

온도센서 배열 모니터링에 의한 매질의 투수성 및 절리 연결성 연구 A Study on the medium seepage and the fracture connectivity by using temperature monitoring with thermal line sensors

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 김태희²⁾, Tae-Hee Kim, 김유성³⁾, Yoo-Sung Kim

1) (주)소암컨설턴트 대표이사, CEO, Soam Consultant Co., Ltd.

2) 한국지질자원연구원 지하수지질연구부 지하수자원연구실 선임연구원, Senior Researcher, Groundwater Resources Group, Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources.

3) (주)소암컨설턴트 이사, Director of Research and Services, Soam Consultant Co., Ltd.

SYNOPSIS : If water flows through a narrow passage into a medium that keeps the equilibrium of temperature, it causes small temperature difference and makes a temperature anomaly. The seepage or leakage often observed at old dams is a representative example of bringing about a temperature anomaly. Therefore, temperature measurements have been regarded as one of excellent methods that can detect the situation of seepage or leakage. However, because existing temperature measurement methods are based on a single sensor, the application of the method to the whole structure is nearly not possible in technical and economical phases. This paper introduces a temperature monitoring system using a thermal sensor cable that is comprised of addressable thermal sensors connected in parallel at many positions within a single cable. Through various laboratory and field experiments, it has been proved that the temperature monitoring technique can give an useful information about permeability of a medium or connectivity of fractures which have been regarded as difficult problems.

Key words : Addressable thermal sensor, Thermal line sensors, Temperature monitoring, Medium seepage, Fracture connectivity

1. 서 론

일반적으로 충적층 내의 지하수 유동 문제, 댐체 누수나 투수 문제 그리고 절리 암반 내의 절리 연결성 특히 지하수나 용질의 유동과 연관된 투수성 문제는 지금까지 해결하기 어려운 난제로 남아 있다고 하겠다. 만일 온도 분포 측면에서 균형을 이루고 있는 매질에 외부로부터 좁은 통로를 통하여 물이 유입되면 대부분의 경우 미소한 온도 차이로써 차별화되며 그곳에서 온도 이상(temperature anomaly)이 발생한다. 따라서, 온도 측정은 댐체 누수나 투수 상태를 탐지할 수 있는 하나의 훌륭한 수단으로 간주되어 왔다. 그러나 현재까지의 온도 측정 방법은 어디까지나 단일 온도센서에 바탕을 두고 있기 때문에 그에 대한 응용을 구조물 전체에 확대 적용한다는 것은 기술적이나 경제적인 측면에서 거의 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 우선 하나의 케이블 내에 여러 개의 온도센서 칩을 장착한 후 서로 간의 통신을 가능하게 하여 여러 위치의 온도를 동시에 측정할 수 있는 소위 온도센서 배

열 모니터링 시스템을 소개하고, 이를 이용한 다양한 실내 및 야외 실험을 통하여 지금까지 난제로 간주된 매질내의 투수성 내지 절리의 연결성 문제에 직접적으로 대처할 수 있음을 밝히는 데 그 목적이 있다.

이를 위해 우선 실내에서 3차원적으로 온도센서 케이블을 배열하고 온도 변화를 유발시킨 후 일정 시간 간격으로 온도를 모니터링 하는 다양한 실험을 실시하였다. 3차원 온도 모니터링의 실험 대상 매질은 물, 토양 2가지 종류가 사용되었다. 우선 물을 매질로 한 3차원 온도 모니터링의 경우에는 온도 변화를 유발시키기 위해 얼음이 사용되었다. 이 실험에서는 얼음이 서서히 녹아감에 따라 3차원적인 온도 분포의 변화를 관찰함으로써 물 속에서의 3차원적인 대류 현상을 규명하고자 하였다. 그리고 토양을 매질로 한 3차원 온도 모니터링의 경우에는 물을 서서히 위에 주입함에 따른 토양내의 온도 변화를 관찰하고자 하였다. 상기 실험은 토양의 투수성 내지 지하수 유동 문제를 해결하는 데 온도 모니터링이 어떠한 정보를 줄 수 있는지를 확인하는데 그 목적이 있다. 한편, 절리 암반 내 절리의 연결성 즉, 절리를 통해 지하수가 유동하는지를 확인하기 위한 현장 온도 모니터링 실험은 두 개의 인접된 시추공을 이용하여 수행되었다. 여기서 하나의 시추공은 더운 물을 주입하는 주입공으로, 다른 하나는 일정 간격으로 온도센서가 배열된 온도센서 케이블을 이용한 온도 모니터링 공으로 사용되었다. 만일 두 개의 시추공사이 단면 내 절리들이 서로 지하수 통로가 될 수 있도록 연결되어 있다면 주입공에서 더운 물을 주입함에 따라 온도 모니터링 공에서는 온도 변화가 관찰될 것이 기대된다.

2. 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도 모니터링 시스템

기존의 온도 측정은 단일 센서에 바탕을 두고 있기 때문에 여러 위치에서의 온도를 모니터링 하기 위해서는 단일 온도센서를 이동하면서 측정을 반복하거나 단일 센서 케이블 여러 개묶어 측정하는 방법을 사용할 수밖에 없다. 그러나 이러한 방법은 전체 케이블 다발의 두께에 대한 제한성과 더불어 측정 데이터 제어에서 오는 문제점, 그리고 케이블 다발을 이동하며 반복 측정함으로 인한 인력과 시간 소모에서 오는 문제점들이 야기된다. 따라서 이러한 문제를 극복하기 위해 단일 케이블 내에 온도센서 칩을 일정 간격으로 병렬로 연결한 온도센서 배열 케이블과 이를 이용하여 온도를 측정하고 각 센서들을 통신으로 제어할 수 있는 온도 모니터링 시스템이 개발되었다(김중열, 2004). 그림 1은 기존 단일 온도센서와 최근에 개발된 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도 모니터링 시스템을 상호 대조하여 나타내고 있다. 여기서는 온도센서 배열 케이블을 3차원적으로 배열함으로써 3차원 공간의 온도 분포 변화도 측정할 수 있음을 보여주고 있다.

