

## 저품질탄 연소시 탈황용 승압송풍기 실속시점 예측

김영균, 이재현\*<sup>†</sup>

한국남동발전, \*한양대학교 기계공학부

# Prediction of the Occurring Time of Stall for a Booster Fan in a Power Plant Combusting Low Quality Coal through Draft Loss

Yeong-Gyun Kim, Jae-Heon Lee\*<sup>†</sup>

Korea South-East Power Company, Inc., Seoul 135-280, Korea

\*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received November 15, 2012; revision received December 12, 2012)

**초록** : 석탄화력발전소에서 저품질탄 연소시 통풍저항 변화로 인해 승압송풍기의 운전점에 영향을 주는 것을 분석하여 현재 운전점 대비 실속시점을 예측하였다. 연료의 발열량이 낮을수록 통풍저항 증가 속도가 빨라지며, 통풍저항과 승압송풍기의 운전점과는 강한 상관관계가 있음을 확인하였다. 발열량이 낮을수록 통풍저항이 빨리 상승하며 이는 곧 승압송풍기의 운전점이 설계탄 대비해서 실속 한계운전점에 빨리 도달하게 된다. 이를 근거로 현재 운전점 대비 한계운전점까지의 운전여유분과 발열량별 통풍저항 증가 속도를 계산하여 실속시점을 예측할 수 있어 송풍기 실속으로 인한 발전출력의 감소나 운전정지에 대비한 정비계획 수립 등 안정운전에 많은 도움이 될 것으로 예상된다.

**ABSTRACT** : This study presents how low quality coal combustion affects the desulfurizer draft system by correlating of draft loss in a coal-fired thermal power plant and predicts the stall occurrence time of a booster fan. In case of low quality coal, a lot of coal is needed to generate equivalent output power, thereby the rating of increasing draft loss was faster than designed amount of coal. We surely confirmed that draft loss affects the specific energy of a booster fan strongly. On this basis, it is possible to predict the occurring time of stall for a booster fan from current operation specific energy to stall limit specific energy. This study suggests increasing speed of draft loss in each caloric value and the impact of specific energy at a booster fan, it expects to help safe operating in a thermal power plant.

**Key words** : low quality coal(저품질탄), draft loss(통풍저항), time of stall(실속시점)

### 1. 서론

우리나라에서 석탄의 분류는 지식경제부 기술표준원에서 설정한 한국산업규격<sup>1)</sup>을 따르고 있으며 탄화도의 진행 정도에 따라 무연탄, 역청탄, 아역청탄, 갈탄으로 구분된다. 분류기준은 고정탄소, 휘발분, 수분함량 등에 의

해 결정된다.

저품질탄이란 수분 함량이 15% 이상이며, 발열량이 5,700 kcal/kg 이하 또는 발열량은 높지만 유황성분이 높은 탄을 의미하여 주로 '저품질탄 = 저열량탄'으로 사용되기도 한다.

저품질탄은 설계탄 대비 열량당 가격이 낮아 경제적 측면에서는 유리하나 고수분, 고휘발분, 저회용점 등의 특성에 따른 보일러 튜브 오염 및 마모증가, 재열기 튜브 온도 상승, 과열기 복사 열전달량 감소, 보일러 배기가스 열손실 증가, 보일러 수명 단축, 저탄장 침강 발생 위험

<sup>†</sup> Corresponding author  
Tel. +82-2-2220-0425; Fax +82-2-2220-4425  
E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr

## 저품질위탄 연소시 탈황용 승압송풍기 실속시점 예측

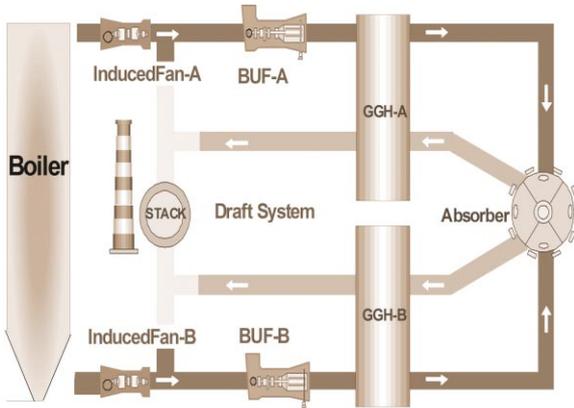


Fig. 1 YeongHeung thermal power plant desulfurizer draft system

성 증가, 화재 발생 가능성 증가, 상단계통의 막힘, 집진기 성능 저하, 낮은 발열량에 의한 통풍설비 용량부족, 소내전력을 증가 및 전체 발전 효율저하 등 여러 가지 문제점이 제기되고 있다. 이처럼 많은 문제점이 제기되고 있으나 연료의 발열량별 탈황 승압송풍기의 운전점에 미치는 영향에 대한 분석은 많이 부족한 실정이다.

이론적으로 발열량에 따라 연소가스 및 통풍저항의 변화가 수반되며 이로 인한 승압송풍기의 운전점이 변화될 것임을 알 수 있다. 하지만 이론적인 연료의 발열량만을 가지고 운전점 변화를 분석한 것이 아닌 석탄화력에서 실제 연소된 연료의 발열량별 승압송풍기의 운전점이 어떻게 변화되었는지에 대한 분석은 매우 의미 있는 일이다. 또한 이를 근거로 현재운전상태 대비 실속 한계운전점까지의 도달시점을 제시하고자 한다.

## 2. 탈황 통풍계통

### 2.1 탈황 통풍계통 설비현황

석탄화력발전에서는 필연적으로 연소가스에 공해물질이 포함되며 이를 저감하기 위해 집진설비, 탈질설비, 탈황설비 등 환경관련 설비를 운영하고 있다. 저품질위탄 연소는 회, 미연탄분, 질산화물, 황산화물 등의 절대적인 양이 많아지며 환경관련 규제범위 내에서 운전하기 위해 설비를 안정적으로 운영하여야 한다.

Table 1 Specification of booster-up fan in YeongHeung #2

Item	Unit	Description	
		at BMCR	at TB
Type	-	Variable pitch axial fan	
Capacity	kW	3,300	
Volume flow	m <sup>3</sup> /h	509.3	611.2
Pressure	mmH <sub>2</sub> O	368.3	460.0
Specific energy	Nm/kg	3,819	4,773
Speed	rpm	890	
No. blade	ea	20	

최근 영흥화력 통풍계통 중 실속현상이 가장 빈번하게 일어나며 운전 여유율이 낮은 설비는 탈황 승압송풍기이다. 이에 이번 연구에서는 영흥화력 2호기 탈황 통풍계통을 대상으로 하였다.

Fig. 1은 영흥화력 탈황 통풍계통<sup>3)</sup>을 간략히 나타낸 것이다. 그림에는 주요 설비인 탈황 연소가스 흐름, 승압송풍기, 가스열교환기, 흡수탑이 있으며 기능 및 구성에 대해 다음과 같이 간단히 기술한다.

탈황 통풍설비 계통(Desulfurizer draft system)은 각 보일러당 2기의 승압송풍기(Booster fan), 2기의 가스열교환기(Gas-gas heater) 및 1기의 흡수탑(Absorber)을 포함한다. 배연 가스는 다음과 같은 계통을 경유하는데, 즉 보일러 유인 송풍기 → 탈황설비 입구 덤퍼 → 승압송풍기 → 미처리가스 열교환기 → 흡수탑 → 처리가스 열교환기 → 탈황설비 출구 덤퍼 → 연돌로 배출된다.

