

# 노후 원자력시설의 해체를 위한 COIL 레이저개발

## Development of Chemical Oxygen Iodine Laser (COIL) for Decommissioning of Old Nuclear Facilities

한국원자력연구소 양자광학기술개발팀  
김택수, 권성욱, 정진만, 김철중

### I. 서론

원자로를 사용하고 있거나 핵무기 생산시설들을 보유하고 있는 나라들이 가지고 있는 가장 큰 고민거리 중의 하나가 노후화된 시설들의 처리문제이다. 노후화된 핵시설들을 처리하기 위한 기존의 전통적인 제염 및 해체 기술들(plasma arcs, water jets, oxygen-gas torches, diamond wires, 등)은 많은 노동력이 필요하고 비용이 비싸며 일반적으로 상당량의 이차 폐기물들을 만들어 내는 단점들을 가지고 있다. 따라서 이러한 제염 및 해체에서 발생하는 기술적 문제들을 효과적으로 처리할 수 있는 새로운 기술이 필요하다. 새로운 기술은 특히 제염 및 해체시 발생하는 이차폐기물들의 양을 최소화 할 수 있어야 하며 재활용시킬 수 있는 기술이어야 한다.

최근에 많은 연구들은 레이저를 이용한 기술이 제염 및 해체용으로 우수하다는 것을 보고하고 있다. 노후화된 핵시설의 제염과 해체에는 고출력(약 20-30 kW)이 필요하다. 고출력 레이저빔은 산업용 광섬유( $1\mu\text{m}$ 에서  $1.5\mu\text{m}$  사이의 파장에서 fused silica에 의해 적은 손실로 전송이 가능한)에 의해 멀리 떨어졌거나 제한된 작업영역으로 보내질 수 있다. 광섬유를 이용한 레이저빔의 원거리 전송은 로봇시설을 활용하여 정확하고 빠른 작업들을 가능하게 한다. 뿐만 아니라 고출력 레이저빔은 두꺼운 부분의 절단(12인치 두께까지), 얇은 두께의 빠른 절단, 오염된 표면의 빠른 처리, 그리고 유사한 다양한 작업들을 가능하게 한다. 하지만 이러한 고출력 레이저빔을 광섬유 전송할 수 있게 고품질의 레이저빔을 제공하는 상업용 레이저가 아직 존재하지 않는다. 현재 상업적으로 널리 이용되고 있는 레이저는 이산화탄소 레이저와 Nd:YAG 레이저 등이 있다. 이산화탄소 레이저가 출력면에서 고출력이 가능한 반면 광섬유 전송이 어렵고 Nd:YAG 레이저는 광섬유 전송이 가능한 반면 출력이 아직 20-30 kW까지 만들지 못한다. 원거리로의 광섬유 전송은 작업자들의 방사능 피폭을 감소시킬 수 있고 그래서 작업시간의 증가로 단가도 낮출 수 있기 때문에 노후화된 핵시설의 제염 및 해체에는 필수적이다. 또한 고품질의 레이저빔은 매우 작은 spot 크기와 좁은 자국만 남겨서 이차적인 폐기물들이 감소되게 한다. 더욱이 고품질의 레이저빔은 작업표면과 절단부분 사이의 공간에 대한 특별한 조절없이 일정하게 절단하는 것이 가능하게 만들어 준다.

노후화된 핵시설의 제염과 해체에 필요한 가장 적합한 레이저가 1977년 초기에 미공군에 의해 무기시설로서 처음 발명되고 개발되었다. COIL 레이저는 광섬유 전송이 가능한 다른 고체레이저에 비해 고출력 발진시 열적 불균일 문제가 없어서 고출력에도 불구하고 집속성이 뛰어나며 광섬유의 흡수가 가장 적어서 고출력을 광섬유 전송하는 데 가장 유리하다. 또한 레이저 가공에 많이 사용되는  $10.6\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> 레이저에 비해  $1.315\mu\text{m}$  COIL 레이저는 파장이 짧으므로 재료의 광흡수율이 높아 일반 산업분야의 용접/절단에서 기존의 가공용 레이저를 대체할 것으로 기대되는 상용성이 큰 레이저이다.<sup>1-3</sup>

한국원자력연구소에서는 1997년부터 과기부주관 민군겸용기술사업과제로 고출력 COIL 레이저를 개발하여 왔으며 현재 6 kW의 출력을 달성한 상태이다. 본 논문에서는 한국원자력연구소에서 개발중인 COIL 레이저의 기본원리와 출력특성에 대해 언급하고자 한다.

