

# Fe-Co-W 소결체와 탄소강의 레이저 용융부 결합형성에 미치는 공정변수의 영향

김성욱\* · 윤병현\* · 정우광\*\* · 이창희\*\*\*

\*포항산업과학연구원 용접센터

\*\*국민대학교 공과대학 신소재공학부

\*\*\*한양대학교 공과대학 신소재공학부

## The effect of welding parameters on the formation of discontinuities in the laser fusion zone between Fe-Co-W sintered segment and mild steel

S. W. Kim\*, B. H. Yoon\*, W. G. Jung\*\* and C. H. Lee\*\*\*

\*RIST WRC, 32 Hyuja-dong, Nam-ku, Pohang City, Kyungbuk 790-330, Korea

\*\*School of Advanced Materials Eng., Kookmin University, Seoul, Korea

\*\*\*Division of MS&E, Hanyang University, Seoul, Korea

### Abstract

This study was performed to clarification of the formation of weld discontinuities in the dissimilar laser fusion zone. Welding parameters were beam power of 1300, 1430, 1560, and 1700 W and travel speed of 1, 1.3, and 1.7 m/min. Most cavities in the fusion zone were observed near the tip. Cavities in the fusion zone observed to be formed and grown from pores in the tip. More cavities were formed as the beam position moves to the tip side. Small cavities were decreased but large cavities were increased when the energy input increased. W content in the fusion zone was increased with heat input and as the beam position close to the tip. In the fusion zone, W content in the dendrite boundary was increased with heat input. Considering the propagation path and fracture morphology, cracks were solidification cracking, and were initiated and propagated

along the dendrite boundaries. The formation of cracks might be related with the W rich  $\mu$  phase which was formed in the grain boundaries and dendrite boundaries.

**Key words** : Diamond saw blade(다이아몬드 쏘 블레이드), Laser welding(레이저 용접), Fusion zone(용융부), Dissimilar materials(이종재료), Cavity(캐비티), Crack(균열)

## 1. 서 론

근래에 다이아몬드를 이용한 공구가 많이 제작되고 있으며 건축현장에서 석재와 콘크리트, 아스팔트 등 건축자재의 절단과 가공에 다이아몬드 쏘 블레이드(diamond saw blade)를 많이 사용하고 있다<sup>1)</sup>. 다이아몬드 쏘 블레이드는 Fig. 1과 같은 구조로써 회전축과 연결되는 저탄소강으로 이루어진 샹크(shank)와 다이아몬드 칩(chip)이 들어있는 소결체 팁(tip)과의 접합으로 이루어진다. 팁은 다시 샹크와의 접합을 위해 다이아몬드 칩이 들어있지 않는 블랭크(blank) 부분과 다이아몬드 칩이 들어가 절단 날의 역할을 하는 본드(bond) 부분으로 구성되어 있다. 샹크와 팁을 접합하기 위해 최근에는 CO<sub>2</sub>레이저 용접이 사용되고 있다.

레이저 용접은 저입열에 의한 열변형 감소, 공장 자동화에 의한 생산량증대, 작은 면적의 용접부와 열영향부에 의한 품질향상 등의 장점들이 있어, 레이저 용접에 의한 생산과 이에 대한 연구들이 이루어지기

는 하지만 레이저 용접에 대한 연구와 기술력의 부족으로 인하여 용접 시 생산되는 다이아몬드 쏘 블레이드의 용접부에서 캐비티(cavity), 균열 등의 결함이 많이 발견된다. 이러한 결함은 접합면적 감소, 용접부의 강도 감소, 다른 결함들의 유발 등 악영향을 주므로 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있으나<sup>2-5)</sup>, 주로 동종 재료간의 레이저 용접에만 국한된 것이었고, 이종간의 레이저 용접 시 생성되는 결함은 재료의 특성에 영향을 받아 원인이 서로 다르게 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이종재료인 Fe-Co-W 소결체와 탄소강의 레이저 용접 시 발생하는 결함들을 중심으로 형성기구를 파악하고자 연구를 진행하였다.

## 2. 실험방법

다이아몬드 쏘 블레이드는 회전축 고정부인 샹크(shank)와 절단날 부분인 팁(tip)으로 구성되어 있다. 샹크는 탄소강을

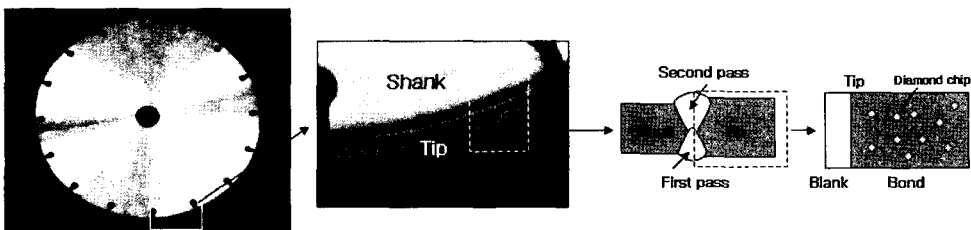


Fig. 1 Components of a diamond saw blade

사용하였고, 텃은 Fe, Co 및 W이 함유된 분말을 이용하여 소결하여 제작하였다. 소결텃은 다이아몬드 칩(chip)을 포함하는 본드(bond)와, 다이아몬드 칩을 포함하지 않고 상크와 함께 용융부를 구성하는 블랭크(blank)로 이루어져 있다. 주성분은 Table 1과 같다.

