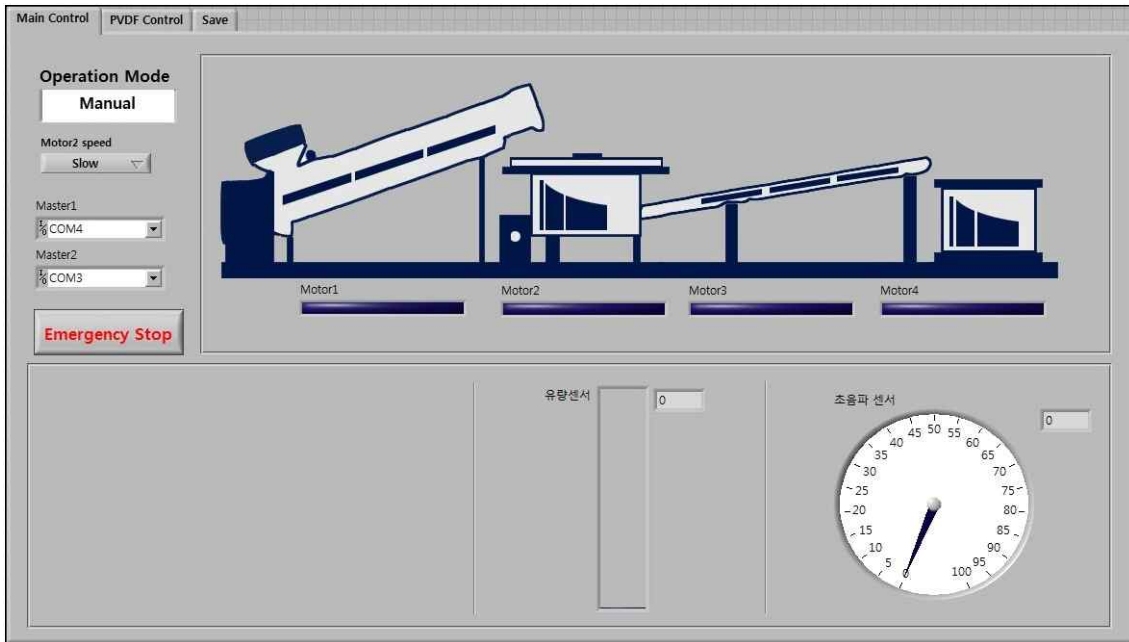


그림 3.180 공정 제어 시스템 동작 메인 패널

공정 제어 시스템 프로그램은 그림 3.180에 보이는 메인 화면과 그림 3.181의 PVDF film 구동용 고전압 증폭기 제어 화면 그리고 그림 3.182는 준설탁 탈수 처리 공정을 통하여 탈수되는 물의 양을 실시간으로 보여주는 저장 화면으로 구성되어있다. 각각의 화면들은 모두 실시간으로 보이며, 현재까지 검증한 결과 어느 정도 오차를 갖는 것으로 확인하였으며, 현재 지속적으로 수정 작업 중에 있다.

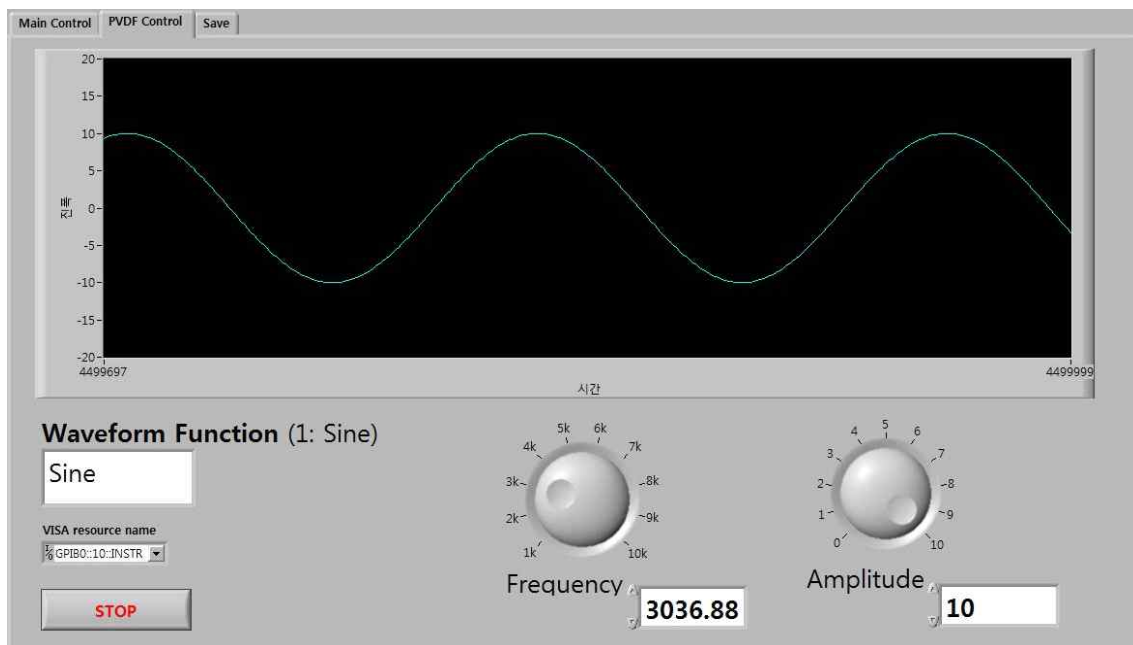


그림 3.181 PVDF film 구동용 고전압 증폭기 제어 패널

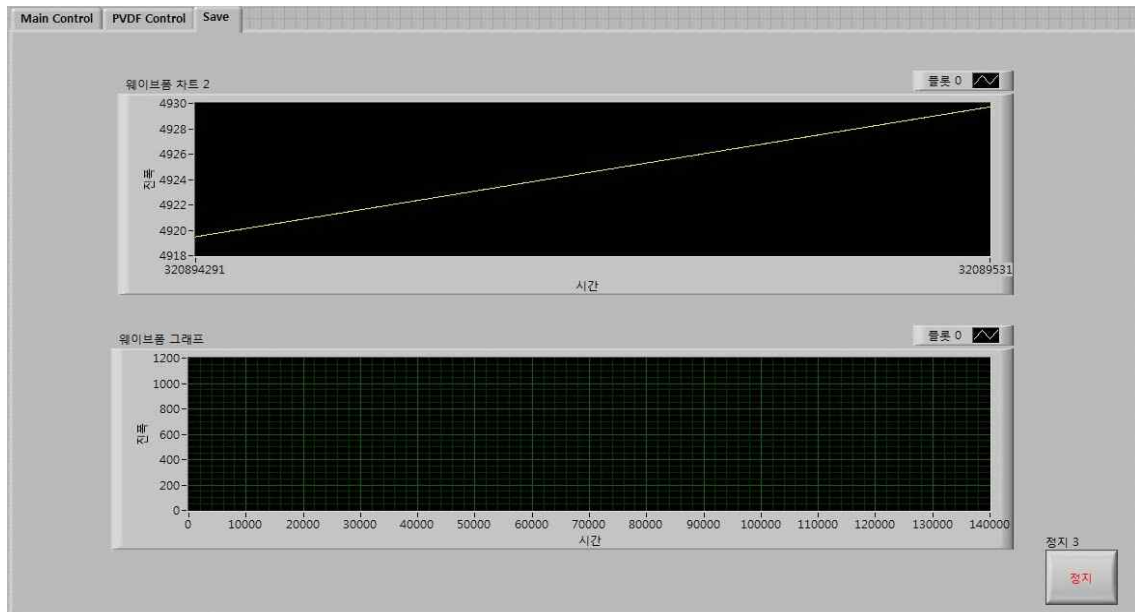


그림 3.182 준설토 처리량을 실시간으로 보여주고 저장하는 저장 패널

공정 제어 시스템은 제어 프로그램인 LabVIEW를 이용하여 프로그램을 설계하였으며, 각 공정마다 모듈화하여 프로그램을 작성하였다. 그림 3.183은 PVDF film 구동용 고전압 증폭기를 제어하기 위하여 GPIB 인터페이스를 연결하고 함수 발생기를 원하는 파형과 주파수 그리고 전압을 조절할 수 있도록 설계하였다.

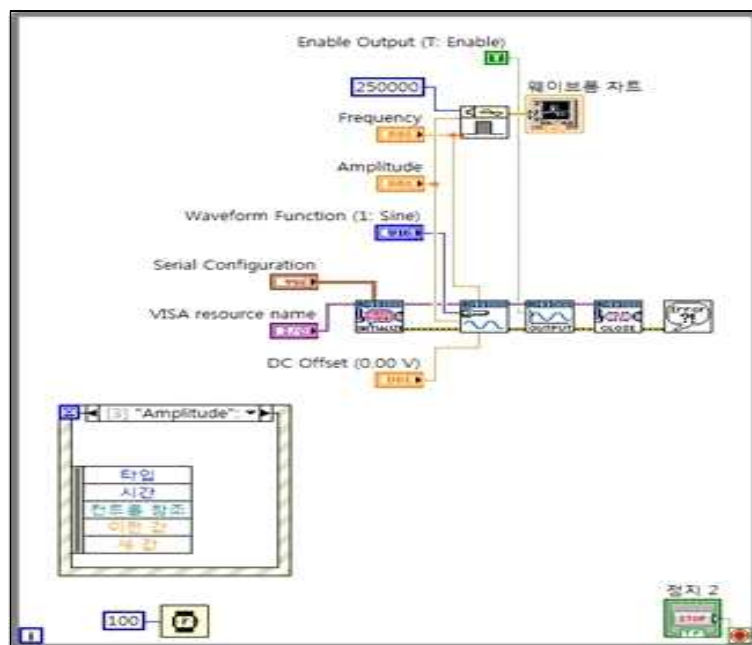


그림 3.183 PVDF film 구동용 고전압 증폭기 제어 프로그램

각 센서부들은 CAN 통신을 통하여 측정 데이터 값들이 마스터 모듈로 전송되고 마스터 모듈은 RS232 인터페이스를 통하여 PC로 데이터를 전송한다. 그림 3.184는 센서 모듈에서 측정된 데이터를 마스터 모듈을 통하여 수집하고 전송하는 프로그램을 보인다.

