

복합재료 디젤피스톤 개발

김성철, 김준수, 임태원

현대자동차 선형연구소 금속재료연구팀

서 론

세라믹 섬유강화 복합재료는 향상된 기계적 물성과 생산성, 선택적 부위보강 등의 장점으로 자동차 및 항공기용 구조재료로서 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 특히, 자동차 부품으로서의 고성능, 저연비 엔진의 개발이 꾸준히 요구됨에 따라 복합재료 피스톤의 적용이 지속적으로 검토되고 있다. 그래서, 많은 피스톤 제작업체에서 디젤엔진용 피스톤의 top 링홈 또는 연소실 원주 모서리부에 복합재료를 양산적용하는 사례가 점차 증가하고 있다. 비록 복합재료 피스톤의 성능이 기존 피스톤 대비 우수하긴 하지만 고가의 세라믹 섬유로 인한 원가상승이 복합재료 피스톤 적용을 제한하는 요인이었다. 이러한 이유로 저가격 및 고성능의 복합재료가 요구되게 되었고 기존 세라믹 섬유를 대신하는 새로운 섬유를 사용하는 복합재료를 연구하게 되었다. 이 연구에서 사용된 섬유는 HTZ(High Temperature Zirconia) 섬유로 화학성분은 46~54% SiO₂, 26~34% Al₂O₃, 16~24% ZrO₂이다. HTZ 섬유는 쥘금강에서 생산되며 기존의 Saffil 또는 Kaowool 섬유보다 가격측면의 장점이 있다. 이번 연구에서는 HTZ 복합재료의 다양한 제작조건에 따른 기계적 물성 및 내마모성의 변화를 관찰하였다. 우선, 가장 적절한 HTZ 복합재료 피스톤 제작조건을 설정하였고, 피스톤 시제품을 제작하여 엔진내구시험을 시행함으로써 내구성을 확인하였다.

시험 순서

1. 복합재료 시편준비

일반적인 프리폼 제조방법[1]에 따라 7, 11, 15 vol%의 HTZ 섬유프리폼을 제작하였다. 블로잉법으로 제조되는 다른 세라믹 섬유들처럼, HTZ 섬유의 초기 결정조각은 비정질을 나타낸다. 그러나, 이 섬유가 고온에서 장시간 유지되면 비정질이 점차 결정화된다. 섬유의 결정화가 복합재료의 물성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 11 vol% 프리폼을 1000, 1100, 1200, 1300℃에서 소결하여 시편을 제작하였다. 모재로는 피스톤 소재로 일반적으로 쓰이는 A336을 사용하였다. 소결된 프리폼을 금형에 위치시킨후 336 용탕을 가압용침시켜 복합재료를 제작하였다.

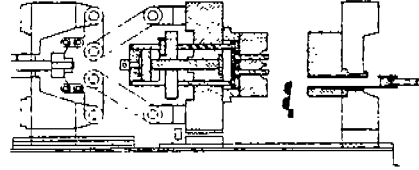


그림 1: 국산 용탕단조기의 단면도

그림 1은 복합재료 시편 및 피스톤 제작에 사용된 국산 용탕 단조기의 단면이다. 용탕단조기의 용량은 250톤이며, 제작된 시편은 대부분 T6 열처리 되었다. 국산용탕단조기는 일반 다이캐스팅 장비에서 게이트, 런너, 컨트롤러를 대폭적으로 개조하여 용탕 가압 효과가 발생할 수 있도록 만든 장치로 기존 외국산 용탕단조기 대비 가격 측면에서 크게 유리하다.

2. 시험방법

제작된 HTZ 복합재료 시편으로 인장 및 충격강도와 내마모성 시험을 시행하였으며, 열전도도도 함께 측정하였다. 인장시험은 상온에서 Shimadzu AG-25TA 장비로 인장시험속도 1mm/min 조건에서 시험하였고 충격물성은 샤피충격시험기를 사용하였다. 11% HTZ 복합재료의 열전도도를 HVS-40-300SDS(Tokyo meter Co.)로 측정하였고 다른 재료와 비교하였다. 마모시험은 pin-on-disc type FALEX 다용도 마모시험기로 시험하였다. 디젤피스톤의 top 링홈 보강재 선택시 내마모성이 가장 중요한 요소이기에 여러가지 다른 재료들과 HTZ 복합재료의 마모물성을 2가지 마모시험 조건에서 비교시험하였다. 상세한 마모시험 조건은 아래 표와 같다.

