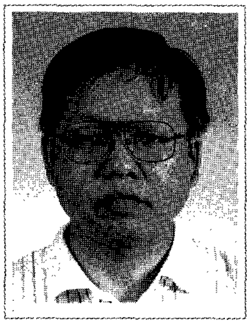
원자력 시설 제염/해체를 위한 고출력 화학 레이저

김 철 중
한국원자력연구소 양자광학기술개발팀 책임연구원



한국원자력연구소의 양자광학기술개발팀(팀장 김철중)에서는 고출력이면서 광섬유를 통하여 원격 전송이 가능하여 원자력 시설의 제염/해체시 원격 레이저 절단 등에 이용될 수 있는 화학 레이저를 개발하여 앞으로 국내의 원격 레이저 제염/해체 연구의 기반을 마련하였다.

개발 배경

원자력발전소나 기타 원자력 관련 시설에서는 정기 검사시 또는 여러 가지 유지 보수 공사시 그리고 노후 원자로 해체시 기기·배관 등의 많은 방사성 오염 금속 폐기물이 발생한다.

현재 이와 같은 금속 방사능 오염물은 크기를 줄여서 폐기물의 발생 부피를 줄여 보관하고 있다. 이 때 발생되는 폐기물 중에는 작업을 하기 위해 가지고 들어갔던 공구류와 기기들도 포함되어 있다.

따라서 발생하는 폐기물의 양을 줄이고 작업시 작업자의 방사능 피폭 위험을 줄여 안전성을 보안하는 연구가 진행되어왔으며, 1980년대 이후 10kW급 이상의 고출력 레이저가 산업적으로 활용되면서부터 레이저를 이용한 원자력 시설의 원격 제염/해체에 대한 연구는 미국·일본 등의 선진국에서 지속적으로 진행되어왔다.

그러나 산업적으로 주로 사용된 고출력 탄산 가스 레이저는 광섬유로 전송이 안되어 거울에 의한 반사를 이용하여 전송시켜서 원자력 시설의 원격 절단에 일부 사용되었지만 사용상의 어려움에 의해 활용이 제한되었으며, 산업적으로 활용되며 광섬유 전송이 가능한 Nd:YAG 레이저는 출력면에서 5kW급 이하로 낮아 두꺼운 금속의 원격 레이저 절단에는 사용상의 한계가 있었다.

따라서 수십kW급의 고출력이 가능하며 또한 광섬유 전송시 흡수가 가장 낮아 고출력 레이저의 광섬유 전송이 유리한 화학 레이저는 차세대의 레이저로 각광받고 있으며, 원자력 시설의 원격 레이저 제염/해

체에 가장 적절한 레이저로 부각되어 미국 · 일본에서는 원격 레이저 제염/해체 연구를 위한 화학 레이저의 개발이 1980년대 말부터 진행되었다.

화학 레이저 COIL

화학 레이저는 화학 연료의 반응에서 생성되는 막대한 화학 에너지를 이용하여 레이저를 발생시키며, 반응하는 화학 연료의 양에 따라 수천kW의 고출력을 낼 수 있는 가장 강력한 레이저이다.

이번에 개발된 화학 레이저인 Chemical Oxygen-Iodine Laser (COIL)는 염소 기체를 염기성 과산화수소수 용액과 반응시켜 고에너지의 여기 산소를 생성시키고 여기 산소가 다시 요오드 원자와 반응하면서 1.3㎛ 파장의 레이저를 발생시킨다.

이와 같은 화학 레이저가 한국원자력연구소에 의해 국내에서 처음으로 개발되었으며, 국내에서 개발된 레이저 중에서 가장 큰 출력인 2.2kW를 달성하여 앞으로 원자력 시설의 해체시 작업자의 안전성 향상에 크게 기여할 수 있게 되었다.

COIL은 1977년 미국 공군에 의해 발명된 이래 주로 군용 목적으로 개발이 진행되었으나 1990년대에 들어서는 1.3㎛의 레이저 파장이 광섬유 전송에 적절하여 원자력발전소 해체 및 중공업 분야의 용접 · 절단 등의 산업적인 응용 관련 연구도 병행되었으며, 1996년 11월 미국에서 ABL(Airborne Laser) 계획이 추진되면서 세계적으로 각광을 받고 있는 레이저이다.

COIL은 발진 효율이 높고 포화강도가 높아 수십kW급의 고출력이 용이하게 이루어질 수 있으며 광섬유 전송시 광손실이 가장 적어 레이저 빔의 원격 전송에 의한 재료 가공에 적합한 레이저이다.