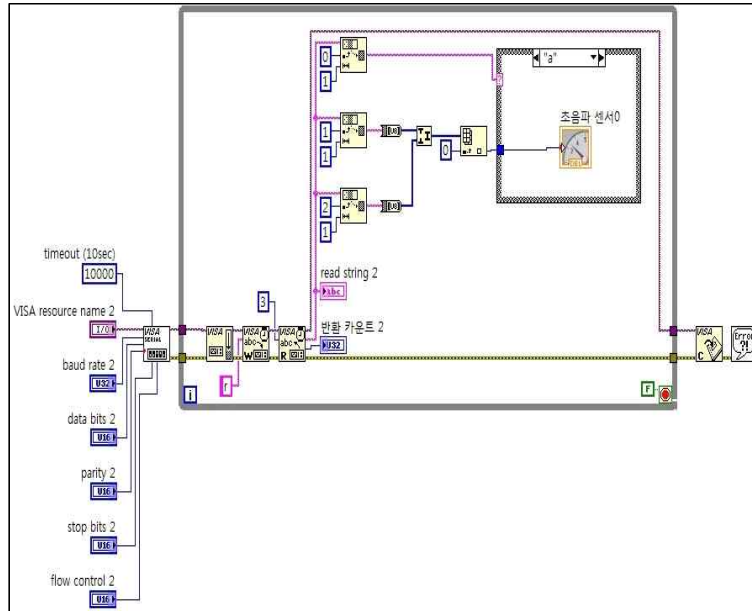


그림 3.184 센서 모듈의 데이터 수집 프로그램

준설토 탈수 처리 공정 제어 시스템은 주 목적이 준설토의 함수비를 낮추는 것에 있으므로 준설토의 탈수량의 측정을 반드시 필요로 한다. 따라서 그림 3.185는 실시간으로 탈수량을 측정하여 공정 제어 프로그램에 업데이트 할 수 있는 프로그램이며, 실시간으로 탈수량을 누적량으로 보여주고 공정이 완료되면 현재까지 수행된 결과를 저장하여 추후에 확인 할 수 있도록 하였다.

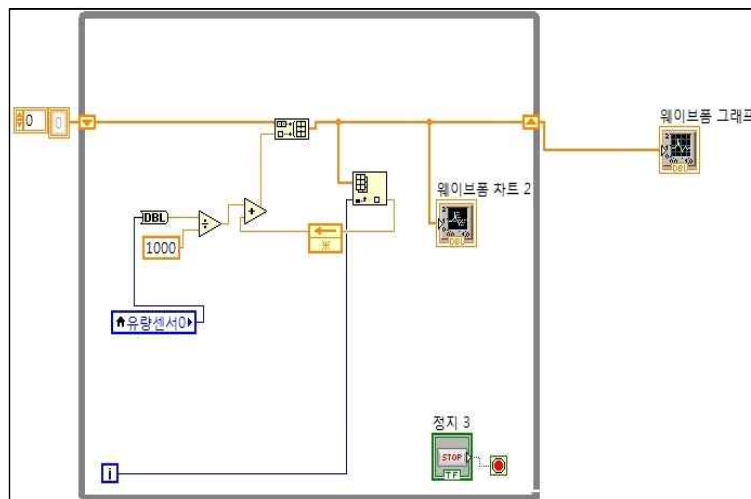


그림 3.185 준설토 탈수량 저장 프로그램

준설토 처리 공정 시스템에서는 여러개의 모터를 사용하므로 효율적인 공정 제어를 위하여 모터를 제어하는 프로그램을 설계하였다. 그림 3.186은 모터 제어 프로그램을 보인다. 개발된 준설토 탈수 처리 공정 제어 시스템은 세 가지 모드로 선택하여 동작 할 수 있도록 설계하였으며, 최적화 모드일때만 측정된 데이터를 이용하여 모터를 제어 할 수 있도록 프로그램을 개발하였다.

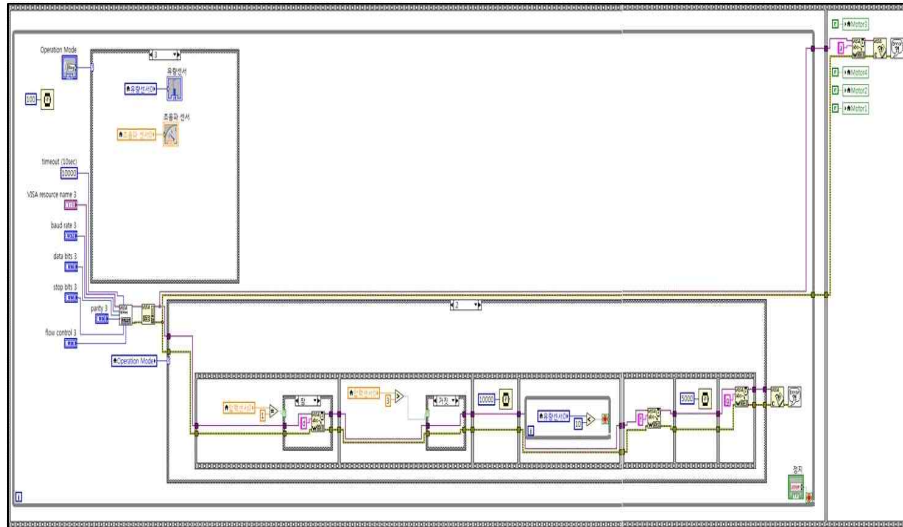


그림 3.186 모터 제어 프로그램

그림 3.187은 개발한 공정 제어 시스템의 순서도를 보인 것으로 프로그램을 처음 시작하면 현재 연결되어 있는 CAN 통신의 마스터를 설정과 PVDF film을 구동할 수 있는 GPIB를 설정하여 인터페이스를 맞추어 주는 순서를 가장 먼저 해주어야한다. 그리고 프로그램을 세 가지 중 한 가지 모드를 선택한다. 그 다음에는 전체 공정 속도를 선택해주어 공정 속도를 조절한다. 이 모드는 자동 모드에서만 동작한다. 공정 속도 설정이 끝나면 센서부를 통하여 측정된 값들이 메인 패널에 보이기 시작하고 준설토 탈수 처리 공정이 진행되게 된다. 준설토의 탈수 처리 공정을 통하여 탈수가 발생되면 탈수량 측정 화면에 데이터가 표시된다. 공정이 종료되면 탈수량은 자동으로 저장된다.

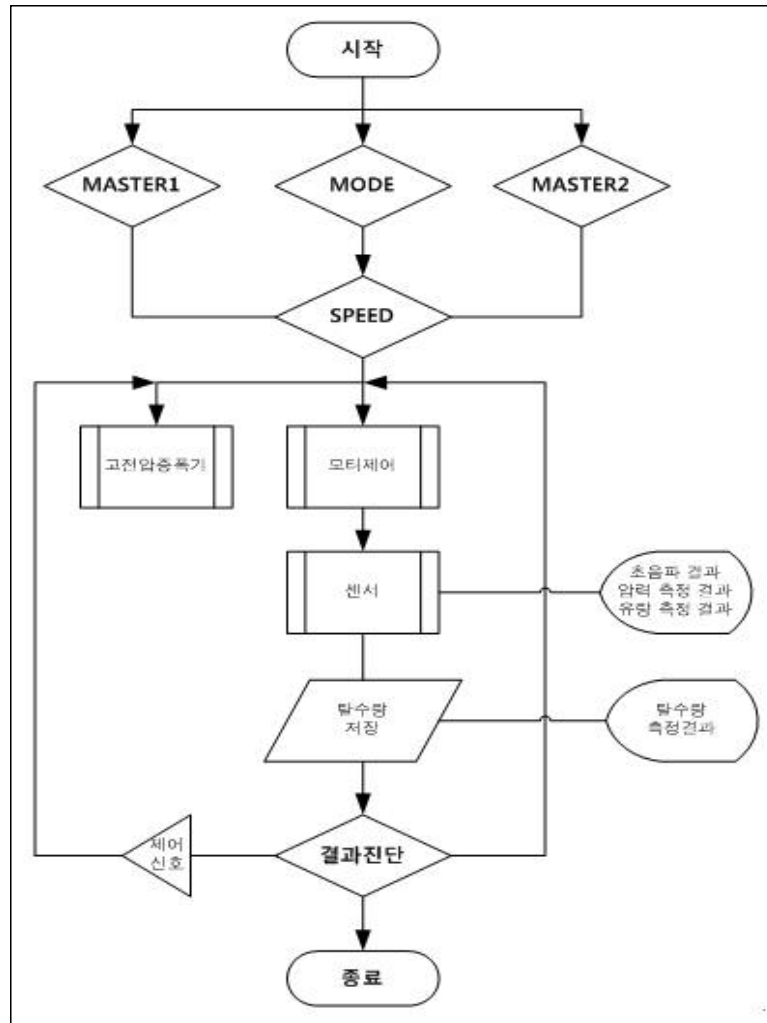


그림 3.187 공정 제어 프로그램 순서도

나. 공정 제어 시스템 실험

그림 3.188은 공정 제어 시스템을 실험실 단위로 구성한 것을 보인 것으로 각 CAN 통신 모듈과 센서 모듈 CAN 통신 분배보드, 함수 발생기, 개발한 PVDF film 구동용 전압 증폭기를 이용하여 공정 제어가 잘 진행되는지 확인하는 실험을 진행하였다. 그림 3.189는 제작한 CAN통신 분배보드와 센서 모듈부를 보인다.



