

## 소결체와 저탄소강의 레이저용접 특성에 미치는 입열량 및 용접부 성분변화의 영향

정우광<sup>†</sup> · 조남준 · 김성욱\* · 이창희\* · 김승대 · 이주형 · 박화수

국민대학교 공과대학 신소재공학부

\*한양대학교 공과대학 신소재공학부

## Influence of Heat Input and Weld Bead Composition on Welding Property in the Laser Welding between Sintered Segment and Mild Steel Shank

Woo-Gwang Jung<sup>†</sup>, Nam-Joon Cho, Sung-Wook Kim\*, Chang-Hee Lee\*, Sung-Dea Kim,  
Joo-Hyoung Lee and Hwa-Soo Park

School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, 861-1 Chongnung-dong,  
Songbuk-ku, Seoul, 136-702, Korea

\*Division of Materials Science and Engineering, College of Engineering,  
Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(2004년 5월 10일 받음, 2004년 6월 15일 최종수정본 받음)

**Abstract** A laser welding was applied between sintered tip of Fe-Co-W and low carbon steel shank for the diamond saw blade. The welding characteristics and formation of defects were investigated carefully for the weld fusion zone in different welding condition. Dendrite arm spacing in weld bead decreased with decrease of heat input. Co and W increased and Fe decreased in the weld fusion zone with increase of the heat input. The corresponding change of composition was observed with the change of beam position. The maximum and total length of crack decreased with increase of the heat input. The crack in weld bead was propagated along the dendrite boundary and was caused mainly by the segregation of constituent during the solidification.

**Key words** diamond saw blade, laser welding, heat input, beam position, crack, segregation

### 1. 서 론

건축현장에서 내화물과 아스팔트 등의 재료 절단에 다이아몬드 쏘 블레이드(diamond saw blade) 공구를 광범위하게 사용하고 있으며<sup>1)</sup>, 다이아몬드 쏘 블레이드는 Fig. 1과 같은 구조로서 회전축과 연결되는 샹크(shank)와 다이아몬드 칩(chip)이 들어있는 소결체 톱(tip)과의 결합으로 이루어진다. 이러한 다이아몬드 쏘 블레이드의 제조방법에는 저용접 금속을 이용하여 접합하는 브레이징(brazing) 방법과 모재를 직접 용접하는 레이저 용접 등이 있는데, 낮은 생산 속도와 환경적인 부담이 큰 브레이징 보다 높은 생산성과 친환경적인 레이저 용접이 많이 채택되고 있는 추세이다. 레이저 용접은 열영향부가 좁아 열변형이 적으며, 깊은 용접부를 얻을 수 있어 높은 피로강도를 가지며, 성형성이 좋고 기계적 특성이 우수한 용접부를 얻을 수 있다<sup>2-4)</sup>.

국내에서 레이저에 의한 다이아몬드 쏘 블레이드 제조

기술은 선진국 제품에 비하여 기공, 균열 등의 결함이 다량으로 발생되고 있으며, 쏘 블레이드는 소결체와 저탄소강의 접합이라는 특성 때문에 국내뿐 만 아니라 국외에서도 용접특성에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 이전의 연구에서 기공의 형성과 용접 특성에 대한 연구<sup>5)</sup>에 이어서 Fe-Co-W 성분의 소결체 tip과 저탄소강 shank 사이의 레이저 용접시 용접특성에 미치는 입열량 및 용접부 성분변화의 영향에 대하여 정량적으로 조사하였다.

### 2. 실험 방법

실험은 2단계로 나누어지며, 첫 번째는 톱과 샹크의 레이저 용접, 두 번째는 용접부의 특성분석으로 구성된다. 톱과 샹크를 최대 출력 3 kW의 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 용접을 수행하였다. 용접방법으로는 먼저 저입열의 레이저 빔을 이용하여 빔파워 (beam power) 750 W, 빔이송 속도(travel speed) 3.5 m/min의 조건으로 고정하여 Fig. 1에서와 같이 한쪽 면을 가접(tack welding)한 후 반대

<sup>†</sup>E-Mail : wjung@kookmin.ac.kr

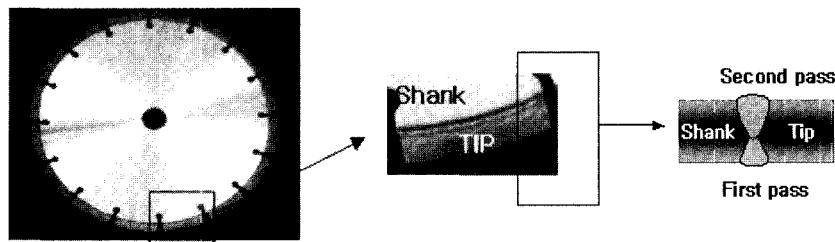


Fig. 1. Components of a diamond saw blade.

