

# 발전소 통풍계통의 압력손실 증가에 대비한 송풍기 블레이드 형상변경

## 1. 소개

최근 대용량의 석탄화력발전소에서는 보일러 통풍계통에 연소용 공기공급과 연소가스배출을 위해서 축류형 송풍기를 사용하고 있다. 이러한 축류형 송풍기는 기존의 발전소 운전조건을 감안한 설계



**김성원**

richkim@kesep.co.kr

울산과학기술대학교 전기공학과 졸업  
한국교육개발원 전기공학과 졸업  
現 한국남동발전(주) 부장

특성을 가지고 있으며 이를 기반으로 설계 제작 및 설치되었다. 그러나 최근의 발전소 경영여건은 대기 오염물질 배출 총량제 실시 및 세계 에너지시장의 다변화로 인한 저품질탄의 사용 필요성이 대두되었고 이는 기존 설계 운전 조건을 초과하는 가혹한 운전 조건을 요구하고 있다.

이러한 이유로 발전소 질소산화물 저감설비, 집진설비, 탈황설비 등은 더욱 가혹한 운전여건에 처하게 되었고, 발전소 통풍계통에 있는 압입송풍기, 유인송풍기 및 탈황용승압송풍기 등의 운전신뢰성이 크게 훼손되고 있

는 실정이다. 영흥화력 3호기 압입송풍기의 경우 부하를 증가시키는 주원인이 되는 암모니아 슬립은 영흥화력 질소화합물의 규제치인 15 ppm 이하의 배출 준수를 위해 탈질설비의 암모니아 주입량이 증가하게 되었고 이러한 암모니아의 과다 주입 과정 중 반응하지 않은 암모니아의 증가로 보일러 통풍계통 흐름상의 통로에 있는 공기예열기의 소자를 오염시켜 공기예열기 전후단의 압력상승을 가져오게 되며 이는 보일러 통풍 전 계통의 압력손실 즉 송풍기 자체의 부하 증가를 초래한다. 따라서 이러한 통풍계통의 부하증가는 발전소 정격출력을 유지하기 위한 유량 및 압력에 추가 부하를 요구하게 되며, 발전소 출력을 줄이지 않는다면 이는 통풍기의 실속 현상으로 이어져 발전소 전체 운전의 신뢰도에 영향을 주는 사태를 초래한다. 이에 영흥화력 3호기 압입송풍기의 형상을 모델링하고 이를 통해서 케이싱, 전동기 정격용량 등은 변화시키지 않은 채로 송풍기 블레이드의 형상 변경만을 통해서 실속여유율의 추가 여유 확보를 통한 발전설비의 안정 운영을 알아보았다.

## 2. 발전소 통풍계통

### 2.1 통풍 개요

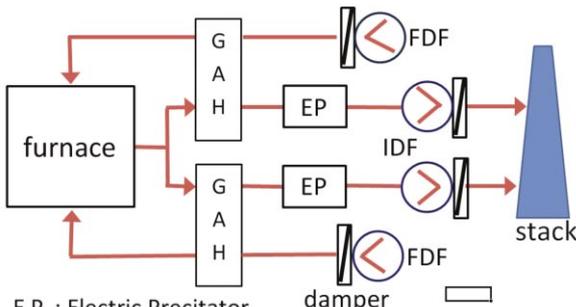
석탄화력발전소의 통풍계통은 그림 1과 같다. 발전소 통풍계통은 보일러(furnace), 공기에열기(GAH: Gas Air Heater), 압입송풍기(FDF: Forced Draft Fan), 전기집진기(EP: Electric Precipitator), 유인통풍기(IDF: Induced Draft Fan) 및 연돌(stack)로 구성되어 있다. 통풍계통에서 유체의 흐름은 압입송풍기에서 연소용 공기를 흡입하여 공기에열기를 통과 시킨 뒤 보일러로 공급하게 된다. 보일러에 공급된 공기는 연료계통으로 공급된 연료와 보일러에서 연소된 후 다시 배기 계통을 거치게 되며 공기에열기를 통과하게 된다. 공기에열기를 통과한 배기가스는 전기집진기에서 먼지를 여과시킨 뒤, 유인통풍기 및 연돌 배압으로 연돌을 통하여 다시 대기로 방출된다.

