

## 제주도 GDHS의 R&D투자 타당성 분석을 위한 연속적 SDP모형의 개발 및 응용사례연구\*

### A Continuous Sequential Decision Process Model for R&D Economic Feasibility Assessment of the GDHS in Chejoo Island and Its Application

양문희\*\* · 장 경\*\*

Moon-hee Yang\*\* · Kyung Chang\*\*

#### Abstract

A GDHS(Geothermal District Heating System) is a heating system supplying a group of districts with heat extracted from geothermal sources. Due to various advantages of GDHS including the saving of fuel consumption as well as the reduction of air pollution, a world-wide trend is to replace central/individual heating systems with GDH systems.

The basic point of this paper is that a crash program mentality leads to inappropriate decisions about policy issues in large-scale research and development like the development of GDHS. R&D funding should be viewed as a sequential decision, not a once-and-for-all choice. Hence we develop an economic feasibility assessment model based on a continuous sequential decision process for the Chejoo Island GDHS Project by modifying Roberts's model.

#### 1. 서론

지역난방시스템(DHS: District Heating System)은 아파트단지 규모의 중앙난방시스템(CHS: Central Heating System)과 달리 지역중심으로 열을 공급하는 시스템이며 폐열을 재활용하기 때문에 열공급가격이 저렴하여 전세계적으로 그 이용도가 높아지고 있다[5]. DHS의 일반적 단점 중 하나는 화석연료의 사용으로 인한 환경오염에 있기 때문에 청정에너지인 지열을 이용할 수 있다면 화석연료 절감효과, 환경개선효과, 및 부대효과 외에도 해외 에너지 의존도를 낮출 수 있어 국가정책과 부합되므로 지

열이용 지역난방은 지열이 부족할 경우 그 경제적 타당성 문제에 귀착하게 된다.[2]

지열이용 지역난방시스템(GDHS: Geothermal District Heating System)의 투자타당성은 지열온도, 열저수지의 용량 등과 같은 지열자원의 특성, 시추시의 불확실성, 열수요규모, DHS의 설계 및 운영방법, 에너지경제환경의 변화, 경제성분석방법 등 여러 가지 요인들에 의해 좌우된다[3]. 특히 에너지경제환경 및 지열개발에 따른 불확실성을 고려하지 않고 단순히 현재의 추정화폐가치로만 평가하게 되면 기존화석연료의 "잠재비용"과 지열에 내포된 "잠재혜택"을 간과하여 지열에너지를 과소평가할 가

\* 이 연구는 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

\*\* 단국대학교 산업공학과

능성이 높다. 예를 들면 석유매장의 지역편재성으로 인하여 발생한 80년대 석유파동은 안정적 에너지원의 확보를 위한 새로운 정치비용을 에너지가격에 부과시켰다. 또한 오염된 지구환경의 정정비용, 온실효과제거비용, 협오시설로 인하여 입지선정시 발생하는 제반비용 등 잠재비용은 현재 예측되거나, 현재 전혀 예상할 수 없는 여러 가지 형태로 화석연료의 에너지가격을 상승시킬 가능성이 있어 지열자원의 상대적 우위성은 예측되고 있다(3). 한편 Haraden[9]에 의하면 동일지역에서 두 번째 심부시추비는 초기시추비의 약 1/3로 감소한다고 보고하였다. 초기시추도 하지 않은 상태에서, 총시추비를 井當 초기추정시추비에 시추횟수를 곱하여 추정한다면 과대 평가된 총시추비로 인하여 지열자원의 가치는 평가 절하될 것이다.

불확실한 에너지환경에 대한 전략의 하나로 소규모의 geothermal pilot plant를 건설, 운영(이하 GDHS R&D 투자로 정의함)한다면 투자손실의 위험도를 최소화할 수 있으며 GDHS와 관련된 제반정보를 이용하여 대규모의 geothermal plant 투자여부도 판단할 수 있을 것이다. 따라서 GDHS R&D투자 평가시 사업이 장기적으로 진행되는 과정에서 의사결정이 변경될 수 있다는 것을 전제로 모형화 할 필요가 있다. R&D 투자가 진행됨에 따라 예상수익이나 예상비용은 다르게 평가되기 때문에 분산을 갖게 되며, 획득되는 새로운 정보에 따라 불확실한 요인이 하나씩 해소되어 이러한 분산은 감소하게 된다. 사업 초기에 추정된 정보곡선에 의거하여 사업의 중단 가능성을 체계적으로 고려하여야 하는 사업을 순차적 의사결정 사업(Sequential Decision Project)이라 한다. 전형적인 경제성모형에는 이러한 특징이 배제되어 있으며 사업종료시까지 그 사업에 내재한 불확실성이 일정하다는 암묵적인 가정 하에 수익이 투자비용보다 큰 경우 투자대상으로 의사결정을 하게 되는데 반해, 순차적 의사결정은 상정된 정보곡선에 따라 불확실성이 감소할 것을 예상하고 의사 결정하는 것이다.

순차적 의사결정과정(Sequential Decision Process)을 전제하고, 지열자원 R&D와 관련된 불확실성과 에너지환경의 불확실성을 금융비용과 분리하여 분석할 수 있으며, 전통적 경제성모형을 보완할 수 있는 모형은 Roberts[12], Weitzman[10], Stensland와 Tjostheim[7] 등이며 이들 체계적 또는 확정적 기본모형을 중심으로 다수의 변경된 논

문이 발표되었다. 본고에서는 제주도 GDHS 건설시 사전 정보로서 오직 예상지열온도(95℃)만 주어졌을 경우 논문[2]에서 추정된 모형매개변수와 입력변수를 필요한 경우 일부 이용하고, Roberts모형을 제주도 GDHS에 적용될 수 있도록 보완하여 순차적 의사결정과정에 입각한 투자타당성 평가모형의 개발과 분석을 시도하였다. GDHS 연구개발사업기간이 여러 단계로 이루어져 있고, 각 단계마다 획득한 새로운 정보를 이용하여 단계별로 투자계속 또는 중지의 의사결정을 할 수 있고, 일회적인 의사결정에 비하여 더 많은 정보를 이용하게 되므로 순차적 의사결정과정을 이용하는 것이 바람직할 수 있다고 판단되었기 때문이다.

