

최종보고서(일반과제용)										보안등급		
										일반[✓], 보안[]		
중앙행정기관명	국토교통부			사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업					
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명		사회이슈해결					
공고번호	공고-제2호			총괄연구개발 식별번호		연구개발과제번호		21CTAP-C152061-03				
국가과학기술 표준분류	EF0601		70%	EF0602		20%	EH0502		10%			
총괄연구개발명	국문	-										
	영문	-										
연구개발과제명	국문	전력 및 열에너지 복합 생산을 위한 모듈화형 방음 기술 개발										
	영문	Development of Modular Soundproofing Technology for Power and Thermal Energy Complex Production										
주관연구기관	기관명	한국에너지기술연구원				사업자등록번호		314-82-02242				
	주소	(34129) 대전광역시 유성구 가정로 152				법인등록번호		160122-0001982				
주관연구책임자	성명	강은철				직위		책임연구원				
	연락처	직장전화	042-860-3511				휴대전화		010-6694-4680			
		전자우편	kec8008@kier.re.kr				국가연구자번호		1015 0556			
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31. (2년 8개월)										
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31. (년 8개월)										
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31. (1년 개월)										
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31. (1년 개월)										
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계		
총계	600,000	20,100	180,000	-	-	-	-	620,100	180,000	800,100	-	
1년차	134,000	4,500	40,200	-	-	-	-	138,500	40,200	178,700	-	
2년차	140,000	4,700	42,000	-	-	-	-	144,700	42,000	186,700	-	
3년차	326,000	10,900	97,800	-	-	-	-	336,900	97,800	434,700	-	
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고				
								역할		기관유형		
공동연구기관	(주)화랑월드	김근호	연구소장	010-4258-0666		ghlove61@naver.com		공동		중소기업		
위탁연구기관												
연구기관 외 기관												
연구개발담당자 실무담당자	성명	강은철				직위		책임연구원				
	연락처	직장전화	042-860-3511				휴대전화		010-6694-4680			
		전자우편	kec8008@kier.re.kr				국가연구자번호		1015 0556			

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 01 월 10 일

주관연구책임자 : 강 은 철

주관연구기관의 장 : 한국에너지기술연구원장 김종남

국토교통과학기술진흥원장 귀하

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[☒], 보안[☐]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업			
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명		사회이슈해결			
공고번호	공고-제2호				총괄연구개발 식별번호		-				
					연구개발과제번호		21CTAP-C152061-03				
국가과학기술 표준분류	EF0601		70%	EF0602		20%	EH0502		10%		
총괄연구개발명	국문	-									
	영문	-									
연구개발과제명	국문	전력 및 열에너지 복합 생산을 위한 모듈화형 방음 기술 개발									
	영문	Development of Modular Soundproofing Technology for Power and Thermal Energy Complex Production									
주관연구기관	기관명	한국에너지기술연구원				사업자등록번호		314-82-02242			
	주소	(34129) 대전광역시 유성구 가정로 152				법인등록번호		160122-0001982			
주관연구책임자	성명		강은철				직위		책임연구원		
	연락처	직장전화	042-860-3511				휴대전화		010-6694-4680		
		전자우편	kec8008@kier.re.kr				국가연구자번호		1015 0556		
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31. (2년 8개월)									
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31. (1년 8개월)									
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31. (1년 12개월)									
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31. (1년 12개월)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금 지방자치단체 기타()				합계			연구개발비 외 지원금
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	600,000	20,100	180,000	-	-	-	-	620,100	180,000	800,100	-
1년차	134,000	4,500	40,200	-	-	-	-	138,500	40,200	178,700	-
2년차	140,000	4,700	42,000	-	-	-	-	144,700	42,000	186,700	-
3년차	326,000	10,900	97,800	-	-	-	-	336,900	97,800	434,700	-
공동연구기관 등	기관명		책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고		
									역할	기관유형	
공동연구기관	(주)화랑월드		김근호	연구소장	010-4258-0666		ghlove61@naver.com		공동	중소기업	
위탁연구기관											
연구기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명		강은철				직위		책임연구원		
	연락처	직장전화	042-860-3511				휴대전화		010-6694-4680		
		전자우편	kec8008@kier.re.kr				국가연구자번호		1015 0556		

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 01 월 10 일

주관연구책임자 : 강 은 철 (직인)

주관연구기관의 장 : 한국에너지기술연구원장 김종남 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

사업명		국토교통기술촉진연구사업			총괄연구개발 식별번호		-	
내역사업명		사회이슈해결			연구개발과제번호		21CTAP-C152061-03	
국가과학기술 표준분류		EF0601	70%	EF0602	20%	EH0502	10%	
총괄연구개발명		-						
연구개발과제명		전력 및 열에너지 복합 생산을 위한 모듈화형 방음 기술 개발						
전체 연구개발기간		2019. 04. 19 - 2021. 12. 31. (2년 8개월)						
총 연구개발비		총 800,100 천원 (정부지원연구개발비 : 600,000 천원, 기관부담연구개발비 : 200,100 천원, 지방자치단체 : 0 천원, 그 외 지원금 : 0 천원)						
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[☒] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도		착수시점 기준(3) 종료시점 목표(6)	
연구개발과제 유형		지정공모 [☒] 자유공모 []						
연구개발과제 특성		실용화						
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		전기-열 복합 생산이 가능하고, 발전 성능 및 방음 성능을 향상시키는 다기능성 PVT 방음 패널을 개발함. 또한 이 다기능성 PVT 방음 패널을 이용한 방음벽 시스템 시공 기법 및 실증 적용을 통한 사업화 모델을 제시함.					
	전체 내용		○ PV와 태양열 집열기를 통합한 형태의 최적 전열 구조 개발 ○ 흡음과 차음 성능을 확보하는 다기능 방음 패널 구조 개발 ○ 전기-열 복합 생산 다기능성 PVT 방음 패널 시제품 개발 ○ 다기능성 PVT 패널의 전기, 온열 생산 및 방음 성능 시험 ○ PVT 방음 패널 직렬 연계 방식의 방음벽 시스템 시공 기법 개발 ○ 다기능성 PVT 패널을 적용한 실증 기술 및 사업화 모델 개발					
	1년차	목표	○ 다기능성 PVT 방음 패널 요소 기술 개발					
		내용	○ 국내외 PVT 기술 연구 현황 및 PV 방음벽 적용사례 조사 ○ PVT 전열 구조 설계 및 베플 형상 검토, PVT 방음벽 시제품 예비 성능 평가 수행 ○ PVT 방음 패널의 흡음, 차음 기능 검토 및 PVT 방음 시스템 특성(온열 생산, 발전 용량 향상, 방음성능 향상) 검토, 시스템 적용성 검토(설치 방법, 경사각에 따른 경제성 분석) ○ 방음(흡음, 차음) 성능 평가 기준 검토 및 시스템 적용 방안 제시					
	2년차	목표	○ 다기능성 PVT 방음 패널 요소 기술 평가 및 개선					
		내용	○ 현장 적용성을 위해 PVT 방음 패널의 두께를 150 mm에서 120 mm로 개선하였고, 이에 따른 PVT 전열 구조를 재설계하였음. 또한 발전효율을 높이기 위한 경사형 PV 방음 패널 시제품을 제작함. ○ PVT 시스템 적용성을 위해 방음 패널의 양쪽 상부에 공기출입구를 확보함. 5개의 PVT 패널을 직렬로 연계하여 열생산성을 높였음. 3kWe급 실증을 위해서 상부와 하부에 각각 5개의 패널을 직렬로 연계하도록 시스템을 설계함. ○ 당해연도 개발된 PVT 방음 패널에 대한 에너지 성능 시험을 수행함. (열성능 534 W/m ² , 모듈 온도 16.4℃ 감소, 발전효율 7.2% 향상) ○ 방음벽의 흡음 성능 적정성은 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz의 4가지 소음조건에서 평균 0.7이상임. 흡음 성능 시험 결과 평균 0.83을 달성함. 차음 성능은 500Hz에서 25dB이상, 1000Hz에서 30dB이상임. 차음 성능 시험 결과 500Hz에서 29.9dB, 1000Hz에서 37.1dB의 차음 성능 달성함.					

	3년차	목표	o 다기능성 PVT 방음벽 시스템 Bench 구축
		내용	- o 실증 현장에 적용을 위한 PV 패널 및 PVT 모듈 제작 (2.0m×1.0m×0.15m) - 방음벽 구조물에 적용 가능한 PV 패널 설계/제작(용량: 350We급, Cell 수: 11×6) - PVT 패널 제작 → 열회수 장치 반영 → PVT 모듈 제작 → 단열 및 공기 입출구 덕트 제작 - o 다기능성 PVT 방음벽 시스템 적용 현장 확보 및 실증형 테스트베드 구축 완료 - COVID19 장기화로 당초 실증 예정 현장에서 현재의 실증 현장으로 변경 - 실증 현장(충청남도 계룡시 두마면)에 약 3.5 kWe급 다기능성 PVT 방음벽 시스템 구축 완료 및 안정적으로 시스템이 가동 중임. - 실증 현장의 구조물 안전성을 확보하기 위하여 안전 내구성 평가를 수행하였음. (풍속 30 m/s 기준, 휨모멘트 12.5 kN·m, 최대변위 3.5 mm) - 다기능성 PVT 방음벽 시스템에 대한 경제성 평가 수행 완료 (투자환수 기간 : 3 kWe급 - 9.9년, 30 kWe급 - 8.8년) - o 다기능성 PVT 방음벽 시공 기법을 개발하여 실증 현장에서 직접 시범 적용함. - 적용 현장 기반 구축 → H빔 프레임 설치 → 1단 PVT 모듈 설치 → 2단 PVT 모듈 설치 → PVT 덕트 배관 설치 → PV 패널 전선 연결 → 부하공간 에너지 공급 - 개별 PVT 모듈 설치가 가능하여 특정 모듈 고장시 보수가 용이하도록 하였음. - o 다기능성 PVT 방음벽 기술에 대한 사업화 모델 제시 - 기본 비즈니스 모델 : PVT 방음 모듈, 3 kWe급 PVT 방음벽 시스템 - 제품의 판매 가격 : PVT 방음 모듈 (0.7백만원/장), 3 kWe급 시스템 (6백만원/건) - 신재생에너지 보급 사업, 제로에너지타운, 친환경 도시 구축 공공인프라 사업 등 - 도로공사, 철도공사 등 공공기관을 대상으로 판매 판로 확충
연구개발성과		<정량적 기술개발 목표 대비 달성> 1. 흡음성능 목표 0.7 이상 → 0.83 달성 2. 차음성능(감쇠) 목표 35 dB 이상 → 37.1 dB 달성 3-1. 발전효율 향상 6% 이상 → 7.2% 달성 3-2. 온도감소 15℃ 이상 → 16.4℃ 달성 4. 열생산량 400 Wt/m² 이상 → 534 Wt/m² 달성 5. 안전 내구성 평가(휨모멘트) 15 kN·m 이내 → 12.54 kN·m 달성 6. 안전 내구성 평가(최대변위) 8 mm 이내 → 3.5 mm 달성 7. 실증 평가 기간 6개월 → 12/03일부터 평가 진행 중 8. 경제성 평가 (ROI) 10년 → 9.9년 달성 (3 kWe급 PVT 방음벽 시스템 기준)	
		<정량적 연구성과 목표 대비 달성> - o 국외논문 게재 1건 목표 → Renewable Energy (SCI) 1건 심사 중 - o 국내논문 게재 2건 목표 → 2건 달성 - o 특허출원 국내 4건 목표 → 5건 달성 - o 특허등록 국내 3건 목표 → 2건 달성 (3건 심사 중) - o 기술이전 1건(20,000천원) → 1건(20,000천원) 확보되어 1월중 체결 - o 보고서 원문 1건 목표 → 1건 달성 - o 실증 설비 1건 목표 → 1건 달성 (실증 적용 3 kWe급 PVT 방음벽 시스템) - o 시제품 2건 목표 → 2건 달성 - o 성과 홍보 1건 목표 → 성과 홍보용 기사 3건 이상 보도 예정 (1월 중) - o 일자리 창출 1건 목표 → 1건 달성	

연구개발성과 활용방안 및 기대효과	○ 국가 신재생에너지 보급 시범 사업, 친환경 도시 구축 공공 인프라 사업에 활용 ○ 제로에너지타운, 친환경에너지타운, 친환경녹색마을 등에 에너지 자립형 공공휴게시설 적용 ○ 도로공사, 철도공사 등 공공기관의 신재생에너지설비의무화 기술로써 활용 ○ 국내 온실가스 감축 목표 및 재생에너지 3020 계획 국가 정책 달성에 활용 ○ 태양에너지와 방음기술의 융합과 더불어 태양에너지 이용률을 극대화 기술임 ○ 국내 신규 방음벽 및 노후 방음벽 대체용 친환경 기술로 활용 ○ Bench Scale 실증을 통한 PVT 방음벽 시스템 사업화 기술로 활용 ○ PV 시스템의 발전성능을 향상시키고, 난방열을 생산/공급하는 에너지 절감 기술로써, 두 기술의 융합은 $2+\alpha$의 획기적인 시너지 효과 기대 ○ 태양광, 태양열, 흡음, 차음 기술을 융합함으로써 기존 단위 기술의 단점을 보완하여 교통소음 방음벽의 보급을 획기적으로 증가시킬 것으로 기대 ○ 신재생에너지와 타 산업간의 융합으로 신시장 창출 및 신규 일자리 증가 기대											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비 (실증)	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	2	5	1	1	1							
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명		규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호		
국문핵심어 (5개 이내)	태양광열		방음벽			태양에너지		다기능		모듈화		
영문핵심어 (5개 이내)	Photovoltaic Thermal		Soundproof Wall			Solar Energy		Multifunction		Modularization		

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요 -----	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 -----	2
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 -----	51
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) -----	59
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 -----	60
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 -----	61
<별첨> 참고문헌 -----	62

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

구분	내용
최종 목표	전기-열 복합 생산이 가능하고, 발전 성능 및 방음 성능을 향상시키는 다기능성 PVT 방음 패널을 개발함. 또한 이 다기능성 PVT 방음 패널을 이용한 방음벽 시스템 시공 기법 및 실증 적용을 통한 사업화 모델을 제시함.
세부 목표	○ PV와 태양열 집열기를 통합한 형태의 최적 전열 구조 개발 ○ 흡음과 차음 성능을 확보하는 다기능 방음 패널 구조 개발 ○ 전기-열 복합 생산 다기능성 PVT 방음 패널 시제품 개발 ○ 다기능성 PVT 패널의 전기, 온열 생산 및 방음 성능 시험 ○ PVT 방음 패널 직렬 연계 방식의 방음벽 시스템 시공 기법 개발 ○ 다기능성 PVT 패널을 적용한 실증 기술 및 사업화 모델 개발

2) 연구개발과제의 년차별 목표

- 1차년도
 - 다기능성 PVT 방음 모듈 요소 기술 개발
- 2차년도
 - 다기능성 PVT 방음 모듈 요소 기술 평가 및 개선
- 3차년도
 - 다기능성 PVT 방음벽 시스템 실증 구축

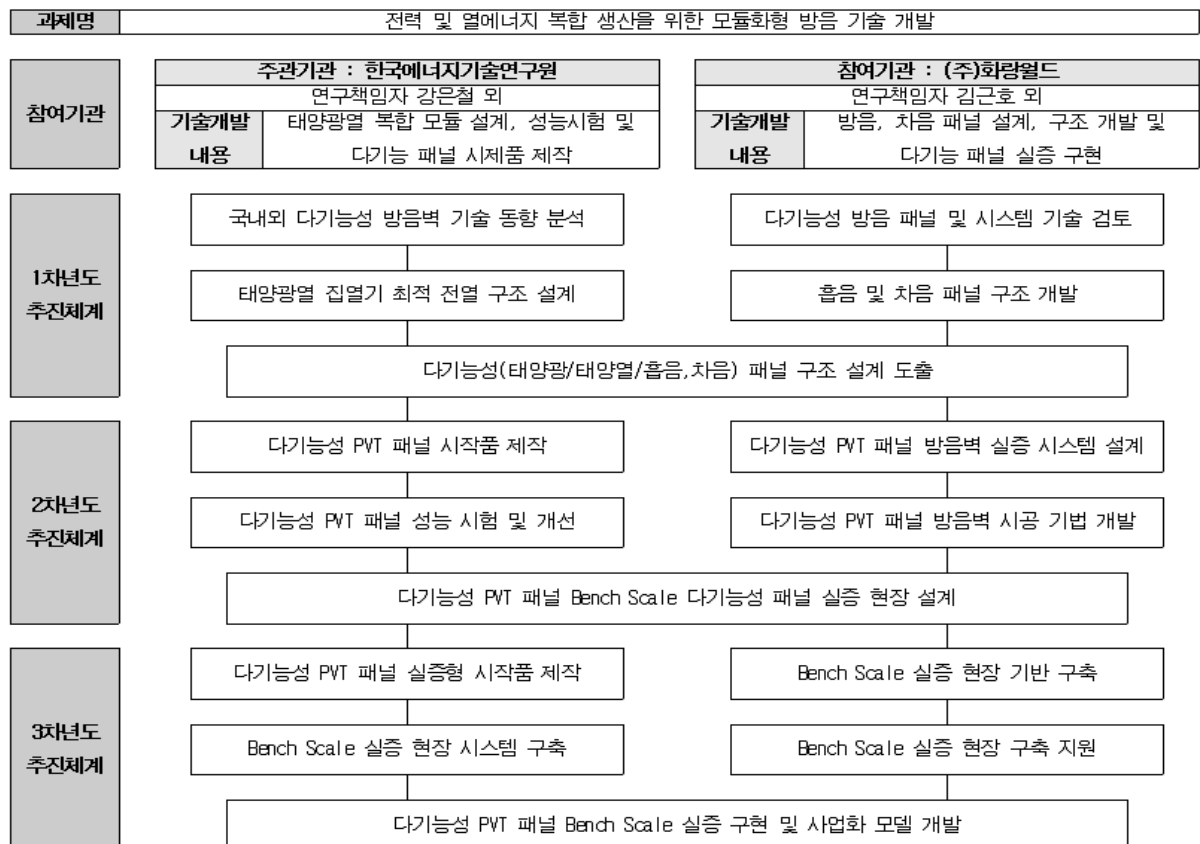
구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	PVT 전열 구조 개발	집열기 전열 구조 설계 완료	352 Wt/m ²	400 Wt/m ²	열효율 40% 이상	10
	흡음, 차음 성능 확보 패널 구조 개발	흡음과 차음 기능을 포함하는 패널 구조 개발 완료	흡음 0.7 차음 30dB	흡음 0.7 이상 차음 35dB 이상	도로 방음벽 기준	10
2년차 (2020)	PVT 패널 시제품 개발	PVT 방음 모듈 시제품 개발 완료	PV 차음 모듈	PVT 방음 모듈	흡음, 차음, 전기, 열 생산	30
	PVT 패널 성능 시험	흡음성능 0.83 차음성능 37.1dB	흡음 0.7 차음 30dB	흡음 0.7 이상 차음 35dB 이상	도로 방음벽 기준	10
		열생산량 534 Wt/m ²	352 Wt/m ²	400 Wt/m ²	열효율 40% 이상	10
3년차 (2021)	실증 Bench 구축 및 시험	3kW급 PVT 방음벽 시스템 구축 완료	PV 방음벽	PVT 방음벽 시스템 구축	흡음, 차음, 전기, 열 생산	10
		휨모멘트 12.5kN·m 최대변위 3.5mm	휨모멘트 15kN·m 최대변위 8	휨모멘트 15kN·m이내 최대변위 8 이내	도로 방음벽 구조물 기준	10
	비즈니스 모델 개발	PVT 방음벽 시스템 시공 기법	-	PVT 모듈 설치 및 보완 용이	기존 방음벽 대체 방안	10

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

가. 연구개발 추진전략·방법

- PV와 태양열 집열기를 통합한 형태의 최적 전열 구조 개발
 - 주관기관(한국에너지기술연구원)의 다년간의 PVT 특허 기술 / 노하우 / 국외 전문가 인프라(미국, 캐나다 등)를 보유
 - 이를 바탕으로 모듈의 크기, 설치 구조, 차압 성능에 따른 방음, 에너지 생산을 하는 다기능성 PVT 방음벽 모듈에 적합한 열회수 장치 개발을 담당
- 흡음과 차음 성능을 확보하는 다기능 방음 모듈 구조 개발
 - 참여기관은 방음벽체 전문 업체로 방음벽 구조 특허 및 노하우 보유
 - 본 과제 기술에 해당하는 PVT 구조에 적합한 방음(흡음 및 차음) 구조 개발을 담당
- 전기-열 복합 생산 다기능성 PVT 방음 패널 시제품 개발
 - 주관기관과 참여기관이 설계한 PVT 및 방음 구조를 바탕으로 본 과제에서 개발하고자 하는 다기능성 PVT 방음 모듈 설계 협업
 - 부산대학교, 공주대학교, KTL 등 다양한 전문가 활용으로 개발한 다기능 모듈의 개선점 확보
- 다기능성 PVT 방음 모듈의 전기, 온열 생산 및 방음 성능 시험
 - 공인시험기관, 일반시험 등 각 기준에 맞는 성능 시험 실시로 연구 객관성 확보
 - 공인시험성적서 및 일반시험성적서(공인시험이 없는 경우)를 성능 지표로 제시
- PVT 방음 패널 직렬 연계 방식의 방음벽 시스템 시공 기법 개발
 - Bench scale 규모(3kWe급)의 실증을 통한 방음벽 시공 기술 개발
 - 다기능성 PVT 방음 모듈의 추가 부품 제작 및 시공 노하우 확보
- 다기능성 PVT 방음 모듈을 적용한 실증 기술 및 사업화 모델 개발
 - 기존 태양열, 방음벽 기술 전문가(산, 학, 연) 입회를 통한 다기능성 PVT 방음벽 시스템 실증 시험 자체 평가로 시스템에 대한 신뢰성 확보 및 사업화 모델 반영
 - 실수요자(공공사업자 등) 의견 수렴 및 실증 시연(홍보)을 통한 사업 진출 확보

나. 연구개발 추진체계



다. 연구개발 추진일정

1차년도														
일련 번호	연구내용	추진 일정 (개월)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	-	-	-	-
1	국내외 기술 동향 분석													
2	시스템 기술 검토													
3	열회수 장치 설계													
4	흡음, 차음 구조 개발													
2차년도														
일련 번호	연구내용	추진 일정 (개월)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	패널 시제품 제작													
2	방음벽 실증 시스템 설계													
3	패널 성능 시험													
4	방음벽 시공 기법 개발													
3차년도														
일련 번호	연구내용	추진 일정 (개월)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	실증 현장 기반 구축													
2	실증 패널 시제품 제작													
3	실증 현장 구축													
4	실증 시험 및 평가													

라. 연구수행 내용

<국내외 PVT 기술 연구 현황 분석>

- 한국에너지기술연구원은 “태양광 모듈 및 이를 이용한 에너지 자립형 신선 외기 난방시스템 (10-1265204)”, 태양광 및 태양열을 이용한 다단 구조형 하이브리드 전열 시스템(10-1650085)“, “자립형 태양열 선선외기 난방 및 온수예열 하이브리드 시스템” 등과 같이 태양에너지를 활용한 에너지 자립형 PVT 응용 기술을 다수 보유하고 있음.
- 최근에는 태양열과 지열의 장점을 결합하여 건물에너지 자립화를 실현하고자 하는 PVT-지열의 하이브리드 시스템에 관한 연구 개발이 수행되었으며, 액체식 PVT와 지열을 융합하는 기술(세화에너지-부산대

학교-한국에너지기술연구원), 공기식 PVT와 지열을 융합하는 기술(한국에너지기술연구원-탐솔)을 통하여 다양한 형태의 PVT 패널을 개발하였음.

- 또한 태양에너지와 지열을 이용하여 공공 휴게시설(벤치, 흡연부수, 버스정류장 등)에서 요구되는 에너지를 자체 생산/공급하는 에너지 자립형 냉온열-전력 복합 생산 PVTG 융합 기술을 개발하였음.
- 태양광발전 패널을 방음벽으로 활용하는 기술은 2015년 이후에 소수 몇몇 연구기관에서 연구가 진행되고 있으나, 주로 방음벽을 대신할 수 있는 태양광발전 패널을 개발하는데 집중되고 있음. 국내 일부 중소기업에서는 이미 도로 방음벽을 태양광으로 대체하는 사업을 수행하고 있음.
- 외국의 경우 상업용 태양광열 시스템은 현재까지 몇몇 업체에 불과하며, 지난 20년 동안 실증연구 프로젝트에 의해 시장에 소개됨. IEA SHC Task 35(PV/Thermal Solar Systems), Task 60(PVT Systems) 연구 프로젝트를 통해 태양광열 시스템 연구가 수행되었으며, 총 70개 기술 중 액체식 PVT와 공기식 PVT가 골고루 개발되었음. 대부분의 프로젝트는 Grammer Solar(독일), Cenergia(덴마크), Sunwatt(미국) 등에 의해 태양광열 시스템 프로젝트가 수행됨.
- 다양한 유형의 태양광열(PV/Thermal) 복합 컬렉터가 캐나다, 독일, 스웨덴, 네덜란드, 이스라엘, 미국, 중국 등에서 상용화 되어 있으며, 액체식 PVT 모듈은 단위모듈 형태로 상품화되고 있음.



[그림 1] 상용화된 PVT 기술 (좌: PVT air 모듈/시스템, 우측 PVT water 모듈/시스템)

- Conserva Engineering사는 자체 개발한 Solarwall 모듈의 상부를 PV모듈로 덮은 공기식 태양광열 집열기를 생산하고 태양전지 성능 향상에 주력하고 있으며, 천공 철판을 지붕이나 외벽에 부착하여 유입공기를 가열하여 유입하거나 공조설비에 유입시키는 Hybrid 에너지시스템을 상용화하여 보급확함.

<국내외 태양광 방음벽 설치 사례>

- 코원(주)에서는 기존의 방음벽을 대체하면서, 태양광 발전량을 조금 더 높일 수 있는 “태양광 발전 기능을 구비한 방음장치(10-1764884)”에 대한 특허를 보유하고 있으며, 이 특허기술을 기반으로 “융복합 경사형 방음 및 태양광발전 모듈 개발사업”을 현재 수행하고 있음.



[그림 2] 노후화된 방음벽을 태양광발전 설비로 교체한 사례

- 메리츠테크놀로지사는 영등포구 올림픽대로 인근에 태양광 발전 기능을 갖춘 태양광 방음벽을 설치하였고, 방음벽 양면으로 발전 가능하도록 태양광 모듈을 설치함. 이 양면 태양광 방음벽은 지난 2016년 서울시 신재생에너지 특화 사업공모에 선정된 사업이며, 태양광 패널과 투명 방음패널, 흡음방음 패널로 구성된 혼합형 방음벽 형태로 높이 4 m, 길이 143 m, 방음벽 상단에 240 W의 양면 태양광 패널 총 54장이 설치됨.



[그림 3] 메리츠테크놀로지사 태양광 방음벽 시공 사례

- 서울시 노원구에 위치한 노원고등학교 주변 동부간선도로에는 2015년도에 높이 3.5 m 길이 105 m의 태양광 방음벽을 설치하였으며, 260 W 태양광 모듈 120장을 2단 상하로 설치하여 연간 36 MW의 전기를 생산할 수 있으며, 또한 노원고등학교 정문 앞에 발전 현황판을 설치하여 누적 발전량, 이산화탄소 저감량 등 실시간으로 발전현황 및 기타사항을 확인할 수 있음.
- 한국도로공사에서는 영동고속도로 광고에 태양광 방음터널을 1.3 km 규모로 설치하였고 2018년 1월부터 전기 생산을 시작하였음. 이 시스템의 발전 용량은 2.6 MW로 일반 가정에서 연간 사용할 수 있는 발전량에 해당하는 규모이며, 이산화탄소 1,500톤 및 미세먼지 5톤을 줄일 수 있는 규모임.
- 국외에서 소개되고 있는 태양광 방음벽 기술을 살펴보면, 방음벽을 대신하여 태양광 패널을 차음벽으로 활용하여 설치하거나, 기존 방음벽에 태양광 패널을 추가로 설치하는 방식이 많이 적용되고 있음. 또한 태양광 발전효율을 높이기 위하여 경사면을 두어서 설치하는 방식을 적용하는 수준임.



