

## 자동차 부품용 티타늄합금

Titanium Parts for Automobile

이 용 태, 현 용 택  
Y. T. Lee, Y. T. Hyun



이 용 태  
• 1952년 9월 2일생  
• 재 료  
• KIMM 내열재료실



현 용 택  
• 1963년 8월 7일생  
• 금속재료  
• KIMM 내열재료실

대한 규제가 강화되면서 차체경량화 및 엔진의 고성능화를 통한 연비향상에 많은 노력을 기울이고 있다. 연비개선은 에너지 절약 차원에서 뿐만이 아니라 지구온난화의 주 원인이 되는 CO<sub>2</sub> 배출량을 줄인다는 관점에서 적극적인 기술개발이 필요하다. 자동차 업계에서는 연비향상의 대책으로서 차체경량화, 엔진 효율향상 및 주행 저항감소 등 여러가지 방법으로 연비향상을 추진하고 있다.

본 글에서는 고성능 자동차에의 적용이 기대되는 티타늄합금 부품의 종류와 특성, 그리고 현재의 개발현황 및 전망에 대하여 기술하고자 한다.

### 1. 서 론

티타늄합금은 비강도가 높으면서도 화학적으로 안정하기 때문에 주로 항공우주 산업과 화학용 장치산업에 많이 이용되어 왔다. 그러나 최근들어 그동안 주로 국방목적의 항공우주산업에 이용되던 티타늄 합금이 점차적으로 일반산업용까지 그 응용분야가 확대되고 있다. 티타늄 재료가 일반 산업용 소재로 이용되는 것은 크게 강도와 내식성이 우수하기 때문이다. 자동차 업계에서도 연비향상 및 고성능화의 관점에서 경량이면서 기계적성질이 우수한 티타늄 합금 부품을 자동차에 적극적으로 적용하려고 노력하고 있다. 최근들어 전세계적으로 지구온난화 방지를 위하여 환경에

### 2. 티타늄합금과 기존 금속재료와의 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 티타늄합금은 그림1에 나타낸 것과 같이 상온에서 비강도(강도/밀도)가 월등하게 높기때문에 소재가 고가임에도 불구하고 자동차용 경량화 소재로 오래 전부터 주목을 받아오고 있다. 또한 티타늄합금은 550°C의 고온에 이르기까지 상대 재료들에 비하여

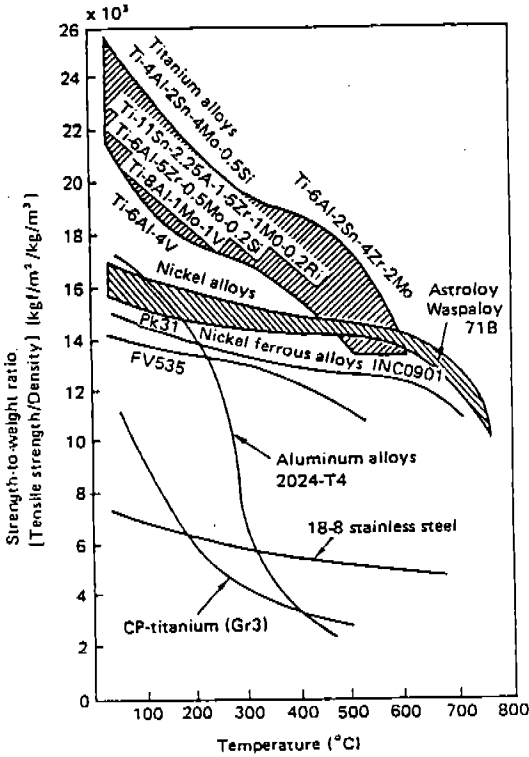


Fig.1 Relationship between strength-to-weight ratio and temperature

우수한 비강도를 유지하기 때문에 고온에서 작동하는 엔진용 구조재료 사용되어질 수도 있다. 티타늄합금은 앞에서 언급한 비강도 뿐만 아니라 비인성(인성/밀도) 또한 상대 금속재료에 비하여 우수하기 때문에 내충격이 요구되는 경량 차체 재료로도 유망하다.(그림2 참조) 아울러 상온에서의 비피로강도(피로강도/밀도) 역시 우수하기 때문에 반복적인 하중이 걸리는 자동차 부품에도 그 사용이 고려되고 있다.(그림3 참조) 티타늄합금은 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 대체소재로 유망하다.

