

Optimization of influent and effluent baffle configuration of circular secondary clarifier using CFD and PIV test

CFD와 PIV test를 통한 원형 2차침전지 유입 및 유출배플 형상 최적화

Young-Gyun Choi* · Kang-Hyung Bae

최영균* · 배강형

Department of Environmental Engineering, Daegu University

대구대학교 환경공학과

Abstract : One-dimensional flux theory (1DFT) is conventionally used for design of secondary clarifier of wastewater treatment plant. However, the 1DFT cannot describe turbulence, density current, shape parameters of the clarifier. In this study, we optimized the configurations of influent guide baffle and effluent baffle through the simulation using computational fluid dynamics (CFD) and its verification by particle image velocity (PIV) test. The energy dissipating inlet (EDI) without influent guide baffle (0°) showed the best efficiency for minimizing downward velocity under the center well of the clarifier. The lowest velocity distribution around the effluent weir region could be obtained with the McKinney baffle (EB-2). The performances of the influent and effluent baffles were clearly verified by PIV test results.

Key words : Baffle, CFD, circular clarifier, optimization, PIV

주제어 : 배플, 전산유체역학, 원형침전지, 최적화, 입자영상유속

1. 서론

하수처리장 2차침전지의 설계를 위해 1차원 플럭스 이론 (1D flux theory, 1DFT)이 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 1DFT는 침전지가 정상 상태에서 이상적인 흐름을 가진다는 가정 하에 적용될 수 있는 이론이며, 실제 원형 또는 장방형 2차침전지에 적용될 경우, 한계고형물플럭스를 최대 25%까지 과다하게 예측할 위험이 있다고 알려져 있다 (Ekama and Marais, 2004). 이는 1DFT에 의해 설계된 실규모 2차침전지의 최대 플럭스 용량이 허용치의 80%에 불과함을 의미한다. 이러한 차이는 실제 침전지에서 발생할 수

있는 와류와 밀도류, 유출웨어와 배플 형상, 원형 침전지 중심의 정류지 형상 등을 설계에 정확히 반영할 수 없기 때문에 발생한다고 알려져 있다 (Ekama et al., 1997).

이러한 1DFT의 한계를 극복하고자 제안된 방법이 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용한 3차원 해석 방법이다. 국외의 경우, CFD를 이용한 2차침전지의 성능 진단과 관련된 연구결과가 상당수 보고되고 있으며, 향후 2차침전지의 신규 설계나 시설물 개선 시에 CFD의 적용 방향을 제시하고 있다 (Glover et al., 2006; Jensen et al., 2006; Merlo et al., 2006). 그러나 아직까지 2차원적인 해석에 그치고 있는 경우가 많고, 침전지 내부 구조물의 최적 배치 방안에 대한 연구도 매우 제한적인 수준에서

* Received 23 January 2014, revised 10 February 2014, accepted 12 February 2014.

* Corresponding author: Tel : 053-850-6692 Fax : 053-850-6699 E-mail : choijg@daegu.ac.kr

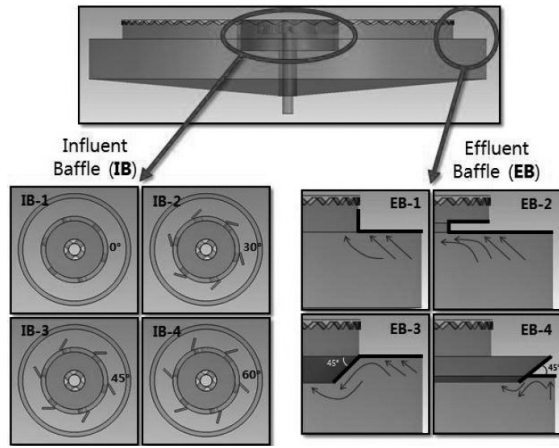


Fig. 2. Influent and effluent baffle configurations

유출배플은 침전지 벽면에서 발생하는 상향유속에 의해 슬러지가 부상하는 것을 방지하기 위해 설치된다 (Stukenberg et al., 1983; ASCE, 1994). Fig. 2의 유출배플 EB-2와 EB-4의 경우 각각 Lincoln (McKinney)과 Stamford baffle로 불리우며 슬러지 부상 방지에 비교적 효과적인 형태로 알려져 있으나 (ASCE, 1994), 이에 대해 유체흐름해석 등을 통한 객관적 입증 자료는 찾아보기 힘들다. 이에 본 연구에서는 유출배플의 형태를 Fig. 2와 같이 4가지 형태 (EB-1, 2, 3, 4)로 변화시키며 CFD와 PIV test를 통해 최적의 형태를 도출하고자 하였다. 침전지 외벽과 유출웨어까지의 거리는 49 mm이며, EB-1 ~ 3 각각의 배플 길이는 15 mm로 하였다. EB-3와 EB-4 배플의 각도는 45°로 고정하였다.

