

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부			사업명	사업명		국토교통기술혁신연구사업				
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명		국토교통기술혁신연구 (사회이슈해결 유형)				
공고번호	공고-제02호			연구개발과제번호		1615012072					
국가과학기술 표준분류	EH1302		40%	EH0102		20%	EH1303		10%		
연구주제	(대분류) 지속가능한 활력사회			(중분류) 건설/교통 환경			(소분류) 미세먼지				
연구개발과제명	국문	오염 배출원 주변 미세먼지 3차원 공간분포 및 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)관측용 원격 계측장비 개발 - 사업장, 건설현장 등									
	영문	Development of 3-dimensional spatial distribution of PM around the pollutant source and remote measurement equipment for mass concentration observation: business sites, construction sites, etc.									
주관연구개발기관	기관명	(주)솔탑			사업자등록번호		314-81-24273				
	주소	(우)34051 대전광역시 유성구 엑스포로 409			법인등록번호		160111-0077340				
주관연구책임자	성명	윤문상			직위		선임				
	연락처	직장전화	042-334-0070			휴대전화		010-5474-1095			
		전자우편	msyoon@soletop.co.kr			국가연구자번호		11084858			
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)									
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31(9개월)									
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(1년)									
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금		합계			연구개발비 외 지원금		
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계			
총계	600,000	20,000	180,000	-	-	-	-	620,000	180,000	800,000	-
1년차	134,000	4,467	40,200	-	-	-	-	138,467	40,200	178,667	-
2년차	150,000	5,000	45,000	-	-	-	-	155,000	45,000	200,000	-
3년차	316,000	10,533	94,800	-	-	-	-	326,533	94,800	421,333	-
공동연구개발기관 등	기관명	책임자		직위	휴대전화		전자우편		비고		
									역할	기관유형	
공동연구개발기관											
위탁연구개발기관	(재)한국품질재단		허경욱	원장	02-2025-9066		kohuh@kfq.or.kr		위탁	비영리	
연구개발기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명	정재영			직위		주임				
	연락처	직장전화	042-341-0181			휴대전화		010-8394-1130			
		전자우편	jjjung@soletop.co.kr			국가연구자번호		12412867			

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

2022년 3월 17일

연구책임자 : 윤문상

주관연구개발기관의 장 : (주)솔탑

사공영보

위탁연구개발기관의 장 : (재)한국품질재단

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업		연구개발과제번호		1615012072	
내역사업명		국토교통기술혁신연구					
국가과학기술표준분류		EH1302	40%	EH0102	20%	EH1303	10%
연구주제		(대분류) 지속가능한 활력사회		(중분류) 건설/교통 환경		(소분류) 미세먼지	
연구개발과제명		오염 배출원 주변 미세먼지 3차원 공간분포 및 질량농도($\mu\text{g}\text{m}^{-3}$)관측용 원격 계측장비 개발 - 사업장, 건설현장 등					
전체 연구개발기간		2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)					
총 연구개발비		총 800,000천원 (정부지원연구개발비 : 600,000천원, 기관부담연구개발비 : 200,000천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)					
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[☒ 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도		착수시점 기준() 종료시점 목표()	
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [<input]<="" checked="" td="" type="checkbox"/>					
연구개발과제 특성		사회이슈 해결					
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		오염 배출원 주변 미세먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 원격 계측장비 개발 과 자료 표출 자동화 기반 기술 개발				
	전체 내용		- 오염 배출원 주변 미세먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 H/W 개발 • 측정 거리 : 5 km 이상 • 측정 자료 : 미세먼지 종류 구분(편광소멸도(Depolarization Ratio)), 3 차원 미 세먼지 공간 분포, 미세먼지 질량 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 거리별 미세먼지 산란 계수 • 거리 분해능 : 7.5 m 이하 • 관측 주기 : 120 초 이내 • 최대 스캔 속도 : 20° /sec - 오염 배출원 주변 미세먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 S/W 개발 • 거리 보정된 후방산란(Backscatter) 프로파일 • 거리별 미세먼지 종류 산출(편광소멸도 프로파일) • 거리별 미세먼지 질량농도 산출				
	1년차	목표	○ 오염 배출원 주변 미세먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측 장비 시작품 개발				
		내용	- 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시작품 H/W 구조 분석 및 개념 설계 - 3 차원 미세먼지 관측용 시작품 H/W 설계 및 제작 - 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시스템 시작품 S/W 신호처리 기술 설계 및 개발 - 선행연구를 통해 개발된 광자계수기, 광센서 성능 개선 - 시작품 자체 성능평가 - (위탁기관)미세먼지 관측 데이터의 오류 데이터 검출 방법에 대한 연구 - (위탁기관)미세먼지 관측 장비의 오류 검출을 위한 품질관리(QC) 알고리즘 개발				
	2년차	목표	○ 현장 적용 가능한 오염 배출원 주변 미세먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관 측 장비 시제품 개발				
내용		- 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시제품 H/W 설계 및 제작 - 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시제품 S/W 개발 - 시제품 구성요건 분석 - 시제품 자체 성능평가 - (위탁기관)개발된 알고리즘을 실제 관측 데이터에 적용 및 보완					

			- (위탁기관)데이터 중앙처리장치의 데이터 품질관리(QC) 알고리즘 개발																																				
	3년차	목표	○ 오염 배출원 주변 미세먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측 장비 시제품 현장 적용 실험을 통한 최적화 및 내구성 테스트																																				
		내용	- 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시제품 최종 성능 검증 - 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시제품 최적화 - 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 사업화 준비 - (위탁기관)주변 미세먼지 관측소의 예측 및 관측 데이터와 연관성 분석																																				
연구개발성과			○ 본 사업을 통해 라이다 방식을 이용한 오염 배출원 주변 미세먼지 입체적 관측 및 질량농도 관측용 원격 관측 장비를 개발 하고자 함																																				
			< 예상되는 연구개발성과 유형 >																																				
			<table><tr><th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서 원문</th><th rowspan="2">연구 시설·장비</th><th rowspan="2">기술요약 정보</th><th rowspan="2">소프트 웨어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr><tr><th>생명 정보</th><th>생물 자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr><tr><td>예상성과 (N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td></tr></table>												구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종		생명 정보	생물 자원	정보	실물	예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N
구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종																													
								생명 정보	생물 자원	정보	실물																												
예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N																												
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			○ 지점별로 산재해 있는 점원 정보가 아닌 광범위한 지역에서의 안정적인 초미세먼지 매핑 정보의 구축																																				
			○ 실시간 미세먼지 주요 배출 지역 규명뿐만 아니라 장기간의 안정적인 데이터 축적에 따른 주요 미세먼지 발생 지역 도출 및 원인규명 자료로써의 활용																																				
			○ 미세먼지 발생원 추적 및 주요 오염원 도출을 통하여 대응방안 마련의 초석 마련																																				
			○ 고해상도의 미세먼지 질량 농도 산출로 조밀하지 못한 기존 대기오염측정망에서 산출되는 미세먼지 농도 자료 보완																																				
			○ 수직/수평 스캔 기능으로 스캔 영역 내에서 오염 배출원 주변 미세먼지 공간 분포 모니터링 활용																																				
			○ 컴팩트한 구조와 소형 장비로 개발하여 차량에 설치하거나 관측지점에 고정 가능																																				
			○ 미세먼지의 생성 및 발생원의 신속한 추적이 가능하고, 3 차원 미세먼지 측정 장치의 국산화 및 수입 대체효과를 기대할 수 있음.																																				
			○ 기존의 미세먼지 관측 자료와 정보의 효율적 공유를 통한 국내 미세먼지 확산 모델링 초기 자료 제공																																				
연구개발성과의 비공여부 및 사유			해당없음																																				
연구개발성과의 등록· 기탁 건수			논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종																										
			생명 정보	생물 자원	정보	실물																																	
			-	2	2	1	-	8	-	-	-	-	-																										
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황			구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장 소)	ZEUS 등록번호																												
국문핵심어 (5개 이내)			미세먼지		라이다		3 차원 관측		편광소멸도		질량농도																												
영문핵심어 (5개 이내)			Fine dust		LIDAR		3-D observation		Depolarization ratio		Mass concentration																												

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	01
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	04
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	127
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	135
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	136
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	137
7. 참고 문헌	139
별첨자료	140
<별첨1> 성과점검 기준표(총괄)	140
<별첨2> 연차별 증빙자료	142

〈 표 목 차 〉

2-1 현업에서 사용하는 미세 먼지 측정 방법	06
2-2 미세 먼지 측정 방법	06
2-3 국내 라이다 장치의 도입 및 개별 현황	07
2-4 대기환경 센서 관련 국내 시장규모 및 전망	08
2-5 기상산업 시장 주요 현황	08
2-6 대기환경 센서 관련 세계 시장규모 및 전망	10
3-1 레이저 빔 확대기에 따른 레이저 발산각 계산 결과	14
3-2 미세 먼지 라이다 장치 시제품에 사용된 레이저 사양	20
3-3 532 nm 간섭 필터의 주요 성능 사양	22
3-4 미세 먼지 라이다 시제품에 사용된 NI PCI - 5105 DAQ 보드 사양	23
4-1 미세 먼지 관측 라이다 시제품 수신 광학계 구성품	40
4-2 수정된 미세 먼지 관측 라이다 시제품 수신 광학계 구성품	41
4-3 QC 4가지 알고리즘의 시작 순서와 내용	59
5-1 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 변경에 따른 사양 비교	63
5-2 소형 미세 먼지 라이다 시제품에 적용할 광 계수기 사양 비교	69
5-3 2차년도 시제품과 보안된 시제품의 주요 부품 사양 비교	71
5-4 미세 먼지 등급 기준	91
5-5 미세 먼지 라이다 시제품의 최종 성과 목표	98
5-6 미세 먼지 라이다 시제품의 전문가 평가 시험 결과	102
5-7 미세 먼지 라이다의 양산 계획	113
5-8 미세 먼지 라이다 인증항목	116
5-9 미세 먼지 라이다 시제품의 장애내역 및 점검사항	117
5-10 제품 홍보를 위한 참가 학회 이력	119
5-11 미세 먼지 라이다 제품 마케팅 전략	123
5-12 에어코리아에서 제공하는 국가 대기오염 측정망의 오염 물질 측정항목	124

〈 립 목 차 〉

2-1 2017 지역별 미세먼지 오염 현황	04
2-2 발생원별 PM 2.5 배출기여도(수도권(좌), 전국(우))	05
2-3 그리스 Raymetrics 사의 3D 스캔 라이다	09
3-1 미세먼지 라이다 장치의 레이저 송신 광학계 구성도	14
3-2 미세먼지 라이다 장치의 레이저 수신 광학계 기본 구성도	15
3-3 미세먼지 라이다 장치의 레이저 수신 광학계 확장 구성도	15
3-4 미세먼지 라이다 장치의 장치 제어부 구성도	16
3-5 미세먼지 라이다 장치의 시스템 제어부 구성도	17
3-6 미세먼지 라이다 장치의 시스템 관리부 구성도	17
3-7 미세먼지 라이다 장치의 영상 표출부 구성도	17
3-8 레이저 수신 광학계의 조건 1의 렌즈 구성 Ray - tracing 결과	18
3-9 레이저 수신 광학계의 조건 2의 렌즈 구성 Ray - tracing 결과	19
3-10 미세먼지 라이다 시제품에 사용된 Ultra 50 레이저의 크기 정보	20
3-11 Ultra 50 laser의 전원 공급 및 쿨링 기능이 포함된 전원공급기	20
3-12 파장에 따른 PMT 센서의 감도	21
3-13 PMT 센서의 형상 및 크기	21
3-14 532 nm 파장의 간섭 필터 중심 파장 및 투과도	22
3-15 광학계 고정을 위한 내부 마운트 3D 모델	24
3-16 스캐닝 모터와 연결을 위한 외부 하우징 3D 모델	24
3-17 미세먼지 라이다 시제품 설계도면	25
3-18 1차년도 미세먼지 라이다 시제품 개발 사진	25
3-19 미세먼지 라이다 장치의 미세먼지 종류(유형) 및 질량 농도 산출 알고리즘	27
3-20 미세먼지 라이다 제어 및 질량 농도 측정 프로그램 인터페이스	27
3-21 빔 확대기의 ZEMAX 시뮬레이션 모식도	28
3-22 빔 확대기를 통하여 발진된 레이저 빔의 형태를 나타낸 Spot Diagram(왼쪽, 100m), (오른쪽, 10 km)	28
3-23 레이저 수신부 망원경의 집속 빔 평가 결과	29
3-24 에어로졸에 의한 일반적인 라이다 신호 예	30
3-25 미세먼지 라이다 시제품의 최대 측정 거리 평가를 위한 실험 준비 사진	31
3-26 미세먼지 라이다 시제품의 최대 측정 거리 평가를 위한 레이저 빔 조사 모습	31
3-27 미세먼지 라이다 제어 및 분석 프로그램에서 측정된 산란 신호 : 3.2 km	32
3-28 미세먼지 라이다 원본 파일을 이용하여 확인한 산란 신호 그래프 : 3.2 km	32
3-29 미세먼지 라이다 원본 신호를 이용한 측정 최소 분해능 확인 결과	33
3-30 오리진을 이용한 미세먼지 라이다 원본 신호의 거리 측정 최소 분해능 확인 결과	33
3-31 미세먼지 라이다 시제품으로 측정된 미세먼지의 후방산란 프로파일	34
3-32 에어코리아 측정 자료와 비교한 미세먼지 라이다 장치의 미세먼지 농도 측정 결과	34
3-33 미세먼지 라이다 시제품의 5단계 QC 알고리즘 확인 방안	35
4-1 빛의 파장에 대한 망막 원추세포 반응	37
4-2 IEC 60825에 따른 시준 레이저 빔의 노출시간에 따른 최대 허용 광량(MPE)	37
4-3 미세먼지 라이다 장치의 송신 광학계 변경에 따른 구성도 변화	39
4-4 미세먼지 라이다 장치의 관측 채널 추가에 따른 수신 광학계 구성도 변화	41
4-5 미세먼지 라이다 시제품의 레이저 송신 광학계 설계 및 평가	42
4-6 뉴턴식 망원경과 카세그레인 망원경의 비점수차에 의한 집속패턴-각도 (1mrad일 경우)	42
4-7 미세먼지 라이다 장치 센서에 집속되는 광 분포	43
4-8 미세먼지 라이다 시제품의 내부 고정 마운트 변화	44
4-9 미세먼지 라이다 시제품의 스캐닝 모터 3D 모델 및 실제 제작 사진	46
4-10 미세먼지 라이다 시제품의 스캐닝 모터와 라이다 광학계 결합도	47
4-11 미세먼지 라이다 시제품의 스캐닝 모터 컨트롤 드라이버	47
4-12 미세먼지 라이다 시제품의 전장부 구성도	48
4-13 미세먼지 라이다 시제품 전장부 3D 구성도 및 실제 구성 사진	49

4-14 미세 먼지 라이다 시제품의 3D 모델링 사진 및 실제 제품 사진	49
4-15 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 소광계수	51
4-16 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 측정 결과_2020년 10월 22일	52
4-17 미세 먼지 라이다 시제품의 스캐닝 방법 및 분포	53
4-18 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 3 차원 공간분포 측정 결과	53
4-19 미세 먼지 측정을 위한 라이다 제어 알고리즘	54
4-20 미세 먼지 측정 라이다 장치 운영 프로그램의 스캐닝 모터 설정 부분	56
4-21 미세 먼지 라이다 운영 프로그램의 디지털타이저 설정 부분	56
4-22 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 질량농도 결과_2020년 10월 23일	57
4-23 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 질량농도 결과_2020년 10월 26일	57
4-24 미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기 오염 관측망의 미세 먼지 측정 결과 비교	58
4-25 미세 먼지 라이다 시제품의 2단계 QC 알고리즘 평가 개념도	58
4-26 미세 먼지 라이다 시제품의 2단계 QC 알고리즘 4+1가지 개념도	59
4-27 미세 먼지 라이다 시제품의 1단계 QC 알고리즘 자체 테스트 실행화면	60
4-28 미세 먼지 라이다 시제품의 2단계 QC 알고리즘 평가 실행 화면	61
5-1 미세 먼지 라이다 시제품의 1064 nm 파장 스펙트럼 데이터	64
5-2 미세 먼지 라이다 시제품의 355 nm 파장 스펙트럼 데이터	64
5-3 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 출력 에너지 평가 결과	64
5-4 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 펄스 폭 측정 결과 (1064 nm)	65
5-5 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 펄스 폭 측정 결과 (355 nm)	65
5-6 미세 먼지 라이다 시제품에 사용된 고전압 전원공급기	66
5-7 미세 먼지 라이다 시제품의 전원보드 설계안	67
5-8 미세 먼지 라이다 시제품에 사용을 위하여 개발된 전원보드	67
5-9 DAQ Board와 전원보드 연결 사진	67
5-10 FastComtec사의 MCS6A 모델의 광 계수기	68
5-11 MCS6A 모델의 광 계수기 테스트 화면	69
5-12 미세 먼지 라이다 시제품에 사용될 MCS8A 모델의 광 계수기	70
5-13 2차년도 시제품의 전장부 구성 사진	70
5-14 소형화를 위한 시제품의 3 차원 도면	70
5-15 외부하우징을 포함한 시제품의 3 차원 도면	71
5-16 미세 먼지 라이다 시스템의 광축 정렬에 의한 미세 먼지 산란 신호의 변화	73
5-17 미세 먼지 라이다 시스템의 미세 먼지 측정 알고리즘	74
5-18 Hot spot 모니터링 기능을 이용한 시간에 따른 미세 먼지 분포 변화 결과	75
5-19 라이다 신호의 광 정렬 상태에 따른 라이다 신호의 변화	76
5-20 라이다 시스템의 광 자동 정렬 알고리즘	76
5-21 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 미세 먼지 표출 프로그램 인터페이스	77
5-22 2차년도에 개발한 미세 먼지 라이다 운영 프로그램의 디지털타이저 설정 부분	78
5-23 2차년도에 개발한 미세 먼지 라이다 운영 프로그램의 스캐닝 모터 설정 부분	78
5-24 최종 미세 먼지 라이다 제어 프로그램 인터페이스	79
5-25 미세 먼지 라이다 시스템의 로그 파일 불러오기 및 저장 기능	80
5-26 레이저 설정 아이콘 및 레이저 입력 변수 설정을 위한 팝업창	81
5-27 광 계수기의 광 판별기 기능	82
5-28 광 계수기에 의한 신호 측정 원리	82
5-29 광 계수기 설정 아이콘 및 광 계수기 입력 변수 설정을 위한 팝업창	83
5-30 스캐닝 모터 설정 아이콘 및 스캐닝 모터 입력 변수 설정을 위한 팝업창	83
5-31 광 정렬을 위한 Actuator 설정 아이콘 및 Actuator 설정 변수 입력을 위한 팝업창	84
5-32 PMT 신호 증폭 량 조절을 위한 고전압 공급 장치 설정 아이콘 및 입력 변수 입력을 위한 팝업창	85
5-33 심플렉스법의 최적화 지점을 찾아가는 방법	87
5-34 2차원 평면상에서 심플렉스법의 좌표 이동 방법	87
5-35 광 자동 정렬 과정을 위한 라이다 신호의 적분 구간 예	88
5-36 미세 먼지 라이다 시제품에 적용된 광 자동 정렬 방법 테스트 결과	88
5-37 FTP 서버를 이용한 미세 먼지 라이다 장치의 광역 측정 망 구성 방안	89
5-38 FTP 서버에 데이터 전송을 위한 프로그램 인터페이스	89
5-39 FTP 서버에 저장되어 있는 라이다 데이터	90
5-40 국가 대기오염 측정망의 미세 먼지 농도 표현 방법(출처. 에이코리아)	91

5-41	미세 먼지 라이다의 미세 먼지 양 및 분포 표출 프로그램 인터페이스	91
5-42	미세 표출 프로그램을 이용한 미세 먼지 양 및 분포 표출 예	92
5-43	대구 시청 별관에서 측정한 미세 먼지 측정 결과 (2021년 10월 27일 11시 20분)	93
5-44	대구 시청 별관에서 측정한 미세 먼지 측정 결과 (2021년 10월 27일 12시 42분)	93
5-45	낮 시간 태양에 의한 배경신호 (2021년 3월 31일)	94
5-46	2021년 3월 31일 09 ~ 19시 기상 실황표	95
5-47	1064 nm 원시신호(Raw data)	95
5-48	355 nm 원시신호(Raw data)	96
5-49	전문가 평가 진행 기관의 KOLAS 공인 시험평가 인정서	97
5-50	전문가 평가를 위한 미세 먼지 라이다 시제품 설치 모습	98
5-51	전문가 평가를 위한 미세 먼지 라이다 시제품 구동 모습	98
5-52	전문가 평가 시험 중 캡처한 미세 먼지 라이다 시제품 인터페이스	99
5-53	미세 먼지 라이다 시제품의 최대 측정 범위 검증 결과 그래프	99
5-54	미세 먼지 라이다 시제품의 거치 측정 분해능 검증 결과	100
5-55	미세 먼지 라이다 시제품의 관측 주기 검증 결과	100
5-56	미세 먼지 라이다 시제품의 최대 스캔 속도 검증 프로그램	101
5-57	미세 먼지 라이다 시제품의 최대 스캔 속도 검증 결과	101
5-58	인증기관에서 발생한 전문가 평가 결과서	102
5-59	대구 시청 별관 101동 옥상 및 주변 풍경	103
5-60	대구 시청 별관 205동 옥상 및 주변 풍경	103
5-61	스캐닝 모터의 설정을 위한 관측 범위 설정	104
5-62	라이다신호 확인 및 광 계수기 설정	104
5-63	라이다 관측 장소의 파노라마 뷰(180°)	105
5-64	대구 시청 별관에서 60° 스캔 범위의 미세 먼지 측정 결과_2021년 10월 21일 새벽	107
5-65	대구 시청 별관에서 60° 스캔 범위의 미세 먼지 측정 결과_2021년 10월 21일 아침	108
5-66	1km 거리 내에 위치하고 있는 신천대로	108
5-67	대구 시청 별관에서 180° 스캔 범위의 미세 먼지 측정결과_2021년 10월 27일	110
5-68	산격동 국가 대기오염 측정소 정보	110
5-69	미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 미세 먼지 데이터(PM 10) 측정 자료 비교 그래프	111
5-70	미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 미세 먼지 데이터(PM 2.5) 측정 자료 비교 그래프	111
5-71	미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 미세 먼지 데이터 비교 결과	112
5-72	전기 안전시험 주요 규격 (출처. 디티앤씨)	114
5-73	전자파 적합성 시험의 주요 규격 (출처. 디티앤씨)	115
5-74	신뢰성 시험 항목 (출처. 디티앤씨)	115
5-75	전기안전인증 진행 순서도	116
5-76	제작 중인 라이다 홍보 브로슈어	118
5-77	(주)솔탑 홈페이지에 소개된 라이다 제품 홍보 사진	118
5-78	2019 방글라데시 원격탐사학회 논문 발표	119
5-79	2020 온라인 방글라데시 기상/기후 학회 논문 발표	119
5-80	YTN 취재 방송 (2021.02.19.)	120
5-81	(주)솔탑 SNS 계정	120
5-82	(주)솔탑 영문 홈페이지	120
5-83	기존 참가 학회 현황	121
5-84	제품 교육 현장	122
5-85	미세 먼지 라이다 시제품의 측정 데이터 분석 알고리즘	124
5-86	미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 측정 자료 분석 프로그램	126
5-87	심사 진행 중인 논문	135
5-88	출원한 특허 심사 중	135

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ 오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 원격 계측장비 개발과 자료 표출 자동화 기반 기술 개발

- **오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 H/W 개발**

- 측정 거리 : 5 km 이상
- 측정 자료 : 미세 먼지 종류 구분(편광소멸도(Depolarization Ratio))
3 차원 미세 먼지 공간 분포, 미세 먼지 질량 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
거리별 미세 먼지 산란 계수
- 거리 분해능 : 7.5 m 이하
- 관측 주기 : 120 초 이내
- 최대 스캔 속도 : $20^\circ / \text{sec}$

- **오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 S/W 개발**

- 거리 보정된 후방산란(Backscatter) 프로파일
- 거리별 미세 먼지 종류 산출(편광소멸도 프로파일)
- 거리별 미세 먼지 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 산출

<기술 목표>

주요성능	단위	개발 목표치			세계최고수준 (보유국)
		1차 년도	2차 년도	3차 년도	
1. 측정범위(거리)	km	< 3	< 5	< 5	< 5 (독일/프랑스)
2. 거리분해능	m	< 37.5	7.5	7.5	7.5 (독일/프랑스)
3. 최대스캔속도	deg. /sec	-	20	20	20 (독일/프랑스)
4. 관측주기	sec	-	120	120	120 (독일/프랑스)
5. 측정 정밀도 (관측기기와의 상관관계)	상관관계	-	0.70 이상	0.85 이상	-

2) 연구개발과제의 연차별 목표

< 1차년도 연구목표 및 내용 >

- 오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측 장비 시작품 개발
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시작품 H/W 구조 분석 및 개념 설계
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 시작품 H/W 설계 및 제작
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시스템 시작품 S/W 신호처리 기술 설계 및 개발
 - 선행연구를 통해 개발된 광자계수기, 광센서 성능 개선
 - 시작품 자체 성능평가
 - (위탁기관)미세 먼지 관측 데이터의 오류 데이터 검출 방법에 대한 연구
 - (위탁기관)미세 먼지 관측 장비의 오류 검출을 위한 품질관리(QC) 알고리즘 개발

< 2차년도 연구목표 및 내용 >

- 현장 적용 가능한 오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측 장비 시제품 개발
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시제품 H/W 설계 및 제작
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시제품 S/W 개발
 - 시제품 구성요건 분석
 - 시제품 자체 성능평가
 - 미세 먼지 종류(PM 10, PM 2.5)를 구별하기 위한 기초 기술 개발
 - (위탁기관)개발된 알고리즘을 실제 관측 데이터에 적용 및 보완
 - (위탁기관)데이터 중앙처리장치의 데이터 품질관리(QC) 알고리즘 개발

< 3차년도 연구목표 및 내용 >

- 오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측 장비 시제품 현장 적용 실험을 통한 최적화 및 내구성 테스트
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시제품 최종 성능 검증
 - 1 개월 이상의 현장 적용 시험 후 현업 관측기기와의 상관도 : 0.85 이상 달성 유무
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시제품 최적화
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 사업화 준비
 - (위탁기관)주변 미세 먼지 관측소의 예측 및 관측 데이터와 연관성 분석

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	오염 배출원 주변 미세먼지 3차원 공 간분포 및 질량농 도 관측 장비 시작 품 개발	라이다 시작품 개발	측정범위 : 5 km이내	측정범위 : 3 km이내	라이다의 최대 관측거리 확인을 통한 성능확인	5 %
			거리분해능 : 7.5 m	거리분해능 : 37.5 m 이하	라이다의 거리분 해능 확인을 통 한 성능확인	5 %
			최대스캔속도 : 20deg/sec	최대스캔속도 : -	공간분포 관측 여부 확인을 통 한 성능확인	0 %
			관측주기 : 120 sec	관측주기 : -	공간분포 관측 여부 확인을 통 한 성능확인	0 %
			측정 정밀도(관 측기기와의 상관 관계): -	측정 정밀도(관 측기기와의 상관 관계): -	라이다로 획득한 데이터의 신뢰도 확인	0 %
2년차 (2020)	현장 적용 가능한 오염 배출원 주변 미세먼지 3차원 공 간분포 및 질량농 도 관측 장비 시제 품 개발	라이다 시제품 개발	측정범위 : 5 km이내	측정범위 : 5 km이내	라이다의 최대 관측거리 확인을 통한 성능확인	5 %
			거리분해능 : 7.5 m	거리분해능 : 7.5 m	라이다의 거리분 해능 확인을 통 한 성능확인	5 %
			최대스캔속도: 20 deg/sec	최대스캔속도: 20 deg/sec	공간분포 관측 여부 확인을 통 한 성능확인	5 %
			관측주기 : 120 sec	관측주기 : 120 sec	공간분포 관측 여부 확인을 통 한 성능확인	5 %
			측정 정밀도 (관측기기와의 상관관계): -	측정 정밀도 (관측기기와의 상관관계): 0.70 이상	라이다로 획득한 데이터의 신뢰도 확인	20 %
3년차 (2021)	오염 배출원 주변 미세먼지 3차원 공 간분포 및 질량농 도 관측 장비 시제 품 현장 적용 실험 을 통한 최적화 및 내구성 테스트	시제품 현장 적용 및 최적화	측정범위 : 5 km이내	측정범위 : 5 km이내	라이다의 최대 관측거리 확인을 통한 성능확인	5 %
			거리분해능 : 7.5 m	거리분해능 : 7.5 m	라이다의 거리분 해능 확인을 통 한 성능확인	5 %
			최대스캔속도 : 20 deg/sec	최대스캔속도 : 20 deg/sec	공간분포 관측 여부 확인을 통 한 성능확인	5 %
			관측주기 : 120 sec	관측주기 : 120 sec	공간분포 관측 여부 확인을 통 한 성능확인	5 %
			측정 정밀도 (관측기기와의 상관관계): -	측정 정밀도 (관측기기와의 상관관계): 0.85 이상	라이다로 획득한 데이터의 신뢰도 확인	30 %

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 연구개발과제의 개요

○ 재난재해에 준(準)하는 최악의 미세먼지로 인한 대기 질 악화로 몸살 앓는 한반도

- 다양한 원인에 의해 발생하는 미세먼지는 직경의 크기에 따라서 미세먼지와 초미세 먼지로 구분되며, 주로 세기관지에 염증반응을 일으켜 천식, 만성기관지염, 기도폐쇄 또는 악화 등 다양한 호흡기 질병 원인이 된다.
- 2013년 세계보건기구 산하의 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서 미세 먼지를 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질(Group 1)로 지정하였다.
- 특히 국내의 경우 미세먼지(PM 10) 오염도는 2006년 이후 개선 정체 경향을 보이며, 최근 봄·겨울철의 PM 2.5 평균농도가 지속적으로 상승 및 주의보 발령 횟수도 증가하고 있다. (관계부처 합동, 2017, 미세먼지 관리 종합대책)

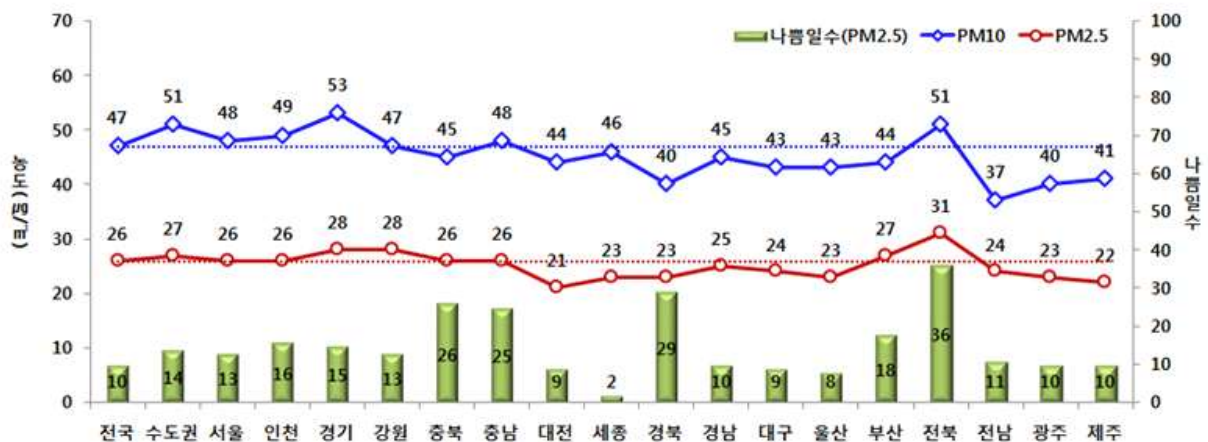


그림 2-1. 2017 지역별 미세먼지 오염 현황

○ 건설·교통 사업장이 국내 미세먼지 발생원인 1순위 배출원으로 분석

- (국내배출) 대도시는 경유차가, 전국적으로는 사업장이 1순위 배출원
 - (수도권) 경유차(23 %) > 건설기계·선박 등(16 %) > **사업장(14 %)**
 - (전국) **사업장(38 %)** > 건설기계·선박 등(16 %) > 발전소(15 %)
- (국외영향) 평상시 중국, 북한 등을 포함한 국외영향은 연평균 30 ~ 50 %, 고농도시(15 ~ 16년 연간, 18 ~ 29일)에는 60 ~ 80 %로 추정 (미세 먼지 관리 종합대책(2018) 주요내용과 방향, 2018, KEI)

○ 건설·교통 부문에 지속적·과학적인 미세먼지 측정을 위한 저비용·고효율의 미세먼지 측정기술 적용 필요성 증대

- 국립환경과학원에서 학교나 건설현장 설치된 미세먼지 간이측정기 정확도 검증결과 48 %에서부터 86 % 까지 다양하며, 장비 설치 및 제작을 위한 비용이 고가로 **저효율·고비용장비 사용으로 인한 예산낭비 심각하다.** (2018.04.12. 중앙일보)
- 휴대용 미세먼지 측정기는 신뢰도가 낮기 때문에 절대적인 수치를 믿기보다는 장소별 차이를 비교해야 하

므로 **광역적이고 시공간적 분석이 가능한 신뢰도 높은 미세 먼지 측정기술 필요하다.** (동 보도)

- 또한 정책 의사결정을 위한 과학적이고 체계적인 실시간 보조자료 제공을 통해 **건설 · 교통부문 종사자뿐만 아니라 대국민 삶의 질 개선을 위한 미세(비산) 먼지 측정기술 필요하다.**
- 미세 먼지 조사 · 단속원이 미세 먼지 발생원에 직접 접촉하여 미세 먼지 농도를 측정하는 종래의 재래식 방식을 벗어나 **실시간으로 발생원을 감시 · 관리할 수 있는 비접촉식 고효율 · 고신뢰성이 보장된 기술 개발 요구가 발생하였다.**



그림 2-2. 발생원별 PM 2.5 배출기여도(수도권(좌), 전국(우))

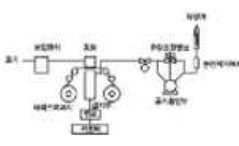
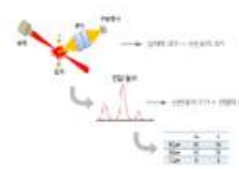
가. 국내 기술 수준 및 시장 현황

○ 기술 현황

- 최근 초미세 먼지(PM 2.5) 오염은 사회적 이슈로 크게 부각되면서 오염 현상과 원인, 대책 등 다양한 측면에서 연구가 진행되고 있다. 중국 발생 미세 먼지의 한반도 영향과 관련하여 한중간 국제협력이 진행되고 있으며, 국내 미세 먼지 발생원인 규명에도 연구가 진행되고 있다.
- 국내에서는 환경부와 기상청 공동으로 한반도에서의 에어로졸(황사, 미세 먼지 등) 발생과 이동을 실시간으로 관측하기 위해 KALION (Korea Aerosol LIDAR Observation Network) 네트워크를 운영하고 있지만, 스캐닝 기능이 없어 오염 배출원 주변의 입체적 관측이 어려운 단점이 있다.
- 현재 현업에서 미세 먼지를 측정하는 방법으로는 다음과 같이 3가지 시험 방법이 있다.
 - 중량농도법: 미세 먼지를 포집해 저울로 무게를 측정하여 온 · 습도 보정 후 무게로만 미세 먼지 농도를 산출.
 - 베타선법: 베타선을 조사하여 베타선이 필터 위에 채워진 먼지를 통과할 때 흡수되는 베타선의 상대적인 세기를 측정하여 포집된 미세 먼지의 질량농도를 측정.
 - 광산란법: 대기 중에 부유하고 있는 입자상 물질(PM)에 빛을 조사하면 입자에 의해 빛이 산란하게 되는데 산란광의 양은 질량농도에 비례하게 된다는 원리를 이용.
 - 중량농도법과 베타선법은 대기오염시험기준에 따르는 미세 먼지 표준 측정 방법이다.
- 국가대기오염측정망의 현재 해상도는 전국 기준 10 km의 해상도로 발생지점의 파악, 지점 간 이동 및 확산 등 과학적 연구를 위한 정밀한 분석 자료를 산출하지 못하고 있다.

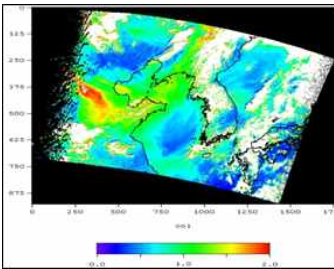
- 지속적 · 과학적인 미세 먼지 측정을 위한 저비용 · 고효율의 미세 먼지 측정기술의 필요성이 증대되고 있다.

표 2-1 현업에서 사용하는 미세 먼지 측정 방법

구분	중량농도법	베타선법	광산란법
측정 방법	24시간 동안 먼지를 포집 측정 전/후 여과지 무게를 비교해 순수한 먼지의 무게 측정	여과지에서 먼지를 채취한 뒤 베타선을 조사하여 베타선이 먼지를 투과할 때 흡수/소멸 되는 베타선 세기 차를 이용해 농도 측정	먼지에 빛을 쏘면 빛이 산란하는 성질을 이용. 산란광의 양을 측정하고, 이를 통해 먼지 농도 역산
측정 항목	PM 10, PM 2.5 크기에 따른 분리 장치 및 여과지에 따라 PM 10, PM 2.5 선택 측정	PM 10, PM 2.5 분리 장치 따라 PM 10, PM 2.5 선택 측정	PM 10, PM 2.5 동시 측정
장점	전 세계 통용 방식, 가장 정확한 수치 제공	실시간 측정 가능	측정기구 저렴하며 휴대용이
단점	측정기구가 고가, 6시간 이상 측정해야 신뢰도가 확보돼 실시간 측정이 어려움	고가이며 측정기구 부피가 크고, 고정형	온/습도 등 환경에 따라 오차가 큼
구성도			

- 미세 먼지를 측정하는 방법으로는 다음과 같은 기술이 있다.

표 2-2 미세 먼지 측정 방법

구분	β -ray	위성	드론
관측 방법	대기 중 공기 흡입	다중 분광 센서를 이용한 AOD(Aerosol Optical Depth) 측정	관측센서 장착
장점	관측 정확도 우수	광역적 관측 가능, 장거리 수송 감시	광역적 관측 가능
단점	Point 방식으로 광역적/입체적 관측 시 비용/공간적 제약 발생 및 실시간 관측 불가	낮은 공간분해능(13 km x 24 km), 지상과 가까운 대기층 관측 시 오차범위가 크고, 실시간 관측 불가	날씨와 관측센서의 종량에 따른 배터리 상태 변화로 실시간 관측 불가
측정 장치			

- 오염 배출원 주변 **미세 먼지의 3 차원 공간 분포 관측이 가능한 라이다**를 이용한 하나의 미세 먼지 모니터링 시스템으로 도시 전역을 실시간 연속적으로 모니터링 가능하다.
- 국내 라이다 기술은 1990년대부터 한국원자력연구원을 중심으로 라이다(LIDAR: Light Detection and Ranging)라 불리는 레이저 원격 탐지 기술이 개발되고 있으며, 2000년대에 광주과학기술원과 기상청에서 라이다 시스템이 도입되어 고출력 고비용 라이다 시스템을 이용한 에어로졸 및 구름의 각종 파라미터를 측정하는 기술들이 국내 여러 기관에서 연구가 진행되고 있다.
- 국내의 라이다 기술은 이미 여러 가지 상용 라이다를 개발하여 현장에 적용한 라이다텍과 십 수 년간 여러 가지 새로운 라이다를 연구하고 있는 한국원자력연구원의 양자광학부에서 주도하고 있으며, 최근에는 (주)솔탑, 한발대, 광주과학기술원 등에서 기상관측, 구름관측 및 풍향/풍속을 라이다 방식을 이용하여 측정 및 분석할 수 있는 새로운 알고리즘 등을 연구하고 있어 앞으로의 발전 가능성은 더욱 밝다고 할 수 있다.

표 2-3 국내 라이다 장치의 도입 및 개발 현황

수행 기관	연구개발 및 도입 내용	현황
한국원자력연구원	- 기상인자(에어로졸, 온도, 습도) 측정용 라이다 장치개발연구. - 원격 방사성물질기체 측정 기술 개발. - 원격 H₂ 측정 라만 라이다 기술	- 기상용 라이다 장치개발 - 방사성물질인 iodine 측정용 차분흡수 라이다 기술 개발 - 수소 측정 라만 라이다 기술개발
기상청	- 일본 NIES, 라이다텍으로부터 Mie 및 편광 라이다 도입 후 상시 측정, 성층권 오존 라이다 도입 측정 - 해외 라이다식 운고계 도입	- 황사, 오존 측정에 사용 중(데이터 축적 중) - 현재 100 여대 라이다식 운고계와 10 여대의 에어로졸 라이다 운용 중
서울대학교	- 기기도입(미국산 : SESI) 및 일본 NIES Mie, Raman 라이다 도입 운영 중	- 황사, 경계고도 모니터링
광주과학기술원	- 독일에서 다파장 라이다 시스템 도입 및 장비 개선 사용 - 에어로졸 연구 수행	- 다파장 Mie, Raman 신호를 이용한 에어로졸 및 기상관측 기술 및 장치 개발연구 수행
이엔쓰리환경라이다텍	- 편광라이다, 성층권 오존 라이다를 개발하여 기상청에 납품	- 현업에 설치 운용 중
(주)솔탑	- 라이다식 운고계 개발 - 바람장 측정용 도플러 라이다 기술이전개발(한발대) - 구름 및 에어로졸 관측용 라만 라이다 개발	- 펄스 라이다 운고계를 개발 - 현재 한발대와 같이 도플러 라이다 장치를 개발 중 - 미세 먼지 및 구름의 광학적 특성 관측 라이다 개발 완료
한발대학교	- 회전/진동 라만 라이다 개발 - 온실가스 연직총량 측정기술 개발 - 에어로졸 물리변수 추출 및 응용 기술 개발	- 회전/진동 라만 라이다를 이용한 온도 및 대기 중 수증기 측정 - 태양광 산란 신호를 통한 온실가스 총량 기술 개발 수행 - 라이다 측정을 통한 에어로졸 물리변수 측정 알고리즘 개발 수행

○ 시장 현황

- 국내 대기환경 센서 관련 시장은 세계시장의 7 % 정도로 예상하고 있으며, 2016년 1,360 억원에서 2021년 1,734 억원 시장으로 성장할 것으로 전망된다.
- 국내의 미세먼지 센서 시장은 대기환경 센서 시장의 10 ~ 20 % 정도로 예측되고 있으며, 가스 센서에 편중된 대기환경 센서 시장에서 미세먼지 센서 시장 확대가 예상된다.

표 2-4 대기 환경 센서 관련 국내 시장규모 및 전망

구분	'16	'17	'18	'19	'20	'21	단위
국내시장	1,360	1,413	1,488	1,584	1,659	1,734	억원

(출처 : BCC, 전자신문, 2016년 세계시장에서 국내시장 규모를 세계시장의 7 %로 계상하여 추정(환율 1070.6원 적용))

- 국내 미세먼지 측정 시스템 기술에서 분석 및 모니터링 기술은 국내의 IT 기술력을 바탕으로 경쟁력을 갖고 있으나 감지 기술 분야에서 선진국 대비 기술 수준이 낮은 것으로 추정된다.
- 국내의 감지센서 기술 분야는 선진국 대비 80 % 수준이며, 첨단센서 기반기술을 적용한 기술 경쟁력이 높은 혁신 제품 개발이 필요하다.
- 기상 분야에서는 「기상산업진흥법」 제정('09) 이후, 날씨경영 우수기업 제도 도입, 기업경영 및 해외 수출 지원 등을 통해 전체적인 시장 규모가 증가되고 있다.

표 2-5 기상산업 시장 주요 현황

구분 \ 연도	2012년	2013년	2014년	2015년
기상산업 시장규모	3,216 억원	3,372 억원	3,693 억원	3,719 억원
기상기업 매출액	1,364 억원	1,388 억원	1,349 억원	1,382 억원
기상기업 수출액	145 억원	56 억원	65 억원	43 억원
기상기업 수	165 개	200 개	244 개	309 개

※기상청, 제3차 기상업무발전 기본계획[2017~2021], 2016.

- 다만, 기상장비 수입·판매, 콘텐츠 단순 재가공 위주의 초기 단계이다.
- 기상사업 등록한 대부분의 기상기업이 장비 분야에 편중('15년 88.3 %)되어 서비스 및 소프트웨어 등을 포함한 사업 분야의 다각화 필요하다.
- 일부 기상장비는 국산화하여 수출중이나, 전체적으로 낮은 국산화율('15년 42.8 %)로 주로 해외장비의 수입·설치 대행만을 하고 있다.
- 국내 에어로졸 라이더의 경우 일본 NIES 사, 독일 IFT 사 및 국내 이엔쓰리환경에서 개발한 라이더를 현업에 사용하고 있으나, 스캔 기능이 없어 연직 관측에 활용되고 있는 실정이다.

○ 경쟁기관 현황

- 현재 국내 산업체에서 라이다 관련 기술을 보유하고 있는 업체는 이엔쓰리환경(현 정상라이다)이 유일하며, 이 업체의 기술도 한국원자력연구원에서 이전 받은 기술이다. 실제로 기상청 등의 수요처에서 주문이 있을 때만 제작했고, 3 차원 미세 먼지 원격 관측용 라이다 개발 사례는 없다.

○ 지식재산권 현황

- 본 기술(오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 원격 계측장비)과 관련된 국내 상용화 제품은 아직 없으며, 국내에서는 라이다를 이용하여 구름의 운고를 측정하는 특허와 연직 에어로졸 특성 분석 관측 특허들이 있다.

○ 표준화 현황

- 제품에 대한 표준화 방안으로 외부 케이스의 방수 방진평가를 위해 IP 65, 대기 중 조사되는 레이저 안정성 평가를 위해 IEC 60825-1, 인체에 미치는 전자기파의 적합성 평가를 위해 EN 61326, 공급되는 전기의 안정성 평가를 위해 EN 60950 등이 있으며, 국내에는 라이다 관련 표준화가 이루어지고 있지 않은 상태이다.

나. 국외 기술 수준 및 시장 현황

○ 기술 현황

- 해외에서 에어로졸 라이다의 경우 미국 NASA Langley Research Center (NASA/LaRC)의 Lidar Applications Group, 독일 라이프찌히의 Leibniz Institute for Tropospheric Research (IFT), 일본 국립환경연구원(NIES)이 선도하고 있다.
- 독일의 IFT와 일본의 NIES는 수십 년간 축적된 라이다 시스템 제작 기술과 분석 및 시스템 구동 알고리즘 노하우를 바탕으로 상업용 라이다 시스템 제작에도 참여하여 과학적 만족도와 상업적 완성도를 충족시키는 시스템을 개발하고 있다.
- 그리스 Raymetrics 사에서 대기 에어로졸 관측을 위해 편광 라이다를 개발하여 판매하고 있다.



그림 2-3. 그리스 Raymetrics 사의 3D 스캔 라이다

○ 시장 현황

- 대기환경 센서 관련 세계시장은 2016년 18.1 억 달러에서 2021년 23.0 억 달러 규모로 증가할 것으로 전망된다.
- 사물인터넷 기술 발달로 다양한 환경 센서 수요 증대와 함께 미세먼지 센서 시장이 높은 비율로 성장할 것으로 전망된다.

표 2-6 대기환경 센서 관련 세계 시장규모 및 전망

구분	'16	'17	'18	'19	'20	'21	단위
세계시장	1,810	1,890	1,980	2,110	2,200	2,300	억원

(출처:BCC, 전자신문, 2016년 추정)

- 에어로졸 라이다 시스템에 대한 연구는 독일 IFT, 일본 NIES, 그리스 Raymetrics가 대표적인 선도 기업으로, 3D Scan LIDAR는 싱가포르(국립환경국), 칠레(칠레 기상청), 프랑스(프랑스 기상청), 독일 (SESAR 프로젝트), 그리스 (Eleftherias Venizelos 공항), 아제르바이잔(Heydar 국제 공항)을 포함하는 많은 국가에서 미세먼지 관측, 기상/항공 관측용으로 활발히 사용되어 있다.

○ 지식재산권 현황

- 선도기술 보유국은 83.3 %가 유럽(핀란드, 독일), 미국이 16.7 %임. 선도기술 보유기업은 핀란드의 VAISALA사, 프랑스 Leosphere사, 독일의 JENOPTIK사 등이 있다.

○ 표준화 현황

- 국제표준화기구(ISO : International Organization for Standardization) 기구에서 라이다에 대한 표준화를 진행하고 있다.

2) 미세먼지 라이다 개발 개요

미세 먼지 측정을 위한 라이다 장치는 대기 공간상에 조사된 레이저 빔이 미세먼지에 의하여 산란된 빛의 파장, 세기 및 레이저 발진 시간과 미세먼지에 의하여 산란된 빛의 도착 시간을 측정하여 미세먼지의 크기, 양 및 레이저 발진 선상의 위치를 측정하는 장치를 말한다. 본 연구는 미세먼지를 측정할 수 있는 라이다 장치와 2축 스캐닝 모터를 결합하여 대기 공간상의 미세먼지의 크기, 양 및 분포를 측정할 수 있는 미세먼지 측정용 라이다 시스템의 개발에 관한 것이다. 미세먼지 측정용 라이다 시스템을 개발하기 위하여 1 ~ 2차년도에는 미세먼지 측정용 라이다 시작품과 시제품을 설계 및 개발하였다. 3차년도에는 미세먼지 라이다 시스템의 소형화와 모듈화를 통하여 미세먼지 라이다 시제품을 설계 개발하였으며, 개발된 미세먼지 라이다 시제품과 시제품에 대한 미세먼지 검출 성능을 연구를 진행하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

2장 3절에서는 1차년에 개발한 미세먼지 라이다 시제품의 설계 · 개발 내용에 대하여 서술하였다.

2장 4절에서는 2차년에 개발한 미세먼지 라이다 시제품에 대한 것으로서, 미세먼지 라이다 시스템의 설계 및 제작, 개발된 시작품을 이용한 검증 실험 및 결과에 대하여 분석한 내용에 관한 것이다.

2장 5절에서는 3차년에 개발한 미세먼지 라이다 시제품에 대한 것으로서, 미세먼지 라이다 시스템의 설계 및 제작, 개발된 시작품을 이용한 검증 실험 및 결과에 대하여 분석한 내용에 관한 것이다.

3) 라이다 장치를 이용한 미세 먼지 측정 장치 시제품 개발

가. 미세 먼지 라이다 시작품의 장치 구성 요소

미세 먼지의 라이다 장치에는 크게 빛의 산란 현상을 발생하기 위한 레이저 송신 광학계, 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 계측하는 레이저 수신 광학계와 대기 공간상에 미세 먼지의 산란 신호를 계측 및 장치를 제어하기 위한 장치 제어부로 나뉜다. 첫 번째, 레이저 송신 광학계는 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 발생시키기 위한 레이저와 발진된 레이저 빔을 멀리까지 송신하기 위한 광학 장치들로 구성되며, 레이저 수신 광학계는 레이저 빔의 조사에 따른 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 수신하는 망원경과 각 파장별 센서로 구성된다. 마지막으로 광학 신호 계측 및 라이다 시스템을 제어하기 위한 장치 제어부는 아날로그 신호인 광학 신호를 디지털 신호로 변환하는 ADC(Analog to Digital Converter) 및 3 차원 공간상에 레이저 빔을 송신하기 위한 2축 스캐닝 모터를 제어하기 위한 장치 제어부로 나뉜다.

나. 레이저 송신 광학계의 특성

레이저 발진기에서 발진된 레이저 빔의 경우, 일정한 레이저 빔 발산각(Beam divergence)을 갖고 있으며, 레이저의 발진 거리가 증가함에 따라 레이저 빔의 크기가 점차 증가하게 된다. 빛의 일반적인 특성상, 빛의 발진 거리의 제곱에 반비례하여 단위 면적당 레이저 빔의 세기가 감소하게 된다. 또한 레이저는 레이저 빔의 발산각에 의하여 발진 거리가 증가함에 따라 레이저 빔의 크기가 증가하게 되며, 레이저 빔의 반지름에 제곱에 반비례하여 단위 면적당 레이저 빔의 세기가 감소하게 된다. 따라서 레이저 빔을 멀리까지 송신하여 미세 먼지에 의한 빛의 산란 현상을 계측하기 위해선, 레이저 빔의 세기를 증가시키고, 레이저 빔의 발산각을 줄이는 과정일 필요하다. 그러므로 라이다 장치에서 레이저 발진기에 발진한 빔을 바로 사용하는 것이 아니라 빔 확대기(Beam expander)를 사용하여 레이저 빔의 발산각을 줄여 사용한다.

레이저 빔 확대기를 거친 레이저 빔은 대기 중에 조사되어 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 계측하게 된다. 이때, 레이저의 조사 방법에 의하여 동축 (On - Axis)와 이축(Off - Axis) 라이다 장치로 구분되게 된다. 동축 라이다 장치는 광학 수신기(Telescope)의 앞쪽에 레이저 송신 거울을 설치하여 광학 수신기의 광축과 레이저 송신 축을 일치시킨 형태로서, 광학 수신기의 FOV(Field of View) 영역과 레이저 빔의 경로를 일치시켜 무한대 영역까지 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 획득할 수 있는 장점이 있다. 그러나 동축 라이다 시스템의 경우, 광학 수신기의 앞쪽에 설치된 레이저 송신 거울에 의하여 가리는 영역이 발생하여 앞쪽 일부분에 발생하는 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 계측할 수 없으며, 일부 영역이 제한되어 있어 레이저 송신 거울에 의하여 가리는 영역의 크기에 의하여 빛의 산란 신호를 계측할 수 없는 영역의 크기와 빛의 산란 신호를 감소시키는 영향이 결정된다. 이축 라이다 시스템의 경우, 레이저 빔의 송신 축과 광학 수신기의 광축을 분리한 형태로서, 광학 수신기를 가리는 영역이 없어 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호가 감소되지 않는 장점을 갖는다. 그러나 물리적으로 레이저 빔의 송신 축과 광학 수신기의 광축이 분리되어 두 영역이 겹치는 영역 (Overlap area)가 적어 동축 라이다 장치에 비하여 적어 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 계측하는 최대 측정 거리 영역이 줄어드는 단점을 갖는다.

다. 레이저 수신 광학계의 특성.

레이저 수신 광학계는 레이저 빔이 대기 중의 미세 먼지 입자에 의하여 후방 산란(Back scattering) 현상에 의한 광학 신호를 수집하는 장치를 말한다. 레이저 수신 광학계는 빛의 산란 신호를 계측하는 망원경(Telescope)과 망원경에 의하여 수집된 광학 신호를 수집 기록하기 위한 센서로 구성된다. 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 이용하여 미세 먼지의 크기, 양 및 거리 정보를 획득하기 위해선, 355 nm 와 1064 nm 레이저를 대기 중에 송신하여야 하며, 이를 통하여 미세 먼지에 의한 빛의 산란 현상이 발생하여 광학 수신기를 이용하여 계측하게 되면, 파장 별로 빛의 산란 신호를 구분하여야 한다. 따라서 광학 수신기에 의하여 수집된 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 광 분할기(Beam splitter) 355와 1064 nm 파장으로 분할하고, 각각의 경로에 수집된 신호에 포함된 광학적 노이즈 성분을 제거하여 신호 대 잡음 비(Signal to noise)를 높이기 위한 협 대역 필터(Narrow Band pass filter)를 추가하기도 한다.

미세 먼지 라이다 장치의 특성 상 미세 먼지의 크기 정보(PM 10, PM 2.5)를 구분하기 위하여 355 nm 와 1064 nm 파장의 빛의 산란 신호를 이용한다. 그러나 355 nm 와 1064 nm 파장은 서로 다른 특성을

갖고 있어 한 종류의 센서를 이용하여 계측하기 어려운 특징을 갖고 있다. 따라서 광 분할기에 의하여 분리된 355 nm 와 1064 nm 파장의 빛의 산란 신호를 계측하기 위한 센서로서, 각각 PMT(Photo multiplier tube)와 APD(Avalanche Photo Diode)를 사용한다.

라. 장치 제어부

미세 먼지 라이다 시스템의 장치 제어부는 미세 먼지 라이다 구성하는 모든 장치의 제어 및 광학 수신기를 통하여 획득한 데이터의 수집 및 기록을 장치를 말한다. 미세 먼지 라이다 시스템을 구성하는 장치는 크게 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 발생시키기 위한 레이저 발진 장치, 광학 수신기를 통하여 수집된 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 수집 기록하는 하는 장치 및 대기 중의 미세 먼지 분포를 측정하기 위하여 레이저 빔의 조사 위치를 변경하기 위한 스캐닝 장치로 구성된다. 일반적으로 라이다 장치는 빛의 산란 현상을 이용하여 측정 대상 체의 종류, 양 및 위치 정보를 수집한다. 따라서 펄스 형태의 레이저 빔을 이용하여 빛의 산란 현상을 계측하며, 레이저 발진 시간과 빛의 산란 신호의 도착 시간 간의 차이를 이용하여 측정 대상 체까지의 거리를 계산한다. 그러므로 레이저 발진기와 광학 수신기에 의하여 수집된 빛의 산란 신호를 기록하는 장치간의 동기화를 통하여 레이저 발진 시간과 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호의 도착시간 및 산란 신호의 파장 별 세기를 통하여 미세 먼지의 크기 및 양을 계산한다. 라이다 장치만을 이용하여 미세 먼지를 측정할 경우, 레이저 발진 선상에서 미세 먼지에 의하여 산란된 빛의 정보만을 이용하기 때문에 미세 먼지의 크기, 양 및 위치 정보만을 획득할 수 있다. 그러므로 공간상의 미세 먼지의 크기, 양 및 분포를 측정하기 위해선, Pan/Tilt 가 가능한 2축 스캐닝 모터와 미세 먼지 라이다 장치를 결합이 필수적으로 요구된다.

마. 미세 먼지 라이다 시스템 최종 개발 목표

본 연구의 목표는 “오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 원격 계측 장비 개발과 자료 표출 자동화 기반 기술 개발”을 최종 목표로 설정하였으며, 세부 내용은 다음과 같다.

- 오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 H/W 개발

- 측정 거리 : 5 Km 이상
- 측정 자료 : 미세 먼지 종류 구분, 3 차원 미세 먼지 공간 분포, 미세 먼지의 질량 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- 거리 분해능 : 7.5 m 이하
- 관측 주기 : 120 초 이내
- 최대 스캔 속도 : 20 °/sec

- 오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측용 S/W 개발

- 거리 보정된 후방산란(Back scattering) 프로파일
- 거리별 미세 먼지 종류 산출
- 거리별 미세 먼지 질량농도 산출

3. 1차년도 과제 수행 과정 및 수행 내용

1) 1차년도 과제 수행 목표

1차년도에는 대기 공간상의 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량 농도를 관측하기 위한 라이다 방식의 관측 장비를 개발하기 위한 개념 설계 및 시작품을 제작하는 것을 목표로 설정하였다. 세부 개발 내용 및 기술 개발 목표는 다음과 같다.

- 오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측 장비 시작품 개발
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시작품 H/W 구조 분석 및 개념 설계
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시작품 H/W 설계 및 제작
 - 선행 연구를 통해 개발된 광자계수기, 광센서 성능 개선
 - 시작품 자체 성능 평가
 - (위탁 기관) 미세 먼지 관측 데이터의 오류 데이터 검출 방법에 대한 연구
 - (위탁 기관) 미세 먼지 관측 장비 오류 검출을 위한 품질관리(QC) 알고리즘 개발
- 기술 개발 목표_1차년도
 - 측정 거리 (Km) : 3 Km 이내
 - 거리 분해능 (m) : 37.5 m

2) 레이저 송신 광학계의 기초 설계 및 구성

- 라이다 시스템의 장치 구성은 크게 레이저 발진기, 송신 광학계, 수신 광학계로 나눌 수 있으며, 라이다 시스템의 설계 시 이들 요소들의 사양이 라이다 시스템의 성능에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보면 다음과 같다.
 - 레이저 발진기 : 라이다 장치는 라이다 장치로부터 떨어진 물체나 대기 공간상의 미세 먼지와 같은 에어로졸 사이의 거리를 TOF(Time-Of-Flight) 방식으로 측정하기 때문에 레이저의 펄스폭, 수신 광학계의 시야각에 영향을 주는 레이저 빔의 발산각은 중요한 요소이다.
 - 레이저 펄스폭: 레이저 빔의 펄스폭은 공간 분해능과 밀접한 관계가 있는 요소로 펄스폭이 수 ns(10 ns 이하)인 레이저를 사용 할 경우 라이다 장치의 거리 분해능은 1.5 m 이하수준으로 운영이 가능하다.
 - 레이저 발산각 : 레이저 빛이 대기 중으로 조사되면 대기의 온도나 굴절률의 변화 때문에 자체적으로 빔의 발산각이 생기고, 수신 광학계의 FOV(Field Of View)와 겹치는 정도를 나타내는 중첩함수(Overlap Function)에 영향을 미친다.
 - 빔 확대기: 빛은 발진 거리에 따라 감쇄하는 특성을 갖고 있다. 따라서 레이저 광원의 발산각을 줄여 장거리까지 빛이 잘 도달할 수 있도록 하는 장치이다. 라이다 장치는 광학 수신기의 FOV 영역 내에서 발생하는 빛의 산란 현상을 계측하는 장치로서, 레이저의 퍼짐 정도를 나타내는 빔의 발산각을 줄임으로서, 광학 수신기의 FOV 영역을 줄일 수 있고, FOV 영역이 축소됨에 따라 외부 환경적인 잡음의 세기를 줄일 수 있어 빛의 산란 신호의 신호 대 잡음 비(Signal to Noise Ratio)를 높일 수 있어 매우 중요한 요소 중 하나이다.
- 레이저 송신 광학계는 전체 시스템의 안정도와 효율에 직접적으로 영향을 미치는 요소로 레이저 광원이 측정 대상에 원활하게 조사가 되고, 조사거리가 멀어질수록 일정한 각도로 퍼지는 빔을 줄여야 한다.
- 이를 발산각이라 하는데 발산각이 크면 레이저의 단위 면적당 세기가 줄어 관측을 하는데 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호가 감소하여 측정에 어려움이 발생하고, 수신 광학계를 FOV 영역에 영향을 미쳐 수

신 광학계의 직경에 커져야 되는 단점을 갖고 있다.

- 본 시작품은 빔 확장기를 이용하여 레이저 광원의 발산각을 줄이고 빔 확장기를 통과한 레이저는 틸트 거울을 이용하여 측정 대상에 원활하게 조사할 수 있도록 아래의 그림과 같이 송신 광학계를 구성하였다.

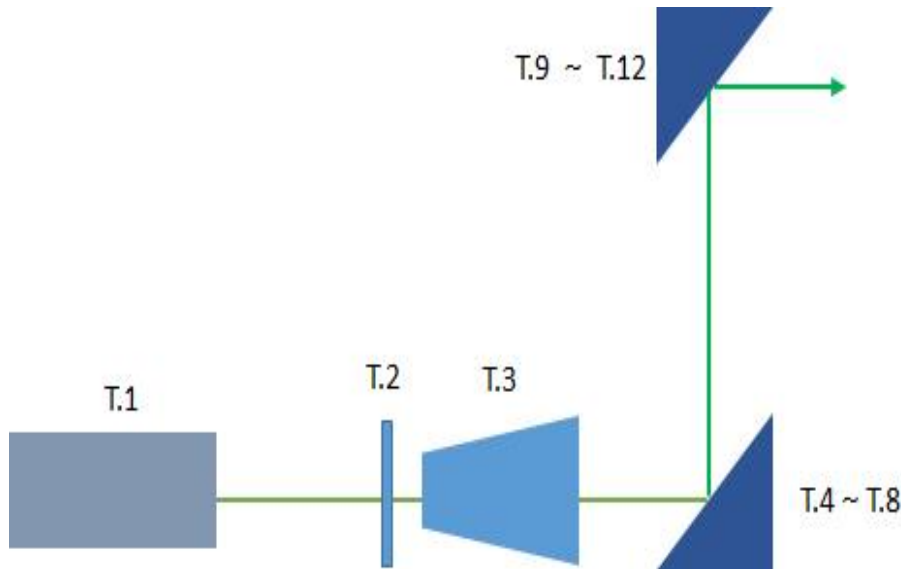


그림 3-1. 미세 먼지 라이다 장치의 레이저 송신 광학계 구성도

- 그림 3-1 미세 먼지 라이다 장치의 레이저 송신 광학계의 구성도에서 T.1은 레이저 발진기, T.2는 특정 파장의 빛을 통과시키기 위한 대역 통과 필터(Band pass filter), T.3은 레이저 빔 확대기, T.4 ~ T.12는 레이저 빔의 경로를 변경하기 위한 레이저 송신 거울 및 고정 마운트를 나타낸다.
- 레이저 발산각은 레이저 광원이 빔 확대기를 통과 후에 빔의 크기가 너무 크게 되면 빔 확대기의 크기가 커지고 그에 따른 광학부품들의 크기도 커지기 때문에 이를 고려하여야 한다. 또한, 관측 시야(망원경의 FOV)에 영향을 주기 때문에 이를 고려하여 레이저 광원을 10배로 확대 가능한 빔 확대기로 설계 진행 하였으며 레이저 빔 확대기를 거치 레이저 빔의 최종 발산각은 다음과 같다.

- 레이저 광원 : 발산각(divergence 2θ) = 1.5 mrad, 빔 크기 $D = 3 \text{ mm}$
- 송신 빔 확대기 : 빔 확대 배율 10 X, 송신 레이저빔 발산각 = 0.15 mrad

표 3-1 레이저 빔 확대기에 따른 레이저 발산각 계산 결과

Nd:YAG laser		
Beam diameter : 3 mm, Beam divergence : 1.5 mard @ 532 nm		
Magnification	Beam diameter	Beam divergence
Beam expander X 10	30 mm	0.15 mrad @ 532
Beam expander X 5	15 mm	0.25 mrad @ 532
Conclusion : Beam expander use a magnification of X 10		

3) 레이저 수신 광학계의 기초 설계 및 구성

- 수신 광학계는 대기 중으로 조사 된 레이저 빔이 대기 중의 입자에 의하여 산란된 신호를 효율적으로 수집하여 데이터 획득이 가능하도록 구성하였다.
- 레이저 빔의 산란된 신호를 수집하기 위한 망원경은 형태에 따라 굴절형 망원경과 반사형 망원경으로 구분된다. 굴절형 망원경은 렌즈의 조합을 통하여 선명한 상을 잡는데 유리하지만 경통의 길이가 길어지는 단점을 갖고 있다. 반대로 반사형 망원경은 반사판을 중간에 삽입하여 경통의 길이가 짧아지는 장점

을 갖고 있으나, 반사판의 영향으로 일부 영역을 가리는 단점을 갖고 있다.

- 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호는 레이저 빔의 세기와 수신 광학계의 직경에 비례하며, 빛의 발진 거리의 제곱에 반비례하는 특성을 갖고 있다.
 - 따라서 미세 먼지에 의한 레이저 빔의 산란 신호의 세기를 높이기 위하여 광학 수신기 직경이 큰 망원경을 사용하게 되면, 망원경의 초점 길이가 길어져 망원경의 경통 길이가 길어진다. 따라서 망원경의 경통 길이를 줄여 라이다 장치의 크기를 줄이기 위하여, 반사형 망원경의 일종인 Cassegrain 방식의 망원경을 이용하여 수집이 가능하도록 선정하였다.
 - 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호는 망원경의 시야각(FOV)영역 내에서만 계측이 가능하다. 따라서 레이저 빔의 발산각보다 광학 수신기의 망원경의 시야각이 더 넓어야 한다.
 - 다음 결과는 미세 먼지 라이다 장치의 수신 광학계를 구성하는 망원경의 시야각을 계산한 결과를 나타낸다.
- 광학계 방식: Cassegrain type Telescope, $D = 200 \text{ mm}$, $f = 2,000 \text{ mm}$ (F/10)
 - FOV(Field Of View) : $1 \text{ mrad} (= 2 \text{ mm}(\text{핀홀 구경}) / 2,000 \text{ mm})$
- 설계된 레이저 수신 광학계는 532 nm 파장을 이용하여 미세 먼지의 양을 계측할 수 있도록 설계하였으며, 향후, 관측 항목이 늘어날 경우를 대비하여 광학계의 확장이 용이하도록 기초 설계하였다.

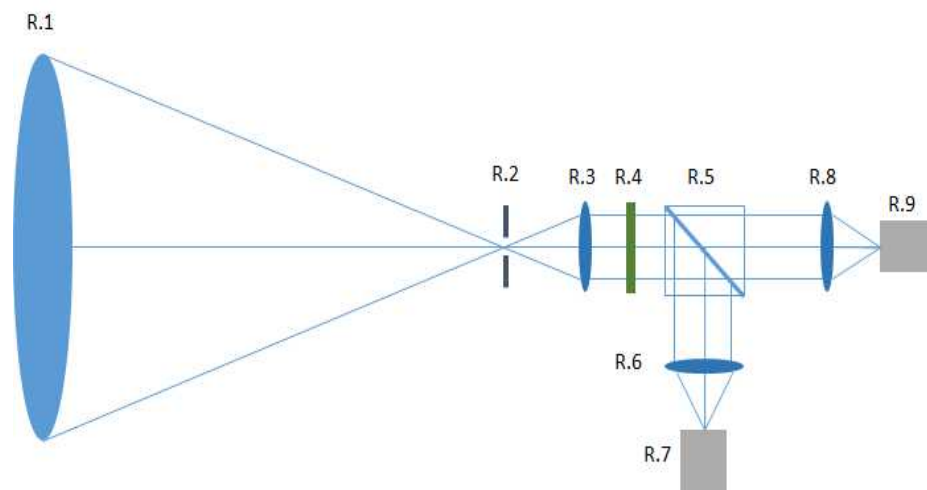


그림 3-2. 미세 먼지 라이다 장치의 레이저 수신 광학계 기본 구성도

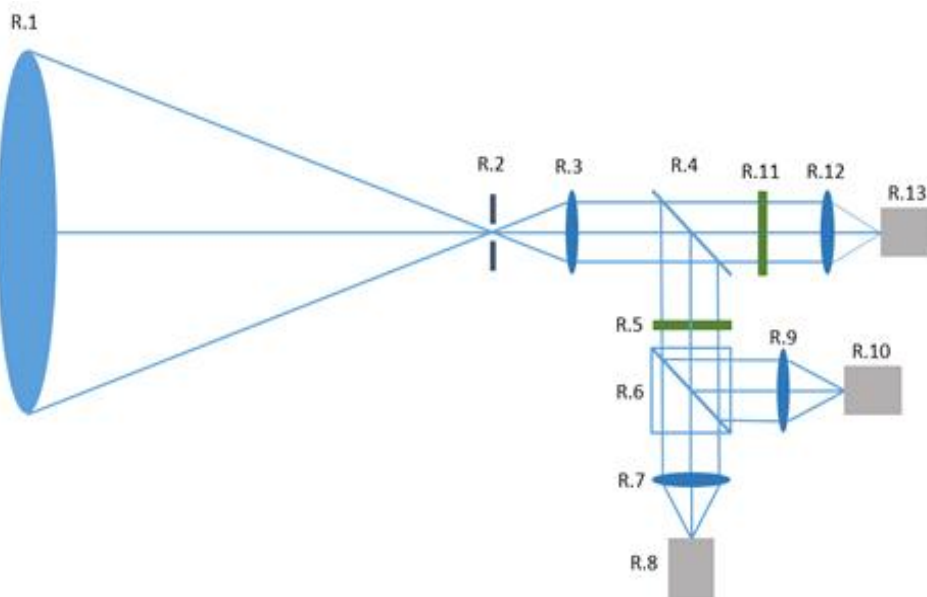


그림 3-3. 미세 먼지 라이다 장치의 레이저 수신 광학계 확장 구성도

4) 미세 먼지 라이다 장치 제어부의 기초 설계 및 개발

- 미세 먼지 라이다 장치는 레이저, DAQ(Data acquisition), 스캐닝 모터, 고전압 공급 장치 등의 다양한 장치가 결합된 하나의 시스템 장치이다.
- 미세 먼지 라이다 장치를 구성함에 있어, 측정 항목 등의 추가 등을 고려하여 레이저 송·수신 광학계의 구성함에 있어 모듈화를 진행할 예정이며 장치 제어부 또한 이를 고려하여 모듈화를 구성하여 추가적인 구성이 용의하도록 개발할 것이다.
- 그림 3-4는 미세 먼지 라이다 장치를 개발함에 있어, 장치 제어부의 구성 방안을 나타낸 것이다. 장치 제어부는 크게 시스템 제어부, 시스템 관리부 및 영상 표출부로 구성할 예정이다.
- 미세 먼지 라이다 장치를 구성하는 각 장치의 경우, 하나의 임베디드 시스템으로 개발된 제품을 이용하여 하나의 시스템을 구성하는 것으로서, 안전사고와 각 장치의 조정 또는 교체를 진행할 때, 각 장치의 개별 움직임이 필요하다. 따라서 병렬 제어 방식을 도입하여 각 장치에 대한 개별 움직임을 제어 할 수 있으며, 각 장치와 연동하여 미세 먼지의 양과 분포를 측정할 수 있도록 개발할 예정이다.
- 하나의 제어 컴퓨터에서 시스템 제어부와 시스템 관리부, 영상 표출부를 병렬 프로세싱 기법으로 개발하여 데이터 생성과 표출에 시간이 많이 걸리는 문제 및 긴급 상황에서 각 장치의 제어가 가능하도록 개발할 것이다.

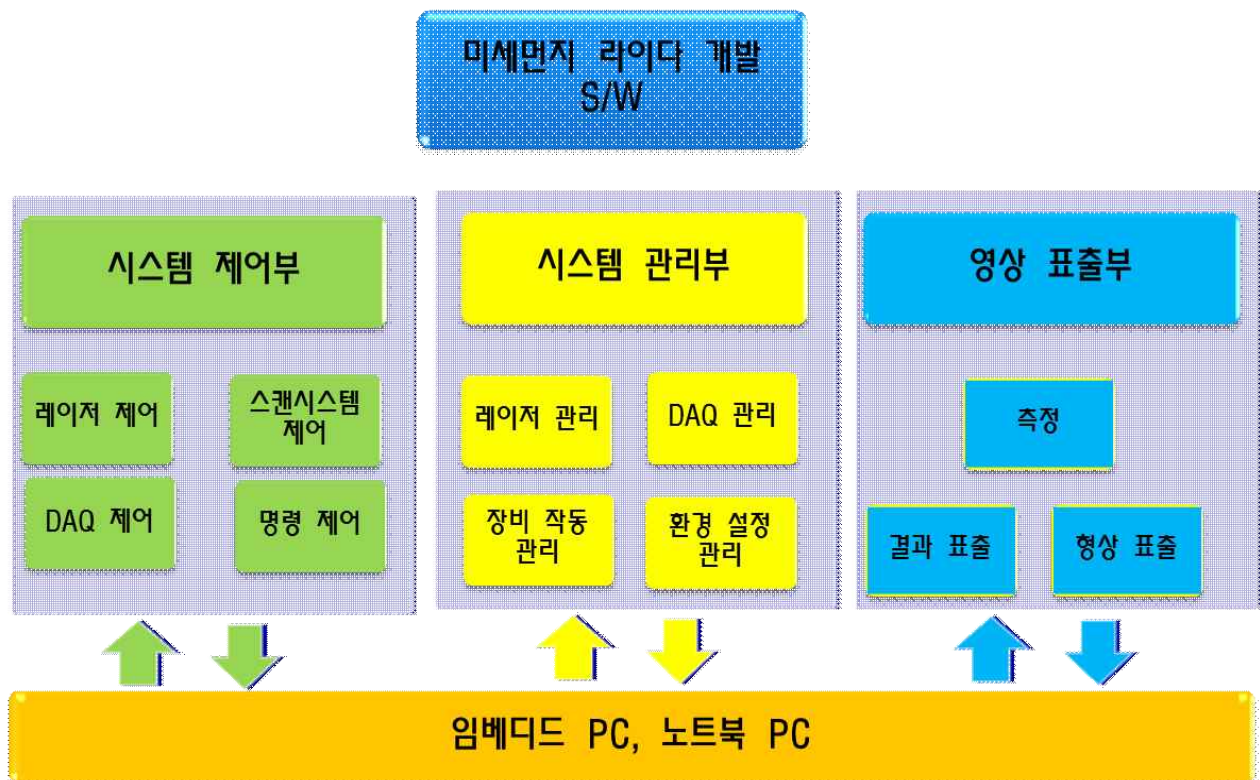


그림 3-4. 미세 먼지 라이다 장치의 장치 제어부 구성도

- 시스템 제어부 : 레이저 및 DAQ 장치 관리, 실시간 자료 처리, 시스템의 모든 명령 제어하는 부분이다.
- 시스템 관리부 : 온도 / 습도 모니터링을 통한 레이저 환경 상태 관리, 장비 작동 인디케이터, DAQ 장치 상태 등 환경 설정 관리하는 부분이다.
- 영상 표출부 : 측정된 데이터를 실시간으로 영상 표출, 후방산란/소산계수, 미세 먼지의 질량농도 결과 값 표출하는 부분으로, 시스템 제어부분과 하나의 시퀀스로 연결된 경우, 데이터 획득과 표출에 많은 시간이 걸릴 수 있다. 따라서 영상 표출부와 시스템 제어부를 병렬 프로세싱 기법으로 개발하여 시스템 제어부에서 계측된 미세 먼지 Data를 루프 간 송신을 통하여 영상 표출부에서 실시간 처리가 가능하도록 개발할 계획이다.



