

지중 열교환기 전열성능 향상을 위한 그라우트 및 그라우팅 기법

조 정 식
한국건설기술연구원

일반원고

1. 서언

지열원 열펌프는 열원 및 히트싱크로 토양, 지하수, 지표수 등을 이용하는 모든 시스템을 대표하는 용어로서, 지열원 열펌프(GSHPs)와 동일한 의미를 갖는 GHPs(Geothermal Heat Pumps)와 GS시스템(Geo-exchange Systems) 등이 있다. 지열원 열펌프는 지중 열교환기와 열펌프, 부동액 순환펌프 그리고 일련의 배관 및 실내 측 분배장치(heat distribution system)로 구성된 시스템이다.

일반적으로 토양 이용 열펌프를 부동액과 냉매간의 열교환 방식에 따라 간접식과 직접식으로 구분할 수 있다. 간접식은 부동액과 냉매가 실내에 설치된 열펌프의 열교환기(증발기 또는 응축기)에서 열교환을 하는 방식이다. 현재 지열원 열펌프 시스템의 주류를 이루고 있는 방식이다. 반면 직접식은 부동액을 사용하지 않고 냉매와 토양이 직접 열교환 하는 방식이다. 이 방식은 지열원 열펌프가 활성화 단계에 접어든 외국에서도 개발 단계에 있는 시스템이다. 간접식 토양 이용 열펌프는 다시 지중 열교환기의 형상에 따라 수직형(vertical type)과 수평형(horizontal type)으로 구분된다.

지중 열교환기로 사용되는 U자 관을 보어홀(시추공)에 삽입한 다음 파이프와 보어홀 사이의 빈공간을 그라우트(뒤채움재)로 다시 채운다. 그라우트는 지중 열교환기 파이프와 보어홀 주변의 토양 또는 암석 등과 열전달을 촉진하고 표층수가 시추공 내로 유입되는 것을 방지하며

보어홀 주변의 수맥에서 보어홀 내로의 지하수 흐름을 방지하는 중요한 역할을 한다. 현재 투과성(permeability)이 낮은 시멘트 그라우트나 벤토나이트 그라우트 등이 주로 사용되고 있다.

그라우트는 파이프 삽입 후 지중 열교환기와 지중의 빈 공간을 되메우는 작업으로서 지중 열교환기 파이프와 시추공 주변의 토양 또는 암석 등과 열전달을 촉진하고 표층수가 시추공 내로 유입되는 것을 방지하며 시추공 주변의 수맥에서 시추공 내로의 지하수 흐름을 방지하는 중요한 역할을 한다.

따라서, 지중 열교환기의 전열성능을 향상시키기 위한 그라우트와 그라우팅(뒤채움시공) 기법을 소개하고자 한다.

2. 그라우팅의 목적

그라우팅이란 적절한 열전도계수를 가지며 동시에 투수도가 작은 그라우트로 보어홀과 지중 열교환기 파이프 사이의 빈공간을 채우는 일련의 시공과정을 말한다. 즉, 그라우팅은 수직 폐쇄형 지중 열교환기를 설치할 때 보어홀과 지중 열교환기의 공간을 메우는 작업이다. 그라우트의 주된 목적은 토양/암석으로 구성된 보어홀 주변의 지중과 지중 열교환기 파이프 내를 순환하는 작동 유체사이에 열전달이 원활하게 일어나도록 하는데 있다. 만약 그라우트로 보어홀 내를 완전히 채우지 않거나 열전도계수가 작은 재료로 보어홀 내를 채우게 되면 지중 열교환기의 열전달 능력은 감소하게 되며 이는 전체 지열원 열펌프 시스

템의 성능감소로 이어진다.

그라우팅은 크게 두 가지 이유로 인해 수행한다.