Fe-Co-W 주성분의 소결체 텃과 탄소강 상크를 최대 출력 3 kW의 CW CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 용접을 수행하였다. 용접 방법으로는 먼저 저입열의 레이저 빔을 이용하여 빔 출력(beam power) 750 W, 빔 이송속도(travel speed) 3.5 m/min의 조건으로 고정하여 Fig. 1에서와 같이 한쪽 면을 가접(tack welding)한 후 반대 면을 고입열의 레이저 빔을 이용하여 각 공정 조건에 따라 본 용접(main welding)을 수행하였다. Table 2에 각 공정변수를 나타내었다. 공정변수는 크게 빔위치를 고정시키고 빔 이송속도 및 빔 출력을 변화시키는 입열량 변화 조건과, 입열량은 고정시키고

고 빔의 위치를 변화시키는 조건으로 나누어 실시하였다.

용접부는 일부분을 절단하여 공정조건에 따른 용입 깊이, 용입비(aspect ratio), 캐비티 형성 유무 및 균열 길이 등을 조사하였다. 미세조직 관찰을 위해 0.3 μm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 까지 경면화 처리를 실시하고, 5 % nital 및 Vilella's etchant (picric acid 0.5 g + HCl 2.5 ml + ethanol 50 ml) 등으로 에칭을 한 뒤 분석을 수행하였다. 캐비티의 분석은 시편의 윗면을 관찰하였으며, 에칭을 하지 않은 상태에서 캐비티의 크기를 측정하여 크기별로 분류하고, 용접부 전체와 캐비티의 크기를 이미지 분석기(image analyzer)로 면적비를 구하여 입열량과 빔 위치 별로 구분하여 비교하였다. 균열은 캐비티 분석과 동일부분을 에칭하지 않은 상태에서 균열 길이를 측정하였으며, 측정되어진 균열의 길이를 최대 길이와 균열 전체의 길이로 구분하여 공정변수에 따라 비교하였다.

Table 1 Chemical compositions of shank and tip (wt.%)

|       | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   | Ni   | Co    | Cu    | W     | Sn   | Fe    |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| Bond  | -    | -    | 3.58 | -     | -     | -    | -    | 8.09 | 5.88  | 32.10 | 45.9  | 3.87 | 0.58  |
| Blank | -    | -    | -    | -     | -     | -    | -    | 1.85 | 42.18 | 0.59  | 16.42 | 1.00 | 37.96 |
| Shank | 0.36 | 0.20 | 0.68 | 0.015 | 0.004 | 1.01 | 0.30 | -    | -     | -     | -     | -    | bal.  |

Table 2 Welding parameters applied in this work

| Change of heat input |      | Change of composition                            |                                 |
|----------------------|------|--------------------------------------------------|---------------------------------|
| Beam position : 0 mm |      | Beam power : 1700 W<br>Travel speed : 1.3 m/min. |                                 |
| Travel speed (m/min) | 1.0  | Beam position (mm)                               | -0.2 (shank)<br>0<br>+0.2 (tip) |
|                      | 1.3  |                                                  |                                 |
| 1.7                  |      |                                                  |                                 |
| Beam power (W)       | 1300 |                                                  |                                 |
|                      | 1430 |                                                  |                                 |
|                      | 1560 |                                                  |                                 |
|                      | 1700 |                                                  |                                 |

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 용접 비드의 형태

Fig. 2는 레이저 용접 실시 후 용접 비드의 형태를 관찰한 것이다. 빔 위치에 따라 팁과 샹크의 정 중앙에서 실시한 경우를 중앙부(center)로 하여 팁 및 샹크 쪽으로 각각 0.2 mm씩 빔 위치를 이동하여 실시하였다. 그림에서 후면(rear side)은 가접(tack welding)을 한 것이고, 전면(front side)은 본용접(main welding)을 실시한 용접부의 비드를 나타낸 것이다. 본용접의 경우 빔위치에 관계없이 비교적 고른 형태의 비드를 나타내고 있으며, 후면에서는 비드 주변으로 스패터(splatter)가 발생하였음을 관찰할 수 있다.

