

AE센서를 이용한 레이저 용융 절단 모니터링

민현식⁺, 이성환*, 안선웅⁺⁺

(논문접수일 2001. 12. 28, 심사완료일 2002. 3. 18)

Monitoring of Laser Fusion Cutting Using Acoustic Emission

Huen-Sick Min⁺, Seoung-Hwan Lee*, Sun-Eung Ahn⁺⁺

Abstract

As laser cutting process is widely used in industry, an automated on-line process control system has become very important. In this paper, development of a laser cutting monitoring system, which is regarded as the fundamental step toward automation of the process, is presented. Acoustic emission and an artificial neural network were used for the monitoring system. With given process parameters including laser power and scanning speed, the system can predict the suitability of laser beam for the cutting of a stainless steel (STS304) plate.

Key Words : Process Monitoring(공정 모니터링), Laser Fusion Cutting Mechanism(레이저 용융절단), Cut Qualities(절단 품질), Acoustic Emission(음향 방출), Artificial Neural Network(인공 신경망)

1. 서론

1960년대에 레이저가 처음 개발된 이래, 레이저가 갖는 고강도, 응집성, 단일 파장성과 조정성 등의 특성에 의해 레이저 가공은 경쟁력 있는 공정으로 자리 잡고 있다. 그 중 레이저 절단은 산업에 이용되는 레이저 공정 중 50~80%정도의 큰 비중을 차지하고 있다⁽¹⁾.

레이저 절단 가공은 국내에서도 산업 현장에서 널리 사용

되고 있지만⁽¹⁸⁾ 가공 변수의 복잡성과 다양성 때문에 그 자동화는 미진한 상태이며, 현재 레이저 절단은 대부분 숙련된 전문가에 의해 수동적 방법으로 수행되고 있다. 절단 가공에 있어서 초기 최적 가공 조건은 장시간 사용하는 동안에는 무의미하며, 절단 가공 제품에 대한 균일한 고품질을 보장하지 못하므로, 레이저 절단 가공 동안 절단 품질을 감지할 수 있는 모니터링 시스템의 개발이 필요하다^{(2),(3)}. 레이저 모니터링 시스템은 레이저 가공의 장애요인을 개선하고 레

+ 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

* 주저자, 한양대학교 기계공학과 (sunglee@hanyang.ac.kr)

주소: 425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지, Tel: 031-400-5288

++ 한양대학교 산업공학과

이제 절단에 대한 신뢰도를 향상시킬 수 있는 자동 공정 제어 시스템을 통한 가공 공정의 자동화를 이루는 데 있어 필수적이다. 특히, 레이저 공정 모니터링 시스템에 있어, 레이저 절단이 되어지는 동안 절단 품질을 감지해 낼 수 있는 센서 시스템의 개발은 가장 핵심적인 부분이다⁽⁴⁾.

레이저 절단 가공에 대한 절단면 품질 실시간 센싱 및 검출을 위하여 많은 연구가 수행되어 왔는데, 장⁽⁴⁾은 실리콘 광소자를 이용하여 가공 중에 발생하는 빛의 주기와 절단면에서 생기는 줄무늬 현상의 주기의 유사성과 절단, 비절단 시 광 신호의 특성을 연구하였고, Sheng⁽³⁾는 음향 신호(acoustic sensing)와 절단, 홈(grooving) 가공에서의 컵(kerf) 깊이와의 관계에 대한 연구를 하였다.

그러나 위에 언급한 센서(시스템)는 저주파 영역의 신호를 검출하여 절단 품질과의 상관 관계를 규명함에 있어서 노이즈의 영향이 주된 문제점으로 지적된다. 따라서 외란의 영향에 민감하지 않은 센서의 적용이 모니터링의 성공 여부를 좌우하는 중요 인자이다. 이 경우 정밀가공 시 공정 감시에 널리 사용되고 있는 음향방출(acoustic emission) 센서의 민감도를 이용하는 것이 타당하다.

본 연구에서는 레이저 절단 시 방출되는 AE신호를 이용하여 절단 특성 중 가장 기본적인 절단 가능 여부의 상관 관계를 규명 후, 인공 지능 학습을 통한 모니터링 시스템을 구축함으로써, Fig. 1과 같은 레이저 자동 공정 제어 시스템의 기초를 마련하고자 한다.