### II. 실험방법

COIL 레이저 장치는 Fig.1과 같이 크게 여기산소발생기, 요오드주입기와 초음속노즐을 포함한 레이저 공진기 그리고 진공장치 등으로 구성되어 있다.

실험장치에 대한 자세한 기술은 참고문헌의 [4,5]를 참고하기 바란다. 또한 6 kW급 COIL 레이저 발진조건은 Table 1. 에 수록하였다.

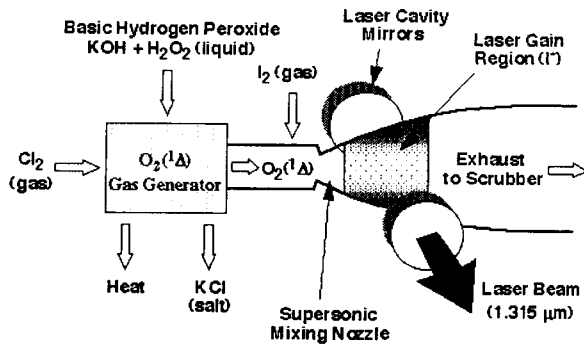


Fig. 1. Basic configuration of COIL system.

Table 1. Operation conditions of 6 kW-class COIL

가스 유량	염소	280 mmole/sec
	완충가스 He	480 mmole/sec
	이송가스 N <sub>2</sub>	380 mmole/sec
	요오드	3 - 5 mmole/sec
여기 산소 발생기	반응공간 부피	3.68 liter
	화학연료 유량	450 liter/min
	jet 속도	>8 m/sec
	가스속도	20-40 m/sec
	반응압력	30-50 torr

### III. 결과 및 고찰

#### III-1. COIL의 기본원리

COIL은 화학 반응에 의해 발생하는 막대한 에너지를 변환시켜 레이저발진을 일으키는 기술로서 화학반응물의 양에 비례하여 출력을 높일 수 있어 MW급 이상의 고출력을 가능케 하는 유일한 기술이며 일부 선진국만이 확보하고 있는 핵심기술이다. COIL 레이저는 산화물질인 여기산소( $O_2(^1\Delta)$ )와 연료물질( $I_2$ )의 혼합에 의한 화학반응을 통하여 들뜬 원자( $I^*$ )를 생성시키고, 이때의 들뜬 원자는 그것의 바닥상태원자보다 훨씬 더 높은 에너지 상태에 존재하게 되며 충분히 긴 수명을 지니고 있어서 들뜬 화학종의 밀도반전이 존재하는 특징이 있다. 즉 화학반응으로 생성된 여기산소가 요오드 원자를 들뜨게 하여  $1.315\mu m$  파장의 레이저발진이 이루어진다.

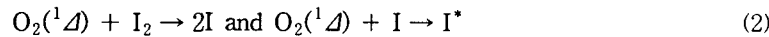
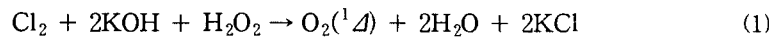


Fig.1에서와 같이 COIL은 여기산소를 효율적으로 발생시키는 여기산소발생기(Singlet Oxygen Generator : SOG) 와 요오드 혼합노즐 및 초음속노즐을 포함하는 레이저공진기, 그리고 반응가스를 배출시키는 배기 장치로 구성되어 있다.<sup>4,5</sup>

#### III-2. COIL의 특성

COIL은 고출력이 가능하다. COIL은 화학연료의 반응 양에 비례하여 MW급까지 레이저 출력을 발생시킬 수 있는 장치이다. 현재 Nd:YAG 레이저는 10 kW급, CO<sub>2</sub> 레이저는 20 kW급까지 가능한 상태이지만 COIL은 더 높은 출력이 가능하다. 본 연구에서 약 6 kW의 출력을 달성하였으며 일본의 경우 10 kW의 상업용 COIL를 시험중에 있다. 또한 미국은 MW급까지 가능한 상태이다.

