플랜트 저널 제18권 제3호(2022) / pp. 28-40

500 MW 석탄화력 발전소에서 바이오매스 혼소율이 미분기 운전인자에 미치는 영향

금준호*, 문승재**†
*한양대학교 파워엔지니어링공학과, **†한양대학교 기계공학부

Effect of Biomass Co-firing Ratio on Operating Factors of Pulverizer in 500 MW Coal-fired Power Plant

Jun Ho, Geum*, Seung-Jae Moon**†
*Department of Power Enginerring, Hanyang University
**†Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT : As the proportion of renewable energy generation is expected to increase, public power generation businesses need to actively consider implementing the expansion of biomass mixing, In this study, the biomass co-firing rate is being changed from 0wt.% to 5.0wt.% at 500MW coal-fired power plant, measuring the major operation characteristics of the pulverizer. First, the composition analysis and grinding characteristics of lignocelluosic biomass were examined, and the effect of volume increase on dirrerential bowl pressure difference, motor current, coal spillage, outlet temperature, and internal fire count was analyzed. As the co-firing rate increased, it was confirmed that the difference in the differential bowl pressure, motor current, and coal spillage treated increased, and the outlet temperature was minimal. The number of internal fires is difficult to find a clear correlation, but it has been confirmed that it is highly likely to occur in combination with other driving factors..

초록 : 신재생에너지 발전 비중 확대가 예상됨에 따라 공공 발전사업자들은 바이오매스 혼소의 확대 시행을 적극적으로 검토해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 500MW 석탄화력에서 바이오매스 혼소율을 0wt.%에서 5.0wt.%까지 변화하며 미분기 주요 운전 특성을 측정하였다. 먼저, 목질계 바이오매스에 대한 구성성분 분석과 분쇄 특성을 알아보았고, 혼합연료의 부피 증가가 미분기 보울 압력 차이, 모터 전류, 이물질 처리횟수, 출구 온도, 내부 화재횟수에 미치는 영향을 분석하였다. 혼소율 증가에 따라 미분기 보울 압력 차이와 모터 전류, 이물질 처리횟수는 상승함을 확인하였고, 출구 온도는 상승 폭이 미미하였다. 내부 화재횟수는 명확한 상관관계를 찾기 힘드나, 다른 운전인자와 결합하여 발생할 가능성이 크다는 것을 확인하였다.

Key words : Co-fired Power plant(석탄화력), Pulverizer(미분기), Lignocelluosic biomass(목질계 바이오매스), Wood Pellets(우드펠릿), Bowl Pressure difference(보울 압력 차이)

† Corresponding Author, smoon@hanyang.ac.kr

-기호설명-

IGV : 입구가이드베인
T : 토크 (N·m)
P : 전력 (W)
s : 보울과 모터 중심축과의 거리 (m)
F : 토크 (N·m)
μ : 혼합 연료의 마찰계수
N : 보울 위 혼합 연료의 수직항력 (N)
HGI : 석탄분쇄지수

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

과거 우리나라 전력산업이 전통적 에너지원인 석탄과 석유, 원자력발전을 중심으로 하는 저렴한 전기를 안정적으로 공급하는 것이 핵심이었다고 하면, 현재의 전력산업은 태양열, 풍력, 수력, 수소 등 다양하고 무한 공급이 가능한 친환경 에너지원을 활용해 안전과 환경, 융합을 통해 적절한 가격에 전기를 안정적으로 공급하는 것, 이른바 전력산업의 패러다임이 변화하는 세상 속에 살아가고 있다. 올해는 제9차 전력수급 기본계획이 수립될 예정인데, 선진국형 에너지 소비구조 구축과 함께 기존의 석탄과 원자력의 입지는 더욱더 줄어들고 신재생 비중을 기존 20%에서 최대 35%까지 늘리는 방안(1)과 이에 따른 신재생에너지 공급의무화제도 (Renewable Portfolio Standard: RPS) 이행 확대방안 또한 포함될 예정이다.

신재생에너지 공급의무화제도는 신재생에너지 발전설비를 제외한 500 MW 이상의 발전설비 용량을 보유한 전기사업자에게 총발전량 중 일정 비율 이상을 신재생에너지로 발전하도록 의무화한 제도로 2012년부터 시행하고 있으며, 2023년까지 10% 비율을 달성해야 한다(2). 공공 5대 화력 발전사는 경제성 확보가 쉬운 태양광, 풍력 등을 중점적으로 추진하여 결실을 보고 있으나, 용지 부족에 따른 대규모 개발과 지자체 반대, 환경평가 등의 인허가 지연으로 인해 추가 발굴에 난항을 겪고 있으며, 해마다 증가하는 신재생에너지 공급의무화제도 이행 또한 많은 부담을 겪고 있다. 최근 3년도 공공 5대 화력 발전사에 대한 신재생에너지 의무공급량을 살펴보면 해마다 증가하는 추세며, 이는 앞으로도 지속할 것으로 예측된다(3).

국내 5대 공공 화력 발전사는 신재생에너지 공급의무화제도를 이행하기 위해 2012년 남동발전 하동 화력본부를 필두로 바이오매스 혼합 연소설비를 신설하여 각종 혼합연소시험 및 대기 환경설비 등 성능개선에 관한 연구를 산학연 협동으로 수행하고 있다.

통상 바이오매스는 석탄보다 발열량이 적기 때문에 동일 출력을 내기 위해서는 전체 연료량이 늘어나게 된다. 이에 따라 석탄 전소 혹은 석탄 중유 혼합 연소로 설계된 보일러 주요 설비에서 예상치 못한 문제점이 발생할 수 있으며, 특히 석탄과 바이오매스 혼합연료의 분쇄를 담당하는 미분기(Pulverizer)에서 운전 상황을 살펴보고 안정적으로 운전이 가능한지 등의 기술적 검토를 수행할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 바이오매스 혼합 연소를 시행중인 500 MW 석탄화력발전소에서 주로 사용되는 목질계 바이오매스를 분석하고, 질량 기준 혼합 연소율을 부피비로 환산하여, 질량비와 부피비에 따른 미분기 주요 운전 인자의 변화를 살펴보고, 안정적 운전이 가능한 범위를 도출해 봄으로써 해마다 가중되는 신재생에너지 공급의무화제도의 원활한 이행에 이바지하고자 한다.

1.2 연구 동향

최근 국내 연구 동향을 살펴보면 신재생 연료 우드펠릿 혼합 연소 시 미분탄 연소 보일러 미분기 운전상태 변화에 관한 연구(4)를 수행하였는데, 500 MW 석탄화력발전소에서 석탄 단독연소와 석탄과 우드펠릿의 혼탄 후 각각의 혼합 연소율에 대한 미분기 운전전류, 보울 압력 차이, 출구 온도를 비교한 결과를 나타내었고, 최대 6.5% 혼합 연소까지 미분기에 미치는 운전상태 변화가 양호한 것을 확인하였다. 다만, 다양한 특성을 가지는 우드펠릿 중 혼합 연소에 사용된 우드펠릿의 종류, 경질 목재 (Hardwood), 연질 목재 (Softwood), 견과류 (Nut) 또는 하수 침전물 (Sewage sludge) 등을 사용하였는지 확인할 수 없었다. 800 MW 대용량 석탄화력발전소에서 우드펠릿 혼합 연소가 미분기에 미치는 영향에 관한 연구(5)에는, 석탄과 우드펠릿 혼탄 후 각각의 혼합 연소율에 대한 미분기 보울 압력 차이, 이물질 처리횟수, 모터 전류, 미분도를 비교한 결과를 바탕으로, 3% 혼합 연소는 안정적이며 그 이상 혼합하여 연소할 경우 미분기 과부하 여부를 관리할 필요가 있는 것을 확인하였다. 다만, 혼합 연소 시험을 3%, 5%의 두 가지 경우에 대해서 수행, 그 이상 값은 추정값으로 산출하였으며, 혼합 연소 조건이 발열량 혹은 중량 기준인지 언급되