승압송풍기(Booster fan)는 배연 가스가 보일러 유인 송풍기에서부터 탈황설비를 거쳐 굴뚝으로 배출되기까지의 전체 구간에서 발생하는 시스템 저항으로 인한 압력손실을 보상하여 연소가스가 굴뚝으로 배출되도록 하기 위한 것으로 통풍설비 계통의 가장 중요한 기기로서 보일러 유인 송풍기 후단에 설치되어 유인 송풍기와 연계되어 운전된다. Table 1은 영흥화력 2호기 탈황용 승압송풍기의 형식, 용량, 유량, 압력, 비에너지, 속도 등의 규격을 나타내고 있다. 승압송풍기는 가변동익의 축류식으로 날개 각도를 조정하여 유량을 제어하고 실속현상을 예방하기 위하여 실속 경고(Stall alarm) 기능을 갖추었다.

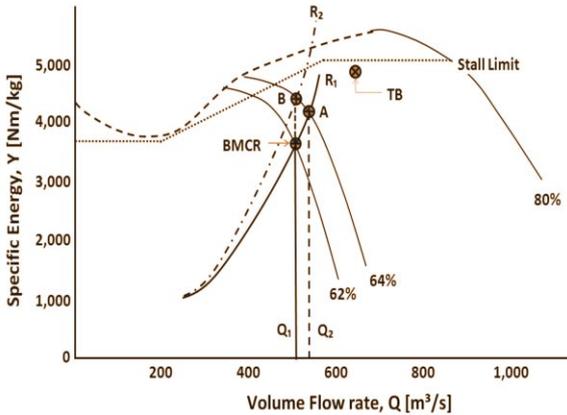


Fig. 2 Performance of booster fan in YeongHeung #2

## 2.2 탈황 승압송풍기의 운전특성

송풍기의 성능은 체적유량에 따른 통풍저항과 압력으로 표현하고 있으나, 산업용으로 쓰이는 축류형 송풍기의 경우 보통 체적유량에 따른 기체의 비에너지(Specific energy)로 표시하기도 한다. 비에너지는 송풍기에 의해 기체에 가해진 엔탈피로서 송풍기에 의한 압력 상승의 크기를 나타내는 것으로 송풍기 분야에서 흔히 사용하고 있다.

Fig. 2는 분석대상 발전소 1개 호기가 800 MW로 정격 운전시 탈황 승압송풍기의 운전상태를 나타낸다. 그림의 가로축은 체적유량, 세로축은 비에너지이다. 위쪽의 S자 모양의 점선과 실선은 블레이드 개도가 80%일 때의 송풍기 특성곡선이며 중간부분 아래에서 위로 올라가는 R 선은 시스템저항곡선이다. 블레이드 송풍기 특성곡선과 시스템저항곡선이 만나는 점이 운전점이다. 그림에서 최대연속정격(BMCR: Boiler Maximum Continuous Rating)으로 표시한 점은 글자 그대로 설비에 무리없이 연속적으로 운전할 수 있는 최대용량의 운전상태로 체적유량 509.3 m<sup>3</sup>/s, 블레이드 개도 62%, 비에너지 3,819 Nm/kg인 점이며 시험블록(TB : Test Block)으로 표시한 점은 최대연속정격 운전점으로부터 체적유량 20% 증가, 압력 25% 증가된 체적유량 611.2 m<sup>3</sup>/s, 비에너지 4,773 Nm/kg인 상태이다. 송풍기 특성곡선에 의해 운전범위가 정해지지만 실제 발전소에서는 특성곡선을 반영한 실속 한계선(Stall limit)을 운영하고 있다.

