

# 지열발전을 위한 지열정의 케이싱 & 시멘테이션

전 종 욱

(주) 이노지오테크놀로지 시스템개발부장

## 1. 지열정 공벽안정화

화산지대에서 지열발전은 기저부하를 담당하는 발전소로 가장 선호하는 발전설비이다. 기술이 점차 발달함에 따라 지열발전을 위해 필요한 고온, 고압의 조건이 완화되기 시작하였고 현재는 우리나라와 같은 비화산지대에서도 지열발전소가 지어지는 단계까지 이르렀다. 허나 필요한 온도조건이 화산지대에 비해 낮아지더라도 현재 바이너리 발전방식의 효율을 감안하면 시추 깊이는 약 5 km 정도가 필요하다. 많은 유량과 깊은 심도는 지열정의 요구조건을 향상 시켰으며 이는 공벽안정의 요구조건으로 여겨지게 되었다.

지열발전소를 건설하는 과정에서 공벽안정화 기술은 크게 두 가지로 나누어서 생각할 수 있다. 우선 시추 시에 작업을 원활하게 하고 시추분쇄물을 이송하며, 시추공벽의 붕괴를 방지하는 머드(mud, 이수) 엔지니어링이 있고, 시추 후에 공벽을 안정화시키기 위한 케이싱 및 시멘테이션이 있다.

공벽의 압력을 통제하고 드릴비트의 냉각, 시추 장비의 침식방지 등의 기능을 하는 머드 엔지니어링은 시추작업과 동시에 이루어지므로 보통 시추엔지니어와 함께 작업이 진행되는 것이 일반적이므로 여기서는 시추 후에 필요한 공벽안정화 기술인 케이싱 및 시멘테이션에 대한 일반사항을 알아보고 케이싱에 대해 좀 더 자세히 서술하도

록 하겠다.

### 1.1 시추 후 공벽안정화

케이싱의 설계와 선정은 아주 중요한 과정이다. 케이싱은 지열정 사용 중 가해지는 다양한 압축, 전단, 굽힘 응력 등에 견딜 수 있어야 하며, 지열정 생성과정에서 발생하는 붕괴 및 파열압력에 견딜 수 있어야 한다. 예를 들어 시멘테이션 작업 중에 케이싱은 시멘트 기둥에서 발생하는 정수압을 극복할 수 있어야 하고 시멘팅이 완성된 후에는 지중에서 형성되는 붕괴압력을 견디어야 한다.

각 케이싱의 양끝은 다른 파이프와 연결하기 위한 커플링이 사용되며, 나사를 이용한 케이싱 연결의 경우 연결 시 발생하는 토크의 계산이 중요하게 된다. 토크가 너무 크면 연결부 응력집중이 일어나고 후에 연결부의 파손을 야기 시킬 수 있고, 토크가 너무 작으면 연결부의 누수 우려가 있다. 케이싱의 연결부 디자인은 외부환경과 단절된 지열정의 완성도를 포함한 지열정 설계와 성공적인 지열정구성에 주요 요소이다. 지열정의 완성은 발전소 운영회사, 시추계약자, 시추기술자, 감독관 등이 지열정 설계 및 건설기간 동안 지속적인 관심과 노력을 기울여 이루어질 수 있다.

일반적으로 지열정을 위한 케이싱의 설계조건은 API (American Petroleum Institute)에서 석유가스 생산에 사용하는 케이싱 설계조건을 따르게 되어있다. API는 케이싱의 설계, 제작, 운반,

테스트 등을 포함한 케이싱 정보를 제공하고 이 같은 케이싱이 견디는 압축, 인장, 붕괴, 파열 등에 견디는 능력과 제품의 질과 항상성 또한 제공하고 있다. 지열정의 케이싱은 인공저류층 생성에서 발생하는 압력, 지열수 생산압력, 부식조건 등에서 안정성이 확보되어야 하므로 이미 사용되었던 케이싱이나 설계조건이 변경된 케이싱은 반드시 새 케이싱이 만족할 수 있는 성능을 실험으로 검증한 후에 사용하여야 한다.

