

Nd:YAG레이저를 이용한 스텐실 절단공정 - (I) 신경회로망에 의한 절단폭 예측

신동식* · 이제훈** · 한유희** · 이영문***

Stencil cutting process by Nd:YAG laser
- (I) Estimation of kerf width by neural network

D. S. Shin, J. H. Lee, Y. H. Han, Y. M. Lee

*경북대학교 대학원 기계공학과, **한국기계연구원 레이저기술연구그룹,

***경북대학교 기계공학부

ABSTRACT

The stencil is a thin stainless sheet in which a pattern is formed, which is placed on a surface of plate to reproduce the pattern of electric circuit. Conventionally the stencil has been produced by etching process. This process has many anti-environmental factors. In this study, Nd:YAG laser cutting process has been applied for stencil manufacturing. The study is focused on estimating kerf width of laser cut stencil by E.B.P.(Error Back-Propagation). This algorithm is good for estimating target value from input value. In this paper, target value was kerf width, and input values were frequency, pulse width, cutting speed and laser power. E.B.P. after learning input and target could estimate kerf width from some variables precisely.

Keywords :

Laser cutting, Stencil, Kerf width, Dross, Pulse width, Nozzle gap, Error Back-Propagation

1. 서론

첨단산업의 발달과 함께 산업전반에 걸쳐 부품의 극소화, 경량화, 고집적화가 확대되고 있으며, 이에 부응하기 위하여 기존의 공정을 대체

할 수 있는 신 공정 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 최근 다품종 소량생산, 신제품 개발주기의 단축, 그리고 특수 전용부품의 주문제작이 증가함에 따라 유연성 있게 대처할 수 있는 공정개발의 필요성이 증대되고 있으며 또한 최근 환경문제에 대한 관심이 대두됨에 따라 제조 산

업분야에서도 환경 저해공정의 환경 친화적인 청정공정으로의 전환이 요구되고 있다. 이에 부응하여 레이저를 이용한 가공에 대한 관심이 높아지고 있으며 이에 대한 집중적인 연구가 진행되고 있다^{1)~6)}.

본 논문은 기존의 스텐실(stencil) 제조공정을 신 공정인 레이저 절단법으로의 대체에 관한 연구로서 각종변수에 따른 절단특성을 분석하였으며 신경회로망(neural network)⁷⁾을 이용하여 절단패턴을 예측하였다.

2. 스텐실 제조공정

스텐실이란 전자 회로기판의 인쇄시 표면에 패턴을 형성시키기 위해 사용하는 얇은 스텐레스 판재이다. 기존의 스텐실 제작은 Fig.1에서 나타낸 바와 같이 폴리머 감광법을 사용하여 패턴을 형성한 후, 에칭(etching)공정을 통하여 스텐실 재질을 부식시키는 방법을 사용하고 있다. 그러나 기존의 스텐실 제조공정은 폐수 발생에 따른 규제 강화로 인하여 공장부지 선정에 어려움이 있을 뿐만 아니라 폐수처리 설비 및 비용이 급격히 증가하고 공정도 복잡하기 때문에 제품의 가격 경쟁력이 크게 저하되고 있다. 반면 레이저 가공법은 필름을 제작할 필요가 없고 에칭공정이 필요 없으며 공정자체가 간단하여 청정공정화 및 자동화가 용이하다는 장점을 가지고 있다.

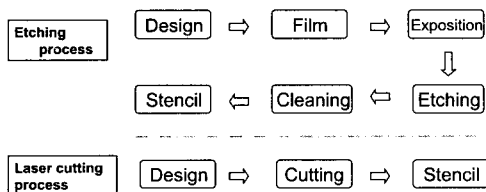


Fig. 1 Comparison of etching and laser cutting process on manufacturing stencil

Fig. 2는 에칭가공과 레이저 절단가공에 의해 제작된 스텐실을 비교한 것으로 레이저 절단가공에 의한 가공면은 에칭가공법보다 진직도가

우수하며 절단폭(kerf width)도 작아 불량률의 감소와 정밀도의 향상을 기할 수 있다. 레이저 빔을 이용한 스텐실 가공기는 유럽(대표적으로 독일 LPKF사)⁸⁾에서 개발하여 전 세계적으로 보급하고 있는 실정이다. 국내에도 이 가공기가 다수 수입되어 사용되고 있으나 장비가격이 고가이므로 설비 확충에 어려움이 있다. 또한 레이저 전문인력의 부족으로 장비에 대한 신속한 사후관리가 이루어지지 못하여 생산계획에 차질이 발생하는 사례가 빈번히 일어나고 있다. 이에 따라 최근 국내에서도 스텐실 가공시스템을 개발하기 시작하였으며 현재 시스템의 완성 및 성능실험을 마친 상태이며 공정 최적화를 위한 실험 데이터의 구축과 이의 활용방안에 대한 연구가 진행중이다¹⁾.

