

最近 自動車 엔진의 材料技術

The Recent Progress in Materials Technology of Automotive Engine

조 원 석*
Won Suk Cho

1. 序 論

제작년('89) 우리나라에서 生産된 總車輛臺數는 110萬臺를 넘어서고, 또 總保有臺數는 300萬臺 水準에 육박하는 등, 자동차산업의 규모에 있어서는 성장에 성장을 거듭하여 왔다. 그러나 向後 우리의 實情은 이러한 밝은면 보다는 수출부진, 품질문제, 石油위기, 公害규제의 強化 등 對内外의 많은 難題들의 도전에 직면하고 있다. 따라서 이러한 문제에 接近하기 위해서는, 美·日·西歐 등 先進自動車 産業國의 技術動向을 分析하고, 우리의 方向定立에 對應키 위한 課題의 해결이 時急하다고 하겠다. 이러한 점에서 새로운 材料의 적용과 공정에 관한 기술의 개발은 原價 및 미래의 品質面에서 중요한 인자로 부각되고 있고, 점증하는 국제 경쟁을 고려할 때 더욱 더 심각하게 考慮되어야 한다.

本 報告에서는 自動車 엔진에 關係 新素材가 실제로 어떠한 형태로 使用되고, 어떻게 자동차의 性能向上에 기여하는가를 최근의 事例를 들어보기로 한다. 材料技術의 진보는 現在 자동차의 과제 해결에 필수불가결한 要素이지만 한편으로는 實用上의 과제도 많이 內在하고 있다. 먼저 자동차 産業의 개요와 그 기술개발의 狀況을 파악하고, 다음으로 엔진기술과 材料技術의 關係에 대해 서술하고자 한다.

2. 自動車와 材料技術

現在 世界의 自動車 生産臺數는 每年 約 5千萬臺 수준이고 生産, 판매거점은 日本, 美國, EC 및 기타로 區分되어 있다.(표 1)

표 2에서 보는 바와 같이 向後 世界市場趨勢는 어느 지역에서도 증가가 豫見되고, 그 증가율은 保有臺數로 每年 平均 2.7% 정도라고 보여진다. 또 自動車 先進 지역으로, 승용차 비율이 높은 서방세계에서의 증가대수가 大部分을 점유하고 있다. 따라서 自動車 技術의 실무 부서에서는 승용차를 中心으로 性能性能의 向上은 물론 商品性, 社會要求 등에도 폭넓게 對應하려고 하는 노력이 필요한 시점이다.

승용차의 重量은 보통 1톤 前後로, 鐵鋼, 輕合金材料로부터 수지, 고무, Glass 材料 등

表 1 世界의 自動車生産 販賣臺數¹⁾

1987年(千臺)

	生産臺數			販賣臺數		
	乘用車	商用車	合 計	乘用車	商用車	合 計
日本	7,891	4,358	12,249	3,275	2,744	6,019
美國	7,099	3,811	10,910	10,276	4,922	15,198
EC	13,014	1,604	14,618	11,348	1,412	12,760
其他	6,065	2,716	8,781			
世界	34,069	12,489	46,558			

*정회원, 기아자동차㈜ 기술센터 재료연구실

表2 世界の乗用車保有臺數の推移¹⁾

地域	保有臺數(百萬臺)		增加數	年間增加率 (1985~2000)
	1985年	2000年		
西歐	121	166	+45	2.1%
東歐	25	54	+29	5.8%
北米	142	184	+42	1.8%
日本	28	39	+11	2.2%
其他	53	106	+53	4.8%
計	369	549	+180	2.7%

으로 구분될 수 있다. 自動車の重量은, 수요자의 끊임없는 要求를 滿足시키고, 부가가치를 높이기 위해서 大型化, 高性能化의 추구로 인해 最近 數年 동안의 증가추세에 놓여 있다.²⁾ 構成材料로는, 물론 대부분 鐵鋼材料가 主流를 이루지만, 重量增加를 抑制하기 위해 알루미늄 등 輕合金과 플라스틱의 使用比率이 점차 증가하고 있다(그림 1). Delphi V 보고³⁾에 의하면, 美國에서도 같은 양상을 豫測하고 있음을 잘 알 수 있다.

