

## 탈황설비 배관내 유동장 해석 및 압력손실 계산 Flow Analysis and Pressure Loss Calculation in the Ducts of FGD System

고성모, 이진욱\*, 황금호\*\*

ATES(주) CFD팀, 고등기술연구원 에너지/환경연구실\*, (주)대우 플랜트본부\*\*

### 요약

탈황설비 배관내 연소가스의 삼차원 유동장에 대한 전산해석을 수행하였다. 복잡한 형상으로 주어진 배관내의 유동장 특성을 관찰하고 압력손실을 계산하였다. 특히 안내깃의 설치유무에 따른 유동장 특성 변화 및 압력손실 감소효과를 집중적으로 고찰하였다. 안내깃의 설치에 따라 유량배분이 적절하게 되고 압력손실이 현저하게 줄어들음을 알 수 있었다. 배관에서의 압력손실을 계산하여 배관 설계 및 송풍기 용량 산정의 적절성을 확인할 수 있었다.

### 1. 서론

최근 국내외적으로 환경문제가 과거의 지역적인 환경오염문제를 떠나 지구온실효과 및 산성비 등과 관련하여 전세계적인 중요한 관심사로 부각되고 있다. 이와 관련하여 대기오염의 생성원중의 하나인 석탄(미분탄)화력 발전소에 대한 규제도 점점 강화되고 있는 실정이다[1]. 표 1에 나타난 바와 같이, 국내의 경우 현재의 미분탄 발전소에서 배출되는 SOx와 분진의 배출량은 1999년 이후의 규제치를 초과하고 있으며, 이와 같은 SOx와 분진배출 문제는 탈황설비 플랜트를 설치함으로써 해결할 수 있는 것으로 알려져 있다.

표 1 석탄화력 발전소에 대한 환경규제 및 배출 현황[1] (O<sub>2</sub> 6% 기준)

오염물질	'94년 이전	'95년 이후	'99년 이후	보령화력발전소	
				without FGD	with FGD
SOx(max. ppm)	700	500	270	502	150
NOx(max. ppm)	350	350	350	227	200
분진(mg/Sm <sup>3</sup> )	200	100	50	176	40

탈황설비내에서는 SOx를 포함한 연소가스가 일련의 장치 및 배관을 거친 후 최종적으로 연돌(stack)을 통하여 배출된다. 이 과정에서 각 배관 및 장치에서 필연적으로 압력손실이 존재하고, 진동 및 소음 등이 발생할 수 있다. 이와 같은 인자는 시스템 설계 및 운전에 주요한 변수로 작용하게 된다. 특히 이 과정에서 발생하게 되는 압력손실은 송풍기 용량 산정에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 탈황설비내에서의 압력손실에 대한 정확한 예측을 통하여 시스템을 최적화하고 적절한 용량의 송풍기를 설치하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

압력손실은 각종 단위장치 및 복잡한 관로를 통과하는 연소가스의 유동에 의하여 발생한다. 이 중 아황산가스 흡수기 등 단위장치들에 대해서는 각 전문업체에서 오랫동안 축적된 자료를 바탕으로 제시하는 값들이므로 비교적 신뢰성이

있는 것으로 보여지고 있다. 그러나, 국내에서 건설중인 탈황장치의 경우, 현재 운전중인 발전소의 기존 장치의 배치에 변경을 가하지 않으면서 탈황설비를 추가하는 특성상 시스템의 배관이 표준형상이 아닌 비교적 복잡한 형상을 지니게 되어 각 배관에서의 압력손실의 계산에는 상대적으로 어려움이 따르게 된다.

