

## 레이저 표면 경화 공정에서 다점 온도 모니터링을 통한 경화층 크기 예측

### Estimation of Hardened Layer Dimensions Using Multi-Point Temperature Monitoring in Laser Surface Hardening Processes

우 현 구\*  
(Hyun-Gu Woo)

**Abstract :** In laser surface hardening processes, the geometrical parameters such as the depth and the width of a hardened layer can be utilized to assess the hardened layer quality. However, accurate monitoring of the geometrical parameters for on-line process control as well as for on-line quality evaluation is very difficult because the hardened layer is formed beneath a material surface and is not visible. Therefore, temperature monitoring of a point of specimen surface has most frequently been used as a process monitoring method. But, a hardened layer depends on the temperature distribution and the thermal history of a specimen during laser surface hardening processing. So, this paper describes the estimation results of the geometric parameters using multi-point surface temperature monitoring. A series of hardening experiments were performed to find the relationships between the geometric parameters and the measured temperature. Estimation results using a neural network show the enhanced effectiveness of multi-point surface temperature monitoring compared to one-point monitoring.

**Keywords :** laser surface hardening process, depth, width, coating, neural network, multi-point temperature monitoring

#### I. 서론

강재에 대한 레이저를 이용한 금속의 표면 경화 공정은 필요한 최소한의 열 입력으로 가공하기 때문에 정밀 부품의 열처리가 가능하고 열변형을 최소화할 수 있으며 냉각제가 필요치 않은 등의 많은 장점을 지니고 있는 반면에 금속 표면의 흡수제인 코팅의 종류와 두께, 재료의 형상, 가공 속도 및 빔의 세기 등 매개변수가 많고, 또한 종래의 가공 기술과 달리 표준화가 되어 있지 못하다는 것 등의 여러 가지 문제점도 지니고 있다. 따라서 이러한 난점을 극복하여 외란이 있는 여러 가지 상황 하에서도 경화층의 품질을 개선하고, 이를 일정하게 유지시키기 위해서는 공정의 계측 및 제어가 이루어져야 한다. 그러나 공정을 제어하기 위해서는 먼저 최종 결과인 경화층의 품질을 대변할 수 있는 공정 변수의 선정과 이의 계측이 중요한 과제가 된다.

경화층의 품질을 대변할 수 있는 공정 변수로는 경화층의 정도도 중요하나 일차적으로는 경화층의 깊이 폭과 같은 기하학적 형상이 기본적인 공정 변수라 할 수 있다. 그러나 재료 내부에서 형성되고 있는 경화층 크기 제어를 위해 공정 중에 이를 실시간으로 측정한다는 것은 매우 어려운 일로, 현재까지 경화층 크기를 측정하는 연구 방법으로는 재료의 전자기적 성질을 이용한 방법[1,2], 전기장을 이용하는 방법[3] 그리고 공정 중 표면의 온도를 측정하는 방법[4,5,6] 등이 있다.

전자기적 측정 방법은 와전류를 이용하는 방법[1]과 외부에서 전자기장을 가하고 Barkhausen Noise를 측정하는 방법[2]이 있다. 그러나 이러한 방법들은 약 1300°C의 매우 고온인

경화되고 있는 부분의 실시간 측정을 위해서는 적합하지 않다. 전기장을 이용한 방법[3]은 경화층 주변에 전기장을 형성시키고 경화 과정시 나타나는 재료 내부의 조직 변화에 따른 전압의 변화량을 측정하는 것이지만 일반적으로 사용되는 표면 코팅재나 열전압에 대한 고려를 해야 한다는 어려운 문제가 있다. 공정중 표면의 온도를 적외선 온도 센서를 이용하여 측정하는 방법[4,5,6]은 가장 많은 연구결과가 발표되었고, 고온부인 측정부에서 멀리 위치할 수 있다는 장점 때문에 실시간 공정 계측에 적합하다. 또한 레이저와 상호 간섭이 없으며 움직이고 있는 물체의 온도측정에도 적합하고 매우 빠른 응답 특성을 가지고 있다.

지금까지의 온도 계측 연구들[4,5,6]에서는 한 점의 표면 온도를 측정함으로써 경화층의 크기를 예측하였다. 그러나 실제 경화층의 형상은 시편 내에 형성된 온도 분포에 의해 결정되므로 본 연구에서는 여러 점의 온도를 동시에 측정하여 경화층 크기의 예측을 보다 정확히 하고자 한다. 예측 방법으로는 입력과 출력의 복잡한 관계도 잘 구현할 수 있는 신경회로망을 이용하고자 한다. 이와 관련된 Chryssolouris[7] 등의 연구를 보면 신경회로망은 우수한 예측 결과를 얻을 수 있고, 실험 데이터에 포함될 수 있는 노이즈(noise)에 덜 민감하다는 보고가 있다.

