

## 저급탄 혼소 확대 보일러의 설계

김 중 길 | 한국전력기술(주) 기계기술처 보일러분야, 차장 | tomorrow@kopec.co.kr  
 이 흥 승 | 한국전력기술(주) 기계기술처 보일러분야, 차장 | tleehs@kopec.co.kr  
 김 동 철 | 한국전력기술(주) 기계기술처 보일러분야, 차장 | bigman@kopec.co.kr

이 글에서는 국내 석탄화력발전회사들이 최근 에너지 자원의 가격 급등과 수급여건의 불확실성 증가에도 이익을 극대화하고, 연료 수급의 안정성을 확보함으로써 경쟁력을 강화할 수 있는 대용량 보일러 및 관련 설비의 저급탄 혼소를 확대방안과 관련 설계요소를 소개하고자 한다.

**세**계 에너지 시장에서 석탄을 연료로 하여 공급되는 전력량은 전 세계 전력 요구량 중 40%를 충당하고 있으며 채굴 연한은 약 160년 이상으로 평가되고 있어 타 에너지원보다 수급이 안정적인 편이다. 그러나 석유자원의 고갈과 거래시장의 투기적 성향으로 계속되는 유가상승과 더불어 석탄액화사업이 석유대체의 대안으로 제시되고 있어 향후 석탄가격의 안정성에도 영향을 줄 것으로 예측된다.

최근의 석탄수급 현황을 보면, 유럽은 꾸준한 공급증가와 수요 감소로 다소의 공급과잉 상태에 있으나 아시아는 베트남과 인도를 포함하여 대만, 한국, 중국 등에서는 지속적인 수요증가 추세로 장기적으로 국제 유연탄 시장은 수급 불균형 가능성이 높고 돌발변수에 따른 시장변동성이 클 것으로 전망되고 있다. 과거에는 양질의 석탄인 역청탄의 가격 변동 폭이 크지 않았고 인도네시아 아역청탄과 같은 저급탄의 공급 인프라가 충분치 않아 보일러 설계를 위해 제시된 범위탄(range coal) 기준이 중요시 되지 않았으나 최근 석탄가격의 상승과 수급 불안정으로 저급탄 수요가 늘면서 범위탄을 성능보장 기준으로 강화하고 설비성능에 한계를 줄이도록 요구하고 있어 아역청탄 혼소를 위한 보일러의 최적설계 방안의 제시가 필요한 시점이다.

### 석탄수급 여건

#### 세계 석탄 매장량 현황

최근 석탄 가격이 강세를 보이는 이유는 아시아 국가들

의 수입량 증가, 중국의 수요증가로 인한 수출물량 축소, 호주 뉴캐슬항 처리용량 한계, 유가상승에 따른 석탄수요 증가, 고열량탄의 수급불안 등이 주요인이며, 국내 유연탄 수급의 문제점은 낮은 자주 공급률, 대 중국 수입량 감소, 공급자 중심의 시장전환으로 추가적인 가격상승 우려 및 수요량의 안정적 확보 곤란, 석탄수급 및 가격변동에 대한 체계적 대응시스템 부족 등에 있다.

온실가스 감축이 지구촌 과제가 된 상황에서 갑자기 석탄이 주목받는 까닭은 고유가의 영향이 크며, 과거에는 고유가 상황에서도 석탄 가격이 안정된 추이를 보였지만 근래에는 석탄 가격이 유가 변동을 따르는 경향을 보이고 있다. 최근 미국 뉴욕타임스 기사에 따르면 “2000년 석유의 에너지 생산 단가는 석탄의 2배에 그쳤지만, 유가가 급등하면서 2007년에는 석탄의 6배 수준으로 상승했다. 그러나 석탄은 앞으로 200년 동안 고갈될 염려가 없으며 100여 개 국가에서 생산되기 때문에 카르텔이 형성되기도 힘들다.”고 보도하고 있다. 그렇지만 2008년 초에도 중국의 석탄 공급이 차질을 빚으면서 spot 시장에서의 석탄가격이 가파르게 상승하는 것을 보면 석탄의 수급여건 변화에 따른 가격의 민감도는 매우 큰 것을 알 수 있다. 그러나 인도네시아 아역청탄의 경우 공급량 증가에 따른 가격의 민감도가 타 국가의 것보다 작아서 경쟁력있는 상품으로 부각되고 있다. 즉, 우리나라 발전용 수입탄의 호주, 중국의 존도가 지나치게 높고, 고열량탄의 수급불안이 지속될 것으로 전망되는 점 등을 고려할 때, 수입 대상국을 확대하

