

## 분말고속도공구강으로 만든 분말성형편치의 손상분석

홍성현 · 배종수 · 김용진

한국기계연구원 재료연구기술부

### Failure analysis of powder compacting punches made of powder metallurgy high speed steels

Seong-Hyeon Hong, Jong-Soo Bae, Yong-Jin Kim

Korea Institute of Machinery and Materials, 66 Sangnam-dong, Changwon,

Kyungnam 641-010, Korea

(Received February 17, 2000)

**Abstract** P/M high speed steels (1.28 % C, 4.20 % Cr, 6.40 % W, 5.00 % Mo, 3.10 % V, bal. Fe) from two different vendors were applied to powder compacting punch. The test results show that failure lives were very different between two punches. There were no difference in volume fraction and mean size of carbides (MC or  $M_6C$ ) but non-metallic inclusions in two punches. Small amount of non-metallic inclusion in the punch did not greatly affect impact energy and transverse rupture strength (TRS). But, fatigue life was drastically decreased by non-metallic inclusions. These results show that fatigue failure was initiated around non-metallic inclusions by cyclic load and the fatigue life was greatly affected by the presence of non-metallic inclusions in the punch.

#### 1. 서 론

분말야금법에 의해 제조되는 고속도공구강은 기존의 용해 후 주조, 열간단조, 압연 등의 일련공정에 의해 제조되고 있는 고속도공구강이 가진 문제점을 개선하기 위하여 개발되고 있는 소재이다. 분말고속도공구강은 기존의 고속도공구강과는 달리 편석이 없고 균일 미세한 조직을 얻을 수 있으며 각종 탄화물 형성과 합금원소의 과포화 고용에 의하여 내마모성이 향상되며 열처리의 안정성 등으로 인하여 특성이 우수하여 금형, 엔드밀, 성형편치 등에 사용되고 있다.<sup>1,4)</sup>

현재 각종 냉간 성형편치 등에 광범위하게 사용하고 있는 분말고속도공구강은 1.28 % C, 4.20 % Cr, 6.40 % W, 5.00 % Mo, 3.10 % V, bal. Fe (중량 %)의 조성을 가진 합금이며, 상기 조성에 Co를 8.5~11 %범위로 첨가한 합금이 엔드밀 등 각종 절삭공구용 소재로 많이 사용되고 있다.<sup>4,5)</sup>

그 중 Co를 함유하지 않는 분말고속도공구강은 적

절한 인성과 내마모성을 가지고 있으므로 분말성형편치에 많이 사용되고 있다. 특히, 철계, 스테인레스계 및 동계의 소결 기계부품을 제조하기 위하여 각종 금속 분말을 고압으로 성형시 기계부품의 형상이 복잡하기 때문에 편치 자체가 예리한 모서리를 가지지 않으면 안되는 경우가 많다. 이러한 경우에 사용 중에 예리한 부위에서 치핑형 파손이 발생하기 쉽다. 분말성형용 편치의 재질로 주조재인 SKD11, SKD61 종이 많이 사용되어 왔으나 최근 편치의 수명향상을 위하여 분말성형을 하는 분말야금회사들에서는 다양한 재질 및 제조회사별로 성형편치의 수명을 비교하여 가장 경제성이 있는 편치의 제작에 많은 노력이 이루어지고 있다.<sup>5)</sup>

주조후 단조압연으로 만든 공구강을 분말 성형편치로 사용한 경우에는 국부적으로 탄화물의 편석으로 인한 밴드구조, 조대한 결정립이 잔존하여 분말 성형시 편치가 마모되어 수명이 다하기보다는 사용 중 예리한 모서리에서 치핑형 파손이 생긴다. 이러한 해결책으로 탄화물의 편석이 없고 결정립도 미세한

분말고속도공구강을 성형편치에 적용함으로써 주조법으로 만든 성형편치에 비하여 수명이 대폭 증가하여 생산성 향상에 크게 기여하였다.