그러나, 自動車用 材料의 장래를 보다 正確하게 하기 위해서는, 특히 新素材의 경우에는 이와 같은 數量的 動向分析만으로는 충분치 못하다. 수량적으로는 극미량이지만, 新材料의 적용에 관한 概念을 把握해 볼 必要가 있다. 크게 볼 때, 高性能 엔진을 위한 耐熱材의 개발, 輕量材料에 의한 response의 向上 등, 構造材料의 機能化和 機能材料의 活用 등을 열거할 수 있다.¹⁾

3. 엔진技術의 課題와 材料技術

자동차는 극히 개인적인 耐久 소비재일 뿐만 아니라 高度로 社會的인 存在이기도 하다. 따라서 이의 技術課題는 商品性, 性能 등 User의 要求 뿐만 아니라 資源問題, 排氣가스, 騒音, 安定性 등 社會的인 要求에도 副應해야만 한다. 最近 엔진技術의 觀點에서 課題를 세분해보면 表3에서 보는 바와 같다. 이들 各 技術項目에서는, 直接材料와의 關聯性이 표시될 수 있는 것은 적으나, 어느 항목도 과제 해결을 위해서는 各 材料와 關聯되지 않는 것은 없고, 또 어느 경우에는 新素材의 活用이 重要한 Key Point로 작용하는 것도 있다.

'60年代 이후 最近까지 승용차 엔진의 變遷과정을 살펴보면, 크게 엔진 出力의 대폭적인 向上과 경량, Compact化가 強力하게 推進되어 왔음을 알 수 있고, 이에 따라 材料도 對應하여 왔다는 사실을 알 수 있다. 現在 先進國의 Engine 技術中 최대의 觀點은 向後 美國에 있어 燃費規制(CAFE)의 大幅的인 절상안에 어떻게 대처하느냐에 모아지고 있다.