### 3. 티타늄합금 부품의 응용현황 특징

앞에서 기술한 티타늄 재료의 특성때문에 티

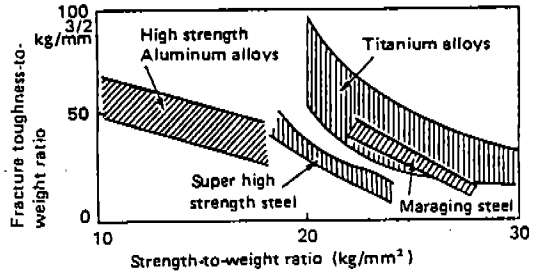


Fig.2 Relationship between strength-to-weight ratio and fracture toughness-to-weight ratio of high strength material

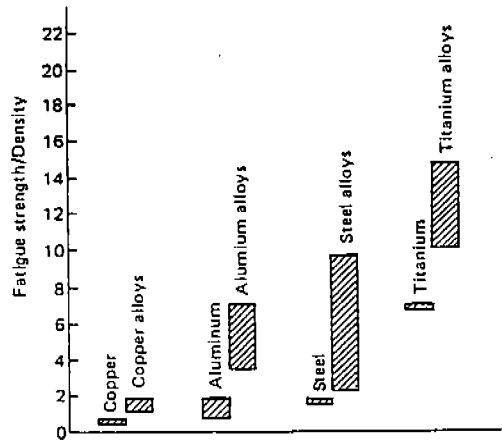


Fig.3 Specific fatigue strength of various metallic materials

타늄합금 부품이 경주용 및 스포츠 차량의 한정적인 부품에 이미 기업화되어 생산되고 있다. 자동차 생산업체들은 1990년 이래 고성능 차세대 엔진의 실용화를 목표로 하여 개발에 많은 노력을 기울이고 있고, 특히 티타늄합금을 엔진부품에 적용하여 성능향상을 꾀하려고 하고 있다. Toyota사는 이미 티타늄 밸브를 양산하여 사용하고 있고, Ford사는 신형차의 밸브트레인 계통에 티타늄합금 부품을 적용하여 판매하고 있으며, Honda사는 스포츠 차량인 NSX차종에 티타늄 합금으로 제조된 커넥팅로드를 사용하고 있다. 그리고 독일의 Porsche사에서는 스포츠용 차량에 이미 오래 전에 티타늄 부품이 엔진 뿐만아니라 기타 부품에도 사용되고 있다. 이와같이 전세계적으로

자동차용 부품으로 사용될 수 있는 티타늄 합금 부품개발에 관한 관심이 고조되고 있지만, 지금까지 개발되어 양산되고 있는 티타늄 합금들은 주로 항공우주 목적에 필요로 하는 성질이 강조되어 있기때문에 자동차의 성능에 적합한 새로운 합금개발과 후처리에 관한 연구가 여러 곳에서 활발하게 진행되고 있다.

현재 자동차용 부품으로 사용되는 티타늄 합금은 주로 엔진에 사용되고 있으며, 주요한 왕복운동 부품인 밸브계통(엔진 밸브, 밸브 스프링, 밸브 리테이너, 밸브 리프터등)과 구동부에서는 커넥팅로드 등이 티타늄합금으로 대체하려는 주된 부품으로 이들의 위치를 그림 4<sup>1)</sup>에 나타내었다. 밸브계통의 경우 이전의 철강재료에서 티타늄 합금으로 대체함에 따라 예상되는 무게감소의 결과를 표 1<sup>2)</sup>에 나타내었다. 이와같이 4기통 2밸브 형의 엔진의 경우 50%의 무게감소가 이루어져 회전수의 증가와 함께 출력이 증가하게 된다.

Table 1. Estimated weight of titanium valve system

Component	Conventional Weight	Titanium Weight
Intake Valve(4)	100g	60g
Exhaust Valve(4)	90g	54g
Valve Spring(8)	60g	22g*
Spring Retainer(8)	30g	8g*
Total per 4 Cylinder Engine	1480g	696g

\* Spring and retainer should be reduced in size and weight due to lowered spring loads

각각의 자동차용 티타늄합금 부품의 특성과 응용현황에 대하여 다음에 기술하였다.

