

대류식 순환장치의 저수지수체 유동특성 및 수질영향

이요상* · 이광만 · 고덕구 · 염경택¹

(한국수자원공사 K-water연구원, ¹댐 · 유역관리처)

Study on Effect of Convection Current Aeration System on Mixing Characteristics and Water Quality of Reservoir. Lee, Yosang*, Kwang-Man Lee, Deok-koo Koh and Kyung-Taek Yum¹ (K-water Institute, K-water, Daejeon 305-730, Korea; ¹Dam & Watershed Department)

This study examines the operational effectiveness of a Convection Current Aeration System (CCAS) in reservoir. CCAS was run from June, 2008 when the thermocline begun forming in the reservoir. This paper reviews the influence of stratification, dissolved oxygen dynamics and temperature in the lake's natural state from June to October 2008. The survey was done on a week basis. Upwelling flow effects a radius of 7~10 m at a surface directly and was irrelevant to the strength of thermocline. On the other hand, it was affected the number of working days, and strength of thermocline at vertical profiles of the reservoir. Longer CCAS run, the deeper was the vertical direct flow area. However it didn't break the thermocline during summer season of 2008. The operating efficiency of the CCAS in the reservoir depends on hydraulics and meteorological conditions. Computational Fluid Dynamics (CFD) is a very useful tool for evaluating the operating efficiency of fluid dynamics. The geometry for CFD simulation consists of a cylindrical vessel 25 m radius and 40 m height. The CCAS is located in center of domain. The non-uniform tetrahedral meshes had a bulk of the geometry. The meshes ranged from the coarse to the very fine. This is attributed to the cold water flowing into the downcomer and rising, creating a horizontal flow to the top of the CCAS. The result of CFD demonstrate a closer agreement with surveyed data for temperature and flow velocity. Theoretical dispersion volume were calculated at 8 m depth, 120 m diameter working for 30 days and 10 m depth, 130 m diameter working for 50 days.

Key words : convection current aeration system, reservoir, CFD

서 론

호수에서의 인공순환은 수층에 산소를 공급하고 표층의 조류제어 등을 목적으로 미국에서 1960년대 중반부터 사용되었으며, 국내에서는 90년대부터 설치되기 시작하였다(허 등, 1999; 한국수자원공사, 2002). 일반적으로 수심이 깊은 호수에서는 하절기가 되면 수온약층이 형성

되어 표면과 심수층 간의 수온성층이 형성된다. 이로 인해 호수의 물이 정체되어 있기 때문에 심수층의 하부에서는 표면층에서 침강되는 식물플랑크톤의 사체 등에 의한 용존산소의 소비가 증가되는 반면 외부에서의 공급이 거의 없기 때문에 무산소층이 된다. 이와 같은 용존산소의 결핍으로 저수지 퇴적층에서 무기물의 용출과 함께 내부부하가 증가하게 되고, 영양염을 포함한 유입수 등의 외부부하가 더욱 가중되어 호수에서는 식물플랑크톤농도

* Corresponding author: Tel: 042) 870-7452, Fax: 042) 870-7469, E-mail: yslee@kwater.or.kr

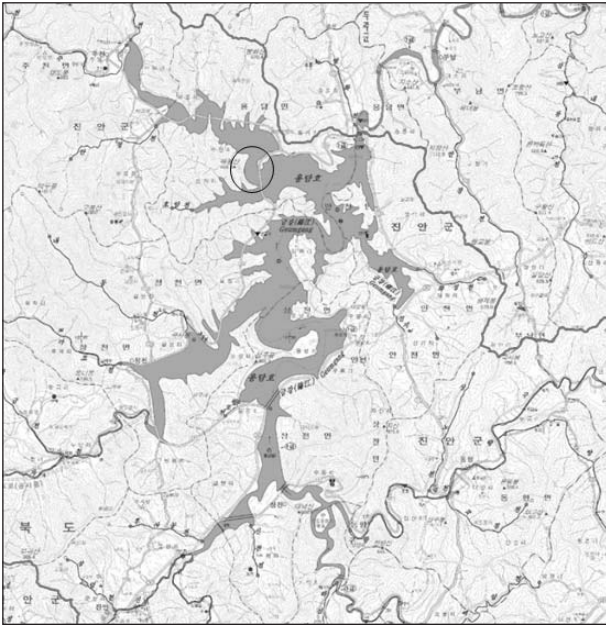


Fig. 1. The map showing the study location of Yongdam reservoir.

의 증가와 투명도 저하 등의 저수지 부영양화현상이 나타나게 된다. 이러한 현상을 제어하는 방안으로 적용된 방법이 인공순환이며 효과적으로 운영되면 심수층에 산소가 공급되어 혐기성층이 소멸되거나 표층 조류의 서식 조건을 변화시킴으로써 녹조현상을 제어할 수 있다(Cooke *et al.*, 1993; Rohan *et al.*, 1993; Brian *et al.*, 1997; Monzur *et al.*, 2000; Chipofya *et al.*, 2003).

본 연구에서는 다목적댐에 최초로 설치된 대류식 순환장치를 장기간 조사하여 유동영향범위 및 수질영향 등을 평가하였으며, CFD적용을 통해 실제현상을 정확히 재현할 수 있는 조건을 설정하므로서 다양한 운영조건에서 모의를 실시하여 실제 운영시 효율성을 높일 수 있는 토대를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

용담댐은 전주권의 용수공급과 하류 홍수피해를 방지하기 위하여 금강의 상류에 건설된 다목적댐으로서 진안군, 장수군, 무주군의 일부가 유역에 포함되고 있다. 대류식 순환장치가 설치된 지점은 Fig. 1에 나타난 지점으로 전주권으로 용수를 공급하는 도수터널의 취수탑이 위치

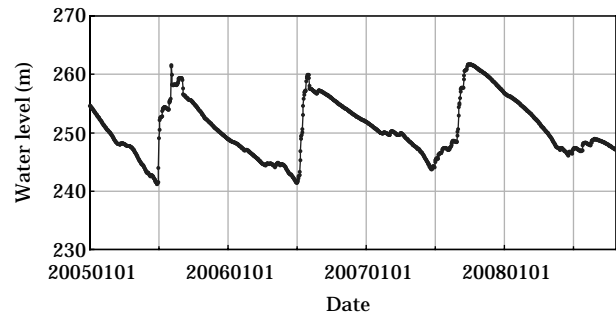


Fig. 2. Water level variation during 2005~2008 in Yongdam reservoir.

