

〈논 문〉 SAE NO. 97370048

## 디젤엔진의 공기청정기내 압력 및 유동분포에 관한 연구

### Study of Pressure and Flow in the Air-Cleaner of Commercial Vehicle

류 명 석\*, 구 영 곤\*, 김 경 훈\*\*, 맹 주 성\*\*\*  
M. S. Lyu, Y. G. Ku, K. H. Kim, J. S. Maeng

#### ABSTRACT

The importance of intake system can not be overstressed in the recent heavy duty commercial vehicle design. The basic requirements of intake system are to have less flow resistance and better air cleaning performance which have direct effects on the performance and service life of engine. In order to improve the performance of engine intake system, the flow phenomena in the intake system should be fully understood. With readily available CFD code, the numerical analysis becomes the more reliable tools for flow optimization in recent design work.

In this research, flow field in the intake system was analyzed by STAR-CD, the 3-D computational fluid dynamics code. Especially, the flow inside of air cleaner was thoroughly analyzed. Pressure distribution and velocity profile in the air cleaner and intake duct was obtained. Having the dust separated from incoming air at the expense of less pressure drop is the ultimate goal for the research.

주요기술용어 : Engine Intake System(엔진 흡기시스템), Air-Cleaner(공기청정기), Pressure Drop (압력강하)

#### 1. 서 론

엔진 흡기시스템은 엔진에 흡입되는 공기가 통과하는 부분을 가리키며 보통 흡기관(Intake Duct), 공기청정기(Air Cleaner), 흡기다기관

(Intake Manifold) 및 신축연결관(Flexible Hose) 등으로 구성되어 있다. 흡기시스템의 설계 목표로서는 공기 흡입저항으로 인한 압력강하를 최소로 줄이고 또한 공기중의 먼지 등의 고형입자 물질 등을 분리해 제거시키는 공기 청정 기능을 최대한으로 높이는 것이라 할 수 있다.<sup>1)</sup> 공기 흡입 저항의 증가는 엔진 흡기 과정에서 연소실내의 공기 충전 효율을 떨어뜨리고 엔진 출력의 저하를

\* 정회원, 고등기술 연구원 대우자동차 기술연구소  
\*\* 대우상용차  
\*\*\* 한양대학교 기계공학과

가져온다. 또한, 트럭과 같은 상용차는 열악한 주위 운전 환경에서 사용되는 경우가 많기 때문에 공기중의 먼지나 모래 등을 걸러내는 기능이 필요하다. 공기중의 먼지 모래가 그대로 엔진 실린더 내부로 유입될 경우 엔진의 피스톤, 라이너 등의 습동 부위의 조기 마모를 촉진하므로 엔진의 수명을 단축시킨다. 트럭 엔진의 흡기 시스템의 최적 설계를 위해서는 흡기 시스템 내부의 유로를 원활하게 하여 유동 저항을 낮추고 공기 청정기의 입자 제거 성능과 내구성을 동시에 고려하며 더 나아가서는 시스템 전체의 저소음화 설계가 필수적이다. 따라서 흡기 시스템의 최적 설계를 위해서는 흡기 시스템내의 공기 유동 현상을 정확히 파악하여 이해하는 것이 중요하다. 특히 앞에서 언급한 바와같이 흡입효율 및 내구성 측면에서 볼때 흡기시스템내 에어크리너는 가장 중요한 요소이다. 즉 에어크리너내 유동현상을 파악하여 내부구조를 개선함으로써 압력강하 및 내구성을 향상시킬 수 있다.

실험적인 방법은 실험 장비 구축과 실험 부품 제작에 많은 노력을 요하는 반면, 수치 해석은 최근 신뢰성 있는 범용코드를 사용하여 비교적 단시간내 유동현상을 분석 예측할 수 있다. 특히 자동차 Car-Program의 개발기간을 단축하기 위한 해석방법으로 단기간 내 다양한 경우의 수치 연구가 수행되고 있다. 그러나 공기 청정기 및 흡기 시스템 내부 유동 현상이 간단하지 않기 때문에 수치 모델에 의한 비교 검증을 위해 실험을 통한 접근 방법도 동시에 수행하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 유체 해석 범용코드인 STAR-CD를 사용하여 흡기시스템내 3차원 유동 현상을 고찰하고자 한다.

