

제주도 동부권역 담 지하수 대수층에서의 염수침입

부성안 (농업기반공사 지하수사업처 토목지질부)

정교철 (안동대학교 지구환경과학과)

1. 서 언

제주도 동부권역에 개발된 많은 공이 염수의 침입으로 인하여 먹는 물이나 농업용수로 사용되지 못하고 폐공되었거나 일부는 관측공으로 활용되기도 하며 가뭄이 들었을 때 농업용수로 취수되는 공을 볼 수 있다. 이들 개발된 공 중 염소이온(Cl^-)이 250mg/l 이상인 지역은 북제주군 한림읍 수원리, 남제주군 대정읍 상모리, 서귀포시 보목동 등 극히 일부지역이나, 동부권역은 해안에서 가까운 곳에 개발된 대부분의 우물에서 염수가 산출되고 있다

이와 같은 제주도 동부권역의 지하수 고염도화 현상에 대하여 농업진흥공사(1989)는 수리경사가 완만한 대수층이 지하수위가 낮으므로 해수의 내륙침투가 용이한 지질조건과 해안 인접지역에서 발생하는 지하수의 과잉양수에 의한 해수침투가 원인이라 하였고, Choi *et al.*(1991)은 해안 인접지역에서의 과잉양수가 해수침입의 주 요인이라 하였다. 윤정수(1986)는 여러 가지 원인 중 동부지역 폐사사구층 내에 다량 함유되어 있는 염분이 강우시 빗물에 용해되어 지하로 침투한 것이 주된 원인이라 하였으나, 고기원(1997)은 서귀포층의 결층 현상과 깊은 관계가 있는 것으로 추정하였으며, 또한 서귀포층의 결층 외에도 균열 또는 절리가 발달된 현무암류가 호층으로 존재하며 스코리아층도 호층으로 발달되어 있어 제주도가 생성될 당시부터 해수가 내륙 깊숙이까지 침투할 수 있는 지질구조 때문이라 하였다.

제주도 동부권역 해안 변에서 발생하고 있는 지하수의 고염도화 현상은 거의 대부분의 용수를 지하수에 의존하고 있는 제주도로서는 매우 심각한 일이다. 특히 북서부와 남서부 해안지역에서도 지하수의 고염도화 현상이 일어나고 있으므로 이에 대한 대책수립이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 제주도 내에서 피해가 가장 큰 지역인 동부권역에 대한 염수침입 현상의 원인을 규명해보았다.

2. 담지하수 대수층으로의 염수침입

(1) 지하수위의 낮은 분포와 과잉양수

동부권역 지하수 대수층에 대한 염수침입 원인의 첫 번째는 이 일대의 지하수위가 대단히 낮고 또한 강수의 영향과 조석의 영향으로 수위가 상승과 하강을 반복함으로써 해수의 상승이 계속적으로 이루어짐과 동시에 과잉양수에 의해 해수침입이 더욱 급속히 이루어지기 때문이다. 동부권역에서는 평균수위에 비하여 수위의 연간변화율이 매우 크다. 동부권역 17개 관측공의 5년간 평균수위가 EL1.24m이나 수위변화량은 평균 1.72m로서 평균수위는 $1.24m \pm 1.72m/2$ 가 되어 최고 EL2.1m에서 최저 EL0.38m로 변화하고 있다. 이에 따라 담·염수 경계면은 상승과 하강을 반복함으로써 담수체의 일부가 염수로 치환되는 것이다.

예를 들면 염수가 산출되는 관측공 중 월평균 수위가 가장 높은 공은 평대 D-203호 공으로 5년간 평균수위는 EL1.76m이다. 이 공의 최고수위는 EL3.86m, 최저수위는 EL1.09m로 수위차는 2.77m이고, 1일 최대 수위변화 폭은 0.25m이며, 해안에서 3.04km 떨어진 곳에서 해수면 아래 (-)22.92m까지 개발되었다.

평균수위가 EL0.90m로 매우 낮은 편에 속하고 1일 수위변화가 0.39m인 고성 D-028호 공은 최고수위가 EL1.61m, 최저수위 EL0.46m로 수위차는 1.15m이고, 1일 최대 수위변화폭은 0.39m이며, 해수면 아래 (-)12.76m까지 개발되어 있고 해안에서 1.82km 떨어져 있다.

