

석탄, 오일 복합 보일러의 최적 운전 시스템

이원욱, 여영구
 한양대학교 화학공학과

Optimization operating system in complex of Coal boiler and Oil boiler

Won Uk Lee, Yeong Koo Yeo
 Dept. of Chem. Eng. Hanyang university

서론

화학공장에서는 증기를 에너지원으로 많이 사용한다. 또한 증기는 공장에서 동력, 중합, 원면, 증류등 여러 가지 목적으로 사용되므로 증기의 생산량이 곧 공장의 에너지 소비량이 된다. 이 증기의 생산량을 최적화 함으로써 공장의 에너지 소비를 최소화 할 수 있다. 대상 공장은 증기 생산 공정이 석탄보일러와 오일보일러가 복합적으로 사용된다. 이 두가지 보일러에서 생산된 증기는 터빈을 통하여 전기를 생산하고 각각의 공장에서 요구하는 조건의 증기 내보낸다. 각 공장에서 요구하는 증기량을 맞추면서 석탄 보일러에서 증기를 생산하는 비용과 오일 보일러에서 증기를 생산하는 비용을 최소화하고 터빈에서 생산하는 전기량은 최대화한다. 석탄 보일러, 오일보일러 그리고 터빈을 각각 모델링하였다. 최적화는 선형 프로그램의 한 기법인 Simplex방법을 사용하였다. 석탄보일러, 오일보일러와 터빈의 효율은 인공 신경망을 이용하여 예측하였다. 각 모델식은 목적함수의 강제조건으로 사용되었다.

석탄보일러의 모델링

대상보일러는 선경 인더스트리 울산 공장용 보일러로 옥내형이고 자연 순환식 보일러이다. 이 보일러는 유동층 보일러로 석회석과 함께 유연탄과 코크가 들어간다. 보통 보일러의 기동을 위해서는 LPG/병커-C유를 사용하고, 정상운전시에는 유연탄/코크를 사용한다.

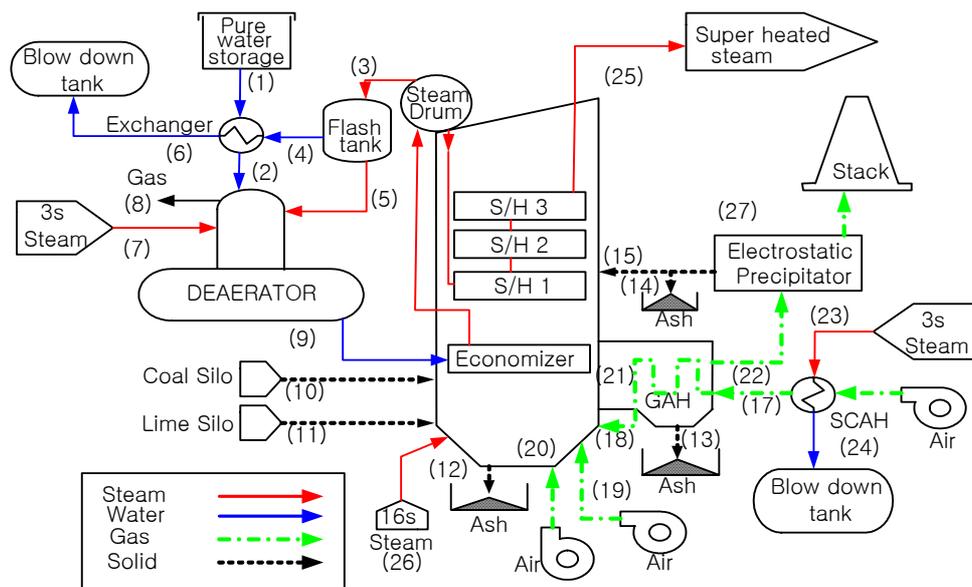


Fig.1. 석탄보일러의 흐름도(증기, 공급수, 공기의 가스, 석탄외 고체)

기본적으로 보일러를 구성하는 장치는 화로, 1,2,3차 과열기(S/H), 절탄기(Economizer), 탈기기(Deaerator), 공기식 공기 가열기(GAH), 증기식 공기 가열기(SAH), 송풍기, 석탄 사일로, 석회석 사일로, 3s(압력 3kg/cm²g, 온도 133℃의 steam), 16s(압력 16kg/cm²g, 250℃의 steam)증기관등이다. 보일러의 최대 증기 생산량은 200ton/hr 이고 생산된 과열증기는 압력이 114kg/cm²g, 온도가 510℃ 이다. Fig.1 에 따른 보일러 모델링식은 다음과 같다.