$1.315\mu m$ 의 파장을 가진 COIL은 광섬유로 전송이 가능하며 이때 현재 광섬유전송에 가장 많이 사용되는 YAG 레이저보다 더 낮은 손실율을 보이고 있다. 광섬유로 100 미터 전송했을 때 약 10%의 손실이 있는 것으로 보고하고 있다.<sup>6</sup>

COIL은 기체 레이저가 가지는 특징중의 하나인 고품질의 레이저빔을 가지고 있다. 그래서 레이저빔의 작은 퍼짐각을 가지고 있어서 spot 크기가 작다. 이는 작은 지름의 광섬유전송이 가능하게 한다. Fig.2에서 레이저출력과 레이저빔 품질을 비교하였다.<sup>6</sup> 1 kW급의 COIL 레이저빔 품질은 약  $40\text{ mm} \cdot \text{mrad}$  이며 이는 1 kW급 CO<sub>2</sub> 레이저와 같은 수준이다. 1 kW급의 COIL를 내경 0.3 mm의 광섬유를 통한 전송이 실험되었고 Fig.3에 나타내었고 90%이상의 전송효율을 보고하고 있다.<sup>6</sup> 절단 재질의 표면에서 레이저출력밀도는 현재 알려져 있는 최고치인  $10^6\text{ W/cm}^2$ 을 보이고 있다. 이러한 고출력과 고품질의 레이저 특성은 COIL를 노후화된 반응로의 두꺼운 절판 절단 작업이 가능하게 한다.

COIL은 재료의 레이저빔 흡수가 레이저 절단에 아주 좋은 흡수율을 보인다. 탄소강의 경우 CO<sub>2</sub> 레이저 보다 COIL이 4배더 좋은 흡수율을 가진 것으로 보고하고 있다.<sup>6</sup>

Carroll 등이 수행한 실험결과들을 살펴보면 다양한 재질에서의 COIL 레이저 절단능력 실험을 수행

하였고 그 결과를 Table 2에 나타내었다.<sup>7</sup> Table 2에 있는 실험결과들은 미공군 연구소에 있는 RADICL 장비로 수행한 결과로서 실험시 레이저의 다중모드 집속 spot 지름은 0.24 mm로 계산되었다. 각 절단 시료들은 stepper motor에 의해 조절되는 horizontal translation stage에 위치하였고 레이저는 고정된 속도로 조사되었다. 직사각형의 노즐을 이용하여 고압의 질소기체를 절단기체로 사용하여 절단

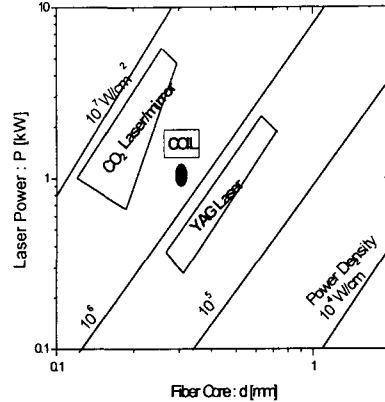
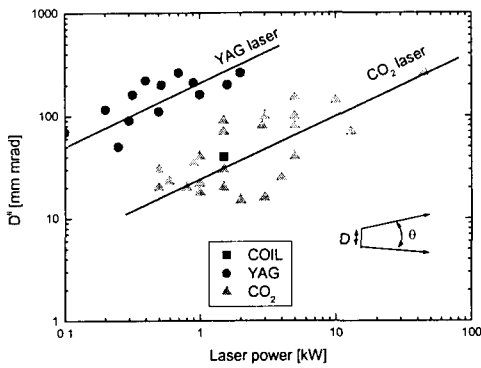


