

## 탄소강 환봉의 레이저 표면변태경화 특성에 관한 연구 (II)

- 빔 프로파일 차이에 따른 레이저 표면변태경화 특성 비교 -

김 종 도\* · 강 운 주\*\*

\*한국해양대학교 기관시스템공학부

\*\*한국해양대학교 대학원

### Study on Characteristics of Laser Surface Transformation Hardening for Rod-shaped Carbon Steel (II)

- Comparison of Characteristics on Laser Surface Transformation Hardening as a Difference  
of Beam Profile -

Jong-Do Kim\* and Woon-Ju Kang\*\*

\*Division of Marine Engineering System, Korea Marine University, Busan 606-791, Korea

\*\*Graduated school, Korea Marine University, Busan 606-791, Korea

#### Abstract

The conventional study on the laser surface transformation hardening has been carried out with a beam of the specified shape and uniform power-intensity distribution in order to ensure the uniformity of the hardening depth. Two types of beams - the circular gaussian beam and rectangular beam of the uniform power-intensity distribution were used in this study. we were supposed to optimize the process parameters and to compare the hardening results with two optics respectively. As a result, the hardness distribution of the hardened zone was similar in both cases and the hardened phase by the rectangular beam was denser than that by the circular gaussian beam.

\*Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received May 21, 2007)

Key Words : Defocusing, Integration mirror, Circular gaussian beam, Rectangular beam

#### 1. 서 론

레이저 표면경화 공정에서 표면의 가열온도를 균일하게 하기 위해 빔은 특정 형상 및 균일한 파워밀도 분포를 갖도록 정형화(beam shaping)하는 것이 일반적이다. 이렇게 빔을 정형화하는 방법으로는 디포커싱(defocusing) 법, 빔 오실레이션(beam oscillation) 법 그리고 인티그레이션 미러(integration mirror) 및 칼레이도스코프(kaleidoscope)를 이용하는 방법 등이 있다<sup>1,2)</sup>. 본 연구에서는 용접용으로 널리 적용되고 있는 가우시안 원형빔 광학계(circular gaussian beam

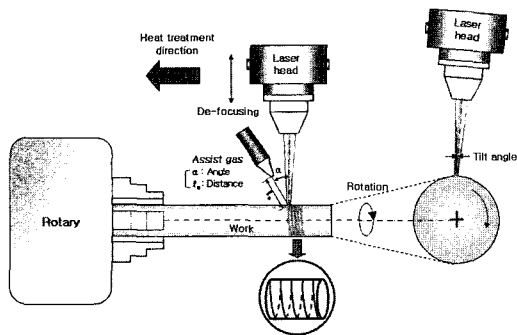
optic)와 자동차 실린더 라이너(cylinder liner) 내면 열처리 전용의 사각빔 광학계(rectangular beam optic)를 이용하였는데, 가우시안 원형빔 광학계의 경우에는 간단히 비초점 거리의 조절만을 통해 빔을 성형하는 디포커싱 법에 해당하고 사각빔 광학계는 특수 가공된 인티그레이션 미러를 이용하여 빔을 성형하는 방법에 해당한다. 경화부 단면형상 및 경도분포 등의 표면경화 특성은 빔의 형상 및 파워밀도 분포의 차이에 따라 다르게 나타날 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 각 광학계별 특성 차이를 제시하고 표면경화 공정의 결과를 비교, 검토함과 동시에 가우시안 원형빔의 표면경화 공정으로의 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

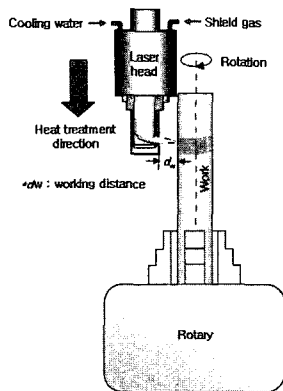
### 2.1 실험장치

실험장치는 가우시안 빔 및 사각빔 광학헤드를 적용하여 각각 두 파트로 나누어 구성하였다. 물론 기본적인 장치구성은 본 논문의 1보와 마찬가지로 4kW급 연속출력 Nd:YAG 레이저, 6축 제어로봇 및 소형 선반으로 구성되며, 실험재료 역시 판상 및 봉상의 SM45C 강을 동일하게 적용하였다. Fig. 1에 각 광학계별 장치개략도를 나타낸다.

