

터키 지열시추 현장 답사기

전 종 욱

(주)이노지오테크놀로지 시스템개발부/고려대학교 건축과 겸임교수

1. 서문

내가 터키의 지열발전소를 방문할 수 있었던 계기는 2010년 발리에서 개최되었던 WGC2010에 서부터 시작된다. 나는 발표대회가 시작되기 전에 Pre-study 코스를 신청하여 수업을 들었고 그때 나는 옆에 앉아서 같이 수업을 들었던 Turgay라는 터키친구를 사귀게 되었다. 한국에 돌아온 후에도 그와 연락을 취하던 중 그가 Aytemiz 그룹 부사장이라는 사실과 터키 내에서 지열발전소를 건설하기 위해 시추가 시작되었다는 것을 알게 되었고, 그는 나를 터키의 시추현장으로 초대해 주었다. 지열발전의 열정을 가지고 달려왔던 내가 터키의 시추현장에서 알게 된 내용을 여러 사람들과 공유하기 위해 본 글을 작성한다.

2. 시추장비, 머드엔지니어링, 시멘테이션

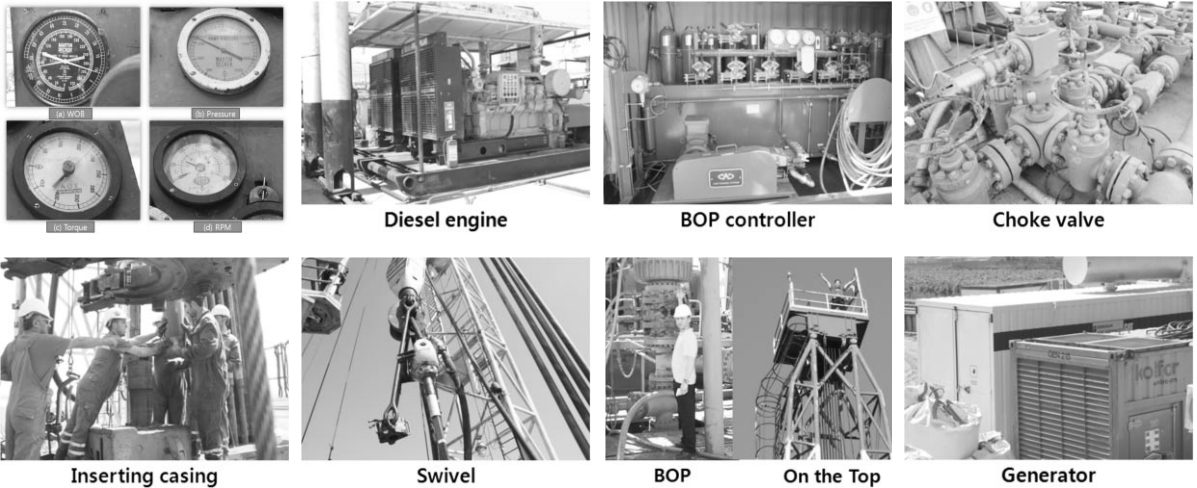
2.1 시추장비

현장에서 보고 들은 시추관련 이야기들을 서술할 것이다. 지열발전의 성공여부는 시추에 있다고 해도 과언이 아니다. Aytemiz는 지열개발권을 정부로부터 받은 후 터키국제석유시추회사(Turkish Petroleum International Company LTD:

TPIC)에 시추계약을 맺었다. TPIC는 시추 Contractor로서 시추만 할 뿐이지 로깅, 케이싱 디자인, 시멘테이션, 머드엔지니어링 등은 Aytemiz에서 따로 서비스 회사를 선정하고 계약하여 진행되었다. 케이싱과 모든 시설이 완료된 후 현장에 남아있어야 하는 부품들은 Aytemiz (Company)가 부담하고 시추 후 가지고 가는 모든 장비는 TPIC(Contractor)가 책임지고 조달 부담한다.

