

영흥화력발전소 보일러배관 화학세정을 위한 유동검토

김진권* · 강신형**

Fluid-Dynamic Study for the Chemical Cleaning of Young-Heung Thermal Power Plant Boiler Pipelines

Jin-Kwon Kim*, Shin-Hyoung Kang**

Key Words : 배관 화학세정 (Pipeline Chemical Cleaning), 배관유동해석 (Pipe Flow Analysis), 종단속도 (Terminal Velocity), 펌프사양선정 (Pump Selection)

ABSTRACT

Chemical cleaning of boiler pipelines is necessary before the commissioning of thermal power plant after many years of construction. Fluid-Dynamic study for the chemical cleaning of boiler pipelines in Young-Heung thermal power plant is carried out. First, flow velocity necessary to sustain and exhaust solid particles in the vertical pipelines is calculated. Second, the flowrate necessary to make the calculated velocities in each vertical pipelines is calculated. Third, all the pipelines are analyzed with the Piping Systems Fluid Flow software to calculate the pressure loss in the pipelines. Finally, the operating point of the applied pump is calculated with the help of the same software.

1. 서론

인천시 옹진군 영흥도 일원에 건설되고 있는 Fig. 1에 나타난 한국남동발전(주)의 영흥화력발전소 1, 2호기는 지속적으로 증가하는 수도권 전력 수요에 능동적으로 대처하기 위한 것으로, 1999년부터 2004년까지 2조여원의 총사업비를 들여서 1600 MW (800MW*2)급 석탄 전소 초임계압 관류형 유연탄 석탄화력발전소로 건설되고 있다.

이러한 화력발전소는 수년간에 걸쳐서 건설되기 때문에, 배관 내부에 산화작용에 의한 스케일이 붙어 있을 수 있고, 용접작업 도중에 발생한 이물질이 배관내부에 남아 있을 수 있다. 운전시 이러한 고체 이물질들은 고속으로 터빈날개에 충돌하여 치명적인 손상을 줄 수 있기 때문에, 보일러 배관들은 건설후 운전에 들어가기 전에 화학세정 및 증기블로잉에 의해서 이물질들을 제거해야 한다.

그런데, 이 영흥화력발전소의 화학세정에는 기존의 화력발전소 보일러 배관 화학세정과 다른 점이 있다. 기존의 국내 화력발전소들은 500 MW급인 반면에, 영흥화력발전소는 국내 최초로 시도되는 800 MW급으로, 주증기량을 기존의 1,720 ton/hr에서 2,415 ton/hr

로, 효율을 기존의 89.33%에서 90.14%로 높이도록 설계개념이 바뀌었기 때문에, 보일러의 높이는 기존의 120 m 정도에 비해서 90 m 정도로 낮지만, 수퍼히터, 리히터 등을 기존의 수평형에서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 수직형으로 배열했다.

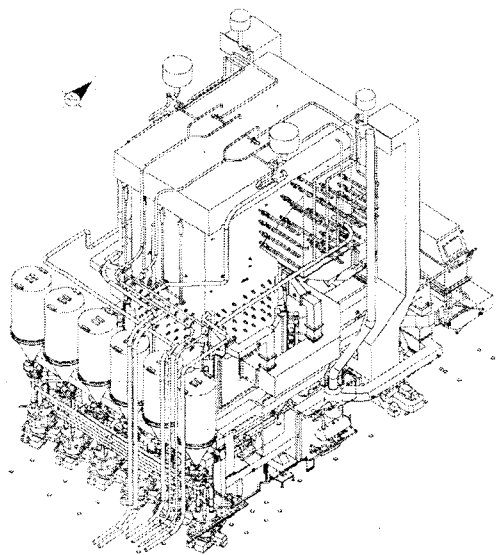


Fig. 1 Young-heung thermal power plant boiler⁽¹⁾

* 서울대 터보동력기계연구센터, TurboHead.com

** 서울대학교 기계항공공학부

* E-mail : realdog@plaza.snu.ac.kr

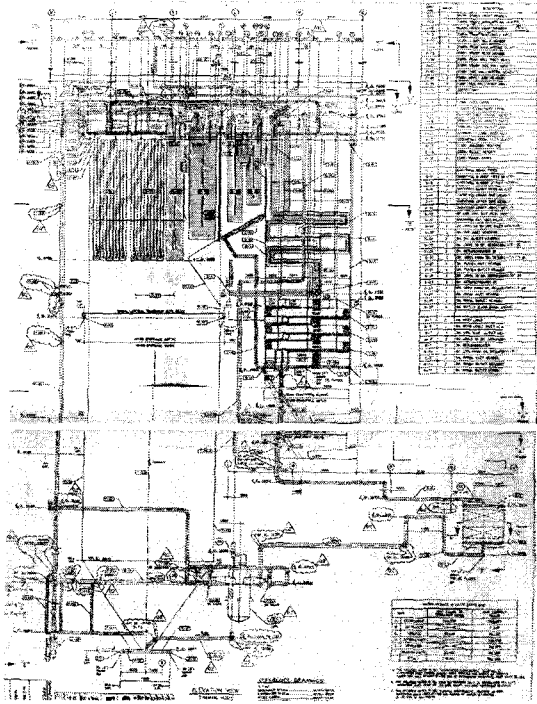


Fig. 2 Young-heung thermal power plant boiler pipe lines⁽¹⁾

즉, 기존의 수평형 수퍼히터, 리히터 배관에서 스케일과 이물질질을 배출하는 데 큰 유속이 필요하지 않은 것과 달리, 이 수직 U 자형 수퍼히터, 리히터 관의 하부에 침전된 스케일이나 이물질질을 화학세정에 의해서 배출하기 위해서는 큰 수직 상방향 유속이 필요하고, 이에 따라서 전반적인 유체역학적 검토가 필요하다.