표 1: 상세 마모시험 조건

항 목	시험조건 (A)	시험조건 (B)	비 고
상대재	철탄 S45C	Gas 질화 SUS440	디스크
마모거리	30 km		
마모압력	100 kg/cm ²	150 kg/cm ²	

속도	2 m/s	2.5 m/s	
운할	엔진오일 dipping		

3. 복합재료 피스톤 시제품 제작 및 엔진시험

소재시험결과로부터, 11vol%, 1100℃ 이상 소결온도 조건에서 제작된 프리폼으로 250톤 국산 용탕단조기를 이용하여 피스톤 시제품을 제작하였다. 1차적으로 전부하 열충격 시험조건에서 50시간 엔진내구시험을 하여 엔진성능 및 피스톤 상태를 검사하였다. 1차 시험후 전부하 내구시험 500시간을 2차로 수행하였다. 엔진출력 및 토크를 시험기간 동안 측정하였고, 시험 완료후 피스톤 외관을 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 복합재료의 기계적 물성에 미치는 세라믹 섬유
부피분율의 영향
시험결과는 아래 표 2와 같다.

표 2: 섬유 부피분율별 기계적 물성시험 결과

물 성	HTZ 7 vol%	HTZ 11 vol%	HTZ 15 vol%	336
인장강도 (MPa)	280 ± 20	280 ± 20	290 ± 10	270 ± 20
충격강도 (J/cm ²)	0.52	0.51	0.48	0.55
경도 (HB)	129	128	128	120
마모부피 (mm ³)*	0.029	0.018	0.018	1.136

* 마모시험은 시험조건(A)에서 수행되었음.

표 2에서 보는 바와 같이, 복합재료의 인장강도는 세라믹 섬유의 첨가에 따라 약간 향상되는 것을 알 수 있다. 복합재료의 충격강도는 섬유분율의 증가에 따라 감소하는 경향이 관찰된다. 전반적으로 10vol% 전후의 세라믹 섬유 보강으로는 기계적 물성의 변화가 크지 않음을 볼 수 있다.

2. 복합재료의 기계적 물성에 미치는 프리폼 소결온도의 영향

프리폼 소결온도별로 제작한 복합재료를 표 2에서와 같은 시험조건으로 물성시험을 수행하여 시험결과를 표 3에 요약하였다.

표 3: 프리폼 소결온도별 복합재료의 기계적 물성

물성	1000 ℃	1100 ℃	1200 ℃	1300 ℃	Ni-resist
충격강도 (J/cm ²)	0.51	0.51	0.53	0.58	-
경도 (HB)	129	128	128	128	150
마모부피 (mm ³)*	0.024	0.018	0.019	0.0059	0.045

표 3을 보면, 소결온도별 물성차이가 크지 않음을 알 수 있다. 모든 조건에서 복합재료의 인장강도는 280MPa 전후한 값으로 측정되었다. 그러나, HTZ 프리폼을 1100도 이상 온도에서 소결한 경우, 내마모성의 현저한 증가가 관찰된다. 1100도 이상 프리폼 소결온도 조건에서 HTZ 복합재료의 마모부피는 같은 시험 조건에서 0.045~0.055 mm³ 정도의 마모부피를 나타낸 Saffil 복합재료나 Ni-resist 주철보다 적은 것으로 측정되어 양호한 내마모성을 나타낸다. 11% HTZ 복합재료의 열전도도도 측정하였으며 그림 2에 나타내었다.

