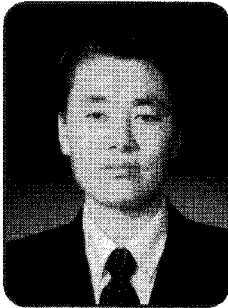


# 유동해석기법(CFD)을 이용한 송풍기 및 덕트 성능개선



한전KPS(주) 기술연구원  
평가분석그룹 선임  
박민수 박사  
TEL : (031)710-4192

## 1. 개요

송풍기의 운전영역은 최고 효율점 부근에서 결정되는 것이 일반적이나 사용조건에 따라 달라질 수 있다. 이 경우 송풍기 내부의 임펠러 및 케이싱에서의 유체역학적인 상호작용에 의해서 서어징(Surging)이나 선회실속(Rotating Stall) 등에 의해 진동이 발생할 가능성이 높다. 그러나 지금까지 발전소 현장에서 유체에 의한 진동이 발생할 경우 그 원인과 대책을 수립하기란 그리 쉬운 일은 아니었다. 따라서 본 문에서는 송풍기 및 덕트 내부의 유체거동 및 압력변동을 유동해석기술을 통해 평가하고 개선방안 도출과 타당성을 검증하고자 한다.

유동 해석 (CFD : Computational Fluid Dynamic)이란 유체의 물리적 움직임을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 해를 얻는 기법이다. 일반적으로 유동은 베어링 윤활과 같은 특별한 경우를 제외하고 대부분 난류이며 비정규성(Irregularity), 확산성(Diffusivity), 높은 레이놀즈수, 3차원 회전도 요동(3-D Vorticity Fluctuation), 소산(Dissipation)등의 특성을 가지므로 그 물리적 현상을 예측하기가 상당히 까다롭다. 그러나 1960년대부터 시작된 유동해석기술은 컴퓨터의 눈부신 발전에 힘입어 기존에 풀지 못하던 다차항의 수학적 문제와 난류 등의 복잡한 유동문제를 보다 쉽게 풀 수 있게 되었다. 그 결과 많은 시간손실과 고가의 비용이 수반되는 실험을 대신하여 전산유체역학을 이용한 유동해석이 다방면에서 사용되기 시작하였다. 실 예로

1970년대의 우주탐사선은 60,000시간의 풍동 실험 등 각종 안전성테스트를 실제조건과 유사하게 고가 장치를 사용하여 실험을 수행하였으나 1980년대의 일본 우주왕복선인 HOPE(H-II Orbiting Plane)는 1970년대보다 100배나 빠른 컴퓨터의 처리속도로 인하여 상당한 시간절약과 비용절감 등의 경제적인 효과를 거둘 수 있었다.

마찬가지로 1980년대부터 GE, Westinghouse, B&W사 등 발전설비 제작사들은 운전 조건이 까다로운 설비에 대한 테스트를 실험을 대신하여 구조 및 유동해석 등 해석적 평가방법을 이용함으로써 안전성 확보, 비용절감, 시간절약 등의 여러 가지 장점을 얻을 수 있다.

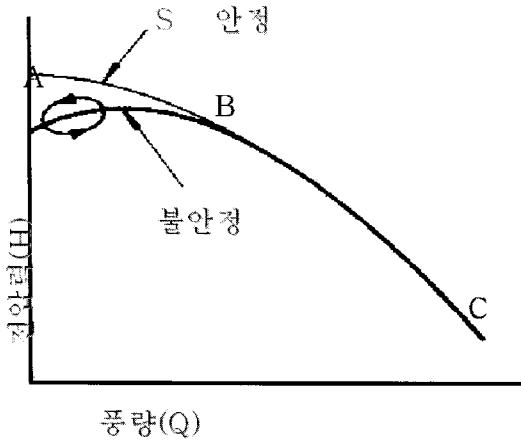
## 2. 유동해석 절차

해석대상인 송풍기는 원심식 유인송풍기로서 고정속도 전동기에 의해서 구동되며 풍량조절은 Inlet Damper와 Outlet Damper 방식을 채용하고 있으며 보일러 1 호기당 유인송풍기 1개가 설치되어 있다. 현장점검과 진동측정 Data를 분석한 결과 내부 유체의 압력변동 주파수성분과 진동 주파수 성분이 일치함을 알 수 있었으며 입구측의 미약한 압력변동이 팬 및 주변 구조물을 통과하면서 진동이 증폭됨을 알 수 있었다. 따라서 유인송풍기 및 덕트 내부를 유동해석을 통해 평가하고 이에 대한 개선방안과 타당성 검증하고자 다음과 같은 업무를 수행하였다.

