

이 경 우 현대자동차그룹 자동차부문 연구개발본부 파워트레인구조해석팀 책임연구원

| e-mail : caselee@hyundai.com

이 글에서는 자동차 엔진 부품의 열피로 파손의 개요와 연구동향에 대해 설명하고자 한다.

엔진 부품의 고주기, 저주기 피로 파손

자동차는 우리의 일상생활에서 없어서는 안 될 중요한 운송수단이다. 시베리아나 알래스카와같이 혹한 지역이나 사하라 사막과 같은 뜨거운 환경에서도 사람이나 물건을 운송하는 데 문제가 없어야 하기 때문에, 자동차를 생산하는 회사에서는 다양하고 가혹한 환경을 고려하여 차체와 엔진을 설계하고 시험하여 개발한다. 그 중에서도 엔진은 차량을 움직이기 위한 동력으로서, 고압의 연소압력에 의해 고속으로 회전하면서 고온의 배기가스를 배출하는 매우 가혹한 조건에서 작동하고 있다. 엔진이 6,000rpm으로 100

시간 움직이면 이미 작용 하중이 300만 사이클을 넘게 되므로, 고주기 피로 관점에서는 피로 한도를 넘게 되므로, 이를 고려한 부품의 설계가 이루어져야 한다. 또한 엔진 작동 중에는 고온의 배기가스에 의한 열팽창으로 높은 열하중을 받다가, 엔진이 정지하면 상온으로 내려오면서 손상이 발생하는 저주기 하중을 받게 된다. 이와 같이 엔진은 고주기 피로하중과 저주기 피로하중을 동시에 받는 특별한 상황에 놓여 있다.

여기에서는 엔진 부품의 저주기 피로 파손에 대해 설명하고자 한다. 배기가스에 의해 열하중을 받는 부품은, 실린더 헤드, 실린더 블록, 피스톤, 배기매니폴드, 밸브, 밸브시트, 터보차저, EGR 쿨러 등 배기가스

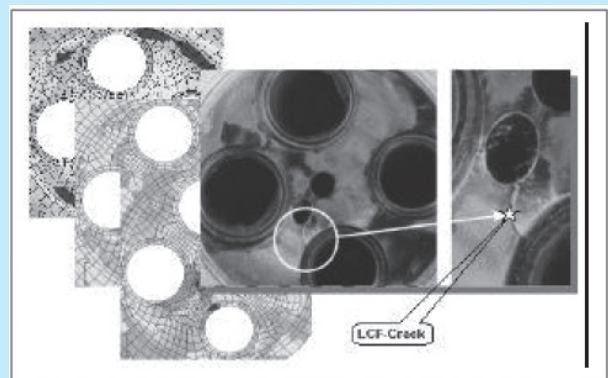
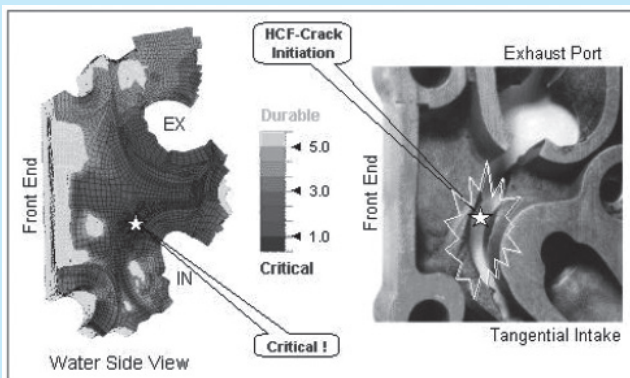


그림 1 엔진 실린더 헤드 고주기 파손(워터사켓 부위)과 저주기 파손(화염면 부위) (F. Maassen, SAE Technical Paper Series, 2001-01-3226 논문에서 인용)



그림 2 배기매니폴드 파손(최복록 등, 한국자동차공학회지, Vol. 18, No. 6, pp. 7-13, 2010 논문에서 인용)

가 배출되면서 가스가 닿아 열전달이 발생하는 부품들이다. 정지 상태의 엔진이 작동을 시작하면, 이런 부품들의 온도가 상온에서 고온으로 높아진다. 대부분의 경우에 온도 상승이 클수록 이로 인한 열응력이 높아지며, 열피로 수명이 짧아진다. 또한 온도의 증가 속도가 빠를수록 시간에 대한 열응력의 증가 구배가 커져서 열피로 수명이 짧아진다. 이러한 파손을 열피로 파손(TMF: Thermo-Mechanical Fatigue)이라고 부른다. 최근에 엔진 다운사이징을 위한 터보차저의 사용 증가와, 연비 향상과 출력 증대를 위해 연소실에 직접 분사하는 방식(GDI: Gasoline Direct Injection)이 적용되면서, 열부하가 증대되어 열피로 파손에 대한 사전 검토가 강조되고 있다.

