

공공연구성과 시작품 제작 수요신청서 참고자료

이 자료 내용을 "실시간 만능 자기상관장치 개발"을 위한 시작품 제작 수요신청서의 참고자료로 제출합니다.

2021 02. 15.

건국대학교 글로벌캠퍼스
연구책임자 : (인)

목 차

제1장 보유한 연구성과 기술 소개	1
제2장 연구성과 시작품 제작 필요성과 내용	4
(1) 계측 연구장비 및 측정기술 개발 필요성	4
(2) 초고속 레이저 광펄스 진단용 새로운 장비 개발 필요성	5
■ 새로운 간섭형/세기형 자기상관장치 개발 필요성	8
■ 새로운 간섭형/세기형 자기상관장치 개발 및 기본 특성	9
■ 새로운 간섭형/세기형 자기상관장치가 가진 문제점 개선	10
① 소형 직류 선형 모터와 선형 엔코더 부착	10
② 정밀 시간분해능($1fs$)을 갖는 고속 데이터 수집 장치 사용	10
③ 광지연 장치로의 변환(Switching) 기능 겸비	11
④ 사용자 편의 구동 프로그램 구축	12
제3장 해외 제품과 시작품과의 특성 비교	13
① 해외 자기상관장치 시장 현황과 특성 비교	13
② 해외 광지연 장치 현황과 특성 비교	17
제4장 초고속 광펄스 진단 장비 개발의 파급효과 및 시장성	18
■ 초고속 고출력 레이저 관련 시장 규모	18
■ 제품 개발 시 예상되는 파급효과 및 활용방안	19
제5장 공공 연구성과로 개발된 장치의 특성과 개선 사항	21
(1) 실시간 자기상관 장치 개발	21
(2) 다 파장에 걸친 초고속 펄스폭 측정을 위한 반도체 광검출기 개발	23
● 근적외선 파장에서 중적외선 파장 대역까지	23
● 자외선 파장에서 가시광선 파장대역	25
(3) 자기상관장치로부터 광지연장치로의 변환이 가능한 통합 장치 시스템 개발	27
① 검출기 세트와 빔가르게 세트로 분리가 가능한 구조 변경	27
② 광지연장치로의 스위칭이 가능 빔가르게 키트 구조 변경	28
(4) 현재까지 개발된 만능 실시간 자기상관장치 시스템의 차별성 요약	30
개발된 GUI 기반 통합 구동 프로그램 사용자 매뉴얼	32
제 6 장 시작품 출시를 위해 향후 개발해야 연구 내용	41
(1) 개발 연구 내용	41
(2) 개발 연구비용	46
시작품 제작 관련 국내 특허	48

제 1 장 보유한 연구성과 기술 소개

■ 보유 개발기술의 개요와 의의

과학 기술과 이를 바탕으로 한 산업 기술에 발달과 진보에 따라 레이저를 이용한 광계측 기술은 눈부신 발전을 이루었으며, 레이저의 발전과 함께 레이저가 가지고 있는 단색성, 지향성, 고휘도성, 결맞음성에 힘입어, 정밀 계측 분야에서 레이저가 차지하는 비중이 매우 높다. 최근의 반도체 제조 기술과 함께 급격한 발전을 보인 컴퓨터 기술 발전과 함께 광통신 기술 발전으로 IT 개발이나, 플로렌, 나노튜브, 그래핀과 같은 1차원, 2차원 신소재 개발과 함께 원자 현미경에 발전으로 이루어진 NT의 발전에 레이저 광을 이용한 정밀 계측 기술이 함께 하였으며, 오늘날 과학 기술 분야 최대 화두로 떠오른 인공지능, 딥러닝 기술 발전에는 2차원 영상 정보가 큰 비중을 차지하고 있다는 사실만 보더라도, 현대 기술 문명 발전과 진보에는 항상 레이저의 기술 발전과 더불어 이루어져 왔다고 해도 과언이 아닐 것이다.

레이저 기술 발전 과정에서 파생된 청색 광다이오드 개발(2014년 노벨 물리학상 수상)과 백색 광다이오드 개발은 에디슨의 백열전구 발명 이후 휘도와 수명에서 커다란 진보를 이룬 새로운 광원의 출현을 알렸으며, 영상분야의 급격한 발전을 가져왔다. 고휘도 청색/백색 광다이오드 개발 이면으로 잘 알려지지 않은 사실로서 1990년대에 개발된 티타늄 사파이어 레이저로 대변된 초고속 펄스 레이저의 개발이 이루어졌으며, 이후의 고출력 펄스 레이저 개발은 급격한 발전을 있어 왔다. 초고속 레이저의 개발은 파장 개발과 출력 세기의 개발이 동시에 급속한 발전을 이루어서 새로운 학문 분야 및 기술 분야의 출현을 불러 왔다. 이는 초고속 레이저가 근적외선 파장영역의 고체 레이저가 출현하여 다단 증폭장치의 개발로 테라 및 페타 와트급의 고출력 개발(2018년 노벨물리학상 수상)이 빠르게 이어졌으며, 펄스폭이 짧아질수록 파장 선폭이 확대되고 비선형 고차고조파 발생 기술로 자외선 및 X선 파장 역영까지의 단파장 고출력 레이저 개발이 이루어져 펄스초를 넘어 아토초 펄스 개발로 펄스 과학(1999년 노벨 화학상 수상), 아토 과학으로 확대되어 테이블 규모에서 전자의 실제거동을 관측할 수 있게 되었다.

1990년대부터 2010년까지 근 20여년 동안 급격한 기술 발전을 이룬 초고속 펄스 레이저 기술 개발은 이제 열 산업 분야에 응용되어 이미 성숙기에 접어들었으며, 최근 초고속 펄스 레이저의 특성(펄스폭이 짧을수록 피크 출력세기가 급격히 증가하여, 파장 변환과 같은 다양한 비선형 현상이나 순간 절삭이 가능해 짐)을 이용하여 수 마이크로 미만의 초미세 가공이 가능해지면서 나노공정 및 반도체 공정분야로의 활용이 확대되고 있다. 또한 우수한 파괴력으로 세포를 선택적으로 제거함과 동시에 주변조직에 열화현상에 의한 부작용을 최소화할 수 있는 펄스초($f_s = 10^{-15}s$) 펄스 레이저의 장점을 이용하여 라식수술, 피부암 치료 등의 의료용 레이저와 고해상도 바이오 이미징, 다광자 여기(또는 공초점) 현미경, 저차원 구조의 첨단소재 물성분석, 분자 동역학, 시분해 분광 등 광범위한 분야로 응용하기 위한 연구개발이 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다.

현재 국내외 고출력 레이저 시스템 개발은 희토류계열의 광파이버 레이저가 주도하고 있으며, 향후 상업용 고출력 레이저는 이들 파이버 레이저가 기존의 고출력 초고속 레이저 시스템들을 대체할 것이다. 이는 광파이버 레이저가 갖는 고출력 효율 특성과 번들로 묶을 수 있는 패키징의 장점에 따라 수백 KW 출력을 갖는 광파이버 레이저는 상업적으로 응용 절단 가공 측면에서 산업계 시장을 주도하고 있다.

이러한 초고속 고출력 레이저가 갖고 있는 특성을 이용하여 연구나 가공, 공정 및 계측 장비(또는 장치)개발을 위해서는 공정에 필요한 최적 조건 확보를 위해서는, 초고속 레이저 광펄스의 특성을 먼저 파악하는 것이 중요하다. 그림 1에서처럼 레이저가 가지고 있는 4대 특성을 파악하기 위해서는 단색성이나 펄스폭이 짧아짐에 따라 수반되어 넓어지는 파장의 확대(불확정성 원리, 파장폭)은 스펙트로미터 소형장치로 쉽게 파악되며, 에너지나 평균 출력세기(파워)는 파워미터 장치로 쉽게 파악할 수 있다. 그러나 펄스폭은 아무리 빠른 초고속 오실로스코프 등을 사용하더라도 전자가 반응하기 어려운 20 ps 이하의 짧은 펄스폭을 측정할 수 없다. 수십 피코초 이하의 초고속 펄스폭을 측정하기 위해서는 짧은 펄스폭 자체 특성을 이용해야 하며, 이 장치를 특별히 자기상관장치(Autocorrelator)라 한다. 이런 의미에서 펄스폭 측정 기술은 단순한 계측 기술이 아니라 중요한 장치/설비 요소기술에 해당한다.

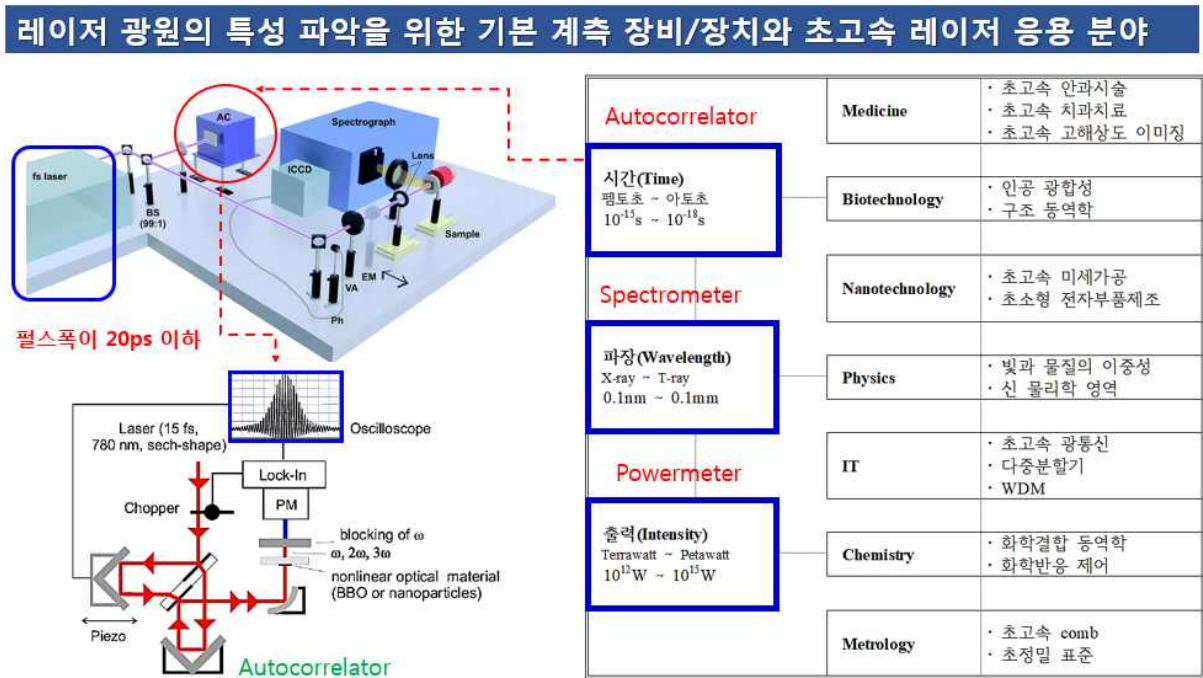


그림 1. 레이저 특성 파악을 위한 계측 장치 및 초고속 레이저 응용 분야

초고속 고출력 펄스광에 대한 정확한 정보(평균출력, 빔형상, 스펙트럼, 펄스폭 등)를 획득하는 것이 이를 응용한 공정이나 실험, 계측 과정에서 그 효율성이나 의미를 파악하는 데 있어서 중요한 매개변수로서 작용한다. 특히 정밀 계측이나 정밀 공정에 활용하기 위한 목적으로 사용되는 초고속 펄스폭의 변화 추이 과정을 엄밀하게 파악하기 위하여, 초고속 펄스 자체특성(펄스폭, 위상 등)을 추출하기 위하여 다양한 방법과 도구들이 개발되어 왔다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 현재까지 펄스광의

펄스폭과 그 위상을 정확히 파악할 수 있는 방법의 일환으로 광게이팅(optical gating)이라는 비선형 기법을 이용하여, 시간지연(time delay)에 따라 시간영역의 진폭세기와 주파수영역의 진폭세기(또는 기법에 따라 변조된 진폭세기)를 동시에 측정하여 보다 많은 실험 정보를 수집하고, 계산된 펄스의 진폭과 그 위상 정보를 시간(또는 주파수 영역에서)영역에서 실험 정보와 반복적으로 맞추어 가는 방법으로써 정확한 진폭과 위상을 추출하는 다양한 방법과 기법들이 개발되었다. 그림 2에서처럼 수 펨토초 펄스폭을 갖는 광펄스들을 정확히 진단하기 위해, 비선형 결정을 이용한 주파수 분해 분광방법인 FROG 기법과 스펙트럼 간섭 현상을 이용한 SPIDER 기법과 같은 최신 기술들이 개발되었지만, 정확도에 비례하여 복잡한 설비와 장치가 요구되어 활용도가 극히 제한적이며 산업계에 활용도가 매우 낮다. 이러한 광게이팅 방법으로 정확한 위상 및 진폭을 추출할 수 있지만, 고가의 주파수 분광장치와 복잡한 광학계의 추가설치가 요구되며, 그에 따른 엄격한 정렬이나 처리시간의 제약 등이 수반되는 단점이 더 부각되었다. 실제로 이렇게 획득된 정확한 진폭과 위상 정보를 활용한 응용사례는 기대만큼 부응하지 못하였다. 고출력 초고속 레이저의 응용 분야에서 의료용 특수 레이저나 가공에 기반을 둔 산업용 광파이버 레이저가 차지하는 비중이 상대적으로 높는데, 이들 레이저들은 대개 피코초나 수백 펨토초 펄스폭을 갖는다. 이에 펄스 자체의 정확한 위상 정보까지는 요구되고 있지 않으며, 정확한 펄스폭($10fs - 10ps$)을 파악할 수 있는 자기상관장치(그림 2의 맨 오른쪽 장치)에 대한 산업계의 요구가 상대적으로 크다. 전 고체 초고속 레이저나 초고속 광파이버 레이저의 개발이 현재 산업계를 주도하고 있는 상황으로 봐서, 산업계의 이러한 요구는 이해할 만하다. 특히 보다 간편하고 유지보수가 용이하며, 위상정보도 추가로 추출할 수 있는 자기상관장치의 개발이 상대적으로 중요성이 부각되고 있으며, 이와 함께 기존의 세기형/간섭형 자기상관장치가 갖고 있는 단점들을 해소할 수 있는 장치 개발에 대한 필요성과 수요 기대는 크다 할 수 있다.

초고속 펄스의 정밀 진폭과 위상을 측정하기 위해서는 간섭계와 고가 전자장치들은 필수적으로 요구

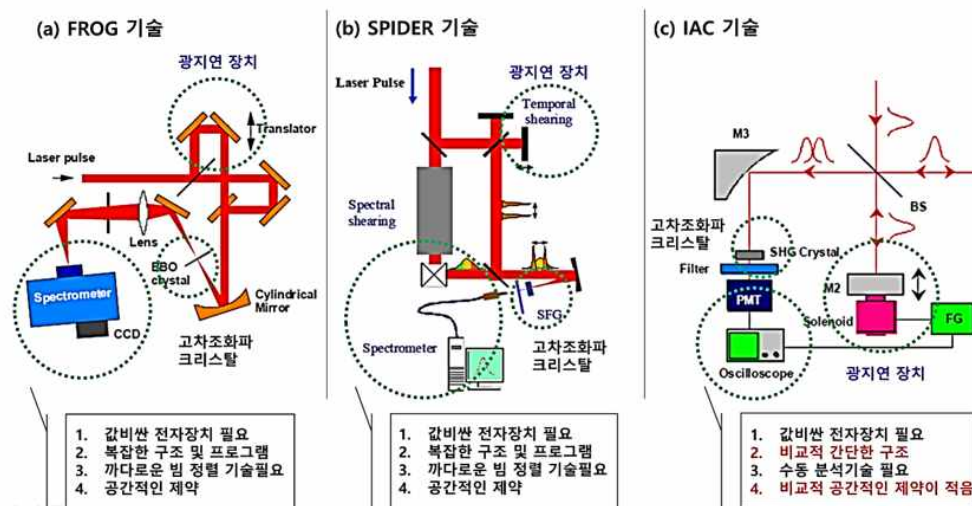


그림 2. 광펄스 진단을 위한 다양한 자기상관장치들 : (a) FROG 기법, (b) SPIDER 기법, (c) 간섭형/세기형 자기상관장치 기법

따라서, 본 과제 제안서처럼 수십 펨토초($fs = 10^{-15}s$)에서 수십 피코초($ps = 10^{-12}s$) 영역의 펄스 특성을 쉽고 간편하게 분석할 수 있는 견고한 세기형/간섭형 자기상관장치를 독창적으로 개발하고

이를 중소기업에 기술 이전하여 경쟁력이 매우 높은 장치/장비로 제품화하고자 한다. 특히 개발하고자 장치는 펄스폭만을 측정하는 자기상관장치가 아니라, 시분해 분광 실험을 위해서는 반드시 사용해야 하는 광지연 장치(Optical Delay Line)로 동시에 쉽게 변환(Switching)이 가능한 장치로, 즉 두가지 기능을 겸비한 설비로 개발할 것이다. 또한 $110ps$ 넘는 전체 시간 지연 범위에 걸쳐서 그 분해능이 $1fs$ 이하가 되는 시간 정밀도를 갖도록 정밀 엔코더 장치와 고속 데이터 수집 장치를 장착하여 정밀 계측이 가능한 설비가 될 것이다. 또 다른 주요 특징으로는 펄스폭을 추출하는 방식을 보다 단순하고 효율적인 방식으로 개발 할 것이다. 대부분 해외에서 판매되고 있는 자기상관장치들은 초고속 펄스를 측정하기 위하여 장치 내에 마이켈슨 간섭계를 꾸미고 입사하는 광펄스를 빔가르개로 두개의 펄스들을 만들어, 이들이 공간적으로 만나는 시점에 비선형 광학결정을 놓고서, 시간적으로 두개의 펄스가 만나는 그 시점에 발생하는 제2고조파 펄스광을 광검출기로 측정하는 방식을 사용한다. 본 과제 제안서에서는 이를 단순화하여 제2고조파를 발생하는 비선형 광학결정을 생략하고, 반도체 광검출기 자체가 갖고 있는 반도체 띠를 이용하여 반도체 띠보다 낮은 에너지를 갖는 광펄스를 강하게 집속시킨다. 이때 광검출기 표면에서 일어나는 이광자 흡수현상(two-photon absorption)으로 발생하는 미세한 전류신호를 검출기 내에 소장된 연산 증폭기 회로(광전도 증폭 회로)로써 크게 전압 신호로 증폭 변환하여 펄스폭을 자체적으로 효과적으로 측정하도록 한다. 이 기술은 과제 제안자가 보유한 기술로서 2020년도 11월에 국내 특허 출원하였다. 본 과제 지원기간에 이 기술을 보다 확대하여 가시광선에서 근적외선 파장영역에 걸쳐서 초고속 펄스폭을 측정할 수 있도록 광검출기를 개발하여, 사실상 개발되어 있는 모든 종류의 초고속 레이저들의 펄스폭을 측정할 수 있는 자기상관장치를 개발하고자 한다. 이런 의미에서 과제명을 “실시간 만능 자기상관장치 개발”이라는 명칭을 사용하였다. 이와 같은 자기상관장치(또는 설비)가 개발이 되면 해외제품 대비 저렴한 가격으로 국내 연구 및 산업현장에 공급함으로써, 국내 연구 및 산업현장에서 필요한 장치/설비를 자립화 구축과 효율성을 제고하고, 연간 수십억 원 상당의 수입대체효과를 달성하며, 나아가 세계적으로 뛰어난 성능을 갖는 만능 자기상관장치 및 부속 장비를 개발하여 수출하고자 하는 것이 본 과제 제안서가 지향하는 바이다.

제 2 장 연구성과 시작품 제작 필요성과 내용

(1) 계측 연구장비 및 측정기술 개발 필요성

국내 과학기술은 어느덧 선진 기술국으로서의 면모를 갖추고 있지만 총체적으로 볼 때, 기술 선진국에서 생산한 장비도입과 이를 활용한 생산기술에 크게 의존하고 있으며, 대기업에서 주도하고 있는 메모리와 같은 반도체나 핸드폰을 포함함 디스플레이 기기, 자동차와 같은 특정분야에서만 선진국과 대등한 수준의 연구개발 성과를 도출하고 있는 실정이다. 최근 주요 산업분야의 성과 대부분은 기술 선진국의 분석 장치와 분석 기술들에 의존도는 여전히 심화되는 추세에 따라 주요 계측용 연구 장비의 국산화 개발 필요성은 날로 커지고 있다. 최근 일본과의 무역 전쟁의 사례에서처럼 **소재, 부품 및 장비 국산화** 중요성은 더욱 강조되고 있다.