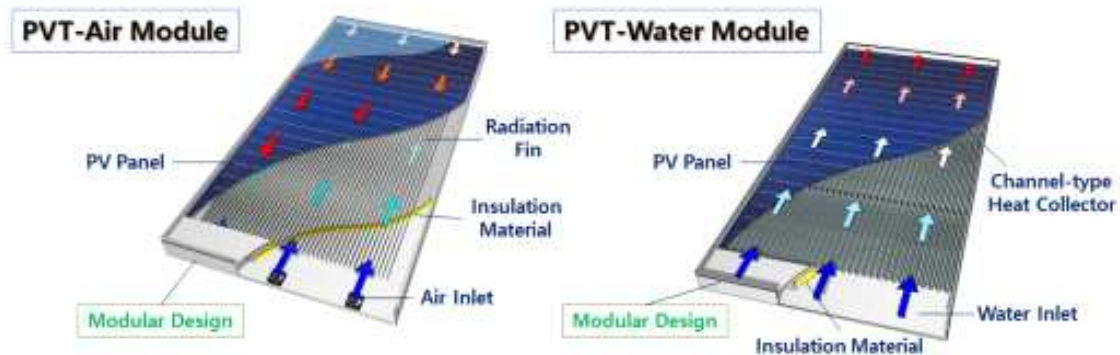
[그림 4] 국외에서 소개되고 있는 태양광 방음벽 설치 사례

- 스위스 Federal Roads Office(FEDRO)의 경우 1989년 처음 태양광 방음벽을 국도에 설치하였으며, 설치규모는 총 800 m, PV 모듈 970 m² 이며, 연간 108 MWh 전기를 생산하고 실시간 모니터링을 통해 근처 수요처에 전기를 공급함.
- 네덜란드 암스테르담 근교 고속도로에는 1990년대에 방음벽 PV 기술을 개발하여 적용하였고, 1998년 가장 규모가 큰 방음벽을 설치함. 총 길이는 1.6 km이며, 연간 176 MW 전기를 생산함.

<태양광열(PVT) 기술 개요>

- 태양광열은 태양광(Photovoltaic)과 태양열(Solar Thermal)기술이 결합한 태양에너지 융합 기술로써, 태양광 모듈에 의해 전력 생산을 하며, 태양광 후면에 공기나 물 등의 유체를 순환시켜 태양복사 에너지를 열에너지로 회수하는 기술임.
- 또한, 기존 태양광 발전 모듈이 가지고 있는 과열로 인한 발전 효율 저하 및 내구성 저하 문제를 후면에 유체를 순환하여 태양광 모듈의 온도를 낮춰줌으로써 태양광 발전 효율이 증가되며, 태양복사 에너지를 회수하여 열 에너지를 생산하여 자원으로 활용할 수 있음.
- 기존의 태양광 발전과 태양열 난방 기술을 하나의 모듈을 통하여 태양광과 태양열 모두를 사용할 수 있는 공간 절약적인 장점을 가지고 있는 기술이며, 따라서 태양에너지 이용율을 3배 이상 높일 수 있는 획기적인 기술임.

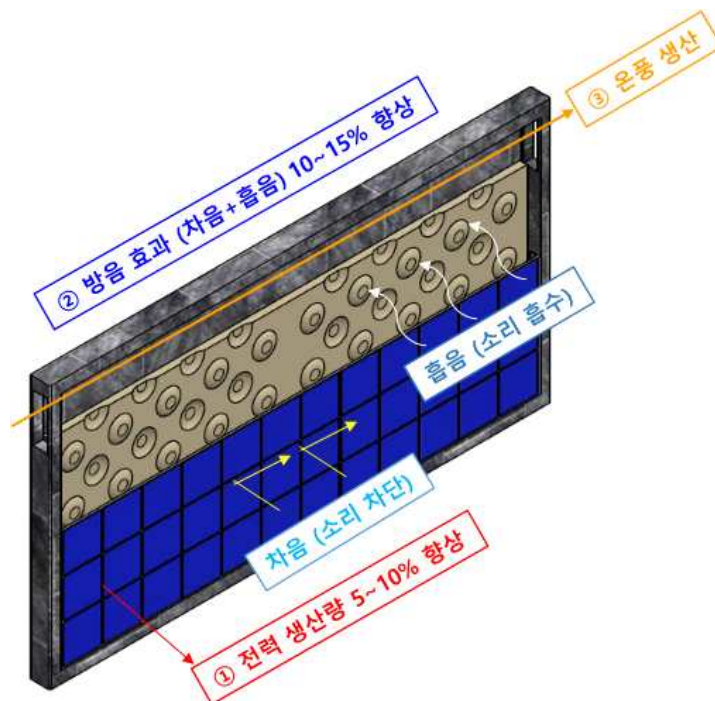
- 순환 유체의 종류에 따라 액체식 및 공기식으로 분류되며, 액체식은 난방 및 급탕용, 공기식은 난방 및 환기부하용으로 많은 연구가 진행되고 있음.
- 액체식 태양광열 모듈은 에너지 밀도가 높은 장점을 가지고 있지만 여름철 과열문제, 겨울철 동파문제 등 작동성에 문제가 많아 최근에는 공기식 태양광열 모듈에도 많은 연구가 진행되고 있음.



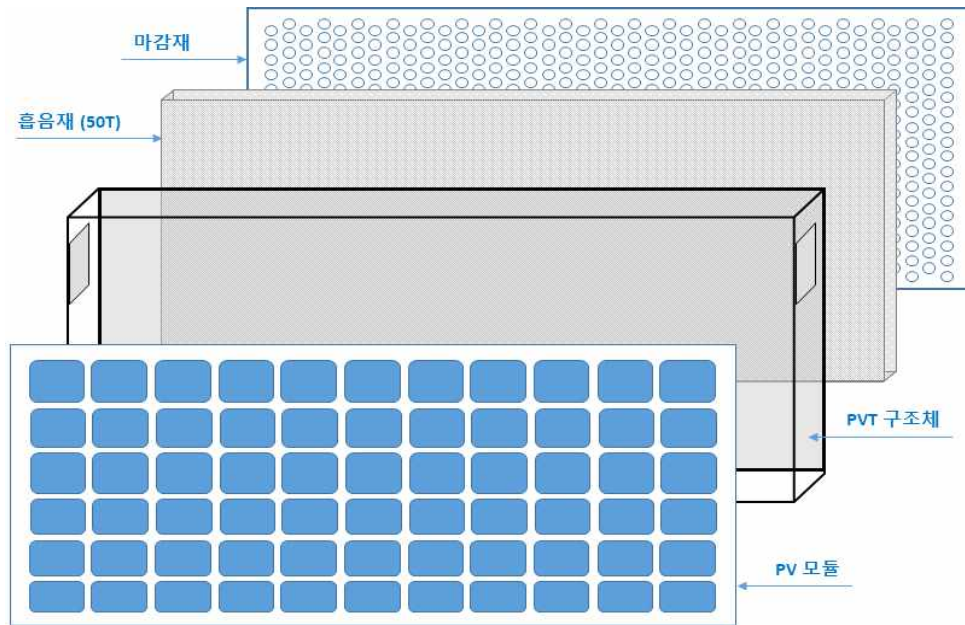
[그림 5] 작동유체에 따른 태양광열 모듈의 개념도 (좌: 공기식, 우: 액체식)

<다기능성 PVT 방음 모듈>

- 다기능성 PVT 방음 모듈의 개념은 [그림 6]과 같으며, 기존의 방음벽 대체 기술로써 온열 생산, 발전용량 향상뿐만 아니라 PV 패널에서의 차음 기능과 흡음재에서의 흡음 기능을 모두 갖고 있기 때문에 방음 성능 향상을 기대할 수 있는 기술임.
- 다기능성 PVT 방음 모듈의 구성은 [그림 7]과 같이 PV 모듈, PVT 구조체, 흡음재, 마감재로 되어 있으며, 단순한 요소기술의 조합이 아니라 각 요소기술을 통합하여 서로 간의 단점을 보완해주는 기술임.
- PV 패널의 단점은 온도가 상승하면 발전량이 저하되는데, PV 패널의 열을 회수할 수 있도록 PVT 구조체가 전열 구조체의 기능을 수행함. 또한 PVT의 열을 회수하기 위해서는 단열재가 필요한데, PVT 방음 모듈에 설치된 흡음재가 단열재 역할을 수행함. 따라서 PVT 방음벽 기술은 기존 대비 방음 성능이 향상될 뿐만 아니라, 태양광 방음벽에서 생산되는 전력량보다 더 많은 전력을 생산할 수 있음. 또한 추가적으로 방음벽으로부터 회수되는 열은 대합실, 공중화장실, 휴게실, 흡연실 등 공공장소에 난방 및 환기예열(춘추, 동계)로 활용이 가능함.



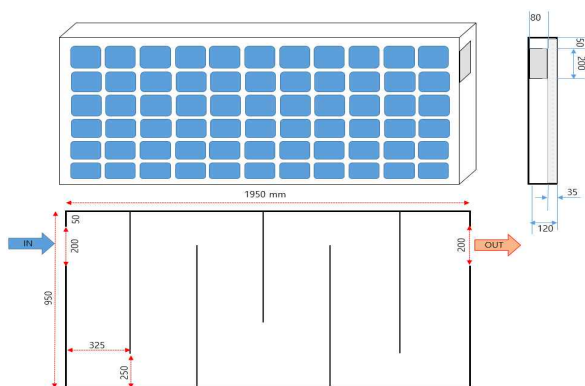
[그림 6] 다기능성 PVT 방음 모듈의 특성



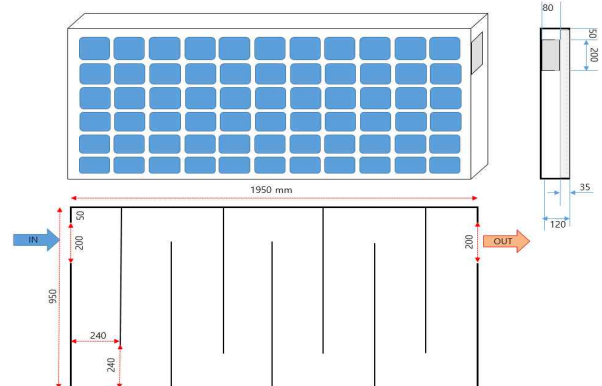
[그림 7] 다기능성 PVT 방음벽 모듈 구조

<PVT 전열 구조 설계>

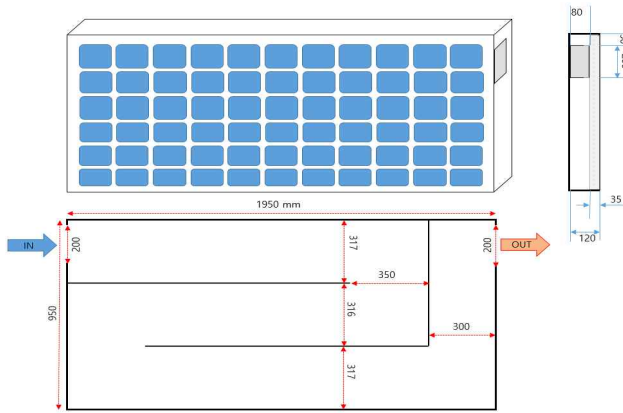
- PVT 전열 회수를 위해서는 PV 패널 후단에 열교환이 잘 이뤄지는 구조로 제작되어야 함. 상용화 판매되고 있는 PV 패널로써 방음벽으로 적용이 가능한 크기는 1000 mm×2000 mm이며, 이 크기에 대하여 전열 구조를 설계하였음.
- 1차년도에 제작된 PVT 방음벽의 공기층 두께는 100 mm로 설계하여 제작하였으며, 2차년도에는 PVT 방음벽의 공기층 두께를 80 mm로 설계하여 분석하였음.
- PVT 전열 회수를 위하여 [그림 8]~[그림 11]과 같이 총 4가지의 구조를 설계하였음. 전열 구조 소재는 열전달이 우수한 스테인레스로 선택하였고, 외부 프레임은 1T 두께로, 내부 베플은 0.5T의 두께로 설계하였음. 제안된 Cases에 대하여 내부 유입되는 공기의 유속은 3.0 m/s(작동 공기유량 0.048 m³/s), 외기온도 15℃, PV 모듈의 표면온도가 50℃라고 가정하였을 때의 압력강하와 PVT 모듈 입출구 온도차를 시뮬레이션을 통해 분석하였음.
- <표 1>은 PVT 전열 구조 형상 및 온도 상승도를 정리한 것임. Case 1의 총 유동거리는 6.15 m이며, Case 2는 7.63 m로 가장 길게 나타남. Case 3과 Case 4는 총 유동거리가 5.10 m로 동일하지만, Case 4는 경사각 5°를 주었음. 압력강하는 Case 3에서 가장 낮게 나타났으며, PVT 입출구 온도차는 Case 2에서 18.9℃로 가장 높게 나타남.



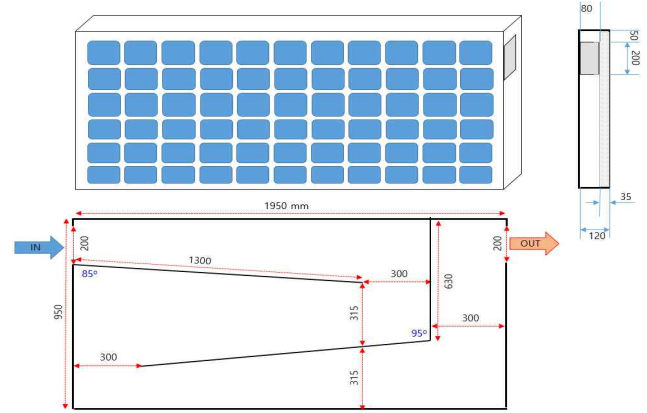
[그림 8] 수직형 6 path 형태의 PVT 구조 (Case 1)



[그림 9] 수직형 8 path 형태의 PVT 구조 (Case 2)



[그림 10] 수평형 3 path 형태의 PVT 구조 (Case 3)



[그림 11] 경사면 3 path 형태의 PVT 구조 (Case 4)

<표 1> PVT 전열 구조 형상 및 온도 상승도 (T_{in} : 15℃, T_{pv} : 50℃ 기준)

Cases	Path type	Path Length [m]	Flow rate [m^3/s]	dP [Pa]	dT ($T_{out}-T_{in}$) [℃]	$Q_{thermal}$ [W]	Q/dP [W/Pa]
Case 1	Vertical, 6 path	6.15	0.048	135.0	16.1	958.3	7.10
Case 2	Vertical, 8 path	7.63	0.048	257.7	18.9	1124.9	3.72
Case 3	Horizontal, 3 path	5.10	0.048	34.1	13.1	779.7	22.87
Case 4	Horizontal, 3 path (Slope 5°)	5.10	0.048	50.8	12.4	738.0	14.53

- 시뮬레이션 결과 열에너지 생산 측면에서는 Case 2가 1124.9 W로 가장 높게 나타났으며, Case 3의 경우 압력강하가 34.1 Pa로 가장 낮았음. PVT 전열구조 형상을 선정하기 위하여 압력강하 대비 열에너지 생산량으로 비교한 결과, Case 2는 3.72 W/Pa로 가장 낮았고, Case 3은 22.87 W/Pa로 가장 높게 나타났음. 따라서 본 연구에서는 Case 3의 경우가 PVT 전열 구조로써 가장 적합하다고 판단하였음.
- PVT 전열 구조체로 Case 3를 선정하여 <표 2>와 같이 PVT 표면온도 변화에 따른 온도상승도와 열 생산량을 분석하였음. 이 때의 온도 상승도와 열생산량 산정식은 다음과 같음.

– 온도 상승도(dT) 산정식

$$dT = T_{out} - T_{in}$$

여기에서, T_{in} 은 PVT 유입공기온도(=외기온도), T_{out} 은 PVT 출구공기온도

– 열 생산량(Q) 산정식

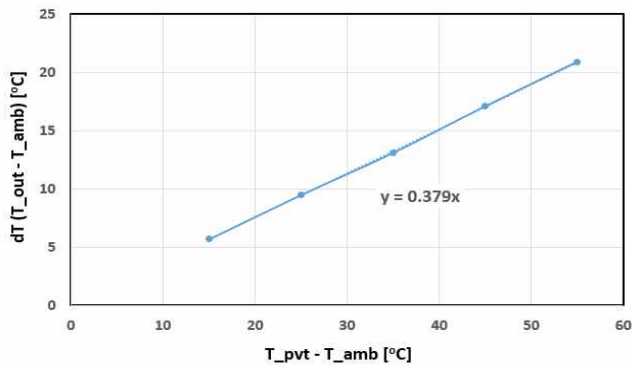
$$Q = \dot{m} \times C_p \times dT$$

여기에서, $\dot{m}$ 은 질량유량, C_p 는 공기의 비열, dT 는 PVT 온도상승도

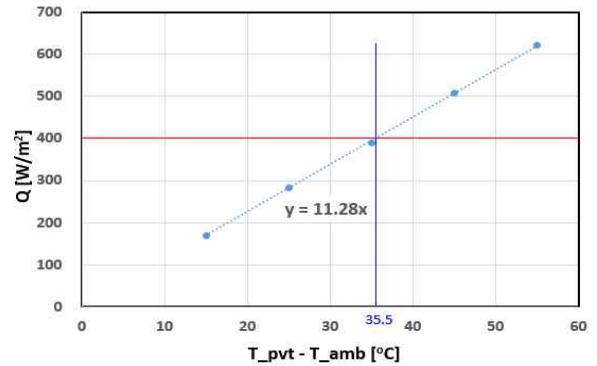
<표 2> PVT 표면온도 변화에 따른 Case 3에서의 온도 상승도

Cases	Flow rate [m ³ /s]	T _{amb} (=T _{in}) [°C]	T _{PV} [°C]	T _{out} [°C]	dT (T _{out} -T _{in}) [°C]	Q [W]
Case 3	0.048	15	30	20.7	5.7	339.3
			40	24.5	9.5	565.4
			50	28.1	13.1	779.7
			60	32.1	17.1	1017.8
			70	35.9	20.9	1244.0

- [그림 12]는 PVT의 작동유량이 0.048 m³/s일 때의 PVT 표면온도 변화에 따른 온도상승도를 나타낸 것이며, 시뮬레이션 분석 결과 PVT 표면온도와 PVT 입출구 온도상승도와의 상관식은 선형으로 나타났음. 이 때의 선형 관계식에 따르면 PVT 표면온도와 외기온도차의 37.9%가 PVT 모듈에서의 온도상승도로 나타남을 알 수 있음.
- [그림 13]은 PVT의 작동유량이 0.048 m³/s일 때의 PVT 표면온도 변화에 따른 열에너지 생산량을 나타낸 것이며, PVT 표면온도와 외기온도와의 차에 따라 열에너지 생산량도 선형으로 나타남을 알 수 있음. 당해연도 정량적 목표인 400 W/m²의 열에너지를 생산하기 위해서는 PVT 표면온도와 외기온도의 차가 35.5°C 이상이어야 가능함을 알 수 있음.

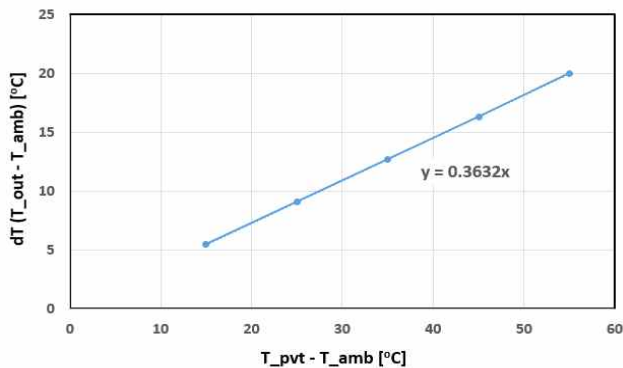


[그림 12] PVT 표면온도 변화에 따른 온도상승도
(at 0.048 m³/s)

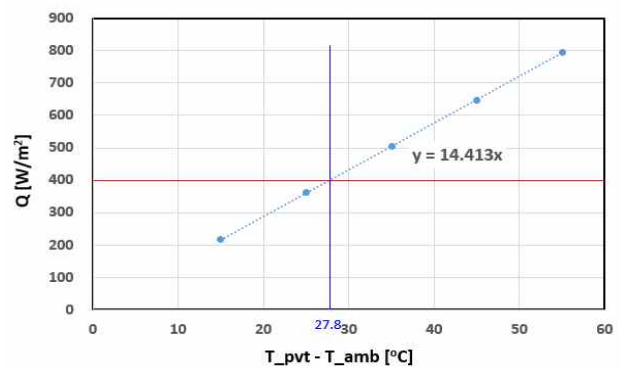


[그림 13] PVT 표면온도 변화에 따른 열에너지
생산량 (at 0.048 m³/s)

- [그림 14]는 PVT의 작동유량이 0.064 m³/s일 때의 PVT 표면온도 변화에 따른 온도상승도를 나타낸 것으로 PVT 표면온도와 외기온도차의 36.3%가 PVT 모듈에서의 온도상승도로 나타남을 알 수 있음.
- [그림 15]는 PVT의 작동유량이 0.064 m³/s일 때의 PVT 표면온도 변화에 따른 열에너지 생산량을 보여주고 있으며, PVT 표면온도와 외기온도의 차가 27.8°C 이상이면, 정량적 열에너지 생산량 목표인 400 W/m²를 달성할 수 있음.



[그림 14] PVT 표면온도 변화에 따른 온도상승도 (at
0.064 m³/s)



[그림 15] PVT 표면온도 변화에 따른 열에너지 생산량
(at 0.064 m³/s)

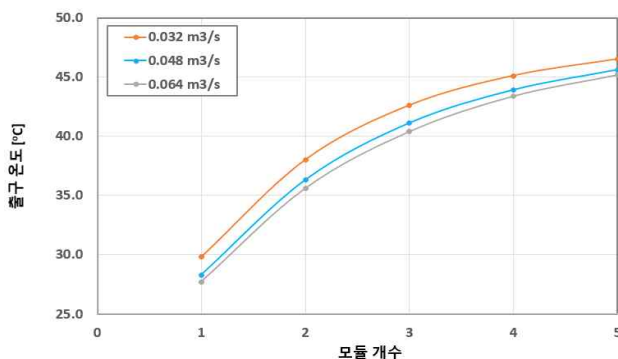
<PVT 방음 모듈 직렬 연계 분석>

- 실증 현장에 적용되는 PVT 방음벽은 직렬(Series)로 연결하여 입출구 온도차 및 열에너지 생산량을 높일 수 있음. 그러나 일정 수량이 넘어가면 온도차 및 열에너지 생산량은 감소하기 때문에 적정량의 연결 개수를 도출해야 함.
- Case 3의 전열 구조 PVT 방음 모듈을 직렬로 연결하여 작동유량($0.032 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.048 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.064 \text{ m}^3/\text{s}$)에 따른 입출구 온도차와 열에너지 생산량을 분석하였음.
- <표 3>은 PVT 모듈 연계 개수에 따른 효과 분석을 나타냈으며, 모듈이 1개일 때부터 총 5개가 직렬로 연계되었을 때까지에 대한 결과를 보여주고 있음.

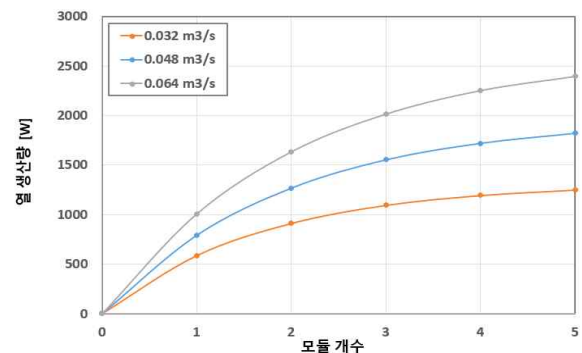
<표 3> PVT 모듈 연계 개수에 따른 효과 분석

Cases	T_{amb} [°C]	T_{PV} [°C]	Flow rate [m^3/s]	Unit	T_{out} [°C]	dT ($T_{\text{out}}-T_{\text{in}}$) [°C]	Q [W]	Q [W/m^2]
Case 3	15	50	0.032	1	29.8	14.8	587	294
				2	38.0	23.0	913	228
				3	42.6	27.6	1095	183
				4	45.1	30.1	1194	149
				5	46.5	31.5	1250	125
			0.048	1	28.3	13.3	792	396
				2	36.3	21.3	1268	317
				3	41.1	26.1	1553	259
				4	43.9	28.9	1720	215
				5	45.6	30.6	1821	182
			0.064	1	27.7	12.7	1008	504
				2	35.6	20.6	1635	409
				3	40.4	25.4	2016	336
				4	43.4	28.4	2254	282
				5	45.2	30.2	2397	240

- 모듈이 1개일 때, 저유량($0.032 \text{ m}^3/\text{s}$)에서의 온도차는 14.8°C , 열생산량은 587 W 로 나타났으며, 고유량($0.064 \text{ m}^3/\text{s}$)에서의 온도차는 12.7°C , 열생산량은 1008 W 로 나타났음. 저유량과 고유량에서의 온도차는 2.1°C , 열생산량은 421 W 로 나타났음.
- 모듈이 5개가 직렬로 연계되었을 때, 저유량($0.032 \text{ m}^3/\text{s}$)에서의 온도차는 31.5°C , 열생산량은 1250 W 로 나타났으며, 고유량($0.064 \text{ m}^3/\text{s}$)에서의 온도차는 30.2°C , 열생산량은 2397 W 로 나타났음. 저유량과 고유량에서의 온도차는 1.3°C , 열생산량은 1147 W 로 나타났음.
- 이러한 결과는 PVT 모듈 연계 개수가 증가할수록 저유량 보다 **고유량으로 운전하는 것이 입출구 온도차는 낮추고, 열에너지 생산 측면에서 효과적이라는 것을 보여주는 결과임.**



[그림 16] PVT 모듈 연계 개수에 따른 작동유량별 출구온도 변화



[그림 17] PVT 모듈 연계 개수에 따른 작동유량별 열 생산량 분석

<설치 경사각에 따른 발전량 분석>

- RETScreen을 이용한 태양광 시스템 발전량 분석 모델은 대한민국, 대전지역 기상데이터를 활용하여 수행하였으며, 태양광 패널 12장을 활용하여 모델을 구성함.
- 태양광 모듈의 면적은 1.6 m²인 삼성 모노실리콘 타입 LPC250SM 모델을 사용하였고, 이 모듈의 효율은 15.6%, 용량은 250 W이며 총 12장으로 구성하여 3 kW급을 모델링하였음. <표 4>는 RETScreen 모델링 분석을 위한 태양광 모듈 사양을 정리하였음.
- 인버터는 온라인 마켓에서 쉽게 구할 수 있는 모델을 선정하였으며, WZRELB사의 3 kW급 용량의 인버터 모델을 사용하였고, 인버터 효율은 85~90%이기에 RETScreen 모델에서의 인버터 효율 값은 중간 값인 87.5%를 사용하였음. <표 5>는 분석에 사용한 태양광 인버터의 사양을 보여주고 있음.

<표 4> 태양광 패널 LPC250SM 사양

면적	효율	용량	NOTC	온도계수
1.6 m ²	15.6%	250 W	45℃	-0.4%/℃

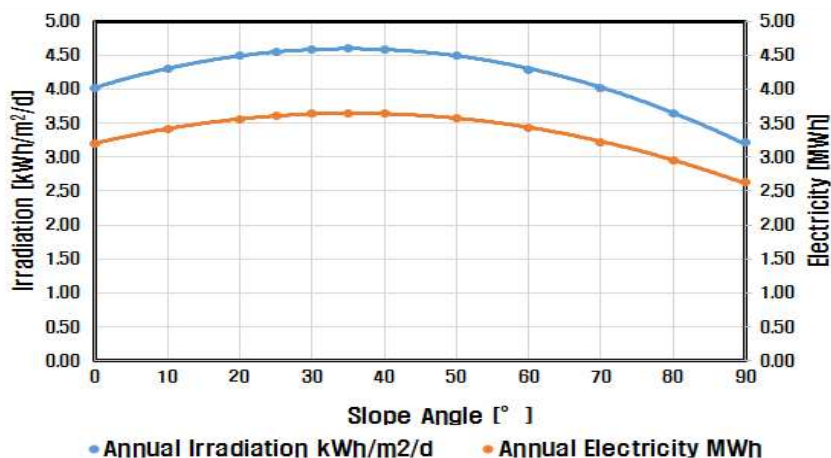
<표 5> 태양광 인버터 사양

DC입력값	효율	용량	주파수	출력값
21~30 V	85~90%	3000 W	60 Hz	120 V

- 지구의 공전과 자전에 의해 태양의 고도 및 방위각은 시간과 계절에 따라 연간 주기로 변화되며, 태양광 및 태양열 시스템 설치각은 일사량을 결정하는 중요한 요소 중 하나임.
- 일사량은 정남향일 때 가장 강하므로 방위각은 0°로 입력하였고 태양광 패널 설치각을 90°~ 0°로 변화하여 연간 일사량 및 발전량을 비교함.
- [그림 18]과 같이 일사량과 발전량은 설치각이 90°~ 0°로 10° 단위로 변화할 때 증가하다 감소하는 사이클형 주기가 나타나며, 40°~ 30°에서 가장 큰 값을 보임. 대전지역의 위도 37°를 고려하였을 때 설치각 37°에서 가장 큰 일사량 값을 나타내는 것으로 판단됨. 설치각에 대한 각각의 연간 일사량 및 발전량은 <표 6>에 정리하였음.

