

레이저 응용 복합가공기술 동향

이제훈 · 서 정 · 신동식 · 김선원

한국기계연구원 정보장비연구센터

1. 서 론

최근 레이저의 적용분야는 열처리, 절단, 용접, 드릴링 그리고 마킹과 같은 산업분야에서 넓게 활용되기 시작하였다. 이는 정밀성, 공정의 유연성, 비접촉 가공 그리고 최소의 열영향부를 가지는 레이저 가공의 특징이 산업계에서 각광을 받았기 때문에 가능하였다. 또한 상기 장점은 기존의 공작기계에 접목되어 생산성을 향상시킬 수 있는 방안이 제시되고 있다^{1),2)}. 이와 같이 레이저 가공 기술과 기존의 기계 가공 기술이 상호 융합 보완된 형태를 레이저 응용 복합가공기술이라고 한다. 레이저 이외의 복합화 추세는 이미 공작기계분야에서 적용이 되기 시작했었다. 대표적인 분야가 선반과 밀링머신을 결합한 공작기계로서 한번의 세팅으로 복잡한 가공물을 정밀하고 경제적으로 제작할 수 있어 복합화에 대한 효용성은 이미 산업현장에서 검증된 바 있다^{3), 5)}.

본 논문에서는 최근 시작된 레이저와 공작기계의 복합가공기술에 대해서 다루고 있다. 레이저 가공기술이 공작기계에 본격적으로 접목이 되려면 고출력레이저 발전 기술, 광화이버 전송시스템 및 집속광학계의 설계기술 그리고 절단공구의 교환과 마찬가지로 광학계의 자동교환장치가 필수적으로 개발되어야 한다. 또한 기존의 공작기계에서는 난삭재로 분류되어 기계가공이 힘들었던 세라믹 및 고경도 금속과 같은 재료 또한 레이저 예열선삭 및 케이빙과 같은 공정의 개발이 필수적으로 이루어져야 한다. 이를 위해서는 선도기술의 현황을 파악하고 시행착오를 최소화하여 연구 개발에 임해야 된다. 이에 따라 본 논문에서는 상기 기술된 레이저 복합가공기술의 현황을 파악하고 향후 진행방향에 대하여 제시하고자 한다.

2. 레이저 복합 가공기의 필요성 및 적용분야

세계 공작기계 산업은 주로 자동차, 항공, 반도체 산업의 성장과 더불어 발전해 왔다. 즉, 자동차, 반도체, 항공 산업은 고객의 요구에 의해 끊임없이 또한 빠른 속도로 변화를 추구하므로 제품의 Life cycle 이 매우 짧아져가고 있는 실정이다. 이에 부응하여, 가공공정은 단납기 생산에 초점이 맞추어지게 되고 지금까지 단공정 작업을 벗어나 공정집약형 가공기인 복합가공기를 개발하게 되었다³⁾.

한편 레이저 빔을 이용한 가공이 산업전반에 걸쳐 급속히 확대되어가는 과정에서 레이저 빔이 가지고 있는 재료가공에서 우수한 특징으로 인하여 기존의 열처리, 용접, 금형의 표면가공 등에서 활발히 적용되고 있다. 이를 통하여 품질 및 신뢰성 그리고 생산성을 향상시키고 있다. 이는 기존의 공작기계와 레이저를 복합화하여야 할 필요성이 증대된다는 의미이기도 하다. 적용 가능한 레이저 복합 가공의 대표적인 예로서, 기존의 선반 공작기계와 레이저 빔을 복합화시킨 형태가 있으며 국부적 열처리(급냉처리 불필요), 마킹, 드릴링, 용접, 절단 그리고 그루빙 가공에 적용될 수 있다. 이는 절삭가공과 동시에 혹은 공작

물이 체결된 상태에서 연속적으로 공정이 진행되어 정밀도를 향상시키고 가공시간을 단축할 수 있는 장점이 있다(다단계공정을 한단계로 단축). 또한 절삭가공이 난해한 재질(텅스텐, 세라믹 등)의 가공시 가공부위를 레이저 빔으로 가열함으로써 절삭성(생산성) 및 정밀도를 획기적으로 개선하는 효과를 얻을 수 있다. 그림 1은 자동차 부품 및 세라믹 가공에서 종전의 기계가공 방법과 비교를 통하여 복합가공의 경제적 효과를 나타낸 것으로서 작업인원 및 기계대수를 획기적으로 줄일 수 있고, 특히, 세라믹 가공 시에도 50% 이상의 가공시간 단축이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