3.1 金屬系 材料

鐵鋼材料는 強度, 耐熱性이 높고, 加工性도 좋아서 비교적 낮은 Cost로 部品化 할 수 있

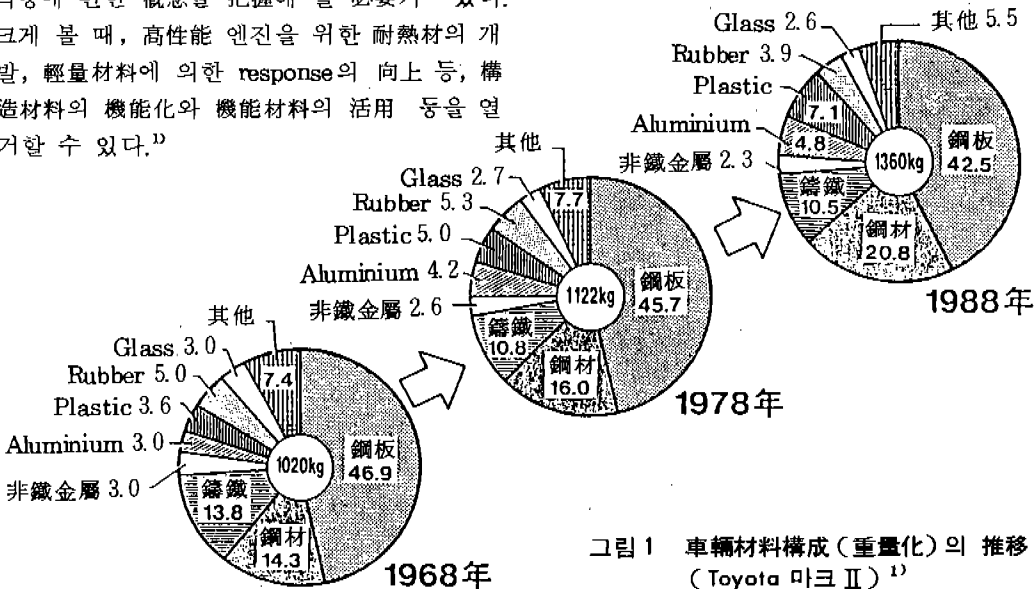


그림 1 車輦材料構成(重量化)의 推移 (Toyota 마크 II)¹⁾

表 3 엔진技術의 課題¹⁾

區 分	細 部 技 術
高性能化	<ul style="list-style-type: none"> · 過 給 · 增進效果 · 冷却性 強化 · 可變機構 · 排壓低減
低燃費化	<ul style="list-style-type: none"> · 輕量·新素材 · Friction 低減 · 希薄燃燒 · 熱效率 向上
快適性的 추구	<ul style="list-style-type: none"> · 종합전자제어 · 排氣系音色改善 · 低振動·低騒音 · EFI 改善
低公害化	<ul style="list-style-type: none"> · 촉매개량 · 成層 Engine · Particulate Trap · 燃燒改善
Compact	<ul style="list-style-type: none"> · Engine · 보기류 · Power Train
新에너지 對應	<ul style="list-style-type: none"> · Methanol · Gas Turbine · 전 기 · 수 소 · 천연가스
정비도 向上	
低 Cost	

表 4 New Materials Impacting Vehicle Design by the Year 2000²⁾

Materials	% of Respondents
Metal Matrix Composites	37 %
Glass	23 %
Ceramics	20 %
New Steels	20 %

어서 계속적으로 중심적인 構造材料로 위치하고 있다. 그러나 鐵鋼材料도 이에 대한 機能化가 추구되어서, 예를 들면 騒音低減用の 제진강판이 '84년경부터 日本의 Toyota 에서 Oil pan에 적용되고 있다. 이 以外에도 工程을 省略해서 原價를 절감하고자 하는 努力이 행해지고 있는데, “非調質鋼”(Con-rod, Crankshaft用)이 이러한 범주에 포함된다고 말할 수 있다.

輕量化 材料로서는, Al, Mg, Ti 등 輕合金과 이를 利用한 複合材料(MMC)가 많이 이용되지만, 部品の 輕量化 效果는, 車輛輕量化 分の 直接的인 燃費에의 기여뿐만 아니고, 특히 運動部品에서는 慣性力의 低減에 의한 騒音低減 등의 派生效果가 많다. 다음에 上記材料 중 몇가지를 열거 說明해 보기로 한다.

(1) 金屬基地 複合材料(Metal Matrix Composite)

美國 Delphi V 報告³⁾에 의하면, 向後 2000 년까지, Plastic 다음으로 車輛設計에 影響을 미칠 수 있는 材料로 우선 MMC(주로 Al base)를 선정하고 있다(表 4). Toyota에서는 纖維強化 金屬 耐摩環 Piston이 '82년에 實用化되어 現在 月 20萬個 이상 生産되고 있다. Alumina 單纖維 혹은 Silica 單纖維가 數% 耐熱 Al 合金에 복합주조되어 우수한 내마모성이 얻어진다. 현재로는 Engine의 高性能에 同伴한 高溫時의 내용착성의 向上을 위해서 Whisker, 金屬, Ceramic 粉末에의 Hybrid化 등이 檢討되고 있다. Piston 以外로는 Connecting rod (Alumina 장섬유 혹은 Ceramic 분말/Al 합금) 등의 檢討例가 있지만, MMC의 擴大適用을 위해서는 製造法을 包含해서 低 Cost化가 큰 숙제로 남아 있다.

(2) Titanium 合金

Titanium과 그 合金에 대한 관심이 1950 年代 초기부터 最近까지 航空宇宙産業을 中心으로 급격하게 증대되고 있는 가운데 (그들의 獨特한 特性으로 인해 —우수한 高溫特性和 높은 比強度), 극히 最近에는 自動車産業에서도 Titanium 合金이 많은 部品에 有用하게 使用될 수 있다는 報告^{4,5)}가 점차로 늘어나고 있다.

일반적으로 내연기관중 3가지 部品이 적용 대상으로 檢討되어 왔다; Intake valve, Exhaust valve, Connecting rod.