세계 연구 장비 시장은 지속적 성장추세로 미국, 일본, 독일 등 3개국이 주도하고 있으며, 이미 선진국 대열에 들어선 국내 기술도 상당한 수준에 도달했지만, 중요성 대비 연구 장비 개발 실적이나 그 산업역량이 상대적으로 뒤쳐진 상태이다. 이에 국내 대학 및 연구소에서 자체적으로 보유하고 있는 제조 기술을 바탕으로 정밀 계측기술을 활용하여, 보다 경쟁력 있는 연구 장비의 개발이 절실히 요구되고 있다.

특히 국내 연구 장비 산업은 관련 기업도 적지만 대부분 대기업을 뒷받침하고 있는 영세 중소기업으로 구성되어 있다. 이러한 연구 장비 개발 기술은 고도의 지식기술 융합산업으로 국가 경제발전을 이끌 메카산업이지만, 현재 이를 뒷받침할 산업화 기반이 미흡하고 아직까지 경쟁력이 취약해 이의 조직적인 육성이 시급한 실정이다. 따라서 국내 분석과학 진흥과 산업화 응용 기술의 확산을 위해서, 국가차원 또는 산업계차원에서 체계적인 분석 장비의 개발과 분석기술의 육성은 매우 중요하며, 금번 사업과 같이 “공공연구성과를 바탕으로 한 시작품 제작 사업”은 시의 적절하며 성과가 높은 사업이 될 것이다. 본 사업의 취지대로 이에 부응하는 경쟁력 있는 분석 장치 개발 및 기술들이 선별적으로 육성된다면 그 개발성과가 자연스럽게, 빠르게 중소기업에 기술 이전되며 사업화로 빠르게 진입할 것으로 기대한다.

(2) 초고속 레이저 광펄스 진단용 새로운 장비 개발 필요성

21세기에 들어서면서 급격한 기술개발이 이루어진 초고속 레이저의 개발과 함께, 초고속 현상에 대한 발견과 더불어 새로운 학문분야 출현과 연관 후속 기술 개발이 급속히 진행되고 있다. 아래의 그림 3은 각각 시간 단위 범위 내에서 발생하는 동역학적 현상을 잘 기술하고 있다.

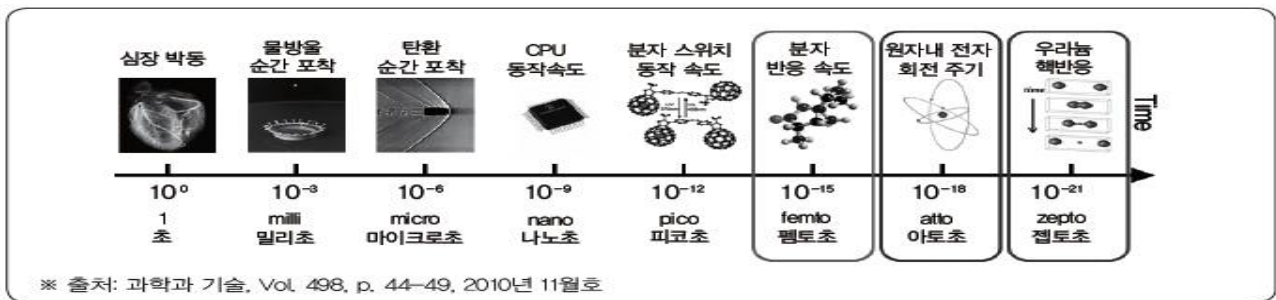


그림 3. 여러 동역학 현상과 관련 동작 시간 단위

이와 같은 초고속 동역학적 현상의 발견과 구현을 가능케 한 초고속 레이저의 개발은 파장 개발과 출력 세기의 개발이 동시에 급속한 발전을 이루어서 새로운 학문 분야 및 기술 분야의 출현을 불러 왔다. 이는 초고속 레이저가 근적외선 파장영역의 고체 레이저가 출현하여 다단 증폭장치의 개발로 테라 및 페타 와트급의 고출력 개발이 빠르게 이어졌으며, 펄스폭이 짧아질수록 파장 선폴이 확대되고 비선형 고차고조파 발생 기술로 자외선 및 X선 파장 역영까지의 단파장 고출력 레이저 개발이 이루어져 펨토초를 넘어 아토초 펄스 개발로 펨토 과학, 아토 과학으로 확대되어 테이블 규모에서 분자나 분자 내 전자의 실제거동을 관측할 수 있게 되었다. 이에 다음 페이지에 나타낸 것처럼 다양한 새로운 학문 분야와 산업계에 개발 기술이 활용되고 있다. 특히 우리나라의 경우 반도체 및

디스플레이용 부품 개발에 레이저를 이용한 사례들이 많이 보고되고 있다.

초고속 레이저 펄스의 주요 특성을 살펴보면, 먼저 수십 펨토초에서 수십 피코초의 짧은 펄스폭의 광펄스는 일반적인 연속광 레이저에 비해 순간휘도가 높은 반면 평균휘도가 낮은 특성이 있다. 이러한 초고속 광 펄스를 시료에 조사했을 때, 보다 느린 시간영역에서 수반되는 열적 현상을 극소화할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 그림 4에와 같이 초고속 레이저 광 펄스(펨토초나 피코초 펄스폭)를 사용함으로써, 보다 느린 펄스폭(예로 나노초 펄스)이나 용접을 이용한 가공 시에 수반되는 열확산에 의한 가공면의 변성 및 절단면에 발생하는 파편에 의한 표면의 오염 등을 최소화할 수 있게 되어 정밀 가공 분야에 광범위하게 활용되고 있다. 특히 절단 면적을 국소화로 함으로써 수 마이크로 미만의 초미세 가공이 가능해지면서 나노공정, 반도체 공정으로 응용 범위를 확대하고 있다.

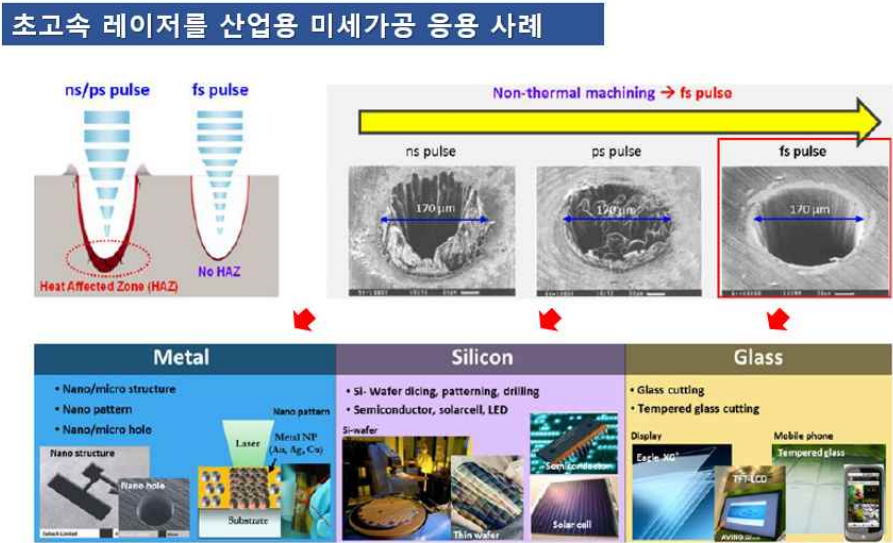


그림 4. 초고속 레이저를 이용한 산업용(반도체 및 디스플레이 장치 등) 미세가공의 사례

초고속 펄스의 짧은 펄스폭에 기인하는 높은 첨두 출력을 바탕으로 타겟 세포에 선택적으로 집속하고, 짧은 시간동안에만 노출함으로써 주변 조직에 큰 영향 없이(열적 부작용 최소화) 선택적으로 파괴할 수 있다는 장점 때문에 라식 수술, 피부암 치료 등에도 이용되고 있다. 더욱이 최근에는 극초단 펄스가 갖는 결맞는 가간섭 특성을 이용하여 타겟 시료 면들을 선택적으로 단층 촬영할 수 있게 되어, 시료나 조직들의 비파괴 검사에 활용하려는 시도와 사례들이 날로 증대되고 있다. 거기에 더해 기존의 반도체 및 신소재 물질들의 동역학 특성 분석, 초고해상도 현미경과 같은 바이오 이미징 연구에 가간섭성과 더불어 짧은 광펄스의 높은 시간 분해 특성을 이용한 응용 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 이와 같이 초고속 레이저 광펄스가 가지고 있는 높은 시간 분해능 특성, 결맞는 가간섭 특성, 넓은 파장 대역 특성(높은 파장 분해능 특성), 고출력 특성을 이용한 초고속 레이저 응용기술은 활용분야와 파급효과가 아주 커서 다양한 공학 분야와 기초과학 분야를 포함하여 새롭게 출현한 IT, BT, NT, ST, ET 분야 등에 걸쳐 다양한 적용과 활용 사례들은 점차로 증대될 것이다. 그

림 5는 다양한 학계 및 산업계 분야에서 초고속 고출력 레이저 시스템을 활용한 응용 사례들을 나타내고 있다.



그림 5. 초고속 고출력 레이저 시스템을 이용한 응용 사례들

초고속 레이저 개발과 활용 기술을 적용하기 위해서는, 우선적으로 초고속 펄스의 정확한 특성 분석이 요구된다. 광펄스의 평균출력, 빔형상, 스펙트럼, 펄스폭과 같은 특성 분석이 다광자 여기 3차원 이미징, 이광자 흡수 현미경, 공초점 현미경, 피부 및 치과치료, 미세가공 등에 적용하기에 앞서서 먼저 이루어져야 하는데, 이는 펄스폭에 따른 첨두 출력세기(peak power)에 의존하는 타겟의 반응이나 손상 및 파괴를 막기 위해서는 활용에 적합한 최적화된 광펄스의 조건을 확보해야 하기 때문이다. 앞서 기술의 개요에서 기술한 바와 같이 초고속 레이저 광펄스의 펄스폭을 정확히 측정하기 위해서는 자기상관장치를 사용해야 하며, 다양한 자기상관장치 중에서 학계와 산업계에서 가장 활용도가 높은 자기상관장치는 보다 단순한 구조를 갖는 간섭형/세기형 자기상관장치이라고 기술한 바 있다. 그림 6은 산업계에서 가장 많이 사용되고 있는 미세 가공 및 광통신용 초고속 레이저의 사양



그림 6. 미세 가공 및 광통신용 대표적인 초고속 레이저의 사양

으로 그 펄스폭이 $60\text{fs} - 10\text{ps}$ 임을 알 수 있으며, 사실상 약 100ps 정도의 최대 시간 지연을 갖고 최소 분해능이 1fs 인 자기상관장치를 개발하면, 학계나 산업계에서 필요로 하는 광펄스의 진단을 효과적으로 이룰 수 있음을 알 수 있다.

■ 새로운 간섭형/세기형 자기상관장치 개발 필요성

앞서 그림 2(c)에서 보인 바와 같이 가장 활용도가 높은 펄스 진단 장치로서 간섭형/세기형 자기상관장치는 그 내부에 마이켈슨 간섭계를 장착하는 기술(자기상관계)이 주로 활용된다. 이 기술의 기본원리는 빔가르개를 이용하여 2개의 광펄스로 나누고, 이중 하나의 광펄스는 주기적으로 왕복하는 시간지연을 시킨다. 2개의 광펄스들을 비선형 물질(2차 고조화파 발생 비선형 광학 결정)에 집속하여, 시간지연이 일치(즉 2개의 광펄스가 시공간적으로 중첩되는 경우)할 때만 발생하는 2차 고조화파(예로서 800nm 파장 중심의 광펄스들에 대한 발생하는 400nm 파장부근의 고조화 광펄스 발생) 펄스를 측정한다. 이때 주기적으로 왕복하는 간섭계의 거리를 정확히 측정하여 시간적으로 환산하면, 측정된 2차 고조화 광펄스의 펄스폭으로부터 본래의 광펄스의 펄스폭을 측정할 수 있다. 이와 같은 2차 고조파 발생용 비선형 결정을 이용한 펄스폭 측정용 자기상관계(자기상관장치)는 상대적으로 간편하여 자체적으로 제작하여 광범위하게 활용되고 있다. 상업적으로 판매되고 있는 해외 자기상관장치들은 거의 예외없이 고조파 발생용 비선형 결정을 포함하고 있다. 그러나 이러한 비선형 결정은 측정하고자 하는 펄스폭에 따라 비선형 결정 자체에 의한 펄스의 확대 왜곡을 막기 위해서는 선택하는 비선형 결정의 두께가 달라져야 한다. 가장 널리 사용되는 BBO 결정의 경우에 펄스폭이 100fs 일 때 두께는 0.5mm 이하, 50fs 일 때 두께는 0.2mm , 20fs 일 때 두께는 0.1mm , 10fs 일 때 두께는 0.05mm 이하이어야 한다. 펄스폭이 10fs 미만인 경우에는 0.05mm 두께의 BBO 결정은 가격만 1000유로(150만원) 이상으로 고가이며, 비선형 결정이 갖는 침습성 때문에 오랫동안 사용하기 어려워 주기적으로 교체해야 한다. 또 다른 문제점은 펄스폭을 정확히 진단하기 위해서는 주기적으로 왕복하는 간섭계의 거리를 정확히 알 수 있어야, 발생한 2차 고조파 광펄스의 펄스폭과 본래 측정하고자 하는 광펄스의 펄스폭을 진단할 수 있다. 그러나 대부분의 상업적으로 판매되는 자기상관장치들은 주사하는 거리 또는 주사 시간에 대한 정보를 제공하고 있지 않고 있다. 소비자가 수동적으로 이동한 거리(이동거리를 광속도로 나누면 시간 변환됨)에 대하여 오실로스코프상에 이동한 2차 고조파 광펄스 이동 시간을 간접적으로 비교하여 광펄스폭을 어림하기 방법을 사용할 수밖에 없어 사용자들이 불편을 겪고 있다. 일부 상업적으로 판매되고 있는 자기상관장치에는 자체적으로 측정된 펄스폭을 제공하기도 하지만, 이의 정밀도는 매우 신뢰하기가 어려우며 펄스폭을 측정할 수 있는 주사 시간 대역도 제한적이며(예로서 $20\text{fs} \sim 3.5\text{ps}$), 비선형 결정을 사용하기 때문에 파장 대역도 제한적이며(다양한 서로 다른 고가의 비선형 결정들을 모두 구비해야 스펙상의 파장 대역이 측정 가능함), 주사 스캔율(예로서 5Hz 고정)도 제한적이다.

따라서 현재 상업적으로 판매되고 있는 해외 상업적 자기상관 장치들은 비선형 결정을 사용하기 때문에 복잡하고 고가의 광학계나 별도의 증폭용 전자장치를 필요로 하며, 엄격한 빔 정렬을 요함에도 불구하고, 그 활용 범위가 극히 제한적이다. 이에 비선형 결정을 사용하지 않고 광검출기 내

광다이오드가 갖고 있는 이광자흡수 현상을 이용하여, 검출되는 미세 전류를 획득하여 이를 증폭하는 내부 회로를 장착한 광다이오드 검출기를 사용함으로써, 견고하며 사용이 편리하며 우수한 특성을 갖는 새로운 형태의 자기상관장치 개발이 필요하다.

■ 새로운 간섭형/세기형 자기상관장치 개발 및 기본 특성 : 과제 제안 기관이 보유한 기술
세기형(Intensity) 및 간섭형(Interferometric) 자기상관장치(Autocorrelator) 검증

그림 7과 같은 자기상관장치 내에 비선형 결정을 사용하지 않는 타입으로 GaP 광전도 검출기내의 이광자 흡수 현상을 이용하여 펄스폭을 측정하였으며, 이 검출기는 파장대역 600 nm ~ 1100 nm에 걸친 광대역의 초고속 펄스의 펄스폭을 측정할 수 있었다. 그림 7의 사진은 과제 제안 기관 실험실에서 자체 제작하여 자기상관장치로서 위의 GaP 검출기를 이용하여 초기에 개발된 자기상관장치를 나타낸다(출처: JOSK Vol. 20, No. 3 pp 435-440, 2016). 여기서 자기상관장치는 간섭형 자기상관장치로서, 펄스의 위상정보를 담고 있으며, 위상정보를 잃게 되는 빔 정렬 방식의

그림 7. 기 개발된 자기상관장치로 펄스를 측정하면 세기형 자기상관장치로서 기능을 한다. 그림 8과 같이 실제 측정할 수 있는 최소 펄스폭은 10 fs 미만으로 약 9.8 fs의 극초단 펄스폭을 측정함을 나타내고 있다. 그림 8에서처럼 파장 스펙트럼 범위가 650 nm ~ 1050 nm에 걸친 광대역 펄스가 측정 가능함이 입증하였기에, 위의 파장 대역에 걸치는 모든 초고속 펄스폭 측정이 가능함을 알 수 있다.

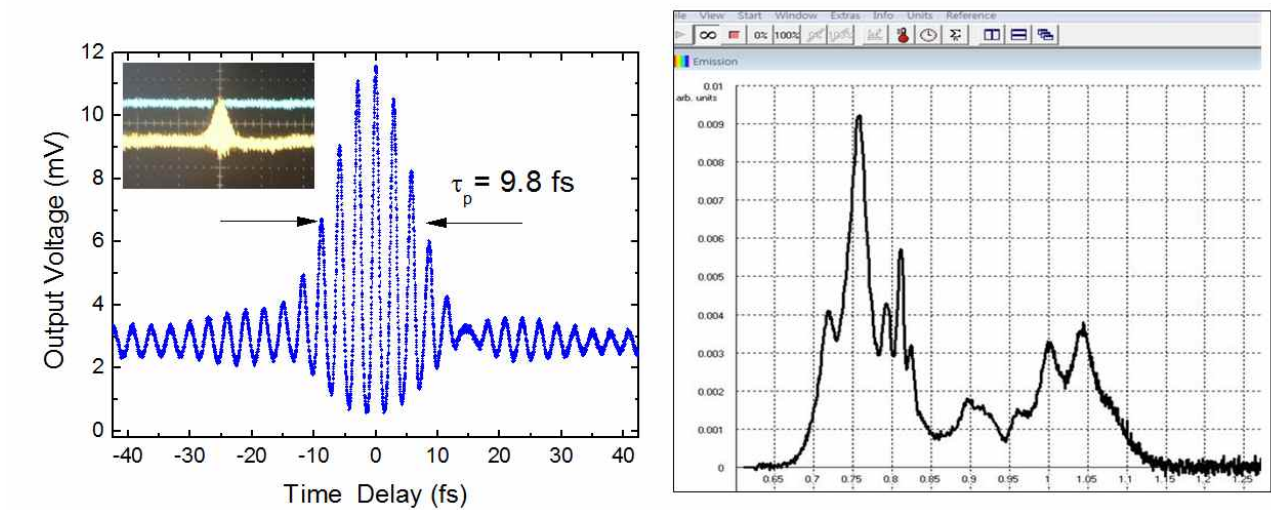


그림 8. 기 개발된 자기상관장치로 측정된 10 펨토초 미만의 펄스폭의 자기상관함수 및 이에 대응되는 펄스의 스펙트럼 (출처: JOSK Vol. 20, No. 3 pp 435-440, 2016)

또한 그림 9에서처럼 비선형 결정(그림 9(b))을 이용하여 펄스를 측정한 경우에 비해, GaP 검출기의 이광자 흡수현상(그림 9(a))을 이용하여 측정한 효율이 결코 뒤떨어지는 않았다. 동일한 출력세기를 갖는 입력광 펄스들에 대하여 GaP 검출기로 측정된 펄스의 신호크기가 BBO 결정을 이용한 경우

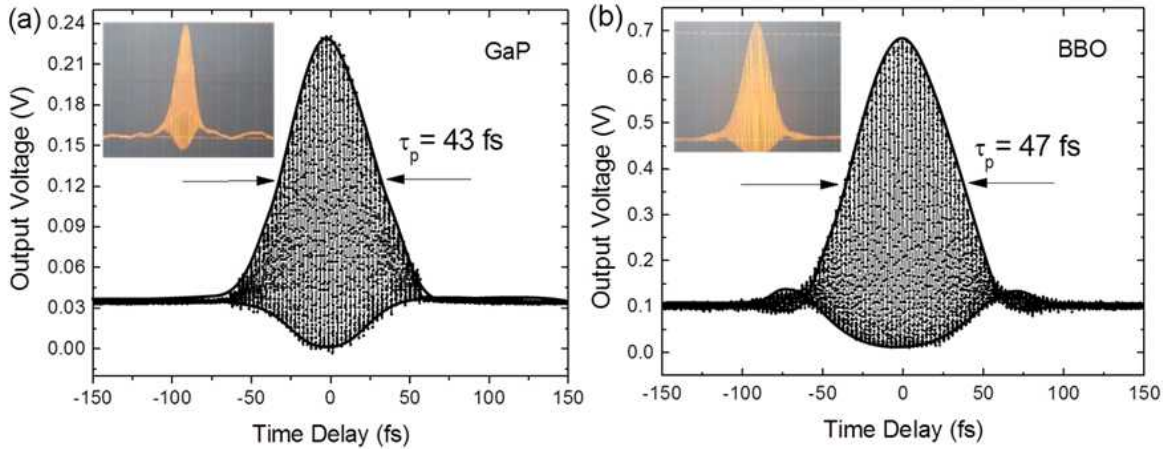


그림 9. 기 개발된 자기상관계 내 (a) GaP 광검출기, (b) BBO 비선형결정으로 측정된 펄스특성

처럼 수백 mV(즉 ~230mV) 스케일에서 동일하게 측정되기 때문에, 변환 효율은 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 비선형 결정을 사용하지 않으며, 고조파 신호를 분리하기 위한 광학 필터나 집속 렌즈와 같은 부가 장치를 사용할 필요가 없다는 간편성과 장치의 단순화가 가능하다는 측면을 고려하면 비선형 결정을 사용하지 않고, 광다이오드 이광자 흡수 현상 자체를 이용한 기법이 더욱 경쟁성을 갖는다고 할 수 있다.

