

위해서는 고온 크립강도를 보완하지 않으면 안된다. 고온 크립강도를 증가시키기 위해 현재 RE, Zr, Ag 등을 합금화하는 연구가 진행되고 있으나 고온강도 증가의 방법 중에서는 세라믹 강화재와 복합화하는 기술이 효과적이다.

Mg합금에 세라믹 강화재를 복합화하는 방법에는 squeeze casting법, stir casting법 등의 공법이 있다. Squeeze casting법은 die casting 장비를 유기적으로 활용할 수 있어 가장 많이 사용되고 있는 공법이다.

또한 stir casting법은 squeeze casting법보다 경제적으로 더욱 유리한 장점을 가지고 있는 반면 porosity, gas pore 등의 구조결함이 다량 생길 가능성이 있는 단점이 있다.

최근에는 기존의 squeeze casting 공정에서 야기되는 예비성형체내의 가스의 혼입과 Mg용탕의 산화, 높은 압력에 의한 예비성형체의 변형등의 문제를 해결하기 위해 용탕침투시에는 저압, 응고단계에서는 고압의 두 단계로 가압하여 기지와 강화재간의 접합강도를 증가시키는 two step squeeze casting 도 적용되고 있다[2].

독일 Technische Univ. 에서 squeeze casting법으로 제조한 Mg금속기 복합재료에 사용된 강화재의 특성을 Table 1에 나타내었다. Table 2에서는 Al₂O₃ 단섬유, 미분화된 탄소섬유, SiC 분말, Si 분말을 강화재로 사용하고 기지합금을 변화시켜 제조한 단일복합재료 및 하이브리드 복합재료를 나타내었다. 이들 복합재료의 특성을 Table 3에 나타내었다. 복합화를 하였을때 상온에서의 강도는 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 탄성계수가 뚜렷히 증가되었고 크립강도도 QE계, AS계의 경우 4배 이상 증가된 특성을 나타내었고 열

팽창계수는 합금계와 상관없이 낮아져 향상된 특성을 보였다.

이들 복합재료를 자동차 피스톤재료인 Al-12Si-Cu-Mg-Ni 공정합금과 크랭크재료인 Al-17Si-3Cu-Mg 과 공정합금과 비교하여 보면 우선 Mg금속기 복합재료의 밀도가 Al합금계보다 현저히 낮아졌고, 상온 인장강도

Table 1. Properties of reinforcements used Mg MMCs

	Alumina Fiber	Carbon Fiber	SiC Particles	Si Particles
Producer	ICI Ltd	Sigri	various	various
Density [g/cm ³]	3.3	1.76	3.2	2.34
E-Modulus [GPa]	300	239	400-420	113
Strength [MPa]	2000	3000	-	-
CTE[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4.7	-1	4-5	7.6
Diameter [mm]	2-3	7	variable	variable
Length [mm]	30-150	variable	-	-
Price [Eu/kg]	55	40	5-20	5-20
Physically harmful	+	-	-	-
Availability	-	+	++	++

Table 2. Material systems investigated

Alloy	Composition	Al ₂ O ₃	CF	Al ₂ O ₃ +Si C hybrid	CF+Si hybrid
CP Mg	Mg 99.5	O		O	
AM 20	Mg 2Al 0.4Mn				O
AZ 31	Mg 3Al 1Zn				O
AS 41	Mg 4Al 1Si		O		
AZ 91	Mg 9Al 1Zn	O	O	O	O
AZ 91 Ca	Mg 9Al 1Zn 1Ca		O		
ZE 41	Mg 4Zn 1RE	O			
QE 22	Mg 2Ag 2RE	O		O	

Table 3. Properties of selected Mg MMCs compared with non reinforced alloys

Material	YS [MPa]	UTS [MPa]		EL [%]	E [GPa]	CTE [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Creep rate [1/s]	
		RT	250				150°C/70MPa	200°C/60MPa
AZ91	180	238	110	2.7	45	27.0	8.5×10 ⁻⁹	6.3×10 ⁻⁷
AZ91+20%Al ₂ O ₃	230	290	157	2.0	69	20.5	7.0×10 ⁻⁹	9.8×10 ⁻⁹
AZ91+22.5%SiC hybrid							not determined	not determined
AZ91+20%CF	220	242	117	0.5	66	19.5	1.3×10 ⁻⁸	2.6×10 ⁻⁹
QE22 (T6)	185	262	210	5.2	48	26.0	4.6×10 ⁻⁹	4.6×10 ⁻⁹
QE22+20%Al ₂ O ₃	270	290		1.2	70	20.0	1.1×10 ⁻⁹	4.6×10 ⁻⁹
QE22+20%SiC hybrid (T6)	265	285		2.4	74	19.5	not determined	not determined
AS41					46	26	5.8×10 ⁻⁹	2.7×10 ⁻⁷
AS41+20%CF	155	186	100	0.5	78	19.5	1.2×10 ⁻⁹	2.2×10 ⁻⁸

