



가솔린 엔진용 배기매니버터 유동특성 해석 및 시험에 관한 연구

엄용석,^{*1} 박남섭,² 신철균,¹ 이점주,¹ 이관순¹

CFD ANALYSIS AND EXPERIMENT OF EXHAUST MANIFVERTER OF GASOLINE ENGINE

Y.S. Eom,^{*1} N.S. Park,² C.G. Shin,¹ J.J. Lee,¹ G.S. Yi¹

To develop the Exhaust Maniverter(Manifold and converter) it needs to consider flow characteristics related to durability and performance of the catalyst, manufacturability, etc. This paper presents the analysis results regarding to flow characteristics such as flow uniformity, tangential speed, O₂ sensor sensitivity and CHT (conjugate heat transfer) for the LCF(Low Cycle Fatigue) for gasoline 2.0 liter engine. The results are satisfactorily corresponded to the general criteria. Also skin temperature and pressure drop were measured at the Engine Bench. These results can be useful for the design guide for Exhaust Maniverter.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 배기매니버터(Exhaust Maniverter), 유동균일도(Uniformity Index), 압력손실(Pressure Drop), 매트 침식(Mat Erosion), 매트 수평속도(Tangential speed)

1. 서 론

전 세계적으로 화석 자원의 고갈에 대한 염려와 환경문제에 대한 인식의 증가로 자동차 산업에서는 연비향상과 오염물질의 저감 향상을 위한 각고의 노력이 이루어지고 있다. 특히 엔진실린더와 바로 체결되는 배기매니버터(Exhaust Maniverter : Exhaust Manifold와 Converter의 합성어)는 엔진 실린더에서 폭발 후 발생하는 연소가스를 한곳으로 모아주는 역할 및 HC, CO등과 같은 인체에 유해한 물질을 정화시키는 역할을 하는 부품이다. 과거 촉매장치는 엔진에서 멀리 떨어진 하부부착식(UCC : Underbody Catalytic Converter)이었으나 촉매활성화 시간(LOT : Light Off Time)을 단축시키기 위하여 엔진과 가깝게 위치하여 배기 매니폴드와 바로 체결되는 형태(WCC : Warm-up Catalytic Converter)로 개발되고 있는 추세이다.

배기 매니버터 개발 시 고려해야할 사항은 엔진의 성능 및 오염물질의 저감 등과 관련된 유동 성능의 예측과 고온의 열팽창 및 수축의 반복과 진동에 대한 내구성능의 예측 등의

성능예측 측면이 있으며 담체(substrate)와 담체를 감싸서 캐닝(Canning) 시 담체를 보호하고, 배기가스의 압력 및 진동에 의해 담체가 설계 목표 위치에서 배기가스 출구 방향으로 밀려 주변부품과 접촉에 의해 파손되지 않도록 담체를 고정할 수 있는 매트(Mat)의 선정 등 제조 측면 등이 있다.

일반적으로 개발 설계 목적으로 유동특성에 대한 해석을 수행하는 경우 계산시간의 단축을 위하여 정상유동으로 가정을 한다. 정상 유동해석의 목적은 실제 엔진의 비정상 배기유동을 각 기통에 대한 정상 유동으로 모사하고 대표적인 평균 거동을 예측함으로써 배기매니버터의 유동특성을 빠르게 파악하기 위함이다. 물론 정상 유동해석에 비해 실제 엔진에서의 조건에 좀 더 근접한 비정상 유동해석을 통하여 각 실린더의 배기간섭을 고려한 해석을 하는 것도 중요하지만, 자동차 개발 기간의 단축에 빠르게 대응하기 위해서 정상유동해석을 수행하는 편이 효율적이다.

본 연구에서는 정상유동해석을 수행하여 촉매의 효율성과 관련된 유속균일도(Uniformity Index), 매트의 침식(Mat Erosion)[1] 영향을 예측할 수 있는 매트 입구 단면 위 수평속도(Tangential speed), 엔진의 성능과 관련하여 중요한 압력손실(Pressure Drop)등의 유동특성의 예측과 저주기 수명 예측(Low Cycle Fatigue)해석을 위하여 필요한 표면온도 분포 특성을 예측하였으며 배기 매니버터 개발 시 설계 자료로 활용하

1 우신공업(주) 기술연구소

2 유한대학 기계과

* Corresponding author, E-mail: eys1977@wooshin.net

었다. 또한 실제 엔진에 장착하여 압력손실과 표면 온도 분포를 측정하였다.

