

# 습식아민 CO<sub>2</sub> 포집설비의 물 세정 단 설계에 따른 흡수제 손실 영향 평가

한선구\*, 고현신\*, 김성규\*, 최시묵\*

\*대림산업 설계실

## The Effect of Designing Washing Column in Post Combustion CO<sub>2</sub> Capture Plant on the Losses of Amine Solvent

Sun-Gu Han\*, Hyun-Shin Ko\*, Sung-Kyu Kim\*, Si-Mook Choi\*

\*Plant Engineering Office, DAELIM Industrial Co., Ltd. D Tower, 17 Jongno 3-gil, Jongno-gu, Seoul, 03155 Korea

(Received June 9, 2017; Revised June 16, 2017)

**ABSTRACT** : To reduce global warming, there are so many studies, investments and efforts. The Post Combustion CO<sub>2</sub> Capture technology is one of these efforts. But the technologies are having trouble with reducing operating prices. And CCS technology which is using amine solvent uses high price amine solvent. There is solvent losses naturally when operating plant. The solvent loss makes operating and maintenance price higher. In this study, how the washing column of treated flue gas affects the losses of amine solvent and operating was studied.

**초록** : 상업규모의 온실가스 저감 기술 중 대표적인 기술 중 하나인 연소 후 습식아민 CO<sub>2</sub>포집 기술에서 기술의 개발에 중점을 두고 있는 부분이 운영비의 개선 부분이다. 습식아민 CO<sub>2</sub> 포집기술에서 사용되는 아민은 대체로 고가의 아민을 사용한다. 고가의 아민을 사용하기 때문에 설비 운영 중 발생하는 흡수제의 손실이 운영비에 영향을 미칠 수 있고 설비의 용량이 커질 수록 운영비는 더욱 커지게 된다. 본 연구에서는 150MW급 석탄화력발전소 배기가스에 아민흡수법 CCS기술을 적용할 경우 흡수제의 손실이 설비 운영비에 미치는 영향과 물 세정 타워의 설계가 흡수제 손실 절감에 어떠한 영향을 미치는지 살펴 보았다.

**Key words** : Post Combustion CO<sub>2</sub> Capture Plant (연소 후 습식아민 CO<sub>2</sub> 포집설비), Amine Solvent Loss(아민 흡수제 손실), Washing Column (물 세정 타워), CCS(온실가스 저감 기술), OPEX(운영비용)

### 1. 서론

세계 각국에서 파리기후협약을 맺는 등의 기후 변화를 막으려는 노력을 많이 하고 있다. 기후 변화를 막기 위한 노력의 일환의 기술 중 대표적이라고 할 수 있는 기술이 CCS 기술이다. CCS 기술 중 대형화가 가장 용이한 기술로 연소 후 습식아민 포집 기술이 있으며 실제로 연소 후 습식아민 포집 기술이 적용된 상용 설비가 늘어나고 있는 추세이다. 습식아민 CO<sub>2</sub> 포집 기술은 화학흡수법으로 공

#### - 기호설명

CCS: Carbon Capture and Storage(or Sequestration)

wf%: 무게 백분율 (Weight %)

† Corresponding Author  
E-mail sghan@daelim.co.kr

## 습식아민 CO<sub>2</sub> 포집설비의 물 세정 단 설계에 따른 흡수제 손실 영향 평가

정운영에 상당한 양의 에너지가 소비되므로 생산되는 CO<sub>2</sub> 단가 대비 운영비가 상대적으로 많이 들어가는 기술이다. 이러한 고 비용의 운영비를 줄이기 위한 연구가 전세계적으로 많이 이루어 지고 있다. 습식아민 CO<sub>2</sub> 흡수공정에서 요구되는 에너지를 절감하기 위해 특수 아민들이 많이 개발되고 습식아민 공정에 적용되어 사용되고 있는데 이 아민은 전통적인 가스공장이나 정유공장 등에서 사용되는 아민에 비해 고가의 아민들이다. 습식아민 공정에서는 설비 운영 간에 다양한 원인에 의해서 흡수제의 손실이 일어나게 된다. 본 논문에서는 흡수제 손실의 원인들 중 설계로 변경으로 줄일 수 있는 것에 대해 고찰하고 CCS에 사용할 아민흡수제 후보로 언급이 가장 많이 되는 흡수제와 그 가격을 기준으로 물 세정 타워의 단수 설계 변경이 흡수제 손실로 인해 증가하는 운영비용에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다.

