

## 전자빔의 응용기술

-표면개질을 중심으로-

김 숙 환 · 이 종 섭 · 여 태 응

### Applied Technology of Electron Beam

- Surface Modification -

Sook-Hwan Kim, Jong-Sub Lee and Tae-Woong Yeo

#### 1. 서 언

최근 표면개질 분야에서는 재료에 대해 고기능화, 고강도화 혹은 복합화 등의 요구가 높아지고 있으며 적극적인 표면개질을 통하여 신소재를 제조하려는 연구개발이 진행되고 있다. 전자빔 가공법에서는  $10^6 \sim 10^9$  (W/cm<sup>2</sup>)의 극히 높은 파워밀도(Power Density)가 얻어질 뿐만 아니라 빔조사 위치를 전자계로 고속, 고정도 제어할 수 있는 하전(荷電)빔 고유의 우수한 특징을 가지기 때문에 표면개질 열원으로서 각광 받고 있다. 기계부품의 표면을 경화시켜 사용할 경우 기능적으로는 그 전체를 경화시킬 필요가 없는 경우가 많기 때문에 필요한 부분만을 국부적으로 경화시키는 것이 소입에 필요로 하는 에너지를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 부품에 소입변형을 감소시켜 열처리후 가공이 불필요하거나 경감시키는 효과도 있다. 국부적인 변태 소입을 실시하는 데는 재료의 열전도특성에 의하여 경화가 필요한 부분이외는 변태점 이상으로 온도가 상승하지 않도록 주의해야 하고, 순간적으로 고밀도 에너지를 투입하여 가열함으로써 급속히 냉각시킬 필요가 있다.

종래의 국부적 소입 법으로서서는 화염 소입 및 고주파 소입등이 있지만 어느 것도 극히 작은 부위 혹은 미려한 표면 형상과 정밀한 소입형상의 제어라는 관점에서 문제점을 갖고 있다. 이에 반해 최근 고출력 빔이 개발되고 이것을 국부적 소입에 적용하려는 연구개발이 적극적으로 진행되고 있으며, 적용 가능한 빔은 전자빔과 레이저 빔이 있지만 레이저의 경우 대기 중에서 작업이 행해지기 때문에 진공실에서 처리하는 전자빔 표면개질에 비해 표면품질이 훨씬 나쁘다. 그리고 전

자빔은 총투입 열량이 작고 열전도에 의한 자기냉각 효과가 극히 커 외부냉각 수단이 필요 없을 뿐만 아니라 처리후 표면이 미려하기 때문에 고품질의 표면개질층을 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

#### 2. 전자빔 표면개질의 개요

전자빔의 역할은 단순히 재료를 용융시키기 위한 열원만이 아니라 에너지의 집속도가 극히 높으면서 고속, 고정도로 제어할 수 있다는 관점에서 아주 우수한 열원이며 지금까지 실용화되거나 연구되고 있는 전자빔 표면개질법은 다음과 같은 것이 있다. 즉 강의 마르텐사이트 변태를 이용한 전자빔 경화법은 아주 오래전부터 행해져 왔고 미국에서는 1970년대 중반부터 실용화되어 왔다. 전자빔 소입은 재료표면을 용융시키지 않고 변태경화를 이용한 것이지만 전자빔 출력을 높여서 재료표면을 용융시키는 전자빔 용융처리법도 있다. 이 경우 급속냉각에 의해 조직의 미세화나 첨가원소등의 고용한을 넘어 과포화 고용이 일어나는 효과를 얻을 수 있다. 또한 용융되는 부분에 합금원소를 첨가하면 전자빔 합금화를 이룰 수 있다. 첨가하는 재료가 점점 증가하여 모재가 용융되지 않거나 극히 일부가 용해되면 모재 표면에 첨가재의 층이 형성되어 마치 용사한 것처럼 표면 층을 얻을 수도 있는데 이것을 전자빔 피복이라고 한다.

전자빔에 의해 용융되는 영역은 아주 작아 급속히 냉각이 일어나기 때문에 용융되는 재료에 따라서 응고부분이 비정질화하여 재료표면에 얇은 비정질 층이 형성되기도 하는데 이를 유약을 바른다는 의미의 영어에서 전자빔 Glazing이라고 부른다.

### 2.1 전자빔 표면개질 장치

전자빔 표면개질은 전자빔 용접에서 시작된 것으로 하드웨어적인 측면에서 전자빔 용접기가 거의 그대로 사용되어 왔다. 특히 표면개질용은 전자빔 편향계통의 특수성이 있지만 전자빔을 발생시키는 전자총이나 열원 등의 주요부는 용접기와 같아 전자총, 전자렌즈, 편향코일, 가공실, 진공시스템, 전원 그리고 이들을 제어하는 제어계로 구성되어 있다. 그리고 요구되는 진공도는 높지 않아도 되지만 전자빔의 측면에서는 높은 쪽이 좋고 작업성 측면에서는 진공도가 낮은 쪽이 유리하다. 전자총 부분은 필라멘트를 가열하여 열 전자를 발생시키기 때문에 필라멘트의 수명을 연장시키기 위하여 고진공도 ( $10^{-5}$ torr)가 필요하고 가공실은 일반 탄소강 용접시  $10^{-2}$ torr 정도면 충분하다<sup>1)</sup>. 필라멘트에서 방출된 열 전자는 전자계에 의하여 양극 방향으로 가속되어 양극의 구멍을 빠져나와 가공실로 나가게 된다. 그리드(grid)는 전자빔의 ON, OFF나 전자빔 전류를 제어하며 양극을 빠져나온 전자빔은 전자렌즈로 집속시킨 후 편향코일로 편향시켜 가공 시편에 조사된다. 편향코일은 필요에 따라서 사용되지만 전자빔 표면개질에 있어서 이러한 편향이 큰 역할을 하는 경우가 많다. 전자빔의 횡단면내 파워밀도 분포는 Fig.1과 같이 나타낼 수 있으며 통상 가우스형은 Fig.1 (a)과 같기 때문에 가열강도가 빔이 조사되는 중앙부와 주변부가 다르게 되어 불균일한 표면개질이 된다. 이러한 현상을 피하기 위해서는 편향 코일을 이용하여 빔을 진동시켜 균일한 파워밀도 분포를 가진 빔의 형태로 만들어 주고 이를 한 방향으로 진동시키면 Fig.1 (b)와 같이 된다.