식 (1)은 실속 한계선식<sup>[4]</sup>이며 한계선의 아래쪽 직선은 체적유량 203.3 m<sup>3</sup>/s 이하일 때 비에너지 3,770 Nm/kg, 위쪽 직선은 체적유량 583.2 m<sup>3</sup>/s 이상일 때 비에너지 5,080 Nm/kg이다. 경사진 부분은 위쪽과 아래쪽 비에너지의 연결선으로 표시된다. 여기에서, Y는 비에너지 [Nm/kg], Q는 체적유량 [m<sup>3</sup>/s]이다.

$$Y = 3.457 \times Q + 3,657 \quad (1)$$

체적유량과 비에너지 관계에서 가스체적유량이 Q<sub>1</sub>에서 Q<sub>2</sub>로 증가함에 따라 운전점은 통풍저항 R<sub>1</sub>을 따라 선형적으로 A점으로 이동하게 된다. 여기서 선형적인 변화의 가정은 미소한 체적유량 증가에 대해 적용한 가정이다. 한편 체적유량은 Q<sub>1</sub>로 일정하게 유지되나 통풍시스템 내에 막힘이 발생하여 통풍저항이 R<sub>1</sub>에서 R<sub>2</sub>로 변화한 경우 운전점은 B점으로 이동하게 된다.

## 3. 저품위탄 사용에 따른 통풍계통의 영향

### 3.1 연구대상 및 자료수집 방법

본 논문의 연구대상은 2009년 1월에서 2011년 6월까지 30개월 동안의 영흥화력 2호기의 소비탄중, 발전량, 압력손실, 승압송풍기 비에너지 등 실제 운전자료로써, 영흥화력 운전정보시스템(PIS: Plant Information System) 및 혼탄관리 프로그램(MCM: Mix Coal Management)에서 취득하였다.

### 3.2 연료 발열량 대비 통풍계통 영향

이번 연구에서는 연료의 발열량 대비 연소가스량과 통풍저항의 변화가 승압송풍기의 운전점에 미치는 영향을 분석하였다. 발열량에 따른 연소가스량은 그 변화정도가 약하며 연소가스량의 변화가 승압송풍기의 운전점에 미치는 영향은 여러 운전조건에 따라 달라지기 때문에 이번 연구에서는 다루지 않고 통풍저항 변화에 따른 운전점 변화에 대해서 집중 분석하였다.

승압송풍기 전단의 운전상황은 동일하다는 가정하에 후단의 통풍저항만을 고려할 때 가장 영향을 많이 미치는 설비는 가스열교환기와 흡수탑이다. 통풍저항이 커지

## 저품위탄 연소시 탈황용 증압송풍기 실속시점 예측

Table 2 Risk causes in plant utility project

Date	Output [MW]	Calorie [kcal/kg]	S-energy [Nm/kg]	Draft loss [mmH <sub>2</sub> O]
2009-04-05	797.0	6,160	2,643.4	291.5
2011-02-16	800.6	5,462	3,830.0	322.5
2010-11-24	797.4	5,409	4,016.6	330.2
2011-04-06	800.0	5,411	3,490.3	325.5
2011-04-17	800.1	5,457	4,112.1	332.8

는 이유는 여러 가지가 있겠지만 석탄연소 후 연소가스에 포함되어 있는 회성분, 미세먼지, 질소산화물, 황산화물 등 각종 물질들이 열교환기 소자에 붙어 고형물을 만듦으로써 연소가스 통로를 좁게 하여 압력손실이 증가한다<sup>5)</sup>고 알려져 있다.

가스열교환기 고형물에는 석고(CaSO<sub>4</sub>)성분 이외에 회성분인 규산(SiO<sub>2</sub>), 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 산화철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 등이 다량 검출<sup>6)</sup>되는데 이는 연소가스의 회성분이 영향을 준 것이다.

저품위탄을 연소하면 동일한 출력을 내기 위해 탄의 절대적인 양이 많아지므로 회성분량 또한 많아지게 되며 이로 인해 가스열교환기 소자에 고형물 생성 속도가 빨라지며 이는 통풍저항 증가 속도가 빨라지게 되는 원인이 된다. 이렇듯 발열량이 낮은 저품위탄을 연소하면 설계탄 대비 통풍저항 증가 속도가 빨라짐을 예측할 수 있다.

흡수탑 내 유량 증가에 따른 부유수분 및 슬러리 성분 유속증가로 흡수탑내의 습기제거기(Mist eliminator)에서 캐리오버(Carry-over)되어 가스열교환기 막힘현상을 촉진시키기도 한다.