#### II. 레이저 표면 경화 공정의 계측

##### 1. 레이저 표면 경화 공정

레이저에 의한 강재의 표면경화 공정은 그림 1에서와 같이 재료의 표면에 집속된 레이저 빔을 조사시켜 재료 내부로의 열전도에 의해 표면의 국부적인 층만을 경화시키는 공정으로서 종래의 경화 처리공정과는 달리 재료 내부의 성질에는 영향을 주지않고, 표면만을 마르텐사이트 조직으로 만들어준다. 이러한 레이저 경화 공정은 현상적으로 볼때 크게

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 8. 16., 채택확정 : 2003. 10. 10.

우현구 : 경일대학교 기계공학부(hgwoo@kiu.ac.kr)

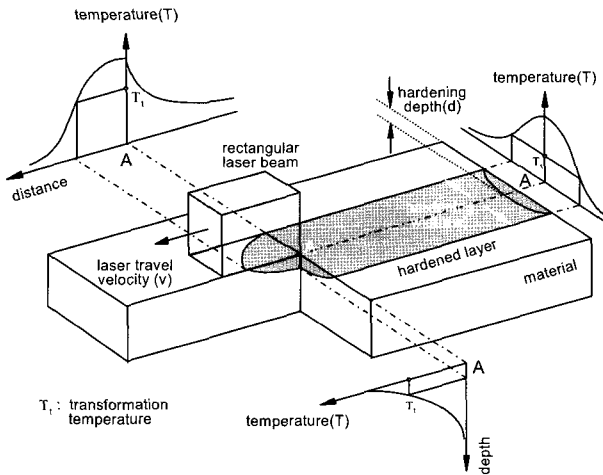


그림 1. 레이저 표면 경화 공정의 개략도.  
Fig. 1. Schematic diagram of a laser surface hardening process.

세부분으로 나누어 생각할 수 있다. 첫번째는 가열부분으로 순철과 퍼얼라이트로 구성된 원래의 재료의 조직을 A3 변태점(transformation temperature)이상의 온도로 가열하여 재료의 표면 얇은층을 오스테나이트 조직으로 만들어준다. 그리고 두번째는 온도 유지 부분으로 가열과 냉각기의 사이에서 재료의 국부적인 얇은층의 온도를 탄소의 확산이 일어날 수 있도록 오스테나이트 온도 이상으로 유지시켜 준다. 마지막 세번째는 냉각 부분으로 레이저 빔이 이동하면 표면에 접촉된 열은 재료 내부로 급속히 전달되면서 표면층은 높은 냉각률을 갖게 되어 정상적인 고상변태가 이루어지지 못하고 준안정조직인 마르텐사이트 조직으로 변태된다. 이러한 재료내의 자기담금질 효과(self-quenching effect)는 종래의 경화법으로는 얻기 어려운 효과로, 부가의 냉각제 없이 급속의 기지조직은 변화시키지 않으면서 표면의 얇은 층만을 경화시키게 된다. 따라서 변태온도 이상으로 가열된 부분에만 경화층이 형성된다[8,9].

2. 공정의 모니터링 변수

경화층의 크기를 알기 위해서는 경화 중에 형성되는 재료 내부의 온도 분포를 알아야 하지만 이는 불가능하므로 표면의 온도 분포를 측정하여 경화층의 크기를 예측하고자 한다. 또한 보다 정확히 예측하기 위해서는 측정 가능한 시편 표면상의 모든 점에서의 온도를 측정하는 것이 바람직하지만 현실적으로 시편 표면의 온도 분포를 모두 실시간으로 측정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 시편 표면의 몇 개의 온도 측정 점을 선정하여 모니터링하고자 한다.

경화 공정에서 시편은 레이저 빔 선단 부에서 가열되기 시작하여 후단 부의 최고 온도점에 도달한 후 레이저 빔을 벗어나면 다시 냉각된다. 경화층은 변태점 온도 이상으로 가열된 부분에서 형성되고 온도는 높은 곳에서 낮은 곳으로 전도되므로 경화층 크기 예측을 위한 표면 온도 측정을 위해서는 시편의 최고온 부의 온도를 측정하는 것이 타당하다. 따라서 지금까지 레이저 경화 공정을 모니터링하는 연구는 모두 사각형 레이저 빔 내의 후단 부에 위치한 최고 온도점을

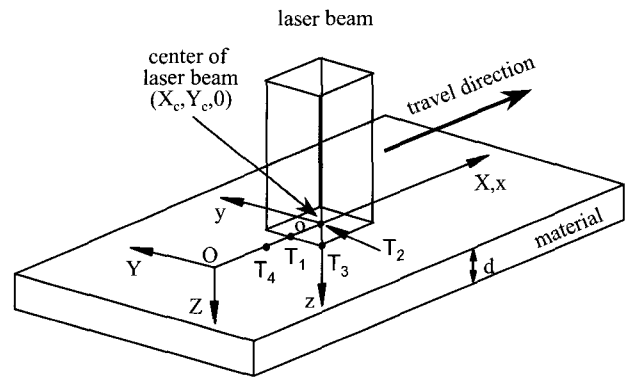


그림 2. 온도 측정점.  
Fig. 2. Temperature monitoring points.

