

분말야금법에 의한 공구강 제조기술



배 종 수

(KIMM 재료기술연구부)

- '75 서울대학교 재료공학과(학사)
- '86 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '78 - '80 한국종합특수강(주)
- '80 - 현재 한국기계연구원 책임연구원



김 용 진

(KIMM 재료기술연구부)

- '83 경북대학교 금속공학과(학사)
- '85 경북대학교 금속공학과(석사)
- '00 한국과학기술원 재료공학과(박사)
- '87 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

공구강은 금형 및 공구를 제조하는 기초소재로서 공업적으로 매우 중요한 소재이다. 공구강의 합금설계 기본개념은 강인한 특성을 가진 마르텐사이트 기지에 매우 경한 탄화물을 석출시켜 경도, 인성, 내마모성을 향상시킨 것이다. 따라서 합금원소의 함량이 최대 35% 정도까지 함유되어 있어 전기로에서 용해된 용탕을 주조할 때 성분편석이 심하고 이로 인해 균열발생 가능성도 높다. 또한 잉곳(ingot)을 열간 소성가공하는 과정에서도 균열발생을 억제하기 위해 소성 변형량을 적게하여야 한다. 이러한 공정상 발생하는 각종 문제점의 원인은 재료물성을 위해 첨가된 많은 함량의 합금원소들이 필연적으로 유발시키는 응고시 성분편석에서 비롯된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구 중에는 ESR Process, VAR Process 등과 같은 용융야금분야의 접근과 응고되는 용탕량을 감소시켜 주조시 잉곳 내부와 표면의 응고속도 차이를 줄이면 편석의 정도를 획기적으로 줄일 수 있다는 인식하에 잉곳 크기를 계속 축소하는 방법도 채택하고 있다. 또 다른 개념의 혁신적인 공정은 분말야금법을 이용한 기술로서 전기로에서 용해한 공구강 용탕을 분무법에 의해 급속냉각시켜 공구강 분말을 제조함으로써 성분편석을 없앨 수 있다. 이렇게 편석없이 제조된 분말을 소결, HIP 등 여러 가지 공정기술을 거쳐 최종 제품이나 중간 소재를 제조할 수 있다. 그림 1은 이러한 개념이 적용된 분말야금법에 의한 공구강 제품 및 소재제조공정을 나타낸 것이다.

표 1. 제조방법별 공구강 분말 특성비교

구 분	Water Atomization	Gas Atomization
분말의 형상	불규칙형	구형
Tap Density	진밀도의 35~45%	진밀도의 65%
Hardness(Hv 0.1)	550~1100	750~1050
O ₂ content(Annealed & Reduction)	1,000~3,000ppm(max,1000ppm)	500ppm이하
Applications	Structural part Die compacting등	HIP, Extrusion등

