

용존공기부상(Dissolved Air Flotation; DAF)의 핵심기술



김 유 창

(KIMM 환경설비연구부)

'90 - '95 연세대학교 환경과학과(학사)
'95 - '97 광주과학기술원 환경공학과(석사)
'97 - 현재 한국기계연구원 연구원

신 흥 식

(수자원공사)



'84 - '01 수자원공사 과장
'01 - 현재 한국기계연구원 파견연구원



나 은 수

(KIMM 환경설비연구부)

'76 - '80 해군사관학교 기계공학과(학사)
'92 - '94 창원대학교 기계공학과(석사)
'98 - '01 충남대학교 환경공학과(박사)
'92 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

가압상태에서 과포화된 물을 노즐이나 니들벨트 등을 통해 배출시키면 대기압하에서 압력변화가 생기고, 이때 발생하는 미세기포가 상승하는 과정에서 수중의 콜로이드 물질과 충돌·부착되어 콜로이드 등의 제거대상물질은 표면으로 부상된다. 이 원리를 이용한 용존공기부상법은 기존의 침전을 이용한 전처리보다 다양한 응용 가능성을 가지고 있다. 우선 기존 설비의 성능을 향상시키기 위해서 공기포화기, 주입노즐, 스키머, 부상조 등의 요소기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 그리고 최근에는 용존공기부상 공정과 타 공정과의 연계를 통한 패키지화에 중점을 두고 있다. 따라서 본고에서는 용존공기부상관련 요소기술과 패키지화에 관한 기술을 소개하고자 한다.

2. 용존공기부상의 요소기술

용존공기부상의 핵심기술은 크게 네 가지로 나눌 수 있다. 첫째는, 공기를 400~600kPa(대략 4~6atm)로 가압하는 공기가압기 관련 기술로 이 기술은 미세 기포를 발생시키는데 있어서 가장 핵심이다. 하지만 500kPa 이상에서는 가압력의 증가가 미세 기포의 지름에 거의 영향을 미치지 않는다. 둘째는, 공기로 가압된 가압수를 대기압하에서 방출시키는데 필요한 노즐이나 니들벨트 관련 기술로 분사 노즐의 기하학적 디자인과 운전조건이 아주 중요하다. 셋째는, 부상된 슬러지

를 제거하기 위한 기술로 스키머(skimmer) 또는 스크래퍼(scraper)의 형태와 운전 방향에 따라 슬러지의 제거에 영향을 미친다. 넷째는, 부상조의 형태로서 원형이나 직사각형의 조와 함께 콘형태 등의 새로운 형태가 연구되고 있다. 그림 1 에서는 이들 요소기술들이 용존공기부상 시스템의 어떤 부분인지를 보여 주고 있다.

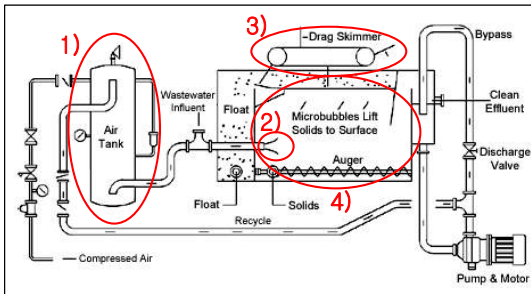


그림 1. 용존공기부상의 각 요소기술

2.1 공기가압기(Air Saturator) 관련 요소기술

공기가압기(Air Saturator)는 용존공기부상공정 동력비의 대략 50%를 차지한다. 따라서 비용절감을 위해 공기가압기를 최적화하는 것이 필요하다. DAF에서 이용되는 용존가압수는 처리수의 일부를 순환시켜(약 10%) 가압탱크에서 공기와 함께 가압시킨 후 부상조의 반응지역에 대기압 상태로 유출시킨다. 가압탱크에서 공기/물의 비는 총공기농도(mg/l)로서 나타내어지는데, 이것은 가압탱크의 압력과 효율 및 순환비율의 함수이다. 일반적으로 수처리에서 사용되는 충전(packed)된 가압탱크의 효율은 90~95%이고, 충전되지 않은(unpacked) 가압탱크의 효율은 60~70%로 가정한다. 반송수(recycled water)에 공기를 가압하여 용존시키는 방법은 여러 가지가 있다. 압력용기나 공기가압조(Air Saturator)의 물속에 공기를 분사시키는 방법, 충전층(packed bed)에 물을 방울방울 떨어뜨리는 방법, 충전되어 있지 않은(unpacked bed) 공기가압조(Air Saturator)에 물을 분사시키는 방법, 노즐로 공기를 미세하게 뿜어내는 방법, 순환펌프의 흡입측에 공기를 주입시키는 방법 등이 있다.