H_i = 각 상태에서의 비엔탈피, x_i = 각 상태에서의 유량

$$\begin{aligned} (H_2 - H_1)x_1 - (H_4 - H_6)x_4 &= 0 & H_3x_3 - H_4x_4 - H_5x_5 &= 0 \\ (H_{17} - H_{16})x_{16} - (H_{23} - H_{24})x_{23} &= 0, & H_2x_2 + H_5x_5 + H_7x_7 - H_8x_8 - H_9x_9 &= 0 \\ (H_{18} - H_{17})x_{16} - H_{21}x_{21} + H_{13}x_{13} + H_{22}x_{22} &= 0, & H_9x_9 + \eta_C H_C x_{10} - H_{25}x_{25} + H_{18}x_{16} - H_{16}x_{16} &= 0 \\ H_3x_3 + H_{12}x_{12} + H_{13}x_{13} + H_{14}x_{14} + H_{22}x_{22} + H_{25}x_{25} - H_9x_9 - H_C x_{10} - H_{11}x_{11} - H_{20}x_{20} - H_{19}x_{19} - H_{17}x_{17} &= 0 \end{aligned}$$

오일보일러의 모델링

석탄보일러와 같이 발전용 증기를 생산하는 보일러이며 최대 증기 생산량은 85 ton/hr 이다. 오일보일러는 화로, 1,2차 과열기, 고압급수 가열기(HPH), 공기식 공기가열기, 증기식 공기가열기, 중유가열기, 절탄기, 3s, 16s 증기관으로 이루어져 있다.

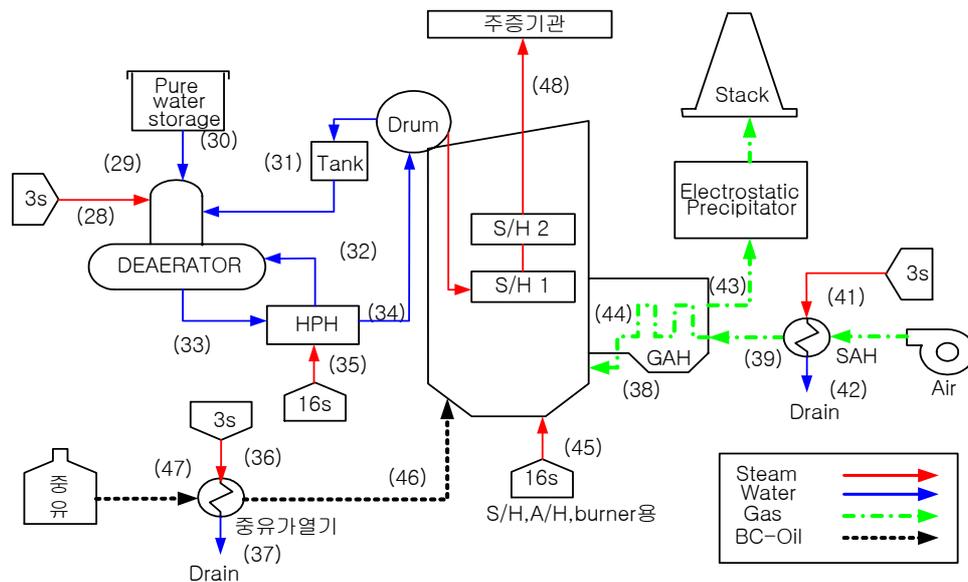


Fig.2. 오일보일러의 흐름도(증기, 공급수, 공기외 가스, 벙커-C유)

오일보일러 흐름도에 따른 모델링식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_{30}x_{30} + H_{28}x_{28} + H_{31}x_{31} + H_{32}x_{32} - H_{33}x_{33} - H_{29}x_{29} &= 0 \\ (H_{34} - H_{33})x_{33} - (H_{35} - H_{32})x_{32} &= 0, & (H_{47} - H_{48})x_{47} - (H_{36} - H_{37})x_{36} &= 0 \\ (H_{38} - H_{39})x_{38} - (H_{44} - H_{43})x_{43} &= 0, & (H_{39} - H_{40})x_{38} - (H_{42} - H_{41})x_{41} &= 0 \\ H_{48}x_{48} + H_{31}x_{31} + H_{44}x_{44} - \{H_{34}x_{33} + (H_{46} + H_C^{oil})x_{46} + H_{45}x_{45}\} &= 0 \end{aligned}$$

$$H_{48}x_{48} - H_{34}(x_{34} - x_{31}) - \eta_O \{ H_{46}x_{46} + H_{45}x_{45} - (H_{41} - H_{42})x_{41} \} = 0$$

터빈과 증기관

터빈은 최대 출력 27MW용과 11MW용 2대로 전력을 생산한다. 증기관은 3s, 6s, 16s, 40s 4종류이며 각각의 요구량은 사용자 정의 상수이다. 각 종류별 증기량이 결정되면 우선적으로 증기량을 맞추어야 한다. 증기량을 맞추면서 전력 생산량을 최대화하는 것이 목적이다. 과열증기(114s)는 석탄보일러 1대와 오일보일러 2대에서 생산되며 오일보일러 2대는 같은 사양의 보일러이다.

