



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2011 년 2월

석사학위 논문

PIV와 CFD를 이용한 디젤엔진용
매연여과장치 내부유동 특성 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

정 찬 규

PIV와 CFD를 이용한 디젤엔진용 매연여과장치 내부유동 특성 연구

A Study on the Characteristic of the
Diesel engine DPF for CFD & PIV

2011년 2월 24일

조선대학교 대학원

기계공학과

정찬규

PIV와 CFD를 이용한 디젤엔진용 매연여과장치 내부유동 특성 연구

A Study on the Characteristic of the
Diesel engine DPF for CFD & PIV

지도교수 이 행 남

이 논문을 기계공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2011년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

정 찬 규

정 찬 규의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 공학박사 박 길 문 ㉠

위 원 조선대학교 교수 공학박사 한 길 영 ㉠

위 원 조선대학교 교수 공학박사 이 행 남 ㉠

2011년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLE	iv
LIST OF FIGURES	v
NOMENCLATURE	vi
ABSTRACT	vii
제 1 장 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
제 2 장 PIV 실험	3
1. PIV 실험장치 및 계측	3
1-1. 속도계측 원리	3
2. PIV 종류 및 원리	5
2-1. 개별입자추적 PIV와 입자분포상관 PIV	5
2-2. 조명부호 PIV	6
2-3. 개별 도심좌표 PIV	7
2-4. 자기상관 PIV	8
2-5. 상호상관 PIV	9
3. PIV 실험장치	11
3-1. 실험장치 계략도 및 명칭	11

3-2. PIV 계측 실험	13
4. 결론	16
제 3 장 PIV와 CFD 연관성	17
1. 서론	17
제 4 장 CFD 해석	19
1. 전산유체역학(C.F.D)의 개요	19
2. 전산유체역학의 적용분야	21
3. C.F.D 종류 및 특징	21
3-1. CFX	21
3-2. STAR-CD	22
3-3. PHOENICS	22
3-4. FIDAP	22
3-5. ICEPAK	23
3-6. FIELDVIE	23
4. C.F.D S/W의 특징	23
5. C.F.D 해석 조건	24
5-1. 경계 조건	24
5-2. 해석 조건	27
6. C.F.D 속도, 압력, 난류강도 분석	30
6-1. 유량과 속도 데이터	30

6-2. 압력 데이터	39
6-3. 난류강도 데이터	47
제 5 장 결론	55

LIST OF TABLE

Table 1. Part Names

Table 2. Specification of PIV system

Table 3. Specification of CFD system

Table 4. Representing the degree of cross-sectional area changes

LIST OF FIGURES

- Fig 1. An outline detection of particle streakline
- Fig 2. The principle of optical Fourier transform
- Fig 3. The notion of cross-correlation function
- Fig 4. Pulse control of the AOM
- Fig 5. Drawing a simple duct PIV experiments
- Fig 6. Drawing a simple duct PIV experiments
- Fig 7. PIV experiment and the PIV device pictures
- Fig 8. Brief description of the PIV experiment
- Fig 9. Velocity Distributions
- Fig 10. Graph, the correlation between PIV and CFD
- Fig 11. Using CFD mesh grid
- Fig 12. Changes in each case within the DPF
- Fig 13. The DPF inside plan
- Fig 14. Graph comparing the inlet and outlet flow
- Fig 15. Velocity graph
- Fig 16. 10 ~ 60mm streamlines of the velocity vector
- Fig 17. Pressure graph
- Fig 18. 10 ~ 60mm figure illustrates the pressure contours
- Fig 19. Turbulence Kinetic Energy graph
- Fig 20. 10 ~ 60mm figure illustrates the Turbulence Kinetic Energy contours

NOMENCLATURE

Tu	: Turbulence Kinetic Energy
V	: Velocity
f	: Frequency of oscillation
g	: Gravitation
Le	: Entrance length
l	: Length of test section
p	: Pressure
Re	: Reynolds number $(= D_h \cdot \bar{u}_m / \nu)$
t	: Time

ABSTRACT

A Study on the Characteristic of the Diesel engine DPF for CFD & PIV

Jung Chan Gyu

Advisor : Prof. Lee Haeng-Nam Ph.D.

Department of Mechanic,

Graduate School of Chosun University

This experiment, DPF (Diesel Particulate Filter) was carried out to find out the changes in flow characteristics of length inside the Inlet pipe. First, DPF is collected with filter from diesel engine which produces particulate matter. Then, the particulate matters are periodically heated in high temperatures until more than 80% of the matters are decreased in amount. During heating, the longer the DPF stays inside the Inlet Pipe, the more the amount of the particle decreased in amount. So, just like finding the flow characteristics, finding the changes in length of Inlet Pipe with internal flow characteristics are also crucial. To carry out the experiment with more accuracy, we do PIV test to find out the internal flow characteristic.

- (1) The experimental value of fluid flow determined by the PIV test and the experimental value of the CFD interpretation was similar. The outlet of CFD was atmospheric pressure, however, there was approximately 13 per cent of deviation as the PIV test was performed using water instead of air. The CFD interpretation was performed on the grounds that the correlation of

these findings was statistically significant

- (2) If the average velocity of flow is stable when the speed increases turbulence generated inside the DPF to meet the basic criteria of the InletPipe CASE1 a 10mm CASE of the points that satisfy the conditions are CASE.
- (3) The increased pressure in the interior of DPF staying time of particles is increased. For high-pressure CASE2. CASE 20mm of the length of the Inlet Pipe point average can be seen that the value is stable and high pressure.
- (4) DPF from inside and a lot of contact with the platinum catalyst in order to increase the exhaust filtration caused a lot of turbulence models are suitable. Inlet Pipe 20mm of the length of the case of CASE2 CASE compared with the other shows high turbulence intensity. This was an increase in velocity. CASE1 of the model, stable and high pressure to the combination of data analysis CASE2 CASE2 Inlet Pipe of a length of 20mm, the best diet that will show the exhaust filtration.

제 1 장 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

통계청의 자료에 따르면 2011년 우리나라의 총 가구 수는 1750만, 자동차 등록대수는 1826만대로(2005년 1500만대) 1가구당 2차량 보유시대이다.¹⁾ 자동차 1대당 인구수는 2.77명으로 2010년 12월말과 비교해 약 26만대 증가했으며 이는 작년 동기 대비 증가대수 약 24만대에 비해 8.3%가 증가한 것으로 나타났다.²⁾ 이와 같이 자동차 사용량이 증가함에 따라 발생하는 배출가스로 인한 대기오염이 심각해지고 있다. 이를 방지하고자 배출가스 온도가 높은 상용차의 경우 미국과 일본은 US2007 과 Japan 2005 규제에 따라 매연여과장치(DPF : Diesel Particle Filter)가 장착된 차량이 판매되고 있다. 향후 EURO-5 규제가 본격적으로 적용되는 2011년부터는 각 자동차 회사의 전략에 따라 매연여과장치나 Urea-SCR 기술이 선택적으로 사용될 것으로 예상된다.³⁾

디젤 엔진의 경우 엔진시동 후 촉매가 활성화되기 이전까지 짧은 시간 이내에 배출가스가 80%이상이 정상화되지 않고 바로 배출되어 지기 때문에 촉매변화기 내의 배기 유동 및 활성화시간(Light-off time)예측은 중요하다. 매연여과장치는 전면에서의 불균일한 배기가스 유동 분포를 개선함으로써 촉매 활성화 시간을 단축시키고 배기가스의 DPF 내부의 잔류시간을 증가시켜 촉매의 수명 및 효율을 증가시킬 수 있다. DPF 전면에서의 배기가스 유동분포에 영향을 주는 인자들은 Inlet pipe 지름과 길이, 확대화의 축 방향 길이 및 형상, 단면지름, Outlet pipe의 형상, 배기가스 유동속도 등으로 알려져 있다.⁴⁻⁵⁾ 디젤엔진의 배기가스에는 환경을 심각하게 오염시키는 입자상 물질인 PM(Particulate Matters)과 질소산화물 (NOx)을 많이 포함하고 있기 때문에, 이에 관한 유해물질 저감연구가 활발히 진행되고 있다. PM을 효율적으로 저감할 수 있는 매연여과장치 DPF는 디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질을 필터로 포집한 후, 포집된 PM을 고온에서 주기적으로 연소와 재생과정을 반복해야 한다. DPF에 대한 과거의 연구는 크게 필터와 촉매를 연구 하였다. 1세대 DPF의 기술(강제 재생 방식) 필터내의 PM을 일정량 포집하고 이를 전기 히터나 버너 등을 이용하여 강제적으로 태우는 방식으

로 구조가 복잡하고, 고장이 잦은 단점이 있다. 이 전기 히터 방식은 미국의 Donaldson사에서 최초로 시작되었다.⁶⁾

LEE⁷⁾은 DPF 채널을 지나는 공기 유동 특성에 대하여 연구하였다, 또한 KWON⁸⁾은 미세입자 배출특성에 영향을 미치는 재생의 영향을 파악하기 위하여 재생조건에서의 미세입자 개수 및 입경특성을 조사하였다. PIV 실험에서는 LEE⁹⁾은 PIV를 이용한 순간속도장 측정에 관한 기초 연구를 행하였고 LEE¹⁰⁾는 단순물체의 후류에 대해서 이미지 영상기법을 사용하여 연구하였다. 분기 사각덕트 내부에서 PIV계측과 CFD를 이용하여 분지부에서의 축방향속도와 2차유동분포를 측정하여 층류 정상유동의 이론해와 PIV 계측 실험 결과로부터 얻어진 속도 분포, 운동 에너지 및 와류분포등을 유동특성에 대하여 LEE¹¹⁻¹³⁾ 등이 연구를 하였다.

DPF는 PM을 80% 이상 저감할 수 있어 성능측면에서 아주 우수하나, 비제어 재생(uncontrolled regeneration)으로 인한 내구성과 경제성이 실용화의 장애 요인으로 작용하고 있다.

본 논문에서는 DPF의 매연여과의 효율을 높이기 위하여 내부의 형상(Inlet pipe)에 따라 변하는 매연의 유동특성을 PIV 실험과 CFD 해석을 통하여 내부의 유속, 압력, 난류강도를 분석하여 DPF 내부의 유동특성을 분석하였다.

제 2 장 PIV 실험

1. PIV 실험 장치 및 계측

1.1 속도계측 원리

최근 들어, 컴퓨터와 전자산업의 발달과 화상처리기술의 도입으로 유동입자들의 변위정보를 담고 있는 유동화상(particle image)을 이용한 속도장 측정기법(Particle Image Velocimetry), PIV 가 개발되어 정성적인 순간 유동정보 뿐만 아니라 정량적인 속도장 정보를 제공하고 있다. 현재 이와 같은 PIV 속도장 측정기술은 매우 빠른 속도로 발전하여 이제는 복잡한 비정상(unsteady), 난류유동(turbulent flow)의 유동구조를 높은 공간분해능으로 정확히 해석하는 것도 가능하게 되었다.

속도장 측정기법의 기본원리는 시간간격 동안 움직인 미세한 입자들의 변위정보를 영상입력장치에 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위를 계측하고 시간간격으로 나누어 줌으로써 속도벡터를 추출하는 것이다.

화상처리를 이용한 속도장 측정기법의 기본원리는 시간간격 동안 유체와 함께 움직인 입자들의 변위 정보를 CCD 카메라와 같은 영상입력장치에 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위를 계측하고 시간간격으로 나누어 줌으로써 속도벡터를 추출하는 것이다.

속도장 측정은 입자영상의 취득, 속도벡터의 추출, 그리고 추출한 속도장 결과를 나타내는 3단계 과정으로 이루어진다. 입자영상을 취득하는 과정에서는 적절한 tracer 입자를 선정하고, 실린더형 렌즈를 이용하여 레이저 평면광을 만들어 측정하고자 하는 유동평면을 조사하게 한 후, CCD 카메라와 같은 영상입력장치를 평면광에 수직으로 설치하여 입자영상을 취득하게 된다. 입자영상 취득시 tracer 입자의 크기와 concentration, 카메라 노출시간, 시간간격 등은 실험조건 및 사용하고자 하는 PIV 속도장 측정시스템에 따라 다르게 설정하여야 한다.

취득한 입자영상으로부터 속도벡터를 추출하는 과정은 입자변위를 어떻게 구하느냐 따라 여러 가지 방법이 사용되고 있으며, 속도벡터 추출 algorithm도 다양하다. PIV

속도장 측정기법을 시간과 공간에 따라 급격하게 변화하는 난류유동에 적용하기 위해서는 측정오차가 적고 효율적인 속도취득 algorithm의 개발과 더불어 난류 통계치를 구하는데 들어가는 계산시간을 줄이려는 노력이 필요하다. 그리고 속도장 측정결과에 가끔 들어있는 error vector 제거 routine도 속도 벡터 추출과정에 포함된다.

속도장 측정 결과를 나타내는 후처리(post processing) 과정에서는 순간 속도장 결과로부터 와도(vorticity)나 rate of strain을 구하거나, 많은 순간 속도장 결과들을 ensemble 평균하여 난류강도, Reynolds shear stress, 난류 운동에너지와 같은 다양한 물리량을 구하기도 한다. 이 밖에도 유체 유동에 관한 지배 방정식들을 활용하여 dissipation rate, 압력의 공간분포 등을 구할 수도 있다.

미국과 일본과 같은 선진국에서는 속도장 측정기법에 관한 연구개발을 한지 역사는 오래 되지 않지만 비교적 짧은 역사 속에서도 많은 진전을 이루었다. 초기에는 주로 저속의 액체유동에 대해 film camera를 이용한 광학적 속도장 측정기법을 적용하여 유동구조를 해석하였다. 그 동안 hardware 측면에서 고해상도 CCD 카메라와 PIV용 전용 펄스레이저를 도입함으로써 측정 가능한 속도범위를 크게 확대시켰으며, software 측면에서 효율적인 속도벡터 추출 algorithm 과 pre-& post processing 과정 개선에 전 세계적으로 많은 노력을 기울여 왔다. 최근에는 속도장 측정의 정확도와 dynamic range 가 크게 향상되고 고속의 난류유동 계측도 가능하게 되었다. 또한 Stereoscopic PIV 나 Holographic PIV 같은 3차원 속도장 측정기법에 대한 연구도 활발하다.

이러한 화상처리를 이용한 PIV 속도장 측정기법은 점점 발달되어 가는 컴퓨터 및 화상처리 기술에 힘입어 복잡한 열유동 문제의 규명 및 유동구조의 물리적 진단에 있어서 가장 효과적이고 강력한 계측방법이다.

2. PIV 종류 및 원리

PIV를 분류하는 기준에 따라서 여러 가지로 정의가 되어 있다. PIV 계측기법은 입자의 기록 방식과 분석방식에 따라 나누어지고, 속도벡터의 추출에 이용되는 입자의 종류가 개별입자인가 아니면 임의의 검사영역내의 입자군인가의 여부에 따라 구분이 가능하다. 입자영상을 취득하는 기록매체에 따라 photographic film 카메라와 CCD 카메라 방식으로 분류되고, 하나의 Frame에 기록되는 입자영상의 노출 횟수에 따라 다중노출 및 단일노출 방식으로 분류되며, 속도벡터를 추출하는 방식에 따라 자기상관기법과 상호상관기법으로 나누어진다.

2-1. 개별입자추적 PIV와 입자분포상관 PIV

속도벡터의 추출에 이용되는 입자의 종류가 개별입자인가 아니면 임의의 검사영역(Interrogation Region)내의 입자군(중복되거나 독립적으로 존재함) 인가의 여부에 따른 구분이 가능하다. 개별 입자를 독립적으로 인식하고 이들에 대하여 순서 또는 번지수를 부여하는 라벨링(Labeling)작업과 함께 개별입자의 미소궤적을 추적하는 개별입자 추적(Discrete Particle Tracking, DPT) PIV(과거의 PTV)와 검사 영역내의 입자군의 분포에 대한 상관관계로부터 속도벡터를 추출하는 입자분포상관 (Particle Distribution Correlation, PDC) PIV로 대별할 수 있다. 이 경우에 DPT-PIV는 PTV와 같은 특성을 나타낸다. 임의로 분포된 위치에서의 랜덤벡터가 얻어지며 후처리과정에서 격자보간이 필요하다. 그러나 PDC-PIV에서는 처음부터 정의된 격자 점의 위치에서 속도벡터가 구해지기 때문에 격자간 보간이 필요 없게 된다. 또한 PDC-PIV에서는 원리적으로 검사영역내의 개별입자의 도심좌표(Centroid)에 대해서도 상관계수를 구할 수가 있기 때문에 DPT-PIV용의 개별입자 영상이 사용될 수가 있다.

일반적으로 두 기법의 장단점을 비교해 보면 다음과 같다. 먼저 DPT-PIV는 개별입자의 자동 인식작업에 약간의 계산시간이 필요하나 동일입자의 추적 알고리즘은 비교적 간단한 연산과정을 요한다. 따라서 전체적인 작업시간이 매우 단축될 수가 있다. 또한 미소시간 동안의 유동장의 변형에 대하여 비교적 둔감한 성질을 나타내기 때문에 이상치(Outliner)의 발생이 억제된다. 그러나 유동장 전체에 걸쳐 추적입자가 독립적으로

균일하게 분포하여야 하며 양호한 산란광의 영상을 제공하여야 한다. 이것은 조명을 비롯한 실험환경 및 실험기법에 크게 의존하게 되며 일반적으로 한 장의 화면에서 얻을 수 있는 유효벡터의 수가 많지 않게 된다.

한편 PDC-PIV에서는 Adrian의 고정상밀도 PIV방식을 제외하고는 스펙클(LSV) 또는 픽셀 계조치의 밝기정보(Intensity, Grey-Level)를 이용(계조치 상호상관법 등)하기 때문에 유동장에 분포된 입자가 개별적으로 인식이 되지 않아도 문제가 되지 않는다. 따라서 입자에 대한 제한조건이 크게 완화가 되어 유동장의 생성이 비교적 용이하게 이루어진다. 또한 얻어진 벡터 수는 검사영역의 격자수로 정해지므로 많은 수의 벡터가 얻어질 수 있다. 그러나 이 방식에서는 상관함수(계수)의 산출에 번거로운 광학적인 배치가 필요하거나 FFT연산과 상관계수의 계산에 매우 큰 컴퓨터 부하를 요구한다. 한편 유동장의 변형에 대하여 상관함수(계수)의 최고치가 민감하게 변함으로서 이상치의 발생에 주의를 하여야 한다. 요약하면 DPT-PIV에서는 PIV에 적합한 입자의 공급 및 조명 등의 문제에 유의하여야 하나 대신 속도벡터 추출에 필요한 컴퓨터 연산속도가 빠르다. 그러나 PDC-PIV에서는 이와 반대로 유동장의 입자조건이 까다롭지 않은 반면 상관계수의 계산에 번거로운 작업이 요구된다.

