

자동차용 티타늄 합금 부품의 개발현황 및 전망



이 용 태
(내열재료실장)

- '70-'74 서울대학교 금속공학(학사)
- '74-'76 한국과학기술원 재료공학(석사)
- '76-'80 국방과학연구소(선연 및 연구원)
- '80-'85 Case Western Reserve Univ. 재료공학(박사)
- '85-'85 Case Western Reserve Univ. 연구원
- '85-'90 독일 항공우주연구소(DLR) 연구원
- '90-현재 한국기계연구원 책임연구원



현 용 택
(내열재료실 연구원)

- '89. 2 인하대학교 금속공학과(학사)
- '91. 2 인하대학교 대학원 금속공학과(석사)
- '91-현재 한국기계연구원 연구원

1. 머릿말

티타늄 합금은 비강도가 높으면서도 화학적으로 안정하기 때문에 주로 항공우주 산업과 화학용 장치 산업 분야에 많이 이용되어 왔다. 그러나 최근들어 냉전구도와 양극화 현상이 무너지고 각국에서 기술 패권주의가 팽창하면서, 그 동안 주로 국방목적의 항공우주 산업에 이용되던 티타늄 합금이 점차적으로 일반 산업용 까지 그 응용분야가 확대되고 있다. 이러한 관점에서 자동차 산업 분야에도 가볍고도 강한 티타늄 합금을 이용하여 자동차의 성능 향상을 위한 대체 부품으로 개발하고자 하는 노력이 배가되고 있다.

그림 1에 티타늄 소재의 기초 원자재가 되는 티타늄 스폰지 생산량을 각 회사별, 각 나라별로 나타내었다⁽¹⁾. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 1990년의 전 세계 티타늄 스폰지 생산량은 약 12만 톤이고, 이중 거의 절반이 구 소련에서 생산되고 있다. 또한 구 소련을 포함한 미국, 일본이 전세계 생산량의 90% 이상을 차지하고 있다. 그림 2에 연도별 항공산업과 일반산업에 이용되는 티타늄 재료의 세계 소비량을 나타내었다⁽²⁾. 이 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 최근들어 세계 경기의 침체로 인하여 일반산업용 티타늄 재료 사용량이 근년에 약간 감소된 경향을 나타내고 있으나, 최근 에너지 절약 및 공해 방지책으로 연비절감 방안이 수송기기 업체뿐만 아니라 소재업체에서도 많은 관심이 집중되고 있어 소비량이 증가될 것으로 예측된다. 티타늄 재료가 일반산업용 소재로 이용되는 것은 크게 1) 강도와 2) 내식성이 좋기

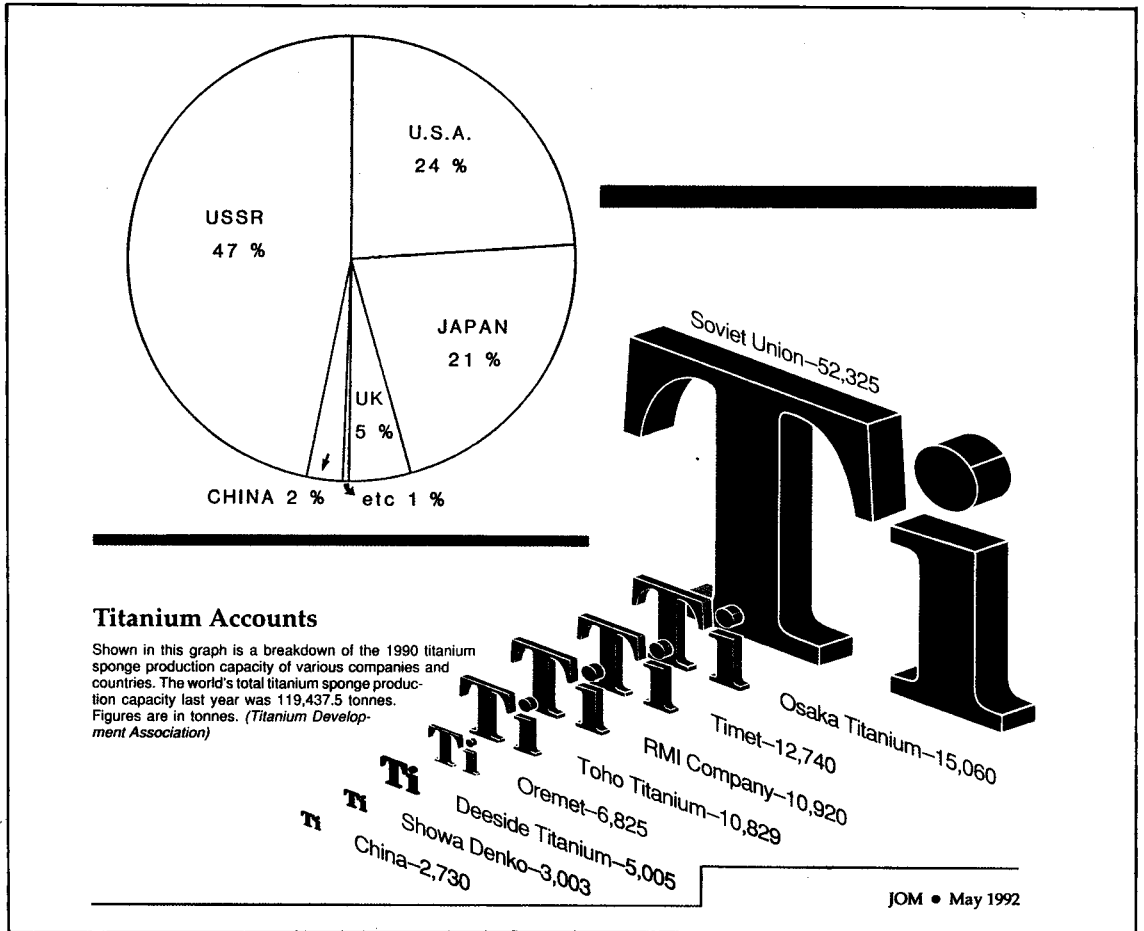


그림 1) 세계 각국의 티타늄 스폰지 생산 현황

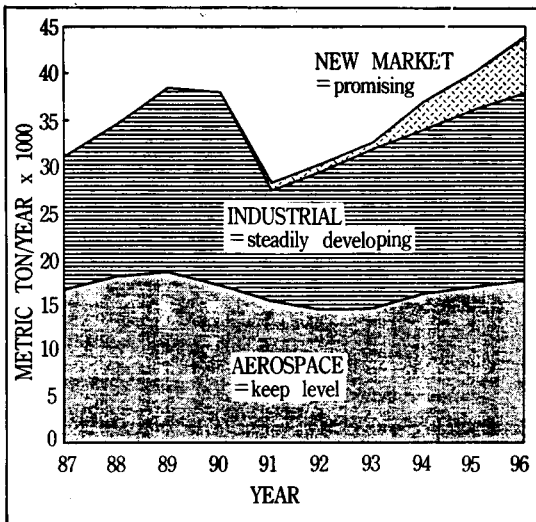


그림 2) 각종 산업에서의 티타늄 응용 분야

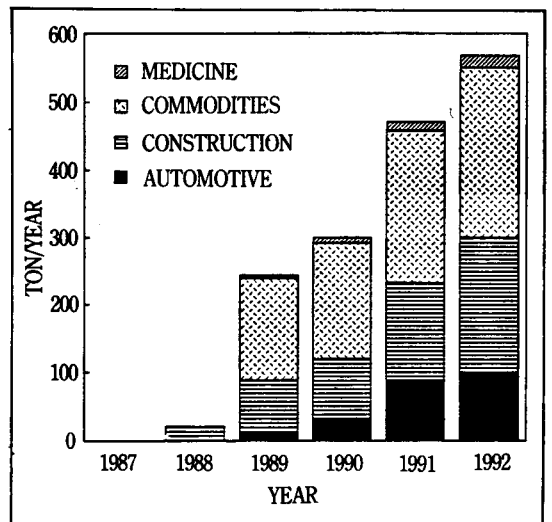


그림 3) 일본 산업에서의 티타늄 합금 사용량

표 1) 티타늄 합금 부품의 응용 및 성질

1) Strength

Characteristics		Aero	Marine	Automotive	Others
Elevated temperature	Movable machine parts	○Engine parts			
	Structural parts	○Structures			
Medium & room temperature	Movable machine parts		○Screws	○engine parts	○Turbine blades ○Blower
	Structural parts		○Frame for deep sea vehicles ○Drilling riser pipes ○Cable ○Pressure vessel		○Frames of eye-glasses ○Gas cylinders ○Bicycle ○Camera case ○Softy tool ○Medicine

2) Anti-Corrosion Resistance

Characteristics	Chemical	Power	Construction	Marine Automotive	
Chemical anticorrosion	○Heat exchangers ○Towers ○Vessels ○Pipings		○Factory roof ○Duct		○Exhaust pipe ○Tank roley
Electro-chemical anticorrosion Anti sea water	○Anodes ○Cathodes	○Condensers in power plants ○Tube sheet ○Desalination plants	○Electrode for protection ○Bridges ○Metal for tunnel ○Marbor structure	○Heat exchanger ○Submarine piping ○Hull plate	
Anti weather			○Building materials ○Monuments ○Messenger wire ○Trolley hanger ○Bolt. Nut		○Automobile outer shell ○Door mirror ○Muffler pipe

때문이다. 이들 특성을 이용하는 산업과 각각의 산업에 사용되는 재료의 성질과 사용영역을 표 1에 나타내었다. 또한 티타늄 합금은 표면 특성이 우수하기 때문에 새로운 산업용 소재로서의 사

용영역이 확장될 것으로 예측된다. 일본의 경우 그동안 티타늄 합금을 자동차 부품으로 사용하고자 하는 노력이 꾸준히 지속되어져 왔음에도 불구하고 자동차 산업에 이용된 티타늄 재료의