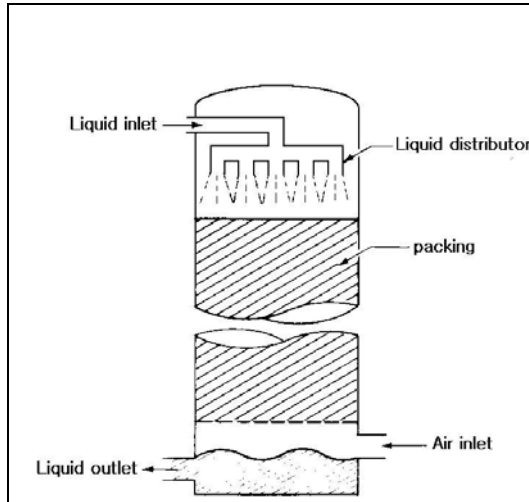


그림 2. 공기포화기(saturator with packing)

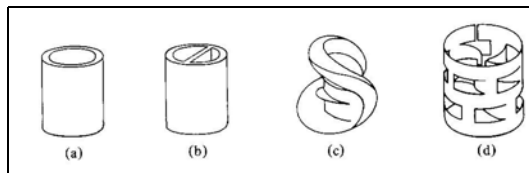


그림 3. 일반적인 패킹(packing):
(a)Raschig ring, (b)Lessing ring,
(c)Berl saddle, (d)Pall ring

펌프의 흡입측에 공기를 주입함으로써 60~80%의 포화율에 도달할 수 있고, 가압조에 터빈믹서 등을 설치하면 90%까지 증가시킬 수 있다. 충전층이 없는 가압조의 운전압력은 충전층이 있는 가압조의 압력 이상으로 운전해야만 같은 양의 공기를 부상조로 보낼 수 있다. 충전된 가압조의 포화율이 충전되지 않은 것에 비해 더 경제적이다. DAF의 공기가압기용 충전층(packed column)에 사용되는 패킹(packing)의 종류는 그림 3과 같다. 이외에도 지름 1~1.5 inch, 길이 25~40mm의 PVC 튜브(또는 폴리프로필렌 링)를 이용하여 충전층의 깊이를 0.8~1m로 하면 90~95%의 포화효율을 이룰 수 있다. 가격도 Pall 링이나 Raschig 링에 비해 저렴하다.

대부분의 충전되지 않은 공기포화기는 공기를 가압수에 녹이기 위해 내부 또는 외부 이덕터(eductor)를 가지고 있다. 따라서 포화조에서 용존되지 않은 공기는 이덕터(eductor)에 의해 다시

순환된다. 이와 같은 순환에 의해 비충진층(unpacked column)의 효율을 높일 수 있다. 그러나 아직도 충전층(packed column)에서 필요한 압력보다 100~200kPa 높게 운전해야 같은 양의 공기를 공급할 수 있다. 가압된 물은 부식성이 있기 때문에 만일 연강으로 가압용기를 제조한다면 부식방지제를 처리해야만 하며, 부상탱크와 가압조의 연결부위는 플라스틱 파이프를 사용하는 것이 바람직하다.

또한, 충전되지 않은 공기포화기의 효율을 향상시키기 위해서 공기포화기 내부를 공기와 물이 잘 접촉 및 용존될 수 있도록 설계한 공기용존용 튜브(air dissolving tube; ADT)를 사용하기도 한다.(그림 4, 5) ADT는 반송된 처리수 일부를 일정한 압력으로 특수 nozzle을 통과시키고 공기압축기로 공기를 공급하면, 이 두 상의 유체가 서로 혼합되면서 tube내를 급격히 회전해 공기가 포화되는 장치이다

2.2 주입노즐(injection nozzle) 관련 요소기술

주입노즐(injection nozzle)은 크게 두 가지 종류가 있다. 하나는, 고정형 오리피스(fixed orifice)로 WRC 등의 이중 오리피스 노즐이고, 다른 하나는, 조절가능한 오리피스(adjustable orifice)로 니들밸브가 사용된다.

DAF에 폭넓게 사용되는 특허된 노즐들은 모두 다섯 가지의 특징을 가지고 있다.