본 연구에서는 이 화학세정을 효과적으로 수행하기 위한 유체공학적 기술검토를 하며, 다음과 같은 단계로 구성된다. 먼저, 주어진 이물질질을 세정액으로 수직상방향으로 밀어올리기 위한 유속을 종단속도 계산을 통하여 구하고, 배관망 검토를 통하여 각 수직배관에서 이 유속을 발생시키기 위해서 배관에 공급해야 할 유량을 계산한다. 그리고, 전체 배관에 이 유량이 흐를 때 발생하는 압력손실을 배관유동해석 소프트웨어로 유명한 영국 Flite 사의 Piping Systems Fluid Flow 를 사용하여 해석한다. 그리고, 실제 화학세정에 사용될 펌프의 작동점을 구하여, 필요한 유량을 충분히 보낼수 있을지를 검토한다.

2. 수직 수퍼히터 U관내 이물질 방출 유속

2.1. 침전물 입자 및 세정액 물성

흐르는 유체 중에 놓인 입자들이 유체로부터 받는 힘은 입자의 형상, 물성, 크기 및 유체의 밀도, 점도, 유속 등에 따라서 층류, 천이, 난류 등의 영역변화를

거치면서 비선형적으로 복잡하게 변화한다. 따라서, 다양한 재질, 형상, 크기의 입자들 모두에 대한 배출가능 유속을 정확하게 계산하는 것은 사실상 불가능하며, 발전소 보일러 물-수증기관의 화학세정 시에 발생할 수 있는 침전물 입자들 중 대표적이거나, 혹은 최악의 입자를 대표로 선정하여, 침전물의 물성과 형상, 크기를 가정하고, 이에 대한 배출 유속을 계산하고, 다른 형상, 물성, 크기의 입자에 대해서는 유체에서 받는 힘의 경향을 비교, 검토함으로써 배출가능여부를 판단하는 것이 합리적인 방안이다.

본 연구에서는 화학세정 전문업체인 (주)방산테크놀로지에서 제공한 화학세정액 물성과 이들의 경험으로부터 대표적인 침전물입자를 가정하였다. 세정액은 (주)방산테크놀로지서 독자개발한 axon-tek 이라는 화학용액으로서, pH 는 약 7 정도로 약산에 해당하고, 밀도는 물과 거의 같은 $\rho_f = 1.008 \text{ kg/m}^3$ 이고, 점성은 물과 거의 같다고 한다.

침전물은 용접 이물질, 산화된 녹이 화학세정액에 녹아 나온 가루, 흙가루, 먼지 등 다양한 종류가 있을 수 있지만, 이들의 경험을 바탕으로, 가장 대표적인 입자로서는 직경 0.2 mm 의 철구 (steel sphere)를 선택하였다. 화학세정에서 발생하는 산화물의 용해과정에서 발생하는 입자를 고려할 때, 직경 0.2 mm 의 철구는 다양한 침전 이물질 중에서 대표적인 침전물에 속하므로, 이를 배출할 수 있는 속도라면 다른 웬만한 침전물은 밀어 낼 수 있다 생각된다.

배관내부의 유속은 균일하다고 가정하였다. 이 가정을 벗어나는 입자, 유체 및 유속에 대해서는 이 절 뒤에서 물리학적으로 합리적인 경향을 제시한다.

2.2. 침전물 배출에 필요한 유속 종단속도

중력가속도가 $g \text{ m/s}^2$ 인 중력장이 수직아래방향으로 작용하는 곳에서, 밀도가 $\rho_f \text{ kg/m}^3$ 인 유체가

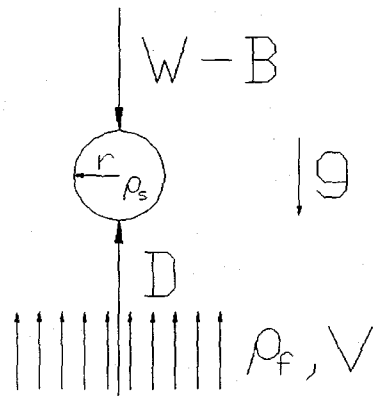


Fig. 3 Forces acting around a particle in a fluid flow.

속도 V m/s 로 수직위방향으로 흐를 때, 이 유동장에 밀도가 ρ_s kg/m³ 이고 반지름이 r m 인 고체구 놓여있다면, 이 고체구는 Fig. 3 에서와 같이 중력 W , 부력 B 와 유체의 항력 D 의 작용을 받는다. 이때 중력, 부력 및 항력은 각각

$$W = \rho_s \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot g \quad (1)$$

$$B = \rho_f \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot g \quad (2)$$

$$D = C_D \cdot \pi r^2 \cdot \frac{1}{2} \rho_f V^2 \quad (3)$$

로 계산된다. 여기서, 식(3)의 우변에 있는 C_D 는 유동저항계수로 유체의 밀도 ρ_f , 유체의 점도 μ , 유체의 속도 V 와 구체구의 반경 r , 구체구의 표면거칠기 ϵ 에 의해서 결정되는 양으로, 간단한 관계식이 존재하지 않고, 매끈한 표면의 구일 때 Fig. 4 와 같은 복잡한 거동을 보인다. 여기서 가로축에 있는 Re 는 레이놀즈수로

$$Re = \frac{\rho_f V \cdot 2r}{\mu} \quad (4)$$

와 같이 정의된다.

