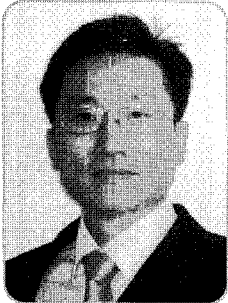


HRSG 보일러내 감온장치에 대한 고려사항



씨씨아이(주)
신동원 부장
Tel : (02)792-1875

개요

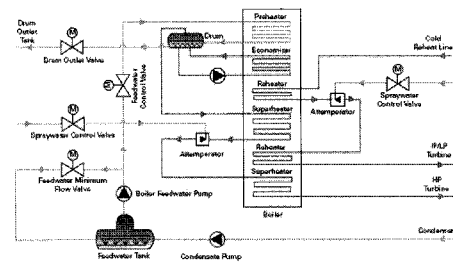
폐열재활용증기보일러(HRSG, Heat Recovery Steam Generator) 제작업체들은 HRSG로부터 생성되는 증기의 최종 온도가 너무 높아지지 않도록, HP(High Pressure)라인이나 RH(Reheat)라인의 최종단 과열증기발생기(Secondary Superheater) 전단 또는 후단에 증기의 온도를 일정온도 이하로 유지하기 위한 별도의 온도조절장치(Attemperator)를 설치한다. 대부분의 경우 과열증기발생기를 여러 부분으로 나누어 최종단 과열증기 발생기 (Secondary Superheater) 전단에 온도조절장치(Attemperator)를 설치한다. - Interstage Attemperator [그림 1]

일반적으로, HRSG의 HP라인에 사용되는 온도조절장치 (Attemperator)는 최고 압력 130 barg(1,900psig), 최고온도 550°C(1,020°F), 최고 유량 300,000kg/h(660,000lb/h)의 조건에서 운전되며, RH라인에서는 HP라인과 비교하여 온도/유량에는 큰 변화가 없으나 최고압력은 30 barg(450psig) 정도가 적용된다. HRSG에 설치되는 온도조절장치 (Attemperator)는 HRSG의 최종단 과열증기발생기 (Superheater)를 통과한 증기의 과열을 방지하여, HRSG의 초기 기동시(Start Up)의 증기 과열도 제어 및 증기터빈(Steam Turbine)으로 인입되는 증기의 적정 온도 유지를 위하여 사용된다.

HRSG에 설치되는 온도조절장치(Attemperator)는 전체 HRSG 성능에 큰 영향을 미치며 아래와 같은 기

능을 제공한다.

- HRSG에서 생성되는 증기의 최종 온도를 제어
 - HRSG의 후단에 위치하는 배관 및 증기터빈 (Steam Turbine)을 포함하는 각 종 기자재의 과열 운전 보호
 - HRSG 초기 기동시(Start Up), 증기터빈 (Steam Turbine)으로 공급되는 증기의 점진적인 과열도 증가 제어
- HRSG 최종단 과열증기발생기(Secondary Superheater)에 공급되는 증기의 온도 제어
 - HRSG 과열증기발생기(Superheater) 튜브의 과열운전 방지
 - HRSG 과열증기발생기(Superheater) 튜브의 과도한 열응력 발생 방지



[그림 1] 과열증기발생기(Superheater) 및 재열증기발생기 (Reheater)에 적용되는 증기온도조절장치(Attemperator)

증기온도조절장치(Attemperator)의 운전과 관련한 주요 문제점 및 근본 원인

온도조절장치(Attemperator)의 운전과 관련하여 가장 많이 발견되는 문제점으로 온도조절장치 (Attemperator)의 운전제어에 문제가 있거나 냉각수의 누수에 의해 적정 이상의 냉각수가 분사되어, 온도조절장치(Attemperator) 후단에 위치하는 배관 및 기자재에 열응력 피해 및 침식/부식의 현상이 발생 할 수 있다. 실제로, 온도조절장치(Attemperator) 후단에 위치하는 과열증기발생기(Secondary Superheater)의 튜브에 발생하는 모든 문제의 약 25%는 온도조절장치

(Attemperator)의 적절하지 못한 운전성능에 기인한다. 이러한 문제가 발생할 시에는 플랜트 전체의 운전 정지 및 과도한 설비개선비용 등의 손실을 가져올 수 있다.

또 하나의 주요 문제점으로써, 온도조절장치(Attemperator)의 운전범위(Turndown Ratio)가 시스템이 요구하는 범위를 모두 만족시킬 수 없거나, 컨트롤 및 누수에 의해 적정 냉각수 분사량 제어에 문제가 있을 경우 HRSG 또는 보일러가 생성하는 증기의 최종 단 온도가 안정적으로 유지될 수 없다는 것이다. 시스템이 요구하는 증기의 온도를 벗어난다는 것은 곧 증기터빈(Steam Turbine)의 운전 효율 감소 및 발전량(Generated Megawatts)의 감소를 가져온다.

만일, 온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 제어에 문제가 있어 과열증기발생기(Secondary Superheater) 및 증기터빈(Steam Turbine)으로 과열되지 않은 습분 및 불순물이 공급된다면 온도조절장치(Attemperator) 후단의 배관 및 기자재 전체에 심각한 문제를 일으킬 수 있다.

상기의 문제점들은 다음과 같은 요인들에 의거한다.

- 온도조절장치(Attemperator)의 잘못된 설계
- 온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 조절 운전 제어 방식의 문제
- 잘못된 설치
- 계측 장비의 잘못된 운전 제어

온도조절장치(Attemperator) 설계

HRSG의 HP라인이나 RH라인에는 반드시 온도조절장치(Attemperator)를 설치하여야 한다. HRSG의 운전이 기동/정지 및 운전 사이클에 따라 운전됨에 따라 온도조절장치(Attemperator)는 상당 기간 냉각수 분사를 하지 않은 채 고온의 증기와 접촉하게 되며, 이러한 상황에서 냉각수 분사가 이루어지면 심각한 열응력이 발생할 수 있기에 온도조절장치(Attemperator)의 설계에는 반드시 이에 대한 대응 설계가 이루어져야 한다.