## 2. GDHS의 순차적 의사결정모형

### 2-1. Roberts모형의 수정

전형적인 경제성 평가모형에 따르면 총혜택의 현가에 총비용의 현가를 제외한 값이 양인 경우 일단 투자대상으로 결론을 내릴 수 있을 것이다. 그러나 GDHS 연구개발사업과 같이 불확실성이 큰 연구개발투자사업의 경제성평가방법은 달라져야 할 것이다. 총비용과 총혜택은 사업의 진행에 따라 초기에 추정된 값과 상당히 다르게 추정될 수 있어 이것의 불확실성을 점진적으로 감소시키면서 사업진행 중에 사업추진의 계속여부를 결정하는 최적 의사결정규칙(Optimal Stopping Rule)이 내포되어야 할 것이다. 또한 사업추진을 계속한 결과 확정적으로 산출될 (총혜택-총비용)의 현가를 최대화하여야 할 것이다. 이러한 개념을 포함한 추계적 기본모형이 Roberts모형[12]이다.

Roberts모형을 적용하기 위해 다음의 가정이 도입되어야 한다. 첫째로, 사업진행 동안의 의사결정시점(또는 단계)은 연속변수인  $s$  ( $0 \leq s \leq S$ )로 표시할 수 있다. 단계 0에서 예상되는 연구개발비용을  $S$ 라 할 때, “단계 $s$ ”의 의미는 이미  $s$ 원의 비용이 투입된 것을 의미하며 향후  $(S-s)$ 원의 투자가 이루어져야 한다는 의미가 된다. 둘째로, 사업이 진행되는 동안 단계 $s$ 에서 추정된 최종혜택(Terminal Benefit)을  $B_s$ 라 하면  $B_s$ 는  $N(\xi_s, \sigma_s^2)$ 인 정규분포를 따르는 확률변수이다. 여기서 단계 0과  $t$ 에서의 표준편차를 각각  $\sigma_0, \sigma_t$ 라 하면,  $\sigma_s = \frac{S-s}{S} \sigma_0$ 로 표시되며  $t \geq s$ 일 때  $\sigma_t = \frac{S-t}{S-s} \sigma_s$

가 된다(그림 1). 즉 혜택은 확률변수로서 그 표준편차는 투입비용에 비례하여 선형적으로 감소하며 단계S에서 표준편차는 0이 되어 혜택은 상수(Constant)가 되는 성질이 있다. 마지막으로 단계s에서 사업을 중지할 경우 B<sub>s</sub>=0이 되나 σ<sub>s</sub>은 감소한다. 즉 일단 투입된 비용은 매몰비용(Sunk Cost)으로 간주되며 수익의 분산을 줄이는 데 기여한다. 상기 가정 하에서 최적의사결정규칙은 다음 정리와 같이 요약된다.

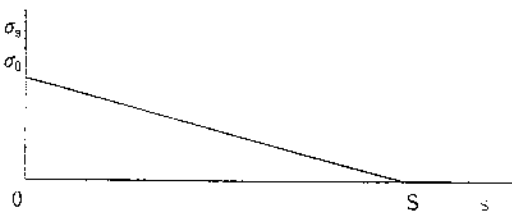


그림 1. 연구개발비에 대한 함수로서의 표준편차

Roberts의 정리 : 확률변수 Y는 N(0, σ²)를 따른다고 하자. 어떠한 단계에서 연구개발사업의 종료시점까지 투입될 총비용을 S, 총혜택 B는 N(ξ, σ²)을 따를 때, 식(1)이 성립할 경우 투자를 계속한다면 (B-S)는 최대화된다.

$$S \leq E[Y|Y \geq \xi] \tag{1}$$

참고로 Y는 확률변수이고 B는 확률변수이나 단계S에서는 상수인 점에 유의하자.

GDHS 연구개발투자시 총혜택(B<sub>s</sub>)은 다양하게 정의할 수 있으나 본고에서는 지열로 대체될 기존에너지(이후 기존난방가격이라 함)와 지열에너지의 가격(이후 지열난방가격이라 함)의 차로 발생하는 현가로 정의하였다. 확률변수 C<sub>s</sub>를 s원의 GDHS 연구개발 투자비가 이미 투입되었을 때 예상되는 지열난방가격이라 하자. C<sub>s</sub>는 N(μ<sub>s</sub>, δ<sub>s</sub>²)를 따르고, μ<sub>s</sub>의 추정치를 E(C<sub>s</sub>)라고 가정하자. 사실 C<sub>s</sub>는 다수의 독립변수의 합으로 표현되므로 현실적인 몇가지 가정 하에 중앙극한정리에 의해 정규 분포로 수렴한다[12]. C<sub>s</sub>는 사업진행에 따라 E(C<sub>s</sub>)에서 E(C<sub>s</sub>)로 등락하면서 분류하며, δ<sub>s</sub>는 감소하게 된다고 가정하자. P(원/Gcal)를 기존난방가격, Q를 연간 열판매량(Gcal/년)이라 하자. T년 이후로 지열공급이 가능하다고 하면 연간 혜택은 Q [ P-E(C<sub>s</sub>) ]