- ① 압력의 순간적인 강하는 주입지점과 가능한 한 가까워야 한다.
- ② 오리피스의 유입부분(inlet)에서 유체의 흐르는 방향을 갑작스럽게 변화(대개 90°)시켜야 한다.
- ③ 노즐에서의 머무름 시간이 1.5 m/sec보다 작도록 오리피스의 크기를 2.5mm이하로 한다.
- ④ 오리피스에서 나오는 유로에 직각으로 충돌판이나 가리개가 있어야 한다.
- ⑤ 배출속도를 낮추고 버블의 확산을 유도하기 위해 유로의 끝에 가늘어진 부분(tapered outlet)



그림 4. 공기용존용 튜브(air dissolving tube; ADT)

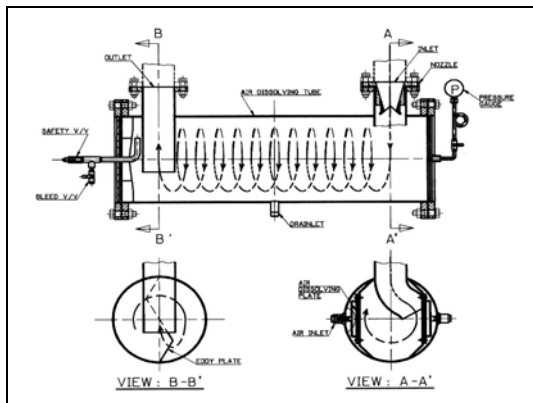


그림 5. 공기용존용 튜브(air dissolving tube:ADT)의 내부모습

을 두어야 한다.

2.3 스크래퍼(또는 스키머) 관련 요소기술

부상된 플럭의 제거는 침전지에서 사용하는 스크래퍼를 부상조의 상부에 설치한 형태로 보면 된다. 표면으로 부상한 플럭은 회전하는 고무판이나 나일론 브러쉬에 의해 제거되며 함수율의 조절은 회전속도와 날개에 의해 조절할 수 있다. 회전하는 방향이 부상조에 유입되는 유입수의 방향과 같으면(co-current; 그림 8) 부상된 부유물이 조 내부의 유동에 의해 유출수에 섞여 배출되기 쉬워 최근에는 유입수의 방향과 반대로 회전시키는 방법인 counter-current형 스크래퍼를 사용한다.(그림 9) 또한, 스크래퍼를 사용하지 않고 그림

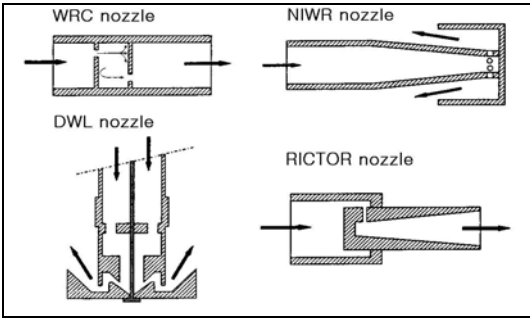


그림 6. DAF에 사용되는 주입노즐의 개략도
 ① 유로에 충돌판을 둔 것(NIWR, WRC 노즐)
 ② 유로에 방향변화를 준 것(DWL, RICTOR, NIWR 노즐)
 ③ 유로의 끝에 가늘어진 부분(tapered section)을 둔 것(RICTOR, DWL 노즐)

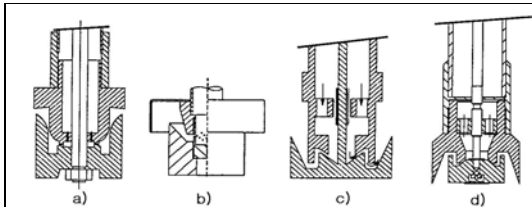


그림 7. 네덜란드에서 개발된 노즐.

a) Leidse nozzle, b) Improved Leidse nozzle, c) DWL "The Hague nozzle", d) Improved "The Hague nozzle"

10과 같이 유체의 수리학적인 효과에 의해 부유물이 월류하여 제거되는 방식을 사용하기도 한다. DAF시스템의 운전 및 유지관리시, 스크래퍼와 관련된 부분인 스크래퍼 날개와 롤러, 스크래퍼 체인, 스크래퍼의 기어박스 등은 기계적인 문제가 발생하는 부분이므로 늘 주의를 기울여야 한다.