케이싱이 지열정에 정상적으로 시공되면 다음은 시멘테이션 작업이 시작된다. 시멘테이션 작업도 지열정의 완성을 위한 매우 중요한 요소로 공학적인 계산과 설계가 주요하게 적용된다. 케이싱 외부로 시멘팅하는 것은 지중의 암반들로부터 케이싱 내부를 공간적으로 단절시키기 위함이다. 주변의 지하수로 유출 혹은 유입을 막고 구조적으로 지열정을 지지해주는 역할도 담당한다.

고온 고압 하에서 양생되는 지열발전 용 시멘트 슬러리는 설계강도를 유지하기 위해 지중 암석구성을 고려하여 선별되어야 하고, 시멘트와 시멘트 첨가물, 시멘트 파티클의 종류와 혼합비는 디자인된 지열정에서 요구하는 환경 아래서 사전에 테스트를 거쳐야 함을 API는 권고하고 있다. 지열정을 위한 시멘테이션은 시추 중 사용되는 머드 펌프를 활용하여 시멘트를 주입하는 과정이 수반된다. 시멘테이션 중에 시멘트 혼합물의 초기 배치가 완료되기까지 시간의 제한을 받을 수밖에 없으므로 펌프는 보통 최대동력으로 가동된다. 그러나 일반적으로 이동하는 시멘트의 이송속도와 압력은 일정하지 못하다. 주입압력은 케이싱 내부의 유체밀도와 케이싱 외부의 다양한 밀도로 분포하는 혼합 유체기둥의 정압에 의해 변화될 수 있고, 시멘트혼합제의 이송속도에 의존하는 수력저항에 의해서도 좌우된다.

### 1.1.1 지열정 케이싱

#### 1) 케이싱의 역할

지열정이 완성되었을 때 케이싱의 역할은 다음

과 같다.

- ① 목표 지열정 깊이에 도달하기 전의 연약층이나 파쇄대 등에서 공벽이 무너지지 않도록 지지력을 확보한다.
- ② 형성된 저류층과 압력차가 있는 지반에서의 원하지 않는 지열수의 유입 또는 유출을 방지할 수 있다.
- ③ 고온의 지열수를 사용할 수 있는 지상설비로 이송시킨다.
- ④ 지열정헤드와 지열정을 적절히 연결시킨다.

이 같은 역할의 지열정은 지중목표로 하는 고온 지열수가 지표로 도달하는데 단절된 유동통로를 제공하게 된다.

#### 2) 지열정 내의 케이싱 종류

그림 1은 지열정을 구성하기 위한 케이싱 프로그램의 한 예를 그림으로 생산을 위한 케이싱을 라이너로 사용한 경우이다. 각 케이싱의 용도와 구조는 다음과 같다.

- ① Structural 파이프 : 미고결층의 지표면에서 공벽붕괴를 방지하기 위한 목적으로 설치하며 시추 시 머드순환시스템 설치를 돕고 시추장비 하부의 지중안정성을 확보해준다.
- ② Conductor 케이싱 : 지표부근의 미고결층에서의 지열정을 보호할 목적으로 지표에서 얇은 심도 구간에 설치되며, 플랫폼의 기반을 보호하기 위해 머드이송구간을 제공한다. 표면에서 마감이 되거나 BOP(Blowout Preventer)와 연결된다.
- ③ Surface 케이싱 : 천부심도의 연약지층에서 지열정의 붕괴를 방지하며, 석회암과 같은 고결암층에 설치되어 시추 시 이송되는 머드의 압력을 담당하게 된다. 최상부에서는 BOP에 연결된다.
- ④ Intermediate 케이싱 : 암염층 등의 압력지층의 바로 아래나 위의 천이지층대에 설치되며 외부와의 차단을 위해 완성도 높은 시멘테이

Hole Size		Pipe Size	
36"	Structural casing	30"	
26"	Conductor string	20"	
17 1/2"	Surface pipe	13 3/8"	
12 1/4"	Intermediate String	9 5/8"	
8 3/4"	Production Liner	7"	

[그림 1] Example of hole and string sizes(in)

선이 필수요소이다. 케이싱이 길어질 경우 다 단 시멘테이션이 요구된다.