## 2. 수치 해석 방법

흡기시스템에 대한 수치 해석으로 현재 해석 프로그램으로 많이 사용되고 있는 STAR-CD를 사용하였다. 해석에 필요한 경계 조건은 실험 장치를 구성하여 입출구 단면에서의 3차원 유속을 측정하여 얻었다. 시스템은 크게 공기 흡입부, 흡기관과 공기청정기로 나누어지며 시스템에 대

한 3차원 모델링은 전용 코드인 ICEM을 사용하였다. 전체 시스템의 Mesh 수는 약 3만개였다. 해석은 현행 사양에 대한 분석과 이를 개선하기 위해 각부의 형상을 바꾸어서 그 영향을 비교 분석하였다. 개선검토는 공기 청정기내의 튜브 형상, Guide Vane 형상에 대해서 이루어 졌으며 각각의 경우에 대하여 내부 유속, 압력 분포, 통과 유량에 대한 비교 검토가 이루어 졌다.

실차 CATIA 데이터를 격자생성 전용코드인 ICEM에서 정리한 후 모델링을 하였으며, 앞에서 언급한 바와 같이 유동해석을 위해 범용코드인 STAR-CD를 사용하였다<sup>2)</sup>. CATIA는 자동차 회사에서 많이 쓰는 3차원 CAD 프로그램이다. 격자형성을 위한 ICEM과 열유동 해석을 위한 STAR-CD의 특징은 다음과 같다.

### ICEM(격자형성)

- Multi-Block 3D Volume or Surface
- Directly Operates on CAD Surface Geometry
- Grid is Not Dictated by CAD Surface Geometry Structure
- Automated Analysis of Multi-Block Connectivity and Topology
- Accuracy to Support Navier Stokes Analysis
- Global Grid Quality Checks, Grid Post Processing
- Boundary Conditions Can be Set in a 3D Environmental

### STAR-CD(유동 해석)

- FVM(Finite Volume Method)
- Body Fitted Coordinated System
- Non-staggered & Unstructured Mesh
- K-ε 난류 모델, 벽면에서 벽함수
- Simple Algorithm
- Upwind Convective Scheme

흡기시스템내 유동해석을 하기 위해서는, 먼저 CAD요원이 CATIA 데이터에서 3차원 선도(Wire Frame)와 표면데이터(Surface Data)를 만들며, 이를 ICEM에서 보조면(Surface)와 영역(Domain)을 만들어 격자형성을 한 후, 이 격

자모델을 받아 STAR-CD를 이용 열유동 해석을 한다. 본 연구에서는 CATIA 데이터는 대우 중공업 상용차 부문 사시 설계실에서 제공받았으며, 격자형성과 유동해석은 본원에서 실시하였다. 공기청정기내는 복잡한 3차원 형상이었기 때문에 격자형성에 2개월의 시간이 소요되었다.

해석에 사용된 Cell수는 29236개이며, 흡기시스템은 크게 덕트와 공기청정기로 구성되어 있다. 공기청정기 내부 필터요소(Filter Element)는 다공질매질(Porous Material)로 처리하였으며 다음과 같이 압력과 저항력 사이에 균형(Balance)을 이루게 하였다.

$$-K_i u_i = \frac{\partial p}{\partial \epsilon_i} \quad (1)$$

( $u_i$ : 평균속도,  $p$ : 압력,  $\epsilon_i$ : 변위,  $K_i$ : 상수)

수치계산은 IRIS에서 10sec/iteration의 약 500번 정도의 반복 계산시간이 소요되었으며, 수렴조건은 6개의 지배 방정식인 연속식, 3개의 운동량(U, V, W)과 2개의 난류량( $k$ ,  $\epsilon$ ) 방정식에 대해 가장 큰 정규화된 잉여량(Normalized Residual)이 0.1% 이하로 하고, 이완계수는 속도 및 난류량에 대해 0.3, 압력에 대해 0.2로 하였다.

