

## 레이저 재료 가공을 위한 광폭빔 광학 장치

Wide Beam Optical System for the Laser Materials Processing

김재도, 조응산, 전병철

인하대학교 기계공학과

Jae-Do Kim, Eung-San Cho, Byung-Cheol Jeon

Department of Mechanical Engineering, Inha University

(1998년 6월 25일 받음)

### Abstract

A new wide laser beam optical system for the laser materials processing has been developed with a polygonal mirror. It consists of polygonal mirror and cooling part that prevents the surface of rotating polygonal mirror from damage by heat. The polygonal mirrors have been designed and made as 24 and 30 facets in pyramid type.

This system provides a uniform linear laser heat source with the surface scanning width from 15 to 50mm according to the scanning height. To examine the wide laser beam, He-Ne laser is used. Also, Acryl is used to confirm the laser beam pattern by burn-pattern print. To analyze the energy distribution of the wide laser beam, empirical values and theoretical values are compared and discussed. To improve the efficiency of the wide laser beam optical system, methods are suggested by the optical theories. For larger area processing like turbine blade, drawing roller, cold roller and guide plate, optimal overlapping locations have been calculated and analyzed by geometric and optical theories.

**Key Words :** Wide laser beam (광폭 레이저 빔), Scanning width (조사 폭), Scanning height (조사 높이), Polygonal mirror (다면경), Beam pattern (빔 형태), Cooling part (냉각부), Optimal overlapping location (최적 중첩 위치), Excessive focal length (잉여 초점 길이)

### 1. 서론

레이저 가공 기술은 전자빔과 함께 고밀도의 고열원을 이용한 가공법으로 표면 가공시 입열량이 적어 금속 가공시에 열영향부가 작고 가공에 따른 열변형이 작다는 장점을 가지고 있다. 특히 전자빔 가공은 진공 상에서의 가공만이 가능하다는 단점을 가지고 있는 반면에 레이저 가공은 대기 중에서의 가공이 가능하며, 빔의 전달을 자유롭게 조절할 수 있고, 가공상 특성들의 제어가 가능하여 많은 응용 기술이 발달되어 왔다.

고출력 레이저를 활용한 가공 기술은 용접, 절단, 표면 처리 분야로 대별된다. 전반적인 기계 기술의 발달은 더 우수하고, 다 기능성의 기계 부품들을 필요하게 되었고, 특히, 표면 처리 분야인 레이저 클래딩, 레이저 표면 경화는

표면에 우수한 기계적 특성을 부여하기 위한 가공법으로 연구·개발되어 왔다<sup>1)</sup>. 지금까지 개발되어 온 기술은 레이저빔의 특성상 집중된 빔에 의한 부품의 국부적 기계적 특성을 향상시키기 위한 연구들이 진행되어 왔고, 이러한 기존의 기술에 의한 가공은 1~3mm 정도의 가공폭을 얻을 수 있지만, 더 넓은 면의 표면 개질을 위해서는 가공폭 상에 한계가 있어 중첩 가공을 하여야 했다. 또, 이러한 중첩 가공은 가공시간과 중첩 가공에 따른 후 가공비를 요하게 되어 가공비를 상승시키게 되었고, 중첩에 의해서 선 가공부에 열처리 효과를 주어 선 가공부의 특성을 변형시키는 문제와 중첩된 부분의 비연속적인 기계적 특성의 분포에 따른 잔류응력 집중으로 크랙(crack)의 발생 등을 유발시켜 기계적 특성을 저하시키기도 한다<sup>2)</sup>. 따라서, 국부가

공에 적합한 레이저 가공의 장점을 가지고서 넓은 면을 가공할 수 있는 광폭빔 광학 장치를 개발하게 되었다.