한 지점이다. 이 지점의 특징은 용담댐 저수지 지류 중 유입하천의 수질상태가 가장 양호한 하천이 유입되는 구역이며, 취수탑이 위치한 관계로 보다 많은 유동이 일어나 물리적으로는 수질이 비교적 좋은 지역이다. 취수탑에서는 연중 안정적으로 취수를 하며 주천으로부터 유입되는 수량보다 취수탑에서 취수하는 양이 많아 본류로부터 유입되는 수량이 대부분을 차지하고 있다.

2. 수문특성

1) 저수지 수위현황

다목적댐 저수지는 효율적인 이·치수를 위해 전략적 수량관리를 하므로 계절별 수위변화는 매년 유사한 경향을 나타낸다. 지난 2005년부터 2008년 10월까지의 수위 변화는 Fig. 2와 같다. 용담호의 2005년 총 강수량은 1,474.8 mm였고 일 최대 강수량은 7월에 180 mm를 초과하는 것으로 나타났으며 월 강수량은 7월에 519.9 mm로써 가장 풍부하였다. 저수지 수위의 평균값은 250.9 m, 변동 범위는 241.2~261.7 m를 나타냈다.

2006년 강수량은 1378.2 mm였고, 무강수일을 제외한 연중 강수량의 평균값과 범위는 각각 9.6 mm, 0.1~85.0 mm였다. 저수지 수위의 평균값은 250.0 m, 변동 범위는 241.4~260.0 m를 나타냈다.

2007년 강수량은 1,536 mm였고 일 최대 강수량은 127 mm였으며 6월에서 8월에 걸쳐 장기간 강우가 발생함으로 인해 수자원측면에서 풍부한 한해였다. 이로 인해 저수량은 풍부하여 최대수위가 261.69 m로 과거 2년에 비해 높이가 상승하였으며, 풍부한 수량을 유지하였다. 2008년은 지난 3년에 비해 강수량이 적은 한해였다. 10월 20일까지 강수량이 791 mm였으며 이로 인해 저수위가 매우 낮아 8월 25일에 최고수위를 나타냈으나 그 높이가 248.91 m로 예년에 비해 10 m 이상 낮은 수위를 기록하였다. 그

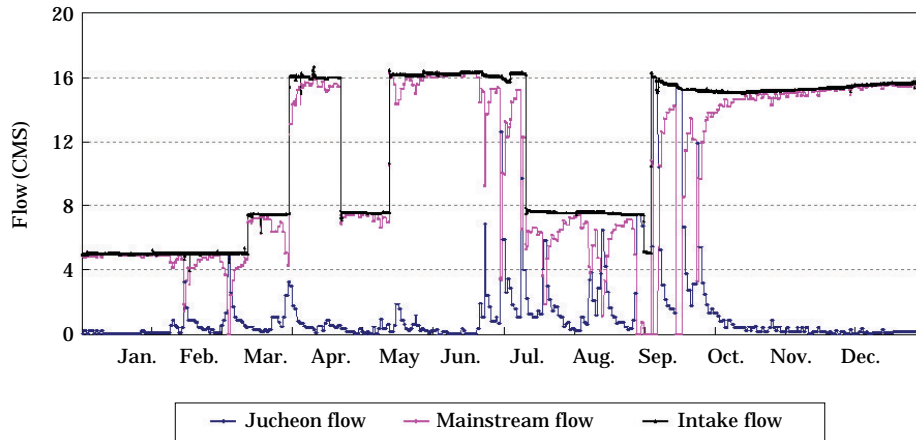


Fig. 3. Variation of water volume at intake tower.

이후에도 별다른 강우가 발생하지 않아 2008년 10월 20일 현재 수위는 247.08 m를 나타냈다.

2) 방류 현황

용담댐 도수터널 취수탑에서의 취수량은 Fig. 3에서 보는 바와 같으며 빈번하게 변화하지는 않았다. 지금까지 운영현황을 보면 저수량이 풍부하지 않은 5월 이전에는 방류량을 8CMS 정도로 유지하나 장마철이 지나 수량이 풍부해지면 9월 이후에는 16CMS 정도로 방류하는 것으로 나타났다.

방류수의 구성을 보면 Fig. 1의 지점도에 나타난 바와 같이 주천에서 유입되는 유입수와 본류에서 유입되는 것으로 되어 있는데, 주천에서 유입되는 수량이 강우기 때를 제외하고는 방류량보다 적어 대부분 본류 유입수가 방류량의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 2007년 방류량의 구성비를 보면 Fig. 3과 같이 하천 유입수가 10.8%를 차지하였고 본류 유입수가 89.2%를 차지하는 것으로 분석되었다.

3) 대류식 순환장치의 특성 및 현장조사

대류식 순환장치는 저수지 수심방향으로 설치된 양수통을 이용하여 호수수를 상부로 밀어올려 수체가 순환하도록 하는 시스템이다. 따라서 연속적으로 하층의 수체가 상승하면서 대기와 접촉하고 주변의 용존산소 농도가 높은 물과 혼합되면서 산소를 공급 받는다. 양수량은 관의 직경과 임펠러의 구조 및 임펠러의 회전속도 등에 따라 다르기 때문에 시설물의 구조에 따라 그 양을 계산할 수 있다. 다만 상승하면서 확산되는 유체가 주변의 물을 끌어 들이기 때문에 실제의 양수량은 더 많은 것으로 추측

된다(Connie et al., 2003).

대류식 순환장치는 성층이 형성된 6월 11일부터 가동을 시작하였으며 주간 단위로 조사를 실시하여 변화양상을 평가하였다. 조사방법은 장치로부터 일정거리 떨어진 5지점(1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 10 m)에서 수질변화와 유속을 측정하였으며, 수심방향으로는 수표면부터 저수지 바닥까지 수질변화를 조사하였다. 조사항목은 대류식장치 가동에 따른 유속과 수질변화를 조사하였다. 유속은 표면유속을 측정하였으며 수질은 수온, DO 등을 10월 초까지 시간에 따른 변화를 측정하였다.

3. 수체 유동모의

저수지에 설치된 순환장치는 저수지 수문상황과 자연변화에 따라 운영효율이 상이하다. 따라서 연구자가 다양한 조건을 현장에서 측정하기는 불가능하며 이런 문제를 대체하는 방안으로 전산유체유동(CFD)을 적용한 모사를 실시함으로써 다양한 조건에 따른 순환효과를 평가할 수 있게 된다(John et al., 1995; Julian et al., 1998). 본 연구에서는 용담댐 저수지에 설치된 대류식 순환장치가 수체 유동에 어떠한 영향을 미치는가를 평가하고자 CFX를 적용하였다. CFX는 ANSYS사에서 개발한 전산유체역학 소프트웨어로 다양한 분야에서 가장 널리 사용되는 범용 유동전문해석 소프트웨어이다.

