

철계분말의 고밀도 성형이 가능한 온간금형윤활 성형법

宇波 繁¹

High Density Forming Method of Ferritic Powder Using by Worm Compaction and Lubrication

S. Unami

1. 서 론

금속분말을 원하는 모양의 형틀에 충전한 후 가압성형하고 소결하는 공정으로 이루어지는 분말야금법은 복잡한 형상의 부품을 저가로 또는 대량으로 제조할 수 있는 특징을 갖고 있기 때문에 공업제품 응용이 날로 확대되고 있다. 철계분말야금 제품에 대해서는 일본 국내생산량의 약 90%는 자동차를 중심으로 하는 수송기계부품이며 2003년의 조사에서는 일본차 1대당 약 8Kg의 철계분말야금 제품을 사용하고 있다.

철계분말야금 제품의 용도를 더욱 확대시키기 위해서는 주조, 판금가공 또는 단조 등의 다른 경쟁하는 공법에 대해서 기술적으로 우위성을 높여야 한다. 즉 분말야금의 특징인 높은 치수정밀도, 형상자유도의 특징을 살려가면서 인장강도, 피로강도, 내마모성, 충격인성 등의 기본특성을 향상시켜야 한다. 이들 특성은 밀도가 높을 수록 좋아지기 때문에 재질 개발과 병행하여 고밀도 성형 기술개발이 중요하며, 이에 따른 공정이 개발이 진행되고 있다. 이를테면 성형 소결 공정을 2회 되풀이 하는 2회 성형 2회 소결법 또는 1회 성형 1회 소결법으로 제조한 소결체를 열간단조 하는 소결단조법, 분말 및 금형을 미리 130℃ 정도로 가열한 상태로 성형하여 2회 소결 하는 온간성형법[1~2](Warm Compaction: WC 법) 등이 거론된다. 그러나 어느 공법에도 도달밀도의 증가에 대응하여 제조단가가 증가하기 때문에 보다 경제적인 고밀도화 공법을 찾아내야 한다.

그래서 비교적 저 비용의 고밀도화 공법인 온간성형법과 대전도포형 금형윤활법[3~4]을 조합한 온간금형윤활성형법[5~8]을 개발하였다. 그림 1에 표시한 바와 같이 이 공법에 의하면 온간성형법과 거의 동등한 비용으로 이보다 높은 밀도를 실현할 수 있었다.

본 원고에서는 우선 온간금형윤활 성형법의 특징에 대하여 기술하고, 이어서 고밀도 성형에 적합하고 고압축성을 나타내는 부분합금화강 분말을 이용한 온간금형윤활성형법에 의하여 제작한 고밀도소결체의 기계적특성에 대하여 설명 하고자 한다.

2. 온간금형윤활 성형법의 특징

철계분말야금에서는 통상 철분과 금형 및 철분끼리의 마찰을 감소하기 위해 철분에 분말윤활제를 첨가 혼합한 후 성형을 한다. 그림 2[7]에 철분과 윤활제로 된 혼합물에 있어서 윤활제첨가량과 압분체의 이론도달밀도의 관계를 나타냈다. 이론도달밀도는 철분과 윤활제의 비중을 각각 7.87 및 1.00으로 하여 가압성형에 의해 공극이 모두 없는 상태로 성형한 후 압분밀도를 측정하여 산출했다. 철분에 혼합하는 윤활제량(내부윤활제)을 감소시키면 이론도달밀도가 높아지는 것을 알 수 있었다.

