



# 고출력 COIL 레이저 설계기술 개발

Development of the Laser Design Technology  
for High-power COIL

韓國原子力研究所

30-48

# 提 出 文

韓 國 原 子 力 研 究 所 長 貴 下

本 報 告 書 를 "高 出 力 COIL 레이저 設 計 技 術 開 發" 課 題 의 最 終 報 告 書 로  
提 出 합니다.

1998年 7 月 31 日

研 究 室 名 : 레이저 光 機 電 技 術 開 發 팀

課 題 責 任 者 : 金 光 石

研 究 員 : 金 哲 中

權 聖 玉

監 修 : 車 亨 基

# 要 約 文

## I. 題 目

高出力 COIL 레이저 設計技術 開發

## II. 研究의 目的 및 重要性

COIL 레이저는 발진효율이 높고 포화 강도가 높아 수십 kW 급의 고출력이 용이하게 이루어질 수 있으며 광섬유 전송시 광손실이 가장 적어 레이저빔의 원격 전송에 의한 재료가공에 적합한 레이저이다. 가공용 레이저로 많이 사용하는 CO<sub>2</sub> 레이저에 비해 발진 파장이 짧으므로 재료의 광흡수율이 높아 일반 산업분야의 용접/절단에서 기존의 CO<sub>2</sub> 레이저를 대체할 것으로 기대되는 상용성이 큰 레이저이다. 또한 COIL 레이저는 전기를 사용하지 않고 값싼 화학연료를 사용하여 레이저 발진을 하므로 경제성이 있을 뿐만 아니라, 차량 혹은 비행기 등에 탑재할 수 있어 기동성이 있으므로 재난구조등에 활용할 수 있다. 따라서 일본등 선진국에서는 이에 대한 응용연구를 본격화하고 있으며 우리의 경우 고리원전 1, 2 호기등 노후 원자로에 대한 제염/해체 연구를 준비해야 할 시점에 있다고 판단된다. 본 연구는 COIL 레이저가 광섬유를 이용한 원격가공에 적합하므로, 노후 원자로의 원격제염 및 해체에 적용할 고출력 COIL 레이저 설계기술 개발을 통하여 추후 대규모 민군 겸용개발 추진을 목적으로 연구개발을 진행시켰다.

### III. 研究의 內容 및 範圍

본 연구에서는 광섬유 전송 및 고출력화가 용이한 고출력 COIL 레이저의 개념설계 및 여기산소 발생기 관련기술 확보 및 레이저 공진기 설계기술 개발을 추진하였다.

본 연구에서 개발한 연구 내용 및 범위는

첫째, COIL 레이저 매질의 광화학 반응 특성 연구이었으며,

둘째, 여기산소 발생기술 연구이며,

셋째, 10 kW 급 COIL 레이저의 개념설계를 위하여 초음속

노즐기술을 연구하였으며

넷째, COIL 레이저 공진기 설계 기술 개발을 위한 부품 특성 실험을 수행하였다.

### IV. 研究 結果 및 活用に 대한 建議

#### 가. 연구 개발 결과

- . COIL 레이저 발전과정에서 일어나는 화학 반응과정 연구
- . 10 kW급 COIL 레이저 개념설계
  - 고효율 대용량 여기산소발생기( Jet type SOG) 설계
- . 레이저 공진기 광학부품 성능 특성실험
  - 200 W 이상의 출력 발전

#### 나. 활용에 대한 건의

본 연구를 통해 고출력 COIL레이저에 대한 개념 설계가 이루어 졌으며

현재 민군 과제로 본격적인 고출력 COIL레이저 개발 과제가 진행 중에 있다.  
앞으로 고출력 COIL 레이저 기술의 응용 및 활용이 활성화 될 수 있도록 지  
속적인 지원이 있기를 기대한다.

# SUMMARY

## I. Project Title

Development of the Laser Design Technology for High-power COIL

## II. Objectives and Importance of the Paper

Recently, high-power COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser) has been becoming more efficient tool in laser materials processing. The reason for the interest stems from the possibility of getting more than tens of kW output power and minimal loss in optical fiber beam delivery. Moreover, shorter wavelength of COIL compare to that of CO<sub>2</sub> laser shows good results in cutting and welding because of its high absorption in materials.

Therefore, some high-developed countries has focused on developing COIL technologies for remote laser processing of the large structure such as the old nuclear power plant.

We have also some nuclear power plants which are more than 20 years old. Therefore, we are trying to develop the laser design technology for high-power COIL, which can be applied to dismantle and decontaminate old nuclear reactor.

## III. Scope and Contents of the Project

We were trying to develop the optical design technology of high-power COIL and singlet oxygen generator, and laser resonator technology. The scope and

contents of the project are as follows ;

- 1) Study of the process of chemical reaction during laser is generated
- 2) Study for efficient singlet oxygen generator
- 3) Supersonic nozzle for high-power COIL
- 4) Evaluation of laser mirrors and measurement of output power

of high-power COIL

#### IV. Results and Proposal for Applications

##### Results

- . Theoretical study of the chemical reaction process under laser operation
- . Basic design of 10kW class COIL
  - Design of efficient singlet oxygen generator (Jet type SOG)
- . Measurement of laser output power with self-developed mirrors
  - more than 200 Watts

##### Proposal for Application

In this project, we developed the optical design technology of high-power COIL. On the basis of this project, we started new large-scale, dual-use technology program between commercial and military. We expect this COIL will be applied successfully to remote laser materials processing.

# 目 次

제 1 장. 서론.....	11
제 2 장. COIL 기술의 발전과정.....	14
제 1 절. 서 설.....	14
제 2 절. 요오드의 전자 에너지 전이와 들뜨기.....	16
제 3 절. 전자준위 $O_2(^1\Delta)$ 의 화학적 생성.....	19
제 4 절. 초기 COIL 레이저의 모습.....	25
제 5 절. 기체상 $O_2$ 와 I간 에너지 전이 반응.....	28
제 6 절. 실제 반응기와 레이저 작동.....	31
제 3 장. COIL 의 동작 및 성능.....	40
제 1 절. 서 설.....	40
제 2 절. COIL 레이저의 발진원리 및 여기산소발생기.....	41
제 3 절. 요오드 혼합 및 초음속 노즐.....	44
제 4 절. 러시아 COIL 레이저의 동작 및 국산 레이저거울의 성능평가.....	49
제 4 장. 결 론.....	52
참고문헌.....	53



## 그 립 목 차

그림 1 $O_2/I$ 레이저에 관련된 에너지 준위도 .....	18
그림 2 $O_2(^1\Delta)$ 발생기에서의 기체-액체 반응 모식도 .....	19
그림 3 용액의 높이에 따른 $O_2(^1\Delta)$ 수득율의 의존도 .....	28
그림 4 $O_2(^1\Delta)$ 에 의한 해리 반응에서의 $I_2$ 준위들 .....	32
그림 5 발생기에서 기체의 전이시간의 함수로 측정된 $O_2(^1\Delta)$ 의 수득률 ..	35
그림 6 a) 압력의 함수로 측정된 $O_2(^1\Delta)$ 의 수득률,	
b) Rigrod extraction model .....	37
그림 7 a) Zagidullin 에 의해 보고된 Jet 반응기 .....	38
b) Zagidullin 에 의해 보고된 Jet 발생기에 대한 완성도 .....	38
그림 8 COIL 레이저 에서의 기본화학 반응들 .....	41
그림 9 COIL 레이저 장치 구성도 .....	43
그림 10 요오드 승화장치 및 광흡수 cell .....	45
그림 11 a) 요오드 혼합노즐 .....	47
b) 초음속 노즐의 구조 .....	48
그림 12 Pitto tube의 압력비에 따른 Mach number .....	48
그림 13 레이저 출력특성 비교 .....	51

## 表 目 次

표 1 기체-액체 반응모형과 속도상수들 .....	20
표 2 러시아 mirror를 사용한 COIL의 동작실험 .....	50
표 3 국산 mirror를 사용한 COIL의 동작실험 .....	32

# 寫眞目次

사진 1 COIL 레이저 발진중 손상된 국산 레이저 mirror의 표면 .....51

## 제 1 장. 서 론

COIL 레이저는 발전효율이 높고 포화 강도가 높아 수십 kW 급의 고출력이 용이하게 이루어질 수 있으며 광섬유 전송시 광손실이 가장 적어 레이저빔의 원격 전송에 의한 재료가공에 적합한 레이저이다. 가공용 레이저로 많이 사용하는 CO<sub>2</sub> 레이저에 비해 발전 파장이 짧으므로 재료의 광흡수율이 높아 일반 산업분야의 용접/절단에서 기존의 CO<sub>2</sub> 레이저를 대체할 것으로 기대되는 상용성이 큰 레이저이다.

COIL 레이저는 전기를 사용하지 않고 값싼 화학연료를 사용하여 레이저 발진을 하므로 경제성이 있을 뿐만 아니라, 차량 혹은 비행기 등에 탑재할 수 있어 기동성이 있으므로 재난구조등에 활용할 수 있다. 광섬유를 이용한 원격가공이 가능하므로 노후 원자로의 원격제염 및 해체에 적용할 수 있는 가장 적절한 레이저이며, 일본등 선진국에서는 이에 대한 응용연구를 본격화하고 있다. 우리의 경우 고리원전 1, 2 호기동 노후 원자로에 대한 제염/해체 연구를 준비해야 할 시점에 있다고 판단된다.

본 COIL 레이저의 국내외적인 기술 동향을 살펴보면, 국내에서는 화학레이저 기술이 본격적으로 개발되어 있지 않으나, 관련된 화학 및 화공기술과 유체역학기술, 고출력 레이저 기반기술 등의 기초가 확보되어 있어 COIL 레이저 개발에 직접적으로 활용이 가능하다.

한국 원자력 연구소에서는 1985 년 HF 화학레이저를 발진시킨 경험이 있으며, 그 동안 kW 급 YAG 레이저를 이용한 고출력 레이저가공과 광섬유 전송기술이 축적되어 있으며, 산업용 레이저 개발과 관련하여 상용화된 레이저 제작기술등의 기반기술이 확보되어 있어, COIL 레이저를 개발할 기반이 이루어져 있다.

한편 해외의 연구개발들을 살펴보면 우선 COIL 레이저는 1978 년 미 공군의 Phillips Lab. 에서 처음 개발되었으며 HF/DF 화학레이저와 마찬가지로 고출력레이저 발진가능성이 인정되어 처음부터 군용으로 개발되기 시작하

였다. 미 공군에서는 747 항공기에 탑재한 COIL 레이저로 미사일을 요격할 수 있는 ABL 프로젝트가 '96 년 11 월 승인되어 Boeing, TRW, Lockheed Martin 사가 참여하여 추진하고 있으며, ABL 프로젝트의 주관기업인 Boeing 은 ABL 의 주도적 관리 및 항공기에 전체시스템 integration 을 담당하며, Lockheed Martin 은 Target Acquisition 및 Beam control 을 개발하고 TRW 사 는 메가와트급의 COIL 레이저를 개발하는 것을 분담하고 있다. TRW 사는 1980 연대 초반부터 SBL (Space-based Laser) 및 MIRACL (Mid-infrared Advanced Chemical Laser) 의 일환으로 HF/DF 화학레이저를 개발한 경험을 바탕으로, 1995 년 COIL 레이저 개발을 시작하여 10 kW 급의 레이저를 개발한데 이어 1996 년에는 수백 kW 급의 COIL 레이저를 개발한 것으로 알려지고 있다. 또한 TRW 는 1998 년에 여러 대의 수백 kW 급 COIL 레이저를 결합하여 메가와트급의 레이저 발전을 계획하고 있으며, ABL 을 위한 지상 COIL 레이저 시설을 이용하여 미사일요격등의 다양한 실증연구를 할 계획이다. 미 공군에서는 COIL 레이저의 산업적 활용을 위하여 SBIR (Small Business Innovation Research) 의 일환으로 COIL 레이저를 이용한 다양한 재료의 가공특성연구 및 COIL 레이저의 장시간 동작특성 연구등에 많은 연구비를 투자하고 있다.

일본에서는 일본 과기청의 지원으로 1987 년부터 노후 원자로의 제염 및 해체, 그리고 일반 산업적 활용을 위하여 200 억원을 들여 Kawasaki 중공업에서 COIL 레이저를 개발하고 있으며, 현재 10 kW 급의 레이저를 개발하여 이의 상용모델 개발을 위한 연구를 하고 있다. Kawasaki 중공업은 Tokai 대학과 공동으로 연속동작 특성개선 및 running cost 절감연구를 통하여 가공용 CO<sub>2</sub> 레이저를 대체할 상용모델을 개발 중에 있으며, 광섬유를 통한 레이저 빔 전송기술을 개발하여 원격가공을 위한 기반기술을 구축하고 있다.

러시아의 Lebedev Physical Institute 에서는 80 연대 초반부터 COIL 레이저개발연구를 하여오고 있으며 1989 년 처음으로 효율적인 여기산소발생을 위하여 Jet type SOG 를 개발하여 고출력 COIL 레이저의 가능성을 보여주었으며 이 분야의 연구를 주도하고 있다. 이밖에 독일의 DLR 은 미국의

Phillips Lab. 으로부터 여기산소장치를 공급받아 COIL 레이저를 개발하고 있으며, 이스라엘은 군사용으로 고효율 COIL 레이저를 개발하는 것으로 알려지고 있다.

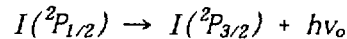
본 연구는 이러한 기술적인 가치와 활용을 목표로 하고, 국내의 고효율 COIL 레이저의 본격적인 연구를 위해 추진되었다.

## 제2장. COIL 기술의 발전과정

### 제 1 절. 서 설

Chemical Oxygen-Iodine Laser(COIL) 기술은 높은 효율과 폭 넓은 응용성 때문에 집중적인 주목을 끌어왔다. 레이저 전이에서 화학반응을 이용한 것은 근래에 들어서 였는데 HCl 레이저가 1965년에, HF/DF 레이저가 1972년에 개발되었다. 그러나 대부분 반응에너지가 레이저 매질을 가열하는 것으로서 사용되기 때문에 효율을 떨어뜨리고 이를 해결하는데는 공학적 어려움이 있었다. COIL 에서는 반응에너지가 높은 효율을 가지고 전자 들뜸 에너지로 전환 되었고 다른 화학 레이저에서 나타난 열 손실이 적었다. 그러나 COIL 의 산소 발생기에서는 여전히 열 손실이 존재하여 이를 해결하려는 공학적인 노력들이 있어 왔다.

Iodine 레이저는 J.V.V. Kasper 와 G.C. Pimentel 등에 의해 1964년에 처음 발견되었다.[1,2] 알킬요오드 화합물이 UV 광분해될 때 발생하는 레이저 현상을 이용하였으며 다음과 같은 경로를 따른다.



여기서 R은 CH<sub>3</sub> 과 CF<sub>3</sub> 이며 이들은 점차적으로 다른 알킬들로 연구를 확대하였으며 레이저파장이 1.315 μm 임을 확인하였다. 또한 이때의 요오드원자의 I(^2P<sub>1/2</sub>) → I(^2P<sub>3/2</sub>) 의 약한 자기 쌍극자 전이임을 알았고 레이저현상은 광분해 과정에서 생성되는 <sup>2</sup>P<sub>1/2</sub> 전자상태의 요오드 원자가 충분한 밀도를 가지고 있기 때문에 발생한다는 것을 알았다. 고출력 장치로서의 요오드 레이저의 잠재력은 A.J. Demaria 와 C.J. Ultee 의 연구 결과로서 밝혀졌다.[3] 그들은 flash photolysis arrangement 실험에서 요오드 레이저의 출력이 65 joule 임을 보고하였다. 또한 요즘 요오드원자의 분광학이 잘 연구되어져 그 결과 요오드원자의 바닥전자상태와 낮은 들뜬 전자상태 (<sup>2</sup>P<sub>1/2</sub>) 가 요오드 분자의 광

분해 과정에서 쉽게 얻어질 수 있으며  $^2P_{1/2}$  전자상태는 바닥상태로의 전이를 가능하게 하는 자기 팔극자 모멘트를 약하게 가지고 있는 것으로 밝혀졌다. [4, 5] 또한  $^2P_{1/2}$  와  $^2P_{3/2}$  전자상태 사이의 미세구조차이가 gain 생산에 충분하였다. 많은 연구자들이 요오드원자의  $^2P_{1/2}$  전자상태의 복사 수명을 측정하려고 시도하였고 대략 0.17-0.02 초 사이의 값을 보고하고 있다. [6-10] 아직도 이해되고 있지 않은 원자간의 반응뿐만 아니라 다양한 quenching 과정들에 의한 영향을 받기 때문에 정확한 복사 수명을 측정하기는 힘들다. 그럼에도 불구하고 대략적인 복사 수명을 0.1초로서 사용하고 있다.