지 않았다. 역청탄-목질계 바이오매스 혼합 연소에 따른 연소로 내 연소 및 배출가스 특성 연구(6)에는 바이오매스 혼합 연소 비율에 따른 연소성과 질소산화물에 대한 영향, 연소로 내 반응 특성을 알아보며 연소성 감소 및 배출가스 특성에 대한 영향성을 예측할 수 있었으나 석탄과 바이오매스의 혼탄 과정을 명확히 설명되지 않았으며, 실제로 적용하기 힘든 혼탄 비율을 선정하여 시험하였음을 확인하였다. 미분탄 석탄화력발전에서의 바이오매스 혼합 연소 동향(7)에는 실제 석탄 발전소에서 적용 가능한 바이오매스 직접 혼합 연소 법을 소개하면서 바이오매스 표준화와 효율적 연소를 위한 전처리 기술 개발의 필요성을 언급하였다.

국외 연구 동향에서 바이오매스 혼합 연소의 경우 혼합 연소기술 자체, 보일러 및 버너 설비에 미치는 영향에 관한 연구는 쉽게 찾아볼 수 있으나 미분기에 관한 연구는 많지 않은 것으로 확인하였다. 이는 에너지 선진국의 경우 태양열, 풍력, 수력 등의 친환경 재생에너지를 활용할 방법이 많아, 바이오매스 혼합 연소를 활용할 당위성이 상대적으로 떨어지고, 발전용 보일러 보다 산업용 보일러에서 바이오매스 펠릿 그 자체로 이용하는 경우가 많기 때문이라 판단된다. 바이오매스의 발전용 설비 활용방안에 관한 연구 동향을 보면 바이오매스 혼합 연소 : 기술, 경험, 연소결과(8)에서 기존 화력발전소의 연료 공급계통에 바이오매스와 석탄을 혼합 후 혼합하여 연소하는 방법, 기존 연료 공급계통과 바이오매스를 분리 후 혼합하여 연소하는 방법, 바이오매스 가스화를 통한 혼합하여 연소하는 방법 등 혼합 연소 기술을 소개하고 실제 적용 중인 발전설비에서 연소과정 시 보일러에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 북미 바이오매스 혼합 연소 현황 검토(9)에 따르면 대부분의 상업적 운영에서 연료의 최대 10%를 대체하기 위한 보조 연료로 활용되고 있으며, 무 탄소 전력부문 대체에 대한 과도기적 선택사항으로 바이오매스 혼합 연소에 대해 지원하는 해결책을 제시하였다. 유럽의 바이오매스 혼합 연소에 대한 평가(10)에서는 대형 석탄 기반 화력발전소에서 바이오매스 혼합 연소는 1차 에너지 균형에서 재생에너지 자원의 점유율 증가에 이바지하는 바가 크다고 평가함과 동시에, kWh 전력생산 당 이산화탄소 등 온실가스 배출량이 가장 많은 석탄을 바이오매스로 대체해 대기 오염물질을 줄일 수 있는 가장 효과적인 방법이라고 하였다. 또한, 목질계 바이오매스 활용 기술 연구(11)에서 미분기 분쇄 후 바이오매스 기체화, 액체화를 통한 연료 활용 가능성을 살펴볼 수 있었다.

1.3 연구 내용

본 연구에서는 바이오매스 혼합 연소 시 미분기 내 주요 운전인자에 미치는 영향을 알아보기 위해 혼합 연소를 중량비 기준으로 수행함과 동시에, 타 연구와 차별성이 있도록 석탄과 바이오매스의 평균 밀도와 중량을 파악하고, 이를 통해 혼합 연료의 부피비를 산출하여 영향을 살펴보았다.

바이오매스 혼합 연소율이 높아지면 수분의 영향이 적어 연소 효율이 높아지는 장점이 있으나, 바이오매스 추가투입에 따른 연료량 증가로 미분기 내부 바울 압력 차이 상승을 초래하게 되는 데 이러한 상황은 중량비 보다는 부피비 증가에 따른 분석이 용이하다. 부피비 비교를 통해 보울 압력 차이와 이물질 처리횟수를 살펴본다.

목질계 바이오매스 특징 중 하나인 부착성 증가로 분쇄가 진행될수록 마찰계수가 증가하며 곧 마찰력 증가로 이어진다. 이는 혼합 연료 중량 증가와 함께 모터 구동 전류를 증가하게 하는 요인이며 이러한 상황은 부피비 보다는 중량비 증가에 따른 분석이 용이하다. 중량비 비교를 통해 모터 전류 변화를 살펴본다.

바이오매스 자체 특성인 휘발분은 그 양이 많아질수록 미분기 내부 화재 등의 문제점이 나타나 안정적인 설비운영에 지장을 초래하게 된다. 부피비와 중량비 두 가지 접근을 통해 출구 온도와 내부 화재횟수를 살펴본다.

마지막으로, 상기 실험 결과를 종합해 안정적인 설비 운영을 위한 혼합 연소 운영기준을 수립하도록 한다.

2. 바이오매스 혼합 연소 시험

2.1 시험설비

본 연구의 시험설비인 보령화력 4호기는 신속한 기동정지 및 기동손실의 최소화, 안정된 저 부하 운전과 높은 열효율을 가지는 석탄화력 발전설비이다. 초임계 압력 관류

형, 변압 운전, 평형통풍, 반 옥외 형식의 500 MW 석탄화력 보일러로, 미국의 CE(社) 및 스위스의 SULZER(社)가 설계하였다. 주요 사양은 보일러 최대 연속 출력 (Boiler Maximum Continues Rating : BMCR) 기준 1,720 ton/hr의 증기를 만들어 낼 수 있으며, 유연탄을 주 연료로 경유를 보조 연료로 사용하며, 증기 조건은 과열기 출구압력 255 ㎏f/㎠, 온도 541℃, 재열기 출구압력 40.6 ㎏f/㎠, 온도 541℃이다.

Fig. 1은 시험설비에 채택된 보일러 평형 통풍계통을 나타내고 있는데, 압입 송풍기 (Forced draft fan)가 연소에 필요한 공기를 보일러 노 내부로 공급하고 유인송풍기 (Induced draft fan)가 연소 후 발생한 가스를 굴뚝 (Stack)을 통해 대기로 배출시키는 방식이다. 노 내 압력이 대기압보다 부압으로 형성되어 연소 가스 및 회 (Ash)의 누설을 방지할 수 있음과 동시에 1차 공기를 얻기 쉬운 장점

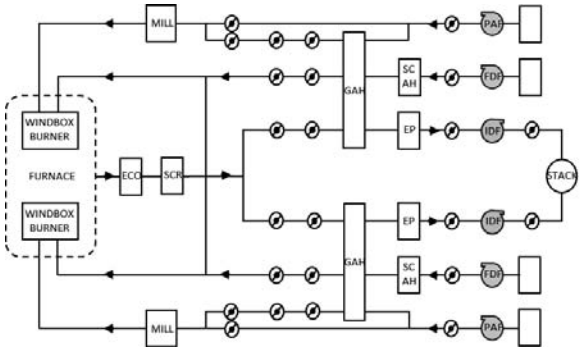

Fig. 1 Balanced draught system of boiler

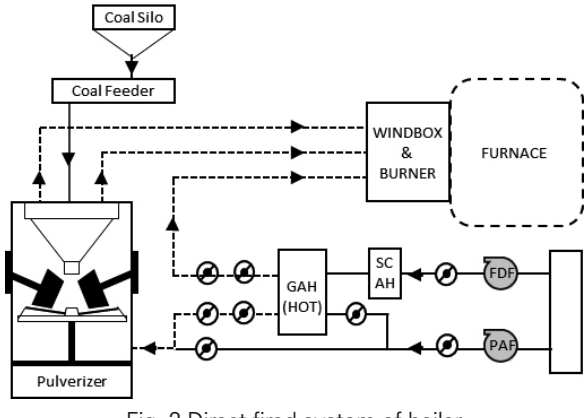

Fig. 2 Direct fired system of boiler

이 있으며, 각 2대의 압입 통풍기, 1차 공기 통풍기 (Primary air fan), 유인통풍기로 구성되어 있다.