현장에는 TPIC 직원과 Aytemiz 직원들이 공존한다. 회사(Company)에 속한 전문 직원으로 시추현장을 관리하고 전반적인 정보를 수집하여 상부에 보고하는 사람으로 Drilling supervisor, Geologist, Petroleum engineer 등이 있다. Drilling supervisor는 리그매니저(Rig manager)로 일했던 경험이 있는 자로 오랜 시추 경력을 가지고 있어 어떤 상황에서도 침착하게 적절한 조언을 해준다. Geologist는 심도 2 m 간격으로 시추된 암석을 씻어 말린 후 현미경으로 사진을 찍어 전문가들에게 보내어 현재 암석이 어떤 것인지 조언을 받고 지열정 깊이에 따른 암석구성의 그래프 및 다양한 로깅데이터를 작성한다. 또한 머드의 입출구 온도, 밀도, 점도 등을 확인한다.

시추회사(Contractor) 직원으로는 우선 시추현장을 총괄 관리하는 리그매니저(Rig manager)가



[그림 1] 시추장비

있다. 리그매니저는 시추현장에서 발생하는 기술적, 경제적 판단을 총괄할 뿐만 아니라 안전에 대한 것도 담당하고 있어서 현장에서는 가장 힘이 있는 위치이다. 그가 어떻게 결정 내리는가에 따라 가장 중요한 시추속도가 좌우된다.

다음으로 오랫동안 몸으로 현장을 익힌 톨부셔 (Tool pusher)가 있다. 현장에서 보통 나이가 많은 편에 속하고 리그매니저 부재 시 현장에서 발생하는 일에 대한 결정권이 있는 중요한 위치이다.

시추기를 직접 운전하는 드릴러(Driller)가 있고 이를 보조해주는 어시스턴트 드릴러(Assistant driller)가 있다. 드릴 파이프를 트리핑(Tripping) 할 때 시추기 몽키보드(Monkey board)에서 드릴 파이프를 잡아주는 데릭맨(Derrickman)이 있고 드릴파이프의 분해조립 및 소모품 교체 등 시추기에서 대부분의 일을 담당하는 Floor men들이 있다. 장비의 기계적 결함을 수리하거나 진단하는 일은 기계기술자(Mechanical engineer)의 몫이다.

안전을 주로 담당하는 HSE(Hearth, Safety and Environment) Manager는 방화관리, 작업 전 Safety meeting, 안전장비 (헬멧, 안전화 등)

점검, 버리지는 머드와 시추 압편이 주변으로 흡수되는지 여부를 늘 확인한다.

지열공을 시추하기 위해서는 잠시도 쉬지 않고 24시간 시추기가 가동되어야 하므로 실제 현장에서 일하는 사람들은 위에서 나열한 필요한 분야의 3배 정도가 필요하다. 현장의 엔지니어들은 30일간 쉬지 않고 일한 후에 13일 간의 휴가를 받아 고향에서 시간을 보내고 돌아온다.

현장의 주간 리그매니저인 Celal은 동시에 3개 사이트의 리그매니저를 총괄할 만큼 능력이 뛰어난 친구이다. 그는 이라크에서 47일 동안 3,390 m 시추를 성공적으로 해내고 현재의 시추현장으로 왔다. 그와 동급이나 야간을 담당하는 리그매니저는 Hakan이다. Celal은 Hakan의 선배로서 둘 다 수도 앙카라에 있는 이 분야에서 가장 좋은 대학(Middle East Technical University)을 나왔다.

Driller는 시추 중에 확인해야 할 여러 가지 게이지들이 있다. 다음의 게이지들을 확인 중 문제가 생겼다고 판단되면 바로 리그매니저를 부른다.

Mud Flow rate: 비트를 도와 시추속도(Rate of Penetration: ROP)를 향상시킬 수 있는 머드의 주입은 유량을 충분히 확보할 수 있어야 한다. 이

현장에서는 분당 약 480~500 갤론의 머드가 Mud pump에 의해 순환되고 있다.

