표면치밀화 기술에 의해 제조된 소결 기어의 기계적 특성

김기정* · 김기범 · 이두환 · 박종관^a · 정동국^a

현대 · 기아자동차 연구개발총괄본부, ^a대한소결금속 기술연구소

Mechanical Properties of Surface Densified PM Gears

Ki Jung Kim*, Ki Bum Kim, Doo Hwan Lee, Jong Kwan Park^a,
and Dong Guk Jeong^a

Research & Development Division, Hyundai · Kia motors, 772-1, Jangduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea

^aR&D Center, Korea Sintered Metal, 29-10, Bonri-ri, Nongong-Eup, Dalseong-Gun, Daegu-si, Korea

(Received February 22, 2012; Revised March 15, 2012; Accepted March 29, 2012)

Abstract A novel PM (powder metallurgy) steel for automotive power-train gear components was developed to reduce manufacturing cost, while meeting application requirements. The high-density PM steel was manufactured by mixing using special Cr-Mo atomized iron powders, high-pressure compaction, and sintering. Tensile strength, charpy impact, bending fatigue, and contact fatigue tests for the PM steel were carried out and compared to conventional forged steel. Pinion gears for auto-transmission were also manufactured by helical pressing, sintering, and surface densification process. In order to evaluate the durability of the PM parts, auto-transmission durability tests were performed using dynamometer tests. Results showed that the PM steel fulfilled the requirements for pinion gears indicating suitable tensile, bending fatigue, contact fatigue strengths and improved gear tooth profile. The PM gears also showed good performance during the transmission durability tests. As a result, the PM gears showed significant potential to replace the conventional forged steel gears manufactured by tooth machining (hobbing, shaving, and grinding) processes.

Keywords: Powder metallurgy, Sintering, Surface densification, Pinion gear

1. 서 론

철계 소결재(PM Steel)는 철계 분말의 혼합-성형-소결-후가공의 간단한 공정을 통해 제작된다. 소결 공법은 복잡한 형상의 부품 성형, 합금설계의 용이성, 적절한 강도 및 내마모성 등의 장점을 가지고 있고, 이 중에서 가공 삭제 및 최소화 효과는 소결재 적용의 가장 중요한 장점으로 부각되어 자동차 파워트레인 분야에 다양하게 활용되어 왔다. 각종 스프로킷류(sprockets), 수동변속기용 싱크로나이저 허브(synchronizer-hub), 밸브 시트(valve seat), 밸브 가이드(valve guide), 유성캐리어(planetary carrier)등이 대표적인 적용 예이다[1]. 최근 분말야금업계에서는 소결재의 강도 향상을 위해 온간 성형(warm compaction), DPDS(double pressing and double sintering), Ni, Mo등 고가의 합금원소

첨가, 소결 단조(sinter-forging), 표면치밀화(surface densification) 등의 다양한 공법들이 소개되어 소결재의 고밀도 및 고강도화를 실현하고 있다[2-4]. 이 중 표면치밀화 공법은 기어류의 치형 완성도와 함께 진밀도 표면을 구현하고 이를 통해 제조비용을 절감하는 효과가 있어, 엔진 및 변속기 기어류 적용을 목표로 다양하게 개발되고 있다[5]. 표면치밀화 공법은 전조기(rolling machine)를 이용하여, 최종 완성치형의 반대 형상을 가진 전조 다이(rolling die)를 소재의 양쪽에 위치 시키고 회전 및 가압을 실시하여, 최종치형을 완성함과 동시에 소결재 내부에 존재하는 기공을 소멸시키는 공법이다.

본 연구에서는 고밀도 소결 소재 및 표면치밀화 공법을 개발하여 파워트레인 구동용 고밀도 기어를 개발하였다. 고압 성형, 고온 소결을 적용하여 7.5 g/cm³ 이상의 고밀

*Corresponding Author : Ki Jung Kim, TEL: +82-31-368-0451, FAX: +82-31-368-7352, E-mail: fdc78@hyundai.com

도를 확보하였고, 표면치밀화공법을 통해 표면밀도 7.8 g/cm^3 수준을 달성하였다. 이러한 과정으로 제작된 소결재의 열처리 전 후의 인장강도 및 피로강도를 평가하여 기존 양산재인 Cr계 단조 합금강(SCr420H1)과 비교하였으며, 이를 바탕으로 자동변속기용 피니언 기어 시제품을 제작하여 치형의 완성도 및 내구성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. 소재 평가

