

지열정 안정화를 위한 케이싱 설계에 대한 해석적 연구

이 은 지, 전 용 석, 김 용 찬^{*†}, 전 종 욱^{**}

고려대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학과, ** (주)이노지오 테크놀로지

An Analytical Study on Casing Design for Stabilization of Geothermal Well

Eun-Ji Lee, Yong Seok Jeon, Yongchan Kim^{*†}, Jongug Jeon^{**}

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University, Seoul 136-713, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

^{**}Department of System Development, INNOGEO Technologies Inc., Seoul Goam Bldg 3F, Korea

(Received August 14, 2012; revision received October 4, 2012)

ABSTRACT: The casing has been used as a protective conduit during all phases of drilling operations and productions for the oil and gas industries. The casing is manufactured in various diameters, wall thicknesses, lengths, strengths, and connections. When the casing is designed, it has to be considered to withstand a variety of forces, such as collapse, burst, and tensile failure, as well as chemically aggressive brines. Once the casing is damaged, serious problems in geothermal well have been detected continuously. Therefore, this paper describes the casing design for stability of geothermal well to determine influence of casing parameters on the strength and load. In addition, the casing design program was developed. The estimated collapse, burst, tension and depth pressure can provide benefit in the casing design and completion method. This program provides a safety factor and predicts the casing stress more easily.

Key words: Well casing(지열정케이싱), Strength(강도), Safety factor(안전계수), Casing design Program(케이싱설계프로그램), EGS(인공저류층생성기술)

기 호 설 명

D : 케이싱 직경(Diameter)
 P : 강도 또는 부하(Strength) [kg/cm², psi]
 Y : 항복강도(Yield strength) [kg/cm², psi]

하첨자

b : 파열(Burst)
 c : 붕괴(Collapse)

j : 조인트(Joint)
 y : 본체항복(Body yield)

1. 서 론

지열에너지를 활용하기 위해 필요한 3대 요소는 지열, 열을 운반할 물, 그리고 물의 운반경로이다. 현재까지 지열발전은 높은 지온경사가 존재하는 화산 지대에서 높은 투수율과 충분한 물이 존재할 경우에만 가능하였다. 하지만 최근 들어 지열만 존재하는 지역에 인공적인 저류층을 생성하여 지열발전이 가능하도록 하는 인공 지열저류층 생성기술(Enhanced Geothermal System, EGS)이 현재 미국, 유럽 등의 여러 나라에서 활발히 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁾ EGS는 지

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3366; fax: +82-2-921-5439

E-mail address: yongckim@korea.ac.kr

열발전에 필요한 열이 충분하게 존재할 경우, 인공적으로 물을 주입하고 수압에 의해 생성된 인공과쇄대가 투수율을 높여 지열발전이 가능하도록 하는 기술이다. 이에 화산성 고온지열 지역이 아닌 우리나라에서도 지열발전의 확대를 위한 일환으로 EGS기술에 집중하고 있다. 일반적으로 EGS기술은 3~5 km 깊이의 지열정을 필요로 하며 고온 고압의 지열정일수록 많은 파괴원인들이 존재한다. 따라서 안전한 지열정의 시공 및 운용을 위해서는 공벽안정화 기술이 중요하며 이러한 기술 중 하나인 케이싱 설계에 더 많은 주의가 요구된다.

지열정 시공 시 현장에서 발생하는 예상치 못한 문제들은 안전문제뿐만 아니라 막대한 경제적 손실을 초래하기 때문에 설계 시 모든 요구조건을 충분히 고려해야 한다. 하지만 수많은 사양의 케이싱 중 지열정 조건을 모두 만족시키는 케이싱을 설계하는 일은 쉽지 않다. 특히 육상석유시추 경험이 없는 국내에서는 케이싱에 관련된 연구가 매우 부족하여 대부분 케이싱 설계를 국외에 맡기는 실정이기 때문에 정확한 설계와 분석에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 케이싱 설계에 영향을 주는 인자들을 찾아보고 그 인자들이 케이싱 강도에 미치는 영향을 분석하여 정리하고자 한다. 또한 케이싱의 고유강도 및 하중을 고려한 안전계수를 설계하고, 이를 통해 보다 쉽고 효율적인 케이싱 설계가 가능한 프로그램을 개발하고자 한다. 일반적으로 지열정의 케이싱 설계는 석유공학을 기반으로 하기 때문에 영국단위가 주로 사용되지만 본 논문에서는 이를 SI 단위로 환산하여 나타내었다.

2. 지열정 케이싱

Fig. 1은 수직형 지열정에서의 전반적인 케이싱 구성을 보여준다. 케이싱은 크게 Conductor, Surface, Intermediate, Production 및 Liner 케이싱으로 구분되며, 공벽이 목표하는 지열정 깊이에 도달하기 전까지 무너지지 않도록 지지력을 확보하는 것이 케이싱의 주된 역할이다. 기본적으로 지열정 케이싱을 설계할 때에는 인공저류층 생성에서 발생하는 압력, 지열수 생산압력, 화학적인 부식조건, 균열 등에 대한 안정성이 확보되어야 한다.

