

해양방류 수치모형에 관한 최근 연구동향 및 성과(I) 제1편:근역혼합 모형의 시각화 방법

서 일 원 (서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수)

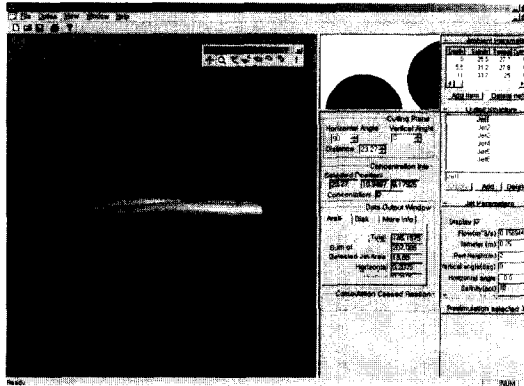
김 영 도 (서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정)

1. 서 론

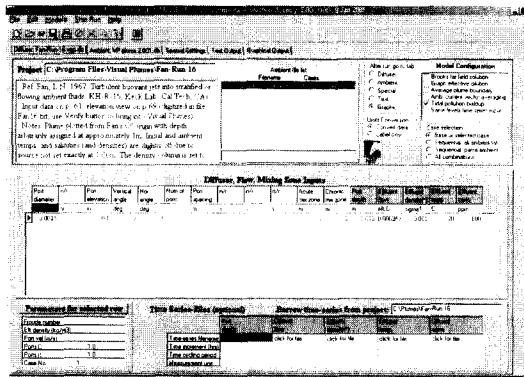
국내외적으로 해안에 인접한 도시의 하·폐수처리장에서 1, 2차 처리한 하·폐수를 해양에 방류하는 경우 해양환경에 미치는 악영향을 최소화하기 위하여 해안에서 일정 거리이상 떨어진 지점의 해저에 수중확산관(submerged diffuser)을 설치하여 이를 통하여 하·폐수를 방류하는 방법을 널리 채택하고 있다(서일원과 류시완, 2000). 수중확산관에서 방류된 부력제트의 근역에서의 초기혼합 특성은 방류 조건, 확산관 특성, 주변류 조건 등에 영향을 받으며, 이를 예측하는 근역혼합 모형을 대별하면 특성길이 모형(length-scale model)과 제트적분 모형(jet-integral model)으로 나눌 수 있다. 특성길이란 방류제트의 운동량 및 부력 흐름률, 주변수의 유속, 밀도성층화 등이 제트의 거동에 미치는 상대적인 크기를 나타내는 무차원화된 값이다. 특성길이 모형은 제트의 거동을 영역별로 특성화하는 길이를 이용해 흐름을 분류하고, 실험을 통해 결정된 비례상수와 지배적인 특성길이들로 표현된 경험식을 사용하여 초기회석률과 플룸상승고 등의 근역혼합 특성을 예측하는 모형이다. 이는 이론적으로는 비교적 단순한 형태의 모형이지만 복잡한 부력제트의 초기혼합 과정을 해석하는데 있어서 가장 널리 사용되고 있으며, 형성된 하수장의 농도 및 크기 등의 결과를 얻을 수 있다. 대표적인 특성길이 모형으로는 CORMIX1, 2, 3 모형(Jirka 등, 1996)과 RSB 모형

(Roberts 등, 1989) 등이 있다. 제트적분 모형은 질량, 운동량, 부력 등에 관한 보존방정식에 유사함수로 가정한 속도 및 농도 분포식을 대입하고 이들을 제트 단면에 대하여 적분하여 얻은 상미분 방정식의 해를 구하는 것이다. 제트적분 모형은 Eulerian 모형과 Lagrangian 모형으로 나눌 수 있으며, 중심선 궤적과 이에 따른 플룸의 농도 및 반폭 등의 결과를 얻을 수 있다. 대표적인 제트적분 모형으로는 UDKHDEN 모형(Muellenhoff 등, 1985), UM 모형(Baumgartner 등, 1994), JETLAG 모형(Lee와 Cheung, 1990) 등이 있으며, UM 모형은 RSB 모형과 더불어 미국 EPA의 PLUMES(Baumgartner 등, 1994)에 포함되어 있다.