본 개발에 적용할 소재의 물성을 확인하기 위해 평가한 2종의 소결 소재의 조성을 표 1에 나타내었다. FL5202는 Cr-Mo-Fe계 고성형성 수분사분인 Hipaloy™에 흑연 0.25%를 혼합한 분말이다. 본 분말은 일반 성형으로도 7.5 g/cm^3 이상의 높은 밀도를 구현하는 특성을 가지고 있다[5]. 본 원료의 고밀도 성형기구는 그림 1에 나타내었다. 일반적인 분말야금 공법에서는 분말의 충전도 향상 및 마찰저감을 통해 성형성을 향상시키고자 왁스류의 윤활제를 첨가하게 되는데, 일정 성형압 이상에서는 이 윤활제들이 외부로 방출되지 못해 성형밀도의 한계를 발생시키는 원인이 된다. 소결용 분말소재인 FL5202에 이용된 Hipaloy™는 $250 \mu\text{m}$ 수준의 균일한 조대분을 사용하여 윤활제의 외부 방출을 용이하게 하고, 성형 시 액상변태 윤활제가 외부로 방출되어 높은 성형밀도를 가능케 한다. 비교재로 제작된 FLN2-4402M은 일반적으로 싱크로나이저 허브, 스포크렛류와 같은 고강도 소결부품에 많이 사용되는 Mo-Ni-Fe계 확산접합분과 흑연 0.20 wt.%를 사용하였다.

Table 1. Chemical composition and raw powders of PM steels

Material	Chemical Composition (wt.%)					Raw powder
	C	Cr	Mo	Ni	Fe	
FL5202	0.25	1.5	0.2	-	Bal.	Hipaloy™
FLN2-4402M	0.20	-	1.5	2.0	Bal.	Distaloy DC™

Fig. 1. Behaviors of (a) conventional powders and (b) Hipaloy™ during pressing process.

고밀도화를 위해 FL5202는 성형압 11 ton/cm^2 가압하여 제작하였고, FLN2-4402M은 온간성형(warm compaction)을 통해 제작하였다. 소결은 N_2 가스 환원분위기, 1300°C 에서 20분간 실시하였다. 본 조건으로 인장 및 충격 시험편을 제작하고, 열처리 특성 평가를 위해 가스 침탄 열처리를 실시하였다. 제작된 시험편을 통해 열처리 전후로 인장시험, 충격시험, 경도 및 미세조직에 대한 소재 검증을 실시하였다. 시험은 국제 표준규격에 준하여 실시하였다. 또한 소결재와 비교 평가를 위해 기존 양산재인 Cr계 합금 SCr420H1도 동일형상으로 제작하여 평가하였다.

2.2. 표면치밀화 특성 평가

상기 소재의 기계적 성질을 바탕으로 표면치밀화에 적합한 소재를 FL5202로 선정하여 굽힘피로강도, 접촉피로강도를 평가하였다. 시험편은 각각 성형-소결-표면치밀화-열처리의 순으로 제작되었다. 굽힘피로강도는 로터리 벤딩(rotary bending) 시험편을 제조하여 평가하였고, 접촉피로시험 강도는 TCRF(thrust contact rolling fatigue) 평가로 실시하였다. 접촉 피로시험에 경우, 표면치밀화의 효과를 확인하기 위해, 압연을 통해 제작된 시험편을 별도로 추가 제작하여 평가하였다.

2.3. 기어 제작 및 내구 평가

본 개발에서는 기어부품으로서의 작동성 및 내구성을 평가하기 위해 자동변속기용 피니언 기어 2종을 제조하였다(그림 2). 피니언 기어는 유성캐리어에 장착되어 선기어 및 링기어와의 섭동을 통해 변속을 발생시키는 유성기어 세트의 한 부품으로 높은 강도와 치형의 정밀도가 요구된다. 변속기 구동 중에 피니언 기어의 인가되는 최대 굽힘 응력, 최대 접촉응력 해석치를 표 2에 나타내었다.

