

자연발생적 염분오염의 영향 – 미국 텍사스 주 사례

Natural Salt Pollution Problem in Texas



이 치 현 |

Ph. D. Post Doctoral Researcher
Texas A&M University
sprigon@neo.tamu.edu



박 영 진 |

서일대학 토목과 교수
profpark@seoil.ac.kr

1. 서론

수자원의 중요성은 이제 중동국가를 비롯한 유럽 연합과 거의 모든 나라에서 그 중요성이 대두되고 있는 실정이다. 앞으로의 수자원에 대한 관심은 비단 충분한 수자원 확보뿐만이 아니라 효과적인 수자원 관리 시스템의 정립과 안정적인 용수공급에 그 초점이 맞춰지고 있다. 이러한 수자원의 효과적인 관리와 안정적인 용수공급을 위해서는 수량과 더불어 반드시 수질을 고려해야만 한다. 본 기사에서는 염분 (salinity)이 용수공급에 미치는 영향에 대해서 기술하였다. 본 기사는 Texas A&M University에서 수행한 프로젝트 보고서 (Ralph Wurbs and Chihun Lee, 2009)를 부분발췌, 인용했음을 밝혀둔다.

2. Texas에서의 염분오염실태와 수자원 공급에 미치는 영향

염분 (salinity)은 음용수의 수질에 영향을 미치며 더불어 파이프 라인 및 물을 이용하는 공업용 설비에 부식과 같은 문제점을 야기한다. Texas 지역의 자연발생적 염분은 Texas 지역뿐만 아니라 인근 주들에도 용수이용, 용수공급에 있어 많은 제한 조건들을 고려케하고 있다.

그림 1은 Permian Basin Salt Source에 의해 영향을 받고 있는 주요 하천들을 나타내고 있다. Pecos, Colorado, Brazos, Canadian 등의 하천들과 그 지류들이 영향을 받고 있으며, Texas주를 비롯한 Oklahoma, New Mexico, 그리고, Kansas 주들이 이 Permian Basin Salt Source의 영향권 아래 놓여져 있으며 이 곳에서 발생하는

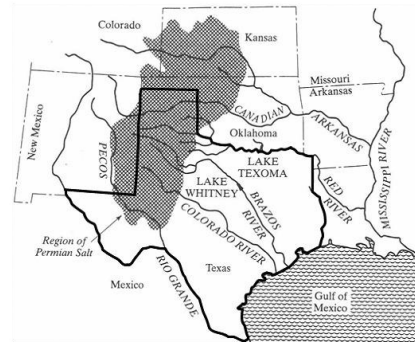


그림 1. Permian Basin Salt에 의해 영향을 받는 주요 하천들

염분으로 인하여 수자원 개발, 관리, 분배 및 이용이 제한되고 있는 실정이다. 이 지역의 하천들의 상류에서는 상대적으로 높은 염분 농도를 함유하고 있는 지하수의 침출로 인하여 높은 염분 농도를 함유하고 있다. 염분 농도는 상류에서 하류로 가면서 급격히 줄어드는 양상을 보이고 있다.

그림 1의 염분원 지역은 2억 3천만년 전인 이첩기(permian age)에 내륙에 형성된 바다로 둘러싸여져 있었다(Rought, 1984). 그 후 해수의 증발로 인하여 두꺼운 암염(halite) 퇴적층이 형성되어 그림 1에서 보여지는 오늘날의 주요 염분원 지역이 되었다. 이 반건조(semiarid) 지역은 석회질로 구성되어져 있으며, 염분으로 둘러싸여진 평원에서는 수 많은 양의 염분이 침투되고, 침출되고 있다. 이러한 영향으로 인하여 상대적으로 수량이 작은 지류에서는 표준해수 TDS (Total Dissolved Solids) 농도인 35,000 mg/l를 초과하는 경우도 발생하고 있다. 2009년에 수행되어진 Texas Brazos 하천의 염분에 대한 연구 보고서(Ralph Wurbs and Chihun Lee, 2009)는 Brazos 하천에 대한 염분수지분석과 Water Rights Analysis Package (WRAP) 프로그램 중 일부인 WRAP-SALT 프로그램을 이용하여 염분 추적 및 염분 농도에 따른 용수공급율의 변화 등을 연구하였다.

