〈연구동향〉

水工構造物에서의 酸素傳達

田 庚 秀*

1. 머릿말

수질을 나타내는 척도로서 가장 널리 사용되는 것 중의 하나로서 용존산소량(dissolved oxygen; DO)을 들 수 있다. 물 속에서 일어나는 많은 화학적, 생물학적 반응들에 산소가 사용되며 따라서 수중의 용존산소농도(DO 농도)가 감소하게 된다. 이와같이 소모된 산소량은 大氣 또는 氣泡(air bubbles)로부터의 酸素傳達(oxygen trans fer)에 의하여 보충된다. 發電, 洪水調節, 用水供給 등의 목적으로 건설된 댐의 존재는 酸素傳達의 관점에서 볼 때에는 부정적인 영향을 미친다. 댐 상류에 저수된 물은 자연 하천에 비하여 水深이 깊고 흐름이 거의 없어 大氣로부터의 酸素傳達量이 적은 반면 생화학적 산소 요구량(BOD)은 貯水池 내에 축적되기 때문에 DO 농도의 低下를 가져온다. 이와 같이 DO 농도가 낮은 물을 그대로 방류할 경우 하류 하천에서의 수질 문제를 야기할 수 있다. 특히 貯水池가 안정된 溫度 成層(stable thermal stratification)을 갖는 경우 貯水池 深水層(hypolimnion)의 물은 大氣와 접하여 산소함유량이 비교적 많은 表水層(epilimnion)의 물과 섞임이 거의 일어나지 않을 뿐만 아니라 각종 有機性 堆積物들과의 반응으로 인하여 산소 결핍이 더욱 심하게 된다. 따라서 貯水池 深水層에서 取水되는 發電用水의 경우 방류에 따른 하류 하천 생태계 파괴 등의 폐해가 더욱 심하기 때문에 미국에서는 각종 환경 관련법규에 의거하여 發電所 면허 갱신시 수질 개선에 관한 의무조항을 강화하려는 움직임을 보이고 있다.

DO 농도가 낮은 貯水池 내의 물은 각종 水工構造物을 통하여 하류로 방류되는 과정에서 어느 정도 산소를 공급받아 DO 농도가 증가하게 된다. 이러한 再曝氣(reaeration) 특성과 그에 따른 DO 농도 증가 정도는 각 水工構造物의 종류에 따라 다르다. 방류 構造物에서의 DO 농도 증가를 예측하기 위해서는 각 構造物의 再曝氣 특성을 파악하고 DO 농도 증가량을 構造物의 제원 및 흐름에 관한 변수들의 함수로서 정량화할 필요가 있다. 이러한 과정이 선행되어야만 기존의 혹은 계획중인 방류 構造物에 의한 DO 농도 증가량을 산정하고 그것이 기준치 또는 필요치에 미달할 경우 방류시설 운영의 개선 또는 構造物 자체의 수정을 도모할 수 있을 것이고, 필요에 따라서는 인공적인 再曝氣(artificial reaeration) 방안을 모색할 수 있을 것이다. 본고에서는 이러한 水工構造物에서의 酸素傳達에 관련된 현재까지의 연구들을 검토하여 요약, 정리하였다. 공기와 물 경계면에서의 질량전달에 관한 基本理論과 이에 영향을 미치는 중요한 물리적 현상들에 관하여 먼저 언급한후 水工構造物에서의 酸素傳達에 관해서 알아 보았다. 構造物 내의 흐름이 自由水面을 갖는지의 여부에 따라 閉鎖水路 構造物 및 自由水面을 갖는 構造物으로 구분하여 각각의 경우에 해당하는 물리적 또는 수리학적 특성과 酸素傳達의 관계를 Jun(1991)과 ASCE Task Committee (1991)의 내용을 중심으로 기술하였다.

2. 基本理論 및 接近方法

2.1 理論的 考察

물과 공기의 경계면을 통한 산소 질량전달은 다음과 같은 식으로 표현된다:

$$\frac{dm}{dt} = kA(C_s - C) \qquad (1)$$

여기서 m은 산소질량, C는 DO 농도, C는 포화 DO 농도, A는 경계면의 면적이고 k는 전달계수(transfer coefficient)로서 전달되는 물질의 종류 및

* 서울대학교 대학원 토목공학과 연구원 공학박사

액체의 성질에 따라 달라지나 관심의 대상을 산소와 물로 국한하면 온도 및 유동의 난류 특성(turbulence characteristics)에 좌우되는 상수이다. C_s의 값은 온도, 압력, 염도 등에 따라 다소 변하나 이러한 변화 관계는 온도에 대한 k의 변화와 함께 이미 잘 알려져 있다(APHA, 1985). Fick의 법칙에서는 질량 변화율이 농도 경사(gradient)에 비례하는데 반하여 위 식에서는 농도 차에 비례하는 것으로 나타내고 있는데 이는 농도의 공간적 변화가 일어나는 곳이 경계면 근처의 작은 부분으로 제한되며 그 외의 곳에서는 농도가 일정하다는 가정을 내포하고 있다.