2.4 부상조 관련 요소기술

부상조의 형태(top view)는 직사각형(그림 11)과 원형(그림 12)이 있으며 처리효율을 높이기 위해 변형된 형태가 있기도 하다. 흐름의 방향에 따라서는 평행류와 방사류가 있다. 평행류는 직사각형 부상조에 사용되고, 방사류는 원형 부상조에 사용된다.

원형 부상조는 유지관리가 용이하고 미관상으로도 우수하지만 직사각형에 비해 소요부지면적

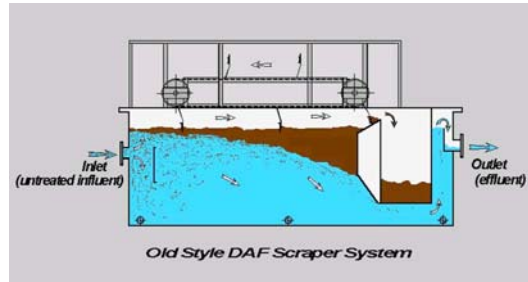


그림 8. Co-current Scraper

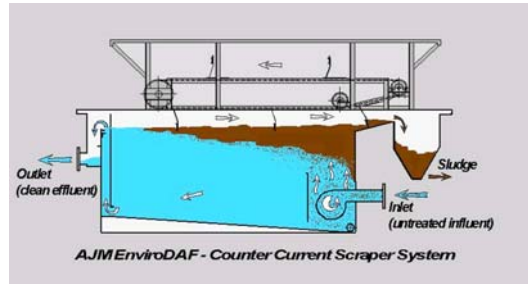


그림 9. Counter-current Scraper

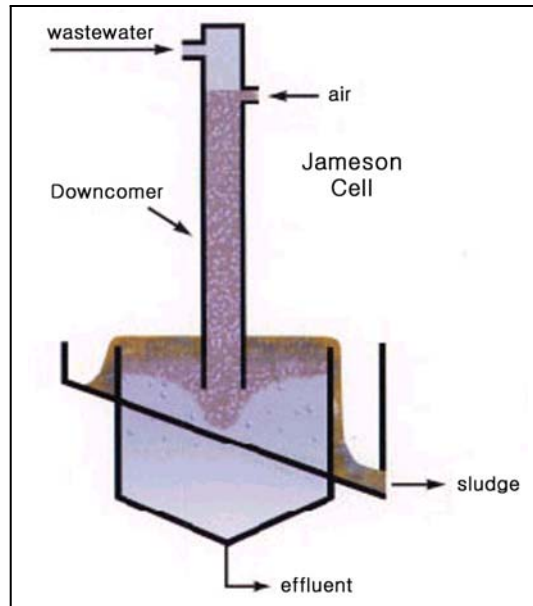


그림 10. 수리학적 월류에 의한 부유물제거 방식

이 커질 수 있다. 또한, 바람이나 슬러지 제거기 운전으로 인한 영향을 받기 쉽고, 부상효율은 일반적으로 직사각형에 비해 낮다. 직사각형 부상조의 장점은 용지를 효율적으로 이용할 수 있고 정류벽이나 도류벽을 설치함으로써 흐름의 균등화를 얻을 수 있다는 점 등이 있다.

