

레이저의 전력기술에의 응용

진 윤 식
한국전기연구소 플라즈마응용연구팀

1. 서 론

레이저는 1960년의 루비레이저 발명이후 30여년이 지난 오늘날 급속한 발전을 거듭하여 산업 및 과학기술계에서 광범하게 이용되고 있다. 레이저가 가진 우수한 單色性, 可干涉性, 높은 指向性, 集光性(고에너지 밀도)을 이용하여 레이저 가공기로서 절단, 용접, 표면처리, 마킹, 구멍뚫기 등에 활용되며, 광파이버를 이용함으로써 내시경과 의료용 메스로서 또한 각종정밀계측의 불가피한 수단으로 등장하고 있다. 그러나 레이저는 일반 기계장치에 비해 비교적 고가이며 정교한 장치이므로 유지비와 취급이 용이하지 않아 아직 일반적인 보급화는 이루어지지 않고 있다.

최근의 레이저의 발전주파수는 마이크로파, 적외선에서 자외선, X선의 영역까지 확대되고 있으며, 펄스폭은 피코초(10^{-12} sec), 펨토초(10^{-15} sec)에 근접하며 출력은 kJ, TW (10^{12} Watt)에 달하는 단계에 와 있다. 이와 같은 고성능 레이저를 이용한 일반산업, 의료용, 통신, 정보처리, 군사기술, 광계측 등의 이용은 눈부실 정도이지만 전력기술분야에의 응용 및 실용화는 충분하다고는 할 수 없다. 에너지원으로서의 레이저 핵융합이나 우라늄 농축을 위한 특별한 레이저는 현재 개발도상에 있다.

본고에서는 전력기술에 응용이 가능한 대출력 레이저의 개발현황과 대표적인 응용예에 대해서 기술하고자 한다.

2. 대출력레이저의 개발현황

가. 탄산가스(CO₂)레이저

CO₂레이저는 많은 레이저 가운데 가장 높은 연속출력을 낼 수 있을 뿐 아니라 전기입력에 대한 레이저 출력인 효율이 10%를 초과하고, 레이저 빔질을 우수하게 하는 것이 비교적 용이한 장점을 가지고 있다. 또한 펄스 동작에 있어서도 펄스당 수백J 이상의 대출력화가 가능하므로 현재 레이저 유희를 목적으로 하는 절연파괴 실험 등에 넓게 이용되고 있다. 이 레이저는 주로 10.6 μ m의 파장을 내고 있으며 이 파장은 맑은 날씨에서의 대기중 전파특성이 다른 레이저에 비해서 우수한 특성을 갖고 있다. 일반적으로 CO₂레이저는 레이저의 효율 및 출력을 증가시키기 위하여 레이저 가스로서 CO₂외에 He와 N₂를 혼합하여 사용하고 있다. 대출력용의 CO₂레이저는 동작방식에 따라 펄스형과 연속형으로 나누어진다. 펄스형 레이저에서는 펄스당 에너지를 높이고 펄스폭을 짧게 하기 위하여 레이저 동작압력을 대기압 정도까지 올리게 되는데 이러한 레이저를 TEA(Transversely Excited Atmospheric Pressure)라고 한다. 이 레이저는 펄스당 수십J 이상의 대출력 펄스가 얻어지므로 대기의 절연파괴 연구에 널리 쓰이고 있으며 현재 1000J급의 장치도 시판되고 있다.

연속형은 레이저 가스의 순환방식, 광축방향, 방전방향에 의해 高速軸流型和 高速橫流型으로 나누어진다(그림 1 참조). 고속축류형은 기체의 순환방향이 광축 및 방전방향과 일치하며, 레이저 빔 질이 횡류형에 비해 우수하며 현재 시판중인 CO₂ 레이저 가공기의 대부분이 이 방식을 채택하고 있다. 고속횡류형은 기체의 순환방향, 광축방향, 방전방향이 각각 수직을 이루는 구조로서 축류형보다는 대출력이 쉽게 얻어지며, 출력이 안정하나 레이저 빔의 성질이 축류형보다 못하므로 주로 열원으로서 사용되며, 용접, 열처리 등에 사용이 가능하다. 이 밖에 CO₂ 레이저의 형태로서는 슬랩(Slap)형과 가스다이내믹 레이저가 있다.

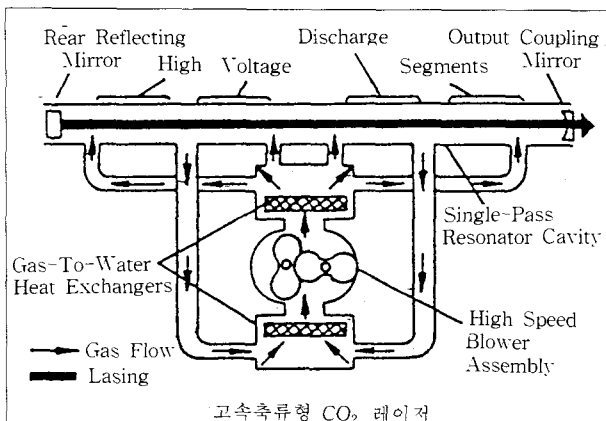
현재 가공용으로 시판되는 CO₂ 레이저는 출력이 이미 50kW에 달하고 있으며, 앞으로 가격과 신뢰성면에서 우수한 고출력의 레이저가 시판될 전망이다.