Fig. 2. Relation between laser power and beam quality 영역에 45° 각도로 붙여넣어 준 실험결과이다. 또한 일본 Junichi 등이 수행한 COIL과 CO<sub>2</sub> 그리고 Nd:YAG 레이저를 이용한 스테인레스 등의 절단실험 결과들을 살펴보면 COIL의 우수성이 잘 나타나 있다.<sup>6</sup> Fig.4에 스테인레스관의 두께에 대한 절단속도 실험결과를 보였다.<sup>6</sup>

### III-3. 실험결과

본 연구에서는 위와 같이 레이저절단에서 우수한 성능을 보여주고 있는 COIL 레이저를 개발하였다. 대용량의 여기산소 생성을 위하여 Pipe jet type의 여기산소발생기를 사용하여 출력특성실험 결과로 염소유량 278 mmole/sec에서 최대출력 6.03 kW을 달성하였으며 이때 buffer 기체로 헬륨(He)을 사용하였고 요오드이송기체인 2차 buffer 기체로는 질소를 사용하였다. 헬륨의 경우 여기산소발생기 측면에서 염소기체와 일부 혼합되어 공급되고 일부는 duct 측면에서 유입되도록 하였다. 사용된 1차 buffer 기체와 2차 buffer 기체 및 염소기체의 기체유량비는 1차 He : 2차 N<sub>2</sub> : Cl<sub>2</sub> = 1.75 : 1.38 : 1 였다. 이때 화학효율은 23.7 %였다. 완충가스를 He으로 사용하는 경우가 질소보다 효율면에서 유리한 것으로 보고되어 있다.<sup>3</sup> 레이저출력은 요오드유량과 염소유량에 크게 좌우되며 염소유량은 레이저발진시 대부분의 경우 변화시키지 않으며 요오드유량을 조절하여 레이저출력을 최적화한다. 요오드유량에 따른 레이저 출력특성을 Fig.5에 나타내었다. 레이저 gain 길이는 200 mm 였으며 초음속 노즐에서 광축까지의 거리는 105 mm 였다.

### IV. 결론

화학레이저인 COIL은 화학, 유체역학, 레이저공학 및 광학기술이 집적화된 기술로서 자체기술로 6.03 kW COIL레이저를 개발하였다. COIL 레이저에 적용된 기술은 국산화 비율이 높으며 국내 산업체에서 독자적으로 개발한 레이저거울, 화학연료 순환펌프등의 순수한 국내기술을 활용하였다.

여기산소발생기는 pipe jet SOG 방식으로서 외국의 COIL 연구그룹에서 널리 사용되고 있는 jet SOG 방식을 응용한 것으로 기존의 방식에 비해 대용량, 고출력 COIL 레이저개발에 적합하다.

화학레이저는 화학반응량에 비례하여 고출력 레이저발진을 쉽게 할 수 있는 장점이 있으며 현재 달성된 레이저출력은 규모면에서 국내에서 개발된 레이저중 최대 출력을 달성한 것이다. 이는 질적으로 1997년 미공군 Phillips Lab.의 연구논문 결과보다 우수한 결과를 달성한 것이다. 이로서 COIL 레이저를 이용한 국내 산업용 레이저 절단 및 용접을 위한 대체기술을 마련하였다.

'97년부터 민간겸용기술개발사업 시범과제로 COIL 레이저개발을 시작하여 연차적으로 1 kW, 2 kW, 6 kW 출력을 달성하였으며 이와 관련된 COIL레이저의 화학반응기술, 초음속유체 제어기술등의 scale-up기술을 확보하였다.