- ⑤ Production 케이싱 : 지열수가 순환되는 저류층을 다른 지층과 격리시키며, 지열수 이송 및 유량제어를 담당한다. 일반적으로 모든 구간이 시멘테이션 되지 않으며 지열수량의 필요에 따라 직경이 결정된다.
- ⑥ Liner 케이싱 : 지중에서 설치되며 지표와는 연결되지 않는 케이싱으로 Intermediate 케이싱하부에 Packer와 Liner hanger에 의해 연결된다.

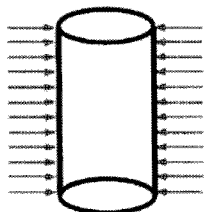
3) 케이싱의 응력특성

지열정 케이싱에 작용하는 응력은 일반적으로

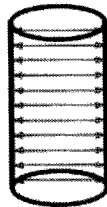
붕괴응력, 과열응력, 인장응력, 3가지로 분류하며 재질이 가지고 있는 항복응력도 포함시킬 수 있다.(그림 2)

- ① 항복응력(Yield load) : 케이싱의 항복응력은 재질에 성형과정에 따라 달라질 수 있다. 케이싱 자체의 항복응력도 주요한 강도특성이거나 지중으로 수 km연결하기위해 발생하는 연결부위의 항복응력 또한 중요하다. 가장 일반적인 케이싱 연결부는 양단에 서로 맞물릴 수 있는 나사홈으로 제작되며 연결부의 항복응력은 메인 케이싱의 항복응력에 비해 높거나 낮다.
- ② 붕괴응력(Collapse load) : 케이싱 샘플이 외압에 의해 붕괴될 때 필요한 최대압력으로 정의된다. 탄성변형과 소성변형 등으로 변형되며 케이싱의 외부표면에 작용하는 정수압을 적용받기 때문에 지상에서 0이고 지열정의 바닥면에서 최대응력을 받는다.(그림 3)
- ③ 과열응력(Burst load) : 지열정에 적용된 철강의 항복강도에 의해 영향을 받으며 지열수 최대압력으로 정의되며 압력의 예측을 위한 Barlow 등 다양한 식이 존재한다.
- ④ 인장응력(Tensile load) : 지열정의 길이가 길어질수록 케이싱의 자체하중으로 인해 인장력이 발생하는데 발생하는 자체하중과 충격하중을 고려하여 인장응력을 결정하게 된다. 대부분의 경우, 케이싱의 연결부가 가장 취약한 부분이므로 케이싱 전체하중을 고려

**Collapse**



**Burst**

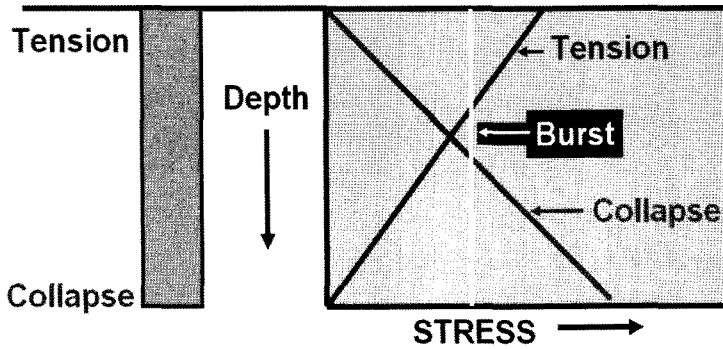


**Tension**

Note: Tension is considered in and of itself and also for its affect on collapse.



[그림 2] Casing load



[그림 3] Theoretical design fact

하여 설계한다. 이때, 최대응력을 고려해야하므로 부력효과는 배제한다.