또한 지열정의 깊이, 순환수의 유량, 지열수의 화학성분 및 지열정의 개방형 여부, 지열정의 굴곡정도, 머드비중(mud weight) 및 외압과의 불균형으로부터 야기되는 모든 저항을 고려하여야 한다.⁽²⁾

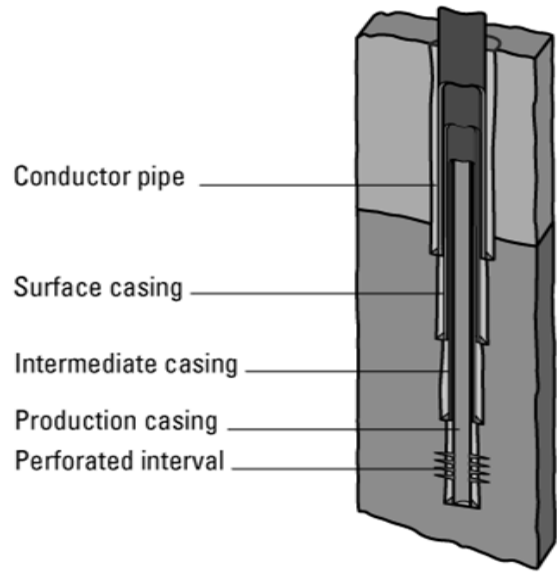


Fig. 1 Structure of casing.

일반적으로 전체 케이싱 길이는 지열수가 생산되는 저류층(reservoir)까지의 거리가 되며, 지열정이 깊어짐에 따라 스트링(string)들의 연결과 시멘팅(cementing)에 더 많은 주의가 필요하다. 이러한 요구조건들을 고려하여 적절한 케이싱의 지름, 재질, 연결방법 및 형상 등을 설계해야 한다.

2.1 케이싱의 응력특성

일반적으로 지열정 케이싱을 설계할 때에는 붕괴(collapse), 파열(burst), 인장(tension) 및 강재에 따른 항복(yield)응력을 고려하여야 한다. 붕괴응력은 케이싱의 외압에 의해 붕괴될 때 케이싱이 견딜 수 있는 최대압력으로, 탄성 및 소성변형으로 나타난다. 이 때 소성변형의 한계값이 케이싱의 붕괴강도가 된다. 일반적으로 케이싱의 붕괴강도는 식(1)⁽³⁾을 이용하여 구할 수 있으며, D/t 값에 따라 붕괴강도는 식(1.1)~식(1.3)으로 나타난다. 여기서 P_c 는 최소붕괴압력(kg/cm²)이고, D 와 t 는 케이싱의 외경과 두께(cm)를 나타낸다. Y_a 는 평균 항복응력(kg/cm²)으로 Table 1과 같이 강재의 등급에 따라 나타난다.

$$P_c = 0.75(2Y_a) \left[\frac{(D/t)-1}{(D/t)^2} \right] \quad (D/t < 14) \quad (1.1)$$

$$P_c = 0.75 Y_a \left[\frac{2.503}{(D/t)} - 0.046 \right] \quad (D/t = 14) \quad (1.2)$$

$$P_c = 0.75 \left[\frac{62.6 \times 10^6}{(D/t)[(D/t)-1]^2} \right] \quad (D/t > 14) \quad (1.3)$$

파열응력은 케이싱 내압에 의한 파괴를 의미하며, 지열정 내 최대압력으로 재질에 대한 영향을 받는다. 케이싱의 파열강도는 식(2)에 나타난 Bar-low식으로 부터 유도할 수 있다. 여기서 압력은 케이싱이 가지는 강도, 즉 고유강도를 의미한다.

$$P_i - P_0 = \frac{2\sigma_t t}{D} \tag{2}$$

이 식에서 P_i 와 P_0 는 각각 내압, 외압(kg/cm²)을 나타내고, D 와 t 는 외경과 두께(cm)를 의미한다. σ_t 는 벽에서 발생하는 인장 혹은 압축에 대한 응력값으로 $P_i > P_0$ 인 경우 σ_t 은 인장값이 되고, $P_i < P_0$ 인 경우 압축값이 된다. 만약 내압만 존재하고, σ_t 가 최소항복응력 Y_m 과 같다고 놓으면 P_0 는 0이 되고, 식(2)는 파열강도를 구하는 식(3)과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$P_i = 0.875(2Y_m t / D) \tag{3}$$

식(3)에서 P_i 는 내적항복압력(kg/cm²) 즉, 케이싱의 파열강도이며, Y_m 은 최소항복강도(kg/cm²)를 나타낸다. 여기서 0.875는 안전계수로 쓰였다.