- 각종 운전/설계 데이터 및 도면 등 기초자료 검토
- 유인송풍기 및 덕트 3차원 형상 모델링 및 Meshing
- CFD 상용코드(CFX)를 이용한 3차원 유동해석 평가
- 유동해석결과 분석 및 개선방안 도출
- 도출된 개선방안을 적용하여 유동해석 재평가 및 검증
- 검증된 개선 방안 또는 설계 변경안 제시 등

### 가. 기초자료 검토

기초자료 검토결과 송풍기의 설계풍량은 19,509(m<sup>3</sup>/min), 설계풍압 567mmAq 이며 설계풍량에 비해 저풍량 상태로 서징이 발생할 가능성이 큰 것으로 나타났다. 서징은 송풍기의 토출구를 점진적으로 닫아 가면서 운전 할 때 소풍량에서 풍량 - 풍압곡선이 우측으로 올라가는 특성의 풍량부분에서 지금까지 조용히 운전되던 송풍기가 풍압과 풍량이 맥동하면서 소음이 발생하고 진동을 일으켜 심한 경우에는 운전이 불가능하게 된다. 이러한 현상을 서징이라 하며, 서징은 송풍기와 덕트 진동계의 자려진동으로써 발생시키는 덕트계의 고유진동수에 해당된다. [그림 1]의 풍량 - 풍압곡선 ABC의 정점 B보다 약간 소풍량의 점S에서 풍량A에서 B까지의 사이가 서징 범위이고, S점을 서징 한계점이라 한다. 이 점은 임펠러의 설계법, 입력의 고, 저 송풍기의 형식에 따라 다르나 일반적으로 서징 한계는 압력비가 클수록 크고, 작을수록 작은 경향이 있다.



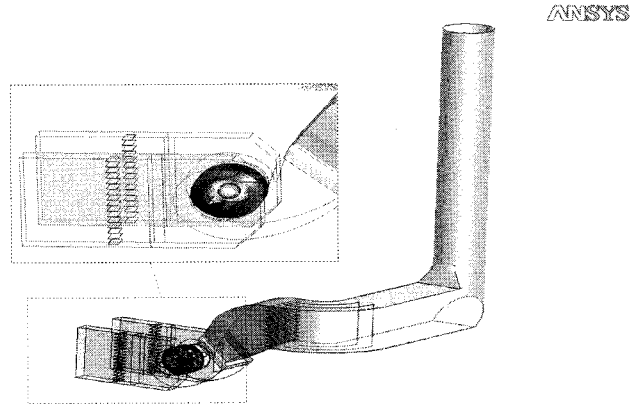
[그림 1] 서징 한계곡선

### 나. 3차원 형상 Modeling 및 Meshing

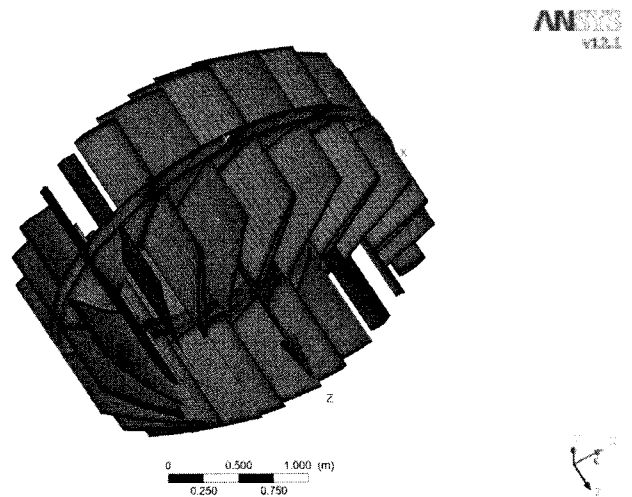
유동해석의 대상으로 고진동 문제가 발생하는 Inlet Damper 전단에서부터 연돌까지를 해석구간으로 설정하고 3차원 형상 Modeling을 수행하였다. [그림 2]는 유인송풍기 및 덕트의 3차원 형상 Model이다.

해석대상 유인송풍기는 원심팬이며 양흡입 방식으로 [그림 3]와 같이 두개의 임펠러가 붙어있는 형식이다. 해석을 위해 유인송풍기의 임펠러 모델은 회전체 전용 Mesh Tool인 TurboGrid를 이용하여 Meshing을 하였으며 전체모델은 CFX의 Pre Mesh Tool을 이용하여 Meshing을 한 후 서로 조합하는 방식으로 수행하였다. 따라서 격자는 임펠러, 임펠러 전단의 흡입

덕트, 임펠러 후단의 케이싱, 그리고 댐퍼와 가이드 베인을 포함하는 전후단의 직선형 덕트로 각각 분리하여 격자를 생성한 후 다시 조합하였다. 이는 운전조건에 따른 임펠러의 회전을 구현하기 위한 Rotating Frame을 적용하기 위한 격자 형태로 이를 통해 실제와 동일한 팬의 거동을 구현하였다.