Fig. 1은 D-203호 공과 D-028호 공에 대한 G-H 이론상의 담·염수 경계면의 깊이를 나타내는 모식도이다. 개발당시 수위는 각각 EL1.09m와 1.04m로서 접이대는 각각 해수면 아래 (-)43.2m와 (-)41.6m에 형성되는 것으로 계산되므로 개발하한 심도인 (-)22.92m와 (-)12.76m는 약 20~28m 정도 염수침입에 대하여 여유가 있었다. 수위의 상승과 하강은, 강수의 영향에 더하여 조석의 영향이 미치면 그 폭은 더욱 커지게 된다. Fig. 2는 D-203호 공과 D-028호 공의 5년간 월평균 최고, 최저 수위에 1일 최대 수위변화량을 포함시켜 계산한 접이대를 나타낸 모식도이다. (A)는 D-203호 공을 나타낸 것으로 개발당시 수위는 EL1.09m이었으며 이때의 접이대의 깊이는 $Z=40h$ 에 의해 $1.09m \times 40$ 으로 (-)43.6m가 된다. 그러나 최저, 최고수위에 조석의 영향을 반영하여 접이대의 깊이를 계산하면,

$$\text{최저수위 } h_1 = 1.09m - 0.25m/2 \approx 0.96m, \quad \therefore Z_1 = (-)38.4m$$

$$\text{최고수위 } h_2 = 3.86m + 0.25m/2 \approx 3.98m, \quad \therefore Z_2 = (-)159.2m$$

간조 때 수위는 최저 EL0.96m까지 내려가고 만조 때 수위는 최고 EL3.98m까지 올라가므로 접이대의 깊이는 수위가 최저일 때 EL(-)38.4m, 최고일 때 EL(-)159.2m로서 그 폭은 120.8m나

된다. (B)는 D-028호 공으로서 개발당시 수위는 EL1.04m이었으며 이때의 점이대의 깊이는 1.04m×40으로 (-)41.60m이다. 본 공 역시 최저, 최고수위에 조석의 영향을 반영하여 점이대의 깊이를 계산하면,

$$\text{최저수위 } h_3 = 0.46\text{m} - 0.39\text{m}/2 \approx 0.26\text{m}, \quad \therefore Z_3 = (-)10.4\text{m}$$

$$\text{최고수위 } h_4 = 1.61\text{m} + 0.39\text{m}/2 \approx 1.80\text{m}, \quad \therefore Z_4 = (-)72.0\text{m}\text{로서}$$

간조 때 수위는 최저 EL0.26m까지 내려가고 만조 때 수위는 최고 EL1.80m까지 올라가므로 점이대의 깊이는 EL(-)10.4m~(-)72.0m로서 그 폭은 61.6m이다. 그 결과 D-203호 공은 갈수기의 간조 때에도 해수의 침입을 받지 않으나 D-028호 공은 공저 심도가 EL(-)12.76m이므로 이 때에는 우물 아래 부분에 염수가 침입하게 된다.

그러나 D-203호 공과 같이 수위의 변화에도 염수침입에 안전하였던 공도 가뭄이 들면, 농업용수는 물론 생활용수 등의 용수 사용량이 급격히 증가하므로, 우물의 채수량이 이에 비례하여 늘어나고 양수기간도 더욱 장기간이 될 것이며, 해안변에 개발된 염지하수 관정은 양식장에 급수하기 위하여 거의 매일 취수할 것이므로 우물의 간섭현상에 의해 Fig. 3에서처럼 수위는 내려가고 점이대가 상승하는 현상(upconing)이 가속화 될 것이며 이로 인하여 공저에 염수가 접촉하게 되고 또한 상승하게 된다.

이와 같이 동부권역 해안 부근에 개발된 우물은 수위가 매우 낮으므로 풍수기와 갈수기에 강수의 영향으로 일어나는 자연적인 수위의 상승과 하강, 조석에 의한 수위의 정현운동 및 과잉양수에 의한 수위하강 등에 의하여 담·염수 경계면은 해수면 아래 근접한 곳에서 상승과 하강을 반복하게 되며 이런 현상이 장기간 지속되면 염수가 상승한 위치까지 담수가 염수로 치환됨으로써 이곳의 지하수는 사용할 수 없게 되는 것이다. 그러므로 과잉양수에 의해 대수층의 파괴가 일어나면 세립물질이 유출되거나 지하수 유로가 변경되게 되며, 양수시 수위강하로 인한 담수체의 수축으로 인하여 해수가 상승하게 되고 이로 인한 수질악화의 가능성이 항상 존재하기 때문에, 이로 인해 우물을 더 이상 사용할 수 없게 될 수도 있으므로 향후 과잉양수에 의한 대수층의 파괴와 과도한 수위 하강을 늘 경계하여야 한다.