그러나, 같은 조성의 분말고속도강을 가스분사후 캔닝/열간등압성형/단조/압연을 거쳐서 제조된 분말고속도강이라 하더라도 분말성형 편치의 적용시 제조회사별로 수명의 큰 차이가 발생할 수가 있다. 본 연구는 두 다른 제조회사에서 나온 조성이 같은 소재를 분말성형 편치로 가공하여 같은 열처리후 구형 무급유 베어링용 Cu계 분말성형시 편치수명을 조사하였고, 수명에 큰 차이가 발생하였던 바, 그 수명차이의 근본적인 원인을 체계적으로 규명하는 데 있다. 이러한 연구결과를 바탕으로 분말야금 공장에서 편치의 재질 선정 및 재질 검수 등에 중요한 사항을 이해하고 분말고속도강 제조회사에서는 재료의 제조시 주의해야할 점을 제공하는 데 있다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 재료는 분말성형편치에 많이 사용되고 있는 분말고속도공구강이며 표 1에 조성을 제시하였으며 가스분사된 분말을 캔닝/열간등압성형 후 단조 등의 열간 가공 및 소둔에 의하여 제작된 소재이다. 두 회사에서 구입한 소재를 그림 1의 (a)와 같은 무급유 베어링 성형용 편치로 제작하였으며 열처리는 질소분위기에서 1190°C에서 40 분간 유지한 후 담금질하였고 이어서 530°C에서 3 시간씩 3회 템퍼링 열처리를 하였다. A사 및 B사의 분말고속도공구강의 열처리후 경도는 각각 Rockwell C scale (HRC)로 65.2, 65.5 이었다.

상편치와 하편치를 장착후 무급유 베어링용 Cu계 분말을 몰드에 장입하고 3 톤/cm<sup>2</sup>의 압력으로 그림 1의 (b)와 같은 Cu계 무급유 베어링 (내경 8 mm, 외경 12 mm, 높이 6.5 mm)을 성형하였다. 사용중 편치의 외관을 관찰하면서 편치의 끝 부위에 발생하는 치핑으로 인하여 성형체의 외관이 문제가 생길 때까지

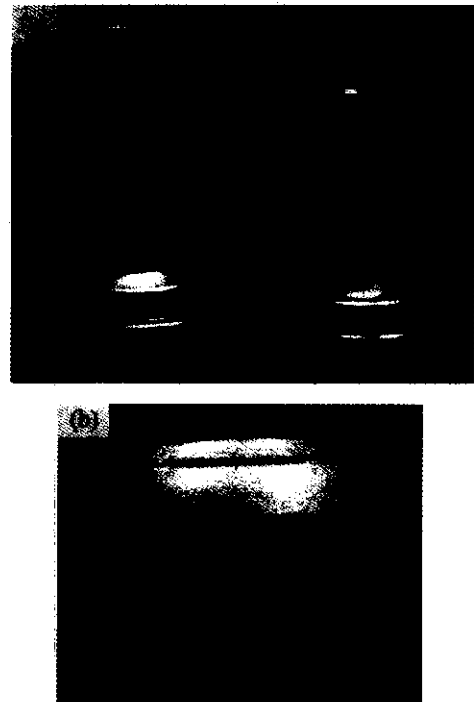


Fig. 1. (a) Punches for compacting Cu based powders into oilless bearing shape. (left side: upper punch, right side: lower punch) (b) Compacted body for sintering.

지 작업이 가능한 성형횟수를 편치의 수명으로 측정하였다.

수명차이의 원인을 조사하기 위하여 기계적 특성과 미세조직을 조사하였다. 사용한 편치의 치핑 파손이 발생한 파면을 주사전자현미경(SEM)으로 조사하였고 편치의 길이 방향으로 충격시험편(폭 3 × 두께 3 × 길이 43 mm<sup>3</sup>), 3중점 굽힘강도 시험편(폭 3 × 두께 3 × 길이 43 mm<sup>3</sup>), 3중점 굽힘형 피로 시험편(폭 2.44 × 두께 2.44 × 길이 24 mm<sup>3</sup>), 경도 시험 및 미세조직 조사용 시편을 절단가공후 연삭하여 제작하였다.

Rockwell 경도기(C-scale, 하중 150 kgf)에서 경도를 측정하였고 샤르피 충격시험기를 사용하여 충격치를 구하였고 이때 시편의 지지점간의 거리는 40 mm으로 하였다. 만능 시험기(Instron Model 4206)에서 0.5 mm/분의 속도로 3점 굽힘시험을 실시하였다. 이때 연삭된 3점 굽힘형 피로시험편(폭 2.44 × 두께 2.44 × 길이 24 mm<sup>3</sup>)은 SiC 연마지(#1200)를 사용하여 길이 방향으로 연마하여 시편의 지지점

Table 1. Chemical composition of P/M high speed steels supplied by two vendors

vender	wt. %						
	C	W	Mo	Cr	V	Fe	
A	1.28	6.40	5.0	4.2	3.1	bal.	
B	1.29	6.42	4.76	4.35	2.86	bal.	