Fig. 2는 보일러 직접 연소방식을 나타내고 있다. 1차 공기 송풍기에서 나오는 공기 중 일부는 추출하여 찬 공기로 사용하고 나머지는 공기예열기를 통과시켜 더운 공기로 사용하는데, 이는 미분탄을 미분기 내에서 적절한 온도를 통해 건조해 노 내로 원활히 이송하기 위함이다.

바이오매스 혼합 연소를 수행하는 방법은 병행 혼합 연소 (Parallel co-firing), 간접 혼합 연소 (indirect co-firing), 직접 혼합 연소 (Direct co-firing)의 3가지 방법으로 나눌 수 있으며(12), 국내 현재의 시점에서 혼합 연소율을 높이는 데에는 많은 제약이 있으므로 화력 발전사는 기존의 보일러 및 연소설비를 그대로 활용한 바이오매스 직접 혼합 연소 방식을 채택하였다.

Table 1 Major biomass co-firing and biomass power plant in south korea

Company	Power plant	Total Capacity (MW)	Biomass Capacity (MW)
KOMIPO	Boryeong #1~8	4,000	Co-firing
KOEN	Samcheonpo #1~6	3,360	Co-firing
	Yeongheung #1~6	5,220	
	Yeosu #2	340	
EWP	Dangjin #1~2	1,000	Co-firing
	Dangjin	100	30
WP	Tacan #1~8	4,000	Co-firing
KOSPO	Hadong #1~8	4,000	Co-firing
	Yeongdong #1	125	125
GJEC	Gunjang Energy	250	85

Table 1은 국내 주요 석탄 바이오매스 혼합 연소 및 바이오매스 전용 발전설비를 나타내고 있으며, 특히 지난 2017년, 남동발전 영동 에코본부는 기존의 석탄화력 방식에서 우드펠릿 전소 발전방식으로 최초로 설비개조를 끝내고 현재 운영 중이다. 국내 대다수 설비는 기존 화력 발전설비에 혼합 연소설비를 추가 설치해 바이오매스 직접 혼합 연소 방식으로 3~5% 혼합 연소를 시행하고 있음을 확인할 수

있다.

Figs. 3, 4는 바이오매스 직접 혼합 연소 방식을 채택한 화력 발전설비의 혼합 과정을 도식화 및 보령 4호기에 바이오매스를 공급해 주는 설비를 보여주고 있다. 2013년 12월 준공되었고, 660 ton/day로 설계되었으며, 보령 3~6호기가 공용으로 사용한다. 하역 (Unloading), 저장 (Storage), 분배 (Distribution)로 나눌 수 있으며, 바이오매스는 발전소 하역 후 체인 컨베이어와 버킷 엘리베이터를 거쳐 2기의 저장조에 쌓인다. 이후 혼탄 비율을 제어시스템에 입력하면 바이오매스 공급기 (Biomass feeder)의 중량측정 모듈 (Weighing module)에서 바이오매스의 중량에 비례하는 전기신호를 발생, 컨베이어 벨트의 회전 속도를 조절하여 호기별 이송 중인 석탄 컨베이어 위로 낙하되어 석탄과 함께 원탄 저장조로 이동한다. 이후 미분기에서 석탄과 바이오매스의 분쇄가 이루어지며, 미분화된 혼합연료는 1차 공기와 함께 미분탄 이송관을 거쳐 저공해 버너 (Pollution Minimum Burner : PM Burner)를 통해 노 내에서 연소가 이루어진다.

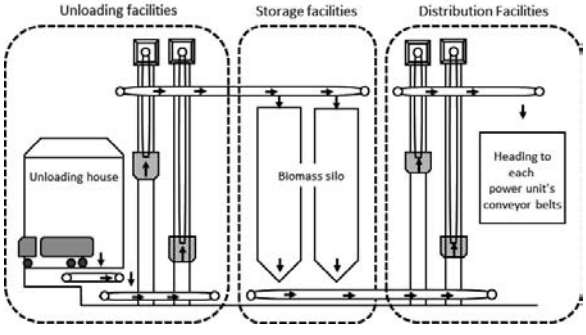

Fig. 3 Detail of biomass mixing process in thermal power plants

Fig. 4 Biomass mixing facilites of Boryeong power plants

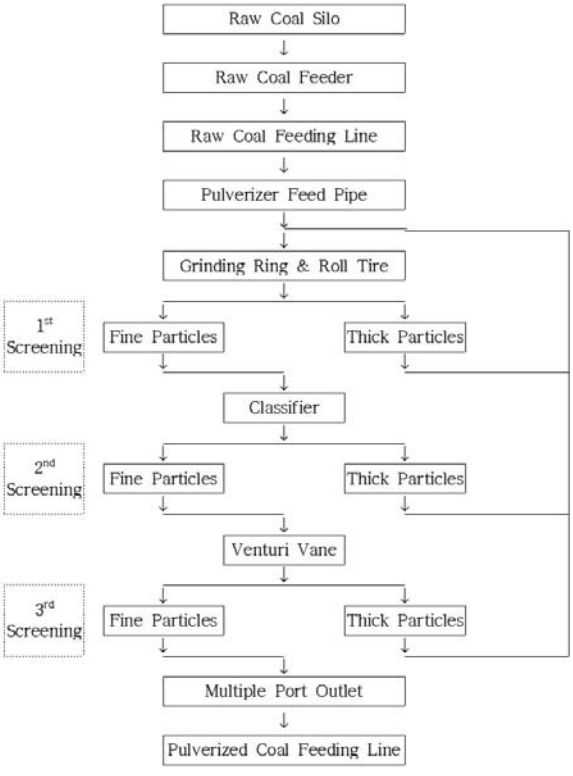

Fig. 5 Flow diagram of coal grinding in pulverizer

2.2 미분기 구조 및 운전 특성

2.2.1 미분기 구조

미분기는 석탄 및 바이오매스 혼합연료를 분쇄하여 노 내로 이동시키는 역할을 하는 설비로, 본 시험설비에는 HP 883 모델의 미분기를 채택하고 있다. 이는 고성능 (High performance)이며, 보울 (Bowl) 안지름이 88인치, 저널 (Journal assembly)로 구성되어 회전하는 그라인딩 롤 타이어 (Grinding Roll Tire)가 3개라는 의미이다. 상부 보울 (Upper bowl) 및 하부 보울 (Lower bowl)로 나뉘며, 1개 호기 당 총 6대가 설치되어 있으나, 평상시는 5대가 운전되고 1대는 예비기기로 사용된다.