(2) 지하지질 구조

동부권역의 지하지질을 구성하고 있는 현무암류의 지질구조가 원인이 된다. 동부권역에는 FOB(Feldspar olivine basalt)가 광범위하게 분포하고 있다. FOB는 점성이 낮아 분출시 이들의 유로를 따라 대·소규모의 용암동굴을 해안저지대에 다수 형성시켰으며 용암동굴은 대부분 수평굴을 이루고 있다. 또한 FOB에는 구갑상의 주상절리 혹은 수직절리가 매우 발달하여 있다. 그리고 FOB는 용암류의 분출 단위가 3~5m 정도로서 용암류 사이에는 화성쇄설층이 퇴적되거나 크

링커 및 파쇄대가 발달되어 있고 스킨리아층도 다수 형성되어 있으므로 이러한 것이 모두 지하수의 좋은 통로가 된다. 그러므로 강수량이 가장 많은 지역임에도 불구하고 이와 같은 1, 2차적인 지질구조를 따라 강수가 급속히 지하로 침투되고 해안으로 유출되므로 수위를 높게 상승시키지 못하며, 갈수기에는 해수가 침입하는 좋은 통로가 되므로 내륙 깊숙이까지 해수가 수평으로 침투하게 된다.

(3) 저투수성 퇴적층의 분포 심도

동부권역 저지대의 수위가 약 EL3m 이하로 낮은 반면에, FOB하부에는 저투수성의 퇴적층인 USF(Uncemented sediment formation)층이 해수면 아래 평균 (-)100.2m 이하에서부터 분포하고 있기 때문이다. USF층은 주로 sandy silt, silty sand 내지 muddy sand층으로서 지하수를 다량 함유하고 있으나 산출이 어려운 난대수층 내지 반대수층을 이루고 있다. 그리고 동부지역은 다른 지역과는 달리 직상부에 저투수성 퇴적층인 서귀포층이 분포하지 않는다. 해수가 침입한 지역을 보면 대부분 평균 수위가 EL3m 이하로서 매우 낮은 편인데 해수를 막아줄 수 있는 퇴적층이 해수면 아래 깊이 분포하므로 G-H원리에 의하면 $100.2m \div 40 \approx 2.50m$ 즉, 수위가 EL2.50m인 지역까지 접이대가 분포하게 된다. 이때 동부권역 관측정 중 해안에서 가장 멀리 떨어진 평대 D-203호 공의 수위변화폭이 2.77m이다.

$$Z_2 = Z_1 = 100.2m \text{ 일 경우 } Z_2 = 40 \times h_2 \text{ 이므로 } (h_2 - 2.77m/2) \times 40 = 100.2(m)$$

$$\therefore h_2 \approx 3.89m$$

즉, 평균수위가 EL3.89m인 지역도 연간 수위변화를 볼 때 수위가 EL2.50m 혹은 그 이하로 하강하므로 이 지역까지 접이대가 침입 형성되어 진다. 그러므로 개발당시의 수위를 근거로 추정하여볼 때 Fig. 4에서처럼 최대 7km까지 염수가 침입하게 될 것이다. 여기에 수평의 투수성 지질구조가 있는 지역이라면 이보다 더 깊숙이 침투가 가능할 것이다.

