

# 엑시머 레이저

김 용 평\*

(경희대 공대 전자정보학부 교수)

## 1. 머리말

1971년 Basorv등이 액체 Xe을 전자빔으로 조사하여 진공자의 영역에서 레이저 발진에 성공한 것이 엑시머 레이저 연구의 시작이다.<sup>[1]</sup> 그 후 표1에 보이는 바와 같이 희가스 엑시머, 희가스-산소 엑시머, 희가스-할로젠 엑시머, 수은-할로젠 엑시머 등의 새로운 엑시머 레이저가 1970년대를 통하여 속속 개발되었다. 이들 엑시머 레이저의 최초의 발진은 거의 모두 전자빔 여기방식에 의해 이루어 졌다. 전자빔 여기 방식은 단위 펄스 당 레이저 에너지는 크나 장치가 비대하게 되어 반복동작이 어려워 실용적이지는 못하다.

그러나 1975년 희가스-할로젠 엑시머가 방전여기 방식으로도 발진에 성공, 엑시머 레이저에 대한 인식을 일신시켰다.<sup>[2]</sup> 방전여기 방식은 펄스 당 출력에너지는 작지만 반복동작이 가능하고 소형이어서 취급이 용이한 장점을 갖고 있다. 따라서 엑시머 레이저의 실용화 기술의 연구개발은 주로 방전여기 레이저의 고반복 동작화, 대출력화, 장수명화 등을 대상으로 이루어져 왔다. 그 결과 방전여기 엑시머 레이저의 성능은 초창기에 비해 현격하게 향상, 이것이 최근의 레이저 가공, 광화학 공정연구의 활성화의 한 토대가 되었다.

엑시머 레이저의 여기방식에는 전술한 전자빔 및 방전여기 방식 외에 마이크로파 여기, 양성자빔 여기, 광여기 방식 등도 연구되고 있다. 그러나 이들 여기 방식 중에서 전자빔 및 방전여기 방식에 대한 연구개발이 가장 앞서 있다. 전자빔 여기 방식으로는 출력에너지 10.5kJ(500ns)의 대형장치가 미국 Los Alamos 국립연구소에서 핵융합용으로 개발되었고, 방전여기 방식으로는 펄스 반복율 500Hz로 평균출력 700W의 XeCl 레이저가 Lambda Physik사에 의해 개발되었다.

엑시머 레이저가 산업계 및 과학기술 연구분야로부터 큰 주목을 끄는 이유는 자외선 영역에서 고출력, 고효율의 레이저가 존재하지 않기 때문이다. 엑시머 레이저는 큰 양자

에너지를 갖는 광자를 지금까지의 어떤 발생 기술보다 풍부하게 공급한다. 비록 방출되는 광자의 수나 코스트의 면에서는 적외선 영역의 CO<sub>2</sub> 레이저에 미치지 못하나 광자 에너지가 높기 때문에 엑시머 레이저는 기존의 CO<sub>2</sub> 레이저로는 불가능했던 프로세스를 가능하게 한다.

본고에서는 엑시머 레이저의 동작원리를 엑시머 계열의 대표적 레이저인 KrF 레이저를 이용하여 기술하고, 특성 및 응용분야 등에 대하여 알아본다.

표 1. 엑시머 레이저의 분류

Excimer Laser	Wavelength(nm)	Excitation Method	1st Oscillation	
Rare Gas	liquid Xe	e	1970	
	Xe <sub>2</sub>	e	1972	
	Kr <sub>2</sub>	e	1973	
	Ar <sub>2</sub>	e	1973	
Rare Gas Oxygen	XeO	e	1974	
	KrO	e	1974	
	ArO	e	1976	
Mercury Halogen	HgBr	e, d, I	1977	
	HgCl	e, d	1977	
	HgI	e, d	1978	
Rare Gas Halogen	KrF	e d	1975 1976	
	XeCl	e d m	1975 1977 1981	
		XeBr	e d	1975 1978
			XeF	e d p
	ArF	e d		1976 1976
		KrCl		e d
	ArCl		d	1977
	XeF (C-A)	I e d	1979	
	Xe <sub>2</sub> Cl	e	1980	
	Kr <sub>2</sub> F	e	1980	

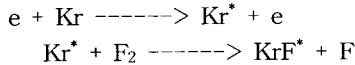
E: Electron Beam Pumping, D: Discharge Pumping, I: Optical Pumping, M: Microwave Pumping, P: Proton Beam Pumping

