

연구 동향

취성재료 레이저 절단 공정의 연구 동향

박병구*, 김동식**

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과 연구원

** 포항공과대학교 기계공학과 교수

1. 서론

유리나 세라믹 등 취성(brittle) 재료는 기계적, 광학적 성질이 우수하고 부식에 강하여 적용분야가 매우 다양하다. 최근에는 평면 TV나 컴퓨터, 모니터, 휴대폰 등에 주로 사용되는 LCD와 PDP 수요가 커지면서 이러한 제품에 사용되는 디스플레이용 유리에 대한 수요도 동반하여 급증하고 있는 추세이다. 따라서, 소재에 손상을 거의 입히지 않으면서 원하는 형태로 취성재료를 고속 절단하는 기술이 요구되고 있다. 전통적인 유리절단 공정은 다이아몬드와 같은 단단한 재질로 이루어진 절삭휠(cutting wheel)에 적절한 힘을 가하면서 유리표면에 절단선을 긋고, 기계적인 힘을 가하여 유리를 분리하는 방식을 이용한다. 한편, 최근에는 유리, 세라믹 등 취성 재료의 절단공정에 레이저를 이용하는 방법이 널리 보급되고 있다. 이 글에서는, 레이저를 이용한 취성재료의 절단공정에 관한 최근 연구 동향을 살펴보고 대표적인 공정의 원리 및 특성을 간략하게 살펴보고자 한다.

Table 1에 제시된 세가지 공정에 대하여 본문에서는 각각 공정(1), 공정(2) 그리고 공정(3)으로 칭하도록 하겠다. Table 1에 제시된 세가지 공정은 전형적인 경우로서, 각각의 공정을 결합하여 이용할 수 있다. 예를 들어, 레이저를 이용하여 재료에 적절한 균열(crack)을 유발하고 기계적인 힘을 가하여 재료를 절단한다면 공정(1)과 공정(3)의 원리를 모두이용한 것으로 볼 수 있다. Table 1에 제시한 세가지 공정의 원리는 여러 유리 절단공정의 기본을 제공하므로 각 공정에 대해서 살펴보는 것은 의미가 있다. 공정(1)은 전통적인 취성 재료의 절단공정으로서 절삭휠로 절단선을 긋고, 절단선 위에 기계적인 힘을 가하여 절단하는 방식이다. 공정(2)와 공정(3)에 비하여 절단속도(cutting speed)가 빠르지만, 절단면에서 미세 균열(microcrack)과 잔류응력(residual stress)이 발생하기 때문에 연마나 열처리 등의 후처리 작업이 필요하다[3]. 공정(2)와 공정(3)은 레이저를 이용한 것으로서, 레이저 단위면적당 조사되는 레이저 출력에 따라서 크게 구분된다. 공정(2)는 고출력 레이저를 이용하여 재료를 용해, 기화시킴으로써 절단하는 공정이다. 높은 레이저 출력을 이용하므로 에너지 효율측면에서 부정적이고, 높은 표면온도에 의하여 미세 균열, 잔류응력, recast layer 등 표면손상이 유발되고, uncontrolled fracture(열응력에 의한 무작위적인 깨짐 현상)가 일어날 가능성이 높다.

Table 1 3 types of cutting method for brittle materials.

	Cutting Process Type	Cutting Energy Source	Surface quality	Cutting speed
(1)	Score-and-snap (Diamond cutting)	Mechanical force	Microcracks	High (not important parameter)
(2)	Melting and evaporation	Laser(>500 W [1])	Microcracks, residual stress, Heat affected zone, Recast layer, Uncontrolled fracture	Order of 1 mm/s [2]
(3)	Controlled fracture	Laser (order of 10 W [1])	Surface damage free, Relatively clean surface	About 50 mm/s [2]

공정(3)은 레이저로 유발한 열응력으로 기계적 균열을 발생시켜 재료를 절단하는 공정이다. 이 경우, 공정(2)의 레이저 출력에 비해 1/10 수준의 작은 출력을 사용된다. 또한, 공정(1)과 공정(2)와 같은 표면 손상 문제가 발생하지 않으므로, 절단면에 대한 별도의 후처리 공정이 필요하지 않아 효율적이다 [7]. 따라서 공정(3)이 유망한 brittle material 절단기술임은 자명하다. 이 글에서는 유리 절단기술 중 controlled (thermal stress) fracture 공정의 연구현황에 초점을 맞추고자 한다.