이므로, s원의 투자비가 투입되었을 때 예상되는 최종편익(B<sub>s</sub>)의 현가는 연간이자율 i를 고려하면 식(2)로 표시된다. 따라서 B<sub>s</sub>는 정규분포를 따르는 확률변수가 되며 그 기대치와 분산은 다음과 같이 추정된다.

$$B_s = e^{-iT} \int_0^{\infty} e^{-it} Q(P - C_s) dt = \frac{1}{i} e^{-iT} Q [ P - C_s ] \tag{2}$$

$$E(B_s) = \frac{1}{i} e^{-iT} Q [ P - E(C_s) ], V(B_s) = \left[ \frac{e^{-2iT} Q^2 \delta_s^2}{i} \right]$$

편의상 단계0에 있다고 가정하고 각 변수들의 아래 첨자를 제거하자. 즉 B와 C는 단계 0에서의 혜택과 지열에너지가격을 의미한다. 단계0에서의 최적 전략은 δ(= δ<sub>c</sub> - δ<sub>s</sub>)의 불확실성 아래에서 [ E(B)-S ]를 최대화하는 방향이 된다. φ(·)를 표준정규확률밀도함수, Φ(·)를 표준정규누적분포함수라고 하자. 식(1)에 의해 사업을 계속할 조건은 아래와 같다.

$$E \{ Y | Y \geq E(B) \} = \int_{E(B)}^{\infty} y \frac{f(y)}{\int_{E(B)}^{\infty} f(y) dy} dy$$

$$= \frac{e^{-2iT} Q \delta}{i} \frac{\phi \left( \frac{P - E(C)}{\delta} \right)}{1 - \Phi \left( \frac{P - E(C)}{\delta} \right)} \geq S \tag{3}$$

여기서 f(y) =  $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[ -\frac{y^2}{2\sigma^2} \right]$ . 식(3)을 정리하면

$$\frac{\delta \phi \left( \frac{P - E(C)}{\delta} \right)}{1 - \Phi \left( \frac{P - E(C)}{\delta} \right)} - \frac{ie^{-2iT} S}{Q} \geq 0 \tag{4}$$

식(4)의 좌변을 g(E(C), P, δ, S, Q, i, T)라고 하면 의 사결정규칙은 아래로 요약된다.

g(E(C), P, δ, S, Q, i, T) > 0 이면 투자 계속  
 g(E(C), P, δ, S, Q, i, T) = 0 이면 투자 계속 또는 중지  
 g(E(C), P, δ, S, Q, i, T) < 0 이면 투자 중지

g(·)에서 {E(C) - P}를 Δ로 놓으면 g(·)는 g(Δ, δ, S, Q, i, T)로 표시된다. g(·)=0을 만족시키는 Δ값을 Δ\*

로 하면  $g(\cdot)$ 는  $\Delta$ 의 단조감소함수이므로[12] 최적의사 결정규칙은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta < \Delta^* \text{ (또는 } P > (E(C) - \Delta^*)) &\text{이면 투자 계속} \\ \Delta = \Delta^* \text{ (또는 } P = (E(C) - \Delta^*)) &\text{이면 투자 계속 또는 투} \\ &\text{자 중지} \quad (5) \\ \Delta > \Delta^* \text{ (또는 } P < (E(C) - \Delta^*)) &\text{이면 투자 중지} \end{aligned}$$

전개의 편의를 위해  $(E(C) - \Delta^*)$ 를 지열개발유도가격으로 정의하자. 즉 기존난방가격이 지열개발유도가격보다 크다면 GDHS 연구개발의 투자타당성은 있는 것으로 정의된다.

참고로 Roberts에 따르면,  $\delta$ 가 0으로 수렴한다면,  $\Delta^*$ 는  $-\frac{ie^{-\delta T} S}{Q}$ 로 수렴한다. 식(5)에  $\Delta^*$ 의 수렴값을 대입하면

$$\frac{1}{i} e^{-\delta T} Q [P - E(C)] - S = E(B) - S > 0 \quad (6)$$

따라서 불확실성이 0인 경우는 전통적 경제성모형과 동일하기 때문에 Roberts모형은 전통적 경제성모형을 내포하는 확장 경제성모형으로 간주할 수 있다.  $\delta \rightarrow \infty$ 일 때  $\Delta^*$ 는  $\infty$ 로 발산하므로  $E(C) < \infty$ 이면 투자를 하여야 한다. 환언하면 불확실성이 대단히 클 경우에는 어떠한 대체에너지도 그 투자타당성이 있다는 의미이다. 전술한 바, 불확실성으로 인한 투자위험(Investment risk)이 있는 상황에서 전통적 경제성모형을 적용할 경우 의사결정이 오판될 정도가  $\delta$ 가 커짐에 따라 커진다. 이 결과는 Haraden [9]의 결론과 의미상에서 동일하다.

### 2-2 연속 SDP모형변수의 추정

#### 가. 비용의 추정

비용의 추정은 논문[2]를 참조 인용하였으며 논문의 전개를 위해 아래와 같이 요약하였다. GDHS의 초기설비투자비는 지하설비투자비(Subsurface Investment Cost), 지상설비투자비(Surface Investment Cost)와 송배열관설비투자비로 대별된다. 총설비투자비 I를 추정하기 위해, ① 지하설비투자비( $I_{SUR}$ )는 생산정과 환원정의 총수에 비례하고, 환원정은 生産井數에 관계없이 한 개를 건설하며(이를 개방형 GDHS라고 함) 생산정과 환원정의 건설비용은 동일

하며, ② 지상설비투자비( $I_{SUR}$ )는 시설용량에 비례하고, ③ 송배열관설비 초기투자비( $I_{TP}$ )는 열수송거리에 비례한다는 가정을 하면 I는 다음과 같이 표시될 수 있다[2].

$$\begin{aligned} I &= I + I_{SUR} - I_{TD} \\ &= c_w \left[ \frac{r_p Q_{dwell} N}{8760 P_G L (1 - r_L)} + 1 \right] + c_s \frac{Q_{dwell} N}{8760 (1 - r_L) U} + c_D \quad (7) \end{aligned}$$

제반 모형변수들의 정의는 본문[2]와 본고의 표 1을 참조한다.