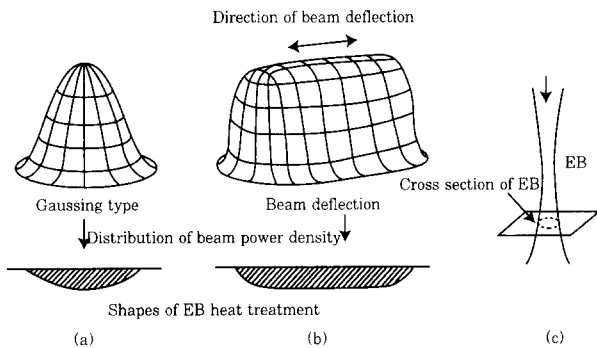


Fig. 1 Power distributions of EB heat treated regions

편향은 x, y 두 방향에서 독립적으로 작용되기 때문에 원, 삼각, 사각, 기타 각종의 편향진동 패턴을 만들 수 있고, 패턴내의 파워밀도 분포를 다양하게 변화시

킬 수 있다. 이 방법은 넓은 횡단면을 가진 빔을 발생시킨 것과 같은 효과를 갖게 된다. 편향은 통상 코일을 이용하여 제어하기 때문에 진동을 고속으로 행하는 것이 어려웠었지만 여러 가지 제어기술의 발달로 고속화되어 수 100kHz 정도까지는 가능하게 되었다<sup>2)</sup>.

### 2.2 전자빔 편향원리 및 종류

전자빔은 아크, 레이저 등의 다른 가공열원과 달리 전자제어로 방향 및 집속위치를 자유로이 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다.

Fig.2는 빔의 조사위치를 이동시키면서 가공하는 편향가공의 원리를 나타낸 것이다. 즉, 집속렌즈를 통과한 전자빔은 상호 직교하도록 배치된 편향코일의 합성자장에 의하여 중심궤도로 부터 벗어나게 된다. 이 합성자장은 컴퓨터 등에 의하여 만들어진 가공 패턴의 지령을 받아 고속응답의 정전류 증폭기로 가변 되기 때문에 가공 패턴을 변화시키면 여러가지 가공이 가능하게 된다.

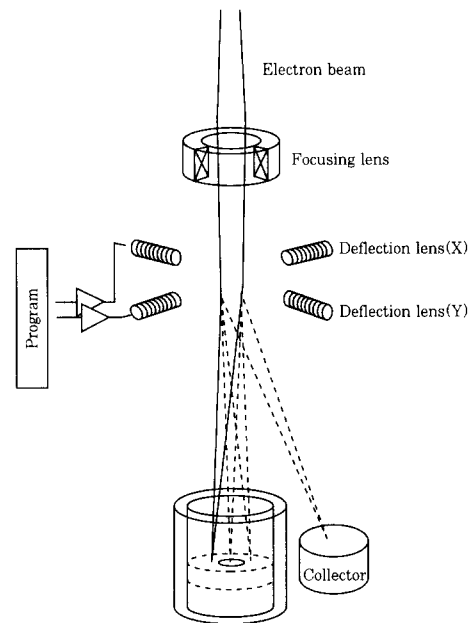


Fig. 2 Principle of electron beam deflection

이러한 특성을 가지는 전자빔을 자계로 제어해서 편향하는 방법을 용도별로 대별하면 Oscillation법, Scanning법, 에너지 제어 편향법 등이 있으며 Fig.3에 대표적인 편향 패턴을 나타내었다. 그리고 각각의 편향패턴별 특성은 다음과 같다.

-Oscillation법: 전자빔을 작은 진폭(2mm정도)으로 조사하고 진동시켜 전자빔에 의하여 만들어진 키홀(Key Hole)을 제어하기도 하고 키홀(Key Hole) 내

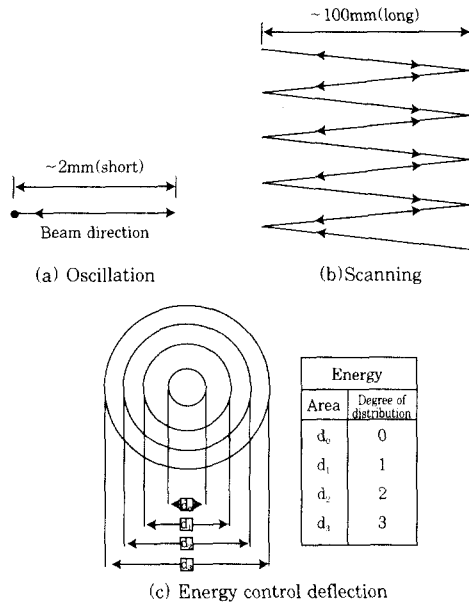


Fig. 3 Typical examples of beam deflection pattern

의 용융금속을 교반해서 탈 가스 효과를 촉진시킴으로서 기공 등의 결함을 방지할 수도 있다.

-Scanning법: 빔을 Oscillation법에 의해 더욱 큰 폭(100mm정도)으로 조사함으로써 용융깊이를 알게 하여 넓은 영역을 효과적으로 가공할 수 있는 방법이다. 물론 이 경우 Oscillation법과 중첩시켜 Oscillation효과를 기대할 수도 있다. 이러한 Oscillation법, Scanning법의 조사조건은 목적에 따라서 빔의 편향주파수, 진폭 등을 임의로 선택하여 피가공물의 이동과 조합시킴으로서 다양한 형태의 패턴을 만들 수 있다.

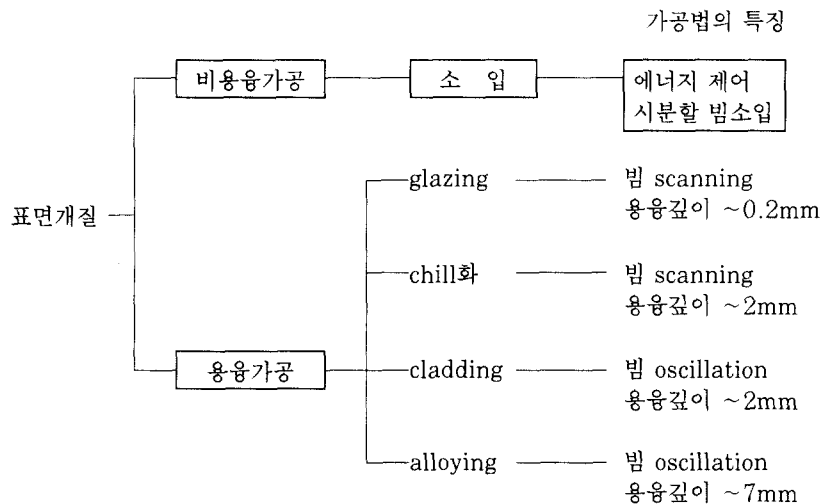
-에너지 제어 편향법: Oscillation법이나 Scanning법은 용융금속의 교반이나 빔조사 영역의 광역화를 목

적으로 하고 있지만, 에너지 제어 편향 법에서는 Oscillation법이나 Scanning법으로는 실현할 수 없는 파워밀도 분포, 가공 패턴형상을 제어하여 열 가공에서의 자유도를 높이도록 한 것이다. 복잡한 형상의 패턴은 컴퓨터로 처리하여 패턴을 조사하고자 하는 위치를 찾아 처리목적에 적합한 시간만 빔을 조사하는 방법이 적용되고 있다.