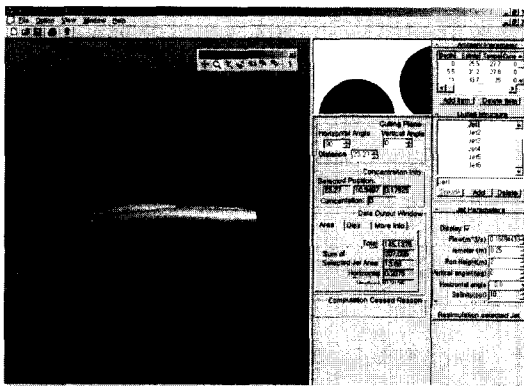
근역혼합 모형은 오랜 기간동안 다양한 모형실험과 현장적용을 통하여 검증 및 개선되어왔으며, 최근 들어 Windows 기반의 GUI(graphic user interface)를 이용한 전·후처리 시스템(그림 1)과 모형 결과의 시각화(visualization) 기법을 도입하여 사용자에게 보다 편리한 시스템으로 개선되고 있다. 구축된 시스템은 온라인을 중심으로 대학과 연구소에 공개되어 일정기간의 시험을 통하여 상용화 중에 있으며, 대표적인 경우가 미국 EPA의 공개 프로그램으로 널리 알려진 CORMIX의 상위버전인 CORMIX-GI(Doneker와 Jirka, 2000)로서, 현재 시험기간을 거친 후 인터넷(<http://steens.es.eogi.edu>)을 통하여 전 세계 사용자를 대상으로 판매되고



a) CORMIX-GI



b) VISUAL PLUMES



c) VISJET

그림 1. GUI를 이용한 전·후처리 시스템

있다. 그밖에도 VISUAL PLUMES(Frick 등, 2000)와 VISJET(Lee 등, 2000) 등이 그림 1의 (b), (c)와 같은 Windows 기반의 전·후처리 시스템

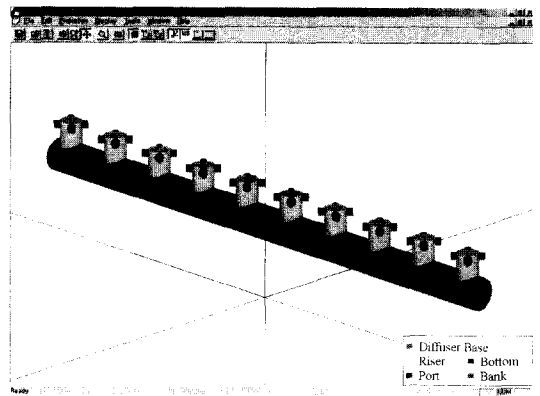


그림 2. CORSPY를 이용한 4공형태 양방향확산관의 시각화

과 시각화기법을 도입하여 보다 사용하기 쉬운 시스템으로 개선 중에 있다.

상술한 근역혼합 모형은 모형의 개발이나 검증과정에 있어 모형실험을 통한 결과에 상당히 의존한다. 그러나 여러 가지 복잡한 조건들에 의해 다양한 혼합거동을 나타내는 부력제트의 거동은 제한된 조건에서의 실험결과를 통해 모든 경우를 검증하기란 무척 어렵다. 또한 외국에 시공된 대부분의 해양방류시스템은 해안선에서 멀리 떨어진 지점에서 심해에 위치하며, 이는 국내에 설치된 해양방류시설의 조건과는 크게 다르다(서일원과 류시완, 2000). 기존의 미국 EPA의 공개프로그램들이 이러한 시각화 기법이 도입되면서 점차적으로 상용화되는 추세에 있기 때문에 국내에서도 국내여건에 적합한 자체적인 모형의 개발과 검증에 지속적인 연구가 필요하다고 판단된

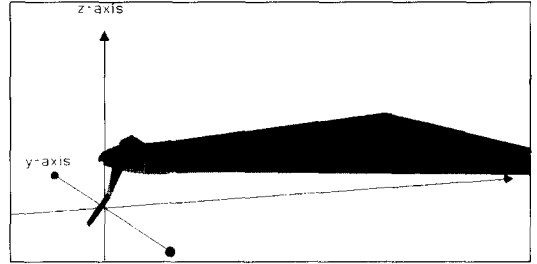
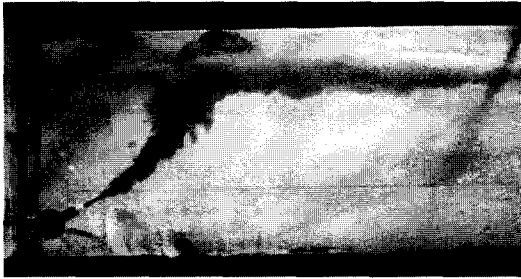


그림 3. 단일확산관의 모형실험과 CORVUE를 이용한 시각화

다. 본 기고에서는 대표적인 외국의 모형개발 사례들을 비교하고, 각각의 후처리 시스템에서 사용된 시각화 방법에 대하여 검토하여, 향후 국내의 연구방향을 제시하고자 한다.