그림 3-5. 미세 먼지 라이다 장치의 시스템 제어부 구성도

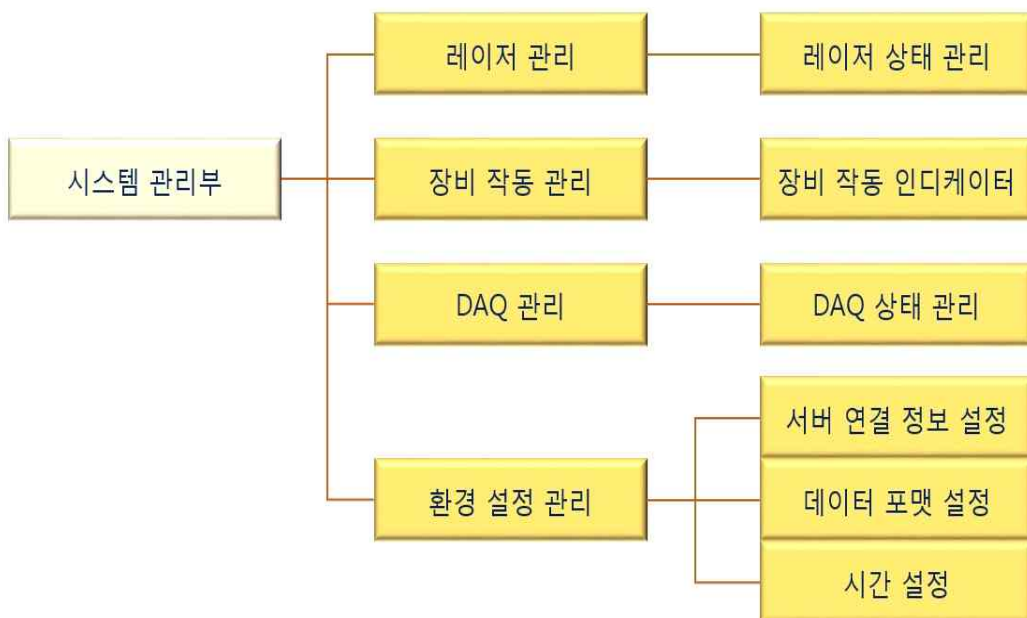


그림 3-6. 미세 먼지 라이다 장치의 시스템 관리부 구성도

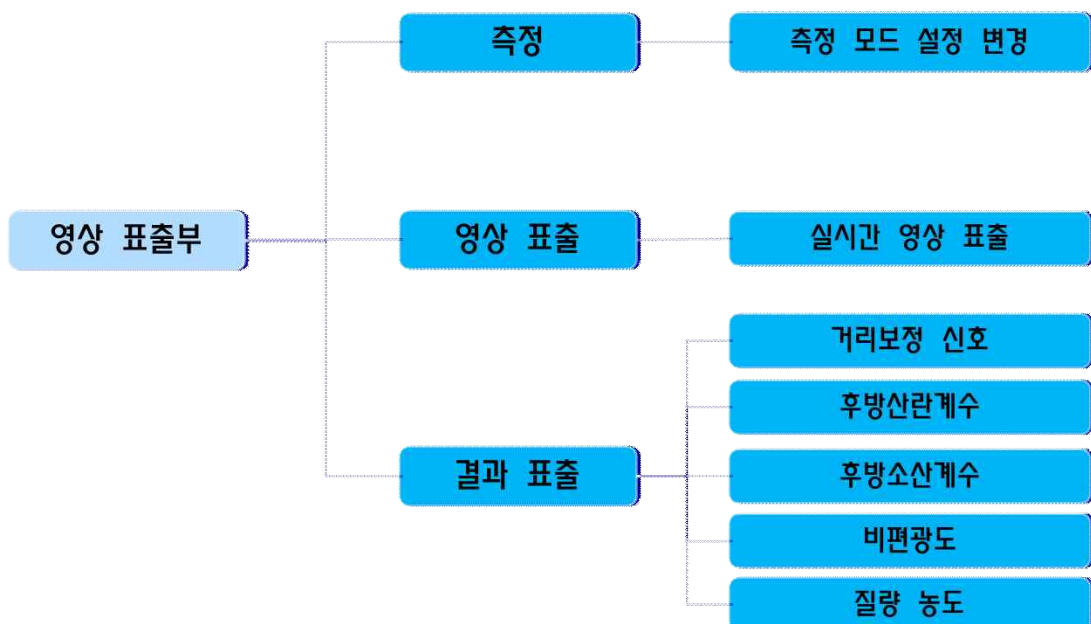


그림 3-7. 미세 먼지 라이다 장치의 영상 표출부 구성도

5) 레이저 송·수신 광학계 부품 선정을 위한 Ray - tracing modeling

- 수신 광학계 설계를 위해 광학 설계 프로그램인 ZEMAX 프로그램을 이용하여 선정된 부품을 적용하여 Modeling 및 Simulation을 수행하였으며, 세부 조건은 다음과 같다.
- 망원경을 이용하여 수집한 신호는 시준렌즈와 집속렌즈를 이용하여 미세 먼지의 산란 신호를 계측하는 센서로 집속이 되도록 구성하였다.
- 시준렌즈와 집속렌즈의 선정과 각 렌즈의 위치를 선정하기 위하여 초점거리가 100 mm인 시준렌즈와 초점거리가 75 mm인 집속렌즈를 이용하여 수신 광학계를 구성하였을 경우와 초점거리가 75 mm인 시준렌즈와 초점거리가 50 mm인 집속렌즈를 이용하여 수신 광학계를 구성하였을 경우로 Simulation을 진행하였다.
- 레이저 수신 광학계 Ray - tracing 1 : 해당 렌즈를 사용하였을 경우 수신 광학계는 각 렌즈 사이에 위치할 광학 부품을 생각하면 최소 190 mm의 거리가 필요하여 수신 광학계의 크기가 커지기 때문에 적절한 렌즈는 아닌 것으로 판단하였다.
- 시준렌즈(D = 1인치, f = 100 mm, LA4380-Thorlabs)
- 집속렌즈(D = 0.5인치, f = 75 mm, AC127-75-Thorlabs)

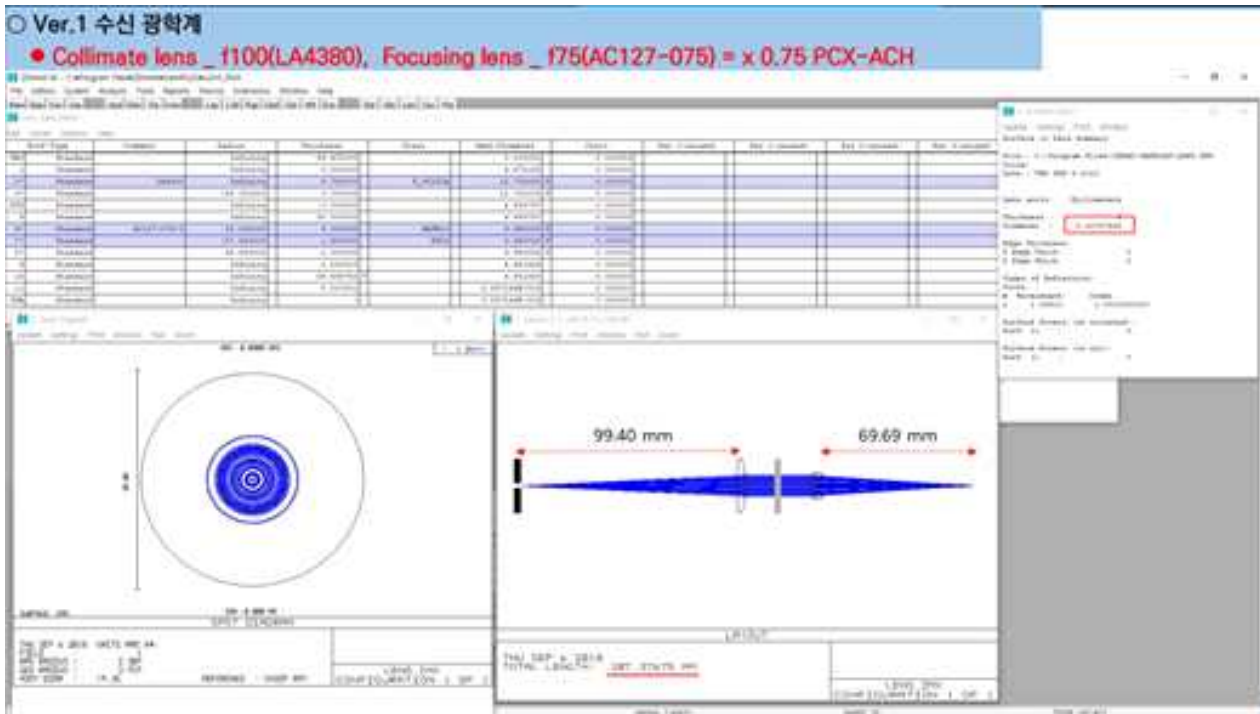


그림 3-8. 레이저 수신 광학계의 조건 1의 렌즈 구성 Ray - tracing 결과

- 레이저 수신 광학계 Ray - tracing 2 : 해당 렌즈를 사용하였을 경우 수신 광학계는 각 렌즈 사이에 위치할 광학 렌즈를 고려하면 140 mm의 거리가 필요하여 수신 광학계 구성 시 Ray - tracing 1 보다 수신 광학계를 작은 사이즈로 구성하는데 유리하기 때문에 수신 광학계의 Ray - tracing 2에 사용된 렌즈를 선정하였다.
- 시준렌즈(D = 1인치, f = 75 mm, LA1608-Thorlabs)
- 집속렌즈(D = 0.5인치, f = 50 mm, AC127-050-Thorlabs)

○ Ver.2 수신 광학계

● Collimate lens _ f75(LA1608), Focusing lens _ f50(AC127-050) = x 0.6 PCX-ACH

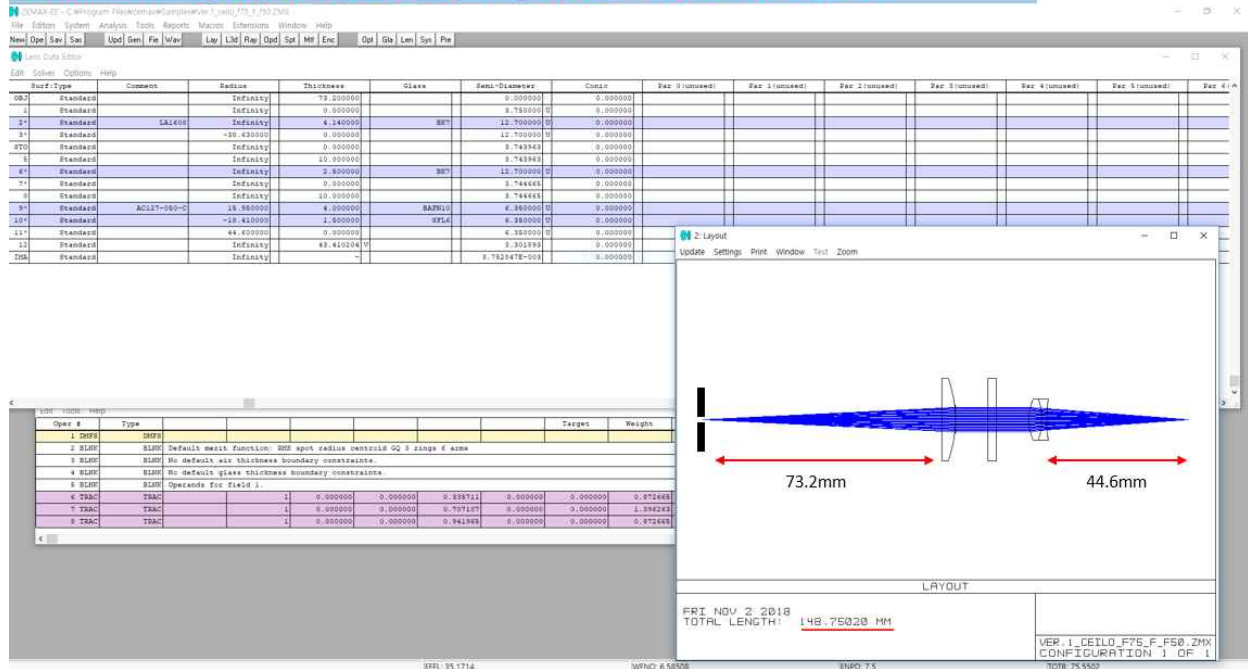


그림 3-9. 레이저 수신 광학계의 조건 2의 렌즈 구성 Ray - tracing 결과

6) 미세 먼지 측정을 위한 라이다 장치 핵심 부품 선정

● 미세 먼지에 의한 빛의 산란 현상을 발생 시키는 레이저 선정

- 미세 먼지에 의하여 산란된 빛의 세기는 레이저 출력, 레이저 발진 거리, 수신 광학계의 직경 등에 영향을 받는다.
- 특히, 레이저는 미세 먼지의 산란 신호의 세기 및 최대 측정 거리를 결정하는 아주 중요한 핵심 요소로서, 미세 먼지의 양 및 위치를 측정하기 위해선, 1064, 532 또는 355 nm 파장의 펄스 레이저를 사용해야 한다.
- 본 연구에서는 미세 먼지 라이다 시작품을 개발하기 위하여 가시광선 영역의 532 nm 파장의 레이저를 선정하였다.
- 미세 먼지 라이다 시작품에서 사용된 레이저는 Quantel사에서 개발하여 판매중인 Ultra 50 Laser를 사용하였다. Ultra 50 laser는 두 개의 레이저 하모닉 장치를 결합하여 1064, 532, 355 nm 파장의 레이저를 동시에 출력할 수 있는 레이저 장치로서, 미세 먼지 측정을 위하여 532 nm 파장만을 이용할 수 있으나, 향후, 미세 먼지 측정 항목을 추가할 수 있어 미세 먼지 측정이 파장인 1064, 532, 355 nm 파장은 동시에 출력할 수 있는 장치를 선정하였다.
- 표 3-2는 미세 먼지 라이다 시작품에 사용된 Ultra 50 laser 장치로서, 532 nm 파장에서 펄스 당 약 30 mJ의 출력을 나타낼 수 있으며, 별도의 전원 공급 장치가 필요한 특징을 갖고 있다.
- 레이저의 펄스 폭(Pulse duration) 약 9 ns 이하로서, 레이저 펄스폭에 의한 미세 먼지 측정 신호의 최소 분해능은 약 1.35 m(9 ns * 0.15 m)로 매우 짧아 미세 먼지 측정을 위한 라이다 장치의 최소 측정 분해능 7.5 m 이하의 목표를 만족하는 매우 우수한 제품이며 선정하게 되었다.
- 그림 3-10은 Ultra 50 레이저의 레이저 발진기의 모습을 나타낸 그림이며, 그림 3-11은 Ultra 50 레이저의 전원 공급과 수랭식 쿨러가 결합된 전원 공급 장치를 나타낸 그림이다.

표 3-2 미세 먼지 라이다 장치 시작품에 사용된 레이저 사양

Model	Ultra 50	
Repetition rate (Hz)	20 Hz	
Energy (mJ)	1064	50
	532	30
	355	12
Pulse duration (ns)	1064	9
Dimensions in mm (H x L x W)	Laser head	52 x 177 x 76
	Power supply	360 x 435 x 133
Weight (kg)	Laser head	0.9
	Power supply	14

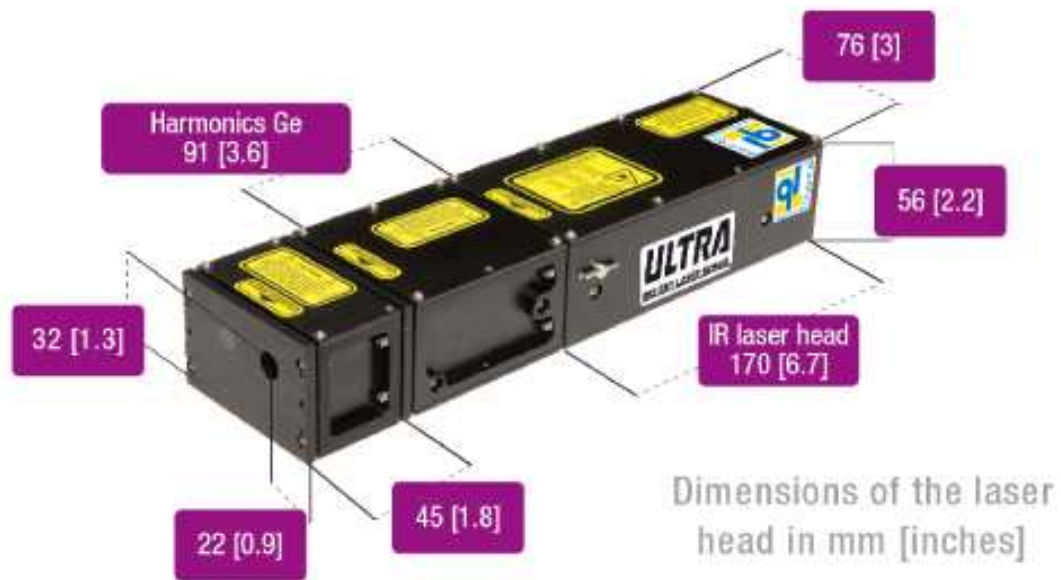


그림 3-10. 미세 먼지 라이다 시작품에 사용된 Ultra 50 레이저의 크기 정보



그림 3-11. Ultra 50 laser의 전원 공급 및 쿨링 기능이 포함된 전원공급기

- 미세 먼지에 의한 산란된 빛을 측정하는 센서 선정

- 산란되어 수집한 신호를 측정하기 위해서는 산란된 빛의 파장에서 습득 효율이 높은 광센서를 선정해야 하는 것이 중요하다.
- 라이다에서 주로 사용하는 센서는 APD(Avalanche Photo Diode), PMT(Photo Multiplier Tube)가 있으며, 두 센서 모두 산란된 빛의 파장에 의하여 습득 효율이 다른 특징을 갖고 있다.
- APD, PMT 두 센서 모두 532 nm 파장에서 사용이 가능하지만, 선정된 PMT가 532 nm 대에서 APD 보다 광자효율이 좋기 때문에 미세 먼지 라이다 시작품의 센서는 PMT로 선정하였다.
- 그림 3-12과 그림 3-13은 미세 먼지 라이다 시작품에 사용될 PMT 센서의 파장별 응답 효율과 형상을 나타낸 것이다.

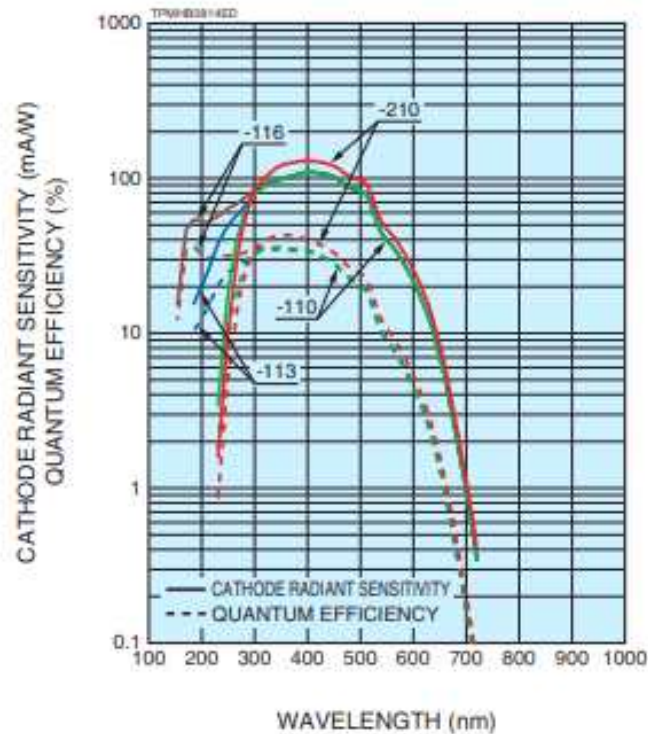


그림 3-12. 파장에 따른 PMT 센서의 감도

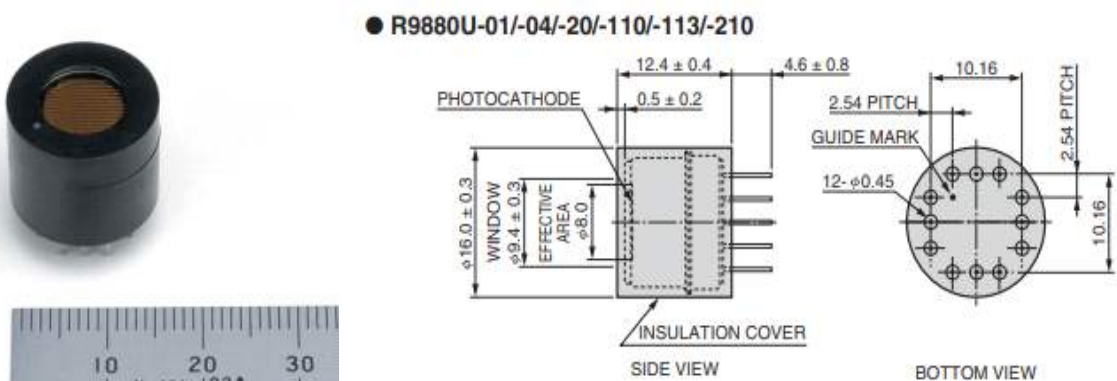


그림 3-13. PMT 센서의 형상 및 크기

- 간섭 필터 선정

- 미세 먼지 라이다 장치는 대기 중의 미세 먼지에 조사된 레이저 빔의 산란 신호를 획득하여 미세 먼지의 양 및 위치를 측정한다. 따라서 낮의 경우, 모든 파장의 빛을 발산하는 태양의 영향을 받게 되며, 레이저에 의한 산란 신호와 태양광에 의한 외부 환경 잡음 신호가 광학 수신기를 통하여 집속되며, 센서에 의하여 기록된다.
- PMT 센서의 경우, 200 ~ 700 nm 사이의 파장의 모든 파장의 빛을 수신 받아 증폭하기 때문에 신호 대 잡음비가 낮아짐.
- 이를 방지하기 태양광에 의한 외부 환경 잡음을 제거해 주기 위해서는 간섭 필터의 선정이 중요하다. 미세 먼지의 산란에 의한 수신 파장인 532 nm 파장만을 투과하고 나머지 파장 대의 신호는 제거해 주기 위한 간섭 차단 필터를 선정 하였다. 선정된 간섭 차단 필터는 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호인 532 nm 파장에서는 투과율이 85 % 이상이고, 다른 파장에 대한 차단율($OD7 = 10^{-7} \times 100\% = 10^{-5}$)이 간섭 필터 사용하여 태양광에 의한 외부 환경 변수에 의한 잡음신호를 최대한 줄일 수 있도록 하였다.
- 표 3-3과 그림 3-14는 선정된 간섭 차단 필터의 532 nm 파장에서의 신호 투과도와 사양을 나타낸 것이다.

표 3-3 532 nm 간섭 필터의 주요 성능 사양

항목	내용
Center wavelength	532.1 nm
FWHM	0.6 nm
Transmission Band	532.1 nm > 85 %
Blocking Level/Range	OD7, 300 to 520 nm, 544 to 900 nm

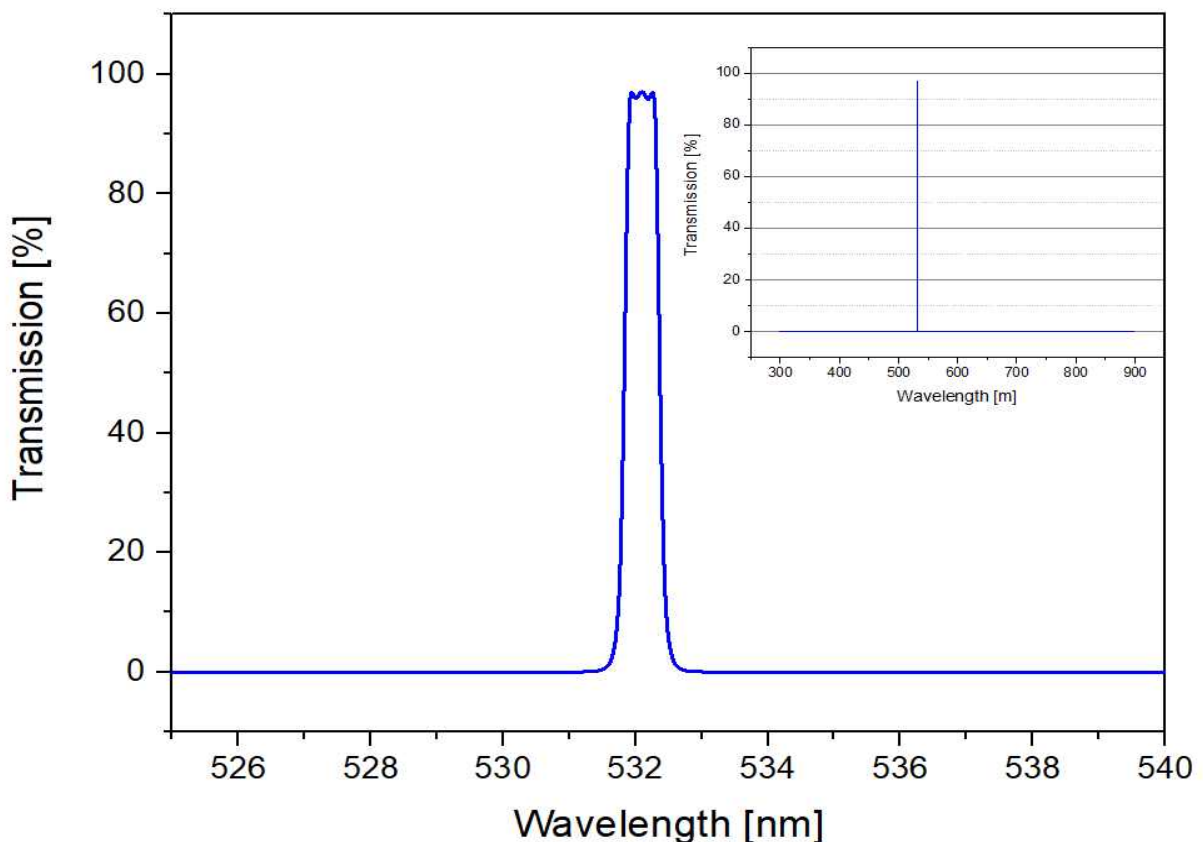


그림 3-14. 532 nm 파장의 간섭 필터 중심 파장 및 투과도

• 미세 먼지 산란 신호를 수집하기 위한 DAQ 보드

- 미세 먼지 측정을 위한 라이다 장치는 수신 광학계를 이용하여 수집된 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 PMT 센서를 통하여 전기 신호로 변환되며, 이를 수집하여 기록하는 장치가 필수적으로 요구된다.
- 미세 먼지 라이다 장치의 데이터 수집(DAQ) 보드의 선정에 있어 가장 중요한 것은 레이저 장치와의 동기화 과정이다. 라이다 장치는 레이저의 발진 시간과 산란 된 빛이 되돌아오는 시간의 차이를 이용하여 측정 물체의 위치를 측정한다. 따라서 미세 먼지 라이다 장치의 DAQ 보드는 외부 트리거 신호에 의하여 동기화가 가능한 장치를 선정해야 한다.
- 또한 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 발생하기 위하여 사용된 레이저 장치의 펄스 폭이 9 ns 이하의 값을 갖고 있기 때문에 미세 먼지의 산란 신호를 정확히 계측하기 위해선, 레이저 펄스 폭의 절반인 4 ns 이하의 높은 대역폭(band width)을 갖는 제품을 선정해야한다. (레이저의 펄스의 반치 폭이 4 ns 임을 이를 대역폭으로 환산하면 약 25 MHz 임)
- 미세 먼지 라이다 시스템의 최종 목표는 최소 거리 분해능이 7.5 m 이하에 측정 거리 분해능이 5 km 이하임으로 이를 고려하여 DAQ 장치를 선정하여 하며, 트리거 채널과 미세 먼지 측정 항목의 추가 될 수 있음을 고려할 때, 최소 3채널 이상의 측정 채널이 필요할 것으로 예상되었다.
- 표 3-4는 미세 먼지 라이다 시작품에 사용될 DAQ 장치인 고속 디지털라이저의 사양을 나타낸 것이다. NI(National Instrument)사의 PCI - 5105 모델의 고속 디지털라이저를 선택하였다.
- PCI - 5105 고속 디지털라이저의 경우, 신호 대역폭인 최대 60 MHz 로서, 레이저 펄스 의 반치폭을 고려하여 선정한 25 MHz 보다 높은 대역폭을 갖고 있으며, 최대 샘플링 속도가 60 Ms/s 속도를 갖고 있어 5 Km 이상의 데이터를 충분히 측정할 수 있다. 또한 PMT에 의한 빛의 산란 신호의 측정 범위인 -1.5 ~ 0 V 사이의 값을 충분히 측정할 수 있는 - 15 V ~ 15 V 사이의 전압 입력 범위를 갖고 있고, 7개의 신호 측정 채널과 1개의 트리거 채널을 갖고 있어 미세 먼지 라이다 시작품의 측정 항목이 늘어나도 충분히 측정할 수 있을 것으로 예상되어 사용하였다.
- 또한 PCI 타입의 인터페이스를 갖고 있고, DAQ 보드에 각 채널마다 16 MB의 메모리를 갖고 있어 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 제어 컴퓨터에 실시간으로 송신하는 이상이 없을 것을 판단되었다.

표 3-4 미세 먼지 라이다 시작품에 사용된 NI PCI - 5105 DAQ 보드 사양

항목	내용
최대 대역폭(band width : MHz)	60
최대 샘플링 속도 (Sampling rate : MS/s)	60
측정 채널 수	8
아날로그 입력 분해능 (bit)	12
On board memory (MB)	16
아날로그 입력 전압 범위 (V)	-15 ~ 15
버스 커넥터	PCI type

7) 시작품 송 · 수신 광학계 고정을 위한 내부마운트 및 외부 하우징 설계 및 제작

- 3D 설계 프로그램(Solid-Works)을 이용한 시작품의 내부 마운트 및 외부하우징 설계 및 제작
 - 기초 설계 자료를 바탕으로 선정한 부품을 모듈화 하여 설계 제작하여 시작품 완성하기 위하여 3D 설계 프로그램인 Solidworks 프로그램을 이용하여 부품들을 설계하였으며, 설계된 제품을 바탕으로 3D modeling 작업을 수행하여 간 부품 간의 간섭이 발생하는 가를 검토하였다.
 - 광학 부품의 특성상, 변형이 발생할 경우, 광 경로의 틀어짐 현상이 크게 발생함으로 각 부품의 변형이 발생하지 않으면서 안정적으로 장착될 수 있도록 내부 특수 마운트를 설계 및 제작하였다.
 - 라이다 장치의 외부 충격을 방지하고, 대기 공간상의 미세 먼지 분포를 측정하기 위한 2축 스캐닝 모

터와의 연결을 고려하여 외부 하우징을 설계하였다. (외부 하우징 크기 : 320 mm x 800 mm x 376 mm)

- 측정 항목의 추가에 따른 측정 채널의 확장성을 고려하여 각 측정 채널이 내부 마운트에 모듈 형식으로 추가될 수 있도록 설계 및 제작하였다.
- 그림 3-15는 광학계 고정을 위한 내부 마운트 3D 모델링 결과를 나타낸 결과이며, 그림 3-16은 외부 하우징과 스캐닝 모터를 결합한 3D 모델링 결과를 나타낸 것이다.
- 그림 3-17은 미세 먼지 라이다 시작품 설계 도면을 나타낸 것이며, 그림 3-18은 미세 먼지 라이다 시작품 설계 도면을 바탕으로 제작된 내부 마운트와 미세 먼지 라이다 시작품의 부품을 결합한 결과를 나타내 사진이다.

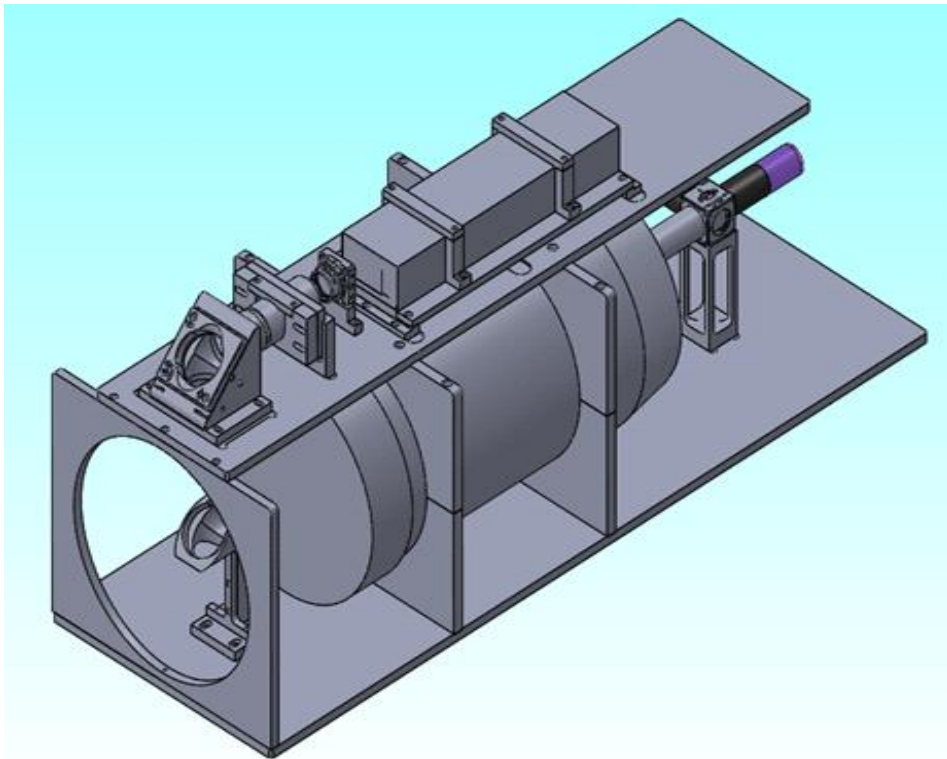


그림 3- 15. 광학계 고정을 위한 내부 마운트 3D 모델

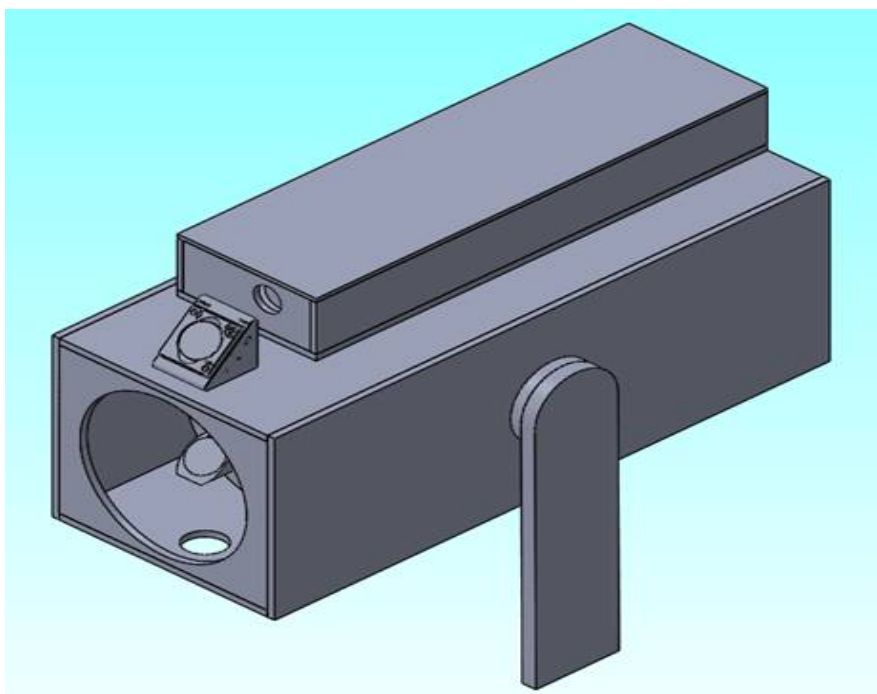


그림 3-16. 스캐닝 모터와 연결을 위한 외부 하우징 3D 모델

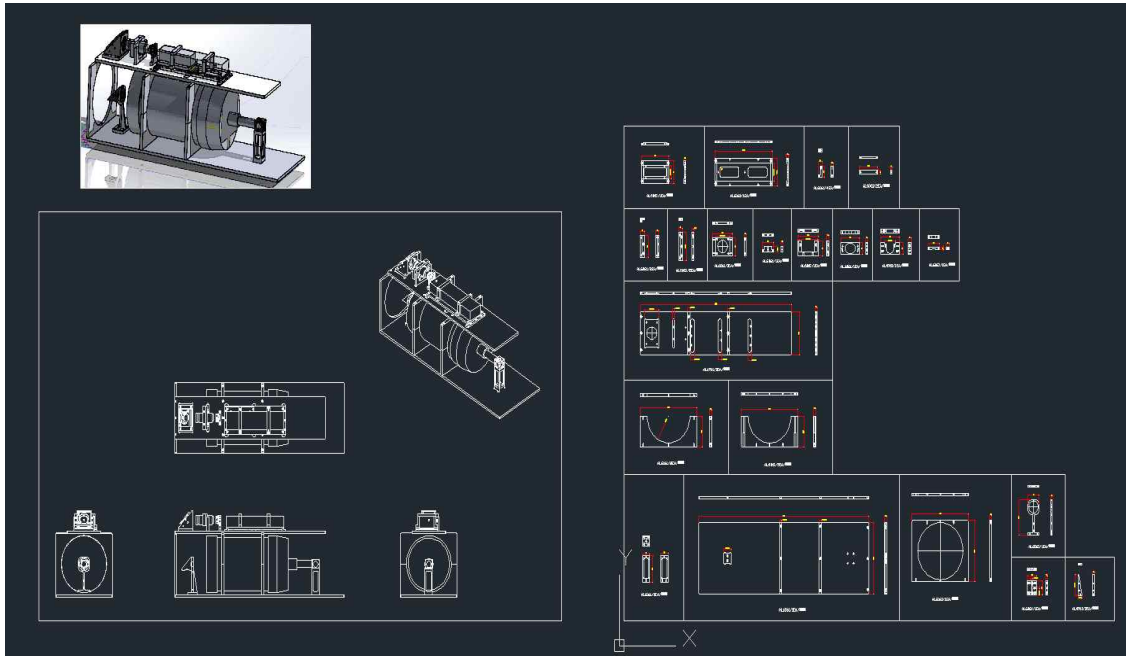


그림 3-17. 미세 먼지 라이다 시작품 설계도면



그림 3-18. 1차년도 미세 먼지 라이다 시작품 개발 사진

8) 미세 먼지 신호 처리 알고리즘 개발

• 미세 먼지 관측 라이다 방정식

- 라이다(Light Detection And Ranging)는 대기 중으로 레이저를 조사하여 에어로졸이나 공기 분자에 의해 후방 산란된 빛을 감지하여 에어로졸의 종류, 양 및 위치를 측정하는 장치이다.
- 측정된 빛의 산란 신호는 라이다의 원시자료로 배경신호를 제거하고, 거리보정과 기기 상수 등에 대한 표준화 작업을 통해 후방산란강도 추출해야 한다.
- 아래 식은 532 nm 파장의 레이저를 대기 중으로 조사하였을 때의 라이다 방정식으로 $P_{532}(z)$ 는 고도 z 에서 후방 산란된 532 nm 파장의 산란 신호의 강도를 나타내며, 여기서 E, C 는 레이저 강도

와 기기상수, β , σ 는 후방산란계수, 소산계수를 의미한다.

$$\begin{aligned} P_{532}(z) &= P_{532,\parallel}(z) + P_{532,\perp}(z) \\ &= \frac{EC}{z^2} (\beta_{aer}(z) + \beta_{mol}(z)) \exp \left\{ -2 \int_0^z (\sigma_{aer}(x) + \sigma_{mol}(x)) dx \right\} \end{aligned}$$

- **미세 먼지 광학적 특성, 종류 및 질량농도 산출 방법**

- 미세 먼지의 질량농도를 산출하기 위해서는 미세 먼지 종류(유형)를 파악하고 분석해야 한다. 미세 먼지의 종류를 분석하는 방법으로는 편광 소멸도를 이용하여 미세 먼지의 유형 구분 할 수 있다.
- 편광소멸도란 라이다에서 한 방향으로 편광 된 레이저 빔이 대기 중으로 조사되어 입자에 의해 산란 될 때, 편광성분이 깨지는 정도를 나타내는 것으로 완벽한 구형입자(수증기)에서는 편광성분이 유지 되며, 비구형 정도가 심한 입자(황사)일수록 편광성분이 깨져 나타난다. (황사 : 0.3 ~ 0.5, 권운 : 0.4)
- 미세 먼지의 질량농도를 산출하기 위해서는 에어로졸의 소산계수를 산출하여야 해야 하며, 에어로졸 소산계수를 산출하기 위해서는 라이다 방정식을 해석해야 하지만 라이다 방정식에는 미지수 두 개 (β_{aer} , α_{aer})가 존재해서 바로 해석이 불가능하다. 이에 기존 선행연구에서 정의된 라이다 상수(lidar ratio)를 이용하여 에어로졸의 소산계수 산출하여 미세 먼지의 질량농도를 산출한다.

- **미세 먼지 광학적 특성(후방산란계수, 소산계수) 및 질량농도 산출 알고리즘 개발**

- 그림 3-19는 미세 먼지 라이다 시작품을 이용하여 측정한 미세 먼지 산란 신호를 이용하여 미세 먼지의 광학적 특성 및 질량농도를 산출하는 알고리즘을 나타낸 것이다.
- 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 빛의 산란 신호를 이용하여 라이다 방정식을 이용하여 편광 소멸도를 구한 후, 선행 연구를 통하여 정의된 라이다 상수를 이용하여 미세 먼지에 의한 소산계수를 산출하여 미세 먼지의 질량 농도를 산출할 수 있도록 하였다.
- 그림 3-20은 미세 먼지 라이다 장치를 제어하여 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 계측하고 미세 먼지의 질량 농도 산출 알고리즘을 적용하여 미세 먼지의 양 및 위치를 측정할 수 있는 제어 프로그램을 나타낸 것이다.
- 미세 먼지 라이다의 DAQ 장치인 ADC를 제어주기 위하여 LabVIEW 기반의 제어 프로그램 개발 하였다.
- 그림에 ①번으로 표시된 부분은 장치 설정에 대한 것으로 Sampling-rate, Record length 및 데이터 저장 등 ADC의 전반적인 설정이 가능하도록 개발하였다.
- ②번은 데이터를 Line Graph 형태로 표출하는 곳으로 실시간 데이터 및 실시간으로 들어온 데이터의 평균값을 표출 할 수 있도록 개발하였다.
- 라이다 장치를 이용하여 획득한 미세 먼지에 의한 산란 신호를 질량 농도로 변환하여 컴퓨터에 저장 하기 위하여 별도의 병렬 프로세싱 기법을 적용하였고, ADC에 의하여 측정된 신호 데이터를 병렬로 구성된 파일 저장 루프로 송신 할 수 있도록 하였으며, 송신된 파일의 순서가 뒤바뀌거나 잊어버리지 않도록 FIFO(First In First Out) 기능을 갖는 루프 간 파일 송신 시스템을 구성하였다.
- 또한 송신된 파일의 경우, 제어 컴퓨터 내부의 시간을 참조하여 시간 별로 제어 컴퓨터의 하드 디스크에 측정된 데이터를 저장할 수 있도록 하였다.

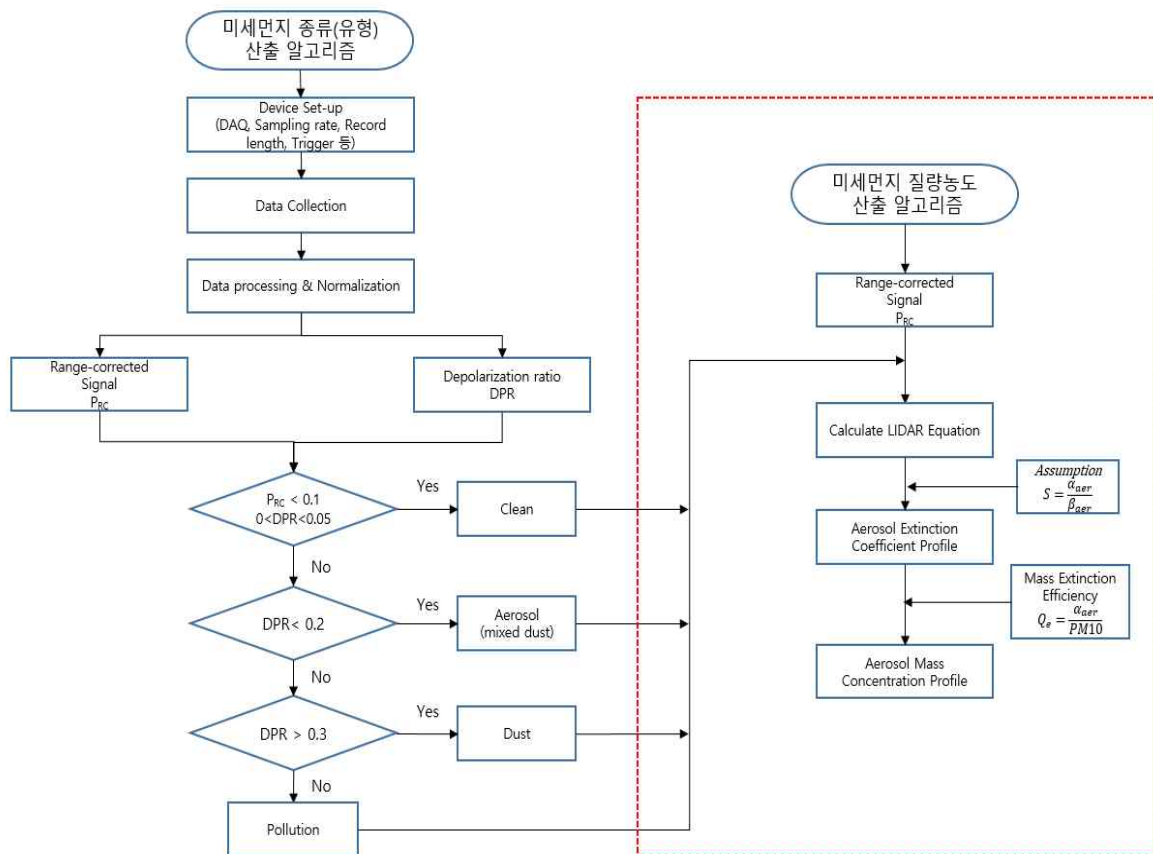


그림 3-19. 미세 먼지 라이다 장치의 미세 먼지 종류(유형) 및 질량 농도 산출 알고리즘

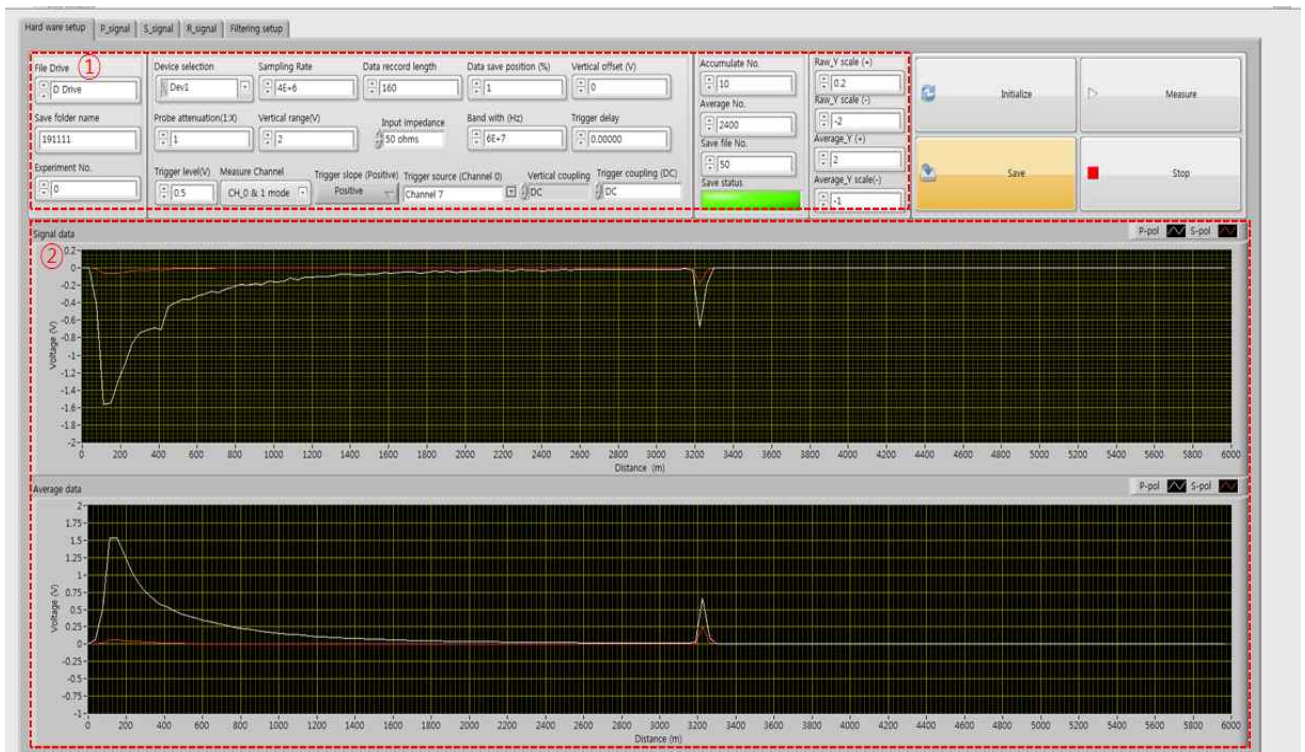


그림 3-20. 미세 먼지 라이다 제어 및 질량 농도 측정 프로그램 인터페이스

9) 수신 센서 보정기술 연구(광자수, 센서 효율 등에 따른 보정)

- 광학 설계 프로그램인 ZEMAX를 이용하여 송신시스템 빔 발산각 시뮬레이션 수행.
- 두 개의 렌즈로 제작된 빔 확대기에서 중요한 것은 레이저 빔을 받아들여 퍼지게 하는 첫 번째 렌즈와 퍼져오는 빔을 다시 평행 광으로 만들어 주는 두 번째 렌즈의 위치가 매우 중요하다. 두 렌즈의 위치가 맞지 않으면 빔이 퍼지거나 모이게 되어 신호 감쇠 현상의 요인이 된다.
- 10배 확대된 빔 확대기의 성능을 평가하기 위해 광학설계프로그램을 이용하여 100 m에서의 빔 크기와 10 km에서의 빔 크기 비교하였다.
- 송신된 레이저 빔의 형태를 고도 100 m와 10 km 거리에서 확인하였을 때, 기준축이 정확히 조정되었을 때 (0.0, 0.0 degree)에는 거리에 상관없이 레이저 빔의 형태가 전혀 변화되지 않음을 확인하였다. 또한, 기준 축이 조금씩 기울어 졌을 때를 가정한 나머지 결과들도 기울어진 정도에 따라 차이가 나기는 하지만 10 km의 고도 관측까지는 관측에 이상을 초래할 빔의 분산이 없음을 확인하였다.

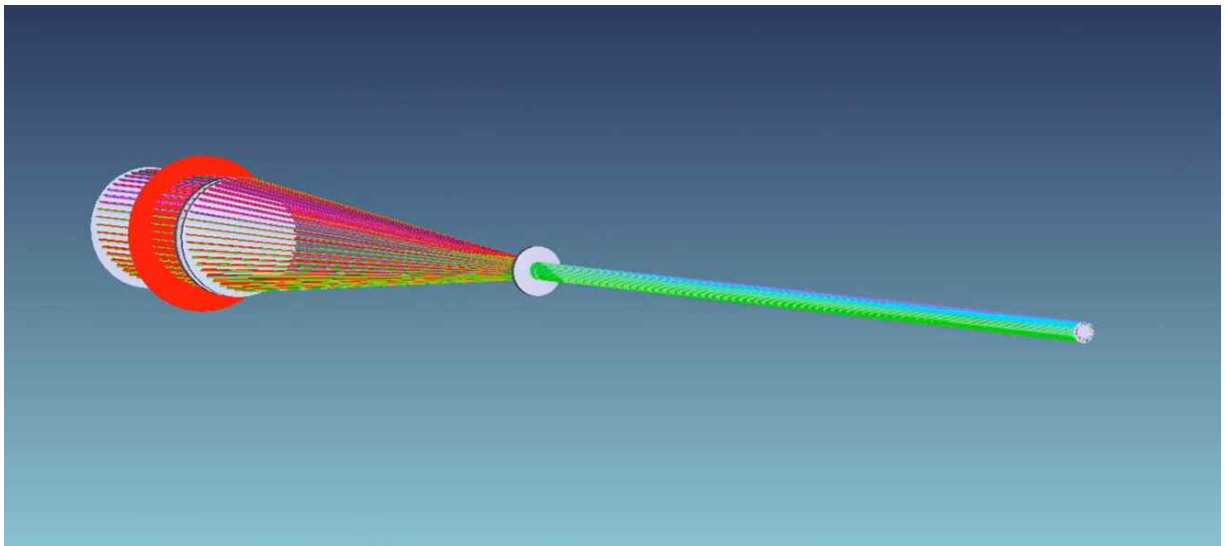


그림 3-21. 빔 확대기의 ZEMAX 시뮬레이션 모식도

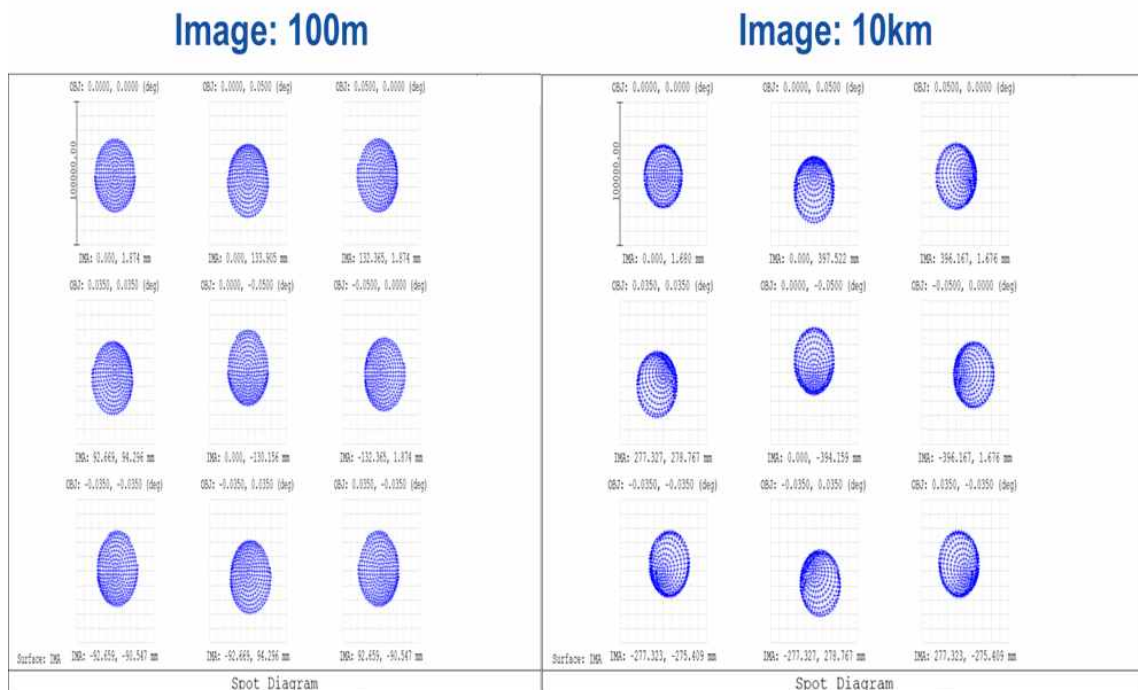


그림 3-22. 빔 확대기를 통하여 발전된 레이저 빔의 형태를 나타낸 Spot Diagram(왼쪽, 100m), (오른쪽, 10 km)

• 광학 설계 프로그램인 ZEMAX를 이용하여 수신 시스템 집속 빔 성능평가

- 망원경을 통해 수집된 신호는 망원경의 초점거리에 놓인 핀 홀에 집속된 후 시준 렌즈, 필터 및 집속 렌즈를 거쳐 10 mm 크기의 PMT에 집속되는 것을 볼 수 있다.
- 송신 레이저의 광 정렬 오차 및 수신 렌즈의 수차에 의해 PMT에 집속되는 빔이 PMT를 벗어나게 되어 신호 감쇠효과를 일으키기도 하는데 설계된 수신 광학계의 수신 집속 빔 시뮬레이션 수행 결과 대부분(99 %)의 빔이 집속되는 것을 확인하였다.

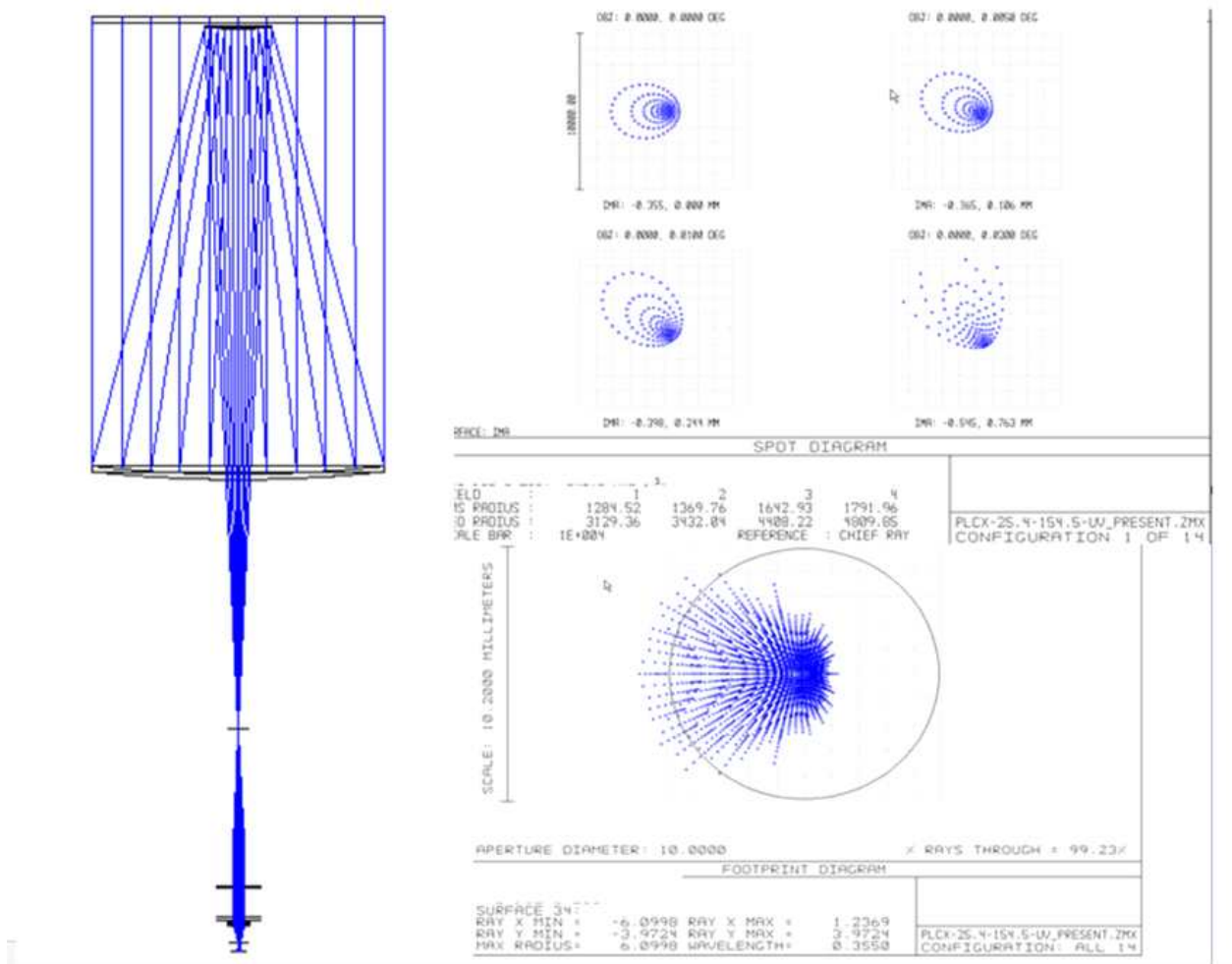


그림 3-23. 레이저 수신부 망원경의 집속 빔 평가 결과

10) 시작품 성능 확인 및 성능 평가

- 측정거리 목표 : 3 km 이상

- 라이다 장치는 펄스 레이저의 발진 시간과 대기 중에 조사된 레이저 빔이 미세 먼지와 같은 에어로졸 등에 의하여 산란된 빛의 도착 시간의 차이를 이용하여 측정 대상체 까지의 거리를 측정한다.
- 그림 3-24는 라이다 장치를 이용하여 대기 공간상의 미세 먼지와 같은 에어로졸에 의한 빛의 산란 신호를 나타낸 그림이다. 일반적으로 빛은 발진 거리에 제곱에 반비례하여 빛의 세기가 떨어지게 된다. 따라서 대기 중에 레이저를 조사하면 라이다 신호는 거리의 제곱에 반비례하는 그래프를 나타내며, 만약 그림 3-24와 같이 특정 구간에 미세 먼지와 같은 측정 물체가 있으면 빛의 산란 양이 증가하여 피크(Peak)치가 나타나게 되는데 이를 이용하여 측정 대상 물체까지의 거리를 확인할 수 있으며, 라이다 장치의 최대 측정 거리를 확인할 수 있다.
- 그림 3-25는 미세 먼지 측정을 위한 라이다 시제품의 최대 측정 거리를 측정하기 위하여 실시한 측정 실험 모습을 나타낸 사진이며, 그림 3-26은 523 nm 파장의 레이저 빔이 조사될 때를 나타내는 사진이다. 그림에서 보는 것과 같이, 제작된 시작품의 최대 측정거리를 확인하기 위하여 수평방향으로 일정한 거리에 위치한 특정 목표물(산)에 레이저 빔을 조사하여 발생하는 빛의 산란 신호를 계측하는 실험을 실시하였다.
- 그림 3-27과 그림 3-28은 미세 먼지 라이다 시제품의 최대 측정 거리 측정 실험 결과를 나타내는 것이다. 실험 결과 레이저 빔의 조사에 따른 특정 목표물에서 발상한 빛의 산란 신호가 3.2 km 인 것을 확인하여, 개발된 미세 먼지 라이다 시제품의 최대 측정 거리 목표 3 km를 만족함을 알 수 있었다.

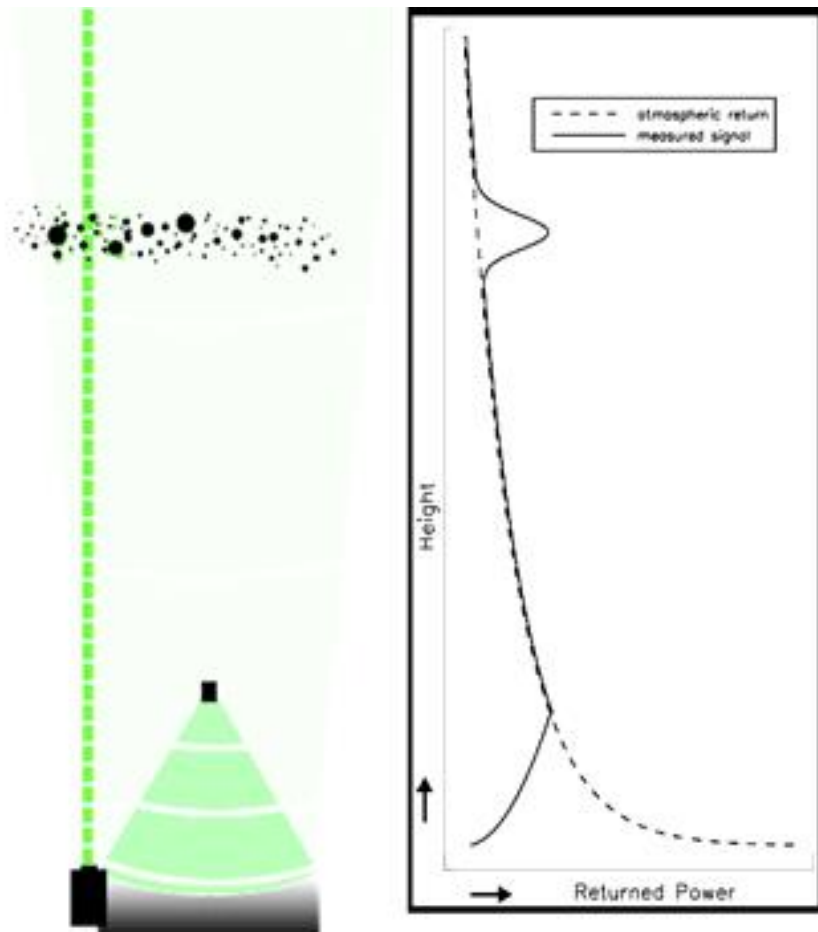


그림 3-24. 에어로졸에 의한 일반적인 라이다 신호 예



그림 3-25. 미세 먼지 라이다 시작품의 최대 측정 거리 평가를 위한 실험 준비 사진

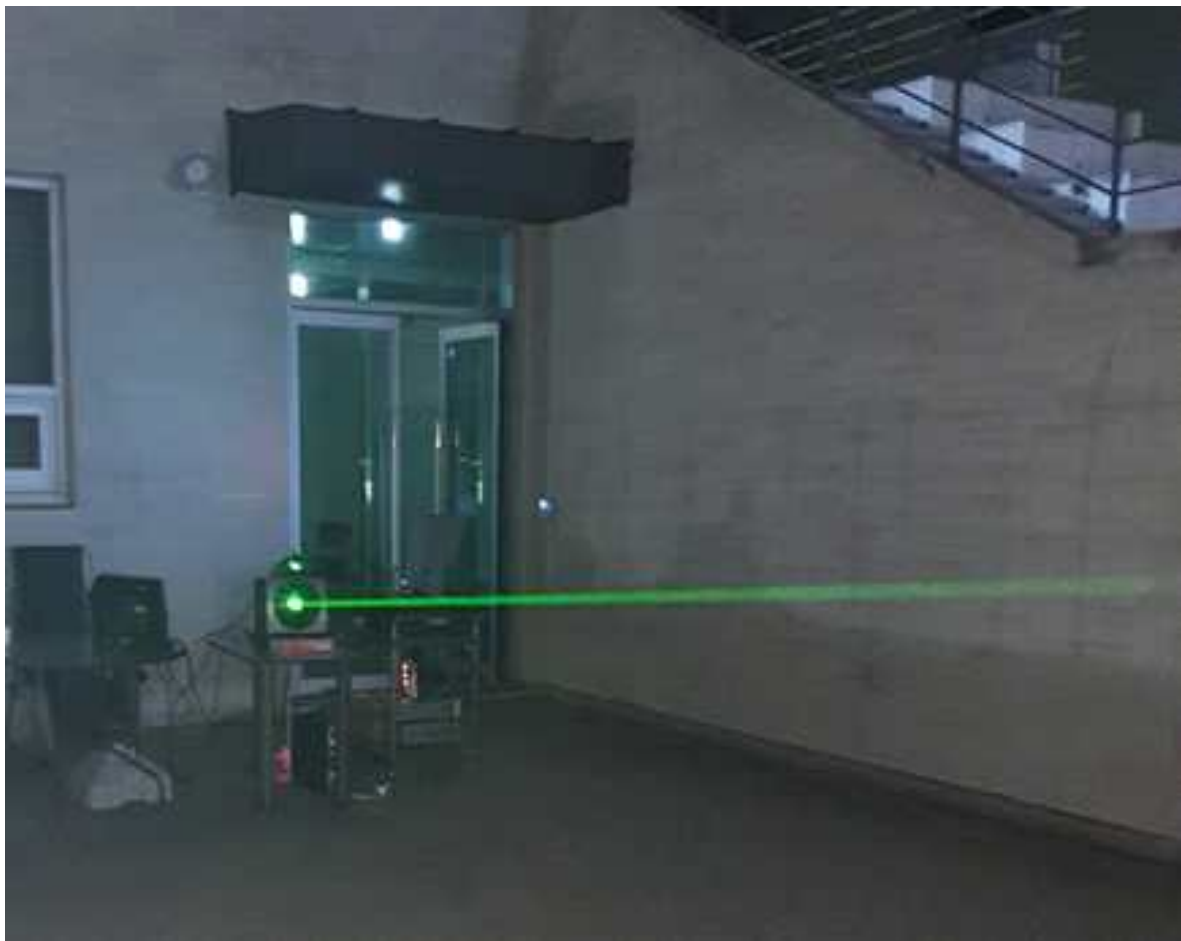


그림 3-26. 미세 먼지 라이다 시작품의 최대 측정 거리 평가를 위한 레이저 빔 조사 모습

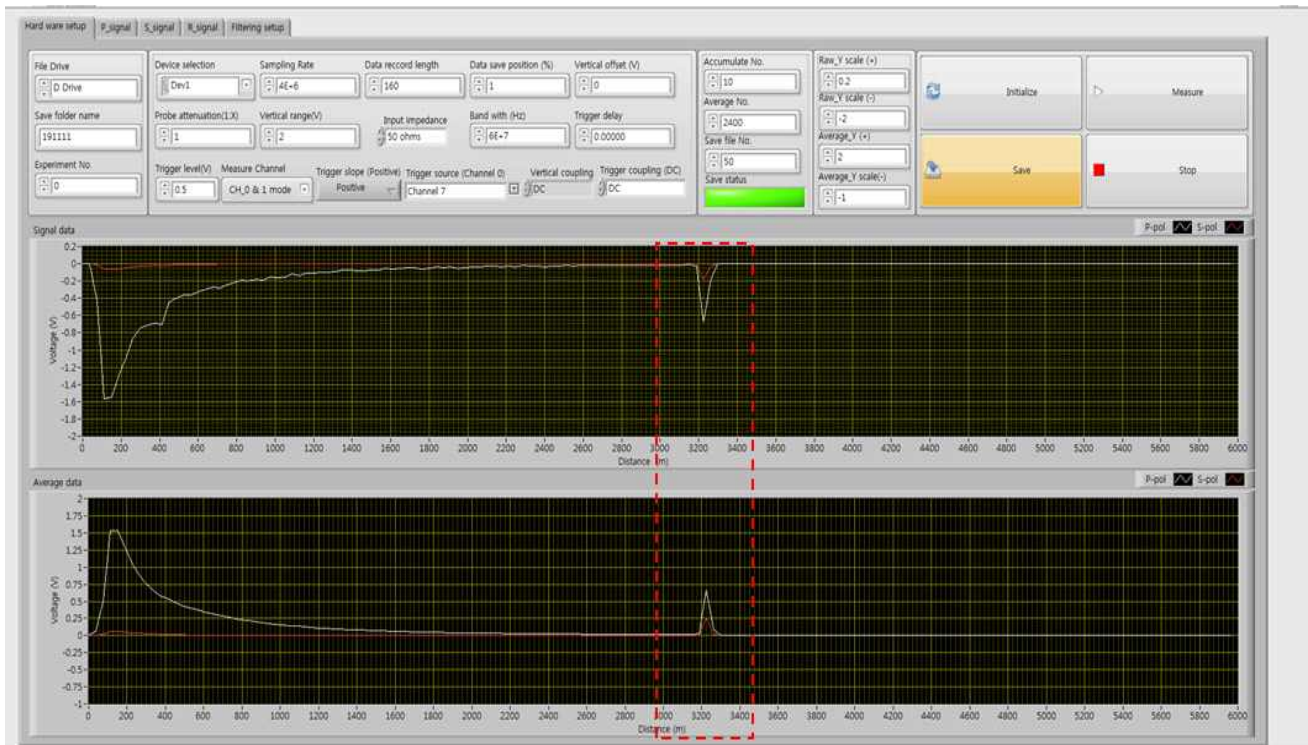


그림 3-27. 미세 먼지 라이다 제어 및 분석 프로그램에서 측정된 산란 신호 : 3.2 Km

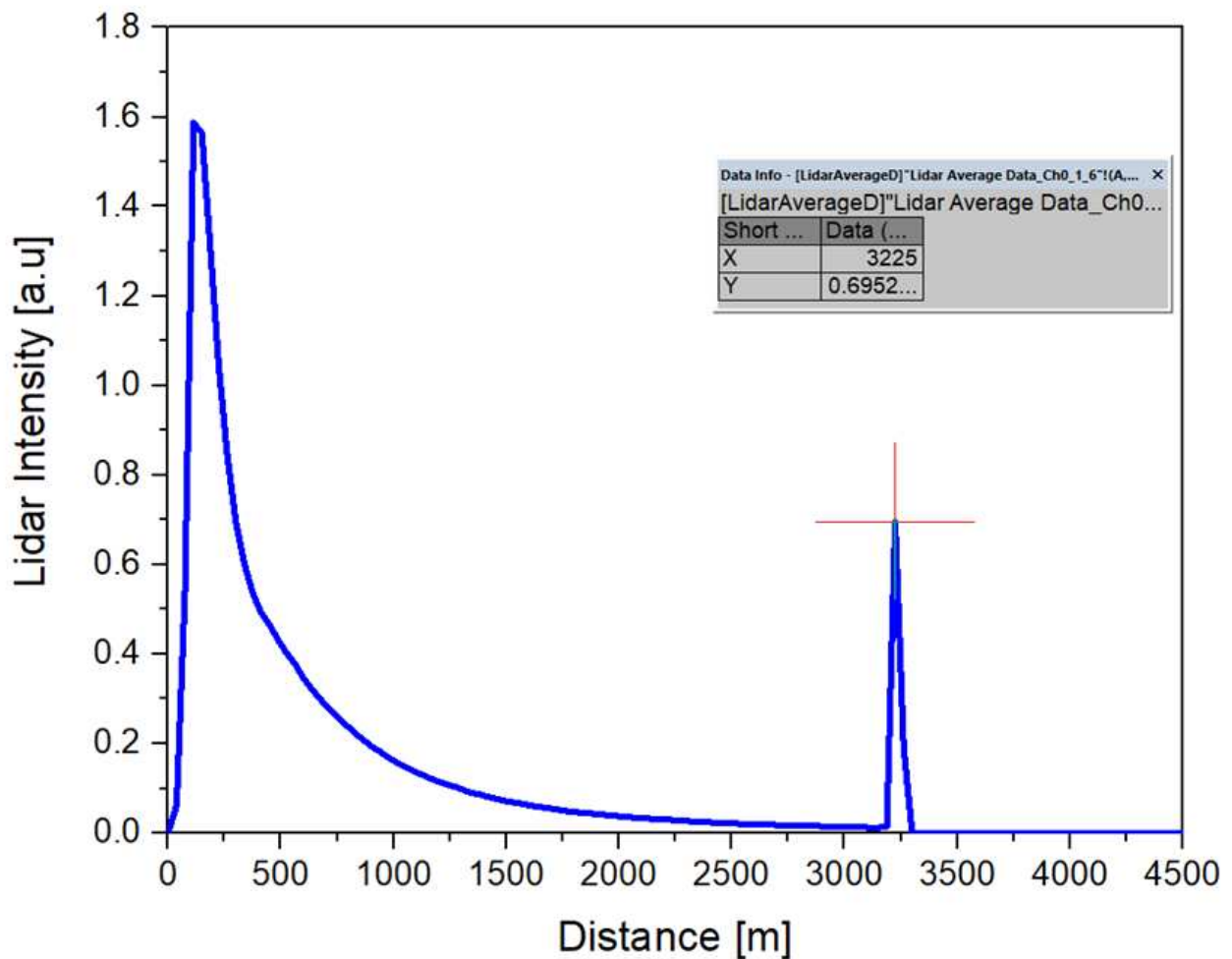


그림 3-28. 미세 먼지 라이다 원본 파일을 이용하여 확인한 산란 신호 그래프 : 3.2 Km

• 거리 측정 최소 분해능 : 37.5 m

- 거리분해능은 측정이 가능한 데이터의 간격이 좁을수록 거리분해능이 높으며, 높은 거리 분해능은 해상도가 좋다는 것을 의미한다.
- 미세 먼지 라이다의 시작품은 4 MHz의 샘플링 간격(250 ns)으로 신호를 획득하였으며, 시간을 거리로 환산하면, 37.5 m의 거리 측정 최소 분해능이 나타난다. 획득한 신호의 측정 거리 간격을 확인하여 거리 분해능을 확인하였다.