**Table 1.** Welding parameters applied in the present work.

Rate of cooling		Change of composition	
Beam position: 0 mm		Beam power: 1700W Travel speed: 1.3 m/min	
Travel speed (m/min)	1.0 1.3 1.7	Beam position (mm)	-0.2 0 +0.2
Beam power (W)	1300 1430 1560 1700	Rewelding	Power: 2100W Speed: 1.3 m/min 2 times welding

면을 고입열의 레이저 빔을 이용하여 공정 조건에 따른 용접(main welding)을 수행하였다. 본 용접의 수행조건은 크게 응고속도의 변화와 성분변화로 나눌 수 있으며, Table 1에 용접조건을 나타낸다. 응고 속도에 따른 용접 조건은 입열량을 변화시켰으며, 성분 변화에 따른 용접 조건은 같은 입열량에서 빔 위치를 변화시켰다.

용접에 따른 입열량은 다음 식으로부터 계산하였다.

$$Q = \eta \frac{P}{v} \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 입열량을 나타내며,  $\eta$ 는 재료의 흡수계수,  $P$ 는 빔파워(beam power),  $v$ 는 빔이송속도 (travel speed)를 나타낸다. 여기서  $\eta$ 는 일반 탄소강의 흡수 계

수 0.2를 적용하였다.

용접부에 대한 분석은 팀이 접합되어진 샹크의 일부분을 다이아몬드 쇼블레이드에서 절단하여 각각의 팀을 윗면(upper section, main welding side)과 가로 단면(transverse cross section), 길이 단면(longitudinal section)으로 시편을 절단하여 공정조건에 따른 기공(cavity) 형성, 균열길이 등을 조사하였다. 팀과 샹크의 화학조성 및 시료가공방법에 대한 상세한 그림은 이전의 논문<sup>5)</sup>을 참조하기 바란다.

절단된 시편은 미세조직 관찰을 위해 연마한 후 다시  $Al_2O_3$  0.3  $\mu m$  파우더를 이용해 경면화 처리를 실시하고 5% nital 및 Villela's etchant (picric acid 0.5 g + HCl 2.5 ml + ethanol 혹은 methanol 50 ml) 등으로 에칭을 한 뒤 분석을 수행하였다.

결합분석은 광학현미경, SEM 및 EPMA를 이용하여 수행하였다. 균열은 기공 분석과 동일부분을 에칭하지 않은 상태에서 균열길이를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 용접부 미세조직

시료를 전술한 방법에 의하여 절단면을 관찰하여 용접 특성을 조사하였다. Fig. 2는 용접부 단면의 미세조직을 나타낸다. 본 연구의 용접조건에서는 모든 시료에서 그

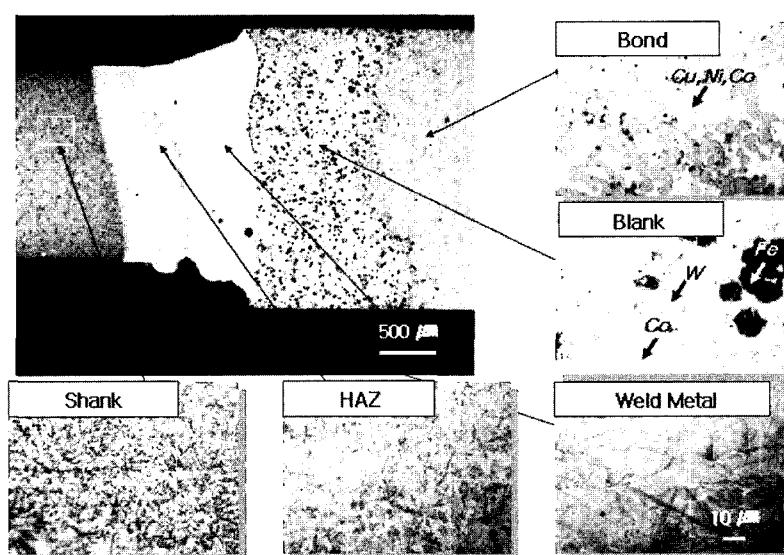


Fig. 2. Microstructures of transverse cross section.

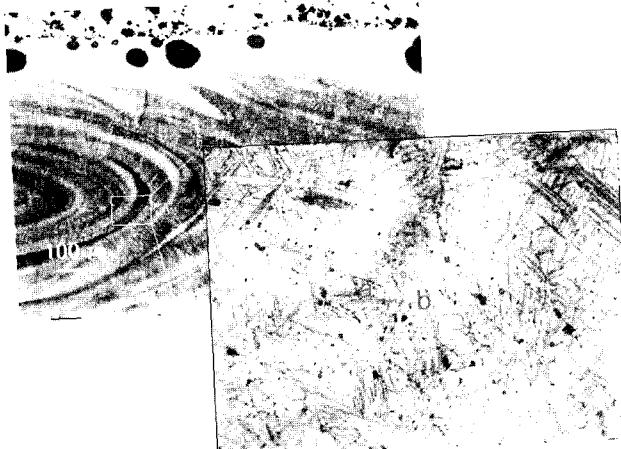


Fig. 3. Microstructure of ripple line in weld upper side.