1) 환경적 영향

- 열교환기의 누수에 의한 지하수 오염 방지
- 농작물 보호 및 우물 등의 수질 보호
- 열교환기를 따라 지하수가 지표로 누수됨을 방지
- 열교환기를 따라 지표 오염물질이 지하로 침투됨을 방지

2) 열전달 문제

- 지중의 토양/암반과 열교환기의 원활한 열전달
- 장기적인 보어홀 내부의 자립 유지
- 열교환기와 보어홀간의 이격 방지를 위해 건조수축이 없는 그라우트 사용

3. 그라우트 재료

3.1 그라우트 재료의 구비조건

1) 지중 열교환기 순환유체와 지중사이의 원활한 열전달 측면에서 그라우트 성질

- ① 보어홀 벽면과 지중 열교환기 순환 유체 간에 열전달이 원활하게 일어날 수 있도록 열전도 계수가 큰 것 이어야 한다.
- ② 보어홀 내에 주입된 그라우트가 응고되는 과정에서 미세공극, 작은 기포들이 형성되지 않도록 재료의 수축이 없어야 한다.
- ③ 보어홀 안으로 그라우트를 원활하게 주입할 수 있도록 적절한 점도를 유지하여야 한다.

2) 지중 환경 및 지하수 오염방지의 환경영향 관점의 측면에서 그라우트 성질

- ① 지표 또는 지표면 바로 아랫부분의 토양 등에 존재할 수 있는 오염물질, 오염된 물 등이 지중 열교환기 파이프를 따라 지하로 침투하여 상수원을 오염시킴을 방지하여야 한다.

② 지하 대수층의 지하수가 유동하여 각각의 대수층 지하수 고유성분이 변하는 것을 방지하여야 한다.

③ 지중 열교환기를 따라 지하수가 지상으로 방출되는 것을 방지하여야 한다.

3) 지중 환경 및 지하수 보전의 측면에서 그라우트 재료의 구비조건

- ① 수직 보어홀이 관통하는 여러 대수층에 존재하는 지하수의 상호 유동을 방지 할 수 있는 투수구가 작아야 한다.
- ② 그라우트를 보어홀 내로 주입하는 동안에는 충분한 낮은 점도를 유지하여 지중 열교환기와 보어홀 내의 빈 공간을 미세 기포의 발생 없이 완전히 채울 수 있어야 한다.
- ③ 그라우트의 주입이 완료된 후에는 높은 점도를 유지하여 응고되는 과정에서 수축이 발생하지 않아 미세 기포가 형성되지 않아야 한다.

3.2 그라우트의 재료

지열원 열펌프의 설치 시 지중 열교환기의 설치가 시공부분에서 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 최적의 지중 열교환기는 최적의 그라우팅 재료를 선정하고 이를 이용하여 지중 열교환기를 시공하는 것으로부터 시작된다. 최적의 그라우팅 재료의 선정은 보어홀 직경, 보어홀이 관통하고 있는 지층의 구조, 지하수의 위치 그리고 자유면 대수층 상단부 토양의 수분 함유량 등에 영향을 받는다.

그라우팅 재료로 벤토나이트 및 벤토나이트 첨가제 혼합물, 시멘트 및 시멘트 첨가제 혼합물, 콘크리트, 모래, 점토, 모래 혼합물 등 여러 가지를 사용할 수 있지만 현재 투과성(Permeability)이 낮은 시멘트 그라우트나 벤토나이트 그라우트 등이 주로 사용되고 있다.

시멘트 계열 그라우트는 시간이 지나면 자신이 가지고 있던 좋은 물리적 성질과 열교환기 파이프 재료인 플라스틱에 대한 접착력이 감소함으로써

<표 1> 그라우트의 열전도도(K)

Grouts without additives	K Btu/h · ft · °F (W/m · K)	Thermally enhanced grouts	K Btu/h · ft · °F (W/m · K)
20% Bentonite	0.42 (0.73)	20% Bentonite – 40% Quartzite	0.85 (1.47)
30% Bentonite	0.43 (0.74)	30% Bentonite – 30% Quartzite	0.70~0.75 (1.21~1.30)
Cement mortar	0.40~0.45 (0.69~0.78)	30% Bentonite – 30% Iron ore	0.45 (0.78)
Concrete at 130 lb/ft ³	0.60 (1.03)	60% Quartzite – Flowable fill (Cement+fly ash+sand)	1.07 (1.85)
Concrete at 150 lb/ft ³	0.80 (1.38)		
Concrete (50% quartz sand)	1.1~1.7 (1.90~2.94)		