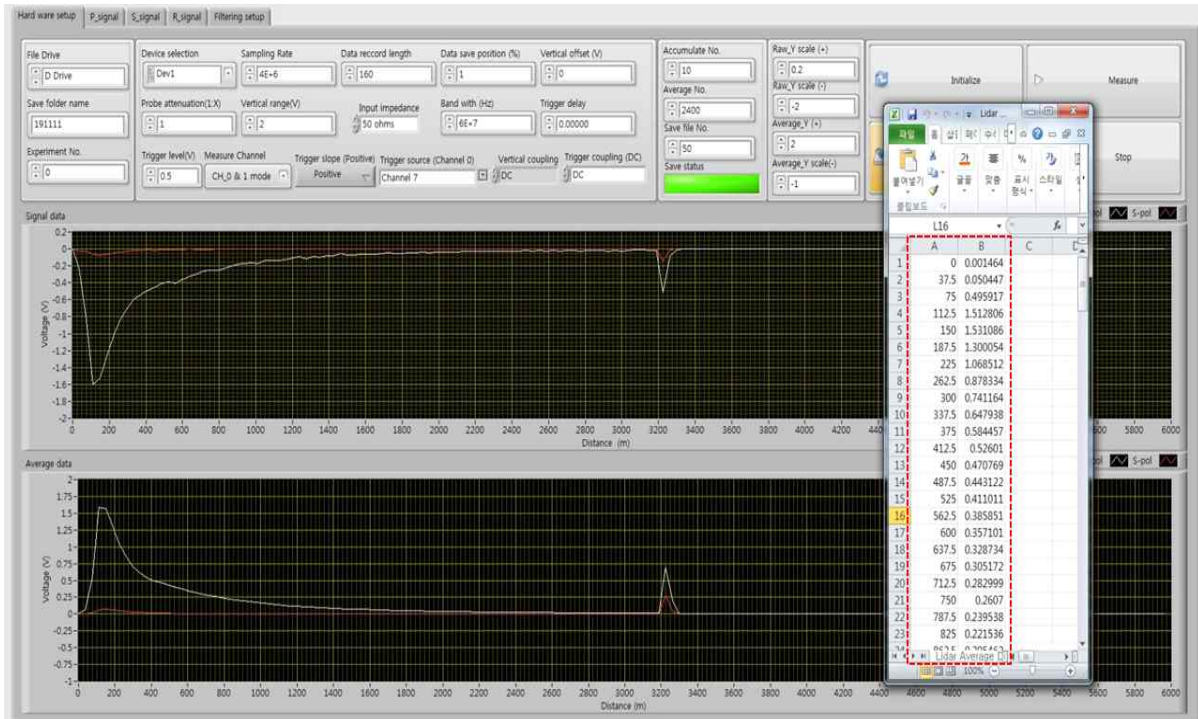


그림 3-29. 미세 먼지 라이다 원본 신호를 이용한 측정 최소 분해능 확인 결과

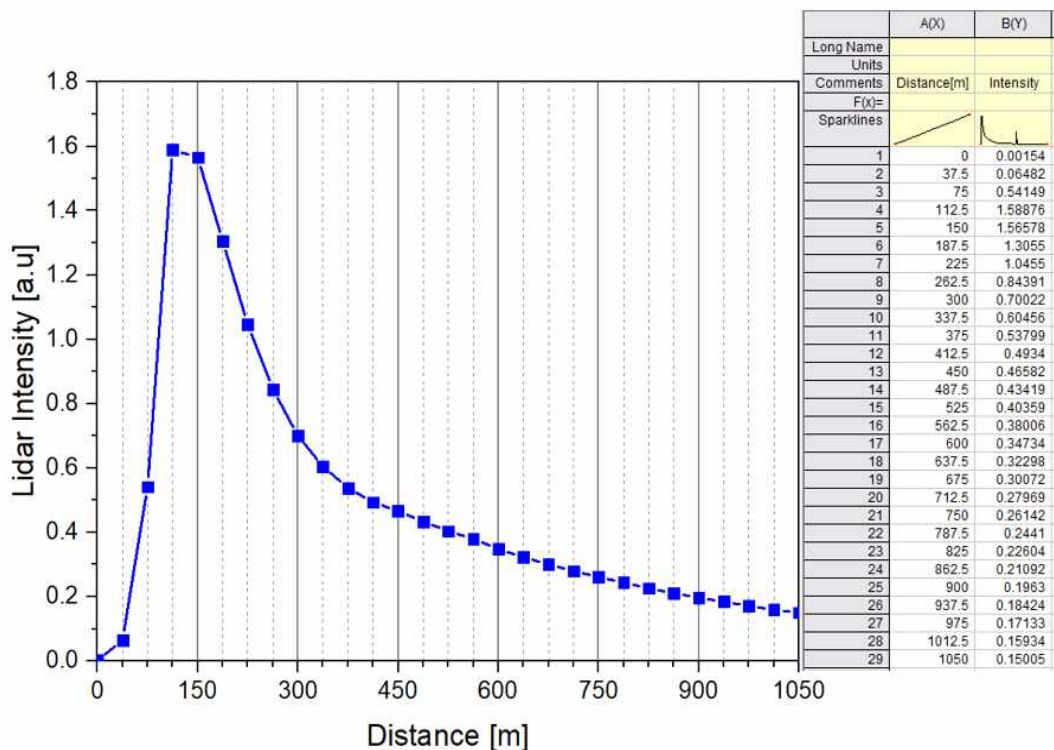


그림 3-30. 오리진을 이용한 미세 먼지 라이다 원본 신호의 거리 측정 최소 분해능 확인 결과

- 거리 보정된 후방산란 프로파일

- 미세 먼지의 질량농도를 산출하기 위해서는 획득된 데이터에서 거리 보정된 프로파일을 산출하여야 하며 거리 보정 프로파일은 미세 먼지의 정성적인 값을 유추 할 수 있다.

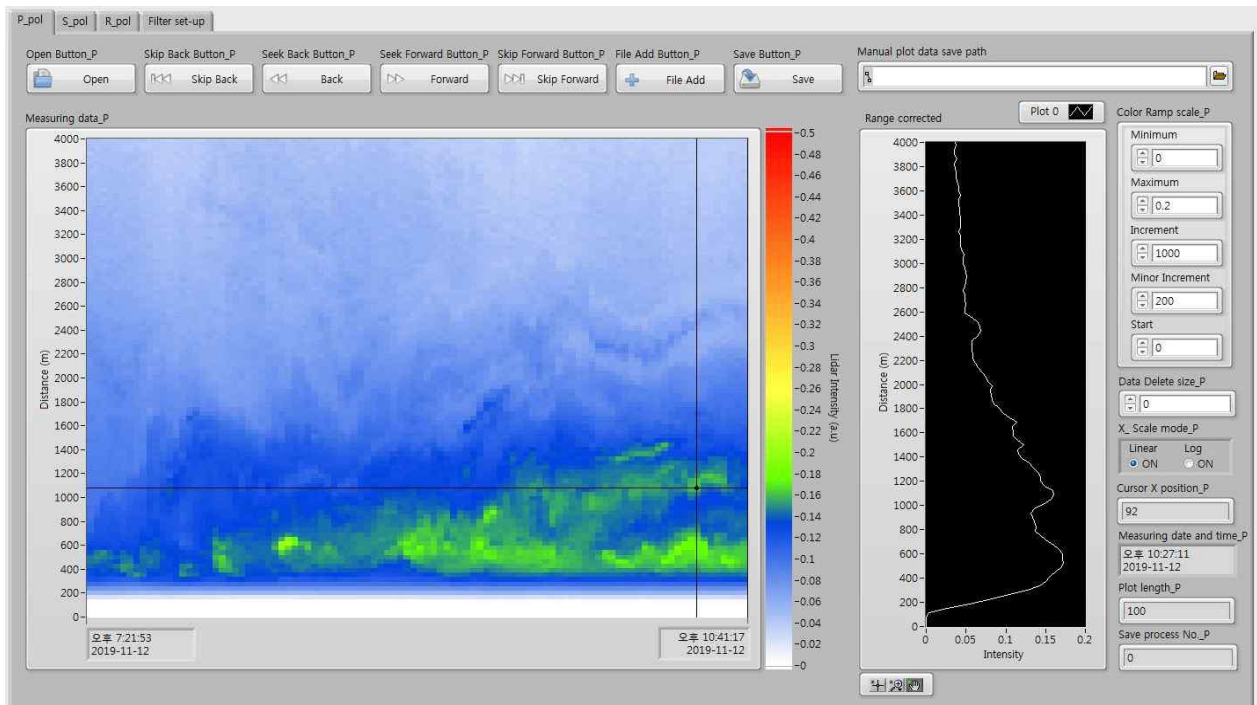


그림 3-31. 미세 먼지 라이다 시작품으로 측정된 미세 먼지의 후방산란 프로파일

- 획득된 프로파일을 이용하여 대전 지역의 한국 환경공단 측정소(읍내동 측정소, 성남동 측정소)와의 데이터 비교. 대전시 읍내동(19:00 ~ 22:00 - 41,48, 40,47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 대전시 성남동(19:00 ~ 22:00 - 28,37, 32,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과의 비교 결과 유사한 경향성을 나타낸다.

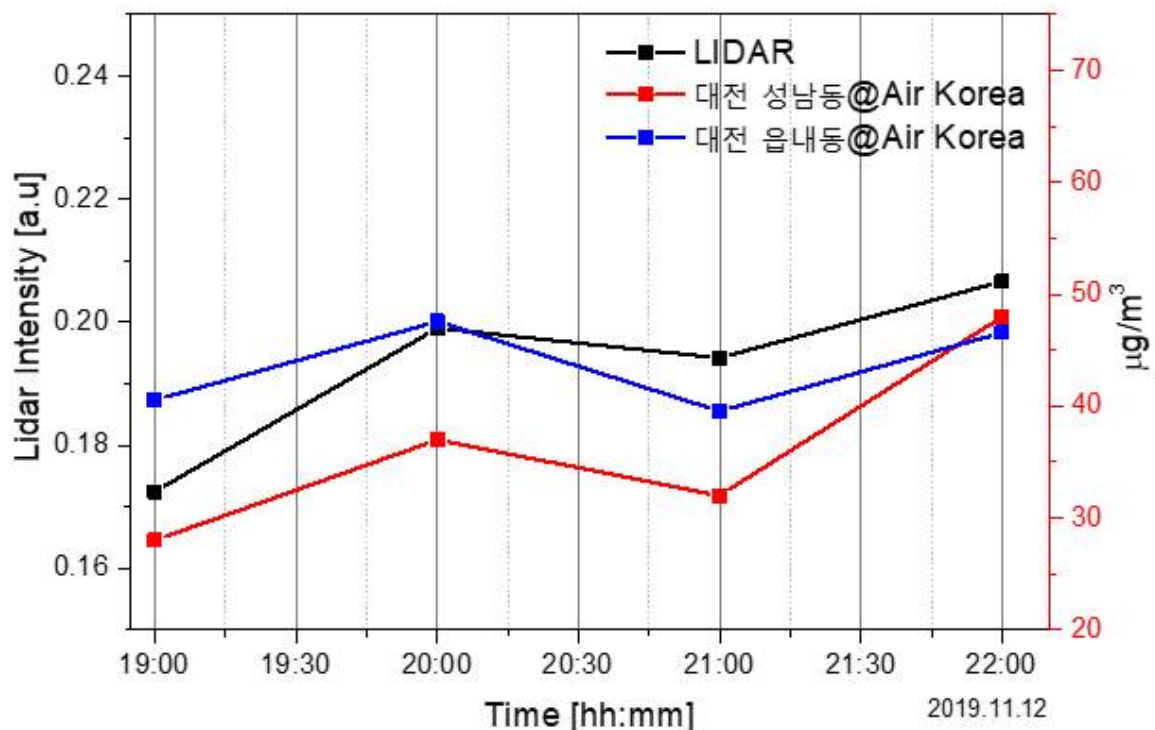


그림 3-32. 에어코리아 측정 자료와 비교한 미세 먼지 라이다 장치의 미세 먼지 농도 측정 결과

11) 미세 먼지 관측 장비의 오류 검출을 위한 품질관리(QC) 알고리즘 개발

- 미세 먼지, 온도, 압력 등을 측정할 수 있는 센서가 외부환경 등에 의하여 영향을 받았을 때, 각 데이터들이 오류인지 아닌지 판단할 수 있는 프로그램으로써, 총 5단계의 알고리즘으로 구성하였다.
- 1단계는 데이터의 완전성을 위하여 수행하는 결측 검사, 2단계는 센서의 물리적 한계를 검사하는 물리 한계검사(Physical range check), 3단계는 센서 데이터의 시계열을 검사하는 지속성 검사(Persistence check), 4단계는 단위시간 변동량의 한계 값을 검사하는 단계검사(Step check), 5단계는 연속된 3개의 데이터가 정상범위 안에 있는지 검사하는 중앙값 필터 검사(Median filter check)로 이루어져 있으며, 총 5단계를 통과하지 못한 데이터들은 오류 가능성을 의심할 수 있는 데이터로 분류하였다.

1단계	결측 검사 (Missing check)	▪ 데이터의 완전성을 위하여 수행 ▪ 일부 요소의 경우 누락된 자료가 다른 요소의 경우보다 중요함
2단계	물리한계 검사 (Physical range check)	▪ 관측장비의 관측범위를 벗어나는지 여부 판단 ▪ 기기의 Range 범위를 벗어나는지 여부 판단
3단계	지속성검사 (Persistence check)	▪ 관측 장비에 장애가 발생하여 관측 값이 전혀 변화하지 않는 경우 ▪ 단위시간 변동량을 이용하여 일정시간 동안 값의 변화가 있는지 여부를 판단
4단계	단계 검사 (Step check)	▪ 단위시간 변동량의 한계 값을 산출하여 관측자료의 정상 여부 판단
5단계	중앙값 필터 검사 (Median filter check)	▪ 센서 데이터의 중앙값(Median)과 현재 센서 데이터 값의 차이가 일정 한계치를 초과하는지 확인

그림 3-33. 미세 먼지 라이다 시작품의 5단계 QC 알고리즘 확인 방안

4. 2차년도 과제 수행 과정 및 수행 내용

1) 2차년도 과제 수행 목표

- 2차년도에는 “현장 적용 가능한 오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측 장비 시제품 개발”이라는 연구과제 수행 목표를 세웠으며, 1차년도 연차 평가 결과를 반영하여 다음과 같은 세부 개발 내용 및 기술 개발 목표를 설정하였다.
 - 시제품 구성요건 분석
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시제품 H/W 설계 및 제작
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시제품 S/W 개발
 - 시제품 자체 성능 평가
 - 미세 먼지 종류(PM 10, PM 2.5)를 구별하기 위한 기초 기술 개발
 - (위탁과제) 개발된 알고리즘을 실제 관측 데이터에 적용 및 보안
 - (위탁과제) 데이터 중앙처리장치의 데이터 품질관리(QC) 알고리즘 개발
- 기술 개발 목표_2차년도
 - 측정 거리 (Km) : 5 Km 이내
 - 거리 분해능 (m) : 7.5 m 이내
 - 최대 스캔 속도 (deg/sec) : 20
 - 관측 주기 (sec) : 120
 - 측정 정밀도 (관측기기와의 상관관계) : 0.70 이상

2) 시작품 보안 및 검토

- 레이저 광원 변경
 - 1차년도 미세 먼지 관측 라이다 시작품은 532 nm 파장의 레이저를 사용하여 미세 먼지의 농도 관측을 목적으로 개발하였다.
 - 그림 4-1은 빛의 파장에 대한 눈의 원추세포 반응을 나타낸 그래프이다. 532 nm 파장은 가시광선 영역(Visible)으로 사람의 눈에 가장 민감하게 반응하는 파장으로 532 nm는 적은 광량으로도 사람에게 치명상을 입힐 수 있음을 나타낸다.
 - 그림 4-2는 레이저 안전등급(Laser safety)규격인 IEC 60825 표준을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯, 레이저 파장에 노출되는 시간이 같을 경우 가시광선 영역의 레이저(532 nm)는 자외선(UV)파장대의 레이저(355 nm)와 적외선(IR)파장대의 레이저(1064 nm)보다 최대 허용 광량이 작음을 알 수 있다.
 - 레이저 빔에 1초 동안 노출되었을 경우 532 nm 파장의 최대 허용 광량은 0.003 W/cm^2 , 1064 nm 파장은 0.01 W/cm^2 , 355 nm 파장은 0.8 W/cm^2 이하로 다른 파장에 비하여 0.6 배에서 100 배 이하로 출력이 낮아야 안전하다.
 - 라이다 장치의 성능은 레이저 출력에 비례한다. 따라서 레이저 안전 기술을 만족하여 532 nm 파장의 레이저의 출력을 낮추게 되면, 미세 먼지와 같은 에어로졸에 의한 산란 빛의 양의 줄어들어 라이다 장치의 성능이 저하 될 수 있다.
 - 본 장비는 사업장, 건설현장 등에서 발생하는 미세 먼지 발생원 추적 및 주요 오염원을 도출하는 목적으로 개발되는 장비로서 발전되는 레이저는 눈에 띄지 않고, 안전해야 하기 때문에 532 nm 파장의 레이저는 적절하지 못하다는 판단되어 다른 파장의 레이저로 변경이 필요할 것으로 예상된다.
 - 그리고 본 장비의 초기 목적은 미세 먼지의 농도(PM 10)를 측정하는 것이었으나, 1차년도 연차 실적

발표를 진행하면서 미세 먼지뿐만 아니라 초미세 먼지(PM 2.5)의 농도 산출의 필요성이 요구되었다. 미세 먼지 뿐 아니라 초미세 먼지의 농도를 관측하기 위해서는 한 파장의 레이저로는 관측이 어렵다. 그렇기 때문에 두 파장의 레이저 광원으로 변경이 필요하게 되었으며, 레이저 안전등급은 가시광선(Visible) 파장대의 레이저보다 자외선(Ultra Violet) 파장 대와 적외선(Infra Red) 파장 대의 레이저가 안정적이기 때문에 532 nm 파장의 레이저는 제거를 하고 355 nm와 1064 nm 파장의 레이저 광원으로 변경을 하였다.

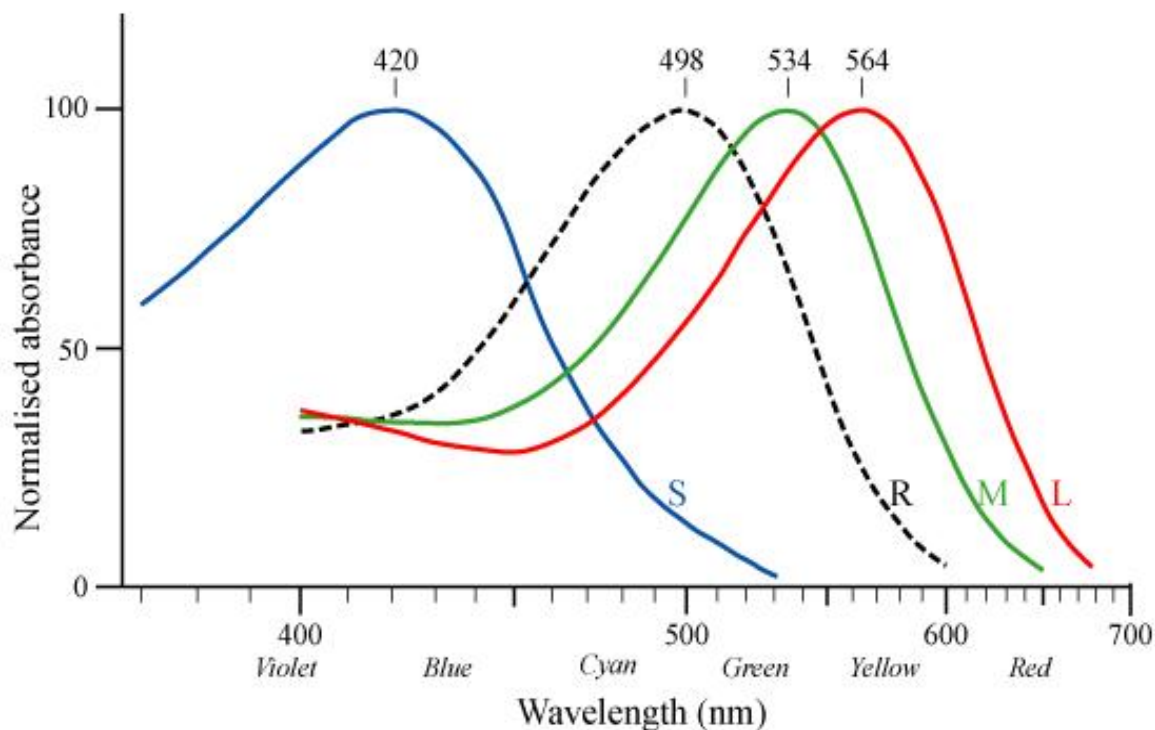


그림 4-1. 빛의 파장에 대한 망막 원추세포 반응

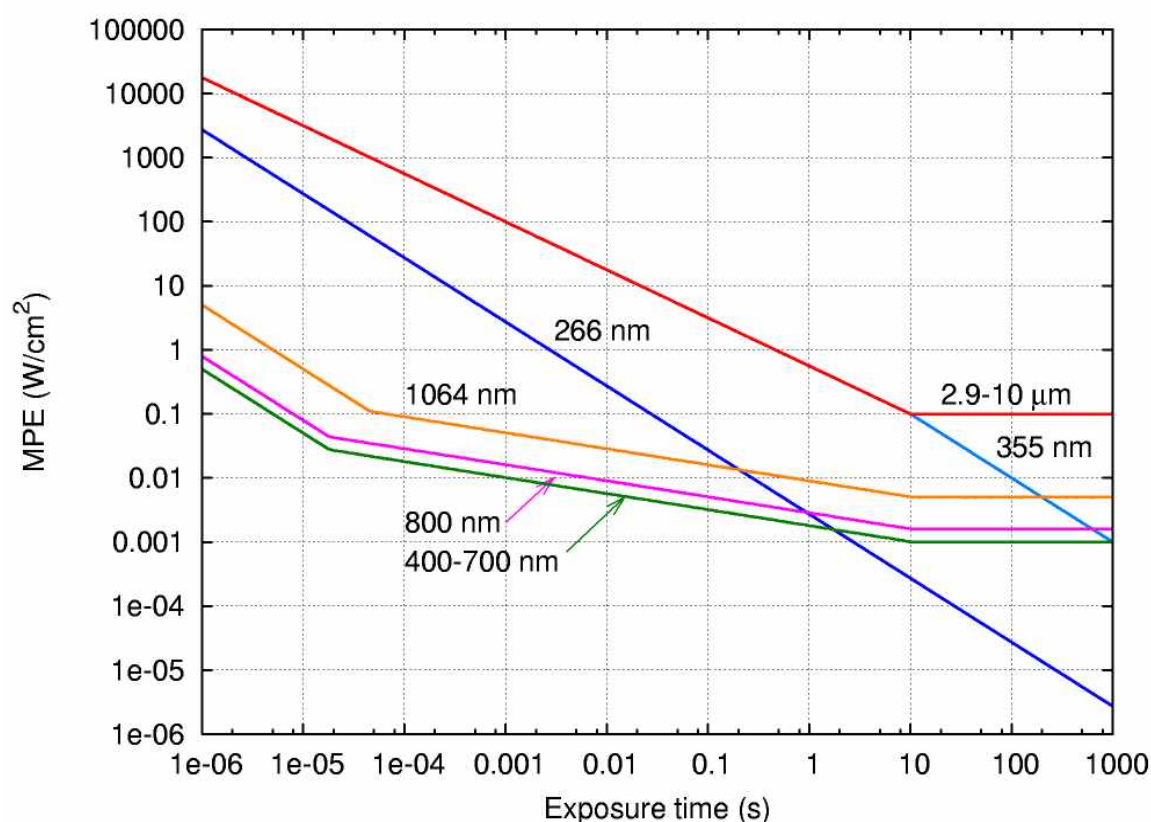
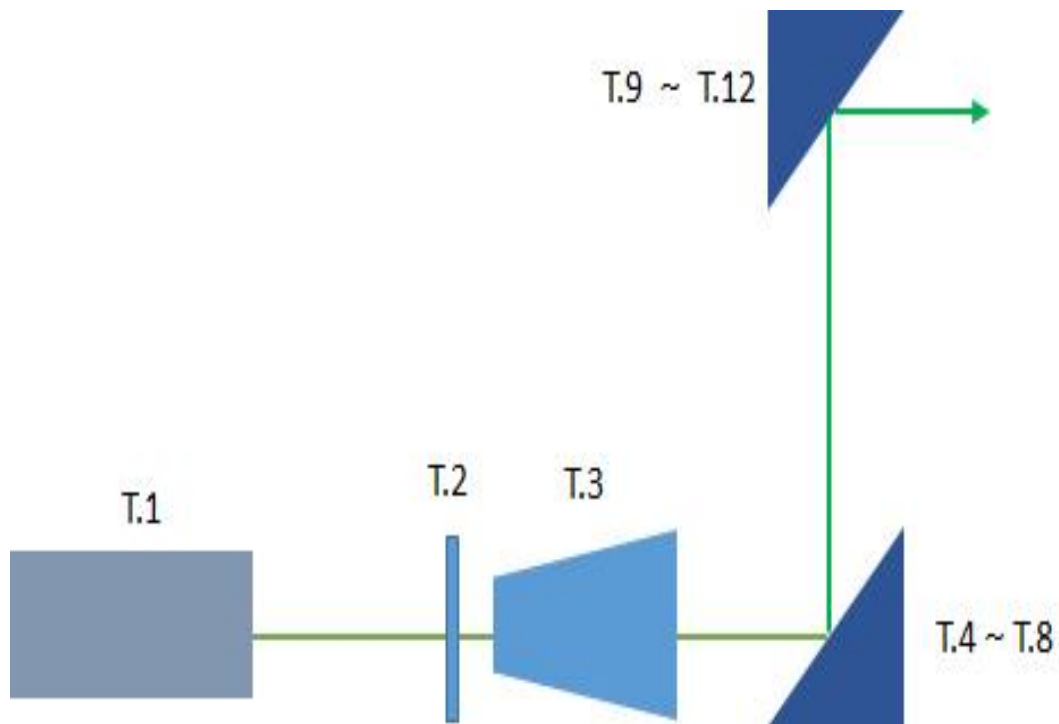


그림 4-2. IEC 60825에 따른 시준 레이저 빔의 노출시간에 따른 최대 허용 광량(MPE)

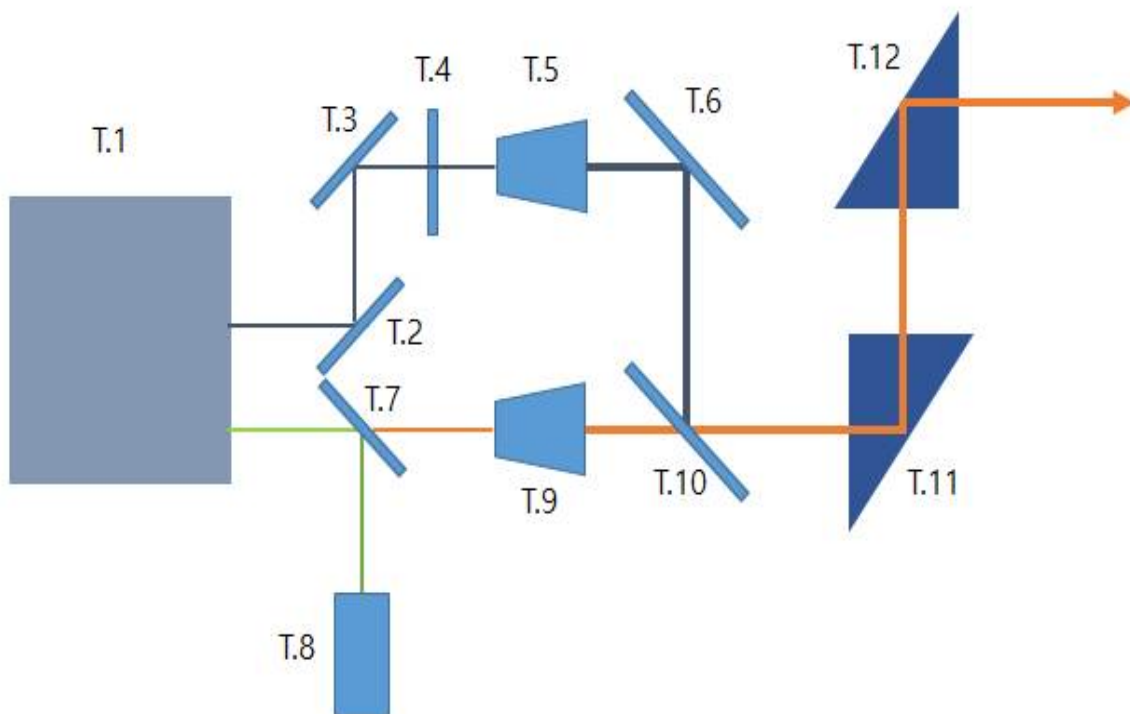
- 미세 먼지 라이다 장치의 레이저광원은 사람의 눈에 영향을 미치는 가시광선 영역의 532 nm 파장의 레이저를 대신하여 자외선 파장대인 355 nm와 적외선 파장대인 1064 nm의 레이저 광원을 사용하기로 결정을 하였다.
- 또한 1차년도 평가 결과, 실생활에 유용한 PM 10과 PM 2.5를 구분하기 필요하다는 의견이 있었으며, 이를 위해선 2개의 파장의 레이저 빔을 이용하여 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호의 계측이 필요하다. 따라서 1064 와 355 nm 파장을 산란 신호의 계측이 필요할 것으로 예상되며, 1차년도에 사용한 Ultra 50 레이저의 경우, 355, 532 및 1064 nm 파장의 레이저 빔을 동시에 발진시킬 수 있다. 따라서 532 nm 파장을 제외한 355 및 1064 nm 파장을 사용하여 미세 먼지를 측정할 수 있도록 라이다 장치의 수정이 필요하다.
- PM 10과 PM 2.5를 구분하여 측정하는 라이다 장치를 구성하기 위하여 레이저 송·수신부의 광학계 변경이 필수적으로 요구된다.

3) 시제품 송·수신 광학계 설계

- 미세 먼지 관측 라이다 시제품 송신 광학계 설계
 - 1차 년도에는 532 nm의 단일파장 레이저를 이용하여 송신 광학계의 구성을 하였으나, 시작품의 보안 및 검토 작업을 수행하여, 사람의 눈에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 523 nm 레이저 파장을 영향이 적은 355와 1064 nm 파장으로 변경하려고 한다.
 - 레이저 광원의 변경에 따라 송신 광학계 구성의 변경이 필요하게 되어 2 차년도 시제품의 송신 광학계는 355 nm와 1064 nm 두 파장의 레이저를 대기 중으로 조사할 수 있도록 아래의 그림과 같이 광학 설계를 진행하였다.
 - 시작품에서 사용한 Quantel 사의 Ultra 50 모델의 레이저는 1064, 532, 355 nm 파장의 레이저를 동시에 발진할 수 있는 모델이다.
 - 따라서 동일한 레이저 발진기를 이용하여 기존 532 nm 파장을 대신하여 1064 nm 와 355 nm 파장의 레이저를 대기 공간상으로 송신할 수 있도록 레이저 송신 광학계를 변경해야 한다. 그러나 Ultra 50 모델의 레이저는 하나의 공진기에서 355 nm와 1064 nm의 파장이 동시에 발진하지만 하나의 포트에서 발진되지 않고 두 포트에서 발진되기 때문에 두 파장의 발진경로가 다르게 나타난다. 이와 같은 원인은 1064 nm 파장을 레이저를 355 nm 파장의 레이저 빔으로 변환하기 위하여 하모닉스들을 거치기 때문이다.
 - 서로 다른 경로에서 발진하는 1064 와 355 nm 파장의 레이저를 다시 하나의 경로로 결합하는 장치가 필요하며, 이를 위한 설계 변경이 필수적으로 요구된다.
 - 따라서 355 nm의 레이저는 반사거울(T.2, T.3 - Reflect mirror)을 이용하여 광 경로의 이동하고 색선택거울(T.6, T.10 - Dichroic mirror)을 이용하여 1064 nm의 레이저와 병합하여 동일한 경로로 대기 중으로 조사할 수 있도록 송신 광학계를 변경하였다.
 - 그림 4-3은 1차년도의 시작품에서 적용된 레이저 송신 광학계와 2차년도 시작품에 적용된 레이저 송신 광학계를 차이를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 사람의 눈에 덜 치명적이며, PM 10 과 PM 2.5 를 구분하기 위하여 1064 와 355 nm 파장의 레이저 빔을 사용하기 위하여 장치의 구성이 변경된 것을 볼 수 있다.
 - 표 4-1은 레이저 송신 광학계의 변경에 의하여 변경과 광학 부품의 내역과 용도를 나타낸 것이다. 미세 먼지 계측을 위하여 532 nm 파장에서 355, 1064 nm 파장을 사용하여, 레이저 송신 파장에 맞는 광학 부품을 선정하였다.



(a) 1 차년도 미세 먼지 라이다 시제품 시제품의 레이저 송신 광학계 구성도



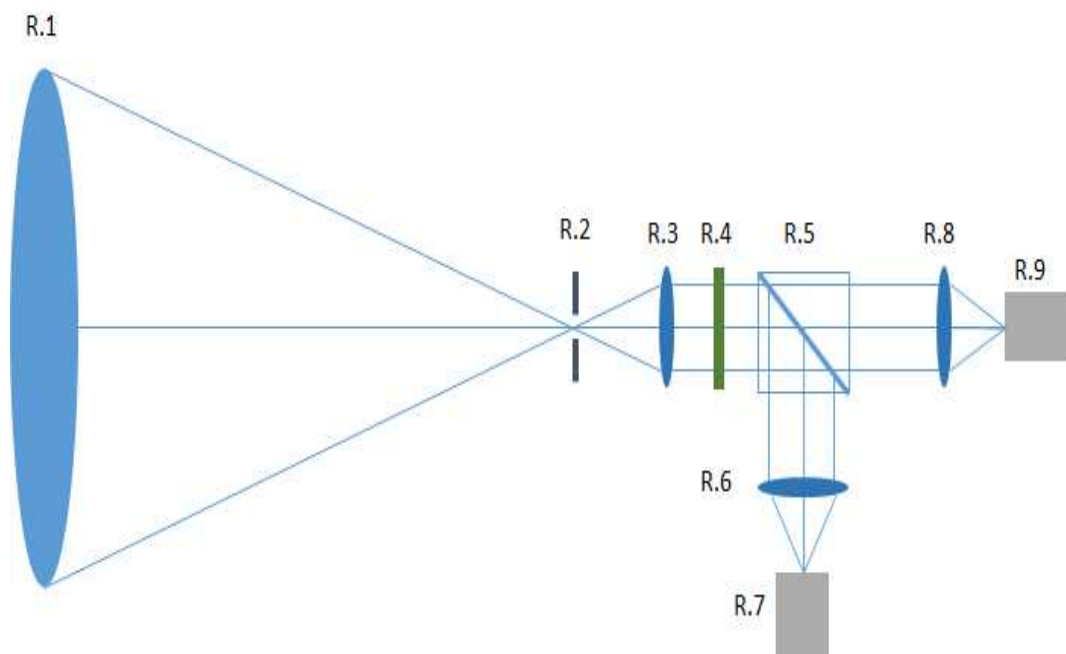
(b) 2 차년도 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 송신 광학계 구성도
그림 4-3. 미세 먼지 라이다 장치의 송신 광학계 변경에 따른 구성도 변화

표 4-1 미세 먼지 관측 라이다 시제품 수신 광학계 구성품

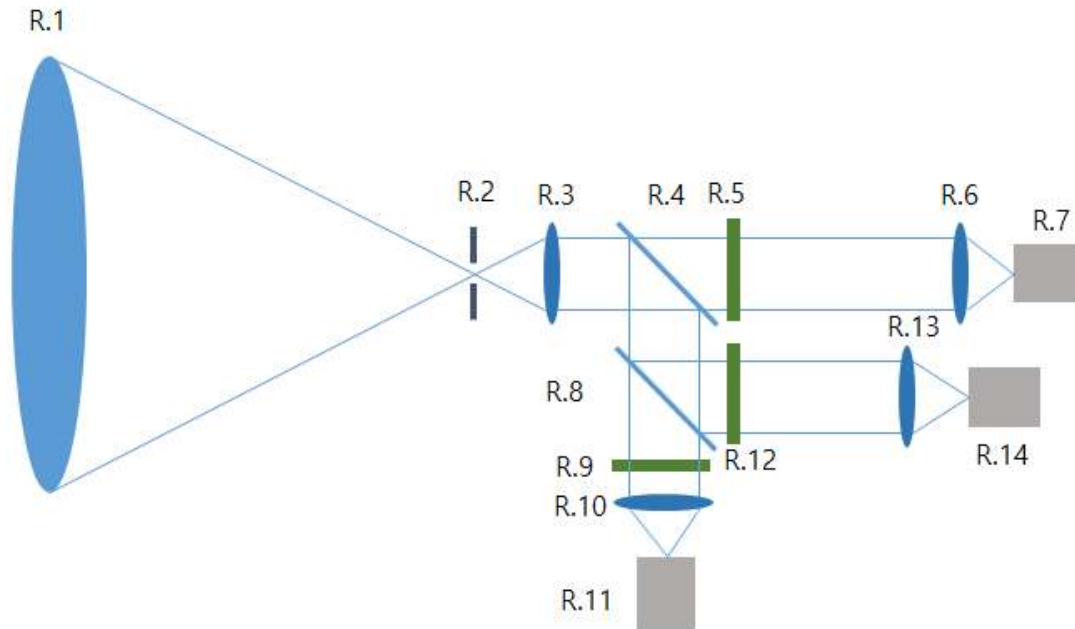
No	품목	용도
T.1	Nd:YAG Laser	송신용 레이저 광원
T.2	45 deg Mirror	355 nm 경로 변경
T.3	45 deg Mirror	355 nm 경로 변경
T.4	Wave plate	355 nm 편광 상태 확인
T.5	Beam Expander	355 nm 빔 발산각 조정
T.6	45 deg Mirror	355 nm 경로 변경
T.7	Beam Splitter	355 nm 경로 변경
T.8	Beam Dump	532 nm 빔 제거
T.9	Beam Expander	1064 nm 빔 발산각 조정
T.10	Dichroic Mirror	355 nm, 1064 nm 병합
T.11	45 deg Mirror	355 nm, 1064 nm 경로 변경
T.12	45 deg Mirror	355 nm, 1064 nm 경로 변경

• 미세 먼지 관측 라이다 시제품 수신 광학계 설계

- 그림 4-4는 미세 먼지 관측 라이다 장치의 수신 광학계 변화를 나타낸 그림이다. 그림 4-4(a)는 미세 먼지 관측 라이다 시제품에 사용된 수신 광학계 구성도를 나타낸 것이며, 그림 4-4(b)는 미세 먼지 관측 라이다 시제품에 사용될 수신 광학계의 구성도를 나타낸 것이다.
- 레이저 파장에 의한 사람의 안전 및 미세 먼지의 PM 10 및 PM 2.5의 구분을 위하여 레이저 송신 광학계를 변경하였으며, 이에 따른 레이저 송신 광학계의 변경이 필수적으로 요구된다.
- 기존 미세 먼지 라이다 시제품을 개발함에 있어 추가 측정항목에 대한 부분을 반영하여 레이저 수신 광학계의 관측 채널 추가가 용의하도록 개발되었다. 이를 활용하여, 그림 4-4(b)와 같이 광 분할기(Beam splitter)를 추가 설치하여 관측 채널을 늘릴 수 있도록 구성도를 변경하였다.
- 산란된 신호는 망원경을 이용하여 수집을 하고, 수집된 신호는 Aperture를 이용하여 배경신호를 1차적으로 제거하고, 배경신호가 제거 된 신호는 빔 분리기를 이용하여 다른 3 파장으로 신호 분리할 수 있도록 구성하였다.
- 분리된 신호는 각 파장에 따른 필터를 이용하여 선택적으로 센서에 입력이 되도록 설계를 진행하였다.
- 표 4-2는 수신 광학계의 변경에 따라 항목이 추가된 광학 부품의 종류와 용도를 정리한 것이다.



(a) 1 차년도 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 수신 광학계 구성도



(b) 2 차년도 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 수신 광학계 구성도

그림 4-4. 미세 먼지 라이다 장치의 관측 채널 추가에 따른 수신 광학계 구성도 변화

표 4-2 수정된 미세 먼지 관측 라이다 시제품 수신 광학계 구성품

No	품목	용도
R.1	Telescope	산란된 신호 수집
R.2	Aperture	배경신호 제거 및 광 시야각 조절
R.3	Collimation Lens	산란된 신호 정렬
R.4	Dichroic Mirror	신호 분리
R.5	Narrow band-pass filter	배경신호 제거
R.6	Focusing Lens	R.7 센서에 신호 집속
R.7	Sensor	신호 획득
R.8	Dichroic Mirror	신호 분리
R.9	Narrow band-pass filter	배경신호 제거
R.10	Focusing Lens	R.11 센서에 신호 집속
R.11	Sensor	신호 획득
R.12	Narrow band-pass filter	배경신호 제거
R.13	Focusing Lens	R.11 센서에 신호 집속
R.14	Sensor	신호 획득

4) 시제품 내부 구성품 설계 및 제작

• 미세 먼지 라이다 주요 광학 부품의 성능 분석 및 설계

- 광학설계 프로그램인 ZEMAX를 사용하여, 송신 광학계와 수신 광학계에 사용하는 중요 광학부품에 대한 설계를 하고, 성능을 분석하였다.
- 레이저빔의 크기는 3 mm, 빔 발산각은 1.5 mrad이므로 수 km에서 레이저의 빔은 너무 퍼지게 된다.
- 1 km를 기준으로 보면, 광학 수차가 회절한계인 이상적인 조건의 경우에도 빔의 크기가 1.5 m 이상이 된다.
- 따라서 빔 확대기를 사용하여 빔의 크기를 키우고, 빔 발산각을 줄여 대기 중으로 조사해야 한다.
- 본 설계에서는 10배의 빔 확대기를 사용하여 빔 발산각을 1/10 로 줄인 후 대기 중으로 조사하는 광

학계를 구성하였고, 이 경우 1 km에서의 빔의 크기는 회절한계의 경우에도 0.15 m 정도이다.

- 그림 4-5는 레이저빔을 확대하여 대기 중로 조사하는 레이저 송신부의 설계 및 평가 결과를 나타낸다.

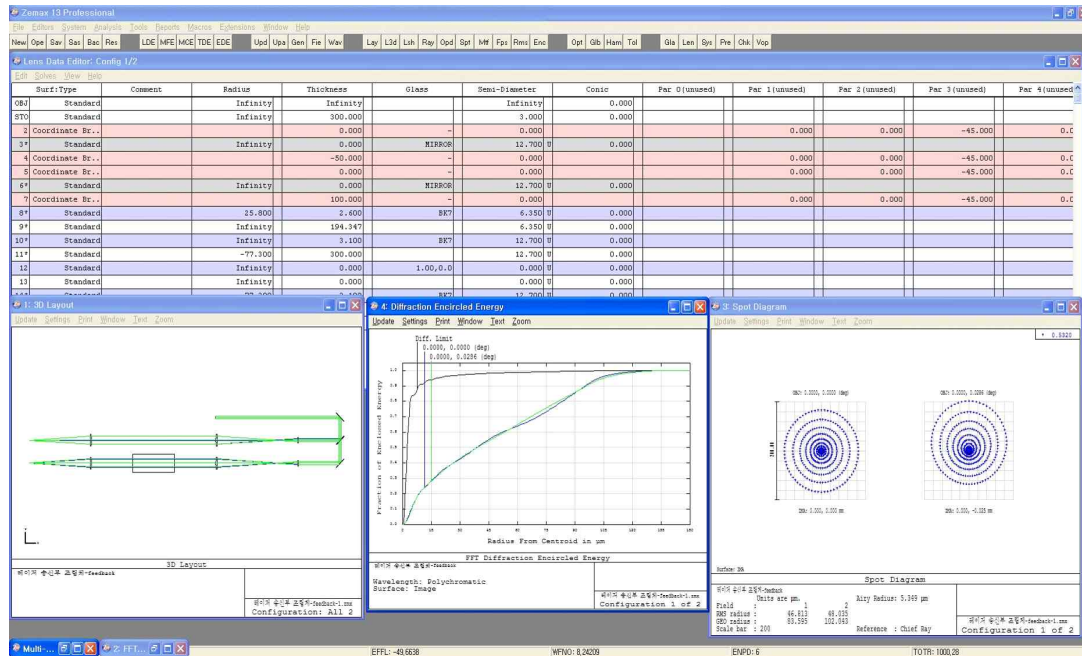


그림 4-5. 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 송신 광학계 설계 및 평가

- 라이다에 많이 사용하는 망원경으로는 뉴턴식 망원경과 카세그레인식 망원경이 있다.
- 뉴턴식 망원경의 경우 비점수차가 발생 한다는 단점이 있어 시제품에는 카세그레인식의 망원경을 선정하여 설계를 하였다.
- 다음 그림 4-6은 수신부에 사용하는 망원경의 설계 결과로 뉴턴식 망원경과 카세그레인식의 망원경에서의 비점수차를 비교한 것으로 동일한 화각의 필드를 주었을 때, 카세그레인식의 망원경은 회절한계에 빛이 들어오는데 비해, 뉴턴식 망원경에서는 집속 점의 크기가 회절한계에서 굉장히 많이 벗어남이 나타난다.

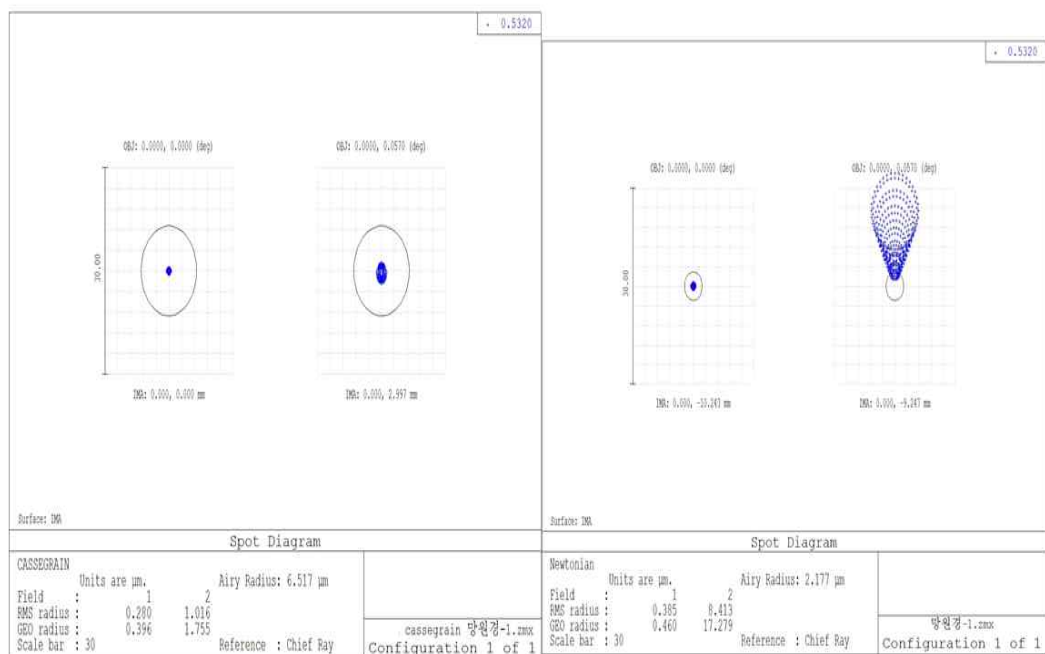


그림 4-6. 뉴턴식 망원경과 카세그레인 망원경의 비점수차에 의한 집속패턴-각도 (1 mrad 일 경우)

- 그림 4-7은 센서에 집속되는 광 분포를 계산한 것으로 망원경을 통과한 빔은 시준렌즈를 통과하여 지름 5 mm의 평행한 빔의 형태로 간섭필터를 통과하여 배경신호가 제거되고, 간섭필터를 통과한 빔은 집속렌즈를 이용하여 센서로 집속됨. 센서에 집속될 때 빔의 크기는 계산 결과 200 μm 로 광센서의 광센서에 집속시키기에는 충분함을 확인 하였다.

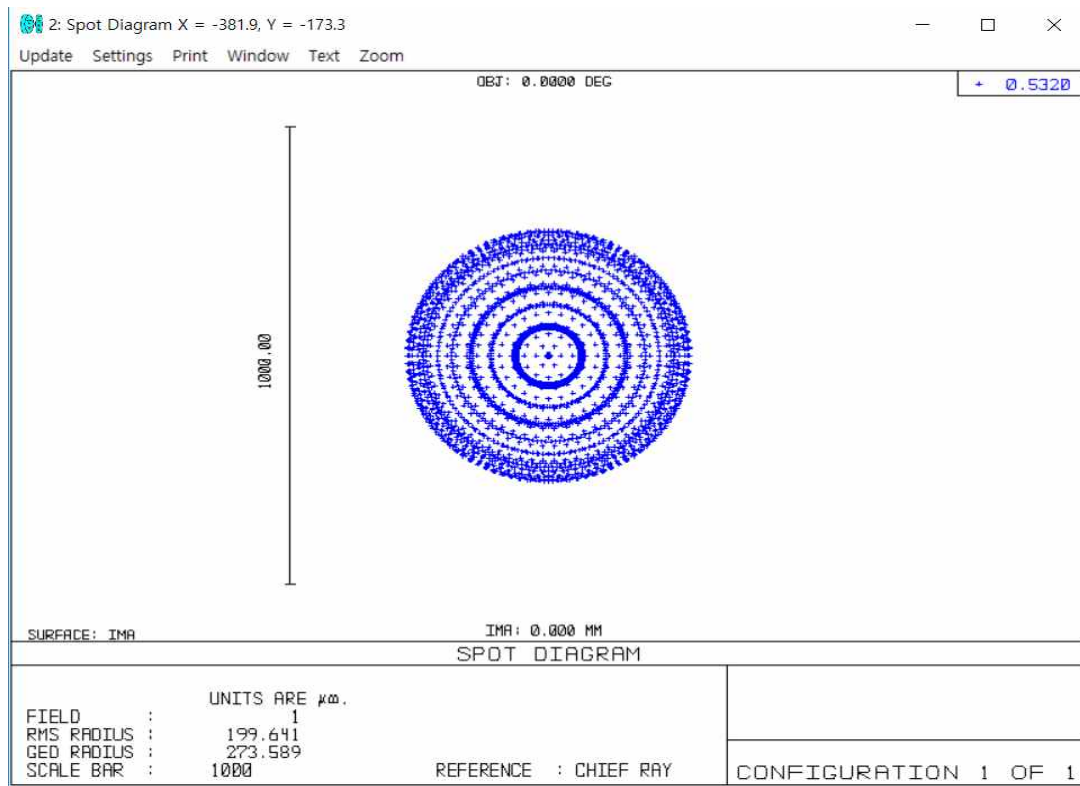
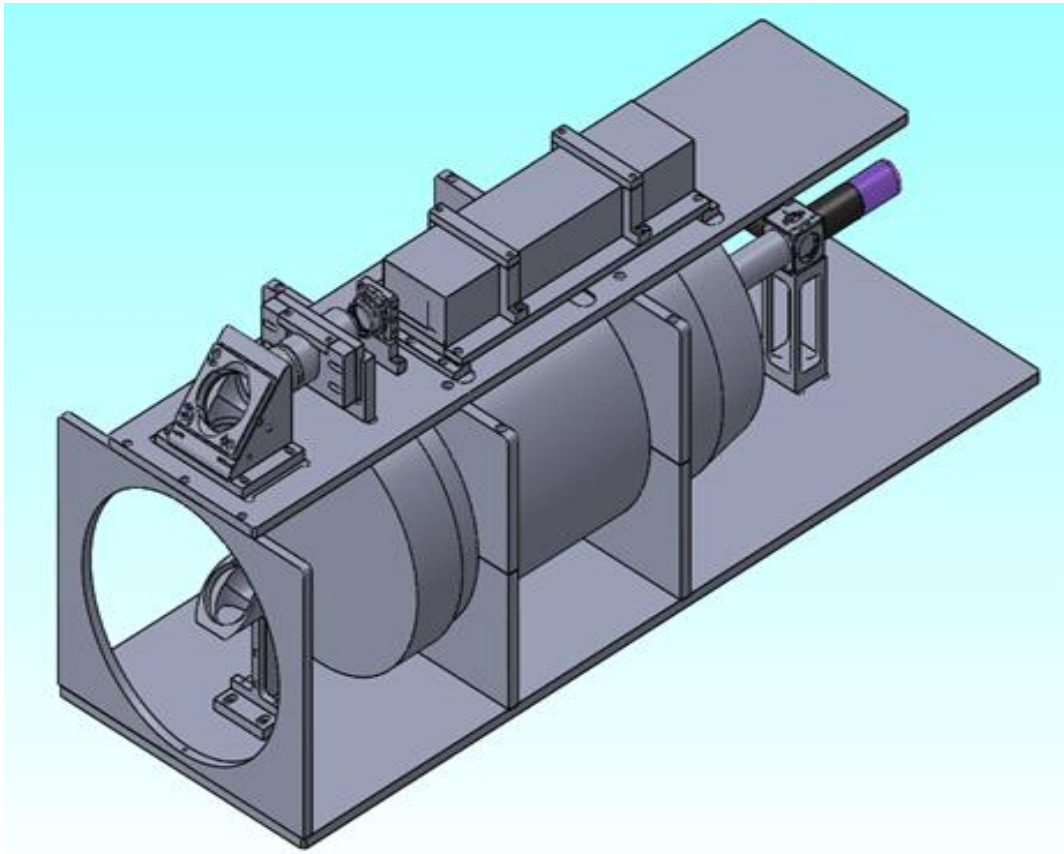


그림 4-7. 미세 먼지 라이다 장치 센서에 집속되는 광 분포

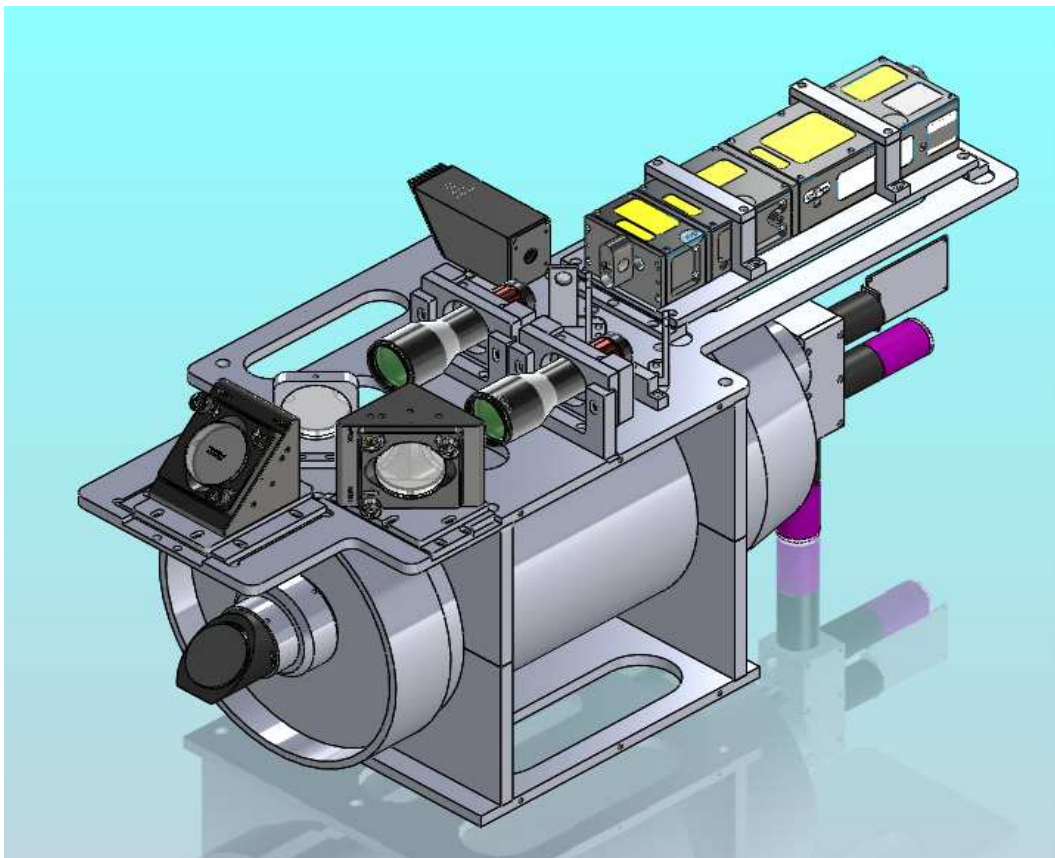
5) 시제품 H/W 설계 및 제작

• 레이저 송 · 수신 광학계 마운트 설계

- 미세 먼지 라이다 시제품은 1차년도에 개발된 미세 먼지 라이다 시제품과는 달리 미세 먼지의 공간적 분포를 계측하기 위하여 스캐닝 장치와 연결이 필수적으로 요구된다.
- 스캐닝 모터는 Pan/Tilt 가 가능한 2축 이송 형태의 스캐닝 장치가 필요하며, 미세 먼지를 계측하기 위한 라이다 장치를 고정하고 지지하는 역할을 해야 한다.
- 스캐닝 모터의 움직임이 원활하게 작동하기 위해서는 송 · 수신 광학계의 무게를 최소화하여 스캐닝 모터에 과부하가 걸리지 않도록 해야 한다.
- 스캐닝 모터에 과부하가 걸리게 되면 Azimuth방향으로 스캔 할 경우에는 큰 무리를 주지 않지만 Elevation방향으로 스캔 시 각도의 오류가 발생하게 되고, 지속적으로 과부하가 걸리게 되면 Elevation방향으로 작동이 되지 않는 문제가 발생할 염려가 있다.
- 그림 4-8은 레이저 송 · 수신 광학계의 내부 고정 마운트를 나타낸 그림으로서, 그림 4-8(a)는 1 차년도 미세 먼지 라이다 장치 시제품의 내부 고정 마운트 나타낸 것이며, 그림 4-8(b)는 2차년도에 레이전 송 · 수신 광학계의 변경 사항을 적용한 미세 먼지 라이다 장치 내부 고정 마운트를 나타낸 것이다.
- 레이저 송 · 수신 광학계의 변경에 따른 장치의 무게 증가 발생하여 스캐닝 모터에 무게 증가에 따른 부하가 발생할 수 있다. 따라서 송·수신 광학계 마운트 설계 시 고정을 하는데 필요하지 않는 부분은 제거를 하여 무게를 최소화 하였고, 제거한 부분을 통하여 광학계와 전장부에 연결하는 전원선, 신호선, 레이저 쿨링 관을 연결할 수 있도록 하였으며, 수평방향 회전 시 발생할 수 있는 각종 선들의 꼬임 현상이 없도록 설계를 진행하였다.



(a) 1차년도 미세 먼지 라이다 시작품 내부 고정 마운트 3D 모델



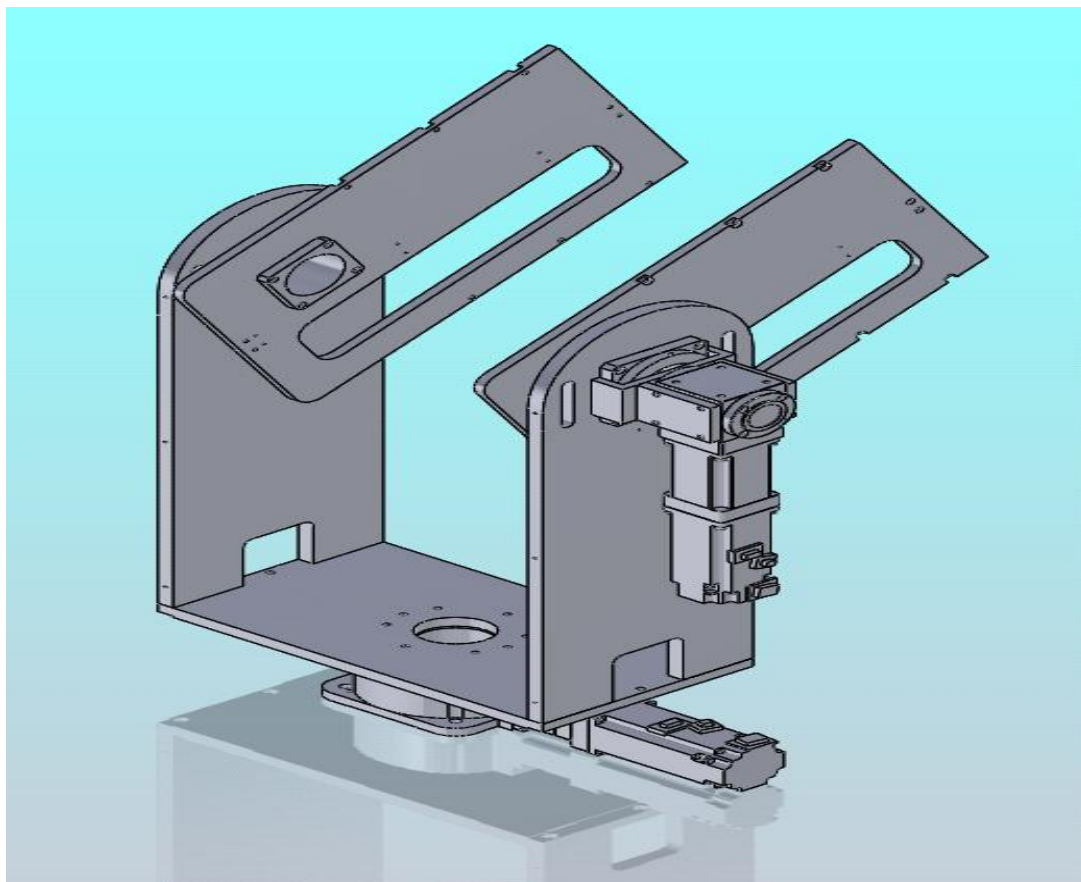
(b) 2차년도 미세 먼지 라이다 시제품 내부 고정 마운트 3D 모델

그림 4-8. 미세 먼지 라이다 시제품의 내부 고정 마운트 변화

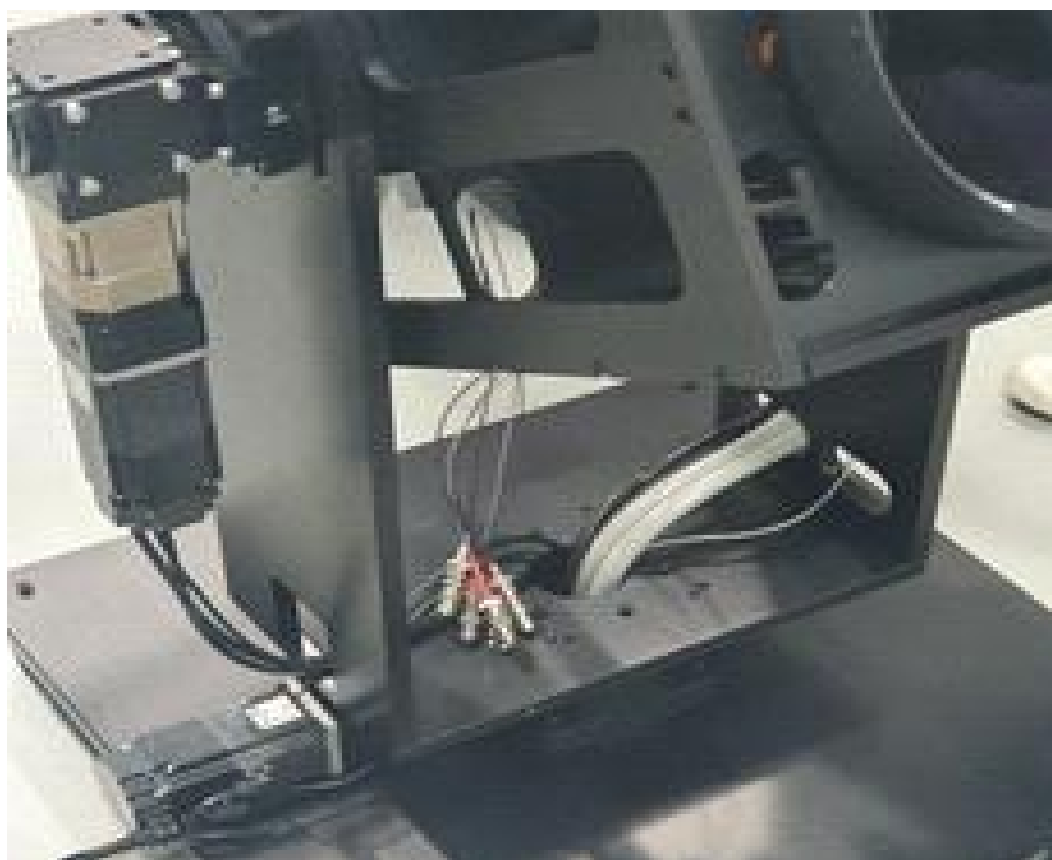
6) Scanning System 구성품 선정 및 제작

• 2축 스캐닝 시스템 선정 및 제작

- 미세 먼지 라이다 장치의 스캐닝 시스템의 경우, 대기 공간상의 모든 지점에 대한 미세 먼지의 양 및 분포의 측정이 가능해야 한다. 따라서 지표면을 제외한 지상 공간에 대한 Azimuth 방향과 Elevation 방향에 대한 레이저 송신이 가능하여 한다.
- Azimuth방향과 Elevation 방향으로 송·수신 광학계가 회전이 가능하도록 스캐닝 모터의 구동이 가능해야 함으로 스캔 모터 2개를 이용하여 2축 스캐닝이 가능하도록 설계 하였다.
- 미세 먼지 라이다 장치는 레이저의 송 · 수신 광학계가 내부 마운트로 고정 되어 있으며, 내부 마운트와 스캐닝 모터를 결합하여 대기 공간상의 미세 먼지의 양 및 분포를 측정하게 된다. 따라서 미세 먼지 라이다 장치의 무게와 Azimuth와 Elevation 방향의 으로 라이다 장치를 이송하여야 하기 때문에 강한 토크가 발생하는 특징을 갖는다.
- 스캐닝 모터의 경우, 스캐닝 모터를 구성하는 장치의 결합을 위하여 일정한 공차를 갖고 있으며, 이러한 공차는 스캐닝 모터의 회전 방향이 전환될 때, 뒤틀림(Backlash)에 의한 밀림 현상이 발생하게 된다. 밀림 현상은 라이다 장치의 무게 및 스캐닝 모터의 회전에 의한 속도에 큰 회전 토크가 발생하며, 회전 중 멈춤 현상이 발생하는 경우에는 강한 충격이 발생할 가능성이 높게 된다.
- 미세 먼지 측정을 위한 라이다 장치는 진동 및 충격 등에 민감한 광학 부품들로 구성되어, 밀림 현상에 의한 충격에 의하여 광학계의 정렬 등이 달라질 수 있는 가능성이 높다. 따라서 이러한 밀림 현상을 줄이기 위하여 스캐닝 모터를 서보 모터와 감속 배율이 높은 감속기를 결합하여 높은 회전 토크와 무게를 견디고, 충격이 덜 발생할 할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 시제품에 사용된 스캐닝 모터는 서보 모터와 감속기의 감속 배율을 조정하여 0.1°의 분해능으로 작동이 가능하며, 분당 회전수는 30 회전이 가능하도록 속도와 가속도를 설정하여 사용할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 장치에 사용된 스캐닝 시스템은 Azimuth방향으로 0 ~ 360° 스캔이 가능하도록 하였으며, Elevation 방향으로 미세 먼지 라이다 장치가 수평상태 있을 때를 0°로 기준 점을 설정하고, 이를 기준으로 Elevation 방향으로 -10 ~ 80° 까지 관측이 가능하도록 설계 개발하였다.
- 그림 4-9는 미세 먼지 라이다 시작품에 사용된 2축 스캐닝 모터의 3D 모델링 사진과 실제 제작된 결과를 나타낸 사진이다. 라이다 장치를 구성하는 레이저, 센서, 스캐닝 모터 연결 선 등을 제어 컴퓨터와 연결하기 위하여 Azimuth 방향으로 회전하는 모터의 중공축에 원형 구멍을 설치하여 각종 연결 선 등을 통과 시켜, Azimuth 방향으로 회전할 때, 각종 연결선들의 꼬임 현상이 발생하지 않도록 제작 하였다.
- 그림 4-10은 미세 먼지 라이다 시작품의 라이다 송 · 수신 광학계와 2축 스캐닝 모터를 결합한 3D 모델링 그림이다.
- 미세 먼지 라이다 시작품의 개발에 있어 각 장치의 결합 또는 교체 등을 결합하여 모듈화를 진행하였다.
- 미세 먼지 라이다 시작품은 레이저 송 · 수신 광학계가 내부 마운트를 통하여 하나의 모듈처럼 고정 되어 있으며, 내부 마운트에 나사 홀을 가공하여 스캐닝 모터의 브래킷과 연결하여 고정할 수 있도록 설계하였다.
- 스캐닝 모터의 경우, 서보 모터와 감속기로 구성되어 있으며, 각 모터의 경우, 모터 컨트롤 드라이버를 움직임을 제어 할 수 있도록 구성하였다. 또한 제어 컴퓨터에서 시리얼 통신을 이용하여 모터 컨트롤 드라이버에 연결이 가능하며, 모터의 구동 속도, 방향, 이송 양 등의 제어 컴퓨터에서 제어할 수 있도록 구성하였다.
- 그림 4-11은 2축 스캐닝 모터를 구동하는 모터 드라이버와 전기를 공급하는 장치를 나타낸 것이다. 2축 모터 작동 시 전기적 노이즈신호가 발생하여 센서에 영향을 줄 수 있어 노이즈필터를 이용하여 센서에 영향을 주지 않도록 모터컨트롤 드라이버를 제작하였으며, 모터의 오작동을 방지하고자 위치 이동 리미트 센서를 결합하였다.