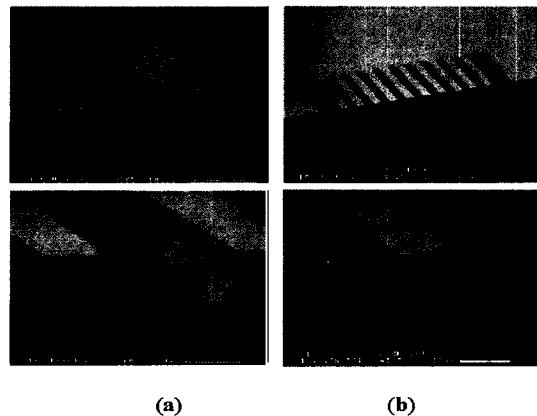


Fig. 2 S.E.M. photography of stencil produced by (a)etching and (b)laser cutting

3. 실험 방법

실험재료로는 스텐실제작용 스텐레스강판(0.2t)을 사용하였으며 레이저가공기는 Nd:YAG 레이저(한빛레이저 Model 510PW)로서 발전기는 최대 500W의 연속출력과 저출력시 TEM00 mode인 출력분포를 가지며 초점거리 40mm의 절단헤드 광학계를 사용하였다. Fig. 3은 본 실험에서 사용한 Nd:YAG laser의 개략도이며 Fig. 4는 실제의 시스템과 빔 이송장치를 나타낸다.

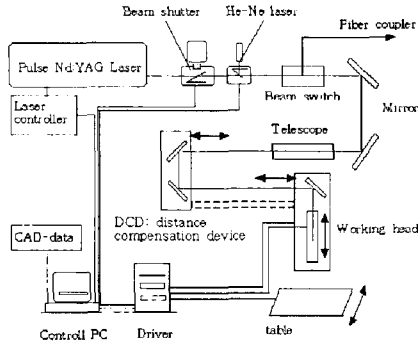


Fig. 3 Structure of stencil manufacturing system by Nd:YAG laser

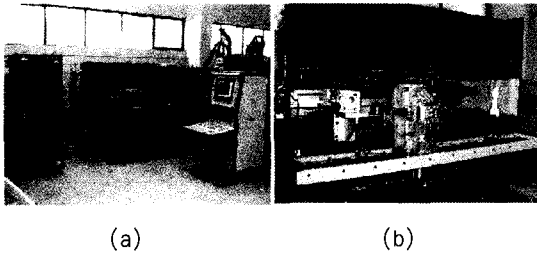


Fig. 4 (a)Stencil manufacturing system and (b)Beam delivery equipment

절단폭의 측정실험에 앞서 노즐갭 (nozzle gap), 가스압(gas pressure)에 따른 드로스 (dross)를 분석하였다. 여기서 노즐갭이란 빔 헤드의 노즐 끝부분부터 공작물까지의 거리를 말하며 이 실험은 적정 노즐갭과 가스압을 결정함으로써 절단폭 예측을 위한 신경회로망의 입력 변수를 줄여 학습속도를 향상시키는 것이 목적이며 노즐갭 0.1~1.1mm, 가스압 2.5~15bar 의 조합된 조건을 통해 최소의 드로스를 측정하였다. 또한 절단폭을 측정하기 위해 Table 1 의 조합된 조건으로 가공 후 절단폭을 측정하였으며 크롬산화물 생성을 막기 위해 질소(N₂)를 절단가스로 사용하였다.