### 2.2 압입송풍기

압입송풍기는 축류형 송풍기로 최근 건설되는 신규 석탄화력의 보일러 통풍계통에 연소용 공기 공급 및 연소가스의 배출용으로 많이 사용되고 있으며, 기체가 축방향으로 유입하여 축방향으로 유출되는 형식으로 최근 항

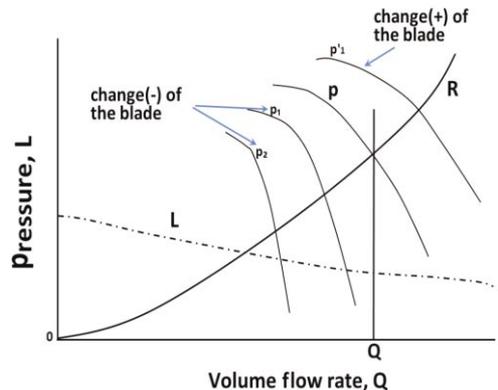
공기 산업의 발달로 효율이 약 90%의 원심형보다 좋으며 날개 사이를 흐른 유체에 무리한 만곡이 없기 때문에 고속운전, 대유량에 적합하다. 축류형 송풍기의 풍량조절은 유압으로 회전 날개의 각도를 제어하므로 부분부하에서도 효율의 저하가 적은 특성을 보이나, 원심형 송풍기에 비해 소음이 크고 설계점 이외의 풍량에서는 효율이 갑자기 떨어지는 결점이 있다.

날개의 각도변화에 따른 송풍기의 특징은 회전 날개 각도를 조절함으로써 부하변화에 대한 효율의 저하 없이 광범위하게 풍량을 조절할 수 있다는 장점이 있다. 그림 2는 풍량과 풍압을 두 축으로 하고 날개각도 기준치 P를 기준으로 증감시켰을 때의 풍압(y축, L)변화와 그 때의 풍량(x축, Q) 변화를 임의의 단위를 사용하여 정성적으로 나타낸 것이다. 날개 각도별 통풍 저항 증가에 따른 풍량과 풍압의 변화 관계로 이해하면 쉽다. 즉 날개 각도  $P_1 - P_n$ 에서 어떤 원인에 의해 보일러 통풍저항이 증가하면 풍량은 감소하고 풍압은 증가함을 알 수 있다. 회전 송풍기의 경우 날개 각도를 변화시킴으로써 통풍저항 증가 시에도 요구 풍량을 유지시킬 수 있다. 그에 따른 동력(L)의 변화도 쉽게 알 수 있다. 특성곡선에서 보는 바와 같이 축류형 송풍기는 풍량이 증가하면 압력곡선(R)을 따라 풍압이 증가하는 특성을 갖고 있으므로 높은 풍압은 높은 부하와 높은 날개 각에서만 이루어진다. 원심형 송풍기와 압력곡선(R)을 비교하면 축류형은 압력의 변화에 대해 풍량변화가 적으므로 안정된 풍량을 운전할



EP : Electric Precipitator  
GAH: Gas Air Heater  
IDF : Induced Draft Fan  
FDF : Forced Draft Fan

[그림 1] Basic schematic of a power plant draft system



[그림 2] Characteristic curve of an axial fan

수 있다.