온간금형윤활 성형법이란 분말윤활제를 미리 금형에 도포함으로써 철분 및 흑연 등의 부원료 분말인 혼합원료 중에 첨가하는 분말윤활제의 양을

1. JFE Steel(주) Steel研究所 鐵粉・磁性材料 研究部 (우) 260-0835
千葉市中央區川崎町 1, Japan
기술해설: 塑性과 加工(日本塑性加工學會誌) 제47권 제542호 pp.
179~183(2006-3)

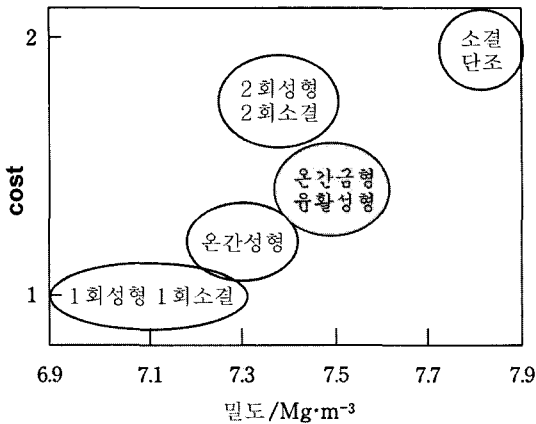


그림 1 각종 성형법에 있어서 밀도와 생산비와의 관계

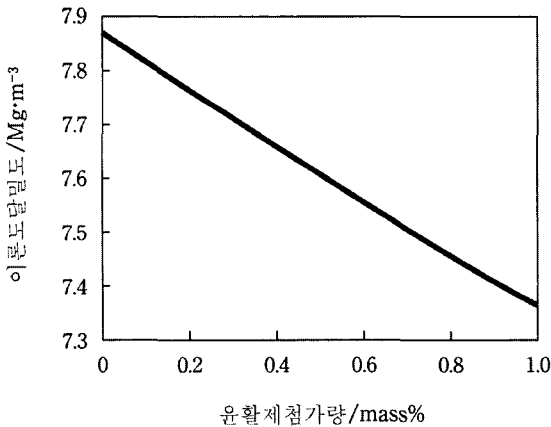


그림 2 철분과 윤활제로된 혼합분의 윤활제 첨가량과 이론도달밀도[7]

낮추고 고밀도를 꾀하는 공법이다. 온간금형윤활 성형법에서는 금형에 도포된 분말윤활제(금형윤활제)에 의해 성형체와 금형간의 마찰이 완화되기 때문에 내부윤활제량이 적은 원료분말을 성형체의 분말이나 결합 등의 문제가 발생 하지 않고 성형하는 것이 가능하게 된다. 내부윤활제량은 통상의 성형법에서는 철분의 량에 대하여 0.6~1.0 mass% 정도 필요하게 되는데 반하여 온간금형윤활성형법으로 0.2mass% 정도의 양으로 충분히 성형이 가능하게 된다. 내부윤활제첨가량의 저감(0.8 → 0.2mass%)에 의해 이론도달밀도는 0.3Mg/m³ 정도 증가한다. 또 내부윤활제첨가량이 적기 때문에 소결시의 탈윤활제공정의 처리시간이 단축되어

소결공정의 생산성을 향상시킬 수가 있다는 이점도 있다.

온간금형윤활 성형법에 있어서 성형공정의 개요를 그림 3[7]에 표시하였다. 온간금형윤활 성형법은 금형에 내장시킨 히터에 의해 130℃ 정도로 가열한 금형표면에 금형윤활제를 대전도포하는 공정과 필요 최소량의 내부윤활제를 혼합한 원료분말을 모두 130℃ 정도로 가열한 후 금형 중에 충전하여 가압성형을 하는 공정으로 구성된다. 윤활제도포장치는 분체도료도포장치를 개량하여 개발한 것으로 윤활제분말을 테프론으로 만든 대전총 내벽과 접촉 시키는 것에 의해 대전시킨 후 금형내의 내벽에 균일하게 도포하는 것이 가능하도록 하였다. 금형윤활제에는 대전총 내에 있어서의 대전성, 예열된 금형표면에서의 부착성 및 성형시에 있어서 윤활성 등을 고려하여 최적의 것을 선정했다. 금형윤활제의 대전 방식으로 해서는 코로나 대전 또는 마찰대전[9]을 쓰는 것이 가능하지만 코로나 대전에서는 금형의 모서리부에 대전분말이 과량 부착하고 말기 때문에 균일도포가 가능한 마찰대전총을 이용했다.