광폭 가공을 위한 많은 방법과 장치들이 개발되어 왔다<sup>3)</sup>. 디포커싱 방법(Defocusing method), 원통형 렌즈(Cylindrical lens method), 세그멘티드 미러(Segmented mirror)와 진동 거울(Oscillating mirror)을 이용한 방법들이 개발되었다<sup>4-6)</sup>. 앞의 세 가지 방법은 고출력 레이저를 사용할 때에 쉽게 냉각을 할 수 있다는 장점이 있지만, 가공할 수 있는 가공폭이 정해져 있다는 단점이 있다. 반면에 마지막 방법은 가공폭을 자유롭게 조절할 수 있다는 장점은 있지만 냉각이 앞의 방법보다 쉽지 않기 때문에 고출력 레이저 가공시에 반사 미러 표면의 손상을 입히기 쉽고, 진동 거울을 제어가 어려워 실제 가공시 양 끝단에 레이저 조사 에너지가 집중되어 표면에서의 손상을 유발시키게 된다. 이러한 문제점들을 해결하고자 본 연구를 통하여서 가공폭의 조절이 가능하며 고출력 레이저에 의한 손상을 방지하기 위한 냉각장치를 설계하였다.

본 연구에서는 24면과 30면의 다면경(Polygonal mirror)을 설계·제작하였으며, He-Ne 레이저와 120W의 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 광폭빔 조사 및 가공 실험을 통하여 15~50mm의 가공폭을 얻을 수 있었고, 광폭빔의 에너지 분포를 광·기하학적인 해석을 통하여 실험 값과 비교 검토하여 광폭빔 조사의 특성을 확인하였다. 또 광폭빔 조사의 효율을 향상시키기 위한 방법들을 광학적인 이론에 의하여 제시하였다. 마지막으로, 터빈 블레이드(Turbine blade), 드로잉 롤러(Drawing roller), 콜드 롤러(Cold roller), 가이드 플레이트(Guide plate) 등과 같이 더 넓은 면의 표면을 개질하기 위해 필연적인 최적 중첩 위치를 에너지 분포에 따른 이론 및 실험적인 검토를 통하여 예측할 수 있었다.

## 2. 본론

### 2.1 광폭빔 광학 장치의 설계

본 연구 개발에서는 광폭빔 광학 장치를 개발하기 위해 다면경, 렌즈와 미러, 구동모터, 냉각장치를 하나의 시스템으로 하여 설계하였다. 연구 개발에서 가공폭이 10~50mm이 되도록 다면경과 렌즈를 설계·설정하였다. 광폭빔 광학 장치의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 구동 모터는 정격 구동시 2000rpm으로 구동되는 모터를 사용하여 레

이저빔의 조사 주파수(Frequency)가 0~1000 Hz범위까지 자유로이 조절될 수 있도록 변압기를 통하여 제어할 수 있도록 설계하였다. 또, 고출력 레이저에서 사용 가능하도록 다면경의 냉각장치는 고속 회전에서도 냉각수가 순환 가능토록 설계하였으며, 3 l/min를 냉각 유량으로 설정하였다<sup>7)</sup>.

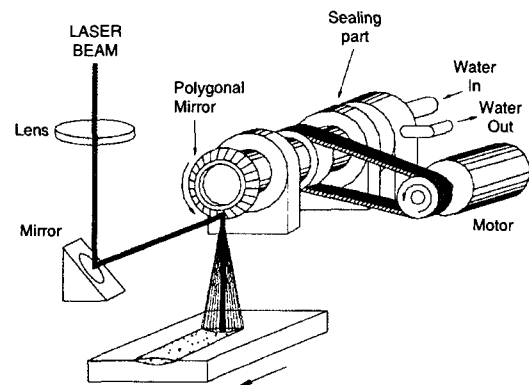


Fig. 1. Schematic of wide beam optical system

### 2.1.1 다면경(Polygonal Mirror)

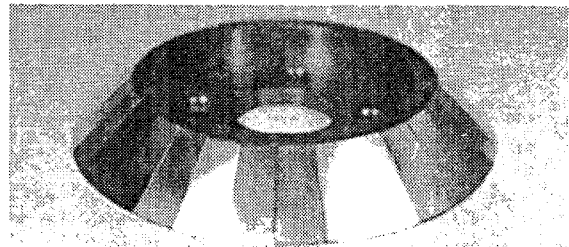


Fig. 2 Photograph of the Polygonal Mirror(24 facet)

