

자동차용 직선화 배기시스템의 피로내구 해석 및 평가

박 세 종¹⁾ · 서 호 철²⁾

경희대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · (주) 세종공업²⁾

Fatigue Durability Analysis and Evaluation for Straighted Type Exhaust System of Automobile

Sejong Park¹⁾ · Hocheol Suh^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Gyeonggi 449-701, Korea

²⁾Sejong Industrial Company LTD., 800-1 Hyomoon-Dong, Buk-gu, Ulsan 683-360, Korea

(Received 27 August 2004 / Accepted 30 October 2004)

Abstract : The exhaust system of automobile is faced with random or spectrum types of fatigue loads during usage life and so needs to be closely estimated for quality and performance to have enough certainty on design endurance life during preliminary design process. Structural operation conditions, operation load history, property of material and manufacturing process etc. should be considered by performing experiment approach. Using the software program for predicting fatigue life quickly and exactly in preliminary design stage saves plenty of time and cost generated by fatigue tests. In this paper, fatigue life prediction was performed on the basis of fatigue analysis using MSC/FATIGUE and load data from field test and the life of development items was estimated and compared through the results.

Key words : Exhaust system(배기시스템), Finite element analysis(유한요소해석), Load data acquisition(하중데이터 획득), Fatigue and durability test(피로 및 내구시험), Fatigue life analysis(피로수명해석)

1. 서 론

자동차의 승차감 향상과 더불어 차량개발과정에 중요시 되는 성능 중의 하나는 신뢰성과 관련된 내구성능 부분이다. 자동차 주요 부품중의 하나인 자동차 배기시스템(Exhaust System)은 엔진에 연결되어 차체하부(Under Body)에 고무행거(Rubber Hanger)로 지지되어 있으며, 가혹한 운용조건과 주행 중 발생하는 매우 복잡한 형태의 불규칙 변동 피로하중이 누적됨과 동시에 엔진으로부터 방사되는 고온의 배기가스 및 운용 중 시시각각 변하는 환경적 요인(열 피로, 부식 피로 등)이 복합적으로 작용

하여 취약부위로부터 최종파손에 이르게 된다.¹⁾ 특히 이러한 파손은 피로하중의 누적에 의한 피로파괴가 크게 좌우하는 것으로 알려져 있으며, 이는 배기시스템의 기능적 손실을 초래하여 자동차의 승차감 저하 또는 시스템 품질과 신뢰성을 저하시키게 된다.²⁾ 따라서 품질이나 성능 측면에서 설계 내구수명에 대한 충분한 신뢰성을 가질 수 있도록 설계개발 과정에서 엄밀한 피로내구성 평가가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 구조물의 사용 환경, 작용 하중 이력, 재질 물성 및 생산 공정 등이 고려되어야 하며 실험적 접근을 통한 검증은 필수적이라 할 수 있다.³⁾

그러나 신차 개발 단계에서 차량의 레이아웃(Lay-Out)이 정해진 후의 한정적인 시간 안에 개발

*To whom correspondence should be addressed.
hcsuh@sejongind.co.kr

로되어야 하는 배기 시스템의 개발 단계 특성
 설계변경에 따른 내구성 검증에 대한 빠른 피
 (Feed-Back)을 설계자에게 요구하게 되며, 이러
 내구성 검증에 대한 피로내구시험의 수행은
 시간과 경비 측면에서 큰 부담이 된다. 따라서 초기
 설계개발 단계에서 신속하고 정확하게 피로수명을
 예측할 수 있는 소프트웨어의 적극적인 활용이 필
 요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 자동차 배기 시스템에 대한 피로
 내구성 해석 및 평가 절차를 수립하고, 굴곡부분이
 상대적으로 많은 경쟁차종의 배기 시스템에 비하여
 직선화시킨 개발 차종의 배기 시스템에 대해 실차
 주행시험을 통해 측정된 하중 데이터와 MSC/
 NASTRAN을 통한 선형탄성(Linear Elastic) 유한요
 소 해석결과를 기초로 MSC/FATIGUE에 의한 피
 로내구해석을 수행하고, 그 결과를 비교 분석하여
 초기 설계 개발 대상 차종의 배기 시스템에 대한 피
 로내구수명을 비교 평가하였다.