## 2. 엑시머 레이저의 동작원리

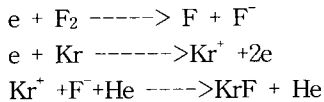
엑시머(excimer; excited dimer)란 전자적으로 들뜬 상태의 원자와 바닥상태의 원자가 결합하여 이루어진 분자로, 여기 상태에서 천이 하면 결합이 풀려 해리 상태가 된다. 레이저 동작은 들뜬 상태와 기저상태 사이의 결합-해리(bound-free) 천이에 의해 이루어진다.<sup>[3]</sup> 따라서 레이저의 일반적 동작원리의 관점에서 고효율 레이저의 특성을 기본적으로 내재하고 있다. 여기서는 가장 전형적인 엑시머 레이저의 특징을 갖고 있고, 또 높은 동작효율에 큰 출력이 얻어지는 KrF 엑시머 레이저의 발진과정에 대해 기술한다.

희가스-할로젠(rare-gas halogen) 엑시머 계열의 하나인 KrF 엑시머는 희가스인 Kr과 할로젠 분자인 F<sub>2</sub>, 그리고 완충가스인 He 또는 Ne을 혼합하여 전자빔 또는 방전으로 여기시킬 때 생성된다. 외부로부터 에너지가 공급되지 않은 상태에서는 Kr과 F<sub>2</sub>의 반응이 일어나지 않으나 여기상태의 원자 Kr\*과 F<sub>2</sub> 분자, 또는 Kr\* 이온과 F<sup>-</sup> 이온과 반응하여 KrF 엑시머가 생성된다. KrF 엑시머의 생성과정의 반응식은 다음과 같다.

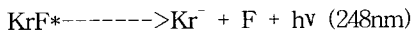
① 여기채널



② 이온채널



여기서 e는 자유전자이다. 전자빔 여기의 경우에는 주로 ②의 이온채널에 의해 KrF가 생성되나, 방전여기의 경우에는 주로 ①의 여기채널에 의해 KrF가 생성된다. 이와 같이 생성된 KrF 엑시머의 수명은 수 ns 이기 때문에 그 수명이 다하면 원래의 Kr과 F로 해리 된다. KrF가 해리 되면 다음과 같이 자외선인 광자 하나를 방출한다.



이 엑시머가 바닥상태로 천이 하여 해리 될 때 나오는 자연 방출 광이 씨앗이 되고, 그 후의 유도방출 과정에 의한 광증폭의 결과 레이저가 발진한다. 유도방출을 일으키기 위해서는 여기상태의 분자밀도가 바닥상태의 분자밀도 보다 많은 이른바 밀도의 반전분포가 형성되어야 한다. 상술한 바와 같이 엑시머는 여기상태에서만 존재하는 분자이기 때문에 기저상태의 분자는 존재하지 않는다. 따라서 엑시머 레이저에 있어서 반전분포의 형성은 대단히 용이하다. 이것이 수명이 극히 짧으면서도 엑시머 레이저가 쉽게 발진하는 이유이다.

엑시머 레이저의 발진과정을 정리하면 다음과 같다.

① 레이저 가스의 여기 과정

② 엑시머의 생성반응 과정

③ 엑시머의 해리와 발광 과정

이들 과정을 그림1의 KrF 엑시머의 에너지 준위 도를 참고하여 설명한다. 이 그림의 가로축은 원자간 거리를 나타내고 세로축은 포텐셜(potential) 에너지를 나타낸다. KrF 엑시머는 여기채널과 이온채널에 의해 생성되는데 여기상태의 포텐셜 에너지 곡선은 안정상태에 있다. 한편 레이저 천이의 아래 준위인 기저상태의 포텐셜 에너지 곡선은 원자간 거리와 함께 단조롭게 감소하는 반발상태이기 때문에 바닥상태에 천이 한 KrF 엑시머는 Kr과 F로 분리된다. 이와 같은 천이를 결합-해리 천이라 하며 아래 준위의 밀도 분포는 무시된다. 이 때문에 KrF 엑시머는 레이저 발진에 필요한 반전분포 형성이 용이하고 엑시머의 생성효율도 크기 때문에 고효율, 고출력 레이저로 동작한다.