Weight on Bit(WOB): BHA(Bottom Hall Assembly)의 직진성을 유지시키며, 비트의 마모, ROP 등을 위해 결정된다. 시추중인 지반의 상황을 고려하여 매일 WOB를 계산하여 비트에 가해지는 하중을 일정하게 유지한다. 드릴러는 리그 매니저가 지시한 WOB가 일정하게 유지될 수 있도록 시추해야 한다. 작은 바늘은 전체 하중을 나타내고 큰 바늘은 WOB를 알려준다. 현재 WOB는 11톤으로 유지되고 있었으며 부탁하여 직접 해보았다. 단순히 WOB는 맞출지 모르나 나머지 게이지들이 말해주는 정보를 종합적으로 판단할 수 없어서 내겐 완전히 단순작업에 불과했다.

Pressure : Bit에 가해지는 충격을 고려하고 머드펌프의 주입압력으로 조절된다. Kick 등의 문제발생을 확인할 수 있다.

Torque : 토크의 변화는 공벽이 중간에 Drilling string을 얼마나 잡고 있는지 알려주며 토크가 일정이상으로 커지면 String이 부러질 수 있으므로 주의해야 한다. 비트의 마모도 토크의 증가로 나타날 수 있다.

RPM : WOB와 RPM은 원하는 ROP를 확보하기 위해 적절히 균형이 맞아야 한다. 비트를 다이아몬드 비트로 사용하면 회전수를 크게 늘릴 수 있으나 필요이상으로 회전수를 늘리면 마모만 생기고 진동이 발생하며 ROP가 크게 떨어진다.

Depth Record : 전체 시추 깊이를 측정하며 한번 표시마다 1 m씩 들어간 것이다. 시간당 표시된 개수를 확인하여 ROP를 계산할 수 있다.

시추장비는 로터리 테이블 방식으로 들어 올리는 힘은 2000 HP, 최대 6500 m까지 시추가 가능한 장비이며 높이는 약 60 m 정도다. 호기심이 발동하여 시추기 꼭대기에도 올라가 봤는데 생각보다 바람이 많이 불었다. 사다리로 올라가는 것

은 체력적으로 쉬운 일이 아니었다.

BOP의 경우 Contractor가 가지고 오며 작동은 질소탱크의 압력으로 된다. 작동이 완료되면 질소압력은 Return pipe로 돌아와 탱크를 가압하고 이 압력은 BOP를 다시 열 때 사용된다고 한다. Blind RAM과 Pipe RAM이 같이 설치된 BOP의 측면으로는 Choke line과 Kill line이 연결되어 있다. Kill line은 이상고압의 Kick이 발생하였을 때 고밀도 머드로 공내의 압력상승을 조절해주는 역할을 한다.

우리나라와 달리 터키는 1984년에 Denizli-Kizildere에 최초의 지열발전소를 20.4 MW의 전력용량으로 건설하였고 현재는 약 14 MW로 운전 중이다. 터키 내에서는 총 6개의 지열발전소가 154.2 MW의 전력을 생산하고 있다. 최근 지열을 이용한 전력생산을 증가시키려는 정부의 노력으로 13개의 지열개발권이 발행되었고 Aytemiz와 유사한 지열개발권을 확보한 회사들이 앞다투어 지열발전소를 건설하기 위한 노력을 하고 있다. 많은 시추관련 전문기업들이 들어와 있어 초기건설비용을 크게 낮출 수 있는 상황이다. 본 현장에서는 시추하는데 하루에 \$16,500가 Rig 리스비를 포함하여 시추회사에 지급된다. 디젤엔진을 사용하여 운전되어야 하므로 디젤경유는 하루에 약 \$400씩 든다. 소모품으로 하루 평균 약 \$1000가 소요되어 하루에 지열공을 시추하기 위해 필요한 금액은 약 \$18,000 이다. 하루 약 2000만원 정도의 비용은 계약단계에서 몇 개의 공을 파느냐에 따라 달라지게 된다. 매일 소요되는 비용은 리그 매니저에 의해 확인되고 고용회사 측에 보고된다.