표 1은 레이저 공정이 기존의 절삭가공과 결합하여 이루어지는 복합가공의 예를 보여주고 있으며 레이저 전용가공분야를 포함하여 레이저가 기계가공을 보조하는 공정(supporting tool), 기존의 절단가공에 상응하는 공정(equivalent tool) 그리고 용접 및 열처리와 같이 기존의 머시닝센터에서 추가할 수 있는 공정(additional tool)으로 분류할 수 있다^{6,7)}.

(1) 기계가공을 보조하는 공정(supporting tool-Assisting process): 난삭재(세라믹, 초합금, 주물)를 절삭가공할 경우 칩성파괴의 영향으로 공구가 파괴되는 현상이 발생

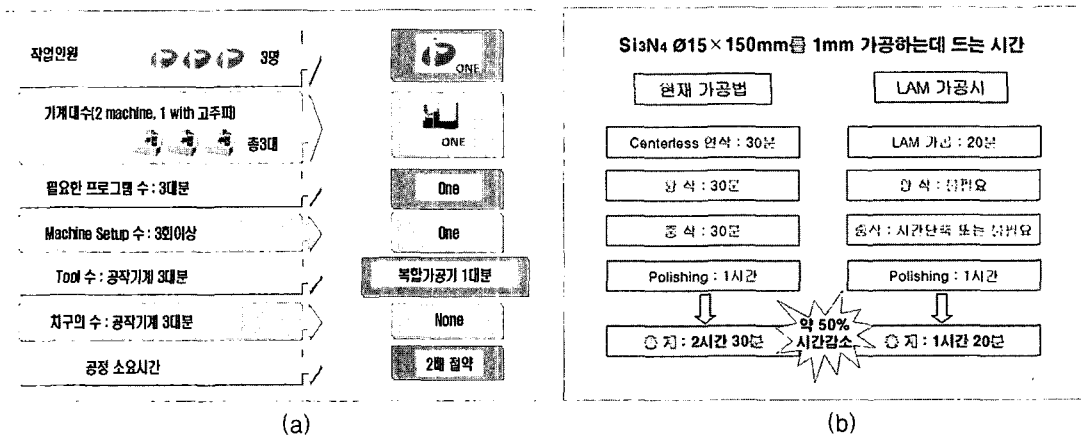


그림 1. 레이저 복합가공의 경제적효과 (a) 열처리공정, (b) 세라믹 예열적삭공정

표 1. 레이저가공이 적용 가능한 복합가공의 분야

Applications of lasers in manufacturing				
Laser-only process	Combination with cutting technologies			
	Supporting tool	Equivalent tool cutting	Addition tool Joining, surface T	
Cutting - Drilling - Cutting - Scribing - Trimming - Laser caving Joining - Welding - Soldering Surface treatment - Hardening - Remelting - Alloying - Caldding	Chip breaking Laser Assited Machning - High strength alloys - Castings - Ceramics	Extending possibility		
		Process	Material	Geometry
		Examples		
		Stamping and Cutting	Turning, milling and Laser caving, Welding, drilling, hardening	
			Grinding and hardening	

하는데 레이저의 예열효과를 이용하면 연성이 증가하고 취성파괴현상이 감소하며 가공효율이 증가하는 효과를 얻을 수 있다. 부가적으로 일반강재의 절삭에 있어서 연속적으로 배출되는 칩을 절단할(Chip breaking) 필요가 있는데 레이저를 이용한다면 비접촉식으로 절단이 가능하여 효과적이다.

(2) 기계가공에 상응하는 공정(equivalent tool-equivalent process): 레이저 가공기술은 기존의 기계가공으로 가능했던 공정까지 확장되고 있는데 대표적인 분야가 레이저 케이빙, 드릴링 및 절단과 같은 분야가 있다.