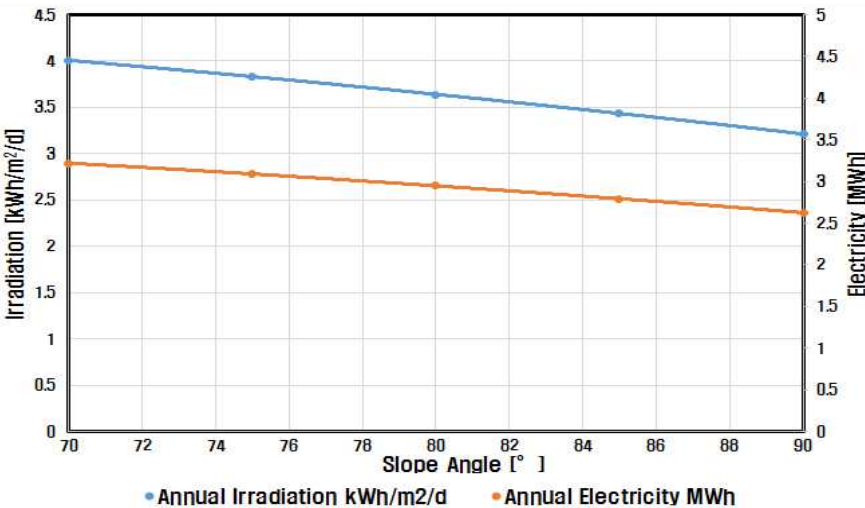
<표 6> 태양광 패널 설치각에 따른 연간 일사량 및 발전량

Slope Angle [°]	90	80	70	60	50	40	35	30	25	20	10	0
Annual Irradiation [kWh/m ² /d]	3.21	3.64	4.01	4.29	4.49	4.59	4.60	4.59	4.55	4.49	4.30	4.01
Annual Electricity [MWh]	2.63	2.95	3.22	3.43	3.57	3.64	3.65	3.64	3.61	3.56	3.41	3.20



[그림 18] 태양광 패널 설치각에 따른 연간 일사량 및 발전량

- 설치 지역의 위도와 설치각이 같을 때 일사량 및 발전량이 가장 큰 것으로 나타났지만, 본 연구의 목표는 방음벽과 태양광열 융합기술로써 설치각을 위도와 동일시하기에 한계가 존재함.
- 태양광열 패널이 방음벽과 융합하기 좋은 설치각은 90°~ 70°이며, 이 범위 안에서 5°씩 설치각을 변화하여 일사량과 발전량을 분석하였고, 그 결과 값은 [그림 19]와 같은 결과를 도출하였으며, 정량적인 값은 <표 7>에 제시하였음.
- 태양광 설치각 70°에서 일사량 및 발전량이 최대값을 나타냈으며, 설치각 90°에서 최저값을 나타냄. 하지만 연간 발전량 차이는 0.6 MWh으로 미미하며 큰 차이를 보이지 않음.



[그림 19] 태양광 설치각 90°~70°에서 연간 일사량 및 발전량

<표 7> 태양광 설치각 90°~70°에서 연간 일사량 및 발전량

Slope Angle [°]	90	85	80	75	70
Annual Irradiation [kWh/m²/d]	3.21	3.44	3.64	3.83	4.01
Irradiation Increase Rate [%]	90→85		85→80		80→75
	6.69		5.49		4.96
Slope Angle [°]	90	85	80	75	70
Annual Electricity [MWh]	2.63	2.79	2.95	3.09	3.22
Electricity Increase Rate [%]	90→85		85→80		80→75
	6.02		5.26		4.63

- 일사량 및 발전량은 5° 변화를 줄 때 증가하며 초기(90°~85) 변화값이 가장 크며 점점 변화값(기울기)이 작아지는 것을 확인하였음. **설치각이 90°에서 85°로 5° 기울이면, 발전효율은 약 6% 증가하며, 10° 기울이면 약 12%가 증가됨**을 알 수 있음. 설치각이 90°에서 70°로 20° 기울이면, 발전효율은 약 22%가 증가됨을 알 수 있음.
- 일사량 및 발전량은 설치각이 작을 때 많은 이점이 있지만, 설치각을 적용할 경우 PVT 방음 모듈의 두께가 두꺼워지고, 무게가 증가할 수 있으며, 또한 추가적인 공정 과정이 발생하기 때문에 그로 인한 제작단가 및 설치단가 등 다양한 금액 발생이 있을 수 있으므로 이러한 변수들을 충분히 고려한 경제성 분석이 추후 필요함.

<방음벽의 개요 및 설계검토 기준>

- 방음벽은 일반적으로 도로에서 발생한 소음 대책에 이용되는 방안으로써, 고속도로 및 국도 등 다양한 곳에서 쓰이고 있으며, 최근 이러한 방음벽의 감음성능 향상과 구조물로서의 기능 향상을 위해 여러 재료와 다양한 구조로 개발이 되고 있음.
- 방음벽은 흡음과 차음의 기능을 갖추고 있으며, 다공질 재료를 통해 공기의 점성에 의해 열에너지로 변환하는 경우로써 소리에너지가 흡수에 의해 감소되는 것이며, 차음은 물체에 의해 소음을 차단하여 투과시키지 않는 물리적 특성을 가지고 있음.
- 방음벽의 음향성능은 기본적으로 차음성능이 요구되며, 필요에 따라 흡음성능이 요구됨. 방음벽의 차음성능은 방음벽 재료에 의한 투과손실과 음원수와 수음점의 위치 관계에 의한 회절감쇠에 의해 결정됨.
- 방음벽 성능평가는 KS F 2808에 근거하여 투과손실을 측정하며, 투과손실에 대한 성능기준은 수음점의 위치에서 방음벽에 기대하는 회절감쇠치에 10 dB을 더한 값 이상으로 하거나, 500 Hz의 음에 대하여 25 dB이상, 1000 Hz의 음에 대하여 30 dB이상의 감음성능을 표준으로 함. 또한, 흡음성능은 시공직전 완제품 상태에서 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz 및 2000 Hz의 음에 대한 흡음을 평균이 70%이상인 것으로 명시함.
- 방음벽은 형태 및 성능과 재질에 의해 다양하게 분류되며, 내부 충전재를 사용하여 소음을 흡수하는 흡음형, 소음의 물리적 진동 특성을 활용한 차음형 등 다양한 방음벽이 있음.
- 방음벽 재료의 특징은 차음 및 소음 반사를 위한 콘크리트 및 플라스틱 방음벽, 흡음 및 차음 이외에 경관을 고려한 점토 및 목재 등 다양한 재료가 사용됨.
- 차음 방음벽은 물리적으로 소음을 차단시켜 방음 효과를 일으키는 것으로, 콘크리트 또는 철판 등 단단한 재료를 사용하여 차음 효과를 얻으며, 차음형 방음벽은 소리의 파동 특성을 이용하여 소음을 반사시키는 반사형 방음벽도 있음.



[그림 20] 콘크리트 방음벽 및 반사형 차음벽

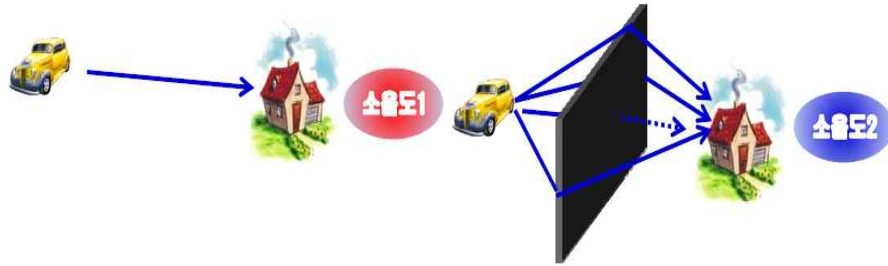
- 흡음형 방음벽은 소음을 흡수하여 소멸시키기 위해 다공성 흡음 충전재를 사용하며 다공에 의해 소리가 열에너지로 변환되거나 또는 소리에너지 크기가 작아져서 주위로 소멸됨.



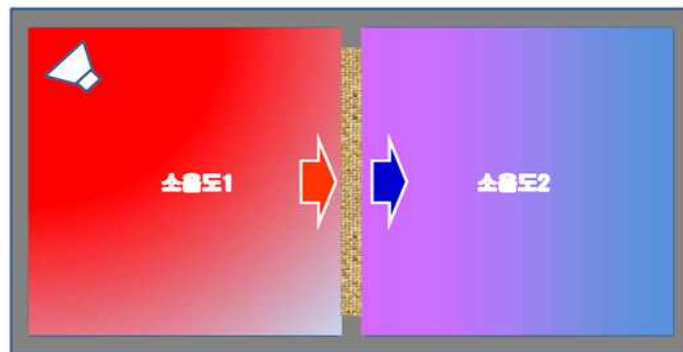
[그림 21] 흡음형 방음벽에 사용되는 흡음 충전재

<방음벽 시험 평가 기준 제시>

- 방음시설은 교통소음을 저감하기 위해 충분한 소리의 흡음 또는 차단효과를 얻을 수 있도록 설치하는 시설을 말하며, 방음시설에는 방음벽, 방음터널, 방음독 등으로 구분됨.
- 환경부 고시(2017-159호)는 방음시설의 성능 및 설치기준을 제시하고 있으며, 설치지역 선정, 방음시설 크기, 설치 지점, 성능 평가 및 사후관리 등 다양한 기준을 제시하고 있음.
- 방음시설의 방음판은 금속재, 비금속재 등 총 4가지로 분류되며, 방음판 성능기준은 KS F 4770 (1~4)에 근거하여 성능평가를 수행함.
- 차음 성능평가는 KS F ISO10140-2에 근거하여 성능평가를 수행하며, 500Hz, 1000Hz 두 소음에 대해 각각 투과손실(=소음도1-소음도2) 25dB, 30dB 이상 나타나야 함.



[그림 22] 교통방음시설 소음 차단 및 흡수 개념도



$$\text{투과손실} = \text{소음도1} - \text{소음도2}$$

(Transmission Loss, TL)

[그림 23] 소음도와 투과손실 상관관계 개념도

- 성능평가는 음원용의 제 2잔향실과 수음용의 제 1잔향실 사이의 설치용 개구부에 시료를 설치하고 각각의 평균 음압 레벨 및 흡음력을 측정하여 시료의 음향 감쇠계수(음향 투과손실)를 측정함.
- 음원실 및 수음실은 각각 경계면이 0.7 m 이상 거리를 두며, 음원실의 경우 음원으로부터 1 m 이상 떨어진 공간 내에, 마이크로폰 사이는 0.7 m 이상 떨어진 5점을 선정하고 음압 레벨을 측정한 후 다음 식에 의해 평균 음압 레벨 및 음향 감쇠계수를 산출함.



[그림 24] 음원실(좌), 수음실(우) 실험체 설치 모습



[그림 25] 제 1,2 잔향실에서 음향 투과손실 측정 과정

- 실내 평균 음압레벨 측정

$$L = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)$$

L_i : i 번째 고정 측정점에서의 음압레벨 측정값 (dB)

n : 측정점 수

- 음향감쇠계수(Sound reduction index, R) 산출

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A}$$

L_1 : 음원실에서의 평균음압레벨 (dB)

L_2 : 수음실에서의 평균음압레벨 (dB)

S : 시료의 면적 (m^2)

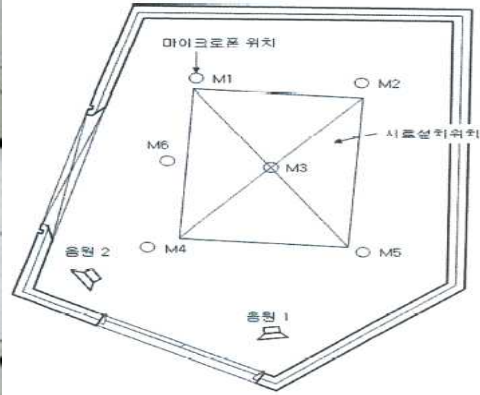
A : 수음실의 흡음력 (m^2)

- 흡음 성능평가는 KS F 2805에 근거하여 성능평가를 수행하며, 250, 500, 1000, 2000Hz 총 4가지의 소음 흡수율 평균으로 아래 <표 8>과 같이 1등급(0.85이상)에서 4등급(0.7이상)까지 4등급으로 나누어 평가함.

<표 8> 흡음 성능 평가 기준표

1 등급	2 등급	3 등급	4 등급
0.85 이상	0.8 이상	0.75 이상	0.7 이상

- 흡음 성능 평가의 잔향실내에 흡음성능을 가진 시료를 설치하고 총 여섯 개의 마이크와 2개의 음원기기를 설치하여 흡음성능을 수행하며 아래 [그림 26]과 같음.



[그림 26] 흡음성능평가 잔향실내 모습

<PVT 방음 모듈용 PV 패널>

- PV 패널은 방음벽 설치시 셀이 프레임에 가려지면 안되기 때문에, 방음벽 크기와 설치 방향 등을 고려하여 [그림 27]과 같이 가로 6열, 세로 11열로 총 66개의 셀로 구성하였음.
- PVT 방음 모듈의 사용된 PV 패널의 사양은 <표 9>에 정리하였으며, 높이 1.96 mm, 가로 994 mm, 두께 80 mm의 크기를 가지며 STC(Standard Test Condition)에서 최대 출력은 307.73 W, NOTC 조건에서 최대 출력 189.36 W값을 가지고 있음.



[그림 27] PVT 방음 모듈용 PV 패널

<표 9> PVT 방음 모듈에 사용된 PV 패널 사양

제 품 모 델 명	EMS300-A66G					
공칭 최대 출력	300 W					
공칭 개방 전압	42.3 V					
공칭 단락 전류	9.08 A					
공칭 최대 출력 동작 전압	35.31 V					
공칭 최대 출력 동작 전류	8.5 A					
태양전지 모듈 크기	H 1.962 mm X W 994 mm X T 80 mm					
태양전지 모듈 정격 효율	15.40%					
태양전지 종류	단결정					
태양전지 직렬 접속 수	66					
바이패스 다이오트 수	3					
바이패스 다이오드 당 연결 태양전지 수	22					
PV 패널 STC & NOTC 조건 전기적 특성						
	Voc[V]	Isc[A]	Vmp[V]	Imp[A]	Pmax[W]	Eff [%]
STC (1000 W/m ² , 25℃)	43.51	9.48	34.74	8.86	307.73	15.78
NOTC (800 W/m ² , 48.1℃)	35.74	7.73	26.93	7.03	189.36	9.71

<PV 방음 모듈 제작 및 성능 평가 수행>

- PV 방음 모듈의 차음 및 흡음 성능평가는 KS F ISO 10140-2(건물 부재의 차음 성능 실험실 측정방법)와 KS F 2805(잔향실험 흡음 성능 측정방법)에 근거하여 성능평가를 수행하였음.
- 방음벽으로써 PV 방음 모듈의 차음 성능 적정 여부는 500 Hz의 소음 조건에서 25 dB 이상 차음 성능을 발휘하고, 1000 Hz의 소음 조건에서 30 dB 이상 차음 성능을 발휘할 때 방음 모듈로써 차음 기능이 가능하다 평가되며, 흡음 성능 적정 여부는 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz의 4가지 소음조건에서 흡음 성능을 측정하여 4가지 흡음계수의 평균이 0.7(4 등급)이상 흡음 성능을 발휘할 때 방음 모듈로써 흡음 기능이 가능하다 평가됨.

① 경사형 PV 방음 모듈

- 경사형 PV 방음 모듈은 [그림 28]과 같으며, 방음벽으로 설치시 PV 모듈에 약 10° 정도의 경사각을 줌으로써 수직형 모듈에 비해 일사량을 더 많이 획득할 수 있는 구조임. 차음 및 흡음 성능에 사용된 시료의 크기는 가로 3470 mm, 세로 3000 mm, 두께 95 mm로 총 10.5 m²의 면적을 가지고 있음.
- 전면부와 후면부에 0.8 mm의 두께를 가지는 냉연 용융 아연 합금 강판을 사용하여 제작되었고, 흡음재는 50 mm 두께의 폴리에스테르 40 K를 사용하여 제작되었음. 차음 및 흡음 성능평가에 사용된 시료의 사양은 <표 10>에 정리함.

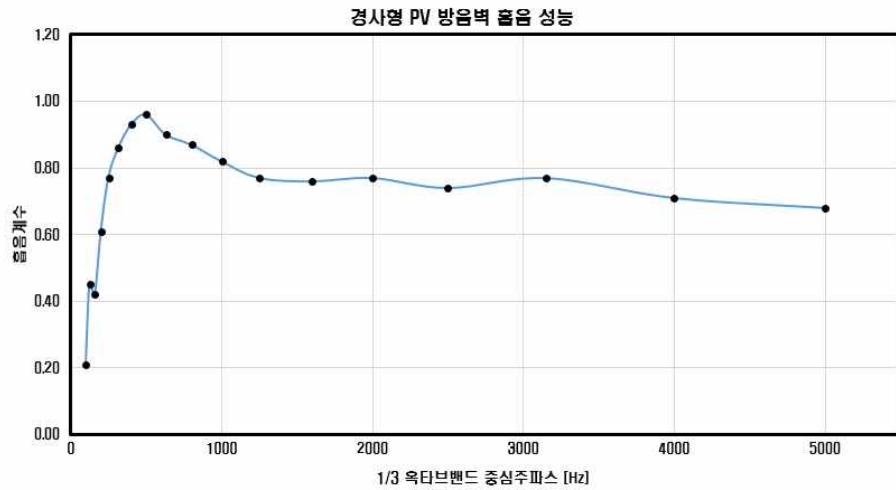


[그림 28] 경사형 PV 방음 모듈

<표 10> 경사형 PV 방음 모듈 시험편 사양

		재료 및 규격	비고
시험편의 크기		W 3470 mm x H 3000 mm x T 95 mm	시험개구면적 10.41 m ²
구 성	전면판	포스맥 냉연 용융 아연 합금 강판 (타공) T 0.8 mm	
	흡음재	PE (Polyester) 40 K T 50 mm	
	후면판	포스맥 냉연 용융 아연 합금 강판 T 0.8 mm	

- KS F 2805규정에 따라 250, 500, 1000, 2000 Hz 소음 조건에서 흡음 성능평가를 수행하였으며, **4가지 소음조건에서 흡음계수의 평균이 0.83**을 나타내었음. 이는 2 등급 흡음 성능을 나타내는 것으로, 최종 개발 목표인 0.7 흡음 성능을 초과 달성하였음. 경사형 PV 방음 모듈의 흡음 성능데이터는 [그림 29]와 <표 11>에 정리하였고, 시험환경은 <표 12>에 정리함.



[그림 29] 경사형 PV 방음 모듈 흡음 성능평가 결과

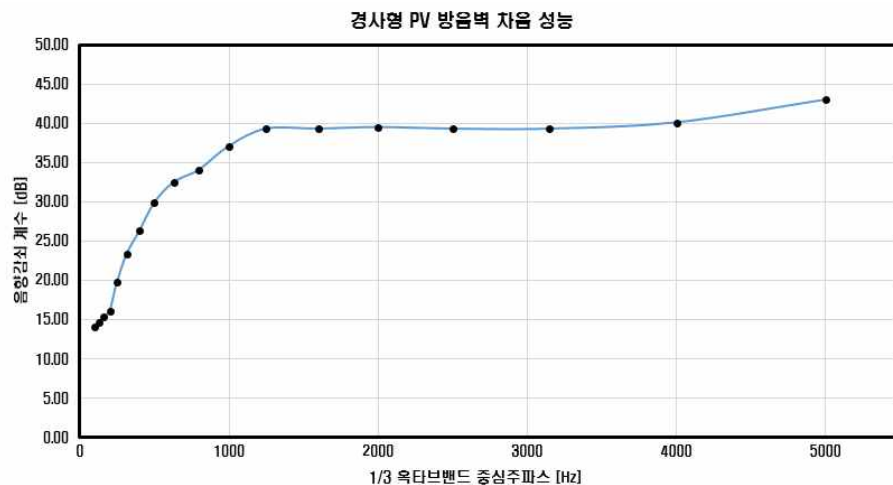
<표 11> 경사형 PV 방음 모듈 흡음 성능평가 데이터

주파수 [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
흡음계수	0.21	0.45	0.42	0.61	0.77	0.86	0.93	0.96	0.90
주파수 [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
흡음계수	0.87	0.82	0.77	0.76	0.77	0.74	0.77	0.71	0.68

<표 12> 경사형 PV 방음 모듈 흡음 성능평가 시험환경

온도	14.9 ~ 15.1 °C
상대습도	42.3 ~ 43.2 %
표면적	291.8 m ²
잔향실 용적	325 m ³

- KS F ISO 10140-2 규정에 따라 500, 1000 Hz 소음 2가지 조건에서 경사형 방음 모듈의 차음 성능평가를 수행하였으며, 2 가지 소음조건에서 각각 29.9, 37.1 dB 차음 성능을 나타내었음. 이는 최종 개발 목표인 1000 Hz 소음조건에서 35dB 이상인 37.1 dB으로 차음 성능을 초과 달성함. 경사형 PV 방음 모듈의 흡음 성능데이터는 [그림 30]과 <표 13>에 정리하였고, 시험환경은 <표 14>에 정리함.



[그림 30] 경사형 PV 방음 모듈 차음 성능평가 결과

<표 13> 경사형 PV 방음 모듈 차음 성능평가 데이터

주파수 [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
음향감쇠 계수 [dB]	14.10	14.60	15.40	16.10	19.80	23.40	26.30	29.90	32.50
주파수 [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
음향감쇠 계수 [dB]	34.10	37.10	39.30	39.30	39.50	39.30	39.30	40.10	43.00

<표 14> 경사형 PV 방음 모듈 차음 성능평가 시험환경

온도	14.9 ~ 15.1 °C
상대습도	45.0 ~ 45.9 %
음원실 면적	249 m ²
수음실 용적	325 m ³

② 수직형 PV 방음 모듈

- [그림 31]은 수직형 PV 방음 모듈의 전경 사진이며, 수직형 PV 방음 모듈의 차음 및 흡음 성능에 사용된 시료의 크기는 차음의 경우 가로 3500 mm, 세로 3000 mm, 두께 95 mm로 총 10.5 m²의 면적을 가지고 있음.
- 경사형과 마찬가지로 전면부와 후면부에 0.8 mm의 두께를 가지는 냉연 용융 아연 합금 강판을 사용하여 제작되었고, 흡음재는 50 mm 두께의 폴리에스테르 40 K를 사용하여 제작되었음. 차음 및 흡음 성능평가에 사용된 시료의 사양은 <표 15>에 정리함.

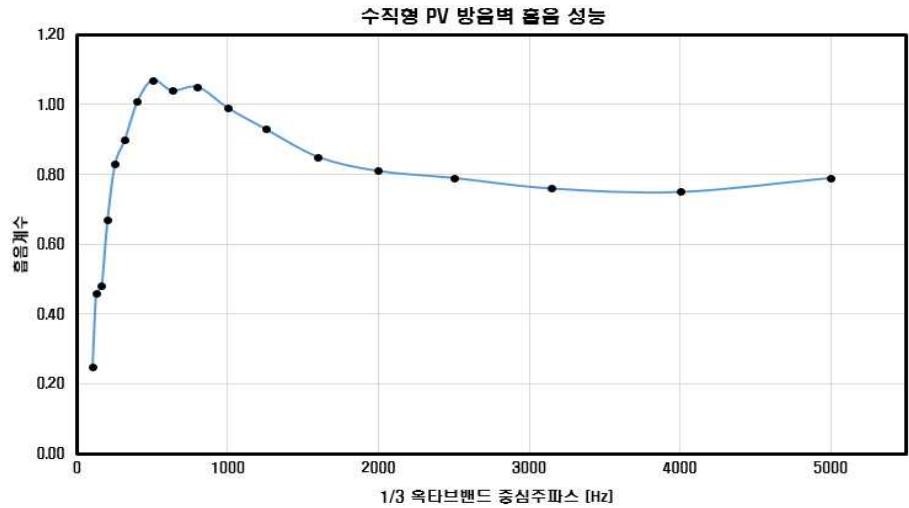


[그림 31] 수직형 PV 방음 모듈

<표 15> 수직형 PV 방음 모듈 차음 및 흡음 성능평가 시료 사양

		재료 및 규격
시험편의 크기	흡음 시험	W 1960mm x H 950 mm x T 95 mm, A 1.86 m ²
	차음 시험	W 3500 mm x H 3000 mm x T 95 mm A 10.5 m ²
구 성	전면판	포스맥 냉연 용융 아연 합금 강판 (타공) T 0.8 mm
	흡음재	PE (Polyester) 40 K T 50 mm
	후면판	포스맥 냉연 용융 아연 합금 강판 T 0.8 mm

○ KS F 2805 규정에 따라 250, 500, 1000, 2000 Hz 소음 조건에서 흡음 성능평가를 수행하였으며, **4가지 소음조건에서 흡음계수의 평균이 0.93**을 나타내었음. 이는 1 등급 흡음 성능을 나타내는 것으로 정량적 개발 목표 0.7 이상의 흡음 성능을 달성함. 경사형 PV 방음 모듈의 흡음 성능데이터는 [그림 32]와 <표 16>에 정리하였고, 시험환경은 <표 17>에 정리함.



[그림 32] 수직형 PV 방음 모듈 흡음 성능평가 결과

<표 16> 수직형 PV 방음 모듈 흡음 성능평가 데이터

주파수 [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
흡음계수	0.25	0.46	0.48	0.67	0.83	0.90	1.01	1.07	1.04
주파수 [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
흡음계수	1.05	0.99	0.93	0.85	0.81	0.79	0.76	0.75	0.79

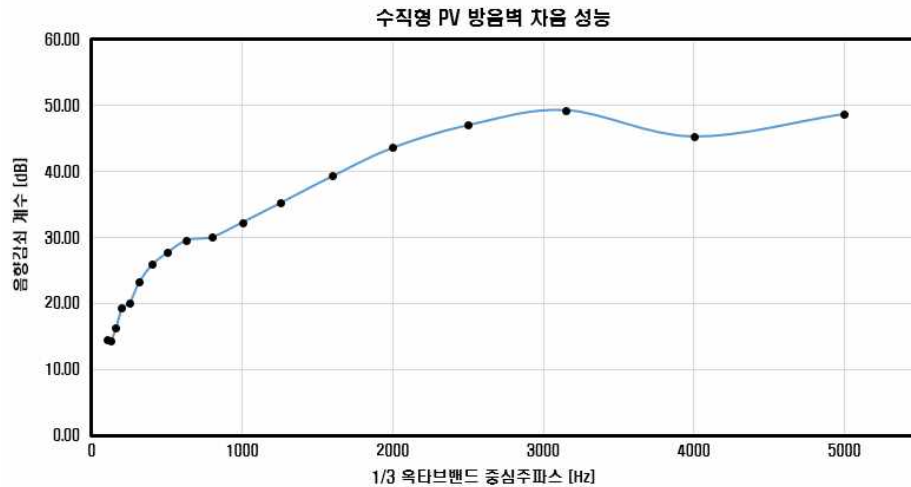
<표 17> 수직형 PV 방음 모듈 흡음 성능평가 시험환경

온도	16.3 ~ 16.6 °C
상대습도	71.3 ~ 72.2 %
표면적	291.8 m ²
잔향실 용적	325 m ³

○ KS F ISO 10140-2 규정에 따라 500, 1000 Hz 소음 2가지 조건에서 수직형 방음 모듈의 차음 성능평가를 수행하였으며, 2 가지 소음조건에서 각각 27.70, 32.30 dB 차음 성능을 달성함. 수직형 PV 방음 모듈의 차음 성능데이터는 <표 18>과 [그림 33]에 정리하였고, 시험환경은 <표 19>에 정리함.