3. 금형윤활제 도포장치

금형에서의 윤활제 도포량은 성형체의 품질, 금형의 수명 등에 영향을 미치기 때문에 온간금형윤활 성형법에 있어서 대단히 중요한 제어인자이다. 금형윤활제의 도포량이 부족했을 경우에는 성형체와 금형벽 접촉면에 있어서의 마찰이 과대하게 되기 때문에 성형체를 금형에서 뽑아내는 공정에서 요동면에 마모가 발생하여 성형부품의 외견을 상하게 할 뿐 아니라 금형에 하중이 증대하여 금형 열화를 가져온다. 또 도포량이 과다하게 될 경우에 성형체표면에 윤활제가 고농도로 혼합하여 철분간의 결합을 약하게 하기 때문에 성형체의 깨어짐 결합이 발생하기 쉽고 형성불량을 일으킬 수 있다.

윤활제의 종류 및 입도가 동일하다고 가정하면 금형윤활제의 도포량은 윤활제도포장치에서의 분무량으로 정해진다.

그래서 금형윤활제의 분무량의 변동을 알 수 있도록 하여 도포장치를 개량하고 모식도를 그림 4[7]에 나타냈다. 이 장치는 (1)고정밀도 정량의 분말을 배출하는 테이블 공급장치를 내장한 호퍼, (2)대전총, (3)노즐, (4)분기블록 및 집진기 등으로

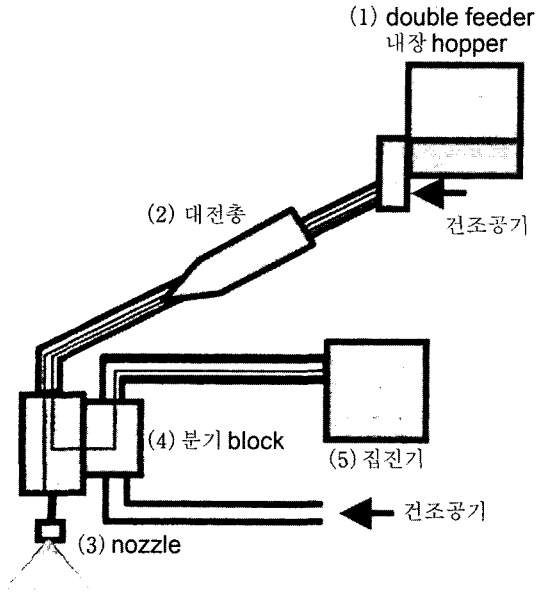


그림 3 온간금형윤활 성형법의 개요[7]

구성된다. 이 장치에 있어서는 윤활제분말은 금형에 분무되어 있지 않은 경우에도 테이블 공급장치에 의해 연속적으로 정량배출되며 건조공기에 의해 호퍼 대전 노즐, 분기블록, 집진기 등으로 기류를 순환수송한다.

금형에 도포할 경우는 분기블록에 들어가는 건조공기를 막음으로 인하여 노즐에서 윤활제가 분무된다. 윤활제를 장치 내에 상시 수송하는 것에 의해 장치 내에 부착 또는 체류하는 윤활제량을 저감시켜 노즐에서의 분무량의 변동을 억제하고 있다. 분무되지 않게 집진기내에 순환된 윤활제는 다시 분무라인에 되돌려진다.

그림 3 에서 표시한 개발장치를 써서 조사한 금형윤활제분무량의 표준편차를 종래의 분체도료도포장치를 써서 했을 때와 비교하여 그림 5[7]에 나타냈다. 윤활제를 1 회에 0.1g 분무시키는 조건으로 10 회 분무 시킨 때의 분무량의 표준편차를 산출하여 변동폭을 평가했다. 그 결과 개발장치에서는 변동폭이 1/4 로 감소하는 것을 확인하였다.

