

〈論 文〉

얼음골의 하계 결빙현상에 관한 수문학적 연구

Hydrological Study of the Freezing in Summer Season at the Ice Valley, Korea

裴 相 根*
Bae, Sang Keun

Abstract

In the Ice Valley, it freezes in summer season. However, there is no ice during winter. In order to clarify the phenomenon of unusual temperature, numerical experiments were conducted using the coupled equations of fluid flow and heat transfer. The results demonstrated that temperature inversion in the Ice Valley is primarily due to delay of the groundwater temperature. Also, the results of the simulation suggest that major factors affecting the delay are the topographical configuration, geological factors and groundwater flow system, combined with groundwater recharge and discharge systems.

요 약

하계에는 얼음이 어나 동계에는 얼지 않는 얼음골의 온도 역전현상을 규명하기 위하여 열이류와 열전도를 고려한 지하수온 형성에 관한 이론식으로 부터 수치실험을 행하였다. 그 결과 얼음골지역의 이상수온현상은 지하수온의 지체에 의한 것임이 판명되었으며 그에 대한 원인도 추정되었다.

1. 序 論

경남 밀양군 산내면 남명리의 천황산 기슭에는 얼음골이 있다. 이 곳에는 3월 중순경부터 7월 중순경에 걸쳐서 얼음이 어나, 겨울에는 얼음이 얼지 않는 지역이 있다.

온도의 역전현상이나 하계 결빙현상에 관한 연구는, 일본에는 德島縣의 이상수온 현상(여름에는 10℃, 겨울에는 20℃)에 관한 연구와 東北과

北海島지방의 風穴현상에 관한 연구 등이 있다. 그러나, 전자는 인근하천의 복류수의 영향에 의한 때문이며 후자는 겨울에 얼었던 얼음이 초여름까지 남아 있어서 여름에도 냉기가 흐르는 것일 뿐 결빙현상은 보이지 않아 얼음골의 현상과 같지 않다.

얼음골의 하계결빙현상에 관한 연구로는 압력설(김, 1968), 증발설(문 과황, 1977)과 Bae and Kayane(1984, 1986)의 기초적 연구 등이 있

* 啓明大學校 工科大學 土木工學科

다. 그러나, 앞의 두가지 가설 중 어느 이론도 얼음골의 현상을 규명하기에는 불충분하며 후자의 두 연구도 아직 하계 결빙현상의 규명에까지 이르지 못한 기초적 조사 단계에 머물러 있는 실정이다. 얼음골은 天然記念物(224호)로 지정되어 있어 조사 및 관측에 많은 제약이 있으며 습도가 높고 기온의 일교차가 심하여 관측기기의 상시 설치로 인한 자료수집은 거의 불가능한 실정이다. 그래서, 본 연구에서는 얼음골의 이상온도현상을 수온등의 기초자료를 토대로 하여 수문학적 관점으로부터 수치실험에 의하여 규명하고자 한다.

2. 研究地域의 概要

우리나라의 동남부에 위치하고 있는 얼음골(동경 128° 59', 북위 35° 34')은 유역면적이 약 0.6km²인 작은 계곡이다(그림 1). 계곡의 東, 西,