간 간격이 10 mm인 3중점 굽힘형 피로 시험용 지그 위에 장착하여 초당 1회씩 압축하중을 가하였다. 인장응력을 받는 시편의 하부가 굽힘강도의 50%, 60%, 70%에 상당하는 응력을 받도록 반복적인 압축하중을 가하였다. 이때 굽힘강도(TRS)와 하중과의 관계식은 3중점 굽힘시험시 일반적인 식 (1)을 사용하였고<sup>6)</sup> 반복적 하중을 가하여 시편이 파괴될 때까지의 사이클 수를 측정하였다.

$$TRS(kg/mm^2) = 3PL/(2T^2W) \quad (1)$$

(P: 하중, T와 W는 각각 시편의 두께 및 폭, L은 지지점간의 거리)

미세조직 분석을 위해서 연마된 시편을 2% Nital로 부식시킨 후 주사전자현미경으로 사진을 촬영하였고 EDS로 확인한 후 탄화물의 색상이 흰색 타입과 회색 타입으로 구분, 각각 V 함량이 많은 MC형 탄화물과 Fe, W 및 Mo 함량이 많은 M<sub>6</sub>C형 탄화물로 구분하였으며 탄화물의 체적분율 및 평균크기를 상분석기를 이용하여 구하였다.<sup>6,7)</sup>

### 3. 실험 결과

#### 3.1 분말성형편치에 적용 시험

B사 분말고속도공구강으로 만든 편치(이하 B로 명명)를 사용할 때 120 만개까지 성형한 후 편치에서 균열이 관찰되었다. 반면, A사 분말고속도공구강으로 만든 편치(이하 A로 명명)를 사용하면 40 만개를 성형한 후 그림 2에 제시된 것과 같이 편치의 예리한



Fig. 2. Punch A (a) and punch B (b) after compacting 40,000 and 1,200,000 cycles, respectively.

끝부위에서 치핑(이빨 빠짐)이 일어나 국부적으로 깨져서 사용이 불가능하였다. 즉, 편치의 수명은 사용 중 마모에 의한 것보다 편치 끝부위의 국부적 파손에 의하여 좌우되었다.

#### 3.2 미세조직 분석

수명차이가 발생한 원인을 규명하기 위하여 미세조직을 조사하였다. 그림 3은 성형편치에서 채취된 시편을 연삭후 2% Nital용액으로 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 1190°C에서 담금질후 530°C에

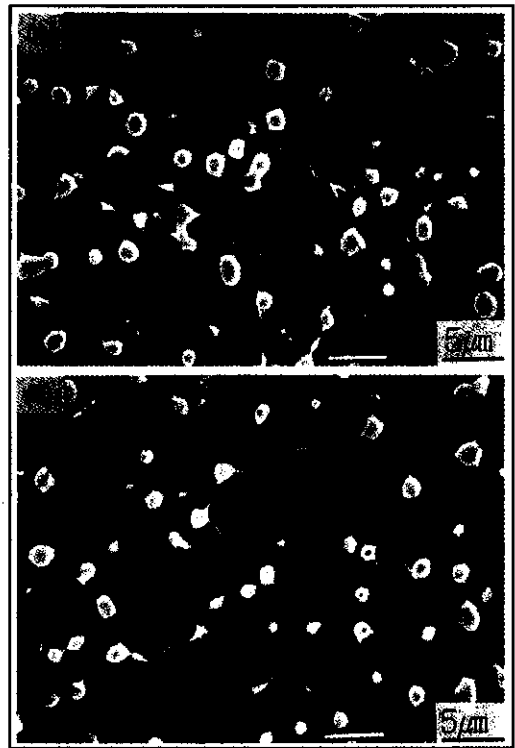


Fig. 3. Microstructures of punches made of P/M high speed steels. (a) Punch A and (b) Punch B (Nital etched)

Table 2. EDS analyses of substitutional elements in carbides

element(wt.%)	carbide type	
	MC(gray)	M <sub>6</sub> C(white)
V	32.88	2.78
Fe	27.03	31.76
W	22.49	40.13
Mo	12.72	22.16
Cr	4.88	3.17

