



자동차용 고온금속재료 연구개발

김윤준 | 노스웨스턴대학교

이용태 | 재료연구소

[요약문]

자동차는 다양한 형상과 기능을 가진 부품소재의 집합체라 할 수 있다. 자동차의 고출력화에 의한 연비향상과 각국의 환경규제 강화 요건을 충족시키기 위해 자동차 엔진의 작동온도와 이에 따른 배기가스의 온도가 꾸준히 높아지는 추세이다. 따라서 고온재료의 선택과 사용이 보다 중요해 지고 있다. 자동차에 사용되는 고온 부품은 설계사양에 맞추어 그리고 경제적인 측면을 고려하여 내열재료를 사용하는 방법과 표면처리를 하는 두 가지 방법이 주로 채택되고 있다. 내열재료를 사용하는 대표적인 부품은 엔진을 구성하는 부품과 연소실로부터 나오는 고온 고압의 배기가스가 이동하는 배기계 부품이다. 엔진을 구성하는 부품 중에는 냉각수에 의해 온도가 제어되는 부분은 경제적인 소재가 사용되나 밸브와 같은 부품은 고온재료가 채용된다. 가장 높은 온도에서 사용되는 배기계 부품에는 경제성이 감안되면서도 높은 열적, 기계적 안정성이 동시에 요구되고 있다. 전통적으로 배기부품에는 구상흑연주철이 널리 사용되어 왔고 현재에도 원가 측면의 강점을 이용해 대부분의 차량에 적용되고 있으나 일부 고출력, 고배기량 엔진의 경우에는 주철의 한계온도 이상의 배기온도가 요구되어 스테인리스 강을 도입하고 있다. 또한 내열 타이타늄 합금, 금속간화합물과 같은 고온재료가 개발됨에 따라 고가의 차종에는 신재료가 이들 부품으로 채용되고 있다. 이 글에서는 배기계 부품의 설계적인 요소에 의한 열적, 기계적 측면의 내구 특성을 살펴보고, 이들 부품에 보편적으로 적용되는 고온 금속재료의 종류 및 기계적 특성을 소개하였다. 아울러 미래의 환경친화적 자동차용 고온 부품을 개발하기 위하여 연구되고 있는 Super Si+MO, 스테인리스 강, TiAl, 고온 타이타늄 합금 등과 같은 자동차 내열 부품으로 사용되는 신소재의 연구개발 동향에 관하여 기술하였다.

1. 머리말

세계적인 경기의 부침에 따라 자동차 산업에도 많은 변화가 있어 왔고, 2009년도에도 전 세계 공장에서 생산된 자동차의 수는 61,295천대에 이르렀다. 이는 2008년도 생산량에 비하면 약 13.4%가 감소된 양이다. 그러나 2012년 경에는 경기 호황기였던 2007년 규모로 자동차 시장이 회복되고 세계 자동차 산업은 다시 성장 기조가 되어 밝은 미래가 열릴 것이라는 전문기관의 예측이 나오고 있다. 우리나라의 자동차 등록대수는 16,000천대를 상회 (2009년) 하고 있고, 국내 생산대수는 2009년에 3,513천대에 이르러 세계 5위의 위치에 있다. 우리나라의 대표적인 자동차 브랜드인 현대/기아차도 2009년에 4,780대를 생산 (외국에서 생산하는 자동차 대수 포함) 하여, 회사규모로는 세계 6위를 차지하고 있다(표 1, 2). 따라서 자동차 산업은 연관산업이나 고용 면에서 우리나라의 가장 중요한 국가 기간 산업의 하나로 등장하였다.



표 1. 국가별 자동차 생산대수

| 순위 | 2008년 | | | 2009년 | | | |
|----|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------------|
| | 국가 | 대수(천대) | 비중(%) | 국가 | 대수(천대) | 비중(%) | 전년대비 증감률(%) |
| 1 | 일본 | 11,564 | 16.3 | 중국 | 13,791 | 22.5 | 48.3 |
| 2 | 중국 | 9,299 | 13.1 | 일본 | 7,935 | 12.9 | -31.4 |
| 3 | 미국 | 8,671 | 12.3 | 미국 | 5,697 | 9.3 | -34.3 |
| 4 | 독일 | 6,041 | 8.5 | 독일 | 5,206 | 8.5 | -13.8 |
| 5 | 한국 | 3,827 | 5.4 | 한국 | 3,513 | 5.7 | -8.2 |
| 6 | 브라질 | 3,216 | 4.5 | 브라질 | 3,183 | 5.2 | -1.0 |
| 7 | 프랑스 | 2,569 | 3.6 | 인도 | 2,628 | 4.3 | 12.9 |
| 8 | 스페인 | 2,542 | 3.6 | 스페인 | 2,170 | 3.5 | -14.6 |
| 9 | 인도 | 2,328 | 3.3 | 프랑스 | 1,935 | 3.2 | -24.7 |
| 10 | 멕시코 | 2,168 | 3.0 | 멕시코 | 1,561 | 2.5 | -28.0 |

- 자동차 공업협회 자료(2010)
- 해외 차 현지생산은 현지국가에 포함

표 2. 자동차 회사별 생산 대수/판매 대수 (천대)

| 순위 | 회사 | 2007 | 2008 | 2009 | |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 생산 | 판매 |
| 1 | Toyota | 9,220 | 8,850 | 7,230 | 7,810 |
| 2 | GM | 8,950 | 7,940 | 6,500 | 6,330 |
| 3 | Renault-Nissan | 7,000 | 6,810 | 4,940 | 5,670 |
| 4 | VW | 6,330 | 6,440 | 6,050 | 6,340 |
| 5 | Ford | 6,030 | 5,230 | 4,700 | 4,820 |
| 6 | 현대/기아 | 3,980 | 4,180 | 4,780 | 4,780 |
| 7 | Honda | 3,890 | 3,390 | 3,010 | 3,390 |
| 8 | Peugeot | 3,590 | 3,390 | 3,040 | 3,190 |
| 9 | Fiat | 2,570 | 2,430 | 2,420 | 2,420 |
| 10 | Suzuki | 2,340 | 2,370 | | 2,310 |
| 11 | Daimler Benz | 1,580 | 1,670 | 1,460 | 1,620 |
| 12 | BMW | 1,580 | 1,480 | 1,260 | 1,290 |

완성차 한 대에는 약 2만여 개의 부품이 조립되어 작동되기 때문에 이들 각각의 부품 생산량은 자동차 한대에 들어가는 개수에 더하여 수리를 대비한 비축양도 고려하면 완성차 대수 보다 몇 배나 많은 부품을 생산하여야 한다. 대표적인 자동차용 부품소재로는 철강이 연상될 정도로 많은 양이 사용되고 있다. 최근에는 지구 온난화에 따른 환경문제와 에너지 절감, 소음과 공해의 절감, 생산 비용과 보수유지 비용의 감소, 내구성과 신뢰성의 증대 등과 같은 요구가 자동차 산업에 가장 중요한 화두로 등장하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 자동차 엔진의 연비 향상과 함께 경량화를 위한 새로운 경량재료와 내열재료의 채용이 가장 중요한 핵심기술이 되었다.