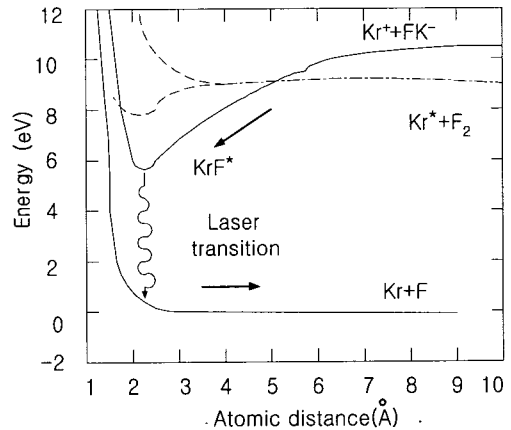


그림 1 KrF 엑시머 레이저의 에너지 준위도

## 3. 여기방법

엑시머 레이저의 여기에는 전자빔 여기, 방전 여기, 마이크로파 여기, 양성자 빔 여기, 광 여기 등의 방법이 이용되고 있다. 그러나 가장 일반적인 방법은 방전 여기방식이다. 여기서는 전자빔 및 방전여기 방식에 대해 기술한다.

### 3.1 전자빔 여기

전자빔 여기방식은 높은 에너지의 전자빔으로 레이저 가스를 직접 여기 하는 방법으로 새로운 엑시머 레이저의 연구나 대체적, 대출력 레이저의 개발에 이용되고 있다. 엑시머 레이저 중에서도 고강도 여기가 필요한 희가스-할로젠 엑시머나 3원자 희가스-할로젠 엑시머 등의 연구에는 고전류 밀도로 고에너지의 전자빔이 이용되고 있다. 한편 KrF 엑시머 레이저와 같이 고효율인 엑시머 레이저의 여기에는 전류밀도가 ~20A/cm<sup>2</sup>인 대면적의 전자빔이 이용되고 있다.

전자빔 발생장치는 일반적으로 마르크스(Marx) 회로와

펄스정형 회로로 형성되는 고전압 펄스를 전자빔 발생 다이오드의 냉음극 전자총에 인가하는 방식으로 구성된다. 여기서 발생된 고에너지 전자빔은 타이타늄 또는 스테인레스막을 통해 레이저 챔버(chamber) 내에 주입되어 레이저 가스를 여기 한다. 예를 들어 Ne/Kr/F<sub>2</sub>의 레이저 가스에 주입되는 전자빔에 의한 KrF 엑시머의 생성효율은 약 24% 정도로 높다. 한편, 전자빔 여기방식의 내부효율(레이저 챔버에 주입된 전자빔 에너지가 레이저 에너지로 변환된 비율)도 높아 약 15%의 장치가 보고되어 있다. 그림2는 대표적인 전자빔 여기 엑시머 레이저 장치를 나타낸다.<sup>[4]</sup>

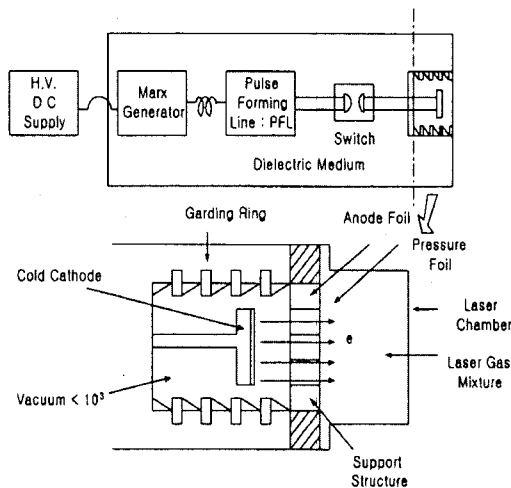


그림 2. 전자빔 여기 엑시머 레이저 장치의 구조

### 3.2 방전여기

방전 여기 엑시머 레이저는 고기압(2~6기압)의 레이저 가스를 공간적으로 균일한 고속의 펄스방전으로 여기 하여 동작한다. 고속 대전류의 펄스방전 회로로서는 용량이행형(capacitor transfer) 회로, LC 반전회로, 펄스정형회로 등이 이용되는데, 균일한 글로우(glow) 방전을 위해서는 주방전에 선행하여 레이저 가스를 미리 전리시키는 예비 전리가 불가결하다. 예비 전리에는 UV, X선, 코로나 방전등이 있는데 주방전과의 조합에 따른 여러 가지 방전 여기 엑시머 레이저가 개발되어 있다.