2-2. 조명부호 PIV

조명부호 PIV는 Adrian의 정의에 의해서, 단일프레임(single-frame)으로 불리어 진다. 한 장의 사진 또는 프레임에 조명을 부호화하여 벡터의 크기 및 벡터의 시점과 종범을 구하는 기법이다. PTV의 초기에 많이 적용이 되었던 모델이다. 펄스 조명의 폭 및 간격을 조정하여 연속펄스 또는 긴 유맥선(streak) 입자영상을 기록한 뒤에 개별 입자의 궤적을 추적한다.

컴퓨터는 전용의 영상처리장치(image processor) 또는 영상보드(image grabber, image board)로부터 이들의 입자의 궤적의 밝기 정보를 2차원의 위치 및 각 픽셀에서의 계조치의 값으로 데이터파일을 받아서 영상처리를 하게 된다. 보통 필터처리를 통한 잡음제거 및 입자영상의 강조, 윤곽선의 검출, 세션화 라벨링, 도심좌표(centroid)의 계산 등을 거쳐 적절한 추적알고리즘에 의해 벡터의 방향과 크기가 자동으로 계산된다.

단점으로는 벡터의 시점 또는 종점을 찾아내기 위하여 조명을 부호화 하여 이를 해독하는 작업이 매우 까다롭다. 일각에서는 지금까지 여러 가지의 기법이 제안되고 있으며 카메라의 셔터가 개방되는 초기시점에 스트로스코프에 의한 짧은 조명펄스를 첨가하여 벡터의 시점을 구별하는 기법을 제시하고 있다.

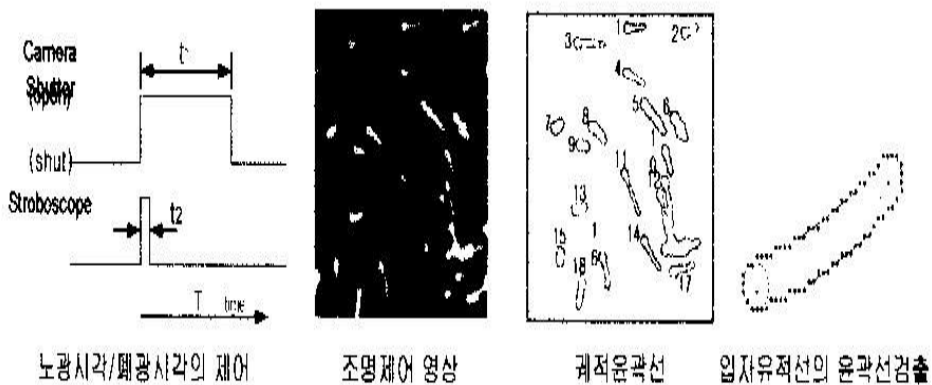


Fig. 1 An outline detection of particle streakline

2-3. 개별 도심좌표 PIV

추적 알고리즘에 따라 연속된 두 프레임 또는 그 이상의 프레임에서 개별추적 입자의 도심좌표를 구하고 이렇게 구해진 2차원의 정수형(integer) 위치정보(x, y 좌표)를 이용하여 벡터의 시작점과 종점을 찾아내는 방식을 취하고 있다. 이 기법은 조명부호 PIV와 유동장의 영상을 기록하는 프레임 수에서 가장 큰 차이점을 나타낸다. 조명부호법에서는 입자의 모든 이동정보가 한 프레임상에 들어가 있다. 따라서 벡터의 크기는 비교적 간단하게 알아낼 수가 있으나 방향판별이 어렵기 때문에 조명에 부호를 부여하여 이 문제를 해결하고 있다. 그러나 도심 좌표법에서는 유동장의 영상이 일정한 시간 간격을 갖는 연속된 프레임에 기록이 된다. 따라서 벡터의 방향은 기록창치의 기계적인 순서에 의해 자동으로 판별되며 이렇게 주어진 방향성을 적극적으로 활용하여 동일 입자의 확인 작업을 행하고 있다.

2-4. 자기상관 PIV

지금까지 많은 연구자들이 사용해 왔으며 대부분이 이기법에 따라서 개발이 되었다. 프레임에 기록되어 있는 입자 쌍의 변위를 분석하는 방법으로, 같은 위치에 미소조사 구간을 설정하여 푸리에 변환(Fourier Transform)과 역 푸리에 변환과정을 거쳐 자기상관함수 값을 구하여 속도벡터를 추출하는 방법이다.

푸리에 변환(Fourier Transform)은 영상처리에서 공간영역의 밝기정보를 주파수영역의 정보로 바꾸어 주는 역할을 한다. 편의상 1차원의 경우만을 생각하면 1차원의 실수 x 의 연속함수 $f(x)$ 에 대한 이산 FT의 쌍은 다음의 식으로 구해진다.

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x)e^{\left(\frac{-j2\pi ux}{N}\right)} \text{-----}(2-1)$$

$$f(x) = \sum_{u=0}^{N-1} F(u)e^{\left(\frac{j2\pi ux}{N}\right)} \text{-----}(2-2)$$

만일 $f(x)$ 및 $g(x)$ 가 $F(u)$ 와 $G(u)$ 의 FT라면 합성(convolution)은 주파수영역의 해석에서 푸리에 변환에서와 같이 한 쌍을 이루며 다음의 관계가 성립한다.

$$f(x) * g(x) = FT^{-1}F(u)G(u) \text{-----}(2-3)$$

이산합성(discrete convolution)의 식은 다음과 같이 주어진다.

$$f_e(x) * g_e(x) = \sum_{m=0}^{M-1} f_e(m)g_e(x-m) \text{-----}(2-4)$$

상관식도 합성과 유사하나 한쪽의 함수에 공액복소수를 취하는 점이 다르며 상관에서도 합성에서와 같이 FT에 관한 법칙이 그대로 적용된다.

$$f(x) \cdot g(x) = FT^{-1}F^*(u)G(u) \text{-----}(2-5)$$

여기에서 \cdot 는 상관의 표시이며 $*$ 는 공액복소수를 의미한다. 이산상관(discrete correlation)의 식은 다음과 같다.

$$f_e(x) \cdot g_e(x) = \sum_{m=0}^{M-1} f_e^*(m)g_e(x+m) \text{-----}(2-6)$$

$f(x)$ 와 $g(x)$ 가 같은 식이 되면 자기상관함수(auto-correlation function)가 되고 다른 상호상관함수(cross-correlation function)식이 된다.

한편 이산상관식의 직접 계산에서 보면 컴퓨터 프로그래밍의 기법에 따라서 연산속도를 상당히 빠르게 할 수도 있다. 따라서 앞의 차이점은 편의적인 구분이 될 수가 있

다. 이것은 자기상관 PIV에서도 동일하게 해당되며 검사영역의 크기나 컴퓨터의 연산 부하와 연계하여 적절히 선택될 수가 있을 것이다. 또한 상관함수식에서의 공액복수수는 영상의 픽셀데이터에 대해서 허수부에만 영향을 미치기 때문에 크기는 변하기 않고 위상(phase)만을 변화시킴으로서 합성의 조작과 아주 유사함을 알 수 있다.

자기상관 PIV에서 상관계수를 구하기 위해서는 FFT(discrete fast FT)를 반드시 행하여야 한다. 그러나 이와 같은 연산작용을 행하지 않고도 볼록렌즈의 FT변환 능력을 이용하여 프린지를 얻거나 나아가 이 프린지의 해석을 위한 FT작업까지 대신하고자 하는 것이 광학 푸리에변환(optical Fourier transform)이다. 다음 [Fig 2.]는 이 원리를 보여준다.

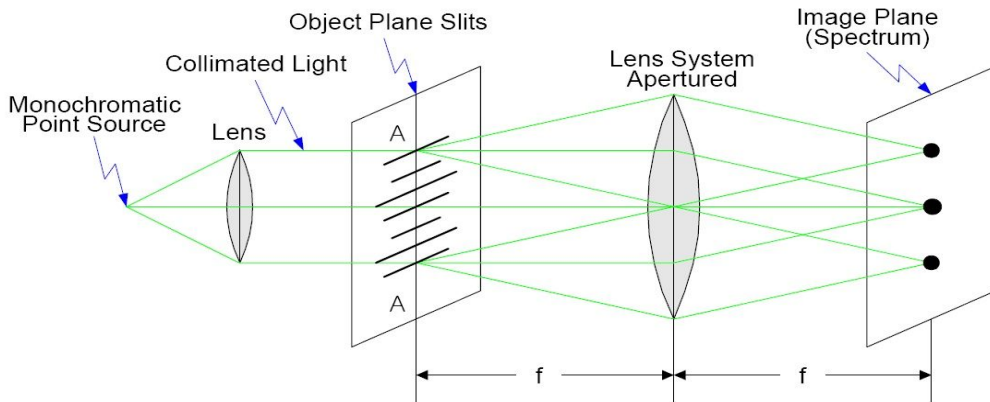


Fig.2 The principle of optical Fourier transform

2-5. 상호상관 PIV

[Fig 3.]의 상호상관 PIV에서는 (x, y) 의 원점이 프레임상에서 속도벡터를 구하기 위한 가상격자의 중심 즉 벡터의 시점을 타나낸다. 이 점을 중심으로 제2프레임상에서 M (또는 N , 일반적으로는 $M=N$)의 값으로 정의되는 탐색영역 반경내의 모든 픽셀의 위치 (s, t) 에서 $(J \times K)$ 의 값으로 표시되는 상관영역에 대한 $\gamma(s, t)$ 의 값을 구한다. 다음으로 이 값들 중에서 최대치의 위치를 찾으면 이곳이 제 2 프레임에서의 벡터의 종점이 된다.

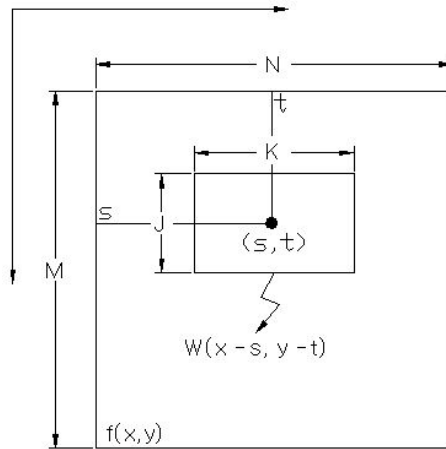


Fig 3. The notion of cross-correlation function

상호상관 PIV는 해상도면에서 가장 적합한 선택은 우선 고속도 비디오 카메라를 들 수가 있다. 여기에서는 카메라가 제공하는 기계적인 프레임수에 따라 공간해상도가 자동으로 설정되며 단지 충분한 조명이 필요하다. 그러나 현재의 고속도 비디오 카메라는 일반적으로 공간해상도가 낮다. 이때 얻을 수 있는 최대 계측속도는 10m/sec 전후라고 보여진다. 다음으로 선택할 수 있는 것이 레이저의 연속광을 단속적으로 절단(chopping)하여 짧은 펄스조명을 발생을 비디오의 동기신호와 연계시키는 방법이다. 여기에서는 비월주사방식(interlace scanning)의 비디오 프레임(frame, 1/30초)의 두 피일드에 임의의 미소 펄스폭과 간격을 갖는 펄스광을 연속적으로 발광시켜 유동장의 영상을 비디오 방식으로 저장하는 기법이다. 밑의 [Fig 4.] 와 같다.

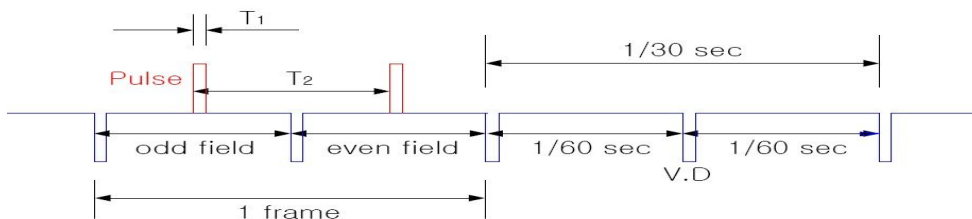


Fig 4. Pulse control of the AOM

3. PIV 실험장치

3-1. 실험장치 계략도 및 명칭

실험 장치는 [Figure 5] 와 같이 실제 DPF의 형상과 같이 제작한 DPF의 모델을 투명 아크릴 1:1모형으로 제작을 하였다. 실험 덕트의 입구와 출구에 Honey comb이 부착된 2000 X 1000 X 1000mm(가로 X 세로 X 높이)크기의 투명아크릴로 제작하였다.

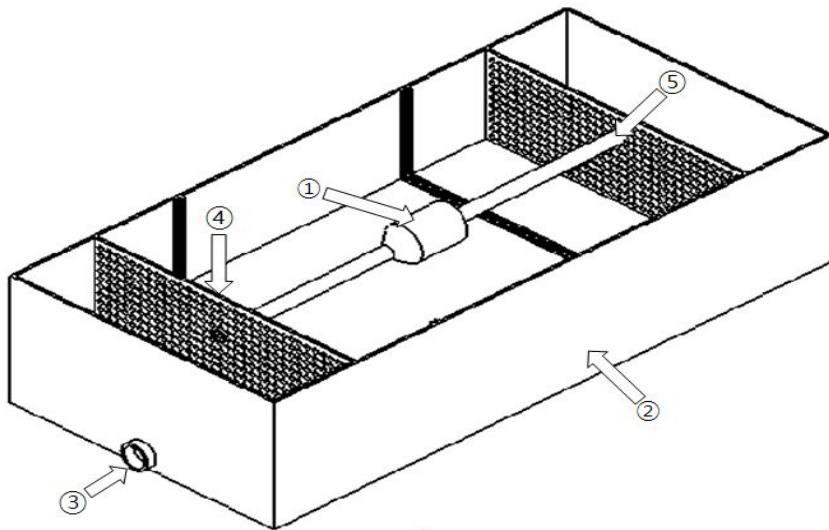


Fig 5. Drawing a simple duct PIV experiments

Table 1. Part Names

	NAME
①	DPF Model
②	Acrylic Water Tank
③	Drain
④	Honey Comb
⑤	Variable Pipe

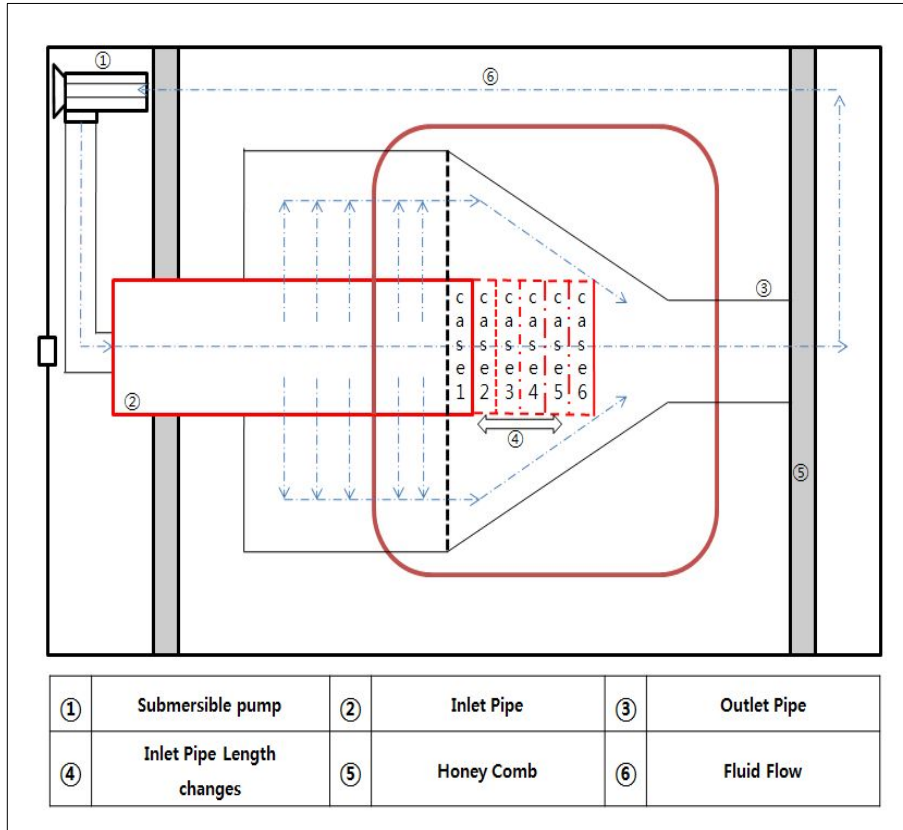


Figure 6. Drawing a simple duct PIV experiments.

수조안의 유동을 발생시키기 위해 입구에 IPV-835F 1마력 수중펌프(①:Submersible pump)를 유속 조절기와 함께 설치하여 유량을 조절할 수 있도록 하였다. Inlet pipe (②)의 길이의 변화를 주기 위해 Pipe가 움직일 수 있도록 할 수 있는 별도의 Pipe (④)를 제작하여 PIV 실험을 진행 하면서 길이를 변화를 줄 수 있게 [Fig 6.] 와 같이 제작 하였다.