립에서와 같이 완전용입(full penetration)이 관찰되었다. 양크와 팀의 두께는 각각 1.5 mm와 2 mm로 서로 다른 두께를 가지고 있으며, 그림에서 윗부분이 본 용접, 아래쪽이 가접을 한 것이다. 시료 전체는 양크 모재, 양크 열영향부, 용융부, 블랭크, 본드의 다섯 부분으로 구성되어 있으며, 용융부에는 기공이 관찰되며, 미세한 기공이 블랭크쪽에 분포하고 있다. 팀 부분의 EDS 분석 결과 블랭크에서는 Co 기지에 미세한 W과 조대한 Fe 분말이 분포하고, 본드에는 Cu-Ni-Co 기지에 W 분말이 분포하고 있음을 알 수 있다. 재용융 시편의 경우 용융부 내부에 많은 기공이 존재하고 있었으며, 비드를 가로질러 형성된 균열도 관찰되었다.

Fig. 3은 시료의 윗면을 연마하여 관찰한 사진을 나타낸다. 용접부위에 ripple line이 형성되어 반복적인 패턴을 이루고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 3에서는 용융부의 ripple line부를 고배율로 관찰한 사진을 나타내고 있다. 사진에서 a 부분은 침상의 형태를 띠며, b 부분은 셀 형 수지상(cellular dendrite) 형태를 이루고 있다. 이러한 ripple line은 팀과 양크 성분의 불완전한 혼합에 의한 것으로 사료된다. a와 b 부분의 경도를 측정한 결과 a는 544 Hv b는 646 Hv로 b 부분의 경도가 더 큰 것으로 나타났다. EDS 분석으로 조성을 측정한 결과, a에서는 Fe 성분이 많고 W성분이 적으며, b에서는 Fe가 적고, W 농도가 높았다. 따라서 W성분이 많은 b 영역이 경도가 높은 것으로 사료되며, 이러한 성분 불균일은 레이저용접의 특징인 빠른 응고속도에 의해 용융금속이 균일하게 혼합되지 않았기 때문이다.

Fig. 4는 입열량에 따른 용융부를 에칭하여 현미경으로 관찰한 미세조직을 나타낸다. 냉각속도에 따른 조직의 변화를 확인하기 위하여 셀형 수지상의 암 간격을 측정은 암 간격을 10μm에 측정하여 평균하였고 있다. 그 결과, 시편 (a)은 7.2 μm, (b)는 5.6 μm (c)는 3.2 μm인 것으로 나타났다. 이것은 입열량이 감소함에 따라 용융부에서의 냉각속도가 빠르고, 그에 따라 수지상

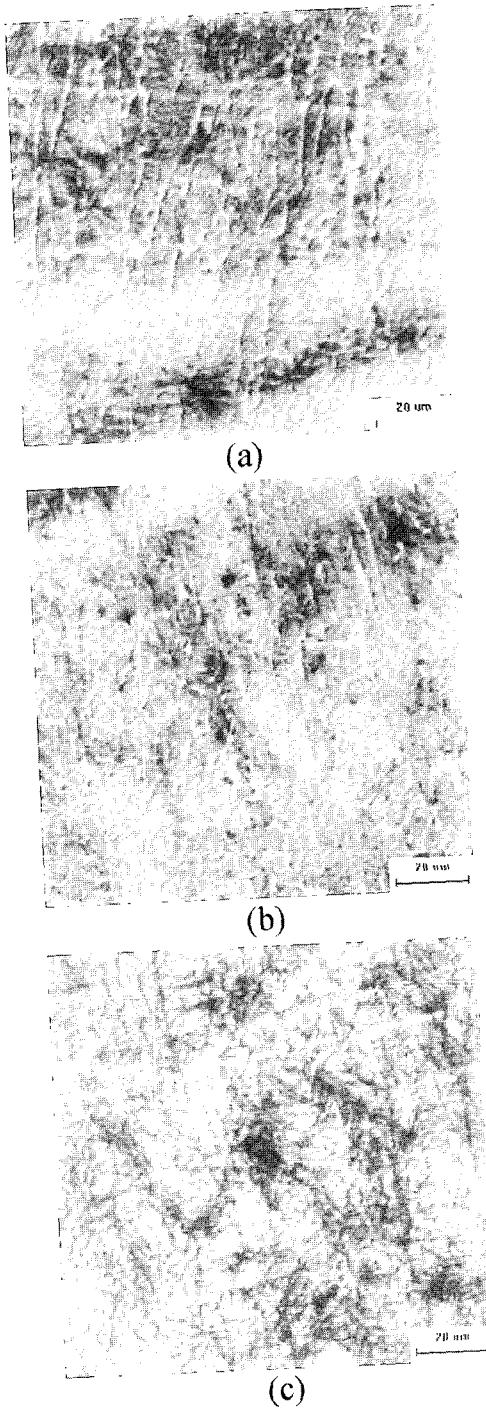


Fig. 4. Microstructure of fusion zone with heat input. (a) 18.7 kJ/m (b) 12.0 kJ/m (c) 10.1 kJ/m

의 암 간격이 감소하는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 일반적인 냉각속도에 따른 응고거동과 잘 일치하고 있다<sup>6)</sup>.