2. AE를 이용한 정밀가공 및 레이저가공 모니터링

Fig. 2는 각기 다른 정밀도를 요하는 경우에 있어서의 센서 적용의 예를 보여주고 있다⁽⁵⁾. 그림에서 알 수 있듯이 AE 센서는 높은 민감도를 나타내며 고주파 응답 특성을 가지므로, 초정밀가공 시의 가공상태 모니터링에 널리 쓰이고 있다^(6-9,19). 특히 비접촉 가공인 레이저가공 시 AE 센서의 장점이 더욱 부각 될 수 있다. 지금까지의 연구 사례들을 살펴보면, Konishi등은 AE신호를 레이저 절단공정을 감시(monitoring) 하는데 사용하였다⁽¹⁰⁾. 프랙탈 차원(fractal dimension)이 추출된 AE 신호를 분석하는데 사용되었는데, AE신호와 물리적 변수 간의 관계를 명확하게 보이지는 못하였다. 또, 레이저용접 분야(용접 상태 감시 등)에서 AE 기술을 이용한 다수의 연구사례 들이 보고되었는데, Whittaker 등은 레이저용접 중 레이저빔과 용접선의 부정렬을 AERms를 이용하여 감지하였고⁽¹¹⁾, Jon도 레이저 용접중 발생하는 레이저 실화, 출력손실, 부정확한 초점 등의 문제점을 AE 기술을 이용하여 관찰하였다⁽¹²⁾. 또, Duley⁽¹³⁾는 레이저 용접시 레이저 출력의 변화에 따른 AE의 주파수 대역의 신호 파형의 연관성을 연구하였고, 주사 속도에 따른 정상화된 AE 신호의 분포도를 관찰하였다. 상기 연구 사례들에서 AE 신호와 레이저 가공중의 물리적 변수간에는 밀접한 상관관계가 존재한다는 것이 보여졌다.

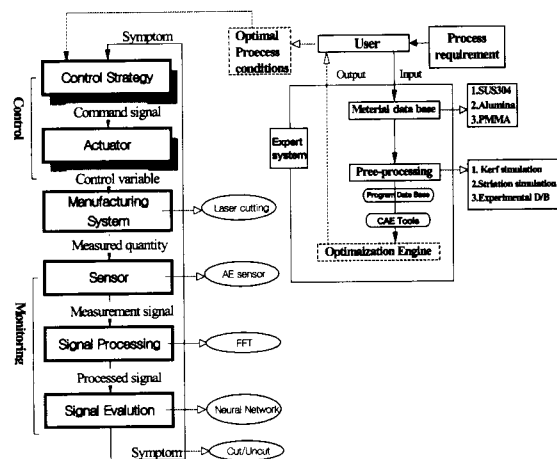


Fig. 1 A typical structure of an intelligent automatic supervisory system

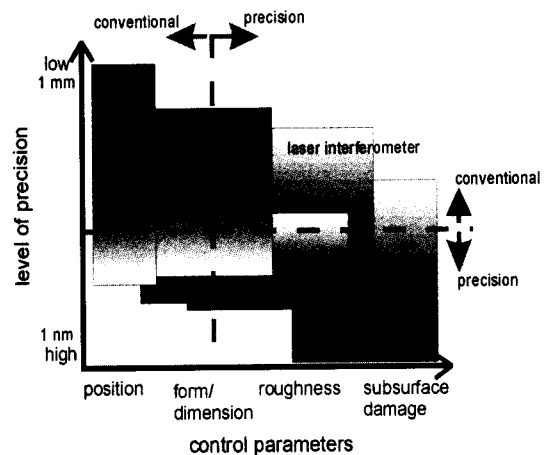


Fig. 2 Sensor application vs. level of precision and error control parameters

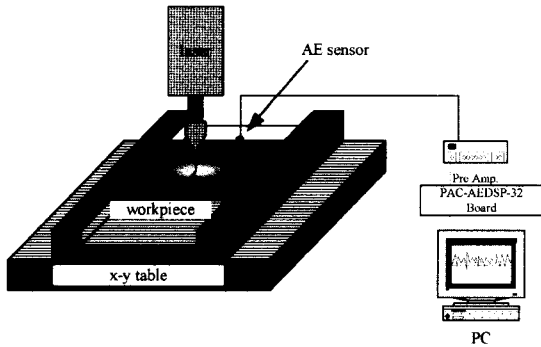


Fig. 3 Experimental setup for process monitoring in laser cutting

3. 실험 장치 및 방법

Fig. 3은 실험 장치와 구조를 간략하게 보여주고 있다. AE 센서는 재료 내부에서 전달되는 표면파를 전기적 신호로 변환시키는 변환자로 압전소자(PZT)를 사용한다.