2. 외국의 근역혼합 모형

2.1 CORMIX-GI

CORMIX는 미국 EPA의 지원을 받아 Cornell 대학에서 개발한 전문가 시스템으로서, 새로운 방류시스템을 설계하거나, 기존의 방류시스템에서 다양한 조건으로 방류된 오염물, 독극물, 또는 온배수를 해석하기 위해 개발되었다. CORMIX는 단일확산관에 의한 수중방류를 위한 CORMIX1 모형, 다공확산관에 의한 수중방류를 위한 CORMIX2 모형, 수표면방류를 위한 CORMIX3 모형을 포함하고 있다. 또한 CORMIX1 모형과 CORMIX2 모형의 수행에 앞서서 단일부력제트의 궤적을 모의할 수 있는 CORJET 제트적분 모형이 포함되어 있다. CORMIX는 기본적으로 정상상태의 주변흐름에 오염물이 방류되는 경우를 위한 모형이나 최근에는 조석의 영향을 받는 주변수역에서 오염물이 내해로 재유입되는 경우도 모의할 수 있도록 수정, 보완되었다(Akar와 Jirka, 1991). 이 밖에도 CORMIX에는 플룸의 2차원 형상을 보여주는 CMXGRAPH와 현장의 단면 농도자료와의 비교를 위하여 누가유량법을 이용하여 원역확산을 모의하는 FFLOCATR 등의 후처리 프로그램이 포함되어 있다. 기존의 CORMIX 3.2 버전까지는 DOS 기반의 공개프로그램으로서 VP-Expert Shell

에 의하여 사용자와의 대화방식으로 자료의 입력 및 계산을 수행하도록 하였다. Kim과 Seo(2001)는 수치실험확산관 개념을 이용한 격자모형을 개발하였고, 이를 고리원전 지역에 가상의 온배수확산관에 적용하였으며, 이 결과를 CORMIX2 모형의 결과와 비교한 바 있다.

CORMIX-GI는 4.0 이후 버전을 나타내는 것으로서 GUI 방식으로 전·후처리가 가능한 상용프로그램이다. CORMIX-GI에는 CORMIX3 모형에 앞서 계산을 수행하는 제트적분 모형인 CORSURF 모형, DOS 버전의 자료화일을 읽어들이는 CORDATA, 민감도 분석을 수행하는 CORSENS, 사용지침서와 기존에 발표된 관련 보고서들을 웹페이지 형식으로 구성해 놓은 CORDOCS 등의 도구들이 추가되었으며, 확산관의 3차원 기하학적 형상을 나타내는 CORSPY와 모형의 계산결과를 3차원 플룸형상으로 나타내는 CORVUE가 새로이 개발되었다(Doneker와 Jirka, 2000). 그림 2는 CORSPY가 제공하는 양방향확산관의 기하학적 형상을 나타내며, 그림 3은 모형실험 사진과 CORVUE를 이용한 시각화된 모의결과를 나타낸다. 이 밖에도 GIS를 결합하여 사용할 수 있도록 해주는 CORGIS와 설계원칙에 기초하여 민감도 분석을 수행하는 CORBATC도 포함되어 있다. 또한 CORMIX3 모형을 준설시 방류되는 탁수의 혼합거동에 확장하여 수표면 방류된 준설토의 혼합과정을 모의하는 D-CORMIX 모형(Doneker와 Jirka, 1997)도 최근에 개발되어 상용화되었으며, 현재 Windows 기반의 상위버전이 개발 중에 있다.

