

와동 발생기를 이용한 자외선 살균 시스템 성능 향상에 관한 연구

김봉환[†] · 안국찬 · 김동진^{*}

진주산업대학교 자동차공학과 · 한라대학교 컴퓨터응용설계학과
(2006. 12. 5. 접수 / 2007. 2. 20. 채택)

A Study on Enhancement of UV Disinfection System Performance by the Vortex Generator

Bong-Hwan Kim[†] · Kook-Chan Ahn · Dong-Jin Kim^{*}

Department of Automotive Engineering, Jinju National University

^{*}Department of Computer Aided Design, Halla University

(Received December 5, 2006 / Accepted February 20, 2007)

Abstract : The effectiveness of a UV(ultra violet) disinfection system depends on the characteristics of the waste water, flow conditions, the intensity of UV radiation, the amount of time the microorganisms are exposed to the radiation, and the reactor configuration. The wast water flow conditions are important factors in the design of UV disinfection system from the point of enhancement view of UV disinfection. The turbulent energy intensity in the wake by the vortex shedding are effective for UV radiation. Therewith the effectiveness of vortex generator is considered as a enhancement of UV disinfection. The experimental results presented give important evidences and explain that it is possible to predict UV disinfection performance based on flow experiments. An experimental investigation of two types of the vortex generator is presented. The qualitative and quantitative evaluations of the wake are made by flow visualization using smoke wire method and the measurement of vortex frequencies in the wind tunnel. From the experiment, following results were obtained that the delta wing type vortex generator is more effective than circular type because of the higher vortex frequencies and the smaller drag.

Key Words : UV(Ultra Violet), disinfection, vortex generator, vortex shedding frequency, delta wing, turbulence intensity

1. 서 론

최종 침전처리가 된 생활하수는 상당히 많은 대장균 및 각종 세균과 바이러스를 보유하고 있는 바, 그대로 방류하게 되면 하류의 수중 생물들에게 막대한 영향을 주게 되며 여기에 포함된 병원성 세균이 있을 시는 인간에게 전염병과 같은 심각한 악영향을 초래할 수 있으므로 국민의 건강과 안전을 위해서 필히 방류 전에 이들 세균을 살균하여야 한다. 최근 하수처리장 공정에서 고도처리를 위한 3차 처리로서 마이크로 필터링처리를 실행한다고 하여도 그 공정의 후단에 자외선살균시스템(UV disinfection system)을 설치하여 살균공정을 거친 후 수질을 개선한 상태에서 하류의 하천 등으로 방류하거나 처리장

내의 재활용수로 사용하게 되는 것이다¹⁾. 자외선 살균시스템은 Fig. 1과 같이 하수처리공정 중의 2차 침전처리 이후의 하수의 유입을 자연 유하로 입수시킨 다음 유입수의 흐름방향과 수평으로 설치된다. 이 때 완전히 물에 잠기도록 설계된 수로 형 자외선살균시스템의 램프에 전원이 들어오면 램프는 254nm의 자외선 C-ray를 90%이상 출력하여 처리장치를 통과하는 유입 하수에 포함된 유해세균과 바이러스를 살균할 수 있도록 되어 있다²⁾. 이러한 생활하수에 대한 자외선살균시스템에서 살균효과를 최대화하기 위해서는 시스템에 유입되는 수질상태와 함께 자외선의 조사세기와 조사량 그리고 이에 맞는 자외선램프의 수와 이의 배치가 가장 중요한 설계변수이다. 아울러 자외선살균시스템의 실제 가동상태에서 하수에 대한 살균효과를 더욱더 높이기 위해서는 자외선램프로부터의 자외선이 하수 내 세

[†] To whom correspondence should be addressed.
bhwkim@jinju.ac.kr

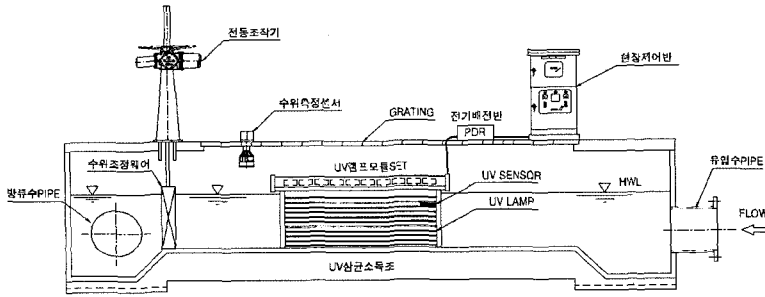


Fig. 1. Actual pilot plant of UV disinfection system.