표 2) 자동차 부품으로 사용 가능성이 높은 Ti 합금의 성질

Alloys	Pure Ti		Near α Alloy			$\alpha+\beta$ Alloy			Near β		β Alloy			Ti-Aluminides	
	Ti-0.25Pd	Ti-5Al -2.5Sn	Ti-8Al -1Mo-1V	Ti-6Al-2Sn -4Zr-2Mo -0.08Si	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-6V 2Sn	Ti-3Al-2V	Ti-5Al -2Sn-4Mo -2Zr-4Cr	Ti-10V-2Fe -3Al	Ti-15V-3Cr- 3Al-3Sn	Ti-3Al-8V- 6Cr-4Zr -4Mo	Ti-13V- 11Cr-3Al	Alpha 2 (Ti-24Al -11Nb)	Super Alpha 2(Ti-24Al -10Nb-3V -1Mo)	
1. Mechanical Properties at RT															
UTS(MPa)	345	972	1020	1014	1124	1290	703	1172	1310	1131	1248	1360	724	1000	
YS(MPa)	221	897	924	917	1020	1200	607	1104	1228	1035	1152	1255	586	793	
E1.5cm(%)	37	16	19	18	16	13	17	12	7	11	10	5	2	2	
RA(%)	35	25	20			15		35			19				
Hardness(Rc)	120BHN	36			36		15-27		41			36			
Charpy Impact(ft-lb)	80-100	19	20-28				35								
2. Physical Properties at RT															
Young's Modulus(GPa)	103	103	121	114	114	114	97	110	103	103	103	104	93	124	
Shear Modulus(GPa)	45	43	46		42			41	41	41	41	43			
Density(g/cm ³)	4.5	4.5	4.4	4.5	4.4	4.5	4.5	4.6	4.6	4.8	4.8	4.8	4.6	4.6	
Electrical Resistivity($\mu\Omega\cdot\text{in}$)	22	20	78	75	67	62	49			58		56			
Specific Heat(Btu/16°F)	0.13	0.13	-	0.1	0.14	0.16				0.12		0.13			
Thermal Expansion (in/in/°F x 10 ⁶)	5.48	5.3	5.6	5.5	5.3	5.2	4.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.5	5.5	
3. Fabrication and Heat															
Treatment															
Beta Transus(°C)	888	888	1038	996	998	946	935	890	796	760	793	718	1070	1050	
Weldability	Excellent	Good	Fair	Fair	Fair	Limited	Good	Fair	Fair	Good	Fair	Poor	Poor	Poor	
Forging(°C)	880	760	1010	1038	980	932	875		900	1038	900	1100			
Solution Treatment(°C)	704/2h/AC	N/A	N/A	982	830/1h/WQ	870/1h/WQ	900/0.5h/WQ	802/1h/WQ	760/1h/WQ	790/0.5h/WQ	815/0.5h/WQ	788/0.5h/WQ			
Aging(°C)	540/1h	N/A	N/A	560/8h/AC	538/4h/AC	593/6h/AC	496/4h/AC	650/8h/AC	495/8h/AC	540/8h/AC	480/12h/AC	482/36h/AC			

사용량은 1988년 이후 최근 들어서야 괄목할 만한 성장이 이루어지고 있음을 알 수 있다(그림 3). 그러나 아직까지도 많은 자동차 생산업체가 참여할 수 있을 정도의 상황에까지는 이르지 못하고 있는 실정이다⁽²⁾.

따라서 이 글에서는 현재 사용중인 자동차용 티타늄 합금 부품의 종류와 특성, 티타늄 부품으로 대체되었을 경우에 성능상의 장단점, 그리고 제조방법과 사용상의 문제점 등을 알아보고, 아울러 가까운 장래에 사용될 가능성이 높은 티타늄 합금

부품의 종류와 개발 양상에 관하여 알아보려고 하였다. 또한 티타늄 부품이 보다 광범위하게 자동차에 사용되기 위해서 어떠한 제약조건들을 극복해야 하는지를 알아보고, 자동차용 티타늄 합금 부품의 미래에 대하여 고찰해 보고자 하였다.

2. 자동차용 티타늄 합금

2.1 개요

자동차 부품으로 사용되는 금속재료는 상온에서의 기계적 강도와 피로성질이 좋아야 하며, 아울러 생산성 향상을 위하여 냉간 가공성과 피삭성이 좋아야 한다. 또한 고온에서 작동하는 엔진에 사용하기 위해서는 300°C 정도에서의 고온 강도, 피로, 크리프 및 내산화성이 좋아야 한다. 이러한 요구사항에 부합되는 자동차용 부품으로 사용 가능성이 높은 티타늄 합금들의 물성을 표 2에 요약하였다. 티타늄 합금은 상온에서의 안정상에 따라서 α , $\alpha+\beta$, β 합금으로 구분 되어진다. 일반적으로 α 합금은 고온 구조용 재료로, β 합금은 상온 가공용 재료로, $\alpha+\beta$ 합금은 두 경우에 모두 사용 되어진다. 자동차용 소재로 가장 많이 이용되는 Ti-6Al-4V 합금은 전형적인 $\alpha+\beta$ 합금으로 열처리가 가능하며, 열처리 조건에 따라 등축정(equiaxed), 침상(lamellar), 혼합(bimodal) 조직으로의 변환이 가능하기 때문에 티타늄 합금 부품이 사용되어지는 조건에 따라 열처리 방법을 달리 하여 미세조직을 조절함으로써 사용목적에 따라

적절하게 변화를 줄 수 있다. 티타늄 합금의 조성에 따른 물리적 및 기계적 성질, 합금의 조성특성, 미세조직과 기계적성질, 열처리 방법 등에 대한 기초 정보를 표 2와 문헌 16에 요약하였다.

산업의 발전과 더불어 환경보호 차원에서 자동차의 성능 향상에 많은 관심이 집중되고 있어 티타늄 부품 사용 가능성이 점차 더 높아지고 있다. 최근들어 심화되고 있는 자동차 공해를 줄이기 위해서 배기가스(NOX)의 규제가 법적으로 성문화(CAFE) 되어지고 있는데, 이러한 요구사항을 만족시키기 위해서는 두 가지 방법이 강구되어져야 한다. 즉, 자동차의 경량화 또는 엔진의 성능을 향상시키므로써 공해를 방지할 수 있는데, 이러한 두 가지 목적 모두에 티타늄 합금 부품이 이용될 수 있다. 현재 자동차에 이용되는 티타늄 합금 부품은 주로 엔진에 들어가는 소형 부품들인데, 티타늄 합금을 엔진 부품으로 사용하게 되면 4기통 승용차의 경우 약 2.2kg 정도의 무게 감소가 이루어진다. 이와같은 소량의 무게감소로도 고속에

표 3) 자동차용 티타늄 부품의 종류 및 특성

Part	Weight	Racing	Concept	Limited	High Grade	Ordinary	Material	Characteristics	
	Reduction	Car	Car	High Grade Car	Car	Car			
Engines	Connecting Rods	30%					Ti-6Al-4V Ti-3Al-2V	Machinability Anti-friction	
	Valves	40%				Ti-1100	Ti-6Al-4V	Machinability Anti-friction	
	Valve Springs	55%					Beta-C Ti-6Al-4V	Anti-friction	
	Spring retainers	40%					Ti-22V-4Al	Formability Anti-friction	
	Under-Carriage	Suspension Spring	50%					Beta-C	Young's Modulus Strength
Drive Shafts		30%					Beta-C	Strength Machinability	
Fittings & Others		40%		Outer shell	Wheel, Door Mirror	Adopted		CP-Ti	Thermal Expansion Ultrasonic Transmission
Motor Bike			Drive Chain		Muffler	Under Study		Ti-15-3	Strength Anti-friction

서의 운동중량이 경감되고, 따라서 각각의 부품의 가속성이 증가하게 되어 보다 빠른 속도로 달릴 수 있기 때문에, 경주용 차량에는 이미 20년 전부터 티타늄 부품이 사용되어지고 있다⁽³⁾. 또한 그동안의 지속적인 연구개발 노력의 결과로 일부 부품이 경주용차에 뿐만 아니라 스포츠용 차량에도 사용되어지고 있다. 표 3에 현재 자동차에 사용되고 있는 티타늄 합금 부품과 이들 부품이 장착되어진 차종 및 재료에 관하여 요약하였다⁽²⁾. 이 표에서 알 수 있는 것과 같이, 처음에 티타늄 합금 부품이 사용되어진 차종은 성능이 우선적으로 고려되는 경주용차(racing car)와 설계단계에 있는 개념차(concept car), 스포츠 카(sports car) 또는 고급 상용차(high grade car)에 적용되고 있다. 그러나 상용차(ordinary car)에는 경제성 측면에서 아직까지는 광범위하게 사용되지 못하고 있는 실정이다. 일반적으로 경주용 차량과 승용차 모두에게 요구되어지는 특성은 1) 안정성, 2) 성능, 3) 신뢰성, 4) 가격, 5) 정부 또는 협회 규격 만족 등이고, 승용차에는 이에 더하여 경제성과 외관이 중요하게 고려되게 된다. 티타늄 부품을 사용하게 되면 전술한 바와 같이 자동차의 성능과 경제성 측면에서 많은 장점을 갖고 있으면서도 승용차에 까지 광범위하게 사용되지 못하고 있는 중요한 이유는 이 재료의 고가로 인한 초기 가격 상승 때문이다.

'90년대에 들어서 세계적으로 자동차 제조 회사들이 고객의 취향에 맞는 고급 승용차나 스포츠차의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 차종의 개발을 위하여 차체 경량화 뿐만 아니라 고효율 엔진의 개발을 통한 연비의 향상, 고속주행, 엔진 출력 향상, 엔진의 반응성(responsibility) 향상, 소음 및 진동의 감소 등을 추구하고 있기 때문에 자동차용 신소재 개발에도 많은 연구가 진행되고 있다. 따라서 이러한 목적의 신소재로 앞에서 언급한 여러가지 물성이 우수한 티타늄 합금 소재를 이용하여 자동차 부품을 대체하고자 하는 노력이 배가되고 있다.

2.2 기존금속재료와의 비교

현재 자동차에 쓰이고 있는 소재는 경제성 때문에 주로 일반 탄소강이 많이 이용된다. 또한 최근들어 자동차 경량화를 위하여 차체재료로 고강도 알루미늄 합금의 사용량이 증가되고 있다. 이들 기존의 소재에 비하여 티타늄 합금은 그림 4에 나타난 것과 같이 상온에서 비강도(강도/밀도)가 월등하게 높기 때문에 소재 가격이 고가임에도 불구하고 자동차용 경량화 소재로 오래 전부터 주목을 받아오고 있다. 또한 티타늄 합금은 500°C의 고온에 이르기까지 상대 재료들에 비하여 우수한 비강도를 유지하기 때문에 고온에서 작동하는 엔진용 구조재로 사용되어질 수도 있다. 티타늄 합금은 앞에서 언급한 비강도 뿐만 아니라 비인성(인성/밀도) 또한 상대 금속재료에 비하여 월등히 우수하기 때문에 내충격이 요구되는 경량 차체 재료로도 유망하다(그림 5 참조). 아울러 상온에

