

자동차용 배기관 설계를 위한 유동 및 구조 해석

이광수^{1*}

CFD and Structural Analysis for Design of Automobile Exhaust Manifold

Kwang-Soo Lee^{1*}

요 약 본 연구에서는 자동차용 배기관에 대하여 유동, 열변형 및 내구해석 등 유동과 구조의 연계 해석을 수행하여, 배기관의 O₂ 농도의 유동분포, 고온의 배기가스에 의한 열적 거동 및 그 내구성을 평가함으로써, 자동차 배기관의 최적설계를 위한 가이드로 활용하고자 한다.

Abstract The objective of this study is the estimation of the O₂ concentration range, the thermal behavior by high temperature exhaust gas and durability of exhaust manifold by the coupling analysis of CFD and structure analysis. This estimation results is used the guideline to the optimum design of exhaust manifold.

Key Words : exhaust manifold, CFD, O₂ concentration, thermal stress, durability

1. 서론

자동차 배기관(Exhaust Manifold)에 대한 대부분의 연구에서는 유동해석[1], 열변형으로 인한 구조해석[2] 등과 같이 해석 분야를 분리하여 연구와 분석이 이루어졌으나, 본 연구에서는 유동, 열변형 및 내구성을 일관적으로 함께 고려하여 분석하고 그 결과를 참조함으로써, 배기관의 설계 및 개발에 도움을 주고자 하였다.

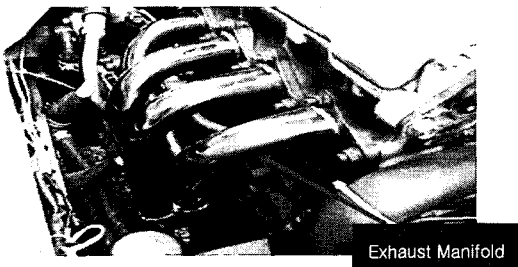
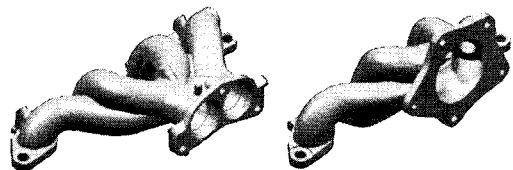


그림 1. 자동차 배기관

그림 1은 본 연구에서 사용된 자동차 배기관의 형상을 나타낸 것이다. 자동차의 배기관은 엔진에서 발생하는 배

기가스를 엔진의 외부로 배출하는 부품으로 고온의 배기가스에 의한 열적거동 및 내구성이 중요한 부품이다. 본 연구에서는 초기설계 단계에서 배기관의 성능을 개선하고자 그림 2와 같이 구시방과 신시방 2개의 배기관 모델을 해석적으로 비교 평가하였다.

배기관의 형상모델링은 CATIA를 이용하였고, CATIA 해석모듈을 이용하여 형상의 손실 없이 유한요소 모델링을 생성할 수 있었다. 이렇게 작성된 FE 모델은 각 해석 단계에서의 기본 해석 모델로 사용됨으로써, 해석 모델 작성에 걸리는 시간을 절약할 수 있었다.



구시방

신시방

그림 2. 배기관의 3D 형상 모델

중요한 최적설계 파라미터로서 성능평가 항목은 아래와 같다.

¹호서대학교 자동차공학과

*교신저자: 이광수(kslee@hoseo.edu)

- 1) 유동 특성에 따른 배기관의 O₂센서에서 O₂ 감지량 문제
- 2) 배기관의 열적 강도 문제
- 3) 배기관의 내구 강도 문제

2개 배기관 모델에서의 O₂ 센서의 위치 및 형상을 결정하기 위한 유동해석은 FLUENT[3], 열변형 및 응력 해석은 CATIA[4], 그리고 피로수명 예측을 위한 내구해석은 FEMFET[5]을 사용하였으며, 이 세가지 해석과정은 상호 연계 해석을 통해 수행하였다.

