모터사이클 머플러 내부 열 · 유동에 관한 시뮬레이션

이중섭†, 지명국*, 심규진*, 정한식*, 이철재**, 배재영***

A Simulation on the Thermal and Fluid about Motorcycle Muffler

Chungseub Yi†, Myoungkuk Ji*, Kyujin Shim*,
Hanshik Chung, Cheoljae Lee**, Jaeyoung Bae***

Key Words: motorcycle(2륜자동차), muffler(소음기)

Abstract

This study represents numerical study on the thermal and fluid flow characteristics of exhaust gas in a motorcycle muffler. The reference engine was used 124.cc small displacement. Numerical analysis with computational fluid dynamics(CFD) was carried out to investigate the exhaust gas that flow into a motorcycle muffler. The STAR-CD S/W used to three dimensional steady state CFD analysis in a muffler. And than We got the information of static pressure it is used to structural analysis ant the first baffle plate using the commercial CAE code ANSYS workbench. Exhaust gas flow third chamber from frist chamber and running second chamber. A simulation result shows that each chamber of muffler temperature is about 460 K, 445 and 463K and pressure is about 22,000 Pa, 16,000 Pa and 10,000 Pa.

1. 서 론

모터사이클의 배기계는 기본적으로는 일반 자동차와 동일하여 배기파이프와 소음기로 이루어져 있으며, 단기통의 경우 배기다기관이 없는 점과 촉매변환기가 없는 것이 가장 큰 차이점이다. 배기계 중 가장 큰 비중을 차지하는 소음기의 경우 그 역할은 엔진의 폭발음을 감소시키는 것이 주목적으로 우리말로 소음기(消音器)라 한다. 그러나 소음기는 단지 소리를 감소하는 역할 외에도 엔진의 성능을 결정하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 도로를 주행하는 모터사이클에 소음기가 없다면 소음(騷音)공해가 심각할 뿐 아니라 유해가스에 의한 피해도 상당하리라 여겨진다.

모터사이클은 사용목적이나 요구사양에 따라 2행정 기관을 적용하거나 4행정 기관을 적용하는데 Fig.1처럼 2행정 기관과 4행정 기관은 그 구조만큼이나 소음기의 구조와 역할도 다르다.

통상 머플러 또는 싸일런스라고 부르는 소음기는 엔진의 실린더 또는 실린더 헤드에 연결되는 배기관(exhaust pipe)과 연결되어 있으며, 소음기는 그 형상에 따라 메가폰 타입, 캔 타입 등으로 나누어진다. 그러나 이것은 4행정 기관의 경우이고 2행정 기관의 경우에는 배기관에 확장챔버가 연결되어 그 모양부터 다른 것을 알 수 있다.

국외 선행연구자들 중 E. Dokumaci[1]는 소음기 내부에 3중의 파이프가 타공되어 설치되는 단순 공명식 소음기의 한 형태로서 챔버와 타공된 파이프의 간격에 따른 주파수 분석을 실험과 이론적 계산을 통해 비교 분석하여 소음감소에 대한 음향학적 측면에서의 연구를 수행하였다. 그리고 이와 유사한 연구로서 F. D. Denia[2]등은 유입구와 유출구가 교차되는 타원형 단순 확장식 소음기에서의 음향학적 거동에 대한 연구로서 유한차분법(FDM)을 이용한 수치해석을 통해 소음기 내

† 삼원기술(주) 기술연구소
mail : cs_yi@hotmail.com
* 경상대학교 기계항공공학부
**동명대학교 자동차공학과
***대림자동차공업(주) 연구기획팀

