

차세대 자동차용 타이타늄합금 부품 개발 동향

현용택, 이용태 | 한국기계연구원

1. 서 론

향후 한국의 미래 산업을 견인할 차세대 성장동력 기술개발사업의 하나로 “미래형 자동차” 과제가 선정된 것은 경제적, 기술적 관점에서 모두가 동의하는 시의 적절한 결정이라 할 수 있다.

산업자원부에서 수행하고자 하는 미래형 자동차를 개발하는데 있어서, 승용차용 고분자 연료전지 운전장치 개발, 하이브리드용 신 동력시스템 및 제어기술 개발, 지능형 사시 통합 제어시스템 개발 등과 같은 자동차 시스템 분야를 비롯한 다양하고 체계적인 기술 분야가 연구개발 되어야겠지만, 이에 더하여 배기량의 감소, 연비 향상 및 친환경 대체 에너지 개발 등에 관련된 기술이 가장 중요하게 대두되는 시대적 핵심 분야라 할 수 있다.

이러한 친환경, 에너지 절약형 미래형 자동차를 개발하기 위해서는 엔진의 경량화와 고효율화가 가장 중요한 기술적 접근 방법이 되어질 것으로 판단된다.

최근 전 세계적으로 친환경 자동차에 관심이 고조되면서 일본, 미국 및 유럽의 주요 자동차 생산국에서 승용차를 시작으로 연비 및 배기가스에 대한 환경 관련 법 규제가 대폭 강화되고 있다. 일본의 경우 배기가스 규제가 2005년에 가솔린 차량의 경우 1998년 대비 약 1/6 수준으로 삭감이 요구되고 있고, 연비도 약 20% 이상 개선하고자 하고 있다. 미국 및 유럽 등지에서도 Tier II, EURO IV, V 등과 같은 배기가스 규제 법규를 제정하여 단계적으로 환경 규제와 연비 향상을 대폭 강화시켜 나가고 있는 실정이다.

국내의 경우 자동차 산업은 국가 기간산업으로 자리 매김하면서 자동차 산업의 세계적인 경쟁력을 향상시키기 위한 신기술 개발에 많은 투자가 이루어지고 있다.

이에 따라 국내에서도 선진국에서 요구하는 저연비, 배기가스 규제뿐만 아니라 지구온난화 방지를 위한 환경규제 등에 효율적으로 대응하고 선진국과의 대외 경쟁력과 기술 확보를 위해 미래형 자동차 기술개발은 필수적이라 할 수 있다.

이와 같은 선진국의 기술규제를 극복하기 위해서는 자동차의 경량화를 통한 연비의 향상과 환경오염을 최소화 하는 기술 개발이 필수적이다. 이에 더하여, 수요자들이 자동차의 고성능화, 고기능화에 대한 욕구가 높아지면서 신소재를 채용한 자동차들이 선호되고 있다. 이와 같은 추세에 부응하여 미국, 일본, 독일 등의 선진 자동차 제조업체에서는 기존에 사용되고 있는 소재보다 무게 대비 강도 (비강도)가 높고, 보다 우수한 고온강도 및 피로강도와

더불어 내부식성이 뛰어난 신소재를 자동차 구조물에 적용하기 위해 많은 연구개발이 진행되어 왔고, 일부 부품은 실용화되어 시판되고 있다. 이러한 목적으로 연구개발 되어 실용화 되고 있는 신소재 부품 중에서는 차체 경량화를 위한 알루미늄 합금부품의 일체형 성형과 엔진용 알루미늄 부품, 마그네슘 부품 및 타이타늄 합금 부품이 가장 각광을 받고 있는 분야이다.^[1,2]

이 글에서는 주로 차세대 자동차용 엔진의 핵심부품으로 중요하게 고려되는 타이타늄 합금 부품을 미래형 자동차 엔진에 채용하기 위한 기술적 연구개발과 경제적 효과에 관하여 기술하고자 한다.

2. 자동차용 타이타늄 부품 기술의 특성

2.1 기술 개요

일반적으로 자동차용 타이타늄 합금 부품들이 가져야 하는 중요한 성질로는 엔진 부품의 경우에는 높은 강도와 탄성계수를 가져야 하나, 스프링은 반대로 낮은 탄성계수를 가져야 하며, 반면에 일부 부품은 감쇄능이 커야 하는 등의 사용 용도에 따라 다양한 물성이 요구된다.

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

현재 자동차에 쓰이고 있는 구조용 소재는 경제성 때문에 주로 일반 탄소강이 많이 이용된다. 최근 들어서는 자동차 경량화를 위하여 차체재료로 고강도 알루미늄 합금의 사용량이 점차 증가되고 있는 추세에 있다. 반면에 엔진의 효율과 연비의 향상을 위해서는 엔진 부품의 경량화가 필수적인 요소이고, 이를 위한 엔진 실린더 재료를 알루미늄이나 마그네슘 합금으로 교환하는 연구과제가 진행되고 있고, 일부 내열부품은 타이타늄 합금으로 교체가 시도되고 있다.

그림 1에 자동차용 부품으로 사용되는 여러 소재들의 비강도, 비피로강도 및 비탄성계수를 상호 비교한 결과를 나타내었다.^[3] 이 결과에서 알 수 있듯이, 타이타늄 합금은 이들 기존의 상대 소재에 비하여 저온에서부터 상온까지 비강도(강도/밀도)가 월등히 높기 때문에 소재가 고가임에도 불구하고 자동차 외장용 경량화 소재로 오래 전부터 주목을 받아 왔다. 또한 타이타늄 합금은 다른 재료들에 비하여 550℃의 고온에 이르기까지 우수한 비강도를 유지하기 때문에 고온에서 작동하는 엔진용 구조재료 사용되어지고 있다.

타이타늄 합금은 앞에서 언급한 비강도 뿐만 아니라 비인성(인성/밀도) 또한 우수하기 때문에 내충격이 요구되는 경량 차체재료로도 유망하다.

