제철공정에서의 제어기술동향

철강제조공정에서 강판을 만드는 공정이 압연이다. 압연공정은 연속주조 공정에서 생산되는 Steel Slab, Bloom, Billet등의 반제품을 높은 온도로 재 가열하고 물리적인 힘을 가해 압연하는 열간압연(이하 열연)과 열연으로 얇아진 강판을 열을 가하지 않고 냉각상태에서 압연하는 냉간압연으로 나뉜다. 본 원고에서는 열연 공정의 가열로 온도제어에 적용한 MFA(Model Free Adaptive Controller)를 소개하고자 한다.

■ 박한구
(포스코 포항제철소 제어기술그룹)

1. MFA(Model-Free Adaptive)

모델링이 필요 없는 적응 제어기(MFA)는 명칭에서 나타나는 것처럼, 프로세스 모델이 필요하지 않는 적응 제어 기술로 General Cybernation Group Inc. (www.cybosoft.com)인 CyboSoft에서 개발하고, 인증한 것이다.

MFA 제어 시스템은 다음 특성을 가진다.

(1) 전문적이고 핵심적인 프로세스 지식이 불필요하다.
(2) 프로세스 대한 특정한 메카니즘이 필요 없다.
(3) 특정 프로세스를 위한 프로그램 제어기 설계가 필요 없다.
(4) 제어기 파라미터의 공정에 따른 별도의 튜닝이 필요 없다.
(5) 복합 루프 시스템 안정성 분석과 기준을 통해 시스템 안정성을 보증한다.

MFA 핵심 제어 기술은 다음의 특정 제어 문제를 처리한다.

(1) SISO MFA : 문제시 되는 제어기의 수동 튜닝을 제거하기 위하여 PID를 SISO MFA로 대체 사용 가능하다.
(2) Nonlinear MFA : 비선형 프로세스를 제어하기 위하여 비선형 MFA를 사용한다.
(3) MFA pH controller : pH 프로세스를 제어하기 위하여 MFA pH 제어기 사용한다.
(4) Feed forward MFA controller : 교란 신호를 처리하기 위하여 Feed forward MFA 제어기를 사용한다.
(5) Anti-delay MFA : 지연 시간이 오래 지속되는 프로세스를 제어하기 위하여 반-지연 MFA를 사용한다.
(6) Robust MFA : 외부 한계에서 작동하는 프로세스 변수를 보호하기 위하여 강건한 MFA를 사용한다.
(7) Time-varying MFA controller : 시간에 따라 변화되는 프로세스를 제어하기 위하여 시간-변화 MFA 제어기를 사용한다.
(8) Anti-delay MFA pH controller : 시간 지연이 변하는 pH 프로세스를 제어하기 위하여 반-지연 MFA pH 제어기를 사용한다.
(9) MIMO MFA : 다중변수 프로세스를 제어하기 위하여 MIMO MFA를 사용한다.

본 원고에서는 가열로 온도 제어를 위하여 MIMO MFA를 사용하여 PID 제어를 대체한다.

2. PID 제어

PID 제어기는 그림 2와 같이 플랜트와 입력 값의 차이인 Error 값을 곱하여 제어 입력을 생성하는 P부분과 Error값을 적분하여 제어 입력을 생성하는 I부분, Error값을 미분하여 제어 입력을 생성하는 D부분으로 구성이 되어 있다.

PID 제어기는 P, I, D의 Gain값을 어떻게 설정하느냐에 따라 원하는 플랜트의 출력이 그림 3의 undamped 경우와 같이 크게 헌팅 할 수도 있고 critically damped의 경우와 같이 안정적으로 제어가 될 수도 있다.

PID 제어기가 그 사용의 편리성과 단순함으로 인해 가장 보편적인 제어기가 되었지만 문제점도 가지고 있다.

- 고정된 gain을 사용함에 따라 프로세스의 변화에 대한 대처가 미흡하다.