<표 18> 수직형 PV 방음 모듈 차음 성능평가 데이터

주파수 [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
음향감쇠 계수 [dB]	14.6	14.40	16.30	19.30	20.50	23.30	25.90	27.70	29.60
주파수 [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
음향감쇠 계수 [dB]	30.10	32.30	35.20	39.30	43.60	47.00	49.30	45.30	48.70



[그림 33] 수직형 PV 방음 모듈 차음 성능평가 결과

<표 19> 수직형 PV 방음 모듈 차음 성능평가 시험환경

온도	16.5 ~ 16.7 °C
상대습도	75.8 ~ 82.1 %
음원실 면적	249 m ²
수음실 용적	325 m ³

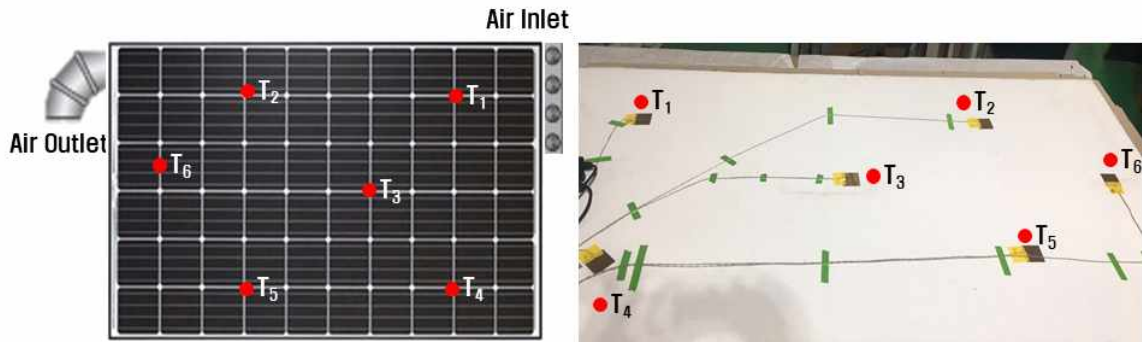
<PV 방음 모듈 제작 및 성능 평가 수행>

- 앞에서 설계된 도면을 바탕으로 개선형 방음 모듈을 제작하였음. 제작된 PVT 방음 모듈의 공기 배플 재료는 내부식성, 내하중, 열전도성에 유리한 스테인레스 재질을 사용하였고, 스테인레스 1T를 판을 절곡하여 스팟용접을 통해 [그림 34]와 같이 공기 배플을 제작함.



[그림 34] PVT 방음 모듈 공기 배플 제작

- PVT 방음 모듈에서 외부로 열에너지 손실을 없애기 위해 단열 작업을 실시하였고, 아티론(발포폴리에틸렌) 계열의 10T 두께의 난연성 보온재를 이용하여 단열 작업을 실행함.
- PV 패널과 공기 배플을 결합하기 위해 앞서 PV 패널의 배면온도를 모니터링하기 위한 온도센서를 [그림 35]와 같이 6개 부착함.



[그림 35] PVT 방음 모듈 PV 패널 온도 측정 포인트



[그림 36] PVT 방음 모듈 공기 배플 온도 측정 포인트

- PV 패널과 배플 내 공기유동으로 인한 열전달 효과를 확인하기 위해 배플 내 공기 유동 온도계를 [그림 36]과 같이 설치하였고 공기 배플 후면에 단열과 방음을 위한 흡음재로 폴리에스터 계열의 50T 두께를 이용하였으며, 열전도도는 0.042 W/(m.K) 이며, 흡음성능은 다음의 <표 20>과 같음.

<표 20> 흡음재의 흡음성능, 두께 50T

주파수(Hz)	125	250	500	1000	2500	NRC
흡음계수	0.3	0.55	0.81	0.83	0.789	0.700

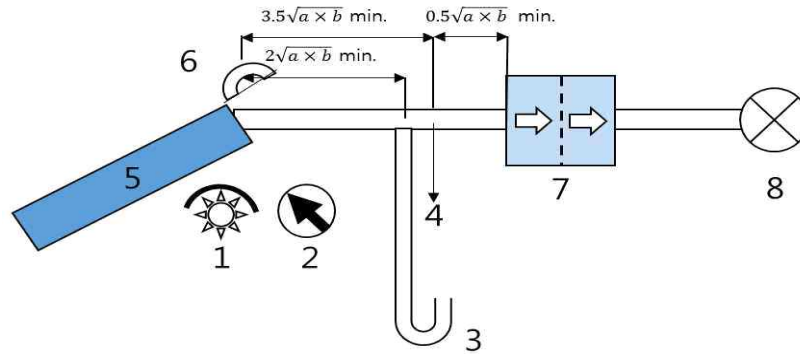
- 또한 다기능성 PVT 방음 모듈 후면은 흡음재의 강성과 오염 방지를 위해 타공형 굴곡 마감재를 사용하였으며, 제작된 모습은 [그림 37]과 같음.



[그림 37] PVT 방음 모듈 시작품

<PVT 방음 모듈 성능 평가 장치>

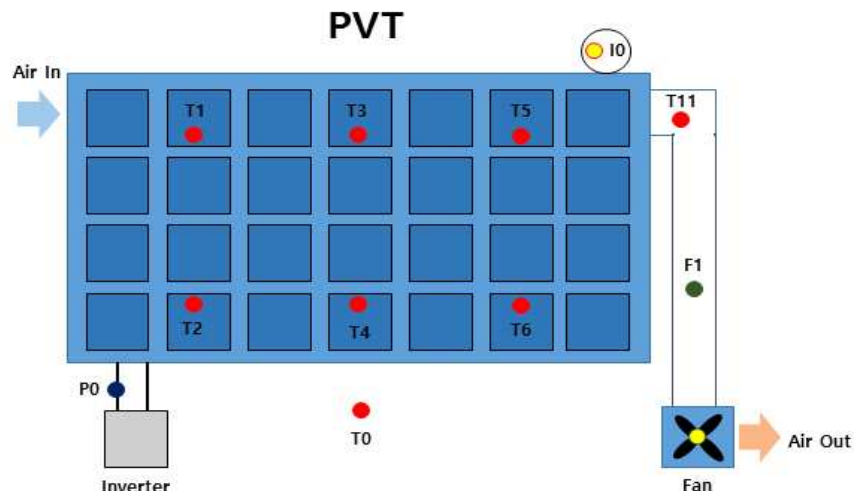
- 본 연구에서 PVT 방음 모듈의 성능 시험 평가를 위한 표준은 태양열 집열기(PVT포함)의 성능 평가 기준인 ISO 9806을 참조하였음. 이는 공기식 태양열 집열기뿐만 아니라 PVT에 대한 성능 시험 평가를 포함하며, 본 연구에서 개발된 모듈은 개방형 구조이므로 [그림 38]과 같은 성능 시험장치 구성도를 참조하여 실험장치를 구성하였음.



- a = the height of the air collector air flow opening
b = the width of the air collector air flow opening
- | | |
|---------------------------------------|--------------------|
| 1. Surrounding air temperature sensor | 5. Solar collector |
| 2. Pressure gauge for surrounding air | 6. Pyranometer |
| 3. Pressure gauge | 7. Air flow meter |
| 4. Temperature sensor | 8. Fan |

[그림 38] ISO 9806 개방형 공기식 집열기 성능 시험 장치 구성도

- 차압 성능을 측정하기 위한 외기압력계(2), 출구측 압력계(3)를 제외하였고, 실외 성능 테스트를 위한 외기 풍속계가 추가적으로 구비되었음. 또한 PVT 방음 모듈에서의 전력 생산량을 비교하기 위한 전압 전류계와 계통 연계형 인버터가 추가됨.
- ISO 9806의 공기식 태양열 집열기 성능시험 장치 구성에 따르면 측정장치는 8가지로 구분되며, 외기와 접하는 부분에 외기온도 센서(1)와, 외기압력계(2)가 구성되어 있고, 출구측 압력계(3), 출구측 온도센서(4), 태양열 집열기(5), 일사량계(6), 풍량계(7), 송풍기(8)로 구성되어 있음.
- 본 연구에서는 차압 성능을 측정하기 위한 외기압력계(2), 출구측 압력계(3)를 제외하였고, 실외 성능 테스트를 위한 외기 풍속계가 추가적으로 구비되었음. 또한 PV와 PVT 전력 생산량을 비교하기 위한 전압 전류계와 계통 연계형 인버터가 추가됨.
- 이에 ISO 9806에 준하는 성능 시험 장치를 구축하기 위한 장치 설계를 진행하였으며, 설계된 구성도는 [그림 39]와 같음.



[그림 39] PVT 방음 모듈 열, 전기 성능 시험 장치 구성도

- [그림 40]은 앞에서 설명한 ISO 9806 기반의 PVT 방음 모듈 성능 시험 장치를 제작한 전경으로 한국에너지기술연구원에 구축되어 있으며, 이 시험 장치를 활용하여 기 개발한 PVT 방음 모듈의 열 및 전기 성능 시험을 수행하였음.



[그림 40] PVT 방음 모듈 열, 전기 성능 시험 장치

- 실험장치 구성에 사용된 온도계의 규격은 <표 21>에 나타내었으며, 1개의 외기온도계와, 1개의 덕트온도계 그리고 10개의 접촉식 패널 온도계를 설치하였음.
- 실험장치 구성에 사용된 일사량계는 LP Silicon-PYRA04 모델로써 규격은 아래 <표 22>와 같으며, PVT 방음 모듈과 평행하게 설치하였음.
- 실험장치 구성에 사용된 풍속계의 규격은 아래 <표 23>과 같으며, 외기풍속계는 실시간으로 모니터링되며, 덕트 풍속계는 PVT의 정류량 조건에서 실험 유량을 측정함.
- 실험장치 구성에 사용된 인버터의 규격은 아래 <표 24>와 같으며, PV와 PVT의 전력을 동일하게 측정하기 위해서 2대를 설치함.
- 실험장치 구성에 사용된 열화상 카메라의 규격은 아래 <표 25>와 같으며, 시운전 단계에서 유로형성 여부와 패널온도 분포를 보기 위해 사용함.

<표 21> 온도계 규격

항목		단위	측정범위
외기온도계	GST-100	℃	-10 ~ 70
덕트온도계	GDT-100	℃	-30 ~ 130
접촉식 패널온도계	SA1-RTD	℃	-200 ~ 500
비고		PT 100 Ohm	

<표 22> 일사량계 규격

항목		단위	재원
일사량계	측정범위	W/m ²	0 ~ 2000
	작도온도	℃	-40 ~ 65
증폭 컨버터	출력범위	mA	4 ~ 20

<표 23> 풍속계 규격

항목		단위	측정범위
외기풍속계 (회전식)	측정 범위	m/s	0 ~ 60
	정확도	%	± 1
덕트풍속계 (열선식)	측정 범위	m/s	0 ~ 30
	정확도	%	± 3

<표 24> 인버터 규격

항목		단위	범위
인버터	정격출력	W	500
	입력범위	Vdc	22 ~ 60
	출력범위	Vac	190 ~ 260
	인버터 효율	%	92
비고		계통연계형 인버터, 동일제품 2개 설치	

<표 25> 열화상 카메라 규격

항목		단위	측정범위
열화상 카메라	공간 분해능	mRad	7.8
	감지기 분해능	Pixel	80 x 60
	시야각	°	35.7 ~ 26.8
	온도 측정 범위	℃	- 20 ~ 250

<PVT 방음 모듈 열-전기 성능 평가>

① 성능 평가 방법

- 성능평가 시험은 대전광역시 한국에너지기술연구원 본원 부지에서 진행하였으며, 평균 외기풍속이 2 m/s 이내이고, 일사조건이 비교적 좋은 날에 진행함.
- PVT 방음 모듈의 설치각도는 지면과 수직으로 설치하여 성능평가를 수행하였으며, 정량적 기술개발 목표인 PV 패널 15 ℃ 냉각 효과로 인한 6% 발전효율 상승과 400 W/m²의 열에너지 생산에 중점을 두어 성능평가를 수행함.
- PVT 열성능 평가는 세 가지의 유량 조건(無유량, 저유량 0.037 kg/s, 고유량 0.058 kg/s)에서 실험을 수행하였으며, 일사량이 30분 이상 안정적인 구간에서 공기 입출구 온도차와 외기풍속 조건이 안정적인 30분 구간을 사용하여 성능평가 분석을 수행함.
- 실험데이터는 1분 단위로 저장하여 분석에 활용함.

② 성능 평가 결과

- 실험 결과 분석에 사용된 데이터는 1분단위로 저장된 데이터를 실험 장치의 온도센서의 데이터가 충분히(10분 이상) 안정화 되었다고 판단되었을 시점으로부터 30분간의 연속 데이터를 활용하였음.
- 실험 결과 분석 시 PVT 방음 모듈 내에서 공기 유동에 따른 열효율과 전기효율이 다르기 때문에, 공기 유동에 따라 無유량, 저유량, 고유량으로 나눠서 분석하였음.
- <표 26>은 PVT 방음 모듈 내부에 공기의 흐름이 없는 상태(無유량)에서의 에너지 성능 시험 결과를 나타내었고, <표 27>은 PVT 방음 모듈 내부에 공기의 흐름이 강할 때인 고유량(174 CMH)에서의 에너지 성능 시험 결과를 보여주고 있음. <표 28>은 공기의 흐름이 적을 때인 저유량(111 CMH)에서의 에너지 성능 시험 결과 값임.
- 실험 결과 분석 사용된 물성치는 공기 밀도 1.2kg/m³, 공기 비열은 1 kJ/kg ℃로 계산함.
- 실험 결과 분석 사용된 수식은 다음과 같음.

- 열 생산량(Q) 산정식

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

여기에서, $\dot{m}$ 은 질량유량, C_p 는 공기의 비열, ΔT 는 입출구 온도차

- 전기효율(η_e) 산정식

$$\eta_e = \frac{P}{A \times G}$$

여기에서, P는 생산된 전력, A는 모듈 면적, G는 일사량

- 열효율(η_{th}) 산정식

$$\eta_{th} = \frac{Q}{A \times G}$$

여기에서, Q는 생산열량, A는 모듈 면적, G는 일사량

<표 26> 無유량 데이터, 2020년 10월 30일

측정시간	법선면 일사량 (W/m ²)	유입 공기량 (kg/s)	외기(유입) 온도 (℃)	유출 온도 (℃)	배면 온도 (℃)	발전량 (W)	열 생산량 (W)	발전 효율 (%)	열효율 (%)
11:30	770	0	15.8	15.8	55.9	180.3	0	12.64	0
11:31	780	0	15.8	15.8	56.0	181.4	0	12.56	0
11:32	780	0	15.8	15.8	56.1	181.3	0	12.56	0
11:33	785	0	15.8	15.8	56.3	182.2	0	12.53	0
11:34	785	0	15.9	15.9	56.5	181.8	0	12.50	0
11:35	776	0	15.9	15.9	56.8	180.6	0	12.56	0
11:36	785	0	15.9	15.9	57.0	180.4	0	12.40	0
11:37	778	0	16.0	16.0	57.2	179.4	0	12.46	0
11:38	773	0	16.1	16.1	57.4	180.5	0	12.60	0
11:39	781	0	16.2	16.2	57.5	179.5	0	12.40	0
11:40	772	0	16.2	16.2	57.5	180.5	0	12.62	0
11:41	780	0	16.3	16.3	57.3	181.7	0	12.57	0
11:42	776	0	16.4	16.4	57.3	182.0	0	12.66	0
11:43	781	0	16.5	16.5	57.2	181.0	0	12.51	0
11:44	787	0	16.6	16.6	57.0	182.9	0	12.55	0
11:45	786	0	16.6	16.6	57.0	182.8	0	12.57	0
11:46	786	0	16.8	16.8	57.3	183.1	0	12.58	0
11:47	776	0	16.8	16.8	57.4	181.5	0	12.63	0
11:48	773	0	16.8	16.8	57.6	181.7	0	12.69	0
11:49	777	0	16.9	16.9	57.6	181.1	0	12.58	0
11:50	780	0	16.8	16.8	57.8	181.0	0	12.53	0
11:51	773	0	16.8	16.8	58.1	180.8	0	12.64	0
11:52	780	0	16.8	16.8	58.2	181.5	0	12.56	0
11:53	771	0	16.8	16.8	57.7	180.7	0	12.65	0
11:54	776	0	16.9	16.9	57.7	182.1	0	12.67	0
11:55	772	0	16.9	16.9	57.9	181.4	0	12.68	0
11:56	776	0	17.0	17.0	57.9	180.8	0	12.57	0
11:57	776	0	17.1	17.1	58.0	181.6	0	12.64	0
11:58	769	0	17.2	17.2	57.9	181.3	0	12.74	0
11:59	778	0	17.2	17.2	58.0	184.0	0	12.77	0
12:00	775	0	17.3	17.3	58.1	182.6	0	12.72	0
평균	778	0	16.5	16.5	57.3	181.4	0	12.59	0

<표 27> 고유량 데이터, 2020년 11월 04일

측정시간	법선면 일사량 (W/m ²)	유입 공기량 (kg/s)	외기(유입) 온도 (℃)	유출 온도 (℃)	배면 온도 (℃)	발전량 (W)	열 생산량 (W)	발전 효율 (%)	열효율 (%)
13:42	801	0.058	11.7	25.3	36.8	205.1	428.1	13.83	53.48
13:43	791	0.058	11.6	25.2	36.4	205.6	428.1	14.04	54.16
13:44	788	0.058	11.8	25.1	36.4	204.8	418.7	14.04	53.17
13:45	800	0.058	11.7	25.0	36.1	205.4	418.7	13.87	52.37
13:46	793	0.058	11.8	25.0	36.3	204.3	415.5	13.91	52.43
13:47	800	0.058	11.8	25.0	36.3	204.5	415.5	13.81	51.97
13:48	790	0.058	12.0	25.1	36.5	204.9	412.4	14.01	52.23
13:49	795	0.058	12.0	25.2	36.4	204.3	415.5	13.87	52.27
13:50	787	0.058	12.0	25.2	36.4	204.2	415.5	14.00	52.80
13:51	783	0.058	12.0	25.2	36.3	203.6	415.5	14.05	53.10
13:52	785	0.058	12.0	25.1	36.4	202.1	412.4	13.90	52.53
13:53	778	0.058	12.0	25.3	36.4	200.7	418.7	13.93	53.85
13:54	782	0.058	11.9	25.1	36.3	200.4	415.5	13.83	53.14
13:55	775	0.058	11.8	25.1	36.2	199.9	418.7	13.92	54.02
13:56	783	0.058	11.7	25.0	36.2	200.8	418.7	13.85	53.47
13:57	780	0.058	11.8	25.0	36.2	199.5	415.5	13.81	53.27
13:58	780	0.058	11.7	25.0	36.2	199.3	418.7	13.80	53.71
13:59	775	0.058	11.7	25.1	36.2	199.3	421.8	13.88	54.43
14:00	769	0.058	11.7	25.0	36.1	197.0	418.7	13.84	54.48
14:01	766	0.058	12.0	25.1	36.2	196.7	412.4	13.87	53.87
14:02	780	0.058	12.0	25.1	36.4	197.9	412.4	13.69	52.87
14:03	772	0.058	12.1	25.1	36.2	198.5	409.2	13.88	53.01
14:04	767	0.058	12.1	25.3	36.6	198.1	415.5	13.94	54.18
14:05	771	0.058	12.0	25.2	36.4	195.7	415.5	13.70	53.89
14:06	769	0.058	12.0	25.2	36.4	195.3	415.5	13.72	54.07
14:07	763	0.058	12.1	25.3	36.6	195.2	415.5	13.81	54.46
14:08	758	0.058	12.1	25.2	36.2	196.2	412.4	13.98	54.40
14:09	765	0.058	12.2	25.1	36.1	197.5	406.1	13.94	53.08
14:10	764	0.058	12.0	25.0	36.1	196.6	409.2	13.90	53.60
14:11	763	0.058	12.1	25.2	36.2	195.9	412.4	13.86	54.05
14:12	753	0.058	12.1	25.1	36.2	193.7	409.2	13.90	54.38
평균	778	0.058	11.9	25.1	36.3	200.1	415.7	13.88	53.44

<표 28> 저유량 데이터, 2020년 11월 10일

측정시간	법선면 일사량 (W/m ²)	유입 공기량 (kg/s)	외기(유입) 온도 (℃)	유출 온도 (℃)	배면 온도 (℃)	발전량 (W)	열 생산량 (W)	발전 효율 (%)	열효율 (%)
10:49	759	0.017	11.9	28.1	39.7	192.9	324.5	13.73	42.79
10:50	765	0.017	11.8	28.1	39.5	192.9	326.5	13.62	42.71
10:51	765	0.017	12.0	28.2	39.6	194.2	324.5	13.71	42.45
10:52	762	0.017	12.0	28.1	39.4	194.1	322.5	13.75	42.33
10:53	768	0.017	12.1	28.3	39.6	192.9	324.5	13.56	42.26
10:54	765	0.017	12.1	28.3	39.7	193.5	324.5	13.65	42.42
10:55	768	0.017	12.1	28.3	39.7	194.3	324.5	13.66	42.28
10:56	765	0.017	12.1	28.2	39.5	194.7	322.5	13.74	42.16
10:57	763	0.017	12.0	28.2	39.8	193.6	324.5	13.70	42.53
10:58	774	0.017	11.8	28.3	39.9	196.6	330.5	13.72	42.73
10:59	774	0.017	11.8	28.3	40.0	195.7	330.5	13.66	42.73
11:00	766	0.017	11.9	28.4	40.2	195.9	330.5	13.82	43.18
11:01	780	0.017	12.0	28.4	40.3	196.7	328.5	13.62	42.15
11:02	774	0.017	12.0	28.6	40.4	198.7	332.5	13.87	42.99
11:03	780	0.017	12.1	28.7	40.6	198.6	332.5	13.74	42.63
11:04	783	0.017	12.3	28.8	40.8	199.3	330.5	13.75	42.24
11:05	781	0.017	12.4	28.9	40.8	197.8	330.5	13.68	42.35
11:06	776	0.017	12.2	29.0	40.6	198.8	336.5	13.84	43.40
11:07	781	0.017	12.1	28.9	40.3	197.5	336.5	13.65	43.09
11:08	781	0.017	12.1	28.8	40.2	197.1	334.5	13.62	42.84
11:09	790	0.017	12.2	28.8	39.9	200.0	332.5	13.67	42.09
11:10	787	0.017	12.2	28.7	39.9	199.4	330.5	13.68	42.00
11:11	786	0.017	12.0	28.7	39.7	200.0	334.5	13.73	42.56
11:12	791	0.017	12.1	28.6	39.8	202.2	330.5	13.81	41.81
11:13	789	0.017	12.2	28.7	40.0	201.6	330.5	13.80	41.92
11:14	786	0.017	12.1	28.7	40.0	202.0	332.5	13.87	42.31
11:15	787	0.017	12.1	28.7	40.1	202.0	332.5	13.85	42.25
11:16	788	0.017	12.1	28.6	40.1	202.3	330.5	13.86	41.95
11:17	802	0.017	12.2	28.7	40.4	198.5	330.5	13.37	41.24
11:18	800	0.017	12.2	28.7	40.4	203.0	330.5	13.70	41.32
11:19	798	0.017	12.1	28.7	40.4	202.3	332.5	13.69	41.70
평균	778	0.017	12.1	28.5	40.0	197.7	329.7	13.71	42.37

- PVT 방음 모듈에서 유량 흐름이 없는 無유량(Q=0 CMH)일 때를 분석해보면, 평균 일사량 778 W/m²(외기온도 16.5℃)에서 PVT 배면온도는 57.3℃로 나타났으며, 배면온도와 외기온도와의 차는 40.8℃로 높게 나타났음. 이 때의 평균 발전량은 181.4 W로 약 12.59%의 발전효율을 보였음. PVT에서의 열효율은 없음.
- PVT 방음 모듈에서 공기가 저유량(Q=111 CMH)으로 작동되었을 때, 평균 일사량 778 W/m²(외기온도 12.1℃)에서 PVT 배면온도는 40.0℃로 나타났으며, 배면온도와 외기온도와의 차는 27.9℃로 나타났음. PVT 방음 모듈에서의 열에너지 생산량은 329.7 W/m²으로 열효율이 42.37%로 다소 높게 나타났음. 이 값은 STC 조건인 일사량 1000 W/m²인 기준에서 423.7 W/m²의 열에너지를 생산함을 알 수 있으며, 전기효율은 평균 13.71%로 나타났음.
- PVT 방음 모듈에서 고유량(Q=174 CMH)으로 작동되었을 때를 분석해보면, 평균 일사량 778 W/m²(외기온도 11.9℃)에서 PVT 배면온도는 36.3℃로 나타났으며, 배면온도와 외기온도와의 차는 24.4℃로 나타났음. PVT 방음 모듈에서의 열에너지 생산량은 415.7 W/m²으로 열효율이 53.44%로 높게 나타났음. 이 값은 STC 조건인 일사량 1000 W/m²인 기준에서 534.4 W/m²의 열에너지를 생산함을 알 수 있음. 전기효율은 평균 13.88%로 나타났음.
- PVT 방음 모듈에서의 공기 유동 유무에 따른 전기와 열 성능 시험 결과를 비교하면, 다음과 같은 결과를 도출할 수 있음.
 - 평균 일사조건인 778 W/m²에서 PVT 방음 모듈의 배면온도는 無유량시 57.3℃(외기온도 11.9℃), 저

유량시 40.0℃(외기온도 12.1℃), 고유량시 36.3℃(외기온도 11.9℃)로 나타났음. 이를 바탕으로 PVT 방음 모듈에서 공기 유입에 의한 배면온도 감소량은 저유량일 때 12.9℃ $[(57.3-11.9)-(40.0-12.1)]$ 로 나타났으며, PVT 방음 모듈에서 공기 유입에 의한 배면온도 감소량은 고유량에서 16.4℃로 나타났음.

- 동 조건에서 발전효율은 無유량일 때 12.59%, 저유량일 때 13.71% 고유량일 때 13.88%로 나타났으며, PV 패널의 온도계수(-1.1998 W/℃)를 반영하여 계산하면, 無유량일 때 12.59%, 저유량일 때 13.35% 고유량일 때 13.50%임을 알 수 있었음. 아울러, 온도계수가 반영된 상태에서의 발전효율 증가분은 저유량에서 6.04%, 고유량에서 7.23%로 나타났음.

<PVT 방음벽 시스템 실증 후보지 선정>

① 충주시 (주)월드에스티

- 충청북도 충주시에 위치한 (주)월드에스티는 금속 재질의 울타리 벽과 방음벽 설치 전문기업으로 PV 방음벽 설치 사례가 있으며, 기업의 공장부지 내의 일사가 좋은 공간이 마련되어 있으며, 이 공간을 활용하여 전력 생산 및 열에너지 생산이 가능한 다기능성 PVT 방음벽 시스템을 설치할 계획이었음.
- (주)월드에스티는 충주시에 제1공장과 제2공장 부지를 보유하고 있으며 최종년도에 연구개발 목표인 3 kWe의 Bench scale 규모의 PVT 방음벽 시스템을 제2공장 부지에 설치하고자 하였음. PVT 방음벽 시스템에 대한 실증 구현을 통하여 전기와 열에너지 생산량 검증 연구를 수행할 계획이며, 생산된 전기와 열에너지는 공장 내 근로자 휴식 시설에 공급하고자 하였음.
- 당초에는 올 4월경부터 PVT 방음벽 시스템을 실증 현장에 구축하려고 하였으나, COVID19의 장기화로 인하여 실증 현장에 외부인 출입을 엄격히 금지시키면서 새로운 실증 현장을 다시 구하였음.