그림 3.188 공정 제어 시스템 실험 구성



(a)



(b)

그림 3.189 CAN 통신 분배 보드(a) 와 센서모듈 (b)

그림 3.190은 개발한 PVDF film 구동용 고전압 증폭기와 전체 실험 사진을 보인다. 개발한 PVDF film 고전압 증폭기는 함수발생기를 공정 제어 프로그램으로 제어하여 사용하였다.

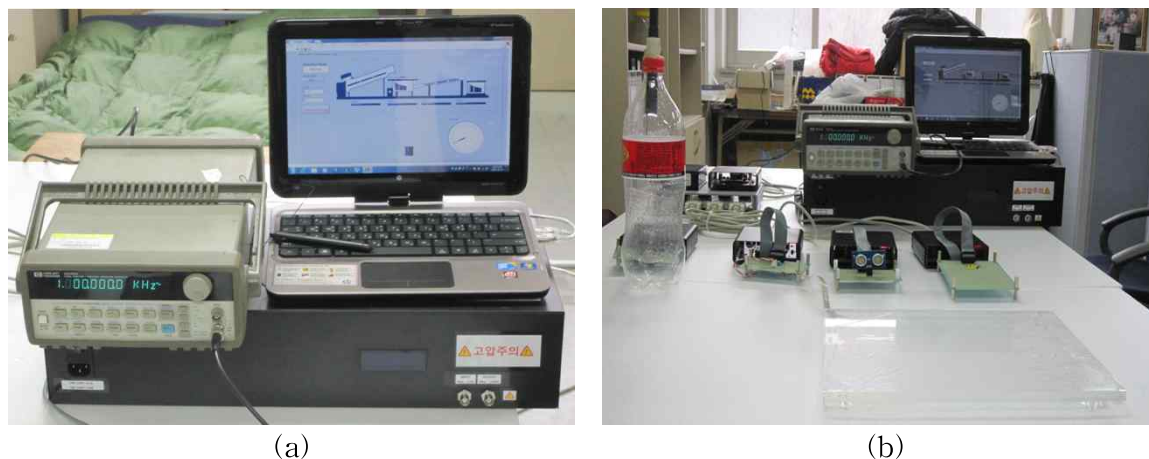


그림 3.190 개발한 PVDF film 구동용 전압 증폭기(a) 와 전체 구성도

(1) 매뉴얼 모드

공정 제어 시스템에서 매뉴얼 모드는 공정 제어 시스템 프로그램 제어를 이용하지 않고 사용자가 임의로 준설토 탈수 처리 장치를 제어하는 수동모드이며 그림 3.191에 보이는 바와 같이 센서부의 데이터만 화면으로 출력되며 나머지 기능들은 동작하지 않도록 설계하였으며 실험을 통하여 동작이 잘 수행되는 것을 확인하였다.

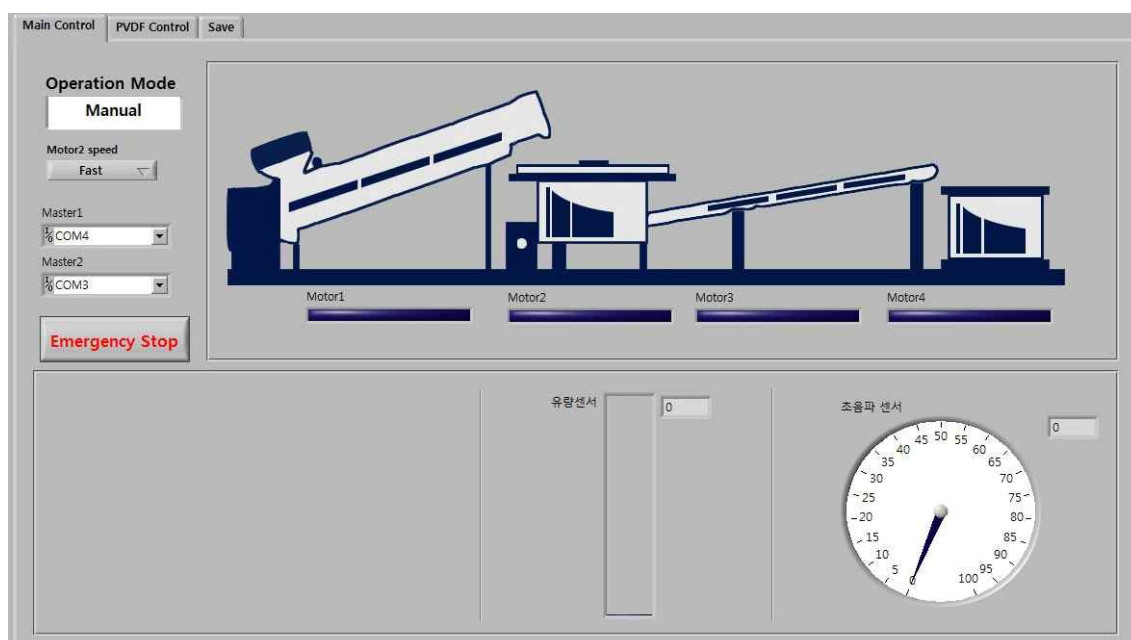


그림 3.191 매뉴얼 모드

(2) 자동모드

자동모드는 모든 모터를 동작시키고 각 센서부를 모두 활성화 시킨다. 다른 모드와 가장 큰 차이점은 공정 처리 속도 제어를 FAST 모드와 SLOW 모드로 설정할 수 있다(그림 3.192와 그림 3.193).

