

염소 바이패스 설비 개발에 대한 연구

이현수*•신상백•홍창식

<동양중앙연구소>

1. 서 론

키른내에서의 폐기물의 소각은 유해 물질의 매우 높은 파괴율과 잔여 폐기물이 생성되지 않는다는 면에서 매우 우수한 것으로 평가되고 있다[1]. 또한 선진국들을 중심으로 폐기물의 소각을 통해서 유연탄이나 중유를 대체하는 열량원으로 사용하고자 하는 시도들이 있어왔으며 국내에서도 시멘트사들을 중심으로 시험적인 연구가 진행되고 있다. 그러나 이러한 폐기물의 시멘트 공정내에서의 소각은 염소 및 알칼리 순환량을 증가시키게 되며, 이에 따라 요구, rising duct 그리고 1 단 사이클론 등에 코팅을 형성시키며 공정 불안을 야기하게 된다. 이러한 순환량의 증가에 따른 공정 불안정에 의해 폐기물의 연료 대체율은 제한을 받게 된다.

이러한 순환 물질을 제거하기 위해서는 순환 물질의 농도가 가장 높은 요구에서 바이패스 시키는 설비의 사용이 일반적이다. 하지만 알칼리 바이패스의 경우에는 요구 가스의 10% 이상을 계외로 배출하게 되어서 많은 열손실과 더스트의 배출이 있게 된다. 최근 들어 일본의 시멘트 엔지니어링사들이 폐기물 소각시 염소 순환량의 증가 문제를 해결하기 위해 염소 바이패스 설비를 개발하였다. 염소 바이패스 라인인 알칼리 바이패스와는 달리 미량의 요구 가스를 바이패스하는 것으로 큰 성과를 거둘 수 있는 것으로 알려져 있다[2]. 본 연구에서는 일본의 Ube 및 Chichibu Onoda 시멘트

에서 각각 개발된 바 있는 바이패스 라인을 검토하고, 이를 토대로 당사에 이 시스템을 적용하는 경우에 적합한 공정 조건 및 설계치를 도출하고자 하였다. 설계치의 도출 방법은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)기술을 이용한 열유체 해석을 주로 사용하였으며, 이를 이용한 설계치의 타당성 검토 작업도 함께 수행되었다.

2. 염소 제거를 위한 이론적 배경

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 요구 가스의 바이패스율에 대해 휘발 물질의 제거율은 휘발 물질에 따라 현저히 다르다[2]. 즉 요구 가스의 5%를 바이패스할 때 염소의 제거율은 90%를 상회하는 반면에 K_2O , SO_3 , Na_2O 의 경우는 각각 약 15%, 8%, 5%의 제거율을 보인다. 이러한 바이패스 비율에 대한 낮은 제거율로 인해 많은 고온 가스를 계외로 배출하게 되므로 과다한 열손실을 초래한다. 더욱이 10% 이상의 바이패스율에 따라 배출되는 더스트의 양도 매우 크기 때문에 이의 처리 문제도 대두된다. 그러나 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 염소의 경우 5%의 바이패스량으로 90%를 넘는 제거율을 보이며 2%의 바이패스 량 정도면 순환량을 충분히 제거할 수 있는 것으로 보고 되고 있다[2].

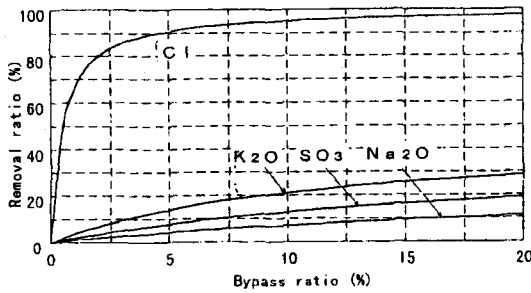


Fig. 1 Relationship between the removal ratio of volatile components and the bypass ratio of kiln exhaust gas [2].

또한 염소 바이패스 설비는 다음 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 더스트의 입도 분포에 따라 염소 함량이 크게 다르고, 대부분의 염소 성분이 미분에 함유되어 있기 때문에 바이패스후 사이클론과 같은 분급 설비를 통해 조분을 다시 요구로 돌려보내고 미분과 가스만을 처리한다면 더스트의 양을 많이 줄일 수 있다. 그리고 바이패스 가스가 작으므로 spray tower 와 같은 별도의 설비를 설치하지 않고도 냉각용 공기만으로 집진이 가능한 온도로 냉각시키는 것이 가능하다. 이와 같은 이유에 의해 알칼리 바이패스의 경우와는 달리 염소의 바이패스는 작은 열손실과 적은 더스트 배출로서 원하는 목적을 얻을 수 있다.