본 연구의 핵심 부품으로 24면(Facet)과 30면의 피라미드(Pyramid)형태의 다면체로 설계하였으며 Fig. 2 와 같다. 면의 수는 레이저빔의 조사 Frequency와 레이저 빔 조사 각에 변화를 주어 가공품의 가공 정도와 가공폭을 결정하는 변수이다. 다면경의 재질은 일반적으로 우리나라 산업체에 많이 보급되어 있는 CO<sub>2</sub> 레이저의 파장대인 10.6μm에서 반사도가 1에 가깝고 열전도율이 좋아 냉각 속도가 빠른 구리를 다면경의 재질도 설정하여 정밀 가공하여 제작하였다<sup>8)</sup>. 또, 레이저의 반사율 향상과 열 흡수와 가공시 발생하는 산화 가스에 의한 다면경의 파손을 막기 위해 표면을 금으로 도금하였다. 그리고, 고출력 레이저에 의한 다면경의 고온화에 따른 파손을 막기 위하여 냉각장치를 설

치할 수 있도록 설계하였다.

### 2.2 광폭빔의 원리

광폭 장치에 의한 가공폭은 빔과 다면경과의 기하학적인 계산에 의해서 다음과 같이 구해진다<sup>2,3</sup>.

$$W = 2H \frac{\tan A}{\sin a} \quad (1)$$

Fig. 3 에서  $W$ 는 가공폭이며  $H$ 는 조사 높이로 다면경 표면에서의 빔의 중심에서부터 가공물까지의 거리이며,  $A = \frac{360^\circ}{2N}$  으로 계산되며,  $N$ 은 다면경의 면의 수를 의미한다. 그리고,  $a$ 는 다면경 표면의 법선과 입사빔과의 각도를 나타낸다. 24면의 다면경의 경우 조사 각이  $15^\circ$ 이고 30면의 경우  $12^\circ$ 이다.

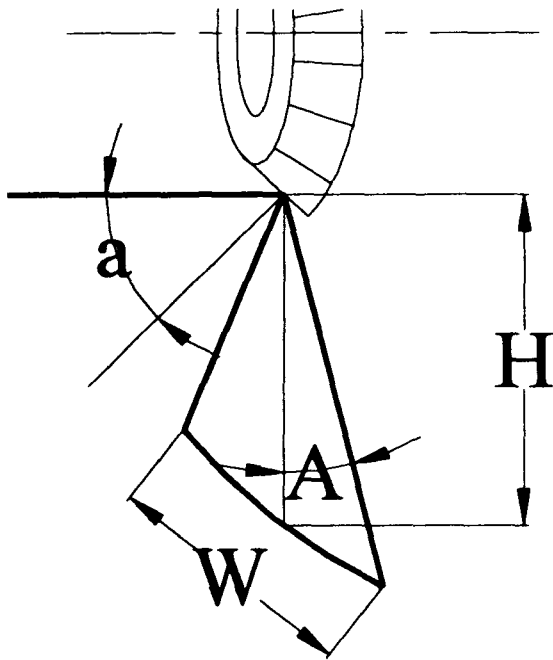


Fig. 3. Schematic principle of polygonal mirror ( $H$  : scanning height,  $W$  : scanning width,  $A$  : scanning angle /2,  $a$  : incident beam angle)

### 2.3 광폭빔의 에너지 분포

광폭빔에 의한 에너지 분포는  $TEM_{00}$  모드에서 Fig. 4와 같다. 이러한 에너지 분포는 아크릴을 이용한 가공시 가공양상을 통하여 확인할 수 있다<sup>11, 12</sup>.

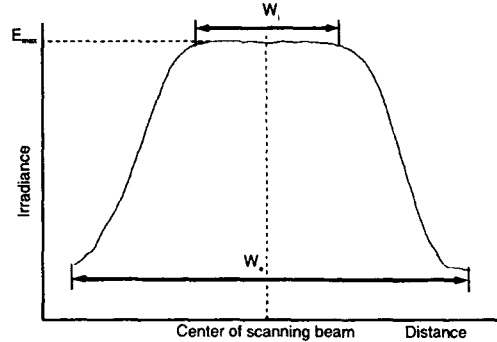


Fig. 4. Energy distribution of the wide laser beam ( $W_i$  : internal scanning width,  $W_e$  : external scanning width)

