

## 소결체와 저탄소강의 레이저용접시 생성되는 캐비티의 형성과 용접 특성에 대한 연구

조남준 · 정우광<sup>†</sup> · 김성우\* · 이창희\* · 김승대

국민대학교 공과대학 신소재공학부  
\*한양대학교 공과대학 신소재공학부

## A Study on the Formation of Cavity and Welding Property in the Laser Welding Fusion Zone between Sintered Segment and Mild Steel Shank

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

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 3월 19일 받음, 2004년 4월 19일 최종수정본 받음)

**Abstract** A laser welding has been made between sintered tip of Fe-Co-W and low carbon steel shank for the diamond saw blade. The welding characteristics and formation of defect has been investigated carefully for the weld fusion zone in different welding condition. Full penetration has been observed for the whole range of heat input investigated in the present work. Bead width and under-fill have been increased with the increase of heat input. With increasing of heat input small cavities were decreased while large cavities were increased. The ratio of total cavity area to the entire weld bead area was not changed significantly with change of heat input. Most of cavities were found near the tip, and supposed to be formed from the pore in the tip.

**Key words** diamond saw blade, laser welding, heat input, Fe-Co-W sintered tip, cavity

### 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 팀(tip)과의 결합으로 이루어진다. 이러한 다이아몬드 쏘 블레이드의 제조 방법에는 저용접 금속을 이용하여 접합하는 브레이징 방법과 모재를 직접 용접하는 레이저 용접 등이 있는데, 낮은 생산 속도와 환경적으로 부담이 큰 브레이징 보다 높은 생산성과 친환경적인 레이저 용접이 제조 방법으로서 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>2,3)</sup>

국내에서 레이저에 의한 다이아몬드 쏘 블레이드 제조 기술은 선진국 제품에 비하여 캐비티등의 결함이 다량으로 발생되고 있으며, 쏘 블레이드는 소결체와 저탄소강

의 접합이라는 특성 때문에 국내뿐 아니라 국외에서도 용접특성에 대한 연구가 많이 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 Fe-Co-W 성분의 소결체 tip과 저탄소강 shank 사이의 레이저 용접시 용접부에 생성되는 캐비티와 용접 특성에 대하여 정량적으로 조사하였다.

### 2. 실험 방법

실험은 2단계로 나누어지며, 첫 번째는 팀과 샹크의 레이저 용접, 두 번째는 용접부의 특성 분석으로 구성된다. 팀과 샹크를 최대 출력 3 kW의 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 용접을 수행하였다. 용접방법으로는 먼저 저입열의 레이저 빔을 이용하여 빔파워 (beam power) 750 W, 빔이 송속도(travel speed) 3.5 m/min의 조건으로 고정하여 Fig. 1에서와 같이 한쪽 면을 가접(tack welding)한 후 반대면을 고입열의 레이저 빔을 이용하여 공정 조건에 따라 본 용접(main welding)을 수행하였다. Table 1은 본 연구에서 이용한 소결체 팀의 본드(bond)부와 블랭크(blank)부 및 샹크의 화학성분을 나타낸다. 레이저 용접은 블랭크와 샹크 사이에서 이루어지며, 본 용접의 수행 조건은 크게 응고속도에 따른 조건과 성분 변화에 따른

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

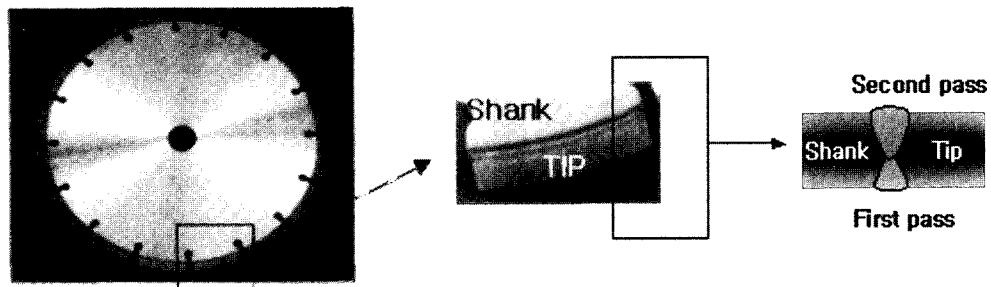


Fig. 1. Components of a diamond saw blade.