[그림 2] 유인송풍기 및 덕트 해석모델



[그림 3] TurboGrid에서 생성한 Blade 격자

### 다. 경계조건

본 해석평가에서는 Unstructured 격자계를 지원하고 복잡한 형상의 경우에도 비교적 용이하게 격자생성 및 해석이 가능한 ANSYS CFX Ver. 12. 1을 사용하였다. 일반적으로 난류유동에 대한 지배방정식으로 연속방정식, Reynolds averaged Navier Stokes (RANS) 방정식을 사용하며, ANSYS CFX는 지배방정식의 이산화방법으로는 FEM(finite element method) based FVM(finite volume method)을 사용한다. 유한요소법에서 사용하는 형상함수의 개념을 이용하여 적분에 필요한 Integration

Point의 값이나 Gradient를 보다 정확하게 구할 수 있다.

유인송풍기 및 덕트 해석 조건은 회전수 890 [rpm]으로 회전하는 임펠러의 효과를 모사하기 위해 Rotating Frame을 적용하였으며, 회전하는 영역인 Rotating Frame과 정지되어 있는 영역인 Stationary Frame 사이의 절대속도와 상대속도의 변환과 Mixing 효과를 고려하기 위해 Stage Interface를 적용하였다.

모든 벽면은 Non Slip 조건이 적용되었으며, 이에 의해 Impeller의 Blade가 포함된 Rotating 영역에서는 날개가 회전하는 효과가 고려된다. Stationary 영역으로 설정된 부분 중 Impeller의 Shroud가 포함된 벽면에는 Rotating Wall 조건을 적용하여 회전효과를 고려하였다. Inlet 조건으로는 운전조건별 각종 모니터링 값과 설계 값을 토대로 [표 1]과 같은 조건에 의해 입구유속을 결정하였으며, 출구는 대기에 개방되어 있으므로 대기압에 해당하는 압력조건을 적용하였다. 측정된 결과에 의하면 진동현상은 출력 50%이하에서 진동이 크게 나타났다.

[표 2]는 발전소 출력 20%일 때를 기준으로 현재 상태인 Case 1과 4가지의 개선(안)에 대한 상대적인 평가를 위해 Case Study를 수행하였다. Case 2는 팬의 전후단을 바이패스 배관으로 연결하는 방법이다.

Case 3~Case 5에서는 입구 측에 Inlet Hole을 신설하여 저출력 운전 중에는 Hole을 개방하는 방법에 대해 평가하였다.

### 3. 유동해석결과

#### 가. 출력에 따른 원심팬 해석결과

[표 3]은 출력에 따라 해석한 결과로서 원활한 수렴 성과 일관된 해석결과와의 비교를 위해 Inlet Damper가 완전개도된 상태인 90°일 때를 기준으로 해석하였다. 해석결과값을 살펴보면 전후단의 압력차는 출력이 작은 경우 전후단의 압력차가 크고 출력이 큰 경우는 압력차가 작음을 알 수 있으며 이는 일반적인 유체기계의 특성과 같다. 즉, 현재 해석방법은 일반적인 유체기계의 특성을 잘 보이고 있으나, 실제 계측된 입구압력과 차이가 있으므로 해석조건이나 해석영역의 정의에 있어서 실제 작동조건과는 차이가 있는 것으로 판단된다. 일반적인 유체기계의 압력상승을 잘 나타내고 있으므로, 원심팬의 성능곡선과 Power의 경향이 일치하는 것으로 판단된다. 특이한 점은 임펠러의 회전부위에서 측정된 X, Y, Z 방향의 힘이 큰 차이를 보이고 있다는 점이다. FX, FY, FZ로 나타낸 각 방향의 힘을 보면, 축의 방향인 Z방향의 힘은 출력이 100%와 80%일 때는 거의 작용하지 않지만, 출력 50%와 20%에서는 크게 작용

[표 1] 유동해석에 적용된 운전조건

출력	Air Flow [m³/sec]	Inlet Damper 각도	Inlet Press. [mmWTR]	INLET Temp. [C]	STACK Temp. [C]	VIB_X	VIB_Y
20%	163,249	90°	-16,821	75.124	91.992	81.826	74.995
50%	189,305		-46,988	130.765	137.242	72.476	68.697
80%	276,316		-126,91	161.435	161.572	30.909	27.566
100%	318,169		-203,18	187.413	184.277	32.944	32.459

