

1.2 밀도류: 작은 차이가 큰 흐름을 만든다

□ 밀도류란?

밀도류 (密度流, density current)는 유체간의 밀도 차이에 의해 발생하는 흐름을 의미한다. 밀도 차이를 유발하는 것으로는 온도, 소금과 같은 화학성분, 그리고 부유사 등을 들 수 있다 (부유사란 물이 흐를 때 부유 상태로 물과 함께 이송되는 모래 혹은 실트 입자를 의미한다). 서로 다른 밀도의 유체가 있을 때 중력에 의해 무게가 달라 흐름이 발생한다. 이와 같은 이유로 밀도류를 중력류 (重力流, gravity current)라고도 한다.

하천에서 저수지로 흘러 들어가는 흐름은 수온이 저수지의 수온과 달라 밀도류 형태가 된다. 봄철에는 하천에서 흘러 들어가는 물의 온도가 저수지의 수온 보다 높아 상층류 (overflow)가 된다. 그러나 여름철에는 낮의 길이가 길고 그동안 태양열로 인해 저수지의 수온이 상대적으로 더 높게 된다. 따라서 하천에서 유입되는 흐름은 하층류 (underflow) 형태를 띠게 된다. 또한 수심이 깊은 저수지의 경우, 여름철에는 저수지의 표면층의 수온이 높고 바닥부근에는 수온이 낮아 두개의 층으로 구분되며 이를 성층화 (stratification) 현상이라고 한다. 이와 같이 성층화된 저수지에 하층류가 발생하는 경우, 밀도류는 저수지 바닥을 타고 흐르다가 자신과 동일한 밀도층을 만나게 되면 이때 수평하게 흐르게 되는데 이를 중층류 (interflow) 라고 한다.

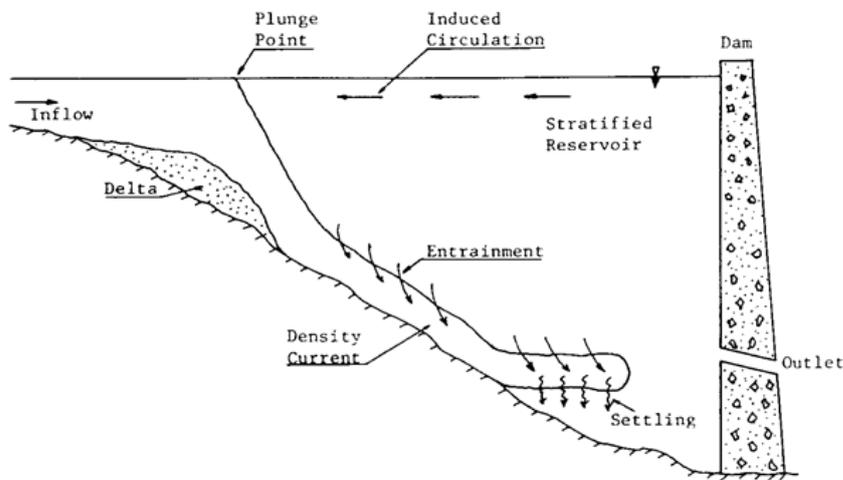


Figure 1.2 Stream Intrusion into a Reservoir

[그림] 저수지로 유입되는 하천수

□ 에스키모의 이글루

차가운 공기는 무겁기 때문에 이를 집을 지을 때 이 성질을 활용할 수 있다. 아래 그림은 이와 같은 원리를 이용한 에스키모의 이글루이다. 밖이 혹한의 기온이라고 해도 입구에 사람이 넘어갈 수 있는 벽을 설치하면 차가운 공기가 벽을 넘어 이글루 내부로 들어오지 못하기에 이글루 안은 따뜻하게 유지할 수 있다.

아래 그림은 서양의 타운하우스 단면도이다. 집밖에서 들어오는 공기는 무겁기 때문에 바닥을 타고 이동하지만 계단이 있는 경우 쉽게 올라오지 못한다. 따라서 침실을 위에 두면 겨울밤을 따듯하게 보낼 수 있다.

