레이저 가공을 위한 고출력 레이저 시스템 설계 인자

김도열*

서문

21세기에 들어서면서 산업 전반영역에서 레이저 응용에 대한 수요가 많이 증가하고 있다. 레이저가 개발 되면서 인간이 빛을 자유자재로 이용할 수 있으므로 인하여 그 응용의 범위가 커져서 광산업 중심의 시대를 가히 도래시키고 있다. 레이저를 이용한 가공에서, 고객의 니즈들이 매우 복잡해지고 다양해짐에 따라서 레이저 시스템 설계에서 고려해야 하는 사항들이 크게 증가하고 있다. 이전에 레이저 가공 자체가 고품질의 소수 부품을 생산하는 단계에서는 미처 고려하지 않았던 대량생산을 위한 시스템 설계와 비교적 출력의 안정성이 낮은 레이저 발생장치를 사용하고 있음에도 불구하고 높은 수준의 균일한 품질의 제품을 생산하는 요구에 직면한 것이다. 따라서 시스템 제조 전문회사들이 레이저를 단순한 도구로서의 취급하던 단계에서 높은 수준의 레이저 이해의 수준이 필요한 단계로 진입하고 있다. 본고에서는 이러한 레이저 시스템을 설계 하는데 있어서 고려하게 되는 몇 가지의 주요 인자들을 살펴보고자 한다.

레이저 가공의 응용 영역

최첨단 자본재 생산장비로, 세계적으로 10여 개국만이 생산능력을 갖추고 있을 뿐인 레이저 가공기는 대부분의 산업분야에서 가공의 정밀도는 물론 원가절감에 획기적인 전기를 이룰 수 있어서 국가산업 경쟁력과도 밀접한 연관이 있다. 특히 고품질의 부품이 필요한 첨단 산업의 경우 레이저 가공기를 통한 부품생산은 필수공정으로 여겨지고 있다.

레이저 가공이 널리 각광을 받는 이유로는 입력 에너지 제어가 쉽고 입력 에너지가 작아서 열 변형이 작으며 높은 생산성을 가지고 있고 자동화가 매우 용이하며 비접촉가공이므로 기존의 생산도구에 비해 탁월한 장점을 갖게 되며, 접합(용접)의 경우 다양한 재질의 가공 다른 재질간, 다른 두께간의 용접 등의 여느 가공도구와는 비교가 안 될 정도의 우수한 장점들 때문이다. 레이저가공은 자동차, 기계, 철강, 항공우주, 코딩, 디스플레이, 반도체, 전자, 그래픽 아트, 모델링, 패키징 등의 산업분야에 그 응용영역이 확장되고 있음을 알 수 있다.

예를 들어 절단으로는 Metal, Plastics, Fabrics, Leather, Wood, Polymer Films, Paper, Label, Glass 등의 재질에, Marking/Engraving 분야에선 Metal, Coated Metals, Plastics, Glass, Rubber, Flexographic Rolls 등에 Drilling은 Metal, Alloy Steels, PCB, Dielectrics, Ceramics, Plastics, Polymer, Films Cigarette Papers 등에 Welding은 Metal, Alloy Steels, Thermoplastics, Polymer, Films, Glass에 효과적으로 양산에 적용되고 있다.

* 하나기술(주)

레이저 가공을 위한 고출력 레이저 시스템 설계 인자

레이저 시스템 설계 구성 요소

레이저 시스템은 레이저와 빔전송계, 가공 시스템(Workstation)과 레이저를 이용한 재료가공기술이 융합된 복합기술의 산물이다. 레이저 가공에서 가장 중요한 레이저의 선택에서는 파장, 출력, 연속 또는 펄스(펄스의 경우에는 펄스폭과, 주기 및 에너지 선택)등의 선택과 더불어 High Beam Quality, Reliability, Positioning Accuracy, Low Operating Cost, Easy Maintenance, Safety는 중요한 고려 인자가 된다. 빔전송계는 레이저 빔이 피가공재료까지 도달하기 전에 고 품질 및 양산에 적합한 형태의 레이저 빔을 변화시키는 구성계이다. 이때 주요 고려인자로는 Spot Quality , Reliability, Flexibility, Complexity, Stability 등이 되겠다. 가공시스템은 PC 또는 CNC를 이용한 제어기술을 사용하여 대상 피 가공재질을 레이저 빔쪽으로 이송시키며, 원하는 형태로 레이저 가공을 하는 시스템이다. 일반적으로 공작기계 및 제반 기계장치의 형태와 비슷하지만 대부분의 공작기계가 위치 제어 기술을 사용함에 비하여 레이저 시스템은 이동 중에 제어를 해야 하는 점이 시스템구성에 크게 다르게 영향을 끼치는 설계 인자이다. 이 시스템의 구성 요소로는 Controller, Control S/W, Stage, Servo, Interface, Vision, Integration 등이다.