빔은 가우시안 파워밀도 분포를 가지는 원형빔과 비교적 균일한 파워밀도 분포의 사각빔을 적용하였다. 각 광학계의 개략적인 빔 프로파일과 집광특성을 Fig. 2에 나타낸다. 가우시안 원형빔의 경우, 비초점 거리(defocusing distance)의 증가에 따라 빔 직경이 거의 선형적으로 증가하고 있으며 파워밀도는 전형적인 가우시안 분포를 보이고 있다(Fig. 2(a)). 반면, 사각빔은 인티그레이션 미러를 통해 직사각형 형태로 집광되며 파워밀도의 경우, 가로폭으로는 완전한 가우시안 분포를, 세로폭으로는 비교적 균일한 모자형상의 분포를 가진다. 이는 실험 전, 번 패턴(burn pattern)을 통해 간접적으로 확인할 수 있었다. 또한, 작업거리(working distance, 광학계 표면에서 시편 표면까지의 거리)의



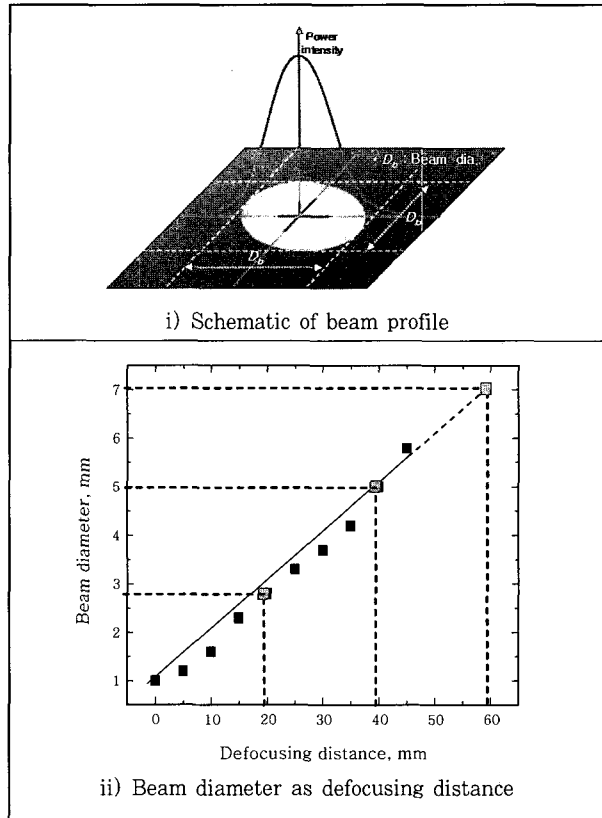
(a) Circular gaussian beam



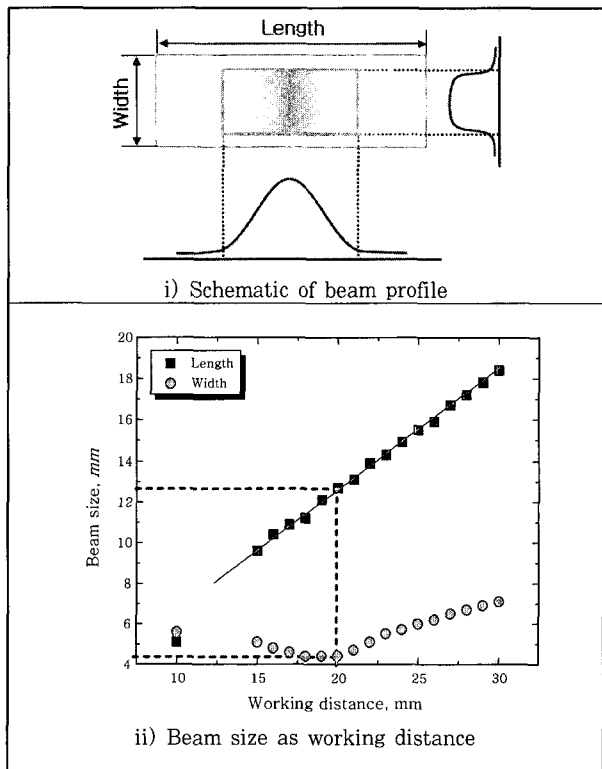
(b) Rectangular beam

Fig. 1 Experimental arrangement

증가에 따라 가로 길이는 점차 증가하지만 폭은 상대적으로 변화가 미미한 것을 확인할 수 있다(Fig. 2(b)).