Table 1 Cutting condition

parameter	Value
Power(W)	12~80 voltage(280~440v)
Frequency(Hz)	400~950
Pulse width(ms)	0.06~0.15
Cutting speed (m/min)	0.12~2

실험을 통해 측정된 데이터는 신경회로망 학습이론에 의거하여 절단폭의 패턴을 분석하였으며 임의의 입력조건에 대한 결과를 예측해 보았다. 여기서 전압, 펄스 반복수(frequency), 펄스 폭(pulse width), 절단속도(cutting speed)를 학습을 위한 입력값(input)으로 설정하였으며 절단폭을 목표값(target)으로 설정하였다. 신경회로망 학습에 사용된 학습법은 오차 역전파 학습법으로서 다음의 식(1)~(6)과 같이 유도된다^{8)~11)}.

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad \text{--- (1)}$$

$$h_k = f(\sum_i w_{ki}x_i) \quad \text{--- (2)}$$

$$z_j = f(\sum_k w_{jk}h_k)$$

$$y_i = f(\sum_j w_{ij}z_j)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum (d_i - y_i)^2 \quad \text{--- (3)}$$

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta w_{ij} + \eta w_{ij}(n-1) \quad \text{--- (4)}$$

$$\Delta w_{ij} = -\alpha \frac{\partial E_i}{\partial w_{ij}} = \alpha (d_i - y_i) \frac{\partial y_i}{\partial w_{ij}}$$

$$= -\alpha (d_i - y_i) f'(\sum_j w_{ij}z_j) h_j$$

$$w_{jk}(n+1) = w_{jk}(n) + \Delta w_{jk} + \eta w_{jk}(n-1) \quad \text{--- (5)}$$

$$\Delta w_{jk} = -\alpha \frac{\partial E_i}{\partial w_{jk}} = \alpha (d_i - y_i) \frac{\partial y_i}{\partial z_j} \frac{\partial z_j}{\partial w_{jk}}$$

$$= -\alpha (d_i - y_i) f'(\sum_j w_{ij}z_j) w_{ij} f'(\sum_k w_{jk}h_k) h_k$$

$$w_{ki}(n+1) = w_{ki}(n) + \Delta w_{ki} + \eta w_{ki}(n-1) \quad \text{--- (6)}$$

$$\Delta w_{ki} = -\alpha \frac{\partial E_i}{\partial w_{ki}} = \alpha (d_i - y_i) \frac{\partial y_i}{\partial z_j} \frac{\partial z_j}{\partial h_k} \frac{\partial h_k}{\partial w_{ki}}$$

$$= -\alpha (d_i - y_i) f'(\sum_j w_{ij}z_j) w_{ij} f'(\sum_k w_{jk}h_k) w_{jk} f'(\sum_l w_{kl}x_l) z_l$$

식(1)은 단극성 활성화함수(logistic function)이며 식(2)는 식(1)에 의한 각층의 출력값이다. 최종 출력값(output)과 목표값(target)의 오차를 식(3)에 따라 계산하는데 이를 오차 에너지(error energy)라 한다. 식(4),(5) 및(6)은 각층에서의 연결강도(weight)를 보정하는 과정으로서 학습시 이루어진다. 여기서 η 는 모멘텀으로서 학습속도를 향상시키기 위한 가속구간을 설정하기 위해 사용한다. 위의 식들은 Fig. 5로 표현할 수 있으며 본 실험에서는 Table 1. 에 나

타낸 조합된 변수를 Table 2. 에 나타낸 조건으로 학습하였다.

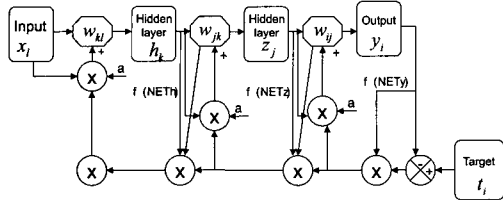


Fig. 5 Alorithm of E.B.P(Error Back-propagation)

Table 2 Learning condition

Parameter	Value
Number of hidden layer	2
Weight	$W_{ki}(3 \times 5), W_{jk}(3 \times 4)$ $W_{ij}(1 \times 4)$
Learning rate (initial,final)	(0.1, 0.005)
Momentum (initial,final)	(0.1, 0.005)
Number of learning	200000

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 가스압이 4bar인 조건에서 노즐과 모재와의 간격에서 따른 드로스량을 분석한 결과이다. 실험에서 노즐갭이 작아질수록 드로스 레벨(dross level)이 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 여기서 드로스레벨이란 드로스의 양을 5등분하여 정성적으로 표시한 것으로 1이 가장 적은 값이 된다.