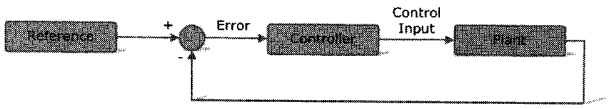
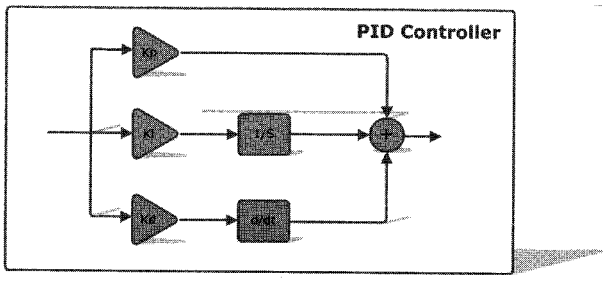


그림 1. 자동제어의 제어 루프



사용처 : Motor제어, 온도제어, 유량제어, 장력제어 등

그림 2. PID 제어기의 구조

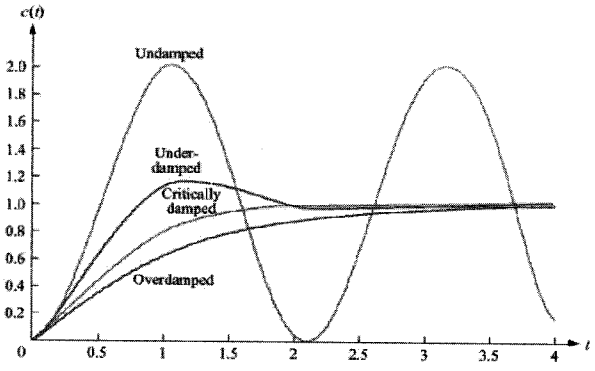


그림 3. PID제어기의 Gain설정에 따른 플랜트의 출력

- 비선형적, 시간지연, 다변수 제어에 취약하다.

먼저, P, I, D의 Gain은 고정된 값이기 때문에 프로세스의 특성이 변화할 경우에 급격히 제어의 성능이 악화될 가능성이 있으며 프로세스가 비선형적이거나 과도한 시간지연이 있거나 혹은 다변수 제어와 같은 복잡한 특성을 지닐 경우 PID 제어기로는 제어하기가 난해하다.

3. MFA 제어

이러한 PID 제어기의 단점을 보완하기 위해 출시된 것이 MFA제어기 이다. MFA는 Model Free Adaptive Controller의 약자로서 PID 제어기와 동일하게 제어하고자 하는 대상의 수식적인 Model을 알지 못하여도 제어가 가능하며 adaptive한 특성을 가지므로 제어대상의 특성이 변하여도 안정적으로 제어가 가능한 제어기이다.

MFA 제어기는 정확히 1:1로 PID 제어기를 대체할 수 있다. 기존에 출시되었던 Neural Network Controller, Fuzzy Controller, Model Based Adaptive Controller와 같은 지능제어를 위한 제어기들을 적용하기 위해서는 많은 사항들을 수정해야 함에 비해 MFA 제어기는 PID 제어기만을 대체할 수 있기 때문에 비교적

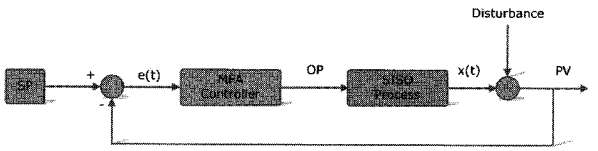


그림 4. MFA 제어기 연결 Block Diagram

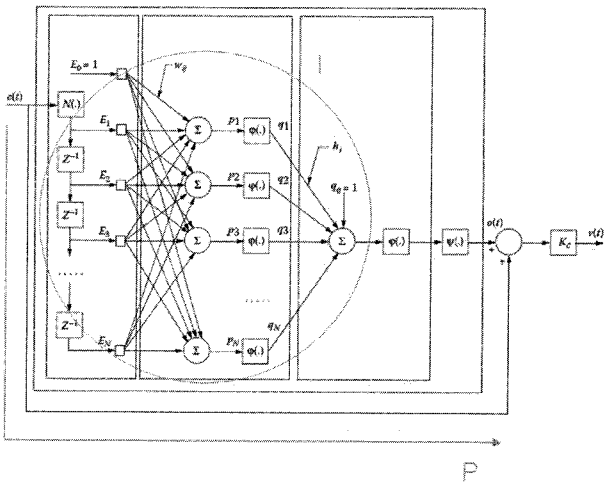


그림 5. MFA제어기의 내부구성도

간단히 적용할 수 있다. 그림 4의 MFA 연결 Block Diagram에서 기존의 PID 제어기가 MFA 제어기로 변한 것 이외에 다른 변화가 없음을 알 수 있다.