나. YAG레이저

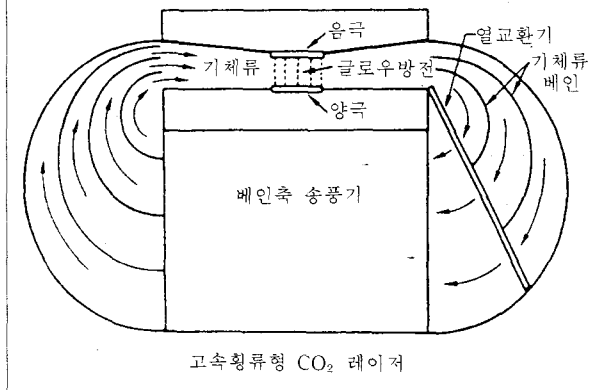
고체레이저는 기체레이저에 비해서 레이저를 발생시키는 매질의 밀도가 높기 때문에 축적에너지가 높고 고출력 레이저를 비교적 소형으로 제작할 수 있다. Nd:YAG(Yttrium Aluminum Garnet)레이저는 연속발전에서 펄스발전까지 다양한 발전형태가 가능하며 다른 고체레이저에 비해 고출력화 및 출력안정성이 뛰어나 다방면에서 광범위하게 사용되고 있다. 또한 근년에 반도체 레이저의 고출력화가 진행됨에 따라 이것을 여기원으로 한 LD(Laser Diode)여기 고체레이저의 개발이 급속히 진행됨으로써 소형화, 고효율화, 신뢰성의 향상이 이루어지고 있다.

고체레이저에 사용되는 결정은 레이저 발진을 일으키는 레이저천이 이온(활성이온)이 母材에 도핑되어 있는 있는 형태로서 대표적인 고체레이저의 하나인 루비레이저의 경우 레이저 이온은 Cr⁺³이온이며, 모재는 사파이어(Al₂O₃)이다. Nd:YAG레이저에서는 Nd와 YAG가 각각 활성이온과 모재이다. 이밖에도 고체레이저로서 레이저핵융합연구용 Nd:Glass 레이저, 대형결정이 비교적 용이하게 얻어지는 Nd:GGG(Gadolinium Gallium Garnet)가 고출력레이저로서 주목되고 있다.

그림 2에 YAG레이저의 일반적인 구성을 보인다. 플래시램프로부터의 방전발광(500~900nm)은 직접 혹은 타원의 반사체를 통하여 YAG 봉에 모아지며, 이 광에 의해 기저준위에 있던 활성매질을 여기시킴으로써 1.06um의 레이저광이 발생된다.

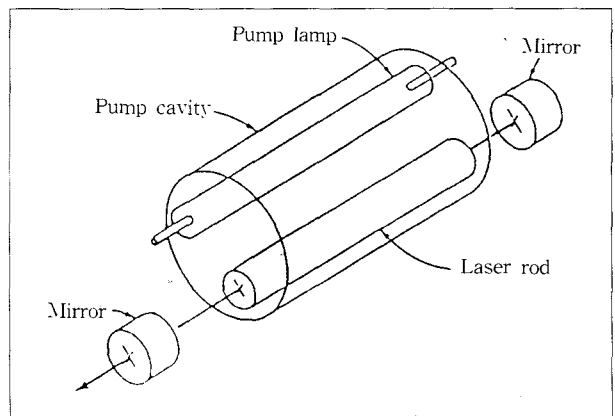


고속축류형 CO₂ 레이저



고속횡류형 CO₂ 레이저

〈그림 1〉 CO₂ 레이저의 형태



〈그림 2〉 YAG레이저의 개략도

기술동향

YAG 레이저는 모재가 결정되므로 비교적 열전도가 좋고 고반복 동작이 가능하지만 레이저 출력은 레이저로드의 열 렌즈 및 열왜곡에 의해 제한된다.

대표적인 대출력 고체레이저로는 핵융합을 목적으로 하는 약 100kJ의 Nd:Glass 레이저가 미국의 Lawrence Livermore National Lab(LLNL)와 오사카대학에서 건설되어 연구되어 왔다. 현재 핵융합에 필요한 레이저 에너지는 1MJ 정도로 알려져 있으며 미국에서는 10kJ × 192의 Nd:Glass 레이저로서 이것을 달성하기 위해 빠르면 1995년부터 LLNL에 건설을 추진할 예정이다.

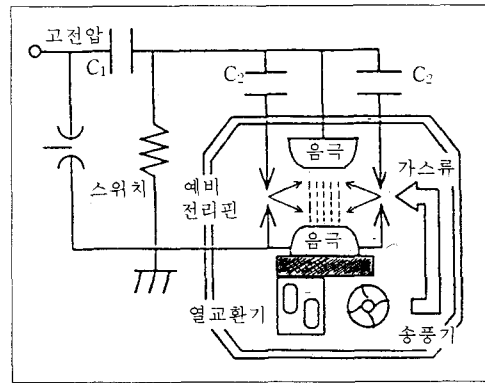
다. 엑시머(Excimer)레이저

엑시머란 "Excited Dimer" 에서 나온 말로 여기된 이원자 분자를 의미하며, 이분자가 레이저 천이를 일으킬 때, 자외선영역의 고출력 레이저 빔이 얻어진다. 여기에서 엑시머의 수명은 매우 짧기 때문에 레이저 여기를 위해서는 고속, 고강도의 펄스 여기가 필요하다. 그림 3에 각종 엑시머레이저의 파장과 출력을 보인다.