2. 배기 시스템의 응력해석

초기 설계개발 단계에서 전체 배기시스템에 대한
 응력해석을 통해 취약부위를 선정한 후, 각 부위에
 대해 보다 엄밀한 해석 및 단품 피로내구성 시험을
 수행하게 된다. 본 연구에서는 굴곡부분이 상대적
 으로 많은 기존의 경쟁 차종(Reference model)과 이
 를 개선하여 직선화시킨 개발대상 차종(Develop-
 ment model)에 대해 동일한 하중 조건 하에서 전체
 배기시스템의 피로내구수명을 비교 평가하는데 목
 적이 있다.

따라서 모델의 간략화를 통해 전체 배기시스템에
 대한 선형탄성 해석을 수행하여 취약부위를 파악하
 고, 실차 주행시험을 통해 얻어진 하중 데이터를 기
 초로, 각각의 부위에 대한 내구수명을 전체적으로
 비교 평가하고 그 결과를 제시하였다.

2.1 유한요소 모델링

유한요소 모델링은 MSC-PATRAN을 이용하였
 다. 해석에 사용된 개발대상 차종과 경쟁차종의 배
 기 시스템에 대한 유한요소 모델은 Fig. 1과 같이 구
 성되었다. 배기시스템은 두께가 얇은 스틸튜브

(Steel Tube)와 스틸판(Steel Plate)을 용접하여 제작
 되며, 따라서 유한요소는 4개의 절점(Node)을 갖는
 사각형 쉘요소(Shell Element)를 이용하였다. 특히
 스프링조인트(Spring Joint) 및 벨로우즈(Bellows)는
 등가의 바요소(Bar Element)를 사용하여 모델링 하
 였으며, 촉매(UCC) 및 소음기(CTR, MAIN Muffler)
 는 내부 질량을 묘사하기 위하여 질량요소(Mass
 Element)를 추가하여 모델링 하였다.

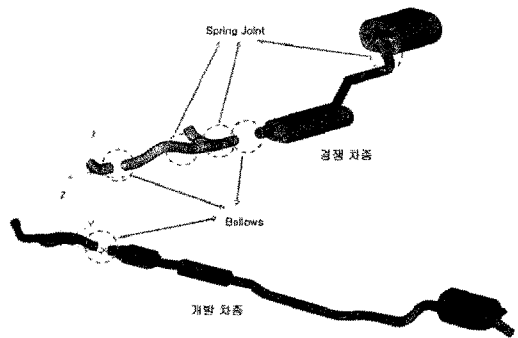


Fig. 1 Finite element model for exhaust system

또한 배기시스템의 로드행거(Rod Hanger)와 차
 체하부를 체결하여 배기시스템을 고정하는데 사용
 되는 고무행거(Rubber Hanger)는 스프링 요소
 (Spring Element)를 사용하였다.

경계조건 및 하중작용 상태는 Fig. 2에서 보여주
 고 있다. 경계조건은 엔진과 고정되는 부위와, 차체
 하부에 체결되는 스프링요소의 부착 부위를 완전
 고정하였다. 하중은 전체모델에 1g의 자중과 함께
 질량점(Mass Point)에 주 하중방향인 지면방향으로
 가속도를 작용하여 응력해석을 수행하였다. 이는
 전체 배기시스템에 대한 피로내구성 해석이 응력해
 석 결과를 기초로 이루어지기 때문이며, 따라서 주
 요한 damage를 초래하는 요소가 지면방향의 가속
 도에 의한다는 가정하에 이루어졌다. 이러한 가
 은 실차 주행시험을 통하여 얻은 데이터를 분석
 여 지면방향의 하중이 다른 하중들에 비해 60%
 상 damage를 초래한다는 결과를 토대로 한 것
 보다 엄밀한 해석을 위해서는 6자유도 하중을
 히 고려해주어야만 한다.