경계면을 통한 질량전달에 관한 여러 이론들(Cussler 1984) 중 가장 널리 사용되는 것으로서 Lewis and Whitman(1924)의 二膜理論(two-film theory)으로서 더 잘 알려진 膜理論과 Dankwerts (1951)의 表面更新理論(surface renewal theory)을 들 수 있다. 膜理論에 의하면 경계면 근처에 정적인(stagnant) 얇은 막이 존재하며 이 막 내에서는 유동이 없어서 질량 전달은 分子擴散(molecular diffusion)에 의해서만 일어나기 때문에 그 이동 속도가 매우 느리다. Fick의 법칙에 의거한 확산과정 (Fickian diffusion process)과의 비교로부터 전달 계수와 분자확산계수 사이에 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$k = \frac{Dm}{\delta} \tag{2}$$

여기서 δ는 막의 두께(film thickness)이다. 따라서 막의 두께를 감소시키는 요소는 곧 전달계수를 증가시켜 질량 전달을 촉진하는 요인이 된다. 그중의 하나가 온도로서 온도 상승은 점성(viscosity)을 감소시켜 막의 두께를 작게하는 동시에 분자확산계수를 크게하여 k를 증가시킨다. 막의 두께를 감소시키는 또 하나의 요소는 난류(turbulence)로서막에 요동을 일으킴으로써 두께를 감소시켜 酸素傳達속도를 증가시킨다.

膜理論이 경계면에 일정 두께의 막이 존재하며 막내의 농도분포가 일정하다는 가정에 근거한 반면 Higbie(1935)는 용존 질량이 시간이 지남에 따라 경계면으로부터 먼 쪽으로 계속 확산되므로 두께 및 농도분포가 일정한 막은 존재할 수 없으며 경계면 부근의 농도 분포는 非定常 擴散方程式(unsteady Fickian diffusion equation)을 따른다는 浸透理論(penetration theory)을 제안하였다. 表面更新理論은 浸透理論을 발전, 완성시킨 것으로서 액체의 영역을 질량 전달이 일어나는 경계면 주변영역(interfacial region)과 그 외의 영역(bulk region) 으로 구분하고 농도가 높은 경계면 주변영역의 액체 要素가 농도가 낮은 영역의 要素와 수시로 교체된다고 보고 있다. 경계면 주변 영역에서의 질량전달 과정은 浸透理論을 따르며 액체 요소가 경계면 주변 영역에 머무르는 시간은 평균값 t_o인 지수확률분포(exponential probability distribution)를 따른다고 가정하면 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$k = \sqrt{Dm/to} \tag{3}$$

여기서 t_o는 액체 要素의 평균 체류시간으로서 난류강도(turbulence intensity)가 클수록 체류시간이 짧아지므로 k가 증가되어 질량전달이 촉진됨을 알수 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 膜理論 또는 表面更新理論으로부터 유도된 k는 각각 한 개의 가변상수(δ 또는 t_o)를 포함하며 이 상수들은 난류강도가 클수록 k를 증가시키는 쪽으로 변화함을 알 수 있다.

2.2 接近方法

식 (1)에 나타난 바와 같이 주어진 瀑氣 시스템(aeration system)에 대하여 전달계수(k)와 경계면적(A)을 알 수만 있다면 酸素傳達에 관한 예측이 가능하다. k에 가장 큰 영향을 미치는 것은 난류 흐름조건이다. 따라서 임의의 흐름 조건하에서의 k값을 예측하기 위해서는 주어진 瀑氣 시스템의 난류 특성을 대표하는 변수들의 함수로서 k를 정량화할 필요가 있다. 이는 다양한 흐름 조건에 대한 실험에 의하여 가능하나 흐름의 양상이 매우 복잡한 水工構造物의 경우 k를 특정 변수들의 함수로서 일반화하여 나타내기 어려운 경우가 많다. 경계면적 A의 경우 물속에 포함된 氣泡들(air bubbles)의 총량(부피)과 크기분포(size distribution)를 알면 총면적의산정이 가능하다. 그러나 氣泡의 크기분포가흐름 조건 및 물에 대한 氣泡의 상대량에 따라 다를뿐만 아니라, 大氣와 접하여 산소를 공급받는 시스템의 경우 大氣로부터 물속으로 誘入되는 (entrained) 공기의 총량 또한 일반화하여 나타내기 어렵기 때문에 A의 산정 역시 용이하지 않다.