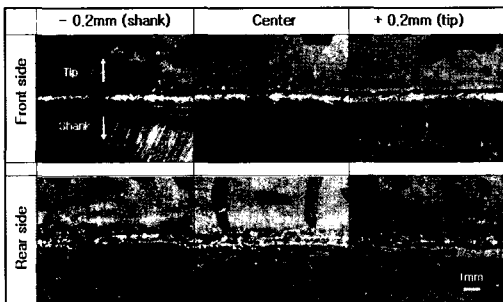


Fig. 2 The shape of laser weld bead

#### 3.2 비드 윗면(upper section)의 미세조직

본용접 비드의 윗면을 그라인딩(grinding)으로 제거한 후 미세조직 관찰을 실시하였다. Fig. 3(a)를 보면 전체 조직은 샹크 모재, 샹크 열영향부, 용융부, 블랭크, 본드의 5부분으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 중심에 있는 용융부에는 둥근 형태의 캐비티가 관찰이 되며, 미세한 크기의 캐비티의 경우 블랭크 쪽으로 비드를 따라 분포하고 있음을 볼 수 있다. 더 크게 확대하여 관찰한 Fig. 3(b)에서 캐비티는 둥근 형태로

블랭크 쪽으로 비드를 따라 형성되어 있으며, 특히 이러한 캐비티들은 용융부 내부에서 블랭크를 따라 띠 모양으로 형성되어 있는 백색 영역에 대부분 분포하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 백색 영역은 용융부 내에서 불완전한 혼합으로 인하여 발생한 성분의 불균일성에 의한 것이며, 일부는 리플라인(ripple line) 방향을 따라 반복적인 패턴을 이루면서 형성되어 있는 것을 볼 수 있다.

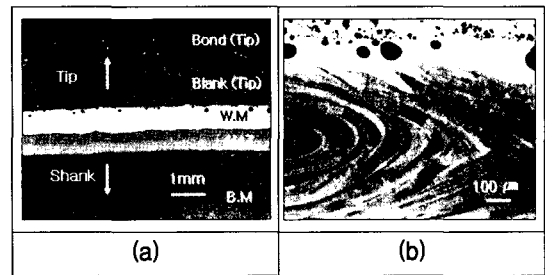


Fig. 3 Microstructures of upper section

#### 3.3 용접부 단면(cross section)의 미세조직

Fig. 4는 용접부 단면의 일반적인 미세조직 형태를 나타낸 것이다.

샹크와 팁의 두께는 각각 1.5 mm와 2 mm로 서로 다른 두께를 가지고 있으며, 용접부에서 위쪽이 본용접, 아래쪽이 가접을 한 것이다. 앞서 살펴 본 바와 같이 전체는 다

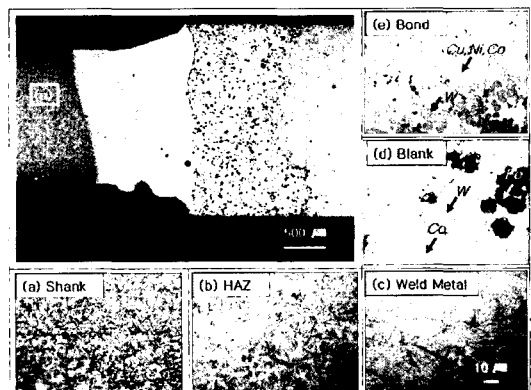


Fig. 4 Microstructures of transverse cross section

섯 부분으로 구성되어 있으며, 팁 부분의 EDS 분석 결과 블랭크에서는 Co기지에 미세한 W과 조대한 Fe 분말이 분포하고, 본드에는 Cu-Ni-Co 기지에 W 분말이 분포하고 있는 형태임을 알 수 있다.

### 3.4 용접부 성분의 변화

Fig. 5는 용융부 내의 성분을 입열량에 따라 재료의 주 성분인 Fe, Co, W을 중심으로 변화를 분석한 결과이다. 입열량이 증가할수록 Fe성분이 감소하며 Co, W성분이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 용접 시 빔의 각도가 상크 쪽으로 약간 기울어져 있으므로 입열량이 증가할수록 블랭크의 용융량이 증가하여 블랭크 쪽의 Co, W 성분이 용융부 내로 더 많이 유입되기 때문인 것으로 생각된다.

빔 위치에 따른 용융부의 성분은 Table 3에 나타내었다. 각 부분은 EDS를 이용하여 5회 측정하여 평균하여 얻었다. 앞서

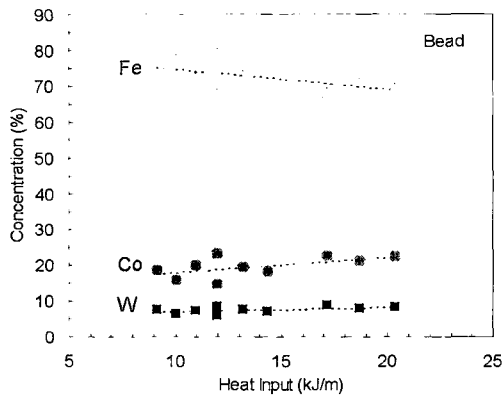


Fig. 5 Chemical compositions of fusion zone with heat input

용접 전의 Table 1의 성분과 비교 시 용접 후에는 상크의 성분과 블랭크의 성분이 서로 혼합하여 나타난 것을 알 수 있으며, 주 성분인 Fe, Co, W을 비교해 보면 빔 위치를 블랭크 쪽으로 이동함에 따라 Fe 함량은 감소하면서 Co, W의 함량은 증가하였고, 상크 쪽으로 이동한 경우에는 상반된 결과를 얻었다.