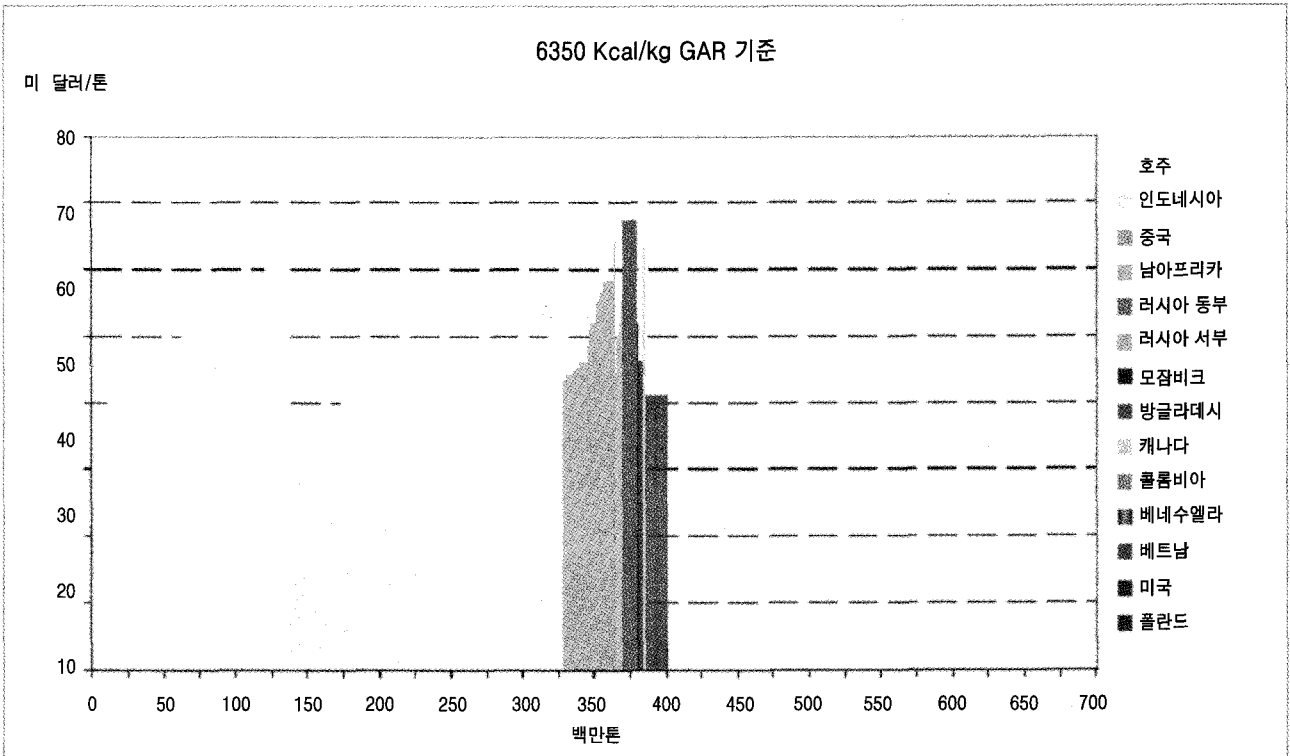


그림 1 공급량 증가에 따른 산지별 공급량에 따른 가격상승(2007, Barlow Jonker)

여 포트폴리오를 재구성하는 전략이 필요하다. 석유·가스에 집중되던 자원전쟁이 석탄에까지 옮겨 붙은 상황에서 보다 값이 낮고 비교적 가격의 민감도가 낮은 저급탄을 기준으로 발전소를 설계하는 것은 수급여건 악화에도 능동적으로 대처할 수도 있고 변동비를 줄여 발전 사업자의 수익을 확대할 수 있는 불가피한 선택이 되고 있다.

### 신규 대용량 석탄화력 발전소의 건설 방향

국내 발전시장에서는 전력계통 규모의 증가에 따라 2000년대에는 보다 큰 단위기 용량의 발전소 건설에 관심이 높아져서 2007년 3차 전력수급계획을 통해 국내 화력 발전 시장에도 1,000MW급 고효율 발전소의 건설이 확정되기에 이르렀다. 한전의 전력연구원과 관련 연구 참여업체는 2002년부터 2008년까지 차세대 화력발전소 기술 개발을 위해 고효율, 환경친화적, 대용량 발전소의 건설을 목표로 기술개발을 단계적으로 수행해 왔다. 기술개발 목표는 주증기 압력 265kg/cm<sup>2</sup>·g, 주증기 및 재열증기 온

도를 각각 610℃/621℃, 터빈형식은 직렬배열(tandem compound) 4Flow, 터빈 최종익(last stage blade) 길이 45" 등으로 결정하였으나 실증을 위해서는 신뢰성 검증과 위험(risk)에 대한 비용 부담 등이 문제점으로 남아 있다. 3차 전력수급계획에서 건설이 확정된 당진 9,10호기 건설 사업은 국내 최초의 1,000MW급 대용량 초초임계 발전소이므로 성능이 검증된 기술 수준을 중심으로 설비를 구성하고 있으며 국내 발전분야의 설계, 제작 및 건설기술 향상의 새로운 도전과 극복의 기회가 될 것으로 기대된다.