저수지에서 순환장치에 의한 유체 유동을 모사하기 위해서는 먼저 저수지 자체의 거동을 분석해 보아야 한다. 만약 저수지의 움직임이 미약하다면 CFD만을 고려하면 되지만 수체의 흐름이 빠르다면 폭기장치에 의한 유동이 저수지 흐름에 많은 영향을 받게 되기 때문이다. 대상 지

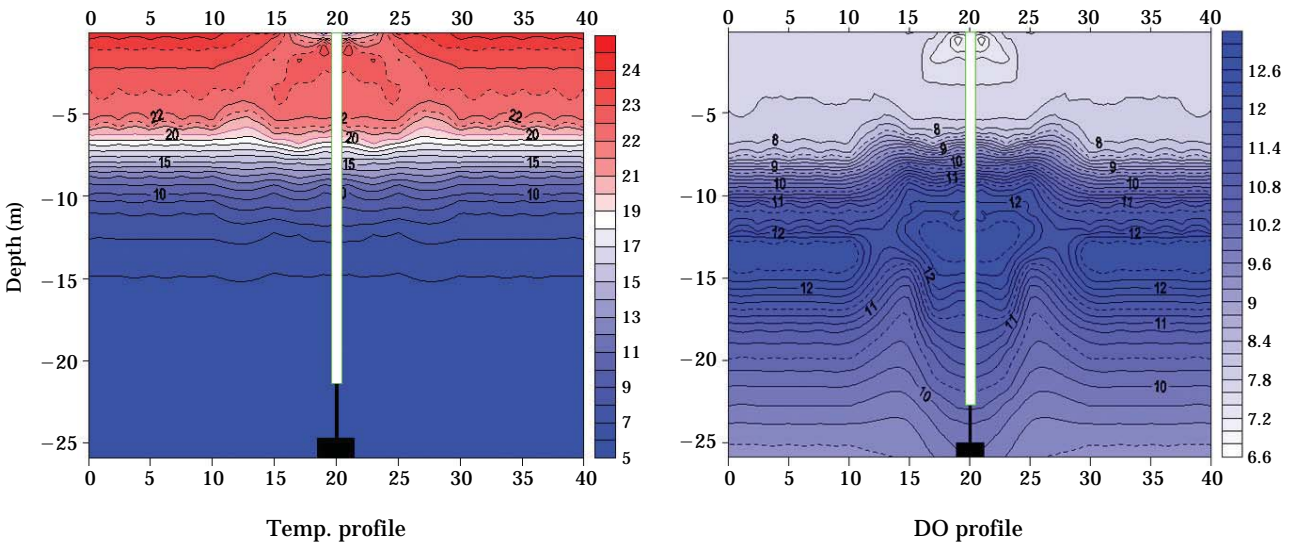


Fig. 4. Vertical profile (June 16, 2008).

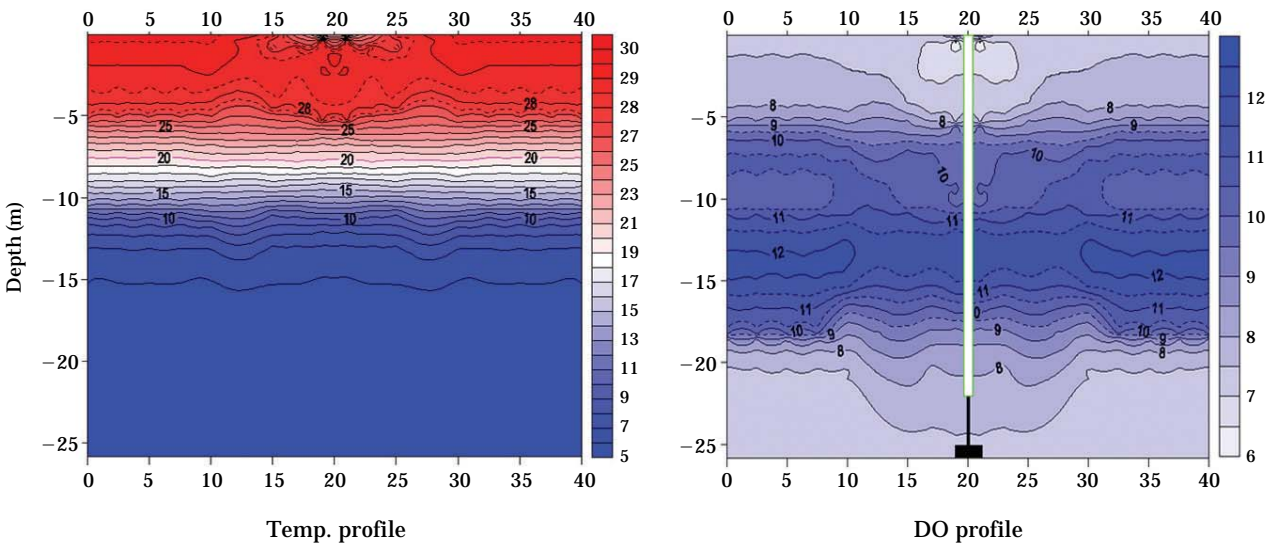


Fig. 5. Vertical profile (July 17, 2008).

역의 수체 거동을 모의하기 위해 SMS-RMA2 모형을 적용하였다. SMS (Surface Water Modeling System)는 U.S. Army Corps of Engineers에서 개발한 모형으로 RMA2는 강이나 항구 혹은 하구와 같은 곳에 관한 유한요소 격자 포인트에서 그 상류 수위와 유속을 계산할 수 있으며 하상마찰, 와류와 지구의 자전 등에 의한 효과를 계산할 수 있고 유입 유량도나 조수 사이클 및 폭풍 등에 의해 야기된 동적흐름도 모델링할 수 있다(SMS User's manual, 2002).