이와 같이 실험한 이유는 향후 필요한 보조데이터를 확보하기 위해서이다. 실험 덕트내의 유동흐름은 Fluid flow(⑥)와 같이 펌프를 통하여 유체의 흐름이 시작되고 DPF 를 통과한 후 Out pipe를 지나 실험 덕트로 흐르는데 지속적인 순환을 위해 실험 장치 에 피드백 장치를 설치하였다

3-2. PIV 계측 실험

PIV실험을 위하여 온도는 상온 20℃에서 30℃, 습도는 40%에서 60%의 차를 유지시켰으며 작동유체는 물이며 추적 입자 중 비중이 작으며 레이저광에 잘 산란되는 ZnO(아연화가루)를 사용하였다. ZnO의 비중은 비중 5.47(비결정성), 5.78(결정성)이다. 비중이 물보다 크기 때문에 입자의 균일한 산란을 위하여, 수중펌프(IPV-835F)를 이용하여 ZnO의 산란 및 유동을 발생시켰으며 이때 레이놀즈수는 $Re=200,000$ 속도는 3.25m/s이었다. Honey Comb이 설치되지 않을 경우 PIV 실험 시 카메라를 촬영하는데 있어서 실험장치 내의 수면 파도가 계속 일어나게 되면서 입자들의 촬영을 정확하게 하게 힘들게 된다. 이에 Honey Comb을 설치하여 Test section내에 발생하는 외부요인을 최소화 시켰다. 실험조건으로는 Inlet pipe를 이용하여 Test section내에서 변화가 가능한 축 방향으로 10mm지점의 유동특성을 측정하였다. CCD 카메라의 측정된 부위 450mm×495mm로 설정하였다. 본 실험의 가시화를 위해 사용된 장비는 [Fig 7.]과 같다.

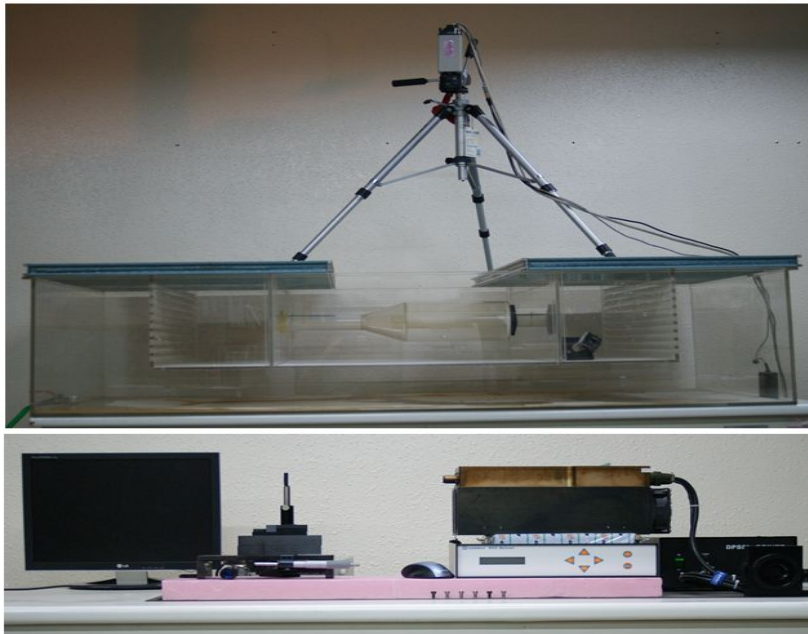


Fig 7. PIV experiment and the PIV device pictures

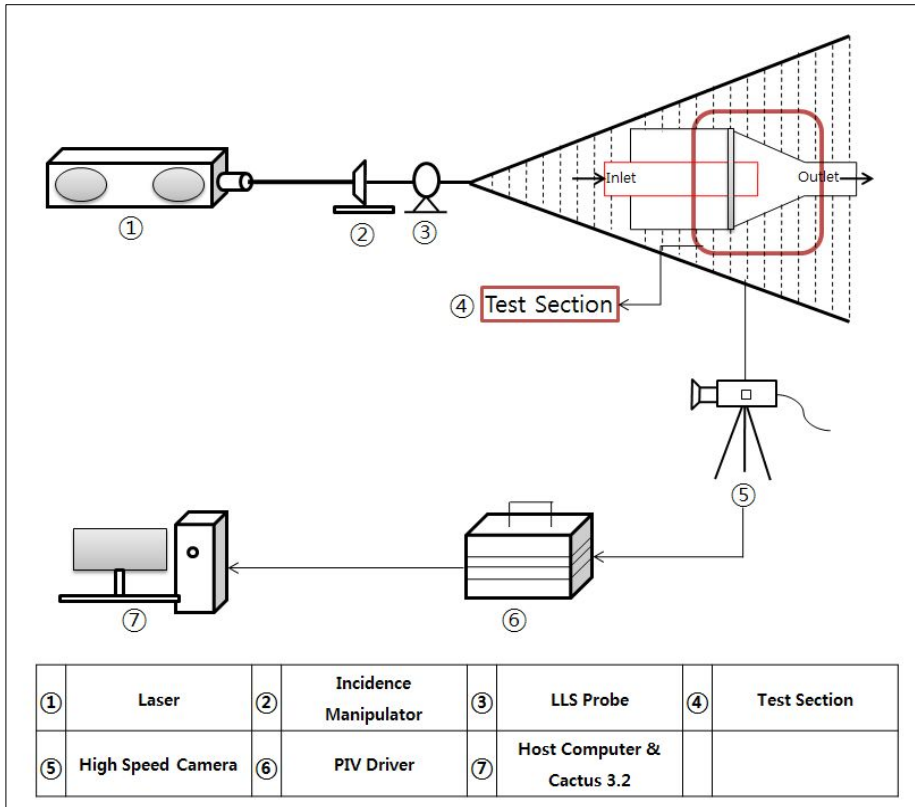


Fig 8. Brief description of the PIV experiment

PIV실험의 계측은 [Fig 8.]의 Laser(①)에서 출력된 직선광이 Incidence Manipulator(②)와 LLS Probe(③)을 지나오면서 평면광을 Test Section(④)에 발광을 시킨다. 이를 평면광과 수직으로 설치된 High Speed Camera(⑤)가 초당 30frame의 이미지 파일을 생성시키며 이 이미지 파일을 Host computer(⑦)에서 Cactus의 소프트웨어를 통해 분석하는 방식이다. PIV Drive(⑥)는 Laser와 High Speed Camera의 펄스 동기를 시키는 장치이다. Cactus는 영상처리장치 또는 영상보드로부터 이들의 입자의 궤적의 발기정보를 2차원의 위치 및 각 픽셀에서의 계조치의 값으로 데이터 파일을 받아서 영상처리를 하게 된다. 필터처리를 통한 잡음제거 및 입자영상의 강조, 윤곽선의 검출, 세선화, 라벨링(labeling), 도심좌표(centroid)의 계산 등을 거쳐 적절한 추적

알고리즘에 의해 벡터의 방향과 크기가 자동으로 계산된다. 저장된 영상은 영상처리장치(Matrox DATA Translation)로부터 아날로그신호를 2차원의 디지털영상정보로 바꾼 후, 각종 전 처리 과정 후 속도, 압력, 난류강도의 데이터를 수치화 시킨다. [Table 2.]는 본 PIV 실험장치의 세부사양이다.

Table. 2 Specification of PIV system

	Item	Specification
Visualization Equipment	Image Grabber	matrox (DATA Translation)
	Light Source	7W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	LLS probe
Measuring Condition	Working Fluid	water
	Temperature	20℃ ±
	Humidity	40% ±
	Velocity	3.25m/s
	Re	200,000
	Particle	ZnO
	Time Resolution	1 / 60 sec
Image Processing	Host Computer	Pentium IV PC (CPU 2.54 GHz RAM 1G)
	Calculation Time	30 frame/sec
	Identification	Cactus'3.2
	Number of Data for Time-Mean	65 frames

3. 결론

[Fig.9]는 DPF 내부의 Inlet pipe의 길이를 변화 시켰을 때 Test-section의 총괄적인 속도벡터 분포를 보여주고 있다. 유동의 흐름은 왼쪽에서 오른쪽으로 진행중인상태이다. [Fig.9] 에서 상단의 사선과 하단의 사선에서 속도벡터가 다르게 측정된 이유는 Test-section 에 있는 레이저 평면광의 광도가 줄어들어 입자들의 산란이 상대적으로 줄어든 것으로 사료된다.

Inlet pipe의 길이 변화에 따라 Inlet pipe쪽에 발생하는 속도벡터들이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이런 속도벡터들의 흐름이 DPF 내부유동현상에 영향을 미치며 위의 내용을 각 좌표 값에 따라 CFD 해석에서 재분석 하였다.

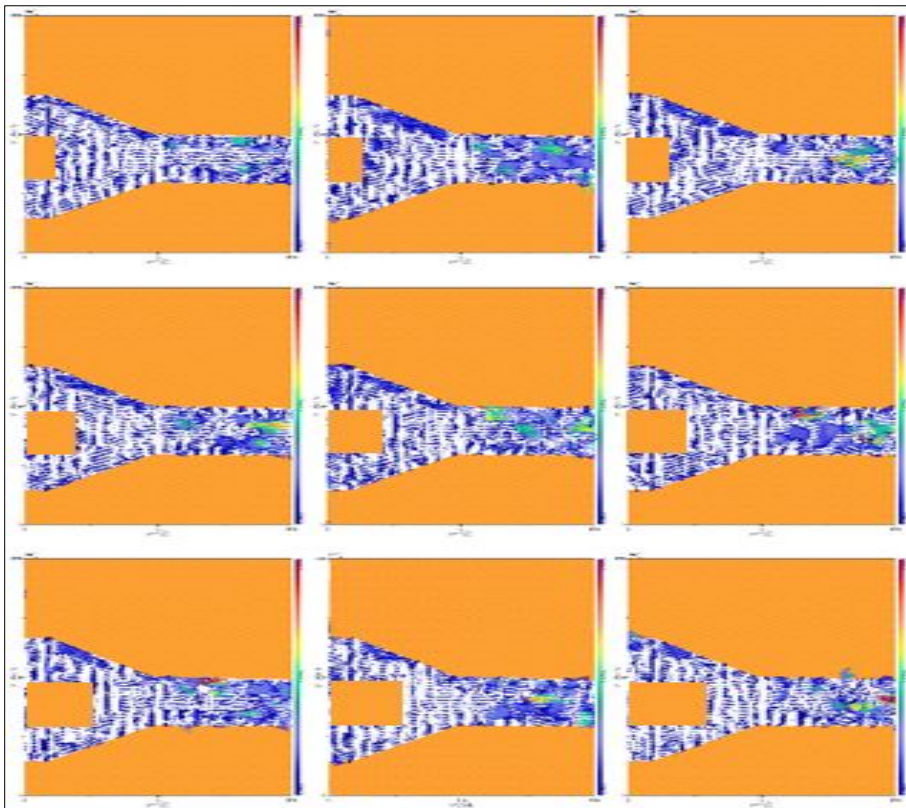


Fig.9. Velocity Distributions

제 3 장 PIV 와 CFD 상관성

1. 서 론

CFD 해석을 진행하기 전 PIV 실험과 CFD의 해석의 상관성을 알아보기 위하여 현재 상용화 되어있는 DPF의 모델을 기준으로 실험과 해석을 진행하였다.

CFD 해석을 위해서는 PIV 실험을 통한 상관성을 규명하여 CFD 해석 시 사용되는 경계조건들을 결정하여야한다. [Fig 10.]은 PIV실험을 물의 조건으로 실험한 것과 CFD 해석을 물과 공기로 해석한 값의 레이놀즈수에 관한 비교 데이터이다. PIV실험은 유속과 온도를 제거의 범위가 사실상 불가능하여 3.25m/s와 20℃로 설정하여 실험하였다. 이와 동일한 조건으로 CFD1을 해석하였으며 그 경향성을 확인하기 위해 20m/s와 600℃로 설정된 CFD2의 해석 값을 CFD1의 해석 값과 비교하였다. 분석결과 [Fig 10.]과 같이 PIV 실험과 CFD1, CFD2의 그래프 상관성 비교결과 중간의 작은 오차율이 보였지만 전체적 그래프의 경향성이 비슷하게 나오는 것을 볼 수 있다.

두 실험의 값이 오차율을 보이는 이유로는 DPF 내부에서의 압력과 난류강도의 변수로 인하여 Outlet pipe로 나올 때 오차율이 있는 것으로 사료된다. Plan 8에서 CFD1, CFD2의 대기압이지만 PIV실험의 경우 물이 실험 수조에 차는 상태이므로 대기압의 조건을 주지 못하여 내부의 압력 값에 영향을 미치는 것으로 사료된다. [Figure 10.]과 같은 상관성 비교를 통하여 PIV 실험과 CFD1, CFD2해석의 상관성이 있다고 판명되어 CFD2의 경계 조건 air 600℃, 20m/s ($Re=12550$)으로 CFD의 해석을 진행하였다.

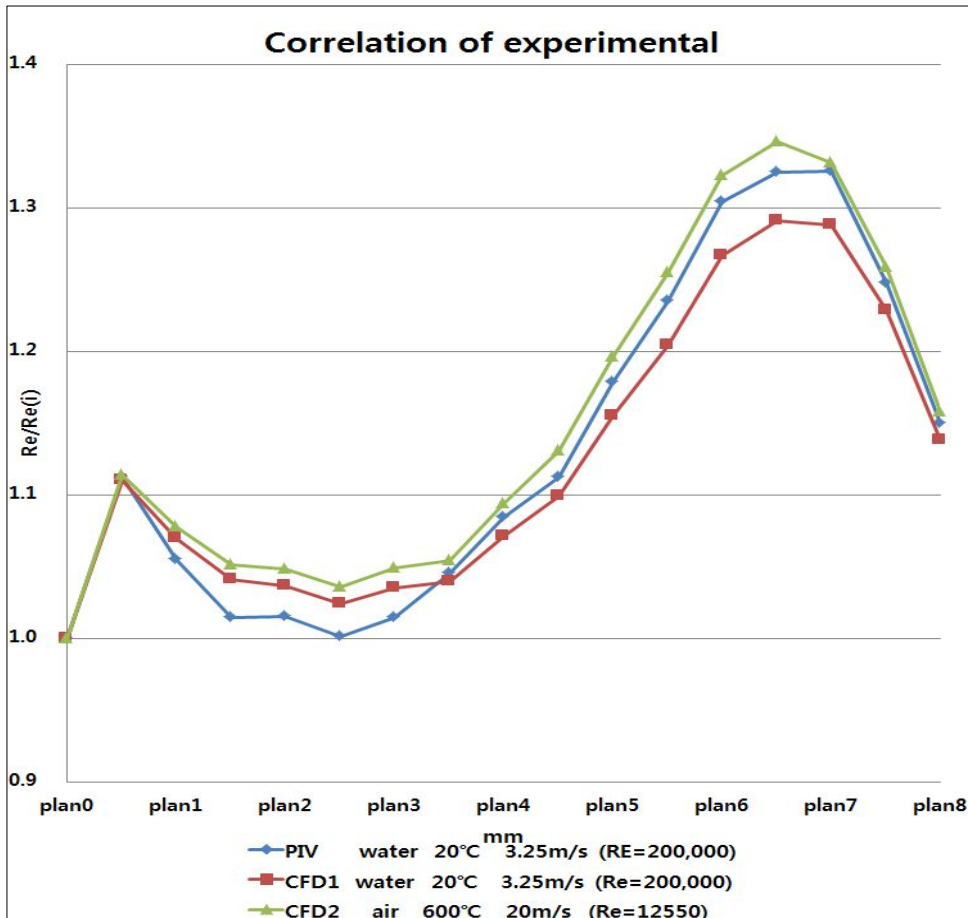


Fig 10. Graph, the correlation between PIV and CFD

제 4 장 CFD 해석

1. 전산유체역학 (C. F. D)의 개요

전산유체역학은 유체의 물리적 움직임을 수학적 방정식으로 표현한 편미분방정식 또는 적분 방정식들을 컴퓨터를 이용하여 수치적 방법으로 풀어 해를 얻는 학문이다.

우리의 생활 주변을 포함해서 자연에서 일어나는 모든 물리적 현상을 해석하는 데는 관찰 또는 현장을 재현하는 실험적 방법과 수학적 언어를 사용하여 그 현상을 표현하는 방정식을 만들어 해석하는 방법과 사람의 수작업 등으로 간단히 구해지지 않는 복잡한 유동현상에 대한 유체운동 방정식을 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션하는 방법으로 나눌 수 있다. CFD는 마지막에 속하며, 물리현상을 해석하는 이러한 세가지 방법은 서로 밀접한 관계를 가지고 있다. 유체 움직임에 대한 수학 방정식을 만들기 위해서는 탁월한 물리적 직관을 가져야 하며, 실험을 통해서 나타난 유체운동 현상에 대한 물리적 법칙을 발견하고 이해할 수 있는 바탕이 있어야 한다. 지금 현재 사용하고 있는 유체운동 방정식은 지난 역사속의 물리학자, 수학자, 공학자들의 끊임 없는 실험적, 이론적 노력과 발견에서 나온 산물들이라고 할 수 있다. 모형제작, 측정기술의 어려움과 함께 비용과 시간에 의해 제약을 받는 실험적, 이론적 노력과 발견에서 나온 산물들이라고 할 수 있다.

모형제작, 측정기술의 어려움과 함께 비용과 시간에 의해 제약을 받는 실험적인 방법과 고전적인 수학적 유체 운동 방정식 해석법으로 풀기 어려운 실제적 문제들의 해답을 컴퓨터가 발달하면서 CFD를 통해서 구할 수 있게 되었다. CFD는 실제로 우리가 알고 싶은 선박, 자동차 항공기 주위와 내부 그리고 다양한 기계, 화학공업장치, 전자기기 내부에 대한 복잡한 유동현상에 대한 시뮬레이션이 가능하다. 이러한 점에서 CFD는 시간을 절감할 수 있는 경제적인 방법이고 시뮬레이션 과정에서 대부분의 유체 운동정보를 모두 얻을 수 있어서 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

최근에는 수학자들에 의해 유체 운동방정식을 보다 효과적이고 정확하게 수치적으로 풀 수 있는 방법과 수학적 모델링들에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 그리고 난류

유동과 같이 아직 완전하게 밝혀지지 않은 유체 운동현상에 대해서도 수치해석이 가능하게 해주는 물리적 모델링들이 많이 개발되고 있어서 CFD 발달에 깊이를 더해가고 있다.