2.2. CFD를 이용한 침전지 전산모사 조건

본 연구에서는 CFD 해석을 위해 상용 프로그램인 CFX (ver. 10.0)를 사용하였으며, 침전지 설계에는 CFX에서 호환이 되는 CAD 프로그램인 CATIA (ver. 5.0)를 사용하였다 (ANSYS, 2003). 수치해석을 위한 격자생성은 형상과 유동양상을 고려하여 형상과 흐름이 급변하는 곳은 격자크기를 작게, 형상과 흐름의 변화가 완

만한 곳은 격자크기를 크게 하는 가변격자를 채택하였다. 격자의 크기는 최소 1 mm에서 최대 5 mm이며 격자생성에 사용된 형태는 사면체, 피라미드 및 프리즘으로 침전지 내부의 구조에 적합한 형태로 구성하였다. 유동변동이 심할 것으로 예상되는 EDI 유입구, 유입 가이드배플과 유출배플 그리고 침전지 벽면의 격자는 프리즘과 사면체격자를 조합하여 세밀하게 구성하였다. 각각의 유출배플의 형태에 따른 격자통계는 Table 1과 같다.

Table 1. Mesh statistics (EB: Effluent Baffle)

Type	Tetrahedra	Pyramids	Prisms	Total
EB-1	859,782	2,571	204,067	1,066,420
EB-2	838,569	2,581	204,353	1,045,503
EB-3	878,253	1,034	232,260	1,111,547
EB-4	888,174	1,127	231,149	1,120,450

CFD 해석을 위한 경계조건으로 유입유체를 물로 가정했으며 난류모델은 자유면과 벽면에서의 영향을 동시에 해석하기 위해 SST (shear stress transport) 모델을 사용하였다. 침전지 유입조건 (inlet mass flow rate)은 표면부하율 $20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 을 기준으로 하여 계산된 0.03 kg/s 를 적용하였고, 유출부 (outlet)는 대기압 상태에서 자연 유출되도록 상대기압 (relative pressure)을 0 pa로 설정하였다. 침전지의 벽면은 no-slip condition을 적용하였고, 수표면은 풍향이나 온도에 의한 영향을 받지 않는 자유수면을 갖도록 하였다. 유체의 온도는 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 항상 일정하다고 가정하였다.

2.3. PIV test

수공학 분야에서의 유속측정은 흔히 ADV (acoustic doppler velocimetry)와 PIV (particle image velocimetry)가 사용되고 있다. ADV는 3차원 유속데이터를 얻을 수 있고 휴대가 용이하나 (Kim et al., 2006), 수 cm/s 이상

의 범위에서 유속 측정이 가능하고 수표면 부근에서는 유속측정이 불가능하여 bench-scale의 실험에서는 다소 부적합하다. 이에 본 연구에서는 CFX를 이용한 수치해석 결과에 대한 검증을 위해 PIV test 기법을 채택하였다.

본 연구에서 사용한 PIV test 시스템 (Fig. 3)은 흐름의 정량적인 특성을 가시화시키는 장치이며, 광학영상기술을 이용하여 흐름장 내의 여러 지점의 속도를 동시다발적으로 측정할 수 있는 방법을 제공한다. PIV test를 위해 사용한 seeding particle은 유체흐름에 따라서 움직일 정도로 충분히 작고, 부력의 영향을 최소화 할 수 있어야 하므로, 본 연구에서는 seeding particle로서 hollow glass bead를 사용하였다. 입자의 직경은 200 μm 이며, 비중은 1.05 내외인 것으로 알려져 있다. CCD (charge-coupled device) 카메라(120 Hz CCD, Canon)는 같은 입자의 움직임을 1초에 120장을 촬영하여 host computer에 저장하고 이 사진들에 나타난 동일 입자들의 움직임을 시간에 따라 추적함으로써 유속을 측정하게 된다. 본 연구에서 사용된 카메라는 362×362 pixel의 해상도를 가진다. 즉, 1초에 촬영된 120장 사진 각각의 시간 간격은

1/120초가 되며, 입자의 속도 벡터는 위치의 변화량을 시간 간격으로 나눔으로써 얻어진다. 후속 영상처리작업은 auto-correlation method를 사용하였다 (Park et al., 2001).