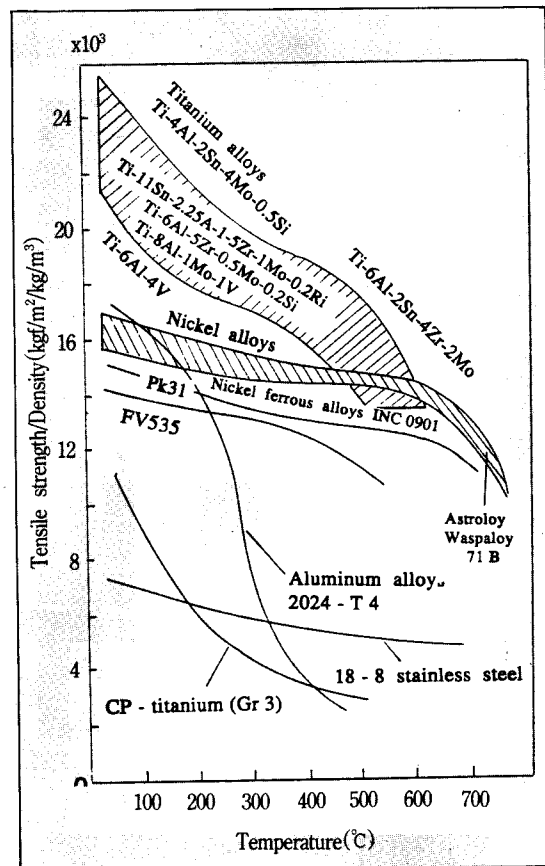


그림 4) 각종 합금의 비강도 대 온도와의 관계 비교

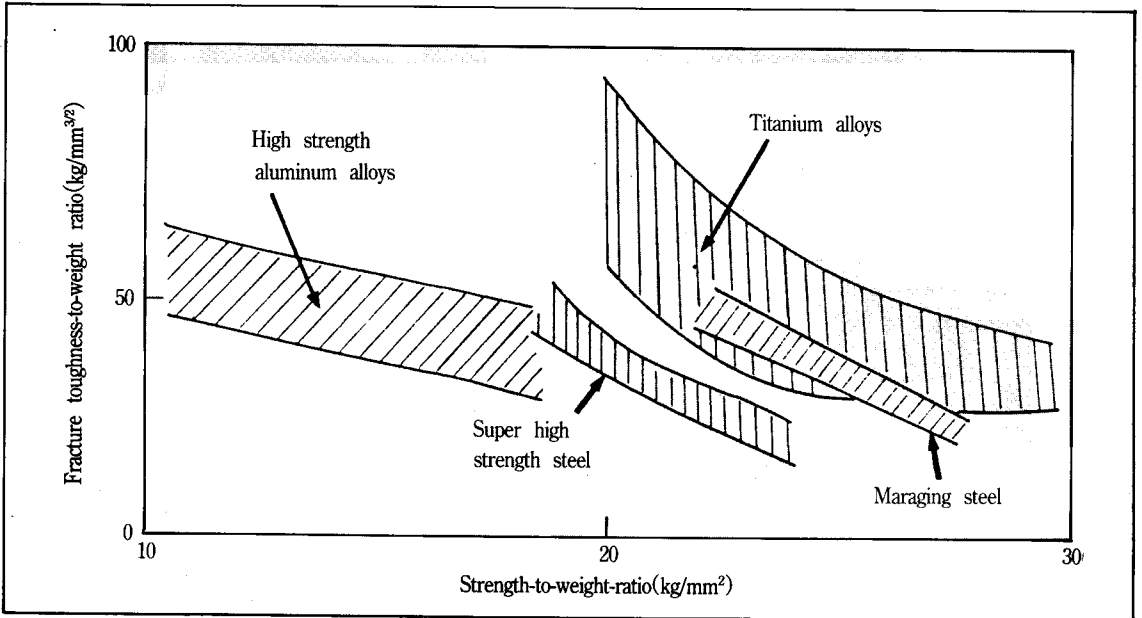


그림 5) 각종 합금의 비파괴인성 대 비강도와와의 관계 비교

서의 비파괴강도(피로강도/밀도) 역시 우수하기 때문에 반복적인 하중이 걸리는 자동차 부품에도 그 사용이 고려되고 있다(그림 6 참조). 티타늄 합금은 고온에서도 피로강도가 인장강도의 0.55~0.65 정도를 유지하기 때문에 기존의 철강재료의

0.35~0.50 정도에 비하여 월등히 높고, 따라서 고온에서 내피로성이 요구되는 엔진 부품의 대체 소재로 유망하다.

티타늄 합금의 특성을 이용하여 가까운 장래에 사용되어질 것으로 예측되는 또 다른 부품이 연구 개발되고 있다. 티타늄 재료는 비강도가 높을 뿐만 아니라 탄성계수가 낮기 때문에 스프링 재료로 사용하게 되면 중량을 경감시킬 수 있게 되어, 엔진용 밸브 스프링으로 뿐만 아니라 차체용 suspension 스프링으로도 이용되어 자동차의 경량화에 많은 기여를 할 수 있다. 또한 티타늄 합금은 다른 금속재료에 비하여 높은 비강도를 가지면서도 감쇄능(damping capacity)이 높기 때문에, 최근에는 방진용 부품을 개발하여 자동차의 운행중에 발생하는 진동이나 충격을 흡수함으로써 보다 승차감을 높이는데 사용하고자 하고 있다. 이러한 성질을 이용한 부품개발의 한 예로 뒷거울의 보호대가 있으며, 이러한 부품은 운행중에 진동에 의한 거울의 흔들림을 막아주어 후방물체의 식별을 보다 용이하게 하는데 사용될 수도 있다. 이와같이 티타늄 합금의 특성을 이용한 새로운 자동차 부품에 대한 연구 개발이 지속적으로 진행되고 있다.

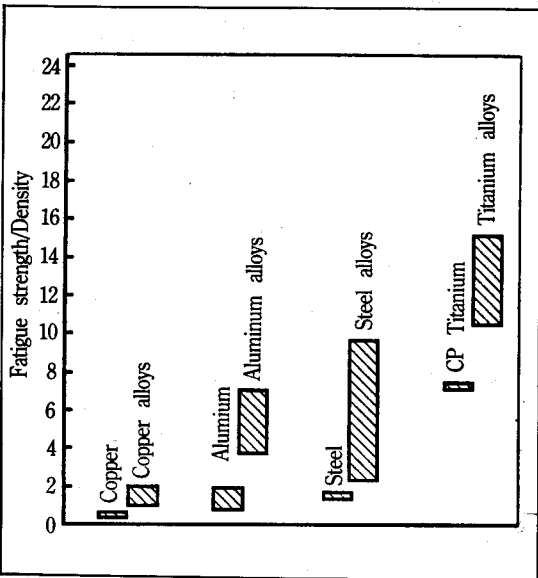


그림 6) 각종 합금의 비피로강도 비교

3. Ti 합금 부품의 응용 현황 및 장점

3.1 응용 현황

앞에서 기술한 티타늄 재료의 특성을 이용하여 티타늄 합금 부품이 경주용 및 스포츠 차량의 한정적인 부품에 이미 기업화되어 생산되고 있다. 현재 자동차용 부품으로 사용되는 티타늄 재료는 주로 엔진에 사용되고 있으며, 밸브, 밸브 리테이너, 커넥팅 로드, 밸브 스프링이 주 제품이다. 엔진 단면도와 이들 부품의 위치를 그림 7⁽⁴⁾에, 기존 부품을 티타늄으로 대체함에 따라 예상되는 무게감소의 결과를 표 4⁽⁵⁾에 나타내었다. 또한 실제 일본에서 스포츠용 차에 이용되는 티타늄 부품의 형상을 그림 8⁽⁶⁾에 나타내었다. 이들 부품에 대한 특성과 응용 현황에 대하여 다음에 기술하였다.

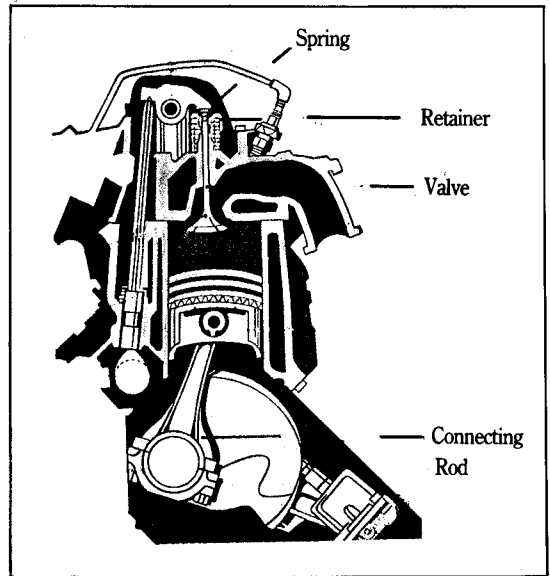


그림 7) 티타늄 부품이 이용되는 엔진 단면도

3.1.1 밸브(Valve)

티타늄 합금으로 제조된 자동차용 부품중에서

가장 많이 활용되는 부품은 엔진 실린더의 흡입과 배기용 밸브이다. 미국에서 자동차용 밸브만 전

표 4) 엔진부품을 티타늄 합금으로 대체할 경우의 무게감소 효과

Parts	Amount Per An Engine	Original Parts		Titanium Parts		Weight saving by Titanium Part
		Used Material	Weight of a part(gr)	Weight of a part(gr)	Possible Material	
Intake Valve	4	Heat Resistance Steel SUH 3 SUH 35	100	60	Ti-6Al-4V	40%
Exhaust Valve	4		90	54	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	40%
Valve Spring	8	Spring Steel Piano Steel	60	22**	β-C (Ti-3Al-8V-6Cr 4Mo-4Zr)	63%
Valve Retainer	8	Carbon Steel S45C	30	8**	Ti-6Al-4V Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr Ti-20V-4Al-1Sn	73%
Connecting Rod	4	Carbon Steel S45C	1100	730	Ti-6Al-4V	34%
Total Weight per an Engine			5880	3616		40%

* 4 Cylinder 2 Valve Type Engine

** Including Design Modification

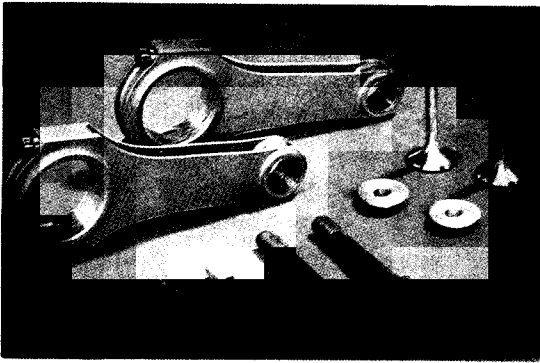


그림 8) 스포츠 카에 이용되는 티타늄 부품

문적으로 생산하는 업체가 다수 있을 정도로 일반화된 경제성이 있는 부품이다. 현재 상용차에 사용되는 내열강 밸브는 100gr 이나, 티타늄 합금으로 대체하는 경우에는 60gr 정도로 밸브 한 개당 40gr 정도의 무게 감소가 가능하고, 따라서 동적중량이 감소되어 10~15%의 고속성능이 증대되는 것은 물론이고, 티타늄 합금은 고온 내식성이 우수하기 때문에 수명이 2~3배 증대되어 경제성과 신뢰성의 증대가 예상된다. 실제로 티

타늄 밸브를 V-8 엔진에 채용한 경우에 캠 축의 형상 설계변경의 결과와 함께 회전수가 증대하여 약 800rpm 정도의 엔진 회전수가 증대되고, 이에 따른 torque 증가가 보고되어 있다⁽⁴⁾ 흡입용 밸브의 경우에는 작동온도가 300°C 이내로 낮기 때문에 Ti-6Al-4V 합금이 사용되나, 배기용 밸브의 경우에는 전자보다 사용온도가 더 높기 때문에 고온용 티타늄 합금인 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo가 사용되고 있다. 티타늄 합금으로 제조된 흡입용 밸브는 약 10년 전부터, 배기용 밸브는 약 5년 전부터 상용화되어 사용되고 있으며, 보고된 자료에 의하면 흡입용 밸브의 수명은 약 9년, 그리고 배기용 밸브의 수명은 약 4년 정도로 알려져 있다⁽⁴⁾. 미국에서 제조되는 대부분의 경주용차에는 이러한 티타늄 합금 밸브가 사용되고 있다. 또한 티타늄 합금 밸브를 사용한 일제 경주용차 R380이 호주 릴레이 레이스에서 우승을 하고, R382가 일본 그랑프리 레이스에서 우승을 거둔 예도 있다⁽⁷⁾.