레이저를 이용한 재료 가공기술은 위의 모든 관련 기술들의 특성이 집합되어 나타난다. 시스템 구성 기술에 의하여 양산성을 결정되며, 요구되는 품질에 따라 공정 프로세스 및 피 가공재료의 형태 등이 정해진다. 필요에 따라서는 피가공재료의 재질과 디자인을 변화시켜야 하기도 한다. 재료가공의 임계치를 한정시키는 요인들을 레이저입장에서 살펴보면 금속절단의 경우 Spot size, Power Density, Focal Depth가 가장 중요한 고려인자가되며 미세 가공의 경우에는 Kerf Width, Material thickness, Productivity Spot Size, Depth of Field Pulse Mode, Power, Pulse to Pulse Stability가 중요 인자이다. 용접(접합)의 경우에는 Power Modulation, Pulse, Beam Spot Size, Depth of Field, Beam Profile를 주요하게 고려해야 한다.

레이저의 다양한 장점으로 인하여 레이저 가공의 다양하고 많은 분야에 그 응용영역이 넓어지고 있으나 최적의 시스템을 구성하기 위한 적절한 인자를 찾아 내는 것이 매우 어렵다. 왜냐면 레이저 및 빔전송계, 집광계 등의 7가지 이상 되는 인자들이 서로 종속변수로 작용하여서 하나의 요인이 변할 때 다른 인자에 바로 영향을 끼쳐서 레이저 프로세스의 조건이 바뀌기 때문이다. 이러한 점 때문에 레이저 시스템의 설계에서는 다양한 실험과 시스템 설계 경력이 레이저 시스템 구성에 결정적으로 중요하게 된다. 또한 장기적인 신뢰성(장기간 레이저 시스템의 안정적인 운영)과 고 품질 제품의 생산을 위한 설계에는 더더욱 중요하게 영향을 끼친다.

레이저 시스템 사용을 고려하는 사용자들은 레이저 출력 및 파장을 선택 할때에는 레이저 가공 핸드북을 사용하여 적절한 범위를 가늠하는 것이 먼저이다. 대부분의 핸드북은 절단, 용접, 표면처리, 천공 등에서 재질, 레이저, 출력에 따른 대표적인 가공속도와 출력을 나타내 보