2. Controlled thermal stress fracture 공정의 연구현황

먼저 controlled fracture의 역사를 간략하게 살펴 보도록 한다. Garibotti(1963)는 레이저를 이용한 brittle material의 절단방법을 처음으로 제안하였다 [3]. 이는 레이저로 절단선을 긋고, 초음파 에너지로 재료를 분리하는 원리이다. Lumely(1969)는 재료의 상변화를 일으키지 않고 열응력으로 균열을 전파시켜 재료를 절단하는 controlled fracture 공정을 제안하였다[4]. 이전의 Garibotti의 방법은 레이저로 재료의 용해 및 기화를 유발하여 균열을 형성하는 원리인 반면 Lumely의 공정에서는 재료의 상변화를 배제하였다. 따라서 절단에 필요한 레이저 에너지를 획기적으로 줄였다. Grove등(1970)은 controlled fracture 방식을 유리에 적용하였다 [5]. 비교적 근래에는 Kondratenko(1997)가 레이저를 이용한 controlled fracture 방법에 물 분사에 의한 냉각 공정을 추가한 방법을 제안하였다[6].

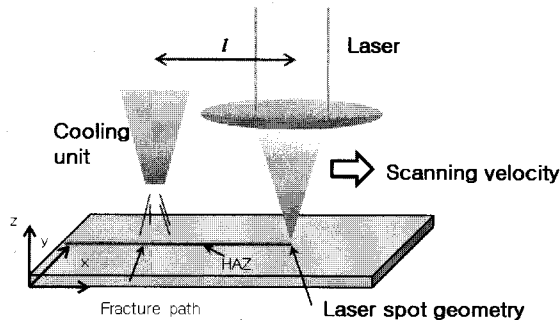


Fig. 1 Schematic of controlled thermal stress fracture method.

Fig. 1은 controlled thermal stress fracture method의 개념도이며 유리 절단 공정과 관련된 주요변수를 보여준다. 재료를 직선을 따라 절단한다고 가정하자. 다양한 모양의 레이저 빔을 시편위의 가상의 절단선을 따라 진행시키고 그 뒤로 냉각장치(물이나 공기와 같은 냉각유체의 분사)가 일정거리를 두고 레이저 빔을 따라간다. 일반적으로 균열은 냉각 지점에서 유발되고 레이저 진행속도와 비슷한 속도로 전파되어 재료의 절단이 일어난다. 수분사에 의한 급속 냉각은 균열의 생성 및 전파를 강화시키는 역할을 하므로 절단 공정의 효율을 증가시킨다. Kondratenko에 의해 수냉각 방법이 제안된 시점 이후 수행된 controlled fracture를 이용한 취성 재료의 절단공정에 관한 연구는 아래와 같이 정리할 수 있다.

Tsai 등은 레이저를 이용한 brittle material의 controlled fracture의 원리를 규명하고, 이를 바탕으로 LCD 유리절단 품질을 높이는 다양한 시도를 하였다[7-11]. Controlled fracture 방법에 의한 절단공정을 세단계로 나누고 각 단계의 특성 및 원리를 실험과 수치해석을 바탕으로 분석하였다 [7]. 1단계(Fracture Initiation)는 레이저 빔이 시편위를 출발하는 순간과 균열이 만들어지는 시간이다. Fig. 2에서와 같이 표면에 레이저 빔이 흡수되면서, 레이저 빔의 중심부에서는 압축응력이 분포하고 시간이 지남에 따라 압축응력이 인장응력으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 표면에서의 충분한 인장응력은 균열을 발생시키는 원인이 된다.

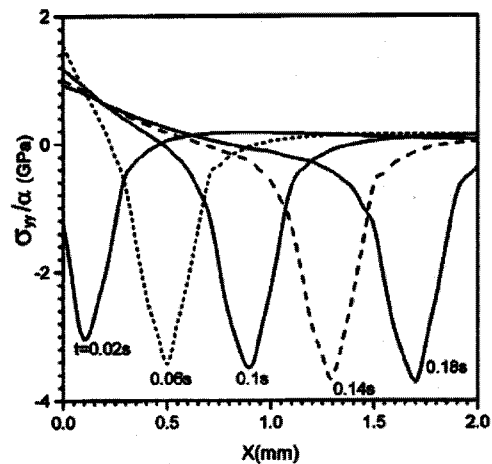


Fig. 2 Stress distribution of σ_{yy} for the stage I on the surface [7].