J.V.V. Kasper 와 G.C. Pimentel 등에 의해 1964년에 발표된 논문은 요오드 레이저의 광범위한 기술적 발전을 유도하였다. 60년대 후반과 70년대에 굉장히 많은 집중적인 연구가 진행되어졌다. 그 선구자로서 독일의 Max Plank Institute Für Plasmaphysik 의 K.J. Witte, R. Volk 등의 많은 사람들이 고풍력 요오드 레이저 기술을 발전시켰다. [11]

초기에 행해진 요오드 레이저의 연구들을 살펴보면 큰 에너지를 저장하기가 가능한 긴 복사수명과 적절한 gain cross section 때문에 뛰어난 레이저 시스템이 된다는 것이다. 사실 복사수명 동안의 요오드 gain 관계 ( $\alpha$ )는 다음 식으로 확실하게 정의되고 화학적으로 들뜨는 요오드 레이저의 중요한

$$\alpha = \sigma(g_u N_u - g_l N_l) \quad (2)$$

기초가 된다. 여기서  $\sigma$ 는 magnetic transition cross section 이고  $N_u$  와  $g_u$ ,  $N_l$  와  $g_l$  는 각각 높은 상태와 낮은 상태들의 일반적인 population density 들과 축퇴도들을 나타낸다. 낮은 압력상태에서 나타나는 전이선 넓어짐 현상을 다음의 gain 에 대한 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 T 는 온도 이고 A 는 복사 방출 속도를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{7}{12} \sigma_o \sqrt{\frac{T_o}{T}} \left( N_u - \frac{1}{2} N_l \right) \quad (3)$$

$$\sigma_o = \frac{\lambda^3 A}{8\pi} \left( \frac{m}{2\pi k T_o} \right)^{1/2}$$

상온(T = 300 K) 에서  $(7/12) \sigma_o$  는 약  $7.4 \times 10^{-18} \text{ Cm}^2$  의 값을 가진다. 위의

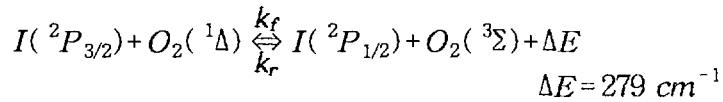


식은 요오드 레이저에 대한 두 가지 중요한 항목을 보여주고 있다. 첫 번째는 바닥상태와 들뜬 상태들 사이의 미세 분리 구조에 대한 것으로서 gain이 이미 반전이 일어나기 전에 이루어졌다는 것을 축퇴도들이 보여준다. 이 사실은 Steve Davis 에 의해 보고되었으며[12] 화학 반응 계에서 중요하게 다루어지는 부분이다. 두 번째는 작동 온도를 감소시킴으로서 gain 을 증가시킬 수 있다는 것을 온도항이 보여준다는 것이다. 이것 또한 화학 반응 계에서는 중요한 것이다.

## 제 2 절. 요오드의 전자 에너지 전이와 들뜨기

요오드원자의 긴 복사수명은 화학반응들에서와 같은 낮은 세기의 들뜨기를 허용한다. 불행하게도 섬광 광분해를 제외하고는 직접적으로 요오드원자 들뜬 상태를 만들 수 없었다. 60년대 후반에 전자적으로 들뜬 산소분자에 대한 연구가 활발히 진행되면서 이 분야에 발전이 있었다. 다양한 화학 반응들에 의해 첫 번째 들뜬 전자상태의 산소가 생성될 수 있다는 것이 밝혀졌다. 이 때 첫 번째 들뜬 전자상태와 바닥상태간의 에너지 차이는 약 1 e.V. 이하인 것으로 알려졌다. 많은 연구자들이 첫 번째 들뜬 전자상태( $O_2^1 \Delta$ )를 화학적인 방법들을 사용하여 생성하려 했고 그중 David R. Kearns 는 선구자라고 할 수 있다. 말 할 나위도 없이 이러한 일들의 동기는 요오드 레이저의 들뜨기를 위한 것이 아니었고 반응 포텐셜 에너지언덕을 통과하여 선택적인 경로를 따르는 반응 중간체로서의 전자적으로 들뜬 산소분자를 이용하여 새롭고 흥미 있는 화학반응 생성물들을 생성하자는 것이었다. 단일항 전자상태의 산소분자는 많은 특성들을 가지고 있다. 산소분자의 단일항 전자상태는 45분의 복사 수명을 가지는 스핀 전이 금지 전자상태이다. [13,14] 따라서 화학적으로 단일항 전자상태를 생성시킬 수만 있다면 안정한 에너지 저장소로서 이용할 수 있다는 것이다. 그 사이에 R. Derwent, D. Kearns, 그리고 B. Thrush 는 그림1.에서 보이듯이 단일항 전자상태의 산소분자로부터 요오드원자로의 에너지 전이가 공명에너지 전이경로를 통하여 가능하다는 것을 인식하

게 되었다. [14-17]



$$I(^2P_{1/2}) = K_{eq} \cdot \frac{[I(^2P_{3/2})][O_2(^1\Delta)]}{[O_2^T] - [O_2(^1\Delta)]}$$

$$K_{eq} = \frac{k_f}{k_r} = 0.75 \exp\left[\frac{402}{T}\right] \quad (4)$$

여기서 약간의 에너지 차이( $\Delta E = 279 \text{ cm}^{-1}$ )에도 요오드로의 에너지 전이는 가능하고 요오드의 들뜸 속도 상수  $k_f = 4.6 \times 10^{13} \text{ cm}^3/\text{mol-sec}$  는 상온에서 약 2.9배로 반전 속도  $k_r = 1.6 \times 10^{13} \text{ cm}^3/\text{mole-sec}$  를 앞선다. 많은 연구자들은 전기적 방전을 이용하여  $O_2(^1\Delta)$  들뜸을 생성하는 경로를 설명하였다. 분명하게도 온도를 낮추어 주면 에너지 전이 과정이 더 유리하다. Derwent 등은 관련된 에너지 경로에 대한 상호연관 규칙에서 대칭 제한이 존재하지 않는다고 주장하였다. [17] 더욱이 전이 속도는 기체 충돌과 밀접한 것으로 나타나며 에너지전이 속도는 스핀 허용 과정처럼 보여진다고 주장하고 있다. 만약 바닥상태에서 산소의 준안정상태의 분율,  $f$  를 정의하면

$$f = \frac{[O_2(^1\Delta)]}{[O_2^T] - O_2[ ^1\Delta]}$$

그리고  $O_2(^1\Delta)$ 의 수득율  $Y_\Delta$  과 연관된 정의는 다음과 같다.

$$Y_\Delta = \frac{O_2(^1\Delta)}{[O_2^T]}$$

여기서  $[O_2^T]$  는 총 산소량을 나타내고 요오드의 양은  $[I^T] = [I(^3P_{1/2})] + [I(^3P_{3/2})]$ 으로 나타내고 그래서 gain 식(3)은 다음과 같이

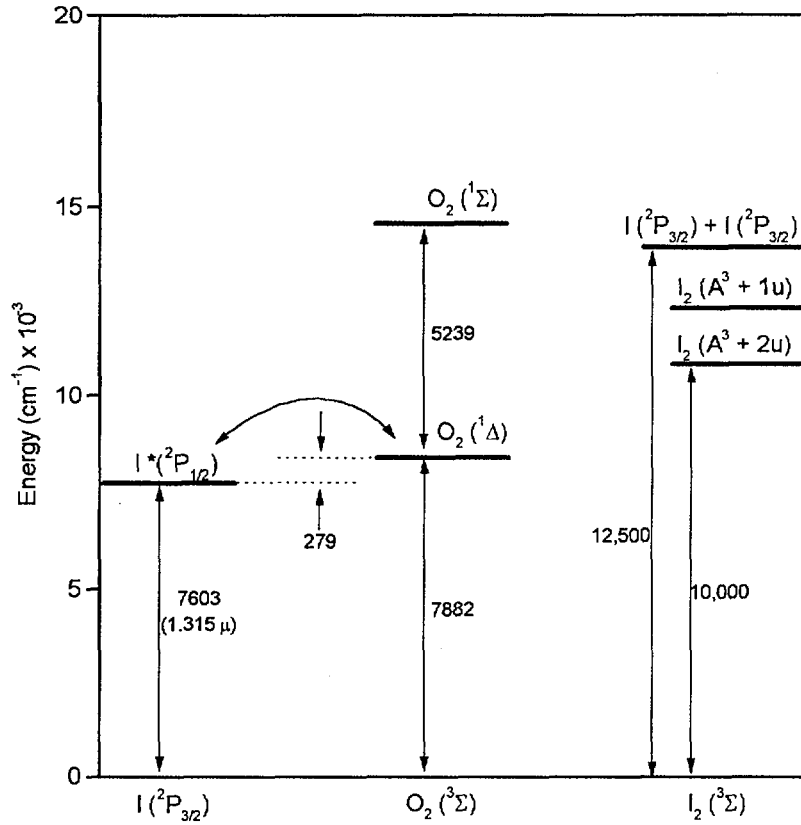


그림 1. O<sub>2</sub>/I 레이저에 관련된 에너지준위도.  
 (Molecular spectroscopy of O<sub>2</sub> and I<sub>2</sub> as they are pertinent to the O<sub>2</sub>/I laser.)

바뀌게 된다.

$$a = \frac{1}{2} a_0 \sqrt{\frac{T_0}{T}} \left\{ \frac{1.5f\epsilon^{402/T} - 1}{0.75f\epsilon^{402/T} + 1} \right\} [I^T]$$

또는

$$a = \frac{1}{2} a_0 \sqrt{\frac{T_0}{T}} \left[ \frac{2K_e \left( \frac{Y_\Delta}{1 - Y_\Delta} \right) - 1}{K_e \left( \frac{Y_\Delta}{1 - Y_\Delta} \right) + 1} \right] [I^T] \quad (5)$$

여기서 식(4)이 이용되었다. 산소-요오드 에너지 전이 레이저에 대한 식(5)은 온도와 gain 간의 밀접한 관계를 보여주고 총 요오드 양과 선형관계를 가지는 것을 보여주기 때문에 매우 중요하다. 사실상  $K_e f \gg 1$  일 때 예를 들어  $K_e \cong 2.9$ 이고  $f = 2$  다시 말해  $O_2(^1\Delta) = \frac{2}{3} O_2^T$  일 때 식(5)은 들뜬 산소 분자에 독립적이며 gain 이 최대값,  $a_m \cong a_0 \sqrt{\frac{T_0}{T}} [I^T]$ , 에 가깝게 된다. 이것은 적당하거나 심지어 낮은 양의  $O_2(^1\Delta)$  의 생성으로도 레이저 현상이 일어날 수 있다는 것을 제시한다. 만약 문턱 gain 경우 즉,  $a=0$  일 때를 조사해보면 문턱에 대해서 필요한 들뜬 산소 분율  $f_t$  가 다음과 같거나 상온에서  $O_2(^1\Delta)/O_2^T$  비가 14.5 % 라는 것을 곧바로 알게된다. 200 K 에서 문턱에 대한  $O_2(^1\Delta)/O_2^T$  의 요구량은 8.3 % 까지 떨어진다.

$$f_t = \frac{2}{3} \exp\left[-\frac{402}{T}\right] \cong 0.169 \quad (5a)$$

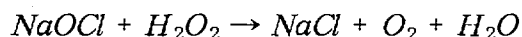
$$\text{or} \quad Y_\Delta = \frac{1}{2K_e + 1}$$

그래서 산소로부터 요오드원자로의 공명 에너지 전이 경로에서는 요오드의 레이저 현상을 위해 더 높은 준위의 산소 들뜸이 필요 없고 이것은 화학적 들뜸 과정을 좀더 손쉽게 해주는 역할을 하게 된다.

### 제 3 절. 전자준위 $O_2(^1\Delta)$ 의 화학적 생성

위에서 언급했거나 다소 잘 알려지지 않았던 그 당시 몇몇 일들은 화학적 산소-요오드 레이저( COIL )와 요오드원자의 화학적 들뜸으로 진행되는 원동력을 제공하였다. Selinger 와 그 동료들이 NaOH 용액에  $Cl_2$  기체를 통과시켜 만든 sodium hypochlorite 용액과 hydrogen peroxide 용액을 빠르게 혼합하여 그 과정에서 적외선영역의 강한 액체 방출을 관찰하였다. [18,19] 그러한 방출은 아마도 액체에 잡힌  $O_2(^1\Delta)$  dimer 로부터 나오는 것으로 보여

진다고 제안되었다. [20] 만약 전자적으로 들뜬 산소가 액체상에서 생성되었다면 그때 달아나는 산소도 들뜨게 되었을 것으로 생각되어졌다. 산소를 생성하는 반응은 이미 hypochlorite 기체-액체상 반응으로 잘 알려져 있다. Hypochlorite를 생성시키기 위해 KOH용액에  $Cl_2$  기체를 흡수시키고 생성된 hypochlorite 가 과산화수소와 반응하여 산소가 발생하게 된다.



$O_2(^1\Delta)$  생성에서 전개되는 자세한 반응들은 Held 와 그 외의 사람들이 제한하였으며 표1에 요약하였다. [21-23]

표1. 기체-액체 반응 모형과 속도상수들.  
( Gas-liquid reaction model and rate constants.)

반응	속도상수
1. $HO_2^- + Cl \rightarrow HOOC + Cl^-$	$K_1 = 2.7 \times 10^{10} \text{ CM}^3/\text{mole-sec}$
2. $HO_2^- + HOOC \rightarrow ClO_2^- + H_2O_2$	$K_2 = \infty$
3. $ClO_2^- \rightarrow Cl^- + (O_2^1\Delta)$ (in liquid)	$K_3 = \infty$
4. $(O_2^1\Delta) \rightarrow O_2(^3\Sigma)$ (in liquid)	$K_4 = (5 \pm 2) \times 10^5 \text{ sec}^{-1}$ ; liquid deactivation
5. $OH^- + H_2O_2 \rightleftharpoons O_2H^- + H_2O$	Equilibrium: $K_e > 10^4$

위의 표에서 반응 2와 3은 반응 1과 비교하여 속도가 무한대에 가깝게 진행되는 것처럼 느껴진다. 반응 5에서 평형은  $HO_2^-$  이온 쪽으로 이동한다. Khan 은 hypochlorite 반응을 통하여 액체에서 생성되는  $O_2(^1\Delta)$  의 총 양자효율을 조사하였다. [19, 20] 산소분자의 파동함수는 명확한 3개의 전자상태,  $^1\Sigma_g^+$ ,  $^1\Delta_g$ ,  $^3\Sigma_g^-$  (바닥상태), 에 대한 항을 고려해야 한다. 전이( $^1\Sigma_g^+ \leftrightarrow ^3\Sigma_g^-$ ) 는 전기 쌍극자 금지, 스핀 금지, 대칭 금지이고 단지 7초의 수명을 가지는 약한 자기 쌍극자 전이이다. 전이( $^1\Delta_g \leftrightarrow ^3\Sigma_g^-$ ) 는 45초의 수명을 가지는 스

핀금지와 대칭 금지인 자기 쌍극자 전이이다. 만약 반응물들이 바닥상태 또는 들뜬 상태의 생성물을 생성시키기 위해 가질 수 있는 조건이 있다면 그것은 전자 스핀이 반응물과 들뜬 상태의 생성물들 사이에 보전되어야만 한다는 것이 논의되었다. 반응물과 바닥상태의 생성물들 사이에서는 스핀이 보전되어질 수 없다. 스핀이 바닥상태가 아닌 들뜬 상태의 생성물에 보전되어진다면 그때는 들뜬 상태와 바닥상태간의 광학 전이가 엄격히 금지되고 생성물의 상태가 매우 준안정 상태로 존재하게 될 것이다. [24, 25]

사실, 사람들은 들뜬 상태에서의 강한 발광이 들뜬 상태와 바닥 상태 들간의 스핀 허용 전이들이라는 것을 암시하기 때문에 많은 화학발광 반응이 전자 준위들로 효과적인 들뜸을 생성하는 것이 아니라고 가정할지도 모른다.