## 2. 공정개요 및 운영단가 산정

### 2.1 습식아민 CO<sub>2</sub> 포집 공정

발전소에서 배출되는 배기가스에서 CO<sub>2</sub>를 포집하기 위한 습식아민 공정의 일반적인 공정도는 다음과 같다(Fig. 1). 발전소 배기가스가 송풍기를 거쳐 흡수탑(Absorber)으로 이송되며 흡수탑 내부에서는 CO<sub>2</sub>를 적게 머금은 린아민(Lean Amine)과 만나 CO<sub>2</sub>가 제거 된 상태로 흡수탑 상부로 배출 된다. 이때 흡수탑 내부에서 아민과 CO<sub>2</sub>간의 반응은 발열 반응이다.

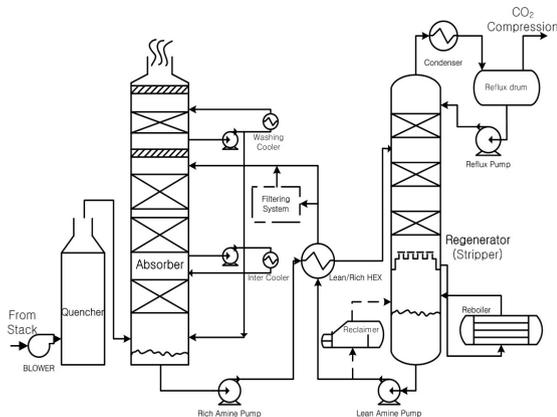


Fig. 1 Process Flow Diagram of Typical CCS using Amine Solvent

CO<sub>2</sub>를 가득 머금은 리치아민(Rich Amine)은 재생탑(Regenerator or Stripper)으로 이송되어 재비기(Reboiler)를 통해 가열되어 린아민과 CO<sub>2</sub>로 분리되며 CO<sub>2</sub>는 사용처에 알맞게 보내 지고 린아민은 다시 흡수탑으로 보내 진다. 이때 재생탑 내부에서 일어나는 반응은 흡열반응이다. 흡수탑 상부에서는 물이 순환되는 구간이 있는데 이 구간을 아민흡수제의 손실을 줄이기 위한 물 세정 타워(Washing Column)라고 한다.

물 세정 단의 기본 작동원리는 다음과 같다. 물이 세정 단을 통과하면서 기상의 아민을 흡수하게 되며 그냥 방치하여 자체 순환시킬 경우 순환되는 물 속에 아민의 농도는 높아지게 될 것이다. 그러므로 세정 단 내부로 순환되는 아민의 농도를 낮추기 위해 순환되는 물보다 낮은 농도의 아민 혹은 Fresh water를 세정 단 입구 배관에 주입하고 세정을 하고 나서 아민 농도가 높아진 물은 하부의 세정 단으로 보내게 된다. 하부로 보내진 물은 농도가 하부의 아민농도보다 낮으므로 하부 단의 아민농도를 낮추는 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 아민 공정 전체 내에서 추가로 주입되는 물 혹은 버려 지는 물이 없도록 설정한 후 연구를 수행 하였다.

### 2.2 공정 내 흡수제 손실

일반적인 아민 공정에서 주로 발생하는 아민의 손실은 아래의 Table 1과 같다. 이 흡수제 손실 원인 중 기계적 손실(Mechanical Losses)과 비말 손실(Entrainment Losses)은 잘못된 설계 그리고 잘못된 보수작업, 설비의 노후화 등으로 나타나는 현상이다. 이와 같이 기계적 손실과 비말 손실은 정상적인 설계 및 운전 상황에서는 문제가 되지 않는 손실이다. 그리고 열화물 생성으로 인한 손실(Degradation Losses)은 흡수제 특성 및 잘못된 운전 등으로 발생하는 손실이다. 증발 손실(Vaporization Losses) 역시 흡수제의 특성으로 인해 생기는 손실이므로 정상 상태에서는 어쩔 수 없는 손실이나 이 손실은 추가 보완설비를 통해 손실 완화가 가능하다. CCS 공정도(Fig. 1)에서 흡수탑 상부에서 증발 손실이 대부분 일어나며 여기에 물 세정 단을 추가 설치함으로써 증발로 인해 발생하는 흡수제 손실 감소를 최대화 할 수 있다. 이렇듯 물 세정 단은 설계 강화로 효과적인 운영비 감소를 달성할 수 있는 부분이기 때문에 물 세정 단 설계에 따른 효과에 대해서 연구를 수행하였다.