균이나 미생물에 골고루 잘 도달할 수 있도록 하수의 유체역학적 흐름을 최적화하는 것이 매우 중요하다³⁾. 이러한 관점에서 볼 때, 일반적인 자외선살균시스템의 구성에 덧붙여 자외선의 조사 효율을 더욱 높게 유지할 필요가 있다. 종래의 기술은 지상에서 송풍기에 의해 공기를 주입하고 수로의 바닥에 산기관(air diffuser)을 설치하여 공기방울을 이용하는 방법과 전기작동형 진동자(electric vibrator)를 설치하여 그 진동을 유체흐름에 이용하는 방법이 개발되어 사용되어 왔다. 산기관을 설치할 경우에는 공기발생을 위해 별도의 송풍기와 공기배관 및 산기관을 추가로 설치하여야 하며 송풍기 운전에 의한 동력비로 인하여 경제성이 떨어진다. 진동자를 사용하는 경우는 동력의 증가는 미미하지만 유체로의 진동전달에 의한 유체 와동의 발생으로 인해 자외선 조사효율의 증가가 크지 않으므로 추가적인 장치의 설치에도 불구하고 자외선 살균효과가 상대적으로 크지 않은 단점이 있다⁴⁾.

종래의 기술적 문제점을 해결하고 살균작용의 신뢰도를 향상시키기 위해 하수가 유입되는 자외선살균시스템의 유입 측 챔버(chamber) 내에 와동발생기(vortex generator)를 경사지게 설치하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 이 방법은 자외선살균시스템의 수로 내에 일정한 와동을 지속적으로 발생시켜 유체가 통과하는 동안의 동일한 접촉시간 내에 자외선 조사효율을 종래의 시스템보다 증가시킴으로써 하수의 살균효과를 크게 할 수 있다^{5,9)}.

본 연구에서는 하수처리를 위한 수로 형 자외선 살균시스템의 성능향상을 위하여 와동발생기를 적용할 경우에 있어서의 와동발생기의 형상에 따른 와동 및 후류특성을 가시화 실험과 후류 유동장의 계측실험을 통하여 규명하고자 한다. 아울러 와동발생기 설치로 인한 와동방출이 자외선램프 주위 유동장의 난류에너지강도에 미치는 영향을 정량적으로 규

명함으로써 고효율 하수처리용 자외선 살균시스템의 국산화 및 기존 시스템의 성능향상에 기여할 뿐만 아니라 나아가서는 국민 건강과 안전에 이바지하고자 한다.

2. 실험

2.1. 실험장치

본 연구에서는 전체 길이가 6,375mm이고 시험부의 크기가 305mm(폭) × 305mm(높이) × 3,200mm(길이)인 개회로 노즐형의 흡입식 아음속 풍동을 사용하였다. 공기는 3상 교류전동기(3.7kW)로 구동되는 축류송풍기에 의해 흡입되고 노즐형의 수축부와 시험구간을 거쳐 확대 부를 지나 송풍기를 통해 유출된다. 인버터(inverter)를 이용하여 최대유속인 약 30 m/s까지 조절할 수 있으며, 풍동의 개략도는 Fig. 2와 같다. 실험모델은 풍동 입구에서 하류 쪽으로 약 1,800mm 위치에 설치하였고 시험구간의 재질은 투명 아크릴판으로 하였으며 유동이 균일하도록 입구에 40mesh의 스크린을 설치하여 시험구간에서의 난류강도가 약 2%를 유지하도록 하였다. 시험구간에서 속도분포의 균일도는 경계층을 제외하면 1.0 ~ 1.5% 정도로 양호하게 나타났다. 실험에 사용된 모델들의 폭을 기준으로 한 형상비(aspect ratio)는 11.8이고 폐쇄비(blockage ratio)는 11.8%이다.

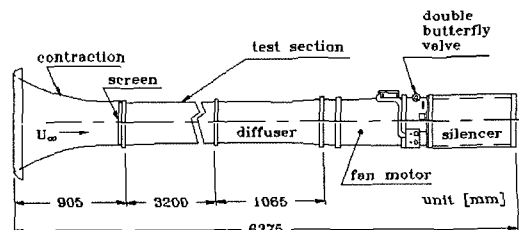


Fig. 2. Schematic diagram of the wind tunnel.