그림 9에 엔진용 밸브의 실물과 함께 특수 표면처리의 예를 나타내었다. 티타늄 밸브를 사용

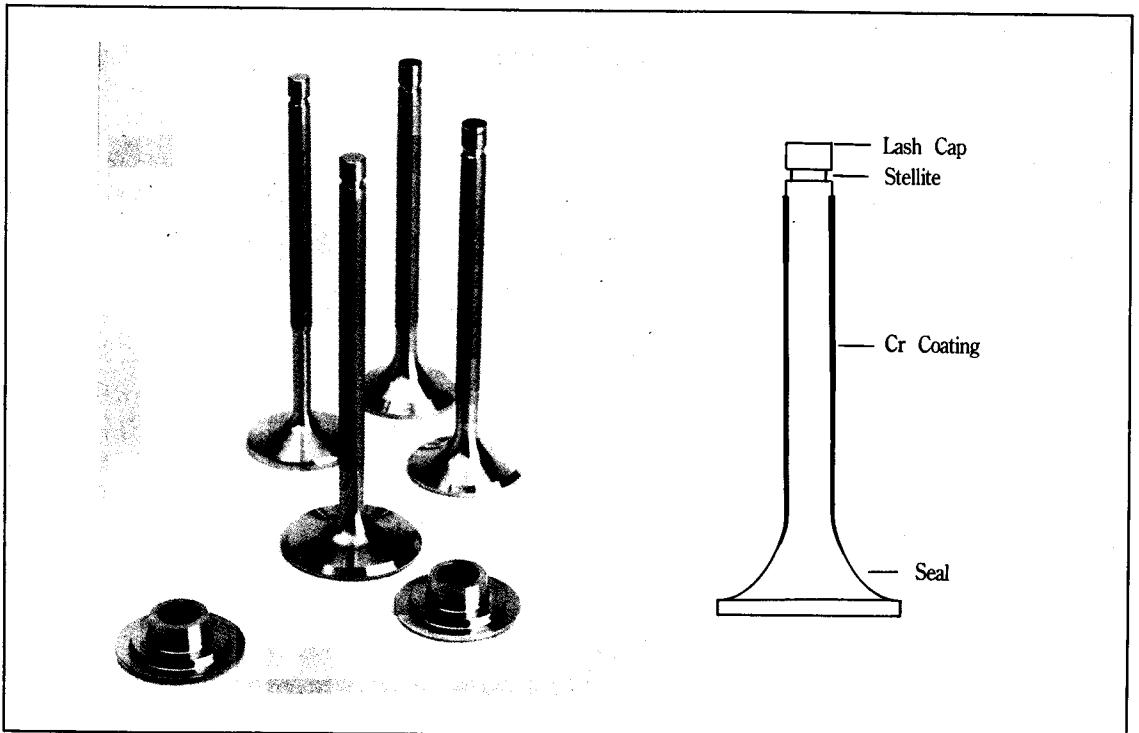


그림 9) 자동차용 티타늄 밸브 및 표면처리 예

하는 경우에는 밸브 측면과 가이드 사이에서 빠른 왕복운동에 의한 마찰열에 의하여 축 부위의 표면이 용융되어 달라 붙는 경우가 생기기 때문에 표면처리가 필수적으로 요구된다. 따라서 밸브의 축 부위에는 그림에 나타낸 것과 같이 30~40 μ m의 경질 크롬 도금을 하거나, 나중에 기술할 Mo 용사, Tiduran 법과 같은 표면처리 방법에 의한 특수 처리가 반드시 선행되어야 한다. 또한 밸브의 끝부위는 rocker arm과의 마찰에 의하여 철강재보다 연한 티타늄 밸브가 쉽게 손상되기 때문에 철강재 cap(lash cap)을 밀착시키거나, stellite 은납 brazing 처리에 의한 철강재 cap을 용접시켜 사용되어야 한다. 그러나 밸브의 마개(seal) 부위는 왕복운동에 의한 마모가 그리 큰 문제를 야기시키지 않기 때문에 특수한 표면처리 없이도 사용이 가능하다. 고온의 엔진 내부에서 작동하는 밸브를 사용하는 동안에 발생하는 여러가지 급속적인 문제⁽¹⁹⁾들을 살펴보면 밀면은 고온크립에, 마개의 측면은 고온산화와 부식에, 축의 하단부는 피로에, 중앙부는 마모에, 윗부분은 캠 축과의 마모에 의하여 파괴에 이르기 때문에 티타늄 밸브의 가공 열처리를 통하여 이와같은 작동조건에서 보다 오래 사용할 수 있도록 후처리가 고려되어야 한다.

3.1.2 밸브 리테이너(Valve Retainer)

이 부품은 형상이 단순하고 작기 때문에 간단한 단조작업과 기계가공으로 쉽게 제조될 수 있다. 따라서 경제성의 관점에서도 유망하기 때문에 경주용 및 스포츠용 자동차에 이미 적용되어 양산화되고 있다. 현재 일본에서 생산되고 있는 이 제품의 생산량이 이미 연간 25만개를 상회하고 있다^(4,7). 또한 이 제품은 특수한 표면처리를 하지 않고도 사용될 수 있기 때문에 티타늄 합금을 자동차 부품에 응용하기에 가장 용이한 부품중의 하나이다. 현재 상용차에 사용되고 있는 밸브 리테이너는 주로 내열강으로, Ti-6Al-4V 합금으로 대체하는 경우에는 20gr 정도의 무게 감소가 예측되며, 따라서 밸브의 경우와 마찬가지로 운동중량이 감소되어 엔진의 효율이 증가된다. 일반적으로 이 제품의 재료로는 Ti-6Al-4V가 많이 사용되나, 상온 성형성이 좋은 β 티타늄 합금(Ti-

15V-3Al-3Sn-3Cr) 합금도 이용된다.

3.1.3 커넥팅 로드(Connecting Rod)

자동차 엔진의 운동중량을 경감시키는데 있어서는 무엇보다도 중량이 큰 커넥팅 로드의 무게 감소가 가장 효과적이기 때문에, 일찍부터 자동차 부품으로서의 사용이 고려되어 왔다. 그러나 티타늄 합금의 가격이 기존의 철강재료에 비하여 10배 정도 비싸고, 형상이 복잡하여 형단조를 하여야 하며 아울러 가공성이 철강보다 좋지 않기 때문에, 이러한 경제적인 문제점으로 인하여 현재까지도 밸브나 밸브 리테이너에 비하여 그리 많이 사용되어지지 못하고 있다. 또한 최근에는 알루미늄 합금의 성능향상으로 기존의 철강재료 뿐만 아니라 알루미늄 합금 부품과도 경쟁을 하여야 하는 상태에 있다. 커넥팅 로드를 티타늄 합금 부품으로 대체하는 경우에는 그 합금의 물성에 부합되는 형상으로 설계가 변경되어야 한다. Groth⁽⁸⁾의 계산에 의하면, 기존의 형상을 유지하는 티타늄 부품인 경우에는 약 43%의 무게감소가, 최대부하 응력을 고려하여 일부를 보강하는 설계를 할 경우에는 약 27%의 무게감소가 티타늄 합금의 낮은 탄성계수를 고려하여 안전한 설계를 할 경우에는 약 17%의 무게감소가 가능하다고 보고하고 있다. 이 부품은 엔진의 회전수와 동일한 빠른, 속도로 움직이기 때문에 17%의 커넥팅 로드 정지 중량 감소는 성능개선의 면에서 획기적이라 할 수 있다.

커넥팅 로드에서 사용되는 티타늄 합금으로는 Ti-6Al-4V가 가장 많이 쓰이고 있으나, Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-4Al-4Mn-0.2Si, Ti-7Al-4Mo 등의 합금도 가공성과 강도의 관점에서 고려되고 있다. 커넥팅 로드의 thrust면에는 내마모성 증대를 위한 표면처리를 하여야 하는데, 밸브의 경우와 마찬가지로 Mo용사, 경질 크롬도금, Tiduran 처리 등이 사용된다. 티타늄 합금으로 제조된 커넥팅 로드의 사용상의 문제점으로 변형(distortion), 볼트의 피로파괴, 결합부위에 위치한 베어링의 파괴, 윤활의 어려움에 의한 마모 등이 있다. 이러한 기술적인 문제점과 경제성의 어려움에도 불구하고 자동차의 경량화와 연비향상, 공해방지의 현대적인 개선점을 달성하기 위해서 티타늄 합금으로 제조된 커넥팅

로드가 보다 많이 사용되어질 전망이다.

3.1.4 스프링(Spring)

티타늄 재료는 비강도가 크면서도 탄성계수가 다른 금속재료에 비하여 낮기 때문에 스프링 재료로 사용하게 되면 피로강도가 높으면서도 무게가 가벼운 자동차용 스프링의 생산이 가능하다는 장점이 있다. 일반적으로 코일 스프링의 경우, 스프링 상수 (k)와 전단응력 (τ)은 다음의 관계식으로 나타내어 진다.

$$k = (P/\delta) = (G/n) \times (d^4/8D^3) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\tau = (8 P D/\pi d^3) \dots\dots\dots (3.2)$$

여기서 P는 하중(kg), δ는 변형량, G는 전단탄성계수(kgf/mm²), n은 스프링 권수, d는 스프링 재료의 직경(mm), D는 스프링 코일의 직경(mm)을 나타낸다. 이 경우 스프링 전체 무게(W)는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$W = (\pi^2 d^2 D n \rho)/4 \dots\dots\dots (3.3)$$

여기서 ρ는 밀도를 나타내며, 식 (3.1), (3.2)를 이용하여 D, d, n을 치환하면

$$W = (2 G \rho/\tau^2) \times (P^2/k) \dots\dots\dots (3.4)$$

와 같이 나타내 진다. 이것으로 부터 일정한 하중 (P)이 걸리는 상태에서 동일한 스프링 상수 (k)를 가지는 스프링의 중량은 전단탄성계수와 비중에 의하여 결정되게 된다. 티타늄 합금의 경우, 철강 재료와 비교하여 강도가 같은 상태에서 밀도가 56%, 전단탄성계수가 50% 정도 밖에 되지 않기 때문에, 같은 성능을 가지는 스프링의 경우에 무게가 이론적으로 28% 정도가 되며, 따라서 72%의 무게 감소가 가능하다. Sherman⁽⁹⁾은 β 티타늄 합금을 이용한 suspension 스프링을 설계할 경우 50~70% 정도의 무게 감소가 가능하다는 것을 보여주었다. 실제로 β 티타늄 합금 Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr을 이용하여 코일 스프링을 만든 경우, 최대 전단응력 839MPa까지 사용 가능하면

서도, 이와 동일한 성능을 가지는 철강 스프링에 비하여 47%의 무게 밖에 가지지 않기 때문에 확실한 중량감소 효과가 기대된다.