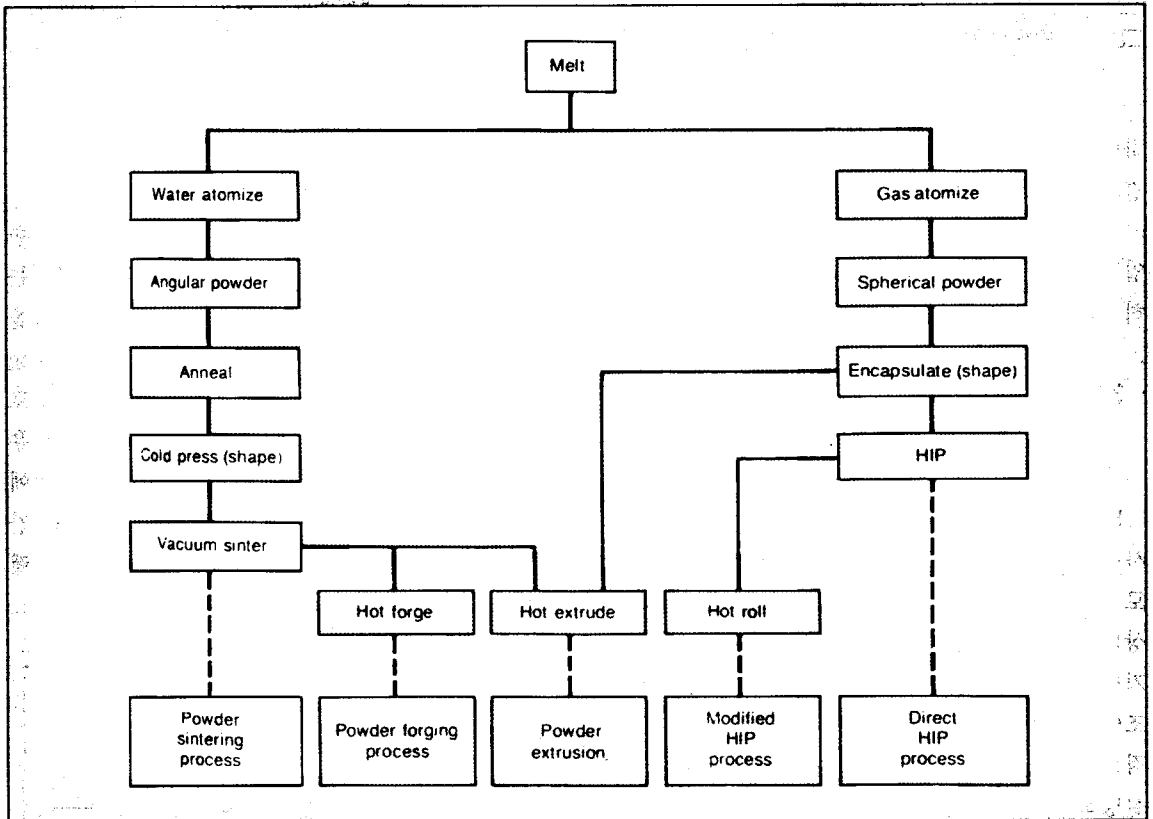


그림 1. 분말야금법에 의한 공구강 제조기술

2. 공구강분말 제조기술

공업적으로 이용되는 공구강분말은 분무법(Atomization)에 의해 제조된다. 가장 많이 사용되는 분무법은 수분사분무법(Water Atomization)과 불활성가스분무법(Inert Gas Atomization)인데 제조방법별 분말의 특성을 표 1에 정리하였고 제조장치 개략도를 그림 2에 나타냈다.

3. 공구강분말의 고밀도화기술

3.1 진공소결공정(Vacuum Sintering Process)

진공소결기술은 일반적인 분말야금기술을 적용한 것으로 그림 3과 같이 수분사로 제조된 불규칙형상의 분말을 이론밀도의 70%이상 되도록 성형한 후에 1,200~1,300℃의 온도에서 진공소결

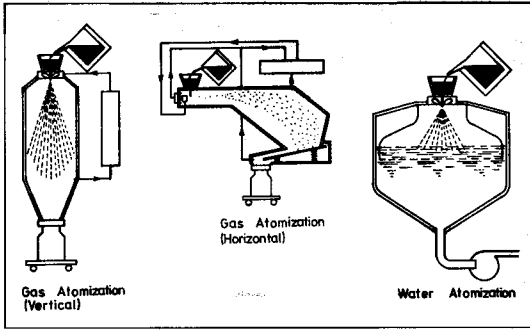


그림 2. 수분사분무장치와 가스분사분무장치의 개략도

하여 소결밀도를 이론밀도의 99~99.5% 되는 소결제품을 제조하는 방법이다. 진공소결법은 주로 구조용 부품제조에 적용되고 있다. 이 부분은 공업적으로 활용도가 높으므로 4절에서 보다 상세히 설명하였다.

3.2 고온등압 성형 공정 (Hot Isostatic Pressing Process)

HIP제조공정은 그림 4와 같이 가스분사분말을 사용하여 분말을 Canning하고 300~500℃ 범위로 가열 후 탈가스한 다음 1100~1200℃, 1,000이상의 기압에서 HIP처리를 빌렛 (Billet)을 제조하거나 Near net shaping에 의한 고부가성 부품제조에 적용되는 제조기술이다. 이 부분 역시 공업적으로 활용도가 높으므로 5절에서 보다 상세히 설명하였다.

