

개방형 지중열교환기 설계를 위한 지중 열전도도 평가

: 스탠딩컬럼웰(Standing Column Well, SCW) 중심으로

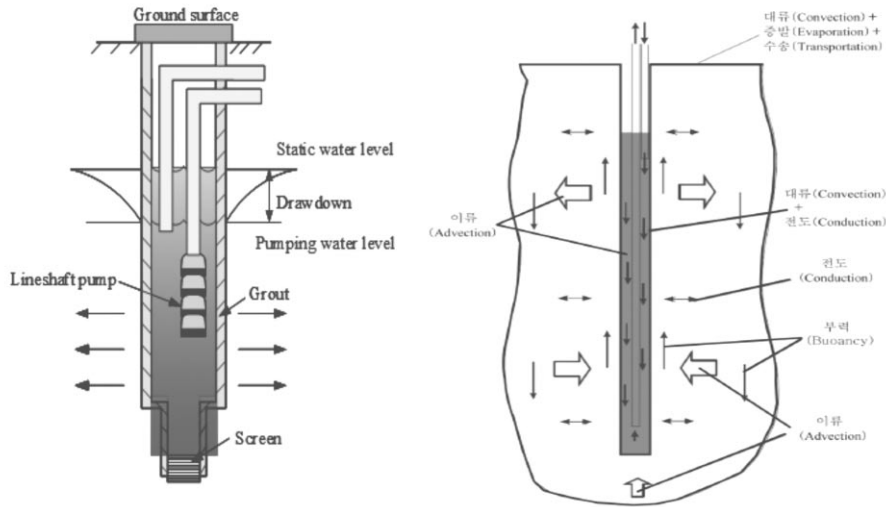
고려대학교 건축사회환경공학부 교수 최항석
고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 최현준
한국건설기술원 전임연구원 이철호
한국산업기술시험원 선임연구원 윤명섭

1. 서론

스탠딩컬럼웰(Standing Column Well, SCW)이란 개방형 지중열교환기의 하나로 단일정 수주(우물 전체 심도에서 지하수로 차 있는 우물의 깊이) 내 지하수를 지열 히트펌프 시스템의 열원으로 활용하며, 지하수를 추출하여 히트펌프로 순환시키고 다시 우물로 주입하는 방식이다. 국내에서는 스탠딩컬럼웰을 『수직으로 우물공을 설치하고 우물공으로부터 지하수를 취수하여 열교환을 한 후 지하수를 다시 동일한 우물공으로 주입하는 방식』으로 정의하고 있다. 스탠딩컬럼웰은 추출정과 주입정을 별도로 두는 복수정 방식이나 폐회로 순환 파이프를 적용하는 밀폐형 지중열교환기와는 설계 및 시공에 있어 근본적인 차이가 있다. 외국에서는 에너지정(energy well), 난류정(turbulent well) 등 다양한 이름으로 불리고 있다.

일반적으로 스탠딩컬럼웰 이용하는 지열 냉난방 시스템은 토양열원(ground-coupled) 시스템에 비해 열전달 성능이 우수해 냉난방 효율이 높으며, 지중열교환기 설치 면적과 천공 개수를 줄일 수 있어 초기 투자비가 적게 드는 시스템으로 알려져 있다. 스탠딩컬럼웰은 그림 1과 같이 암반과

지하수의 직접 열교환 방식을 적용한다. 따라서, 일반적인 지열 냉난방시스템에 비해, 유입수, 유출수, 파이프, 주변 지반, 지하수 등이 서로 연계되어 복합적이며 다양한 경로를 통하여 열교환이 이루어지게 된다. 여기서, 유입수는 심정에서부터 히트펌프로 추출(유입)되는 지하수를 의미하고, 유출수는 히트펌프로부터 심정으로 주입(유출)되는 지하수를 의미한다. 열전달 경로는 심정 벽면에서의 순환수—지반 열전도, 지층에서의 열복사, 순환수—지반 그리고 심정 내 순환수의 열대류, 펌핑으로 인하여 발생하는 지하수의 반경방향 흐름과 이로 인한 열이류 등이 있다. 심정 벽면을 통한 지하수의 반경방향 흐름은 심정 저부에서는 펌핑으로 인한 수두저하로 인해 지하수가 흡입되는 반면, 상부에서는 유출관에서의 환수로 인하여 순환수가 심정 밖으로 밀려나가게 된다. 따라서, 심정 중간부분에서는 반경방향흐름이 서로 상쇄된다. 심정내의 온도가 과도하게 상승하거나 하강하면 스탠딩컬럼웰 유출수 일부를 심정 외부로 배출하는 블리딩(bleeding)을 하게 된다. 블리딩을 실시하면 심정으로 가는 유출수가 심정에서 히트펌프로 추출되는 유입수의 양보다 작아져 심정 내에 압력차가 증가하고 이는 대수층에서 심정 내부로 지하수 유입을 증가시켜 심정내 열교