STAR-CD의 흡기시스템내 유동해석에 사용된 지배방정식은 비압축성 3차원 Navier-Stokes 방정식에 표준  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였다.

### 3. 해석결과

본연구에서는 현사양 공기청정기의 내벽(Inner Tube), Guide Vane(Guide Vane) 및 입구형상의 변화에 따른 압력 및 유동분포를 고찰하였다. [Table 1]은 해석상 중요한 경우(Case)를 요약하여 보았다.

현사양(Case 1)에 대하여 내벽을 86%(Case 3), 92%(Case 5) 제거 해보았으며, Guide Vane의 유무(Case 2, Case 4) 및 입구형상의 확장(Case 6, Case 7)한 경우에 대하여 수치해석을 하였다. 각각의 경우(Case)에 대한 유량 및 압력 분포를 고찰하였다[Table 2]. 현사양(Case 1)의 경우 전체 80% 정도의 압력 강하가 공기청정기내에 일어난다. 본 연구에서 수행한 6가지의 경우 모두가 압력 강하가 65~75% 정도 일어난다.

Guide Vane(Guide Vane), 내벽(Inner Tube) 및 입구 형상을 변화시킨[Case 2~7] 경우 전체적으로 압력 강하 값이 감소되었다. Case 2의 Guide Vane 제거시 압력 강하의 강하율이 22% 정도 생기며, 내벽 제거시(Case 3)는 32%로 더욱 크다. 그러나 내벽 제거시는 Guide Vane 유무에 크게 영향을 받지 않는다(Case 4, Table 2). 즉 내벽을 제거하면 할수록 압력 강하 감소율은 커진다(Case 5, Table 3). Table 1의 Case 6에서 보듯이 현사양에 공기청정기 유입 면적을 변화시키면 Case 3와 같은 효과를 얻을 수 있

Table 1 Specifications

	Inner Tube	Guide Vane	Modification of the inlet Area
Case 1	Current Spec.(360 round)	○	×
Case 2	Current Spec.	×	×
Case 3	50° round	○	×
Case 4	50° round	×	×
Case 5	30° round	○	×
Case 6	Current Spec.	○	○
Case 7	50° round	○	○
Case 8 (실험)	80° round(Inner Tube Tilt)	○	×

Table 2 Flow Rate and Pressure Drop

No.	Flow Rate thru Air Filter [%]			$\Delta P_{a/c}$ [mmAq]	$\Delta P_{sys}$ [mmAq]	Inlet Flow Distribution [%]		
	Inlet Side	Middle	Out Side			CCW	CW	Axial
Case 1	10	37	53	304.9	383.5	60.9	3.8	35.3
Case 2	11	37	52	223.1	301.8	44.9	28.1	27.0
Case 3	20	30	50	183.6	262.3	53.0	25.4	21.6
Case 4	19	30	51	182.8	261.5	52.6	25.0	22.4
Case 5	21	29	50	142.8	221.5	47.0	36.9	16.1
Case 6	20	31	49	184.6	264.0	60.8	3.3	35.9
Case 7	26	27	47	169.9	249.3	63.0	18.9	18.1

다. Element 활용도를 알기위해 통과 유량을 세 부분으로 나누어 해석하면 내벽에 의해 입구 부분의 유량이 상대적으로 작다. 즉 이로인해 Element 사용이 불균일하므로 Element를 입구 부분과 중간 부분만이라도 균일하게 사용하도록 하였다[Case 3, 4, 5, 7]. 일반적으로 Case 1에 비해 입구 사용율이 향상되나, 현사양에 Guide Vane 제거시(Case 2)는 거의 변화가 없다. Case 3, 5는 내벽을 86%, 92% 제거한 경우 제거율이 커짐에 따라 현사양에 비해 입구 Element 통과율이 20% 까지 커진다. 그러나 Case 4(Case 3에 Guide Vane 제거) 역시 Case 3에 비해 변화가 없다. 입구면적을 향상시켰을때(Case 5, 6)는 입구와 중간부분 통과유량이 거의 비슷해진다. Element 통과 유량과 압력 강하의 2가지 측면에서 내벽을 제거하고 입구 형상을 넓힌 Case 7은 좋은 결과를 보인다.