터키는 우리나라와 달리 고엔탈피의 증기를 찾기 위한 시추가 이루어진다. 높은 엔탈피의 증기를 확보하기 위해 지열 저류층을 찾는 것이 시추의 목적이다. 만족할 만한 저류층을 찾았다면 머드가 크게 유실 될 것이고 지열공은 약 50 m 정도 추가 시추된다. 지열정을 콘트롤하면서 지열저류층의 스팀을 생산하기 위해 지열정 내의 수력정압을 순차적으로 낮추어준다. 즉 지열정의 순환

수를 머드 대신에 물로 바꾸어 순환시키고 다시 공기로 순환시켜 원하는 증기를 생산하게 된다.

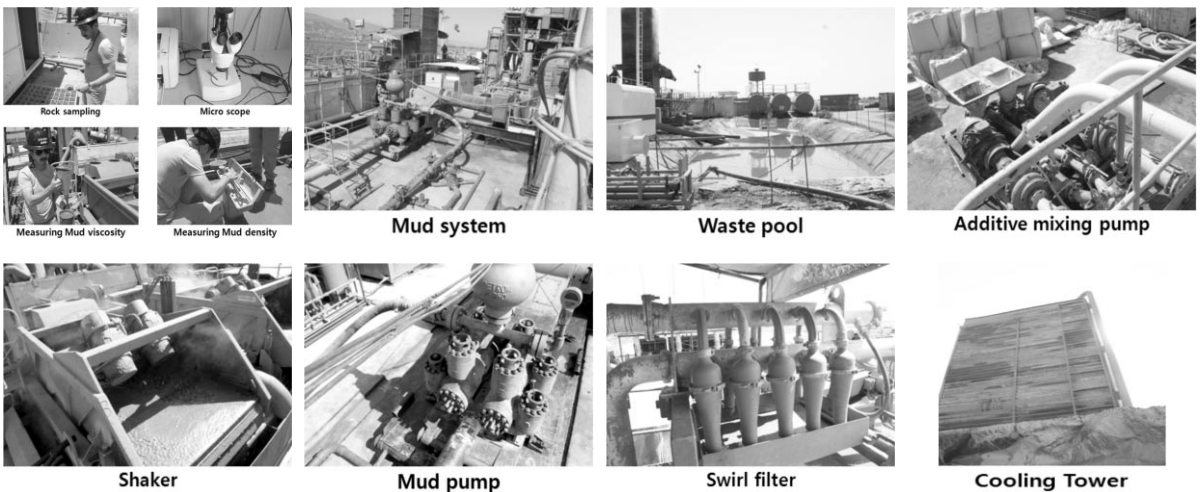
2.2 머드엔지니어링

현장은 MI SWACO라는 현지에선 유명한 회사가 머드엔지니어링을 담당하고 있는데 최근에 솔럼버저로 인수되었다고 한다. 전 세계의 지열발전관련 엔지니어링 회사들은 할리버튼과 솔럼버저 이 두 회사가 경쟁하듯이 사들이고 있다.

머드의 주요 혼합물 종류로는 Polymer 타입과 벤토나이트 계열이 있는데 벤토나이트 계열은 Reservoir를 오염시킬 수 있는 여지가 있어 Polymer타입인 Lignosulfonate를 사용하고 있다. 여러 가지 물성으로 혼합된 머드는 머드탱크에서 교반되어 펌프를 통해 드릴파이프로 이송된다. 파이프 내의 머드는 비트노즐로부터 분사되어 시추암반에 충격을 가하여 시추를 크게 돕는다. 또한 이미 시추된 공벽이 무너지지 않도록 공벽 안정을 유지하면서 비트에 의해 파쇄된 암석을 지열정 밖으로 끌어올려주는 기능도 있으므로 머드엔지니어링에서 적절한 점성과 밀도 및 화학적 안정의 유지는 필수요소이다.

