

Development of monitoring device with thermal line sensors and its use for grouting and leakage problems

¹⁾, Jungyul Kim, H. Honarmand²⁾, ³⁾, Yoosung Kim, ⁴⁾, Jiyeon Nam

¹⁾ () , C.E.O., SOAM Consultant Co.,Ltd.

²⁾ C.E.O., TeKa Berlin.

³⁾ () , Director of research and services, SOAM Consultant Co.,Ltd.

⁴⁾ () , Team manager, SOAM Consultant Co.,Ltd.

SYNOPSIS : The measurement of abnormal change of temperature(temperature anomaly) will help determine the safety of various engineering constructions, as the measurement in body often used to diagnose one's health. Temperature anomaly can be occurred in leakage or seepage of water flow in rocks, and in ground water table etc. Grouting materials injected in fractured rocks generate heat during hardening process. The degree of temperature change is associated directly with heat flow characteristics, that is, thermal conductivity, specific heat capacity, density of the surrounding rocks and can afford to assess the grouting efficiency. However, in practice, the use of traditional temperature measuring technique composed of only one single thermal sensor has been fundamentally limited to acquire thermal data sufficient to use for that, partly due to the time-consuming measuring work, partly due to the non-consecutive quality of data. Thus, in this paper, a new concept of temperature measuring technique, what we call, thermal line sensor technique is introduced. In this, the sensors with an accuracy of 0.02°C are inserted at regular intervals in one line cable and addressed by a control device, which enables to fundamentally enhance the capability of data acquisition in time and space. This new technology has been demonstrated on diverse field model experiments. The results were simply meant to be illustrative of a potential to be used for various kinds of temperature measurements encountered in grouting and leakage problems.

Key words : thermal conductivity, thermal line sensor, grouting efficiency, leakage problems

1. 서 론

인체의 이상 유무는 우선 체온 상태를 점검함으로써 쉽게 유추될 수 있다. 제반 토목 시설물의 안정성도 그의 온도 분포가 시간적 및 공간적인 측면에서 전체적으로 형평을 이루고 있는가에 달려 있다고 볼 수 있다. 일반적으로 시설물은 노후화됨에 따라 여러 가지 요인에 의해 구조적인 변형 즉, 예를 들면 크고 작은 균열을 수반하게 되며 그곳에서 미소한 온도 이상대(temperature anomaly)가 형성될 수 있다. 오래된 댐체나 그 주위에서 관찰되는 누수(leakage) 내지 투수(seepage) 현상은 바로 상기 온도 이

상대를 대변할 수 있는 대표적인 사례가 된다. 지하수면은 바로 온도 변화의 분기점이 되며 지하수의 흐름은 그 과정에서 열을 운반하기 때문에 역시 온도 이상을 유발하는 요인이 된다. 차수벽 시설이나 연약지반 보강을 위해 시추공에 주입되는 고결재료(예: cement)는 양생과정에서 상당한 열을 방출하기 때문에 일정기간 동안 특유의 온도 이상이 형성된다. 이러한 과정에서 차별화되는 온도 변화는 주로 주위 매질의 열전달 특성 즉, 매질의 열 전도도(thermal conductivity) λ , 비열(specific heat capacity) c , 온도 전이도(temperature conductivity) α 및 밀도 ρ 에 의해 결정되며 그들은 상호 다음과 같이 연관된다.

$$\lambda = \rho \cdot c \cdot \alpha \quad (1)$$

암반에 대한 실험 결과에 의하면 식 (1)에서 대체로 $\lambda \sim \rho$, $\alpha \sim 1/c$ 를 나타낸다. 일반적으로 온도와 연관된 암반 물성은 λ 에 의해 차별화되고 있으며 그 값은 코어 샘플에 대한 실내 실험이나 시추공 내에서 직접 구해진다. 그림 1은 λ 를 구하기 위한 이상적인 모델을 보여주고 있다. 여기서 원통형 매질은 무한히 연장되며 동시에 완벽한 열 전도도를, 동시에 그 주위 매질(암반)은 균질 등방성을 나타내고 있는 경우이다. 이 때, 온도장 $T_2(r, t)$ 는 다음과 같이 단순화된 열전도 비선형 미분방정식으로 표현된다(Kristiansen, 1982).