측정 점으로 선정하였다. 따라서 본 연구에서는 그림 2과 같이 최고 온도점을 중심으로 하여 4개의 센서를 사용하여 표면 온도를 측정하였다. 그림에서 X-Y계는 고정 좌표계이고 x-y계는 레이저 빔에 원점을 둔 이동 좌표계이다. T1, T2, T3, T4는 각각 측정된 온도를 나타내며, T1이 레이저 후단부 중심에 위치하고 있고 이 점을 중심으로 x-y 방향을 따라 방사형으로 레이저 빔 크기의 반에 해당하는 7mm씩 거리가 떨어져 있는 곳을 나머지 온도 측정점으로 선정하였다.

3. 적외선 다점 온도 측정 시스템

본 연구에서는 실험 시 측정 온도 범위를 적절히 조절하고 레이저 빔의 파장 대와의 간섭을 피하기 위하여 적외선 센서를 직접 제작하여 사용하였다. 측정 온도의 평균값인 약 100 0°C에서 방출되는 복사에너지는 90% 정도가 1.5μm에서 10μm의 적외선 파장 대에 있게 된다. 열원인 CO2 레이저 빔의 파장은 10.6μm이므로 본 연구에서는 4μm에서 최고의 감응도(spectral sensitivity)를 갖는 PbSe photo conductive형의 적외선 광 센서를 사용하였다. 적외선 온도 측정 시스템의 구성은 그림 3와 같이 대물 렌즈, aperture, 적외선 광센서 및 신호 증폭 회로로 구성되어 있다. 적외선 센서의 목표 면적(target area)은 직경 1mm로 하여 거의 한 점의 온도 값으로 근사될 수 있도록 제작되었다.

사용된 적외선 측정 센서의 특성을 파악하고, 실제 경화 시편 표면 온도와 측정 신호 출력 전압 간의 상호 관계를 구하기 위한 센서 특성(sensor calibration) 실험을 따로이 행하였다. 측정 대상은 실험에 사용되는 시편과 동일한 것을 사용하였으며, 시편에 레이저를 이용하여 가열하면서 시편에 설치된 열전대와 적외선 센서의 출력값을 동시에 측정하여 비교하였다[9].

4. 레이저 표면 경화 실험

실제 경화층 크기와 표면 온도의 관계를 구하기 위하여 그림 4와 같이 실험 장치를 구성하였다. 시편을 일정 속도로 이동시키면서 표면에 사각 레이저 빔을 조사하는 동시에 다점 온도 측정을 하였다. 시편은 일반 기계부품 강재인 SM45 C를 사용하였으며, 시편의 표면은 매끈하게 가공한 후 레이저 빔의 흡수율을 높이기 위하여 코팅재를 도포하였다.

코팅재는 레이저 경화 공정에서 일반적으로 많이 쓰이는

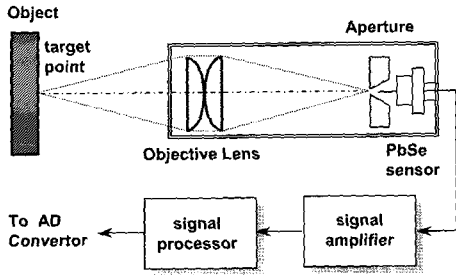


그림 3. 적외선 온도 측정 센서의 광학적 개략도.  
Fig. 3. Schematic diagram of the optical system for measurement of radiation emitted from a hardening workpiece.

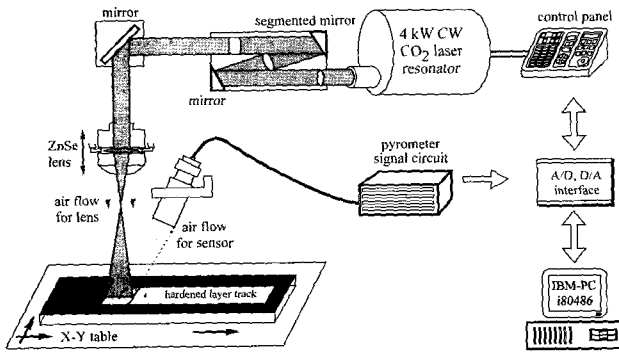


그림 4. 레이저 표면 경화 공정의 계측 및 제어를 위한 실험 장치의 개략도.  
Fig. 4. Experimental setup for temperature monitoring and control in laser surface hardening processes.

표 1. 건조된 흑연 코팅재의 원소 중량비(%).  
Table 1. Chemical composition of the graphite coating material after enough dry(wt %).

원소	N	C	H	O	P
구성비	5.11	71.27	5.37	16.28	0.0089
원소	Fe	Si	Mn	Ni	Cr
구성비	0.01	0.12	0.0006	0.0004	0.0015

흑연(graphite)를 주성분으로하는 착색제를 사용하였다. 건조된 코팅재를 한국 화학 연구소에 의뢰하여 원소 성분을 분석한 결과를 표 1에 나타내었다.