Table 3. Volume fraction and mean size of carbides in specimens A and B

vol. % and mean size of carbide	specimen	
	A	B
MC carbide, vol. %	5.61	5.76
M <sub>6</sub> C carbide, vol. %	6.82	6.51
total carbide, vol. %	12.43	12.27
MC carbide, mean size(μm)	0.79	0.73
M <sub>6</sub> C carbide, mean size(μm)	1.05	1.11

서 3 시간씩 3 회 템퍼링된 조직이다. 표 2는 EDS 분석으로 색깔이 다른 탄화물의 성분 분석결과이다. 회색부위의 탄화물은 V 함량이 많은 MC계 탄화물이고 흰색의 탄화물은 Fe, W 및 Mo 함량이 많은 M<sub>6</sub>C계 탄화물이며 템퍼링된 마르텐사이트기지에 탄화물이 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다.<sup>6)</sup> A와 B 소재에서 탄화물의 체적분율 및 평균 크기는 표 3에 제시된 것과 같이 거의 같음을 알 수 있다. 이는 같은 조성의 합금을 같은 조건으로 열처리를 하였기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 성형편치의 수명에 미치는 영향이 탄화물의 체적분율, 크기 등과 같은 조직상의 차이에 의한 것이 아님을 의미한다.

그림 4의 (a), (b)는 각각 성형편치 A 및 B에서 채취된 시편을 연삭후 예칭없이 500배의 배율로 관찰한 SEM 사진이다. 검게 보이는 아주 작은 비금속 개재물들이 고르게 분포되어 있음을 알 수 있다. 시편 A에서는 약 4 μm, 2.2 μm, 1.1 μm, 0.4 μm 크기의 개재물들이 다수 관찰되었고 비금속 개재물들의 EDS 분석결과는 그림 5의 (a-1), (a-2)과 같다.

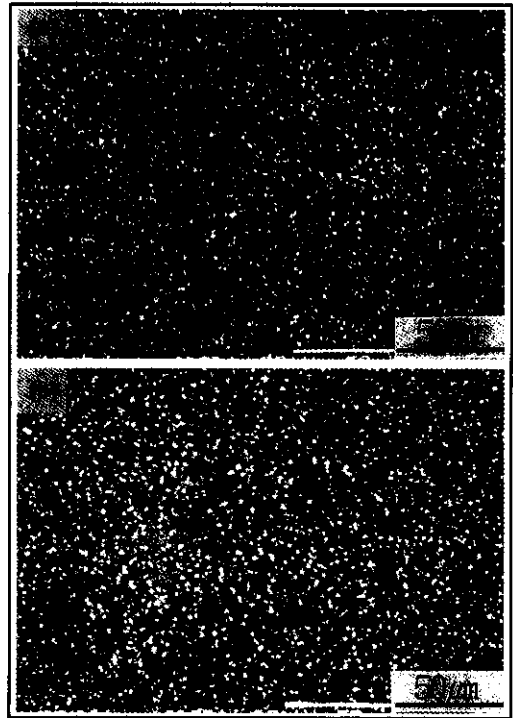


Fig. 4. Microstructures of punches made of P/M high speed steels. (a) Punch A and (b) Punch B (As polished)

즉, SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계열, MnS계열 등으로 다양한 개재물이 존재하였다. 시편 B에서는 0.4~1.1 μm 범위의 크기를 갖는 SiO<sub>2</sub> - CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계열의 아주 작은 개재물이 일부 존재하였다(그림 5의 (b)). 그림 6에 나타난 바와 같이 시편 A에서 더 큰 크기의 비금속 개재물이 많이 관찰됨을 알 수 있다.