### 3.1 밸브(valve)

티타늄합금으로 제조된 자동차용 부품중에서 가장 많이 활용되는 부품은 엔진 실린더의 흡기와 배기용 밸브이다. 미국에서 자동차용 밸브만 전문적으로 생산하는 업체가 다수 있을 정도로 일

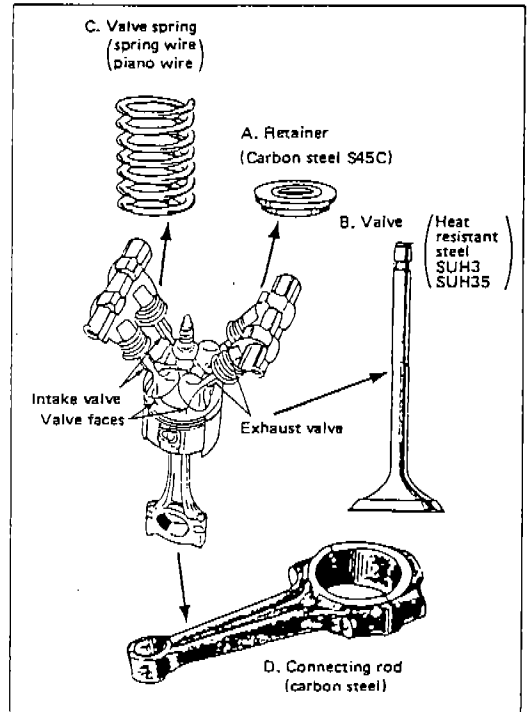


Fig.4 Example of titanium components for automotive application conventional materials indicated in parentheses

반화된 경제성이 있는 부품이다. 현재 승용차에 사용되는 내열강 밸브는 100gr이나, 티타늄합금으로 대체하는 경우에는 60gr정도로 밸브 한개당 40gr정도의 무게감소가 가능하고, 따라서 동적중량이 감소되어 10~15%의 고속성능이 증대되는 것은 물론이고, 티타늄합금은 고온 내식성이 우수하기 때문에 수명이 2~3배 증대되어 경제성과 신뢰성의 증대가 예상된다. 흡기용 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-2Mo-0.2Si (Ti6242S)가 사용되고 있다. 실제로 티타늄 밸브를 V-8 엔진에 채용한 경우에 캠 축의 형상 설계변경의 결과와 함께 약 800rpm 정도의 엔진 회전수가 증대되고, 이에 따른 torque 증가가 보고되어 있다.<sup>1)</sup> 티타늄 밸브를 사용하는 경우에

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 30~40 $\mu$ m의 경질 크롬 도금을 하거나, Mo용사, Tiduran법과 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 은 납 brazing 처리에 의한 철강재 cap을 용접시켜 사용하여야 한다. 그러나 밸브의 마개(seat)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 문제들<sup>3)</sup>을 살펴보면 밀면은 고온크립, 마개의 측면은 고온산화와 부식, 축의 하단부는 피로, 중앙부는 마모, 윗부분은 캠 축과의 마모에 의하여 파괴에 이르기 때문에 티타늄 밸브의 가공열처리를 통하여 이와 같은 작동조건에서 보다 오래 사용할 수 있도록 후처리가 고려되어야 한다.

### 3.2 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. 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 무게감소가 예측되며, 따라서 밸브의 경우와 마찬가지로 운동중량이 감소되어 엔진의 효율이 증가된다. 일반적으로 이 제품의 재료로는 Ti-6Al-4V이 많이 사용되나, 상온 성형성이 좋은  $\beta$  티타늄합금(Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr)도 이용된다.

### 3.3 밸브 스프링(valve spring)

티타늄 합금은 비강도가 크고 탄성계수와 밀도가 작기 때문에 이상적인 스프링 재료라 할 수 있다. 티타늄의 밀도는 일반 철강재료의 약 60%, 전단탄성계수는 약 50% 정도밖에 되지 않기 때문에 (3.1)식으로 부터 두 재료의 스프링 상수, 와이어 지름, 피치원 지름이 같을 경우 유효 권수가 감소하고 이론적으로는 70%이상의 경량화가 가능하다. 스프링 무게는 다음과 같이 계산되어진다.

스프링 무게(W) :

$$W = \frac{\pi^2 \cdot d^2 \cdot D}{4} N\rho = \frac{\pi^2 \cdot d^2 \cdot D}{4} \cdot \left[ \frac{G}{K} \cdot \frac{d^4}{8D^3} \right] \cdot \rho \quad (3.1)$$

여기서 K는 스프링 상수, G는 전단 탄성계수, N은 유효 코일수, d는 와이어 지름, D는 피치지름,  $\rho$ 는 밀도이다.