$O_2(^1\Delta)$ 의 생성이 준안정 상태와 바닥상태간의 강한 스핀 금지인 경우를 조절해 준다. 그 결과 사람들은 100 %의 양자효율을 가진 액체상에서의  $O_2(^1\Delta)$ 의 생성을 논의해 오고 있다. [20, 21, 24] 분명하게 준안정한 상태의 산소는 액체상태에서의 확산으로 인한 액체 비활성화가 진행되지만 70%에서 80%의 효과적인 수득율을 가지는 것이 관찰되어졌다. [26, 27, 29, 30]

표1.의 반응들이 매우 높은 효율을 가지고  $O_2(^1\Delta)$ 를 생성할 수 있기 때문에  $O_2(^1\Delta)$ 의 생성에 대한 물리적 과정을 연구할 필요가 있다. 기체/액체 반응 모식도가 그림2.에 나타내어 졌다. 염소 기체가 염기성 과산화수소(basic hydrogen peroxide, BHP)의 액체 표면에서 흡착되고 표1.에서 보여진 반응순서에 따라 반응이 진행되어진다. 생성된 산소는 액체 층으로부터 확산되어지고 기체로 날아가기 위해 액체 층에서 떨어져 나온다. 액체상에 있는 동안에 표1.의 반응4식에 의한 빠른 비활성화가 진행되어진다. 결과적으로  $O_2(^1\Delta)$ 생성의 정도는 충분하게 소량으로 유지시켜야 한다. 왜냐하면 생성되는 깊이 정도에 따른 확산하는 시간이 비활성화를 충분히 야기하지 못하기 때문이다. 따라서 염소 기체는  $O_2(^1\Delta)$ 의 생성의 깊이나 다른 모든

$O_2(^1\Delta)$  보다 BHP 속으로 더 깊게 흡착되어서는 안되고 그에 따른 열분해로 비활성화될 것이다. 확산 상수를 이용하여  $O_2(^1\Delta)$  의 생성 깊이를 미리 예측할 수 있을 것이다. 기체에 대한 액체 확산 상수는  $D \cong 7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$  이고 확산 깊이는 다음 식과 같이 액체 존재 시간에 관계되며,

$$l^2 = 2D_{cl} \tau_{cl}$$

그리고 전형적인 e-folding residence time 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_{cl} = (k_1[HO_2^-])^{-1} \cong 10^{-7} \text{ sec}$$

그래서 반응 깊이는 다음과 같다.

$$l = \sqrt{2D_{cl}(k_1[HO_2^-])^{-1}} \cong 1.2 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

이는 염소기체가 거의 즉시 꿰뚫어 버리고( $10^{-7} \text{ sec}$ ) 들뜬 상태의 산소를 발생시키는 반응을 한다는 것을 나타낸다. 지금 이 산소는 이 액체 깊이로부터 확산되어져야만 하고 이 때 걸리는 시간은 또한 액체상 비활성화를 경험하는 시간이 된다. 그래서  $O_2(^1\Delta)$  가 특정 액체상 존재 시간  $\tau_0$  을 액체 막에서  $D_{cl} \cong D_0$  이기 때문에 다음과 같이 가진다. 액체에서  $O_2(^1\Delta)$  의 존재 시간이 약  $10^{-7}$  초이기 때문에 액체상

$$\tau_0 = \frac{l^2}{2D_0} = \frac{D_{cl}}{D_0 K_1 [HO_2^-]} = 10^{-7} \text{ sec}$$

비활성화 속도  $\Delta t = 10^{-5} \text{ sec}$  에 의해 야기되는 비활성화는 작고  $O_2(^1\Delta)$  는  $\tau_0/\Delta t = 10^{-2}$  이기 때문에 대부분 날아가 버린다.

Copeland 등은  $O_2(^1\Delta)$  의 생성에 대한 매우 훌륭한 기체/액체상 분석을 제공하였다. [28] 이러한 분석은 기체상 액체막으로부터 염소 기체의 액체막 표면 흡수에 대해 설명하였다. 염소 기체분자들이 막과 충돌하고 관통하고 반응하는 속도뿐만 아니라 기체 속도를 설명하고 있다. 그들은 그 과정이  $HO_2^-$  을 생성시키기 위해 염소 기체를 이용하는 반응 시간 상수,

$10^{-7} \text{ sec} \cong k_1 [\text{HO}_2^-]$  보다 긴 시간동안 정지 상태에 있다고 주장하였다. 또한 액체상에서  $\text{O}_2(^1\Delta)$  생성은 단열적으로 염소 액체막의 증감에 달려있다고 주장하였다. 인접한  $\text{O}_2(^1\Delta)$  액체 비활성화를 설명할 뿐만 아니라 기체상으로부터 액체로 거꾸로 확산되는  $\text{O}_2(^1\Delta)$  에 대해서도 설명하였다. 첫 번째 시간 의존성은 액체막 표면에 있는 기체상에서 염소 기체의 분리가 시간에 의존하기 때문인 것을 보였다. 이것은 분명하게 염소 기체 흐름의 속도에 상대적인 액체 유속에 의존한다는 것을 나타낸다.

위에서 논의한 현상을 그림 2. 에 나타내었다. 염소 기체가 액체 속으로 효과적인 다량 이동 속도,  $U_l^g$  를 가지고 막에 접근한다. 즉, 염소 질량 이동 상수는 분자들이 막 표면을 때리고 표면을 뚫고 막에서 확산되고 반응하는 염소 열 속도로 구성되어 있다. 부분적인 염소 시간 의존성은 기체상에서 나타난다.

$$rS \frac{dC_{cl}^g}{dt} = -U_l^g C_{cl}^g \quad (7)$$

여기서  $C_i$  는 화학종의 농도들이고  $r$  은 액체막 속도와 기체 속도의 비이다. 그리고  $S$  는 막표면 면적과 기체부피간의 비이다. 액체상에서 염소가 특정한 길이의 확산/반응성 있는 변화를 수행한다.

$$[D_l(k_1[\text{HO}_2^-])^{-1}]^{1/2}$$

$$C_{cl}^l(x,t) \approx P_{cl} C_{cl}^l(o,t) \exp(-x/l) \quad (8)$$

결과적인 액체  $\text{O}_2(^1\Delta)$  의 분포,  $C_o^l(x,t)$  는 액체상  $\text{Cl}_2$  유용성과 연관되지만 큰 세 가지 항을 가진다.

$$C_o^l(x,t) \approx P_{cl} C_{cl}^l(o,t) \left[ \exp\left(-\frac{x}{\sqrt{D_o/K_4}}\right) - \exp\left(-\frac{x}{l}\right) \right] + P_o^g C_o^g(o,t) \exp\left(-\frac{x}{\sqrt{D_o/K_4}}\right) \quad (10)$$



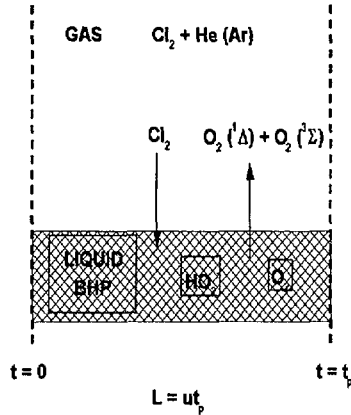


그림2.  $O_2(^1\Delta)$  발생기에서의 기체-액체 반응 모식도  
 ( Gas-liquid system for  $O_2(^1\Delta)$  generation.)

식(10)에서 첫 번째 지수항은  $O_2(^1\Delta)$  의 확산( $D_0$ ) 와 비활성화 속도( $K_4$ )의 측면에서 인접한  $O_2(^1\Delta)$  의 액체 비활성화를 나타낸다. 두 번째 지수항은 액체막에서  $Cl_2$  농도 변화량의 측면에서 생성에 대해 설명한다. 그리고 마지막 항은 액체에서  $O_2(^1\Delta)$  의 비활성화와 기체상에서 액체상으로의  $O_2(^1\Delta)$  의 반환을 설명한다. 후자의 경우는 산소 기체의 압력이 큰 경우를 제외하고는 정상적으로 작은 값을 가진다. 막에 충돌하고 반응하는 기체  $Cl_2$  의 양은  $Cl_2$  가 충돌할 확률  $P_{cl}$  과  $Cl_2$  기체 농도,  $C_1^g(o,t)$ , 의 표면의 곱으로 나타낸다. 산소도 같은 식으로 정의된다.  $P_o^g$  와  $C_o^g$ . 체에서  $O_2(^1\Delta)$  가 생성될 때 마다 식(10)과 같은 반응에 의해 표면에서 확산이 일어나고 액체 표면으로부터 기체상으로 날아가 버린다.  $O_2(^1\Delta)$  가 액체 표면에 붙어있는 동안에 액

체상 비활성화가 진행된다. 아직  $O_2(^1\Delta)$  가 떨어져 나가는 과정에 대한 물리학적 이해가 아직 부족하기 때문에 산소/액체 표면 이탈 시간과 비활성화를 액체와 기체간 산소 유량의 균형을 이용하여 측정하였다.

#### 제 4 절. 초기 COIL 레이저의 모습

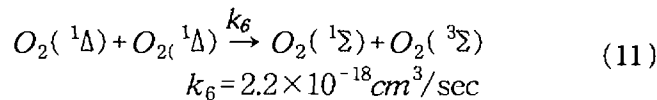
화학적으로 들뜬 요오드 원자에 의한 레이저현상은 1977년 McDermett 와 그 동료들에 의해 처음 발견되고 1978년에 보고되었다.[26] 이 때 *basic*  $O_2(^1\Delta)-H_2O_2$  반응을 이용하여  $O_2(^1\Delta)$  를 생성시키기 위해 bubbler 가 이용되었다. 초기 연구에서는 수 밀리와트의 출력이 1979년에는 평균 100 와트의 출력으로 급속히 발전하였다.[30]

그 가운데 COIL 의 성공이 있었다. 되돌아보면 그 당시 전개되는 화학적 그리고 물리적 과정들에 대한 지식의 부족은 심각했다. 사람들은 화학적 들뜨기와 레이저 현상의 성공을 이끈 Held, Hurlock 그리고 Copeland 등이 전개한  $O_2(^1\Delta)$  생성에 대한 화학물리학을 이해하지 못했다.[21-23, 28] 사람들은 단지 기초단계의 기체상 반응속도론적 과정을 이해하는 정도였다. 예를 들면 수증기의  $I(^2P_{1/2})$  와의 충돌 현상이나  $I_2/O_2(^1\Delta)$  충돌에 의한 바닥상태 원자들의 생성들은 이해되지 못하고 연구 대상으로만 평가하는 정도였다. 그리고 이미 존재하던 견고한 기술적인 배경은 요오드의 광분해에 관한 연구로부터 얻은 요오드 원자의 레이저 물리학이 전부였다. 그럼에도 불구하고 화학적 들뜨기와 레이저 현상은 성취되었고 빠르게 발전하였다. 이것은 우선 아주 완만한 레이저 물리학이 관여하기 때문이다.  $I(^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2})$  전이는 경쟁하는 다른 전자 상태를 가지고 있지 않고 gain 과 레이저 현상을 만들기 위해 식(3, 4, 5)식으로 요구되는  $O_2(^1\Delta)$  수득율에 대한 요구가 양호하다. 이는  $O_2(^1\Delta)$  의 화학적 생성에 대한 부족한 이해와 명확하지 않은 기체 속도론적 과정들로부터 연구하는 사람들을 괴로운 실패 없이 피해갈 수 있게 해주

었다.

McDermett 등에 의해 사용된  $O_2(^1\Delta)$  발생기는  $Cl_2$  기체가 BHP 용액을 통과하면서 기포를 발생시키면서 반응하고  $O_2(^1\Delta)$  를 생성시키는 Sparger 형태였다. [29, 30]

Sparger 에서는 BHP 에 붙잡힌 염소 기포가 기포 주위의 액체 표면에서 반응해야하고 액체막에서 생성된  $O_2(^1\Delta)$  는 기포가 액체의 Head 를 통하여 옮겨지는 동안 기체 기포로 확산되어야 한다. 만약 BHP 에서 기포의 존재시간이 너무 짧으면 염소가  $O_2(^1\Delta)$  으로 전부 전환되지 않을 것이며 발생기 수득율이 낮을 것이다. 만약 BHP head 가 너무 크면 즉, 기포 존재 시간이 너무 길 경우는 비활성화 과정이 시작된다. 이러한 발생기에서는  $O_2(^1\Delta)$  의 비활성화가 두 종류가 존재한다. 첫 번째는 기포에 있는  $O_2(^1\Delta)$  가 기포 주변의 액체로 다시 확산되어져 붙어버리고 비활성화 된다. 두 번째는 느린  $O_2(^1\Delta)$  비활성화/몽침 과정이 기포 자체에서 일어난다.



이 과정은 작은 속도상수를 가지지만 압력에 의존한다. 긴 유체 head는 기포에 대한 매우 큰 hydrostatic 압력을 제공한다. 예를 들어 만약 가득찬 발생기의 산소 압력이 1 Torr이라면 8cm 의 BHP head는 기체 기포에 대해 8 Torr 의 hydrostatic 압력을 제공할 것이다. 이는 J. Kodymova에 의해 제시되었으며 Sparger 반응기에서의  $O_2(^1\Delta)$  수득율에 대한 hydrostatic head의 효과를 그림3. 에 보였다. [26] 결과적으로 최적의 완성도에서 Sparger는 단지 중간과 낮은 압력에서 작동할 수 있고 Sparger의 산소 생산 능력은 Sparger 장치에 이용할 수 있는 액체 표면 면적에 의해 좌우된다. 많은 유량을 얻는 방법은 이동에 따른 손실을 증가시키는 많은 산소 포집에서 초래되는 Sparger 표면 면적을 증가시키는 것이다.