### 아역청탄 보일러의 설계

#### 아역청탄의 연소 특성

국내 석탄화력 발전소의 저급탄 혼탄 실적을 보면 보일러 형식에 따른 아역청탄 혼탄 성능은 2 Pass 보일러보다는 1 Pass 보일러가, 접선연소(tangential firing) 방식보다는 대향류 연소(opposite firing) 방식의 혼탄 성능이 상

대적으로 양호한 것으로 평가되고 있는데 이는 노 내의 온도분포가 고르게 형성될수록 국부과열이 억제되어 저급탄 연소에 유리한 때문이다. 아역청탄을 위한 보일러 설계의 고려사항은 슬래깅성, 파울링성, 분쇄도, 마모성 등이 있으며 상세설계를 위한 고려사항은 열부하율, 노출구 온도, 제매기 수량, 버너 용량, 미분기 용량 등이 있다. 경제성 검토를 위해서는 저급탄의 연료비 감소효과, 설비비 증가율, 소내 소비율 증가, 탄소세 저감 효과 등을 감안할 수 있다.

불필요한 혼탄 범위 확대는 초기투자비 증대, 보일러 소내소비율 증가, 효율감소, 미분기와 버너의 신뢰성 저하 등 최적 설계 측면에서는 부작용이 커질 수 있고, 낮은 혼탄비율의 설계는 다양한 탄종을 소화할 수 있는 여유를 제한받게 된다. 따라서 아역청탄의 장기 수급여건, 기존 발전소의 운용실적, 설비의 신뢰성, 경제성 등을 종합적으로 감안할 때 대용량 신구화력 발전소의 보일러는 아역청탄의 도입단가가 현저히 낮은 추세를 보이지 않는 한 50% 수준의 아역청탄 혼탄비율의 선택이 위험이 적은 방안이 된다.

## 대용량 아역청탄 보일러 설계

### 열 부하율

열부하율(heat release rate)은 보일러 연소로 단면, 체적, 유효투영면, 버너 지역에 투입되는 순수입열(net heat input) 또는 연료입열(fuel heat input)의 양을 수치로 표현한 것으로 연료의 특성 대비 보일러 크기를 표현하는 기준이 된다. 열부하율에 영향을 주는 연료의 특성은 회용착성(slagging potential), 질소산화물 발생 경향, 노출구 가스온도 등이 있으며, 보일러의 형식, 버너의 형식, 버너상단 연소공기 주입구(over fire air port)의 적용기술 등도 관계가 된다.

국내의 발전소 설계사의 설계기준, 제작사의 공급실적 등을 참조하여 50% 아역청탄 설계를 위한 열부하율 설계 기준을 수립하였다. 그러나 제작사들 입장에서는 기존의 설계 및 운전 실적을 중심으로 설계변경을 최소화하여 입

찰에 참여하고자 하므로 보일러 크기 증대에 부정적인 시각을 갖고 있는 편이어서 신뢰성 향상을 위한 발전설비 설계의 평가에는 어려움이 따른다.

### 열 흡수 분배비율

보일러 각부의 열 흡수 비율(heat absorption rate)은 보일러의 주증기 압력의 상승에 따라 수관부보다 증기관부에 집중되고 있다. 이러한 열 흡수 분배비율은 급수온도, 저온 재열증기 온도, 노 및 절탄기의 크기 등에 따라 다양하나, 동일 탄종을 연소하는 경우 유사형식의 보일러에서는 차이가 적어진다. 보일러 각 압력부별 열 흡수율 및 전열면적 비율은 보일러 제작사의 고유 설계사항으로 일정 비율로 제한하는 것은 쉽지 않으나, 부분부하 운전 시 보일러의 적정 성능을 유지하여야 하고 기동 시간을 단축시킬 수 있도록 과열기 및 절탄기에서의 적절한 열 흡수율/전열면적 비율 선정할 필요가 있다. 특히 과열기 전열면적의 축소설계는 보일러 기동 시 보일러 재순환 펌프가 정지되기 시작하는 Wet Mode로부터 Dry Mode로 전환하는 단계에서 안정적인 운전이 문제가 있을 수 있고 기동 시간을 지연시키는 원인이 된다. 따라서 보일러 과열기 및 절탄기의 열 흡수율/전열면적 적정 비율을 확인하고 전열면적 또는 열흡수 분배비율에 대한 최소 기준조건을 제시하는 방안이 추천된다.