2. 전산유체역학의 적용분야

CFD해석법을 적용하고 있는 여러분야의 연구들을 개략적으로 살펴보면 다음과 같다. 에너지 절감을 개발하기 위해 선박주위에서 일어나는 파형 및 난류 운동 해석과 고효율의 선박추진기 개발을 위해 프로펠러 주위, 워터제트 추진기의 유체 운동 현상을 해석하는데 사용되고 있다. 잠수함의 경우 잠수함 설계 전반에 걸친 유동해석 뿐만 아니라, 유체에 의해 발생하는 소음을 예측하여 소음에 의한 추적의 원인을 제거하는데 적용되고 있다. 거친 파랑 중에 운항하는 선박에 대해 CFD시뮬레이션 하여 선박의 운동 형태와 파도에 의해 작용하는 매우 큰 유체력 등을 예측하여 안정적이고 구조적으로 신뢰할 수 있는 선박을 설계하는데 사용되고 있다.

자동차의 경우 엔진 소음분야의 소음수준이 많이 감소함에 따라 고속에서의 발생하는 주요공력소음에 대한 연구, 연소해석, 자동차 엔진, 실린더 헤드 내의 회전유동 해석 등에 CFD가 적용되고 있다.

전자제품에 CFD가 적용된 예로서 잉크젯을 설계하는데 부품이 작아서 실험이 어려운 잉크 액적의 생성, 크기, 형상해석과 컴퓨터의 냉각 장치해석들이 있다.

항공 분야에서는 무중력 상태에서의 연소특징 해석을 CFD를 이용하고 있으며, 연료탱크에서 연료흐름과 항공기와 우주선이 받는 추진력과 토크의 크기해석과 연료연합 문제해석 등에도 적용되고 있다. 이외 자연과학분야 등 여러 분야에서 다양하게 CFD해석법이 이용되고 있다.

3. C. F. D 종류 및 특징

3-1. CFX

Ansys사에서 개발한 전산유체 해석 프로그램이다. CFX는 복잡한 형상 주위의 층류 및 난류 유동과 열전달 문제를 해석하기 위해 개발된 범용 프로그램이다. 물체 고정격자(Non orthogonal Body Fitted Grid)를 사용하여 일반적인 압축성 층류 및 난류 유동장 해석이 가능하다. 유동장 해석능력의 중요한 인자가 되는 난류 모델로는 k 모델을 비롯하여 Algebraic Stress 모델과 미분 레이놀즈 스트레스 모델 등을 사용자가 정의하여 이용할

수 있다. 확산효과를 줄이기 위한 다양한 차분기법이 제공되며, 이차원 Adaptive Gridding 기법을 사용하여 보다 정확한 해석을 이룰 수 있다. CFX는 공학문제 해석에 폭 넓게 적용될 수 있는데, 자동차 외형 모델 및 엔진 유동해석, 생체내 유동, 건물내부의 화염전파와 같은 환경문제, 화학공정, 항공기 날개 주위의 유동장 해석, 원자력 발전소의 냉각시스템 해석 등이 주요 연구분야이다.

3-2. STAR-CD

STAR-CD는 영국 Imperial College의 A.D. Gosman교수연구 그룹에 의해 개발되어 1985년경부터 상용되어 오늘날에는 가장 강력한 성능을 자랑하는 범용 C.F.D 소프트웨어로 미국, 영국, 독일, 일본, 프랑스 등 선진국 등에서 널리 사용되고 있는 열 유체 해석 소프트웨어이다. STAR-CD는 C.F.D분야 모델링과 결과값의 출력을 담당하는 PROSTAR와 해석을 담당하는 STAR로 구성되어 있다. STAR-CD는 C.F.D 분야 산업체의 현장 연구소 등에서 손쉽게 사용할 수 있는 설계 지원용 C.F.D Tool이며 C.A.E분야 중 열유체 해석부문의 가장 강력한 C.F.D도구이다.

3-3) PHOENICS

PHOENICS는 크게 해석영역의 모델링을 도와주는 전처리 모듈인 SATELLITE, 수학적 방정식을 계산하는 EARTH, 계산결과를 화면에 처리하는 PHOTON 직교좌표계에서 복잡한 형상을 모두 처리할 수 있도록 구성되어 있다. PHOENICS는 평이한 영어로 쉽게 구성되어 있어 C.F.D에 대한 사전 지식이나 경험이 없더라도 유체유동 시뮬레이션을 할 수 있도록 되어 있다. VR Interface는 1-D, 2-D, 3-D의 모든 경우에 대해 문제를 편리하게 설정 할 수 있으며, 그 명확한 결과를 손쉽게 가시화할 수 있다는 장점을 갖추고 있다.

3-4. FIDAP

FIDAP는 유한요소법을 사용하는 범용 열유체 해석 코드로써, 일반열유동, 난류유동, 응고, 용해, 복사열 전달, 화학반응 등을 포함하는 물리적인 현상을 뉴턴 또는 비뉴턴 유체운동, 자유표면 해석등을 포함하여 수치적으로 해석할 수 있다.

3-5. ICEPAK

전자제품의 열전달 및 유동해석전용코드로 각종 전자제품 및 환기시스템의 열유동 현상을 수치적으로 묘사할 수 있는 전자장비 냉각해석전용 프로그램으로서 편리한 Object-based modeling 및 Automatic mesh Generation 기능으로 모델링 시간을 대폭적으로 감소시켰다. 전자제품내의 열 발생을 최소화하고 열 방출을 최소화하고 열 방출을 최대화하기 위해 전자 부품, PCB, FAN, Vent, CAabinet 등의 위치 및 크기를 선정하는데 이용되며 전자제품 기구설계의 모든 분야에 적용 가능하다.

3-6. FIELDVIEW

FIELDVIEW 는 C.F.D 전용 data visualization 프로그램이다. 여타의 많은 data처리 프로그램들이 상당히 강한 능력들을 갖고 있지만, FIELDVIEW는 오로지 C.F.D에만 개발 방향이 맞춰져 있다. 따라서, 단지 화려한 graphic 성능뿐 아니라 열 유동해석에서 요어지는 고도의 data처리 능력을 갖추고 있다. Solver에서 정의된 유동변수를 이용하여 사용자가 요구하는 여러 가지 수학적 계산을 할 수 있는 기능과 분석단계에서 보고자 하는 surface를 정의할 수 있는 다양한 기능을 제공, 그래픽 윈도우상에서 particle을 심을 수 있다. 또한 다양한 형태의 표현방법을 제공하고 미리 계산된 입자 경로를 animation 시킬 수 있으며, 다른 scalar data를 이용하여 입자의 크기와 색깔을 조정 가능하다. 이 외에도 모델링의 많은 아이템을 가지고 있다.

4. C.F.D S/W의 특징

가장 큰 특징으로 기하학적 대상물에 대한 정확한 격자생성과 후처리 도구를 필요로 한다는 것이다. 이들은 C.F.D와 구조해석을 위한 전후처리 목표로 개발되었으며, 여러 개 이상의 C.F.D solver에 대한 Direct Input Data를 제공한다. 이 생성된 입력 데이터는 각각의 Solver에 대한 cell에 의한 경계조건이 포함되어 있으며, 수치값도 삽입할 수 있다.

또한, 1D/2D/3D 모델링을 위한 FEM/FDM/FVM Element제공과 다른 CAD S/W와의 호환이 가능하며, Body표면의 경계에 의존하지 않는 격자생성과 직교격자생성법에 의한 직교

및 원통격자생성, 구조 및 비구조 격자생성 등이 가능하다. 면지정에 의한 분할설정과 함께 다양한 격자진단기능이 있어 사용자의 전후처리모듈의 통합구축은 물론 자동적인 CAD테이터의 수정도 이루어 진다.

이러한 다양한 특징들로 이루어진 C.F.D S/W들은 원래 열유체 해석을 위한 격자생성모듈로써만 개발되었으나 근래의 컴퓨터 성능의 향상 및 구조해석 분야에 복잡한 형상에 대한 셀 또는 판요소 및 3차원 솔리드 격자등의 정교한 격자를 요구함에 따라 점차 구조해석 및C.F.D 해석을 위한 범용 전후처리 코드로 개발되기에 이르렀다.

5. CFD 해석 조건

5-1. 경계조건

해석모델은 ANSYS Work bench의 Design Modeler와 ICEM CFD를 이용하여 [Fig 11.]와 같이 모델링 하여 격자를 생성하였다.

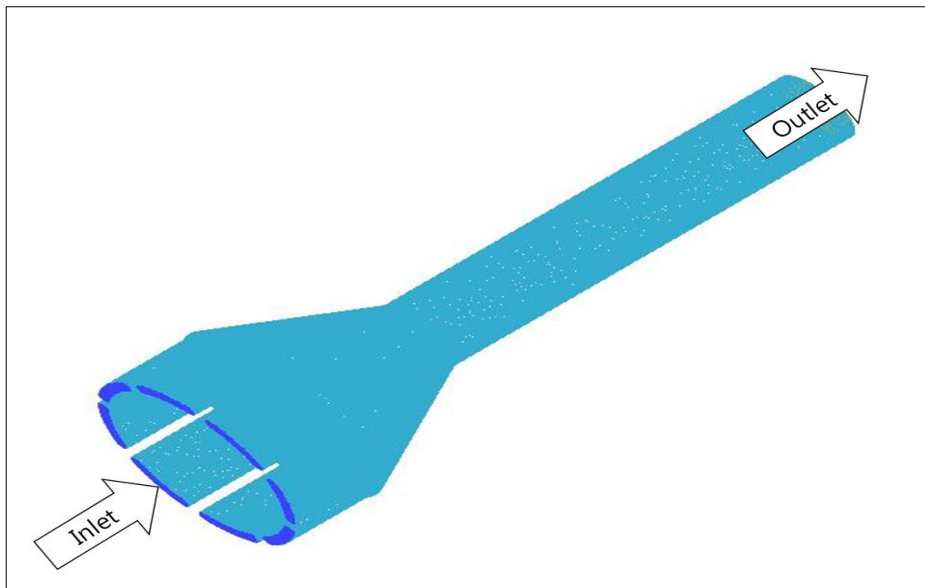


Fig 11. Using CFD mesh grid

해석의 용이성을 위해서 정상 상태 비압축성 유동으로 가정하였다. 난류모델은 K- ϵ 모델을 적용 하였다. 충분히 수렴된 해를 구하기 위해 물리량의 최대 변화량이 1×10^{-6} 이하가 될 때 수렴된 것으로 간주하였다. 약 500회 정도 반복계산을 실시한 결과, 물리량의 변화가 1×10^{-6} 이하로 유지되어 수렴되었고 완전한 수렴을 확인하기 위해 약 50회 정도 반복계산을 수행하였다. 해석 조건으로는 Inlet pipe의 속도 20m/s, Re=125,550 실험온도 600°C 적용하였다. Outlet 조건에는 대기압(Opening)으로 적용하여 실제 대기와 똑같은 조건을 부여 하였다. Mesh Type은 Tetra mesh를 적용하였고, 경계 면에는 Prism mesh를 3겹으로 적용하였다. 이는 다양한 형상의 표현과 해석시간의 단축을 위해 사용되는 혼합기법으로 중요한 부분 및 복잡한 형상은 Tetra mesh를 이용하고 벽면과 같은 형상이 단순한 부위는 Prism mesh로 설정하였다. 위의 내용을 [Table 2.] 으로 요약 하였다

Table 3. Specification of CFD system

	item	Specification
Hard ware	Host Computer	Pentium4 PC (CPU 3.2 GHz RAM 4G)
Soft ware	Modeling	ANSYS Workbench Design Modeler
	Mesh	ICEM CFD
	interpreter	ANSYS CFX V11.0
Boundary condition	RANS	$K-\epsilon$
	Working fluid	Air
	Temperature	600°C
	Velocity	20m/s
	Residual Target	10^{-6}
	Mesh Type	Tetra mesh
	Max Iteration	500
	INLET	Re=12,550
	OUTLET	Opening

5-2. 해석 조건

DPF 내부의 유동특성이 가장 고르게 나오는 지점을 알아보기 위해 [Fig 12.] 와 같이 Inlet pipe의 길이가 10mm인 CASE 별로 Inlet pipe의 길이를 10mm 증가시켜 60mm 지점까지의 총 CASE6의 해석 조건을 주었다.

이와 같이 CASE1~6 까지 해석 된 데이터들을 분석하기 위해 각 분석 지점을 [Fig 13.] 과 Inlet pipe의 0mm 지점을 Plan0 으로 설정하고 각 10mm 간격으로 80mm 지점까지의 총 Plan8의 구간의 평균속도, 평균압력, 난류강도의 데이터를 그래프화 시켰다. 또한 정확한 그래프 형성을 위해 5mm 지점의 데이터를 이용하였으나 본 그림에는 표기하지는 않았다.

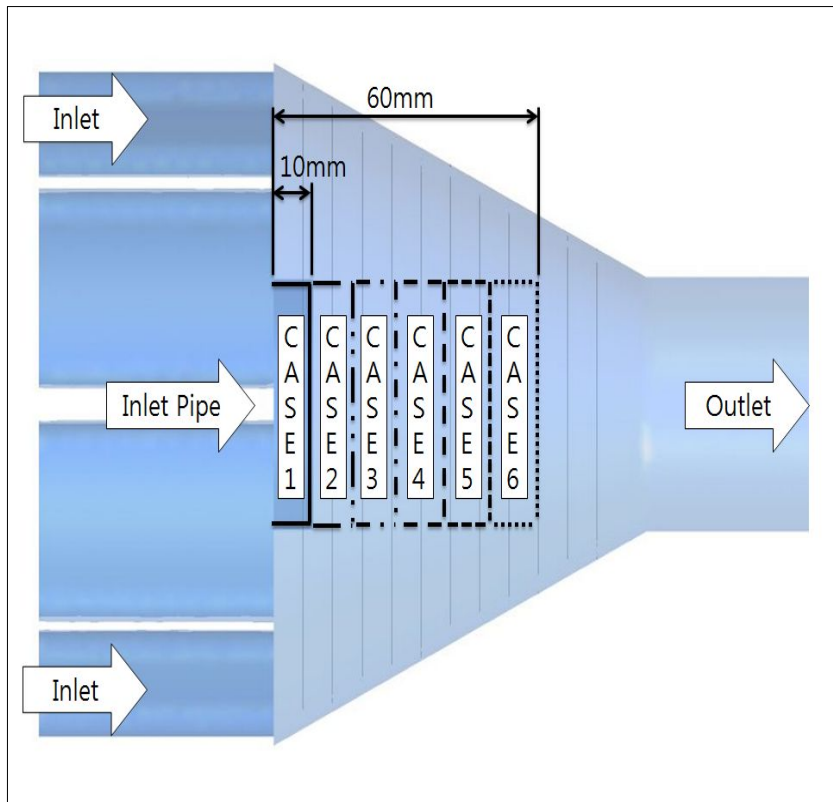


Fig 12. Changes in each case within the DPF

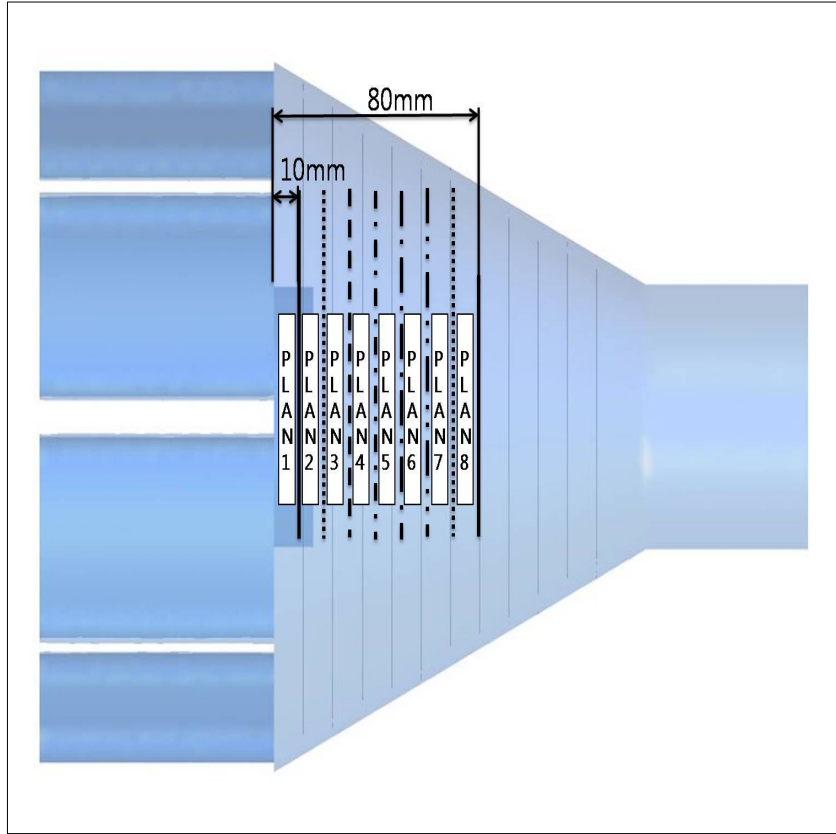
























































Fig 13. The DPF inside plan

본 CFD 해석에서 중요한 각 CASE 당 Plan 별 단면적 변화는 다음 페이지 [Table 4.]와 같이 나타났다. 단면적의 크기는 cm^2 이며 소수점 자리는 생략하였다. DPF 형상과 Inlet pipe의 길이에 따라 단면적의 변화는 주황색의 그림으로 표현하였다.

Inlet pipe의 길이가 변화가 되면 각각의 플랜의 단면적은 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Table 4. Representing the degree of cross-sectional area changes

	plan0	plan1	plan2	plan3	plan4	plan5	plan6	plan7	plan8
case1									
A (cm ²)	30	153	132	113	95	78	63	50	38
case2									
A (cm ²)	30	129	132	113	95	78	63	50	38
case3									
A (cm ²)	30	129	108	113	95	78	63	50	38
case4									
A (cm ²)	30	129	108	88	95	78	63	50	38
case5									
A (cm ²)	30	129	108	88	70	78	63	50	38
case6									
A (cm ²)	30	129	108	88	70	53	63	50	38

6. CFD 속도, 압력, 난류강도 분석

6-1 유량과 속도 데이터

본 연구의 특성상 각 CASE의 변화 시 유량은 CASE1과 동일조건이던지 가장 유사하게 나와야 한다. 상용차의 운전 시 RPM에 따라 DPF 내부는 항상 일정한 평균유량을 가지고 있고 그 유량에 맞게 설계된 CASE1의 유량과 동일함을 유지하여야 상용차의 기본 성능에 영향을 미치지 않기 때문이다. 유량의 변화가 적은 CASE가 본 연구의 가장 기본 조건이다. [Fig 15.]와 같이 각 CASE 별로 평균 유량이 비슷하게 나왔지만, CASE2번이 Inlet의 경우 0.39% outlet의 경우 0.25%의 오차를 보이며 CASE1과 가장 근사한 평균 유량을 나타내었다.