### 2.4 광폭빔의 조사 특성

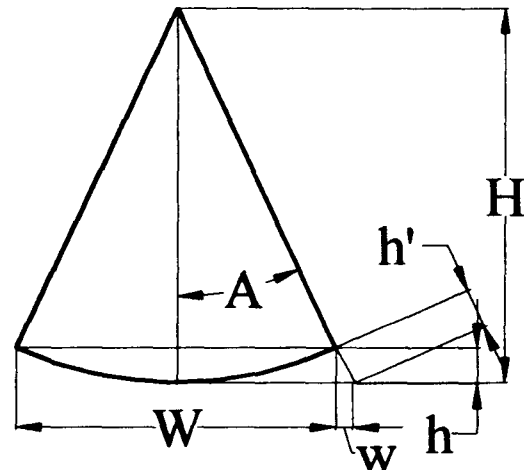


Fig. 5 Profile of the wide beam ( $h'$  : excessive focal length)

광폭빔은 렌즈를 통과한 레이저빔이 다면경에 의해서 가공 재료에 조사되면서 광폭을 얻게 되는데 그 조사 형태가 Fig. 5 에서와 같이 부채꼴 형태로 조사된다. 여기서  $H$ 는 조사 높이,  $h'$ 은 잉여 초점 길이(excessive focal length)이다. 잉여 초점거리는 다음과 같이 유도된다.

$$h' = \frac{(1 - \cos A) \times H}{\cos A} \quad (2)$$

위 식에서 알 수 있는 것과 같이 잉여 초점 길이는 조사각의 함수로 Fig. 6과 같다. 집속렌즈에 의한 심도(depth of focus)<sup>11)</sup>가 잉여 초점 길이보다 작게 되면 이 범위에서의 에너지 밀도가 낮은 면에 분포하게 되어 가공상의 손실이 발생되게 된다. 잉여 초점 길이가 심도 범위보다 커지면 집속된 빔의 초점이 커지게 되고 레이저빔의 강도 분포가 현

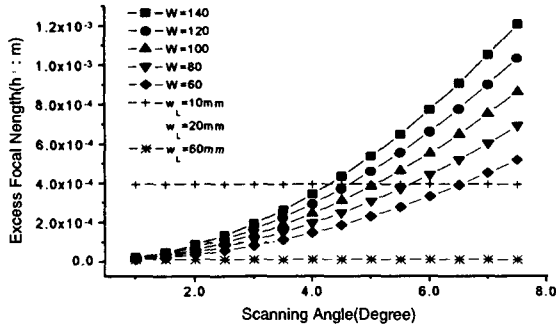


Fig. 6. Excessive focal length with scanning angle and scanning height ( $W$  : scanning height,  $W_i$  : incident beam diameter)

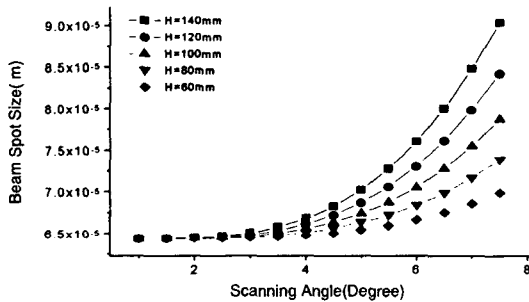


Fig. 7. Beam spot size at various scanning angle and scanning height

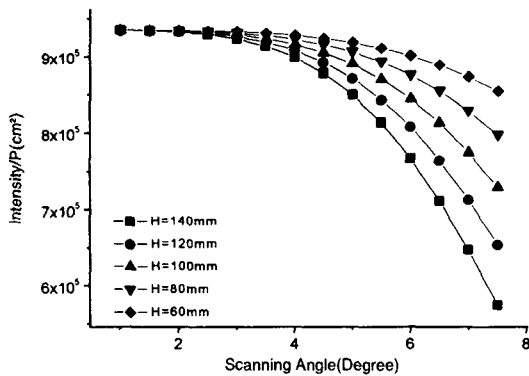


Fig. 8. Intensity at various scanning angle and scanning height ( $P$  : laser power)

저히 감소하는 것을 알 수 있다(Fig. 7, Fig. 8)<sup>[3], [6], [7]</sup>. 따라서, 가공상의 특성과 가공 손실을 최소화하기 위한 광폭빔 조사 특성을 예측할 수 있다.