상분석기를 이용하여 A 시편과 B 시편의 비금속

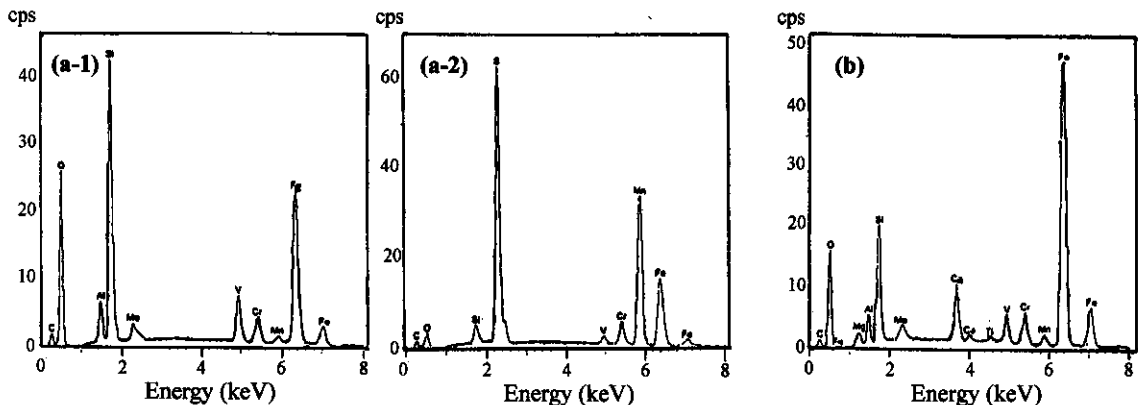


Fig. 5. EDS analyses of non-metallic inclusions in A (a-1, a-2) and B specimens(b).

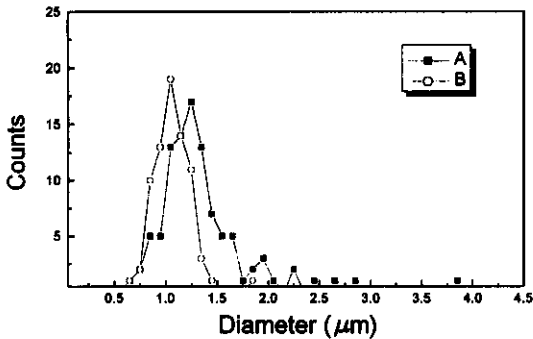


Fig. 6. Size distributions of non-metallic inclusions in polished A and B specimens.

개재물 체적분율은 각각 0.40%, 0.17% 이였고 평균 크기는 각각 1.4, 1.0 μm 이였다. B 시편에서보다 A 시편에서 측정된 비금속개재물의 체적분율과 개재물의 크기가 약간 큼을 알 수 있다. 이러한 비금속개재물의 작은 차이가 편치의 성능에 큰 영향을 줄 수 있다.

3.3 기계적 성질의 분석 및 결과 비교

두 편치에서 채취된 시편으로 다양한 기계적 성질을 측정하여 두 편치간의 수명 차이가 어떤 기계적 성질과 밀접한 관련이 있는지를 조사하였다. 경질합금에서 일반적인 특성평가 항목인 충격치와 굽힘강도를 측정하여 표 4에 제시하였다. B 시편의 충격치와 굽힘강도가 A 시편보다 약간 높았으나 차이는 크지 않았다. 본 연구에서 시험된 편치의 수명차이 원인은 인성인 충격치의 차이라고 일반적인 인식으로 생각되기 쉬우나 본 실험결과, 두 시편간의 충격치에서 큰 차이는 발생하지 않았다. 충격시험편의 파면을 그림 7에 제시하였으며 A 시편의 충격 파면에서는

Table 4. Mechanical properties of specimens A and B

Property Specimen	Impact energy (J/cm <sup>2</sup> )	Transverse rupture strength (kN/mm <sup>2</sup> )
A	17.4 ± 3.6	4.27 ± 0.06
B	19.9 ± 6.5	4.46 ± 0.05

Table 5. Number of cycles to failure in three point bend type specimens subjected by cyclic compressive load

Load(stress) Specimen	127.5 Kg (334.4 Kg/mm <sup>2</sup> )	104.1 Kg (273.4 Kg/mm <sup>2</sup> )	86.8 Kg (226.9 Kg/mm <sup>2</sup> )
A	434 cycle	818 cycle	1,962 cycle
B	351 cycle	2,331 cycle	4,695 cycle

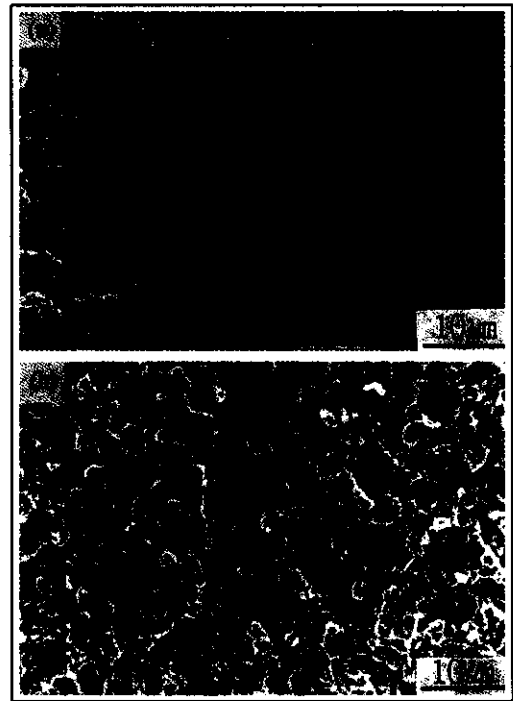


Fig. 7. Fracture surfaces of impact tested specimens of P/M high speed steels taken in (a) punch A and (b) punch B.