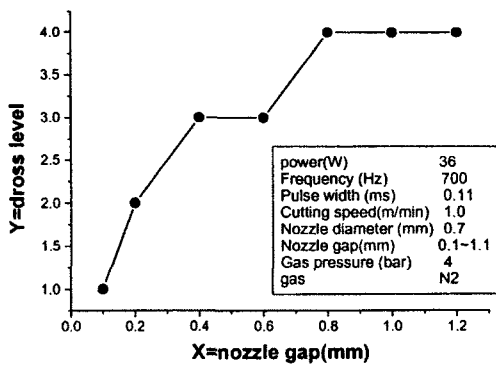


Fig. 6 Effect of nozzlegap on dross level

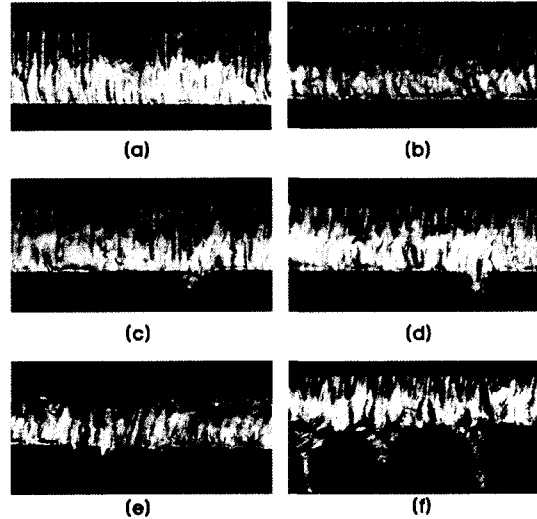


Fig. 7 View of cut edge with nozzle gap
(a) 0.1mm, (b) 0.3mm, (c) 0.5mm,
(d) 0.7mm, (e) 0.9mm, and (f) 1.1mm

Fig. 7에서 보는 바와 같이 노즐간격이 0.1mm 일때는 드로스가 거의 발생하지 않았으며 노즐 간격이 증가함에 따라 드로스량이 증가함을 알 수 있다. 이는 노즐 간격이 적을수록 가스가 좁은 절단부위에 집중적으로 공급됨으로서 용융물의 제거가 노즐 간격이 큰 경우 보다 용이해 짐으로서 나타난 결과로 사료된다. 절단시 육안으로 관찰한 결과 노즐 간격이 증가할수록 절단물 하단에 절단가스의 외류가 형성되어 용융물이 깨끗하게 제거 되지 못함을 알 수 있었다.

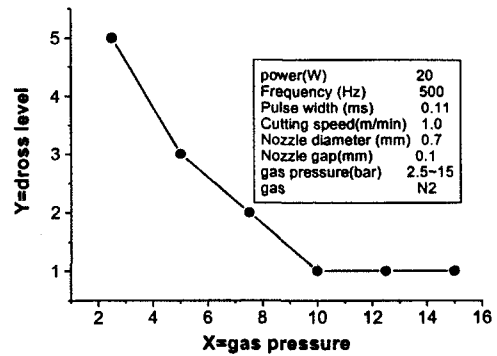


Fig. 8 Effect of gas pressure on dross level

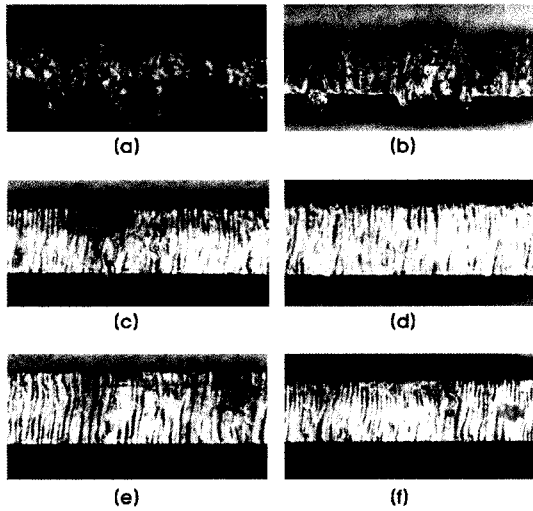


Fig. 9 View of cut edge with gas pressure (a) 2.5bar, (b) 5bar, (c) 7.5bar, (d) 10bar, (e) 12.5bar, and (f)15bar

Fig. 8은 절단 가스압에 따른 영향을 나타낸 것으로 가스압이 증가함에 따라 드로스 레벨이 급격히 감소하다가 일정해지는 경향을 보여주고 있다. Fig. 9에서는 가스압에 따른 절단면의 드로스 형상을 사진으로 보여주고 있다.