Fig. 7, Fig. 8에서와 같이 집속렌즈에 입사되는 레이저 빔의 직경이 작을 수록 가공 손실을 최소화 할 수 있다. 입사빔의 직경에 따른 심도는 Fig. 5에서와 같다. 집속빔의

직경을 작게 하여 에너지 밀도를 증가시키기 위한 빔 확대기 (beam expander)의 반대 개념인 빔 축소기 (beam reducer)를 장착하여 사용할 경우 집속빔의 직경은 약간 증가하게 되나, 심도가 길어지게 되어 가공 손실을 줄일 수 있다<sup>[6]</sup>.

### 3. 실험방법

#### 3.1 He-Ne 레이저를 이용한 광폭빔 조사 실험

24면과 30면의 다면경을 사용한 광폭빔 조사 실험을 He-Ne 레이저, 포토 다이오드 (Photo-diode)와 오실로스코프를 활용하여 레이저빔 조사폭을 조사높이에 따라서 측정하였다. 조사폭은 He-Ne 레이저가 가시광선 영역의 레이저이기 때문에 육안으로도 조사폭을 확인할 수 있으며, 정확한 조사폭을 얻기 위한 포토 다이오드를 광폭빔 양단에 설치하여 정확한 조사폭을 측정할 수 있도록 하였다.

#### 3.2 120W CO<sub>2</sub> 레이저와 아크릴을 이용한 광폭빔 조사 실험

본 연구에서 개발된 광폭 장치를 이송 테이블에 장착하여 광폭빔 조사 실험을 하였다.

120W CO<sub>2</sub> 레이저, 190.5mm의 심도를 가지는 집속렌즈, 이송 테이블의 이송 속도를 0.14~0.4m/min으로 조절하여, 아크릴을 이용하여 실험하였다<sup>[20]</sup>. 광폭빔의 조사 높이에 따른 조사폭과 그에 따른 빔 조사 형태를 실험 값과 광폭빔 조사 특성에 대한 이론과 비교 및 검토하여 광폭 장치의 실제 가공에의 적용 가능성 대하여 고찰하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 He-Ne 레이저에 의한 광폭빔 조사

He-Ne 레이저를 사용하여 24면과 30면의 다면경으로 광폭빔 조사 실험을 한 결과 조사폭은 선형적인 관계를 갖는 것을 알 수 있었다. 이론적인 계산에 의한 가공폭보다 작은 조사폭을 나타내는 이유는 면과 면 사이의 모서리 부분에서의 반사에 의한 손실이 있기 때문이고, 이런 손실을 줄이기 위하여서는 다면경의 직경을 크게 하면 된다. 하지만, 이렇게 할 경우에는 다면경의 제작에 많은 비용이 필요하고, 전체 시스템의 크기가 커지기 때문에 50~80%의 조사 효율이 되게 설계하는 것이 가장 타당하다.

4.2 120W CO<sub>2</sub> 레이저에 의한 광폭빔 조사

4.2.1 광폭빔 가공 형태

Table 1. Experiment Parameter

Parameter	
Number of Mirror Facet	24, 30
Scanning Height(mm)	60~140
Travel Speed(m/min)	0.14~0.4

광폭빔 조사 실험의 변수는 Table.1 과 같다. 광폭빔 조사에 의한 아크릴 가공 형태는 Fig. 9의 형태를 가지게 된다. 이는 광폭 장치에 의한 광폭빔의 에너지 분포가 Fig. 4 와 같이 나타나기 때문이다. 조사 높이에 따른 표면 조사폭은 조사 높이에 대해 선형적인 관계를 가지게 된다(Fig. 10). 테이블의 이송 속도에 따른 가공폭의 영향이 작은 것은 아크릴의 용융점이 낮기 때문이고 가공 깊이는 이송 속도가 느려질수록 깊어지는 것을 알 수 있었다. 이는 모재에 전해지는 에너지의 양이 많아지기 때문이다. 또, 조사 높이가 높아짐에 따라서 표면 조사폭(W)과 내부 조사폭(W)의 차이가 커지게 되고 더 많은 에너지 손실이 발생된다. 실제 금속을 이용한 레이저 클래딩과 레이저 하드닝 가공에서 가공 될 수 있는 가공폭과 경화 깊이, 다이루션(dilution), 클래딩 층의 두께를 예측 가공할 수 있다.