(a) Gaussian beam



(b) Rectangular beam

Fig. 2 Beam profile and focusing characteristic

### 2.2 실험방법

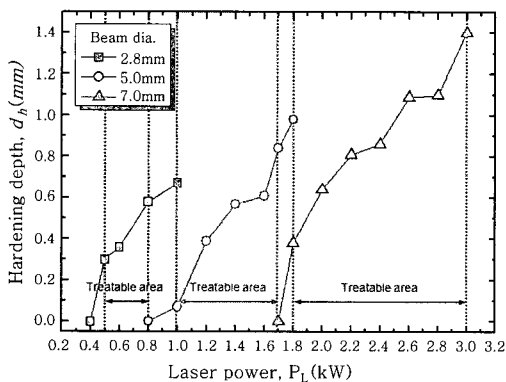
실험절차는 본 논문의 1보와 동일한 요령으로 실시하였다. 광학계별 표면경화 특성을 비교, 검토하고 공정 변수를 최적화하기 위하여 본 실험에 앞서 적절한 빔 사이즈를 선정하였다. 열처리 전용의 사각빔 광학계는 자동차 실린더 라이너의 내면 열처리 전용으로 설계된 것으로 작업거리 20mm에서 가장 적합하였으며 번 패턴 (burn pattern) 확인 결과, 빔 사이즈는 가로 12.8mm, 폭( $W_b$ ) 4.3mm였다. 반면, 가우시안 빔의 경우에는 빔 사이즈에 따라 파워밀도가 비교적 크게 변할 것으로 판단되어 표면용융 유발 가능성이 적고 표면을 최대한 균일하게 경화시킬 수 있으면서 열처리 가능 출력범위가 비교적 넓은 빔을 선정하였다. Fig. 3에 가우시안 빔 사이즈별 출력에 따른 경화 깊이변화 양상을 나타낸다.

빔 직경이 2.8mm로 작으면 파워밀도가 증가하므로 열처리 가능 출력은 낮지만 표면 용융 가능성이 높아져 경화가능 출력이 좁은 범위에 국한되는 반면, 빔 직경이 7.0mm로 크게 되면 빔 자체의 파워밀도가 낮기 때문에 상대적으로 높은 출력이 요구되지만 열처리 가능 출력 범위는 비교적 넓게 나타났다. 그러므로 가우시안 원형 빔의 경우에는 2.8mm와 7.0mm 빔의 중간 특성을 갖는 5.0mm 직경의 빔을 이용하여 실험하였다. 특히, 가우시안 원형빔의 경우에는 빔 진행방향에 구애를 받지 않지만 사각빔은 가로 및 폭 방향으로 파워밀도가 다르므로 빔의 진행은 파워밀도가 균일한 폭 방향으로 정하여 프로파일 면에서 가우시안 빔과 차별을 두고자 하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 경화부 단면 및 경도분포 특성

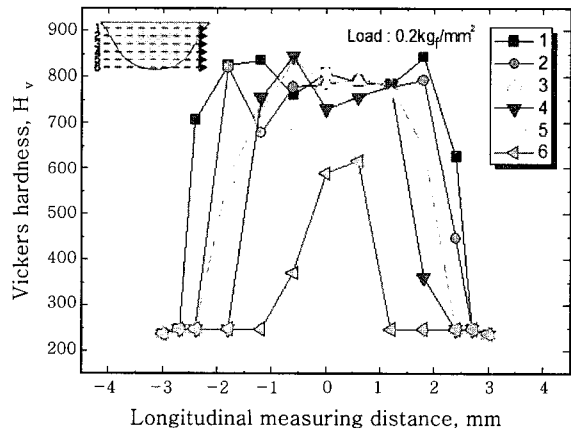
열축적과 경화 트랙간 중첩의 영향을 배제한 빔 자체



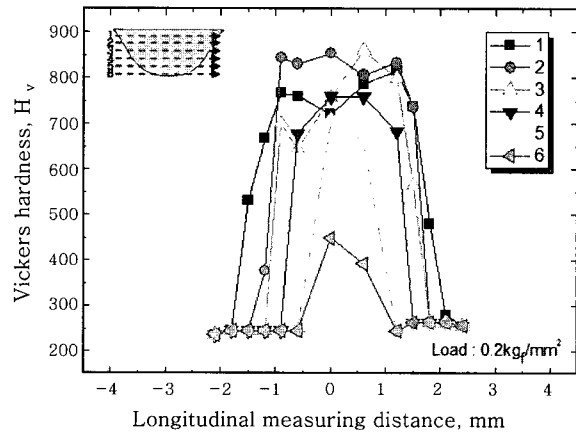
**Fig. 3** Heat treatable range of output power as beam diameter  
(N : 20rpm,  $v_b$  : 54mm/min,  $G_s$  : 20 l/min)