MFA 제어기는 내부적으로 PI제어기와 유사한 구조를 지닌다. MFA 제어기에서 P 부분은 그림 5에서와 같이 이전 시간의 Error값에 K_C라는 상수를 곱하여 제어 입력을 만들어내는 PID 제어기의 P부분과 동일하다. 하지만 MFA 제어기의 I부분은 이전 시간의 Error값을 더한다는 점에서는 동일하지만 Neural Network로 구성을 하여 각각의 Error값들이 최종적 Error인 e(t) 값을 최소화하는 방향으로 지속적으로 유기적인 재구성을 하게 된다. 이로 인해 프로세스에 변화가 있다 하더라도 제어기도 그에 맞게 지속적인 재구성이 되어 안정적으로 제어가 가능한 것이다.

4. 가열로 연소제어

그림 2는 온도제어를 위한 Cascade Loop를 개념적으로 설명하기 위해 간략히 표시한 것이며 실제 Gas와 Air의 Control Input을 생성하기 위해서 부가적인 Logic이 구현되어 있는데 그것이 바로 연소제어이다. 연소제어는 가열로 내에서 최적의 연소조건을 만들어 주기 위해 Gas와 Air의 비를 조절하는 제어이다. 연소시에 Gas의 양이 많게 되면 불완전 연소가 일어나 가열로 내에 흑연이 발생하게 되며, Air의 양이 많게 되면 과다한 산소로 인해 Slab가 산화하여 표면에 Scale이 발생하게 된다. 연소제어 방식에는 크게 Single Cross Limit 방식과 Double Cross Limit 방식이 있으며 Single Cross Limit 방식은 흑연방지를 최우선으로 하는 방식이다. 그림 6은 이 방식의 개념을 설명한다.

그림 6은 연소 시 Gas와 Air의 관계에 대해 표시한다. 직선 $F_A = \beta \times F_F$의 직선은 이론 Air비로서 Gas 및 Air의 유량을 나타낸다. 이 직선으로부터 하측으로 동작점이 되는 경우 Gas 과잉이 되기 때문에 흑연이 발생한다. 그래서 일반적으로 Air 양의 설정치는 이론치에 공기과잉비 μ를 곱한 값이 된다. 그래서 안정한 연소 상태에 있는 Gas와 Air의 양은 직선 $F_A = \mu \times \beta \times F_F$로 된다. 만약 현재 연소상태가 A점에서 안정하다 한다면 부하가 증대될 경우 동작점은 A에서 B로 이동하게 되는데 만약 동작점이 $F_A = \mu \times \beta \times F_F$직선을 따라 이동하면 아무 문제도 발생하지 않는다. 하지만 실제로는 Gas의 유량조절 Valve가 작기 때문에 동작점을 이동하는 동안에는 Gas와 Air의 비가 맞지 않아 연소는 PATH 1을 따라 이루어지게 된다. 이 경우 PATH 1이 직선 $F_A = \beta \times F_F$점 아래로 떨어지게 되면 흑연이 발생하게