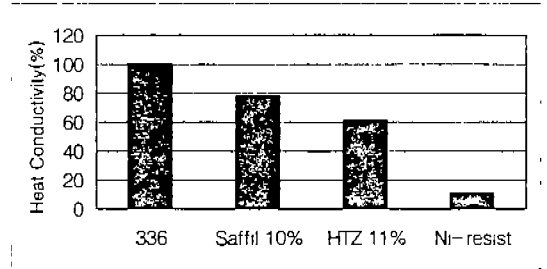


그림 2: 여러가지 재료의 열전도도 비교

그림 2에 336 합금과 비교한 상대 열전도도값을 나타내었다. HTZ 복합재료의 열전도도는 336 합금의 약 60% 정도이며 Saffil 복합재료보다 약간 더 낮은 것으로 측정되었으나 Ni-resist 주철보다는 훨씬 큰 값을 갖는다. 그러므로, 디젤엔진용 피스톤에서 Ni-resist 주철을 HTZ 복합재료로 대체할 경우 부품의 냉각효율 향상을 기대할 수 있다.

3. 마모시험 조건(B)에서 다양한 재료의 마모 물성 비교

그림 3 과 4에 시험결과를 나타내었다. 그림 3 과 4에서 사용한 기호의 정의를 표 4에 정리하였다.

표 4: 그림 3~4에 사용된 기호

기호	의미	비고
Ni-resist	Ni-resist 주철	디젤피스톤의 일반적인 top 링홈 보강재
HTZ	섬유의 화학조성 = 알루미늄+실리카+지르코니아	11 vol% 복합재료 (F) : as cast (T6) : T6 열처리
AS	화학조성 = 알루미늄+실리카 (= Kaowool 섬유)	
336	복합재료의 모재로 사용된 Al 합금	피스톤 재질(AC8A)
Alborex	알보렉스 휘스커 보강 복합재료	24 vol%, 모재 336
F3D.20S	SiCp 20% 보강 복합재료	Duralcan 에서 생산하는 상용복합재료

링홈을 복합재료로 국부 보강한 복합재료 디젤엔진 피스톤 시제품을 제작하였다. 그림 5와 6에 피스톤용 HTZ 섬유 프리폼과 top 링홈 부근 HTZ 복합재료의 광학현미경 미세조직을 나타내었다.

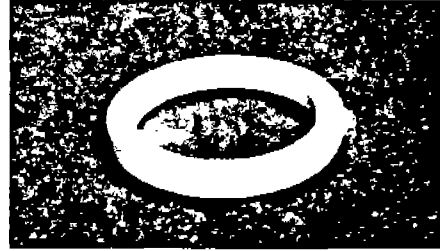


그림 5: 피스톤용 프리폼

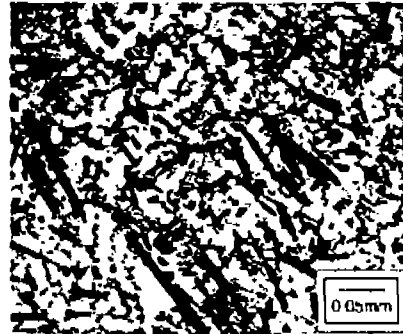


그림 6: HTZ 복합재료의 미세조직

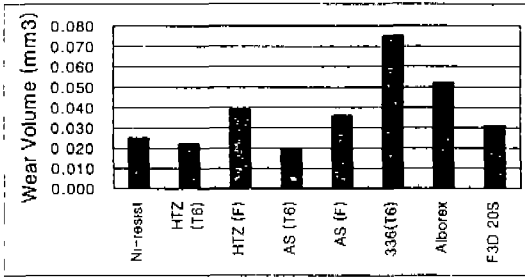


그림 3: 다양한 재질의 마모시험 결과

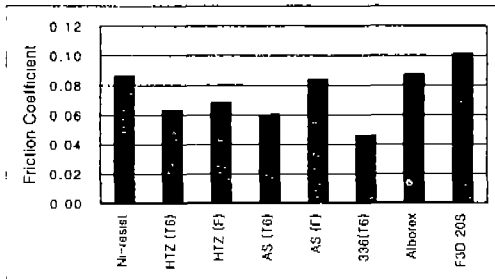


그림 4: 다양한 재질의 마찰계수

그림 3~4를 보면, T6 열처리된 HTZ 복합재료가 Ni-resist 주철이나 다른 종류의 복합재료보다 적은 마모부피 및 마찰계수를 나타내어 양호한 내마모성을 가짐을 알 수 있다.