Fig. 3 과 같은 상황에서 고체구가 수직으로 낙하하지 않고 상승하는데 필요한 유속은 다음 식과 같이 유동항력 D 가 중력과 부력의 차이인 $W - B$ 보다 커지는 속도를 계산하면 된다.

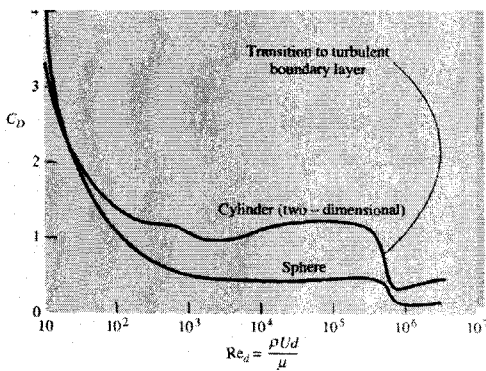


Fig. 4 Drag Force Coefficient of Smooth Sphere⁽²⁾

$$C_D \cdot \pi r^2 \cdot \frac{1}{2} \rho_f V^2 \geq (\rho_s - \rho_f) \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot g \quad (5)$$

$$V \geq \sqrt{\frac{8}{3} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \cdot \frac{r}{C_D} \cdot g} \quad (6)$$

여기서, 유동저항계수 C_D 는 Fig. 4 에서와 같이 레이놀즈수 Re 의 비선형함수인데, 식 (4)에서와 같이 유속 V 을 포함하므로, 식 (6)은 한번에 계산될 수 없고 몇차례의 반복 계산을 통하여 수렴시켜야 한다.

여기서는 다음의 물성값들이 사용되었고, 반복계산방법으로 C_D 를 계산하면, 균일한 수직상방향 유동에서 침전이물질 방출유속은 약 0.09 m/s 정도가 된다.⁽³⁾

$$\rho_s = 7800 \text{ kg/m}^3 \quad (7a)$$

$$\rho_f = 998 \text{ kg/m}^3 \quad (7b)$$

$$r = 0.0001 \text{ m} \quad (7c)$$

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2 \quad (7d)$$

$$\mu = 0.001 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)} \quad (7e)$$

2.3. 단순화 가정의 합리성 검토

2.3.1 배관내부의 유속분포 고려

영용화력발전소 보일러 내의 배관들은 효율적인 열 흡수를 위한 내경 23mm 튜브들의 수백개짜리 번들에서부터 적은 압력손실로 물을 보내기 위한 내경 389mm 짜리 헤더(header)에 이르기 까지 수만개의 파이프 구성되어 있다. 보일러 배관 내에는 수많은 곡관, 접속관 등이 있고, 관의 직경대비 길이도 천차만별이기 때문에, 이러한 배관들 내에서는 유체의 속도가 균일하지 않고, 수많은 대칭,비대칭의 유속분포가 존재할 것이다. 어떤 유속분포나 평균유속보다 높은 영역과 평균유속보다 낮은 영역을 가지므로, 대표적으로 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 완전발달된 층류유동 또는, 난류유동으로 이물질 방출여부를 판단해 볼 수 있다.

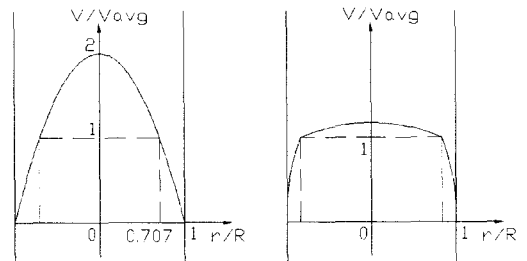


Fig. 5 Typical laminar and turbulent velocity profile in a pipe

완전발달된 층류유속분포를 가지는 Fig. 5의 왼쪽그림에서는 원형파이프 단면 중에서 평균속도보다 큰 값을 나타내는 $r/R < 1/\sqrt{2} \approx 0.707$ 인 중앙부위의 원형의 단면적과 평균속도보다 작은 값을 나타내는 $r/R > 1/\sqrt{2} \approx 0.707$ 인 가장자리 부위의 원형의 단면적은 같다. 완전발달된 층류유동의 배관내에서 반경방향의 평균유속은 0라는 사실을 고려하면, 이는 배관 내의 평균유속이 2.2절에서 계산된 침전이물질의 배출속도와 같을 때, 이물질의 반경방향의 위치에 따라서 아래로 가라앉는 이물질과 위로 배출되는 이물질의 비가 거의 같음을 의미한다.

완전발달된 난류유동의 유속분포는 일반적으로는 Fig. 5의 오른쪽에 나타낸 것처럼, 층류유동의 경우와 비교해서 더 균일한 형태를 나타내고, 평균속도를 상회하는 유속을 나타내는 중앙부위의 영역이 층류에 비해서 더 넓어진다. 즉, 배관내의 평균유속이 2.2절에서 계산된 침전이물질의 배출속도와 같을 때, 수직하강하는 이물질 보다 수직상승하는 이물질의 수가 더 많을 것이라는 것을 알 수 있다.