### 3. 통풍계통 압력손실 증가 사례

#### 3.1 영흥화력 3호기

발전소 운전은 여러 가지 제약사항이 있으며, 그 중 압입통풍계통의 문제는 환경규제와 관련이 있으며, 환경규제에 대한 추세는 더욱 강화되고 있다. 특히 수도권에 위치한 영흥화력발전소는 국내의 타 발전소와 비교하여도 세계적으로 유례를 찾기 힘들 정도의 규제를 받고 있다. 향후에도 영흥화력 동일 부지 내에 추가 호기가 건설되어야 하는 여건을 감안하면 총량제 기준을 적용받아야 함으로 배출규제 준수에 의한 발전소 운영여건은 더욱 어려워질 전망이다.

영흥화력 3호기 통풍계통의 운전 표준조건은 흡입온도 30℃, 가스차압 89 mmH<sub>2</sub>O, 보일러 노내 산소농도 2.55% 및 윈드박스 압력 100 mmH<sub>2</sub>O를 기준으로 운전되어야 하나, 공기에열기 가스차압 상승에 의한 부하증가(최대 250 mmH<sub>2</sub>O), 하절기 온도 상승에 의한 부하증가(최대 40℃) 등의 송풍기 부하증가 요인에 의하여 노내압 및 윈드박스 차압을 비정상적으로 운전하는 경우가 발생한다.

이와 같은 비정상운전은 압입송풍기의 부족압력 여유율을 보충하기 위한 것으로 발전소 출력을 유지하기 위해서는 불가피한 선택이지만 산소농도 저하 및 윈드박스 압력저하는 각각 미연탄분 증가와 보일러 버너존의 열화 등의 문제를 초래할 수 있다.

영흥화력 발전소에서 외부로부터 공기를 보일러에 공급하는 설비는 압입송풍기이다. 송풍기 형식은 축류형이며, 부하 조정은 속도가 890 rpm으로 일정한 상태에서 유압식으로 블레이드 피치각(pitch blade)을 조절하여 시행한다.

#### 3.2 공기에열기의 압력손실

압입송풍기 압력손실의 첫째 원인은 황산암모늄(Ammonium Bisulfate, NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>)형성에 의한 막힘

(plugging)을 들 수 있다. 황산암모늄(NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>)은 연소가스가 공기에열기에서 냉각될 때 연소가스 내 암모니아 슬립과 삼산화황(SO<sub>3</sub>)이 160 ~ 230℃ 온도범위에서 반응하여 형성된다. 이때 반응하는 암모니아 슬립은 선택적촉매환원법(SCR: Selective Catalytic Reduction)에서 미반응 상태로 배출되는 암모니아를 말하며, 삼산화황은 연소가스 중 이산화황의 산화에 의해 생성된다. 황산암모늄은 점착성 물질로 공기에열기 열소자에 회분과 함께 부착되어 막힘 및 부식을 유발하여 차압증대 중요 요인으로 작용한다.

둘째 요인으로는 산노점 이하에서 황산 응축에 의한 파울링(fouling)을 들 수 있다. 공기에열기 열소자 및 연소가스 온도가 산노점 이하인 경우 삼산화황이 황산으로 응축되어 열소자 표면에서 회분과 결합하여 파울링을 유발하게 되며, 특히 삼산화황의 농도가 높을수록 산노점이 증가, 공기에열기에서 파울링 형성영역 또한 함께 증가하여 차압도 상승하게 된다.

#### 3.3 송풍기 운전점의 변동

표 1은 압입통풍계통의 운전조건과 송풍기 운전점의 변동을 나타낸다. 공기에열기에서 표 1에서의 조건과 같이 영흥화력 발전소 3호기 출력을 880 MW기준으로 할 때 가스측 차압이 89에서 250 mmH<sub>2</sub>O로 상승 시 공기에열기 2차공기 차압은 63에서 145 mmH<sub>2</sub>O로 상승하고 2차공기가 82 mmH<sub>2</sub>O 차압만큼 상승 시에 따른 송풍기의 압력상승이 필요하게 된다. 송풍기 압력손실에