만의 경화특성을 파악하기 위해 평판 상에서 기초 실험을 행하였다. Fig. 4는 평판 상에서 1회 스캔한 단면의 깊이에 따른 종방향 경도분포를 나타낸다. 사이즈에 차이가 있을 뿐, 가우시안 빔과 사각빔 모두 유사한 분포를 가지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 가우시안 원형빔의 경우 가우시안 파워밀도 분포를 가짐에도 불구하고 경도 분포는 사각빔의 경우와 유사하게 나타나는데, 이는 특정 파워밀도 이상에서는 동일하게 변태온도 이상으로 가열되어 급속 냉각 시, 거의 균일한 경도를 가지기 때문인 것으로 판단된다.

광학계별로 환봉을 경화 처리한 후, 경도특성을 비교하기 위해 레이저 출력 1.8kW, 빔 이송속도 72mm/min 및 회전수 22rpm의 동일조건에서 실험하였으며, 그 결과를 Fig. 5 및 6에 나타낸다. 가우시안 빔을 이용한 경우, 경화 폭은 넓고 깊이는 얇은 다소 납작한 모양인 반면, 사각빔은 경화부 폭은 좁고 깊이는 깊은 비교적 볼록한 모양이다. 경도분포는 종방향과 깊이방향으로 나누어 측정하였다. 종방향 경도분포는 곡선의 형상에 다소 차이가 있을 뿐, 두 광학계 모두 주기적으로 증감