대부분의 유속분포가 Fig. 5에 나타낸 두 극한적인 유속분포사이에 있을 것으로 추정되는 바, 배관 내의 평균유속이 2.2절에서 계산된 침전이물질의 배출속도와 같을 때, 대부분의 유속분포에서는 이물질이 수직상방향으로 움직일 것이다. 그러나, 가능하면 침전 이물질 배출 필요유속 이상의 평균유속을 흘려서, 침전물질의 수직상방향 배출이 쉽게 되도록 할 필요도 있다.

2.3.2 침전 물질의 형상, 표면거칠기, 물성 검토

침전물질의 형상이 구형이 아닌 경우나 표면거칠기를 가진 경우에, 수직으로 정렬된 핀 등과 같은 특수한 형상과 배치를 제외하고는, 대부분의 형상에 대해서는 Fig. 3에서 수직상방향으로 도움을 주는 저항계수가 구형보다 크다. 즉, 구형 침전물에 대해서 침전물 배출 유속을 구하면, 다른 형상 또는 표면거칠기를 가진 침전물도 배출할 수 있을 것이다.

위에서 대표적인 침전물로 가정 한 쇠구슬의 비중은 7.8 정도로, 흙, 먼지, 금속부스러기 등 웬만한 재질의 밀도보다 크다. 따라서, 특별히 중금속 등이 침전물에 포함되지 않는다면, 2.2절에서 계산된 배출속도를 기준 배출속도로 생각할 수 있다.

3. 입자배출유속을 위한 필요 유량

3.1. 개요

영흥화력발전소 보일러 배관들은 크게 물-주증기관

부 (water-steam line)과 재열증기관 (reheater steam circuit)으로 나눌수 있고, 화학세정도 이 두 부분에서 별도로 실시된다.

물-주증기관은 주물공급관 (main water feed pipe)에서 공급된 물이 1차절탄기 (primary economizer assembly tube), 2차 절탄기 (secondary economizer assembly tube) 등을 거치면서 배기가스에 의해서 예열되고, 로깔때기 (furnace hopper) 및 나선 물벽튜브 (spiral waterwall tube), 로 수직 물벽튜브 (furnace vertical water wall tube)를 타고 로를 올라가면서 가열되어 분리기(separator)에서 물은 아래로 내려가서 주물공급관으로 합류하고, 증기는 다시 백패스 연결관 (back pass connecting pipe)를 거쳐서, 로 지붕 가열핀 판넬 튜브 (furnace roof fin-welded panel tube), 백패스 배관 및 튜브 망 (back pass pipe & tube network)으로 백패스 쪽에서 더욱 가열되고, 디비전 수퍼히터 입구본관 연결관 (link to division superheater inlet header)을 통해서 디비전 수퍼히터 판넬튜브 (division superheater panel tube), 플래튼 수퍼히터 어셈블리 튜브 (platen superheater assembly tube), 피니쉬 수퍼히터 어셈블리 튜브 (finish superhaeter assembly tube)를 거쳐서, 수퍼히터 출구 연결관 (superheater outlet leader)을 통해서 과열상태의 증기를 스팀터빈 쪽으로 내보낸다.

재열증기관 (reheater circuit)은 터빈에서 팽창되며 냉각된 증기를 다시 보일러로 끌어와서 가열하여 터빈 저압부로 보내어 터빈의 출력을 증가시키는 역할을 하는 부분이다. 여기서 증기는 저온 재열 입구 파이프 (cold reheater inlet pipe), 재열 저온 어셈블리 튜브 (reheater low temperature assembly tube), 재열 디수퍼히터와 연결관 (reheater desuperheater & links), 피니쉬 재열 어셈블리 튜브 (finish reheater assembly tube), 고온 재열 출구 파이프 (hot reheat outlet pipe)의 순으로 흐르며, 보일러의 열을 받게 된다.

이상에서 과열배관의 디비전 수퍼히터, 플래튼 수퍼히터, 피니쉬 수퍼히터와 재열배관의 피니쉬 리히터가 U자로 수직으로 매달린 튜브들이다. 이 부분에서의 침전물 입자를 수직상방향으로 배출할 수 있는 유량을 구하는 것이 이 연구의 동기이다. 그러나, 실제로 화학세정에서는 이러한 수직 U관 만에만 침전입자가 있는 것이 아니다. 따라서, 주 물공급관에서 피니쉬 수퍼히터에 이르는 물-주증기관 부의 모든 배관을 흐름을 따라가면서, 수직상방향의 흐름이 있는 곳에서는 2.2절에서 계산한 유속을 발생할 수 있어야 한다. 재열배관에서도 마찬가지이다.

3.2. 물-증기관부 화학세정시 필요한 유량

물-수증기관부의 화학세정시 침전물 방출에 필요한 유량은, Table 1에 나타낸 바와 같이 세정액의 흐름

을 따라가면서 각각의 배관부분에 대해서, 병렬로 흐르는 모든 수직상방향 배관들의 단면적의 합과 이 단면적에서 침전물 배출유속을 곱한 유량을 계산하면 된다.