용융부는 용융선(fusion line)으로부터 에피택셜 성장(epitaxital growth)을 통하여 용접부 중심까지 응고가 진행된다. 본 연구에서의 대상이 된 레이저 용융부는 용융면적이 작고 레이저 용접 특유의 매우 빠른 응고속도를 가지며 덴드라이트의 크기도 매우 미세하다. Fig. 6에서와 같이 셀형 덴드라이트(cellular dendrite) 암의 폭을 10군데씩 측정하여 평균한 결과 입열량이 큰 시편에서는 7.2  $\mu\text{m}$ , 중간 시편에서는 5.6  $\mu\text{m}$ , 작은 시편에서는 3.2  $\mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다. 이는 입열량이 감소함에 따라 냉각속도가 빨라지고 그에 비례하여 덴드라이트 암의 폭도 감소할 것이라는 예상과 일치하는 결과이다. 한편, 셀형 덴드라이트

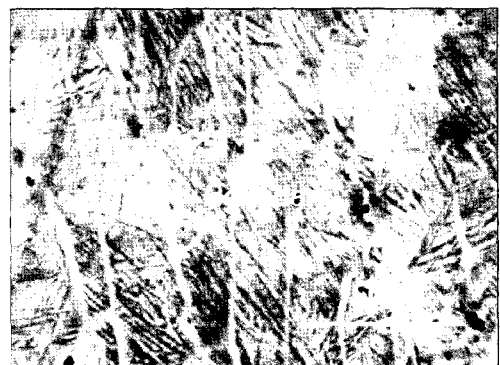


Fig. 6 Microstructure of cellular dendrite

Table 3 Chemical compositions of fusion zone with beam position (wt.%)

|        | C | Si   | Mn   | P | S | Cr   | Mo   | Ni   | Co    | Cu   | W    | Sn   | Fe    |
|--------|---|------|------|---|---|------|------|------|-------|------|------|------|-------|
| C+0.2  | - | 0.02 | 0.39 | - | - | 0.43 | 0.25 | 2.07 | 28.06 | 0.08 | 9.78 | 0.02 | 58.9  |
| Center | - | 0.03 | 0.37 | - | - | 0.54 | 0.15 | 1.71 | 25.2  | 0.17 | 9.16 | 0.05 | 62.62 |
| C-0.2  | - | 0.03 | 0.56 | - | - | 0.5  | 0.29 | 1.65 | 23.27 | 0.17 | 7.62 | 0.04 | 65.87 |

코어(core)와 경계(boundary)의 성분차이를 비교하기 위해 EDS 분석을 실시하여 Table 4와 같은 결과를 얻었다. 셀 경계에서의 조성은 입열량이 증가할수록 Fe가 감소하고, W은 증가하지만 Co는 거의 변화가 없었다. 이것은 앞서 용융부 전체의 성분 분석에서 확인했듯이 입열량이 증가에 따라 블랭크 쪽의 용융이 더 발생하여 용융부 내 전체적인 W, Co 함량이 증가하고, Fe 함량은 감소하는 경향의 영향도 작용하였겠지만, 입열량이 증가함에 따라 냉각속도가 감소함으로써 발생하는 편석의 경향이 더욱 뚜렷하게 작용한 영향도 큰 것으로 본다. 즉, 용융금속의 응고 과정에서 W성분은 셀 경계 쪽으로 편석되는 경향이 크며, 냉각속도의 감소는 이러한 경향을 더욱 크게 만든 것으로 사료된다.

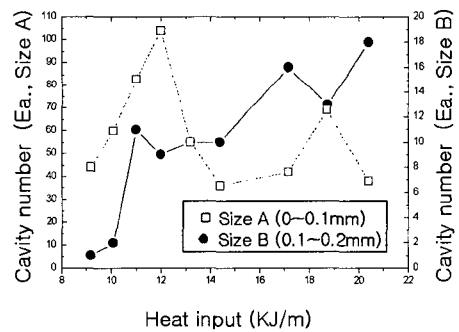
### 3.5 캐비티의 분포와 생성 원인

Fig. 7(a)는 입열량에 대한 캐비티의 크기별 분류이다. 실험 방법에서 설명한 바와 같이 캐비티의 최대 직경을 기준으로 크기를 분류하였다. 그림에서 size A는 0~0.1 mm 크기의 캐비티를 말하며, size B는

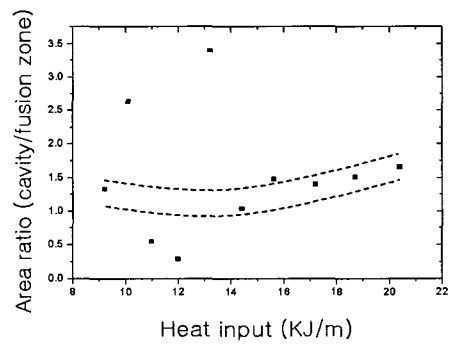
0.1 mm 이상의 캐비티를 말한다. 작은 캐비티의 개수는 입열량에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보이지만 입열량의 증가에 따라 큰 크기의 캐비티의 개수는 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 입열량이 클수록 용융부의 냉각속도가 감소하여 용융부 내부에서 작은 크기의 캐비티가 서로 합쳐 소멸하면서 성장할 시간이 충분하기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 7(b)는 캐비티의 면적과 용융부의 면적을 비율로 나타내어 입열량 별로 정리한 그래프이다. 입열량에 따른 면적비를 보면 약간 증가하는 경향이 있는 것 같기도 하지만 거의 일정한 비율로 존재한다고 생각할 수 있다. 이는 앞서 캐비티 개수와 면적비를 고려할 때 입열량에 따라 캐비티는 용융부에 그대로 남아 있으면서 작은 캐비티가 소멸하면