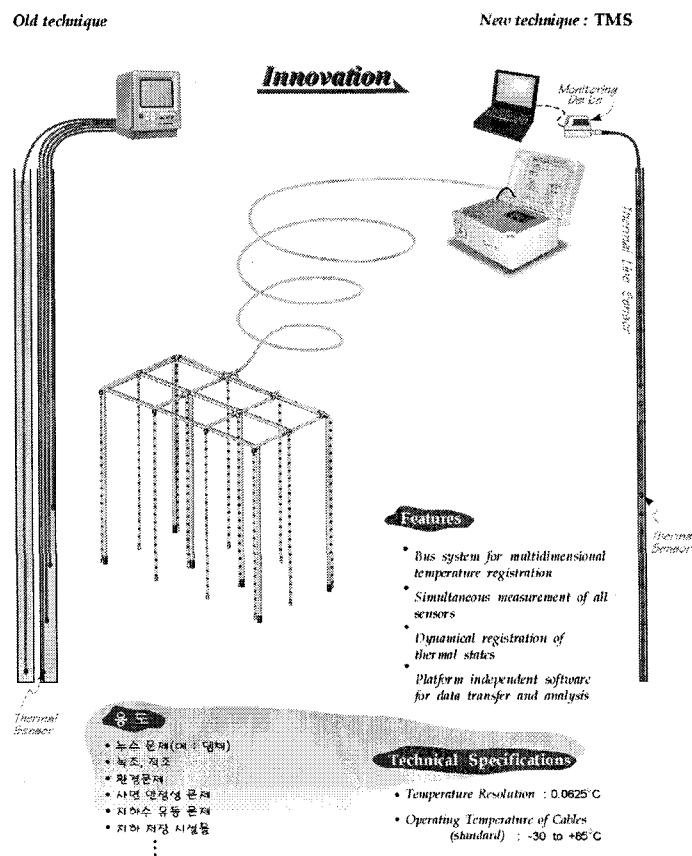


그림 1. 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도 모니터링 시스템의 근본원리.

3. 실내 3차원 온도 모니터링 실험

그림 2는 3차원 온도 모니터링 실험을 위한 3차원 격자 틀(640×650×640mm)에 온도센서 배열 케이블이 고정되어 있는 장면을 보여주고 있다. 여기서 10cm 간격으로 온도센서가 배열되어 있는 온도센서 배열 케이블 총 8개가 사용되었으며 총 207개의 온도센서가 3차원 내에서 서로 일정 간격을 유지하면서 배열되도록 하였다. 그림 3은 물 속의 온도 변화를 유발시키기 위해 열음을 물속에 삽입한 후 3차원적인 온도 변화를 측정하고 있는 장면을 보여주고 있다. (a)는 상기 온도센서 배열 케이블이 3차원 격자 틀에 고정된 상태에서 물속에 삽입된 장면을, (b)는 온도변화를 유발시키기 위한 열음을 물속에 삽입한 위치를 확대하여 나타내고 있으며, (c)는 열음이 삽입된 위치를 세로 수직 3단면에서 다시 나타내고 있다. (d)는 온도 측정 결과에 대한 분석의 편의성을 도모하기 위해 3차원 격자 틀을 가로 수직 5단면과 세로 수직 5단면으로 세분화하고 있다.

그림 4는 시간 경과에 따른 세로 수직 3단면에서의 온도 변화를 나타내고 있다. 열음이 삽입된 초기 시간에서는 열음이 삽입된 위치에서 낮은 온도를 보여주고 있으며 시간이 경과함에 따라 낮은 온도는 점차 아래 방향으로 전이되고 있는 것을 알 수 있다. 측정 후기 시간에는 열음이 거의 녹은 상태로 다시 온도 분포가 원래 상태로 복원되고 있음을 관찰된다. 그림 5는 시간 경과에 따른 가로 수직 3단면에서의 온도 변화를 이전과 같은 방법으로

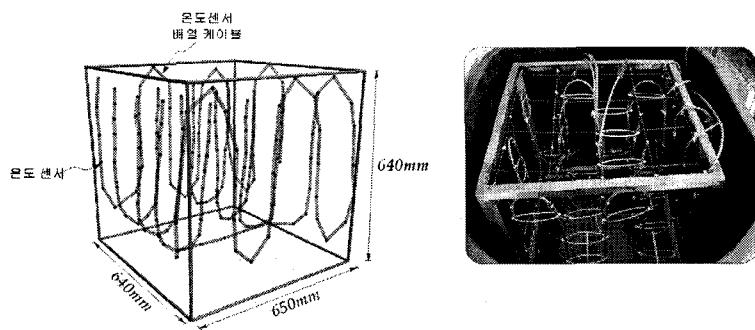


그림 2. 3차원 온도 모니터링을 위해 3차원 격자 틀에 온도센서 배열 케이블이 고정되어 있다.