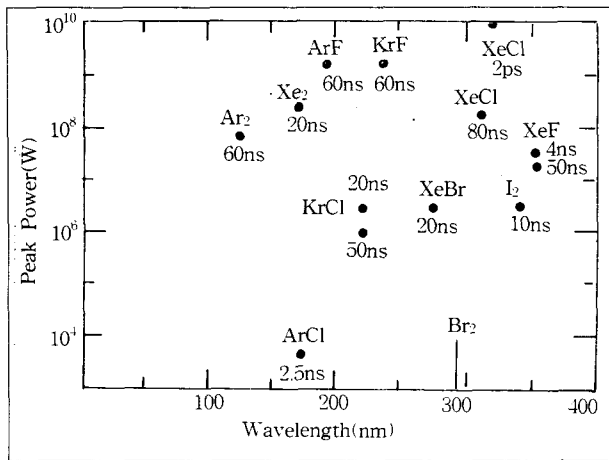
그림 4는 방전여기 엑시머레이저의 개략도를 보인다. 전극간에 수십 kV의 전압을 인가하여 대전류의 자기 지속 글로우방전을 발생시켜, 방전중의 고속전자와 입자와의 비탄성 충돌에 의해 상위준위를 형성한다. 방전공간에 많은 에너지를 주입하여 엑시머를 광범하게 생성시킴으로써 레이저 발생길이를 확대시키기 위해서는 공간적으로 일정한 방전의

생성이 필요하다. 이를 위해서 고전압펄스 인가에 의한 방전 공간에의 전자공급(예비전리)을 행하며 이 방법으로서 스파크, 코로나, X-선, 전자빔 등이 있다.

자외선 영역의 강력한 광원으로서는 엑시머레이저는 가공용과 핵융합용으로 그 용도가 나뉘어진다. 가공용으로는 주로 DRAM용의 리소그라피 광원으로 사용되고 있으며, 그밖의 재료의 미세 정밀 가공용으로 응용범위가 확대되고 있다. 또한 핵융합용으로는 일본의 전자총합연구소에서 8kJ, 12빔 출력의 전자빔 여기 KrF 레이저 Super-ASHURA가 건설중에 있다.



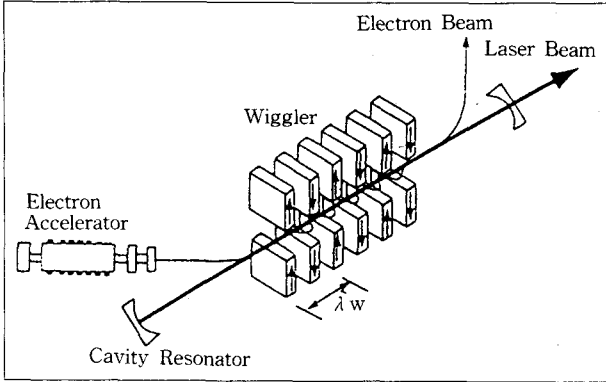
〈그림 4〉 방전여기 엑시머 레이저의 개략도



〈그림 3〉 엑시머레이저의 파장과 출력

라. 자유전자레이저

自由電子레이저(Free Electron Laser : FEL)는 일반적인 레이저와는 달리 원자나 분자의 에너지 준위에 속박되어 있지 않다는 의미의 "자유"전자를 이용한다는 점이 특징이다. FEL의 기본적인 개념을 그림 5에 나타낸다. 상대론적인 속도(빛의 속도에 가까운 속도)로 가속시킨 전자 빔을 위글러(Wiggler)로 불리는 週期 磁界(Periodic Magnetic Field)에 입사 시킴으로써 蛇行運動을 시킨다. 이 전자의 사행운동과 전자파가 공명함에 의해서 전자의 운동에너지가 전자파의 운동에너지로 변환된다. FEL의 발전 과정은 전자빔의 에너지 등을 변화시킴으로써 연속적으로 가변할 수 있는 특징이 있으며 그 발전 과정은 마이크로파에서 자외선에 이르는 넓은 범위에서 직접 전자파로 변화시키기 때문에 고출력, 고효율의 레이저로서 자격을 갖추고 있다. 더욱이



〈그림 5〉 자유전자 레이저의 개념도

상호작용후 남아있는 전자빔으로부터 쉽게 에너지를 높은 효율로 회수하는 것이 가능하다.

1970년에 J.M. Madey에 의해 제창, 명명된 FEL은 고출력화 및 고효율화가 진행되어, 1980년대로부터 현재에 이르기까지 독자적으로 발달되어온 가속기 기술과 결합하여 다양한 가속기를 사용한 실험이 행하여지고 있다. 현재 FEL은 실용화를 향한 연구가 진행중에 있으나 장치가 거대하여 건설비가 고가이므로 가스레이저, 반도체레이저 등의 각종 레이저와 자이러트론 등의 각종 전자관과 경합을 벌이고 있는 상태이다.

FEL은 대형토카막장치(핵융합장치)인 ITER의 ECR 가열용으로 출력 1MW급의 연속동작, 130~260GHz의 주파수 가변능력을 갖춘 장치가 ITER 참여국들에 의해 개발되고 있으며, 이들 레이저를 이용한 응용기술이 개발되고 있다.

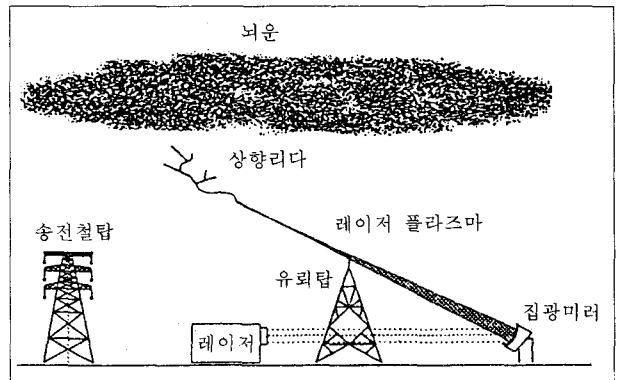
이상 대표적인 고출력레이저에 대해서 알아보았다. 이밖에도 고출력레이저로서 화학레이저(산소-육소, HF 등)과 가지영역의 고출력에너지로서 구리증기레이저 등을 들 수 있으며 이들 레이저를 이요한 응용기술이 개발되고 있다.