DPSS 발생기로부터 생성된 레이저는 원형침전지로 주사되면서 공기-아크릴-물과 같이 서로 다른 매질을 통과하게 됨에 따라 굴절률에 편차가 발생하게 된다. 이에 본 연구에서는 원형침전지 외곽에 정사각형 수조를 만들어 물을 채움으로써 상이한 매질을 통과함에 따라 발생하게 되는 빛의 굴절을 최소화 하였다 (Fig. 3 하단).

3. 결과 및 토의

3.1. EDI 유입배플의 각도가 침전지 유속분포에 미치는 영향

원형침전지에서 EDI는 침전슬러지 층의 두께와 이에 따른 고형물의 농도 분포를 결정할 정도로 매우 중요한 설계인자이다 (Metcalf & Eddy Inc., 2003; ASCE, 1994). EDI가 속도에너지를 분산·소멸시키는 기능을 수행한다는 점은 다양한 연구결과를 통해 알 수 있으며 (Ghawi and Kriš, 2011; Pophali et al., 2009; Stukenberg et al., 1983), EDI를 다층 (multiple layer)으로 구성하여 유속에너지를 대폭 감소시키는 기술도 소개된 바 있다 (Zhou, 2008). 그러나 일반적인 EDI에 부착된 유도 baffle의 각도가 침전지 내의 전반적인 유속분포에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 보고된 바가 없다. 이에 본 연구에서는 EDI로부터 유체의 유출각도가 침전지 내부 유속장에 미치는 영향을 파악하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 제시하였다.

EDI에 부착된 배플의 각도에 따라 EDI와 FFW 사이에서 형성되는 하향유속장의 차이가 확연하게 나타나는 것을 확인하였다. 특히 IB-2의 경우에는 하향유속이 가장 크게 나타나 침전지 바닥에서의 수평유속에 심각한 영향을 미칠 수 있는 것으로 확인되었다. 침전지 바닥에서의 수평유속 증가는 2차침전지의 고액분리에 악영향을 줄 수

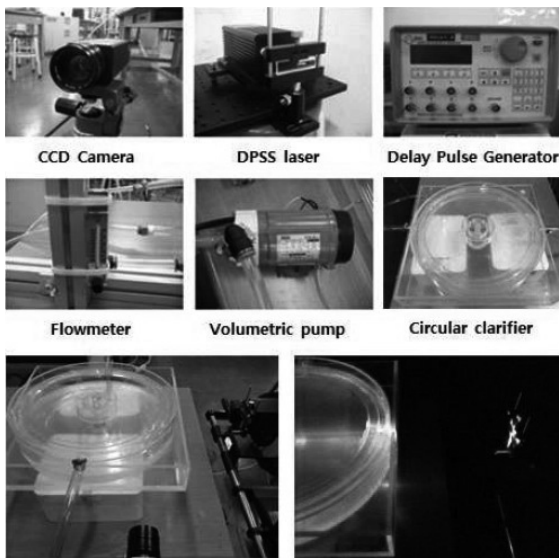


Fig. 3. Bench scale PIV test system

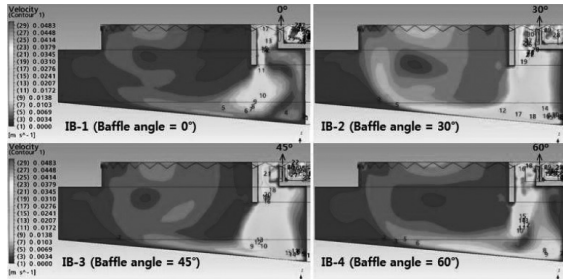


Fig. 4. Effects of influent baffle configuration on the velocity distribution

있을 뿐만 아니라 침전 슬러지의 재부상 가능성을 높이게 되므로 가급적 이를 낮추는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 보았을 때, IB-1이 유입 유속에너지 감소에 가장 효과적인 것으로 파악되었으며, IB-4, IB-3, IB-2의 순으로 유속에너지 감소 효과가 큰 것으로 나타났다(Fig. 4).

Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 IB-1 ~ 4 및 EDI를 통과한 유체는 FFW를 만나 하향흐름을 갖게 된다. 침전지 바닥 부근에서는 이러한 하향흐름이 방사형 흐름으로 전환되어 입자의 침전성을 저해하는 요인으로 작용하게 된다 (ASCE, 1994; Metcalf & Eddy, 2003; Ghawi and Kriš, 2011). 특히 FFW가 너무 크게 설계될 경우, 침전지 바닥 유속의 증가로 인해 슬러지 재부상의 위험이 커질 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Burt and Ganeshalingam, 2005). 본 연구에서는 침전지 바닥 부근의 유속을 평가하기 위하여 Fig. 4에 제시한 유속분포에서 침전지 바닥으로부터 2 cm 떨어진 지점의 유속을 침전지 중심에서 10 cm 간격으로 추출하여 Fig. 5에 제시하였다. IB-2의 경우 침전지 중심으로부터 약 50 % 지점에 이르기까지 바닥 유속이 가장 높은 것으로 나타났으며, 가이드 배플의 각도가 증가할수록 (30 ~ 60°) 침전지 바닥 유속은 감소하는 것으로 확인되었다. 배플이 설치되지 않았던 IB-1의 경우, 침전지 바닥에서의 유속분포가 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이는 유입부의 유체가 갖는 유속에너지를 IB-1이 가장 효과적으로 소멸시켰음을 의미한다.

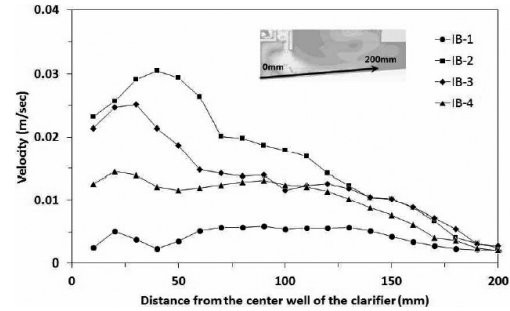


Fig. 5. Effects of influent guide baffle angle on the radial velocity distribution near (2 cm above) the bottom of the clarifier

결론적으로 EDI에서는 가이드 배플이 없는 것 (IB-1)이 침전지 바닥 수평유속을 저감시키는 데 가장 유리하며, 가이드 배플이 있다하더라도 그 각도가 클수록 유리할 것으로 판단되었다. 따라서 이후의 연구결과는 EDI가 모두 IB-1의 형태를 갖는 것으로 하였다.

3.2. 유출배플의 형상이 유속분포에 미치는 영향

Burt and Ganeshalingam (2005)의 원형 침전지에 대한 CFD 해석결과에 의하면 EDI로 유입된 유체의 상향 유속 전단면이 항상 침전지 외벽에 도달하기 전에 발생한다고 하였다. 이는 침전지 외곽으로 유체가 이동할수록 바닥면에서의 방사상 유속보다 웨어부 유출에 따른 상향유속이 상대적으로 더 커지기 때문이다. Fig. 6에 제시한 CFD 모사결과에서도 이와 유사한 결과가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 특히 배플이 설치된 부분을 경계로 하여 상향유속의 증가가 뚜렷한 것으로 나타났다.

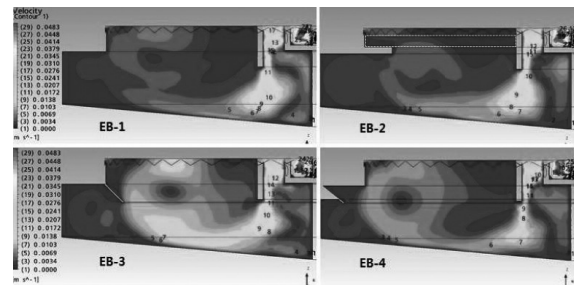


Fig. 6. Effects of effluent baffle configuration on the velocity distribution

유출웨어 최하부에서 배플이 설치된 최상부까지의 단면 (Fig. 6 EB-2에서 흰색 점선 내부)에서 유속벡터를 추출하여 분석한 결과, 상향유속분포는 EB-3 (0 ~ 0.0167 m/s), EB-4 (0 ~ 0.0115 m/s), EB-1 (0 ~ 0.0088 m/s), EB-2 (0 ~ 0.0054 m/s) 순으로 높은 것으로 확인되었다. EB-2는 다른 배플과 달리 웨어 부분 전체에 걸쳐서도 고른 상향유속을 나타내는 것으로 확인되어 수평형태의 상향유속방지 배플 (EB-2, McKinney baffle)이 원형 침전지에서 입자 재부상 방지 및 웨어에서의 안정적인 유출수 월류에도 가장 유리한 것으로 판단되었다.