해석에 사용된 배기시스템의 주재료인
 의 재료물성치는 Table 1과 같으며 벨로우

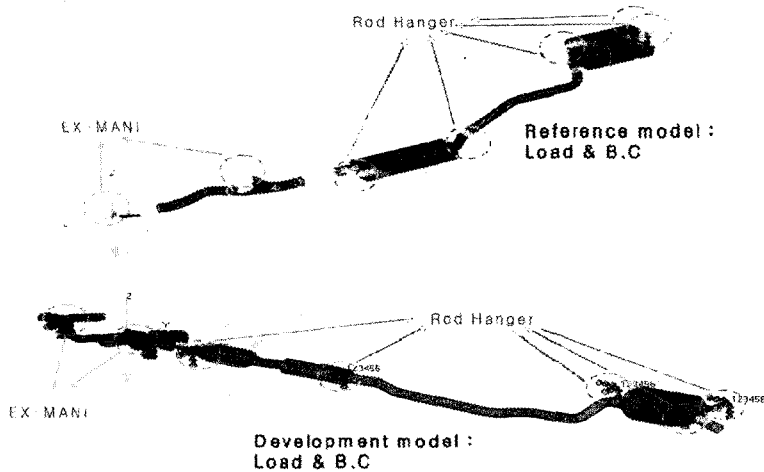


Fig. 2 Schematic diagram for load and boundary condition of exhaust system

Table 1 Material properties of SUS409

SUS409 Mat'l Property	
Young's Modulus, E(MPa)	2.06E5
Yield Stress, YS(MPa)	245
Ultimate Tensile Stress, UTS(MPa)	406

프링조인트의 재질 및 물성치는 부품제작업체와 완성차 업체에서 제공된 데이터를 사용하였다.

2.2 응력해석 결과

정하중 상태에서의 취약부위 예측과 피로 내구 해석을 위해 경쟁차종과 개발차종에 대해 수행한 선형탄성 유한요소 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 원형 표시된 부분에 응력집중이 되는 취약부위 인 것을 알 수 있으며, 이들 취약부위에 대한 국부적인 피로내구해석이 요구된다고 할 수 있다.

Table 2는 응력집중 부위에 대해 개발 차종과 경쟁차종의 최대 응력상태를 비교하여 보여 주고 있다. 해석결과를 비교해 보면 개발차종이 전체적으로 균일한 응력상태를 보여주고 있으며, 취약부위별 비교에 있어서도 경쟁차종에 비해 응력상태가 양호한 것으로 나타났다. 이는 개발차종이 경쟁차종에 비해 외부하중에 대한 하중분산이 효과적으로 이루어지고 있음을 파악할 수 있다.

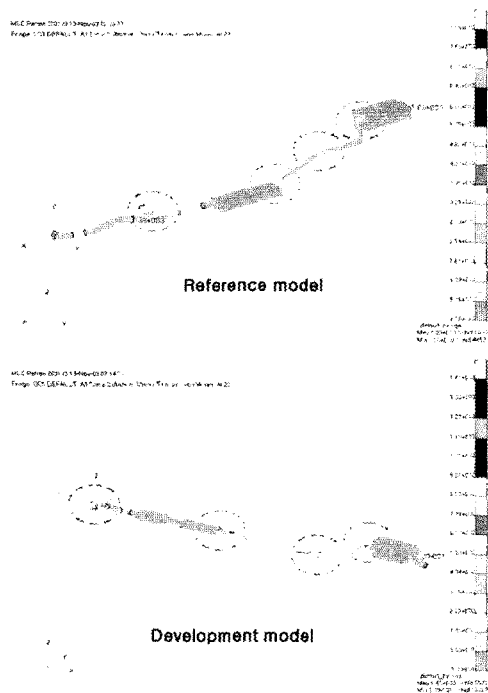


Fig. 3 Stress distribution of exhaust system

Table 2 Maximum stress of reference and development model for exhaust system (Unit:mN/mm²)

	Reference model	Development model
Front part	6.18E3	1.19E3
Center MFL part	2.98E3	1.32E3
Pipe part	1.77E3	1.48E3
Main MFL part	2.40E3	1.14E3

3. 피로내구 해석 및 평가

배기시스템에 대한 피로설계기준을 결정하기 위해서는 배기시스템을 이루는 요소들에 대한 피로데이터(Fatigue data)가 필요하다. 이러한 피로데이터를 획득하는 방법은 임의로 설정된 조건 하에서 피로시험을 수행하는 것이 일반적이다.⁴⁾ 임의의 조건에서 획득된 설계기준은 실제상황을 재연한 것이 아니기 때문에 신뢰성이 결여될 우려가 있다. 따라서, 배기 시스템의 피로내구성 평가를 위해서는 가장 가혹한 피로조건 하에서 데이터를 획득하여, 피로설계기준을 결정할 필요가 있다.