2. 유동해석

2.1 유동 특성 인자

배기 매니버터 개발 시 고려해야할 유동특성은 유속균일도 (Uniformity Index), Mat 입구 수평속도(Tangential Speed), 압력 손실(Pressure Drop) 등이 있으며, 내구 수명 예측을 위하여 표면온도의 분포 결과가 요구된다.

유속균일도는 촉매입구 단면에 배기가스가 골고루 잘 분포 하는지의 정도를 나타내는 지수이며 촉매의 효율성을 예측하기 위하여 사용되며 일반적으로 Welten[2]등이 제안한 식을 사용하며 식 (1)과 같다. 여기서 S 는 담체 전면적, v_i 는 담체 격자 i 에서의 국부 속도, \bar{v} 는 평균속도, S_i 는 담체 격자 i 의 단면적을 말한다.

$$r = 1 - \sum_{i=1}^N \frac{|v_i - \bar{v}|}{2\bar{v}S} S_i \quad (1)$$

매트 입구 단면 위의 수평속도(Tangential Speed)는 Mat의 침식(Erosion)과 관련하여 매우 중요한 인자로서 설계목표를 만족하지 못하였을 경우 Fig. 1과 같이 매트(Mat)의 침식 발생의 원인이 되며 이로 인해 담체 고정력(Holding Force)이 감소하게 되어 담체가 배기가스 출구 방향으로 이동하게 되어 주변 부품과 부딪히게 되어 파손 되는 경우가 발생하기도 한다.

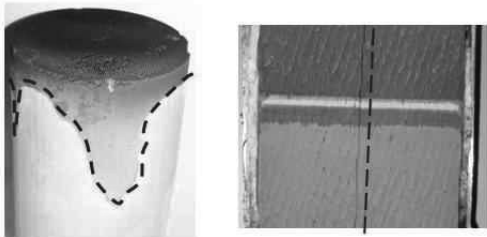


Fig. 1 Mat Erosion and Substrate Crack

또한 Fig. 2와 같이 배기 매니버터의 입구와 출구 단면에서의 총 압력(Total Pressure)에 대한 차이(Pressure Drop)는 엔진 성능과 관련하여 아주 중요한 해석인자이며, 엔진에 영향을 미치지 않는 범위에서 설계되어야 한다. 산소센서의 민감도는 최고 유속의 흐름에 노출되어 있으며 각 러너(Runner)간 편차가 없는 위치에서 가장 좋으며 이 위치에 산소센서를 장착되도록 한다.

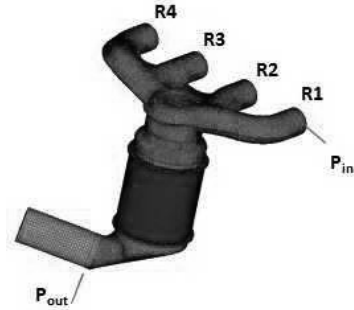


Fig. 2 Section for Pressure Drop

2.2 해석 방법

가솔린 엔진용 배기 매니버터에 대해 실제 운전조건에서의 유동특성 인자와 표면온도 분포를 파악하기 위해 정상해석을 수행하였으며 복합열전달해석(Conjugate Heat Transfer)을 수행하였다. 입구의 배기가스는 870℃ 공기로 가정하고, 출구에는 출구압력조건을 사용하였으며 압력값은 실험에서 측정한 배압을 적용하였다. 배기 다기관 및 플랜지 파이프 내 3차원 난류유동 및 촉매변환기로 유입되는 고온의 배기가스의 속도와 압력분포를 계산하기위해 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식과 함께 이상기체 상태방정식을 사용하였다. 난류 모델로는 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 담체 내 유동은 축방향으로만 층류유동이 있고 반경 방향으로로는 유동이 없는 다공성 매질(Porous Media)로 모델링 하였으며 상용코드인 STAR CD[3]에서 제공하는 압력과 저항력 사이의 관계는 식 (2)와 같다. 여기서 α_i 와 β_i 는 선정된 담체의 특성값으로 반경방향의 질량전달이 없는 것으로 가정하여 큰 값으로 설정하였고, 주유동방향의 α_i 와 β_i 는 임효재 등[4]이 정리한 식 (3)에 코팅 두께 및 Poiseuille 계수 등을 보정하여 계산하였다. 여기서 GSA(Geometric Surface Area)는 촉매의 단위 체적당 washcoat의 면적을 나타내며, OFA(Open Frontal Area)는 촉매의 전체 단면적 대비 유량이 흐르는 면적의 비율이다. λ 는 담체의 길이, P_o 는 Poiseuille number를 나타낸다. 또한 배기 매니폴드, 플랜지, 셸(Shell) 외벽 면에는 영역별로 구분하여 대류형 열경계조건을 적용하고 주위의 온도와 열전달 계수를 지정하였다.