Fig. 5에 석탄 분쇄 흐름도를 나타내었다. 상부 보울은 급탄기 (Coal feeder)로 부터 석탄이 보울 중앙으로 공급되며, 0.2 인치 간격으로 떨어진 보울과 그라인딩 롤 타이어

사이를 지나면서 분쇄되는데 이는 보울과 그라인딩 롤 타이어 사이의 직접적인 마찰이 생기지 않음을 의미한다. 분쇄된 미분탄은 보울 상부에 설치되어 미분도를 조정하는 역할을 하는 분류기 (Classifier)와 벤츄리 베인 (Venturi vane)을 통과하여 약 200 메쉬의 미분도로 미분탄 이송관을 통해 미분탄 버너를 거쳐 보일러 노 내로 공급된다. 하부 보울에서는 혼합연료의 이송과 건조를 담당하는 공기 유입 덕트 (Air inlet duct)와 상부로 흐름과 유출 각도를 변화시켜 주는 베인 휠 (Vane wheel), 석탄 내 이물질을 걸러주는 스크래퍼 (Scrapper)로 구성되어 있다. 공기는 1차 공기 송풍기로부터 유입되며, 미분기 외부에 있는 공기 유입 덕트의 내부에는 대기에서 흡입한 찬 공기 (Cold air)와, 공기예열기를 거친 온 공기 (Hot air)의 풍량을 제어하는 베인이 있어 온도를 조절할 수 있다.

2.2.2 운전 특성

미분기의 운전성능을 효과적으로 발휘하기 위해서는 다양한 제어 요소들이 있으나, 그중 바이오매스 혼합 연소에 직접적인 영향을 주는 요소에는 보울 압력 차이, 모터 전류, 이물질 처리횟수, 출구 온도, 내부 화재횟수 등이 있다.

보울 압력차이는 미분기 내부의 보유 연료량이 노 내로 배출되지 못하고 내부 체류시간이 길어질 경우 높아지며, 보통 그라인딩 롤 타이어 가압을 올려서 분쇄력을 향상시키는 것과 분쇄된 미분탄이 배출되기 쉽도록 배출력을 증가, 즉, 1차 공기량을 증가시키고 벤츄리 베인의 개도를 조절하는 방법이 있다.

모터 전류는 유도전동기의 토크와 전력을 통해, 토크는 미분기의 마찰력으로 부터 알아볼 수 있으며 아래 식(2-1)부터 식(2.4)로 나타내었다.

$$T \propto P \quad (2\text{-}1)$$

$$P = I2 \times R \quad (2\text{-}2)$$

$$T = s \times F \quad (2\text{-}3)$$

$$F = \mu \times N \quad (2\text{-}4)$$

여기에서 T는 토크, P는 전력, I는 전류, R은 저항, s는 보울과 모터 중심축과의 거리, F는 보울과 혼합연료의 마찰력, μ는 혼합연료의 마찰계수, 그리고 N은 보울 위 혼합연료의 수직항력을 나타낸다.

이물질 횟수는 습식 회 처리법 기준, 통상적으로 석탄 내부에 섞인 돌, 철편 등의 이물질이 분쇄되지 않을 때 미분기 외부 파이라이트 호퍼 (Pyrite hopper)에서 수동으로 처리하는 것을 의미하는데, 바이오매스 혼합 연소가 늘어나면 미분기 내부 보유 연료량이 많아지므로 일부가 상부 보울에 부착된 디플렉터를 맞고 하부 보울로 넘어가는 경우가 있다.

Appendix에 휘발분 함량에 따른 미분기 출구 온도를 나타내었다. 미분기 출구 온도는 가능한 한 높게 유지할수록 미분탄 예열이 잘 되어 노 내로 이송 후 쉽게 연소가 될 수 있다. 하지만, 적정온도 이상의 경우 노 내 도달 전, 즉, 미분탄 관 혹은 미분기 내에서 발화점 도달에 의한 내부 화재의 위험이 있으므로 조심해야 한다.

2.3 바이오매스 성분 및 분쇄 특성

2.3.1 바이오매스 성분

국내 화력 발전사에서 사용하는 바이오매스 연료는 주로 식물계통이며, 이 중 목질계 바이오매스 (Lignocellulosic biomass)가 가장 많이 사용된다. 목재의 3대 주요 성분은 셀룰로스 (Cellulose), 헤미셀룰로스 (Hemicellulose), 리그닌 (Lignin)이며, 기타 회분 및 송진과 같은 추출물로 구성되어 있다(13). 여기서 3대 주요 성분을 목질 섬유소 (Lignocellulose)라 하는데 이에 대한 정량분석은 미국의 연방 정부 기관인 에너지부 (Depart of Energy: DOE) 산하 단체인 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 발행한 시험절차에 따른다(14). Table 2는 목질계 바이오매스의 건조 상태에 따른 함수율과 발열량을 나타내는데, 이는 연료로서 능력에 주 영향을 미치는 2가지 요소이다(15).

본 시험설비에서 주로 사용되고 있는 바이오매스 5종은 한국산 하수 침전물, 미국산 아몬드껍질 펠릿, 미국산 우드펠릿, 베트남산 우드펠릿 2종이며, Table 3은 상기 바이오매스 5종을 구성하는 주요 성분에 대한 건식기준 분석 결과를 토대로 주요 성분인 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 리그닌 및 기타성분으로 정리한 표이다.

기타성분 함량이 높은 하수 침전물을 제외한 결과를 살펴보면 베트남산 우드펠릿의 셀룰로스 함량이 미국산 우드펠릿이나 아몬드껍질 펠릿보다 높고, 헤미셀룰로스와 리그

Table 2 Moisutre rate and heating value of lignocellulosic biomass

Condition	Moisture rate (%)	Heating value (kal/kg)
Right after logging	50~60	1,700
Dried during mid-summer	25~30	2,900
Dried for many years	15~20	3,700
Completely dried	0	4,500

Table 3 List of biomass dry basis components in use in unit 4, Boryeong

Items	Sewage sludge, S.Korea (wt.%)	Nut shell pellet, U.S. (wt.%)	Wood pellet A, U.S. (wt.%)	Wood pellet B, Vietnam (wt.%)	Wood pellet C, Vietnam (wt.%)
Cellulose	27.6	23.9	31.6	43.7	44.5
Hemi cellulose	12.3	24.2	22.2	16.8	17.8
Lignin	34.7	47.9	43.3	36.6	36.0
Etc.	25.4	4.0	2.9	2.9	1.7
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

닌 함량은 낮은 것을 알 수 있다. 또한, 같은 우드펠릿이라도 원산지에 따라 성분 차이가 나는 것을 알 수 있고, 이를 통해 혼합 연소 시 미분기 영향 및 혼합 연소시험 결과에도 영향을 미칠 수 있다고 추정된다.

2.3.2 분쇄 특성

바이오매스 5종에 대한 분쇄 특성을 알아보기 위한 표준화된 시험방법은 현재까지는 없는 상황이다(16). 이에, 석탄의 분쇄 특성을 위한 측정방법인 석탄의 분쇄지수 [Hardgrove Grindability Index: HGI] 측정법(17)을 사용하여 상대적인 비교를 해 보기로 하였다. HGI란 석탄의 분쇄 특성을 나타내는 지수로써 석탄의 품위를 평가하는 중요한 지표로 사용되고 있는데, 석탄을 구성하는 원소의 함량이 비슷해도 각각의 분쇄 특성은 다르며, 일반적으로 탄화도가 클수록 분쇄도가 높다. ASTM D 409로 표준화되어 있으며, 항습 기준시료 (Air dry basis) 50 g을 분쇄기에 넣어 284 N 하중에서 20 rpm으로 60회전 시켜 분쇄 후, 200 메쉬 체로 20분간 쳐서 통과된 미분탄 양을 측정하여, 약 12.55 g이 통과되었을 때 HGI를 100으로 하고 다음 식으로 분쇄도를 구한다.

$$HGI = 6.93W + 13 \quad (2\text{-}5)$$

여기에서, W는 200 메쉬 체로 통과된 미분탄 질량 (g)을 나타내고, 200 메쉬는 사방 1인치의 넓이에 4만개의 구멍을 가진 체로서 구멍의 크기는 74 ㎛ X 74 ㎛ 이다.