[그림 1] 스탠딩컬럼웰 시스템의 개략도와 열 이동 메커니즘(박두희 등, 2010)

환이 더욱 활발해진다.

2. 지반의 열전도도 평가 방법

스탠딩컬럼웰 설계를 위해서는 현장의 지중 열전도도를 적절히 산정하는 것이 중요하며, 국내에서는 신재생에너지센터 공고 제2013-13호에서 현장 열응답시험(Thermal Response Test, TRT)을 통해 지반의 유효 열전도도(effective ground thermal conductivity)를 산정하도록 규정하고 있다. 현장 열응답시험은 스탠딩컬럼웰 내 순환수를 순환시키는 과정에서 유입수에 일정 열량을 주입한 후, 심정에 재유출시키는 방식을 취하며, 시간에 따른 유출입수 온도 측정을 통해 지반의 유효 열전도도를 산정할 수 있다. 현장 열응답 시험결과를 이용하여 유효 열전도도를 산정하기 위해 일반적으로 무한 선형열원 모델(infinite line-source model)을 적용한다. 무한 선형열원 모델은 보어홀을 무한히 긴 열원으로 가정하고 열 전달은 보어홀과 지반의 접촉면에서 열원의 수직(방사)방향으로만 일어나며, 열원의 말단부에서의 열전달은 무시한다. 또한, 열원은 항상 일

정하게 유지된다는 가정 하에 단순화된 선형 방정식을 적용한다.

현장 열응답시험 초기에는 열용량이 일정하게 공급되지 않아 약간의 오차를 나타내는 것으로 알려져 있다. Gehlin(2002)는 초기 열용량이 일정하지 않은 것을 고려하여 시험 시작 후 5시간 가량의 시험결과는 지반의 유효 열전도도 계산시 제외해야 한다고 제안하였다. 국내에서 이세균 등(2008)도 선형 최소자승법을 이용하여 초기 시간을 제외해야 실험오차를 최소화 할 수 있다고 보고한 바 있다. 한편, 무한 선형열원 모델은 지반을 비다공질체(solid)이고 균질한 재료로 가정하기 때문에 실제 스탠딩컬럼웰의 경계조건과 다르며 지하수의 흐름에 의한 열교환이나 심정 내 대류 현상 및 열이류 등의 영향을 직접 고려할 수 없다. 본 기사에서는 현장 열응답시험이 갖는 이러한 한계에 의해 발생할 수 있는 오차를 수치해석을 통해 평가하고, 현장 열응답시험에 의해 산정된 지반의 유효 열전도도의 적용성을 검토하였다. 여기서, 지반의 유효 열전도도는 현장 열응답 시험결과를 무한 선형열원 모델을 통해 산정한 열전도도를 의미하고 지반의 열전도도는 지반을 구

<표 1> 현장 열응답 시험조건 및 시험결과

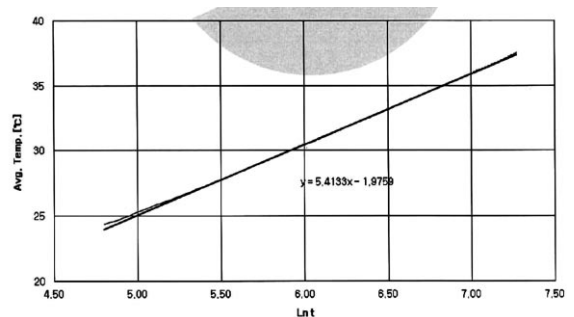
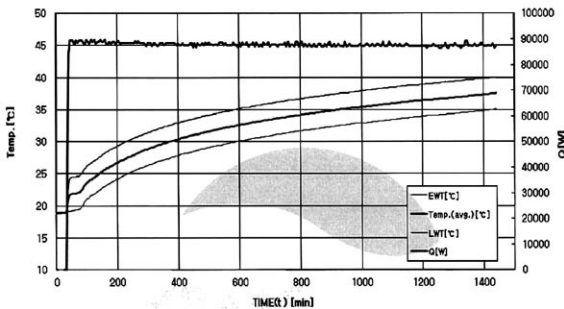
시험 항목	단 위	시험결과
초기 지중온도	℃	18.95
입출구 평균온도	℃	5.03
투입 열량 Q	W	87,693
기울기 m	-	5.41
유효 열전도도	W/mK	3.22