2. 유동해석

유동해석은 배기관의 내부 형상을 이용하여 배기가스의 유동특성을 해석적으로 분석하여 O₂센서에서의 O₂ 농도를 측정 하여 그림 3의 기존 모델과 수정 모델 비교, 배기관내의 유동에 따른 O₂ 센서의 적합한 위치를 조사하기 위해 수행 되었으며, CATIA 해석모듈에서 생성된 유한요소 모델을 NASTRAN의 bulk 데이터 포맷으로 변환하여, FLUENT에서 사용할 수 있게 하였으며, 물성치나 경계조건 등을 추가로 생성하여 해석을 수행하였으며, 그림 4에 데이터 변환 및 해석 과정을 나타내었다.

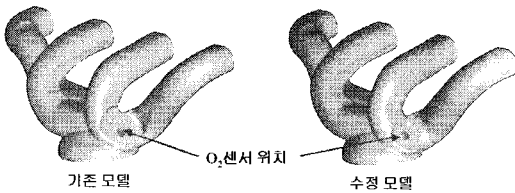


그림 3. 기존 모델과 수정 모델

또한 각각에 대한 Inlet 및 Outlet에 대한 경계조건, 메쉬와 물성치 등 해석 입력 데이터는 그림 5와 표 1과 같으며, 중요한 해석 조건은 아래와 같다.

- 1) 각 배기입구에서의 산소를 구별하기 위하여 산소의 종류를 4가지로 가정하였다.
- 2) 2200 RPM에서 0.013636364초 마다 1-3-4-2 순서로 유동이 흐르도록 입구의 경계조건을 시간의 함수로써 정의 하였다.
- 3) Data 축출은 유동의 주기성이 보여지는 단계에서 2 사이클에 대해서 수행하였다.

4) Turbulence Model : Standard K-E Model

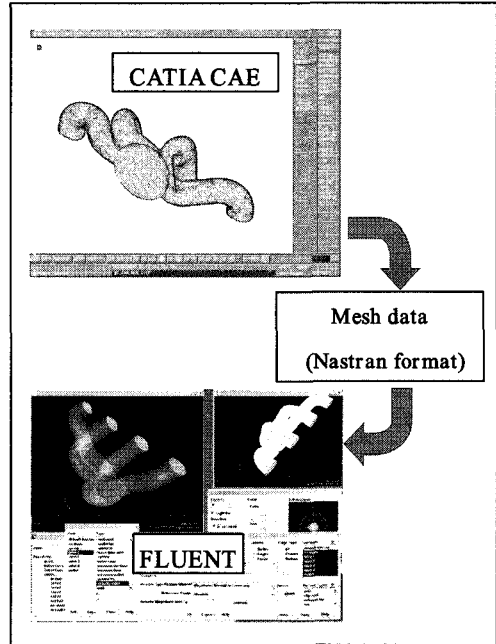


그림 4. Data Export for FLUENT

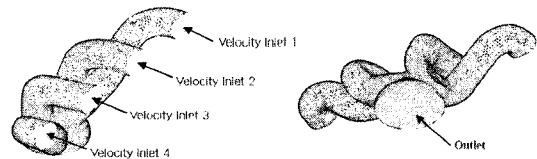


그림 5. 유동해석을 위한 경계조건

표 1. 재료 특성치 및 경계조건 입력값

재질 특성	Exhaust Gas 밀도	0.41 kg·m ⁻³	Temperature : 568.96K 압력 : 2.4 KPa
	O ₂ 밀도	0.45941 kg/m ³	
	혼합Gas의 점도	3.779e-5 kg/m·sec	
Inlet 조건	velocity	14.02147 m/sec	
	Turbulence Intensity	10%	
	Turbulence Viscosity Ratio	30	
	0.013636364초 마다 1-3-4-2 순서로 가스 유입		
Outlet 조건	대기조건으로 가정		

그림 6-9는 각 배기관을 통한 배기가 이루어질 경우에 대한 구시방과 신시방에 대한 O₂의 분포와 유동 등을 나타내고 있으며, 그림 10은 각 경우에 있어서 시간에 따른 O₂ 농도 변화를 보여주고 있다. 이 두 사양의 결과를 분석하여 개선방안을 도출할 수 있었으며, 본 분석을 위하여 이용한 해석 결과들은 아래와 같다.