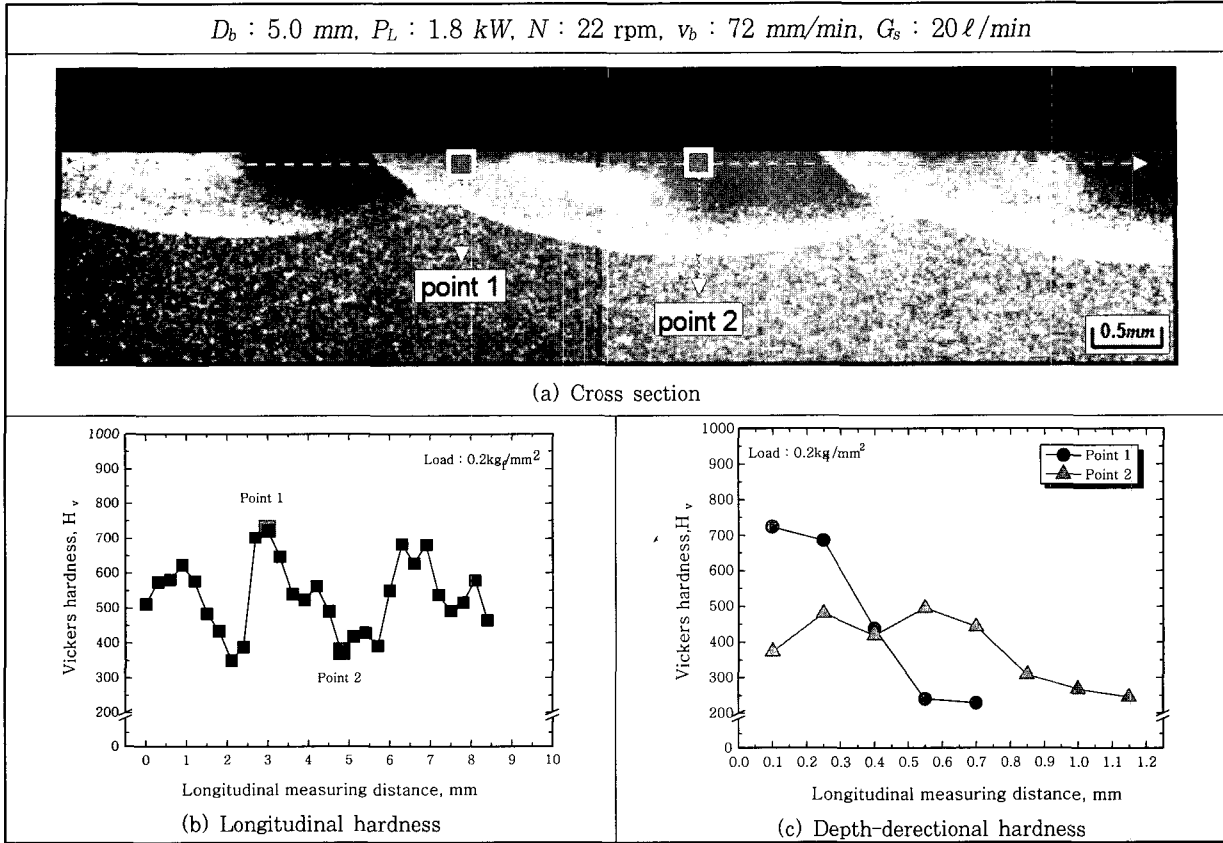


(a) Gaussian beam

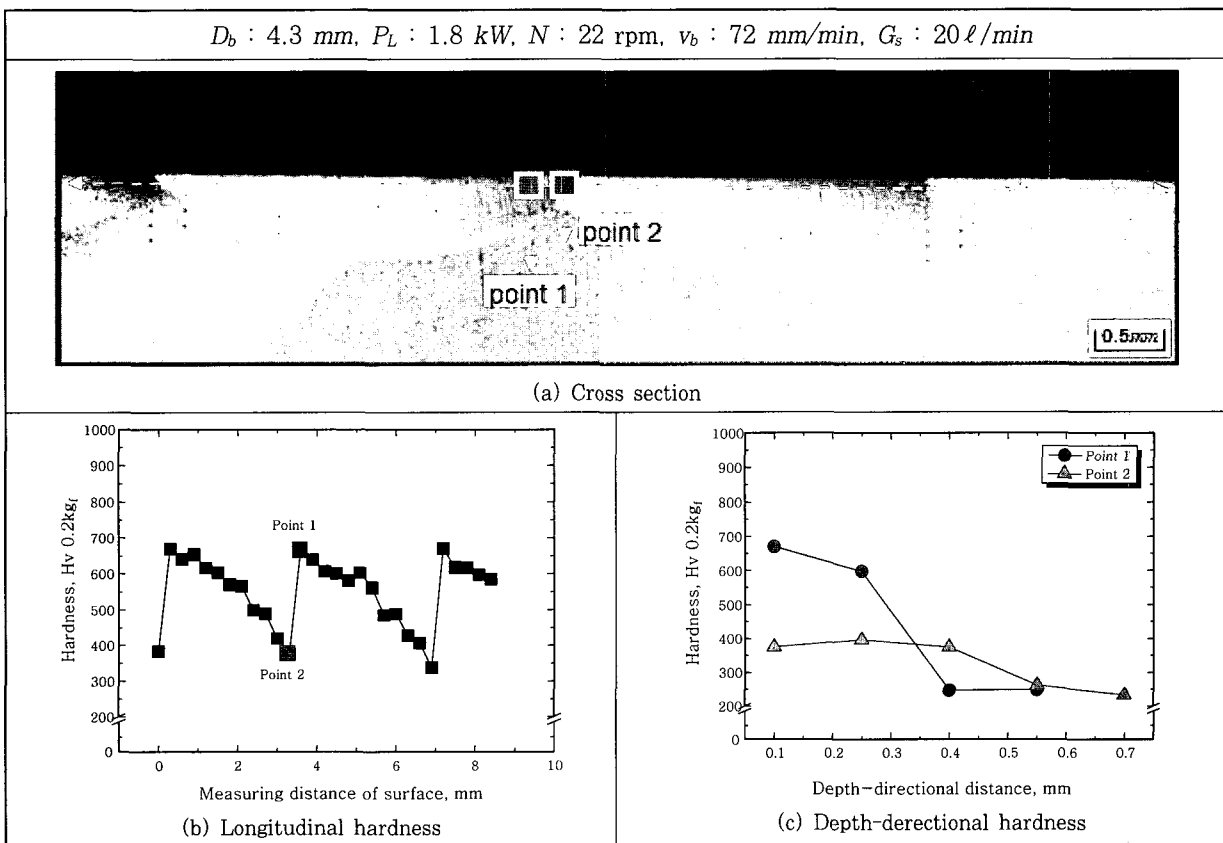


(b) Rectangular beam

**Fig. 4** Hardness profile of hardened zone



**Fig. 5** Hardness distribution of hardened zone(circular gaussian beam)



**Fig. 6** Hardness distribution of hardened zone(rectangular beam)

을 반복하는 경향을 보이는데, 이는 경화트랙과 트랙이 겹쳐지는 중첩부 근방에서 템퍼링에 의한 경도 저하가 발생하기 때문이다. 깊이방향 경도분포는 종방향 경도 중에서 상대적으로 높고 낮은 두 지점을 선택하여 측정하였다. 깊이방향 경도분포도 두 광학계를 이용한 경우 모두 유사하게 나타나는데, point1에서는 깊이에 따라 점차적으로 감소하는 경화부의 전형적인 특성을 나타내고 있는 반면, point2에서는 소폭 상승하다가 떨어지는 경향을 보이는데, 이는 측정 위치가 깊이에 따라 중첩 경계부로부터 멀어져 점차적으로 열영향을 적게 받기 때문인 것으로 분석된다.

3.2 공정변수의 최적화