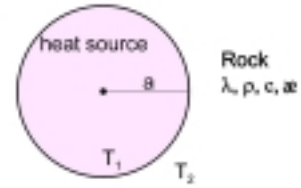


그림 1. 암반 내 원통형(반경 a) 열원이 존재하는 모형의 단면도

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad t > 0, \quad r \geq a \quad (2)$$

상기 이상적인 조건 하에 원통형 경계면에서는 다음 조건이 성립되며

$$-\lambda \cdot 2\pi a \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=a} = q - mc \frac{\partial T_1}{\partial t}, \quad -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=a} = H(T_1 - T_2) \quad t > 0$$

m : 열원 길이당 질량, q : 길이당 열원 용량, H : 원통형 경계면의 접촉 저항

이들은 식 (2)와 더불어 해를 찾게 된다. 그런데, 현실적으로 온도 측정은 $r < a$ (열원 원통형 내부)에서 수행되기 때문에 $T_1(t)$ 에 대한 해가 관심의 초점이 된다. Blackwell(1954), Kristiansen(1982) 및 Villinger(1983)는 상당 시간이 경과된 후의 $T_1(t)$ 이 다음과 같이 단순화된 공식을 얻게 됨을 보여주고 있다.

$$T_1(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + c \quad (3)$$

식 (3)으로부터 λ 를 구하기 위해서는 두 개의 측정 즉, $T_1(t_2)$ 및 $T_1(t_1)$ 이 요구되며 만약, 열원 원통형 반경 a 가 최소화되면 겉보기 열 전도도 λ_a 는 실제 열 전도도 λ 에 수렴하게 된다. 즉,

$$\lambda_a \rightarrow \lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln(t_2/t_1)}{\Delta T}, \quad \Delta T = T_1(t_2) - T_1(t_1) \quad (4)$$

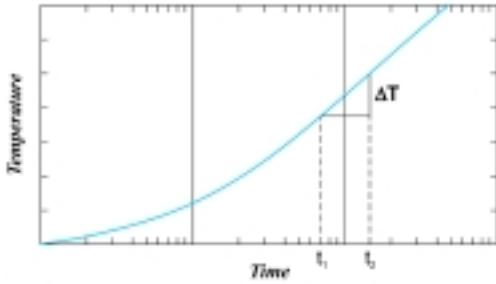


그림 2. 원통형 열원에 의한 $T_1(t)$ 온도 상승 사례

여러 개 묶어 온도 측정에 시도하였으나 여기서는 우선 전체 케이블 다발 두께의 제한성과 측정 데이터의 제어 문제는 불가피하며 나아가서 케이블 다발의 이동에 따른 반복 측정 역시 상당한 측정 시간과 인력 소모를 요구하는 것이다. 따라서, 본 연구의 주요 내용은 우선 온도 측정의 현실화를 위해

- 하나의 케이블에 여러 개의 센서를 장착하여 동시에 측정할 수 있는 장치-편의상 다중센서배열 케이블(Thermal Line Sensor: TLS)이라 명명-를 개발하고(그림 3(b) 참조)
- 또한 장기간 모니터링 할 수 있는 데이터 제어 장치를 개발

하는 데 있으며 나아가서 다양한 현장 모형 실험을 통하여 그라우팅 및 누수문제에 접근할 수 있는 바람직한 측정기법을 소개하는 데 있다.

2. 그라우팅 성과 판단을 위한 현장 모형 실험

다중센서배열 케이블에 대한 기본 착상 및 실험은 독일 TeKa사 Dr. Honarmand에 의해 수행되어 (TeKa internal report, 2001) 그의 응용 가능성이 입증된 바 있으며 당해연도(2003년)에는 SOAM-TeKa 공동연구계약에 따른 사업의 일환으로 상기 TLS의 개선 및 그를 이용한 측정기법 개발에 역점을 두었다. 그림 4는 길이 3.5m 케이블에 온도센서 28개를 장착하여 모니터링 할 수 있는 소위 TLS 측정시스템 전모를 나타내고 있다. 각 센서는 변조신호(modulation signal)를 받아들여 자기 위치를 알릴 수 있는 기능을 갖고 있으며(addressable thermal sensor) 모니터링 장치(화살표로 표시)는 각

