

가공경화가 고려된 커먼레일 파이프의 피로해석

A study on fatigue analysis of the work-hardened common rail pipe

*곽효서¹, #김철², 김영호³, 장효성¹, 산세레이스¹

*H. S. Kwak¹, #C. Kim(chulki@pusan.ac.kr)², Y. H. Kim³, H. S. Jang¹, San Sereitish¹
¹부산대학교 창의공학시스템 협동과정, ²부산대학교기계기술연구원, ³부산대학교 기계공학부

Key words : Fuel injection Pipe, Autofrettage, Fatigue Life, F.E.M.

1. 서론

2014년부터 발효되는 EURO6 배기가스 배출기준을 만족시키기 위한 커먼레일 시스템의 연료분사계는 200MPa수준의 압력을 요구하므로 기존 소재 보다 항복비와 연신율이 우수한 소재가 필요하고, 이러한 소재를 이용한 연료분사관 제작시 각각의 공정에 대한 검증과 내압에 대한 내구수명을 개선할 수 있는 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고강도, 고연신율 특성을 가진 합금강 재질의 열처리된 인발관을 이용하여 커먼레일 시스템 연료분사관의 자긴가공이 고려된 유한요소해석을 수행하였고, 각각의 자긴도에 따른 연료분사관 주요 부위의 잔류응력과 안전율 80%를 반영한 최대 작동압력 250MPa에서의 유효응력을 평가하였다. 해석결과를 토대로 내경부의 압축잔류응력 뿐만 아니라 외경부에서는 발생하는 인장잔류응력까지 고려한 피로수명에 대한 최적의 자긴도를 결정하였다.

2. 연료분사관의 자긴가공해석

자긴해석을 위해 단순 직관의 자긴처리에 대한 축대칭 탄소성 유한요소해석을 실시하였다. 연료분사관 파이프 소재(외경 6.35mm, 내경 3mm, 두께 1.675mm), 메쉬는 약 2만개이며, 위아래 양 끝면은 길이방향으로 대칭조건을 주었고, 내경부에는 자긴압력을 부여한 후 압력을 제거하였다. 해석결과, 자긴처리에 의한 파이프 벽 두께의 원주방향 잔류응력 분포는 내·외경부에 각각 압축과 인장 잔류응력이 나타났다. 이론 및 유한요소 해석결과와의 비교를 위해 임의의 자긴도 20%, 40%, 60%에 대한 원주방향 잔류응력을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 자긴도가 증가할수록 내벽면의 압축잔류응력과 외벽면의 인장잔류응력이 비례적

으로 증가하였다.

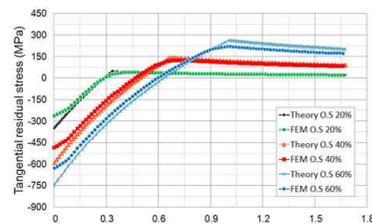


Fig. 1 Tangential residual stresses classified by theory and the FEM according to the autofrettage pressures

3. 자긴가공된 연료분사관의 구조해석

자긴처리 후, 최대 작동내압 250MPa를 부여한 구조해석을 수행하였다. 해석결과, 연료분사관의 직진부와 파이프 앞끝이 만나는 목부위(Neck)에서 최대 유효응력이 발생하였다. 이는 실제 다른 연료분사관의 균열 발생 위치와 동일하므로, 목부위가 응력집중이 발생하는 가장 취약한 부위임을 알 수 있다. 그러므로 목부위를 반드시 고려하여 자긴도를 선정 되어야함을 알 수 있다. 이에 일정한 자긴압으로 자긴된 연료분사관 해석모델에 최대 작동내압 250 MPa이 작용할 때의 연료분사관 직진부와 목 부위(Neck)의 벽 두께에 따른 유효응력을 평가하였고 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