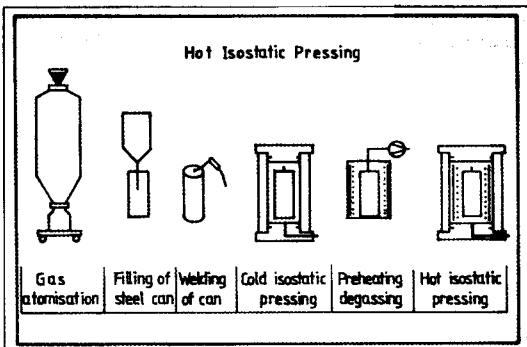


그림 4. HIP Process

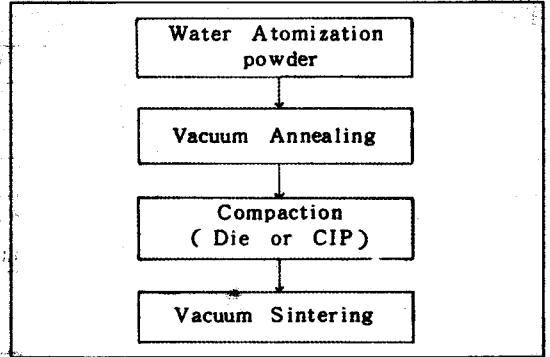


그림 3. Vacuum Sintering Process

3.3 STAMP Process

STAMP 공정은 고에너지 성형기술을 이용한 것으로 그림 5와 같이 수직식 가스분사법보다는 경제적인 수평식 가스분사법으로 제조된 분말을 주로 사용하는 것이 특징이다. 분말을 Canning 및 탈가스(Degassing)한 후에 1,100~1,200℃로 예열한 다음 열전도도가 낮고, 열적 안정성이 우수한 비성형성재료(Talcum, Pyrophyllite등) 내에 장입하여 4000bar의 높은 압력으로 대개 5분간 성형하는 제조방법으로서 주로 열간단조용 빌렛 제조에 적용된다.

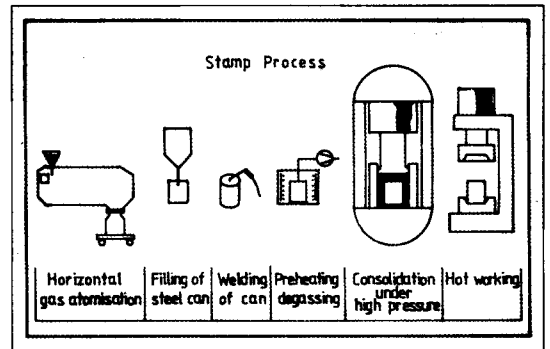


그림 5. STAMP Process

3.4 분말압출공정(Powder Extrusion Process)

압출기술에 의한 공구강 제조에는 그림 6에서처럼 가스분사나 수분사 분말을 적용할 수 있다.

가스분사 분말은 Canning 및 탈가스 후 압출을 하며, 수분사 분말을 사용할 경우에는 분말을 고무몰드에 장입한 후에 CIP처리로 고밀도화하여 1,000~1,200℃로 예열후 압출한다. 이때 압출비는 보통 10:1정도로 하고, 압출 시의 압력은 7~8ton/cm²정도로 적용한다. 압출 후 소재의 밀도는 보통 이론밀도의 99.5~99.9%에 이른다.

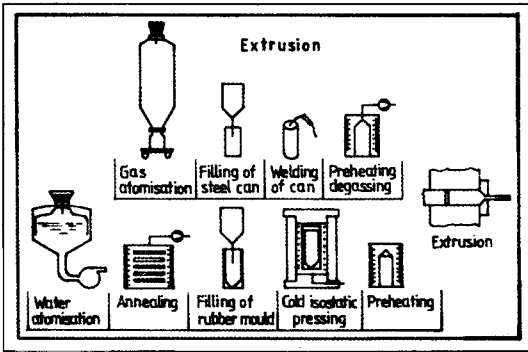


그림 6. Powder Extrusion Process

3.5 분말단조공정(Powder Forging Process)

분말단조기술은 일반 구조용재료에 있어서 고밀도화, 고강도화를 목적으로 최근 선진국에서 개발 응용되고 있는 기술이다.