2단계(Stable Fracture Growth)는 안정적인 균열의 성장단계로서 1단계에서 생긴 균열이 절단방향을 따라 안정적으로 전파된다.

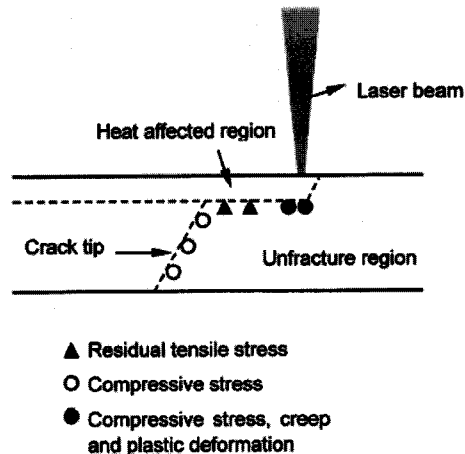


Fig. 3 Stress state between the crack tip and laser spot [7].

Fig. 3은 2단계에서 균열 tip과 레이저 빔 근처에서의 응력상태를 나타낸다. 레이저 빔의 뒤쪽에 분포한 인장응력은 균열이 위에서 아래로 전파하도록 해주고, 균열 tip에서의 인장응력으로 인하여 균열 tip이 안정적으로 전파될 수 있다. 균열이 시편의 가장자리에 근접하는 3단계에서는 2단계에서 균열 tip에 작용하던 압축응력이 인장응력으로 될 가능성이 있다. 따라서 균열의 전파는 불안정해져 의도치 않은 방향으로 시편이 절단되는 현상이 발생하기도 한다.

Tsai 그룹의 연구에서는 두꺼운 세라믹 재료를 절단하기 위하여 Nd:YAG 레이저와 CO₂ 레이저를 동시에 이용하는 방법도 제안하였다[8]. Nd:YAG 레이저와 CO₂ 레이저의 에너지가 각각 60, 44 W이고 두께가 10 mm, 너비가 27 mm인 시편 절단의 경우 최대 3 mm/s의 절단속도를 보였다. 시편의 너비가 좁아질수록 절단속도는 증가하였으며, 레이저 진행속도를 증가시킬 경우 깊이 방향으로의 균열이 일정하지 않아 절단면이 불안정해짐을 보였다. 2004년에는 반복적인 레이저 경로수정을 통하여 레이저 경로와 균열전파 경로의 차이를 줄이는 체계를 고안하였다[9]. 레이저 경

로가 직선과 곡선일 경우 균열에 의한 절단 경로는 레이저 경로와 일치하지 않는 경우가 빈번하게 발생한다. 이미지 센서와 컴퓨터 프로그램을 이용하여 경로를 계속 수정한 결과 보통 5번의 수정 후 희망하는 절단선과의 격차를 충분히 작은 범위로 수렴시킬 수 있었다. 또한 후속 연구에서는, LCD 유리를 레이저 controlled fracture 방식으로 절단하는 공정에서 유리에 굽힘응력을 가하여 절단면의 질을 향상시켰다[10]. 이 방법에서 사용된 굽힘 방법은 3 point bending이며 굽힘을 가하기 전후의 표면의 변위는 각각 0.18 mm, 0.43 mm 였다. 두 경우 모두 절단면의 조도는 차이가 거의 없었다. 2008년에는 LCD 유리절단을 위하여 다이아몬드 휠로 절단선을 그어 미리 균열을 생성시키고 균열 위에 레이저 빔을 가하여 controlled fracture 방식으로 완전히 절단하는 방법을 제안하였다[11]. 수치해석 결과, 표면에서의 인장응력이 다이아몬드 휠로 선을 긋지 않은 경우보다 두배 가량증가함을 보였다.