배관내 유동특성 및 압력손실의 정확한 예측을 위해서는 연소가스의 유동에 대한 기하학적 상사(geometrical simialrity) 및 역학적 상사(dynamic simialrity)가 고려된 모형시험이 수행되는 것이 최선이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 상사를 만족시킬 수 있는 규모의 모형실험을 수행하기 위해서는 장기간의 실험수행기간 및 많은 제작비용이 요구되며, 또한 모형제작시 기하학적 상사를 완벽하게 만족시키기가 어려운 문제점이 발생한다. 이와 같은 모형실험의 어려움을 해결할 수 있는 대안으로서 전산유체역학 기법에 의한 유동장해석 기술을 들 수 있다. 전산해석의 경우에도 해석결과는 실제 현상과 어느 정도의 오차를 지니게 된다. 그러나 반응이나 상변화 등을 동반하지 않는 순수한 유동장 해석시에는 오차가 비교적 적은 것으로 알려지고 있다. 특히 최근에 활용되기 시작한 비정렬격자계(unstructured grid)의 적용은 복잡한 기하학적 형상을 실제 형상과 완전히 동일하게 설정할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 이런 점을 고려하면, 전산해석 결과가 지니는 오차의 범위는 경우에 따라서는 모형실험이 가지는 오차범위 이내에 포함될 수 있을 것으로 판단된다. 부가적으로 모형실험장치 제작비용의 절감 및 상대적으로 빨리 해석결과를 확보함으로써 공사 수행기간의 단축을 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 울산화력발전소의 탈황설비 배관내를 흐르는 연소가스의 삼차원 유동장에 대한 전산해석을 수행하여 각 배관내에서의 압력손실을 계산하였다. 곡률이 심한 배관인 경우에는 안내깃(guide vane)을 설치하지 않은 경우와 설치한 경우에 대한 유동해석을 각각 실시하여 상호간에 대한 압력손실 및 유동장의 변화를 고찰하여 안내깃 설치의 적절성을 판단하였다. 이와 같은 방법론을 현재 건설중인 울산화력발전소의 4, 5, 6호기에 적용하였으며, 계산결과를 반영하여 안내깃 설치위치 및 송풍기 사양결정 등 기본설계에 반영하였다.

## 2. 수학적 방법

그림 1은 울산화력발전소에 건설될 탈황장치의 구성도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 연소가스는 기존 발전소의 전기집진기 후단에서 두 개로 분기된 배관을 통하여 탈황장치로 유입된 후 일련의 장치를 순차적으로 지나게 된다. 이와 같은 탈황장치내의 유동장은 비반응/비압축성 유동으로 볼 수 있으며, 유동장을 지배하는 방정식은 3차원 직교좌표계에서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial \rho u_i \phi}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi$$

여기서  $x_i$  및  $u_i$ 는 3차원 직교좌표계에서 각 방향 및 속도성분을 나타내고,  $\phi$ 는 해석대상 종속변수로서 각 축방향의 속도, 난류운동에너지  $k$  및 난류운동에너지 소멸을  $\varepsilon$ 을 각각 나타낸다. 그리고  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\Gamma_\phi$ 와  $S_\phi$ 는 각 종속변수에 대한 등가확산계수 및 생성항을 각각 나타낸다. 탈황장치 시스템내의 관로는 직교성을 벗어나고 비교적 복잡한 형상을 지닌다. 본 연구에서는 이런 점을 고려하여 비정렬격자계[2]를 적용하여 배관의 기하학적 형상을 실제 형상과 완전히

동일하게 구현하여 해석을 수행하였다. 그림 2는 비정렬격자계의 예(표면격자)로서 안내깃을 보여주기 위하여 위와 옆벽의 격자를 제거하였으며, 안내깃 주위에는 유동의 변화가 심하므로 격자점을 밀집시켰다. 본 연구에서는 이와 같은 수학적 방법론을 모두 포함하고 있는 프로그램중 하나로서 열유체 해석 상용패키지인 FLUENT/UNS[3]를 이용하여 삼차원 관로내의 난류유동장을 해석하였다.