- 1) 벽면에서의 각각의 O₂ 농도 Contour
- 2) Velocity Vector
- 3) 3차원 Pathline
- 4) 기존 모델과 수정 모델에서 각각 장착된 O₂ 센서 부위의 4가지 O₂ 평균값 Graph

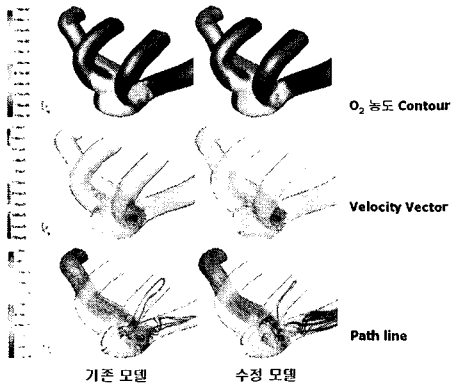


그림 6. 유동해석 결과 비교 (1번 배기)

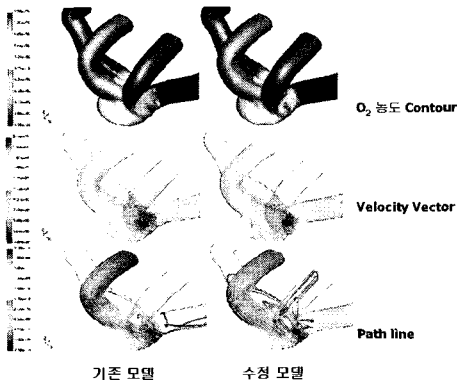


그림 7. 유동해석 결과 비교 (2번 배기)

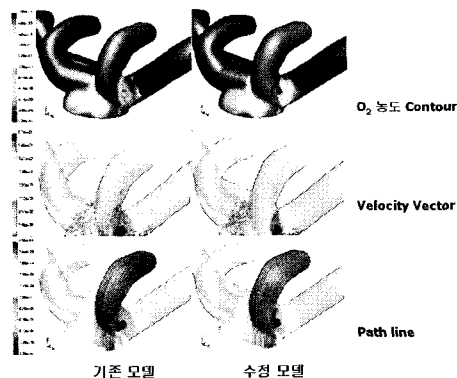


그림 8. 유동해석 결과 비교 (3번 배기)

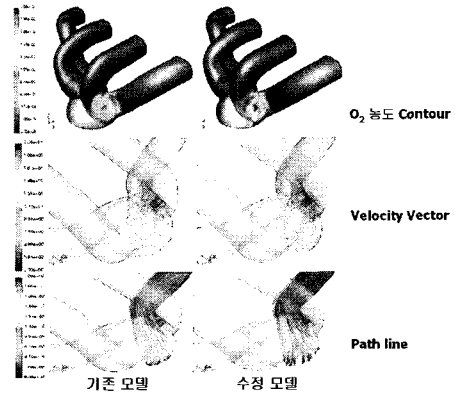


그림 9. 유동해석 결과 비교 (4번 배기)

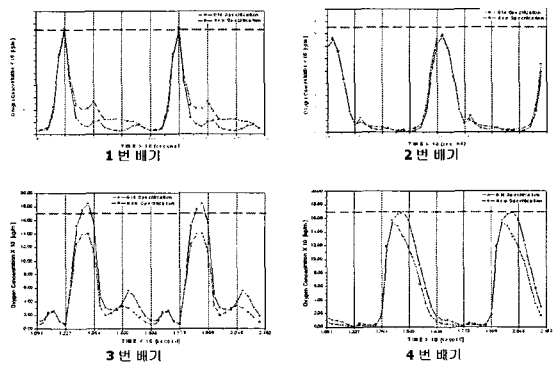


그림 10. 시간에 따른 O₂ 농도 그래프

이와 같은 유동해석결과 분석과 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻어, 설계에 반영하였다.

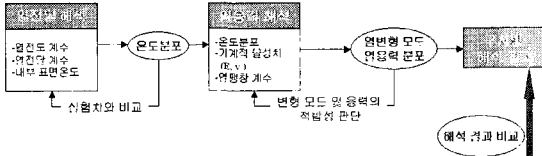
- 1) 기존 모델과 수정 모델에서 O₂ 센서 특성을 예측하기 위한 물질전달 및 유동장 해석을 수행하였다.
- 2) 해석결과 수정 모델이 기존 모델에 비하여 그림 10에서와 같이 3번과 4번 배기시에 더 많은 산소를 감지할 수 있을 것으로 예측되었다.
- 3) 그림 6~9에서 수정 모델이 기존 모델과 비교해서 O₂ 센서로 부드럽게 유동이 유입되어 재순환영역을 줄여주었기 때문이다.