레이저 가공 산업에서 가장 널리 쓰이는 CO_2 레이저는 파장이 10.6㎛로서 광섬유를 투과하지 못해 광섬유 전송에 의한 원격 레이저 가공이 불가능하며 Nd:YAG 레이저는 광섬유 전송은 가능하나 beam quality가 떨어지며 출력이 낮은 단점이 있다.

그러나 1.3㎛ 파장의 COIL은 광섬유에서의 흡수가 가장 적어서 고출력 레이저를 광섬유로 전송시킬 수 있다.

또한 레이저 출력면에서도 COIL은 기존의 산업용 레이저의 출력을 능가하여 노후 원자력 시설의 원격 해체 및 중공업 분야의 두꺼운 금속판의 레이저 가공에 적절한 레이저이다.

우선 COIL의 기본적인 원리와 응용성에 대해서 살펴보기로 하겠다.

COIL의 원리

COIL은 여기 (산소$O_2(^1\Delta)$)로부터 원자 요오드로의 에너지 전이를 기초로 한 레이저이다. $O_2(^1\Delta)$는 여기 산소 발생 장치(Singlet Oxygen Generator, 이하 SOG) 안에서 염기성 과산화수소 용액인 BHP(Basic Hydrogen Peroxide)와 염소(Cl_2)와의 반응에 의해 생성된다. 여기 산소의 생성에 사용되는 가장 기본적인 반응식은 다음과 같다.

$$2KOH + H_2O_2 + Cl_2 \rightarrow 2KCl + 2H_2O + O_2(^1\Delta) \quad (1)$$

여기 산소($O_2(^1\Delta)$)는 에너지를 보관하는 역할을 하고 요오드 원자는 레이저 빛을 방출한다. 들뜬 요오드 원자는 $O_2(^1\Delta)$와 $O_2(^1\Sigma)$로부터 요오드 분자와 요오드 원자로의 에너지 전이를 포함하는 연쇄 반응에 의해 생성되며 아래 식과 같다.

$$I_2 + nO_2(^1\Delta) \rightarrow 2I + nO_2 \quad (2)$$

$$I + O_2(^1\Delta) \rightarrow I^* + O_2 \quad (3)$$

$$I^* \rightarrow I + hv \quad (4)$$

〈그림 1〉에서는 요오드와 산소간의 에너지 전이에 해당하는 에너지 준위도와 COIL의 개략도를 나타내었다.

COIL의 성능을 나타내는 특성 중의 하나는 화학 효율(chemical efficiency)이다. SOG를 통하여 지나는 염소 분자의 수와 방출되는 광자의 수의 비가 화학 효율이며 다

음 (5)식으로 나타내어진다.

$$\text{chemical efficiency}(\eta) = \frac{\text{laser power(W)}}{E_{ph} \times N_A \times \sigma} \quad (5)$$

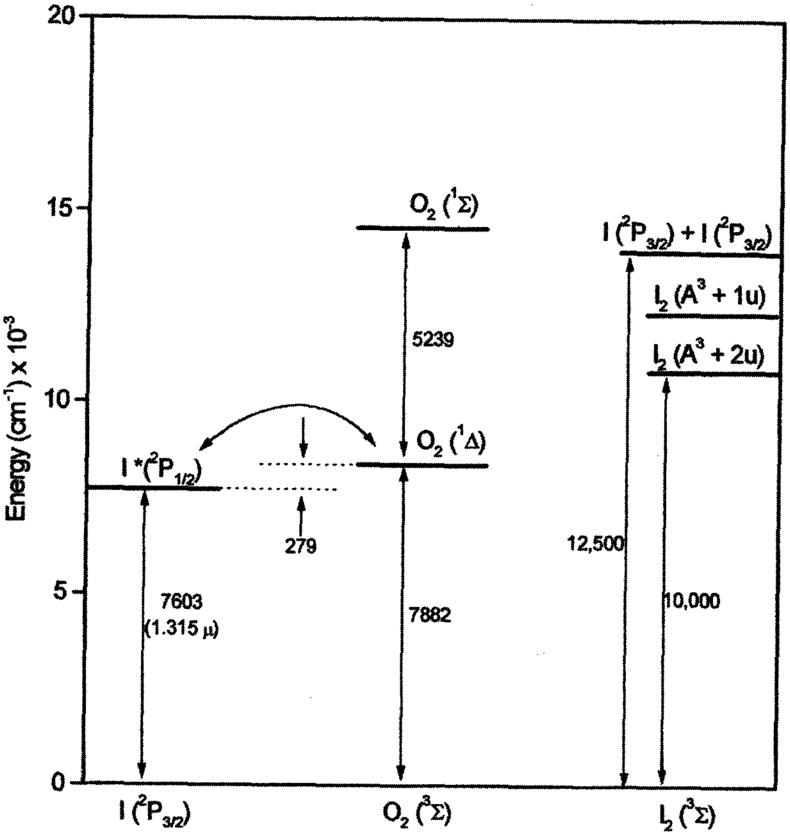
여기서 E_{ph}는 photon energy를 나타내며, N_A는 아보가드로수이고 σ는 molar flow rate를 의미한다. 이 때 각 항의 상수값을 대입하면 다음 (6)식으로 정리된다. (6)