지열정 길이가 길어짐에 따라 케이싱에 발생하는 인장응력은 자체하중과 충격하중을 함께 고려하여야 한다. 케이싱의 인장강도는 결합강도(joint strength)와 본체항복강도(body yield strength)로 나타

Table 1 Average yield strength(Y_a)

Grade	Y_a (psi)	Y_a (kg/cm ²)
H-40	50,000	3515.35
J-55	65,000	4569.95
N-80	85,000	5976.09
P-110	123,000	8647.76

Table 2 ST&C, LT&C constant values(C)

Grade	ST&C	LT&C
F-25	53.5	-
H-40	72.5	-
J-55	96.5	159.0
N-80	112.3	185.0
P-110	146.9	242.0

난다. 결합강도는 인장력이 있는 케이싱의 연결부가 가지는 항복강도로, 결합방법에 따라 다르게 나타난다.

식(4)는 케이싱의 연결방법 중 하나인 ST&C(short thread and coupling) 방법에서의 결합강도를 나타낸다.

$$P_j = 0.80 C(33.71 - D) \left[\frac{1}{t - 0.07125} + 24.45 \right] \times 0.7854 \left[(D - 0.1425)^2 - d_i^2 \right] \tag{4}$$

여기서 P_j 는 최소결합강도(kg)를 나타내고, D 와 d_i , t 는 각각 케이싱의 외경, 내경, 두께(cm)를 의미한다. 이 때 C 는 강재의 등급에 따라 다르게 나타나는 상수값으로 Table 2와 같이 나타난다. 식(5)는 재질이 가지는 최소항복응력에 케이싱의 단면적을 곱한 값으로 케이싱이 가지는 본체항복강도를 나타낸다. 이 식에서 P_y 는 본체항복강도(kg)를 나타내고, Y_m 은 최소항복응력(kg/cm²), D 와 d_i 는 각각 외경과 내경(cm)을 말한다.

$$P_y = Y_m \left(\frac{\pi}{4} (D^2 - d_i^2) \right) \tag{5}$$

케이싱의 항복응력은 재질이 가지는 고유값이며, 재질등급에 따라 그 값이 바뀐다. 항복응력은 같은 재질이라 하더라도 성형과정에 따라 달라질 수 있으므로 설계시 재질에 대한 전반적인 고려가 필요하다. 최소항복응력은 재료가 거시적인 소성변형을 시작할 때의 응력으로 영구변형이 지정값에 달했을 때의 응력한계를 나타낸다. 이 값은 케이싱의 설계한계(design limit)로 작용하여 케이싱 설계시 기준이 된다.

2.2 케이싱의 고유응력에 영향을 미치는 인자

케이싱이 가지는 고유응력 즉, 고유강도는 케이싱 사양에 따라 다르며 다양한 인자들에 의해 그 값이 결정된다. 케이싱 강도에 영향을 주는 주요인자로 는 케이싱의 외경, 무게, 두께, 재질등급 및 연결방법 등이 있다. 케이싱의 효율적인 설계를 위해서는 위의 주요인자들이 케이싱의 고유강도에 미치는 영향을 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서 사용된 케이싱 데이터는 미국의 Drilling Software사에서 제공한 자료를 참고하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 케이싱 외경(Outside diameter, OD)

케이싱의 외경은 단계별 케이싱의 지름으로 정의되며 비트(bit) 크기에 따라 결정된다. 연결되는 케이싱 사이에는 충분한 시멘트 허용이 가능해야하며, 이를 위해서는 연결부의 외경차가 최소 5 cm 이상 나도록 설계해야한다. 케이싱의 길이 및 종류에 따라 외경의 크기는 달라지고, 단계별 케이싱의 외경은 17.8~76.2 cm 범위로 나타난다. 일반적으로 생산라인의 케이싱은 50.8~76.2 cm 정도의 외경을 가지며, 깊이가 깊어질수록 크기가 작은 외경의 케이싱을 설계한다. 단계별 다른 직경의 설계는 다음 Fig. 2를 통해 설명될 수 있다. Fig. 2는 외경변화에 따른 케이싱의 붕괴 및 파열강도의 변화를 나타낸다. 이 때 케이싱의 외경을 제외한 다른 조건은 모두 동일하게 하였다. 또한 식(1)과 식(3)에 해석에 사용된 케이싱의 사양을 대입하여 붕괴 및 파열강도를 구하고 데이터 값과 비교하였다. 케이싱의 붕괴강도는 케이싱 외경과 두께의 비, 즉 D/t 값에 따라 식(1.1)~식(1.3)로 구분되는데, 해석에 사용된 케이싱의 D/t 값은 모두 14보다 크므로 식(1.3)을 사용하였다.