3. 결 언

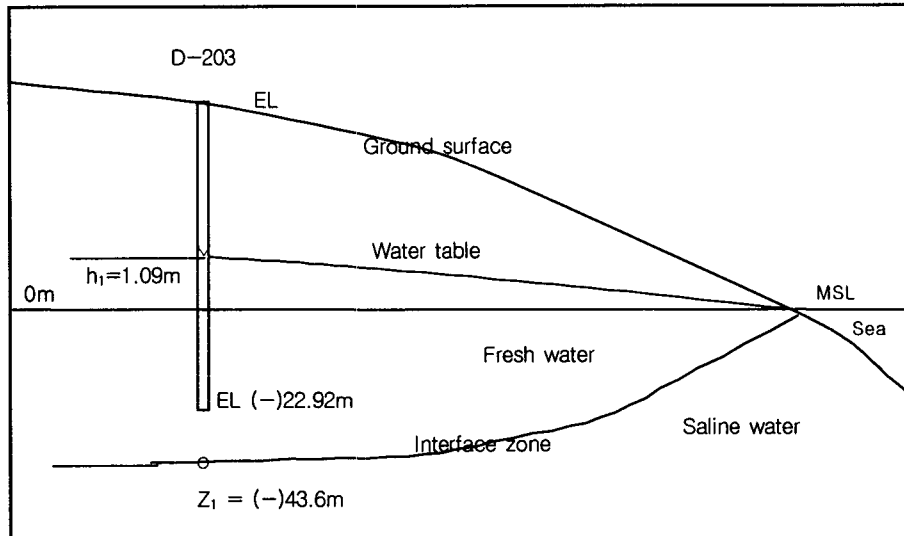
각 권역별 관측공의 평균수위는 동부가 EL1.24m, 서부가 EL6.72m, 남부가 EL35.26m, 북부가 EL41.26m 인데 평균수위에 대한 수위변화율은 동부가 139%, 서부가 86%, 남부가 33%이고 북부가 73%로서 동부권역은 평균수위는 가장 낮으나 수위변화율이 가장 크게 나타난다. 즉, 동부권역은 대체로 지하수위가 낮는데 비하여 수위변화폭이 크므로 담수체 수위의 상승과 하강폭보다 담·염수 경계면의 상승·하강폭이 더 크다.

동부권역 관측공중 조석에 의한 1일 수위변화가 감지되는 12개 관측공에서 강수량의 증감에 의해 일어나는 월 평균 최대 수위변화폭은 평균 1.73m이었으나, 조석에 의해 일어나는 1일 최대 수위변화폭은 0.43m로 월 평균 최대 수위변화폭의 25% 밖에 되지 않는 것으로 보아 동부권역 역시 조석보다는 강수에 의한 수위변화가 더 크다.

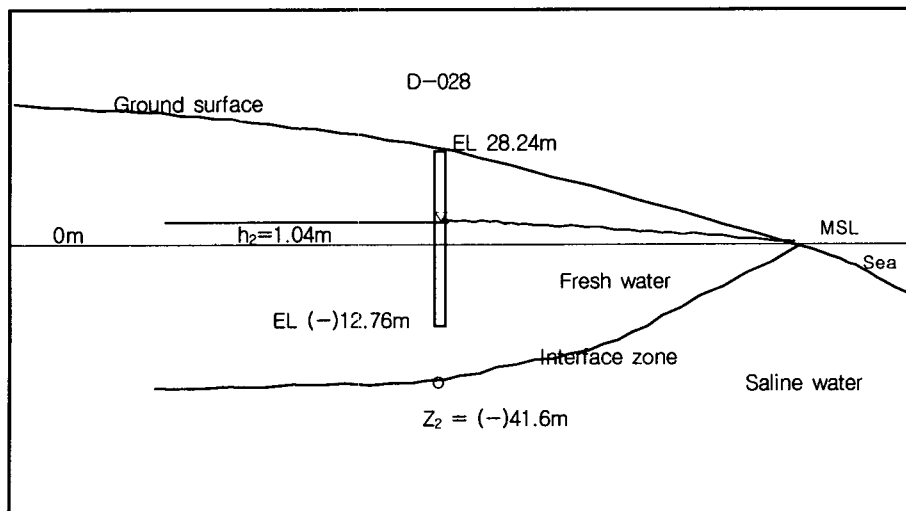
동부권역 담지하수 대수층에 대한 염수침입의 주된 원인은, 첫째 동부권역 해안변에 분포하는 지하수의 수위가 EL3m 이하로 매우 낮으므로 인한 갈수기 때의 자연적인 수위하강과 용수사용량의 급증으로 인한 과잉양수로 담수렌즈가 얇아져 접이대가 공저로 상승하게 되는 것, 둘째 점성이 낮은 침상장석감람석현무암의 분출로 인하여 생성된 2차 구조를 따라 지하수가 매우 잘 유통할 수 있는 지질적인 조건, 셋째 저투수성의 미고결퇴적층이 약 135m 정도나 두껍게 분포하지만 그 분포 심도가 해수면 아래 평균 약 (-)100m 이하에 분포하고 있어 해수유입을 효과적으로 차단하지 못하기 때문이며, 이런 요인이 복합적으로 작용하여 담지하수 대수층에 염수가 침입하는 것은 물론 해수의 내륙침투를 촉진시켰다.