HGI는 1차 함수로써, HGI 값이 가지는 의미는 값이 작을수록 분쇄하기 어렵다는 것이다. 또한 HGI 값과 분쇄 정도는 비선형 관계를 맺고 있는데, 이는 구간별 감소하는 것의 의미가 다르다는 것이다. HGI가 40 이하일 경우 Very Hard, 40~60은 Hard, 60~80은 Medium Hard, 80~100은 Soft로 분류한다.

한편, HGI 측정은 바이오매스 단독, 석탄 단독, 석탄과 바이오매스 혼합으로 3번 진행한 평균값으로 적용하였으며, 석탄은 아역청탄인 KCH를 사용하였다. 석탄과 바이오매스의 혼합은 상대적인 비교를 위해 같은 혼합량을 임의로 선정하였고, 혼합량은 무게비의 8%로 정하였다. 또한, 바이오매스의 비중이 적은 관계로 HGI 측정에서 시료량을 시험방법의 50 g의 절반인 25 g 으로 하였다.

Table 4 HGIs of Biomass, KCH, and biomass mixed with KCH

Items	Sewage sludge, S.Korea (wt.%)	Nut shell pellet, U.S. (wt.%)	Wood pellet A, U.S. (wt.%)	Wood pellet B, Vietnam (wt.%)	Wood pellet C, Vietnam (wt.%)
Biomass	18.3	0.0	1.9	2.6	2.6
KCH	41.0	41.0	41.0	41.0	41.0
Mixed (8%)	34.8	29.3	29.9	33.7	31.5

Table 4는 바이오매스 5종의 HGI 측정값과 석탄과 바이오매스 혼합 (8%) 에서의 HGI 측정값, KCH의 HGI 기준값을 나타낸 것이다. HGI 측정값이 46인 KCH를 사용하였으며, 5종류의 바이오매스의 HGI 측정값을 나타내었다. 하수 침전물 단독의 HGI는 18.3으로 타 바이오매스와 달리 분쇄에 큰 문제가 없으며, 이를 제외한 4종의 바이오매스는

단독 시 분쇄성능이 낮게 나타났다. 이로 인해 석탄과 혼합된 경우 석탄 단독일 때 보다 분쇄성능이 낮게 나타남을 알 수 있다.

이상의 바이오매스 분쇄 특성 결과로부터 하수 침전물을 제외한 목질계 바이오매스 4종에 대해, 리그닌 성분이 많아지면 바이오매스의 HGI 값이 작아지는, 즉, 분쇄효율이 낮아진다는 상관관계를 알아낼 수 있었다.

2.4 시험조건 및 수행방법

2.4.1 시험조건

시험설비인 제4호기 보일러에서 운전 조건은 다음과 같다. 발전단 출력은 자동발전제어 (Automatic Generation Control: AGC)와 주파수 추종 (Governor Free: GF) 모드이며, 총 공기량은 산소 3.2% 자동모드 설정, 미분기 운전은 총 6대, 버너 각도 자동모드 설정하였다.

Tables 5, 6은 본 시험에 사용된 석탄과 바이오매스의 주요 성상에 대해 공인기관 분석 결과를 보여주고 있다. 분석결과를 살펴보면 역청탄 (Bituminous Coal)과 아역청탄 (Sub-bituminous coal)의 전 수분은 각각 9.80~10.40wt.%, 20.41~23.66wt.%로, 휘발분은 각각 28.80~30.50wt.%, 35.00~41.70wt.%로 나타난다. 반대로 회분은 각각 16.70~23.90wt.%, 4.60~6.94wt.%로, 고정탄소는 44.30~51.00wt.%, 39.19~46.93wt.%로 나타난다. 이를 통해 역청탄은 아역청탄에 비해 전 수분과 휘발분은 낮고, 회분과 고정탄소는 높은 공업 분석 특징을 확인할 수 있다. 분쇄도는 두 탄의 종류 모두 46~55 HGI를 보이며, 변형점 (Initial Deformation Temperature)은 역청탄 1,340~1,540℃, 아역청탄 1,149~1,210℃로 역청탄이 높게 나타난다. 두 탄 종류의 구분 기준이 되는 발열량은 5,500 ㎉/㎏을 기준으로 나뉘며, ASTM D 388에서 역청탄 5종, 아역청탄 3종, 총 8종에 대해 발열량 기준으로 분류하였으며, 이를 Appendix에 첨부해 놓았다. 실험에 사용한 역청탄 3종의 평균 수분은 10.13wt.%, 평균 HGI는 46.67, 평균 인수식 발열량은 5,918.3 ㎉/㎏ 이며, 아역청탄 3종의 평균 수분은 22.15wt.%, 평균 HGI는 49.33, 평균 인수식 발열량은 5,303 ㎉/㎏ 이다. 시험에서는 각 3종 탄의 종류에 대해 혼탄 (Coal blending)을 시행하였는데, 탄질의 균일성을 증가시켜 연소성 개선 효과를 얻기 위함이다. 바이오매스는 앞서 연구한 분쇄 특성에서 베트남산 우드펠릿 2종과 주요 구성성분이 비슷한 우드펠릿 2종을 추가하여, 총 4종을 사용하였다. 이들의 평균 전 수분은 7.55wt.%로, 10.13wt.%의 역청탄보다 높고, 22.15wt.%인 아역청탄 보다 낮다. 여기서 주목해야 할 분석 결과는 휘발분인데, 평균 73.69wt.%로 석탄의 2~2.5배 정도 상당히 높게 나타나며, 미분기 내부 화재횟수에 깊은 영향을 미칠 것을 예상할 수 있다. 한편, 평균 HGI는 2.68로 분쇄성이 매우 좋지 않으며, 평균 인수식 발열량은 4,415 ㎉/㎏로 석탄보다 낮음을 확인할 수 있다.

2.4.2 수행방법

혼탄 및 바이오매스 혼합연료의 총 발열량은 5,550~5,650 ㎉/㎏ 이며, 각 5일간 0wt.%, 3.5wt.%, 4.0wt.%, 4.5wt.%, 5.0wt.% 혼합 연소 시험을 진행하였다. 혼합 연소 시 미분기 내 혼합연료의 부피비를 알아보기 위해 아역청탄의 평균 밀도 1.30 ㎏/㎥(18)과, 우드펠릿의 평균 밀도 0.70 ㎏/㎥(19)를 고려하였고, Table 7에 혼합 연소율 별