유럽과 일본 등 자동차 선진국에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 자동차 엔진의 소형화와 엔진의 작동온도를 올려서 엔진의 효율을 증대하는 기술적 방법을 강구하고 있다. 엔진의 작동온도가 올라갈수록 배기가스의 온도

도 올라가게 되어(가솔린 엔진은 1050°C, 디젤 엔진은 850°C) 엔진에 사용되는 구동부품과 배기 매니폴더의 소재도 내열 스테인리스와 고온 타이타늄 합금과 같은 고온재료의 채용과 내열 코팅 등과 같은 경제성이 높은 생산 공정이 고려되고 있다.

자동차를 구성하는 20,000여 개의 부품 중에서 내열성이 가장 심각하게 요구되는 부분은 단연 엔진, 특히 배기계용 재료이다. 엔진의 연소효율(엔진연비)향상과 출력 증대는 배기가스 온도와 비례하는 경향이 있기 때문이다. 또한 최근 환경문제에 대한 관심이 고조되면서 자동차 배기가스에 대한 규제가 날로 강화되고 있다. 이러한 규제에 대응하고 연비향상, 고출력화를 달성하기 위해서 최근 개발되고 있는 엔진은 배기가스 온도가 더욱 높아지는 추세에 있으며, 이를 위해서는 엔진과 배기계 부품의 고온 안정성, 즉 고온에서 재료의 고강도화와 내산화성 및 최적의 설계디자인이 내구성 확립에 중요한 요인이 된다¹¹⁻¹⁴.

엔진의 핵심 구동부품인 이른바 5C 부품(Cylinder block, Cylinder head, Crankshaft, Camshaft, Connecting rod)들은 냉각수를 이용해 부품의 급격한 온도 상승을 방지하고 있다. 자동차 엔진의 종류(즉, 가솔린엔진 혹은 디젤엔진)에 따라, 터보차저의 장착여부에 따라 그리고 설계적인 특성에 따라 배기가스의 온도는 변하게 된다. 일반적으로 최대 배기온도는 가솔린 엔진의 경우 1000°C 정도에 육박하고, 디젤엔진의 경우에는 이 보다 다소 낮은 850~900°C 수준으로 개발된다¹⁵. 실린더 헤드와 연결된 배기계의 경우에는 별도의 냉각 장치가 없어, 고온의 배기가스 온도에 그대로 노출된다. 특히 배기 매니폴더는 고온의 배기가스에 직접적으로 노출되는 통로로 고온 열피로 강도가 높아야 하고, 열용량과 소음이 적은 고온재료가 채용된다. 또한, 이 부품은 상온과 고온을 반복하는 극심한 열피로 조건에서 작동되기 때문에 고온 내산화성과 내열강도가 요구되며 촉매 활성화 시간 단축에 의한 배기가스 저감 효과를 얻기 위해 경량화에 의한 열용량을 최소화 해야 한다. 대부분의 자동차에는 고온부식, 고온산화, 고온 열피로 특성이 우수하며, 열팽창계수가 낮고, 성형성이 우수한 내열 스테인리스 강으로 부품을 제조하고 있다. 배기계 부품의 장착 위치 및 형상을 그림 1에 나타내었다.

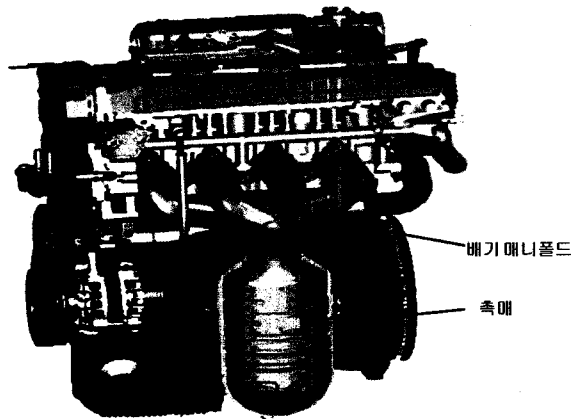


그림 1. 배기계 부품 (매니폴더, 촉매)의 장착 위치 및 형상

최근에는 경량 내열재료가 연구개발 됨에 따라 고가의 자동차에는 고온용 타이타늄 합금, TiAl과 같은 금속간화합물 등과 같은 신소재도 채용되고 있다. 고온 타이타늄 합금은 550°C까지, TiAl 금속간화합물은 800°C의 고온에서도 다른 재료들에 비하여 우수한 비강도를 유지하기 때문에 고온에서 작동하는 엔진용 구조재로 사용된다. 타이타늄 합금은 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. 또한 타이타늄 합금은 고온에서도 피로강도가 인장강도의 0.55~0.65 정도를 유지하기 때



문에 기존의 철강재료의 0.35~0.50 정도에 비하여 높다. 따라서 고온에서 내피로성이 요구되는 엔진 부품의 대체 소재로 유망하다. 이와 같은 타이타늄 재료의 특성 때문에 타이타늄 합금 부품이 경주용 및 스포츠 차량의 부품으로 이미 사용되고 있다.

이 글에서는 자동차 배기계에 적용되는 재료들의 요구 특성을 살펴보고 실제 차량에 사용되는 내열재료의 종류와 물성에 대해 논의하고자 한다. 아울러 최근 들어 내열부품에 다양하게 사용되는 페라이트계와 오스테나이트계 스테인리스 내열강과 고온 타이타늄 합금 그리고 TiAl 등과 같은 신소재의 응용과 연구개발 현황에 대해서 알아보았다.

2. 자동차 배기계 재료의 요구 특성

배기계는 배기 매니폴더, 터보차저 및 촉매로 조금 더 세분화 할 수 있는데, 각 부품에 적용하는 재료는 고온강도, 열피로 특성, 고온 내산화성, 재료비 등을 종합적으로 고려하여 결정하게 된다. 배기 매니폴더는 그림 1에서 보여주는 바와 같이 엔진 헤드에 장착되어 있으며, 연소실에서 고온, 고압으로 배출되는 연소가스를 촉매를 거쳐 머플러로 보내는 통로 역할을 한다. 배기 매니폴더는 엔진구동시 구속된 상태에서 반복적인 열팽창과 수축을 받게 되어 이로 인한 피로균열이 생성되고 균열부가 선택적으로 산화되어 균열이 진전되면서 파단에 이르게 된다. 또한 환경규제 강화로 인해 배기가스의 오염물질을 걸러주는 촉매 담체의 cell수도 과거 400cell에서 600cell, 900cell로 꾸준히 증대되면서 산화스케일 박리에 의한 촉매 담체 파손 및 막힘 현상도 자주 문제가 되고 있는 실정이다. 그림 2는 사용 중 열충격에 의해 산화 및 피로 파손된 배기 매니폴더의 사진이다.