일반적으로 외경의 증가에 따라 붕괴 및 파열강도 모두 감소하고, 외경이 작을수록 높은 붕괴강도 및 파열강도를 가짐을 알 수 있다. 식(1)과 식(3)에서 붕괴 및 파열강도는 t/D 값에 비례하여 증가하는 것을 보여준다. Fig. 2에 나타난 케이싱의 두께(t)는 모두 1.3 cm로 동일하기 때문에 외경이 증가

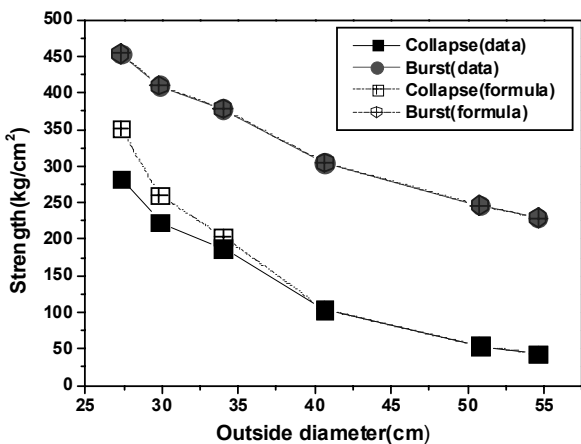


Fig. 2 Variation of collapse and burst strength with OD(N-80, $t = 1.3$ cm, ST&C).

하면 붕괴 및 파열강도는 감소하게 된다. 따라서 심도가 깊을수록 외경을 작게 설계하여 높은 붕괴 및 파열강도를 갖도록 해야한다. D/t 의 값에 따라 elastic, transition, plastic range 구간으로 나뉘고 근사식 또한 달라지는데 외경이 35 cm 미만인 구간은 천이구간에 가깝다. 이 구간에서는 다른 식과 비교하여 강재의 강도뿐만 아니라 탄성계수 등을 복합적으로 고려하여야 하기 때문에 근사식에 의한 오차가 발생된 것으로 보이며, D/t 값이 커짐에 따라 데이터와 계산값이 거의 정확함을 확인하였다.

Fig. 3은 케이싱의 외경크기에 따른 케이싱의 결합 및 항복강도의 변화를 보여준다. 결합 및 항복강도는 앞서 살펴본 붕괴 및 파열강도와는 반대로 외경이 커짐에 따라 강도가 증가하였다. 본체항복강도를 나타내는 식(5)를 통해 모든 조건이 동일할 때, P_y 는 D^2 에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 또한 본체항복강도는 케이싱 무게에 많은 영향을 받게 되는데 외경의 증가는 케이싱 자체의 무게증가를 의미한다. 즉 외경의 증가에 따라 본체항복강도는 강해지는 것이다. 그리고 외경이 결합강도에 미치는 영향은 다른 강도들에 비해 미미함을 알 수 있다.

3.2 케이싱 무게(Nominal weight, NW)

지열정에서 케이싱의 무게는 단위 길이 당 질량(kg/cm)으로 정의되며, 케이싱의 두께와 같은 의미로 사용된다. 케이싱 두께는 외경과 내경의 차이를 말하므로 같은 외경에서 두께가 커진다는 것은 내경이 작아짐을 의미하고, 이는 케이싱의 무게가 증가

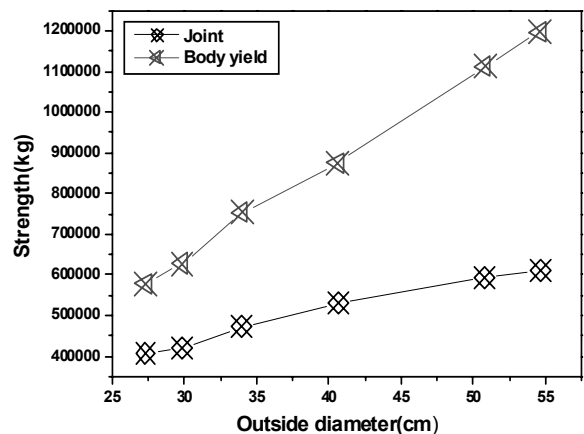


Fig. 3 Variation of joint and yield strength with OD(N-80, $t = 1.3$ cm, ST&C).

함을 나타낸다. 식(6)은 결합방법으로 plain-end를 사용할 때, 케이싱의 무게와 두께와의 관계를 나타낸 식이다.

$$w = C(D - t)t \tag{6}$$

여기서 w 는 plain-end 결합에서의 케이싱 무게(kg/cm)를 나타내고, D 와 t 는 외경과 두께(cm)이며, 두 값의 차이는 케이싱의 내경을 나타낸다. C 는 변환계수(conversion factor)로, SI 단위에서는 0.0247, 영국단위에서는 10.69를 사용한다. 이 식에서 무게와 두께는 서로 비례하여 나타나고, 내경이 같을 때 두 값의 비는 C 와 같다.