Table 1 Typical Amine Solution Losses<sup>(1)</sup>

Mechanical Losses	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leaks at pipe flange/gasket connections</li> <li>- Pressure gauge/sample line purges</li> <li>- Frequent filter changes</li> <li>- Heat exchanger leaks, etc.</li> </ul>
Entrainment Losses	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Damaged or missing mist pads</li> <li>- Tower diameter too small for gas flow</li> <li>- Floodings, etc.</li> </ul>
Vaporization Losses	<ul style="list-style-type: none"> <li>- High amine concentration</li> <li>- High system temperature</li> <li>- Low system pressure</li> </ul>
Degradation Losses	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemical degradation</li> <li>- Thermal degradation</li> <li>- Heat stable salt formation</li> </ul>

### 2.3 운영단가 산정 기준

흡수제 손실이 운영비에 미치는 영향을 살펴보기 위한 설비 용량 기준으로 150MW급 CCS를 선정하였으며 운영비 산정 기준에 있어서는 몇 가지 가정을 하였으며 그 내용은 다음과 같다.

#### 2.3.1 CCS설비 전체 운영 비용 산정

CCS설비의 전체 운영 비용 기준은 흔히들 이야기하는 CCS설비가 경제성을 갖기 위해서 달성해야 한다는 목표인 30\$/ton-CO<sub>2</sub> 기준으로 산정하였다.

#### 2.3.2 흡수제 선정

습식아민을 사용한 CCS 기술을 개발함에 있어 가장 많이 언급되고 사용되고 잘 알려져 있는 흡수제를 기준으로 하였다. 두 가지의 아민을 혼합하여 사용하였으며 첫 번째로는 AMP(Aminomethyl propanol)라는 구조적 안정성과 흡수용량이 큰 아민을 선정하였고 두 번째 아민으로는 Piperazine이라는 흡수 속도가 빠르고 흡수용량이 큰 물질을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 두 물질의 흡수 비율은 38wt% AMP 와 7wt% Piperazine 이다.

#### 2.3.3 흡수제 가격 선정

흡수제를 구매 할 경우 소량 구매와 대량 구매는 그 가격 차이가 현격하다. 실제 설비의 흡수제 구매는 대량으로 이루어 지기 때문에 대량 구매의 가격을 알면 좋을 것이나 실제 구매할 계획이 있지 않은 이상 대량 구매가격을 알기란 쉽지가 않다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 CCS 상용흡

수제 가격 범위로 잘 알려져 있는 10 ~ 20\$/kg 범위에서 중간 가격인 15\$/kg을 채택하였다.

### 2.4 공정모사 프로그램 선정 및 프로그램 Input

Bryan Research & Engineering, Inc. 社の 공정모사 프로그램인 ProMax 4.0을 선정하여 본 논문의 연구를 수행하였다.

150MW급 CCS 설비의 공정모사는 위에서 언급한 흡수제인 38wt% AMP + 7wt% Piperazine 용액 유량 1,300 ton/hr으로 배가스 유량 : 600,000 Sm<sup>3</sup>/hr, CO<sub>2</sub> 농도 : Dry Basis 14.1 mole% (Standard Condition : 1 ATM / 15.6 oC)의 가스를 처리 하도록 구현하였으며 배가스 내의 CO<sub>2</sub> 중 90%를 포집 할 수 있도록 스템을 공급하여 공정모사를 구현하였다.

## 3. 물 세정 타워 설계에 따른 흡수제 손실 비용 계산

### 3.1 물 세정 타워의 설계

Fig. 2의 공정도처럼 물 세정 타워는 흡수탑 상부에서 1 단의 형태로 설계하는 것이 일반적이다. 물 세정 단에서 Pump Around로 세정 단의 온도를 낮추는 것이 일반적인데 이는 다음과 같은 두 가지 효과를 보여 준다.