Segall 등은 두대의 레이저를 사용하여 원하지 않는 방향으로 절단되는 현상(premature fracture) 방지에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다[12-14].

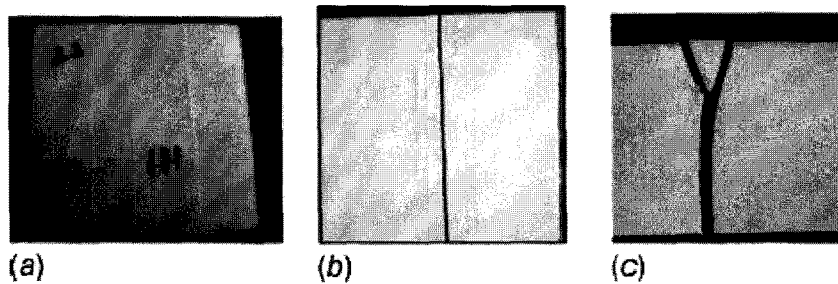


Fig. 4 (a) photographs of scribing, (b) controlled fracture, and (c) uncontrolled fracture [1].

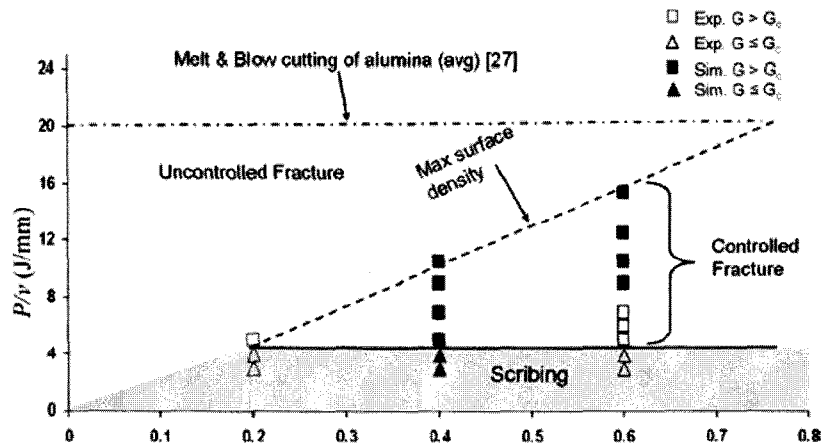


Fig. 5 Graph relating process parameters and fracture characteristics [1].

앞서가는 저출력 CO₂ 펄스 레이저가 재료의 표면에 얇은 균열을 유발하고(prescoring 레이저), 후속하는 고출력 CW CO₂ 레이저가 균열을 성장시켜 절단(cutting 레이저)하는 방식을 이용하여 alumina를 절단하였으며, 레이저 빔이 한 개인 경우와 비교하여 제안한 방법이 premature fracture의 발생 확률을 감소시킴을 보였다[12].

레이저 절단 가공 시 시편의 한 끝만 지지할 경우 지지되지 않는 쪽에중력이 작용하여 불량이 발생할 확률이 커진다. Akarapu등은 한 개의 레이저 빔을 이용한 alumina 절단공정에서 레이저 에너지를 조절하면서 절단 실패 확률을 낮추는 방법을 제안하였다[14]. 수치해석에 PIA criterion을 적용하여 절단이 진행되면서 파괴가 일어날 확률을 계산하였고, 레이저 에너지와 빔의 크기를 변화시키면서 파괴 확률을 낮출 수 있음을 보였다. 통상적인 조건에서 파괴가 일어날 확률이 99 %인 상황에서도 레이저 인자(레이저 에너지, 레이저 빔의 크기)를 잘 조정하면 파괴 확률을 10 % 이내까지도 감소시킬 수 있음을 보였다.