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

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co	Cu	Nb	Ti	W	Sn	N	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.

용접 조건으로 분리하였다. 응고 속도에 따른 용접 조건은 입열량을 변화시켰으며, 성분 변화에 따른 용접 조건은 같은 입열량에서 빔 위치를 변화시켰다.

용접에 따른 입열량은 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

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

여기서  $Q$ 는 입열양을 나타내며,  $\eta$ 는 재료의 흡수계수,  $P$ 는 빔파워(Beam power),  $v$ 는 빔이송속도(travel speed)를 나타낸다. 위 식을 이용하여 입열양을 계산한 결과는 Table 2와 같다. ( $\eta$ 는 일반 탄소강의 흡수 계수 0.2를 적용하였음)

용접부에 대한 분석은 팀이 접합되어진 샹크의 일부분을 Fig. 2와 같이 절단하여 각각의 팀을 Fig. 3에서와 같이 윗면(upper section, main welding side)과 가로 단면(transverse cross section), 길이 단면(longitudinal section)으로 시편을 절단하여 공정조건에 따른 용입 깊이( $\alpha$ )(penetration depth), 용입비(aspect ratio), 불규칙 험프(irregular hump), 캐비티(cavity) 형성, 균열 길이 등을 조사하였다.

절단된 시편은 미세조직 관찰을 위해 연마하고

**Table 2.** Heat input calculated from welding condition.

Heat Input (kJ/m)	Travel speed (m/min)		
	1	1.3	1.7
1300	15.6	12.0	9.2
Beam Power (W)	1430	17.2	13.2
1560	18.7	14.4	11.0
1700	20.4	15.6	12.0

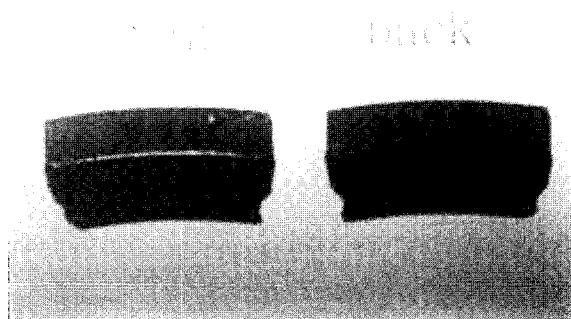


Fig. 2. Departed specimen from shank body.

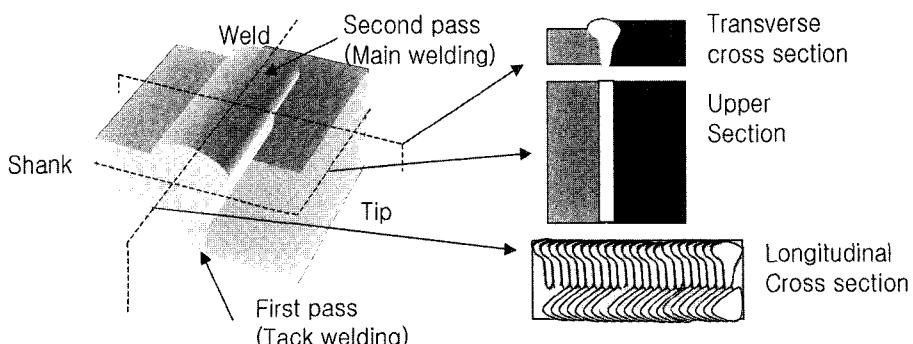


Fig. 3. Schematic diagram of cutting direction of the specimen for analysis.

후 다시  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.3  $\mu\text{m}$  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.

용입깊이는 스케일 바(scale bar)가 있는 광학현미경을 이용하여 본 용접(main welding)을 기준으로 비드(bead)로부터 용입된 깊이를 5회 측정해 평균값을 취하였고, 용입폭(penetration width)도 각각 5회씩 측정하여 평균한 뒤 그 비를 계산하여 용입비를 결정하였다.