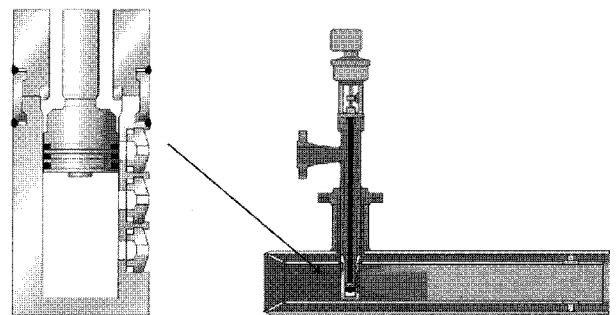
만일, 다노즐탐침식(Multi-nozzle probe style) 온도조절장치(Attemperator)와 같이 냉각수 분사 유량 제어부의 대부분이 온도조절장치(Attemperator)를 통과하는 증기흐름에 노출되어 있는 경우에는 냉각수 분사가 일어날 때마다 과도한 열응력 발생에 의한 피로 누적으로 노즐 및 노즐 홀더, 온도조절장치

(Attemperator) 본체, 그리고 피스톤 링과 같은 주요 부품에 균열이 발생하여 파손될 수 있다.

또한, 다노즐탐침식(Multi-nozzle probe style) 온도조절장치(Attemperator)의 경우, 냉각수 분사량이 극히 적을 때에는 냉각수가 분사되기 전에 온도조절장치(Attemperator) 내부에서 기화하여 플래싱(Flashing)이 발생할 수 있으며 노즐과 노즐 홀더의 부식을 일으킬 수 있다.

피스톤 링을 포함한 다노즐탐침식(Multi-nozzle probe style) 온도조절장치(Attemperator) 내부의 부품들은 온도조절장치(Attemperator)의 일반적 운전 에 따른 극심한 온도 편차에 기인하는 많은 문제점 들에 노출되어 있다.

탐침식 온도조절장치(Attemperator)의 경우 배관 내부의 증기의 유속에 그대로 노출되기에 동압(Velocity head)의 운동에너지(Kinetic energy)가 온도조절장치(Attemperator)의 진동을 유발시켜 와류와 고온의 흐름 속에서 탐침식 온도조절장치(Attemperator)의 배관 용접부 및 본체에 균열이 발생할 수 있다. 이러한 균열이 발생함에 따라 냉각수를 분사하는 노즐 방향이 뒤틀리게 되어 온도조절장치(Attemperator)의 원활한 기능을 발휘할 수 없게 된다.



[그림 2] 다노즐탐침식(Multi-nozzle probe style) 온도조절장치(Attemperator)

Technical Data

Type DA-M

Manufactured by BTG

Capacity Unlimited, Depends of size and numbers of nozzles.

Size of OP-nozzle	OP-20	OP-28	OP-40
Max Kv (m ³ /h)	2,0	3,6	5,9
Max Cv (US gal/h)	2,3	4,2	6,8
Rangeability			

냉각수 분사 제어 요소

HRSG의 HP/RH 라인의 온도 조절 장치(Attemperator)는 넓은 운전영역이 요구되며 최대운전점 뿐만 아니라 최소운전점에서의 선능도 반듯이 고려되어야 한다. 온도조절장치(Attemperator)에 요구되는 운전영역(Turndown requirement)이 20:1이라는 것은 단순히 냉각수 제어 밸브의 유량이나 Cv 값을 의미하지는 않는다. 온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 분사량과 관련된 제어 밸브의 운전영역(Turndown requirement)은 냉각수 압력, 증기 배관 압력 및 필요 유량 변화에 따른 노즐에서의 배압(Back pressure) 변동 등과 같은 시스템 전체의 운전을 고려한 것이다.

HRSG 급수펌프(Boiler Feed Pump)의 운전 방식이 등속운전(fixed speed) 일 경우, HP/RH 라인에 분사되는 냉각수의 압력은 유량의 변동에 따라 큰 편차를 가지며 유량이 줄어들수록 압력은 증가한다. 반면, HP/RH 라인은 발전소가 기동시(Start-up) 또는 부분부하 운전시에는 압력이 매우 낮기에 냉각수 유량 제어 밸브는 극한의 운전영역(Turndown requirement)을 필요로 하게 된다.

냉각수 유량제어와 관련된 운전영역(Turndown requirement)은 온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 분사가 일어나는 노즐 양단의 차압 변화에 영향을 받는다. 이러한 영향으로 고정된 분사면적을 갖는 노즐(Fixed area nozzle) 보다는 스프링 장착 노즐(Spring loaded nozzle)을 채용한 온도조절장치(Attemperator)가 냉각수 유량 변화에 대하여 훨씬 더 안정적으로 운전 될 수 있다.

냉각수 제어용 밸브는 넓은 운전영역(Turndown requirement) 뿐만 아니라, 저유량 운전범위에서는 높은 차압(ΔP)을 받으며 유량이 많이 흐를 때는 차압(ΔP)이 줄어들기에, 이러한 차압 변화에 견딜 수 있어야 한다. 따라서 냉각수 제어밸브는 반복되는 운전/정지에 불구하고 높은 밀폐성(Tight shut-off) 유지하여야 하며, 이를 위해 밀폐시 접촉되는 플러그 및 시트의 신뢰성이 높아야 한다.