3. 전력기술에 있어서 레이저의 응용

가. 레이저 유뢰

대출력레이저의 전력기술에의 응용으로서 최근 주목을 끌고 있는 것이 "레이저 誘雷"이다. 레이저 유뢰는 레이저 빔을 집광함으로써 지상으로부터 雷雲까지 (혹은 그 일부에) 線相의 절연파괴영역(플라즈마 채널)을 형성하여 뇌를 안전한 장소로 유도함으로써 전력설비의 뇌격을 방지하는

것으로서 1974년 Ball에 의해 그 가능성이 제창되었다(그림 6 참조). 레이저에 의한 기체의 절연파괴현상은 1963년도에 처음으로 보고되었고, 그 이후 레이저파장, 압력 등의 기체조건과 각종패러미터의 영향에 관한 실험연구가 수행되었고, 또한 이들을 설명하기 위한 이론검토 등 광절연파괴에 대한 많은 연구가 수행되었다.



〈그림 6〉 레이저 유뢰의 개념도

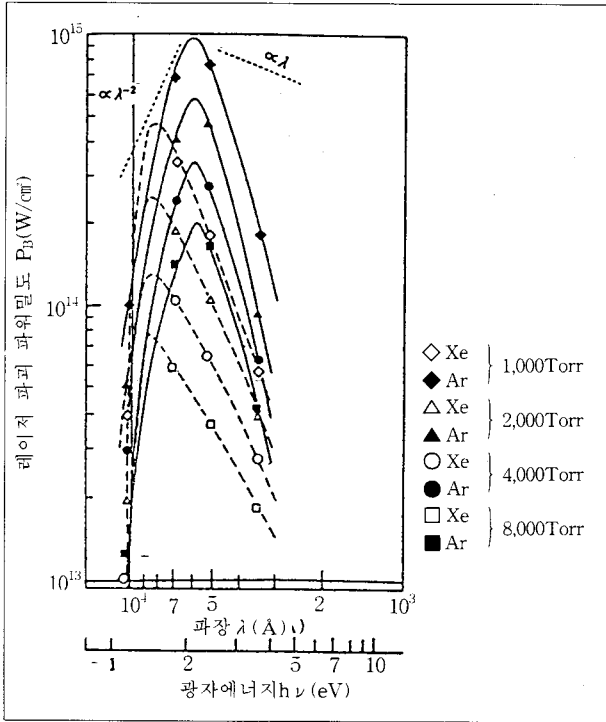
레이저유뢰를 실현하기 위해서는 수십m 이상의 긴거리의 플라즈마 채널은 형성하는 것이 요구된다. 현재 장거리의 플라즈마 채널을 형성하는 방식으로서

- (1) 레이저 절연파괴 플라즈마채널방식(CO₂ 레이저, 적외광)
- (2) 레이저 전리 플라즈마채널방식(KrF 레이저, XeCl 레이저, 자외광)

이 있다. 여기에서 레이저파괴 플라즈마는 레이저 집광부 부근에서 강한 발광과 불꽃음을 동반하는 강전리(전자수밀도 Ne ≥ 10²³ ~ 10²⁵ M⁻³)의 상태로 된다. 또 레이저전리 플라즈마는 집광부 부근에서 강한 발광과 불꽃음을 내지 않는 약전리 (Ne ≤ 10¹⁸ M⁻³)의 상태이다. 레이저파괴 플라즈마 채널방식은 레이저 광의 흡수가 레이저 전리 플라즈마 채널방식에 비해 크기 때문에 장거리화가 어렵지만 고온플라즈마에 기인한 불꽃방전의 가이드 효과가 주목되고 있다.

레이저에 의한 절연파괴를 일으키기 위해서는 레이저 광강도가 어떤 임계치(P_B)를 넘어야 한다. 그림 7의 실험결과에서 알 수 있는 바와 같이 레이저 파괴 파워밀도 P_B는 기체압력의 증가에 따라 감소하고, 또 레이저 파장의 변화에 대해서도 극대치를 갖는다. P_B는 기체의 종류, 압력, 에어로졸이나 먼지, 레이저의 파장, 펄스폭, 빔의 크기 및 집광

기술동향

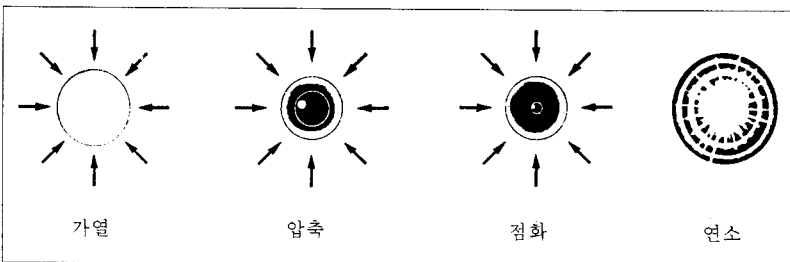


〈그림 7〉 레이저 파괴 파워밀도의 파장과 압력의존성

시스템에 의해 복잡하게 변화한다.

레이저유뢰에 상용되는 레이저로서는 적외선의 CO₂ 레이저 또는 엑시머레이저가 제안되고 있다. 그러나 수m급의 갭에 대한 방전유도실험은 대출력의 Glass레이저 혹은 CO₂ 레이저로 플라즈마 채널을 형성하여 여기에 임펄스 전압을 인가하는 방식으로 행하고 있다. 지금까지 에너지 150J의 펄스 CO₂ 레이저를 이용하여 12m의 방전유도에 성공한 것이 방전유도거리로서는 최장이다.

고전압발생장치를 사용한 옥내실험에서 50J/m의 레이저 에너지로서 리다를 생성하기 위해서 필요한 전계강도는



〈그림 8〉 레이저관성 핵융합의 원리도

200kV/m인 것으로 알려져 있다. 또한 야외의 예비실험에 있어서 높이 50m의 유뢰탑상에 뇌운이 존재하는 경우 리다 생성에 필요한 전계강도(수백kV/m)가 자주 현실적으로 존재하는 것이 확인되었다. 이상의 옥내실험 및 야외 예비실험의 결과에 의해서 레이저에 의한 유뢰는 수십미터 높이의 유뢰탑 꼭대기에 레이저 플라즈마에 따른 상향 리다를 형성함으로써 실현가능할 것으로 추론은 되지만, 금후에도 야외 실험을 계속 실시하여 레이저유뢰를 위한 제반 조건을 검증해 갈 필요가 있다.