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 입열양과 빔위치별로 구분하여 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 용접 특성

시료를 전술한 방법에 의하여 절단면을 관찰하여 용접 특성을 조사하였다. 시료의 윗면 및 단면을 연마하여 관찰하면 용접부위에 ripple line이 형성되어 있는 것을 볼 수 있었다. 이는 용접 비드내에서 텁과 샹크 성분의 불완전한 혼합에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 4는 입열량에 따라 용접한 여러 시편 중에서 입열량이 상, 중, 하인 시편들을 하나씩 선정하여 절단한 용접부 단면을 나타낸다. 본 실험에서는 모든 공정조건의 입열량에서 용접부가 완전용입(full penetration)된 것을 알 수 있다. 모든 용접조건에서 완전용입이 되었으므로 캐비티의 생성원인 중 금속의 증기에 의한 요인은 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 왜냐하면 용접부 내에서 형성된 금속 증기는 완전용입시 가용접 부분으로 빠져나가기 때문이다.

Fig. 5는 용입폭의 측정을 나타낸다. 용입폭은 입열량에 따라 약간씩 차이가 있었으며, 대체로 입열량이 증가

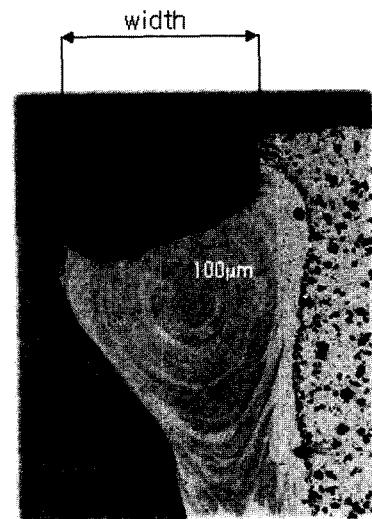


Fig. 5. Formation of penetration width.

함에 따라 용입폭 또한 증가하였다. 언더필(under-fil)은 대부분의 비드형태가 볼록 형태인 것에 반하여 오목하게 형성됨으로써 비드가 노치(notch) 역할을 하여 기계적 특성을 떨어뜨리는 일종의 용접결함으로 생각할 수 있다. 특히 본 연구에서와 같이 블랭크와 텁의 두께가 상이한 경우 단차가 형성되므로 이러한 언더필의 형성경향은 더욱 크다고 할 것이다. 언더필의 깊이는 앞서 용입깊이의 측정과 같은 방식으로 측정하였으며, Fig. 6에 언더필을 측정하는 방법과 입열량에 따른 변화를 나타내었다. 여기서 입열량의 증가에 따라 언더필 형성은 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서, 용접 수행시 입열량이 증가하게 되면 언더필 형성 경향도 증가하므로 용접성이 저하될 수 있다는 것을 고려하여야 할 것이다.

Fig. 7은 용입 깊이와 폭 및 용입비를 입열양별로 정리한 것이다. Fig. 7에서 보듯이 용입폭은 대체적으로 입열량이 증가함에 따라 증가하였으며, 그와 반대로 용입비는 감소하였다.