중첩부 부근에서의 템퍼링에 의한 경도 저하는 불가피하였다. 그래서 공정변수의 최적화는 열축적과 중첩의 영향 및 템퍼링에 의해 경도가 저하하는 폭을 최소화하는데 주안을 두었다. 각 광학계별 최적 조건은 가

우시안 빔의 경우, 레이저 출력( $P_L$ ) 1.8kW, 빔 이송 속도( $v_b$ ) 90mm/min, 시편 회전수( $N$ ) 27~29rpm의 범위에서 얻어졌으며, 사각빔의 경우에는 레이저 출력 1.8kW, 빔 이송속도 72mm/min, 회전수 26~28rpm 범위에서 얻어졌다. 각 최적화 결과 중, 대표적인 것의 단면 및 경도분포를 Fig. 7에 나타낸다. 경도는 거의 350~750Hv 범위 내를 유지하였다. 경도 저하폭은 환봉의 길이방향으로 10mm를 열처리한다고 가정했을 때, 가우시안 빔의 경우에는 대략 3mm, 사각빔은 대략 4mm정도로 확인되었다. 열처리부의 경화깊이는 규격 KS D 0215<sup>3)</sup>에 의거하여 경도 550Hv까지의 깊이로 정의되지만 환봉을 열처리 한 경우, 중첩과 열영향에 의해 동일 시편에서도 측정 부위별로 경화깊이가 달라지므로 경화부 전면에 걸친 유효 경화깊이를 명확하게 정의하기가 어렵다. 그래서 종방향 경도분포의 최고점에서의 깊이방향 경도분포를 기준으로 하여 유효 경화깊이를 측정된 결과, 가우시안 빔의 경우 대략 0.33mm,