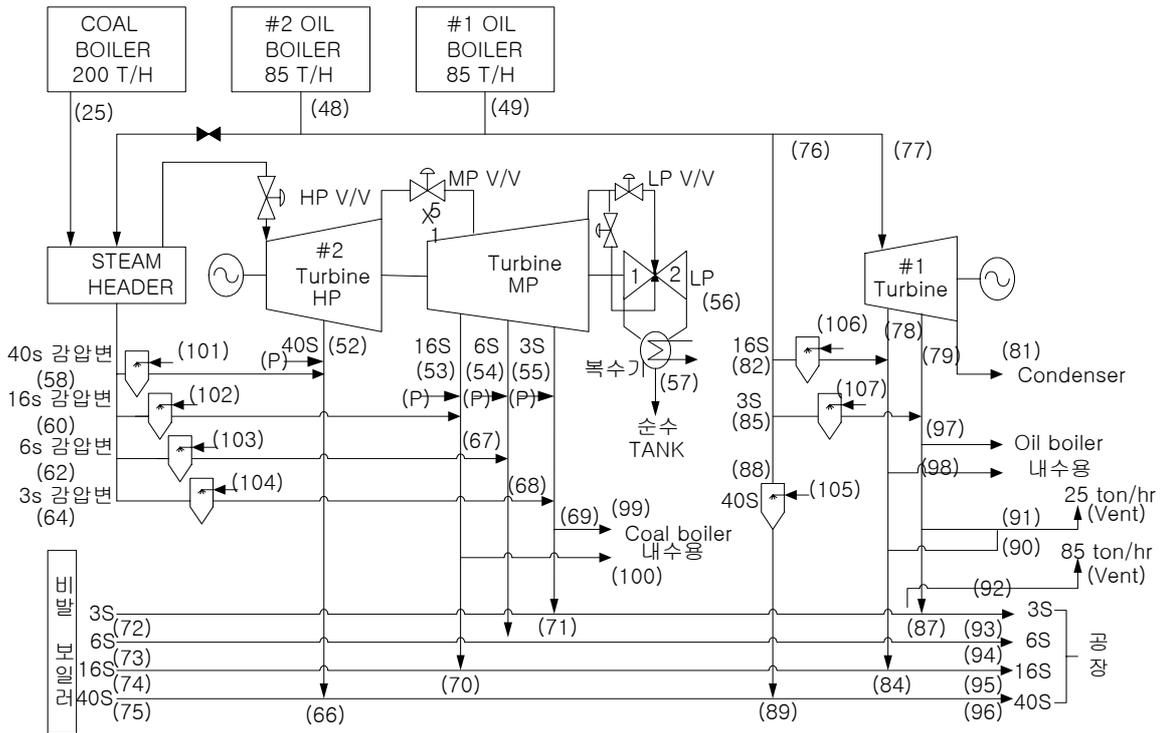


Fig.3. 터빈에서의 증기흐름도

위 터빈의 증기 흐름에 대한 모델식이다.

$$3600 \times P_{TG2} - \eta_{TG2} \{ H_{50}x_{50} - (H_{52}x_{52} + H_{53}x_{53} + H_{54}x_{54} + H_{55}x_{55} + H_{56}x_{56}) \} = 0$$

$$P_{TG1} - \eta_{TG1} \{ H_{77}x_{77} - H_{78}x_{78} - H_{79}x_{79} - H_{81}x_{81} \} = 0$$

$$3600 \times P_{TG2} - H_{50}(x_{50} + x_{58} + x_{60} + x_{62} + x_{64}) - 0.07H_p x_{50} + H_{66}(x_{58} + x_{101} + x_{52}) + H_{67}(x_{60} + x_{102} + x_{53}) + H_{68}(x_{62} + x_{103} + x_{54}) + H_{69}(x_{64} + x_{104} + x_{55}) + H_{56}x_{56} - H_w(x_{101} + x_{102} + x_{103} + x_{104}) = 0$$