GDHS의 잔존가치를 무시하고, 설비수명을 n년으로 하면,  $C_0$ 는 식(8)과 같다[2].

$$C_0 = C'_0 + C_F + C_T = (\beta_0 + \beta_1 P_f) N - \alpha_1 (N) - \alpha_0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서} \\ \beta_0 &= (r_0 + r_T - r_0 r_T) (a + b Q_{dwell}) - \frac{r_T c_s Q_{dwell}}{8760 n U (1 - r_L)} \\ \beta_1 &= (1 - r_G) (1 - r_T) Q_{dwell} \\ \alpha_0 &= \frac{r_T (c_f D + c_w)}{n} \\ \alpha_1 (N) &= \frac{r_T c_w}{n} \left[ \frac{r_p Q_{dwell} N}{8760 P_G L (1 - r_L)} - \right. \\ P_f &= \frac{1}{(1 - r_L) E_{bj}} \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_j C F_j}{Q F_j} \quad (9) \end{aligned}$$

따라서 식(7)과 (8)로부터 총비용 S는 다음과 같이 추정될 수 있다[2].

$$S = I + C_0 (P/A, i, n) (P/F, i, 2) \quad (10)$$

$$\text{여기서 } (P/A, i, n) = \frac{1 - (1+i)^n}{i(1-i)^n}, \quad (P/F, i, n) = \frac{1}{(1-i)^n}$$

#### 나. 혜택의 추정

혜택의 추정을 위해 P, E(C), i, Q, T 및  $\delta$ 의 추정방법이 필요하다. 추정치는 표 2를 참조한다. 먼저 Q의 추정방법을 설명하면 다음과 같다. 열수송기구당 열수요량( $Q_{dwell}$ )에 열수송기구수를 곱하면 열수요량이 된다. 여기에 송열할 때 발생하는 송배열 열손실률( $r_L$ )을 고려하면 열공급량은 다음과 같이 추정할 수 있다.

표 1. 모형변수의 정의 및 추정치

기호	정의	추정치
a	열수용가 가구당 연간 기본요금	46,200 원/년, 가구
b	열사용량 요금단가	23,910 원/Gcal
CF	열전용보일러에 공급되는 화석연료의 단가, 원/단위	참조 [3]
QF <sub>i</sub>	열전용보일러에 공급되는 화석연료의 열효율, Gcal/단위	참조 [3]
C <sub>o</sub>	감가상각비를 제외한 연간 운영비	N과 D의 함수
C <sub>o'</sub>	연간 준운영비	N과 D의 함수
C <sub>w</sub>	정당 설비투자비용	15.949 억원/정
c <sub>s</sub>	Gcal/h당 투입되는 지상설비 초기투자비용	1.190억원/Gcal/h
c <sub>i</sub>	Km당 투입되는 송배열관설비 초기투자비용	3.17억원/Km
D	열수송거리	입력변수
δ	Gcal당 지열난방가격의 표준편차	입력변수
E <sub>s</sub>	열전용보일러의 열효율	0.895
i	할인율	6%
L	연평균부하율	30%
m	열전용보일러의 투입화석연료의 종류	
n	GDHS의 설비수명	20년
N	열수용가구수	입력변수
P	기존난방가격, 원/Gcal	표 2. 참조
P <sub>i</sub>	열전용보일러에 투입되는 복합연료의 평균가격	13,861원/Gcal
P <sub>g</sub>	정당 지열력	입력변수
Q	연간 열판매량, $NQ_{well}/(1-r_s)$ , Gcal/년	
Q <sub>well</sub>	제주도 아파트기준 가구당 연간 열수요량	11.5467 Gcal/년, 가구
r <sub>o</sub>	열판매수익에 대한 준운영비의 비율	16%
r <sub>g</sub>	지열충당률	70%
r <sub>L</sub>	송배열 열손실률	3%
r <sub>p</sub>	지열력충당률	30%, 50%, 70%
r <sub>T</sub>	법인세율	40%
T	GDHS의 건설기간	2년
U	연평균이용률	25%

$$Q = \frac{Q_{dwell} N}{(1 - r_L)}$$

본고에서는  $Q_{dwell}$ 을 추정하기 위해, 중앙난방 또는 개별 난방을 하는 대규모 아파트단지를 대상으로 지열수를 공급한다는 가정과 난방용 열에너지의 원별구성비율은 전국적으로 일정하다는 가정 하에 도시 가구당 열수요량을 추정한 후, 도시 주택형태별 가구당에너지소비의 상대비율을 곱하여 추정하였다[3].

P의 추정은 지열로 대체될 기존 에너지의 종류에 따라 다르다. 특정 화석연료의 난방가격은 식(9)에  $m=1$ 을 대입하여 추정하였다. 참고로 식(9)는 열전용보일러에 투입되는 화석연료 j의 투입비율이  $s_j$ 일 때 최종에너지 1 Gcal를 생산하기 위해 투입되는 화석연료의 평균단가를 의미한다. 지열이 기존화석연료를 대체할 때 특정 화석연료만 대체하는 것이 아니므로 평균가격으로서의 기존난방가격의 추정이 필요하다. 제주도의 도시아파트에서 사용되는 보일러의 종류는 도시가스를 제외한 연탄, 등유, 경유, 중질중유, 프로판, 전기보일러이므로 지열난방으로 대체될 화석연료의 비율이 예측되어야 기존 평균난방가격을 추정할 수 있다. 그러나 본고에서는 지열로 대체될 화석연료들의 점유비율이 현재의 점유비율과 같다는 가정하에 제주지역의 기존 평균난방가격을 추정하였으며 표 2에 요약하였다.