2.2 VISUAL PLUMES

PLUMES는 RSB 모형, UM 모형, Brooks (1972)의 원역해석 방법 등을 포함한 DOS 기반 혼합구역 해석프로그램으로서 밀도성층화된 흐름수역에서의 수중방류된 단일 또는 병합플룸의 근역 및 원역 혼합을 모의할 수 있다. RSB 모형은 임의의 방향과 속도를 가진 정상상태의 가로흐름이 있는 선형 밀도성층 수역에서 방류된 선플룸의 초기회석률과 하수장의 형태를 연구한 실험에 기초한 모형이다. UM 모형은 UMERGE 모형(Muellenhoff 등, 1985)을 개량, 발전시킨 Lagrangian 적분모형으로 투영면적포획 가정을 사용한다. UM 모형의 가장 기본적인 가정은 각 플룸 요소들은 동일한 궤적을 따라 움직이며 농도와 유속 등의 모든 물리량은 정상상태라는 것이다. UM 모형은 플룸의 궤적에 대한 요소의 길이가 작을 때 궤적이 회절된다면 플룸요소의 중심은 플룸의 횡단면 중심과 일치하지 않는 효과를 모의할 수 없다. 또한, 궤적의 반경이 플룸의 반경보다 작을 때, 즉 플룸이 증첩되는 부분이 발생할 때 UM 모형은 초기 회석률 계산을 중단하는 결점이 있다(김창서 등, 2000).

VISUAL PLUMES는 GUI를 포함한 Windows 기반의 PLUMES의 상위버전으로서, 보다 다양해진 그래픽기능, 시계열 자료의 입력기능, 조석환경에서의 배경농도 작성기능, 민감도 분석, 병원균감소 모의 기능 등이 추가되었다. 이러한 기능을 추가하기 위하여 VISUAL PLUMES에는 UDKHDEN 모형에 기초한 DKHW 모형, 수표면 방류를 위한 PDS 모형(Davis, 1999)에 기초한 PDSW 모형, UM 모형을 3차원으로 확장한 UM3 모형, RSB 모형에 기초한 NFIELD 모형(Roberts, 1999)이 추가되었으며, 현재 원역확산에 대하여 도달률(visitation frequency)을 이용한 통계적 해석을 위한 FRFIELD 모형(Roberts, 1999)을 추가할 예정이다(Frick 등, 2000). 그림 4는 VISUAL PLUMES의 전형적인 결과로서 플룸의 2차원 궤적 및 거리에 따른 회석률 등을 나타내며, 현재 버전에서는 3차원 입체영상 및 동영상상을 이용한 결과는 제공하지 않는다.

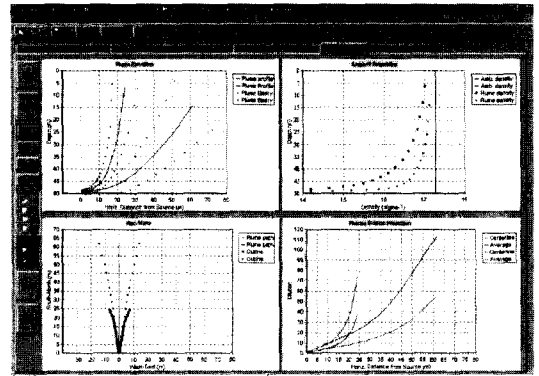


그림 4. VISUAL PLUMES의 모의결과

2.3 VISJET

JETLAG 모형은 UOUTPLM 모형(Frick, 1984)을 기초한 Lagrangian 적분모형으로서 투영면적포획 가정을 이용하여 주변류에 방류된 부력제트의 3차원 초기혼합 거동을 모의하며, 오랜 기간동안에 다양한 이론, 기초 실험, 현장 연구 등을 통하여 광범위한 검증은 거쳤다. JETLAG 모형에서는 그림 5에서와 같이 초과유속의 크기와 방향, 반폭, 두께 등으로 정의되는 플룸요소를 이용하여 부력제트의 궤적을 Lagrangian 방법으로 추적한다. 또한 유속 및 농도분포를 top-hat 분포로 가정하였으며, 흐름확립 영역은 세부적으로 고려하지 않는 모형이다.