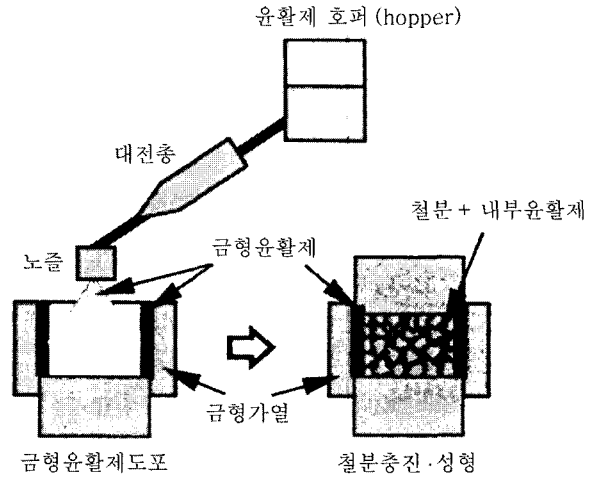


그림 4 분무량정밀도가 뛰어난 윤활제도포장치의 모식도[7]

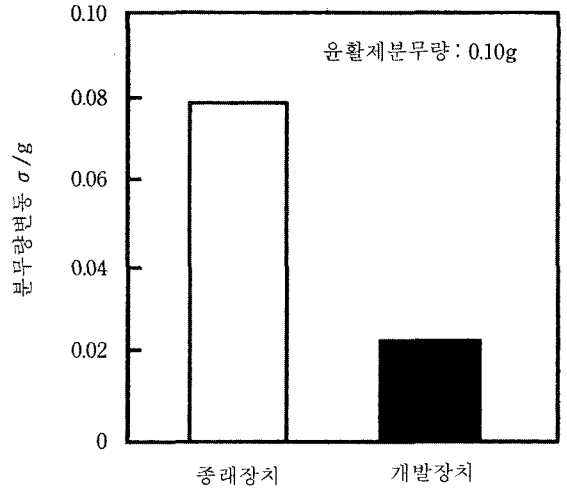


그림 5 윤활제도포장치에 있어서 윤활제의 분무량 변동[7]

표 1 압분체 특성의 평가조건

성형법	흑연분	내부윤활제종류	내부윤활제량	성형온도	금형윤활
보통성형	0.6mass%	스테아린산아연	0.75mass%	실온	없음
온간성형		온간성형용 윤활제	0.6mass%	130℃	없음
온간금형윤활성형		온간성형용 윤활제	0.2mass%	130℃	있음

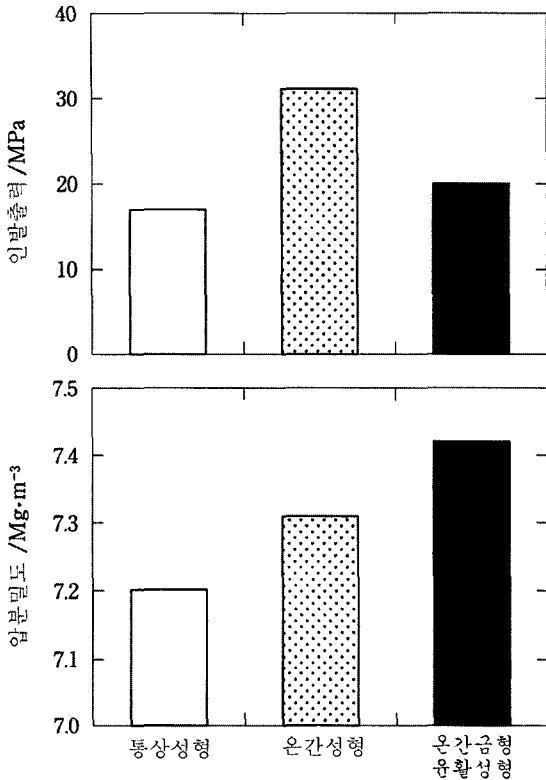


그림 6 각종 성형법의 인발력과 압분밀도[7](성형 압력: 686MPa)