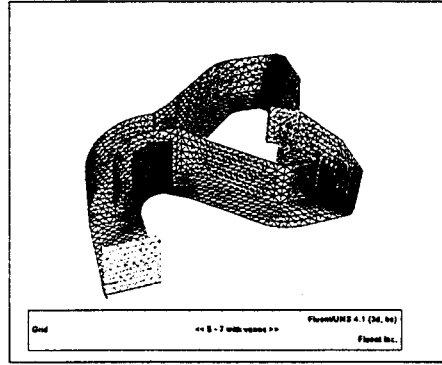
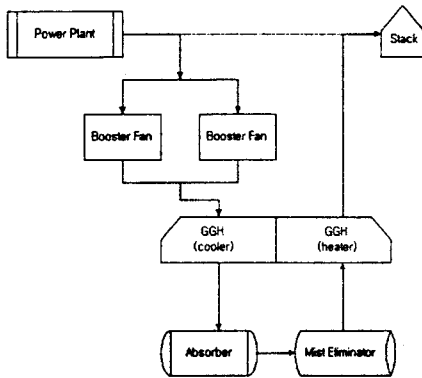


그림 1 탈황설비에서 연소가스 흐름도      그림 2 비정렬격자계의 예(표면 격자)

### 3. 결과 및 고찰

울산화력발전소의 탈황설비의 배관시스템은 7부분으로 이루어진다. 여기서는 이들을 대표하여 5호기 중에서 열교환기(GGH)와 연돌(stack) 사이에 있는 제 7번 관의 유동해석 결과를 보이고자 한다. 그림 3과 4는 관벽의 압력분포로서, 안내깃을 설치함으로써 입구와 출구의 압력차(즉 압력손실)가 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다. 그림 5는 안내깃이 없을 경우의 속도벡터로서 연돌에 가까운 쪽의 90도로 꺾이는 곳에서 바깥쪽 관벽으로 흐름이 밀려나고 안쪽 벽에는 흐름이 박리(separation)되어 큰 압력손실을 예측할 수 있다. 그러나 안내깃이 설치되어 있는 경우 그림 6과 같이 흐름이 적절히 분배되어 박리가 일어나지 않는 것을 확인할 수 있다.

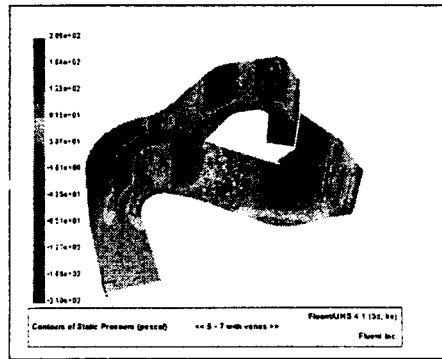
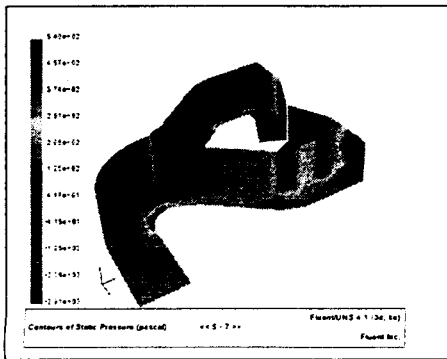


그림 3 안내깃이 없을 때의 압력분포      그림 4 안내깃 설치시의 압력 분포

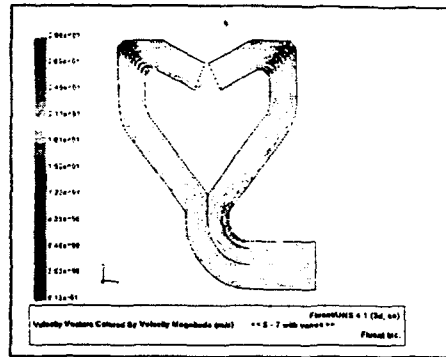
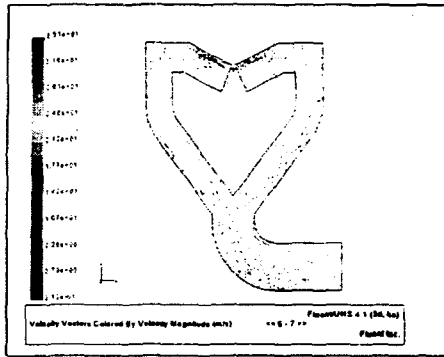