■ 새로운 간섭형/세기형 자기상관장치가 가진 문제점 개선

① 소형 직류 선형 모터와 선형 엔코더 부착

그림 7과 같은 프로토타입 자기상관장치가 지닌 가장 큰 문제점은 마이켈슨 간섭계 내에 주기적인 시간지연을 위한 왕복 운동은 우퍼가 수행하지만, 이의 정확한 거리를 검출하는 장치가 없어서, 시간지연을 정확한 측정할 수 없는 단점을 지녔다. 이에 정확한 거리를 측정하기 위하여 선형엔코더를 장착하였고, 주기적인 왕복 운동도 보다 견고한 형태의 DC 모터/보이스코일로 교체하였다. 선형 엔코더는 분해능 $0.1\mu m$ 이고, 최대 검출 속도는 $0.96m/s$ 인 사양을 갖추며, 선형 DC 모터는 스프링 내부에 갖추어져 주기적인 사인 운동이 원활하다.

② 정밀 시간분해능($1fs$)을 갖는 고속 데이터 수집 장치 사용

10 펨토초 이하의 펄스폭을 분해하기 위해서는, 최소한 시간 분해능은 1 펨토초가 되어야 한다. 따라서 시스템 전체 분해능을 실질적으로 결정하는 것은 선형 엔코더로부터 측정되는 거리를 광속으로 나눈 것이 시간 지연이 되므로, 엔코더의 거리 분해능이 $0.1\mu m$ 이므로, 왕복 운동을 고려한 시간 분해능은 $0.67fs < 1fs$ 가 된다. 아래의 그림 10에서처럼 이러한 $1fs$ 분해능은 가장 가벼운 수소 분자가 갖는 가장 빠른 분자 진동 주파수($3333cm^{-1} = 10^{14}Hz = 10fs$)에 해당함으로, 무거워서 이 보다 느리게 진동하는 모든 다른 분자들의 진동 주파수를 모두 분해할 수 있음을 의미한다. 따라서

1 fs 분해능을 갖는 시분해 자기상관장치/광지연 장치는 시분해 분광 계측 기법에서 모든 분자들의 거동을 파악할 수 있는 가장 큰 분해능을 사실상 의미한다. 엔코더가 갖는 최소 분해능을 손상하지

System Bandwidth

Target : 1 fs resolution for 100ps scan

lattice vibration with 10 fs period ($10^{14} \text{ Hz} = 100 \text{ THz} = 3333 \text{ cm}^{-1}$)

lattice vibration with 10 ps period ($10^{11} \text{ Hz} = 0.1 \text{ THz} = 3.33 \text{ cm}^{-1}$)

From an actuator (Voice coil) with 1 inch moving distance

1.5cm scan range : $\frac{2L}{c} = \frac{2 \times 1.5}{3} \times 100 \text{ ps}$

1. DAQ card Resolution ;

Sampling $N = 10,000 \text{ pts}$, Actuator Speed $V = 20 \text{ Hz}$

Sampling rate = $\frac{N}{1/(2 \times V)} = \frac{10,000}{1/(2 \times 20)} \text{ pts/s} = 400 \text{ KS/s}$

NI USB DAQ 6351 ~ 500KS/s/ch

NI USB DAQ 6356 ~ 1.25MS/s/ch

2. Linear Encoder Resolution ;

RSF Elektronik :

MS 15 TTL $\times 100 = 0.1 \mu\text{m} \rightarrow 0.67 \text{ fs} \approx 1 \text{ fs}$

MS 15 TTL $\times 200 = 0.05 \mu\text{m} \rightarrow 0.39 \text{ fs} \approx 0.5 \text{ fs}$

3. Detector System Resolution (dependent to gain setting)

30dB gain setting for PDA25K ~ 300KHz

40dB gain setting for PDA25K ~ 100KHz

그림 10. 자기상관장치/광지연장치 전체 시스템 선폭(분해능)

않고 모든 데이터를 획득(총 스캔 범위 100ps, 액추에이터 구동 속도 20Hz, 주사 운동 당 10,000개 데이터 수집 전제)하기 위해서는 그림 10에서 기술한 바와 같이 데이터 수집장치(DAQ 카드)의 최소 샘플링(수집) 속도는 채널당 500KS/s/ch이 되어야 한다. 최소한 2-3 채널을 이용하는 계측 경우를 고려하여 데이터 수집 속도는 채널 당 최소한 1.25MS를 사용해야 하며, 채널 마다 독립된 샘플속도를 갖는 데이터 수집 카드의 가격은 630만원 정도이다. 이러한 고가의 데이터 수집 장치와 선형 엔코더 및 광전도성 광다이오드 검출기가 자기상관장치의 핵심 부품으로 공급 가격이 저렴해질 수 없지만, 1 fs 분해능을 갖는 측정 시스템으로서 정확한 펄스폭 진단과 함께 앞으로 기술하게 될 시분해 분광 계측 기능도 동시에 겸비할 수 있음을 고려하면 충분한 가치와 기능을 수행한다고 판단한다.

③ 광지연 장치로의 변환(Switching) 기능 겸비

자기상관장치에는 고속 데이터 수집장치가 포함되어 있어서 선형 엔코더와 함께 정확한 시간 지연을 1 fs 분해능으로 검출할 수 있게 된다. 이때 자기상관장치 내에 구성되어 있으면서, 마이켈슨 간섭계의 한 쪽 팔(arm)에 위치하며 액추에이터로 왕복 운동하는 되반사경 장치가 시분해 분광 계측 기법에서 널리 사용되고 있는 광지연 장치(Optical Delay Line)가 된다.

광지연 장치(ODL)를 이용한 시분해 분광 기법

◆ 여기-탐사 분광 기법 개발 → 저차원 구조 물성분석 및 신물질 개발에 필요한 핵심장비로 활용

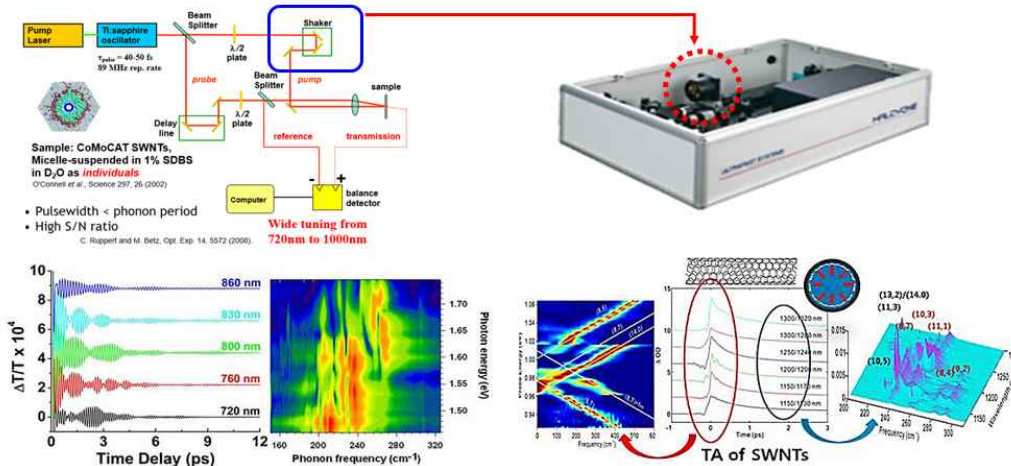


그림 11. 광지연 장치를 이용한 pump-probe 시분해 분광 기법 응용 사례

그림 11에 기술한 바와 같이 그림 속에 Shaker는 되반사경이 달린 액추에이터 시스템을 의미하며, 시분해 분광기법 중에 가장 대표적인 여기-탐사(pump-probe) 기법에서는 이와 같은 광지연 장치를 이용하여, 시료에 순간적인 여기광 펄스로 여기한 이후에, 탐사광으로 시료 내 분자들의 격자 진동 모드(전자 또는 분자 진동)들이 실려 있는 미세한 반사율/투과율을 검출함으로써 나노 물질(단일벽 탄소나노튜브)의 종류(나노튜브의 크기에 따라 진동 주파수가 달라짐)를 정밀하게 분석해 낼 수 있는 새로운 기법이 개발되었다. 이와 같은 응용 사례는 기타 나노 물질에도 동일하게 적용될 수 있으며, 초고속 레이저와 함께 본 과제 제안서에서 개발하고자 하는 자기상관장치 개발에는 이러한 고정밀 광지연 장치 개발이 부수적으로 파생된다. 이러한 광지연 장치는 독자적으로 출시될 수도 있으며, 또는 펄스폭 측정을 위한 자기상관장치에서 세트 단위로 조립된 일부 부품들(예로 빔가르개 세트와 광검출기 세트)을 교체하거나 제거하면 바로 광지연 장치로 변환할 수 있는 구조로 개발할 것이다. 이에 대한 내용은 후반부에서 보다 자세히 기술한다.

④ 사용자 편의 구동 프로그램 구축

앞서 기술한 자기상관장치나 광지연 장치에 있는 선형 엔코더로부터 고속으로 수집되는 이동 거리를 광속으로 나누어 시간 지연으로 변환하고, 지속적으로 왕복 운동을 하는 액추에이터의 스캔 주파수(1 ~ 20 Hz)에 맞추어 일정한 시점마다 데이터를 수집하기 위해서 데이터 수집장치로부터 발생되는 아날로그 신호나 디지털 신호들을 이용하여 액추에이터 운동 및 데이터 수집을 제어한다. 이와 같은 제어 및 수집 기능을 담당하는 통합 구동 소프트웨어를 Labview 기반으로 개발하여 구축한다. 이에 대한 원천 코드는 과제 제안 소속 기관에서 지난 2018년도에 소프트웨어 저작권 등록을 하였다. 이 통합 구동 프로그램은 그동안 많은 발전과 진화를 거치는 과정에서 편의성과 수월성을 담보할 수 있도록 여러 기능들이 보강되어 왔다. 이에는 액추에이터를 구동하기 위한 전력 증폭기에 공급되는 아날로그 신호의 주파수, 크기 및 위상 제어가 포함되어 있으며, 선형 엔코더로부터 발생되

는 상대적 위치를 파악할 수 있는 참조 신호를 기반으로 거리를 시간으로 변환하는 기능, 수집된 펄스 신호를 가우시안 함수나 sech 함수로 피팅하거나 간섭형 및 세기형 자기상관함수로 피팅하는 기능, snapshot으로 저장하는 기능 등 다양한 기능들이 개발되어 포함되어 있다. 특히 주기적인 엑추에이터 스캔 범주 내에 반복적으로 나타나는 펄스폭이나 탐사 신호광 신호를 빠른 주사 주파수(통상 5 ~ 20Hz의 엑추에이터 스캔 주파수)로 누적 평균하는 기능이 포함되어 있기에, 펄스폭이나 초고속 현상 신호 변화를 뛰어난 신호 대 잡음비로 수집 저장할 수 있는 기능이 포함되어 있다. 이러한 독특한 특성은 통상 신호 대 잡음비를 높이기 위하여 별도로 록인앰프(Lock-In Amp) 장치를 사용하는 시분해 기법과 비교해도 동일한 신호 대 잡음비를 나타냄을 확인하였다. 이러한 구동 통합 구동 프로그램은 다른 상업적인 해외 제품에서도 찾아 볼 수 없으며, 본 과제 제안서에서 개발하고자 하는 장치/장비 시스템만이 갖는 독특한 장점이라 할 수 있다. 이러한 통합 구동 프로그램은 새로운 기능을 부여할 여지가 남아 있어, 과제가 채택이 되면, 통합 구동 프로그램은 지속적으로 진화할 것이다. 현재까지 개발된 구동 프로그램은 본 자료의 말미에 사용자 매뉴얼로 소개하였다.

제 3 장 해외 제품과 시작품과의 특성 비교

본 과제제안서에서 개발하고자 하는 “실시간 만능 자기상관장치”에는 비선형 결정을 사용하지 않고 광다이오드 검출기 자체의 이광자 흡수현상을 이용하여 간결하게 펄스폭만을 측정하기 위한 자기상관장치 기능과 시분해 분광용으로 널리 사용되고 있는 광지연 장치로 쉽게 변환할 수 있는 기능이 포함된다. 하지만 해외 제품들은 이들을 각각 별도의 제품으로 상업적으로 판매하고 있다. 특히 광지연 장치는 해외에서 한, 두 군데에서만 독점적으로 판매하고 있는 실정이다. 이에 해외에서 상업적으로 판매하고 있는 펄스폭 측정을 위한 자기상관장치들을 선별적으로 먼저 소개하고, 이들 제품들과 현재까지 과제 제안자가 개발한 장치들과의 성능 비교를 총괄적으로 소개한다.

① 해외 자기상관장치 시장 현황과 특성 비교

초고속 펄스광의 펄스특성을 분석할 수 있는 상용화장치들은 해외에서 다양한 기업체에서 판매하고 있다. 대표적으로 미국의 코히런트(Coherent)사, 스펙트라-피직스(Spectra-Physics)를 인수한 뉴포트(Newport), 그리고 독일의 에이피이(A.P.E.), 리투아니아의 라이트 컨버전(light conversion) 등이 있으며, 실질적으로 두 기업(coherent, newport)이 기술을 선도함과 동시에 시장을 독점하고 있는 상황이며, 아래 제품들은 대표적인 펄스측정 장치의 상용화 제품들이다. 아래에 소개한 바와 같이 대다수의 자기상관장치를 판매하는 회사들은 비선형 결정을 사용하는 장치들이 주로 공급되고 있으며, 독일의 A.P.E. 사에서는 비선형 결정을 이용한 자기상관장치가 주이지만, 일부 파장에서 광다이오드 검출기를 이용한 제품도 출시하고 있다. 그러나 이러한 광다이오드 검출기는 특정 파장에서만 사용되고 있으며, 본 과제 제안서에서 개발하고자 하는 여러 광다이오드 검출기 사양은 이 회사에서 판매하고 있는 제품과 다른 특성과 기능이 포함 될 것이다. 특별히 최근에는 Femto-Easy와 같은 신생 회사에서 매우 간결한 구조의 자기상관장치(ROC)를 공급하고 있는데, 나름 펄스폭을 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있기는 하지만, 측정하고자 하는 초고속 레이저의 파장이 달라지면, 다른 제품으로 구

매해야 하며, 내부에 비선형 결정을 사용하고 있다는 단점을 여전히 내재하고 있다.

1) Coherent(사): SSA(Single-Shot Autocorrelator)

	펄스 측정영역	20 fs ~ 500 fs
	시간 분해능	< 2 fs
	지연행정	> 3 um
	스캔율	> 10 Hz
	파장 측정영역	680 ~ 1100 nm
	고조파 크리스탈	사용
	입사광	자유공간

2) Spectra Physics(사): Pulse Scout2 -> Newport(사)로 합병

	펄스 측정영역	20 fs ~ 3.5 ps
	시간 분해능	< 5 fs
	지연행정	> 3 um
	스캔율	> 10 Hz
	파장 측정영역	420 ~ 1600 nm
	고조파 크리스탈	사용
	입사광	자유공간

3) FEMTOCHROME(사): FR-103XL RAPID SCANNING AUTOCORRELATOR

	펄스 측정영역	5 fs ~ 90 ps
	시간 분해능	< 5 fs
	지연행정	> 0.75 um
	스캔율	> 10 Hz
	파장 측정영역	420 ~ 1800 nm
	고조파 크리스탈	사용
	입사광	자유공간/광파이버

4) A.P.E(사): PulseCheck

	펄스 측정영역	10 fs ~ 12 ps
	시간 분해능	< 4 fs
	지연행정	> 1.5 um
	스캔율	> 10 Hz
	파장 측정영역	700 ~ 1200 nm
	고조파 크리스탈	사용
	입사광	자유공간

5) LIGHT CONVERSION(사): GECO Scanning Autocorrelator

	펄스 측정영역	10 fs ~ 10 ps
	시간 분해능	< 3.3 fs
	지연행정	> 1.5 um
	스캔율	> 10 Hz
	파장 측정영역	500 ~ 2000 nm
	고조파 크리스탈	사용
	입사광	자유공간

6) EKSPLA(사): AC532/1064

	펄스 측정영역	5 ps ~ 100 ps
	시간 분해능	< 33.3 fs
	지연행정	> 0.75 mm
	스캔율	> 10 Hz
	파장 측정영역	420 ~ 2000 nm
	고조파 크리스탈	사용
	입사광	자유공간

7) Thorlabs(사): FSAC

	펄스 측정영역	40 fs ~ 1 ps
	시간 분해능	N/A
	지연행정	> 6 um
	스캔율	5 Hz
	파장 측정영역	650 ~ 1100 nm
	고조파 크리스탈	사용안함
	입사광	자유공간

이와 같은 해외에서 판매되고 있는 자기상관장치들과 과제 제안 기관이 보유한 기술로 개발한 장치와의 비교는 그림 12와 같다.

기관 보유 핵심 기술과 유사 해외 제품(AC)들 사이의 특성 비교 :
1. 해외 상용화 제품[자기상관장치: Interferometry Autocorrelator(IAC)]

 Femtochrome(사): FR-103XL	 Coherent(사): SSA	 A.P.E.(사): PulseCheck	 Newport(사): Pulse Scout2
--	---	---	---

보유 핵심기술인 광지연시간변환 프로그램이나 반도체 검출기 사용으로 해외 제품들에 비해 뛰어난 편리성과 우수한 성능성 !