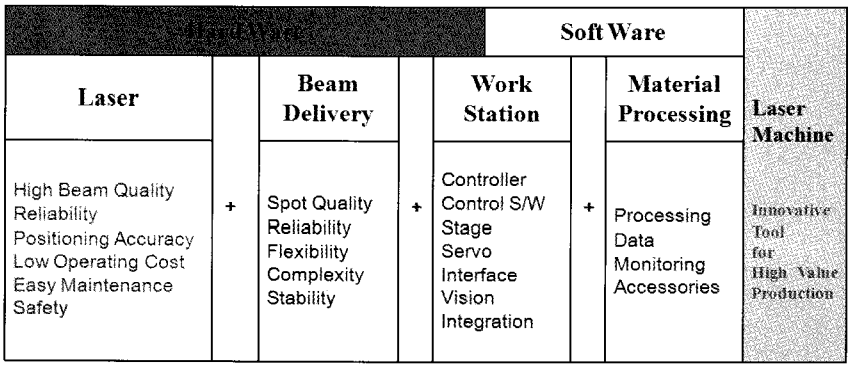

그림 1. 레이저 시스템 구성 요소와 관련 기술

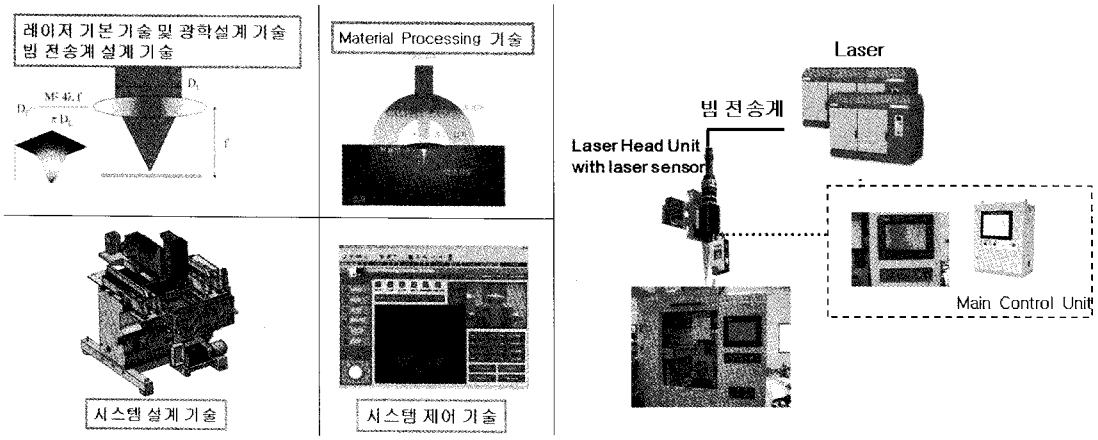

그림 2. 레이저 시스템 구성 기술

여주기 때문이다. 그러나 레이저 시스템의 구성과 빔전송계 등의 설계 조건에 따라 레이저 가공의 특성 및 조건이 달라지기 때문에 핸드북은 적절한 범위를 선정하는 참고로만 해야한다.

레이저의 선택

고출력 레이저 가공 영역에서 사용되는 주요 레이저는 CO_2 레이저, 고체 (Nd:YAG, DISK, Fiber)레이저 등을 사용하며, 통상 사용되는 출력은 약 500W ~ 6KW까지로 대략적인 크기는 $1\times3\times1.5m^3$, 무게는 최대 약 2 Ton까지 이다. 레이저는 그 응용 영역별로 무게, 출력, 크기가 매우 다양하다. 요즘에는 다양한 레이저들이 출시되고 있고 각기의 장점을 부각시키고 있어서 잘못하면 레이저의 사양만을 근거로 하여 레이저 시스템 설계에 그대로 반영하는 실수를 저지를 수있다. 레이저 시스템은 사용하고자 하는 용도와 고객의 정확한 니즈에 따라서 레이저를 다르게 선택해야 한다. 그러하지 않을 경우 큰 투자를 하고도 최대의 효과를 내지 못하는 일이 일어나는데 이는 레이저 시스템 설계자의 잘못이라 하겠다.

고출력 CO_2 레이저의 경우는 전통적인 기술인 Fast Axial Flow(FAF)형태와 기체 소모량과 크기를 줄인 새로운 형태인 Diffusion-Cooled 형인 Slab 레이저가 있다. 각각은 시스템의 구성시 빔의 품질과 유지보수 인자, 가격 등을 고려하여 레이저 시스템 설계자가 고객의 니즈에 맞추어 사용하게 된다.

고체 레이저는 전통적인 Lamp Pumping 방법인 Nd:YAG LPSS 형이 있고, 고체 레이저의 빔모드를 좋게 하고 효율을 높이도록 여기 에너지원을 Laser Diode를 사용한 Laser Diode Pumping 방법인 Nd:YAG DPSS 형이 있다. 최근에는 DPSS의 열 영향을 최소화하기 위하여 레이저 매질을 원통형이 아닌 동전 같은 형태의 Disc로 함으로 냉각효과를 개선한 DISC 레이저가 있으며, 광섬유를 레이저 매질로 하여 laser Diode를 접합하여 여기시킨 Fiber 레이저가 있다. 각각의 레이저는 응용 영역별로 장단점을 고려하여 레이저 시스템 설계

파 장	레이저	Modulation	
		CW	Pulse
10.6 um	CO_2	Welding Cutting	Drilling Micro Cutting
1.06 um	Nd:YAG LPSS		
	Nd:YAG DPSS		
	Fiber		
	Disc		

표 1. 레이저 가공에 사용되는 대표적인 레이저

레이저 가공을 위한 고출력 레이저 시스템 설계 인자

자가 선택하여 설계에 반영한다.