<표 2> 지질 분류별 투수도

분 류	투 수 도
사 력 층	10 ⁻² ~ 10 ²
깨끗한 모래층	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻²
미세 모래층	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻¹
빙하 점토층	10 ⁻¹⁰ ~ 10 ⁻⁷
해저 점토층	10 ⁻¹¹ ~ 10 ⁻⁸
혈 암 층	10 ⁻¹² ~ 10 ⁻⁸
화 성 암 층	10 ⁻⁸ ~ 10 ⁻⁴
사 암 층	10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁴
석 회 암 층	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻⁷
침식 석회암층	10 ⁻⁴ ~ 1

그라우트의 접착력이 감소하여 그라우트와 파이프의 접촉면에 미세한 틈새가 형성되고 이는 결국 그라우트의 투수도를 증가시켜 지중 열교환기의 열전달 능력을 감소하게 하는 단점이 있어 벤토나이트 계열의 그라우트를 많이 사용한다. 하지만 벤토나이트 계열의 그라우트의 경우에도 사용하기에 조건이 일치하지 않는 경우도 있으므로 이러한 경우는 강성이 우수한 시멘트 계열의 그라우트를 사용한다. 이렇듯 그 조건에 따라 그라우트의 선택이 열교환기의 성능을 좌우하므로 신중히 검토

후 그라우트의 종류를 선택하여야 한다.

그라우트가 보어홀 주위의 지층성분보다 투수도가 크면, 지하수가 보어홀 내로 침투할 수 있으며 또 보어홀 내로 유입된 오염물질이 지중으로 침투할 수 있다. 투수도는 물이 고체물질의 단면을 통해 단위시간 당 유동하는 거리를 나타낸 것이다.

다음의 표에서 보면 그라우트의 열전도도 및 다양한 종류의 지질이 갖는 투수도는 입자와 입자 사이의 공극이 작을수록 투수도가 작은 것을 알 수 있다.

1) 벤토나이트 첨가제 혼합 그라우트

순수 벤토나이트 슬러리에 열전도계수를 향상시키기 위한 목적으로 모래나 규사 등과 같은 첨가제를 사용한다. 전체적으로 첨가제의 비율이 증가하면 벤토나이트 그라우트의 열전도 계수는 증가한다. 그중 규사와 실리카샌드를 첨가 하였을 때 열전도계수의 증가율이 크게 나타난다. 하지만 증가량이 크게 증가 하는 단점이 있다.

2) 시멘트 계열 그라우트

시멘트는 주로 포틀랜드 시멘트로 석회질 원료와

점토질 원료를 적당한 비율로 혼합한 상태에서 작게 분쇄 한 후 그 일부가 용융될 때까지 소성하여 얻어진 클링커에 응결 조절제로 약간의 석고를 첨가하여 만들어진다. 시멘트의 주성분은 석회·규사·알루미나·산화철 등이다. 이 시멘트를 산화철로 정선하여 이들 성분이 적은 것을 사용한다.

3) 순수 시멘트 그라우트

시멘트 그라우트는 시멘트와 물을 혼합물에 부

수적인 재료나 첨가제를 혼합한 것을 말하며 순수 시멘트 그라우트는 수화 시멘트와 물의 혼합으로 이루어진다. 이는 압력이 심한 곳이나 유동의 변동이 심한 곳, 파쇄암 지대 등에 벤토나이트보다 많이 사용된다. 이는 대수층의 유속이 심한 경우는 벤토나이트 그라우트는 씻겨나갈 우려가 있으나 시멘트 그라우트의 경우는 우수한 저항성이 있어 이를 방지할 수 있다. 또 불포화 토양 지역에서도 균열 및 이에 따른 열전달 성능 저하가 발생하는 벤토나이트 그라우트보다 시멘트 그라