또한 티타늄 합금은 감쇄능이 크고 고유진동수가 크므로 엔진의 고속회전시에 문제가 되는 surging현상을 피할 수 있기 때문에 수명연장에 확실한 효과가 있다. 스프링의 일차고유진동수 (f₁)는 다음과 같이 나타내어진다.

$$f_1 = d/(2 \pi n D^2) \sqrt{(g G/2 r)} \dots\dots\dots (3.5)$$

여기서 고유진동수는 Hz로 나타내지며, g는 중력 가속도(9.8×10³mm/s²), r은 스프링 재료의 단위 체적중량(kg/mm³), 그리고 다른 상수는 위에서 정의된 의미를 가진다. 실제로 스프링에 이용되는 β-C 티타늄 합금의 고유진동수는 870Hz로 기존의 철강부품의 483Hz에 비하여 월등히 증가된다⁽⁵⁾. 이러한 무게감소와 고유진동수 증가와 같은 확실한 결과에도 불구하고 이 분야에 대한 연구결과는 상대적으로 적으나, 실제로 티타늄 합금으로 제조된 스프링은 피로강도가 아주 우수하여 사용수명이 2~3배 연장된다고 보고되어 있다. 또한 티타늄 합금 스프링을 사용할 경우에는 철강 또는 알루미늄 부품과 접촉되는 부위에 특수한 표면 처리를 할 필요가 없다는 장점을 가지고 있다.

티타늄 합금으로 제조된 suspension 및 엔진 스프링이 장착된 경주용차가 오래전 부터 사용되고 있고, 일부 상용차에도 이러한 스프링이 시험적으로 사용하고 있는데, 대표적인 차량으로 Porsche 917을 들 수 있다. 또한 미국에서는 19개의 상용차종에 일반 스프링 대신 티타늄 합금 스프링을 장착하여 사용되고 있다는 보고도 있다⁽⁴⁾.

3.2 엔진에 Ti 부품을 사용할 때의 이점

엔진 부품으로 티타늄 합금을 사용하게 되면 부품 자체의 무게감소로 인한 부하경감과 같은 경량화 효과 뿐만 아니라, 이들 부품과 연계되어 사용되어지는 엔진 시스템의 설계변경이 따라서 이루어 저서 고효율 엔진의 제조가 가능해 진다.

앞에서 언급한 엔진에 사용되는 티타늄 부품의 경량화에 의한 추가 효과를 알아 보았다.

밸브 및 밸브 리테이너

밸브 및 리테이너가 티타늄 합금으로 교체되어 부품의 무게가 감소되면 상하 운동시에 왕복운동 질량이 감소되고, 이에 따라 캠 샤프트의 형상을 개선하여 흡입과 배기 밸브의 열림과 닫힘 시간을 조절할 수 있게 된다. 아울러 공기 흡입시간을 보다 오래 열어두게 되어 흡/배기 밸브의 overlap 시간을 감소시킬 수 있게 된다. 이로 인하여 밸브 시스템의 가속성과 반응성이 향상되어 엔진 회전수가 증가되고, 아울러 torque가 증가되게 된다. 또한 엔진의 소요 성능이 설계단계에서 결정되어진 경우에는 엔진의 소형화가 가능하게 되어 자동차의 소형화, 경량화가 가능하게 된다. 또한 이들 부품의 경량화로 인하여 밸브 시스템의 마찰이 경감되게 되어 고성능 엔진의 제조가 가능해지며, 이에 따라 엔진의 신뢰성과 수명이 연장되게 된다. 실제로 밸브 시스템에서 발생하는 마찰이 엔진 전체에서 발생하는 마찰의 25% 정도라고 알려져 있으며, 이들 부품을 티타늄 합금으로 대체하였을 경우에는 약 10% 정도의 전체 마찰을 줄일 수가 있다고 보고되어 있다.⁶⁾

밸브 및 리테이너의 중량이 감소되면, 스프링에 걸리는 부하를 경감시켜 이 부품의 수명을 연장시킬 수 있게 되고, 따라서 실린더 헤드의 마모를 감소시키게 되어 엔진의 신뢰성과 수명을 연장시킬 수 있게 된다. 아울러 밸브 시스템의 중량감소는 스프링의 경량화 또는 소형화로 연계되어 스프링에 의한 마찰 역시 경감시킬 수 있게 되므로 고성능 엔진을 가능하게 한다.

커넥팅 로드

티타늄 합금으로 이 부품을 제조하여 기존의 철강 부품을 대체하게 되면 앞에선 살펴본 것과 같이 약 40%의 무게감소가 가능하고, 이로 인하여 크랭크 샤프트의 경량화와 연결 부위의 직경이 작아지게 되어 피스톤의 마찰력이 감소하게 된다. 크랭크 샤프트 시스템의 경량화는 왕복회전 질량이 감소하게 되어 엔진의 진동과 소음을 줄일 수 있을 뿐더러, 엔진 회전수의 증대와 torque의

증대로 연결되어 엔진의 경량화 내지는 소형화를 유도하여 연비의 향상에 기여하게 된다.

밸브 스프링

티타늄 재료는 앞에서 언급한 것과 같이 고비강도를 가지기 때문에 동일한 형상을 가지는 경우에는 기존의 스프링강으로 제조된 밸브 스프링보다도 약 40% 정도의 무게 감소가 가능하게 되어, 엔진 회전수의 증가에 기여하게 된다. 또한 티타늄 재료의 전단탄성계수는 기존의 스프링 강보다 약 50% 정도로 낮기 때문에 앞에서 살펴본 것과 같이 스프링의 중량을 감소시키거나, 유효권수를 감소시켜 스프링의 밀착높이를 약 30% 정도 감소시킴으로써 엔진의 소형화를 가능하게 할 수 있다. 티타늄 재료는 감쇄능이 크고, 고유진동수가 크기 때문에 harmonic motion에 의한 부하 응력(surging 부하응력)이 경감되어 엔진의 회전수가 증가되어도 안전하게 사용될 수 있다. 또한 티타늄 재료의 고피로강도, 내열성, 고내식성, 비자성 등의 특징으로 인하여 스프링의 파괴를 방지할 수 있어서 엔진의 수명연장에 기여하게 된다. 아울러 이들 특징과 스프링 부품 경량화로 인하여 밸브의 반응성 향상과 함께 엔진 효율을 향상시킬 수 있게 되기 때문에 고성능 엔진 제조에 기여하게 되는 장점이 있다.

4. 가까운 장래의 자동차용 Ti 부품

티타늄 합금의 좋은 물성을 이용하여 가까운 장래에 자동차 부품으로 이용하고자 몇가지 부품이 연구 개발되어 왔다. 이와같이 티타늄 재료로 대체 가능성이 높은 자동차 부품을 그림 10과 그림 11¹⁰⁾에 나타내었다. 또한 이들 부품에 대한 특성과 응용 전망에 관하여 다음에 기술하였다.

4.1. 크랭크 샤프트(Crank Shaft)

티타늄 합금으로 교체되어질 수 있는 자동차 부품으로 엔진의 동력을 동체에 전달하는 크랭크 샤프트를 들 수 있다. 일본과 미국의 몇몇 자동차 회사에서 실험적으로 제조하여 실용화를 위한 노력이 있어 왔다는 보고는 있으나⁷⁾, 아직까지도

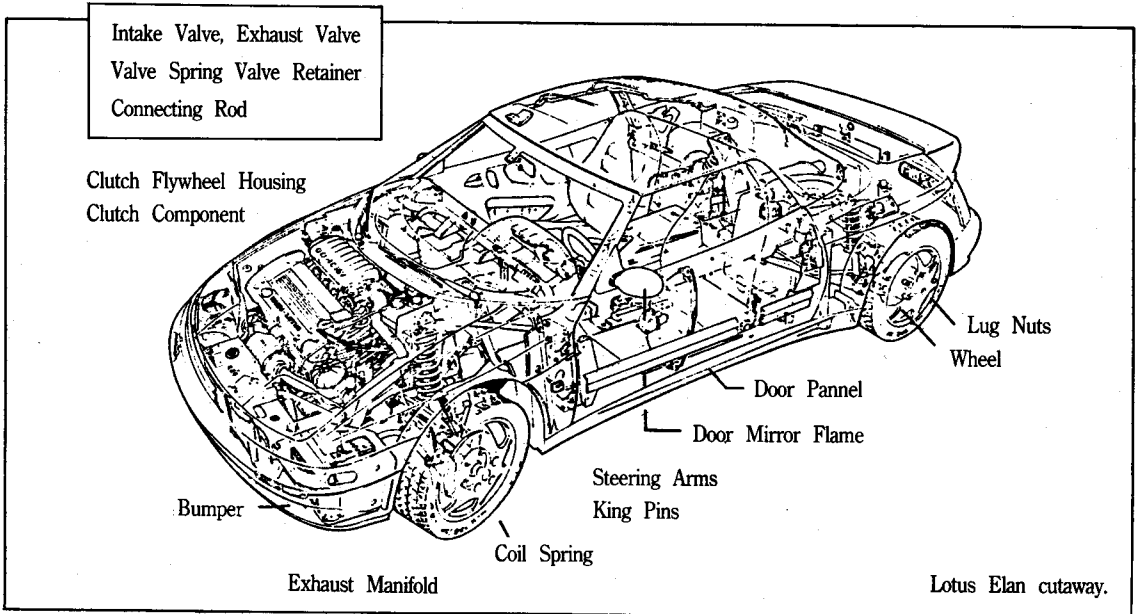


그림 10) 대체 가능성이 높은 자동차용 티타늄 부품 및 부위

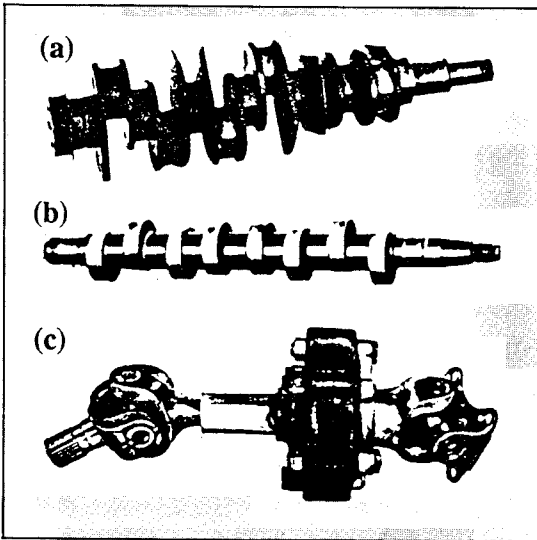


그림 11) Porsche의 엔진에 이용된 티타늄 부품 :