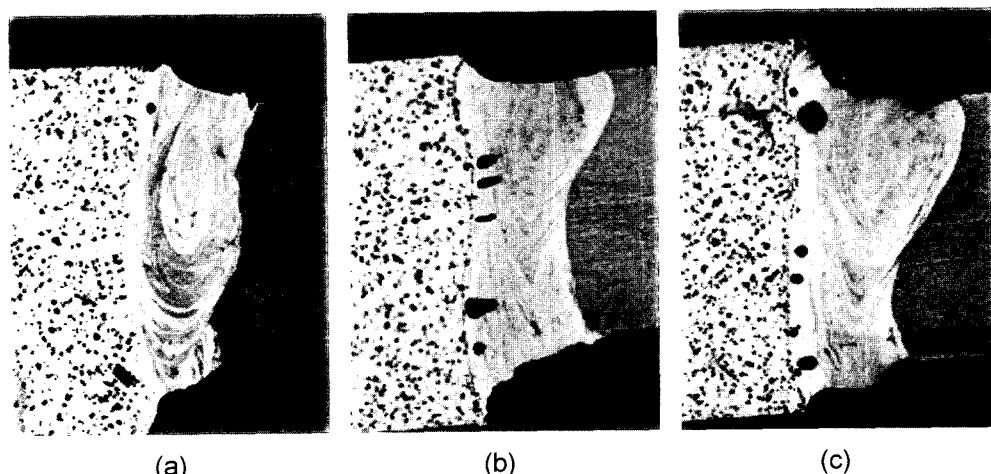


Fig. 4. Microstructures of weld zone with heat input. (a) Low heat input (9.2 kJ/m) (b) medium heat input (14.4 kJ/m) (c) High heat input (20.4 kJ/m)

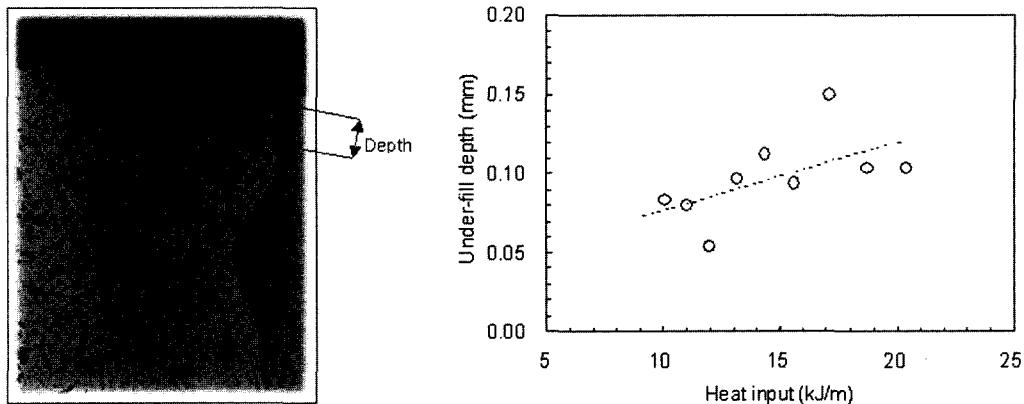


Fig. 6. Depth of under-fill.

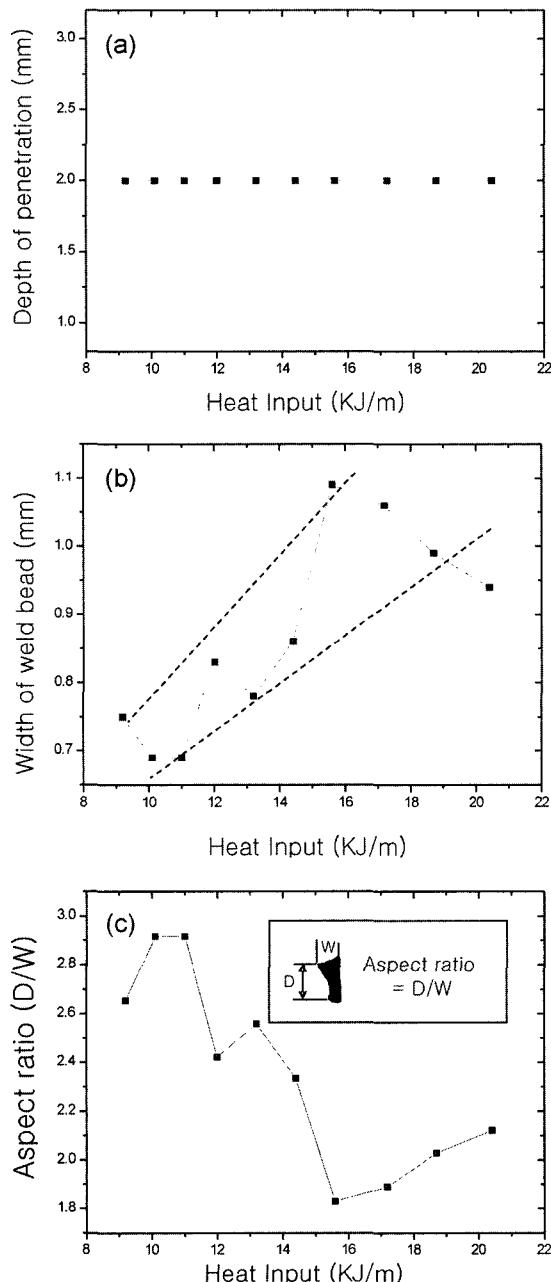


Fig. 7. Change of penetration depth(a), width(b) and aspect ratio(c) with heat input.