Table 4 Chemical compositions of cellular dendrite core and boundary

| dendrite boundary   |       |       |         |
|---------------------|-------|-------|---------|
| composition         | Fe    | Co    | W (wt%) |
| Heat input (kJ/m)   | (wt%) | (wt%) |         |
| high input (17.2)   | 65.15 | 21.19 | 13.72   |
| middle input (12.0) | 66.31 | 21.46 | 12.24   |
| low input (9.2)     | 69.51 | 20.87 | 9.62    |
| dendrite core       |       |       |         |
| composition         | Fe    | Co    | W       |
| Heat input (kJ/m)   |       |       |         |
| high input (17.2)   | 69.51 | 23.29 | 7.19    |
| middle input (12.0) | 69.72 | 23.22 | 7.07    |
| low input (9.2)     | 72.61 | 20.83 | 6.56    |



(a)



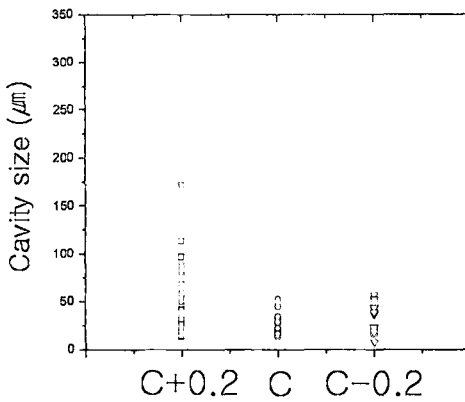
(b)

Fig. 7 Relationship of cavities with heat input (a) Cavity number (b) Area ratio

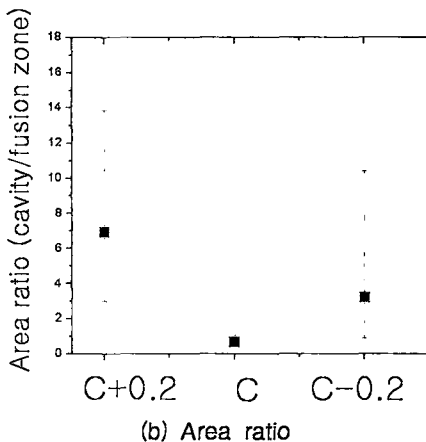
서 큰 캐비티로 성장한 것으로 판단된다.

빔 위치에 따른 캐비티의 분포 결과는 Fig. 8과 같다. 캐비티의 크기를 보면 빔 위치를 틱쪽으로 이동시킨 경우는 틱과 상크의 중심 및 상크 쪽으로 이동시킨 경우보다 캐비티의 크기가 큰 것들이 많이 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 용융부에 대한 캐비티의 면적율을 이미지 분석을 통하여 측정한 결과도 동일한 경향을 나타내고 있으며, 이를 통하여 캐비티의 형성과 소결 형태의 틱이 밀접한 관계를 이루고 있음을 알 수 있다.

앞서 Fig. 3에서 관찰된 바와 같이 캐비티의 형성은 용융부 내에서 틱 쪽으로 몰



(a) Cavity size



(b) Area ratio

Fig. 8 Relationship of cavities with beam position

려 있으며, 이와 같은 형태는 모든 공정 조건에서도 동일하였다. 따라서 캐비티의 형성 원인은 상크와 직접 용융되는 틱 즉, 블랭크라고 판단하고 블랭크에 대한 분석을 실시하였다. Fig. 9는 블랭크의 SEM 관찰 사진 및 EDS 이미지 매핑(image mapping) 결과이다. 이미지 매핑 결과를 보면 블랭크는 Fe, Co, W의 분말로 구성된 소결체이며, 각각의 분말이 따로 혼합되어 있다. Co, W 분말은 작은 크기로 고르게 분포하고 있으나 Fe분말은 큰 크기로 인하여 일정면적을 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 한편 소결체 내부는 Fig. 9(d)에서와 같은 미세한 형태의 기공(pore)이 고르게 분포하고 있으며 이를 이미지 분석을 통하여 기공률을 측정한 결과 면적비로 3.2%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 소결체에서는 완벽하게 소결을 실시한다하더라도 일부 기공이 남을 수 있으며, 특히 본 연구에서와 같이 소결시 소결 첨가제로 파라핀을 사용한 경우에는 소결시 파라핀의 탄소성분이 대기 중의 산소와 결합함으로써 CO<sub>2</sub> 기체를 형성하게 되고, 이것이 소결을 방해하게 되어 내부에 기공을 형성할