열피로 파손 메커니즘

일반적인 저주기 피로 파손은 등온 조건에서 반복적인 외부 하중으로 소성이 누적되어 발생하는 것을 뜻하는데, 열피로 파손은 외부 하중뿐만 아니라 온도도 함께 변화하는 과정에서 발생하는 소성이 파손의 원인이 된다. 열피로 하중 형태는, 온도 변화와 외부 하중의 변화에 따라 크게 In-phase cycle(a), out-of-phase cycle(b), diamond cycle(c) 등 세 가지로 나눌 수 있다.

In-phase는 온도 증가 시에 기계적 하중이 같이

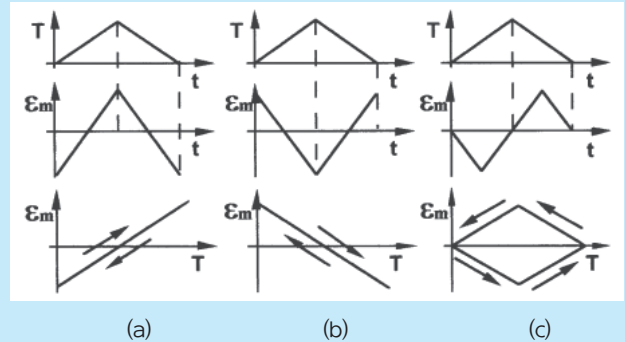


그림 3 열피로 하중 형태(C. Falcao et al., SAE Technical Paper Series, 2001-01-4068 논문에서 인용)



그림 4 엔진 실린더 헤드와 배기매니폴드 온도분포(Seifert et al., SAE Int. J. Mater. Manf. Vol. 7, Iss. 2, 2014 논문에서 인용)

인장으로 증가하는 경우이고, 반대로 압축되면 out-of-phase이다. Diamond cycle은 두 가지가 복합된 경우이다. 일반적으로 out-of-phase 형태의 열피로가 가장 가혹도가 높으며, 열피로 파손이 발생하는 엔진 부품의 경우 주로 out-of-phase 형태이다. 예를 들면, 실린더 내에서 연소된 고온의 배기가스가 배기 매니폴드(exhaust manifold)를 통해 배출될 때, 배기가스가 모이는 합류부는 크게 열팽창을 하지만 헤드에 체결되어 있는 부분은 냉각수에 의해 지속적으로 온도 상승이 제한되기 때문에, 합류부의 열팽창이 억제된다(그림 4). 따라서 이 부분은 온도가 올라가면서 압축하중이 증가하는 out-of-phase 형태가 된다. 일반적으로 고온으로 올라갈수록 재료의 강도는 낮아지므로, 고온 상태의 합류부에서는 소성 발생이 쉽

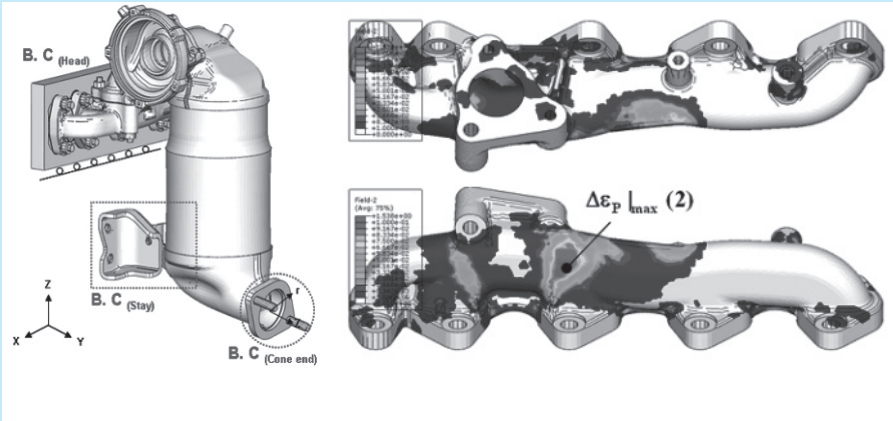


그림 6 소성변형률에 의한 열피로 파손 예측(최복록 등, 한국자동차공학회지, Vol. 18, No. 6, pp. 7-13, 2010 논문에서 인용)