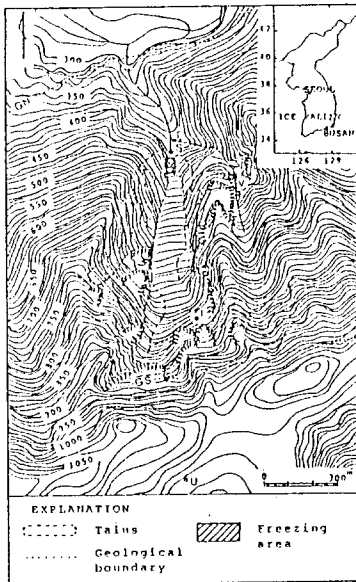


Fig.1 Location of the study area

北向의 各斜面은 柱狀節理가 잘 발달한 數 10m의 안산암으로 된 절벽과 같은 지형을 이루고 있다. 谷底 및 斜面의 일부에는 長徑 3m 이하의 다

양한 크기를 가진 安山岩의 破片으로 이루어진 Talus가 존재하며 계곡의 중앙부에는 谷底의 最南端의 谷頭部(valley head)로부터 발생한 土石流가 있다. 土石流는 長徑 30cm 전후의 돌들로 이루어져 있으며 돌사이에는 흙이나 부식토가 있으며 나무가 자라고 있다. 여름에 얼음이 어는 지점은 퇴적된 土石流의 말단부에 위치하며 標高 400m 전후로 南北方向으로 약 100m 東西方向으로 30m 정도의 범위에 분포하고 있다. 얼음이 어는 지점의 上部에는 長徑 1.5~2m 정도의 돌이 堆積해 있던가 또는 돌이 이 보다 작을 경우에는 돌과 돌 사이에 흙이나 부식토가 들어 있어서 지표면 온도의 영향을 받기 어려운 상태로 되어 있다. 얼음골의 頂上部에는 면적 약 4.7km²의 평탄면이 있어 이 평탄면에 함양된 지하수의 일부가 얼음골 지하수의 주요 공급원이 된다.

본 지역은 그림 1의 GN과 GS 선을 경계로 하는 세 종류의 지질로 구성되어 있다. GN線의 以南은 玆拉기의 火成活動에 의해 거의 같은 時期에 분출 또는 관입한 암석으로 구성되어 있다. GS線 以南은 Hornfels가 散在하고 있는 凝灰岩類로 이루어져 있으며 GN線과 GS線 사이에는 熱變成作用에 의해 硅化作用을 받은 緻密한 안산암으로 구성되어 있다. GN線 以北은 백악기에 관입한 흑운모화강암으로 이루어져 있다(신과 이, 1973; 원 등, 1978; 김과 이, 1981).

3. 觀測方法和 結果

1989년 9월 30일부터 1990년 6월 23일에 걸쳐서 그림 1의 각 관측지점에 대하여 관측한 값은 그림 2에 나타내었다. 그림 1의 관측지점중 S는 하계 결빙지점의 아랫부분에 위치하는 湧水지점이고 T는 얼음골의 동쪽계곡에서 흘러내리는 개울물이 湧水와 합류하기 직전의 지점이며 V는 얼음골의 동쪽계곡을 흐르는 개울물로 절벽 아래 지점이다. I는 남쪽의 정상에서 유출된 지하수가 얼음골의 지하수로 함양되는 지점이며,