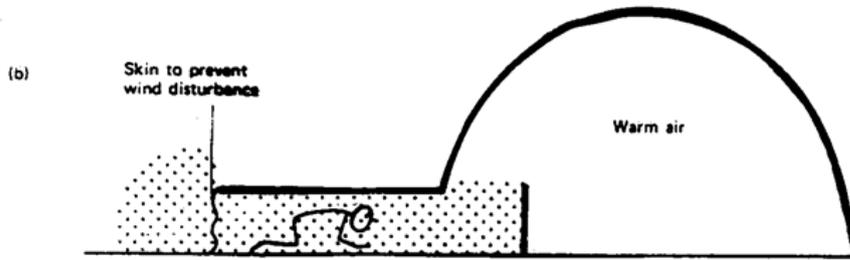
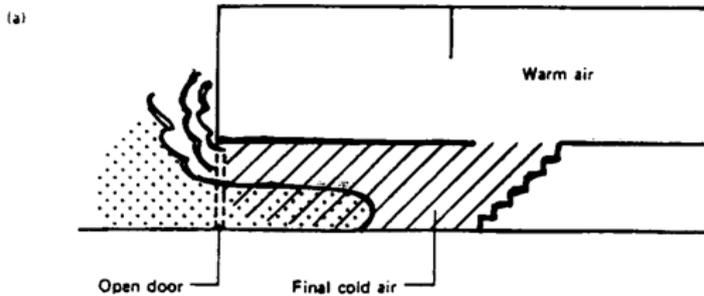


Fig. 6.16 — Comparison of (a) Western house and (b) Eskimo igloo.



[그림] (a) 에스키모의 이글루 (b) 타운하우스 단면

□ 자이툰 부대 모래폭풍

모래폭풍 (sand storm or dust storm)은 사막에서 흔하게 발생하는 기상학적 현상이다. 이 라크에 파견된 우리나라 자이툰 부대 막사에 모래폭풍이 엄습하는 사진을 보지 않았더라도 미션 임파서블 고스트 프로토콜 편에서 한 동안 지속되는 모래폭풍의 위용을 경험했을 것이다.

사막에서 모래폭풍은 어떻게 발생하는 것일까? 사막에 기상학적인 현상에 의해 바람이 불면 바닥의 모래가 바람에 의한 유동에 의해 쓸려 위로 올라간다. 이를 전문용어로 연행 (entrainment)이라고 한다. 일상용어로서 연행이라 함은 경찰관이 피의자를 체포하여 데리고 가는 것을 의미한다. 물리적인 의미의 연행도 같은 의미이다. 유동이 바닥의 모래입자를 데리고 가는 것과 매우 흡사하다.

바람에 의한 유동은 난류의 폭발 (burst) 현상으로 바닥의 모래를 들어 올린다. 이때 작은 입자는 난류운동에너지에 의해 바람에 날려 부유 상태로 이동하며 비교적 큰 입자는 바닥부근에서 튀어가면서 이동한다. 부상된 모래입자들이 유동의 밀도를 변화시켜 상호작용을 하므로 사막의 모래폭풍도 엄연한 밀도류의 한 종류이다.



[사진] 자이툰 부대에 연습하는 모래폭풍

□ 탄광 메탄가스 폭발

우리는 종종 외국의 탄광에서 폭발사고가 발생하여 갱도 안에 일하던 광부가 매몰되었다는 뉴스에 접하곤 한다. 탄광 사고는 오래 전부터 발생하여 왔는데 채굴 과정에서 메탄가스가 발생하여 이것이 갱도 안에서 폭발 사고로 이어지는 것이다. 메탄가스는 공기보다 가벼워 갱도의 천장을 타고 이동하다가 더 이상 상승할 수 없는 지점에 축적된다. 이때 전기가 나갔다가 다시 들어오는 등의 스파크가 발생하면 축적된 메탄가스가 폭발하게 된다. 아래 그림은 갱도 안의 메탄가스 거동을 실험으로 재현한 것이다. 공기와 메탄가스 대신에 물과 소금물을 사용하였는데 소금물이 물보다 무겁기 때문에 갱도 형상을 뒤집어서 재현하였다. 실험을 통해 갱도 안의 메탄가스 축적 과정과 공기를 주입함으로써 메탄가스를 배출시키는 방법 등을 연구할 수 있다.