3.1 실차 주행 시험

본 연구에서 배기시스템의 피로내구성 평가를 위해 사용된 하중이력은 질량점에 작용하는 가속도이며, 완성차업체에서 보유한 PG(Proving Ground)의 크로스컨트리로드(X-Country Road)에 대한 실차 주행 시험 시 획득한 하중이력을 사용하였다. Fig. 4는 측정된 가속도 스펙트럼을 나타내었으며 Fig. 5는 측정된 가속도 이력에 대한 2D, 3D Range Mean Matrix를 보여주고 있다.

3.2 피로내구 해석

피로 내구해석 과정을 간략히 Fig. 6에 도식적으로 나타내었다. 본 연구에서는 구조물의 피로수명 예측에 널리 사용되고 있는 Strain-Life Method(ϵ -N Approach)를 사용하였으며, Damage Rule(Analysis Method)은 식 (1)과 같이 평균응력의 효과를 고려한 "Smith Watson Topper"식을 사용하였다.^{5,6)}

$$\sigma_{max} = \frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma' = (2N_f)^b \quad (1)$$

또한 선형탄성의 응력해석 결과로부터 노치선단의 소성영역을 고려한 결과로의 보정(Correction)을 위해 식 (2)와 같이 Neuber's Rule을 선택하여 피로해석을 수행하였다.

Neuber는 특정노치의 기하학적 형상을 분석하여 다음의 관계를 유도하였다.

$$K_t = \sqrt{K_\sigma \cdot K_\epsilon} \quad (2)$$

여기서, K_t : 이론적 응력집중계수

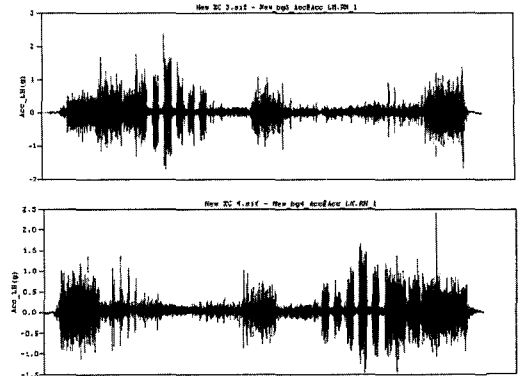


Fig. 4 Acceleration spectrum of exhaust system

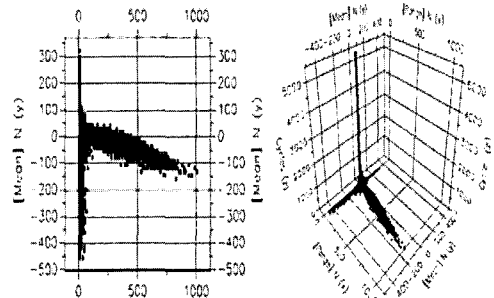


Fig. 5 2D and 3D graph of range mean matrix with acceleration spectrum for exhaust system

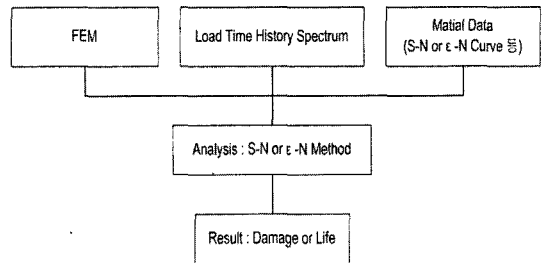


Fig. 6 Flow chart of fatigue durability analysis process

K_σ : 응력집중계수, K_ϵ : 변형률 집중계수

식 (2)는 이론적 응력집중계수가 응력 및 변형률 집중의 기하학적 평균 또는 K_σ 와 K_ϵ 의 곱의 제곱근임을 나타낸다. 이 방법은 하나의 노치형상에 대하여 증명되었지만, 이런 관계식은 대부분의 노치형상에 대하여 유효하다고 알려져 있다.⁷⁾