위에서 언급한 바와 같이 水工構造物에서의 酸素

傳達에 대하여 k와 A를 정량적으로 일반화하기 어렵기 때문에 보다 간단한 경험적 모형이 종종 사용된다. 어떤 산소 공급 시스템의 총부피를 V라 하면 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dC}{dT} = K_{La}(C_s - C) \tag{4}$$

여기서 $K_{La} = kA/V$로서 總體的 전달계수(overall transfer coefficient)라 한다. kA가 시스템내의 전체 영역에서 일정하다고 가정하면 식 (4)를 적분하여 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$C_2 = C_s - (C_s - C_1)\exp(-k_{Lat}) \tag{5}$$

여기서 C_1 및 C_2는 각각 構造物 上流端 및 下流端에서의 DO 농도이고 t는 물이 시스템내에 머무르는 시간이다. 이로부터 다음과 같이 정의되는 전달효율(transfer efficiency, E)에 관한 식을 얻는다.

$$E = \frac{C_2 - C_1}{C_s - C_1} = 1 - \exp(-K_{Lat}) \tag{6}$$

E 값은 C_1 및 C_2에 대한 현장 측정으로부터 간단히 계산할 수 있고, 따라서 K_{La} 또한 식 (5)로부터 쉽게 구해진다. 이와같이 어떤 특정 水工構造物에 대하여 구한 E 및 K_{La} 값들은 그 構造物에 대해서만 적용이 가능하지만, 酸素傳達에 관계된 여러 변수들에 관한 지식으로부터 이를 일반화하여 사용할 수 있다. 즉, 시스템내의 수량, 수중에 함유된 공기량, 氣泡의 크기분포, 난류강도 등이 k와 A에 어떤방식으로 영향을 미치는가에 대한 물리적 이해로부터 직관적인 판단에 의하여 유사한 水工構造物에서의 酸素傳達에 관한 대략적인 예측에 적용이 가능하다.

3. 水工構造物에서의 酸素傳達

3.1 閉鎖水路 構造物

酸素傳達을 위한 閉鎖水路 構造物로는 광범위하게는 貯水池 深水層에서의 DO 농도 개선을 위한 인공적인 瀑氣 시설(Ashley et al. 1990), 폐수처리 시설(Favre 1990) 등도 포함되나 여기서는 貯水池에서 水車(hydroturbine)를 통하여 방류되는 흐름에서의 酸素傳達, 즉 吸出管 瀑氣 시스템(draft-tube aeration system)에 관하여 알아보기로 한다. (Fig. 1 참조) 관

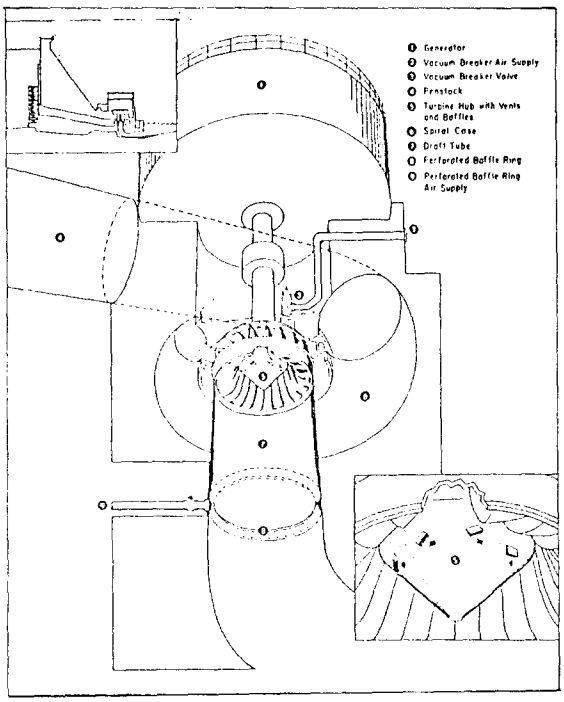

Fig. 1 Draft-tube Aeration System(After Graham 1984)