3. 염분수지분석 (Salinity budget Study)

물수지분석과 더불어 염분수지분석은 하천의 수량에 따른 염분의 정량적 분석과 염분농도의 변화, 그리고, 하천-저수지 시스템에서 시간에 따라 이동하는 염분의 이동을 파악하는데 필요한 분석이다. 염분수지분석을 위해서는 같은 시간대의 하천유량과 그 유량에 포함된 염분의 양 또는 농도자료를 확보해야만 한다. U.S. Geology Survey (USGS), U.S. Army Corps of Engineering (USACE), U.S. Environmental Protection Agency

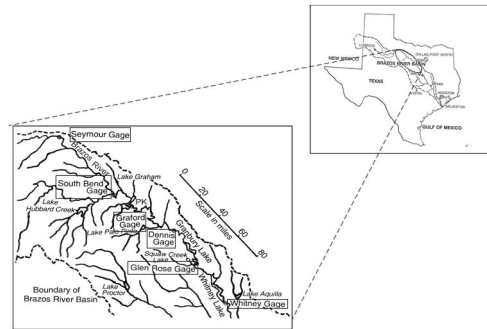


그림 2. 염분수지분석을 위한 연구범위

(USEPA)가 공동으로 수행한 연구에서는 Texas 지역 내 Brazos 하천에 대한 하천유량과 그에 따른 염분의 농도를 수집하였다. 자료수집기간은 1964년 10월부터 1986년 9월까지 총 276개월동안 월평균 하천유량과 염분농도를 수집하였다. 본 기사에서의 염분수지분석은 위 연구에서 수집되어진 자료를 기초로 수행되었다.

그림 2는 Texas Brazos 하천과 염분수지분석을 위해 채택된 연구지역의 범위를 보여주고 있다. 그림 2의 우측상단에 표시된 Brazos 하천은 118,000 km의 하천연장과 115,565 km²의 유역면적을 포함하고 있다. 총 6개의 관측소와 3개의 저수지가 염분수지분석을 위해 선택되어졌으며, 이들 관측소와 저수지 사이의 유량과 염분량에 대한 정량적 분석이 수행되어졌다. 기본적으로 염분수지분석은 Mass Balance Equation을 이용하여 계산되어지며, 하천유량과 염분량에 대한 계산식은 다음과 같다.

Volume Budget

$$\text{Gaging Station } F_{DS} = F_{UP} + F_{OI} - F_{OO}$$

$$\text{Reservoir } \Delta S = F_{UP} - F_{DS} + F_{OI} - F_{OO} - EP$$

Load Budget

$$\text{Gaging Station } L_{DS} = L_{UP} + L_{OI} - L_{OO}$$

$$\text{Reservoir } \Delta SL = L_{UP} + L_{OI} - L_{OO} - L_{DS} + L_X$$

F_{UP} , L_{UP} : upstream streamflow, upstream load

F_{DS} , L_{DS} : downstream streamflow, downstream load

학술/기술기사

F_{OI}, L_{OI} : other incremental inflow, other incremental inflow load

F_{OO}, L_{OO} : other incremental outflow, other incremental outflow load

$\Delta S, \Delta SL$: the changes of storage volume, the changes of storage load

L_x : other load

EP : Net evaporation-precipitation

Other incremental inflow는 관측소와 관측소 간 구간으로 유입되는 지표하 기저유출이나 강우유출에 대한 부분을 포함하며, other incremental outflow는 용수수급량 (water supply diversion), 증발산량 (evapotranspiration) 등을 고려한 항목이다.

U. S. Geological Survey (USGS), Texas Department of Water Resources, Brazos River Authority는 1970년 초반부터 1980년대까지 Texas 지역 내 저수지들을 선택하여 실제 저수지의 월별 저수지의 TDS 농도를 측정하였다. 그림 3은 염분수지분석을 통하여 계산되어진 Granbury 저수지의 TDS 농도와 해당 기간에 실제 관측되어진 저수지 TDS 농도와와의 비교를 보여주고 있다. 염분수지분석 결과 유역 내 염분농도는 상류단에서 가장 높은 농도를 보였고, 본류와 지류에서 유입되는 많은 양의 하천유량으로 인하여 희석되어 하류단으로 갈수록 TDS 농도는 감소되는 추세를 보였다. 계산되어진 저수지의 TDS 농도는 실제 관측되