### 3.2. 용접부 외부 결함

용접비드에서는 스파터를 비롯하여 다양한 형태의 용접결함이 관찰되었는데 대표적인 것은 Fig. 8에 나타낸 바와 같다. Fig. 8(a)는 스파터이고, (b)와 (d)는 불연속적인 비드, (c)는 용입불량, (e)는 외부 캐비티 (f)는 균열을 나타낸다. 이러한 비드 외부에서 관찰되는 결함들은 일정한 패턴을 가지고 반복해서 나타나는 것이 아니므로 정량화하기는 곤란한 것으로 파악되었고, 내부에서 관찰되는 캐비티 및 균열을 기준으로 공정 변수에 따른 용접부의 특징을 파악하고자 하였다.

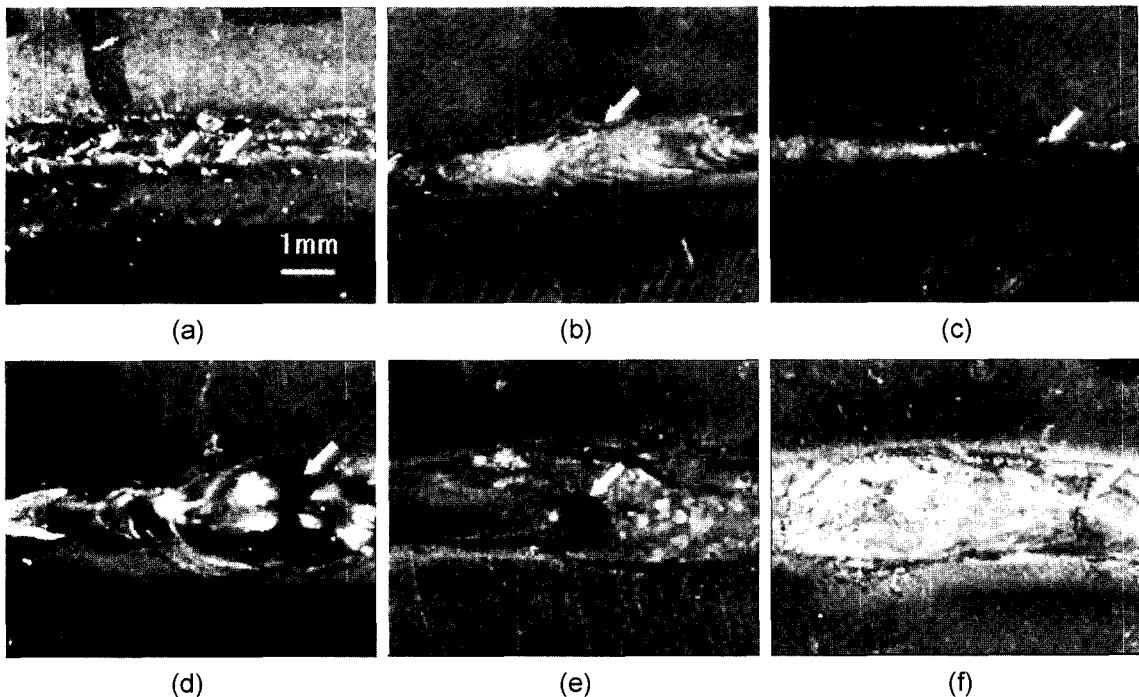
### 3.3. 캐비티의 분포

Fig. 9는 입열량에 대한 크기별로 분류한 캐비티의 변화를 나타낸다. 실험 방법에서 설명한 바와 같이 캐비티의 최대 직경을 기준으로 크기를 분류하였다. Fig. 9에서 size A는 0~0.1 mm 크기의 캐비티이며, size B는 0.1 mm 이상의 캐비티를 나타낸다. 작은 캐비티의 개수는 입열량 증가에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보이지만 입열량의 증가에 따라 대형의 캐비티 개수는 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 입열량이 클수록 용융부의 냉각속도가 감소하여 용융부 내부에서 작은 크기의 캐비티가 서로 합쳐져 소멸하면서 성장할 시간이 충분하기 때문인 것으로 사료된다.