다른 기체 레이저들에서처럼 필요로 하는 기체 흐름이 광학 공명기에 수직하게 함으로써 레이저 크기를 급속히 현실화되었다. 이러한 도안은 1979년에 Benard 등에 의해 100W의 도안에서 보이게 하였고 1981년 TRW에서는 Berg 등이 2kW CW 장치를 보이게 하였다.[30, 31] 공군 무기 연구소에 Hager 등에 의한 장치는 아주 큰 bubbler와 "sewer pipe quantum engineering" 을 이용하는 것에 의해 출력을 100배 증가시켰다.[32] 이러한 도안의 마지막은 1985년 Hager 등에 의해 보고된 4 m의 gain 길이를 가지고 4.6 kW의 출력의 레이저이다.[32]

많은 수의 연구자들이 COIL 영역에 뛰어 들어 Cl<sub>2</sub>-BHP 반응기의 다양한 조건 변화에 따른 출력의 여러 형태들을 보이고 제시하였다.[33-36]

Sparger 반응기와 작동 압력 그리고 유속에 의해 실질적으로 제한되기 때문에 레이저의 크기가 곧 현실화되었다.[37-39]

$$P = 91 M_d U_d \left\{ Y_\Delta - Y_{Th} - N_\Delta \left( \frac{N_{I_2}}{U_d N_d} \right) \right\} \eta_{eff} \quad (12)$$

식(12)은 현상적인 에너지 균형 식이다. 나오는 출력, P, 를 Cl<sub>2</sub>의 유량 M<sub>cl</sub>과 염소 반응 응용인자 U<sub>cl</sub>, O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)의 수득율 Y<sub>Δ</sub>, O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 수득율에 필요한 문턱을 Y<sub>Th</sub>, 요오드 분자 해리에 사용된 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) 분자의 수 N<sub>Δ</sub>, 요오드분자의 농도 N<sub>I<sub>2</sub></sub>, 전추출 효율 η<sub>eff</sub>의 항들로 설명하였다. η<sub>eff</sub> 항은 혼합에 따른 손실, 속도론적 비활성화 손실 그리고 광학적 방출 손실 등을 설명하고 있다. 그리고 91이라는 값은 kilojoules/ mole의 에너지 단위를 가진 요오드의 에너지 차이를 나타낸다.

bubbler 반응기에서 O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ)의 수득율이 매우 높고(35%에서 65%), 문턱 에너지를 약 10%까지 낮출 수 있기 때문에 이용할 수 있는 출력을 만드는 방법은 염소의 유량을 증가시키는 것이다. 하지만 bubbler 반응기에서는 낮은 속도와 낮은 압력으로 제한 받는다. 따라서 출력을 높이기 위해서는 초음속의 유속과 gain 영역을 증가시키고 "sugar scooping" 현상을 최소화하는

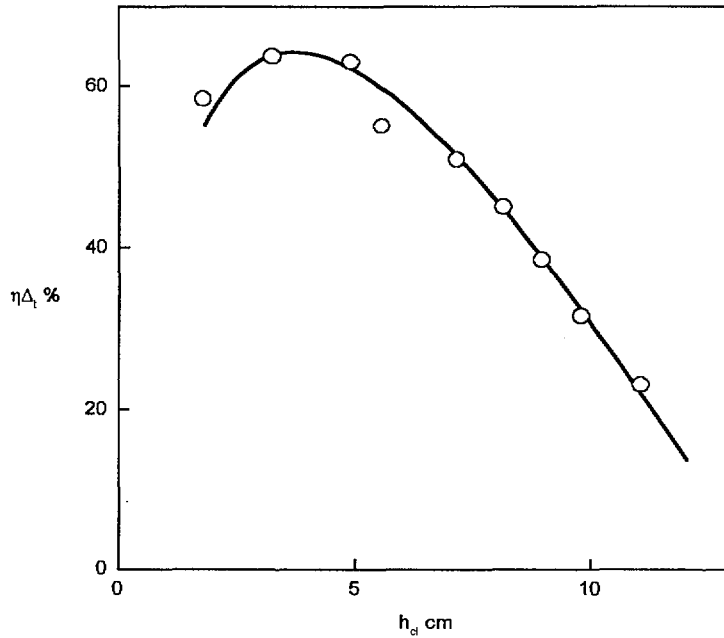


그림3. 용액의 높이에 따른  $O_2(^1\Delta)$  수득율의 의존도.  
 ( The dependance of the  $O_2(^1\Delta)$  yield on the height of solution.

것이 필요하였다. 염소의 유량은 다음과 같이 나타낸다.

원자의  $I(^2P_{1/2}) \rightarrow I(^2P_{3/2})$  전이

$$\dot{M}_{cl} = \rho_{cl} \cdot v_{cl} \cdot A$$

여기서 염소 밀도  $\rho_{cl}$  는 압력에 의해 좌우된다. 아음속의 4kW급 COIL 이 큰 Sparger 면적과 큰 노즐 영역(A)을 가지고 완성되어 졌다. 초음속의 장치는 다른 크기 인자인 속도  $v_{cl}$ , 가 들어가야 할 것이다.

### 제 5 절. 기체상 $O_2$ 와 I간 에너지 전이 반응

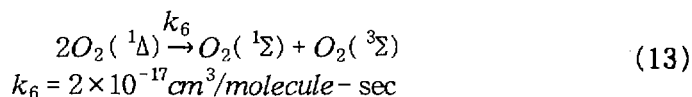
현대적 산소 반응기 기술을 살피기 전에 기체상에서 에너지 전이가 일어나는 현상을 다시 한번 되돌아 볼 필요가 있다. 산소분자와 요오드원자사

이의 공명에너지 교환 반응이 일어나기 위해서는 다음의 많은 반응들이 있다.

- a) 산소 분자에서의 에너지 재배치 반응
- b) 산소 분자와 요오드 원자 사이의 에너지 재배치 반응
- c) 요오드 원자의 Quenching 반응
- d) 요오드 분자의 해리 반응

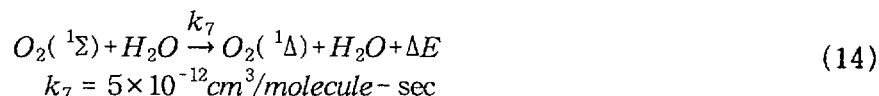
위의 과정들에 대한 문헌적 연구들은 매우 풍부하였지만 얼마 전이야 R.F.Heidner 에 의해 재정리되고 실험적 자료들과 다양한 과정들에 대한 평가가 정리되고 보고되어졌다. [40, 41]

위의 반응들 중 첫 번째 경우에는 단지 두 가지의 중요한 반응들이 있다. 첫 번째는 이전에도 언급했듯이 에너지 pooling 반응이다. 즉, 전자적으로 두 번째 들뜬 에너지 상태 [ $O_2(^1\Sigma)$ ] 가 분자 충돌에 의해 생성되는 반응이다.



Heidner 는 이 반응에 대한 온도 의존성을 발견하였다. [40] 반응 속도가 낮은 온도일수록 조금씩 증가하는 것이다. 이 반응식은  $O_2(^1\Delta)$ 의 손실을 보여주기 때문에 중요하다. 그리고 산소 발생기의 압력이 압력의 제곱 승에 비례하여 손실을 증가시킨다.

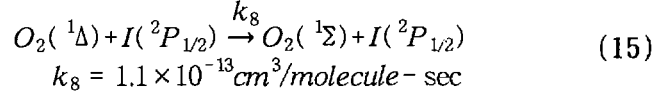
두 번째 에너지 재배치 반응은  $O_2(^1\Sigma)$ 의 수증기와의 quenching 반응이다.



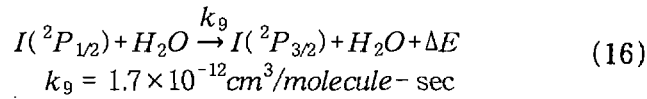
이 반응은 더 높은 전자 에너지 상태에서부터 ( $^1\Delta$ ) 상태로의 에너지 전달을 나타낸다. 이 과정에서 열이 발산된다.  $^1\Sigma$  와  $^1\Delta$  상태에서 바닥상태인  $^3\Sigma$  으로의 수증기에 의한 직접적인 비활성화는 매우 느리다.

산소 분자와 요오드 원자간 에너지 교환 반응들은 이전에 보였던 식

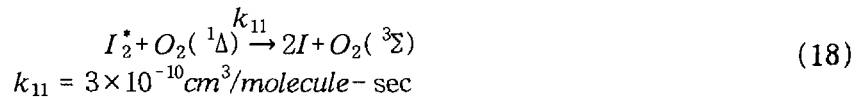
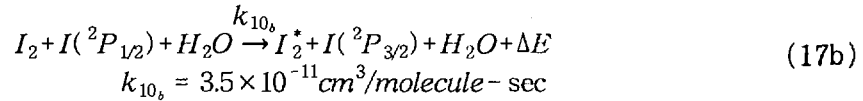
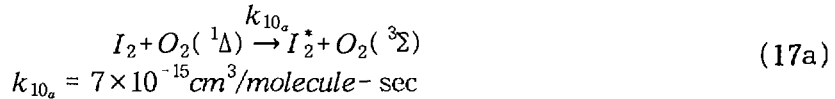
(4)으로 나타내어지는 요오드 들뜨기를 위한 공명 에너지 전이 반응들이며 또한 들뜬 산소와 들뜬 요오드 원자들 사이의 반응에 의한 산소의 두 번째 들뜬 전자상태로의 에너지 pooling 반응이다.



이 반응은 매우 빠른 속도를 가지고 있어서 반응 계의 속도론적인 설명을 할 수 있는 매우 중요한 반응이다. 식(13)에 더불어 요오드 quenching 속도가 물에 의해 기인한다.



마지막으로 매우 중요한 반응은 요오드 분자의 해리 반응이다. 해리 반응이 없으면 요오드 원자를 생성시킬 수 없기 때문이다. 그리고 레이저도 만들 수 없다. 아직도 요오드 분자의 해리 반응은 잘 이해되는 것은 아니다. 다음의 두 반응들의 결과로 해리 반응이 전개된다.



여기서  $O_2(^1\Delta)$  에 의한 요오드 분자의 원자로의 해리 반응은 세 가지의 중요한 속도 항들이 관여한다. 첫 번째 두 개의 속도,  $k_{10a}$  와  $k_{10b}$  는 요오드 분자를 바닥 전자상태에서 진동에너지적으로 매우 높은 들뜬 상태( $v > 30$  to  $40$ ) 로 들뜨게 만든다. 바닥 전자상태에서 진동에너지적으로 들뜬 요오드 분자  $I_2^*$  는 그림4에서처럼  $O_2(^1\Delta)$  와의 또다른 충돌에 의해 해리하게 되며

Heidner 에 의해 매우 빠른 것이 확인되었다. [41] 이 과정에서는  $I_2(x, v > 30)$  가  $O_2(^1\Delta)$  에 의해  $I_2(B^3\pi_{ou}) v \approx 3$  준위로 들뜨게 된다. 들뜬 요오드 분자는 두 개의 요오드 원자로 해리되는  $I_2(B^1\pi_{iu})$  전자상태와 겹치기에 충분한 에너지를 가진다. 불분명한 것은 어떻게 요오드 원자가 존재하지 않은 상태에서 초기에 요오드 분자의 진동에너지 들뜸이 일어나느냐이다. 대부분은  $O_2(^1\Delta)/I_2$  의 충돌들은  $k_{10_s} \approx 3.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{molecule-sec}$  의 느린 들뜸 속도로 소량의 진동에너지적으로 들뜬  $I_2^*$  를 생성시킨다. 그 결과로 반응식 (18)에 의해  $I$  원자가 생성되자마자 들뜸 속도  $k_{10_s} \approx 3.5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{molecule-sec}$  를 가지고 느린 들뜸 속도보다 만배 빠르게 들뜨게 되고 진동에너지적으로 들뜬 요오드 분자의 생성은 진행된다. [42, 43]

이와 같은 두 단계의 과정은 출력 균형 조사 실험을 통하여 예상되어진다. [39] 두 개의  $O_2(^1\Delta)$  가 요오드 분자를 해리시키기 위해 사용되며 첫 번째 것은 식(15)에 따라  $I(^2P_{1/2})$  를 생성시키고 두 번째 것은 식 (17)에 사용된다. 따라서 최소한 두 개의  $O_2(^1\Delta)$  가 요오드 분자 해리 반응에 사용된다는 것을 가정할 수 있고 분명하지 않은 것은 총 요오드분자에서 얼마나 해리되느냐 하는 것과  $H_2O$  나 다른 비활성화 화학종에 의해  $I_2^*$  비활성화에 따른 부가적으로 필요한  $O_2(^1\Delta)$  의 양이 얼마나 되는 가이다.

## 제 6 절. 실제 반응기와 레이저 작동

산소가 액체에서 발생되어질 때마다 그리고 위에서 언급했듯이 액체/기체 막 표면에 확산되어질 때마다 기체상으로 떨어져나갈 수 있도록 표면으로부터 탈착하여야 한다. 그와 같은 탈착 과정 논의는 액체에서 생성된 산소의  $O_2(^1\Delta)$  표면 비활성화를 설명하기 위해 이른바 탈착 수득을  $Y_j^o$  라고 하



는 측면에서 특징지어질 수 있다. 뿐만 아니라 기체상에 있는  $O_2(^1\Delta)$  가 액체 표면으로 확산되고 표면과 충돌하는 것도 포함한다.

Disk 나 Spray 반응기는  $O_2$  가 발생하는 표면들의 주어진 부피에 의해 좌우된다. 기체상에서  $O_2(^1\Delta)$  의 발생은 인접한  $O_2(^1\Delta)$  가 반응기의 부피에 의해 발생되어지는 부피측정으로서 측정될지도 모른다. 사용된 염소에 의해 화학 정량적으로 산소분자가 발생되기 때문에 부피에서 염소의 손실은 직접적으로 산소의 생성과 연관된다. 이때 산소의 생성은 표면에서 탈착 수득을 향을 통하여 고려한다. 기체상의 반응기 부피에서 산소의 움직임은 결과적으로 식(13)과 식(14)에 의해 표현되어지고  $O_2(^1\Delta)$  의 손실은

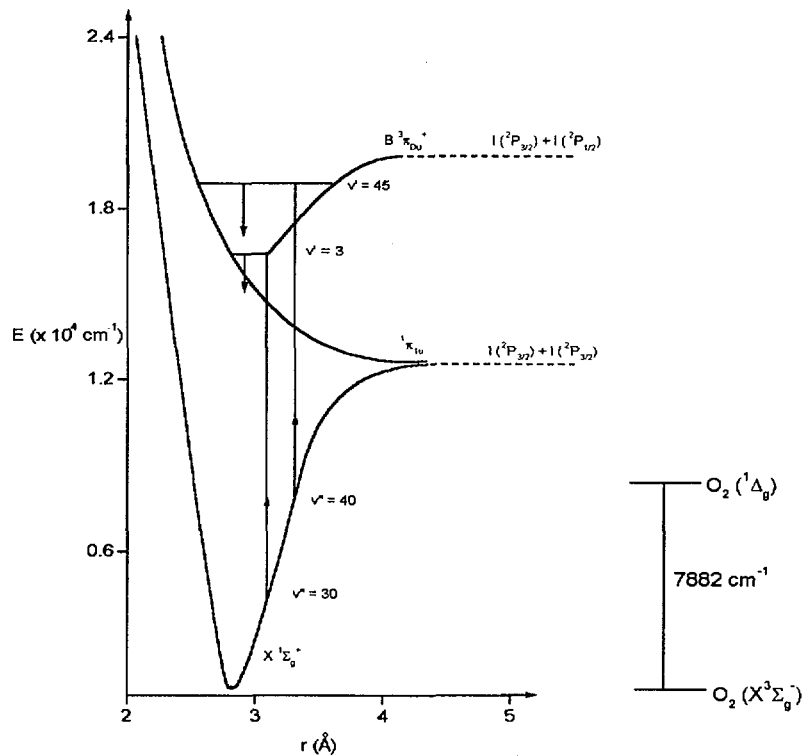


그림4.  $O_2(^1\Delta)$ 에 의한 해리반응에서의  $\frac{1}{2}$  준위들  
( $\frac{1}{2}$  levels involved in the dissociation by  $O_2(^1\Delta)$ .)

pooling 반응과 전자적으로 들뜬 두 번째 전자상태로부터 첫 번째 들뜬 전자 상태로의 산소 분자의 반전 충돌로 나타내어질 수 있으며 아래 식의 두 번째 항과 세 번째 항이 각각의 경우를 나타낸다.

$$\frac{dC_{\Lambda}^g}{dt} = Y_s^o \exp(-t/\tau_{cl}) - 2K_6(C_{\Lambda}^g)^2 + K_7(M)(C_{\Sigma}^g)$$

여기서  $C_{\Lambda}^g$  는 기체상에서의  $O_2(^1\Delta)$  의 농도를 나타내고  $C_{\Sigma}^g$  는  $O_2(^1\Sigma)$  의 농도를 나타낸다. 그리고 위의 식의 첫 번째 항은 연소 유용성과 탈착 수득을  $Y_s^o$  를 통한 표면으로부터의 산소 이탈을 보여준다.  $\tau_{cl}$  는 발생기에서의 연소의 수명을 나타내고 연소를 흡수하는 산소를 생성시키는 표면의 분리를 연소 기체 속도로 나눈 것,  $\tau_{cl} = S/U_{cl}^g$ , 으로 결정한다.  $O_2(^1\Sigma)$  의 농도는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$\frac{dC_{\Sigma}^g}{dt} = K_6(C_{\Lambda}^g)^2 - K_7(M)(C_{\Sigma}^g) = 0$$

위의 식의 도함수는 빠른 부분 평형을 고려해서 0으로 정의하였다. 위의 두 식들은 결합될 수 있고  $Cl_2$  의 원래 농도,  $C_{cl}^o$  로 나누어서 규격화될 수 있다. 그 때  $N_{\Delta}$  는  $N_{\Delta} = C_{\Lambda}/C_{\Lambda}^o$  로 정의하고 특정 조건에서  $N_{\Delta}(t=0) = 0$  일 때  $\tau_p = (K_6 C_{cl}^o)^{-1}$  로 정의한다.