$$\text{chemical efficiency}(\eta) = \frac{\text{laser power(W)}}{90.62\ \text{kJ/mole} \times Cl_2\ \text{flow rate(mmole/s)}}$$

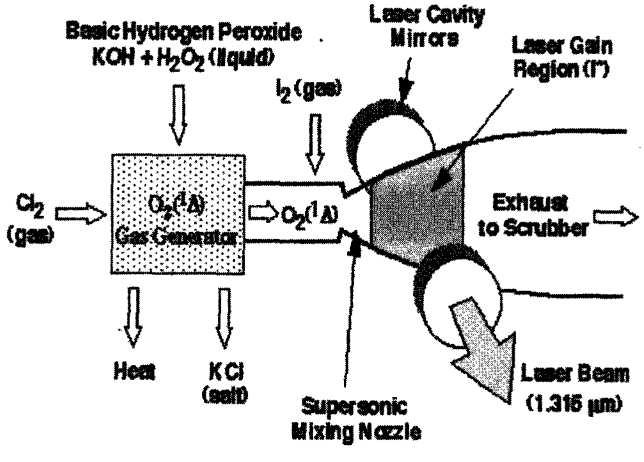
COIL 레이저 발진에서 가장 문제가 되는 부분은 고효율 대용량의 여기 산소 발생기(SOG)로서, 초기에는 bubble type SOG를 이용한 저출력 레이저 발진 연구를 하였으나 이후 drum type SOG 및 Jet type SOG가 개발되어 고출력 COIL 레이저 발진이 가능하게 되었다.

특히 러시아에서 처음 개발된 Jet type SOG는 화학 반응 효율이 높을 뿐만 아니라 구조적으로도 매우 간단하면서 대용량의 여기 산소를 발생시켜주므로 고출력 레이저 발진을 위한 다양한 Jet type 산소 발생기 연구가 선진국에서 활발히 진행되고 있다.

여기 산소 발생기에서의 여기 산소를 생성시키는 반응은 위 (1)식과 같이 간략하게 표현되며 BHP 용액으로부터 여기 산소가 생성될 때까지의 주요 반응은 다음과 같이 요