결과 및 고찰

1. 저수지 수질변화 및 유속분포

대류식 순환장치를 가동하고 5일이 지난 후부터 조사를 실시하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 2008년의 강우 특성이 지난 2년과 달라 저수지 수위가 약 10m 이상 낮게 유지되었다. 9월 26일까지 조사한 결과는 아래 Figs. 4~6과 같다. Fig. 4는 가동 후 5일이 지난 6월 16일 표면온도는 25°C이고 수심 10m 지점에서 수온 10°C를 나

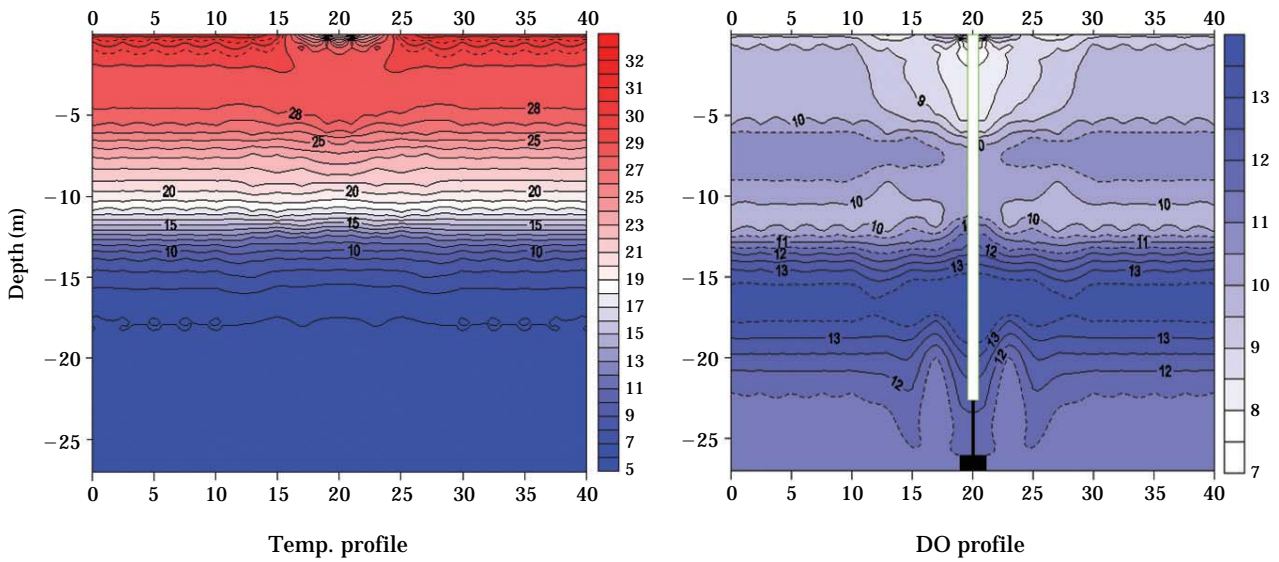


Fig. 6. Vertical profile (August 8, 2008).

타냈으며, 양수된 저층수는 수평방향으로 퍼져나가 약 10 m 지점까지 직접 영향을 미치는 것으로 나타났고 그보다 먼 지점에서는 표면의 더운 물과 혼합되면서 수온이 상승되어 동일한 온도층으로 흘러들어가면서 수평방향으로 이동되는 것으로 나타났다. DO분포는 상하층 간 비교적 하층의 DO농도가 오히려 조금 높아 양수된 저층수가 확산하면서 비교적 짧은 거리에서 완전히 동일해 지는 것으로 나타났다.

약 한달이 지난 7월 17일 저수지 수질상태는 대기온도의 상승과 태양광량의 증가로 표면온도가 7월에 비해 약 6~7°C 상승한 약 31°C를 나타냈고 10°C 수온층은 약 11 m지점으로 하강된 것으로 나타났다 (Fig. 5). 양수된 저층수의 확산도 6월 조사 결과와 유사한 반지름 약 10 m 지점까지였으며, DO의 영향도 비슷한 것으로 나타났으나 수체의 전반적인 DO농도는 6월에 비해 전반적으로 조금 낮아진 것으로 조사되었다. 다시 약 20일이 지난 8월 8일 조사시에는 10°C 수온층이 약 13 m지점으로 나타나 약 2 m 정도 하강된 것으로 나타났고 가장 높은 DO농도층도 수온성층의 변화에 따라 조금 더 밑으로 내려간 것으로 나타났으며 표층에서 DO의 혼합이 보다 넓은 지역에서 이루어지는 것으로 나타났다 (Fig. 6).

8월 8일 조사 후에 몇 차례 조사를 하였으나 비슷한 경향을 나타냈으며, 9월말 경부터 조금씩 대기온도가 내려가면서 변화가 나타나기 시작했으며, 9월 26일 조사결과에서는 뚜렷한 변화를 보였다. 표면온도가 24°C까지 하강하였으며 수심 9 m지점까지 수직혼합이 이루어지면

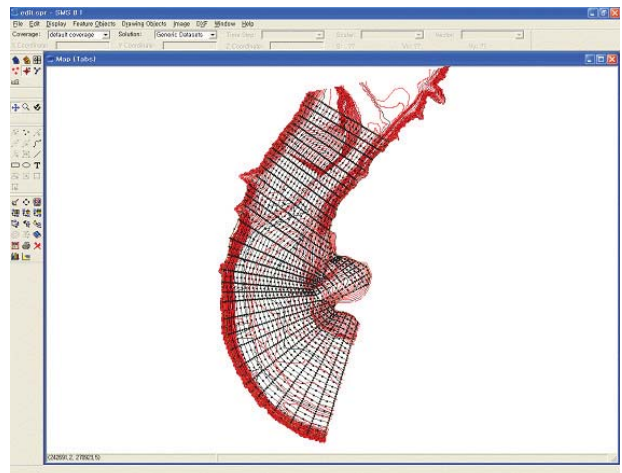


Fig. 7. Grid used for SMS-RMA2 simulation.

서 수온과 DO농도가 일정하게 나타났다. 이는 대기온도의 저하로 인해 표층수의 온도가 낮아지면서 나타나는 자연적인 현상으로 대기온도가 낮아짐에 따라 그 깊이는 점점 더 깊어지게 되어 수심이 낮은 지점에서는 완전한 전도현상이 나타나게 된다. 이러한 현상은 10월 이후에 계속되는 자연적인 현상이므로 대류식 폭기장치의 가동 없이도 발생하는 대류현상이므로 장치의 가동을 중단하였다.