$$H_{66}(x_{58} + x_{101} + 1.07x_{52}) - (H_{50}x_{58} + H_w x_{101} + 1.07H'_{52} x_{52}) = 0$$

$$H_{67}(x_{60} + x_{102} + 1.07x_{53}) - (H_{50}x_{60} + H_w x_{102} + 1.07H'_{53} x_{53}) = 0$$

$$H_{68}(x_{62} + x_{103} + 1.07x_{54}) - (H_{50}x_{62} + H_w x_{103} + 1.07H'_{54} x_{54}) = 0$$

$$H_{69}(x_{64} + x_{104} + 1.07x_{55}) - (H_{50}x_{64} + H_w x_{104} + 1.07H'_{55} x_{55}) = 0$$

$$\begin{aligned}
& (H_{89} - H_{80})x_{88} + (H_{89} - H_w)x_{105} = 0 \\
& (H_{84} - H_{80})x_{82} + (H_{84} - H_w)x_{106} + 1.07(H_{84} - H'_{78})x_{78} = 0 \\
& (H_{87} - H_{80})x_{85} + (H_{87} - H_w)x_{107} + 1.07(H_{87} - H'_{79})x_{79} = 0 \\
& -H_{69}(1.07x_{55} + x_{104} + x_{64}) - H_{87}(1.07x_{79} + x_{85} + x_{107}) - (H_{72}x_{72} - H_{93}x_{93} - H_{69}x_{99} - H_{87}x_{97} - H_{87}x_{91}) = 0 \\
& -H_{68}(1.07x_{54} + x_{103} + x_{62}) - (H_{73}x_{73} - H_{94}x_{94}) = 0 \\
& -H_{67}(1.07x_{53} + x_{102} + x_{60}) - H_{84}(1.07x_{78} + x_{82} + x_{106}) - (H_{74}x_{74} - H_{95}x_{95} - H_{84}x_{98} - H_{84}x_{90} - H_{67}x_{100}) = 0 \\
& -H_{66}(1.07x_{52} + x_{101} + x_{58}) - H_{89}(x_{88} + x_{105}) - (H_{75}x_{75} - H_{96}x_{96}) = 0 \\
& (P_{TG1} + P_{TG2}) + H_{56}x_{56} - H_w \sum_{i=101}^{107} x_i - (H_{25}x_{25} + H_{48}x'_{48} + H_{48}x_{48}) \\
& = (H_{72}x_{72} + H_{73}x_{73} + H_{74}x_{74} + H_{75}x_{75}) - H_{97}(x_{99} + x_{97}) - H_{98}(x_{100} + x_{98}) - (H_{90}x_{90} \\
& \quad + H_{91}x_{91} + H_{92}x_{92}) - (H_{93}x_{93} + H_{94}x_{94} + H_{95}x_{95} + H_{96}x_{96}) + H_{81}x_{81}
\end{aligned}$$

결론

앞에서 살펴본 터빈 모델로부터 증기 요구량을 맞추면서 과열증기는 최소, 전력 생산량은 최대가 되도록 하는 목적함수를 최적화한다. 여기서 최적의 과열증기량을 구할 수 있다. 이 과열증기량에 따라 1대의 석탄보일러와 2대의 오일보일러가 생산해야 할 증기량이 결정된다. 결정된 증기량은 다시 석탄보일러 모델식을 강제조건으로 갖는 목적함수를 최적화 함으로써 연료인 유연탄/코크의 유량을 결정하게 된다. 오일보일러도 마찬가지로 벵커-C유의 유량을 결정한다. 결국 우리가 필요한 각 종류별 증기량에 따른 최적의 연료비를 계산할 수 있게 된다. 이는 불필요하게 낭비 되는 연료를 줄일 수 있기 때문에 전체 공장에 필요한 증기생산비를 최적화 할 수 있는 것이다.

참고문헌

1. Y. K. Yeo et. al., "A Rule-Based Steam Distribution System for Petrochemical Plant Operation", Ind. Eng. & Chem. Res., Vol.37, No.3, 1998, Pages 1051-1062.
2. Masatoshi Nishio et. al., "Optimal Use of Steam and Power in Chemical Plants", Ind. Eng. Chem. Process Des., Dev. 1982, 21, Pages 640.
3. K. J. Åström and R. D. Bell, "Drum-boiler dynamics", Automatica, Volume 36, Issue 3, March 2000, Pages 363-378
4. 임장순, 최국광, 엄기찬 공저; '최신증기동력학', 청문각출판사, 1999