3. 열응력 해석

열응력 해석은 CATIA 해석모듈을 이용하여 수행하였다. 그림 11과 같이, 배기관 내부표면과 외부환경의 온도

차에 의한 열전달 해석을 수행한 후, 열전달 해석의 결과를 이용하여 열응력 해석을 수행하였다.

• 구시방



• 신시방: 구시방 해석 조건과 동일한 조건(초기온도만 변화)으로 해석 진행

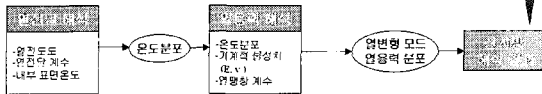


그림 11. 열 전달 및 응력해석 과정

각각 열전달 및 열응력 해석을 수행하기 위한 물성치 및 경계조건은 표 2와 그림 12와 같다.

표 2. 재료 특성치 및 경계조건 입력치

열전달 해석	열전도 계수	37.65e-6 W/mm ² ·°C	
	열 전달 계수	Outer (외기온도 25 °C)	60.0e-6 W/mm ² ·°C
		Inner	155.5e-6 W/mm ² ·°C
	내부 표면 온도	구사양	800 °C
		신사양	900 °C
열응력해석	종단성계수	140 Gpa (상온 162.7GPa, 고온상태를 고려)	
	포아송 비	0.31	
	열팽창계수	10.6e-6 / °C	

특히 재료에 있어서 구시방은 구상흑연주철(FCD)을, 신시방은 경도, 항복강도 및 내열성이 좋은 규소-몰리브덴 주강(Si-Mo Iron)을 사용하였다[6].

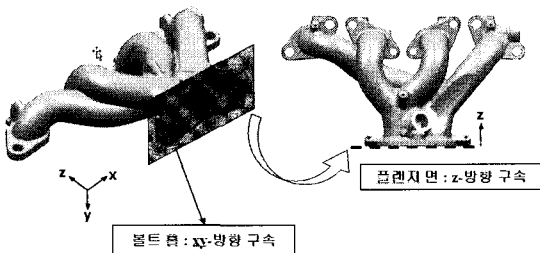


그림 12. 열 응력해석을 위한 구속조건

그림 12는 열 응력해석을 위한 구속조건을 보여주고 있으며, 그림 13~18은 각각 구시방과 신시방의 동일한 조건에서의 열 응력 해석에 따른 온도 분포와 변형 모드 그리고 그 온도 차이로 인한 응력분포를 나타내고 있다.

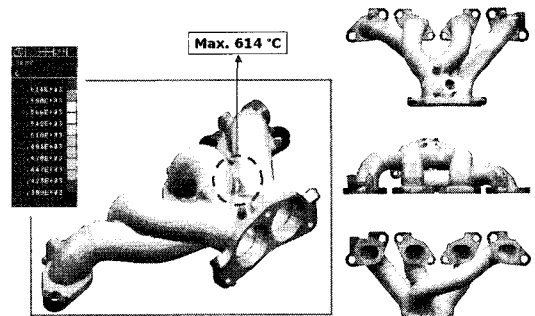


그림 13. 구 시방의 온도 분포

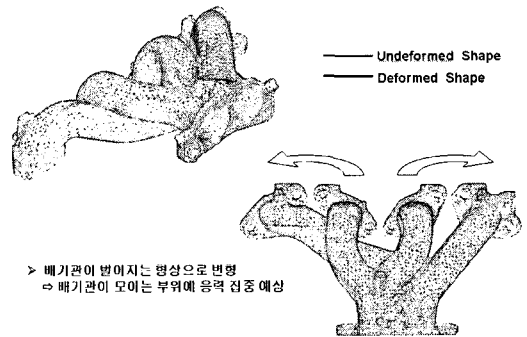


그림 14. 구 시방 변형 모드

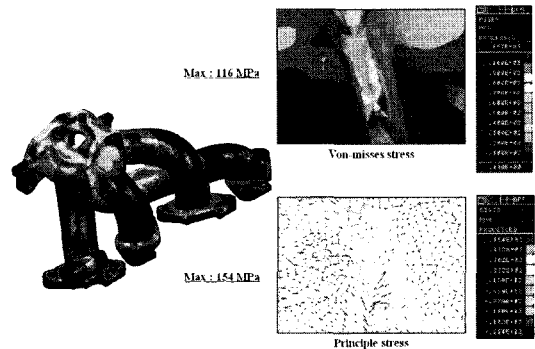


그림 15. 구 시방 응력 분포(Von-Misses)