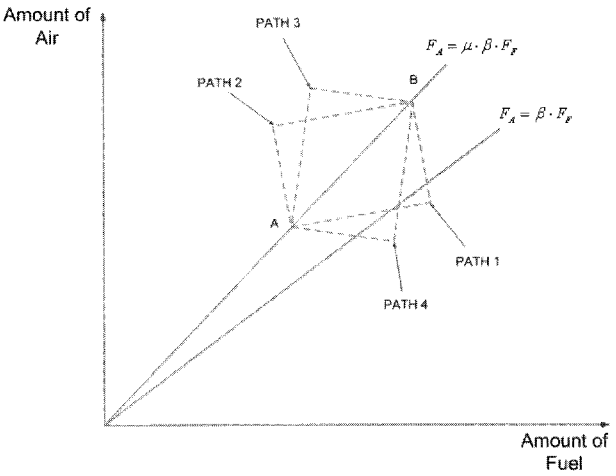


그림 6. 연료유량과 연소공기유량의 관계

F_A : 연소공기유량의 설정치
F_F : 연료유량의 설정치
β : 이론 공연비
μ : 공기과잉률

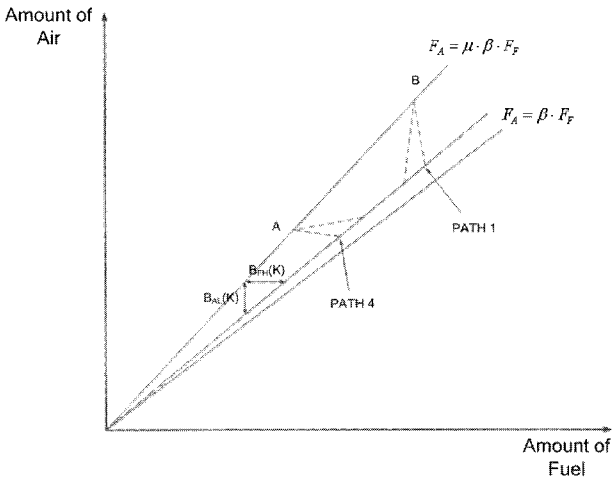


그림7.흑연방지 방법의 개념

된다. 반대로 Air Valve의 크기가 상대적으로 작다면 Air의 양이 과다하게 되어 PATH 3을 따라 연소가 이루어지는 경우도 있다. 다만 이 경우 흑연은 발생하지 않으나 산화에 의한 Scale발생 확률이 높아진다. 반대로 부하가 감소하여 B점에서 A점으로 이동한다면 그림 6의 PATH 2를 따라 이동하게 되며, Valve의 상대적인 크기에 따라 PATH 4을 따라 이동할 수도 있다.

이러한 현상들에 기반하여 흑연의 발생을 방지하기 위해서는 그림 6에서 설명한 바와 같이 PATH 1과 PATH 4가 직선 $F_A = \beta \times F_F$ 아래로 벗어나지 않도록 Gas와 Air의 양에 Limit를 설정함으로 비교적 간단하게 대처가 가능하다. 그림 6에 Gas유

량의 상한 Limit B_{FH} 와 Air유량의 하한 Limit B_{AL} 을 설정하여 (2-1)과 (2-2)를 만족하도록 유량을 제어함으로써 좋은 결과를 얻을 수 있다.