첫째로 설비 운영에 있어 보충수를 필요치 않게 해 준다. Pump Around를 이용하여 세정 단의 온도를 낮춰 공급받은 배가스의 온도와 비슷하거나 약간 높게 운전을 하면 Absorber 상부로 나가는 처리된 배가스에 함유된 물이 공

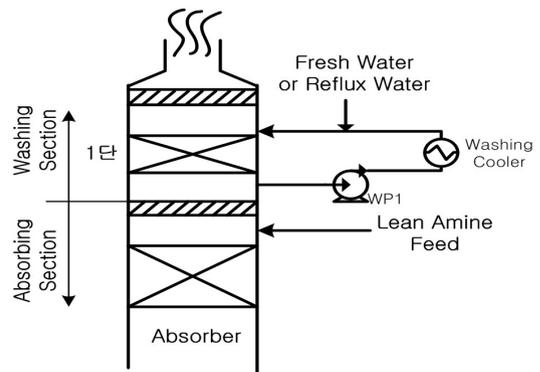


Fig. 2 1 Section of Washing Column

## 습식아민 CO<sub>2</sub> 포집설비의 물 세정 단 설계에 따른 흡수제 손실 영향 평가

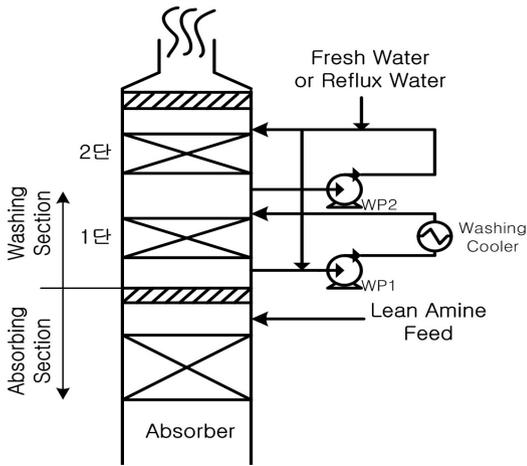


Fig. 3 2 Sections of Washing Column

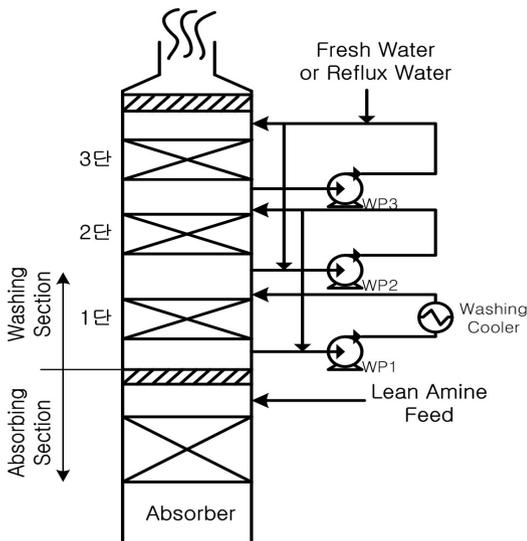


Fig. 4 3 Sections of Washing Column

급받은 가스 내의 함유된 물의 양과 비슷해져 추가 보충수 없이 물의 물질 수지가 맞게 된다.

둘째로 세정 단 내부를 지나는 배가스의 온도가 세정 단 인입 온도보다 낮아지게 되면서 함유하고 있던 물의 응축이 일어나게 된다. 이 응축과정에서 기체상태로 있던 아민이 함께 응축이 되게 되며 이는 흡수탑 하부로 보내져서 시스템 내로 회수되게 된다.

CCS아민공정에서 일반적으로 적용하는 1단의 세정 설계 (Fig. 1, 2)에 세정 단을 2단(Fig. 3)에서 3단(Fig. 4)까지 추가로 설계하여 그 결과를 살펴 보았다.