#### 3.2.1 자외선 예비전리

그림 3에 고반복 동작이 가능한 UV예비 전리 용량이행형(capacitor transfer) 장치의 한 예를 보인다.<sup>[5]</sup> 방전은 광축과 수직인 방향으로 일어난다. 방전체적은 1.8(방전간격) x 1.2(방전폭) x 54(방전길이)의 크기로 펄스 당 400~600mJ의 출력에너지가 얻어진다. 그림에서 콘덴서 C<sub>1</sub>에는 20~30kV의 고전압이 인가되어 축적된 에너지는 thyatron 스위치가 닫히면 방전관 내부의 콘덴서 C<sub>2</sub>에 이행한다. 이때 음극 옆의 작은 틈 사이로 전류가 흘러 아크방전이 일어난다. 이 방전으로부터 발생하는 강력한 자외선 광이 레이저 가스를 예비 전리시킨다. C<sub>2</sub>의 전압이 충분히 높아지

면 레이저 가스는 절연파괴를 일으켜 고속의 펄스방전이 일어난다. C<sub>2</sub>-전극-레이저 가스를 포함하는 폐회로의 인덕턴스가 충분히 작으면 방전 전류는 고속으로 올라가 효율 좋게 엑시머 가스를 여기 한다. 방전회로와 기계적인 구조가 간단하여 장치의 소형화가 가능하기 때문에 많은 실용적인 엑시머 레이저에 이 방법이 이용되고 있다. 이 레이저의 출력은 300mJ/펄스 정도이고 효율은 1~2%이지만 최근에는 3%이상의 장치도 개발되어 있다. 또 펄스 당 출력도 1J 이상으로 향상되고있다.

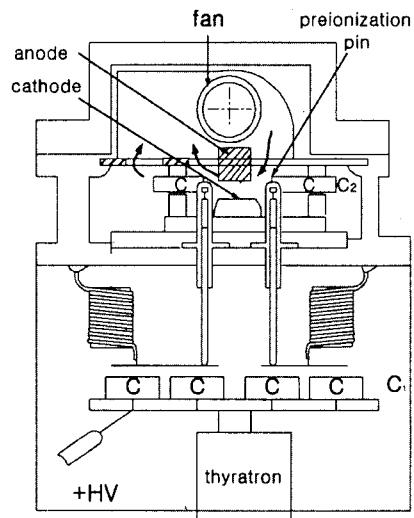


그림 3. 자외선 예비전리 방전 여기 엑시머 레이저 장치의 구조

#### 3.2.2 X선 예비전리

레이저 가스의 단위체적 중에 주입되는 에너지에는 한계가 있고, 레이저의 고출력화에는 일반적으로 여기체적을 크게 하여야 한다. 방전 여기 엑시머 레이저는 이를 위해 큰 체적의 레이저 가스를 일정하게 예비전리하고 또 균일하게 고속으로 글로우 방전시킬 수 있는 기술이 필요하다. 여기에는 예비 전리원으로서 레이저 가스에 대해 투과율이 뛰어난 X선이 적당하다. 또 주방전에는 대용량의 고전압펄스가 필요한데 효율 좋게 여기하기 위해서는 펄스정형 회로를 이용하는 것이 일반적이다. 그림4에 X선 예비 전리 방식의 엑시머 레이저의 한 예를 나타낸다.<sup>[6]</sup> 10(방전간격) x 8(방전폭) x 110(방전길이) cm<sup>2</sup>의 방전체적을 갖는 장치로 최대 펄스출력 44J(펄스폭 85ns)가 얻어진다. 예비전리용 X선은 -185kV로 가속된 전자빔을 탄탈륨(Ta) 막(10μm)에 조사하여 발생시킨다. 약 1mm두께의 알루미늄 전극을 통과한 X선은 대체적의 레이저 가스를 균일하게 예비 전리한다. 주방전용회로는 10단 마르크스 전원, 펄스정형라인(PFL; pulse forming line), 레이저 캡 스위치, 펄스전송선(PTL; pulse transmission line)으로 구성되어 있다. 마르크스 전원에 의해 PFL(H<sub>2</sub>O 콘덴서)은 펄스충전(150~400kV)된다. 레이저 캡의 자폭 후 PFL에 축적된 에너지는 PTL에 전송된다.