VISJET은 JETLAG 모형을 이용하여 하나의 연속유도관 내에 서로 다른 방류각을 지닌 다중 부력제

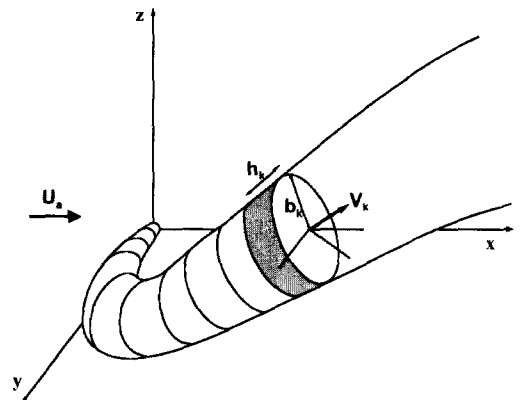


그림 5. JETLAG 모형의 플룸요소

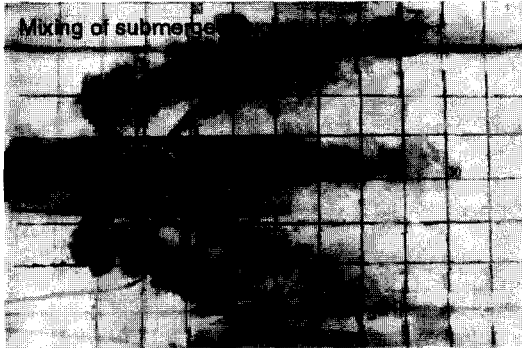


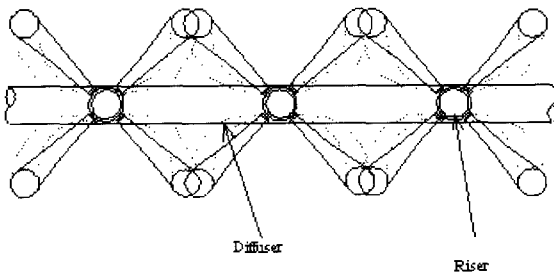
그림 6. 홍콩 해양방류시스템의 모형실험 및 VISJET 모의결과

트를 각각 개별적인 단일 부력제트 모의를 통하여, 이를 시각화하고 분석하는 Windows 기반의 프로그램이다. VISJET은 현재 초기버전이 완성되어 인터넷(<http://www.aoe-water.hku.hk/visjet>)을 통해 공개 중이며, 향후 사용자들의 경험을 토대로 보완 및 개선하여 웹기반의 시스템으로 구축할 예정이다. VISJET의 입력환경에서는 각각의 유도관이나 방류구에서의 부력제트 방류조건을 개별적으로 입력해야 하며, 이를 이용하여 염수침입이나 수두손실로 인하여 유도관이나 방류구 간의 상이한 방류조건을 고려할 수도 있다. VISJET은 JETLAG 모형의 결과를 3차원 그래픽과 애니메이션을 이용하여, 유도관 내의 부력제트들의 거동을 보다 사실적으로 표현해 준다. 그림 6은 홍콩 하수방류시스템의 연직유도관 체원을

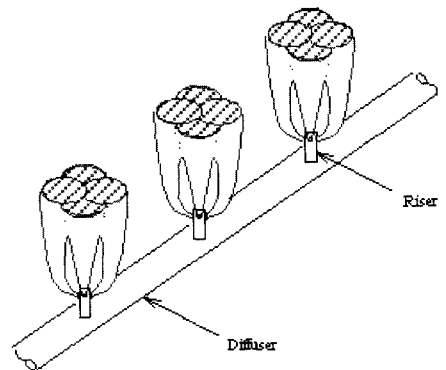
고려한 8공형태 확산관에 대한 모형실험과 6공형태 확산관에 대한 VISJET 모의결과를 나타낸 것이다. 그러나 VISJET에서는 인접한 부력제트들의 궤적에 따른 병합현상과 이로 인한 혼합거동의 영향은 고려하지 않는다.

3. 국내의 연구 동향

국내의 경우, 그림 2에 나타난 것과 유사한 형태의 연직유도관을 사용한 양방향확산관이 마산·창원, 울산, 속초, 부산, 서귀포 등에 위치한 하수처리장의 해양방류시설로서 사용되고 있거나 사용될 예정이다(서일원과 류시완, 2000). 이러한 4공형태 양방향확산관의 병합과정은 그림 7에 나타난 바와 같이 방류