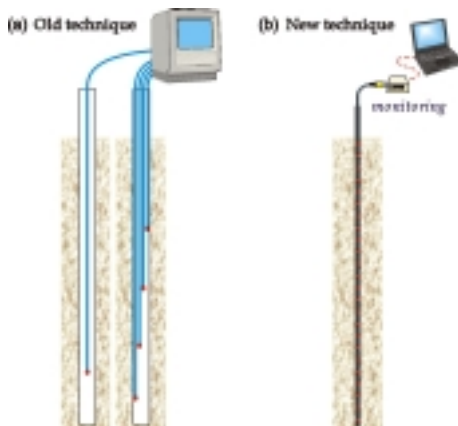


그림 3. 온도 측정 방법
(a) 단일 온도 센서
(b) 다중 온도 센서

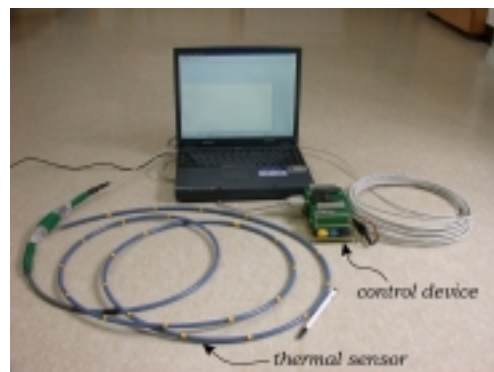


그림 4. 선진화된 TLS(Thermal Line Sensor) 측정시스템 전모.

측정 때마다 변조신호를 송신하여 각 센서의 위치를 확인하고 동시에 온도측정 데이터를 받아들여 저장한다. 이러한 측정은 임의로 설정된 시간 간격마다 장기간 자동으로 반복될 수 있게 되어 있다.

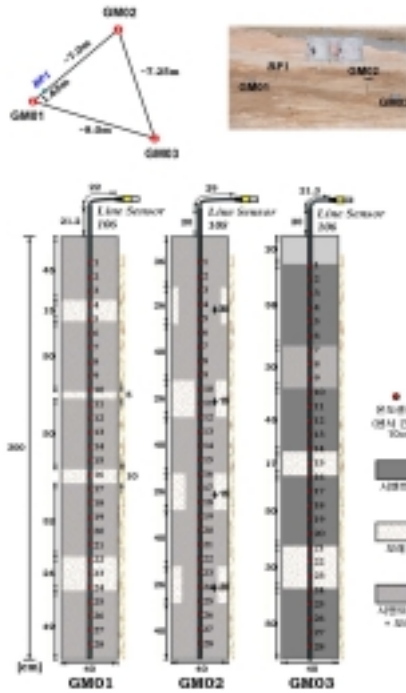


그림 5. 다양한 그라우팅 모형



그림 6. 그라우팅 모형 설치 과정

그림 5는 현장 실험을 위한 3개의 서로 다른 모형(GM01~GM03)을 나타내고 있다. 직경 약 40cm, 길이 3m의 PVC 파이프(두께 약 7mm) 내에 순수한 모래와 시멘트+모래가 서로 두께를 달리하면서 호상으로 배치되고 있으며 여기서 모래층은 그라우팅이 제대로 되지 않은 상태를 의미하고 있다. 모형 GM01에서 기대되는 주요 연구내용 중 하나는 모래층 두께가 5cm일 경우에도 그 위치가 온도 측정에 의해 인식될 수 있는가이다. 모형 GM02는 그라우팅 된 매질의 두께가 심도에 따라 변화하고 있음을 보여주고 있다. 모형 GM03은 무엇보다 식 (1)에서 특히 온도전이도 α 와 연관된 다양한 실험을 위한 것이다. 온도센서 배열은 PVC 파이프 중앙에 위치한 수도 파이프(직경 약 15mm) 내에 삽입되었다. 한편, 모형 GM01에 인접하여 직경 약 3.5mm steel pipe를 삽입함으로써 별도로 원 지반의 심도에 따른 온도 변화를 관찰하고자 하였다. 그림 6은 모형이 설치되는 과정을 보여주고 있다. 연구의 효율성을 높이기 위하여 지하수면이 지하 약 4m 이하인 지역이 선정(대전시 대덕구)되었으며 우선 PVC 파이프가 지하에 매설되어 약 1주일이 경과된 후 (모형과 주위 매질과의 온도 평형을 위해) 모형 내 각 층이 형성되었다. 그림의 하단에는 완성된 모형과 측정되는 과정을 나타내고 있다.