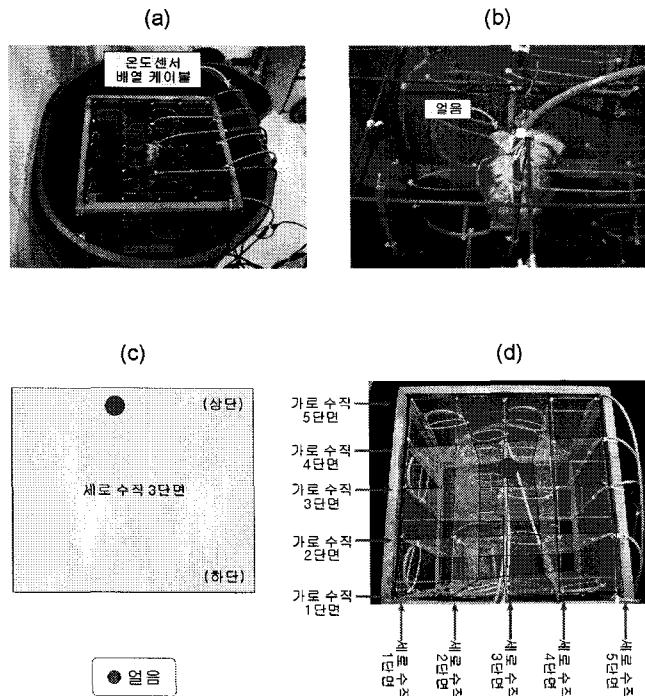


그림 3. 물속에 열음을 삽입하여 3차원 온도 변화를 관찰하기 위한 실험 장치.

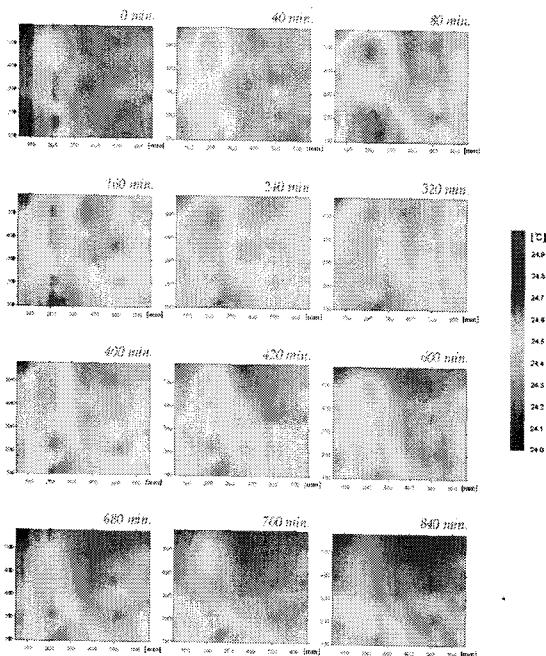


그림 4. 시간경과에 따른 세로 수직 3단면에서의 온도 변화.

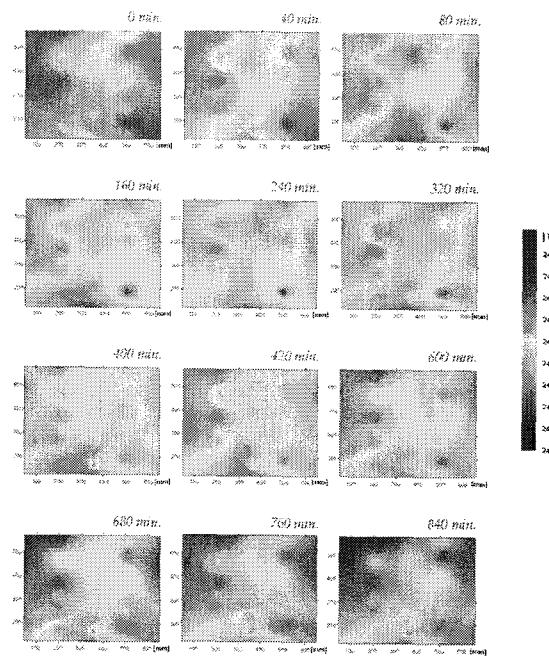


그림 5. 시간경과에 따른 가로 수직 3단면에서의 온도 변화.

나타내고 있다. 이 단면에서는 열음이 단면 중앙 상단에 위치하고 있으며, 세로 수직 3단면에서와 비슷한 온도 변화 양상을 보이고 있다. 그림 6은 토양에 물을 서서히 주입하여(위 그림 참조) 그의 유동 경로를 규명하기 위한 3차원 온도 모니터링 실험 장면을 보여주고 있다. 아래 그림은 분석의 편의를 위해 3차원 격자 틀을 가로 수직 5단면과 세로 수직 5단면으로 나눈 것이다. 그림 7은 시간 경과에 따른 세로 수직 3단면에서의 온도 변화를 나타내고 있다. 물이 서서히 주입되고 있는 초기 시간에서는 뚜렷한 온도 변화가 관찰되지 않고 있다가 220분부터 물 주입에 따른 온도 변화가 관찰되고 있다. 온도 분포 변화를 살펴보면 수직 아래 방향으로 물이 유입되기 보다는 지표면 근처에서 물이 넓게 퍼지고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 물의 흐름은 대체로 단면의 좌측 부분에 집중되고 있으며 우측 방향으로는 거의 물의 유동하지 않는 것으로 판단된다. 시간이 흐를수록 서서히 아래 방향으로 물이 퍼져나가는 현상도 관찰되고 있다. 또한 340분 시간대에 지표면에 매우 낮은 온도가 감지되고 있는데 이는 실험을 다양하게 하기 위해 일시적으로 찬물을 집중적으로 주입한 경우에 해당된다. 그림 8은 시간 경과에 따른 가로 수직 2 단면에서의 온도 변화를 나타내고 있다. 시간 경과에 따른 온도분포 변화를 살펴보면 대체로 단면의 중앙부로 물이 서서히 유입되는 것으로 판단