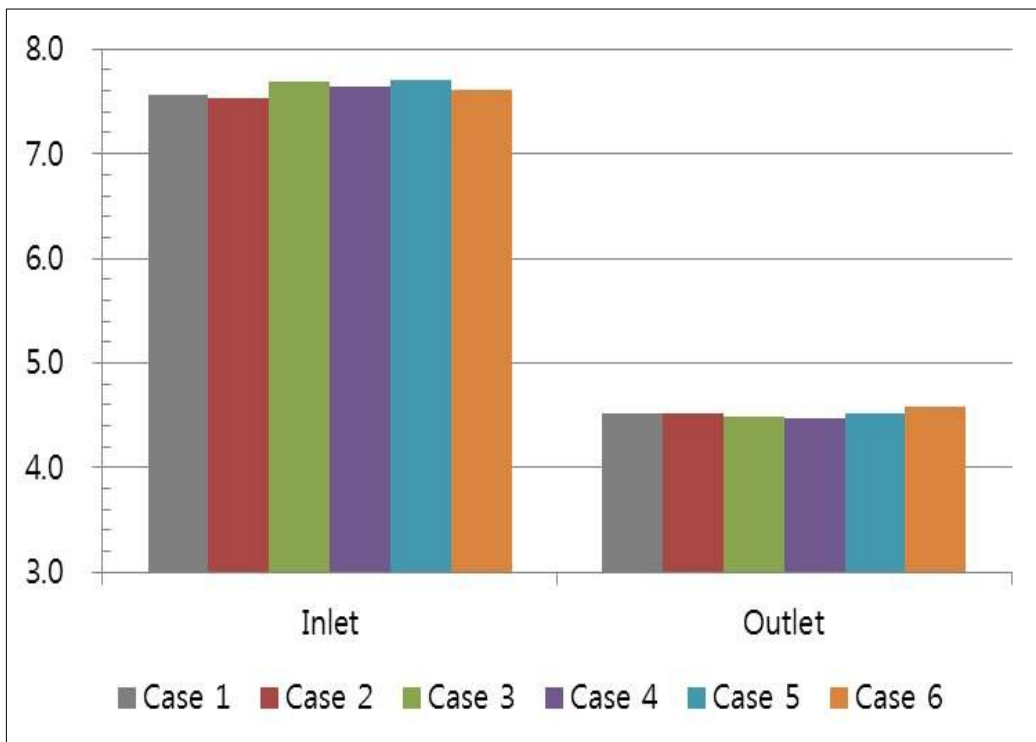


Fig 14. Graph comparing the inlet and outlet flow

[Fig 16.]의 경우 Inlet pipe의 길이가 10mm 지점일 경우 DPF의 내부의 속도 벡터를 연결한 스트림 라인의 그림이다. 두 종류의 [Fig 15.]는 측면에서의 속도벡터의 스트림라인을 캡처하였고, 상단에서 봤을 때 속도벡터의 스트림 라인을 캡처하였다. 이와 같이 2가지 방법으로 나타낸 이유는 속도벡터가 보여줄 수 있는 스트림 라인이 다르기 때문이다. (a),(b)의 경우 속도벡터가 DPF의 형상 내에서 균일하게 분포가 되어있다.

다른 (c)~(l)의 그림에서는 속도벡터가 점점 커져 나가는 것을 볼 수가 있다. DPF의 형상의 특성상 Outlet으로 갈수록 좁아지는 콘의 형상을 가지고 있기 때문에 Inlet pipe의 길이가 증가 할수록 Outlet로 나가는 면적이 좁게 형성되기 때문에 속도가 점차 빨리지는 것으로 사료된다.

Inlet pipe가 10mm지점의 형상의 경우 Inlet pipe가 다른지 점에 위치했을 때보다도 속도벡터가 균일하게 나타났다. 본 연구에서는 속도벡터가 크면서 압력이 높고 난류강도가 많이 일어나는 모델을 찾고 있다. 이런 모델일수록 DPF 내에서 백금촉매와 PM(Particulate Matters)과 질소산화물 (NOx)이 산화 작용 시간이 증가하여 매연 저감율이 더 높은 DPF를 설계 할 수 가있다.

[Fig 15.] 의 속도 비교 그래프의 경우 평균 속도가 안정적이면서 DPF 내부에서 유속이 증가가 되면 와류의 생성이 많이 지는 기본 조건이 된다. 와류가 많아지면 공기가 DPF내부에서 머무를 수 있는 시간과 동량이 늘어남을 의미하며 이는 DPF의 기능 향상에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 이를 토대로 분석해보면 CASE1, CASE5의 경우가 대표적으로 평균유속이 높다. 하지만 CASE5의 경우 Plan1~3 구간까지 속도가 높고 Plan4~8의 구간으로 갈수록 유속이 낮아 졌다. 이는 유속의 변화가 심하여 DPF내부의 기체가 불안정함을 유추할 수 있다.

다른 CASE의 plan1~3 구간의 유속의 증가는 Inlet pipe의 길이변화로 인한 plan1~3의 단면적의 감소에 따른 변화이며, plan3~6 구간의 속도의 변화는 압력의 변화와 난류강도의 증가로 인해 것으로 보인다. CASE2가 CASE1과 비슷한 경향을 보이면서 평균속도가 증가하는 것을 알 수 있다.

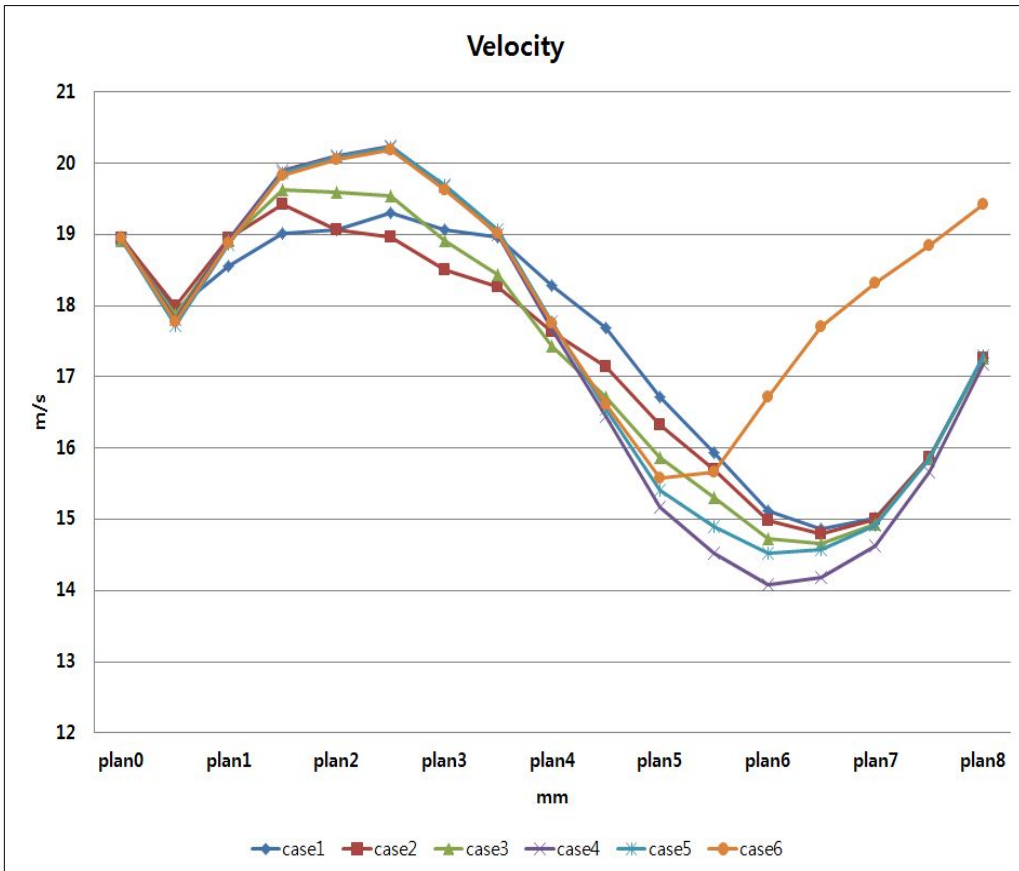
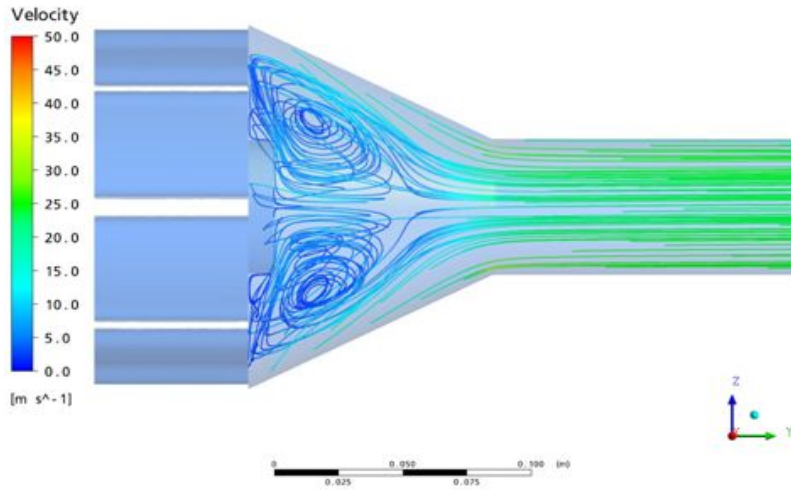
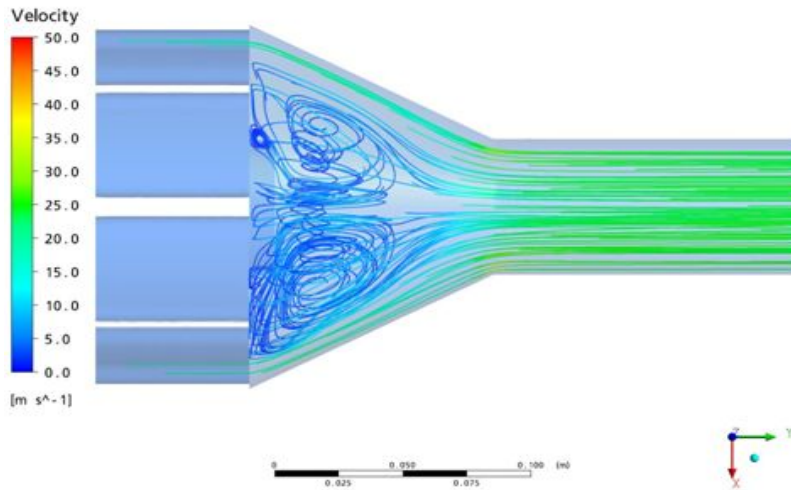