본 실험에서는 PAC-R15 센서를 사용하였다. 얻어진 신호를 PAC-1220 전치증폭기를 이용하여 증폭하고, PAC-AEDSP-32 보드를 통해 신호를 분석하였다. 가공 변수로는 빔 이송 속도, 보조 가스 압력, 레이저의 출력 등을 조정하여 실험을 하였고, Table 1은 실험을 위한 가공 조건이다. 실험 시 박판의 절단 여부를 주 관찰 대상으로 하였다.

AE센서를 통해 얻어진 전기신호는 전치증폭기에서 20dB 증폭하였고, 증폭된 아날로그 신호는 2MHz의 샘플링 속도로 디지털 신호로 변환되어진다.

Table 1 Cutting conditions

Parameter	Value
Material & thickness [mm]	SUS304, 1mm
Feed rate (Press.= 3kgf/cm ² , Power=350W)	500~1500 mm/min
Power (Press.=10kgf/cm ² , Feed rate=500mm/min)	100~350 W
Pressure (Feed rate= 500mm/min, power=350W)	3~20 kgf/cm ²
Nozzle gap [mm]	0.2
Beam mode	TEM ₀₀ (CW)
AE sensor	Resonant type
Sampling rate	2MHz
Pre amplifier	20dB

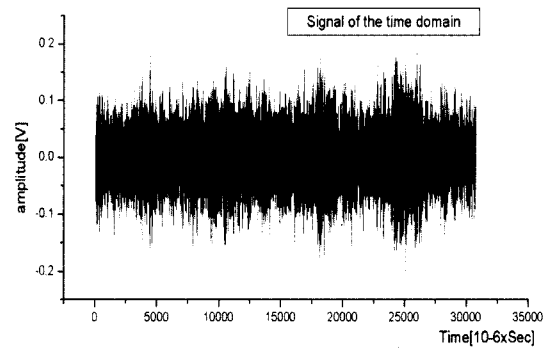


Fig. 4 Typical AE signal

이미 언급한 바와 같이, 비접촉식 가공인 레이저 가공, 특히 박판 가공 시 기계적인 힘의 변화량이 미미하여, 시간 영역의 신호와 절단 경향과의 연관성을 찾기가 힘든 경향이 있다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 RMS신호는 공정 감시 시 항상 충분한 정보를 제공하는 것은 아니므로⁽¹⁴⁾, 추출된 신호로부터 필요한 정보를 얻기 위해서는 다른 종류의 신호처리 기술도 함께 요구된다. 본 연구에서는 레이저가공시 AE 발생원의 물리적 성질을 주파수 영역에서 해석하기 위해 스펙트럼 해석(spectral analysis)을 사용하였다. 시간 영역에서 샘플링된 신호들을 FFT 아날라이저를 이용하여 실시간으로 주파수 영역의 신호로 변환시켜 주파수 특성들을 살펴보고, 실험시의 물리적변수와의 관계를 고찰하였다. Fig. 5는 신호 처리 과정을 나타낸 것이다.