분말단조기술 공정개요는 그림 7와 같이, 수분사 및 진공소둔처리된 분말을 윤활제와 혼합하

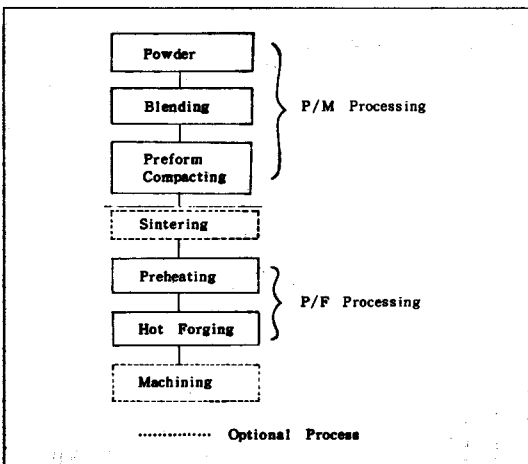


그림 7. Powder Forging Process

여 냉간성형으로 예비성형체(Preform)을 제조한 다음 1차로 1000~1200℃에서 예비소결을 한다. 예비소결한 제품을 열간단조(10ton/cm² 이상)에 의해 최종 형상의 제품을 제조하는 기술이다.

3.6 CAP(Consolidation by Atmospheric Pressure) Process

가스분사법으로 제조된 분말과 H₃BO₃ Methanol 용액을 적정량 혼합하여 혼합분말을 유리몰드에 장입하고 300~500℃에서 탈가스처리한다. 도가니에 Granulated graphite를 장입한 후 진공밀봉된 캡슐을 넣고 대기상태 하에서 1,200℃로 약 16시간동안 가열하는 제조방법으로 소결상태는 이론밀도의 95~99%에 도달된다. 또한 약 30~40%의 열간가공으로 고밀도 중간재를 제조하는 경우도 있다.(그림 8. 참조)

본 제조공정에서 H₃BO₃ acid 처리목적은 입자간의 고온확산시 확산결합에 있어서 표면산화물의 영향을 감소시키고 뿐만 아니라 저융점 공정액상(Low melting-point eutectic melt)을 형성시켜 소결을 촉진시킨다.

또한 도가니 내에 Granulated graphite를 넣는 것은 소결 시에 고온에서 수축이 발생하더라도 유동도가 우수해서 몰드 지지상태를 초기와 같은 형상으로 유지시켜 형상의 변화를 방지하는 목적으로 적용되기 때문에 Near Net Shaping 기술로 많이 적용되고 있다.

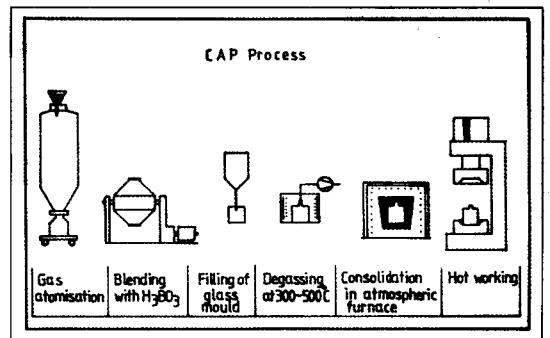


그림 8. CAP Process

3.7 CSD(Controlled spray deposition) Process

CSD 제조방법은 용탕의 직접분사에 의해 편석이 없는 고속도 공구강의 제조에 적합한 방법으로 공정개요는 그림 9와 같다.

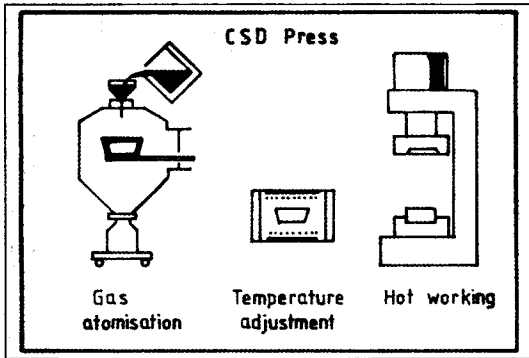


그림 9. CSD Process

용탕을 질소가스로 분사하여 불과 수 mm 떨어져 있는 냉각장치가 부착된 Target에 적층시켜 응고시키는 방법으로 Target를 조정함으로써 여러 층으로 적층할 수 있다. CSD 공정으로 제조된 제품의 밀도는 이론밀도의 약 95~99%에 이르고, 기공은 밀폐기공(Closed pore)형태로 존재한다. 최종 적층된 층은 약 30~40%의 열간가공을 거쳐 진밀도인 소재를 제조하기도 한다.