2.2. 실험방법

와동발생기의 단면형상으로서 원형, 타원형, 삼각, 사각형 등의 형상이 있는데 유동에 의한 항력 특성과 제작상의 용이함을 고려하여 주로 원형과 삼각형이 많이 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 선행연구결과를 바탕으로 와동발생기의 실험모델로 원주(circular cylinder)와 삼각주(trigonal cylinder)를 선정하였다.

실험모델의 후류속도측정을 위해서 정온열선풍속계(CTA, TSI사의 IFA300)와 X형의 열선을 사용하였고, 열선교정은 교정 표(look-up table)를 이용하였다. 난류성분을 분석하기 위해서 정온열선풍속계에서 나오는 출력신호를 5kHz의 저역통과필터를 거쳐 A/D변환기를 통해 컴퓨터로 온라인 처리하고 프로그램으로 원격조종이 가능하게 하여 직접 컴퓨터로 저장하였다. 측정위치는 등 간격으로 하였고 열선의 이송은 2차원 자동이송장치를 사용하여 실험을 수행하였다. 또한 신호분석을 위한 데이터는 10kHz의 추출주파수(sampling frequency)로 매 측정 점 당 4,096개씩의 자료를 20번씩 획득하여 앙상블 평균(ensemble average)을 취하였다. 그리고 단순히 평균 속도측정을 하는 시험 부 앞쪽의 자유흐름속도 측정에는 표준피토탄압관(standard Pitot static tube)과 미세압력계(micro-manometer Furness사 FCO12)를 사용하였다. Fig. 3은 이상의 데이터 취득방법의 개략도를 나타낸 것이다. 여기서 자유유동흐름방향을 X축으로 지정하였고 여기에 수직인 방향을 Y방향으로 정하였다. 원점은 Fig. 3에서와 같이 모델의 끝지점으로 하였다. 측정지점은 모델의 폭을 기준으로 $X/d = 5.0$ 지점에서 $Y/d = \pm 3.0$ 의 영역에서 $0.2d$ 씩 이송하면서 측정하였다.

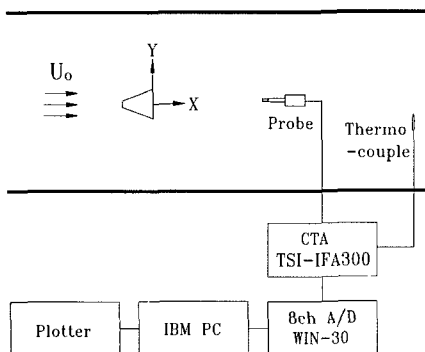


Fig. 3. Schematic diagram of the measuring and data processing system.

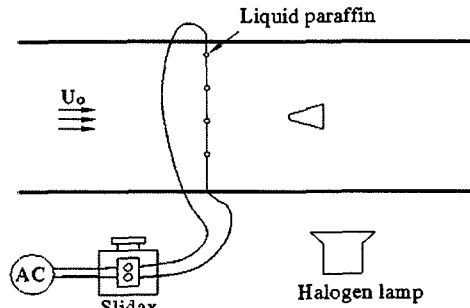


Fig. 4. Schematic diagram of the flow-visualization by the smoke wire method.

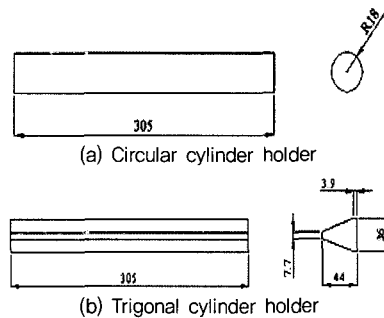


Fig. 5. Geometry of experimental models.

본 연구에서는 실험에 사용된 모델에 대한 와동의 생성 메커니즘을 정성적으로 살펴보고자 연기유선(smoke-wire)기법을 이용하여 유동가시화 실험을 수행하였다. Fig. 4는 가시화장치의 개략도이다. 먼저 연기가 잘 보이도록 하기 위하여 피사체 뒤쪽에 검은 종이를 부착하고 풍동 내의 유속을 1.0m/sec에 고정시킨 후 상류 측에 0.3mm 두께의 니크롬선을 모델과 직각이 되도록 설치하였다. 다음으로 니크롬선에 액체 파라핀(liquid paraffin)을 균일하게 맺히도록 한 후 전압조절기(slidax)를 사용하여 전압을 조절하면서 연기를 발생시켰다. 연기를 할로겐 램프(halogen lamp)로 조명하면서 캠코더(camcorder)로 촬영한 후, 영상처리 보드를 이용하여 포착(capture)하였다. 본 실험에 사용된 모델은 Fig. 5와 같이 아크릴 재질의 삼각주와 원주를 사용하였으며 제원은 Fig. 5와 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1. 가시화 실험결과

Fig. 6과 7은 원주와 삼각주에 대한 가시화실험 결과들이다. 각각에서 와 유출에 의한 유선의 변화



Fig. 6. Flow-visualization results of the circular cylinder holder.