<표 3> 벤토나이트 그라우트의 물리적 성질

종류	고체 벤토나이트 함량 (%)	물 gal (liter)	평균량 gal (liter)	그라우트중량 lb/gal (kg/liter)	열전도계수 Btu/h·ft·°F (W/m·K)	투수도 cm/sec
Aquaguard	30.0	14.0 (53.0)	16.8 (63.6)	9.92 (1.19)	0.43 (0.74)	1 × 10 ⁻⁶
Aquagrout	22.7	20.0 (75.7)	23.2 (87.8)	9.50 (1.14)	0.43 (0.74)	8 × 10 ⁻⁶
Benseal/EZ Mud	15.3	33.0 (124.9)	36.6 (138.5)	8.94 (1.07)	0.38 (0.66)	6 × 10 ⁻⁶
BH Grout	30.0	14.0 (53.0)	16.8 (63.6)	9.93 (1.19)	0.45 (0.78)	3 × 10 ⁻⁶
Enviroplug	30.0	14.0 (53.0)	16.9 (63.9)	9.86 (1.18)	0.44 (0.76)	1 × 10 ⁻⁶
Groutwell	18.0	27.0 (102.2)	30.7 (116.2)	9.05 (1.08)	0.41 (0.71)	1 × 10 ⁻⁷
Puregold	30.0	14.0 (53.0)	16.9 (63.9)	9.87 (1.18)	0.44 (0.76)	2 × 10 ⁻⁶
Guick Grout	20.0	23.0 (87.1)	27.0 (102.2)	9.25 (1.11)	0.41 (0.71)	3 × 10 ⁻⁷
Volcay Grout	20.0	23.0 (87.1)	27.5 (104.1)	9.08 (10.9)	0.43 (0.74)	1 × 10 ⁻⁷

<표 4> 벤토나이트 및 시멘트 계열 그라우트의 특징

종류	장점	단점
시멘트계	<ul style="list-style-type: none"> • 즉시 이용이 가능하고 적당한 투과성을 가지고 있음 • 혼합과 이송이 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> • 수화열에 의한 튜브 손상 가능 • 튜브에 밀착되지 않을 수 있음 • 양생 시간 필요 • 밀도가 높으며 수축 가능성이 있음
벤토나이트계	<ul style="list-style-type: none"> • 수화작용에 의한 열발생이 없음 • 공정시간이 짧음 • 적당한 투과성, 낮은 밀도 	<ul style="list-style-type: none"> • 혼합이나 이송이 어려움 • 연분이나 유기산에 영향 받음 • 지층 수분이 적을 경우에 수축이나 균열발생이 일어날 수 있음

<표 5> 각종 그라우트의 투수도

그라우트	투수도
순수 시멘트(시멘트+물 혼합물) 6gal/포	10^{-7}
순수 시멘트(시멘트+물 혼합물) 10gal/포	10^{-5}
벤토나이트/물 (6% 벤토나이트)	10^{-8}
벤토나이트/물 (20% 벤토나이트)	10^{-8}
환성 벤토나이트	10^{-8}
입상 벤토나이트	10^{-7}
입상 벤토나이트/플리머(15% 벤토나이트)	10^{-8}
코어스 벤토나이트	10^{-8}

우트의 사용이 많다. 하지만 시멘트 그라우트의 경우에는 아래와 같은 단점을 생각하여야 한다.

- ① 수화 시멘트를 이용한 순수 시멘트 그라우트의 강성이 벤토나이트계열의 강성보다 크기 때문에 지중 열교환기와 그라우트 사이에 열전달이 원활하게 이루어 질수 없다.
- ② 수화 시멘트의 경우에는 물과 반응하면서 열이 발생(수화열)하는데 이 열로 인해 지중의 물성치를 바꿀 수 있다. 그리고 지중 열교환기 파이프 표면과 열원 시스템에 손상을 일으킬 수 있다.

4) 시멘트 첨가제 혼합 그라우트

순수 시멘트 그라우트의 산출량을 증가시키고 밀도를 감소시킬 목적으로 벤토나이트나 모래 등을 순수 시멘트 그라우트의 첨가제로 사용하고 있다. 하지만 시멘트 그라우트 슬러리의 점도를 낮추기 위해 물을 과다하게 사용하면 접착력이 감소한다. 이와 같이 시멘트 그라우트 슬러리의 단점을 극복하기 위해 벤토나이트를 첨가제로 사용하고 있다.

4. 그라우트 시공기법

일반적으로 그라우트 시공순서는 그라우팅 전 작업(그라우트 펌프 선정, 그라우트 혼합방법 선정, 소요 그라우트 계산), 현장 그라우팅 시공(그

라우트 주입 파이프 삽입, 그라우트 슬러리 혼합, 그라우트 슬러리 주입, 그라우트 주입 파이프 제거), 그라우팅 후 작업(장비 세척, 현장 정리, 보고서 작성)으로 크게 세부분으로 나눌 수 있다. 전체적으로 보면 펌프와 그라우트 주입파이프를 이용하여 그라우트 슬러리를 보어홀 내로 주입하는 것이다.