이는 고속의 가스분위기에서 드로스의 양이 급격히 줄었으며 표면조도가 우수함을 알 수 있었다. 또한 가스압이 10bar 이상일 경우는 표면조도 및 드로스의 양이 큰차이가 없음을 알 수 있으며 렌즈의 강도, 가스 주입장치의 한계강도 등을 고려하면 10bar가 가스압의 적정값임을 알 수 있었다. Fig. 10은 이송속도를 일정하게 유지하면서, 출력에 따른 절단폭의 변화를 나타낸 것이다. 절단폭은 펄스폭, 펄스반복수, 전압의 조합된 조건에서 실험하여 얻은값의 평균이며 출력은 펄스평균출력을 의미한다. 출력 12W에서 가장 작은 절단폭(43.23 μ m)을 얻을 수 있었으나 스파터의 양이 많고 저출력으로 인한 미절단 부위가 발생하였다. 이때 안정성을 고려한 최적의 출력값은 20W이었으며 절단폭은 74.25 μ m로서 비교적 낮은 값을 나타낸다. 현재 스텐실의 표준 패드폭(pad width)이 120 μ m(독일 LPKF사 산정)임을 감안하면 레이저를 이용해

더욱 정밀한 스텐실을 제작 할 수 있고 편광장치 이용 및 모재의 두께를 낮춤으로 인해 더 작은 폭의 절단도 가능함을 알 수 있다.

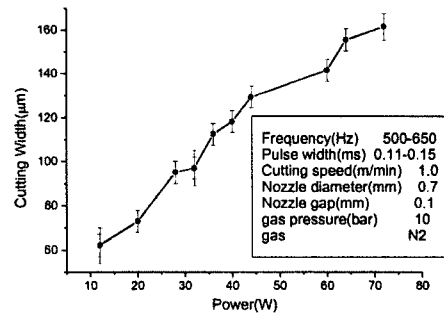
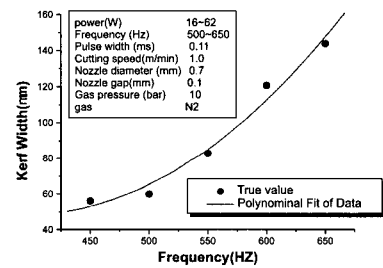
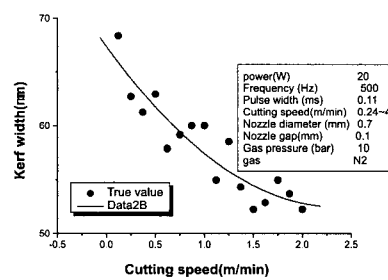


Fig. 10 Effect of power on cutting width



(a)



(b)

Fig. 11 Effect of (a)frequency, and(b)cutting speed on kerf width

한편 Table 1. 의 각종변수를 조합하여 절단 후 절단폭을 측정 한 결과 Fig. 11의 결과를 얻을 수 있었으며 Fig.11(a)에서 출력이란 펄스 반복수에 따른 출력을 의미한다. 또한 Fig. 11 상의 그래프 영역의 선정된 실험조건으로 실험하였고 절단폭은 절단면 중 세군데를 측정 한 값의 평균으로 설정하였다. 그리고 위의 실험을 통해 얻어진 데이터를 이용해 절단폭을

예측하기 위해 신경회로망 학습이론을 도입하였으며 20만 번의 학습을 통한 최종 오차에너지는 0.0919를 나타내었다. Fig. 12는 학습초기 영역의 오차에너지로서 초기 2000번의 학습을 할 때까지의 오차에너지를 나타낸 것이다. 식 (3)으로 표시되는 오차에너지는 학습의 정도를 나타내는 기준이 된다. Fig. 13은 위의 학습을 통해 얻을 수 있는 연결강도와 미학습 입력변수의 행열곱 즉 예측값(simulated value)과 실제 측정값(true value)값과 비교한 것으로 비교적 잘 일치함을 보여준다. Fig. 14는 신경회로망 학습시 얻어진 연결강도에 의해 임의의 조건에서도 예측이 용이함을 보여준다.

