

Flotation cell 연구 (1) - Lab. Flotation cell 및 injector 해석

이종필¹⁾, 최병학¹⁾, 박광만²⁾

¹⁾ 한솔기술원 ²⁾ 한솔제지

1. 서론

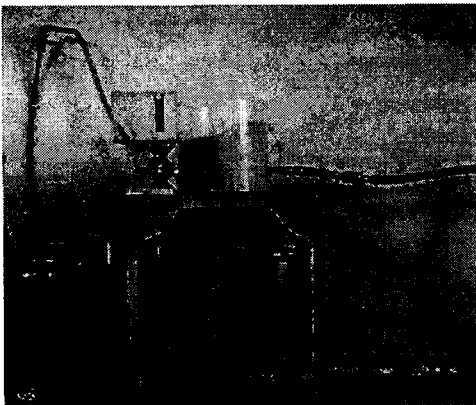
Flotation은 예로부터 광산에서 선별 부유법으로 사용한 것을 제지에 응용하면서 현재까지 탈목 공정에서 전세계적으로 널리 사용되고 있다. Flotation은 기포의 소수성을 이용하여 소수성 잉크와 기타 소수성을 띤 이물질들을 제거하는 방법이다. 탈목 공정 중 유일하게 잉크를 제거하는 공정으로 탈목공정에서는 심장과 같은 역할을 한다. 물론 washing 또는 washing + 백수 정화를 통하여 잉크를 제거하기도 하나, washing이 친수성 잉크와 입자 크기가 작은 잉크에 적합하므로 아직까지는 Flotation과 상호 보완적으로 사용되고 있다. 당사에서도 일반적으로 Flotation 법에 의하여 잉크를 제거하고 있다.

본 연구에서는 잉크 제거 효율을 증대시키기 위하여 탈목공정 중 잉크제거 기능을 하는 Flotation cell의 구조 및 역할을 알아보고, 이에 대한 해석을 시도하기 위하여 Lab. flotation cell을 제작하여 공장에 설치된 flotation cell을 모사하여 보았으며, flotation cell에서 가장 중요한 part인 injector의 역할과 이에 대한 해석을 시도하였다.

2. 재료 및 방법

1) 재료

본 실험에서는 Flotation cell에서의 흐름 및 현장과의 데이터 유사성을 위하여 Deadzone이 존재하는 기존 Voith 부상 탈목기 대신 실험자의 오차를 최대한 줄일 수 있는 CFC cell 형태의 Lab. Flotation cell을 자체 제작하여 실험을 수행하였다. 내부를 관찰하기 위하여 투명한 아크릴을 재료로 제작하였다. injector는 step diffuser형으로 아크릴로 제작하였고 dimension 영향을 관찰하기 위하여 다양한 크기의 injector를 제작하여 실험을 수행하였다.



「그림 1」 제작된 Lab. Flot. Cell

Lab. Flotation cell 사양

- 모노펌프, 유량계, 유량 controller, Air flow meter, injectors

2) 실험 방법

본 실험에서는 injector로 흡입되는 공기량은 설치된 air flow meter로 측정을 하였고, pump에 의하여 유입되는 유체의 유량은 설치된 flow meter (magnetic type) 를 이용하였다.

ㄱ) Step diffuser 해석

기존 현장에서 사용되는 step diffuser의 dimension과 유입되는 지료의 양을 실측한 후 계산하여 dynamic analogy를 유추하였다.

ㄴ) Air/Stock ratio 변화

동일 dynamic analogy를 갖는 injector에서 air/stock ratio가 어떻게 변하는가를 관찰하기 위하여 4가지 injector를 제작하고 유량을 변동시키면서 유입되는 공기량을 측정하였다.

ㄷ) Step diffuser dimension 영향

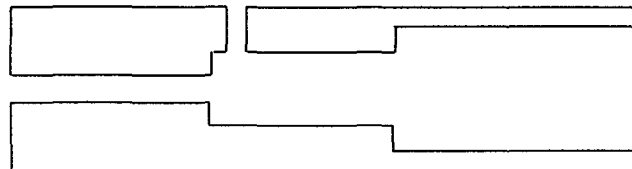
흡입되는 공기량에의 Step diffuser dimension 영향을 파악하기 위하여 실험 계획법 중 Box, Hunter & Hunter method를 사용하여 실험을 수행하였다.