레이저 시스템 설계자가 레이저 가공 응용을 위한 레이저 선택에 있어서 중요하게 고려하는 인자가 Beam parameter Product: BPP이다. BPP는 레이저 시스템 설계시에 레이저 빔의 특성을 잘 나타내는 간단한 수식이기 때문이다. 아래 수식에서 K는 Beam Propagation factor이고 M_2 은 Time diffraction limited factor이다.

BPP 와 레이저 출력간의 레이저 가공 응용의 대략적인 범주가 아래 그림에서 찾아 볼 수 있다. 레이저 시스템 설계자는 이러한 유형의 그림으로부터 처음 응용영역에 대한 고려를 할 때 대략적인 출력의 범위와 빔 품질의 범위를 가늠하고 이어 그 영역 내에서 보다 구체적인 실험을 하여 최적인 조건을 찾아낸다. 예를 들어 레이저 용접의 경우 200W~10kw, BPP는 4 ~ 100 정도이다. 적절한 출력 범위는 실제적으로 레이저 용접 실험을 하여 고객의 니즈에 적합한지를 확인 후 양산성을 고려하여 출력을 높인다. 그러나 출력의 증가가 생산성의 증가에 직접 비례하지 않기 때문에 적절한 출력 범위를 고려한 후에는 재현성 실험을 반드시 해야 한다. 또한 BPP는 레이저 용접의 용접특성에 직접적인 영향을 주기 때문에 간과해서는 안된다.

우리가 레이저 시스템을 설계하는데 있어서 대상 피가공재질이 결정되고 레이저 빔으로 가공해야할 품질 및 양산조건 결정에 있어서 레이저 선정은 아주 중요하고 결정적이다. 빔의 품질은 양산 제품의 품질을 결정하는 매우 중요한 사항이므로 양산시 출력을 자주 변화 시켜야 하는가와 출력변화에 따른 레이저 빔의 특성 변화는 매우 중요하다. 아래 그림은 레이저 종류별로 출력 변화에 따른 BPP 변화를 나타낸 유용한 그림이다.

레이저 가공 프로세스에서 고려 인자

레이저 빔이 대상 피가공 재료에 입사되면 일부는 반사하고 또 다른 일부는 흡수되며 나머지는 투과한다. 이는 재질과 레이저 파장과의 상호작용에서 그 비율이 결정된다. 레이저 가공의 특성을 결정 짓는 인자가 흡수율이다. 이 흡수율에 영향을 끼치는 인자는 파장, 편광, 레이저빔 입사각, 재질, 재질의 온도, 재질의 표면상태, 재질의 형태 등이다. 따라서 이러한 제반 인자들을 모두 고려해야 최적의 레이저 시스템을 구성할 수 있다.

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{w_0 \cdot \Theta_0}$$

여기에서 BPP는 아래와 같이 정의 된다.

$$w_0 \cdot \Theta_0 = \frac{\lambda}{K \cdot \pi} = \frac{M^2 \cdot \lambda}{\pi}$$

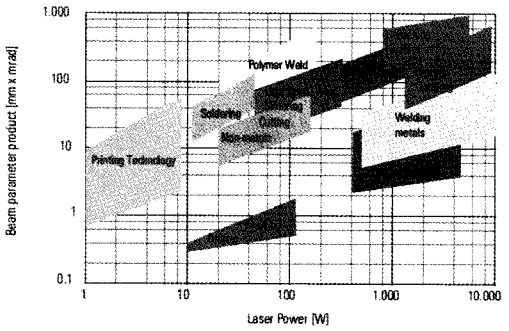

그림 3. 레이저 응용영역에서의 레이저 출력과 BPP

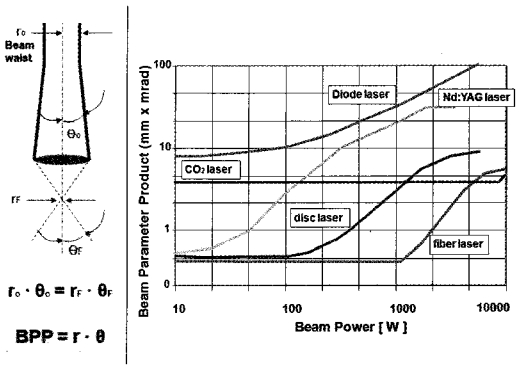

그림 4. 레이저 종류별 레이저 출력과 BPP

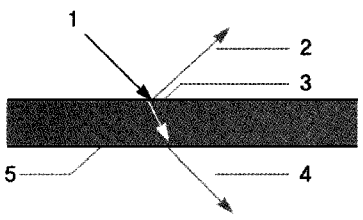

그림 5. 재료에 인가되는 레이저 빔
[1. 입사되는 레이저빔 2. 반사 3. 흡수 4. 투과 5. 피가공 재료]