아울러 상온에서의 비피로강도(피로강도/밀도) 역시 우수하기 때문에 반복적인 하중이 걸리는 자동차 부품에도 그 사용이 고려되고 있다. 타이타늄 합금은 고온에서도 피로강도가 인장강도의 0.55~0.65 정도를 유지하기 때문에 기존의 철강재료의 0.35~0.50 정도에 비하여 높고, 따라서 고온에서 내피로성이 요구되는 엔진 부품의 대체 소재로 유망하다.

이와 같은 타이타늄 재료의 특성 때문에 타이타늄 합금 부품이 경주용 및 스포츠 차량의 부품으로 한정된 양이 이미 기업화되어 생산되고 있다.^[1,4]

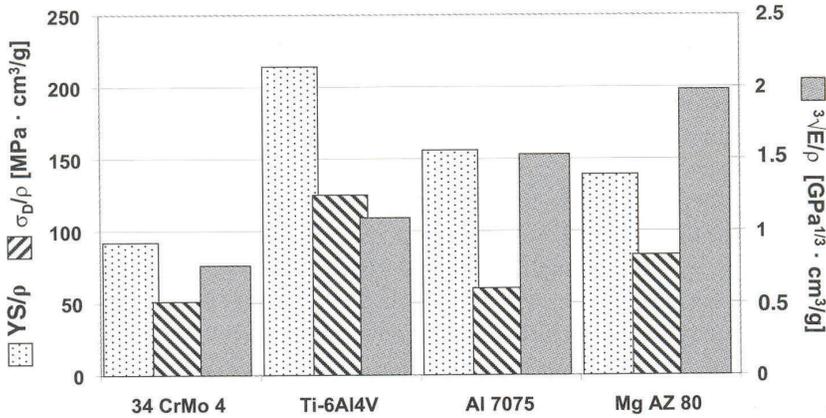


그림 1. 자동차용 소재들의 비강도, 비피로강도 및 비탄성계수 비교

타이타늄 합금의 우수한 특성을 이용하여 오래전부터 자동차용 부품으로 적용하기위한 많은 노력이 진행되었으나, 현재까지도 널리 적용되지 못하는 가장 주된 이유는 그림 2에서 알 수 있는 것과 같이 타이타늄 소재의 높은 가격 때문이다.^[1,5] 최근 타이타늄 원소재의 가격을 낮추기 위한 신기술 개발 및 새로운 공정 등의 개발이 활발히 진행되고 있어 멀지 않은 장래에 타이타늄 부품을 적용한 자동차가 주위에서 쉽게 찾아볼 수 있는 날이 도래할 것으로 여겨진다.

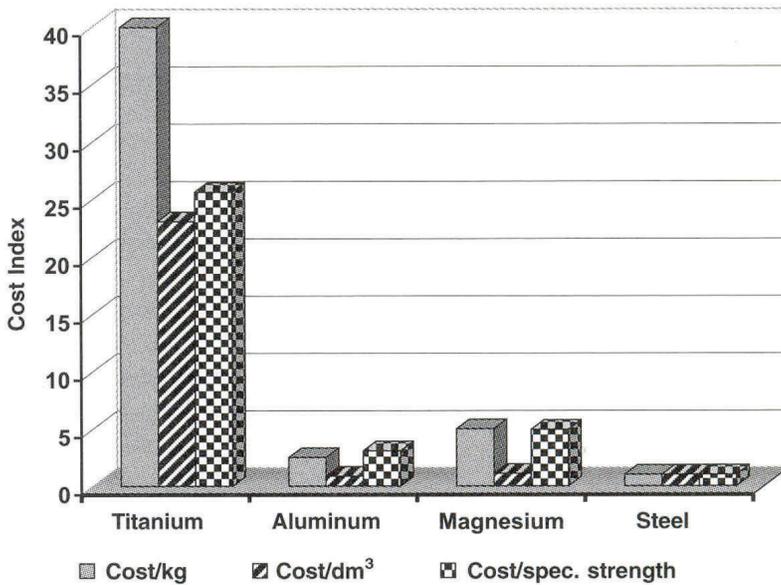


그림 2. 타이타늄 합금과 기타 소재와의 가격 비교 (steel 가격 = 1)^[1]

2.2 자동차용 타이타늄 합금 부품의 성형

일반적으로 자동차에 사용되는 타이타늄 합금 부품을 만들기 위해서는 주로 압연, 단조, 분말야금, 압출, 주조, 용접 등의 비교적 간단한 금속재료 가공 공정이 사용된다.

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 타이타늄 합금 부품이 가져야 하는 가장 중요한 기계적 성질은 상온에서의 강도 및 연신율과 피로강도가 좋아야 한다는 것이다. 예를 들면 피로강도가 가장 중요시 되지만 형상이 간단한 부품인 스프링의 경우 이것을 제조하는데 있어서는 단순한 스프링 가공으로 가능하다. 반면에 높은 피로강도도 요구되면서 형상이 복잡한 부품인 커넥팅로드의 경우, 이 부품을 제조하기 위해서는 단조, 주조, 또는 분말야금 방법 모두가 가능하나, 요구되는 피로강도를 얻기 위해서는 정밀 주조품 및 분말야금 제품인 경우에는 열간 정수압 가공(Hot Isostatic Pressing)이, 단조품인 경우에는 기계가공이 필수적으로 수반되어야 한다. 그러나 실제로 어느 공정을 택할 것인지는 거의 대부분이 경제성과 생산성에 달려 있다.

타이타늄 합금은 일반 산업용 금속재료에 비하여 용융상태에서 반응성이 커서 진공에서의 주조와 특수한 주형 재료가 필요하고, 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 주형재를 이용하여 부품을 제조한다. 타이타늄 재료의 용해 시에 가장 문제가 되는 기술은 용해 도가니와의 반응 억제와 용탕중의 불순물 혼입, 그 중에서도 잔존 산소의 양을 10ppm 이내로 조절하여야 하는 것이다. 타이타늄 중의 산소는 소량이 유입되어도 충격인성에 많은 영향을 주기 때문이다.