에서의 전달손실(transmission loss)을 실험과 수치해석을 비교하였다. 또한 국내 선행연구자들 중 김민호 등[3,4]은 소음기가 장착된 실제 차량을 실험 대상으로 선정하여 정상상태의 소음기내 유동현상과 맥동파 형태의 배기가스 유입에 따른 비정상상태의 유동특성을 전산 유체역학 코드인 STAR-CD을 사용하여 소음기내의 유동현상을 가시화 하였다. 또한 정상상태와 비정상상태의 소음기 내 3차원 유동현상을 파악하여 소음기내의 압력손실이 해석과 실험이 6% 이내로 잘 일치함을 보여주었다. 또한 정상상태에서 소음기 내부의 격벽(baffle plate)위치, 격벽에 존재하는 유동통로의 위치, 입구부와 출구부의 오프셋(offset)등을 변경인자로 하여 이에 따른 유동특성을 연구하였다.

본 연구는 현재 양산중인 125 cc급 소형 모터사이클의 머플러에 대한 기초적인 열·유동 가시화를 수치해석을 통해 확인하는 것에 목적이 있다. 아울러 기초설계 자료로 활용하고자 한다.

(a) 2-stroke (b) 4-stroke

Fig.1 Motorcycle exhaust systems.

2. 열 · 유동해석 방법 및 경계조건

2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 Fig.2와 같이 내부 격판(baffle plate)이 2개와 지지판 1개가 설치되는 머플러이다. 입구로 유입되어 첫 번째 챔버를 거쳐 세 번째 챔버로 이동하고 다시 두 번째 챔버로 이동한 후 최종 대기로 배출되는 모델이다. Fig.3은 수치해석을 위한 변수로 첫 번째 챔버의 체적을 변수로 설정하였으며, 지지대는 구조물을 지지하는 역할이기 때문에 제외시켰다. 또한 출구파이프에는 2중관으로 내부에 타공되어 고주파대의 소음을 제거시켜주는 일종의 공명실이 마련되어 있는데 출구 유동에 많은 영향을 주지 않는 부분이므로 해석에 참여시키지 않았다. 실제 모터사이클에서 배기되는 작동유체는 화학반응 및 크랭크각도에 따른 비정상 상태의 압력파를 가지고 있다. 그러나 이번 연구에서 확인하고자 하는 결과는 첫 번째 격판의 위치에 따른 머플러 내부의 온도분포와 압력분포를 확인하는 것이 목적이 있다. 따라서 머플러 내부의 유동분포성을 고려하여 설계할 때 필요한 결과를 획득하기 위해 해석방법은 3차원 압축성 정상상태일 때를 가정하여 이미 공학적으로 검증된 열유체 상용코드인 STAR-CD ver.3.24를 이용하여 계산을 수행하였다. 난류모델은 k-ε 표준모델을 적용하였으며, 속도항과 압력항의 연결은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 또한 지배방정식의 대류항과 난류항의 차분은 상류도식법을 적용하였고, 작동유체의 밀도항은 중앙도식법을 적용하였다.

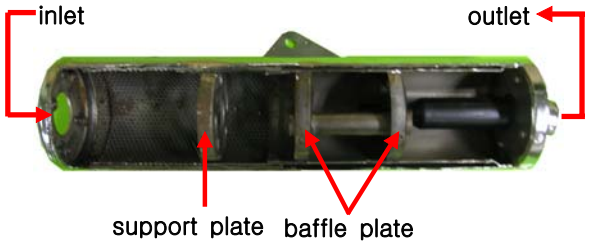
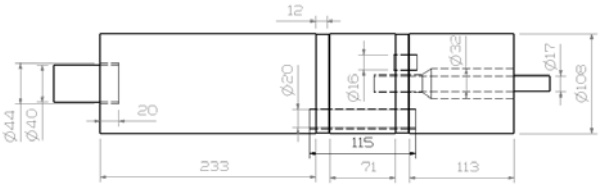
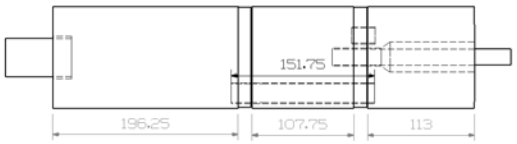


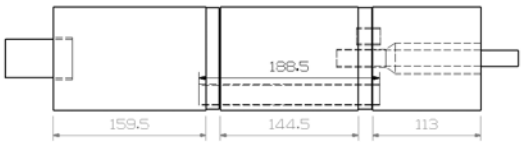
Fig.2 Photograph of commercial muffler model.