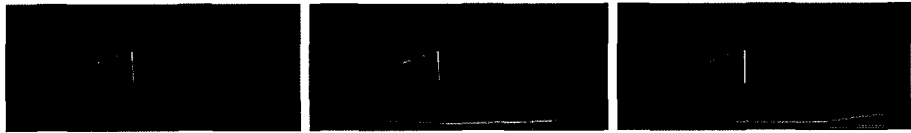


Fig. 7. Flow-visualization results of the trigonal cylinder holder.



(a) Circular cylinder holder



(b) Trigonal cylinder holder

Fig. 8. Comparison of the flow-visualization results.

를 정성적으로 살펴볼 수 있으며 전체적으로 볼 때 삼각주의 경우에서 후류의 폭 및 길이가 원주보다 작게 나타났다¹⁰⁾. Fig. 8은 두 모델의 가시화 결과사진을 비교한 것이며 후류의 폭을 보여주고 있다. 정성적인 비교이기는 하지만 삼각주의 경우는 후류 폭이 실린더 폭과 거의 같으나, 원주의 경우는 실린더 폭보다 후류 폭이 큰 것을 알 수 있다. 이렇게 후류 폭이 크게 되면 항력이 증가하게 된다^{10,11)}.

3.2. 유동실험결과

Fig. 9~12는 두 모델의 유동실험결과를 비교한 것이다. 자유유동속도는 실제상황을 고려하여 레이놀즈수(Reynolds number) 기준으로 대략 7,000~14,000을 유지할 수 있는 자유유동 속도를 정하였으며 이때의 자유유동속도는 3.0m/sec와 6.0m/sec이다. 먼저 $X/d = 5.0$ 에서 측정된 평균속도분포를 나타낸 Fig. 9를 살펴보면 각 모델에서 자유유동속도 3.0m/sec와 6.0m/sec의 분포는 거의 비슷하며 삼각주의 중심부분에서의 속도 결손이 작고 폭도 좁은 것을 알 수 있다. 이는 앞선 수치해석^{10,11)}에서 삼각주의 항력이 적게 나타났는데 이를 뒷받침해주는 결과라고 판단된다. 그리고 주 흐름방향과 이에 수직인 방향에 대한 난류강도분포를 Fig. 10과 11에 나타내었는데 주 흐름방향의 난류강도는 삼각주의 경우가 낮게 나타났으며 수직방향의 난류강도는 거의 비슷하게 나타났고 두 경우에서 모두 삼각주의 난

류강도분포 폭이 좁은 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 10에서 확인하였듯이 삼각주의 후류 폭이 작기 때문에 나타난 결과이다.

Fig. 12와 13에는 와유출주파수(vortex shedding frequency)를 측정하기 위한 파워스펙트럼(Power spectrum) 분석결과이다. 침두치를 보이는 지점은 와유출(vortex shedding)에 의한 것이며 여기에 해당되는 주파수가 와유출주파수에 해당된다. 여기서 특이한 사항은 삼각주의 경우, 와유출주파수가 원주에 비해서 높다는 것이다. 이를 Table 1에 비교하여 나타내었는데 삼각주의 경우가 자유유동속도 3.0m/sec와 6.0m/sec

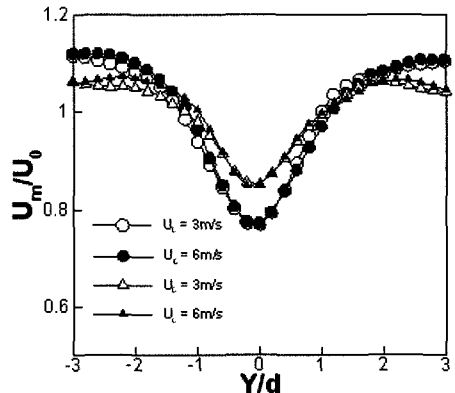


Fig. 9. Comparison of the streamwise velocity distributions at $X/d = 5.0$ (○, ●: Circular cylinder, △, ▲: Trigonal cylinder).