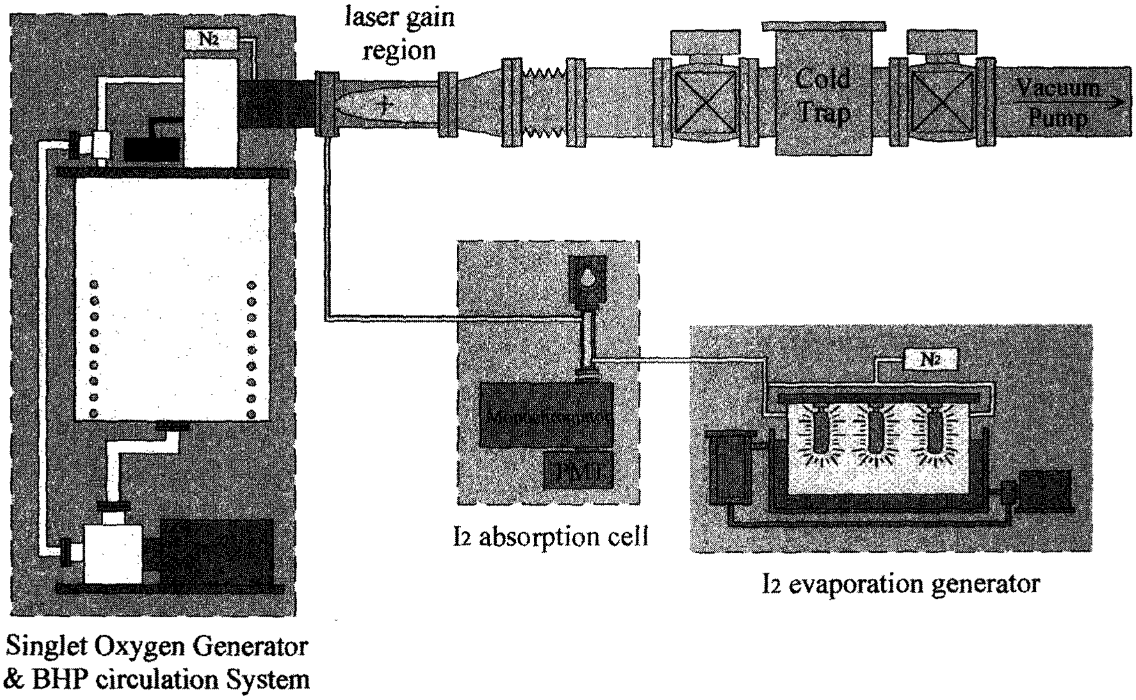


(a)

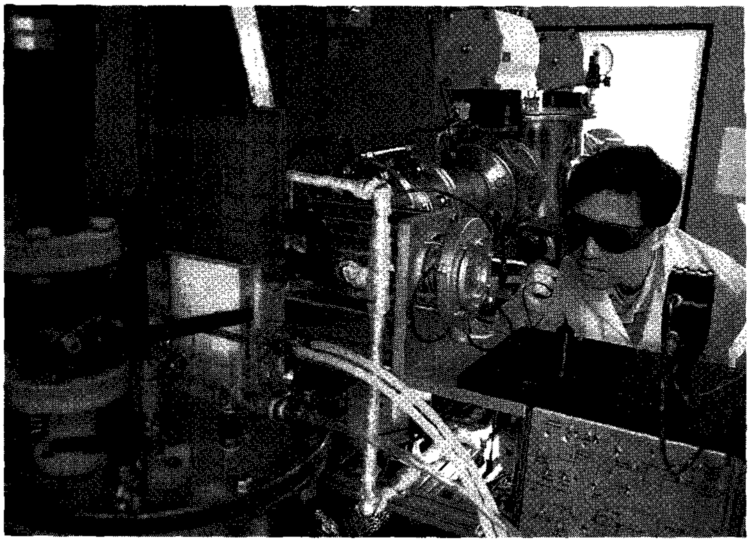


(b)

〈그림 1〉 (a)O_2와 I간 에너지 준위도, (b) COIL 개략도



〈그림 2〉 한국원자력연구소에서 개발된 COIL 장치의 구성도



한국원자력연구소 COIL 발진 실험

약될 수 있다.

$H_2O_2 + OH^- \Leftrightarrow HO_2^- + H_2O$ (7)

$HOO^- + Cl_2 \rightarrow HOOCl + Cl^-$ (8)

$HOO^- + HOOCl \rightarrow ClOO^- + H_2O_2$ (9)

$ClOO^- \rightarrow Cl^- + O_2\,(^1\Delta)$ (10)

여기서 생성된 여기 산소는 위 (2)~(4)식에 따라 레이저를 발진시킨다.

COIL의 장치 구성

COIL의 장치 구성은 Jet-type의 여기 산소 발생 장치(Jet Singlet Oxygen Generator, JSOG), 초음속 노즐(Supersonic Nozzle)을 포함한 레이저 헤드(Laser Head), 그리고 진공 장치로 구성되어 있다.

〈그림 2〉는 한국원자력연구소에서 개발된 COIL 장치의 구성도이며 〈사진〉은 출력 실험을 하는 사진이다.

제염과 해체를 위한 COIL의 응용성

노후 핵무기 생산 시설과 원자로의 제염/해체는 세계적으로 중요한 해결 과제이며 우리 나라도 원자력 발전소의 제염/해체 문제는 먼 훗날의 문제만은 아니고 이제부터 관심을 가지고 대처하여야 할 분야이다.

현재 가지고 있는 기술력으로 원자력 관련 시설의 제염/해체 문제들을 해결하기에는 신속성 · 안전성, 그리고 가격 대비 효율성에서 부족한 실정이다. 따라서 제염/해체 계획을 활성화시키고 폐기물들을 효과적으로 분리시킬 수 있는 새로운 기술이 필요하다.