### 미분기 설계기준

1,000MW급 대용량 석탄화력 발전소에서 역청탄과 아역청탄을 혼소하는 보일러를 설계할 경우, 미분기 설계기준은 역청탄 설계탄 + 아역청탄 범위탄 50% 혼소 기준으로 보일러 최대출력(boiler maximum continuous rating)에서 예비기 한 대를 갖도록 하는 것이 향후 석탄의 수급여건이 악화되더라도 혼소율을 유지할 수 있는 방안이다. 인도네시아 아역청탄에는 4,800kcal/kg 수준의 발열량이 낮은 석탄도 있고 호주 역청탄에는 분쇄도(HGI)가 35 수준의 분쇄성이 낮은 석탄도 있으며, 수급여건에 따라 이보다 낮은 저급탄의 공급가능성도 있어 석탄 공급계통 및 연소용 공기 공급계통은 저급탄 설계를 여유율 범위에

포함하여 설계하는 것이 바람직하다.

### 통풍계통 설계

송풍기 설계 여유율(test block margin)은 공기에열기 누설, 슬래깅과 파울링에 의한 보일러 튜브면 마찰 저항, 덕트 및 계통의 누설, 시운전 오차 등을 감당하기 위해 최초 설계 단계에서 반영하는 여유율이다. 아역청탄 설계를 위해 일차공기 송풍기에 대한 여유율을 추가 고려한 설계 사례는 없었으나, 수분이 높고 분쇄도(HGI)가 낮은 석탄의 연소 시 미분기 내 재순환 비율이 높아져 일차공기의 압력이 부족해지고 최대출력 운전 시 예비기까지 운전되고 있는 최근 시운전 사례를 감안할 필요가 있다.

1차 공기 송풍기는 초기투자비 절감과 신뢰성 향상을 목적으로 원심형을 주로 채택하였으나 축류형이 전 부하 영역에서 효율이 높을 뿐만 아니라 부하의 제어특성이 우수하여 수명기간 동안의 경제성은 우수한 것으로 평가되었다. 1차 공기 송풍 계통은 통풍계통 1열의 정지(runback) 발생 후 2차측 압력이 높은 재기동 상황에서 재기동 송풍기의 실속(stall, 출구저항으로 인한 날개 끝의 와류분리, 실속 및 진동현상) 발생 위험성이 크게 증가하여 부하를 감발하거나 여유가 큰 축류형 송풍기를 설치하지 않으면 곤란하였으나 축류 송풍기의 날개(blade) 전단부에 위회통로(bypass duct)를 적용하고부터 저부하에서 실속에 의한 불안정성을 크게 개선함으로써 효율 좋은 송풍기를 경제적으로 적용할 수 있게 되었다.

### 절탄기 바이패스 덕트 설치

탈질설비의 최적 운전을 위해서는 SCR 적정 반응온도인 320℃ 이상 유지되어야 하며, 300℃ 이하 운전 시는 탈질효율이 약 10% 정도 감소하게 된다. 적정 운전온도 이하에서는 황산암모늄(Ammonium Bi-sulphate)이 생성되어 촉매 활성을 저하시켜 탈질 효율이 감소되는 결과가 된다. 국내 기존 발전소의 보일러는 대부분 30% NR의 저부하 운전 시 탈질설비 입구 연소가스 온도가 244 ~ 251℃로 매우 낮아 절탄기 바이패스 덕트를 설치하는 것이 일반적이다. 그러나 재열증기 온도제어를 위해 대류부 분할 댐

퍼(backpass bias damper)를 적용하게 되면 기동초기에 탈질설비 입구 연소가스 온도를 300℃ 이상으로 유지하게 되어 별도의 절탄기 바이패스 덕트도 필요치 않게 된다.

### 부하변동률

부하변동률은 기동시간 단축 및 중앙 급전지령 등에 대한 응답성 향상을 고려하여 전 부하범위에서 검증되는 항목이며, 터빈발전기의 열응력(thermal stress)이 적도록 허용가능 온도변화 범위 내에서 충족되어야 한다.