비금속 개재물이 관찰이 용이하였다. 이런 비금속 개재물이 소량이 있는 경우에 충격치에 큰 영향을 주지 않았다.

그러면, 어떤 기계적 성질이 분말성형편치의 사용 중 예리한 모서리에서 치핑형 파손에 영향을 주는지를 검토하였다. 분말성형용 편치는 반복적인 사용 중에는 굽힘 강도이하의 응력이 계속적으로 편치의 예리한 모서리 부위에 가하여지는 점을 고려하여 피로 특성의 차이를 조사하였다.<sup>5)</sup> 분말성형 편치의 크기가 작으므로 시편을 채취하여 일반적인 피로시험을 하는 것은 매우 어려운 작업이므로 소형시편으로도 측정이 가능한 3 중점 굽힘 피로시험을 실시하였다. 표 5에 그 결과를 제시한 바와 같이 굽힘강도의 70% 이상에 상응하는 높은 하중인 127.5 kg이 걸릴 때는 두 시편간의 수명차이가 유사하였으나, 굽힘강도의

60% 이하에 상응하는 작은 하중들이 적용될 때 B 시편이 반복적인 하중하에 파괴까지의 사이클수가 클 수 있다. 반복적으로 가하여지는 하중이 클 때는 큰 인장응력을 받는 3중점 굽힘시편의 표면에서 쉽게 피로균열이 생성되어 전파하므로 개재물 양의 작은 차이가 피로수명에 큰 영향을 주지 않은 것으로 사료된다. 하중이 큰 극단적인 경우가 굽힘강도에 상응하는 하중이 가하여지는 경우이다. 비금속개재물의 작은 차이를 보인 A와 B 소재에서 굽힘강도의 차이가 크지 않는 것은 큰 하중하에서 시험은 비금속개재물의 영향을 정확히 규명하기 어려움이 있음을 시사한다. 본 실험결과, 하중이 클 때는 작은 비금속개재물이 재료의 파단에 큰 영향을 주지 않았지만 적용하중이 감소하면 반복적인 하중하에서 피로균열이 개재물 주위에서 발생하여 피로파괴가 용이하게 발생하므로 개재물이 피로수명에 큰 영향을 주

었다.

본 실험에서 두 시편(A, B)의 충격치 차이는 크지 않았으나 피로수명은 적용된 하중에 따라서 큰 차이를 보여줌을 알 수 있었다. A 시편의 피로 파면을 그림 8에 제시하였으며 인장응력이 걸린 시편이 표면부에서 응력이 집중되어 피로 균열이 전파되었음을 알 수 있다. 그림 8의 (b)에 보이는 것처럼 피로 파괴 파면에서 비금속 개재물이 관찰되었다.

그림 9는 실제 성형편치의 치핑형 파손이 일어난 부위를 주사전자현미경으로 관찰한 결과이며 파면에 비금속 개재물이 관찰되었다. 비금속 개재물에서 균열이 발생하여 전파되어 시편의 파괴가 일어난 것으로 판단된다. 고속도 공구강과 같은 고경도 재료에서는 반복적인 하중이 가해질 때 일단 균열이 생성이 되면 균열의 전파가 용이하므로 개재물과 기지와의 계면적이 많을수록 균열이 생성되기 용이한 위치가 많아지므로 파괴가 쉽게 일어나는 것으로 판단된다.