나. 레이저 핵융합

레이저 핵융합은 플라즈마의 관성을 이용하여 플라즈마를 가두게 되므로 磁氣가둠核融合(Magnetic Field Confinement Fusion)과 구분하여 성가둠핵융합(Inertial Confinement Fusion)이라고 불리운다. 레이저핵융합은 펠릿 타겟(Pellet Target)이라 불리우는 직경 100μm 정도의 燃料球에 고출력의 에너지를 집중시켜 고온, 고밀도 플라즈마를 생성하여 핵융합을 일으킨다. 연료로서는 중수소(D) 및 삼중수소(T)가 이용된다. 중수소와 삼중수소를 연료로 하는 레이저 핵융합에서 압축펠릿 내부에는 다음과 같은 D-T 핵융합 반응에 의해 에너지가 방출된다.



이 핵융합반응과 동시에 다른 핵융합반응(D+D, T+T)도 일어나지만 이들의 양은 온도 수백keV에서는 D-T반응량의 10% 정도이다. 관성핵융합과정은 다음의 단계를 거친다(그림 8 참조).

(1) 가열: 레이저파이 연료펠릿에 조사되면 표면이 가열되고 플라즈마의 분출이 시작된다.

(2) 압축: 플라즈마 분출의 반작용으로 펠릿내부가 압축된다.

(3) 점화: 연료는 고체밀도의 1000배 정도로 압축되어 중심부는 1억도의 온도에 달하고 自己點火가 일어난다.

(4) 연소: 핵융합반응은 연료전체에 폭발적으로 일어나고 이때 조사된 레이저 에너지의 수백배에 해당하는 에너지를 방출한다. 현재 미국의 리버모어국립연구소, 로체스터대학 NRL, 프랑스의 원자력연구소, 일본의 大阪

대학, 중국의 상해정밀광학기계연구소 등 선진 여러나라에서 관성핵융합을 위한 연구기관을 설립하여 연구를 진행중이다.

다. 레이저에 의한 우라늄 농축

천연적으로 산출되는 우라늄은 우라늄 238(²³⁸U)과 우라늄 235(²³⁵U)의 同位元素가 포함되어 있는데 그 대부분이 우라늄 238이며 235는 0.7%밖에 포함되어 있지 않다. 현재 세계원자력발전의 주류를 이루고 있는 경수로에서는 우라늄 235를 수%로 농축한 것을 연료로 사용사고 있기 때문에 어떤 방법으로든 천연우라늄을 농축할 필요가 있다. 광화학반응을 이용하여 우라늄을 농축하고자 하는 아이디어는 옛날부터 있었지만 적절한 광원이 없었기 때문에 실용화되지는 못했다. 그러나 근년의 급속한 레이저기술의 발전과 더불어 이 방법이 각광을 받게 되었고 미국을 시작으로 하여 각국에서 레이저를 이용한 우라늄농축(레이저우라늄농축)의 연구가 진행되어 왔다.

우라늄을 농축하는 방법으로는 현재 세계에서 가장 생산규모가 큰 기체확산법과 원심분리법이 있다. 이 방법들은 실용화되어 있기는 하지만 우라늄 235와 우라늄 238의 근소한 질량차를 이용해서 농축을 하고 있기 때문에 아무리 해도 필요한 농축도까지를 1회의 조작으로 마치는 것은 불가능하다.

어떤 고유한 상태에 있는 우라늄 원자나 우라늄화합물 분자의 에너지 준위를 보면 우라늄 235와 238 사이에는 미소하지만 뚜렷한 차가 있는 것이 알려져 있다. 이것을 同位體 시프트(Shift)라고 부르고 있으며, 이것을 이용하여 농축을 하는 것이 레이저 우라늄 농축이다. 우라늄 원자의 동위체 시프트를 이용하는 것이 原子法이고 우라늄화합물 분자의 시프트를 이용하는 것이 分子法이다. 원자법과 분자법 어느쪽도 이 에너지 준위의 차이에 해당하는 만큼의 에너지 차이를 가진 레이저 광을 조사시킴으로써 선택적으로 우라늄 235만을 여기시키는 것이 가능하여 높은 효율로 농축하는 것이 가능하다. 이 때문에 지금까지의 방법에 비하면 대폭적으로 비용을 줄일 수 있는 가능성이 있다.

라. 레이저 광송전

태양광 에너지를 유용하게 이용하는 한가지 방법으로서 지상이 아닌 지구로부터 약 36000km 떨어진 정지궤도에 태양위성발전소(Solar Power Station : SPS)을 설치하려는 구상이 1977년에 제안되었다. 이 구상에 의하면 가로

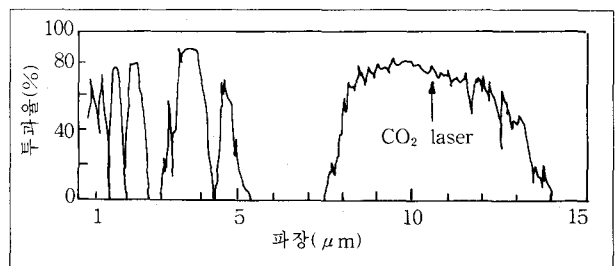
세로 11km×4km의 태양전지패널에 의해 발생시킨 약 800만kW의 전력을 마이크로파에 의해서 지상으로 송전시켜 약 500만kW의 전력을 얻는다는 것이다. 한편 레이저광 에너지이용의 하나로서 레이저 광송전의 구상이 1972년에 제안되어 그 기초적 연구가 수년간 수행되어 왔다.