Fig.1은 엔진 흡기시스템내 압력분포를 수치 해석한 결과로 덕트내에서는 거의 변화가 없으며, 유입부 곡관으로부터 변화가 있으며, 공기청정기 전후에서 대부분 압력 강하 변화가 일어난다. 따라서 현사양 공기청정기내 압력 강하가 전체의 80%로 가장 큰 요소이므로 형상 변화에 따른 공기청정기내 유동현상을 우선적으로 해석할 필요가 있다. 즉 제시한 개선안은 공기청정기내 압력 강하 값의 감소는 유로의 개선에 기인된다. 현사양(Case 1)을 분석해 보면 Blower에 의해 흡입되는 불순물 및 공기는 공기청정기로 시계방향, 반시계 방향 및 축방향의 세부분으로

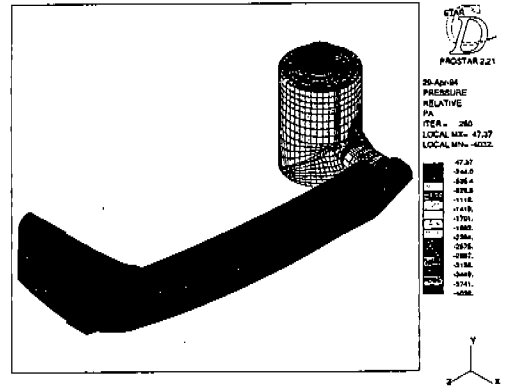


Fig.1 Pressure Distribution at the Inlet of the Current Aircleaner(Case 1)

나누어지며 유입된다. 유입직전의 흡기관(Intake Duct)의 곡률에 의한 원심력 효과에 의해 공기청정기 내부에서 시계 방향으로의 강한 유속이 생기며 출구방향으로의 나선형 회전 유동을 보인다.

Fig.2, 3은 흐름방향 각 위치에서 회전 유동성분을 보여준다. 또한 내벽과 외벽 사이에 설치된 Guide Vane에 의해 출구 방향으로의 나선형 유동성분이 축진되며(Fig.4), 입구부분의 내벽은 입구부분의 Element로 유입되는 공기의 양을 감소시키고 있다. 공기청정기내로 유입된 불순물은 공기흐름에 비해 외벽근처에서 나선형 회전을 한다(Fig.5). 입구 Inner Tube 끝부분에서 대부분 공기는 Element로 유입되며, Inner Tube는 입구에서의 공기 및 불순물로부터 Element를 보호하는 역할을 한다. 그러나 이로 인해 앞의 결과에

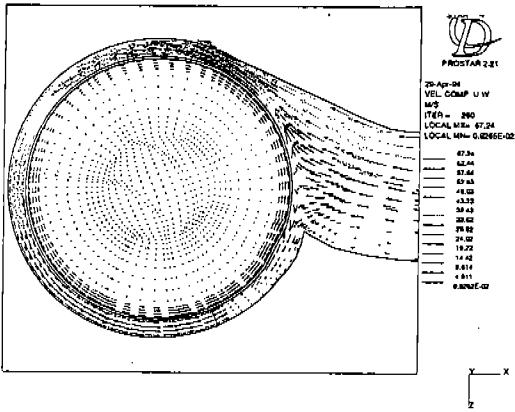


Fig.2 Velocity Distribution at the Inlet of the Current Aircleaner (Case 1)

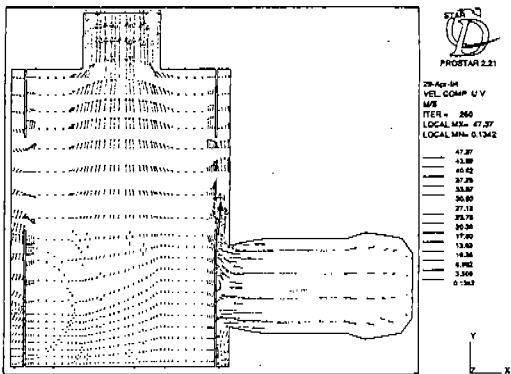


Fig.3 Velocity Distribution at the Vertical Section of the Inlet of the Current Aircleaner (Case 1)