作動溫度가 比較的 낮은 Intake valve는 Ti-6Al-4V으로 많이 적용하고자 하고, 作動溫度가 비교적 높은 Exhaust valve에서는 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si 合金이 고려되고 있다. Connecting rod에서는 다른 部品과 마찬가지로 Steel, Al 합금, Al 複合材料 등과 치열한 競争이 예상되고 있지만(특히 이 部品の 複雜한 Loading 양상으로 인해) Ti-6Al-4V 合金이 적절한 材料라고 現在까지 판단되고 있다. 이미 Racing car에서는 valve 用으로 Ti 合金이 적용되어 엔진의 高性能, Response 向上에 기여하고 있다.

Ford에서는 '91년에 Mexico에서 生産하는 엔진의 排氣 valve에 적용할 計劃이라고 보고하고 있으며, Honda에서는 Autobicycle 엔진의 Connecting rod에 적용하고 있다고 알려져 있다. 또한 Toyota 자동차에서도 현재 活潑하게 研究가 進行되고 있는 것으로 보고¹⁾되고 있다. 이 材料에 대한 向後課題는 製造 原價 節減과 高溫에서 長期間 使用時 야기되는 표면 Oxide에 대한 Barrier Protection의 研究라고 판단된다.

(3) 非調質鋼(Micorallloyed Steel)

自動車 部品 중에서, Engine 部品, Steering 部品 등 고부하가 걸리는 部品은 鋼을 熱間鍛造한 후, 소입소려(調質), 기계가공의 공정을

거쳐서 製造되는 것이 대부분이다. 이 製造工程중에서 調質工程의 目的은 部品 全體를 熱處理해서 部品에 必要한 強度 및 延性を 부여하는 것이다. 이러한 調質工程을 省略하고도 特定部品에서 요구되는 特性을 얻을 수 있는 “非調質鋼”이라는 概念이 1970年代 초반 西獨에서 처음 소개된 이래, 1979年 第2次 石油위기를 계기로 이에 대한 관심과 研究力이 더욱 집중하게 되었다. 또한 最近의 中東위기는 에너지 節減의 중요성을 재인식시키므로, 이런 種類의 경제적인 材料에 대한 연구는 向後 國內에서도 더욱 더 促進되리라 예상된다. 非調質鋼은 그동안 여러 연구자들에 의해서 그 理論의 背景⁶⁾이 비교적 잘 定立되어 왔고 다음과 같은 部品들이 여러 자동차회사에 의해서 적용되어 왔다(表5).

非調質鋼의 強化機構는 鋼에 V, Ti, Nb을 한가지 또는 複合添加해서 이들의 炭化物 또는 炭氮化物의 미세석출에 의한 석출강화가 기본이다. 좀 더 複雜한 강종에서는, Austenite 분해와 재결정 등을 부가적으로 制御하고자 Cu, Ni, Cr, Mo, B 등과 같은 원소들이 添加되기도 한다. 또한 Al, N, O, S도 중요한 影響을 미치고, Ca, Zr 또는 Rare Earth 원소들도 非金屬介在物의 形상을 改善하기 위해 添加된다. 非調質鋼은 既存의 調質(Quench & Temper) 處理한 鋼에 못지않은 強度를 確保할 수 있으나, 炭素含量이 中炭素鋼 이상으로 많이 함유될수록 연성과 충격치가 저

表5 非調質鋼의 長點 및 適用例

長 點	適 用 例
— 열처리 공정의 생략	— Crankshafts in Volkswagen and Daimler Benz
— 소재원가 절감	— Connecting Rods in Ford of Europe
— 열처리 변형 제거	— Connecting Rods at Mitsubish and Honda
— Straightening의 최소화	— U-bolts of leaf spring at Teksid
— 절삭형 향상 (특히, 표면 Grinding)	— Steering Knuckle Support at Peddinghaus — Antisway Bar in Renault — Connecting Rods for Cars and Trucks, Various Steering Parts for Cars, Induction Hardened Gears for Trucks, Crankshafts for Cars and U-bolts of leaf Springs for Cars, All in Volvo.