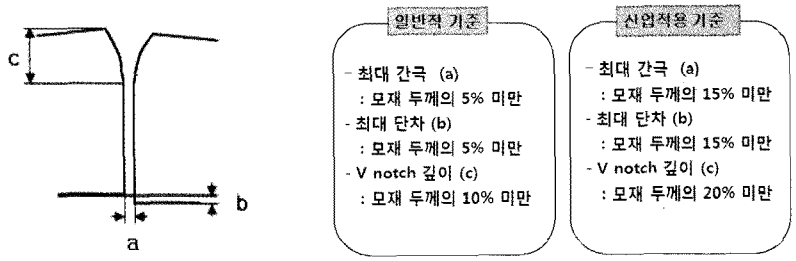

그림 6. 레이저 용접에서 모재의 간극 설계 기준

경우에 따라서는 레이저 빔의 재료에서 흡수율을 높이기 위하여 대상 재질의 레이저 가공을 위한 형태의 변화를 주기도 하고, 표면처리를 하는 등의 별도의 공정이 필요하기도 한다. 다음 그림은 레이저 용접 설계시 대상 재질에 요구되는 인자의 예이다.

이에 더하여 레이저 빔의 모드(TEM 모드) 또한 레이저 시스템 설계의 중요 고려 인자가 된다. 아래 그림은 레이저 빔 모드에 따른 레이저 용접시의 용입 그림을 나타낸 예이다. 빔모드에 따라서 용입의 형태가 크게 달라짐을 볼 수 있다.

레이저 가공의 효율을 높이거나 품질을 높이기 위하여 레이저 빔을 조사할 때 보조기체를 동축 또는 적절한 각도로 인가하기도 한다. 이때 보조기체의 종류 및 분사 각도에 따른 그 특성이 다르다. 레이저 절단의 경우에는 산소의 산화 에너지를 이용하기 위하여 산소를 사용하며 레이저 용접 시에는 He, Ar 또는 압축 공기를 선택 사용 한다. 레이저 절단의 경우에 보조기체를 분사하는 노즐의 디자인은 매우 중요하다. 절단면의 직진성과 절단의 최대 효율을 결정하는 주요 인자가 되기 때문이다. 아래 그림은 미세 절단을 위래 설계된 노즐의 모습이다. 이러한 설계로 Kerf Width를 최소화 시키며 절단의 경사를 줄인다. 이는 절단 노즐을 통해 나온 보조기체가 최대 속도의 흐름을 갖도록 설계한 매우 좋은 결과이다.

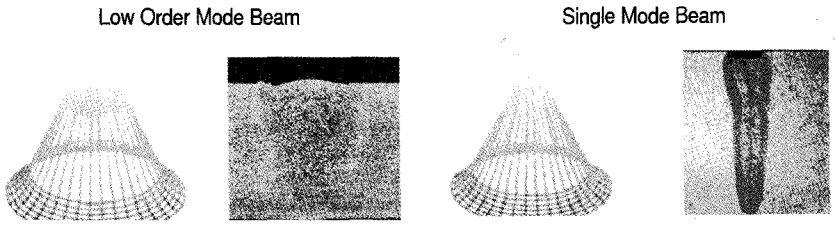

그림 7. 레이저 용접에서 빔모드와 용입 형태

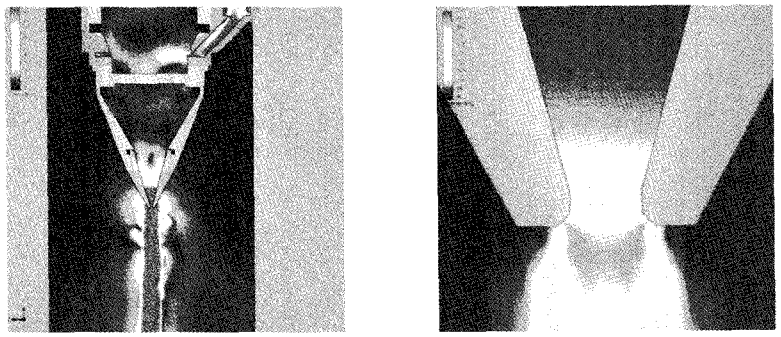

그림 8. 보조기체용 노즐TIP의 디자인 (기체분사노즐에서 기체가 최대 속도에서도 평행하게 분사 되도록 설계됨)