$$\frac{dP}{dx_i} = -(\alpha_i \bar{v} + \beta_i) u_i \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\rho K}{2\lambda OFA^2}, \quad \beta = \frac{\mu P_o GSA^2}{8 OFA^3} \quad (3)$$

2.3 해석 결과

배기 매니버터 개발 시 필요한 유동특성에 대해 예측하였으며 Table. 1에 결과를 나타내었다. 각 실린더 별로 유동의 균일도는 0.9이상의 결과를 나타냈으며 2,3번 런너(Runner)의 균일도가 상대적으로 낮으며 촉매입구를 통과하는 유로의 길이가 짧아 속도 증가에 의한 것으로 사료된다. 수평속도는 3번 런너를 통과할 경우 가장 높으며 1번 런너를 통과할 경우가 가장 낮은 수치를 나타내었다. 압력손실은 2번의 경우 나머지 런너보다 낮으며 유로의 밴딩(bending)각이 작아 회전속도 성분이 상대적으로 작게 발생함에 따른 것으로 판단된다.

Table. 1 Results of Flow Characteristics

	R1	R2	R3	R4
UI(Uniformity Index)	0.93	0.91	0.92	0.94
Tangential Speed(m/s)	64	78	103	83
Pressure Drop(kPa)	42	38	44	41

Fig. 3은 담체 입구에서 유속의 분포도를 나타낸 것이다. 2,3번의 런너를 통과하는 경우 최고 속도의 분포가 1.4번에 비해 넓게 분포하는 것을 알 수 있으며 담체 입구를 통과하는 유로의 길이가 짧아 속도가 증가하는 것으로 보인다. 또한 최고 속도의 위치는 담체의 중심에서 많이 떨어져 있어 담체 내구 성능 및 매트에 영향을 미칠 것으로 사료되며 설계목표를 만족하지 못할 경우 개선이 요구된다.

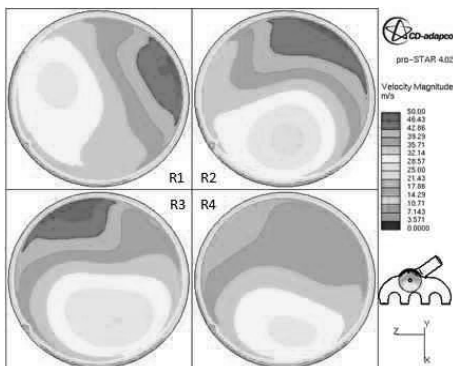


Fig. 3 Velocity Magnitude at Section 25mm inside Substrate

Fig. 4에는 매트(Mat)의 침식(Erosion)의 영향을 예측하는 수평속도를 나타낸 그림이다. 매트 입구 단면에서 회전하는 속도 성분을 나타낸 것이며 이 속도가 설계목표를 만족하도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 담체 영역은 주유동방향의 속도만이 존재하므로 수평속도는 존재하지 않아 “0”으로 나

타하며 매트(Mat) 입구 단면에 회전하는 속도 성분만이 존재함을 알 수 있다.