[그림 41] 충주시에 위치한 (주)월드에스티 공장 전경



[그림 42] (주)월드에스티 제2공장 부지내 PVT 방음벽 시스템 실증 예정 현장

② 계룡시 케이윌텍

- COVID19의 장기화로 인하여 실증 현장 변경이 불가피 한 상황에서 지난 8월에서야 현재의 실증 현장인 케이윌텍을 확보할 수 있었으며, [그림 43]과 같이 상호 협력 협약서를 작성하여 연구 수행 중에 있음.
- 케이윌텍은 충청남도 계룡시 두마면에 위치한 중소기업으로써, 주요업종은 제조업임. 실증 현장은 케이윌텍 회사 부지로써 회사 출입구 우측면에 도로와 평행하게 다기능성 PVT 방음벽 시스템을 적용할 계획임.

상호 협력 협약서	
한국에너지기술연구원 열변환시스템연구실과 케이윌텍은 태양에너지를 활용한 전력 및 열에너지를 복합 생산하는 PVT 방음벽 시스템을 실증 현장에 적용하고 원활하게 성능 평가 실험이 이뤄질 수 있도록 다음과 같은 내용으로 당사자간 상호 협력을 수행한다. ☐ 협약기간 : 2021년 08월 11일 ~ 2022년 12월 31일 ☐ 과 제 명 : 전력 및 열에너지 복합 생산을 위한 모듈화형 방음 기술 개발 ☐ 과제책임자 : 강 은 철	- 난방열 공급 휴게공간 및 기계설비실 지원 3. PVT 방음 시스템 운전, 시스템 유지 보수, 실험 데이터 확보 등을 위한 자유로운 실증 현장 방문 지원 4. PVT 방음 시스템 실증 현장 적용 및 시스템 운영상에 발생할 수 있는 현안에 대한 상호 기술 정보 공유 본 협약서에서 언급하지 않았거나 추후 교류협력 활동을 위한 추가적인 사항이 생길 경우 쌍방 합의에 의해 그 내용을 추가하거나 별도의 협약을 마련하도록 한다. 본 협약서의 내용을 상호준수하며 2부 작성, 날인하여 쌍방이 각각 1부씩 보관한다. 2021. 08. 11.
- 협 력 활 동 사 항 - 1. 케이윌텍에서는 PVT 방음벽 시스템 실증 적용을 위한 현장 공유 - 3kWe급 PVT 방음벽 시스템 설치 공간 공유 - 난방열 공급을 위한 휴게공간 지정 위치 공유 2. 한국에너지기술연구원 열변환시스템연구실은 PVT 방음벽 시스템 현장 설치를 위한 부대비용 지원 - PVT 방음 시스템 현장 설치 비용 지원	
한국에너지기술연구원 열변환시스템연구실장 신 형 기	케이윌텍 대표 김 겸 석

[그림 43] PVT 방음벽 시스템 실증 현장 적용을 위한 상호 협력 협약서



[그림 44] 계룡시에 위치한 케이윌텍 회사 전경



[그림 45] 케이웰텍 회사 출입구 우측면 PVT 방음벽 시스템 실증 예정 현장

<PVT 방음벽 시스템 실증 시공 기법>

- 실증 현장에서의 다기능성 PVT 방음벽 시스템 시공 기법은 다음과 같은 가이드라인을 따라 적용할 수 있음.
- PV 패널 제작 → PVT 방음 모듈 제작 → PVT 방음벽 시스템 현장 설치 (기반 구축 → H빔 구조체 설치 → 하단 PVT 방음 모듈 설치 → 상단 PVT 방음 모듈 설치 → PVT 덕트 배관 설치 → Mixing 챔버 설치 → 송풍기 설치 → 실내/실외 덕트 배관 설치) → 모니터링 시스템 구축 (필요시) → 전력 계통 (독립형 또는 계통 연계형) → 자동제어 시스템 구축 → 실증 시공 완료 → 시스템 성능 평가 (필요시)
- 시공 순서별 세부내용은 다음과 같음.

① PV 패널 및 PVT 방음 모듈 제작

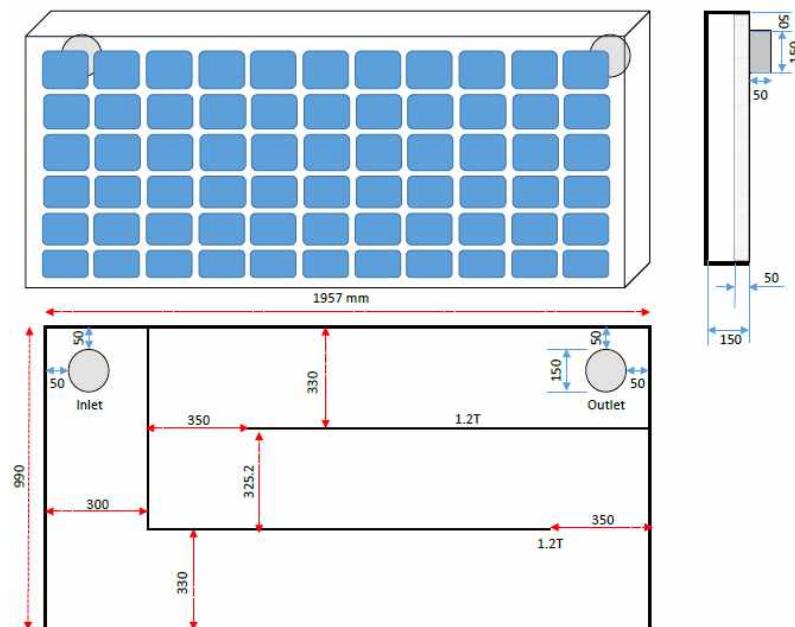
- PVT 방음 모듈 제작을 위한 PV 패널의 선정은 전열 유로를 제작할 수 있게 PV 패널 양끝단에 조립할 수 있는 공간이 있어야 하며, 국내에서 상용화되고 있는 패널들은 양끝단에 공간이 없어 방음벽용 PV 패널을 별도로 설계하여 [그림 46]과 같이 제작하였으며, 사양은 <표 29>와 같음.
- 전산열유동 해석을 통해 선정된 최적의 PVT 전열 구조를 반영하여 실증 현장에 설치하기 위해 총 12개의 PVT 방음 모듈을 제작하였음. 기본 구조는 앞에서 제작하여 성능평가를 수행한 PVT 방음 모듈과 동일하며, 기존 스테인레스판 대신 내부식성, 내하중이 좋은 아연도금으로 제작하였음.
- PVT 방음 모듈의 유로 및 베플의 구조는 [그림 47]과 같으며, 시공 및 추후 유지보수의 편리함을 위해 PVT 방음 모듈의 공기유동 입출구 통로는 직경 500mm로 모듈 뒷면에 배치하였음. 방음 모듈의 내부 구조 및 치수는 [그림 48]에 나타내었음.
- PVT 방음 모듈의 단열 마감재로 흡음재를 사용하였으며, 흡음재 성능 및 형상 유지, 그리고 모듈의 구조 변형을 방지하기 위하여 후단에는 [그림 49]와 같은 강도 강화용 굴곡형 다공성 패널로 마감하였음. [그림 50]은 실증 현장에 적용을 하기 위해 기 제작된 PVT 방음 모듈과 H빔 구조체를 보여주고 있음.



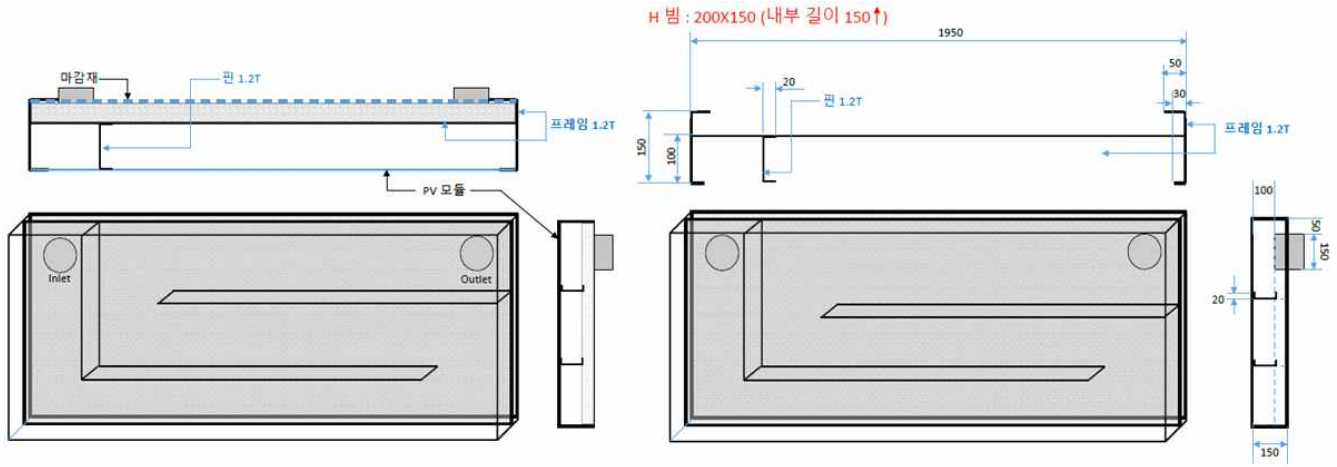
[그림 46] PVT 방음 모듈용 PV 패널

<표 29> PVT 방음벽에 적용된 PV 모듈 사양

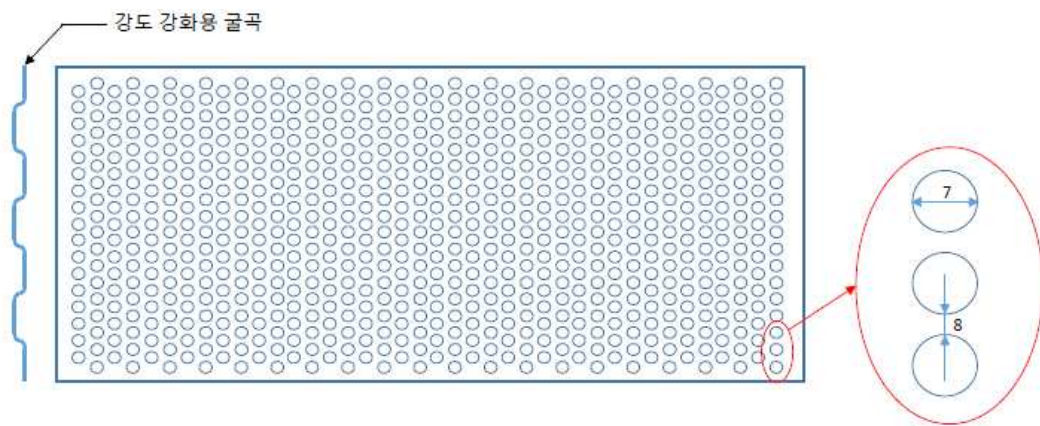
Maximum power	365 W
Open-circuit voltage	47.67 V
Short-circuit current	9.84 A
Maximum power voltage	39.38 V
Maximum power current	9.27 A
Power tolerance	0 ~ 3%
Standard test condition	E=1000 W/m ² , T _c =25℃
Maximum system voltage	1000 V
Maximum series fuse rating	15 A
Fire resistance rating	Class C
Module fire performance (For USA)	Type 1
Weight	23 kg
Dimensions	1950 x 986 x 3.2 mm



[그림 47] PVT 방음벽 패널 유로 및 베플의 구조



[그림 48] PVT 방음벽 패널 내부 구조 및 치수



[그림 49] PVT 방음 모듈의 강도 강화용 굴곡형 다공성 마감재



[그림 50] 실증 현장용 PVT 방음 모듈과 H빔 구조체

② 3 kWe급 PVT 방음벽 시스템 현장 설치

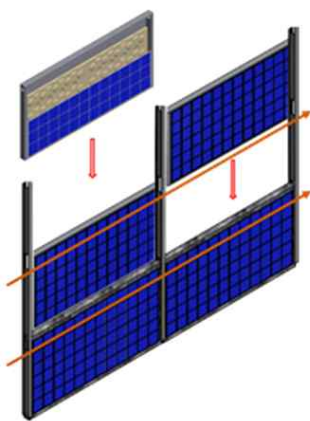
- PVT 방음벽 시스템의 실증을 위해 앞에서 언급한 케이윌텍의 회사 부지 내에 남향의 위치에 도로와 평행하게 설치 적용하였으며, 실증을 위해 설치된 PVT 방음벽 시스템의 용량은 3.5 kWe이며, 전체적인 설치 사진과 전경은 [그림 51]과 같음.
- PVT 방음 모듈은 상부 5장, 하부 5장으로 총 10장을 설치하여 각 층의 유로를 150 mm 주름관으로 직렬 연결하고, 상부층과 하부층의 유로를 연결하여 온열을 생산할 수 있도록 하였음. 또한 파손 등의 이

유로 인해 지상에서 500 mm 띄어서 설치하였으며, H빔의 간격은 기존 방음벽 시공을 대체하기 위해 약 2 m 간격으로 기존과 동일하게 설치하였음.

- [그림 52]와 같이 기존 노후화 된 방음벽을 PVT 방음벽 시스템으로 대체하기 위해 PVT 방음 모듈을 H빔에 끼워 연결할 수 있도록 시공 및 유지보수가 용이한 구조로 설계하여 현장에 적용하였음.
- PVT 방음벽 시스템의 실증 현장 설치 순서는 [그림 53]과 같음. 먼저, PVT 방음벽 시스템을 설치하기 위한 기반구축 작업을 하였으며, H빔 프레임을 기존 방음벽 설치 간격(약 2m)으로 설치한 후, 하부 5장의 PVT 방음 모듈을 조립하고, 그 위에 상부 5장의 PVT 방음 모듈을 조립한 후 모듈이 움직이지 않도록 쇠기를 이용하여 고정하였음. 상부와 하부의 유로를 덕트관으로 연결하고, 휴게소에 온열을 공급할 수 있는 Mixing 챔버와 실내 덕트를 설치하여 구축을 완료하였음.
- PVT 방음벽 시스템에서 생산된 온열을 휴게소에 공급하기 위해 Mixing 챔버를 제작하였으며, 송풍기의 사양은 유량(600 CMH)과 차압(500 Pa)을 고려하여 선정하였으며, Mixing 챔버의 설계 도면은 [그림 54]와 같음.



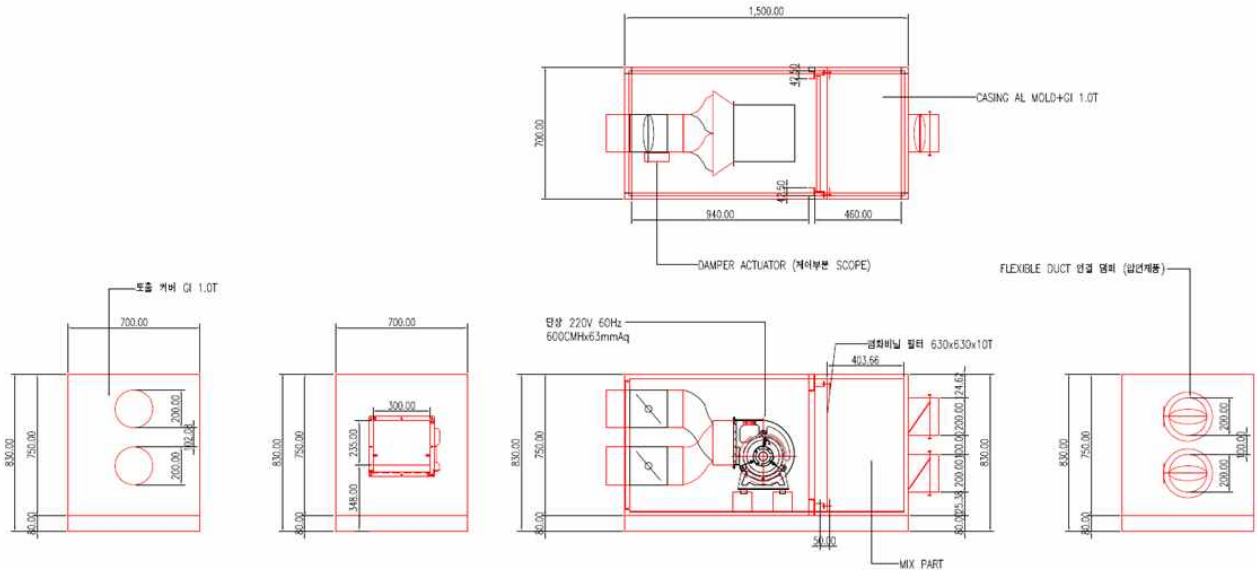
[그림 51] PVT 방음벽 시스템의 전체 사진 및 전경



[그림 52] PVT 방음 모듈 현장 시공 (기존 노후 방음벽 교체 및 유지보수 용이)



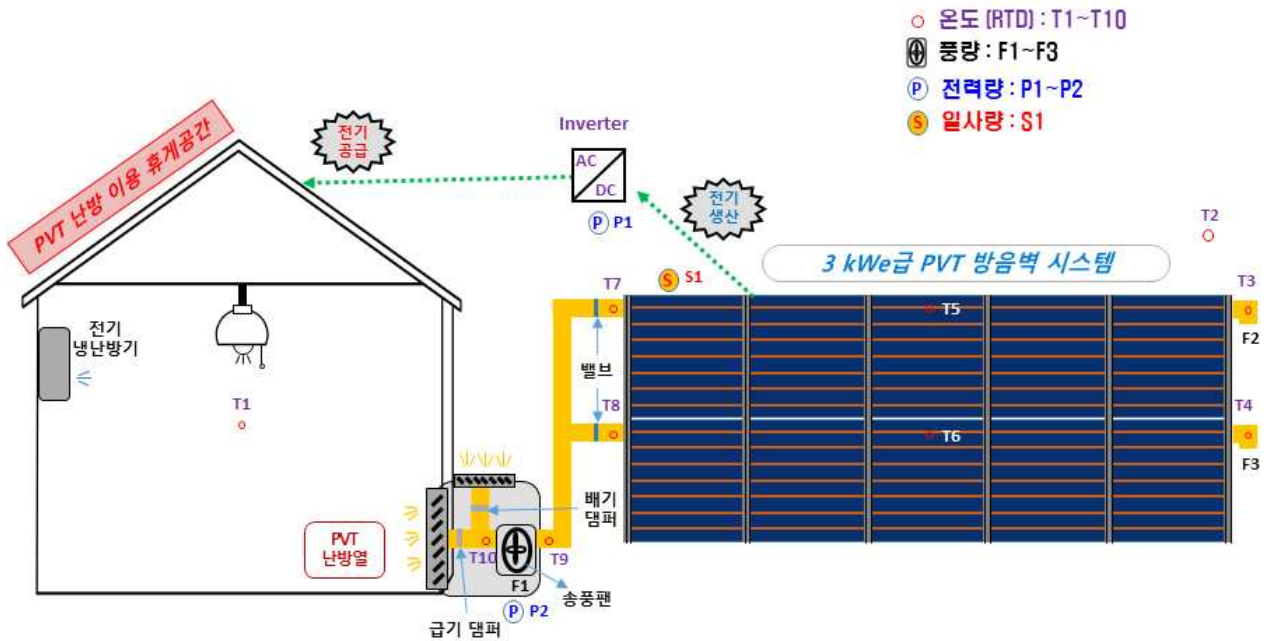
[그림 53] PVT 방음벽 시스템 실증 현장 설치 순서



[그림 54] Mixing 챔버 설계도면

③ 실증 현장 모니터링 시스템 구축

- PVT 방음벽 시스템의 성능 평가를 위한 모니터링 시스템을 구축하였음. [그림 55]와 같이 PVT 방음벽 시스템에서 얻어진 온열 및 전기 생산을 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 LabVIEW로 프로그램화하여 모니터링 시스템을 구축하였음.
- 실험 데이터 확보를 위해서 온도센서는 총 10개를 설치하였음. PVT 방음벽 시스템의 상부와 하부 각각의 입구부, 중간부, 출구부의 온도를 측정하였고, 시스템이 자동으로 운전될 수 있도록 휴게소 온도와 Mixing 챔버의 온도를 측정하여 자동제어를 위한 데이터로 수집, 활용하였음. 또한, 생산된 전력 및 온열을 이송하기 위한 송풍기의 소비전력을 실시간으로 모니터링 하였음.
- 태양광에 의한 전력 생산을 분석하기 위하여 시스템과 평행하게 일사량계를 설치하였고, 상부와 하부의 PVT 시스템으로부터 생산되는 누적 발전량을 모니터링 하고 있음. <표 30>은 PVT 방음벽 시스템에 적용된 모니터링을 위한 센서 리스트를 보여주고 있음.



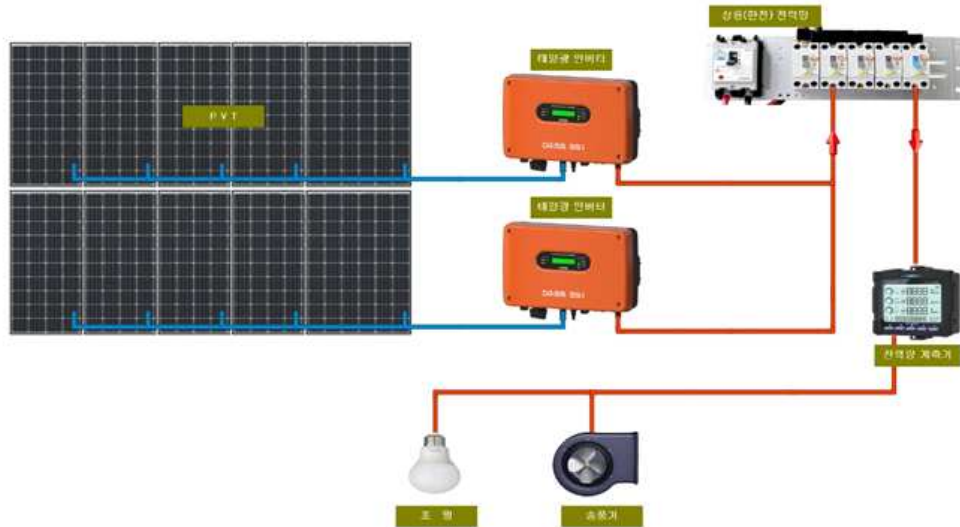
[그림 55] PVT 방음벽 시스템 실증 현장 설치 순서

<표 30> PVT 방음벽 시스템 모니터링 센서 리스트

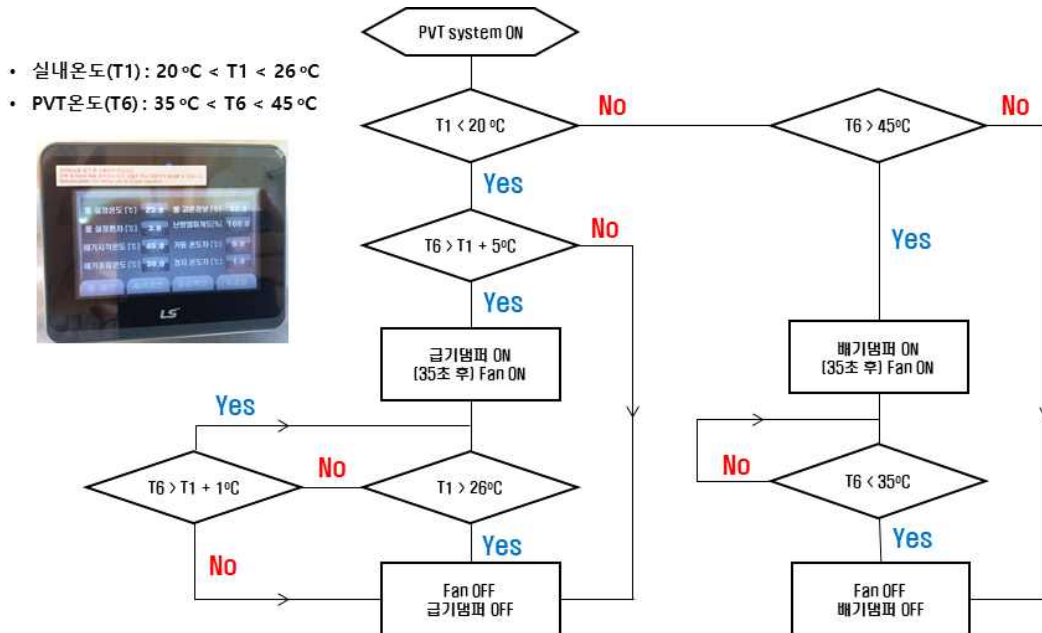
No.	Sensor	Type	Range	EA	Remarks
T1	Room Temp.	RTD		1	Air
T2	Ambient Temp.	RTD		1	Air
T3	PVT 1st series(upper) Inlet Temp.	RTD		1	Duct insert
T4	PVT 2st series(bottom) Inlet Temp.	RTD		1	Duct insert
T5	PVT 1st series(upper) middle Temp.	RTD		1	Duct insert
T6	PVT 2st series(bottom) middle Temp.	RTD		1	Duct insert
T7	PVT 1st series(upper) outlet Temp.	RTD		1	Duct insert
T8	PVT 2st series(bottom) outlet Temp.	RTD		1	Duct insert
T9	PVT mixing air outlet Temp.	RTD		1	Duct insert
T10	PVT supply or Exhaust air Temp.	RTD		1	Duct insert
F1	Total air flowrate			1	direct measuring
P1	PVT 1st series(upper) Power		~ 3 kW(+)	1	Inverter
P2	PVT 2st series(bottom) Power		~ 3 kW(+)	1	Inverter
P3	Fan Power (consumption)		10 CMM	1	Power meter
S1	Solar radiation			1	

④ 전력 계통 및 자동제어 시스템 구축

- PVT 방음벽에서 생산되는 전기는 인버터에서 교류로 변환한 후 휴게공간에 사용할 수 있도록 계통 연계 형으로 적용하였으며, PVT 방음벽 시스템 적용 전력 계통도의 개요도는 [그림 56]과 같음.
- PVT 방음벽 시스템에서 생산된 온열은 휴게공간에 효율적으로 적용할 수 있도록 자동제어 로직을 설계 하여 적용하였음. 실내온도(T1)가 20~26℃로 유지될 수 있도록 20℃ 이하가 되면 급기댐퍼가 열리고, 송풍팬이 작동하여 PVT 방음벽에서 생산된 온열을 공급하고 26℃ 이상이 되면, 다시 작동이 멈추도록 제어하였으며, PVT 방음벽의 온열 온도가 45℃ 이상이면, 외부로 배출될 수 있도록 제어하였음. [그림 57]은 시스템에 적용된 제어 로직을 보여주고 있음.