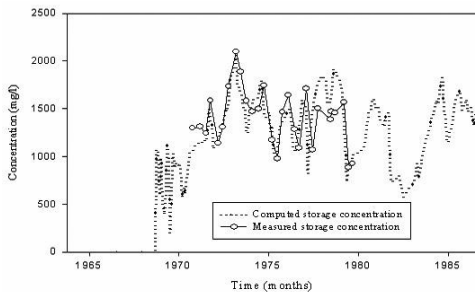


그림 3. Storage Concentration in Granbury Reservoir

어진 값들과 근접한 결과를 보여주고 있으며, 저수지 바로 하류의 관측소에서의 TDS의 농도 변화 추세는 저수지 TDS 농도 변화 추세와 유사한 결과값들을 보이고 있다.

4. Texas Water Availability Modeling (WAM) System

Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ)에서는 Texas 주의 수권인가 (water right permit) 시스템의 관리와 지역의 수자원 관리를 위해 Water Availability Modeling (WAM) 시스템을 개발하였다 (Wurbs 2005). WAM 시스템은 하천과 저수지 시스템의 수자원 관리 시뮬레이션 모델인 Water Right Analysis Package (WRAP)와 WRAP 프로그램 시뮬레이션을 위한 Texas 주 내의 총 23개 하천유역에 대한 입력자료들로 구성되어져 있다. 이 입력자료들에는 각각의 하천에 대한 수문학적, 수리학적 정보들과 각각의 지점들에 대한 수권 (water right) 정보들을 포함하고 있다. 이 입력자료에는 약 8,000개의 수권인가 (water right permit)와 인근 다섯 개 주와의 수자원 이용에 대한 계약, 3,400여개에 달하는 저수지 정보, 500여개의 주요 지점들과 12,000여개에 달하는 2차 주요지점들에 대한 수문학적, 수리학적 정보들이 포함되어져 있다. Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ)에서는 주기적으로 이들 지점들에 대해 변경된 정보들을 추가, 갱신하고 있으며, 또한 새로운 수권들과 변경된 수권내용에 대한 정보들 또한 주기적으로 관리하고 있다. 이러한 WRAP/WAM 시스템은 1990년대 후반부터 Texas 지역 내의 수자원 관리를 위해 적용되어져 오고 있으나 염분이 수자원 공급에 미치는 영향은 아직 고려되고 있지 않다.

최근에 개발되어진 WRAP-SALT 프로그램은

관심의 대상이 되는 지역의 염분 농도값과 그에 따른 통계치를 계산해주는 프로그램으로서 이를 바탕으로 염분 농도에 대한 대안적인 수자원 관리방안을 제시하기 위해 개발되어졌다. WRAP-SALT는 주로 농도의 빈도수에 대한 통계를 계산하며, 이에 따른 수자원 공급에 대한 신뢰지수 (Water Supply Reliability Index)를 제공해준다.

WRAP-SALT는 WRAP 프로그램 중 하나인 WRAP-SIM의 출력자료를 다시 입력자료로 이용하며, WRAP-SALT 프로그램의 출력자료는 TABLES 프로그램을 이용하여 빈도분석과 수자원 공급에 대한 신뢰지수를 산출하게 된다. 또한, WRAP-SALT는 지점에 대한 월별 염분양 또는 염분농도값을 입력자료로 이용하게 된다. 이를 통해 WRAP-SALT는 해당 연구지역에 포함된 저수지의 수자원 공급현황, 저수지 운용방안, 각 지점의 하천유량에 따른 염분을 추적하는 역할을 하게 된다. WRAP-SALT 프로그램은 염분의 정량적 해석만을 위한 프로그램으로서 염분의 생물학적, 화학적 반응과 과정들은 고려하지 않는다.