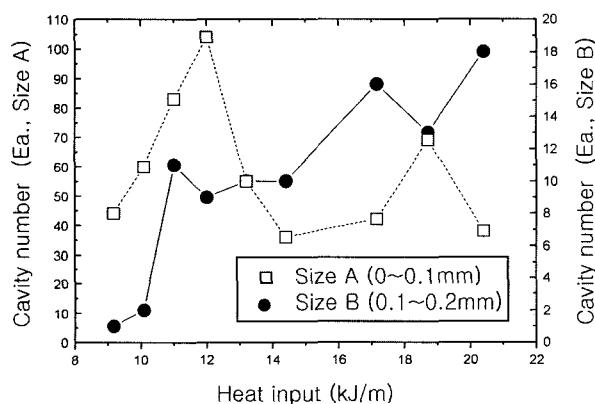
Fig. 10은 용융부의 면적에 대한 캐비티의 면적의 비율을 입열량별로 정리한 그래프이다. 입열량에 따른 면적비를 보면 약간 증가하는 경향이 있는 것 같기도 하나 거의 일정한 비율로 존재한다고 볼 수 있다. 따라서, 앞서 캐비티 개수와 면적비를 고려할 때 입열량에 따라 캐비티는 용융부에 그대로 남아 있으면서 작은 캐비티가 소멸하면서 큰 캐비티로 성장한 것으로 판단된다.

### 3.4. 캐비티의 형성

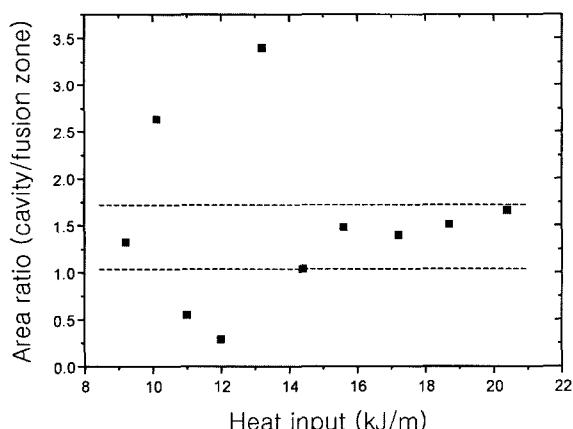
캐비티의 생성원인에 대하여 Katayama와 Matsunawa 등의 연구자<sup>4-9)</sup>들에 따르면, 금속 기체의 증발과 보호가스의 영향 등의 외적인 요인과 모재로부터의 유입 특히 재료의 특성, 즉 소결체의 기공에 의한 생성 등으로 설명



**Fig. 8.** Discontinuities of weld bead. (a) spatter (b) discontinuous bead (c) lack of fusion (d) discontinuous bead (e) outer cavity (f) crack



**Fig. 9.** Relationship between cavity number and heat input.



**Fig. 10.** Relationship between area ratio(cavity/ fusion zone) and heat input.

할 수 있다. 그러나 본 실험에서는 용접시 용접부의 완전 용입이 된 것으로 확인되었기 때문에 외부적인 요인보다는 내부적인 요인이 크게 작용하였음을 추정할 수 있다.