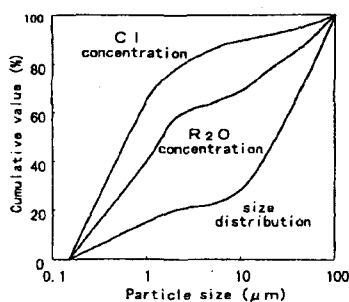


Fig. 2 Cumulative bypass dust particle size distribution and the concentration of volatile components in the bypass dust [2].

3. 일본사들의 설비 검토

3.1 ChichibuOnoda 시멘트사 설비 검토[2]

Fig. 3 에 도시한 바와 같이 요구에 경사진 형태로 설치되어 있는 바이패스 probe 와 냉각용 팬을 이용하여 요구가스를 바이패스한다. 이후 사이클론을 거쳐 조분을 집진한 후에 열교환기 혹은 보일러를 거쳐서 이후 백필터로 향하게 된다. 바이패스 probe 의 위치는 요구에서 휘발된 염소의 농도가 가장 높으면서도 더스트의 배출량을 최소화 하기 위해서 더스트의 비산량이 적은 곳을 선정해야 한다.

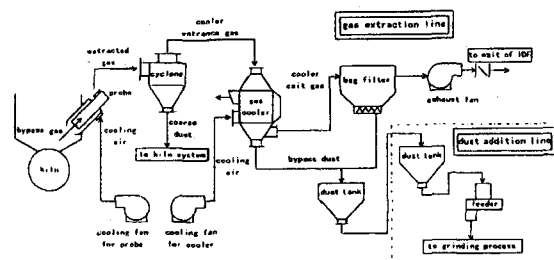
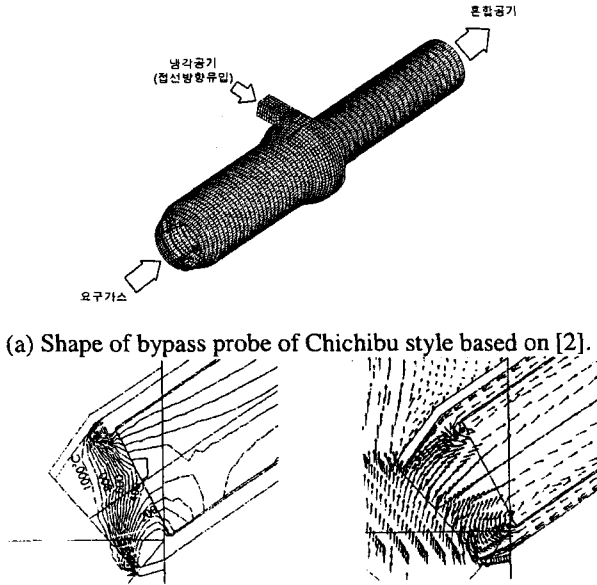


Fig. 3. Process diagram of chlorine bypass process of Chichibu-Onoda[2].

바이패스된 요구가스는 probe 의 선단을 보호하고 내부의 코팅을 방지하기 위해 probe 에 접선 방향으로 진입하는 냉각 공기와 혼합되면서 사이클론으로 진입한다. 이로부터 전술한 바와 같이 더스트 입경에 따라 염소 농도가 차이가 나기 때문에 이를 적절히 분급할 수 있는 분급 성능을 가져야만 염소제거율을 최대화 할 수 있다. 이후 덕트를 지나 열교환기를 거치게 되는데 이 열교환기는 냉각 공기와 뜨거운 공기의 혼합을 통한 직접적인 방식이 아니고 간접 방식의 열교환기로 구성된다. 냉각된 공기는 최종적으로 백필터를 거치게 되고 이후 깨끗한 공기는 계외로 배출되고 더스트는 클링커 콘베이어로 이송된다.

라이징덕트 내부에서 더스트의 비산이 적은 곳을 선정하여 probe 위치를 결정하는 것과 함께 probe 선단 부분의 유동을 적절히 형성시키서 probe 의 선단의 보호와 함께 코팅의 형성을 방지

하는 것은 매우 중요하다.



(a) Shape of bypass probe of Chichibu style based on [2].
 (b) Temperature and velocity variation at probe inlet section[2]

Fig. 4 Computational geometry of probe and computational results of probe section of Chichibu.