GDHS 연구개발의 진행여부를 결정하기 위해 지열난방가격 E(C)의 추정이 필요하다. 지열난방가격은 에너지 경제환경을 포함하여 여러 가지 요인에 의하여 결정되어야 하나 본고에서는 E(C)를 1와  $C_0$ 를 회수하는 할인단가로 정의하였다. 따라서 적정이익이 보장되지 않기 때문에 그 가격은 최소지열난방가격이 될 것이며 민간기업이 제공할 수 있는 최소판매가격이 될 것이다. 따라서 E(C)는 최종에너지 가격기준으로 다음 식을 만족하여야 한다.

$$1 + C_0(P/A, i, n)(P/F, i, 2) = E(C) Q N(P/A, i, n)(P/F, i, 2)$$

$$E(C) = \frac{C_0 + I(A/P, i, n)(F/P, i, 2)}{Q} \tag{11}$$

에너지 관련 연구개발 사업의 경우 할인율은 보통 5%-15% 사이로 적용되고 있으나[12] 본고에서는 경제동계연보의 각종 이자율, 기업경영분석의 제조업자본비용, 제조업의 자본순이익율을 분석하여 6%로 추정하였다[3]. T의 추정은 지열선진국의 현 기술수준을 고려하여 2년으로 추정하였다[3].

Roberts모형변수 중에서 가장 중요한 변수는 불확실성의 크기를 대변하는  $\delta$ 이다. Brown과 Kahn(1979)의 의회 증언에 따르면 석유가격의 경우 기술혁신을 통하여 석유가격의 1/3이하로 줄어들기가 쉽지않다고 보고하였다. Merrow[11]에 따르면 초기 에너지추정가격에 대한 할인된 미래에너지추정가격의 비율은 1/2의 분산을 가진다고 보고하였다. MIT의 John Deutch, Harvard大의 James Harian 등 에너지전문가들에 의하면  $\delta$ 값을 10달러로 하는 것이 바람직하다고 추천하였다[10]. 미국의 경우는 대체로 대형프로젝트에 있게 마련인 위험기파적인 성질을 상쇄하기 위해서, 대체에너지 개발이나, 첨단기술의 개발에 상당한 위험보상을 주어 개발을 진행하고 있다. 또한 식(10)에 의해 산출된 E(C)는 모의실험 결과 Gcal당 최저 2만원 수준부터 최고 10만원 수준까지의 범위로 분석되었다[3]. 이러한 사실을 고려하여 본고에서는 어느 정도의 위험프리미엄을 인정하기 위해  $\delta$ 값을 10,000원/Gcal로 추정하였으며 아울러 투자위험기파적인 투자자를 위해 3,000원/Gcal와 5,000원/Gcal의 경우에 대해서 민감도 분석을 수행하였다.

표 2. 최종에너지 1 Gcal당 투자되는 화석연료의 단가(1994년 10월 소비자가격 기준)

(단위: 원/Gcal)

연탄	등유 (저유황)	경유 (저유황)	중질중유	프로판	도시가스	전력	평균
21,148	42,305	35,779	16,988	44,879	47,862	40,040	32,643

표 3. 지열개발유도가격

(단위: 원/Gcal)

지열력 크기 단위: Mw	거리 km	열수용기구수									
		1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
3	0	27,499	23,555	19,239	19,239	17,342	17,667	16,486	16,847	15,997	16,341
	10	46,074	31,474	24,868	23,529	21,004	20,716	19,223	19,225	18,188	18,295
	20	64,938	41,260	29,940	27,452	24,327	23,521	21,734	21,431	20,218	20,122
	30	83,820	50,788	36,382	31,443	27,442	26,166	24,093	23,517	22,134	21,854
5	0	27,499	19,239	15,997	16,847	15,295	14,195	14,986	14,195	13,556	14,195
	10	46,074	27,452	22,134	21,431	19,216	17,647	17,880	16,831	15,983	16,328
	20	64,938	36,382	27,436	25,513	22,687	20,698	20,493	19,210	18,175	18,283
	30	83,820	46,015	33,081	29,314	25,896	23,504	22,922	21,418	20,206	20,111
7	0	27,499	19,239	15,997	14,195	15,295	14,195	13,370	12,725	13,556	13,029
	10	46,074	27,452	22,134	19,210	19,216	17,647	16,468	15,544	15,983	15,281
	20	64,938	36,382	27,436	23,504	22,687	20,698	19,206	18,039	18,175	17,318
	30	83,820	46,015	33,081	27,428	25,896	23,504	21,719	20,325	20,206	19,205
9	0	27,499	19,239	15,997	14,195	13,029	14,195	13,370	12,725	12,207	11,780
	10	46,074	27,452	22,134	19,210	17,318	17,647	16,468	15,544	14,798	14,181
	20	64,938	36,382	27,436	23,504	20,982	20,698	19,206	18,039	17,096	16,315
	30	83,820	46,015	33,081	27,428	24,307	23,504	21,719	20,325	19,201	18,271
11	0	27,499	19,239	15,997	14,195	13,029	12,207	13,370	12,725	12,207	11,780
	10	46,074	27,452	22,134	19,210	17,318	15,976	16,468	15,544	14,798	14,181
	20	64,938	36,382	27,436	23,504	20,982	19,201	19,206	18,039	17,096	16,315
	30	83,820	46,015	33,081	27,428	24,307	22,116	21,719	20,325	19,201	18,271
13	0	27,499	19,239	15,997	14,195	13,029	12,207	11,594	11,117	12,207	11,780
	10	46,074	27,452	22,134	19,210	17,318	15,976	14,967	14,177	14,798	14,181
	20	64,938	36,382	27,436	23,504	20,982	19,201	17,863	16,815	17,096	16,315
	30	83,820	46,015	33,081	27,428	24,307	22,116	20,477	19,196	19,201	18,271
15	0	27,499	19,239	15,997	14,195	13,029	12,207	11,594	11,117	10,736	11,780
	10	46,074	27,452	22,134	19,210	17,318	15,976	14,967	14,177	13,540	14,181
	20	64,938	36,382	27,436	23,504	20,982	19,201	17,863	16,815	15,967	16,315
	30	83,820	46,015	33,081	27,428	24,307	22,116	20,477	19,196	18,162	18,271
17	0	27,499	19,239	15,997	14,195	13,029	12,207	11,594	11,117	10,736	10,424
	10	46,074	27,452	22,134	19,210	17,318	15,976	14,967	14,177	13,540	13,014
	20	64,938	36,382	27,436	23,504	20,982	19,201	17,863	16,815	15,967	15,268
	30	83,820	46,015	33,081	27,428	24,307	22,116	20,477	19,196	18,162	17,306