Table 4. Comparison of Mg MMCs properties with those required for use as materials for piston and crankcases (NGD : low pressure chill casting)

Property	Unit	Al-12Si-Cu-Mg-Ni (T6)	Al-17Si-4Cu-Mg NDG	AZ91-1Ca+20% CF	AS41+20% CF	QE22+20%Al ₂ O ₃ (T6)
Density	kg/	2.7	2.73	1.9	1.8	2.1
YS (RT)	MPa	275-335	210-240	200-240	150-160	250-275
UTS (RT)	MPa	295-360	220-300	225-260	175-196	270-300
YS (200 °C)	MPa	190-220	160-180	152	110	215
UTS (200 °C)	MPa	240-250	200-250	160	120	245
EL	%	1-3	0.2-0.8	0.5	0.5	1.5
Bending Fatigue (RT)	MPa	120	100-110	90-125	90-100	100-130
Bending Fatigue (200 °C)	MPa	85	75-85	60	75	85-100
Creep rate 200 °C/60MPa	10 ⁻⁹ 1/s	0.6	not determined	180.0	20.0	1.25
E-Modulus	GPa	79.5	83-87	60-66	74	78
CTE (20-200 °C)	10 ⁻⁹ 1/K	20	18	19-20	19.3-19.7	20
Thermal Conductivity	W/mK	155	110-150	140	not determined	not determined

는 AZ계, AS계의 경우는 다소 낮아졌으나 QE계는 상당히 회복된 값을 나타내었다[Table 4]. 또한 고온 인장강도도 상온과 마찬가지로의 경향을 보였다. 열피로 강도는 고온용 합금인 QE계 복합재료가 우수한 값을 나타내었고 열팽창계수, 열전도도도 Al합금과 대동소이한 수준을 확보하고 있는 것으로 나타나 자동차 부품으로의 적용 가능성을 시사해 주고 있다[3].

영국의 Magnesium Elektron 사에서는 Duralcan사의 stir casting법과 유사한 Fig. 1과 같은 MELRAM process로 Mg금속복합재료를 제조하고 있다[4]. 용융금속과 세라믹 강화재를 균일하게 혼합한 후 종래의 주조법을 행하거나 ingot을 제조한 후 이를 다시 용해하여 주조하는 방법으로서 현재 batch size가 180 kg 정도이며, ingot 제조뿐만 아니라 압출을 통해 billet도

생산하고 있다. 이들 MELRAM 복합재료는 우수한 열팽창특성을 보이고 산화계재물, 가스계재물이 현저히 감소된 조직을 보였으며 Table 5와 같이 우수한 기계적 특성을 나타내고 있다. Fig. 2는 이러한 물성을 가진 MELRAM 복합재료로 각각 사형주조, 정밀 주조하여 제조한 판과 실린더, 커버, 모형항공기 엔진, 사이클 크랭크, 임펠러, 자동차용 실린더 라이너등을 제조한 그림이다. 그림에서 보여진 모형항공기 엔진은 통상 알루미늄으로 사형주조하면 무게가 130 g이지만 MELRAM 복합재료로 제조하였을 경우는 95 g으로 경량화가 가능하다. 이와 같이 Magnesium Elektron 사는 여러 가지 다양한 주조법에 의해 복합재료를 제조하여 자동차 부품에의 적용을 검토중에 있다.

탄소 장섬유 강화 Mg금속기 복합재료는 자동차재료에서 중량 감소뿐만 아니라 고온에서의 우수한 강도를 보이며 내열특성을 가지고 있어 각광받고 있는 재료이

Table 5. Actual and specific properties of MELRAM Mg based composites

Property	Mg ZC 63	MELRAM (ZC 63 matrix) 12%SiC
Density (gm/cm ³)	1.9	2.0
UTS (MPa)	210	165
0.2% PS (MPa)	125	142
Modulus (GPa)	45	68
Specific Strength	112	82
Specific 0.2% PS	67	71
Specific Stiffness	24	34