4. 피스톤 시제품의 제작 및 엔진시험

예비엔진시험(전부하조건, 50 시간)

그림 7에 용탕단조된 복합재료 피스톤 시제품의 외관을 나타내었다. 복합재료 피스톤의 마모상태는 기존중력주조 피스톤 대비 양호하였다. 엔진시험 중에는 특히 고RPM에서 blow-by gas의 감소가 관찰되었다.

전부하 엔진 내구시험(500 시간)

그림 8을 보면, 출력, 토크 및 엔진내구시험후 top 링홈폭이 기존 피스톤과 복합재료 피스톤 적용 엔진이 동등함을 알 수 있다. Top 링홈의 마모량은 복합재료 피스톤과 기존 피스톤이 동등 수준으로 측정되었고, 링홈 저면의 탄소침적량은 약간 감소한 것으로 나타났다.

참고 문헌

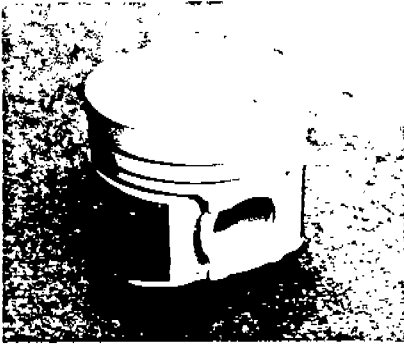


그림 7: HTZ 복합재료 피스톤

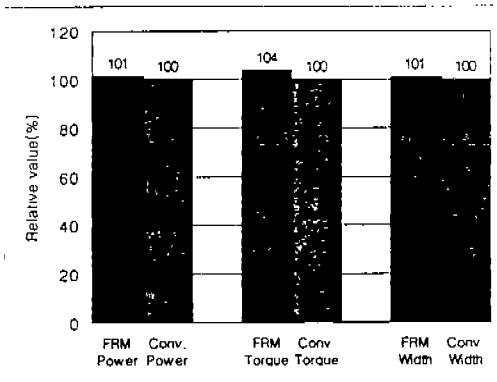


그림 8: 전부하 엔진시험 결과

결 론

- HTZ 복합재료는 섬유부피분율(7~15 vol%)이나 프리폼 소결온도(1000~1300℃)에 따른 인장강도값의 변화가 적고, 모재(336)와 동등수준의 강도를 나타내는 것으로 측정되었다. 그러나 프리폼 소결온도 1100℃ 이상의 복합재료에서는 현저한 내마모성 증가가 관찰되었다.
- HTZ 복합재료는 Ni-resist 주철, Saffil 섬유 또는 Kaowool 섬유 복합재료, 입자강화 복합재료 대비 동등이상 수준의 내마모성을 가지고 있는 것으로 측정되었다.
- 50 시간 및 500 시간 전부하 엔진시험을 통하여 HTZ 복합재료의 디젤엔진용 피스톤 적용가능성을 검증하였다.

- Taewon Lim, "Fabrication and Mechanical Behaviour of Aluminum Matrix Composite Materials", *Ph.D. dissertation, New York state University*, Nov., 1990
- A.R. Baker, "Developments in materials for Pistons", *Materials and design*, Vol. 9, No. 1, 1988
- Tommy J. Bedwell, "MMC Pistons a solution for 1990's High Output Diesels", *SAE 890595*, 1989
- Tadashi Donomoto, "Ceramic Fiber Reinforced Piston for High Performance Diesel Engines", *SAE 860162*, 1986
- Rifat Keribar, "An Investigation of Structural Effects of Fiber Matrix Reinforcement in Aluminum Diesel Pistons", *SAE 900536*, 1990
- Alexandre Afonso, "Development of Fiber Reinforced Aluminum Alloy for Diesel Piston Applications", *SAE 910632*, 1991
- F. K. Chi, "Elevated Temperature Mechanical Properties of Squeeze Cast Metal Matrix Composites for Diesel Pistons", *SAE 930183*, 1993
- "FRM Piston", *Journal of Japan Society of Mechanical engineers*, Vol. 90, No. 824, 1987, p909
- H.W. Nam, "Mechanical Properties and Fatigue Behavior of HTZ/AC8A Metal Matrix Composites", *Journal of Korean Society of Metal Matrix Composite*, Vol.11, No. 5, 1998