### 3. 불확실성하에서의 투자타당성 평가 및 민감도분석

#### 3.1 투자타당성의 평가

모형매개변수의 추정치가 합리적으로 추정되었다고 가정할 때 본고의 GDHS 연구개발투자의 타당성은 지열력 수준, 열수요량, 열수송거리 등의 모형입력변수에 크게 좌우된다. 물론 생산정 및 환원정의 수에 따라 투자타당성은 변동된다.

$P_0$ 의 추정구간은 3-17Mw로, 열수용자규모와 송배열관 길이는 1,000-10,000가구, 0-30Km로,  $\delta$ 는 10,000원/Gcal로 입력변수공간을 제한하여 지열개발유도가격을 표 3에 요약하였다. 표에서 제시된 바 지열개발유도가격의 범위는 10,424원/Gcal (17Mw, 0Km, 10,000가구)에서 83,820원/Gcal (3Mw, 30Km, 1,000가구)에 걸쳐있으므로 지열개발의 투자타당성은 한마디로 언급하기가 쉽지 않다. 입력변수공간의 대표점에 해당하는 지열력 7Mw, 열수송거리 20Km, 열수용가구수 5,000가구의 경우를 보면(이때의 초기총투자비(I)는 143.59억원,  $C_0$ 는 6.56억원/년, 열생산량(Q)은 59,519 Gcal/년 산출되었음), 지열개발유도가격은 22,687원/Gcal로 산출되었다. 제주지역 1994년도 기존 난방평균가격이 32,643원/Gcal이므로 대표점의 경우 식

(5)에 의해 GDHS 연구개발의 투자타당성은 있다고 할 수 있다. 참고로 식(11)에 의하면 지열난방가격은 34,349원/Gcal로 추정되어 제주지역 기존 난방평균가격보다 높으므로 지열의 경제성은 없다고 판단하게 된다. 즉 [2]의 분석결과보다 Roberts모형은 위험도전적(Risk-taking)인 결과임을 알 수 있다. 참고로 지열개발유도가격이 기존 난방평균가격(32,643원/Gcal)이하인 경우는 지열개발의 타당성이 있다고 판정될 수 있으므로 표 3에 검게 칠하여 그 영역을 표시하였다.

향후 지열로 대체될 화석연료의 구성비율을 예측할 수 있다면 예측비율을 이용하여 난방가격을 추정할 수 있으나 본고에서는 화석연료 중 가격이 가장 낮은 중질중유와, 제주도에서 현재 사용은 하고 있지 않지만 향후 문화수준의 향상으로 대체될 가능성이 있고, 가격이 가장 바싼 도시가스를 지열이 대체한다고 가정하였을 때의 두 가지 극단적인 경우에 대하여 투자타당성을 열수송거리별로 표 4에 분석하였다. 표에서 짙은 검은 색 영역은 중질중유를 대체한다고 가정하였을 때 투자타당성이 있다고 판단되는 영역(중질중유가격이 지열개발유도가격보다 높은 영역)을 나타내며, 옅은 검은 색 영역은 도시가스를 대체한다고 가정하였을 때 투자타당성이 있다고 판단되는 영역(도시가스가 가격이 지열개발유도가격보다 높은 영

표 4. GDHS 연구개발의 투자타당성의 범위

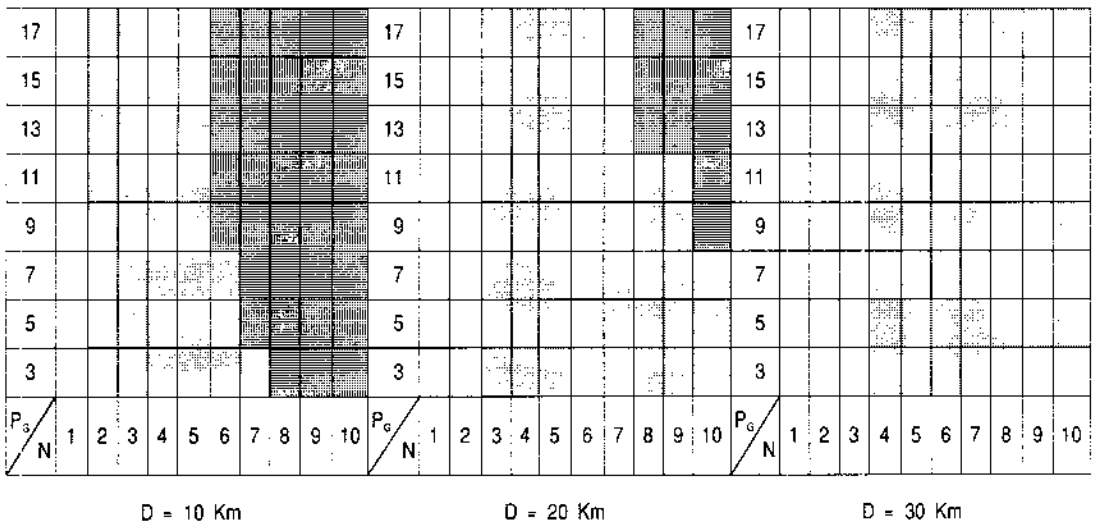




표 5. GDHS의 형태에 따른 지열개발유도가격의 변화

(단위: 원/Gcal)