자기상관장치(Interferometry Autocorrelator)

	Femtochrome 제품	A.P.E. 제품	본 기관 보유 기술 장치 특성 (프로토타입 장치 사진은 후에 기술)
펄스 측정범위	> 5 fs	> 10 fs	> 1 fs
시간 분해능(스캔 정밀도)	< 2 fs	< 4 fs	~ 1 fs
지연 행정 정밀도(주사 거리)	> 0.77 um	> 1.5 um	> 0.77 um
스캔율(스캔 주파수)	> 10 Hz	> 10 Hz	> 1 Hz
측정가능 파장영역	> 420 nm	> 700 nm	> 400 nm

그림 12. 해외 판매 자기상관장치와 기관 보유 기술로 개발된 자기상관장치와의 사양 비교

상기와 같이 해외에서 판매되고 있는 대다수의 자기상관장치는 비선형 결정을 사용하여, 측정하고자 하는 초고속 레이저의 중심파장이 바뀌면, 다른 종류의 비선형 결정을 추가 선택 사항으로 별도로 구매해야 하며, 측정하고자 하는 펄스폭이 100 fs 이하로 매우 짧은 경우에도, 펄스폭 확대 현상을 피하기 위해 사용하는 비선형 결정의 두께도 보다 얇은 결정으로 교체해야 하는 비용 뿐 만 아니라 사용자가 번거로운 재 정렬 과정이 수반된다. 즉 측정하고자 하는 중심파장과 측정하고자 하는 펄스폭 사양에 따라 다양한 선택 사항이 추가되어 사용하기가 번거롭고 비용이 상당하다. 그림 12와 같이 본 기관이 보유한 기술을 사용하는 경우에는 펄스 분해능 뿐 만 아니라, 스캔 범위, 스캔 주파수

및 측정 가능한 파장 범위 등 모두 항목에서 해외 판매 제품들보다도 더 뛰어난 성능을 보이고 있다. 또한 가격 경쟁력 측면에서도 매우 저렴한 편이며, 측정 시스템에는 고속 데이터 수집 카드가 포함되어 있기에, 소비자 입장에서는 시분해 분광 실험이나 다른 실험에도 이러한 범용의 고속 데이터 수집 카드를 활용할 수 있기에 추가 장점을 가진다. 특히 해외 제품군에는 제공되고 있는 독특한 통합 구동 소프트웨어를 이용하면, 실시간 펄스폭 디스플레이 뿐 만 아니라, 누적 평균되는 회수를 조절하면서 평균 수집된 신호를 획득 저장할 수 있으며, 간섭형/세기형 자기상관신호로부터 빠른 시간 내에 연산하여 정확한 펄스폭을 추출해 낼 수 있다. 여기서 개발하고자 하는 자기상관장치에는 광다이오드 검출기가 3가지 종류가 포함되는데, 근자외선/가시광선 파장영역에는 GaN 광다이오드 검출기, 근적외선 파장영역에는 GaP 광다이오드 검출기, 보다 긴 파장의 근적외선/중적외선 파장영역에는 Si 광다이오드 검출기가 제공되는데, GaP나 Si 광다이오드 검출기는 이미 개발이 끝난 상태이나 GaN 광다이오드 검출기는 아직 개발 중이라 과제가 수행되는 기간 내에 개발을 모두 끝낼 것이다. 현재 이 광다이오드를 이용한 기본 특성들은 실제 구현됨을 확인한 상태이지만, 배경 DC 전압을 제거하기 위한 회로 개선 작업이 진행 중이라 예산과 시간이 좀 더 투입되면 개발이 완료될 것이며 이에 대한 기술은 후반부에 보다 자세히 기술하였다.

② 해외 광지연 장치 현황과 특성 비교

그림 13에서 기술한 바와 같이 해외에서 판매되고 있는 광지연 장치는 A.P.E.사와 MesaPhotonics사 두 군데가 있지만, MesaPhotonics 제품을 사용하기가 너무 불편하여 구매자가 거의 없는 편이고, 실질적으로는 A.P.E.사가 독점적으로 판매하고 있다. 이들 제품군과 비교해서 과제 제안 기본이 보유한 기술로 프로토타입으로 제작된 광지연 장치가 그림 13의 맨 오른쪽 사진에 나타나 있다. 이 장치의 특성은 A.P.E.사와 거의 동등한 성능차이를 보이지 않고 있지만, 그림에서 확인할 수 있듯이 우

기관 보유 핵심 기술과 유사 해외 제품(ODL)들 사이의 특성 비교 :

2. 해외 상용화 제품[광지연장치: Optical Delay Line(ODL)]



해외 제품들은 본 기관이 보유한 특이한 사용자 편의 구동 프로그램을 별도로 제공하고 있지 않다 !

광지연장치(Optical Delay Line)

	A.P.E 제품	MesaPhotonics 제품	본 기관 보유 기술 개발 장치 특성 (맨 오른쪽 프로토타입 장치 사진)
최소 시간 분해능	~ 1 fs	~ 1 fs	< 1 fs (0.77 fs)
스캔 주파수	0.1 ~ 10 Hz	0.1 ~ 10 Hz	0.1 ~ 10 Hz
최대 주사거리(시간)범위	150 ps (±11.25mm)	65 ps (±5mm)	> 150 ps (±11.25mm 이상)

그림 13. 해외 판매 광지연 장치와 기관 보유 기술로 개발된 광지연 장치와의 사양 비교
리의 장치는 되반사경의 크기가 1인치로 A.P.E사 제품의 1/2인치 크기보다 크기 때문에, 사용자가

레이저 빔 정렬이 훨씬 용이하다. 또한 우리의 장치 경우에는 뒤에서 보다 자세히 기술하겠지만, 펄스폭을 측정하는 자기상관장치로부터 쉽게 광지연 장치로 변환이 가능하며, 한 대 자기상관장치를 가지고 광지연 장치로 기능 변환이 용이하기에 광지연 장치를 별도로 구매할 필요성이 없게 되는 큰 장점을 가진다. 한편 A.P.E.사 광지연 장치는 기본적으로 우리 장치(DC 모터 구동)와는 다르게 스테핑 모터로 구동하기에 인가하는 디지털 펄스 개수를 카운팅하여 정확한 시간지연을 추출한다는 점에서 우리의 장치와는 다르게 구동한다. 우리 장치의 경우에는 선형 엔코더로 이동 거리를 직접 측정하고, 고속 데이터 수집 장치로 액추에이터로 직접 구동하며, 구동 통합 프로그램으로 시분해 분광 신호들을 별도로 수집 및 신호 처리할 수 있다는 장점을 보유하고 있기에, 사용자 편이 활용성이 더 높다고 판단한다. 고속 데이터 수집 장치는 여러 아날로그 입력 채널(통상 16개 채널)을 가지고 있으니까, 광지연 장치 구동과 동시에 여러 계측 실험 및 신호 획득을 한꺼번에 수행할 수 있다. A.P.E. 광지연 장치를 구매하여 사용할 경우에는 이를 구동시키면서, 동시에 수행하는 계측 실험에서는 데이터 신호를 고속으로 수집하여 저장하기 위해서 별도의 데이터 수집 장치를 사용해야 하는 경우가 더 흔하다. 이는 추가 비용 발생을 의미한다.

제 4 장 초고속 광펄스 진단 장비 개발의 파급효과 및 시장성

■ 초고속 고출력 레이저 관련 시장 규모

현재 초고속 레이저의 펄스를 측정 및 분석할 수 있는 산업용 표준 국산 자기상관장치는 없으며, 앞서 기술한 바와 같이 고가이지만 제한된 기능만을 보이는 해외장치들의 수입에 전량 의존하고 있다. 이미 논의한 바와 같이 보다 편리한 기능과 성능을 겸비한 자기상관장치와 동시에 요긴한 광지연장치 개발이 함께 이루어진다면, 초고속 레이저를 응용한 학계 및 산업분야에서 광펄스 측정과 시분해 계측 분야에서 범용의 표준 장치로서 광범위하게 활용될 것으로 전망한다.

세계 레이저 가공장비 시장 규모는 2013년에 112.4억 달러 규모에서 연평균 6.18% 성장률이 예측되는바, 2021년에는 190억 달러로 예상된다. 국내 레이저 가공 시장 규모는 세계 레이저 가공장비 시장 규모에 약 5% 정도를 차지하니까, 국내 레이저 가공 시장의 규모는 2013년 현재 6,662억원 규모에서 2021년에는 7,074억원 규모로 추산되고 있으며, 의료용 레이저의 경우도 2013년 1477억원 규모에서 2021년에는 1,570억원 규모로 예측하고 있다. 다른 한편 국내 레이저 관련 시장 규모에 대한 예측으로 2020년에 국내 레이저 광원 및 레이저 장비 시장 규모가 각각 2조 1770억원과 3조 800억이라는 추산이 있었다(2016년 9월 전자신문). 현재 레이저 가공분야에서 광파이버 레이저 시스템에 기반한 산업용 고출력 펄스 레이저 시장의 경우 아시아-태평양 지역 시장규모가 2021년에 800억원 규모로서 연 평균 성장률이 27.3%로 빠르게 성장한다는 보고가 있다(전기연구원 보고서). 피코초 펄스를 포함한 초고속 펄스 레이저가 차지하는 비중은 정확한 통계가 제시된 바는 없으나 점차적으로 증가하는 추세임은 확실하며, 보수적으로 추산한다 해도 수백억원 규모에 달할 것은 확실하다. (국내 최대 초고속 레이저 유통 업체인 코히어런트 코리아의 매출 규모는 766억원이며, 이 업체에서 극초단 레이저 사업부가 매출에서 점유하는 비율은 약 10% 정도로 추산되어, 단일 업체

규모로도 100억원에 육박한다) 그럼에도 불구하고 국내 초고속 레이저 광원은 일부 연구실에서 자체 제작한 연구용 키트를 제외하고는 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 국내 산업계는 선택의 여지없이 고가의 레이저 광원과 부대 장비를 수입해 오고 있으며, 이에 따라 초고속 펄스폭 진단장치/장비 또한 부수적으로, 뚜렷한 자각 없이 수입해 오고 있어 국가 경제적 측면에서도 적지 않은 외화 유출이 이루어지는 현실이다.

이러한 국내 상황에 비추어, 유지보수가 용이하고 저가이며 활용성이 매우 높으며 사용자 편의성이 뛰어난 실시간 만능 자기상관장치와 광지연 장치의 국산화 개발은 시급하다고 할 수 있으며, 고출력 초고속 산업 및 의료용 레이저의 빠른 성장에 맞추어 이를 진단하고 활용 범용성이 높은 장치 시스템 구축이 필연적으로 요청되고 있는 시점이라 판단하고 있다.

따라서 본 과제 제안서처럼 산업적으로 요구되는 다양한 초고속 광 펄스폭들을 요구되는 사양에 맞게 개편이 용이하며, 사용자 편리성을 감안하여 별도의 기타 전자 계측 장비를 사용하지 않는 견고한 구조로 간편하게 정확한 펄스폭을 실시간으로 측정하며, 이를 고속 데이터 수집 장치를 통해 디스플레이하거나 저장할 수 있는 만능의 실시간 자기상관장치 개발을 조기에 완성하고, 핵심기술들을 중소기업에 통해 기술 이전하여 국내 학계 및 산업계에 조속히 공급하여 국산화 성공사례로 기여하고자 하며, 나아가 개발된 펄스폭 진단 장치/장비를 세계에 수출하는 모범 사례로 나서고자 한다.

■ 제품 개발 시 예상되는 파급효과 및 활용방안

전술한 바와 같이, 초고속 펄스 레이저를 이용하여 고해상도 바이오 이미징, 분자 동역학, 시분해 분광 등의 기초연구와 나노공정 및 반도체 미세 패터닝 공정 등의 산업분야, 그리고 피부, 치아, 안과 등의 의료분야로의 활용을 위한 장비(또는 장치)개발이 점점 확대되고 있다. 이러한 장비(또는 장치)개발의 최적화된 조건을 확보하기 위해 펄스광에 대한 특성분석(평균출력, 빔형상, 스펙트럼, 펄스폭 등)이 중요한 부분으로 요구됨에 따라 간편하고 실시간으로 펄스특성을 파악하거나, 이를 이용한 고조파 발생을 이용한 파장 변환, 새로운 계측 광학계 개발에 꼭 필요한 자기상관장치/광지연장치의 필요성이 증가하고 있다. 특히 기초의학 및 생물학 분야에서는 생체시료의 표면 뿐 아니라 내부까지 3차원 이미징이 가능한 다광자여기 현미경이 개발되고 있으나, 보다 내부 깊은 곳까지의 고해상도 이미지를 실현하기 위하여 다양한 홀로그래밍 광학계를 개발하고 있다. 전체 구조 내 광학/분광계에서 변화하는 펄스광의 정보를 실시간으로 확인하면서 최적화된 광학/분광계를 구성해야 되며, 중간 중간에 펄스특성 분석 장치를 사용하고 있는 현실이다. 초고속 레이저 광원이 사용되는 곳에는 반드시 자기상관장치/광지연 장치가 사용된다고 간주할 수 있다.

개발하고자 하는 주요 장치 및 부대 장치들이 출시가 이루어지면, 직접적인 파급효과를 정확하게 수치적으로 환산하기는 어렵겠지만, 앞서 기술한 국내 레이저 장비 연산 규모와 산업용 고출력 펄스 레이저 규모를 고려할 때, 연간 수십억 규모를 환산되며 최대 50억원 규모의 수입 대체효과

를 산정할 수 있다. 여기에는 디스플레이용 패널 하자를 교정하는데 많이 사용되고 있는 피코초 산업용 레이저를 고려하지 않은 매우 보수적인 수치이다. 상대적으로 적은 시장규모를 갖는 국내 시장보다도 중국 시장을 겨냥한 제품 개발이 더 고려되어야 하며, 이를 위해 제품의 안정성, 신뢰성, 견고성 및 핵심 기술 보안 유지에 더 신경을 써야 한다고 믿고 있다. 이런 의미에서 핵심 기술이 될 수 있는 독특한 통합 구동 소프트웨어 개발과 반도체 광다이오드 검출기 회로 개발을 위해 과제 지원이 꼭 요청되며, 과제 지원을 통해 진보된 구동 프로그램과 새로운 반도체 검출기 개발이 조속히 이루어져 보다 완성된 제품 출시가 되기를 기대한다.

공공 연구성과로서 현재까지 개발된 장치/설비의 내용을 정리하면 아래와 같다. 각 내용들을 차례에 따라 좀 더 구체적으로 기술한다.

- 실시간 모니터링과 펄스폭 피팅이 가능한 자기상관 장치 개발
- 가시광선에서 근적외선 파장대역에 걸친 초고속 펄스폭 측정이 가능한 광다이오드 검출기 개발
- 자기상관장치로부터 여기-탐사 시분해 분광 장치(광지연 장치)로의 변환이 가능한 장치 개발

(1) 실시간 자기상관 장치 개발

현재까지 개발한 연구 결과는 크게 2가지 종류 연구 주제로 실시간 만능 자기상관장치를 개발하였다. 먼저 첫 번째 연구 주제는 반도체 광다이오드의 이광자 흡수현상을 이용한 초고속 펄스폭 (펨토 및 피코초 짧은 시간폭)을 검출해 내는 자기상관장치 개발로서 광계측 요소 기술에 해당한다. 초고속 레이저 등에서 발생하는 짧은 펄스폭이 10 피코초 이하일 때는 전자전기 계측기로 분해능의 한계 때문에 측정할 수 없고, 짧은 펄스폭을 가진 펄스의 자체 특성을 이용하여, 즉 제2고조파 발생이나 이광자 흡수현상과 같은 비선형 효과를 이용하여 측정할 수밖에 없다. 초고속 펄스의 에너지는 에너지 검출기, 파장(또는 주파수)은 분광기로 검출이 가능하지만, 시간 폭은 위와 같은 비선형 효과를 이용해야만 펄스폭을 측정할 수 있다. 보통 짧은 펄스폭 자체 성질을 이용하여 두 개의 광 펄스가 중첩될 때(마이켈슨 간섭계 이용) 발생하는 제2고조파 발생을 이용하는 방법은 광학적 비선형 결정을 사용해야 하고, 펄스의 중심 파장이 달라지면, 비선형 결정의 방향을 새로이 조절하거나, 다른 종류의 비선형 결정을 별도로 구매해서 장치 내에 새로이 장착하여 사용해야 한다. 이에 반하여 반도체 광다이오드를 이용하는 경우에는 비선형 결정을 전혀 사용하지 않더라도, 광검출기 내 반도체 소재의 흡수 에너지 띠(밴드갭)보다도 더 작은 광자(광원) 에너지(또는 더 긴 파장을 갖는 광원)를 갖는 광원 조건을 만족하면, 별도의 조절이나 교체 없이도 이광자 흡수 현상에 의해 발생하는 순간적인 광전도 전류를 전압으로 증폭하여 광 펄스폭을 검출할 수 있다. 현재까지 이와 같은 반도체 광다

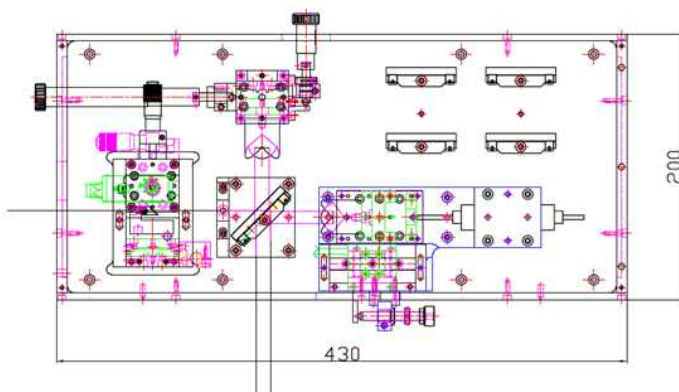


그림 14. 개발된 실시간 자기상관장치 설계 도면 및 개발 장치도
이오드(예시 GaP)를 이용하여 초고속 펄스의 펄스폭을 검출하는 기법을 이용하여 펄스폭 측정하는 장치로서 간결하고 견고한 자기상관기를 개발하였다. 새로운 기술적인 특징으로 광지연을 위해 기존

위상 정보를 어느 정도 파악할 수 있음을 잘 나타내고 있다. 펄스폭 내에 있는 이들 간섭 패턴 개수로부터 이 시스템이 제시한 측정 펄스폭이 정말로 맞는 지 여부를 추가로 확인할 수 있다. 이점 때문에 굳이 간섭 패턴이 나타나지 않는 세기형 자기상관 신호 대신에 이와 같은 간섭형 자기상관 신호를 측정해야 하는 이유를 잘 설명하고 있다.