예를들면, (1) 주 물공급관에 존재하는 수직상향배관으로는 내경 406.8 mm 인 배관 1 개와 내경 296.4 mm인 배관 2 개가 존재한다. 각각에 대한 전체 단면적은 0.13 m², 0.138 m² 이고, 이에 대해서 각각 이물질 배출유속 0.09 m/s를 적용하면, 이 배관에서 이물질 수직배출에 필요한 유량은 각각 0.702 CMM 과 0.745 CMM 이 된다. (18) 피니쉬 수퍼히터 어셈블리 튜브에는 내경 29.0 mm 혹은 내경 38.8 mm 인 배관 1105 개가 존재한다. 이물질 배출유량을 충분히 크게

Table 1 Summary of flowrate and pressure loss for the chemical cleaning of water-main steam line

번호	배관	일자배출유속을 위한 필요유량 (CMM)	7.055CMM 때의 압력 손실(kPa)
1	주 물 공급관 (main water feed pipe)	0.745	4.412
2	1차 질탄기 어셈블리 튜브 (primary economizer assembly tube)	3.202	2.124
3	1차 질탄기 출구연결관 (primary economizer outlet link)	0.745	3.98
4	2차 질탄기 어셈블리 튜브 (secondary economizer assembly tube)	3.765	2.994
5	2차 질탄기 걸이 튜브 (secondary economizer hanger tube)	1.271	3.177
6	질탄기 혼합배관 (economizer mixing line)	0.745	5.895
7	로 깔대기 및 나선 물벽튜브 (furnace hopper & spiral water-wall tube)	4.751	33.046
8	로 수직 물벽 패널 튜브 (furnace vertical water-wall tube)	3.069	1.169
9	로 물벽 리저어 파이프 (furnace water-wall riser pipe)	1.805	0.487
10	백패스 연결관 (back pass connecting pipe)	1.191	0.612
11	로 지붕 가열핀 패널 튜브 (furnace roof fin-welded panel tube)	0 (중력방향)	1.819
12	백패스 배관 및 튜브망 (back pass pipe & tube network)	배관망 해석필요	5.782
13	다비전 수퍼히터 입구분관 연결관 (link to division superheater inlet header)	1.172	1.434
14	다비전 수퍼히터 패널튜브 (division superheater panel tube)	2.509	2.343
15	1번 디수퍼히터와 연결관 (desuperheater #1 & link)	1.052	1.443
16	플래튼 수퍼히터 어셈블리 튜브 (platen superheater assembly tube)	3.197	1.777
17	2번 디수퍼히터와 연결관 (desuperheater #2 & link)	1.284	1.783
18	피니쉬 수퍼히터 어셈블리 튜브 (finish superheater assembly tube)	7.055	1.031
19	수퍼히터 출구 연결관 (superheater outlet lead)	1.172	1.604
	최대필요유량(CMM)	7.055	
	압력손실합(kPa)		76.912

예측하기 위하여 큰쪽 배관인 내경 38.8 mm를 기준으로 생각하면, 1105 개 튜브의 총 단면적은 1.3065 m² 이 되고, 이 튜브에 각각 이물질 배출속도 0.09 m/s를 적용하면, 필요유량은 7.055 CMM 이 된다. 나머지 배관들에 대한 자세한 계산과정은 강신형과 김진권⁽³⁾에서 자세히 찾을 수 있다.

여기서 주목할 부분은 (12) 백패스 배관 및 튜브망에 배관망해석필요라고 적은 부분이다. 다른 모든 부분에서는 병렬로 흐르는 관들은 모두 같은 직경의 관 혹은 튜브들이 반면에, 여기서는 내경 42mm 인 튜브 226 개, 내경 301.4 mm 인 파이프 1개, 내경 37.4 mm 인 튜브 120 개가 직렬과 병렬로 복잡하게 얽혀 있어서 다른 부분과 같이 일률적으로 어떤 비율의 유량이 분배될지 미리 알지 못하고, 전체 배관망 및 유량을 Piping Systems FluidFlow 에 입력하고 해석을 해보아야 할 수 있고, 이에 대해서는 뒤에서 다시 논한다.

Table 1에 계산한 결과를 보면 물-주증기관 각부분에서 침전물을 배출하는데 필요한 유량의 최대값은 피니쉬 수퍼히터 어셈블리 튜브에서의 7.055 CMM 이다. 즉, 물-주증기관에 7.055 CMM 의 유량으로 화학세정을 행하면, 다른 수직상방향 배관에서는 충분한 유속

Table 2 Summary of flowrate for the forward direction chemical cleaning of the reheater circuit

번호	배관	일자배출유속을 위한 필요유량 (CMM) 정방향	압력손실 (kPa)
1	저온 재열 입구 파이프 (cold reheater inlet pipe)	4.101	
2	재열 저온 어셈블리 튜브 (reheater low temperature assembly tube)	14.177	
3	재열 디수퍼히터와 연결관 (reheater desuperheater & links)	8.204	
4	피니쉬 재열 어셈블리 튜브 (finish reheater assembly tube)	8.924	
5	고온 재열 출구 파이프 (hot reheat outlet pipe)	0 (중력방향)	
	최대필요유량(CMM)	14.177	
	압력손실합(kPa)		

Table 3 Summary of flowrate for the backward direction chemical cleaning of the reheater circuit

번호	배관	일자배출유속을 위한 필요유량 (CMM) 역방향	유량 8.924CMM 때의 압력 손실(kPa)
5	고온 재열 출구 파이프 (hot reheat outlet pipe)	4.899	0.085
4	피니쉬 재열 어셈블리 튜브 (finish reheater assembly tube)	8.924	0.139
3	재열 디수퍼히터와 연결관 (reheater desuperheater & links)	0 (중력방향)	0.279
2	재열 저온 어셈블리 튜브 (reheater low temperature assembly tube)	0 (중력방향)	0.129
1	저온 재열 입구 파이프 (cold reheater inlet pipe)	4.101	0.597
	최대필요유량(CMM)	8.924	
	압력손실합(kPa)		1.229

으로 침전물을 배출하며, 피니쉬 수퍼히터 U관에서는 침전물배출유속인 0.09m/s 의 유속이 나올 것이다.