머드의 재사용을 위해서는 이송된 분쇄 암편을 제거해 주어야 한다. 시추공저에서 분쇄된 암편은 일반적으로 가장 많이 사용되는 Shaker와 Swirl 두 가지 방식으로 제거되고 있었다. Shaker에서 상대적으로 큰 분쇄 암편들이 제거된 후 머드는 쿨링타워로 보내져 식혀진다. 지중에서 올라오는 머드의 온도는 약 섭씨 69도이고 이를 58도까지 냉각시킨다. 냉각된 머드는 Swirl 방식 암편 분류기에 들어가 분쇄 암편들이 제거된 후 머드탱크로 다시 유입된다. 한편 분류된 분쇄 암편들은 시추현장의 옆에 위치한 Waste Pool에 버려지게 되고 한 달에 한번씩 외부로 유출된다.

머드엔지니어는 외부계약자로서 매시간 머드를 샘플링하여 물리적 화학적 변화와 머드손실을 측정하고 기록하게 되어있다. 머드의 점도확인 시 일정한 체적의 V-funnel에 필터링된 머드를 채우고 유출구를 열어 단위시간 당 유출량을 측정하여 점성을 측정한다. 지상으로 올라오는 머드의 물성이 크게 변화하면 리그 매니저에게 바로 보고가 된다. 드릴러는 실시간으로 머드 유량과 압력을 확인하며 시추를 진행하는데 머드압력에 이상이 발생했을 경우 다음과 같은 순서로 시추현장을 확인해 본다



[그림 2] 머드엔지니어링

- (1) 우선 Mud condition을 살펴 점도 등에 변화가 생겼는지 머드 엔지니어에게 확인한다.
- (2) 이상이 없을 시 Mud pump의 이상을 살핀다.
- (3) Surface line에 이상이 있는지 확인한다.
- (4) Kelly에 이상이 있는지 확인한다.
- (5) Drilling string에 이상이 있는지 확인한다.

내가 현장에 있을 때도 머드압력의 이상이 발생했었고 그 원인은 Drilling string에 작은 구멍으로 확인되었다. 이런 일은 시추공정을 지연시키는 큰 변수가 된다. 시추 공정 중 시추기의 아래는 늘 머드로 더럽혀져 있어서 물청소를 자주 해 주는 편이었다. 현장의 시추심도가 약 2100 m인 시점에서 현재 분쇄된 암편들은 약 45 분 후에 머드를 타고 올라와 시추된 지반의 정보를 제공하게 될 것이다.

2.3 시멘테이션

지열정을 장심으로 시추하기 위해서는 비트의 크기를 단계별로 줄여서 시추해 들어가야 한다. 시추 후 공벽을 안정화시키기 위해서는 케이싱과 공벽 사이를 시멘테이션 해주는 것이 필수작업이다. 지열발전 현장에서 시멘테이션에 대해 들었던 정보를 공유해보려 한다.

지열정 시멘테이션을 위해서는 사이트 특성에 맞는 정확한 시멘테이션 혼합비를 결정하여야 한다. 혼합비를 알기 위해 우선 사용될 지열정 시멘트와 실리카, 그리고 현장에서 채취한 지열수를 시멘테이션 엔지니어링 전문업체로 보낸다. 전문업체는 실험실에서 첨가제로 들어갈 물질들의 다양한 배합비로 지열정 사이트에서 발생할 수 있는 고온 고압환경을 만들어 양성실험을 실시한다. 시멘트와 실리카, 지열수 등의 정보를 연구실로 보내면 거기서 배합에 대한 실험을 하고 응고지연제, 유출방지제, 화학적 보강제 등을 어떻게 섞어야 할지 결정해준다. 예를 들어 Friction

reducer의 량을 결정하기 위해 고온고압의 물 속에서 혼합된 시멘트의 시간에 따른 유동성을 측정한다. 시멘테이션 작업은 보통 4시간 안에 끝나야 한다. 그 후부터는 시멘테이션이 굳기 시작할 수 있다.