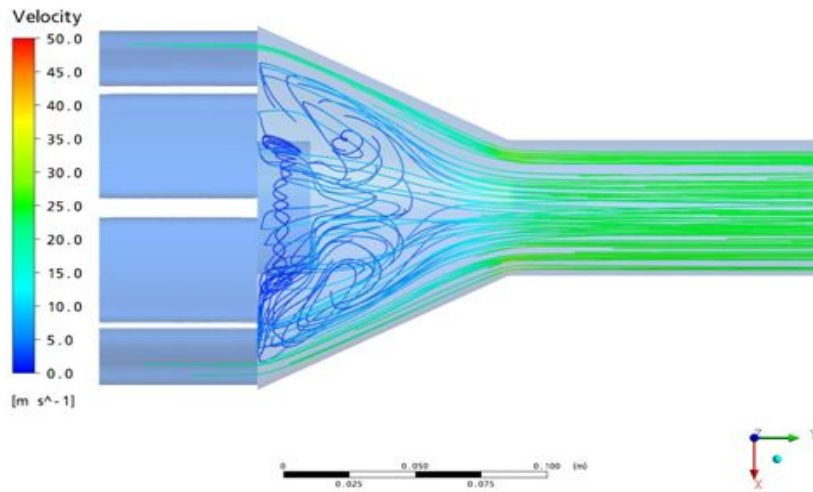
Fig 15. Velocity graph



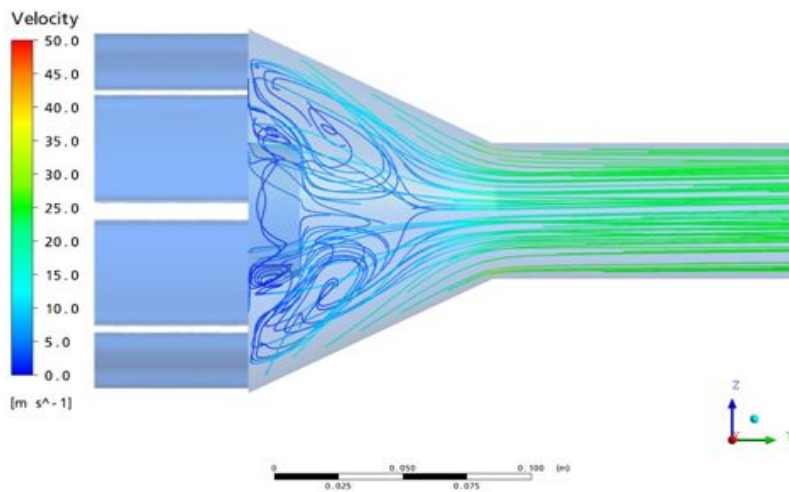
(a) CASE 10mm



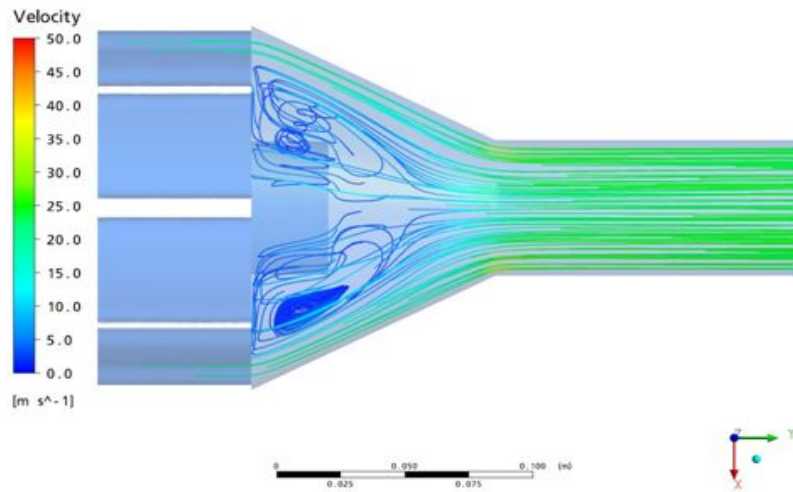
(b) CASE 10mm



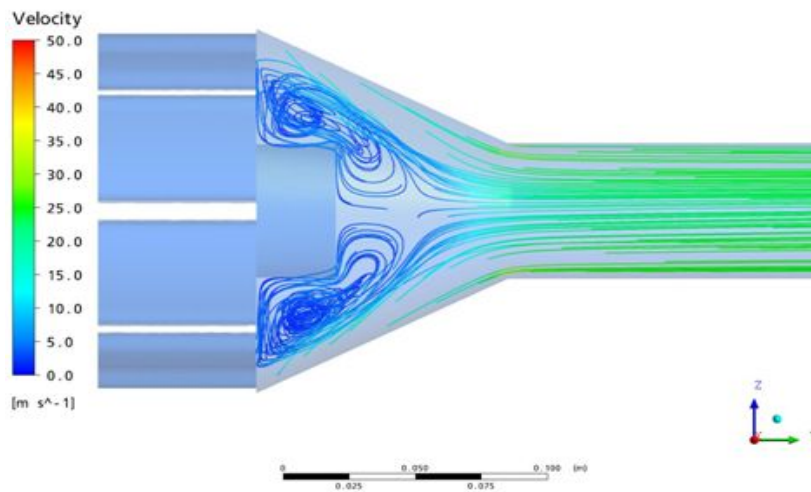
(c) CASE 20mm



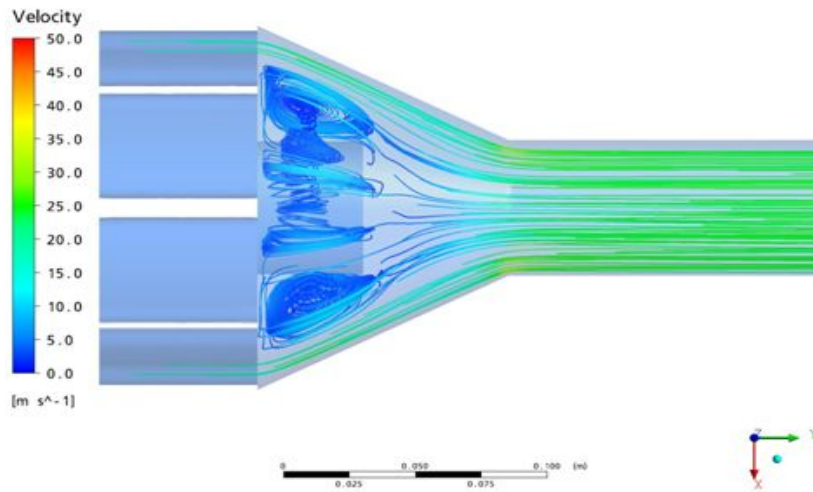
(d) CASE 20mm



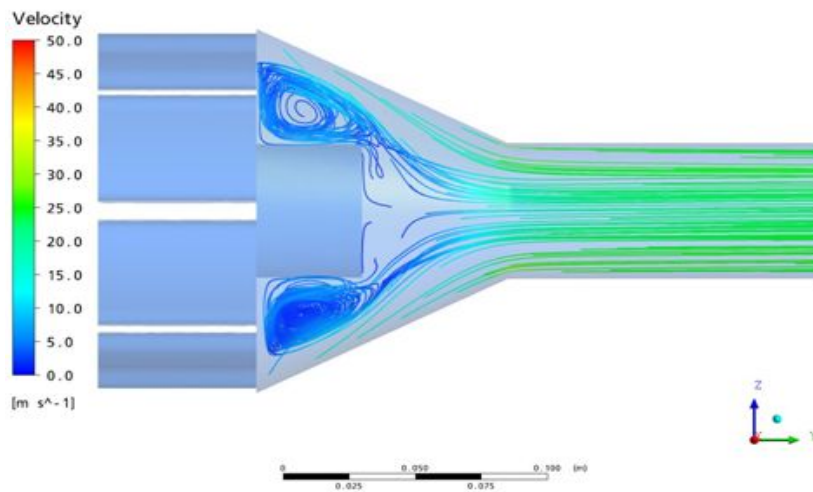
(e) CASE 30mm



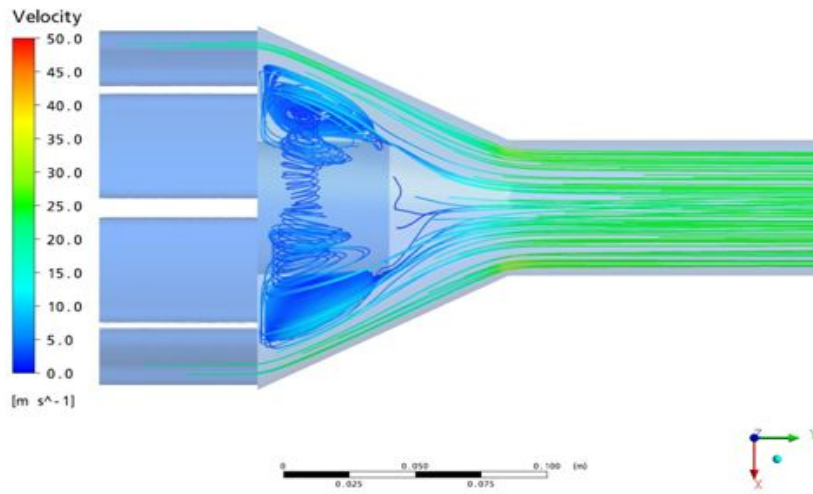
(f) CASE 30mm



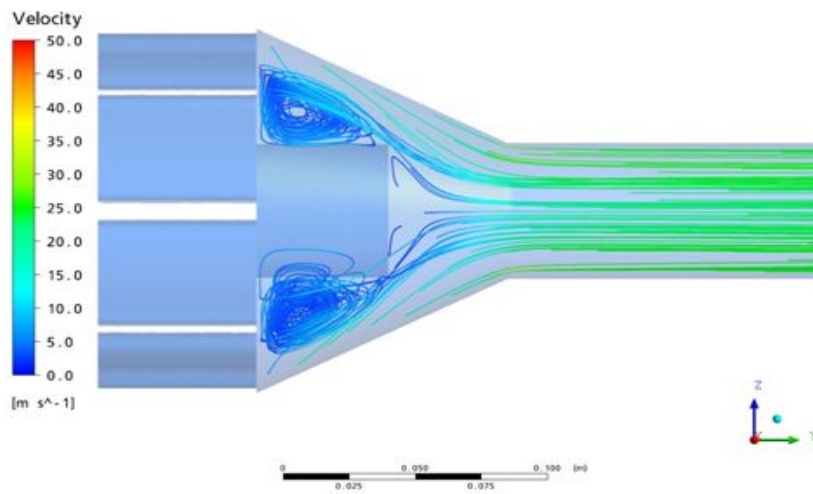
(g) CASE 40mm



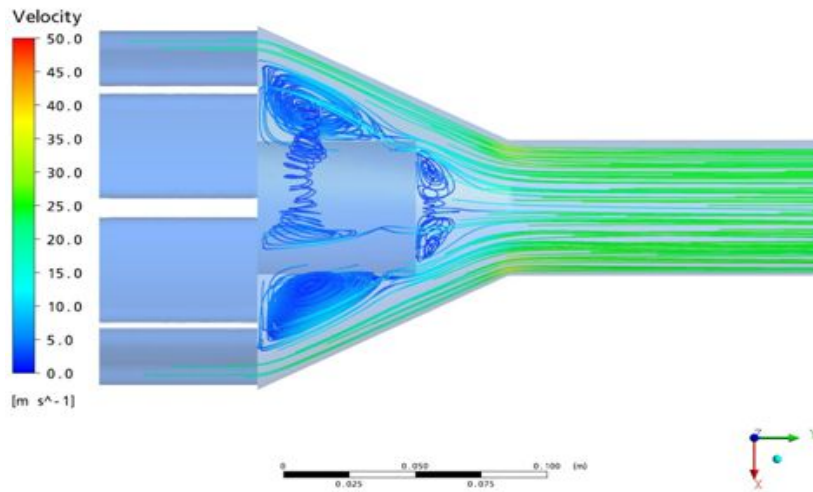
(h) CASE 40mm



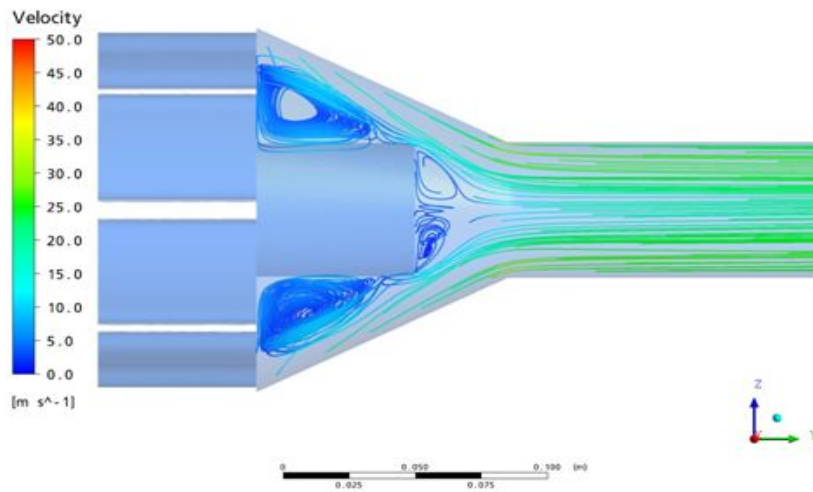
(i) CASE 50mm



(j) CASE 50mm



(k) CASE 60mm



(l) 60mm

Fig 16. 10 ~ 60mm streamlines of the velocity vector

6-2 압력 데이터

압력의 증가는 DPF내부에서 입자들이 머물고 있는 시간의 증가와 관계가 있다. 따라서 압력의 증가가 CASE1보다 많이 일어날수록 유체의 정체도 많이 일어난다.

[Fig 17.]는 압력데이터를 plan별로 데이터화한 그래프이다. 이 그래프는 정압력 그래프이기 때문에 속도그래프와 반대형상을 나타내고 있다. CASE2의 경우 전 구간에서 CASE1 보다 높은 압력을 보여주고 있으며 CASE3의 경우 Plan 3구간에서 압력이 CASE1 보다 높아지는 것을 볼 수 있다. 기타 CASE의 경우 Plan 5를 지나기 전까지 낮은 압력을 보여주며 이후 Plan에서 압력이 급격히 상승함을 볼 수 있다. 이는 Plan 5~6 구간에서의 단면적 변화가 많아 나타나는 현상으로 사료된다.

[Fig 17.]의 CASE2~4는 일부구간에서만 압력이 증가하는 경향을 보이지만 CASE2는 전 구간에서 CASE1보다 높은 압력을 보이고 있다. Plan1 ~ 3 사이의 압력이 줄어든 이유는 DPF의 부채꼴 형상의 시작부분 특성상 압력이 줄어 들은 것으로 사료된다.

CASE2의 경우 [Fig 18.]은 압력데이터를 등고선으로 표현한 것이다. CASE3~6으로 갈수록 DPF 중앙의 압력등고선이 낮아지는 것을 볼 수 있다. (a)~(1)의 그림에서는 압력의 분포의 입구 즉 Inlet 부위에서 압력이 가장 높게 측정이 되었다. 공기가 통과 할 수 있는 입구가 좁은 형상이다 보니 이러한 현상이 나타났다. 아래의 그림에서 압력의 분포는 Inlet pipe의 길이에 따라서 크게 편하였다. CASE1에서 CASE3 까지 의 압력분포가 Inlet pipe의 길이가 증가함에 따라서 전체적이 압력이 증가하였다. 하지만 이후 CASE4~6 의 경우 압력의 증가가 크게 늘어났기 때문에 본 연구에서 원하는 데이터 값이 적절하지 않다는 것을 알 수가 있다.

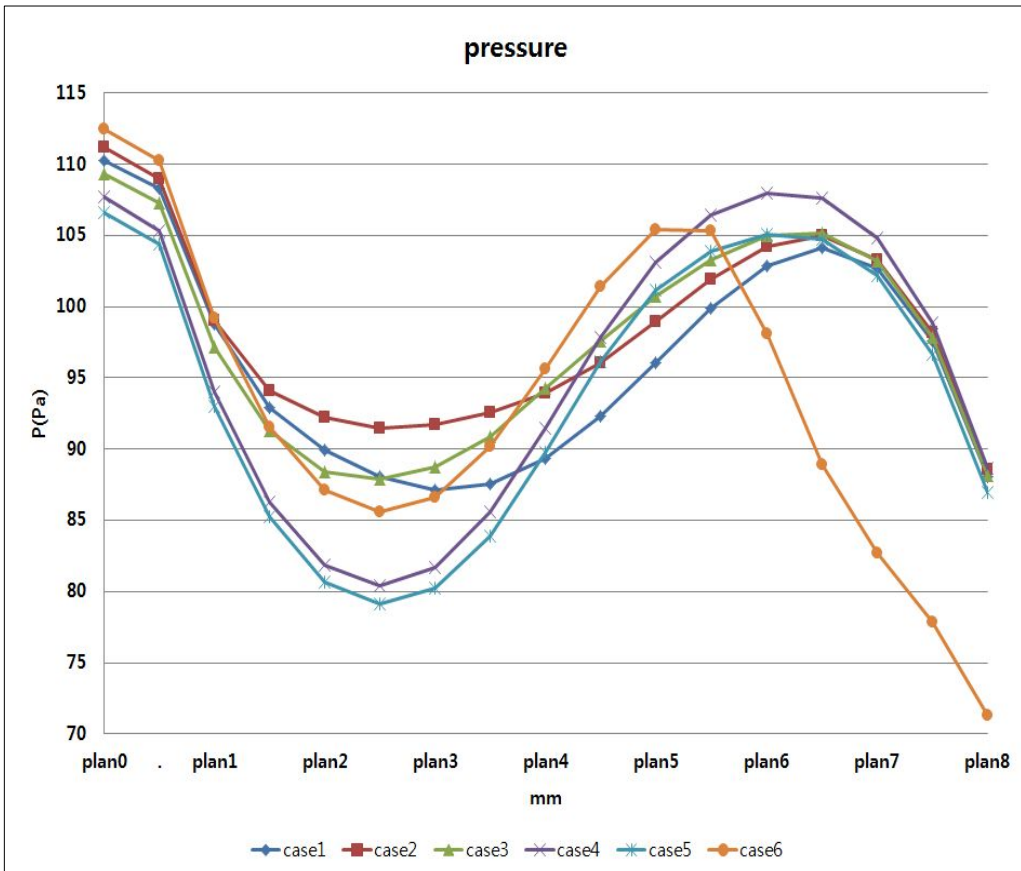
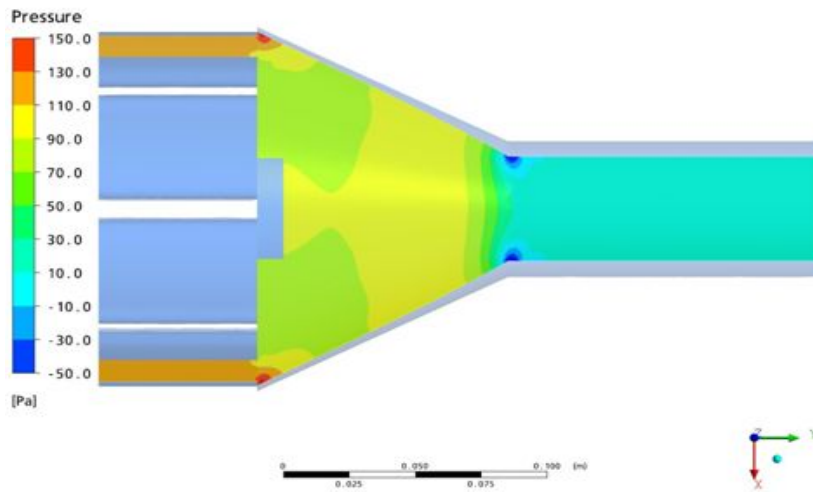
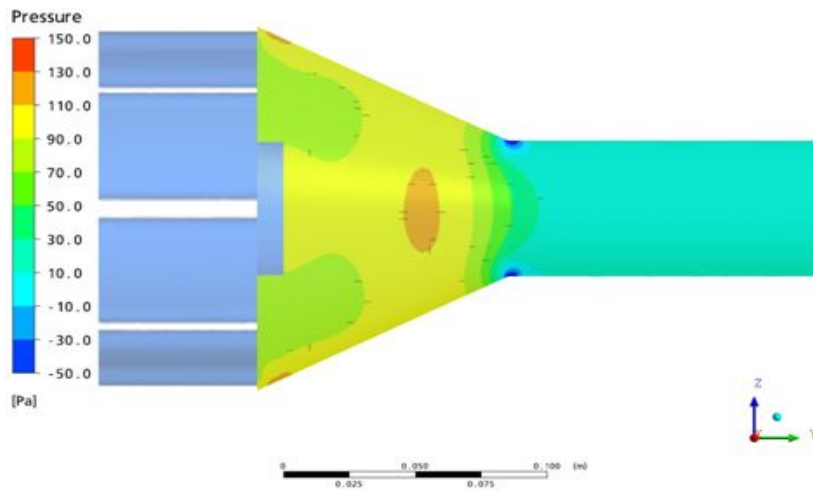