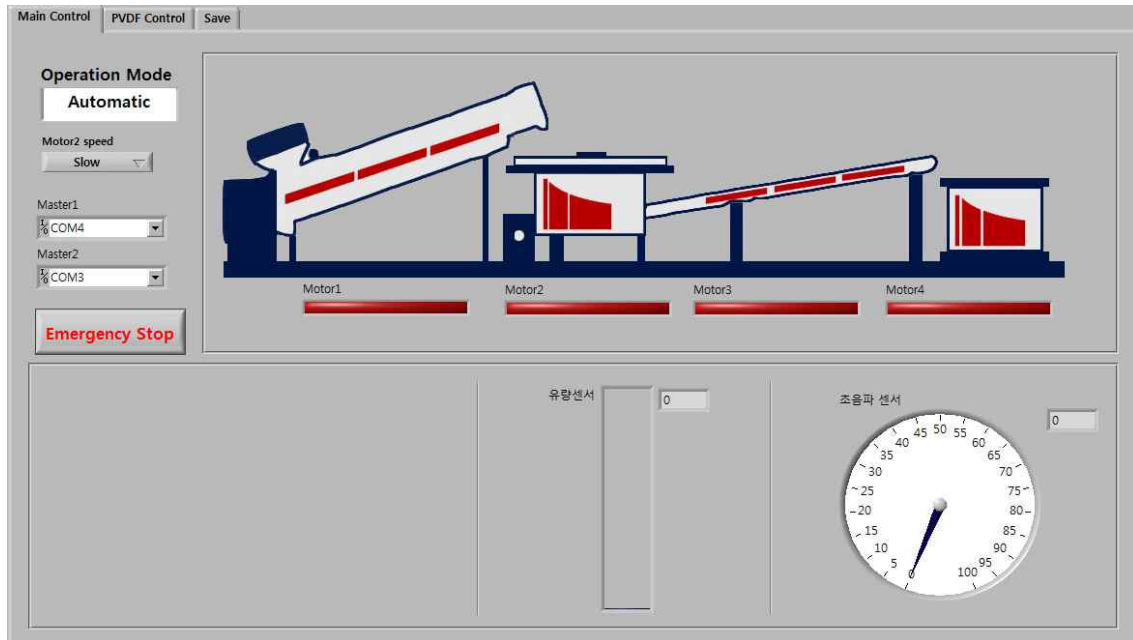


그림 3.192 자동 모드 SLOW 속도 제어

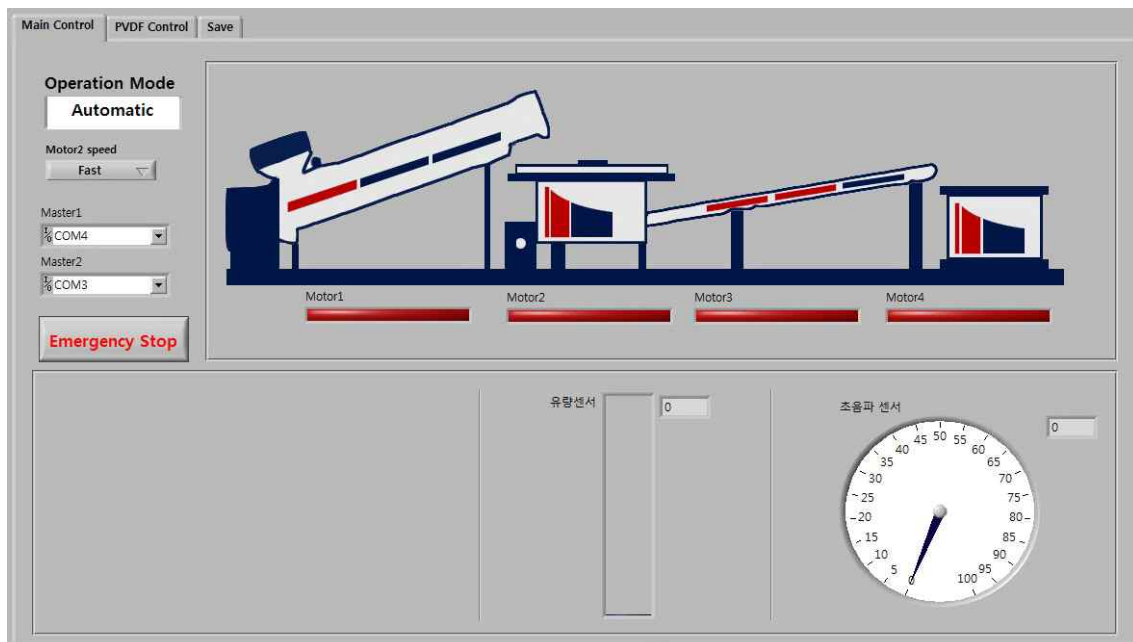


그림 3.193 자동 모드 FAST 속도 제어

(3) 최적화 모드

준설토 탈수 처리 공정 제어 시스템에서 가장 효율적으로 공정 처리를 하기 위하여 최적화 모드를 설계하였다. 최적화 모드는 각 센서부를 통하여 들어오는 데이터를 피드백 받아 각 모터를 제어하고 사용자가 최적의 모드로 공정을 할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 다른 모드들과 가장 큰 차이점은 센서부를 통하여 측정된 값을 피드백 받아서 프로그램 상으로 연산하고 최적의 값으로 모터와 PVDF film 고전압 증폭기를 조절하는 점이다. 실험을 통하여 제어 시스템을 확인한 결과 아직은 최적화하는데 미흡하지만 준설토 탈수 처리를 하는데는 무리가 없을 정도로 제어가 되는 것을 확인하였다. 그러나 여전히 준설토의 량과 함수비에 따라 최적화 모드의 프로그램 수정이 필요하다.

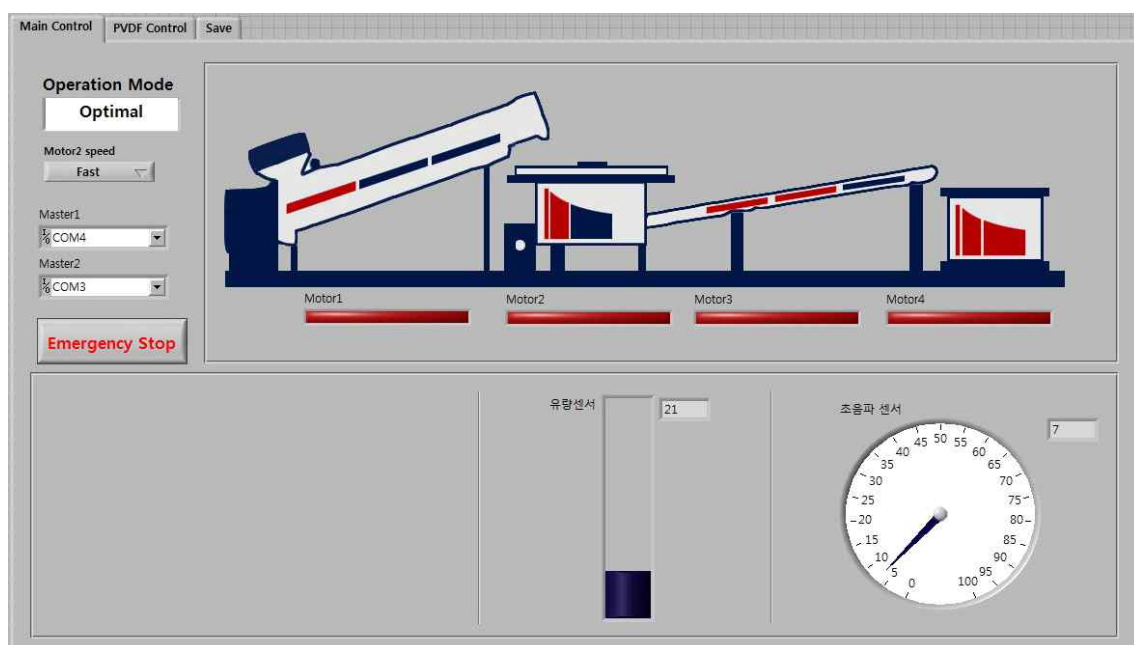


그림 3.194 자동 모드 FAST 속도 제어

제9절 오염 준설토 처리 장치 모델 개발

1. 개요

PVDF 필름을 이용하여 준설토의 탈수 및 정화를 위해 기초 및 응용실험한 결과를 바탕으로 오염 준설토 처리장치를 개발하고자 하였다. 준설토사가 PVDF 필름을 응용한 컨베이어벨트에서 각각 다른 영향인자(음파의 주파수, 강도, 시간 등을 최적화한 조건)를 가진 구간을 지나게 되고 이 과정으로 준설토사의 탈수처리가 되는 개념이다. 또한, 탈수뿐 만 아니라 준설토사가 유류 등으로 오염되어 재활용이 불가능 할 경우에 음용가능 계면활성제를 첨가하고 최종 처리된 토양 및 처리수에 효소기반 바이오 살포제를 이용함으로써 토양을 정화시켜 처리비용 등을 감소시키거나 양질의 흙으로 만들어 이를 재활용할 수 있게 됨으로써 효과적인 준설토사의 활용을 기대하고자 장치를 개발하였다.

2. 처리장치 모델

오염준설토 처리장치는 호퍼를 통해서 준설토사를 투입하고 스크류압축장치로 준설토사가 잘게 부서지도록 설계되었다. 스크류압축장치로부터 배출된 준설토사는 PVDF 필름을 이용한 컨베이어벨트에 안착되어 준설토사의 상태에 따라서 영향인자를 조절하고 탈수효율을 증대시키고자 하였다. 준설토사에 유류 등으로 오염되어 있을 경우에는 호퍼에 오염상태에 따라 바이오 계면활성제를 투입하고 정화시켜 후처리비용을 감소시키거나 양질의 흙으로 만들어 재활용이 가능하도록 하였다. 이 장치의 기본 설계도를 그림 3.195에 정리하였으며 최종 개발된 캐드모형도는 그림 3.196에 종합공정관리 전 각 장비의 사진은 그림 3.197에 나타내었다.