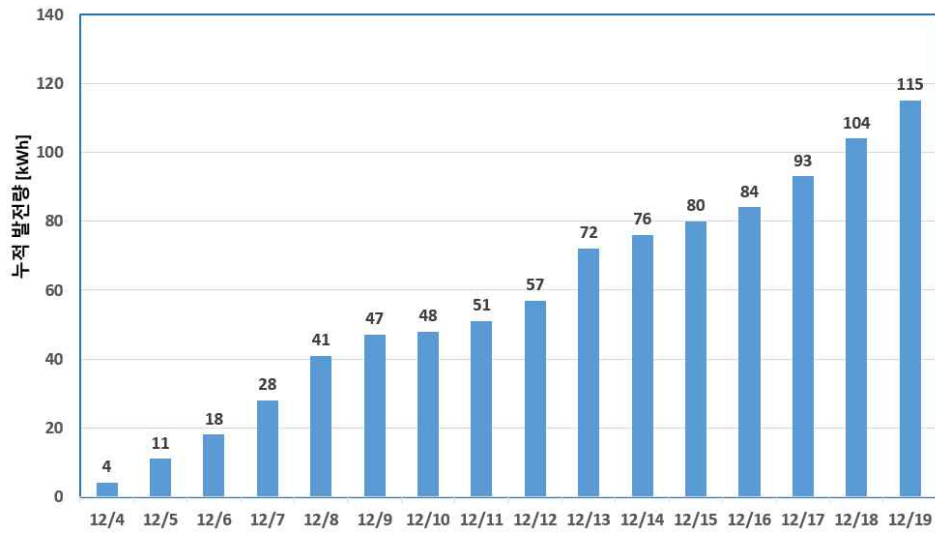
[그림 56] PVT 방음벽 시스템 적용 전력 계통도



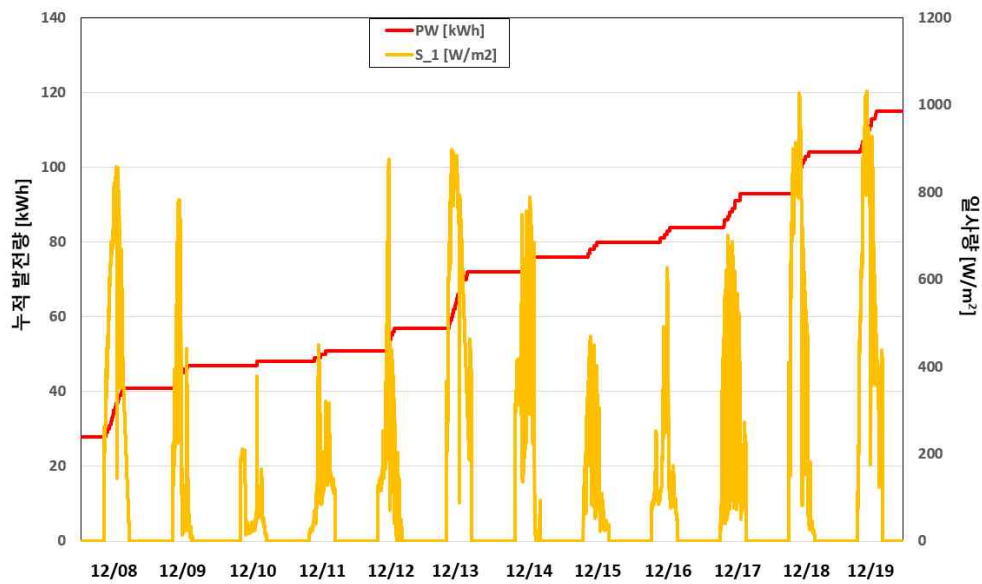
[그림 57] PVT 방음벽 시스템 제어로직 순서도

⑤ PVT 방음벽 시스템 성능 평가 및 분석

- [그림 58]은 PVT 방음벽 시스템에 의해 생산된 전력을 나타내는 일별 누적 발전량을 나타낸 그래프이며, [그림 59]는 일별 누적 발전량과 일사량을 비교한 그래프임. 발전량 수집은 시스템 구축이 완료된 12월4일(토)부터 12월19일(일)까지 16일 동안의 데이터이며, 일사량은 모니터링 시스템이 구축된 12월8일(수)부터 오전 8시부터 오후 5시까지 수집하여 분석하였음.
- **실험 기간 동안의 총 누적 발전량은 115 kWh가 생산**되었으며, 일일 최대 발전량은 13일(월)에 측정된 15 kWh인데, 이 날은 쾌청한 환경에 외기온도가 상당히 낮아서 발전량이 큰 것으로 분석되었음. 일일 최소 발전량은 10일(금)에 측정된 1 kWh로 이 날은 비가 많이 왔기 때문에 분석되었음. 이와 같이 PVT 발전량은 일사량에 따라 큰 편차를 보였으며, 일사량이 높고 외기온도가 낮으면 발전량이 높아짐을 확인할 수 있었음.
- <표 31>은 PVT 방음벽 시스템에서의 전력 생산에 의한 발전효율을 분석한 결과임. 발전효율은 PVT 시스템에 도달하는 일일 일사량 대비 일일 발전량의 비로 나타낼 수 있음. 본 시스템에 적용된 PV 패널의 발전효율은 약 18%이며, **PVT 방음벽 시스템에서의 평균 발전효율은 약 13.4%로 나타났음**. [그림 60]은 PVT 방음벽 시스템에서의 일별 일사량 대비 발전량을 수식화한 결과를 보여주고 있음.



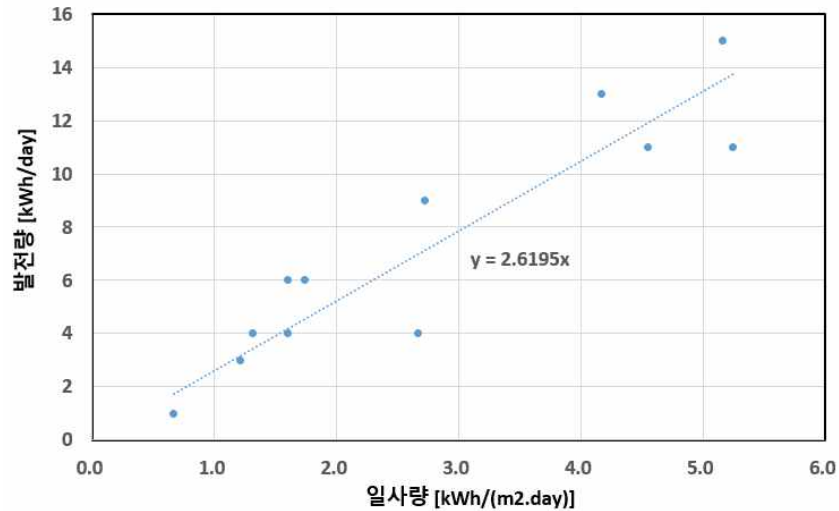
[그림 58] PVT 방음벽 시스템에 의한 일별 누적 발전량 [kWh]



[그림 59] 일별 누적 발전량 및 일사량 비교

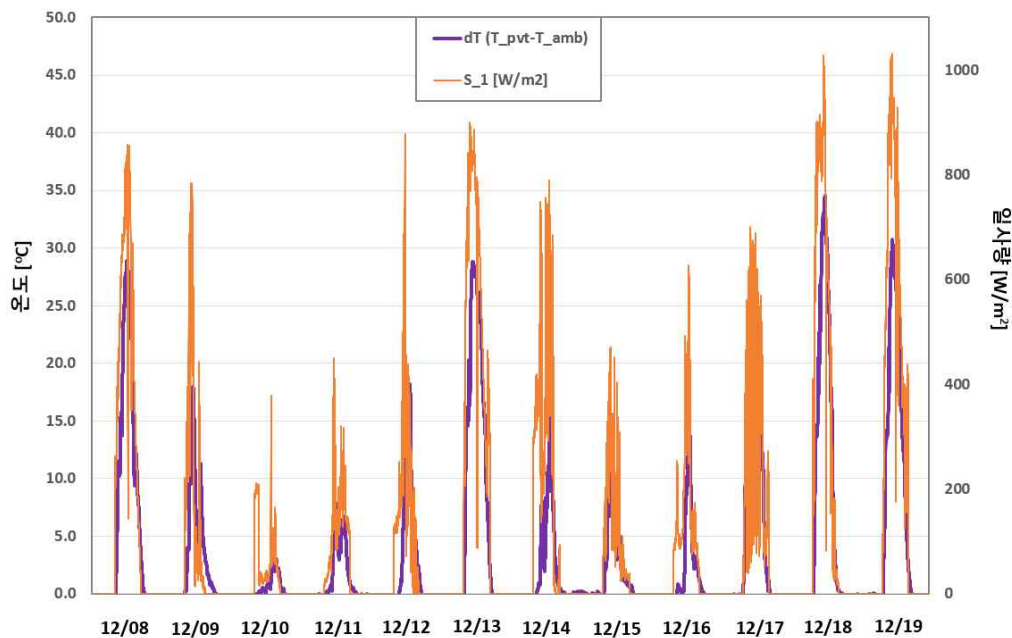
<표 31> PVT 방음벽 시스템에서의 전력 생산에 의한 발전효율

날짜	일일 일사량 [kWh/(m ² ·day)]	일일 발전량		발전효율 [%]
		kWh/day	kWh/(m ² ·day)	
12/08	4.2	13	0.65	15.6
12/09	1.6	6	0.3	18.7
12/10	0.7	1	0.05	7.5
12/11	1.2	3	0.15	12.4
12/12	1.7	6	0.3	17.2
12/13	5.2	15	0.75	14.5
12/14	2.7	4	0.2	7.5
12/15	1.3	4	0.2	15.2
12/16	1.6	4	0.2	12.5
12/17	2.7	9	0.45	16.5
12/18	4.5	11	0.55	12.1
12/19	5.2	11	0.55	10.5
평균	2.7	7.3	0.4	13.4



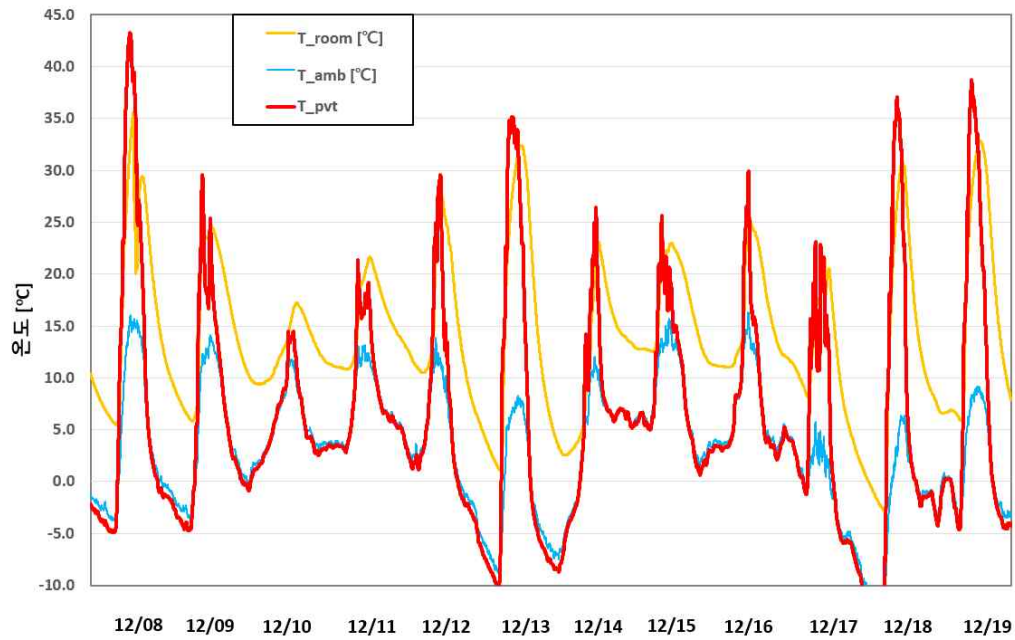
[그림 60] 일별 일사량 대비 발전량 비교 선도

- PVT 방음벽 시스템의 온열 생산량은 일사량을 측정한 12월8일(수)부터 공급, 제어하였으며, 작동 송풍량은 565 CMH로 공급하였고, 실내 설정온도는 23℃, 온도편차는 3℃로 제어하여 실내온도가 20℃에서 26℃에 유지될 수 있도록 하였음. PVT 방음벽에서 공급될 수 있는 **최대 온도차(PVT 모듈 온도에서 외기온도를 뺀 값)**는 18일 낮 12시20분경에 34.6℃를 보였으며, [그림 61]은 일별 일사량에 따른 온도상승차를 그래프로 나타내었음.

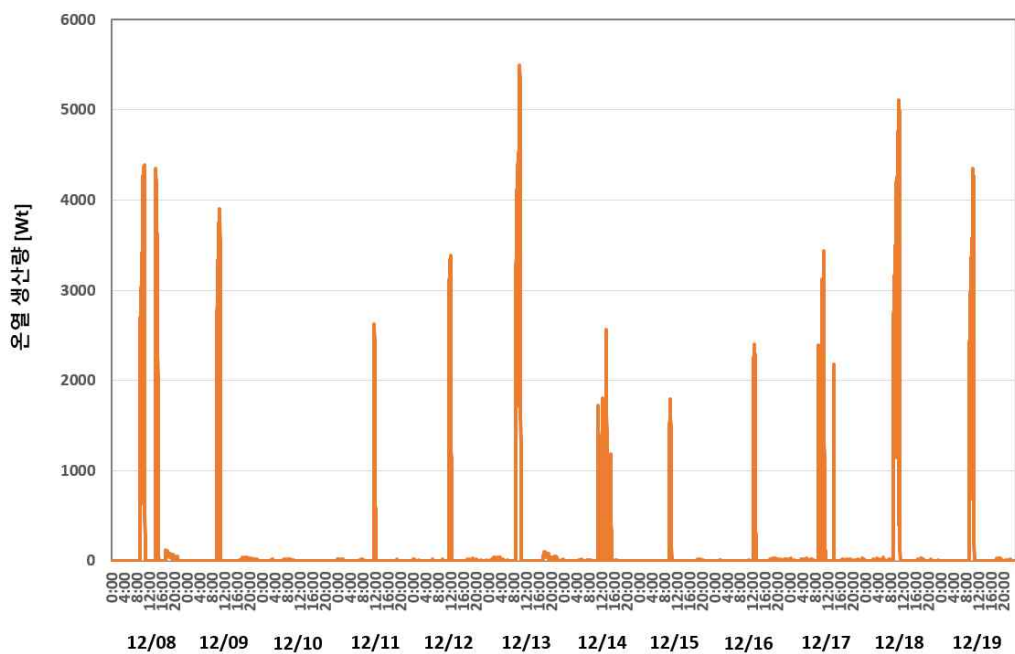


[그림 61] 일별 일사량에 따른 PVT와 외기와의 온도차 그래프

- [그림 62]는 일별 외기온도 대비 실내온도와 PVT 모듈의 온도를 보여주고 있으며, [그림 63]은 실험기간 동안에 PVT 시스템에서 휴게실로 공급되는 온열량을 나타내고 있음. **PVT 시스템에서 실시간으로 공급되는 온열량은 최대 5,495 Wt**이며, 이 기간 동안에 PVT 시스템을 운전하기 위해 사용된 전력은 10.2 kWh로 PVT 시스템에서 생산된 전체 전력량에 약 8.8%에 해당됨.

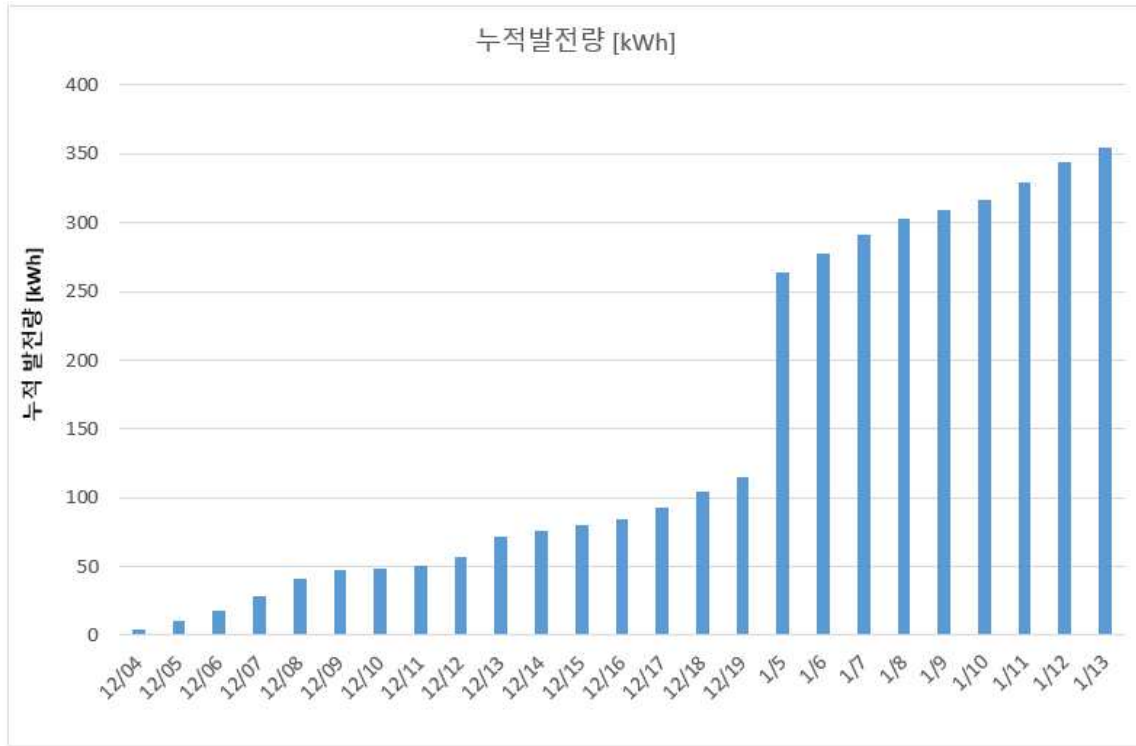


[그림 62] 일별 외기온도 대비 실내온도와 PVT 배출온도 그래프



[그림 63] 일별 PVT 시스템에서 휴게실로 공급된 온열량

- [그림 64]는 12월부터 누적해온 PVT 발전량을 포함하여 과제 종료 이후인 1월까지의 PVT 방음벽 시스템 전력 생산량을 나타내고 있음. 과제가 종료된 이후에도 다기능성 PVT 방음벽 시스템은 안정적으로 정상 가동되고 있음을 알 수 있으며, 2021년 12월 4일부터 2022년 1월 13일까지 총 40일 간의 누적 발전량은 약 355 kWh가 생산되었음을 알 수 있었음.



[그림 64] PVT 방음벽 시스템에 의한 일별 누적 발전량 [kWh]

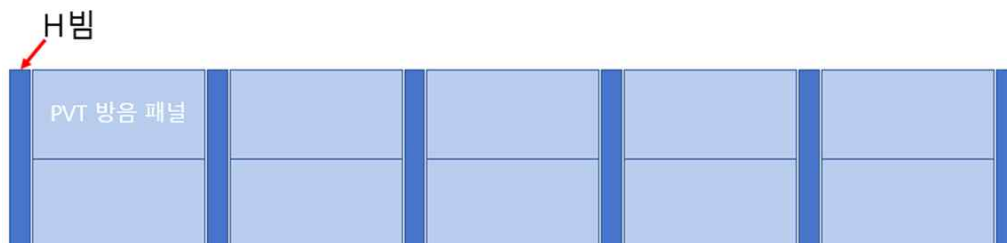
<PVT 방음벽 시스템 유지보수 및 안전 내구성 평가>

- PVT 방음벽의 유지보수는 기존의 방음벽 유지보수와 동일하게 이뤄져야 하며, PVT 방음 모듈이 손상되었을 시 동일한 PVT 방음 모듈로 교체하여야 함. 또한 전력 생산이 원활이 이뤄질 수 있도록 PVT 모듈에 쌓인 먼지 및 이물질을 주기적으로 제거해야 함.
- PVT 방음벽 시스템의 안전 내구성 평가를 수행하여야 함. 고속 열차풍과 강풍에 의한 풍하중은 방음벽 및 기초 구조물, 이에 부가되어져 있는 기타 구조물 등의 모멘트에 영향을 미칠 수 있으므로, PVT 방음벽도 강풍과 같은 환경에서 적절한 내구성이 확보됨을 확인해야 함. PVT 방음벽 구조물이 풍하중에 의하여 발생하는 휨모멘트와 최대변위가 <표 32>의 판정기준에 부합하는지를 확인하기 위하여 응력해석을 통해 그 결과를 확인함.

<표 32> 판정 기준

	판정 기준(기준 풍속 30m/s 이상)
휨모멘트	15 kN-m 이하
최대변위	8 mm 이하

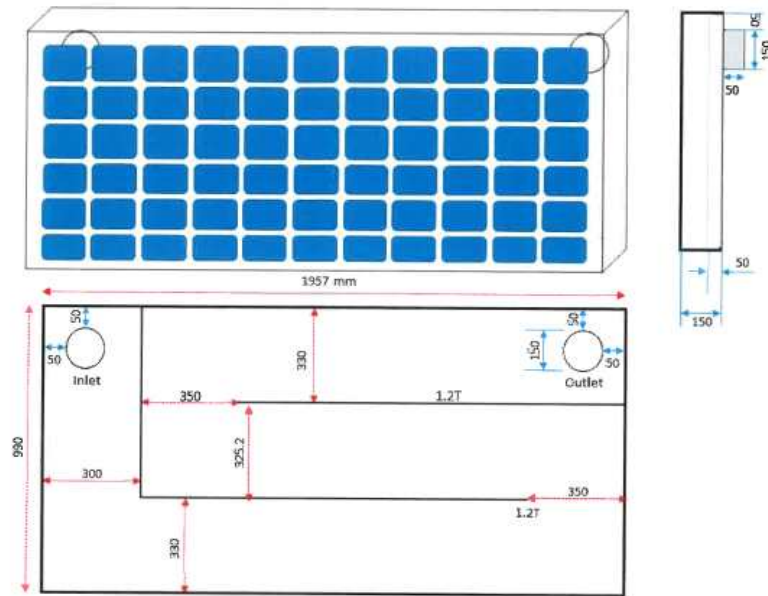
- PVT 방음벽 시스템 구조물은 [그림 65]와 같이 상하 2 set, 횡단 5 set로 구성되고, 총 6 set의 H빔으로 구성되어 있음. H빔은 일반 구조용 압연강재이며, PVT 방음 모듈은 아연도금강판 재질임. PVT 방음 모듈의 외형 크기와 구성은 <표 33>, [그림 66]과 같음.



[그림 65] PVT 방음벽 시스템 구조물

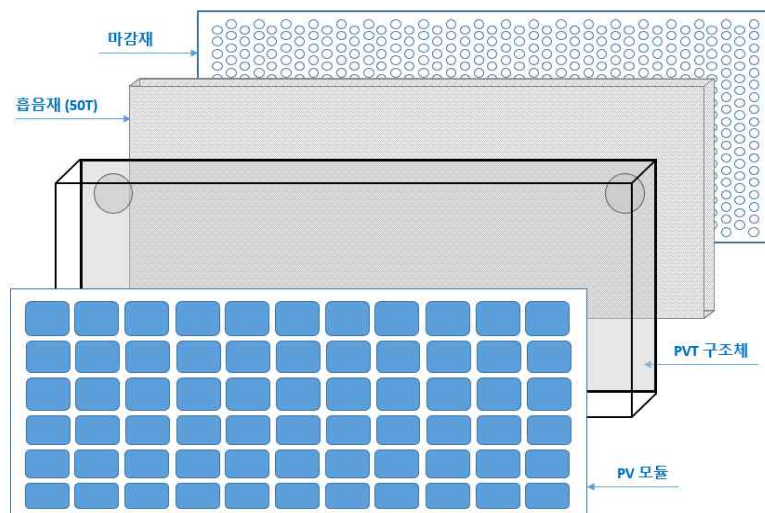
<표 33> PVT 방음 모듈 외형 크기

PVT 방음 패널	크기[mm]
가로	1,957
세로	990
폭	150
패널 판재	1.2



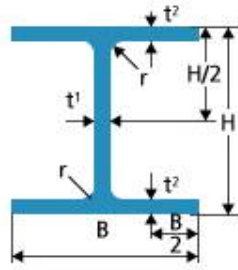
[그림 66] PVT 방음 패널 구조

- 각 H빔 사이에 배치된 PVT 구조체는 가로 1,957mm, 세로 990mm, 두께 150mm의 형상이며, 내부에 [그림 66]과 같은 형상으로 유로가 배치되어 있음. 또한 [그림 67]과 같이 전면에 PV모듈과 PVT 구조체, 흡음재, 마감재로 구성되어 있음.



[그림 67] PVT 패널 구성

- 해석에 이용한 H빔은 [그림 68]과 같은 단면으로 높이 2,500mm인 H빔 6 set 사이에 각각 2개의 PVT 방음 모듈이 설치되어 총 10개의 PVT 방음 모듈을 지지하는 형태임. H빔의 규격은 <표 34>와 같으며, H빔의 재질은 일반 구조용 압연강재로 <표 35>와 같음.



[그림 68] H빔 형상

<표 34> H빔 200mm×150mm 규격

공정치수	표준단면치수 [mm]			
mm	H×B	t ¹	t ²	r
200×150	194×150	6	9	13

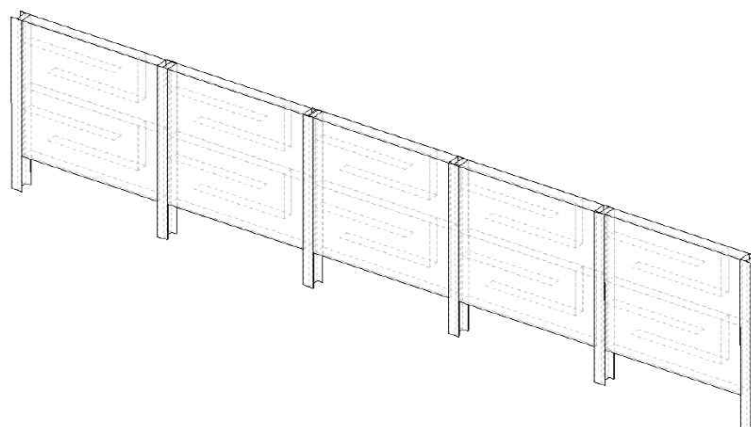
<표 35> 일반구조용 압연강재(Structural steel) 물성치

물성치	값	단위
Modulus of elasticity	200	GPa
Poisson's ratio	0.3	-
Standard yield strength	250	MPa
Mass density	7,850	kg/m³

- o PVT 방음 모듈 구조체는 아연도금강판으로 두께 1.2mm이며, 해석에 이용한 물성치는 <표 36>와 같음. 해석을 위한 전체 구조체의 형상은 [그림 69]와 같으며, 상하부의 각 PVT 패널 간의 간격은 없는 것으로 가정하였음.

<표 36> 아연도금강판(Galvanized steel) 물성치

물성치	값	단위
Modulus of elasticity	200	GPa
Poisson's ratio	0.29	-
Standard yield strength	550	MPa
Mass density	7,800	kg/m³



[그림 69] 해석 구조체 형상

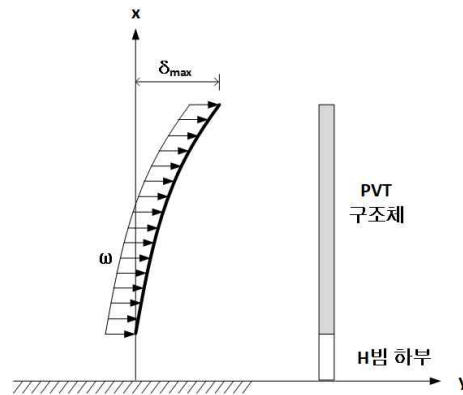
- 해석은 풍속 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s를 대상으로 하였고, PVT 방음 모듈 전면을 부하로 설정하였으며, H빔 하부의 지지대를 고정면으로 설정하였음. 이 때 풍속에 따른 속도압은 아래 식과 같이 베르누이 식을 이용하였음.

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2$$

여기서, P는 속도압[kgf/m²]이며, ρ는 공기밀도[kg/m³], v는 풍속임. 공기의 밀도는 0.125 kg/m³으로 가정하였으며, 중력가속도는 9.80665 m/s²로 계산하였음.

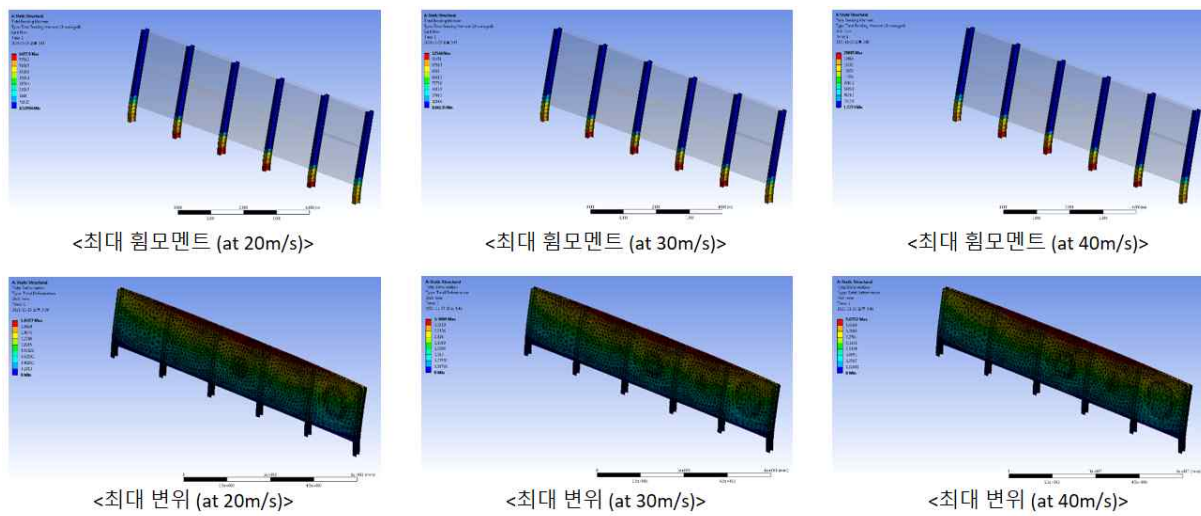
○ 해석방법 및 가정

- [그림 70]과 같이 H빔 및 PVT 방음 모듈 구조체 전면에 균일하중(ω, 압력)으로 작용(단, 고정부(정체점 형성)에서는 유속을 0 m/s로 가정
- H빔의 하부면을 고정면으로 가정, H빔의 높이는 2,500mm로 가정
- PVT 구조체는 가로 1,957mm 세로 990mm이며, PVT 구조체 전면에는 PVT가 350mm로 배치되는 것으로 가정하였으며, PVT 방음 모듈과 PVT 방음 모듈 구조체 간의 이격거리는 0mm로 가정
- 해석은 linear steady에 준하며, 등방성으로 가정
- 응력 해석 결과를 분석함으로써 PVT 방음 패널 구조물의 내구성 평가를 진행하였음.