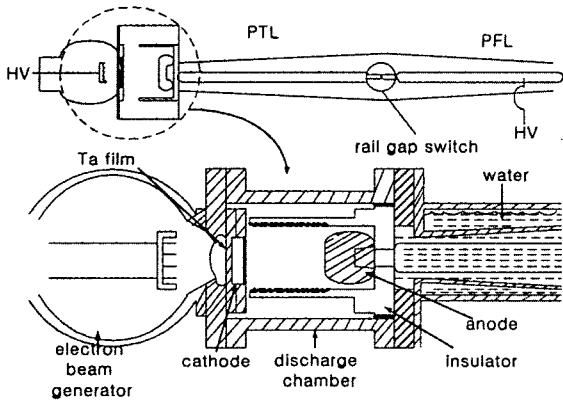


그림 4. X-선 예비전리 방전 여기 엑시머 레이저 장치의 구조

방전 플라즈마에 효율 좋게 에너지를 주입하기 위해서는 여기회로의 특성 임피던스를 방전 플라즈마의 임피던스에 가능한 한 일치시키는 것이 필요하다. 이 때문에 PTL 입력단에서의 약 1Ω의 임피던스는 출력단에서 0.48Ω까지 변환된다. 이렇게 해서 얻어진 레이저빔은 공간적으로 거의 균일한 강도분포를 갖는다. 이 장치로 얻어진 단위체적당의 출력에너지는 5J/l 이다.

## 4. 엑시머 레이저의 특성

### 4.1 장점

#### 4.1.1 짧은 파장특성

엑시머 레이저는 종래의 레이저에서는 볼 수 없었던 많은 장점을 가지고 있다. 그 중에서도 가장 주목되는 것은 짧은 파장특성이다. 표1에 보인 것과 같이 희가스-할로젠 가스의 조합으로 약 50 mm 마다 강력한 레이저 발전이 얻어진다. 이들 광이 갖는 광자에너지는 우리 주위에 있는 많은 물질의 구성분자를 절단하고 원자를 유리시키며 다른 분자와도 결합시킬 수 있다. 구성분자의 결합 해리 에너지가 레이저의 광자에너지 보다 낮고, 더욱이 그 구성분자의 흡수파장 영역이 레이저 파장에 일치하면 간단히 광자 하나의 흡수로 분자결합을 자를 수 있다. 예를 들어 메탄은 탄소의 주위에 4개의 결합고리가 있고, 이것이 탄소와 결합하고 있다. 이 4개의 C-H 결합에 레이저 광을 조사하여 하나씩 결합고리를 자르면 최종적으로 탄소만을 유리시킬 수 있어 다이아몬드 구조로 결정 성장시킬 수 있다. 여기서 레이저광의 파장을 나누어서 조사하면 선택적으로 분자결합을 해리시킬 수 있다.

#### 4.1.2 높은 휘도성

엑시머 레이저의 단위 펄스 당 에너지는 레이저 매질 가스의 종류에 따라 다르지만 보통 100~500mJ이다. 펄스 폭이 약 10ns라 하면 이 출력은 10~50MW에 필적한다. 이와

같이 단시간에 고밀도 파워를 얻을 수 있다. 또 렌즈를 이용하여 레이저광을 집속하면 고밀도 여기가 가능해져 1개의 분자에 2개의 광자가 동시에 충돌하는 이른바 2광자 흡수를 일으킬 수 있다.

일반적으로 진동수  $\nu$ 의 광으로 여기 했을 때의 에너지는  $E=h\nu$  인데 2광자흡수를 일으키면 그 에너지는  $E=2h\nu$  가 되어 진동수가 2배인 광으로 여기 했을 때와 같다. 물론 2광자 흡수가 일어날 확률은 적지만 이 현상을 잘만 사용하면 극단파장의 광 없이도 광 반응을 일으킬 수 있어 싼값의 장파장 영역의 창재를 사용할 수 있다.

### 4.1.3 짧은 펄스폭 특성

엑시머 레이저의 펄스 폭은 보통 수십 ns로 짧다. 일반적으로  $CH_4$  와  $O_2$ 의 반응은 연속적으로 일어나  $CO_2$ 와  $H_2O$ 가 생성된다. 그런데 펄스 레이저로 여기 하면 중간 생성물의 상태에서 반응을 중지시킬 수 있다. 이것은 화학적 이용법이지만 그 외에도 단 펄스의 발열에 의해 고정도의 열 가공에도 이용할 수 있다. 일반적으로 자외선은 적외선이나 가시광선에 비해서 물질내부의 투과거리가 짧다. 따라서 짧은 펄스의 자외선 광을 피가공물에 조사하면 흡수 단면적이 극히 작기 때문에 국부적으로 고온을 발생시킬 수 있고 단시간에 열의 확산을 무시할 수 있어 열에 의한 고정도가공이 가능하게 된다.