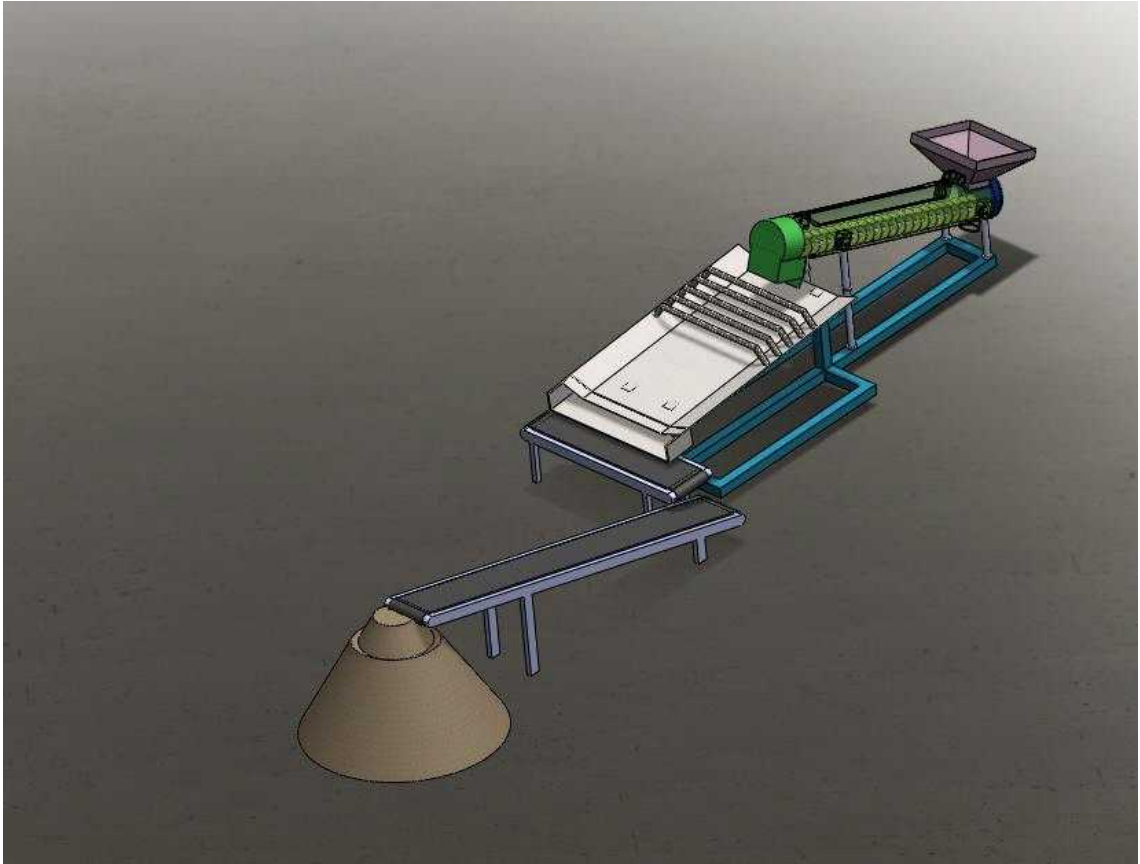
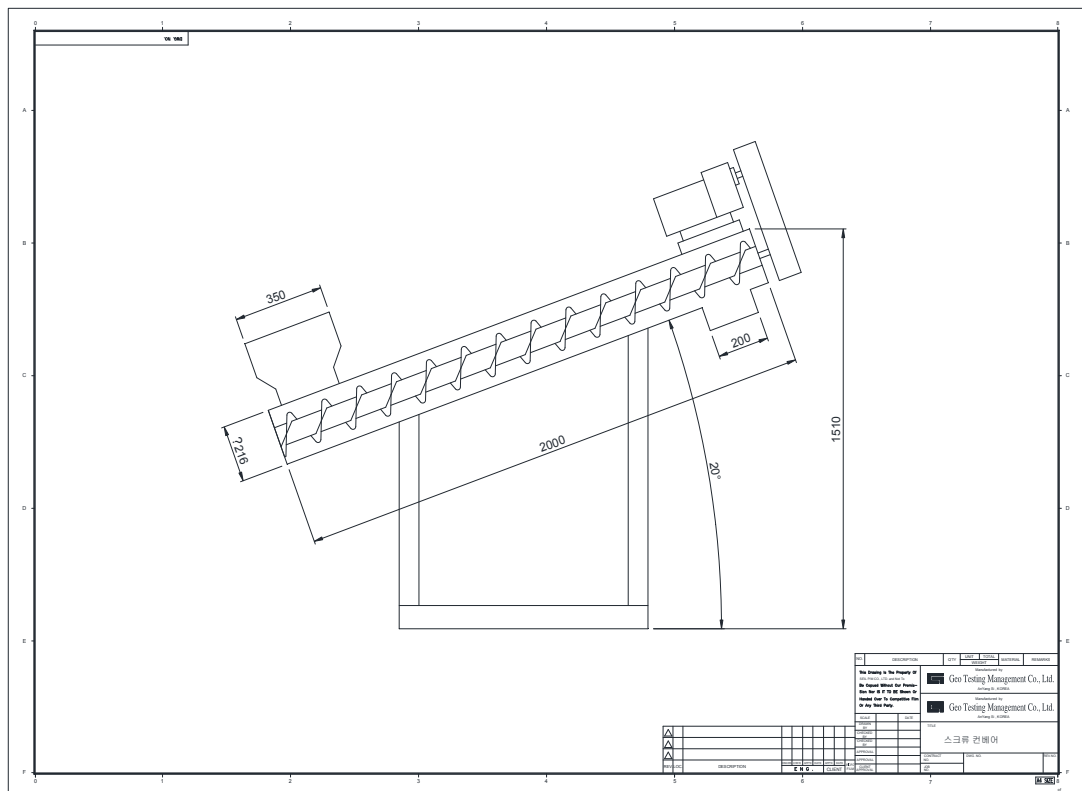
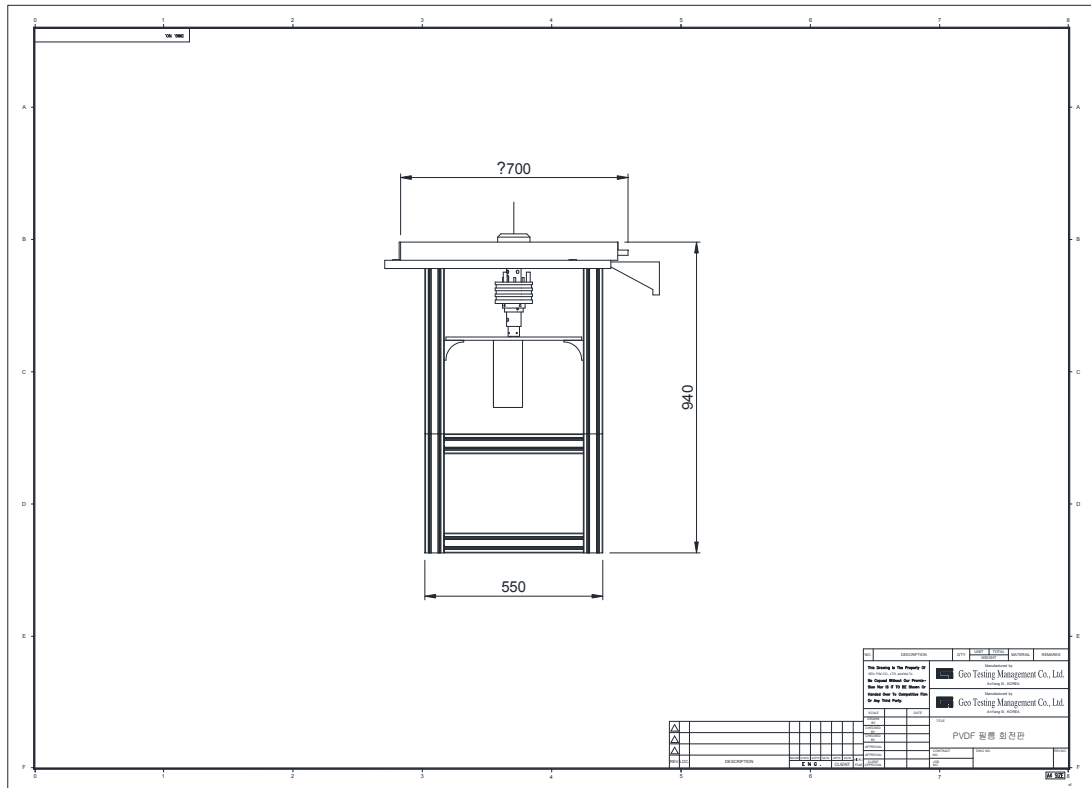


그림 3.195 오염 준설토 처리 장치(기본설계)

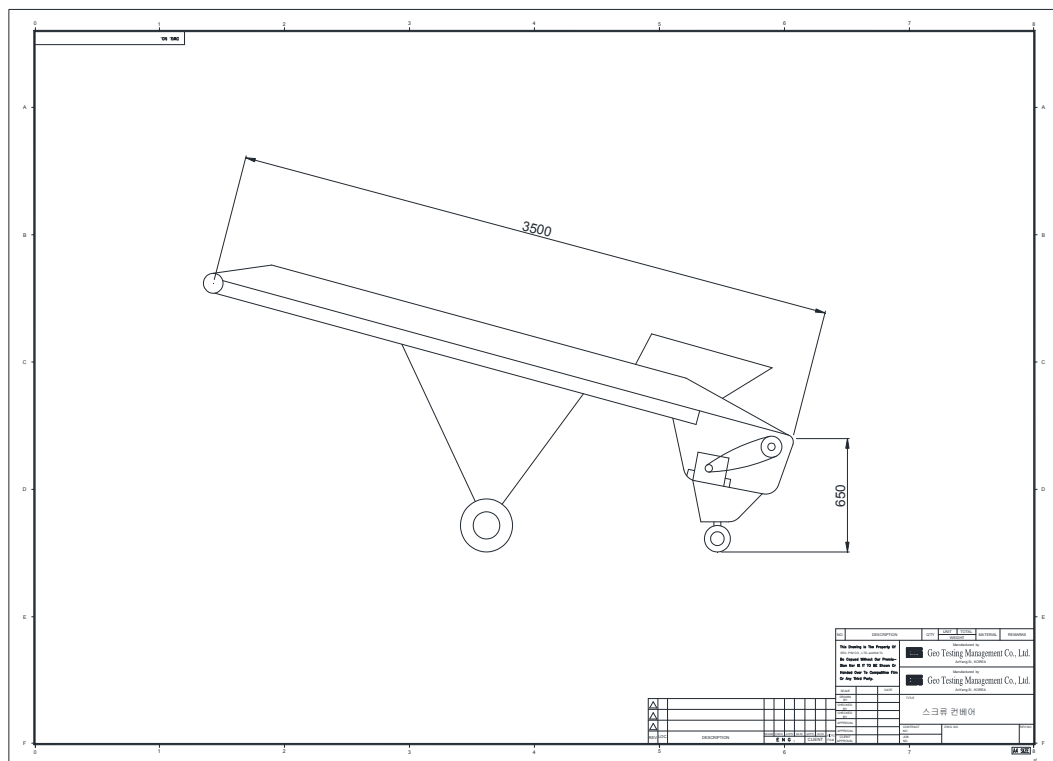


(a) 스크류압축장치

그림 3.196 오염 준설토 처리 장치 CAD 모형도(계속)



(b) 1차 PVDF를 이용한 회전식 탈수장치



(c) 컨베이어벨트

그림 3.196 오염 준설토 처리 장치 CAD 모형도(계속)