(a) model-1



(b) model-2



(c) model-3

Fig.3 Geometry of muffler models.

2.2 경계조건 및 격자생성

지배방정식을 계산하기 위해 사용된 경계조건은 Fig.4와 같이 입구에 500 K의 온도로 -20 m/s

의 속도로 유입된다고 가정하였다. 그리고 출구의 경우 대기조건을 충분히 반영하기 위해 출구 미관 직경의 10배로 확장시켜 돔(dome) 형상으로 격자를 생성시키고 끝단에 대기압력 조건을 부여하였다. 또한 격자가 생성된 부분은 고체영역을 제외한 유체영역에만 국한하여 계산격자를 생성시켰다. 따라서 파이프 및 격벽의 경우 외부와 노출되어 있지 않기 때문에 단열조건을 부여하였고, 외부와 노출되는 머플러 케이스의 경우 주위 온도가 400 K로 일정하게 유지되고, 열저항을 $2.3\times E^{-5}$ m^2·K/W로 설정하였다.

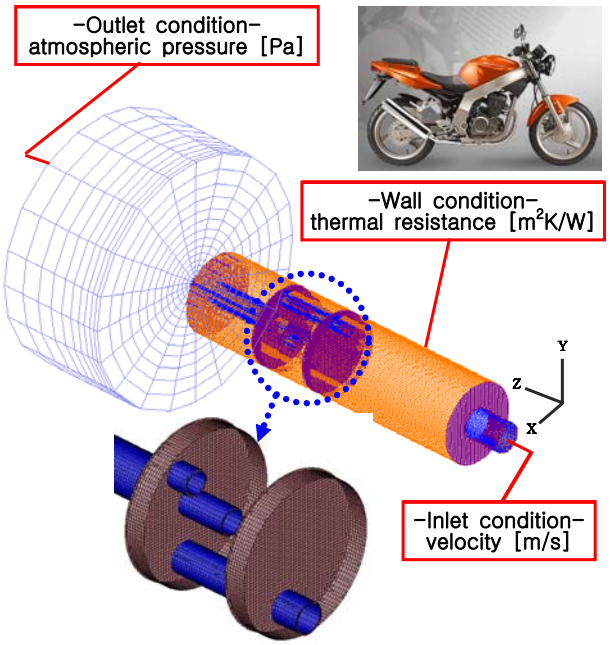
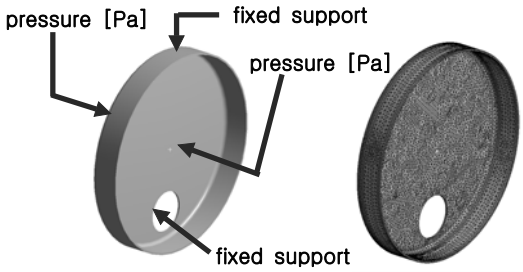


Fig.4 Grid system and boundary conditions of muffler model.

3. 구조해석 방법 및 경계조건

열·유동적인 수치해석의 경우 모든 구조물은 격자생성에서 제외되며, 해석되지 않는 공간이다. 따라서 유체역학적 구조물은 변형이 없는 강체(rigid body)가 되기 때문에 구조물에 대한 구조해석은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 압력을 가장 많이 받는 첫 번째 격판에 대한 구조해석 ANSYS Workbench를 사용하여 Fig.6과 같은 경계조건을 부여하여 구조적인 안정성을 확인하고자 하였다. 격판의 윗면은 머플러 케이스와 용접되어 고정되는 부분이므로 고정시켰고, 격판 전후 단면에 대하여 열·유동해석을 통해 획득한 압력을 경계조건으로 부여하였다. 계산에 사용된 격자수



(a) boundary conditions (b) mesh structure

Fig.5 Grid system for structural analysis and boundary condition at 1st baffle plate.