3.3. 유출배플의 형상에 따른 PIV test 결과

CFD 분석결과에 대한 비교·검증을 위해 아크릴반응조와 hollow glass bead를 사용하여 실시한 PIV test 결과를 Fig. 7에 제시하였다. DPSS로부터 발생된 레이저빔의 굴절을 최소화 (공기층 배제)하기 위해 원형침전조를 정사각형 수조에 침지하여 (Fig. 3) 실험을 하였음에도 불구하고 레이저가 여러 층의 아크릴을 통과하게 되는 부분 (Fig. 7 Analytical area 외부)에서는 심한 굴절 및 이에 따른 해석오차가 발생하여 PIV 분석에서는 제외하였다.

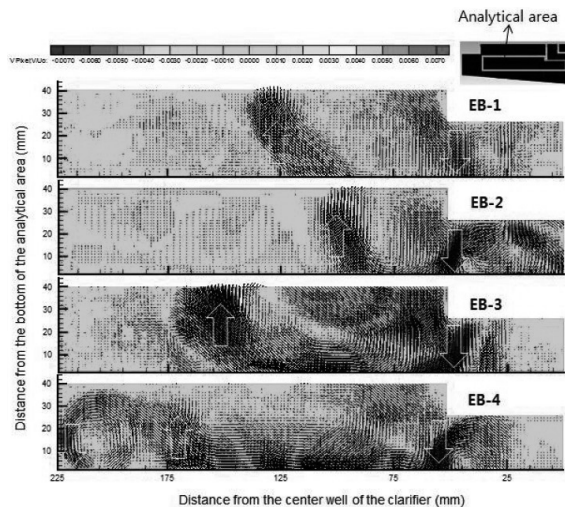


Fig. 7. Velocity profile in the radial cross-section (experimental results by PIV test)

PIV test 결과 동일한 영역에서의 CFD 해석 결과 (Fig. 6 참고)와 매우 유사한 유속분포가 얻어졌다. 특히, 원형침전지 중심으로부터 하향유속 및 상향유속이 비교적 강하게 발생하는 지점의 위치가 CFD 모사결과와 거의 동일한 것으로 나타나 이론적 해석결과의 신뢰성을 충분히 검증할 수 있었다.

3.4. CFD와 PIV test 결과 비교·분석

CFD 해석결과와 PIV test 결과를 비교·분석하기 위해 침전지 중심부에서 방사상으로 150 mm 떨어진 지점 (유출배플로부터 약 30 mm 안쪽)에서 깊이 방향의 유속벡터를 추출하였다. 이렇게 PIV test와 CFD 모사결과로부터 추출된 유속벡터의 비교 결과를 Fig. 8에 제시하였다.

Lamberto et al. (1999)은 완전혼합탱크의 층류 유동해석을 위해 실험적, 이론적 분석을 실시하였으며, 이를 통해 교반 패들과 인접한 유체의 경우 PIV test 결과가 CFD 해석결과에 비해 낮은 유속분포를 보인다는 것을 밝혔다. 이는 PIV test에 사용되는 입자의 마찰이 패들 근처에서 더욱 심해지는데 따른 것으로서 다른 형태의 실험에서도 동일한 결과가 나타나는 것으로 확인되었다 (Choi et al., 2010). 그러나 본 연구결과에서는 이러한 현상이 나타나지는 않았으며, 오히려 EB-3과 EB-4의 경우에는 PIV test 결과의 유속분포가 이론적 해석결과에 비해 높은 것으로 확인되었다 (Fig. 8). 이는 PIV 해석을 위한 단면이 Fig. 7과 8에 제시한 것과 같이 침전조 바닥 또는 벽면 등과는 무관하여 마찰이 발생하지 않았을 가능성이 크고, PIV test에 사용된 bead의 비중이 1.05보다 작았기 때문이다. 그럼에도 불구하고 EB-1과 EB-2의 경우에는 PIV test 결과와 CFD 해석결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