5. 측정 온도와 경화층 크기의 상관 관계

그림 5-6에서는 이와 같은 경화 처리 및 온도 측정 실험을 레이저 출력과 이송 속도를 다양하게 변화시키면서 실험한 후 정상상태 구간의 시편을 절단하여 얻어지는 경화층 깊이와 폭에 대하여 실험시 측정된 온도와의 관계를 보여주고 있다. 이 때 주의하여야 할 것은 측정된 표면 온도가 시편 표면의 온도가 아니라 코팅층의 온도일 수 있다는 점이다. 코팅층이 잔류한다면 시편 표면의 온도보다 직접 가열되는 코팅층의 온도가 더 높을 것이며 이것이 표면 온도로 측정될 수 있다. 실제 실험 과정에서 보면 레이저로 코팅층이 가열

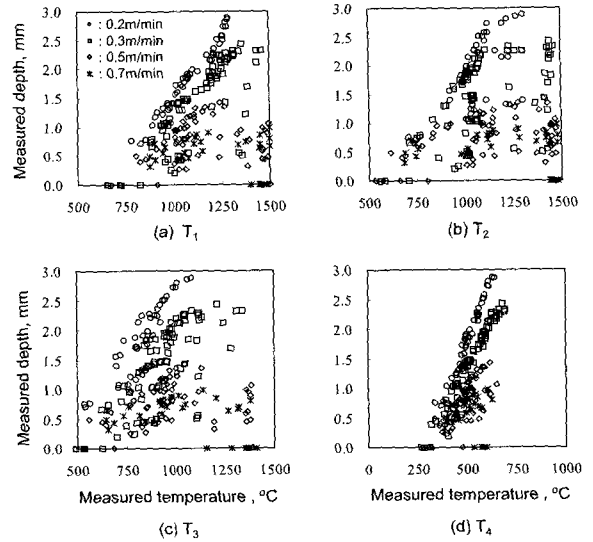


그림 5. 여러 온도 측정점에 대한 경화층 깊이.  
Fig. 5. Relationships between hardening depth and various temperature measuring points.

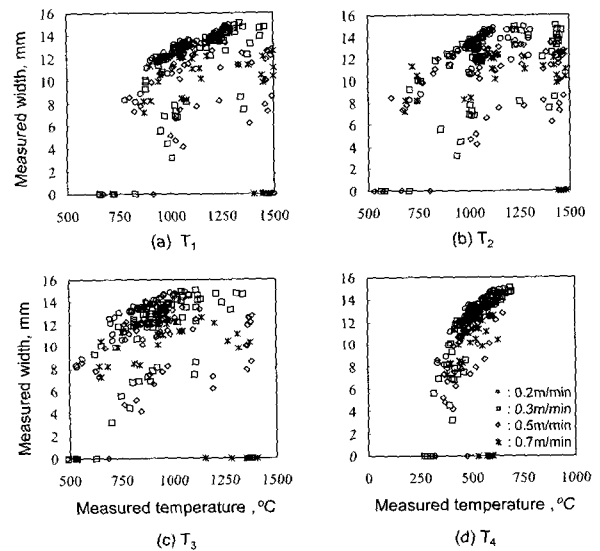


그림 6. 여러 온도 측정점에 대한 경화층 폭.  
Fig. 6. Relationships between hardening width and various temperature measuring points.

되면서 레이저 빛이 닿는 선단에서부터 고온으로 가열된 코팅층은 보호 가스나 대류에 의해 제거되기 시작하여 빛의 후단으로 갈수록 코팅층은 얇아지고 빛을 벗어나면 더 이상 코팅층은 제거되지 못하고 잔류하게 된다. 따라서 코팅층의 영향을 가장 적게 받는 온도 측정점은 T4이고 가장 영향이 큰 측정점은 상대적으로 온도가 낮은 T2나 T3가 될 것이다. T4가 코팅층의 영향을 가장 적게 받으므로 가장 정확한 시편 표면의 온도를 측정하는 반면에 공정의 실시간 모니터링이나 실시간 공정 제어를 위한 계측 신호로 사용된다면 이는 공정 후 계측이 되므로 T1보다 시간 지연이 발생하게 되며 이는 제어 시스템의 성능을 크게 저하시킬 수 있는 요인이 될 가능성이 있다. 한편 이송속도 측면에서 보면 열입력이

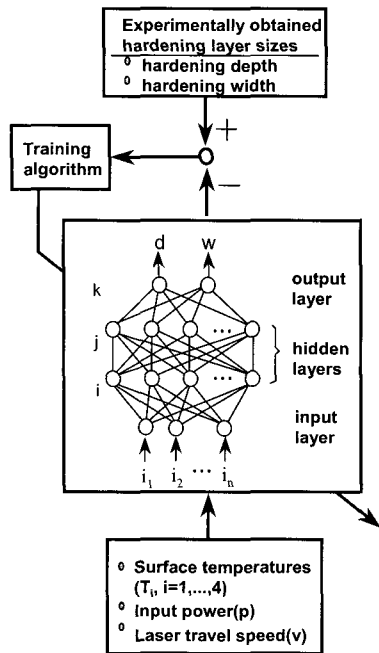


그림 7. 경화층 크기를 예측하기 위한 신경회로망의 학습과 예측 과정.

Fig. 7. Block diagram of the training and estimation procedures for hardening layer sizes using a neural network estimator.