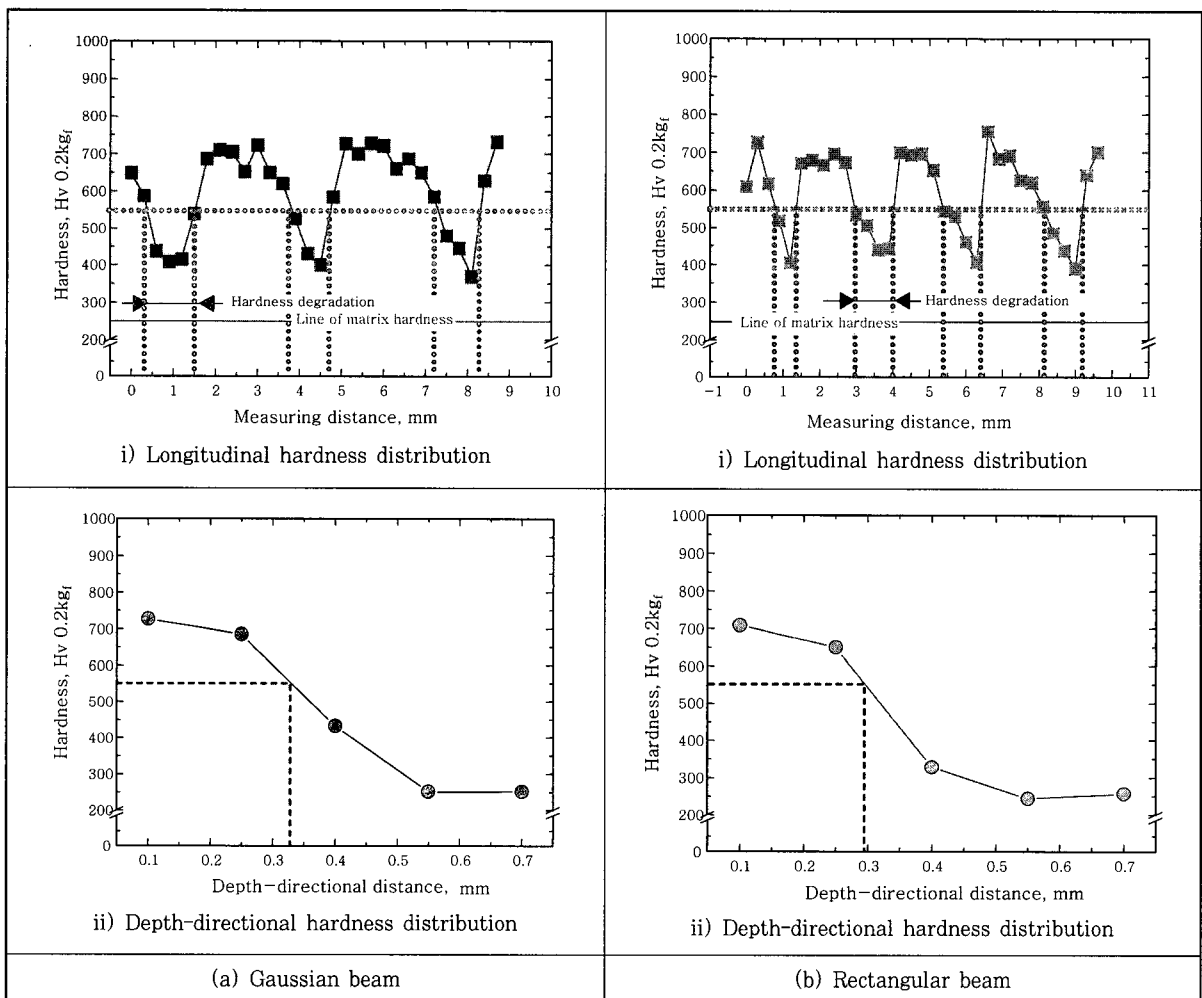


Fig. 7 Optimization of process parameters

사각빔의 경우 0.3mm가량으로 나타났다.

마지막으로, 가우시안 빔이 사각빔에 비해 동일 거리를 열처리한다고 가정했을 때, 더 적은 회전수로 가능하다는 것을 경도분포를 통해 기능할 수 있는데, 이는 가우시안 빔의 사이즈(4.3mm)가 사각빔(3.4mm)에 비해 더 크기 때문이다. 그러나 표면용융의 관점에서는 파워밀도 분포가 균일한 사각빔이 가우시안 빔에 비해 오히려 더 나은 결과를 보일 것으로 예상된다.

### 3.3 경화조직의 비교

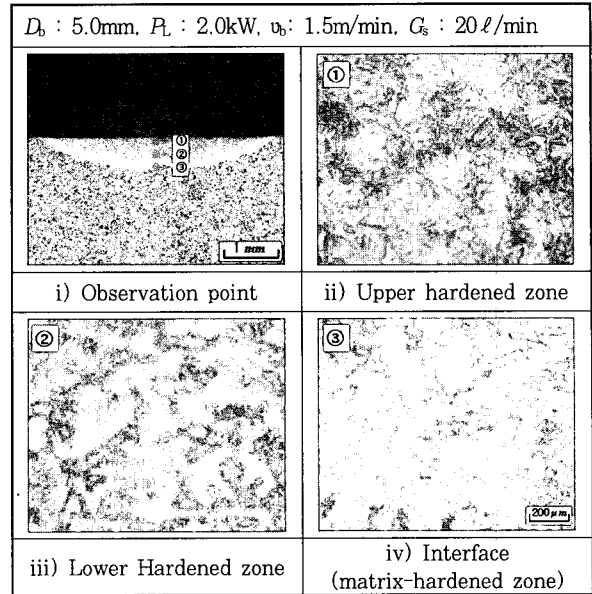
추가적인 경화특성 비교를 위해 각 광학계에 의한 경화부 조직을 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 평판상에 1회 스캔한 단면사진과 깊이에 따른 동일 부위의 1000배 확대사진을 Fig. 8에 나타낸다. 표면에 가까울수록 높은 온도로 가열되고 빠른 속도로 냉각되므로 대부분의 모재 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태하여 치밀하게 분포하고 있다. 또한, 깊이가 깊어질수록 마르텐사이트 조직은 감소하며 그 사이에 잔류오스테나이트 조직이 증가하는 것을 확인할 수 있다<sup>4)</sup>. 또한, 모재와의 경계는 A<sub>1</sub>과 A<sub>3</sub> 변태점 사이의 온도로 가열되어 냉각된 영역으로, 페라이트만 선택적으로 변태한 오스테나이트 조직 중에 일부 페라이트 조직이 나타나고 있다. 이러한 깊이에 따른 조직적인 차이가 발생하는 이유는 깊이에 따른 온도이력의 차이 때문이다.

