

초고속/대면적 레이저 가공을 위한 핵심요소 기술

이재훈, 김경한 | 한국기계연구원

[요약문]

초고속 레이저 가공을 위한 스캐너 장비와 초정밀/대면적 가공을 위한 스테이지 시스템을 동기화함으로써 가공의 정밀도를 보장하고 대면적 가공 분야에 적용할 수 있는 핵심요소 기술을 소개하였다. 스캐너-스테이지 동기화를 위한 핵심요소 기술인 두 시스템 사이의 하드웨어적 동기 기술 및 스캐너-스테이지의 가공 경로 분할을 위한 연동 알고리즘 기술에 대한 내용을 수록하였다.

1. 서론

최근 레이저 소스 개발 및 레이저 펄스폭이 초단파 됨에 따라 초정밀 가공이 가능해지고 있다^[1]. 레이저 가공 공정의 적용 분야가 확대되고 있으며 태양전지 분야, 디스플레이 분야, 전자부품, 자동차 산업에 폭넓게 적용되고 있다^[2-5]. 본 산업군의 발전동향은 단납기화(초고속화), 대면적화, 초정밀화, 환경문제를 고려해 전식화 되고 있다^[6]. 산업 발전 동향에서 보듯 초정밀화를 요구하며 동시에 대면적화를 요구하는 상반된 기술 경향을 보이고 있다. 그림 1에서 보여 주듯이 초고속 스캐너 가공 영역은 50×50mm 정도로 한정되어 있는 시스템에서는 스캐너 영역 초과되는 영역의 스테이지를 이송시키면서 가공하면 된다. 기존의 방식은 Step & Scanning 시스템으로 스테이지의 이송/정지를 반복하면서 스캐너 가공을 한다. 스캐너-스테이지 연동 시스템(Scanner-stage on the fly)은 스테이지의 정지 없이 연속적으로 가공하는 것이다. 고속 스캐너와 정밀/대면적 스테이지를 동기화해 정밀도를 유지하면서 대면적 가공이 가능한 기술로써 연동 시스템 적용시 가공속도가 극대화되며 가공의 불연속 부위가 없어져서 가공 품질의 향상을 가져 올수 있다.

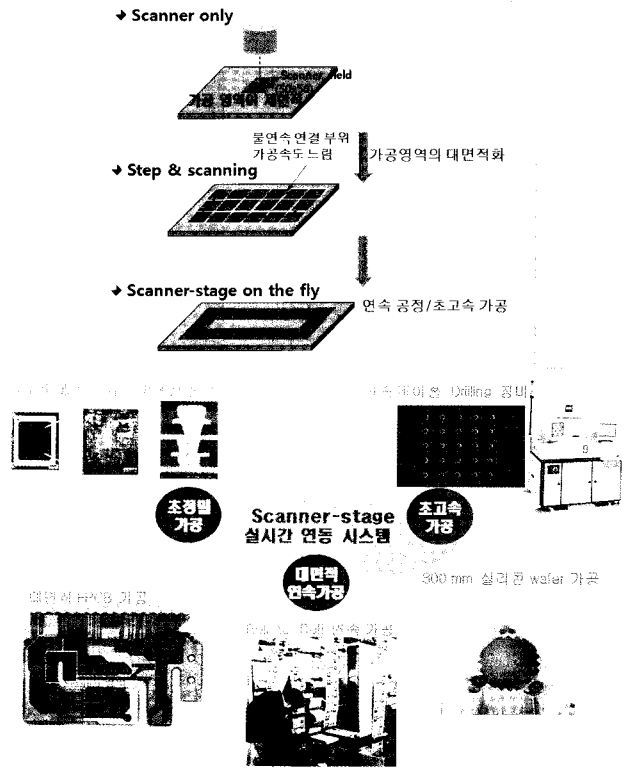


그림 1. 스캐너-스테이지 연동 시스템의 발전(상) 및 응용 가능 분야(하)