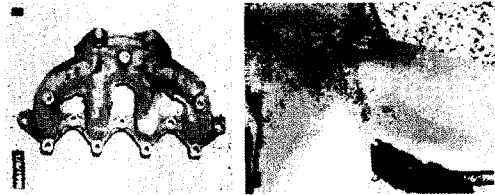


그림 2. 열충격에 의해 파손된 배기 매니폴더 사진

배기 매니폴더는 형상적인 특징으로 말미암아 엔진의 각 기통으로부터 빠져 나온 배기가스들이 한데 모이는 합류부의 온도 변화가 가장 심하고, 이에 따라 열응력이 집중된다. 엔진의 구동 및 정지를 반복하게 되면 응력 집중부는 저주기 피로(Low cycle fatigue) 혹은 열기계적 피로(Thermo-mechanical fatigue) 모드로 균열이 생성된다. 그림 3에서 엔진의 구동 및 정지 시 응력 집중부에서 실측한 온도-응력 및 응력-변형률 관계를 보여주고 있다. 응력 변형률의 관계는 전형적인 열기계적 피로 혹은 저주기 피로시 흔히 관찰되는 hysteresis curve와 유사하게 나타나게 된다.^[6-8]

터보차저(그림4)는 배기 매니폴더의 하단에 장착되고, 터빈 휠과 컴프레서 휠을 이용해 흡기 매니폴더로 흡입되는 연료와 압축공기를 강제로 불어넣어 엔진 출력을 향상시키는 역할을 한다. 현재 양산 중인 거의 모든 디젤 자동차와 일부 고출력 가솔린 엔진에는 이와 같은 터보차저가 장착되어 엔진의 출력을 향상 시키는 역할을 담당하고 있다. 터보차저 시스템은 그림 4에서 보여주는 것과 같이 터보차저 자체 만으로도 상당히 많은 부품들로 구성되어 있는데, 이중 터빈 휠과 터빈 하우징이 고온의 배기가스에 노출되는 대표적인 부품이다. 터빈 휠의 경우 높은 배기가스 온도에 노출될 뿐만 아니라 100~200 천 rpm에 달하는 고속 회전을 하기 때문에 이들 부품에 사용되는 재료의 고온 강도가 특히 중요한 요소이다. 터빈 하우징은 배기 매니폴더로부터 빠져 나온 배기가스들이 터빈 휠을 돌리기 위해 이동하는 통로로써, 달팽이와 같은 형태의 나선형 구조로 제작된다. 나선형 형상이 고온에서 변형되지 않도록 설계하

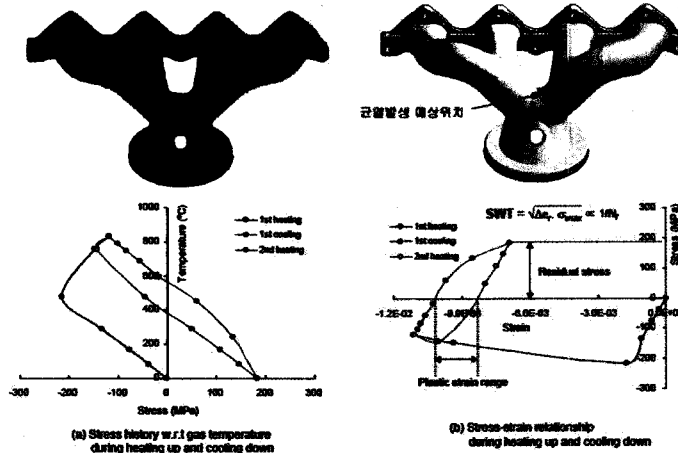


그림 3. 엔진의 구동-정지 시 합류부의 (a) 온도에 따른 응력변화, (b) 응력-변형을 거동^{6,7)}

고, 적절한 내열 재료를 선택하는 것이 내구성 확보에 중요한 요소이다. 또한, 터보차저의 부품들은 엄격한 치수의 정확도가 확보되어야만, 엔진의 부하를 줄이고 출력을 극대화 시킬 수 있으므로 재료의 선정, 주조 및 가공까지 세심한 관리가 요구된다.

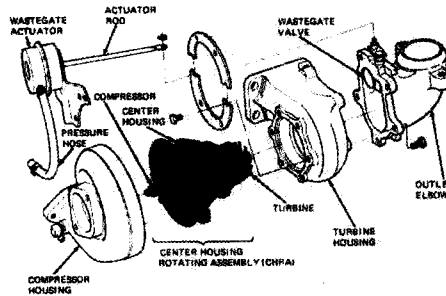


그림 4. 터보차저 구성부품⁸⁾

3. 배기계 재료의 종류

배기계 부품용 재료로 가장 많이 쓰이는 금속재료는 주철이다. 주철은 주조가 용이하고 가격이 저렴하며, 일반적인 페라이트 기지의 구상흑연주철에 Si와 Mo 합금을 통해 약 850°C 정도의 배기가스 온도까지는 내열성을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있고, 그 이상의 온도에서는 A1변태점을 넘어서기 때문에 기지의 오스테나이트 변태가 일어나 급격한 변형(열팽창)이 야기되어 사용이 불가능하다. 하지만 최근에 출시되는 자동차의 고출력 엔진들의 경우 배기가스 온도가 변태점 이상에서 작동되도록 소재 개발이 요구되므로 오스테나이트 기지(일명 Ni-resist)의 구상흑연 주철을 사용하거나 스테인리스 강을 적용하는 경우가 많다. 터빈 하우징 용으로는 구상흑연주철과 더불어 CGI (Compacted Graphite Iron)에 Si 및 Mo를 합금한 재질이 사용 되기도 하고, 터빈 휠 재질로는 Inconel을 사용하는 것이 일반적이다. 최근에는 내열 스테인리스 강과 고온용 타이타늄 합금, 금속간화합물 등과 같은 상대적으로 고가이지만 내열성이 우수한 신재료가 일부 자동차의 엔진에 채용되고 있다. 현재 각 자동차 브랜드에서 양산용 자동차



에 채용되고 있는 부품들과 이들에 사용되는 주요 재료와 화학성분 및 성분 허용범위를 표 3 및 표4에 각각 정리하였다.

표 3. 배기계 부품에 주로 적용되는 내열 재료

| 시스템명 | 부품명 | 적용 재료 (대분류) | 적용 재료 (소분류) | 비고 |
|---------|---------|--------------------|-------------|-----------|
| 배기 매니폴더 | 배기 매니폴더 | 주철 | 구상흑연주철 | Si, Mo 첨가 |
| | | | CGI | Si, Mo 첨가 |
| | | | Ni-resist | Ni 첨가 |
| | | 스테인리스 강 | 페라이트계 판재 | |
| | | | 오스테나이트계 판재 | |
| | | | 오스테나이트계 주강 | |
| 터보차져 | 터빈 하우징 | 주철 | CGI | Si, Mo 첨가 |
| | | 스테인리스 강 | 오스테나이트계 주강 | |
| | 터빈 블레이드 | Ni-base Superalloy | Inconel | |
| 촉매 | 촉매 하우징 | 주철 | 구상흑연주철 | |