하한다는 결점을 안고 있다. 그러나 이러한 점들은 高충격치를 要하지 않는 部品을 選定 (예를 들면, Con-rod, Crankshaft 등) 해서 우선 적용하거나 또는 合金의 조성 및 Processing route를 最適化한다면 克服될 수 있다고 판단된다.

3.2 構造用 Ceramics

Ceramics를 엔진 部品에 使用하면, 熱效率의 向上, 排氣가스중의 HC, CO의 低減, Diesel Particulate의 감소, 騒音의 低減 및 出力의 向上 등을 기대할 수 있다. 現在 先進國에서 進행중인 엔진用 Ceramics의 연구는 다음과 같은 4가지 分野로 集약할 수 있다.⁷⁾

- SI engine with low mass structural components, such as piston pins and poppet valves.
- Ceramic diesel turbo compound engine
- Turbochargers with ceramic impellers
- Ceramic regenerative gas turbine

表6에 제 26차, 27차 東京 Motor Show에

出品된 엔진 Ceramics 部品の 대표적인 例를 要約해 보았다.

Engine 部品에 적용대상인 高溫, 高强度 Ceramics중 대표적인 例와 材料特性을 表7에 나타내었다. 이 중에서 Si₃N₄가 새로운 製造工程(Nitrogen gas pressure sintering technique)의 開發로 量産時 가장 적당한 材料로 各광을 받고 있다.

Heat engine 部品用 材料로서, 構造用 Ceramic의 많은 장점에도 불구하고 다음과 같이 材料 자체의 “취약성”에 기인한 결점들이 있다;

- Linear behavior up to fracture
- Little crack arrest capability
- 强度의 信賴性 不足(재현성의 열세 및 강도 편차가 큼)

이러한 傾向은 材料에 내재하는 결함들에 기인하는데, 이러한 결함들은 상당히 통계적 分析을 要하게 된다(Statistical Analytical Techniques). 이러한 통계학적 確率分析(熱分析 包含)에 의하면, 部品에 있어서 failure가 發

表6 Engine Ceramic Structural Component Applications⁷⁾

Manufacturer	Ceramic SI Eng.	Ceramic Diesel	Ceramic Gas Turbine	Ceramic Turbo	Ceramic Turbo Generator	Poppet Valve	Ceramic Cyl. Liner
Isuzu	Yes (1)	Yes (2)		Yes (3)	Yes (4)	Yes	Yes
Mazda	Yes					Yes	Yes
Nissan	Yes (5)			Yes (6)		Yes	Yes
Toyota			Yes (7)				

- (1) SI engine family with ceramic poppet valves and cylinder liners
- (2) Ceramic Diesel without water cooling includes ceramic piston top, head firedeck, poppet valves, cylinder liners and valve train components
- (3) Ceramic turbocharger impeller and bearings
- (4) Turbine driven generator for exhaust energy recovery with ceramic exhaust turbine impeller and bearings
- (5) Ceramic intake valves, sodium cooled exhaust valves
- (6) Ceramic turbocharger impeller, plastic compressor impeller and ball bearings
- (7) Ceramic gasifier and turbine rotors, gasifier and power turbine scroll assemblies, combustor, turbine vanes, scroll back plates, regenerator, regenerator seal platform duct and thermal barriers.

表7 高温, 高强度 Ceramics의 材料特性⁸⁾

特性 / 材料	S ₃ N ₄	SiC	AlN	SiAlON	PSZ	Mullite	Al ₂ O ₃
比重	3.2	3.15	3.5	3.16	5.2	3.16	3.98
强度 (GPa)	1.0 (RT)	1.1 (RT)	0.7 (RT)	0.6 (RT)	1.2 (RT)	0.4 (RT)	0.5 (RT)
	0.6 (1200℃)	1.1 (1400℃)	0.6 (1200℃)	0.6 (1200℃)	0.4 (800℃)	0.5 (1200℃)	0.4 (800℃)
弹性率 (GPa)	280	420	300	250	150	220	400
硬度 Hv (GPa)	17	24	16	15	13	11	18
热膨胀率 (×10 ⁻⁶ /℃)	3.0	4.8	5.7	2.8	8.0	4.5-5.0	8.1
热传导率 (cal/cm S℃)	0.13	0.28	0.18	0.07	0.005	0.01	0.08
破壊靱性值 (MPa·m ^{1/2})	6	4	-	4	9	2.6	4