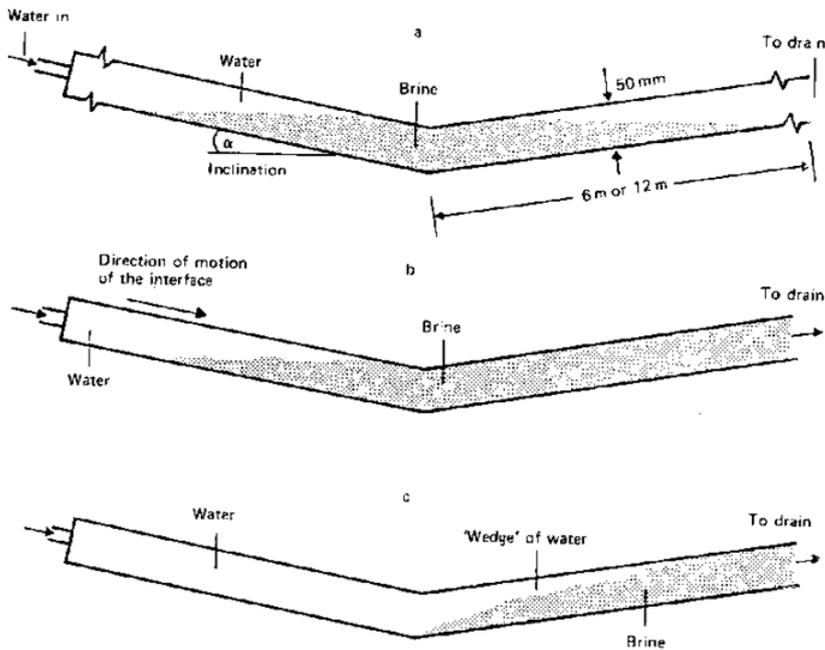
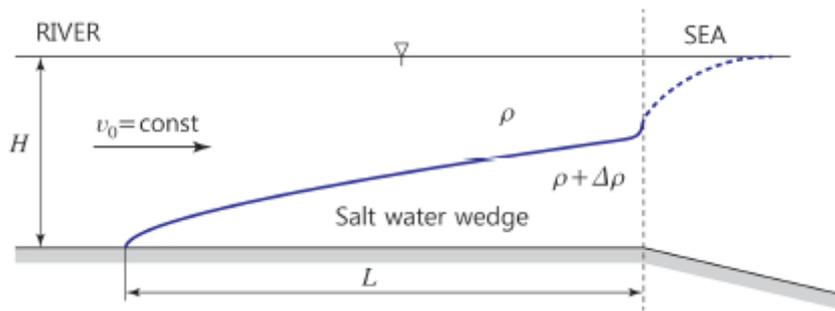


Figure 6.14 Laboratory model of the Golborne Colliery incident. (a) Layout of model. (b) Motion of brine as a plug. (c) Water channelling over the brine once the dip has been cleared. (From Mercer, 1981; Crown copyright.)

[그림] 갱도 안의 메탄가스 거동

□ 한강에서 염수썰기 현상

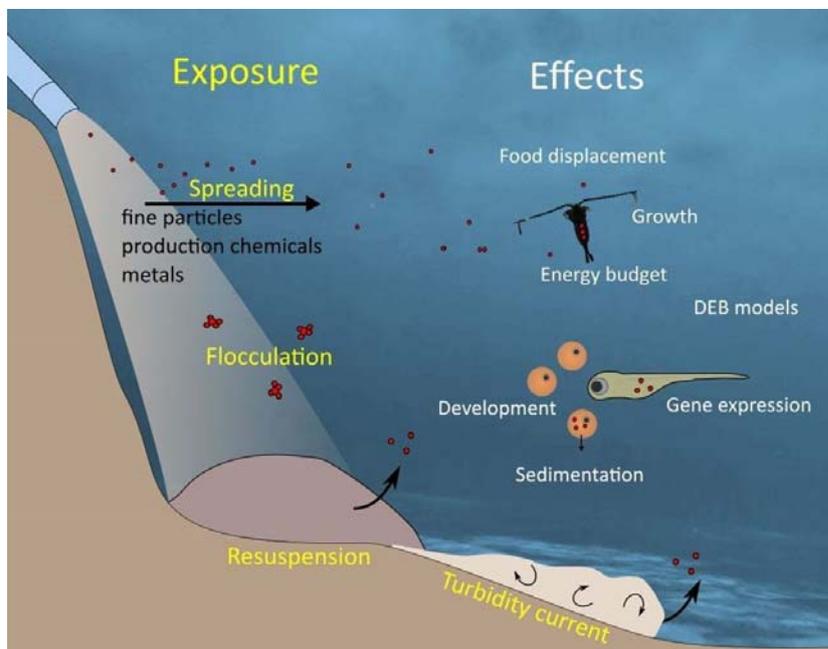
하천의 민물 (담수)과 바다의 짠물 (염수)이 만나면 어떻게 될까? 일반적으로 하구에서 하천의 민물과 바닷물이 만나는데 염수가 무겁기 때문에 아래로 내려가서 썰기 (wedge) 형상을 띄게 되며 이를 염수썰기 (saline wedge)라고 한다. 민물과 짠물이 만들어내는 염수썰기는 수심에 따라 다르지만 수 km에 걸쳐 형성되기도 한다. 염수썰기는 바닷물의 조건에 따라 육지쪽으로 밀려왔다 바닷쪽으로 돌아가는 일을 반복한다. 바닷물의 수위가 높은 만조 시에는 염수썰기가 내륙으로 이동하고 반대로 간조 시에는 바닷쪽으로 밀려가게 된다. 즉, 해수위에 따라 염수썰기는 이동을 하는데 우리나라 서해와 같이 조석의 차가 심한 곳에서는 수십 km를 이동한다고 한다. 염수썰기가 하천 바닥을 타고 내륙으로 이동하는 경우 하천의 물을 취수하여 생활용수, 농업용수, 공업용수 등으로 사용할 수 없게 된다. 이를 막기 위해 하구에 하굿둑을 쌓는다. 한강 하류의 신곡수중보는 일종의 하굿둑 역할을 하지만 말 그대로 수중에 설치되어 조위가 일정 이상이 되면 하천 방향으로 흐름이 발생하게 설계되어 있다. 한강에 신곡수중보가 건설되기 전에 염수썰기는 워커힐까지 이동하였고 신곡수중보 건설 이후에도 여의도 63빌딩까지 염수가 침투한다고 한다. 염수썰기의 이동 범위를 짐작하게 하는 대목이다.