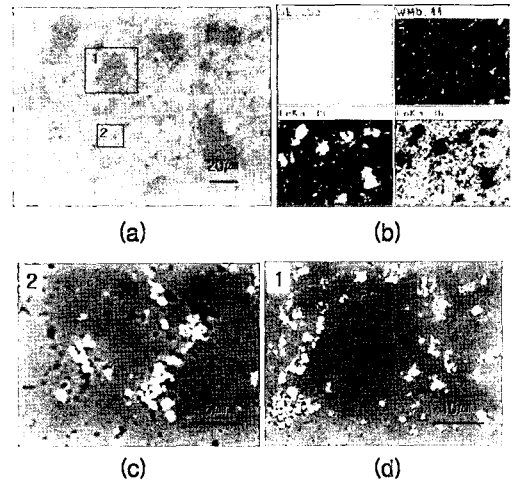
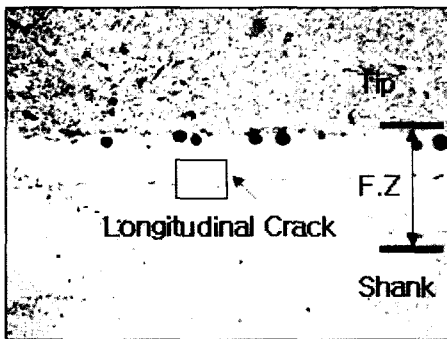


Fig. 9 Microstructure of sintered blank and EDS mapping

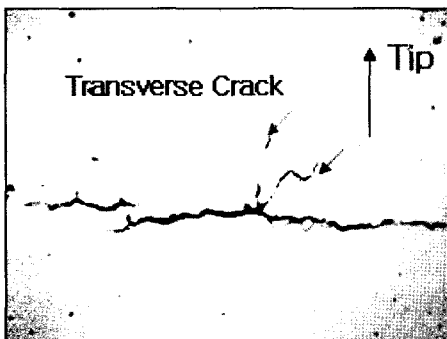
수 있다<sup>6)</sup>. 따라서, 본 연구에서 캐비티의 원인은 캐비티의 형성위치, 성장방향 등을 근거로 블랭크 내부에 잔존하고 있는 기공에서부터 비롯된 것으로 생각하며, 용접시 블랭크와 상크가 고온의 레이저 빔으로 인해 용해되는 과정에서 블랭크 내부의 기공도 서로 합쳐지고 성장하게 되고, 응고 시 용접부 내부에 잔존하여 캐비티를 형성한 것으로 사료된다.

### 3.6 균열의 형태 및 분포와 형성원인

용접부 내부에서는 Fig. 10에서와 같이 캐비티를 비롯하여 균열도 관찰이 되었다. 용접부에서의 균열은 형태에 따라 용접비드와 평행하게 전파하는 종균열(longitudinal crack)과 용접비드를 가로 질러 전파하는 횡균열(transverse crack)로 분류하였다.



(a)



(b)

Fig. 10 Cracks in the fusion zone

종균열의 경우에는 전체 입열량 조건에서 모두 관찰되는 것은 아니었고, 1.56 KJ/m의 입열량 조건에서 비드 전반을 따라 비드 중심부에 형성된 것이 관찰되었다. 횡균열의 경우에는 전반적인 공정조건에서 관찰이 되었으며, 입열량 증가에 따라 크기에 변화를 보이면서 비드를 가로질러 형성되었고, 응고시 응고방향에 따라 팁 쪽에서부터 중심부 쪽으로 성장하는 형태이다. 특히 대부분의 횡균열은 용접부를 중심으로 팁 쪽으로 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

공정변수에 따른 균열의 형성 경향은 균열의 길이 측정을 통하여 파악하고자 하였다. Fig. 11은 각각 용접부 내에서 관찰되는 전체 균열 길이(Total crack length, TCL)를 입열량으로 나타낸 것이다. 각각의 경우 입열량이 증가함에 따라 균열의 길이는 반비례하여 감소하는 경향을 나타내었다. 일반적인 균열의 경우 입열량이 증가함에 따라 용융체적이 증가하게 되고 그에 따라 응고 수축시 응력이 크게 작용하여 균열이 발생할 경향이 더 증가할 것이다. 하지만 본 연구에서 관찰된 균열의 경우는 그와는 반대의 경향을 나타내는 것이 특징이다.