상향유속의 경우에는 Fig. 6과 7에 제시된 결과와 유사하게 EB-2의 경우가 전반적으로 낮은 것으로 조사되었고, EB-3가 가장 높은 것으로

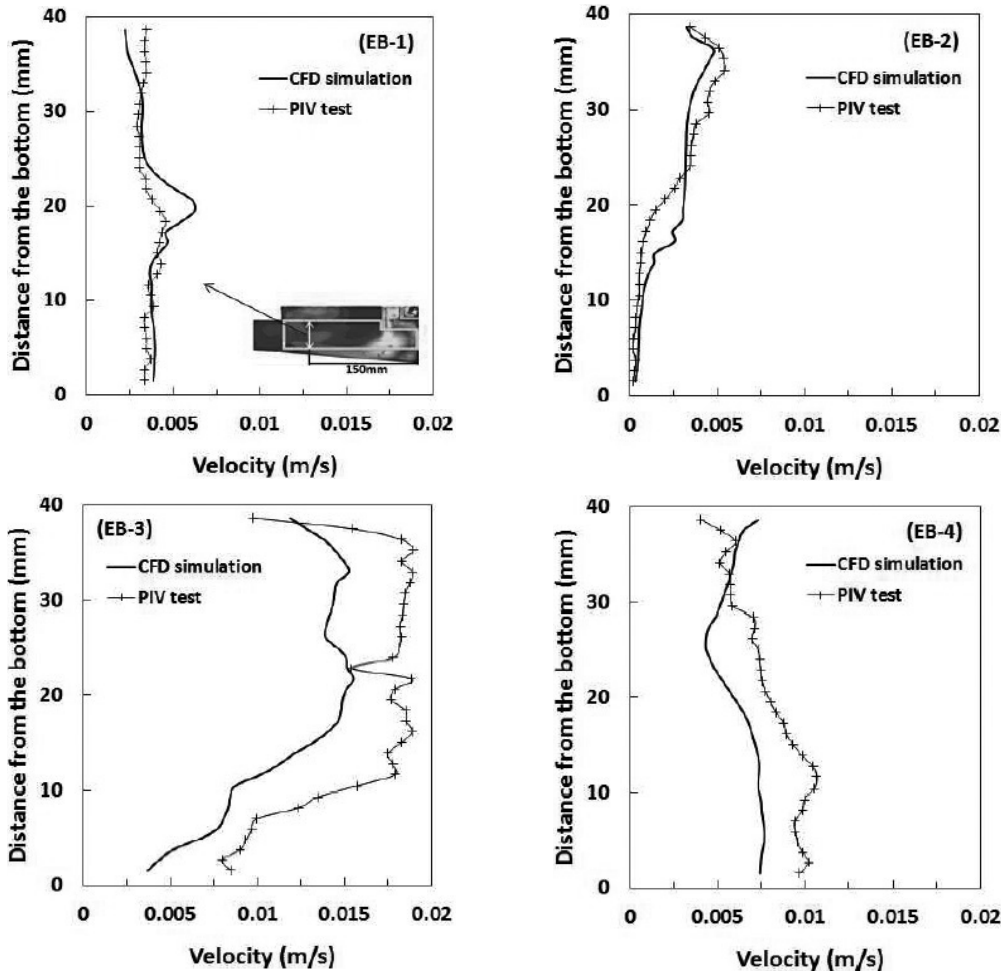


Fig. 8. Comparison between CFD and PIV test results at a vertical line of the analytical area (vertical line is 150 mm apart from the center well)

확인되었다. 결국 McKinney (EB-2) 배플이 원형침전지에서 상향 유속을 저감시키는 가장 유리한 형태라고 판단되며, 이를 제외한 배플은 오히려 배플을 설치하지 않는 경우보다 상향유속 감소에 더 불리할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 원형침전지의 유입 및 유출배플의 위치 및 형태가 침전지에서의 수리학적 거동에 미치는 영향을 CFD 해석을 통해 파악한 뒤, 가장 효율적인 배플의 위치 및 형태를 도출하고자 하였다. 또한 입자영상유속 (PIV) 측정

을 통한 실험적 방법을 통해 CFD 해석결과에 대한 검증을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 원형침전지 EDI에 부착되는 가이드 배플의 각도를 0° , 30° , 45° , 60° 로 변화시키며 하향유속분포를 예측한 결과, 가이드 배플이 설치되지 않는 (0°) 경우가 하향 유속 감소에 가장 유리한 것으로 확인되었다.
2. 원형침전지에서 흔하게 적용되는 4가지 형태의 유출배플에 대해 상향유속 방지효과를 파악한 결과 McKinney 형태 (EB-2)의 배플이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