타이타늄 합금의 단조는 합금 종류에 따라 단조 온도가 약간 달라지기는 하지만 일반적으로 850~1050℃ 사이에서 $10^0 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 의 가공속도로, 금형온도 100~300℃로 예열하여 수행한다. 최적의 물성과 형상을 얻기 위해서는 소재온도, 금형온도, 단조속도, 단조횟수, 윤활제, 단조기 용량 등을 고려하여 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 단조공정의 시뮬레이션과 정밀금형 성형을 함으로써 경제적인 생산방법이 추구하고 있다.

분말야금법으로 제조할 경우 분말의 초기 화학조성이 이미 합금화 되어 있는 경우에는 prealloyed PM (powder metallurgy) 방법으로, 다양한 조성의 분말을 혼합하여 제조하는 경우에 BE (blended elemental) PM 방법으로 성형되어진다. BE PM 방법은 경제성의 관점에서 많이 이루어지고 있으나 분말과 함께 유입되는 산소, 수소 등에 의하여 소결 후에도 공공과 같은 결함이 남게 되어 물성이 저하된다.

2.3 표면처리

일반적으로 타이타늄 재료는 다른 금속재료에 비하여 탄성계수가 90~110 GPa로 낮을 뿐만 아니라 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 마찰열에 의하여 표면이 발화하게

나 녹아 붙은 경우가 생기게 된다. 자동차 부품으로 타이타늄 재료를 사용하는 경우에도 이러한 문제점이 생기게 되기 때문에 윤활제의 사용이 고려되어야 하나, 지속적인 윤활제의 공급이 어렵기 때문에 표면처리를 하여 표면의 강도를 높이면서 마찰계수를 낮추어 발화와 용착의 문제를 해결하게 된다. 이와 같은 표면처리 방법으로는 다음의 세 가지가 많이 이용된다.

● 침입형 원소 경화법

타이타늄은 산소, 탄소, 질소, 보론과 같은 침입형 원소의 고용도가 높고, 고용에 의한 화합물 생성으로 인하여 표면경도가 매우 높아지며, 또한 공업적으로 비교적 수월하게 작업할 수 있기 때문에 이 방법이 많이 이용된다. 이러한 방법으로는 흑연중의 탄소를 타이타늄 재료 표면에 확산시켜 탄화물을 형성시키는 방법, 질소 또는 암모니아 가스와의 반응에 의하여 표면에 질화물을 형성시키는 방법, 염욕 경화법, 보론화 처리법 등이 있다. 이 중에서 질화 처리가 일반적으로 많이 이용되는데, 이 방법은 800~1000℃ 정도의 고온 순수 질소가스 중에 부품을 장입하여, 표면에 30~50 μ m의 질화층이 형성되도록 하는 방법이며, 주로 흡입밸브, 밸브 리테이너의 표면처리에 이용된다. 이와 같이 질화처리된 부품의 표면강도는 Vickers 강도 1000 이상의 단단한 코팅층이 형성되게 된다. 또 다른 방법으로 800℃ 정도의 고온 특수염 부품을 담가, 표면에 50 μ m 정도의 질소와 산소의 반응층이 생성되도록 하는 Tiduran 법이 타이타늄 합금 부품의 표면처리에 아주 유용하다. 이 처리에 의하여 표면의 강도가 질화층과 유사한 단단한 코팅층이 형성되고, 이로 인하여 마모량이 90% 정도 감소하고 마찰계수가 40%정도 저하되어 자동차용 부품으로 유용하게 사용될 수 있다는 보고가 있다.^[6] Tiduran 법에 의하여 표면처리된 밸브 및 가이드, 커넥팅 로드 및 베어링, 피스톤 핀, 밸브 스프링, 밸브 리테이너 등이 실제로 사용되고 있다.

● 도금법(습식법)

현재 사용되는 여러 가지 도금방법 가운데 타이타늄 합금 부품에는 경질 크롬 도금이 가장 유망하다고 알려져 있다.^[7] 도금하기 전에 전처리를 적절히 함으로써 타이타늄 표면과 틱니 형상으로 강하게 맞물린 밀착된 크롬 도금층이 형성되어 마모와 마찰에 좋은 효과가 있게 된다. 공업적으로 제조시설이 저렴하여 경제성이 좋기 때문에 많이 이용되고 있으나, 최근에는 크롬에 의한 공해 문제 때문에 건식 코팅 기술이 더 많이 고려되고 있다.

● 용사 및 용접법(건식법)

건식 도금의 한 방법으로 Mo이나 WC 등을 타이타늄 합금 부품 표면에 용사시켜 표면 성질을 개선하고자 하는 것이며, 이 중에서도 플라즈마에 의한 Mo용사가 미국에서 가장 많이 이용된다고 알려져 있다.^[8] 이 용사법은 Shot Blast로 전처리를 한 다음, Mo과 가스를 적절히 혼합하여 플라즈마 상태의 고온으로 부품 표면에 용사함으로써 단단하면서도 고밀도의 접착력이 좋은 코팅층이 얻어지며, 이에 따라 다른 어떤 코팅 방법보다도 내마모성이 향상된 표면이 형성된다. 또한 기계적 가공에 의하여 표면정도를 0.005mm 까지 조절할 수 있기 때문에 높은 정밀도가 요구되는 밸브 축에 적용하기가 용이하다. 또한 타이타늄 보다 단단한 부품과 맞부딪치는 부위에는 수명연장을 위하여 강도가 높은 합금을 용접하여 사용하게 되는데, 이 경우에 Stellite Brazing이 가장 많이 이용된다. 이 방법으로 타이타늄과 다른 용접할 금속사이에 니켈을 넣어 Brazing하는 동안 은납과 니켈이 반응하여 강도가 높은 용접이 가능하게 된다. 실제로 Stellite 용접방법으로 흡입밸브의 꼭지에 사용함으로써 좋은 결과를 얻고 있다.