는 4면체 격자 12,040개가 소요되었다. 격판의 재질은 일반적인 구조강으로 설정하였으며, 탄성계수는 $2.0\times E^{11}$, 포아송 비는 0.3, 밀도는 7,850 kg/m^3의 물성치를 가진다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

앞서 언급한 지배방정식과 경계조건을 부여하여 수치해석적 모델에 대한 시뮬레이션 결과 다음과 같이 가시화할 수 있었고, 정성적인 결과에 대해서 설명하고자 한다.

Fig.5는 머플러 내부 작동유체에 대한 온도분포와 벽면에 대한 온도분포를 나타내고 있다. 전반

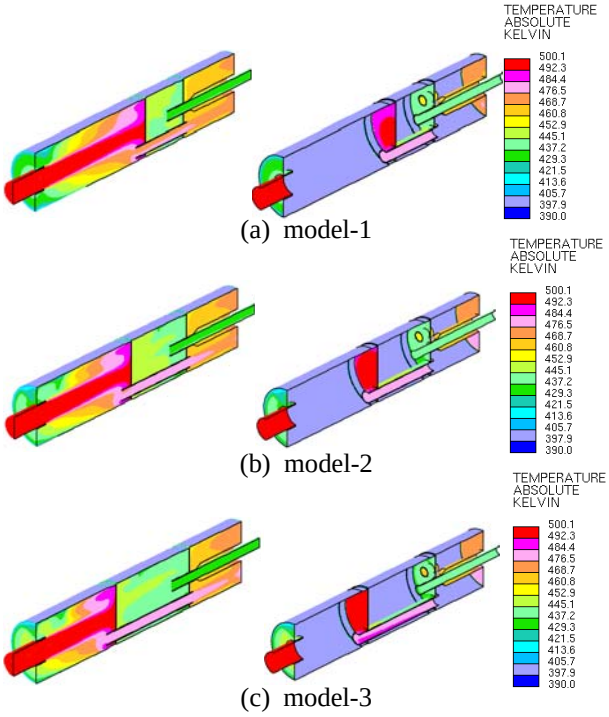
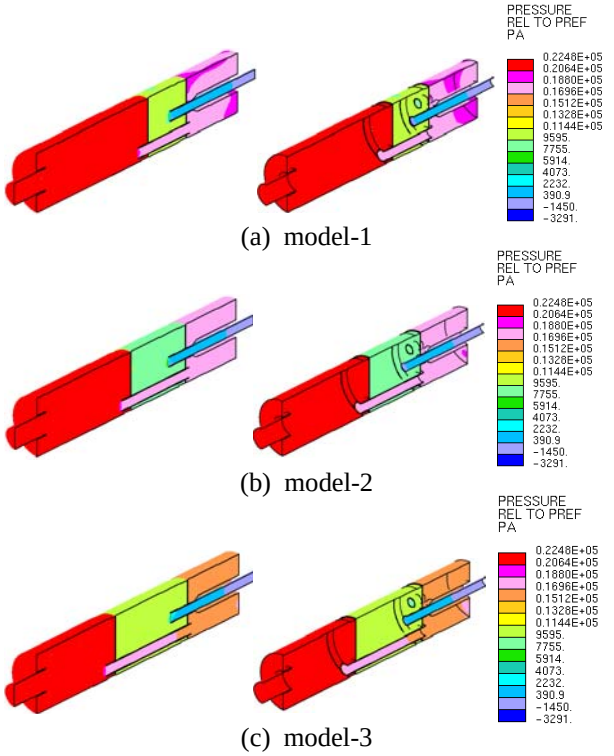


Fig.6 Comparisons of temperature distribution in muffler.