표 4. 재료별 화학성분과 허용 범위

| 순위 | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Nb | Cu | Mg | Ti | |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-----|---|
| 주철 | Low | 3.3 | 3.4 | 0.6 | 0.10 | 0.015 | - | - | 1.0 | - | 0.4 | 0.025 | - | |
| | Si-Mo | -3.8 | -3.8 | max | max | max | - | - | max | - | -0.6 | min | - | |
| | High | 2.8 | 4.0 | 0.35 | 0.05 | 0.05 | - | - | 0.80 | - | 1.0 | 0.025 | - | |
| | Si-Mo | -3.7 | -4.5 | max | max | max | - | - | -1.2 | - | max | min | - | |
| | CGI | 3.0 | 4.0 | 0.30 | 0.07 | 0.02 | - | 0.60 | 0.4 | - | - | 0.050 | 0.2 | |
| Ni-resist | | -3.6 | -4.6 | max | max | max | - | max | -0.7 | - | - | max | max | |
| | | 2.0 | 4.8 | 0.7 | 0.07 | 0.03 | 1.6 | 34.0 | - | - | - | 0.035 | - | |
| 스테인리스 강 | 429계열 | | 0.03 | 1.0 | 1.00 | 0.04 | 0.03 | 14 | - | 1.5 | 0.4 | - | - | |
| | | | max | max | max | max | max | -16 | - | -1.8 | -0.6 | - | - | |
| | 444계열 | | 0.025 | 1.0 | 1.50 | 0.04 | 0.03 | 17 | - | 1.5 | 0.30 | - | - | |
| | | | max | max | max | max | max | -20 | - | -2.5 | -0.80 | - | - | |
| | ACI | HF 계열 | 0.20 | 1.5 | 2.0 | 0.04 | 0.15 | 18.0 | 8.0 | - | 1.0 | - | - | - |
| | | | -0.50 | max | max | max | max | -22.0 | -12.0 | - | -2.0 | - | - | - |
| | ACI | HH계열 | 0.30 | 1.5 | 0.75 | 0.04 | 0.11 | 24.0 | 12.0 | - | 1.7 | - | - | - |
| | | | -0.50 | max | -1.1 | max | -0.15 | -27.0 | -15.0 | - | -2.1 | - | - | - |

3.1 구상흑연주철

자동차 배기부품용 구상흑연주철에는 내열성을 향상시키기 위해 페라이트계 구상흑연주철에 Si를 3.5~4.5 wt.%, Mo를 최대1.0 wt.% 정도 첨가한다. 이 경우 페라이트 기지에 펄라이트와 Mo탄화물이 형성된다. 탄소와 실리콘의

함량은 탄소 당량(Carbon Equivalent (C.E.) = %C+%Si/3)으로 표현되며 이를 통해 흑연의 형상을 예측할 수 있다^[10]. C.E가 4.8 이상의 과공정에서는 탄소가 부유하거나 수축이 발생할 수 있다. 반면, C.E값이 낮으면 수축과 Chill이 생성될 경향이 높아진다. 또한, 내산화성 향상을 위해 Si함량을 현저히 증가시키므로 탄소의 양은 2.8~3.7wt.% 정도로 제한되는 것이 일반적이다.

실리콘은 주철에 첨가되었을 때 기지를 페라이트화 하여 승온 시 열변형을 최소화 하고 표면에 고온산화를 방지 하는 안정적인 산화층(SiO₂)을 형성하여 내산화성을 증가시킨다. 문헌에 따르면, 실리콘 첨가량이 증가함에 따라 산화증량이 감소하였고, 실리콘 함량이 4wt.% 이상 첨가된 경우 시간이 경과하여도 산화증량에는 변화가 없었다^[11-14]. 일반적으로 4wt.% 이상의 Si첨가는 산화 량이 증가하는 것은 방지할 수 있으나, 과다 첨가될 경우 상온 충격 특성이 취약해지고 경도가 높아 양산 및 가공성에서 문제가 된다. 또한, 과다한 Si의 첨가는 열균열을 쉽게 야기시키기도 한다. 주철재에 Mo을 0.5~2wt.% 첨가하였을 때 상 경계에 Mo 탄화물을 형성하여 고온강도와 내크립성이 향상된다. 그러나 결정립계에 생성된 카바이드는 인성을 감소시키고 수축결함이 발생할 가능성이 있으므로 1wt.%로 제한하는 것이 좋다.

배기가스 온도가 850℃ 이상의 고출력 엔진인 경우에는 오스테나이트 기지의 구상흑연주철을 사용한다. 일반적으로 Ni-resist 혹은 D5S라고 불리는데, Ni를 35~40wt.% 첨가하여 기지를 오스테나이트화 시킨 것이 특징이다. Si-Mo합금 페라이트계 구상흑연주철이 850~900℃ 사이에서 기지가 페라이트-오스테나이트 변태를 하는데 반해 Ni-resist 주철은 모든 온도에서 안정적인 오스테나이트 기지를 유지한다. 하지만 과도한 Ni 첨가로 인해 주조성이 좋지 않고, 원가가 상승하여 널리 사용되지는 못하는 실정이다. 그림 5에서 Si-Mo 주철과 Ni-resist 주철의 조직을 비교하였고, 그림6에 각 온도에서의 고온 인장강도를 비교하였다^[15].

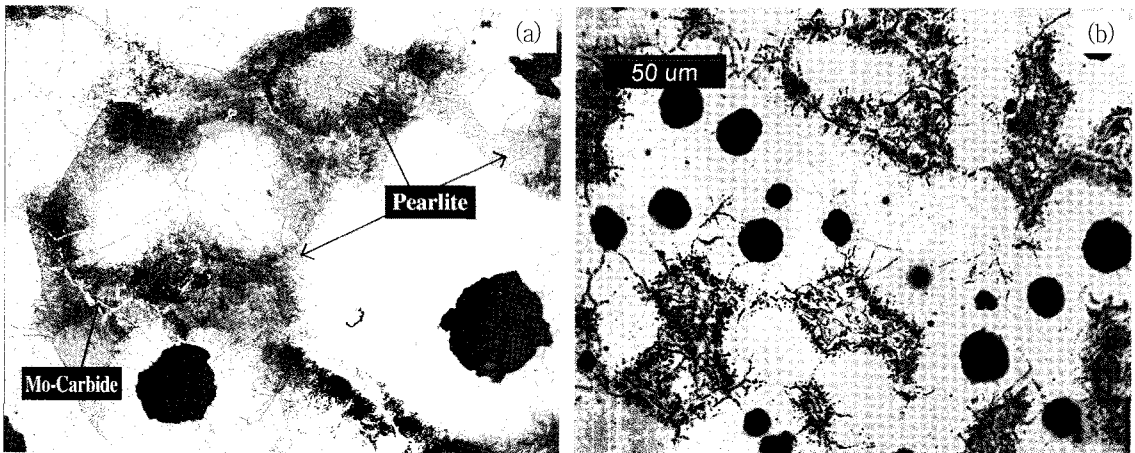


그림 5. (a) Si-Mo 주철과 (b) Ni-resist 주철의 미세 조직

3.2 스테인리스 강

스테인리스 강은 850℃ 이상의 고출력 엔진에 적용된다. 제작 방법에 따라 프레스+용접하는 판재 사양과 주조 사양(주강) 두 가지가 있다. 판재 사양은 주로 400계열의 페라이트계 스테인리스 강을 사용하고, 제한적으로 300계열의 오스테나이트계도 적용된 사례가 있다. 주강의 경우 오스테나이트계(ACI (Alloy Casting Institute) HF 및 HH계열^[16-19] 강종을 주로 사용함)를 사용하게 된다. 표 4에 열거한 것과 같이 스테인리스 강의 경우 판재와 주강 모두 공통적으로 내열성 향상을 위해 Nb성분을 합금하여 사용하고 있으나, 두 종류의 강재의 미세조직을 비교해 보면 확연한 차이가 있음을 알 수 있다(그림 7). 특히, 주강의 경우 판재보다 C 함량이 비교적 높게 첨가되는데, 이는 배기계 부품의 작동 환경 특성상 내부식성(sensitization)이 크게 요구되지 않고, 주조를 수월하게 할 수 있기 때문이다.