(a) 미세 먼지 라이다 시제품의 스캐닝 모터 3D 모델링 사진



(b) 미세 먼지 라이다 시제품의 스캐닝 모터 제작 사진

그림 4-9. 미세 먼지 라이다 시제품의 스캐닝 모터 3D 모델 및 실제 제작 사진

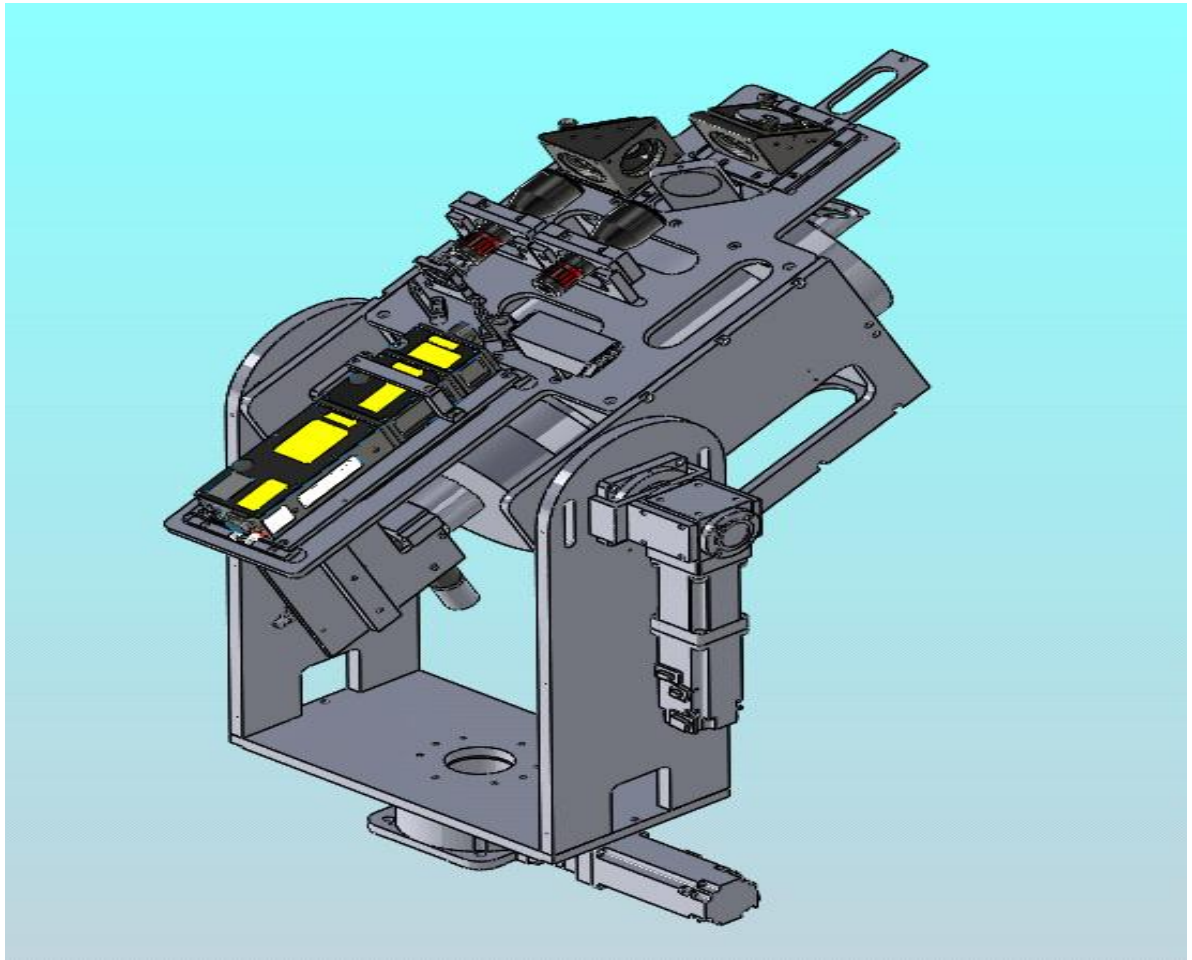


그림 4-10. 미세 먼지 라이다 시제품의 스캐닝 모터와 라이다 광학계 결합도

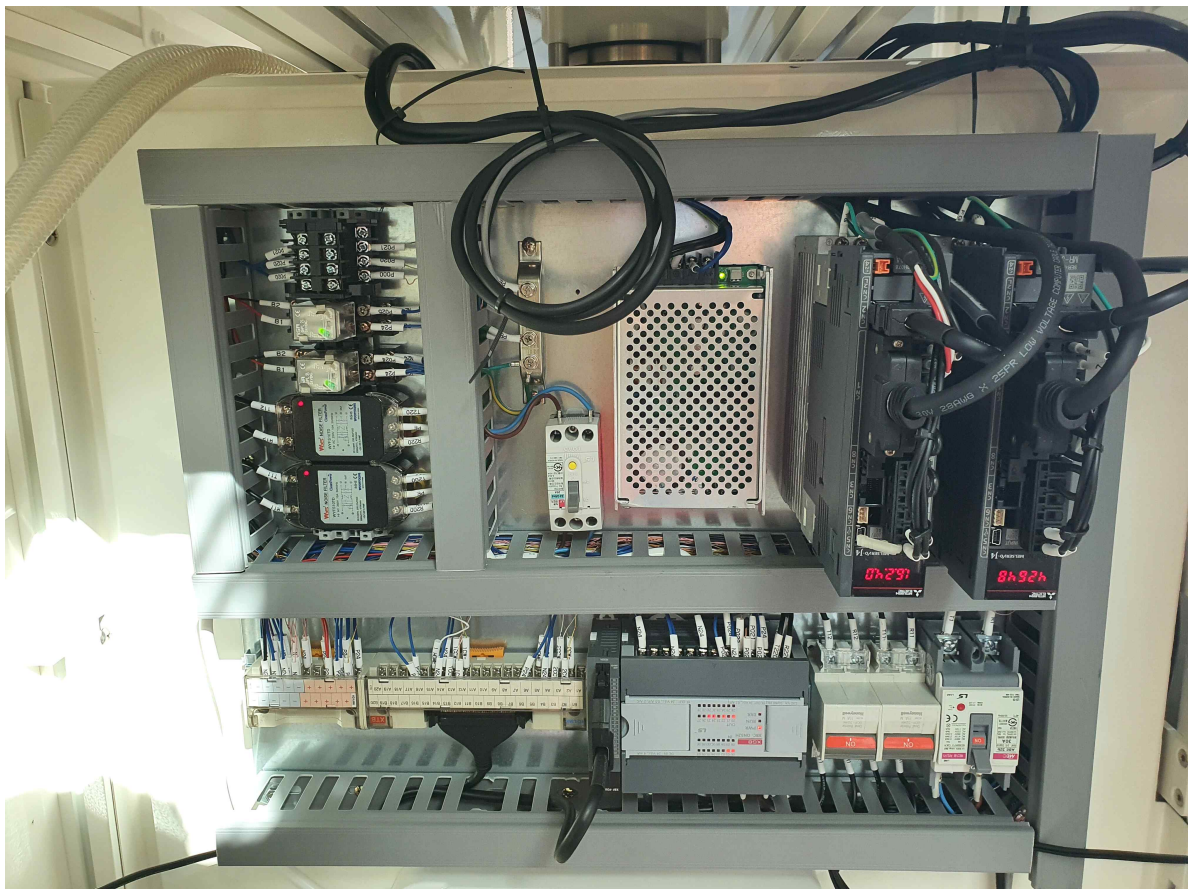


그림 4-11. 미세 먼지 라이다 시제품의 스캐닝 모터 컨트롤 드라이버

7) 전장부 구성품 선정 및 제작

• 미세 먼지 라이다 장치 전장부 설계

- 미세 먼지 라이다 장치의 전장부는 각 장치들에 전기를 공급하고 제어하는 역할을 하는 것을 말하며, 전장부를 고정하는 외함이 스캐닝 모터를 고정하는 역할 수행할 수 있도록 하였다.
- 그림 4-12는 미세 먼지 라이다 장치의 전장부의 주요 장치를 나타낸 것이다. 라이다 장치의 제어 컴퓨터의 전원을 공급하는 장치와 각 센서들의 전원을 공급하는 Power 보드, 레이저의 발진 및 온도 제어를 위한 Laser control 보드, 스캐닝 모터의 전원을 공급하는 Motion control 보드 등으로 구성되었다.
- 그림 4-13은 미세 먼지 라이다 시제품 전장부의 3D 설계 모델링 사진과 실제 개발된 미세 먼지 라이다 전장부 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 각종 전기 장치의 배선이 전장부 외함에서 보이지 않도록 배치하였으며, 전장부 외함 내부에 모니터를 설치하여 라이다 장치 제어 및 획득 신호의 관찰이 가능하도록 하였다.

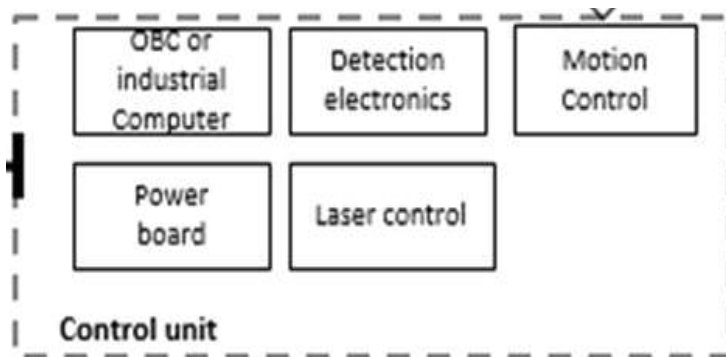
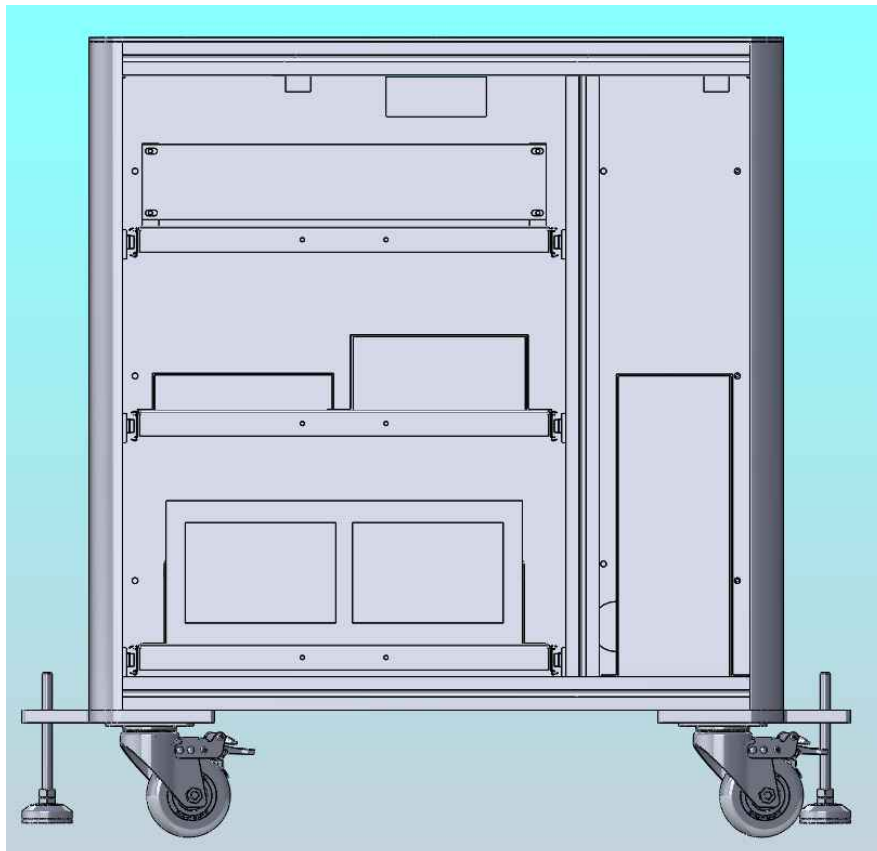
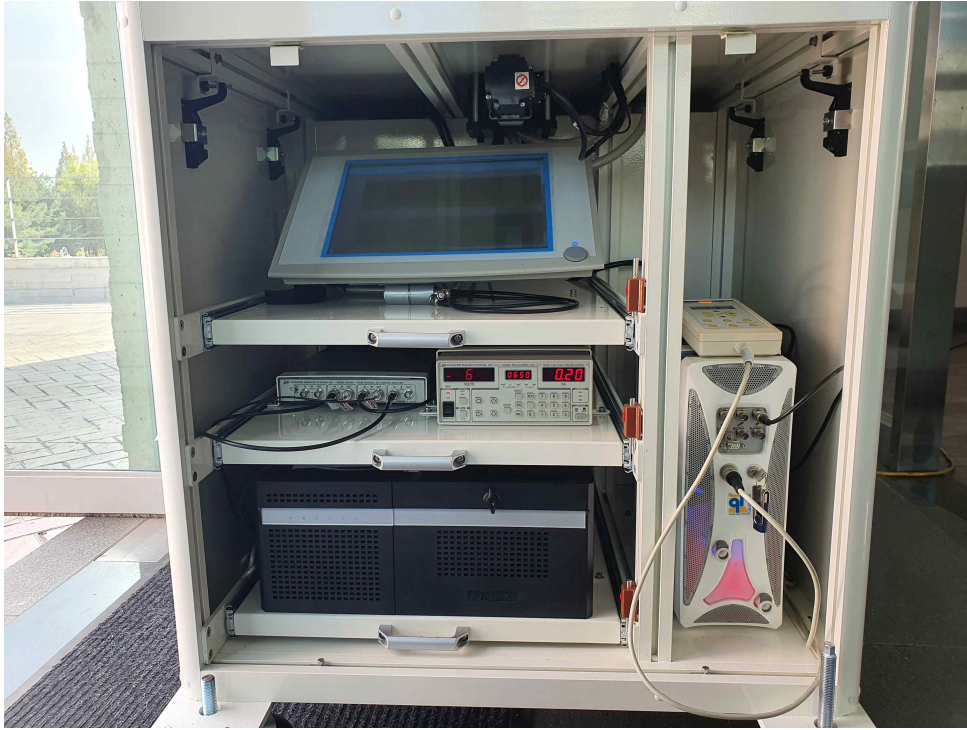


그림 4-12. 미세 먼지 라이다 시제품의 전장부 구성도



(a) 미세 먼지 라이다 시제품의 전장부 3D 모델링 사진



(b) 미세 먼지 라이다 시제품의 전장부 실제 구성 사진

그림 4-13. 미세 먼지 라이다 시제품 전장부 3D 구성도 및 실제 구성 사진

8) 시제품 외부하우징 H/W 설계 및 제작

- 송 · 수신 광학계, Scanning system, 전장부로 구성된 라이다의 외부의 충격으로부터 보호를 하기 위하여 외부 하우징 설계를 진행 하였다.
- 송 · 수신 광학계, Scanning system은 측정 간에 발생할 수 있는 선 꼬임현상이 없고, 외부의 충격을 방지하기 위하여 감싸는 형태로 설계를 진행하였다.
- 광학계의 앞부분에는 대기 중으로 레이저를 조사하고 송신 받는 부분은 보호윈도우를 장착할 수 있도록 하였으며, 이 부분을 제외하고 모두 외부에 노출이 되지 않도록 설계를 진행 하였다.
- 전장부의 외부케이스는 전장부 내에서 발생할 수 있는 열을 외부로 방출하기 위하여 공기 순환용 Fan을 장착하여 외부공기와 내부공기가 순환될 수 있도록 하였다.

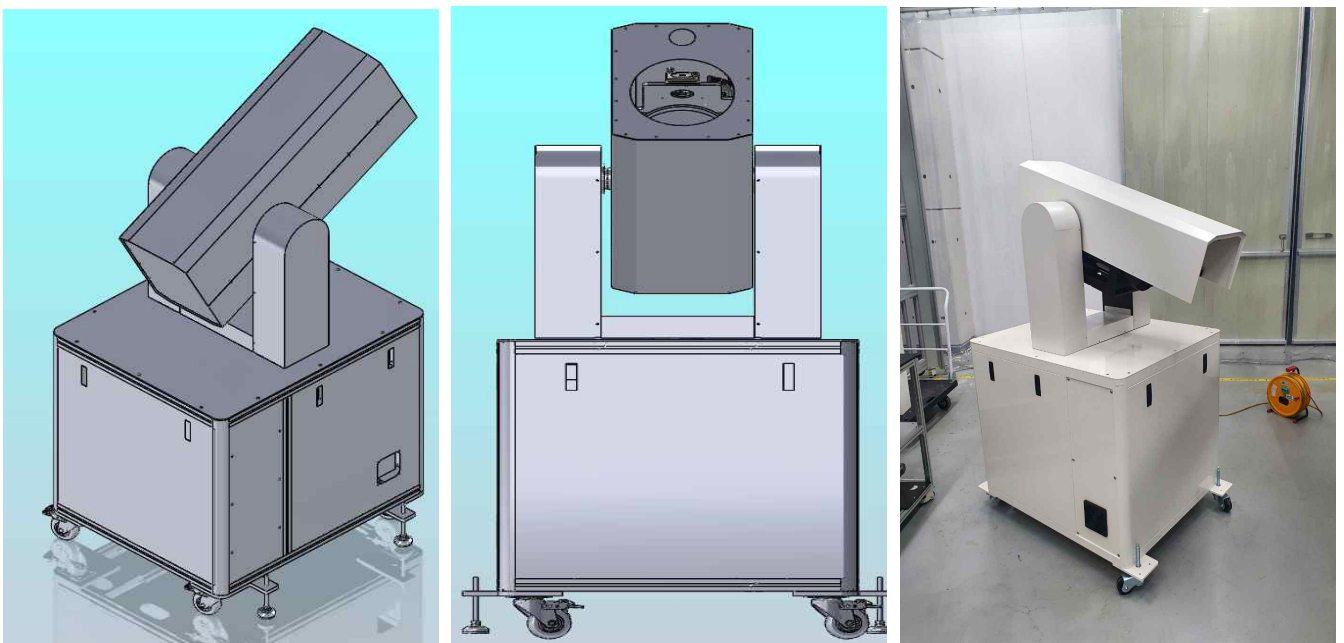


그림 4-14. 미세 먼지 라이다 시제품의 3D 모델링 사진 및 실제 제품 사진

9) 미세 먼지 특성(후방 산란계수, 소산계수) 분석 S/W 개발

- 라이다 방정식을 기초로 후방 산란강도를 이용하여 에어로졸 소산계수를 산출한다.

$$P(z) = \frac{EC}{z^2}(\beta(z))\alpha(z) \quad (1)$$

- $P(z)$ 는 고도 z 에서 후방 산란된 레이저 빛의 세기, E 는 레이저 빛의 초기세기, C 는 기기상수 β 는 후방산란계수, α 는 소산계수를 나타내며 각각은 공기분자(아래첨자 *mol*)와 미세 먼지(아래첨자 *aer*)에 의해 영향을 받기에 $\beta = \beta_{mol}(z) + \beta_{aer}(z)$, $\alpha = \alpha_{mol}(z) + \alpha_{aer}(z)$ 과 같이 구분한다.
- 공기분자에 의한 후방산란계수 및 소산계수는 큰 변화를 보이지 않기에 상수로 지정. 이에 두 변수(후방 산란계수와 소산계수)는 미세 먼지 농도에 따른 함수.
- 특정 구간에서의 소산계수는 $\alpha(z) = e^{-2 \int_{z_1}^{z_2} \sigma(z) dz}$ 로 표현되며,

$$\beta_{aer} = L\alpha_{aer} \quad (2)$$

- 식(1)을 풀기위해 후방산란계수와 소산계수간의 가정식(2)가 필요하다.¹⁾

$$S(z) = \ln(z^2 P(z)) \quad (3)$$

- 식(1)을 식(3)과 같이 놓고, 식 (2)를 대입하여 풀면 아래 식(4)와 같이 표현 가능, 이때 공기분자(*mol*)은 일정한 값임으로 상수로 처리한다.

$$\frac{dS}{dz} = \frac{EC}{\alpha} \frac{d\alpha}{dz} - 2\alpha \quad (4)$$

- 식(4)에 대해 거리에 따른 소산계수는 식(5)에 적용하여 산출한다.

$$\alpha = \frac{e^{\left[\frac{1}{EC}S(z_2) - S(z_1)\right]}}{\frac{1}{\alpha(z_1)} + \frac{2}{EC} \int_{z_1}^{z_2} e^{\left[\frac{1}{EC}S(z_2) - S(z_1)\right]} dz} \quad (5)$$

- 그림 4-15는 미세 먼지 관측라이다 시제품으로 2020년 10월 22일(11:50 ~ 18:00)관측된 데이터를 식 5로 산출한 거리별 소광계수 임. 400 m ~ 2,000 m 구간에서 0.6 ~ 0.75 km⁻¹값을 보이고 시간이 지남에 따라 0.4 ~ 0.45 km⁻¹ 값을 나타낸다.

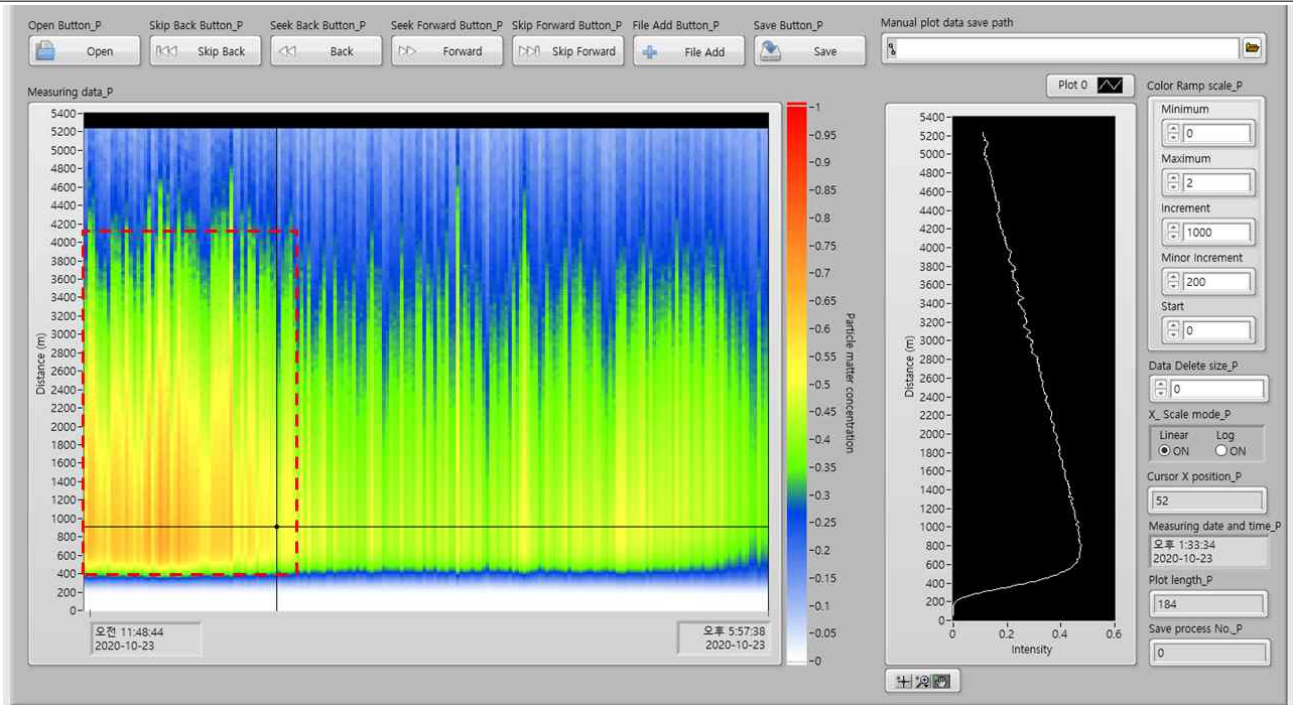


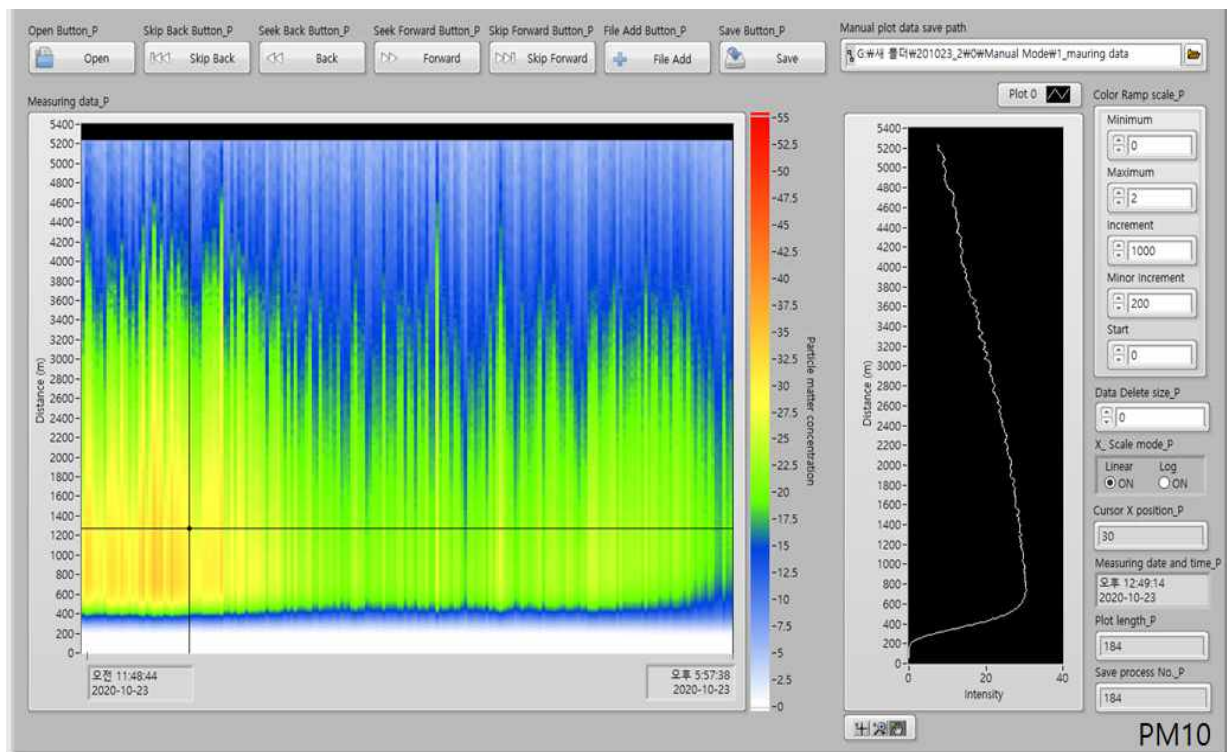
그림 4-15. 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 소광계수

10) 거리별 미세 먼지 질량 농도 산출 S/W 개발

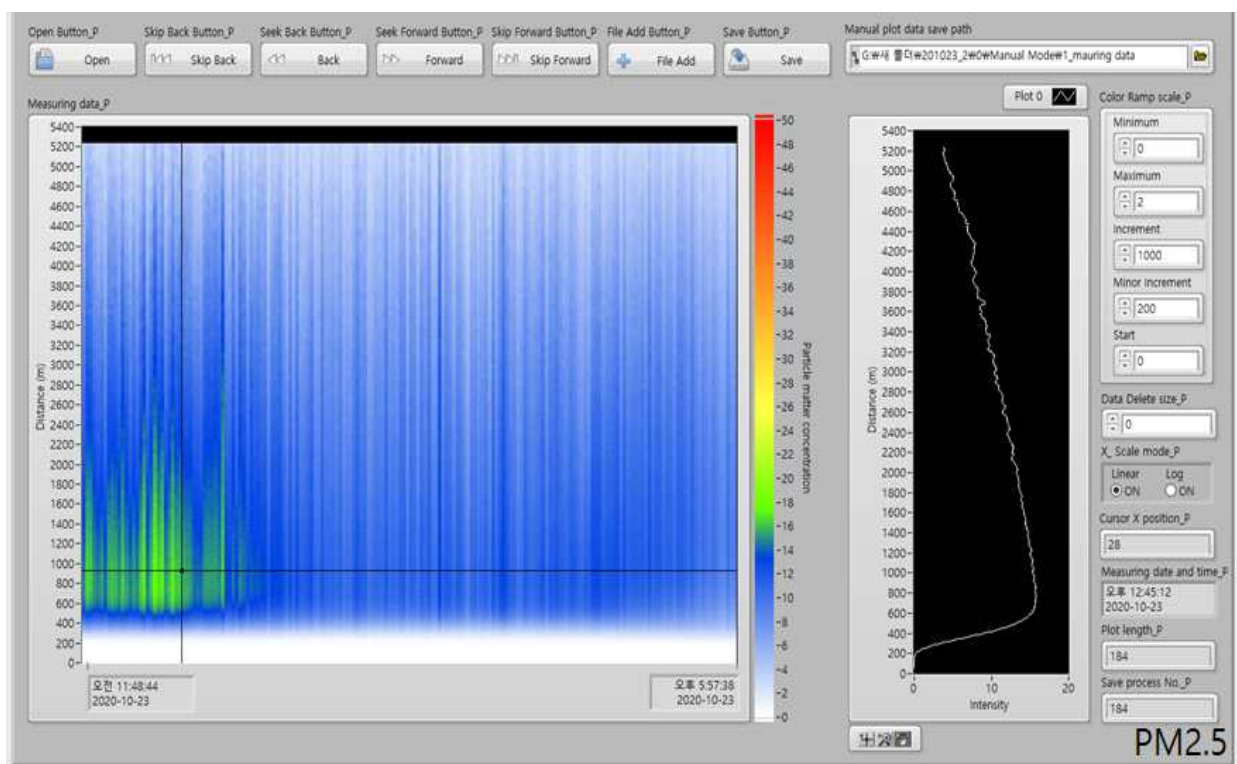
- 산출된 소산계수에 소산효율(extinction efficiency)을 각각 적용하여 거리에 따른 질량 농도 값 산출한다.

$$Particle\ Mass = \frac{\alpha}{Q} \quad (6)$$

- 식 6에서 α 는 소광계수(km^{-1}), Q 는 소산효율(m^2g^{-1})임. 소산효율은 입자의 종류에 따라 다른 값을 가지며, 조대 오염입자 PM 2.5 ~ PM 10 = $7\ m^2g^{-1}$, 미세 오염입자 PM 2.5 = $8\ m^2g^{-1}$ 값을 나타낸다.
- 355와 1064 nm에서 오염 입자의 후방 산란 계수를 이용하여 파장역지수(Ångström exponent) 값 산출한다.
- 파장역지수(Ångström exponent)는 두 파장의 소산계수나 후방산란계수 값으로부터 산출되는 입자 크기에 관련된 요소로 대기 중에 입자 크기가 큰 입자가 존재할 경우 그 값이 0에 가까운 값을 가지고 반대로 작은 입자가 존재할 경우 1 이상의 높은 값을 갖는다.
- 본 연구에 적용되는 355와 1064 nm의 파장 대에서는 입자크기가 $0.1 \sim 10\ \mu m$ 의 직경을 가지는 입자일 경우 그 값이 0 ~ 4의 값을 가지는 것을 Mie theory를 이용하여 계산하였다.
- 미세 먼지(PM 10)과 초미세 먼지(PM 2.5)의 파장역지수 값의 기존 연구 자료와 Mie theory를 이용한 계산 자료로 부터 미세 먼지만 있을 경우 0, $2.5\ \mu m$ 이하의 초미세 먼지만이 존재할 경우 4의 파장역지수를 적용한다.
- 355와 1064 nm의 파장역지수 값을 산출하고, 이 값과 설정된 각각의 파장역지수 값으로부터 오염입자의 후방산란계수에서 미세 먼지와 초미세 먼지로 구분된다.
- 그림 4-16은 식 6으로 산출된 미세 먼지 질량 농도 값으로 2020년 10월 22일(11:50 ~ 18:00)관측된 데이터에서 소산계수를 이용하여 산출한 결과를 나타낸다.



(a) 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 PM 10 결과_(2020년 10월 22일)



(b) 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 PM 2.5 결과_(2020년 10월 22일)

그림 4-16. 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 측정 결과_2020년 10월 22일

11) 미세 먼지 농도 3 차원 분포 산출 S/W 개발

- 미세 먼지 관측 라이다 시제품을 이용하여 획득한 신호의 경우, 운영 프로그램을 제어하는 컴퓨터에 자동으로 저장되며, 식 5와 6을 이용하여 정량적인 미세 먼지 농도로 산출되어 저장된다.
- 그림 4-17은 미세 먼지 관측 라이다 시제품의 스캐닝 지역을 나타낸 것임. 미세 먼지 라이다 시스템은 원점(O)에 라이다 시스템이 위치하며, 스캐닝 장치를 이용하여 사용자가 입력한 각도대로 일정한 지역을 스캐닝 하여 데이터를 획득할 수 있다.
- 그림에서 보는 것과 같이 부채꼴 형태의 스캐닝 지역을 갖게 되어 극 좌표계(Polar coordinate system)를 갖게 된다. 극 좌표계의 경우, 거리 (R)과 각도로 이루어진 좌표계로 일반적인 직교 좌표계와는 아래와 같은 수식을 이용하여 변환이 가능하다.

$$\begin{aligned} x &= R \cos \theta \\ y &= R \sin \theta \end{aligned} \quad (7)$$

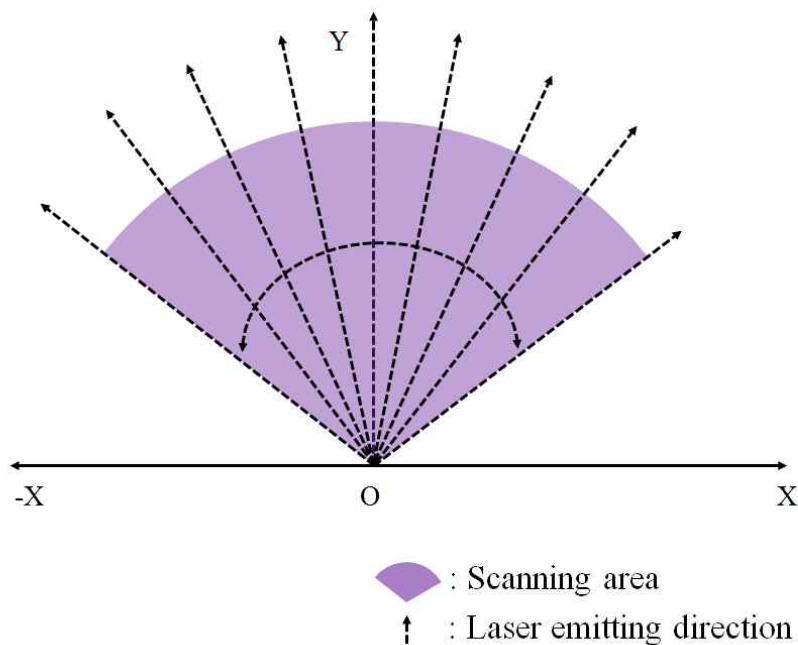


그림 4-17. 미세 먼지 라이다 시제품의 스캐닝 방법 및 분포

- 그림 4-18은 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 측정한 공간적인 미세 먼지 분포를 나타낸 것이다. 미세 먼지의 분포를 컬러링(Coloring)하여 색으로 나타냈으며, 커서 기능을 활용하여 원하는 지점에 대한 미세 먼지 양의 확인이 가능하다.

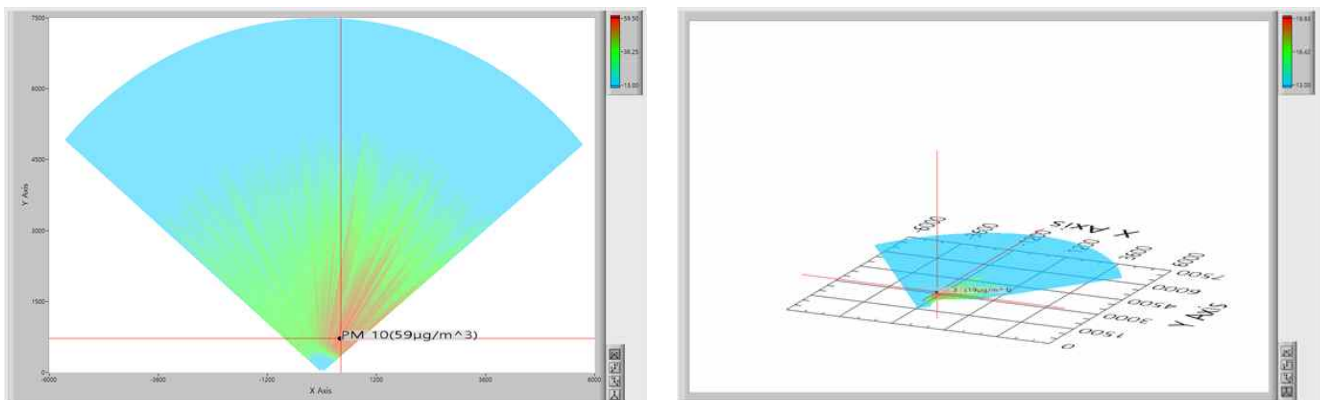


그림 4-18. 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 3 차원 공간분포 측정 결과

12) 시제품 제어 및 통합 운영 프로그램 개발

• 미세 먼지 라이다 장치의 측정 알고리즘

- 그림 4-19는 미세 먼지 측정 라이다 시제품의 운영 알고리즘을 나타낸 것으로 고속 디지털라이저(High speed digitizer)와 스캐닝 모터(Scanning motor)를 이용하여 미세 먼지의 공간적 분포에 대한 측정이 가능하도록 알고리즘을 구성하였다.
- 미세 먼지 측정을 위한 라이다 시스템의 경우, 스캐닝을 위한 Azimuth & Elevation motor와 레이저 및 고속 디지털라이저 시스템의 서로 독립적인 임베디드(Embedded) 시스템으로 구성된다.
- 라이다 장치의 특성 상, 측정 물체의 위치 정보를 측정하기 위해선, 레이저 발진 시간과 신호의 도달 시간의 계측이 필수적으로 요구된다. 따라서 레이저와 고속 디지털라이저 간의 동기를 맞추는 것이 필수적으로 요구된다. 레이저와 고속 디지털라이저 간에 동기의 경우, 레이저의 Q-switch 신호를 이용하여 동기를 맞출 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 장치의 경우, 오염 배출원 부근에서 배출원을 감지하고, 배출원에서 배출하는 미세 먼지의 양을 측정할 수 있어야 한다. 그러므로 미세 먼지 라이다 장치의 측정 모드를 Manual mode 와 Sequence mode로 구분하여 알고리즘을 구성하였다.
- Manual mode는 오염 배출원에서 발생하는 미세 먼지 분포를 측정하는 모드로서, 스캐닝 모터를 이용하여 오염 배출원 방향으로 라이다 장치를 움직인 후, 시간에 따라 미세 먼지의 배출 양과 변화를 측정할 수 있는 모드를 말한다.
- Sequence mode는 미세 먼지 라이다 장치와 스캐닝 모터를 이용하여 일정한 공간상에 레이저를 조사하여 미세 먼지의 양 및 분포를 측정할 수 있는 모드를 말한다. Sequence 모드는 데이터 획득과 스캔이 모터의 이동이 결합된 형태로서, 스캐닝 영역과 스캐닝 각도를 입력받아 데이터 획득과 스캐닝 모터의 이동을 결합하여 하나의 스캐닝 패턴을 생성한 후, 이를 반복하여 측정할 수 있도록 하였다.
- Manual mode 와 Sequence mode를 통하여 획득한 데이터의 경우, 제어 컴퓨터에 측정 모드 별 폴더를 생성하고 측정 시간, 측정 방향 등의 정보를 파일 명에 기입하여 자동으로 저장할 수 있도록 하였다.

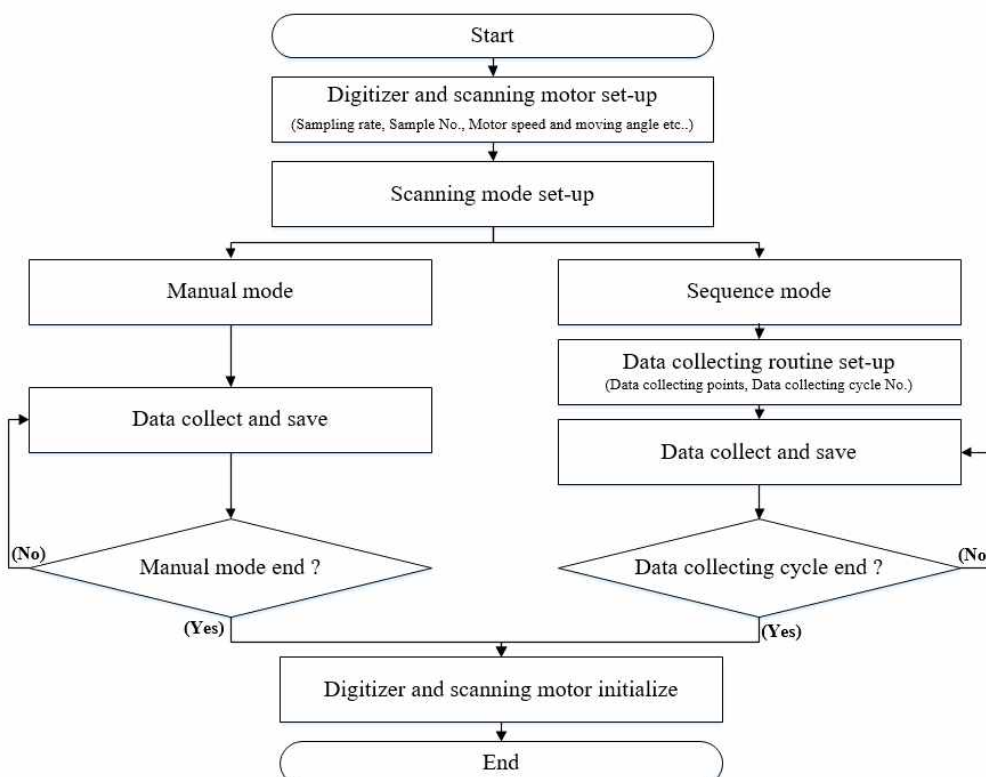


그림 4-19. 미세 먼지 측정을 위한 라이다 제어 알고리즘

- **미세 먼지 라이다 장치의 Manual mode**

- 미세 먼지 라이다 시스템의 Manual mode는 두 가지 기능을 갖고 있다.
- 첫 번째 기능은 미세 먼지 라이다 신호 획득을 위한 레이저 송·수신 광학계 정렬 확인 기능이다. 본 기능은 사용자가 Manual mode를 선택하여 실행할 때, 파일을 저장할 것인가 또는 저장하지 않은 것인가를 선택할 수 있도록 하여, 파일을 저장하지 않을 경우, 레이저 송·수신 광학계의 광학계 정렬 정도를 레이저 송신 거울을 이용하여 조정할 때, 실시간으로 변화하는 신호를 확인 할 수 있는 기능이다.
- 두 번째 기능은 오염 배출원에서 발생하는 미세 먼지의 양 및 위치의 변화를 시간에 따라 계측 저장하는 기능을 말한다.
- 이 기능은 Sequence mode를 통하여 미세 먼지의 양 및 분포를 계측하는 과정에서 발견된 오염 배출원에 대한 미세 먼지 배출 양의 변화를 시간에 따라서 계측 및 모니터링이 가능한 기능이다.

- **미세 먼지 라이다 장치의 Sequence mode**

- 미세 먼지 라이다 시스템의 Sequence mode는 manual mode를 통하여 미세 먼지 라이다 시스템의 광학계의 정렬(Alignment)가 완료된 후, 일정한 공간에 미세 먼지를 라이다 시스템을 통하여 자동으로 획득하는 모드를 말한다.
- Sequence mode의 경우, 사용자가 입력한 측정 루틴에 따라 자동으로 스캐닝 모터와 디지털타이저를 구동하여 미세 먼지 데이터를 자동으로 획득하는 기능을 하는 측정 방법이다. 레이저 및 고속 디지털타이저의 경우, 레이저의 Q-Switch Out 단자에서 발생하는 TTL 신호에 의하여 동기화가 가능하다. 그러나 스캐닝 모터의 경우, 별도의 트리거(Trigger) 기능이 없다.
- 미세 먼지 라이다 장치를 구성하는 각 장치의 경우, 안전사고 예방을 위하여 긴급 정지가 가능하여 하며, 각 장치의 수리 또는 이상 확인 등을 위하여 개별 제어가 필요하다. 따라서 각 장치를 병렬 제어 방식으로 제어할 수 있도록 프로그램이 구성되어 있다. 그러므로 미세 먼지 라이다 장치를 통하여 데이터 획득 과정을 수행하는 도중에 스캐닝 모터가 이송할 가능성이 발생한다.
- 이러한 오류를 방지하기 위하여 별도의 Sequence mode를 생성하여 미세 먼지의 양 및 분포를 측정 과정과 스캐닝 모터 구동을 통한 이송 과정을 순차 제어를 방식을 채택하였다.
- 스캐닝 모터를 수동으로 데이터 획득을 위한 첫 지점에 위치한 후, 사용자가 입력한 측정 루틴(스캐닝 패턴)에 따라 자동으로 스캐닝 모터와 디지털타이저를 구동하여 미세 먼지 데이터를 자동으로 획득 및 저장할 수 있도록 하였다.
- 각 지점에 획득한 데이터를 각각의 지점에 대한 저장 폴더를 생성하여 저장할 수 있도록 하였으며, 루틴 반복 횟수에 따라 이를 구분할 수 있도록 파일 저장 명을 구성하였다.

- **미세 먼지 라이다 장치의 제어 프로그램 개발**

- 그림 4-20과 그림 4-21은 미세 먼지 라이다 운영 프로그램의 인터페이스를 나타낸 것으로, 그림 4-20의 경우, 스캐닝 모터의 설정 부분과 라이다 장치의 측정 위치를 확인할 수 있는 카메라의 영상을 확인할 수 있도록 구성되어 있다.
- 스캐닝 모터의 경우, 매뉴얼 모드와 시퀀스 모드를 나눠 제어할 수 있도록 구성하였고, 매뉴얼 모드의 경우, 스캐닝 모터의 원점 위치를 설정하지 않고 움직이는 것이 가능하며, 시퀀스 모드에서 사용할 경우, 사용자가 설정한 지점에서 자동으로 일정한 루틴을 반복할 수 있도록 스캐닝 모터의 원점 위치 설정 및 일정한 위치로의 자동 복귀가 가능하도록 구성하였다.
- 또한 스캐닝 모터의 작동 오류에 인하여 긴급한 정지가 가능하도록 긴급 정지 버튼을 매뉴얼 모드와 시퀀스 모드 둘 다 가능하도록 프로그램을 구성하였다.
- 카메라의 경우, 사용자가 측정할 위치를 확인할 수 있도록 장착되었으며, 스캐닝 모터의 움직임 등을 확인할 수 있어야 함으로 미세 먼지 라이다 운영 프로그램과 카메라 구동을 위한 코드를 병렬 제어 방식으로 개발 하였다.

- 그림 4-21은 미세 먼지 라이다 운영 프로그램의 디지털라이저 설정 및 획득 데이터를 확인 할 수 있는 부분의 인터페이스를 나타낸 것으로 디지털라이저의 Sampling rate, Sample data 개수, 획득 데이터의 저장 위치 등을 설정할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 운영 프로그램의 경우, 라이다 시스템의 광학계 정렬의 확인을 위해선, 각각의 레이저 펄스에 의한 신호 확인이 필요하며, 미세 먼지 산출을 위해선, 사용자가 입력한 횟수만큼의 레이저 펄스에 의하여 발생한 미세 먼지 신호의 평균 신호가 필요하다.
- 그러므로 각각의 레이저 펄스에 의한 신호를 확인할 수 있도록 Signal data 확인 창을 구성하였으며, 사용자가 입력한 횟수만큼 레이저 펄스에 의한 신호를 평균하여 보여줄 수 있는 Average data 확인 창을 각각 구성하였다.

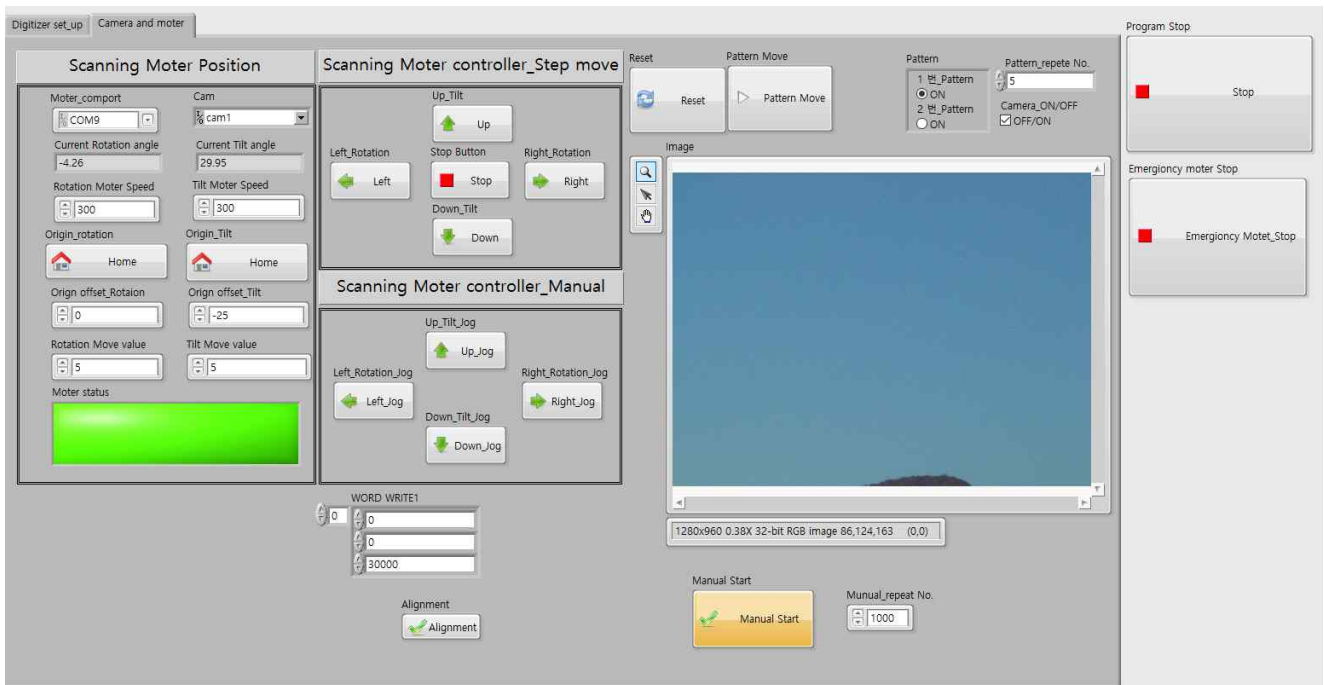


그림 4-20. 미세 먼지 측정 라이다 장치 운영 프로그램의 스캐닝 모터 설정 부분

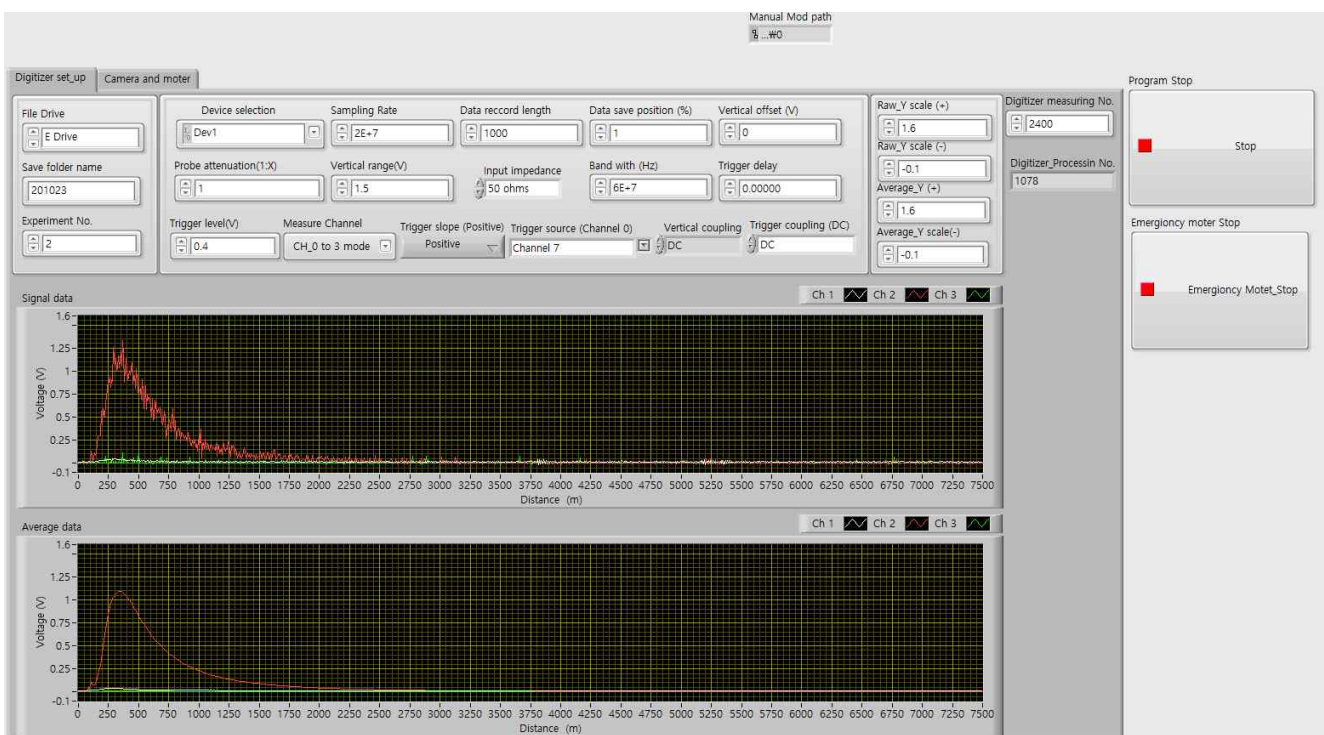


그림 4-21. 미세 먼지 라이다 운영 프로그램의 디지털라이저 설정 부분

13) 시제품 자체 성능 평가

- 그림 4-22는 미세 먼지 관측 라이다 시제품으로 산출한 미세 먼지 질량농도로 2020년 10월 23일 Azimuth 방향으로 2도 간격으로 30분간 스캐닝하며 측정한 데이터로 500 ~ 2,000 m 지역에서 PM 10 : $57 \mu\text{gm}^{-3}$, PM 2.5 : $19 \mu\text{gm}^{-3}$ 으로 관측되었다.
- 그림 4-23은 2020년 10월 26일 09시에 2도 간격으로 30분간 스캐닝하며 측정한 미세 먼지 질량농도 데이터임. 관측 시 안개가 껴서 레이저가 안개에 의해 산란되어 관측거리가 3,000 m 정도였으며, PM 10 : $78 \mu\text{gm}^{-3}$, PM 2.5 : $59 \mu\text{gm}^{-3}$ 관측되었고, 국가 대기오염 관측망 결과는 PM 10 : $76 \mu\text{gm}^{-3}$, PM 2.5 : $30 \mu\text{gm}^{-3}$ 이었다. 국가 대기오염관측망은 1시간 동안의 평균 자료이고, 미세 먼지 관측 라이다의 자료는 2분 간격의 자료여서 결과 값의 차이가 나타난다.
- 그림 4-24는 미세 먼지 관측 라이다 시제품으로 산출한 미세 먼지 질량농도와 국가 대기오염 관측망 PM 10, PM 2.5 자료를 비교한 것으로 2020년 10월 5일 ~ 2020년 10월 9일 측정한 데이터를 비교하였다. PM 10, PM 2.5 자료 비교 결과 각각 0.74, 0.71의 상관관계를 보였다.

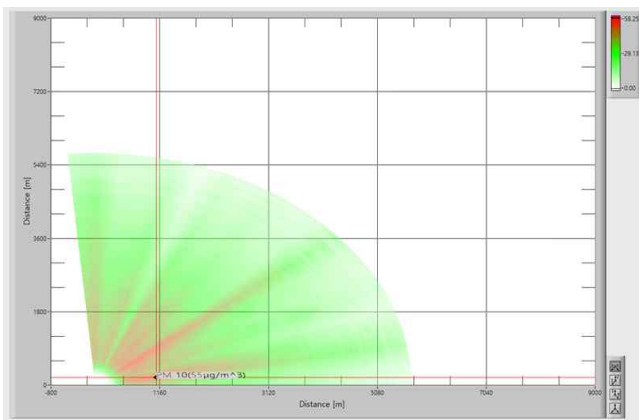


그림 4-22. 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 질량농도 결과_2020년 10월 23일

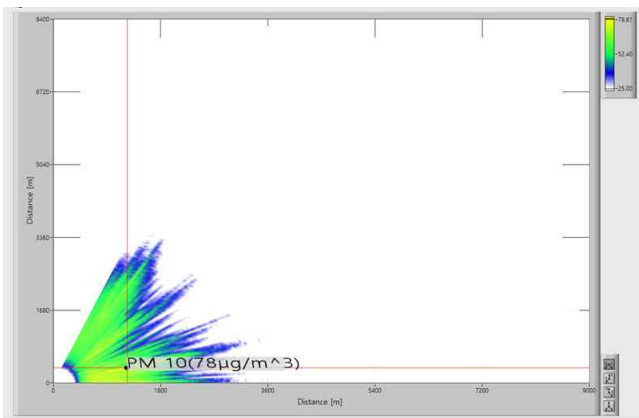
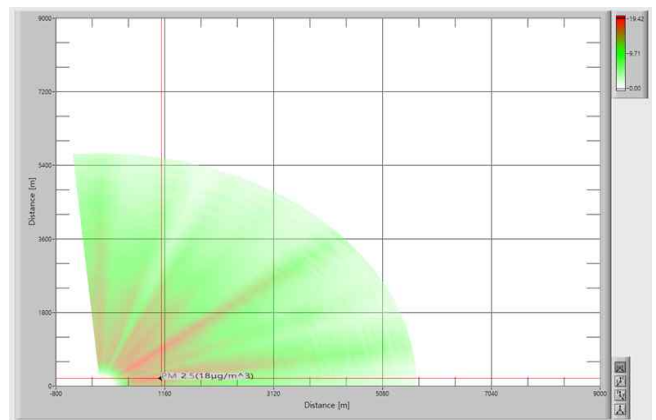
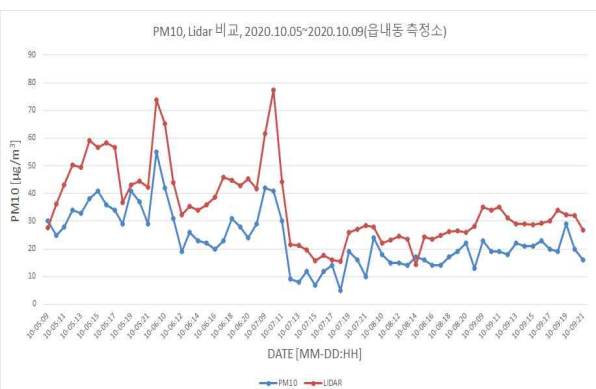
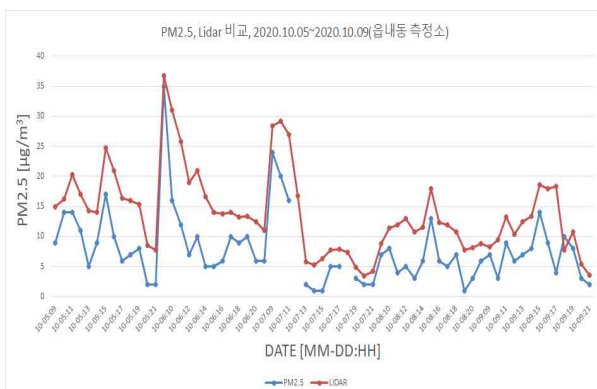
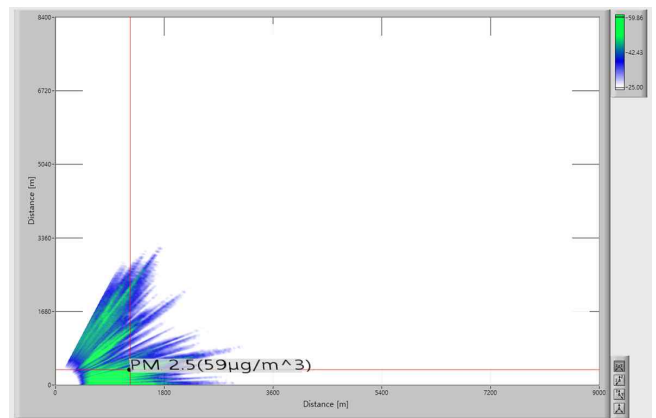


그림 4-23. 미세 먼지 라이다 시제품으로 측정한 미세 먼지 질량농도 결과_2020년 10월 26일



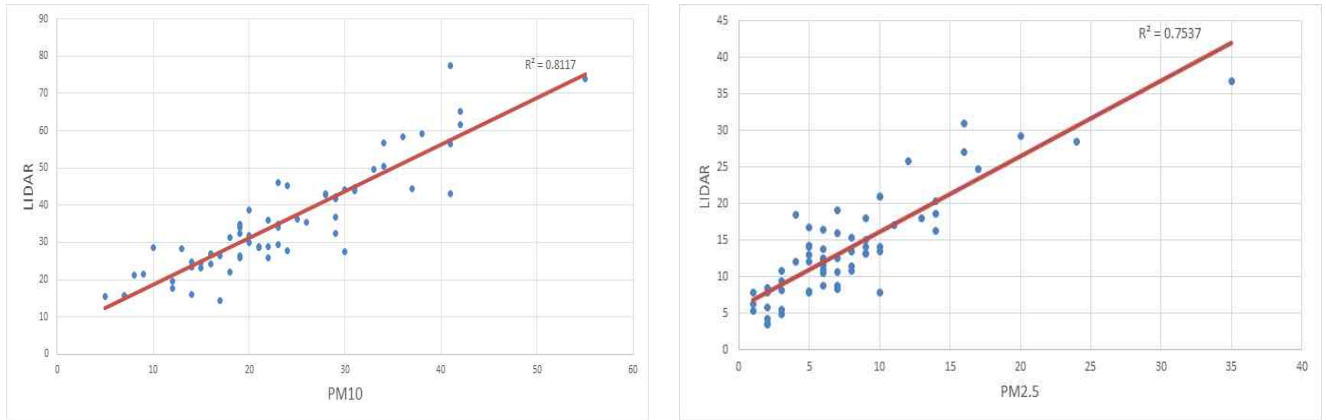


그림 4-24. 미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기 오염 관측망의 미세 먼지 측정 결과 비교

14) 개발된 품질관리 프로세스를 실제 관측 데이터에 적용 및 보완

• 수집 데이터 비교분석을 통한 품질관리 알고리즘 개발 : 2단계 QC

- 개별 수집 장치 내부에서 1단계 QC 알고리즘을 수행한 이후, 정보를 판별한 데이터를 중앙의 장치로 송신하면, 중앙 장치에서는 송신된 데이터들의 ID 값과 위치 값, 데이터 판별 값들을 취합하여 해당 시간대에 모든 임베디드 장치의 데이터를 분석하기 위해 DB에 저장하였다.
- 저장된 데이터들을 비교 분석하여 발생한 오류는 없는지 2단계 QC 알고리즘을 진행하였다.
- 데이터 간의 비교 분석을 통해 오류 값을 찾아내고 신뢰성이 확보된 데이터만을 활용하였다.
- 이런 과정은 개별 수집 장치 독립의 품질관리 단계 이후에 2차적으로 비교 분석을 통한 품질관리를 시행하는 것으로써 수집되는 영상 및 판별 정보 값의 정확성과 신뢰성을 높여주고, 데이터를 처리하는 시간을 감소시키는 효과가 나타났다.
- 기존에 계획되어 있던 오류 판별 절차는 ‘데이터 추가 정확’→‘데이터 처리’→‘데이터분석’→‘오류 판별’→‘오류 데이터 처리’순으로 진행하고자 하였으나, 전문가 자문 및 실제 사례 분석, 자체 테스트 과정을 거쳐 4가지 QC 알고리즘을 개발하게 되었으며, ‘데이터 비교 검사’→‘범위 검사’→‘위치 검사’→‘Madsen-Allerup 공간검사’의 순으로 진행하였다.
- 또한, 개별 수집 장치의 숫자가 시간의 흐름에 따라 대폭 증가하는 상황을 고려하여 중앙 처리 장치에서 적용할 수 있는 처리 속도 개선 알고리즘을 추가적으로 개발하여 적용하였다.

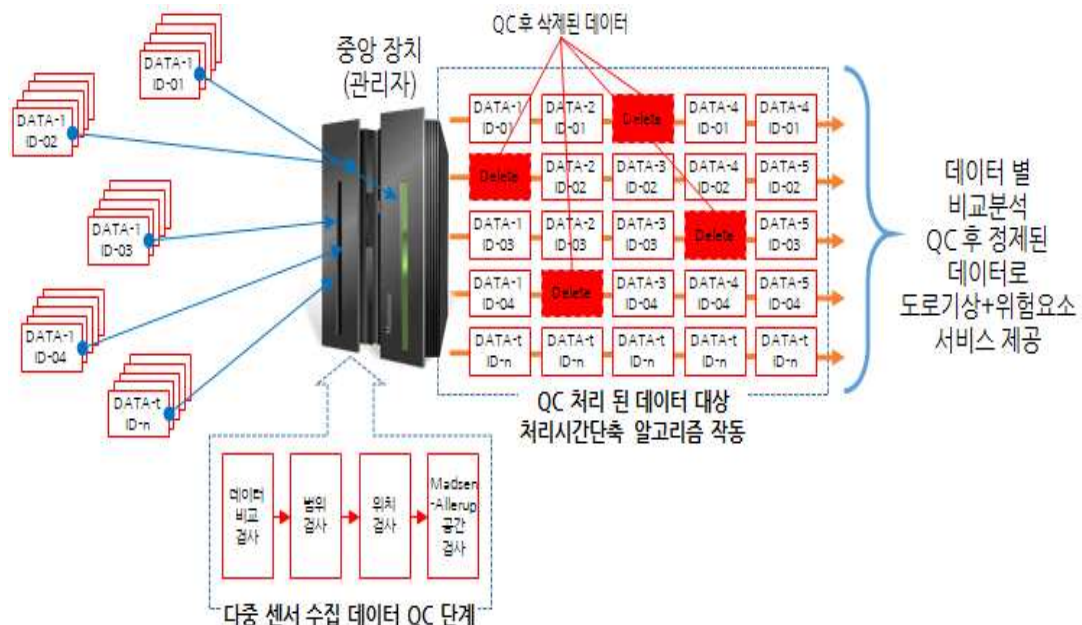


그림 4-25. 미세 먼지 라이다 시제품의 2단계 QC 알고리즘 평가 개념도

15) 미세 먼지 관측용 2단계 QC 4가지 알고리즘

- 2단계 QC 4가지 알고리즘에 대한 종류 및 검사내용

표 4-3 QC 4가지 알고리즘의 시작 순서와 내용

순번	검사종류	검사내용
1	데이터 비교 검사	관측 장치 간의 단순 데이터 비교 관측 장치 간의 데이터 비교를 통하여 이상치 검출
2	범위 검사	기존 수집 데이터의 통계분석을 통해 산출된 표준편차 σ 이용 관측 데이터가 $\pm 3\sigma$ 을 벗어나는지 여부 판단
3	위치 검사	GPS를 이용하여 동일 GPS 위치에서의 관측 데이터 정상여부 판단
4	Madsen-Allerup 공간 검사	일정한 주변 지역 안에 있는 관측소 데이터의 중간 값과 상위 및 하위 분위수를 이용한 분석방법 비모수 공간성 검사를 통한 공간 검사

- 2단계 QC 4가지 알고리즘 개념도(흐름도)

- ① 검사 대상 선정 : 개별 수집 장치에서 중앙으로 보내온 데이터들의 위치를 비교하여 그룹 생성한다.
- ② 1 step 데이터 비교 검사 : 그룹 내 검사 대상 장치 간 데이터를 상호 비교한다.
- ③ 2 step 범위 검사 : 기존 데이터의 통계 분석을 통해 산출된 표준편차 이내에 속하는지 판단한다.
- ④ 3 step 위치 검사 : GPS 데이터를 이용하여 관측 데이터의 정상여부 판단한다.
- ⑤ 4 step Madsen-Allerup 공간검사 검사 : 비모수 공간성 검사를 통한 공간 검사한다.
- ⑥ 처리시간단축 알고리즘 : 데이터 비교 검사를 통과한 데이터 들을 대상으로 데이터 처리에 걸리는 시간을 단축시키는 알고리즘 적용하였다.
- ⑦ QC 종료 및 오류 데이터 제외 : QC 종료 및 오류 데이터 처리할 수 있도록 하였다.

수집 데이터 비교 분석을 통한 데이터 2단계 QC 4가지 개념도

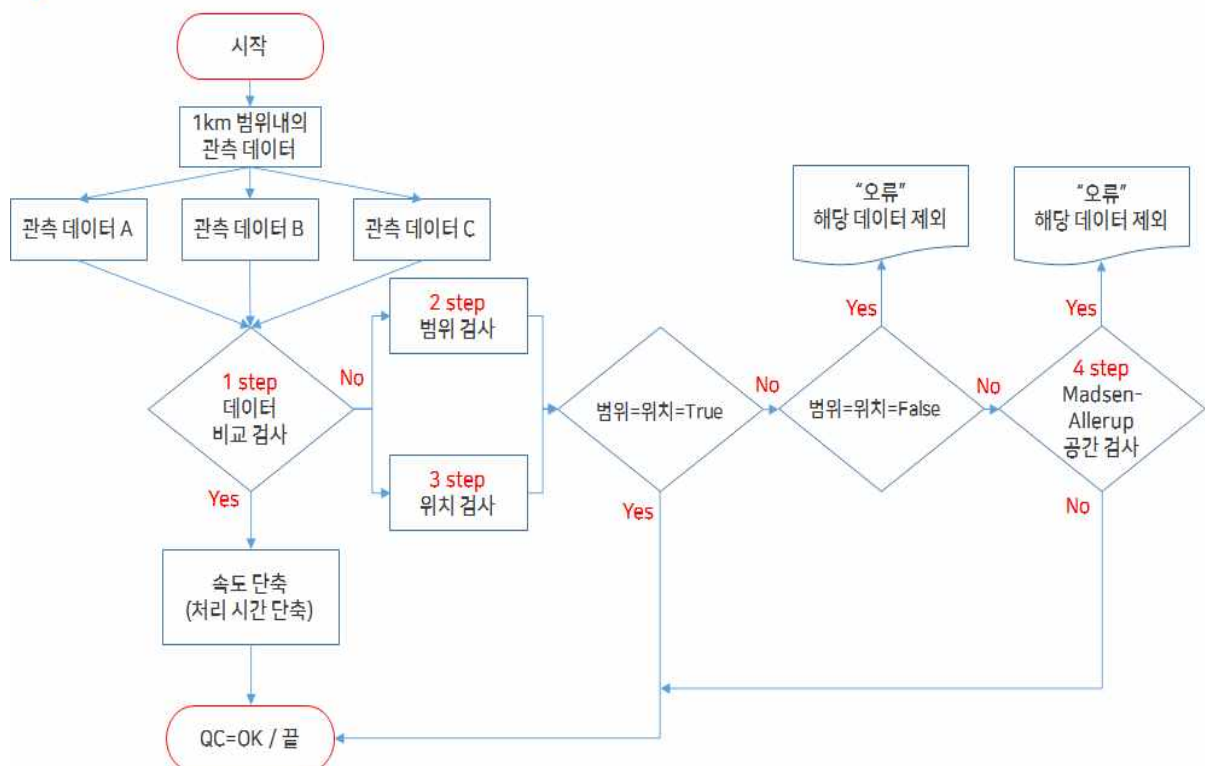
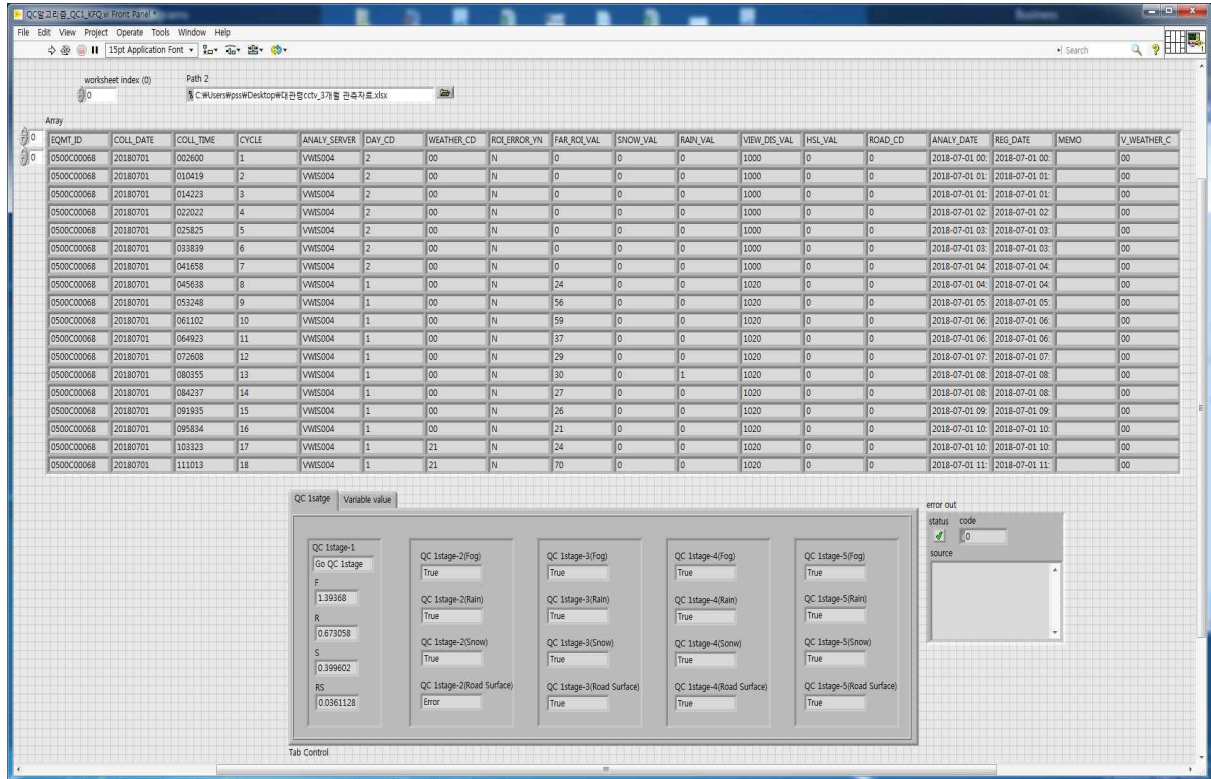
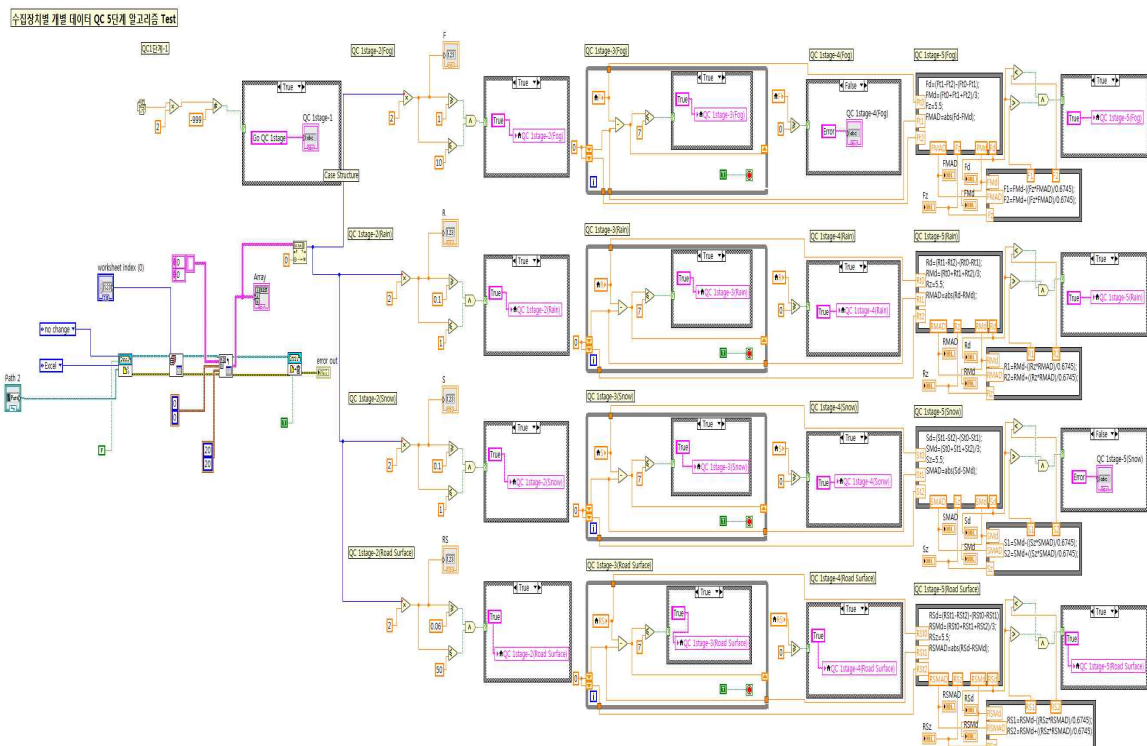


그림 4-26. 미세 먼지 라이다 시제품의 2단계 QC 알고리즘 4+1가지 개념도

- 1단계 QC 알고리즘을 구현하기 위해 개별 수집 장치로부터 처리되는 데이터 값을 모니터링 할 수 있도록 제작하였으며, 본 데이터는 테스트를 위해서 기 저장된 데이터 값을 엑셀 형태로 불러와 알고리즘을 실행할 수 도 있다.
- 앞서 소개한 1단계 QC 5가지 알고리즘에 대한 실제 작동 내용을 확인할 수 있도록 설계하였으며, 실시간 데이터 또는 테스트 데이터를 대상으로 결과 값을 도출하여 정확성, 신뢰성, 처리속도 등을 분석 및 파악할 수 있다.