Fig. 4와 Fig. 5는 케이싱의 두께(무게)변화에 따른 케이싱의 강도변화를 나타내고 있다. Fig. 4는 두께변화에 따른 붕괴 및 파열강도를 보여준다. 그래프를 살펴보면 두께가 증가함에 따라 붕괴 및 파열강도가 증가함을 알 수 있다. 앞서 t/D 값에 비례하여 붕괴 및 파열강도가 증가함을 확인하였다. 이 조건에서 외경은 47 cm로 고정되어 있으므로 t 값의 증가에 따라 붕괴 및 파열강도는 증가하게 된다. 특히 파열강도의 경우, 두께의 증가율과 강도의 증가율이 선형적으로 나타남을 확인하였다.

Fig. 5에 나타난 결합 및 항복강도 역시 두께가 증가함에 따라 강도가 커짐을 알 수 있다. 같은 조건에서 두께 및 무게의 증가는 케이싱의 모든 고유강도를 크게 한다. 케이싱의 무게는 케이싱의 본체항복강도에 크게 영향을 주기 때문에 설계 시 반드시 고려하여야 하는 중요한 인자이다. 또한 케이싱의 두께는 외경과 같이 케이싱의 종류에 따라 결정되

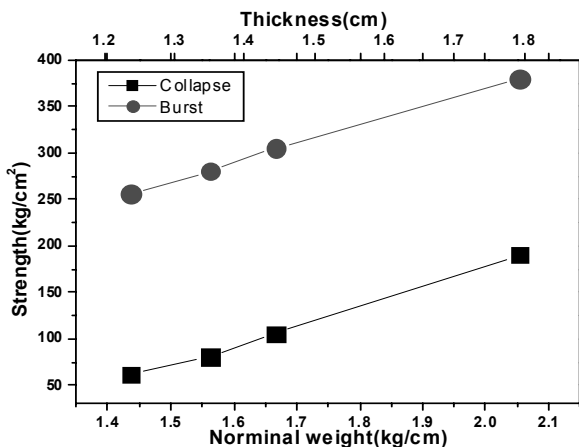


Fig. 4 Variation of collapse and burst strength with NW(N=80, OD = 47.3 cm).

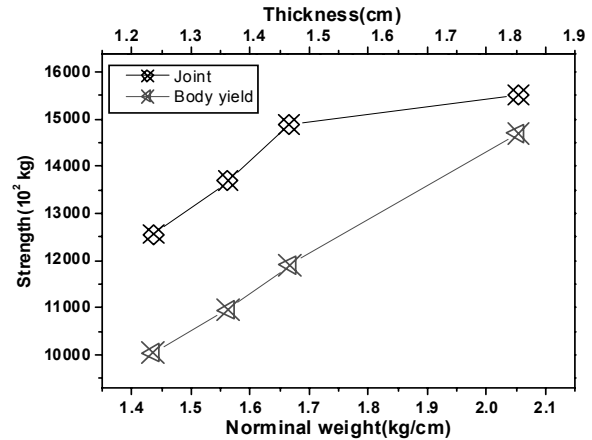


Fig. 5 Variation of joint and body yield strength with NW(N=80, OD = 47.3 cm).

는 인자가 아니므로 보다 신중한 설계가 필요하다.

3.3 케이싱의 결합방식(Joint method)

케이싱의 결합강도는 연결부의 결합방식에 따라 달라진다. 케이싱의 연결부는 대부분 파괴에 있어 가장 취약한 부분이므로 하중을 고려한 적절한 결합방식을 채택하는 것이 중요하다. 케이싱의 결합방식을 채택할 때에는 내벽의 평활도, 외경의 최소화, 얼라이언트, 용이한 설치 및 경제성을 고려하여야 한다. 또한 각 케이싱의 연결부에서 적당한 인장력을 가질 수 있도록 설계하여야 한다.

케이싱의 결합방식에는 크게 나사를 맞물려 연결하는 Thread and Coupling(T&C) 방법과 용접방식이 있으며, 일반적으로 시공 및 후처리가 용이한 T&C 방법이 더 선호된다. 케이싱의 종류에 따라, 즉 외경크기에 따라 연결방식은 다양하게 존재하며 외경이 작아질수록 더 많은 연결방식이 존재한다. 특히 석유나 지열발전분야의 surface 케이싱에서는 T&C 연결방법 중 하나인 buttress 방식을 많이 사용한다.