P <sub>0</sub>	가구수	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
	형태								
1	개방형	40,527	37,898	34,678	33,867	33,283	31,803	31,573	30,546
	폐쇄형	52,471	50,906	46,145	46,153	46,159	43,830	44,049	42,665
3	개방형	29,940	27,462	24,327	23,521	21,734	21,431	20,218	20,122
	폐쇄형	33,123	31,474	27,461	27,468	25,251	25,537	25,747	25,925
5	개방형	27,436	25,513	22,687	20,698	20,493	19,210	18,175	18,283
	폐쇄형	27,436	27,452	24,327	22,134	22,937	21,431	20,218	21,004
7	개방형	27,436	23,504	22,687	20,698	19,206	18,039	18,175	17,318
	폐쇄형	27,436	23,504	24,327	22,134	20,493	19,210	20,218	19,216

역)을 나타낸다. 따라서 투자타당성이 있는 영역은 열은 검은 색과 짙은 검은 색 영역의 중간영역이 될 것으로 전망된다.

3.2 민감도분석

총괄 분석된 경우의 수가 너무 방대하므로 매개변수공간의 대표점을 이용하여 민감도를 분석하였다. 개방형 GDHS인 경우에는 경쟁력이 있는 것으로 나타났으나 순환형 GDHS(사용된 지열수를 하천으로 방출할 경우 환경이 오염될 수 있으므로 환경오염방지를 위해 사용된 지열수를 환원정수를 이용하여 열저수지로 돌려보내는 시스템으로 보통 생산정 마다 환원정수를 건설함)의 경우 열수용가구수의 변화에 따른 민감도는 표 5에서 제시된 바 P 값을 약 33,000원으로 설정할 경우 4,000가구 이상이면 일단 GDHS의 투자타당성은 있는 것으로 분석되었다.

표 6에서 제시된 바, 지열력충당률에 따라 지열정수가 결정되므로 지열력 충당률에 따른 민감도 분석은 중요하다. 개방형인 경우 지열력 충당률에 상관없이 투자타당성이 있는 것으로 나타났으며, 순환형에서는 3Mw 일 때 지열력충당률이 0.5 이상인 경우를 제외하고 모두 투자타당성이 있는 것으로 분석되었다.

δ값이 3,000원/Gcal과 5,000원/Gcal인 경우에 대한 민감도분석은 표 7에 요약하였다. 두 경우 모두 열수용가구수가 5,000가구 이상만 되어도 투자타당성은 있는 것으로

표 6. 지열력 충당률 크기에 따른 지열개발유도가격의 민감도

(단위: 원/Gcal)

지열력 Mw	개방형			순환형		
	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7
3	24,327	27,461	30,478	27,461	34,481	42,299
5	22,687	24,327	25,915	24,327	27,461	30,478
7	22,687	22,687	24,327	24,327	24,327	27,461
9	20,982	22,687	24,327	20,982	24,327	27,461
11	20,982	22,687	22,687	20,982	24,327	24,327
13	20,982	22,687	22,687	20,982	24,327	24,327
15	20,982	20,982	22,687	20,982	20,982	24,327
17	20,982	20,982	22,687	20,982	20,982	24,327

로 나타났다. 대표점의 δ값이 3,000원/Gcal인 경우 여타 화석연료의 난방가격이 28,843원/Gcal 이상이어야만 투자타당성이 있으며, 5,000원/Gcal인 경우 26,263원/Gcal 이상이어야만 투자타당성이 있는 것으로 분석되어 δ의 값에 따라 지열개발유도가격은 민감하게 변함을 확인할 수 있다. 그러나 이 경우라도 정당 지열력이 약 9Mw이상이기만 하다면 충분히 투자가능성이 있다.

할인율의 변동(0.05, 0.06, 0.07)에 따른 지열개발유도

표 7.  $\delta$ 값에 따른 지열개발유도가격의 민감도

(단위: 원/Gcal)

$\delta$	거리 km	기구수의 변화							
		3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
3,000	0	23,224	21,885	22,693	21,885	21,298	20,851	21,429	21,060
	10	28,341	25,799	25,804	24,517	23,586	22,880	23,213	22,683
	20	33,401	29,595	28,843	27,069	25,796	24,833	24,943	24,254
	30	-	33,394	31,874	29,595	27,969	26,747	26,644	25,794
5,000	0	20,906	19,557	20,375	19,557	18,953	18,488	19,089	18,706
	10	25,801	23,413	23,418	22,178	21,266	20,563	20,896	20,365
	20	30,359	26,952	26,263	24,616	23,410	22,485	22,592	21,921
	30	35,547	30,352	29,006	26,952	25,456	24,312	24,216	23,409
10,000	0	15,997	14,195	15,295	14,195	13,370	12,725	13,556	13,029
	10	22,134	19,210	19,216	17,647	16,468	15,544	15,983	15,281
	20	27,436	23,504	22,687	20,698	19,206	18,039	18,175	17,318
	30	33,081	27,428	25,896	23,504	21,719	20,325	20,206	19,205