### 3. 전자빔에 의한 표면개질

전자빔에 의한 표면개질 형상은 Table 1에 나타낸 바와 같이 비용융 가공과 용융가공으로 대별된다. 비용융 가공의 대표적인 예로서 변태경화를 이용한 소입을 들 수 있다. 높은 파워 밀도를 가지는 전자빔이나 레이저 빔에 의한 소입은 종래의 화염 소입이나 고주파 소입과 달리 냉각을 위한 촉매를 필요로 하지 않는다는 것이다. 즉, 모재 내부로 열 확산에 의해 자기 냉각시킴으로서 마르텐사이트 변태를 일으켜 경화시키는 방법이다. 전자빔과 레이저빔 소입의 큰 차이는 전자빔에서는 금속 표면상태에 좌우되지 않고 안정한 소입층을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 전자계에 의하여 고속, 고정도로 임의의 형상, 파워 밀도분포를 제어할 수 있는 반면 레이저 빔에서는 피가공물의 표면상태에 영향을 받을 뿐만 아니라 파워밀도를 균일화하기 위하여 빔을 거울에 의해 기계적으로 진동시키는 방식을 사용하고 있다는 점이다. 전자빔에 의한 용융 가공예로서는 Glazing, Chill화, Clad, 합금화 등이 있다. Glazing은 높은 파워밀도를 가진 전자빔을 피가공물에 조사하면 그 부분이 급속히 용융(깊이 ~ 0.2mm)되어  $10^5-10^6(K/s)$ 의 냉각속도로 응고하기 때문에

Table 1 Classification of surface modification by electron beam



Fe계, Ni계, Pd계 등에서는 빔 조사부가 비정질화 하여 여러 가지 우수한 특성이 얻어진다.

Chill화는 주물의 표면을 용융(깊이 ~1mm)시킴으로서 흑연이 오스테나이트 기지중에 균일하게 분포되고 표면소입의 경우와 같이 급속히 자기 냉각되면 레데부라이트(Ledeburite)조직이 만들어져 내마모성을 향상시키는 방법이다. Clad는 부품표면에 다른 금속상을 국부적으로 육성(깊이 ~2mm)하는 방법으로 희석률을 낮게 하여 Clad재의 특성열화를 제어하는 것이 중요하고 부품의 내식, 내열, 내마모등을 향상시키기 위하여 적용된다. 특히 표면 층만 고가인 합금 층으로 하는 것에 의해 원가절감도 가능하다. 합금화는 합금성분을 가능한 한 균일하게 용융(깊이 ~ 7mm) 분포시켜 표면 층의 내마모성을 향상시키기 위한 목적으로 적용하고 있다.

전자빔은 고밀도의 열원이지만 빔 조사위치를 전자계로 고속, 고정도 제어할 수 있는 고유의 우수한 특성을 가지고 있고, 이러한 제어특성의 우수성은 표면개질 열원의 유효한 수단이 되고 있다. 이와 같이 제어특성이 우수한 전자빔 열원을 기계 부품등의 전자빔 표면개질에 이용할 경우 다음과 같은 장점이 있다.

- (1) 국부적인 표면개질을 할 수 있다.
- (2) 대부분의 경우 냉각장치가 필요 없다.
- (3) 표면개질 속도가 빠르기 때문에 절삭 등의 가공 Line상에서 처리가 가능하다.

또 부품표면 전체가 아니라 경도 등의 특별한 기능이 필요하게 되는 부분만을 처리할 수 있다는 관점에서

- (4) 미처리 부분의 재료특성은 그대로 유지된다.
- (5) 표면개질시 부품의 변형을 최소화 할 수 있기 때문에 후가공이 거의 필요 없다. 이외에 전자빔의 특징으로서
- (6) 어떠한 복잡한 형상에서도 눈으로 볼 수 있는 곳이면 표면개질이 가능할 뿐만 아니라 고주파 소입의 코일과 같은 부대장치가 필요 없다.
- (7) 빔 출력, 빔조사 위치를 전자적으로 제어할 수 있기 때문에 정밀, 고속제어가 가능하고 표면개질 위치나 깊이를 정밀하게 제어할 수 있다.
- (8) 진공중에서 표면개질 처리를 하기 때문에 산화, 질화등의 악 영향이 없고 고품위의 표면처리층이 얻어진다.
- (9) 에너지 효율이 높고 성에너지형의 표면개질법이다.
- (10) 합금화나 코팅의 경우 처리하고자 하는 부분만 합금원소를 첨가하면 되기 때문에 합금원소를 절약할

수 있다. 특히 공급이 불안정하거나 자원이 부족한 고가의 합금원소를 첨가하는 경우에 유효하다.

### 3.1 전자빔 소입

#### 3.1.1 소입의 원리 및 특징

전자빔은 집속렌즈의 조정에 의하여 빔직경을 작게 줄일 수 있기 때문에 에너지 밀도가 매우 높다. 에너지 밀도는 Fig.4에 나타난 바와 같이 가스 불꽃이나 플라즈마 아크에 비해 수 1,000배 내지 수 10,000배에 달하고 이러한 고에너지 밀도의 전자빔을 이용한 소입원리는 대단히 간단하다. 경화시키고 싶은 부분에 순간적(약 0.5 ~ 수초)으로 전자빔을 조사하는 것만으로 소입이 완료된다. 전자빔은 에너지 밀도가 높기 때문에 전자빔이 조사된 부분만 급속히 가열되어 변태점 이상의 온도로 된다. 즉, 국부적으로 급속히 가열되기 때문에 그 주위는 냉각된 상태이고 전자빔을 멈추면 Fig.5에 나타난 바와 같이 가열된 부분의 열은 열전도에 의해서 주위로 확산되어 급냉된다. 이와 같이 피가공물 자신에 의하여 냉각되는 현상을 자기냉각이라고 한다.