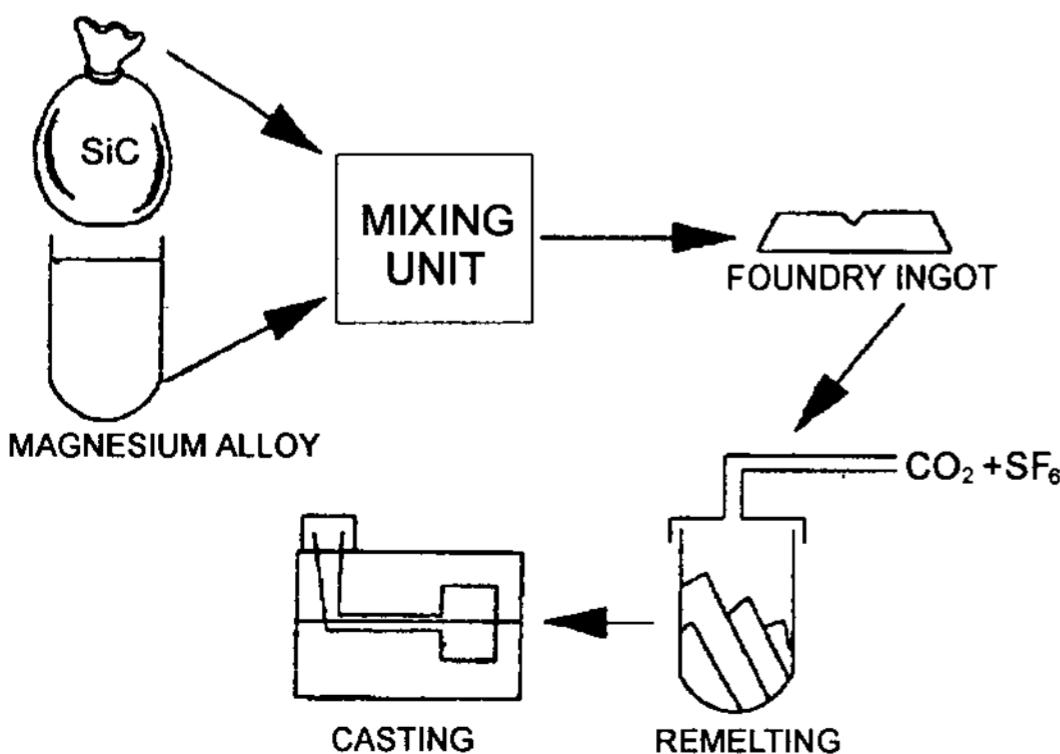


Fig. 1. Schematic representation of Mg MMCs production

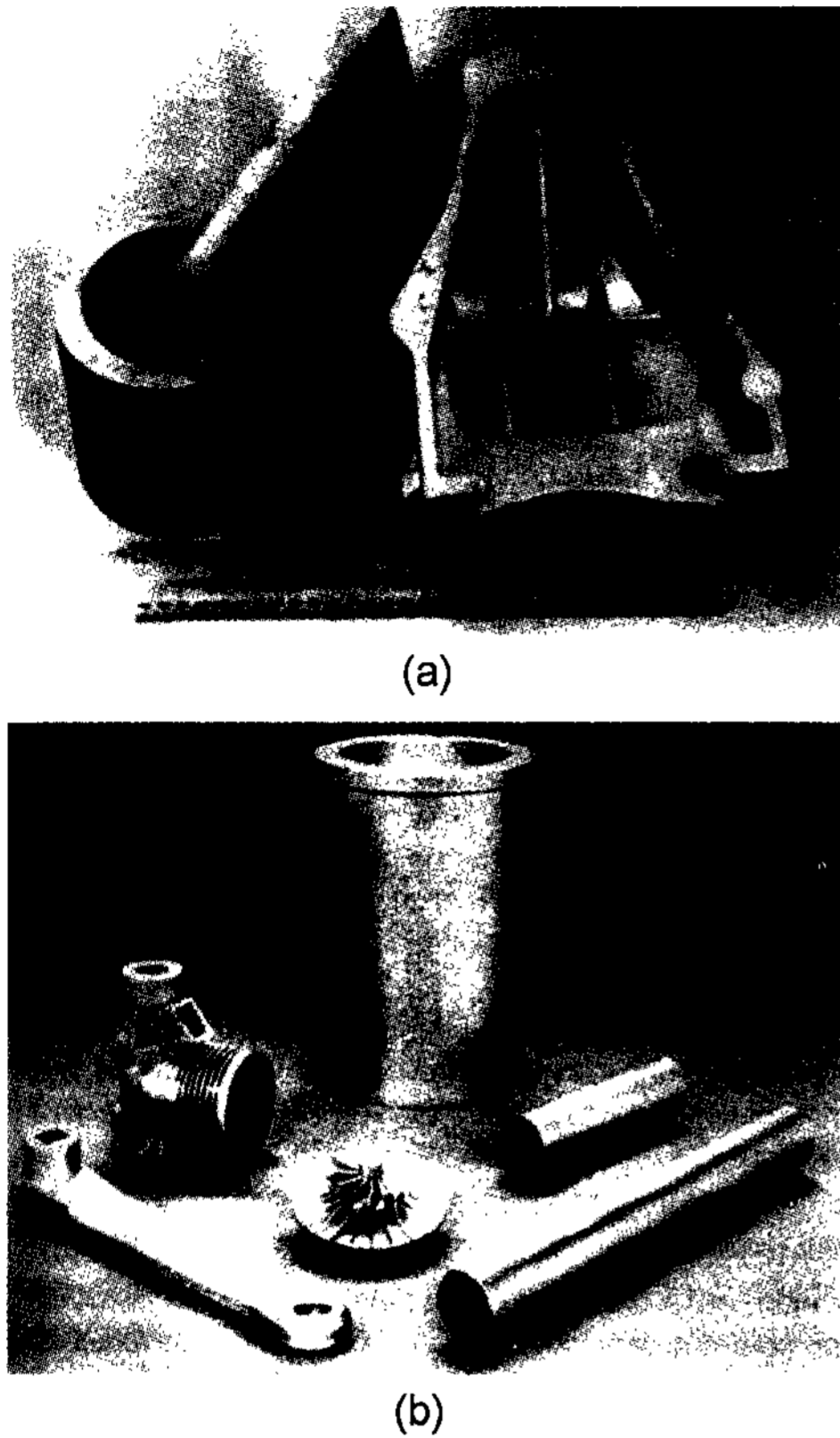


Fig. 2. Sand cast parts (a) and Investment cast parts (b)

다. 그러나 고가의 섬유를 전반적으로 사용하기에는 한계가 있다. 이러한 난제를 해결하기 위한 방안으로 국부적으로 강화한 복합재료가 개발되었다. 그러나 이러한 재료는 복합부와 비복합부의 상이한 특성에 의해 제조시 또는 사용중 계면에서 발생하는 높은 응력에 의해 계면근처에서 치명적인 파괴가 일어나는 문제가 발생된다. 이러한 응력을 감소시켜 응력집중을 방지하기 위해 Fig. 3와 같이 섬유의 부피분율이 경사화된 복합재료가 독일의 Erlangen-Nürnberg Martensstr Univ.에서 개발되었다[5]. 이러한 경사기능 복합재료는 필라멘트 와인딩에 의해 섬유의 부피를 조절하였고 squeeze casting 법에 의해 국부적으로 강화시켰다. Fig. 4에서와 같이 섬유분율이 경사화된 복합재료가 열사이클 동안의 복합재료의 손상을 현저히 감소시켜 주어 열사이클에 증가함에 따라 섬유분율이 경사화된 복합재료가 국부복합재료보다 크랙 밀도가 감소하여 Fig. 5에서 보여진 것처럼 계면 전단강도가 우수하며, 기지재료가 CP Mg일때보다 상대적으로 Al함유량이 많