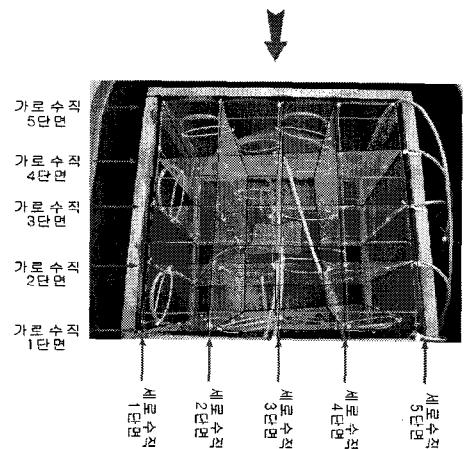
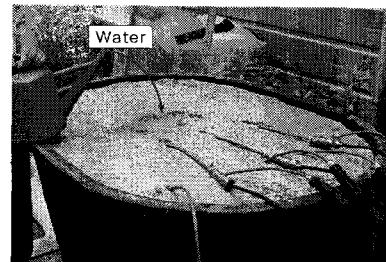


그림 6. 토양내 물의 유동 경로 파악을 위한 3차원 온도 모니터링 실험 장면.

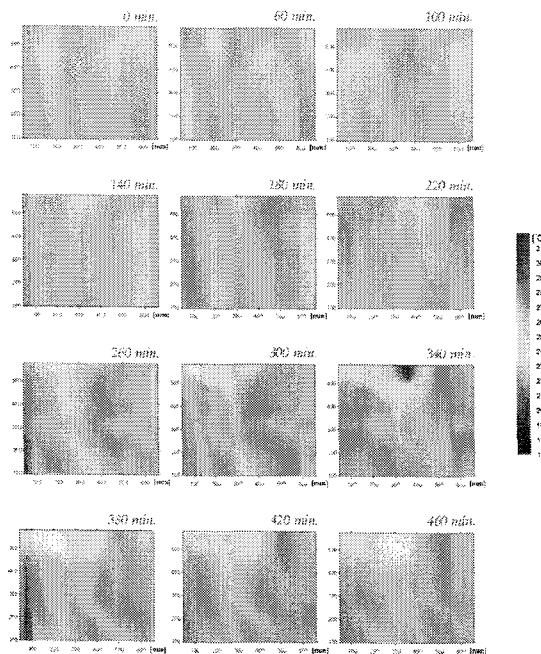


그림 7. 시간경과에 따른 세로 수직 3단면에서의 온도 변화.

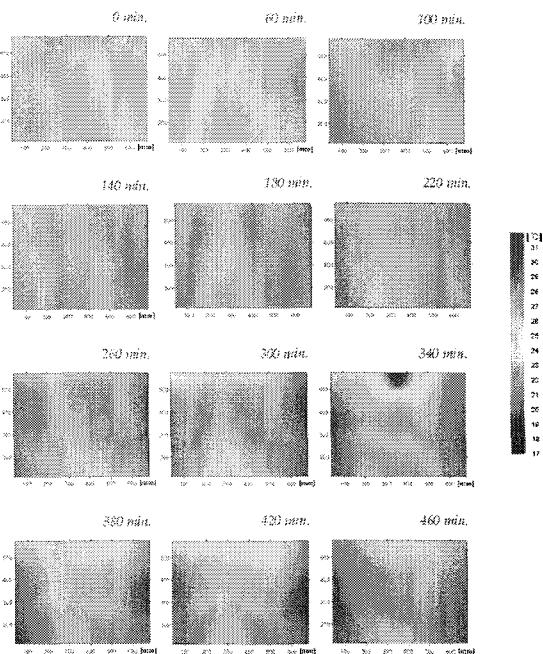


그림 8. 시간경과에 따른 가로 수직 2단면에서의 온도 변화.

된다. 그림 9는 찬물을 집중적으로 주입한 시간대 주변의 온도분포 변화를 보여주고 있다. 여기에서는 이전과는 달리 시간 간격을 1분 간격으로 하였다. 찬물이 집중적으로 주입되었을 때 지표면에서만 낮은 온도가 확산되고 있으며 하부 방향으로 물의 유입은 대단히 서서히 진행되고 있는 것으로 판단된다. 상기 실험 자료는 모두 3차원 공간에서 취득된 자료이지만 이를 분석하기 위해 지금까지는 2차원 단면상에 표현하였다. 하지만 이러한 분석은 많은 2차원 단면에 대한 온도 분포 변화를 관찰해야 하기 때문에 그만큼 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 분석의 효율성이 크게 떨어진다고 하겠다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 3차원적인 자료를 입체적으로 영상화하여 시간 경과에 따른 3차원적인 변화 양상을 그대로 구현할 수 있는 “View4D” 소프트웨어가 개발되었다. 그림 10은 상기 실험에 의해 얻어진 시간대별 3차원적인 온도 분포 변화를 “View4D” 프로그램에 의해 입체적으로 영상화하여 나타내고 있다. 여기서는 물 주입 초기 시간(0분)의 3차원 온도분포와 온도변화가 가장 큰 시간대(약 333분~345분)의 3차원 온도분포 영상을 상호 대조하여 나타내고 있다. 토양 내로 물의 유입되는 경로가 3차원 상에서 그대로 확인될 수 있음을 알 수 있다.