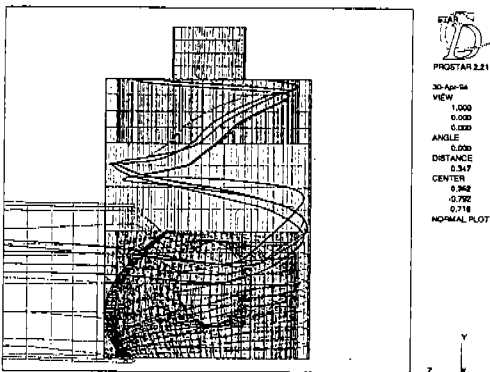


Fig.4 Representative Air Trace of the Current Aircleaner (Case 1)

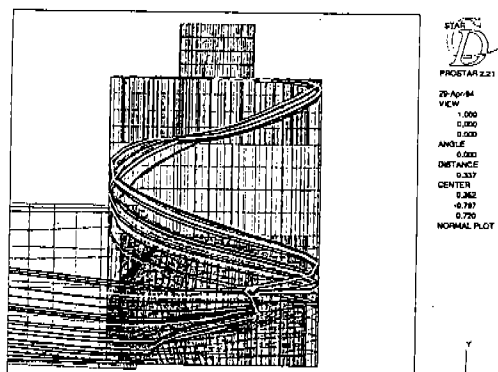
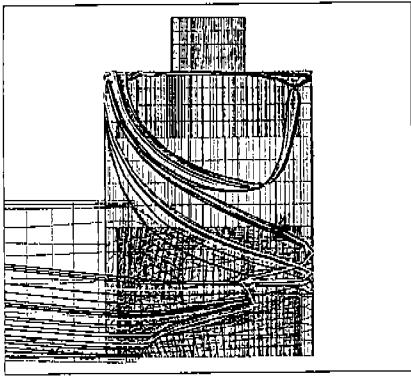


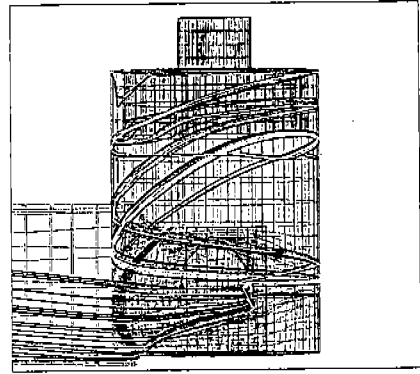
Fig.5 Representative Dust Trajectory in the Aircleaner (Case 1)

서 보듯이 불균일하게 Element를 사용하게 된다. 공기청정기로 유입되는 유체는 크게 공기와 불순물 입자로 나눌 수 있다. 불순물은 공기와의 밀도 차이 정도로 분류될 수 있다. 유입된 불순물은 일반적으로 Filter Element에 여과되며 밀도가 큰 입자 일수록 큰 원심력을 가진다. 공기와 불순물의 밀도차에 의하여 불순물 입자 궤도가 상대적으로 공기청정기 외벽을 향하고 있다. 큰밀도를 가진 불순물은 출구 내벽 (Inner Tube) 과 외벽 사이로 모이게 한다. 즉, 외벽 방향으로 불순물을 분리시켜 출구에 있는 내벽과 외벽 사이에 머물게 하여 출구 Inner tube는 "Dust Trap" 역할을 한다. Case 2는 현사양에 Guide Vane를 제거한 후 공기 및 불순물 입자 궤적을 고찰하였다. 그 결과 공기청정기내 유입부분 반 시계방향 유속 및 압력강하율이 감소하였다 (Table 2). 그러나 불순물 입자 (공기보다 밀도가 큰 입자)가 출구 방향에서 Dust Trap 바깥부분까지의 중간 영역까지 크게 재순환 영역을 형성하고 있다 (Fig.6). 이는 비록 초기 압력강하의 감소가 있어도 불순물 제거상의 문제로 인해 내구성 문제가 생길 수 있다는 것을 예시한다. Case 3는 내벽을 86%를 제거한 경우의 공기흐름, 압력분포를 나타낸다. 이 경우 초기 부압이 현사양 (Case 1)에 비해 120mmAq가 감소되었다 (Table 2). 즉 입구 내벽을 일부 제거하여 공기청정기 유입부에서 공기 유동이 원활해지며 (Fig.7), Ele-