### 4.2 단점

#### 4.2.1 짧은 펄스폭 특성

이 성질은 앞에서 기술한 대로 엑시머 레이저의 장점이기도 하지만 단점이기도 하다. 반복을 수백 pps의 펄스 레이저를 예로 들면  $10^{-2}$ 초마다  $10^{-9}$ 초간의 펄스 광이 발생한다. 다시 말해 펄스 간격에 비해서 레이저 발진시간이 훨씬 짧다. 따라서 펄스 레이저광을 가공에 이용할 때 연속발전의 레이저와 같이 매끄럽게 일직선상으로 가공하기 어렵고 고르지 못한 가공 면을 남긴다. 또 레이저 CVD(chemical vapor deposition)와 같이 기판 위에 막을 입혀 나갈 경우에는 먼저 광반응에 의해 생성된 라디칼(radical)이 기판 위에서 재결합하여 막을 이루는데, 곧바로 그 표면이 막 반응의 가스로 덮이기 때문에 몇 배를 반복하여도 엄밀히 말해 똑같은 막을 형성하기 어렵다. 그러나 이 단 펄스성을 잘만 이용하면 다층 구조막을 형성하는데 그다지 어려움은 없을 것이다.

#### 4.2.2 낮은 간섭 특성

단일 모드의 레이저광을 렌즈로 집속하면 초점에서의 spot 직경은  $d=f\lambda/\pi D$  ( $f$ :렌즈의 초점거리,  $\lambda$ :레이저 파장,  $D$ :레이저빔의 직경)로 주어진다. 이 식으로부터 알 수 있듯이 파장  $\lambda$ 가 짧으면 spot 직경도 작게 되고 미세 가공에 유리하다. 그러나 엑시머 레이저는 간섭성이 그다지 좋지 못하다. 일반적으로 가스 레이저의 상 준위 수명은 비교적 길기 때문에 발생한 광이 유도방출을 반복하면서 수없이 공

진기 속을 왕복하여 지향성이 좋은 빔으로 성장한다. 그러나, 엑시머 레이저는 상준위의 수명이 수십 ns로 짧기 때문에 공진기 속을 2~3회 정도밖에 왕복할 수 없다 (공진기 길이가 3cm인 경우). 이 때문에 지향성이 좋은 빔을 만들기 어렵다. 그러나 증폭효율은 극히 높아 수회의 왕복만으로도 고출력이 얻어진다.

엑시머 레이저를 여기광원으로만 이용하면 문제가 없지만 미세 가공용으로 이용하려면 빔의 질을 높여야 한다. 이를 위해서 공진기를 종래의 안정 공진기 대신 불안정 공진기를 이용하면 간섭성이 좋은 빔이 얻어진다.<sup>[7]</sup>

#### 4.2.3 매질가스의 짧은 수명

엑시머 레이저에는 보통 할로젠가스를 사용한다. 특히 불소가스는 전기음성도가 4.0으로 모든 원자 중에서 가장 높아 다른 원자와 격렬하게 반응하여 불화물을 만든다. 레이저장치를 살펴보면 레이저 챔버 본체의 수지나 금속, 주방 전용전극, 예비전리 콘덴서, 가스순환형 팬, 냉각용 파이프, 광학계 등 각종의 재료가 이용된다.

레이저 발진이 계속되면 시간경과와 함께 불화물이 증가하여 레이저 출력이 작아진다. 연속적으로 레이저 발진을 행하면 내부에서 발생하는 자외선에 의해 불화작용이 현저하게 진행돼 출력은 더욱 감소한다. 이 때문에 엑시머 레이저는 질소 레이저에 비해 에너지 코스트가 높다. 이 문제를 경제적으로 해결하기 위해 가스의 수명을 높이는 방법이 두 가지 연구되고 있다. 하나는 가스와 재료와의 접촉면을 테프론(teflon)으로 코팅하거나 전극을 니켈(nickel)로 하여 불화를 막는 것이다. 다른 하나는 생성된 불화물을 회수하는 방법으로 할로젠화물과 레이저 매질가스의 액화온도의 차를 이용하여 액체질소 온도부근의 적당한 온도에서 불화물을 냉각하는 방법이다.

### 5. 응용분야

상술한 대로 엑시머 레이저는 자외선 영역에서 고효율, 고출력으로 동작하기 때문에 그 응용분야가 매우 넓다. 재료의 초미세 가공, 화학공업, 의료분야는 그 중에서도 가장 주목받고 있는 엑시머 레이저 응용분야이다.