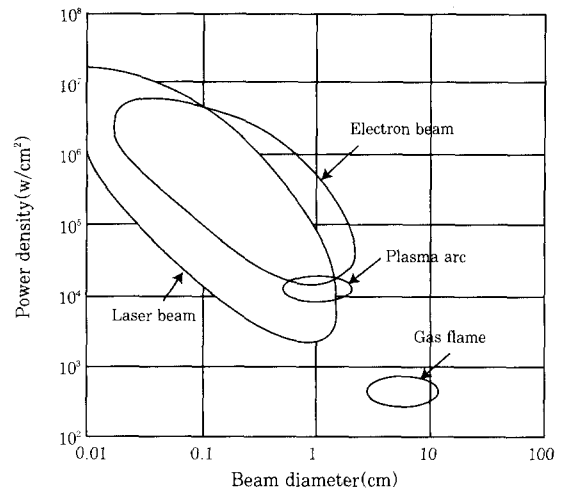


Fig. 4 Power distributions of EB heat treated regions

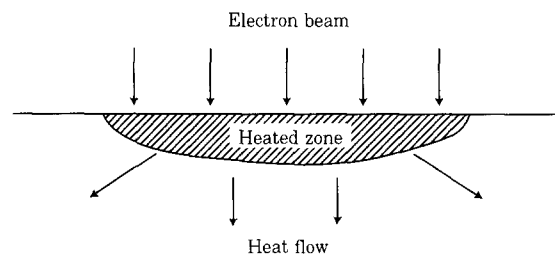


Fig. 5 Schematic diagram showing self-cooling effect

일반적으로 자기냉각을 하기 위해서는 강의 경우 소입층의 8배의 두께가 필요하다고 되어 있지만 전자빔 소입에서는 최소한 4배 이상이면 양호한 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있다.

이때의 냉각속도는 임계 냉각속도 보다 훨씬 빠르기 때문에 강을 경화시키는 마르텐사이트 조직을 형성시키게 되어 전자빔이 조사된 부분만 경화시킬 수 있는 것이다. 이러한 경화처리 방법은 여러 가지 전자빔 주사변수에 따라 영향을 받기 때문에 원하는 경도 및 경화층의 표면품질을 얻기 위해서는 Fig.6에 나타낸 변수들을 피가공물에 적합한 형태로 전자빔을 제어하여 주사하지 않으면 안 된다. 최적화된 가열패턴의 일례는 Fig.7과 같이 나타내지기 때문에 가열시간에 따라 소입 심도가 깊어지는 것을 알 수 있다. 이러한 관계로부터 소입 깊이에 대한 가열시간이 구해지고 필요한 파워밀도가 결정된다. 그러나 소입하고 싶은 면 전체를 이와 같은 패턴을 주는 것은 쉽지 않다.

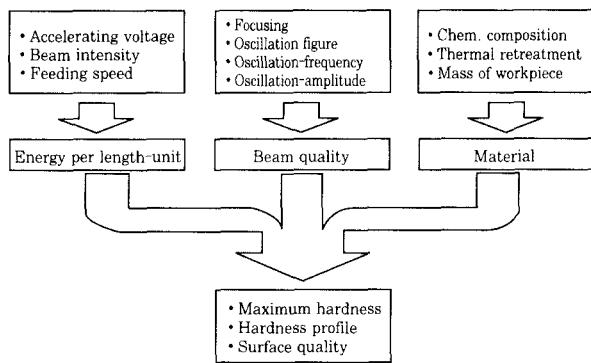


Fig. 6 Factors influencing surface hardening

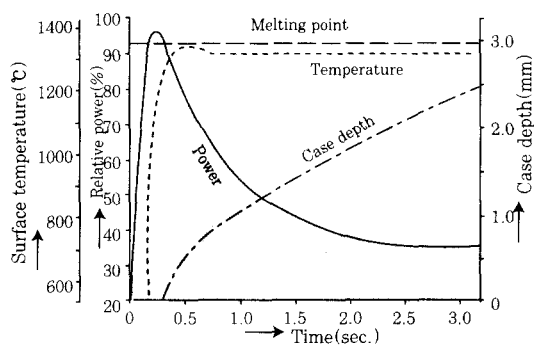


Fig. 7 Typical example of optimal heating pattern

전자빔 방법에서는 빔의 횡단면(직경 0.5mm ~ 수 mm)의 면적밖에 소입되지 않기 때문에 넓은 면적을 소입 시키고자 할 때에는 상술한 바와 같이 편향진동에 의하여 실질적으로 빔 직경을 크게 하거나, 빔 혹은 시편을 모두 이동시키면서 처리하면 효율을 높일 수

있다. 이러한 경우에도 자기냉각을 가능하게 하기 위하여 재료내부 혹은 표면에 경화시키지 않는 부분이 필요하다. 빔을 움직이는 방법에도 여러가지 유형이 있는데 그 중의 한 방법으로 Fig.8<sup>3)</sup>과 같이 경화면을 작은 경화점의 모임으로 구성하는 방법도 있다. 이는 마치 TV의 화면을 구성하는 것과 같은 것으로 전자빔이 1회에 50~100 $\mu$ s의 펄스로 조사되는데 이를 체류시간(Dwell Time)이라고 한다. 예를들어 어느 체류시간(Dwell Time: 100 $\mu$ s)인 점을 가열하면 전자빔은 다음 점으로 이동하고 이점을 100 $\mu$ s만큼 가열하고 또 다른 점으로 고속 이동하게 되는데 점에서 점으로 이동은 X축과 Y축의 좌표를 부여하기 때문에 이것이 편향코일에 지령을 내려 순서대로 이동하게 된다. 이와 같은 조사에 의하여 하나의 도형을 형성할 수 있고 가열형상, 가열밀도 및 분포 등을 임의로 선택할 수 있기 때문에 과열 없이 전면부를 경화 처리할 수 있다.

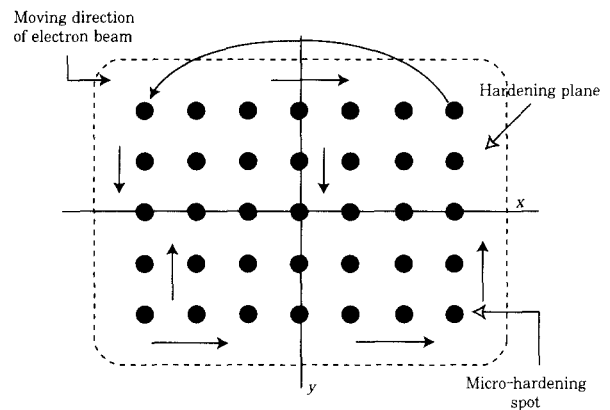


Fig. 8 Micro-dot pattern of the electron beam

이와 같은 방법을 선택하는 이유는 경화면의 중심부와 주변부에서는 가열 냉각의 상태가 달라지기도 하고 경화부분의 형상이 일정하지 않아 가열 냉각 상태가 다르게 되기 때문이다. 따라서 냉각능을 고려한 정지 및 위치이동을 하지 않으면 일정한 파워밀도 분포의 빔을 일정시간 주사하더라도 균일한 경화깊이를 얻을 수 없게 된다. 그러나 일반적으로 정지시간을 길게 하면 경화깊이가 크게 되기 때문에 정지시간을 변화시키는 것으로 균일한 경화 깊이 혹은 요구하는 경도 분포를 얻을 수 있다.