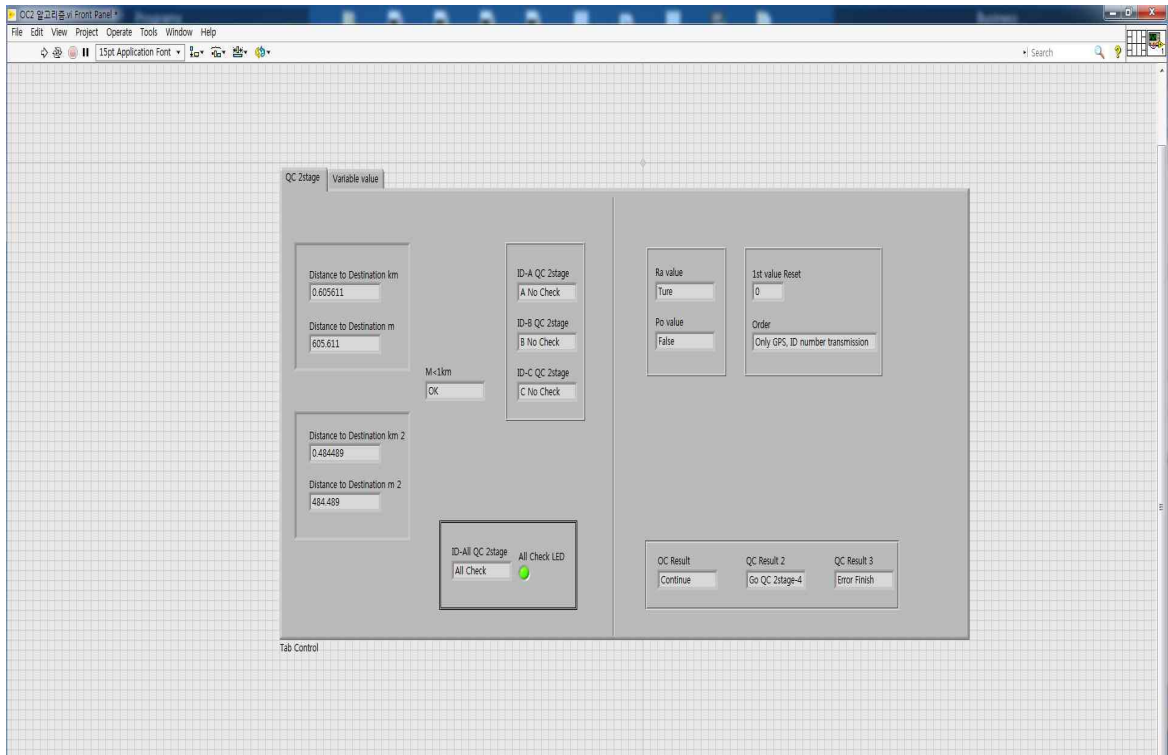
(a) 미세 먼지 라이다 시제품의 1단계 QC 평가 프로그램 인터페이스



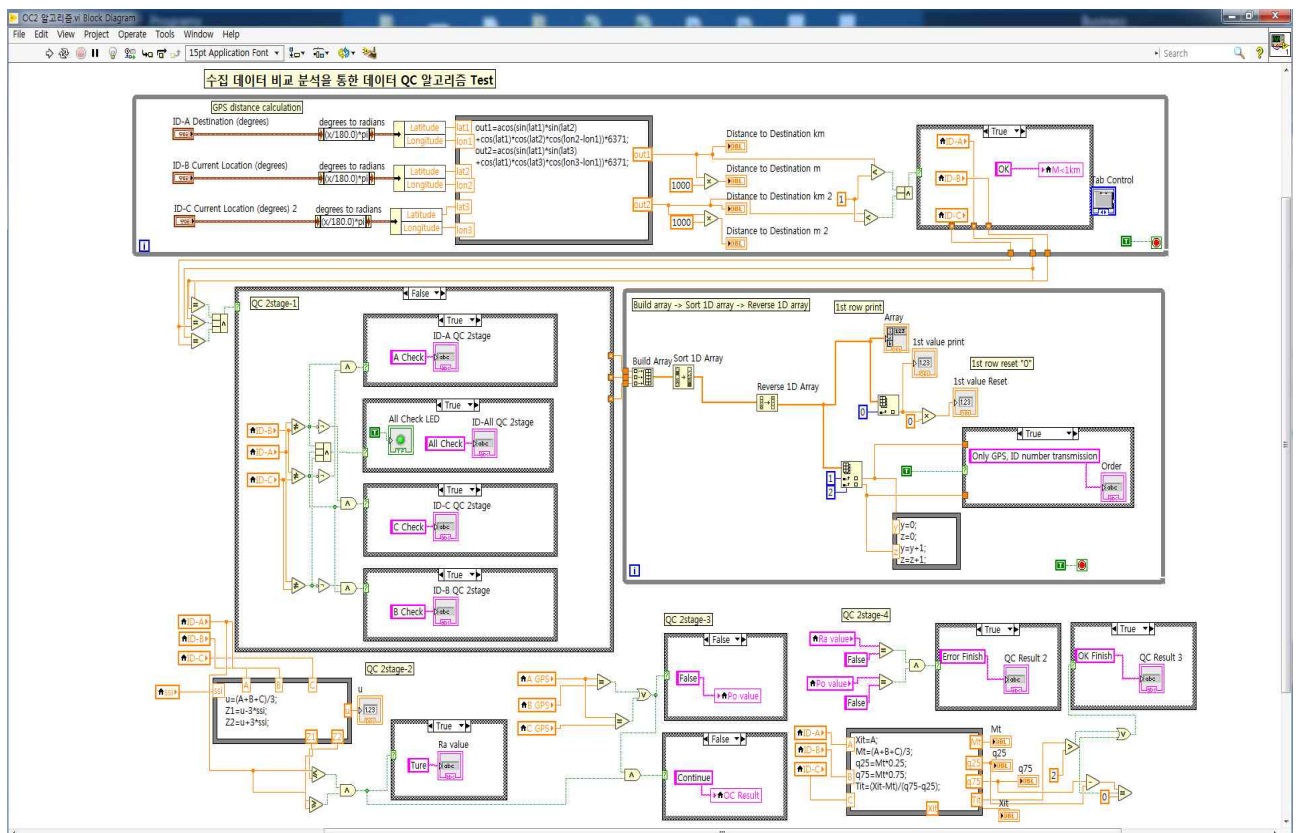
(b) 미세 먼지 라이다 시제품의 1단계 QC 평가 프로그램 세부 코드

그림 4-27. 미세 먼지 라이다 시제품의 1단계 QC 알고리즘 자체 테스트 실행 화면

- 중앙 장치에 수집된 개별 수집 장치들의 데이터를 대상으로 2단계 QC 알고리즘을 구현하기 위한 프로그램 설계로서 1단계 알고리즘 테스트 결과 값을 바로 이용하여 2단계 QC 알고리즘을 테스트하거나 테스트용 데이터를 이용해 작동 여부 및 속도를 측정 하였다.
- 2단계 QC 알고리즘을 실시간 데이터나 테스트용 데이터를 이용해 성능 검사를 할 수 있도록 설계하였으며, 자체 테스트를 통해 처리속도 단축 알고리즘의 성능을 확인하였다.



(a) 미세 먼지 라이다 시제품의 2 단계 QC 평가 프로그램 인터페이스



(b) 미세 먼지 라이다 시제품의 2단계 QC 평가 프로그램 세부 코드

그림 4-28. 미세 먼지 라이다 시제품의 2단계 QC 알고리즘 평가 실행 화면

5. 3차년도 과제 수행 과정 및 내용

1) 3차년 과제 수행 목표

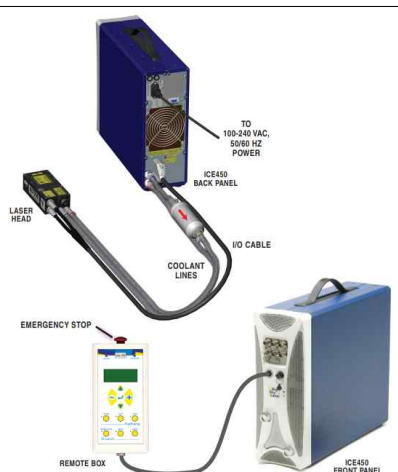
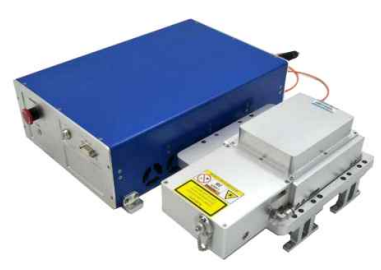
- 3차년도에는 “오염 배출원 주변 미세 먼지 3 차원 공간분포 및 질량농도 관측 장비 시제품 현장 적용 실험을 통한 최적화 및 내구성 테스트”라는 연구과제 수행 목표를 세웠으며, 2차년도 연차 평가 결과를 반영하여 다음과 같은 세부 개발 내용 및 기술 개발 목표를 설정하였다.
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시제품 최적 성능 검증 (1개월 이상의 현장 적용 시험 후, 현업 관측기기와의 상관도 : 0.85 이상 달성 유무)
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시제품 최적화
 - 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 사업화 준비
 - (위탁기관) 주변 미세 먼지 관측소의 예측 및 관측 데이터와 연관성 분석
- 기술 개발 목표_3차년도
 - 측정 거리 (Km) : 5 Km 이내
 - 거리 분해능 (m) : 7.5 m 이내
 - 최대 스캔 속도 (deg/sec) : 20
 - 관측 주기 (sec) : 120
 - 측정 정밀도 (관측기기와의 상관관계) : 0.85 이상

2) 시제품 최적화

- 시제품 보완사항 분석
 - 2차년도에 제작한 시제품은 가로 x 세로 x 높이 mm의 사이즈로 이동성이 떨어져 사업장 및 건설현장에서 발생하는 **미세 먼지를 관측/감시**하기 위하여 사이즈의 축소가 필요하다.
 - 시제품의 사이즈 축소를 위하여 라이다를 구성하고 있는 레이저 송·수신 광학계, 스캐닝시스템, 전장부의 구성품의 변경이 가능한 품목을 조사하고, 대체가 가능한 물품을 분석하였다.
 - 2차년도 시제품에 사용한 레이저 광원은 Quentel사의 Ultra 50 모델로 Nd:YAG 레이저이다. 본 레이저는 1064 nm의 단파장(하나의 파장)만 발진이 되는 레이저이지만, 레이저의 최종 발진부에 파장변환 매질을 설치하여 2차 조화파인 532 nm의 파장과 3차 조화파인 355 nm의 파장을 동시에 발진이 가능한 다파장 레이저로, 여러 가지 파장을 한 번에 조사가 가능한 고효율 레이저이다.
 - Ultra 50 레이저는 Flash lamp를 이용하여 레이저의 매질인 Nd:YAG 크리스털이 에너지 이득이 최대 이득이 이루어지도록 하는 시스템으로, 레이저 발진간의 발진 간에 발생하는 열은 물을 이용하여 식혀주는 수랭식 냉각시스템(Water Cooling System)으로 구성되는 레이저이다.
 - 수랭식 냉각기를 이용하는 레이저는 출력이 mJ 단위로 고효율의 레이저로 발진이 가능하다는 장점이 있지만, 물리적 특성 상 레이저 발진기와 냉각기의 사이즈가 커지고 레이저 발진기와 냉각기 사이에 연결하는 연결부가 많아 이를 이용하여 구성한 라이다 장치는 사이즈가 커질 수밖에 없다.
 - 이를 보완하기 위하여 DPSS(Diode Pumped Solid State) 레이저를 많이 사용을 한다.
 - DPSS 레이저는 레이저 발진 간에 발생하는 열을 공기를 이용하여 식혀주는 공랭식 냉각시스템을 이용하는데, 레이저의 발진기와 냉각기의 사이즈가 작고 레이저 발진기와 냉각기 사이에 연결하는 연결부가 적어 이를 이용하여 라이다 시스템을 구성할 경우 수랭식 냉각기를 이용하는 레이저보다 소형으로 구성이 가능하다는 장점이 있다.
 - 하지만 DPSS는 레이저의 특성상 레이저의 출력이 낮고, 단파장(하나의 파장)으로 조사가 되어 두 가지 이상의 파장을 사용할 경우 2개 이상의 레이저 광원을 사용해야 한다.

- 레이저 광원을 2개 사용할 경우 각각의 레이저의 동기화 작업이 필요하며, 1개의 레이저광원을 사용할 때보다 광학계의 구성이 커지고, 레이저 광원 자체의 가격이 5천만 원 이상의 고가가 되기 때문에 본 시제품에 사용하기에는 적합하지 않다.
- 일반적으로 사용하는 라이다 시스템은 하나의 지점에 설치를 하고 연직고도의 관측을 주로 진행하기 때문에 라이다 시스템의 대형화가 되어도 무방하고, 따라서 수랭식 레이저를 사용하는 경우가 많다. 하지만, 본 미세 먼지 관측용 라이다는 사업장, 건설현장 등에서 발생하는 미세 먼지의 관측을 목표로 하기 때문에 하나의 지점에 설치하지 않는다. 따라서 이동성이 요구가 되며, 장비의 소형화가 필요하다.
- 따라서 본 시제품에서는 공랭식 냉각기를 사용하면서 1064 nm 파장과 2차 조화파인 532 nm의 파장과 3차 조화파인 355 nm의 파장을 동시에 발진이 가능하고 레이저 광원과 냉각시스템, 레이저 발진기와 냉각기 사이에 연결하는 연결부가 적은 공랭식 냉각기를 사용하고, 동시에 355 nm와 1064 nm의 파장으로 발진되는 레이저 광원으로 교체를 하였다.
- 본 레이저 광원은 공랭식 냉각 시스템을 사용하고 있어 레이저의 출력이 μJ 단위로 Ultra 50에 비하여 출력은 낮지만, 높은 반복율로 작동을 하여 출력이 낮은 단점을 보완이 가능하다.
- 표 5-1은 2차년도에 구성하였던 Ultra 50의 레이저 광원과 3차년도에 변경하여 사용한 레이저 광원의 사양 비교한 것이다.

표 5-1 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 변경에 따른 사양 비교

		Ultra 50			EO-355-N		
Wavelength		1064 nm	532 nm	355 nm	1064 nm	532 nm	355 nm
Repetition rate		20 Hz			1 kHz		
Energy		50 mJ	30 mJ	12 mJ	310 μJ	300 μJ	224 μJ
Pulse duration		10 ns			7 ns		
Beam Size		3 mm			1 mm		
Beam Divergence		7 mrad	6 mrad	5 mrad	1.73 mrad		
Size	Laser Head(W×H×P)	52 mm x 177 mm x 76 mm			286mm x 180mm x 118.5mm		
	Cooling System(W×H×P)	360 mm x 435 mm x 133 mm			366mm x 264 mm x 102 mm		
Laser Head & Cooling System							

- 2차년도 시제품에 사용한 Ultra 50 레이저 광원에 비하여 레이저 발진기의 사이즈는 크지만, 이 크기로 인하여 송신 광학계의 사이즈가 커지는 것에는 영향을 주지 않기 때문에 본 시스템에 사용하기에 적합하다.
- 그리고 레이저 발진기와 냉각시스템 사이에 연결하는 품목이 작아 시제품의 사이즈를 축소하는데 많은 이점이 있다.
- 변경한 레이저 광원이 제조사에서 제공한 사양에 맞는 사양인지 확인을 진행 하였다.
- 레이저 광원의 확인 사항은 레이저의 발진파장, 레이저의 펄스폭, 레이저의 파장을 확인 하였다.
- 그림 5-1과 그림 5-2는 레이저 광원의 발진 파장을 확인한 그래프로, 발진하는 레이저의 파장은

1064.337 nm, 354.897 nm로 미세 먼지 라이다의 광원의 파장으로 선정 한 1064 nm와 355 nm에 충족함을 확인하였다.

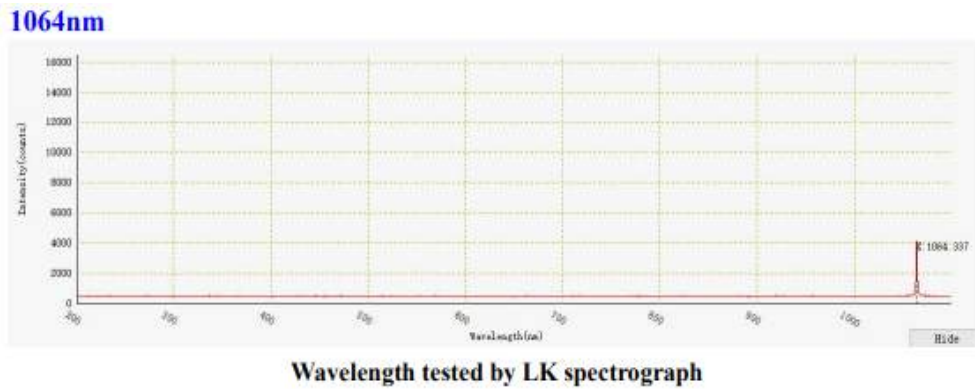


그림 5-1. 미세 먼지 라이다 시제품의 1064 nm 파장 스펙트럼 데이터

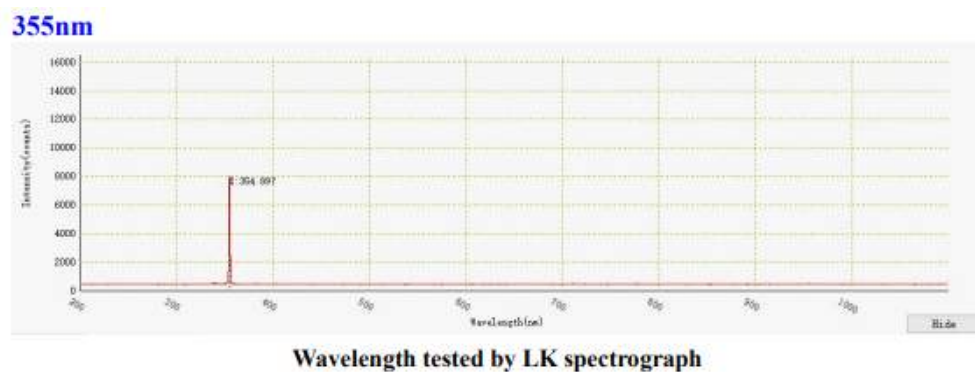


그림 5-2. 미세 먼지 라이다 시제품의 355 nm 파장 스펙트럼 데이터

- 레이저 광원의 제조사에서 1064 nm와 355 nm의 에너지는 300 μ J, 200 μ J로 제공이 가능하다고 제안을 하였다. 제조사에서 제안한 에너지대로 레이저가 발진 여부를 확인을 해보았다. 그림 5-3은 1064 nm 파장과 355 nm 파장의 레이저 에너지를 측정한 데이터로 1064 nm의 최대에너지는 368 μ J이고, 355 nm의 최대에너지는 220 μ J이 나오는 것을 확인하였으며, 제조사에서 제공하는 300 μ J과 200 μ J은 만족하는 것을 확인 하였다.

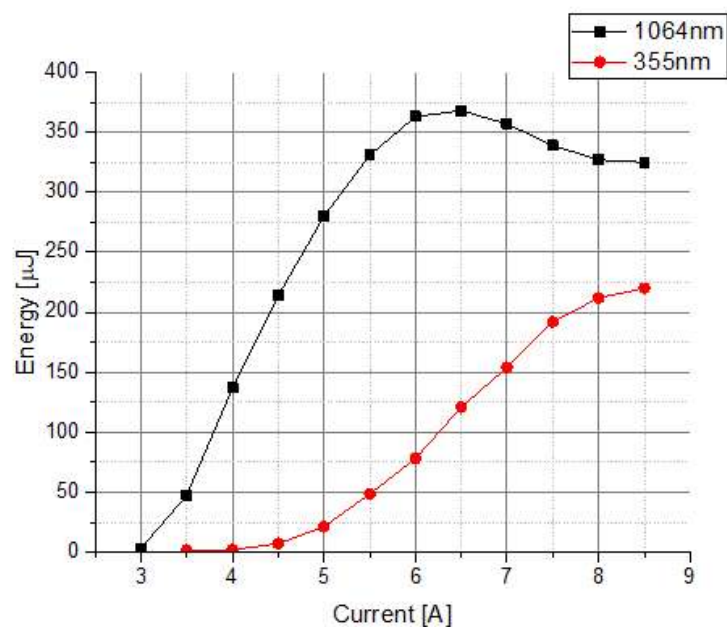
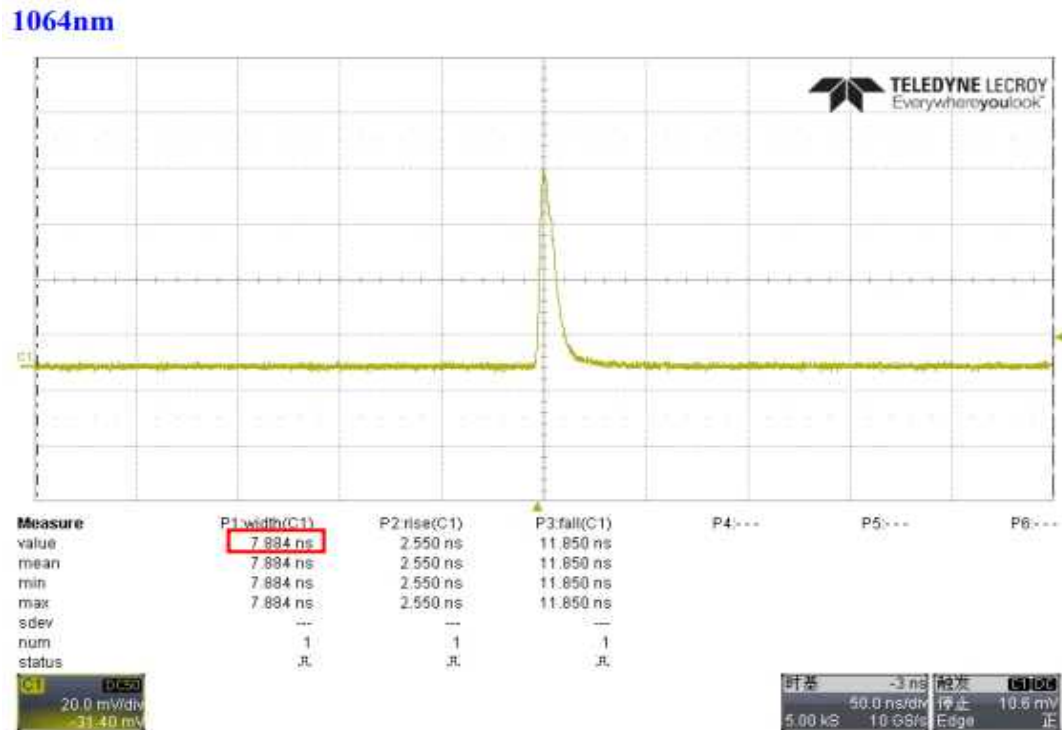


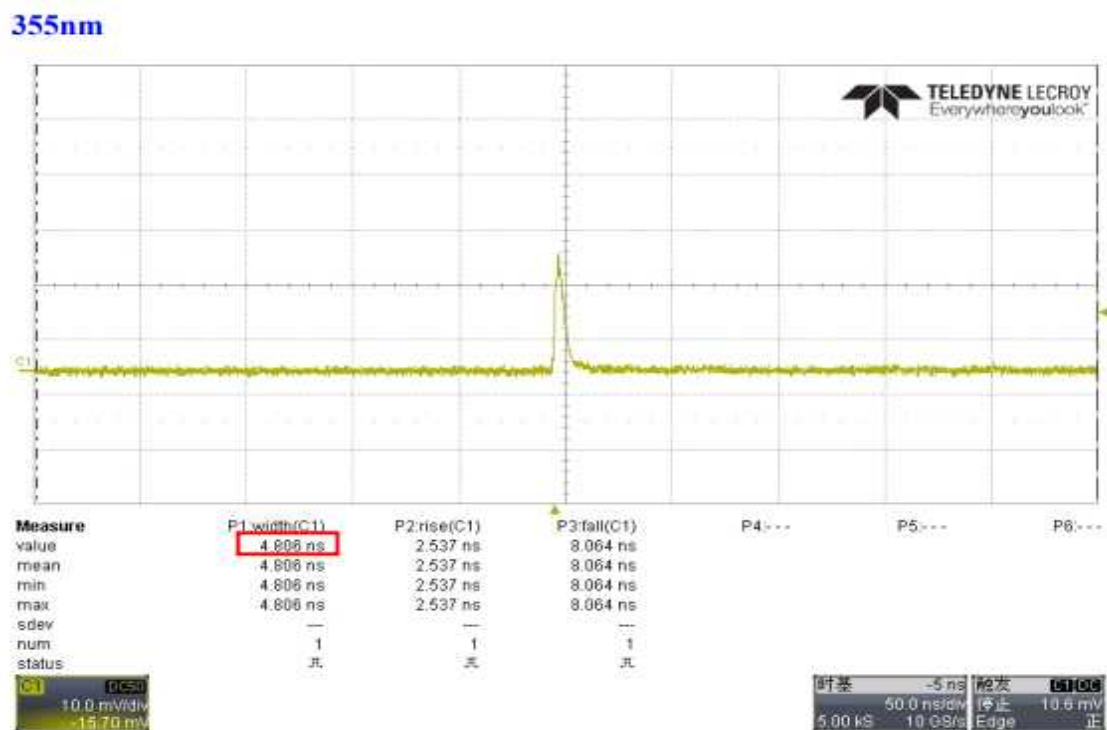
그림 5-3. 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 출력 에너지 평가 결과

- 레이저의 펄스폭은 라이다의 거리분해능에 영향을 주는 요소로 본 라이다 장치는 7.5 m 이하의 거리 분해능으로 관측이 요구되기 때문에 본 라이다 장비에 사용하는 레이저는 50 ns 이하의 펄스폭이 요구된다.
- 레이저 광원의 펄스폭 측정 결과 1064 nm 파장은 7.8 ns, 355 nm 파장은 4.8 ns로 나오는 것을 확인 하였으며, 본 라이다장비에 사용하는데 적합한 것을 확인하였다.



Pulse width tested by LK oscilloscope is 7.884ns

그림 5-4. 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 펄스 폭 측정 결과 (1064 nm)



Pulse width tested by LK oscilloscope is 4.806ns

그림 5-5. 미세 먼지 라이다 시제품의 레이저 펄스 폭 측정 결과 (355 nm)

- 미세 먼지에 의하여 후방 산란되는 레이저 신호는 수신 망원경을 이용하여 수집된다. 수집한 신호는 분할거울을 이용하여 1064 nm와 355 nm의 신호로 나뉘지며, 나뉜 신호는 APD센서와 PMT센서에 입력되어 미세 먼지의 정보를 획득한다. 신호 획득에 사용하는 APD센서는 5 V DC 전압 인가가 필요하고, PMT 센서는 - 800 ~ - 1100 V의 고전압의 인가가 필요하다. 2차년도 시제품에 센서의 전원공급기는 APD 센서에는 5V DC 전원 어댑터를 이용하여 전원을 인가하였고, PMT 센서에는 Standard Research System 사의 고전압 공급기를 이용하여 전원을 인가하였다. 그림 5-6은 2차년도에 PMT센서에 고전압을 인가하기 위하여 사용한 전원공급기로 사이즈가 205 mm(W) X 355.6 mm(P) X 88.9 mm(H)로 사이즈가 큰 편에 속하며, 장비의 소형화를 위해서는 전원 공급기의 개발이 필요하다.



그림 5-6. 미세 먼지 라이다 시제품에 사용된 고전압 전원공급기

- 시제품의 소형화를 위하여 5 V의 DC 전압과 -1200 ~ 0 V의 전압이 출력되는 전원보드(Board)를 제작하고, DAQ Board를 이용하여 원격 제어가 가능한 장치를 개발하였다.
- 제작한 전원보드는 125 mm(W) X 120 mm(P) X 40 mm(H)로 기존의 고전압 전원공급기보다 작은 사이즈로 제작을 하였다.
- DAQ Board는 NI사의 USB 6001 모델로 USB를 이용하여 전원보드에 0 ~ 5 V를 원격으로 공급 제어할 수 있도록 하였다.
- DAQ Board와 제작한 전원보드는 임베디드 시스템에서 각 센서에 인가되는 전압의 인가여부(센서의 전원 On/Off)를 조절할 수 있으며, DAQ Board에서 0.1 V씩 가변 하여 PMT에 -25 V 단위로 -1250 ~ 0 V 사이의 고전압을 공급 할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-7과 그림 5-8은 제작한 전원보드를 나타내는 그림으로 5V DC전압 출력단, ±5 V DC전압 출력단, -1200 ~ 0 V DC 고전압 출력단, DAQ Board Interface 연결단, AC 220V 입력단으로 구성되어 있다.
- 그림 5-9은 DAQ Board와 전원보드의 연결 사진으로 DAQ Board의 경우, 2개의 전압 출력 채널이 존재하며, 이를 전원 보드에 연결하여 원격으로 2개 채널에서 PMT에 - 1250 ~ 0 V의 고전압이 차동으로 공급할 수 있도록 하였다.

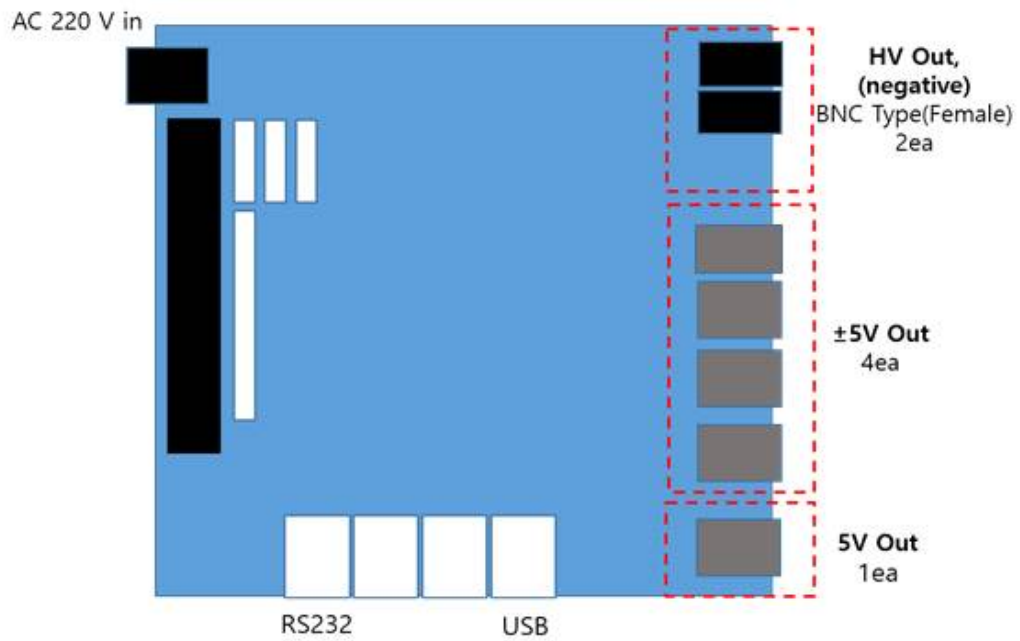


그림 5-7. 미세 먼지 라이다 시제품의 전원보드 설계안

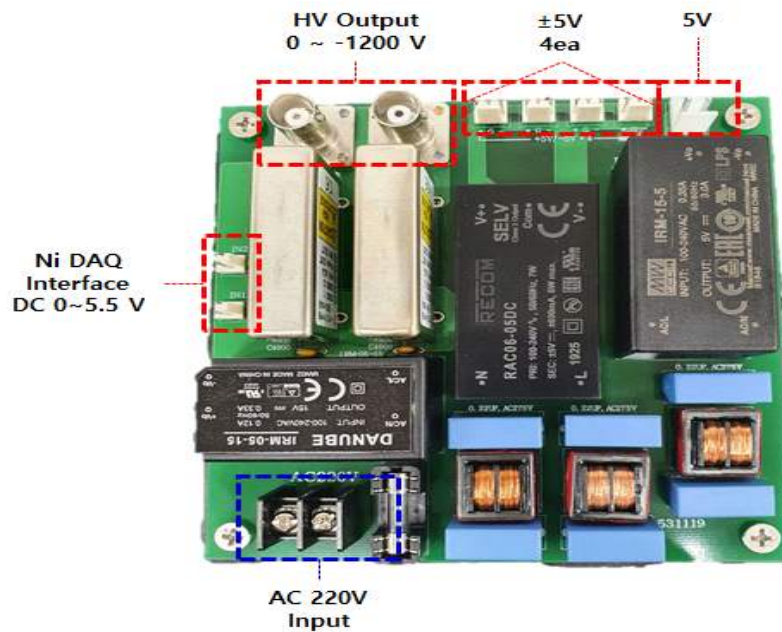


그림 5-8. 미세 먼지 라이다 시제품의 사용을 위하여 개발된 전원보드



그림 5-9. DAQ Board와 전원보드 연결사진

- 2차년도 시제품에는 ADC(Analogue Digital Converter)를 이용하여 센서로 수집한 신호를 분석하도록 시스템을 구성 하였다.
- ADC는 센서로 수집한 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 장치로, 가격대가 저렴하고, PCI 타입으로 구성이 되어있어 PC 기반의 장치에 적용하기 쉬운 장점을 갖고 있다.
- 그러나 ADC의 경우, 별도의 노이즈 처리 장치가 없으며 일반 PC에 사용하기 때문에 크기가 큰 단점을 갖고 있다.
- 본 시제품에는 일반 PC를 사용하지 않고, 임베디드 시스템으로 장비제어와 신호분석을 처리하기 때문에 PCI 타입의 ADC는 사용이 어렵고, 레이저 출력이 낮아 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호의 세기 낮아 신호 대 잡음 비가 매우 낮아진다.
- 따라서 기존 ADC를 대신하여 광 계수기를 이용하여 데이터를 수집할 수 있도록 변경하였다.
- 광 계수기는 하나의 임베디드 장치로서, USB 통신을 이용하여 수집된 빛의 산란 신호를 제어 PC에 전송이 가능하며, 신호 측정을 위한 각 채널에 별도의 광 판별기(Discriminator)를 가지고 있어, 측정 신호의 노이즈 신호제거, 신호레벨 조절 등의 보정이 필요하지 않기 때문에 본 시스템에 적용하기에 적절하다.
- 그림 5-10은 미세 먼지 라이다 장치 제품에 적용을 위하여 한국원자력연구원의 협조를 받은 Fast Comtec사의 MCS6A 모델의 광 계수기를 나타낸 사진이다.



그림 5-10. FastComtec사의 MCS6A 모델의 광 계수기

- MCS6A 모델은 100 ps의 Time Resolution을 갖고 있으며, 1 GB의 FIFO 메모리를 갖고 있으며 USB 2.0의 통신 인터페이스를 이용하여 측정 데이터를 제어 PC에 전송 할 수 있다.
- 미세 먼지 라이다 시제품에 광 계수기 적용하기 위하여 한국원자력연구원의 협조를 받아 MCS6A 광 계수기를 이용한 측정 실험을 수행하였다.
- 제조사에서 제공하는 데이터 수집 프로그램을 이용하여 355 nm 와 1064 nm 파장의 레이저 빔에 의한 빛의 산란 현상을 광 계수기로 측정하는 실험을 수행하였다.
- 1 kHz 의 레이저 펄스 반복률을 갖는 레이저를 이용하여 355 nm 와 1064 nm 파장을 약 60초간, 7.68 nm 시간 분해능을 갖고 2048개의 데이터를 광 계수기를 이용하여 측정할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-11은 MCS6A를 이용하여 낮 시간 동안 1064 nm 와 355 nm 파장의 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 계측한 결과 나타낸 것이다. 그림 5-10에서와 같이 낮 시간동안에 MCS6A를 이용하여 빛의 산란 신호를 계측할 때, 신호의 왜곡 현상이 발생하였다. 그러나 밤 시간동안 받은 데이터는 동일 조건에서 신호의 왜곡 현상이 발생하지 않았다.
- 낮 시간 동안 MCS6A 광 계수기를 이용하여 측정한 데이터의 왜곡 현상이 발생한 원인은 다음과 같은 원인으로 분석되었다.
- 광 계수기는 각 측정 채널에 있는 광 판별기의 임계 값을 넘는 신호의 개수를 세는 장치이다. 그러므로 광 계수기를 이용한 측정 방법에서 정량적인 양을 알기 위해선, 특정한 레이저 펄스에 의하여 발생한 신호의 개수를 비교하여야 한다.
- 따라서 특정 레이저 펄스 개수에 도달할 동안 각 채널의 광 판별기에 설정된 임계 값을 넘는 신호의 개수를 내부 메모리에 저장하고, 측정된 데이터를 제어 컴퓨터로 전송하게 된다.
- 이러한 일련의 과정에서 낮 시간 동안에는 태양에 의한 배경 잡음 신호에 의하여 측정 데이터의 크기가 증가하게 되고, 정량적인 측정을 위하여 설정한 레이저 펄스에 도달할 때까지 내부 메모리에 데

이터를 누적해야 함으로 내부 메모리의 사용량이 증가하게 된다.

- 또한 측정 데이터를 실시간으로 제어 컴퓨터에 전송하는 과정에서 측정 데이터의 크기가 증가하여, 전송 시간의 지연이 발생하고, 측정 데이터의 로스를 줄이기 위하여 내부 메모리에 저장하게 된다.
- 따라서 낮 시간 동안 측정된 데이터의 증가와 측정 데이터의 제어 PC에 전송하는 과정에서 발생한 데이터 전송 병목 현상으로 내부 메모리의 사용량이 폭증하는 현상이 가속화 된다. 일련의 과정에서 내부 메모리가 부족할 경우, 기존 데이터에 측정 데이터를 병합하는 과정에서 오류가 발생하여 신호의 왜곡 현상이 발생한다.
- 이러한 현상은 밤 시간에는 발생하지 않았는데, 이와 같은 원인은 낮 시간에는 태양에 의한 배경 잡음 신호가 크게 발생하여 측정 데이터의 크기가 훨씬 크기 때문이다. 상시 측정 장치인 미세 먼지 라이다 시스템에 MCS6A 모델의 광 계수기를 적용하기 어려울 것으로 판단되었다.
- 본 라이다 시스템에는 MCS6A 모델보다 데이터 전송속도가 높고, FIFO 메모리가 큰 MCS8A 제품을 선택하였다.
- FastComtec사의 MCS8A 모델은 USB 3.0으로 통신이 가능하여 기존 MCS6A 모델에 비하여 4배 이상의 데이터 전송 속도를 갖고 있으며, 2 GB의 FIFO 메모리를 탑재하고 있어 미세 먼지 라이다의 측정 과정에서 발생하는 측정 데이터 왜곡 현상이 발생하지 않을 것으로 판단하였다.
- 표 5-2는 MCS6A와 MCS8A 제품 사양을 나타낸 것으로서, MCS8A의 USB 통신 속도와 내부 메모리가 우수한 성능을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

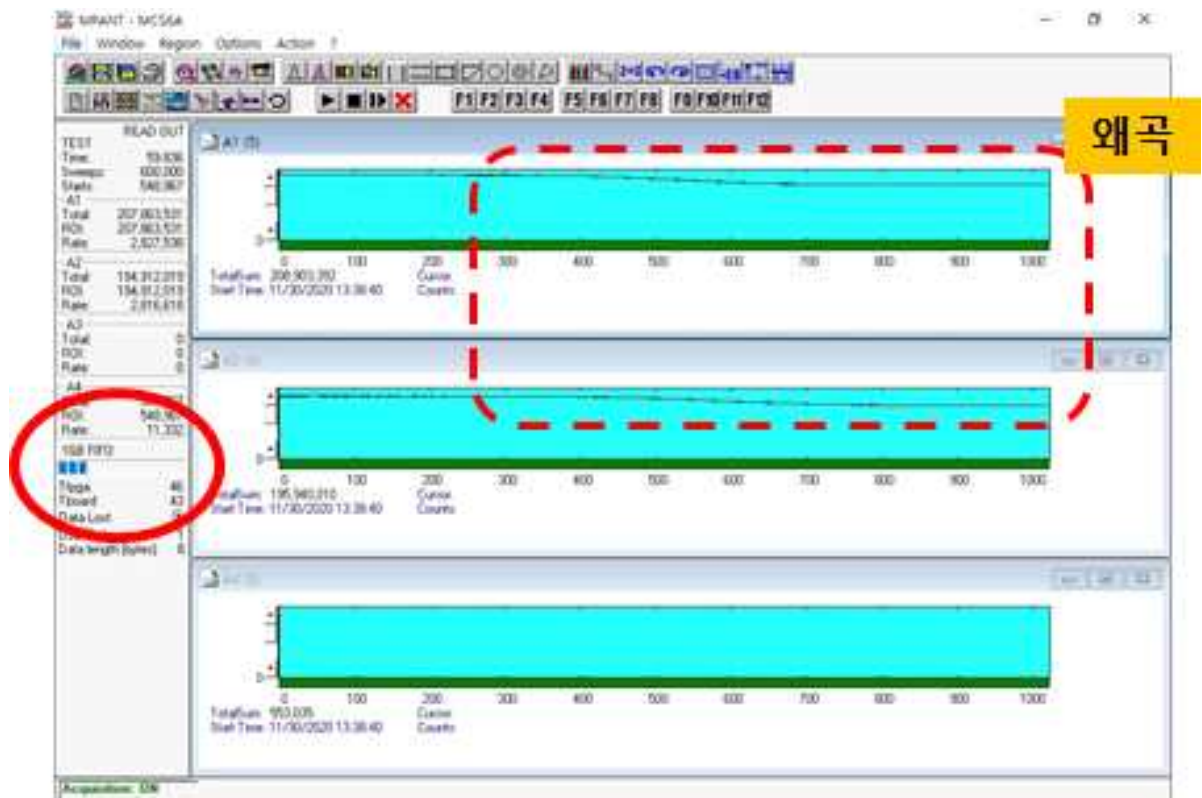


그림 5-11. MCS6A 모델의 광 계수기 테스트 화면

표 5-2 소형 미세 먼지 라이다 시제품에 적용할 광 계수기 비교 사양

	MCS6A	MCS8A
Communication Interface	USB 2.0	USB 3.0
Measuring Channel	Trigger : 1 ea Signal : 3 ea	Trigger : 1 ea Signal : 4 ea
Time resolution	100 ps	800 ps
Memory	1 GB FIFO	2 GB FIFO



그림 5-12. 미세 먼지 라이다 시제품에 사용될 MCS8A 모델의 광 계수기

- 2차년도에 제작한 시제품의 소형화를 위하여 레이저 광원, 전원공급기, 신호분석 시스템의 보완이 필요한 것으로 확인 되었고, 이 품목을 변경하여 장비의 소형화가 가능하도록 시스템을 구성하였다.
- 그림 5-13은 2차년도에 제작한 시제품의 하단부의 사진으로 전원공급기와 레이저 수랭식 냉각기, 운영 및 조작부의 구성품으로 큰 사이즈로 구성되어 있는 요소들을 변경하여 시제품의 소형화를 진행하였다.



그림 5-13. 2차년도 시제품의 전장부 구성 사진

- 그림 5-14는 소형화된 시제품의 3 차원 도면으로 레이저의 컨트롤러, 고전압전원공급기는 Tilt축의 스캐닝시스템의 구성품에 위치시켜 장비의 하단부의 부피를 줄였고, 장비 운영을 위한 임베디드 시스템, 광 계수기, 스캐닝 모터시스템의 구성도를 변경하여 장비의 사이즈를 최소화 하였다.

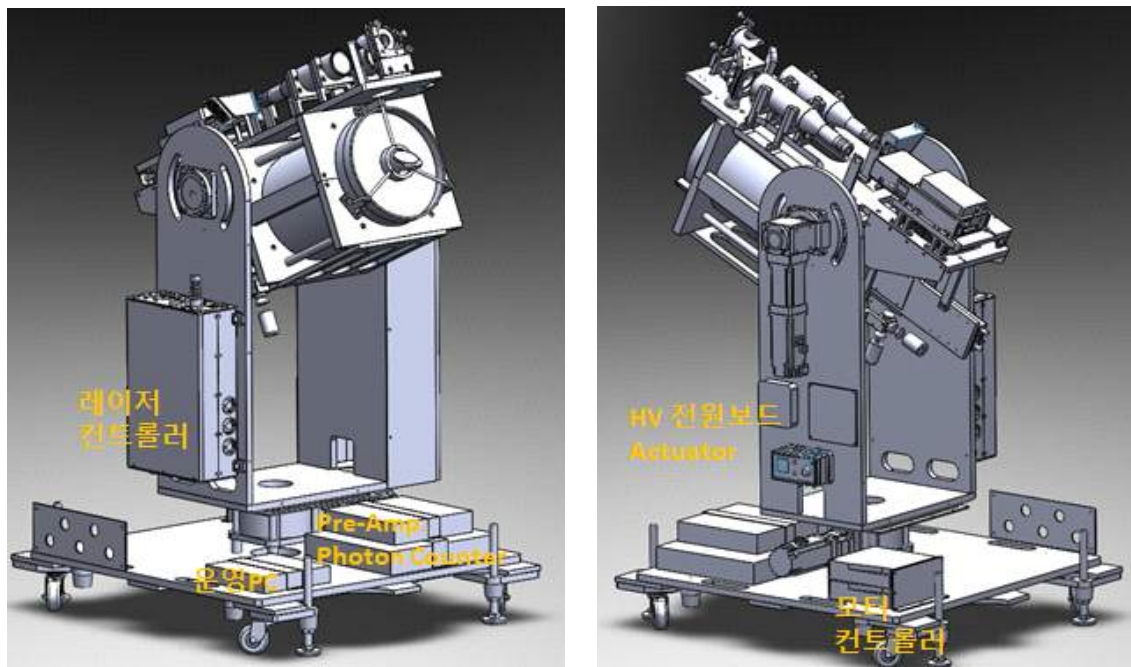


그림 5-14. 소형화를 위한 시제품의 3 차원 도면

- 그림 5-15는 개선된 시제품의 외부하우징을 추가한 최종 도면으로 송·수신 광학계와 Tilt축의 스캐닝모터의 외부하우징을 둥근 형태로 설계하여 디자인적인 요소도 추가하였다.
- 그리고 제품의 하단부는 무게중심을 잡아줄 수 있도록 각진 형태로 설계를 하였으며, 바퀴의 양끝 쪽에 원형 형태의 고정 바를 이용하여 이동성을 높이고 장비의 고정이 쉽도록 설계를 진행 하였다.

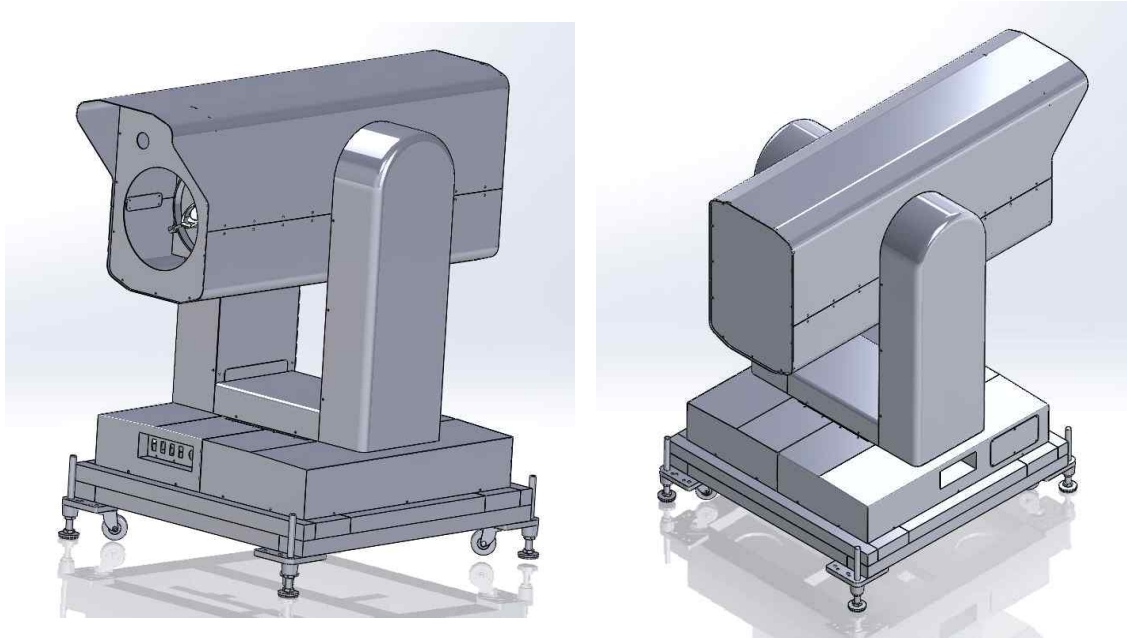


그림 5-15. 외부하우징을 포함한 시제품의 3 차원 도면

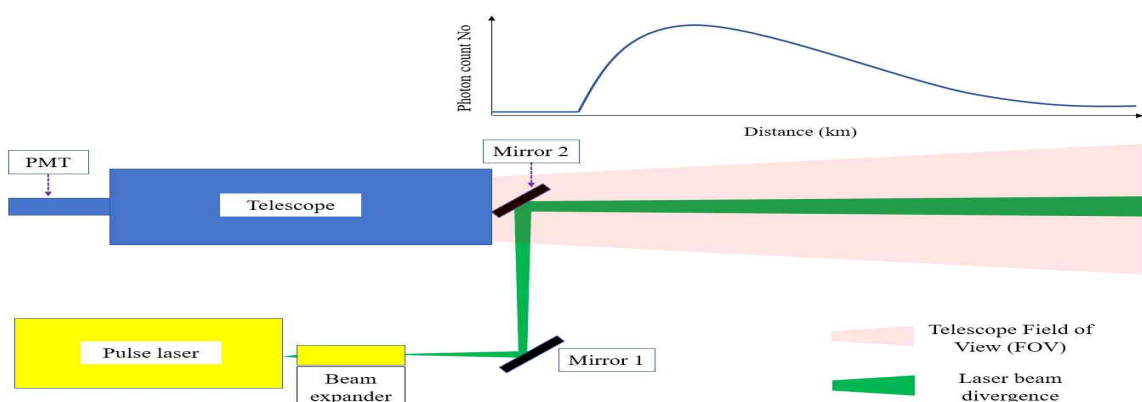
- 표 5-3은 2차년도 제작한 시제품과 보완된 시제품을 비교한 것으로 장비는 130 mm X 300 mm X 400 mm의 크기가 축소화 되었으며, 잘 다듬어 진 디자인을 확인할 수 있다.

표 5-3 2차년도 시제품과 보완된 시제품의 주요 부품 사양 비교

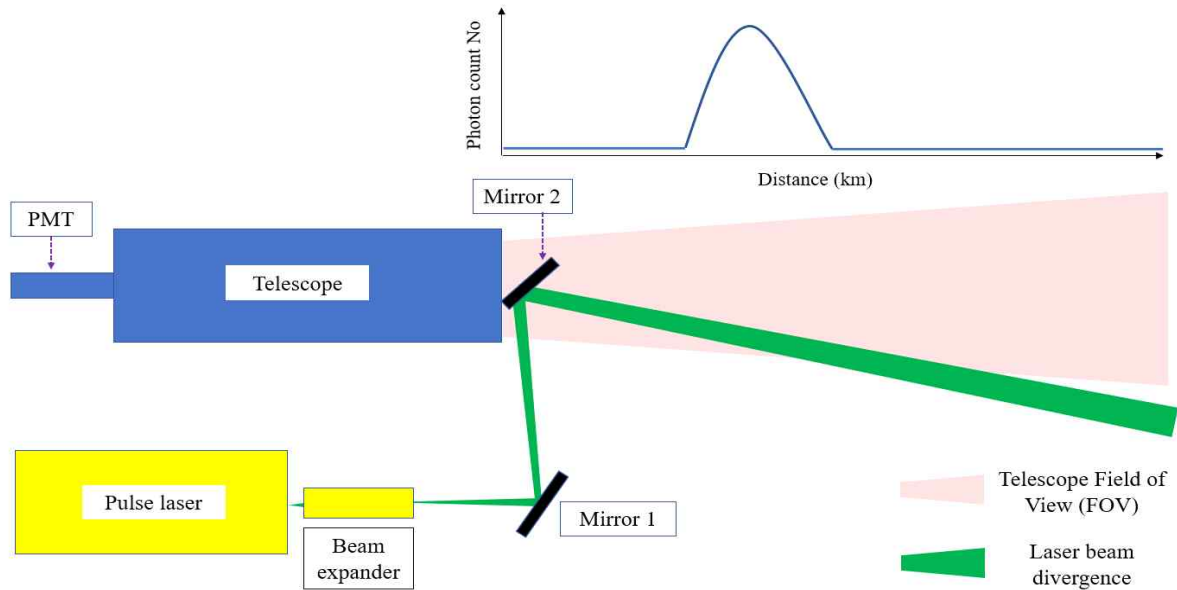
		2차년도 시제품		3차년도 보완 시제품	
송신부	Wavelength	355 nm	1064 nm	355 nm	1064 nm
	Repetition rate	20 Hz		1 kHz	
	Energy	12 mJ	50 mJ	200 μ J	300 μ J
수신부	Diameter	200 mm		200 mm	
	Channel	3 Channel		3 Channel	
	Range	5 km		5 km	
	Resolution	7.5 m		7.5 m	
장비 크기(W x D x H)		830 mm × 1000 mm × 1680 mm		700 mm × 700 mm × 1200 mm	
제품 사진					

• 미세 먼지 라이다의 자동 광 정렬 시스템 적용

- 미세 먼지 라이다 시스템은, 대기 중에 레이저를 송신하는 레이저 송신 축과, 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 수신하는 광 신호 수신 축의 일치 정도가 매우 중요하다.
- 그림 5-16은 미세 먼지 라이다 시스템의 레이저 송신 축과 광 신호 수신축의 변화에 따른 미세 먼지 라이다 신호의 변화를 나타낸 것이다. 미세 먼지 라이다 시스템은 광 신호 수신기의 정 중앙에 거울을 설치하여 레이저 송신 축과 광 신호 수신 축을 일치시키는 동축(On - Axis) 라이다 시스템을 사용한다.
- 동축 라이다 시스템은 광 신호 수신기의 정 중앙에 거울을 설치하여 일부 앞쪽 부분의 신호를 수신하지 못하는 단점이 있으나, 그림 5-16(a)와 같이 레이저 빔의 발산각에 의한 레이저 빔의 퍼짐과 광 신호 수신기의 FOV(Field of view) 영역과 겹치는 부분(Overlap)이 거의 무한대까지 확장할 수 있어, 미세 먼지에 의한 산란 신호의 측정 거리가 향상되는 효과를 얻을 수 있다.
- 그러나 그림 5-16(b)와 같이 레이저 송신 축과 광 신호 수신 축이 많이 어긋나게 되면, 광 신호 수신기(Telescope)의 FOV와 겹치는 부분(Overlap)이 부분의 작아져 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 측정할 수 있는 미세 먼지 측정 거리가 단축되는 현상을 발생한다.
- 라이다 장치의 레이저 송신부의 광축과 레이저 수신부의 광축의 어긋남 현상은 다양한 현상에 의하여 발생한다. 특히, 라이다 장치는 상시 측정 장비로 미세 먼지의 양과 분포를 계측하기 위하여 야외에 노출된 형태를 갖고 있다. 따라서 사계절 외부 환경의 온도 변화를 견디어야 하며, 바람, 눈, 우박 등의 다양한 기상 현상에 의한 충격을 받게 된다.
- 외부 충격 또는 외부 온도의 변화는 라이다 장치의 내부의 국부적인 열 변형을 발생시켜 광축의 변화를 일으키며, 이는 라이다 장치를 이용한 계측 방법의 신호의 유효성 및 측정 거리의 단축을 야기한다.
- 라이다 장치의 측정 유효성과 반복성을 향상시키기 위하여 355 nm 와 1064 nm 파장의 레이저를 송신하는 거울에 PZT(Piezo electric transducer) 방식의 Actuator를 설치하여 레이저 송신부의 광축을 레이저 수신부의 광축과 일치 하도록 장치를 구성하였다.
- 미세 먼지 라이다 시제품에 적용된 PZT를 이용한 라이다 장치 광축 정렬 방법은 크게 사용자에게 의한 수동 정렬 방법과 제어 컴퓨터에서 라이다 광축 변화를 감지하여 자동으로 광축을 정렬하는 자동 정렬 방법으로 개발되었다.
- 수동 정렬 방법은 실시간으로 계측되는 라이다 신호를 사용자가 판단하여 레이저 송신부에 부착된 PZT를 제어하여 광축을 정렬하는 방식이며, 자동 정렬 방법은 라이다 신호를 적분하여 적분 값이 최대가 되는 PZT 위치를 자동으로 찾아가는 방식을 사용하였다. 두 방법을 미세 먼지 라이다 시스템에 동시에 사용하기 위하여 PZT의 움직임을 제어하기 위한 코드를 병렬 제어 방식을 이용하여 라이다 제어 프로그램에 사용하였다.



(a) 레이저 송신 축과 광 신호 수신 축 사이의 광 정렬이 잘되었을 때, 미세 먼지 산란 신호



(b) 레이저 송신 축과 광 신호 수신 축 사이의 광 정렬이 잘못되었을 때, 미세 먼지 산란 신호
 그림 5-16. 미세 먼지 라이다 시스템의 광축 정렬에 의한 미세 먼지 산란 신호의 변화

• 스캐닝 시스템 알고리즘/시퀀스 성능 최적화

• 미세 먼지 분포 측정을 위한 스캐닝 알고리즘.

- 미세 먼지 라이다 시스템의 소형화를 위하여 레이저 및 데이터 수집 장치의 변화가 발생하였으며, 레이저 송신 축과 광 신호 수신 축의 광축 자동 정렬 장치가 추가되어 대기 공간상의 미세 먼지 측정을 위한 스캐닝 시스템의 제어 알고리즘의 변화가 발생하였다.
- 그림 5-17은 새롭게 개발된 미세 먼지 라이다 시스템의 스캐닝 알고리즘을 나타낸 것이다.
- 미세 먼지 라이다 시스템의 스캐닝 알고리즘의 가장 큰 변화는 레이저 송신 축과 광 신호 수신 축의 광 정렬 상태를 평가하고, 광 정렬 상태가 나빠지면 레이저 송신 축의 Actuator를 Simplex method를 이용하여 최적의 광 정렬 상태가 되도록 자동으로 Actuator를 조정하는 자동 광 정렬 방법을 적용한 것이다.
- 자동 광 정렬 과정은 미세 먼지 라이다 시스템의 스캐닝 시작 지점에서만 실시하며, 미세 먼지에 의한 라이다 신호를 평가하여 사용자가 입력한 임계 값보다 작으며, 자동 광 정렬을 위한 Simplex method를 적용하며, 임계 값보다 높으면 스캐닝 과정을 수행할 수 있도록 하였다.
- 스캐닝 모터의 측정 지점, 측정 각도, 측정 방향 등의 정보를 측정 파일의 이름에 표시하여 저장할 수 있도록 하였으며, 표출 프로그램에 미세 먼지 라이다 시스템의 이용하여 측정한 미세 먼지 신호의 정보를 text 파일 같이 저장하여 표출 프로그램과 연동할 수 있도록 구성하였다.
- 레이저의 발진 에너지는 낮으나 근거리에서 사람의 눈에 들어가면 실명에 위험이 있고, 고전압 공급 장치의 경우, 감전 사고가 발생할 수 있으며, 스캐닝 모터의 움직임에 의하여 사람이 다칠 염려가 있어 미세 먼지 라이다 시스템을 구성하는 모든 장치의 경우, 개별 제어가 가능하도록 병렬 제어 방식을 사용하였다.
- 스캐닝 패턴을 진행할 때, 광 계수기에 의한 데이터 수집 도중에 스캐닝 모터가 움직임이 발생하지 않도록 스캐닝 모터의 움직임과 광 계수기 제어를 순차제어 방식으로 사용할 수 있도록 설정하였으며, 전역 변수를 통하여 긴급제어가 가능하도록 구성하였다.

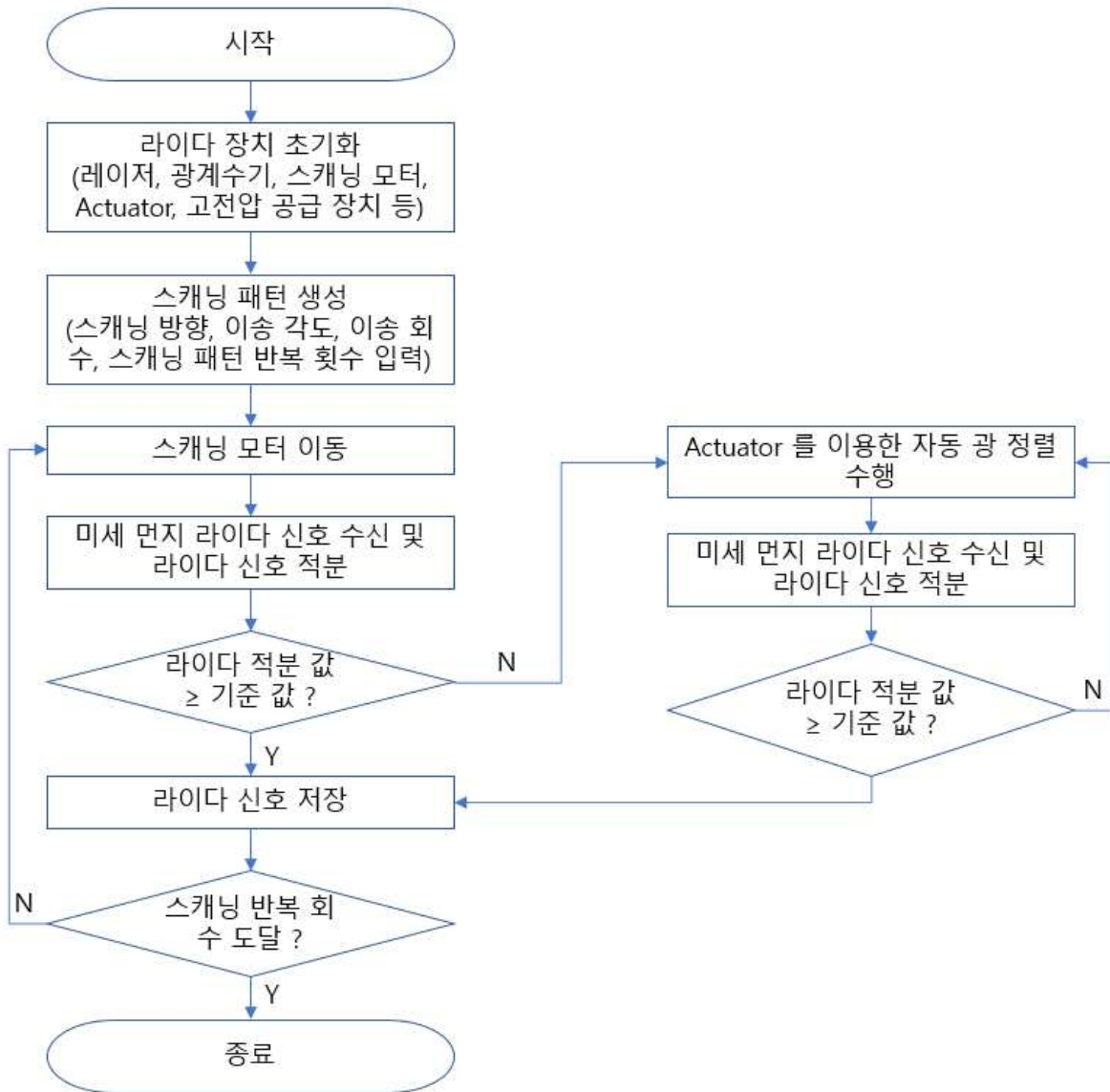


그림 5-17. 미세 먼지 라이다 시스템의 미세 먼지 측정 알고리즘

• 시퀀스 성능 최적화

- 본 연구를 통하여 개발된 미세 먼지 라이다 시스템의 공장 또는 건설현장과 같은 미세 먼지의 오염 배출원에 대한 관측을 주목적으로 한다.
- 배출원의 감지 및 모니터링이 가능하도록 배출원 감지 기능을 수행하는 스캐닝 모드와 배출원에서 발생하는 미세 먼지의 모니터링을 하는 Hot spot 측정 모드로 나눠 개발하였다.
- 미세 먼지 라이다 시스템의 스캐닝 모드의 경우, 사용자가 입력한 스캐닝 모터의 움직임 방향, 측정 각도, 측정 각도 분해능 등의 정보를 바탕으로 임의의 공간상에 미세 먼지 양 및 분포를 측정할 수 있는 모드를 말한다.
- 스캐닝 모드를 통하여 획득한 데이터를 바탕으로 특정 지역에 미세 먼지의 양이 급격히 발생하는 것이 나타나게 되면, 측정 데이터를 기반으로 미세 먼지의 양이 급격히 발생하는 지점에 대한 위치 정보를 확인 한 후, 스캐닝 모터를 구동하여 이동할 할 수 있도록 하였다.
- 스캐닝 모드를 통하여 획득한 정보를 바탕으로 라이다 시스템의 레이저 발진 방향이 일치 된 후, Hot spot 모니터링 모드로 변환하여 미세 먼지를 측정할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-18은 라이다 시스템의 Hot spot 지역에 대한 측정 자료를 나타낸 것으로서, Hot spot 모니터링 기능은 스캐닝 모드와 달리, 배출원에서 발생하는 미세 먼지에 대한 모니터링 기능임으로, 시간에 따라 미세 먼지의 발생량의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

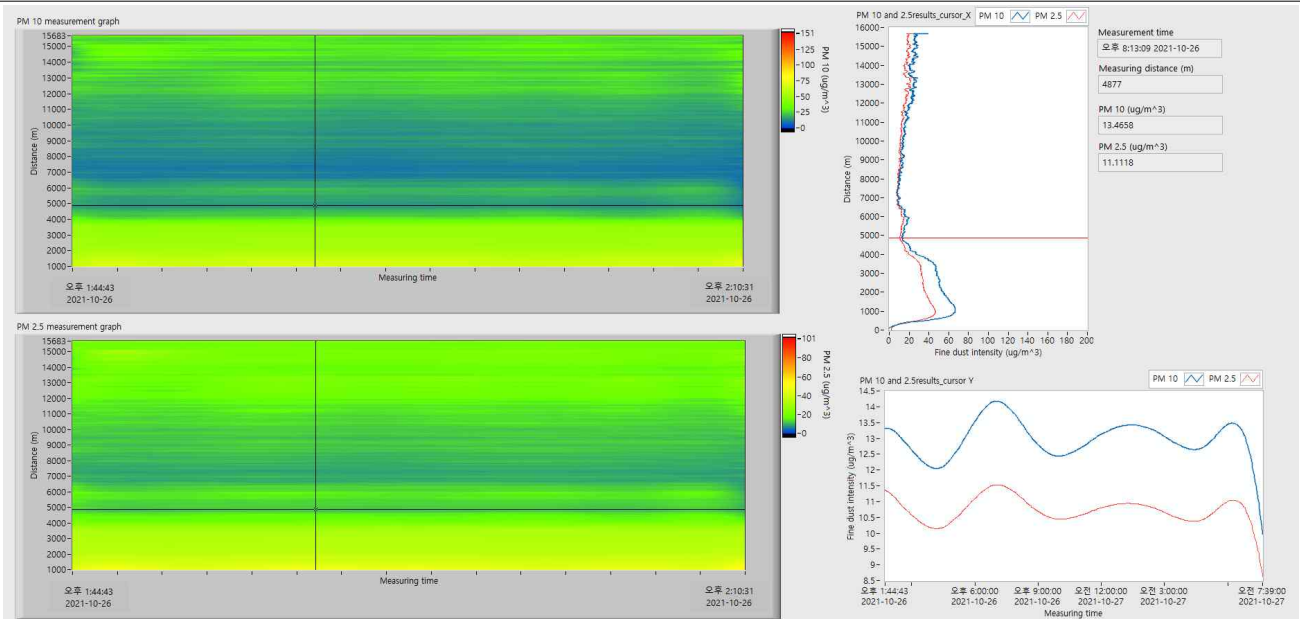


그림 5-18. Hot spot 모니터링 기능을 이용한 시간에 따른 미세 먼지 분포 변화 및 결과

- 미세 먼지 라이다 시스템의 장치의 레이저 송·수신 장치의 성능 개선 및 내구성 향상을 위하여 자동 광 정렬 장치를 구성하였으며, 이를 적용하여 스캐닝 모드와 Hot spot 모드의 측정 시퀀스를 최적화하기 위하여 광 정렬 알고리즘의 구현 및 적용을 최적화 하였다.
- 그림 5-19는 라이다 시스템에서 발생하는 외부 환경적인 변수에 의하여 레이저 송신 측과 광 신호 수신 측의 변화에 따른 라이다 신호의 변화를 나타낸 그림이다.
- 그림에서 보는 것과 같이 레이저 발진기에 발진된 레이저 빔의 경우 일정한 Beam divergence 을 갖고 있으며, 이를 줄이기 위하여 Beam expander를 사용한다.
- Beam expander를 거치 레이저 빔의 경우, 레이저 발진기에서 발진한 레이저 빔보다 Beam divergence가 작아져, 레이저 빔을 보다 멀리까지 송신할 수 있다.
- 그러나 Beam divergence가 완전히 없어진 것은 아니기 때문에 레이저의 발진 거리에 따라 조금씩 레이저 빔의 크기가 커진다.
- 동일하게 광 신호를 수신하는 광 수신기(Telescope)또한 일정한 FOV(Field of view)를 갖고 있어 라이다 시스템으로 멀어지면서 FOV 크기가 커진다.
- 미세 먼지에 의한 라이다 신호는 레이저 빔과 광 수신기의 FOV가 겹치는(Overlap) 되는 영역에서 발생한 산란 신호를 계측하며, 두 영역의 겹침이 없어지면 산란 신호를 수신할 수 없다.
- 따라서 그림 5-19와 같이 레이저의 송신 측과 광 신호 수신 측 사이의 정렬이 외부 환경적인 변수에 의하여 변화가 되면 라이다 신호가 감소하는 특징을 가진다.
- 그림 5-20은 미세 먼지 라이다 시스템의 자동 광 정렬 알고리즘을 나타낸 것이다.
- 미세 먼지 라이다 시스템의 자동 광 정렬 알고리즘은 라이다 시스템의 특성을 고려하여 고안된 기술로서, 레이저 송신 측에 설치된 거울의 Pan/Tilt를 움직임을 조절할 수 있도록 설치된 Actuator를 제어하여 레이저 송신 측을 이동하여 광 신호 수신 측과의 겹침을 늘리는데 초점을 맞춘 알고리즘이다.
- 레이저 송신 거울에 의한 레이저 송신 측의 움직임은 2차원 평면상에서 움직임으로 3 점 위치에서 라이다 신호를 획득한 후, 적분하여 최대 값을 갖는 지점으로 이동하는 알고리즘이다.
- 라이다 시스템에 적용된 자동 광 정렬 알고리즘은 Simplex method를 기반으로 하고 있으며, 각 지점의 평가를 위하여 라이다 신호의 적분 값을 이용한다.
- Simplex method는 일종의 수치 대응 방법으로 최적 값을 찾기 위한 움직임을 무한으로 반복하게 된다. 따라서 광 정렬을 위한 Simplex method를 시작하고 끝내기 위하여 임계 값을 설정할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 시스템은 크게 넓은 지역에 미세 먼지의 양 및 분포를 측정하여 오염 배출원을 찾는 스캐닝 모드와 배출원에서 발생하는 미세 먼지의 양을 모니터링 할 수 있는 Hot spot 모드로

개발되었다.

- 스캐닝 모드를 수행할 때, 광 자동 정렬 과정은 스캐닝이 시작되는 지점에서 수행 여부를 판단 할 수 있도록 하여, 스캐닝에 의한 데이터 수집 시간을 단축할 수 있도록 하였다.
- Hot spot 모니터링 과정을 수행할 때는 각각의 신호를 측정하고 이를 적분하여 광 자동 정렬 과정의 수행 여부를 판단할 수 있도록 구성하였다.