Table 2. Laser Cutting data for various materials

Material	Gas Pr. [psig]	Power, P [kW]	Cut depth d[mm]	Kerf width $w_k$ [mm]	Cutting speed v[m/min]	$vw_k$ [m*mm/min]	d/p [mm/kW]
Al	75	4.7	9.83	0.91	0.96	0.8736	2.09
	115	5.09	13.21	1.78	0.12	0.2136*	2.5953
	115	5.44	15.24	1.78	0.12	0.2136*	2.8015
	115	5.05	20.57	1.78	0.03	0.0534*	4.0733
	115	5.55	10.67	1.78	0.30	0.534*	1.9225
	115	6.26	5.59	1.78	0.75	1.335*	0.8930
	115	6.33	4.83	1.65	1.50	2.475*	0.7630
Cu	10	4.6	1.09	1.02	2.4	2.448	0.2370
Ni	70	4.2	8.76	1.02	0.6	0.612	2.086
	80	4.46	6.5	1.14	0.9	1.026	1.457
	80	3.43	12.95	0.94	0.3	0.282	3.775
Ti	75	4.2	8.38	1.27	2.16	2.7432	1.9952
	75	4.2	13.41	1.14	1.08	1.2312	3.1929
	75	5.65	11.73	1.09	1.62	1.7658	2.0761

\* Data from Ref[13]

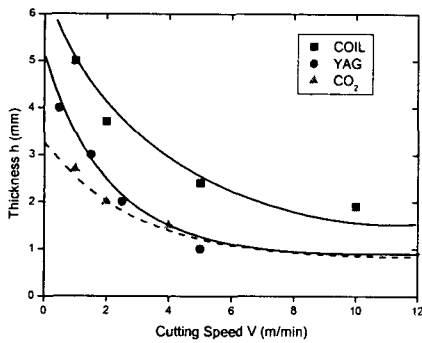


Fig. 4. Relationship between cutting speed and plate thickness of stainless steel type 304

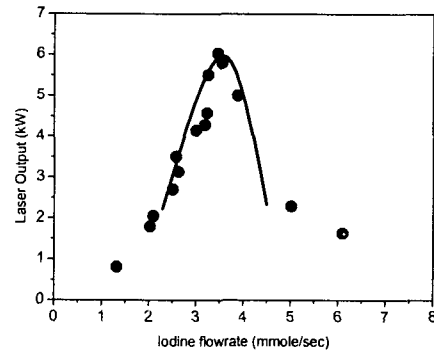


Fig. 5. Output power vs Iodine flowrate

## V. 참고문헌

1. M.V. Zaggidullin, V.D. Nikolaev, M.I. Svistun, N.A. Khvatov, N.I. Ufimtsev, "High efficient supersonic chemical Oxygen iodine laser with a chlorine flow rate of 10 mmol s<sup>-1</sup>" *Quantum Electronics* 27(3) 195-199 (1997)
2. K.R. Kendrick, C.A. Helms, B.G. Quillen, "Determination of singlet-oxygen generator efficiency on a 10-kW class supersonic chemical oxygen-iodine laser(RADICL)." *IEEE J. Quantum Electron.*, 35(12), 1759-1764(1999)
3. M.V. Zagidullin, A.Yu. Kurov, N.L. Kupriyanov, V.D. Nikolaev, M.I. Svistun, and N. V. Erasov, "Highly efficient jet O<sub>2</sub> (1Å) generator," *Sov. J. Quantum Electron.* 21, pp. 747-753, 1991
4. Sung-Ok Kwon, Taek-Soo Kim, Seong-Hoon Kim, Yun-Dong Choi, Yun-Sig Lee, Young-Soo Park, Hyung-Shik Kim and Cheol-Jung Kim, "BHP jet stabilization of COIL", XIII Symposium on GCL/HPL, SPIE Vol. 4184(2000)
5. Taek-Soo Kim, Sung-Ok Kwon, Yun-Dong Choi, Cheol-Jung Kim, "수 kW급 COIL 레이저의 출력특성 연구," 군사과학기술학회 종합학술대회, Vol.II, p775(2001).
6. A. Junichi, T. Noriaki, Y. Kozo and A. Toshio, "Application of Chemical Oxygen Iodine Laser(COIL) for Dismantling of Nuclear Facilities," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 32, No.34, pp. 517-523(1988).
7. D.L. Carroll and J.A. Rothenflue, "Experimental Study of Cutting Thick Aluminum and Steel with a Chemical Oxygen-Iodine laser using N<sub>2</sub> or O<sub>2</sub> gas assist," In Proc. XI Inter. Symp. Gas Flow and Chemical lasers and High Power Laser(GCL/HPL'96),Edinburgh, Scotland, UK.