

티타늄합금 엔진부품개발

Development of Titanium Alloy Engine Parts

김 상 호, 인 치 범, 조 원 석
S. H. Kim, C. B. In, W. S. Cho



김 상 호
· 1959년 11월생
· 경량부품 연구, 촉매연구
· 기아자동차 기술센터
재료연구실



인 치 범
· 1966년 11월생
· 경량부품 연구, 촉매연구
· 기아자동차 기술센터
재료연구실



조 원 석
· 정회원
· 1953년 3월생
· 경량소재 연구
· 기아자동차 기술센터
재료연구실

1. 서 론

티타늄합금은 철강에 비하여 중량이 60%로 가벼울 뿐 아니라 내열강 수준의 내열성을 가지고 있어 내열성이 요구되는 엔진부품의 경량소재로 적합하다. 티타늄합금은 고가이므로 현재까지는 주로 항공기용 내열소재로 많이 사용되어 왔고, 자동차에는 경주용

자동차에 한정되어 사용되어 왔으나, 자동차의 고성능화 추세에 따라 최근에 일본의 혼다자동차에서 개발 시판된 NSX에 티타늄합금 콘넥팅로드가 양산적용된 바 있다¹⁾. 앞으로 티타늄 합금부품의 양산적용은 고성능, 저공해차량에 대한 요구수준 상승과 가격상승의 상반된 요인에 따라 결정되어질 것으로 예상된다. 티타늄합금 적용이 고려되고 있는 자동차용 엔진부품으로는 흡기밸브, 배기밸브²⁾, 콘넥팅로드¹⁾, 밸브스프링 리테이너³⁾, 밸브스프링⁴⁾등이 있다. 이러한 부품들은 대부분 엔진내에서 왕복운동하는 부품들로서 경량화에 따라 관성중량이 감소되어 경량화 효과가 큰 부품들이다. 이러한 부품의 개발을 위해서는 티타늄합금의 물성을 고려한 부품의 형상설계기술과 단조, 가공, 열처리등의 공정기술개발이 선행되어야 할 것이다. 따라서 본 고에서는 엔진부품들을 티타늄합금으로 설계한 경우의 부품신뢰성을 FEM 해석을 통하여 조사하고, 단조, 열처리등의 제조공정기술을 고찰하며, 내구실험을 통한 내구성확인 및 해석결과와의 적합성을 검증하고, 최종적으로 시제작된 티타늄합금부품을 사용할 경우 엔진성능이 어느정도 향상되는가를

확인한다.

2. 부품제작

2.1 밸브

흡기밸브는 엔진의 종류에 따라 사용온도가 다소 차이가 나기는 하나 일반적인 사용온도는 200°C~400°C 이다. 티타늄밸브의 경우는 내열강에 비해 열전도도가 낮아 사용온도가 50°C~100°C 정도 높으므로, 고 rpm에서는 밸브온도가 400°C 이상으로 상승한다²⁾. 따라서 400°C 이상에서 500MPa이상의 항복강도를 가지며, 티타늄합금중 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 Ti-6Al-4V(Ti64) 합금을 흡기밸브용 소재로 선택하였다. 그림 1은 Ti64 합금과 밸브용 내열강 SUH11의 고온항복강도를 측정된 결과로, Ti64합금이 흡기밸브의 사용온도범위에서 내열강수준의 항복강도를 가지고 있음을 보여준다.

배기밸브는 사용온도가 750°C까지 상승되므로 고온용으로 개발된 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si(Ti6242) 합금을 사용하여 제조하였다. 그림 2는 Ti6242 합금과 밸브용 내열강 SUH35의 항복강도를 비교한 것으로

배기밸브의 사용온도영역에서 Ti6242 합금이 SUH35에 비하여 항복강도가 높은 것을 보여준다.