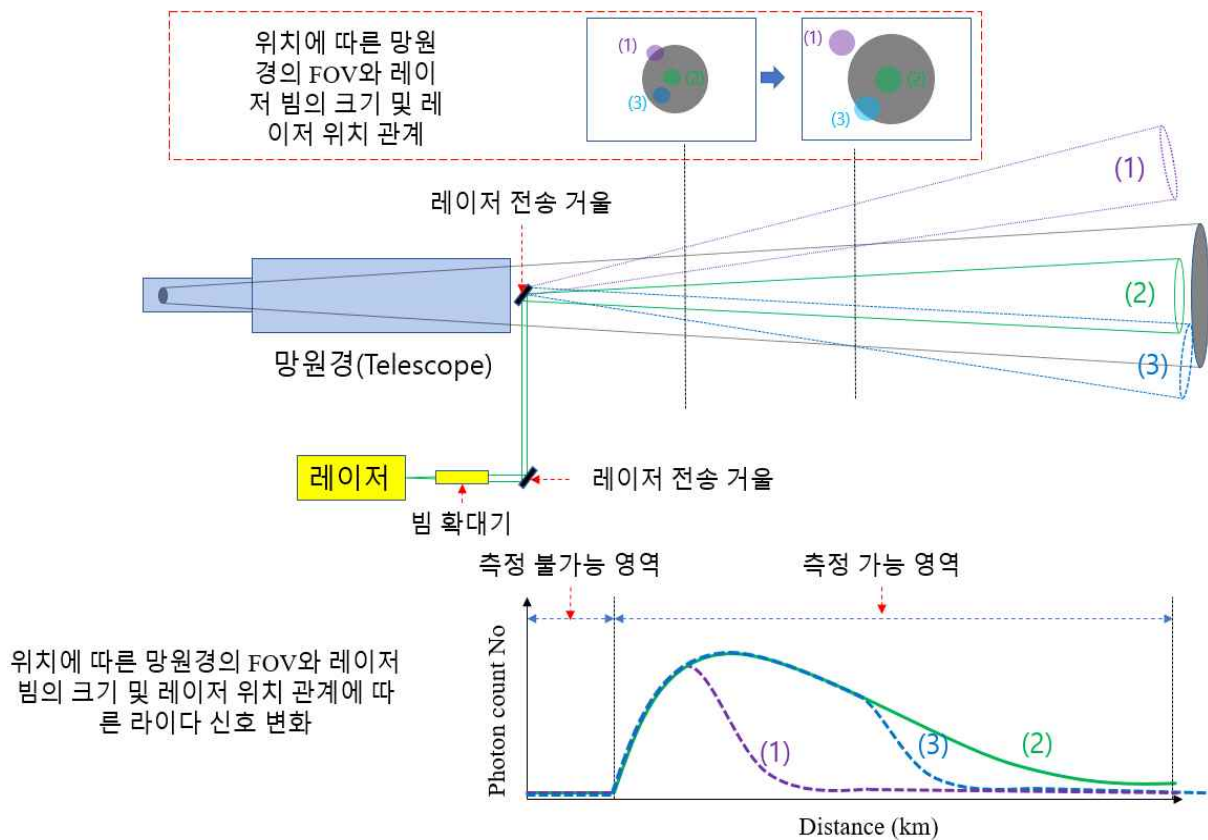


그림 5-19. 라이다 신호의 광 정렬 상태에 따른 라이다 신호의 변화

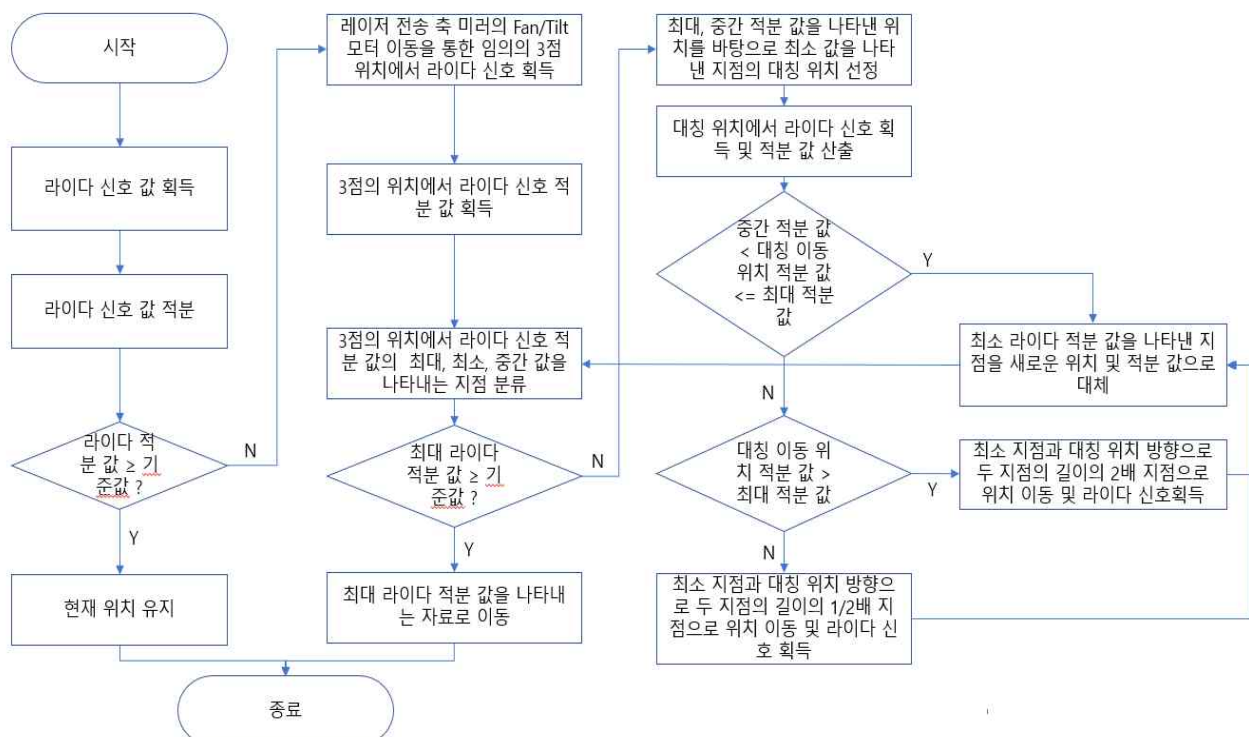


그림 5-20. 라이다 시스템의 광 자동 정렬 알고리즘

• 시스템 SW 신호처리 성능 최적화

- 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 미세 먼지 산란 신호의 경우, 미세 먼지에 의한 빛의 신호를 미세 먼지의 양으로 변환하는 신호 처리 과정을 수행하여야 한다.
- 미세 먼지 라이다 시스템의 경우, 대기 중에 미세 먼지를 측정하기 위하여 40 ~ 120 초 사이의 데이터 획득 과정을 수행하며, 획득된 데이터를 이용하여 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호의 레이저 빛의 발진 거리에 따른 레이저 빛의 감쇄를 보정하는 거리 보정, 배경 잡음 신호의 제거 및 신호의 필터링 등의 신호 처리 과정, 라이다 소산 효율 및 질량 소산 계수 측정 등의 일련의 과정을 거쳐 미세 먼지의 양 및 분포를 측정하게 된다.
- 따라서 라이다 시스템을 이용하여 미세 먼지를 측정하는 과정과 획득한 빛의 산란 신호를 미세 먼지 신호로 변환하는 과정을 순차적으로 이용할 경우, 데이터 획득 과정에서 많은 시간이 소요되는 문제를 가지고 있다.
- 미세 먼지 라이다 시스템은 미세 먼지 라이다 시스템의 운용 프로그램과 빛의 산란 신호를 이용하여 미세 먼지의 양으로 변환하는 신호 처리 과정을 분리하여 수행할 수 있도록 병렬 프로세싱 기법을 이용하여 개발되었다.
- 라이다 시스템의 제어 및 데이터 획득 과정에서 측정한 데이터를 신호 처리 루프에 전달하기 위하여 Queue를 이용하였다. Queue의 경우, 루프 간 전달을 위한 것으로서, 자체에 메모리를 갖고 있어 FIFO(First In First Out)이 가능하다. 따라서 라이다 시스템을 이용한 데이터를 신호 처리 루프에서 처리할 수 있도록 하였다.
- 신호 처리를 통하여 획득한 미세 먼지의 양 및 분포를 별도의 Viewer 프로그램을 이용하여 위성 또는 지도상에 표출 할 수 있도록 미세 먼지 측정 자료와 측정 정보를 하나의 폴더에 같이 저장하여 라이다 장치 제어와 신호처리 및 표출에 걸리는 시간을 단축하였다.
- 그림 5-21은 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 자료를 바탕으로 위성 또는 지도에 미세 먼지 측정 정보를 표출하는 프로그램을 나타낸 것이다.
- 라이다 장치의 미세 먼지 표출 프로그램은 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 획득한 355 nm와 1604 nm 파장의 빛의 산란 신호를 읽어, 미세 먼지의 양 및 분포를 자동으로 산출하는 역할을 한다. 커서 기능을 이용하여 특정 지역의 PM 10, PM 2.5의 양 및 분포를 확인 할 수 있다.



그림 5-21. 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 미세 먼지 표출 프로그램 인터페이스

- 시스템 통합 제어 및 운영 프로그램 최적화

- 미세 먼지 제어 프로그램 인터페이스 최적화

- 미세 먼지 라이다 시스템은 레이저, 광 계수기, 고전압 공급 장치, 스캐닝 모터, 광 정렬 장치, 카메라 등의 다양한 장치가 결합된 장치이다.
- 각 장치의 초기 구동 및 입력 변수를 위하여 수많은 변수 입력창이 필요하여 미세 먼지 라이다 시스템의 인터페이스가 복잡하였다.
- 미세 먼지 라이다 시스템의 제어 프로그램 인터페이스 단순화를 위한 Log 파일 시스템과 팝업 창을 통한 변수 입력이 가능하도록 프로그램 인터페이스 수정 작업을 실시하였다.
- 그림 5-22와 그림 5-23은 2차년도에 개발한 미세 먼지 제어 프로그램을 나타내는 그림으로, 데이터 수집을 위한 디지털타이저 설정창과 스캐닝 모터 및 측정 영상을 표시하는 창으로 나뉘져 있다.
- 두 개의 탭을 이용하여 장치의 운용 간에 불편한 사항이 있어 하나의 탭으로 소프트웨어 개선을 진행하였으며, 시스템 통합 제어 및 운용프로그램을 최적화 하였다.

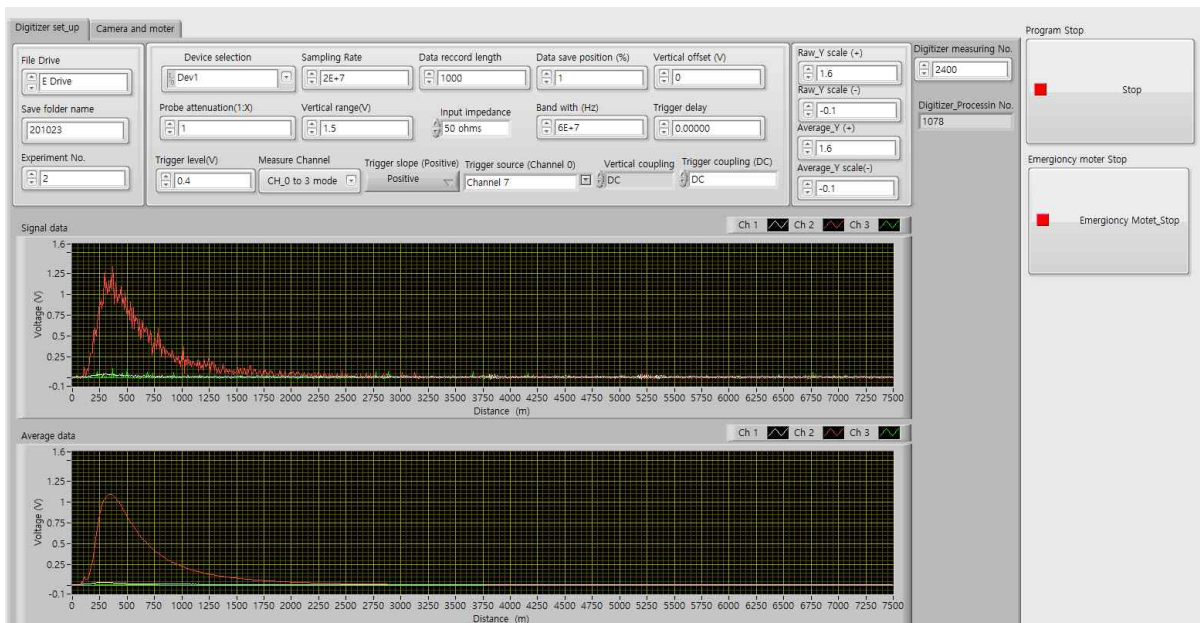


그림 5-22. 2차년도에 개발한 미세 먼지 라이다 운영 프로그램의 디지털타이저 설정 부분

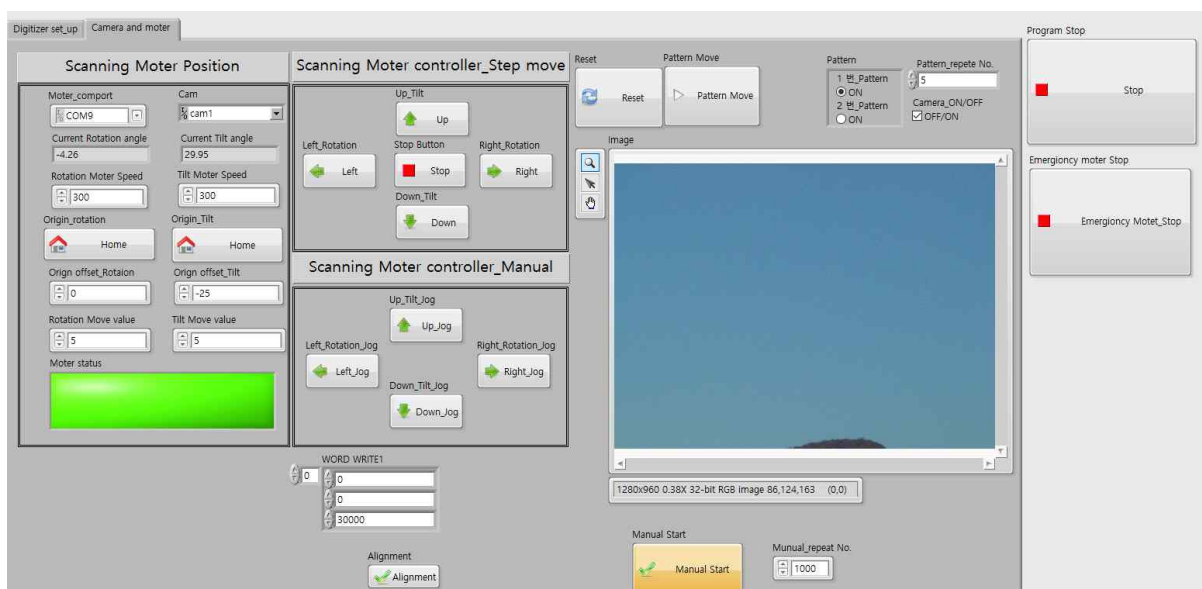


그림 5-23. 2차년도에 개발한 미세 먼지 측정 라이다 운영 프로그램의 스캐닝 모터 설정 부분

- 그림 5-24는 최적화를 진행한 미세 먼지 라이다 시스템의 제어 프로그램의 인터페이스를 나타낸 것으로, 현재 측정 위치를 나타내는 카메라 영상과, 미세 먼지 라이다 시스템을 통하여 획득한 미세 먼지 데이터를 확인하는 창으로 나타낼 수 있도록 하였다.
- 355, 387, 1064 nm 파장의 미세 먼지 산란 신호 확인 창과 스캐닝 모터의 수동 제어를 위한 모터 제어 버튼, 레이저 송신 측에 설치된 355, 1064 nm 파장의 레이저 송신 광축 수동 정렬을 위한 Actuator 정렬 버튼을 앞쪽에 위치하였다.
- 제어 프로그램의 상단에 광 계수기, 레이저, 스캐닝 모터, 고전압 공급 장치, 광축 정렬을 위한 Actuator, 측정 위치 확인을 위한 camera 등의 장치들을 설정할 수 있는 버튼을 생성하여, 이를 팝업 프로그램과 연동할 수 있도록 하였다.
- 또한 각 장치들의 동작을 위한 기본 설정 값을 Log 파일 형태로 저장 또는 불러 올 수 있도록 Log 파일 설정 및 불러오기 버튼을 생성하였으며, 미세 먼지 라이다 장치를 이용하여 획득하는 데이터의 설정을 프로그램 종료 시 이를 저장할 수 있도록 하였다.

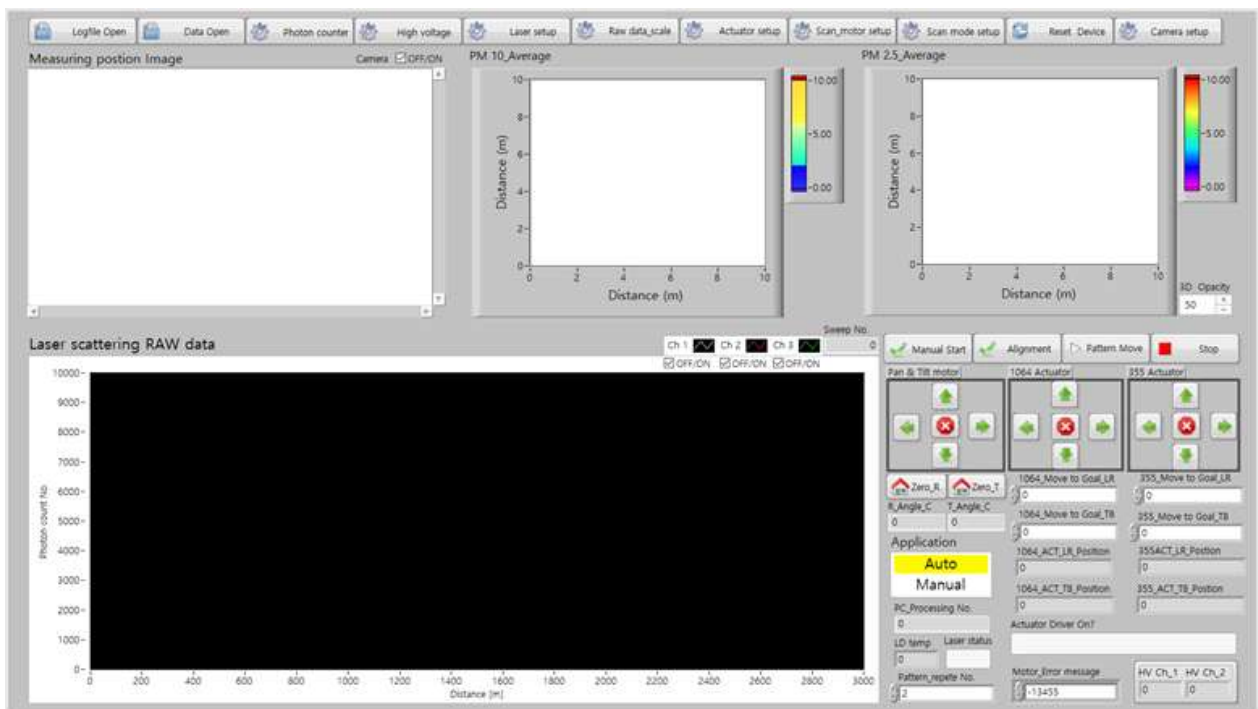
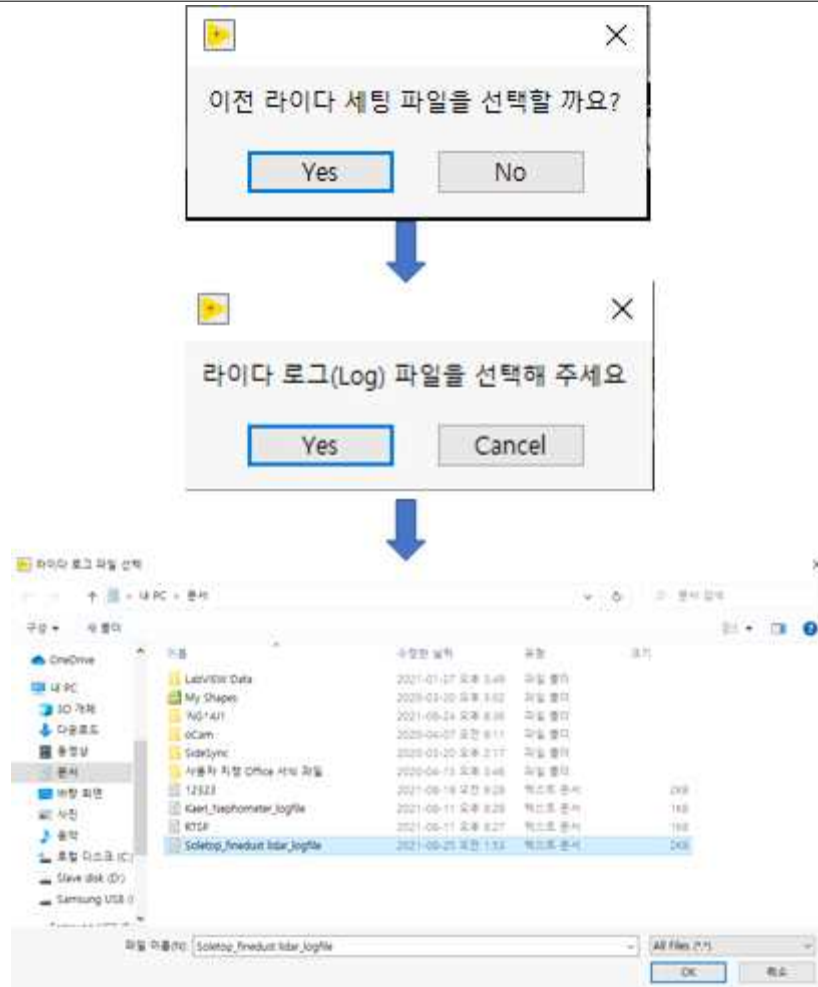


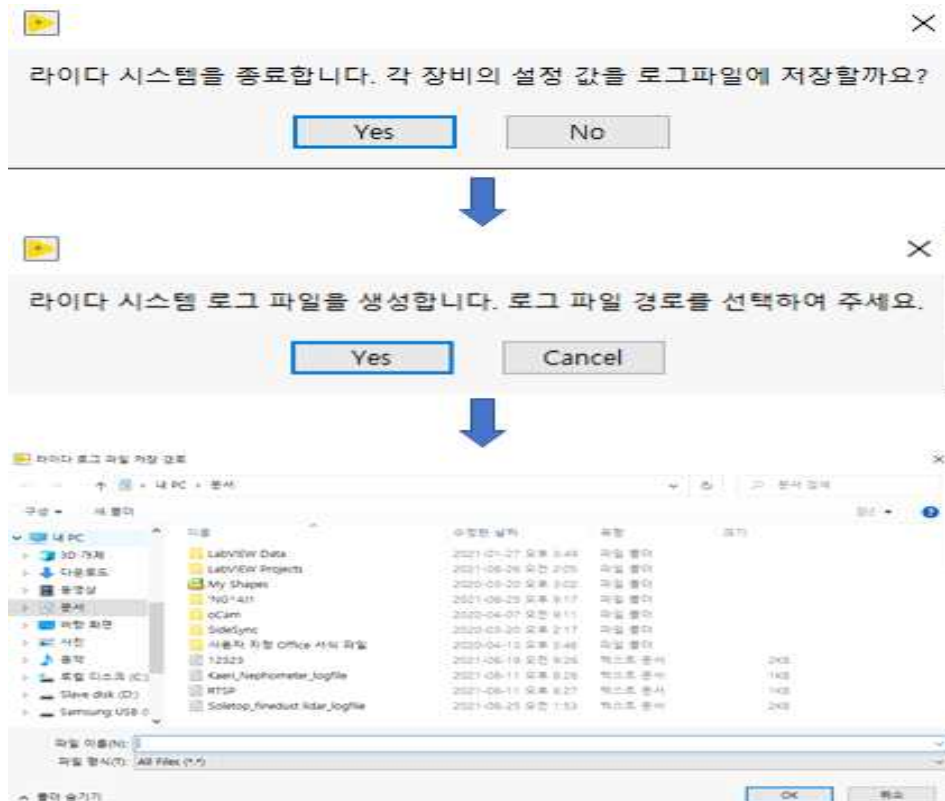
그림 5-24. 최종 미세 먼지 라이다 제어 프로그램 인터페이스

가. 미세 먼지 라이다 시스템의 로그 파일 시스템

- 미세 먼지 라이다 시스템을 구성하는 장치의 초기 구동 또는 이전의 측정 변수 입력 값을 자동으로 적용하기 위하여 Log 파일 시스템을 적용하였다.
- 미세 먼지 라이다 시스템의 Log 파일은 Text 파일 형태로 저장되어 있으며, 제어 프로그램이 처음 구동할 때, 각 장치의 초기 구동을 위한 각각의 입력 변수를 저장한 것이다.
- Log 파일의 경우, 미세 먼지 라이다 시스템이 종료 될 때, 사용자의 선택에 따라 저장할 수 있으며, 각 장치에 입력된 모든 변수를 자동으로 분류하여 저장할 수 있도록 하였다.
- 또한 별도의 Log 파일 불러오기 버튼과 저장 버튼을 통하여 사용자가 이전 실험에 사용한 각 장치의 입력 변수를 자동으로 읽어 적용할 수 있으며, 저장 버튼을 사용하여 현재 입력된 각 장치의 입력 변수를 저장하여 다음 측정에 사용할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-25는 미세 먼지 라이다 시스템의 라이다 시스템의 로그 파일 저장 방법 및 불러오기 기능을 나타낸 것이다.



(a) 미세 먼지 라이다 시스템의 로그 파일 불러오기



(b) 미세 먼지 라이다 시스템의 로그 파일 저장 방법

그림 5-25. 미세 먼지 라이다 시스템의 로그 파일 불러오기 및 저장 기능

나. 미세 먼지 라이다 시스템의 레이저 제어를 위한 입력 변수 설정

- 미세 먼지 라이다 시스템에 사용된 Micro chip 형태의 레이저의 경우, RS - 232 시리얼 통신을 이용하여 원격으로 레이저의 발진 제어, 레이저 입력 전류 값 조절을 통한 레이저 펄스 에너지 제어가 가능하다.
- 또한 시리얼 통신을 이용하여 레이저 발진 유·무 표시와, 레이저 외부 온도, 헤드 온도, 내부 크리스탈 온도 등의 다양한 정보를 제공한다.
- 레이저의 입력 변수를 입력할 수 있는 버튼을 사용하여 레이저 발진 및 펄스 에너지 값의 조절을 위한 레이저 입력 전류 값을 변경할 수 있는 팝업창을 불러올 수 있도록 하였으며, 값 입력이 완료되며, 팝업창이 종료되고 자동으로 파업 창에서 입력한 값이 RS - 232 시리얼 통신을 이용하여 레이저에 반영 되도록 하였다.
- 레이저와 제어 컴퓨터 사이의 RS - 232 통신을 이용하여 명령어 송신과 반환 값을 확인하여 실제 레이저의 발진이 시작하면, 미세 먼지 라이다 시스템의 제어프로그램 인터페이스에 레이저 발진을 알리는 창이 활성화 되며, 레이저의 상태를 나타내는 온도 정보를 메인 창에서 확인 할 수 있도록 구성하였다.
- 미세 먼지 라이다 시스템에 사용된 레이저의 경우, 355 nm 와 1064 nm 파장을 사용하여 사람의 눈에 보이지 않고, 355 nm 파장에서 펄스 당 200 mJ 로 레이저 출력력이 약하지만 근거리에서 사람 눈에 들어가 경우를 대비하여 긴급 정지 기능을 필요할 수 있다.
- 병렬 제어 방식을 사용하여 제어함으로, 레이저 제어를 위한 버튼을 통한 입력 외에 긴급 정지 버튼을 클릭하면 자동으로 레이저 발진을 중단할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-26은 미세 먼지 라이다 제어 프로그램의 레이저 장치 설정 아이콘과 레이저 장치 설정 변수 입력을 위한 팝업 프로그램을 나타낸 것이다.



그림 5-26. 레이저 설정 아이콘 및 레이저 입력 변수 설정을 위한 팝업창

다. 미세 먼지 라이다 시스템의 광 계수기 제어를 위한 입력 변수 설정

- 미세 먼지의 산란 신호의 세기는 레이저 펄스 에너지에 비례하므로, 미세 먼지 라이다 소형화를 위하여 펄스 에너지가 낮은 레이저를 사용하여 미세 먼지에 의한 산란 신호의 세기가 낮아 신호 대 잡음비가 하락하게 된다.
- 그림 5-27은 광 계수기의 광 판별기(Discriminator)의 역할을 나타낸 그림이다. 광 계수기는 각 측정 채널에 광 판별기를 갖고 있으며, 특정 시간 분해능(Bin time) 안에서 광 판별기의 임계(Threshold) 값을 넘어가는 광자 펄스의 개수를 세는 장치를 말한다.
- 그림 5-27에서 보는 것과 같이 레이저의 조사에 의하여 대기 중이 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호가 광자 펄스 형태로 나타내며, 각 측정 채널에 부착된 광 판별기의 임계 값을 넘는 빛의 산란 신호의 개수를 측정한다.

- 따라서 외부 환경 변수에 의하여 발생하는 잡음 신호보다 광 판별기의 임계 값을 높게 설정하여 외부 환경 변수에 의한 잡음 신호를 제거할 수 있어 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호의 신호 대 잡음 비를 향상할 수 있다.
- 그림 5-28은 광 계수기의 획득 데이터의 누적에 따른 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 Period는 하나의 레이저 펄스에 의하여 나타나는 미세 먼지에 의한 산란 신호의 개수를 시간에 따라 나타낸 것이며, 이를 시간별로 누적 할 경우, 그림의 결과(Result)처럼 고속 디지털타이저를 이용하여 획득한 것과 동일한 형태의 결과를 획득할 수 있다.

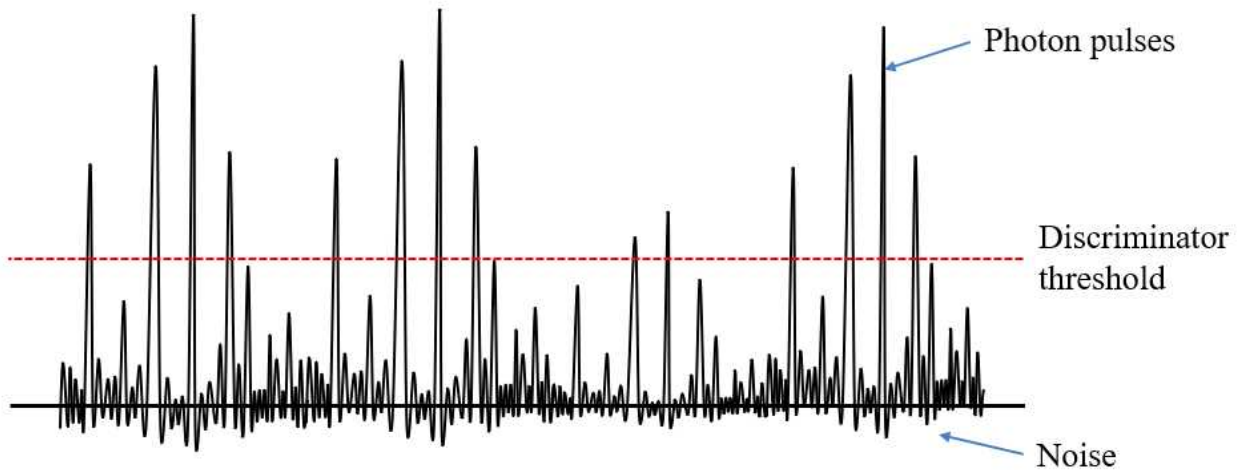
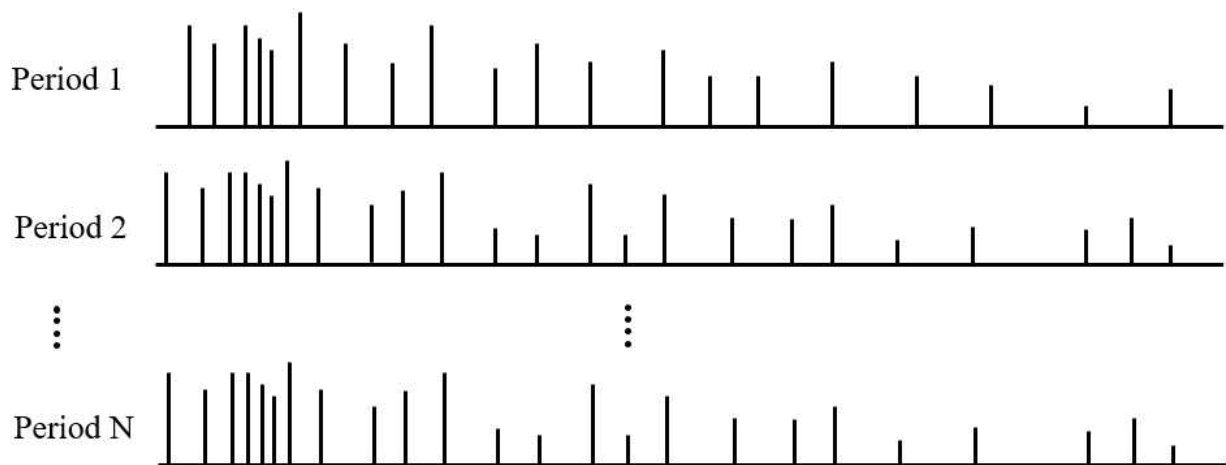


그림 5-27. 광 계수기의 광 판별기 기능

Pulse from detector



Direct accumulation in
high speed memory

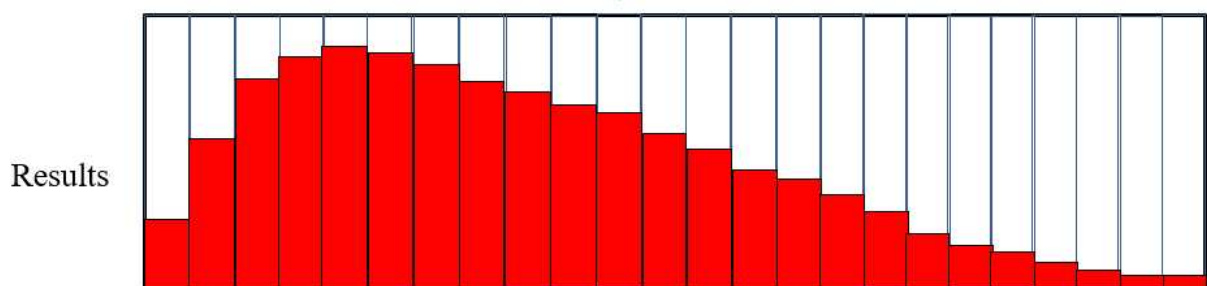


그림 5-28. 광 계수기에 의한 신호 측정 원리

- 미세 먼지 라이다 시스템의 광 계수기는 대기 공간상에 레이저 빔을 조사한 후, 미세 먼지 입자에 의하여 산란 된 빛을 수집하여 미세 먼지의 농도 및 분포를 계측한다.
- 따라서 레이저의 Q - Switch Out 신호를 광 계수기 트리거 신호로 이용할 수 있도록 하였으며, USB 3.0 통신을 이용하여 수집된 자료를 제어 컴퓨터에서 확인 할 수 있도록 구성하였다
- 그림 5-29는 미세 먼지 라이다 시스템 제어 프로그램 인터페이스 단순화 및 기능 최적화를 위하여 미세 먼지 라이다 시스템의 광 계수기의 입력 변수 설정을 위한 아이콘과 팝업 프로그램 창을 나타낸 것이다.
- 대기 공간상의 미세 먼지의 농도 및 분포를 정량적으로 측정하여 비교하기 위해서, 일정한 레이저 펄스에 의한 누적 결과 값을 비교하여야 한다. 따라서 광 계수기의 입력 변수의 경우, 레이저 펄스 개수를 나타내는 Sweep preset No. 최소 측정 시간 분해능 (Bin time), 최대 측정 거리(Range), 각 채널의 활성화 유 · 무, 에지 모드(Edge mode), 광 판별기의 임계 값 (Threshold value) 등을 입력할 수 있게 하였다.

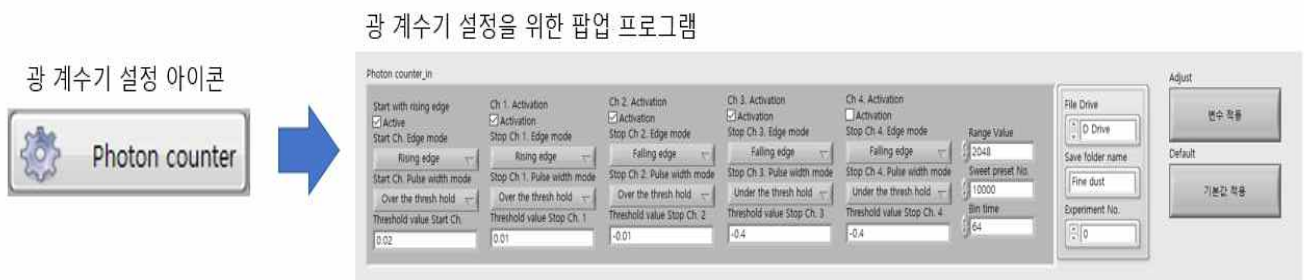


그림 5-29. 광 계수기 설정 아이콘 및 광 계수기 입력 변수 설정을 위한 팝업창

라. 미세 먼지 라이다 시스템의 스캐닝 모터 입력 변수 설정

- 미세 먼지 라이다 시스템은 대기 공간상의 미세 먼지의 농도 및 분포를 측정하기 위하여 미세 먼지 측정 라이다 장치와 스캐닝 모터를 결합한 형태이다.
- 스캐닝 모터의 경우, 회전(Rotation)과 상하(Tilt) 움직임을 통하여 3 차원 공간상에 미세 먼지 측정이 가능하도록 설계되었다.
- 스캐닝 모터의 경우, 미세 먼지 측정 라이다 장치를 회전 및 상하 움직임을 제어하는 것으로서, 움직임 도중 안전사고가 발생할 수 있어, 긴급 정지 기능을 구현하기 위하여 병렬 제어 방식으로 스캐닝 모터의 움직임을 제어할 수 있도록 구성하였다.
- 그림 5-30은 미세 먼지 라이다 시스템 제어 프로그램의 인터페이스 단순화 및 기능 최적화를 위하여 개발된 스캐닝 모터를 설정 아이콘과 스캐닝 모터 설정 입력을 위한 팝업창을 나타낸 것이다.
- 스캐닝 모터의 경우, RS - 485 시리얼 통신을 이용하여 제어 컴퓨터와 연결되며, 각 모터의 움직임 속도, 영점 이동량(offset), 1 step 당 이송량 등을 입력할 수 있다.

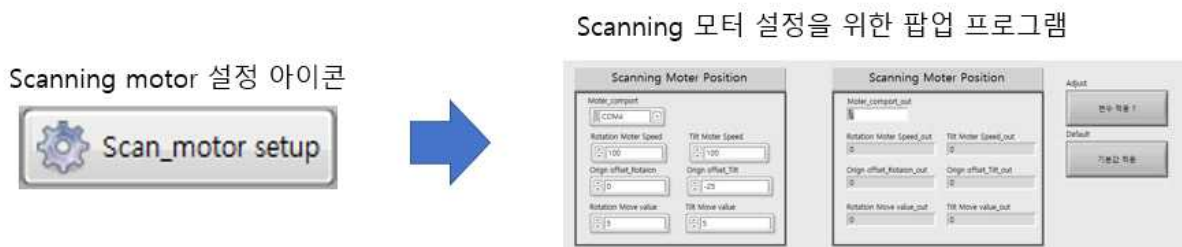


그림 5-30. 스캐닝 모터 설정 아이콘 및 스캐닝 모터 입력 변수 설정을 위한 팝업창

마. 미세 먼지 라이다 시스템의 광 정렬 Actuator 입력 변수 설정

- 미세 먼지 라이다 시스템의 경우, 레이저 송신 측과 광 신호 수신 측의 일치 정도에 따라 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호의 변화가 발생한다.
- 또한 외부 온도 변화에 따라 라이다 장치를 구성하는 각 장치에서 열 변형으로 인한 레이저 송신 측과 광 신호 수신 측 사이의 변화가 일어나며, 이를 원격으로 조정할 수 있도록 레이저 송신 측에 설치된 레이저 송신 거울(Mirror)에 PZT 방식의 Actuator를 설치하였다.
- Actuator의 경우, USB 통신을 이용하여 속도와 가속도의 움직임의 제어가 가능하며, 한 스텝 당 이송량의 입력이 필요하다.
- 그림 5-31은 미세 먼지 라이다 시스템 제어 프로그램의 인터페이스 단순화 및 기능 최적화를 위하여 개발된 Actuator 설정 아이콘과 입력 변수 설정 팝업 창을 나타내 것이다.



그림 5-31. 광 정렬을 위한 Actuator 설정 아이콘 및 Actuator 설정 변수 입력을 위한 팝업창

바. 미세 먼지 라이다 시스템의 광 증배기 고전압 공급 장치 입력 변수 설정

- 미세 먼지 라이다 시스템은 355 와 1064 nm 의 레이저를 공기 중에 조사하여 미세 먼지에 의한 355, 387 와 1064 nm 파장의 빛의 산란 신호를 계측한다.
- 3개의 파장 중, 355 와 387 nm 파장의 산란 신호의 경우, PMT를 이용하여 증폭하여 계측한다.
- PMT에 의한 빛의 산란 신호의 증폭량은 PMT에 인가하는 전압 또는 전류의 양을 조절하여 가변이 가능하다.
- 기존의 경우, PMT의 신호 증폭을 위하여 별도의 고전압 공급 장치를 이용하여 수동으로 조절한다.
- 미세 먼지 라이다 시스템의 소형화를 위하여 고전압 공급 장치를 설계하여 개발하였으며, USB 통신이 가능한 다기능 보드를 이용하여 원격으로 전압 공급량을 조절할 수 있는 회로를 개발하였다.
- 기존 고전압 공급 장치에 비하여 크기 10배 이상 축소되었으며, 원격으로 제어 컴퓨터에 증폭량의 조절이 가능하도록 개발하였다.
- 그림 5-32는 미세 먼지 라이다 시스템 제어프로그램 인터페이스 단순화를 위하여 개발된 고전압 공급 장치 설정 아이콘 및 입력 변수 팝업 창을 나타낸 것이다.
- PMT의 신호 증폭량 조절을 위하여 인가되는 전압은 0 ~ - 1250 V 사이의 전압을 인가하여 매우 위험함으로 긴급 정지 기능을 필요하며, 초기 세팅 과정에서 신호 증폭량의 조절이 필요함으로 병렬 제어 방식을 채택하였다.
- 고전압 공급 장치에서 0 ~ 5 V 사이의 입력 값을 입력하면 자동으로 - 250 배의 전압이 PMT에 적용되도록 구성하였다. NI USB 6001 다기능 DAQ 보드의 경우, 전압 출력 채널이 2개임으로 두 채널에 차동으로 PMT의 인가전압을 조절할 수 있도록 전압 보드와 프로그램을 개발하여 추후, 측정 채널이 증가하더라도 기존의 장치를 이용할 수 있도록 하였다.

고전압 공급장치 설정 아이콘

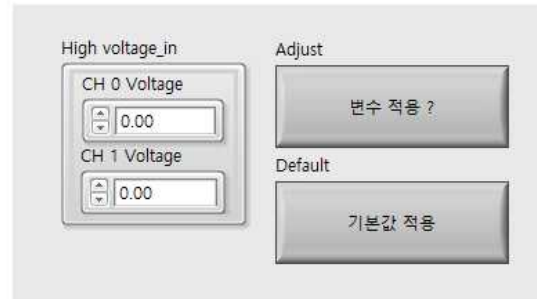
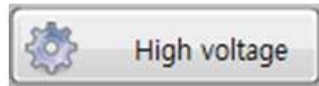


그림 5-32. PMT 신호 증폭 량 조절을 위한 고전압 공급 장치 설정 아이콘 및 입력 변수 입력을 위한 팝업창

• 미세 먼지 라이다 제어 프로그램 최적화

- 미세 먼지 라이다 시스템은 레이저, 광 계수기, 스캐닝 모터, 광 정렬을 위한 Actuator, 고전압 공급 장치 및 카메라 등 다양한 장치가 결합된 시스템이다.
- 각 장치의 경우, 개별적인 동작과 상호 결합을 통하여 대기 공간상의 미세 먼지 농도 및 분포를 측정하기 위하여 동작하며, 이를 통하여 획득한 데이터의 저장, 신호 처리 등의 다양한 과정을 거친다.
- 각각의 장치에 대한 개별 동작 및 상호 연결된 동작을 위하여 병렬 제어 방식을 사용하여 개별 제어 및 순차 제어 방식으로 결합하여 개발하였다.
- 미세 먼지 라이다 제어 프로그램의 최적화를 위하여 사용 기능에 따라 크게 3가지 기능으로 분류하여 최적화를 진행하였다.

• 미세 먼지 라이다 초기 세팅을 위한 Alignment 기능.

- Alignment 기능은 미세 먼지 라이다 시스템의 레이저 송신 축과 광 신호 수신 축의 일치 정도를 사용자가 점검 및 수정하기 위하여 개발되었다.
- Alignment 기능을 수행할 때는 스캐닝 모터를 원하는 방향으로 이동 한 후, 대기 중에 레이저를 조사하여 대기 중에 포함된 미세 먼지에 의하여 산란된 광 신호를 광 계수기로 계측한다.
- 실시간으로 획득하는 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 관찰하며, 광 정렬을 위한 Actuator를 조작하여 레이저 송신 축 변화에 따른 레이저 송신 축과 광 신호 수신축의 일치 정도를 판단할 수 있도록 하였다.
- Alignment 기능을 수행하는 과정에서 사용자가 수동으로 광 정렬 과정을 수행할 수 있으며, 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 바탕으로 Simplex method(단체법)을 이용한 자동 광 정렬 과정도 병행하여 수행할 수 있도록 코드를 개발 하였다.

• 스캐닝 모터를 이용한 대기 공간상의 미세 먼지 측정 기능

- 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 대기 공간상의 분포한 미세 먼지의 농도 및 분포를 측정하기 위한 기능이다.
- 대기 공간상의 미세 먼지의 농도 및 분포를 계측하기 위해선, 레이저, 광 계수기 및 스캐닝 모터의 상호 연동 과정이 필요하다.
- 스캐닝 범위와 스캐닝 각도를 입력하게 되면 자동으로 레이저, 광 계수기 및 스캐닝 모터를 제어하여 입력한 횟수만큼 자동 반복하여 움직일 수 있도록 설정하였다.
- 이 과정에서 외부 온도 변화 및 충격 등에 의하여 레이저 송신 축과 광 신호 수신 축의 일치 정도가 떨어지게 되면 이를 감지하고, 스캐닝 모터가 처음으로 되돌아온 상태 광 정렬을 위한 Actuator를 이용하여 자동 광 정렬을 위한 Simplex method를 수행할 수 있도록 하였다.

- Simplex method를 이용한 자동 광 정렬 수행 과정을 마친 후, 사용자가 설정한 광 정렬 상태 일치 정도 값에 미치지 못할 경우, 다시 광 정렬을 위한 Simplex method를 수행할 수 있으며, 사용자가 설정한 광 정렬 상태 일치 정도 값을 넘길 경우, 이후의 스캐닝 과정을 수행 할 수 있도록 하였다.
- 광 계수기를 이용한 데이터 획득 도중, 스캐닝 모터가 작동하는 문제와 스캐닝 모터가 움직이는 도중, 광 계수기를 이용한 데이터 획득 과정이 수행되는 문제를 없애기 위하여 순차제어 방법을 채택 하였다.
- 각각의 과정에서 광 계수기 및 스캐닝 모터 드라이버와 제어 컴퓨터 간에 상호 통신을 통하여 동작 완료를 확인 한 후, 다음 과정을 정해진 순서에 의하여 진행 할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 시스템에 부착된 측정 지역 확인 영상과, 355, 387 과 1064 nm 파장의 미세 먼지에 의한 산란 신호 계측 결과 값을 자동으로 분류하여 저장하는 기능을 갖고 있다.

• Hot spot 지점 모니터링 기능

- Hot spot 지점 모니터링 기능은 대기 공간상이 미세 먼지 농도 및 분포를 측정하는 과정에서 나타난 오염물질 배출원은 지점이 선택하며, 배출원 지점으로 스캐닝 모터를 이동하여 배출원에서 배출되는 오염물질의 농도를 연속으로 관측하기 위한 기능이다.
- 스캐닝 과정에서 오염물질 배출원이 파악되면, 스캐닝 모터를 이용하여 배출원 지점으로 이동하여 배출원에서 발생하는 오염물질의 농도를 시간에 따라 모니터링 할 수 있도록 하는 기능이다.
- Hot spot 지점에서 시간에 따라 배출된 오염 물질의 농도 변화 및 값을 확인 할 수 있도록 측정 시간 및 위치 정보를 미세 먼지 측정 데이터와 미세 먼지 라이다 시스템에 부착된 카메라를 통하여 획득한 영상의 파일 명에 같이 저장할 수 있도록 하였다.

• SW 개선을 통한 산출물 표출 기능 개선

• 자동 광 정렬 알고리즘을 이용한 광 정렬 개선 효과 분석

- 미세 먼지 라이다 시작품에 적용된 광 자동 정렬 장치는 레이저 송신부와 레이저 수신부 상의 광축을 일치하는 방법으로서, 라이다 장치를 이용하여 획득한 신호 이용하여 레이저 송신부의 광 경로 조절을 위한 거울에 설치된 Actuator를 제어하여, 레이저 송신부 광축을 수신부 광축과 일치시키는 방법이다.
- 라이다 장치의 레이저 전송 축과 수신 축은 광 경로 조절을 위한 거울에 설치된 2개의 Actuator에 의하여 2차원 움직임을 갖는다.
- 그림 5-33은 2차원 상에 심플렉스법을 적용하여 최대 또는 최소 지점을 찾기 위한 방법을 나타낸 것이며, 그림 5-34는 심플렉스 방법을 이용하여 새로운 지점을 찾아갈 때 사용되는 Reflection(반사), Expansion(확대), Contraction(축소)의 세 가지 움직임을 나타낸 것이다.
- 그림 5-33과 같이 2차원 평면상에서 심플렉스법을 이용하여 최대 또는 최소 점을 찾기 위해선, 그림과 같이 3 지점에서 획득한 값을 이용하여 가장 좋은 점(Best), 가장 안 좋은 점(Worst), 중간 점(Second worst) 지점으로 분류한다.
- 분류된 3 지점 중, 가장 안 좋은 지점의 값을 높이기 위하여 다른 두 지점을 기준으로 대칭 이동된 지점 Reflection 지점을 이동한 후, 그 지점의 값을 구한다.
- Reflection 지점을 이동하여 획득한 값이 남은 두 지점의 값과 비교하여, 가장 좋은 지점의 값보다 Reflection 지점의 값이 높을 경우, Expansion 지점을 이동하게 된다. 그 후, 가장 안 좋은 점을 Expansion 지점을 대체하고, 남은 가장 좋은 지점과 중간 지점을 다시 평가하는 심플렉스법을 반복한다.
- 만일 Reflection 지점의 값이 가장 좋은 점과 중간 점 사이의 값이면, 가장 안 좋은 지점을 Reflection 지점으로 대체한 후, 남은 가장 좋은 지점과 중간 지점을 다시 평가하는 심플렉스법을 반복한다.

- 만일 Reflection 지점의 값이 중간 값보다 낮을 경우, Contraction 지점으로 이동한 후, 가장 안 좋은 지점의 위치와 값의 정보를 Contraction 지점의 위치와 값으로 대체한 후, 남은 가장 좋은 지점과 중간 지점을 다시 평가하는 심플렉스법을 반복한다.
- 심플렉스법에서 Reflection은 가장 좋은 지점과 중간 지점을 기준으로 가장 안 좋은 지점을 대치 이동하는 방법이며, 가장 많이 사용하는 방법이다.
- 심플렉스법에서 Expansion은 가장 안 좋은 지점이 Reflection 지점을 이동하는 방향으로 두 지점 사이의 두 배의 거리를 이동하는 방법으로서, 가장 좋은 지점과 중간 지점의 값보다 Reflection 방향에 더 좋은 값이 있으므로 한 번에 많은 양을 이동하는 방법이다.
- 심플렉스법에서 Contraction은 가장 안 좋은 지점과 Reflection 지점의 방향으로 이동 거리가 1/4 지점으로 움직이는 것으로 최대 또는 최소 지점에 가까워져, 값이 수렴할 때 나타낸다.

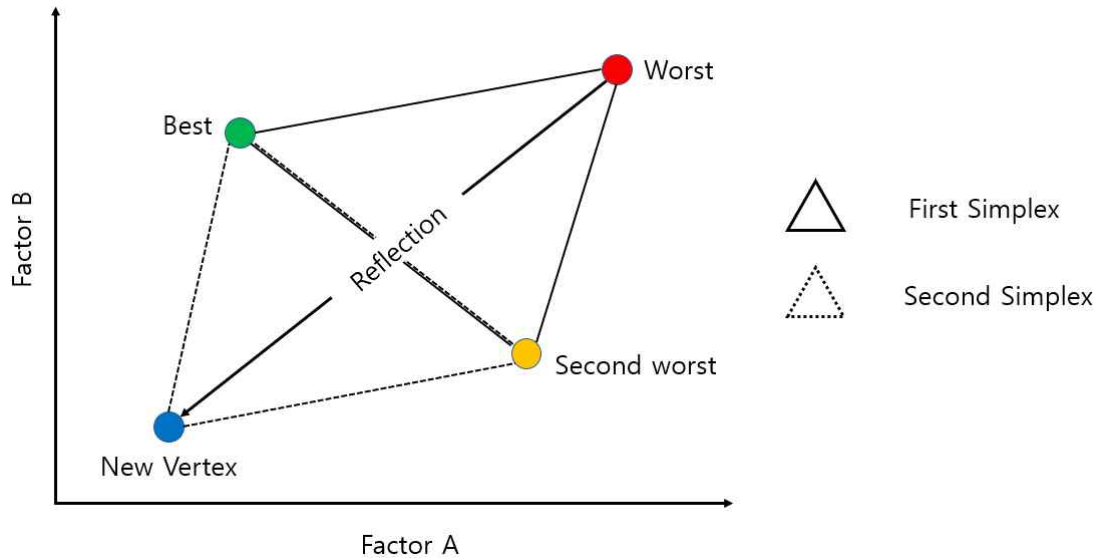


그림 5-33. 심플렉스법의 최적화 지점을 찾아가는 방법

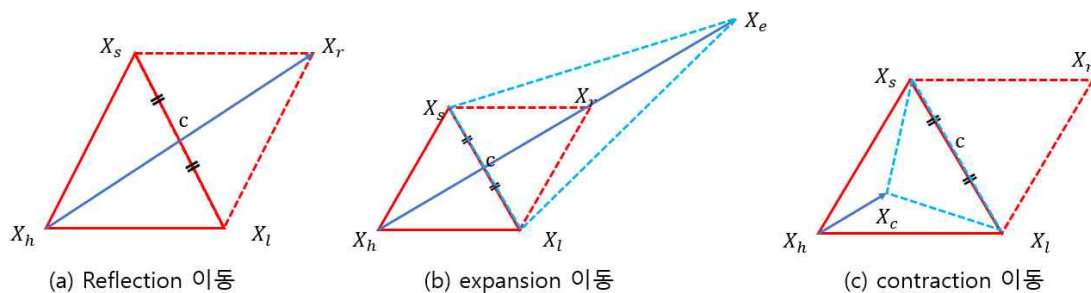


그림 5-34. 2차원 평면상에서 심플렉스법의 좌표 이동 방법

- 그림 5-35는 심플렉스법을 이용하여 미세 먼지 라이다 장치의 레이저 송·수신부의 광축 자동 정렬 방법을 적용할 때, 레이저 전송 거울에 설치된 Actuator의 전송 거울에 의하여 위치 변화가 나타날 때, 각 위치의 좋고, 나쁨을 평가하기 위한 방법을 나타낸 것이다.
- 그림에서 보는 것과 같이 레이저 송·수신부의 정렬 상태에 따라 라이다 신호가 변화하게 된다. 이때, 신호의 일정 구간을 적분하여 레이저 전송 거울을 움직이는 Actuator의 위치와 결합하여 최적의 위치로 이동할 수 있는 알고리즘을 적용한다.
- 심플렉스 방법의 특성상, 최적의 위치를 찾기 위하여 무한대로 움직임으로, 라이다 신호의 적분 값이 일정 값이 이하일 경우, 라이다 장치의 자동 광 정렬 과정을 수행할 수 있도록 하였으며, 정렬 과정에서 획득하는 새로운 지점에서의 라이다 신호 적분 값이 사용자가 설정한 일정한 값 이상으로 회복 될 경우, 심플렉스법을 이용한 자동 광 정렬 루프를 빠져나와 라이다 신호를 계측하는 루프로 진행할 수 있도록 하였다.

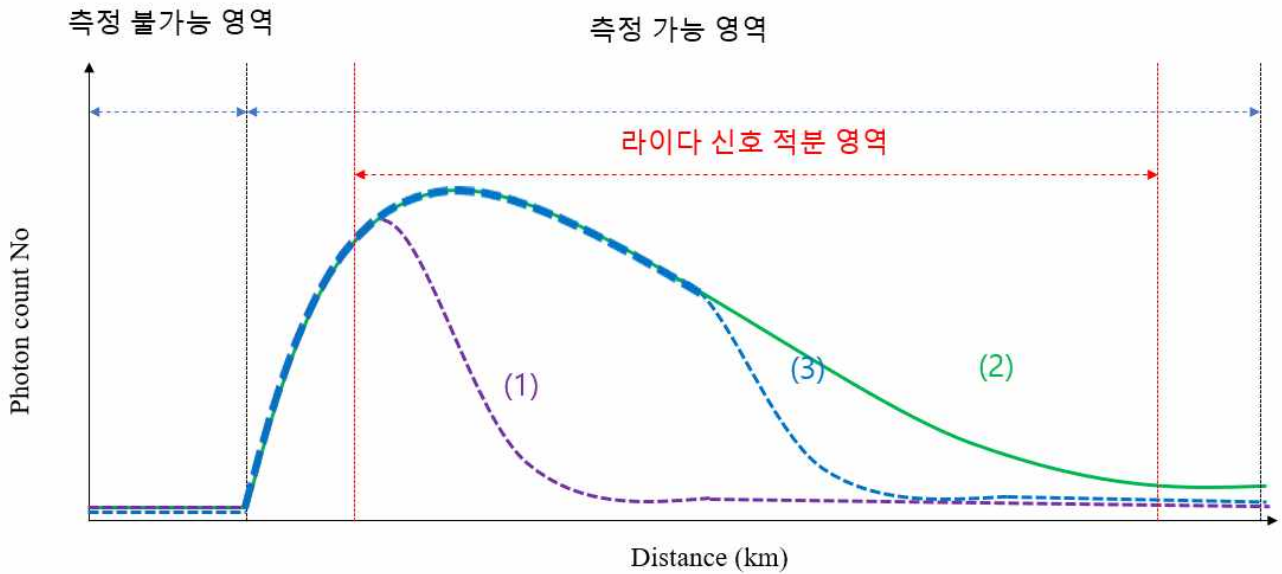


그림 5-35. 광 자동 정렬 과정을 위한 라이다 신호의 적분 구간 예

- 그림 5-36은 심플렉스법을 이용하여 미세 먼지 라이다 시제품의 광 자동 정렬 효과를 검증한 결과를 나타낸 것이다.
- 그림의 그래프들은 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 라이다 신호를 획득한 결과를 나타낸 것으로서, 초기 Initial position 1이라 표시된 그래프는 심플렉스법을 적용하여 자동 광 정렬을 수행할 때, 최초의 심플렉스를 수행하기 위한 3점 중 최초의 위치에서 획득한 라이다 신호를 나타낸 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯, 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호가 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 레이저 송신부의 광축과 레이저 수신부의 광축이 너무 많이 틀어져 나타는 결과이다.
- 그림 5-36의 결과를 보면 미세 먼지 라이다 시제품의 자동 광 정렬 과정인 심플렉스법을 수행함에 따라 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호가 점차 넓은 영역에서 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 심플렉스법을 반복 수행함에 따라, 레이저 송신부의 광축과 레이저 수신부의 광축이 레이저 전송부의 거울에 설치된 Actuator에 의하여 점차 일치됨을 의미한다.

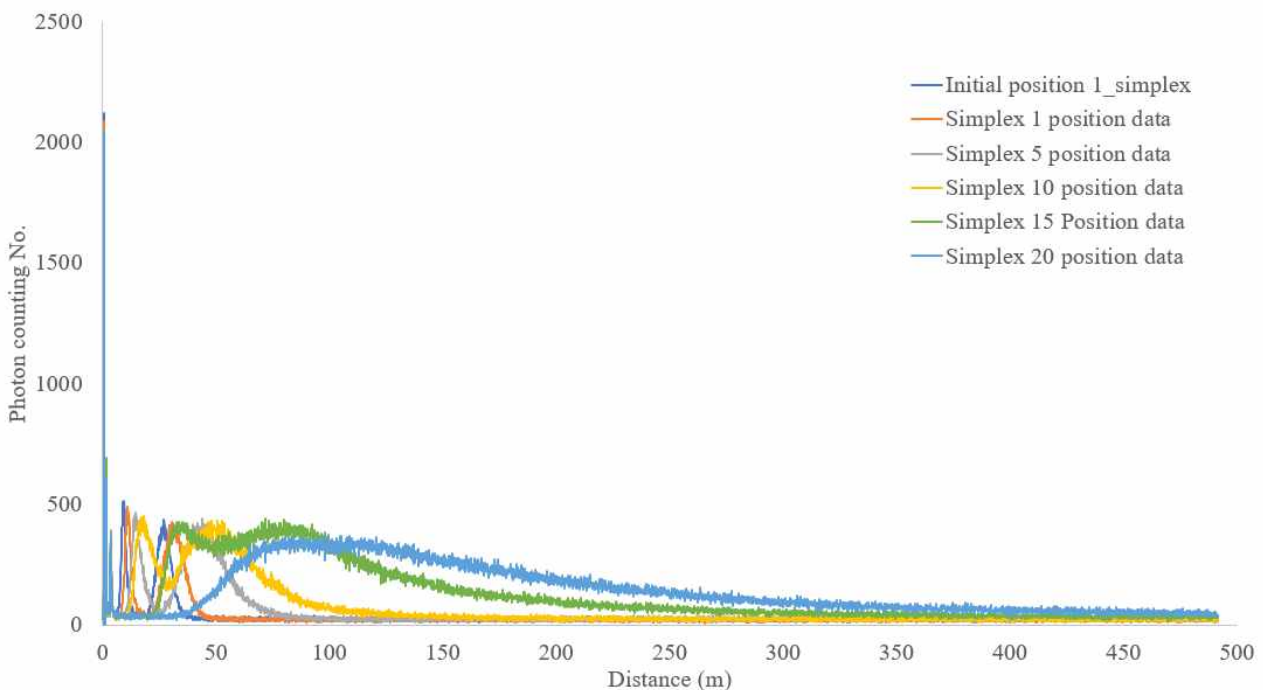


그림 5-36. 미세 먼지 라이다 시제품에 적용된 광 자동 정렬 방법 테스트 결과

• 미세 먼지 데이터 관리 및 시각화

- 미세 먼지 라이다 장치의 경우, 반경 5 km 공간 내의 미세 먼지의 양 및 분포를 측정하기 위한 장치로 개발되어, 광역 지역에 대한 미세 먼지의 양 및 분포를 제공하는데 한계가 있다.
- 광역 지역에 미세 먼지의 발생, 양 및 분포를 제공하기 위해선, 다수의 미세 먼지 측정 라이다를 네트워크 그물망처럼 설치하여야 한다.
- 하나의 미세 먼지 라이다 시스템이 아닌 다수의 미세 먼지 라이다 시스템을 설치하여 운영할 경우, 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 정보의 유지, 보안 및 관리 등의 문제가 발생하며, 이를 시민들에게 제공하기 위한 체계적인 방법이 필수적으로 요구된다.
- 다수의 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 측정한 정보의 유지, 보안, 관리 및 시민들에게 체계적으로 제공하기 위하여 FTP 서버를 이용한 데이터베이스 구축 방법을 도입하게 되었다.
- 그림 5-37은 다수의 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 데이터를 수집, 관리하기 위하여 위한 방법을 나타낸 것이다. 각각의 측정 사이트에 설치된 미세 먼지 측정 라이다 시스템을 이용하여 획득한 계측 데이터를 회사에서 관리하는 FTP 서버에 실시간으로 전송하고, 측정 지역의 미세 먼지 양 및 분포의 정보를 FTP 서버와 통신을 통하여 웹상에서 제공할 수 있도록 하였다.

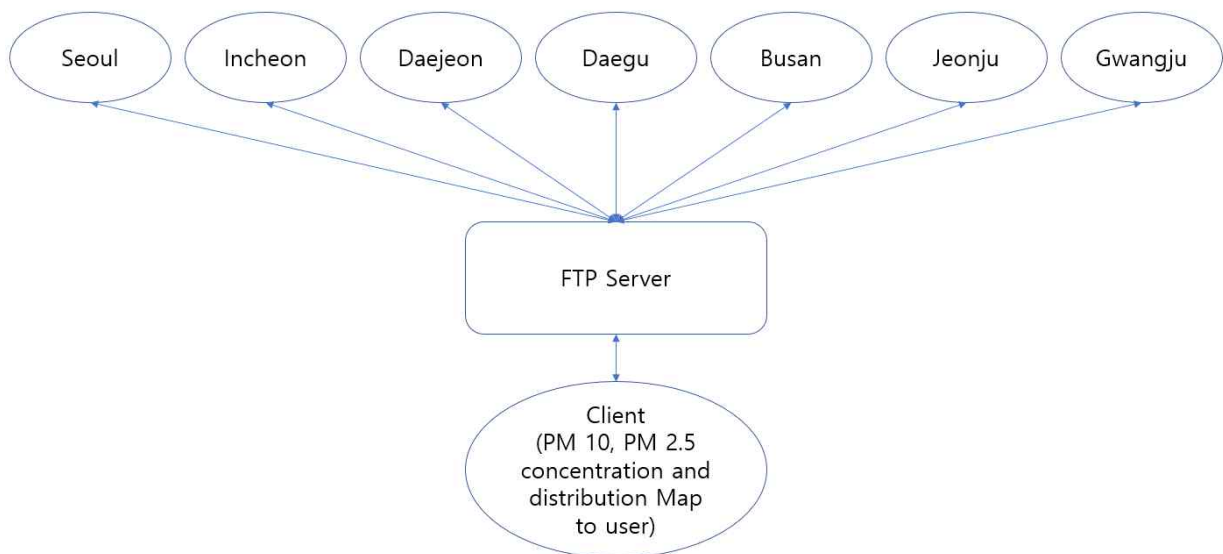


그림 5-37. FTP 서버를 이용한 미세 먼지 라이다 장치의 광역 측정 망 구성 방안

- FTP 서버의 경우, 각 클라이언트의 권한 설정이 가능함으로, 접속하는 클라이언트의 보안 관리가 용의하며, 실시간으로 들어오는 각 데이터의 유지 및 관리가 편리한 장점이 있다.
- 그림 5-38은 각 미세 먼지 측정 사이트에서 구동되는 미세 먼지 라이다 장치를 이용하여 측정한 미세 먼지의 양 및 분포에 대한 정보를 대전에 위치한 (주)솔탑 본사에서 관리하는 FTP 서버에 실시간으로 측정 정보를 전송하는 프로그램을 나타낸 것이다.



그림 5-38. FTP 서버에 데이터 전송을 위한 프로그램 인터페이스

- 다수의 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 데이터를 FTP 서버에 전송하기 위하여 미세 먼지 라이다 장치를 제어하는 제어프로그램에 추가하였다. 미세 먼지 라이다 장치를 이용하여 측정한 실시간 미세 먼지의 양 및 분포에 관한 데이터를 FTP 데이터 전송 코드를 이용하여 전송할 수 있도록 하였다.
- 순차 제어 방법을 이용하여 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 측정한 데이터를 FTP 서버에 전송하도록 하게 되면, FTP 서버의 데이터 전송을 위한 시간에 의하여 라이다 시스템의 스캐닝 속도가 느려 질 수 있다. 또한 FTP 서버의 오류로 인하여 에러가 발생할 경우, 미세 먼지 라이다 시스템 자체가 멈출 수 있다.
- FTP 서버 오류에 의한 미세 먼지 라이다 시스템의 멈춤 현상을 방지하기 위하여 FTP 데이터 전송 코드와 미세 먼지 라이다 시스템의 제어 코드를 병렬 제어 방법으로 분리하였다. 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 데이터를 제어 컴퓨터에 저장하고 전송할 데이터의 목록만을 Queue를 이용하여 FTP 데이터 전송 루프에 전달할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 제어 코드와 FTP 데이터 전송 코드를 분리하여, FTP 서버의 오류에 의한 미세 먼지 측정 자료의 전송이 불가능한 경우에도 미세 먼지 라이다 시스템을 이용한 데이터 측정 과정은 계속 진행 된다.
- 이러한 경우, 미세 먼지 라이다 제어코드에 의하여 생성된 데이터가 FTP 데이터 전송 코드에 미세 먼지 측정 데이터가 Queue에 계속하여 쌓이게 된다. 이런 경우, Queue에 쌓이는 미세 먼지 데이터가 클 경우, Queue에 의한 제어 컴퓨터의 메모리 부족으로 미세 먼지 라이다 시스템 자체가 멈출 수 있다.
- 이러한 오류를 방지하기 위하여 FTP 데이터 전송 코드에 미세 먼지 라이다 시스템을 이용하여 획득한 데이터의 목록만을 전송할 수 있도록 하였으며, FTP 데이터 전송 코드에 의하여 데이터 전송이 완료되면, 제어 컴퓨터의 하드 디스크에 저장된 측정 데이터를 지울 수 있도록 하였다.
- FTP 데이터 전송 코드는 Queue의 데이터 유·무에 의하여 활성화 되도록 하였다. 만일 Queue 데이터가 들어오면 자동으로 FTP 데이터 전송 코드가 활성화 되며, 없을 경우 Queue에 데이터가 들어올 때까지 비활성화 되도록 하였다. 만일 FTP 데이터 전송 코드가 활성화 되어 FTP 서버에 데이터를 전송할 때, 서버의 응답이 30초 이상 없을 경우, 30초에 한 번씩 서버의 응답을 확인 할 수 있도록 하였으며, 서버 연결이 활성화 되면 목록에 있는 데이터를 순차적으로 전송할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-39는 미세 먼지 라이다 장치의 검증을 위하여 대구 시청과 협의하여 대구 시청 옥상에 설치된 미세 먼지 라이다를 통하여 획득한 대구 지역의 미세 먼지 양 및 분포의 측정 자료를 대전 (주) 솔탑 본사에 설치된 FTP 서버에 전송된 것을 캡처한 것이다.

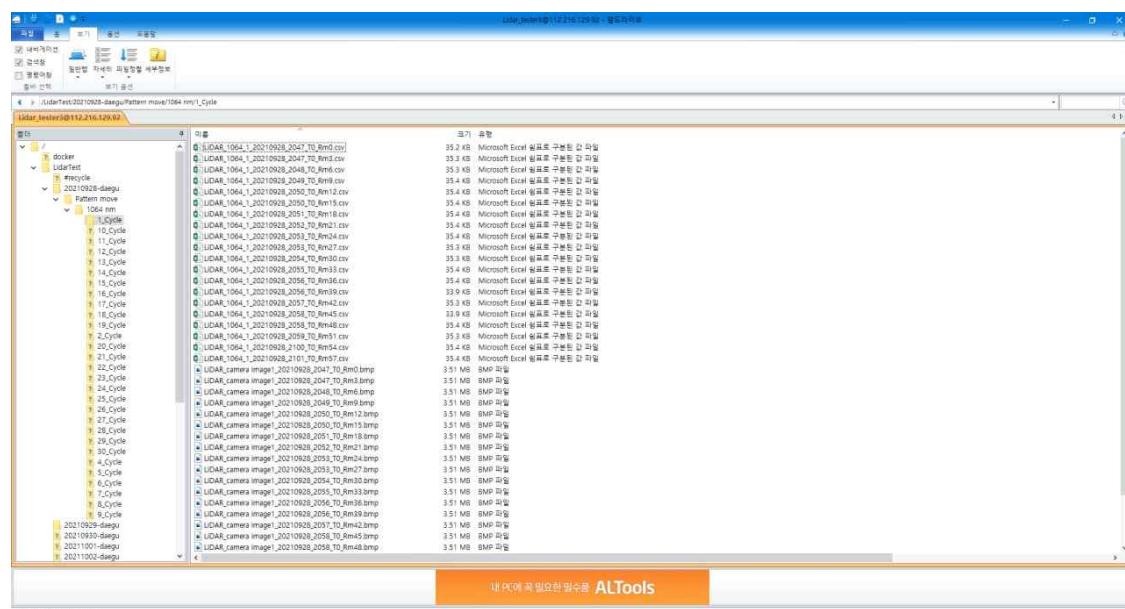


그림 5-39. FTP 서버에 저장되어 있는 라이다 데이터

- 라이다로 획득한 데이터는 카카오지도와 매핑을 통하여 미세 먼지의 농도를 시각화로 표출하였다.
- 표 5-4는 국가 대기오염 측정망에서 제공하는 미세 먼지의 등급기준으로 4 가지 등급으로 표현을 하며, 그림 5-40은 미세 먼지 등급에 따라 색상을 다르게 표현하여 가시적으로 표출을 하도록 되어 있다.

표 5-4. 미세 먼지 등급 기준

등급	미세 먼지 기준 농도	초미세 먼지 기준농도	표현 색상
좋음	0 ~ 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0 ~ 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	파랑
보통	31 ~ 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	16 ~ 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	초록
나쁨	81 ~ 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	36 ~ 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	노랑
매우 나쁨	151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상	76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상	빨강



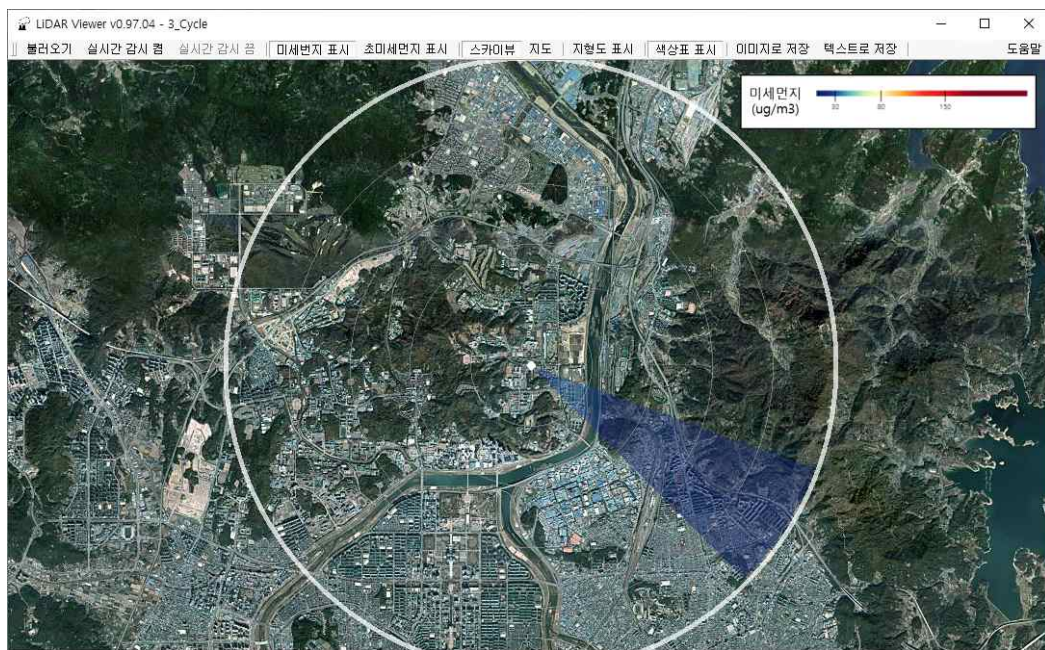
그림 5-40. 국가 대기오염 측정망의 미세 먼지 농도 표현 방법 (출처. 에어코리아)

- 라이다로 획득한 데이터는 국가 대기오염 측정망의 표현 등급과 표현색상을 동일하게 표현이 되도록 표출프로그램을 개발하였다. 그림 5-41은 라이다로 획득한 데이터를 표출하는 프로그램의 실행 화면이다.

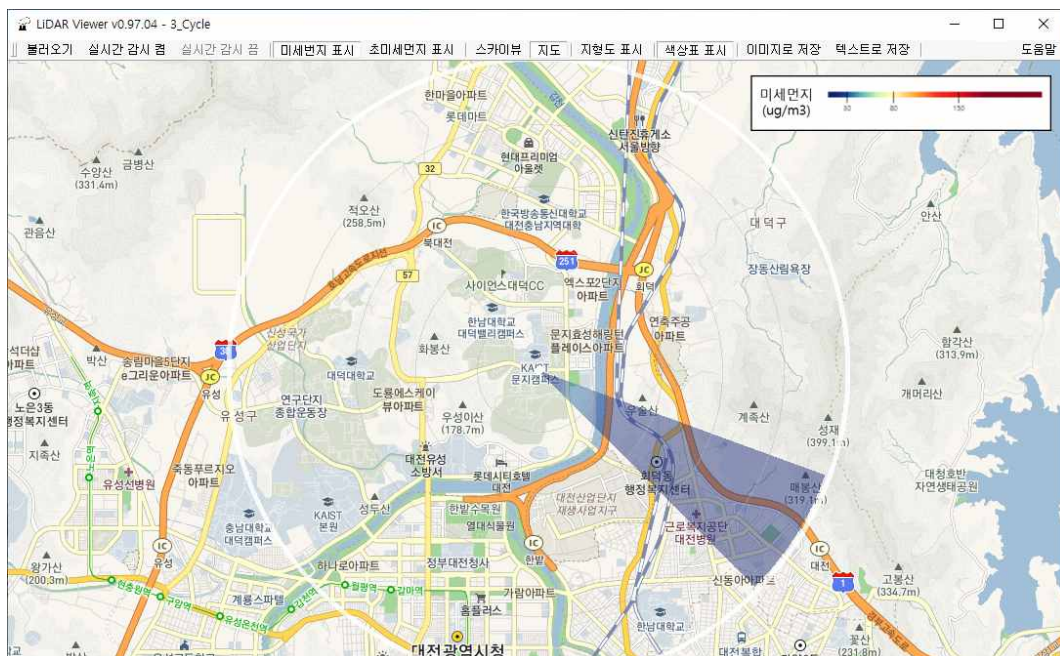


그림 5-41. 미세 먼지 라이다의 미세 먼지 양 및 분포 표출 프로그램 인터페이스

- 표출프로그램은 데이터 불러오기 기능, 실시간 감시기능, 지도 표현기능, 시각화 표출 이미지 저장 기능, 데이터의 텍스트 저장기능을 구현하였으며, 이 기능은 프로그램 상단에 표시된다.
- 실시간 감시기능은 스캐닝모터를 이용하여 Rotation 각도를 회전하여 데이터의 획득이 완료될 때마다 순차적으로 표현이 된다.
- 표출프로그램의 지도의 우측 상단에는 미세 먼지의 농도 표현방법을 표출하였고, 라이다로 획득한 데이터는 라이다의 설치장소를 중심으로 표출 된다.
- 그림 5-42는 20°의 Rotation 범위를 1°의 간격으로 관측을 한 데이터를 표출프로그램으로 불러왔을 때 화면으로 라이다의 설치장소를 중심으로 1 km의 반경 별로 원형으로 표시하여 5 km의 반경으로 표출이 가능하도록 하였다.
- 지도 표출은 스카이뷰와 일반 지도로 선택하여 표출이 가능하다. 을 할 수가 있고 적으로 볼 수 있도록 구성을 하였으며, 2가지로 것을 보여주는 한 것으로, 이다. 지도 데이터에 관측 데이터를 매핑하여 미세 먼지 농도 값을 표출한다.