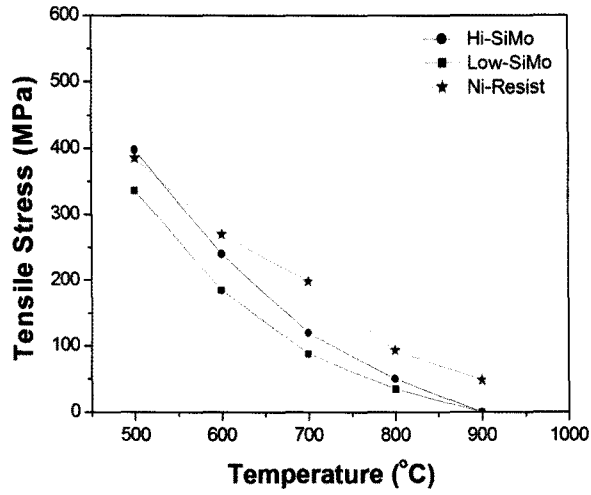


그림 6. 주철재의 고온 인장강도

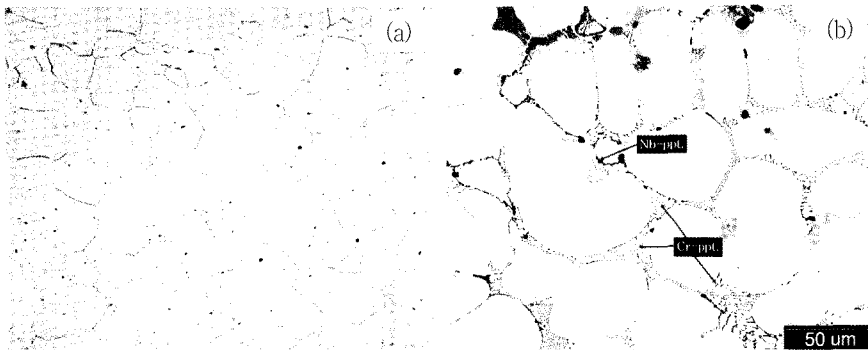


그림 7. (a) 429계열 스테인리스 판재와 (b) ACI HF계열 스테인리스 주강의 미세조직¹⁷⁾

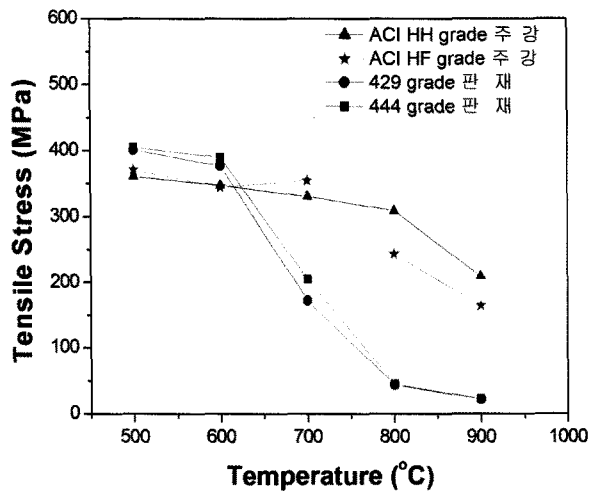


그림 8. 배기 매니폴더용 스테인리스 강의 고온 인장강도

스테인리스 강의 고온 강도는 그림 8에서 알 수 있는 것과 같이 주철재(그림 6) 보다 높지만, 판재사양의 경우 용접부가 열충격에 취약해질 수 있고, 주강의 경우에는 박육화에 한계가 있어 중량이 많이 나가는 단점이 있다. 주강의 경우 이런 단점을 극복할 수 있는 박육주조 공법 개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 하지만 이런 단점에도 불구하고 탁월한 내산화성과 고내열성을 바탕으로 최근에는 고출력 엔진용 배기 매니폴더와 터빈 하우징으로 적용 범위를 넓혀가고 있다.

그림 9에 800℃에서의 각 강종별 고온 저주기 피로시험 결과를 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 것과 같이 고온에서는 ACI HF grade 주강이 가장 낮은 값을 보이는 반면에 429 grade 판재가 가장 높은 값을 보임을 알 수 있다.

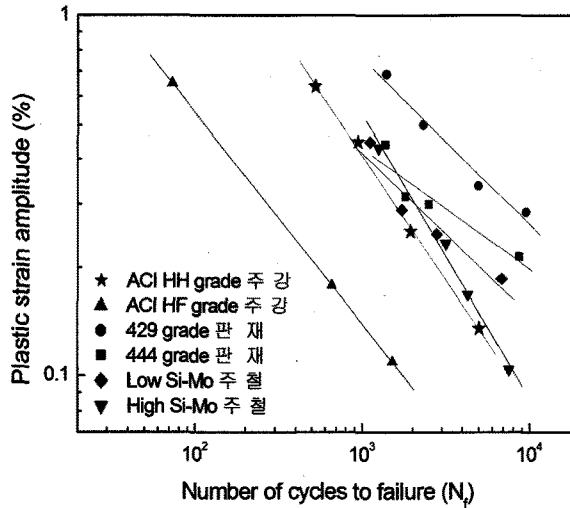


그림 9. 강종별 800℃에서의 고온 저주기 피로 시험 결과

보다 고온에서 사용할 수 있는 스테인리스 주강 소재를 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다. 주로 페라이트계 와 오스테나이트계 스테인리스 주강재를 합금원소를 변화시켜서 고온에서의 인장강도, 항복강도, 연신율과 같은 다양한 물성을 측정하였다(그림. 10, 11, 12). 아울러 이들 합금의 화학성분을 표 5와 표 6에 나타내었다.