다. 이렇게 소성이 발생한 부위는, 엔진이 정지되어 온도가 상온으로 내려오면 인장 잔류응력 상태가 된다. 이러한 과정이 반복되면, 소성이 누적되어 결국 균열이 발생하여 파손에 이르게 된다.

열피로 수명 예측

최근 개발기간의 단축과 원가 절감의 요구에 의해, 개발 단계에서 적극적인 시뮬레이션의 활용이 늘어나고 있다. 열피로 파손에 대해서도 시뮬레이션 선행

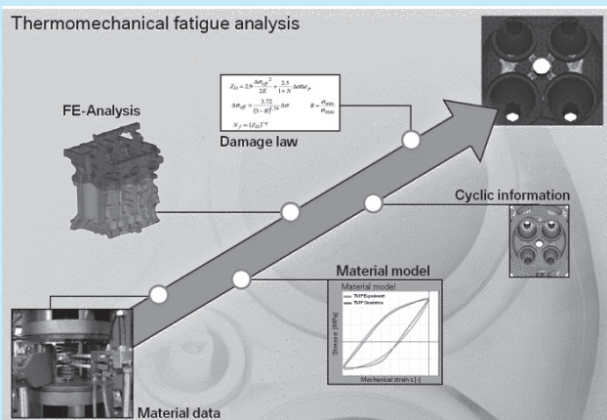


그림 5 열피로 피로 수명 예측 해석 절차(S. Thalmair et al., SAE Technical Paper Series, 2006-01-0541 논문에서 인용)

평가를 하기 위해, 다양한 방법이 사용되고 있는데, 아직까지 모든 경우에 통용되는 한 가지 방법은 없다.

기본적으로 저주기 피로는 소성 변형률이 클수록 파손 위험성이 커지므로, 열피로 파손 예측도 고온 조건에서의 von-Mises 응력이 나 고온-저온의 한 주기에 대한 소성 변형량

의 증가량으로 단순하게 평가하기도 한다(그림 6). 하지만, 상대적 비교가 아닌 정량적인 수명 예측을 하기 위해서는 피로 거동 외에 크립과 산화 영향도를 고려한 정밀한 재료 거동 모델을 사용해야 하는데, 여기에는 Sehitoglu 방법과 Chaboche 방법이 있다. 최근에는 재료 거동 모델에 CTOD 균열 진전 모델을 연계하여, 보다 정확히 수명 예측을 하는 방법이 개발되어 산업계에 적용이 시도되고 있다.(그림 7)

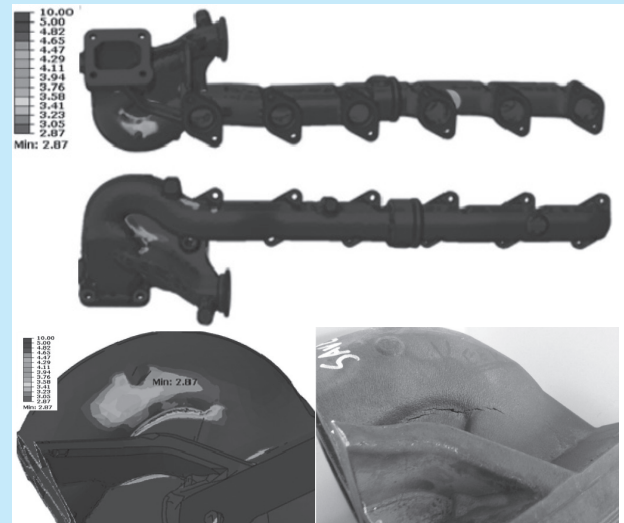


그림 7 균열 진전 모델에 의한 열피로 수명 예측(Seifert et al., SAE Int. J. Mater.Manf.Vol. 7, Iss. 2, 2014 논문에서 인용)