그림 7은 모형 GM01이 완성된 후 약 80시간 동안 10분 간격으로 측정된 결과를 각 센서 위치 (센서 1은 상단, 센서 28은 하단, 그림 5 참조)에 따라 표현하고 있다. 측정초기에는 온도가 급상승(약 50°C)하며 온도 하락은 대체로 완만한 형태를 보여주고 있다. 화살표로 표시한 온도 변화는 지면에 인접한 센서에 의한 것으로써 지면의 온도 변화가 반영된 것이다. 또 다른 실험에 의하면 시멘트에 경화촉진제(예: 염화칼슘)를 부가하면 양생온도가 80°C를 상회하고 있음이 관찰되었다. 본 실험의 목적은 무엇보다 온도 측정에

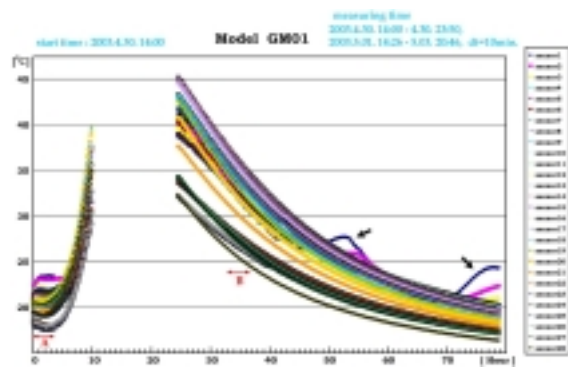


그림 7. 각 온도 센서에서 측정된 온도 변화

의해 각 층을 식별하는 데 있다. 이를 위해서는 다양한 측정 및 분석기법으로 접근될 수 있기 때문에 편의상 다음 두 가지 기법 즉, 양생기법 및 나가기법으로 분리하여 서술하고자 한다.

2.1 양생기법

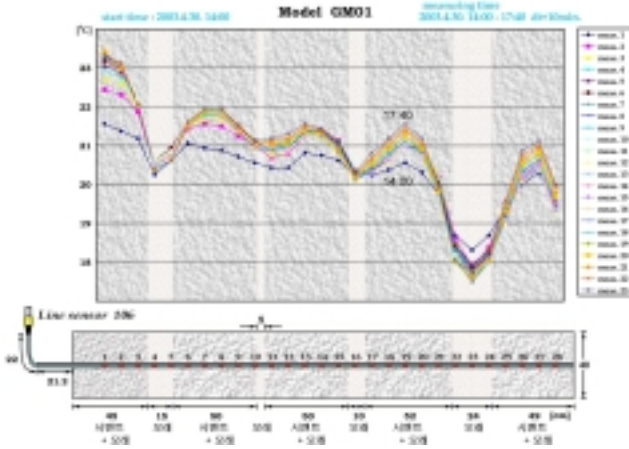


그림 8. 양생 초기(그림 7의 화살표 A 시간범위) 각 센서에서 관찰된 온도 변화

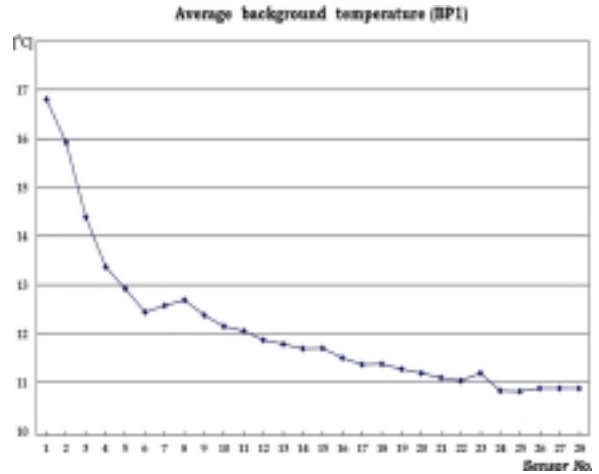


그림 9. 모형 주위 심도(센서 위치)에 따른 온도 변화

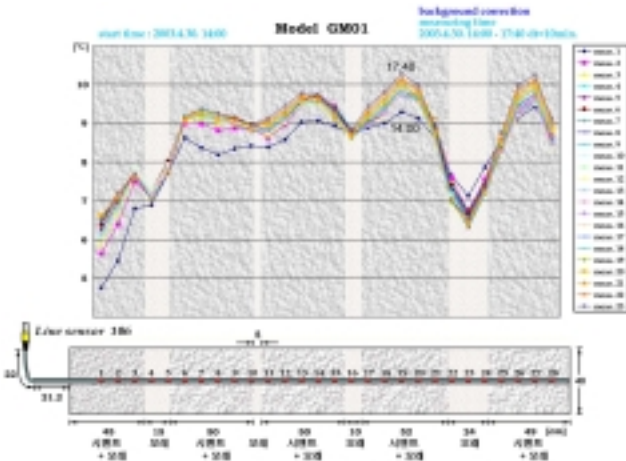


그림 10. 양생 초기 각 센서에서 관찰된 온도 변화(주위 온도 변화가 고려됨)