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.197 종합공정관리 전 장비사진

제10절 결론

이 연구의 최종목표는 매년 증가하고 있는 준설토 및 복합오염토의 처리문제를 해결할 친환경적 통합탈수정화법 및 장치를 개발하여 준설토 및 복합오염토의 재활용을 활성화하고 국내 현실에 적합한 재활용 기술을 중점적으로 확보하기 위한 것으로 연구결과, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1. 침강·자중압밀시험 결과 초기 간극비는 그 시료에 대한 토질정수가 아니라 초기 슬러리 간극비에 따라 달라지는 경향을 보이며, 이러한 경향은 초기 슬러리 함수비에 따른 확산 이중층 구조의 차이에서 발생한다. 또한 시료 표면 채취법 및 전기 비저항 탐침법을 통해 산정한 초기 간극비는 서로 비슷한 경향을 보였다. 향후 다른 흙의 특성에 관한 충분한 데이터가 축적된다면, 국내 시료에 대한 명확한 기본 물성치와 초기슬러리 간극비와 초기 간극비 상관관계를 얻을 수 있으며, 이 상관관계는 비선형 유한변형 압밀해석에 있어서 국내 준설토매립장 설계에 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.
2. 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계는 저응력 및 고응력 구간에서 서로 다른 경향을 보이며, 간극비가 큰 저응력 구간에서 그 변화폭이 큰 것을 확인할 수 있었다.
3. 화학분석 결과 본 연구의 경상북도 ○○지역 하상 준설토 경우 점성 준설토의 경우 모든 지역의 조건에 만족하여 특별한 정화 처리 없이 활용이 가능하며, 사질 점성토의 경우는 불소 검출량이 1, 2지역의 기준치보다는 높게 검출되었으나, 본 연구과제에서 사질점성토를 활용하고자하는 토목공사의 뒷채움재 및 경량혼합재 활용에는 특별한 정화처리없이 활용이 가능하다.
4. 낙동강 사질 준설토의 경우 측정장비에 관계없이 함수비가 증가할수록 열전도도가 증가하였다.
5. 일반적으로 다짐시료내로 관입이 필요한 비정상 탐침법의 경우는 접촉에 의해 열저항을 측정하는 비정상 열선법(QTM-500)에 비해 비교적 큰 열저항(낮은 열전도도)이 측정된다. 이는 탐침 관입시 입상시료의 교란을 유발하여 탐침과 시료의 접촉이 불량하게 되고 교란으로 인해 간극이 생기게 되기 때문이다. 추가로 형성된 간극 사이 공기나 수분으로 인해 열저항이 실제보다 높게 평가되는 경향이 있다. 즉, 다짐 입상체의 열저항 측정은 탐침법보다 접촉에 의한 열선법이 측정에 신뢰성을 준다고 볼 수 있다.
6. 현장에서 사질 준설토를 되매움재로 사용시, 모래의 함수비를 충분히 높게 유지하면서 높은 다짐에너지로 다지는 것이 해당 준설토의 열특성 향상에 필요하다.

7. 사질토, 사질점토, 화강풍화토를 대상으로 PVDF 필름을 사용하여 탈수할 경우, 탈수량이 PVDF 필름을 사용하지 않고 탈수한 방법보다 상대적으로 높게 나타났다.
8. 탈수량을 비교·분석한 결과, 모든 경우에서 자연탈수방법의 경우보다 PVDF 필름을 적용할 경우에 탈수효율이 높은 것으로 나타났다. 대상지반이 사질토일 경우에는 사질토의 특성(투수계수가 높음)으로 큰 효과를 보이지 않았으나 사질점토의 경우에서 PVDF 필름을 이용한 유출량이 자연 탈수보다 효과적인 것을 알 수 있었다.
9. 계면활성제를 이용한 오염원 제거 실험에서 계면활성제만 사용하여 오염원을 제거한 방법으로 측정한 TPH 값과 계면활성제를 이용한 후에 초음파를 조사하여 오염원을 제거한 방법으로 측정한 TPH 값이 오염원을 제거하지 않은 오염토의 TPH 값보다 크게 감소하였다. 또한, 계면활성제만을 이용한 경우와 계면활성제와 초음파를 이용하였을 때의 TPH 감소율을 비교한 결과, 거의 유사한 경향을 보였으나 대부분 계면활성제와 초음파를 이용한 경우에서 TPH값이 낮게 나타났다.
10. PVDF 탈수의 경제성 분석을 정리하여보면 아래와 같다.

탈수법	탈수 후 함수비 (%)	처리비용지수	비고
열탈수	50	100	초기함수비 : 97% 처리량 : 26 m ³ /day
벨트프레스	72	121	
필터프레스	60	111	
Decant	75	132	
PVDF 탈수 (본연구)	67	97	

- 15년 운전 비용과 초기원가 포함, 열탈수 처리비용을 100 기준
- 열탈수(에너지 비용), 벨트프레스(응집제 비용)의 추가적 비용
- PVDF 탈수 : 초기 투자비용과 운전에 소요되는 에너지가 작고 1톤트럭에 맞춤 제작으로 인한 이동성이 장점

위의 결론을 종합적으로 판단한 결과, PVDF 필름으로부터 준설토의 탈수효율은 자연 탈수방법보다 높게 나타났으며(사질점토의 경우 약 30% 증가), 자유롭게 이동 가능하고 자동제어시스템을 구축한 준설토 처리 통합 장치를 개발함에 따라 현장에서 즉시 준설토를 탈수 할 수 있을 것으로 판단되며, 유류에 오염된 오염토의 경우에도 응용가능한 계면활성제(SDS)를 사용하여 토양환경보전법에서 제시하고 있는 TPH 성분의 토양오염기준인 2,000mg/kg 이하로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 목표달성도

PVDF, 바이오 계면활성제 및 효소기반 살포제를 이용한 준설토 및 복합오염토의 정화기술 연구 개발 과제의 연구개발 최종 목표달성도는 다음 표 4.1과 같다.

표 4.1 연구개발 최종 목표달성도(2011년 12월 28일)

목 표	달 성 도 (%)	내 용
• PVDF를 이용한 준설토 및 복합오염토 탈수 및 정화기술	100	• PVDF 및 계면활성제 적용 시 탈수 및 세척효율 검토 • 처리 전 후 준설토의 기본 토성시험 • 초연약 준설토의 자중압밀에 따른 흡착된 잔류 오염원의 외부 유출에 대한 시험적 평가와 해석적 검증 • 점착력이 큰 세립 준설토에 대한 처리방안 제시 : 탈수에 의한 체적감소로 인한 매립효율 증대, PSDDF 활용을 통한 준설토매립장(인공섬포함)매립 시나리오제시 • 사질토성 준설토의 재활용 방안 제시 : 준설토의 전열특성(열전도도) 평가를 통해 지중열교환기 및 송배전관로의 뒤편재로서 가능성 평가, 기타 포장재료, 경량 혼합재 및 지반구조물 뒤편재로서 활용법 제시
• 음용가능한 계면활성제를 이용한 준설토 및 복합오염토 정화기술	100	• 준설토 오염을 제거하기 위한 계면활성제의 자료 수집 및 분석 • 준설토 오염을 제거하기 위한 계면활성제 종류 결정
• 오염 준설토 처리 장치 모델의 개발	100	• 효율적인 에너지 사용을 위한 공정시스템제어연구 • 효율적 운영 및 관리를 위한 방안 연구 • 효율적인 에너지 사용을 위한 공정시스템제어연구 • 공정 운영 안정성 분석 및 최적화 설계 • Scale up을 통한 현장 적용성 검토(처리 기기 제작)

2. 관련분야의 기여도

- 가. 순수 물리적 힘(PVDF, 즉 파동 및 충격에너지, 전기에너지가 운동에너지로 변하는 압전특성을 이용한 에너지)을 이용한 처리장치 및 기술이면서 화학약품 전무한 정화법(chemical free zone)으로 친환경적 공법 개발이라는 취지에 크게 부합, PVDF적용은 초음파기술의 단점과 한계를 극복할 수 있는 차별화된 기술이라고 판단되며, 준설토 및 복합오염토양 정화기술에 관한 국내외 기술수준을 크게 향상시킬 수 있을 것이라 예상된다.
- 나. 친환경에 대한 학문영역과 심도가 확대되면서 향후 이 연구에 대한 수요는 다른 어느 분야보다도 급증할 것으로 보이며 토양세척 기술을 질적, 양적 측면에서 향상시킬 수 있다는 점에서 매우 고무적이며, 이로 인한 취업의 기회증대와 활성화가 이루어질 것으로 기대된다.
- 다. 한미 FTA 체결을 기점으로 하여 미국을 비롯한 해외건설시장을 보다 적극적으로 개척해야할 필요성이 제기되었으며, 이 연구에서 개발할 고부가가치의 첨단 토목기술 적용을 통하여 국내외 시장확대와 국내 건설산업의 선진화 계기가 될 것으로 예상된다.
- 라. 이 연구개발의 기초이론 및 실험을 바탕으로 다양한 응용산업 현장에 종사할 전문인력을 양성하고 인접분야(BT, ET)로 진출할 인력을 배출할 수 있을 것으로 기대된다.
- 마. 친환경의 관한 연구가 인간의 삶에 유익하게 응용되고 산업화로 이용가능하게 됨에 따라 이에 대한 이해와 지식의 축적은 어느 때 보다도 중요성이 높아지고 있어 발전 가능성이 무궁한 연구개발이라 볼 수 있고 친환경시대에 부응하는 전문적 능력과 폭넓은 소양을 갖춘 고급 연구 인력 양성이 가능할 것으로 예상된다.