$$\mu \times \beta \times F_f - B_{AL}(K) < F_A \qquad (2-1)$$

$$F_F < \frac{F_a}{\mu \times \beta} + B_{FH}(K) \qquad (2-2)$$

F_a : 실제 공기유량
F_f : 실제 공기유량

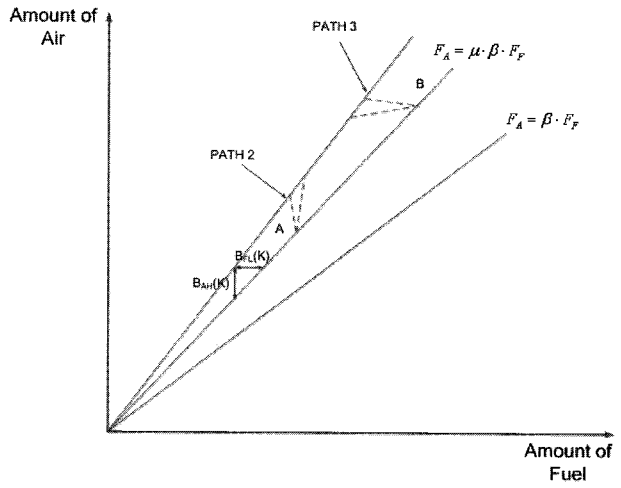


그림 8. 에너지절감 및 Scale방지 방법 개념

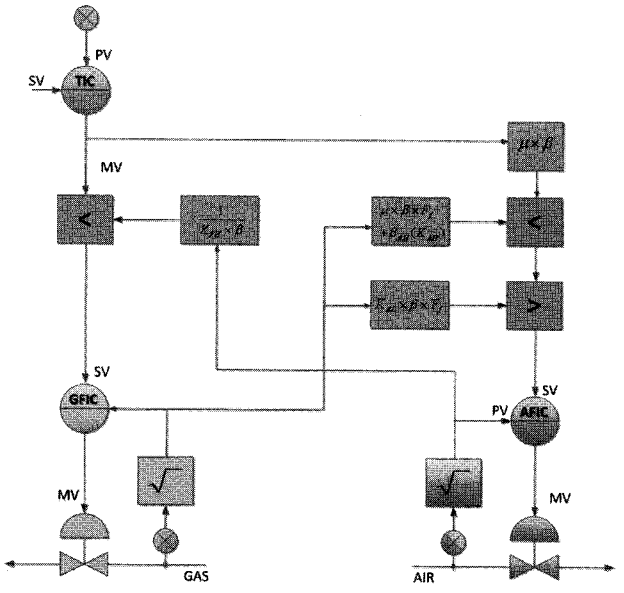


그림 9. Single Cross Limit 방식 연소제어 System

이 결과를 그림으로 나타내면 그림 7과 같다. Gas Valve의 움직임에 상한치를 설정하고 Air Valve의 움직임에 하한치를 설정함으로 연소지점이 특정한 값, 즉 이론 공연비 이하로 떨어지는 것을 방지하는 것이다. 이로 인해 흑연의 발생을 최대한 억제 할 수가 있다. 반대로 Air로 인한 Slab의 Scale이 과도하게 생성되거나 과도한 Air로 인한 노온의 상승이 방해를 받는다면 그림 7과 (2-1), (2-2)에 추가적으로 Air에 대한 Limit를 설정함으로써 대처할 수가 있다. Gas에 대해 Limit를 설정하게 되면 그림 7의 PATH 2와 같은 경로로 연소지점이 이동하게 되는데 이는 연료의 급속한 감소를 막게 되어 연료의 절약이 없고 응답성이 나쁘게 되므로 통상 Limit를 설정하지 않는다. 이 경우를 식과 그림으로 나타내면 (2-3), (2-4)와 그림 8로 나타낼 수 있다.

$$\mu \times \beta \times F_f - B_{AL}(K) < F_A < \mu \times \beta \times F_f + B_{AH}(K) \qquad (2-3)$$

$$F_F < \frac{F_a}{\mu \times \beta} + B_{FH}(K) \qquad (2-4)$$

Single Cross Limit 방식에 있어서 명확하게 알 수 있는 것은 상하한의 Band폭이 넓을 때 응답성이 개선된다는 것이다. 이러한 관점에서 Gas와 Air에 대한 상, 하한치 B_{AL}, B_{AH}, B_{FL}, B_{FH}를 Gas와 Air의 유량에 따라 가변적으로 설정하여 Band의 크기를 최대한 확보하는 것이 응답을 최대한 개선하는 방법이 될 것이다. 위의 (2-3), (2-4)를 통해 각 상, 하한치의 방정식을 유도하여보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B_{FH}(K_{FH}) &= \left(\frac{1}{K_{FH}} - \frac{1}{\mu}\right) \times \frac{F_a}{\beta}, K_{FH} < \mu \\ B_{AL}(K_{AL}) &= (\mu - K_{AL}) \times \beta \times F_f, K_{AL} < \mu \\ B_{AH}(K_{AH}) &= (K_{AH} - \mu) \times \beta \times F_f, K_{AH} > \mu \end{aligned} \qquad (2-5)$$

결론적으로, (2-3), (2-4), (2-5)를 결합하면 다음과 같은 연료유량 설정치에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$K_{AL} \times \beta \times F_f < F_A < \mu \times \beta \times F_f + B_{AH}(K_{AH}) \qquad (2-6)$$

$$F_F < \frac{F_a}{K_{FH} \times \beta} \qquad (2-7)$$

(2-6), (2-7)의 조건을 통해 Single Cross Limit 연소제어 방식의 Block Diagram은 그림 9와 동일하게 된다.

5. 가열로 M/S제어의 문제점

5.1 예열대 하부 온도 헌팅

가열로의 상, 하부의 유량을 동일하게 조절하는 M/S제어 방식은 예열대 하부 Zone에 심각한 온도헌팅을 유발한다. 그림 10과 같이 상부의 온도는 설정치를 잘 추종을 하지만 하부온도의 헌팅 폭이 150℃에 달하며 온도가 안정되지 못하고 지속적으로 불안정하게 제어가 되고 있음을 알 수 있다.