[표 2] Case Study 조건

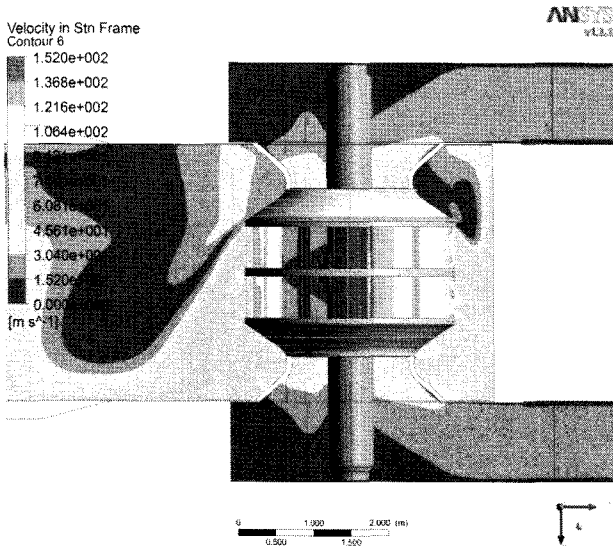
Case No	Case Study 내용 (출력조건 20 % 기준)	출력	Inlet Damper 각도
Case 1	현재 상태	20%	18°
Case 2	입출구를 연결하는 Bypass Line 신설		
Case 3	입구측에 Inlet Hole 신설 (높이 1m × 폭 0.5m)		
Case 4	입구측에 Inlet Hole 신설 (높이 1.5m × 폭 0.6m)		
Case 5	입구측에 Inlet Hole 신설 (높이 2m × 폭 0.7m)		

하는 것으로 나타났다. 원래 원심팬을 양흡입의 형태로 장착한 이유는 이와 같은 축방향의 추력을 상쇄시키기 위한 목적이 있으나, 출력이 작은 경우 즉, 유량이 작은 경우에는 축방향으로 힘이 상쇄되지 않고 크게 작용하는 것으로 판단된다. X와 Y방향의 힘은 출력이 큰 경우 크게 작용하며, 출력이 작아질수록 작아지는 것을 알 수 있다.

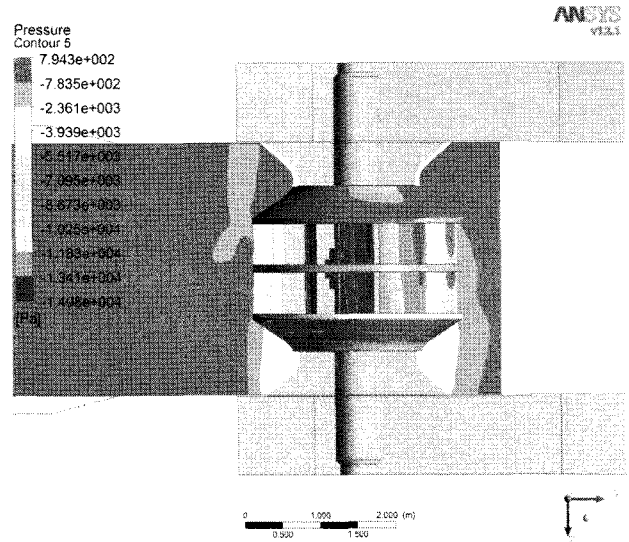
[표 3] 출력에 따른 원심팬 해석결과

출력	100%	80%	50%	20%
P [Pa]	4.51E+03	4.96E+03	5.23E+03	6.10E+03
FX [N]	2.35E+03	2.31E+03	-5.54E+02	-3.17E+02
FY [N]	4.41E+03	2.21E+03	1.10E+03	3.22E+02
FZ [N]	9.78E-01	7.31E+01	-7.56E+03	8.94E+03

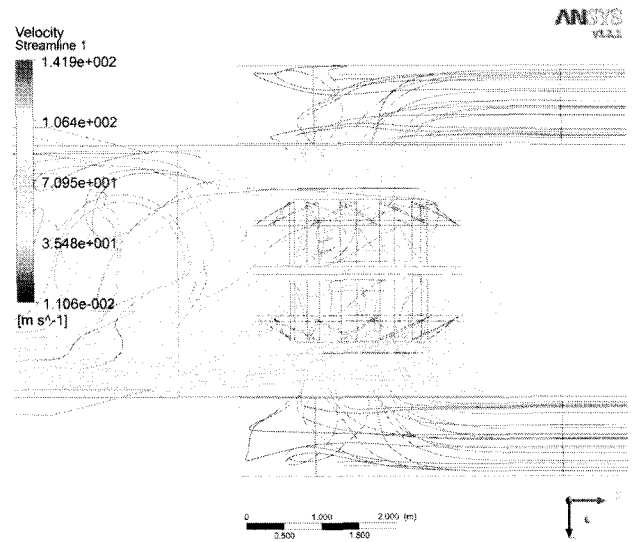
출력 20%인 경우는 임펠러 주위에서 비대칭적인 유동패턴이 나타나 Z방향(축방향)으로의 힘이 크게 작용하는 것으로 판단된다. [그림 4]를 보면 상하의 대칭형태가 아니라 하부의 유속이 빠르게 형성되는 것을 볼 수 있고, 그 결과로 [그림 5]에서와 같이 상부의 압력이 높게 형성되게되며 임펠러표면에 작용하는 압력이 상부가 크므로 Z 방향으로 큰 힘이 작용하게 된다. 이와 같이 속도편차에 의한 압력편차가 발생하는 이유는 [그림 6]에서와 같이 유량이 적은 경우 임펠러후류의 Casing에서 유선이 한쪽 벽면으로 편향되는 Coanda Effect (유체가 점성효과에 의해 자기의 에너지가 덜 소비되도록 표면을 따라 흐르는 현상)가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.