(3) 기계가공에 추가적으로 적용 가능한 공정(additional tool-enlargement of available technology): 용접 및 열처리 공정은 절삭 공정 후 연속적으로 적용이 가능하며 한번의 체결로서 가공이 가능하기 때문에 경제적 효과가 뛰어나고 정밀도도 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

표 2는 밀링, 선반가공과 같은 기계가공에 적용이 가능한 레이저 가공을 정리한 것으로서^{6,7)} 표 1에서 3가지로 분류된 레이저 복합가공공정이 적용될 경우의 기술적 특징에 대하여 보여주고 있다.

3. 레이저 복합가공기의 해외 개발동향

레이저 복합가공기를 개발하기 위해서는 공정기술, 시스템 통합기술 및 광제어기술 관련 연구가 필요하다. 이에 대한 대표적인 연구기관으로서 독일의 Stuttgart 대학 레이저 연구소(IFSW)가 있으며 선반기반 레이저 복합가공기를 이용하여 레이저 열처리, 클래딩, 용접, 및 디버링 등과 같은 가공공정에 대한 연구를 하고 있고 레이저 복합가공기 전용 가공헤드의 설계 및 제작에 앞선 기술을 보유하고 있다. 그림 2는 IFSW에서 설계/제작한 레이저 복합가공기의 가공헤드로서 기존의 공구 교환방법과 호환성을 가질 수 있게 설계되었다. 레이저 빔을 이송시키는 방법으로는 가공헤드의 측면으로 광 화이버를 접목시키는 방법과 주축과 동일한 방향으로 빔을 이송시키는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

표 3은 레이저와 기계가공용 공작기계와의 복합화가 적용된 복합가공시스템에 대한 국제 특허 현황이다. 주요 업체로서는 FANUC 및 Deckel Maho와 같은 공작기계 제작업체와 Daimler사와 같은 자동차 제

표 2. 레이저가 선반 또는 밀링가공기에 복합화되었을 경우의 기술적 특징

(●: 높음, ○: 중간, 빈칸: 낮음)

Laser process	Useful in		Process enhancement in			Simultaneous
	Turning	Milling	Technology	Materials	Geometry	
Equivalent process						
Drilling	●	●		●	●	●
Cutting	●	○		○	●	
Caving						
Trimming	●	●	○	●	●	●
Marking						
Enlargement of available technology						
Welding	●	●	●		●	○
Soldering			●		●	
Hardening	●	●	●		○	○
Remelting	○	○	●			
Alloying			●	○		
Caldding						
Assisting process						
Chip breaking	●		●	●		●
Laser Assisted machining	●	●	●	●		●

- a Additional tool support necessary
- b Additional material support necessary
- c Additional workpiece handling necessary