2. 저수지 수체 유동 모사

저수지에서 수문변화에 따른 수체의 유동을 모사하기

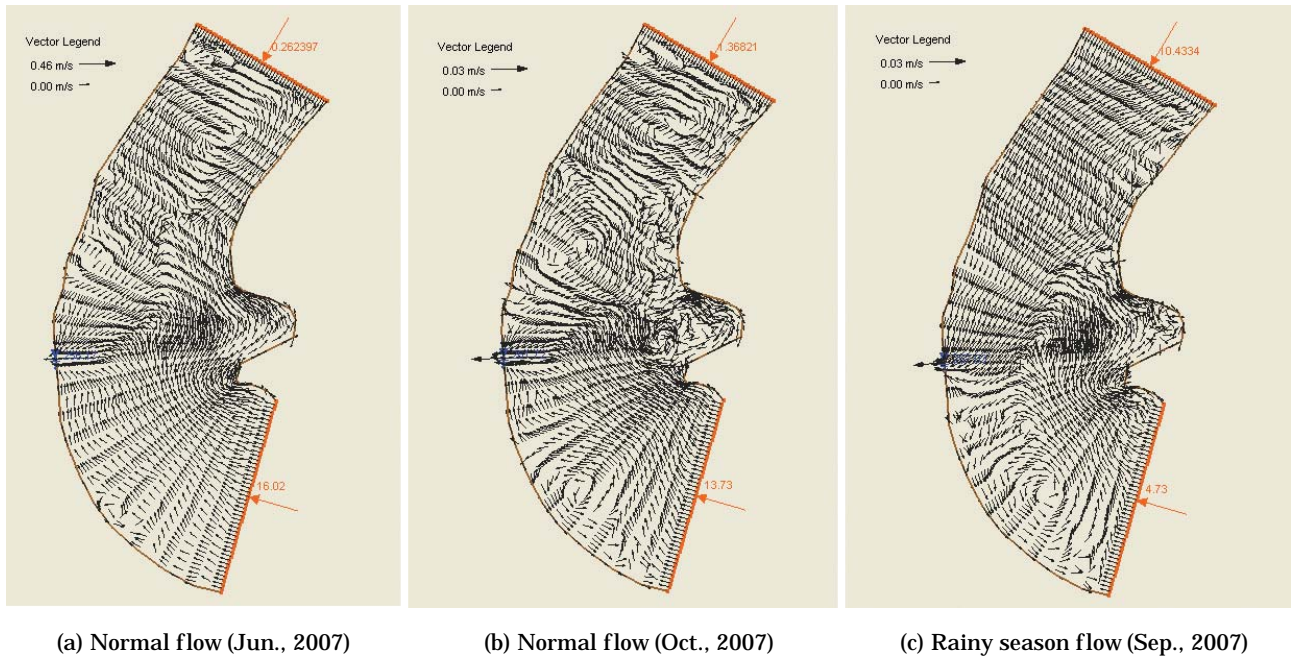


Fig. 8. Instantaneous velocity vector in study area.

위해 SMS-RMA2 모형을 적용하였다. 대상지는 취수탑이 있는 저수지 지류이며, 길이는 약 1,250 m이고 폭은 평균 375 m 크기를 갖고 있는 지형이다. 댐 저수지 구역에 대한 1 m 간격의 등고선을 가지고 대상지역에 대하여 격자를 구성하였으며 유속이 상대적으로 빠른 취수탑 부근은 좀 더 세밀하게 구성하였다 (Fig. 7).

이 지역의 수문특성은 항상 변화하므로 연중 나타나는 대표적인 3가지 경우로 구분하였다. 첫 번째로 여름 강우기 후에 저수지에 물이 풍부한 경우의 흐름, 두 번째로 봄철 저수지 물이 풍부하지 않은 상태에서 주천으로 부터의 유입은 최저인 상태 그리고 세 번째로 강우기에 짧게 나타나는 하천위주의 흐름으로 구분하여 모의하였다.

1) 봄철 본류 위주의 흐름이 발생하는 경우

2007년 6월에 나타난 수문조건으로 6월 1일 수위는 246.17 m이고, 유입조건은 주천에서 0.26CMS이고 본류에서 16.02CMS 상태였으며, 취수탑에선 16.28CMS를 취수하는 상태에서 모의하였다 (Fig. 8(a)).

가장 큰 유동장이 형성되는 지역은 취수탑 앞지점으로 약 1 cm sec⁻¹를 나타냈으며, 그 외 대부분의 지점에서는 0.05 ~ 1.5 cm sec⁻¹ 범위를 나타냈다. 전체적인 흐름장은 댐에서 상류방향으로의 흐름이 크므로 취수탑 아래서는 상류로의 흐름이 주를 이루며, 취수탑을 지나서는 흐름이 정체되면서 주천에서 유입되는 흐름과 합쳐져 큰 원형태

의 흐름이 나타났다. 이때 수위변화는 6월 1일에 246.17 m에서 18일에는 244.09 m로 낮아졌다.

2) 강우기 후 본류 위주의 흐름이 발생하는 경우

2007년 10월에 나타난 수문조건으로 10월 1일 수위 261.72 m이고, 유입조건은 하천에서 1.37CMS이고 본류에서 13.74CMS 상태였으며, 취수탑에선 15.1CMS를 취수하는 상태에서 모의하였다 (Fig. 8(b)).

가장 큰 유동장이 형성되는 지역은 취수탑 앞지점으로 약 1 cm sec⁻¹를 나타냈으며, 그 외 대부분의 지점에서는 0.05 ~ 1.5 cm sec⁻¹ 범위를 나타냈다. 전체적인 흐름장은 댐에서 상류방향으로의 흐름이 크므로 취수탑 아래서는 상류로의 흐름이 주를 이루며, 취수탑을 지나서는 흐름이 정체되면서 주천에서 유입되는 흐름과 합쳐져 2개의 큰 원형태의 흐름이 발생했다. 이 기간 중 수위변화는 10월 1일에 261.72 m에서 10일에는 261.52 m로 낮아졌다.