이러한 문제점은 M/S제어를 사용하면 하부 온도제어를 하지 않는 것과 동일하기 때문에 필연적으로 나타나는 현상이라 할 수 있겠다. M/S제어가 하부 온도에 미치는 영향은 여러 가지가 있을 수 있겠지만 대표적인 사례를 하나만 들자면 그림 11과 같이 나타낼 수 있다.

그림 11의 그래프에서 상부온도가 25℃정도 상승을 하였는데 M/S제어방식은 하부의 온도는 고려하지 않고 상부의 온도만을 고려하기 때문에 하부의 온도는 정상임에도 불구하고 전체적인 Gas사용량을 줄이게 되어 결과적으로 하부에 110℃정도의 온도감소를 가져오게 된다. 하부의 온도감소 폭이 상부에 비해 더 큰 것은 상, 하부 Gas Valve의 용량 차에서 기인한 것이라 생각된다.

5.2 상,하부 온도편차 증가

그림 12는 예열대에서 하부의 온도 유출로 인해 하부의 온도가 지속적으로 감소하고 있지만 M/S제어를 사용함으로 인해 이를 보상하지 못하는 경우를 나타내고 있다. 두 개의 그래프 중 상부의 그래프는 예열대 상, 하부의 온도그래프를 나타내며 하부의 그래프는 그 시간의 Gas사용량을 나타낸다. M/S제어방식을 사용하기 때문에 상부와 하부의 Gas사용량이 동일한 비율로 상승, 감소함을 볼 수 있다. 상부는 하부에 비해 온도유출이 심하지 않기 때문에 온도가 안정화되면서 Gas의 소비량이 점진적으로 감소하고 있음을 볼 수 있지만 하부의 경우 온도유출이 일어나고 있음에도 불구하고 상부의 유량에 비례하여 제어를