[그림 4] XZ 단면에서의 속도분포 (20%)



[그림 5] XZ 단면에서의 압력분포 (20%)



[그림 6] 임펠러 주위의 유선분포 (20%)

## 나. Case Study 결과

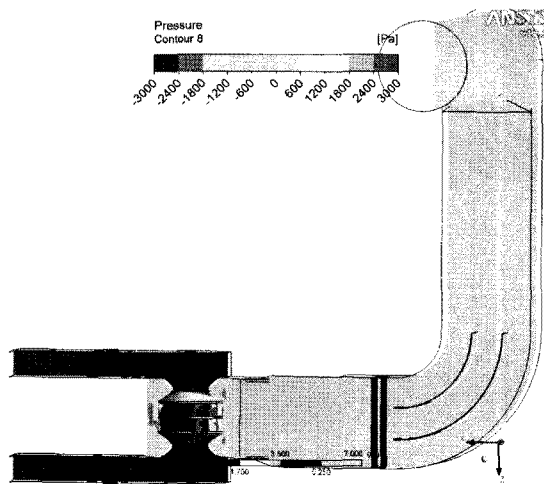
Case Study는 현재 상태와 개선(안)에 대한 상대적인 평가를 위해 수행되었으며 현재 상태에서 실현 가능한 개선(안)을 도출하고 그중 실현가능성이 큰 두가지 방법을 도출하여 현재 상태와 비교하였다. 그 결과 Case 2인 경우는 유인송풍기의 후단에 (-) 압력이 발생하는 것으로 나타나서 본 설비에서는 Inlet Hole을 설치하는 방법이 효과가 뛰어난 것으로 판단된다. Inlet Hole의 크기를 변경하는 조건인 Case 3~Case 5의 해석결과를 분석해 보면 Inlet Hole이 클수록 진동은 감소되는 경향을 보이니 일정크기 이상일 경우 오히려 진동이 발생할 가능성이 큰 것으로 나타났다. [표 4]는 개선(안)에 따른 각각의 Case 별 해석결과이다.

[표 4] 개선(안)에 따른 원심팬 해석결과

출력	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
P [Pa]	5.34E+03	4.92E+03	3.02E+03	2.01E+03	1.10E+03
FX [N]	-4.55E+02	-1.12E+02	5.45E+02	2.27E+02	1.17E+03
FY [N]	-0.75E+01	-1.15E+03	1.21E+03	-3.61E+02	3.25E+02
FZ [N]	1.35E+03	1.38E+02	2.01E+02	2.80E+03	1.99E+02

1) Case 1

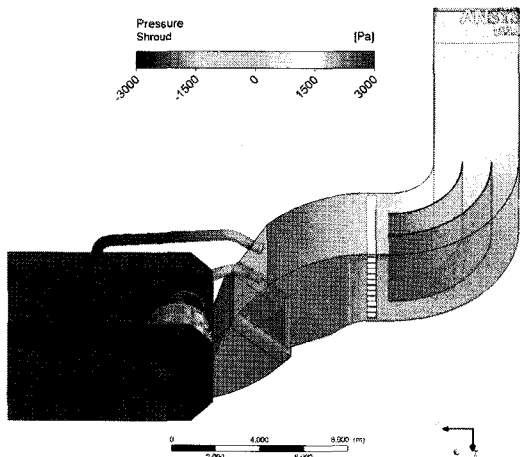
Case 1은 1호기의 현재 상태를 해석조건으로 설정한 것으로서 실제 진동값이 크게 나타나는 정격 출력값 20%, 실제 운전시의 Inlet Damper 각도 18°일 때의 해석결과이다. 해석 결과 [그림 7]과 같이 덕트 후단에서 -600Pa~1,200Pa의 압력 분포를 보였다.