<표 1> Specific energy according to the condition change

case	specific energy (Nm/kg)	volume (m <sup>3</sup> /s)	air temp' (°C)	GAH Diff Pr. (mmH <sub>2</sub> O)	
				gas side	air side
stand-ard	2,603	264	30	89	63
1st aim	2,920	264	30	250	145
2nd aim	3,030	272	40	250	145

따른 운전점은 식 (1)과 같이 계산함으로써 비에너지(Y)가 2,920 Nm/kg으로 상승되어야 함을 알 수 있고, 이를 1차 운전 목표점(1st aim)으로 산정하였다.

$$Y = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{K}} - 1 \right] \quad \text{식 (1)}$$

여기서 흡입압력  $P_1$ 은 -97 mmH<sub>2</sub>O (=100373.8 PaA), 출구압력  $P_2$ 는 172+82=254 mmH<sub>2</sub>O (=103815.9 PaA), 공기밀도  $\rho$ : 1.1647 kg/m<sup>3</sup>@30°C, 비열비  $k$ 는 1.4이다.

통풍계통에서의 온도변화는 여름철 대기 온도 상승으로 송풍기 흡입온도 30°C에서 40°C로 상승 시 공기밀도가 저하하고 공기밀도 저하에 따라 과잉공기량 추종을 위해 공기유량 증가가 필요하다.

온도 변화에 따른 공기밀도가 30°C에서 1.1647 kg/m<sup>3</sup>이고 40°C에서 1.1275 kg/m<sup>3</sup>로 3.3%가 저하하고 이에 따른 공기량 증가는  $264 \times 3.3\% = 272$  m<sup>3</sup>/s이다. 공기량 증가에 따른 비에너지 증가는 저항추세선 기준으로 공기예열기 가스차압 250 mmH<sub>2</sub>O에서 보간 산출하여 3,030 Nm/kg가 됨을 알 수 있고, 이를 2차 목표점(2nd aim)으로 산정하였다.

### 3.4 실속현상

축류형 송풍기 운전 시에는 실속이라는 특수한 현상이 발생되는데, 이 현상은 송풍기가 과부하로 운전될 경우 발생하는 공기의 역학적 현상이다. 축류형 송풍기 실속 발생원인은 송풍기의 입구 또는 출구가 댐퍼나 재의 누적 등으로 막혀 송풍기 회전날개의 개도와 비교하여 풍량 흐름이 지나치게 적고 풍압이 커지는 경우에 발생한다. 송풍기 입구 또는 출구측 댐퍼의 고장으로 단혀 통풍덕트 내부 단면적이 감소하는 경우에 발생하며, 공기예열기 소자에 재의 누적 등으로 전극이 막히는 경우, 전기 집진기 내부 통로 막힘 및 제어카드 오동작으로 송풍기 피치 날개가 과도하게 열리는 경우 등이 있다.

발전소 통풍계통에 대한 실속의 영향으로는 송풍기 내

부의 공기흐름 맥동에 의하여 부하가 크게 변동하므로 실속 발생 시 전동기 전류변동이 필수적으로 나타나며, 그 변동 폭에 따라 송풍기 날개에 어떤 영향을 미치는지 결정된다. 실속이 발생되면 송풍기 자체에서 진동이 발생하므로 부하 측에서 가장 민감하게 확인할 수가 있다. 실속 발생 시 전동기 전류와 함께 풍량 및 풍압이 매우 불안정한 모습을 보이므로 실속을 확인하기 위하여 송풍기 입출구의 풍량 및 풍압의 감시가 필요하다.

압입송풍기 운전에서 시스템 통풍저항이 증가됨에 따라 압력곡선은 풍량의 감소와 함께 증가되었다가 감소하고 다시 상승하여 풍량이 '0'이 되었을 때 풍압이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 이렇게 압력이 고점을 지나서 저점으로 꺾이는 점을 실속한계선이라 하고 날개의 각도 변화에 따른 실속 한계점을 있는 선을 실속선이라 한다. 발전소 운영에 있어서 실제 실속선인 2차 실속한계선 외에 가상의 1차 실속한계선을 설정하여 운전 시 경보 및 감시장치 등을 통해 1차 한계선 아래에서 운전함으로써 발전설비 전체의 안정운동을 꾀하고 있다. 영흥화력 3호기도 실제 실속선의 11.1% 아래에 1차 한계선을 설정하여 운영하고 있다.