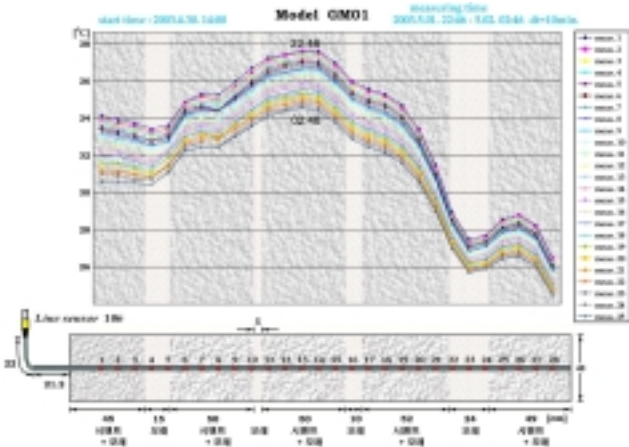


그림 11. 양생 후기(그림 7의 화살표 B 시간범위) 각 센서에서 관찰된 온도 변화

그라우팅 매질은 그의 구성 성분에 따라 특유의 양생온도곡선을 나타내고 있다(그림 7 참조). 그림 8은 양생초기(그림 7에서 화살표 A로 표시한 시간구간)의 각 센서에 대한 온도 변화를 나타내고 있다. 모래층이 두꺼울수록 상대적인 온도 편차가 두드러지게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 만약, 주위 지중온도변화(그림 9 참조)를 고려한다면 그림 10에 나타난 바 온도 편차를 정확하게 관찰할 수 있다. 센서 1~3 위치는 지면과 인접하기 때문에 지면의 온도 변화가 영향을 주고 있음이 관찰된다. 그림 11은 양생온도가 하락하는 시

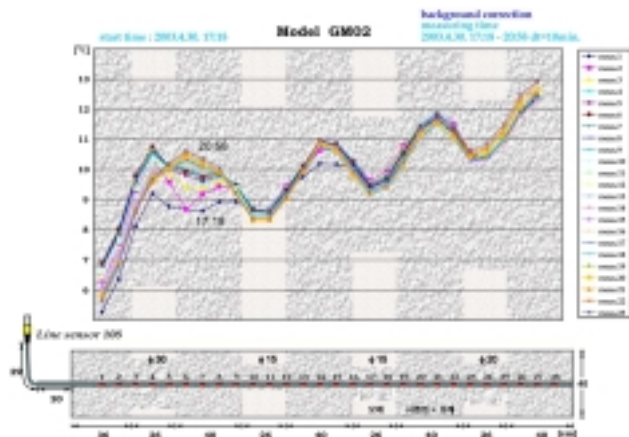


그림 12. 양생 초기 각 센서에서 관찰된 온도 변화

간구간(그림 7에서 화살표 B로 표시한 구간)에 대한 결과를 나타내고 있다. 여기서 특이한 점은 센서 위치 13 주위에서 최대의 온도를 나타내고 있다는 데 있다. 즉, 측정된 온도는 센서 주위와 인접한 매질보다는 양생과정에서 이미 가열된 그라우팅 매질 전체 분포에 의해 결정된다는 것이다. 따라서 각 층의 식별을 용이하게 하기 위해서는 양생초기의 온도 변화가 보다 바람직한 자료가 되는 것이다.

그림 12는 그라우팅 매질의 두께 변화에 대한 온도 측정결과를 나타내고 있다. 이미 언급한 바 비록 모든 센서가 그라우팅 매질 내에 놓여 있으나 측정되는 온도는 매질 부피에 의해 결정되기 때문에 그에 따른 온도 편차는 두께 변화에 대한 뚜렷한 반응을 나타내고 있다. 상기 실험 결과를 바탕으로 온도 변화에 의해 각 층을 식별할 수 있는 방법을 편의상 “양생기법”이라 명명하였다.