Fig. 11은 용접부에 형성된 캐비티를 보여주는 사진들이다. 사진 (a)은 용접부의 윗면을 나타내며 (b)는 용접부의 단면을 나타낸다. 윗면과 단면에서 모두 캐비티의 형성은 용융부 내에서 텁족으로 몰려 있으며, 이와 같은 형태는 모든 공정 조건에서 동일하였다. 이와 같이 캐비티의 생성에 직접 영향을 미치는 것이 샹크와 직접 용융되는 텁 즉, 블랭크라고 추정하고 블랭크에 대한 분석을 실시하였다. Fig. 12는 블랭크의 SEM 관찰사진 및 EDS 이미지 매핑(image mapping) 결과와 기공의 이미지 분석결과를 나타낸다. 이미지 매핑 결과를 보면 블랭크는 Fe, Co, W의 분말로 구성된 소결체이며, 각각의 분말이 따로 혼합되어 있다. Co, W 분말은 미세하며 고르게 분포하고 있으나 Fe 분말은 비교적 조대하여 일정 면적을 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 한편 소결체 내부는 Fig. 12(c)에서 알 수 있듯이 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 실시한다 하더라도 일부 기공이 남을 수 있으며,<sup>10)</sup> 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 수 있다.<sup>11)</sup> 따라서, 본 연구에서 캐

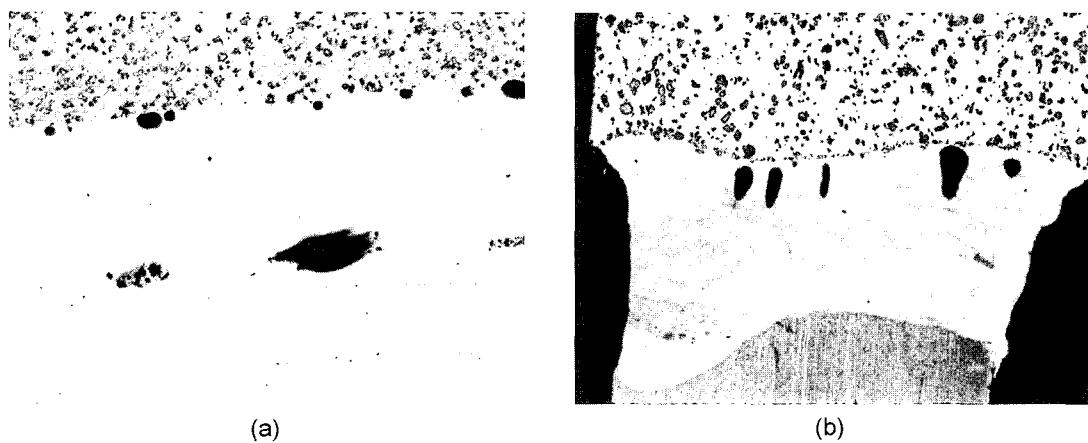


Fig. 11. Location of cavity in the weld bead; (a) upper section (b) cross section.