3. 국내외 연구개발 동향

3.1 국외 동향

선진국의 경우에는 자동차의 양산단계를 지나서 안정성과 함께 고성능의 최고급 차량을 개발하는 단계에 있고, 따라서 타이타늄 합금 부품을 적용하려는 노력이 활발히 진행되고 있다. 타이타늄 합금은 스테인레스 강의 약 5배 정도 높은 가격으로 인하여 자동차 부품으로의 적용은 주로 경주용차나 컨셉트차 등에 국한되어 있었다. 그러나 자동차 엔진 부품의 경량화로 인한 연비향상, 가속성능향상, 출력향상 등 고성능의 에너지 절약형 승용차를 개발하기 위하여 세계 유수의 자동차 업계에서는 타이타늄 합금을 사용한 엔진부품 개발에 전력 질주하고 있다. 현재 적용 또는 개발되고 있는 타이타늄 합금 부품의 예를 그림 3에 나타내었다.^[4,9] 타이타늄 합금 부품은 그림 4에 나타낸 것과 같은 동력계통의 엔진 밸브, 밸브 스프링, 밸브 스프링 리테이너, 커넥팅로드 등과 같은 엔진 부품에 적용할 경우 자동차의 경량화와 더불어 고성능화를 꾀할 수 있다. 이와 같은 장점 때문에 일찍이 독일의 Porche에서는 intake valve, suspension spring, cam-shaft, crank-shaft 등에 적용하였으며, Formular-1 경주에서 6년 연속 Constructors 분야에서 우승을 차지한 Honda의 F-1 엔진의 경우 밸브 트레인계와 커넥팅로드 등에 타이타늄 합금을 적용하였다.^[10,11]

Toyoda사는 이미 타이타늄 합금 밸브를 양산하여 사용하고 있고, Ford사는 신형차의 밸브 트레인계통에 타이타늄 합금 부품을 적용하여 판매하고 있으며, Honda사는 스포츠 차량인 NSX차종에 경제적이면서 가공성이 우수한 합금인 DAT-52F 타이타늄 합금으로 제조된 커넥팅로드를 사용하고 있다.^[12-14] 또한 미쯔비시사에서도 엔진용 타이타늄 합금 부품의 사용을 고려하고 있고, 스미토모사와 다이도사에서는 이들 부품을 개발하여 일본 자동차 생산사에 공급하고자 노력하고 있다. 이와 같이 전 세계적으로 모두 자동차용 부품으로 사용될 수 있는 타이타늄 합금 부품 개발에 관한 관심이 고조되고 있지만, 지금까지 개발되어 양산되고 있는 타이타늄 합금들은 주로 항공 우주 목적으로 개발된 합금을 사용해 왔기 때문에 엄격한 규격의 품질인증으로 인한 가격의 상승이 자동차 경제성의 관점에서 상대적으로 열세를 점해 왔다. 이에 자동차 부품으로 사용할 수 있는 저가이면서도 적절한 기계적 성질을 가지는 새로운 합금개발과 성형 및 후처리에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 자동차용 부품으로 사용되기 위해서는 상온에서 내마모성, 고피로강도, 가공성, 고성능 선재가공 등과 같은 성질이 향상된 새로운 합금의 개발이 요구되어진다.

미래의 자동차용 타이타늄 부품은 보다 높은 온도에서 견딜 수 있고, 높은 강도를 가지면서 경제적인 성형이 가능한 새로운 합금이 개발되어 사용되어질 것으로 예측된다.

타이타늄 합금을 엔진 부품으로 사용하게 되면 4기통 승용차의 경우 약 2.2kg 정도의 엔진 무게 감소가 이루어진다. 이와

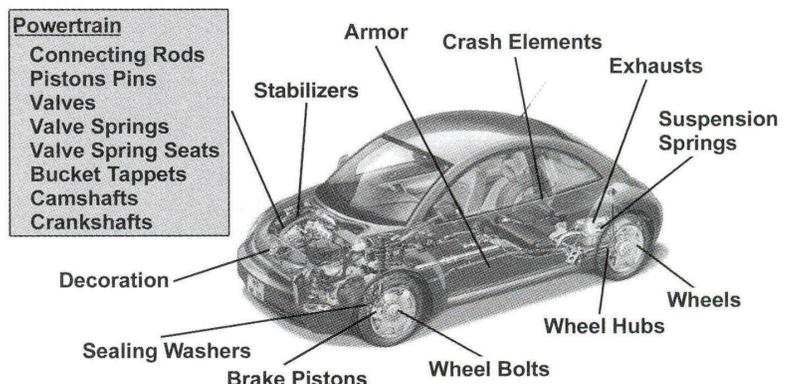


그림 3. 타이타늄 합금으로 대체 가능한 자동차 부품 적용 예^[1]

같은 소량의 엔진 무게 감소로도 고속에서의 운동 중량이 경감되고, 따라서 각각의 부품의 가속성이 증가하게 되어 보다 빠른 속도로 달릴 수 있기 때문에 경주용 차량에는 이미 25년 전부터 타이타늄 합금 부품이 사용되어지고 있다. [15] 표 1에 현재 자동차에 사용되고 있는 타이타늄 합금 부품과 이들 부품을 적용하였을 경우의 무게 감소 효과와 이들 부품이 장착되어진 차종 및 재료에 관하여 그림 3에 요약하였다. [1,16]