기어 시제품은 헬리컬 성형-소결-표면치밀화-가스 침탄 소입 및 소려-내경 및 좌면 가공 순으로 제조하였다. 본 제작의 핵심 공정인 헬리컬 성형, 표면치밀화 공법을 그림 3에 나타내었다. 헬리컬 성형은 성형 시 상부 펀치(upper punch)를 회전시키면서 가압하여 1차 치형을 완성하였고,

Fig. 2. Pinion gears of 6-Speed auto-transmission.

(a)

(b)

Fig. 3. (a) Helical pressing and, (b) Selective surface densification processes for pinion gears.

표면치밀화 시에는 최종 치형의 완성 및 표면 밀도 상승을 위해 양측에 전조 다이를 위치시켜, 회전 및 가압을 실시하였다.

시제품의 성형성을 평가하기 위해 헬리컬 성형 시 성형압과 성형밀도, 소결 밀도와 상관관계를 도출하였고, 최적 치밀화량과 이에 따른 치밀화 깊이를 선정하기 위해 치밀화량에 따른 표면의 기공 분포 및 치밀화 깊이를 이미지 분석을 통해 평가하였다. 제조된 시제품에 대해 치형 및 조도측정, 기공 분포, 미세조직, 표면 경도 및 유효 경화깊이를 측정하였다. 시제품에 대한 내구성은 당사 변속기를 대상으로 한 내구평가를 통해 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소재의 기계적 성질

표 3에 소결재인 FL5202, FLN2-4402M과 비교재인 단조재(SCr420H1)의 물성평가 결과를 나타내었다. FL5202와 FLN2-4402M는 모두 열처리 후 단조재인 SCr420H1과 유사한 1,000 MPa 이상의 높은 항복강도를 나타내었다. 밀도측면에서는 FL5202가 7.63 g/cm^3 으로서, 이론밀도 대비 96%, FLN2-4402M 가 7.47 g/cm^3 으로 이론밀도 대비 94%의 높은 밀도 수준을 달성하였다.

그림 4에 각 소재별 열처리 전과 후의 미세조직을 나타

Fig. 4. Microstructures of FL5202 (a, c) and FLN2-4405M (c, d).

Table 2. Summary of stresses for the pinion gears

Part	Bending Stress (MPa)	Contact Stress (MPa)
Pinion Gear#1	260	1450
Pinion Gear#2	270	1450

내었다. 열처리 전 조직의 FL5202는 페라이트(ferrite) 및 펄라이트 (pearlite) 조직(a), FLN2-4405M은 상부 베이나이트(upper bainite) 조직(b)을 나타내었다. 열처리 시에는 두 재질 모두 양호한 마르텐사이트(martensite) 조직((c), (d))을 나타내었다. 소재상태에서의 미세조직 차이는 원료 분말의 형태와 합금성분에 기인한다. FL5202는 Cr 과 Mo 가 용융 합금화된 저합금계 수분사분을 원료로 사용하고 FLN2-4405M은 Ni 및 Mo를 첨가한 확산접합분을 사용한 고합금계 분말로서, 소결 후 공냉에서도 상부 베이나이트 조직을 나타낸다. 두 소재는 열처리 후 강도가 유사하지만, 소재상태의 가공성 및 표면치밀화 용이성을 고려하여 FL5202를 개발 재질로 선정하였다.

3.2. 피로강도 평가

기어에서 요구되는 피로 물성치를 확인하기 위해 굽힘 피로강도 및 접촉피로강도를 평가하였다(그림 5). 소결재의 굽힘강도는 표면치밀화가 되지 않은 상태에서 시험한 결과이다. 단조재인 SCr420H1은 650 MPa를 나타내었고, 소결재인 FL5202는 380 MPa로 단조재 대비 약 58%의 강도수준을 나타내었다. 이러한 강도 수준은 소재의 밀도에 기인한다. 소결재 표면 및 내부의 기공은 결함으로 작용하므로, 밀도가 저하될수록 피로강도가 낮아지는 경향을 나타낸다. 그러나, 본 개발에서 목표로 하는 자동변속기의 피니언 기어의 최대 응력 해석치(표 2) 기준으로 45% 이상의 높은 강도를 나타내기 때문에 강도 요건을 만족하는 수준으로 판단된다(표 2). 또한 실제 기어 시제품 제작 시에는 표면치밀화 공법을 통해 밀도를 7.8 g/cm³ 수준으로 증가시켜 표면의 기공이 소멸되기 때문에 추가적인 강도 상승이 예상된다.