금속이 액상선을 지나게 되면, 액체금속 중에 덴드라이트가 발생하여 온도가 감소되면서 성장한다. 고상선에 가까워짐에 따라 액상은 점점 감소하고, 고상선 바로 위에서 액체는 가늘고 긴 액막(liquid film)을 형성하게 되는데, 이 단계에서 고체는 분리되어 있는 상태이고, 내하중능력 및 변형능이 동시에 부족하므로 강도가 약하고, 유동성이 없는 상태에서 가하여진 인장력으로 인하여 결정립계의 액막은 파괴됨으로써 균열이 발생하게 된다. 특히 금소 중에 저융점의 공정을 형성하는 성분이 있는 경우 균열 발생이 더욱 용이한데 이것은 저융점상이 결정립계에 편석하여 그 부분



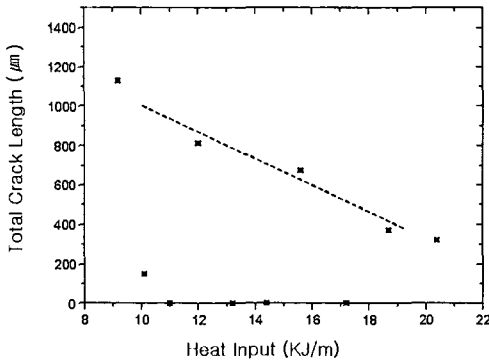


Fig. 11 TCL(Total crack length) with heat input in the weld

의 응고온도를 현저히 저하시키므로써 액막단계의 온도범위를 저온으로 낮추기 때문이다<sup>7)</sup>. 따라서, 이러한 이론을 근거로 판단시 본 연구의 대상이 된 균열에서도 결정립계 또는 덴드라이트 경계를 따라 편석된 성분이 존재할 것이며, 이 성분으로 인하여 형성되는 상은 저융점 상일 것으로 판단되어 분석을 실시하였다.

응고 시 편석에 대하여는 앞서 성분 분석에서 살펴본 것으로 덴드라이트 경계를 따라 성분 분석 결과 Co, W 성분의 농도가 더 높은 것으로 파악되었고, 이를 통하여 Fig. 12와 같은 Fe-Co-W의 삼원계 liquidus projection을 고려해 보았다. 편

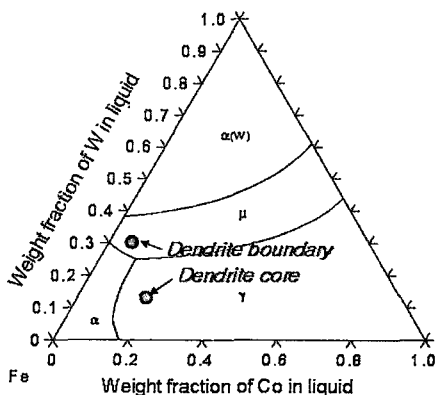


Fig. 12 Fe-Co-W liquidus projection

석 정도가 심한 조성을 고려하면 초기 응고되는 덴드라이트 코어의 성분과 경계의 성분은 W함량에서 큰 차이가 난다. 따라서 liquidus projection 상에서 이를 고려하면 초기의 덴드라이트 코어 성분은  $\gamma$ 의 형태로 정출되어 응고되고, 덴드라이트 경계는 편석으로 W함량이 증가하면서 최종의 액상은  $\gamma$ 와  $\mu$ 상( $(Co,Fe)_7W_6$ , rhombohedral 구조)의 공정상으로 응고될 수 있다. 즉, 응고과정은 상태를 고려하면  $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow (\gamma/\mu) + \gamma$ 와 같은 형태로 진행될 것으로 판단되며, 이  $\gamma/\mu$ 상은 응고 하한선을 떨어뜨리는 역할을 하여 고온균열을 유발시킬 수 있다.

따라서, 고온균열이 전파되는 끝부분을 중심으로 성분 분석을 실시하였다. 그 결과 Fig. 13에서와 같이 덴드라이트 경계에서 W성분의 농도가 높은 것을 확인할 수 있었고, 균열은 이를 따라 전파하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 14는 균열부를 강제로 파단시켜 균열 단면을 관찰한 것이다. 단면을 보면 균열 내부에도 미세한 크기의 기공(pore)이 존재하고 있는 것을 볼 수 있고, 특히 (c)에서 균열 내부는 매끄러운 형태의 표면을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 균열이 형성시 표면에 잔류액상이 형성되어 있었음을 보여주며, 균열의 형성원인은 고온균열임을 보여준다. 앞서 입열량에 따른 균열의 형성 경향에서 균열이 입열량에 따라 감소한 것은 이러한 고온균열의 영향과 관련이 있는 것으로 판단되며, 입열량이 증가함에 따라 편석 경향이 증가하고 그에 따라 잔류액상의 양이 증가할 것으로 생각된다. 이것은 고온균열의 이론에서 액상의 양이 충분한 경우에는 일단 균열이 생성되더라도 그 균열 틈을 따라 재충진(backfilling)을 유발하고, 이는 균열의 치유(healing) 효과