이상에서 기술한 바와 같이 전자빔 소입은 다른 열원에서는 기대할 수 없는 높은 파워 밀도와 자기냉각 작용, 선택 소입등이 가능하기 때문에 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

1) 극히 얇은 소입이 가능하고 정확하며 안정된 제어

를 할 수 있다.

- 2) 소입경도가 크면서도 소입균열이 발생하기 어렵다.
- 3) 소입에 따른 변형이 거의 없고 소입후 마무리 가공이 필요 없다.
- 4) 소입부 형상의 자유도가 높고 가열 파워 조사 범위가 길기 때문에 깊은 구멍 안쪽이나 좁은 홈의 내부도 소입 처리할 수 있다.
- 5) 가열로나 소입조가 필요 없고 작업환경이 좋기 때문에 생산라인 중에 설치하여 On-Line 가공할 수 있고 공정을 단순화시킬 수 있다.

이외에도 성능 및 생산성의 차원에서 많은 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 성에너지 특성을 가지고 있기 때문에 자동차 공업을 비롯한 각종 기계 가공부품 분야에 획기적인 개선이 가능한 열처리 수단으로 기대되고 있다.

### 3.1.2 전자빔 소입시 유의점

첫째는 재료의 이력을 정확히 이해하는 것이 가장 중요하다. 그리고 오스테나이트화시 C의 확산이 충분히 되지 않으면 위치에 따라 C량이 불균일하게 분포하게 되는데 이는 급냉후 경도가 C량에 따라 영향을 받기 때문에 경도가 불균일하게 되는 원인이 된다. 또한 전자빔 소입은 처리속도가 빠르고 오스테나이트화 온도 유지시간이 짧기 때문에 균일한 소입조직을 얻기 위해서는 C의 확산거리가 짧게 되도록 소입전에 조직을 미세하게 하는 것이 바람직하다<sup>4)</sup>.

경도 뿐만 아니라 소입 깊이도 소재의 이력에 따라 크게 영향을 받는데 예를 들어 같은 AISI 4150강을 등은 소입-소려, 소입-소려, 소둔, As-Rolled 처리한 4종류로 나누어 전자빔 소입처리 하면 소입깊이는 Fig.9와 같이 나타나게 되는데 경도 Hv 600을 나타

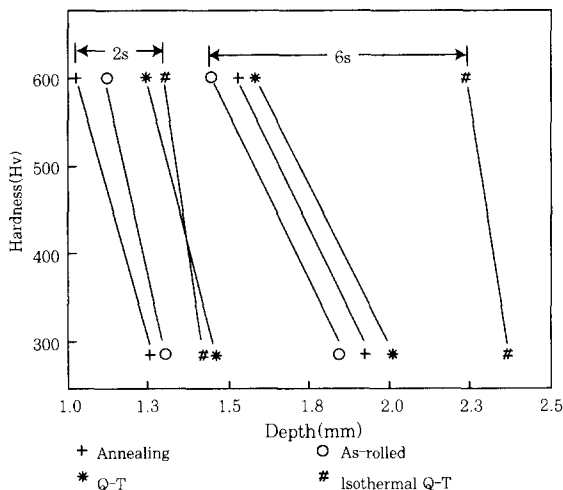


Fig. 9 Effects of hardenability with pre-heat treatment

내는 경화깊이는 등은 소입-소려한 재료가 가장 큰 것을 알 수 있다<sup>5)</sup>.

둘째는 부품의 설계단계부터 새로운 소입법을 염두에 두어야 한다는 것이다. 종래의 부품은 기존의 소입법에 가장 적합하도록 설계되어 있고 그것이 최적설계인 부품도 많다. 그러나 부품에 주어지는 기능을 고려해 볼 때 기능적으로 최적인 형상을 전자빔 소입할 수 있도록 형상을 변경하기도 하여 소입하기 쉽도록 분할해 놓는 지혜도 필요하다. 따라서 전자빔 소입과 같이 국부적으로 정밀하게 제어되는 방법에서는 처음부터 이러한 특징을 살릴 수 있는 새로운 설계가 필요하다.

### 3.1.3 전자빔 소입장치

전자빔 소입의 최대 문제점은 진공실내에서 피가공물을 처리해야 한다는 점과 생산성 차원에서 단시간에 진공도를 효율적으로 높이는 것이 관건이다. 이러한 관점에서 생산기를 분류해 보면 다음과 같이 3종류로 대별할 수 있다.

1) Single Station형: Bottom Delivery형으로 진공실의 테이블에 가공지그를 설치하고 테이블이 상하로 이동할 수 있도록 구성한 것이다. 피가공물은 테이블을 아래로 이동시킨 상태에서 취부하고 테이블을 위로 이동시킨 상태에서 진공후 전자빔을 조사하여 소입시키는 것으로 1회에 1개 처리를 기준으로 시간당 140개 이상의 생산시 적합하다.

2) Dial Shift형: Dial Index 테이블 위에 통상 4개 이상의 Station을 설치하고 각 Station에 지그를 장착하여 가공위치 이외의 곳에서 피가공물을 취부할 수 있도록 한 것으로 시간당 250개 이상의 생산에 적합하다. 만약 한번에 3개 부품을 소입처리 한다면 거의 3배의 생산성을 올릴 수 있고 전자동 무인운전도 가능하다.

3) Stage Pump형: Dial Index 테이블의 1/2 을 진공 레일로 패키징이 되는 레일 플레이트로 덮어씌우고 가공 위치에 이를 때까지 단계적으로 진공처리하고 가공이 완료되면 가공 위치에서 이탈함에 따라 진공이 대기상태가 되도록 한 것으로 시간당 1,200개 이상의 생산능력이 있다.

## 3.2 전자빔과 레이저 빔의 특징비교

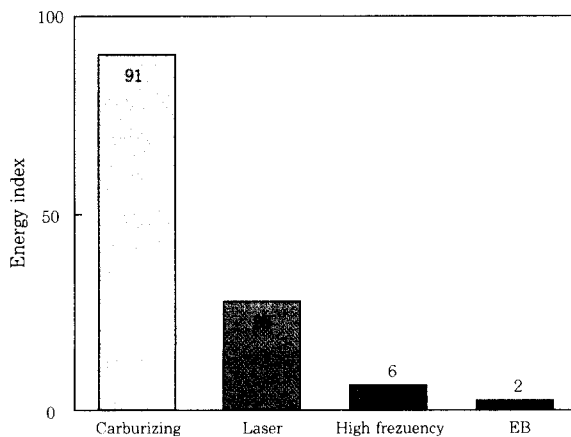
전자빔과 특성을 비교할 수 있는 것으로 레이저빔을 들 수 있는데 Fig.4에서 명확히 알 수 있는 바와 같이 에너지 밀도는 거의 같고 레이저빔을 이용하여 소입처리를 할 수도 있다. 강의 소입에 있어서 이들 두 가지 방법의 특징에 대해 비교해 보면 Table 2와 같다.