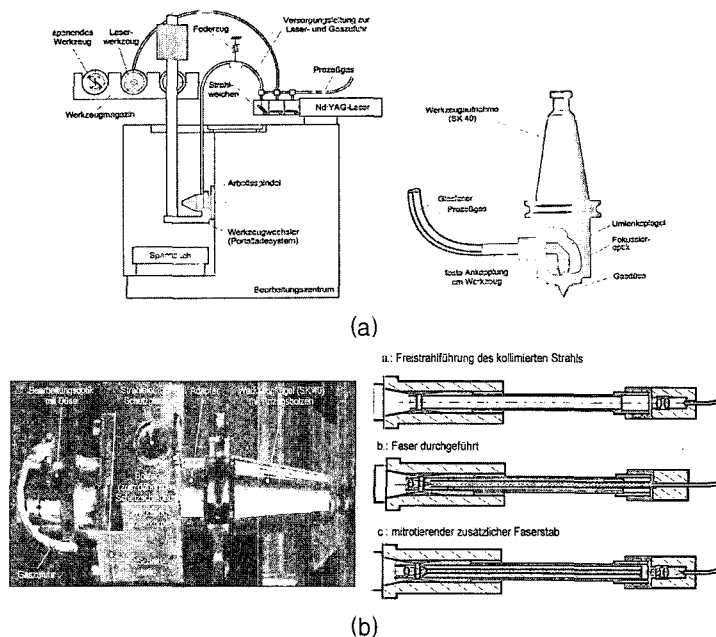


그림 2. 기존의 자동 공구 교환 장치에 적용된 빔 이송헤드의 예(IFSW): (a) 공구교환방식, (b) 공구체결방식

표 3. 레이저 복합가공기술관련 특허의 예^{8,9)}

No	등록번호 (출원번호)	등록일 (출원일)	출원인	발명의 명칭
1	특1993-0703887	1993.12.14	화낙	레이저 가공 가능한 복합형 공작기계
2	10-1997-0011964	1997.04.01	다이머크라이슬러	선삭공구에 의해 열처리 강제 공작물을 정밀 선삭하기 위한 방법 및 장치
3	US 6,666,630 B2	2003.12.23	DaimlerChrysler AG	Milling Machine and Milling Process
4	US 5,906,459	1999.05.25	Societe Nationale d'Etude Et de	Laser-Assisted Milling Process
5	US 5,859,405	1999.06.12	Daimler Benz	Cutting Tool Precision Turning Method and Apparatus for a Heat Treatable Steel Workpiece
6	US 5,160,824	1992.11.03	MAHO	Machine Tool for Laser-Beam Machining of Workpieces
13	US 2004/0104207 A1	2004.06.03	Jinn-Fa(TW)	Laser Assisted Maching and Devices
14	US 2002/0153358 A1	2002.10.24	Toshihiko Inou(JP)	Laser Beam Hardening Device
15	US 6,393,687 B1	2002.05.28	Deckel Maho GmbH	Machine Tool for The Processing of Workpieces with Cutting Tool and Laser Beam
16	US Des. 344,393	1994.03.08	Jeffrey W. Lawhorn	Laser Lathe

조사가 주류를 이루고 있다. 본 특허들의 주요내용은 레이저를 이용한 선삭, 밀링시의 보조가공 및 열처리분야의 복합가공 기술로 이루어져 있다.

이와 같은 특허기술이 지금까지 상용화되지 않고 있는 이유로서는 시스템 및 공정에 대한 연구가 충분히 이루어지지 않았기 때문이다. 그러나 최근 독일 IFSW, 독일 IPT(Institut Produktionstechnologie), 미국 Fraunhofer USA 그리고 IWS(Institut Werkstoff- und Strahltechnik)에서 예열효과 및 열처리공정에 대한 연구결과가 발표되고 있으며¹⁰⁾⁻¹²⁾ 미국 Purdue 대학의 신영철 교수팀은 CO₂레이저와 선반의 복합화에 대한 연구가 활발히 진행되기 시작하였다¹³⁾⁻²⁰⁾.

그림 3~7은 상기 설명된 레이저 복합가공을 다양한 연구기관에서 적용한 예를 보여주고 있다. 특히, 세라믹재료의 가공은 일반 절삭공구로서 가공이 불가능하고 공

업용 다이아몬드 휠을 이용하여 미소량으로 연삭가공해야 하는 단점을 보유하고 있는데 레이저의 예열효과를 겸비한 절삭공정은 가공의 효율성이 뛰어나 적용성이 뛰어난 것으로 판단된다. 이와 같은 레이저 예열선삭은 고온특성 및 열효율특성이 뛰어나며 경량화가 용이하나 가공을 위한 가격 경쟁력이 낮은 세라믹 브레이크 디스크 및 엔진 부품의 제작에 접목할 수 있는 대표적 기술로서 분류될 수 있다(<그림 8>, <그림 9> 참조)²¹⁾.

4. 한국기계연구원에서의 레이저 응용 복합가공 공정개발

국내의 레이저 복합가공시스템 및 공정에 관한 연구는 현재 한국기계연구원에서 수행하고 있으며 세라믹 예열선삭 및 강제

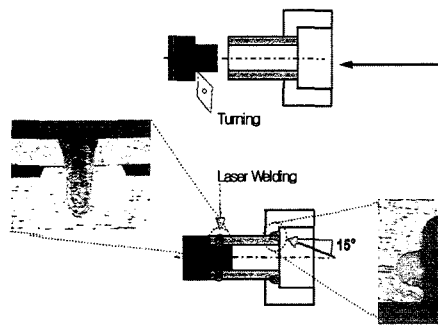


그림 3. 선삭공정과 레이저 용접이 결합된 예 (IFSW)