최근 우리 나라를 포함한 몇몇 나라에서는 반도체 소자의 고집적화에 혼신의 힘을 기울여 경쟁하고 있는데, 소자의 집적화가 되면 될수록 회로는 봉착하게 된다. 이 한계를 타파하기 위한 기술이 바로 광 이용 기술이다. 엑시머 레이저를 반도체 제조공정에 이용하면 자외선에 의한 광화학 반응에 의해 종래의 복잡했던 제조공정을 간단하게 할 수 있고 300°C 이하의 비교적 저온에서 반도체 소자의 제작이 가능하다. 엑시머 레이저를 이용한 반도체 소자의 대표적 공정은 LCVD (laser chemical vapor deposition), 광도핑(doping), 광에칭(eching), 반응가스를 사용하지 않는 광 제조공정인 대기 중에서의 광 산화공정, 리소그래피(lithography), 어닐링(annealing)등이다.

특히 최근 엑시머 레이저의 유력한 응용분야로 대두된 것은 박막제작에 있어서의 PLD(pulsed laser deposition) 기술 분야이다.<sup>[8]</sup> PLD는 물리적 기상 증착법(PVD; physical vapor deposition)의 하나로, 레이저광을 진공장치내의 고체 표적물에 조사하여 박리(ablation)를 유도하고 이때 방출되는 입자를 기판 위에 추적하여 박막을 형성시키는 기술이다. 따라서 기존의 MBE(molecular beam epitaxy)나 MOCVD (metal-organic chemical vapor deposition)로 대표되는 기상 증착(vapor deposition) 기술에 비해 공정 면에 있어서나 실험장치의 규모 면에 있어서나 간단하고 효율적인 기술이다. PLD에 이용되는 광원은 ArF, KrF, XeCl 등의 엑시머 레이저, Nd:YAG 레이저, CO<sub>2</sub> 레이저 등 있으나 가장 뛰어난 특성을 나타내는 것은 광자 에너지가 가장 큰 엑시머 레이저이다.

화학공업에의 응용은 엑시머 레이저가 탄생한 후 가장 먼저 응용이 연구된 분야이다. 이것은 종래에는 열과 압력과 촉매가 필요했던 화학 공정이 광반응에 의해 저온도에서도 고효율로 가능하기 때문이다. 제래의 화학공정은 수율을 높이기 위해 반응온도를 높여야만 했다. 그런데 온도가 높아지면 불필요한 생성물이 많아져 선택율이 저하된다. 따라서 반응온도를 내리면 불필요한 부산물의 생성을 억제할 수 있어 반응의 선택성을 향상시킬 수 있다. 예를 들어 염화비닐모노머를 제조할 경우 약 500°C에서의 열반응에 의해 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>로부터 약 60%의 C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl을 얻을 수 있다. 이 반응에 KrF 엑시머 레이저를 조사하면 수율은 75%가 되고 선택율은 85%가 된다. 이 반응온도를 300°C 로 내리면 수율은 약 60%가 되나 선택율은 99%로 높아진다.

레이저를 의료분야에 이용하는데는 두 가지 방법이 있다. 그 하나는 레이저의 고 에너지 밀도를 이용하는 것이고 다른 하나는 생체조직의 광 감수성을 이용하는 것이다. 레이저의 고밀도 에너지를 이용하는 대표적 예는 레이저 메스이다. 이를 이용하면 암세포와 같은 부위를 다른 생체조직의 손상 없이 완벽하게 잘라낼 수 있다. 특히 엑시머 레이저가 위력을 발휘하는 분야는 생체조직의 절개이다. 이것은 다른 장파장의 레이저로는 불가능한데 엑시머 레이저의 짧은 파장 특성 때문에 표면으로부터 1μm이내로 광이 흡수돼 피부, 신경, 근육, 연골, 치아 등을 고경도로 절개할 수 있다. 레이저 의료분야 중에서도 가장 많은 관심을 모으고 있는 분야는 안과분야이다. 1960년 레이저가 출현한 이래, 의사들은 레이저가 안과진료에 강력한 도구가 될 수 있다는 확신 아래 많은 임상실험을 계속해 왔다. 그 결과 오늘날 안과 의사의 95% 이상이 눈의 치료에 레이저를 이용하고 있다. 즉, 망막의 응고, 망막의 재접합, 유리체 섬유 및 막의 제거, 반점의 제거, 노안, 녹내장, 백내장 등의 치료에는 예외 없이 레이저를 이용하고 있다. 특히 종래의 안과진료 방법을 근본적으로 변화시킬 수 있는 새로운 기술로 현재 전세계적으로 임상연구가 활발히 진행되고 있는 것은 엑시머 레이저 에블레이션(ablation)에 의한 각막 성형기술이다. 이것은 LRK(laser refractive kerato plasty) 또는 PRK (photore-fractive keratotomy) 등으로 알려진 기술로, 일반