생하는 장소가 반드시 外部 Stress를 가장 많이 받는 곳은 아니라는 것을 보여준다. 왜냐하면, Batdorf의 理論(Weak Link Theory)에 따르면, Ceramics 部品の failure mode는 部品の 체적과 표면적에 따른 결함의 方向性 또 결함에 작용하는 Stress의 정도에 依存하기 때문이다.

따라서, Ceramics의 이러한 결점들을 피하고 장점들을 살려서 部品에 적용하기 위해서 美·日 등 선진국에서는 既存의 部品設計 基準과는 다른 것으로 接近하고 있는 實情이다. 成功的인 엔진용 Ceramics 部品開發은 형상에 있어서 劃期的인 變化를 가져와야 하며, 만일 단순히 既存 金屬製品의 그것과 똑같이 製品을 設計한다면 치명적인 失敗가 초래될 것으로 판단되고 있다.

4. 將來의 自動車 엔진과 材料

將來의 自動車 엔진에 대해서는 종래부터 Energy 수급 문제와 關聯지어 왔지만 最近에는 地球 전체의 환경문제로부터 接近하려는 시각이 점차 강하게 대두되어 왔다. 그러나 어느 경우도 技術的 完成度라는 점에서는 現狀의 Reciprocal 엔진을 克服하는 것은 아직 나

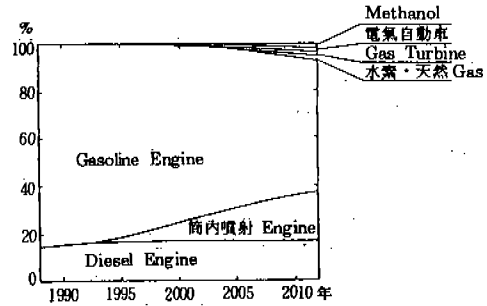


그림 2 將來의 自動車 엔진

타나지 않았다고 보여진다(그림 2).

그림 2에서 보는 바와 같은 部類에서는 Methanol 車가 汎用 自動車로서 가장 可能性이 높다고 판단되고 있다. 그러나 Methanol을 燃料로 사용하기 위해서는 엔진과 燃料系의 부식대책, 排出가스 中 Formaldehyde 低減 등의 課題도 많다.

가스터빈 엔진에서는 세라믹스 部品の 活用에 의한 熱效率의 向上이 기대된다. 전기 자동차에서는 新素材 利用에 의한 電池 용량 증대와 輕量化를 克服해야만 한다. 또한 수소는 Clean한 燃料이지만, 車輛에서의 搭載性의 문제가 크고, 수소저장 合金을 包含해서 한 단계 높은 技術開發을 기대해야 한다.

參 考 文 獻

1. S. Sakurai (Toyota 自動車); User-Maker 交流 Forum, 日本 經濟新聞社, Apr. 1990, p. 37.
2. Makoto Ohsawa; 日本 自動車技術, Vol. 44, No. 6, 1990, p. 3.
3. Delphi V Forecast and Analysis of the U. S Automotive Industry Through the Year 2000. OSAT, University of Michigan, Ann Arbor, Dec. 1989.
4. A. M. Sherman and J. E. Allison; SAE Paper 860608, 1986.
5. W. Cho, J. E. Allison, J. W. Jones and A. W. Thompson; Proc. of the 5th IPG, Beijing, China, 1989. p. 273.1
6. J. H. Woodhead; Proc. of Microalloying Forging Steels, Golden, Colorado, TMS, 1987, p. 3.
7. F. A. Wyczalek, H. Kawamura, and C. M. Suh; SAE-C Preprint Paper 89195-XXXX, 1989.
8. 土井晴夫; New Ceramics, No. 4, 1989, p. 51.