터키 지열발전현장에서 사용되고 있는 시멘테이션 첨가제와 각각의 주요기능은 다음과 같다.

CFR (Friction Reducer): Low viscosity를 확보하여 주입저항을 줄여서 압력강하를 줄여준다.

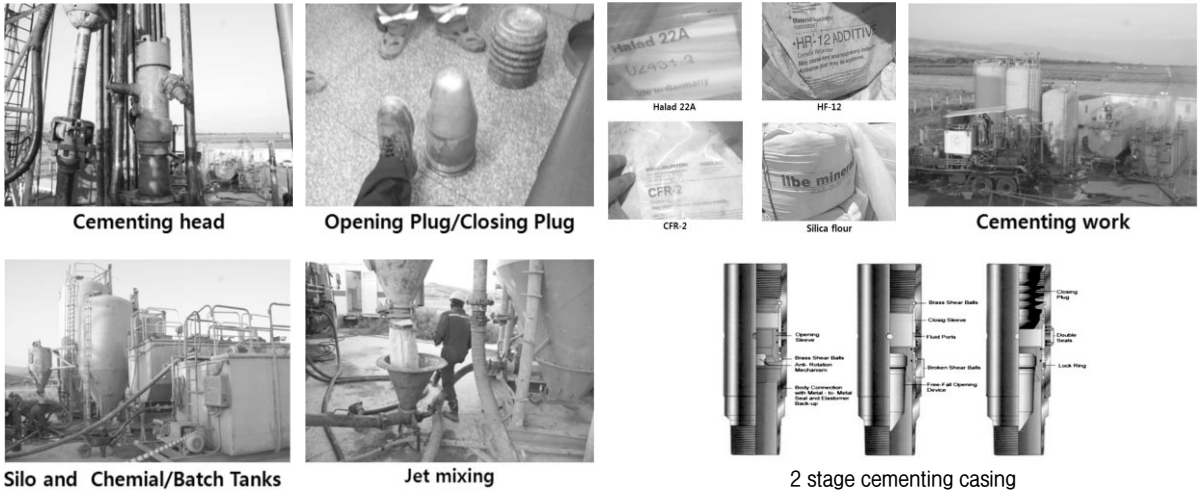
Hal-344 (Fluid loss방지): 물을 함유하면 젤리같은 상태를 유지하여 시멘트가 작은 Fracture로 지속적으로 유출되는 것을 방지해 준다.

HR (retarders): 주입과정 동안 시멘트가 굳는 것을 방지해준다.

Silica Flour: 고온지열정의 내구성을 확보해준다.

현장에서는 2단 시멘테이션이 진행 중이었다. 일반적이지 않은 지반을 만났을 경우(주로 사용할 파쇄대가 아닌 곳임에도 불구하고 지열수의 유-출입이 크게 발생하는 곳을 막아야 하는 경우 등) 지반에 따른 선택적인 시멘테이션이 필요할 때 2단 시멘테이션을 사용하기도 하고 시멘테이션을 해야 할 깊이가 충분히 깊어서 시멘테이션을 채웠을 때 시멘트의 수력정압이 지층의 파쇄압력보다 커질 것으로 예상될 때, 혹은 시멘테이션 작업 시 펌핑압력과 시간을 줄여야 할 경우 등에서 2단으로 시멘테이션 작업이 진행된다. 2단 시멘테이션은 케이싱과 지열공 사이의 환영공간을 시멘테이션 할 때 적절한 깊이에 단을 나누고 아래쪽 시멘테이션을 채운 후 위쪽 시멘테이션을 채우는 방법을 말한다.

- (1) 그림 3내의 2 stage cementing casing 그림에서 보이는 특수한 Collar (Divider:DV)를 단을 나눌 지열정 깊이에 위치시킨다. 이때 케이싱과 시추공 사이가 일정간격 떨어질 수 있도록 Centralizer를 설치하는데 깊이가 들어갈수록 자주(18 m 간격)설치하고



[그림 3] 시멘테이션

위로 올라오면 40m 간격으로 설치한다고 한다.