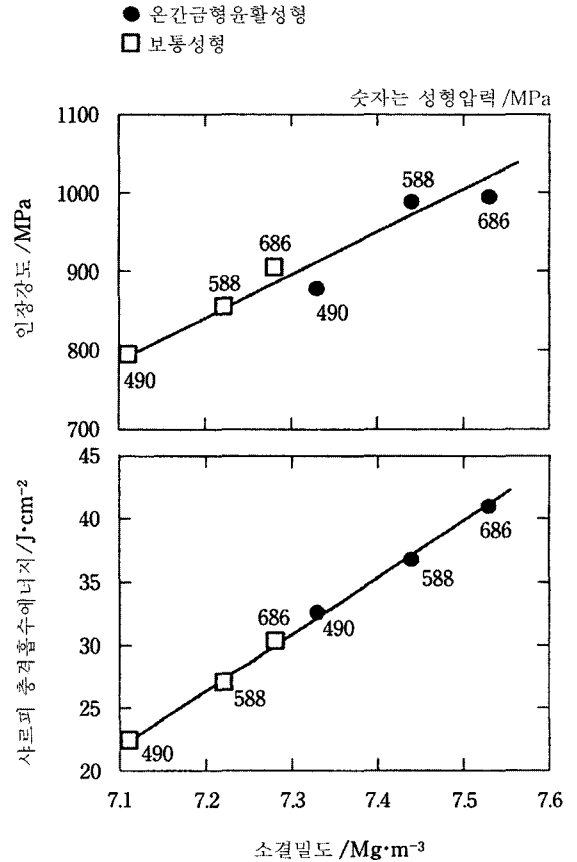


그림 7 각종 성형법에 의해 제작한 소결체의 기계적 특성[8]

4. 온간금형윤활 성형법에 의한 고밀도 성형

원료분말로서 Fe-4mass% Ni-1.5mass% Cu-0.5 mass% Mo 부분 합금화 강분을 써서 표 1에 표시한 비율로 첨가제를 배합한 후 686MPa 압력으로 성형을 했을 때의 각 성형법에 있어서의 인발출력 및 압분밀도의 값을 그림 6[7]에 표시하였다.

Fe-4mass% Ni-1.5mass% Cu-0.5mass% Mo 부분합금화강분은 아톰마이크 순철분의 표면에 소정량의 Ni 분, Cu, Mo 분을 열확산에 의해 접합한 것으로 고밀도, 고강도의 소결체 부품재료에 많이 이용되고 있다. 온간금형윤활 성형법에 있어서의 인발출력은 내부윤활제를 0.6mass% 첨가한 온간 성형법의 값보다 낮아지고 통상성형법의 값과 거의 동등하다. 온간금형윤활 성형법에 있어서의 압분밀도는 통상성형법의 경우에 약 0.2Mg/m³, 온간성형법에서 약 0.1Mg/m³ 높게 되어 7.4Mg/m³로 되었다.

여기서 밀도의 상승은 내부윤활제의 첨가량이 낮아진 것과 금형윤활에 의해 금형에 성형압력 분산이 억제된 효과에 의한 것으로 생각된다. 일반적으로 압분밀도의 상승과 더불어 가압방향에 대하여 수직방향으로 철분의 탄성 및 소성 변형량이 증대하여 탈형시에 금형과 성형체간의 마찰력(인발출력)이 증대하지만 온간금형윤활성형법으로는 일반성형법, 온간성형법 보다 압분밀도가 높아짐에도 불구하고 인발출력은 낮아지고 있다. 즉, 같은 밀도의 압분체를 성형하는 때 낮은 인발출력을 얻을 수 있다는 것을 보여 주고 있다.

5. 온간금형윤활 성형법에 의해 제작한 고밀도 소결체의 기계적특성

5.1 소결체의 특성

(1) 평가조건: 원료로 하여 사용한 분말의 조성

및 성형조건을 표1에 나타냈다. 보통 성형법은 원료분말 및 금형을 가열하지 않고 실온의 상태로 성형을 하였다. 온간금형유회활 성형법은 130℃로 가열한 금형의 표면에 유회활제도포장치를 써서 금형유회활제를 대전도포한 후 미리 130℃로 가열해 둔 원료분말을 충전하여 성형하였다. 어느 쪽의 성형법에 있어서도 성형압력은 490~686MPa로 하였다.