참 고 문 헌

- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 박사학위논문.
- 농림부·농어촌진흥공사·제주도, 1992~1997, 제주도 장기관측망 설치 및 조사실적보고서.
- 농수산부, 농업진흥공사, 1985, 지하수개발사.
- 부성안, 1999, 제주도 지하수 부존특성 및 이용가능량산출에 대한 연구, 안동대학교 석사학위논문.
- 손주형, 1999, 제주도 기저지하수의 수위분포에 관한 연구, 부경대학교 석사학위논문.
- 윤정수, 1986, 제주도 동북지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구, 제주도연구 3집, 43~53.
- Choi, S.H., Kim, Y.K., Lee, D.Y., 1991, Sea Water Intrusion in the Coastal Area of Cheju Volcanic Island, Korea. J. Korea Inst. Mining Geol. 24(3), 319~327.
- Fetter, C. W., 1994, Applied Hydrogeology, Prentice Hall, 691.
- Halaguchi, 1931, 濟州道の 地質, 朝鮮地質調査要報 10卷 1號, 1~34.

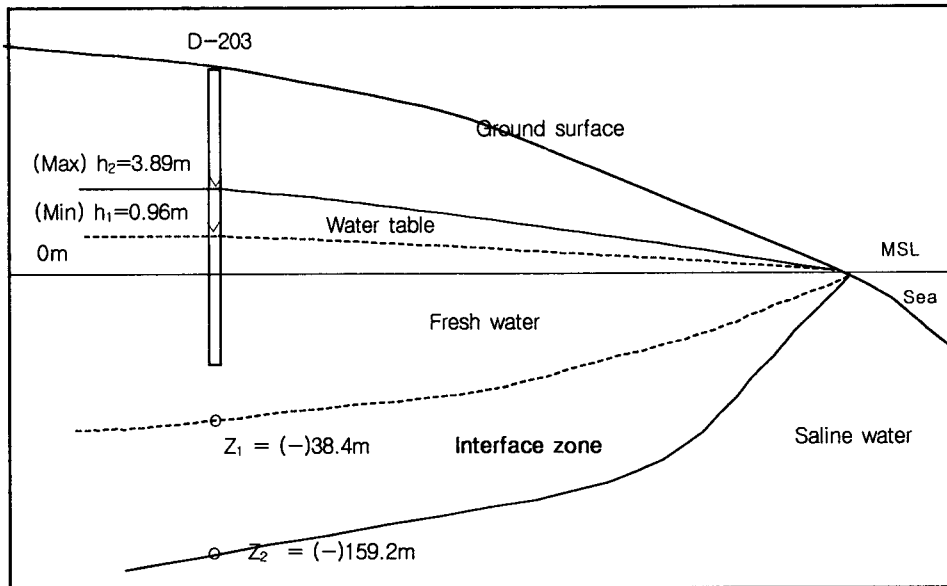


(A)