3.3. 재열관부 화학세정시 필요한 유량

재열관부에 대해서도 마찬가지로 침전입자 배출유량을 구할 수가 있고, 이를 계산한 것이 Table 2 에 요약되어 있다. (2) 재열 저온 어셈블리 튜브에는 수평방향, 수직방향으로 연속적으로 진행하면서 열전달을 받는 내경 55.5 mm 의 가는 배관이 1105 가닥 존재한다. 이 튜브의 총단면적은 2.6253 m² 이고, 이 단면적에 유속 0.09 m/s를 적용하면, 침전물 배출에 필요한 최소 유량은 14.1766 CMM 이 된다. 이 값은 물-주증기관의 화학세정에 필요한 유량 및 재열배관의 다른 부분의 화학세정에 필요한 유량의 약 두배에 해당하는 양으로, 이 때문에 화학세정에 필요한 펌프용량, 모터용량, 전기용량 등 모든 값들이 두배가 되어야 한다는 의미로 회피하고 싶은 경우이다.

이 문제는 재열배관의 도면과 화학세정 방법을 검토하면 해결할 방법이 있다. 재열배관은 터빈에서 중간 팽창한 스팀을 끌어다가 보일러에서 다시 가열한 후 저압터빈으로 보내는 배관이다. (2) 재열 저온 어셈블리 튜브에는 스팀이 수평과 수직상방향으로 가므로, 화학세정시에는 세정액의 흐름을 반대로 하면, 세정액이 수평과 수직하방향으로만 흐르므로, 침전물은 큰 유량 없이도 중력에 의해서 배출될 수가 있다.

세정액을 역방향으로 순환시키면서 세정할 경우, 이 물질 배출에 필요한 유량을 계산한 결과를 Table 3 에 나타내었다. 재열배관 전체를 화학세정하는데 필요한 유량이 8.924CMM 으로 63% 수준으로 감소했다. 물-주증기관의 화학세정에 필요한 유량과 유사한 수준으로 동일한 펌프를 활용할 수 있다.

4. 화학세정시의 압력손실 및 필요 펌프 사양

4.1. 개요

화학세정에 필요한 유량이 계산되었으므로, 이 유량이 배관을 흐를 때 발생하는 압력손실을 계산하면, 화학세정에 필요한 펌프의 사양을 알 수 있고, 주어진 펌프로 화학세정할 때, 작동점 유량 등을 계산할 수 있다.

단순한 배관에서도 이와 같은 계산을 수작업으로 하는 것은 Moody 선도로 표시되는 배관에서의 유량-압력손실 관계의 비선형성으로 인해서 쉽지가 않다. 이와 같이 배관망에서의 유량-압력손실, 펌프의 작동점 등을 계산해주는 소프트웨어들이 있는데, 여기서는 영국 Flite 사의 Piping Systems Fluid Flow (이하 PSFF) 를 사용한다.

영흥화력발전소 보일러 배관은 수만개가 넘는 배관 및 곡관, 접합관 등의 배관요소들이 복잡하게 구성되어

있어서 전체를 PSFF 에 입력하는 것도 수개월이 걸리는 작업이다. 여기서는 전체 배관을 Table 1 과 Table 3 에 나타낸 24개의 직렬로 연결된 배관그룹으로 분리하고, 각 배관그룹 내에서 동일한 직경의 병렬 배관들은 유량이 분배된다고 가정하여, 하나만 계산함으로써 배관유동해석을 단순화하였다. 본 논문에서는 두 예만 나타내고, 나머지 계산과정은 강신형과 김진권⁽³⁾ 을 참고하도록 한다.