성하는 흙 입자들 자체의 열전도도라 정의한다. 이 둘을 구분하는 이유는 앞서 설명한 바와 같이 현장 열응답시험을 통해 산정한 지반의 유효 열전도도는 무한 선형열원 모델을 적용하여 산정하기 때문에 여러 가지 오차가 포함되어 있어 실제 지반의 열전도도와는 다른 개념이기 때문이다. 일반적으로 지반은 흙 입자와 공기, 물로 구성되어 있으며, 공기의 열전도도는 무시할 정도로 작기 때문에, 간극률(porosity)과 같은 단위체적당 부피비를 알고 있다면 흙 입자와 물의 부피비를 이용하여 등가 열전도도를 산정할 수 있다. 이렇게 흙 입자의 열전도도와 등가 열전도도를 구분하는 이유는 동일한 흙 입자로 구성된 지반이라 할지라도 간극률에 따라 단위체적의 열전도도가 다르게 정의되기 때문이다. 따라서, 여기에서는 지반의 열전도도는 지반 내부의 흙 입자와 간극을 채우고 있는 물의 영향을 고려한 열전도도를 의미하는 것으로 정의하도록 한다.

3. 수치해석을 통한 지중 열전도도 비교

현장 열응답 시험결과를 역해석하기 위해 적용된 해석 프로그램은 FLUENT이다. FLUENT는 ANSYS사에서 개발한 유한체적 해석프로그램으로 CFD(Computational Fluid Dynamics) 전용 해석 프로그램이다. 지중의 열전달 해석에서 CFD 해석이 필요한 이유는 스탠딩컬럼웰과 같은 지중 열교환기에서는 지중의 열전도(conduction) 뿐만 아니라 유체의 흐름에 의한 열전달도 중요하기 때문이다. FLUENT를 사용하여 충남 일대의 한 현장에 시공된 스탠딩컬럼웰에서 수행한 현장 열응답 시험결과를 역해석하여 지반의 열전도도를 추정하고, 지반을 다공질체(porous)와 비다공질체(solid)로 가정하였을 때의 수치해석 결과를 서로 비교하여 현행 지중 열전도도 산정법에 대한 적용성을 검토해보고자 한다. 표 1은 현장 열응답 시험조건 및 시험결과로 나타난 지반의 유효 열전도도를 나타내며, 그림 2는 현장 측정 결과를 나타낸다.

해석의 편의를 위해 지반을 단층으로 모사하고, 유입관의 직경은 깊이에 따라 일정하다고 가정하였다. 현장 열응답시험을 수치해석으로 모사한 결과가 실제 현장 시험결과와 가장 잘 일치할 때, 수치해석에 적용한 지반을 구성하는 흙 입자의 열전도도(ks)를 현장의 대표 열전도도로 역해석을 통해 산정하는 방법으로 먼저 지반의 유효 열전도도를 결정하였다. 역해석에서 고려된 해석조건



[그림 2] 현장 열응답 시험결과

<표 2> 역해석에 적용된 심정과 유입, 유출관의 형상 및 물성치

	심정	유출관	유입관	내부 케이싱
깊이	401m	24m	399m	24m
지름	200mm	50mm	100mm	200mm
열전도도	-	4W/m℃	0.1W/m℃	0.1W/m℃

은 다음 표 2와 표 3과 같고 2차원 축대칭 수치해석 모델은 그림 3과 같다. 또한, 해석의 단순화를 위해 지열정 내부 유체의 흐름은 기본적으로 층류로 간주하였다. 하지만 지열정 내부에 설치된 유출입 파이프 안의 유체의 흐름은 파이프 표면과의 마찰과 빠른 유속을 고려하여 난류로 모델링하였다. 따라서 본 연구에서는 파이프 내부와 지열정 안의 유체 흐름을 유효 수리전도도(Keff, Chen과 Jiao, 1999) 개념으로 적용하였다(박두희 등, 2010).