레이저광송전의 특징으로는 다음의 사항을 들 수 있다.

① 빔이 공간을 전파하는 경우의 빔 확산각 θ 는 $\theta \approx 1.22 \lambda / D$ (rad)으로 주어지고 레이저광 방식은 마이크로파에 비해서 파장이 $10^3 \sim 10^5$ 배 짧기 때문에 빔 확산이 $10^3 \sim 10^5$ 배 작게 된다. 여기에서 D는 빔출력단에서의 빔의 직경이고, λ 는 사용빔의 파장이다. 이때문에 레이저 광 빔의 수광면은 마이크로파 빔의 그것에 비해 상당히 작아진다.

② 고도가 높아짐에 따라 공기의 압력이 낮아지게 되고 저압력하에서 공기의 절연파괴 전계강도 E(V/cm)가 마이크로파인 경우에 상당히 낮아진다. 예를 들어 공기압력 0.01기압에 있어서 파괴강도는 레이저광의 경우에는 E~10MW/cm 인데 반해서 마이크로파에 대해서는 약 1kV/cm으로 매우 낮다. 이상의 서술한 내용은 레이저 광송전방식의 장점이지만, 한편 전기입력에서 레이저 광출력에너지로의 변환효율이 마이크로파의 변환효율보다 낮은 단점이 있다. 또한 우주로부터 지구로의 에너지 전송을 고려하는 경우에 사용하는 레이저의 전파특성을 충분히 고려할 필요가 있다. 레이저 광의 대기중의 투과특성의 일례를 그림 9에 보인다. 그림중에 "大氣의 窓"에 해당하는 파장 영역 여러 개 볼 수 있으며, 그중의 하나인 10 μ m 부근에 주목하여 TEA CO₂ 레이저를 이용한 기초실험에 관하여 기술한다.

우주에서 발생된 에너지가 레이저광 빔 에너지로 변환되고 그것이 지상에서 전기로 변환되기까지의 변환 및 전파 흐름도를 그림 10에 나타내었다. 또한 그림 11은 실제의 장치도이다. 우선 정지궤도상에서 태양에너지를 전기에너지로 변환하여 레이저 출력에너지를 내는(그림 10

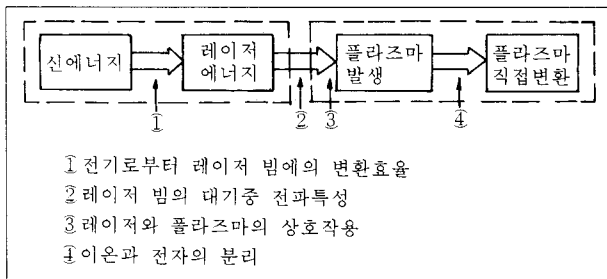


(그림 9) 대기중의 레이저 빔 투과특성의 파장 의존성

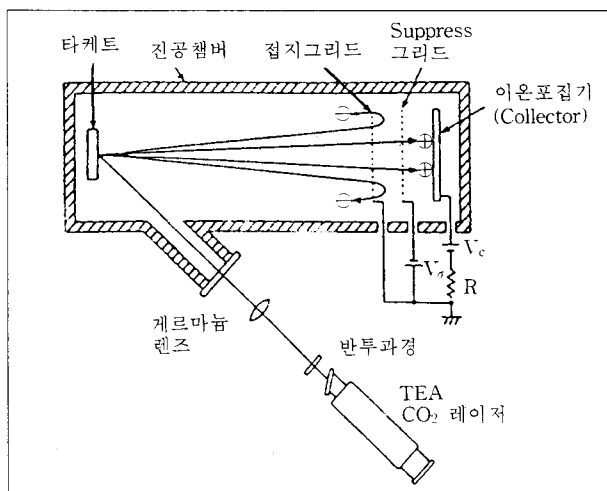
기술동향

의 ①부분이 그림 11의 TEA CO₂ 레이저부이며 레이저 광이 우주 및 대기를 전파하는 영역 (그림 10의 ②)이 그림 11에서는 레이저장치로부터 나온 빔이 진공용기에 입사하기까지의 부분에 대응한다. 그후 입사된 빔은 타겟상에 집광되고, 입사레이저 에너지는 플라즈마의 팽창 에너지로 변환된다. (그림 10의 ③).

이때의 입사레이저 광 강도는 $I \approx 10^9 \sim 10^{10} \text{W/cm}^2$ 으로 비교적 낮고, 레이저 광 에너지를 흡수해서 레이저 생성 플라즈마로 에너지가 변환되는 기구는 주로 고전흡수(역제동복사)에 의해 이루어진다. 이 결과 레이저 생성 플라즈마는 팽창을 시작한다. 이 플라즈마가 팽창해가고 전면에는 정전분리기(Plasma Direct Converter : PDC)를 설치하여 이온과 전자를 분리, 이온만을 이온포집기(Collector)에서 포집하여 그 운동에너지를 전기에너지로 변환한다.



〈그림 10〉 에너지 전파의 흐름도



〈그림 11〉 레이저 광송전을 위한 실험 장치도

마. 각종계측에의 응용

(1) 전계, 전압 측정

광을 이용하여 전계, 전압을 측정하는 경우 고려되는 효과로서는 포켈스(Poekels)효과, Kerr효과가 주로 이용된다. 레이저응용계측으로서 이들 효과는 감도, 동작영역, 시간응답성, 안정성 등의 관점에서부터 가장 실용적이며, 많은 측정계가 개발되어 있다.