(a) crank shaft (b) cam shaft (c) drive shaft

실제 자동차에 적용했다는 사례는 없다. 그럼에도 불구하고 이 부품을 대체하고자 하는 노력이 연구개발 부서에서 지속적으로 고려되고 있다. 티타늄 합금으로 제조된 크랭크 샤프트를 채용하는 경우에는 마찰열에 의한 응축을 방지하기 위하여 밸브의 축에 적용하는 표면처리 방법이 사용되

어져야 한다. 이 부품의 제조를 위하여 주로 사용되는 재료로는 Ti-6Al-4V과 함께 가공성이 좋은 Ti-5Al-2Cr-1Fe도 고려되고 있다. 이 부품을 티타늄 합금으로의 교체는 더디게 하는 다른 하나의 이유로는, 엔진의 지속적인 회전을 위해서는 관성이 큰 부품, 즉 밀도가 높은 철강과 같은 재료가 오히려 더 좋다는 연구결과에 의하여, 경제성의 관점에서 불리한 티타늄 합금이 더욱 제약을 받고 있다.

4.2 기타 엔진용 부품

엔진과 같이 움직이는 부품을 경량화하게 되면 앞에서 기술한 이유에 의하여 엔진의 효율이 증대하게 되고, 자동차 경량화에 보다 효율적이게 된다. 이러한 이유로 엔진에 들어가는 몇가지 소형 부품을 티타늄 합금으로 대체하고자 하는 시도가 지속적으로 되어 왔다. 이러한 부품으로는 록커 암(rocker arm)과 밸브 스프링이 성공적으로 채용되어 가까운 장래에 사용량이 증가할 것으로 예상된다. 또한 개발이 시도된 부품으로 피스톤 핀이 있는데 Ti-6Al-4V으로 제조된 이 부품은 사용중에 응축의 문제점이 발견되어 전술한 표

면처리 방법으로 해결하였으나, 사용온도 조건에서의 낮은 탄성계수로 인하여 구부러지는 등의 변형 문제가 발생하여, 현재는 Ti-8Al-1Mo-1V 합금으로 대체하여 시험이 지속되고 있다. 또한 이러한 엔진 부품중의 하나로 커넥팅 로드를 연결하는 볼트(neck-down bolt)가 Ti-6Al-4V 재료로 제조되어 시험해 본 예가 있으나⁽¹¹⁾, 아직까지 실용화 단계에까지는 이르지 못하고 있다.

4.3 차체 및 기타 부품

경주용차의 배기계통 부품으로 직경 40~50 mm의 Ti-6Al-4V 합금 관재를 구부러 철강재 flange에 용접시켜 장착한 결과, 기존의 부품에 비하여 35~40%의 중량 감소효과를 얻을 수 있었다는 보고와 함께 티타늄 합금의 낮은 열전달 계수에도 불구하고 엔진의 성능에 아무런 영향을 주지 않기 때문에, 차체 경량화의 한 방편으로 이러한 재료대체가 가능하다고 알려져 있다. 실제로 Porsche 908 차량의 배기계통을 순수 티타늄 재료의 관재와 관재를 용접하여 제작한 결과, 450 kg의 차체 경량화를 시킨 예가 있다. 또한 크러치 디스크와 같은 트랜스미션 부품도 티타늄 재료로 대체가 시도되고 있으며, 최근에는 밸 하우스와 같은 부품을 스피닝으로 제조하여 사용하고 있기도 하다. 이러한 부품의 파괴시험 결과 충격완화 효과가 좋다고 알려져 있다. 또한 부분적이기는 하지만 소량의 티타늄 합금 볼트와 너트가 부품간의 체결에 사용되기도 한다. 이러한 목적으로 사용되는 볼트와 너트의 형상을 그림 8에 엔진 부품과 함께 나타내었다.

5. 자동차용 Ti 합금 부품의 성형 및 후처리

일반적으로 자동차용 티타늄 합금 부품들이 가져야 하는 주요한 성질로는 앞에서 살펴본 바와 같이 엔진 부품의 경우에는 높은 강도와 탄성계수를 가져야 하나 스프링은 반대로 낮은 탄성계수를 가져야 하며, 반면에 일부 부품은 감쇄능이 커야 하는 등의 사용용도에 따라 다양한 물성이

요구된다. 또한 이들 부품을 성형하기 위해서는 경제성이 높은 공정이 선정되어야 하며, 요구되는 물성을 얻기 위한 열처리 또는 표면처리와 같은 후처리가 병행되어야 한다.

5.1 Ti 합금 부품의 성형

일반적으로 자동차에 사용되는 티타늄 합금 부품을 만들기 위해서는 주로 압연, 단조, 분말야금, 압출, 주조, 용접 등의 비교적 간단한 금속재료 가공 공정이 사용된다^(12, 13, 14, 15). 그 이유로는 자동차에 사용되는 부품이 몇 종류 되지 않기도 하지만, 자동차 부품의 속성상 교체가 가능하기 때문에 항공기 부품에서의 품질 인증과는 달리 비교적 관대한 검사 규격이 적용되기 때문이다. 자동차용 티타늄 합금 부품이 가져야 하는 가장 중요한 기계적 성질은 상온에서의 강도 및 연신율과 피로강도가 좋아야 한다는 것이다. 따라서 이들 부품이 사용되는 상황에 따른 피로강도와 형상의 복잡성에 관한 관점에서 가공 공정과 제조 부품과의 관계를 도시하면 그림 12와 같이 나타낼 수 있다. 예를들면 피로강도가 가장 중요시 되지만 형상이 간단한 부품으로 스프링을 들 수 있다. 이러한 스프링을 제조하는데 있어서는 단순한 스프링 가공으로 가능하다. 반면에 높은 피로강도도 요구되면서 형상이 복잡한 부품으로는 커넥팅 로드를 들 수 있는데, 이 부품을 제조하기 위해서는 단조, 주조, 또는 분말야금 방법 모두가 가능하나, 요구되는 피로강도를 얻기 위해서는 정밀 주조품 및 분말야금 제품인 경우에는 정수압 가공(Hot Isostatic Pressing)이, 단조품인 경우에는 기계가공이 필수적으로 수반되어야 한다. 그러나 실제로 어느 공정을 택할 것인지는 거의 대부분이 경제성과 생산성에 달려 있다.

티타늄 합금은 일반 산업용 금속재료에 비하여 용융상태에서 반응성이 커서 진공에서의 주조와 특수한 주형재료가 필요 하고, 소재 가격이 비싸며, 가공성, 용접성 등이 나쁘기 때문에 가공 노력 및 경비가 보다 많이 요구된다. 주조는 일반적으로 VAR(Vacuum Arc Remelting), EB(Electron Beam) 용해, Plasma 용해 등의 방법으로 진공에서 청정 용해하여 CaO 등의 반응성이 낮은 세라믹 주형

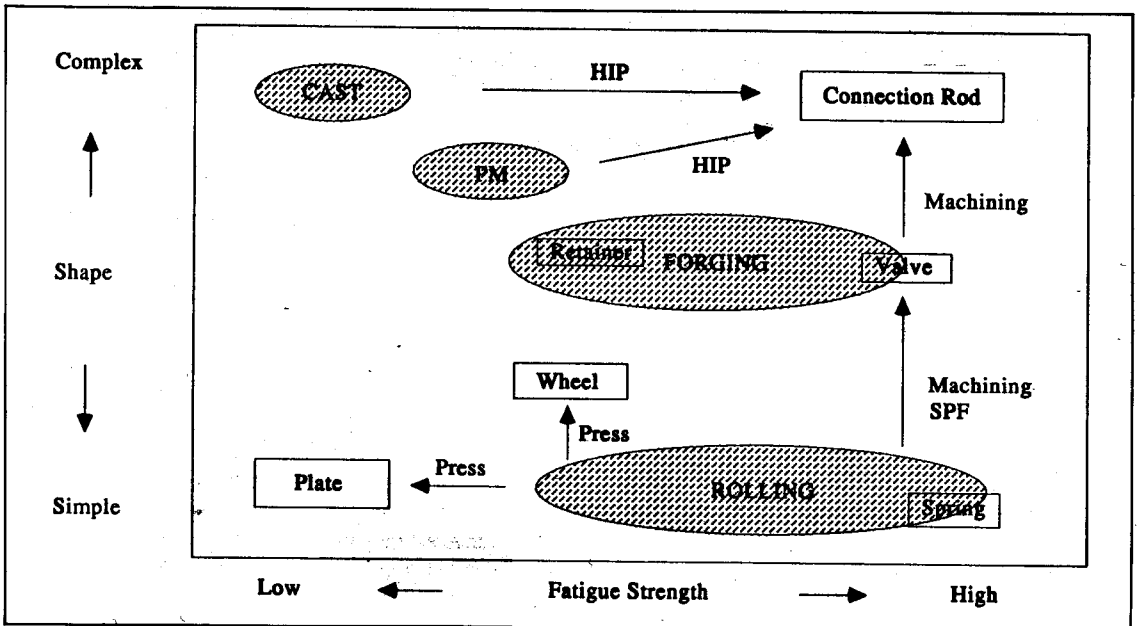


그림 12) 자동차용 Ti 부품의 가공 공정 및 제조 부품

재를 이용하여 부품을 제조한다. 티타늄 재료의 용해시에 가장 문제가 되는 기술은 용해 도가니와의 반응 억제와 용탕중의 불순물 혼입, 그 중에서도 잔존 산소의 양을 10ppm 이내로 조절하여야 하는 것이다. 티타늄 중의 산소는 소량이 유입되어도 충격인성에 많은 영향을 주기 때문이다. 그림 13에 경제성을 고려하여 정밀주조 방법으로 여러개의 밸브를 제조한 예를 보여주고 있다.

티타늄 합금의 단조는 일반적으로 850~1050°C 사이에서 $10^0 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 의 가공속도로, 금형온도 100~300°C로 예열하여 수행한다. 최적의 물성과 형상을 얻기 위해서는 소재온도, 금형온도, 단조속도, 단조횟수, 윤활제, 단조기 용량 등이 고려되어 작업하여야 하며, 후처리에 의한 미세조직 조절로 최적의 물성을 얻을 수 있어야 한다. 최근에는 항온단조법에 의한 소성온도와 가공량을 조절함으로써 최적의 미세조직을 가지는 부품을 제조하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 또한 CAD/CAM 기법을 이용하여 단조조건 시뮬레이션과 정밀금형 성형을 함으로써 경제적인 생산방법이 추구하고 있다.