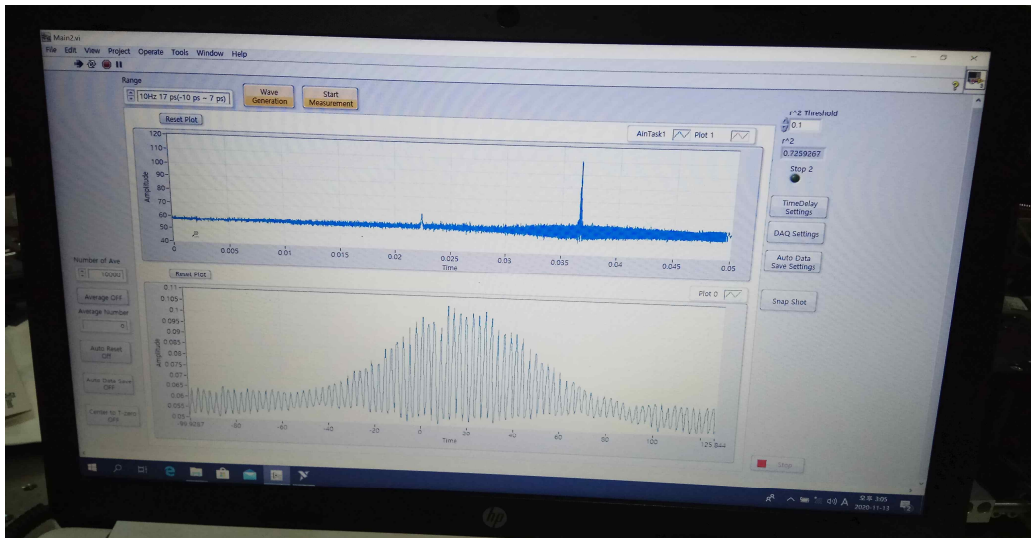


그림 16. 현재까지 개발된 자기상관장치와 구동 통합 프로그램으로 측정된 펄스폭

(2) 다 파장에 걸친 초고속 펄스폭 측정을 위한 반도체 광검출기 개발

● 근적외선 파장에서 중적외선 파장 대역까지

대부분의 레이저는 가시광선 파장대역에서 근적외선 파장대역에 걸쳐 있으므로, 다 파장에 걸친 초고속 펄스폭 측정이 가능한 자기상관장치 개발은 실용적인 측면에서 매우 중요하며 제품의 활용도는 높아질 수밖에 없다. 현재까지 다 파장에 걸쳐서 초고속 펄스의 펄스폭을 측정하는 기술이나 장치는 상기(2장과 3장)에 기술한 바와 같이 대부분 비선형결정을 이용하고 있기에, 비선형 결정을 별도로 구매해야 하며, 이는 레이저 중심 파장에 따라 비선형 결정을 추가선택(옵션)사항으로 별도 구매를 해야 한다. 그러나 앞서 2장에서 기술한 바와 같이 소형 광다이오드 검출기 자체가 가지고 있는 이광자흡수 현상을 이용하여 복수의 광다이오드 세트를 간편하게 교체함으로써, 광대역 파장대역의 초고속 레이저 광원의 펄스폭들을 효율적(편리하게)으로 측정하고, 1 펨토초 이하 분해능을 가지면서 단순하고도 견고한 하드웨어 장치 구조를 이용한 측정 시스템 개발은 매우 높은 경쟁력을 갖게 된다. 이와 같은 반도체 광다이오드를 이용하여 초고속 펄스의 펄스폭을 검출하는 기법이 파장 별로 단편적으로 알려져 왔지만(주로 근적외선 파장 대역에 국한되어 왔음), 본 과제 제안에서는 동일한 한 대의 펄스폭 측정용 자기상관장치만을 가지고, 소형 크기로 3~4가지 종류 별로 구분되는 광다이오드 검출기(광전도 증폭기)를 개발하여 필요할 때마다 해당 광검출기로 교체 사용함으로써,

자외선 파장에서 가시광선 및 근적외선 파장 대역에 걸친 초고속 펄스들을 검출할 수 있는 장치를 개발하고자 한다. 즉 동일한 자기상관장치(펄스폭을 측정하기 위한 마이켈슨 간섭계)내에 소형 해당 광전도 증폭 광검출기를 단순히 교체함으로써, 중심파장이 자외선에서 근적외선 파장(343 nm ~ 1300 nm)에 걸친 다양한 초고속 광펄스의 펄스폭을 측정할 수 있는 기술과 간편한 장치를 개발하고자 한다. 이러한 제안이 실제로 구현될 수 있음을 그동안의 연구를 통하여 확인하였다. 현재까지 개발된 연구 성과를 구체적으로 살펴보면, 근적외선 파장 대역의 초고속 펄스들은 GaP, GaAsP, Si 광다이오드 검출장치로 측정할 수 있으며, 자외선과 가시광선 파장 대역의 초고속 펄스들은 (Al)GaN 나 SiC 광다이오드 검출장치로 그 펄스폭을 효과적으로 측정할 수 있음을 다음과 같이 확인하였다. 이들 파장 대역에서 앞서 개발된 동일한 한 대의 자기상관장치를 사용하였고, 이 시스템의 시간 분해능은 동일하게 0.7 펨토초 분해능을 갖는다.

다음의 그림 17과 그림 18은 소형의 복수 광다이오드 증폭기를 개발하여, 다 파장에 걸쳐서 중심파장을 갖는 초고속 광 펄스들의 폭스폭 측정과 광다이오드들의 개별 특성을 측정한 결과들을 나타내고 있다(여기서 사용한 레이저 광원은 Newport사의 InSight X3 레이저로 680-1300nm까지 연속적으로 파장 변환이 가능한 펨토초 레이저이다)

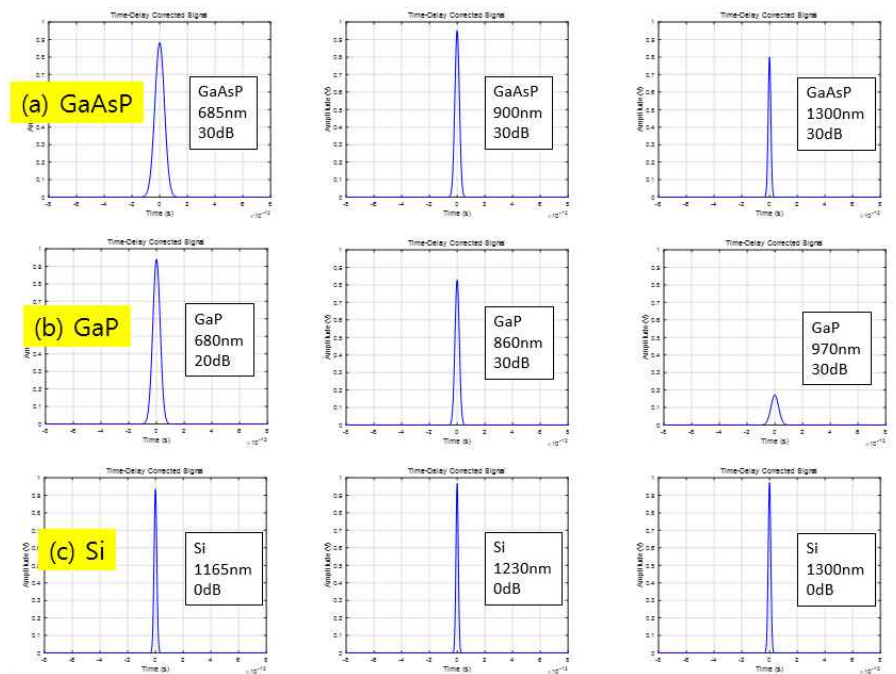


그림 17. 개발된 실시간 자기상관장치 내에 장착된 서로 다른 광다이오드 검출기로부터 그 중심파장이 다른 초고속 광펄스들의 펄스폭을 측정하고, 이를 피팅 결과들을 나타낸다. 각 광 검출기마다 왼쪽 패널들은 측정 가능한 짧은 파장을 나타내고, 오른쪽 패널들을 측정 가능한 가장 긴 파장을 나타낸다.

그림 17은 실제로 근적외선 파장영역(685nm ~ 1300nm)에 걸쳐서 발생되는 펨토초 광 펄스의 펄스폭 측정을 위하여 GaAsP, GaP 및 Si 광다이오드 광검출기를 제작하여 자기상관장치 내에 구축하여 그 펄스폭을 측정하고, 측정된 펄스폭을 피팅으로 검출한 결과를 나타내고 있다. 측정을 위해 사용된 입력 세기는 300mW 평균출력을 동일하게 유지하였고, 광다이오드 증폭기(광검출기)의 증폭율은

0dB ~ 30dB로 조정하였다. 이들 광 증폭기는 그 증폭율이 최대 70dB이기 때문에 이광자 흡수현상에 의해 발생하는 낮은 광전도 전류를 충분히 증폭할 수 있는 상당 여유가 있었다. 여기에서 이들 서로 다른 반도체 광다이오드 증폭기들은 광다이오드 자체 밴드갭(에너지 띠) 때문에 측정 가능한 파장 범위는 종류별로 제한되는데, GaP나 GaAsP 반도체 증폭기는 측정 가능한 파장 범위는 각각 680nm ~ 970nm, 680nm ~ 1300nm임을 알 수 있다.

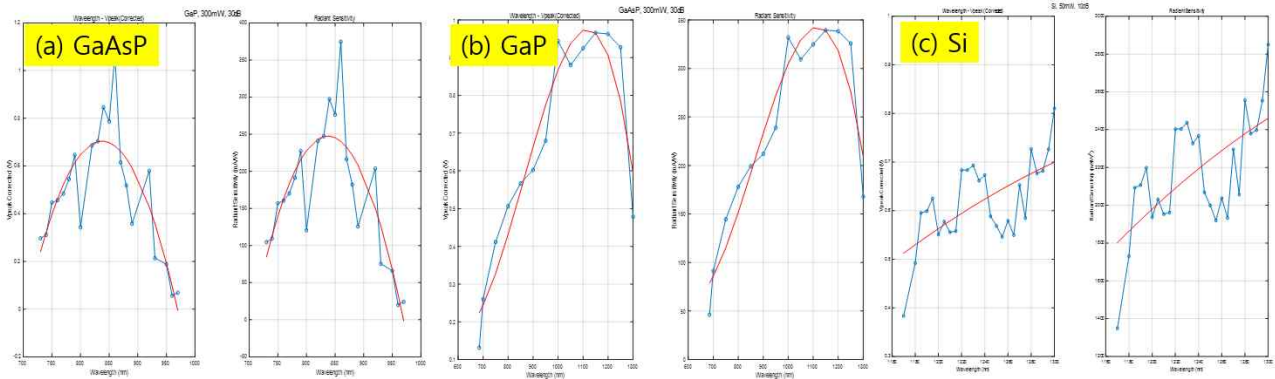


그림 18. 개발된 광다이오드 증폭기별로 펄스폭 측정이 가능한 파장 범위를 측정한 결과

그림 18은 위의 종류별 광다이오드 증폭기를 사용하였을 때, 파장별로 측정되는 신호 크기를 나타내는데, 그 크기(왼쪽 패널)와 규격화한 감도(오른쪽 패널)를 내연으로 표현한 실험결과이다. 입사광 출력을 일정하게 유지하고, 파장 간격을 각각 15nm, 50nm, 5nm 별로 파장을 변화시켜가면서, 펄스폭의 최대 피크값을 검출하여 측정하였다. 측정결과는 각 다이오드 별로 알려진 파장 대비 신호 감도와 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 측정된 신호들이 모두 다 이광자흡수 현상에서 발생되고 있음을 뒷받침하고 있다. 특히 Si의 경우에는 사용된 레이저(Insight, Newport)의 파장이 최대 1300nm로 고정되어 있어, 이 파장까지만 측정되었지만 다이오드의 감도 특성으로 보아 2000nm 부근까지의 중적외선 파장영역의 초고속 펄스폭 측정이 가능할 것으로 판단된다.

● 자외선 파장에서 가시광선 파장대역

자외선 파장에서 가시광선 파장대역에 걸치는 초고속 펄스들의 펄스폭을 측정하기 위해서는 에너지띠가 보다 큰 광다이오드가 필요하다. 이에 적합하며 현재 판매되어 구입이 가능한 광다이오드로는 SiC와 GaN(AlGaIn) 광다이오드가 있다.

그림 19는 가시광선 파장 대역의 초고속 펄스의 펄스폭 측정을 위해 상업적으로 판매되고 있는 SiC와 GaN 광다이오드를 사용하여 광다이오드 증폭기를 개발하여, 그 펄스폭 측정이 가능함을 검증한 실험 결과를 나타내고 있다. SiC와 GaN 광다이오드를 사용하여 펄스폭을 측정한 학계 보고가 2건 있었으나, 이들은 모두 공진기로부터 발생된 광펄스가 아니라 모두 다 별도의 레이저 증폭 장치로 광펄스들을 증폭하여, 펄스 당 에너지($\sim \mu J$)가 매우 높은 광펄스들을 사용하였다. 여기 실험처럼 오직 공진기로부터 발생된, 즉 펄스당 에너지($\sim nJ$)가 낮은 가시광선 파장대역인 광 펄스의 펄스폭 측정 사례는 아직 학계에 보고된 사례는 없다. 이 실험을 통해 얻은 공진기로부터 나온 가시광선 파

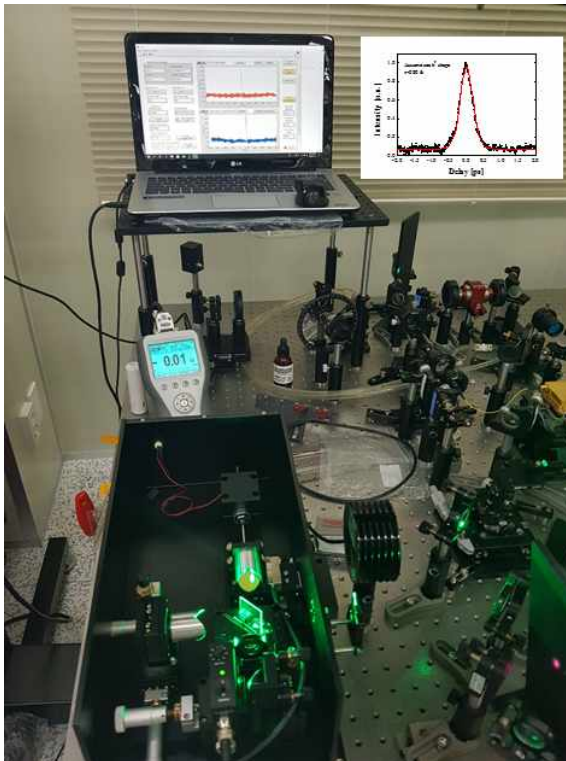


그림 19. SiC와 GaN 광증폭기를 이용하여 514nm 파장중심의 가시광선 파장영역의 펄스 측정

장영역의 펄스 측정 결과를 보면 SiC 광증폭기보다는 GaN 광증폭기가 더 뛰어난 감도를 보였다. 이 측정 과정에서 새롭게 발견한 점으로 현재 GaN 광다이오드를 이용한 광증폭기가 가지고 있는 해결해야 할 단점으로, 측정하고자 하는 가시광선 파장대역보다 훨씬 짧은 파장이 에너지 띠(bandgap)가 되어야 하는 광다이오드들은 그렇게 큰(높은) 에너지 띠 특성으로 필히 수반될 수밖에 없는 높은 암 전류값과 이로 말미암아 나타나는 큰 배경 전압 때문에 광다이오드 검출기가 포화되는 단점이 나타났다. 이에 현재 큰 암 전류를 자동적으로 낮추는 회로 개선 연구가 진행되고 있는데, 기본적으로 해결이 가능함을 확인한 상태이다. 추후에 과제가 채택되어 예산이 투입되면, 이를 개발이 조만간 이루어 질 것으로 기대된다. 이 단점이 해결되면 가시광선 파장대역의 초고속 펄스 파형 관측이나 펄스폭 측정이 보다 더 간편해지고, 쉽게 펄스폭 측정이 이루어질 것으로 전망한다. 이 실험 과정에서 확인된 사항

으로 대략 입력 펄스광의 평균 출력세기가 70mW 정도이면 쉽게 펄스폭 측정이 가능할 것으로 예상되고 있다. 참고로 그림 19는 전기연구원에서 개발한 근적외선 파장영역의 Yb:KYW 펄스 레이저를 광원으로 BBO 결정을 사용하여 제2고조파 발생으로 얻은 514nm 부근의 수십 KW급 가시광선 파장영역의 초고속 펄스 레이저이다. 한편 이 파장대역의 펄스를 광원으로 또 다시 제2고조파 발생용 비선형 결정을 사용하면 257nm 부근의 제2고조파가 발생할 것이다. 이 파장대역에서는 비선형 결정자체가 갖고 있는 차체 UV 파장 흡수효과 때문에 129nm 부근에 있는 257nm의 제2고조파를 발생시키기 어려워 펄스폭 측정이 사실상 불가능하게 된다. 이에 반해 극자외선 파장영역에 밴드갭을 갖는 AlGaIn와 같은 반도체 광다이오드 증폭기를 개발하여 사용하면 이러한 문제점을 쉽게 극복할 수 있다. 이에 대한 연구도 과제가 채택되면 개발할 계획으로 있다. 위의 전기연구원 측정 실험과정에서 얻은 실험 결과를 보면, 514nm 부근의 고출력 펄스 레이저 광원으로 발생하는 광펄스들의 펄스폭은 약 280fs 으로 측정되었으며, 이 결과로 그동안 전기연구원에서 해결하지 못하였던 펄스폭 측정 문제를 해소해 주었다.

펄스폭을 측정하는 기술이나 장치는 앞서 2장과 3장에서 기술한 바와 같이 대부분 비선형결정을 이용하고 있기에, 중심파장이 달라지면 그에 적합한 비선형 결정을 별도로 구매해야 하며, 이는 추가선택(옵션)사항으로 추가 구매를 해야 한다. 그러나 본 과제 제안에서 개발하고자 하는 소형 광다이오드 검출기 세트를 사용하면, 자외선에서 적외선 파장대역까지 사실상 모든 초고속 레이저 광원들로부터 발생하는 초고속 펄스들의 펄스폭을 동일한 장치 내에서 기존에 사용하던 광 검출기 세트를 측정하고자 하는 파장에 적합한 광 검출기 세트로 간편하게 나사로 해체 후 교체하면 추가 정렬과정 없이 바로 사용할 수 있기에 편의성과 수월성으로 뛰어난 경쟁력을 갖는다. 향후 초고속 레

이저나 광원을 이용한 펄스초 조정밀 가공 및 표면 개질 기술 개발에 최적 조건을 확보하기 위해서는 펄스폭 검출기는 반드시 필요하며, 향후 UV 펄스초 광원을 이용한 의료보건 신기술 개발 분야, 예로서 가전 물품 살균기 개발, 공용시설용 살균기 개발, 혈액 및 제약 백신 등 부작용이 적은 특수 살균분야에 최적 조건을 확보하기 위해서는 자외선 및 가시광선 파장대역의 초고속 레이저 광원의 활용 증대와 함께 이에 적합한 펄스폭 측정 장치에 대한 필요성이 증대될 것으로 전망한다.

(3) 자기상관장치로부터 광지연장치로의 변환이 가능한 통합 장치 시스템 개발

일반적으로 초고속 펄스의 펄스폭을 측정하는 자기상관장치와 시분해 분광 기술을 이용하여 소재의 빠른 동역학적 거동을 관측하기 위해서 널리 사용하는 광지연 장치는 별도 기기로 사용되어 왔으며, 각기 별도의 장치명, 즉 “자기상관장치(Autocorrelator)” 및 “광지연장치(Optical Delay line)” 제품으로 각기 판매되고 있다. 그런데 자기상관장치와 광지연장치에는 동일한 액추에이터로 광지연을 만들고 있기 때문에, 동일한 액추에이터를 이용하여 이 두가지 장치를 통합할 수 있다. 다시 말하면, 자기상관장치 내에 설치되어 있는 액추에이터만을 이용하여 입사광을 반사시키고, 자기상관장치 내 펄스폭을 측정하는 검출기 부분을 해체해서 분리한 후에 액추에이터로부터 반사되는 광펄스를 빼내서 사용하면 자기상관장치 1대로부터 광지연 장치 1대로 변환이 가능하다. 현재까지 개발된 자기상관장치 내 부품들을 키트(한 몸체 세트) 형식으로 개발하면, 분리 제거가 가능한 빔가르게 키트와 분리 제거가 가능한 광검출기 키트를 펄스 측정용 자기상관장치로 사용하다가, 여기-탐사 측정 기법으로 응용하기 위한 광지연장치로 변환하고자 할 때, 해당 키트들을 제거 후에 필요한 키트를 손쉽게 설치하기만 하면 광지연장치로 즉각적으로 변환할 수 있는 통합 장치가 가능하다. 이때 이렇게 변환된 광지연 장치는 액추에이터에 입사광을 넣고서 되 반사된 광을 뽑아서 사용(nondegenerated pump beam)할 수도 있으며(독립된 광지연 장치로 기능함), 또는 입사된 광을 빔가르게로 적절한 세기로 두 개로 갈라서 한 개는 액추에이터에 입사시키고, 액추에이터로부터 시간 지연된 되 반사광(탐사광)을 얻으며, 빔가르게에서 얻은 나머지 광은 움직이지 않는 또 다른 되반사경으로부터 되 반사광(여기광)을 거울경으로 다시 반사시켜 약간의 거리차를 두고 나란하게 진행하는 여기-탐사광들을 한꺼번에 뽑아 낼 수 있는 광지연 장치(degenerated pump-probe beams)로도 쉽게 변환하여 사용할 수 있다. 이와 같은 아이디어를 바탕으로 기존에 사용하던 자기상관장치를 구조 변경하였으며, 자기상관장치에서 광지연 장치로 손쉽게 변할 수 있는 통합 장치개발 새롭게 개발하였다. 이렇게 개발된 자기상관장치에는 키트 단위로 광/기계 부품들이 제작되었으며, 특히 개발된 검출기 세트와 빔가르게 세트들은 모두 키트 형태로 분리, 조합이 4개의 볼트만을 사용하여 가능하도록 하였다.