### 3.2 세정 단계에 주입되는 Reflux Water의 유량 선정

물 세정 단계에 순환되는 물의 아민 농도를 희석 시키기 위한 방법으로 Fresh Water 혹은 Reflux Water를 주로 사용하는데 본 연구에서는 폐수가 발생하지 않도록 설정하고 연구를 진행하였기 때문에 희석 방법으로 Fresh Water 대신에 Reflux Water를 사용하였다. 탈거탑 상부에서 아민을 Washing하기 위한 역할을 하는 Reflux Water 중 일부를 빼서 물 세정단 최 상위 단계에 주입을 하는데 이때 탈거탑의 Washing 효율 저하와 흡수탑 Washing 효율 상승이 Trade-off관계에 있다. 이와 같은 상관관계를 이용하여 Reflux Water 중 20%를 흡수탑 상부로 보내는 것으로 선정하였다. 아래의 그림(Fig.5)을 참조 바란다. 물론 탈거탑에서 발생하는 아민의 손실은 흡수탑에서 발생하는 손실에 비하면 매우 적지만 Reflux Water를 흡수탑에서 많이 끌어다 사용할 경우 탈거탑 상부에서 Reflux Water를 분배하는 액 분배기의 설계가 어려울 뿐 더러 운영방식이나 설계에 따라서는 탈거탑에서 손실되는 흡수제가 상대적으로 많은 경우가 있다. 따라서 절대적인 손실량 보다는 손실 경향성을 보고 Reflux Water의 유량을 선정하였다.

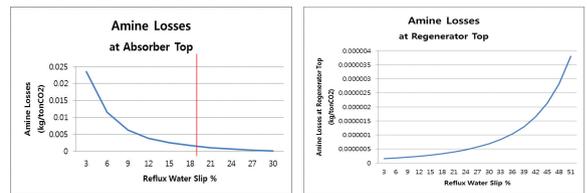


Fig. 5 Amine Losses at Absorber Top (Left), at Regenerator Top (Right)

### 3.3 흡수제 손실량 및 운영비용 계산 결과

환율은 약 최근 3개월간의 평균가격인 1,125 원/USD를 반영하였다. 설비는 1년에 8,000시간 가동 되는 것으로 가정하였다. 또한 세정 단이 추가되면서 발생하는 펌프가 추가 가동되게 되는데 이 펌프의 전력은 1단 추가될 때마다 200kW가 추가로 소모된다고 가정하였고 이때의 전력가격은 한국전력거래소의 2017년 6월1일자 평균 육지 계통한계가격(SMP)인 85.73 원/kWh를 기준으로 계산하였다.

Table 2. Solvent Losses and Operational Cost of Each Cases of Washing Column Design

	Amine Losses (kg/tCO <sub>2</sub> )	Cost of Losses (억원/year)	Operating Cost of Washing Pumps (억원/year)	CCS Plant Operating Cost without Losses (억원/year)	Proportion of Total Cost of Losses (%)
Case1	12.423	2079	0	334.6	621.6
Case2	0.223	37	1.4		11.6
Case3	0.042	7	2.8		2.9
Case4	0.003	0.6	4.2		1.4

흡수탑 상부에 물 세정 단이 아예 없는 경우를 Case 1, 1 단의 세정 단을 추가하는 경우를 Case 2, 2단의 세정 단을 추가하는 경우를 Case 3, 3단의 세정 단을 추가하는 경우를 Case 4로 하여 산출된 계산결과를 위의 Table 2 에 정리하였다.

#### 4. 결론

Case1의 경우 설비의 운영이 아예 불가능 할 정도로 많은 양의 아민의 손실이 일어나므로 논외로 하겠다. 본문에 언급한 바와 같이 Case 2의 경우는 기본적인 설계이다. Case 2를 기준으로 Case 4까지 비교할 필요 없이 Case 3와 비교만 하더라도 150MW급 CCS설비를 운영함에 있어 연간 흡수제 보충 비용만 약 28.6억원의 절감이 가능하며 이는 설비 전체 운영비용에 약 8.7%에 달하는 비용의 절감이 가능한 것이다. 300MW ~ 500MW 급으로 용량이 커질 수록 그 영향은 더욱 커지게 된다.

흡수제 손실 비용이 매우 크기 때문에 CCS설비의 설계

시 부수적인 설비라고 간과하지 말고 본 논문에서 제시한 방법 이외에도 다른 여러 방법에 대해서 고민하고 설치비와 운영비도 함께 고민하면서 설계를 해야 경쟁력 있는 CCS기술이 개발 될 것이며 좋은 많은 기술들이 개발 될 것이라 기대한다.

#### 감 사

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(NO. 20142010201810).

#### 참고문헌

- (1) Micheal H. Sheilan, Ben H. Spooner, Egbert van Hoorn, 2015, Amine Treating and Sour Water Stripping, Tenth Edition, Sylphur Experts Inc., Calgary, Alberta, Canada, pp. 92~95. 