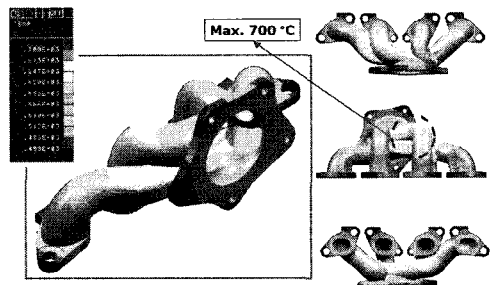


그림 16. 신 시방 온도 분포

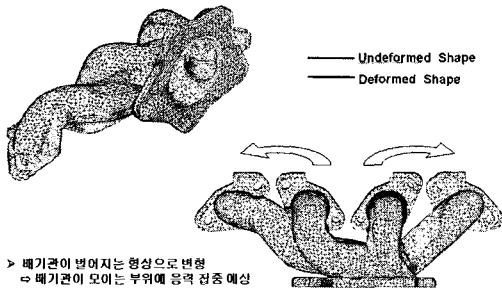


그림 17. 신 시방 변형 모드

(3.5mm)보다 두꺼워서 응력과 변형량 측면에서 동등한 결과를 얻었다.

4. FEMFAT 내구피로해석

내구해석은 FEMFAT을 사용하였으며 그림 19와 같이 CATIA 해석모듈의 열응력 해석결과와 격자모델(Mesh)를 이용하여, 그림 20과 같은 과정으로 해석하였다.

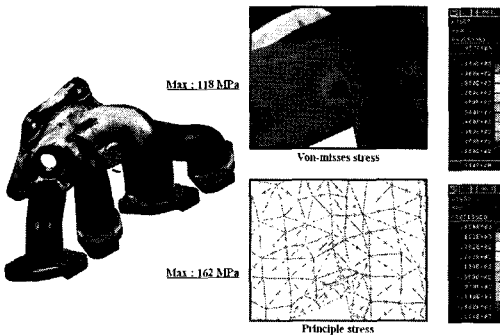


그림 18. 신 시방 응력 분포(Von-Misses)

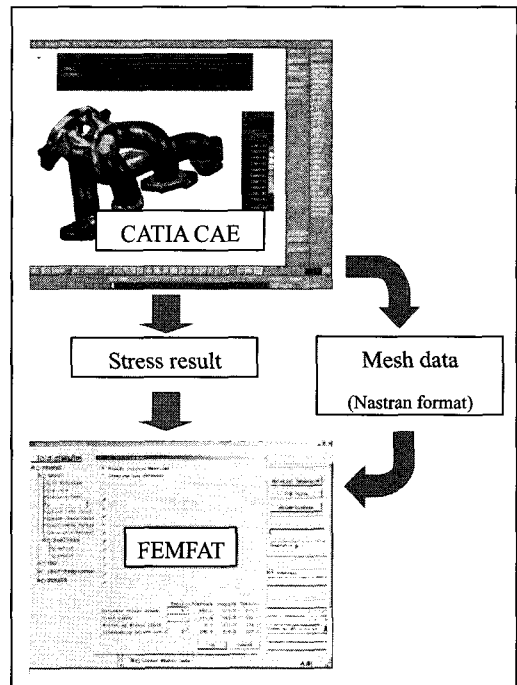


그림 19. Data Export for FEMFAT

그림 12~18과 같은 열 응력해석의 결과를 분석하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻어, 설계에 반영하였다.