이들 그림에서부터 알 수 있듯이, 페라이트계 스테인리스는 500℃까지는 강도를 유지하다가 그 이상의 온도에서는 급격하게 감소함을 알 수 있다. 반면에 연신율은 이 온도 이상에서는 급격하게 증가한다. 오스테나이트계 스테인리스 주강은 저온에서의 강도는 상대적으로 낮지만 850℃ 이상에 이르기까지 상온에서의 강도를 유지하여 비교적 우수한 고온변형 특성을 나타냄을 알 수 있다^[26]. 페라이트계 (F1-2)와 오스테나이트계 (A1-1) 스테인리스 강의 미세조직을 그림 13에 비교하였다. 이상의 결과로부터 HA계열의 오스테나이트계 주강을 배기 매니폴더로 채용하기 위한 다양한 실차 시험이 진행되고 있어서 불원 국산 자동차의 부품으로 채용될 것으로 기대된다.

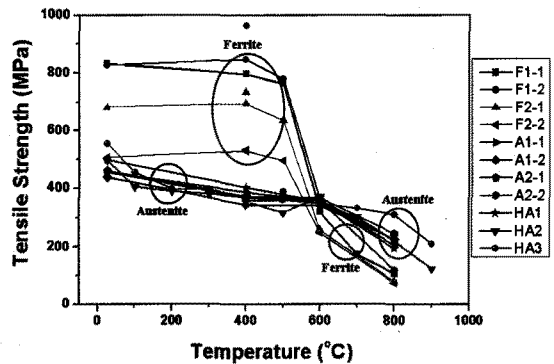


그림 10. 각종 스테인리스 소재의 인장시험 온도에 따른 인장강도의 변화

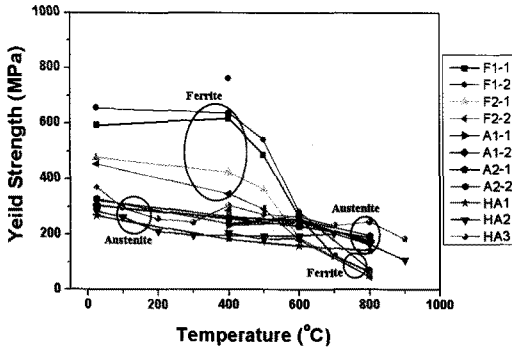


그림 11. 각종 스테인리스 소재의 인장시험 온도에 따른 항복강도의 변화

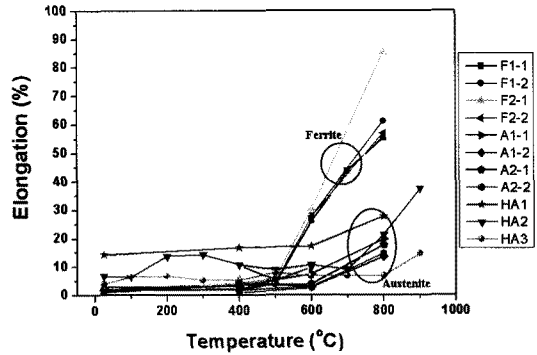


그림 12. 각종 스테인리스 소재의 인장시험 온도에 따른 연신율의 변화

표 5. 페라이트계 스테인리스 주강의 화학성분 비교

| 기호 | 화학성분 (wt.%) | | | | | | | | | |
|------|-------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Nb | W | N |
| F1-1 | 0.51 | 0.74 | 0.67 | 0.025 | 0.007 | 1.54 | 20.10 | 1.82 | - | 0.05 |
| F1-2 | 0.45 | 0.67 | 0.74 | 0.025 | 0.006 | 1.48 | 18.76 | 1.35 | 1.74 | ↑ |
| F2-1 | 0.45 | 0.66 | 0.66 | 0.025 | 0.005 | 1.41 | 21.23 | 1.48 | - | ↑ |
| F2-2 | 0.44 | 0.73 | 0.69 | 0.027 | 0.006 | 1.41 | 21.99 | 1.48 | 1.63 | ↑ |

표 6. 오스테나이트계 스테인리스 주강의 화학성분 비교

| 기호 | 화학성분 (wt.%) | | | | | | | | | |
|------|-------------|-------|-------|--------|--------|-----------|-----------|---------|---------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Nb | W | N |
| A1-1 | 0.56 | 0.97 | 1.13 | 0.026 | 0.215 | 18.85 | 25.12 | 2.52 | 0.13 | 0.05 |
| A1-2 | 0.58 | 0.97 | 1.33 | 0.027 | 0.225 | 23.46 | 25.46 | 2.52 | 0.13 | ↑ |
| A2-1 | 0.53 | 1.31 | 1.10 | 0.028 | 0.218 | 19.44 | 25.61 | 2.46 | 2.04 | ↑ |
| A2-2 | 0.54 | 1.09 | 1.20 | 0.029 | 0.216 | 19.69 | 25.59 | 2.51 | 3.60 | ↑ |
| HA1 | 0.2~0.5 | 1.5이하 | 1.5이하 | 0.04이하 | 0.15이하 | 8.0~12.0 | 18.0~22.0 | 1.0~2.0 | - | - |
| HA2 | 0.2~0.5 | 1.5이하 | 1.5이하 | 0.04이하 | 0.15이하 | 9.0~12.0 | 19.0~22.0 | 1.0~2.0 | 2.2~3.2 | - |
| HA3 | 0.2~0.5 | 1.5이하 | 1.5이하 | 0.04이하 | 0.15이하 | 12.0~15.0 | 24.0~27.0 | 1.7~2.1 | - | - |

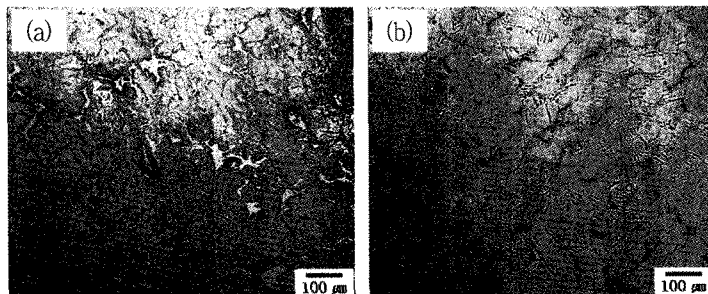


그림 13. (a)페라이트계 미세조직(F1-2)과 (b)오스테나이트계 미세조직(A1-1)

3.3 고온 타이타늄 합금^[27]

타이타늄 합금으로 제조된 자동차용 부품 중에서 가장 많이 활용되는 부품은 엔진 실린더에 사용되는 흡기용 및 배기용 밸브이다. 미국과 일본에서는 자동차용 타이타늄 합금 밸브만 전문적으로 생산하는 업체가 다수 있을 정도로 일반화된 경제성이 있는 부품이다. 밸브가 경량화 되면 왕복 운동 중에 관성 질량이 감소되고 따라서 밸브의 응답성이 높아져 엔진의 소형화 또는 경량화가 가능해진다. 이에 따라 엔진의 연비가 향상되고, 자동차의 정속성이 개선되며, 엔진의 고출력이 가능해지는 연쇄적인 효과가 발생한다. 현재 승용차에 사용되는 내열강 밸브 한 개의 무게는 100gr이나, 타이타늄 합금으로 대체하는 경우에는 60gr 정도로 밸브 한 개당 40gr 정도의 무게 감소가 가능하고, 따라서 동적 중량이 감소되어 10~15%의 고속성능이 증대되는 것은 물론이고, 타이타늄 합금은 고온 내식성이 우수하기 때문에 수명이 2~3배 증대되어 경제성과 신뢰성의 증대가 예상된다. 실제로 타이타늄 밸브를 V-8 엔진에 채용한 경우에 캠 축의 형상 설계 변경의 결과와 함께 약 800rpm 정도의 엔진 회전수가 증대되고, 이에 따른 torque 증가가 보고되고 있다.