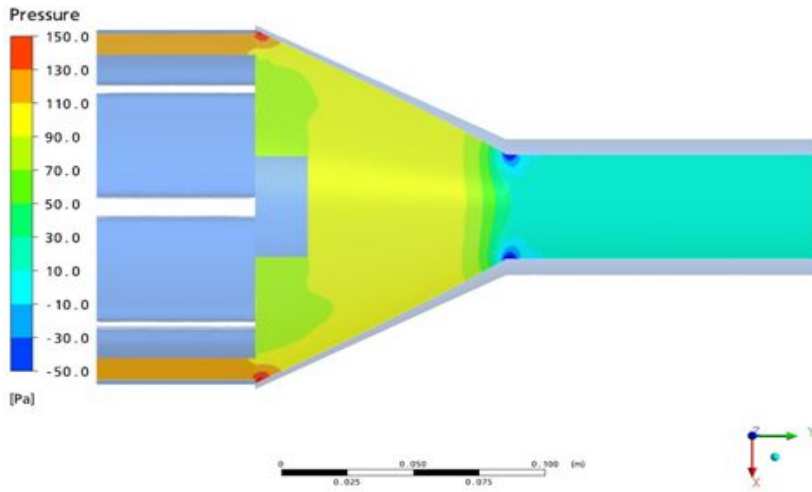
Fig 17. Pressure graph



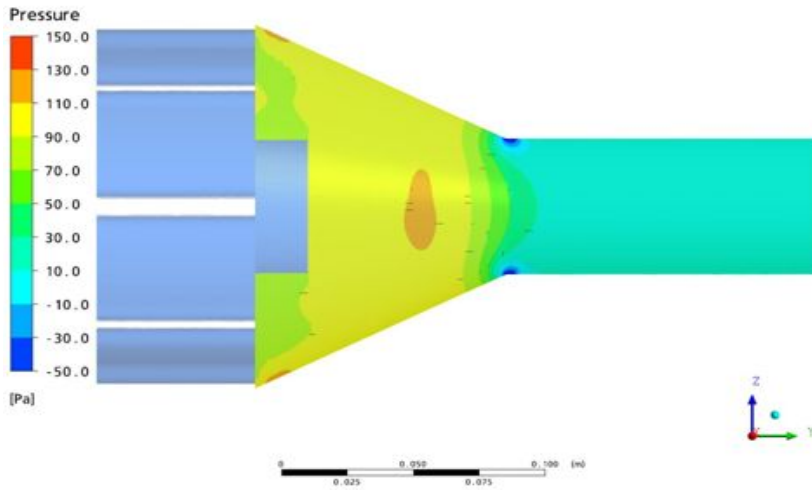
(a) CASE1



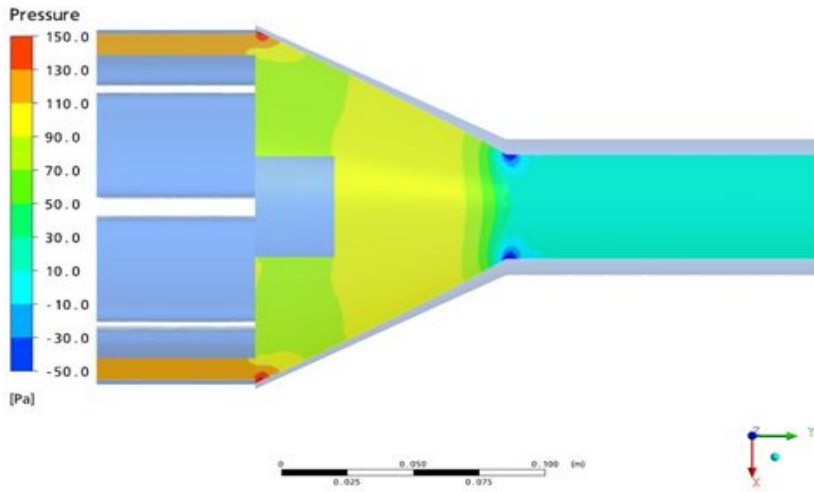
(b) CASE1



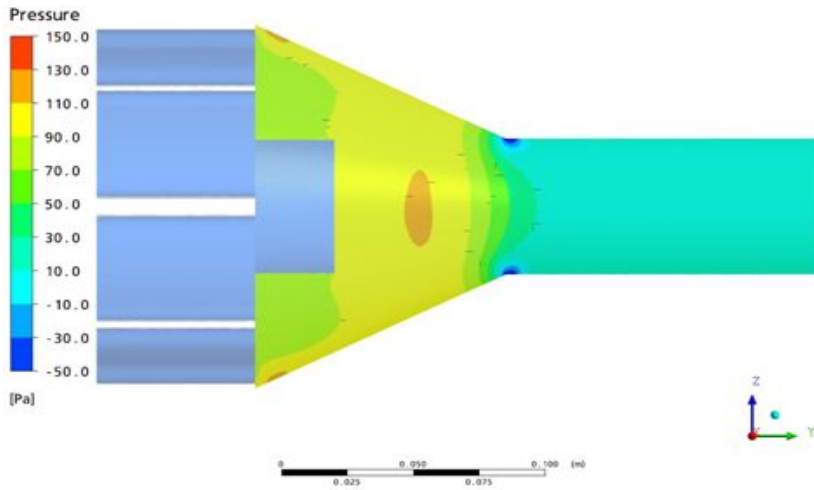
(c) CASE2



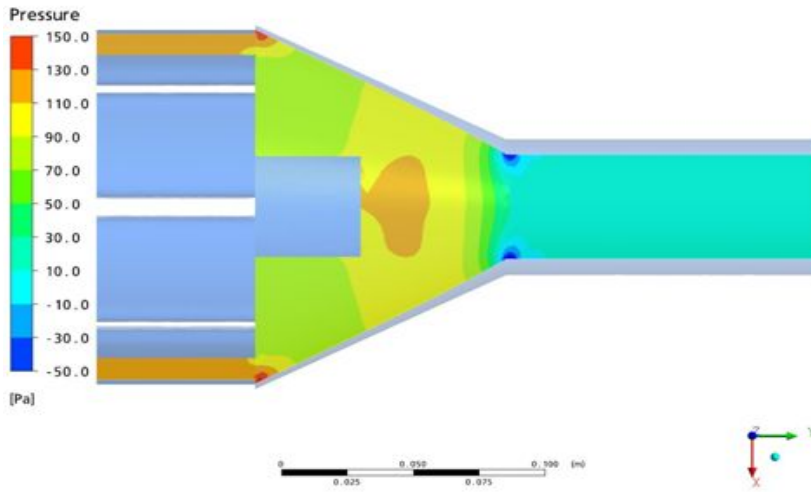
(d) CASE2



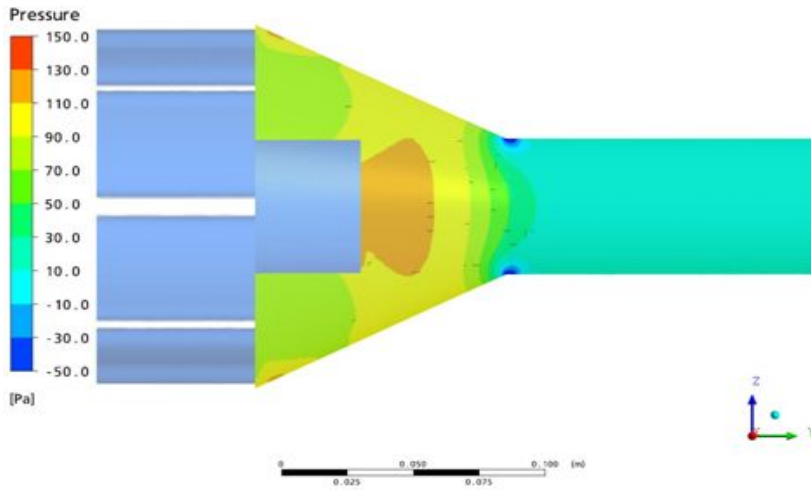
(e) CASE3



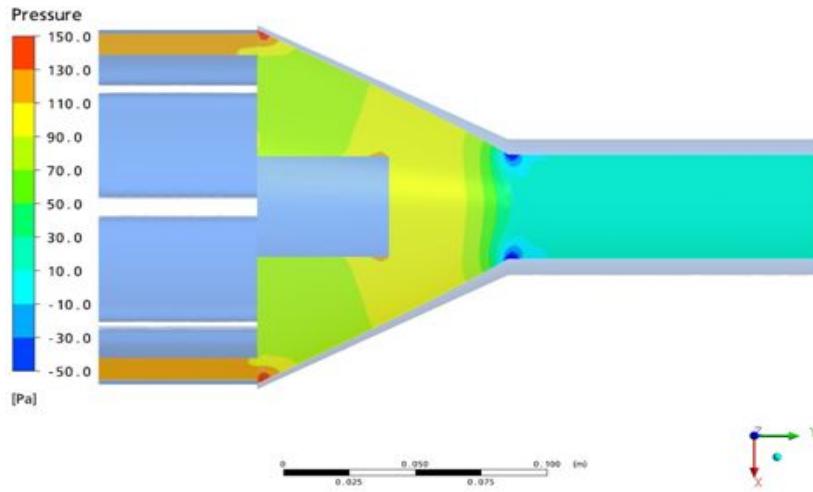
(f) CASE3



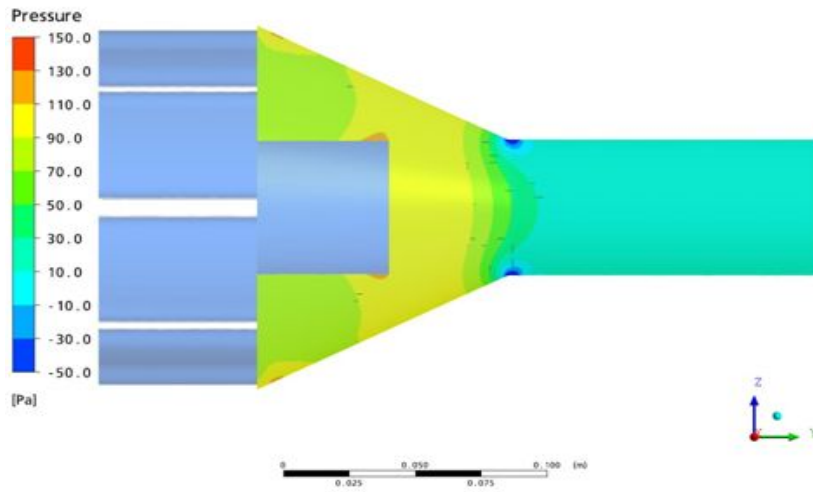
(g) CASE4



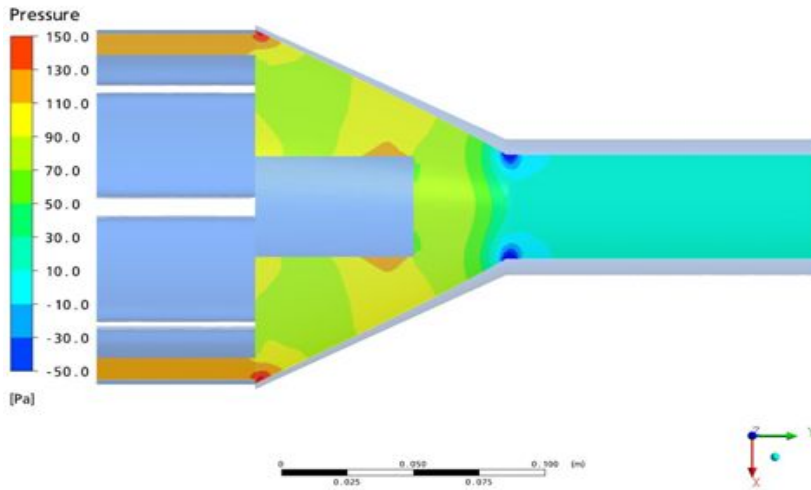
(h) CASE4



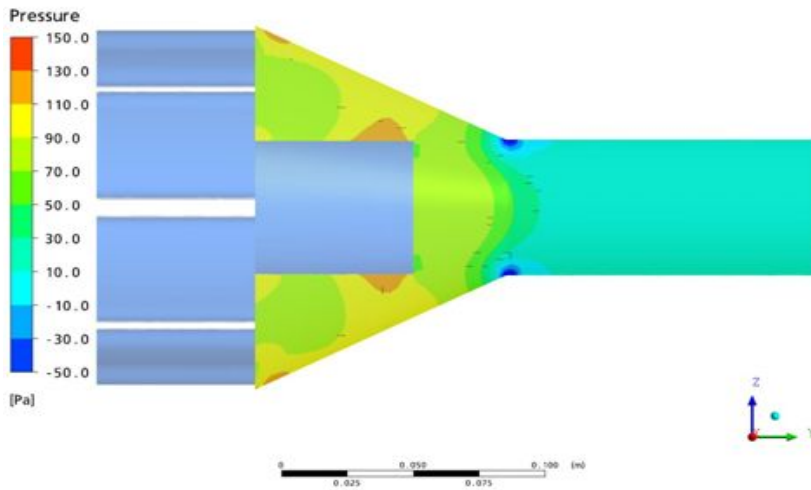
(i) CASE5



(j) CASE5



(k) CASE6



(l) CASE6

Fig 18. 10 ~ 60mm figure illustrates the pressure contours

5-3. 난류강도 데이터

[Fig 19.]은 각 Plan 별로 난류강도를 그래프 화 시킨 것이다. CASE2의 경우 Plan3 지점부터 CASE1의 난류강도보다 높게 나타나기 시작했다. 속도와 압력데이터에서 CASE2와 비슷한 결과를 가진 CASE3의 난류강도가 Plan1~4구간에서 낮게 나오는 것을 확인하였다. 이후 약간의 증가는 있었지만 CASE1과 유사한 난류강도를 계속 보여주고 있다. 난류강도의 경우 평균적으로 CASE2의 경우가 다른 CASE에 비해서 높게 나타났 다.

그래프의 전반적인 성향은 Plan이 뒤로 갈수록 증가 하였다. 이는 Inlet pipe로 인 하여 DPF의 내부의 난류강도가 크게 바뀌었다는 것을 알 수가 있다. Inlet Pipe의 길 이가 10mm의 경우 Plan3에서 부터는 20mm인 경우보다 난류강도가 줄었다. 이는 CASE1 의 Inlet Pipe의 길이는 CASE2의 Inlet Pipe의 길이보다 DPF의 내부에서의 난류강도 변화의 영향을 적게 준다는 것을 알 수 있다.

속도와, 압력의 그래프의 경우 초기 모델인 CASE1의 경우가 본 연구에서 요구하는 가장 근사 값과 유사 했지만, DPF 내에서 더 많은 촉매작용을 일으키기 위해서는 형상 내부에서 와류가 많이 발생해야 된다. 이에 CASE2의 경우는 CASE1 와의 비교를 하였을 때 유속과 압력의 데이터의 값보다 더 높은 %의 난류강도를 가지고 있다. 난류강도가 높을수록 DPF 내에서 와류가 많이 발생하기 때문에 매연의 여과율을 더욱 높일 수가 있다. CASE4~6의 경우 Plan1~8까지 전체 구간에서 CASE1에 비해 낮은 난류강도를 보여 주고 있어 본 실험에서 찾고자하는 CASE가 아님을 알 수 있다.

난류강도가 높을수록 DPF 내부에서 와류가 많이 발생하거나 발생하려고하는 에너지 가 많다는 것을 뜻한다. 아래의 [Fig 20.]은 난류강도를 등고선으로 나타낸 그래프이 다. 등고선의 그래프를 보면 CASE2가 난류강도 평균적으로 높고 넓게 분포하고 있음 을 보여주고 있다. 하지만 위의 [Fig 19.]의 그래프에서의 CASE2의 경우가 가장 높은 난류강도를 보였지만 [Fig 20.]에서는 CASE6의 모델이 가장 큰 난류강도를 보이고 있 다. 이는 [Fig 19]의 경우는 전체적인 Plan의 난류강도를 나타 낸 것이고 [Fig 20.]의 경우는 어느 한 단면을 정하여 그 부분의 난류강도만 나타냈기 때문에 이러한 등고선 의 분포가 나타났다

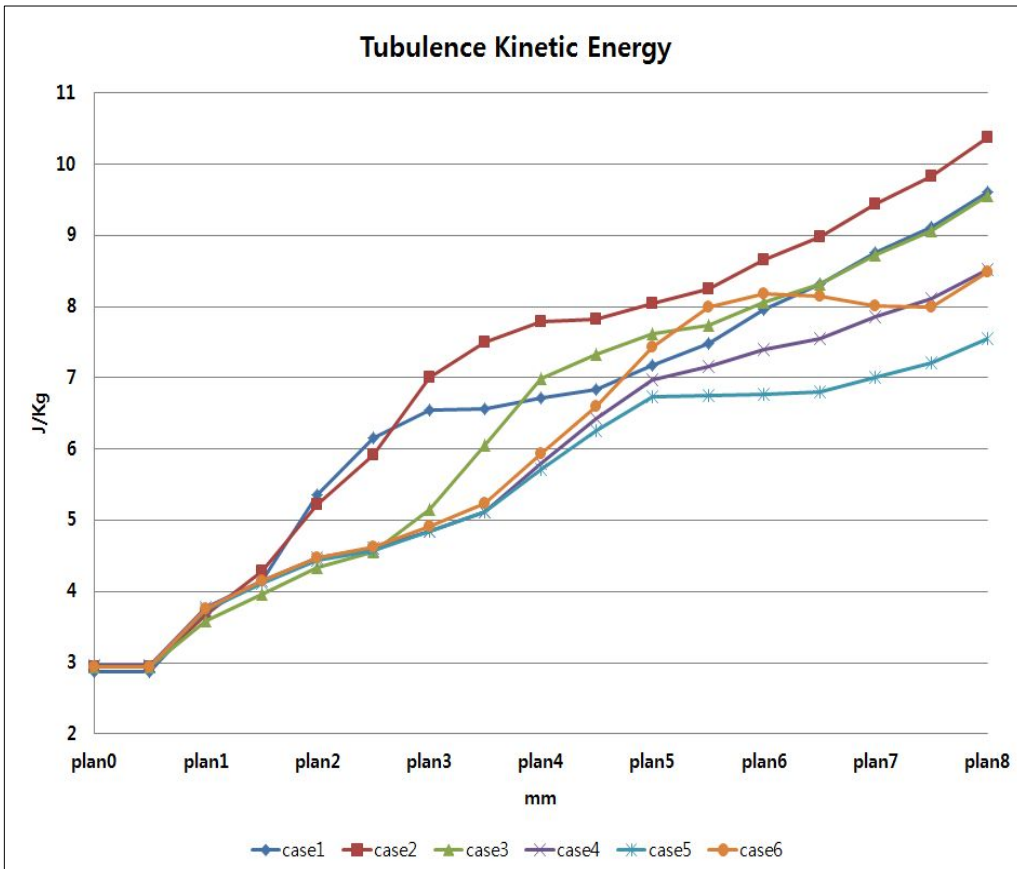
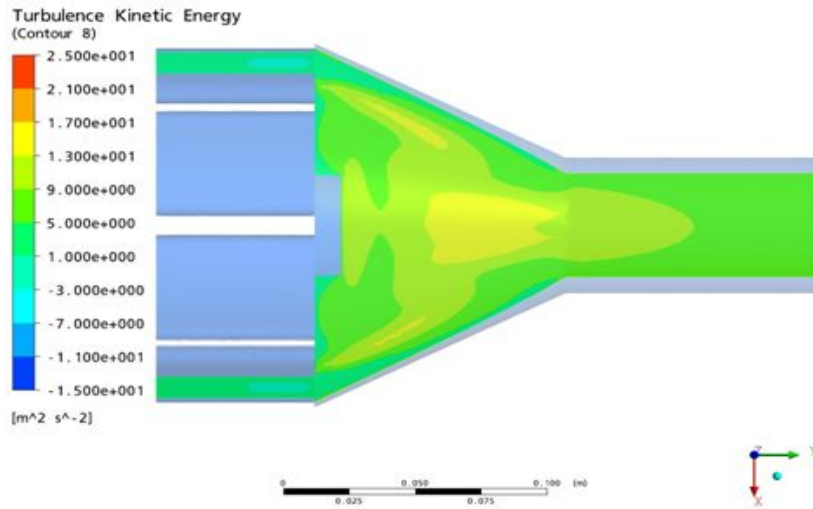
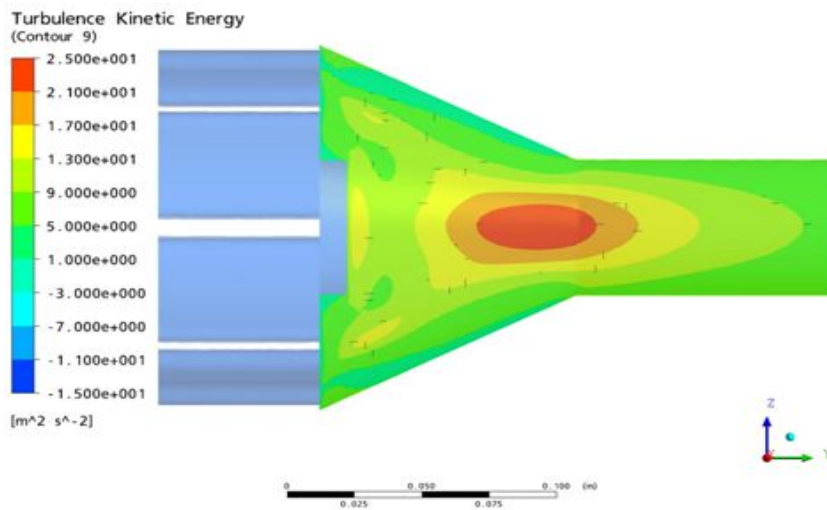