3. Step diffuser 해석

1) Voith - sulzer사의 Step diffuser 분석 및 그 응용 실험

Step diffuser를 해석하기 위하여 Esher-Wyss社 CFC cell에 유입되는 지료유속과 injector 내부 직경을 실측하여 보았다. Step diffuser의 개략적인 모양은 [그림-2]와 같다. Primary cell의 경우에 유량은 보통 30,000 l/min이고, CF Compact flotation cell주위에 50개의 injector가 설치되어 있다. 그러므로 한 injector당 주입되는 유량은 600 l/min가 된다. 실측한 Step diffuser의 내부 직경은 31, 41, 56mm이다. 마찬가지로 secondary cell의 경우에 계산을 하면 한 secondary injector당 유량이 300 l/min이다. 각 유량에 따라 내경이 변하는데 실측치를 [표-1]에 정리하였다.

정해진 유량에서 각 Step에서 속도를 계산하면 [표-2]와 같다. 그 결과를 보면 primary cell과 secondary cell은 유량과 그에 따라 cell tub의 크기가 다를 뿐 각 step diffuser내 step에서의 속도는 거의 유사하다. 결국 탈목 process에서 사용되는 step diffuser는 유속이 첫번째 직경에서 14.4m/s, 두번째에서 8.1m/s, 세번째에서 4.4m/s가 되도록 설계되어 있다는 것을 알 수 있다. 세 부분에서의 Reynolds number를 살펴보면 모두 난류 영역에 포함되어 있는 것으로 보아 심한 난류가 발생함을 알 수 있다.



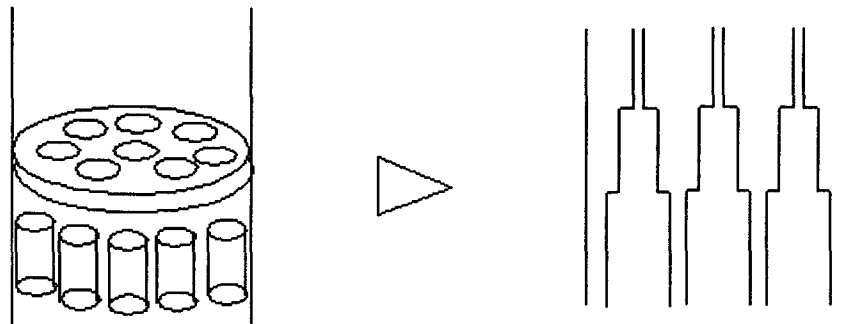
「그림 2」 Step diffuser 내부 간략도

| | D1 | D2 | D3 | Stock flow | Inlet Pr |
|----------------|----|----|------|---------------|------------|
| Primary cell | 31 | 41 | 56mm | 550~600 l/min | 0.9bar |
| Secondary cell | 21 | 28 | 38mm | 270~320 l/min | 1.2~1.3bar |

[표-1] 정상적인 CFC cell의 primary와 secondary injector dimension 및 조건

| Primary | D(mm) | V (m/s) | N_{Re} | Secondary | D(mm) | V (m/s) | N_{Re} |
|---------|-------|---------|----------|-----------|-------|---------|----------|
| Step 1 | 31 | 14.15 | 446,400 | Step 1 | 21 | 14.43 | 302,400 |
| Step 2 | 41 | 8.09 | 332,100 | Step 2 | 28 | 8.12 | 226,800 |
| Step 3 | 56 | 4.34 | 246,400 | Step 3 | 38 | 4.4 | 167,200 |

[표-2] 계산에 의한 primary와 secondary injector의 직경별 속도와 난류정도(N_{Re})