## 4. 블레이드 형상 변경에 의한 개선

### 4.1 블레이드 형상 변경

통풍계통의 압력손실을 보전하고 송풍기의 용량을 향상시키기 위해서는 일반적인 방법으로는 송풍기의 회전수의 변경, 송풍기의 추가 및 송풍기를 교체하는 방안을 고려할 수 있다. 그러나 어느 경우에도 기존에 설계 설치된 송풍기를 바꾸기에는 전동기 및 전기설비의 변경, 시스템 덕트, 케이싱의 변경 등 구조적인 변경뿐만 아니라 시간적 경제적인 요인도 간과할 수 없는 부분이다. 따라서 전동기, 케이싱 등의 외형적인 요인은 그대로 둔 상태에서 송풍기 블레이드 자체의 형상 변경으로 통풍기의 압력상승을 일으키고자 한다.

압입송풍기 블레이드는 케이싱 등 외형상의 변경을 하지 않는 여건상 비에너지 증가를 위한 블레이드 폭 및 형상만을 개선하였다. 유량증대를 위해서는 블레이드 길이

및 회전수 증대가 필요하나 탄중이나 탄의 열량변화가 압입송풍기의 유량 증가에 미치는 영향이 적고 외형상 변경이 불가한 이유로 블레이드 길이는 변경 전후 동일하다. 블레이드 폭은 약 16% 증가시킴으로써 유효면적 또한 같은 비율로 증가한다. 다만 유동에서 공기역학적 변화가 있을 수 있으나 변경 전후의 유동조건이 거의 유사하다고 가정할 때 면적 증가에 따른 토크 증가가 예상된다. 따라서 동일한 회전속도에서 유입동력 또는 공기의 엔탈피 증대 즉 비에너지가 동일한 비율로 증가할 것을 예측할 수 있다.

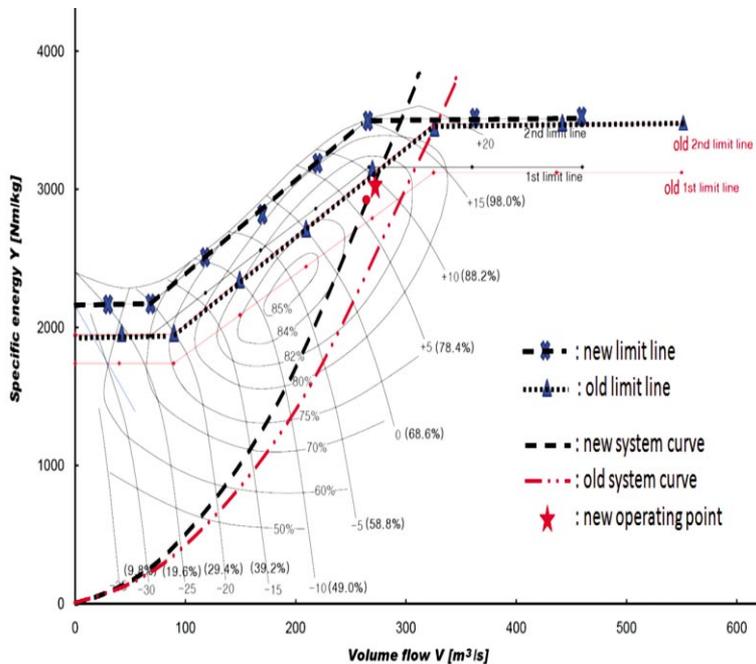
#### 4.2 송풍기 특성곡선의 검토

그림 3은 블레이드 형상변경 전후의 특성을 비교해서 나타낸다. ▲로 표시된 실선이 기존실속선이며 ✕로 표시된 점선이 개선된 실속선으로 1차 한계선(1st limit line)은 실제 실속선인 2차 한계선(2nd limit line)의