벽을 통하여 수류 속으로 주입된 공기(injected air)는 물보다 밀도, 즉 관성(inertia)이 매우 작기 때문에 流入 즉시 관의 중심쪽으로 이동하지는 못하고 관벽 주위에 기단(air pocket)을 형성한다. 공기의 부력과 하향 수류에 의한 견인력(drag force)이 평형을 이룬 상태에서 亂流剪斷(turbulent shearing)에 의하여 기단으로부터 부서져 나온 작은 氣泡들이 수류에 쓸려 이동함으로써 관내의 흐름은 물과 氣泡로 구성된 二相流(two-phase flow)를 형성한다. 이와같이 관벽 부근에서 생성된 氣泡들은 하류로 이동하면서 亂流擴散(turbulent diffusion)에 의하여 관의 중심쪽으로 퍼져 점차 단면 전체에 고르게 분포하게 된다. 이러한 과정에서 초기에는 크기가 작던 氣泡들은 하류로 이동함에 따라 상호간의 충돌(collision)에 의하여 뭉치게 되고(coalescence) 또한 크기가 과대해진 氣泡들은 다시 부서지기도 하는데 이러한 현상들은 주입된 공기량, 氣泡의 크기, 수류의 난류특성(난류 강도 및 渦의 크기) 등에 의하여 지배된다. 따라서 氣泡의 크기분포는 일반적으로 전 영역에서 균등하지 않게 된다. 酸素傳達은 이러한 氣泡들의 표면을 통해서 이루어지며 이때 酸素傳達을 지배하는 중요 한 인자들은 앞의 이론적 고찰에서 살펴본 바와 같다.

吸出管 瀑氣 시스템의 가장 큰 장점 중의 하나는 대기중의 공기를 관내에 흡입시켜 酸素傳達에 사용하기 때문에 다른 방안들(Ruane, et al. 1977)에 비하여 경제적이라는 것이다. 이는 관내의 압력이 대기압보다 낮을 때 가능한데 그렇지 못할 경우에는 압축기를 사용한 공기 주입이 필요하다. 대기로부터의 공기 흡입 장치는 Raney(1977)와 Raney and Arnold(1973)에 의하여 개발되었다. deflector plate라 불리는 이 장치를 공기 주입구의 바로 앞에 설치함으로써 공기 주입구 부근에 압력이 낮은 後流 (wake) 지역이 형성되어 대기로부터의 공기 흡입이 용이하게 된다. 이러한 瀑氣 시스템의 설계에 있어서 가장 어려운 점의 하나는 과연 어느 정도의 DO 농도 증가를 기대할 수 있을지를 정확히 판단하기 힘들다는 것이다. 특정댐의 瀑氣 시스템에 대하여 측정, 계산된 전달 효율 값들을 기초로 하여 새로운 시스템을 설계하기는 무리이며 이를 위해서는 DO 농도 증가량을 관련 변수들의 함수로서 정량화하여 나타냄으로써 새로 설계하고자 하는 시스템의 거동에 관한 예측이 가능하도록 하는 것이 필요하다. 이러한 노력은 Buck 등(1980)에 의하여 처음으로 시도되었다. 그들은 氣泡의 크기가 일정하며, 공기와 물의 체적비(volume ratio)가 유량비(discharge ratio)와 같다는, 즉 氣泡의 이송 속도가 물의 유속과 동일하다는 가정하에 다음과 같은 吸出管 瀑氣 시스템의 酸素傳達式을 유도하였다.

$$C_2-C_1 = \alpha \frac{Qa}{Qw} (C_s-c_1)t \qquad (7)$$

$$\alpha = 6K_L/D \qquad (8)$$

식 (7)과 (8)에서 K_L=kA, D는 氣泡의 직경, Q_a는 단위 시간당 공기 주입량, Qw는 물의 유량이다. 그들은 α를 酸素傳達을 지배하는 가변상수로 보고 다양한 조건에서의 현장 관측으로부터 그 값들을 산정하였다. 그러나 식 (8)에서 알 수 있듯이 α는 전달계수와 氣泡의 총표면적 뿐만 아니라 氣泡의 크기까지도 포함하는 포괄적인 계수이기 때문에 시스템내의 제반 조건들이 酸素傳達에 관계된 개개의 요소에 어떠한 영향을 미치는지를 이로부터 판단하기는 매우 어렵다.

吸出管 瀑氣 시스템에 관련된 모형실험에 의한 연구는 극히 드물다. Quigley and Boyle(1976)과 Quigley 등(1975)은 일정한 원형 단면적을 갖는 연직관에서의 흐름에 대하여 유속과 공기 주입량을 변화시켜가며 시간 변화에 따른 폐쇄 시스템내에서의 DO 농도 변화를 측정하여 총체적 전달계수($K_{L.a}$)를 추정하였다. 그들의 실험 결과는 공기와 물의 유량비(air-water discharge ratio)가 커질수록 $K_{L.a}$의 값이 증가함을, 즉 酸素傳達이 촉진됨을 보이고 있는데 이러한 경향은 氣泡의 총표면적 증가에 따른것으로서 기대되는 결과이다. 그러나 그들의 실험장치는 수조에서의 수면을 통한 대기로부터의 酸素傳達을 허용하고 있어 $K_{L.a}$ 값이 실제보다 크게 산정된 것으로 보인다. Jun(1991)은 氣泡의 크기분포와 氣泡上昇 속도(bubble rise velocity)를 고려하여 다음과 같은 酸素傳達式을 유도하였다.