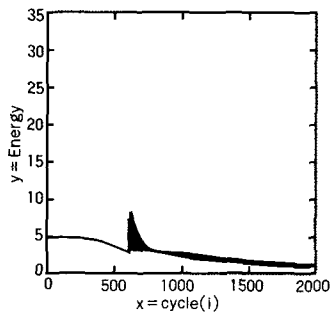


Fig. 12 Error energy on 1/100cycles

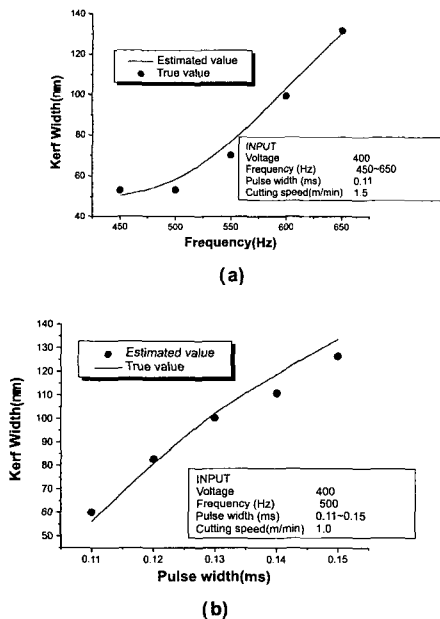


Fig. 13 Comparison of estimated value and true value

on variation of (a)frequency, (b)Pulse width

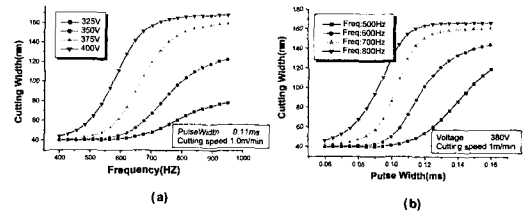


Fig. 14 Estimation of cutting width on variation of frequency(a),pulse width(b) with neural network

5. 결론

레이저를 이용한 스텐레스 스텐실 제작에서 드로스는 가스압에 영향을 많이 받으며 노즐과 모재와의 간격이 0.1mm, 가스압 10bar일 경우에 드로스가 가장 적게 나타났다. 전술한 조건 하에 절단폭은 펄스평균출력 20W에서 스패터와 미절단 부위가 없는 최소 절단폭을 얻을 수 있었으며 펄스반복수 및 펄스폭이 절단폭에 미치는 영향은 실험에 사용한 변수와 측정치를 이용한 신경회로망 학습법에 의해 쉽게 예측이 가능하였다. 이로서 절단폭 뿐만 아니라 스패터, 표면조도, 드로스도 신경회로망을 이용하여 예측 가능함을 말해주며 나아가 공정 자동화시에 필요한 절단 형상에 대한 최적의 조건을 산출하는데 응용될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이재훈, "레이저를 이용한 건식 인쇄회로기판 제조 공정개발 및 보급", 세미나 자료, 한국기계연구원
2. 김도훈, "레이저가공학", 경문사, pp. 103, 281~294, 1996
3. Michael Bass, "Laser Materials Processing", North-Holland Publishing Company, 1983
4. PCB 세미나, "PCB 산업의 교류증진 및 산학 협력 활성화 방안" 해진대학, 2000, 11
5. Von J. Kickelhain, "Laserunterstuetzte Herstellung von Feinleiterstrukturen in

- Additivtechnik”, Galvanitechnik, Vol. 88, Nr. 2, 1997
6. R. Luchs, “Alternative mit 3D-MID”, EPP, pp.44~45, March 1995
 7. Simon Haykin, “Neural Networks”, Prentice Hall International Editions, pp.161~175, 234~230, 751~756, 1999
 8. S.Ykung, “Digital Neural Networks”, Prenticehall international, Inc., pp. 184~192, 1993
 9. 이현엽, 문경일, “MATLAB을 이용한 퍼지 뉴로”, 아진, pp. 245~281
 10. 이성환, “패턴인식의 원리”, 홍릉과학 출판사, pp. 3~134, 1994.
 11. Frank h. Eeckman, “Neural Systems: Analysis and Modeling”, Kluwer Academic, pp. 5~38, 1993