3.8 제조공정별 특성비교

이상 열거한 분말야금법을 이용한 공구강제조법에 있어서 각 제조방법별로의 특성을 비교하여 보면 표 2와 같다. 한편, 분말제조법에 있어서 가스분사법은 제조설비면에서 수직식과 수평식으로 분류되지만 공구강 원료분말 제조 시에는 수평식

표 2. P/M HSS 제조법의 각종 특성비교

공정기술	생산형태	제품중량(kg)	주 용 도	관련제조업	투자규모	생산능력(ton)
HIP	billets for subsequent hot working	100 - 10,000	high speed steel	specialty steel plants	very high	8,000
STAMP	forging preforms billets	50-2,500	high alloy steels	forging plants, rolling mills tor specialty steels	high	800
CAP	preforms for hot working or reHIP ping	10-300	superalloys high alloy steels	turbine production, forging, plants rolling mills	medium	900
Extrusion	bars rods tubes	-	-	steel extrusion plants	moderate	-
Forging	structural parts near net shapes	-	-	powder forging shops	moderate	-
Sintering	structural parts near net shapes	0.001-10	high speed steel	sintering plants	moderate	<1,000
CSD	forging preforms	10-1,000	high alloy steels, superalloys	forging plants, rolling mills	moderate	<1,000

설비가 훨씬 경제적인 것으로 알려져 있다.

4. 소결공구강 제조기술

진공소결에 의한 공구강 분말야금제품 제조시에 사용되는 원료분말은 수분사분무법(Water Atomization)으로 제조된 불규칙형상의 분말을 사용한다. 한편, 성형작업은 성형체의 밀도가 5.5~7g/cm³으로 되도록 일반적인 냉간성형(30~50ton/in²)이나 CIP(25~40ton/in²)방법을 이용한다. 이때 사용되는 대표적인 분말의 특성은 표 3과 같다.

공구강 분말제품에 대한 소결은 일반적으로 진공분위기 하에서 처리되며, 소결 후 제품의 특성에 영향을 미치는 인자는 분말혼합시의 첨가원소, 소결온도 및 유지시간 등을 들 수 있다.

(1) 첨가원소의 영향

공구강 분말을 혼합할 때 소결특성에 영향을 미치는 첨가원소들은 Graphite, Silicon, Boron 및 탄화물 등을 들 수 있다. 이러한 각 원소들이 소

표 3. 압축성형용 M2분말의 특성
(제조회사 : Powdrex)

항 목	특 성
Apparent density(g/cm ³)	2.2
Tap density(g/cm ³)	3.0
Flow rate	40.0s/50g
Sieve analysis(%)	(-100mesh)
	-100+150 9
	-150+200 19
	-200+325 33
	-325 39
Green density(g/cm ³)	6.9
(60 tsi : Die wall lubricant)	
Chemical composition (wt%)	0.87C, 0.3Mn, 0.2Si, 6.2W, 5.0Mo, 4.0Cr 1.8V, 1100O ₂ (ppm), 250 N ₂ (ppm)

결시에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

- Graphite의 영향

공구강 분말에 첨가 혼합되는 Graphite는 입자 크기가 0.7~2 μ m이며, 첨가되는 양은 0.05~0.3wt%로 통용되고 있다. 이때 혼합하는 방법으로는 소량의 공구강 분말과 Graphite를 먼저 혼합한 다음 잔류량의 공구강 분말을 첨가하여 혼합한다.

이처럼 공구강 분말에 첨가되는 Graphite는 소결시에 Carbon loss를 보충할 뿐아니라 분말입자간 계면에서 저융점 공석상을 생성시켜 소결성을 증대시키고 적정 소결온도를 저하시키는 특성이 있다. 일례로 입자의 크기가 평균 17.5 μ m인 M2 분말에 대한 Graphite첨가에 따른 소결온도의 변화를 보면 M2분말의 경우 Graphite를 0.05% 첨가할 경우 90 $^{\circ}$ C 정도의 낮은 온도에서도 거의 Full density를 획득할 수 있음이 알려져 있고, 또한 탄소량이 증가할수록 점차 낮은 온도에서 고밀도화가 되는 것으로 소개되고 있다.(그림 10 참조)

- 기타 원소의 영향

원료 분말에 포함되어 있는 산소는 소결시 분말에 함유된 Carbon과 반응하여 CO를 생성한다.