냉각수 제어용 밸브의 트립을 지나는 출구 유속은 유체의 캐비테이션(Cavitation) 및 밸브의 침식(Erosion)을 막기 위하여 30 m/s(100 ft/sec) 이하로 유지되어야 한다. 온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 제어 밸브에 요구되는 이러한 높은 수준의 성능은 DRAG◆ 100DSV 제품으로 충족시킬 수 있다.

특히, DRAG◆ 100DSV 모델의 경우, 다수의 미세 유로를(Multi-path) 형성하는 디스크를 적층시켜 미세한 유량변화를 제어할 수 있는 Equal Percentage 밸브성능특성을 실현하여 낮은 Cv 값에서도 높은 제어 성능을 발휘함으로써, 정밀한 냉각수 분사를 통한 온도 조절장치(Attemperator) 출구 증기 온도 제어가 가능하다.

설치(Installation)

온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 분사량은 온도조절장치(Attemperator) 후단의 온도센서의 온도 계측으로 제어된다. 이 때, 온도센서는 냉각수가 분사된 후 증발되지 않은 습분이 온도센서의 온도계측에 영향을 주지 않도록, 분사된 냉각수가 충분히 증발할 수 있는 시간을 고려한 거리에 설치한다.

온도조절장치(Attemperator) 후단의 증기라인에 엘보우 등 곡관이 형성될 경우, 분사된 냉각수가 모두 증발 할 수 있는 충분한 거리를 두고 설치하여야 한다. 만일 너무 거리가 짧을 경우에는 곡관에 미처 증발하지 않은 습분이 고속으로 부딪혀 표면에 증발되지 않은 공기방울이 모일 수 있으며, 열응력발생, 온도조절장치(Attemperator) 운전 불안정 및 곡관의 부식을 가져올 수 있다.

온도조절장치(Attemperator)의 입구 측에도 곡관으로부터 충분한 거리를 고려하고 라이너(Liner) 등을 설치하여 냉각수가 분사되는 지점에서의 증기 흐름을 균일하게 유지하여야 한다.

계측장치

온도조절장치(Attemperator)의 운전 제어 방식이 피드백(Feedback) 방식이라면 온도센서를 온도조절장치(Attemperator) 후단에 충분한 거리를 두고 설치하여 분사된 냉각수가 완전히 증발한 후에 온도를 계측할 수 있도록 하여야 한다.

분사된 냉각수의 미세화(Atomization) 및 증발(Evaporation)

온도조절장치(Attemperator)가 적정한 성능을 위해서는 온도조절장치(Attemperator)의 기계적 구조 설계 뿐만 아니라 열역학적, 유체역학적 측면이 고려되어야 한다. 온도조절장치(Attemperator)에 공급되는 냉각수의 미세한 분사, 분사된 물방울의 분쇄, 그리고 미세 물입자의 증발 등이 완벽하게 이루어 지지 않는

한, 아무리 기계적으로 복잡한 온도조절장치(Attemperator)라 할지라도 증기의 온도 제어는 물론 증발되지 않은 냉각수의 배수 등 커다란 문제를 야기할 수 있다.

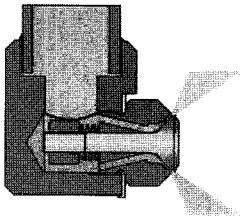
온도조절장치(Attemperator)를 통과하는 과열증기로 분사된 냉각수의 제어를 위하여 아래 세 가지 중점 사항을 유의하여야 한다.

- 냉각수 미세 분사(Primary atomization)
- 분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization)
- 증발(Evaporation)

냉각수 미세 분사(Primary atomization)

냉각수 미세 분사(Primary atomization)란 온도 조절장치(Attemperator)의 냉각수 분사 노즐을 통한 냉각수의 미세한 분사를 의미한다. 이 단계에서는 냉각수 유량에는 상관없이 미세한 물방울을 만드는 것이 매우 중요하며, [그림 3] OP Nozzle과 같이 유로의 면적 변경이 가능한 노즐(Variable area nozzle)을 사용하여야 하며 특성과 장점은 아래와 같다.

- 냉각수 미세 분사(Primary atomization), 기계적 구조식/압력식
- 유량에 상관없이 미세 분사 가능
- 소용돌이(Swirl) 현상으로 미세화 극대화
- 냉각수 분사 제어 밸브 보호
- 노즐의 미세 찌꺼기 자체 처리 가능
- 최소 분무량 100 kg/h (220 lb/h)까지 적절한 미세화 분사 가능



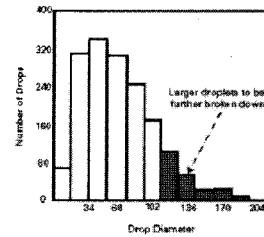
[그림 3] 유로의 면적 변경이 가능한 노즐(Variable area nozzle)

고정 오리피스 노즐(Fixed orifice nozzle)은 최대 유량에 맞춰 제작되기에 실제 유량이 적은 운전상황에서는 노즐 양단의 차압이 줄어들어 냉각수의 미세 분사가 잘 일어나지 않는다. 따라서 고정 오리피스 노즐(Fixed orifice nozzle)은 운전영역비(Turndown

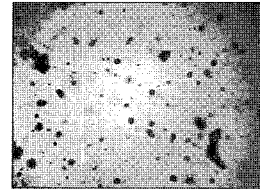
Ratio)가 3:1 이하로 제한적이다.(노즐 차압 ΔP 10~15 bar/150~225 psi 인 경우)

냉각수 미세 분사(Primary atomization)를 통하여 증기로 분사된 미세 물방울들은 균일하지 않은 각각의 지름을 갖게 되며, 물방울 지름은 [그림 4]와 같은 분포를 보인다. 증기 또는 공기압을 이용한 미세 분사는 제외

[그림 4]의 물방울 지름 분포 중에서 파란색으로 표기된 일정 크기 이상의 물방울 들은 증기에 분사된 이후 다시 작은 물방울로 분쇄된다. 전체 냉각수 분사량 대비 상대적으로 큰 물방울의 량은 단지 일부분임을 알 수 있다. 이는 [그림 5]에서도 확인할 수 있다.