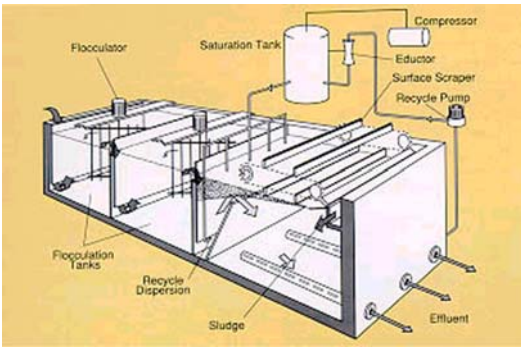


그림 11. 직사각형의 부상조를 갖는 DAF

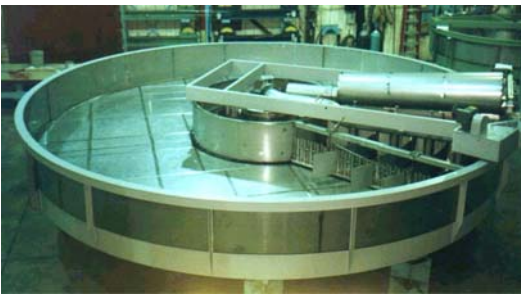


그림 12. 원형의 부상조를 갖는 DAF

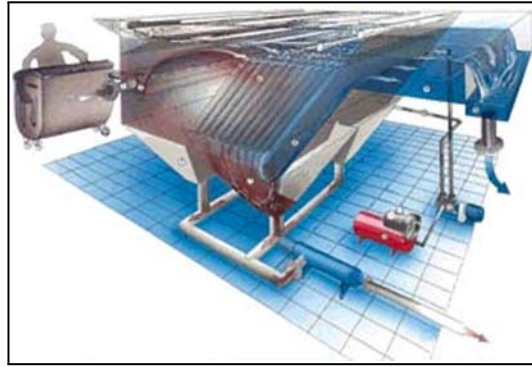


그림 13. 경사판(lamella)이 설치된 부상조를 갖는 DAF(I)



그림 15. 변형된 형태의 부상조를 갖는 DAF(II)

최근에는 부상조 내에 경사판(lamella)을 두어 유효 분리면적을 증가시켜 부상과 침전이 함께 고려된 형태가 개발되었다.(그림 13) 이 시스템은 부상된 부유입자 들이 부상조 내의 유동에 의해 유출수와 함께 빠져나가는 것을 경사판(lamella)을 통해 제거하는 것으로 기존의 부상 시스템보다 유출수의 수질이 좋다. 그리고 DAF의 운전시 유체의 유동이 적은 사공간(dead zone)이 발생하는데 이를 보완하기 위해 그림 15와 같이 조 내부의 사공간(dead zone)을 없애 유체의 유동을 원활히 하여 정확한 흐름 패턴을 유도한 시스템도 선을 보이고 있다. 이와같은 부상조들은 조 내부의 유동을 시뮬레이션하여 얻은 결과를 통해 설계된 것으로, 유동해석을 통해 새로운 형태의 DAF시스템을 발전시킨 좋은 사례라고 할 수 있다.

3. 패키지화 관련 기술



그림



그림 1

용존공기부상의 특성상 플록은 버블과 함께 위로 부상되고 처리된 물이 하향류로 흐르기 때문에 여과지를 부상조 밑에 두어 부상과 여과의 효과를 함께 고려한 “역류형 용존공기부상-여과방식(counter current dissolved air flotation and filtration; COCO-DAFF)”인 패키지화한 시스템이 개발되었다.(그림 17) 기존 방식은 원수의 흐름과 발생기포가 같은 방향으로 흐르며 충돌/부착되었으나, COCO-DAFF방식은 원수는 하향류로 흐르고 발생기포는 상향류로 흐르게 함으로써 수리학적 접촉시간을 증가시킨 역류형 용존공기부상-여과방식이다. 유입구의 구조는 플록에 손상을 주지 않도록 압력손실의 분포가 균형을 유지하고, 움직이는 물과 정지해 있는 물과의 속도차이를 줄이기 위해 그림 18과 같은 콘형태가 가장 효과적이다.

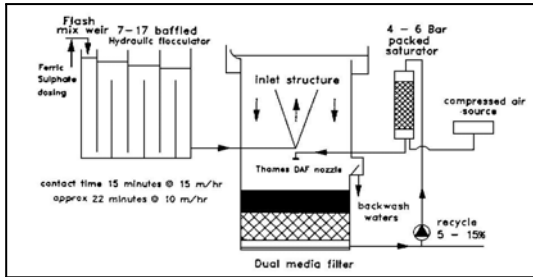


그림 17. 용존공기부상과 여과지를 결합한 COCO-DAFF의 개략도



그림 18. COCO-DAFF의 원수 유입구의 형태

4. DAF 펌프관련 기술

지금까지의 DAF는 미세한 버블을 생성하기 위해 공기포화기(air saturator)와 공기압축기(air compressor)가 필요하였다. 하지만 최근에 펌프 내에서 공기를 용존시키는 DAF용 펌프가 개발되었다. 이 펌프는 흡입쪽 라인에서 공기를 빨아들일 수 있도록 설계가 되어 있는데 이렇게 흡입된 공기는 고속으로 회전하는 임펠러(impeller)에 의해 압축 용존된다. 임펠러(impeller)에 의해 실 챔버(seal chamber)는 대기압보다 낮은 압력이 되고, 따라서 공기는 빨려들어 물과 혼합되 미세한 버블로 압축된다. 이와같은 DAF용 펌프는 외국의 여러 펌프회사(CORNELL, MONOSEP, NIKUNI 등)에서 개발돼 현재 사용되고 있다.