- (2) 일반적인 시멘테이션 작업으로 1차 시멘테이션을 마친 후 그림 3 내의 Opening/Closing Plug에서 작업화와 크기 비교가 된 Opening Plug를 케이싱 내로 떨어뜨린다. 추는 2 stage cementing casing에서의 중간그림 같이 내려온 후 펌프에 의해 가압되어 2차 시멘테이션이 가능하게 하는 Fluid Port를 열어준다. Opening Plug에 의해 케이싱 내의 아래쪽으로는 더 이상 어떤 유체도 흐를 수 없고 Fluid Port를 통해 환영공간으로의 통로가 확보된다.
- (3) 머드를 주입하여 Fluid Port에서 지표면까지 환영공간을 깨끗하게 정리한 후에 2단계 시멘테이션 작업이 진행되는 것이다.
- (4) Fluid Port를 통한 시멘테이션 작업이 지표까지 마무리되면 Closing plug를 내려 보내어 Fluid Port를 막아준다.
- (5) 2단 시멘테이션을 가능하게 해주는 이 모든 장비들은 시멘테이션 완성 후 다음 시추작업에 문제가 없도록 Drillable material로 구성되어있다.

현장에는 시멘테이션을 위해 Chemical tank와 Batch tank가 들어와 있었다. 시멘트를 사전에 잘 혼합하여 교반기 있는 탱크에 넣어두었다가 지열공 시멘테이션에 사용하면 가장 좋은 시멘테이션을 할 수 있으나 현실적으로 대부분의 지열공은 상당히 많은 시멘트가 필요하므로 Jet 믹서를 사용하는 것이 일반적이다. 지열공에 사용되는 G-class시멘트와 요구되는 첨가물이 혼합되어 사일로에서 분말로 제공되고 화학적으로 필요한 부분은 물과 섞여 Chemical tank로 부터 제공된다. 시멘트 혼합은 숙련된 기술자가 시멘트 슬러리를 만들어내는데 혼합이 적절했는가를 알아보기 위해 슬러리의 밀도를 지속적으로 점검한다. 시멘테이션을 위한 특수차량은 시멘트를 펌핑하여 지열공으로 이송시킨다. 아무리 숙련된 기술자가 혼합하더라도 안정성을 완전히 확보할 수 없으므로 마지막에 주입되어 지열공 가장 아래쪽에서 시멘테이션 되는 부분은 사전에 완벽하게 믹싱되어 교반 시켜놓은 Batch tank의 것을 사용한다.

시멘트의 배합비는 아래와 같고 실험실에서 온도압력 조건을 모사하여 실험한 결과 5시간 4분 후에는 약 50 psi의 압축강도를 가질 정도로 굳고, 30분 정도가 더 지나면 약 500 psi의 압축강



Power meter (14 MW)



Generation building



With Turgay



With drilling supervisor



Cooling tower



Cooling pump



With rig managers



At the drilling site

The first geothermal power plant in Turkey

With my friends in Turkey



Drilling works



Rig Picture

[그림 4] 기타사진

도를 가진다고 한다.

배합비 : 시멘트 + 54% 물 + 0.3% CFR-2 +
0.3% Hal-22A + 0.15% HR-12

3. 맺음말

터키의 내 친구 Turgay의 도움으로 지열발전을 위한 시추현장을 방문했고, 그곳에서 알게 된 정보들을 두서없이 작성해 보았다. 시추현장에서 메

인이 될 수 있는 장비와 엔지니어링, 작업을 기록한 것으로 개인적으로 지열현장에서 있었던 행복한 기억들을 다시 되새겨볼 수 있는 시간이 되었던 것 같다. 이 글이 지열발전을 시작하는 사람들이나 지열발전에 관심 있어 하는 분들에게 조금이나마 도움이 될 수 있기를 바라는 마음에 작성되었으니 형식적으로나 내용적으로 부족한 점이 있더라도 양해 해주기 바란다. 