특히, 가우시안 빔보다 사각빔에 의한 마르텐사이트 조직이 더 치밀하게 분포하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 사각빔이 가우시안 빔에 비해 스폿의 사이즈가 작아서 파워밀도가 높을 뿐만 아니라 파워밀도 분포도 비교적 균일한 데에 기인한다. 즉, 앞서 언급했지만 사각빔이 가우시안 빔에 비해 에너지의 분산이 적고 에너지가 스폿 내로 집중되기 쉬우므로 비교적 깊은 곳까지 고르게 가열할 수 있기 때문이다. 이를 통해, 경화조직적 측면에 있어서는 가우시안 빔보다 사각빔이 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

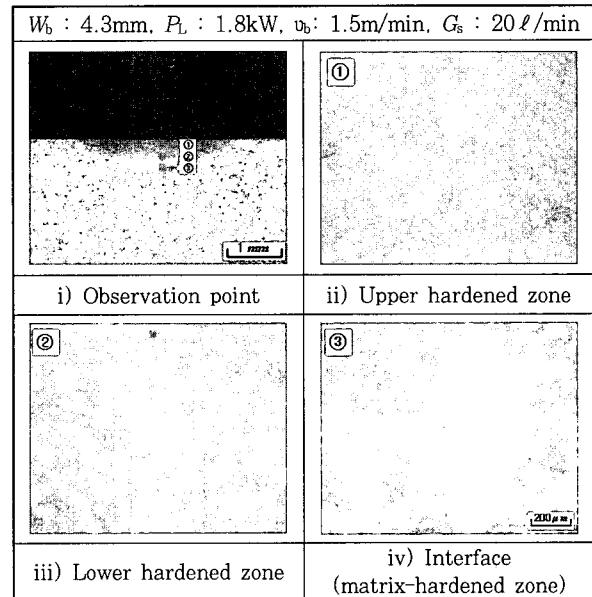
## 4. 결 론

빔 프로파일이 서로 다른 두 광학계를 적용하여 각각의 경화 특성을 비교, 검토하고자 하였으며 그 결과를 다음과 같이 요약한다.

- 1) 가우시안 분포의 원형빔 광학계와 파워밀도 분포가 비교적 균일한 열처리 전용의 사각빔 광학계를 실험에 적용하였다.
- 2) 가우시안 원형빔은 열처리 가능 출력범위를 고려



(a) Gaussian beam



(b) Rectangular beam

Fig. 8 Microstructure in hardened zone

하여 5.0mm 직경의 빔을, 사각빔은 작업거리 20mm에서 최적화된 빔을 적용하였다.

3) 환봉 표면을 열처리한 시편의 경도는 종방향 경도 분포의 경우에만 형상적으로 약간의 차이가 있을 뿐, 깊이방향 경도분포는 비슷하게 나타났다.

4) 공정변수의 최적화는 템퍼링에 의해 경도가 저하하는 폭을 최소화하는데 주안을 두었다. 두 광학계 모두 경도분포에 있어서는 대략 350~750Hv 사이값을 유지하였으며, 경도 저하폭은 10mm를 경화 처리했다고 가정한 경우, 가우시안 빔은 대략 3mm, 사각빔은

4mm 정도로 나타났다.

5) 경화부 조직은 사각빔이 가우시안 원형빔에 비해 더 치밀하게 분포하고 있는 것이 확인되었으며, 그것은 파워밀도의 차이에서 기인한다고 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지원 지역산업기술개발사업인 "레이저 복합가공기용 핵심 광학모듈 개발 : 10024308" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. John F. Ready : LIA HANDBOOK OF LASER MATERIAL PROCESSING, Laser Institute of America, (2001), 223~261
2. 柴田公博 : 레이저焼入の實際, 溶接學會誌 **64-3**, (1995), 10~13
3. KS : D0215, Methods of measuring case depth for steels, (1985)
4. G.N. Haidemenopoulos : Coupled thermodynamic/ kinetic analysis of diffusional transformations during laser hardening and laser welding, Journal of alloy sand compounds, 320, (2001), 302~307