Table 5 Key properties of coal used in experiments

Items	Unit	Bituminous Coal			Sub-Bituminous Coal		
		Glencore-A	Peabody	Moolaben	KCH	Energyman	Cloudpeak
Total Moisture (As fired basis)	wt.%	10.40	9.80	10.20	20.41	22.37	23.66
Proximate Analysis (Wet basis)							
Moisture	wt.%	2.50	3.00	2.50	13.77	13.96	13.47
Ash	wt.%	16.70	23.90	16.80	6.94	5.15	4.60
Volatile Matter	wt.%	29.80	28.80	30.50	38.35	41.70	35.00
Fixed Carbon	wt.%	51.00	44.30	50.20	40.94	39.19	46.93
Ultimate Analysis (Dry basis)							
Hydrogen	wt.%	4.01	4.04	4.32	4.98	5.39	5.10
Nitrogen	wt.%	1.88	2.07	2.03	1.53	1.41	1.19
Sulfur	wt.%	0.48	0.41	0.62	0.88	0.19	0.32
Hardgrove Grindability Index	HGI	48	46	46	46	47	55
Initial Deformation Temperature	℃	1,340	1,540	1,530	1,160	1,210	1,149
Higher Heating Value							
As received basis	kal/kg	6,043	5,574	6,138	5,236	5,342	5,331
Air dry basis	kal/kg	6,576	5,994	6,664	5,673	5,922	6,042
Dry basis	kal/kg	6,744	6,180	6,835	6,579	6,881	6,983
Net Calorific Value	kal/kg	5,796	5,330	5,880	4,914	4,996	4,994
Grain Size							
< 2 ㎜	%	21.50	22.90	21.70	14.71	13.89	24.92
< 0.2 ㎜	%	0.00	0.00	0.00	1.15	1.62	0.00

Table 6 Key properties of biomass used in experiments

Item	Unit	Wood Pellet A (Deokam)	Wood Pellet B (Supung-E)	Wood Pellet C (Artis)	Wood Pellet D (Hoptin)
Total Moisture (As fired basis)	wt.%	6.8	8.7	7.0	7.7
Proximate Analysis (Wet basis)					
Moisture	wt.%	-	-	-	-
Ash	wt.%	0.51	1.21	1.41	3.00
Volatile Matter	wt.%	74.20	72.85	75.80	71.92
Fixed Carbon	wt.%	18.49	17.67	15.79	14.36
Hardgrove Grindability Index	HGI	2.6	2.6	2.8	2.7
Higher Heating Value					
As received basis	kal/kg	4,550	4,480	4,340	4,290

Table 7 Total fuel volume rate in pulverizer by co-firing ratio

Co-firing ratio (wt.%)	Fuel	Unit weight (kg)	Density (kg/㎥)	Volume (㎥)	Total volume (㎥)	Volume ratio※
0	Wood pellet	0.0	Wood pellet 0.70 Coal 1.30	0.00	76.92	0
	Coal	100.0		76.92		
3.5	Wood pellet	3.5		5.00	79.23	6.31
	Coal	96.5		74.23		
4.0	Wood pellet	4.0		5.71	79.56	7.18
	Coal	96.0		73.85		
4.5	Wood pellet	4.5		6.43	79.89	8.05
	Coal	95.5		73.46		
5.0	Wood pellet	5.0		7.14	80.22	8.90
	Coal	95.0		73.08		

※ Volume Ratio = Volume of Wood pellet (㎥) ÷ Total Volume (㎥)

부피비를 나타내었다. 혼합 연소 시 미분기에 미치는 영향을 알아보기 위해 본 시험에서 선정한 주요 측정 인자는 보울 압력 차이, 모터 전류, 이물질 처리횟수, 출구 온도, 내부 화재횟수이다. 미분기는 시험 기간 내 연속운전을 하기에, 보울 압력 차이와 모터 전류, 출구 온도는 시작일 0시를 기준으로 4시간 간격으로 측정하였다. 이물질 횟수는 Day Shift 기준, 내부 화재횟수는 시작일 0시를 기준으로 24시간 동안 수행한 횟수를 측정하였다.

3. 미분기 운전 인자 변화

3.1 보울 압력 차이

Fig. 6은 혼합 연소율 변화에 따른 미분기 각각의 보울 압력 차이의 평균값과 해당 연소율 별 측정값의 표준오차(Standard Error) 범위를 표시한 것이다. 전체적인 값은 1,60~2.10 kPa에서 나타나고 있으며, #D, #E 미분기 측정값이 비교적 크게 나타나고 있다. 제어 가능한 미분기 운전 변수를 최대한 같이 설정하고 시험을 수행하였으나 분쇄도에 영향을 주는 다양한 인자들로 인해 측정값은 차이가 있지만, 혼합 연소율이 증가함에 따라 보울 압력 차이가 증가하는 경향은 전체적으로 같다.

이는 앞서 살펴본 바와 같이 혼합 연소율 별 혼합연료의 부피비와 연계하여 설명이 가능한

사항으로, 0wt.% 기준 우드펠릿의 부피비가 3.5wt.% 시 6.31%, 4.0wt.% 시 7.18%, 4.5wt.% 시 8.05%, 5.0wt.%

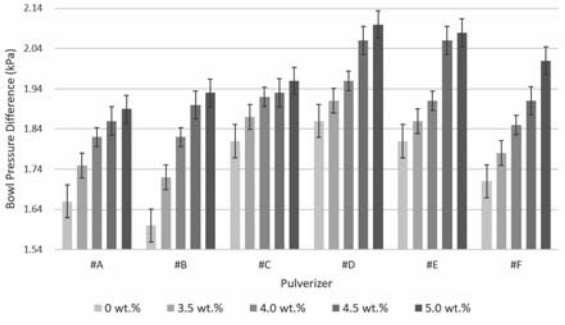

Fig. 6 Average and standard error value of bowl pressure difference on pulverizers by changing co-firing ratio

시 8.90% 늘어난다. 혼합 연소율이 증가함에 따라 공급되는 연료량 또한 증가하여 미분기 내부에 체류하는 혼합 연료의 양이 많아지는데, 이는 부피비가 늘어났음을 의미한다. 체류 양이 많으므로 혼합 연료의 분쇄시간이 길어지고 이와 같은 영향으로, 상·하부 간 보울 압력 차이가 벌어지는 것을 확인할 수 있다. 통상적으로 미분기는 보울 압력 차이 2.35 kPa 아래에서 운전하며, 일정 수준을 넘어가면 미분기 분쇄성능이 급격히 저하되어 압력 차이는 급격하게 증가하고 불시 정지하는 현상이 일어나게 된다. 본 시험 결과 5.0wt.% 혼합 연소 시 안정 가능 운전범위까지 약 0.25 kPa의 여유가 있음을 확인하였으나, 그 이상 혼합 연소 시 운전범위에 근접할 것으로 예상한다.

3.2 모터 전류

Fig. 7은 혼합 연소율 변화에 따른 미분기 각각의 모터 전류의 평균값과, 해당 연소율 별 측정값의 표준오차(Standard Error) 범위를 표시한 것이다. 전체적인 값은 32~42 A에서 나타나고 있으며, #D와 #F는 5.0wt.% 혼합 연소 시 42 A 까지 근접함을 확인할 수 있다. 모터 전류 측정값 또한 모터 사용 연수에 대한 성능 차이로 인해 미분기 별 최소, 최대값은 차이를 보이나, 혼합 연소율이 증가함에 따라 상승하는 경향은 같다. 특히 0wt.%와 3.5wt.% 구간에서 상승 폭이 타 구간보다 커짐을 확인할 수 있는데, 우드펠릿의 부피비가 0에서 6.54로 증가하는 구간이다. 이러한 현상은 연소실 내부로 공급되는 연료의 전체적인 발열량을 맞추기 위해 미분기 내부에 공급되는 혼합 연료량이 많아

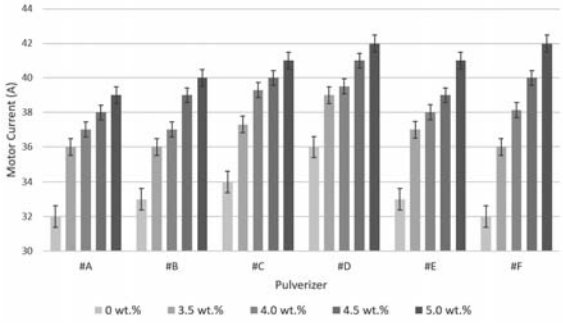

Fig. 7 Average and standard error value of motor current on pulverizers by changing co-firing ratio