[그림-3] Voith injector⁴¹⁾와 Eco-cell step diffuser module 개념도

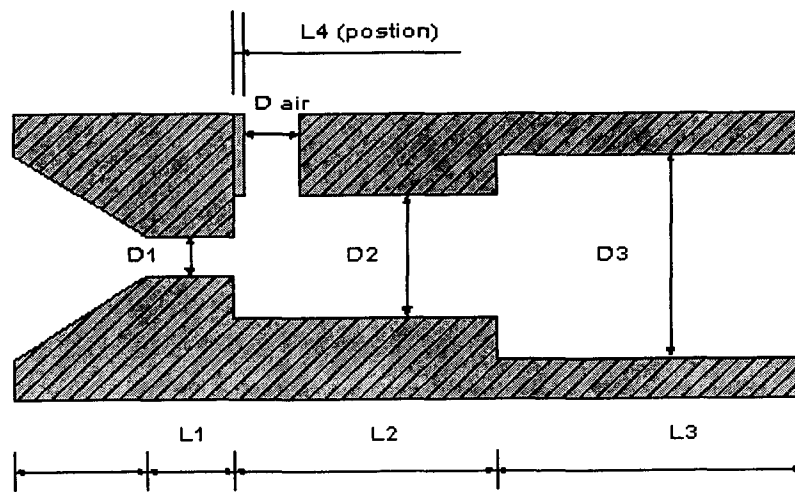
Eco-cell의 step diffuser module을 해석하는데 위의 연구결과를 이용해 보도록 하겠다. Eco-cell은 기존 voith cell과 CFC cell의 장점만을 선택하여 만든 것으로 tub는 voith tubular cell이고 injection part는 step diffuser를 사용하였다. 당사에서 DIP Line 중 일부의 voith cell을 injector의 교체만으로 Eco-cell로 개조하였고 그 결과 탈목 효율이 향상되었다. [그림3] 설계상에 의하면 injector를 변경함으로써 40%에서 60%로 공기흡입률이 20% 향상 되게 된다. 기존의 injector로는 설계상의 공기흡입률인 40%에도 훨씬 못 미치게 운전되고 있었다. 그 이유는 기존의 Injector는 지료가 분산되고 건조되면서 옆부분의 공기 흡입구를 막기 때문에 공기 흡입률이 저하되는 현상이 발생하였으나 step diffuser module 로 교체되면서 개선되었다. 결국 기존보다 공기 흡입률이 상승되었고 이로 인하여 탈목 효율이 향상된 것으로 보인다. injector 구조의 변경으로 탈목 효율 향상을 가져오는 좋은 예라고 할 수 있다.

⁴¹⁾US Patent 4,726,897

앞서 계산해낸 step diffuser내부에서의 유속을 참고로 하여 Eco-cell에서의 step diffuser module의 dimension이 어떻게 되어야 하는 가를 밝혀 내겠다. Modified Eco-cell로 유입되는 유량은 $13.2\text{M}^3/\text{min}$ 이고, 한 stage에 3개의 step diffuser module이 존재하므로 각 module당 약 $4.4\text{M}^3/\text{min}$ 의 유량이 공급되며, 한 Module에 9개의 step diffuser가 존재하므로 한 diffuser 당 유량이 약 $500\text{ l}/\text{min}$ 이 된다. $500\text{ l}/\text{min}$ 유량을 정해진 유속($14.4, 8.1, 4.4\text{m}/\text{s}$)로 만들기 위해서는 직경이 각각 $27, 36, 49\text{mm}$ 가 되어야 한다는 것은 계산으로 알 수 있다. 현재 설치된 injector module을 실측한 결과 예측과 정확하게 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로 Voith-Sulzer step diffuser의 design은 동일한 Dynamic behavior를 가지도록 설계된 것을 알 수 있다.

2) Step diffuser dimension 영향 분석 실험

Step diffuser의 dimension영향을 파악하기위해서 8가지 변수를 추출하여 연구를 진행하였다. 이런 dimension 변수가 영향을 미치는 성질에는 공기/지료비, 생성된 공기 방울 크기 및 분포와 전체 탈목 효율 등이 있다. 이 중에서 본 연구에서는 위에서 언급하였듯이 공기 흡입률에 의해서도 탈목효율에 상당한 차이가 발견되므로 첫 번째 단계로 Air 혼입 비율에 대한 영향만을 먼저 실험을 통하여 알아보기로 하였다.