Table 2는 일자별 연소특성을 나타낸 자료이며 2009년 4월 5일부터 2011년 4월 17일까지의 자료 중 일부로서 일일간격으로 일일평균출력, 발열량, 비에너지, 통풍저항을 나타내고 있다. 통풍저항은 가스열교환기 전단과 가스열교환기 후단의 압력차이다. Fig. 3는 Table 2의 전체자료를 사용하여 일일평균출력, 평균발열량이 연속으로 비슷한 날의 통풍저항 추이를 나타낸다. 평균열량 5,408 kcal/kg 탄의 경우 선형관계식으로 나타낼 때 1일에 3.56 mmH<sub>2</sub>O의 압력손실이 증가되는 것을 알 수 있다. 유사한 방법으로 평균발열량이 5,435, 5,495, 5,798, 6,049 kcal/kg인 경우에 대해 1일당 3.06, 2.94, 2.54, 2.34 mmH<sub>2</sub>O의 압력손실이 증가한다. Fig3에 표시한 선형관계식은 자료수집기에서 임의의 기준일을 설정한 것이므로 1일 압력손실 변화율인 기울기 외의 물리적 의미를 부여할 수는 없다. 발열량별 통풍저항 증가 추이 자료를 바탕으로 Fig. 4에서는 1일 압력손실 증가를 나타내는 기울기를 탄의 발열량 변화에 따른 추이로 나타낸 것이다. 열량이 낮은 탄을 연소할수록 압력손실 증가 속도가 높아지며, 특히 열량이 5,500 kcal/kg 이하일 때 상승속도가 급격히 증가함을 알 수 있다. 시간이 경과함에 따라 가스열교환기의 막힘현상으로 인한 통풍저항 증가는 자연스러운 현상이지만 발열량이 낮은 저품위탄

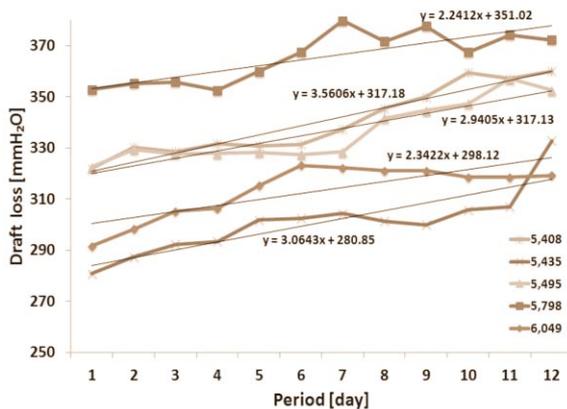


Fig. 3 Trend of draft loss at 5,408~6,049 kcal/kg coal

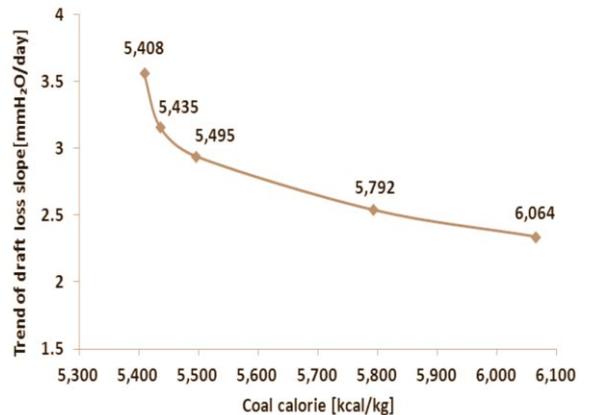


Fig. 4 Trend of draft loss slope to coal calorific

을 연소할 때 통풍저항 증가 속도가 빨라지고 이로 인해 승압송풍기의 운전 여유율이 빨리 줄어드는 것은 발전소 안정운전에 문제점으로 대두되고 있다.