이러한 새로운 기술은 제염/해체에서 발생한 많은 폐기물을 장기간 보관시켜야 하는 문제를 해결하여야 하며, 이를 위해서는 방사성 폐기물을 재활용시킬 수 있는 기술이어야 한다.

지금까지의 제염/해체 기술들(plasma arcs, water jets, oxygen-gas torches, diamond wires 등)은 많은 제약들을 가지고 있다.

기존의 제염/해체 기술들은 많은 노동력이 필요하고 값이 비싸며, 일반적으로 상당량의 이차적인 폐기물들을 만들어낸다.

가끔 덩치가 큰 장비가 필요하게 되는데 이는 제한된 작업 지역에서만 사용할 수 있으며, 장비들의 대부분은 두꺼운 물체나 특정 재질의 폐기물들을 절단할 수가 없다.

이러한 결과들 때문에 제염/해체 분야의 응용뿐만 아니라 유사한 산업적 활용을 위해 다용도의 기술이 필요하다.

최근에 많은 실험들을 통해 레이저 절단 기술이 제염/해체용으로 고효율의 기술이라는 것이 보여지고 있다.

일본의 원자력 관련 시설에서는 많은 수의 스테인리스관들과 12인치 두께의 스테인리스 지지대의 절단에 20kW급 CO(일산화탄소) 레이저를 사용하는 것을 보여주었다.

하지만 일산화탄소 레이저는 4~8μm의 파장에서 동작하기 때문에 광섬유를 통한 전송이 어려워 광전달 손실이 크며 광축의 정열이 어렵고 전송 장치의 크기가 큰 거울을 이용한 전송 장치가 필요하며, 협소한 지역으로의 전송과 효과적인 원격 전송이 힘들다.

반면에 광섬유를 통해 전송이 가능한 레이저는 실제 원자력 시설의 절단에 필요한 높은 평균 출력을 발생시키지 못하고 있다.

Nd:YAG 레이저는 일반적으로 1.06μm에서 동작하며 광섬유를 통한 전송이 용이하지만 5kW 이상의 출력이 힘들다. Nd:YAG 레이저는 핵연료와 plutonium glove box 등의 원격 절단에 이용되곤 하였다.

이러한 모든 레이저 절단 적용에 기존의 산업용 레이저들은 상대적으로 얇은 판의 절단 또는 특정한 용도의 반복적인 절단에만 사용되었다.

비록 레이저 절단이 적은 양의 이차적인 폐기물들을 만들어냄에도 불구하고 대부분의 경우 현실적인 속도를 가지고 절단하기에는 너무 두껍고, 집속된 레이저빔을 절단 물체에 초점을 유지하는 데 어려움이 있었다.

레이저 절단을 위해서는 절단될 물체의 표면에서 대략 1mm 이내에 레이저 초점을 유지해야 한다.

그래서 로봇이 작업할 물체 표면에 레이저빔을 정확하고 정밀하게 집속시켜야 하며, 로봇이 절단할 작업 물체의 열변형에 적응하여 레이저 초점의 위치를 조절할 수 있어야 하고, 로봇 이동시 주변 구조물이 걸리지 않도록 잘 대처해야 한다.

원자력 시설의 작업 현장에서 이와같은 요건을 만족시키기는 매우 어려우며, 이를 일부 해결하기 위해서는 보다 빔 특성이 좋아 집속이 잘되는 고출력 레이저가 필요하다.

현재 미국에서 진행되는 Rocky Flats 원자력 시설의 해체에 glove box는 plasma arc 절단이 현재 기본 방식이지만 상대적으로 이차적인 폐기물들이 많다. 따라서 레이저

절단을 이용하여 이를 개선하기 위한 연구가 Sandia 국립연구소의 지능/로봇팀에서 시도되었다.