2. 국내외 기술개발 및 연구동향

스캐너-스테이지 연동을 위한 스캐너 보드를 제작/판매하는 업체로서는 독일의 SCANLAB사가 있으며 RTC4 스캐너 제어 보드에서 on the fly, 즉 연동기능을 지원해 왔다. 최근 RTC5 보드가 개발되어 20-bit 제어신호를 처리할 수 있어 기존 16-bit 보드보다 16 배의공간 분해능이 향상되었다. 독일의 RAYLASE사 역시 스캐너-스테이지 연동이 가능한 인터페이스 모듈(MOTF, Marking on the fly)이 있는 스캐너 보드를 개발하였다. 하지만 개발된 스캐너 보드의 주 응용분야는 LCD 패널등의 대면적 전자부품에 레이저 마킹을 위한 것으로 1축의 컨베이어 스테이지에 제품을 이송하며 제품 일련 넘버, 시각등 표식의 목적에 국한되어 왔다.

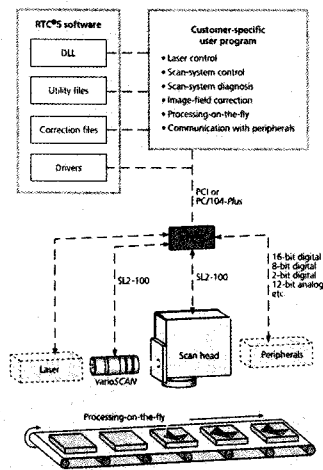


그림 2. 최근 시판되는 연동을 위한 RTC5 보드 및 스캐너 시스템 개략도

스캐너-스테이지 연동 레이저 가공 장비는 미국의 ESI사에서(Electro Scientific Industries) 마이크로급 비아홀 드릴링 및 PCB 절단에 최초로 적용하였다. ESI사는 마이크로 엔지니어링 분야의 제품 제조를 위한 레이저 시스템을 공급하는 회사로서 스캐너-스테이지 하드웨어 동기 기술과 연동 알고리즘에 독보적인 기술을 보유하고 있다. ESI사의 연동 가능 UV 레이저 드릴링 시스템인 HDI5330는 전체 스테이지 533 mm×635mm 영역에서 $\pm 20\mu\text{m}$ 정밀도를 보장하며 최고 500mm/s로 가공이 가능하다.

최근에는 미국의 Aerotech사 스캐너-스테이지 연동기술을 레이저가공에 도입했다. 그림 3에 보이듯이 가공 부위가 스캐너 영역을 넘어서는 경우도 가공이 가능한 시스템이다. 그리고 가공경로를 미리 계산하여 최적화하는 알고리즘을 도입하였다.

독일 LPKF사에서도 최근 MicroLine 6000 모델을 출시하여 Coverlayer, PCB와 FPC 절단에 적용하였다. 작업 면적은 ESI사 제품과 유사하게 533 mm×610mm 이고 정밀도 또한 $\pm 20\mu\text{m}$ 이내이다. LPKF사에서 제공하는 연동 알고리즘 관련 소프트웨어는 LPKFCAM 이며 최적 가공 경로를 생성하여 20% 라우팅 시간을 절감하는 효과를 보여주었다.

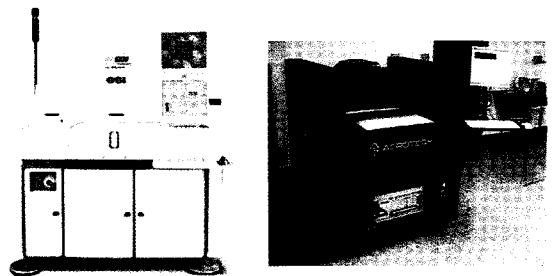


그림 3. 스캐너-스테이지 연동 가공 장비:
(좌)ESI사와 (우)Aerotech사

국내에서는 스캐너를 이용한 레이저 용접에 연동개념을 적용하여 왔다. 자동차 산업에서 1999년도 TWB 레이저 용접기술이 도입되어 자동차 DOOR INNER 양산에 적용되었고, 2001년도 TWB 레이저 용접 시스템 국산화 개발 및 동년 Nd:YAG 레이저를 이용한 레이저용접기술이 차체조립 라인에 적용되었다. 자동차 부품 메이커인 성우하이텍에서는 차체 부품에 레이저 용접 기술을 적용하여 2006년 5월 신차에 적용하였다. 그러나 자동차 용접에서는 초정밀을 요구하지 않아서 기존의 연동 기술로는 레이저 초정밀 절단 및 드릴링 공정에 사용할 수 없었다. 다수의 FPC/PCB 생산 업체들은 미국의 ESI장비를 구입하여 공정에 사용하고 있으며 국내에서 개발 수요가 늘어나는 현실이나 본격적인 연구는 전무한 상태였다. 2009년 산업원천 기술개발 사업에서 “신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공 시스템 개발”로 스캐너-스테이지 연동 가공 시스템에 대한 핵심 기술 개발이 시작되었다.