흡기용 밸브의 경우에는 작동온도가 300℃ 이내로 낮기 때문에 Ti-6Al-4V 합금이 사용되나, 배기용 밸브의 경우에는 고온의 배기가스와와의 접촉에 의해 온도 영역이 흡기용 밸브보다 높기 때문에 고온용 타이타늄 합금인 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.2Si (Ti-6242S)가 사용되고 있다. 그러나 이러한 고온 타이타늄 합금도 기존에 사용되고 있는 SUH35 강 (21-4N 밸브 강) 등에 비하여 충분한 내열성을 가지지 못하기 때문에 사용온도 영역이 더 높은 Ti-6Al-2.7Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si (TIMETAL1100), Ti-6Al-4Sn-3.5Zr-3Mo-1Nb (DAT 54), IMI 834 합금 등의 채용이 고려된다. 최근에는 보다 고온물성이 향상된 MMC(타이타늄 금속기 복합재료, Ti-6Al-4V/SiC)나 TiAl기 Gamma 금속간화합물 등이 이용되고 있다. 실제로 Gamma기 금속간화합물 배기 밸브가 도요타 알테자에 사용되었다.

타이타늄 밸브를 사용하는 경우에 밸브 축 면과 가이드 사이에서 빠른 왕복운동에 의한 마찰열에 의하여 축 부위의 표면이 용융되어 달라붙는 경우가 생기기 때문에 표면처리가 필수적으로 요구된다. 따라서 밸브의 축 부위에는 30~40 μ m의 경질 크롬 도금을 하거나 Mo용사, 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, stellite은납 brazing 처리에 의한 철강재 cap을 용접시켜 사용하여야 한다. 그러나 밸브의 마개(seat) 부위는 왕복 운동에 의한 마모가 그다지 큰 문제를 야기시키지 않기 때문에 특수한 표면처리 없이도 사용이 가능하다. 고온의 엔진 내부에서 작동하는 밸브를 사용하는 동안에 발생하는 여러 가지 급속적인 문제들을 살펴보면 밀면은 고온 creep, 마개의 측면은 고온산화와 부식, 축의 하단부는 피로, 중앙부는 마모, 윗부분은 캠 축과의 마모에 의하여 파괴에 이르기 때문에 타이타늄 밸브의 가공열처리를 통하여 이와 같은 작동 조건에서 보다 오래 사용할 수 있도록 후처리가 고려되어야 한다.

아직까지 타이타늄 밸브가 상용차에 광범위하게 사용되지 못하고 있는 이유는 역시 고가의 타이타늄에 의한 낮은 경제성에 있다. 실제로 타이타늄 밸브는 기존의 철강 밸브보다 5배 이상 고가라고 여겨진다. 따라서 보다 저가의 타이타늄 밸브를 개발하기 위해서는 소재 가격을 낮추는 시도와 아울러 저가의 가공 공정에 의한 다양한 비용 절약 노력이 이루어져야 한다. 타이타늄 소재 가격을 낮추기 위해서는 불순물이 엄격하게 규제된 항공 목적의 고가 스폰지를 사용하여 압연재를 만드는 대신에 품질관리가 덜 엄격한(또는 불순물의 영향이 최소화 하는 허용치가 높은 압연재) 자동차용 타이타늄 소재를 채용하는 것도 한 방법이다. 밸브 제조 공정에 있어서도 기존의 엷장조 대신에 추출 단조법을 채택함으로써 투입 재료 자체를 비싼 세봉에서 조금 더 직경이 큰(따라서 재료의 가공 코스트, 수익 면에서도 유리한) 환봉으로 대체하여 제조할 수 있는 공정의 개발도 필요하다. 표면처리도 고가의 내마모 Mo 용사 대신에 OD처리 (Oxygen Diffusion Treatment) 등을 채용함으로써 가격을 낮춘다면 보다 다양한 자동차용 밸브가 사용되어질 것이다. 자동차 엔진에 타이타늄 합금이 채용되는 부품과 부위를 그림 14에 나타내었다.

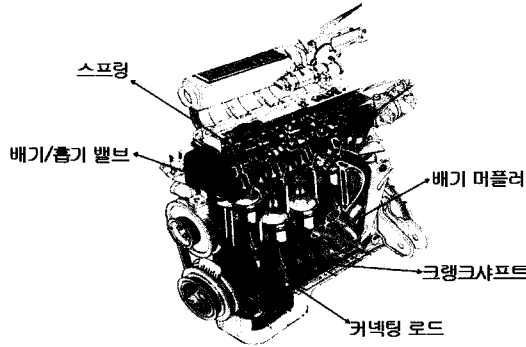


그림 14. 타이타늄 소재가 적용된 자동차용 엔진

3.4 TiAl 금속간화합물^[27]

주로 미국, 일본 등에서 연구 개발된 Gamma TiAl 금속간화합물을 이용하여 600°C에서 1,000°C 범위에서의 자동차와 항공기 엔진의 고온부품으로 사용하고자 하는 시도가 꾸준히 수행되어 왔다. TiAl계 금속간화합물은 비중이 낮고(4.2g/cm³) 고온에서의 내열성과 내산화성이 우수하기 때문에 자동차용 터보차저와 배기밸브로 개발되어 양산차에 사용되고 있다.

그러나 TiAl 금속간화합물은 상온에서의 낮은 연성과 파괴인성 그리고 가공성 등이 낮기 때문에 모든 차량에 채용되기에는 아직도 많은 기술적 사항이 고려되고 있다. 가격 또한 가공과 성형의 난점으로 인하여 상대적으로 비싸기 때문에 일부 한정된 자동차의 고온 부품으로 사용되고 있다. 그러나 가격경쟁이 덜 한 항공기 엔진에는 보다 많은 부품이 채용되고 있다.

일본에서는 Daido특수강에서 TiAl 벨브를 생산하여 Mitsubishi 자동차의 터보차저 로타에 사용하고 있다. 이들 금속간화합물의 물성향상과 대량생산에 의한 가격이 낮아지면 보다 많은 고온 부품에 사용될 것으로 예측된다.