일본의 1,000MW급 Hitachi-naka #1 및 Shinchi#1 발전소는 경제적인 운전조건(터빈발전기의 열충격(thermal shock)에 의한 수명 저감)을 고려하여 1~3%/min의 부하변동률을 제시하고 있으나, Tachibanawan #2, Haramachi #1, Matsuura #1,#2 등 1,000MW급 보일러는 대부분 2~4%/min의 부하변동률을 기준으로 설계 및 운전하고 있다. 이는 응답성이 낮은 대용량 발전설비의 특성을 개선하기 위해 재열기 온도제어를 대류부 분할 댐퍼와 가스 재순환 송풍기(gas recirculation fan)를 모두 적용한 사례에서만 가능한 것으로 기저부하용으로 사용되는 경우는 대류부 분할 댐퍼만을 적용하고 부하변동률은 30%~50%NR 운전범위에서 1%/min과, 50%~100%NR 운전범위에서 3%/min을 적용하는 것이 적합하다.

### Soot Blower 수량

아역청탄은 갈탄형 회로 분류되며 Slagging 성이 높다. 따라서 고온의 열 집중(heat flux)이 작용하는 노벽의 열흡수를 방해받지 않도록 노벽면의 청결상태를 유지하는 것이 중요하다. 아역청탄 전소를 고려한 삼천포 5,6(500MW)의 경우 수관부 제매기(wall blower)를 92개 설치하였으며, 중국의 Yuhuan(1,000MW)발전소의 경우 아역청탄계열의 신화탄으로 설계하였으나 116개의 수관부 제매기 수량을 적용하여 인도네시아 아역청탄도 전소하는 수준으로 운전되고 있다. 아역청탄을 50% 혼소 또는 장기적인 혼소를 확대를 고려하여 버너상단 연소공기 주입구(OFA) 상부에 수관부 제매기를 4단(1단 약 30개 기준 총 120개 설치)으로 설치하고 증설을 고려한 1단(약 30개)의

개구부를 설치하는 것이 적절한 수준으로 평가된다.

### 대류부 분할 댐퍼

넓은 부하범위에서 터빈의 효율을 유지하고 터빈의 후육부 금속온도 변동을 최소화하기 위해서는 정해진 부하범위에서 주증기/재열증기 온도를 일정하게 유지하여야 한다. 일반적인 재열증기온도 제어방법은 과열저감 분사수(desuperheater spray), 버너 입사각 조절(adjustable burner nozzle angle), 대류부 분할 댐퍼(backpass bias damper), 가스 재순환(gas recirculation) 등이 있으며 보일러의 형식, 설계탄, 운전형태의 요건과 증기온도 조절범위에 따라 적절히 적용될 수 있는데 대용량 석탄연소 보일러에서는 대부분 기동특성을 개선하고 다양한 석탄을 연소하는데 도움이 될 뿐만 아니라 중간 부하 운전 시 증기온도 제어범위가 넓어 대부분 대류부 분할 댐퍼를 기본으로 적용하고 있다.

### 맺음말

세계는 지금 고유가 시대를 맞이하여 에너지원 확보에 총력을 기울이고 있어, 자원전쟁을 방불케 하고 있다. 최

근 자주 발생되고 있는 에너지원의 수급불균형에 기인한 연료가격의 상승은 발전회사들에게 심각한 손실을 안겨주고 있어 아역청탄 혼소율이 높은 발전설비의 설계는 불가피한 선택이 되고 있다. 아역청탄 혼소율이 높은 1,000MW급의 대용량 초초임계압 석탄화력 발전소 건설은 증기조건 향상을 통한 효율개선 효과와 더불어 아역청탄 혼탄 성능 개선을 통한 연료비 원가절감과 수급여건 악화 등의 에너지자원 공급환경의 변화에 능동적으로 대응하기 위한 전략적 설계 개념이다. 이러한 대용량 초초임계압 발전소의 설계개념을 정립하기 위해서는 아역청탄 설계를 위한 열부하율, 열흡수율, 노출구 가스온도, 고온부재질선정, 미분기 최적설계, 통풍설비 여유율 확대, 유인 통풍계통 통합화, 효율 높은 축류형 1차공기 송풍기 적용, 슬래깅 대비 제매기 보강, 대류부 분할 댐퍼를 통한 재열증기 온도제어 등 여러 가지 보일러 최적설계가 고려되어야 한다. 기술 선진국들에 비하면 1,000MW 발전소 건설 경험의 시작은 늦었지만 최신기술을 습득하고 아역청탄 혼소에 대한 설계개념을 정립하여 유사 후속사업의 설계 기준을 제시함으로써 국내 발전소 관련 산업의 발전과 국가경쟁력에 기여할 수 있고 해외 발전시장 개척에 교두보를 확보할 수 있으리라 기대된다.