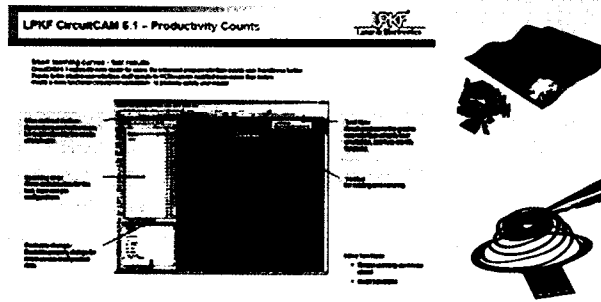


그림 4. LPKF사의 최적경로생성 소프트웨어(좌) 및 FPCB 절단제품(우)

3. 연구개발 현황

한국기계연구원에서는 초고속/대면적 레이저 가공을 위한 핵심요소 기술 개발을 수행하고 있으며, 최종목표 연동 정밀도 $\pm 15\mu\text{m}$, 연속가공면적 $650\text{mm} \times 650\text{mm}$ 및 가공속도 라우팅 기준으로 450mm/s 인 연동 장비를 개발하는 것이다. 핵심요소 기술은 크게 스캐너-스테이지 연동을 위한 스테이지 최적경로생성 알고리즘 개발과 스캐너와 스테이지를 하드웨어적으로 동기화 하는 기술 개발이다. 그림 5에서는 개략적인 연동 시스템 구성 및 제어 블록 선도를 보여주고 있다.

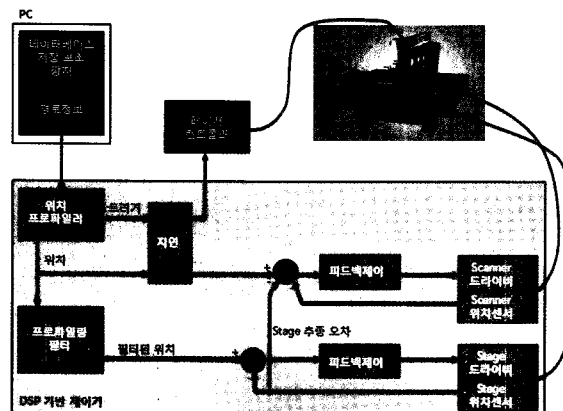


그림 5. 스캐너-스테이지 연동을 위한 제어블록선도



3.1 최적경로생성 알고리즘 개발

최적경로생성은 레이저 연동 레이저를 구동하기 위해서 스테이지의 경로를 계산하여 스캐너-스테이지 모두 최적의 가공 경로를 갖게 되어 궁극적으로 최적의 가공 품질 및 속도를 보장하게 된다. 이때 스테이지의 경로는 주축으로써 가공도면을 단순화한 경로가 되며 미세한 가공 부위는 스캐너가 주로 담당하게 된다. 예로 그림 6에서 프리마사의 가공 경로 생성 예를 보여 주는데, main axes 부위는 스테이지가 이송경로이고, local axes 부위는 스테이지 가공 경로이다.