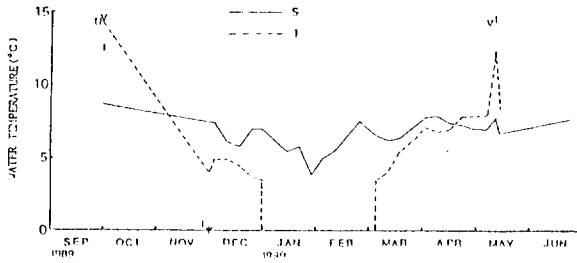


Fig.2 Variations of water temperature

U는 정상에 위치하는 목축농가가 사용하는 우물의 위치이다. 그림 2에서 V와 I 지점을 흐르는 물은 다같이 그 근원을 산의 정상부에서 유출되는 지하수에 두고 있음으로 항온인 U의 수온이 흐름의 경로에 따라 V나 I로 변화하게 된다. 즉, V는 표면에 노출된 상태로의 유동 경로가 길므로 열교환의 영향을 많이 받게 되나 I는 그 영향을 적게 받게 될 것이다. T 지점의 수온은 V 지점의 물이 유하하면서 얼음골에서 유출하는 지하수의 영향을 받음으로써 생긴 결과이며 S 지점의 수온은 항온인 수온에 얼음의 존재나 얼음의 크기 및 강수 등에 의한 영향이 개재된 결과라고 볼 수 있을 것이다. S 지점의 수온과 T 지점의 수온과의 역전 현상은 9월 및 4월경에 일어난다. 9월말 경에는 V 지점의 수온이 I 지점의 수온 보다 높으나 11월말 경에는 두 지점 모두 결빙하며 5월 중순경에는 I 지점의 수온이 V 지점의 수온보다 약간 높음을 알 수 있다. T 지점의 수온변화로부터 이점의 수온은 2개월이상 결빙하나 S 지점은 결빙하지 않음을 알 수 있다. 또한 I 및 V 지점은 관측치가 드물어서 정확히는 알 수 없으나 관측시의 주변 상황이나 얼음의 언 정도 및 인근 주민의 설명으로부터 I 및 V 지점의 결빙과 해빙시기가 T 지점보다 1.5개월 이상의 차이가 날 것으로 사료되기 때문에 이 두 지점의 결빙 기간은 대략 5개월 이상일 것으로 추정된다. S 지점의 수온 변화도로부터 항온을 7°C 정도로 추정 할 수 있다.

4. 數值實驗

4.1 基礎方程式과 數值模型

Darcy 式과 連續式으로부터 유도되는 定常상태에 있어서의 非等方, 不均質帶水層에 대한 二次元 地下水流動모델은 다음式과 같이 表現된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

여기서, h : 水理水頭, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : 透水係數, X, Y, Z : 좌표축.

Stallman(1963)이 유도한 非定常상태에 있어서의 非等方, 不均質帶水層에 대한 지하수와 얼음의 흐름에 관한 기본방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$C \rho \frac{\partial T}{\partial t} = K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z^2} - C_w \rho_w (U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (2)$$

여기서, T : 온도, t : 시간, C_w : 地下水의 比熱, ρ_w : 지하수의 밀도, C : 帶水層의 比熱, ρ : 대수층의 밀도, K : 帶水層의 熱傳導率, U, V, W : x, y, z 方向의 지하수의 flux 이다. 여기서,

$$U = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \\ W = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

이며, 지하수의 흐름에 대한 경계조건을 만족하는 式(1)을 수치해석함으로써 구한다. 式(1)에 대한 數值解析은 배(1989)의 방법을 따른다.

式(2)를 數值解析하기 위한 차분화 과정도 式(1)과 같게 하였다. 式(1)과 式(2)를 Strongly Implicit Procedure 에 따라 모의발생을 행하였다.

4.2 數值實驗과 考察

얼음골의 이상 수온현상을 규명하기 위하여 지

하수와 얼의 흐름에 대한 3차원 수치해석을 행하였다.

지하수 유동해석은 얼음골지역으로 유입되는 지하수가 얼음골의 정상부 지역으로부터 유출되는 지하수이므로 그 양의 변화가 크지 않을 것으로 사료되어 3차원 정상류모형을 이용하였다. 지하수유동을 파악하기 위한 수치모형의 경계조건은 그림 3의 수치해석을 위한 경계(파선으로 나

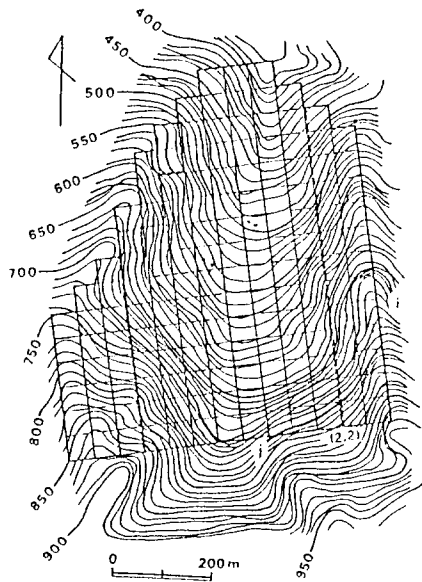


Fig.3 Grid spaing used in subsequent simulations. Broken line shows simplified simulation boundary of the east and west.