[그림 4] 냉각수 미세 분사에 따른 물방울 지름 분포 (Droplet Distribution from Primary Atomization)



[그림 5] 노즐 분사 15 inches 이후의 냉각수 미세 분사 물방울 확대 사진

분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization)

분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization)는 물방울이 분사된 증기 흐름의 유속에 따른 동력(Dynamic force)에 의하여 발생한다. 따라서, 물방울에 가해지는 동력(Dynamic force)은 물방울을 유지하고자 하는 점성력(Viscous force)을 이겨낼 정도로 커야 하며 이는 아래의 We 수數(We Number) 공식으로 정의할 수 있다.

$$We = \frac{\text{Dynamic force(동력)}}{\text{Surface tension(표면장력)}} = \frac{\rho V^2 D}{\sigma}$$

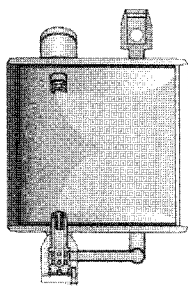
- D = 물방울 지름
- ρ = 증기 밀도
- V = 증기와 물방울 간의 상대속도
- ρV² = 증기의 속도 수두
- σ = 표면장력(물방울 온도에 따름)

We 數수 > 12 일 경우, 동력(불안정성, destabilizing)이 물방울의 표면장력(안정성, stabilizing force)을 극복하고 물방울의 분쇄를 일으켜 더 작은 물 입자로 잘게 쪼갤 수 있다.

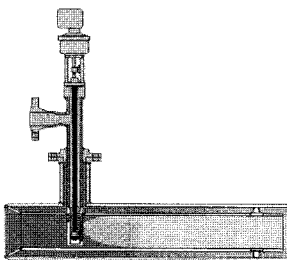
분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization)를 극대화하기 위해서는 [그림 7]과 같이 증기 흐름 방향과 같은 방향으로 냉각수를 분사하기 보다는 [그림 6]과 같이 증기 흐름과 냉각수 분사 방향이 서로 직각을 이루게 하여 증기와 물방울의 상대속도가 최대가 되게 할 필요가 있다.

HRSG의 HP/RH 라인은 질량유량이 적을 경우 압력이 낮고, 질량유량이 많을 경우 압력이 높아, 전 운전 범위에서 체적유량의 변화는 크지 않으며 증기의 유속은 언제나 비교적 빠르다. 따라서 HRSG의 전 운전 범위에 걸쳐 증기와 분사된 냉각수 물방울의 상대속도를 최대화 한다면, 높은 동력을 물방울에 가할 수 있어 분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization)를 극대화 할 수 있다.

하기의 [그림 6]과 같이 냉각수가 증기의 흐름 방향과 직각으로 분사되면 증기와 분사된 물방울의 상대속도를 극대화 할 수가 있다. 하지만, [그림 7]과 같이 과거에 많이 사용되던 탐침식(Probe Style) 온도조절장치(Attemperator)의 경우, 냉각수의 분사가 증기의 흐름방향으로 이루어져서 상대속도가 최소화 되며 물방울에 가해지는 동력(Dynamic force)이 물방울의 점성력(Viscouse force)을 이기지 못하여 분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization)가 충분히 일어나지 않을 수 있다.



[그림 6] 증기흐름 수직방향의 냉각수 분사



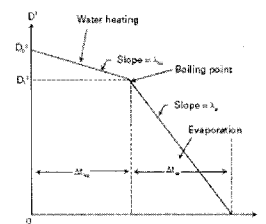
[그림 7] 증기흐름과 동일한 방향의 냉각수 분사

증발(Evaporation)

분사된 물방울은 증기의 유속에 의해 미세하게 분쇄(Secondary atomization)된 후 증기로부터 열을 흡수하여 증발하게 된다. 이 때 분사된 물방울이 모두 증발하게 되는 동안의 시간은 분사된 냉각수 전체의 표면적에 의해 결정되며, 따라서 각각의 분쇄된 물방울의 지름의 제곱에 반비례하여 증발 시간이 길어진다.[그림 8]

만일, 분사된 물방울이 배관에 설치된 온도센서에 이를 때까지 증발되지 않는다면, 온도센서에 미세 물입자가 닿게 되어 측정된 온도의 정밀도가 크게 떨어져 시스템 제어에 문제가 발생할 수 있다. 더욱이, 다량의 물방울이 채 증발하기 전에 온도 조절장치(Attemperator) 후단의 곡관 등에 부딪히게 되면 부식과 열충격(Thermal shock)에 의한 배관 손상을 가져올 수 있다.

HRSG에 사용되는 온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 분사량이 적절히 조절되지 않거나, 분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization) 및 증발(Evaporation)에 문제가 발생되었을 경우, HRSG 최종단 과열증기발생기(Secondary Superheater)로 증발되지 않은 냉각수 물방울이 공급되어 튜브 및 헤더에 치명적인 손상을 줄 수 있다. 따라서, 온도조절장치(Attemperator)의 적정 운전을 위하여, 분사된 물방울이 완벽히 증발될 수 있는 충분한 시간을 갖도록 고려하여야 한다.