밸브의 제작은 일반적인 밸브제작공정인 Upset 단조방법을 사용하였다. 단조공정온도를 설정하기 위하여 티타늄합금의 열간압축 실험을 통하여 성형온도와 성형속도에 따른 성형력의 변화를 측정하였다. 그림 3과 그림 4는 각각 Ti64 합금과 Ti6242 합금의 열간압축실험결과를 나타낸 것으로, 성형속도의

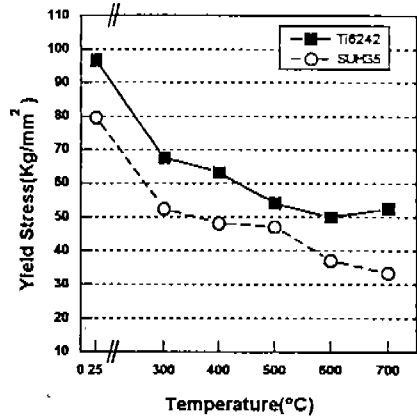


그림 2 Ti6242 합금과 SUH35의 고온항복강도 비교

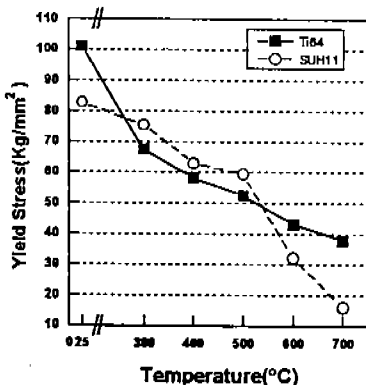


그림 1 Ti64 합금과 SUH11의 고온항복강도 비교

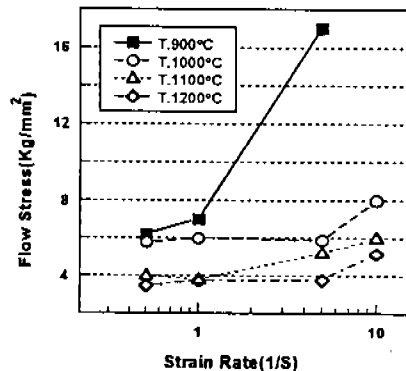


그림 3 Ti64 합금의 성형속도에 따른 성형력 변화

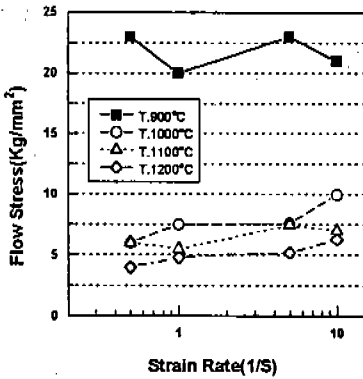


그림 4 Ti6242 합금의 성형속도에 따른 성형력 변화

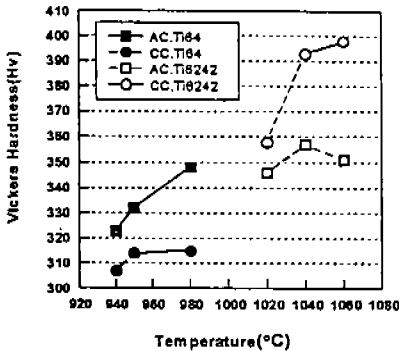


그림 5 티타늄합금의 소입열처리조건에 따른 경도 변화

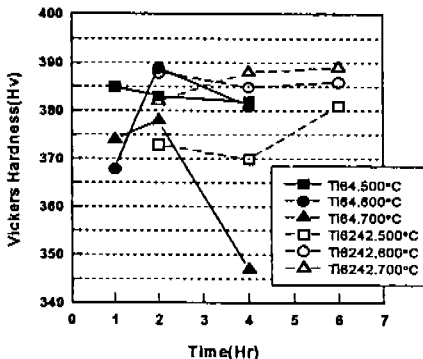


그림 6 티타늄합금의 소려열처리조건에 따른 경도 변화

영향은 비교적 적으나, 1000°C 이상의 온도에서 성형력이 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서 1000°C 이상의 온도에서 성형이 용이함을 알 수 있다.