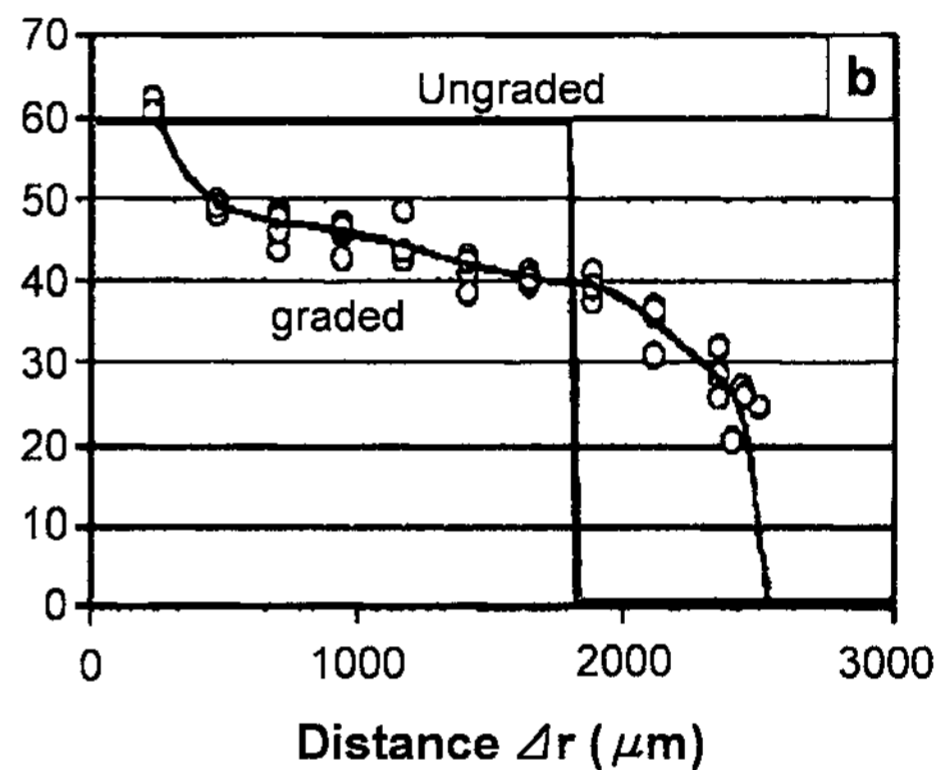
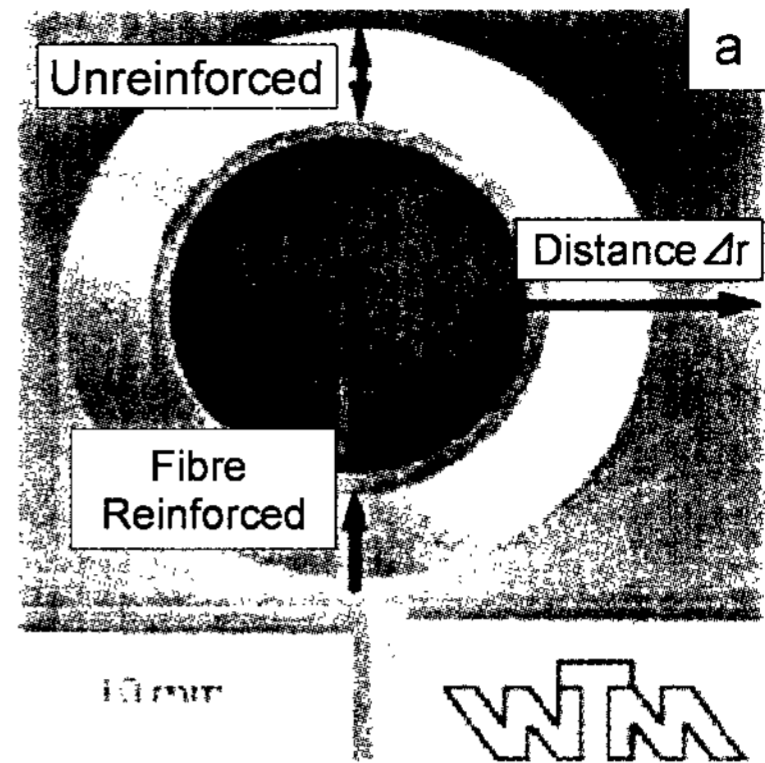


Fig. 3. Locally fiber reinforced Mg MMCs with graded structure (a) and transition of fiber content(b)