4.2.2 다면경의 면수에 따른 가공 특성

다면경의 면수가 많을수록 조사 각이 작아진다. 같은 조

사 높이에서 조사폭은 작아지지만, 좁은 조사폭에 더 높은 에너지 밀도를 가지게 되어 가공 깊이가 깊게 나타난다. 따라서 30면의 다면경을 사용한 실험결과에서 표면 조사폭과 내부 조사폭의 차가 작게 되어 더 균일하게 가공된다.

4.2.3 최적 중첩위치

기존의 가공법에 의한 중첩은 TEM<sub>00</sub>모드의 경우 빔 직경의 50% 범위에서 중첩을 하였으나 가공면의 상당한 부분이 중첩에 의하여 다시 불필요한 열처리를 받게 된다. 따라서 가공 손실을 줄이기 위한 방법으로 Fig. 4 에서와 같이 강도가 균일하게 분포된 영역의 가공폭을 중첩 위치로 선정할 수 있고, 실험을 통하여 중첩 위치는 내부 조사폭을 통하여 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 광폭빔 광학 장치를 통하여 10~50mm의 가공폭을 얻을 수 있었다.
- (2) 광폭빔의 조사 특성을 통하여 가공상의 특성을 예측할 수 있었다.
- (3) 넓은 면을 가공하기 위한 최적의 중첩 위치를 선정할 수 있었다.
- (4) 본 연구에서 개발된 광폭빔 광학 장치는 고출력 레이저 가공에도 사용할 수 있다.

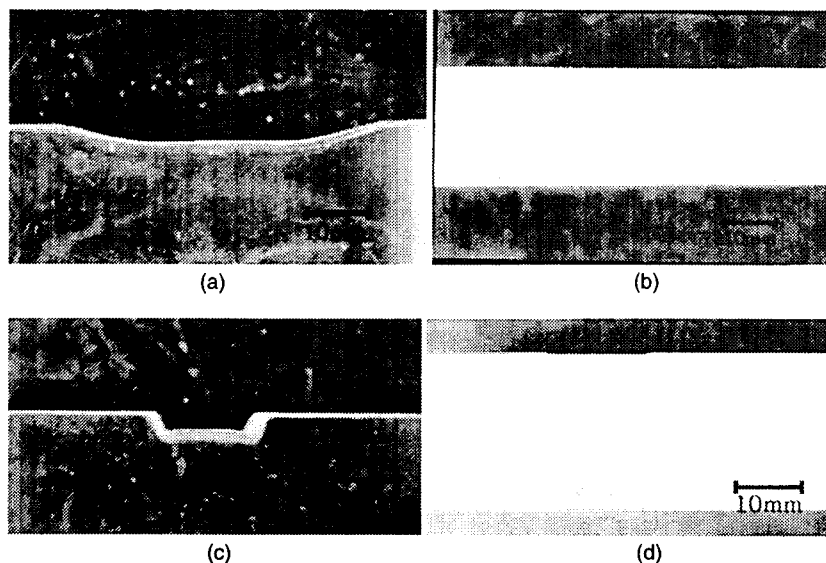


Fig. 9. Photograph of the acryl at travel speed 0.14m/min, scanning height 140mm (a), (b) and travel speed 0.14m/min, scanning height 60mm (c), (d) with 24 facet polygonal mirror