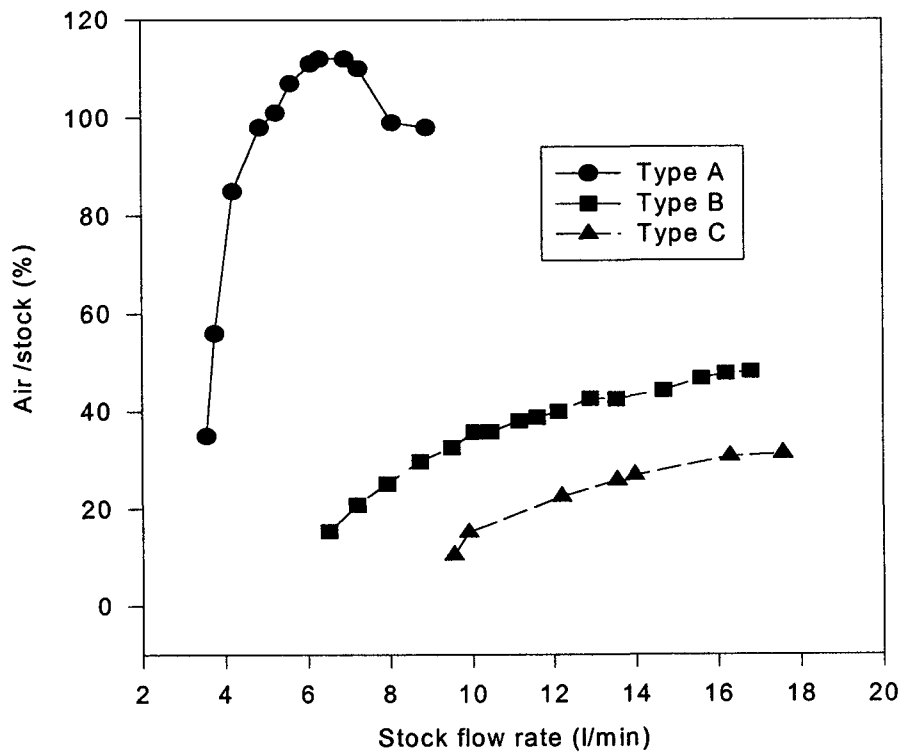
「그림 4」 실험에서 사용된 step diffuser와 설계 영향 변수들

Step diffuser 內 dimension의 영향을 보는데 8개의 인자가 필요한데 실험 수를 감소시키기 위하여 8개 인자 중 first diameter ($D1$)을 일정하게 놓고 나머지 7개의 인자들만 동시에 해석하기로 하였다. 이를 위하여 실험 계획법(Experimental Design) 중 2 Level로 분석을 하는 Box, Hunter & Hunter 방법을 사용하여 각 영향 인자별로 전체 공기 흡입량에 미치는 영향을 파악하여 보았다.

ㄱ) Dimension 공기 흡입량과 흡입되는 공기/지료비에 미치는 영향

Injector를 각각 10, 30, 50 l의 유량에서 step에서의 속도가 14.4, 8.1, 4.4m/s가 되도록 제작하였다. 흥미롭게도 Type B, C는 동일한 공기/지료비를 나타내고 있으나, type a의 Injector는 설계 유속이 나오는 영역이하에서 최대 maximum air/stock ratio가 나타나고 - 최대 공기/지료비도 B,C보다 높다 - 설계 유속 부근에서는 오히려 낮아지는 현상이 발견되었다.

Stock flow rate vs. air/stock



[그림-5] 실험 결과

| Type | D1 | D2 | D3 |
|------|-----|------|------|
| A | 4.0 | 5.0 | 7.0 |
| B | 6.7 | 8.9 | 12.0 |
| C | 8.5 | 11.5 | 15.5 |

[표 3] 실험에 사용된 Injector dimension

Max. Air/stock ratio를 증가시키기 위해서는 동일한 dynamic analogy를 가지지만 큰 직경을 갖는 하나의 injector보다는 여러 개의 작은 직경을 갖는 injector를 사용하는 것이 유리하다.