2.2 나가기법

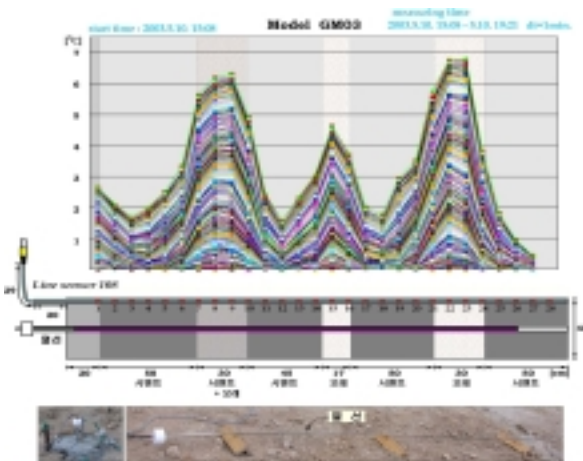


그림 13. 열선으로부터 균등한 열을 방사할 경우 각 센서에서 관찰되는 온도 변화

참고로, 그림 14는 각 센서에 대한 온도 변화를 나타내고 있으며 그림 15에는 그 중 4개 센서에 대한

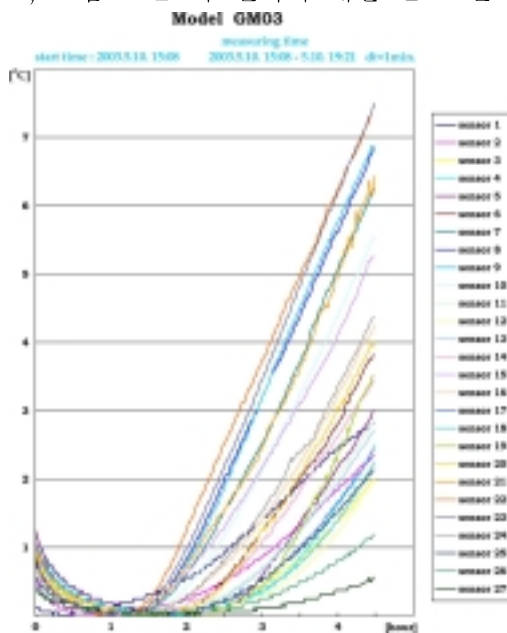


그림 14. 각 센서에서 시간 경과에 따라 관찰되는 온도 변화

양생기법은 대체로 그라우팅 후 바로 활용함이 바람직하다. 그런데, 이러한 적정한 측정 시점에 대응하지 못하였을 경우 즉, 그라우팅이 완료된 후 이미 주위 매질의 온도와 형평을 이루었을 경우에 대해 본 연구는 하나의 새로운 측정기법을 소개하고 있다. 우선, 식 (2)(열전도 비선형 미분 방정식)에 부합되는 조건을 마련하기 위해 모형 중앙에는 특수제작된 열선(그림 13의 하단 부분)을 모형 중앙에 삽입한 후 약 4시간 가열(약 400°C)하였으며 동시에 그로부터 약 20cm 떨어진 위치에서 온도가 측정되었다. 즉, 식 (1)에 의거 각 층에 대한 온도전이도 α 의 변화를 관찰하였다(그림 13 참조). 전체적으로 모래층 내지 모래층이 함유된 매질에서 순수 시멘트 매질보다 온도가 빨리 전달되는 것을 볼 수 있다.

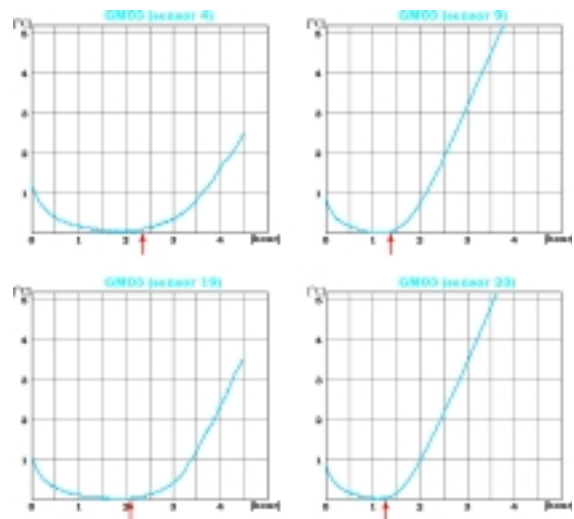


그림 15. 각 센서에서 시간 경과에 따른 온도 변화(화살표 위치는 각 센서에서 온도가 감지되는 시점)