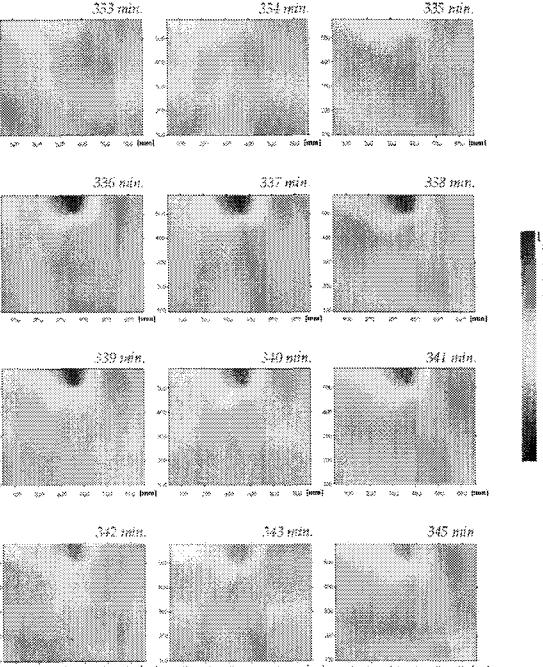


그림 9. 찬물이 집중적으로 주입되었을 경우 시간 경과(1분 간격)에 따른 세로 수직 3 단면에서의 온도 변화.

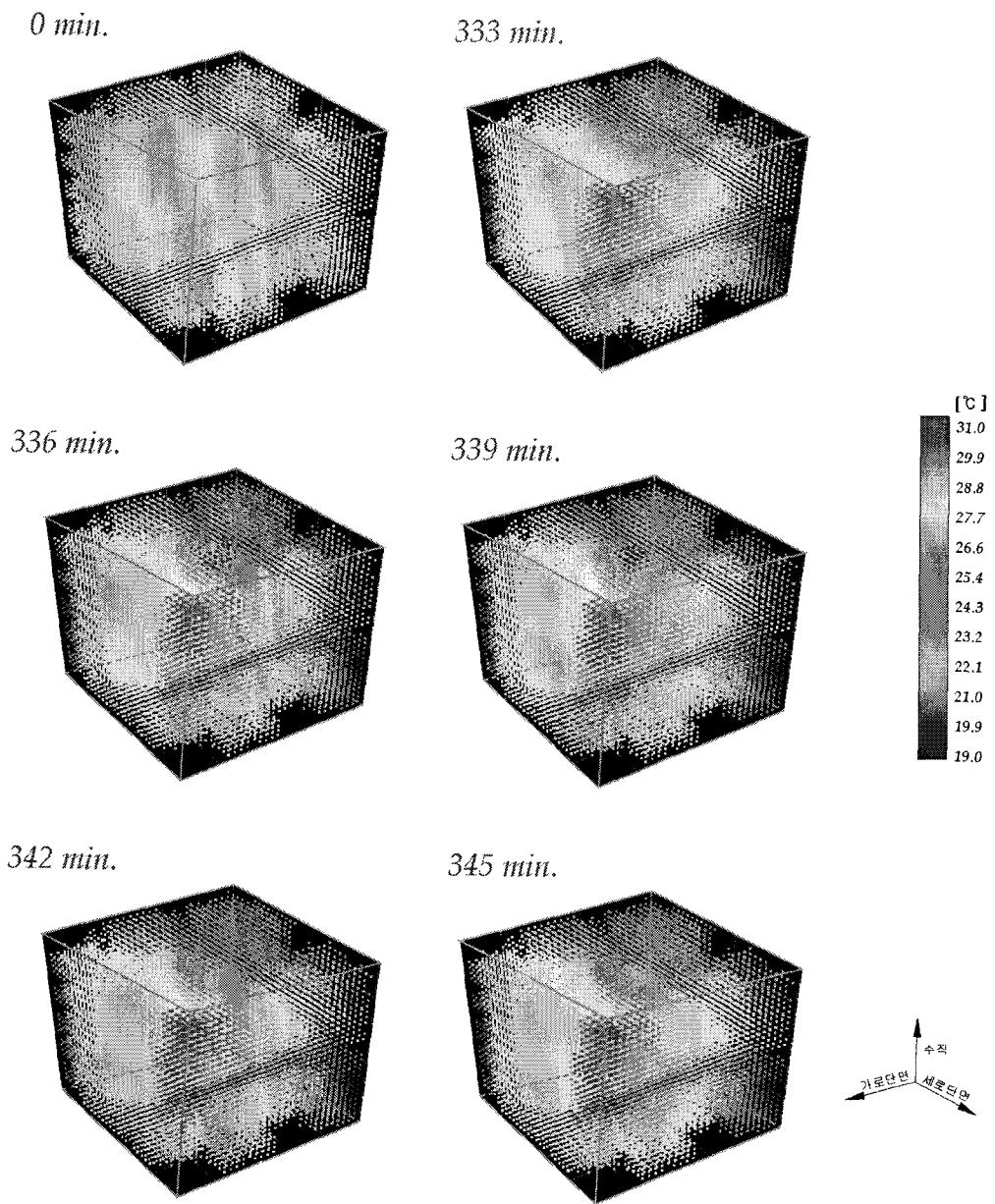


그림 10. 토양내 물의 유동을 규명하기 위한 실험으로 얻어진 시간대별 3차원적인 온도변화가 “View4D” 프로그램에 의해 입체적으로 영상화 되고 있다.