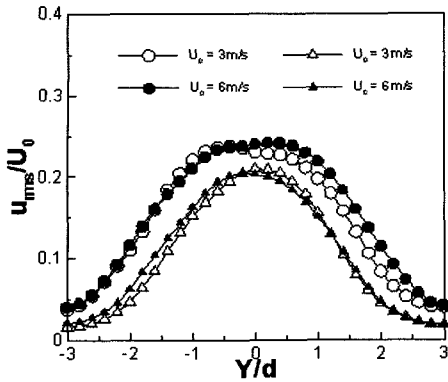


Fig. 10. Distribution of the streamwise turbulent intensity at $X/d=5.0$ (○,●:Circular cylinder, △,▲:Trigonal cylinder).

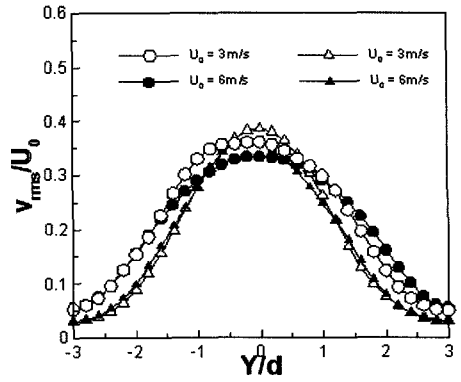


Fig. 11. Distribution of the lateral turbulent intensity at $X/d=5.0$ (○,●:Circular cylinder, △,▲:Trigonal cylinder).

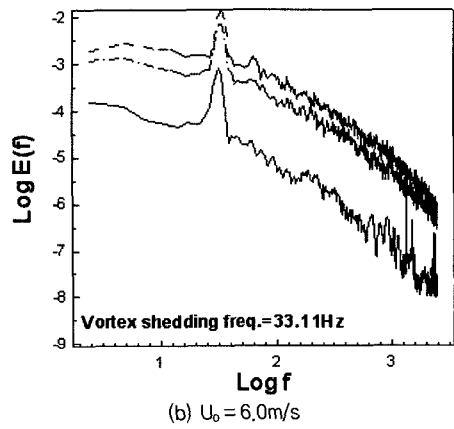
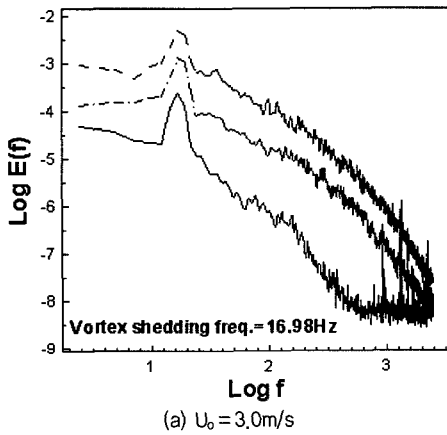


Fig. 12. Power spectrum distribution of the circular cylinder holder.

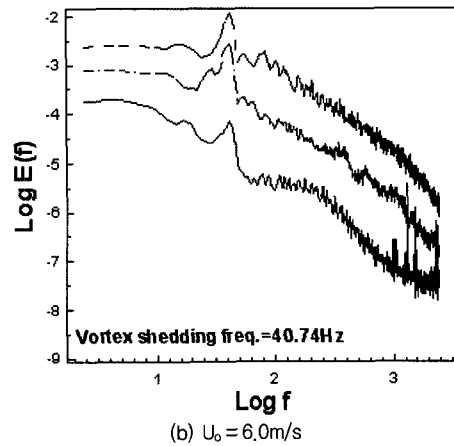
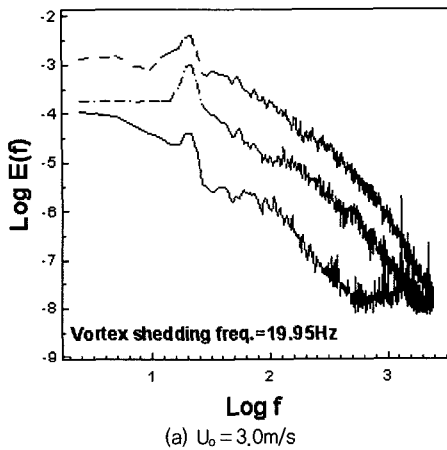


Fig. 13. Power spectrum distribution of the trigonal cylinder holder.