Fig. 5는 용접빔 위치를 양크와 팀의 센터를 중심으로 팀쪽 또는 양크쪽으로 이동하여 용접을 수행한 시편 및 재용접 시편의 단면 관찰 사진을 나타낸다. 본 실험에서 모든 공정조건의 시편에서 용접부가 완전용입(full penetration)된 것을 알 수 있다. 빔위치를 팀쪽으로 이동시킨 경우 상당히 많은 기공이 관찰되었으며, 양크쪽

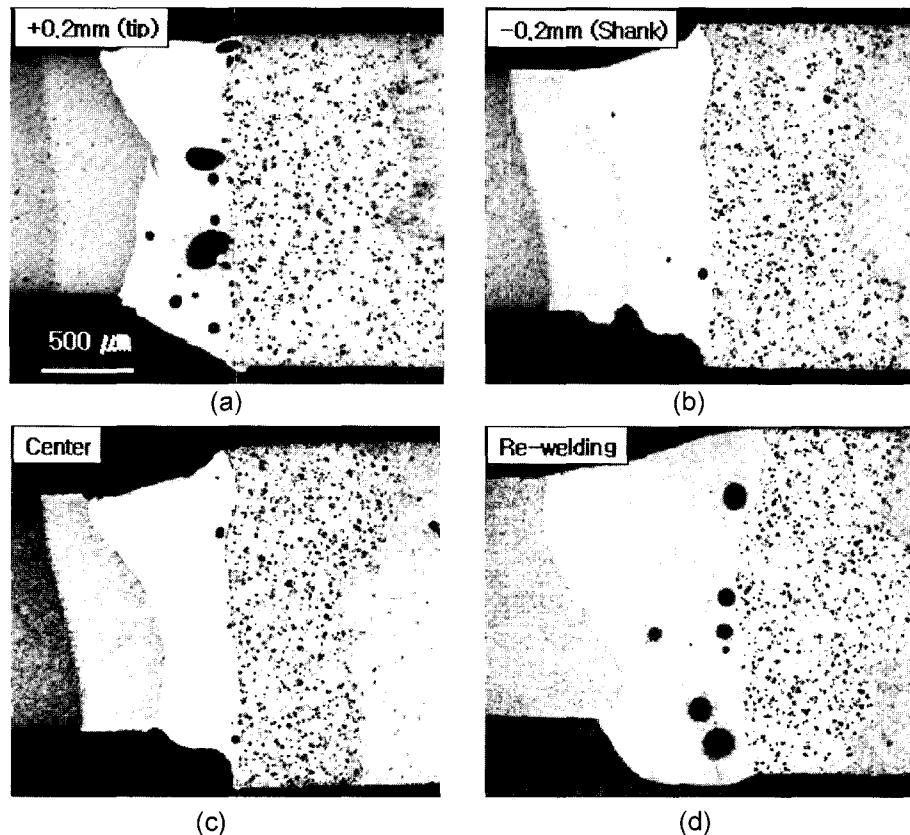


Fig. 5. Microstructure of weld with different beam position.

으로 이동시에는 감소한 것을 알 수 있다. 또한 재용접 시편의 경우 용융부 면적이 크게 증가하였고, 조대한 기공이 관찰되고 있다. 기공의 생성원인은 이전의 논문<sup>5)</sup>에서 고찰한 바와 같이 소결체 블랭크 내부에 존재하는 기포가 용접시 용융부로 흡입되어 서로 합쳐지고 성장하게 되어 응고가 될 때 용융부에서 완전히 제거되지 못하고 잔존하여 생성된 것으로 사료된다.

### 3.2. 입열량 및 빔위치에 따른 용접부 조성변화

이전의 논문<sup>5)</sup>에서 나타낸 바와 같이 본 연구에서 사용한 색코는 일반 저탄소강이며, 팁은 Fe, Co, W을 주성분으로 하는 소결체이다. Fig. 6은 용융부 내의 조성을 재료의 주성분인 Fe, Co, W를 중심으로 변화를 분석한 결과이다. 입열량이 증가할수록 Fe 성분이 감소하며, Co와 W 성분이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 용접시 빔의 각도가 색코쪽으로 약간 기울어져 있어 입열량이 증가할수록 블랭크의 용융량이 증가하여 블랭크 쪽의 Co, W 성분이 용융부 내로 더 많이 유입되기 때문이다.