A와 B 편치에서 조성이 동일하며 열처리도 동일한 조건에서 수행하였기 때문에 탄화물 크기 및 양의 차이가 없었고 기지상의 차이도 관찰되지 않았다. 실제 분말 성형편치에 30 kg/mm<sup>2</sup>의 성형압력이 가하여지지만 모서리부위에는 응력이 집중이 용이하여 그 이상이 응력이 반복적으로 가하여지는 것으로 사료된다. 그러나, 실제 편치 A가 40 만회 성형후 치핑형 파손이 발생하였으므로 재료의 굽힘강도보다 훨씬 낮은 응력이 편치의 모서리 부위에 적용되었을 것으로 판단된다. 따라서, 굽힘강도보다 훨씬 작은 응력이 편치에 반복적으로 가하여졌고 비금속 개재물주위에 응력이 집중되어 피로균열이 발생후 전파하여 치핑형

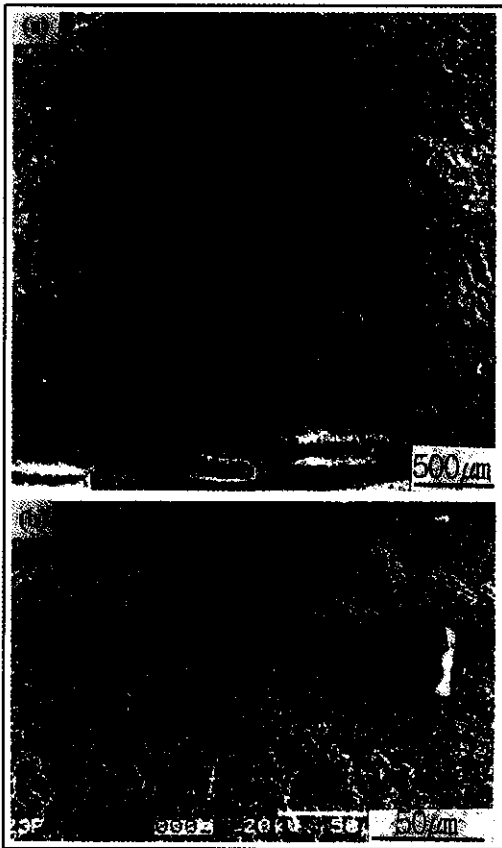


Fig. 8. Fracture surfaces of fatigue tested A specimen. (a) X 37 (b) X 500

Fig. 9. Chipping fracture surface of punch A after powder compaction testing.

파손이 일어난 것으로 판단된다. 특히, 재료내에 비금속개재물의 양이 작은 차이가 피로특성에 큰 차이를 주며 분말성형편치의 사용중 치핑형 피로파손에 큰 영향을 주었음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

서로 다른 회사에서 제조된 같은 조성의 분말고속도공구강을 같은 열처리하여 만든 분말성형편치의 현장시험에서 치핑형 파손으로 인한 수명차이가 약 3배 발생하였다. 이에 대한 원인 분석연구를 한 결과는 다음과 같다.

1. 충격성질이나 굽힘 강도에 큰 차이를 주지 않을 정도로 작은 양의 비금속 개재물이 3중점 굽힘 피로특성에 큰 영향을 주었으며 비금속 개재물 주위에서 균열이 쉽게 형성되어 피로수명을 크게 감소시켰다. 편치의 수명차이는 비금속 개재물 양의 차이에 의한 피로수명의 차이가 주된 원인이었다.

2. 분말성형편치의 재질선정 및 재질 검수 등에 비금속 개재물을 철저히 관리하여야 하며 분말고속도강 제조회사에서는 재료의 제조시 비금속 개재물의 제어가 매우 중요하다.

3. 사용중 치핑형 파손이 주로 일어나는 분말성형편치의 상대적인 수명평가에 3중점 굽힘피로시험이 간단하면서도 효과적이었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과기처의 선도기술개발사업으로 수행되었으며 연구비 지원과 삼도분말야금(주)의 협조에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. J. R. Davis: ASM Specialty Handbook, Tool Materials, ASM, Metals Park, Ohio (1995) 21.
2. E. Klar: Metals Handbook, 9th Ed., Vol 7, ASM, Metals Park, Ohio (1984) 784.
3. L. Westin and H. Wisell: Scandinavian J. of Metallurgy, 25 (1996) 41.
4. 진양공업(주) 카탈로그, JeonYang Powder Metallurgy High Speed Steel, 1999.
5. R. Andersson: Mod. Dev. in P/M, 17 (1984) 359.
6. 이상훈, 배종수, 임태수, 홍성현, 김용진, 신평우: 대한금속학회지, 37 (1999) 1475.
7. 김용진, 배종수, 홍성현, 정형식, 안재환: 대한금속학회지, 37 (1999) 1081.