① 검출기 세트와 빔가르게 세트로 분리가 가능한 구조 변경

현재까지 개발된 자기상관장치의 구조는 그림 20과 같으며, 여기서 붉은 사각형들은 각각 빔가

분리 가능한 키트 구조

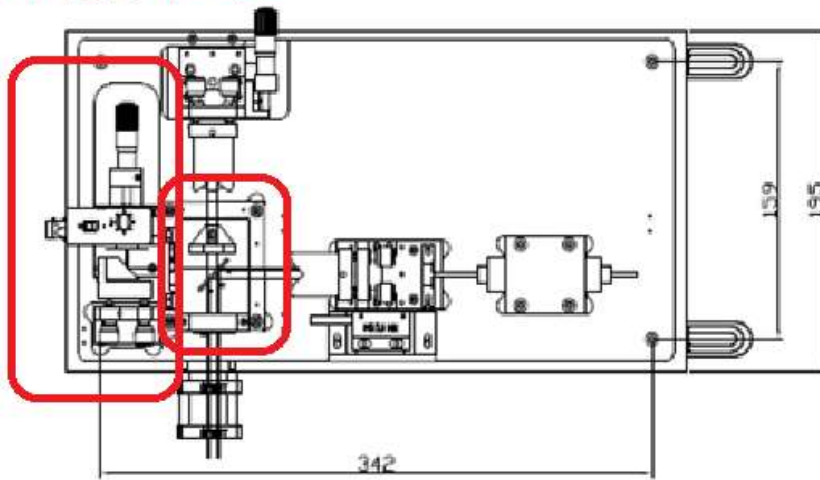


그림 20. 기존의 자기상관장치로부터 광지연장치로 변환하기 위하여 분리 가능한 키트 구조로 설계 변경
 르게 키트와 광다이오드 증폭기와 파라볼릭 미러가 한 키트 모듈로 구성되어 있다. 이 키트 모듈들은 쉽게 분리할 수 있도록 구조 변경되어 제작되었다.

② 광지연장치로의 스위칭이 가능 빔가르게 키트 구조 변경

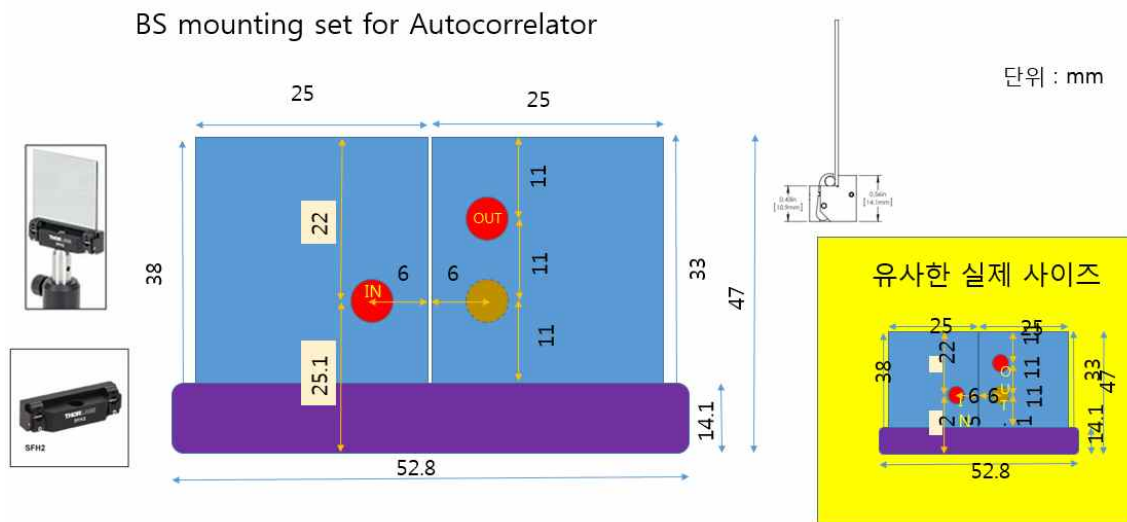


그림 21. 군속도 보정용으로 개발된 펄스 측정용 빔가르게 키트 구조

빔가르게에 의한 펄스 확대 현상을 피하기 위하여 군속도가 보정되는 자기상관장치를 위한 빔가르게 키트 구조는 그림 21과 같으며, 정확한 펄스폭 측정을 위한 두께 3mm 빔가르게(반사율 50%)를 앞뒤로 놓아 자기상관장치 내 빔가르게에 의한 군속도 확대 현상이 보정되도록 하였다. 하지만 자기상관장치를 광지연 장치로 변환하기 위해서는 여기광과 탐사광을 나란히 뽑아낼 수 있도록 빔가르게 키트 구조를 다음과 같이 변경해야 한다. 이러한 빔가르게 키트는 자기상관장치에서 사용하

던 빔가르게 키트와 별도로 추가 제작되어야 하면, 그림 22에서와 같이 액추에이터로부터 반사된 광 (탐사광)이 이격된 상태로 자유 공간으로 통과해야 한다.

BS mounting set for Optical Delay Line

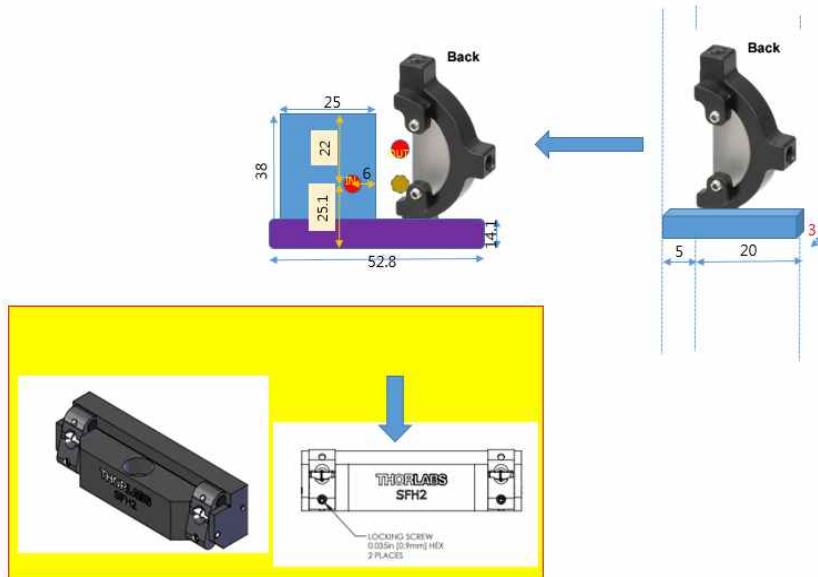


그림 22. 여기 및 탐사광으로 구성된 두 개의 빔을 형성하기 위하여 빔가르게 키트의 설계 구조 변경

따라서 앞 그림 21에서 빔가르게 키트 내에 위치한 2개의 빔가르게 중에 하나(오른쪽)는 광지연 장치로 활용하기 위해서는 제거되어야 한다. 이는 액추에이터로부터 반사된 광을 빔가르게를 다시 통과하기 않고 지나야 하기 때문이며, 이렇게 사용하면 nondegenerated pump beam 방식으로 독립된 광지연 장치(광검출기 세트 제거 후)로 활용할 수 있다. 한편으로 제거된 오른쪽 빔가르게 대신에 위 그림 22의 오른쪽 그림에서와 같이 D형 모양의 마운트로 전반사경(은 평면반사경)을 나란히 설치하고, 다른 쪽 arm에 있는 되반사경으로부터 오는 반사빔을 D형 마운트의 전반사경으로 반사시키면 degenerated pump probe beams이 형성되어(가까운 이격 거리를 두고 나란히 진행하는 여기 빔 및 탐사빔이 형성)서, 시분해 분광실험에서 가장 널리 활용되는 여기-탐사 기법을 위한 견고한 여기-탐사광이 손쉽게 만들어진다. 이와 같이 펄스폭 측정을 위해 자기상관장치를 사용하다가, 그림 22와 같은 빔가르게 키트로 교체 설치하면, 여기광과 탐사광을 형성하기 위해 별도의 광학계를 꾸밀 필요 없이, 간편하고 견고하게 나란한 여기 및 탐사광을 형성시킬 수 있는 광지연 장치로 손쉬운 변환이 가능하다. 광학계 구성 자체가 매우 작아지고 이점을 추가로 얻을 수 있다. 이와 같은 통합 장치 개발은 자기상관장치가 단순히 펄스폭을 측정하는 장치 기능과 더불어 (여기-탐사광 형성을 위한) 광학계로서 그 활용도를 높일 수 있게 된다.

그림 23은 현재까지 개발된 최종적으로 완성된 자기상관장치로부터, 여기-탐사 기법을 효율적으로 활용할 수 있도록 여기광과 탐사광이 약 6mm의 짧은 거리로 나란하게 형성된 모습을 나타내고

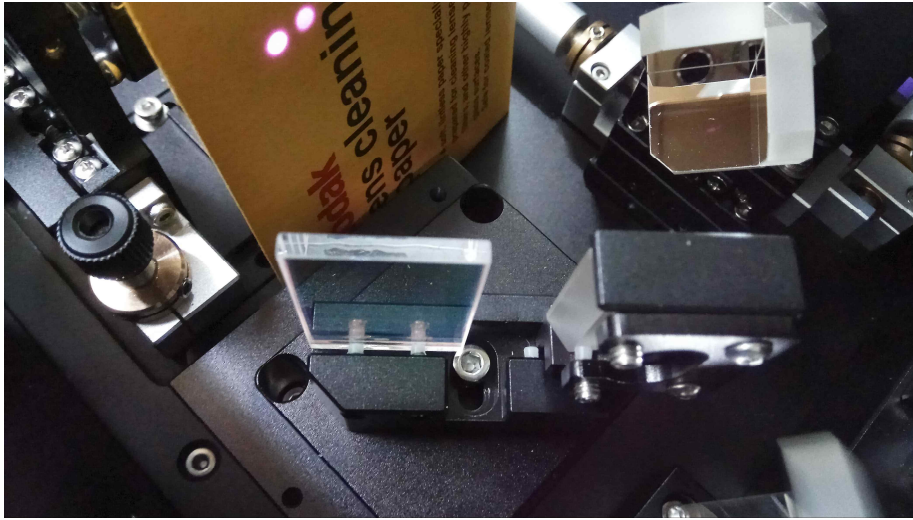


그림 23. 여기-탐사 기법이 가능한 광지연장치로 변환된 자기상관장치
 있다. 그림 23 하단에는 실제 액추에이터가 10Hz 로 빠르게 구동되고 있는 상태로 탐사광이 흔들림이 없이 매우 안정되게 형성됨을 알 수 있다. 이들 2개 빔을 각각 여기광과 탐사광으로 활용하여 다양한 여기-탐사 기법 실험을 수행할 수 있다. 이때 두 빔들은 이미 자기상관계로부터 변환되었기 때문에 이들 광펄스들 사이의 시간차는 시간차가 같은 영점(zero-delay)이 매우 근접해 있으므로 한쪽 arm에 있는 병진기 노브를 조금만 움직이면 영점을 쉽게 찾을 수 있다. 이와 같은 현재까지 자기상관장치 및 광지연 장치가 통합된 시스템 개발이 이루어져 있다. 이와 같은 장치는 아직 학계 보고나 상업적인 제품으로 개발된 사례가 없다.

(4) 현재까지 개발된 만능 실시간 자기상관장치 시스템의 차별성 요약

□ 개발된 실시간 자기상관장치 시스템의 독창적인 특성

1. 오픈 루프 방식으로 구동 전압값에 따라 시간 주사(스캔) 범위를 임의로 설정 가능
 (닫힌 루프 방식으로 시간 주사 범위가 고정된 해외 상업적인 제품과 차별성을 가짐)
2. 실시간 관측 및 누적 평균을 통한 신호 대 잡음비 높은 측정값 기록 기능
3. 개발된 장치는 펄스폭 측정을 위한 자기상관장치 기능과 광지연(Optical Delay Line)장치로의 선택적 변환(selective-switching)을 간편하게 이룰 수 있는 기능
4. 액추에이터의 움직인 거리를 0.1미크론 정밀도로 빠르게 측정이 가능한 선형엔코더 부착
5. 측정하고자 하는 레이저 광 펄스의 중심파장이 자외선, 가시광선 및 적외선 파장영역에 따라서, 신호 검출을 위한 광검출기를 3가지 종류(자외선, 가시광선, 적외선 영역) 중에 하나로 선택적으로 간편하게 변환할 수 있는 기능 (일부 추가 개선, 보완 사항 내재함)
6. 각 광 검출기내 센서는 다양한 반도체(AlGaIn , GaIn , GaP , Si) 광다이오드 중에 하나이며(각 다이오드 종류가 측정 파장범위를 결정함), 그 표면에 집속된 광 세기에 따라 미세 전류가 발생하는데, 이를 고전압으로 증폭시키는 회로가 광검출기 속에 내장되어 있음. 증폭율 조정은

0dB ~70dB까지 10dB 간격으로 선택 조절 기능 (일부 추가 개선, 보완 사항 내재함)

□ 광지연 시스템에 기반한 펄스폭 측정용 자기상관장치의 개별 특성

1. 펄스 측정 시간 범위: 약 110ps 이상의 시간 범위 내에 걸치는 극초단 펄스 측정가능
2. 시간 분해능: 1fs 이하(~ 0.7fs)까지 시간분해 가능
3. 지연행정(주사거리): 최소 1.5 mm 이상의 지연행정 가능
4. 스캔율(스캔속도, 주사율): 1Hz, 3Hz, 5Hz, 8Hz 및 10Hz 사이에서 임의로 선택 가능
(통상 5Hz 이상 주사율을 실시간이라 하며, 높은 주사율은 빠른 데이터 획득시간을 의미)
5. 파장 범위: 자외선, 가시광선 및 적외선 파장 대역의 펄스 광원에 대해 측정 가능

□ 개발된 기타 부속 장치 및 사용자 편의 인터페이스의 특성

1. Labview 기반(그래픽) 신호수집 및 분석 가능한 프로그램 구축 및 제어 알고리즘 개발
2. 광지연 조절을 위한 기본 함수발생 프로그램 모듈 구성
3. 데이터 수집, 변환, 위상 동기화 및 조절 가능 프로그램 모듈 구성
4. 부속 장치로서 선형엔코더 신호 처리 및 동기화를 위한 DAQ card (데이터 수집 장치) 1대와 DAQ카드로부터 발생된 아날로그 신호를 증폭하여 액추에이터를 구동하는 전력증폭기 1대가 키트 형식으로 제공됨
5. 펄스폭 측정을 위한 자기상관장치로부터 다른 계측 실험을 위한 광지연 장치로 변환 (switching)하고자 할 때, 여러 아날로그 입력 채널을 갖고 있는 DAQ card 이용과 이들 신호들을 처리(누적 평균 등)할 수 있는 사용자 편의 다기능 제어 인터페이스 구축
6. 다음 페이지에 개발된 사용자 구동 GUI 통합 프로그램 메뉴얼을 첨부하였다.
(일부 추가 개선, 보완 사항 내재함)

< 개발된 GUI 기반 통합 구동 프로그램 사용자 메뉴얼 >

Autocorrelator

SW Manual (Version 2.0.2)

건국대학교 / HME

December 31, 2020

Xanadu C&I

Contents

Contents	i
1 설치 환경	1
2 Main Panel	1
3 Time Delay Settings	2
4 DAQ Settings	3
5 Auto Data Save Settings	5
6 Snap Shot	5
7 기본 측정 방법	6

1 설치 환경

본 SW 와 Autocorrelator 는 아래의 환경을 지원한다.

- ⑦ PC: 3.0GHz 이상의 속도를 가지는 dual core 이상의 CPU
- ⑦ RAM: 4GB 이상
- ⑦ OS: Windows 7 64bit 이상
- ⑦ USB2.0 이상의 USB port
- ⑦ 설치 용량: 약 1.5GB 의 HDD 공간 필요 (Labview Runtime Engine 및 NI-DAQ run-time engine 설치 용량 포함)

2 Main Panel



Main Panel 화면

프로그램을 실행하면 위의 그림과 같은 main panel 윈도우가 열린다. 여기서 각 부분의 설명은 아래와 같다.

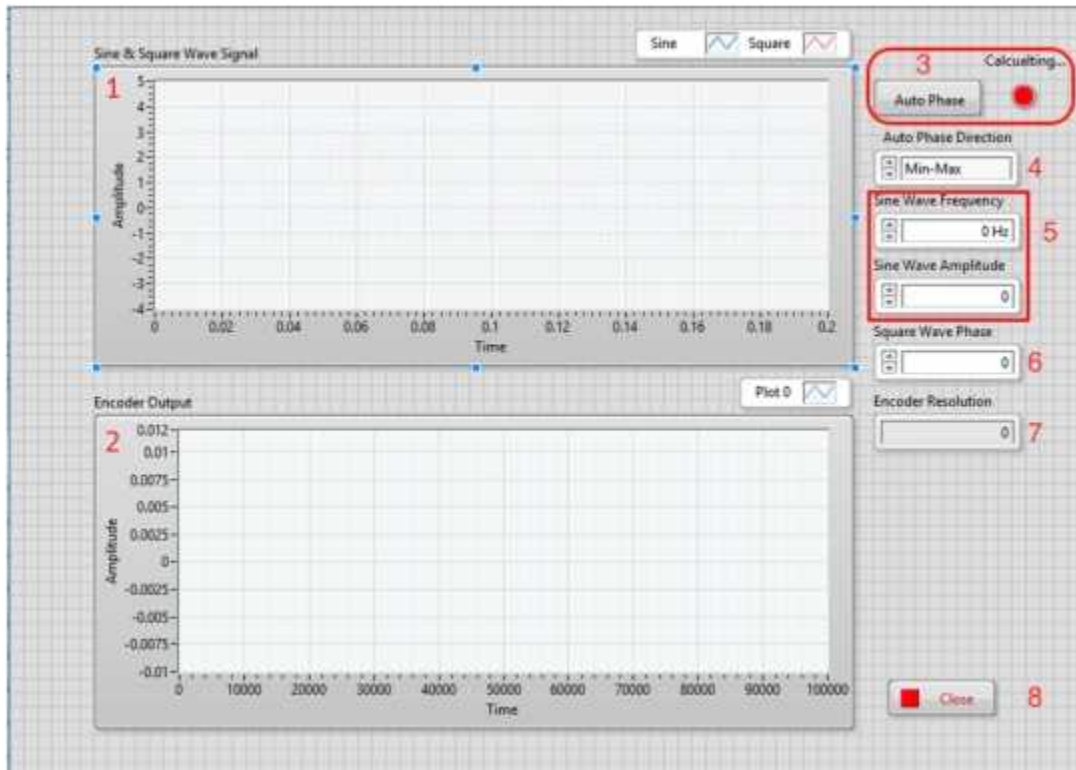
1. 현재 측정 **data plot** 현재 측정되고 있는 raw data를 plot 한다.
2. 누적 평균 **data plot** raw data의 시간축을 보정하고 내삽한 data를 plot 한다. 또한 Average ON/OFF 버튼이 ON 상태인 경우 누적하여 평균한 data를 plot 한다. 누적 평균과 관련된 설정은 아래 ⑥ 참고.
3. **Range** 현재 설비에 설정된 측정 범위를 선택한다. 설정된 측정 범위는 OS의 사용자 폴더\Documents\UFL 폴더에 있는 Preset.dat 파일에 기록된 내용이다.

4. **Wave Generation** Moving mirror를 작동시켜 time delay를 형성한다.
5. **Start Measurement** 측정을 시작한다. 일반적인 측정에서는: 1) 3의 range 를 설정 하고; 2) 4를 ON 상태로 작동시킨후; 3) 5를 눌러 측정을 시작하는 순서로 진행한다.
6. **Average Settings** 측정시 계산하는 누적 평균값에 대한 설정. *Number of Ave*: 평균 계산의 최대 반복 수. *Average ON/OFF*: 평균 계산을 ON/OFF 한다. OFF 시에는 시간축 보정 및 내삽만을 수행하여 2번 plot창에 표시하며 ON에서는 plot를 누적하여 평균한다. 여기서 버튼을 ON → OFF 하면 누적 평균이 reset 되어 다시 1부터 시작하게 된다. *Average Number*: 현재까지 누적된 plot의 갯수를 표시한다.
7. **Auto Reset ON/OFF** 측정 오류 발생시 자동으로 오류가 발생한 측정 data를 누적 평균에서 제외하고 측정중지/재시작을 수행한다. 이때까지의 누적평균 data는 보존되고 측정 data의 오류가 제거된후 누적 평균 process가 재개된다.
8. **Auto Data Save ON/OFF** 아래 12를 통해 설정된 자동 data 저장 설정에 따라 일정 측정수 마다 data 저장을 활성화/비활성화 한다. 자세한 내용은 Section 5 참조.
9. **Center T-zero ON/OFF** 측정한 레이저 펄스를 특정 함수에 fitting 한 후 얻게되는 time zero의 위치를 이용해 현재 측정의 시간축을 보정하는 기능을 ON/OFF 한다. fitting 하여 얻은 time-zero가 없을 경우 보정값은 0이다.
10. **Time Delay Settings** Time Delay Setting 윈도우를 띄운다. Section 3 참조.
11. **DAQ Settings** DAQ 설정 윈도우를 띄운다. Section 4 참조.
12. **Auto Data Save Settings** Auto Data Save 설정 윈도우를 띄운다. Section 5 참조.
13. **Snap Shot** 현재 누적 평균 *data plot* 의 data를 새로운 윈도우에 띄운다. Section 6 참조.
14. **Stop** SW를 종료한다.
15. Auto Reset과 관련된 설정값으로 향후 버전에서 제거될 항목임.