Table 2는 빔위치에 따른 용융부 성분의 분석결과를 나타낸다. 분석은 EDS를 이용하여 5회 측정하여 평균하여 구하였다. +0.2는 빔위치를 팁블랭크쪽으로 이동한 것을 나타내며, -0.2는 색코쪽으로 이동한 것을 나타낸다. 용접전의 색코와 팁의 성분과 비교하면, 용접 후에 색코의 성분과 팁 성분이 서로 혼합된 것을 알 수 있다. 주성

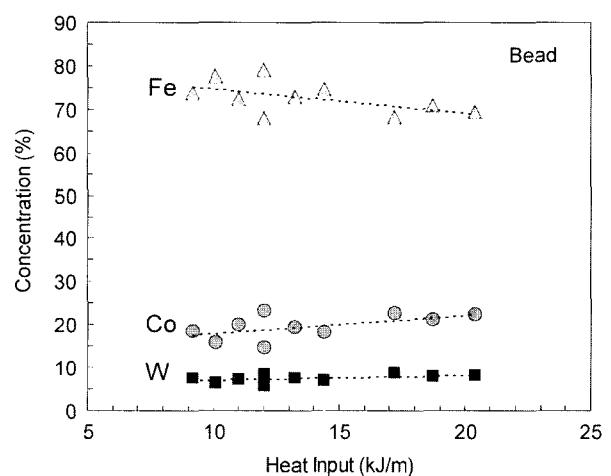


Fig. 6. Chemical compositions of fusion zone with heat input.

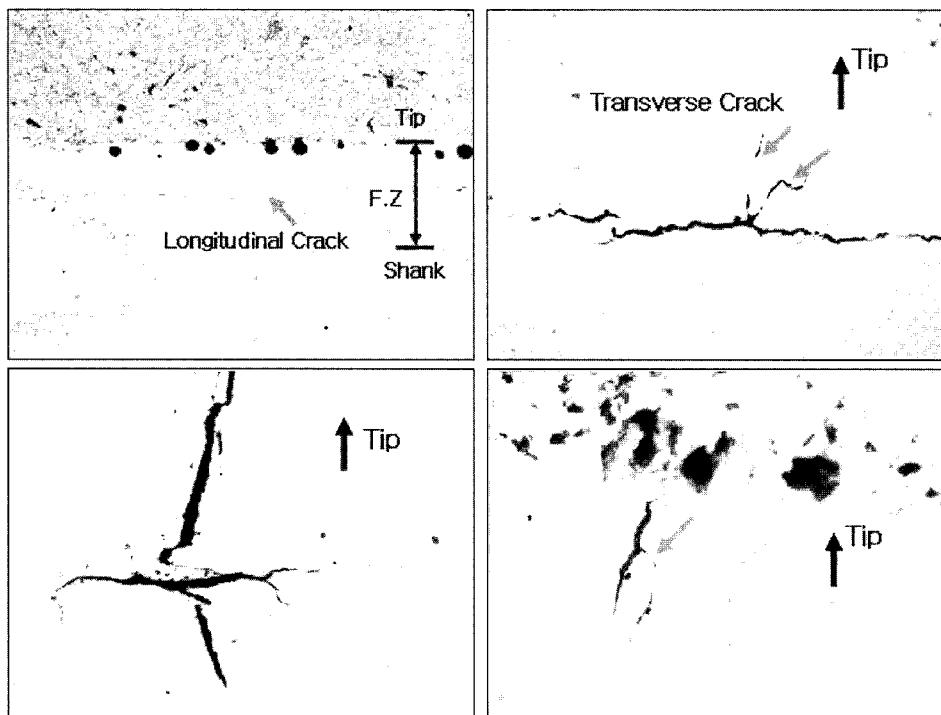
분인 Fe, Co, W를 비교하여 보면, 빔 위치를 블랭크쪽으로 이동한 것은 Fe 함량이 감소하고 Co, W의 함량이 증가하였으며, 빔위치를 색코쪽으로 이동한 경우에는 상반된 결과를 얻었다. 빔위치의 변화없이 재용접을 실시한 경우에는 센터에서 용접한 것과 유사한 조성을 나타내었다.

### 3.3. 균열 생성

용접부 내부에서는 기공을 비롯하여 균열도 관찰이 되

**Table 2.** Chemical compositions of fusion zone with different beam positions.

	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Co	Cu	W	Sn	Fe
C+0.2	0.02	0.39	0.43	0.25	2.07	28.1	0.08	9.78	0.02	58.9
C	0.03	0.37	0.54	0.15	1.71	25.2	0.17	9.16	0.05	62.6
C-0.2	0.03	0.56	0.50	0.29	1.65	23.3	0.17	7.62	0.04	65.9
Rewelding	0.02	0.36	0.49	0.07	1.80	25.1	0.31	8.50	0.04	63.3

**Fig. 7.** Cracks in fusion zone.

었다. 용접부에서의 균열은 형태에 따라 용접비드와 평행하게 전파하는 종균열(longitudinal crack)과 용접비드를 가로 질러 전파하는 횡균열(transverse crack)로 분류하였으며, Fig. 7은 균열의 대표적인 형태를 나타낸다.