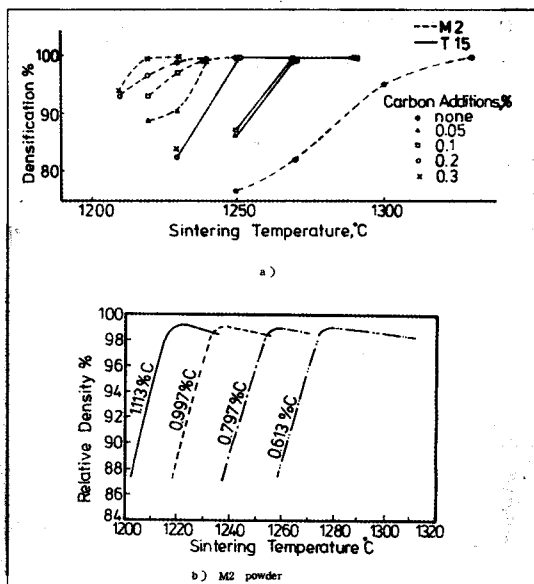


그림 10. 소결온도와 탄소첨가량에 따른 소결밀도 변화

이때 0.01%의 O₂에 의해 0.01wt%의 Carbon loss가 생성되므로 원료 분말에 함유되는 산소량은 최대한 억제되어야 하며 보통 O₂ 함량은 1,000ppm 이하로 조정된 분말이 양호한 특성을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

한편, Silicon(Si)의 첨가는 강제의 용점을 저하시키는 원소로 이에 따라 소결온도도 다소 저하시키는 역할을 함으로써 Graphite 첨가와 같은 효과를 얻을 수 있으나, Si 원소자체의 확산계수가 낮기 때문에 합금화된 상태로 첨가되어야 한다.

또한, Boron(B)의 첨가는 소결시에 분말의 표면과 반응하여 저융점 공석상을 생성시켜 소결온도를 저하시키는 역할을 하며, 이에 따라 소결을 활성화시키는 것으로 소결이 촉진된다.

이 때에 Boron의 첨가방법으로는 Boron산화물의 알콜 수용액으로 첨가한 후 약 95℃에서 건조시킨다. 이 결과 공구강 분말은 Boron 산화물로 코팅되어 소결온도 구간(1,200℃ 전후)에서 탄소(Carbon)와 접촉하여 다음과 같은 환원반응에 의해 붕소로 변화되어 활성 소결제로서 작용하며 소결을 촉진시키는 것으로 알려져 있다.

(2) 소결 온도 및 시간의 영향

소결 온도 및 시간의 영향은 그림 11에서 처럼 소결 온도가 높아질수록 보다 짧은 시간 내에 고밀도화를 달성할 수 있으나, 그림 12에서와 같이 소결온도의 상승이나 시간의 증가에 따라 탄화물 입자 및 결정립 크기가 증가하기 때문에 소결밀도의

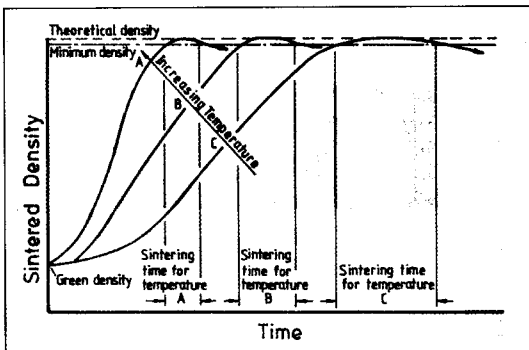


그림 11. 소결온도 및 시간에 따른 소결밀도의 관계

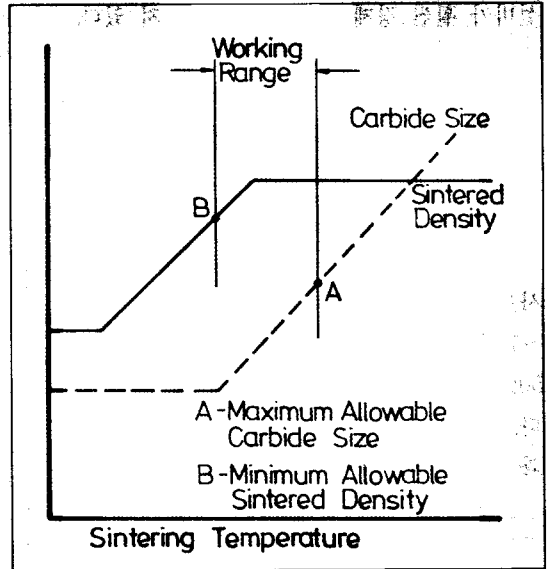


그림 12. 소결밀도와 탄화물 입자크기의 변화

최대화와 탄화물이나 결정립 크기의 최적화를 위한 소결 온도의 범위는 상당히 높은 것으로 분석되고 있다. 일반적으로 M2 분말 성형품의 경우에는 1,220~1,240℃ 범위의 온도에서 소결되고, T15 분말 성형품의 경우에는 1,250~1,270℃ 범위에서 소결되는 것으로 알려져 있으나, 저융점 공석상의 형성시키는 합금원소가 첨가될 경우에는 소결온도가 1,180~1,210℃ 정도의 온도까지 저하될 수 있다.