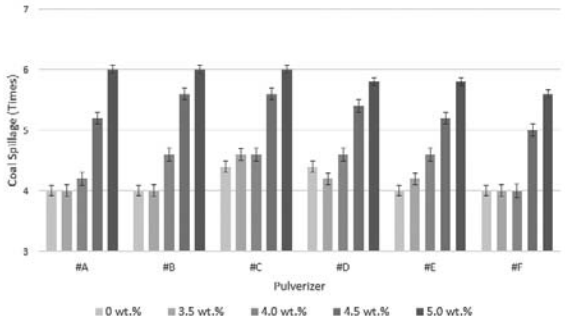

Fig. 8 Average and standard error value of coal spillage on pulverizers by changing co-firing ratio

보울 위 체류하는 연료의 중량이

증가하여 더 많은 구동력이 필요하기 때문이다. 통상적으로 정격부하 운전 시 급탄기는 36 ton/hr의 연료를 공급하며, 이를 환산하면 초당 약 1.67 ㎏의 부하가 신규로 미분기에 더해지는 것과 같다. 또한, 이를 미분기 상부 분쇄과정에서의 마찰계수 특성과도 연계하여 설명할 수 있는데, 이는 목질계 바이오매스가 가지고 있는 특성인 점착성이 미분기 분쇄 시 반영된 결과이다. 석탄의 경우 분쇄가 진행될수록 구(球)형이 되어 마찰계수가 적어지지만, 우드펠릿의 경우 분쇄가 진행될수록 점착성이 증가하여 미분기 분쇄부에 체류하면서 분쇄효율을 낮추는 역할을 한다.

유도전동기에서 전류의 제곱은 전력에 비례하고, 전력은 토크에 비례한다는 것은 널리 알려진 사실이다. 토크는 거리와 힘의 곱으로 나타낼 수 있으며, 미분기에서 토크 또한 작용거리와 마찰력의 곱으로 나타낼 수 있다. 작용거리는 전동기 중심축과 미분기 보울 상부까지의 거리, 마찰력은 보울 상부 혼합연료의 마찰계수와 수직항력의 곱으로 나타낼 수 있다. 이를 연계하여 결과를 살펴보면 0wt.%에서 3.5wt.%의 급격하게 증가하는 구간은 우드펠릿이 공급됨에 따라 점착성 또한 급격하게 증가하여 마찰계수가 기존 대비 커지게 되므로 마찰력과 토크가 증가하며, 이에 미분기 구동 시 소요되는 전력이 증가, 즉 전류가 증가함을 알 수 있다. 이 외 3.5~5.0wt.% 구간에서도 우드펠릿 공급량이 많아지며 마찰계수가 증가, 선형적으로 상승함을 알아볼 수 있다.

한편, 모터 과전류에 관한 판단은 통상 50 A에서 수행하며, 본 시험 결과 5.0wt.% 혼합 연소 시 측정값은 42 A로 약 8 A의 여유가 있음을 확인하였다.

3.3 이물질 처리횟수

Fig. 8은 혼합 연소율 변화에 따른 미분기 각각의 이물질 처리횟수의 평균값과, 해당 연소율 별 측정값의 표준오차(Standard Error) 범위를 표시한 것이다. 전체적인 값은 앞선 보울 압력 차이와 모터 전류와는 달리 미분기 별 편차 없이 4~6회에서 나타나고 있어, 비교적 안정적으로 운영됨을 확인할 수 있다.

측정된 값을 부피비로 비교해 보면 0~4.0wt.% 구간에서는 우드펠릿 부피비가 0에서 7.18까지 증가하지만, 이물질 처리횟수는 구간에서 거의 일정함을 알 수 있다. 4.0~5.0wt.% 구간에서는 우드펠릿 부피비가 7.18에서 8.90으로 증가하면서, 이물질 처리횟수 또한 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 우드펠릿 부피비 증가율이 7 수준에서 안정적이고, 그 이상을 넘어갈 경우 조금씩 이물질 처리횟수가 증가함을 확인할 수 있다.

한편, 미분기 내 이물질은 롤 타이어의 무게와 압력에 분쇄되지 않는 돌, 철편 등의 이물질이 하부 스크래퍼 룸에서 파이라이트 호퍼로 배출되어 처리하게 되며, 운전 과정에서 1차 공기 흐름의 불균일 혹은 롤 타이어 유압 시스템 등 문제가 생기면 원탄이 같이 배출되기도 한다. 본 시험 결과 배출된 이물질은 혼합 연소율이 높아질수록 돌과 철편 외에도 약간의 원탄과 우드펠릿 분쇄물도 섞여 있음을 확인할 수 있었는데, 이는 혼합 연소율 4.0~4.5wt.% 구간에서 미분기 내 분쇄 가능 용량을 일부 초과하여 분쇄부 밖으로

연료가 넘쳤을 가능성이 있다.

통상적으로 이물질 처리횟수는 연료에 특별한 사항이 없는 한 3~8회/Shift 에서 관리되고 있는 것을 고려하면, 본 실험 결과는 적정 처리횟수 내에서 운영되고 있다고 볼 수 있다. 다만, 상기 기술한 바와 같이 이물질 자체 배출과 분쇄용량 초과에 의한 배출 등 복합적인 요인이 있으므로 혼합 연소율과 이물질 처리횟수는 절대적인 상관관계가 있다고 판단하기는 어렵고, 영향을 받고 있다고 추정할 수 있다.

3.4 출구 온도

Fig. 9는 혼합 연소율 변화에 따른 미분기 각각의 출구 온도의 평균값과, 해당 연소율 별 표준오차 (Standard Error) 범위를 표시한 것이다. 전체적인 값은 57~61℃에서 나타나고 있으며, #A~#C 보다는 #D~#F에서 소폭 상승한 값을 나타내고 있다.

혼소율이 0~5.0wt.%로 늘어남에 따라 우드펠릿 부피비는 0에서 8.90까지 늘어나며, 이는 우드펠릿의 특징 중 하나인 휘발성분이 많이 유입됨을 의미한다. 미분기 보울 하부에서 온 공기 (Hot Gas)가 유입됨과 동시에 우드펠릿의 휘발성분으로 인해 발열이 시작된다. 다만, 상승 폭은 매우 미미하며, 출구 온도 60℃ 이상에서는 상승 폭이 축소되거나 제한되는 것을 확인할 수 있다.