#### 4. 승압송풍기 실속시점 예측

앞에서는 저품위탄 연소시 연소가스량과 통풍저항이 어떻게 변화되는지에 대해 알아보았으며, 이를 바탕으로 연소가스와 통풍저항이 탈황 승압송풍기의 운전점에 어떤 영향을 미치는지 수집된 자료를 바탕으로 분석하였다. 발열량에 따른 연소가스량의 변화는 큰 차이가 없으며, 연소가스량과 송풍기 비에너지와는 상관관계가 없음을 확인하였다.

Fig. 5는 통풍저항과 비에너지와의 상관관계를 나타내는 그래프로서 통풍저항 증가에 따라 비에너지가 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 이 자료는 일일 평균출력 800 MW ± 2 MW 이내의 운전자료를 분석한 것이다. Fig. 5의 추세선을 근거로 800 MW ± 2 MW 이내의 일일 평균출력에서 통풍저항이 1 mmH<sub>2</sub>O 변화함에 따라 비에너지 7.56 Nm/kg이 변화됨을 유추할 수 있다.

앞에서 자료를 분석한 결과 저품위탄 연소시 연소가스량은 다소 증가하였지만 승압송풍기의 운전점과의 상관관계가 약하며, 통풍저항 증가는 승압송풍기 운전점과 강한 상관관계가 있음을 알았다. 이를 근거로 현재의 운전점에서 한계운전점까지의 비에너지 여유분을 발열량별 통풍저항 증가 속도와 비에너지 변화값으로 나눠 실

속지점을 구하는 간이 계산식을 다음과 같이 제시한다.

$$T = \frac{G}{S \cdot C} \tag{2}$$

식 (2)에서 T는 실속 예상시점, G는 현재운전점에서의 한계운전점까지의 여유 비에너지값[Nm/kg], S는 발열량별 증가 속도 [mmH<sub>2</sub>O/day], C는 1 mmH<sub>2</sub>O당 비에너지 변화값 [Nm/kg]을 나타낸다.

Fig. 6은 현재운전점과 한계운전점까지의 비에너지 여유값을 보여주고 있다. 식 (2)를 적용하여 현재운전점 비에너지가 한계운전점 비에너지까지 도달하는 예상시점을 석탄 발열량별로 계산할 수 있다. 여기서 현재운전점은 영흥화력 2호기 계획 예방정비정지(2010년 4월 17일 ~ 2010년 6월 13일)후 2010년 7월 31일 운전자료로써 평균출력 800 MW, 급탄량 307 ton/h, 통풍저항 286 mmH<sub>2</sub>O, 가스량 492 m<sub>3</sub>/s, 비에너지 3,842 Nm/kg인 경우이다. 한계운전점은 식 (1)에 의해 가스량 492 m<sub>3</sub>/s 일 때 비에너지 4,768 Nm/kg이며 현재운전점 비에너지와 차이는 926 Nm/kg이다.

식 (2)를 적용하여 평균출력 800 MW 기준으로 현재운전상태 대비 나머지 조건은 동일하며 발열량 대비 통풍저항변화로 인한 시스템저항곡선만을 변수로 가정하면, 평균 5,408 kcal/kg 열량의 탄을 지속적으로 사용할 경우 34.4일 이후에 한계운전점에 도달하게 됨을 예상할 수 있으며 이와 같은 방법으로 5,435, 5,495, 5,798, 6,049 kcal/kg 열량의 탄은 각각 39.9일, 41.7일, 52.3