주입 파이프를 보어홀의 하단까지 주입시킨 후 그라우트 슬러리가 채워질 수 있도록 지속해서 채워야 한다. 그러므로 보어홀의 직경은 지중 열교환기 파이프가 그라우트 주입파이프가 모두 삽입될 정도의 충분히 커야 한다. 주입되고 있는 경우에 그라우팅이 완료될 때까지 그라우트 주입 파이프가 보어홀 내에 삽입된 상태를 유지하여야 한다.

4.1 그라우트 펌프

그라우트 주입 파이프와 그라우트 펌프를 이용하여 그라우트 슬러리를 보어홀 내로 주입할 때 그라우트 슬러리는 보어홀의 하단부터 지속적으로 채워져야 한다. 보어홀 시추 후에는 그 보어홀의 내부에서 각종 이물질들이 나오게 된다. 이는 물질들의 비중이 그라우트 슬러리보다 상대적으로 작기 때문에 일어나는 현상이다. 그러므로 보어홀 최하단부터 그라우트 슬러리를 주입함으로써 지상으로 방출할 수 있는 것이다. 그라우트 펌프는 그라우트 슬러리를 유동시키는 과정에서 발생하는 마찰손실을 극복할 수 있을 정도 이상의 가압능력을 가지고 있어야 한다. 여기서 마찰손실은 그라우트 슬러리가 그라우트 주입 파이프 안을 유동하는 동안 발생하는 것이며 보어홀 내로 주입된 그라우트 슬러리가 보어홀의 빈 공간에서 상향으로 유동하는 과정에서도 발생한다. 그라우트 펌프의 구조 및 이송방법에 따라 용적식 펌프와 비용적식 펌프로 구분된다.

1) 용적식 펌프

유체를 이송시키기 위해 용적식 펌프는 유체가

완전히 간혀 있는 체적의 크기를 감소시킴으로써 유체에 압력을 가한다. 원심펌프와 같은 비용적식 펌프와는 달리 비교적 낮은 속도에서 고압이 발생하는데 그 이유는 펌핑 효과가 유체의 동적저동 대신에 체적변화에 따르기 때문이다. 이러한 용적식 펌프의 용량은 펌프 안에 유체가 갇히는 체적으로 표현되며 일반적으로 리터 또는 갤런과 같은 체적단위를 사용한다. 용적식 펌프의 경우, 누수가 없다고 가정하면 펌프 출구에서 유체 토출압력에 상관없이 일정 체적유량으로 유체를 이송시킬 수 있다. 즉 용적식 펌프는 낮은 속도에서 고압으로 일정유량의 유체를 이송시킬 수 있기 때문에 그라우트 슬러리와 같이 점성이 있는 유체를 이송시키는 데 적합한 펌프이며 유체에 압력을 가하는 방법으로 펌프 내의 체적변화를 채택하기 때문에 그라우트 슬러리의 전단변형이나 요동을 최소화시킬 수 있다.

2) 비용적식 펌프

비용적식 펌프의 대표적인 예로 원심펌프를 들 수 있다. 용적식 펌프와는 달리 원심펌프는 임펠러 또는 로터가 회전함에 따라 발생하는 원심력을 유체에 전달함으로써 유체를 이송시킨다. 이러한 원심펌프는 구동모터가 일정속도로 회전하더라도 일정한 유량으로 유체를 토출시킬 수 없다. 반면, 펌프 출구의 토출압력 조건에 따라 유체의 토출 유량을 변화시킬 수 있는 장점이 있지만 비용적식 펌프를 이용하여 그라우트 슬러리를 보어홀내로 이송시키는 것은 효율적이지 않다.

4.2 그라우팅 시 유의점

1) 건조상태에서 벤토나이트 그라우팅

지하수의 저하가 발생할 우려가 있거나 지속적으로 지하수위가 낮은 곳은 벤토나이트 그라우팅을 시공해서는 안된다. 건조 시 심하게 수축하는 벤토나이트 특성 때문에 수축으로 발생한 미세 틈새로 인해 지중 열교환기의 열이 지중으로 열

이 전달되지 않기 때문이다. 이 경우에는 모래를 첨가하여 모래의 부피로 인해 벤토나이트의 수축률이 줄어들기 때문에 모래를 첨가하여 사용하여야 한다.