[그림] 염수썩기 개요도

□ 미국 미네소타 주 호수 광미 폐기

미국의 중서부에 위치한 미네소타 주는 호수를 만개 이상 가지고 있어 자동차 번호판에 이를 그려 넣고 자랑할 정도이다 (미국은 주마다 자동차 번호판이 다르며 주의 특징을 표시한다). 광산에서 광물을 분리하고 남은 찌꺼기를 광미 (鑛尾, mine tailing)라고 하는데, 과거 미네소타 주에서 이를 처리하기 위해서 밀도류를 사용했다. 즉, 광미를 잘게 부순 후에 물과 섞어 적절한 농도의 혼합물을 만들어 호수에 방류하면 밀도류가 형성되어 호수의 깊은 곳까지 흘러간 후 광미를 퇴적시킨다. 이렇게 광미를 처리하면 호수의 깊은 곳까지 특별한 동력 없이도 광미를 옮길 수 있다. 이러한 처리방법은 매우 경제적이었다. 나중에 호수 깊은 곳에 퇴적된 광미에서 산성 폐수가 흘러나와 호수를 오염시킨다는 사실이 밝혀지고 난 후에는 이와 같은 처리방법은 불법화되었다.



[그림] 밀도류를 이용한 광미의 처리

□ TVA의 밀도류 이용

우리는 TVA라고 하면 미국 루즈벨트 대통령의 대공황 당시 댐 건설 사업을 연상한다. 원래

TVA는 Tennessee Valley Authority의 약자로 굳이 우리말로 번역하면 “테네시 유역 관리청” 정도가 되지 않을까 싶다. TVA에서는 106,190 km²에 달하는 부지의 다목적댐과 저수지, 수력발전, 주운, 홍수관리뿐 아니라 레저시설 관리, 용수공급, 환경시설 운영 등의 업무를 수행하고 있다. 뿐만 아니라 TVA는 유역내 다수의 화력발전소와 원자력발전소를 소유하고 운영하고 있다.