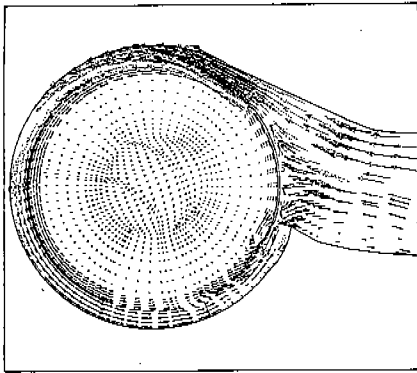
STAR 21  
PROSTAR 2.21  
20-Apr-94  
VIEW  
1.000  
0.000  
0.000  
ANGLE  
0.000  
DISTANCE  
0.243  
CENTER  
0.362  
-0.788  
0.700  
NORMAL PLOT

Fig.6 Representative Dust Trajectory in the Aircleaner (Case 2)



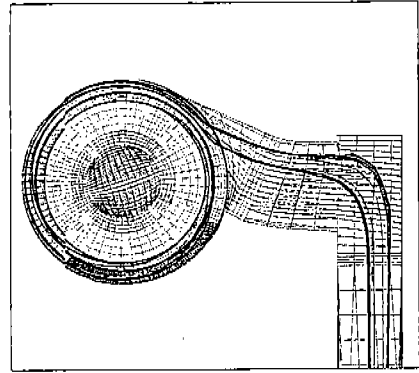
STAR 21  
PROSTAR 2.21  
20-Apr-94  
VIEW  
1.000  
0.000  
0.001  
ANGLE  
-0.076  
DISTANCE  
0.243  
CENTER  
0.338  
-0.788  
0.718  
NORMAL PLOT

Fig.8 Representative Dust Trajectory in the Aircleaner (Case 3)



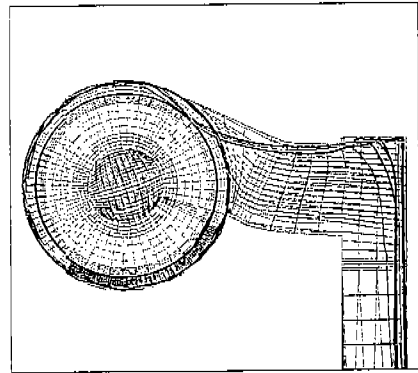
STAR 21  
PROSTAR 2.21  
29-Apr-92  
VIEW: COMP U W  
WD  
ITER= 248  
LOCAL MD= 48.86  
LOCAL MW= 0.1004E-01  
44.86  
45.61  
46.14  
46.81  
33.47  
30.13  
28.78  
27.48  
26.06  
18.27  
13.88  
10.06  
6.702  
3.268  
0.1004E-01

Fig.7 Velocity distribution at the Inlet of the Modified Aircleaner (Case 3)



STAR 21  
PROSTAR 2.21  
01-May-94  
VIEW  
0.000  
1.000  
0.000  
ANGLE  
0.000  
DISTANCE  
0.242  
CENTER  
0.408  
-0.800  
0.713  
NORMAL PLOT

(a) Air



STAR 21  
PROSTAR 2.21  
01-May-94  
VIEW  
0.000  
1.000  
0.000  
ANGLE  
0.000  
DISTANCE  
0.405  
-0.800  
0.721  
NORMAL PLOT

(b) Water

Fig.9 Representative Stream Line in the Intake Flow

ment를 통과하는 유량분배가 현사양에 비해 균 등해진다(Table 1). Fig.8은 불순물 입자 경로를 보여주며 현사양에 비해 공기청정기내에서는 두번 회전후 출구방향의 Dust Trap에 모인다. Case 4는 내벽의 86%를 제거하고 Guide Vane 을 없앤 경우인데 전반적인 유동 현상은 Case 3 와 비슷하며, 압력강하 및 Element 통과 유량 분배 역시 Case 3와 거의 같다. 현사양에 Guide Vane을 제거한 Case 2와는 상이하게 불순물 입자 궤도는 출구방향 내벽 방향으로 보인다. 즉 내벽을 제거한 경우는 Guide Vane에 유무에 무관하게 출구 방향의 내외벽 사이에 정의된 'Dust Trap'에 불순물의 재순환 영역이 생긴다.