Table 3. Mechanical properties of PM and forged steels

Material	FL5202		FLN2-4402M		SCR420H1
	Sintering	Heat Treatment	Sintering	Heat Treatment	Heat Treatment
Density (g/cm ³)	7.63	-	7.47	-	-
Y.S. (MPa)	227	1089	492	1014	1011
UTS (MPa)	439	1111	664	1175	1261
Elongation (%)	13.2	0.9	6.1	1.1	1.2
Impact E (J/cm ²)		15 (Un-Notch)		15 (Un-Notch)	13.5 (10R notch)
Hardness (HV30)	135	-	208	-	-

Fig. 5. Bending fatigue strengths of FL5202 and SCR420H1. **Fig.6. Contact fatigue strengths of FL5202 and SCR420H1 (Thrust Contact Rolling Fatigue Test).**

그림 6에 TCRF 접촉피로 평가 결과를 나타내었다. 치밀화를 하기 전에는 약 3,200 MPa 수준의 접촉 피로강도를 나타내었고, 치밀화 후에는 약 4,100 MPa 수준의 피로강도를 나타내어 약 29%의 강도 상승효과가 발생하였다. 기존 양산재인 SCr420H1은 약 5,000 MPa 이상의 높은 면압에서도 우수한 내구성을 나타내었다.

표면치밀화 후에도 SCr420H1 대비 낮은 접촉강도는 나타내는 것은 결정립도 차이에 기인한다. 그림 7에 FL5202와 SCr420H1의 오스테나이트 결정립 조직을 나타내었다. SCr420H1은 결정립 크기는 약 10 μm 수준으로서 단조 후 노멀라이징 공정을 통해 미세한 결정립을 갖는 반면,

Fig. 7. Austenitic grain sizes of (a) forged steel and, (b) FL5202.

FL5202는 20~30 μm 의 결정립 크기를 나타내었다. 이는 소결 시 발생하는 결정립 성장에 의해 단조재 대비 조대한 결정립을 갖는 것으로 사료된다. 이러한 결정립도의 차이가 접촉강도에서의 열세의 원인으로 판단되며, 결정립 크기 제어는 향후 본 기술의 개선 과제로 판단된다. 그러나 본 개발에서 목표로 하는 피니언 기어의 접촉 응력인 1,450 MPa 이상의 우수한 강도를 확보하였음을 알 수 있다.

3.3. 피니언 기어 성형성 평가

1차적인 치형을 부여하는 공정인 헬리컬 성형에 대해 최적 성형압 및 밀도를 선정하였다. 그림 8에 헬리컬 성형 시 성형압에 따른 성형 밀도 및 소결 후 밀도를 도식하였다. 성형압 증가에 따라 선형적으로 성형 밀도가 증가함을 알 수 있고, 소결 시 성형 밀도 대비 약 0.1 g/cm^3 의 밀도 상승 효과를 확인할 수 있다. 또한 약 10.7 ton/cm^2 이상에서 성형밀도 7.37 g/cm^3 , 소결밀도 7.50 g/cm^3 수준의 높은 밀도를 확보하였다. 본 개발에서는 금형 수명과 요구 밀도를 고려 약 11 ton/cm^2 의 성형압을 선정하여 시제품을 제작하였다.

Fig. 8. Densities after pressing and sintering processes as a function of increasing pressure.