$$\frac{dN_{\Delta}}{dt} = Y_s^o \exp(-t/\tau_{cl}) - N_{\Delta}^2/\tau_p \quad (19)$$

이 식은 Rcati 방정식으로써 해답은 imaginary Bessel 함수의 항에서 얻어질 지 모른다.

$$N_{\Delta} = \frac{2Y_s^o}{R} \exp(-t/\tau_{cl}) \left\{ \frac{aI_1(Re^{-t/2\tau_{cl}}) - K_1(Re^{-t/2\tau_{cl}})}{aI_0(Re^{-t/2\tau_{cl}}) - K_0(Re^{-t/2\tau_{cl}})} \right\} \quad (20)$$

여기서 R 은  $R^2 = 4Y_s^o(\tau_{cl}/\tau_p)$  로서 정의되고  $a$ ,  $a = K_1(R)/I_1(R)$  는  $N_{\Delta} = 0$  와  $t=0$  일 때의 적분 상수이다.  $I$  와  $K$  는 imaginary Bessel 함수의 첫 번째

와 두 번째 항이다. 발생기 부피 수득을  $Y$  는 총 산소량과  $O_2(^1\Delta)$  의 비,  $Y = C_A/C_o^t$  로서 정의되고  $N_A$  를 계산할 수 있다.

$$N_A(t) = \frac{C_A(t)}{C_{cl}^o} = \frac{C_A(t)}{C_o^t} \frac{C_o^t(t)}{C_{cl}^o} = \frac{C_A(t)}{C_o^t} U(t) \\ = [1 - \exp(-t/\tau_{cl})] Y_A$$

$U(t)$  는 기체 염소의 사용량이고 화학 정량적으로 총  $O_2^t$  생성과 같은 것으로 정의된다. 즉,  $O_2^t(t) = C_{cl}^o(t) = C_{cl}^o[1 - \exp(-t/\tau_{cl})]$ . 이것을 그리면 그림5와 같다. 또한  $Y_s^o \cdot (\tau_{cl}/\tau_p)$  인자를 가진 탈착 수득율에 의해 규격화되었다.  $Y_s^o \cdot (\tau_{cl}/\tau_p)$  인자는 탈착 수득율과 염소 기체의 수명 대 Pooling 수명의 비, 이 값은 1보다 작다, 간의 곱이다. 탈착 수득율은 1보다 클 수 없으며 즉,  $Y_s^o \leq 1$  또한 기체의 속도가 50 cm/sec이고  $S = 0.1$  cm 일 때  $\tau_{cl} \ll \tau_p$  이다. 그래서 만약 염소 기체의 압력이 200 Torr 이상에서 시작되지만 않으면  $Y_s^o \cdot (\tau_{cl}/\tau_p)$  값은 실질적으로 모든 경우에 1보다 작다.

어느 정도 발전된 회전 디스크 반응기는 염소 반응 영역에 새 용액을 가지고 가기 위해 부분적으로 BHP 에 잠겨 있는 회전 디스크를 가지고 있다. 그러한 장치를 "rotocoil" 이라고 부르며 산소 수득율  $Y_A$  를 가지기 위해 염소 유속 1.5 mole/sec 를 가지고 35 kilowatts 의 출력에서 작동된다. [38, 39] 비록 측정하기 어려울지 모르지만 60%의 발생기 출구  $O_2(^1\Delta)$  수득율은 회전 디스크 반응기를 가지고 얻었다. [44]

$O_2(^1\Delta)$  가 발생기와 수송관으로의 입구의 부피 안에서 발생할 때마다 식(19)에 pooling 손실과 원료로서 진행되어진다. 운송관과 비활성화를 위한 해결책은 식(19)의 탈착 수득율( $Y_s^o = 0$ )과 (20)의 결과로부터 얻을 수 있다. 이동 손실이 압력에 의존하게 된다.  $O_2(^1\Delta)$  의 그러한 수득율,

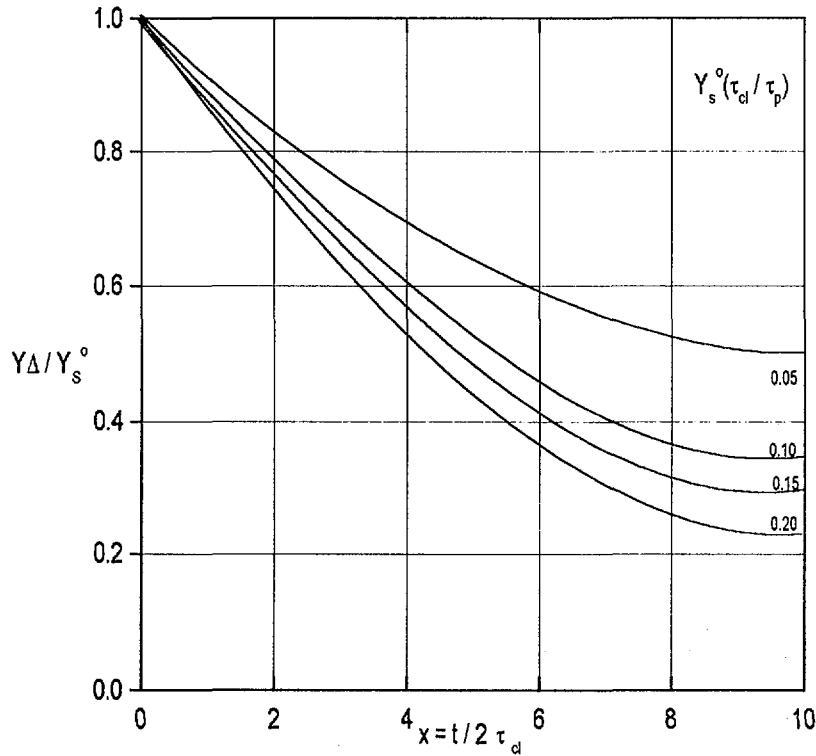


그림5. 발생기에서 기체의 전이 시간의 함수로 측정된  $O_2(\Delta)$ 의 수득율.

(Normalized volumetric  $O_2(\Delta)$  generator yield as a Function of gas transit time in the generato

( $Y_{\Delta}$ )

이 다음의 관계식을 통하여 대표적인 수송  $O_2(\Delta)$  측정으로부터 결정된다.

$$\frac{1}{Y_{\Delta}} = \frac{1}{Y_{\Delta}^{\circ}} + k_6[O_2]t = \frac{1}{Y_{\Delta}^{\circ}} + k_6[O_2]\left(\frac{V}{A}\right)v \quad (21)$$

여기서 기호는 이미 정의된 바 있다.  $t$ 는 수송관에  $O_2(\Delta)$ 의 존재 시간이다.  $t = V/Av$ 와 같이 정의된다. 생성된  $O_2(\Delta)$ 의 수득율에 대한  $O_2$  디스크 반응기의 실험적 자료를 그림6에 보였으며 Rigrod 형태에 대한 분석에 따르면 "Rotocoil"의 출력을 역시 그림6에 나타내었다. "Cavity" 출력이 자료의 Rigrod curve의 fitting에 매우 불투명하게 기초하였고 cavity 손실

인자를 그러한 자료로부터 외삽 하였다. 레이저 정렬뿐만 아니라 총 노즐을 그림8에 역시 나타내었다. 그러한 장치에서 나타난 두 가지 문제점은 도안된 BHP 선형 이동 속도(>20 to 40cm/sec) 가 나오지 않는 것이 첫 번째 문제점이고 두 번째는 부피와 표면 면적의 비가 매우 높지 않다는 것이다. 이 두 가지의 문제점은 BHP 의 점도가 원인이다. 매우 점도가 높은 용액은 BHP 용액을 높은 disk 회전 속도들에서 최적의  $O_2$  전개를 연기시킨다. 또한 점도 때문에 움직이는 판 위의 막 두께가 실질적으로 0.05cm 에 가깝다. 그래서 20 배의 2/h 값이 거의 최고 치이다. 연기되는 현상을 최소화하기 위하여 회전 속도를 줄이는 것에 의해 발생기 완성도에 대한 심각한 제한이 있는 이러한 인자들이 가열에 의해서 야기되고  $H_2O$  수증기 분리에 의해 야기된다. 표면 면적과 부피의 비에서 실질적인 반응기에서 큰 막 두께가 높지 않았다.

비록 회전 disk 반응기의 동기와 접근방식이 막 화학에 의해 필요한 조건의 완벽한 이해를 기초한 것이 아닐지라도 Balan 등과 Zagidullin 등에 의해 제안되고 보였던 반응기의 새로운 발생을 이끌었다.[45-47] 이러한 반응기들은 액체가 압력차이에 의해서 좌우되는 어떤 속도에서 움직이는 유체가 작은 구멍으로부터 분사될 수 있다는 접근 방식에 의해 제안되었다. 그러한 반응기의 구조를 그림7에 나타내었다.[45, 46] 표면 면적과 부피의 비에 의해 생성되는 작은 액체 기둥 분리들(0.01cm 만큼 작은)을 보였다.

여기서 액체 기둥을 따라 움직이는 염소 기체가 액체의 표면상에 흡수되는 동안, 직경이 약 0.03cm 의 구멍은 액체가 아래로 향하도록 설계되었다. 그 결과 유체의 속도 조절이 완벽하게 되었다. 막의 심각한 과열과 고갈이 일어나지 않는 시간대에서 BHP 유체 기둥의 교체를 할 수 있었다. 그래서 산소 수득율과 염소 이용량을 최적화를 Zagidullin 이 50 meters/sec 의 유체 이동 속도들을 이용하여 보고하였다.[46] 더욱이 주어진  $\dot{m}$  에 대한 거의 90-95% 의 염소 이용량을 위한 jet 기둥(L)의 높이를 조

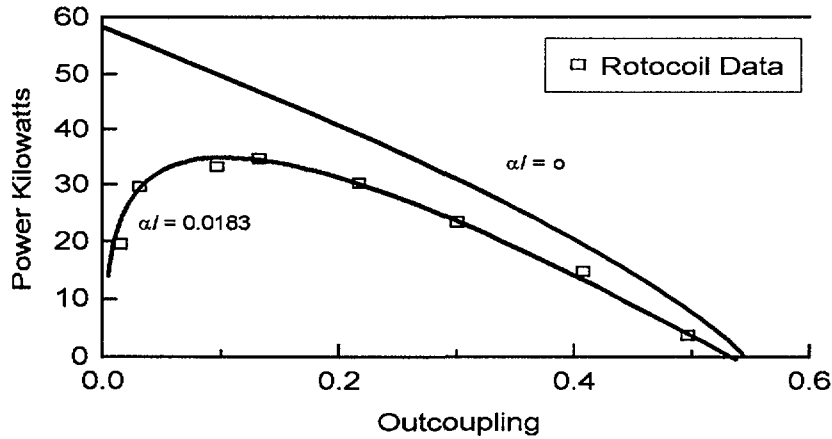


그림6. (b) Rigrod Extraction Model

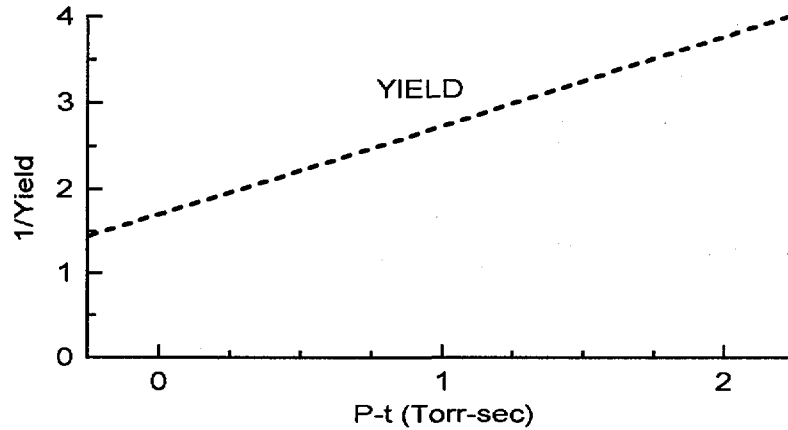


그림6. (a) 압력의 함수로 측정된  $\alpha^1(\Delta)$ 의 수득율.  
( $O_2(\Delta)$  yield as a function of pressure.)

절할 수 있기 때문에 높은 압력에서 작동 시킬 수 있었다. Zadullin 은 30 Torr 의 산소 압력에서 발생기를 작동했다는 것을 보고하였다.[46] 이는 기계적인 회전 disk 반응기와는 달리 요구되는 유체 속도가 유체 교체 시간이 주어진 염소 질량 유속과 유량에 의해 선택된 기둥 높이와 잘 맞기 때문에 도 달되어 일어날 수 있었다.

움직이는 액체 기둥 반응기의 또 다른 장점은 이전에도 언급했듯이 반

응기의 부피와 무게를 줄이기 위해 반응기 부피당 표면 반응 면적을 최적화하는 것이 바람직하다. 단위 부피당 반응기 면적이 클수록  $O_2(^1\Delta)$  이 단위 부피당 더 발생하게 된다. Sparger 와 회전 disk 그리고 droplet 분사 반응기들에 대해 경우 도달할 수 있는 단위 부피당 표면 면적들이 문헌에 보고되었

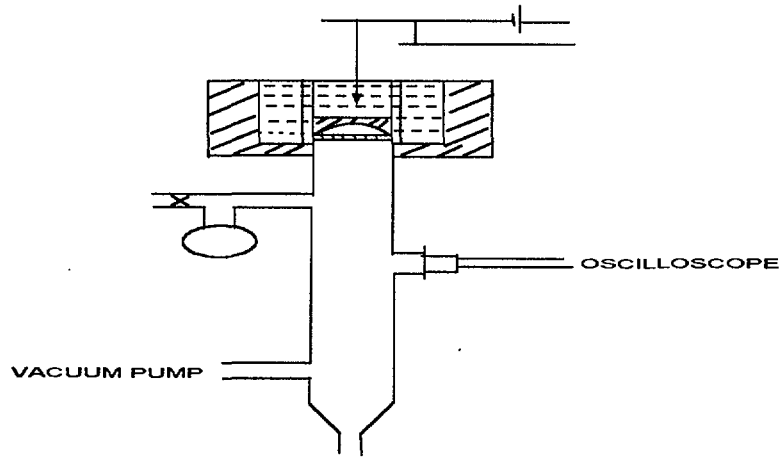


그림 7. (a) Zagidullin 에 의해 보고된 Jet 반응기  
(Jet Reactor as Demonstrated by Zagidullin.)

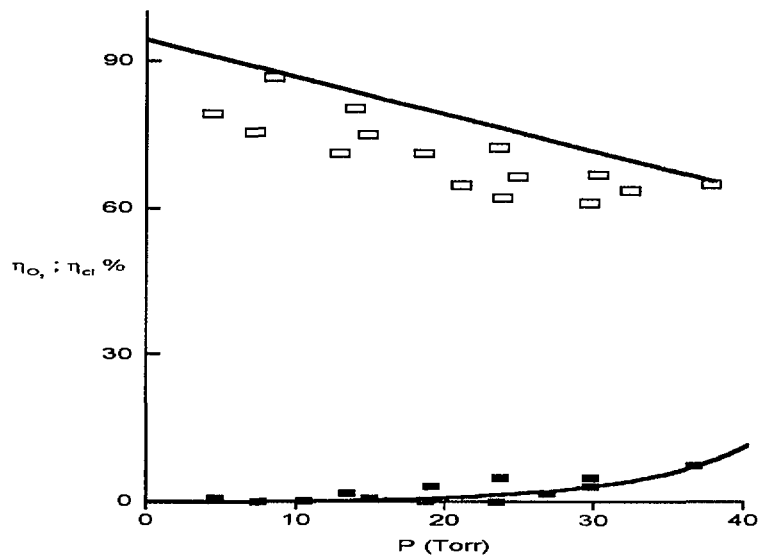


그림 7. (b) Zagidullin 에 의해 보고된 Jet 발생기에 대한 완성도.  
(Performance of Jet reactor as demonstrated by Zagidullin.)