[그림 70] PVT 구조체 하중분포

- 해석 결과는 [그림 71]과 같으며, 풍속 변화에 따른 해석 결과를 <표 37>에 정리하였음. 최대 휨모멘트는 구조체의 가운데 하부에서 발생하였으며, 최대 변위는 구조체의 가운데 상부에서 발생하였음. **풍속 30 m/s에서의 휨모멘트는 최대12.544 kN·m로 해석되었으며, 최대변위는 3.4889 mm로 해석됨.**



[그림 71] PVT 구조체 하중분포

<표 37> 해석 결과 정리

풍속 [m/s]	속도압 [kPa]	휨모멘트 [N·m]		최대변위 [mm]
		최대	최소	
20	0.245	6,477.9	0.53994	1.8477
30	0.552	12,544	0.86135	3.4889
40	0.981	20,805	1.22740	5.6552

<PVT 방음벽 시스템 경제성 평가 분석>

- RETScreen은 신재생에너지 설비에 대한 경제성을 분석하는 평가 도구로써, 초기투자 대비 대체설비 비용, 에너지 생산량, 이산화탄소 저감량 등을 고려하여 분석하는 프로그램임.
- RETScreen은 NASA에서 지원하는 기상데이터를 활용하며, 건물정보와 시스템 정보를 입력하여 에너지 절감량을 분석함. 또한 비용정보의 입력을 통해 앞서 계산된 에너지 절감량을 바탕으로 내부수익률 및 투자금 환수 기간 등을 계산하여 경제성을 평가할 수 있음. 더불어 온실가스 배출량 정보를 입력하여 온실가스 저감량 분석도구로도 활용이 가능함.
- PVT 방음벽 시스템에서 전기 부분은 RETScreen 프로그램에서 제공되는 PV 시스템 분석 방법을 통해 경제성을 평가할 수 있으며, PVT의 열에너지는 공기식 태양열 집열기 분석 방법을 통하여 경제성 분석이 가능함.
- 본 연구에서는 3 kWe급의 소형 PVT 방음벽 시스템과 30 kWe급의 중형 PVT 방음벽 시스템에 대한 경제성 평가를 수행하였음.

① 3 kWe급 PVT 방음벽 시스템

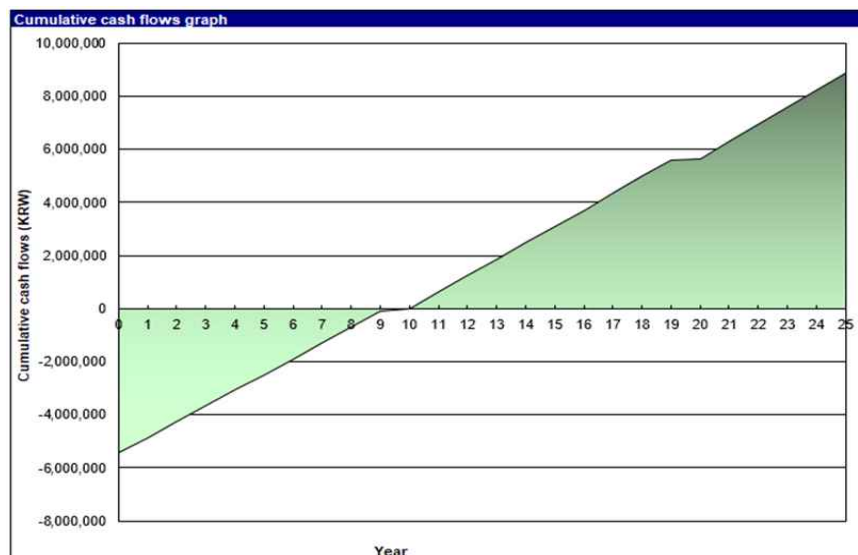
- 3 kWe급 다기능성 PVT 방음벽 시스템에 대한 경제성 평가를 위하여 <표 38>과 같은 입력 정보를 활용하였음. PVT 시스템 설치 현장은 실증 현장인 계룡시로 가정하였고, 기상데이터는 계룡시와 가까운 대전 기상데이터를 활용하였음.
- PVT 방음 모듈의 단가는 1kWe 당 2,000천원 정도를 예상하였으며, 대체 방음벽의 예상 단가는 설치 면적(m²)당 50천원 정도로 책정하였음. 인버터 가격은 1kW 당 150 천원으로 정하였고, 효율 94%, 수명을 10년으로 하여 분석하였음.
- PVT에서 생산되는 열에너지 분석을 위하여 난방 설정온도 20℃에 예열 환기량은 400 CMH로 정하였으며, 난방기간은 10월부터 이듬해 5월 중순까지, 난방 시간은 일일 10시간으로 하였음.
- PVT에서 생산되는 전기에 대한 발전단가는 2021년 10월 22일 기준으로 REC 42 원/kWh, SMP 110원/kWh으로 총 152 원/kWh로 책정하였음. 소비되는 에너지에 대하여 전기요금은 78.3 원/kWh, 가스요금은 15 천원/GJ로 책정하였음.
- <표 38>에서 제시한 입력 정보들을 기반으로 3 kWe 다기능성 PVT 방음벽 시스템에 대한 경제성 분석을 수행하였고 그 결과를 <표 39>에 제시하였음. PVT 방음벽 시스템에 대한 실질적인 투자비는 5,450 천원으로 이 금액은 PVT 방음벽 시스템 투자비 6,450천원에서 기존 방음벽 설치비용 1,000천원을 절감시킨 금액임.
- PVT 방음벽 시스템에서 태양광 판매 수익은 436 천원/yr이며, 난방 비용 절감액은 149 천원/yr으로 평가되었고, PVT 방음벽 시스템의 전체 에너지 비용 절감액은 연간 585 천원/yr로 분석되었음. 따라서 **PVT 방음벽 시스템의 투자환수기간(ROI)은 9.9년으로 나타남.** 아울러, 3 kWe급 PVT 방음벽 시스템에서의 온실가스 저감량은 2.0 tCO₂/yr로 평가됨.

<표 38> 3 kWe급 다기능성 PVT 방음벽 시스템 경제성 분석을 위한 입력 정보

구 분	입력 정보	구 분	입력 정보
현장	계룡시	기상데이터	대전 (NASA 데이터)
PVT 설치 용량	3 kW	위치	경도 127.4°, 위도 36.4°
PVT 설치 면적	20 m ²	난방 디자인 온도	-8.2℃
PVT 예상 단가	2,000 천원/kWe	난방 설정 온도	20℃
방음벽 예상 단가	50 천원/m ²	예열 환기량	400 CMH
방음벽 설치 각도	90° (정남향)	난방 기간	10/1~5/15 (7.5 개월)
PVT 발전 효율	17.8%	난방 시간	10 시간/일
PVT 발전 단가	152 원/kWh	PVT 흡수율	70%
인버터 단가	150 천원/kWe	PVT용 팬 소비동력	7 W/m ²
인버터 효율	94.0%	전기요금	78.3 원/kWh
인버터 수명	10 년	천연가스 요금	15 천원/GJ
연료비 상승 비율	2.0%	온실가스 배출 정보	
인플레이션 비율	1.5%	화석연료	45%
인센티브 및 보조금	해당 없음	원자력	30%
프로젝트 수명기간	25 년	천연가스	22%
대출 비율	해당 없음	기타 (신재생)	3%

<표 39> 3 kWe급 다기능성 PVT 방음벽 시스템 경제성 분석 결과

태양광 시스템 경제성 분석		태양열 시스템 경제성 분석	
구 분	결과 값	구 분	결과 값
PVT 시스템 투자비	5,450 천원	태양열 시스템 투자비	없음 (PVT에 포함)
태양광 판매 수익	436 천원/yr	난방 비용 절감액	149 천원/yr
Simple payback	12.5 년	온실가스 저감량	0.4 tCO ₂ /yr
투자환수기간 (ROI)	13.7 년		
온실가스 저감량	1.6 tCO ₂ /yr		
3 kWe PVT 방음벽 시스템(방음벽+태양광+태양열) 경제성 분석			
PVT 방음벽 시스템 에너지 비용 절감액	585 천원/yr		
PVT 방음벽 시스템 투자환수 기간 (ROI)	9.9 년		
온실가스 저감량	2.0 tCO ₂ /yr		



[그림 72] 3 kWe급 PVT 방음벽 시스템 ROI 분석 결과

② 30 kWe급 PVT 방음벽 시스템

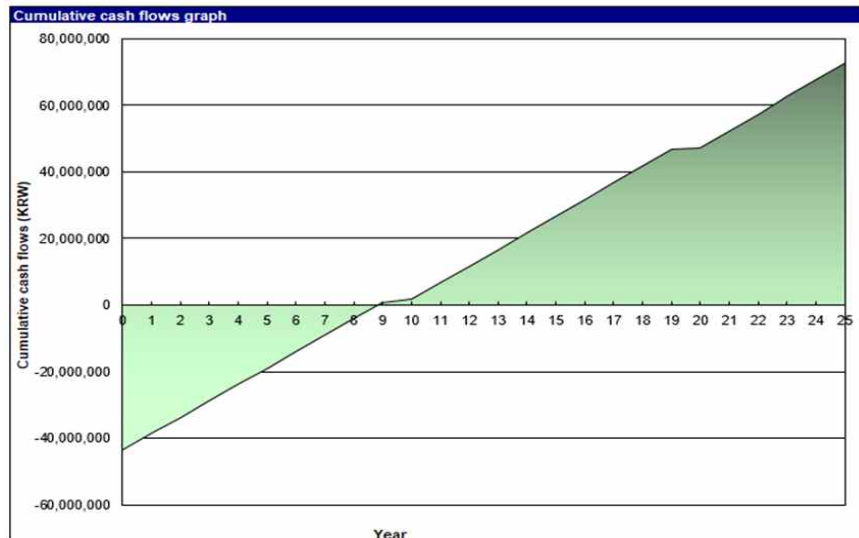
- 중형 PVT 방음벽 시스템에 대한 경제성 분석을 위하여 30 kWe급 시스템을 도입하였음. 30kWe급 PVT 방음벽 시스템에 대한 입력 정보는 <표 40>에 나타내었음. PVT 시스템 설치 현장은 앞에서와 동일하다고 가정하였음.
- PVT 방음 모듈의 단가는 앞에서 분석한 소형 PVT 방음벽 시스템의 비용보다 약 20% 정도 절감된다는 가정하에 1kWe 당 1,600천원 정도를 예상하였으며, 대체 방음벽의 예상 단가도 설치 면적(m²)당 40천원 정도로 책정하였음. 인버터 가격은 1kW 당 120 천원으로 기존 가격 대비 20% 절감하였음.
- PVT에서 생산되는 열에너지 분석을 위한 입력 정보는 소형 시스템과 동일하며, 다만 건물 체적이 증가하여 예열 환기량을 2000 CMH로 변경하였음.
- 30 kWe PVT 방음벽 시스템에 대한 경제성 분석 수행 결과는 <표 41>에 나타내었음. PVT 방음벽 시스템에 대한 실질적인 투자비는 43,600 천원으로 이 금액은 기존 방음벽 설치비용 8,000천원을 절감시킨 금액임.
- PVT 방음벽 시스템에서 태양광 판매 수익은 4,361 천원/yr이며, 난방 비용 절감액은 538 천원/yr으로 평가되었고, PVT 방음벽 시스템의 전체 에너지 비용 절감액은 연간 4,899 천원/yr로 분석되었음. 30 kWe PVT 방음벽 시스템에서의 투자환수기간(ROI)은 8.8년으로 나타났으며, 연간 17.3 tCO₂/yr의 온실가스가 저감되는 것으로 평가됨.

<표 40> 30 kWe급 다기능성 PVT 방음벽 시스템 경제성 분석을 위한 입력 정보

구 분	입력 정보	구 분	입력 정보
현장	계룡시	기상데이터	대전 (NASA 데이터)
PVT 설치 용량	30 kW	위치	경도 127.4°, 위도 36.4°
PVT 설치 면적	200 m ²	난방 디자인 온도	-8.2℃
PVT 예상 단가	1,600 천원/kWe	난방 설정 온도	20℃
방음벽 예상 단가	40 천원/m ²	예열 환기량	2000 CMH
방음벽 설치 각도	90° (정남향)	난방 기간	10/1~5/15 (7.5 개월)
PVT 발전 효율	17.8%	난방 시간	10 시간/일
PVT 발전 단가	152 원/kWh	PVT 흡수율	70%
인버터 단가	120 천원/kWe	PVT용 팬 소비동력	7 W/m ²
인버터 효율	94.0%	전기요금	78.3 원/kWh
인버터 수명	10 년	천연가스 요금	15 천원/GJ
연료비 상승 비율	2.0%	온실가스 배출 정보	
인플레이션 비율	1.5%	화석연료	45%
인센티브 및 보조금	해당 없음	원자력	30%
프로젝트 수명기간	25 년	천연가스	22%
대출 비율	해당 없음	기타 (신재생)	3%

<표 41> 30 kWe급 다기능성 PVT 방음벽 시스템 경제성 분석 결과

태양광 시스템 경제성 분석		태양열 시스템 경제성 분석	
구 분	결과 값	구 분	결과 값
PVT 시스템 투자비	43,600 천원	태양열 시스템 투자비	없음 (PVT에 포함)
태양광 판매 수익	4,361 천원/yr	난방 비용 절감액	538 천원/yr
Simple payback	10.0 년	온실가스 저감량	1.6 tCO ₂ /yr
투자환수기간 (ROI)	11.0 년		
온실가스 저감량	15.7 tCO ₂ /yr		
30 kWe PVT 방음벽 시스템(방음벽+태양광+태양열) 경제성 분석			
PVT 방음벽 시스템 에너지 비용 절감액		4,899 천원/yr	
PVT 방음벽 시스템 투자환수 기간 (ROI)		8.8 년	
온실가스 저감량		17.3 tCO ₂ /yr	



[그림 73] 30 kWe급 PVT 방음벽 시스템 ROI 분석 결과

<PVT 방음벽 시스템 사업화 모델 제시>

○ 시장 진입을 위한 현안 검토

- 국내 PV 시장은 연간 484.7억원 48,473 m²의 시장이 형성됨. 이 중 개발과제와 유사한 방음형 PVT 시장은 연구개발 초기의 진입시장으로 시장은 아직 형성되지 않음 (독점적 지위)
- 국내 태양열 시장은 정부와 민간부문을 합해 연간 400억 원 수준. 신재생에너지원 중 30여년 이상의 오랜 역사를 갖고 있지만 시장 규모는 영세한 실정임. 최근에는 PVT 관련 분야에 여러 업체들이 연구 개발 역량을 쏟고 있음.
- 태양광 전체 시장규모는 연간 1,400 MW를 기록 중에 있으며, 이러한 태양광의 급성장은 당분간 이어질 전망이며 PVT 등 틈새 기술 개발에 관한 관심은 아직 부족한 실정임.

○ 사업화를 위한 연구개발 프로세스 : 기술 개발 → 시제품 개발 → 성능 및 신뢰성 검증 → 사업 수행

○ 기본 비즈니스 모델 : PVT 방음 모듈, 3 kWe급 PVT 방음벽 시스템

제품명	제품 설명	예상 소비자	제품의 유형
PVT 방음 모듈	PV 패널 + 태양열 집열기 + 흡음 + 차음 기능을 하나의 제품에서 모두 수행 가능한 컴팩트형 모듈	₩700,000/장	단일 제품
PVT 방음벽 시스템	PVT 방음 모듈들을 연계하여 기존 방음벽을 대체하고 전기와 온열을 복합 생산하여 자동으로 공급하는 3kWe 급 독립형 또는 계통 연계형 시스템	₩6,000,000/시스템	시스템화 제품

○ 신재생에너지 보급사업, 친환경 도시 구축 공공인프라 사업, 제로에너지타운, 친환경에너지타운, 친환경 녹색마을 등에 에너지 자립형 전기-열 복합 생산 시스템 사업화 모델로 활용

에너지 자립형 PVT 방음벽 시스템 제품화 모델 개발 및 사업화

- 독립형, 계통 연계형 PVT 방음벽 시스템 제품화 모델 개발
- 신재생에너지 보급사업, 친환경 도시 구축 공공인프라 사업 등 판매 전략구축

시제품 제작 및 성능 검증을 통한 기술 신뢰성 확보 효과

- 3 kWe급 PVT 방음 시스템 적용, 벤치 마킹, 제품의 신뢰성 검증
- 10 kWe급 이상 규모의 시스템 안정화 및 제품의 신뢰성 검증

다기능성 PVT 방음벽 시스템 설계, 제작, 최적화 기술 개발

- 다기능성 PVT 방음 모듈 설계/제작 및 시스템 설치 가이드라인 개발
- 흡음, 차음 기능 향상 및 전력, 온열 에너지 생산 시스템 최적 운전 기술 개발

○ 기본 비즈니스 모델 판매 전략

- 기술 개발 : PVT 방음 모듈 및 3kWe급 PVT 방음벽 시스템 개발
- 효과 검증 : 개발 기술에 대한 효과 입증, 표준기반 성과 측정 및 검증
- 맞춤형 서비스 : 사용자 간담회/공청회 등 다양한 소통기회 마련, 사용자 불만사항에 대한 시스템 개선 등을 통하여 사용자 맞춤형 서비스 제공
- 안정성 및 신뢰성 : 안정적인 열 공급 및 신뢰성 있는 운영 서비스 제공
- 에너지절감 : 열사용 시뮬레이션을 통한 가시화된 에너지절감 효과 홍보
- 사업기반 구축 : 사업 설명회 개최, 시범사업 시행, 전담부서 조직 등
- 사업 확대보급 : 지사단위 사업개발, 지사 전담 조직 확대

<PVT 방음벽 시스템 사업화 방안>

○ 융복합 패널 발전사업자 모델

- 철로, 도로 방음시설 임대사업, 시설주체(도로, 철로)와 수익화 사업 모델 공유 (부지공급, 시공비, 투자, 수익 배분)
- 공동연구기관에서는 이미 PV 방음 패널에 대한 특허권을 보유하고 있고 방음패널 설계/시공능력 보유
- PV 발전사업에 있어서도 상록수 역사 60kW 태양광 흡음 패널 사업 등의 실적을 보유함

○ 정부 조달사업 참여

- 공공시설에 적용되는 방음 패널에 대한 발주시 본 개발품을 우선 적용 고려
- 신기술 및 신재생에너지 시설의 공익성을 강조하고, 우수기술 및 특허기술권 보유를 통해 정부조달 우선구매 활용
- PVT 방음벽 기술에 대한 타 경쟁사가 없는 상황이며, 특허 보유 기관으로써 우선 적용 요청

○ 신재생에너지 의무화 사업 및 정부 보급사업 참여

- 전기-열 복합 생산 시스템의 기술기준 제정에 따른 보급사업 확대, 신재생에너지 의무보급 대상 사업자와 연계하여 신시장 개척
- PVT 연계 시장은 도입기의 시장으로 경쟁사가 전무한 실정으로 본 기술력이 성숙되는 시점에 정부 보급 정책 도입 가능성이 높음
- 신재생에너지 보급 사업 중 PV 사업은 시장의 매력력이 높지만 부지의 제약으로 시장이 정체기에 접어들었으나, PVT 방음벽 시스템 기술은 기존 방음벽을 대체하고, 유휴 부지를 활용할 수 있기에 성장성이 높음.

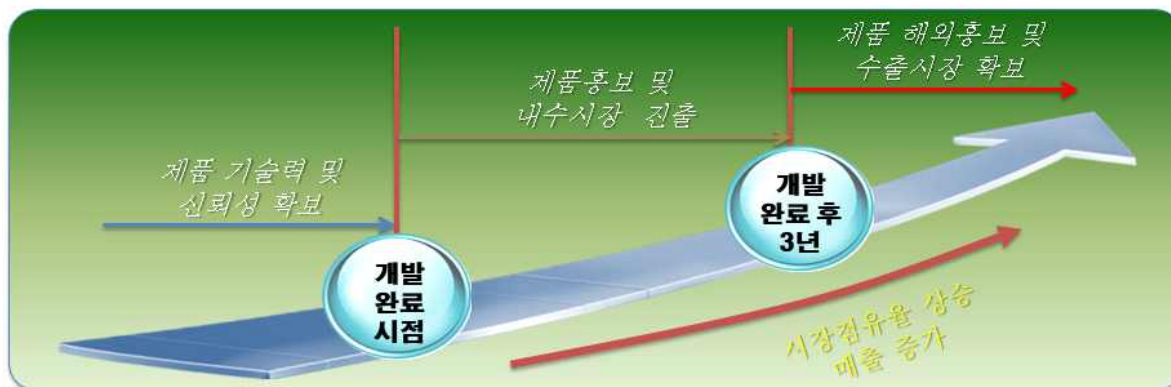
○ 제품 홍보 및 시장 진출 계획

- 다기능성 PVT 방음 모듈에 대한 제품 완성도를 높인 후 특허 및 디자인 기술력을 확보함
- PVT 방음벽 기술에 대한 신뢰성 확보 및 신기술 인증 후 정부 조달 인증제품으로 등록
- 신문, 방송 매체 등에 제품 홍보, 국가 신재생에너지보급 시범사업, 공공기관 대상 판매 판로 확충 등 내수시장 진출
- 내수시장 진출 이후에는 제품의 브랜드 이미지를 구축하고, 기술의 우위를 통한 해외시장 진출 경쟁력 확보
- 각종 해외 박람회를 통한 지속적인 홍보와 마케팅 전략을 추진해 나갈 것임.
(국제신재생에너지박람회, 국제태양에너지박람회 등)
- 국제 특허 출원을 통한 기술 선점 후 동남아시아, 중앙아시아, 유럽, 미국 등으로 제품의 우수성을 홍보하고 상대적으로 기술우위를 통한 제품의 경쟁력을 확보해 나갈 것임.
- 구글 등에 키워드 검색 등록, U-tube 동영상, Facebook 등록 등을 통해 해외에서도 다기능성 PVT 방음벽 시스템을 쉽게 검색이 가능하게 하는 등 제품에 대한 해외 판매 전략을 확보함.

○ 사업화 비즈니스 모델을 통한 수익 창출 방안

- 발전사업자 : 정부의 에너지 정책에 따른 신재생에너지 의무 사용 필수
- 공공기관 : 유휴부지 활용을 통한 수익성 창출 기대, 공익성이 높은 사업으로 사회적 관심 창출 가능

수입 유형	수익 모델	수익 전략
발전사업자	자체 발전사업 모델	· 자체 발전사업을 통한 전력 판매 수익 모델 · 일부 투자를 통한 지분에 의한 전력 수익 모델
	서비스 공급	· 개발제품의 특허기술료 모델 · 제품 공급 및 시공을 통한 수익 모델 · 설계, 시공, 감리 전방위 수익모델
공공기관	공공의무화 사업	· 공공기관에 의무화 사업 수익 모델 창출 (도로공사, 철도공사 등)
	조달 우선 구매	· 우수기술 우선구매 제도를 통한 조달시장 참여
	발전의무사업	· 발전 의무대상 사업자를 통한 재구매 수익모델



제품 홍보 활동 전략 [~개발 완료 시점]	내수 판매 전략 [~ 개발 완료 후 3년]	수출 판매 전략 [개발 완료 후 3년 ~]
- 다기능성 PVT 방음 모듈 제품 완성 - 제품에 대한 특허/디자인기술 확보 - 공인인증기관 제품 인증서 발급 - 에너지 자립형 방음벽 시스템 설계/제작/판매 인프라 확보	- 신문, 방송 매체 등에 제품 홍보 - 조달우수 제품 등록 완료 - 국가 신재생에너지 보급 시범 사업 수행 - 도로공사, 철도공사 등 공공기관 대상 판매 판로 확충	- 제품의 브랜드 이미지 구축 - 유사제품 대비 상대적 기술우위를 통한 경쟁력 확보 - 해외 박람회 참여 마케팅 추진 - 구글, U-tube, Facebook 등을 통한 제품 판매 전략 확보

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ 다기능성 PVT 방음 모듈 제작 기술력 확보

- PVT 방음 모듈에서 열을 잘 확보할 수 있는 최적의 전열 구조 설계 및 반영
- PV 패널과 흡음재를 이용한 차음, 흡음 성능 개선형 방음 모듈 구조 개발
- 기존 방음벽 지지대인 H빔에 적용할 수 있는 형태의 PV 패널 설계 및 제작 기술력 확보
- 방음 기능과 전력 생산이 가능한 경사각 10°의 PV 방음 모듈 시제품 설계 및 제작
- 태양열을 최적으로 확보할 수 있고, 제작이 용이한 형태의 열회수 장치 설계/제작 기술력 확보
- 국제 기준(ISO 9806)에 준하는 PVT 방음 모듈 성능 시험을 위한 시험평가 장치 개발
- 도로나 철도에 활용가능한 방음벽 기준인 흡음(0.7 이상), 차음(30 dB 이상) 성능 수치를 초과하는 PVT 방음 모듈 개발 완료 (개발품 : 흡음 0.83, 차음 37.1 dB)
- 태양에너지로부터 온열을 40% 이상 생산할 수 있는 PVT 방음 모듈 개발 완료

○ 다기능성 PVT 방음벽 시스템 설계/시공/운전 기술력 확보

- 방음벽 시스템 설치 경사각에 따른 발전량 분석 기술력 확보
- 3 kWe급 다기능성 PVT 방음벽 시스템 현장 설계 기술력 확보
- 기존 방음벽을 용이하게 대체할 수 있는 PVT 방음벽 시스템 시공 기법 개발
- PVT 방음벽 시스템 시공 기법에 기반한 3 kWe급 다기능성 PVT 방음벽 시스템 실증 현장 적용
- PVT 방음벽 시스템에서 열 공급을 위한 덕트 배관 기술력 확보
- PVT 방음벽 시스템에서의 전력 생산에 의한 계통 연계 기술력 확보 (독립형, 계통연계형)
- 다기능성 PVT 방음벽 시스템의 자동제어 기법 기술력 확보 및 현장 적용
- PVT 방음벽 시스템 안전 내구성 평가를 위한 구조 해석 기법 확보
- 3 kWe급(소형), 30 kWe급(중형) PVT 방음벽 시스템에 대한 경제성 분석 기술력 확보

○ 다기능성 PVT 방음벽 시스템 기술 사업화 모델 방안 제시

- 사업화를 위한 단계별 프로세스 기술력 확보
 - 기본 비즈니스 모델 : PVT 방음 모듈, 3 kWe급 PVT 방음벽 시스템
 - 신재생에너지 보급사업, 친환경 도시 구축 공공인프라 사업 등에 활용 가능
 - 제로에너지타운, 친환경에너지타운, 친환경녹색마을 등에 에너지 자립형 시스템 사업화
 - 철로, 도로 방음시설 임대사업, 시설주체(도로, 철로)와 수익화 사업 모델 제안
 - 정부 조달 사업에 참여하여 공공시설인 방음 패널의 발주시 개발품 우선 적용 고려
 - 신기술 및 신재생에너지 시설의 공익성 강조, 조달 우선구매 제도 적극 활용
 - 신재생에너지의무화사업 및 정부 보급사업 참여를 통한 신시장 창출
-