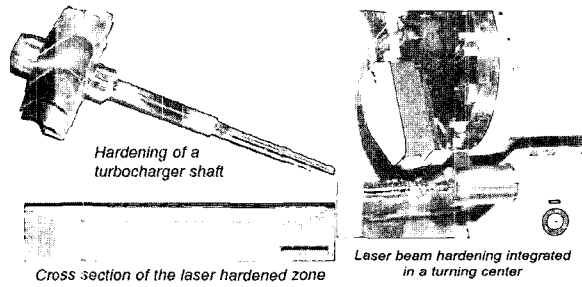


그림 4. 레이저 복합가공기를 이용한 표면열처리 기술(Fraunhofer USA)



그림 5. 엔드밀과 레이저 어블레이션이 결합된 레이저 복합가공기(Deckel Maho사)

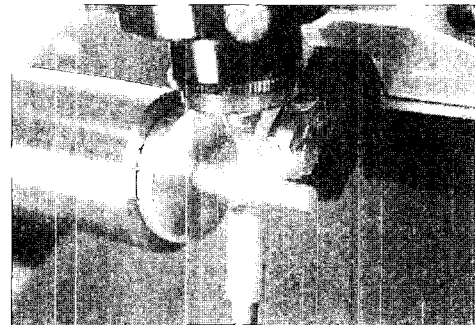


그림 6. 레이저 예열을 통한 세라믹의 선삭작업(Purdue Univ.)

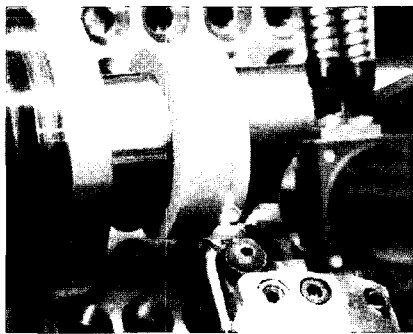


그림 7. 레이저로 예열하면서 선삭을 하는 장면(IPT)

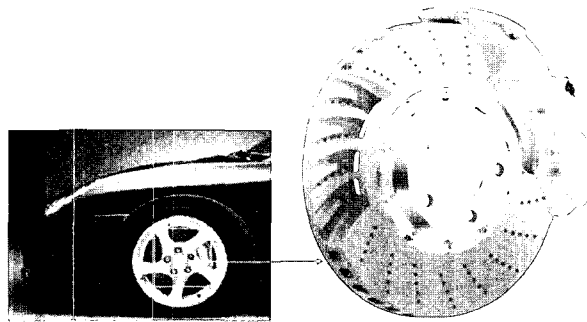


그림 8. 세라믹화가 진행되고 있는 브레이크 디스크

의 열처리 작업을 수행할 수 있는 레이저 복합가공기를 개발하고 있다. 핵심기술로서 레이저 복합가공기용 빔 이송 장치, 레이저 가공 핵심 모듈 등의 시스템기술과 세라믹 예열선삭 및 레이저 열처리 등의

이중 복합 공정 기술이 있다.

그림 10은 한국기계연구원에서 현재 개발 중인 레이저 복합가공 시스템을 도식화한 그림으로서 점선으로 표시된 광학모듈은 공구교환을 위한 리볼버의 회전과, 축

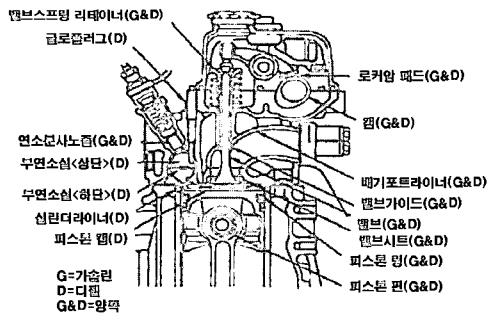
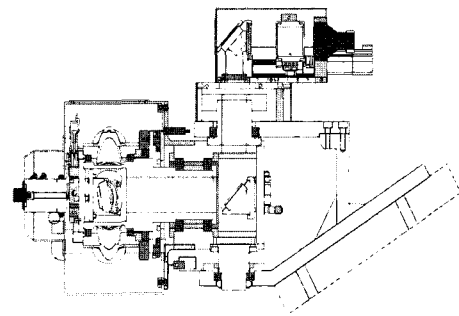


그림 9. 세라믹화가 검토되고 있는 자동차 엔진부품



(a)