- 1) 구시방과 신시방의 Exhaust Manifold를 이용하여 열응력 해석을 수행하였고, 변형 모드와 응력분포를 비교한 결과 두 가지 사양 모두 동등수준의 결과를 나타내었다.
- 2) 신시방이 구시방보다 고온 조건에서 해석을 수행했음에도 신시방의 두께(4mm)가 구시방의 두께

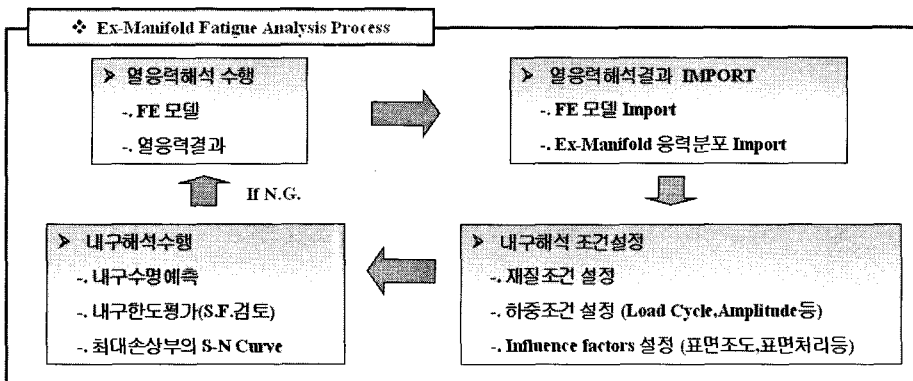


그림 20. 내구 해석 과정

해당 재질에 대한 내구특성에 관한 실험데이터를 확보하지 못하여, 내구수명을 평가하기 위하여 FEMFAT의 재료 데이터베이스(DB)에서 제공하는 유사한 기계적 및 피로성질을 갖는 표 3과 같은 노들러 주강(Nodular Cast iron)의 S-N 선도(Curve)를 적용하였다.

표 3. 재료의 기계 및 피로 특성치

적용 온도	25 - 800℃ (New Model은 900℃)	
적용 회수	1000000 회	
부품재질 (Ultimate Strength)	Nodular Cast Iron	250 Mpa
표면조도 (µm)	200	

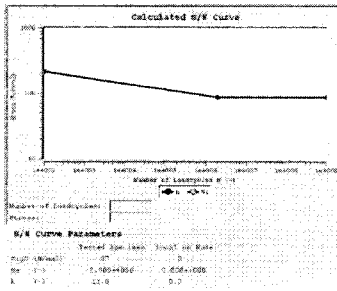


그림 21, 22에 나타난 바와 같이 Damage Criteria는 적용하중 Cycle에 대한 내구수명 Cycle의 비(Ratio)로 나타내며, 그 값이 1 이면 균열이 발생하게 된다. 표3의 데이터를 적용하기 위하여 기준이 되는 내구수명 사이클은 10^6 으로 하여, 적용 가능한 사이클을 계산하였다. 이와 같은 내구해석에 의해 신구시방의 피로취약 부위와 내구수명을 비교 분석한 후 개선방안을 수립하였다. 그림 23은 동일한 특정 지점에서 신구시방의 계산된 응력구배, 표면조도 등을 고려하여 수정하여 적용된 S-N 선도와 무한수명 영역을 보여주고 있다.

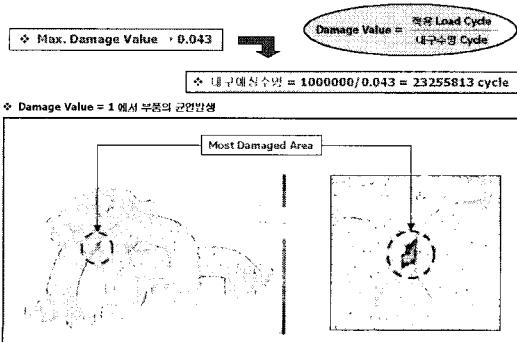


그림 21. 구시방의 내구해석 결과(Damage Criteria)

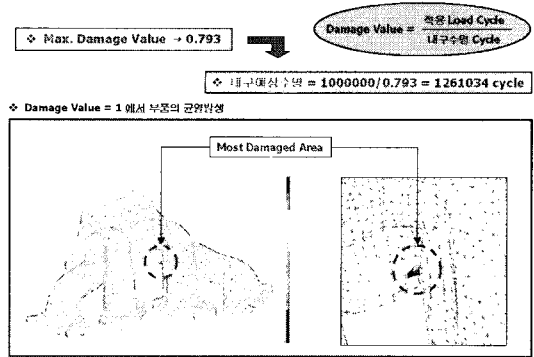


그림 22. 신시방의 내구해석 결과(Damage Criteria)