3 Time Delay Settings

Time Delay Setting은 기본적으로 Main Panel의 3 Range 선택을 통해 설정한다. Time Delay Setting 설정창에서는 Range 선택값에 미리 준비된 moving mirror 구동 sine 파의 frequency 와 amplitude, phase 등을 직접 설정할 수 있다. 시간 range 에 대한 설정은 Section 4 DAQ settings 창의 5 T-axis Interpolation Start & Stop 를 이용하여 설정할 수 있다.

1. **Sine & Square Wave Signal** DAQ의 아날로그 출력에 전달되는 sine 파 및 square 파를 표시한다.
2. **Encoder Output** Encoder에서 출력되는 신호를 표시한다.



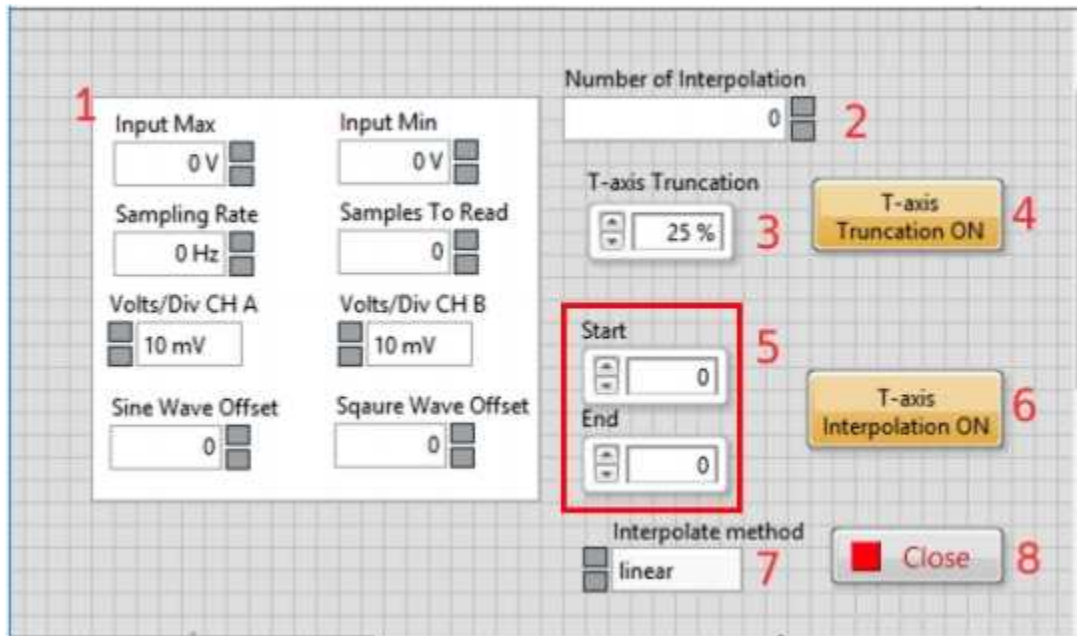
Time Delay Setting 화면

3. **Auto Phase** 출력되는 sine 파에 의한 moving mirror의 구동 범위가 최적으로 조절 되는 phase 를 자동으로 계산하여 설정한다.
4. **Auto Phase Direction** Auto Phase 기능을 수행할 때, 그 방향을 Max-Min 형태로 할 것인지 Min-Max 형태로 할 것인지 결정한다.
5. **Sine Wave Frequency & Amplitude** 출력되는 sine 파의 frequency (Hz) 와 amplitude (V) 를 설정한다.
6. **Square Wave Phase** 출력되는 sine 파와 square 파의 상대 위상(phase)를 설정한다.
7. **Encoder Resolution** 현재 설치된 Encoder의 resolution을 표시한다
8. **Close** 설정창의 내용을 적용하고 창을 닫는다.

4 DAQ Settings

Data acquisition process의 기본 설정을 변경하고 측정후 raw data의 processing에 관련한 내용을 수정할 수 있다.

1. **DAQ Channel Setting:** 측정에 사용하는 DAQ Analog input channel을 설정한다.
입력되는 전압의 *Input Max*, *Input Min* 및 *sampling rate* 와 *samples To Read* 갯수



DAQ Settings 화면

를 조절할 수 있다. 10 Volt/Div 값은 화면에 표시되는 신호의 크기를 설정하고 Sine & Square Wave Offset 은 Moving mirror의 output 함수의 offset을 설정한다.

2. **Number of Interpolation** 측정된 신호의 후처리 과정에서 interpolation number를 설정한다.
3. **T-axis Truncation %** 측정된 신호의 후처리 과정에서 신호의 양끝단을 얼마나 제거할지를 전체 신호중의 % 값으로 설정한다.
4. **T-axis Truncation ON/OFF** 3에서 설정한 신호 양끝단 제거 과정의 ON/OFF 를 설정한다. 일반적으로는 ON 상태 유지.
5. **T-axis Interpolation Start & Stop** Data 후처리 과정에서 T-axis interpolation의 start 와 end 위치를 설정한다. 이 값은 기본 설정을 통해 Main Panel의 3 Range 값에서 설정이 가능하며 여기서는 기본 설정 범위 이외의 범위를 지정하고자 할 때 사용한다.
6. **T-axis Interpolation ON/OFF** T-axis interpolation의 ON/OFF 를 설정한다. 일반적으로는 ON 상태 유지.

□ 샘플 비율(sampling rate)와 샘플 갯수(sampling number)의 설정: 10 ps 주사(스캔) 범위를 1 fs 간격(분해능)으로 획득하기 위해서는, 10,000 샘플 갯수가 필요하다. 이를 10 Hz 주파수로 actuator(shaker)를 움직이고, 이의 반주기마다 주사 범위를 화면에 나타내기 위해서는 샘플 비율은 다음과 같아야 한다. 즉, $10,000 \text{ pts} / ((1/(10 \times 2)) \text{ s}) = 200,000 \text{ pts/s} = 200 \text{ KS}$ 이어야 한다. 현재 사용중인 DAQ 카드는 채널당 200 KS 샘플 비율 속도가 되어야 하며, 위의 DAQ Channel Setting에서 Sampling Rate를 200,000으로 설정하면 반주기마다 스캔 범위가 나타난다. 같은 방식으로 5 Hz로 actuator를 스캔한다면, 샘플 비율은 위의 그림에서 보이는 것과 같이 100,000 Hz로 설정한다.

7. **Interpolation Method** T-axis interpolation에 사용하는 계산 방법 선택. Nearest, Linear, Spline 3가지 선택이 가능하다.
8. **Close** 설정창의 내용을 적용하고 창을 닫는다.

5 Auto Data Save Settings

일정한 측정 간격마다 Data를 지정한 경로에 저장하는 기능을 설정한다.



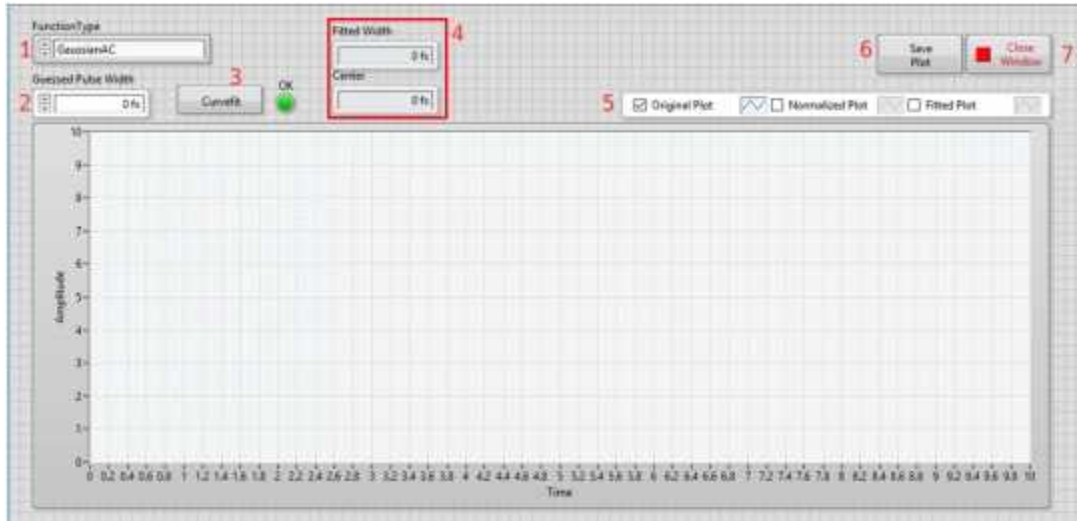
Auto Data Save Settings 화면

1. **Auto Data Save Interval** Data 저장 간격을 설정한다.
2. **Data Save Path** Data 가 저장되는 경로를 지정한다. 경로에 저장되는 data 파일명은 날짜_시간_현재의 누적평균 숫자.tsv 로 저장된다.
3. **Auto Data Save ON/OFF** 자동저장 기능을 ON/OFF 한다. Main Panel의 8 Auto Data Save ON/OFF 버튼과 연동된다.
4. **Close** 설정창의 내용을 적용하고 창을 닫는다.

6 Snap Shot

Main Panel의 13 Snap Shot 버튼을 누르면 현재의 누적 평균 data 가 Snap Shot 창에 plot 된다.

1. **Function Type** Data Fitting 에 사용할 함수를 선택한다. 선택할 수 있는 함수는 *GaussianAC*, *GaussianIAC*, *SechAC*, *SechIAC*의 4종류이다.
2. **Guessed Pulse Width** Fitting 에서 사용되는 펄스 폭의 initial guess 값 입력. 펄스 중심의 initial guess는 0 fs 를 사용한다.



Data Snap Shot 화면

3. **Curvefit** Function type에서 지정한 함수로 fitting한다. Curve Fit 버튼을 누르면 fitting이 진행되며 fitting이 완료되면 Fitting OK에 불이 들어온다.
4. **Fitted Width & Center** Fitting이 완료되면 결과로 계산되는 펄스 폭 및 펄스 중심 값을 표시한다.
5. **Data Display Plot** 최초 창이 열릴때는 [13] Snap Shot 버튼이 눌릴때의 누적평균 plot의 data가 표시된다 (파란색). Curve fitting을 수행하면 Fitting 결과 (초록색)와 이때 사용된 normalized data (빨간색)이 함께 표시된다. Plot 오른쪽 위의 plot legend의 check-box를 on/off하여 표시할 plot을 선택할 수 있다. 마우스를 이용하여 확대가 가능하다.
6. **Save Plot** 현재 Plot 화면의 data를 ascii file 형태로 저장한다. 첫번째 열은 Delay Time (fs)이고 두번째 열부터 각각 Fitting 전 raw data, Fitting 결과 plot data, Fitting에 사용된 normalized data 이다.
7. **Close Window** Snap Shot 창을 닫는다.

7 기본 측정 방법

기본적인 측정은 Main Panel에서 data 를 측정하고 Snap Shot 창에서 data plot fitting 및 data 저장을 진행한다.

1. 프로그램 실행 후 Main Panel의 [3] Range 에서 측정 Range를 설정한다.
2. Main Panel의 [4] Wave Generation 버튼을 클릭하여 구동 sine 파를 생성하고 actuator의 작동을 확인한다.
3. [5] Start Measurement를 클릭하여 현재 측정 data plot 및 누적 평균 data plot 에 표시되는 후처리된 data를 확인한다.

4. 6 에서 누적 평균 수를 설정하고 누적평균을 진행한다.
5. 누적된 data 의 수가 Number of Ave 와 같아지면 자동으로 Snap Shot 창이 열린다.
만일 측정 진행도중 Snap Shot 창을 열고자 할 때는 13 Snap Shot 버튼을 누른다.
6. Snap Shot 창에서 필요한 Data Fitting 및 Data 저장을 진행한다. Section 6 참조.

제 6 장 시작품 출시를 위해 향후 개발해야 연구 내용

(1) 개발 연구 내용

공공 연구 성과로서 현재까지 개발된 실시간 만능 자기상관장치를 시제품으로 출시하기 위해서는 앞서 제5장에서 기술한 바와 같이 해결되어야 할 연구 내용이 남아 있다. 이를 정리하면 아래와 같다.

- 광지연 장치로 구동되는 액추에이터 개선 작업
- 고속 데이터 수집 장치를 이용한 고정밀, 광지연 장치 기능 확대
- 근자외선과 가시광선 파장영역에서 작동되는 광다이오드 검출기 개선 및 완성 작업
- 새로운 기능이 추가된 통합 구동 프로그램의 개선 작업

① 액추에이터 개선 연구 내용

현재 개발된 자기상관장치나 광지연 장치를 구동시키는 그림 24에 보이는 것과 같이 액추에이터로 선형 DC 모터를 사용해 오고 있다. 이 모터에는 앞서 2장에서 기술한 바와 같이 모터 장치 내에 스프링이 내부에 장착되어 있어서, 가해주는 사인파형의 전압에 따라서 스프링의 복원력에 의하여 액추에이터가 주기적으로 왕복 주사 운동이 가능하게 해 주는 역할을 수행한다. 그러나 이러한 주기적인 운동에는 매번 주사할 때마다 스프링의 자체 복원력 탄성 특성 때문에 매번 주사 운동마다 일정하지 않아 매회 스캔 범위가 일정하지 않다는 단점이 내재 되어 있다. 근본적으로 이와 같은 특성은 액추에이터 구동을 오픈루프(open-loop) 방식을 채택하였기 때문에 피할 수 없는 현상이지만, 닫힌 루프(closed-loop) 방식으로 제어를 할 경우에, 피하기 어려운 스캔 범위의 고착화를 피하기 위한 선택이었다. 처음부터 액추에이터의 구동 주파수를 임의로 바꿔 가면서, 스캔 범위를 임의로 선택하고자 했기 때문에 제어 방식을 오픈루프 형태로 선택한 점은 이 시스템의 큰 장점으로 작용한다고 믿어 의심치 않는다. 현재 상황에서는 이와 같이 매번 스캔 범위가 달라지는 현상의 문제 해결은 정확한 위치 정보를 선형엔코더를 통해 확인할 수 있으며, 엔코더 신호 중에 참조 신호(이

Challenges for Real-time Readout

1. Which control is suitable ? (Closed Loop or Open Loop)

- Closed Loop : PID controller, High Accuracy, Fixed Scan Range
- Open Loop : Selective but Floating Scan Range
(Linear Motor : MotiCont, DDLM-019-070-01)

2. Which Linear Encoder will be best ?

- Absolute or Incremental
- Resolution
- Speed
(RSF Elektronik, MS 15 TTL x100, 0.1 μ m, 0.96 m/s)

3. How to read, convert & display scan distance to time scale ?

- High speed DAQ
(AO: Sine Wave generation, Counter & AI: Encoder Read Out)
- GUI Application



그림 24. 펄스 특성 검출 장치/장비에 사용된 주요 부품 특성

지점을 엔코더는 영점 거리로 인식)이용하여 사인 파형을 따르는 전체 이동 거리의 최대값과 최소값을 발체(총 이동거리)해서, 이동거리의 양쪽 끝 지점 부근의 일정 거리 부분을 절삭(따라서 실제 총 이동거리의 일정한 비율(약 80%)만이 엔코더 이동거리로서 데이터 수집카드로 수집됨)한다. 이렇게 신호처리하면 항시 매번 주사 운동할 때마다 스프링 탄성 변화에 의해 주사 이동 거리가 변화하더라도, 수집되어 처리되는 이동 거리는 비록 실제 이동 거리보다 일정비율로 적어지지만, 항상 동일한 주사 범위를 구현할 수 있다. 비록 기대하는 액추에이터 구동은 원활히 잘 작동되고 있지만, 보다 근본적인 해결책을 찾거나 현재까지 인식하고 있지 못하고 있는 보다 더 성능이 좋은 액추에이터의 특성 파악을 위하여 새로운 액추에이터로 교체 연구할 계획이다. 현재 파악하고 있는 적합한 액추에이터는 2가지 형태가 있는데, 보이스 코일 형태와 전기 실린더형이 있다. 통상 이러한 액추에이터들은 서보 모터형태로 공급될 수도 있는데, 우리가 개발한 시스템은 선형 고정밀 엔코더와 고속 데이터 수집 장치가 전제되기 때문에, 서보 모터형태는 제외될 것이다. 이런 제품들의 특성들은 판매처와 사전 교류를 통해 필요한 정보를 얻기가 매우 힘들어서, 몇가지 기본적인 특성만 확인되면 실제 구입해서 작동하는 것이 더 빠른 해결책이 될 것으로 전망한다. 이들 액추에이터 제품들은 개당 가격이 항상 기대보다 높아서 최소한 개당 100만원을 상회한다. 보다 적합한 특성의 액추에이터를 선정하기까지 최소한 2가지 종류로 종류별로 2개 이상의 구매가 이루어져야 할 것이다. 현재 사용 중인 액추에이터 보다도 더 특성이 낫다고 판정되는 액추에이터가 선정되면, 이를 장착한 자기상관장치나 광지연 장치를 개발하기 위해서는 기존의 설계를 모두 새롭게 바꾸어야 하는 과정을 거쳐야 할 것이다. 이에 따라 새로운 구조 설계 변경과 제작까지 기대보다도 상당한 시간이 소요될 것으로 전망된다. 한편으로 금번 코로나 사태로 해외 주문 물품들이 제작되어 배송되기까지 예년에 비하여 최소 한 달 내지는 두 달 정도 더 소요되는 상황을 겪어 본 터라, 본 과제의 수행기간이 6개월을 감안하면 필요한 광학/기계 부품들의 주문과 발주가 적절하게 이루어져야 할 것으로 보인다.