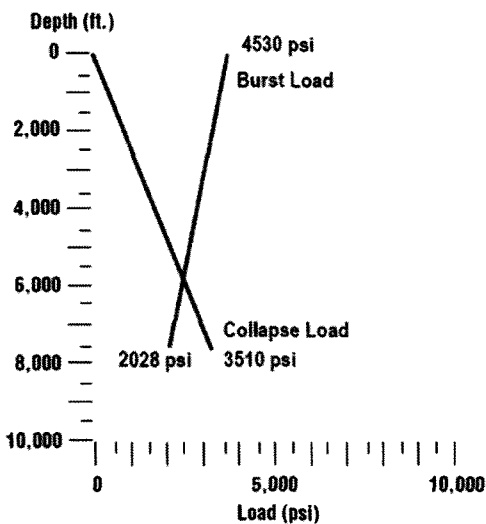
인장응력은 1.8배, 파열응력은 1.1배를 적용하여 케이싱의 설계 값으로 채택한 것이다.

그림 4는 지중으로 깊이질수록 붕괴응력이 커지고 파열응력은 낮아지는 것을 나타낸 일반적 지열정 응력특성을 나타낸다. 이론적으로는 파열응력이 지열정 내 유체압력이므로 일정해야 하나 지상으로 올라갈수록 지열정 외부압력이 낮아져 상대적으로 파열압력을 높게 잡아야한다.

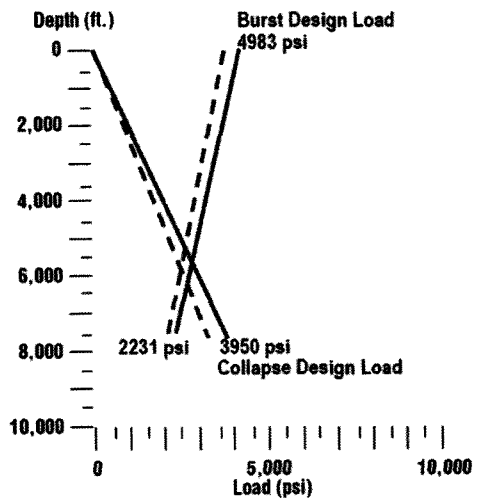
그림 5는 석유나 가스 시추 시 케이싱설계에서 안전율을 고려한 것으로 API에서는 석유가스 시추 시 제안하는 값 중에 하나로 붕괴응력은 1.125배,

### 3) 케이싱의 설계

지열정이 깊어짐에 따라 스트링(string)들의 연결과 시멘팅은 더 많은 주의를 요구하게 된다. 지름이 다른 케이싱의 길이는 여러 가지 영향에 의해 달라질 수 있는데 주로 암석특성(단층 파쇄구조, 수분함유량, 굽은정도, 활성정도, 미고결층 등)과 층간수(formation fluids)(공내 유입압력은 시추를 위한 머드압력보다 크거나 작을 수 있



[그림 4] Design loads



[그림 5] Application of design factor

음), 지열정 콘트롤 압력정도, 관련법규 등에 따라 달라진다. 이 같은 임계조건 등은 모든 시추조건에 적용될 수 있으며, 현장에서 발생하는 예상치 못한 문제들로 인해 훨씬 더 복잡해질 수 있다. 이는 지열정의 보수와 안정을 위해 추가 스트링이 더 필요할 수 있음을 의미한다. 다음과 같은 이유로 설치비용이 크게 증가할 수 있다.

케이싱을 설계하는데 우선 목표하는 유량을 지열정에서 생산하기 위해 케이싱의 지름을 고려해야 한다. 지열정의 깊이와 순환수의 유량, 지열수의 화학성분 등도 설계에 반영되어야 하고, 지열정의 개방형 여부, 슬롯 라이너구간, 방향성시추시작구간, 지열정의 굴곡정도, 등에 의해 케이싱의 재질, 연결부, 각 케이싱들의 길이가 결정된다.

일반적으로 케이싱은 지열정 바닥에서부터 설계되며 BOP없이 안전하게 시추가 가능한 구간에도 영향을 받는 전체 케이싱 길이는 지열수가 생산되는 저류층까지의 거리가 된다. 지열수의 유량과 케이싱의 총 길이는 케이싱 프로그램과 지열정의 형상, 필요한 장비 등을 결정할 수 있게 해준다. 왜냐하면 지열정은 석유시추정과 같이 케이싱 내의 튜브를 사용하지 않고 원유에 비해 훨씬 더 많은 지열수(대개 100,000 kg/hr 이상)를 생산하기 때문이다.