Fig. 6은 연결방법에 따른 결합강도를 두께의 변화에 따라 나타낸 것으로, surface 케이싱에 많이 쓰이는 ST&C와 buttress를 비교하였다. 결합강도는 buttress가 ST&C보다 약 1.5배 크게 나타났으며, 두께가 증가함에 따라 두 결합강도는 모두 증가하여 나타났다. 또한 두께에 대한 영향이 ST&C보다 buttress에서 더 크게 나타남을 확인하였다. 두 결합방식에 대한 결합강도의 차이는 서로 다른 연결부 사양을 가지기 때문으로 보인다. Table 3에 나타난 ST&C와 buttress의 연결부 사양을 비교해보면 같은 외

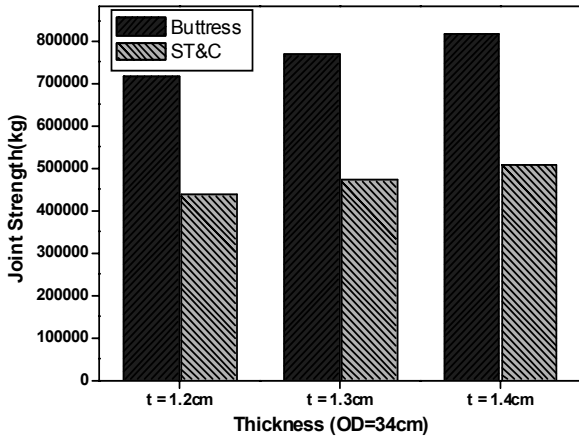


Fig. 6 Variation of joint strength according to joint method.

Table 3 Joint specifications(ST&C, Buttress)

Casing OD (in)	Joint method	OD (mm)	Minimum length (mm)	Weight (kg)
7'	ST&C	194.46	184.15	3.8
7'	Buttress	194.46	254.00	4.78
9~5/8'	ST&C	269.88	196.85	8.18
9~5/8'	Buttress	269.88	269.88	10.51
13~3/8'	ST&C	365.12	203.20	11.64
13~3/8'	Buttress	365.12	269.88	14.41
20'	ST&C	533.40	228.60	19.69
20'	Buttress	533.40	269.88	22.72

경에서 ST&C보다 buttress 연결부의 길이가 더 길고, 무게 역시 더 무거운 것을 알 수 있다. 앞서 케이싱의 무게가 케이싱 강도에 미치는 영향이 크다는 것

을 알았다. 따라서 결합강도는 ST&C보다 buttress에서 크게 나타났고, 같은 조건에서 더 강한 결합강도를 가지는 buttress 결합방식이 현재 surface 케이싱에 많이 적용되는 이유로 볼 수 있다. 본 연구에서는 surface 케이싱에 국한하여 결합방식에 따른 결합강도를 비교하였다. 하지만 케이싱의 설치되는 깊이, 즉 케이싱의 종류에 따라 케이싱 외경이 달라지고 그에 맞는 결합방식이 달라지기 때문에 조건에 맞는 방식을 채택하는 것이 설계시 중요하다.

3.4 케이싱 강재의 등급(Grade)

케이싱 강재 등급은 주로 케이싱의 인장 및 항복 응력에 영향을 준다. 강재의 등급은 강도와 야금학적인 물성치에 따라 다양하게 구별되며, 케이싱의 종류 및 지열정 조건에 따라 사용되는 강재가 다르다. 케이싱의 강재는 지열정의 화학특성, 즉 부식이나 황화물에 의한 응력균열 현상 등을 방지할 수 있어야 하고, 응력부식에 의한 파괴가능성을 최소화하여야 한다.

일반적으로 케이싱의 강재는 API 5CT, 5L, BS 3601, 1387에서 선택하며, 선호되는 강재로는 API 5CT에 속하는 H-40, J-55, K-55, C-75, L-80 등이 있다. 이러한 강재등급에서 첫 글자인 알파벳은 인장강도를 나타내고, 숫자는 최소항복강도를 의미하며 단위는 7030.69 kg/cm²(10³ psi)를 사용한다. 일반적으로 최소항복강도는 케이싱의 설계한계를 의미하므로 숫자가 클수록 심도가 깊은 케이싱에 사용된다. 케이싱 강재등급에 따른 항복 및 인장강도, 경도(hardness)가 Table 4에 나타나있다. 표를 살펴보면 같은 최소

Table 4 Yield, tensile strength and hardness

Grade	Yield strength				Minimum tensile strength		Hardness	
	Minimum		Maximum		ksi	kg/cm ²	HRC	HBW/HBS
	ksi	kg/cm ²	ksi	kg/cm ²				
H-40	40	2812	80	5624.55	60	4218.41		
J-55	55	3866.88	80	5624.55	75	5273.02		
K-55	55	3866.88	80	5624.55	95	6679.16		
N-80	80	5624.55	110	7733.76	100	7030.69		
L-80	80	5624.55	95	6679.16	95	6679.16	23	241
C-90	90	6327.62	105	7382.23	100	7030.69	25.4	255
C-95	95	6679.16	110	7733.76	105	7382.23		
P-110	110	7733.76	140	9842.97	125	8788.34		