(a) 스카이뷰를 이용하여 데이터 가시화 표출



(b) 일반지도를 이용하여 데이터 가시화 표출

그림 5-42. 미세 표출 프로그램을 이용한 미세 먼지 양 및 분포 표출 예

- 지도에 표출된 데이터 중 원하는 지점의 지도를 클릭하면 클릭한 지점의 미세 먼지(PM 10)와 초미세 먼지(PM 2.5)의 농도 값이 표출되고, 이를 통하여 미세 먼지의 농도 값의 확인이 가능하다.
- 그림 5-43와 그림 5-44는 미세 먼지의 농도 값을 측정한 데이터로, 측정시간, 미세 먼지와 초미세 먼지의 농도, 경도, 위도, 관측지점으로부터의 거리가 표출된다.



그림 5-43. 대구 시청 별관에서 측정한 미세 먼지 측정 결과 (2021년 10월 27일 11시 20분)



그림 5-44. 대구 시청 별관에서 측정한 미세 먼지 측정 결과 (2021년 10월 27일 12시 42분)

2) 시제품 최종 성능검증

• 미세 먼지 라이다 시제품 기초 성능 평가

- 2차년도에 개발한 시제품의 보완점을 개선한 시제품을 이용하여 성능확인을 진행 하였다. 그림 5-45은 낮 시간 태양에 의한 배경신호를 측정한 데이터로 2021년 3월 31일 09시 30분부터 18시 30분까지 광자계수기의 적분시간을 (Bin-time)을 ns로 평균을 60,000번(1분)하여 태양에 의한 배경 신호의 광량을 측정한 것이다.
- 배경신호 관측은 라이다를 이용하여 관측하는 조건과 동일한 조건에서 실험한 것으로 대기 중에 조사하는 레이저는 막아 레이저에 의한 산란신호는 수집되지 않고 순수 태양의 배경신호만 측정을 하였다.
- 배경신호 측정 결과 낮 시간에는 48,000개의 광자가 배경신호로 들어오는 것을 알 수 있는데, 이 광자수는 포아송 분석에서 통계적으로 219개 정도의 광자가 요동 된다는 것을 의미한다.
- 실제 야간에 얻어지는 라이다 신호에서 포톤의 수가 약 219개 정도 얻어지는 거리가 S/N(Signal to Noise)비가 1이 되는 지점이고, 이 지점이 최대 관측거리가 된다.
- 만약 레이저 펄스수를 600,000번으로 관측을 한다면 태양에 의한 배경신호는 480,000개가 되고, 신호의 요동은 692개가 되는 곳까지 측정을 할 수 있음을 알 수 있다.

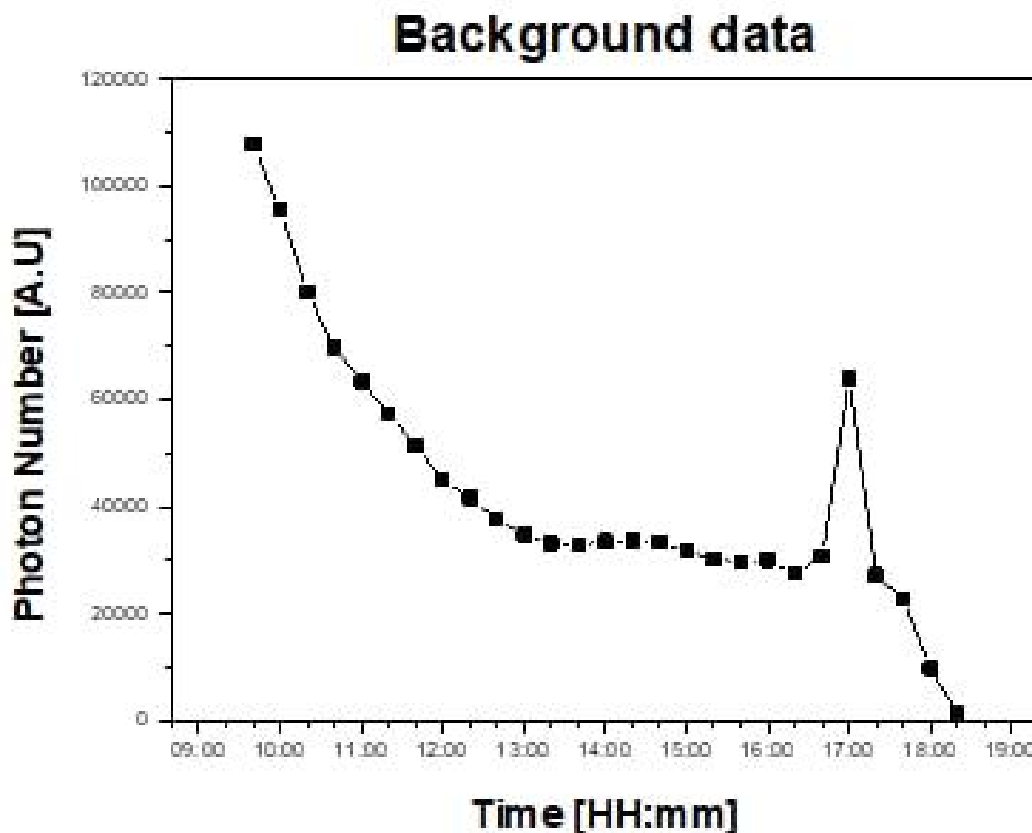


그림 5-45. 낮 시간 태양에 의한 배경신호 (2021년 3월 31일)

- 배경신호 관측 결과 시간이 지날수록 태양에 의한 배경신호는 줄어들다가 17시에 배경신호가 늘어나는 경향이 나타나는데, 이는 구름의 영향으로 배경신호가 늘어난 것으로 그림 5-46을 보면 17시에서 18시 사이에 구름의 양이 많아지는 것을 확인 할 수 있다.

시간	날씨				기온(℃)			강수			바람		기압(hPa)
일.시	현재일기	시정 km	운량 1/10	중하운량	현재 기온	이슬점 온도	체감 온도	일강수 mm	적설 cm	습도 %	풍향	풍속 m/s	해면 기압
31.19H		20 이상			19.6	-4.6	19.6			19	북북동	0.9	1012.6
31.18H	구름많음	20 이상	6	0	21.6	-4.5	21.6			17	북동	0.9	1012.3
31.17H	구름조금	20 이상	5	0	23.9	-6.2	23.9			13	북북동	0.9	1011.9
31.16H	구름조금	20 이상	4	0	24.0	-8.3	24.0			11	서남서	1.1	1011.9
31.15H	구름조금	20 이상	5	0	23.9	-3.4	23.9			16	남서	1	1012.0
31.14H	구름조금	20 이상	4	0	23.3	-3.1	23.3			17	남동	1.4	1012.6
31.13H	구름조금	20 이상	3	0	21.0	-4.2	21.0			18	동남동	1	1013.5
31.12H	맑음	20 이상	2	0	19.4	-1.7	19.4			24	서남서	1.4	1014.6
31.11H	맑음	20 이상	0	0	16.8	1.2	16.8			35	남서	1.8	1015.7
31.10H	맑음	20 이상	2	0	14.6	2.7	14.6			45	남	1.1	1016.2
31.09H	맑음	20 이상	2	0	11.2	1.6	11.2			52	남	1.3	1016.2

그림 5-46. 2021년 3월 31일 09시 ~ 19시 기상 실황표

- 개발한 라이다 시제품의 최대 관측거리를 확인하기 위하여 관측을 하였을 때 라이다의 신호와 최대 관측거리의 확인을 위하여 5 A의 전류(Current)를 인가하여 레이저를 조사하여 1분 동안 데이터를 수집하여 355 nm와 1064 nm의 원시신호(Raw Data)를 획득하였다.
- 그림 5-47은 1064 nm의 원시신호(Raw data)로 10 km의 거리까지 신호가 관측되는 것을 확인할 수 있으며, 낮 시간에 관측 시 5 km의 거리까지 관측이 가능할 것으로 예상되었다.

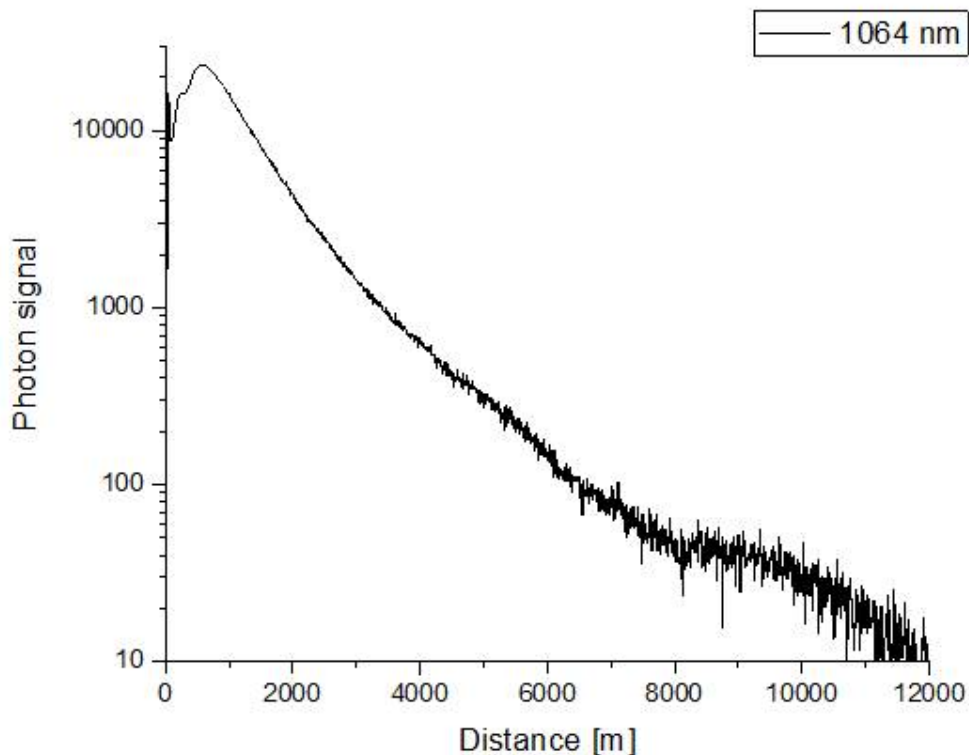


그림 5-47. 1064 nm 원시신호(Raw data)

- 그림 5-48은 355 nm의 원시신호(Raw data)로 6 km의 거리까지 신호가 관측이 가능한 것을 확인할 수 있으며, 낮 시간에 관측 시 4 km의 거리까지 관측이 가능할 것으로 예상되었다.
- 355 nm의 원시신호를 보면 1064 nm의 신호보다 신호 획득 거리가 짧은 것을 볼 수 있는데, 이는 파장이 짧을수록 산란되는 양이 많은 빛의 특성으로 나타나는 현상이다.

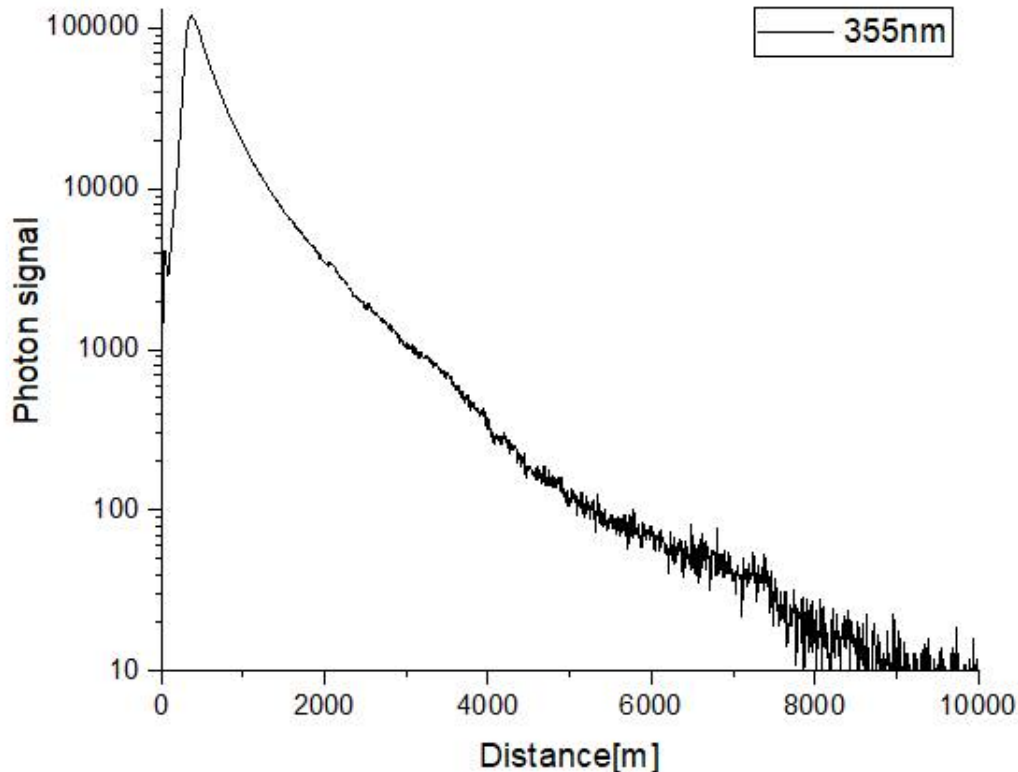


그림 5-48. 355 nm 원시신호(Raw data)

- 원시신호 획득을 통하여 각 파장의 최대 측정거리를 예측을 통해 355 nm 파장은 최대 측정거리는 4 km로 예측이 되는데, 이는 레이저의 인가 전류를 6 A이상으로 올리면 최대 측정거리는 5 km 이상이 가능 할 것으로 예측된다.

• 미세 먼지 라이다 시제품 전문가 평가 시험

- 개발한 미세 먼지 관측용 라이다의 H/W와 S/W의 최종목표 확인을 위하여 계측 기기의 시험 평가를 전문으로 하는 KOLAS 전문 업체에 의뢰를 하여 최종목표의 달성을 진행하였는지 평가를 진행하였다.
- 국내에는 라이다의 표준화 작업이 이루어지지 않은 상황으로, 개발한 라이다의 성능 검증을 위하여 KOALS 전문 업체를 이용하여 라이다의 성능 평가시험을 진행하였다.
- 그림 5-49는 전문가 평가를 진행 한 (주)스탠드랩스 사의 한국인정기구에서 인정을 받은 KOLAS 공인 시험평가 인정서이다.

KOLAS 공인시험기관 인정서

(주)스탠다드랩스

인 정 번 호 : KT625

법 인 등 록 번 호 : 135111-0082960
(또는 고유번호)

사 업 장 소 재 지 : (소재지)경기도 안양시 동안구 엘에스로91번길 46, 401 (호계동)

최 초 인 정 일 자 : 2014년 05월 16일

인 정 유효 기 간 : 2018년 07월 05일 ~ 2022년 07월 04일

인정분야 및 범위 : 별첨

발 행 일 : 2021년 03월 05일

상기 기관을 국가표준기본법 제23조 및 KS Q ISO/IEC 17025:2017에 의거하여 KOLAS 공인시험기관으로 인정합니다. 또한 ISO-ILAC-IAF 공동성명에 언급된 바와 같이 인정된 분야 및 범위에 대한 기술적 능력과 시험기관의 품질경영시스템이 적절함을 인정합니다.



한국인정기구장
(Korea Laboratory Accreditation Scheme)



한국인정기구(KOLAS)는 국제시험기관인정협력체(ILAC)의 상호인정협정(MRA) 서명기구입니다.

1/8

그림 5-49. 전문가 평가 진행 기관의 KOLAS 공인 시험평가 인정서

- 표 5-5는 미세 먼지 라이다 시제품의 최종 성과 목표를 나타낸 것이다. 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 범위, 미세 먼지 측정 최소 거리 분해능, 관측 주기 및 라이다 최대 스캔 속도 등으로 구성되어 미세 먼지 라이다 시스템의 정량적 평가가 이루어 질 수 있도록 구성하였다.
- 미세 먼지 라이다 시스템의 측정 범위와 측정 최소 거리 분해능, 관측 주기의 경우, 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 측정한 미세 먼지의 양 및 범위를 나타내는 측정 파일을 통하여 측정 결과를 검증할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 시제품의 최대 스캔 속도의 경우, 라이다 시제품의 측정 파일로서는 확인이 불가능하다. 따라서 모터의 움직인 각도, 모터 움직임 시작 시간, 동작 멈춤 시간을 기록할 수 있도록 스캐닝 모터 제어 프로그램을 수정하였다.
- 최대 스캔 속도 검증에 앞서, 별도의 각도 측정기를 이용하여 움직임 입력 각도와 실제 스캐닝 모터가 움직인 각도를 제3자 검증 기관에 확인한 후, 실제 스캐닝 모터의 최대 스캔 속도를 검증할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 관측용 라이다의 평가를 위하여 그림 5-50과 그림 5-51과 같이 (주)솔탑의 2층 Lab실 앞쪽에 라이다를 설치하였다.

표 5-5 미세 먼지 라이다 시제품의 최종 성과 목표

No.	시험항목	성능 판정 기준
1	미세 먼지 관측용 라이다 측정범위(거리)	5 km 이상
2	미세 먼지 관측용 라이다 거리분해능	7.5 m 이하
3	미세 먼지 관측용 라이다 관측주기	120 초 이내
4	미세 먼지 관측용 라이다 최대 스캔 속도	20 °/sec



그림 5-50. 전문가 평가를 위한 미세 먼지 라이다 시제품 설치 모습



그림 5-51. 전문가 평가를 위한 미세 먼지 라이다 시제품 구동 모습

- 미세 먼지 라이다 시제품의 전문가 평가 시험 결과
 - 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 범위(거리) 검증 결과

- 그림 5-52는 전문가 평가 시험 당시 미세 먼지 라이다 시제품의 제어프로그램 인터페이스를 캡처한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 (주)솔탑에서 3 km 거리에 위치한 계곡산 방향으로 레이저를 조사하여 미세 먼지에 의한 빛의 산란 신호를 계측할 수 있도록 하였다.
- 캡처한 그림에서도 나타나는 것처럼 5 km 이상에서 빛의 산란 신호가 강하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 거리가 5 km 이상임을 의미하며 성능 목표로 삼은 5 km를 만족함을 알 수 있다.
- 그림 5-53은 엑셀 프로그램을 이용하여 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 범위를 확인한 결과를 나타낸다.

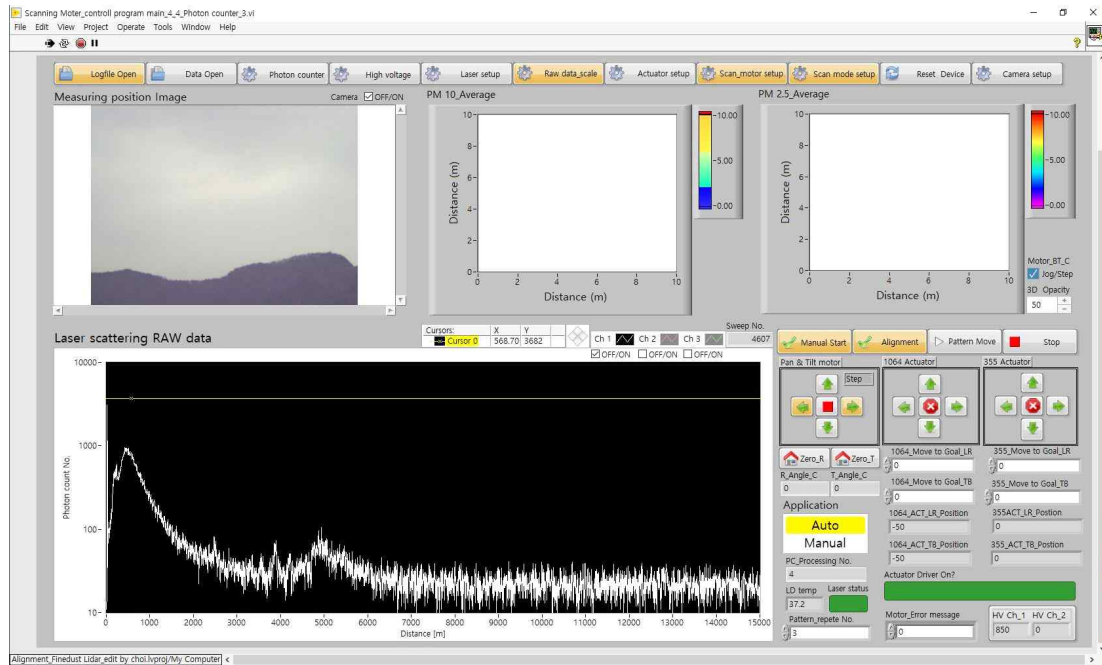


그림 5-52. 전문가 평가 시험 중 캡처한 미세 먼지 라이다 시제품 인터페이스

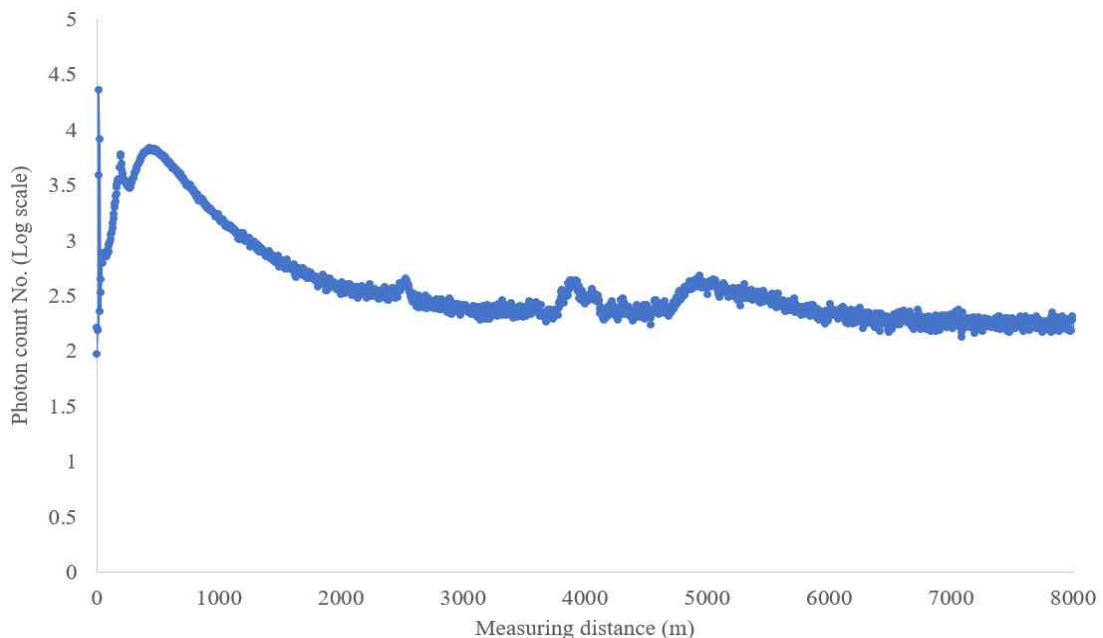


그림 5-53. 미세 먼지 라이다 시제품의 최대 측정 범위 검증 결과 그래프

- 미세 먼지 라이다 시제품의 거리 분해능 검증 결과
- 그림 5-54는 미세 먼지 라이다 시제품의 거리 분해능을 확인하기 위하여 엑셀을 이용하여 미세

먼지 측정 자료를 불러온 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 미세 먼지 라이다 시제품의 거리 분해능이 3.84 m 간격으로 목표로 설정한 7.5 m 간격을 만족하는 것을 볼 수 있다.

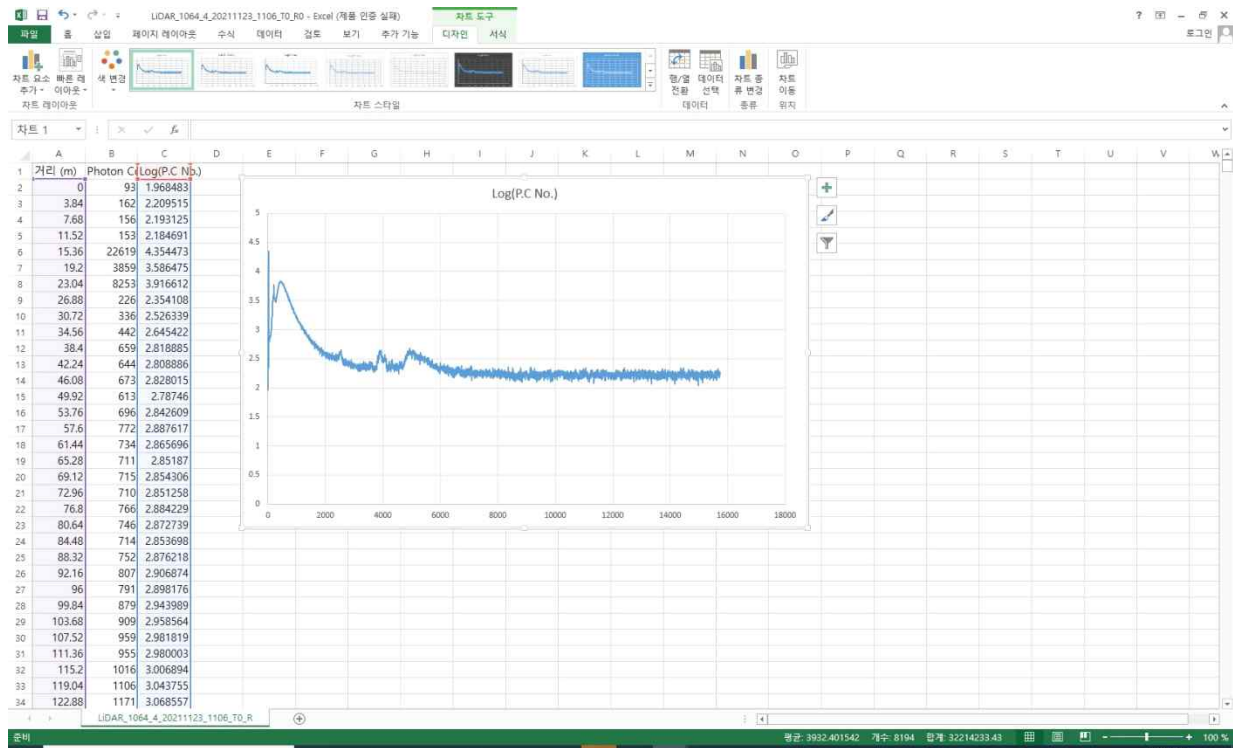


그림 5-54. 미세 먼지 라이다 시제품의 거리 측정 분해능 검증 결과

• 미세 먼지 라이다 시제품의 관측 주기 검증 결과

- 미세 먼지 라이다 시제품의 관측 주기를 검증하기 위하여 일정한 70°의 스캐닝 범위를 10°간격으로 측정할 수 있도록 하였다. 측정 파일의 저장 시간을 통하여 관측 주기를 검증하였다.
- 그림 5-55는 스캐닝을 통하여 획득한 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 파일의 정보를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 한 지점의 관측 주기가 약 45 초 이내로서, 성능 목표로 설정한 120 초 이내를 만족하는 것을 볼 수 있다.

E:\20211123 test1\Pattern move\ x +

← → ↻ ⌂ E:\20211123\test1\Pattern%20move\1064%20nm\4_Cycle\

E:\20211123 test1\Pattern move\1064 nm\4_Cycle\의 인덱스

[부도 디렉터리]

이름	크기	수정된 날짜
LIDAR_1064_4_20211123_1106_T0_R0.csv	134 kB	21. 11. 23. 오전 11:06:10
LIDAR_1064_4_20211123_1106_T0_R1.csv	134 kB	21. 11. 23. 오전 11:06:54
LIDAR_1064_4_20211123_1107_T0_R2.csv	133 kB	21. 11. 23. 오전 11:07:37
LIDAR_1064_4_20211123_1108_T0_R3.csv	134 kB	21. 11. 23. 오전 11:08:21
LIDAR_1064_4_20211123_1109_T0_R4.csv	134 kB	21. 11. 23. 오전 11:09:04
LIDAR_1064_4_20211123_1109_T0_R5.csv	133 kB	21. 11. 23. 오전 11:09:47
LIDAR_1064_4_20211123_1110_T0_R6.csv	133 kB	21. 11. 23. 오전 11:10:30
LIDAR_1064_4_20211123_1111_T0_R7.csv	133 kB	21. 11. 23. 오전 11:11:14
LIDAR_camera image4_20211123_1106_T0_R0.jpg	23.3 kB	21. 11. 23. 오전 11:06:10
LIDAR_camera image4_20211123_1106_T0_R1.jpg	23.4 kB	21. 11. 23. 오전 11:06:54
LIDAR_camera image4_20211123_1107_T0_R2.jpg	23.3 kB	21. 11. 23. 오전 11:07:37
LIDAR_camera image4_20211123_1108_T0_R3.jpg	23.2 kB	21. 11. 23. 오전 11:08:21
LIDAR_camera image4_20211123_1109_T0_R4.jpg	22.9 kB	21. 11. 23. 오전 11:09:04
LIDAR_camera image4_20211123_1109_T0_R5.jpg	22.9 kB	21. 11. 23. 오전 11:09:47
LIDAR_camera image4_20211123_1110_T0_R6.jpg	22.6 kB	21. 11. 23. 오전 11:10:30
LIDAR_camera image4_20211123_1111_T0_R7.jpg	22.3 kB	21. 11. 23. 오전 11:11:14

그림 5-55. 미세 먼지 라이다 시제품의 관측 주기 검증 결과

• 미세 먼지 라이다 시제품의 최대 스캔 속도 검증 결과

- 미세 먼지 라이다 시제품의 최대 스캔 속도를 검증하기 위하여, 스캐닝 모터의 움직인 각도, 움직인 시작 시간, 종료 시간 및 방향 등의 정보를 기록할 수 있도록 스캐닝 모터 제어 프로그램을 제작하였으며, 반복 실험을 통하여 이를 검증 할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-56은 미세 먼지 라이다 시제품의 최대 스캔 속도를 검증하기 위한 스캐닝 모터 제어프로그램의 인터페이스를 나타낸 것이며, 그림 5-57은 최대 스캔 속도 검증 결과 데이터를 나타낸다. 그림 5-57에서 보는 것과 같이 스캐닝 모터의 방향에 관계없이 20°각도를 움직이는데 약 1초의 시간이 안 걸리는 결과를 확인 할 수 있다. 이는 성능 목표치인 최대 스캔 속도 20°/sec를 만족함을 의미한다.

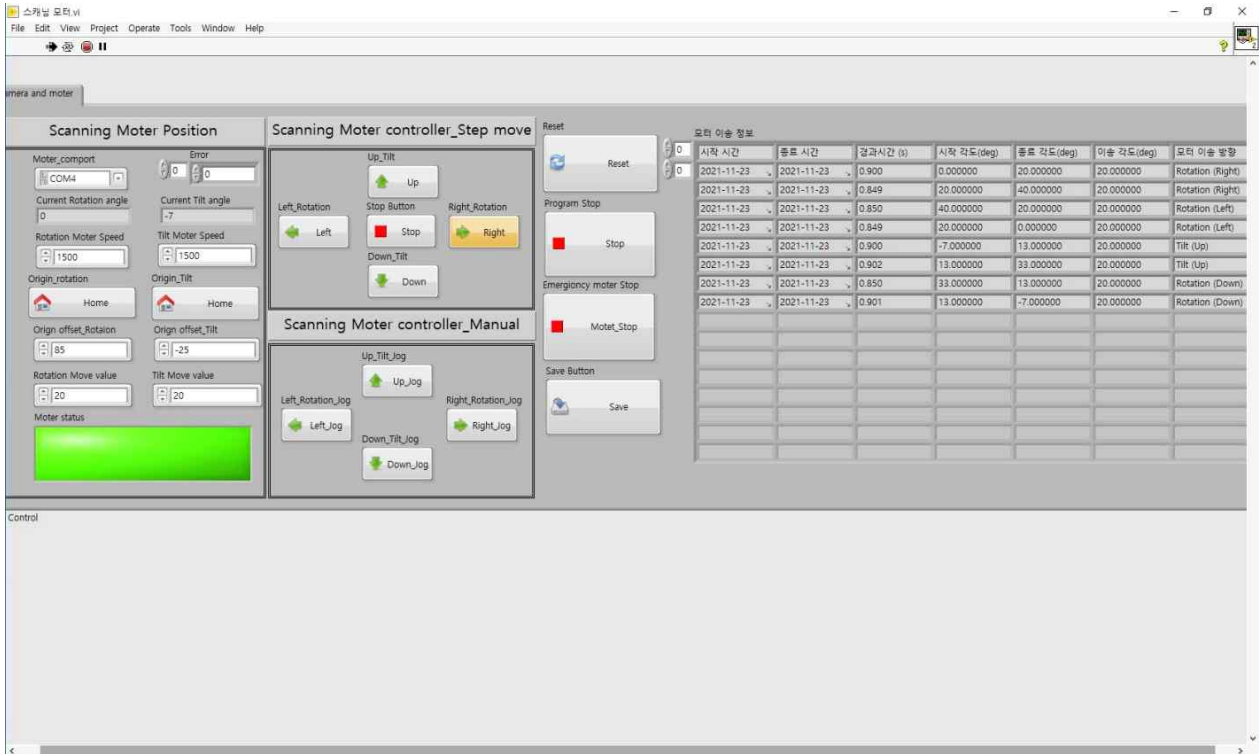


그림 5-56. 미세 먼지 라이다 시제품의 최대 스캔 속도 검증 프로그램

모터 운송 결과 - Excel (개별 인증 실패)

시작 시간	종료 시간	경과시간 (s)	시작 각도(deg)	종료 각도(deg)	이송 각도(모터 이송 방향)
2021-11-23 오전 11:18:32.003	2021-11-23 오전 11:18:32.903	0.9	0	20	20 Rotation (Right)
2021-11-23 오전 11:18:38.855	2021-11-23 오전 11:18:39.704	0.849	20	40	20 Rotation (Right)
2021-11-23 오전 11:18:48.853	2021-11-23 오전 11:18:49.703	0.85	40	20	20 Rotation (Left)
2021-11-23 오전 11:19:19.354	2021-11-23 오전 11:19:20.203	0.849	20	0	20 Rotation (Left)
2021-11-23 오전 11:19:26.804	2021-11-23 오전 11:19:27.704	0.9	-7	13	20 Tilt (Up)
2021-11-23 오전 11:19:43.103	2021-11-23 오전 11:19:44.005	0.902	13	33	20 Tilt (Up)
2021-11-23 오전 11:19:51.454	2021-11-23 오전 11:19:52.303	0.85	33	13	20 Rotation (Down)
2021-11-23 오전 11:19:58.504	2021-11-23 오전 11:19:59.405	0.901	13	-7	20 Rotation (Down)

그림 5-57. 미세 먼지 라이다 시제품의 최대 스캔 속도 검증 결과

- 미세 먼지 라이다 시제품의 전문가 평가 시험 결과 종합 의견

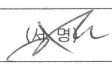
- 표 5-6은 미세 먼지 라이다 시제품의 전문가 평가 시험의 결과를 나타낸 표이며, 그림 5-58은 제3자 인증 평가 기관에서 발생한 평가 결과서 원본은 캡처한 것이다. 표와 그림에서 보는 것과 같이 성능 평가의 지표로 설정한 모든 항목이 적합한 것을 알 수 있다.

표 5-6 미세 먼지 라이다 시제품의 전문가 평가 시험 결과

주요 성능지표	단위	성능목표	검증결과	판정
미세 먼지 관측용 라이다 측정범위(거리)	km	≥ 5	5 km 이상	적합
미세 먼지 관측용 라이다 거리분해능	m	≤ 7.5	3.84 m	적합
미세 먼지 관측용 라이다 관측주기	초	≤ 120	45 초 이내	적합
미세 먼지 관측용 라이다 최대 스캔 속도	초	≤ 1	1초 이내	적합

 Standard Labs STANDARD Laboratory for Certification Service (주)스탠다드랩스	평가결과서	Test Report No.: SR-21-2081 Page: 1 of 17
--	-----------------------------------	--

1. 의뢰자
 - 기 관 명: ㈜솔탑
 - 주 소: 대전광역시 유성구 엑스포로 409(문지동)
 - 의뢰일자: 2021년 11월 10일
2. 제조자
 - 기 관 명: ㈜솔탑
 - 주 소: 대전광역시 유성구 엑스포로 409(문지동)
3. 시험성적서 용도: 과제 목표 성능달성 확인용
4. 시험대상품목
 - 시 료 명: 미세먼지 관측용 라이다
 - 모 델 명: SMPL-8
5. 시험기간: 2021년 11월 23일
6. 시험방법: 본 시험의 기준방법 및 시료는 의뢰자가 제시한 것임
7. 시험결과: 적합

시험실무자	기술책임자
성 명: 안대하 (인) 	성 명: 이수준 (인) 

- 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않습니다.
 - 이 성적서는 ㈜스탠다드랩스의 사전동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며 용도 이외의 사용을 금합니다.

2021. 11. 30.

(주)스탠다드랩스

대표이사 (인) 

경기도 안양시 동안구 엘레스로 91번길 46, 401(호계동)

Tel: 070-7700-9351, Fax: 02-6670-2288

SLB-P-22-01(0)



그림 5-58. 인증기관에서 발생한 전문가 평가 결과서

• 미세 먼지 라이다 장치와 미세 먼지 측정기의 비교 관측을 통한 성능 검증

- (주)솔탑과 대구 스마트시티 간의 업무 협약을 통하여, (주)솔탑에서 개발된 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 대구 지역의 미세 먼지 분포와 양을 측정할 수 있는 실험을 공동으로 진행하기로 하였다.
- (주)솔탑에서는 미세 먼지 라이다 시제품을 제공하고, 대구 스마트시티는 미세 먼지 라이다 장치의 설치 장소를 제공하기로 하였으며, 설치된 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 획득한 데이터를 서로 공유하여 대구 지역에서 발생하는 미세 먼지의 분포 및 유형 등의 정보를 서로 활용할 수 있도록 측정 자료를 공유하기로 협의하였다.
- 대구 스마트시티에서 미세 먼지 라이다 시제품의 설치 장소로 제공하기로 한 장소는 두 곳으로, 대구 시청 별관 101동과 205동 옥상을 제시하였다.
- 대구 시청 별관 101동의 경우, 전방 2 km 내에 고층 아파트가 차지하고 있고 옥상 주변에 설치된 구조물에 의하여 미세 먼지 라이다 시제품의 성능을 검증하기 부적합하였다.
- 대구 시청 별관 205의 경우, 주변에도 고층 아파트가 자리하고 있으나, 5 km이상의 거리에 위치하고 있고, 옥상에 장애물이 없어 미세 먼지 라이다 시제품을 이용한 미세 먼지 측정 성능을 검증하기 적합하여 장기 관측 시험을 진행하기로 하였다.
- 그림 5-59와 그림 5-60은 대구 스마트시티에서 미세 먼지 라이다 시제품의 성능 검증 실험을 위하여 제고하기로 한 대구 시청 별관 101동과 205동의 주변 풍경을 나타낸 사진이다.



그림 5-59. 대구 시청 별관 101동 옥상 및 주변 풍경



그림 5-60. 대구 시청 별관 205동 옥상 및 주변 풍경



- 대구 스마트시티의 도움을 받아 미세 먼지 라이다 시제품을 이용한 대구 지역 미세 먼지 양 및 분포를 측정하는 장기 시험은 2021년 9월 28일에 장비를 설치하여 관측을 시작하고 11월 11일까지 관측을 실시하였다.

- 대구 시청 별관에서 가장 가까운 국가 대기 측정소는 대구 산격동 측정소로서, 대구 시청 주변에서 발생한 미세 먼지의 양을 시민들에게 예보하고 있다. 따라서 미세 먼지 라이다 시제품의 스캐닝 영역에 대구 산격동 측정소를 포함한 지역으로 설정하였다.
- 대구 산격동 측정소에서 시민들에게 제공하고 있는 미세 먼지와 초미세 먼지 측정결과와 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 측정한 결과를 비교하여 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 정밀도를 비교할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-61은 대구 시청 별관 205동 옥상에 설치된 미세 먼지 라이다 시제품을 나타낸 사진이며, 그림 5-62는 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 대구 지역 미세 먼지의 양과 분포를 측정하는 모습을 나타낸 사진이다.



그림 5-61. 스캐닝 모터의 설정을 위한 관측 범위 설정

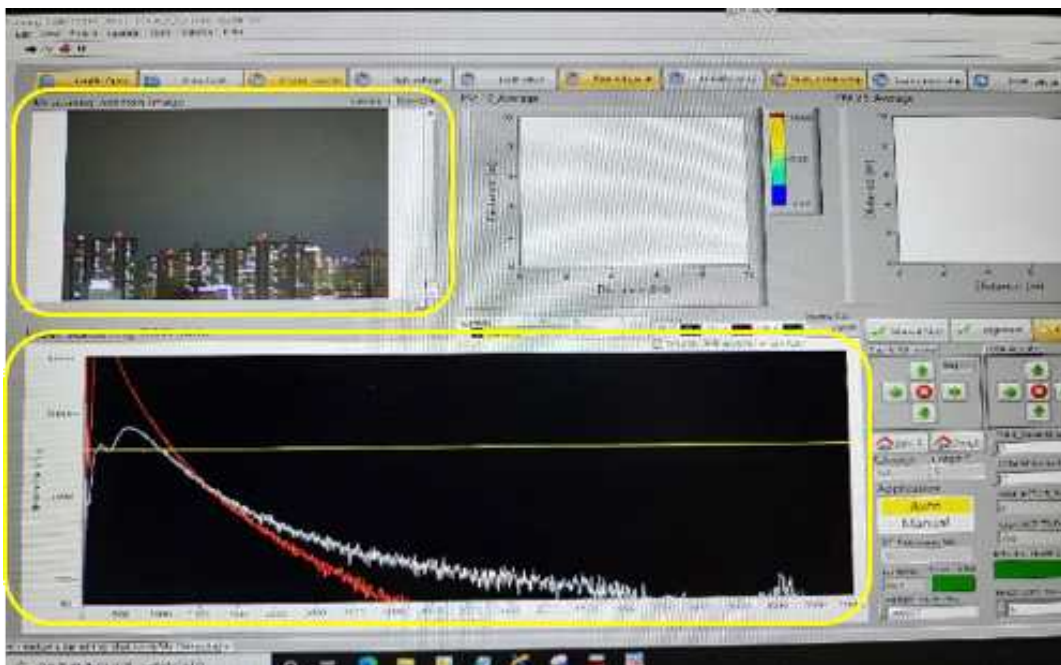


그림 5-62. 라이다 신호 확인 및 광 계수기 설정

5. 라이다를 이용한 미세 먼지 농도 연속 관측

- 대구 시청에서 실시한 미세 먼지 라이다 시제품의 장기 연속 관측 테스트는 60°와 180°의 스캐닝 범위를 갖게 하여 진행하였다. 스캐닝 범위 60°로 설정한 실험은 개발된 미세 먼지 라이다 시제품과 대구 산격동 미세 먼지 측정소의 결과를 비교하기 위하여 실험으로서 두 장치에서 획득한 미세 먼지 측정 결과를 직접 비교하여 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 측정한 미세 먼지 측정 결과의 유효성을 검증하기 위한 것이다. 두 번째는 미세 먼지 라이다 시제품의 미세 먼지 측정 범위를 180°로 확대한 실험으로서, 시간에 따라 광역 범위에서 발생하는 미세 먼지의 양 및 분포의 변화를 관측하기 위한 실험이다.

5-1. 60°범위 연속 관측 테스트 방법

- 미세 먼지 라이다 시제품의 한 방향 측정 시간을 40 초로 설정하고, 60°의 스캐닝 범위를 3도 간격으로 미세 먼지를 측정하는 연속관측 실시하였다.
- 대구 산격동 미세 먼지 측정소를 스캐닝 영역의 가운데로 설정하고, 도심 주변의 미세 먼지의 배출이 많을 것으로 예상되는 주택과 도로 주변지역을 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 미세 먼지의 양 및 분포를 측정할 수 있도록 하였다.
- 관측범위를 60°로 설정한 이유는 보호천막의 양쪽 기둥에 영향을 받지 않고, 주변 장애물(아파트, 에어컨 실외기, 굴뚝 등)에 영향을 받지 않는 관측 범위가 60°이기 때문이다.

5-2. 180°범위 연속 관측 테스트 방법

- 미세 먼지 라이다를 설치하여 관측한 장소는 전방은 도로, 아파트가 위치하고 있는 도심지역이고 후방은 산이 위치하고 있는 산간지역이다.
- 도심지역과 산간지역에서의 미세 먼지 농도 비교를 위하여 180°의 관측범위를 5°의 간격으로 지정하여 관측을 시작하였다.
- 180°범위 관측은 보호천막의 2면을 제거하여 관측을 진행하기 때문에 비로부터 보호를 받지 못한다. 측정 기간 동안 맑은 날도 있었지만, 비가 오는 날도 있었기 때문에 180°관측은 3일만 진행을 하였다.
- 미세 먼지 라이다 시제품의 한 방향 측정 시간을 40 초로 설정하고, 180°의 스캐닝 범위를 5도 간격으로 미세 먼지를 측정하는 연속관측 실시하였다.
- 그림 5-63은 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 180°의 스캐닝 범위를 나타내기 위하여 파노라마 사진을 이용하여 나타낸 것이다. 사진에서도 볼 수 있는 도심 지역과 산간 지역이 구분되어 나타나는 것을 볼 수 있다.

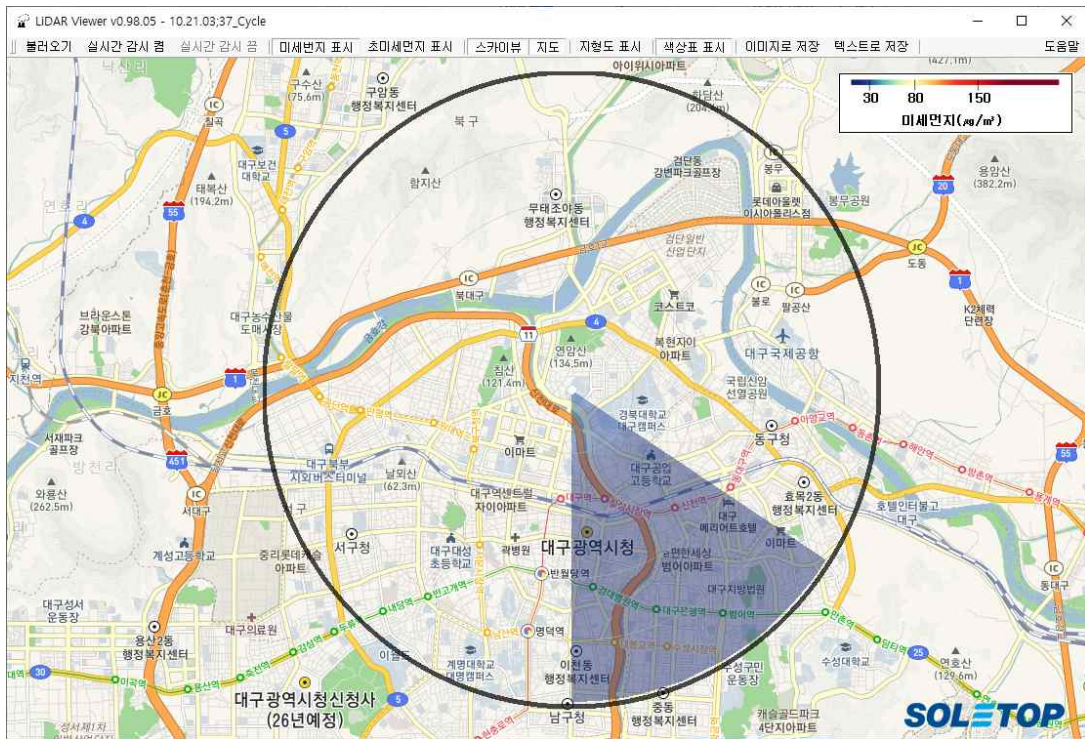


그림 5-63. 라이다 관측 장소의 파노라마 뷰(180°)

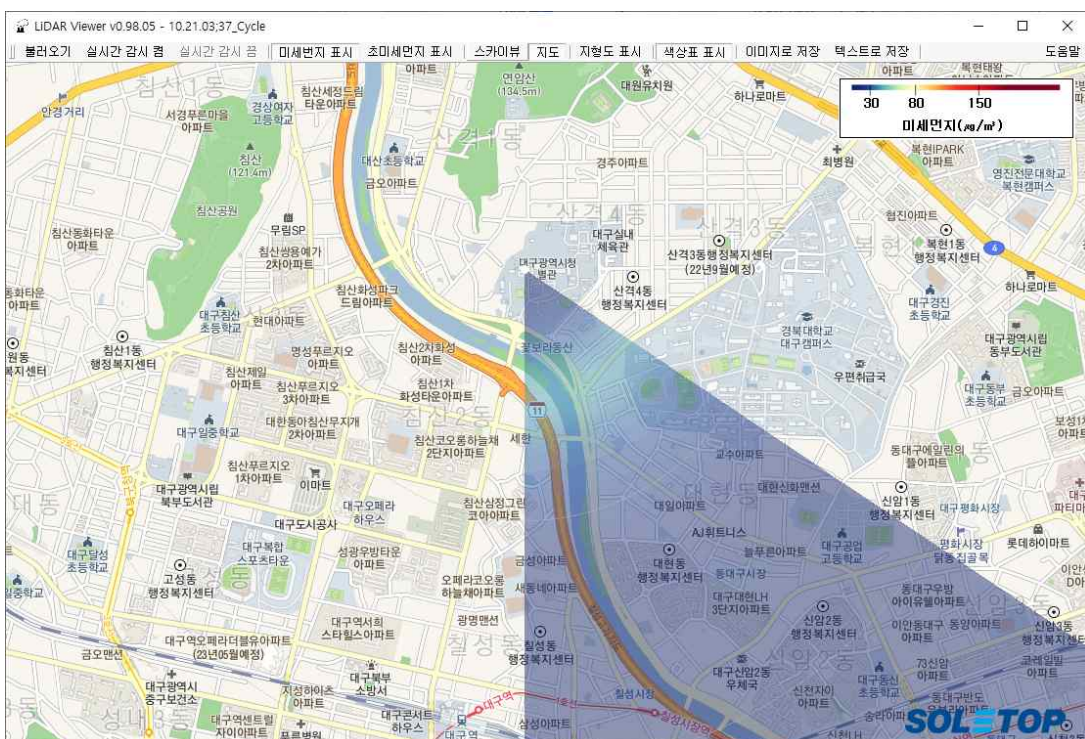
6. 미세 먼지 라이다 시제품의 연속 관측 측정 결과

6-1. 차량에 의한 미세 먼지 증가현상 관측 (60° 범위 관측)

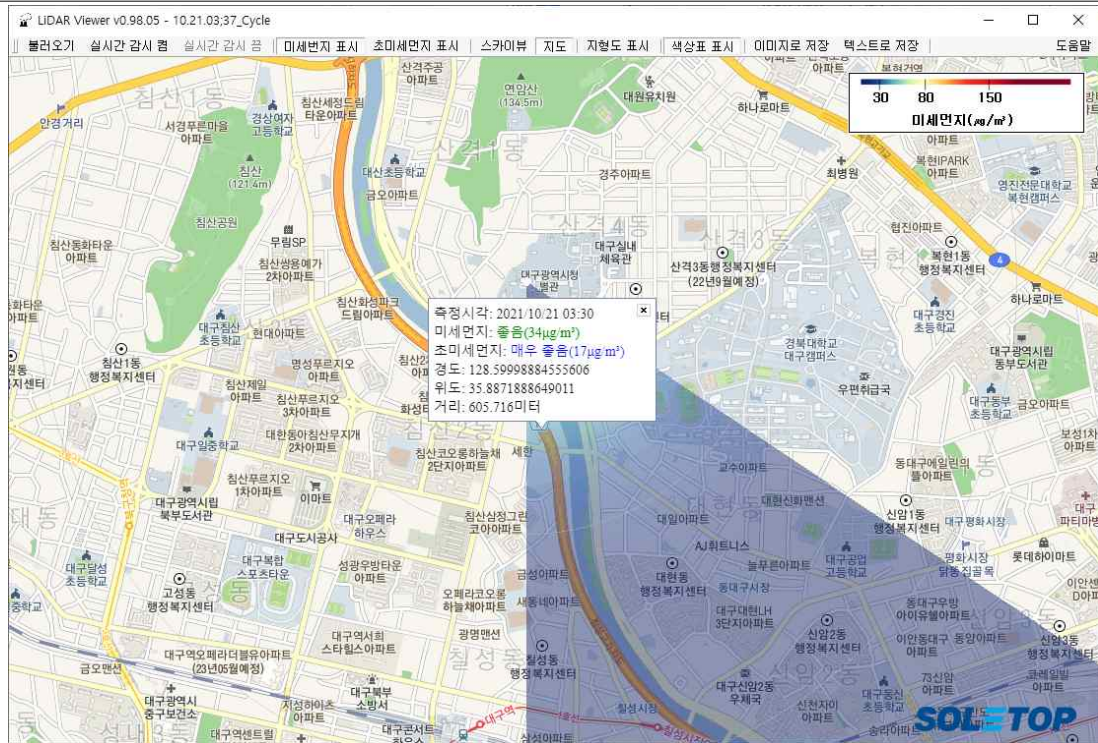
- 그림 5-64는 2021년 10월 21일 03시의 관측데이터로 대구시청별관에서 1 km 거리 내에 미세 먼지의 농도는 평균 $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 주변지역에 비하여 높게 나오는 것을 볼 수 있는데, 1 km 전방에 위치하고 있는 도로(신천대로, 신천동로)를 이용하는 차량에서 발생하는 미세 먼지의 영향을 받아서 높게 나온 것이다.



(a) 10월 21일 03시 관측데이터



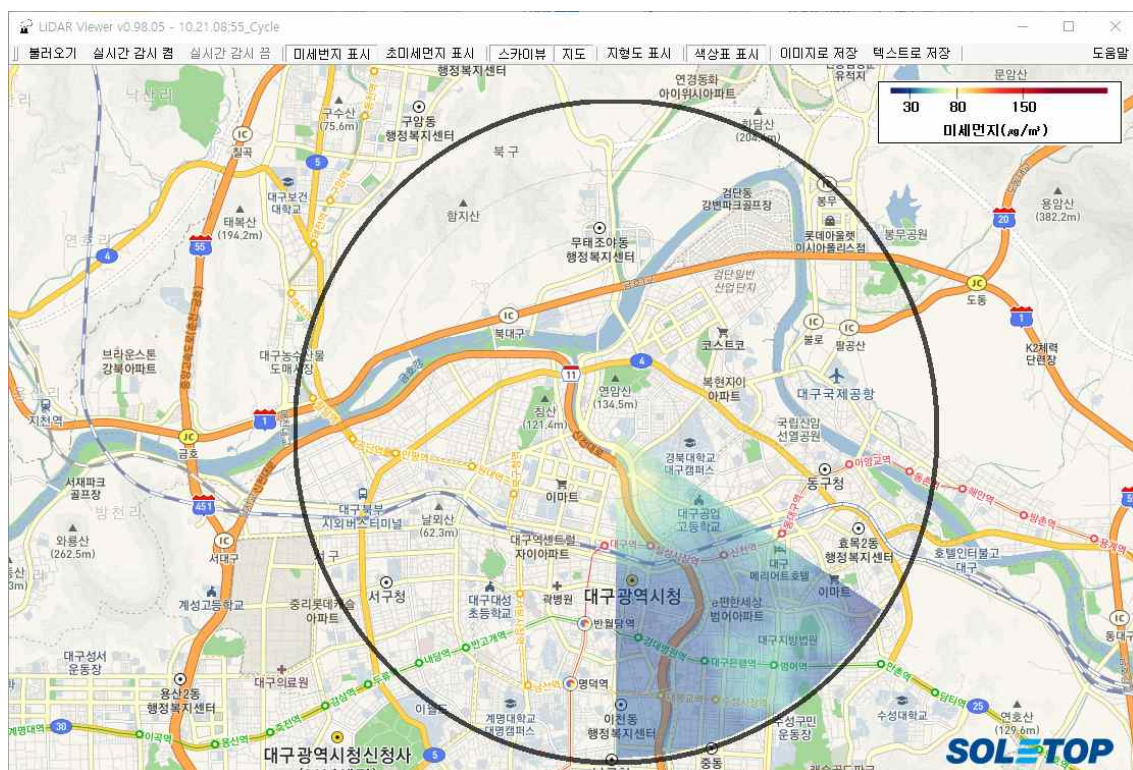
(b) 10월 21일 03시 관측 데이터(1 km내의 거리 확대)



(c) 10월 21일 03시 관측 데이터(1 km내의 거리 확대)

그림 5-64. 대구 시청 별관에서 60° 스캔 범위의 미세먼지 측정 결과_2021년 10월 21일 새벽

- 그림 5-65는 2021년 10월 21일 08시의 관측데이터로 대구시청별관에서 1 km 거리 내에 미세먼지의 농도는 평균 $98\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 03시보다 높게 관측 되었는데, 이는 출근시간으로 인해 차량 통행이 증가하여 미세먼지의 농도가 더 높게 관측이 되었다.
- 그림 5-66은 2021년 10월 21일 08시 신천대로의 차량 통행 사진이다.
- 연속관측을 진행하면서 새벽시간에는 미세먼지의 농도가 낮고, 아침 ~ 저녁시간에는 미세먼지의 농도가 높아지는 경향을 확인할 수 있었는데, 차량의 운행으로 인하여 발생한 미세먼지의 영향으로 파악된다.



(a) 10월 21일 08시 관측데이터



(b) 10월 21일 08시 관측데이터(1 km내의 거리 확대)

그림 5-65. 대구 시청 별관에서 60° 스캔 범위의 미세먼지 측정 결과_2021년 10월 21일 아침

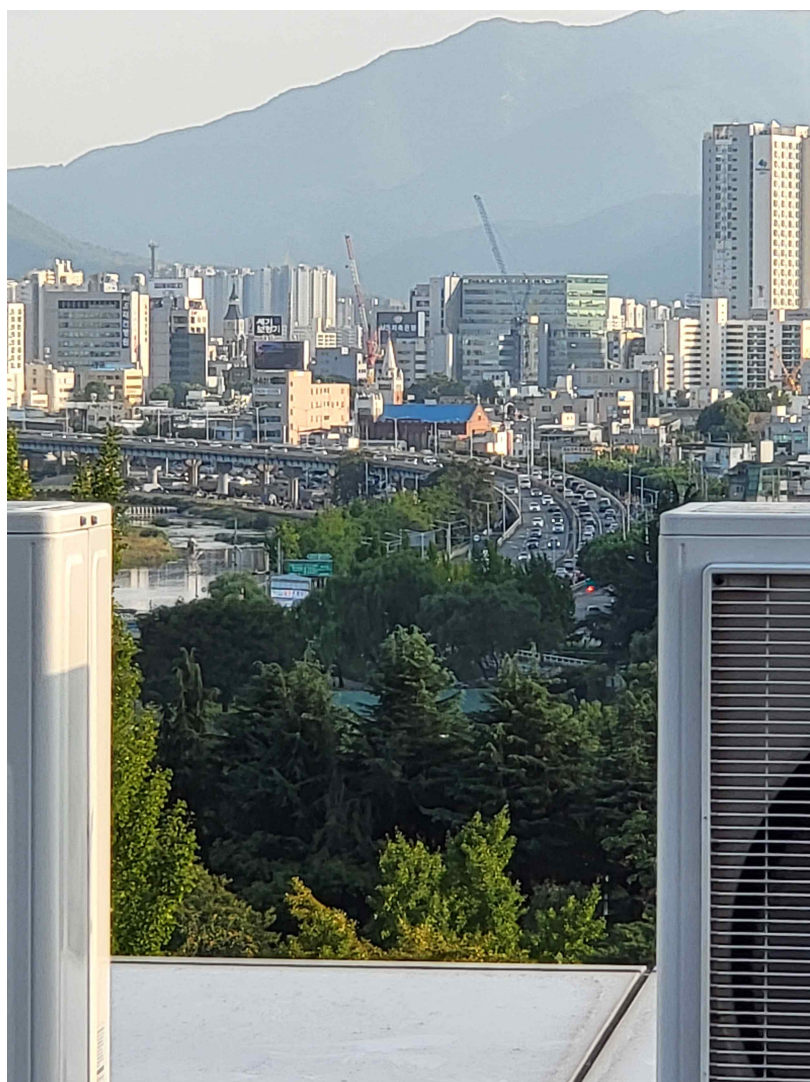
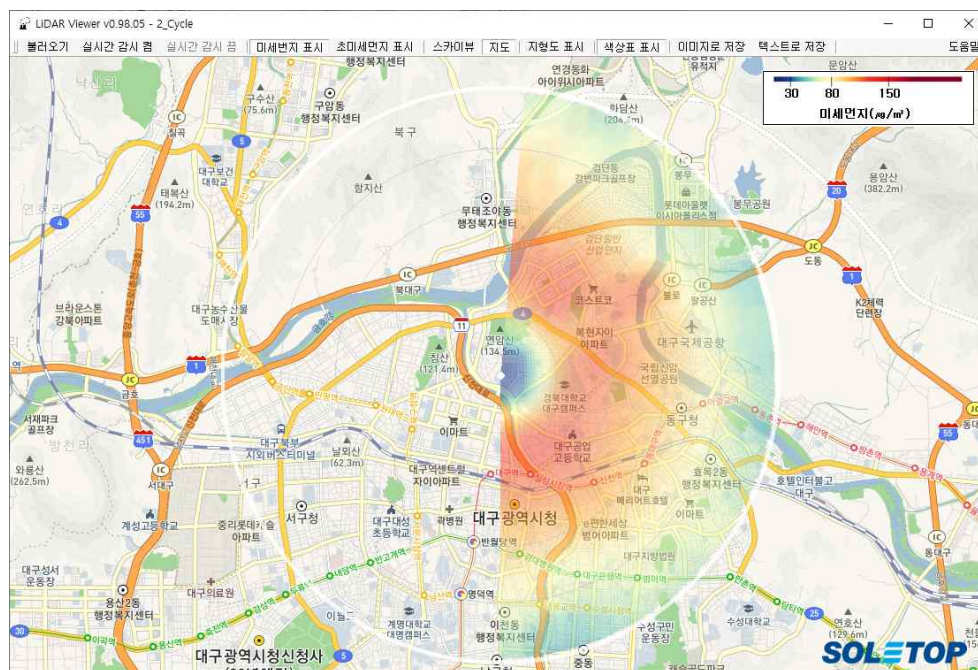


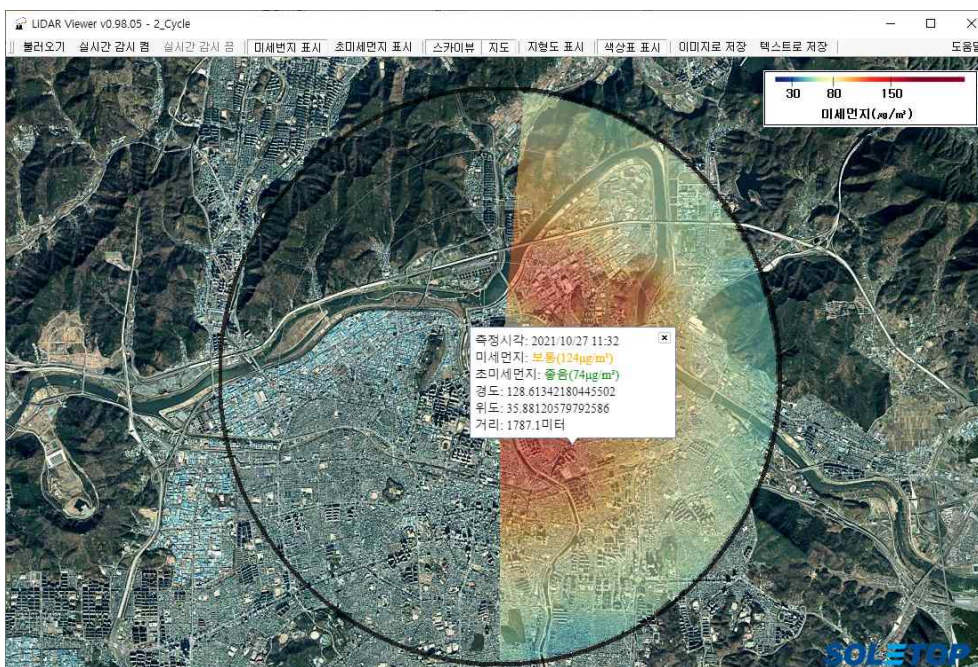
그림 5-66. 1 km 거리 내에 위치하고 있는 신천대로

6-2. 도심지와 산에서의 미세 먼지 농도 관측 (180° 범위 관측)

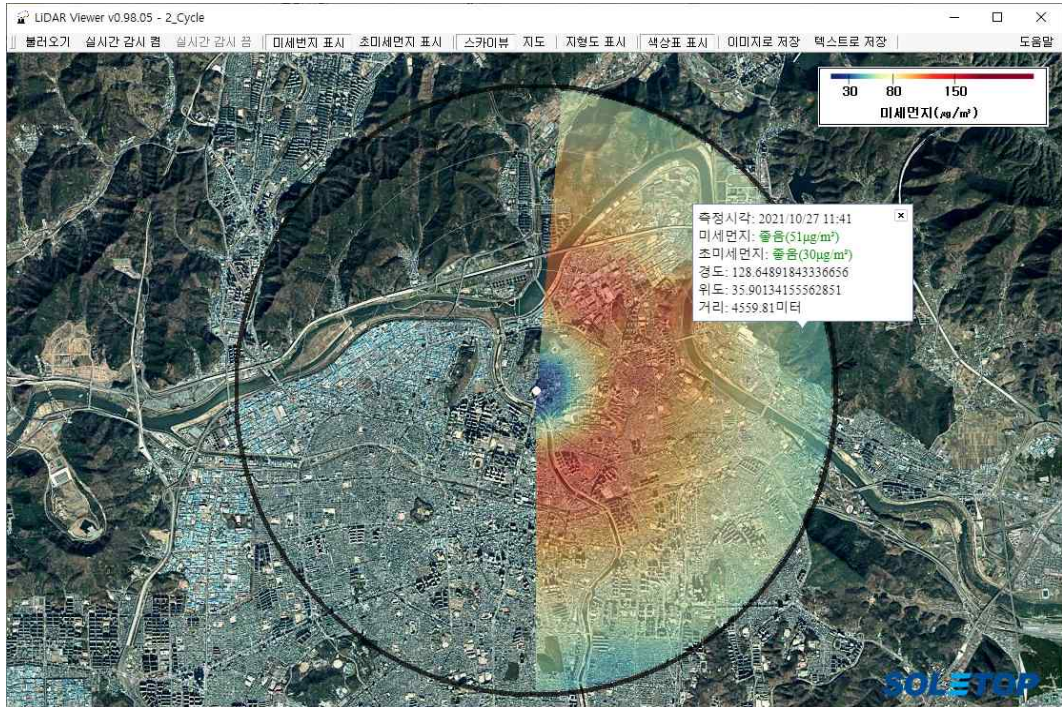
- 그림 5-67은 2021년 11월 27일 11시에 관측한 데이터로 180°범위를 관측한 데이터로, 도심지역과 산악지역에서의 미세 먼지 농도의 차를 관측하였다.
- 라이다를 설치하고 관측하는 범위에는 도심지역과, 산악지역이 복합적으로 이루어져 있다. 관측 데이터를 보면 4 km내의 범위에는 산이 위치하지 않고 아파트, 도로, 상가 등 도심지역이고, 5 km 근방에는 비파산, 용두산, 무학산. 용암산 등의 산악지역으로 구성되어 있음을 알 수 있다.
- 도심지역의 미세 먼지 농도는 평균 $124 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 농도로 관측이 되었으며, 산악지역의 미세 먼지 농도는 평균 $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측이 되었다.
- 도심지역은 차량의 이동, 공사 등으로 미세 먼지의 발생원이 존재하고 있어 미세 먼지의 농도가 높은 것으로 판단되며, 산악지역은 도심지역과 달리 미세 먼지의 발생원이 존재하지 않아 미세 먼지의 농도가 낮게 나온 것으로 보인다.



(a) 2021년 10월 27일 관측 데이터 (지도뷰)



(b) 2021년 10월 27일 관측 데이터 (도심지역 / 스카이뷰)



(c) 2021년 10월 27일 관측 데이터 (산악지역 / 스카이뷰)

그림 5-67. 대구 시청 별관에서 180° 스캔 범위의 미세 먼지 측정 결과_2021년 10월 27일

- 미세 먼지 라이다로 관측한 데이터와 국가 대기오염 측정망에서 운용하는 산격동의 미세 먼지 관측 데이터와 비교를 하였다.
- 산격동의 국가 대기오염 측정소는 2020년 대구시청별관 105동에 설치하여 운용을 하고 있으며, 라이다와 산격동 국가 대기오염 측정기의 데이터 비교를 위하여 라이다의 60° 연속관측지점에 산격동 측정소가 포함이 되도록 라이다를 설치하여 동시간대의 미세먼지의 농도 값을 비교하였다.

측정소 정보

알려두기

- 지도의 지역명을 클릭하면 각 지역에 해당하는 측정소 위치 정보를 조회할 수 있습니다.
- 조회 후 **측정소명**을 클릭하면 해당 측정소의 상세 정보를 조회할 수 있습니다.

도시대기 대구 조회 엑셀	
측정소명	측정소
남산1동	대구광역시 중구 남산로2길 125 대구명덕초등학교(남산동)
내당동	대구광역시 서구 서대구로3길 46 내당4동 행정복지센터 3층 옥상(내당동)
다사읍	대구광역시 달성군 다사읍 매곡로12길 37 다사읍주민자치센터
대명동	대구 남구 성당로30길55 성명초등학교별관3층옥상 성명초등학교 별관 3층 옥상
만촌동	대구 수성구 만촌2동 934 (동원초등학교)(국채보상로 1000) 동원초등학교
본동	대구광역시 달서구 구마로26길 62 본동행정복지센터(본동)
산격동	대구광역시 북구 연암로 40 시청별관 105동 3층 옥상 (산격동)
서호동	대구 동구 서호동 25-1(안심로49길 70) 반야월초등학교 옥상
수창동	대구 중구 수창동 73 (수창초등학교)(달성로 22길 30) 수창초등학교
시지동	대구광역시 수성구 노변공원로 52 노변초등학교 (시지동)
신암동	대구 동구 신암동 72-1 (신암5동사무소)(아양로 37길 92) 주민센터
유가읍	대구광역시 달성군 유가읍 테크노북로6길 20 비슬공원

측정소명	산격동 측정소 (도시대기)
운영기관	대구광역시보건환경연구원
주소	대구광역시 북구 연암로 40 시청별관 105동 3층 옥상 (산격동)
설치년도	2020
측정항목	SO ₂ CO O ₃ NO ₂ PM ₁₀ PM _{2.5}

그림 5-68. 산격동 국가 대기오염 측정소 정보

- 그림 5-69는 라이다의 관측데이터와 국가 대기오염 측정망의 미세 먼지(PM 10)의 농도데이터로, 라이다로 관측한 미세 먼지의 농도는 국가 대기오염 측정망에서의 측정한 미세 먼지 농도 값과 같은 경향성을 띄는 것을 알 수 있다.

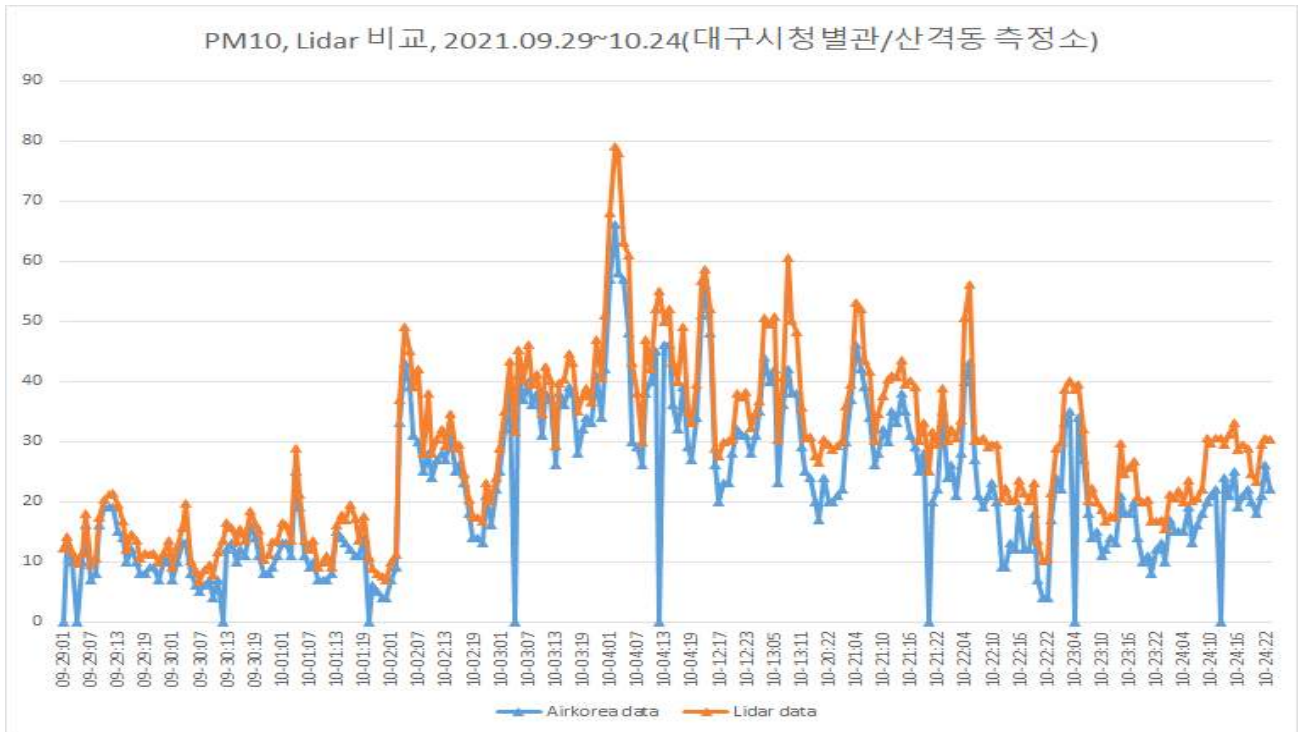


그림 5-69. 미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 미세 먼지 데이터(PM 10) 측정 자료 비교 그래프

- 그림 5-70은 라이다의 관측데이터와 국가 대기오염 측정망의 초미세 먼지(PM 2.5)의 농도데이터로, 라이다로 관측한 미세 먼지의 농도는 국가 대기오염 측정망에서의 측정한 미세 먼지 농도 값과 같은 경향성을 띄는 것을 알 수 있다.