5. 분말공구강 제조기술

개략적인 제조공정은 불활성 가스분무법으로 얻어진 구형 입자 분말을 금속용기에 충전하고 500℃ 정도로 가열된 상태에서 진공배기시킨 후 밀봉한 빌렛을 열간등압성형법으로 고밀도화시킨다. 현재 특허 등록되어있는 스웨덴의 ASP Process와 미국의 CPM Process가 이 기술에 포함된다. CPM Process로 생산되는 대표적인 냉간 및 열간가공용 분말공구강 소재의 화학적 조성을 표 4에 나타냈다.

분말공구강의 균일하고 미세한 결정립과 탄화물조직으로 인해 우수한 인성과 항복강도, 내마

표 4. 대표적인 분말공구강 소재

Trade name	Constituent elements %								Hardness
	C	Cr	W	Mo	V	Co	S	Other	HRC
Cold-work tool steels									
CPM 9V	1.78	5.25	...	1.30	9.00	...	0.03	...	53-55
CPM 10V	2.45	5.25	...	1.30	9.75	...	0.07	...	60-62
CPM 15V	3.40	5.00	...	1.30	14.50	...	...	...	62-64
CPM 440V	2.15	17.50	...	0.50	5.75	...	...	...	57-59
Vanadis 4	1.50	8.00	...	1.50	4.00	...	...	...	59-63
Vanadis 10	2.90	8.00	...	1.50	9.80	...	...	1.0Si, 0.5Mn	60-62
Hot-work tool steels									
CPM H13	0.40	5.00	...	1.30	1.05	...	...	...	42-48
CPM H19	0.40	4.25	4.25	0.40	2.10	4.25	...	...	44-52
CPM H19V	0.80	4.25	4.25	0.40	4.00	4.25	...	...	44-56

모성 및 높은 경도가 얻어진다. 또한 용해 주조 공구강에 비해 바나듐 함량을 보다 증가시킬 수 있으므로 내마모성이 크게 향상된다. 종래 용해 주조 공구강의 경우에는 바나듐을 첨가할 수 있는 한계가 4% 수준이며 이 수준을 초과할 경우 열간 소성가공과정에서 쉽게 균열이 발생된다. 그러나 분말공구강의 경우 최대 20%까지 첨가가 가능하다. 그림 13와 그림 14는 종래 용해주조 공구강과 CPM 9V의 충격치와 내마모성을 상호 비교한 것으로 분말공구강이 매우 우수함을 알 수 있다. 분말공구강 CPM 10V는 바나듐 함량이 매우 높은 소재로서 높은 경도, 높은 압축강도 또는 우수한 내마모성이 요구되는 펀치와 냉간성형 금형과 Stamping공구, 분말압축성형펀치 및 금형, 압연 롤, 목공예용 공구 등에 주로 쓰인다.

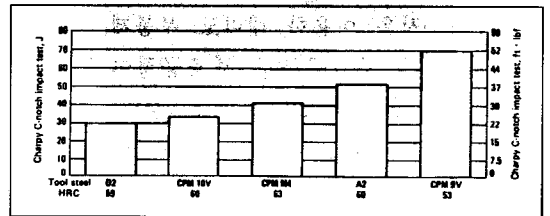


그림 13. CPM 9V의 충격치 비교

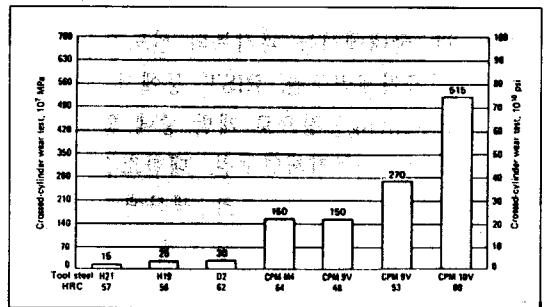


그림 14. CPM 9V의 내마모성 비교

표 5. CPM 440V의 내마모성 및 충격치 비교

	Hardness	Crossed-cylinder wear resistance		Charpy C-notch toughness	
		10 ⁷ MPa	10 ¹⁰ psi	J	ft-lbf
CPM 440V	59	276	40	16.3	12
CPM 440V	56	...	...	21.7	16
Vanadis 4	56.5	28	4	35.3	26
Vanadis 10	59	28	4	31.2	23
CPM H13	60	517	75	35.3	26