티타늄합금은 감쇄능이 크고 고유진동수가 크므로 엔진의 고속회전 시에 문제가 되는 surging 현상을 줄일 수 있기 때문에 회전수와 더불어 출력을 높일 수 있다. 스프링의 일차고유진동수( $f_1$ )는 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$f_1 = \frac{d}{2\pi nD^2} \sqrt{gG/2r} \quad (3.2)$$

여기서 고유진동수는 Hz로 나타내지며, g는 중력 가속도, r은 스프링 재료의 단위 체적중량, 그리고 다른 상수는 위에서 정의된 의미를 가진다. 예를들어 일반 철강재료의 제1차 진동수를 500Hz라고 하면 티타늄의 경우는 약 900Hz정도로 엔진 회전수는 약 1.8배 정도 증가한다. 그림 5<sup>4)</sup>는 철강재료와  $\beta$  티타늄합금 밸브 스프링의 surging특성을 비교한 것을 나타낸 그림인데 높은 회전수에서도 티타늄합금의 응력파형은 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다. 또한 스프링의 재료의 전단탄성계수는 기존의 스프링 강보다 약 50%

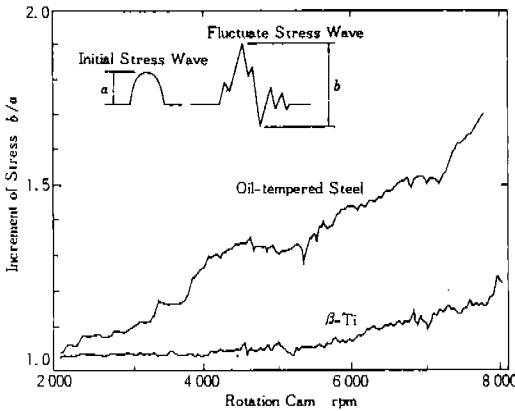


Fig.5 Dynamic characteristics of  $\phi$ -Ti valve spring compared with oil-tempered steel valve spring as function of engine rotation

정도로 작기 때문에 스프링의 권수를 줄일 수 있고 밸브스프링의 밀착높이를 감소시킴으로써 엔진의 소형화 및 경량화를 꾀할 수 있다. 밸브스프링의 실용상의 문제점으로서서는 fretting 마모<sup>4)</sup>가 있는데 이는 표면경화 처리기술의 개발에 의해 내마모성을 향상시킬 수 있다.

### 3.4 커넥팅 로드(connecting rod)

커넥팅 로드는 엔진부품중에서도 대형 운동 부품이기 때문에 비강도가 높은 티타늄합금을 사용하게 되면 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다. 우선 관성질량이 대폭 감소되어 엔진의 회전수를 증가시켜 고회력을 얻을 수 있다. 예를들어 엔진 회전수가 6000rpm에서 8500rpm으로 증가하게 되면 관성질량은 2배가 된다. 따라서 회전수의 증가에 따른 고회력을 얻으려면 운동부품의 경량화에 의한 관성질량을 줄여야 한다. 티타늄합금으로 이 부품을 대체하게 되면 약 40%의 무게감소가 가능하고 관성질량의 감소로 크랭크 샤프트 등의 관련부품에 까지 파급효과도 커서 엔진 전체의 소형화와 경량화가 가능하게 된다. 다음은 왕복회전 질량의 감소로 마찰력도 크게 줄어들어 엔진의 진동과 소음을 줄일 수 있을 뿐 더러, 연비의 향상에도 기여하게 된다.

커넥팅로드에 사용되는 티타늄합금으로는 Ti

-6Al-4V이 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 경계성의 면에서 유리하면서 기계적 성질도 Ti-6Al-4V 합금에 뒤지지 않는 Ti-3Al-2.5V 합금을 실제로 적용하고 있다. 커넥팅로드의 thrust면에는 내마모성 중대를 위한 표면처리를 하여야 하는데, 밸브의 경우와 마찬가지로 Mo용사, 경질 크롬도금, Tiduran 처리 등이 사용된다. 티타늄합금으로 제조된 커넥팅로드의 사용상의 문제점으로 변형(distortion), 볼트의 피로파괴, 결합부위에 위치한 베어링의 파괴, 윤활의 어려움에 의한 마모 등이 있다. 이러한 기술적인 문제점과 경계성의 어려움에도 불구하고 자동차의 경량화와 연비향상, 공해방지의 현대적인 개선점을 달성하기 위해서 티타늄합금으로 제조된 커넥팅로드가 보다 많이 사용되어질 전망이다.

### 3.5 기타 부품

앞에서 열거한 부품들 외에도 티타늄합금으로 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,<sup>5)</sup> 아직까지 실제 자동차에 적용했다는 사례는 없다.