종균열의 경우에는 전체 입열량 조건에서 모두 관찰되는 것은 아니었고, 1.56 kJ/m의 입열량 조건에서 비드 전체에 비드 중심부에 형성된 것으로 관찰되었다. 횡균열의 경우에는 모든 공정조건에서 관찰이 되었으며, 입열량 증가에 따라 크기가 변화를 보이면서 비드를 가로질러 형성되었고, 응고시 응고방향에 따라 텁 쪽에서부터 중심부 쪽으로 성장하는 형태이다. 특히 대부분의 횡균열은 용접부를 중심으로 텁 쪽으로 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 재용융 시편을 관찰하면, 균열이 수지상 경계를 따라 생성되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

공정조건에 따른 균열의 생성 경향을 정량화하기 위하여 균열의 길이를 시편별로 측정하였다. Fig. 8은 각 시편에서 용융부 내에서 관찰되는 균열의 최대 균열 길이(maximum crack length) 및 전체 균열 길이(total crack length)로 나타낸 것이다. 각각의 경우 입열량이 증가함에 따라 균열의 길이는 감소하는 경향을 나타냈었다.

용접에서 균열은 용접부에 발생한 응력이 커서 그 부

분의 소성변형능이 응력을 극복하지 못하는 경우에 발생할 수 있다. 따라서 응고, 냉각시의 석출이나 변태 등에 의해서 용접부의 연성이 현저하게 저하하거나, 과다한 응력이 생기는 조건에서 균열이 발생될 수 있다<sup>7)</sup>.

용접부에 존재하는 인이나 황은 용융부의 응고시에 응고구간을 넓혀서 균열생성을 조장하며, 또한 입계에 편석되어 저용점 화합물을 생성하여 응고균열을 발생시키는 원인이 될 수 있다<sup>7,9)</sup>. 본 연구에서의 용접비드내에 존재하는 균열의 생성원인을 고찰하기 위하여 균열주위의 인 또는 황의 화합물의 존재여부를 EPMA를 이용하여 조사하였다. 본 연구에서 사용한 샹크와 소결체팁에서 인과 황성분은 소결체팁에는 거의 없으며, 저탄소강인 샹크에만 각각 0.015%와 0.004%가 포함되어 있다. 시편내 균열주위를 EPMA로 분석한 결과 인과 황 성분은 농도가 매우 낮았으며, 시료 전체에 고르게 분포하고 있어 특정부위에 편석되어 있는 것을 확인할 수 없었다. 따라서 본 연구에서의 균열은 인이나 황의 석출물과 같은 저용점 화합물의 편석에 의한 것이 아님을 알 수 있다.

용접을 수행하게 되면 고온에 의해 시료의 일부가 용해된 후 냉각되어 응고하며, 이러한 과정이 매우 짧은 시

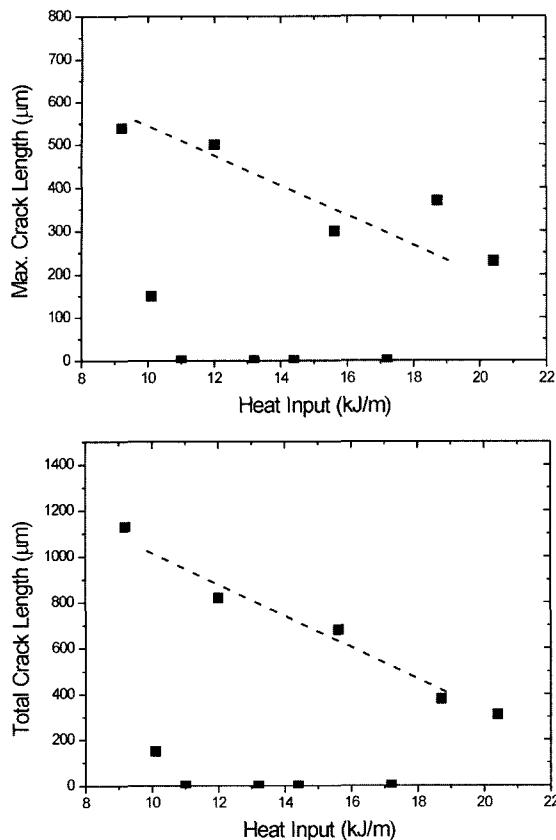


Fig. 8. Crack length with heat input.