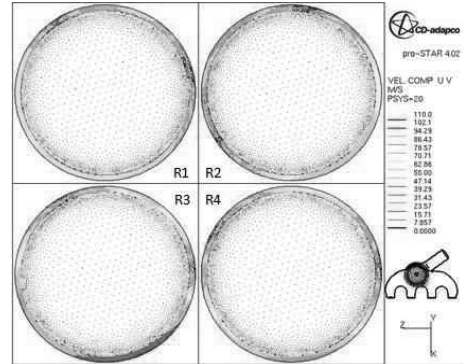


Fig. 4 Tangential Speed at front of Mat

Fig. 5는 배기 매니버터에 장착되는 산소센서 주위의 속도 분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 산소센서의 위치는 최고 유속의 지점에 가깝고, 각 런너 간 산소센서로 흐르는 유속의 편차가 작은 위치에 장착한다. 산소센서로 흐르는 최고 속도는 R1: 250m/s, R2: 198m/s, R3: 189m/s, R4: 235m/s 이며, 평균속도는 218m/s 이다. 산소센서로 흐르는 최고유속의 평균값에 비해 R1: +15%, R2: -9%, R3: -13%, R4: +8% 범위에 위치함을 알 수 있다.

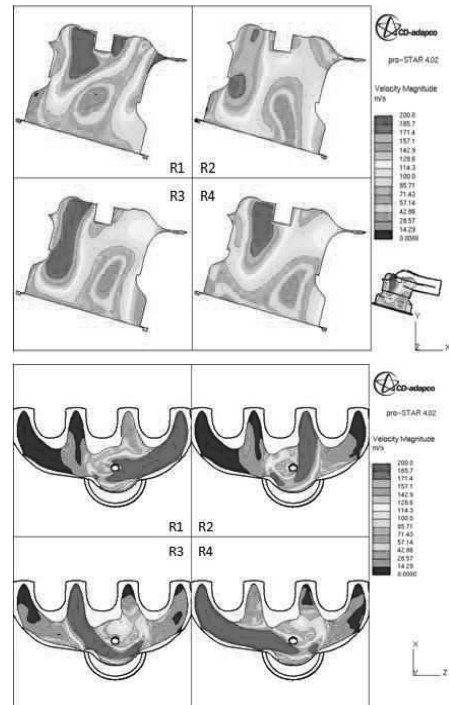


Fig. 5 Velocity Magnitude at Oxygen Sensor

Fig. 6는 배기 매니버터의 유동 영역이 아닌 고체 영역의 온도 분포해석을 수행한 결과를 나타낸다. 배기 가스가 합류되는 부분이 가장 온도가 높게 나타나며, 촉매 표면은 매트(Mat)의 열전달 계수가 작아 가장 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 데이터는 내구 해석용 격자에 매핑(Mapping)을 하여 내구 수명 예측에 활용하였다.

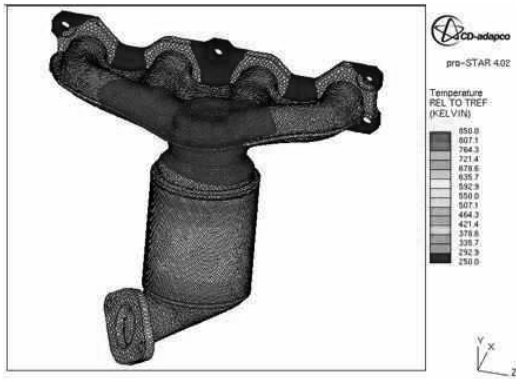


Fig. 6 Temperature Results of Analysis

3. 실험장치 및 방법

3.1 온도 측정 방법 및 결과

해석을 통하여 예측한 결과가 타당한 지를 파악하고 실제 엔진에 장착하여 배기매니버터의 압력손실과 주요 부위에서 온도를 데이터 레코더(YOKOGAWA DX2008-1-4-2)를 이용하여 측정하였다.



Fig. 7 Position of thermocouples

온도와 압력을 측정하기 위해 각각의 샘플을 제작하였으며 Fig. 7에 온도 측정을 위해 K type 열전대를 부착한 모습을

나타내었다. 각 Runner는 입구 플랜지에서 30mm 떨어진 위치, Runner의 합류부, 콜렉터(Collector), WCC의 상단과 중앙부, 주물 플랜지의 중심부에 열전대를 부착하였고 최고온도를 측정하였다. Fig. 8에 온도결과 그래프를 나타내었다. 배기 가스 최고 온도는 850℃이며, 입구 플랜지 30mm 떨어진 지점의 각 Runner 부위에서는 700℃, 합류부와 콜렉터(collector)부위에서는 760℃, WCC상단과 중앙은 700℃, 600℃, 주물플랜지 부위에서는 640℃로 측정되었다. Fig. 9에 실제 엔진에 장착되어 최고 온도까지 가열된 상태를 나타내었다.