4.2. 주 물공급관의 배관유동해석 예

주물공급관 부의 배관유동해석을 위해서 도면으로부터 Fig.6 의 배관망 정보를 구했다. 왼쪽아래에 있는

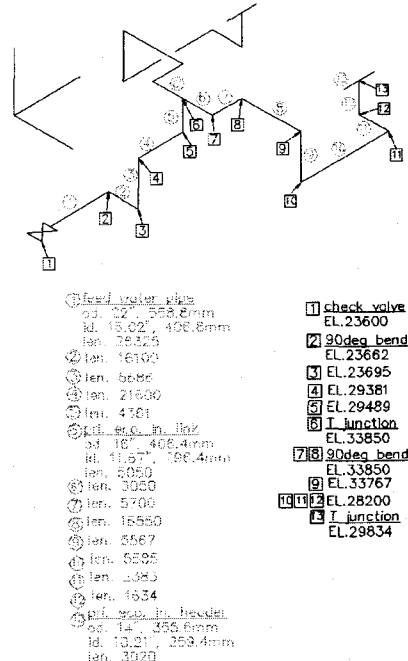


Fig. 6 Schematic of the main feed water pipe

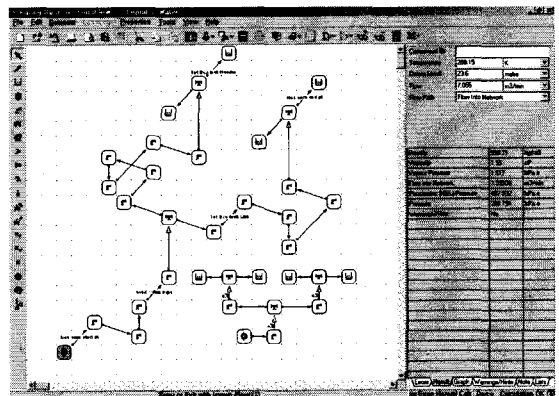


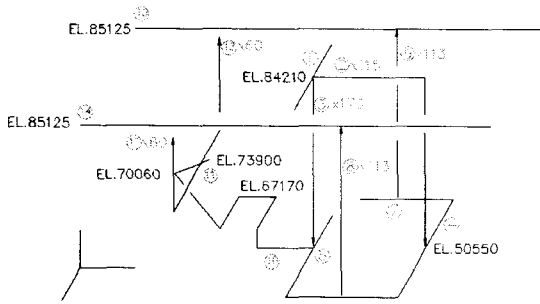
Fig. 7 PSFF Analysis of the main feed water pipe.

체크밸브를 통해서 주물공급관으로 세정액이 공급되고, 몇개의 곡관을 통해서 높이가 변하면서, 양쪽의 1차 절단기 튜브 입구헤드들로 분기가 되어 나간다

이를 PSFF에 입력하여 Fig.7 에서와 같이 나타내고, 배관요소의 사양과 위치 등의 정보를 입력하였다. 그림의 오른쪽 아래에는 반복되는 곡관 등의 요소를 갯수로 입력하여, 간략하게 구성한 것을 나타낸다. 계산결과와는 동일하며, 다른 요소의 계산에서는 이와 같이 간략화된 배관망을 사용하여 입력하였다.⁽⁴⁾

확보한 도면은 조립도면으로, 곡관이나 티 등의 세세한 형상이 없으므로, 도면으로 부터 파악하여, 입력한 배관구성과 실제 배관구성은 차이가 있을 수 있다. 그러나, 도면확보, 현장 답사를 통하여 확보할 수 있는 최대한의 자료를 활용하여 합리적으로 입력하였다.

주 물공급관의 입구에서 화학세정유량인 7.055 CMM 의 세정액이 유입될 때, 두 1차 절단기 튜브 입구헤드에 이르는 압력손실은 4.412 kPa 로 계산되었다.⁽³⁾ 다른 배관요소에서도 동일한 방법으로 배관유동 해석을 하여 그 결과값들을 Table 1 에 정리하였다.



- ① back pass roof outlet header
id: 150.0mm, [assumed]
len: 19.428
- ② back pass roof fin-welded panel tube
back pass upper lower rear fin-welded panel tube
od: 60.5mm, 12.5, id: 46.9mm
len: horiz: 141.72
len: vert: 336.27
- ③ back pass front access tube
back pass front fin-welded panel tube
od: 57mm, 12.5, id: 42mm
len: 336.60
- ④ back pass lower rear front header
od: 150, 400.4mm
id: 116.7, 295.4 mm
len: 19.428
len: back pass depth
- ⑤ back pass lower side header
od: 150, 400.4mm
id: 116.7, 295.4 mm
len: 19.428
len: back pass depth
- ⑥ back pass upper fin-welded panel tube
od: 57mm, 12.5, id: 42mm
len: 336.60
- ⑦ back pass lower extension pipe inlet pipe
od: 405.4mm, 152.5, id: 301.4mm
len: horiz: 140.0
len: vert: 180.0
len: horiz: 600.0
len: horiz: 600.0
len: slope: 40.75
- ⑧ back pass extension side inlet header
od: 405.4mm, 152.5, id: 301.4mm
len: slope: 54.33
- ⑨ back pass extension floor fin-welded panel tube
back pass extension side fin-welded panel tube
od: 50.0mm, 12.7, id: 37.3mm
len: horiz: 107.2
len: vert: 180.0
- ⑩ back pass upper side header
od: 150.0mm, 400.4mm
id: 116.7, 295.4mm
len: 208.12

Fig. 8 Schematic of the back pass pipe & tube system

4.3 백 패스 배관 및 튜브 시스템의 배관유동해석 예

백 패스 배관 및 튜브 시스템 부분은 로에서 나온 배기가스의 고온을 활용하여 증기를 더 과열상태로 만드는 부분이다. 도면검토 및 현장답사 결과, 이부분에는 Fig.8 에 나타낸 바와 같이 굵은 파이프 몇개와 가는 튜브 수백개 병렬로 흐르는 것으로 파악되었다. 이 경우에 다른 부분과 같이 유량 분배를 예측할 수 없기 때문에, 전체 수백개의 요소를 Fig.9 와 같이 직접 입력하여 배관망 유동해석을 실시하였다.

화학세정유량인 7.055CMM 을 주입할 때, 각 수직배관에서의 유량으로부터 계산된 유속이 침전입자 배출에 충분함을 확인하였고, 압력손실을 계산하여 Table 1 에 같이 나타내었다.

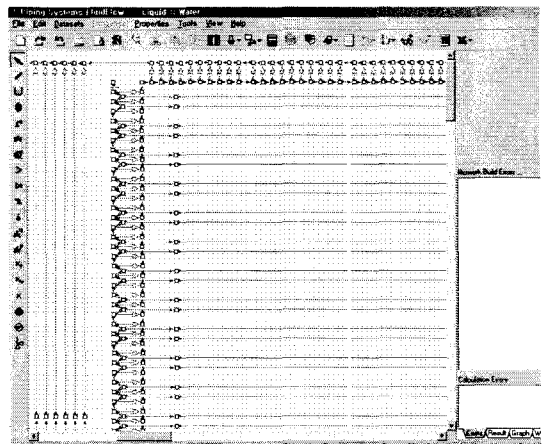


Fig. 9 Piping Systems Fluid Flow Analysis of the back pass pipe & tube system.