피로내구수명을 계산하기 위해서는 평가대상 부품의 피로성질이 필요하나 이런 피로물성에 관한 데이터가 없는 경우가 많은 것이 현실이며, 따라서

본 연구에서는 기존에 제공된 스펙(Spec)과 같은 물성을 사용하여 Pseudo Damage를 평가 하였다. Damage 계산 시 사용한 재료는 SUS409이며 Fig. 7에 ϵ -N선도를 보여주고 있다.

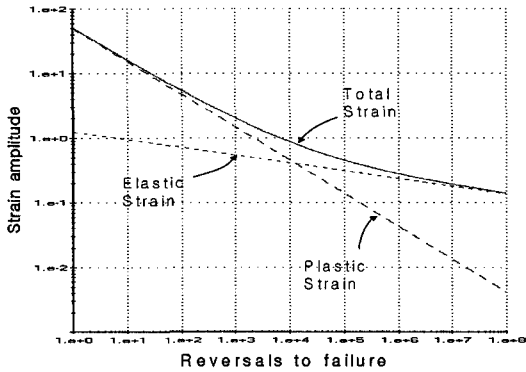


Fig. 7 S-N curve for SUS409

본 연구에서 피로내구 해석 시 사용한 하중이력은 완성차 업체가 보유한 PG의 X-Country주행 시 획득한 Load Spectrum(1 life)을 반복적으로 작용하였다. 이때 실제 경쟁차종이 X-Country주행 시 파손된 시점에서 Damage가 1이 되도록 scale factor를 변화시키며 반복 계산하여 최종적으로 Factor를 확정 한 후 Damage 및 Life를 비교함으로써 내구성을 검증 하였다. 그러나 단 1회의 실차내구시험을 통한 파손 결과를 사용하는 것은 피로의 성질을 보면 대표성을 갖기 어려우며, 이를 보완하기 위해서는 다수의 실험을 통한 결과에 대한 신뢰도 분석을 통하여 신뢰성 있는 대표 값을 사용하여야 한다. Fig. 8~11은 취약부위 네 곳에 대한 피로내구해석 결과를 보여 주고 있다.

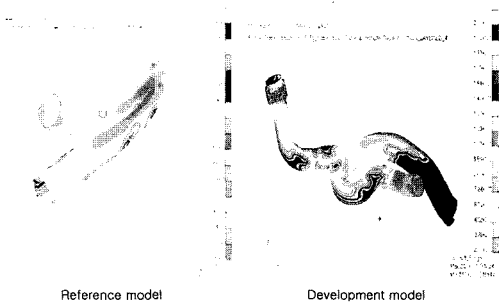


Fig. 8 Fatigue durability analysis of reference model and development model on the front part

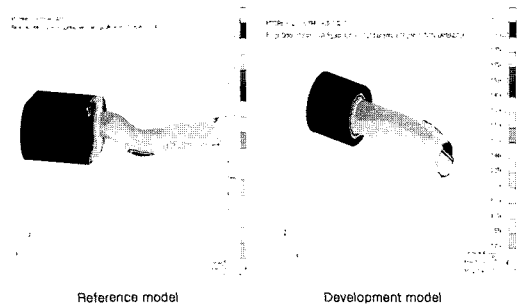


Fig. 9 Fatigue durability analysis of reference model and development model on the center part

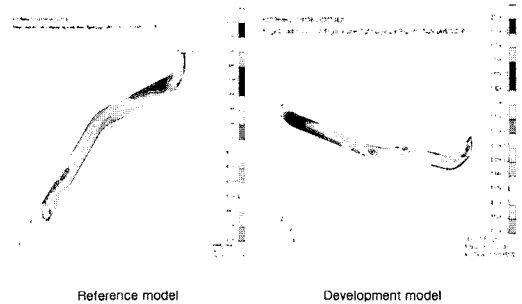


Fig. 10 Fatigue durability analysis of reference model and development model on the pipe part