3) 강우기 하천 위주의 흐름이 발생하는 경우

2007년 9월에 나타난 수문조건으로 9월 4일부터 6일까지 97 mm의 강우가 발생하고 강우 발생 후 하천흐름이 조금 안정화된 9월 7일 1일간의 흐름 양상을 모의하였다 (Fig. 8(c)). 이런 경우는 연중 몇 차례 되지 않으며 1 일간밖에 볼 수 없는 것은 하천유량의 급격한 감소로 인해 상황이 지속되지 않기 때문이다. 전체적인 흐름장은

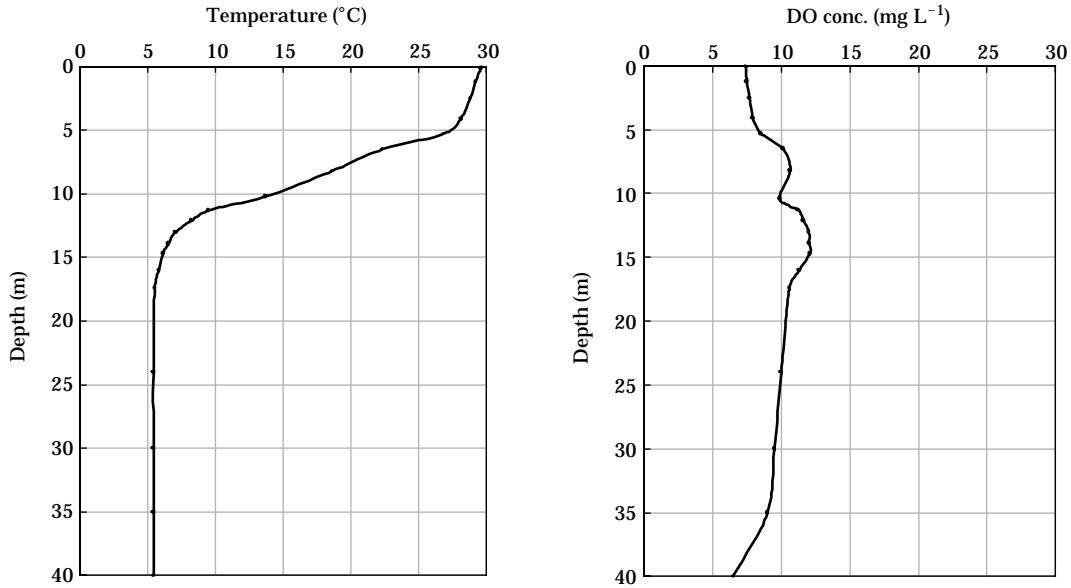


Fig. 9. Initial temperature and DO profile.

상류 하천에서의 흐름이 크므로 취수탑 위에서는 하류로의 흐름이 주를 이루며 취수탑을 지나서는 수위가 높아지면서 흐름이 정체되면서 본류에서 유입되는 흐름과 합쳐져 큰 원형태의 흐름을 나타냈다. 이 기간 중 수위는 9월 4일 0시에 254.81 m에서 9월 7일 24시에 257.44 m로 2.63 m 상승되었다.

이상의 결과에서 나타난 바와 같이 각각의 경우 유입량은 서로 다르지만 저수지 수체의 흐름 속도는 모두 $0.05 \sim 1.5 \text{ cm sec}^{-1}$ 로 매우 느리게 나타나 CFD모사에 저수지 흐름은 고려하지 않아도 될 것으로 평가되었다.

3. CFD 모사

1) 해석 도메인 설정

CFD를 이용한 수체거동을 모사하기 위해 Domain을 설정하였다. 본 해석에서 다루는 형상은 실제 순환장치가 설치된 저수지를 단순하게 형상화해 깊이 40 m, 반경 25 m인 원형 Domain으로 구성하였으며, 45° 각도의 형상만을 이용하여 모사를 수행한 후 전체면으로 확대하였다. 사용된 격자수는 약 34.6만 개의 element가 사용되었으며 수면부는 순환장치의 분출부에서 멀어질수록 속도가 느려지는 경향을 반영하여 격자를 생성하였다. 순환장치는 직경 790 mm의 원형관이 수심 30 m지점까지 도달하고, 수면부에 임펠러가 위치되어 있는 형태로 되어 있으며 수심 아래 부분의 저온층 물이 관입되어 상층으로 이동하여 수면부로 분출된다.

해석에서 매우 중요한 조건으로 온도성층 조건을 유지하기 위해 CFD에서 제공하는 복사모델 중 Discrete Transfer 복사모델을 적용하였고, 수치모사를 통해 시간에 따른 수체의 거동을 보기 위해 Simulation Type은 Transient 옵션을 선택하였으며 Time Steps은 수치모사의 수렴성에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 가장 큰 Timescale을 반영하는 Adaptive Time Steps 옵션을 선택하였다.

2) 경계조건

수치모사를 진행하기 위해서는 해석 Domain을 둘러싸고 있는 모든 surface들에 대하여 미리 설정한 Domain Physics에 대응하는 경계조건을 설정하였다. 분출부의 유속은 순환장치의 일일양수량 $10,656 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 을 설정하였고, surface에서 유체의 유속은 no-slip조건을 적용하였다. 열전달 조건으로 Domain의 바닥면은 수심별 온도분포 값에서 저층의 온도를 일정하게 유지하는 것으로 설정하였고, Domain의 바깥쪽 면은 수심별 온도분포를 일정하게 유지하는 것으로 설정하였다. 초기 온도와 DO분포는 수심에 따라 Fig. 9에 나타난 그래프와 같으며, 이 값은 현장에서 6월 18일에 측정된 값이다. 복사조건으로는 수표면에서의 열전달이 실제 대기온도와 기상조건에 따라 이루어지게 된다. 실제 조건을 단순화하여 대기 온도를 낮에는 30°C , 밤에는 25°C 로 일정하게 유지하는 것으로 설정하였으며 수면에서의 열전달 계수를 낮에는 $8,000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, 밤에는 $5,000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 로 설정을 하여 수체거동을 모사하였다.