적으로는 각막조각기술(corneal sculpting) 이라 불린다. 각막조각기술은 기본적으로 각막의 앞 표면에 콘택트 렌즈의 형상을 조각하는 기술로 근시, 원시, 난시의 치료에 이용된다. PRK의 모든 임상실험에는 파장 193 nm, 펄스에너지 160-195 mJ/cm<sup>2</sup>, 펄스 반복율 10 Hz의 ArF 엑시머 레이저가 이용된다. 전술한 바와 같이 엑시머 레이저에는 여러 가지 파장에서 동작하는 레이저가 있지만 ArF 레이저의 파장에서 주위의 조직에 영향을 주지 않으면서 각막의 조직이 가장 깨끗하게 제거된다. 이 기술의 중요성은 현재 우리의 주위에 안경을 사용하고 있는 사람의 비율을 생각하면 쉽게 이해될 수 있다.

또한 생체조직의 광 감수성의 이용은 암세포와 같은 병든 세포가 광 감수성이 있는 특성물질과 친화하는 성질을 이용하는 것이다. 예를 들어 HpD를 체내에 투여한 후 이것이 암 조직에 모였을 때 레이저로 조사하면 레이저 에너지는 HpD로 부터 암 조직내의 산소에 옮겨져 활성이 강한 산소로 되는데 이 활성산소가 암 조직을 케멸시킨다.

그 외에 엑시머 레이저는 원격탐사에도 이용된다. 엑시머 레이저광이 조사된 부분에 오존이 발생하는데 이 오존 분포를 측정하여 지구상의 환경변화를 측정할 수 있다.

## 6. 맺음말

엑시머 레이저는 지금까지 개발된 어떤 광원보다도 자외선의 광을 효율 좋고 풍부하게 공급하며 지극히 넓은 응용분야를 갖고 있다. 또 다른 레이저에 비해 개발의 역사는 짧지만 그 잠재성 때문에 선진각국에서는 적극적으로 연구개발이 진행되어 지금은 반복 동작율 250-500Hz, 출력 1000W정도의 장치가 상품화되어 실용화의 단계에 접어들었다. 우리 나라에서도 뜨거운 관심은 기울여지고 있으나, 아직 연구개발은 지극히 미비한 실정이다.

현재 상품화되어 있는 엑시머 레이저는 어느 정도의 실용성은 갖고 있으나 아직은 해결되어야 할 많은 문제점도 안고 있다. 예를 들어 미량이지만 극히 반응성이 강한 할로젠계열 가스를 이용하기 때문에 가스의 취급기술, 레이저 광학계나 가스용기의 손상문제 등이 기존의 가스 레이저에 비해 어렵다. 실용화에 가장 뛰어난 방전여기 엑시머 레이저의 경우 높은 가스압력 하에서 균일한 방전을 유지하는 문제, 고전압 대전류의 방전에 따른 스위칭 문제, 플라즈마에 에너지 주입시 임피던스 정합문제 등이 출력이나 효율, 반복동작, 신뢰성 등에 제약을 준다.

그러나 기술개발이 비약적으로 이루어지고 있고, 몇 가지 문제점에도 불구하고 응용분야는 확대 일로에 있다. 특히 자외선 영역에서 고출력과 높은 광자 에너지를 필요로 하는 재료의 초미세 가공, 의료, 광화학 분야에서의 응용은 더욱 확대될 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- [1] N. G. Basov, and et. al., Soviet J. Quant. Elect. 1, 18(1971).
- [2] C. A. Brau and J. J. Ewing, Appl. Phys. Lett. 27, 350(1975).
- [3] C. K. Rhodes, *Excimer Lasers*, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- [4] F. Kannari, et. al., IEEE J. Quantum. Electron. QE-19, 232(1983).
- [5] K. Miyazaki, and et. al., Appl. Phys. B-52, 1(1991)
- [6] W. J. Sarijeant, and et. al., IEEE J. Quantum. Electron. QE-14, 177(1978).
- [7] G. De. Nunzio, and et. al., Appl. Phys. Lett. 71, 3782(1997).
- [8] D. B. Chrisey and G. K. Hubler, *Pulsed Laser Deposition*, John Wiley, New York, 1994.

## 저 자 소개



### 김용평(金容平)

1955년 2월 9일생. 1979년 2월 경희대 공대 전자공학과 졸업. 1981년 2월 경희대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 3월 Keio 대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986년 4월-1988년 7월 Imperial College of Science and Technology 연구원. 1988년 8월-1996년 8월 한국표준과학연구원 책임연구원, 레이저연구실장. 1996년 9월-현재 경희대 공대 전자정보학부 부교수.