밸브의 시제작은 1100°C에서 Upset 단조하여 공냉한 후 열처리하였다. 티타늄 밸브의 열처리조건을 설정함에 있어, 흡기밸브는 강도, 인성, 내피로성이 우수한 $\alpha+\beta$ 조직으로, 배기밸브는 내크립, 피로인성이 좋은 β 조직을 가지는 것이 바람직할 것으로 판단되었다. Ti64 합금을 $\alpha+\beta$ 조직 온도영역에서 소입조건에 따른 경도변화를 측정된 결과, 그림 5에 나타낸 바와 같이 980°C에서 2시간 처리후 공냉(AC)할 때가 제어냉각(CC)했을 때보다 높은 경도값을 얻을 수 있었다. 소려열처리는 그림 6에 나타낸 바와 같이 600°C에서 2시간 처리할 때 경도값이 높아, 흡기밸브의 열처리조건은 980°C에서 2시간 처리 후 공냉, 600°C에서 2시간 소려처리하는 것으로 설정하였다. 한편 Ti6242 합금은 Colony β 조직에서 크립, 피로성질이 우수한 것으로 보고되고 있는데, 이러한 Colony 조직은 공냉과 수냉의 중간냉각속도로 제어냉각하여 얻어질 수 있다⁵⁾. Ti6242합금의 소입조건에 따른 경도는 그림 5에서 볼 수 있듯이 1040°C에서 1시간 처리후 제어냉각하여 Colony 조직으로 하였을 때가 공냉하였을 때보다 높았다. 소려처리는 그림 6에서 볼 수 있듯이 600°C~700°C에서는 경도가 처리시간에 크게 영향을 받지 않으므로, 600°C, 2시간 처리로 설정하였다. 열처리된 밸브표면에 형성된 산화층은 취약하여 피로성질을 저하시키는 것으로 알려져 있으므로⁶⁾, 가공제거하였으며, Stem부는 내마모성을 확보하기 위하여 Mo 용사처리하였다.

2.2 밸브스프링리테이너

밸브스프링 리테이너는 밸브스프링을 밸브

와 연결, 고정시키는 부품으로 사용온도는 그다지 높지 않다. 따라서 단조가 용이한 냉간단조용 티타늄합금인 Ti-22V-4Al 합금을 사용하였다. 단조는 600°C에서 성형하여 공냉하였다. 가공한 후 내마모성 갖게하기 위하여 산화처리하여 표면에 티타늄산화층을 형성시켰다. 그림 7은 시제작된 티타늄밸브와 밸브스프링 리테이너의 사진이다.

3. FEM 구조해석

제조된 밸브의 신뢰성을 확인하기 위하여 FEM 구조해석을 하였다. 해석프로그램은 ABAQUES를 사용하였으며, 배기밸브는 부위별로 700°C에서 상온까지의 온도분포를 가지는 것으로 하였으며, 안전계수를 1.2로 하여 계산된 탄성계수와 포아슨비를 사용하였다.

구속은 밸브시트와 접촉하는 헤드페이스부에 한정시켜 Contact Element를 사용하여 모델링하였다. 하중은 헤드 부위에 가해지는 것으로 하였다. 밸브에 가해지는 하중은 두 가지로 나눌 수 있는데 첫째는 폭발력에 의한 하중이며, 두번째는 밸브의 왕복운동에 의해 가해지는 충격력이다. 가스폭발에 의한 힘은 밸브의 왕복운동의 관성력에 의한 충격에 비해 작아, 밸브에 가해지는 하중은 밸브의 관성력을 동해석하여 700N으로 하였다. 기존의 내열강 밸브는 티타늄밸브에 비하여 무거우므로 충격하중을 850N으로 하여 해석하여 비교하였다. 해석결과는 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 여기에서 알 수 있듯이 최대응력이 걸리는 부위는 밸브페이스부였으며 그 값은 표 1과 같다. 흡기밸브에 걸리는 최대응력과 항복응력의 비 R.F는 1.1로 한계치에 근접해 있으나 안전계수를 고려한 값으로 파괴가 발생되지 않을 것으로 추정되었다. 배기밸브의 경우는 흡기밸브에 비해 밸브직

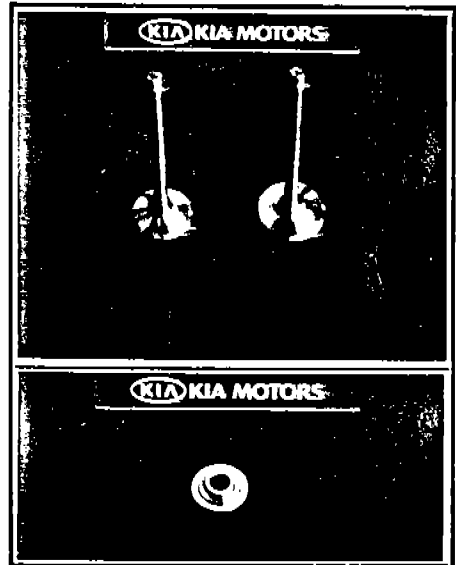


그림 7 시제작된 티타늄합금 부품사진
(상 : 밸브, 하 : 밸브스프링 리테이너)