그림 5 안내깃이 없을 때의 속도벡터    그림 6 안내깃 설치시의 속도벡터

전산해석에 의해 관 입구와 출구의 압력을 측정해서 얻은 압력손실과 손실계수법[4]을 이용하여 계산한 압력손실 값을 표 2에 나타내었다. 여기서 안내깃 (guide vane)이 없는 경우와 있는 경우를 계산하여 그 결과를 서로 비교하여 안내깃의 영향을 살펴보았다. 압력손실이 적게는 43.7 Pa에서 많게는 348.5 Pa의 감소를 보여, 그 효과가 상당함을 알 수 있었다. 전반적으로 전산해석에 의한 계산결과는 손실계수법에 의한 계산결과보다 약간 적은 압력손실을 나타내고 있으나 그 정도의 차이는 심하지 않음을 알 수 있다. 4호기와 6호기도 5호기와 마찬가지로 전산해석 결과가 손실계수법에 의한 값 보다 모두 약간 낮은 압력 손실을 나타내었다.

표 2 울산화력 5호기 배관에서의 압력(전압) 손실, 단위 : pascal

		전산해석	손실계수법
5-1	w/o vane	127.5	
	with vane	82.1	100.6
5-2	w/o vane	130.5	
	with vane	86.8	102.7
5-3	w/o vane	143.1	
		135.4	
	with vane	101.7	105.8
		76.5	83.9
5-4		6.8	13.5
5-5		17.1	6.6
5-6		1.6	
5-7	w/o vane	451.0	400.6
		434.8	400.6
	with vane	156.7	
		86.3	

상기의 결과를 요약하여 압력손실에 대한 값을 정리하면 표 3과 같다. 각 배관에서 두 개의 배관에서 하나로 합쳐지거나 또는 하나의 배관에서 두 개의 배

관으로 분리되는 경우에는 안정성을 고려하여 압력손실이 큰 쪽의 값을 적용하였다. 각 장치에서의 압력손실은 장치를 제공하는 업체의 기술사양에 의한 값을 적용하였다. 표 3의 결과로부터 이번 울산화력 공사에 설치될 추가송풍기 (booster fan)는 예측되는 압력강하에 비하여 약 7-8% 정도의 여유를 가지는 것으로 나타났다. 이와 같은 여유 용량은 적절한 값으로 판단된다.

표 3 울산화력 탈황장치에서의 압력(전압)손실, 단위 : pascal(N/m<sup>2</sup>)

FROM	TO	4호기	5호기	6호기
E/P	B/F	94.9	86.8	98.2
B/F (PRES. INCREASE)		(4216.7)	(4216.7)	(4216.7)
B/F	GGH	71.9	101.7	93.7
GGH		457.	457.	457.
GGH	JBR	6.8	6.8	6.8
JBR		2402.	2402.	2402.
JBR	M/E	17.1	17.1	17.1
M/E		196.	196.	196.
M/E	GGH	1.6	1.6	1.6
GGH		524.	524.	524.
GGH	STACK	117.6	117.6	117.6
PRES. LOSS TOTAL		3888.9	3910.6	3914.0
INCREASE - LOSS		327.8	306.1	302.7

#### 4. 결론

전산유체역학 기법을 이용하여 탈황설비 배관내 유동장 해석을 수행하였다. 안내깃의 유무에 따른 유동장의 특성을 관찰하였으며, 압력손실을 계산하였다. 안내깃의 설치에 따라 유량배분이 적절하게 되고 압력손실이 줄어들음을 알 수 있었다. 배관에서의 압력손실을 계산하여 배관설계 및 송풍기 용량 산정의 적절성을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. P. S. Ji et al., "A Prospect of IGCC Commercial Application to Korea", Tenth Korea-U.S.A. Joint Workshop on Coal Utilization Technology, Taejon, Korea, 1994
2. S. E. Kim et al., "A Reynolds-Averaged Navier-Stokes Solver Using Unstructured Mesh-Base Finite-Volume Scheme", AIAA paper 98-0231
3. Fluent/UNS User's Guide, Fluent Inc., 1997
4. 김교두 역, 공기조화설비 설계 핸드북, 도서출판 한미