타난 경계)보다 東西의 兩경계가 산등성이까지 확장된 경계(굵은 선으로 나타낸 경계)로 함이 보다 더 타당하다고 사료된다. 그러나 설정된 경계 밖의 지형이 절벽과 같이 대단히 경사진 지형이어서 투수계수의 설정 정도에 따라 지하수의 흐름이 큰 영향을 받을 뿐만 아니라 컴퓨터의 계산용량에도 무리가 있으며 계산시간 또한 보다 더 장시간을 요한다. 그러므로 東西의 경계를 경사가 큰지점의 안쪽으로 설정하여 큰 무리가 없는 지하수면의 설정이 가능하게 하였으며 계산도 편이 하게 하였다. 본 지역의 계곡에는 지각변동

시에 파쇄된 안산암이 매몰 되었으며 그 상부에 토석류가 위치하고 이 토석류의 일부가 매몰된 안산암의 공극 일부에 협재되어 있을 것으로 추정된다. 그래서, 대수층의 투수성이 양호할 것으로 생각됨으로 본 계곡의 지하수면은 남쪽지역에는 지표면 보다 100~200m 정도 아래일 것으로 추정되며 그 깊이는 북쪽으로 갈수록 점점 얕아져 북쪽지역의 최하류지점에는 불투수층 암반이 노출되어 있으며 그 위로 湧水하고 있고 이 지점에는 지표면과 지하수면이 일치하고 있다. 그래서 지하수면 설정은 북쪽지역은 지표면보다 100~200m 정도 깊게 하고 남쪽지역의 최하류단 및 그 상류지역 두 지점은 지표면과 동일하게 하였다. 상기 이외의 지역에 대한 지하수면 설정은 지표면 표고로부터 지형등을 고려하여 가정할 후 사방의 지하수면 표고의 최대오차를 15m로 하여 Relaxation을 행하여 지하수면을 조정한 후 다시 지형등을 고려하여 재조정하였다. 최하류지점의 지하수면과 지표면이 일치하는 곳으로부터 50m 深部를 하부경계로 하였으며 전 지역의 하부경계는 수평하게 설정하였다. 경계조건은 지하수면 일정과 불투수층 경계조건을 사용하였다.

지질은 표층, 토석류, 기층으로 분류하였으며 투수계수는 각각 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$, $1 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$, $1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ (山本, 樞根, 1980)로 하였다. 절점은 그림 3에서와 같이 X, Y 방향으로 50m, Z 방향으로 20m 간격으로 설정하였고 이 방성은 10배로 收束作定係數는 0.00001m로 하였다. 이들 결과중 남북방향으로 계곡의 중간 지점에 위치하는 세 단면과 동서 방향으로 얼음이 어는 부분의 3단면 그리고 남북 방향으로 얼음이 어는 지역을 포함하는 두 단면에 대한 포텐셜 분포도가 그림 4~그림 6에 나타나 있다. 그림 4는 남북 방향으로 계곡의 중간지점에 위치하는 단면이다. 이들 3차원 구조의 3단면의 포텐셜 분포로부터 얼음골의 중간지역에는 지하수의 上向流와 남쪽방향으로의 흐름은 존재하지 않고 지하수 흐름은 수평방향류와 下向流로 이루어져 있음을 알

Table 1. Monthly variations of grounwater temperature from the three-dimensional heat transfer model. The values appear 10000 times of the results. The upper part of the broken line shows freezing point in summer.