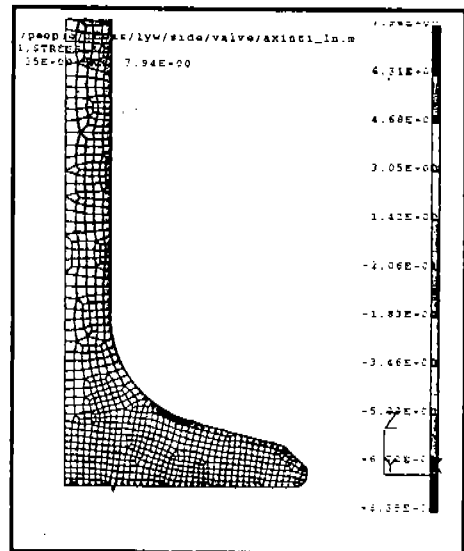


그림 8 흡기밸브의 응력분포

표 1 밸브구조해석결과

구분	Von Mises 응력	R.F	최고응력부위
흡기밸브	417MPa	1.1	헤드페이스
배기밸브	185MPa	1.6	헤드페이스

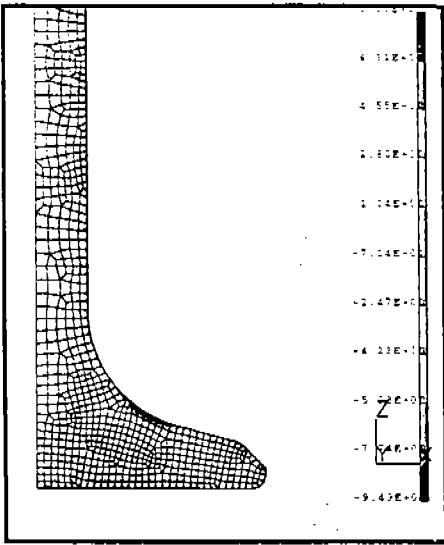


그림 9 배기밸브의 응력분포

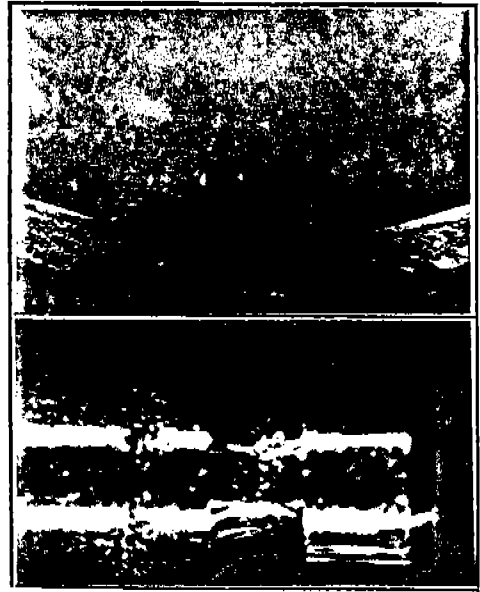


그림 11 40시간 내구실험후 밸브 마모형상 (상 : 헤드페이스, 하 : 코터)

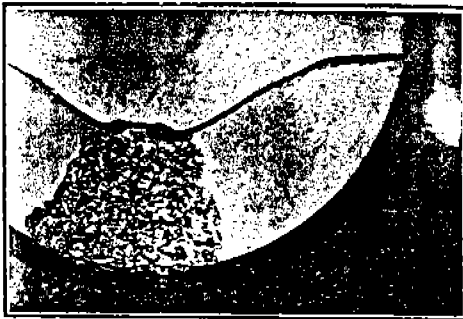


그림 10 내구실험에서 파손된 흡기밸브

경이 작아서 밸브선단부에 가해지는 Bending Moment가 작아 흡기밸브에 비하여 R.F 값이 커므로 더욱 안전한 것을 알 수 있다.

4. 내구실험

밸브 및 밸브스프링 리테이너의 내구성을 모터링테스트를 통하여 검증하였다. 단품내구시험기는 밸브를 왕복운동시키면서 외부가열에 의하여 밸브를 실제의 작동온도로 가열되도록 설계되어있다. 먼저 FEM 해석결과,

최대응력이 큰 흡기밸브를 600°C, 600rpm의 가혹한 운전조건에서 시험한 결과 6시간 36분 경과후 그림 10에 나타난 바와 같이 Fillet 부분이 파손되었다. 이것은 FEM 해석에서 Fillet 부분에 최대하중이 가해지는 결과와 잘 일치하고 있다.