**Table 2** Comparative aspects of electron and laser beam hardening

항 목	전자빔	레이저빔
에너지 효율	99%	15%
반사 방지	반사가 없기 때문에 별도처리 불필요, 반사율 0%	반사 방지제의 도포 반사율 40%
분위기 조건	진공중	대기중 (보조가스 필요)
에너지 전달	진공실내의 전자렌즈 혹은 moving gun의 이동에 의해 전달	거울이나 화이버로 평행빔 전송 (발전기 한대로 work station 여러개 분기(分岐)가능)
초점	집속렌즈의 전류제어로 가변 (100~600mm)	렌즈 초점거리가 고정이기 때문에 가공bed를 이용
빔 편향	전기 제어식으로 임의의 패턴을 선택(빔편향, 면 편향등)	빔 편향에는 반사거울 등의 교환이 필요하며 패턴이 고정
운영비	1(전기) (전자빔을 1로 한 경우)	7 ~ 14 (전기, 레이저 및 보조가스)

에너지 효율측면에서 검토해 보면 레이저 빔은 광(光)이고 광(光)은 금속표면에서 반사하기 때문에 에너지 흡수성이 나빠 Fig.10에 나타낸 바와 같이 에너지 효율은 고주파 소입보다도 나쁘다. 반면 전자빔은 금속표면에서 거의 반사하지 않기 때문에 에너지 효율은 99%로 아주 높다. 그리고 레이저 빔은 대기를 차단해야 하기 때문에 보조가스를 이용하여 대기 중에서 소입을 행하는데 반해 전자빔은 빔을 조사하기 때문에  $10^{-2}$  Torr정도의 진공이 필요하다. 따라서 큰 물품의 소입은 레이저빔 쪽이 취급하기 용이하다.

분위기 조건의 제약은 있지만 빔 에너지의 전송은 레이저빔 쪽이 우수하다. 또한, 1대의 발전기로 여러 개의 Work Station으로 빔전송이 가능하기 때문에 레이



**Fig. 10** Comparison of energy index for quenching methods

저빔 쪽이 효율적인 Line 설계로의 이용가치는 크다.

레이저빔은 초점을 맞출 경우 가공 Bed의 이동이 필요하지만, 전자빔은 집속렌즈의 전류제어에 의해 임의의 위치로 초점을 맞출 수 있다. 또 고에너지를 이용하는 소입에서는 빔의 편향기능으로 소입 패턴을 결정할 수 있다. 전자빔은 전기 제어방식이기 때문에 컴퓨터의 프로그램을 변경함으로써 빔의 편향을 간단히 해결할 수 있어 소입의 자유도는 전자빔 쪽이 크다.

전자빔은 레이저 빔과 같이 레이저 가스나 보조가스를 필요로 하지 않으며, 에너지 효율이 극히 높기 때문에 운영비는 전자빔 쪽이 오히려 낮다. 그러나 처리부품의 형상, 요구품질특성, 생산량 등에 따라 종합적으로 검토하여 적당한 Process를 결정하는 것이 바람직하다. 그리고 전자빔 소입의 경우 다음과 같은 이점이 있다.

- ① 내마모성이 현저히 향상된다.
- ② 에너지 효율이 극히 높다.
- ③ 복잡한 형상의 국소 소입에 적합하다.
- ④ 소입변형이 적다.

### 3.3 전자빔 표면개질 사례

#### 3.3.1 소입

전자빔 소입은 전자빔 편향기술을 이용하여 빔의 제어성을 충분히 발휘한 예로서 엔진 타펫, 미니기어의 소입예에 대하여 기술하고자 한다.

##### 1) 엔진 타펫

밸브 개폐가 일어나는 동력전달 부품으로 원통형의 중심부분이 마모되기 쉬운 부분이고 형상도 복잡하다. 그렇기 때문에 종래의 방법인 유도코일을 이용한 고주파 소입에서는 코일을 삽입하기 곤란하여 소입처리가 어려웠고 레이저에 의한 소입에서도 소입면에 흡수제를 도포 하여야만 하고 안정된 소입특성을 확보하기 어려운 등의 문제점을 안고 있었다. 전자빔 소입에서는 소입영역에 대해 전자빔 편향기술을 이용하여 극히 작은 입열도 제어가 가능하다. Fig.11에 나타낸 바와 같이 패턴을 중첩시킴으로서 빔의 파워밀도를 균일하게 분포시키는 방법을 나타내었다. 이러한 방법에서는 외주부위로 갈수록 표면적이 넓게 되고 특히, 열전도로 외주부위로 열이 빠져나가 버리기 때문에 이 부분에서의 빔 파워밀도가 가장 크게 되도록 중첩시키는 것이 바람직하다. 그리고 내측으로 갈수록 빔 파워밀도를 작게 하여 중심부 근처에서 열이 집중되지 않도록 빔을 조사할 필요가 있다. 이렇게 할 경우 넓은 영역의 구면부위에서도 깊이 0.9mm 정도까지 균일한 소입층을 얻을 수 있다. 이 부품의 전자빔 소입효과를

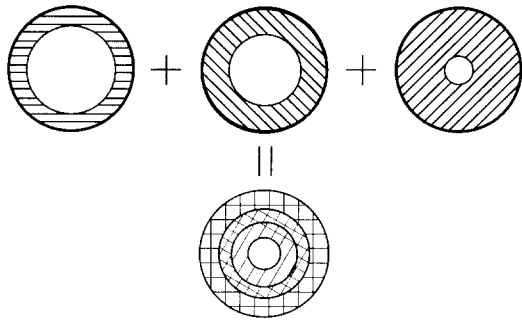


Fig. 11 Schematic diagram of quenching pattern

확인하기 위하여 실제 엔진에 조립하여 타펫의 마모량을 조사한 결과 타펫 푸쉬 로드면의 마모량은 미처리 부품(소입-소려제품)의 1/6~1/2이고 현저히 내마모성이 향상된 것을 보고하고 있다<sup>6)</sup>.

이때의 가공조건을 정리하면 다음과 같다.