4. 고온저주기 피로수명

배기계 부품은 2.1절에서 언급했다시피, 엔진의 구동 및 정지를 반복하다 보면 배기가스가 함유되는 지점의 온도 변화가 가장 커지게 된다. 이로 인해, 재료의 열팽창 수축이 hysteresis 형태로 반복되게 되고, 결과적으로 열응력(Thermal Stain)이 발생하여 파손에 이르게 된다. 이러한 거동은 저주기 피로 혹은 열기계적 피로 양상과 매우 유사하다. 따라서 완성차 업체와 배기부품 개발 업체에서는 이 두 가지 평가를 실시하여 재료의 내구 수명 예측에 활용하고 있다. 이들 두 가지 평가요소 중에서 저주기 피로 시험이 열기계적 피로 시험보다 평가 결과를 보다 손쉽게 얻을 수 있기 때문에 주로 활용되고 있다. 그림 9는 800°C에서 주철과 스테인리스 강의 고온 저주기 피로 평가 결과를 Coffin-Manson식($\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon' t(2N)^C$)으로 도식화 한 것이다.^[20-25] 시편상태에서 얻어진 소성변형률 범위($\Delta \epsilon_p$) 값과 실차에서 엔진 구동 상태에서 실시간 얻어진 실측 값을 바탕으로 열응력 해석(CAE)을 수행하여 배기계 부품의 내구 수명을 예측하는 자료로 활용된다.

5. 맺음말

자동차의 배기계에 주로 사용되는 고온재료의 요구 특성과 현재 상용화 된 주철제 및 스테인리스 강 등과 같은 소재의 고온 특성에 대하여 알아보았다.

자동차 배기부품의 기본 요구 특성은 고온 열기계적 피로 수명의 극대화이다. 특히, 열적으로 취약한 부위에서 hysteresis 형태의 응력-변형률 형태를 보이기 때문에 고온강도와 고온저주기피로 수명을 확보하는 것이 중요하다. 가장 보편적으로 사용되는 구상흑연주철의 경우 Si과 Mo 합금을 통해 고온강도, 저주기 피로수명 및 고온 내산화성을 확보하게 된다. 하지만 페라이트 기지가 850°C 부근에서 오스테나이트로 변태되는 점 때문에 이 온도 이상의 배기가스를 배출하는 고출력 엔진에는 사용할 수 없다. 따라서, 대안으로 선택할 수 있는 재료가 Nb을 첨가한 스테인리스 강(판재 혹은 주강) 이다. 스테인리스 강은 주철에 비해 고온 강도, 피로 수명 및 내산화성에서 월등히 앞서는 재질이긴 하나, 원가 측면에서 매우 불리하여 제한적으로만 적용되어 왔다. 하지만 엔진의 고출력화 추세는 지속될 것으로 보여 스테인리스 강에 대한 수요는 증가할 것으로 예상된다.

최근에는 경재성이 낮다고 판단되는 초내열합금, 고온 타이타늄 합금, 금속간화합물 등과 같은 소재도 보다 다양하게 검토되고 있다. 자동차 엔진의 사용 온도가 높아짐에 따라 기존의 철강소재보다 우수한 고온 물성을 가지는 다양한 소재가 개발되어 불원 사용 되어질 것이다.

❁ 참고 문헌

- [1] S.H. Park, J.M. Kim, H.J. Kim, S.J. Ko, H.S. Park, and J.D. Lim: SAE Technical Paper Series, No. 2005-01-1688, SAE international, Warrendale, PA, 2005.
- [2] L. Delin, R. Logan, G. Burger, G. Liao, D. McFarlan, B. Black, R. Williams, SAE Technical Paper Series, No. 2007-01-1227, SAE international, Warrendale, PA, 2007.
- [3] D. Li, R. Perrin, G. Burger, D. McFarlan, B. Black, R. Logan, and R. Williams: SAE Technical Paper Series, No. 2004-01-0792, SAE international, Warrendale, PA, 2004.
- [4] W. Dunlap, A. Druschitz: SAE Technical Paper Series, No. 2010-01-0657, SAE international, Warrendale, PA, 2010.
- [5] SAE Standard J2515, "High temperature materials for exhaust manifold", SAE international, Warrendale, PA, 1999.
- [6] 최복록, 박재인, 장훈, 박관흠: 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집 2호, 2002, pp. 586-91.
- [7] 최복록: 한국자동차공학회 논문집 제15권 제1호, 2007, pp. 135-45.
- [8] S.D. Antolovich and A. Saxena: Thermomechanical Fatigue: Mechanisms and Pratical Life Analysis, vol. 11, 2002, pp. 738-45.
- [9] W.H. Crouse, D.L. Anglin, Automotive Mechanics, 10th Ed., McGraw-Hill, 1993.
- [10] W. Fairhurst and K. Röhrig: Foundry Trade Journal, 1979, Vol. 146, pp. 657-81.
- [11] N. Birks, G.H. Meier, and F.S. Pettit: Introduction to the High-Temperature Oxidation of Metals, 2nded., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006, pp. 101-62.
- [12] F. Tholence and M. Norell: J. Phys. Chem. Solids, 2005, vol. 66, pp. 530-34.
- [13] F. Tholence and M. Norell: Surf. Interface Anal., 2002, vol. 34, pp.535-39.
- [14] F. Tholence and M. Norell: Oxid. Met., 2008, vol. 69, pp. 13-36.
- [15] Y.-J. Kim, H. Jang, Y.-J. Oh: Metall. Mater. Trans. A, 2009, vol. 40, pp. 2087-97.



[16] J.R. Davis (Ed), ASM specialty handbook—stainless steels, ASM International, Materials Park, PA, 1994.
 [17] Y.-J. Kim, H. Jang, Y.-J. Oh: Mater. Sci. Eng. A, 2009, vol. 526, pp. 244-49.
 [18] Y.-J. Kim, H. Jang: Mater. Sci. Eng. A, 2010, vol. 527, pp. 5415-20.
 [19] Y.-J. Kim, D.-G. Lee, H.K. Jeong, Y.-T. Lee, H. Jang: J. Mater. Eng. Perform., 2010, vol. 19, pp. 700-4.
 [20] L.F. Coffin: Trans. ASME, 1954, vol. 76, pp. 931-50.
 [21] G.H. Rubiolo: Acta Metall. Mater., 1991, vol. 39, pp. 619-26.
 [22] L.E. Tucker, R.W. Landgraf, and W.R. Brose: SAE technical Report, No. 740729, SAE international, Warrendale, PA, February 1974.
 [23] B.I. Sandor: Fundamentals of Cyclic Stress and Strain, 1sted., University of Wisconsin Press, Madison, WI, 1972, pp. 51.
 [24] S. Rabinowitz and P. Beardmore: J. Mater. Sci., 1974, vol. 9, pp. 81-99.
 [25] R.W. Landgraf, J. Morrow, and T. Endo: J. Mater. JMLSA, 1969, vol. 4, pp. 176-88.
 [26] 배기 메니폴더용 스테인리스 주강의 고온인장 특성평가, 연구보고서 2007.05, 한국기계연구원 부설 재료연구소, 이용태
 [27] 타이타늄, 한국철강신문, 2009, 제 2장, 이용태, ISBN 978-89-89069-42-3



김 윤 준

- 노스웨스턴대학교 재료공학과 교환교수
- 관심분야: 자동차용 소재개발
- E-mail : yoonjun@gmail.com



이 용 태

- 재료연구소 구조재료연구본부 특수합금연구그룹 책임연구원
- 관심분야: 타이타늄합금 응용연구, 항공기 엔진용 고온재료, 구조재료 성형연구
- E-mail : ytleee@kims.re.kr