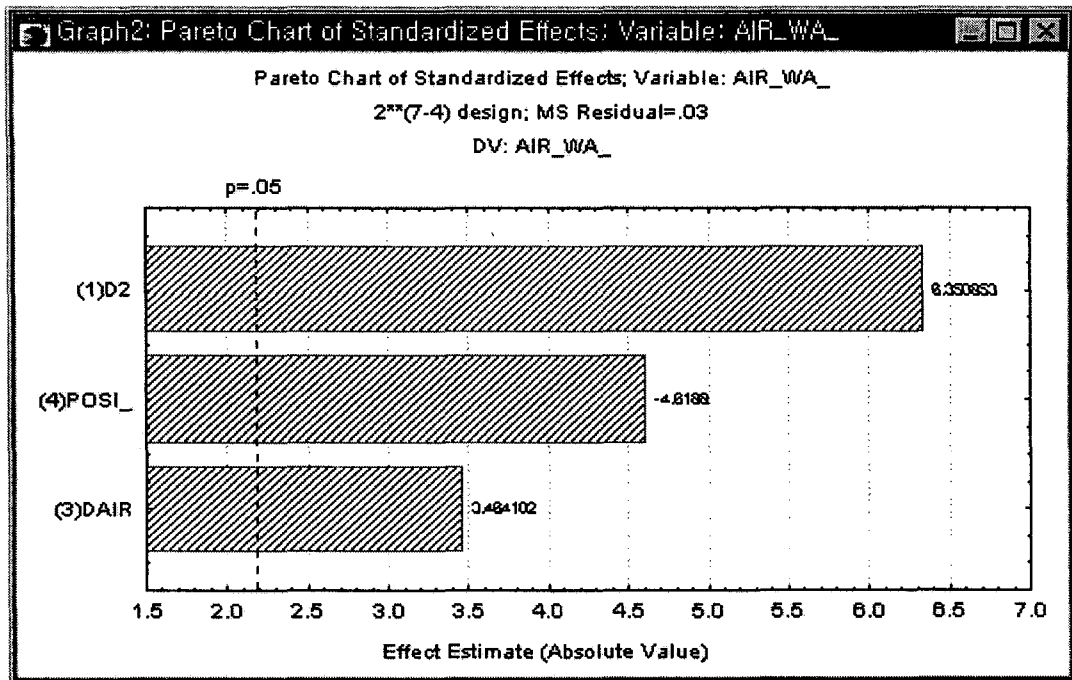
ㄴ) Injector내 다른 dimension이 공기 흡입량에 미치는 영향

| Case | D2 | D3 | Dair | Pos. | L1 | L2 | L3 | Air flow (l/min) |
|------|----|-----|------|------|----|----|----|------------------|
| 1 | 6 | 8.5 | 5 | 2 | 20 | 50 | 30 | 3.5 |
| 2 | 8 | 8.5 | 5 | 0 | 10 | 50 | 50 | 4.75 |
| 3 | 6 | 10 | 5 | 0 | 20 | 30 | 50 | 4.35 |
| 4 | 8 | 10 | 5 | 2 | 10 | 30 | 30 | 4.5 |
| 5 | 6 | 8.5 | 10 | 2 | 10 | 30 | 50 | 4.25 |
| 6 | 8 | 8.5 | 10 | 0 | 20 | 30 | 30 | 4.9 |
| 7 | 6 | 10 | 10 | 0 | 10 | 50 | 30 | 4.5 |
| 8 | 8 | 10 | 10 | 2 | 20 | 50 | 50 | 4.65 |