4.4 펌프 사양 결정 및 작동점 예측

Table 1과 3 으로 부터, 물-주증기관 배관과 재열배관의 화학세정을 위해 필요한 유량은 각각 7.055CMM 과 8.924CMM 이고, 이때의 압력손실은 각각 77.9kPa 과 1.3 kPa 임을 알 수 있다. 이때, 화학세정을 위해 필요한 펌프양정은 사양정 80m 정도를 더해서 결정해야 하므로, 유량 9CMM 에서 90m 정도의 양정이 나오는 펌프면 화학세정에 사용될 수 있음을 알 수 있다.

화학세정업체에서 보유하고 있는 펌프 모델 H2515-700 은 정격에서의 유량이 408 ton/h 즉 6.8 CMM 이고, 헤드는 170 m 이다. 이 펌프로 화학세정을 실시할 때의 펌프작동점 및 유량, 수직배관에서의 유속을 파악하기 위하여, 펌프의 성능곡선을 PSFF 에 Fig.10 에서와 같이 입력하였다. 또, Table 1, 3 에서 계산된 유량-압력손실값을 가지고, 물-주증기관 및 재열배관을 각각 PSFF 의 Kv 손실요소로 모델링하여 입력하였다.

물-주증기관을 모델링한 Kv 요소와 화학세정용 펌

프 및 교축밸브로 구성된 Fig.10의 배관망에서, 교축밸브를 조절하면, 유량 13 CMM, 양정 110 m 에서 펌프가 작동하게 할 수 있다. 이 유량은 각 수직상방향 배관에서 침전입자를 수직상방향으로 배출하기에 충분한 유속을 발생시킨다.

재열배관에 대해서도 같은 방법으로 펌프의 작동점을 예측하면, 재열회로에 화학세정액을 스팀의 흐름과 반대방향으로 작동시킬 때, 펌프는 유량 14.5 CMM, 양정 90 m 정도에서 작동할 수 있음을 알 수 있다.

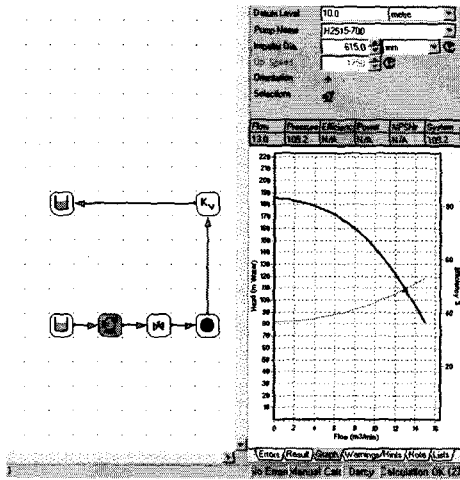


Fig. 10 Modelling of the water-steamline as Kv element and prediction of pump operating point with PSFF

5. 결론

영흥화력발전소의 보일러 배관의 화학세정시 대표적인 침전 이물질로서 직경 0.2 mm 인 쇄구슬을 가정할 때, 침전 이물질들을 수직상향 배관에서 배출하는데 필요한 유속은 0.09 m/s 정도이다. 주 수증기 배관 및 재열배관의 모든 수직상방향 배관에서 이 유속을 내기

위해서는 각각 7.055 CMM 과 8.924 CMM 의 유량을 송출해야 하고, 이 때 발생하는 압력손실은 각각 76.9 kPa 과 1.229 kPa 이다. 단, 재열회로의 배치상 재열회로의 화학세정 시에는 원래의 재열 스팀이 순환하는 방향의 역방향으로 화학세정액을 순환시켜야 한다.

이 유량-압력손실 관계와 약 90 m 에 달하는 보일러 배관 높이에 의한 실양정 및 화학세정에 사용될 정격유량 408 ton/h, 양정 170 m 인 화학세정용 펌프 H2515-700의 성능곡선을 고려하여, 영흥화력발전소 보일러의 주 수증기 배관 및 재열배관의 화학세정시의 펌프 작동점을 계산해 보면, 주 수증기 배관의 산세정시에는 유량 이 약 13 CMM 정도가 흐르고, 재열배관의 산세정시에는 유량이 약 14.5 CMM 정도에서 작동하도록 할 수 있다. 따라서 이 펌프를 사용한 화학세정시 설정한 침전입자들의 배출을 효과적으로 달성할 수 있다.

후 기

본 연구를 지원해 주신 (주)방산테크노로지에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 영흥화력발전소 관련도면, 2000, by Alstom, ABB Combustion Engineering Inc., Doosan Heavy Industries & Construction Co. Ltd, and Korea Electric Power Corporation.
- (2) Frank M. White, 1995, Fluid Mechanics, Third Edition, McGraw-Hill
- (3) 강신형, 김진권, 2003, 영흥화력발전소 보일러 증기관 부의 화학세정 배관유동해석, 서울대학교 유체기계연구실 보고서, TML-TR41
- (4) Flite Software Ltd., 2000, A Guide to Using Piping Systems Fluid Flow V2.x