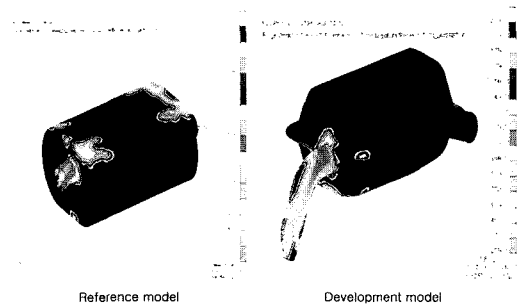


Fig. 11 Fatigue durability analysis of reference model and development model on the main part

Table 3 Results of maximum damage and minimum life

	Reference model		Development model		Ratio
	Damage	Life	Damage	Life	
Front part	6.697	355.8	0.036	65567.1	184.3
Center MFL part	1.000	2379.9	0.058	41371.0	17.38
Pipe part	0.135	17647.6	0.050	47499.5	2.69
Main MFL part	0.162	14679.7	0.039	61192.5	4.17

이상의 배기시스템의 취약부위에 대한 피로내구 해석 결과로부터 각 부위별 최대 손상 및 최소 수명

을 Table 3에 나타내었다. 동일한 하중 조건 하에서 피로내구 수명 해석을 수행한 결과 개발차종이 경쟁차종에 비해 예상되는 모든 취약 부위에서 2.6배 이상 수명이 긴 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 차동차 배기 시스템 개발 시 초기 설계단계에서 잦은 설계변경에 따른 피로내구성 검증에 대해 신속하고 정확하게 피로수명을 예측할 수 있도록 피로내구성 해석 및 평가 절차를 수립하였으며, 실차 주행시험을 통해 측정된 하중 데이터와 유한요소 해석결과를 기초로 피로내구해석을 수행하고, 그 결과를 비교 분석하여 배기시스템에 대한 피로내구수명을 비교 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 선형유한요소 해석 결과 경쟁 차종에 비해 개발 차종의 응력분포가 균일하고 낮게 나타났으며, 동일한 조건 하에서 피로내구 수명 해석 결과 개발 차종이 경쟁차종에 비해 예상되는 모든 취약 부위에서 수명이 긴 것으로 나타났다.
- 2) 본 해석 결과를 통해 개발 차종이 경쟁차종에 비해 피로내구 측면에서 앞서는 것으로 판단된다. 또한 설계 개발 초기에 피로내구성 예측 소프트웨어를 활용함으로써, 잦은 설계변경으로 인한 반복적인 피로내구 시험에 따른 시간과 비용을 줄이는데 효율적이라 판단된다.
- 3) 향후 취약부위에 대한 엄밀한 해석과 더불어 부품 내구시험 및 해석결과와의 상관관계에 대한 정립과 함께, 시편에 대한 피로시험을 수행하여 피로시험데이터의 획득이 필요하다고 하겠다.

후 기

본 논문은 경희대학교 박경석교수님의 지도로 수행되었으므로 이에 감사를 드립니다.

References

- 1) I. B. Chyun and K. Z. Cho, "Fatigue Life Prediction of a Multi-Purpose Vehicle Frame," Transactions of KSAE, Vol.6 No.5, pp.146-152, 1998.
- 2) S. S. Bassa, N. J. Sheth and S. R. Swanson, "Development Random Load Life Prediction Model," Material Research and Standards, March, 1973.
- 3) H. F. Moore and T. M. Jasper, "An Investigation of the Fatigue of Metals," Univ. Ill. Eng. Exp. Stn. Bull. 1924.
- 4) B. H. Bae and S. C. Park, "Effect of Residual Stress of Shot Peening on Fatigue Strength of Leaf Spring," 2003 KSAE Spring Conference Proceeding, Vol.II, pp.733-738, 2003.
- 5) K. N. Smith, P. Watson and T. H. Topper, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals," Journal of Material, Vol.5, No.4, pp.767-778, 1970.
- 6) H. Neuber, "Theory of Stress Concentration for Shear-strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Strain Laws," J. Appl. Mech. Trans. ASME Vol.E28 pp.544, 1961.
- 7) O.H. Basquin, "The Exponential Law of Endurance Tests," Am. Soc. Test. Mater. Proc. Vol.10, pp.625-630, 1910.