작아서 가열된 온도가 낮고 레이저 빔의 조사 시간이 짧은 빠른 이송 속도 조건일수록 코팅층의 영향이 크게 나타나게 된다.

그림 5과 그림 6의 실험 결과를 보면 같은 표면 온도일 때 이송 속도가 작을수록 표면의 열이 재료 내로 전달될 시간적 여유가 많으므로 경화층이 더 크게 형성됨이 나타나있다. 즉 이송 속도가 느리면 재료 내로 열전달이 충분히 이루어져 깊이 방향으로 온도 구배가 작아지고 경화층의 깊이는 깊어지며, 이송 속도가 빠르면 표면에서 깊이 방향으로 열이 충분히 전달되지 못한 채 시편이 이송되고 레이저 빔이 지나 가면 다시 냉각되므로 경화층이 얇아진다.

그림 5(a)의 온도  $T_1$ 을 보면 이송 속도가 0.2m/min인 데이터가 온도에 대해 거의 직선적으로 모여서 분포하고 있으나 이송 속도가 증가할수록 온도에 대한 깊이의 관계가 불명확해져 이송 속도 0.7m/min의 데이터를 보면 약 800°C에서 1500°C까지 범위에서 경화층 깊이가 0.3mm에서 1.0mm까지 넓게 분포하고 있다. 그림 5(b)의 온도  $T_2$ 에서는 이송 속도가 0.2m/min인 데이터가 비교적 선형적인 분포를 보여주고 있지만 그 이상의 이송 속도 조건에서는 500°C에서 1500°C까지 넓게 분포하고 있다. 이렇게 넓게 분포하는 것은 센서에 의해 시편의 온도가 측정되지 못하고 코팅층의 온도가 측정됨으로써 온도와 시편에 형성된 경화층의 관계가 제대로 나타나지 않음을 나타내는 것이다. 그림 5(c)의 온도  $T_3$ 에서도 이송 속도가 빨라지는 조건의 데이터일수록 온도와 경화층 깊이의 관계가 잘 나타나지 않고 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 온도  $T_2$ 보다는 온도  $T_3$ 의 경우가 전반적으로 같은 온도에 대해 더 깊은 경화층 깊이를 보여주고 있어서 같은 경

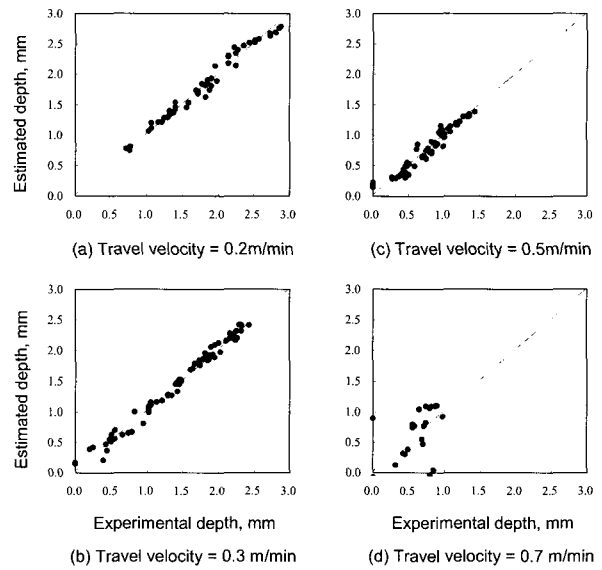


그림 8. 여러 가지 이송 속도 조건에서 예측된 경화층 깊이.  
Fig. 8. Estimated results of hardening depth for various travel velocities.

화층일 경우  $T_3$ 가  $T_2$ 보다 온도가 전반적으로 낮음을 알 수 있다. 그림 5(d)의 온도  $T_4$ 에서는 앞에서 언급한 바와 같이 코팅층의 영향을 가장 적게 받는 측정점이므로 온도와 경화층 깊이의 관계가 잘 나타나 있다.

그림 6에 경화층 폭과 각각의 온도  $T_1, T_2, T_3, T_4$ 에 대한 관계가 나타나 있다. 전반적인 데이터 분포는 그림 5의 경우와 비슷하게  $T_2$ 와  $T_3$ 에서 데이터가 비교적 넓게 분포되어 있고 이송 속도가 큰 경우의 데이터가 특히 넓게 분포되어 있다.  $T_4$ 의 경우는 경화층 깊이의 경우와 같이 코팅층에 영향을 덜 받는 측정점이므로 데이터의 분포가 넓지 않게 나타나고 있으며 여기서 특히 데이터가 몰려있어서 서로 겹친 데이터가 많다. 이는 경화층 폭 방향으로, 열원이 가해지는 부분에서는 온도가 쉽게 상승하지만 그 바깥쪽 즉 레이저 빔을 벗어난 곳에서는 재료 내로의 열전달에 의해 냉각되는 부분이므로 경화층의 폭은 조사되는 레이저 빔 크기인 14mm와 비슷한 크기로 형성되는 데이터가 많기 때문이다.