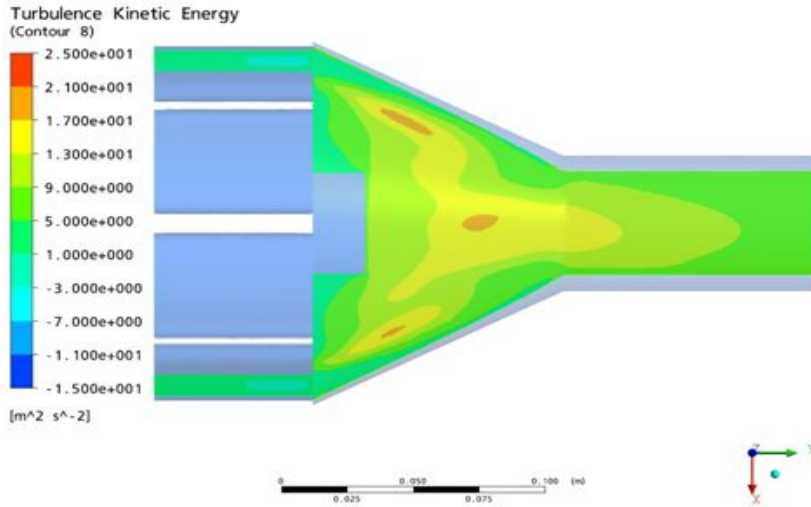
Fig 19. Turbulence Kinetic Energy graph



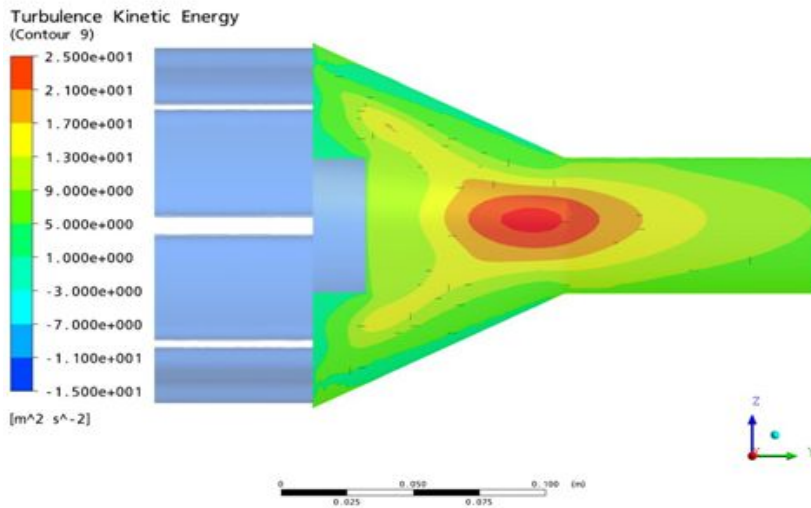
(a) CASE1



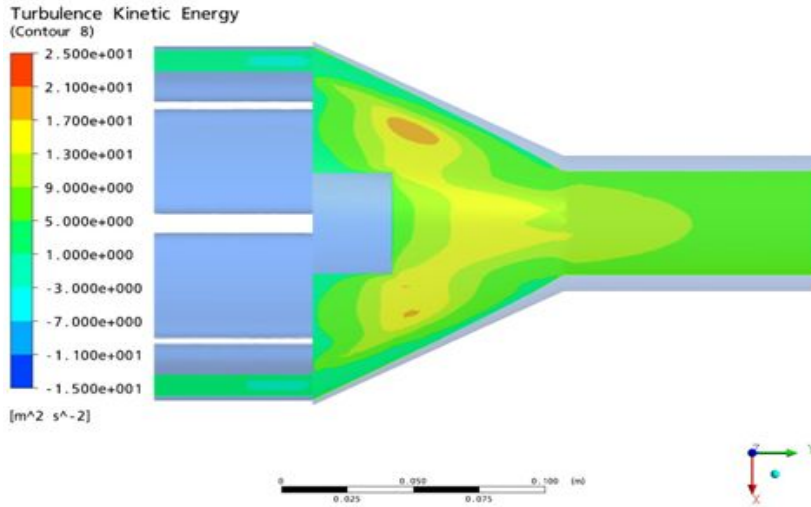
(b) CASE1



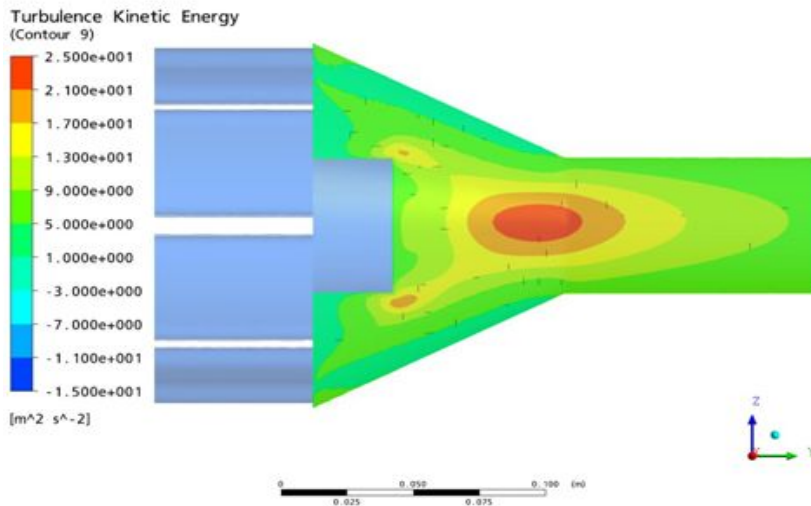
(c) CASE2



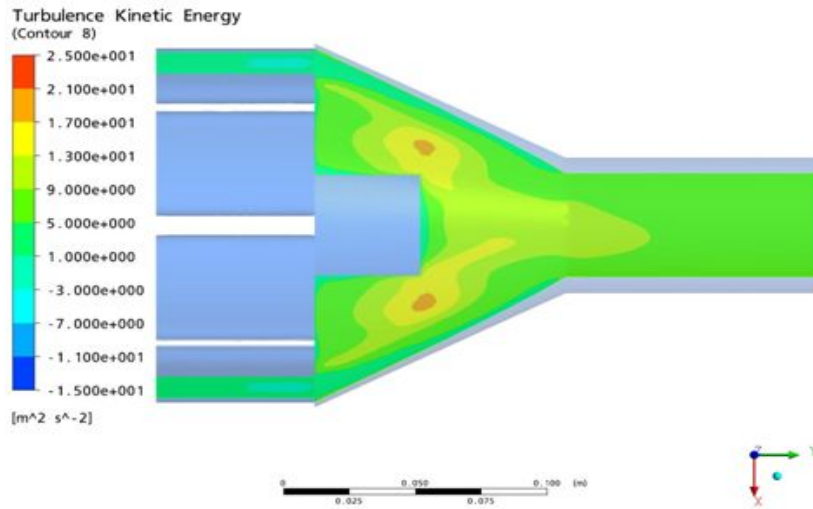
(d) CASE2



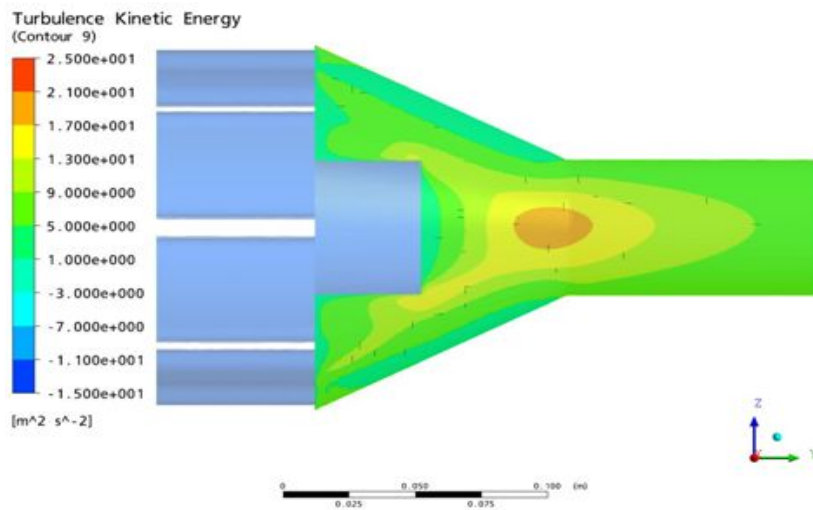
(e) CASE3



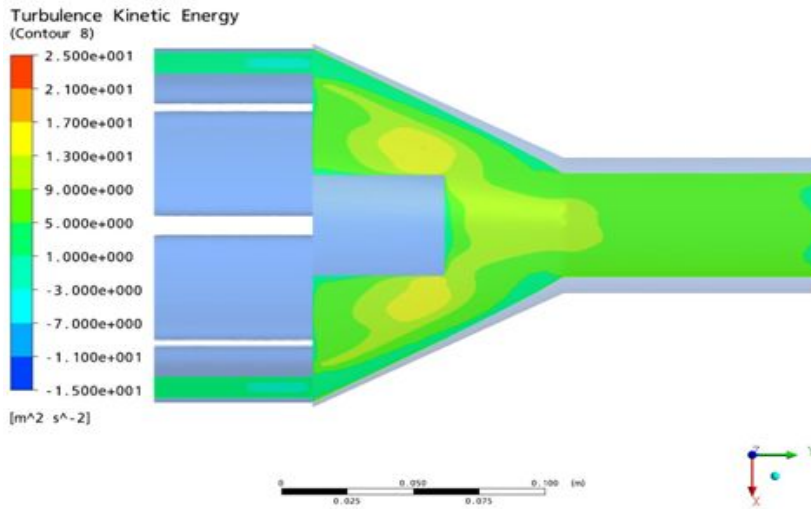
(f) CASE3



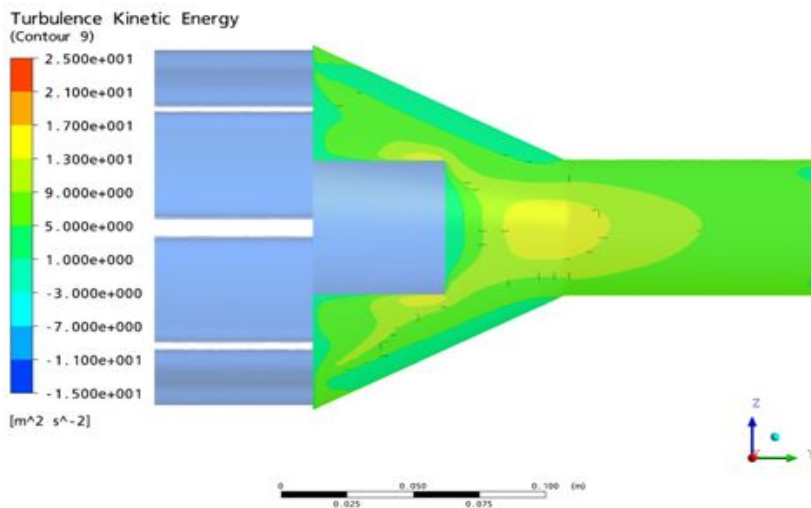
(g) CASE4



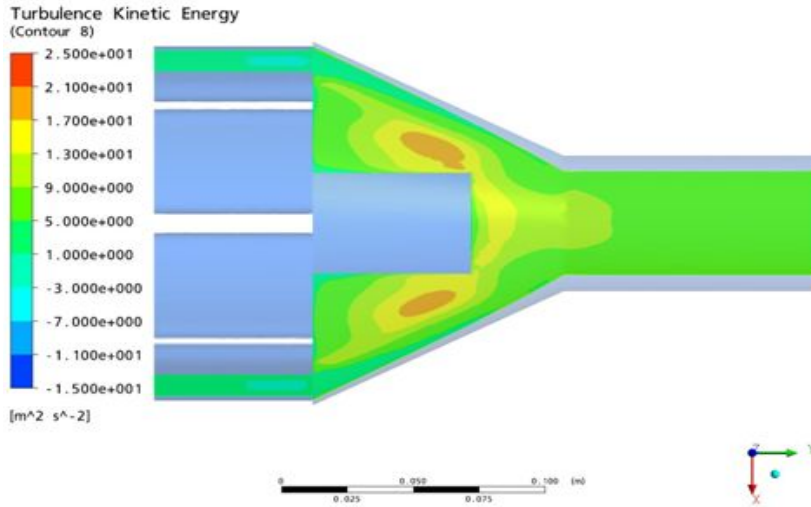
(h) CASE4



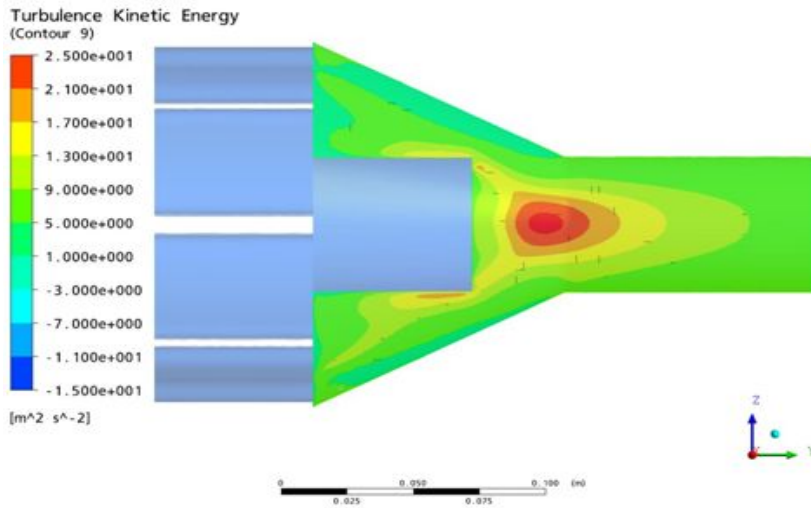
(i) CASE5



(j) CASE5



(k) CASE6



(l) CASE6

Fig 20. 10 ~ 60mm figure illustrates the Turbulence Kinetic Energy contours

제 4 장 결론

PIV실험과 CFD 해석을 통한 디젤엔진용 매연여과장치 내부유동 특성 연구는 매연여과장치인 DPF의 내부의 Inlet Pipe의 길이의 변화에 따른 유속, 압력, 난류강도의 변화에 따라 달라지는 매연여과율에 대하여 PIV실험을 먼저 진행을 하였다. 초기 모델로 잡은 CASE1의 PIV의 유속의 실험 결과 값과 CFD 해석의 유속 결과 값의 상관성을 규명하였고, Ansys CFX를 활용한 DPF의 내부 유동특성 연구를 진행하였다. 이에 측정된 내부의 유동특성에 대한 실험 및 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) PIV 실험을 통한 유속에 대한 결과 값과 CFD 해석의 결과 값의 경향이 비슷하게 나타났다. CFD의 경우 Outlet이 대기압 이었지만, PIV 실험의 경우 공기가 아닌 물로 실험을 한 결과 약 13%의 오차율이 있었다. 이러한 조건들을 조합하여 상관성이 있다고 판명되어 CFD 해석을 진행 하였다.
- (2) 유속의 경우 평균속도가 안정적이면서 속도가 증가하게 되면 DPF내부에서 와류가 생성되는 기본 조건을 만족하는 CASE는 CASE1의 Inlet Pipe가 10mm인 지점이 가장 조건을 만족시키는 CASE이다.
- (3) 압력이 증가하면 DPF의 내부에서 머물고 있는 입자들의 시간이 증가된다. 압력이 높은 CASE의 경우 CASE2의 Inlet Pipe의 길이 20mm인 지점이 평균적으로 안정적이고 높은 압력 값을 알 수 있다.
- (4) DPF의 내부에서의 백금촉매와 많은 접촉을 하여 매연여과율을 높이기 위해서는 와류가 많이 발생하는 모델이 적당하다. Inlet Pipe의 길이 20mm인 CASE2의 경우 다른 CASE와 비교하여 높은 난류강도를 나타내고 있다. 이는 유속의 증가가 높았던 CASE1의 모델과, 압력이 안정적이고 높은 CASE2의 데이터를 종합하여 분석한 결과 CASE2의 Inlet Pipe의 길이가 20mm일 때 가장 좋은 매연여과율을 보일 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) [Http://www.nso.go.kr](http://www.nso.go.kr)(통계청)
- (2) [Http://www.kwtimes.com.kr](http://www.kwtimes.com.kr) (강원타임즈)
- (3) V. Johnson, " Diesel Emission Control in Review" , SAE Paper No.2007-01-0023, 2007.
- (4) 신동원, 윤천석, "DPF의 유동특성에 관한 과도해석 연구" Transactions of KSAM, Vol. 12, No. 1, pp.131~138, 2010
- (5) Herman, W., Harald, B., Frank, T., Hubert, N. and Detlev, R., "Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction", SAE Technical Paper No. 930780, 1993
- (6) 한국기계연구원 엔진환경그룹 DPF 연구실
- (7) Daniel W. Wendland, John E. Kreucher, "Reducing Catalytic Converter Pressure With Enhanced Inlet-Header", SAE Technical Paper No. 952398, 1995
- (8) S.U.LEE, D.R.LIM, S.K.LEE, M.J.KIM and H.K.JANG. " Characteristics of Air Flow Through a DPF Channel" KFMA. August 23-25, 2006, Kyungju, Korea.
- (9) S.G.KWON, Y.H.PARK, J.C.KIM, C.S.LEE. "Effect of DPF Regeneration on the Nano Particle Emission of Diesel Passenger Vehicle" KSAE, Vol. 15, No.3 pp153-159. 2007.
- (10) Y.D.LEE, "A Basic Study on the Instantaneous Velocity Field Measurement Using PIV", M.S. Thesis. Pohang Uni., 1995.
- (11) H.LEE, "A Study on Fluid Characteristics in the Wake of Bluff Bodied by Multivision PIV". M.S. Thesis. Korea Maritime Univ., 2001
- (12) H.N.LEE., G., M.PARK., and G.D.LEE "An Experimental Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct by using PIV Technique", KOSME, Vol. 25, No. 6: 17-24, 2001.
- (13) H.N.LEE., G., M.PARK., and G.D.LEE "A Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct by using PIV and CFD", KSAE, Vol. 1:

421-427,2001.

- (14) H.N.LEE., G., M.PARK., and G.D.LEE "An Experimental Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct", KCORE, Vol. 1, No. 1: 270-275, 2001.