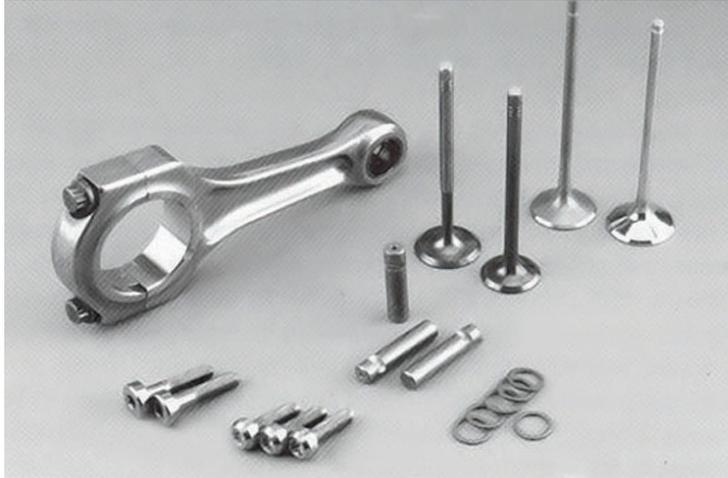


그림 4. 현재 상용화 된 자동차 및 오토바이용 타이타늄 합금 부품^[1]

표 1. 자동차용 타이타늄 부품 및 그 적용에 따른 경량화 효과^[16]

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

표 1에서 알 수 있는 것과 같이 우선적으로 타이타늄 합금 부품이 사용되어진 차종은 성능이 우선적으로 고려되는 경주용차(racing car)와 설계 단계에 있는 개념차(concept car), 스포츠 카(sports car) 또는 고급 상용차(high grade car)에만 채용되어져 왔다. 가까운 장래에 상용차에 까지 사용이 고려되고 있는 타이타늄 합금 부품의 특성과 개발현황은 다음과 같다.

● 커넥팅 로드 (connecting rod)

커넥팅로드는 엔진부품 중에서도 운동 질량이 큰 대형 구동 부품이기 때문에 비강도가 높은 타이타늄 합금을 사용하게 되면 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다.

우선 관성질량이 대폭 감소되어 엔진의 회전수를 증가시켜 고회출력을 얻을 수 있다. 예를 들어 엔진 회전수가 6000rpm에서 8500rpm으로 증가하게 되면 관성질량은 2배가 된다. 따라서 회전수의 증가에 따른 고회출력을 얻으려면 운동 부품의 경량화에 의한 관성질량을 줄여야 한다. 타이타늄 합금으로 이 부품을 대체하게 되면 약 40%의 무게 감소가 가능하고 관성질량의 감소로 크랭크 샤프트 등의 관련 부품에 까지 파급효과도 커서 엔진 전체의 소형화와 경량화가 가능하게 된다. 아울러 왕복 회전 질량의 감소로 마찰력도 크게 줄어들어 엔진의 진동과 소음을 줄일 수 있을 뿐 더러, 연비의 향상에도 크게 기여하게 된다.

커넥팅로드에 사용되는 타이타늄 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. Honda사의 NSX car에는 경제성의 면에서 유리하면서 기계적 성질도 Ti-6Al-4V합금에 뒤지지 않는 Ti-3Al-2.5V(DAT-52F)합금을 실제로 적용하고 있다.^[17] 커넥팅 로드의 thrust면에는 내마모성 증대를 위한 표면처리가 필수적인데, 현재 많이 사용되고 있는 공정으로 Mo용사, 경질 크롬 도금, Tiduran처리 등이 이용된다. 타이타늄 합금으로 제조된 커넥팅로드의 사용상의 문제점으로는 변형(distortion), 볼트의 피로파괴, 결합 부위에 위치한 베어링의 파괴, 윤활의 어려움에 의한 마모 등이 있다.^[18] 이러한 기술적인 문제점과 경제성의 어려움에도 불구하고 자동차의 경량화와 연비향상, 공해방지의 현대적인 개선점을 달성하기 위해서 타이타늄 합금으로 제조된 커넥팅 로드가 보다 많이 사용되어질 전망이다.

● 밸브 (valve)

타이타늄 합금으로 제조된 자동차용 부품 중에서 가장 많이 활용되는 부품은 엔진 실린더의 흡기와 배기용 밸브이다. 밸브는 흡기밸브의 경우 최대 900℃까지 열적 하중을 받으며 밸브면은 밸브 seat와 반복적인 접촉에 의해 변형을 받으며, 밸브 shaft는 굽힘 하중을 받을 수 있다. 이와 같은 복합적인 하중조건하에서 작동하기 위해서는 밸브 재료는 크리프 저항성, 장기간 사용에 대한 안정성, 연성, 산화저항성 등이 우수해야 한다. 현재 사용되고 있는 철강재료를 대체하기 위한 밸브재료로 Si₃N₄ 세라믹스, γ 타이타늄 알루미늄나이드, 고온용 타이타늄 합금 등이 있는데, 이들 재료로 대체할 경우 기존 소재에 비하여 약 40~50%의 무게감소가 가능하다.^[19,20] Si₃N₄ 밸브는 성공적으로 시험을 마쳤지만 연성과 품질 보증 측면에서 문제가 있어 아직까지는 실용화는 고려하고 있지 않다. 현재 상용차에 사용되는 내열강 밸브는 100gr이나, 타이타늄 합금으로 대체하는 경우에는 60gr정도로 밸브 한 개당 40gr정도의 무게 감소가 가능하고, 따라서 동적 중량이 감소되어 10~15%의 고속성능이 증대되는 것은 물론이