Kalyan-Sundaram 등은 CO₂ 레이저에 수냉각 장치를 결합한 가공장치를 자체적으로 설계(LWJ, Laser Water Jet)하고 alumina 절단공정의 여러 변수들과 절단면과의 관계를 이론적으로 분석하였다[15-18]. 취성 재료인 Polycrystalline cubic boron nitride의 절단에 있어 CO₂ 레이저에 물분사 장치를 결합한 결과 CO₂ 레이저와 산소 가스를 결합하여 절단할 때보다 절단속도는 느리지만, 열영향부가 감소되고 taper가 작아지는 등 표면 품질은 더 좋아지는 것으로 나타났다[15]. Barnes등은 alumina 절단에 수냉각 방식을 적용하였다[16]. 물로 냉각하여 절단하는 경우 그렇지 않은 경우 보다 같은 결과를 얻기 위하여 레이저 출력을 증가시켜야 하나 절단 공정을 제어하기는 쉽다는 사실을 확인하였다. 수치해석을 통하여 재료 표면의 시간에 따른 응력 변화를 관찰한 결과 대기 중 냉각으로 계속 압축응력만 작용하는 경우에도, 물로 냉각한 경우 압축응력이 인장응력으로 바뀐을 보였다.

Molian 등은 LWJ를 이용한 alumina 절단 품질을 정량적으로 분석하였다[18]. 표면 profilometer 측정 결과 수냉각을 이용한 경우 표면 조도가 확연하게 낮음을 보였다. 이들은 LWJ를 이용한 alumina의 절단 공정을 대상으로 공정변수와 절

단 결과의 상관 관계를 체계적으로 분석하였다 [1]. 구체적으로, 레이저와 노즐간 수평거리, 노즐 크기, 인가한 물의 압력, 레이저 출력, 진행속도, 빔 직경을 변화시키면서 절단결과를 분석하였다. Fig. 4는 절단 결과를 대표적인 유형별로 분류한 것이다. Fig. 5은 여러 공정변수와 절단결과와의 관계를 정리해서 나타낸 결과이다.

Kondratenko는 실험을 통하여 레이저 빔의 모양과 냉각부와의 거리 등 기하학적 변수와 균열의 깊이와의 관계를 규명하였다 [6]. 또한 2004년에는 다단계로 물을 분사함으로써 더 깊은 균열을 유발하는 방법을 제안하였고 이를 실험적으로 증명하였다[19]. 예를 들어, 0.7 mm 두께의 borosilicate 유리를 95 W의 CO₂ 레이저를 이용하여 절단하는 경우, 단일노즐을 사용하였을 때는 300 mm/s 이하의 절단속도를 얻을 수 있으나 5 단계의 냉각장치를 직렬로 배치하여 사용할 때 최대 절단 속도는 550 mm/s에 이른다.

Yamamoto 등은 레이저 유리의 laser scribing 공정에 관한 수치해석을 수행하여 레이저 출력, 빔 모양, 레이저와 물 분사 거리 등 여러 변수와 균열 깊이와의 관계를 조사하였다[20]. 균열의 깊이는 냉각부 표면의 최대 인장응력에 의해 결정되고, 레이저 빔과 냉각부 사이의 거리가 줄어들수록 표면의 최대 인장응력과 재료 내부의 최대 압축응력이 작아지고 최대 압축응력의 위치가 재료의 아랫면에 가까워짐을 보였다.

3. 요약

최근, 전자, 디스플레이, 반도체 등 여러 분야에서 광학적, 기계적 등의 성질이 우수한 유리와 세라믹 재료의 사용이 급증하고 있다. 이러한 취성 재료의 절단가공에 있어서 전통적인 기계적 방식은 미세균열로부터 자유로울 수 없다는 한계를 지닌다. 따라서 레이저로 열응력을 발생시켜 재료를 절단하는 controlled fracture 레이저 절단공정은 기존 공정을 대체하는 새로운 기술로 각광받고 있다. 따라서 controlled fracture에 대하여 많은 연구가 진행되고 왔으며 현재에도 다양한 새로운 공정이 개발되고 있다. 하지만 아직도 열응력에 의해 재료가 변형, 절단되는 물리적인 메커니즘이 명확히 규명되어 있지 않을 뿐 아니라 레이저 광원, 냉각방식 및 각종

공정변수가 절단 품질에 미치는 영향도 체계적으로 분석되지는 못한 실정이다. 따라서 보다 효과적인 공정개발을 위해서는 추후 더욱 심도 있고 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