다. 비록 200배의 A/V 값을 이룰 수 있다할지라도 실제로 Sparger 나 bubble 반응기는 기포 흐름 때문에 20-30배의 값에 제한된다. 이와는 달리 분사형 반응기는 다양한 값을 가질 수 있다.

지금까지 COIL 에 대해서 레이저로서 발전시키고 그것이 가진 폭 넓은 응용성 그리고 완성도를 높이려는 다양한 기술적인 동기들의 관점에서 COIL 기술의 발전과정을 살펴보았다. 하지만 아직도 이러한 노력에도 불구하고 해결해야 할 많은 문제점을 가지고 있다.



## 제 3 장. COIL 의 동작 및 성능

### 제 1 절. 서설

COIL 레이저는 화학반응에 의해 생성된 여기상태의 산소로부터 에너지를 전달받아 들뜬 요소 원자에 의해 레이저 발진이 일어나는 것으로서, 화학반응 생성물의 양에 비례하여 고출력 발진이 가능한 레이저이다. COIL 레이저는 고출력이면서도 뛰어난 집속성, 장거리전송의 용이성등 군사용 산업용으로 적용될 수 있는 적절한 레이저로 평가되고 있으나 다른 고출력 레이저 장치와 달리 전기 광학적 기술뿐만 아니라 기체역학, 화학공학적으로도 고도의 고급기술이 필요한 분야이다.

COIL 레이저 발진에서 가장 문제가 되는 부분은 고효율 대용량의 여기산소발생기 (singlet oxygen generator ; SOG) 로서, 초기에는 bubble type SOG 을 이용한 저출력 레이저 발진연구를 하였으나 이후 drum type SOG 및 Jet type SOG 가 개발되어 고출력 COIL 레이저 발진이 가능하게 되었다. 특히 러시아에서 처음 개발된 Jet type SOG 는 화학반응 효율이 높을 뿐만 아니라 구조적으로도 매우 간단하면서 대용량의 여기산소를 발생시켜 주므로 고출력 레이저 발진을 위한 다양한 산소발생기 연구가 선진국에서 활발히 진행되고 있다.

COIL 레이저는 발진효율이 높고 포화 강도가 높아 수십 kW 급의 고출력이 용이하게 이루어 질 수 있으며 광섬유 전송시 광손실이 가장 적어 레이저빔의 원격 전송에 의한 재료가공에 적합한 레이저이다. 가공용 레이저로 많이 사용하는 CO<sub>2</sub> 레이저에 비해 발진 파장이 짧으므로 재료의 광흡수율이 높아 일반 산업분야의 용접/절단에서 기존의 CO<sub>2</sub> 레이저를 대체할 것으로 기대되는 상용성이 큰 레이저이다.

COIL 레이저는 전기를 사용하지 않고 값싼 화학연료를 사용하여 레이저 발진을 하므로 경제성이 있을 뿐만 아니라, 차량 혹은 비행기 등에 탑재할 수 있어 기동성이 있으므로 재난구조등에 활용할 수 있다. 광섬유를 이용한 원격가공이 가능하므로 노후 원자로의 원격제염 및 해체에 적용할 수

있는 가장 적절한 레이저이며, 일본등 선진국에서는 이에 대한 응용연구를 본격화하고 있다. 우리의 경우 고리원전 1, 2 호기등 노후 원자로에 대한 제염/해체 연구를 준비해야 할 시점에 있다고 판단된다.

현재 고출력 레이저 응용기술은 일반 사회/문화와 직접적인 연관을 가지고 있는 경우가 많지 않지만, 레이저 기술은 고품질의 빛을 다루는 기술로서 그 파생기술은 사회, 문화 전반에 많은 영향을 미치고 있다. COIL 레이저로부터 발생하는 파생기술로는 미사일 요격을 위한 원격레이저빔 전송기술, 산업적 활용을 위한 레이저가공기술 그리고 재난구조에 이르기까지 사회 전반에 많은 영향을 미치고 있는 기술로 미래 사회의 신기술이라 할 수 있다.

## 제 2 절. COIL 레이저의 발진원리 및 여기산소발생기

COIL 레이저는 다음과 같은 화학반응에 의하여 발생하는 여기산소에 의해 요오드 분자가 요오드 원자로 해리가 되고, 다시 여기산소에 의해 요오드 원자가 여기 되어 이로부터 레이저 발진이 이루어진다. (그림 8)

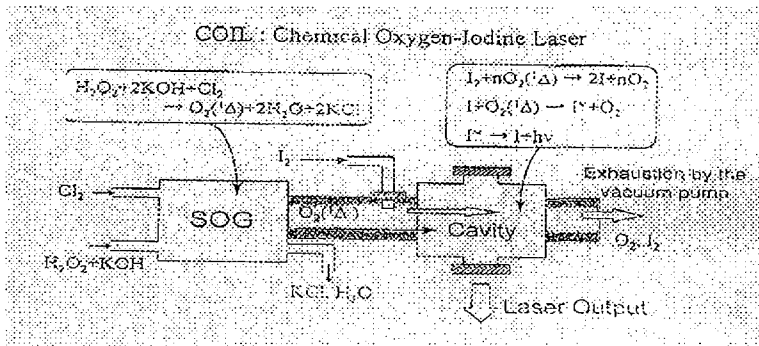
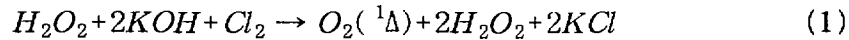


그림 8. COIL 레이저에서의 기본 화학 반응들.

( The fundamental reactions of COIL system.)

일반적으로 stoichiometric method 에 의한 반응(1) 식은 그 반응속도가 크지 않으므로 반응속도를 높여주기 위하여 러시아 LPI 에서는  $H_2O_2$  와 KOH 의 mole 비가 다음과 같이 조절하여 COIL 동작을 하고 있다. (non-stoichiometric method)

$$\frac{[H_2O_2]}{[KOH]} = \frac{9\text{mole}/\ell}{8\text{mole}/\ell} = 1.1 \quad (5)$$

또한 미국의 Phillips Lab. 에서는 이러한 방법과 더불어 KOH 이외에 NaOH 와 LiOH 등의 알카리를 혼합하여 사용함으로써 여기산소 발생효율을 높여주는 방법을 사용하고 있음을 알 수 있었다.

여기산소의 발생에 사용되는 KOH 가 약 4 mole/liter 인 경우 chlorine utilization 은 약 98% 이상인 것으로 알려져 있으며 이러한 이유로 LPI 에서는 8 mole/liter 의 KOH 를 사용하여 chlorine utilization 이 최대가 되도록 실험조건을 맞추어 사용하고 있었다.

여기산소 발생을 위하여 LPI 에서는 두 개의 스테인레스 용기를 준비하여 (그림 9) mixing tank 에서는  $H_2O_2$  및 KOH 의 BHP (Basic Hydrogen Peroxide) 혼합용액을 준비하고 collecting tank 는 COIL 의 동작 중에 jet SOG 를 통하여 분사되는 BHP 를 저장하게 된다.  $H_2O_2$  에 KOH 를 천천히 섞게 되면 용해열이 발생되는데 이때 mixing tank 의 cooling coil 이 설치되어 있어 액체질소를 이용하여 용해열을 식혀주게 된다. LPI 에서는 BHP 를 순환시켜주는 gear pump 가 준비되어 있지 않아 COIL 동작이 끝나게 되면 collecting tank 에 모아진 BHP 는 mixing tank 와 collecting tank 사이에 진공펌프를 이용하여 압력 차가 발생되도록 하여 mixing tank 로 이동시키며 다음 실험을 준비하게 된다.

알카리성 용액인 BHP 는 COIL 의 동작 전에 약  $-20^{\circ}C$  로 냉각시켜 주는데 이는 용액의 온도가 낮아질수록  $H_2O$  의 포화증기압이 낮아져 여기산소발생기에서 생성되는 여기산소를 deactivation 시켜주는 반응속도를 크게 낮출 수 있기 때문이다.

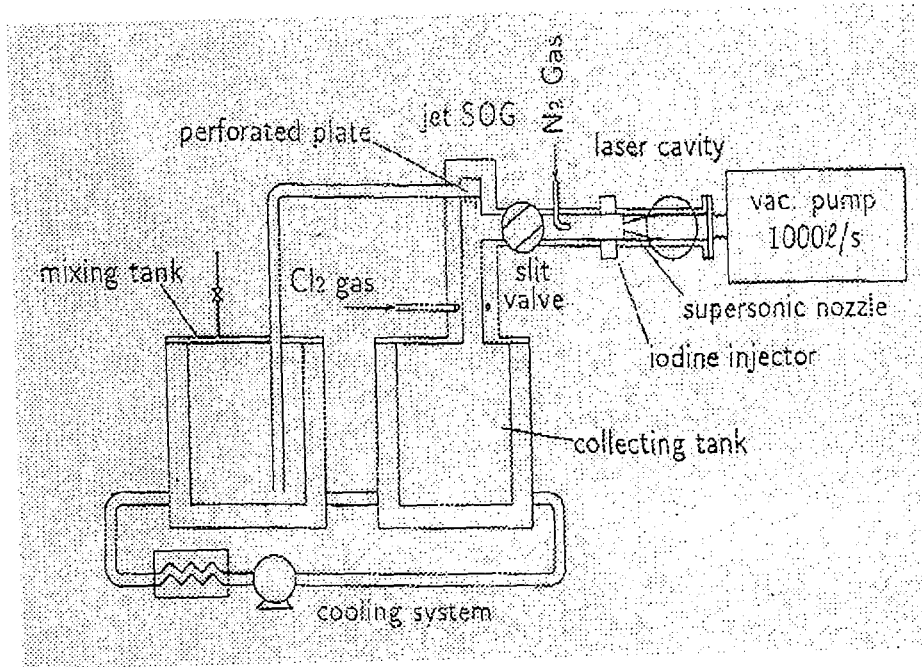


그림 9. COIL 레이저 장치 구성도  
 ( Schematic diagram of COIL system. )

COIL 레이저의 핵심이라 할 수 있는 여기산소발생기 (SOG) 는 반응 단면적이 12 X 50 mm 이고 염소가스와 반응하는 길이는 100 mm 로서 Plexiglass 로서 제작하여 염소가스와 BHP 와의 반응을 쉽게 관찰할 수 있었다. 여기산소발생기에는 두께 3 mm, 직경 0.8 mm 의 86 개 hole 이 있는 perforated plate 가 있는데 이를 통하여 BHP 가 jet 을 형성하면서 분출되고 jet 의 표면을 통하여 염소가스와 반응하여 여기산소가 발생하게 되는 것이다.

발생된 여기산소는 slit valve 를 통하여 plenum duct 으로 이동하게 되는데 slit valve 로부터 2 cm 떨어진 위치에 N<sub>2</sub> buffer gas 와 혼합되어 iodine injection nozzle 로 향하게 된다. 여기산소는 이들 분자들 사이의 충돌과정과 물분자 그리고 기타 미반응 염소가스와 충돌하면서 이완되어 화학변환효율을 크게 낮추게 되는데 이러한 deactivation 및 quenching

효과를 줄이기 위하여 He 혹은 N<sub>2</sub> 를 buffer gas 로 사용하게 된다. LPI 에서는 COIL 의 동작비용을 줄이기 위하여 He 대신에 가격이 저렴한 질소가스를 완충용으로 사용하고 있었다.

### 제 3 절. 요오드 혼합 및 초음속 노즐

요오드는 상온에서 고체로 존재하며 가열하게 되면 기체분자상태로 쉽게 승화되는 특성을 갖고 있다. LPI 에서는 그림 10과 같이 tungsten lamp 의 빛을 이용하여 광흡수를 시켜주어 승화시켜주는 장치를 사용하고 있었다. 요오드가 승화되면 약 60°C로 가열시킨 질소가스로 불어주어 요오드 혼합노즐로 보내진다. 여기산소와 분자간 충돌에 의해 준공명 에너지 전달과정으로 해리/여기되는 요오드는 요오드의 유량이 많아질수록 레이저 출력이 증가하게 되지만 어느 임계값을 넘게되면 요오드 분자 및 원자 자체가 여기산소를 quenching 시키는 역할을 하게 되어 레이저 발진효율을 떨어뜨리는 역할을 하게 된다. 따라서 요오드의 유량을 정확히 제어할 수 있는 장치가 필요로 하게된다. 그림10에는 요오드 발생장치에서 생성되는 요오드가 광흡수 cell을 통과하게 되는데 요오드 자체는 약 488 nm 에서 강한 흡수가 있으므로 파장영역에서 다음의 식과 같이 광흡수를 측정하고 carrier gas 로 사용되는 질소가스의 유량을 알면 요오드의 유량을 알 수 있다.

$$n_{I_2} = \frac{1}{L \cdot \sigma} \ln(I_{R1}/I_{P1}) \quad (6)$$

여기서  $n_{I_2}$  : 요오드 분자 농도,  $I_{R1}$  : 요오드를 흘리지 않을 때의 광투과 intensity,  $I_{P1}$  : 요오드를 흘릴 때의 광투과 intensity 이다.

질소가스의 압력이 100 Torr 이고, 요오드 분자의 분압이 약 1 Torr 인 경우 요오드 유량 (iodine mass flow rate)은 다음과 같다.

$$M_{I_2} = n_{I_2} \times \text{질소유량} \quad (7)$$

요오드는 초음속 노즐 바로 전에서 여기산소발생기로부터 생성되어 나오는 여기산소와 혼합이 이루어진다 (그림 11). 요오드 혼합노즐은 재질이

구리로서 두께가 14 mm 이고 요오드가 흡착되는 것을 방지하기 위하여 레이저 동작 중에는 약 70°C 로 가열시켜 사용한다. 요오드 혼합노즐의 양쪽 면에는 직경 0.6 mm 의 21 개의 hole 이 2 열로 배열되어 있고 이들 사이의 간격은 약 2 mm 이다.

여기산소와 혼합된 요오드 분자는 이들 사이의 에너지 전달과정에 의해서 요오드의 해리/여기가 이루어지는데, 요오드 원자의 반전분포를 쉽게 이루어지게 하려면 혼합기체의 온도를 낮추어야 한다. 따라서 그림11에

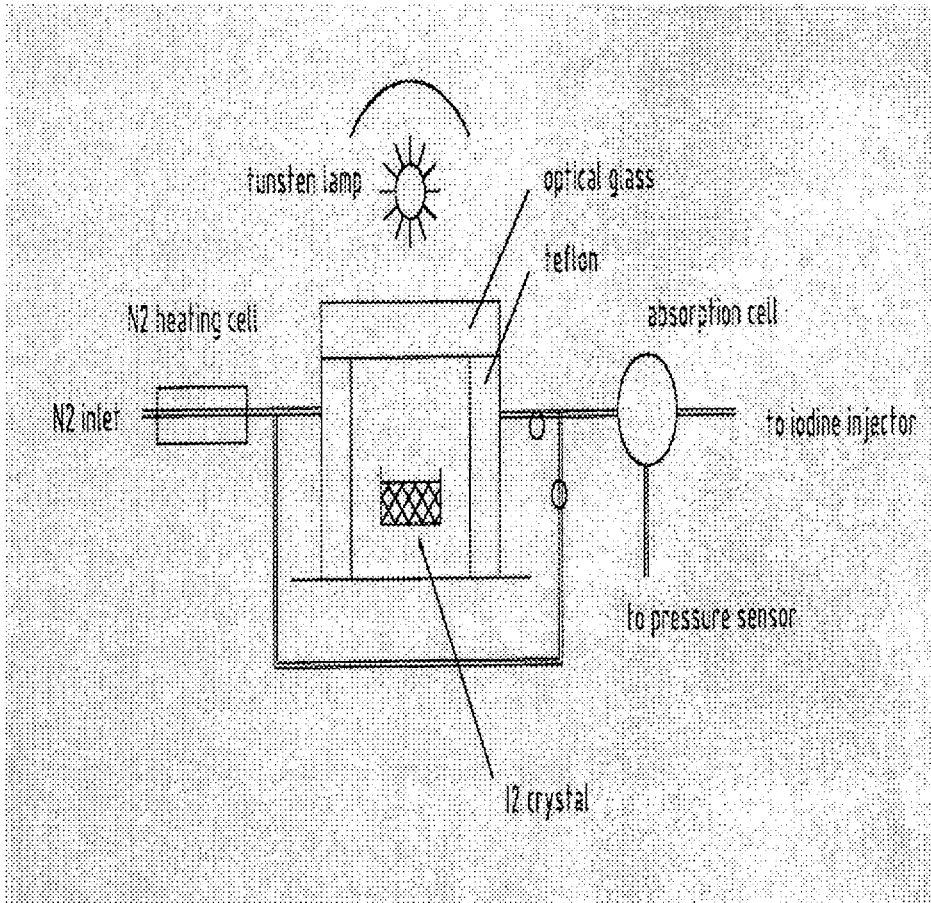


그림 10. 요오드 승화장치 및 광흡수 cell.