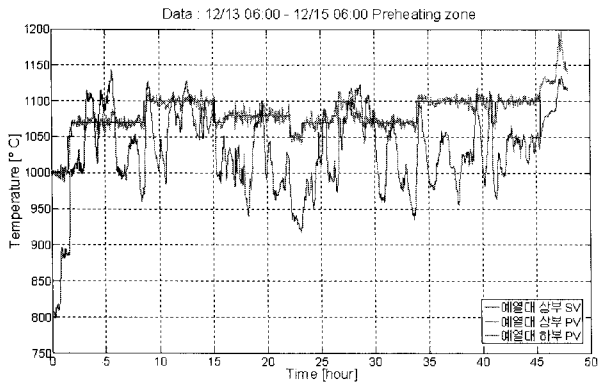


그림 10. 예열대의 M/S제어 온도 Trend

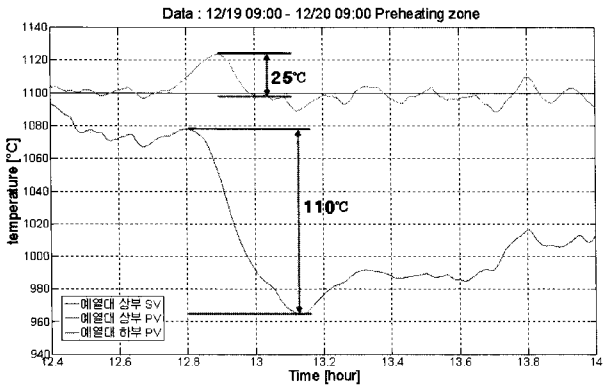


그림 11. M/S제어의 영향

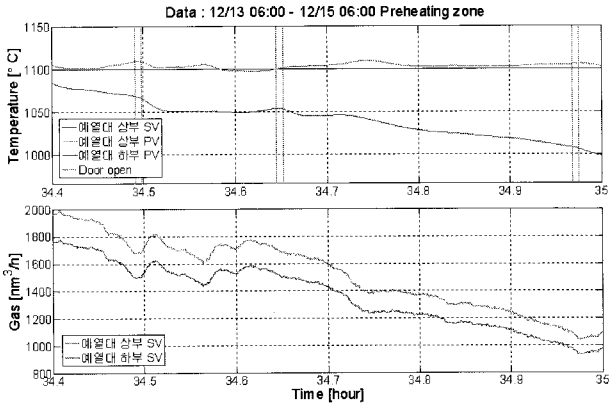


그림 12. 예열대 상,하부 온도편차

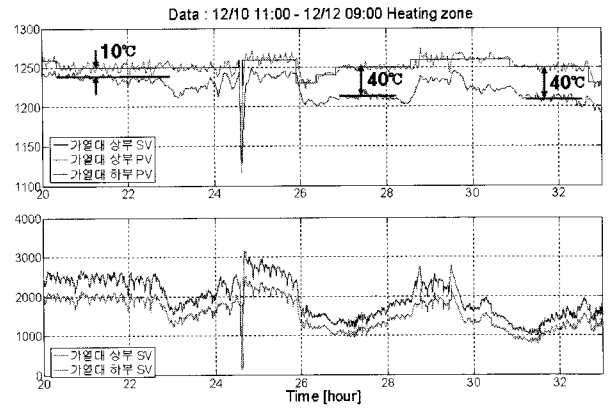


그림 13. 가열대 상, 하부 온도편차의 변동

함으로 인해 하부의 온도유출을 보상하지 못해 상, 하부 온도편차가 시간이 지남에 따라 증가하게 된다.

5.3 상, 하부 온도편차의 변동

그림 13은 가열대에서 상, 하부 온도와 Gas사용량을 나타낸다. 가열대와 균열대는 M/S제어를 시행함에도 불구하고 상부와 하부의 온도 Trend가 비슷한 형상을 보인다. 하지만 문제가 되는 부분은 상부와 하부의 온도편차가 수시로 달라진다는 점이다. 상부와 하부는 통상 10℃ 정도의 차이를 유지하도록 제어를 하게 되는데 M/S제어를 사용하게 되면 이 차이를 유지하는 것이 거의 불가능해진다. 아래쪽의 Gas사용량 그래프에서 M/S제어를 사용하면 같은 비율로 Gas량이 변동하기 때문에 상, 하부의 온도변화도 동일할 것이라 생각하기 쉽지만 실제는 온도유출이나 Gas Valve의 용량 등 외적인 요인들에 의해 하부의 온도는 상부와는 다른 형상을 보이게 된다.

6. MFA에 의한 M/S제어 대체

이제까지 언급된 M/S제어의 문제점들에 대해 효과적으로 대처하기 위해 그림 14의 구조를 가지는 2X2 MIMO MFA를 적용한다. MFA 제어기를 통해 기존의 Master Slave 제어방식을 상, 하부 독립제어로 변경함으로써 하부의 온도제어에 대한 불확