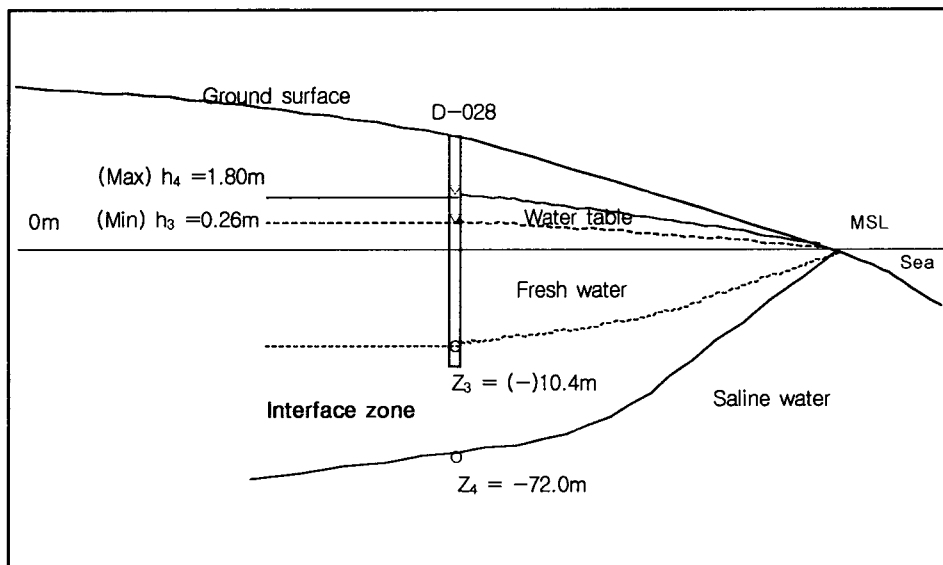


(B)

Fig. 1. Depth to interface zone between the fresh and the saline water.



(A)



(B)

Fig. 2. Elevation of the interface zone varying with rainfall and tidal change.

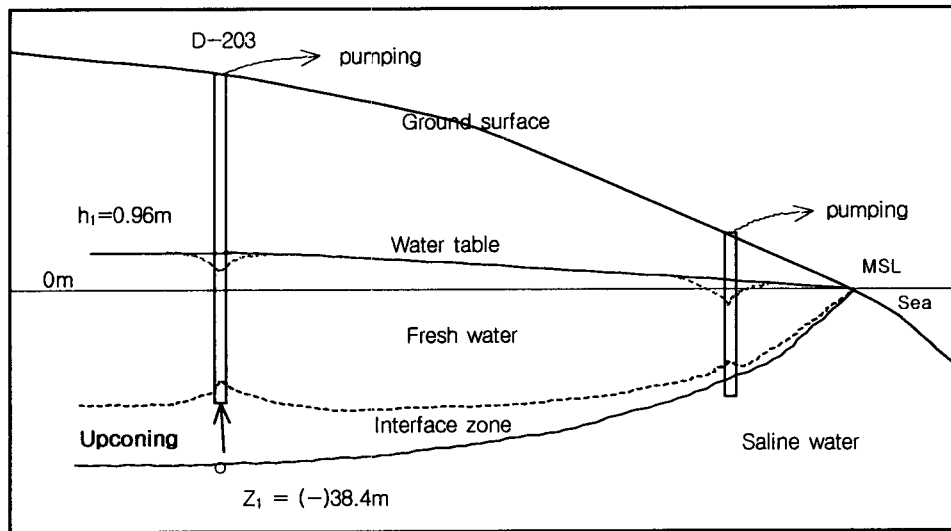


Fig. 3. Upconing of the saline water level due to simultaneous pumping of two wells.

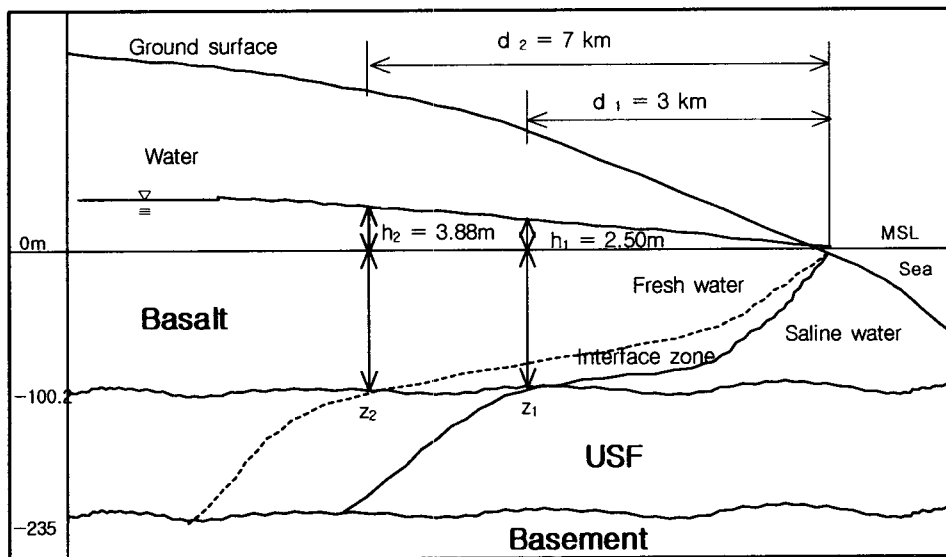


Fig. 4. Schematic diagram on distribution of the interface zone in eastern Cheju Island.