### III. 신경회로망을 이용한 경화층

#### 1. 신경회로망 예측기(neural network estimator)

금속 표면의 온도 분포와 경화층 깊이 사이의 연관 관계는 앞 절에서 본 바와 같이 매우 복잡하여, 입력과 출력 사이의 연관성을 알아내기가 어려운 곳에 적합한 신경회로망을 사용함으로써 공정중의 금속 표면의 온도를 측정함으로써 경화층 크기를 예측하고자 하며, 그 중에서도 사상(mapping) 기능이 뛰어난 다층 인식자(multilayer perceptron) 신경회로망[10]을 사용하였다. 신경회로망의 학습을 위해 오차 역전파 학습법(error backpropagation learning law)이 사용되었으며 이에 의해 신경회로의 매개 변수들은 반복적으로 수정되면서 학습된다.

#### 2. 신경회로망을 이용한 예측

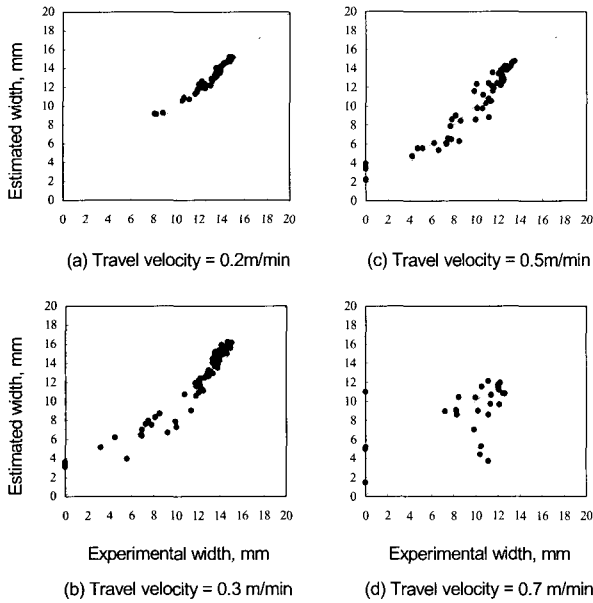


그림 9. 여러 가지 이송 속도 조건에서 예측된 경화층 폭.  
 Fig. 9. Estimated results of hardening width for various travel velocities.

레이저 경화시 측정되는 실시간 정보인 온도를 이용하여 경화층 크기를 예측하기 위하여, 앞 절에서 보여지는 다양한 경화 조건에서 구해진 215개 데이터의 경화층의 크기와 온도의 관계를 신경회로망을 이용하여 학습하고 예측하였다. 신경회로망의 학습 및 예측을 위한 구조로는 그림 7에 개략적으로 나타내었다.

입력으로는 레이저 출력과 이송 속도 그리고 네 점의 측정된 온도로 하였으며 출력은 실험으로 얻어지는 경화층 깊이 및 폭으로 하였다. 여러 번의 시행착오를 거쳐 은닉층은 2개 층으로 정하였고 이의 노드수는 각각 15개로 하였다. 학습율은 0.7, 모멘텀은 0.5로 하여 10000회 학습하였다.

3. 예측 결과

앞 절에서 살펴본 바와 같이 측정되는 온도는 이송 속도에 따라 크게 영향을 받으므로 이송 속도 별로 나누어 예측 결과를 그림 8-9에 나타내었다. 그림 8의 경화층 깊이의 예측 결과를 살펴보면 0.7m/min보다 낮은 이송 속도에서는 예측이 아주 잘 이루어져, 이상적으로 예측될 때를 나타내는 직선에 근접하는 것을 볼 수 있다. 이송 속도가 0.7m/min인 경우는 다소 분포가 퍼져있어 예측 오차가 상대적으로 큼을 알 수 있으며, 이것은 앞의 측정된 온도 응답에서도 살펴본 바와 같이 이송 속도가 커지면 시편의 온도보다는 코팅체의 온도가 측정되는 경우가 많았으므로 온도와 경화층의 상관관계가 적어지기 때문이다. 그림 9의 경화층 폭의 예측 결과를 보면 이송 속도가 높아질수록 예측 오차가 커지는 것을 뚜렷이 볼 수 있어 깊이보다는 폭의 예측에서 코팅의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

그림 10에서는 이러한 예측 결과를 종합하여 표준 편차와 오차의 절대값의 평균을 구하여 나타내었다. 앞 그림에서 보듯이 그림 10(a)의 깊이의 경우를 보면 이송 속도가 0.2m/min,