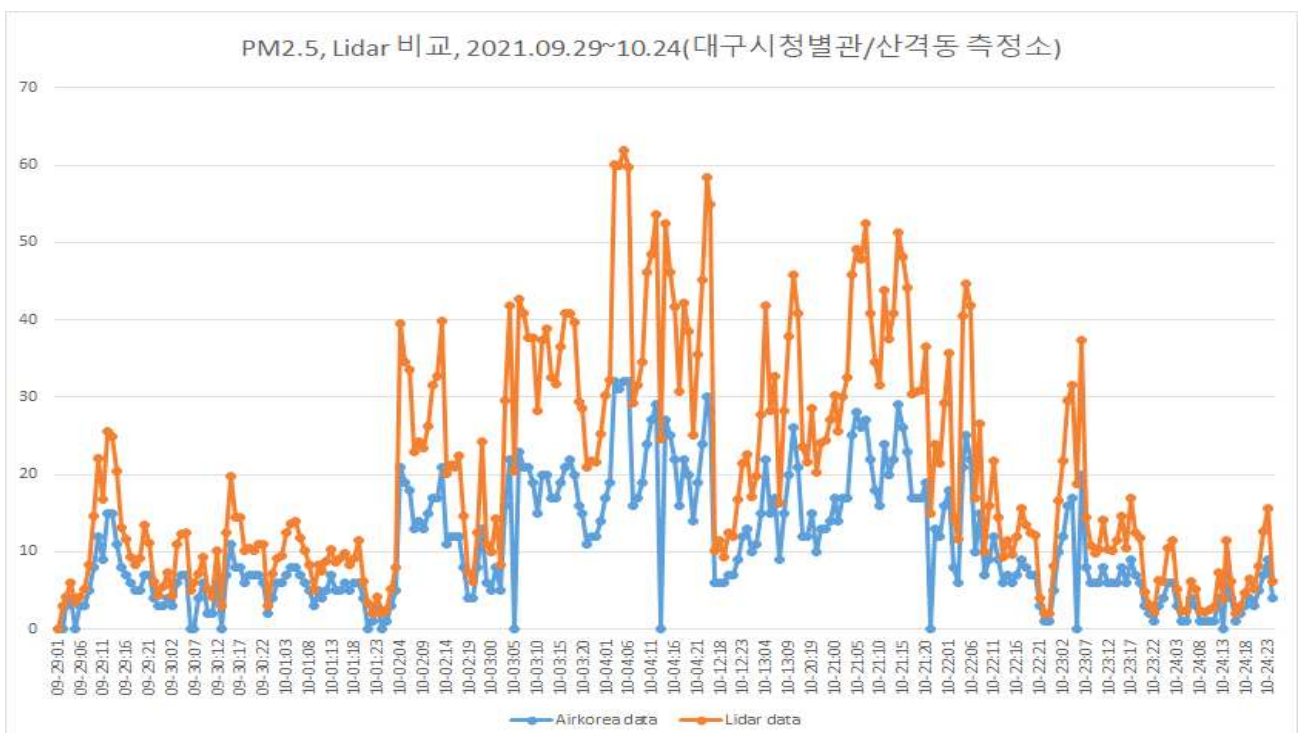
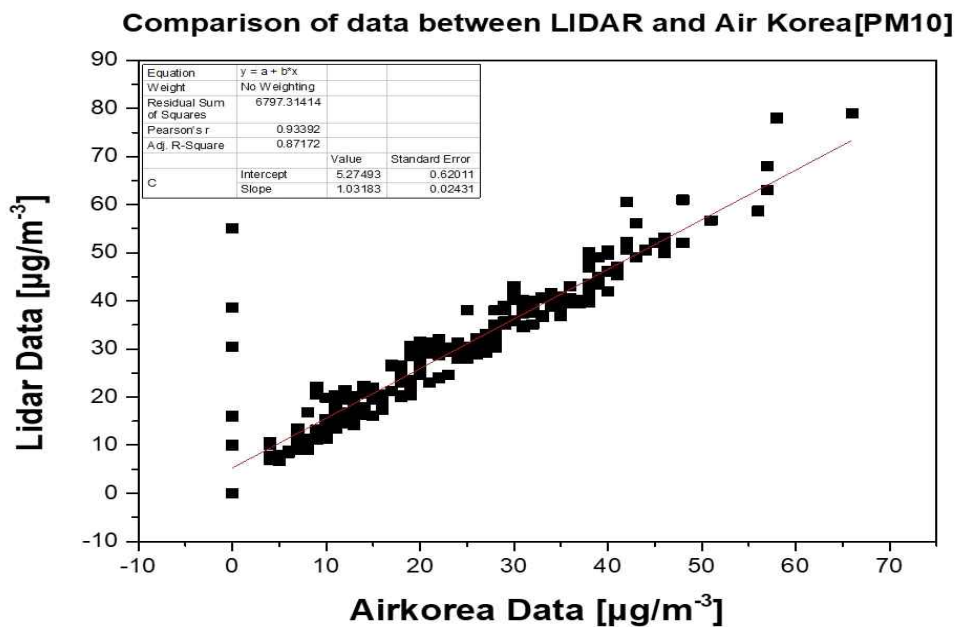
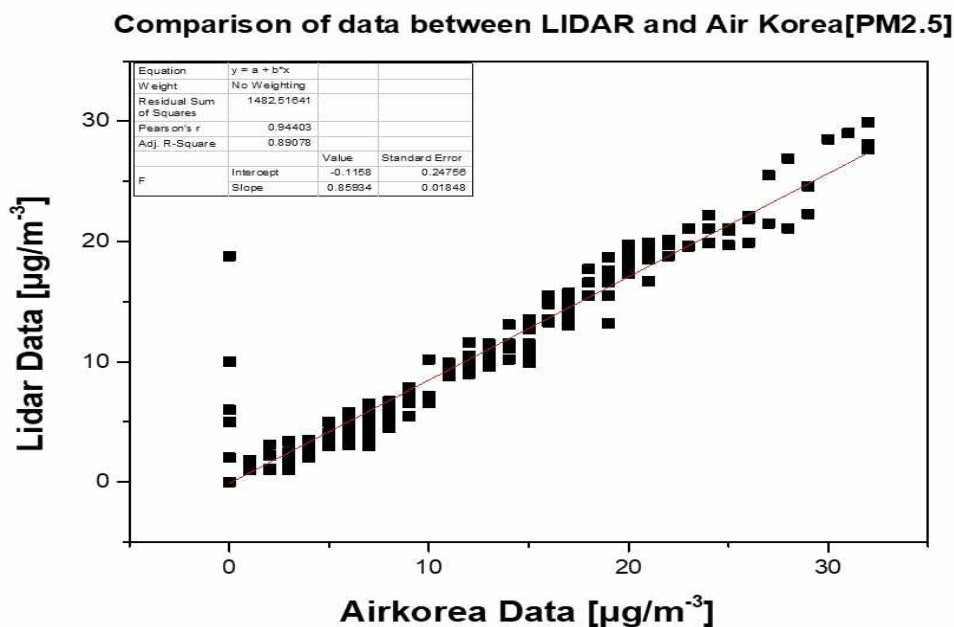


그림 5-70. 미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 초미세 먼지 데이터(PM 2.5) 측정 자료 비교 그래프

- 그림 5-71은 라이다와 국가 대기오염 측정망에서 측정한 미세먼지와 초미세 먼지 데이터를 비교한 데이터로, X 축은 국가 대기오염 측정망의 데이터이고, Y 축은 라이다의 데이터이다.
- 라이다로 획득한 미세먼지와 초미세먼지의 질량농도 값은 대기오염 측정망에서 측정한 미세먼지와 초미세먼지의 질량농도 값보다 높은 경향성을 확인할 수 있는데, 대기오염 측정망의 미세먼지 측정기는 대기 중의 미세먼지를 포집하여 수분을 제거하여 미세먼지의 농도를 측정하는데, 라이다는 수분을 제거하지 않고 대기 중에 존재하는 미세먼지에 의한 신호를 획득함으로써 높은 경향성이 나타나는 것으로 보인다.
- 두 데이터의 비교를 위하여 선형성을 나타내는 선형 추세선을 구해보면, 라이다로 측정한 미세먼지와 초미세 먼지의 데이터는 0.87, 0.89의 높은 상관관계를 보임을 알 수 있었고, 이를 통하여 라이다의 신뢰성을 검증하였다.



(a) 미세먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 미세먼지 데이터 비교_PM 10



(b) 미세먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 초미세 먼지 데이터 비교_PM 2.5
 그림 5-71. 미세먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 미세먼지 데이터 비교 결과

3) 사업화 준비

• 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 제품화(양산) 계획 수립

- 연구개발을 통하여 개발한 시제품의 제품화 계획을 4단계로 나누어 진행을 할 예정이다.

● (1단계) 제품 디자인

- 시스템디자인 전문기업, 산 · 학 · 전문가를 대상으로 제품디자인(UI, 인터페이스 등) 및 모델링 수행
- 컨설팅 전문가 및 시스템 개발 전문가를 중심으로 멘토링을 수행하여 개발제품에 대한 컨설팅 체계 구축 및 제품화 중장기 계획 수립

● (2단계) 시제품 제작 & 피드백

- 개발기술 대상 프로토 타입 제작, 공정향상 등 외형 제품을 위한 시스템구성 최적화 수행
- 지속적인 멘토링 및 피드백을 통해 시제품 대상 기능 및 성능 보완
- 외형디자인 최종 확정 및 고객중심 인터뷰 · 설문 수행

● (3단계) 시험인증 및 지식재산권 획득

- 개발기술 대상 핵심 기능 · 성능을 공인인증기관 대상 시험인증 수행
- 특허, S/W 등록, 논문 등 지식재산권 확보를 통한 시장 선점 및 제품 · 기업 홍보효과 기대

● (4단계) 제품화

- 개발기술의 최종 제품 구현 및 양산/제품 및 기업홍보 수행

표 5-7 미세 먼지 라이다 양산 계획

구분	구체적인 내용
형태/규모	- o 상용화 형태 : 측정 장비 및 모니터링 시스템 - o 수요처 : 건설업체, 환경부/국토부/기타 행정기관 - o 예상 단가 : 150,000,000 원 - o 개발 투입 인력 및 기간 - 개발 투입인력 : ~ 225 M/M - 개발 기간 : ~ 24 개월(2022년 ~ 2023년)
상용화 능력 및 자원 보유	- o 본사 연구소에서 자체 개발 및 상품화 - o 국내 라이다 관련 특허 10건 및 핵심기술이전 수혜 - o 광주고등광기술연구소/한국원자력연구원과의 관련 위탁연구 수행 경험 보유
상용화 계획 및 일정	- o 제품 개발 완료 및 현장 적용 : 2023년 - o 단가 절감 및 상품화 작업 완료 : 2024년 - o 판매 개시 : 2024년

• 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 전기안전 인증 방안 수립

- 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다는 전기용품안전관리법에 의거하여 전기를 사용하는 전자제품은 전

기 안전 시험, 전자파적합성(EMC) 시험, 신뢰성 시험의 진행이 필요하고, 3가지 시험을 모두 통과 하면 제품의 인증이 완료되어 인증서의 발급과 동시에 판매가 가능하다.

- 전기안전 시험, 전자파 적합성(EMC) 시험, 신뢰성 시험은 한국화학융합시험연구원(KTR), 한국산업 기술시험원(KTL), 한국기계전기전자시험연구원(KTC) 등 국내 공인인증기관과 (주)인터시스, 스탠다드 랍스, 디티앤씨 등 국가에서 인정하는 사설인증기관에서 시험의 진행이 가능하다.
- 전기 안전시험은 전기제품에서 발생하는 과열, 누설전류, 절연노화, 방사선방사, UV방사, 기계적 위 험 등으로 인하여 발생하는 화재위험, 감전위험, 상해위험, 에너지위험, 방사위험 및 기계적/ 화학 적 위험에 대한 안전성을 입증하는 시험으로 국제전기기술위원회 IEC의 기준에 충족하는지 확인을 하는 시험으로 그림 5-72와 같은 규격을 따른다.

주요규격

정보통신 제품 IEC 60950-1 IEC 62368-1 IEC 60950-22 IEC 62040-1 + 	오디오비디오 제품 IEC 60065 IEC 62368-1 + 	계측 제어기기 IEC 61010-1 IEC 61010-2-010 IEC 61010-2-020 IEC 61010-2-040 IEC 61010-2-051 IEC 61010-2-81 IEC 61010-2-101 + 
의료기기 IEC 60601-1 IEC 60601-1-3 IEC 60601-1-6 IEC 60601-1-8 IEC 60601-1-9 IEC 60601-1-10 IEC 60601-1-11 IEC 60601-2-2 IEC 60601-2-4 IEC 60601-2-5 IEC 60601-2-6 IEC 60601-2-7 IEC 60601-2-10 IEC 60601-2-18 IEC 60601-2-22 IEC 60601-2-24 IEC 60601-2-25 IEC 60601-2-27 IEC 60601-2-28 IEC 60601-2-30 IEC 60601-2-32 IEC 60601-2-34 IEC 60601-2-37 IEC 60601-2-43 IEC 60601-2-44 IEC 60601-2-49 IEC 60601-2-54 IEC 60601-2-62 IEC 60601-2-63 IEC 60601-2-65 IEC 60601-2-66 IEC 80601-2-30 ISO 80601-2-56 ISO 80601-2-61 IEC 62366 IEC 80601-2-60 + 	가전제품 IEC 60335-1 IEC 60335-2-2 IEC 60335-2-4 IEC 60335-2-5 IEC 60335-2-7 IEC 60335-2-11 IEC 60335-2-14 IEC 60335-2-15 IEC 60335-2-21 IEC 60335-2-24 IEC 60335-2-32 IEC 60335-2-34 IEC 60335-2-75 IEC 60335-2-80 IEC 60335-2-89 IEC 60335-2-97 IEC 60335-2-65 IEC 60335-2-58 IEC 60335-2-16 IEC 60335-2-40 IEC 60335-2-8 IEC 60335-2-23 + 	배터리 IEC 62133-2 IEC 60133 GB 31241-2014 IEC 61960-3 IEC 62281 UN Manual 38.3 UL 1642 UL 2054 UL 2056 JIS C 8712 + 

그림 5-72. 전기 안전시험 주요 규격 (출처. 디티앤씨)

- 전자파적합성(EMC) 시험은 전자기기를 작동시킬 때 발생하는 전자파가 다른기기에 영향을 미치는 여부(복사성 방사/Radiated Emissions, 전도성 방사/Conducted Emissions)와 다른 기기에서 발생 한 전자파에 영향을 받는 여부(복사성 내성/Radiated Susceptibility, 전도성 내성/Conducted Susceptibility)를 확인하는 시험으로 그림 5-73과 같은 규격을 따른다.

• 주요규격

Test Scope	
정보통신기술기기 (IT, AV 등)	EN 55032, EN 55035, EN 55022, EN 55024, CISPR 32, CISPR 35, CISPR 22, CISPR 24, KN 32, KN 35, VCCI, PART 15b, ICES-003, AS/NZS CISPR 22, ETSI EN 303 345, ETSI EN 303 340, ETSI EN 303 372-2
무선기기	EN 301 489 Series, KN 301 489 Series
산업용기기	IEC 61000-6-1,2,3,4 EN 61000-6-1,2,3,4 KN 61000-6-1,2,3,4 CISPR 11, KN 11, EN 55011
가전기기	EN 55014-1, EN 55014-2 CISPR 14-1, CISPR 14-2 KN 14-1, KN 14-2 AS/NZS CISPR 14-1
의료기기	IEC 60601-1-2, IEC 60601-1-4, ISO 80601-2-12 ISO 80601-2-55, KN 60601-1-2, EN 60601-1-2
기타기기	EMC 담당자 문의

그림 5-73. 전자파 적합성 시험의 주요 규격 (출처. 디티앤씨)

- 신뢰성 시험은 제품의 극한 환경에서도 성능을 보장하기 위한 시험으로 개발 · 제조과정에서 신뢰성 향상, 평가, 보증 받기위하여 실시하며, 그림 5-74와 같이 환경시험, 기구시험, 신뢰성 예측시험, 가속수명시험, 기타시험의 5가지 항목으로 나누어 평가한다.

제공 서비스

환경시험 제품의 운송 및 사용 환경에 따라 다양하고 상이한 기후 환경에 따른 스트레스를 받아 결국 고장의 원인이 되므로, 제품이 받는 스트레스를 미리 분석하고 시뮬레이션 하여 최적의 성능을 유지하기 위한 내구성을 평가하는 시험입니다. - 고온/저온시험 - 고도시험 - 온도충격(열충격) 시험 - 습도시험 - 염수분무시험 - IP(방진/방수) 시험 - 강우시험 - 복합부식시험 	기구시험 제품의 운송 및 사용 환경에서 발생될 수 있는 다양한 기계적 스트레스를 시뮬레이션 하여 문제를 사전에 제거하기 위한 시험입니다. - 진동시험(Sine, Random, SOR, ROR) - 충격시험(Halfsine, Sawtooth) - 낙하시험 - 가속도시험 - 내진시험 
신뢰성 예측 제품의 운용 및 사용조건을 고려하여 설계 및 개발 단계에서 신뢰성 달성을 위해 수행하며, 부품 및 어셈블리 등 하드웨어 신뢰도를 예측하고 평가하는 방법입니다. 	가속수명시험 제품 개발 주기의 급격한 단축에 비해 요구 수명은 증가하는 추세로 개발제품의 고장을 산출, 열화패턴 분석 등 개발품의 신뢰성 확보를 위한 수명평가 방법입니다. 
기타시험 - 모래 및 먼지 - 폭발환경 - 유체오염 - 성능평가시험 - 균류(곰팡이) - 결빙 - 일사시험 	

그림 5-74. 신뢰성 시험 항목 (출처. 디티앤씨)

- 개발이 완료된 라이다의 시제품은 3가지 시험 항목 중 5가지 품목의 인증시험이 필요하며, 품목에 따른 인증항목은 표 5-7과 같다.

표 5-8 미세 먼지 라이다 인증항목

인증시험 품목	인증 항목명	비고
Housing Classification	IP 65	외부케이스의 방수·방진평가
Laser Safety	IEC 60825-1	레이저 안정성평가
EMC Compliance	EN 61326	전자기파 적합성 평가
Electrical Safety	EN 60950	전기안전성 평가
Vibration	IEC 60068-2-6	외부 충격평가

- 인증시험을 진행하기 위하여 라이다 시제품의 기술문서를 준비하였으며, 기술문서의 종류는 아래와 같다.

1. 모양 및 구조 - 외형
2. 모양 및 구조 - 작용원리
3. 모양 및 구조 - 치수
4. 모양 및 구조 - 특성
5. 사용기한
6. 사용방법
7. 사용 시 주의사항
8. 성능 및 사용목적
9. 시험규격
10. 원재료
11. 저장방법

- 인증항목의 조사를 마친 후 인증시험의 순서를 알아보았다. 그림 5-75는 인증시험의 순서도로 시험의 기간은 부적합 판정 시 진행하는 디버깅 작업을 포함하여 평균 1년의 시간이 소요된다.

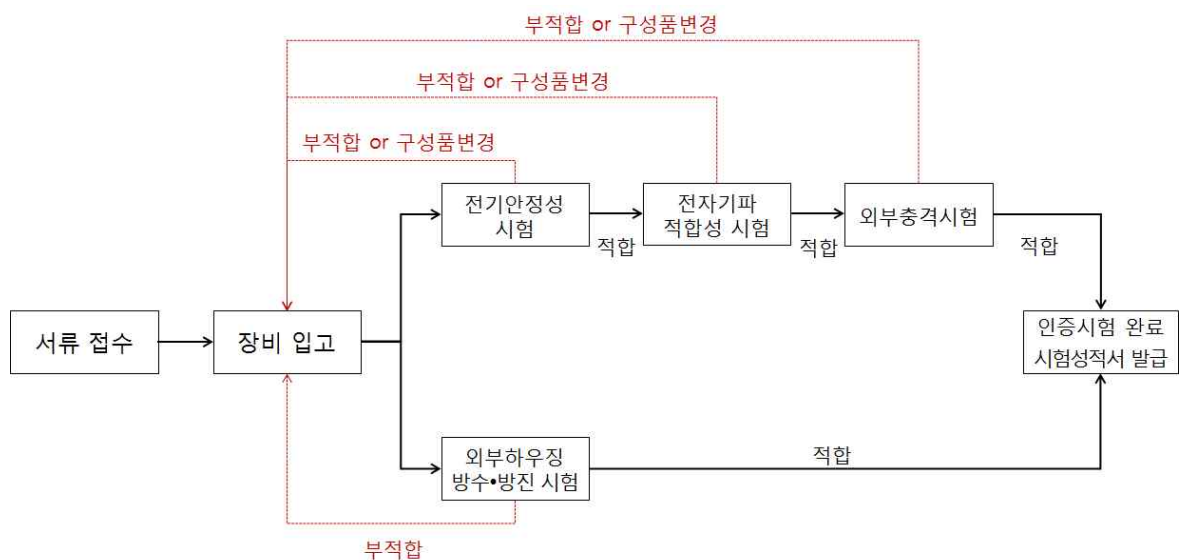


그림 5-75. 전기안전인증 진행 순서도

• 3 차원 미세 먼지 관측용 라이다 시제품 H/W 유지보수 방안 수립

- 라이다 시제품의 미세먼지 관측을 진행 중 장애가 발생할 경우를 대비하여 장애증상과 장애원인과 해결을 위한 점검사항을 정리하여 시제품 H/W의 유지보수 방안을 수립하였다.
- 표 5-9는 개발한 시제품을 운영하면서 발생한 증상과 장애 원인 그리고 해결을 위한 점검사항을 정리한 것으로 라이다의 운영 간에 다른 장애 발생 시 장애내역과 점검 사항은 지속적으로 업데이트 할 예정이다.

표 5-9 미세 먼지 라이다 시제품의 장애내역 및 점검사항

No	증상(장애내역)	장애 원인	점검 사항
1	레이저는 작동하지만 관측이 되지 않음.	1. 광 계수기	1. 광 계수기와 임베디드 시스템의 통신 여부 확인 2. 광 계수기의 전원 인가 여부 확인 3. Log 파일의 적용 여부 확인
		2. 전원공급기	1. DAQ 보드와 임베디드 시스템의 통신 여부 확인 2. DAQ 보드와 전원공급기의 연결 여부 확인 3. 전원공급기와 센서 연결 여부 확인
2	범위 관측이 되지 않음.	1. 스캐닝 시스템	1. 스캐닝 시스템의 전원 인가 여부 확인 2. 스캐닝 시스템과 임베디드 시스템의 통신 여부 확인 3. 스캐닝 시스템 드라이버의 배선 연결 상태 확인
3	관측이 한번만 진행됨.	1. 광 계수기	1. 광 계수기와 임베디드 시스템의 통신 여부 확인 2. 운영프로그램의 명령어 광 계수기에 입력 여부 확인 3. Log 파일에서 광 계수기 Setting 설정 확인
		2. 스캐닝 시스템	1. 스캐닝 시스템의 전원 인가 여부 확인 2. 스캐닝 시스템과 임베디드 시스템의 통신 여부 확인 3. 범위관측 설정여부 확인 4. 스캐닝 시스템 드라이버의 배선 연결 상태 확인
4	전원은 인가하였으나 라이다가 켜지지 않음	1. 전원부	1. 라이다 내부의 차단기의 상태 확인 2. 라이다의 비상스위치(Emergency Stop Switch) 확인
5	레이저가 나오지 않음	1. 레이저 컨트롤러	1. 레이저의 전원 인가여부 확인 2. 레이저와 임베디드 시스템의 통신 여부 확인 3. 레이저 컨트롤러의 비상스위치(Emergency Stop Switch) 확인

• 미세 먼지 관측용 라이다 홍보 방안 수립

● 제품 홍보물 제작

- 한국콘텐츠진흥원에서 지원하는 홍보물 제작 지원 사업 또는 각 지자체에서 지원하는 해외 마케팅 홍보물 제작 지원 사업을 활용한다.
- 사내 디자인 팀과 협업을 통하여 제품 홍보 브로슈어를 제작을 진행 중이며, ㈜솔탑 홈페이지에 미세먼지 관측용 라이다의 정보를 등록하였고, 이를 통하여 홍보를 진행하고 있다.



SRL-300 LIDAR
Atmospheric Remote Sensing System

DESCRIPTION

Lidar is the optical equivalent of radar(LIDAR is an acronym of Light Detection And Ranging) an active remote sensing technique.

SRL-300 LIDAR is based on the particles of elastic and inelastic (Raman) backscatter. A pulsed laser beam is emitted into the atmosphere. The light is scattered by particles or molecular in the atmosphere. Some of the light reaches the receiving telescope where it is amplified and digitized. Interactions with nitrogen, water vapor(Raman scattering) and atmospheric gases, aerosols(Mie/Rayleigh scattering) can provide a wealth of information about the atmosphere.

SRL-300 LIDAR offers a well-established method of determining the vertical profile of the aerosol extinction coefficient independently from the aerosol backscatter coefficient. SRL-300 LIDAR is suitable for multiple atmospheric monitoring applications, including advanced cloud analysis. We provide complete lidar solutions, including all hardware and software necessary to operate the system and analyses the data.

SRL-300 LIDAR			
Data acquisition System	1 Set	Transmitting System	1 Set
Data acquisition Software	1 Set	Receiving System	1 Set



SRL-300 LIDAR
Atmospheric Remote Sensing System

Parameters

- Cloud layer, Dust layer
- Depolarization ratio
- Lidar ratio
- Angstrom exponent
- Visibility
- Color ratio
- Aerosol type determination(dust, cloud, aerosol...)
- Aerosol microphysical properties(volume and surface concentration...)
- PBL(Planetary boundary layer)
- Backscatter and extinction coefficient
- Aerosol optical depth(AOD)
- Water vapor mixing ratio
- Cloud & Aerosol classification
- SSA(Single scattering albedo)

Specification

CONFIGURATION	SPECIFICATIONS
Transmitter	Laser source: Nd:YAG Wavelength: 355 nm, 532 nm Pulse duration: 6 ns Repetition rate: 10 Hz Beam divergence: < 0.5 mrad after 5X beam expansion
Receiver	Telescope: Cassegrain (300, 400 mm) Field of view: 0.5 ~ 2 mrad Focal length: 3,000 mm Measurement range: 20 km/15 km @ Elastic signal (night/day) 15 km/4 km @ Raman signal (night/day) Vertical range resolution: 7.5, 15, 30 m (variable)
Detector	Detection channels: P-S-polarization signals (355, 532 nm) I2 Raman signals (387, 607 nm) Water vapor Raman signals (408, 660 nm) Liquid water Raman signals (424 nm) Elastic channels: Photomultiplier tubes for 355, 532 (P-S) nm (quantum efficiency > 42% @ 400 nm) Raman channels: Fast photon counting system (350 MHz) for Raman channels (386, 408, 424 ~ 607 ~ 660 nm)
Software	Automatic instrument control Automatic data processing Real time visualization

Option

SOLETOP
Remote Sensing & Measurement
499, Eupok-m, Namsang-gil, Daeyoung, 34070, South Korea
T +82-42-3341213 F +82-42-867-7445
sales@soletop.com www.soletop.com

그림 5-76. 제작 중인 라이다 홍보 브로슈어

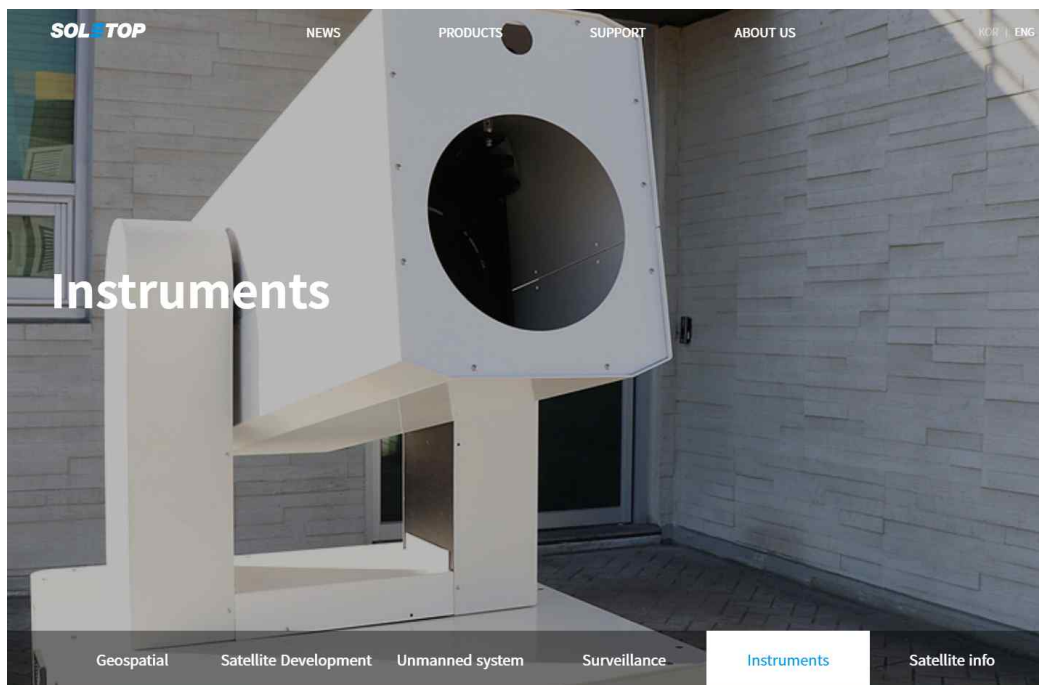


그림 5-77. (주)솔탑 홈페이지에 소개된 라이다 제품 홍보 사진

- 제품 홍보 방안 수립
- 국내 및 해외홍보 방안(기사, 보도자료, 기고문, 인터뷰 등)

(가) 학회 참가

- 당사는 국내 및 해외학회에 이미 지속적으로 참여하고 있으며, 제품을 활용한 결과물에 대해 발표 및 논문 게재를 통한 홍보를 수행을 중이다.
- 제품 개발 과정과 결과에 대한 논문을 실 수요국 학회에서 발표하여 잠재 고객 확보한다.

표 5-10. 제품 홍보를 위한 참가 학회 이력

구분	학회 명	참여 형태
국내	대기환경학회	발표/게재
	한국기상학회	
	한국광학회	
	대한원격탐사학회	
국외	ICCEST(International conference on earth & environmental science and technology	발표
	MetMed(International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean)	

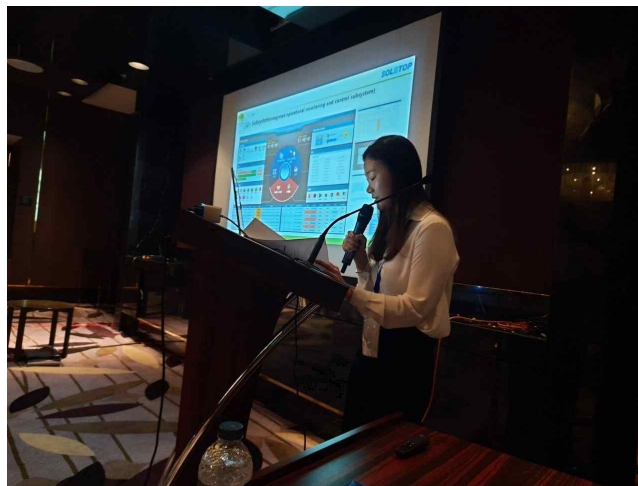


그림 5-78. 2019 방글라데시 원격탐사학회 논문 발표



그림 5-79. 2020 온라인 방글라데시 기상/기후 학회 논문 발표

(나) 언론사를 통한 홍보

- 당사 제품에 대한 취재 요청으로 다수의 방송 이력 보유하고 있으며 YTN, Aving.Network 등의 언론사 취재를 통해 제품의 컨셉, 목적, 주요 기능에 대해 홍보한다.
- 향후 기존 취재 경로를 이용하여 신제품의 효과성에 대해 제보하여 여러 고객층에 홍보한다.



그림 5-80. YTN 취재 방송 (2021.02.19.)

(다) SNS 및 홈페이지 홍보

- 당사에서는 국문/영문 홈페이지를 운영하여 잠재고객의 언어적 제약을 감소시켰다.
- 다수의 수요가 발생할 것으로 예상되는 중국 시장을 겨냥하여 중국어 버전을 추가할 예정이다.



그림 5-81. (주)솔탑 SNS 계정

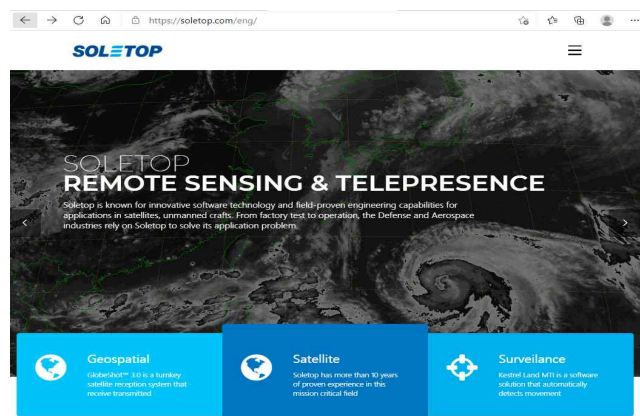
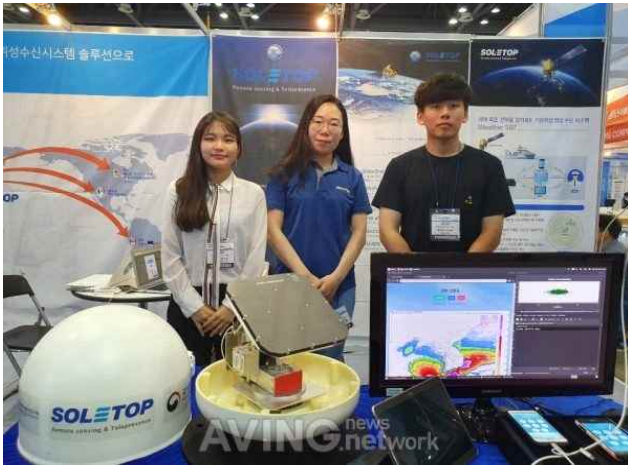


그림 5-82. (주)솔탑 영문 홈페이지

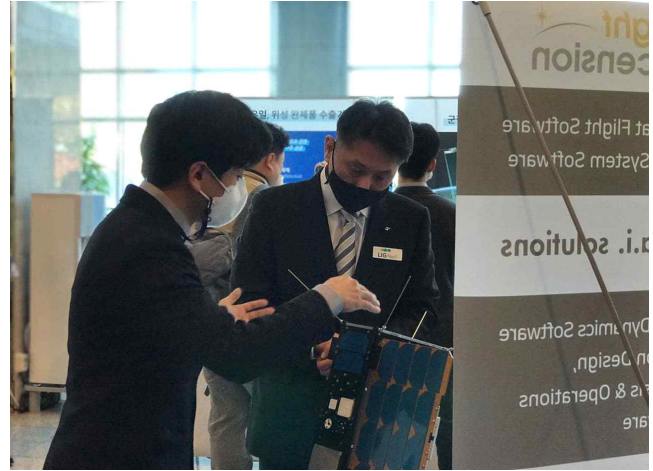
• 전시회 참가

(가) 기존 참가 경험

- 당사는 국내 및 해외 박람회에 지속적으로 참여하여 보유 제품을 홍보한 경험이 있다.
- 온라인/오프라인의 여러 경로를 이용하여 다수의 전시회 참여 경험 축적한 노하우로 보유 제품 홍보를 할 예정이다.



(a) 2019 기상기후 박람회



(b) 2020 한국우주과학회 기업 홍보 부스



(c) 박람회 참여 기업과 공동협력 미팅 수행



(d) 2020 공군 Aerospace 전시회

그림 5-83. 기존 참가 학회 현황

(나) 참가 예정 박람회

- 2022년에는 기상기후박람회 및 대한환경학회 기업 부스 전시회 등에 참여 예정이다.(※코로나 19 거리두기 단계에 따라 변경 가능)

• 기타

(가) 사용자 맞춤형 교육 제공

- 제품에 관심있는 예비 고객들을 대상으로 제품 Guideline 및 Tutorial을 제공하고 실제 구매로 이어질 수 있도록 사용자 교육 실시한다.
- 보유 제품에 대해 공공기관을 대상으로 교육을 실시한 경험적 노하우를 적용하고, 수요 및 시국에 따라 온라인/오프라인 교육 병행한다.
- 성장단계별 맞춤형 마케팅 전략
 - 국내외 전시회 참가를 통해 전문기관에 의뢰하여 마케팅 자료를 D/B화 및 인쇄물 간행 후 국내외 유관기관 배포와 정보공유를 통한 해당 품목의 구매를 원하는 바이어에 대한 직접 마케팅이 가능하다.
 - e-Business 활성화를 위한 전시회 관련 데이터의 웹사이트 게시 및 온라인 활용을 활성화 한다.



그림 5-84. 제품 교육 현장

- 잠재적 경제효과

- 전시회 참가를 통한 국내외 판로개척이 가능하다.
- 국제전시회 참가를 통하여 최신기술, 시장동향의 파악이 가능하다.
- 해외 바이어와의 교류를 통한 네트워크 구축이 가능하다.

- 제품의 판로 확보 계획

- 국내외 고객 시장을 세분화하여 시장 진입 전략 도출한다.
- 국내 고객의 경우, 공공기관 중심으로 수요가 발생되기 때문에 해당 기관의 비전 또는 목표에 부합하는 전략으로 접근한다.
- 국외 고객의 경우, 유사 기능을 탑재한 타사 제품군에 대한 기술 우월성과 차별화에 초점을 둔다.
- 국내외 잠재 고객의 경우 ISO 인증에 준하여 기술 및 규격에서 표준화된 제품임을 증명하여 시장 진입장벽을 최소화한다.

- (주)솔탑은 2006년 최초 획득 이래 ISO 9001 인증을 계속해서 갱신하고 있으며 최근 2018년 11월 22일 갱신

- ISO 9001 인증으로 세계 표준 품질 공정 체계와 규격을 따르고 있음을 증명

- 국외의 경우 기 구성된 현지 법인 및 현지 에이전시를 통해 아시아지역 및 북미지역 시장을 대상으로 적극적인 마케팅 수행을 계획하고 있다.

- 아시아/오세아니아 지역 : 태국, 필리핀, 스리랑카, 인도네시아 등 현지 에이전시를 통한 제품 홍보 및 프로모션을 통해 시장 진출 가능
- 국내외 유관 컨퍼런스·학회·박람회에 참석하여 부스 운영을 통한 적극적인 고객 접점 마련 방안 수립

• 시장진입 및 마케팅 계획

- 국내외 장비 실정에 따라, 저비용·고효율의 장비라는 강점을 판매 전략으로 시장진입을 계획하고 있다.
 - 오염도 높은 '우심지역'에 위치한 건설업체를 테스트베드로 선정하여 장비 신뢰성 확보
 - 경쟁사 제품(국내/외)과 연구/개발 관측 장비와의 현장에서 직접적인 성능 비교 평가 시행
 - 국내외 관련 인증 체계 확보
- “미세 먼지 측정 장비 도입의 필수화”법 제정이 가능할 수 있도록 미세 먼지 유관기관(환경부 · 국토부 · 기타 산하 기관)에게 구체적인 의사결정 자료를 제공함으로써, 진출 시장을 계획하고 있다.
- 시제품 및 홍보자료를 제작하여, 환경부 · 국토부 · 기타 산하 행정기관을 방문하여 장비의 필요성 제시 및 적극적인 홍보를 수행을 계획하고 있다.
 - 국내 · 외 유관 컨퍼런스·학회·박람회에 참석하여 부스 운영을 통한 적극적인 고객 접점 마련 방안 수립
- 단기/중기/장기 마케팅 전략을 수립하여 체계적인 마케팅 활동의 수행을 계획하고 있다.

표 5-11 미세 먼지 라이다 제품 마케팅 전략

마케팅 전략	내용
단기 마케팅 전략	• 제품의 경쟁력 강화/국내 홍보 마케팅 강화, 다양한 라이선스 체계 수립 • 시제품 테스트를 통해 현장에 최적화된 장비로 개선 • 고객군 별(일반기업, 정부공공 등) 차별화 영업 전략 수립
중기 마케팅 전략	• 인지도 향상을 위한 국내/국제 세미나 및 리서치 기관을 통한 홍보 • 제품 기반 응용 솔루션 개발을 통한 판매, 제품 기반 응용 서비스 기회 창출
장기 마케팅 전략	• 글로벌 경쟁 우위 기능 확보, 아웃소싱을 통한 원가 절감 • 해외 판매 확대를 위한 글로벌 서비스 지원 역량 확보

4) 데이터 검증 프로세서 개발

- 주변 미세 먼지 관측소의 예측 및 관측 데이터와 연관성 분석
 - 현업에서 사용하는 장치의 경우, 대부분 포집식 측정 방법으로 대기 중의 공기가 필터를 통과할 때, 필터에 의하여 걸러진 미세 먼지의 중량을 측정하는 방법을 사용하고 있다.
 - 현업에서 사용하는 미세 먼지 측정기를 이용하여 미세 먼지의 분포를 측정하기 위해선 그물망과 같은 구조로 다수의 측정기를 설치하여야 미세 먼지의 양 및 분포를 측정할 수 있다.
 - 국가 대기오염 측정망의 경우, 측정기의 설치 단가가 비싸며 측정 부지 등의 선정이 어려워 그물망과 같은 구조로 설치가 불가능하여 측정소 근처의 미세 먼지의 양만을 1시간 단위로 시민들에게 제공하고 있다.
 - 표 5-12는 국가 대기오염 관측망에서 측정한 대기 오염정보를 한국환경공단에서 관리하는 에어코리아에서 제공하는 측정 항목을 나타낸 것이다. 환경 오염물질의 대표적인 질소산화물(NO2), 일산화탄소(Co), 오존(O3), 미세 먼지(PM 10, PM 2.5) 등을 매 시간마다 제공하고 있음을 알 수 있다.
 - 에어코리아의 경우, 누구나 국가 대기오염 관측망에서 측정한 대기오염 정보를 사용 가능하도록 데이터베이스를 구성하고, 오픈형 API(Application Programming Interface :응용 프로그램 프로그래밍 인터페이스)를 제공하고 있다.

표 5- 12 에어코리아에서 제공하는 국가 대기오염 측정망의 오염 물질 측정항목

분류	설치 목적	측정 항목
도시대기측정망	도심(거주)지역의 평균대기질 농도 측정	SO ₂ ,CO, NO ₂ ,O ₃ ,PM 10, PM 2.5 등
국가배경농도측정망	국가의 배경농도를 파악하고 외국으로의 오염물질 유입, 유출 상태 파악	SO ₂ ,CO, NO ₂ ,O ₃ ,PM 10, PM 2.5 등
교외대기측정망	도시를 둘러싼 교외지역의 배경농도측정	SO ₂ ,CO, NO ₂ ,O ₃ ,PM 10, PM 2.5 등
도로변대기측정망	자동차 통행량과 유동인구가 많은 도로변 대기농도 측정	SO ₂ ,CO, NO ₂ ,O ₃ ,PM 10, PM 2.5, Pb, HC, 교통량 등
항만측정망	항만지역 등의 대기 질 현황 및 변화에 대한 실태조사	SO ₂ ,CO, NO ₂ ,O ₃ ,PM 10, PM 2.5 등

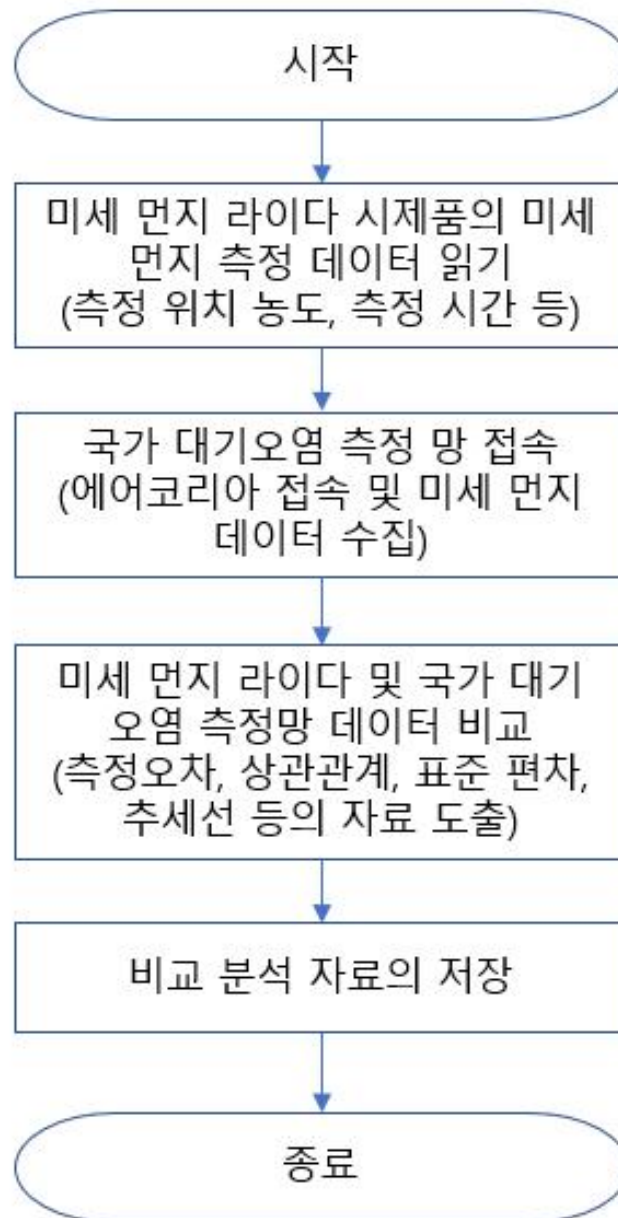


그림 5-85. 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 데이터 분석 알고리즘

- 미세 먼지 라이다 장치를 이용한 미세 먼지 측정 방법의 경우, 미세 먼지의 양 및 분포를 측정하기 때문에 측정된 데이터의 비교 분석이 어려운 특징을 갖고 있다.
- 따라서 미세 먼지 라이다 장치를 이용하여 측정한 미세 먼지 측정 데이터의 검증 및 분석을 위하여 국가 대기오염 관측망의 자료와 비교, 검증할 수 있는 방법을 고안하였다.
- 미세 먼지 라이다 장치를 이용하여 미세 먼지의 양 및 분포를 계측할 때, 국가 대기 관측망에서 측정한 미세 먼지의 양과 비교하여 미세 먼지 라이다 장치의 측정 자료의 신뢰성을 확보하고 이를 바탕으로 미세 먼지 라이다 장치의 교정 자료로 활용하는 방법이다.
- 그림 5-85는 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 데이터 분석하는 알고리즘을 나타낸 것이다. 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 국가 대기 측정망의 대기 오염물질 측정소가 있는 지역에 설치하여 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 데이터와 비교 분석을 실시하는 방법이다.
- 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 미세 먼지를 측정할 때, 미세 먼지의 측정 시간, 위치 정보를 측정 데이터와 같이 저장한 후, 미세 먼지 라이다 시제품이 설치된 위치의 국가 대기 오염 측정망의 측정소 데이터와 비교할 수 있도록 하였다.
- 이를 통하여 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 측정한 PM 10과 PM 2.5의 값을 국가 대기오염 측정망의 측정 자료와 비교하여 상관관계를 분석할 수 있도록 하였다.
- 두 측정 데이터의 상관관계 분석을 통하여 두 데이터의 상관관계를 나타내는 결정계수(R2), 두 데이터에 의한 추세선(Trend line), 측정 오차(Measuring error), 표준 편차(standard deviation) 등을 산출할 수 있도록 하였다.
- 산출된 결정 계수를 이용하여 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 데이터의 신뢰성 검증을 위한 자료로 사용할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기 오염 측정망의 측정 자료간의 상관관계에 의한 추세선을 획득하여, 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 오차, 표준 편차, 측정 불확도(Measuring uncertainty)를 획득할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기 오염 측정망의 측정 자료를 비교하여 획득한 추세선의 값을 이용하여 향후, 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 오차를 보정할 수 있는 보정 계수 등을 산출할 수 있는 자료로 활용 할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-86은 미세 먼지 라이다 시제품의 측정 데이터 분석을 위한 알고리즘이 적용된 분석 프로그램의 인터페이스를 나타낸 것으로 알고리즘을 구현을 위하여 프로그램 개발 툴인 LabVIEW를 이용하였다.
- 개발된 분석 프로그램은 미세 먼지 라이다 시제품을 이용하여 측정한 데이터와 국가 대기오염 측정망의 데이터를 비교하기 위하여 미세 먼지 라이다의 설치 위치 정보인 위도와 경도 정보를 바탕으로 국가 대기오염 측정망의 가장 인접한 측정소를 자동으로 선정하여 측정데이터를 가져올 수 있도록 하였다.
- 국가 대기오염 측정망의 측정소 데이터를 가져오기 위하여 한국환경공단에서 관리하는 에어코리아의 데이터베이스에 TCP/IP 통신을 이용하여 접속하여 데이터를 수집할 수 있도록 하였다.
- 미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 측정 자료를 분석할 때, PM 10과 PM 2.5를 나눠 분석할 수 있도록 하였으며, 시간에 따른 미세 먼지 라이다를 통하여 획득한 PM 10과 PM 2.5의 자료를 동시에 표출할 수 있도록 하였다.
- 또한 두 자료의 분석을 통하여 두 장치간의 상관관계를 나타내는 결정 계수와, 추세선(기울기와, 절편)을 도출할 수 있도록 하였으며, 이를 이용하여 미세 먼지 라이다 시스템의 측정 오차, 표준 편차 등을 산출할 수 있도록 하였다.
- 산출된 자료의 경우, 엑셀 파일 형태로 저장이 가능하며 장기 측정 자료를 이용하여 향후, 미세 먼지 라이다 시제품의 교정을 위한 보정 계수 산출 자료로 활용 할 수 있도록 하였다.
- 그림 5-86에 나타난 자료는 미세 먼지 라이다 시제품을 대구 스마트시티와 협의하여 대구 시청 별관에 설치하여 2021년 9월 29일 오전 01시에서 2021년 10월 24일 오후 11까지 라이다로 관측한 미세먼지와 초미세먼지의 농도 값과 산격동 측정소의 미세먼지와 초미세먼지의 농도 값을 비교한 것으로, 라이다로 획득한 데이터는 0.87과 0.89의 결정계수를 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 라이다로 획득한 데이터의 높은 신뢰성을 확인할 수 있었다.

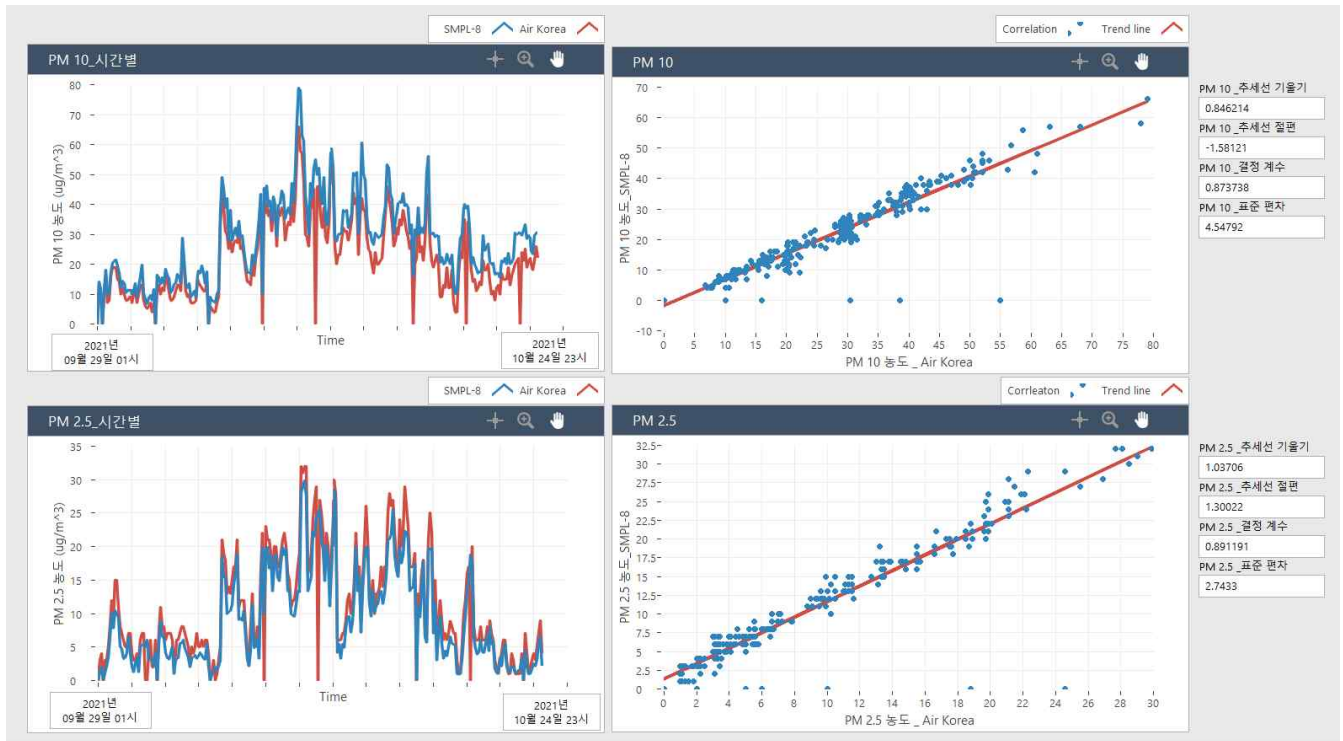


그림 5-86. 미세 먼지 라이다 시제품과 국가 대기오염 측정망의 측정 자료 분석 프로그램

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시작품 개발

- 송 · 수신 광학계의 이론적 분석 결과 확인
- 광학 설계를 통한 Ray-tracing modeling의 성능 확인
- 광자계수기, 광센서의 성능 개선여부 확인
- 미세먼지에 의한 광학적 특성(후방산란계수, 소산계수) 산출 가능성 확인
- 실시간 데이터 처리 가능 여부 확인
- 시작품 성능 확인을 통한 라이다를 이용한 미세먼지 관측 가능성 확인

○ 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시제품 개발

- 송 · 수신 광학계의 광 설계 성능 확인
- 두 파장을 이용한 미세먼지, 초 미세먼지 관측 여부 확인
- 신호처리 알고리즘의 결과 확인
- 송 · 수신 광학계와 스캔시스템의 연동 여부 확인
- 미세먼지에 의한 광학적 특성(후방 산란계수, 소산계수) 산출 여부 확인
- 거리별 미세먼지 질량 농도 산출 여부 확인
- 제어 및 통합 운영 프로그램의 성능 확인
- 시제품 성능 확인을 통한 3 차원 미세먼지 공간분포 및 질량농도 관측 여부 확인

○ 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시제품 개발

- H/W 소형화 가능성 확인
 - H/W 최적화 가능성 확인
 - 데이터 표출 시각화 가능성 확인
 - 장기간 관측을 통한 시제품의 내구성 확인
 - 국가 대기오염 측정망과 동시관측을 통한 시제품의 성능 확인
 - 전문가 평가를 통한 시제품 최종 목표달성 확인
-

(2) 정량적 연구개발성과

○ 3 차원 미세먼지 관측용 라이다 시작품 개발

- 최대 측정범위(거리) : 3 km 이내
- 거리분해능 : 37.5 m 이하
- 소프트웨어 등록 : 3건
- 신규인력채용 : 1명

○ 3차원 미세먼지 관측용 라이다 시제품 개발

- 최대 측정범위(거리) : 5 km 이내
- 거리분해능 : 7.5 m
- 최대스캔속도 : 20deg/sec
- 관측주기 : 120sec
- 측정 정밀도(관측기기와의 상관관계) : 미세먼지 - 0.81, 초미세먼지 - 0.75
- 국내 학술회의 발표 : 1건
- 특허출원 : 1건
- 소프트웨어 등록 : 2건
- 신규인력 채용 : 1명

○ 3차원 미세먼지 관측용 라이다 시제품 개발

- 최대 측정범위(거리) : 5 km 이상
 - 거리분해능 : 7.5 m
 - 최대스캔속도 : 20deg/sec
 - 관측주기 : 60sec
 - 측정 정밀도(관측기기와의 상관관계) : 미세먼지 - 0.87, 초미세먼지 - 0.89
 - 국내 학술대회 발표 : 1건
 - 특허출원 : 1건
 - 소프트웨어 등록 : 3건
 - 신규인력 채용 : 2명
 - 라이다 시제품 : 1건
-

(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

☐ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2020년도 한국광학회 하계 학술대회	윤문상, 박선호	20.07.15	부산 BEXCO	대한민국	대한민국
2	2021년도 한국정밀공학회 추계 학술대회	윤문상, 전봉기, 최인영, 정재영, 전영찬	21.11.2	부산 BEXCO	대한민국	대한민국

☐ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

☐ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호
1	2019	1차년도 연차실적 계획서	2019. 12. 17	
2	2020	2차년도 연차실적 계획서	2020. 11. 24	

☐ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

☐ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	미세 먼지 질량농도 측정을 위한 다 파장 라이다 장치	대한민국	(주)솔탑	20.12.30.	10-2020- 0188011				100 %	활용
2	특허	광 정렬 틀어짐 현상 개선을 위한 자동 정렬 장치	대한민국	(주)솔탑	21.12.28.	10-2021- 0189563				100 %	활용

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
	√									√	

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	클렛 알고리즘을 이용한 라이다 후방산란 소광계수 산출 프로그램	19.10.28	(주)솔탑	19.10.28	C-2019-03141 2	(주)솔탑	100 %
2	라이다 신호에서의 거리 보정된 후방 산란 신호 분석 프로그램	19.10.28	(주)솔탑	19.10.28	C-2019-03256 2	(주)솔탑	100 %
3	정밀 센서 데이터 다중 품질관리 프로그램	19.09.30	(재)한국품질재 단	19.09.30	C-2019032588	(재)한국품질재 단	100 %
4	라이다 신호를 측정하기 위한 ADC 제어 프로그램	20.10.22	(주)솔탑	20.10.22	C-2020-03688 5	(주)솔탑	100 %
5	미세 먼지 라이다 신호 분석 프로그램	20.10.22	(주)솔탑	20.10.22	C-2020036884	(주)솔탑	100 %
6	라이다 시스템의 스캐닝 모터 제어 프로그램	21.08.17	(주)솔탑	21.11.01	C-2021-04388 6	(주)솔탑	100 %
7	라이다 시스템의 광학계 정렬 원격 제어 프로그램	21.09.01	(주)솔탑	21.11.01	C-2021-04388 7	(주)솔탑	100 %
8	라이다 시스템의 로그(Log) 파일 저장 시스템	21.08.17	(주)솔탑	21.12.31	C-2021-06043 6-2	(주)솔탑	100 %

□ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

□ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

□ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

○ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	미세 먼지 관측 라이다	21. 07. 01	(주)솔탑	(주)솔탑	미세 먼지 관측	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31		

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

□ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)		2년		
	소요예산(천원)		3,000,000		
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
			0	6,000,000	14,500,000
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내	0	45	75
		국외	0	3	4
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획		미세 먼지 관측용 라이다의 사업화 외에는 타 모델 계획은 없음.		
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
		0			
	수 출	0			

☐ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

☐ 고용 효과

구분			고용 효과(명)	
고용 효과	개발 전	연구인력		
		생산인력		
	개발 후	연구인력		
		생산인력		

☐ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

☐ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

☐ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

☐ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)
1	(주)솔탑	2019. 04. 19	2019. 04. 19 ~ 2021. 12. 31	1	1
2	(주)솔탑	2020. 01. 01	2020. 01. 01 ~ 2021. 11. 30	1	1
3	(주)솔탑	2021. 01. 01	2021. 01. 01 ~ 2021. 05. 31	1	1
4	(주)솔탑	2021. 06. 01	2021. 06. 01 ~ 2021. 12. 31	1	1

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	

□ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

○ 소프트웨어 등록 : 3건

– 3차년도에 소프트웨어를 3건 등록 진행.

1. 라이다 시스템의 스캐닝 모터 제어 프로그램, C-2021-043886
2. 라이다 시스템의 광학계 정렬 원격 제어 프로그램, C-2021-043887
3. 라이다 시스템의 로그(Log)파일 저장 시스템, C-2021-060436-2

2) 목표 달성 수준

연구개발목표	달성내용	달성도(%)
○ 오염 배출원 주변 미세 먼지 3차원 공간분포 및 질량농도 관측용 H/W 개발 – 측정 거리 : 5 km 이상 – 측정자료 : 미세 먼지 종류 구분 (편광소멸도(Depolarization Ratio)), 3차원 미세 먼지 공간분포, 미세 먼지 질량 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 거리별 미세 먼지 산란계수 – 거리분해능 : 7.5 m 이하 – 관측 주기 : 120초 이내 – 최대 스캔 속도 : 20°/sec	○ 오염 배출원 주변 미세 먼지 3차원 공간분포 및 질량농도 관측용 라이다 시제품 H/W개발 – 측정 거리 : 5 km 이상 – 측정 자료 : 미세 먼지 종류구분 3차원 미세 먼지 공간분포 미세 먼지 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 거리별 미세 먼지 산란계수	100 %
○ 오염 배출원 주변 미세 먼지 3차원 공간분포 및 질량농도 관측용 S/W 개발 – 거리 보정된 후방산란(Backscatter) 프로파일 – 거리별 미세 먼지 종류 산출(편광소멸도 프로파일) – 거리별 미세 먼지 질량농도 산출	○ 오염 배출원 주변 미세 먼지 3차원 공간분포 및 질량농도 관측용 라이다 시제품 S/W 개발 – 거리 보정된 후방산란 프로파일 – 거리별 미세 먼지 종류 산출 – 거리별 미세 먼지 질량농도 산출 – 미세 먼지 농도 표출 시각화	100 %
	○ 오염 배출원 주변 미세 먼지 3차원 공간분포 및 질량농도 관측용 라이다 전문가 평가	100%

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○ 비 SCI 논문 1건

- 3차년도 목표내용 중 비SCI 논문 1편은 논문 투고결과 수정본 제출요청을 받아 논문의 보완을 진행 중으로, 보완을 진행하여 논문 등록이 되도록 진행할 예정임.

저자	논문번호	논문제목	저자	제출일자	선정일자	상태	조치
1	2021-42	[일반-연구논문] 미세먼지 공간분포 및 질량농도 관측용 라이다 시스템 개발	윤문상 ((주)솔탑)	2021-12-29	2021-12-29	최종판정완료/수정본 제출요청	열람

제목(국문) 미세먼지 공간분포 및 질량농도 관측용 라이다 시스템 개발

제목(영문) Development of a lidar system for observing the spatial distribution and mass concentration of fine dust

공동저자 윤문상((주)솔탑), 최민영((주)솔탑), 전봉기((주)솔탑), 정재영((주)솔탑), 전영찬((주)솔탑)

논문분류 연구논문

원고형식 정규논문(일반)

전공분야 광기술

OCIS codes
1. 010.0280 Remote sensing and sensors
2. 010.1100 Aerosol detection
3. 010.1350 Backscattering

논문파일
Manuscript: 2021-42_1_1.pdf (1.3 MB)
저자첨점표: 2021-42_1_2.pdf (497 KB)

수정요청/수정제출 2022-03-03 2022-03-06

접수확인 2022-01-06

심사 (1자)

판정 S 2022-03-07 E 2022-03-07 재심 2022-03-07

답변서 심사의견 보기/답변 달기 S 2022-03-07

저자포기 포기메일 작성

삭제/종결

닫기

그림 5-87. 심사 진행 중인 논문

○ 특허 등록 1건

- 특허 등록은 출원한 특허의 심사를 통하여 등록을 진행해야 함.
- 2차년도(2020년)에 출원한 특허의 심사가 2022년 3월 기준으로 74번째로 대기 중으로 등록을 진행 할 예정임.

출원일자	2020-12-30	출원번호	10-2020-0188011
귀하의 출원은 국제특허분류 G01S 7/481(으)로 분류되어 담당 심사관과 또는 담당 심사관이 아래와 같이 지정되었으며, 심사 착수는 심사대기 순번에 따라 검토됩니다.			
년월	심사대기 순번		
2022년 02월	자율주행심사팀 이세경 심사관 042-481-8740 심사대기 순번 : 688건 중 74번 심사관지정		
2022년 01월	자율주행심사팀 이세경 심사관 042-481-8740 심사대기 순번 : 642건 중 131번 심사관지정		
2021년 12월	자율주행심사팀 이세경 심사관 042-481-8740 심사대기 순번 : 634건 중 144번 심사관지정		

그림 5-88. 출원한 특허 심사 중

2) 자체 보완활동

- 비 SCI 논문 1건
 - 논문 투고 결과 수정본 제출 요청을 받음.
 - 논문의 보완을 진행하여 논문 등록을 완료 할 예정.
 - 특허 등록 1건
 - 2차년도(2020년)에 출원한 특허의 심사가 완료되면 특허의 등록을 진행 할 예정.
 - 미세먼지 관측용 라이다 제어프로그램 GS 인증
 - 본 연구를 통하여 개발한 제어프로그램의 GS 인증 진행 예정.
 - 소프트웨어 등록 3건
 - 3차년도에 소프트웨어 3건을 추가로 등록 진행.
-

3) 연구개발 과정의 성실성

- 본 연구를 진행하면서 비 SCI 논문 1건, 특허 등록 1건을 제외한 모든 목표는 달성을 하였음.
 - 코로나로 인하여 2차년도와 3차년도의 연구비 변경, 부품수급이 지연되어 제품의 개발의 지연이 발생 하였지만 계획하였던 시제품 H/W의 보완 및 소형화, 시제품의 S/W 최적화의 진행을 완료.
 - 최적화가 완료된 시제품을 대구스마트시티와 협업을 통해 대구시청별관에 라이다를 설치하여 장기간 테스트를 통하여 라이다의 성능검증을 완료하였으며, 대구시청별관에 설치되어 운영 중인 산격동 국가 대기오염 측정망의 데이터와 비교 분석하여 라이다의 신뢰성을 검증.
 - 전문가 평가를 통하여 본 연구과제의 최종목표를 달성함을 확인.
 - 3차년도에 계획하지 않은 소프트웨어의 등록을 3건 추가 등록을 진행.
 - 비 SCI 논문 1건, 특허 등록 1건은 연구과제 종료 이후에도 심사가 완료되면 등록을 완료 할 예정.
-

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 라이다 장치의 측정 데이터의 안전성 확보
 - 레이저 전송 거울에 Actuator를 설치하여 원격으로 라이다 장치의 송 · 수신 광학계의 광축 정렬 방법 개발.
 - 단체법(Simplex method)를 적용한 라이다 장치의 송 · 수신 광학계의 광축 자동 정렬 기법의 개발 및 실효성 확인
 - 스캐닝 기법의 적용
 - Azimuth 와 Elevation 의 조절이 가능한 2축 스캐닝 장치를 결합한 라이다 시스템 개발로 대기 공간상의 미세 먼지 분포와 양을 측정할 수 있는 시제품 개발
 - 기상 분야에 활용되는 라이다 장치에 스캐닝 기법을 결합한 스캐닝 라이다 장치 개발로 인하여 대기 공간상의 구름의 높이를 측정하는 운고계(Ceilometer) 등에 활용할 수 있는 기반 기술 개발.
-

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 개발 결과의 활용 방안

- 개발된 미세 먼지 관측 라이더는 3 차원 공간 분포 변화를 실시간 측정 가능하고 더불어 거리별 미세 먼지 질량농도 변화를 입체적으로 정확히 예측 가능하여 최근 사회적으로 가장 큰 이슈인 미세 먼지에 대한 연구에 기초자료로 활용될 데이터 제공
- 개발된 미세 먼지 관측 라이더는 미세 먼지의 거리별 체계화된 고해상도 데이터 제공을 통해 미세 먼지 원인분석 및 대응방안 마련, 대국민 예보 서비스 개선을 위하여 정부, 지자체, 관련 연구기관에서 기초 연구 자료로 활용 가능
- 미세 먼지 핫스팟 지역에 대한 조기경보, 신속대응, 저감조치가 선택적으로 가능하여 경제적 효율성 증대
- 미세 먼지 발생원의 신속한 추적이 가능
 - 반경 5 km내에 존재하는 오염 배출원의 실시간 모니터링 감시 가능
 - 차량에 탑재하여 배출원 주변으로 이동하여 미세먼지 모니터링 가능
- 고해상도 종류별 미세 먼지 질량 농도 산출로 조밀하지 못한 기존 대기오염측정망에서 산출되는 미세 먼지 농도 자료 보완 가능
 - 현재 국가 대기오염 측정망에서 운용하는 미세먼지 측정기(베타선법 측정기)는 1 km 간격으로 설치할 경우, 미세 먼지 및 초미세 먼지의 측정 거리 분해능은 1 Km이지만, 본 연구를 통하여 개발한 라이더는 측정 거리분해능이 7.5 m로 미세먼지 측정기에 비하여 130배 이상이 향상됨. 따라서 조밀한 간격으로 미세 먼지 및 초미세 먼지의 자료 제공이 가능함.
- 지점별로 산재해 있는 점원 정보가 아닌 광범위한 지역에서의 안정적인 초미세 먼지 매핑 정보의 구축

○ 예상 활용 분야

- 개발된 3 차원 미세 먼지 관측용 라이더를 이용한 종류별 미세 먼지 농도 자료는 스마트 시티뿐만 아니라 모든 시·군에서 고해상도 미세 먼지 농도 자료 산출을 위한 원격탐사 장비로 활용 가능
- 3 차원 공간 분포로 측정이 가능하므로 미세 먼지 원인 물질 파악을 위한 자료 산출에 활용 가능
- 1 km × 1 km 픽셀의 정보로 미세먼지의 정보를 산출할 경우 라이더는 미세먼지 관측기보다 예산의 절감이 가능하고 거리 분해능이 향상된 미세먼지 및 초미세 먼지의 측정 자료 제공이 가능함.
- 대전광역시 격자화
 - 대전광역시 정보: 면적-539.8km², 자치구- 5개, 행정동- 79개



그림 5-87. 대전시 대기오염측정소 현황(좌), 대기질 관측장비(우)

- 대전광역시는 행정동에 비하여 대기오염 측정소의 수가 적고, 대전 1, 2산업단지와 대덕산업단지 그리고 대덕 테크노 밸리 등 제조업 사업장이 집중 분포되어 오염 배출원과 생활권이 근거리에 위치하고 있기 때문에 정확하고 신속한 미세먼지의 수치제공이 필요함.
- 1 km × 1 km 픽셀의 정보를 미세먼지 측정기로 미세먼지 정보를 산출한다고 가정했을 때, 대전광역시의 단순 격자화하면, 미세먼지 측정기는 최소 540개의 설치가 필요하며, 장비 구매 가격만 대략 135억원의 비용이 예상되며, 설치와 운용비용을 고려하면 150억원 이상의 예산 소요가 예상됨.
- 본 사업을 통해 개발한 라이다는 10 km 반경으로 관측이 가능하기 때문에 약 25대의 설치가 필요하며, 장비 구매 가격만 대략 100억원의 비용이 예상되며, 설치와 운용비용을 고려하면 110억원의 예산 소요가 예상됨.
- 따라서 라이다를 이용하여 대전광역시 격자화를 진행하게 될 경우 최소 25억원의 예산 절감이 예상되며, 대전광역시의 실시간 미세먼지의 질량농도 관측과 미세먼지의 확산이나 이동경로에 대한 추적에 활용이 가능함.

	미세먼지 측정기 (국가 대기오염 측정망)	미세먼지 라이다
제품명	미세먼지 자동측정기-BAM1020	원격 미세먼지 모니터링 시스템
방식	베타선법	원거리 레이저 산란 방식
데이터 표출 간격	1시간	2분 이내
측정 범위	측정기 주변	5 km 이내 (7.5m 간격)
장점	인지도 높음, 정확성	광범위한 지역 측정 가능, 집중발생 지역 측정 가능, 이동형
단점	수리비 및 수리기간 오래 걸림	인지도 낮음, 고가
가격	25,000천원	200,000천원 이내
이미지		

○ 3 차원 미세 먼지 자동관측 장비를 이용한 활용분야

- 환경 및 기상 연구 : 미세 먼지의 광학적 특성 및 입체적 공간분포 변화 특성 산출 등
- 기상예보 : 기상예보 사업자, 기상서비스 사업자 활용
- 국방분야 : 공항 전투기, 민항기 이·착륙 시 경보 예측
- 재난/안전 분야 : 미세 먼지, 황사 등 예보에 활용

7. 참고 문헌

- 아이알에스글로벌, 2017, “미세먼지에 대한 산업 분야별 대응 전략과 연관 시장의 향후 전망”
- 미래산업리서치, 2020, “(초)미세먼지 국내외 관련 산업 정책동향과 주요 핵심 산업기술 및 시장전망”
- 아이알에스글로벌, 2018, “기후변화대응 온실가스, CO2관련 시장동향과 기술개발 전략”
- S. D. Klett, “Stable analytical inversion solution for processing lidar returns” *Applied Optics*, 20, 211-220(1981).
- Fernald, F. G., “Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments” *Appl. Opt.*, 23, 652-653 (1984).
- P. B. Russel, T. J. Swisler and M. P. McCormick, “Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements” *Appl. Opt.* 18, 3783 (1979).
- S. D. Klett, “Algorithm for inverting lidar returns: comment” *Appl. Opt.* 23, 2855 (1984).
- P. B. Russel, B. M. Morley, J. M. Livingston, G. W. Grams and E. M. Patterson, “Orbiting lidar simulations. 1: Aerosol and cloud measurements by an independent-wavelength technique” *Appl. Opt.* 21, 1541 (1982).
- M.H. Kim, H.D Yeo, N. Sugimoto, H.C. Lim, C.K. Lee, B.H. Heo, Y.S. Yu, B.J. Sohn, S.C. Yoon, S.W. Kim “Estimation of Particle Mass Concentration from Lidar Measurement” *Atmosphere*, 25, 1-9.(2015).
- P. Royer, P. Chazette, K. Sartelet, Q. J. Zhang, M. Beekmann, and J.-C. Raut., “ground-based observations in the frame of MEGAPOLI experiment” *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 10705-10726 (2011).
- Raut, J.-C., Chazette, P., and Fortain, A. “New approach using lidar measurements to characterize spatiotemporal aerosol mass distribution in an underground railway station in Paris” , *Atmos. Environ.*, 43, 575-583(2008).
- Raut, J.-C., Chazette, P., and Fortain, A. “Link between aerosol optical, microphysical and chemical measurements in an underground railway station in Paris, *Atmos. Environ.*” , 43, 860-868 (2008).
- Raut, J.-C. and Chazette, P. “Assessment of vertically-resolved PM10 from mobile lidar observations” , *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 8617-8638, (2009).
- Hanel, G. “The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the Relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air” , *Adv. Geophys.*, 19, 73-188, (1976).
- Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, R. Boi, Y. Kaufman, and B. Holben, “Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions” *Appl. Opt.*, 35, 2672-2686 (1996).
- Cattrall, C., J. Reagan, K. Thome, and O. Dubovik, “Variability of aerosol and spectral lidar and backscatter and extinction ratios of key aerosol types derived from selected Aerosol Robotic Network locations.” *J. Geophys. Res.*, 110, D10S11, (2005).
- Omar, A. H., and Coauthors, “The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm” , *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 1994-2014, (2009).

< 별첨 >

별첨 자료

1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 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.