[그림 8] 분사된 물방울의 증발(Evaporation)

온도조절장치(Attemperator)설계 추천 사항

온도조절장치(Attemperator)를 설계하기 위해서는 기계적 설계, 밸브 구조 및 과열운전에 대한 사항을 면밀히 고려하여야 한다. 또한, 온도조절장치(Attemperator)의 적절한 운전을 위해서는 온도조절장치(Attemperator)의 설치에도 많은 주의사항을 따르며 온도조절장치(Attemperator) 전단의 직관거리, 후단의 곡관까지의 직관거리, 온도 센서의 설치 위치 등은 반드시 하기의 추천사항을 따라야 한다.

기계적 설계, 밸브 구조 및 과열운전에 대한 사항

HRSG에 설치되는 온도조절장치(Attemperator)는 HRSG의 Hot/Warm/Cold 기동 및 부하증가 및 감소에 따르는 운전 상황 변화에 적절히 대응하여 운전되어야 한다. HRSG 자체는 부하의 변동이 없을 시에는 별도의 냉각수 분사가 필요하지 않도록 설계된다. 하지만, 부하의 변동이 있을 경우에는, 과열된 증기의 온도 변화가 발생하며, 냉각수의 분사를 통한 온도 조절이 필요하게 된다. 따라서 온도조절장치(Attemperator)는 안정된 부하 하에서, 장기간 과열증기에 그대로 노출될 수 있기에 고온에 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

HRSG의 부하에 변동이 생겨 냉각수의 분사가 필요해질 경우, 온도조절장치(Attemperator)는 과열증기의 온도에서 냉각수의 온도로 급격한 온도 변화를 겪게 된다. 이때의 온도차는 350 ~ 450°C (630 ~ 810°F)이며, 온도조절장치(Attemperator)에 열충격(Thermal shock)을 줄 수 있다. 일반적으로 HRSG의 전체 운전 수명 기간 중, 온도조절장치(Attemperator)는 약 10,000번 이상의 열충격(Thermal shock)을 받게 된다.

[그림 7]과 같이 증기의 흐름에 그대로 노출된 탐침식(Probe style)의 온도조절장치(Attemperator)의 경우, 상기의 열충격(Thermal shock)과 관련하여 아래의 문제점을 갖는다.

- 노즐의 헤드 부분이 냉각수 분사 조절 부위 아래에 위치한다
- 노즐의 헤드는 냉각수가 분사될 때까지 배관을 흐르는 증기의 온도와 같은 고온 상태이다.
- 열충격(Thermal shock)에 의한 피로 누적으로 냉각수 분사가 500회 이상 이루어 질 경우 문제가 발생할 수 있다.
- 온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 제어 부위에 금이 가거나 고착이 생겨 누수가 발생할 수 있다.

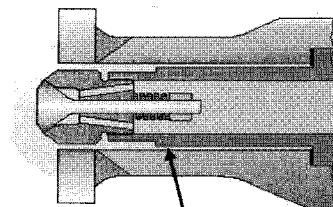
열충격(Thermal shock) 현상 뿐 만이 아니라, 탐침식(Probe style)의 온도조절장치(Attemperator)는 증기의 흐름에 그대로 노출되어 운전 중 노출된 탐침형(Probe style) 부위가 증기 흐름 방향으로 휘 수도 있으며 von Karman vortex street 현상에 의해 진동이 발생할 수 있다. 진동이 발생되어 탐침형(Probe style) 부위의 자연진동수(natural frequency)에 가

카워지면 심각한 기계적 손상이 발생하여 플랜트 전체를 정지시켜야 할 경우가 나타날 수도 있다.

산업 현장에서 사용되고 있는 [그림 7]의 다노즐탐침식(Multi-nozzle probe style) 온도조절장치(Attemperator)는 단일노즐의 탐침식(Probe style)보다 노즐 헤드가 훨씬 크기에 상기와 같은 문제점이 더욱 부각될 수 있다.

이러한 열피로(Thermal fatigue) 문제를 해결하기 위해서는 온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 분사 제어 부위를 배관 내의 증기 흐름으로부터 분리할 필요가 있다. 이러한 구조에서는 온도조절장치(Attemperator)의 냉각수 분사 제어 부위가 냉각수의 온도 상태에서 갑작스러운 온도 변화를 최소화 할 수 있기에 열충격(Thermal shock) 등을 방지할 수 있다. CCI사는 무한요소법을 통한 피로 분석(Finite stress element analysis)과 공장 검사 및 다수의 현장 운전 사례를 통하여, 증기에 분사되는 냉각수의 온도와 증기의 온도 차이가 250°C (450°F) 이상일 경우에는, 냉각수 제어 밸브와 노즐이 일체형으로 형성된 탐침식(Probe style) 온도조절장치(Attemperator)는 사용할 수 없다는 결과를 확인하였다.

아울러, 온도조절장치(Attemperator)의 중요 부품과 증기의 흐름 사이에 단열공간(Thermal barrier)을 두어 과도한 온도 변화를 줄일 수 있기에, CCI는 이러한 구조를 채택한 온도조절장치(Attemperator)의 사용을 추천하는 바이다.

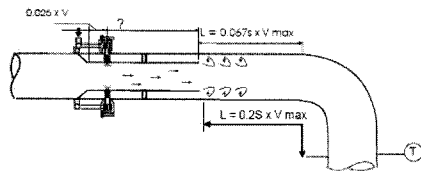


Thermal Barrier
[그림 9] 단열 공간

라이너(Liner)

대부분의 온도조절장치(Attemperator) 제작업체에서는 온도조절장치(Attemperator) 후단의 증기 배관을 열충격(Thermal shock)으로부터 보호하기 위하여 라이너(Liner)를 공급한다. 하지만, 적절히 설계된 라이너(Liner)는 이러한 기능 뿐만이 아니라 온도조절장치(Attemperator) 성능 개선을 가져올 수도 있다. 라이너(Liner)는 다음과 같은 기능을 가질 수 있다.