(a) 연직유도관간의 병합



(b) 연직유도관내의 병합

그림 7. 4공형태 양방향확산관의 병합현상

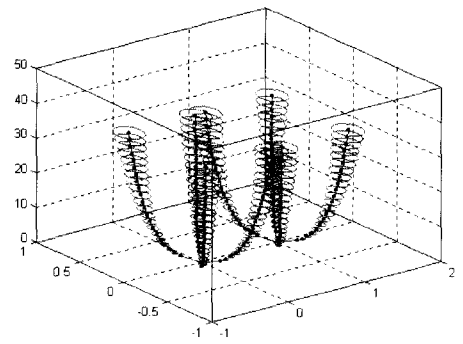
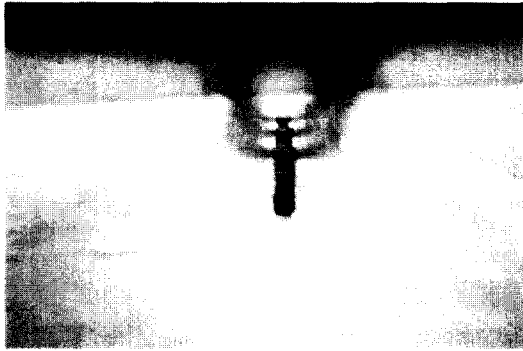


그림 6. 홍콩 해양방류시스템의 모형실험 및 VISJET 모의결과

조건과 주변조건에 따라 기하학적으로 복잡한 형상을 가지며, 이러한 현상은 선플룸을 가정한 기존의 근역모형으로서는 초기 혼합거동을 정확하게 예측할 수 없다. 서일원 등(2000b)은 정체수역에서 4공형태 양방향확산관의 방류포트로부터 방류되는 부력제트의 병합현상을 크게 두 가지 형태로 분류하여 각각에 대한 병합현상을 고찰한 바 있다. 부력이 운동량에 비해 큰 경우에는 하나의 연직유도관 내의 서로 다른 4개의 방류포트에서 방류되는 부력제트가 중심선은 교차하지 않으나 주변수 유입에 의해 횡단면이 확장됨으로써 병합이 발생하고, 운동량이 부력에 비해 큰 경우에는 인접한 연직유도관의 서로 마주보는 포트에서 방류된 부력제트들이 연직유도관간의 중간 지점에서 중심선이 접근해 나가면서 병합이 발생한다(서일원 등, 2000b).

서일원 등(2000a)은 병합에 의한 유입량 감소를 고려하여, 4공형태 양방향확산관에서 방류된 부력제트의 근역혼합 특성을 예측할 수 있는 제트적분 모형을 개발하였고, 이를 수리모형 실험의 결과와 비교하여 검증한 바 있다. 그들이 제시한 모형에서는 병합시에 대부분의 운동량이 소실된 부력지배 흐름인 경우에는 2차원적인 수평방향의 병합으로 근사시킬 수 있으므로, 두 개의 수평한 미소요소를 고려하였으며, 병합이 이루어지면 주변수와의 접촉면적이 감소하여 포획량이 감소하므로, 플룸들이 병합할 때 표면적의 손실로 인한 포획량의 감소를 유입면적의 감소로써 모형화하였다. 그림 8은 국내의 하수방류시스템을 재현

한 모형실험 결과와 서일원 등(2000a)이 개발한 제트적분 모형에서 계산된 부력제트의 3차원 궤적 및 이에 따른 반쪽을 나타낸 것이다. 국내 하수처리장의 해양방류에 사용된 4공형태 양방향확산관에서의 부력제트의 병합여부를 고려하여 근역혼합 거동을 보다 합리적으로 예측하고, 이를 알기 쉽게 시각화하는 방법에 대한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

4. 결론

다양한 기하학적인 형상을 지닌 수중확산관에서 방류된 부력제트들은 인접 부력제트들간의 병합을 통하여 매우 복잡한 혼합거동을 보인다. 이러한 근역에서의 혼합거동을 보다 이해하기 쉽게 설명하기 위해서는 사용자에게 시각화된 정보를 제공하는 것이 중요하다. 최근 외국에서는 기존의 모형들을 보완 및 통합하고 GUI와 시각화 방법을 도입하여 사용자에게 보다 편리한 시스템을 개발 중에 있다. 국내의 경우, 하수방류시스템에 사용된 4공형태의 유도관을 지닌 확산관은 시공 후에도 방류 조건 및 주변류 조건에 따라 병합과정을 달리하며, 이러한 병합과정은 초기 희석거동에 영향을 미친다. 사용자에게 이러한 정보를 보다 정확하게 제공하기 위해서는 희석률이나 플룸상승고와 같은 정량적인 정보이외에도 궤적에 따른 개별적인 플룸의 병합거동과 형성된 하수장의 기하학적 형상에 관한 시각화된 정보를 필요로 한다. 외국의 연구동향 및 이에 따른 성과를 조사하여