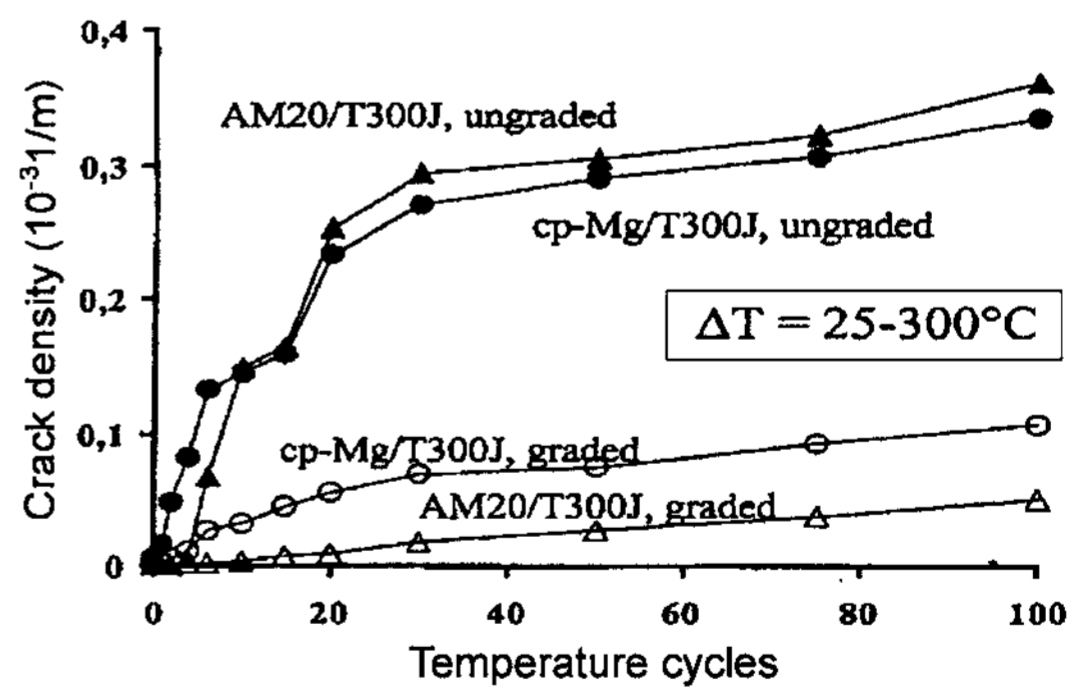


Fig. 4. Crack density with thermal cycles and composites

은 AM20합금이 우수한 것으로 나타났다.

이러한 경사기능 복합재료는 비교적 가혹한 조건의 열사이클이 수반되는 자동차부품의 재료로의 적용가능성이 매우 높다고 할 수 있겠다.