3.4. 표면치밀화 및 내구 평가

표면치밀화 공정은 치형의 완성도와 함께 표면을 치밀화 시키는데 그 목적이 있다. 치밀화의 경우 치면 및 치저부 공히 최대 응력이 집중되는 수십 μm 이상까지 치밀화가 이루어져야 하므로, 본 개발에서는 최저 치밀화 깊이를 200 μm 수준으로 설정하였다. 그림 9에 치밀화량에 따른 표면 치밀화 깊이를 도식하였다. 치밀화 깊이는 치면 P.C.D(pitch circle diameter) 부를 기준으로 측정하였다. 결과에서, 치밀화량 0.15 mm에서도 200 μm 이상의 치밀화 효과를 나타내었다. 기어의 구동환경에서 최대 접촉 응력은 최표면 및 표면 수십 μm 에서 발생함을 고려할 때, 낮은 치밀화량으로도 높은 치밀화 효과를 확인할 수 있었다. 그러나, 0.55 mm 이상의 치밀화량에서는 과도한 살밀림에 의해 그림 10과 같은 표면 살점침 결함이 발견되었다. 이를 근거로 해서 최적 치밀화량은 0.3~0.5 mm 수준으로 설정하였다. 본 조건을 통해 제조된 기어의 기공분포를 그림 11에 나타내었다. 치면 및 치저부 표면에 약 200 μm 수준

Fig. 9. Effect of rolling amount on surface densification depth.

Fig. 10. Surface defects by severe rolling.

Fig. 11. Density profiles of PM pinion gear.

의 치밀화층이 형성된 것이 확인되었으며, 내구성에 악영향을 미치는 살결침 결함은 발생하지 않았다.

그림 12에 성형 및 소결, 표면치밀화, 열처리 후 치형을 도시하였다. 열처리 후에도 프로파일 및 리이드의 큰 변화는 발생하지 않았다. 이러한 치형 개발을 통해 설계 요구 수준인 JIS 3급의 기어등급을 확보하였다. 또한 치표면 조도는 표면치밀화 후에 $Ra\ 0.12\ \mu m$ 수준으로서, 기존 셰이빙(shaving) 가공재 대비($Ra: 0.69\ \mu m$) 우수한 표면조도를 확보하였다(그림 13).

열처리 후의 표면 경도 및 유효경화 깊이를 그림 14에 나타내었다. FL5202는 표면경도 HV 760, 유효경화 깊이는 0.5 mm 수준으로, 설계 요구 수준인 표면경도 HV 650 이상, 유효 경화깊이 HV 550 0.4~0.7 mm를 만족하는 양호한 경도 분포를 나타내었다. 이렇게 제조된 피니언 기어 시제품은 당사 변속기 내구 평가 3회를 통과하여, 내구성이 검증되었다.

Fig. 12. Gear profile (left) and lead (right) on each process.

Fig. 13. Surface roughness of (a) gear machining of forged steel and (b) PM rolling.

Fig. 14. Case hardness profiles of PM (FL5202) and forged (SCR420H1) steels.

4. 결 론

표면치밀화 공법에 의해 제조된 소결기어의 기계적 성질과 특징은 다음과 같다.

1) 고밀도 소재인 FL5202와 표면치밀화 기술을 적용하여 차량의 구동용 기어 부품을 소결화할 수 있는 신기술을 개발하였다.

2) 고성형성 분말을 이용하여, 일반적인 분말야금공법에서 달성할 수 없었던 7.5 g/cm^3 수준의 높은 소재밀도를 달성하였고, 이를 통해 인장강도 1000 MPa 급의 고강도 재질을 개발하였다.

3) 표면치밀화 기술을 통해 표면은 진밀도에 가까운 7.8 g/cm^3 을 달성하였고, 굽힘 피로강도 및 접촉 피로강도 평가 결과, 기어에서 요구되는 강도 수준 이상의 물성을 달성하였다.

참고문헌

- [1] Leander F. Pease, William G. West: Fundamental of Powder Metallurgy, MPIF, New Jersey (2002).
- [2] U. Engström: New high performance PM applications by warm compaction of Densimix powders, EURO PM2000, Munich (2000).
- [3] E. Ilia, M. O'neill, K. Tutton, G. Lanni, S. Letourneau and M. Haehnel: Benchmarking Industry - Powder forging makes a better connecting rod, SAE Technical Paper 2005-01-0713.
- [4] S. Bengtsson, L., Forden, S., Dizdar and P. Johansson: Surface Densified PM Transmissions Gears, 2001 International Conference on Power Transmission Components: Advances in High Performance Powder Metallurgy Applications, Ypsilanti MI, Oct 16-17, 1-25 (2001).
- [5] T. Takemasu, T. Koide, Y. Takeda, S. Dizdar and T. Shinbutsu: Analysis and Durability Test of Surface Rolled 1P1S 1.5Cr-0.2Mo Very High Density Gear, World PM Congress, Florence, (2010).