- 열충격(Thermal shock)으로부터 증기 배관을 보호
- 증기의 유속을 증가시켜 분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization) 효과 강화
- 흐름에 변경에 따른 와류(Vortices)를 형성하여 분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization) 효과 및 증기와의 열교환 효과 개선
- 분쇄된 물방울의 증기와의 열교환 및 증발 촉진
- 배관 단면적을 축소하여 냉각수 분사 효과 증대
- 분사된 냉각수가 용이하게 섞일 수 있도록 증기 흐름을 개선



[그림 10] 라이너(Liner) 설치 사례

일반적인 설치 방법: 온도조절장치(Attemperator)의 라이너(Liner) 입구 측의 직관 거리는 배관 지름의 3배 이상으로 한다. 냉각수가 분사되는 노즐로부터 라이너(Liner)의 길이는 운전요건에 따라 1~1.8 m (3~6 ft)이다. 특히, HRSG의 HP/RH 라인의 온도조절장치(Attemperator) 후단 곡관 까지의 거리는 분사된 물방울이 라이너(Liner) 끝으로부터 최소 0.067초간 최대 유속으로 부유하며 증발될 수 있도록 한다. 라이너(Liner) 끝으로부터 온도센서까지 거리는 분사된 물방울이 0.2초 이상 최대 유속으로 흘러 배관 내의 증기가 균일한 온도 분포를 보일 수 있도록 한다. 만일, 냉각수의 분사량이 배관의 증기량 대비 15% 이상일 경우에는, 온도센서까지 거리를 0.3초 이상 최대 유속으로 흐를 수 있도록 늘려야만 한다. 상세한 설치 방법은 실제 온도조절장치(Attemperator)의 운전 상황에 따라 보다 정밀히 계산하여야 한다.

관련 제품

Model DAM: Wall mounted variable area nozzles

DAM 모델 온도조절장치(Attemperator)는 HRSG의 운전상황에 적합하도록, 아래와 같은 모든 기계적, 열역학적, 유체역학적 검토 사항을 고려하여 제작되었다. 냉각수 유량 제어용 밸브는 증기 배관에 냉각수를 분사하는 온도조절장치(Attemperator)와 별도로 설치 냉각수 분사 노즐의 배관 내 증기 흐름에 대한 노출 부

위 최소화

냉각수 분사 부위가 증기 흐름을 영향을 주지 않아 von Karman vortex street 현상에 의한 진동 방지 고속의 증기 흐름에 노출된 부위가 최소화 되어 냉각수 분사 노즐 부위의 휨 발생 방지

라이너(Liner)의 적정 설계로 증기 배관의 보호와 더불어 온도조절장치(Attemperator) 성능 개선

유량의 변화에 관계없이 원활한 냉각수 미세 분사(Primary atomization) 성능 유지

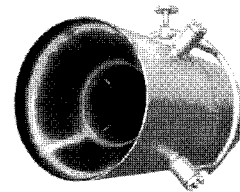
분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization) 극대화

냉각수 분사 시 직경 125 micron 이하의 미세한 물방울로 분사

각각의 냉각수 분사 노즐은 최적화된 분사 성능을 발휘할 수 있도록 설계

증기 배관 전체 단면적에 효과적으로 침투할 수 있는 냉각수 분사 패턴(Pattern)

냉각수 유량 제어용 밸브는 높은 차압(ΔP)을 견딜 수 있도록 설계 하여 냉각수 분사 노즐 수명 향상

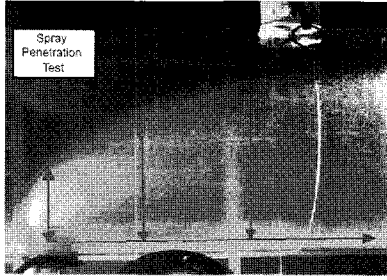


BTG에서 제작한 온도조절장치(Attemperator)-라이너(Liner)를 채용한 DA-M 모델

온도조절장치(Attemperator)와 관련된 Total System Solution 및 지속적인 온도조절장치(Attemperator) 개발

- 분사된 물방울 지름
- 각각의 노즐로부터 분사된 냉각수 물방울의 배관 면적 전체에 대한 분사 패턴
- 분사된 냉각수 물방울의 증기 흐름 내 침투 현상 [그림 11]
- 냉각수 분사 이후 첫 번째 곡관까지 필요한 최소 거리
- 냉각수 분사 이후 온도 센서까지 필요한 최소 거리

Coolsizer™ 프로그램을 이용함으로써 모든 형태의 온도조절장치(Attemperator)에 대하여 상기와 같은 설계 주안점들을 계산해 낼 수 있다.



[그림 11] 기체 흐름에 수직으로 분사된 액체의 흐름 형상

온도조절장치(Attemperator) 제작/구매를 위한 필수적인 제품사양

아래의 제품 사양들은 HRSG의 HP/RH 라인에 설치되는 온도조절장치(Attemperator)에 대한 것이며, 온도조절장치(Attemperator)로부터 분사되는 냉각수와 배관 내 증기의 온도차가 250°C (450°F) 이상인 경우, 필수적으로 갖추어야 사항들이다.