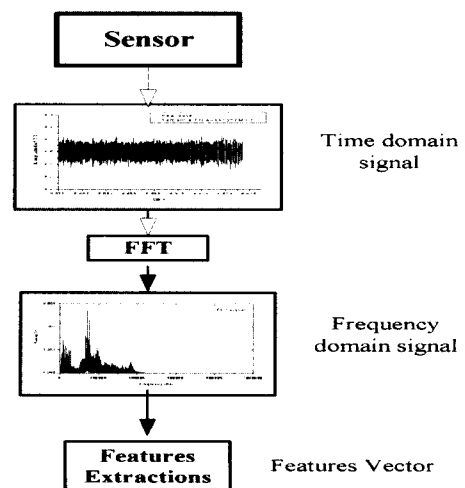


Fig. 5 Data signal process

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8은 실험 결과에 따른 FFT 신호 경향이다. 먼저Fig. 6을 보면 절단 영역에서의 신호 형태는 가공 조건에 관계 없이 일정한 주파수 영역(400kHz 이하)에서 민감도를 보였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 비 절단 영역에서의 신호 형태로서 보조 가스 압력에 따른 차이를 보이고 있다. 보조 가스가 저압일 경우(Fig. 7)에는 저주파 (200kHz 이하) 영역에서 신호가 검출되었다. 반면, 보조 가스가 고압일 경우(Fig. 8)에는 전 주파수 영역에서 불규칙한 신호의 형태를 보였다.

위에서 보여진 절단 품질에 따른 주파수 신호의 유형을 수식화하여 가공 모니터링 시스템에 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 신호의 형상을 인공 신경 회로망에

입력하여 절단 가공 모니터링 시스템에 이용하고자 한다.

5. 신경 회로망을 이용한 절단 특성 예측

5.1 신호 학습

4장에서 실험을 통해 측정된 신호를 오차 역전파 학습법 이론⁽¹⁵⁻¹⁷⁾에 의거하여 학습을 하였다. 입력값은 입력 노드 수의 한계 때문에 FFT신호를 25kHz별로 RMS화한 신호를 이용하였고, 절단 유무를 목표값으로 설정하였다. Table 2는 학습 조건을 나타내고, Fig. 9는 학습 과정의 개략도이다.

5.2 학습 결과

총 23개의 패턴을 학습시킨 결과 1214609 반복 학습 후에 출력 오차 한계값(RMS)이 목표치 0.001이하의 9.999996e-4값

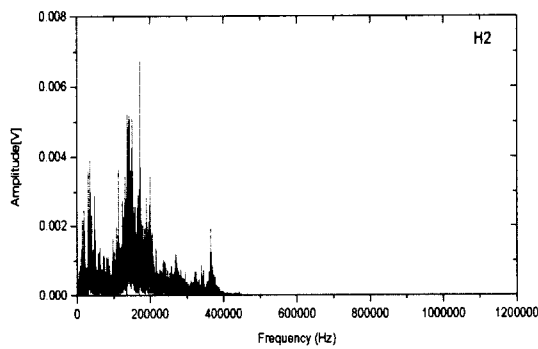


Fig. 6 Typical AE spectrum of cutting case (power=350W, P(N₂)=2Kgf/cm², feed rate=800mm/min)

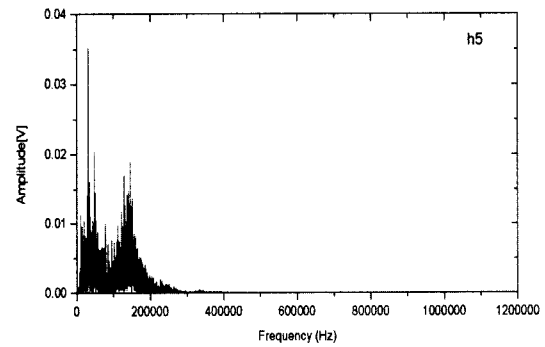


Fig. 7 Typical AE signals of un-cutting case with low pressure inert gas (power=350W, P(N₂)= 2kgf/cm², feed rate=1700mm/min)

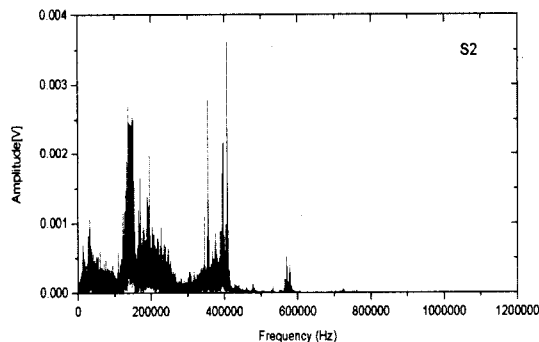


Fig. 8 Typical AE signals of un-cutting case with high pressure inert gas (power=130W, P(N₂)=10kgf/cm², feed rate=1000mm/min)