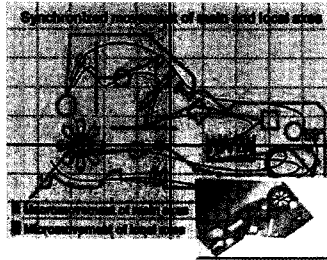


그림 6. 프리마사의 최적경로 생성의 예

최적경로생성 알고리즘을 위해서는 그림 7과 같이 가공도면에서 스테이지의 경로를 생성하게 되는데, 스테이지의 가공경로를 최소화하면서 가감속을 최소화하는 방향으로 최적화 하는 알고리즘을 채택한다. 이때 스캐너의 가공 영역이 가공도면을 포함할 수 있는 구속조건으로 가지고 있다. 또한, 가공 품질의 향상을 위해서 정속의 가공속도를 유지함으로써 가공시편에 단위시간당 레이저 에너지 조사량을 일정하게 하는 것이 핵심기술이다. 그림 7은 가공경로를 스테이지와 스캐너 경로로 분기하는 예이다. 스테이지 경로 생성시 가공경로가 스캐너 영역에 포함됨을 보여준다. 또한, 스캐너 끝부분에서 왜곡을 방지하기 위해 스캐너 중심에서 가공이 되도록 하는 것이 가공 품질에 도움을 줄 것이다. 스캐너 제어보드에서는 스테이지의 위치/속도 정보를 입력 받아서 원래 도면과의 차를 계산해서 스캐너 이송 지령을 주며 그림 7(우)과 같은 양이 될 것이다.

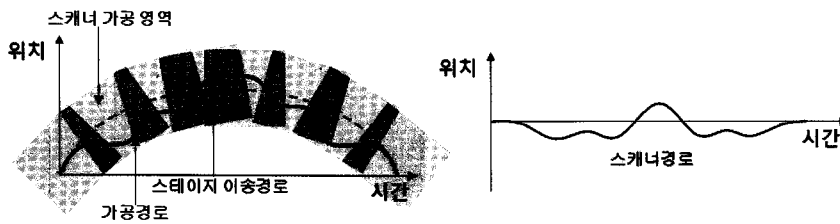


그림 7. 스테이지 경로 생성 개략도(좌) 및 스캐너 경로 생성 개략도(우)

그림 8에서는 두가지의 스테이지 경로를 비교한 결과이다. 스테이지 이송경로를 1에서 2로 변환시켰을시 스테이지의 이송량이 줄어 스테이지의 로드는 줄 것이다. 하지만 스테이지의 가감속 시간이 감소하여 다소 스테이지에 무리가 있음을 예측할 수 있다. 또한, 가공영역이 스캐너의 중심에서 벗어날수록 가공 품질에 문제가 발생할 수 있다. 그림 8(우)은 스테이지 경로가 변할시 스캐너의 속도(v_{sc}) 변화를 예측한 그래프로 수식 1과 같이 가공속도(v_{la})가 일정해야 한다. 즉, 가공속도를 일정하게 하기 위해서 스캐너가 스테이지 속도를 보상하는 방식을 선택하였다.

$$V_{st,1} + V_{sc,1} = V_{st,2} + V_{sc,2} = V_{fa} = const. \quad (\text{수식 1})$$

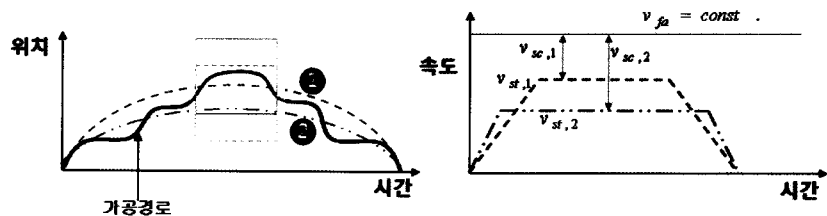


그림 8. 스테이지 경로에 따른 속도 변화(좌) 및 스캐너-스테이지 속도 관계도(우)

향후 최적경로생성을 위한 알고리즘 개발은 스테이지 경로가 최적화 되어 자동으로 생성되고 시뮬레이터 개발을 통해 검증될 예정이다. 시뮬레이터에서는 스테이지 및 스캐너 위치가 시뮬레이션 되며 스테이지 속도와 가속도가 화면에 출력되어 스테이지 기계 한계를 넘지 않음이 검증될 것이다. 그림 9는 대략적인 최적경로생성을 위한 알고리즘 개발 및 소프트웨어 순서도이다. DWG 또는 DXF 의 파일의 CAD 데이터를 입력받아 경로생성을 위한 인터페이스를 조정후 스테이지 최적/최단 경로 생성 데이터를 생성하고 시뮬레이션으로 검증한다. 최종적으로 검증된 스테이지 경로 데이터를 machine에 입력하게 된다.