THE END OF THE FEBRUARY														
-142753														
-44181 -142753 -24483														
-10754 -32891 -6902	2726	-3082												
2368 -5109 1935	4353	2630	-3718											
6457 3632 5577	5947	4861	2859	-1867	-1398									
7190 6298 6618	6662	6287	5203	3728	3432	-18								
7321 6856 6893	6918	6862	6560	6020	5524	3801	273							
7575 7237 7241	7265	7279	7245	7133	6988	5940	4419	5879	8211					
8860 8652 8648	8658	8667	8671	8660	8635	8364	7874	7583	6429	5901	836			
14445 14411 14410	14412	14415	14416	14417	14414	14369	14252	14092	13603	13208	11435	15091		
32594 32589 32588	32587	32587	32586	32585	32583	32577	32559	32527	32412	32280	31710	32492	41507	
70000 70000 70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000
THE END OF THE MARCH														
-112202														
-47197 -112202 -28374														
-14483 -35038 -9923	1679	-7547												
1669 -7703 1156	3929	1415	-7876											
6221 3099 5311	5717	4487	1708	-6208	-6122									
7029 6093 6432	6481	6079	4857	2813	2441	-4635								
7185 6703 6743	6768	6702	6374	5719	5183	2916	-3644							
7490 7144 7147	7170	7181	7138	7009	6843	5663	3712	5363	7975					
8933 8715 8709	8718	8726	8727	8711	8677	8375	7781	7461	6070	5287	-1497			
14841 14804 14803	14805	14807	14809	14808	14804	14752	14620	14445	13925	13488	11188	15289		
33223 33218 33217	33216	33216	33215	33214	33212	33205	33183	33147	33022	32879	32273	33136	42710	
70000 70000 70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000
THE END OF THE APRIL														
-65428														
-43329 -65428 -28792														
-16912 -32017 -12082	645	-9907												
884 -9426 296	3448	195	-9930											
5975 2517 5031	5480	4059	557	-8409	-8705									
6869 5885 6249	6303	5866	4466	1880	1392	-7050								
7054 6555 6599	6623	6546	6185	5386	4797	1968	-6131							
7413 7060 7062	7084	7092	7039	6887	6699	5351	2962	4886	7791					
9016 8788 8781	8788	8795	8792	8770	8727	8389	7647	7313	5737	4629	-4001			
15230 15190 15188	15190	15192	15193	15192	15186	15125	14973	14782	14221	13718	10670	15475		
33805 33800 33799	33799	33798	33797	33796	33794	33785	33760	33719	33584	33426	32762	33718	43847	
70000 70000 70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000
THE END OF THE JUNE														
76943														
-23799 76943 -19135														
-14295 -15362 -9883	-1585	-5604												
-1716 -8658 -2368	2277	-2606	-5383											
5280 1501 4058	4882	2869	-1972	-5288	-6279									
6551 5462 5881	5944	5370	3436	701	-4	-4345								
6804 6277 6326	6349	6243	5791	4723	4023	741	-3458							
7284 6919 6919	6938	6938	6862	6649	6408	4743	2029	4309	7722					
9206 8960 8949	8955	8958	8949	8913	8849	8420	7374	7043	5353	3974	-1157			
15979 15933 15930	15932	15934	15934	15931	15921	15839	15626	15408	14746	13901	10191	16134		
34844 34837 34836	34836	34834	34834	34833	34831	34818	34785	34733	34574	34362	33560	34733	45937	
70000 70000 70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000
THE END OF THE JULY														
98447														
-14466 98447 -13868														
-11100 -8093 -8038	-2053	-3523												
-2732 -7053 -2805	1736	-2446	-3130											
4791 1184 3569	4576	2392	-1965	-3153	-3629									
6387 5255 5691	5762	5091	2965	523	-822	-2259								
6685 6145 6198	6219	6093	5589	4443	3568	568	-1432							
7231 6861 6859	6877	6872	6783	6537	6237	4506	1920	4225	7763					
9312 9057 9044	9049	9050	9037	8994	8918	8441	7284	6970	5387	4021	676			
16338 16289 16286	16288	16290	16290	16285	16272	16179	15929	15698	14990	13999	10468	16650		
35307 35300 35299	35298	35298	35297	35296	35293	35279	35240	35182	35010	34756	33903	35188	46896	
70000 70000 70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000

현상이며 이에 대한 원인을 살펴보면, 정상부의 頭部로 유출함으로써 얼음골의 지하수면의 유지 넓은 평지에 함양된 지하수가 얼음골 지역의 습 와 열의 대량유입이 가능하게 한다. 동, 서, 남

쪽의 3면이 절벽에 가까운 지형으로 둘러 싸여 태양열의 유입을 방해하며 뿐만아니라 이들 절벽을 타고 흐르는 물은 얼음골 내부의 온도환경을 변화시키는데 대단히 중요한 역할을 한다. 하계 결빙지점의 위치가 지하수 유출지역이나 지표면의 열이 유입되지 못하게 차단 되어 있다. 이상과 같은 것을 주요 원인으로 들 수 있겠다.