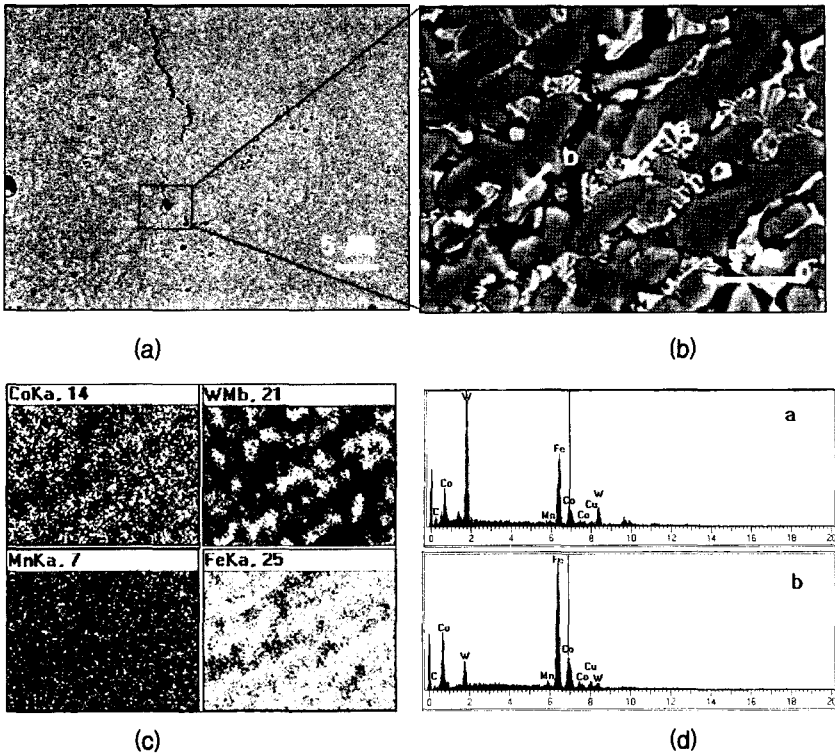


Fig. 13 Microstructure of crack area and result of EDS analysis

### 4. 결 론

이상과 같은 결과에 의하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 입열량이 클수록, 빔 위치가 팁 쪽으로 이동할수록 Fe 성분보다 Co, W 성분이 증가하며, 용융부 내에서는 입열량 증가에 따라 덴드라이트 영역에서 코어 보다는 경계에 W 성분이 증가 하며, Co 성분은 변화가 없고, Fe 성분은 감소하였다.
2. 빔 위치를 팁 쪽으로 용접한 경우 기공이 증가하는 경향을 보였다. 입열량 증가에 따라 작은 크기의 캐비티는 감소하고, 큰 크기의 캐비티는 증가하는 경향을 나타내었으며, 용융부에서 캐비티가 차지하는 분율에서는 큰 변화가 없

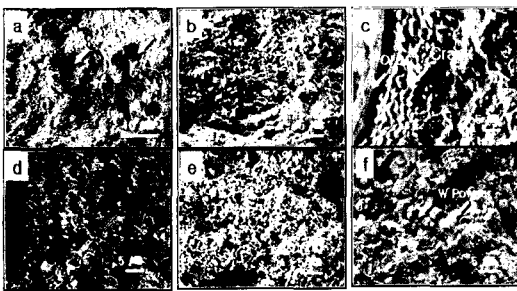
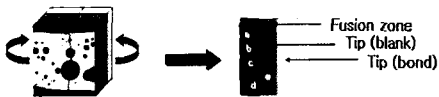


Fig. 14 Fractured surface of crack region

를 발생시켜 균열이 감소하는 결과를 가져올 수 있다는<sup>8)</sup> 것과 연관지을 때 본 연구에서도 입열량 증가는 액상량의 증가를 초래하고 이것이 균열의 치유 효과를 발생시킴으로써 균열이 감소되었다고 판단된다.

- 는 것으로 파악되었다.
3. 캐비티의 대부분은 용융부 내 팁 주위에서 관찰되었고, 소결팁 내부에 존재하던 기공이 성장하여 형성된 것으로 판단된다.
  4. 입열량이 증가함에 따라 균열의 발생은 감소하는 경향을 나타내었고, 덴드라이트 경계를 따라 전파되는 형태이다.
  5. 고온균열의 발생은 결정립과 덴드라이트 경계에서 편석에 의한 잔류액상의 형성인 것으로 보이며, 응고시  $\gamma/\mu$  공정상을 형성시킨 것으로 판단된다. 입열량 증가로 인한 편석의 증가, 잔류 액상량의 증가는 균열 치유 효과를 발생시킨 것으로 판단된다.
  6. Rendal M.German: Powder Metallurgy science, Metal Powder industries Federation, pp. 195
  7. J.C.borland: British Welding J. Vol. 8, 1960, pp. 508
  8. J.C.borland: Welding and Metal Fabrication, Vol. 47, 1979, pp. 19-21

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 산학협력연구(2002-000-00031-0)지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. V.V Borisova, S.M. Kutev and S.F. Moryashev: Paton Welding J. Vol. 5(1), 1993, pp. 56-58
2. Shigeki Fujinaga, Hiroo Takenaka, Toru Narikiyo: J. Phys. D:Appl. Phys. Vol. 33, 2000, pp. 492-497.
3. D.F. Farson, K.R. Kim: Section F-ICALEO, 1998, pp. 197-206
4. John Dowden, Phiroze Kapadia: J. Phys. D:Appl. Phys. Vol. 28, 1995, pp. 2252-2261
5. Bruno Martin, Alexandre Lored, Michel Pilloz: Optics & Laser Technology, Vol. 33, 2001, pp.