고, 타이타늄 합금은 고온 내식성이 우수하기 때문에 수명이 2~3배 증대되어 경제성과 신뢰성의 증대가 예상된다. 흡기용 밸브의 경우에는 작동온도가 300℃ 이내로 낮기 때문에 Ti-6Al-4V 합금이 사용되나, 배기용 밸브의 경우에는 흡기용 밸브에 비하여 사용온도가 800℃ 정도로 높기 때문에 고온용 타이타늄 합금인 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.2Si (Ti-6242S) 가 주로 사용되고 있다. 실제로 타이타늄 합금 밸브를 V-8 엔진에 채용한 경우에 캠축의 형상 설계 변경의 결과와 함께 약 800rpm 정도의 엔진 회전수가 증대되고, 이에 따른 torque 증가가 보고되어 있다. 타이타늄 합금 밸브를 사용하는 경우에 밸브 측면과 가이드 사이에서 빠른 왕복운동에 의한 마찰열에 의하여 축 부위의 표면이 용융되어 달라붙는 경우가 생기기 때문에 표면처리가 필수적으로 요구된다. 따라서 밸브의 축 부위에는 30~40μm의 경질 크롬 도금을 하거나, Mo 용사, Tiduran법과 같은 표면처리 방법에 의한 특수 처리가 반드시 선행되어야 한다. 또한 밸브의 끝 부위는 rocker arm과의 마찰에 의하여 철강재보다 연한 타이타늄 밸브가 쉽게 손상되기 때문에 철강재 cap (lash cap) 을 밀착시키거나, stellite 은납 brazing 처리에 의한 철강재 cap을 용접시켜 사용하여야 한다. 그러나 밸브의 마개(seat) 부위는 왕복 운동에 의한 마모가 그리 큰 문제를 야기 시키지 않기 때문에 특수한 표면처리 없이도 사용이 가능하다. 고온의 엔진 내부에서 작동하는 밸브를 사용하는 동안에 발생하는 여러 가지 금속적인 문제들을 살펴보면 밀면은 고온 크리프, 마개의 측면은 고온 산화와 부식, 축의 하단부는 피로, 중앙부는 마모, 윗 부분은 캠축과의 마모에 의하여 파괴에 이르기 때문에 타이타늄 합금 밸브의 가공열처리를 통하여 이와 같은 작동 조건에서 보다 오래 사용할 수 있도록 후처리가 고려되어야 한다.

● 밸브 리테이너 (valve retainer)

이 부품은 형상이 단순하고 작기 때문에 간단한 단조 작업과 기계가공으로 쉽게 제조될 수 있다. 따라서 경제성의 관점에서도 유망하기 때문에 경주용 및 스포츠용 자동차에 이미 적용되어 양산화 되고 있다. 또한 이 제품은 특수한 표면처리를 하지 않고도 사용될 수 있기 때문에 타이타늄 합금을 자동차 부품에 응용하기에 가장 용이한 부품 중의 하나이다. 현재 상용차에 사용되고 있는 밸브 리테이너는 주로 내열강으로, Ti-6Al-4V 합금으로 대체하는 경우에는 20gr 정도의 무게 감소가 예측되며, 따라서 밸브의 경우와 마찬가지로 운동 중량이 감소되어 엔진의 효율이 증가된다. 일반적으로 이 제품의 재료로는 Ti-6Al-4V이 많이 사용되나, 상온 성형성이 좋은 β 타이타늄 합금 (Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr)도 이용된다.

● 스프링 (spring)

타이타늄 재료는 비강도가 크면서 탄성계수가 다른 금속재료에 비하여 낮기 때문에 스프링 재료로 사용하게 되면 피로강도가 높으면서도 무게가 가벼운 자동차용 스프링의 생산이 가능하다는 장점이 있다. 일반적으로 차축 코일 스프링의 중량은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$m \approx \frac{\rho \cdot G}{\Gamma^2} \left(\frac{2 \cdot P^2}{\kappa} \right)$$

이 식으로부터 일정한 하중 (P)이 걸리는 상태에서 동일한 스프링 상수 (κ)를 가지는 스프링의 중량은 전단 탄성계수 (G), 비중 (ρ)과 비틀림 하중 하에서의 피로강도(Γ)에 의하여 결정된다는 것을 알 수 있다. 타이타늄

합금의 경우, 철강재료와 비교하여 강도가 같은 상태에서 밀도가 56%, 전단 탄성계수가 50% 정도 밖에 되지 않기 때문에 같은 성능을 가지는 스프링의 경우에 무게가 이론적으로 28% 정도가 되며, 따라서 72%의 무게 감소가 가능하다. Sherman은 β 타이타늄 합금을 이용한 suspension 스프링을 설계할 경우 50~70% 정도의 무게 감소가 가능하다는 것을 보여 주었다.^[21] 실제로 타이타늄 합금 Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (β -C)을 이용하여 코일 스프링을 만든 경우, 최대 전단응력 839MPa의 범위까지 사용 가능하면서도, 이와 동일한 성능을 가지는 철강 스프링에 비하여 47%의 무게 밖에 되지 않기 때문에 확실한 중량감소 효과가 기대된다.

또한 타이타늄 합금은 감쇄능이 크고 고유진동수가 크므로 엔진의 고속회전 시에 문제가 되는 surging 현상을 피할 수 있기 때문에 수명 연장에 확실한 효과가 있다. 실제로 스프링에 이용되는 β -C 타이타늄 합금의 고유진동수는 870Hz로 기존의 철강부품의 483Hz에 비하여 월등히 증가된다. 또한 타이타늄 합금 스프링 재료의 전단 탄성계수는 기존의 스프링 강보다 약 50%정도로 적기 때문에 스프링의 권수를 줄일 수 있고 밸브 스프링의 밀착 높이를 감소시킴으로써 엔진의 소형화 및 경량화를 꾀할 수 있다. 특히 타이타늄 합금 스프링은 타이타늄 합금 고유의 우수한 내부식성으로 인하여 표면처리를 따로 할 필요가 없다.