Fig. 4(a)에 나타난 이중관 형태의 바이패스 probe 형상은 정확한 design 은 아니고, 당사에서 문헌[2]을 토대로 재구성한 것이다[2]. Fig. 4(b)에는 Chichibu사에서 수행한 열유체 해석 결과인 온도와 속도 분포를 각각 나타내었다. 선단 보호용의 냉각 공기가 이중관 구조로 되어있는 probe 선단에 접선 방향으로 유입되면서 선단 부분을 보호하게 되며 바이패스 가스와 합쳐지면서 외벽 부분에 와류를 형성시켜서 덕트에 코팅이 발생하는 것을 방지 시킨다. Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 기울어져 있는 경사각이나 요구 가스의 유동 현상을 고려한 적절한 형태의 설계 및 운전 조건이 핵심 기술이다.

3.2 Ube 사 설비 검토[3]

Fig. 5에 나타난 바와 같이 라이징 덕트에 수직으로 probe가 설치되어 있고 여기에 하부의 팬

으로부터 냉각공기가 냉각실에 접선 방향으로 진입 되면서 이후 사이클론에서 조분을 회수하는 동시에 뜨거운 바이패스 가스와 냉각 공기의 혼합을 진행한다. 이후 긴 덕트를 통해 더욱 냉각이 진행되며 이후 백필터를 통해 미분을 집진한다.

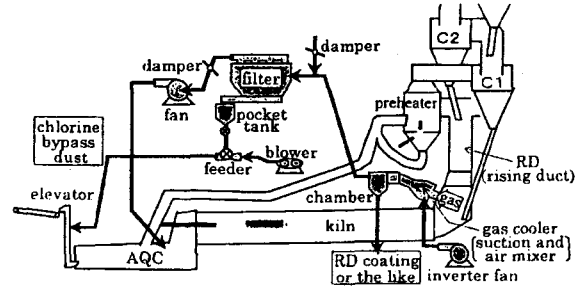
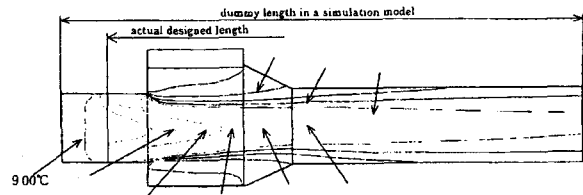


Fig. 5. Process diagram of chlorine bypass process of Ube [3].

선회하면서 진입 되는 냉각용 공기는 orifice 효과를 보이기 때문에 요구측으로 역방향의 와류가 형성되면서 probe의 선단을 보호하며 코팅의 발생을



방지하게 된다 [3]. Fig. 6에 Ube사의 probe에 대한 열유체 해석 결과를 나타내었다 [3].

Fig. 6 Temperature profiles of bypass probe of Ube [3].

4. 당사 4,5호 키른 염소 바이패스 시스템 설계 방안

4.1 바이패스 위치

염소 바이패스를 설치할 때 염소의 농축도가 가장 높고, 더스트의 비산이 적은 부분을 선정해야만 추기량을 최소화하면서 높은 제거 효율을 얻을

수 있으며 추기된 더스트의 처리량을 줄일 수 있다 [2]. 전산 모사 결과 4,5 호 키른의 경우는 전면부(Fig. 7 에 표시된 부분)에서 낮은 유속과 순환 유동이 발생하는 것으로 판단되어 최적점인 것으로 사료된다. 보다 정확한 지점의 설정을 위해서는 키른 가동 및 비가동시 요구의 측정과 관찰이 필요하다.

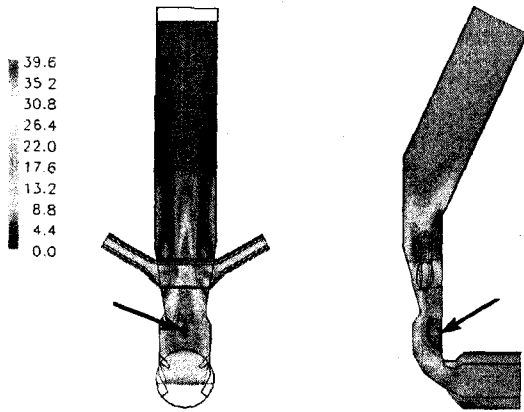


Fig. 7 Velocity profiles in 4, 5K rising duct and kiln outlet.