비교·검토한 결과, 향후 국내 해양방류시스템의 조건을 고려한 실험연구와 이를 바탕으로 한 자체적인

수치모형의 개발 및 시각화기법을 도입한 사용자위주의 시스템의 구축이 필요하다고 판단된다. ●

〈참고문헌〉

김창시, 서일원, 박문현 (2000). "마산·창원 하수확산관의 회석특성 해석." 대한토목학회논문집, 제20권, 제2-B호, pp. 211-221.

서일원, 류시완 (2000). "국내의 하수해양방류시설의 현황 및 효율." 대한토목학회지 학술기사, 제48권 제4호, pp. 17-22.

서일원, 여홍구, 김영도 (2000a) "양방향 다공확산관의 근역혼합 예측을 위한 제트적분모형 개발." 2000년도 학술발표회 논문집(III), 대한토목학회, pp. 263-266.

서일원, 여홍구, 이동섭, 류시완 (2000b) "정체수역으로 방류된 수평부력제트의 병합특성." 대한토목학회논문집, 제20권, 제4-B호, pp. 513-524.

Akar, P. J., and Jirka, G. H. (1991). CORMIX2: An expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged multiport diffuser discharges. Report No. EPA/600/3-91/073, Environmental Research Laboratory, U.S. EPA, Athens, GA.

Baumgartner, D. J., Frick, W. E., and Roberts, P. J. W. (1994). Dilution models for effluent discharges, 3rd edition. U.S. EPA.

Brooks, N. H. (1972). Dispersion in hydrologic and coastal environments. Report No. 600/3-73-010. U.S. EPA.

Davis, L. R. (1999). Fundamentals of environmental discharge modeling. CRC Press, Baton Raton, FL.

Doneker, R. L., and Jirka, G. H. (1997). D-CORMIX continuous dredge disposal mixing zone water quality model: laboratory and field data validation study. Oregon Graduate Institute.

Doneker, R. L., and Jirka, G. H. (2000). "The CORMIX-GI system for mixing zone prediction, regulatory analysis, and outfall design." Proceedings International Conference Marine Waste Water Discharges 2000, Genova, Italy, pp. 139-151.

Frick, W. E., Roberts, P. J. W., Davis, L. R., Keyes, J., Baumgartner, D. J., and George, K. P. (2000). Dilution models for effluent discharges, 4th edition. U.S. EPA. (Draft)

Frick, W. E. (1984). "Non-empirical closure of the plume equations." Atmospheric Environment, Vol. 18, No. 4, pp. 653-662.

Jirka, G. H., Doneker, R. L., and Hinton, S. W. (1996). User's manual for CORMIX: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. DeFrees Hydraulics Laboratory, Cornell University.

Kim, D. G., and Seo, I. W. (2001). "Numerical Modeling of the tee thermal diffuser in coastal regions." Coastal Engineering Journal, World Scientific Pub. Co. and Japan Society of Civil Engineers, Vol. 43, No. 1, pp. 59-78.

Lee, J. H. W., and Cheung, V. (1990). "Generalized Lagrangian model for buoyant jets in current." Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 6, pp. 1085-1105.

Lee, J. H. W., Cheung, V., Wang, W. P., and Cheung, S. K. B. (2000). "Lagrangian modeling and visualization of rosette outfall plumes." Proceedings Hydroinformatics 2000, Iowa. (CDROM)

Muellerhoff, W. P., Soldate, A. M., Baumgartner, D. J., Schuldt, M. D., Davis, L. R., and Frick, W. E. (1985). Initial Mixing characteristics of municipal ocean discharges. Report No. EPA-600/3-85-073a, U.S. EPA, Washington, D.C.

Roberts, P. J. W. (1999). "Modeling Mamala bay outfall plumes. I: near field II: far field." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 6, pp. 564-583.

Roberts, P. J. W., Snyder, W. H., and
Baumgartner, D. J. (1989). "Ocean outfalls. I:
submerged wastefield formation. II: spatial
evolution of submerged wastefield. III: effect of

diffuser design on submerged wastefield." *Journal
of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 1,
pp. 1-70.