결과를 보여주고 있다. 화살표로 표시한 시점은 온도가 전달되어 바로 각 센서에서 온도 상승이 시작되는 시간이 된다. 그림 16은 이러한 온도 상승 시점 t_i 를 이용하여 각 매질 α 의 속도($20\text{cm}/t_i$)로 전환한 결과를 나타내고 있다. 각 층의 분리가 뚜렷하게 인식되고 있다. 그런데, 이러한 성과를 얻기 위해서는 우선 서로 인접한 두 개의 천공이 요구되기 때문에 그만큼 조사경제성이 떨어진다고 할 수 있다. 한편, 식 (1)에 의거 α 가 크다는 것은 그만큼 열량이 빨리 전달된 것을 의미한다. 만약, 열원을 제거하고 동시에 그곳에서 온도를 측정하게 된다면 센서 주위 매질의 α (비열)에 의해 온도 편차가 발생될 것이 기대된다. 그림 17은 상기 착상에 의한 측정 결과를 나타내고 있다. 각 층에 대한 온도 변화가 뚜렷하게 차별화되고 있음을 볼 수 있다. 본 연구에서 이러한 측정 방법을 편의상 “나가기법”이라 명명하였다.

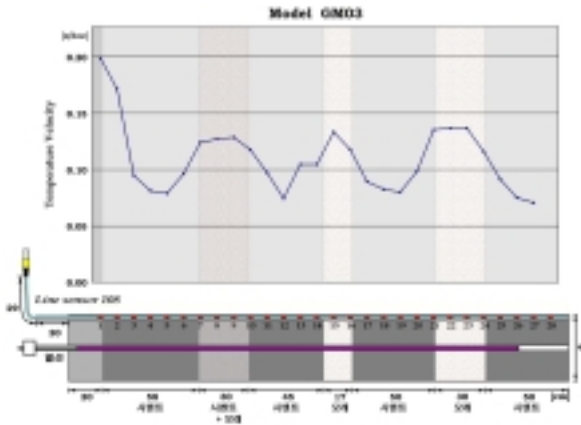


그림 16. 온도 전이도(α) 관찰을 통한 각 층의 분리

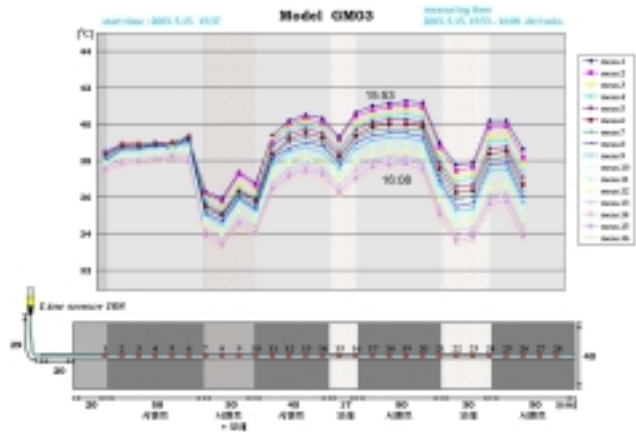


그림 17. 나가기법에 의한 각 층의 분리

3. 누수 판단을 위한 실내 모형 실험

온도 측정에 의해 누수 내지 투수 상태를 인식할 수 있음은 이미 알려진 사실이다. 단순히 재래의 단일센서 측정이 그의 현실화에 크게 부응하지 못하고 있을 뿐이다. 다음 실내 실험은 바로 TLS 시스템의 효과가 반영되고 있음을 보여주는 것이 된다. 그림 18은 누수 모형 및 측정 과정을 나타내고 있다. 칸막이 중앙 하단에 위치한 낯쇠판 내부에는 6개의 구멍($\phi 2\text{mm}$)이 천공되어 그로부터 물의 양이 조절되어 흐르도록 하였으며 그 주위에 4개의 온도센서(5cm 간격) 케이블이 배치되고 있다. 각 센서의 온도 측정 정확도는 약 0.02°C 에 달하고 있기 때문에 1°C 미만의 온도 변화도 쉽게 관찰될 수 있다. 그림 19는 흐르는 물의 양을 달리하였을 경우 각각의 온도 측정 결과를 나타내고 있다. 온도센서 케이블이 낯쇠판에 인접할수록 온도변화 폭이 상대적으로 크게 달리함을 볼 수 있다. 이러한 실내실험에는 자연 상태와는 달리 여러 가지 여건 즉, 실내온도, 칸막이 내부 및 주입되는 물의 온도차 등이 고려되어야 하나 이러한 상황에서도 온도변