$$C_2-C_1 = k \frac{SM}{Vm} \frac{L}{U_a} \frac{O_a}{Q_w} (C_s-C_1) \qquad (9)$$

여기서 S_m과 V_m은 각각 단일 氣泡에 대한 평균 표면적 및 평균 체적이며 L은 공기 유입구에서 유출구까지의 거리, U_a는 氣泡上昇 평균속도로서 氣泡의 크기에 따라 값이 주어진다(Haberman and Morton1956). 난류강도와 渦의 크기를 고려한 차원해석으로부터 k에 영향을 미치는 무차원 변수들로서 Reynolds수, 관의 상대조도, 공기와 물의 유량비 및 氣泡의 크기(평균 직경)와 관경의 비를 제시하였다.

Quigley 등과 유사한 모형 실험에 의하여 K_a의 값을 구하였으며 또한 氣泡의 크기분포를 측정함으로써 k의 값을 산정하였다. Jun의 실험 결과에 따르면 공기와 물의 유량비가 같을 경우 유속이 빨라짐에 따라 난류강도가 커지므로 k의 값이 증가하나, 같은 유속에서 공기와 물의 유량비가 증가하면 氣泡 표면적의 증가에 의해 $K_{L.a}$의 값은 커지나 공기 단위 부피당 작용하는 난류강도가 작아지기 때문에 k의 값은 감소함을 보이고 있다. 이러한 실험결과로서 수리학적으로 매끈한 관에 대하여 다음과 같은 전달 계수 k에 관한 다음과 같은 무차원식이 유도되었다.

$$k/U = (0.804 \times 10^{-5}) Re^{0.363} z^{0.225} \qquad (10)$$

여기서 U는 평균유속, Re는 Reynolds수로 식 (9)의 유도에 사용된 값의 범위는 10^5 정도이며, z는 공기와 물의 유량비로서 0.01-0.15의 값이 실험에 사용되었다. 또한 Jun은 氣泡에 대한 移送擴散 方程式 (advective diffusion equation) 및 Monte Carlo 모의기

법을 사용하여 氣泡의 크기분포를 예측하는 계산모형을 개발하여 유속, 공기량, 마찰계수 등이 氣泡의 크기분포에 어떤 영향을 미치는지에 대하여 분석하였다. Jun의 연구는 吸出管 瀑氣 시스템에 관하여 酸素傳達의 基本理論으로부터 접근하여 전달계수 및 氣泡와 물의 접촉면적의 정량화를 시도한 최초의 연구로서 의의가 있으나 사용된 실험장치가 수평방향의 흐름을 포함한 실제의 吸出管내의 흐름을 재현하지는 못하였다.

3.2 自由水面을 갖는 構造物

自由水面을 갖는 酸素傳達 水工構造物의 종류는 매우 다양하나 構造物내의 흐름은 크게 다음의 세종류로 구분할 수 있다. (Fig. 2 참조)

(1) 自由水面을 갖는 흐름(개수로 또는 여수로에서의 흐름)
(2) 자유젯(free jet)
(3) 遷移流(transitional flow), 즉 개수로 흐름이나 자유젯이 靜水池(static pool)에 작용할 때 발생하는 跳水(hydraulic jump) 또는 沈降 流(plunging flow) 등의 흐름

水工構造物에 따라서는 이중 한 가지 이상의 흐름형태를 갖는 수도 있으나 세 가지 이상을 갖는 경우는 거의 없다. 自由水面을 갖는 수로에서의 흐름은 난류전단흐름(turbulent shear flow)이다. 즉 수로바닥에서 발생한 난류경계층은 하류로 갈수록 점점 발달하여 결국 수면에 이르게 된다. 수로경사가 급한 경우, 모형실험(Straub and Anderson 1958) 및 여수로 현장관측(Cain and Wood 1981)에서 나타나듯이 대기로부터의 공기 誘入을 좌우하는 것은 수면의 난류변동(turbulent fluctuations)이다. 즉, 수면변동이 심할수록 많은 양의 공기가 誘入되며, 誘入된 공기덩어리가 부서짐으로써 형성된 氣泡들은 난류유동에 의하여 하향 이송되는데 氣泡들이 부력에 의하여 다시 표면으로 부상하기 전에 어느 정도의 깊이까지 이송되는지는 흐름의 난류강도에 좌우된다. 따라서 흐름의 난류강도가 클수록 誘入 공기량이 많아지고 氣泡의 수중 체류시간이 길어져 酸素傳達이 촉진된다.