4.2 조업 조건

바이 패스 설비의 크기 및 조업 조건은 키른 출구 가스와 온도에 의존하기 때문에 키른마다 그 설비의 설계치는 바뀌게 된다. 본 연구에서는 당사의 4,5 호 키른의 조업조건을 고려하고 이를 토대로 바이패스 설비에 대한 설계치를 계산하였다. 다음의 Table 1 에 나타낸 바와 같이 당사 4,5 호 키른의 운전조건을 고려하고 바이패스 가스의 유속을 대략 10m/s 을 기준으로 설정하면 바이패스 가스의 풍량과 이를 냉각시킬 수 있는 냉풍량을 계산할 수 있게된다.

Table 1. Operating condition of 4,5 kiln line

요구 가스 풍량	998 [Nm ³ /min]
요구 온도	992 [°C]
바이패스 풍량	0.7752 [m ³ /s]

바이패스 가스의 유속	10 [m/s]
냉풍온도	25 [°C]
냉풍량	1.2539 [m ³ /s]

4.3 바이패스 probe 의 형태

이 절에서는 바이패스 프로브의 형태에 대해서 Chichibu 사와 Ube 사의 설비를 비교 검토하였다. 라이징덕트로부터 요구가스를 바이패스하는 probe 의 설비를 비교하면 Ube 사의 probe 가 단일관의 사이클론형 구조로서 이중관의 구조를 가지고 있는 Chichibu 사의 probe 보다 단순한 형태를 갖는 이점을 갖는다. 그리고 집진을 위한 요구의 뜨거운 공기를 냉각할 때 Ube 사는 probe 에 일체화되어 있는 냉각실에서부터 분급을 위한 사이클론에 도달되면서 냉각이 완료되는 단순한 형태인데 Chichibu 사의 경우에는 별도의 보일러나 열교환기와 같은 별도의 설비가 요구된다[2]. 반면 Ube 사의 설비는 요구 가스와 냉각공기가 혼합되기 때문에 이 합쳐진 풍량을 사이클론과 덕트 그리고 집진 설비에서 처리하게되고, Chichibu 사의 설비는 뜨거운 요구가스와 냉각공기의 극히 일부분만이 probe 에서 만나고 대부분의 냉각공기는 보일러나 열교환기에서 간접방식으로 열교환이 일어나기 때문에 처리되는 덕트와 집진기의 용량이 상대적으로 작을 수 있다. 이와 같은 설비에 대한 검토후 본 연구에서는 비교적 설비가 간단한 Ube 사의 probe 에 대한 열유체해석을 통한 역설계를 수행하였다. 그러나 향후 설비의 실제 제작시에는 양사 설비에 대한 엄밀한 성능 및 경제성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4.4 바이패스 프로브의 설계치

Fig. 8 과 Table 2 에 4.1-2 에 나타난 당사 4,5K 의 공정 조건에 따라 계산된 바이패스 설비의 probe 에 대한 설계치를 나타내었다. Fig. 8(a)에서 L_2 는 열유체 계산에 쓰인 임의의 길이로서 열유체 해석의 결과로부터 그 최종 길이를 산정할 수 있다.

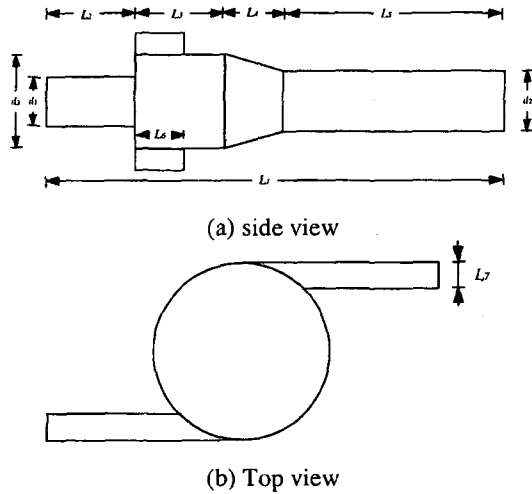


Fig. 8. Detailed dimensions of Ube style bypass probe.

Table. 2 Design values of bypass probe system.

dimension	길이[mm]	dimension	길이[mm]
L_1	3395	L_6	88.5
L_2	380	L_7	177
L_3	440	d_1	314
L_4	361	d_2	342.5
L_5	1342	d_3	542

4.5 열유체(CFD) 해석을 통한 설계 방안의 타당성 검증

다음의 Fig. 9 에 열유체 계산에 사용한 probe 의 계산 격자를 나타내었다. 요구 가스와 냉각 공기의 양은 4.4 절에 나타난 공정 조건을 주었으며, 이들이 혼합하여 혼합 공기로 빠져나가고 이후 사이클론으로 향한다.