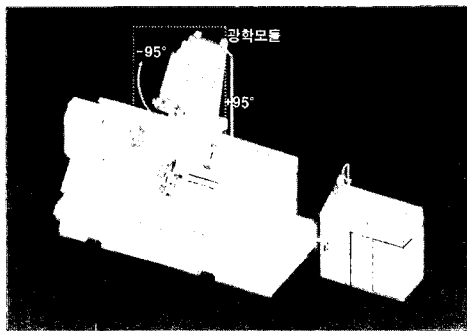
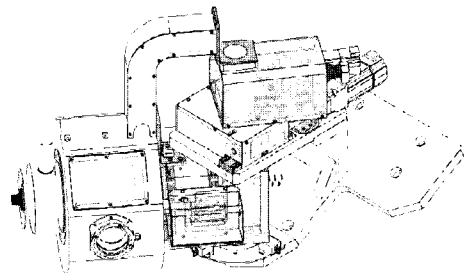


그림 10. 리볼버형 광학 모듈이 설치된 레이저 복합가공기



(b)

그림 11. 리볼버형 빔 이송 광학 모듈의 개념도 (a) 단면도, (b) 3차원 구성도

을 기준으로 $\pm 95^\circ$ 회전이 가능하여 가공시 레이저 빔의 기울임 각을 제어할 수 있는 기능을 가진다. 또한, 광화이버를 통하여 광학모듈에 조사되는 레이저 빔은 광파이버를 통하여 광학모듈에 전달되어 콜리메이션 렌즈를 지나 3번의 밴딩미러와 가공헤드에서의 집속을 통하여 재료표면에 조사되어진다. 이와 같은 빔의 이송 및 기구부는 그림 11에서의 개념설계 모델을 바탕으로 제작되었으며 그림 12와 같이 시작품으로 완성될 수 있었다. 본 광학모듈의 구성방식은 리볼버식으로서 착탈의 공정이 필요가 없기 때문에 기존의 빔이송헤드(<그림 2> 참조)에서 발생이 가능한 문제점인 레이저 빔 이송용 광화이버의 혼선 및 착탈시 충격력에 의한 광학계 손상 등을 제거할 수 있는 대안이다. 본 시스템은

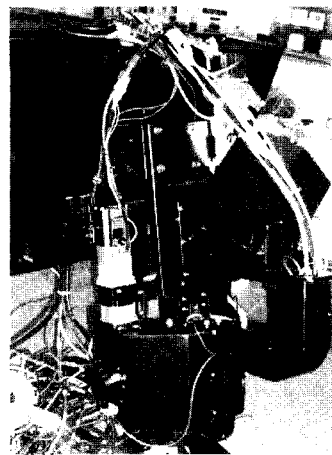


그림 12. 제작중인 리볼버형 광학모듈 (한국기계연구원)