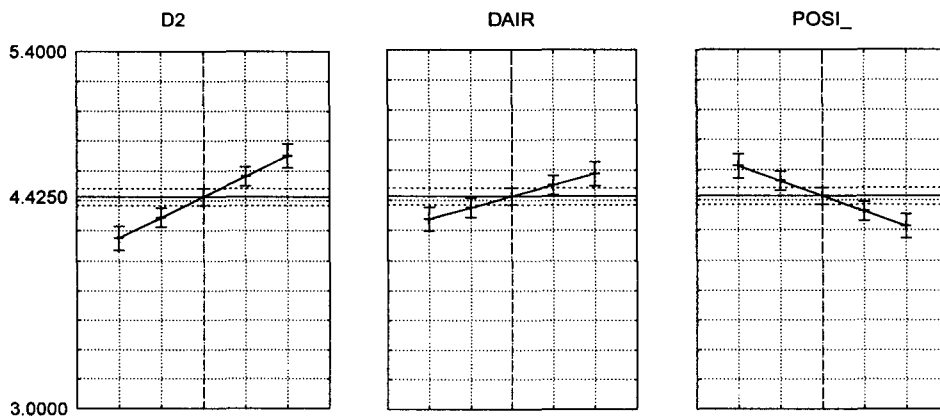
「표 4」 실험에서 사용된 step diffuser와 설계 영향 변수들

실험을 하기 위하여 Box, Hunter & Hunter 법으로 실험을 설계하였다. 실험 배열과 흡입된 공기량을 「표-4」 나타내었다. 분석 결과는 「그림 6, 7」에 나타내었다.

「그림 6」을 보면 점선은 95% 신뢰구간에서 변수의 영향이 없는 오차 범위 지역을 나타낸다. 그림의 3가지 인자들은 모두 이 점선 밖에 있으므로 95%로 신뢰성을 가지고 말할 때 영향이 있는 것으로 판단이 된다. 나머지 인자들은 오차 범위내에서 변화하므로 영향이 상대적으로 적은 것으로 판단된다. D2(2번 확장), D_{air}(공기 흡입구 직경)는 증가할수록 공기 흡입량이 증가하고, Posi.(2번 확장과 공기 흡입구간의 거리)는 감소할수록 공기 흡입량이 증가한다. 세번째 직경의 (D3) 영향은 상당히 작은 것으로 나타났다. 즉 공기 구멍이 두번째 팽창의 초기에 있기 때문에 세번째 직경에는 별 영향을 받지 않는 것이다. step diffuser의 설계 개념도 세번째 팽창은 공기 흡입보다는 turbulence를 한번 더 일으켜 주는데 목적이 있다. 그러므로 본 실험의 결과는 예측과 상당히 일치한다. 탈목 효율에 대한 실험은 수행하였으나, 오차가 심하여 재 실험을 할 예정이다. 향후 탈목 효율에 대한 실험과 기포 크기 관찰 실험을 수행하여 injector 구조의 optimization과 기포크기에 대한 injector dimension의 영향을 파악해보도록 하겠다.



[그림 6] Pareto Chart of Standized Effects



[그림 7] Response Profiles

4. 결론

본 실험은 Step diffuser 의 해석과 구조 변경에 따른 영향을 파악하기 위하여 몇가지 인자들을 대상으로 실시하였다. 결론은 다음과 같다.

- 1) Voith - sulzer 의 step diffuser 는 동등한 dynamic analogy를 갖도록 설계가 되어

있다. 이것을 이용하면 정해진 생산량을 맞추기 위한 injector의 숫자 및 내부 설계를 유추할 수 있다.

- 2) 동일 analogy를 갖는 injector라도 어느 이하로 구경이 낮아지면 max. air/stock ratio 와 동일 유속을 갖는 지점에서의 air/stock ratio도 달라지게 된다.
- 3) 공기 흡입률 증가라는 관점에서는 동일 입구 구경하에서 첫번째 확장과 Air 흡입구의 내경, air 흡입구의 위치가 가장 중요한 영향인자이다.

향후 연구에서는 실제 지료 조건하에서의 step diffuser의 역할 - 즉 잉크 제거 효율, 생성되는 기포의 크기 및 분포 - 등을 해석하여 보겠다.

5. 참고 문헌

- 1) Szatkowski, "Recycling & Deinking", Tech 92
- 2) Lothar Gottsching, et al, "Effect of Air volume and Air bubble.", 3rd Research Forum on Recycling, 17 -25, Nov. 20,1995
- 3) L. Pfalzer, "Deinking Process Technology", Progress in Paper Recycling, Feb, 1992
- 4) Dr. E. Linck, et al, "Operating Experience with the New Esher Wyss Compact Flotation Deinking Plant"
- 5) John, Milliken, "Recycling Pulp under Pressure", Tappi, Vol.80, No.0, pp79 ~