- ①도트 간격: 0.2mm, ②도트수: 약 3,000개, ③도트당 빔 조사시간: 5 $\mu$ s, ④패턴의 중첩회수: 약130회 ⑤빔 조사시간: 2sec

2) 미니기어

기존의 고주파 소입 방법에서는 미니기어(직경 14mm)의 치차면을 소입시 치차의 선단부에 열이 집중되어 치차 선단 전체가 경화하여 취약하게 되고 치차 각각의 측면을 소입하려고 할 경우 먼저 소입된 치차가 편면 소입시 소려되는 현상이 발생하는 문제점이 있었다. 전자빔 방법에서는 Fig.12와 같이 빔을 2가지로 시분할하고 피처리재를 고속 회전시켜 빔을 조사함으로써 치차의 양면이 동시에 가열되기 때문에 앞서 기술한 문제점이 발생하지 않아 양호한 소입이 가능하게 된다. 또한, 전자빔의 분할비를 임의로 선택할 수 있기 때문에 치차의 양면에서 소입형상을 용이하게 변화시킬 수 있다.

3.3.2 Glazing

여러 가지 합금이나 금속으로 표면처리를 실시한 금속 표면에 높은 파워밀도의 빔을 조사하여 표면층만 용융(용융깊이 ~0.2mm)시키면 열전도에 의하여 급속 냉각(10<sup>6</sup>°C/s)되어 미세한 조직으로 되고 합금계에 따라 비정질층이나 경화층을 얻을 수 있다. 그 결과 경도, 내마모성, 내식성 등이 향상되게 된다. 예를 들어 공구강(Type O-2, 0.9%C, 1.6%Mn, 0.25%Si)을 전자빔 처리하였을 때 마모량은 1/2까지 감소하는 결과를 보여주었으며, 소둔처리재, 종래의 소입법, 전자빔 용융처리법에 의한 경도와 마찰계수, 마모량등에 관하여 정리해 보면 Table 3<sup>7)</sup>과 같다. 이러한 결과는 상당히 미세한 마르텐사이트 조직의 형성에 의한 것이라고 생각된다. 또한, 공구강 (SKH51상당)에 전자빔

처리한 경우 불산염 용액(pH 8.0)중에서 전해부식 시키면 흐르는 전류가 1/10까지 감소하여 내식성 향상이 확인되고 있다<sup>8)</sup>.

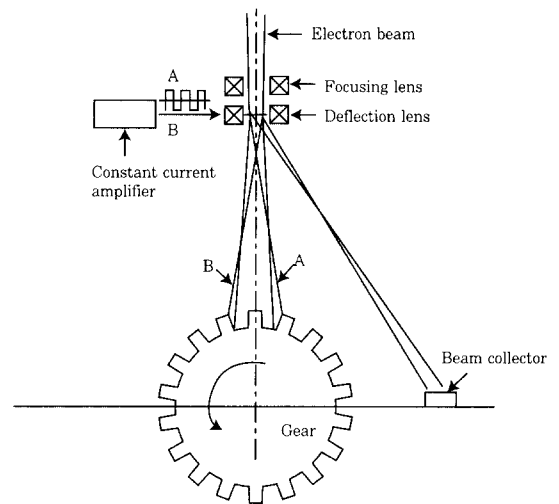


Fig. 12 Quenching method of miniature gear

Table 3 Result of wear test

구분	Knoop 경도	마찰 계수	마모율 (mm <sup>3</sup> /m)	마모비
소둔처리재	230	0.50	1.6×10 <sup>-4</sup>	1
소입처리재	730	0.74	1.1×10 <sup>-4</sup>	0.69
전자빔 처리	800	0.90	0.82×10 <sup>-4</sup>	0.51

또한, 고밀도 열원으로서 레이저와 전자빔에 대해 예를 들면 Nb 기지에 두께 15 $\mu$ m의 Ni 도금 시편을 이용하여 표면 1m<sup>2</sup>를 비정질 표면합금(Ni-40Nb)을 만드는 것에 적용했다고 할 때 2kW의 레이저를 이용하면 25시간 이상의 처리시간이 필요하지만 6kW의 전자빔을 이용하면 약 22분만에 처리할 수 있다고 보고하고 있다<sup>9)</sup>. 왜냐하면 레이저빔은 거의 대부분이 시료표면에서 반사되어 용융에 이용되는 것은 조사되는 파워의 수%에 지나지 않고 처리방법이 빔 조사부분에 시편을 기계적으로 왕복운동 시킬 필요가 있고 그 속도에 한계가 있기 때문이다. 이에 반해 전자빔 처리에서는 전자빔을 수 100Hz로 진동시킬 수 있고 전자빔 조사의 진폭방향과 직교방향으로 시편을 이동시킬 수 있기 때문이다.

3.3.3 Chill화

종래에는 Chill층을 형성시키기 위하여 주형제작시 냉금을 설치하여 급냉시키는 방법과 레이저로 빔 조사 부분에 흡수제를 도포하여 용융(용융깊이 ~1mm) 및 응고시 자기 냉각작용에 의해 레테뷰라이트



(Ledeburite) 조직으로 만들어 경화층을 얻었다. 그러나 전자빔 법에서는 냉금이나 흡수제의 도포가 필요하지 않을 뿐만 아니라 파워도 크게 할 수 있기 때문에 처리능력도 향상시킬 수 있다. 또한, 경화층의 경도가 균일할 뿐만 아니라 1.2mm 깊이 까지 Hv 800정도에 이르기 때문에 내마모 특성을 크게 향상시킬 수 있다.

3.3.4 클래딩(Cladding)

Fig. 13은 일반 탄소강에 WC계 합금분말을 바인더로 도포한 후 전자빔을 Oscillation시킴으로서 일반 탄소강에 WC합금이 잘 융합된 전자빔 처리예를 나타낸 것이다. 즉 Oscillation법을 적용하면 용융금속이 교반되어 내부 기공이 제거되고 모재와의 밀착력을 증가시킬 수 있다. 또한 Fig.14는 Nb 표면에 Ni<sub>80</sub>Nb<sub>40</sub>을 도포하고 전자빔 (직경60 $\mu$ m)을 주사해서 비정질층을 만들었을 때 깊이방향의 경도분포를 나타낸 것으로 약 30 $\mu$ m 깊이까지 경도가 Hv 1,100인 비정질층이 형성됨을 확인할 수 있다<sup>10)</sup>.

레이저나 전자빔과 같이 고밀도 열원을 이용한 클래딩에서는 다른 육성용접법에 비해 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 파워밀도가 높기 때문에 고속, 고능률의 육성이 가능하다.
- 2) 모재로 유입되는 입열이 적기 때문에 열변형이 적다.
- 3) 모재의 희석율이 낮아 첨가원소의 조성이 클래드층의 조성이 된다.
- 4) 조성의 선택범위가 넓고 난가공재의 육성이 가능하다.