일찌기 Formula I 경주용 차량이나 경주용 오토바이에 타이타늄 합금 스프링이 사용되었지만 일반 승용차에는 적용된 예가 드물었다. 그러나 최근 독일의 Volkswagen에서 제조한 경승용차인 Lupo FSI 모델에 타이타늄 합금 서스펜션 스프링이 장착된 차량이 출고되고 있다.^[1] 적용된 소재는 전통적인 Ti-6Al-4V 합금 대신 Timetal LCB (Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al) 합금이 자동차 스프링용 소재로 사용되었다. 이는 형 β 합금으로 $\alpha + \beta$ 형 합금에 비해 낮은 전단계수를 가지며, 합금원소로 비싼 바나듐 대신 철을 사용하여 경제적인 면에서도 기존의 스프링 재료에 비해 결코 떨어지지 않는 것으로 알려지고 있다.^[22]

● 기타 부품

앞에 열거한 부품들 외에도 타이타늄 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 있으나, 아직까지 실제 자동차에 적용했다는 사례는 없다. 그럼에도 불구하고 이 부품을 대체하고자 하는 노력이 연구개발 부서에서 지속적으로 고려되고 있다. 타이타늄 합금으로 제조된 크랭크 샤프트를 채용하는 경우에는 마찰열에 의한 용착을 방지하기 위하여 밸브의 축에 적용하는 표면처리 방법이 사용되어야 한다. 이 부품의 제조를 위하여 주로 사용되는 재료로는 Ti-6Al-4V와 함께 가공성이 좋은 Ti-5Al-2Cr-1Fe 도 고려되고 있다. 이 부품을 타이타늄 합금으로의 교체를 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 타이타늄 합금이 더욱 제약을 받고 있다.

이 외에도 개발이 시도된 부품으로 피스톤 핀이 있는데 Ti-6Al-4V합금으로 제조된 이 부품은 사용 중에 용착의 문제점이 발견되어 표면처리를 통하여 해결하였으나, 사용온도 조건에서의 낮은 탄성계수로 인하여 구부러지는 등의 변형 문제가 발생하여, 현재는 Ti-8Al-1Mo-1V합금으로 대체하여 시험이 지속되고 있다. 또한 이러한 엔진부품 중의 하나로 커넥팅로드를 연결하는 볼트 (neck-down bolt)가 Ti-6Al-4V 재료로 제조되어 시험해본 예가 있으나 아직까지 실용화 단계에까지는 이르지 못하고 있다. 최근에는 클러치 디스크와 같은 트랜스 미션 부품도 타이타늄 재료로 대체가 시도되고 있으며, 벨하우징과 같은 부품을 스피닝으로 제조하여 사용하고 있기도

하다. 엔진 부품들 외에도 타이타늄 합금으로 대체하려는 부품으로는 door mirror, front bumpers, rear bumpers, rug nuts, wheel 등이 고려되고 있다.

3.2 국내 동향

세계적인 추세와 궤를 같이하여 우리나라의 자동차 회사에서도 타이타늄 부품을 적용하고자 과거 국책과제로 선도기술개발 사업 (G7 과제)의 “엔진경량화 소재개발” 과제의 세부과제로 “자동차 엔진용 타이타늄 합금 부품 개발” 과제를 3년간 (‘92. 9~’95. 7) 한국기계연구원 주관으로 현대자동차(주)와 기아자동차(주), 고려상사, RIST와 함께 수행하였다.

우선적으로 타이타늄 합금으로 대체가 요구되어진 엔진 부품으로는 커넥팅로드, 밸브, 리테이너, 밸브 스프링 등으로, 참여 자동차 회사가 성형을 담당하고, 스프링 제조를 위한 선재 개발은 고려상사가, 표면처리에 관한 연구는 RIST가, 그리고 과제 총괄과 합금개발, 후처리, 특성평가 등 산업적 응용에 필요한 기술적 분야는 한국기계연구원이 담당하여 과제를 수행하였다.^[23]

이들 제품 개발을 위한 주요 요소 기술은 주로 단조, 주조, 선재 인발, 압출, 스프링 성형과 같은 타이타늄 합금의 제조 공정기술과 가공열처리, 표면처리 등과 같은 타이타늄 합금의 후처리 기술이 소요된다. 당시의 국내 타이타늄 합금 소재기술은 그간의 한정된 타이타늄 합금 및 제품의 수요로 인하여 거의 초보적인 단계이었으며, 가공기술 또한 장비의 미비와 제조 경험의 부족으로 전문가가 거의 없는 상태에서 과제가 진행되었다. 그러나 3년간의 개발기간을 통하여 타이타늄 소재가공에 있어서는 거의 기술적인 문제없이 시제품을 생산하여 특성평가를 완료할 수 있었으나 원소재 가격의 고가로 인한 제품원가 측면 (기존에 사용되는 부품의 가격대비 10 배 이상의 가격이 예상되어짐) 에서 상용차로의 채용이 불가능하였고, 더욱이 자동차 제조업체에서 구상하던 신규 스포츠카의 생산계획마저 불투명해지면서 과제를 미완성으로 종료한 실적이 있다.

미래형 자동차의 성능향상을 위해서는 타이타늄 합금 부품 개발의 중요성이 보다 심각하게 고려되고 있는 상황에서 앞에서 언급한 가공 및 후처리 등과 같은 요소 기술 개발이 시급한 실정이다. 그간의 지속적인 연구와 시대적 변화에 따른 제조업체의 가공능력 향상과 국내에 장비의 보완으로 이제는 자동차 엔진용 부품의 가공에 관한 한 큰 문제없이 대량생산에 대비할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 아직도 비싼 원소재 가격에 의한 타이타늄 부품의 가격이 기존 제품에 비해 상대적으로 높기 때문에 성능과 수명연장의 차원에서 다시 한번 고려함으로써 새로운 개념의 미래형 자동차 부품이 개발되어질 수 있을 것으로 생각된다.