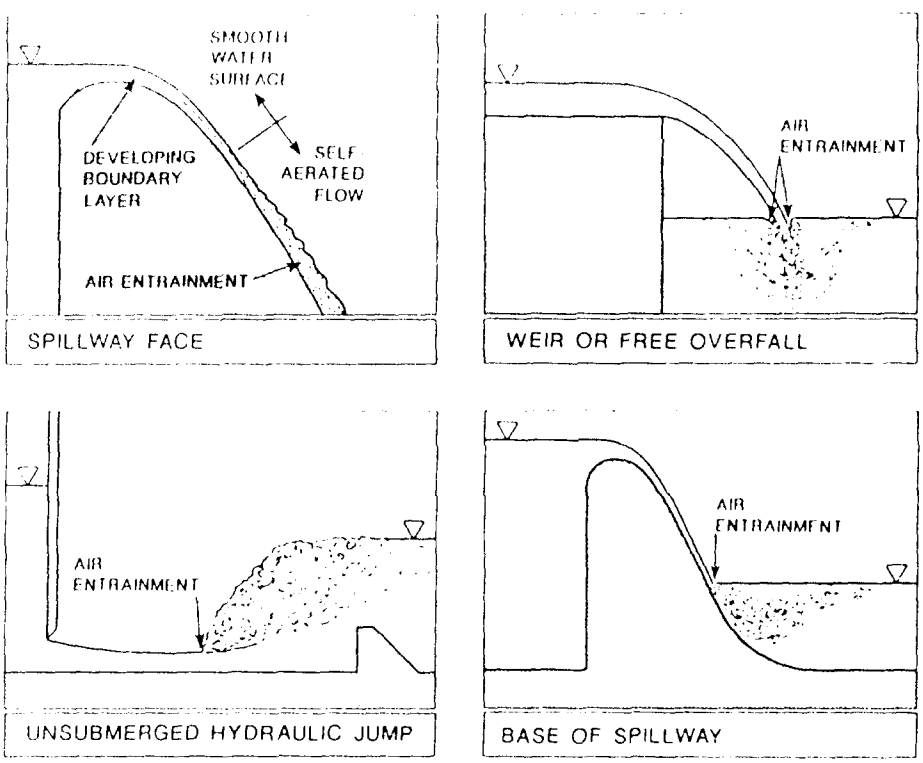

Fig. 2 Examples of Self-Aerating Flows(After Gulliver, et al. 1990)

이러한 自由水面을 갖는 自瀑氣흐름(self-aerated flows)에 관한 최근의 연구들은Wilhelms and Gulliver (1989)에 의하여 요약되어 있다.

자유젯에 의한 수면변동 및 空氣誘入 특성은 주로 젯의 유속, 난류강도 및 젯의 형상(jet shape)에 따라 다른데, 난류강도와 젯의 형상은 構造物의 형상에 따라 변한다. 월류웨어는 난류강도가 비교적 낮은 水脈젯(sheet jet)을 형성하고, 원추형 밸브는 난류강도가 큰 원추형젯(conical jet)을 형성하며, 수문오리피스(gated orifice)의 경우에는 수문의 완전 개방시 중간 정도의 난류강도를 갖는 밀집젯(compact jet)이 형성된다. 유속과 난류강도가 큰얇은 젯일수록 작은 물방울(droplet)이나 물보라(spray)로 빨리 부서진다. 난류강도가 낮은 밀집젯의 경우 젯이 부서지지도 않고 空氣誘入이 전혀 일어나지 않을 수도 있는 반면, 원추형젯의 경우에는 상당량의 공기를 誘入하여 뛰어난 瀑氣 능력을 갖는다. 따라서 자유젯을 갖는 水工構造物내의 물과 공기의 접촉면적과 그에 따른 酸素傳達 능력은 각 構造物의 특성에 따라 크게 다르다.

減勢池(stilling basin)나 沈降池(plunging pool)에서의 水理現象은 매우 복잡하고 構造物의 설계나 운영조건에 따라 다르나, 일반적으로 젯의 두께와 速度水頭에 비하여 池(pool)의 크기가 작고 수심이 얕을수록 酸素傳達의 관점에서는 효과적이다. 대개의 경우 젯이 池에 誘入할 대 誘入된 공기를 함께 이송하며 減勢池내에서는 跳水, 전단력, 構造物과 수류의 상호작용 등에 의하여 유발된 난류가 酸素傳達에 기여한다.

일반적인 水工構造物의 수리특성 및 空氣誘入에 관한 기존의 연구는 많지 않다. Sharma(1976)는 高水頭의 水門을 갖는 수로에서의 수리학적 특성 및 空氣誘入에 관하여 跳水가 일어나는 경우와 그렇지않은 경우에 대하여 연구하였으며, McKeogh andElsawy(1980)는 젯이 池내에 침투하여 확산할 때 발생하는 水理現象 및 空氣誘入에 관한 연구에서 空氣誘入의 메카니즘과 흐름조건이 氣泡의 분포에 어떤영향을 미치는지에 대하여 언급하였다.