電氣光學效果로 불리우는 이들의 원리는 다음과 같다. 어떤 물질(전기광학소자)에 외부로부터 전계를 가하면 물질의 분극상태가 변하여 그 결과 물질중을 전파하는 광의 굴절률이 변화한다. 이것이 전기광학효과이며, 굴절률 n의 전계 E에 대한 의존성은 다음과 같은 급수전개식으로 표현할 수 있다.

$$n = n_0 + aE + bE^2 + \dots$$

여기에서 n₀는 통상(외부전계 0)의 굴절률이고, a, b는 상수이다. 위의 식에서 우변의 제2항인 전계에 비례하는 굴절률변화가 포켈스효과, 제3항의 전계의 제곱에 비례하는 변화를 kerr효과로 정의하고 있다. 전계의 3승 이상의 항에 의한 굴절률은 기여도가 적으므로, 무시해도 좋다. 또 포켈스효과와 kerr효과가 동시에 나타나는 일은 없고 물질을 구성하는 결정의 대칭성 혹은 분극분자의 구조에 따라 그 하나만이 현저하게 나타난다. 이들 효과를 이용하여 포켈스효과를 가진 결정을 측정공간에 배치하거나, kerr효과를 가진 액체를 측정공간에 채워서 각각 레이저광을 조사시켜, 입사광과 출력광의 위상변화를 측정함으로써 전계측정이 가능하다.

이들 효과는 19세기말에 F.Pockels와 P.Kerr에 의해 현사의 예측 및 이론해석이 이루어진 후 레이저의 출현을 가져온 1960년대 이후, 광변조기, 광서터, 정압측정기, 전계 측정기등에 응용되기에 이르렀다. 1980년대에 들어와서 기능의 향상, 센서부의 소형화, 고감도화, 고정밀화가 도모되어 전력계통의 적용이 진전되었으며, 여러 가지의 고전압현상계측에 응용되게 되었다.

전기광학효과를 이용한 측정법의 특징로서는

- ① 전기량으로부터 광으로의 정보변환이 전기광학효과를 가진 물질내에서 이루어지므로 변환용의 전자회로나 전원이 필요없다.

- ② 센서부가 유전체로만 구성되기 때문에 측정점의 전기적 절연이 가능하다.
 - ③ 정보전송매체가 광이고 전기적 유도잡음이 강하다.
 - ④ 원리적으로는 100GHz까지의 응답특성이 기대된다.
- 등을 들 수 있다.

(2) 자계의 측정

패러데이 효과는 광을 이용해서 자계 혹은 전류를 측정하는데 폭넓게 이용되고 있다. 특히 고전위부의 전류측정이나 전자계 간섭이 있는 환경에서의 전류측정기술로서 중요한 수단이 되고 있다. 패러데이 효과는 1845년 M.Faraday가 연글라스에서 발견한 것으로 자계속에 놓여진 투명물질을 직선편광의 빛이 통과할 때에 편광면이 회전하는 현상이다. 편광면의 회전각은 자계의 강도에 비례해서 변화하므로 이를 이용하여 자계나 전류를 측정하는 다양한 방법이 고안되었다. 회전각 θ 는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = V f B \cdot dh$$

여기에서 B는 자속밀도, V는 Verdet 상수, dh는 광의 전파방향의 거리이다. 전류측정의 경우에는 통전도체의 주위를 둘러싸도록 광로를 설정한다. 이 경우 도체에 흐르는 전류를 I라고 하면, 도체 주위를 따라 적분한 식은 다음과 같이 된다.

$$\oint H \cdot dh = I$$

따라서 회전각에 대한 윗식과 결합하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\theta = \mu V N I$$

여기에서 μ 는 투자율, N은 도체주위에 감은 광로수이다. θ 를 직접측정하기는 어려우므로 일반적으로 편광판을 사용하여 회전각 θ 을 투과광으로 변환한다. 광량의 변화를 전압으로 변환하면 전류치를 구할 수 있다.

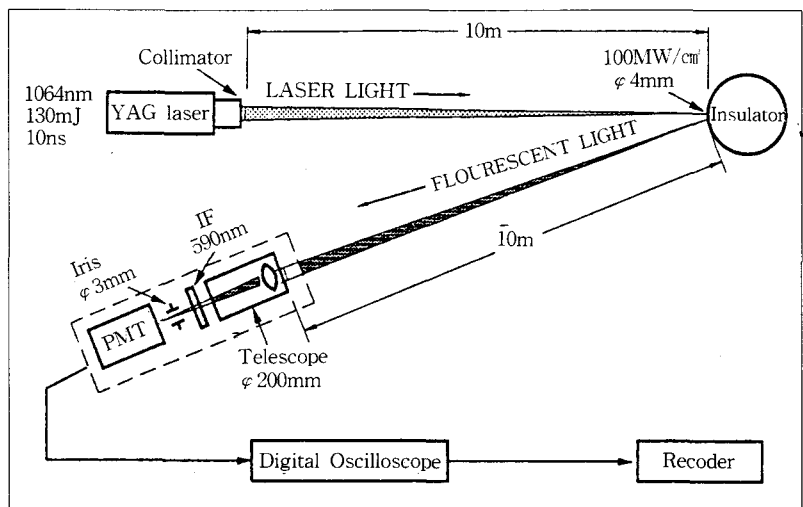
전류측정범위는 mA급의 소전류로부터 MA급의 펄스전류까지 매우 넓고 실용적인 측정수단으로서 이용되고 있다. 초기에는 실험실내에서 펄스 대전류 측정이 주된 것이었지만 근년에는 전력계통기기의 측정

에도 계속 도입되고 있다. 또 측정방식의 개발과 더불어 패러데이 효과 소자의 개발도 진행되고 있다.