분말야금법으로 제조할 경우 분말의 초기 화

학조성이 이미 합금화 되어 있는 경우에는 prealloyed PM(powder metallurgy) 방법으로, 다양한 조

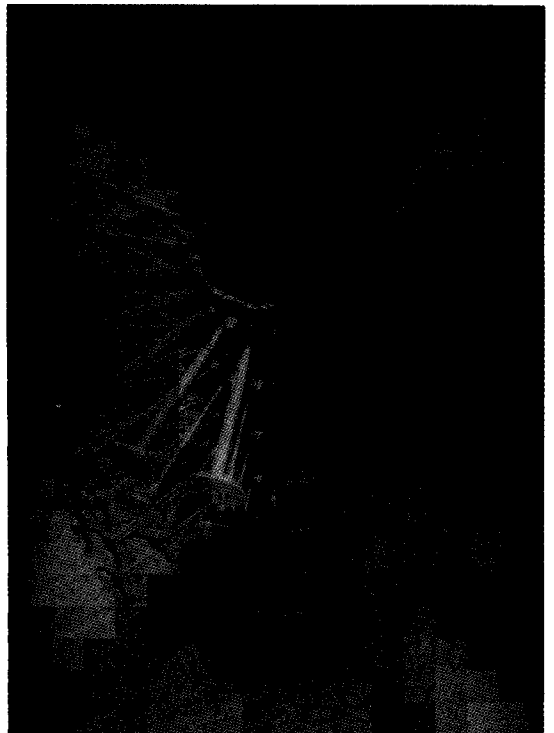


그림 13) 정밀주조법으로 제조한 티타늄 밸브 예

성의 분말을 혼합하여 제조하는 경우에 BE(blen-
ded elemental) PM 방법으로 성형되어진다. BE
PM 방법은 경제성의 관점에서 많이 이루어지고
있으나 분말과 함께 유입되는 산소, 수소 등에
의하여 소결후에도 공공과 같은 결함이 남게되어
물성이 저하된다.

5.2 표면처리

일반적으로 티타늄 재료는 다른 금속재료에
비하여 탄성계수가 90~110 GPa로 낮을 뿐만 아
니라 마찰계수가 0.5~0.6 정도로 크기 때문에 다른
부품과 마찰이 있는 기계요소 부품에 사용하기
위해서는 윤활유, 흑연, MoS₂ 등의 윤활제의 사용이
요구되어진다. 이러한 윤활제의 사용 없이 다른
금속재료와 미끄러짐 마찰이 있는 경우에는 마
찰열에 의하여 표면이 발화하거나 녹아 붙는 경
우가 생기게 된다. 자동차 부품으로 티타늄 재료를
사용하는 경우에도 이러한 문제점이 생기게 되기
때문에 윤활제의 사용이 고려되어야 하나, 지속
적인 윤활제의 공급이 어렵기 때문에 표면처리를
하여 표면의 강도를 높이면서 마찰계수를 낮추어
발화와 용착의 문제를 해결하게 된다. 이와같은
표면처리 방법으로는 다음의 세가지가 많이 이
용된다.

침입형 원소 경화법

티타늄은 산소, 탄소, 질소, 보론과 같은 침입형
원소의 고용도가 높고, 고용에 의한 화합물 생성
으로 인하여 표면경도가 매우 높아지며, 또한 공
업적으로 비교적 수월하게 작업할 수 있기 때문에
이 방법이 많이 이용된다. 이러한 방법으로는 흑
연중의 탄소를 티타늄 재료 표면에 확산시켜 탄
화물을 형성시키는 방법, 질소 또는 암모니아 가
스와의 반응에 의하여 표면에 질화물을 형성시
키는 방법, 염욕 경화법, 보론화 처리법 등이 있다.
질화처리가 일반적으로 많이 이용되는데, 이 방
법은 800~1000°C 정도의 고온 순수 질소가스중에
부품을 장입하여, 표면에 30~50μm의 질화층이
형성되도록 하는 방법이며, 주로 흡입밸브, 밸브
리테이너의 표면처리에 이용된다. 이와같이 질화

처리된 부품의 표면강도는 Vickers 강도 1000 이
상의 단단한 코팅층이 형성되게 된다. 또 다른
방법으로 800°C 정도의 고온 특수염에 부품을 담가,
표면에 50μm 정도의 질소와 산소의 반응층이
생성되도록 하는 Tiduran 법이 티타늄 합금 부품의
표면처리에 아주 유용하다. 이 처리에 의하여 표
면의 강도가 질화층과 유사한 단단한 코팅층이
형성되고, 이로 인하여 마모량이 90% 정도 감소
하고 마찰계수가 40%정도 저하되어 자동차용 부
품으로 유용하게 사용될 수 있다는 보고⁽¹¹⁾가 있다.
Tiduran 법에 의하여 표면처리된 밸브 및 가이드,
커넥팅 로드 및 베어링, 피스톤 핀, 밸브 스프링,
밸브 리테이너 등이 실제로 사용되고 있다⁽¹²⁾.

도금법(습식법)

현재 사용되는 여러가지 도금방법 가운데 티
타늄 합금 부품에는 경질 크롬 도금이 가장 유
망하다고 알려져 있다⁽⁹⁾. 도금하기 전에 전처리를
적절히 함으로써 티타늄 표면과 틱니 형상으로
강하게 맞물린 밀착된 크롬 도금층이 형성되므
로써 마모와 마찰에 좋은 효과가 있게 된다. 공
업적으로 제조시설이 저렴하여 경제성이 좋기
때문에 많이 이용되고 있으나, 최근에는 크롬에
의한 공해문제 때문에 건식 코팅 기술이 더 많이
고려되고 있다.

용사 및 용접법(건식법)

건식 도금의 한 방법으로 Mo이나 WC 등을
티타늄 합금 부품 표면에 용사시켜 표면 성질을
개선하고자 하는 것이며, 이 중에서도 프라즈마에
의한 Mo용사가 미국에서 가장 많이 이용된다고
알려져 있다. Shot Blast로 전처리를 한 다음, Mo과
가스를 적절히 혼합하여 프라즈마 상태의 고온
으로 부품 표면에 용사함으로써 단단하면서도
고밀도의 접착력이 좋은 코팅층이 얻어지며, 이
에따라 다른 어떤 코팅 방법보다도 내마모성이
향상된 표면이 형성된다. 또한 기계적 가공에 의
하여 표면정도를 0.005mm 까지 조절할 수 있기
때문에 높은 정밀도가 요구되는 밸브축을 제조
하기가 용이하다. 또한 티타늄 보다 단단한 부품과
맞부딪치는 부위에는 수명연장을 위하여 강도가
높은 합금을 용접하여 사용하게 되는데, 이 경우에

Stellite Brazing이 가장 많이 이용된다. 이 방법으로 티타늄과 다른 용접할 금속사이에 니켈을 넣어 Brazing하는 동안 은납과 니켈이 반응하여 강도가 높은 용접이 가능하게 된다. 실제로 Stellite 용접 방법으로 흡입밸브의 꼭지에 사용함으로써 좋은 결과를 얻고 있다.

6. Ti 합금 부품의 개발 현황 및 전망

6.1 국내외 개발현황 및 전망

선진국의 경우에는 자동차의 양산단계를 지나서 최고급 성능의 차량을 개발하는 단계에 있고, 따라서 티타늄 합금 부품의 적용이 활성화 되고 있다. 현재까지는 주로 경주용과 고급 스포츠 차량에 국한되어 있지만, Toyoda사는 이미 티타늄 밸브를 양산하여 사용하고 있고, Ford사는 신형차의 밸브 Train 계통에 티타늄 합금 부품을 적용하여 판매하고 있으며, Honda사는 스포츠 차량인 NSX 차종에 티타늄 합금으로 제조된 커넥팅 로드를 매월 3000개 정도 사용하고 있다. 또한 미스비사에서도 엔진용 티타늄 합금 부품의 사용을 고려하고 있고, 스미토모사와 다이도사에서는 이들 부품을 개발하여 일본 자동차 생산사에 공급하고자 노력하고 있다. 독일의 Porsche사에서는 스포츠용 차량에 이미 오래 전에 티타늄 부품이 엔진에 뿐만 아니라 기타 부품에도 사용되고 있다.

이와 같이 전세계적으로 모두 자동차용 부품으로 사용될 수 있는 티타늄 합금 부품 개발에 관한 관심이 고조되고 있지만, 지금까지 개발되어 양산되고 있는 티타늄 합금들은 주로 항공우주 목적에 필요로 하는 성질이 강조되어 있기 때문에 자동차의 성능에 적합한 새로운 합금개발과 후 처리에 관한 연구가 여러 곳에서 활발하게 진행되고 있다. 자동차용 부품으로 사용되기 위해서는 상온에서 내마모성, 고피로강도, 가공성, 고성능 선재가공 등과 같은 성질이 향상된 새로운 합금의 개발이 요구되어진다. 또한 이 분야의 새로운 연구개발의 결과로 가까운 미래에 자동차용 부품으로 사용이 고려되는 신소재에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다. 미래의 자동차용 티타늄

부품은 보다 높은 온도에서 견딜 수 있는, 고강도를 가지는, 경제적인 성형이 가능한 새로운 합금이 개발되어 사용되어질 것이 예측된다. 이러한 예로 스미토모사에서 현재 개발중인, 그리고 가까운 미래에 사용하기 위하여 연구중인 과제를 표 5와 표 6에 정리하였다⁵⁾.