4.1 WRAP-SALT Input

위에서 기술한 바와 같은 WRAP-SALT 프로그램을 모의하기 위해서는 우선 WRAP-SIM 프로그램의 출력자료를 이용해야한다. 이 WRAP-SIM 출력자료에는 각각의 지점들에 대한 유량값, 수로 손실, 용수공급량, 월초 저수지용량, 월말 저수지용량, 저수지 내의 증발산-강우량 등이 포함되어 있다. 연구지역의 하천과 저수지 시스템에 대한 공간적 정보는 지점(control point) 정보로 입력되어진다. 염분의 양이나 농도는 특정 지점에 대해 입력되어지며, 이를 바탕으로 프로그램 내에서 다른 지점들의 농도 또는 염분 양을 각 지점의 하천유량과 더불어 계산되어진다.

4.2 WRAP-SALT Simulation

WRAP-SALT 프로그램은 해당 기간 내 해당 하천과 저수지 시스템의 월별 하천유입량과 유출량에 따른 각 지점의 염분양과 농도값을 계산한다. 주어진 해당 월에 각 지점에 유입되는 유입량에 따른 유입 염분양을 계산한 후 그 지점에서의 염분유출량과 저수지의 염분양 또는 농도값이 계산되어진다. 저수지의 농도값은 월말 저수지량에 대한 체적중량농도 (volume-weighted concentration)를 나타낸다.

실제 저수지의 상류부에 염분이 포함된 하천유량이 유입되면 유입된 염분은 시간에 걸쳐 저수지에서 이동하게 되며 유입된 염분이 다시 저수지 밖으로 방출되기까지는 일정 기간의 지체시간이 필요하게 된다. 저수지 바로 하류단의 염분농도분포는 저수지에서 방출되는 방출수의 염분농도분포를 따른다는 가정하에 이 지체시간을 고려하여 저수지 바로 하류단의 농도값을 구할 수 있게 된다. WRAP-SALT 프로그램에서는 다음과 같은 식을 이용하여 저수지 하류단의 농도값을 구하게 된다.

$$OC_M = SC_{M-L} \times F_1 \left(1.0 + \left(\frac{V}{V_C} \right) (F_2 - 1.0) \right) \quad (1)$$

여기서, OC_M 은 해당 월 M의 유출수의 평균농도값이며, SC_{M-L} 은 월 M의 저수지 체적중량농도값을 나타내며 L은 지체계수 (Lag time)를 나타낸다. V는 해당 월의 저수지의 평균저수량을, V_C 는 해당 저수지의 저수용량을 나타낸다. 입력변수 F_1 과 F_2 는 저수지의 전환량 (diversions)과 하류단 방출량 (downstream releases)에 따라 달라진다. 만약, 프로그램 내에서 F_1 과 F_2 값이 1.0이고, 지체시간 L이 0이면 방출수의 농도값은 해당 월의 저수지 농도값과 같아지며 (1)식은 (2)식으로 표현되게 된다.

$$OC_M = SC_M \quad (2)$$

4.3 Simulation Example

1964년부터 1986년까지 276개월동안 U.S.

Geological Survey(USGS)에서 수집한 월별 하천 유량값과 월별 TDS(Total Dissolved Solids) 농도값을 이용하여 염분수지분석을 수행하였으며, 개발되어진 염분수지분석의 결과값을 이용하여 1940년 1월부터 2007년 12월까지의 WRAP-SALT 프로그램의 입력자료를 개발하였다. 또한, 276개월의 관측자료값들을 이용하여 1940년부터 2007년까지 총 816개월의 자료값을 생성하기 위하여 SALIN 프로그램을 개발하였다. SALIN 프로그램은 기존에 확보되어진 하천유량값을 이용하여 관측되지 않은 연도의 염분 농도값을 추정하는 프로그램으로서 선형회귀법, 비선형 회귀법, 선형보간법 등을 이용하여 관측되지 않은 연도의 염분 농도값을 생성하게 된다.

WRAP-SALT 프로그램을 구동하기 위해서는 WRAP-SIM 프로그램의 출력자료가 필요하게 되며, 이 출력자료에는 Brazos 하천의 모든 지점에 대한 수문학적, 수리학적 자료들이 포함되어 있다. 그러나, WRAP-SIM의 출력자료에는 염분에 대한 자료값은 포함되어 있지 않다. WRAP-SALT의 입력자료에는 총 7개의 주요지점에 대한 월별 하천유량값과 월별 TDS 농도값을 포함한다. 이 7개의 주요지점에 대한 월별 TDS 농도값들은 WRAP-SALT 프로그램 안에서 WRAP-SIM 출력자료에 포함되어 있는 각 지점들의 하천유량에 대한 월별 TDS 농도값들을 계산하는 데 이용되게 된다.