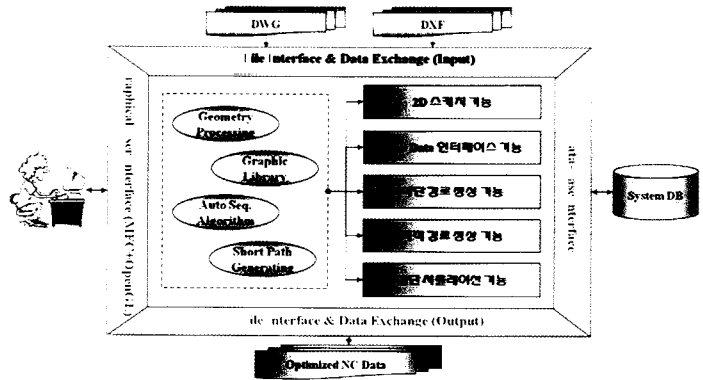


그림 9. 연동알고리즘 구현을 위한 소프트웨어 개발 개략도

3.2 스캐너-스테이지 동기화 기술

스캐너와 스테이지 동기화를 위해서 하드웨어적 방법으로 스테이지의 위치/속도 정보를 엔코더 신호를 통해 스캐너 보드에 입력하는 방식을 취하였다. 연동 제어 보드는 크게 스테이지의 모션을 제어하는 모션보드, 스테이지-스캐너 보드 인터페이스를 위한 MOTF (Marking on the Fly) 보드와 스캐너 제어보드로 구성되어 있다. 그림 10은 스캐너-스테이지 연동을 통한 가공의 예시 및 각 제어기의 역할을 설명하였다. P₁에서 P₂경로로 가공시 스테이지의 시간과 위치정보가 모션보드를 통해 지령한다. MOTF 보드에서 스테이지의 변화량과 스테이지 이송 방향을 계산하고 스캐너 보드에 지령하며 스캐너 보드에서 원래의 가공 목표치와 입력된 지령을 차감하여 스캐너 위치 지령을 한다. 이때 발생하는 동기오차는 스캐너 보드에서 입출력되는 신호의 주기에 따라 결정된다. 예를 들어 30μs 마다 스캐너의 위치 정보를 보상한다면 발생할 수 있는 연동 오차는 다음과 같은 식으로 예상할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{연동오차} &= 30\mu\text{s}(\text{동기오차}) \times 0.1\mu\text{m}(\text{스테이지 분해능}) \times 300\text{mm/s}(\text{스테이지 속도}) \\ &= 9\mu\text{m} \end{aligned} \quad (\text{수식 2})$$

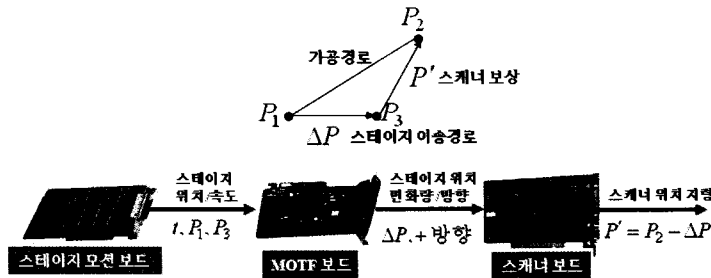


그림 10. 스캐너-스테이지 연동을 위한 제어보드 및 역할

즉, 스캐너-스테이지에 의한 연동 오차는 스캐너 입출력 신호주기에 의해서 항상 존재하는데, 스캐너보드의 CPU 를 고성능화하면 연동오차를 감소시킬 수 있다. 최근에는 스캐너의 온도 변화 등에 따른 오차를 보상하기 위한 closed loop 스캐너 시스템이 개발되어 정밀도를 높이고 있다. 차후 연동 시스템 구축 후 여러 가지 오차 요인들을 도출하여 오차보상 알고리즘도 개발할 예정이다.