5. 結論

얼음골의 일부지역에서 나타나는 하계의 결빙현상과 동계의 비결빙현상을 수문학적으로 규명하기 위하여 수치실험을 행하였다. 그 결과 얼음골의 수온 역전 현상은 지하수온의 지체현상에 의한 것임을 알았으며 아래와 같은 원인이 얼음골의 수온 역전현상에 기여한다는 것으로 추정되었다.

(1) 얼음골 谷頭部 정상의 평원에서 유출되는 지하수가 얼음골의 지하수를 함양하며 얼음골의 지하수면을 유지시키는데 기여하다.

(2) 지표면은 단열상태를 유지하며 열의 공급은 삼면의 절벽을 타고 함양되는 지하수에 의한다.

(3) 삼면이 절벽에 가까운 북향 사면이어서 태양열의 유입이 극히 적어 동계 중 절벽으로부터 유입되는 지하수온을 많이 강하시킨다.

(4) 하계 결빙지역이 지하수 유출지역이나 지표면으로부터 유입되는 열이 안산암의 바위 등으로부터 차단된 단열상태를 유지한다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 지원해주신 한국학술진흥재단에 심심한 사의를 표합니다.

參考文獻

1. 金相旭, 李永吉(1981): 楡川盆地 北東部 白堊紀 火山岩類의 火山岩石學 및 地質構造. 광산지질, 14, 35-49.
2. 金聖三(1968): 얼음골(密陽君)의 夏季結氷現象에 관하여. 한국기상학회지, 4(1), 13-18.
3. 文勝義, 黃水鎭(1977): 密陽 얼음골의 夏季結氷現象에 관한 研究. 釜山大學校 自然學科 論文集, 4, 47-57.
4. 裴相根(1989): 三次元 定常地下水模型에 의한 홍적대지의 地下水 流通解析. 한국 수문학회 논문집, 22(1), 81-90.
5. 申炳雨, 李在英(1973): 密陽地域의 河床堆積物에 의한 地化學的 調査. 광산지질, 6(1), 19-28.
6. 元鐘寬, 姜必種, 李尙憲(1978): 慶尙益地の 構造解釋과 Igneous Pluton 에 관한 研究. 지질학회지, 14(3), 79-92.
7. Bae, S.K. and Kayane, I.(1984): *Diurnal direct-beam solar radiation upon Ice Valley, Korea*. Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, 10, 25-28.
8. Bae, S.K. and Kayane, I.(1986): *Hydrological study of Ice Valley, Korea*. Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, 12, 15-20.
9. Stallman, R.W.(1963): *Computation of groundwater velocity from temperature data*. U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap., 1544-H, 36-46.
10. 新井 正, 佐倉保夫(1980): 最近の江川の異狀水温について. *ハイドロロジー*, 10, 2-11.
11. 江川良武, 堀伸三郎, 坂山利彦(1980): 風穴の成因について—過去における低温氣候起源說に對する反論—. *地學雜誌*, 89(2), 1-11.
12. 木下誠一(1982): 凍土の物理學, 森北出版, p. 227.
13. 佐倉保夫(1978): 土壤水分移動と地中溫度分布の關係について. 筑波大學水理實驗センター報告, 2, 37-45.
14. 志保井利夫(1974): 北海道常呂郡留邊しべ町温根湯つつじ山の風穴について. *地學雜誌*, 83(2), 25-28.
15. 山本莊毅, 樞根勇(1980): 最新地下水學, 山海堂, p. 511.