4. 절리 연결성 규명을 위한 현장 실험

그림 11은 절리 연결성 규명을 위해 선정된 심도 약 90m인 두개의 시추공(GS-5 및 GS-6)과 이를 이용하여 다중 심도 열추적자 시험을 위한 개념도를 나타내고 있다. 여기서 시추공 GS-5는 주입공으로, 시추공 GS-6은 온도 관측공으로 사용되었으며 두개 시추공 사이의 거리는 3m이다. GS-5 주입공에서는 이중 패커(double packer)를 이용하여 주입 심도구간을 고정시키고 일정한 압력으로 지하수보다 높은 온도의 물(약 25°C)을 주입하였다. GS-6 온도 관측공에는 약 2m 간격으로 온도센서가 배열된 온도센서 배열 케이블을 삽입하여 열추적자 시험시 온도 모니터링을 실시하였다. 표 1은 열추적자 시험시 추적자(약 25°C의 물) 주입 심도 구간 및 각 시추공의 수리 전도도(hydraulic conductivity)를 나타내고 있다. 그림 12는 주입공(GS-5)의 심도 약 12.5~15.3m 구간을 이중 패커로 고정하고 추적자를 주입하였을 때 온도관측공(GS-6)에서의 온도 모니터링 결과를 초기 온도와의 차(temperature difference)로 나타내고 있다. (a)는 추적자 주입이 진행되고 있는 과정이고 (b)는 추적자 주입을 중단하고 온도가 점차 떨어지고 있는 과정의 결과를 나타내고 있다. 이때 온도센서 배열은 심도 약 15m~65m 사이에 놓이도록 하였다. 추적자를 주입하는 과정에서의 결과((a) 참조)를 살펴보면 GS-5호 공 주입 심도구간과 비슷한 GS-6호공 심도구간에서 온도가 가장 높게 올라가고 심부로 온도가 전이되는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 바로 주입구간에서 두개의 시추공 사이의 절리가 서로 연결되어 있음을 시사하는 것이며, 심부로 온도가 전이되는 현상은 GS-6호공에서 지하수가 심부방향으로 흐름에 의해 나타나는 것이라 할 수 있다. 추적자 주입을 중단한 후 온도가 내려가고 있는 과정에서의 결과((b) 참조)에서는 심도 약 45m 지점에서 온도의 급작스런 변화(화살표로 표시)가 관찰되고 있는데 이는 그 심도구간에 지하수가 유동하고 있는 절리가 발달하고 있기

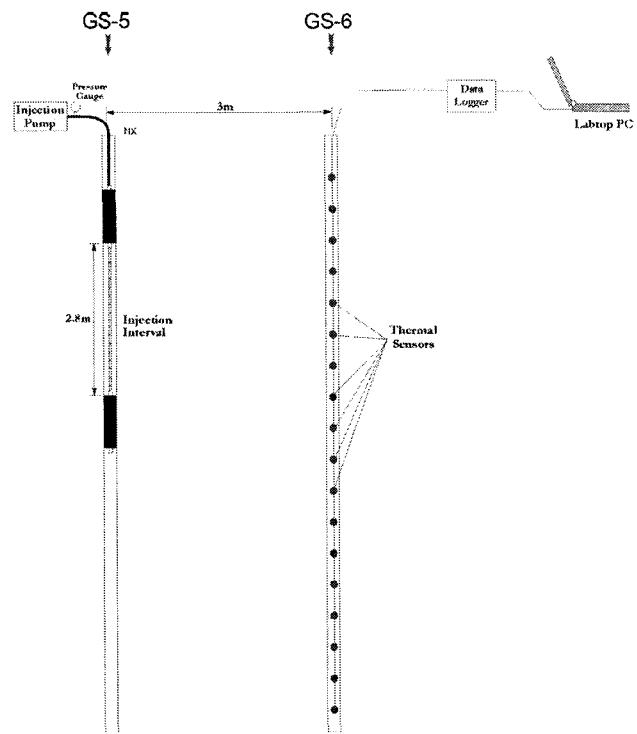


그림 11. 다중심도 열추적자 시험에 대한 개념도.

표 1. 열추적자 시험시 추적자 주입 심도 구간 및 각 시추공의 수리 전도도(hydraulic conductivity).

No	Injection Interval (m)		Hydraulic Conductivity(m/min)	
	upper depth	lower depth	GS-5	GS-6
1	12.5	15.3	7.403E-05	1.104E-04
2	18.5	21.3	7.902E-05	1.071E-04
3	33.5	36.3	6.545E-05	6.765E-05
4	45.5	48.3	9.121E-05	1.041E-04
5	50.5	53.3	9.110E-05	9.640E-05
6	60.5	63.3	7.416E-05	1.179E-04
7	66.5	69.3	9.890E-05	1.121E-04
8	70.5	73.3	1.073E-04	6.208E-05
9	75.5	78.3	8.357E-05	1.895E-04