3.3 1축 스테이지- 2축 스캐너 연동 플랫폼

제작된 연동 제어보드 및 레이저, 스테이지, 주변기기들을 조합하여 1축 스테이지-2축 스캐너 연동 플랫폼을 제작하였다. 레이저는 IPG사의 1064nm, 30ns 펄스폭, 12W 파이버 레이저를 사용하고, 스테이지는 다사로봇사의 400mm stroke, 최고속도 500mm/s, 정밀도 5 μ m의 리니어 스테이지를 사용하였다. 스캐너는 10mm 구경, 100mm 초점거리인 CTI사 제품을 사용하였다. 현재 플랫폼이 완성되어 기초 연동 실험을 수행하고 있으며 연동 알고리즘 고성능화 연구도 병행하고 있다.

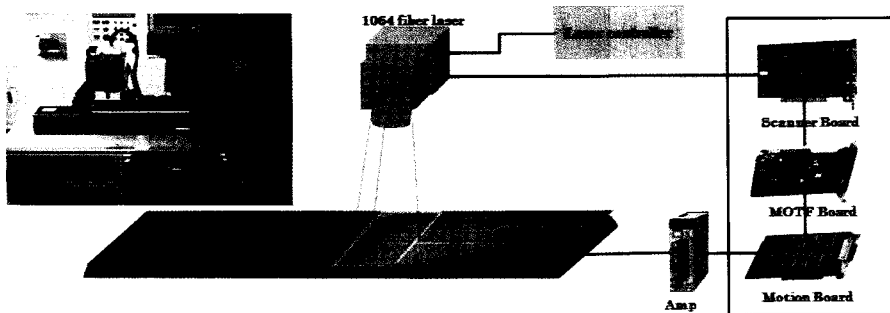


그림 11. 1축 스테이지-2축 스캐너 연동 플랫폼 사진 및 구성도

4. 결 론

초고속 레이저 가공을 위한 스캐너 장비와 초정밀/대면적 가공을 위한 스테이지 시스템 동기화를 위한 핵심 기술에 대해서 논의하였다. 연동을 위한 최적 경로를 생성하기 위한 알고리즘 개발을 위해서 스테이지의 최단경로 이송과 가속을 최소화하는 것을 목표로 하고 있다. 가공품질 보장을 위해서 스캐너의 중심부 근처에서 가공되도록 알고리즘을 개발하고 있으며 정속의 가공속도를 목표로 하고 있다. 스캐너-스테이지 동기화를 위한 하드웨어를 제작/구성 했으며 연동오차에 대한 연구도 병행하여 수행하고 있다. 또한, 1축 스테이지-2축 스캐너 연동 플랫폼을 제작

하여 연동 기초 수행을 하고 있다.

✻ 참고 문헌

- [1] S. Nikumb, Q. Chen, C. Li, H. Reshef, H. Y. Zheng, H. Qiu and D. Low, Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers, Thin Solid Films Vol. 477, pp.216-221, 2007
- [2] T. Kim, S. Park, H. Oh, and Y. Shin, Analysis of the laser patterning inside light guide panel, Optics & Laser Technology 39, pp.1437-1442, 2007.
- [3] D. Kyeong, M. Gunasekaran, K. Kim, and J. Yi, Laser edge isolation for high-efficiency crystalline silicon solar cells, Journal of Korean physical society, Vol. 55, pp.124-128, 2009.
- [4] Schmidt M., Eber G., The future of lasers in electronics, Proceedings of ICALEO, 2003.
- [5] 강희신, 서정, 조택동, 로봇 기반 원격 레이저 용접에 관한 연구, Journal of korean society of laser processing, Vol. 11, pp.21-27, 2008.
- [6] 서정, 이제훈, 신동식, 고속레이저 가공 및 핵심기술 동향, 기계와 재료, 21권, pp. 146-155, 2009.



이 제 훈

- 한국기계연구원 나노융합생산시스템 연구본부
광응용생산기계연구실 책임연구원
- 관심분야 : 레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및
시스템
- E-mail : jaeholee@kimm.re.kr



김 경 한

- 한국기계연구원 나노융합생산시스템 연구본부
광응용생산기계연구실 선임연구원
- 관심분야 : 레이저 시스템 및 초단파 레이저
바이오 응용
- E-mail : khkim@kimm.re.kr