酸素傳達에 관한 기존의 연구들은 대부분이 특정 構造物에 국한된 것이거나 웨어나 階段水路의 酸素傳達 특성에 관한 것들이다. 산소 이외의 다른 물질 특히 질소전달에 관한 연구도 종종 찾아볼 수 있는데 서로, 다른 물질간의 전달특성의 관계에 대해서는 Gulliver 등(1990)이 제안한 바 있으며 이로부터 어떤 물질에 대한 전달특성으로부터 다른 것들에 대해서도 유추하여 알 수 있다. 다양한 종류의 水工構造物과 그 운영조건에 대하여 공통적으로 적용할 수 있는 이론의 개발이 어렵기 때문에 대부분의 원형 연구(prototype study)들은 특정 構造物에 관한 것들로서, 단순히 DO 농도의 증가를 유량과 構造物에서의 損失水頭의 함수로 나타내려는 데 그치고있다. 또한 대부분의 연구들이 저수지에서 尾水(tailwater)에 이르기까지의 다양한 흐름영역이 개별적으로 미치는 영향보다는 전체 構造物이 酸素傳達에 미치는 영향을 포괄적으로 다루고 있다. 반면에 水工構造物의 종류에 따른 酸素傳達 특성을 관측자료에 근거하여 이론적으로 설명하고자 하는 노력도 있었는데 이러한 연구들을 간략히 요약하면 다음과 같다.

Avery and Novak(1978)은 모형실험을 통한 분석으로부터 농도 부족비(deficit ratio), 즉 상류 및 하류 DO 농도의 포화농도와의 차의 비와 Froude수, 젯 Reynolds수 및 尾水深(tailwater depth)과의 관계를 구하였다. Nacasone(1987) 또한 실험실 웨어에서의 酸素傳達에 관한 연구에서 尾水深을 포함한 酸素傳達 관계식을 구하였다. 그러나 구해진 관계식들을 실험에 사용된 단위폭당 젯 유량 및 沈降高의 범위를 벗어난 경우에 적용한 결과는 만족스럽지 못한것으로 나타났는데 이는 젯 瀑氣 특성의 차이 때문으로서 水脈(nappe)의 난류특성에 따른 결과인 것으로 보인다. Avery and Novak(1978)은 또한 다양한 방향성, 계단고 및 길이를 갖는 階段水路들에서 일어나는 酸素傳達에 관하여 연구하여 계단수로에서 상당한 양의 酸素傳達이 일어남을 보였다. 減勢池의 경우 水理現象 및 空氣誘入 현상이 매우 다양하여 酸素傳達 특성을 정의하기가 극히 어렵다. Leutheusser 등(1973)은 跳水의 형태 및 젯 확산에따라 酸素傳達 특성이 다를 뿐만 아니라 상류에서의 유속분포가 완전히 발달되었는지(fully developed) 여부 또한 跳水의 瀑氣特性에 영향을 미침을 보였다. Avery and Novak(1975)에 따르면 跳水시의 酸素傳達은 젯 Reynolds수와 Froude수의 함수로서 모형실험에서의 축척 결정(scaling)이 용이하지 않음을 보이고 있다.

4. 맺음말

酸素傳達에 관한 기본이론은 이미 잘 정립되어 있

어 酸素傳達의 메카니즘과 어떠한 요인들이 중요한 영향을 미치는지는 충분히 이해되고 있는 상태이다.

즉, 식 (1)에 표현된 바와 같이 酸素傳達量을 결정하는 것은 공기와 물의 접촉면적과 전달계수이며 이들은 수중의 공기함유량, 氣泡의 크기분포, 수류의 난류특성 등에 좌우된다는 것은 이미 잘 알려져 있다. 그러나 水工構造物내의 흐름은 매우 복잡하여 이러한 요인들을 정량화 내지는 예측하기가 매우 어렵다. 이러한 이유로 기존 연구의 대부분은 基本理論에 근거하거나 관련되기보다는 특정 構造物에서는 酸素傳達을 경험적인 방법에 의하여 나타내는데 그치고 있다. 이러한 연구들의 결과로부터 유사한 構造物의 酸素傳達을 정성적으로 예측할 수는 있으나 酸素傳達 시스템의 설계 등을 위한 신뢰할 만한 정량적 예측은 불가능하다. 이를 위해서는 전달계수및 (自由水面을 가진 構造物의 경우) 空氣誘入量이 난류특성을 대표하는 변수들의 함수로서 정량화되어야 하며, 氣泡의 크기분포에 대한 예측이 가능해야한다. 이는 단순한 현장관측을 통해서 이루어질 수 없으며 따라서 보다 기초적인, 이론적 접근에 의한 실험실에서의 연구가 필요하다 하겠다.