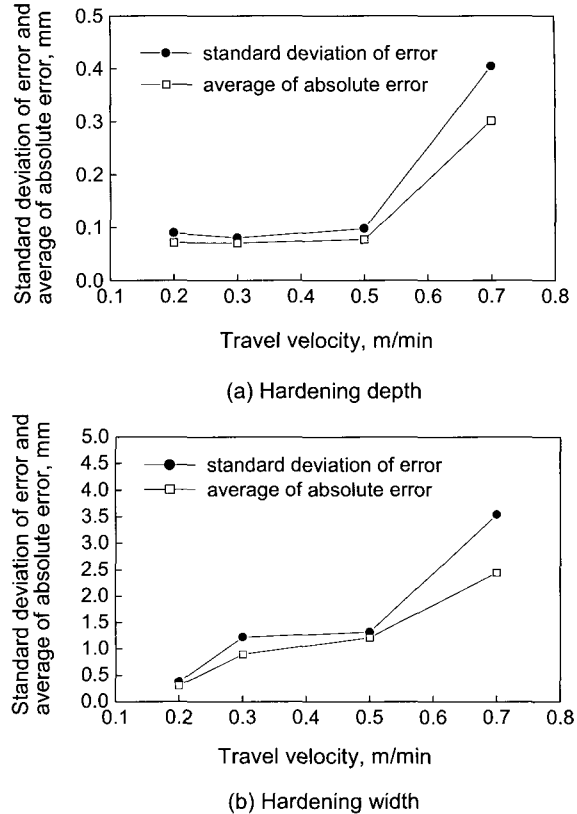


그림 10. 여러 가지 이송 속도 조건에서 다점 온도 정보를 이용한 예측오차의 표준 편차와 절대 오차의 평균.  
 Fig. 10. Standard deviation of estimation error and average of absolute estimation error for various travel velocities using multi-point temperature monitoring.

0.3m/min, 0.5m/min에서는 예측 오차의 표준 편차와 절대오차 평균이 거의 같지만 속도 0.7m/min에서는 표준편차가 0.405mm로 0.098mm인 0.3m/min의 경우에 비해 4배로 커지고 있고 절대오차의 평균값도 0.302mm로 0.077mm인 0.3m/min의 경우에 비해 4배 가까이 커지고 있다. 그림 10(b)에서 폭의 경우를 보면 0.2m/min에서는 오차가 상당히 적고 이송 속도가 증가할 수록 오차가 증가하여 0.3m/min, 0.5m/min의 속도에서는 오차가 거의 비슷한 수준이고 0.7m/min에서는 오차가 급격히 커진다. 특히 이송 속도 0.2m/min의 경우는 표준편차 0.38mm, 절대오차 평균 0.31mm로 오차가 매우 적어 상당히 정확한 폭의 예측이 가능함을 알 수 있다. 실제 경화층 폭은 레이저 빔의 크기인 14mm에 가깝게 얻어지므로 여기서 보여지는 표준편차와 절대오차 평균은 매우 작은 값이라 할 수 있다.

4. 다점 모니터링과 한점 모니터링의 예측 결과 비교

그림 11에서는 위와 같은 데이터에 대하여 한점 온도와 이송속도, 레이저 출력 조건만을 가지고 경화층 크기를 예측한 결과를 나타내었다. 즉 4점의 온도 정보 중 3점의 온도 정보를 제외한 최고온부( $T_1$ )의 온도만을 이용하여 동일한 구조의 신경회로망과 같은 학습 조건으로 하여 예측 결과를 비교하였다. 오차의 표준 편차를 보면 경화층 깊이의 경우 0.2m/min, 0.3m/min, 0.5m/min 조건에서 다점 측정인 경우가 0.1mm이하인데 비하여 한 점 측정인 경우 약 0.15mm 정도

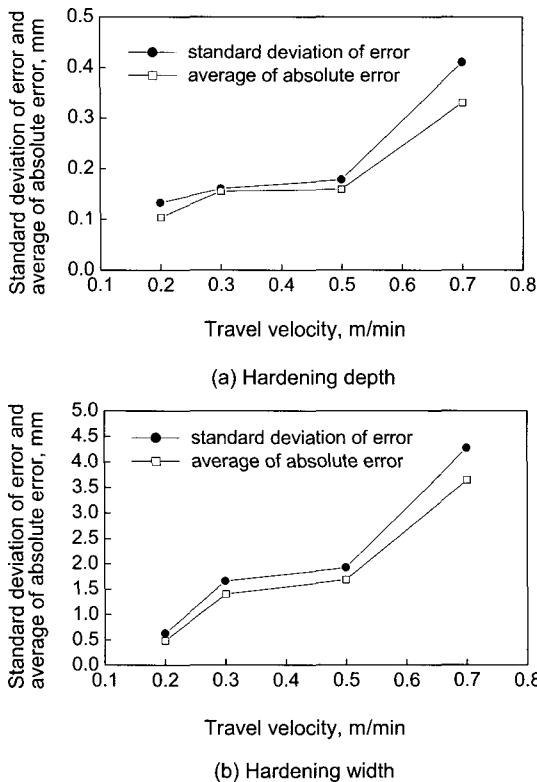


그림 11. 여러 가지 이송 속도 조건에서 한점 온도 정보를 이용한 예측오차의 표준 편차와 절대 오차의 평균.  
 Fig. 11. Standard deviation of estimation error and average of absolute estimation error for various travel velocities using one-point temperature monitoring.