그 후 N₂-10Vol% H₂ 분위기 중 1250℃로 60분 유지하여 소결을 하였다. 얻어진 시험편을 이용하여 인장강도와 샬피 충격값을 측정했다.

(2) 평가결과: 온간금형유회활 성형법 및 보통 성형법에 의해 제작한 소결체의 인장강도 및 샬피 충격값을 그림 7[8]에 표시하였다. 인장강도 및 샬피 충격값이 소결밀도의 증가와 더불어 높아지는 것을 알 수 있다. 동일 성형압력으로 비교하면 온간금형유회활 성형법에서는 보통 성형법에 비해 소결밀도가 약 0.2Mg/m³ 높아지고 인장강도는 100MPa, 샬피 충격값은 10 J/cm² 높게 된다. 686MPa 압력으로 성형한 경우에는 소결밀도가 7.5Mg/m³ 이 되고 인장강도 1000MPa, 샬피 충격값 40J/cm² 이라는 높은 값이 얻어진다

온간금형유회활 성형법에 의해 제작한 소결체 단면의 기공분포 상태를 그림 8[8]에 표시하였다. 겉은 부분이 기공이며 표층부와 내부에는 상태에 차이는 확인할 수가 없었다. 이것은 금형유회활제의 도포량을 적절하게 제어하고 있기 때문에 금형에 도포한 유회활제가 성형체 표층부에 들어가서 소결 후에 조대한 기공을 형성하는 문제를 불러 일으키지 않았기 때문으로 판단된다.

5.2 소결 광휘열처리재의 특성

(1) 평가조건: 원료분말로 Fe-4mass% Ni-1.5mass% Cu-0.5mass% Mo 부분 합금화강분, 천연 흑연분(0.6 또는 1.0mass%) 및 유회활제(0.2mass%)에서 된 혼합분말을 사용했다. 성형소결은 5.1 (1)절과 같은 조건으로 행했다. 그 후 알곤 분위기 중, 900℃, 30분 가열한 후 50℃의 유랭해서 200℃에서 60분 어닐링을 행한 후 인장 강도, 샬피 충격값 및 회전곡 굽은 피로강도를 측정했다. 회전곡굽은 피로시험은 평행부 직경 8mm 길이 15.4mm 평활환봉시험편을 써서 소야(小野) 회전곡굽은 피로시험기에 의해 회전수, 3000rpm 응력비, R=-1 조건으로 실험하였다. 사이클 수 10⁷회에 있어서 파괴되지 않는 최대 응력값을 내구한도로 하였다.

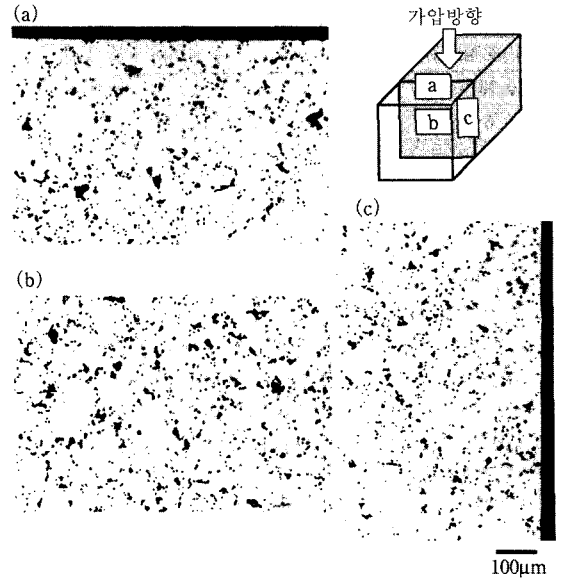


그림 8 온간금형유회활성형법에 의해 제작한 소결체의 기공분포[8]

표 2 온간금형유회활 성형법에 의해 제조한 소결광휘열처리재의 기계적성질[7]

흑연첨가량 /mass%	소결밀도 /Mg·m ⁻³	인장강도 /MPa	샬피 충격흡수에너지 /J·cm ⁻²	회전피로강도 /MPa
0.6	7.53	1800	44	450
1.0	7.51	1250	25	470

(2) 평가결과 : 온간금형유회활 성형법을 써서 제작한 시험편을 소결광휘 켄칭 하였을 때의 밀도와 기계적 특성을 표 2[7]에 나타냈다. 어느 흑연 첨가량에도 소결 밀도는 거의 동등하여 7.5Mg/m³ 이상의 높은 값을 나타냈다. 낮은 C 재의 인장강도 및 충격값은 높은 C 재의 값보다 높았다. 인장 강도는 1800MPa, 충격값은 44J/cm²이다.