레이저 가공을 위한 고출력 레이저 시스템 설계 인자

레이저 가공 생산성

레이저 가공의 생산성은 고객사에서 양산시 부품의 원가에 크게 영향을 주기 때문에 매우 중요하다. 일반적으로 고가인 레이저 장비를 최대한 고효율로 활용해야 하는 이유이다. 이를 위해서는 대상 재질의 선정되었을 때 최적의 레이저를 선정하고 시스템의 효율화를 극대화 시키며, 경우에 따라서는 대상 재질이 레이저 프로세스에 알맞도록 설계 변경이 필요하기도 하다. 아래 그림은 독일의 Fraunhofer IWS에서 발표한 Mild Steel의 레이저 용접에 대한 레이저 별 용입깊이와 용접 속도를 나타낸 그림이다. 용접하고자 하는 대상 재질의 형태 (표면상태, 절단면사이의 갭 등) 와 원하는 용입깊이 및 속도에 따라서 적절한 레이저를 선정하는 하나의 예를 나타낸 것이다.

이상에서 우리는 매우 간략하게 레이저 시스템의 설계 인자 일부를 살펴보았다. 간단하게 살펴보아도 최적 레이저 시스템 설계의 주요한 인자는 적정 레이저 선정, 최적 빔전송계 설계, 레이저 빔중심에서의 가공시스템, 보조기체 노즐 설계 등이 상호 종속적인 관련성을 가지고 있어서 최적화 설계가 매우 어려움을 알 수 있다. 따라서 레이저 시스템 설계 엔지니어들은 레이저를 단순히 가공기 구성에 있어서 하나의 부품으로 간주할 것이 아니라 제반 종속관계를 고려한 설계를 해야 할 것이다. 물리, 광학, 기계, 전자, 전기, 제어, 소프트웨어, 재료 등의 복합기술이 상호 접목해야 비로소 최적인 시스템을 설계할 수가 있다. 21세기에 초고집적, 초경량 부품들을 생산하기 위한 필수 생산 장비로서의 레이저 생산 시스템의 그 중요성이 더하고 있으므로 우리도 이에 걸맞은 레이저 시스템의 설계자들 뿐 아니라 수퍼바이저 또한 양성할 수 있는 방안의 모색이 필요하다.

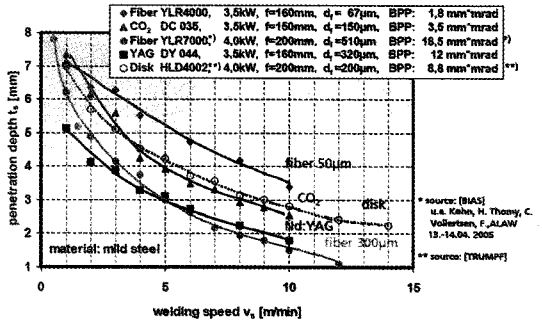

그림 9. 레이저 종류별 용접 속도와 용입깊이

참고문헌

[1] EPIC: Fiber-Laser Workshop: 5-6 November 2008
[2] Company Information (Rofin-Sinar, IPG, GSI, Coherent)
[3] 하나기술(주) 기술 자료 (www.hanalser.com)
[4] Industrial Laser Solutions, Jan. 2009

약 력

김도열 (金道熱)

• 약 력 :
고려대학교 물리학 학사, 고체물리석사, MBA(국제경영전공)
1983~1992 LS 전선연구소 레이저 개발 그룹장
1992~ 하나기술(주) 대표이사 사장
1999~ 하나루미너스(주) 대표이사 사장
2009~2010 Rotary International 3650 District Assistant Governor
2008~2009 한국광학회 부회장