DOW사에서는 Fig. 6과 같이 Al₂O₃/AZ91 복합재료로 톱니형 스프라켓, 캠샤프트, 폴리-V-폴리 오일펌프

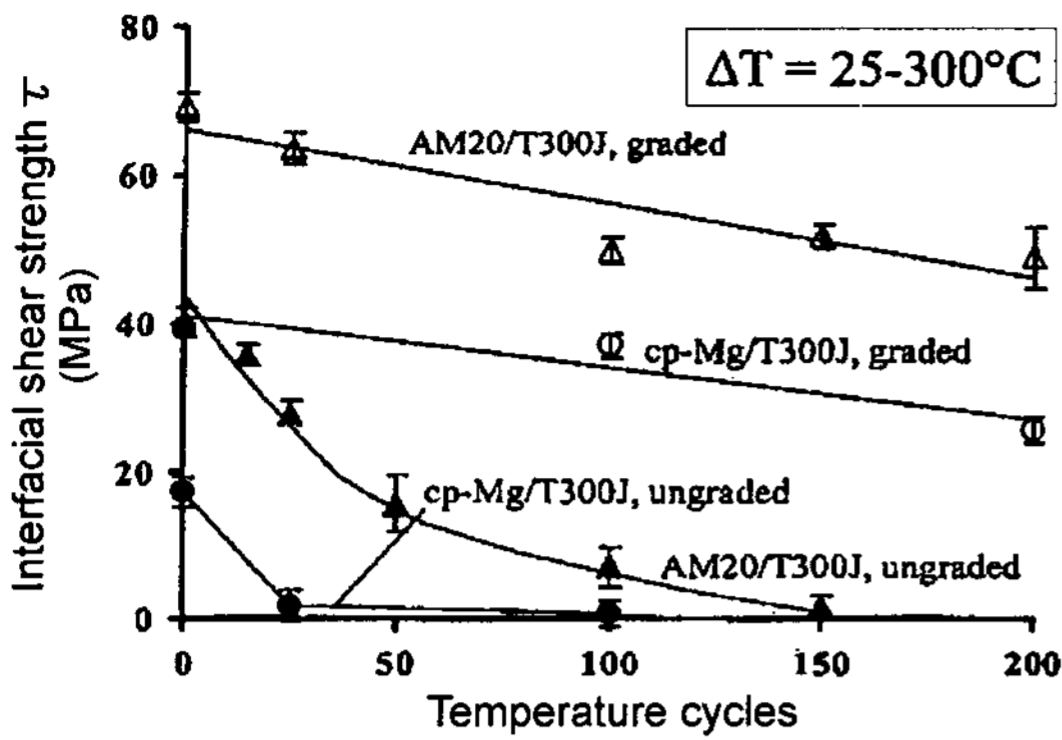


Fig. 5. Interfacial strength with thermal cycles and composites

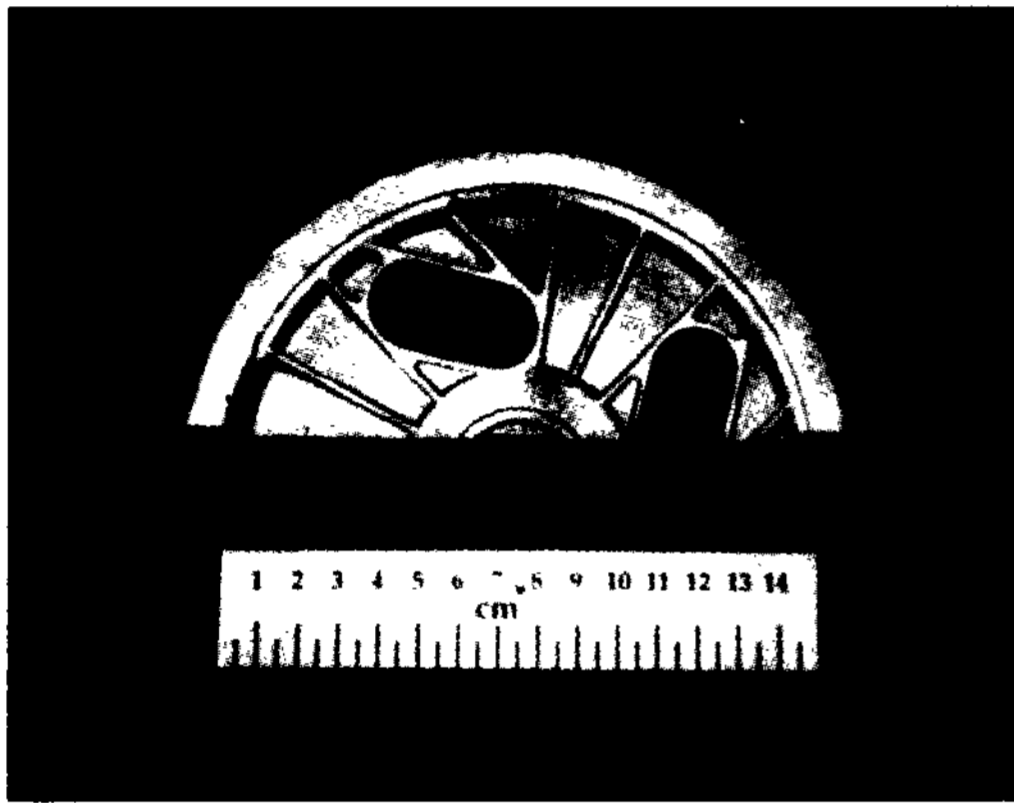


Fig. 6. A composite pulley casting

커버 등을 제조하여 32,000-50,000 마일의 주행거리를 기록하는 등 실차 적용시험을 행하였다[6].

한편 국내에서는 몇몇 국책연구소와 대학을 중심으로 Mg금속기 복합재료에 관한 연구를 행하고 있으나 그 적용에는 아직은 미진한 단계에 있다. 부산대학교에서는 상용Mg합금인 AZ91에 Y, Nd 등을 첨가시켜 고온기계적성질, 부식거동을 향상시키는 연구, 양호한 예비성형체를 제조하기 위한 연구, squeeze casting 공정인자의 최적화를 통해 양호한 미세구조를 가진 복합재료의 제조 및 특성평가, 여러 가지 강화재를 복합화하여 복합재료를 제조하는 등의 연구를 수행해 왔으며 최근에는 Si분말과 Mg용융금속의 반응에 의해 자발적으로 생성되는 고경도, 고용점의 Mg₂Si 금속간화합물을 강화재로한 복합재료를 제조하여 양호한 기계적성질을 확보하고 있다[7-16].

Mg합금은 구조용 합금중 최경량 재료로써 Mg금속기 복합재료의 적용분야는 Table 6에서 나타낸 바와

Table 6. Potential aerospace and Automotive applications of cast Mg MMCs

Application	Components	Justification
Aerospace	Landing Gear	Wear and Weight
	Satellite	Weight, Specific Stiffness and Strength
	Antenna	
	Helicopter	
Automotive	Disk totor	Wear and Weight
	Pulley	
	Piston Ring Groove	Wear and Weight
	Gear	
	Gearbox Bearing	
	Differential Bearing	
	Wheel	Weight and Specific Stiffness
Connecting Rod		
	Rocker Arm	Weight, Wear and Specific Stiffness

같이 다양하며 고부가가치의 항공재료, 자동차재료로서 충분한 가능성이 있어 현재 국내외적으로 개발단계에 있다. 또한 입자강화 Mg금속복합재료는 등방성을 가지고 있기때문에 항공재료로서의 적용가능성을 충분히 만족시킬 수 있어 그 타당성이 검토되어지고 있다. 특히 안테나와 광학장치와 같은 부품들은 열팽창계수, 열· 전기 전도도, 전자기파 방출 차단과 같은 특성에 매우 민감하므로 적용을 위한 특성분석이 충분히 이루어져야한다.