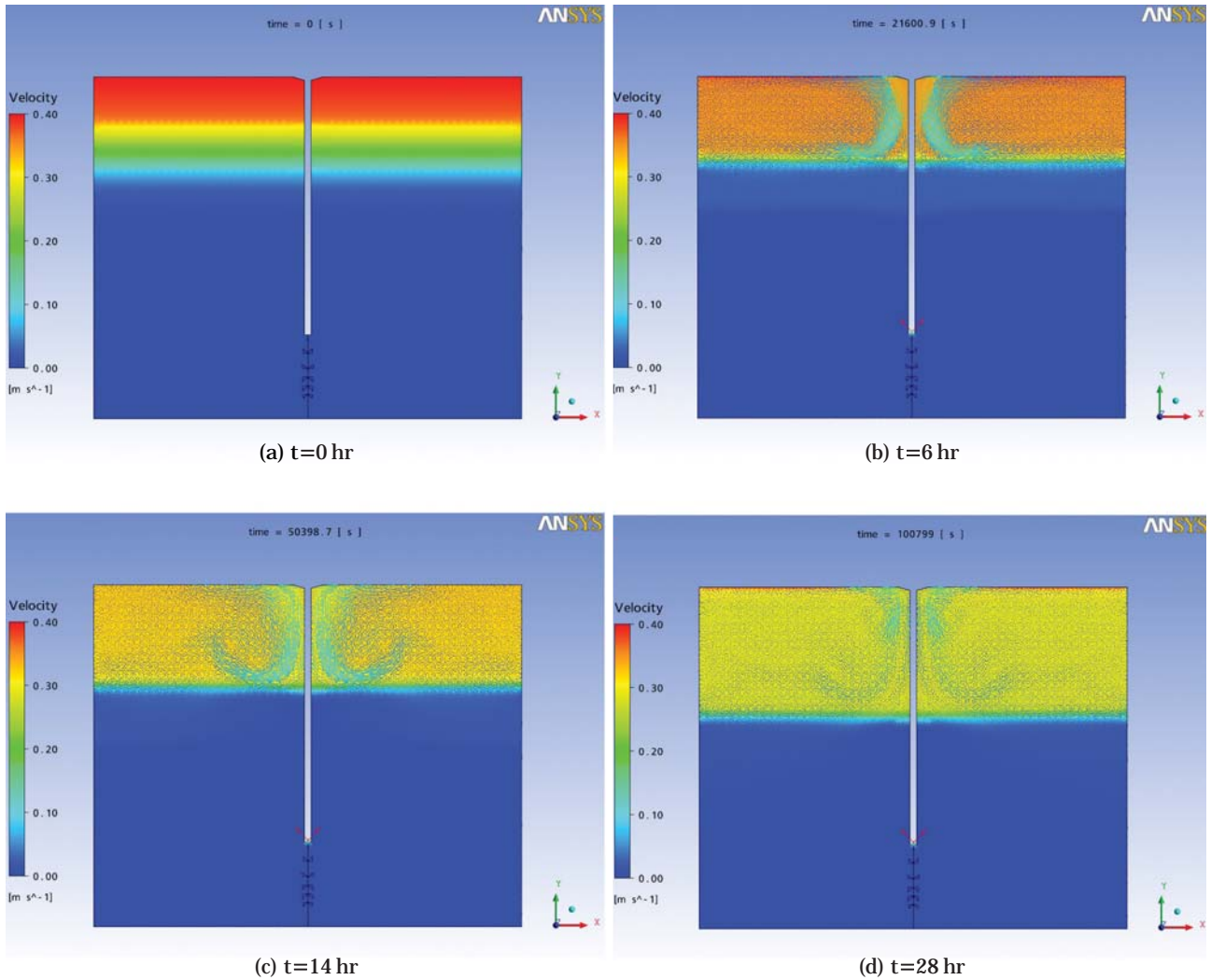


Fig. 10. Velocity vector and temperature profile.

3) 순환장치 운영시 수체거동 특성 모사

저수지에서의 유동장 변화를 모사한 결과는 Fig. 10과 같다. 각 그림들은 경과 시간별 속도장과 온도장을 보여 주고 있는데, 그림에서 알 수 있듯이 분출구를 통해 수면으로 공급된 저온의 물이 밀도차에 의해 수심아래로 가라앉는 것을 확인할 수가 있다. 하지만, 가라앉는 동시에 상층부의 따뜻한 물과 섞여 온도와 밀도가 변하게 되고, 이로 인해 저층으로 유동이 계속되지 못하고 수평방향으로 유동의 변화가 일어나는 것으로 나타났다. 이는 실측한 것과 동일한 결과를 나타내므로 모사결과는 신뢰할 수 있는 것으로 판단되었다.

Fig. 11은 반경 4 m지점에 위치한 수직선을 따라 분포하는 온도를 나타낸다. 온도는 초기부터 매 4시간 간격으

로 나타내고 있는데, 온도 경계층의 상층부가 시간이 갈수록 수심아래로 확장되어 가는 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 형상 한가운데 위치한 장치로부터 분출된 유체의 방사상 속도분포를 나타낸 것이다. 수체유동 모사 결과 3 m지점에서는 0.25 m sec^{-1} 를 나타냈고, 5 m지점에서는 0.2 m sec^{-1} 의 유속을 나타냈다. 현장 실측 결과는 3 m지점에서 $0.05 \sim 0.17 \text{ m sec}^{-1}$ 를 나타냈고 5 m지점에서는 $0 \sim 0.12 \text{ m sec}^{-1}$ 의 범위를 나타내 유속은 모사 결과가 조금 크게 산정되는 것으로 나타났다. 그러나 현장 조사 자료는 바람 등과 같은 자연요인에 의해 많은 영향을 받기 때문에 보다 많은 자료를 확보하여 비교해 보아야 할 것으로 판단되었다. 반면 영향범위는 반경방향으로 10 m

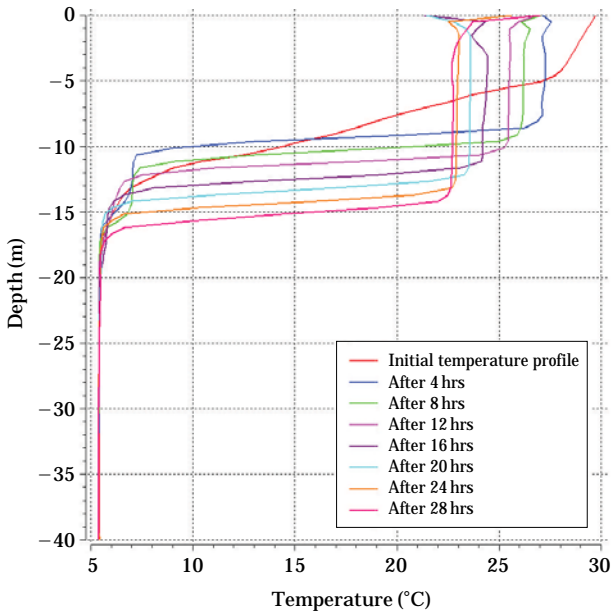


Fig. 11. Variation of temperature profile.

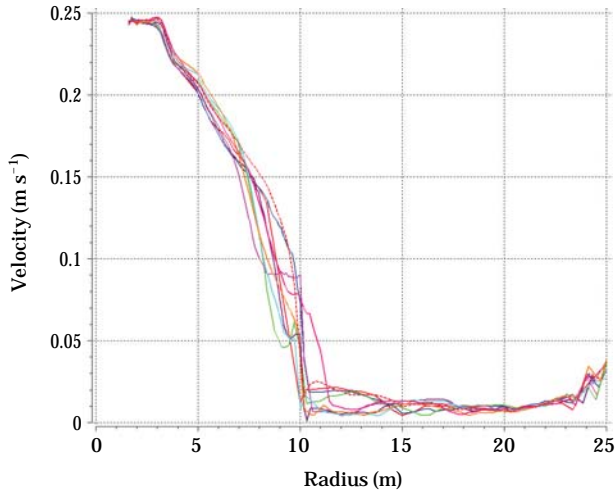


Fig. 12. Velocity distribution at surface.