(3) 플라즈마 계측

플라즈마의 상태(온도, 밀도)를 계측하는 방법으로는 플라즈마로부터 방사되는 전자파를 분석하는 플라즈마 분광법(Plasma Spectroscopy)이 많이 사용되어 왔다. 이 방법은 플라즈마에 외란을 주지 않고 계측이 가능하다는 장점이 있는 한편 방사전자파에 포함되어 있는 플라즈마의 정보에 한계가 있고, 조건이 다른 플라즈마의 계측에 대응하기 어렵다는 일면이 있다. 이에 반해 외부로부터 전자파를 플라즈마에 입사하여 플라즈마에 의한 응답의 결과를 이용해서 플라즈마의 상태를 아는 방법을 능동적 플라즈마분광법(Active Plasma Spectroscopy)라고 부른다. 이 방법은 원하는 플라즈마의 정보를 얻기 위해서 입사전자파의 파장, 강도, 스펙트럼형상, 나아가서 편광특성을 임의로 선택하여 실험함으로써 계측의 자유도가 대폭 증가한다.

최근 방전플라즈마 및 핵융합과 관련한 초고온 플라즈마의 상태를 정확하게 파악하게 된 것은 이 능동분광법에 의한 것이 많다. 한 예로 대출력 루비레이저로부터 방출된 광자가 전자에 충돌함으로써 생기는 톰슨산란의 강도와 스펙트럼의 프로파일로부터 전자밀도와 전자온도를 구하는 방법이 없었다면 현재의 고온플라즈마의 연구는 생각할 수 없는 것이다.



〈그림 12〉 레이저를 이용한 활성염해측정 장치 개념도

기술동향

측정대상이 되는 플라즈마의 크기와 밀도의 제약에 의해서 계측에 사용되는 전자파의 파장은 보통 밀리미터대 이하의 단파장이 되어야 한다. 최근 레이저기술의 진전에 의해 이들 파장대역에도 여러 가지의 조건을 만족시키는 코히어런트한 전자파가 만들어지게 되어 능동분광법의 유용성에 박차가 가해지고 있다. 금후에도 큰 발전 가능성을 갖고 있는 분야로 기대되고 있어 레이저 응용플라즈마 계측(Laser Aided Plasma Diagnostics)의 분야로 불리기 시작했다.

플라즈마에 전자파를 입사시킨 경우 그 각주파수 ω 가 플라즈마의 밀도에 의해 결정되는 소위 플라즈마주파수 ω_p (cut-off 점이라고도 불림)보다 낮거나, 높은가에 따라 반사되거나, 투과광에 영향을 주거나, 전자파의 전파속도와 진행 방향에 변화를 주는 굴절이 생기거나, 혹은 산란되거나 한다. 능동분광법에 기초한 플라즈마계측의 원리는 이들 현상의 이용방법에 따라서 다음과 같이 분류된다.

- ① 전자파의 反射를 이용한 방법
- ② 전자파의 透過를 이용하는 방법
- ③ 전자파의 屈折을 이용하는 방법
- ④ 전자파의 散亂을 이용하는 방법

(4) 애자의 염분 측정

전력시스템에 사용되는 애자의 오손염분은 절연불량의 주원인으로서 섬락사고의 원인이 된다. 펄세법이나 시판의 애자오손측정장치 등 종래의 애자오손량 측정법은 실사용애자근방에 설치한 파이롯애자를 측정하여 실사용애자의 오손량을 추정하는 것이다. 그래서 새로운 측정법으로서 실사용 애자의 오손량을 직접, 비접촉, 원격적으로 측정하기 위한 펄스 YAG 레이저를 이용한 염해관측장치가 제안되었다.

그림 12와 같이 YAG 레이저광을 약 10m 떨어진 애자의 표면에 조사하면 표면에 부착된 염분(NaCl)이 열적으로 여기증발되어 Na와 Cl로 분해되며, 분해된 Na 원자가 원래의 상태(기저상태)로 돌아올 때 590nm의 파장을 가진 발광이 나타난다. 이 발광을 수광망원경으로 수광하여 간섭필터를 통한 다음 광전지증배관(PMT)으로 보내면 광전지증배관은 발광에 비례하는 신호를 오실로스코프의 전압신호로 보내게 된다. 발광량으로부터 염분오손량을 정량적으로 산출하기 위해서는 각종의 조건하에서 염분오손량과 발광량

의 관계를 먼저 구해 놓아야 한다.

4. 결 론

레이저 기술의 진보는 레이저가 발명된 지 4반세기가 지난 지금도 멈출줄을 모르고 더욱 새로운 레이저 기술이 개발되고 있으며 또 그것이 새로운 응용기술의 개발을 유발시키고 있다. 예를 들면 室温 반도체 레이저는 광통신, 광디바이스, 레이저 프린트 등의 민생기술이나 산업기술에의 응용분야에서의 수요를 확대시키고 있다. 또 레이저 기술과 로봇 기술이 결합된 새로운 레이저 가공기술, 고출력 레이저를 로봇에 탑재함으로써 폐원자료를 해체하는 기술, 엑시머레이저를 이용한 미세가공기술이나 동위원소분리 등 새로운 레이저와 응용기술의 진보는 크게 주목받고 있다. 그러나 레이저가 만능의 기계는 아니며, 그 응용도 레이저가 가진 특성을 충분히 활용하지 못할 때는 오히려 비경제적이며, 비효율적으로 될 수 있다.

우리나라에서의 레이저의 전력기술에의 응용은 아직 초기단계로 판단되며, 실용화도 충분치 못하지만, 앞으로의 연구결과에 따라 그 응용범위는 크게 증가할 것으로 기대된다.

◆ 참고문헌 ◆

1. W.Koehner, "Solid - State Laser Engineering", Springer-Verlag, New York, Heidelberg, 1976
2. 김도훈, "레이저가공학", 경문사, 1990
3. 稻場文男 外, レーザーハンドブック, 朝倉書店, 1982
4. "대출력 연속파 CO₂ 레이저 개발연구(III)" 과학기술처(한국전기연구소) 보고서, 1992
5. 大出力レーザーの電力技術への應用調査専門委員會, 電氣學會技術報告 第553號(1995.7)日本電氣學會
6. オプトロニクス社 編輯部, "最先端レーザーテクノロジー集成", 1989