② 고속 데이터 수집 장치를 이용한 고정밀 자기상관 장치 및 광지연 장치 기능 확대

앞서 2장 11쪽 페이지에서 기술한 바와 같이, 시스템의 시간 분해능을 결정하는 주요 요소로는 선형 엔코더와 고속 데이터 수집 장치가 있다. 선형 엔코더는 거리 분해능이 $0.1\mu m$ 를 사용하기 때문에, 이의 시간 분해능은 $1fs$ 미만이다. 따라서 실질적인 데이터의 시간 분해능을 결정하는 요소는 사용하는 데이터 수집 장치의 샘플링 속도가 좌우한다. 스캔범위가 약 1인치인 액추에이터를 사용하면, 실제 검출하는 거리는 $1.5cm$ 정도로 약 $100ps$ 주사 범위를 얻는다. 현재까지 개발된 자기상관장치나 광지연 장치의 최대 주사 범위가 약 $100ps$ 에 이른다. 이 주사 범위 전체에서 $1fs$ 시간 분해능으로 데이터를 수집하기 위해서는 10^5 개의 데이터, 즉 십 만개의 데이터를 수집해야 하고, 액추에이터를 $10Hz$ 로 구동하면서, 매 주사마다 데이터를 수집하기 위해서는 $2 \times 10^6 Samples/s = 2MS/s$ 인 샘플속도를 갖는 고속 데이터 수집 장치를 사용해야 한다. 특히 광지연 장치로 자기상관장치를 변환하여 신호를 획득하기 위해서는 동일한 데이터 수집 장치를 가지고 또 다른 입력신호들을 다른 아날로그 입력 채널들로 받아야하기 때문에, 동시 샘플링이 가능하여 채널 당 샘플 속도가 떨어지지 않는 데이터 수집 카드를 사용하여야 한다. 따라서 진정한 의미에서 최대 주사 범위 $100ps$ 에 걸쳐서



그림 25. 동시 샘플링 2 MS/s 샘플 속도의 데이터 수집 장치(NI USB-6366)

1fs 시간 분해능으로 데이터를 수집하기 위해서는 샘플 속도가 2MS/s 인 동시형 데이터 수집 장치를 사용해야 한다. 이에 적합한 신뢰할 만한 USB 타입의 데이터 수집 장치로는 그림 25에서와 같이 NI사의 모델 USB-6366이 유일하며, 한 대 가격이 630만원에 이른다. 고속 데이터 수집으로 신호 대 잡음비를 10배 이상으로 높으며, 데이터 수집 시간을 크게 감소시킬 수 있다면 다소 비싼 가격이라도 범용의 계측 장비로서는 충분한 가치가 있다고 볼 수 있다. 특히 소비자 입장에서는 펄스폭 측정용 자기상관장치/광지연 장치를 구입하는 함으로써 범용의 고속 데이터 수집카드를 덤으로 얻게 되는 이점으로 충분히 가격 경쟁력이 있다고 인식할 수 있다. 이에 개발 연구 기간에는 이 장치를 구입하여 그 특성을 실증하고, 광지연 장치로서 기대하는 기능을 충분히 수행하는 지를 확인하는 연구 작업이 꼭 필요하다. 현재까지 그 구입 가격이 높아서 샘플 속도가 2MS/s 인 동시형 데이터 수집 장치로 개발된 자기상관장치/광지연 장치 특성을 테스트한 적이 없다. 추가로 스캔 범위를 1인치가 아니라 2인치가 가능한 액추에이터를 사용하여, 스캔 범위를 200ps 이상으로 늘려서 펄스폭을 측정해야 하는 경우를 고려해서, 샘플 속도가 최소한 2MS/s 인 데이터 수집 장치를 사용하여 그 기능을 추가하는 작업이 필요하다고 판단한다.

③ 근자외선과 가시광선 파장영역에서 작동되는 광다이오드 검출기 개선

앞서 제5장 26쪽 페이지에서 기술한 바와 같이, 자외선 및 가시광선 파장영역에 있는 초고속 광펄스의 펄스폭 진단을 위해서는 에너지 띠가 큰 GaN 광다이오드를 이용한 광검출기 개발이 해결되어야 한다고 하였다. 현재 가시광선 파장영역의 고출력 펄스 레이저 광원 개발이 레이저 개발 분야에서 뜨거운 연구 주제로 진행되고 있는데, 이는 고체 레이저 시스템으로 초미세 가공을 통한 디스플레이 패널 개발이나 자외선 파장 영역으로 광변환을 통한 의료 수술용, 바이오 이미징 연구이나 살균용 레이저 광원으로 각광을 받기 때문이다. 이때 레이저 증폭과정에서 레이저 이득 매질로 파이버 결정이나 광파이버 증폭기를 사용하는 데, 이들의 발진 파장은 거의 예외 없이 $1000nm = 1\mu m$ 부근으로 이를 제2고조파 발생을 하면, $510nm$ 부근에서 고출력, 고반복, 수백 펄스 초 광펄스들을 발생시킨다. 향후 근적외선 파장영역에 집중되었던 고출력 펄스 레이저 광원 개발이 의료용 및 산업용 수요 증대에 따라 가시광선/자외선 파장영역으로 레이저 광원 개발로 무게의 추가 기울 것이다. 특히 펄스폭이 짧을수록 첨두 출력은 급격히 증가하기 때문에, 비선형 결정을 이용한 제2고조파 발생으로 가시광선 파장영역의 펄스 초 광펄스들을 자외선 파장영역의 초고속 펄스들로 변환이 매우 용이하다. 이렇게 개발된 자외선 파장영역 레이저 광원을 이용한 바이오/살균을 위한 산업용 수요는 잠재적으로 큰 시장이 될 수 있다. 특히, 이러한 초고속 고출력 레이저 광원은 자외선 파장영역의 연속광원으로 사용할 수 있는 AlGaIn LED보다 큰 평균출력과 첨두출력을 갖기 때문에 상대적으로 큰 장점을 갖는다. 이러한 산업적, 시대적 수요 흐름을 고려할 때, 가시광선/자외선 파장영역의 광펄스 진단장치 개발은 시의 적절하게 이루어져야 할 것으로 보인다. 앞서 11쪽에서 기술한 실험 결과를 보면, 가시광선 파장영역의 광펄스 진단을 위해서는 GaN 광다이오드를 사용하여 광검출기를 개발하는 것이 더 효율이 좋다고 하였다. 하지만 이 GaN 광다이오드를 이용한 광검출기 개발에서 GaN 광다이오드가 가진 큰 에너지 띠 때문에, 큰 암전류가 발생하고 이는 큰 배경 전압으로 나타나서 광검출기가 포화되는 단점이 발생한다고 하였다. 여기에서 이러한 단점을 보이는 이유는 그림 26에서 볼 수 있듯이, 광다이오드를 GaP 대신에 GaN로 교체하고 광전도 증폭기 회로는 그림 26과 같은 회로를 동일하게 사용하였기 때문이다. 이 단점을 해결하기 위해서는 광전도 증폭 회로를 DC값으로 나타나는 암전류를 빼내거나, 또 다른 방법으로 암전류를 상쇄시키는 증폭 회로를 새롭게 제작하여야 한다. 현재 새로운 증폭 회로 설계 작업이 진행 중이며, 어느 정도 해결책을 확보한 상태이다. 과제 지원이 이루어져 예산이 투입되면, 3개월 이내로 문제가 해결되고 그림 26과 유사한 GaN

광검출기 키트가 완성될 것으로 전망한다. 이 과정에서 사용할 광다이오드는 GaN와 AlGaIn을 두 가지 타입을 사용하여, 가시광선과 근자외선 파장영역의 초고속 펄스 진단을 위해 각각 사용하여 광검출기를 개발 할 것이다. 특히 여기서 사용한 GaN 광다이오드는 모두 다 국내에서 생산되는 소재 부품들을 이용할 것이며, 국내 소재 부품 시장 확대를 함께 도모할 것이다. 현재 이 국내 기업을 통해 GaN 광다이오드들을 공급받고 있으며, 이 업체에서도 이러한 광검출기 개발에 큰 관심을 보이고 있다. 광검출기 개발에는 광전도 증폭기 회로의 PCB 보드 제작이 포함되나 외형 마운트 제작은 시작품이만큼 금형이 아닌 소량 주문 제작 형태가 될 것이다. 이러한 광다이오드 키트가 완성되면, 다른 종류의 광다이오드들도 새롭게 설계된 광전도 증폭회로에 적용시키면, 지금 보다도 암전류 특성이 더욱 억제된 더 좋은 특성을 보이는 반도체 광검출기가 개발될 것이다. 이에 소요되는 예산은 최소한 700만원으로 추산한다.

GaP photoconductive amplifier

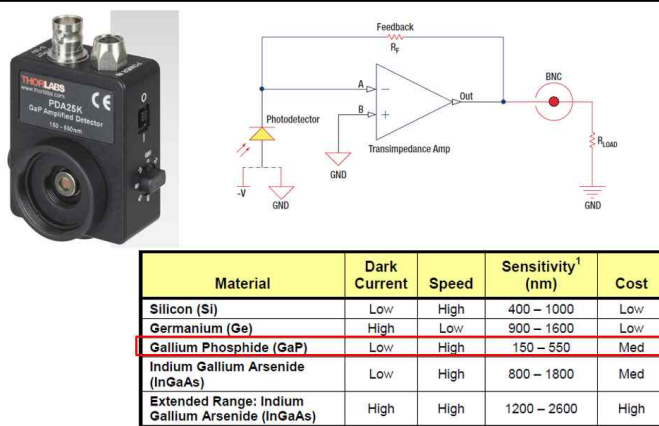


그림 26. 광전도 증폭회로가 내장된 GaP 광다이오드 광검출기 키트(새로운 제품으로 개발하여 출시 예정)

④ 랩뷰 기반 사용자 편의 통합 구동 프로그램 개선

앞서 5장에서 기술한 바와 같이 우리의 초고속 광원의 광검출 및 그 응용을 위한 장치/장비 개발에 가장 핵심이 되는 기술은 반도체 광검출기 개발과 함께 랩뷰 기반 통합 구동 프로그램이 될 것이다. 현재까지 개발된 통합 구동 프로그램은 펄스폭 진단을 위한 자기상관장치에 적용하는 데는 하등의 문제점 없이 잘 구동함을 확인하였다. 앞서 2장 12쪽에 기술한 바와 같이, 이 프로그램의 원천 코드는 과제 제안 소속 기관에서 2018년도에 소프트웨어 저작권으로 이미 등록 하였다. 이 통합 구동 프로그램은 그동안 많은 발전과 진화를 거치는 과정에서 편의성과 수월성을 담보할 수 있도록 여러 기능들이 보강되었고, 각각은 그림 27에서 볼 수 있듯이 모듈형태의 VI(가상계측기)로 구성되어 있다. 이 프로그램이 랩뷰 기반으로 구성된 이유는 우리의 시스템이 스캔 전 범위에 걸쳐 기본적으로 $1fs$ 의 시간 분해능으로 데이터를 고속 수집하기 위해서이며, 이를 담당할 고속 데이터 수집 장치에는 아날로그 입출력, 디지털 입출력 및 카운터 출력 신호들을 발생시킬 수 있기 때문이다. 아날로그 출력 신호를 이용하여 액추에이터를 구동하기 위한 전력 증폭기에 공급되는 신호를 공급하고, 디지털 출력신호들을 이용하여 트리거링이나 제어 신호로 사용하고, 카운터 신호를 이용하여 선형 엔코더로부터 읽어드리는 거리 신호들을 카운팅하게 된다. 이들 신호들은 쉽게 그 크기나 주파수, 및 위상 제어가 용이하며 수학적인 연산도 빠르게 수행할 수 있기 때문이며, 무엇보다도 카드 내 내부 클럭 신호의 신뢰성을 담보할 수 있기 때문이다. 그동안 진화 과정을 거쳐서 현재까지 완성된 구

동 프로그램 내 모듈들은 체계적으로 구성되어 있으나, 상당히 복잡하고 유기적으로 물려 있어서 이를 체계적으로 설명하기가 어렵다. 기본적으로 그림 27에서처럼 병렬 루프 구조이며, 아날로그 신호, 디지털 신호 및 카운터 신호 처리 과정으로 구별되어 있다. 각 모듈 내부에는 거리를 시간으로 변환하는 기능, 수집된 펄스 신호를 가우시안 함수나 sech 함수로 연산하여 펄스폭을 출력하거나, 간섭형 및 세기형 자기상관함수로 바로 펄스폭을 출력하는 기능, 신호를 누적 평균하는 기능, snapshot으로 현재 데이터를 저장하는 기능 등등 다양한 기능들이 포함되어 있다.

Labview GUI Configuration

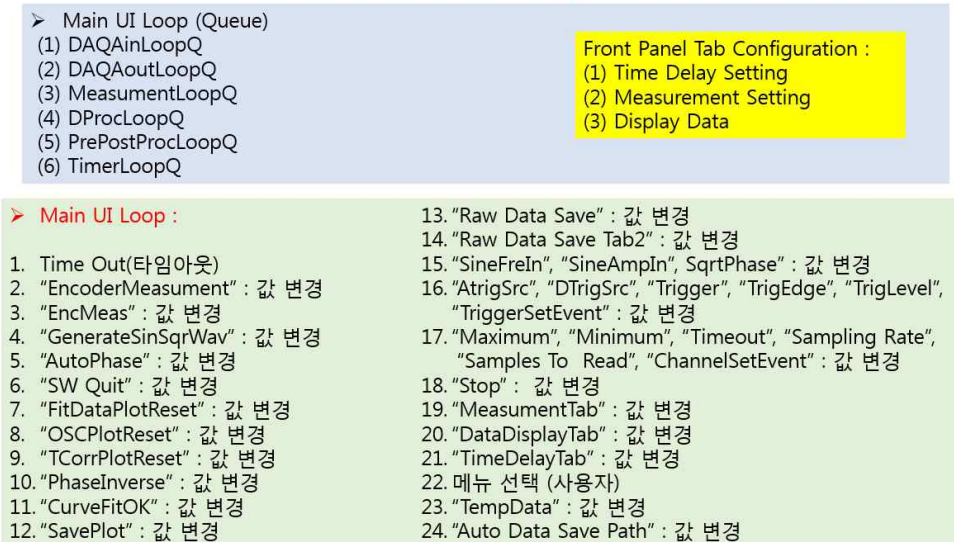


그림 27. Labview 기반 사용자 편의 통합 구동 프로그램의 주요 구성 요소들

이와 같이 다양하고 편리한 기능들이 수록된 만큼, 사용자 편의로 새로운 편의 기능을 요구하게 되면, 구동 프로그램은 재수정을 해야 한다. 현재까지 펄스폭 측정을 위한 자기상관장치와 광지연 장치로의 변환 구동도 상당히 잘 작동하고 있다. 하지만 펄스폭 측정에만 초점을 맞추어 펄스신호가 들어오는 아날로그 입력 채널 1개만을 고려한 신호 처리로 프로그램이 구성되어 있어서, 또 다른 신호를 아날로그 입력 채널로 받아서 동시에 처리하여 디스플레이하는 기능이 빠져 있다. 특히 광지연 장치로 변환하여 신호처리를 하는 경우에, 관측하고자 하는 신호들이 2개 이상일 때를 대비한 코드 수정이 필요하며, 또는 펄스 측정 동시에 다른 입력 신호들을 관측하고자 할 때 그 기능이 생략되어 있다. 이런 경우를 고려하여, 최소한 입력 신호 3개를 대비하여 아날로그 입력 채널 3개를 동시에 모니터링 할 수 있도록 프로그램을 전면 수정해야 하는 과제가 해결되어야 한다. 이 과제가 해결되어야 우리의 계측 장비 시스템이 갖고 있는 장점을 최대한 발휘할 수 있으며, 단순한 펄스폭 측정장치가 아닌 초고속 현상을 계측할 수 있는 장비 시스템으로써의 면모를 갖게 될 것이다. 3개의 입력 채널로 들어오는 신호들을 동시에 모니터링하기 위해서는 각 채널 당 샘플 속도는 동일하게 유지되어야 분해능 훼손 없이 온전한 신호들을 수집하기 때문에, 고가이지만 반드시 동기형(Simultaneous) 데이터 수집 카드를 사용해야 할 이유가 여기에 있다. 이러한 구동 프로그램 코딩 수정 작업은 2개월 내로 마무리 될 것으로 전망되며, 코딩 수정 작업은 시간과 효율측면을 고려해서 랩뷰 프로그램 코딩 전문가를 섭외해서 진행할 것이다. 이에 프로그램 개발비는 최소한 500만원으로 추산한다.

(2) 개발 연구비용

앞서 시작품 출시에 앞서서 해결해야 할 과제들을 차례로 설명하였다. 이 개발 과정에서 각 항목마다 투입되어야 할 예산들에 대해서도 기술하였다. 여기에는 실제로 자기상관장치/광지연 장치 시작품 출시에 포함되어야 할 주요 광학 부품들에 대한 종류와 사양들이 빠져 있다. 예를 들어 고가의 되반사경 세트(자기상관장치에 2개, 독립된 광지연 장치에 1개), 자외선/가시광선/적외선 파장영역 각각에 맞는 가르계(자기상관장치에 반사율이 50%이며 파장별 3종류 3개, 광지연 장치 내 반사율이 80%인 파장별 3종류 3개)와 D형 모양의 금속 반사경 등이 있다. 특히 되반사 거울경은 고가(한대 당 110만원)이지만 사용자 편의를 위하여 그 크기가 1인치이며, 평면 정밀도가 5초인 사양을 사용해야 고속으로 왕복 운동하는 환경에서 입력/출력광의 선형 지향성을 유지할 수 있다. 빔 가르계와 같은 품목들도 사용하는 파장영역마다 서로 다른 광학 증착막 두께를 사용해야 하기 때문에, 파장별로 구입해야 하며 반사율이 다르면 반사율에 비율에 따라 서로 다른 빔가르계를 사용해야 한다. 이들 광학 부품들은 국내에서 생산이 되지 않거나, 가격이 더 높은 경우가 많아서 상대적으로 저렴한 해외 광부품을 사용한다 해도, 자외선/가시광선/근적외선 파장영역마다 별도 품목으로 구입해서 사용해야 한다. 여러 파장에서 동시에 사용할 수 있는(우리의 시스템의 지니는 최대 장점임) 만능 실시간 자기상관장치 개발이니만큼 이러한 다품종 광학 부품을 모두 포함해서 시작품으로 출시해야 한다. 또 광디텍터에 집속해야 하는 파라볼릭 미러 또한 파장영역 별(3종류)로 구입하여 사용해야 하는데, 해당 가격이 30만원 정도이다. 추가로 선형 엔코더도 정밀도가 높은 $0.1\mu m$ 인 신뢰성이 있는 제품을 사용해야 하며, 한 대당 가격이 80만원이다. 이러한 광학부품들과 소형 액추에이터, 선형 엔코더들은 예상보다 훨씬 가격들이 높아서, 초기 개발 비용이 상당하며 기술력은 차치하더라도 중소기업이 독자적으로 이러한 광계측 관련 진단 장비를 개발하기는 사실상 어렵다. 펄스폭만을 측정하는 해외 자기상관장치들도 기본 사양만 구입가격이 3000만원이며, 추가로 파장이 다르거나, 펄스폭이 매우 짧은 광펄스들을 측정하기 위해 추가 옵션을 선택하면 옵션 마다 1000만씩 구입 가격이 상승한다. 우리의 경우처럼 자외선/가시광선/근적외선 파장 전 영역에 걸쳐서 펄스 진단을 위해, 전체 사양으로 선택하면 역대 가까이까지 가격이 상승한다. 우리의 시스템의 경우에는 이보다 최소한 절반 가격으로 낮출 수 있으며, 사용자들이 가격 측면에서 쉽게 선택할 수 있도록 범용 사양으로 최대한 가격을 낮출 것이다. 사용자가 원하는 최소 사양에 따라 위의 광학부품들의 개수를 낮출 수는 있겠지만, 기본적으로 꼭 사용해야 할 광학/기계 부품들은 완전한 제품 개발 이후에 선별적으로 골라낼 것이다. 따라서 본 과제 지원에서는 자기상관장치/광지연 장치 제품 출시 및 판매를 전제로 한 시작품 제작을 위하여, 소요되는 예산을 다음과 같이 제시한다.

자기상관장치 1대와 별도로 독립된 형태의 광지연장치 1대 개발을 위한 소요 예산을 추산하였다.

시작품 제작을 위하여 구입해야 할 품목들	예산 소요 예산 (천원)
선형 액추에이터(2종류, 4개)	$1,000 * 4 = 4,000$
데이터 수집 장치(NI USB-6366, 2대, 자기상관장치 및 독립된 광지연장치 각각 1대)	$6,300 * 2 = 12,600$
GaN, AlGaIn 광검출기 개발비	7,000
통합 소프트웨어 개발비	5,000
되반사경(Ultrastable Retroreflecting Mirror, 3개)	$1,100 * 3 = 3,300$
선형 엔코더(2대)	$850 * 2 = 1,700$
파라볼릭 미러(parabolic mirror, 3종류)	$300 * 3 = 900$

R = 50% 빔가르게 (3파장, 3종류)	200 * 3 = 600
R = 80% 빔가르게 (3파장, 3종류)	200 * 3 = 600
D형 금속 반사경(2파장, 2종류)	200 * 2 = 400
전력 증폭기 박스 구입(3대)	300 * 3 = 900
아이리스 다이아프레임(6개) 엔코더 장착용 마운트 어댑터 외 (2 세트)	250 * 8 = 2,000
자기상관장치/광지연 장치 하드웨어 제작비 (X 병진기 2대, XY 병진기 2대, XZ 병진기 2대, 엑추에이터 마운트 키트 2대, 빔가르게 키트 6대, 광검출기 키트 3대, 베이스 판 2 세트 제작 및 착색 공정 포함)	10,000
총 액	49,000,000원

< 시작품 제작 관련 국내 특허 출원 내역 >