1. 스프링을 장착하여(Spring loaded) 분사 면적 변화가 가능한(Variable area) 노즐을 사용

상세설명:

- 스프링을 장착한 노즐은 뛰어난 분사 패턴을 갖기에 냉각수 분사량에 상관없이 원활한 냉각수 미세 분사(Primary atomization)가 가능하다. 반면, 고정된 분사면적을 갖는 노즐(Fixed area nozzle)은 분사량이 줄어들면 냉각수 미세 분사(Primary atomization) 성능을 발휘할 수 없다.
- HRSG 기동 시, 분사되는 냉각수의 온도는 상대적으로 높고 배관 내 증기의 압력은 낮은 상황 하에서는 냉각수 제어 밸브에 플래싱(Flashing) 현상이 발생할 수 있기에 스프링 장착 노즐(Spring loaded nozzle)로 압력 부하를 증대시켜야 한다.
- 노즐 전단에 일정 압력 이상을 형성하여 냉각수 제어 밸브의 운전영역(Turndown)을 줄일 수 있으며, 따라서 온도조절장치(Attemperator) 전체의 운전영역(Turndown)을 개선할 수 있다.

2. 분사된 냉각수의 증기 배관 내 침투 및 증발에 대한 평가 및 계산서를 첨부하여야 한다.

상세설명:

냉각수가 분사되어 증기 배관이나 라이너(Liner)까지 차가운 물방울이 직접 닿게 되면 과도한 열응력(Thermal stress)이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여, 냉각수가 분사된 이후 배관 지름에 해당하는 거

리 이후의 지점에서, 냉각수의 배관 지름의 12% 이상 배관 표면으로부터 간격을 유지 할 수 있도록 냉각수 분사가 이루어 져야 한다.

3. 증기 배관의 원주면 상에 다수의 노즐을 설치한다. 냉각수의 분사 방향은 증기 흐름 방향의 수직으로 한다.

상세설명:

- 증기 배관 단면적 전체에 고른 냉각수 분사가 이루어 지기 위해서는 다수의 노즐이 증기 배관 원주면 상에 설치되어야 한다.
- 분사된 물 방울의 분쇄(Secondary atomization)효과를 극대화 하기 위하여 냉각수의 분사 방향은 증기의 흐름에 수직으로 이루어 져야 한다.
- 냉각수 분사 노즐의 증기 흐름 내 노출을 최소화 하여 열충격(Thermal shock) 현상으로부터 보호될 수 있다.

4. 냉각수와 증기의 온도차(ΔT)가 250°C (450°F) 이상일 경우, 냉각수 제어 밸브 부분과 냉각수를 분사하는 온도조절장치(Attemperator) 부위를 분리하여 과도한 온도차에 의한 기계부품의 손상을 방지하도록 한다.

상세설명:

- 냉각수 제어 밸브 부위는 냉각수의 온도에만 노출되어 운전되도록 한다.
- 다노즐탐침식(Multi-nozzle probe style) 온도조절장치(Attemperator)와 같이 냉각수 분사 유량 제어부의 대부분이 온도조절장치(Attemperator)를 통과하는 증기흐름에 노출되어 있는 경우, 냉각수 분사가 없는 운전 상황 하에서는 배관 내 증기의 온도로 과열되어 냉각수 분사가 일어날 때마다 과도한 열충격(Thermal shock)을 받는다.

5. 라이너(Liner)를 설치하여야 한다.

상세설명:

- 운전 상황 변화에 따라 분사된 냉각수가 증기 배관에 직접 닿아 과도한 열응력(Thermal stress)이 발생하지 않도록 배관을 보호한다.
- 배관 내의 증기 유속을 증대시켜 분사된 물방울의 분쇄(Secondary atomization) 효과를 극대화

한다.

- c. 라이너(Liner) 끝 단에 와류(Vortices)를 형성하여 라이너(Liner) 상에 미쳐 증발되는 못한 물방울의 분쇄(atomization) 및 증기와의 열교환 효과를 개선할 수 있다.
- d. 증기 흐름을 개선시킬 수 있는 구조물 역할을 하여 온도조절장치(Attemperator)의 성능을 최대화 할 수 있다.

6. 냉각수 노즐이 배관 내 증기의 흐름에 최소한으로 노출되도록 설치 하여야 한다.

상세설명:

- a. 온도조절장치(Attemperator)의 주요 부품들에 가해지는 열충격(Thermal shock)을 줄일 수 있다.
- b. 배관 내 증기의 흐름을 방해하지 않아 증기의 압력손실을 줄일 수 있다.
- c. 고속의 증기 흐름에 의해 온도조절장치(Attemperator)의 주요 부품이 휘는 것을 막을 수 있다.
- d. 증기의 흐름에 과다 노출 된 구조에서는 온도조절장치(Attemperator)에 진동이 발생할 수 있다.

7. 온도조절장치(Attemperator)의 중요 부품과 증기의 흐름 사이에 단열공간(Thermal barrier)이 있는 구조로 설치되어야 한다.

상세설명:

단열공간(Thermal barrier)을 두어 고온의 증기와 냉각수 간의 온도차에 의한 열응력(Thermal stress)을 줄일 수 있다.

8. HRSG의 모든 운전 상황 하에서, 분사된 냉각수의 최대 물방울 직경은 125 micron 이하로 유지되어야 한다. 온도조절장치(Attemperator) 공급업체는 각 운전 조건에서 분사된 물방울의 직경을 계산하여 온도조절장치(Attemperator) 설계의 근거를 계산서 및 실험자료로 제시할 수 있어야 한다.

상세설명:

- a. 분사된 물방울의 직경이 큰 경우, 증발이 채 이루어지기 전에 증기 배관에 닿아 많은 분체점을 야기할 수 있다.
- b. 분사된 물방울의 직경은, 증기와 접촉하여 증발하거나 또는 증기의 흐름에 따라 흘러 직관 등에 부

딴했을 때 충격을 주지 않을 정도로 작아야만 한다. 특히, 현장에서의 온도 조절 장치(Attemperator) 후단 배관 설치 면적에 제한되어 있기에 분사된 물방울의 직경은 철저히 검토되어야 한다.