[그림 7] Case 1의 덕트내부 압력분포단면

2) Case 2

Case 2는 유인송풍기 전단과 후단을 Bypass Line으로 연결하였을 때를 평가한 것으로 해석조건은 Case

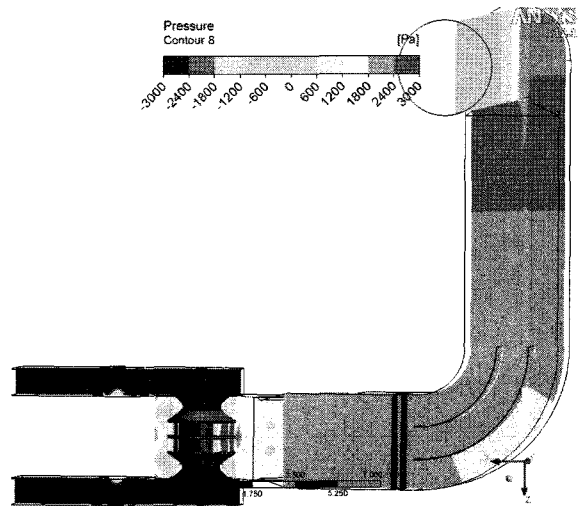


[그림 8] Case 2의 덕트표면 압력분포

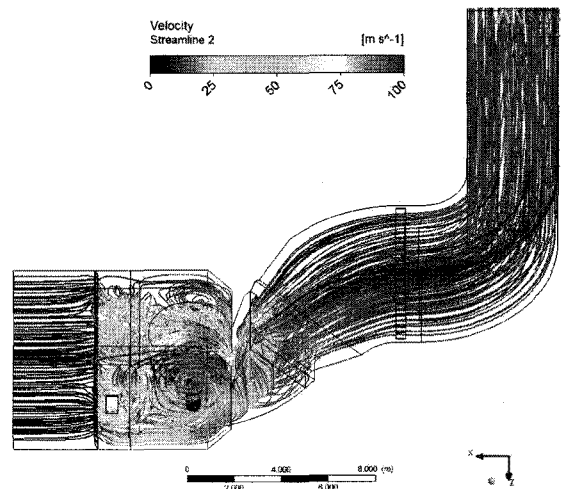
1과 동일한 조건을 적용하였다. 해석 결과 [그림 8]과 같이 덕트 후단에서 0 Pa~1,500Pa의 압력 분포를 보였다. 이는 대용량의 유인송풍기 영향으로 Bypass Line을 통해 배기가스가 역류하는 것을 나타낸다.

3) Case 3

Case 3는 Inlet Damper 바로 후단에 Inlet Hole을 높이 1m × 폭 0.5m로 만들 경우를 해석한 결과이며 [그림 9]와 같이 덕트 후단에서 1,200Pa~



[그림 9] Case 3의 덕트내부 압력분포단면



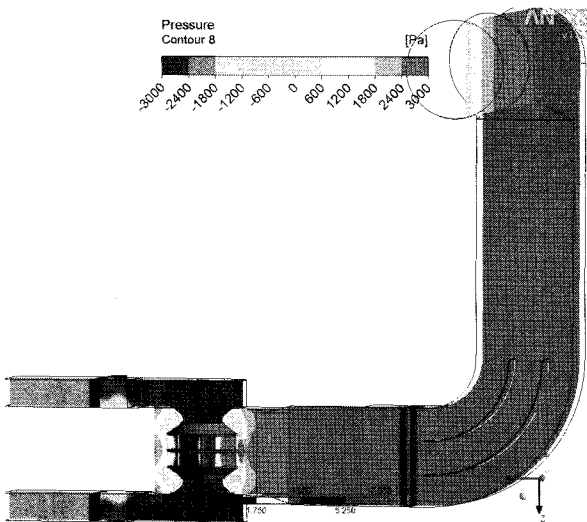
[그림 10] Case 3의 덕트내 유선의 거동

3,000Pa의 압력 분포를 보였다. 이는 Inlet Hole을 통해 유입된 외기가 팬의 회전에 의해 압력이 상승하고 있음을 보여 준다. 그러나 덕트내부 압력분포단면을 보면 압력이 불균일한 단면이 일부 나타나며 이는 진동을 유발할 가능성이 있음을 나타낸다.

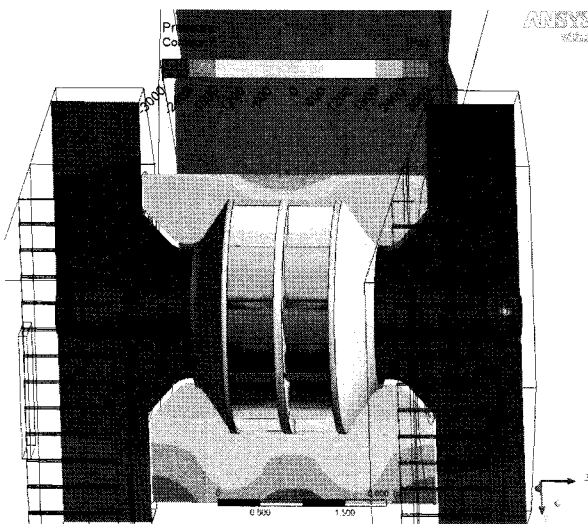
[그림 10]은 덕트내 유선의 분포를 나타낸 것으로서 Inlet Hole을 통해 외기가 유입되어 혼합되는 것을 보다 자세히 확인할 수 있다.