CPM 440V는 내마모성과 내식성이 동시에 요구되는 용도에 이용되는 분말공구강이다. 이 소재는 약 5.75% V을 함유하며 내마모성 증가를 위해 탄소 함량을 증가시킨 440C 단조 마르텐사이트계 스테인레스강이다. 표 5에 CPM 440V의 내마모성과 충격치를 다른 소재와 비교하였다. 내마모성에서는 CPM 10V보다 열등하지만 용해 주조 공구강 D2와 T440C 보다는 우수하다.

6. 결 론

지금까지 분말야금공정에 의해 제조되는 공구강의 제조방법, 경제성 및 특성에 대해 알아보았다. 2절에서 소개된 여러 가지 제조공정 중 실제 양산화에 적용되고 있는 공정은 3절에 소개된 진공소결공정을 이용한 내마모 부품제조와 4절에서 소개된 분말공구강 제조공정이다. 특히 HIP공정에 의해 제조된 분말공구강의 세계시장 규모는 연간 약 15,000톤으로 그 수요가 매년 5~6% 수준으로 계속 증가하고 있으며 응용범위도 종래의 절삭공구 위주에서 열간 및 냉간 금형, 반도체 패키징용 정밀금형 등으로 점차 확대되고 있다. 국내에서는 과기부의 선도기술개발사업으로 한국기계연구원, RIST 등에서 HIP공정 및 Spray forming공정으로 개발 중에 있다. 한편 소결공구강은 한국기계연구원, 대한소결 등에서 연구개발과 함께 부분적으로 생산에 적용하고 있다. 지금까지 분말야금법에 의해 제조된 공구강이 기존의 공구강에 비해 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 보편화되지 못한 것은 기존 공구강에 비해 제조원가가 높다는 단점을 가지고 있기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 선진국에서는 분말공구강제조 분야에서는 대형 HIP 혹은 Quick HIP공정을 이용한 대량생산체제를 구축하는 연구를 하고 있는 중이며, 소결공구강제조 분야에서는 진공소결공정

을 거치지 않고 질소나 수소 분위기 하에서 연속소결이 가능한 새로운 합금분말이나 소결공정을 개발하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] G.A. Roberts, R.A. Cray : Tool Steels, ASM, 4th Ed.(1980)627
- [2] Erhard Klar : Metals Handbook, ASM, 9th Ed., Vol 8(1984)784
- [3] William H. Cubberly : Metals Handbook, ASM, 9th Ed., Vol 3(1980) 38, 250, 421.
- [4] P.R. Brewin : Powder Metallurgy- an overview, The Institute of Metals, London(1991) 296.
- [5] 鈴木清右 : 特殊鋼, 32(1983)35.
- [6] P. Beiss : MPR, No 4(1983)186.
- [7] A. Kasak and E. J. Dulis : Powder Metall., 21(1978), 114.
- [8] C. Tonberg, P. Billgren : MPR, 47(1992), 19.
- [9] P. Hellman : MPR, 47(1992), 25.
- [10] M. Hirano and N. Kawai : MPR, 41(1986), 527.
- [11] R. J. Beltz, J. D. Dankoff, R. J. Henry and R. V : Adv. in PM, 6(1991), 177.
- [12] J. W. Shaw and R. A. Queeney : Adv. in PM, 2(1990), 77.
- [13] N. Tsuchiya, O. Terada, M. Saito and H. Suzuki : Powder and Powder Metall., 36(1989), 66.
- [14] A. Fujiki, Y. Maki, M. Kanou and I. Tanimoto : Powder and Powder Metall., 35[1988] 34.
- [15] M. Torralba, L. E. G. Ganbronerioi, J. M. Ruizprietio and M. M. Dasneves : Powder Metall.,36(19934), 55.