항복강도를 갖는 재질이라도 경도의 차이에 따라 최대 항복강도가 달라지는 것을 알 수 있다. 예를 들어 현재 surface 케이싱에 많이 사용되는 N-80과 L-80을 비교해보면 두 재질의 최소 항복강도는 5624.55 kg/cm²(80,000 psi)로 같다. 하지만 N-80의 경우 경도한계가 없고 최대항복강도가 7733.76 kg/cm²(110,000 psi)인 반면 L-80은 최대로크웰경도가 23이고, 최대항복강도는 6679.16 kg/cm²(95,000 psi)이다. 항복강도만 고려한다면 N-80이 L-80에 비해 우수해 보인다. 하지만 N-80의 경우 황화물응력균열(SSC)에 노출되어 있는 반면 L-80은 조질처리(quenching and tempering)가 되어있어 화학적 부식에 강하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 케이싱의 재질등급을 선택할 때에는 지열정 환경에 맞게 설계하는 것이 무엇보다 중요하다.

Fig. 7은 강재등급과 외경 및 두께의 비(D/t)에 따른 최소붕괴강도를 보여준다. 재질등급의 숫자가 클수록 높은 붕괴강도를 가지며, D/t 값이 커질수록 최소붕괴강도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 주목되는 점은 외경이 작을수록 재질에 의한 최소붕괴강도가 크게 차이날 수 있다는 점이다. D/t 값이 커진다는 것은 외경이 커지고 두께가 얇아짐을 의미하므로 앞서 살펴본 인자들이 강도에 미치는 영향과 같은 결과를 보여준다. 또한 강재등급이 높을수록 최소붕괴강도는 크게 나타났고 강도가 클수록 탄성곡선과 만나는 점의 D/t 값은 작게 나타나는 것을 확인하였다.

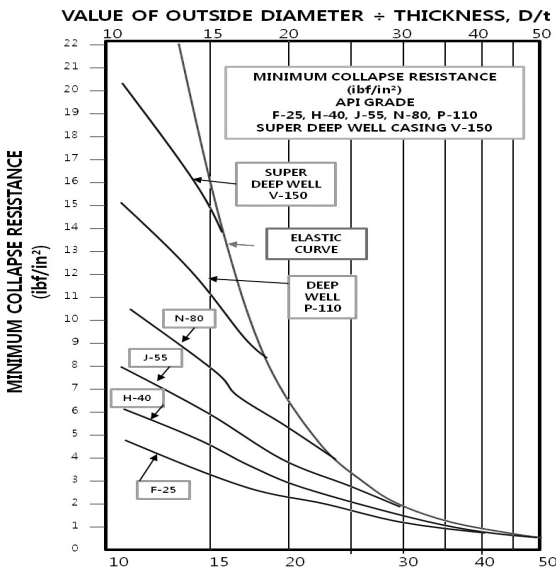


Fig. 7 Variation of minimum collapse strength with grade and D/t.⁽⁶⁾

4. 케이싱 디자인 프로그램

케이싱 설계에서 가장 중요한 것은 보다 효율적이고 안정화된 설계를 하는 것이다. 여기서 안정화된 설계란 케이싱의 파괴가능성을 최소화시키는 것을 말하며, 이를 위해서는 케이싱에 작용하는 하중이 탄성범위 내에 있어야 함을 의미한다.

이 때 탄성범위 내에서의 최대응력이 케이싱이 가지는 허용응력이 되며, 하중에 대비하여 이 값을 여유롭게 설계할 필요가 있다. 설계계수는 파괴하중과 허용하중과의 비 또는 파괴강도와 허용응력과의 비를 말하며 안전계수라고도 한다. 케이싱의 안전계수는 식(7)과 같이 정의된다.

$$Safety\ Factor(SF) = \frac{Strength}{Load} \quad (7)$$

즉, 붕괴응력의 안전계수는 케이싱의 붕괴강도와 발생하는 붕괴하중의 비, 파열응력의 안전계수는 파열강도와 파열하중의 비로 각각 구할 수 있다. 안전계수는 결국 케이싱의 허용응력에 여유를 주기 위한 것으로, 일반적으로 케이싱 설계시 적용되는 안전계수는 고유강도에 따라 Table 5와 같이 나타난다. 피로가 발생할 가능성이 있는 다양한 조건에서 케이싱의 강도와 운용하중에 대한 비율을 사용하는 것은 케이싱의 선택에 적절성을 준다. 예를 들어 깊이에 따라 증가하여 나타나는 외력, 즉 파열하중에 파열설계계수를 곱하여 그 값이 케이싱이 가지는 파열강도보다 작으면 이 값을 안전계수로 지정하여 실제 설계에 적용할 수 있다. 그러므로 안전계수를 지정하여 설계에 반영하는 것은 설계과정에서 매우 유용하며, 지열정 시추시 혹은 운용시 응력에 의해 발생하는 케이싱 파괴위험을 최소화할 수 있게 된다. 그리고 실제로 실패한 케이싱의 설계변수들은 다음 설계에 인용되어 대안을 제시해주며 안전한 지열정 보호를 가능하게 해준다.