출구 온도가 높으면 혼합연료 자체가 가열된 상태로 노내로 투입되기 때문에 보일러 연소성이 좋게 되나, 미분기 내부 혹은 미분탄 이송과정에서 화재가 발생할 가능성이 있다. 이 경우 화재확산을 방지하기 위해 미분기를 불시 정지

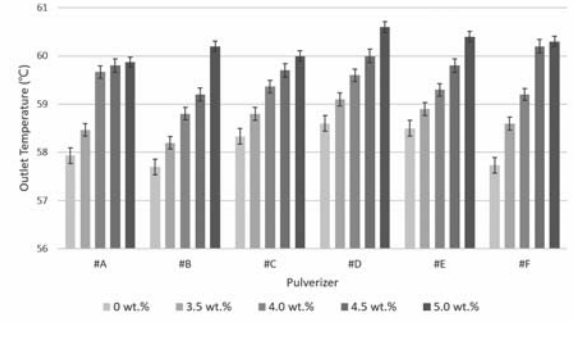

Fig. 9 Average and standard error value of outlet temperature on pulverizers by changing co-firing ratio

Table 8 Measured value of inner fire of pulverizers by changing co-firing ratio

Co-firing Ratio \ Pulverizer	Value (Times)	#A	#B	#C	#D	#E	#F
0wt.%	Maximum	0	0	0	0	0	0
	Minimum	0	0	0	0	0	0
	Average	0	0	0	0	0	0
3.5wt.%	Maximum	0	0	0	0	0	0
	Minimum	0	0	0	0	0	0
	Average	0	0	0	0	0	0
4.0 %	Maximum	0	0	0	0	0	0
	Minimum	0	0	0	0	0	0
	Average	0	0	0	0	0	0
4.5wt.%	Maximum	0	0	0	0	0	0
	Minimum	0	0	0	0	0	0
	Average	0	0	0	0	0	0
5.0wt.%	Maximum	0	0	0	1	0	0
	Minimum	0	0	0	0	0	0
	Average	0	0	0	0.5	0	0

해야 하는 등 안정적인 운영에 영향을 미친다. 따라서, 출구 온도는 항시 일정하게 관리해야 하는데 이를 제어해 주는 시스템이 온도 추종 시스템이다. 출구 온도가 높아지면 하부 보울을 통해 미분기 내부로 들어가는 따뜻한 공기 (Hot air) 량을 줄이고 차가운 공기 (Cold air) 량을 늘리는데, 덕트 내부의 베인 각도 조절로 자동 수행하게 된다. 일반적으로 출구온도를 60℃이하로 유지하기 위해서는 온 공기 베인 개도는 33~34%, 냉 공기 베인 개도는 29~30%에서 운전한다. 이를 통해, 혼합 연소율이 일정 비율 증가하더라도 출구 온도상승은 제한적 범위 내에서 움직일 것을 확인할 수 있다.

3.5 내부 화재횟수

미분기 내부 화재횟수는 바이오매스 혼합 연소 시 미분기 운전의 안전성을 평가하는 중요한 측정이 될 수 있다. Table 7은 혼합 연소율 변화에 따른 미분기 6대의 내부 화재횟수를 표시한 것이다. 혼합 연소율 5.0wt.% 시 미분기 #D에서 화재가 1회 발생하였다. 미분기 내 화재 발생은 주로 하부 보울 내 스크래퍼의 마찰로 인한 불꽃 발생이 대부분이라 추정(20)되나, 앞선 4가지 시험 결과에서 미분기 #D의 압력 차이 증가율과 출구 온도상승이 높게 나왔기에 이로 인한 바이오매스의 발화 영향을 무시할 수는 없을 것으로 추정한다.

4. 결 론

본 연구는 500 MW 석탄화력발전소에서 바이오매스 혼합 연소율이 미분기 운전 인자에 미치는 영향을 알아보기 위해 바이오매스 직접 혼합 연소 방식으로 석탄과 바이오매스 혼합 연소를 0wt.%, 3.5wt.% 에서 5.0wt.% 까지 0.5wt.% 간격으로 시험하였고 아래와 같은 결론을 도출하였다.

첫째. 미분기 보울 압력 차이는 바이오매스 혼합 연소율이 증가함에 따라 연료량이 많아지면서 분쇄되지 못한 연료의 내부 체류 시간 증가로 상승하였으며, 보울 상부 보유 연료 중량에 영향을 받는 모터 전류 또한 상승하였다. 또한, 분쇄 가능 용량 초과로 연료가 하부 보울로 넘치면서 이물질 처리횟수 또한 증가함을 알 수 있었다. 따라서 혼합 연소율 증대가 필요할 때 상기 3가지 요인은 미분기 운전에 직접 영향을 주기에 우선하여 고려해야 할 필요가 있을 것이다.

둘째. 미분기 출구 온도는 바이오매스 혼합 연소율이 증가함에 따라 상승하는 경향을 보이나 출구 온도 추종 제어 시스템이 냉, 온 공기비 조절을 통해 출구 온도를 설정값으로 유지하기 때문에 상승 폭은 매우 미미하며 제한됨을 알 수 있다. 타 인자보다 미분기 운전에 미치는 영향이 적으므로 혼합 연소율 증대 시 비교적 관리가 쉬울 것이다.

셋째. 미분기 내 화재 발생은 1회 발생하여 혼합 연소율 증가 혹은 미분기 출구 온도와 직접적인 상관관계를 찾기 힘들다. 다만, 특정 미분기 운전 인자와 연관성을 찾아볼 수 있었고, 이와 복합적으로 발생할 가능성이 크기에 혼합 연소 시 예의주시할 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

(1) MOTIE, 2019, The 3rd Energy Master Plan

(2) Korea Energy Agency, 2020, Renewable Energy Policy

(3) MOTIE, 2018~2020, Announcement of mandatory supply by supply duty

(4) Sunghwan Oh, 2015, A study on the change of the pulverizer operating state in Co-combustion with coal and wood pellet by the pulverized coal fired power plant, Doctoral dissertation, Gyeongsang University

(5) Chunhwan Lee, 2018, Effect of wood pellets mixing on the pulverizer operation in the 800MW coal fired power plant, Doctoral dissertation, Hanyang University

(6) Yeongho Hwang, 2015, In-furnace Combustion and Emission Gas Characteristics of Coal and Woodpellet Co-firing in the air-staged Pulverized Coal Combustion Furnace, Doctoral dissertation, Pusan University

(7) Tae-Young Mun, Zelalem Tumsa Tefera, Uendo Lee, Jeung Woo Lee and Won Yang, 2014, Evaluation of Plant Performance during Biomass Co-firing in Pulverized Coal Power Plant, J. Korean Soc. Combust, 19(3), pp.8-17

(8) Tillman, D.A., 2000. Biomass cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences, Biomass and bioenergy, 19(6), pp.365-384

(9) Agbor, E., Zhang, X., & Kumar, A., 2014, A review of biomass co-firing in North America. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, pp.930-943

(10) Bergman, P.C., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R. and Kiel, J.H.A., 2005, Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations, Energy Research Centre of the Netherlands, ECN-C-05-013

(11) Kobayashi, N., Guilin, P., Kobayashi, J., Hatano, S., Itaya, Y. and Mori, S., 2008, A new pulverized biomass utilization technology, Powder technology, 180(3), pp.272-283

(12) The International Renewable Energy Agency, 2013, Biomass Cofiring - Technology Brief, IEA-ETSAP and IRENA© Technology Brief E21

(13) KPLI, 2014, Fuel management practice, KPLI-Renewal-2, pp.102
(14) Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D. and Crocker, D., 2008, Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass, Laboratory analytical procedure, 1617, pp.1-16
(15) Demirbas, A., 2002, Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels, Energy exploration & exploitation, 20(1), pp.105-111
(16) Manouchehrinejad, Maryam, Ian van Giesen, and Sudhagar Mani, 2018, Grindability of torrefied wood chips and wood pellets, Fuel processing technology, 182, pp.45-55
(17) KPLI, 2016, Boiler operation practice, KPLI-Renewal-3, pp.176
(18) Flores, Romeo M., 2013, Coal and coalbed gas: fueling the future. pp.25
(19) Tumuluru, Jaya Shankar., 2016, Specific energy consumption and quality of wood pellets produced using high-moisture lodgepole pine grind in a flat die pellet mill, Chemical engineering research and design, 110, pp.82-97
(20) Zalosh, Robert G, 1987, Review of coal pulverizer fire and explosion incidents., Industrial Dust Explosions, ASTM International, 1987.