참고문헌

1. American Public Health Association(1985).Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16th Ed. Washington, D.C.
2. ASCE Task Committee on Gas Transfer at Hydraulic Structures(1991). "Gas transfer at hydraulic structures," in Airwater Mass Transfer Selected papers from the Second Int. Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, 460-493,ASCE, New York, NY.
3. Ashley, K.I., Mavinic, D.S., and Hall, K. J. (1991) "Oxygen transfer in full lift hypolimnetic aeration systems,"in Airwater Mass Transfer Selected papers from the Second Int. Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, 648-659,ASCE, New York, NY.
4. Avery, S.T. and Novak, P.(1978). "Oxygen transfer at hydraulic structures." J.Hydr. Div., ASCE, 104(HY11), 1521-1540.
5. Avery, S. and Novak, P.(1975). "Oxygen uptake in hydraulic jumps and at overfalls."Proc. o-f the 16th IAHR Congress, Sao Paulo, Brazil, 329-337.
6. Buck, C. L., Miller, D. E., and Sheppard,A.R. (1980) "Prediction of oxygen uptake capabilities in hydroelectric turbines utilizing draft tube aeration systems." Alabama Power Com-pany, Birmingham, AL.
7. Cain,P. and Wood, I.R.(1981)."Measurements of selfaerated flow on a spillway." J.Hydr.Div,ASCE,107(HY11), 1425-1444.
8. Cussler, E.L.(1984).Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems.Cambridge Univ. Press,New York.
9. Danckwerts, P.V.(1951)."Significance of liquidfilm coefficients in gas absorption." J.Ind. Engrg. Chem., 43(6), 1460-1467.
10. Favre, R.P.(1991). "The use of a deep shaft for the waste water treatment plant of Orgamol SA,"in Airwater Mass TransferSelected papers from the Second Int. Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces,756-764, ASCE, New York, NY.
11. Graham, D.S.(1984). "Review of effects of dissolved gas mitigation upon hydroturbine performance," presented at the Winter Annual Meeting of the ASME, New Orleans, LA,Dec. 9-14.
12. Gulliver,J.S., Thene, J.R., and Rindels, A.J. (1990). "Indexing gas transfer in selfaerated flows."J.Envir. Engrg., ASCE, 116(3), 503-523.
13. Haberman, W.L. and Morton, R.K.(1956). "An experimental study of bubbles moving in liquids." Trans., ASCE, 121, 227-252.
14. Higbie, R.(1935). "The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure." Trans., Amer. Inst. Chem. Engrg., 31, 365-389.
15. Jun, K.S. (1991). "Oxygen transfer in closedconduit turbulent shear flows." Ph.D Thesis, the Univ. of Iowa.
16. Lewis, W.K. and Whitman, W.G.(1924). "Principles of gas absorption." J. Ind. Engrg. Chem. , 16(12), 1215-1220.
17. McKeogh, E.J. and Elsawy,E.M.(1980). "Air retained in pool by plunging water jet." J. Hydr. Div., ASCE, 106(HY10), 1577-1593.
18. Nakasone, H.(1987). "Study of aeration at weirs and cascades." J. Envir. Engrg.,ASCE, 113 (1), 64-81.
19. Quigley, J.T. and Boyle, W.C.(1976). "Modelling of vented hydroturbine reaeration." J.Water Pollut. Fed., 48(2),357-366.
20. Quigley, J.T.,Villemonte,J.R.,and Boyle, W.C. (1975). "Vented hydroturbine aeration and power foregone." Proc. of the Symposium on Reaeration Research, ASCE Hyd. Div. Specialty Conference, Gatlinburg, TN, 137-168.
21. Raney, D.C.(1977). "Turbine aspiration for oxygen supplementation." J. Envir. Engrg.Div., ASCE, 103(EE2), 341-352.
22. Raney, D.C. and Arnold, T.G. (1973). "Dissolved oxygen improvement by hydrolectric turbine aspiration." J. Power Div., ASCE, 99(PO1), 139-153.
23. Ruane, R.J., Vigander, S., and Nicholas, W.R. (1977). "Aeration of hydro releases at Ft.Patrick Henry Dam." J. Hydr. Div., ASCE, 103(H-Y10), 1135-1145.
24. Sharma, H.R.(1976). "Airentrainment in high head gated conduits." J. Hydr. Div.,ASCE, 102 (HY11), 1629-1646.
25. Straub, L.G. and Anderson, A.G.(1958). "Experiments on self aerated flow in open channels." J. Hydr. Div., ASCE, 84(HY7),1-35
26. Wilhelms,S.C. and Gulliver,J.S.(1989). "Selfaerating spillway flow." Proc. of the National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, 137-168.