실제 흡기밸브의 최대 가혹운전조건은 400°C, 3,000rpm 정도이므로 이 조건에서 40시간까지 가동하였으나 파괴는 발생되지 않았다. 40시간 운전후 밸브와 밸브스프링 리테이너의 상태를 관찰한 결과, 파괴나 마모의 흔적은 거의 관찰되지 않았다. 그림 11은 40시간 내구후 밸브의 헤드페이스와 코터 부분 마모상태를 관찰한 사진이다. 기존의 내열강밸브와 마모상태를 비교한 결과 마모형상이 거의 유사하였다. 밸브스프링 리테이너도 40시간 내구후 마모가 관찰되지 않았다.

5. 엔진성능실험

경량 티타늄부품을 사용하였을 때 엔진성능의 향상효과를 알아보기 위하여 당사 중형 엔진을 사용하여 성능실험을 하였다. 기존의 강재 엔진부품을 대체한 티타늄합금부품은 흡기밸브, 배기밸브, 밸브스프링 리테이너였다. 이러한 부품의 중량은 기존부품의 60% 수준이다. 밸브계 부품이 경량화됨에 따라 그 효과를 얻기 위해서는 밸브스프링의 스프링응력과 캠샤프트의 프로파일도 경량 밸브계에 매칭되어야 한다. 따라서 본 실험에서

는 스프링 응력을 기존스프링의 75% 수준으로 하였으며, 캠프로파일도 밸브의 개구시간이 길어질 수 있도록 공격적으로 변경하였다. 엔진실험은 전부하 조건에서 rpm을 1000~6000 영역사이에서 변화시켰다. 사용된 연료는 무연가솔린이었다. 고속영역에서의 실험결과를 그림 12와 그림 13에 나타내었다. 저속영역에서는 출력과 토크가 기존 엔진과 거의 동일한 수준이었으나 고속영역에서는 3%~4% 향상되었다.

6. 요 약

티타늄합금을 사용하여 흡기밸브, 배기밸브, 밸브스프링 리테이너를 시제작하였다. FEM 구조해석결과와 모터링 내구실험결과를 통해 이들 부품들이 신뢰성을 가지는 것으로 판명되었다. 엔진성능실험을 통해서 고속영역에서 엔진출력 및 토크가 3%~4% 향상되었다. 단 향후 엔진내구실험을 통하여 충분한 내구성검증이 필요하다고 판단된다.

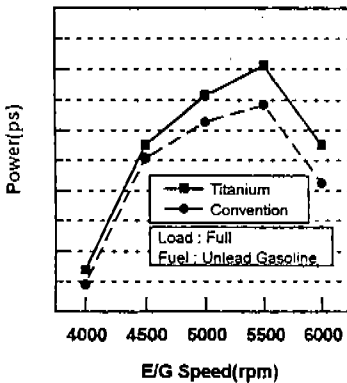


그림 12 경량티타늄부품 엔진 Power 향상 효과

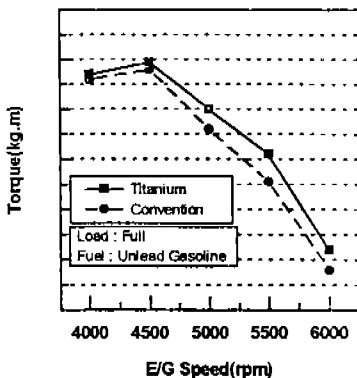


그림 13 경량티타늄부품 엔진 Torque 향상 효과

참고문헌

1. T. H. Matsuhara et al., Honda R & D Technical Review, Vol.3(1991) P.12
2. J. E. Allison et al., Journal of Metals, March(1987) P.15
3. M. Y. Mushiake, Titanium Sym., Vol.38 No.2(1990) P. 57
4. Toyota Engine Technology, March 1989
5. D. F. Neal et al., "Effect of Heat Treatment on Structure and Properties of IMI 829", Titanium 80 Sci. & Tech., (1980) P. 1287
6. K. Mixuno et al., Titanium Toward the 21th Century, P. 210