WRAP-SIM 프로그램을 구동하기 위하여 Texas Commission on Environmental Quality(TCEQ)에서는 Brazos 하천유역에 대한

두 가지 입력자료들을 개발하였다. 첫 번째 입력자료는 BWAM 입력자료(Brazos WAM Dataset)로서 Brazos 하천의 3,834개에 달하는 지점들의 수문학적, 수리학적 정보들을 포함하고 있다. BWAM 데이터를 이용한 모의결과는 방대한 양의 출력자료값들을 포함하고 있어 출력자료값들의 분석에 많은 시간이 소요되게 된다. 최근에 개발되어진 BRAC 데이터(Brazos River Authority Condensed Dataset)는 Brazos River Authority의 연구용역을 통해 개발되어졌으며, 3,800여개에 달하는 주요 지점들을 관심의 대상이 되는 48개의 주요지점들로 압축시켰다. 이 48개의 주요지점들은 물론 BWAM 데이터에 포함이 되어져 있으며, BWAM 데이터와 BRAC 데이터를 이용하여 모의한 출력값들은 거의 유사한 결과값들을 보이고 있다. 개발되어진 WRAP-SALT의 입력자료는 하나의 입력자료로 BWAM 데이터와 BRAC 데이터를 이용한 두 가지 모의에 모두 쓰일 수 있게 개발되어졌다.

4.4 Simulation Results

개발되어진 WRAP-SALT의 입력자료는 multiple-reservoir system 가동과 염분과의 상관관계 분석, 염분조절댐(Salinity control dam)의 염분조절효과 분석, 하천-저수지 시스템 내 수많은 지점들에서의 염분농도값들의 빈도해석에 근거한 수자원 관리전략 수립 등을 목적으로 하는 다양한 모의실험을 가능케한다. WRAP-SALT 프로그램 구동 후 얻어진 출력자료는 TABLES 프로그램

표 1. 주요지점들에 대한 결과물 요약(BWAM8, 1940-2007)

Control Point	MeanMonthly Volume (ac-ft)			MeanMonthly Load (tons)			MeanConcentration (mg/l)		
	Inflow	Outflow	Storage	Inflow	Outflow	Storage	Inflow	Outflow	Storage
LRCA58	0	100,048	0	0	34,824	0	0.0	256.0	0.0
BRSE11	0	19,193	0	0	85,258	0	0.0	3,266.8	0.0
421331	7,271	3,869	251,401	6,641	6,366	438,680	671.7	1,210.0	1,283.2
BRSE23	45,617	45,617	0	119,898	119,899	0	1,932.9	1,932.9	0.0
515531	56,368	51,985	544,292	130,472	131,046	1,275,992	1,702.2	1,853.8	1,724.0
515631	70,650	69,015	127,349	106,851	108,361	226,961	1,112.2	1,154.6	1,310.6
515731	94,957	90,530	545,895	108,501	109,235	699,968	840.3	887.4	943.0
515831	6,999	6,403	39,081	2,016	2,004	13,309	211.8	230.1	250.4

표 1. 주요지점들에 대한 결과물 요약(BWAM8, 1940-2007) (계속)

Control Point	MeanMonthly Volume (ac-ft)			MeanMonthly Load (tons)			MeanConcentration (mg/l)		
	Inflow	Outflow	Storage	Inflow	Outflow	Storage	Inflow	Outflow	Storage
509431	32,532	30,573	197,111	9,624	9,473	70,991	217.6	227.9	264.9
BRBR59	304,019	304,019	0	173,757	173,757	0	420.3	420.3	0.0
516431	20,026	18,895	130,109	5,681	5,685	41,148	208.6	221.3	232.6
516531	19,940	18,115	187,562	5,637	5,638	61,168	207.9	228.9	239.8
BRHE68	413,723	413,723	0	205,875	205,875	0	365.9	365.9	0.0
BRRI70	452,223	452,223	0	216,953	216,954	0	352.8	352.8	0.0
BRGM73	430,583	430,583	0	201,140	201,140	0	343.5	343.5	0.0