만일 지열정 내에서 이상유동이 발생할 경우 케이싱은 충분히 커져야 하며 이로써 유동시 발생하는 압력강하를 크게 줄일 수 있고, 생산성을 향상시킬 수 있다.

저온지열수를 생산하는 지열정은 낮은 지열수의 압력으로 인해 스스로 분출할 수 없기 때문에 펌프를 설치하여야 한다. 라인 샤프트 펌프나 지열수증펌프를 설치하여야 하고 어떤 것을 하느냐에 따라 펌프수리를 위해 케이스의 크기도 달라진다. 이 같은 모든 요소들을 고려한 후에 설계되는 지열정의 생산라인 지름은 보통 20 ~ 34 cm이다.

지열정 케이싱을 설계하는 과정에서 3가지 중요한 사항은 다음과 같다.

첫째, 스트링의 직경은 드릴비트 크기에 의해 제

한되며 지열정의 직경은 깊어질수록 줄어든다는 점이다.

둘째, 케이싱에 필요한 비용과 직경을 줄이기 위해서는 가능한 케이싱연결부위 간극을 늘려야 한다는 점이다.

셋째, 시추 중 가장 빈번하게 문제가 발생하는 부위는 케이싱 연결부위라는 점이다.

두 번째와 세 번째 문제는 서로 상충되는 관계로 케이싱 연결 간극을 길게 설계할수록 경제적이지는 하나 지열정의 문제발생 빈도를 증가시키고 지열정의 콘트롤도 쉽지 않다는 것이다. 만일 문제가 발생하여 추가 스트링이 문제부위를 보완하기 위해 설치되면 막대한 추가금액이 발생하고 이 같은 추가 스트링을 위해서는 케이싱의 충분한 지름도 요구된다. 물론 추가 스트링에 의해 줄어든 지열정의 지름은 목표유량을 순환시키기에 적절해야 한다.

주어진 지열정의 바닥 깊이와 지름을 기초하여 케이싱의 간격을 결정하기 위해서는 지층수, 암반 특성, 표면 케이싱 설치 깊이, 지열정 콘트롤, 지하수관련 규정 등이 고려되어야 하며 다음과 같이 세부적인 이유를 들 수 있다.

지하수보호 : 지하수관련 법규는 지하수를 보호하기 위해 지열정으로 지하수의 유입과 시추시 사용되는 머드가 지하수로 유출되는 것을 금지하고 있는 것이 일반적이다.

Kick 발생 시 지열정 콘트롤 : 발생한 kick은 마지막으로 시멘팅된 케이싱 바닥면의 파쇄압력을 넘지 않는 범위에서 안전하게 제거되어야 한다.

문제발생이 예상되는 지층과의 단절: 붕괴위험이 있거나 돌출된 부위, 미고결층, 일수가 크게 손실되거나 보수되지 못하는 지점, 수평한 저류층 상부에 위치한 저압지층 등과의 단절되어야 한다.

지열정 압력조절 : 지열정의 압력조절은 이수의 혼합비율에 의한 비중조절로 이루어질 수 있고, 이수기동의 비중은 지열정 하부의 지반 공

극의 압력을 조절하게 된다. 이는 종종 지반파쇄압력보다 높게 유지되어 이수유실을 발생 시키는데 고온 지열정의 경우 대부분이 판구조운동의 경계면에 위치하기 때문에 암석의 파쇄등급이 낮아 케이싱을 디자인하는데 더욱 신중해야 한다.

생산 저류층 정의: 지열정의 생산 저류층은 한 개 이상의 경우가 많으므로 지열수를 주로 생산할 수 있는 저류층을 선택적으로 사용하면 케이싱의 고려가 필요하다.

일반적인 케이싱 프로파일이 선정된 후 각 케이싱의 선정과 단계별 직경은 3가지(지름, 무게, 재질) 치수에 의해 변화될 수 있다.

지름은 주요한 치수로 각 케이싱의 외경을 의미하며, 케이싱 지름이 줄어들 때 연결부로 사용되는 커플링은 포함되지 않는다.