(a) model-1

(b) model-2

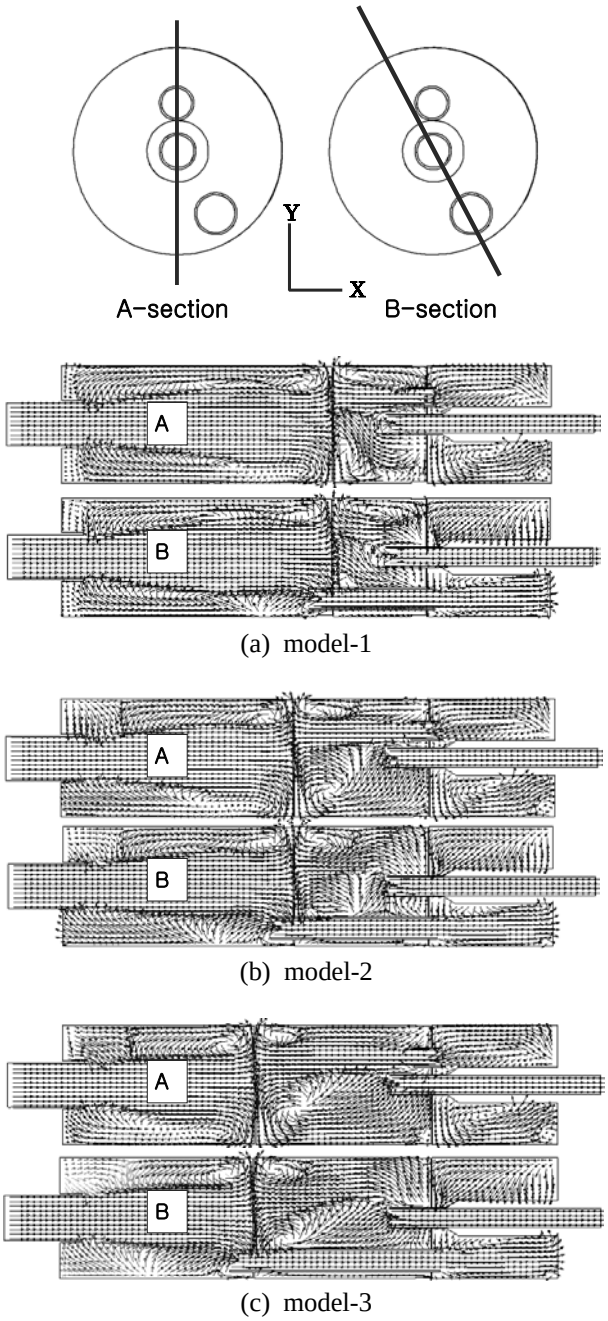
(c) model-3

Fig.7 Comparisons of static pressure distribution in muffler.

적인 온도분포를 보면 머플러 케이스로 일정하게 열이 대기로 빠져 나가기 때문에 급격한 온도편차가 발생되는 모델은 없었다. 다만 첫 번째 격판에서 model-3의 경우 가장 높은 온도로 넓게 분포함을 확인할 수 있었다. 이는 입구와 첫 번째 격판과의 거리가 짧기 때문에 외부로 빠져나가는 열이 그만큼 줄어들었기 때문으로 판단된다. 모든 모델에 대하여 격판의 경우 외부와 단절되는 부분이므로 경계조건으로 단열조건을 부여하였기 때문에 온도분포가 케이스에 비해 높게 나타났다.