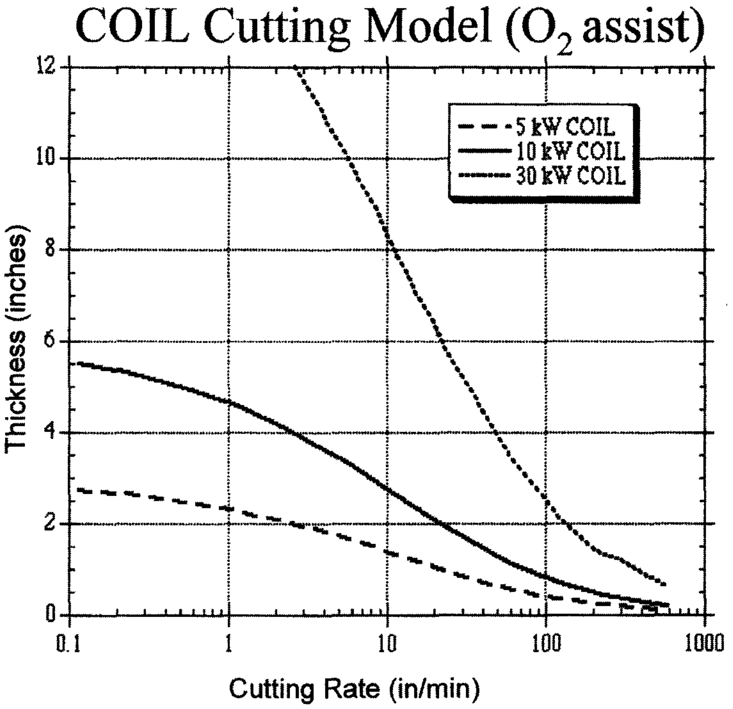
1/8 인치 두께의 스테인리스로 만들어진 golve box를 절단하는데 3kW급 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 하지만 3kW급 레이저는 golve box의 지지 구조물이나 flange를 절단하기에 출력과 속도가 충분하지 못했다. 그리고 출력이 낮아 상대적으로 짧은 초점 거리의 렌즈를 사용하여 집속된 레이저가 glove box 외곽을 정확하게 따라가야만 했다.

더욱이 많은 glove box들은 1/2 인치 두께의 스테인리스로 만들어졌고 특정 부분에는 납판과 함께 얇은 판으로 만들어졌다. 그러한 얇은 판의 레이저를 이용한 직접 절단은 시도되지 않았다. Nd:YAG 레이저 절단은 우선 수동으로 납판을 제거하고 레이저 절단을 그 다음에 수행해야 한다.

COIL의 우수한 레이저빔 집속 특성과 다양한 재질에 대한 좋은 절단 특성 때문에 COIL은 원자력 시설의 원격 제염/해체에 큰 장점을 보인다.

이산화탄소(CO_2) 레이저와 COIL의 파장 차이는 유사한 출력에서 절단 속도를 COIL 레이저가 약 3배 정도 빠르게 만든다.

또한 표준 plasma arc 절단으로는 약 3인치보다 더 두꺼운 구조물은 절단하기 힘든 반면, COIL 절단의 컴퓨터 계산 모형에 따르면 30kW급 시설에서 2cm/min의 이상의 속도를 가지고 30cm 두께의 스테인리스도 절단할 수 있다. 〈그림 3〉은 COIL을 이용한 절단 실험과 계산의 결과을 보여주고 있다.



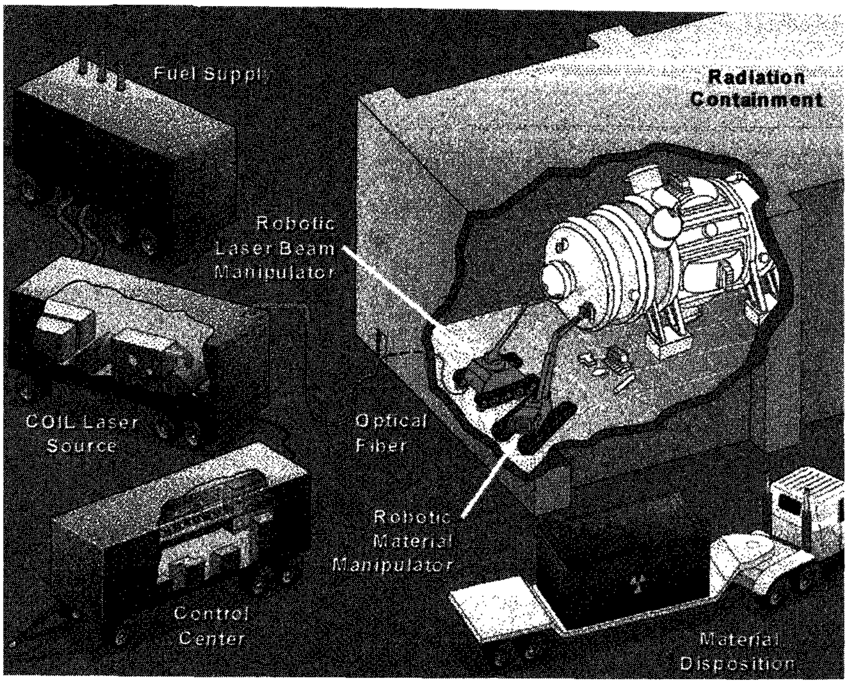
〈그림 3〉 COIL을 이용한 절단 실험 및 계산 결과

원자력 관련 시설의 제염과 해체에서 레이저를 사용함으로써 얻어지는 장점들은 높은 평균 출력의 레이저(약 20~30 kW)에서만 완전히 이루어질 수 있다.