간에 이루어지므로 소재는 응력을 받게 된다. 이러한 응력이 용접부의 균열의 형성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이러한 응력의 영향을 보다 정량적으로 고찰하기 위하여 본 실험조건에서의 잔류응력을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 계산하였다. Fig. 9는 시뮬레이션에서 사용한 그리드와 용접부 부근의 잔류응력을 계산결과를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서는 빔이송속도를 1.0 m/min으로 고정하고 빔파워를 변경시켜 입열량을 변화시켰다. Fig. 10은 Fig. 9의 grid A와 B에 대하여 입열량에 따른 용접후의 잔류응력을 계산한 결과를 나타낸다. 본 계산에서는 열전달은 차분법을 이용하였고, 응력은 변형율을 이용하여 해석하였다. Fig. 10에서 A점에서는 압축응력이 B점에서는 인장응력이 작용하고 있음을 나타내고 있으며, 용접시 빔파워가 증가함에 따라서 압축응력과 인장응력이 모두 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이 계산결과는 heat input양이 증가함에 따라서 잔류응력이 증가한다는 일반적으로 알려진 정성적인 경향과 일치하고 있다. 그러나 본 연구에서 수행한 용접 실험결과에서는 heat input이 증가함에 따라서 균열의 발생이 감소하는 경향을 나타내어 상기의 계산결과와 상반된 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서의 용접시 생성되는 균열의 주된 발생기구는 잔류응력에 의한 것이 아닌 것으로 판단할 수 있다.

다음으로 본 연구에서 균열의 생성원인으로 검토할 수 있는 것은 고온균열이다. 응고과정에서의 냉각속도의 차

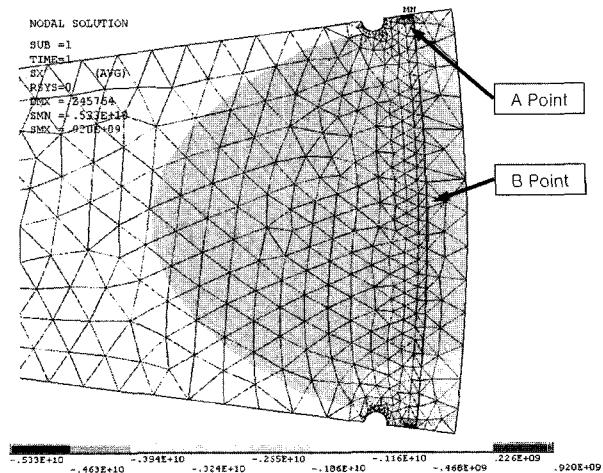


Fig. 9. Grids designed in simulation and profile of residual stress around weld bead.

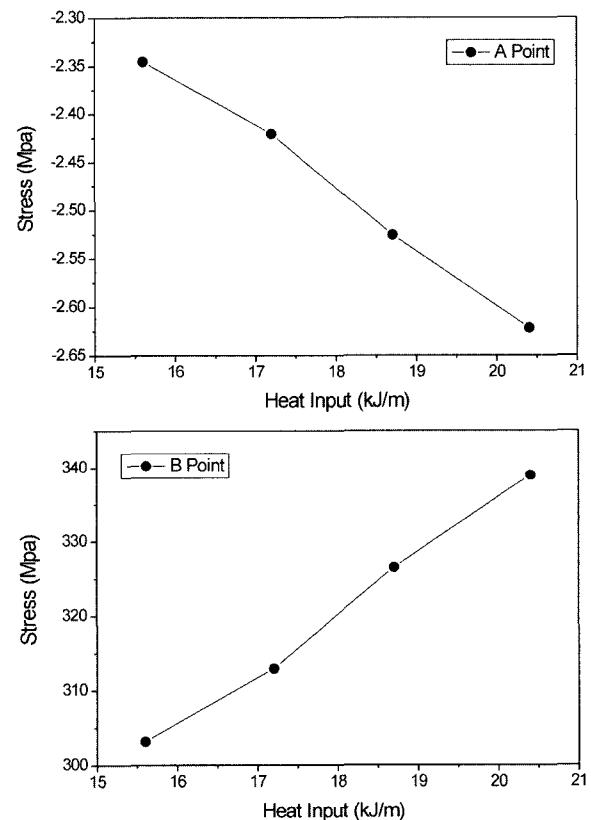


Fig. 10. Change of residual stress at Point A and B in Fig. 9 with heat input.

이는 구성 성분의 편석정도를 다르게 할 수 있다. 금속이 액상선을 지나게 되면, 액상중에 수지상이 생성되며 온도가 감소되면서 성장한다. 고상선에 가까워짐에 따라 액상은 점점 감소하고, 이때에 냉각속도의 차이에 의해서 고상과 액상사이에서의 편석의 정도가 차이가 날 수 있다. 이러한 조성의 차이는 미세조직의 기계적 특성을 변화시키며 균열발생에 영향을 미치게 된다. 따라서 균열이 전파되는 끝부분을 중심으로 성분분석을 실시하였