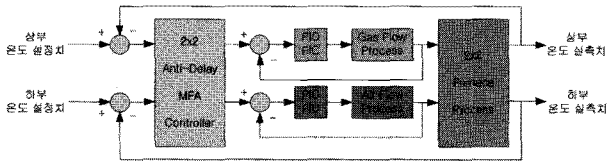


그림 14. 2x2 MIMO MFA

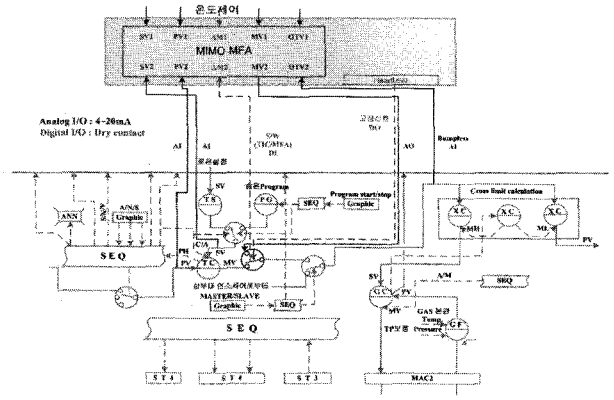


그림 15. PID제어기와 MFA제어기의 병렬구성

실성을 최대한 줄일 수 있으며 장입, 추출문의 영향 또한 MFA가 가지고 있는 기능의 하나인 Feed Forward 특성을 사용하여 미리 영향을 예측하여 제어함으로써 온도유출에 의한 온도헌팅을 최대한 감소시킬 수 있다. 상, 하부의 간섭현상 역시 MFA의 MIMO 특성, 즉 Multi Input Multi Output 기능을 사용하여 상부와 하부의 상관관계를 고려해 온도헌팅이 발생하지 않도록 제어가 가능하다. 또한, 가열로는 로내에 장입된 소재의 양에 따라 온도의 분포 범위가 달라지는 특성이 있다. 이는 환경과 조건에 따른 Process의 변화라 볼 수 있으며 고정된 Gain값을 사용하는 PID 제어기에서는 Process가 달라지면 불안정한 제어특성을 보일 수 있는 반면에 MFA는 변화된 Process를 학습하여 안정적인 제어가 가능하도록 적응하는 특성이 있기 때문에 더욱 안정적인 제어가 가능하다.

기존의 PID제어기를 통한 Master Slave제어방식과 MFA제어기를 통한 독립제어 방식 간의 자유로운 전환을 위해 DCS 내부에서의 연결은 그림 15와 같이 기존의 시스템과 병렬연결 구조를 가지며 운전자는 상황에 맞게 PID 제어기와 MFA 제어기를 선택하여 사용할 수 있다. 또한, MFA제어기는 별도의 WorkStation에 설치가 되어 DCS와 Remote I/O방식으로 연결이 되기 때문에 MFA가 설치된 WorkStation에 문제가 발생하여도 DCS에는 영향을 주지 않으며 이러한 문제가 발생하더라도 당시의 상황을 그대로 유지하면서 자동적으로 PID 제어기로 제어권이 넘어가도록 안정적인 Bumpless Switch 구성이 되어있다.

7. MFA제어 효과

7.1 M/S제어의 영향

M/S제어는 예열대 하부에 150℃에 달하는 온도헌팅을 유발하고 하부의 지속적인 온도유출을 보상하지 못하며, 상, 하부간 온도편차를 일정하게 유지하지 못한다. 이를 MFA 제어기를 사용하게 되면 상, 하부를 독립적으로 제어하게 되며 M/S제어 사용시 발생하는 문제점들을 해결할 수 있다.

7.2 장입, 추출문에 의한 영향

장입, 추출문은 예열대, 균열대에 10~20℃에 달하는 온도헌팅을 지속적으로 일으키게 되며 지속적인 하부의 온도유출로 이어지게 된다. MFA 온도제어기를 사용하게 되면 장입, 추출문의 영향을 미리 MFA 제어기가 파악하여 Feed Forward 보상을 하게 되므로 장입, 추출문의 Open시 온도변화를 최소화 할 수 있다.

7.3 상, 하부 온도간섭의 영향

하부의 Gas 변화로 인해 생기는 상부의 온도간섭현상은 지속적인 온도헌팅을 유발 할 수 있으므로, MIMO MFA를 사용하여 간섭에 의한 영향을 고려한 제어가 가능해짐으로써 간섭에 의한 영향을 최소화 할 수 있다.

7.4 외적 변수에 의한 영향

예열대는 장입된 소재의 총 부피에 대해 프로세스의 변화가 존재하며 부피가 증가할수록 온도분포가 넓어지는 현상이 발생하는데 MFA 온도제어기를 사용하면 변화되는 프로세스에도 안정적으로 대처가 가능하다.

7.5 재무적 효과

현재 MFA를 적용한 가열로의 연간 COG사용량은 73.7Mnm3이다. M/S제어 사용으로 인해 야기되는 하부의 온도헌팅은 비효율적인 Gas사용과 직결된다. MFA를 사용하여 안정적인 온도제어를 하게 된다면 Gas사용량을 5%이상 절감 할 수 있을 것으로 기대하고 있으며 이를 금전적으로 환산을 하면 연간 2억 6천만 원 정도의 절감효과가 있을 것으로 생각된다.

저 자 약 력

박 한 구

- 1983년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업
- 1997년 5월 미국 Stevens Institute of Technology 대학원 졸업, 컴퓨터엔지니어링 석사학위 취득
- 1982년 12월 POSCO 포항제철소 입사하여 제철공정에 있어서의 공장 자동화를 위한 제어기술 개발 업무 담당