세계적인 추세와 패를 같이하여 우리나라의 자동차 회사에서도 티타늄 부품을 적용하고자 하는 노력을 많이 하고 있다. 이러한 이유에서 최근에 대책과제로 진행되고 있는 HAN(Highly Advanced National) Project의 “정보전자에너지 소재개발”의 중과제로 “엔진경량화 소재개발”이 선정되었고, 그 세부과제로 “티타늄 합금 부품”이 채택되어 한국기계연구원 주관으로 향후 10년간 연구가 진행될 예정이다. 그러나 국내에는 티타늄 합금을 생산할 수 있는 시설이 거의 없는 상태이고, 아울러 이 합금을 연구해 본 경험도 일천한 상태이기 때문에 아마도 본 HAN 과제를 통하여 티타늄 재료에 관한 연구가 활성화 되리라 기대하고 있다. 국내의 티타늄 합금의 용해 및 주조 관련기술은 몇군데 대학과 연구소에서 실험실적 연구를 해 본 상태에 불과하고 생산적인 측면에서는 시험 결과가 거의 없는 상태이다. 따라서 자동차용 티타늄 합금 부품을 생산하는데 있어서는 소재를 수입하여 시제품을 제작할 수 있는 능력은 있으나, 소재개발 및 생산 능력은 전무한 상태에 있다. 또한 경제적인 부품 생산에 관한 기술도 아직은 선진국을 따라가기가 어려운 상태이다. 이러한 관점에서 이번 HAN 과제(티타늄 분야)에서는 1차적인 목표를 자동차 엔진용 티타늄 부품을 시험 제작해보는데에 까지 도달해 보고자 하고 있다. 이를 위하여 기아 자동차 기술연구소에서는 엔진 밸브의 설계, 성형, 코팅하여 실제 차량에 정착하여 실험해 보는 단계까지를 1차년도 연구목표로 설정하고 있으며, 현대자동차 기술연구소에서는 커넥팅 로드 시제품 제작에, 그리고 한국로트웍스사에서는 정밀주조 방법을 이용하여 상업성이 높은 화학용 부품 생산과 아울러 자동차용 부품의 생산을 위한 용해, 주형재료, 주형설계 등에 관한 연구 및 시제품 생산까지를 계획하고 있다. 이러한 연구 개발을 통하여 수요가

표 5) 스미토모사의 자동차용 티타늄 합금 개발

개발 합금	목 표	적 용 부 품
내마모성 Ti 합금	Stellite 이상의 내마모성을 가지는 내마모 Ti합금 개발 및 PTA 육성기술	밸브
고피로강도 선재 β-Ti 합금	고피로강도를 가지면서 냉간성형성이 우수하고, 단면 감소율이 70% 이상되는 선재용 β-Ti 합금개발	밸브 스프링
냉간 단조용 신 β-Ti 합금	β-Ti 합금 중 변형 저항이 가장 적은 냉간 단조가 가능한 신종 β-Ti 합금개발 (예) Ti-20V-4Al-1Sn	밸브 리테이너
경제성있는 고강도 Ti-6Al-4V 합금	산소를 Ti-6Al-4V 내에 0.4-0.5%까지 인위적으로 첨가시켜 강도가 20%정도 향상된 경제적인 Ti-합금 개발	흡입 밸브, 커넥팅 로드
경량 Ti-합금	현재 커넥팅 로드에서 사용되는 철강 재료보다 피로 강도가 높은 경량 Ti 합금 개발	커넥팅 로드

표 6) 미래용 티타늄 재료 개발

개발 합금	목 표	연 구 분 야
고온 티타늄 합금	배기 밸브 및 Turbo rotor 등에 사용하기 위한 고온 티타늄 재료	경량 내열 금속간 화합물(TiAl) 1) 상온 연성 개선 2) 양산화 개술 3) 내산화 개선 기술
초 고강도 선재용	고강도를 가지는 밸브 스프링 가공용 β-Ti 합금 선재	가공 열처리 기술
경제적인 Ti 합금	Ti 합금의 가격을 낮추기 위한 정밀 성형 또는 스크랩 이용기술	1) 스크랩 활용 기술 2) 정밀 압연 기술

많은 자동차 시장에 티타늄 부품이 사용됨으로써 해서 국내 티타늄 생산에 기폭제가 될 수 있도록 노력하고자 한다.

6.2 경제성

티타늄 합금은 가볍고도 강도가 높기 때문에 자동차 부품의 경량화를 위해서 이 재료의 선택이 끊임없이 고려되어져 왔다. 그러나 현재까지도 자동차용 부품으로 다양하게 사용되지 못하고 있는 이유는 이 재료의 공학적인 적합성에 있는 것이 아니라 경제적인 선택성에 기인된다. 일반적으로 자동차 업계에서 재료 또는 부품 대체시에 성능 증대보다는 가격 절감에 더 많은 비중을 두어

왔기 때문에, 단위 무게 감량을 위하여 지불되어 지는 경비가 어느 정도 이상인 경우에는 항상 문제가 되어 왔고, 티타늄 합금 부품 역시 이러한 문제 때문에 사용이 제한되어 왔다. 그러나 최근 들어 어느때 보다도 자동차 배기가스에 기인하는 공해문제와 이를 해결하기 위한 연비향상, 그리고 경량화 등에 많은 노력이 기울여지고 있기 때문에, 단위 무게 감량을 위해 지불하는 경비의 수준이 더 높히 책정되게 되었고, 이 결과 경제성 때문에 부품으로 채용하는데 문제가 되어 왔던 재료 및 부품이 다시금 선택상의 고려 대상이 되고 있다. 현재 티타늄 합금 부품의 가격은 기존의 부품에 비하여 5-10배 정도 비싼 상태이기 때문에, 이에 상응하는 성능 개선이 이루어질 수 있을 때만 대체

부품으로 사용 가능한 상태이다.

티타늄 합금의 가격이 비싼 이유는 국가적인 독점체제에 있는 항공산업과 너무 밀접한 관계에 있기 때문으로 생각된다. 항공산업은 그 특성상 단위 무게 감량을 위하여 지불할 수 있는 비용이 자동차산업에 비하여 월등히 높고, 소량 다품종이 요구되는 독점 성향이 높은 산업으로 소수의 기업에 의하여 단합되어 있는 상태이기 때문에 가격이 비싼 티타늄 부품이 기꺼이 채용되어 사용되고 있다. 세계 정세의 변화에 따른 항공산업의 경기하락과 이에따른 티타늄 재료의 새로운 수요처 확보를 위한 노력, 그리고 앞에서 언급한 자동차 연비 향상을 위한 경량재료 개발의 호재가 겹쳐 자동차용 티타늄 합금 부품의 일반산업에서의 사용이 그 어느때 보다도 낙관적인 상태에 있다고 볼 수 있다. 그러나 티타늄 합금 분야에 뿐만 아니라 알루미늄 합금, 복합재료, 철강재료 등과 같은 각 재료분야에 있어서 성능 향상에 관한 연구 개발의 활성화에 의하여, 티타늄 합금이 자동차용 부품으로 선정되기 위해서는 기존의 부품 대체와 같은 수동적인 노력보다 더 어려운 재료 선택의 경쟁체제에 돌입함에 따라 보다 능동적인 노력 없이는 또다시 어려운 상황에 처하게 될 것이다. 따라서 티타늄 재료 생산 업체의 능동적인 가격인하 노력과 더불어 보다 우수한 재료를 제조하기 위한 연구·개발이 지속되어야 할 것이다.

실제로 티타늄 재료를 생산하는데 소모되는 에너지는 알루미늄 재료보다 약 2배 정도 밖에 되지않고⁽¹⁸⁾, 원료도 지구상에 풍부한(Clark No 4) 상태이므로 공정 개선 등과 같은 노력 여하에 따라서는 가격이 낮아질 수도 있다. 이러한 가격인하는 자동차산업과 같은 새로운 수요를 창출하게 되므로 대량생산에 의한 연쇄적인 가격인하가 가능할 수도 있겠다. 현재 티타늄 업계가 어려움을 겪고 있음에도 불구하고 자동차산업에의 참여 노력이 아직도 부족한 상태에 있다. 자동차의 대량생산 체제에 의한 시장성을 생각해 볼 때 자동차 한대당 1kg의 티타늄 합금 부품의 수요가 창출되면 연간 수백만 kg의 티타늄 재료수요가 창출된다는 것을 고려할 때 자동차용 티타늄 합금 부품개발에 보다 많은 노력을 기울일 필요가 절

실한 때라고 할 수 있다.

7. 맺음말

자동차의 일부에 이미 사용되고 있는 티타늄 부품들과 가까운 장래에 사용되어질 수 있는 티타늄 부품들의 종류와 특성 및 제조방법 등에 관하여 알아 보았다. 가볍고도 견고하면서 고강도를 지니는 티타늄 합금들의 특징을 이용하여, 자동차의 성능향상을 위한 경량화를 달성하고자 사용가능성이 오랫동안 탐색되어져 왔다. 현재까지는 밸브, 밸브 리테이너, 스프링, 커넥팅 로드 등의 엔진 부품이 티타늄 합금으로 교체되어 사용되어짐으로써, 이들 부품의 동적중량을 감소시켜 엔진의 성능 향상에 많은 기여를 하였다. 아울러 차체 경량화를 위하여 몇 부품이 티타늄 합금으로 대체되어질 가능성이 점차 높아지고 있다. 그러나 최근들어 알루미늄 합금의 고강도 및 고인성화, 경제적인 복합재료의 개발, 경제성이 향상된 고강도 철강재료의 개발이 계속되어짐에 따라 금속학적인 티타늄 합금 성능 향상은 물론 경제성 있는 티타늄 재료 공급이 병행되어져야만 자동차용 티타늄 부품의 수요가 보다 많이 창출되어질 것이다. 아울러 최근에 대책과제로 진행되고 있는 국내의 자동차용 티타늄 부품 생산에 관한 연구 계획에 대하여 간단히 기술하였다. 경량 고강도를 가지는 티타늄 합금은 아직도 자동차용 부품으로써 많은 매력을 가지고 있다.

참 고 문 헌

1. JOM, Vol. 44(5), 1992, 6
2. K. Sakei ; "New Development in Application of Titanium as an Ecological Metal", presented in 7th World Conference on Titanium, San Diego, July 1992
3. 徳田祥一 ; 神戸製鋼技報, 18券 4號, 1968, 36
4. P. Jette, A. Sommer ; Titanium for Energy and Industrial Application, D. Eylon ed., AIME, 1981, 199
5. 桑山哲也, 志田善明, 村岡義章 ; 佳友金屬, Vol. 41

- (2), 1989, 47
6. 大同特殊鋼 Brocher, 1991.
 7. 西村 孝; 金屬 Titanium 應用, 日刊工業新聞社, 1990, 72
 8. K. Groth; Konstruktion, Vol. 21, No. 10, 1969, 381
 9. A. M. Sherman; Titanium Coil Springs for Automotive Suspension Systems, SAE paper 800481(Cited from ref. 4)
 10. Y. Fukuhara; Nonaerospace Application of Titanium, Sixth World Conference on Titanium, Cannes, France, 1988, 381(Cited from H. Mezger and E. Strehler; Automobile Industrie, Vogel-Verlag, 17, Jahrgang, Heft 1, 1972)
 11. K. Rüdinger, A. Ismer; Titanium Science and Technology, Plenum, 1973, 185
 12. 박노광, 이용태; 機械와 材料, 3卷 1號, 1991, 106
 13. 박노광; 機械와 材料, 4卷 2號, 1992, 103
 14. G. Welsch, Y. T. Lee; Metall. Trans. A, 14A, 1983, 761
 15. Y. T. Lee, K. -J. Grundhoff, G. wirth; Z. Metallkd, 78, 1987, 49
 16. 김성준, 이용태; 機械와 材料, 2卷 4號, 1990, 102
 17. R. I. Jaffee; "An Overview on Titanium Development and Application", Titanium Science and Technology, Kimura and Izumi, eds., AIME, N. Y., Vol. 1, 1980, 53
 18. B. Finner; Härterei Technische Mitteilungen, Vol. 26(1), 1871, 47
 19. J. E. Allison, A. M. Sherman and M. R. Bapna; JDM, Vol. 39(3), 1987, 15