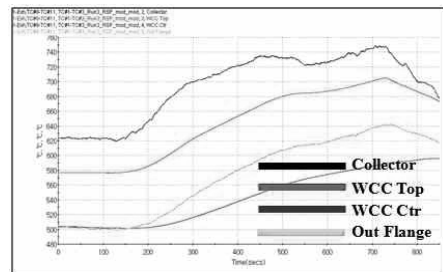
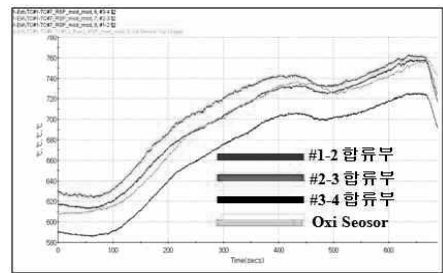
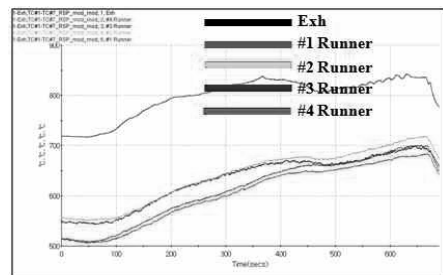


Fig. 8 Temperature Results

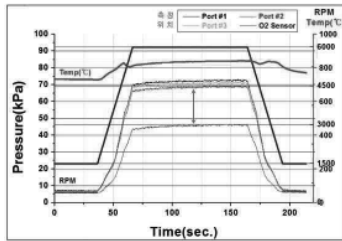


Fig. 9 Photograph of test Exhaust Maniverter



3.2 압력 측정 방법 및 결과

압력을 측정하기 Fig. 10(a)와 같이 샘플을 제작한 후 엔진에 장착하였다. 엔진을 구동하여 6000rpm을 유지하여 최대 압력을 측정하였으며 결과는 Fig.10(b)에 나타내었다. R1: 72.5kPa, R2: 69kPa, R3: 71kPa, 주물플랜지에 부착되어 있는 산소센서에서 46.3kPa로 측정되었다. 런너(Runner) 간 차이가 크지 않으며 배기 매니버터 전체의 압력손실(Pressure Drop)은 26kPa인 것으로 나타났다.



(a) (b) Fig. 10 Pressure Drop Results.

5. 결 론

배기 매니버터 개발을 위해 유속균일도, 매트 입구 수평속도, 산소센서 위치 적합성, 압력손실 등의 유동성능 지수들을 예측하여 설계자료로 활용하였으며, 실제 제품을 제작하여 온도 및 압력을 측정하였다.

유속균일도는 0.93, 0.91, 0.92, 0.94로 담체를 통과하는 배

기가스는 담체의 전체 면적을 잘 활용하여 오염물질을 정화 시키기에 충분할 것으로 판단되며, 각 런너(Runner)간 차이가 없음이 예측되었다. 담체를 보호하는 매트(Mat)의 입구 단면에 흐르는 속도는 최고속도가 103m/s 로 예측되었으며, 산소 센서는 1번 런너(Runner)로 배기가스가 유입될 경우 산소센서로 흐르는 최대속도는 평균최대속도의 15% 상승하는 것을 알 수 있었다. 또한 실제 엔진에 장착하여 온도와 압력을 측정하였으며 향후 배기 매니버터 설계 자료로 활용할 계획이다.

후 기

본 논문은 중소기업청 슈퍼컴퓨터 활용 기술 개발사업의 지원으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2002, Berkman, M.E. and Katari, A., "Transient CFD : How Valuable is it for Catalyst Design?," *SAE 2001-1-0064*.
- [2] 1993, Weltens, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H. and Rammoser, D., "Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction," *SAE 930708*.
- [3] 2006, *STAR CD Ver 4.02 User Manual*, CD Adapco CO.
- [4] 2003, 이원근, 임효재, "축매를 고려한 배압 계산에서의 인자 결정 연구," *한국자동차공학회논문집*, 제11권, pp77-82.