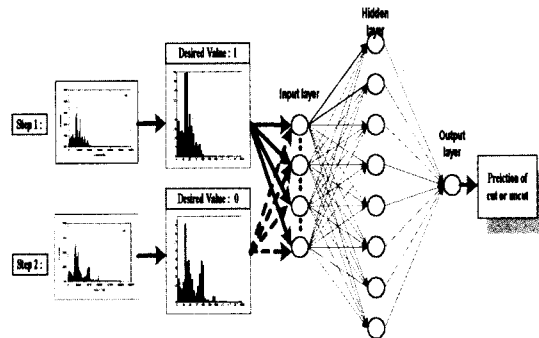


Fig. 9 Architecture of the neural network

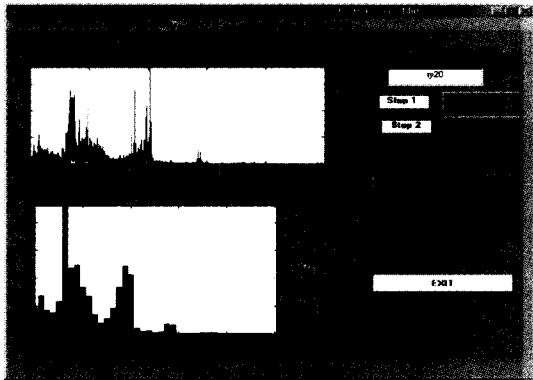
Table 2 Leaning condition

Parameter	Value
Number of hidden layer	1
Weight	Wij(413x41), Wjk(41x1)
Desired Value	1(cutting),0(un-cutting)
Number of Learning samples	23
Leaning rate	0.1
Max number of leaning	10 ⁹
Object of error energy	0.001

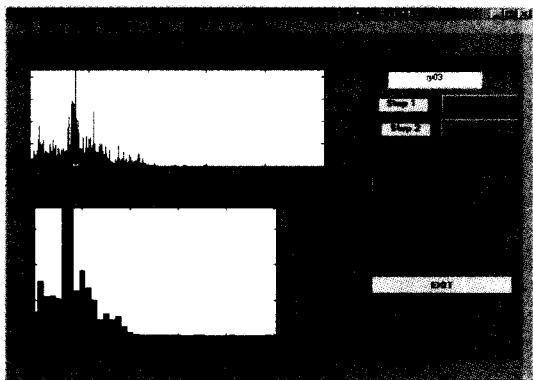
Table 3 Implementation results utilizing the neural networks

Input Parameters [FFT signal]				Outputs
Test condition			Desired value	
Power[W]	Feed rate [mm/min]	Pressure of N ₂ gas [kgf/cm ²]		
350	500	0	0	0.013
350	500	5	1	1.001
350	500	10	1	1.0012
350	500	15	1	0.9993
350	500	2	1	1.0016
350	800	2	1	0.9984
350	1100	2	1	0.9980
350	1400	2	1	1.0011
350	1700	2	0	-0.0009
350	2000	2	0	0.0011
350	2300	2	0	0.0011
350	2600	2	0	-0.0009
350	2800	2	0	-0.0003
200	500	10	1	0.9997
230	500	10	1	0.9986
260	500	10	1	1.0001
290	500	10	1	1.0004
320	500	10	1	0.9998
100	1000	10	0	-0.0000
130	1000	10	0	0.0000
160	1000	10	0	0.0000
190	1000	10	0*	0.2350
250	1000	10	1	1.0000
280	1000	10	1	0.9991
310	1000	10	1	1.0017

1: cutting , 0: un-cutting , *: un learning data



(a) Un-cutting case



(b) Cutting case

Fig. 10 The laser cutting monitoring system

에 도달하였다.

Table 3 은 학습에서 얻어진 연결 강도에 의해 학습 데이터와 미 학습 데이터의 예측 값과 실제 측정값과 비교한 것

으로 90% 이상의 일치함을 보여주고 있다. 따라서 본 실험에서 얻은 결과를 토대로 레이저 절단 모니터링 시스템의 구축이 가능함을 보였다.