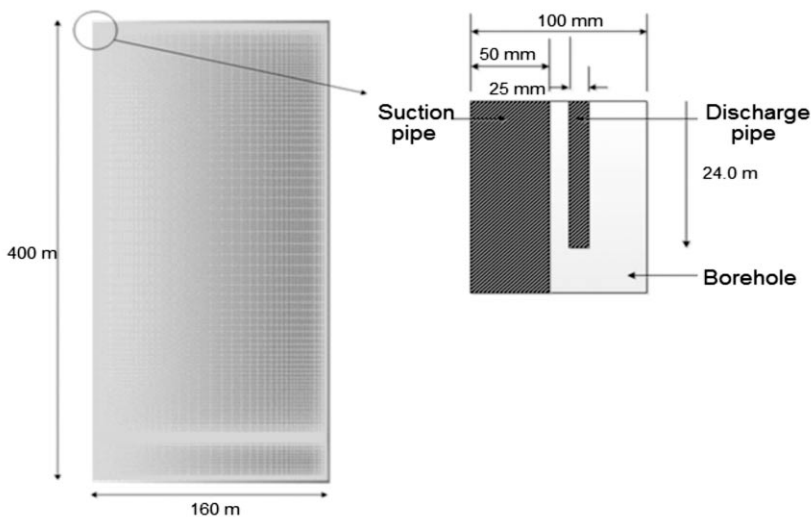
흡 입자의 열전도도(k_s)가 2.4, 2.8, 3.2, 3.6 W/mK인 경우에 대해 현장 열응답시험을 모사하였으며 지반의 유효 열전도도는 앞서 밝힌 바와 같이 무한 선형열원 모델을 적용하였다. 흡 입자 자체의 열전도도에 따른 현장 열응답시험 해석결

<표 3> 역해석에 적용된 지반의 열적 및 수리적 물성

열적 물성		수리적 물성	
지열경사	$T(^{\circ}C) = 16.7 + 0.0225 \cdot \text{depth}(m)$	수리 전도도	$9.03 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
밀도	2615 kg/m ³	간극률	3 %
비열	1000 J/kg-℃		

과에서 산정한 유효 열전도도는 표 4에 정리하였다. 역해석을 통해 스탠딩컬럼웰이 시공된 현장 지반을 구성하는 흡 입자의 열전도도(k_s)는 2.4 W/mK와 3.2 W/mK 범위이며, 특히, 흡 입자의 열전도도(k_s)가 2.8 W/mK인 경우에 역해석한 지반의 유효 열전도도(3.18 W/mK)가 현장 열응답 시험결과인 3.22 W/mK와 가장 잘 일치하였다.

역해석을 통해 산정된 흡 입자의 열전도도(k_s) 2.8 W/mK와 간극률(3%)을 적용하여 부피비로 산정한 지반의 등가 열전도도(k_{eq})는 2.73 W/mK이다. 현장 열응답시험을 수치해석으로 모사하여 산정된 지반의 유효 열전도도는 3.18 W/mK이며, 이는 수치해석에 의해 산정된 지반의 등가 열전도도(k_{eq})보다 약 16%정도 큰 값이다. 역해석



[그림 3] 2차원 축대칭 수치해석 모델(FLUENT)

<표 4> 역해석으로 산정된 지반의 유효 열전도도

흙 입자 열전도도 k_s (W/mK)	등가 열전도도 k_{eq} (W/mK)	유효 열전도도 k_{eff} (W/mK)	비고
2.4	2.35	2.63	+12%
2.8	2.73	3.18	+16%
3.2	3.12	3.72	+19%
3.6	3.51	4.49	+28%