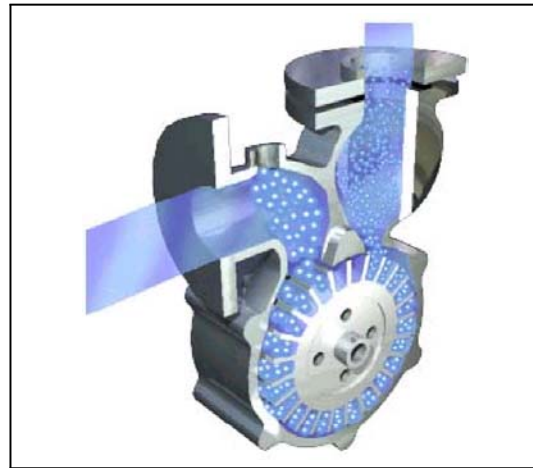


그림 19. DAF용 펌프(I)

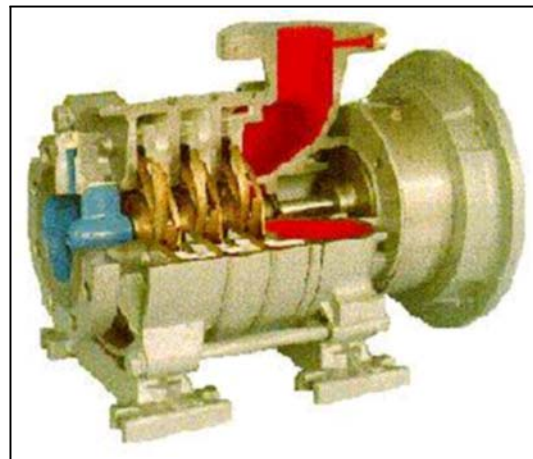


그림 20. DAF용 펌프(II)

5. 결 론

지금까지의 내용을 보면, 기존 시스템의 효율을 향상시키기 위해 기계설비의 혁신적인 개선에서 유체의 유동해석을 통한 부상조 설계에 이르기까지 많은 연구가 있었음을 알 수 있다.

근래에는 이 용존공기부상 기술이 주목을 받고 있다. 이유는 기존의 침전 기술로는 처리하기 힘든 다양한 오염원들이 많이 존재하기 때문인데, 침전되지 않는 부유플록 들은 이 용존공기부상 기술을 이용하여 처리하면 침전에 비해 우수한 효과를 거둘 수 있다. 따라서 밀도가 작아 침전이 어려운 물질을 포함하는 수처리에서 가장 유망한 공정으로 기대되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.K.Edzwald : "Principles and Applications of Dissolved Air Flotation", Wat. Sci. Tech. Vol. 31, No. 3-4, pp. 1-23, 1995
- [2] J. Haarhoff and S. Steinbach : "A Model for the Prediction of the Air Composition in Pressure Saturators", Wat. Res. Vol. 30, No. 12, pp. 3074-3082, 1996
- [3] M. Viitasaari, P. Jokela and J. Heinanen : "Dissolved Air Flotation in the Treatment of Industrial Wastewaters with a Special Emphasis on Forest and Foodstuff Industries", Wat. Sci. Tech. Vol. 31, No. 3-4, pp. 299-313, 1995
- [4] J. Heinanen, P. Jokela and T. Ala-Peijari : "Use of Dissolved Air Flotation in Potable Water Treatment in Finland", Wat. Sci. Tech. Vol. 31, No. 3-4, pp. 225-238, 1995
- [5] A. Eades and W. J. Brignall : "Counter-current Dissolved Air Flotation/ Filtration", Wat. Sci. Tech. Vol. 31, No. 3-4, pp. 173-178, 1995
- [6] K. Fukushi, N. Tambo and Y. Matsui : "A Kinetic Model for Dissolved Air Flotation in Water and Wastewater Treatment" Wat. Sci. Tech. Vol. 31, No. 3-4, pp. 37-47, 1995
- [7] E. M. Rykaart and J. Haarhoff : "Behaviour of Air Injection Nozzles in Dissolved Air Flotation", Wat. Sci. Tech. Vol. 31, No. 3-4, pp. 25-35, 1995
- [8] J. V. Puffelen and P. J. Buijs : "Dissolved Air Flotation in potable water treatment: The Dutch Experience", Wat. Sci. Tech. Vol. 31, No. 3-4, pp. 149-157, 1995