지점까지는 분출되는 유동의 직접영향을 받고, 그 보다 먼 지점에서는 유속이 거의 없는 간접영향권임을 나타내고 있어 이는 모사결과와 실측치간에 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 13은 반경방향의 수면 온도분포를 보여주고 있다. 장치로부터 분출된 저온의 물이 반지름 약 10 m 지점까지는 수온변화에 영향을 미치는 직접영향권인 것을 알 수 있다. 이상과 같이 모사결과는 현장에서 실측한 것과 유사한 결과를 나타내므로 결과의 신뢰성이 높은 것으로 판단되었다.

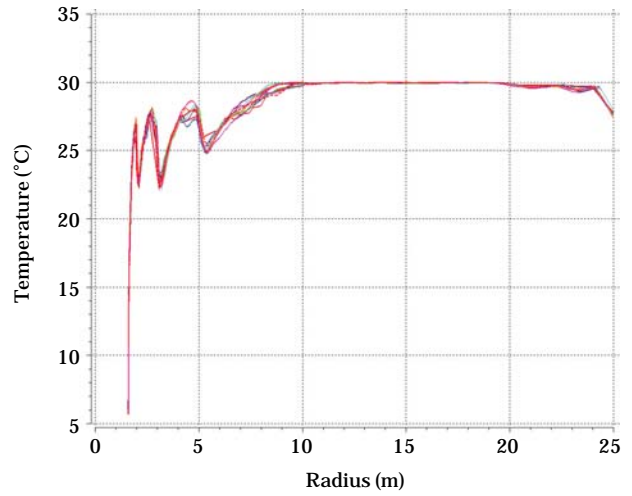


Fig. 13. Temperature distribution at surface.

적 요

용담댐 저수지에 설치된 대류식 순환장치에 대한 현장 조사 결과에 의하면 수평방향의 직접영향권은 성층 강도에 큰 영향 없이 반지름 7~10 m에 이르는 것으로 조사 되었으며 수직방향으로는 성층강도에 따라 또는 가동기간에 따라 조금씩 달라지는 것으로 나타났다. 즉 가동시간이 길어짐에 따라 하층에서 올라온 수온이 낮은 수체는 보다 깊게 먼 곳까지 이동하는 것으로 나타났으나 성층을 깨지는 못하는 것으로 나타났다. 2008년 현장에서 실측 조사한 결과와 CFD모사 결과에 의하면 이런 조건에서 한 달을 가동하면 하층에서 올라온 수체가 대류식 장치 주변으로 수심 8 m, 지름 120 m의 수층을 이루게 되며 50일을 가동하면 수심 10 m, 지름 130 m의 수층을 이루는 것으로 평가되었다.

대류식 순환장치가 설치된 지역에 대한 CFD모사를 하기 전에 이 지역의 흐름특성을 평가하였다. 대상 지역의 흐름은 연중 크게 3가지로 구분되었으며 각각의 경우 유량은 다르지만 저수지 수체의 흐름 속도는 모두 $0.05 \sim 1.5 \text{ cm sec}^{-1}$ 로 나타나 CFD모사시에 저수지 흐름을 고려하지 않아도 될 것으로 평가되었다. CFD를 이용한 수체거동 모사결과 순환장치로부터 3 m 지점에서의 유속은 0.25 m sec^{-1} 를 나타냈고, 5 m 지점에서는 0.2 m sec^{-1} 를 나타냈다. 현장 실측 결과와 비교시 유속은 모사 결과가 조금 크게 산정되는 것으로 나타났으나 향후 보다 많은 자료를 확보하여 비교해 보아야 할 것으로 판단되었다. 반면 영향범위는 반경방향으로 10 m 지점까지는 직접영향을

받고, 그 보다 먼 지점은 간접영향권임을 나타내고 있어 이는 모사결과와 실측치 간에 일치하는 것으로 나타났다. 수면에서의 온도분포는 순환장치로부터 분출된 저온의 물이 반지름 약 10 m 지점까지는 수온변화에 영향을 미치는 직접영향권인 것을 알 수 있다. 이상과 같이 모사 결과는 현장에서 실측한 것과 유사한 결과를 나타내므로 결과의 신뢰성이 높은 것으로 판단되었다.

인 용 문 헌

- 한국수자원공사. 2002. 수중폭기운영관리최적화보고서.
- 허우명, 김재욱, 김범철. 1999. 상수원지(달방댐)에서 수중폭기에 따른 수질변화 연구. *한국물환경학회지* **15**: 335-343.
- Brian, K. and A.E. Gezawy. 1997. Design and model tests for an efficient mechanical circulator/aerator for lakes and reservoirs. *Wat. Res.* **31**(6): 1283-1290.
- Chipofya, V.H. and E.J. Matapa. 2003. Destratification of an impounding reservoir using compressed air-case of Mudi reservoir, Blantyre, Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth* **28**: 1161-1164.
- Connie, D., DeMoyer, E.L. Schierholz, J.S. Gulliver and S.C. Wilhelms. 2003. Impact of bubble and free surface oxygen transfer on diffused aeration systems. *Water Reserach* **37**: 1890-1904.
- Cooke, G.D., E.B. Welch, S.A. Peterson and P.R. Newroth. 1993. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, 2nd Ed., Lewis Publication.
- Environmental Modeling Research Laboratory of Brigham Young University, SMS 8.0 User's Manual, 2002.
- John, C.L. 1995. Hypolimnetic aerators: Predicting oxygen transfer and hydrodynamics. *Wat. Res.* **29**(11): 2475-2482.
- Julian, D.C., B.P. Martin and J. Hannon. 1998. Use of computational fluid dynamics to model reservoir mixing and destratification. *Wat. Sci. Tech.* **37**(2): 227-234.
- Monzur, A.I. and T. Asaeda. 2000. Artificial mixing of lake water by bubble plume and effects of bubbling operations on algal bloom. *Wat. Res.* **34**(6): 1919-1929.
- Rohan, S. and J. Imberger. 1993. Reservoir destratification via mechanical mixers. *Journal of Hydraulic Engineering* **119**: 4.

(Manuscript received 8 January 2009,
Revision accepted 23 February 2009)