#### 4) Case 4

Case 4는 Inlet Damper 바로 후단에 Inlet Hole을 높이 1.5m × 폭 0.6m로 만들 경우를 해석한 결과이다. 해석 결과 [그림 11] 과 같이 덕트 후단에서 2,000Pa~2,500Pa의 압력 분포를 보였다. 이는 Inlet Hole을 통해 유입된 외기가 팬의 회전에



[그림 11] Case 4의 덕트내부 압력분포단면

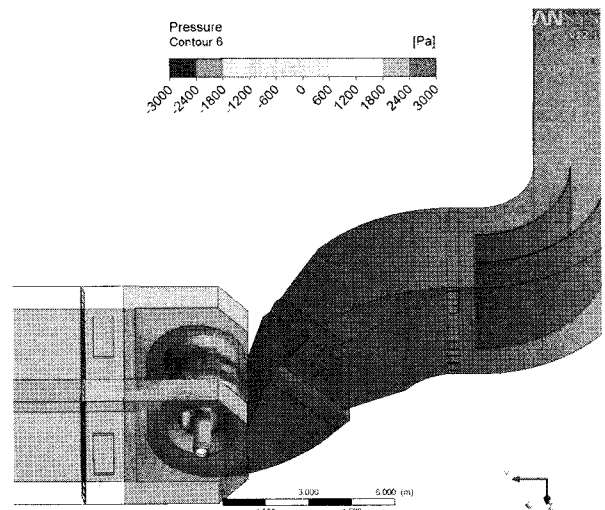


[그림 12] Case 4의 유인송풍기 주변 압력분포단면

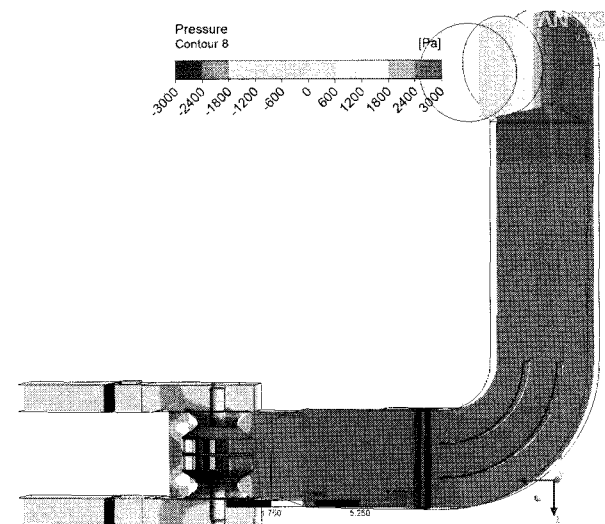
의해 압축되고 있음을 보여며 덕트 내부 압력분포단면을 보면 비교적 균일한 압력분포를 보이고 있으며 이는 진동발생이 상대적으로 적을 가능성이 있음을 알 수 있다. 또한 [그림 12]는 유인송풍기 주변의 압력분포를 나타낸 것으로서 비교적 균일한 압력분포를 보이고 있다.

#### 5) Case 5

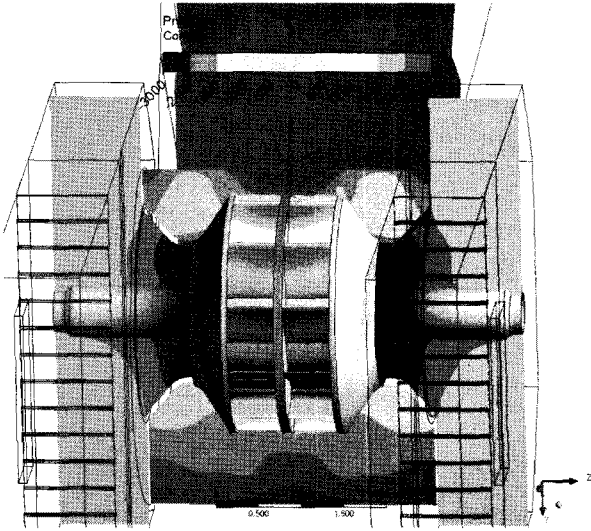
Case 5는 Inlet Damper 바로 후단에 Inlet Hole을 높이 2m × 폭 0.7m로 만들 경우를 해석한 결과이다. 해석 결과 [그림 13]~[그림 16] 와 같이 유인송풍기 후단에서 1,800Pa~3,000Pa의 압력 분포를 보인다. 그러나 유인송풍기 전단의 경우 외기의 과다 유입으로 Case 4에 비해 압력이 상승했음을 알 수 있다. [그림 17]의 덕트내부 압력분포단면 또한 Case 4에 비