이와 같은 고출력 레이저를 산업용 광섬유에 의해 멀리 떨어져 있거나 제한된 작업 영역으로 보내기 위해서는 레이저의 파장이 광섬유의 흡수가 작은 1.5㎛ 부근이어야 한다.

더구나 우수한 집속 특성을 가진 레이저는 광섬유 전송시보다 작은 직경의 광섬유를 사용할 수 있어, 광섬유 전송 후에 로봇이 레이저를 작업 물체에의 표면에 집속시켜 절단할 때 보다 높은 레이저 세기를 유지할 수가 있어 로봇의 위치 제어에 용이하며 보다 두꺼운 절단이 가능하다.

두꺼운 부분의 절단(12인치 두께



〈그림 4〉 광섬유 전송 원격 원자로 해체

의 원자로까지), 보다 빠른 절단, 오염된 표면의 보다 빠른 처리에 있어 고출력은 이러한 작업들을 가능하게 하는 데 있어 중요한 요소이다. 그러나 아직 이런 고출력에서 광섬유로 전송된 고품질의 빔을 제공하는 상업용 레이저는 없다.

이산화탄소 레이저가 출력면에서는 평균 출력이 가능한 반면 광섬유 전송이 어렵고, 반대로 Nd:YAG 레이저는 광섬유 전송이 가능한 반면 출력을 20~30kW까지 만들어 내기가 어렵다.

또한 지금까지 Nd:YAG 레이저의 광섬유 전송은 최대 약 10kW까지 달성되었지만 여러 개의 레이저빔을 합성하여 한 개의 광섬유로 전송시켜서 레이저의 집속 특성이 매우 나쁘다.

원격지로의 광섬유 전송은 작업자들의 방사능 피폭을 감소시킬 수 있고 그래서 작업자 회전률에 따른 단가도 낮출 수 있다.

피폭에 대한 위험이 적은 레이저 작업은 단지 최소의 유지 보수만 필요할 것이고 그에 따른 노동 시간과 방사능 노출이 그만큼 줄어들게 된다.

고품질의 레이저는 매우 작은 집속된 레이저빔을 만들기 때문에 절단시 절단폭이 작아 이차적인 폐기물이 감소되고 있다.

더욱이 우수한 레이저 집속 특성은 레이저 절단시 물체 표면으로부터 집속된 레이저빔이 이탈되는 것을 허용하는 범위를 크게 하여 로봇과 절단 부분 사이의 공간에 대한 엄격한 제어 없이도 균일한 절단을 가능하게 한다.

〈그림 4〉는 광섬유를 통해 원격 전송으로 원자력 시설의 해체를 하는 응용 예를 보인 것이다. 절단 작업을 하는 로봇과 절단된 해체물을 제거하는 로봇 두 대가 같이 해체에 이용되고 있다.

COIL의 기타 응용성

COIL은 우수한 집속 특성을 유지하면서도 고출력 발진이 가능하다. 이미 외국에서는 비록 단시간 동안 동작하지만 수백kW급이 실현되었으며 이를 여러 개 사용한 수천kW급 고출력 항공기 탑재형 COIL이 수백km의 거리에서 적국 미사일을 격추시키기 위해 지금 개발중에 있다.

일반 산업용 광섬유에 의해 쉽게 전송되는 파장인 1.315㎛ 인 수십kW급 COIL은 조선 등의 중공업 산업용 및 원자력 제염/해체 분야에서 다용도 기술로서 광범위하게 사용될 것이다.

COIL은 다양한 재료와 다양한 두께의 구조물 절단, 표면 처리, 그리고 용접에도 이용될 수 있다.

COIL의 산업화는 빠르게 발전하고 있다. 산업용의 장시간 연속 사용이 가능한 20~30kW급 시설이 개발될 것이며 곧 활용될 것으로 기대된다.