저C재의 회전 굽은피로 강도는 405 MPa 이며 종래의 2회성형2회전 소결재[11](흑연첨가량 0.6 mass%, 밀도 7.34Mg/m³ 회전곡 피로강도 305MPa)에 비교하면 피로강도는 30% 정도 높아지고 있다 온간금형유회활 성형법으로 제작한 소결체는 2회성형2회소결법으로 제작한 것보다 밀도가 높기 (7.53Mg/m³) 때문에 피로특성이 높아진 것이라고 생각된다. 또 높은 C재의 회전굽은 피로강도는 470MPa로 저C재보다 높은 값을 나타냈다. 이 고 피로강도는 C량의 증가에 의해 잔류 오스테나이트

표 3 소결 칩탄 열처리재의 평가조건

기호	혼합분말		흑연분 /mass%	내부윤활제	성형
	부분합금량/mass%				
	Ni	Mo			
2Ni-1Mo/CC	2	1	0.5	스테아린산아연 0.75 mass%	통상성형
2Ni-1Mo/WD				온간성형용윤활제 0.2 mass%	온간금형윤활성형
1Mo/WD	-	1			

트량이 증가한 것에 기인 한다고 생각된다[7].

5.3 소결칩탄열처리재의 특성

(1) 평가조건: Fe-2 mass% Ni-1 mass% Mo 및 Fe-1 mass% Mo 의 부분합금화강분 흑연분 및 윤활제로 된 혼합분말을 공시분으로 했다. 분말의 배합조성을 표 3 에 표시하였다. 성형소결은 5.1(1)결과 같은 조건으로 했다.

그 후 870도에서 60분 카본포텐셜 0.8%로 칩탄 후 60℃의 유냉한 후 200℃에서 60분 어닐링한 후 면압피로 강도를 측정했다. 면압피로시험은 그림9⁸⁾에 표시한 것과 같이 외경 60mm 두께 5mm 원판형 시험편을 이용해서 1500번으로 연마한 시험편로면에서 강구를 전동 시킨 6구식 면압피로 시험기(회전수 1000rpm)에 의해 실시했다. 사이클 수 10⁷회에 박리가 생기지 않은 하중을 피로한도 하중으로 식(1)[10]과 식(2)[11]에 따라서 최대접촉 응력(헬쯔응력)을 산출하여 면압피로강도로 정하였다.

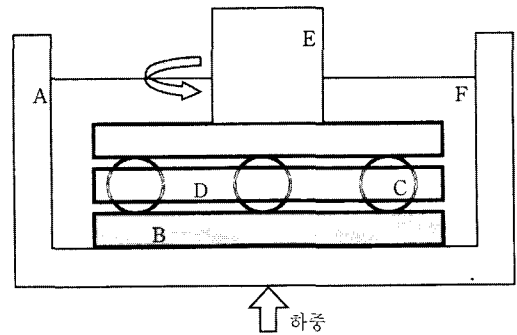
$$\sigma_w = 0.62[Pr^2(1/E+1/E')^{2/3}]^{1/3} \quad (1)$$

$$E' = -324 + 69.29 \quad (2)$$

- P: 시험강구의 부하하중(kN)
- r: 시험강구(mm)
- E: 시험강구의 탄성계수(206 GPa)
- E': 소결체(GPa)
- P: 소결체 밀도(Mg/m³)

(2) 평가결과: 소결칩탄재의면압 피로시험의 결과를 그림10⁸⁾에 표시한다. 온간금형윤활 성형법을 이용해서 제작한 2Ni-1 Mo재는 소결밀도는 7.50Mg/m³ 면압피로강도는 4.4GPa이며 통상 성형법을 이용해서 제작한 것보다 0.26Mg/m³, 1.0GPa 높은 값을 얻었다.