1988년 여름은 이 지역 역사상 가장 더웠던 시기중의 하나였다. 1984년 - 1988년간 계속된 가뭄으로 미국 동남부 지역은 최악의 상황을 치달고 있었다. 당시 TVA의 수자원 관리와 발전 부서도 화력발전소 및 원자력발전소의 안전관리에 촉각을 곤두세우고 있었다. 당시 TVA 동부 유역 저수지 시스템의 하류에 위치한 원자력발전소에 비상상황이 발생하였다. 이 발전소는 Chickamauga 저수지의 바닥 부근에서 냉각수를 취수하고 있었는데 계속되는 무더위로 인하여 저수지 취수구 부근 물의 온도가 상승하여 냉각수로 부적합하게 될 거라는 예측 결과를 통보받았다. 원자력발전소의 냉각수로 사용하기 위한 물의 온도는 28.3°C 이하이며 저수지로부터 냉각수를 취수하지 못할 경우 발전은 중단된다. 보통 여름철은 전력수요가 매우 높으며 발전 중단으로 인한 경제적인 손실은 막대하다. 원자력발전소의 발전 중단을 막기 위해서 TVA 엔지니어들은 상류에 위치한 댐으로부터 차가운 물을 방류하여 밀도류 형태로 Chickamauga 저수지에 공급하기로 한다. 이때 밀도류가 차가운 온도를 유지하며 이동해야 할 거리는 상류의 Norris 댐으로부터 257 km에 달하며 도중에 Melton Hill 댐과 Watts Bar 댐을 통과해야 했다. 엔지니어들은 상류 댐 방류에 따른 밀도류 추적 컴퓨터 모델을 구축하여 방류량에 따른 밀도류의 각 지점의 도달시간, 수온 등을 제시하였다. 공학적으로 이점은 매우 중요하다. 적절한 양이 적절한 시각에 공급되어야 필요한 시각에 냉각수의 온도를 유지시킬 수 있기 때문이다. 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 활용하여 최적의 방류량과 운영방법을 도출하였고 이를 활용하여 Chickamauga 저수지 취수구의 수온을 낮춰 원자력발전소의 발전중단을 막을 수 있었다. TVA 엔지니어들의 이와 같은 노력이 없었다면 Chickamauga 저수지 취수구 부근의 수온이 취수 한계를 넘는 날이 20일 이상 지속되어 발전 중단으로 인한 피해는 엄청났을 것으로 평가되고 있다.

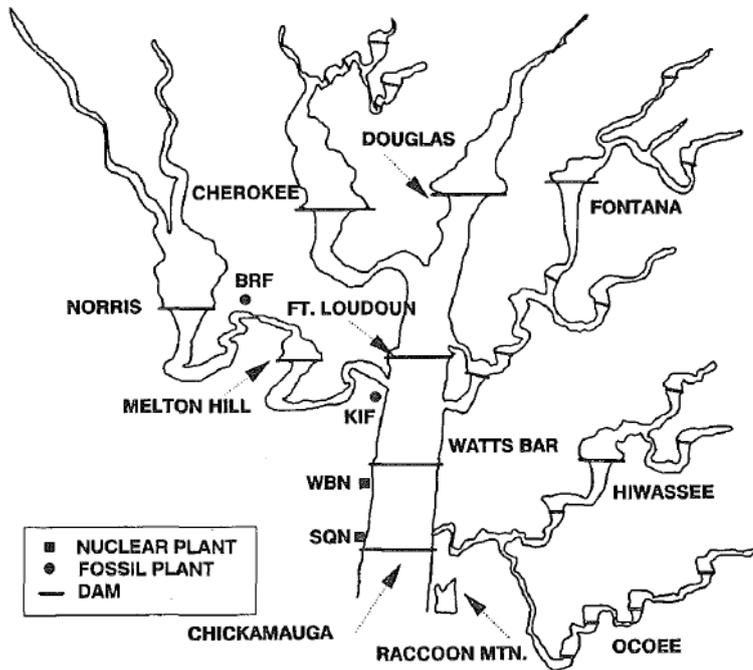


FIG. 1. TVA Reservoir System, Eastern Basin

[그림] TVA 동부 유역도

☞ 이상에서 밀도류는 일상에서 많이 관찰되며 우리생활에 많이 이용되고 있음을 알았다. 하구에서 바닷물의 내륙 침투를 막기 위해 하굿둑을 건설하면 하천수를 수자원으로 더 잘 활용할 수 있다. 그러나 기수역이 파괴되는 생태적인 비용을 지불해야 하므로 이해득실을 면밀히 따져줘야 한다. 과거 미국에서 광미를 처리하기 위하여 밀도류 형태로 호수에 방류하였는데 지금은 엄청난 환경비용을 치르고 있다. 미국 테네시 유역의 사례에서 보았듯이 밀도류를 이용하여 사회적 재난을 막을 수 있었는데 여기에는 디테일한 공학적 계산이 필요하였다. 우리 사회가 고도화 되어가면서 밀도류에 대한 활용의 범위도 깊어지는 전망이다.

참고문헌

Alavian, V. and Ostrowski Jr., P. (1992). Use of density current to modify thermal structure of TVA reservoirs, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(5), 688-706.

깊은 저수지의 전도현상