이 것 외에도 개발이 시도된 부품으로 피스톤 핀이 있는데 Ti-6Al-4V으로 제조된 이 부품은 사용중에 윤착의 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 엔진 부품중의 하나로 커넥팅로드를 연결하는 볼트(neck-down bolt)가 Ti-6Al-4V 재료로 제조되어 시험해 본 예가 있으나,<sup>6)</sup> 아직까지 실용화 단계에까지는 이르지 못하고 있다. 최근에는 클러치 디스크와 같은 트랜스 미션 부품도 티타늄 재료로 대체가 시도되고 있으며, 벨 하우스링과 같은 부품을 스프링으로 제조하여 사용

하고 있기도 하다. 엔진부품들의에도 티타늄합금으로 대체하려는 부품으로 Door Mirror, Front Bumpers, Rear Bumpers, Rear Bumpers, Lug Nuts, Wheels 등이 고려되고 있다.

#### 4. 향후 과제 및 전망

현재 자동차에 사용되고 있는 티타늄합금 부품은 적용 부위와 양에 있어 매우 한정되어 있다. 따라서 앞으로 티타늄합금 부품의 적용범위를 확대시키려면 티타늄 재료의 가격외에도 몇몇 기술상의 문제점들을 해결하여야만 한다.

우선 무엇보다도 가장 중요한 과제는 티타늄합금의 가격 인하이다. 특히 구조용 부품에 대해서는 알루미늄합금의 고강도 및 고인성화, 경제적인 복합재료의 개발, 경제성이 향상된 고강도 철강재료의 개발의 활성화에 의하여, 티타늄합금이 자동차용 부품으로 선정되기 위해서는 기존의 부품대체와 같은 수동적인 노력보다 더 어려운 재료선택의 경쟁체제에 돌입하게 되었다. 따라서 티타늄 재료 생산 업체의 능동적인 가격인하 노력과 더불어 보다 우수한 재료를 제조하기 위한 연구 개발이 지속되어야 할 것이다.

재료특성에 있어서도 내열성 및 내마모성 등이 아직까지도 문제가 되고 있다. 배기계통 부품(예를들면 배기밸브)의 경우 내열성, 크립저항성, 산화저항성이 아직 불충분하고 엔진부품의 경우 왕복운동에 의한 마모, 윤착 등이 문제가 되고 있다. 이와같은 문제점을 해결하기 위하여 여러 가지 기술이 개발되고 있으며,<sup>7-8)</sup> 또한 기존의 표면처리 방법과 더불어 많은 처리방법들이 제시되고 있지만 아직도 해결하여야 할 문제점들이 많이 남아 있다.

티타늄합금이 자동차용 부품으로 사용되기 위해서는 상온에서 내마모성, 고피로강도, 가공성, 고성능 선제가공 등과 같은 성질이 향상된 새로운 합금의 개발이 요구되어 진다. 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 내열성이 우수하며, 고강도와 더불어 경제적인 성형이 가능한 새로운 합금이 개발되어 사용되어질 것이 예측된다.

#### 5. 맺음말

지금까지 자동차의 일부에 이미 사용되고 있는 티타늄합금 부품들과 가까운 장래에 사용 가능성이 있는 티타늄 부품들의 종류와 특성에 관하여 알아 보았다.

자동차용 부품으로서 티타늄합금은 단순히 차체 경량화 뿐만이 아니라 엔진부품에 적용되어 동적중량의 감소, 고회전, 고회출력을 통한 고성능 엔진의 실현에 많은 기여를 하였다. 그러나 아직까지도 티타늄합금을 일반 양산차에 까지 적용하려면 해결해야할 문제점들이 많이 남아 있지만 티타늄합금의 우수한 성질들은 차세대 자동차용 재료로서 보다 많이 사용되어질 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. P. Jette, A. Sommer ; Titanium for Energy and Industrial Application, D. Eylon ed., AIME, 1981, 199
2. 桑山哲也, 志田善明, 村岡義章 ; 住友金屬, Vol. 41(2), 1989, 47
3. J. E. Allison, A. M. Sherman and M. R. Bapna ; JOM, Vol.39(3), 1987, 15
4. T. Igarasi et al. : WIRE 90 SPRING TECHNOLOGY ESF INTERNATIONAL CONFERENCE, (1990).
5. 西村孝 ; 金屬 Titanium應用, 日刊工業新聞社, 1990, 72
6. K. Rudinger, A. Ismer ; Titanium Science and Technology, Plenum, 1973, 185
7. W. Takahashi et al. : SAE Technical Paper 90 0535
8. 渡部直也他 : HONDA R & D Technical Review, 3(1991), P.208