또 온간금형윤활성형법으로 제작한 2Ni-1 Mo재와 1Mo 재의 면압피로강도를 비교하면 2Ni-1 Mo재



- A : 시험용기
- B : 시험편
- C : 강구 (SUJ-2)
- D : 강구압
- E : 회전축
- F : 윤활유

그림 9 면압 피로시험의 개요⁸⁾

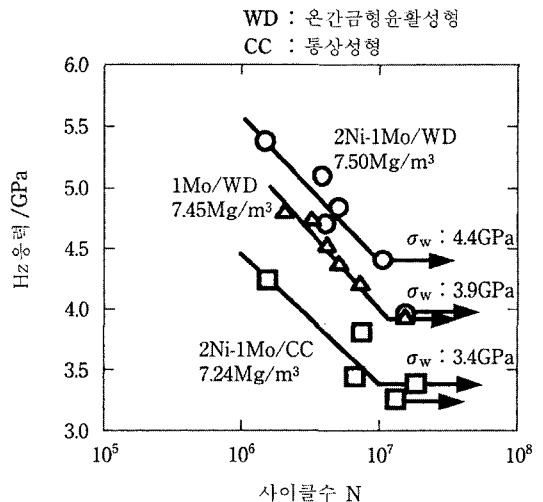


그림10. 소결칩탄재의 면압피로 특성⁸⁾

쪽이 1Mo재 보다 0.5GPa높게 일어졌다. 이 높은 면압피로강도는 높은 소결밀도와 면압피로과정에 있어서 특이조직(백색상)의 생성을 억제 한 것이 요인이라고 생각된다⁸⁾.

이상과 같이 온간금형윤활 성형법에 의한 고밀도화에 따라 소결체 및 소결 열처리체의 기계적 특성의 향상이 확인되었다.

6. 결 론

분체도장기술을 응용한 대전도포형 금형윤활법과 온간성형법을 조합시킨 온간금형윤활 성형법에 대하여 해설했다. 이 공법을 이용하여 1 회 성형 1 회 소결로 종래의 고밀도 성형법인 온간성형법을 상회하는 고밀도 성형이 가능하게 됐다. 성형체의 고밀도화에 따라 뛰어난 기계적 특성을 갖는 소결체 및 소결 열처리체의 제조가 실현 가능하다고 생각된다. 앞으로 고밀도 고강도 부품양산 공정에 응용이 기대된다.

본 논문은 한국소성가공학회와 일본소성가공학회의 번역 게재협정에 의하여 저자의 허락을 생략하고 번역하여 게재합니다.

참고문헌

- [1] U. Engstrom, B. Johansson, J. Rasmus: Proc. Of 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, (1998), 21~26.
- [1] 尾期由紀子, 宇波繁, 上園聰: 川鐵技報 33-4, (2001), 170~174
- [2] W. G. Ball, P. f. Hibner, F. W. Hinger, J. E. Peterson, R. R. Phillips: Int. J. Powder Metall., 33-1(1997), 23~32.
- [3] Gasbarre, G. P. Jr.: Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 3(2001), 38~46.
- [4] 宇波繁, 尾期由紀子, 上園聰: 粉體粉末冶金協會平成 14 年度 春季講演大會概要集, (2002), 256.
- [5] 宇波繁, 上園聰: 上同, (2002), 28.
- [6] 宇波繁, 尾期由紀子, 上園聰: JFE, 4(2004), 70~76
- [7] 宇波繁, 尾期由紀子, 上園聰: 上同, 7(2005), 6~13
- [8] 渡邊隆: 塗裝工學, 29-5(1994), 176~192.
- [9] 曾田範宗: 軸受(1964), 110, 岩波書店.
- [10] 小倉邦明, 高城重彰, 前田義昭, 香月淳一, 憐田一男: 川鐵技報, 21-3(1989), 205~254.