Fig.7은 압력분포를 나타내고 있으며, 정성적으로 볼 때 첫 번째 챔버는 모두 높은 압력이 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이 체적에서의 압력분포를 대기압을 기준하여 평균하면 model-1은 22,373 Pa, model-2는 21,450 Pa 그리고 model-3은 21,284 Pa 정도의 압력을 받고 있었다. 그리고 그 다음 챔버로 이동하면서 압력은 하강하게 되고, 최종 대기로 배출되는 챔버에서는 압력 기울기가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig.8은 머플러 내부 단면에 대한 속도벡터분포를 나타내고 있으며, Fig.9는 머플러 내부의 입자추적 결과를 나타내고 있다. 입구에서 유입되는 유동은 첫 번째 격판에 부딪히면서 가장자리 쪽으로 이동하게 되고 그 벽면에서 유동 재순환이 발생하게 된다. 또한 일부는 상부 벽면을 타고 입구 쪽으로 이동하다가 입구 파이프에서 유입되는 속도와의 압력차로 인해 다시 격판 쪽으로 이동하면서 격판 주위에 복잡한 유동이 발생됨을 알 수 있었다.

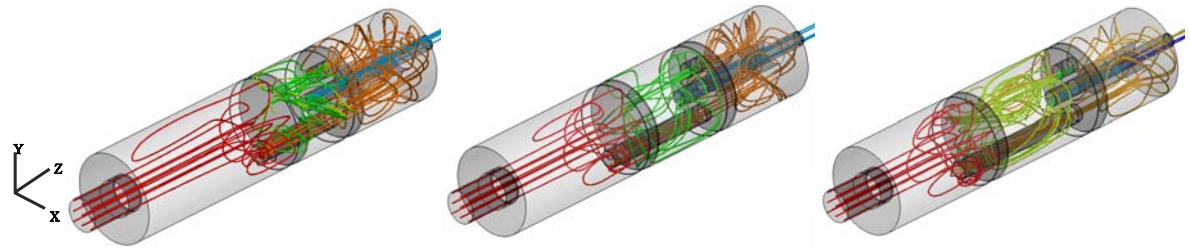


(a) model-1

(b) model-2

(c) model-3

Fig.8 Comparison of velocity vector distributions at A and B section in muffler.



(a) model-1 (b) model-2 (c) model-3

Fig.9 Comparisons of particle tracking in muffler.

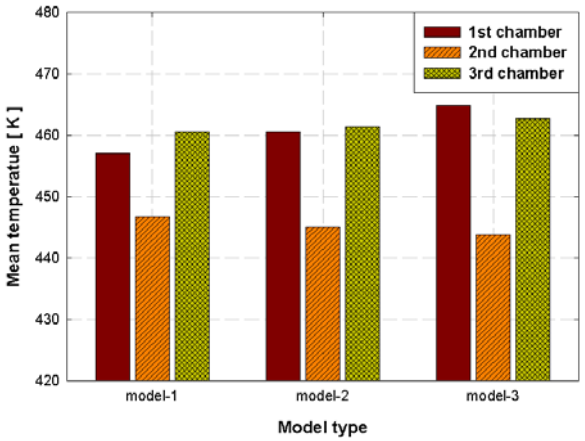


Fig.10 Comparisons of mean temperature about chambers in muffler

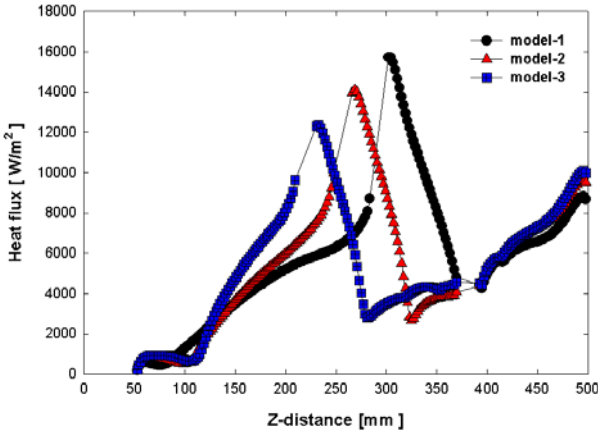


Fig.11 Comparisons of mean heat-flux about models at muffler casing.