레이저 기술은 1980년대 이후 자동차 · 가전 · 중공업 분야에서 산업

용 레이저에 의한 레이저 가공 기술이 도입되어 공정 자동화에 기여하며 생산성 및 경제성을 향상시켜왔으며, 1990년대 말 현재 CO_2, Nd:YAG, Excimer, Diode 등의 산업용 레이저가 광범위하게 사용되고 있으나 광섬유 전송에 의한 레이저 가공은 수kW급 이하에서만 사용되고 있어 10kW급 이상의 고출력 광섬유 전송이 가능한 새로운 차세대의 산업용 레이저가 요구되고 있어 앞으로 COIL의 산업적 활용이 기대되고 있다.

외국의 개발 현황

현재 미국은 이미 1970년대 말부터 개발중에 있으며 독일 · 일본 · 러시아 · 중국 · 이스라엘 · 체코 등에서는 1980년대 말부터 COIL 레이저 기술 개발을 시작하였다.

일본은 원자력 시설 해체 계획의 하나로 1980년대 말부터 COIL 개발에 착수하였으며, 가와사키중공업이 10kW COIL를 4년 전에 개발하여 광섬유 전송에 의한 원격 레이저 절단을 실증하였다.

독일은 미국의 10kW급 COIL 레이저를 도입하여 개선 연구를 수행중이며, 중국은 대련의 물리화학연구소에서 7kW급을 개발하였고, 역시 10kW급의 COIL을 개발중에 있다.

러시아는 Lebedev 물리연구소와 Arzamas 핵물리연구소에서 kW급 이상을 개발중이며, 이스라엘과 체코는 수백W급의 소형 COIL을 이용한 기초 연구를 수행하고 있다.

미국은 1978년 처음으로 Phillips 연구소에서 COIL 레이저를 개발하였으며, TRW사는 10kW급을 1995년도에 개발하였으며 현재 수백kW급의 COIL 레이저를 개발한 상태이다.

미국은 군용으로 개발된 COIL 레이저의 민수 분야 활용을 위해 미국의 원자력 관련 연구소인 Brookhaven 국립연구소와 Sandia 국립연구소에서 COIL 레이저의 원자력 시설의 제염 및 해체 연구가 추진되고 있으며, 한 · 미 원자력 상설공동조정위원회의 승인에 따라 이들과의 공동 연구 추진이 가능하게 되어 민수 분야의 활용을 위한 연구를 보다 적극적으로 추진할 수 있게 되었다.

COIL의 산업적 활용을 위해 미 공군연구소에서는 STTR(Small Business Technology Transfer Program) 계획의 일환으로 미국의 STI사와 COIL 레이저의 산업적 활용 연구를 수행하여 7.6kW의 출력을 광섬유로 전송하여 레이저가공 연구를 수행하였다.

결론 및 앞으로의 전망

COIL은 레이저 출력과 사용된 염소의 양에 대한 비율인 화학 효율로 성능이 정해지며, 한국원자력연구소에서는 최근 화학 효율 22%를 달성하여 효율면에서도 일본과 미국의 25~30 %에 육박하고 있다.

앞으로 3년 동안에 화학 효율을 개선하고 화학 반응 시설을 확충하여 10kW 출력을 달성하면서 늘어가는 국내 노후 원자력 시설의 해체 수요를 사전에 대비할 계획이다.

한국원자력연구소는 현재 2년의 단기간에 국내에서 kW급의 COIL을 개발할 수 있었으며, 외국과의 기술 교류를 통하여 향후 3년 내에 레이저 출력에 있어 미국을 제외한 여타 나라의 수준까지 COIL 레이저 기술을 축적할 수 있을 것으로 보인다.

현재 COIL 레이저 기술은 광섬유 원격 전송에 의한 노후 원자로 제염/해체에 적용되는 원자력 산업과 국방 분야에 적용될 수 있는 기반 기술로서 아직 산업/공공 수요를 만족시킬 수 있는 수준의 기술은 국내에서 미개발 상태이다.

기술 개발 완료 후에 즉시 중공업 등의 기존 기술이 활용되고 있는 분야의 산업적 활용을 기대하기는 어려우나 재난 구조, 원자력발전소 보수 등과 같이 현재의 산업적 기술로서 해결하기 어려운 분야에 COIL 레이저의 고출력과 기동성 등의 특성이 활용될 수 있을 것이며 국내 원자력 산업 관련 기관에서 보다 많은 관심을 가져야 할 것이다.