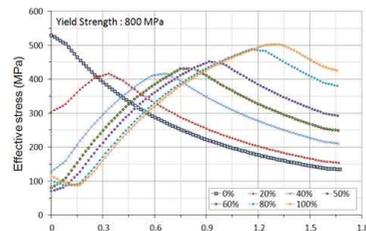


Fig. 2 Effective stresses of straight part of the common rail pipe

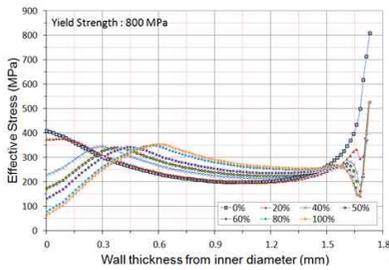


Fig. 3 Effective stresses of neck part of the common rail pipe

직관부에서 자긴된 연료분사관의 경우, Fig. 2에서 알 수 있듯이 자긴가공이 안된 연료분사관(0%)의 내경 벽면의 유효응력(약 530MPa)에 비해 자긴처리를 하였을 경우, 유효응력이 최대 약 70~100MPa로 감소하는 것을 알 수 있었으며, 자긴도가 증가할수록 유효응력이 더 낮아지는 경향을 보였다. 목부위에서 자긴가공이 안된 연료분사관(0%)의 경우, Fig. 15에서 알 수 있듯이 외측 표면에서 최대 유효응력이 소재의 항복강도(800MPa)를 넘어선 824MPa를 나타내어 구조적으로 불안정하였고, 자긴된 연료분사관의 경우, 최대 유효응력이 항복강도보다 낮은 614 ~ 627MPa를 나타내어 구조적으로 안전하였다.

4. 자긴된 연료분사관의 피로해석

각각의 하중조건에 대하여 피로시험을 수행한 결과, 10⁷cycles에서 파단이 발생하지 않는 피로한도(Endurance limit)는 575MPa이다.

자긴된 연료분사관의 작동내압에 대한 피로해석을 위하여, 자긴도에 따른 잔류응력결과를 갖고 있는 모델의 내경부에 작동내압 250MPa에 대한 구조해석 및 피로해석을 수행하였다. 주요 경계조건은 앞의 구조해석과 동일하며, 연료분사관에는 최소20MPa, 최대250MP로 작동내압이 작용하는 것으로 가정하였다. 해당 Fe-C계열 합금강소재는 탄소함량이 약 0.2%인 연강에 분류되므로 해석모델에 Goodman이론을 적용하였다. 각 자긴도에 대한 최대 교번응력 및 피로수명에 대한 FEA결과값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Results of fatigue life according to the autofrettage pressures

Autofrettage	Maximum	Minimum
--------------	---------	---------

Pressure	alternating stress	life
0 MPa (O.S 0%)	657.59 MPa	Limited
494 MPa (O.S 20%)	339.67 MPa	Unlimited
587 MPa (O.S 40%)	306.73 MPa	Unlimited
621 MPa (O.S 50%)	315.61 MPa	Unlimited
648 MPa (O.S 60%)	321.78 MPa	Unlimited
682 MPa (O.S 80%)	327.82 MPa	Unlimited
693 MPa (O.S 100%)	346.46 MPa	Unlimited

해석결과, 자긴처리를 하지 않은 연료분사관의 경우(O.S 0%), 피로수명은 2x10⁷Cycles로 나타났으나, 피로시험으로부터 얻은 피로한도(575MPa)를 기준으로 내구수명을 판단할 경우, 자긴처리 하지 않은 연료분사관의 최대 교번응력(657.59MPa)이 피로한도 이상을 나타내었다. 이에, 최대 교번응력(Alternating stress)을 피로한도(575MPa)이하로 감소시키기 위하여 자긴처리가 요구되며, 자긴처리를 통하여 연료분사관의 최대 교번응력을 절반수준 (300MPa~350MPa)으로 감소시킬 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 유한요소해석을 통하여 피로시험에서 얻은 SN data를 이용하여 각 자긴도로 자긴된 연료분사관에 작동내압이 작용할 때의 피로해석을 수행하였고, 구조 및 피로 해석결과를 바탕으로 피로수명 개선을 위한 최적의 자긴도는 40%임을 알 수 있었다.

후기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Kim, J. H., Shim, W. S., 2008, "A Study on Residual Stress Analysis of Autofrettagged Thick-Walled Cylinders", Trans. of the KSME, Vol. Symposium of KSME 08MF080, pp. 482~487
- Rainer Jorach, P. Bercher, D. Burke, M. Calvo, N. Guerrassi, G. Meissonier, N. Milovanovic, 2011, "Diesel common-rail fuel technology for future high-efficiency ultra low emission light-duty engines", 11th Stuttgart international Symposium