6. 신경 회로망을 이용한 모니터링 시스템

앞 절에서 오차 역전파 학습법에 의해 얻은 학습 결과로

Fig. 10과 같이 모니터링 시스템을 구축해보았다. Fig. 10은 절단 특성 모니터링 프로그램으로 센서에서 입력된 시간 영역의 신호를 FFT 과정을 통해서 주파수 영역의 신호로 전환한 후, 25kHz별로 RMS화한 FFT 신호를 가지고 패턴 인식을 한다. 패턴 인식은 신경 회로망으로 구성된 추론 엔진에 의해 가공절단/비절단 여부를 판독하는 시스템이다.

7. 결론

본 연구는 레이저 가공의 장애요인을 개선하고 레이저 절단에 대한 신뢰도를 향상시킬 수 있는 레이저 자동 공정 제어 시스템에 대한 기초 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) AE 신호와 절단 품질 중 기본이 되는 절단 여부의 상관 관계를 파악하였다.
- (2) AE 주파수 영역의 신호를 입력값으로 한 인공 신경망의 오차 역전파 학습법을 이용하여 AE신호와 절단 특성의 상관 관계를 학습시킨 결과 90% 이상의 예측률을 보였다.
- (3) 학습된 결과를 기반으로 레이저 절단 가능 여부를 모니터링 하는 신경 회로망 시스템을 구축하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2000-000322-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) 최은석, 한국찬, 나석주, "레이저 절단에서 Sugeno 퍼지 적분을 이용한 재료 유사성 비교에 관한 연구," 대한 용접학회지, 제12권, 제3호, pp. 356~363, 1994.
- (2) H. Jorgensen, Flemming Olsen, "Process monitoring during CO₂ laser cutting," Proceeding of SPIE, January, pp. 198~208, 1991.
- (3) P. Sheng, G. Chryccolouris, "Investigation of acoustic sensing for laser machining processes," J. Mater. Process. Technol., Vol. 43, pp. 145~163, 1994.
- (4) 장옥진, 김봉채, 김재도, "레이저 절단에서 광소자를 이용한 가공공정 모니터링," 한국 정밀공학회지, 제13권, 제12호, pp. 30~37, 1996.
- (5) Lee, Y., Dornfeld, D. A., "Application of Open Architecture Control System in Precision Machining,"

- 31st CIRP International Seminar on Manufacturing Systems Berkeley CA, pp. 436~441. May, 1998.
- (6) Xuemei Chen., "Monitoring and Analysis of Ultra-Precision Machining Processes using Acoustic Emission," Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 1998.
- (7) Yoonchul Lee., "Monitoring and Planning for Open Architecture Manufacturing of Precision Machining using Acoustic Emission," Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 2000.
- (8) Dornfeld, D. A. and Lisiewicz, V., "Acoustic Emission Feedback For Precision Deburring," Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 93~96, 1992.
- (9) Kannatey-Asibu Jr., E. and Dornfeld, D. A., "Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting," Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 103, pp. 30~340, August, 1981.
- (10) Konishi, Y. et al., "Basic Study For Relationship Between Fractal Dimension of AE Signal and Laser Cutting," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 28, No. 2, 1994.
- (11) Whittaker, J. W. et al., "In Process Acoustic Emission Monitoring of Laser Welds," The Second Int. Conf. on Acous. Emission, Lake Tahoe, NV, 1985.
- (12) Jon, M. C., "Noncontact Acoustic Emission Monitoring of Laser Beam Welding," Welding Journal, Vol. 64, pp. 43~48, Sept. 1985.
- (13) W.W. Duley., "Laser Welding," Wiley, pp.187~195, 1999.
- (14) Rangwala, S. and Dornfeld, D.A., "Sensor integration using neural networks for intelligent tool condition monitoring," Trans. of ASME, J. of Engi. Ind., Vol. 112, p219, 1990.
- (15) 김대수, "신경망 이론과 응용 = Neural networks 1," 하이테크정보, 1994.
- (16) 오창석, "뉴로 컴퓨터," 내하 출판사, 1996.
- (17) 이현엽, 문경일, "Matlab을 이용한 퍼지 뉴로" 야진, 1999.
- (18) 옥철호 외 3인, "야그 레이저에 의한 공구강의 표면개질에 관한 연구," 한국공작기계학회지, 제9권, 제2호, pp. 66~71, 2000.
- (19) 맹민재, 정준기, "음향방출을 이용한 코팅공구의 마멸검출," 한국공작기계학회지, 제10권, 제5호, pp. 9~16, 2001.