다시 세 번째 챔버로 이동하면서 벽면과 충돌하게 되고 배출되는 파이프 위-아래로 쪼개지면서 이동하여 유입되는 반대쪽에 설치된 두 번째 챔버로 이동하는 파이프로 빠져나가게 된다. 최종 두 번째 챔버는 대기와 압력차가 가장 많이 발생하는 부분이므로 배기 파이프에서의 압력이 낮아지기 때문에 배출되는 속도가 높아지게 된다.

Fig.10은 각 챔버 내의 평균온도를 나타내고 있다. 첫 번째 챔버의 경우 체적이 감소하면서 온도가 상승하였고, 두 번째 챔버의 경우 반대로 체적이 증가하면서 온도가 하강함을 알 수 있었다. 그리고 세 번째 챔버의 경우 체적이 항상 일정하고, 고온의 유체가 첫 번째 챔버를 통해 유입되고, 첫 번째 챔버에 비해 단위면적당 빠져나가는 열손실이 적기 때문에 평균온도는 높게 나타난 것으로 사료된다.

Fig.11은 머플러 케이스 위쪽으로 빠져나가는 열유속을 나타내고 있다. 두 번째 챔버의 경우 체적이 증가하는 model-2와 model-3의 경우 열유속 급하강하여 230 mm 지점과 275 mm 지점에서 다시 상승함을 알 수 있었다. 그러나 model-1의 경우 끝까지 하강하는 기울기를 보이고 있었다.

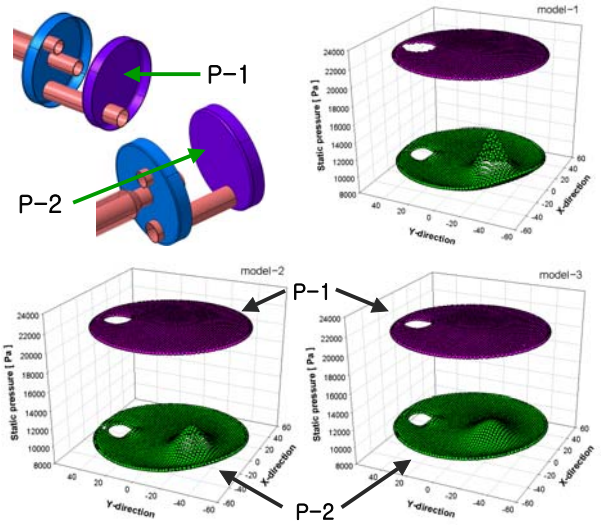
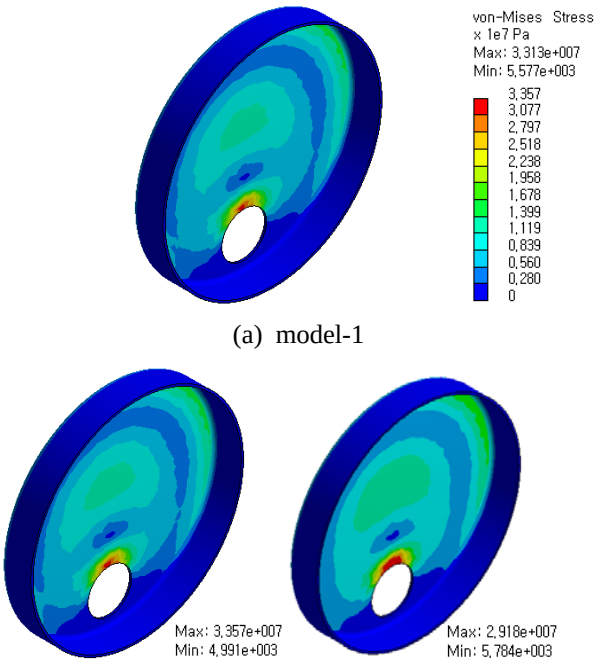


Fig.12 Comparisons of static pressure at 1st baffle face.