시, 지반을 다공질체로 모사하였기 때문에 심정내 대류에 의한 열교환과 다공질 지반을 통해 지하수 흐름에 의한 열교환이 추가로 고려되어 10% 정도 증가된 유효 열전도도가 산정된 것으로 사료된다. 이러한 경향은 Deng(2002)이 스탠딩컬럼웰의 현장 열응답 시험결과가 지반의 자체의 열전도도보다 크게 산정된다고 밝힌 바 있고 이를 스탠딩컬럼웰에서 강화(증가) 열전도도 개념(Enhanced Thermal Conductivity)으로 설명하였다. 강화(증가) 열전도도란 스탠딩컬럼웰 내부의 대류(convection)와 지하수의 이류(advection) 효과로 인해 무한 선형 열원법으로 산정한 지반의 유효 열전도도가 실제 지반의 열전도도보다 크게 산정된다는 의미이다. 실제로 국내에서 한국내동공조인증센터가 수행한 전주와 세종시의 스탠딩컬럼웰 현장 시험결과를 살펴보면, 동일한 지역에서 수행한 현장 열응답 시험결과가 수직 밀폐형 지중열교환기의 경우보다 스탠딩컬럼웰에서 약 25% 이상 크게 나타났다.

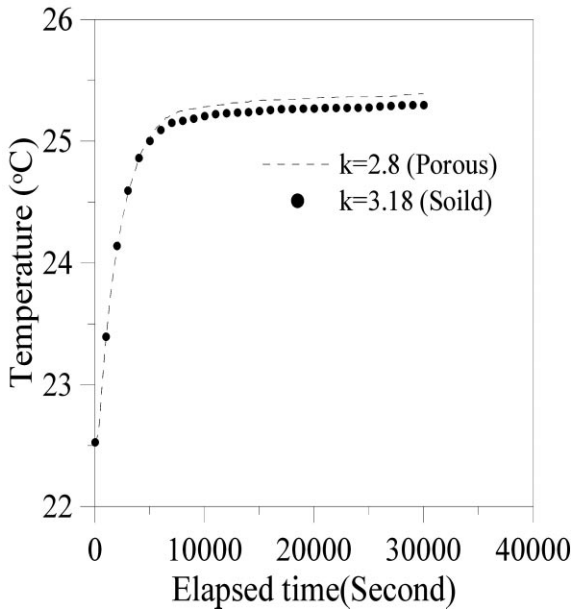
4. 냉방순환 모사를 통한 현장 열응답 시험 결과 검증

앞서 수행한 수치해석 결과와 기존 문헌에서 보고한 바와 같이, 스탠딩컬럼웰 시스템 또는 개방형 시스템에서 현장 열응답시험을 수행할 경우, 심정내 대류와 지반의 수리적 영향으로 인해 지반의 열전도도보다 상승된 유효 열전도도를 획득하게 된다. 현행 스탠딩컬럼웰 설계에서는 현장 열응답 시험결과를 이용하여 지반의 열물성을 적

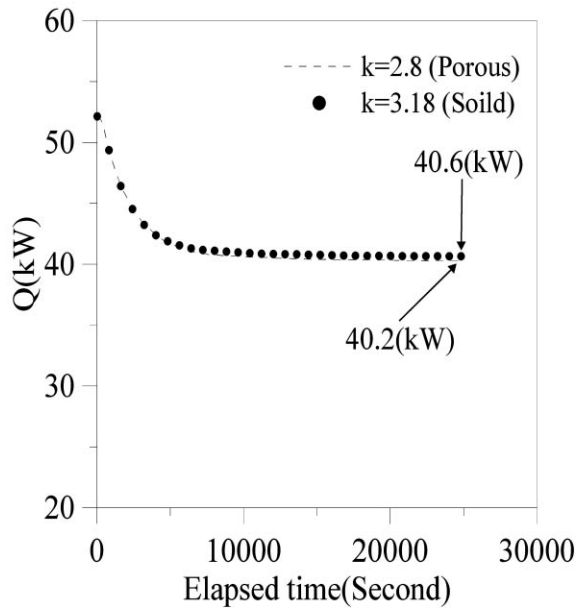
용하게 되며 지반을 비다공질체(solid)로 가정한다. 이 절에서는 실제 지반의 다공성을 고려하여 수리전도도 영향을 해석에 포함시키는 경우와 현장 열응답 시험결과로부터 산정한 지반의 유효 열전도도를 일반적으로 스탠딩컬럼웰의 설계에서 가정하는 비다공질체의 열전도도로 적용한 경우를 비교하여 현행 설계법의 적용성을 검토하였다. 즉, 지반을 실제 다공질체로 가정한 경우 흙 입자의 열전도도(k_s)를 2.8 W/mK와 수리 전도도(9.03×10^{-8} m/s)를 적용하고, 지반을 비다공질체로 가정한 경우는 흙의 열전도도(k_s)가 2.8 W/mK일 때 현장 열응답 시험결과에서 산정된 지반의 유효 열전도도인 3.18 W/mK을 비다공질 지반의 열전도도로 적용하였다.