(2) 정량적 연구개발성과

○ 정량적 기술개발 목표 대비 달성 성과

- 흡음성능 목표 0.7 이상 → 0.83 달성
- 차음성능(감쇠) 목표 35 dB 이상 → 37.1 dB 달성
- 발전효율 향상 6% 이상 → 7.2% 달성
- 온도감소 15℃ 이상 → 16.3℃ 달성
- 열생산량 400 Wt/m² 이상 → 534 Wt/m² 달성
- 안전 내구성 평가(휨모멘트) 15 kN·m 이내 → 12.54 kN·m 달성
- 안전 내구성 평가(최대변위) 8 mm 이내 → 3.5 mm 달성
- 실증 평가 기간 6개월 → 12/03일부터 평가 진행 중
- 경제성 평가 (ROI) 10년 → 9.9년 달성 (3 kWe급 PVT 방음벽 시스템 기준)

○ 정량적 연구 목표 대비 달성 성과

- 국외논문 게재 1건 목표 → Renewable Energy (SCI) 1건 심사 중
- 국내논문 게재 2건 목표 → 2건 달성
- 특허출원 국내 4건 목표 → 5건 달성
- 특허등록 국내 3건 목표 → 2건 달성 (3건 심사 중)
- 기술이전 1건(20,000천원) → 1건(20,000천원) 확보되어 1월 중 체결 예정
- 보고서 원문 1건 목표 → 1건 달성
- 연구시설·장비·실증설비 1건 목표 → 1건 달성 (실증 적용 3 kWe급 PVT 방음벽 시스템)
- 시제품 1건 목표 → 2건 달성
- 성과 홍보 1건 목표 → 성과 홍보용 기사 3건 이상 보도 예정 (1월 중)
- 일자리 창출 1건 목표 → 1건 달성

<정량적 기술 개발 목표 대비 달성도>

평가 항목 (주요성능 Spec)	단위	전체 항목 에서 차지하는 비중 (%)	세계최고 수준 보유국/ 보유기업 (/)	연구개발 전 국내수준	당해연도 개발 목표/실적/달성도			평가 방법
			성능수준	성능수준	최종 목표치	실적	달성도 (%)	
1. 흡음성능	-	15	0.7	0.6	0.7	0.83	118	시험성적서
2. 차음성능(감쇠)	dB	15	35	35	35	37.1	106	시험성적서
3. 발전효율 향상 (온도감소)	% dT(℃)	10	4% (10℃) (한국/KIER)	4 (10)	6 (15)	7.2 (16.3)	120	자체 시험평가 결과 (전문가 입회평가)
4. 열생산량	Wt/m ²	15	352 (한국/KIER)	352	400	534	133	자체 시험평가 결과 (전문가 입회평가)
5. 안전 내구성 평가 (휨모멘트)	kN·m	10	-	-	15 이하	12.54	119	구조 해석 결과 (최종보고서)
6. 안전 내구성 평가 (최대변위)	mm	10	-	-	8 이하	3.5	228	구조 해석 결과 (최종보고서)
7. 실증 평가 기간	월	20	-	-	6	1.5	25	전문가 입회 평가 (전문가 초청 평가 시행)
8. 경제성 평가 (ROI)	년	5	-	-	10	9.9	101	경제성 분석 결과 (3Kw 기준)

<정량적 연구 목표 대비 달성도>

구분		최종 목표	현재 실적	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	1	(1)		심사 중
	비SCI				
	계	1	(1)		
국내 논문 게재	KCI	2	2	100	성과등록 완료
	비KCI				
	계	2	2	100	
특허 출원	국내	4	5	125	성과등록 완료
	국외				
	계	4	5	125	
특허 등록	국내	3	2	67	성과등록 완료
	국외				
	계	3	2	67	
인력 양성	석사				
	박사				
	계				
기술 이전	계약 건수	1	1	100	1월 체결 예정
	계약액	20,000	20,000	100	
	징수액	20,000	20,000	100	
국제 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
국내 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문	1	1	100	최종보고서
	연구시설·장비	1	1	100	실증 현장 시스템
	기술요약정보				
	생명자원	생명정보			
		생물자원			
		신품종			
	소프트웨어				
기타	화학물				
	국내논문 발표	0	4		추가 달성
	시제품	2	2	100	성과등록 완료
	성과 홍보	1	(3)	300	1월 보도 예정
	일자리 창출	1	1	100	성과등록 완료

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

☐ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Numerical Modeling and Experimental Validation of Soundproof Photovoltaic-Thermal Air Baffle Design	Renewable Energy	김유진	-	ELSEVIER	Renewable Energy	SCI	심사 중	0960-1481	100
2	국제 기준 공기식 태양열 집열기 열 성능 평가 연구	한국태양에너지 학회논문집	김유진	Vol.41, No.1	대한민국	한국태양에너지학회	비SCI	2021.02	1598-6411	100
3	방음벽 PVT의 공기유로 설계를 위한 CFD 시뮬레이션 사전 분석 연구	신·재생에너지	김유진	Vol.17, No.3	대한민국	한국신재생에너지학회	비SCI	2021.09	1738-3935	100

☐ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2019 한국태양에너지학회 추계학술발표대회	태양광열 모듈을 활용한 다기능성 방음벽 시스템 설계	이광섭	2019.10.17	청 풍리조트	대한민국
2	한국신재생에너지학회 2019 추계학술대회	전기 열 복합생산이 가능한 다기능성 PVT 방음벽 시스템	김유진	2019.11.13	메종글래드제주	대한민국
3	2020 한국태양에너지학회 추계학술발표대회	다기능성 방음벽 PVT 공기유로 설계를 위한 CFD 시뮬레이션 사전 분석 연구	김유진	2020.10.22	무창포 비체펠리스	대한민국
4	2020 한국태양에너지학회 추계학술발표대회	국제 기준 공기식 태양열 집열기 열 성능 평가 연구	김유진	2020.10.22	무창포 비체펠리스	대한민국

☐ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식
1	2022	에너지 자립형 다기능성 PVT 방음벽 시스템							

☐ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호
1	2022	최종보고서	2022.01.12	

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	태양광열(PVT)을 이용하여 전기 및 열을 복합 생산하는 다기능성 방음모듈 및 이를 적용한 방음벽체 시공방법	대한민국	한국에너지기술연구원	2019.10.16	10-2019-0128420	한국에너지기술연구원	2021.08.13	10-2292054	100	√
2	디자인	흡음판	대한민국	(주)화랑월드	2019.07.22	30-2019-0034956	(주)화랑월드	2020.04.01	30-1053660	100	
3	특허	태양광 패널 설치장치	대한민국	(주)화랑월드	2020.10.16	10-2020-0133861				100	
4	특허	가변형 배플을 적용한 열회수 태양광 발전시스템 및 이의 운전제어방법	대한민국	한국에너지기술연구원	2020.12.01	10-2020-0165281				100	
5	디자인	태양광 및 태양열을 이용한 복합 방음패널	대한민국	한국에너지기술연구원	2021.12.14	30-2021-0060143				100	

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1				√							
2										√	
3										√	
4										√	
5										√	

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	흡음형 태양광방음 모듈	2020.04	메리츠산업개발	-	방음벽	-	(주)대우건설기술연구원	2020.05.19
2	경사형 태양광방음 모듈	2020.04	메리츠산업개발	-	방음벽	-	(주)대우건설기술연구원	2020.04.24

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)
1	3kWe급 PVT 방음벽 시스템	2021.12	한국에너지기술연구원	한국에너지기술연구원 (주)화랑월드	케이웰텍(충남 계룡시)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)
1	통상 실시	태양광열(PVT)을 이용하여 전기 및 열을 복합 생산하는 다기능성 방음모듈 및 이를 적용한 방음벽체 시공방법에 관한 특허 및 노하우	케이웰텍	2022.01	2022	20,000

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과			PVT 방음 모듈, 3kWe급 PVT 방음벽 시스템		
사업화 계획	사업화 소요기간(년)		1		
	소요예산(천원)		400,000		
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
			-	1,000,000	5,000,000
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내	-	30	50
		국외	-	-	-
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획		30 kWe급 이상의 PVT 방음벽 시스템 사업화 모델 개발			
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
			-	-	-
	수 출		-	-	-

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			2020년	2021년	
1	전력 및 열에너지 복합 생산을 위한 모듈화형 방음기술개발	(주)화랑월드	1	0	1
합계			1	0	1

[사회적 성과]

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	언론 보도	3건 이상	전기와 열을 만드는 방음벽 기술 개발...방음 성능도 뛰어나	2022.01

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	표창장	장관 표창장	에너지절약 및 효율향상 유공	강은철	2021.11.17	산업통상자원부
2	우수논문상	우수논문상	2019년도 한국신재생에너지학회 추계학술대회 우수논문 선정	김유진	2019.12.18	한국신재생에너지학회

<참고 1> 연구개발성과 실적 증빙자료 예시

성과유형	첨부자료 예시
연구논문	논문 사본(저자, 초록, 사사표기를 확인할 수 있는 부분 포함, 연구개발과제별 중복 첨부 불가)
지식재산권	지식재산권 등록증(또는 출원서) 사본(발명인, 발명의 명칭, 연구개발과제 출처 포함)
제품개발(시제품)	제품개발사진 등 시제품 개발 관련 증빙자료
기술이전	기술이전 계약서, 기술실시 계약서, 기술료 입금 내역서 등
사업화 (상품출시, 공정개발)	사업화된 제품사진, 매출액 증빙서류(세금계산서, 납품계약서 등 매출 확인가능 내부 회계자료) 등

<참고 2> 「국가연구개발혁신법」 시행령 제33조 제4항 및 별표 4에 따른 연구개발성과의 등록·기탁 대상과 범위

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설 · 장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상(부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설·장비 또는 공동 활용이 가능한 모든 연구시설·장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열·발현정보 등 유전체정보, 서열·구조·상호작용 등 단백질체정보, 유전자(DNA)칩·단백질칩 등 발현체 정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보(소관 기술위원회를 포함한 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함)
기탁	생명자원 중 생물자원	세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물자원, 인간 또는 동물의 세포·수정란 등 동물자원, 식물세포·종자 등 식물자원, DNA, RNA, 플라스미드 등 유전체자원 및 그 밖의 생물자원
	화합물	합성 또는 천연물에서 추출한 유기화합물 및 관련 정보
	신품종	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신품종 및 관련 정보

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 전기-열 복합 생산이 가능하고, 발전 성능 및 방음 성능을 향상시키는 다기능성 PVT 방음 패널을 개발함. 또한 이 다기능성 PVT 방음 패널을 이용한 방음벽 시스템 시공 기법 및 실증 적용을 통한 사업화 모델을 제시함. - PV와 태양열 집열기를 통합한 형태의 최적 전열 구조 개발 - 흡음과 차음 성능을 확보하는 다기능 방음 패널 구조 개발 - 전기-열 복합 생산 다기능성 PVT 방음 패널 시제품 개발 - 다기능성 PVT 패널의 전기, 온열 생산 및 방음 성능 시험 - PVT 방음 패널 직렬 연계 방식의 방음벽 시스템 시공 기법 개발 - 다기능성 PVT 패널을 적용한 실증 기술 및 사업화 모델 개발	○ 종래의 방음벽 대체 기술로써 흡음 성능과 차음 성능을 향상시키고, 태양에너지로부터 전력과 온열을 복합 생산하여 활용할 수 있는 다기능성 PVT 방음 모듈을 개발하였음. 아울러, 이 PVT 방음 모듈을 활용한 3kWe급의 다기능성 PVT 방음벽 시스템 시공 기법 개발 및 실증 적용을 통한 사업화 모델을 제시하였음. - PV와 태양열 집열기 연계 방안 및 다양한 패턴의 전열 구조를 해석하여 최적의 전열 구조를 도출함. - 기존 흡음재를 PVT 모듈의 단열재로 활용하여 흡음과 차음 성능을 향상시키는 방음 모듈 구조를 개발함. - 방음벽용 PV 패널과 최적 전열 구조의 집열기를 제작하여 통합한 형태의 PVT 방음 모듈 시제품을 개발함. - 다기능성 PVT 모듈의 성능 시험 결과 목표대비 높은 수치를 달성하였음. - 종래의 방음벽을 대체할 수 있도록 PVT 방음벽 시공 기법을 개발하여 실증 현장에서 시범 적용함. - PVT 방음 모듈 및 3kWe급 PVT 방음벽 시스템을 시범 적용하여 이를 벤치마킹한 사업화 모델을 제시함.	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 연구개발 최종 목표 대비 정성적 목표 달성은 완료되었다고 판단함.
 - 정량적 연구성과 목표는 대내외적인 사유로 일부 미달되었음.
 - 국외 논문 게재(목표 1건) : 당해연도에 SCI급 논문 1건을 투고한 상태이며, 현재 심사 중에 있음.
 - 특허 등록 (목표 3건) : 총 5건의 특허가 출원된 상태이며, 이 중 현재 2건이 등록되었음.
 - 실증 평가 기간 (목표 6개월) : COVID19의 장기화로 실증 현장이 불가피하게 변경되었고, 현장에 설치할 PVT 제작이 지연되어 11월 말에야 실증 시스템 구축이 완료되었음. 12/03일 이후로 시스템이 정상적으로 운영되고 있으며, 지난 한 달간 시스템 가동 상태로 보아서 6개월 이상 실증 운영이 가능할 것으로 판단됨.
-

2) 자체 보완활동

- 국외 논문 게재 : 기 투고한 논문에 대한 심사 결과에 따라서 Review 내용을 보완할 것임. 보완 내용을 반영한 논문을 재투고하거나, 타 SCI 논문에 새롭게 투고하여 논문이 게재될 수 있도록 노력할 것임.
 - 특허 등록 : 현재 5건의 특허 출원 중 2건이 등록된 상태임. 나머지 3건에 대해서도 특허청의 검토 내용을 반영하여 적어도 1건 이상이 등록될 수 있도록 특허사무소와 협업을 통하여 대응할 것임.
 - 실증 평가 기간 : 과제가 종료된 이후에도 주기적으로 현장을 방문하여 실험데이터를 확보하여 분석하였음. 아울러 이 PVT 방음벽 시스템을 벤치마킹할 수 있도록 지속적인 시스템 안정성과 내구성을 검토하고 보완해 가겠음.
-

3) 연구개발 과정의 성실성

- 기 제출한 SCI 논문은 PVT 방음 모듈의 방음 특성과 열 특성을 최적화하기 위한 전열 구조 해석에 관한 것으로서, PVT 방음 기술에 대한 전반적인 소개 및 실험을 통해 검증된 PVT 모듈에서의 전열 구조 형상에 따른 열유체 해석 결과를 바탕으로 작성된 논문임. 논문에서 중요시하는 실험 값과 해석 값을 비교 검증하고 새로운 형태의 해석 결과 값을 도출하는 논문이기에 충실히 준비되었다고 사료됨.
 - 본 과제에서는 총 4편의 특허출원을 목표로 하였지만, 등록목표 3건을 만족시키기 위하여 1건의 특허를 추가로 달성한 것임. 마지막 1건은 실증 현장에 적용된 PVT 방음 모듈의 디자인을 보호하기 위한 것으로 추후 사업화를 위한 기술 이전시 추가 항목으로 반영할 수 있을 것으로 기대함.
 - 당초에는 올 4월경부터 PVT 방음벽 시스템을 실증 현장에 구축하려고 하였으나, COVID19의 장기화로 인하여 실증 현장 제공 기업이 외부인 출입을 엄격히 금지시키면서 새로운 실증 현장을 찾을 수 밖에 없었으며, 지난 8월에서야 현재의 실증 현장을 확보할 수 있었음. 이로 인해 실증 현장 구축이 5개월 정도 지연되었고, 11월말에서야 비로소 실증 현장 구축이 완료되었음. 이후 실증 적용된 PVT 방음벽 시스템이 정상적으로 운영될 수 있도록 거의 매일 현장에 방문하여 시스템을 점검하였고, 12월03일 이후에는 실험데이터를 확보할 수 있었음. 지난 한 달간 PVT 방음벽 시스템 가동 상태로 보아서 6개월 이상 실증 운영하는 데에는 이상이 없을 것으로 판단됨.
-

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 국내 방음벽 설치 길이는 총 3,200km에 달하며 주거환경 개선을 위한 인프라 확대로 수요증가 전망
 - 기존의 철로나 도로 주변의 노후화된 방음벽을 대체하고, 신규로 설치 예정인 교통소음 저감 지역에 방음벽 및 에너지 생산 구조물로 적용
 - 역사 내의 공공장소(대합실, 화장실, 휴게실, 흡연실, 벤치 등)나 버스 정류장 등에 전력과 열에너지(겨울철 온풍, 여름철 온수 예열)를 자체 생산하여 공급하고자 하는 시설에 적용
 - 태양광, 태양열, 흡음, 차음 기술을 융합하는 에너지 효율 향상 기술로써 기존의 개별 기술의 단점을 보완하여 교통소음 방음벽의 보급을 획기적으로 증가시킬 것으로 기대함.
 - 국가 에너지 정책 달성 기술로 태양광 보급(설치 면적감소 효과), 전기, 난방에너지 보급(온실가스 저감 효과)을 통한 수요 증가가 기대됨.
 - 노후화 교체 혹은 신설이 필요한 방음벽 설치 구역에 에너지 생산형 다기능성 PVT 방음벽을 설치함으로써 에너지 걱정없는 안심사회 실현에 공헌
 - 에너지 수요에 대응하는 기술로써 국가 전력 계획에 기여할 것이며, 공공시설 부문의 에너지 수요 및 공급 안정화에 이바지 함.
 - 상용화 기술이 확보되면, 친환경 재생에너지 기술로써 수출 가능성이 높고 국가에너지 경쟁력 향상에 기여함.
 - 태양에너지와 방음기술의 융합과 더불어 태양에너지 이용률을 극대화한 신재생에너지 융합 기술로 신산업 창출에 기여 가능
 - 열사용 시설 적용 기술 개발 및 Scale-up 후속 연구를 통해 상용화 기술로 확대 가능
 - 신재생에너지 시장에서의 건전하고 현실적인 경쟁 구조를 만들어, 전체 신재생에너지 시장의 가격 경쟁력 상승에 기여함.
 - 공공인프라 시설에 방음벽 친환경 에너지화를 통한 에너지전환정책에 대한 국민 인식 개선 기대.
 - 신재생에너지 설치의무화, 제로에너지빌딩 의무화 정책 기술로 에너지 기술 선점 효과 기대.
 - 신재생에너지와 타 산업간의 융합으로 신시장 창출 및 신규 일자리 증가 기대.
-

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

- 국내 온실가스 감축 목표(2030년, 37%) 및 재생에너지 3020 계획(2030년, 20%) 국가 정책 달성을 위한 재생에너지 보급 기술로 활용
 - 태양에너지를 이용하여 전기와 열을 융합 생산하는 시스템을 구축함으로써, 2025년부터 의무화를 추진하고 있는 제로에너지빌딩(ZEB)의 필수 아이템으로 활용
 - 본 연구개발과제를 통해 다기능성 모듈 시제품화, Bench Scale 실증을 통한 신뢰도 확보, 시공가이드라인 확보 모듈 사업화 및 수출 시장 진출 활용 가능
 - PV 시스템의 발전성능을 향상시키고, 난방열을 생산/공급하는 에너지 절감 기술로써, 두 기술의 융합은 $2+\alpha$ 의 획기적인 시너지 효과 기대
 - 소음 방지와 더불어 전력과 열에너지를 소비하는 시설(도서관, 문화예술관, 콘서트 홀 등)에 활용
 - 대형 건축물, 산업시설, 산간 오지 목축장, 방목장 등 친환경 방음벽, 울타리 신기술로 활용
 - 국가 신재생에너지 보급 시범 사업, 친환경 도시 구축 공공인프라사업에 활용
 - 제로에너지타운, 친환경에너지타운, 친환경녹색마을 등에 에너지 자립형 공공휴게시설 적용
 - 도로공사, 철도공사 등 공공기관의 신재생에너지설비의무화 기술로써 활용
 - 고속도로, 국도 등의 도로변 방음벽에도 동일한 기술 적용이 가능하며, 동남아시아 지역의 도로, 철도 인프라 수출시 다기능성 PVT 방음벽 시스템 기술에 대한 동반 진출이 가능함
 - 태양에너지와 방음기술의 융합과 더불어 태양에너지 이용률을 극대화 기술임
 - 국내 신규 방음벽 및 노후 방음벽 대체용 친환경 기술로 활용
 - Bench Scale 실증을 통한 PVT 방음벽 시스템 사업화 기술로 활용
-

< 별첨 > 참고문헌

- [1] 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증에 관한 규칙, 국토교통부 고시, 제2019-179호, 2019.
- [2] International Standard ISO 9806, Solar energy solar thermal collectors test methods, 2013.
- [3] International Standard ISO 9806 Solar energy, solar thermal collector test methods, 2017.
- [4] Gohosolar, http://gohosolar.com/soundproof_wall
- [5] 방음시설의 성능 및 설치기준, 환경부 고시, 제2017-159호, 2017.
- [6] 고속도로공사 전문시방서, EXCS 10 10 05, 한국도로공사, 2013.
- [7] IEC 61215-1, Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1: Test requirements, 2021.
- [8] Mcquiston, F. C. and Paker, J. D., Heating, Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design, 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA, pp. 299-365, 2005.
- [9] Duffie, J. A. and Bechman, W. A., Solar Engineering of Thermal Process, 4th Edition, Wiley-Interscience Publication, Hoboken NJ, USA, pp. 202-321, 2013.
- [10] Akpinar, E. K. and Kocyigit, F., Experimental Investigation of Thermal Performance of Solar Air Heater Having Different Obstacles on Absorber Plates, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol.37, No. 4, pp. 416-421, 2010.
- [11] Tanda, G., Performance of Solar Air Heater Ducts with Different Types of Ribs on the Absorber Plate, Energy, Vol. 36, No. 11, pp. 6651-6660, 2011.
- [12] Z. Zhao, H. Yuan, S. Gao, Y. Tian, Comparative study on performance and applicability of high temperature water steam producing systems with waste heat recovery, Case Studies in Therm. Eng., 28, 101622, 2021.
- [13] Bahrehmand, D., Ameri, M., and Gholampour, M., Energy and Exergy Analysis of Different Solar Air Collector Systems with Forced Convection, Renewable Energy, Vol. 83, pp. 1119-1130, 2015.
- [14] Sun, C., Liu, Y., Duan, C., Zheng, Y., Chang, H., and Shu, S., A Mathematical Model to Investigate on the Thermal Performance of a Flat Plate Solar Air Collector and Its Experimental Verification, Energy Conversion and Management, Vol. 115, No. 1, pp. 43-51, 2016.
- [15] MOTIE, Implementation plan for renewable energy 3020, 2017.
- [16] Kang, J.G., Kim, J.H., and Kim, J.T., A study on the performance comparisons of air type BIPVT collector applied on roofs and facades, J. Korean Solar Energy., 30(5), 56-62, 2010.
- [17] Park, S.H., Bang, A.Y., Kim, J.H., and Kim, J.T., An experimental study of air type photovoltaic thermal collector, J. Korean Solar Energy, 39(2), 23-32, 2019.
- [18] Jin, D., Zhang, M., Wang, P., and Xu, S., Numerical Investigation of heat transfer and fluid flow in a solar air heater duct with multi V-shaped ribs on the absorber plate, Energy, 89, 178-190, 2015.
- [19] Jin, D., Zuo, J., Quan, S., Xu, S., and Gao, H., Thermohydraulic performance of solar air heater with staggered multiple V-shaped ribs on the absorber plate, Energy, 127, 68-77, 2017.
- [20] Buonomano, A., Calise, F., Palombo, A., and Vicidomini, M., BIPVT systems for residential applications: An energy and economic analysis for European Climates, Appl. Energy, 184, 1411-1431, 2016.
- [21] Gautam, K.R., and Andresen, G.B., Performance comparison of building-integrated combined photovoltaic thermal solar collectors (BIPVT) with other building integrated solar technologies, Solar Energy, 155, 93-102, 2017.
- [22] Kim, Y.J., Lee, K.S., Yang, L., Entchev, E., Kang, E.C. and Lee, E.J., Validation and numerical sensitivity study of air baffle photovoltaic-thermal module, Energies, 13(8), 1-13, 2020.
- [23] Calise, F., Cappiello, F.L., d'Accadia, M.D., and Vicidomini, M., Dynamic simulation, energy and economic comparison between BIPV and BIPVT collectors coupled with micro-wind turbines, Energy, 191(15), 116439, 2020.
- [24] Kim, T.Y., and Kim, S.J., Fluid flow and heat Transfer characteristics of cross-cut heat sinks, Int.

- J. Heat Mass Transf., 52(23-24), 5358-5370, 2009.
- [25] Pritchard, P.J., Fox, R.W., and McDonald, A.T., 2011, Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics, 8th edition, John Wiley & Sons, Inc, pp. 357-420.
- [26] Kim J.H, Kim S.H, Yoo S.H, Public Acceptance of the Renewable Energy 3020 Plan Evidence from a Contingent Valuation Study in South Korea, Sustainability, Vol. 12, No. 12, 2020.
- [27] Kim Y.W, Yu K.H, Study on the Certification Policy of Zero Energy Building in Korea Sustainability, Vol. 12, No. 8, 2020.
- [28] Kameda M, Sakai S, Isomura M, Sayama K, Hishikawa Y, Matsumi S, Haku H, Wakisaka K, Tanaka M, Kiyama S, Tsuda S, Nakano S, Efficiency evaluation of a-Si and c-si solar cells for outdoor, Proceedings 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, DC, pp. 1049-1052, 1996.
- [29] Nishioka K, Hatayama T, Uraoka Y, Fuyuki T, Hagihara R, Watanabe M, Field test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature, Solar Engineering Materials and Solar Cells, Vol. 75, pp. 665-671, 2003.
- [30] Fudholi A, Sopian K, Yzadi M.H, Ruslan M.H, Hussein A.I, Kazem A, Performance Analysis of Photovoltaic thermal(PVT) Water Collectors, Energy conversion and Management, Vol. 78, pp. 641-651, 2013.
- [31] Teo H.G, Lee, P.S, Hawlader M.N.A, An active cooling system for photovoltaic modules, Applied Energy, Vol. 90, No. 1, pp. 309-315, 2012.
- [32] Irwan Y.M, Leow W.Z, Irwanto M, Fareq M, Amelia A.R, Gomech N, Safwati I, Indoor Test Performance of PV Panel through Water Cooling Method, Energy Procedia, Vol. 79, pp.604-611, 2015.
- [33] Tonui J.K, Tripanagnostopoulos Y, Improved PVT solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation, Renewable Energy, Vol. 32, No. 4, pp. 623-637, 2006.
- [34] Gagliano A, Tina G.M, Nocera F, Grasso A.D, Aneli S, Description and performance analysis of a flexible photovoltaic thermal solar system. Renewable Energy, Vol. 22 pp. 361-366, 2019.
- [35] Misha S, Amira L.A, N. Tamaldin, Rosli M.A.M, Sachit F.A, Simulation CFD and experimental investigation of PVT water system under natural Malaysian weather conditions, Energy Reports, Vol. 6, No. 7, pp. 28-44, 2020.
- [36] Touafek K, Khelifa A, Adouance M, Theoretical and experimental study of sheet and tubes hybrid PVT collector, Energy Conversion and Management, Vol. 80, pp. 71-77, 2014.
- [37] KS F ISO 10140-1 음향-건물 부재의 차음 성능 시험실 측정방법 - 제1부: 특정 제품에 대한 적용 규칙, 2014.
- [38] KS F ISO 10140-1 음향-건물 부재의 차음 성능 시험실 측정방법 - 제2부: 공기 전달음 차단성능 측정방법, 2014.
- [39] KS F 2805 잔향실 내의 흡음률 측정방법, 2014.
- [40] Niccolo Aste, Claudio Del Pero, Fabrizio Leonforte, Massimiliano Manfren, Performance monitoring and modeling of an uncovered photovoltaic-thermal water collector, Solar Energy, Vol. 135, pp. 551-568, 2016.
- [41] Swinbank, W. CQJR., Long-wave radiation from clear skies, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 89, 381, 339-348, 1963.
- [42] Najin A. Jassim, Suhaib J. Shbailat, Three-dimensional CFD Analysis for Simulating Dual Channel Solar Collector with Different Absorbing Media, International Journal of Thermal Technology, 2017.
- [43] W. Mustafal, M.Y. Othman, A.Fudholi, Numerical investigation for performance study of photovoltaic thermal nanofluids system, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 12, pp. 14596-14602, 2017.
- [44] MOTIE, Implementation plan for renewable energy 3020, 2017.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘전력 및 열에너지 복합 생산을 위한 모듈화형 방음 기술 개발’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.