아울러, 자동차 부품용 타이타늄 합금 개발을 목표로 한 G7과제 이후에도 추진연구원과제, 국가지정연구실 (NRL) 과제 등의 국책과제로 타이타늄 합금 전반에 관한 다양한 연구개발이 당 실험실에서 진행되었고, 이를 통하여 국내에서 전혀 보유하지 않았던 진공용해 및 주조기술, 성형기술, 후처리기술, 특성평가기술 등이 장비의 보강과 함께 기술적 축적이 이루어진 상태이다. 또한 보다 저가의 타이타늄 합금에 관한 연구개발과 의료용 및 보건복지용 타이타늄 합금의 개발과 부품성형기술, 타이타늄 알루미늄아이드 합금 등 미래 합금의 제조와 특성평가 등이 연구되어 경제성을 제외한 기술적 관점에서의 자동차용 타이타늄 합금부품의 개발은 큰 어려움 없이 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 맺음말

현재 자동차에 사용되고 있는 타이타늄 합금 부품은 적용 부위와 양에 있어 매우 한정되어 있다. 따라서 앞으로 타이타늄 합금 부품의 적용 범위를 확대시키려면 타이타늄 재료의 가격을 낮추는 노력이 보다 활발히 진행되어야 하며, 이외에도 몇몇 기술상의 문제점들을 해결하여야만 된다.

우선 무엇보다도 가장 중요한 과제는 타이타늄 합금의 가격 인하이다. 특히 구조용 부품에 대해서는 알루미늄 합금의 고강도 및 고인성화, 경제적인 복합재료의 개발, 경제성이 향상된 고강도 철강재료 개발의 활성화에 의하여, 타이타늄 합금이 자동차용 부품으로 선정되기 위해서는 기존의 부품 대체와 같은 수동적인 노력보다 더 어려운 재료 선택의 경쟁 체제에 돌입하게 되었다. 따라서 타이타늄 재료 생산 업체의 능동적인 가격 인하 노력과 더불어 보다 우수한 재료를 제조하기 위한 연구 개발이 지속되어야 할 것이다.

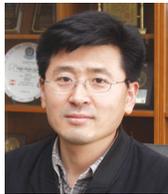
재료 특성에 있어서도 내열성 및 내마모성 등이 아직까지도 문제가 되고 있다. 배기계통 부품(예를 들면 배기 밸브)의 경우 내열성, 크리프 저항성, 산화 저항성 등이 아직 불충분하고, 엔진 부품의 경우 왕복 운동에 의한 마모, 용착 등이 문제가 되고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 여러 가지 기술이 개발되고 있으며, 또한 기존의 표면처리 방법과 더불어 많은 처리 방법들이 제시되고 있지만 아직도 해결하여야만 될 문제점들이 많이 남아 있다.

타이타늄 합금이 자동차용 부품으로 사용되기 위해서는 상온에서 내마모성, 고 피로강도, 가공성 등과 같은 성질이 향상된 새로운 합금의 개발이 요구되어 진다. 또한 이 분야의 새로운 연구 개발의 결과로 가까운 미래에 자동차용 부품으로 사용이 고려되는 신소재에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다. 미래의 자동차용 타이타늄 부품은 보다 높은 온도에서 견딜 수 있는 내열성이 우수하며, 고강도와 더불어 경제적인 성형이 가능한 새로운 합금이 개발되어 사용되어질 것으로 예측된다.

V. 참고문헌

- [1] O. Schauerte : Titanium and Titanium Alloys (Eds. : M. Peters, C. Leyens), Wiley-Vch, Weinheim (2003) 467
- [2] H. Friedrich : Advanced Engineering Materials, Vol.5, No.3 (2003) 105
- [3] H. Friedrich, J. Kiese, H. G. Haldenwanger, A. Stich : Ti-2003 Science and Technology, G. Lutjering, J. Albrecht (eds.), Wiley-Vch, (2003) 3393
- [4] K. Faller : SAE 2002 World Congress, 2002-01-0363 (2002) 27
- [5] S. Eisenberg : EURO FORUM, May 12-13, 1998
- [6] K. Rudinger, A. Ismer : Titanium Science and Technology, Plenum (1973) 185
- [7] 徳田祥一 : 神戸製鋼技報, Vol. 18, 4 (1968) 36
- [8] W. Takahashi, M. Nakanishi and T. Kuwayama : Sumitomo Search, No. 39 (1989)
- [9] K. Faller and F. H. Froes : JOM, April (2001) 27
- [10] H. Mezger and E. Strehler : Automobile Industrie, Vogel-Verlag, 17, Jahrgang, Heft (1972)
- [11] T. Otowa : Titanium & Zirconium Vol.40, 2(1992) 16

- [12] M. Mushiake et. al : SAE Paper 910428
- [13] Y. Hagiwara, K Takahashi : SAE Paper 891769
- [14] S. Nakamura et. al : SAE Paper 910425
- [15] H. Mezger and E. Strehler : Automobile Industrie, Vogel-Verlag, 17 (1972)
- [16] K. Sakai : Titanium '92, Science and Technology, F.H. Froes and I.L. Caplan (eds.), TMS (1992) 2659
- [17] K. Kimura, N. Kawase, S. Ito : Honda R&D Technical Review, Vol.3 (1991) 12
- [18] T. Matsubara : Titanium & Zirconium Vol. 39, No.4 (1991) 175
- [19] U. Hoyer, P. Rahnavardi (BMW AG) : MTZ Motortechnische Z. 60 (1999) 590
- [20] T. Furuta, T. Yamaguchi, Y. Shibata, T. Saito : Proc. of 9th World Conf. on Titanium, St. Petersburg (1999)
- [21] A. Sherman (Ford), S. Seagle : Beta Titanium Alloys in the 1980s', R. Boyer and H. Rosenberg (eds.), TMS (1986)
- [22] P. Allen, P. Bania, A. Hutt, Y. Combres: Proc. of the 8th World Conf. on Titanium, Birmingham (1995) 1680
- [23] G7과제 보고서 : 경량엔진 소재 개발 - 자동차 엔진용 티타늄합금 부품 개발 (1995)



현 용 택

- 한국기계연구원 공정연구부 선임연구원
- 관심분야 : 타이타늄의 기계적 특성평가
타이타늄합금의 용해 구조
- E-mail : ythyun@kmail.kimm.re.kr



이 용 태

- 한국기계연구원 재료기술연구소장
- 관심분야 : 항공소재부품개발
- E-mail : ytleee@kmail.kimm.re.kr