제5장 연구개발결과의 활용계획

1. 연구결과의 활용방안

가. 이 연구개발의 성공으로 창의적인 세척관련 기술개발을 이룰 수 있고 환경 친화적이며 경제적 이점을 동시에 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

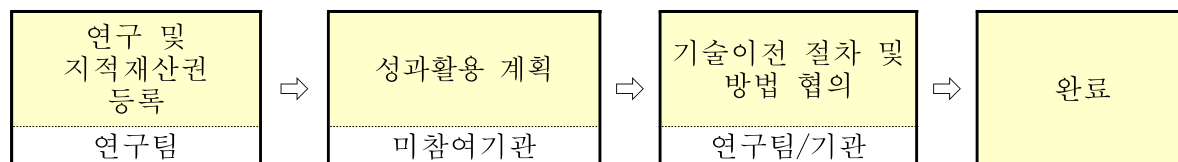
나. 이 연구로 원천 기술이 확보되고 추후 실/대형 및 현장적용을 위한 연구가 진행된다면 이를 이용한 기업화 또는 해당 기업으로의 기술이전에 상당히 유리한 위치를 확보할 수 있을 것이며 녹색기술을 주안점으로 국제적 위상확립에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

다. 오염부지 진단 및 평가, 평가예측, 지하수 복원 설계 및 오염복원, 사후관리 등 환경 관련 전문 기업으로 도약할 수 있을 것으로 판단된다.

라. 실용화 대상 요소기술을 다음과 같이 정리하여 성과활용에 대한 구체적 계획을 수립하였다.

요소기술	형태	일정
피브이디에프 필름을 이용하는 진동기 및 이를 구동하는 방법	특허출원	출원번호: 10-2011-0137981
압전필름을 이용한 준설토정화시스템	특허출원	출원번호: 10-2010-0052126
준설토 회전식 탈수장치	디자인출원	출원번호: 30-2012-0000231
압전필름과 초음파를 이용한 오염토(유류 및 중금속) 처리법	특허출원	2012년 상반기 출원 계획
압전필름과 초음파를 이용한 계면활성제의 오염토(유류 및 중금속)처리 효율 증대법	특허출원	2012년 하반기 출원 계획

마. 과제의 미참여기관이 본 연구의 성과를 활용하고자 할 경우 다음 행정절차에 의해 진행하며 세부 연구를 주제별/기관별로 정리하여 성과 활용이 용이하도록 하였다.



구 분	주관연구기관	공동(위탁)연구기관	참여기업
담당자 및 연락처	명지대학교 토목환경공학과 김영욱 yukim@mju.ac.kr PVDF를 이용한 준설토(오니토) 탈수 / 계면활성제를 이용한 준설토 정화 명지대학교 전자공학과 김정국 jk.kim@mju.ac.kr 공정 자동화 시스템 / PVDF 구동을 위한 적정 앰프 연구	고려대학교 건축사회환경공학과 최항석 hchoi2@korea.ac.kr 준설토의 특성, 처리 효율에 따른 준설토의 침강 및 자중압밀 특성, 초연약 준설토의 자중압밀에 따른 흡착된 잔류 오염원의 외부유출에 대한 시험적 평가와 해석적 검증	삼현피에프/지오티엠 slmania@hanmail.net 오염 준설토 처리 장치 개발을 위한 시스템 및 장치 설계 및 모형 제작

바. 기술의 보급을 위한 연구참여 기관별 지적재산권 현황

명지대학교 토목환경공학과 특허명(특허번호)		국가명	등록일
초음파 발진기 (초음파를 이용한 슬러지 처리기) (30-2008-0003173)		대한민국	2008(등록)
초음파를 이용한 연직배수재 및 관리방법 (10-2007-0097451)		대한민국	2007(등록)
가변형 연직배수재 및 이를 이용한 시공방법 (10-2007-0097453)		대한민국	2007(등록)
흡수팽창재를 이용한 연약지반 탈수 및 배수장치 그리고 그 방법 (10-2007-0126975)		대한민국	2007(출원)
명지대학교 전자공학과 특허명(특허번호)			
AUTOCAPTURE PACING/SENSING CONFIGURATION (US20090187228)		미합중국	2009 (출원)
AUTOCAPTURE PACING/SENSING CONFIGURATION (US7512441)		미합중국	2009
AUTOCAPTURE PACING/SENSING CONFIGURATION (US7092756)		미합중국	2006
Method of extracting low-frequency or high-frequency component from a signal with slope tracing waves (US20070232947)		미합중국	2007 (출원)
기울기추적파를 이용한 저주파 또는 고주파 신호 분리방법 (10-0675019-0000)		대한민국	2007
고려대학교 건축사회환경공학과 특허명(특허번호)			
저응력 자중 압밀 시험 장치 및 이를 이용한 자중 압밀시험 방법 (10-2008-0010043)		대한민국	2008 (출원중)
지중 열교환기용 그라우트재 (10-2009-0023688)		대한민국	2009 (출원중)
에너지 터널 및 그 시공방법 (10-2009-0061662)		대한민국	2009 (출원중)
삼현피에프 특허명(특허번호)			
중공부를 갖는 합성거더 및 이를 이용한 합성 거더 교량의 시공방법 (10-2009-0028057)		대한민국	2009(출원)
부모멘트를 효율적으로 지지하면서 시공성이 향상된 연속화 교량의 상부구조 및 그 시공방법 (10-2009-0061851)		대한민국	2009(출원)
단순보 형식으로 제작되어 지점부에서 발생하는 휨모멘트를 최소화하는 합성라멘교의 시공방법 (2008-0043237)		대한민국	2008(출원)
휨 하중이 미리 도입된 프리스트레스트 가설 교량 및 그 제작공법 (제10-871831호)		대한민국	2008(등록)
힌지구조의 제작설비를 이용한 교량용 합성거더의 제작방법 (2008-0077730)		대한민국	2008(출원)
합성거더 교량의 유지관리 장치 및 이를 적용할 수 있도록 하는 교량구조 (2008-0077959)		대한민국	2008(출원)
동바리 설치가 필요없는 합성 라멘교의 시공방법 (2008-0124441)		대한민국	2008(출원)
장경간화가 가능한 교량용 분절형 프리스트레스트 콘크리트 빔 및 그 제작방법 (10-2008-0162014)		대한민국	2008(출원)

2. 연구결과의 활용주체 및 활용 대상지역

가. 활용주체

- (1) 기술이전에 따라 토양 정화업 및 준설 등록업체
- (2) 소규모 오염토양 자체처리가 가능한 군부대 등
- (3) 토지 및 주택개발사업 중 발생한 오염토양 정화 및 처분

나. 활용대상지역

- (1) 해안 및 항만건설/개발시 인공습지, 매립지, 서식지 및 인공섬 개발 사업 등
- (2) 미군군부대 이전 계획지역 환경복원사업
- (3) 공단지역, 전 공장지역, 매립지 등 오염 의심지역
- (4) 토지 및 주택개발사업 등 토양정화가 시급한 지역
- (5) 군부대, 주유소, 유해물질 저장탱크 주변 등 정화명령 조치지역

3. 기대효과 및 파급효과

가. 기대효과

(1) 기술적 측면

- 이 연구개발의 성공을 통하여 준설토 및 복합오염토 정화기술수준을 선진국대비 80% 수준에 이를 수 있으며, PVDF라는 환경친화적인 녹색에너지를 사용하여 처리 효율을 높임에 따라 기존 준설토 및 복합오염토 정화기술 대비 화학약품사용량을 대폭 감소함으로서 경제적 측면과 환경적 측면을 동시에 개선할 수 있을 것으로 판단된다.
- 뿐만 아니라 현재까지 준설토 및 복합오염토양의 정화에 관한 국내기술의 취약점이 이 연구를 통하여 상당한 개선이 가능할 것으로 기대된다.
- 녹색정화 처리 전후의 준설토의 물리 화학적 특성 평가와 준설토 성상 및 녹색정화 처리 효율에 따른 준설토 활용방안 제시하고, 점착력이 큰 세립토의 경우는 효과적인 탈수공정을 통하여 준설토 매립체적 감소시켜 비교적 양질의 사질토의 경우는 토목공사용 뒤채움재 및 경량 혼합재로 개발이 기대된다.
- 마이크로프로세서를 이용하여 공정 시스템을 자동 제어함으로서 보다 효율적이고 개선된 유지관리 기술의 개발이 기대된다.

(2) 환경적 측면

- 순수 물리적 힘(PVDF, 즉 파동 및 충격에너지, 전기에너지가 운동에너지로 변하는

압전특성을 이용한 에너지)을 이용한 처리장치 및 기술이면서 화학약품 전무한 정화법(chemical free zone)으로 친환경적 공법 개발이라는 취지에 크게 부합된다. 또한, PVDF적용은 초음파기술의 단점과 한계를 극복할 수 있는 차별화된 기술이라고 판단되며, 준설토 및 복합오염토양 정화기술에 관한 국내외 기술수준을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 경제적/산업적 측면

- PVDF적용 및 오염물질의 혼합정도/농도에 따른 설계된 세척액의 적용을 통한 약품 사용량의 감소뿐만 아니라 약품사용에 따른 부식을 방지하기 위한 초기시설비와 유지에 관한 비용부담을 감소할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 약품사용량의 감소에 따른 오염부하량의 감소로 후처리문제를 해결함과 동시에 바이오 에너지인 PVDF를 적용함에 따라 사회적 호응도가 클 것으로 판단된다.