본 연구에서는 안전계수를 이용하여 효율적인 케이싱 설계가 가능한 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 Fig. 8과 같은 순서로 진행된다. 설계하고자 하는 지열정의 조건에서 발생하는 하중을 계산하고 이

Table 5 Common casing design factor

Collapse	Burst	Tension
1.0-1.125	1.0-1.25	1.6-2.0

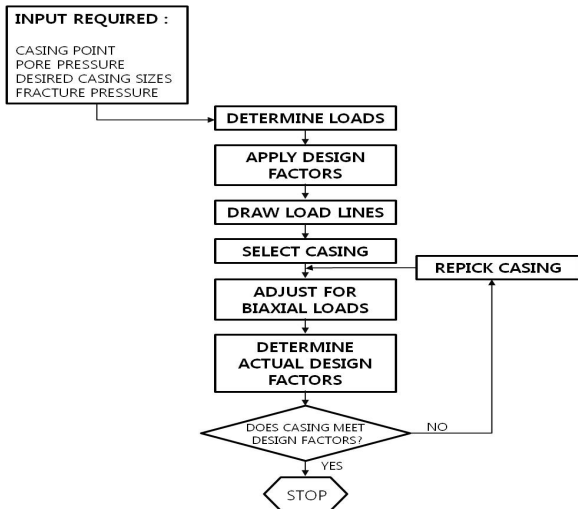


Fig. 8 Casing design flow chart.

값에 만족하는 강도를 가진 케이싱을 선택한다. 그리고 케이싱을 지열정에 적용하였을 때 안전계수와 설계계수를 비교하여 설계한 케이싱이 타당한지, 실제 적용이 가능한지를 판단할 수 있도록 한다. 이러한 과정을 통해 조건에 맞는 적절한 케이싱을 설계함으로써 파괴위험성을 최소화할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 지열정 공벽안정화 기술 중 하나인 케이싱의 설계에 대해 알아보았다. 케이싱의 파괴원인은 매우 다양하기 때문에 지열정 및 모든 요구조건을 만족하는 케이싱 설계가 필요하다. 케이싱은 기본적으로 탄성변형 범위 내에서의 설계가 요구되며, 위험요소를 최소화하는 것이 핵심이다. 케이싱의 강도에 영향을 미치는 인자들은 크게 외경, 두께, 결합방식, 재질등급 등이 있으며, 인자들에 따라 케이싱의 고유강도가 증감하는 것을 확인하였다. 붕괴 및 파열강도는 외경이 작을수록 증가하였고, 두께 및 무게가 커질수록 증가하였다. 또한 결합강도는 결합방식에 따라 많은 영향을 받으며 surface 케이싱의 경우, buttress 결합방식이 가지는 결합강도가 타 결합방식에 비해 큰 것을 확인하였다. 그리고 케이싱 재질에 따라 본체항복강도 및

인장강도가 많은 영향을 받는데 단순히 재질이 가지는 강도뿐 만 아니라 환경적인 요인, 화학적 부식 등을 고려하여 재질을 선택해야한다. 또한 본 연구에서는 다양한 응력 및 하중을 고려하여 케이싱을 설계할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 케이싱 설계프로그램은 지열정의 조건들을 미리 파악하고 하중을 예측하여 케이싱 설계를 보다 효율적으로 수행하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 신재생에너지기술개발사업(No.2010T100200494)과 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203250)이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Min, G. B., 2011, Status and Prospects of EGS technology for the development non-volcanic zone, Journal of the Sarek, Vol 40, No. 10, pp. 43-48.
2. Jeon, J. U., 2011, The casing and cementing of geothermal well for geothermal system, Journal of the Geothermal Energy Vol. 7, No. 2, pp. 4-10.
3. Huang, X. and Mihsein, M., 2000, Collapse strength analysis of casing design using finite element method, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 77, pp. 359-367.
4. Byrom, T. G., 2007, Casing and Liners for Drilling and Completion, Gulf Publishing Company, Texas, pp. 261-265.
5. Chiotis, E. and Vrellis, G., 1995, Analysis of casing failures of deep thermal wells in Greece, Geothermics, Vol. 24, pp. 695-705.
6. National Tube Division, U. S. Steel Corp., 1958, Seamless Drill Pipe, Casing, and Tubing, Bulletin, Vol. 15.