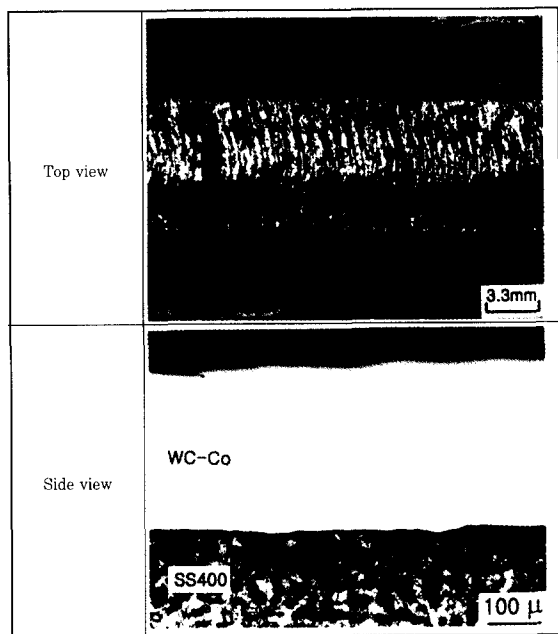


Fig. 13 Macrographs of EB clad

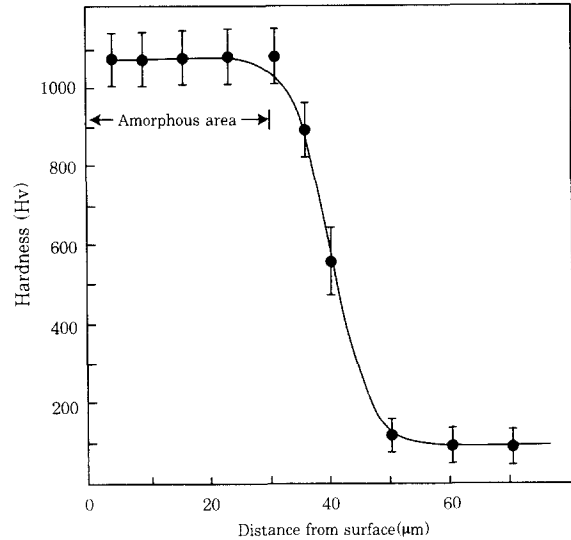


Fig. 14 Formation of amorphous layer

3.3.5 합금화

전자빔 합금화의 대표적인 적용례 중의 하나가 Fig. 15에 나타낸 바와같이 디젤엔진용 알루미늄 합금주물 피스톤의 Top Ring 홈이다. 디젤엔진의 경우 압력이 높기 때문에 Top Ring 홈의 내마모성이 문제가 되어 종래에는 Top Ring 홈 부분에 내마모 특성을 향상시키기 위하여 경도가 높은 Ni합금 주철을 일체화하는 방법이 사용되었지만 접합강도에 문제가 있었다. 그러나 전자빔 법에서는 부분적인 용해로 합금화함으로써 접합부 강도상의 문제는 없으며, 공정조적으로 경도를 높여 내마모 특성을 향상시키는 방법으로 용가재는 주로 Ni, Cu등이 사용되고 있다. 용융깊이는 7mm에 이르기 때문에 기공이 문제가 되지만 전자빔 특유의 Oscillation법을 적용함으로써 탈 가스 시킬 수 있어 기공 등이 없는 건전한 합금층을 얻을 수 있다. 용융영역에 약 20%의 Cu을 합금화한 경우 모재 경도의 약 2.5배 경도가 얻어진다고 보고되고 있다.



Fig. 15 Typical example of EB alloying

## 4. 맺 음 말

자동차 및 우주항공 관련 분야에서 표면개질에 대한 연구는 여러 가지 용접공정을 이용하여 많이 행해져 왔지만 전자빔을 이용한 연구는 극히 미미한 실정이다. 향후 사용조건이 가혹화와 고부가가치 소재의 적용이 확대되는 추세를 감안한다면 전자빔에 의한 고품위 표면개질의 적용기술도 확대될 것으로 예상된다.

특히, 전자빔에 의한 표면개질은 진공중에서 고에너지밀도의 열원을 고속, 고정도로 제어할 수 있어 가장 적합한 열원이라고 말할 수 있다. 또한, 장치를 생산라인 중에 설치할 수 있어 In-line화가 용이하고 고품률, 고품질을 지향하는 새로운 표면개질법으로 발전하고 있다. 본 해설에서 살펴본 바와같이 전자빔 표면개질은 비정질, 합금화, 클래드, 초전도등의 부가가치가 높은 여러 가지 정밀부품 가공분야에 적용이 가능하기 때문에 소재와 공정의 종합적인 연구개발이 필요하리라 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. A.H. 메레카 : 電子ビ-ム溶接-原理と實際-(1972), 94, (株)産報
2. 平本, 阪本, 大峯 : 溶接學會論文集, Vol.4(1986), No.1, p.84
3. 中村 孝 : 金屬, 1981年 1月號, 20 ; 金屬 臨時 增刊號(1981) 6月, 7
4. 岩田 篤 : 電子 ビ-ム變態 焼入れ, 精密機械, vol.48(1982) No.5, p635
5. J.E. Jenkins: Dynamic Electron Beam Hardening Cycles, Metal Progress, July(1981) p.38
6. 松井, 内田, 熊野, 平田 : 電子 ビ-ム變態 焼入れ, 自動車 技術 (1988) Vol. 36
7. A.W. Ruff and L.K. Ives, Wear, Vol.75(1982) p.285
8. B.G. Lewis and P.R. Sirutt, J. Metals, Nov.(1982) p.37
9. N. Kumagai, S. Jikihara, A. Kawashima, K. Asami, and K. Hashimoto: Proc. Int. Meeting Advanced Materials, Materials Research Society, Vol.3 (1989)
10. H.W. Bergmann and B.L. Mordike, JMat. Sci., vol.16 (1981) p.863



- 김숙환(金肅煥)
- 1959년생
- 포항산업과학연구원
- 고밀도에너지 빔 용접공정, 고상접합, 용접야금
- E-mail: weldksh@rist.re.kr



- 이종섭(李鍾燮)
- 1956년생
- 포항산업과학연구원
- 철강 및 비철금속의 용접야금, 용접균열 현상, 이종재료 접합
- E-mail: jonglee@rist.re.kr



- 여태웅(余泰熊)
- 1972년생
- 포항산업과학연구원
- 브레이징, 마찰 및 특수용접, 용접야금
- E-mail: yeotw@hanmail.net