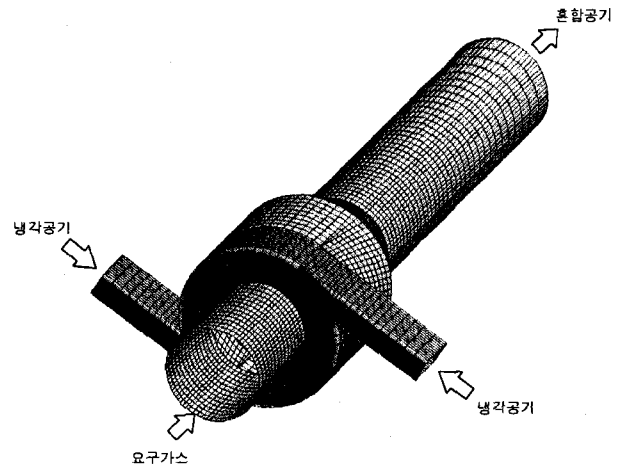


Fig. 9 Computational geometry.

4.6 계산 결과 벡터도, 속도 분포, 온도 분포

Fig. 10 에 probe 에서의 온도 분포를 등고선으로 나타내었다. 유입된 기체는 냉각 공기의 선회류와 만나면서 온도가 하강하고 냉각 공기가 역류하면서 probe 벽면 부분에 저온 지점을 형성하게 된다. 이러한 선회하는 저온 지점을 통해 알칼리 및 염소에 의한 코팅의 방지 및 덕트를 보호할 수 있다. 또한 Fig. 8 과 Table 2 에 나타난 L_2 는 계산을 위한 임의의 길이이고 실제로 probe 를 설치할 시에는 냉풍 공기의 역류가 도달하는 지점인 L'_2 가 되어야 한다.

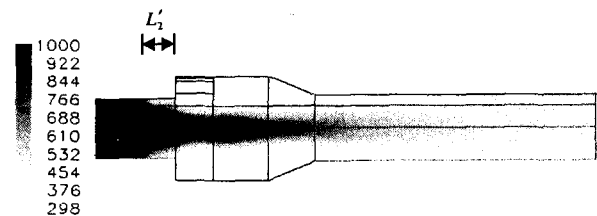


Fig. 10 Temperature profile in probe, cooling chamber and outlet duct(°K)

Fig. 11 에 probe 에서의 유동 특성을 나타내었다. 점선 방향으로 유입되는 냉풍 공기가 orifice 효과를 주어서 바이패스된 공기는 덕트의 중심부를 빠른 유속으로 통과하게 된다. 이에 따라 동그라미

로 표시된 냉풍 공기의 역류 현상이 일어남으로써 덕트에서의 코팅은 방지되고 온도는 하강하여 덕트를 보호한다.

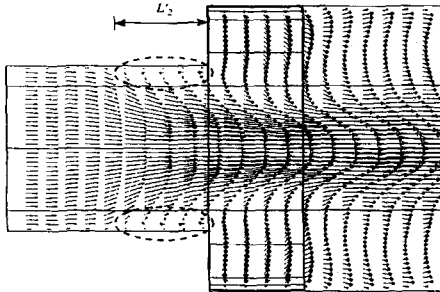


Fig. 11 Flow velocity profile in probe inlet duct section and cooling chamber.

5. 결론

이상으로 폐기물의 연소 시에 발생할 수 있는 염소에 대한 바이패스설비에 대한 검토 및 당사 공정에 적합한 probe 설계에 대한 연구를 수행하였다. Chichibu 및 Ube사에서 각각 개발된 염소 바이패스 설비는 폐기물의 혼소시에 발생할 수 있는 염소 순환량의 증가에 따른 공정 불안정 방지를 위한 좋은 수단으로 판단된다. 본 연구에서는 상대적으로 설비가 단순하다고 판단된 Ube식 probe 설비를 역설계하여 당사의 공정 조건을 기준으로 한 설계를 제시하였다. 향후 실험 연구와 함께 pilot 설비를 통한 실공정 실험을 수행할 예정이다.

6. 참고문헌

- [1] USA Air Resources Board Report No. C-84-020
- [2] Naoki Ueno, Hitoshi Uchida, Hiroshi Harada, Akio Yoshida and Toshiaki Hirose "Stable Kiln Operation and Effective Recycling of Waste Achieved by Chlorine Bypass System", *Procd. Cement*

Manufacturing Technology Symposium, No. 55, 1998 pp24-31

- [3] Fujiwara Masanori, Misumi Seiki and Fujimoto Masaki, "Chlorine Bypass System by UBE", *Procd. Cement Manufacturing Technology Symposium*, No. 55, 1998 pp18-23