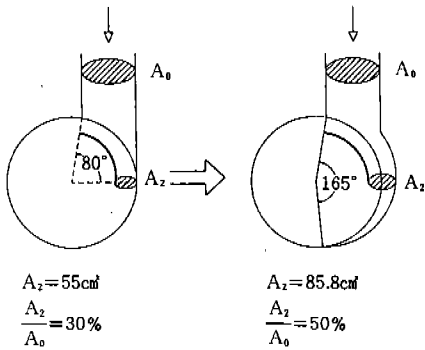


Fig.10 Modification of Aircleaner Inlet Area (Case 8)

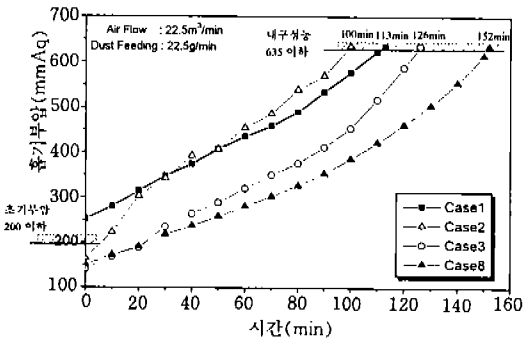


Fig.11 Comparisons of the Durability Test for Each Samples

내벽 제거율에 따른 효과를 보기위해 Case 5는 내벽을 92%까지 제거하였으며, 이 경우 역시 Table 2에 보면 현상양 및 Case 3에 비해 압력강하가 감소하며 Element 통과 유량 배분이 좋아진다. 흡기시스템의 불순물 제거는 공기청정기 이외에 흡기관에서 Elbow 및 유입부의 Cab 부위에서도 여과된다. 특히 수분과 같은 입자는 흡기 덕트 Elbow에서 제거분리되도록 하였다. Fig.9와 같이 밀도가 무거운 수분입자는 공기 흐름에 비해 원심력에 의해 외벽 가까이로 흘러 Drain Cock에서 여과된다. Table 2에서 보면 Case 7이 가장 좋은 결과를 나타낸다. 본연구에서는 입구 형상을 넓히는 방법대신 내벽을 Fig.10와 같이 경사지게 위치시키는 방법을 제안하였으며 이

를 실험한 결과 초기부압(압력강하)이 유사하게 감소되었으며, 내구성시험도 우수하게 나타났다 (Fig.11). 향후 이에 대한 수치해석이 수행되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본연구의 현상양 및 개선안에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 흡기시스템의 흡입 공기에 대한 유동저항은 전체의 70~80% 정도가 공기청정기에서 발생된다(Table 3). 따라서 대부분의 유로 저항 개선 연구는 공기청정기에 집중되었다.
- 2) 공기청정기내에서 흡입된 공기는 3차원 나선형 회전유동을 하며 출구방향으로 진행된다. 입구면적, 내벽(Inner Tube), Guide Vane 등이 이에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 유로저항을 줄이기 위하여 내벽에 대한 형상 개선이 이루어진 공기청정기에 대한 개선안이 제시되었다. 또한 공기청정기의 입구 단면적을 크게하고 입구측 Housing벽면과 Deflector 사이의 면적을 확대시키는 것이 유동저항을 줄이는 데 효과적일 것으로 예측된다.

#### 후 기

본 논문은 고등기술연구원 자동차기술실의 과제명 “엔진 흡기시스템내 최적설계”의 일부이다.

#### 참 고 문 헌

1. John J. Silvestri & Thomas Morel, “Study of intake System Wave Dynamics and Acoustics by Simulation and Experiment”, SAE Paper No. 940206, 1994.
2. Myung Seok Lyu et al., Numerical & Experimental study of Three Dimensional Flow in engine Room, SAE Paper No. 960270, 1996.