제6장 참고문헌

1. 김남천 외, 환경인을 위한 수처리실험, 동화기술, pp.41~47, 2000
2. 고석오, “소수성 유기오염물의 계면활성제에의 흡수계수 결정.” 대한환경공학회지. 21(8).
3. 박용하, 윤서성, 방상원, 김미정, 양재의 이양희, “토양오염지역의 관리 및 복원방안 연구”, Korea Environment institute Re-07, p7-15
4. “신계면활성제 입문”, 한국염색기술정보사 편집국, 1판, 1996.
5. 신현무, “유류오염토양의 토양세척을 위한 계면활성제 선진방법.”, 경성대학교 건설 환경공학부, 1999
6. 염익태, 안규홍, “계면활성제를 이용한 In-Situ 토양세척”, 한국토양학회지 Vol. 2. No. 2. pp 9~24, 1997.
7. 윤현석, “계면활성제 탈착촉진법을 이용한 유기화합물로 오염된 토양의 정화” 서울대학교 석사학위 논문, pp 4~41, 1999.
8. 위지혜, 홍성연, 이대수, 박상우, 최항석(2011), “송배전관로 되메움재로 활용하기 위한 국내 순환골재의 다짐 및 열적 특성 평가”, 한국지반공학회 논문집. 제27권 제7호 pp. 17 - 33
9. 장민, “오염토양 정화를 위한 세척제의 특성에 관한 연구”, 광운대학교 석사학위논문, pp59~65, 1997
10. 차세대 시스템 설계 연구실, “준설토 처리 공정 운영 시스템 연구 보고서”, 명지대학교 전자공학과, 2010.06.
11. 조현주, “토양세척공정에 사용되는 계면활성제 연구 동향”, 한양대학교 환경공학과 석사학위 논문, pp 9~45, 2000.
12. 조윤경, “계면활성제를 이용한 토양에서의 유기오염물질의 고정화 방안에 관한 연구”, 이화여자대학교 대학원 석사학위 논문, pp 7~32, 1998.
13. 차세대 시스템 설계 연구실, “준설토 처리 공정 자동화 시스템을 위한 통신 시스템 연구 보고서”, 명지대학교 전자공학과, 2010.06.
14. 차세대 시스템 설계 연구실, “천장식 주유기를 위한 CAN 통신 시스템 설계 규격서”, 명지대학교 전자공학과, 2010.03.
15. 최상일, 류두현, 김형수, “유기물질에 의해 오염된 토양에 대해 In-Situ 세척기법의 적용성 연구”, 한국토양학회지, Vol. 1, No. 2, pp 61~72, 1996.
16. “토양환경공학”, 향문사, 2007.
17. 환경부, 2007a, 오염토양정화방법가이드라인
18. Ahn, C.K., Y.M. Kim, J.M. Park and S.H. Woo, Selective adsorption of phenanthrene on activated carbons for surfactant reuse in soil washing process., Stud. Surf. Sci. Catal. 159,461~464(2006)
19. Archie, G. E. (1942). “The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics.” Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers., 146, 54-62.
20. ATMEL, “ATMEGA128” Datasheet. Rev.8151D-AVR-07/09.

21. ATMEL, "AT90CAN128" Datasheet. Rev.7679H-CAN-08/08.
22. Bear, J., 1979. *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York.
23. Been, K. and Sills, G. C. (1981), "Self-weight Consolidation of Soft Soils : An Experimental and Theoretical Study", *Geotechnique*, Vol. 31, 519-535.
24. Bo, M. W. (2002), "Deformation of Ultra-Soft Soil", Ph.D. Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
25. Braja M. Das, 2006. *Principles of Geotechnical Engineering*, California State University, Sacramento, pp. 156-160.
26. Buermann, W. J. Kinzel., December 8-10,1997. Theoretical and Experimental Investigation of the Pressure-dependent Permeability of Unsaturated Soils with Regard to Flow by Vibration in Porous Media. 1GT's Tenth Symposium on Gas, Oil, and Environmental Biotechnology and Site Remediation Technologies, Orlando.
27. Burmann, W.; Kinzel, J., 1997. On the Permeability of Porous Media Like Soils, Packings or Dumping Material Influenced by the Fluid Pressure(in German), First Report on the Deutsche Forschungsgemeinschaft Research Project Th159/18-1: Influence of Mechanical Vibrations on Fluid Flow in Porous Media-Flow by Vibration(in German), Report No. 736, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe.
28. Cargill, K. W. (1983). "Prediction of consolidation of very soft soil." *Journal of Geotechnical Engineering*,. 110(6).
29. Cargill, K. W. (1986), "The large strain, controlled rate of strain (LSCRS) device for consolidation testing of soft fine-grained soils", Technical Report GL-86-13, Waterways Experiment Station, Corps of Engineer, Vicksburg, MI.
30. Daily, J. W.; Harleman, D. R. F., 1996. *Fluid Dynamics*, Addison-Wesley, Reading.
31. DANIEL J. INMAN, 2007. *Engineering Vibration*. Pearson Education, Inc.
32. Edwards, D.A., Luthy, R.G., and Liu, Z.(1991). "Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in micellar nonionic surfactant solutions." *Enviro. Sci. & Tech.*, Vol.25, No.1, pp.127-133
33. Exner, J.H., Alperine, E.S., Groen, A.Jr., and Morren, C.E.(1984). "In-place detoxication of diesel-contaminated soil." *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, Vol.9, No.2, pp.113-136.
34. Imai, G., Tsuruya, K., and Yano, K. (1979). "A treatment of salinity in water content determination of very soft clays." *Soil and Foundations*. 19(3), 84-89.
35. JongWoo Lee, Sangjun Lee, Minkyu Kim, Kiil Yang, Jungkuk Kim and Woong Huh, "Development of Vehicle Condition Monitoring System using CAN Communication" *Journal of the Research Institute of Industrial Technology* Volume 24, 2005 MyongJi University, pp.200-205.
36. Kinzel, J., 1996. Investigation of the Permeability of Fine Sand for Air-Containing Water as a Function of the Fluid Pressure (in German), Diploma Thesis, Institute

- for Hydromechanics, University of Karlsruhe.
37. Konrad Etschberger, 2001, "Controller Area Network", IXXAT Press.
 38. Krishna R. Reddy, Robin Semer, Jeffrey A. Adams , Air flow optimization and surfactant enhancement to remediate toluene-contaminated saturated soils using air sparging Environmental Management and Health Volume 10, Issue 1 pp52-63 ISSN 0956-6163
 39. Lee, J. S. (2003) High resolution geophysical techniques for small-scale soil model testing. Ph.D. Thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
 40. Liu, Z, Laha, S., and Luthy, R.G (1991) Surfactant solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in soil-water suspensions, Water Sci. Technol., Vol. 23, pp. 475-485.
 41. Mari shin et al, Effect of surfactant alkyl chain length on soil cadmuin desortion using surfactant/ligand system, Chemosphere, 58, 735-742, 2002.
 42. McDermott, J.B., Unterman, R., Brennan, M.J., Brooks, R.E., Mobley, D.P., Schwartz, C.C., and Dietrich, D.K.(1989). "Two strategies of PCB soil remediation: biodegrada-tion and surfactant extraction." Environmental Progress, Vol.8, No.1, pp.46-51.
 43. Morris, P. H. (2002), "Analytical solutions of linear finite-strain one -dimensional consolidation", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol.128, No.4, 319-326.
 44. Neupane D., "Gemini Surfactant-Treated Oxide Particles for Removal of Nonionic Organic Compounds from Aqueous Phase", University of Hawaii, 11~16, 27~30, 1997.
 45. NXP, "TJA1040/TJA1041 high speed CAN transceiver" Application note, AN00094, Rev.03 - 8 November 2006.
 46. NXP, "TJA1040 high speed CAN transceiver" Application note, AN10211, Rev.02 - 10 November 2006.
 47. NXP, "PCA82C250 CAN controller interface" Datasheet, Rev.06 - 26 March 2009.
 48. Park J. W and Jaffe P.R., " Partitioning of Three Nonionic Organic Compounds between Adsorbed Surfactants, Micelles and Water", Environmental Science & Technology, Vol.27, No.12, 2559~2565, 1993
 49. Peter Hank and Egon J?hnk, "SJA1000 Stand-alone CAN controller" Application note, AN97076, PHILIPS, 15 December 1997.
 50. PHILPS, "SJA1000 Stand-alone CAN controller" Datasheet, 04 Jan 2000.
 51. Rosen M.J, "Surfactant and Inter facial Ph en omena ", chap . 3-4, 2nd ed John Willy & Son s, Inc NewYork, 1989.
 52. Rosen, M.J., "Surfactant an d Interfacial Phen omena ", 2nd Edition, John Wiley and Son s, New York, 1989.
 53. Stark, T. D., Choi, H., and Schroeder, P. R. (2005), "Settlement of Dredged and Contaminated Material Placement Areas, I: Theory and Use of Primary

- Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill." *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 2, pp. 43–51.
54. Stark, T. D., Choi, H., Schroeder, P. R. (2005), "Settlement of Dredged and Contaminated Material Placement Areas, II: Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill Input Parameters." *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 2, pp. 52–61.
 55. Thomas Suerman, "Upgrading Note PCA82C250/251 ' TJA1040, TJA1050 V1.0", PHILIPS, 20th of November 2001.
 56. Victor L. Streeter; E. Benjamin Wylie; 1985. *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill.
 57. William F. Hughes, Ph. D.; John A. Brighton, Ph. D.;1999. *Fluid Dynamics*. Academic: London.
 58. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. and Heilberg, S., (1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.97, No.SM10, 1393–1413.
 59. Wylie, E. B.; Streeter, V. L. Suo, L., 1993. *Fluid Transients in Systems*, Prentice Hall, New York.
 60. Xu, S., Sheng, G., and Boyd, S.A. (1997) Use of organoclays in pollution abatement. *Adv. Argon*, 59, pp. 25–62.
 61. Znidarcic, D. (1999). "Predicting the Behavior of Disposed Dredging Soils." *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, Proceedings of the 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 2, pp.877–886.

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술 혁신사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.