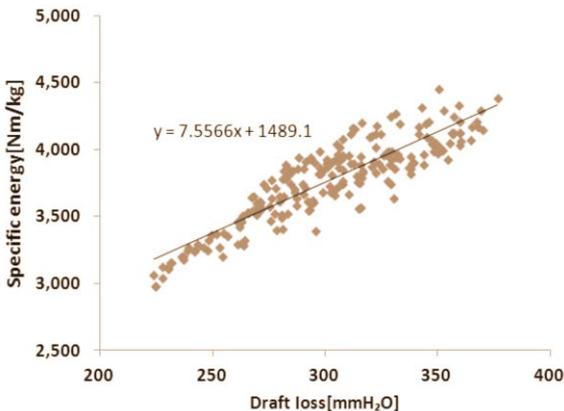


Fig. 5 Relation between draft loss and specific energy

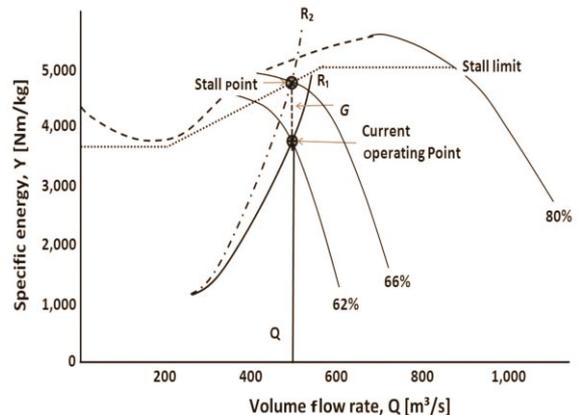


Fig. 6 Stall point of booster fan in YeongHeung #2

## 저품위탄 연소시 탈황용 증압송풍기 실속시점 예측

Table 5 The expected day of stall point at booster fan in YeongHeung #2

Coal calorie [kcal/kg]	Allowance of specific energy [Nm/kg]	Draft loss slope [mmH <sub>2</sub> O/day]	Specific energy slope [Nm/kg · mH <sub>2</sub> O]	Expected day of stall point [days]
5,408	926	3.5606	7.56	34.4
5,435	926	3.0643	7.56	39.9
5,495	926	2.9405	7.56	41.7
5,798	926	2.3422	7.56	52.3
6,049	926	2.2412	7.56	54.7

일, 54.7일 후에 한계운전점에 도달하게 됨을 예측할 수 있다. 이를 표로 나타낸 것이 Table5이다.

### 5. 결론

점점 강화되는 대기환경오염물질 배출농도 규제치를 준수하고 경제적인 석탄 수급상황에 맞추기 위해 저품위탄 혼합연소는 불가피하며, 이로 인한 영향 또한 피할 수 없을 것이다.

본 연구에서는 석탄화력발전소에서 저품위탄 연소시 발열량별 연소가스량과 통풍저항 변화가 탈황용 증압송풍기의 운전점에 미치는 영향을 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 설계탄 대비하여 저발열량과 수분함량이 높은 저품위

탄을 사용할 경우 연소가스량은 다소 증가하나 송풍기의 운전점에 미치는 영향은 미약함을 확인하였다.

(2) 발열량이 낮은 탄의 경우 동일한 출력을 내기 위해 탄의 절대적인 양이 많아지며 이로 인해 발열량 감소에 따른 통풍저항 증가율이 빨라지는 것을 알 수 있었고, 특정 발열량 이하에서 급격하게 증가함을 확인하였다.

(3) 발열량별 통풍저항의 1일당 증가 속도, 통풍저항 증가에 따른 비에너지의 변화율을 파악함으로써 송풍기에서 현재운전점 대비 실속시점을 예측할 수 있다. 이로서 저품위탄 사용으로 송풍기 실속이 발생하여 발전출력의 감소나 운전정지에 대비한 정비계획 수립이 가능하다.

### 참고문헌

1. Korean Agency for Technology and Standards, 2010, KS E 0006 석탄이용기술용어.
2. KOSEP, 2012, “저품위탄 비율 확대 연소에 따른 설비에 미치는 영향”.
3. KOSEP, 2004, YeongHeung Thermal Power Plant Unit 1,2 Operation manual.
4. Howden, 2002, Stall Monitoring.
5. Lee Gue sung, 2010, Combustion Engineering, Hyungseul.
6. KEPRI, 2010, “영흥 GGH 차압상승보고”.