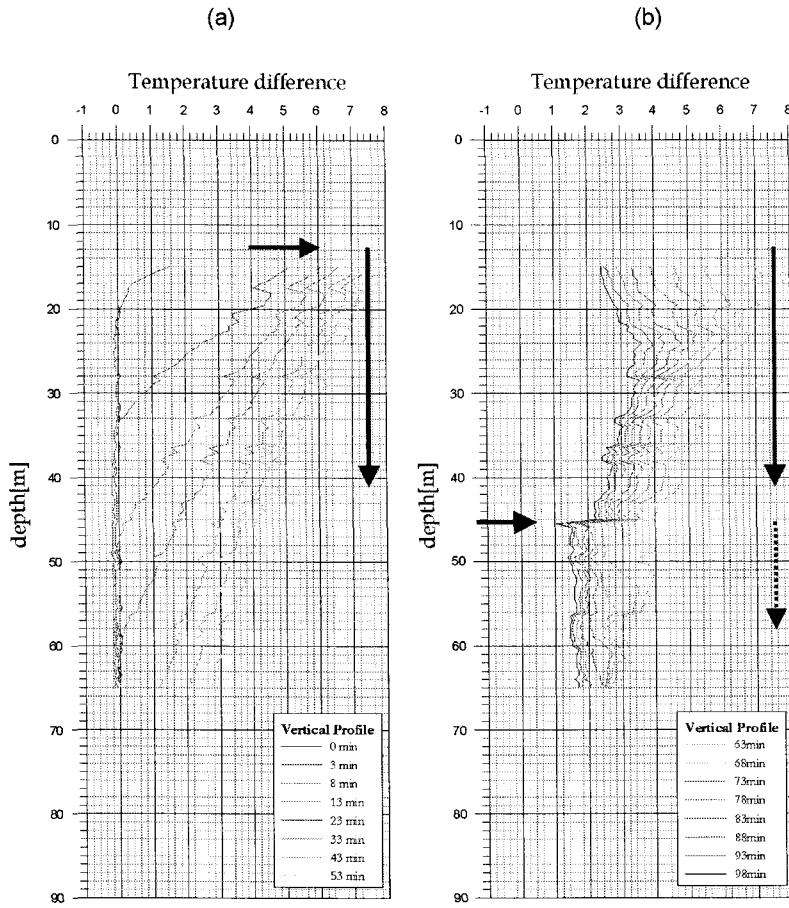


그림 12. GS-5 주입공에서 뜨거운 물을 심도 12.5m~15.3m 구간에 주입하였을 때 GS-6 온도관측공에서 측정된 온도 변화를 나타내고 있다. (a) 주입시, (b) 주입중단후.

때문으로 판단된다. 그림 13은 GS-5호공의 주입 심도구간을 달리하였을 때 GS-6호공에서의 온도 모니터링 결과를 나타내고 있다. 이때 GS-6호공에 온도센서 배열 케이블(온도센서 간격 2m)은 심도 약 5m~85m 구간에 놓아도록 하였다. (a)는 주입 심도구간이 18.5~21.3m 인 경우로 역시 온도 상승 효과 및 심부방향으로 온도가 전이되는 현상(downstream)이 그대로 관찰되고 있다. 즉, 이 심도 구간에서도 두개의 시추공 사이 단면 내 절리가 서로 연결되어 있다고 할 수 있다. 특히, 심도 약 20m로부터 상부 구간으로는 온도의 변화가 거의 일어나지 않지만 하부 방향으로는 온도가 크게 변하고 있음이 관찰되는 데 이는 바로 이 시추공에서 확실하게 downstream 현상이 뚜렷하게 나타나고 있음을 시사하는 것이라 할 수 있다. (b)는 주입 심도구간이 45.5~48.3m 인 경우로 이전과 비슷한 양상을 보이고 있어 이 구간도 절리의 연결성이 있는 것으로 판단된다. (c)는 주입 심도구간이 33.5~36.3m 인 경우이다. 여기서는 거의 온도변화가 관찰되지 않고 있다. 따라서 이 구간의 두개 시추공 사이 단면 내 절리는 서로 연결되지 않는 것으로 판단된다. (d)는 심도 50.5~53.3m 구간에서 주입된 경우로 GS-6호공 전 심도구간에서 거의 온도 변화가 관찰되지 않고 있지만 심도 약 58m~68m 구간에 약간의 온도 변화가 관찰되고 있다(타원으로 표시). 이는 절리 연결성은 있으나 그의 투수성이 크지 않기 때문으로 판단된다. (f)는 주입 심도구간이 60.5~63.3m 인 경우로 전 구간에 걸쳐 거의 온도변화가 관찰되지 않으므로 연결성이 없음을 시사하고 있다. 이러한 현장실험 결과들을 종합하면 열추적자 시험시 온도센서 배열 케이블을 이용한 다중심도 구간의 온도 모니터링 결과는 바로 절리의 연결성을 판단할 수 있는 대단히 효율적인 방법임이 입증되었다고 할 수 있다.