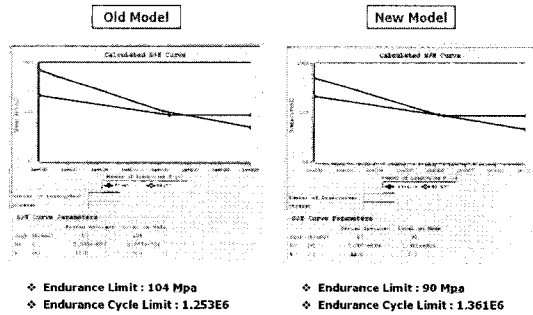


그림 23. 신구시방에 대하여 수정된 S-N 선도

이와 같은 내구해석결과 분석과 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻어, 설계에 반영하였다.

- 1) 배기관의 기존 모델과 신 모델의 Damage Value는 각각 0.043, 0.793으로 구 모델의 내구수명이 약 18.4배 더 우세한 것으로 판단된다.
- 2) 구 모델 대비 신 모델의 내구성능 열세는 3,4번 채널(Run Channel) 교차부에 생성된 예리한 노치(Notch)에 의한 국부적인 응력집중 및 급격한 응력구배에 의해 기인하는 것으로 판단된다.
- 3) 신 모델의 내구성능 개선을 위해서는 3,4번 채널 교차부에 생성된 노치를 제거하고 라운딩(Rounding) 처리를 통해 응력감소 및 분산을 유도하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통하여 유동, 열응력 및 내구해석의 연계 해석과정을 CATIA 해석모듈을 이용함으로써, 유동과 구조

해석의 연계해석 방법 정립뿐 만 아니라 복잡한 3차원 CATIA 형상으로부터 신속하고 효율적으로 복합적인 해석업무를 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다. 해석결과를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

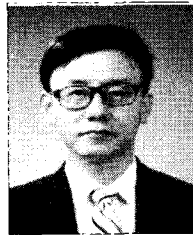
- 1) 유동 해석 결과 수정 모델의 경우, 기존 모델과 비교해서 O₂ 센서로 부드럽게 유동이 유입되어, 그림 8,9와 같이 3번과 4번 배기 시에 더 많은 산소를 감지할 수 있었다.
- 2) 열응력 해석 결과 구시방과 신시방 모두 동등 수준의 열응력 분포를 보이기 때문에, 신시방의 열적 강도에 문제가 없다고 판단된다.
- 3) 내구 해석 결과 신시방이 구시방에 비하여 열세의 내구성을 보이며, 이러한 원인은 최대응력 발생부의 예리한 노치에 의한 것으로, 이 노치를 제거하고, 이 부위에 라운딩 처리를 하면 내구성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 조용석, 김득상, 주영철, “근접착식 촉매장치의 유동 분포 측정 및 해석에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집(B) 제25권 제4호, pp.533~539, 2001.
- [2] 김범근, 이은현, 최복록, “터보 디젤 엔진용 배기 매니폴드의 열변형해석”, 대한기계학회 논문집(A) 제31권 제3호, pp.338~343, 2007.
- [3] FLUENT User’s Manual Ver. 6.0, FLUENT Inc., 2007.
- [4] CATIA User’s Manual Ver. 5.17, Dassault Systems Inc., 2007.
- [5] FEMFAT User’s Manual Ver. 4.6, MAGNA Powertrain Inc., 2007.
- [6] Ductile Iron news(Issue 1), "Physical Properties of Manifold materials", Ductile Iron Society, USA, 2001.

이 광 수(Kwang-Soo Lee)

[정회원]



- 1985년 2월 : 인하대학교 조선공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 인하대학교 선박공학과 (공학석사)
- 2005년 8월 : 한국과학기술원 자동차및설계공학과(공학박사)
- 1987년 ~ 1992년 : 삼성중공업 선박해양연구소(대리)
- 1992년 ~ 1997년 : KT 생산기술연구소(과장)
- 1997년 ~ 1996년 : 한국IBM PLM사업부(부장)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 자동차공학과 조교수

<관심분야>

CAD, DMU, CAE, 공차분석, 창의공학(TRIZ), 피로파괴, 가상공장, 전문가시스템, 프로그래밍