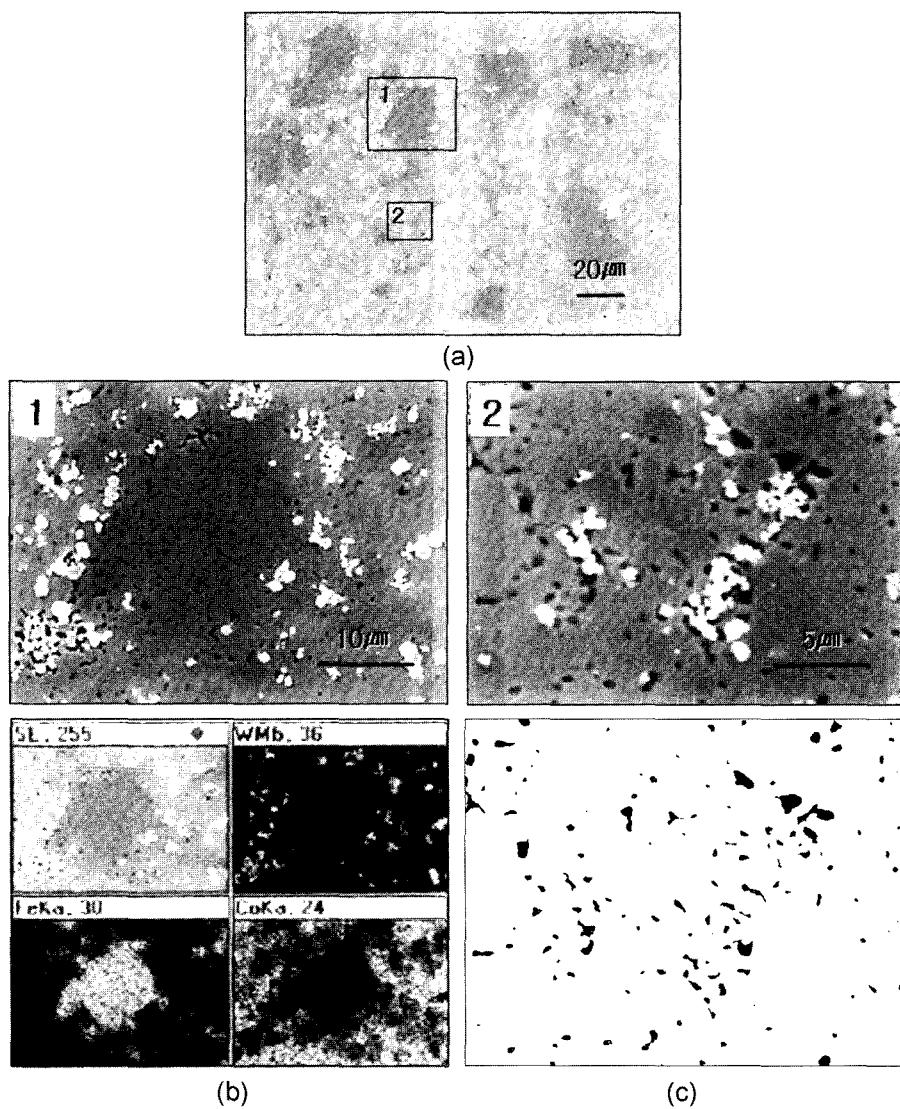


Fig. 12. Microstructure of sintered blank and EDS mapping.

비티의 원인은 캐비티의 형성위치, 성장방향 등으로부터  
블랭크 내부에 잔존하고 있는 기공에서부터 비롯된 것으로  
사료되며, 용접시 블랭크와 샹크가 고온의 레이저 빔

으로 인해 용해되는 과정에서 블랭크 내부의 기공이 서  
로 합쳐지고 성장하게 되어, 용고시 용접부 내부에 잔존  
하여 캐비티를 형성하는 것으로 추정된다.

#### 4. 결 론

다이아몬드 쇼 블레이드 제조시 Fe-Co-W을 주성분으로 하는 소결체와 저탄소강 샹크의 레이저 용접에서의 용접 특성과 결합형성에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 입열량 9.2~20.4 kJ/m의 모든 범위 내에서 완전용입이 관찰되었다
2. 입열량이 증가함에 따라 비드 폭이 증가하였고, 언더필이 증가하였다.
3. 입열량 증가에 따라 작은 크기의 캐비티는 감소하고, 큰 크기의 캐비티는 증가하는 경향을 나타내었으며, 용융부에서 캐비티의 면적율은 큰 변화가 없었다.
4. 캐비티의 대부분은 텁 주위에서 관찰되었고, 용융부 내 기공은 소결텅 내부에 존재하던 기공이 성장하여 형성된 것으로 판단된다.

#### 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, Laser Welding, John Wiley & Sons Inc., New York, (1999).
3. J. F. Lancaster: Metallurgy of Welding, 5th ed., Chapman & Hall, London, (1993).
4. S. Katayama, N. Seto, M. Mizutani and A. Matsunawa, Proc. Int. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Dearborn Michigan, p.C16 (2000).
5. A. Matsunawa, J.-D. Kim and S. Katayama, Proc. Int. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, San Diego California, **83**, G73 (1997).
6. K. Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, 2nd ed., Butterworths & Co Ltd., London, (1992).
7. M. Pastor, H. Zhao, R. P. Martukanitz and T. Debroy, Welding Journal, June, p.207 (1999).
8. J. Xie, Proc. Int. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, San Diego California, **87**, D11 (1999).
9. A. Matsunawa, N. Seto, M. Mizutani and S. Katayama, Proc. Int. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Orlando Florida, **85**, G151 (1998).
10. J. N. Lee and M. H. Moon, Powder Metallurgy, Kwanglim, Seoul, p.101 (1981).
11. R. M. German, Powder Metallurgy Science, 2nd ed., Metal Powder Industries Federation, Princeton, p.195 (1994).