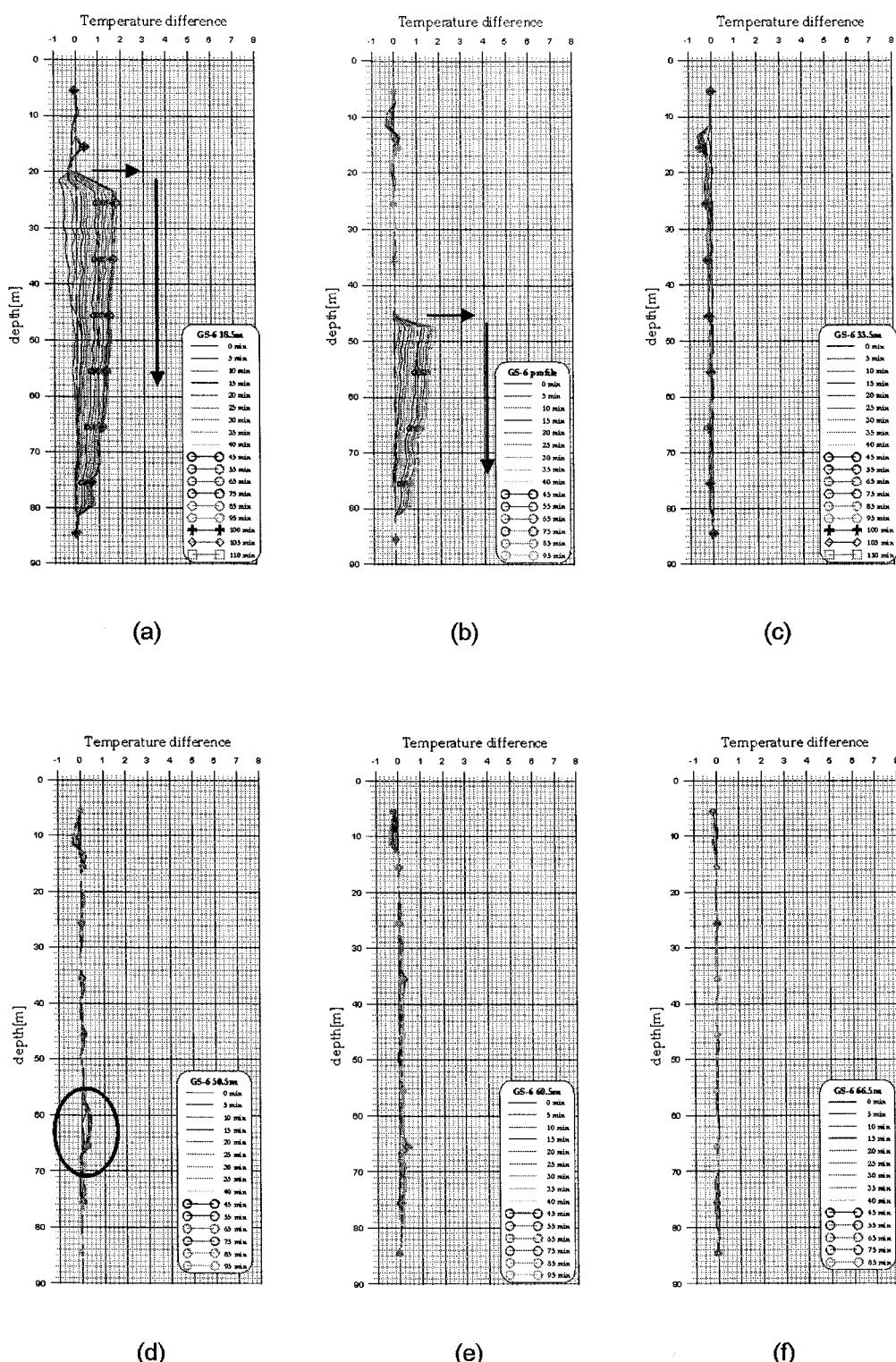


그림 13. 다중심도 열추적자 시험시 GS-6호공에서의 온도모니터링 결과. GS-5호공의 주입 심도구간 (a)18.5~21.3m, (b)45.5~48.3m, (c)33.5~36.3m, (d)50.5~53.3m, (e)60.5~63.3m, (f)66.5~69.3m.

5. 결 론

본 연구에서는 매질의 투수성 내지 암반내의 절리 연결성을 규명하기 위한 방법으로 온도 모니터링 기법을 제안하고 있으며, 이를 효율적으로 수행하기 위해 우선 여러 위치의 온도를 동시에 측정할 수 있는 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도 모니터링 시스템을 소개하였다. 또한 매질의 투수성 및 매질 내 물의 흐름을 온도 모니터링에 의해 규명할 수 있음을 3차원 실험을 통해 입증하였다. 물 속에 얼음을 삽입한 후 3차원적인 온도 모니터링 실험에서는 찬물이 아랫방향으로 내려가는 물의 대류 현상을 그대로 보여주었다. 또한 토양의 투수성을 규명하기 위한 3차원 실험에서는 3차원적인 투수성 즉, 물의 유동 상태를 파악할 수 있었으며, 특히 본 연구에서 개발된, 3차원 자료를 입체적으로 영상화하여 시간대별로 확인할 수 있는 “View4D” 프로그램은 향후 3차원 온도모니터링 결과를 분석하는 데 매우 유용하게 활용될 것이 기대된다. 한편, 절리 암반내의 두 시추공사이의 절리 연결성을 규명하기 위한 열 추적자 실험에서는 바로 상기 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도 모니터링 시스템이 활용되어 심도 구간별 절리 연결 상태를 명확하게 규명할 수 있었다. 상기 결과를 종합해 보면 본 연구에서 제시한 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도 모니터링 시스템은 매질 내 투수성 문제나 절리 연결성 규명은 물론 호수 환경 변화 감시, 제방 및 저수지 누수 감시, 지하수 유동 해석, 그라우팅 성과 판단 등 다양한 분야에서 크게 활용될 것이 기대된다.

사 사

본 논문은 2004년도 중소기업기술혁신개발사업 지원으로 연구되었으며 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. 김중열, Hornamand, H., 김유성, 남지연(2004), “그라우팅 누수 문제에 대처한 온도센서 배열 모니터링 장치 개발”, 한국지반공학회 2004 봄학술발표회 논문집, pp.509~516.