에서 17.5%, 23.0% 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 볼 때 삼각주의 난류에너지 분포가 하류

에서 높게 나타난 이유는 Table 1에서 알 수 있듯이 와류출주파수의 증가로 인해 나타난 결과라 판단된다.

Table 1. Comparison of the vortex shedding frequencies

	Circular cylinder holder		Trigonal cylinder holder	
	$U_0 = 3.0\text{m/s}$	$U_0 = 6.0\text{m/s}$	$U_0 = 3.0\text{m/s}$	$U_0 = 6.0\text{m/s}$
Vortex shedding frequency [Hz]	16.98	33.11	19.95 (17.5% ↑)	40.74 (23.0% ↑)

4. 결론

수로 형 자외선살균시스템의 성능을 향상시키는 방안으로서 자외선램프 주위 유동장의 난류에너지강도를 높이기 위한 와동발생기 설치를 고려하였다. 와동발생기 설치에 따른 자외선램프 주위 후류 유동장 특성연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 후류형태를 규명하기 위한 가시화실험을 통하여 삼각주인 경우가 원주인 경우보다 후류 폭이 작아서 항력 측면에서 유리함을 알 수 있다.

2) 레이놀즈수가 증가할수록 난류에너지강도에 결정적 영향을 미치는 와유출주파수가 증가하는데, 삼각주가 원주인 경우에 비하여 레이놀즈수가 14,000인 경우에 약 23% 정도 증가였다.

3) 와동발생기가 설치되지 않은 기존 시스템의 유체흐름 내 난류유동에너지(turbulent kinetic energy)에 비하여 삼각주를 설치한 경우가 표면에 대한 난류유동에너지가 더욱더 크게 됨으로써, 와동발생기에 의해 발생하는 와유동이 삼각익을 통과하면서 난류유동을 보다 크게 하며 유체 내에서의 자외선조사 정도를 더욱 활발하게 한다.

따라서 난류에너지강도의 증가는 하수의 자외선 살균시스템의 효율을 증가시키는데 효과가 있을 것이며, 이러한 효율증가는 홀더의 형상변경으로 가능하므로 경제적인 장점을 갖게 되어 본 실험결과를 실제 시스템에 적용할 수 있게 될 것이다.

참고문헌

1) P. Gelzhauser, "UV Plants for Water Disinfection

Requirements Test and Construction Characteristics in Berlin", 1989.

2) E. R. Blatchley, W. L. Wood, P. Schuerch, "UV Pilot Testing Intensity Distribution and Hydrodynamics", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 121, No. 3, pp. 258, 1995.

3) R. Iranpour, G. Gamas, O. Moghaddam, A. Tabeji, "Hydraulic Effects on Ultraviolet Disinfection: Modification of Reactor Design", *Water Environmental Research*, Vol. 71, No. 1, pp. 114, 1999.

4) F. J. Loge, R. W. Emerick, D. E. Thompson, D. C. Neldon, J. L. Darby, "Factors Influencing Ultraviolet Disinfection Performance Part I : Light Penetration to Waste Water Particles", *Water Environmental Research*, Vol. 71, No. 3, pp. 377, 1999.

5) 김봉환, 류병남, 강동구, "배연탈질설비의 성능 향상을 위한 가스혼합에 관한 연구", *한국박용기관학회지*, 제23권, 204호, pp. 462~472, 1999.

6) G. Raman, "Supersonic Jet Mixing Enhancement Using Impingement Tones from Obstacles of Various Geometries", *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 454~462, 1995.

7) J. Wendt, W. R. Hingst, "Flow Structure in the Wake of a Wishbone Vortex Generator", *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 11, pp. 2234~2240, 1994.

8) H. J. Lugt, "Vortex Flows in Nature and Technology", pp. 81~83, 1983.

9) 실용신안 등록 제0346466호, "수로형 고효율 자외선 살균장치", 2004.

10) H. R. Higuchi, W. Anderson, J. Zhang, "Three-Dimensional Wake Formations Behind a Family of Regular Polygonal Plates", *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 6, pp. 1138~1145, 1996.

11) B. Z. Sung, "Analysis of the Vortical Flows around a 60 Degree Delta Wing with Vortex Flap", Ph. D Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1985.