11% 아래에 설정되어 있다. 또한 그림상의 점선으로 표시된 변경된 시스템 저항곡선상의 ●는 공기에열기 막힘에 의한 운전조건 변경 시 1차 목표점(압력 증가)이며, ★는 대기 온도 상승 시 유량 증가에 필요한 비에너지 상승분까지 고려한 2차 목표점(온도 증가)을 나타낸다.

변경 전의 특성곡선에 의한 실속선(▲로 표시된 실선)과 변경된 조건에서의 시스템 저항곡선을 비교해보면 1차, 2차 운전목표점이 1차 실속선의 경계를 넘어 실속 위험 범위 안에 있음을 알 수 있다. 반면 개선 후는 특성곡선이 좌상향됨으로써 실속선도 좌상으로 이동하고 실속범위의 압력도 상향됨으로써 압입송풍기는 가혹 운전 조건인 1차, 2차 운전목표점에서도 1차 실속한계선 범위에서 운전이 가능함을 확인하였다.

표 2는 블레이드 폭을 증대시켰을 때의 비에너지 증가치를 나타내고 있다. 표에서 블레이드 폭을 증대시켰을 때 개선 전과 후의 비에너지가 최빈 운전영역인 최대 보증출력 75%부하(75% MGR) 및 보일러최대연속정격



[그림 3] Change of the stall limit curve before and after the blade reconfiguration

<표 2> Specific energy of the air before and after configuration

Case	75% MGR Volume		BMCR Volume		rate of increase (at 75% MGR/BMCR)
	before	after	before	after	
1st limit specific energy	2,360	2,733	2,760	3,160	1.158/1.145
2nd limit specific energy	2,622	3,036	3,066	3,510	1.158/1.145
Margin between 1,2 limit	11.1%		11.1%		

(BMCR) 범위 내에서 개선전후의 증가 비율(rate of increase)을 계산해봄으로써 비에너지가 14.5% ~ 15.8%가 증대된 것을 알 수 있고, 이는 블레이드 폭의 증대율 약 16%와 거의 일치함을 알 수 있다.

압입송풍기 개선 전후의 데이터를 통한 특성 곡선 및 효율 곡선에서 각각의 일정압력 및 일정유량에서의 효율 감소가 있었음을 알 수 있었다. 영흥화력발전소는 전력수급 여건 등을 고려하여 보일러최대연속정격(BMCR)부분에서 운전이 된다는 것을 감안하여 BMCR에서의 효율을 기준으로 보면 개선 전 약 86.5%, 개선 후 약 83%로 효율은 2.5% 이상 감소했음을 확인할 수 있다.

### 5. 맺음말

엄격한 환경규제 및 저품질탄 연소로 인한 보일러 통풍계통의 압력손실로 부하가 증가한 압입통풍기의 블레이드 형상을 변경하고, 그 결과로 발전소 전체 운영의 신뢰성을 향상시킬 수 있었다. 압입송풍기의 비에너지 여유율은 블레이드 넓이를 16% 증가시킴으로써 발전소 주요 운전점인 보일러최대연속정격 운전부분에서 넓이 증가율과 같은 약 16% 정도의 상승을 가져왔다. 따라서 변경된 운전 조건하에서도 실속의 영향 없이 압입송풍기 운전이 가능하다. 전동기 동력 소요와 효율 측면에서 보면 비에너지 여유율 확보를 위한 형상 변경을 통해 송풍기 효율은 주요 운전영역인 보일러최대연속정격 부분에서 기존 약 86.5%에서 개선 후 약 83%로 효율은 2.5%이상 감소했다. (KIPEC)