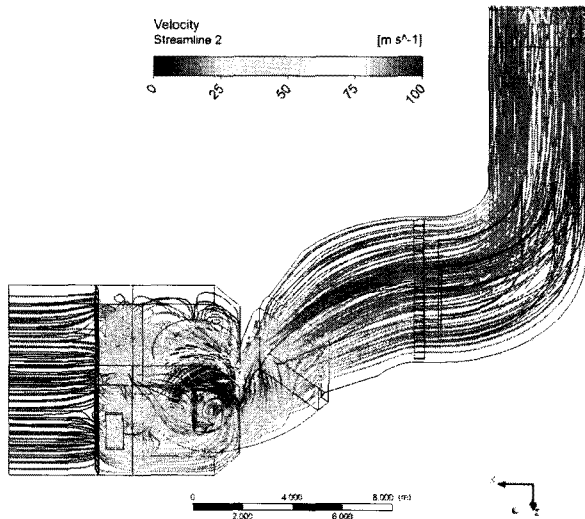
[그림 13] Case 5의 덕트표면 압력분포



[그림 14] Case 5의 덕트내부 압력분포단면



[그림 15] Case 5의 유인송풍기 주변 압력분포단면



[그림 16] Case 5의 덕트내 유선의 거동

해 불균일한 압력분포를 보이고 있다. 이는 Inlet Hole 이 더 크어도 불구하고 Case 4에 비해 진동발생이 발생할 가능성이 상대적으로 높음을 알 수 있다. 유선의 분포도 [그림 16]에서 보는 바와 같이 유인송풍기 후단의 유선의 분포가 비교적 고르기는 하나 Case 4에 비해 속도가 높은 부위가 있음을 알 수 있다.

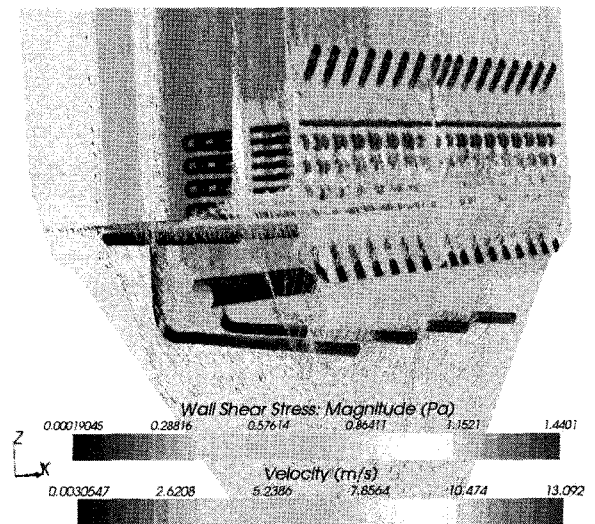
#### 다. 결론 및 권고사항

출력조건 별 유동해석결과 출력조건 0~50%에서 진동이 발생될 가능성이 큰 것으로 판단되며 Case Study 결과 Case 2의 Bypass Line을 설치하는 방법과 Case 3~Case 5의 Inlet Hole을 설치하는 방법을 검토한 결과 Case 3~Case 5의 Inlet Hole을 설치할 경우가 진동 발생 가능성이 적을 것으로 판단된

다. 또한 Inlet Hole의 크기는 1.5m × 0.6m~2m × 0.7m 일때 가장 진동이 적게 나타날 것으로 판단되며 이때의 유량은 약 130~200 인 것으로 평가되었다. 그러나 유동해석의 결과와 실제 현장 여건은 다소 상이한 요인이 존재하므로 가변형 Inlet Hole을 2m × 0.7m로 설치하고 미세 조정을 통해 현장여건에 맞게 조정하는 것이 보다 바람직할 것으로 판단된다. 이밖에도 가변형 Inlet Hole의 운영시 저출력조건인 0~80% 조건에는 Inlet Hole을 개방하고 고출력조건인 80~100% 조건일 경우 Inlet Hole을 닫고 운전하는 것이 바람직할 것으로 나타났다.

#### 4. 맺음말

실제 현장에서 발생하는 물리적인 현상들을 컴퓨터를 이용하여 해석적으로 평가할 경우 설비개선 전과 후에 나타날 수 있는 각종 변수와 정보들을 사전에 검증할 수 있다. 예를 든다면 보일러, 열교환기 등의 유동 및 연소해석에서는 속도, 온도, 압력 뿐 만 아니라 반응물질, 화학반응, 연료입자 분포, 열 방출량, 배기가스 분포 등 기존의 평가방법으로 얻어낼 수 없었던 많은 양의 다양한 정보를 얻어낼 수 있다. 나아가 그 결과 값을 이용해 구조해석을 수행할 경우 노내 및 튜브의 취약부위 도출, 구조적 안전성 검증, 수명예측 등이 가능하다. 따라서 최근에는 유동해석과 구조해석을 연계한 연성해석(FSI:Fluid Structure Interaction)이 각광받고 있으며 이를 통해 발전소 현장에 보다 정확한 엔지니어링 평가도구로 자리매김할 것으로 판단된다.



[그림 17] 보일러 유동/연소해석 예