표 2. 염분농도 1,000mg/g를 고려한 저수지에서의 전환량(Diversion) 신뢰분석 (BRAC8,1940-2007)

Control Point	Target Diversion (ac-ft/yr)	Both Quantity & Quality Reliability				Quantity Only Reliability			Quality Only Reliability			Number Months Concentration	
		Shortage (ac-ft/yr)	Volume (%)	Period (%)	Reliability (%)	Shortage (ac-ft/yr)	Volume (%)	Period (%)	Reliability (%)	Shortage (ac-ft/yr)	Volume (%)	Period (%)	Zero
421331	9,923.5	7,450.87	24.92	24.75	0.0	100.00	100.00	7,450.87	24.92	24.75	0	614	
515531	59,482.1	55,145.52	7.29	7.23	0.0	100.00	100.00	55,145.52	7.29	7.23	0	757	
515631	36,025.4	24,940.79	30.77	31.37	0.0	100.00	100.00	24,940.79	30.77	31.37	25	560	
515731	18,336.0	6,371.19	65.25	64.22	0.0	100.00	100.00	6,371.19	65.25	64.22	8	292	
515831	2,394.3	0.00	100.00	100.00	0.0	100.00	100.00	0.00	100.00	100.00	2	0	
509431	38,348.0	119.75	99.69	99.75	0.0	100.00	100.00	119.75	99.69	99.75	2	2	
516431	48,000.1	81.57	99.83	99.51	81.57	99.83	99.51	0.00	100.00	100.00	1	0	
516531	39,337.1	0.00	100.00	100.00	0.0	99.83	100.00	0.00	100.00	100.00	0	0	
Total	251,846.3	94,109.70	62.63		81.57	99.97		94,028.12	62.66				

램을 이용하여 염분농도에 대한 빈도분석과 수자원 공급에 대한 신뢰지수를 산출하게 되며, 표 1과 2는 모의실험 후 얻어진 결과값들을 나타낸다.

표 1은 BWAM 데이터를 이용하여 모의실험한 후 얻어진 주요지점들의 평균유량, 평균 TDS 부하량과 평균 TDS 농도값들을 나타낸다. 위의 표에서 얻어진 결과물들은 모두 TABLES 프로그램을 통해 얻어진다.

표 2는 용수의 농도제한을 고려한 용수공급의 신뢰분석 결과표이다. 표 2의 경우 저수지에서의 전환량(Diversion) 농도값을 1,000mg/l로 제한하여 모의실험 한 결과 농도를 고려하지 않은 경우에는 거의 모든 저수지와 모의실험 기간내에서 부족량 없이 100%의 목표전환수 공급을 충족시키고 있으나, 방출되어지는 유량의 농도값을 1,000mg/l로 제한한 경우에는 부족량이 발생하여 신뢰지수가 저하되는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 WRAP-SALT는 농도제한에 따른 신뢰도 분석을 제공함으로써 정량적 분석뿐만 아니라 정성적 분석 또한 가

능하게해준다.

5. 결론

염분은 수자원을 어느 곳에서 이용하는지, 어떤 목적으로 이용하는지를 결정함에 있어 고려해야할 중요한 인자들 중 하나이다. Texas와 인근 지역에서 염분은 많은 양의 용수공급을 함에 있어 심각한 제한요소로 대두되고 있는 실정이다.

본 학술기사는 이 전에는 시도되지 않았던 염분에 대한 영향을 고려하여 보다 효율적인 수자원 관리 시스템을 정립하는 방법을 제시하고, 수자원 용수공급 신뢰분석에 좀 더 정확한 지표를 제공하는 데 그 목적이 있다. 또한, Texas Water Availability Modeling(WAM) 시스템의 기능을 향상시키고, Texas내에서 가장 큰 하천유역인 Brazos 하천유역을 연구대상범위로 삼아 염분의 이동과 염분이 수자원 공급에 미치는 영향을 조사, 분석하였다. ☞



References

1. Wurbs, R. A. (2009). "Salinity simulation with WRAP." Texas Water Resources Institute, Texas A&M University, College Station, Tex.
2. Wurbs, R. A., and Lee, C. (2009). "Salinity budget and WRAP salinity simulation studies of the Brazos River/reservoir system." Texas Water Resources Institute, Texas A&M University, College Station, Tex.