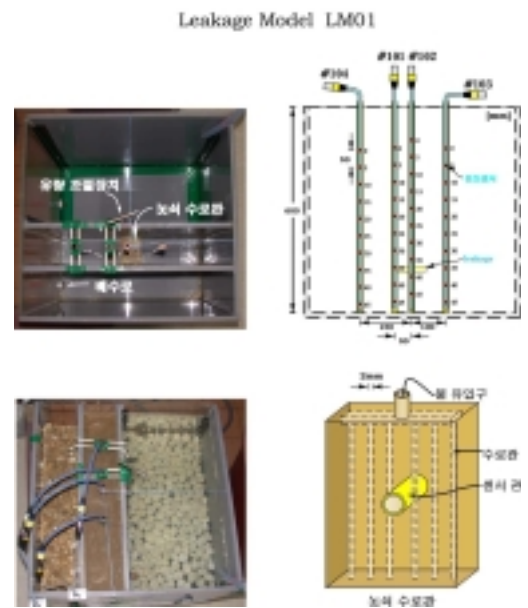


그림 18. 누수 문제에 대처한 실내 모형 및 측정 과정

화는 차별화되어 관찰될 수 있었다.

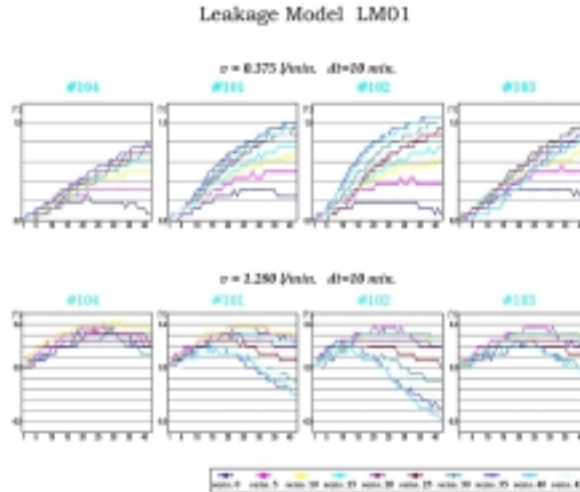


그림 19. 각 센서 위치에서 물 유입량에 따라 관찰되는 온도 변화

4. 결 론

본 논문의 주요 내용은 온도 측정을 통하여 그라우팅 성과 및 누수 상태를 판단할 수 있는 다양한 측정 및 분석 기법을 소개하고 있다. 최근, SOAM-TeKa 국제공동연구를 통하여 선진화된 다중온도센서 배열 측정 장치의 개발은 무엇보다 시간적 및 공간적 측면에서 일관성을 띤 온도 측정을 가능하게 하였기 때문에 보다 정확하고 경제성을 띤 응용이 기대될 수 있었다. 특히, 본 논문에서는 그라우팅 성과 판단을 위해서 두 가지 바람직한 측정 기법 즉, 양생기법 및 나가기법이 소개되었다. 즉, 그라우팅이 시작되는 시점에는 양생기법이, 그라우팅 후에는 나가기법이 활용되어 응용의 다양성이 보장될 수 있었다. 특히, 시추공이 유지될 수 없는 지반(예: 연약지반)에서도 최소한의 공경을 갖는 파이프 내지 시추공에 의해 측정이 가능하다. 한편, 상기 기법들에 의한 성과는 무엇보다 센서와 주위 매질과의 접촉 상태에 따라 크게 달라지는 경향을 보여주었다.

비록, 상기 온도측정 기술이 보다 다양한 응용성을 갖기 위해서는 우선 임의의 센서케이블 길이(현 기술 수준에서 약 100m 미만)에서도 센서 위치를 찾을 수 있는 재료 선정 및 제어장치의 선진화가 요구되고 있으나 본 실험과정에서 소개한 다양한 기법들은 향후 제반 그라우팅 성과 판단이나 누수 내지 특수 판단 등을 위한 큰 디딤돌이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. BLACKWELL, J. H.(1954), "A transient flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk", *J. Appl. Phys.*, 25, 137~144
2. KRISTIANSEN, J. I.(1982), "The transient cylindrical probe method for determination of thermal parameters of earth materials". *GeoSkifter*, 18, Aarhus.
3. Villinger, H.(1983) *In Situ Bestimmung der Waermeleitfaehigkeit in Bohrungen, dissertation*, Technical University Berlin.