되어 오차가 약 50%증가함을 알 수 있다. 경화층 폭의 경우도 전반적으로 한 점 측정 결과의 오차가 약 50%정도 증가한다. 이러한 결과로부터 다점 온도 측정의 타당성이 증명될 수 있으며, 이제까지의 연구 결과들로는 경화층 크기를 실시간 예측하는데 있어서 온도 측정 외에는 큰 어려움이 있으므로 이러한 예측 오차 감소는 레이저 표면 경화 공정에서 매우 큰 의미가 있다고 생각된다.

IV. 결론

레이저 표면 경화 공정에서 재료 내부에 형성되고 있는 경화층의 크기를 공정 중에 실시간으로 측정한다는 것은 매우 어려운 일로, 적외선 센서를 이용한 온도 측정 방법이 현재까지는 유일한 방법이라 할 수 있다. 하지만 한 점의 표면 온도 측정으로는 재료내의 온도 분포에 의해 결정되는 경화층 크기를 정확히 예측하는데 어려움이 있으므로 본 연구에서는 공정중 가장 고온인 곳의 부근의 네 점의 온도를 공정의 모니터링 변수로 선정하였다. 실험을 통해 측정된 온도는 이송 속도와 측정점에 따라 크게 달라지는 특성을 보여주고 있으며 특히 흡수율을 높이기 위해 필수적으로 사용되는 코팅층이 제거되고 잔류하는 양에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 측정된 온도 정보와 경화층의 관계를 나타내기 위하여 복잡한 사상 관계에도 적합한 신경회로망을 이용하여 온도와 경화층 크기의 관계를 모델링하고 경화층 크기를 예측하였다.

이송 속도가 증가함에 따라 예측 오차가 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 특히 속도가 0.7m/min의 경우 오차가 급격히 증가한다. 0.5m/min 이하의 이송 속도 조건에서는 절대오차와 표준 편차가 경화층 깊이인 경우 0.1mm 이하, 경화층 폭인 경우 1.5mm 이하의 정확도로 예측이 가능함을 알 수 있다. 온도 측정점에 따라서도 측정된 온도의 정확성이 크게 달라지는데 일반적으로 선정되는 최고온도부의 측정점보다 레이저 빔을 벗어난 후방이 코팅층의 영향을 덜 받아 경화층 크기와의 상관 관계가 더 좋게 나타나고 있다. 하지만 실시간 공정 모니터링이나 제어를 위한 신호로서는 시간 지연이 발생하는 단점도 있다.

다점 측정의 예측성 향상을 비교하여 보여주기 위하여 같은 데이터를 이용하여 한점 측정의 온도(최고온 부의 온도, T<sub>1</sub>)만 사용한 예측 결과와 비교하였다. 한점 측정의 경우에 비해 오차를 약 50%가량 줄일 수 있어 예측 오차를 줄이기 위한 방법으로서 다점 측정은 매우 유력한 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

향후 여러 측정점에 대한 예측 성능과 시간 지연등을 고려한 정량적 분석이 이루어 진다면 공정의 모니터링 및 제어 시스템의 성능 향상에 크게 도움이 될 것이다.

참고문헌

- [1] H. G. Woo, Y. J. Park, H. S. Cho and Y. H. Han, "An experimental study on the in-process measurement of case depth for laser surface hardening process", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, vol. 10, no. 2, pp65-75, 1993.
- [2] G. Bach, K. Goebbels, and W. A. Theiner, "Characterization of hardening depth by barkhausen noise measurement", *Material Evaluation*, vol. 46, pp. 1676-1680, nov. 1988.
- [3] V. Rubruck, E. Geissler, and H. W. Bergmann, "Case depth control for laser treated materials", *Proc. 3rd ECLAT Conf.*, vol. 1, pp. 207-216, 1990.
- [4] S. Z. Lee, E. Geissler, and H. W. Bergmann, "On-line computer controlled laser hardening", *Proc. 5th Int. Conf. Lasers in Manufacturing*, pp. 301-312, Sept. 1988.
- [5] A. Drenker, E. Beyer, L. Boggering, R. Kramer, and K. Wissenbach, "Adaptive temperature control in laser transformation hardening", *3rd European Conference on Laser Treatment of Materials*, pp. 283-290, 1990.
- [6] F. Bataille, J. M. Cerez, and D. Kechemair, "A systematic method for the design of a multivariable controller actuating power and speed during a CO2 laser surface treatment", *Journal of Laser Application*, vol.4, pp. 43-47, 1992.
- [7] G. Chryssolouris and M. Guillot, "A comparison of statistical and AI approaches to the selection of process parameters in intelligent machining", *Trans. ASME, J. Engng Ind.*, vol. 112, pp. 122-131, 1990.
- [8] J. Mazumder, "Laser heat treatment : the state of art", *Journal of Metals*, May, 1983, pp.18-26.
- [9] H. G. Woo, *Estimation and Control of the Hardening Layer Sizes in Laser Surface Hardening Processes*, Ph.D. Dissertation, KAIST, 1997.
- [10] Y. H. Pao, *Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks*, Addison Welsley, 1989.

**우 현 구**

1965년 2월 4일 출생. 1987년 서울대학교 기계설계학과 (공학사). 1989년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1997년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 2002년~현재 경일대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 공정제어, 광학3차원

측정.