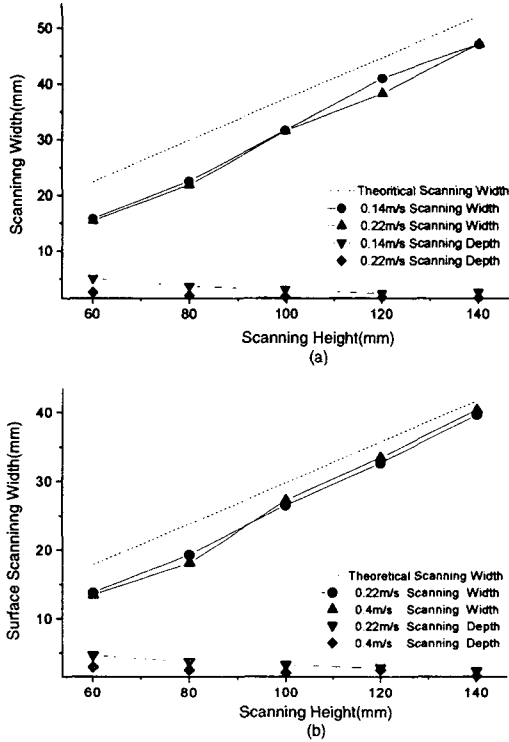


Fig.10. Surface scanning width at various scanning height with 24 facet polygonal mirror (a), with 30 facet polygonal mirror (b)

**참고문헌**

1. 정원기, "구상흑연주철의 CO<sub>2</sub> 레이저 표면경화 특성", 한국정밀공학회 '97년도 춘계학술대회논문집, pp.998 ~1002 (1997)
2. 김재도, 윤상원, 강영주, "A Study on Cladding Using the CO<sub>2</sub> Laser", 대한용접학회 추계학술대회논문집, pp.186 ~190 (1996. 11월)
3. P. J. Oakley, "Laser Heat Treatment and Surfacing Techniques", The Welding Institute Research Bulletin, pp.1 ~11 (January, 1981)
4. S. Kimura, N. Sano, and S. Sugiyama, "Laser Heat Treatment with Beam Focussing Optical Systems", Toshiba Co.
5. Mikio Takemoto, Masanobu Shinya, "Coating of Aluminide Intermetallic Compounds by Laser Fusion Reaction", Proc. of LAMP '92, pp.773 ~778.
6. Isamu Miyamoto, Hirashi Maruo, "Novel Laser

Beam Shapping Optics: LSV Optics Applications to Transformation Hardening and Ceramic Joining", Proc. of ICALEO '92, pp.88 ~102.

7. Yang Xi Chen and Yan Yuhe, "Laser Cladding with Wide-band Scanning Rotative Polygon Mirror", Vol. 69, ICALEO '89, pp.205 ~215.

8. Yang Xi Chen, Wang Bao Qi, Zhao Xin and Wang Yun Shan, "Laser Cladding by 10kW-CO<sub>2</sub> Laser Wide-band Scanning Pyramid Mirror", Proc. of ICALEO '94, pp. 1 ~9

9. Yang Xi Chen, Zhao Xin, Wang Yun Shan and Wang Bao Qi, "New Development of Laser Cladding System with Larger Area for Industrial Application", Proc. of ICALEO '95, pp.269 ~278.

10. Donald C. O'Shea, Elements Modern Optical Design, John Wiley & Sons, p. 243, p. 261, pp.282 ~278 (1985)

11. J. Wilson, J. F. B. Hawkes, Laser Principles and Applications, Prentice Hall, p. 99, p. 167 (1987)

12. Yoshiaki Arata, Isamu Miyamoto, "Some Fundamental Properties of High Power Laser Beam as a Heat Source(Report 1)", Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 3, No. 1 (April, 1972)

13. R. Olen Lund, David E. Stoltzman, "Optimization of Focussed Spot Characteristics for Laser Beam Material Processing", Proc. of ICALEO '92, pp.1 ~9.

14. David R. Whitehouse, Card J. Nilson, "Plastic Burn Analysis(PBA) for CO<sub>2</sub> Laser Beam Diagnostics", Proc. of ICALEO '90, pp.13 ~27.

15. Yang Xi Chen, Yan Yu He, Peng Shou Jun, Shi Jing Nian, "The Role of Beam Shape in Convection and Heat Transfer in Laser Melted Pool", Proc. of ICALEO '90, pp.480 ~491.

16. Leonard Midliore, Laser Materials Processing, Maecel Dekker, Inc., pp.49 ~64, pp.209 ~237.

17. Isamu Miyamoto, Hirashi Maruo, "Effects of Misalignment in Focussing CO<sub>2</sub> Laser Beam by Parabolic Mirror", Proc. of ICALEO '93, pp.341 ~349.