3. 결 언

Mg금속기 복합재료를 자동차 경량화 재료로서 적용하기 위한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 노력들에 반해 자동차용 재료로써 적용한 사례는 아직 미미한 실정이다. 이는 복합화기술, 즉 제조기술확보가 아직 미흡하고 강화재와 Mg합금의 가격이 비교적 높기 때문이기도 하다. 따라서 복합화 제조공정 기술의 확립과 Mg재활용 기술등에 관련된 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Magnesium castings for Automotive applications, JOM July 1995. 28
- [2] H. Lianxi and W. Erde, Materials Science and Engineering A278 (2000) 267
- [3] K. U. Kainer : Development of Magnesium metal matrix

- composites for power train application, Proc. ICCM 12, July, Paris (1999)
- [4] J. F. King and T. E. Wilks : Development of Lightweight Castable Magnesium alloy composites, proc. IMA, May, Berlin (1994)
- [5] W. Schaff, F. Geinrich, C. Korner and R.F. Singer : Thermal Fatigue of Locally Reinforced Magnesium with Graded Structure, Proc. ICCM 12, July, Paris (1999)
- [6] A. Luo and M. O. Pekguleryuz : Development of Cast Magnesium Matrix Composites, proc. IMA, May, Berlin (1994)
- [7] K. S. Sohn, K. J. Euh, S. H. Lee and I. M. Park : Mechanical Property and Fracture Behavior of Squeeze Cast Mg Matrix Composites, Metallurgical and Materials Transactions A, vol.29A, October 1998, 2543
- [8] S. H. Lee, K. S. Sohn, I. M. Park and K. M. Cho : Effect of Applied Pressure on Mechanical Properties of Squeeze Cast Mg Matrix Composites, Metals and Materials
- [9] I. M. Park, Y. S. Choi and S. H. Lee : Microstructure and Properties of AZ91Mg/Al₂O₃ Metal Matrix Composites, Proceedings of Advanced Materials and Technology for the 21st Century-JIM'95 Fall Meeting, (1995) Dec.12-15, Honolulu, Hawaii
- [10] K. C. Kim, Y. S. Cho, I. D. Choi and I. M. Park : Fabrication Processing and Properties of AZ91D Mg/9(Al₂O₃)₂ (B₂O₃) Metal Matrix Composites, Proceedings of the 3rd Asian Foundry Conference, (1995) Nov. 8-10, Kyungju
- [11] E. K. Jeon, M. J. Kim, I. D. Choi, K. M. Cho, I. M. Park : Microstructure of Squeeze Cast Mg-Al-Zn-(Y,Nd)/Al₂O₃ Metal Matrix Composites, PRICM-2 June 18-22, 1995, Kyongju, Korea
- [12] I.M.Park, K.M.Cho and Y.H.Park : Effect of squeeze cast pressure on fracture Properties of AZ91Mg/Al₂O₃ metal matrix composites, proceedings of the 115th Japanese Institute of Metals conference, Fukuoka, 1994/ 10/ 8-10, 132
- [13] S. S. Jhung, I. M. Park and K. M. Cho : Effect of Squeeze Cast Pressure on Microstructure of Mg-Al₂O₃ Metal Matrix Composites, Proceedings of International Symposium on Light Materials for Transportation Systems, Kyongju, June 20-23, 911-920
- [14] I. M. Park, K. M. Cho, S. H. Lee and N. J. Kim : Microstructure and Properties of Squeeze Cast Mg-Al₂O₃(sf) Composites, Proceedings of the 9th International Conference on Composite Materials, Madrid, 12-16 July, 1993, vol. 1, 247-254
- [15] Yoon-suck Choi, Kyung-mox Cho, Ik-min Park : Fabrication and mechanical properties of squeeze cast Mg matrix composites, TMS, (1997/02), (Orlando, USA), 74
- [16] D. H. Oh, S. H. Jeon, I. M. Park, K. M. Cho and I. D. Choi : Fabrication and Properties of Reaction Squeeze Cast (Al₂O₃+Si)/Mg Hybrid Metal Matrix Composites, Journal of the Korean Foundrymen's Society, vol.20 No.1(2000) 13