Fig.12는 첫 번째 격판에서 받는 압력분포를 3차원으로 나타낸 결과이다. P-1은 첫 번째 챔버에 받는 압력이고, P-2는 두 번째 챔버에서 반대방향



(a) model-1

(b) model-2 (c) model-3

Fig.12 Comparisons of von-mises stress distribution at 1st baffle plate.

으로 받는 압력을 나타낸다. 양단에서 받는 압력차는 model-1 부터 12,216 Pa, 12,376 Pa, 10,760 Pa로 model-3이 압력차가 가장 낮게 나타나 구조적으로 유리한 것으로 판단된다.

Fig.12는 첫 번째 격판에 대한 구조해석을 수행한 결과이다. 격판에 양쪽면에 앞서 취득한 Fig.11의 압력값을 면적으로 평균하여 경계조건으로 입력하여 구조해석 결과인 등가응력(von-mises stress)을 계산하였다. 전반적으로 등가응력이 가장 높게 발생되는 부분은 파이프와 연결되는 홀 부분에서 가장 높게 나타났다. 파이프와 격판이 압입되어 점 용접이 되어있기 때문에 경계조건에서 고정시켰다. 때문에 홀 상부 쪽에 가장 많은 응력을 받고, 반대로 하부 쪽은 거의 받지 않았다. 그 외 중심부와 가장자리 부분에서 응력을 받고 있음을 확인할 수 있었으며, 구조적으로는 변형을 무시할 만한 것으로 나타났다.

4. 결 론

모터사이클용 머플러에 대한 열·유동해석과 압력을 가장 많이 받는 첫 번째 격판에 대한 구조해석을 수행한 결과 첫 번째 챔버의 체적이 감소할수록 열유속이 앞부분에서 낮게 나타나 외부와의 열전달이 둔화되어 전반적으로 높은 온도를 유지하고 있었다. 반면 두 번째 챔버의 경우 외부로 빠져나가는 열유속이 크기 때문에 가장 낮은 온도분포를 나타내고 있었다.

압력분포의 첫 번째 챔버의 앞쪽에서 받는 압력은 model-1, model-2, model-3 순서로 크게 받고 있었다. 이는 두 번째 챔버의 체적이 반대로 증가하였기 때문에 대기로 잘 빠져나갔기 때문이었다. 한편 반대쪽 격판에서 받는 압력은 model-3, model-1, model-2 순서로 크게 받고 있었으나 차이는 크게 나지 않았다. 따라서 구조해석한 결과 또한 아주 비슷한 응력분포를 보였고, 특히 파이프와 연결되는 홀 부분에서 응력이 집중되는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역혁신인력양성사업과 2단계 BK21의 지원과 대림자동차공업(주) R&D 센터 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) E. Dokumaci, 2001, "Sound Transmission in Mufflers with Multiple Perforated CO-Axial Pipe", Journal of Sound and Vibration, Vol. 247, No. 3, pp. 379~387.

(2) F. D. Denia, J. Albelda and F. J. Fuenmayor, 2001, "Acoustic Behaviour of Elliptical Chamber Mufflers", Journal of Sound and Vibration, Vol. 241, No. 3, pp. 401~421.

(3) Minho Kim, Wooin Chung, Inbum Chyun, 1999, “A Study on the Flow Characteristics of Steady State and Pressure Variation inside the Muffler with the Inflow of Pulsating Exhaust Gas”, Journal of KSAE, Vol.7, No.8, pp.150~159.

(4) Minho Kim, Wooin Chung, Inbum Chyun, 2000, "A Study on the Flow Charactristics and Pressure Loss of a Muffler for the Variation of Volumetric Rate and Offset", Journal of KSAE, Vol.8, No.4, pp.93~99.