Reference

- 1) Kalyanasundaram, D., Shrotriya, P., Molian, P., 2009, Obtaining a Relationship Between Process Parameters and Fracture Characteristics for Hybrid CO₂ Laser/Waterjet Machining of Ceramics, JOURNAL OF ENGINEERING MATERIALS AND TECHNOLOGY-TRANSACTIONS OF THE ASME, Vol. 131(1), 011005.
- 2) Kalyanasundaram, D., Shehata, G., Neumann, C., Shrotriya P., 2008, Design and validation of a hybrid laser/water-jet machining system for brittle materials, JOURNAL OF LASER APPLICATIONS, Vol. 20(2), pp. 127-134.
- 3) Garibotti, D. J., 1963, Dicing of Micro-semiconductors, U.S. Patent No. 3,112,850.
- 4) Lumely, R. M., 1969, Contolled Separation of Brittle Materials Using a Laser, Am. Ceram. Soc. Bull., pp. 850-854.
- 5) Grove, F. J., Wright, D. C., and Hamer, F. M., 1970, Cutting of Glass with a Laser Beam, U.S. Patent No. 3,543,979.
- 6) Kondratenko, V. S., 1997, Method of Splitting Non-metallic Materials, U.S. Patent 5,609,284.
- 7) Tsai, C. H., Liou, C. S., 2003, Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture, JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME, Vol. 125(3), pp. 519-528.
- 8) Tsai, C.H., Chen, H. W., 2003, Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique, JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, Vol. 136(1-3), pp. 166-173.
- 9) Tsai, C. H., Chen, C. J., 2004, Application of iterative path revision technique for laser cutting with controlled fracture, OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING, Vol. 41(1), pp. 189-204.
- 10) Tsai, C. H., Lin, B. C., 2007, Laser cutting with controlled fracture and pre-bending applied to LCD glass separation, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, Vol. 32(11-12), pp. 1155-1162.
- 11) Tsai, C. H., Huang, B. W., 2008, Diamond scribing and laser breaking for LCD glass substrates, JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, Vol. 198(1-3), pp. 350-358.
- 12) Segall A. E., Cai G., Akarapu R., Romasco A., Li B.Q., 2005, Fracture control of unsupported ceramics during laser machining using a simultaneous prescore, JOURNAL OF LASER APPLICATIONS, Vol. 17(1), pp. 57-62.
- 13) Segall, A. E., Cai, G., Akarapu, R., 2006, Studies on the use of offset and angled prescores for fracture control during laser machining of alumina ceramics, JOURNAL OF LASER APPLICATIONS, Vol. 18(4), pp. 325-329.
- 14) Akarapu, R., Segall, A.E., 2008, Active Stressing and the Micromanipulation of Stress-States for Delaying Fracture During Unsupported Laser Cutting, JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME, Vol. 130(6), 061004.
- 15) Kalyan-Sundaram, D., Wille, J., Shrotriya, P., Molian, P., 2008, CO₂ laser/waterjet cutting of polycrystalline cubic boron nitride, *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, Vol. 36, pp. 517-524.
- 16) Barnes, C., Shrotriya, P., Molian, P., 2007, Water-assisted laser thermal shock machining of alumina, INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS & MANUFACTURE, Vol. 47, pp. 1864-1874.
- 17) Kalyanasundaram, D., Shehata, G., Neumann, C., Shrotriya, P., 2008, Design and validation of a hybrid laser/water-jet machining system for brittle materials, JOURNAL OF LASER APPLICATIONS, Vol. 20(2), pp. 127-134.
- 18) Molian, R., Neumann, C., Shrotriya, P., Shrotriya, P., Molian, P., 2008, Novel laser/water-jet hybrid manufacturing process for cutting ceramics,

JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE
AND ENGINEERING-TRANSACTIONS OF
THE ASME, Vol. 130(3).

- 19) Kondratenko, V. S., 2004, Cutting Method for Brittle Non-metallic Materials, U.S. Patent 2004/0251290 A1.
- 20) Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., Ohmura E., 2008, Thermal stress analysis on laser scribing of glass, JOURNAL OF LASER APPLICATIONS, Vol. 20(4), pp. 193-200.



박병구

2009년 포항공과대학교 기계공학과 학사
2009년-현재 포항공과대학교 기계공학과 대학원 석사과정



김동식

1998년 UC Berkeley 기계공학 박사
1998년-2000년 UT Austin, 조교수
2000년-현재 포항공과대학교 기계공학과 교수