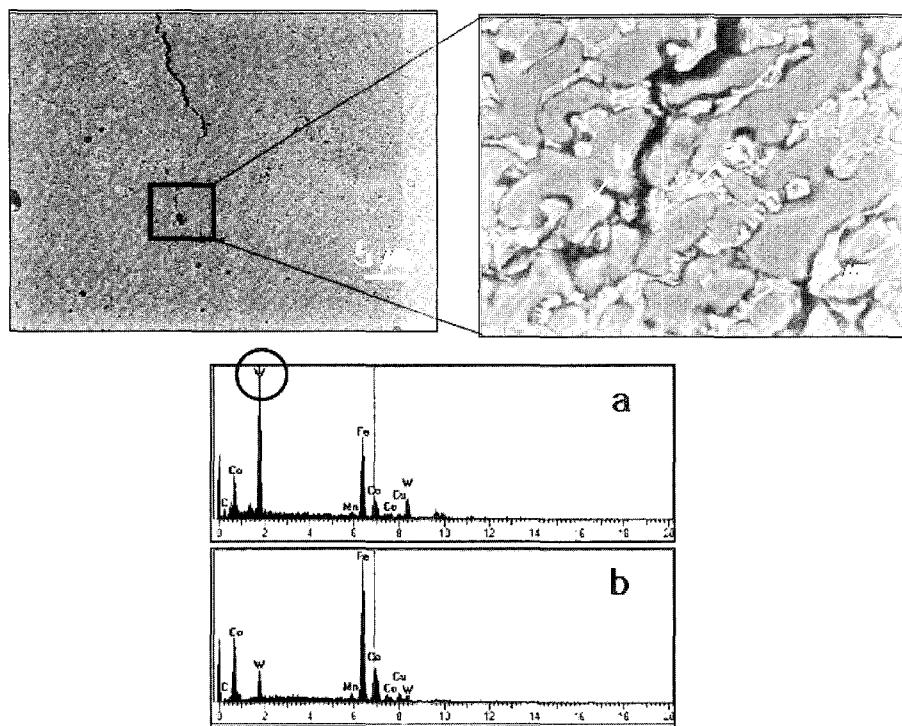


Fig. 11. Microstructure of crack area and result of EDS analysis.

**Table 3.** Chemical compositions of dendrite core and boundary in the fusion zone. (wt%)

	Fe	Co	W
dendrite core	66	19	15
dendrite boundary	38	10	52

다. Fig. 11은 균열주위의 수지상 미세조직을 EDS 분석한 결과를 나타낸다. 그림에서 a의 수지상 코어와 b의 수지상 경계에 대한 EDS 분석결과를 Table 3에 나타낸다. 표에서 수지상 경계에서 W 성분이 훨씬 높은 것을 알 수 있다. 앞서 경도 측정결과에서도 나타난 바와 같이 W 성분이 많은 조직은 경도가 더 크기 때문에 변형능이 부족하여 균열이 이러한 수지상 경계를 따라 전파하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

다이아몬드 쏘 블레이드 제조시 Fe-Co-W을 주성분으로 하는 소결체와 저탄소강 상크의 레이저 용접에서의 입열량과 용접빔위치의 변화가 용접특성에 미치는 영향에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 입열량이 감소함에 따라 용접부의 수지상 간격이 감소하였다.
2. 입열량이 증가함에 따라 용접부의 Co와 W 성분은 증가하고, Fe 성분은 감소하였다.
3. 빔위치를 변화시켰을 때 이동위치에 따라 그에 상응하여 용접부의 성분이 변화하였다.
4. 입열량이 증가함에 따라 용접부내의 균열 발생이 감

소하고, 균열의 길이도 감소하였다.

5. 본 용접조건에서의 균열은 수지상 경계를 따라 생성되었으며, 용융부의 응고시 구성성분의 편석에 의한 고온균열에 의해 발생된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국민대학교 교내연구비에 의해 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. V. V. Borisova, S. M. Kutev and S. F. Moryaschev, Paton Welding J., 5(1), 56 (1993).
2. W. W. Duley: CO<sub>2</sub> Lasers, Effects and Applications, p. 248, Academic Press, Inc., New York, (1976).
3. J. Norrish: Advanced Welding Processes, p. 195, Institute of Physics Publishing, Ltd, Bristol, UK. (1992).
4. R. A. Lindberg and N. R. Bratton: Welding and Other Joining Processes, p. 124, Allyn and Bacon, Inc., Boston, (1976).
5. N.-J. Cho, W.-G. Jung, S.-W. Kim, C.-H. Lee and S.-D. Kim, J. MRS-K, 14(4), 300 (2004).
6. M. C. Flemings: Solidification Processing, p. 148, McGraw-Hill Inc. New York, (1974).
7. S. Kou: Welding Metallurgy, p. 216~220, John Wiley & Sons, New York, (1987).
8. J. F. Lancaster: Metallurgy of Welding, 5th ed., p. 192, Chapman & Hall, London, UK, (1993).
9. K. Masubuchi: Analysis of Welded Structures, p. 528, Pergamon Press Ltd., London, UK, (1980).