3. 입자영상유속계 (PIV)를 통한 실험결과에서도 McKinney 배플이 유출부 상향유속 저감에 가장 유리한 것으로 나타났으며, 다른 형태의 배플은 오히려 배플이 설치되지 않은 경우보다 상향유속 감소에 불리할 것으로 전망되었다.
4. PIV test 결과가 CFD 해석결과와 비교적 잘 일치하여 이론적 해석결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: KRF-2007-314-D00153)

참고문헌

ANSYS (2003) *ANSYS-CFX 5.6 User Manual*, ANSYS-CFX Europe Ltd., Oxfordshire, UK.

ASCE (1994) *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, 4th Edn., WEF Manual of Practice 8, ASCE Manual and Report on Engineering Practice No. 76, USA.

Burt, D.J. and Ganeshalingam, J. (2005) *Design and optimisation of final clarifier performance with CFD modelling*, presented at the CIWEM/Aqua Enviro Joint Conference, included in "Design and Operation of Activated Sludge Plants".

Choi, Y.G., Bae, K.H. and Yoon, J.H. (2010) Optimization of influent and effluent baffle configuration of a rectangular secondary clarifier using CFD and PIV test, *J. KSWW*, Vol. 24, No. 1, pp. 41-50.

Ekama, G.A., Barnard, J.L., Gunthert, F.W., Krebs, P., McCorquodate, J.A., Parker, D.S. and Wahlberg, E.J. (1997) *Secondary settling tanks: theory, design, modelling and operation*, IAWQ STR No. 6, London: International Water Association; London.

Ekama, G.A. and Marais, P. (2004) Assessing the applicability of the 1D flux theory to full-scale secondary settling tank design with a 2D hydrodynamic model, *Water, Res.*,

Vol. 38, pp. 495-506.

Ghawi, A.G. and Kriš (2011) Improvement performance of secondary clarifiers by a computational fluid dynamics model, *Slovak J. of Civil Eng.*, Vol. 19, No. 4, pp. 1-11.

Glover, G.C., Printemps, C., Essemiani, K. and Meinhold, J. (2006) Modelling of wastewater treatment plant - how far shall we go with sophisticated modelling tools?, *Water Sci. Technol.*, Vol. 53, No. 3, pp. 79-89.

Jensen, M.D., Ingildsen, P., Rasmussen, M.R. and Laursen, J. (2006) Computational fluid dynamics modelling of hydraulics and sedimentation in process reactors during aeration tank settling, *Water Sci. Technol.*, Vol. 53, No. 12, pp. 257-264.

Kim, S.S., Park, N.S., Moon, Y.T. and Lee, S.J. (2006) Case study on remodeling outlet structure within a sedimentation basin for improving performance, *J. KSWW*, Vol. 20, No. 6, pp. 911-918.

Lamberto, D.J., Alvarez, M.M. and Muzzio, F.J. (1999) Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 54, pp. 919-942.

Merlo, R.P., Esping, D., Jimenez, J., Campanella, K., Freedman, S., Parker, D., Wahlberg, E., Witzgall, B. and Caldwell, B. (2006) *Getting more out of secondary clarifiers for wet weather flow management using state of the art tools*, WEFTEC 2006, Water Environment Foundation, pp. 292-309.

Metcalf & Eddy, Inc. (2003) *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th Edn, McGraw-Hill, New York.

Ministry of Environment (2011) *Standard for Sewerage Facilities*.

Park, N.S., Park, H.K. and Kim, J.S. (2001) A study on distribution of local velocity gradients in rapid mixers using PIV technique, *J. KSEE*, Vol. 23, No. 12, pp. 2033-2044.

Pophali, G.R., Kaul, S.N., Nandy, T. and Devotta, S. (2009) Development of a novel circular secondary clarifier for improv-

- ing solids liquid separation in wastewater treatment, *Water Environ. Res.*, Vol. 81, No. 2, pp. 140–149.
- Stukenberg, J.R., Rodman, L.C. and Touslee, J.E. (1983) Activated sludge clarifier design improvements, *J. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 55, No. 4, pp. 341–348.
- Zhou, S. (2008) *Multilayer energy dissipating inlet column in center-feed clarifiers*, US Patent No. 07378027.