한국기계연구원에서 특허출원 및 등록을 마쳤으며^{22,23)} 표 3에서 제시된 해외 특허에 대응할 수 있는 국내 기술로서 향후 기술

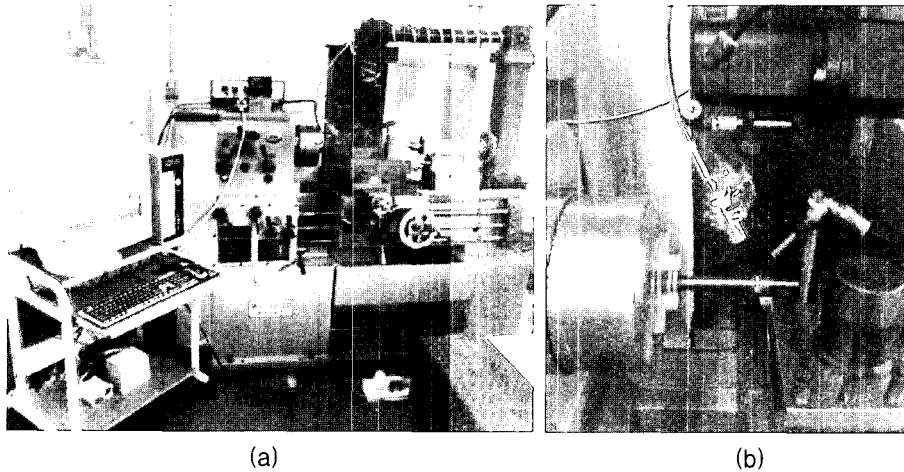


그림 13. 이종복합공정 연구를 위한 (a)온도제어 시스템 및 (b)실험장면

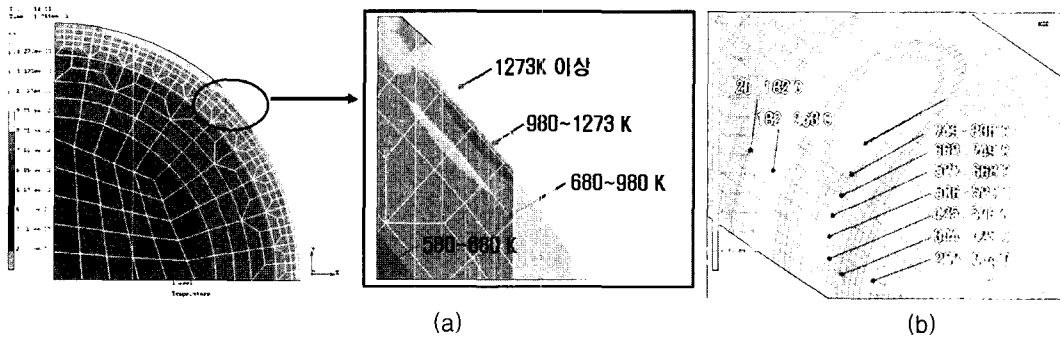


그림 14. 이종복합공정 시뮬레이션: (a)세라믹의 예열효과 (b)탄소강의 열처리

선점을 통해서 시장을 보호할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 13은 가공물의 온도 측정 및 표면 온도의 제어를 위한 시스템을 보여주고 있다. 세라믹 가공 시 표면온도는 최고 2000°C 가까이 도달하므로 고온계(pyrometer)는 온도범위가 넓은 독일 Kleiber 사의 KGAF 730 모델(300-2300°C)이 선정되었다. 또한 보조가스의 유량을 조절하여 가공물의 온도를 제어할 수 있는 유량 조절계(SIERRA 사: Smart-Trak 100)를 사용하였다. 유량 조절 범위는 2-200 l/min이고, 기체는 공기, 산소, 질소 및 아르곤 등 실험 시 사용할 수 있는 모든 가스가 적용이 가능하게 설정하였다. 본 온도제어시스템 및 가공시

스템은 열처리 및 세라믹 예열선삭시의 온도를 측정하고 이를 기반으로 한 데이터베이스를 구축하기 위해 필요한 장치이다. 본 장치를 이용하여 측정된 데이터는 재료 반응 시뮬레이션 결과와의 비교를 통하여 공정변수의 선정 시 적용되었다. 이와 같이 가스를 이용하여 세라믹 예열선삭 및 강재의 열처리를 위한 온도 제어공정은 리볼버형 광학모듈과 마찬가지로 국내 특허를 등록하였다²⁴⁾.

그림 14는 레이저를 이용한 세라믹의 예열 및 강재의 열처리시 재료에 발생하는 열분포를 해석한 결과이다. 이러한 결과는 세라믹의 적정 예열선삭온도인 1200°C 및 탄소강의 열처리온도 조건인 830°C 이상의

공정조건을 도출하기 위한 공정변수를 설정하는데 활용되어 진다. 이와 같은 재료 반응에 관한 연구는 레이저 복합가공기의 공정소프트웨어에 데이터베이스를 구축함으로써 공정최적화를 위한 시행착오를 최소화하여 품질향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

5. 결 론

공작기계의 차세대 시장은 복합 가공화로 예측되고 있으며 일부에서는 이미 진행되고 있다. 이러한 복합화 추세는 최근의 시장 환경 변화에 따라 더욱 더 다양하게 진행될 전망이다. 기존의 기계 가공작업에서 생산성이 한계에 도달함에 따라 조립 부품수를 줄이기 위한 노력이 진행되었다. 역으로 일반 소비자의 기호가 다양해짐에 따라 단위 부품의 형상은 더욱 복잡해지고 이를 위한 소량 생산시스템이 개발되기 시작하였다. 그러나 시스템의 상용화는 아직 시작단계에 불과하므로 집중적인 연구개발을 통하여 레이저 복합가공기를 국산화하면 세계시장에서의 국제 경쟁력을 충분히 확보할 수 있다고 판단된다. 이에 대비하여 한국기계연구원은 복합가공시스템 및 공정에 관한 연구를 진행하고 있으며 레이저와 머시닝센터가 결합된 레이저복합가공기의 설계 및 제작기술을 개발하고 있다.