( Schematic diagram of Iodine sublimation and absorption cell.)

나타난 바와 같이 이들 혼합가스는 초음속 노즐을 통하여 단열 팽창되므로 기체의 온도는 내려가고 기체 분자의 속도는 초음속에 접근하게 된다. 진공펌프의 배기량이 충분한 경우에는 초음속을 돌파하게 되어 충격파가 발생하게 되면서 supersonic branch 에 접근하게 되고 배기량이 충분하지 않게 되면 subsonic branch 로 진행하게 된다.

Supersonic branch 로 진행하는 경우에 혼합기체의 온도는 충분히 낮아져 레이저의 이득이 높아지고 대용량의 여기산소와 요오드 혼합가스를 이송시킬 수 있으므로 고출력레이저의 가능성이 높아진다. 다만 기체분자의 속도가 Mach 2 까지 높아지므로 레이저 이득 길이가 길어져 큰 구경의 레이저 mirror 를 사용해야 한다는 제약이 따르게 된다. Subsonic branch 의 경우 초음속 노즐을 통하여 혼합가스의 온도가 충분히 내려가므로 요오드 원자의 반전분포는 충분히 이루어진다. 산업적 응용을 위한 가공용 레이저를 개발하는 경우에는 경제성을 고려하여 진공펌프의 배기량을 낮추고 subsonic branch 영역에서 COIL 레이저 발진을 할 수 있을 것으로 판단된다.

레이저 공진기 내에서 혼합가스 기체의 속도를 측정하기 위해서 그림11에 나타난 바와 같이 pitto tube를 이용하여 stagnation pressure  $P_{cav}$  와 dynamic pressure  $P^*$  을 측정함으로써 다음 식에 의하여 Mach number  $M_H$  를 알 수 있다.

$$\frac{P_{cav}}{P^*} = \frac{166.7M_H^7}{(7M_H^2 - 1)^{2.5}} \quad (8)$$

(8) 식을 계산한 graph 가 그림12에 나타나 있다. 이러한 관계를 이용하면 공진기 내에서의 gas dynamics 를 유도해 낼 수 있으며, 초음속 노즐의 설계와 관련하여 레이저 공진기 효율을 향상시킬 수 있게 된다. 러시아 LPI 로부터 초음속 노즐을 설계할 수 있는 program 을 입수 할 수 있었으며, 이를 활용하여 우리 자체적으로 진공펌프 배기량을 고려하여 원하는 기체 속도를 얻을 수 있게 되었다.

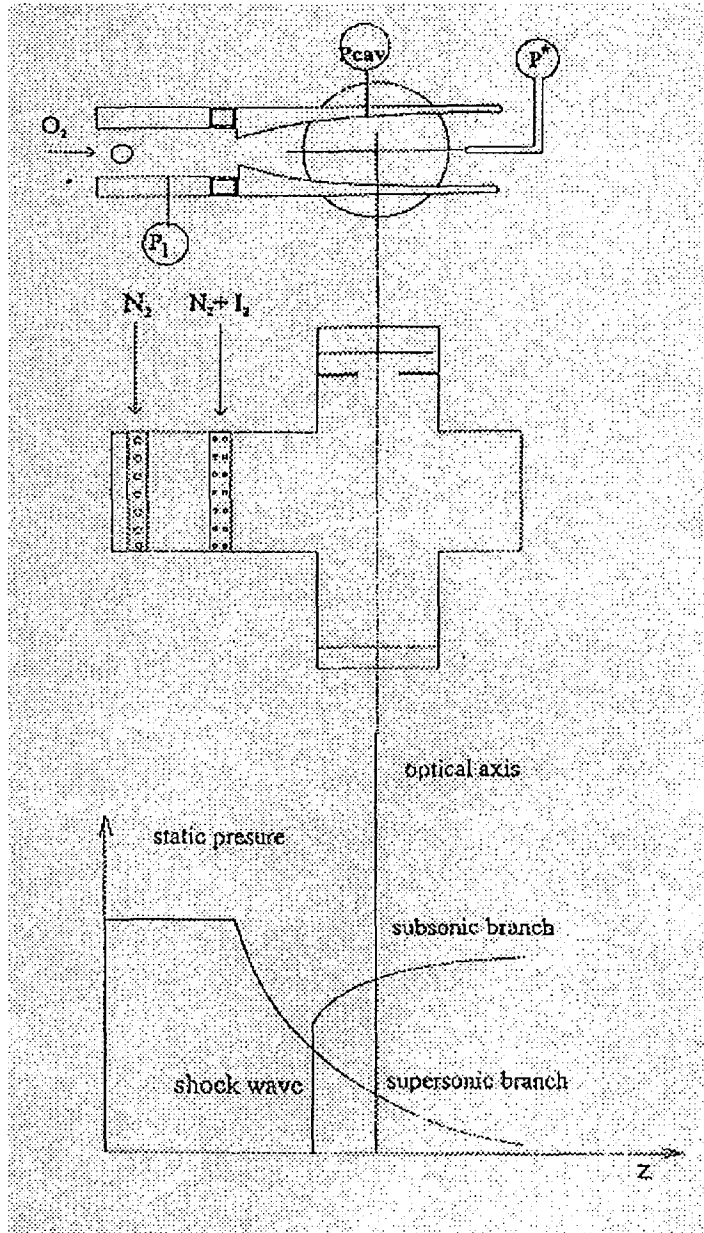


그림 11. (a) 요오드 혼합노즐.  
 ( Mixing nozzle of Iodine. )



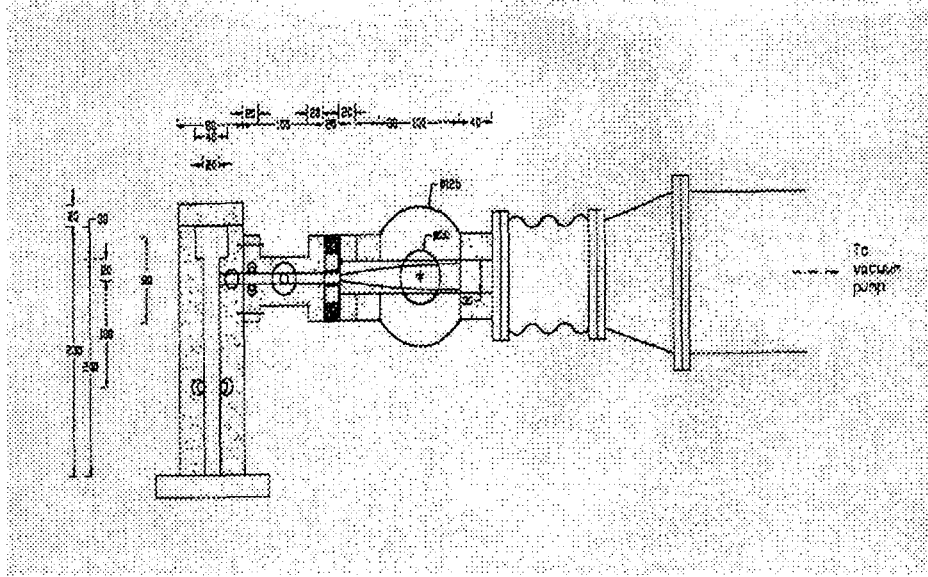


그림 11. (b) 초음속 노즐의 구조.  
 ( Structure of supersonic nozzle. )

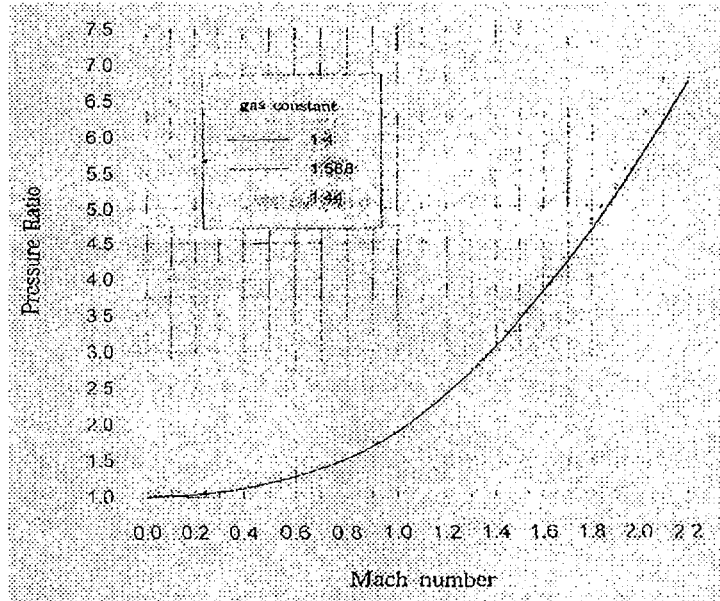


그림 12. Pitto tube 의 압력 비에 따른 Mach number.  
 ( Dependence of Mach number on the pressure ratio in Pitto tube. )

## 제 4 절. 러시아 COIL 레이저의 동작

### 및 국산 레이저거울의 성능평가

러시아 LPI 에서 위에 기술한 여기산소 발생기 및 요오드 혼합노즐 그리고 초음속 노즐을 이용하여 COIL 레이저를 동작시킬 수 있었다. 실험에 사용된 화학연료는  $H_2O_2$  18 mole, 2.5 liter 및 KOH 13.5 mole 2.5 liter 를 혼합한 BHP 용액을 사용하였다. 표 2 에는 러시아 레이저 mirror 를 사용한 실험결과를 나타내었고, 표 3 에는 국내에서 제작하여 준비한 국산 레이저 mirror 를 사용한 실험결과를 나타내었다.

COIL 레이저 발전에 대한 chemical efficiency 는 다음 식으로 나타내진다.

$$\text{chemical efficiency } \eta = \frac{\text{laser power}(W)}{90.0 \text{ kJ/mole} \times Cl_2 \text{ flow rate (mmole/s)}} \quad (9)$$

표에서 알 수 있듯이 거의 동일한 실험조건에서 국산 mirror 를 사용한 레이저 출력이 러시아 LPI 에서 사용되는 mirror 에 비하여 월등히 높은 성능을 나타냄을 알 수 있다 (그림 13). LPI 의 최대 chemical efficiency  $\eta$  는 17.6 % 인 반면 국산 mirror 를 사용한 경우에는 최대출력 215 W, 최대 chemical efficiency  $\eta$  22.8 % 의 값을 얻었다. 이는 mirror 자체의 scattering loss 가 적어 레이저 손실이 거의 없기 때문이다. 그러나 동일한 실험조건에서 반복하여 레이저 발전을 할 경우 레이저 출력이 점차적으로 줄어드는 경향을 보이는데 실험후에 mirror 표면을 현미경으로 검사하였을 경우 사진1에 보인 바와 같이 mirror 표면이 많이 손상된 것을 관찰할 수 있었다. 이는 mirror 를 coating 하고 열처리하는 과정에서 표면의 결함으로 인한 것으로 이를 개선할 필요성이 있다고 판단되었다.

표 2 . 러시아 mirror를 사용한 COIL 의 동작실험.  
( Experimental data of COIL by Russia mirror. )

No.	P1	P2	P3	P4	P10	MN2-1	MC12	MI2	T1	T2	Power (W)	$\eta$ (%)
1	17.6	6.4	1.4	37	5.1	20	100	0.25	0.8	0.18	30	
2	19	6.5	1.2	47	5.3	20	97	0.25	"	"	22	
3	18	7.3	1.25	58	5.2	20	99	0.26	"	"	125	
4	19	7.4	1.3	60	5.2	20	94	0.35	"	"	117	
5	19	8.2	1.4	68	5.3	20	10.2	0.36	"	"	123	
6	20	7.0	1.24	47	4.8	20	10.4	0.36	"	"	132	
7	19	6.2	1.24	37	4.5	20	10.3	0.35	"	"	117	
8	18.6	5.6	1.4	27	4.8	20	10.3	0.35	"	"	96	
9	20.4	7.1	1.2	50	4.8	20	10.4	0.40	"	"	135	
10	19	7.1	1.3	50	5.4	20	10.5	0.30	"	"	91	17.6

표 3 . 국산 mirror를 사용한 COIL의 동작실험.  
( Experimental data of COIL by our mirror. )

No.	P1	P2	P3	P4	P10	MN2-1	MC12	MI2	T1	T2	Power (W)	$\eta$ (%)
1	20	7.1	1.2	49	4.9	20	10.4	0.35	0.8	0.01	215	22.8
2	19.6	6.9	1.2	49	5.1	20	10.2	0.30	"	"	184	
3	20	7.1	1.2	51	4.9	20	9.9	0.41	"	"	201	
4	20	7.1	1.3	51	5.0	20	10.0	0.35	"	"	196	
5	19	7.0	1.2	50	4.9	20	9.8	0.35	"	"	191	
6	20	7.5	1.2	51	5.1	20	10.0	0.35	"	"	140	
7	19	7.2	1.2	50	5.0	20	10.0	0.35	"	"	201	
8	20	7.1	1.2	50	5.0	20	10.0	0.35	1	"	183	

여기서 P1 : SOG pressure (torr),

P2 : Plenum duct pressure,

P3 : Laser cavity stagnation pressure

P4 : iodine photo-absorption cell pressure, P10 : pitto tube dynamic pressure

MN2-1 : primary buffer gas mass flow rate (mmole/sec)

MC12 : chlorine mass flow rate

MI2 : iodine mass flow rate

T1 : output coupler mirror transmittance (%)

T2 : total mirror transmittance

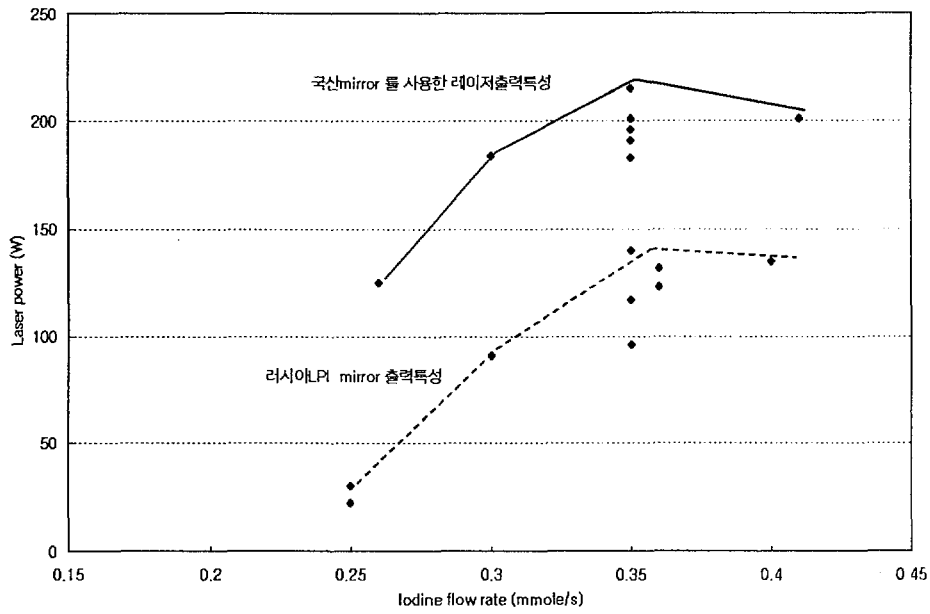


그림 13. 레이저 출력특성비교.  
 ( Comparison of COIL power.)