2) 염분이 많은 곳의 벤토나이트 그라우팅

일반적으로 수돗물의 경우에는 별 문제가 발생하지 않으나 해수나 하천 등과 같은 염분이 있는 물의 경우에는 벤토나이트 입자의 응집현상이 일어나 방수기능을 하지 못하고 암반균열 등을 통해 씻겨 나가 시추공 내부에 영향을 주므로 그라우팅 작업 전에 시험을 통하여 내염성 재료를 사용하는 조치가 필요하다.

3) 시멘트 그라우트의 건조수축 및 열 팽창성

시멘트 그라우트의 건조 수축은 균열로 이어지며 이로 인해 방수현상이 저하된다. 이런 이유로 건조수축을 줄일 수 있는 저감제를 사용하여야 한다. 또 HDPE 파이프와 시멘트의 열팽창성의 차이로 인한 재료의 분리도 고려되어야 한다. 이는 HDPE 파이프는 열 팽창성이 시멘트의 경우보다 14배 정도의 팽창성을 가지고 있으므로 이를 고려해 주어야 한다.

5. 결 언

중대형의 상업 및 공공용 건물에 지열원 열펌프를 적용할 경우 열펌프의 용량이 증가함에 따라 지중 열교환기의 보어홀 깊이 및 수량이 증가한다. 이 경우에 전체 시스템의 초기 설치비 중 천공(drilling or boring) 및 지중 열교환기 설치가 차지하는 비중이 가장 크다. 특히, 시스템 설치 장소의 정확한 토양 물성치와 그라우트의 열물성에 대한 자료 없이 지중 열교환기를 설계할 경우 건물의 필요 냉난방 부하에 대해 과다하게 설계될 수 있으며 이는 시스템의 초기 시공비용 증가를 초래하게 된다.

실제 지중 열교환기 설계가 어려운 점은 지중 열

교환기가 설치되는 지역의 지표면 근처에서 지하 수십 미터까지의 토양에 대한 열물성을 알고 있어도 토양의 연중 수분함량 변화라든지 지표수 또는 지하수의 보어홀 내로의 유입으로 인한 지중 열교환기 열성능 변화에 대한 예측이 곤란하다는 것이다.

따라서, 이와 같은 오차 및 불확실성을 극복하기 위한 방법이 열전도계수 및 투과성 등이 향상된 그라우트를 개발하는 것이며 동시에 최적의 그라우트에 대해 현장 열물성 시험을 수행하는 것이다. 지열원 열펌프시스템은 지중 열교환기를 포함한 지열 열교환 부분의 적정 설계/시공 여부에 따라 전체 시스템의 성능은 물론 초기 설치비가 결정된다. 경제적이면서 효율이 우수한 시스템을 구축하기 위해서는 지중 열교환기의 최적 매설깊이, 길이, 관경, 유량 등의 산출을 위한 시스템 최적 설계 기법은 물론 토양분석, 지중 열교환기 매설 기술 및 그라우팅 (grouting) 기술 등에 대한 연구개발이 반드시 선행되어야 한다.

참고문헌

1. Den Braven, K. R., 2000, "Regulations on grouting for closed-loop ground-coupled heat pumps in the united states," ASHRAE Trans., Vol. 106, pp. 447~452.
2. Lund, J. W. and Freeston, D. H., 2001, "World-wide direct use of geothermal energy 2000," Geothermics, Vol. 30, pp. 29~68.
3. ORNL/DOE, 2001, Assessment of Hybrid Geothermal Heat Pump Systems: Geothermal heat pumps offer attractive choice for space conditioning and water heating
4. Rybach, L. and B. Sanner., 2000, "Ground-Source Heat Pump Systems the European Experience," Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Vol. 21, No. 1, Klamath Falls, Oregon.
5. Zhang, Q. and Murphy, W. E., 2000, "Measurement of thermal conductivity for three borehole fill materials used for GSHP," ASHRAE Trans., Vol. 106, pp. 434~441.
6. 안형준, 백성권, 신현준, 조정식, 2003, "지열 교환기의 열교환성능에 관한 연구," 대한설비 공학회 2003 동계학술발표대회 논문집, pp. 176~181.