냉방순환 수치모사에서는 스탠딩컬럼웰 경계조건으로 히트펌프로부터 심정으로 주입(유출)되는 유출수 온도(35℃)와 질량유속(1 kg/s)을 적용하였다. 두 지반 조건에 대해 유출되는 온도와 유입되는 온도차를 이용하여 스탠딩컬럼웰을 통해 열교환률을 산출하여 비교하였다(열교환률 = 유체의 비열 × 질량유속 × 온도차). 해석에 사용된 스탠딩컬럼웰 모델은 앞 절에서 적용한 모델과 동일하며 지반을 실제 조건인 다공질체(porous)로 해석한 결과와 현재 설계법에서 적용하는 비다공질체(solid) 지반으로 가정하여 해석한 경우에 대해 심정으로부터 유입되는 유입수 온도와 열교환량을 그림 4에 비교하였다.

실제 지반의 간극률과 수리전도도를 고려하여 다공질체로 모사한 해석결과와 현행 설계법에서 제안하는 현장 열응답 시험결과에서 얻어진 유효



(a) 시간에 따른 유입수 온도 변화



(b) 시간에 따른 열교환률

[그림 4] 지반을 비다공질체와 다공질체로 가정한 해석결과 비교

열전도도를 비다공질체로 가정한 지반의 열전도도로 적용한 해석결과가 상당히 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, 스탠딩컬럼웰에 대한 현장 열응답 시험결과로부터 얻어진 유효 열전도도를 비다공질체 지반으로 가정하여 설계하는 현행 설계법은 충분히 적용성이 있다. 다만, 지반의 수리전도도가 일반적인 암반의 경우보다 큰 경우 ($>10^{-5}$ m/s)는 앞에서 수행한 수치해석을 통한 검증 후 현장 열응답 시험결과에 대한 적용성을 확인할 필요가 있을 것으로 사료된다.

5. 맺음말

본 기사에서 수치해석 프로그램 (FLUENT)를 적용하여 충남 인근 현장에 시공된 스탠딩컬럼웰의 현장 열응답 시험결과를 역해석하여 지중 열전도도를 추정하고, 지반을 실제 조건인 다공질체로 해석한 경우와 설계의 편의를 위해 비다공질체로 가정한 경우의 해석결과를 비교하여 현행

지중 열전도도 산정법에 대한 적용성을 검토하였다. 지반을 다공질체로 모사한 해석결과와 현장 열응답 시험결과에서 얻어진 유효 열전도도를 비다공질체로 가정한 지반의 열전도도로 적용한 해석결과가 상당히 유사한 경향을 보였다. 따라서 스탠딩컬럼웰에 대한 현장 열응답 시험결과로부터 얻어진 유효 열전도도를 비다공질체 지반으로 가정하여 설계하는 현행 설계법은 충분히 적용성이 있다고 사료된다.

6. 참고문헌

1. 박두희, 2010, 단일심정 지열히트펌프의 수치적 모델링 Part I: 수치해석 모델 검증 (한국지반공학회지), 제26권, 제2호, pp. 33~43
2. 박두희, 2010, 단일심정 지열히트펌프의 수치적 모델링 Part II: 단일심정 지열히트펌프의 성능평가를 위한 매개변수 연구 (한국지반공학회지), 제26권, 제2호, pp. 45~54.

3. Chen, C., 1999, Numerical simulation of pumping tests in multiplayer wells with non-darcian flow in the well bore, Groundwater, Vol.37, No.3, pp.465-474.
4. Deng, Z., 2004, Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems, Ph.D. Thesis, Oklahoma State University.
5. ANSYS FLUENT, 2012, ANSYS manual Ver. 13.0, ANSYS, Inc. Products.
6. Gehlin, S., 2002, Thermal response test-method development and evaluation, Doctoral Thesis 2002:39. Lulea University of Technology, Sweden. 