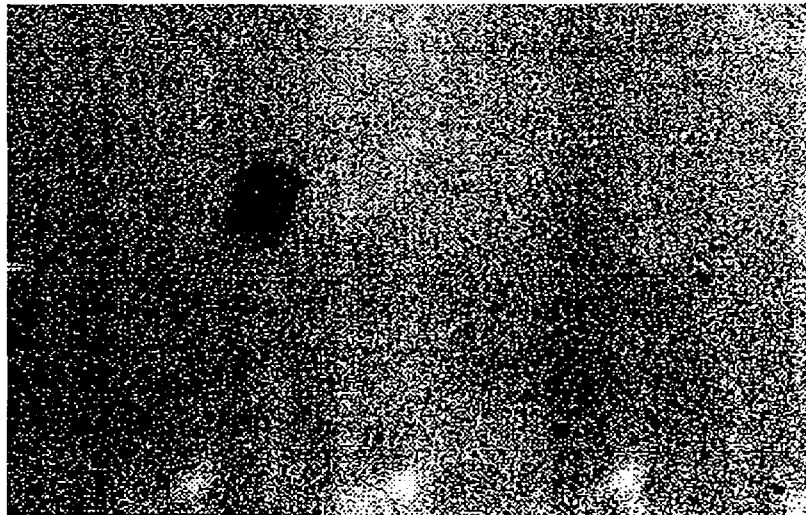


사진 1. COIL 레이저 발진중 손상된 국산 레이저 mirror 표면.  
 ( Inspection of Mirror surface after COIL operation.)

## 제 4 장. 결 론

COIL 은 고출력용 레이저 중에서 가장 큰 100 kW 급 이상의 평균 출력을 발생시킬 수 있고 광섬유 전송시 손실이 가장 적은 발전파장( $1.3\mu\text{m}$ )을 가지므로 일찍이 군사용이나 원자력 산업용으로 연구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내의 본격적인 COIL 레이저 개발에 앞서 기초적인 개념 설계 연구를 진행시켰고 본격적인 군 검용기술 5개년 계획을 추진하여 하였다. 이를 위하여 10 kW 급 COIL 레이저의 개념설계, 여기산소 발생기 관련기술 확보, COIL 레이저 공진기 설계, 외국의 기술 보유 기관과 기술협력 방안 확보가 추진되었으며 COIL 레이저 발전에서 가장 문제가 되는 고효율 대용량의 여기산소발생기 (singlet oxygen generator ; SOG) 로서, 특히 러시아에서 처음 개발된 Jet type SOG 를 선택하였다. Jet type SOG는 화학반응 효율이 높을 뿐만 아니라 구조적으로도 매우 간단하면서 대용량의 여기산소를 발생시켜 줄 수 있기 때문에 10 kW 급의 고출력 레이저 발전을 위해 가장 적합한 형태의 여기산소발생기로 판단되었기 때문이었다. 또한 고출력의 발전을 위한 초음속 노즐의 개발기술과 COIL 레이저 발전과정에서 일어나는 화학반응과정을 이해하고 이를 처리할 수 있는 연구도 진행시켰다. 그리고 국내에서 레이저 발전용 광학부품을 제작하여 러시아의 COIL 장치에 부착하여 실험한 결과 210W 이상의 출력을 얻었으며 러시아 제품보다도 뛰어난 특성을 보여 주었다. COIL 레이저 기술은 국제적인 기술교류가 중요하며 이를 위하여 이러한 연구가 진행되었던 외국 국가의 고급 기술을 습득하기 위하여 기술보유기관으로부터 분야별 기술획득 방안을 강구하여 러시아 Lebedev Physical Institute 로부터는 여기산소 발생장치 부분에 대한 정보를, 일본의 Tokai 대학에서는 COIL 레이저 실험 관련 기술을, 그리고 일본 Kawasaki 중공업으로부터는 산업용 COIL 레이저 관련기술을 획득하기 위해 각 기관 책임자와의 접촉한 바 있다.

## 참고문헌

- 2-1. Kasper J.V.V., Pimentel G.C, "Atomic Iodine Photodissociation Laser," Appl. Phys. Lett., 5, 231-3, (1964).
- 2-2. Kasper J.V.V., Parker J.H., Pimentel G.C, "Atomic Iodine Photodissociation Laser," J. Chem. Phys., 43, 1827-8, (1965).
- 2-3. A.J. DeMaria and C.J. Ultee, High Energy Atomic Iodine Photodissociation Laser, Applied Physics Letters, 2, 67-9, (1966).
- 2-4. Jaccarino V., King J.G., Satten R.A., Stroke H.H., "Hyperfine Structure of I127-Nuclear Magnetic Octupole Moment," Phys. Rev., 94, 1798-9, (1954).
- 2-5. Onaka R. "Hyperfine Splitting in the  $p_5^2P_{1/2}$  Metastable State of I(127)," Phys. Rev., 106, 1178, (1957).
- 2-6. R.J. Donovan and D. Husain, Trans. Faraday Soc., 62, 11, (1966).
- 2-7. D. Husain and J.R. Wiesenfeld, Nature, (1967), 213, 1227; Trans. Faraday Soc., (1967), 63, 1349.
- 2-8. R.G. Derwent and B.A. Thrush, Chem. Phys. Letters, 9, 591, (1971).
- 2-9. R.H. Garstang, J. Res. Nat. Bur. Stand, A, 68, 61, (1964).
- 2-10. D.E. O'Brien and J.R. Bowen, J. Appl. Phys., 40, 4767, (1969).
- 2-11. For a good overview of high energy photolitic iodine laser technology, particularly at Max Plank Institute at Garching, a good starting point would be E.E. Fill, "High Power Iodine Laser," Developments in High Power Lasers and their Applications, LXXIV Corso, Soc. Italiana di Fisica-Bologna, Italy, pp245-273(1981) and references therein.
- 2-12. M.H. Van Benthem and S.J. Davis, "Detection of Vibrationally Excited I<sub>2</sub> in the Iodine Dissociation Region of COIL", J. Phys. Chem., 90, 902(1986).

- 2-13. D.R. Keams, "Physical and Chemical Properties of Singlet Molecular Oxygen", Chemical Review, 71, 395-427, (1971).
- 2-14. R.G. Derwent, D.R. Kearns, and B.A. Thrush, "The Excitation of Iodine by Singlet Molecular Oxygen," Chemical Physics Letters, 6, 115(1970).
- 2-15. R.G. Derwent and B.A. Thrush, "The Radiative Lifetime of the Metastable Iodine Atom  $I(5^2P_{1/2})$ ," Chemical Physics Letters, 9, 591(1971).
- 2-16. R.G. Derwent and B.A. Thrush, "Excitation of Iodine by Singlet Molecular Oxygen Part I, "J. Chem. Soc.-Faraday Transactions II, 68, 720(1972).
- 2-17. R.G. Derwent and B.A. Thrush, "Excitation of Iodine by Singlet Molecular Oxygen Part II, "Discussion of the Faraday Society, 53, 162(1972).
- 2-18. H.H. Seliger, "Chemiluminescence of  $H_2O_2$ -NaOCl Solution, " Anal. BioChem.
- 2-19. A.U. Khan and M.Kasha, "Red Chemiluminescence of Molecular Oxygen in Aqueous Solution, " J. Chem. Phys., 39, 2105(1963).
- 2-20. A.U. Khan and M.Kasha, "Chemiluminescence Arising from Simultaneous Transitions in Pairs of Singlet Oxygen Molecules," J. Am. Chem. Soc., 92:11, 3293(1970).
- 2-21. Held, A.M., Halko, D.J., and Hurst, J.K., "Mechanisms of chloride Oxidation of Hydrogen Peroxide," J. Am. Chem. Soc., 100, 5732-5740(1978).
- 2-22. Richardson, J.D., Kelley and C.E. Wiswall, " $O_2(^1\Delta)$  Generation Mechanism the Chemically Pumped Iodine Laser," J. Appl. Phys., 52, 1066(1981).

- 2-23. S.C. Hurlock, I.B. Goldberg, H.O. Laeger, O.C. Sandall, R.J. Wagner, "Engineering Development of a Singlet Delta Oxygen Generator," AFWL TR-80-153 Air Force Weapons Laboratory, Kirtland AFB, NM, December 1981.
- 2-24. P.V. Avizonis, "Concepts and Approaches for Development of Advanced Short Wavelength Chemical Lasers," Journal Defense Research, 501-9, 1988.
- 2-25. P.V. Avizonis, "Chemically Pumped Electronic Transition Lasers," Gas Flow and Chemical Lasers, Chapter 6, Plenum Publishing Corporation(1984).
- 2-26. J. Kodymova, O. Spalek and A. Hirs1, " $O_2(^1\Delta)$  Loss-Mechanism in Bubbler-Type Chemical Generators," Institute of Inorganic Chemistry, Czechose. Acad. Sci., Prague, Czechoslovakia.
- 2-27. K. Watanabe, S. Kashiwabara, R. Fujimoto, J. Appl. Phys., 59, 42(1986).
- 2-28. D.A. Copeland, W.E. McDermott, V. Quan and A.H. Bauer, "Exact and Approximate Solutions of the Utilization and Yield Equations for  $O_2(^1\Delta)$  Generators," 24th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 6-9 July 1993, Orlando, FL.
- 2-29. W.E. McDermott, N.R. Pchelkin, D.J. Bernard and R.R. Bousek, "An Electronic Transition Chemical Laser," Applied Phys. Lett., 3L, 469(1978).
- 2-30. D.J. Benard, W.E. McDermott, N.R. Pchelkin, and R.R. Bousek, "Efficient Operation of a 100watt Transverse-Flow Oxygen-Iodine Chemical Laser," Appl. Phys. Lett., 34, 40(1979).
- 2-31. J.O. Berg, et. al, "Chemical Oxygen-Iodine Laser Advanced Technology," Vol 1, 2 and 3, Air Force Weapons Laboratory,



- AFWL-TR-85-43, KAFB(1985).
- 2-32. G.D. Hager et al. "COIL-IV, A Chemical Oxygen-Iodine Laser," AFWL-TR-85-64, Air Force Weapons Laboratory, Kirkland AFB, N.M.
- 2-33. C.E. Wiswall, S.L. Bragg, K.V. Reddy, H.V. Lilenfeld, and J.D. Kelley, "Moderate Power CW Oxygen-Iodine Laser of Long Operating Duration," J. Appl. Phys., 58, 115(1985).
- 2-34. K. Truesdell, S.C. Herlock, and G.D. Hager, Unpublished Pockedyne Interl IRD Report(1981).
- 2-35. S. Churassy, R. Bacis, A. Bouvier, C. Pierredit Mery, B. Erbat, J. Bachar and S. Rosenwaks, "The Chemical Oxygen Iodine Laser. Comparison of Theory to Experiments," J. Appl. Phys., 62, 31(1987).
- 2-36. S. Yoshida, H. Fujii, T.Sawano, M. Endo and T. Fujoka, "Efficient Operations of a Chemically Pumped Oxygen Iodine Laser Using Dilute Hydrogen Peroxide," Appl. Phys. Letters, 51, 1490(1987).
- 2-37. P.V. Avizonis and D.K. Neumann, "The Chemical Oxygen-Iodine Laser," Journal Defense Research, 511-524, May 1988.
- 2-38. K.A. Truesdell, K.P. Healy, J.A. Miller, L. Hanko, P. Keating and G.D. Hager, "The Design and construction of a 25kw Rotating Disk chemical O<sub>2</sub>I Laser," WL-TR-89-4p and PL-TR-1035, Jan 1990 and Dec. 1992 Respectively.
- 2-39. P.V. Avizonis, "Chemical O<sub>2</sub>/I Laser technology," 7th Internat. Gas Flow and Chemical Laser Conference, Vienna, 1988.
- 2-40. R.F. Heidner III, " Behavior of O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) in the Oxygen-Iodine Transfer Laser," Journal of Photochemistry, 25, 449(1984).
- 2-41. R.F. Heidner III, "Temperature Dependence of O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) + O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) and I(<sup>2</sup>P<sub>1/2</sub>) + O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ) Energy Pooling," J. Chem. Phys., 74, (1981).
- 2-42. A.N. Dvoryankin, N.Yu. Kudryavteev, and Yu. A. Kulagin,

"Dissociation of Molecular Iodine During Mixing with  $O_2(^1\Delta)$  Flow," Department of Optics, P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow. 8th Internat. Gas Flow and Chem. Laser Conference, Madrid(1990).

2-43. A.J. Vouvier, R. Bacis, A. Bouvier, P. Crozet, S. Churassy, and M. Nota, "The Dissociation of Iodine by Singlet Molecular Iodine," 7th International Gas Flow and Chemical Laser Conference, Vienna 1988.

2-44. J. Hon, D. Plummer, P. Crowell, G.D. Hager, C.A. Helms, K.A. Truesdell, "A Heuristic View of COIL Efficiency," AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 94-2422, 20 June 1994, Colorado Springs, CO.

2-45. N.F. Balan, R.M. Gizatullin, M.V. Zagidullin, A. Yu Kurov, V.D. Nikolaev, V.M. Pichkasov, and M.I. Svistun, "Investigation of a Jet Generator of  $O_2(^1\Delta)$ ", Sov. J. Quant. Electron., 19, 1412(1989).

2-46. M.V. Azgidullin, A. Yu Kurov, N.L. Kupriyanov, V.D. Nikolaev, M.I. Svistun, and A.V. Erasov, "Highly Efficient Jet  $O_2(^1\Delta)$  Generator," Sov. J. Quant. Electron., 21, 747(1991).

2-47. M.V. Azgidullin, N.V. Erasov, A. Yu Kurov, V.D. Nikolaev, M.I. Svistun, and N.A. Khvatov, "An  $O_2I$  Laser Utiliaing a High Pressure  $O_2I$  Generator," Sov. J. Quant. Electron., 21, 1303(1991).

서 지 정 보 양 식						
수행기관보고서번호	위탁기관 보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드			
KAERI/RR-1822/97						
제목 / 부제	고출력 COIL 레이저 설계기술 개발					
연구책임자 및 부서명	김 광 석 ( 원자력 광기전기술 개발팀)					
연구자 및 부서명	김철중( " ), 권성욱 ( " )					
발행지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행일	1998. 6.	
페이지	57 P.	도표	유(O), 무( )	크기	26 cm	
참고사항	'97 년도 자체연구과제					
비밀여부	공개(O), 대외비( ), 급비밀		보고서 종류	연구보고서		
연구위탁기관			계약 번호			
초록 ( 300 단어 내외 )	<p>최근에 활발히 연구되고 있는 고출력 COIL 레이저 설계 연구를 수행하였다. 광섬유 전송 및 고출력화가 용이한 COIL 레이저의 및 여기산소 발생기 관련 기술 확보 및 레이저 공진기 설계기술 개발을 추진하였다.</p> <p>고효율 대용량 여기 산소 발생기에 대한 연구를 수행하였으며 레이저 공진 거울의 성능평가 실험을 수행하였다.</p>					
주제명 키워드 ( 10 단어 내외 )	레이저, COIL, 고출력, 설계,					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET						
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/RR-1822/97						
Title / Subtitle	Development of the Laser Design Technology for High-power COIL					
Project Manager and Dept.	Kwang-Suk Kim (Development of Opto-mechatronics Technology)					
Researcher and Dept.	Cheol-Jung Kim (Development of Opto-mechatronics Tech.) Seong-Ouk Kwon ( " )					
Pub. Place	Taejeon	Pub. Org.	KAERI	Pub. Date	1998. 6.	
Page	57 P.	Fig. and Tab.	Yes(O), No( )	Size	26 cm	
Note	'97 Research Project					
Classified	Open(O), Outside( ), _Class		Report Type	Research Report		
Sponsoring Org.					Contract No	
Abstract (About 300 Words)	<p>High-power COIL(Chemical Oxygen Iodine Laser) has been becoming more efficient tool in laser materials processing. The reason for the interest stems from the possibility of getting more than tens of kW output power and minimal loss in optical fiber beam delivery.</p> <p>We developed the design technology of high-power COIL and singlet oxygen generator (Jet type SOG), and evaluated durability of laser mirrors under laser operation in this project.</p>					
Subject Keywords (About 10 Words)	Laser, COIL, Oxygen generator, Power, SOG					