이와 같은 레이저와 기계가공을 이용한 복합가공기술은 난삭재 가공 기술의 전문 인력을 양성하고, 자동차, 반도체, 전기 절연재, 조선, 정밀기계 등 주요 산업분야의 기술 발전을 가져 올 수 있을 것이며, 제품의 품질 및 신뢰성을 높이는 핵심 기술로 자리잡을 것이다. 이러한 복합 가공 기술은 레이저 시장 뿐 아니라 공작기계 시장을 활성화 시킬 수 있을 것이고, 기존의

가공방법으로 불가능 하였던 난삭재의 가공을 가능하게 함으로서 재료선정의 폭을 크게 확대시킬 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역산업기술 개발 사업인 “레이저 복합가공기 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김도훈, “레이저 가공학”, 경문사, 2005.
2. 박성두, “레이저 가공”. 대광서림, 1998.
3. “복합가공기 시대로의 시장 변화” 월간 공작기계(통권128호), 2003.
4. “과학기술예측조사(2000-2025)”, KISTEP, 1999.
5. “레이저 가공기술의 최신동향”, 월간 자동화기술, 2004.5.
6. H. Hügel, M. Wiedmaier and T. Rudlaff, “Laser processing integrated into machine tools-design, applications, economy”, *Optical and Quantum Electronics* Vol. 27, pp. 1149-1164, 1995
7. Klaus Krastel and Jan Drechsel, “Integration of laser processing in machine tools and their economy”, *SPIE* Vol. 3613, pp. 65-74, 1999.
8. <http://www.uspto.gov/patft/index.html>
9. <http://www.kipris.or.kr>
10. <http://www.ipt.fraunhofer.de>
11. <http://www.fraunhofer.org>
12. <http://www.iws.fraunhofer.de>
13. <http://widget.ecn.purdue.edu/~lampl>
14. Frank E. Pfefferkorn, Yung C. Shin, and Yinggang Tian, “Laser-Assisted Machining of Magnesia-Partially-

- Stabilized Zirconia”, Transactions of the ASME, Vol. 126, pp. 42-51, 2004.2.
15. Stuart Barnes, Richard Morgan, Andrew Skeen, “Effect of Laser Pre-Treatment on the Machining Performance of Aluminum/SiC MMC”, Transactions of the ASME. Vol. 125, pp. 378-384, 2003.10.
 16. Patrick A. Rebro, Yung C. Shin, Frank P. Incropera, “Design of operating conditions for crackfree laser-assisted machining of mullite”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, pp. 677 - 694, 2004.
 17. Kelly Armitage, Syed Masood, Milan Brandt, “Laser Assisted Machining of Hard-to-Wear Materials”, “Magnesia-Partially-Stabilized Zirconia”, Transactions of the ASME, Vol. 126, pp. 42-51, 2004.2.
 18. Shuting Lei, Yung C. Shin, Frank P. Incropera, “Deformation mechanisms and constitutive modeling for silicon nitride undergoing laser-assisted machining”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, pp. 2213-2233, 2000.
 19. C. Zhang, Y.C. Shin, “A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, pp. 825-835, 2000.
 20. Chunhe Zhang, Yung C. Shin, “Wear of diamond dresser in laser assisted truing and dressing of vitrified CBN wheels”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, pp. 41-49, 2003.
 21. “자동차엔진용 세라믹스”, 한국기술기
 22. 이제훈, 서정, 신동식, “공작기계의 레이저 가공을 위한 장치”, 특허등록: 0597906, 2006.
 23. 이제훈, 서정, 신동식, “레이저 빔을 이용하여 공작물을 가공하기 위한 장치”, 특허출원: 10-2005-0088576, 2006.
 24. 이제훈, 서정, 신동식, “레이저빔을 이용한 공작물 가공장치 및 가공방법”, 특허등록: 0597907, 2006.