무게는 단위 길이당 케이싱의 무게로 지열정의 두께를 나타내어 더 무거운 케이싱일수록 내경이 작아지는 것을 의미하기도 한다.

케이싱의 재질은 주로 케이싱의 인장응력과 관계되며 부식이나 황화물에 의한 응력균열 현상 등을 방지하기 위해 지열정의 화학특성에 적합한 특수목적 합금으로 만들어지기도 한다. 표 1은 API에서 제공하는 케이싱 재질에 따른 최소

항복응력과 최대 인장응력을 나타낸다.

### 1.3 지열정 콘트롤

지열정 콘트롤이란 시추 시 만날 수 있는 고온의 지열수가 시추정의 정수압보다 큰 압력으로 존재할 때 고온의 지열수는 지열정으로 유입되는데 이를 효과적으로 방지하거나 지표면으로 안전하게 이송시키는 것을 말한다. 고온의 지열수가 유입되는 것을 kick이라고 부르며, kick 발생 후 지열정 콘트롤이 실패하였을 경우 blowout이 발생하여 인명 및 재산피해를 야기시킬 수 있다.

지열정의 콘트롤 실패를 야기하는 두 가지 경우로 우선 고온의 지열수가 이송되는 경우이다. 고온의 지열수는 지상으로 이송되면서 기화될 수 있고 지열정의 압력조절은 실패하게 된다. 다른 경우로 저류층 상부에 존재할 수 있는 고압의 가스층을 들 수 있다. 가스층은 저류층을 파악하는 과정에서 인지되기 힘들며 일단 고압의 가스가 지열정으로 유입되면 지열정의 압력을 조절하는 것은 불가능해진다. 이런 가스는 보통 황화수소로 농축되어 인체에도 치명적이다. 때문에 지열정 콘트롤이 실패했을 경우 고온의 지열수로 확인되기 전까지는 고압가스로 분류하여 대처해야 한다.

Blowout을 막기 위해 BOP(blowout preventer)가 지열정 상부에 설치되며 사용되는 원리에 따라 회전식(rotating), 환공식(annular), 램식(ram), 등으로 나누어진다.

## 2. 맺음말

최근 지열발전에 대한 관심이 커짐에 따라 본 원고는 지열발전을 위한 다양한 기술 중 공벽안정을 위한 기술에 대해 서술해 보았다. 비화산시대에서의 지열발전을 위한 대심도 공벽의 안정을 위해 필요한 케이싱 및 시멘테이션에 대한 일반 원리를 설명하고 지열정에서의 케이싱 역할, 종류, 응력특성 등을 살펴보고 성공적인 공벽안정을 위한 케이싱 설계에 어떤 것들이 고려되어야 하

<표 1> Grades of casing material

Grades	Minimum Yield Strength(ksi)	Ultimate Tensile Strength(ksi)
H-40	40,000	60,000
J-55	55,000	75,000
K-55	55,000	95,000
C-75	75,000	95,000
L-80	80,000	95,000
N-80	80,000	100,000
C-90	90,000	100,000
C-95	95,000	105,000
P-110	110,000	125,000
V-150	150,000	160,000

는지를 알아보았다.

석유가스장에서 고려하고 있는 안정율을 지열정에서 얼마나 주어야 하는지에 관한 연구는 국내 지질특성을 고려하여 진행되어야 하는 주된 연구분야가 될 것도 예측해 보았다. 또한 지열정의 파괴를 야기 시킬 수 있는 원인과 이를 안정적으로 제어할 수 있는 지열정 콘트롤에 관한 사항을 논의하였다.

국내에도 지열발전소가 활발히 건설, 운전되는 시기가 올 것이고 본 원고가 그 시기를 앞당기기 위해 조금이나마 보탬이 되었으면 한다.

### 3. 인용문헌

1. Rechard, R. P. and Schuler, K. W., 1983, Euler buckling of geothermal well casing, SANDIA report,
2. API guidance document, 2009, Hydraulic fracturing operations well construction and integrity guidelines, HF1 1st edition.
3. Lecture book, 2005, Casing string design, Lone star steel company.
4. John F. and Doug B., 2010, Handbook of best practices for geothermal drilling, SANDIA report 2010-6048. 