- c. 분사된 물방울의 직경이 충분히 작지 않을 경우, 온도 센서에 이르기 까지 증발이 채 이루어지지 않은 채로 온도센서에 고속으로 부딪힐 수도 있으며, 온도센서가 설치된 위치에서 배관 단면적 전체에 균일하지 못한 온도 분포를 보임으로써 온도센서로 정확한 온도값 측정이 어려울 수 있다.

9. 스프링 장착 노즐(Spring loaded nozzle)의 분사면 간격은 최소 2.0 mm (0.2 inch) 이상이어야 한다.

상세설명:

노즐에 이물질이 박혀 막히는 현상을 최소화 하여 냉각수 미세 분사(Primary atomization) 성능을 보증할 수 있다.

10. 냉각수 분사 노즐, 냉각수 제어 밸브의 트림(Trim) 부위 등의 제어용 부품(Moving parts)들은 증기배관 절단 없이 간단히 분해 조립이 가능한 구조로 한다.

상세설명:

증기배관의 절단, 재용접 및 비파괴검사(NDT) 등의 유지보수 비용을 줄일 수 있다.

11. 냉각수 제어 밸브는 증기 배관의 압력이 낮을 때에는 반드시 폐쇄되어야 한다.

상세설명:

증기 발생량이 작은 경우 냉각수 보급라인의 보일러 보급수 펌프(BFP)는 고압을 유지하므로, 냉각수 제어 밸브 및 냉각수 분사 노즐의 누수가 발생할 수 있다.

12. 냉각수 제어 밸브는 모든 운전 조건 하에서 플래싱(Flashing) 또는 케비테이션(Cavitation) 현상을 방지할 수 있는 구조로 한다.

상세설명:

플래싱(Flashing) 및 케비테이션(Cavitation) 현상이 발생하면 냉각수 제어용 밸브, 밸브 후단의 배관 및 냉각수 분사 노즐에 이르기 까지 치명적인 손상을 일으켜 온도조절장치(Attemperator) 성능을 제대로 발휘

할 수 없게 되며 소음/진동에 따른 유지보수 비용이 증가될 수 있다.

13. 냉각수 제어 밸브의 트림(Trim)은 다수의 압력감소단(Pressure drop stage)을 두어 트림(Trim) 출구 유속이 30 m/s(100 ft/s) 이하로 유지될 수 있는 구조로 한다.

상세설명:

냉각수 유량이 적은 운전 영역에서 냉각수 제어 성능을 원활히 유지할 수 있으며 밸브의 시트(Seat) 부위의 마모(Erode)를 방지할 수 있다.

14. 냉각수 제어용 밸브는 FCI 70-2 규격의 Class V 밀폐성능(shut-off) 을 가져야 한다. 높은 밀폐성능을 위하여 밸브 시트 주위에 가해지는 압력은

최소 8.9 kgt/mm (500 ibf/in) 이상으로 한다.

상세설명:

밸브 시트(Seat)에 누수가 발생되어, 고속의 흐름에 따른 시트(Seat) 마모를 방지하여 시트(Seat) 수명을 늘리기 위해서는 높은 밀폐성능이 필요하다. 특히, HRSG 기동 시와 같이 밸브 전후의 차압(ΔP)이 크고 밸브 Cv 값이 작은 운전 범위에서는 탁월한 밀폐성능이 필요하다.

15. 온도조절장치(Attemperator)의 최적 성능 운전을 위해서, 정상상태(Steady state) 운전 하에서 온도조절장치(Attemperator) 후단의 증기 온도는 설정값의 $\pm 3^{\circ}\text{C}(\pm 5.4^{\circ}\text{F})$ 내에서 안정되어야 한다.

1000kW급 가스엔진 MD20G

* 본 자료는 일본 열병합발전센터 자료에서 발췌·번역한 것임

1. 머리말

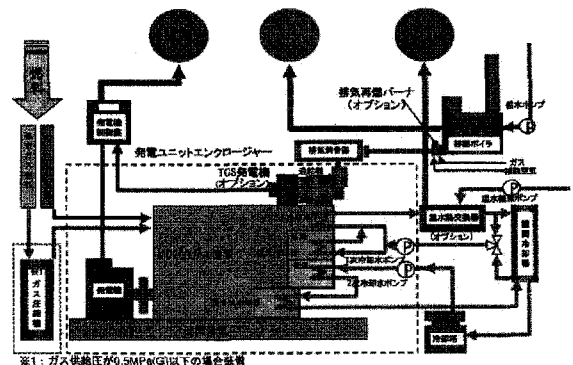
Gas Engine Cogeneration에 대한 시장의 뉴스가 고조에 달했을때 당사는 Daihatsu Diesel의 디젤 엔진 DK20을 base로 하는 1000kW급 가스엔진 MD20을 개발하였다. 2004年 6월 영업개시 이래 지금까지 5대를 受注, 그중 4대를 납품하여 가동하고 있다. 또한 이들 상용기와는 별도로 MD20G를 핵으로 하는 熱電獨立可變 가스엔진 시스템의 Field시험을 실시하여 총 운전시간은 5,000시간을 초과하였다.

여기에서는 MD20G 및 그의 Cogeneration System의 개요, 아울러 그의 도입사례 2건에 관하여 소개한다.

2. 시스템구성 및 특징

[그림-1]에 대표적인 MD20G Cogeneration

system flow를 표시하였다. 이 중에는 Option 仕様の 장치 및 기기도 포함되어 있고 TCS (배기에너지 동력회수시스템) 는 가일층 고효율화를 가능하게 하고 배기 재연 보일러시스템은 열전비 가변범위를 대폭으로 확대하는 장치이다.



[그림-1] MD20G Cogeneration Flow