표 8. 할인율 변동에 따른 지열개발유도가격의 민감도

(단위: 원/Gcal)

할인율	열수용기구수									
	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
0.05	53,876	31,651	22,771	19,590	18,921	17,278	16,033	15,051	15,165	14,440
0.06	64,938	36,382	27,436	23,504	22,687	20,698	19,206	18,039	18,175	17,318
0.07	76,442	44,132	32,103	27,382	26,410	24,057	22,308	20,548	21,106	20,112
0.08	-	50,557	39,029	33,020	31,794	28,847	26,675	24,999	25,193	23,975

표 9. 단열강관과 단열 PU관에 따른 지열개발유도가격의 민감도

(단위: 원/Gcal)

관의 종류	거리 km	열수용기구수의 변화							
		3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
PU 관	0	15,997	14,195	15,295	14,195	13,370	12,725	13,556	13,029
	10	22,134	19,210	19,216	17,647	16,468	15,544	15,983	15,281
	20	27,436	23,504	22,687	20,698	19,206	18,039	18,175	17,318
	30	33,081	27,428	25,896	23,504	21,719	20,325	20,206	19,205
단열 강관	0	15,997	14,195	15,295	14,195	13,370	12,725	13,556	13,029
	10	27,310	23,402	22,604	20,625	19,141	17,980	18,122	17,269
	20	39,280	31,162	28,787	26,021	23,964	22,363	22,029	20,896
	30	51,843	40,839	36,065	31,162	28,342	26,321	25,585	24,187

가격의 민감도는 표 8에 요약된 바, 대표점에서 할인율의 증가에 따라 지열개발유도가격은 18,921원/Gcal에서 31,794

원/Gcal로 증가되어 지열의 경쟁력수준이 급속히 감소하는 현상을 확인할 수 있다.

열수송관의 종류 즉 단열 폴리우레탄관(PU관)을 사용할 경우와 단열강관을 사용할 경우 지열개발유도가격의 민감도는 표 9에 요약하였다. 열수송거리에 관계없이 6,000가구 이상이어야 지열연구개발의 투자타당성이 있으며 단열강관을 사용할 경우 지열의 경쟁력은 하강함을 확인할 수 있다[3].

#### 4. 결론

GDHS 연구개발사업의 투자타당성을 평가할 경우 급변하는 에너지환경 및 지열개발에 따른 불확실성을 고려하지 않고 단순히 현재의 추정회계가치로만 평가하게 되면 기존화석의 잠재비용과 지열에 내포된 잠재혜택을 간과하여 지열에너지를 과소평가할 가능성이 높다. 본고에서는 이러한 잠재비용과 잠재혜택의 불확실성을 지열난방가격의 분산으로 표현한 Roberts모형을 수정, 보완하여 제주도 GDHS 개발투자의 타당성모형개발과 분석방법을 제시하였다.

지화학 및 물리탐사 결과 제주도 특정지역의 기대지열온도는 95℃로 추정되고 있다. 지열저수지의 크기, 지열력과 지열량 등과 같은 지열자원의 특성을 추정하기 위해 필요한 시추도 하지 않은 현재 상황에서 GDHS 개발투자의 타당성을 논하기는 이른 감이 없지 않으나, 주어진 기대지열온도와 충분한 지열에너지가 있다는 가정하에 예상지열력, 열수용기구수와 열수송거리 등 입력변수의 범위를 추정하여 각 시나리오별로 지열개발유도가격을 제시하였다. 따라서 지열과 대체될 화석연료의 최종에너지 기준 1 Gcal당 투입되는 가격정보만 있으면 투자타당성의 여부를 알 수 있도록 하였다.

본고의 모형에 따르면 입력변수공간의 대표점에서 개방형은 물론이고 순환형 GDHS의 경우라도 지열개발유도가격이 기존 난방평균가격보다 전반적으로 낮으므로 투자타당성이 있는 것으로 나타났다. 앞으로 10년 내에는 기존연료의 가격이 다소 안정될 것이라는 전제로 편차를 3,000원으로 할 경우도 지열은 여전히 경쟁력을 확보함을 확인할 수 있었다. 세부적으로, 저유황 등유, 저유황 경유, 도시가스 등과 같은 화석연료를 대체하는 상황에

서는 가격경쟁력이 충분하므로 지열의 투자타당성은 있는 것으로 분석되었으며, 연탄이나 중질중유를 대체하는 상황하에서는 전반적으로 투자타당성이 약하나 열수요량, 열수송거리 및 지열력에 따라 투자타당성 여부가 결정되므로 지열개발유도가격을 표로 제시하여 의사결정론자가 판단하도록 하였다.

본고의 모형에서 분석된 바 GDHS개발투자의 경제적 타당성은 검증이 되었으므로, 정부는 불확실성을 확실히 감소시킬 수 있는 심부시추를 조속히 수행하여, 지열에너지의 부존가능성을 확인하는 것이 대체에너지 개발의 초석이 될 것이며 상당한 수준의 지열부존이 밝혀진다면 이는 제주지역 대체에너지기본계획 및 전략에 충격적인 대수정을 초래시킬 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] 상공자원부, 에너지 총조사보고서, 1993.
- [2] 양문희, 김태유, 이상규, "기대지열온도하에서 GDHS의 경제성분석 사례연구", 대한산업공학회지, 제 23권, 제1호, (1997).
- [3] 통산산업부, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안 연구(II), 941K101-113API, 1995. 2.
- [4] 한국지역난방공사, 경영통계, 1993-1994.
- [5] Einarsson, S. S., "Geothermal District Heating" in Geothermal Energy Review of Research and Development, H.C.H. Armstead(ed.), U.N.E.S.C.O., Doc. ISBN 92-3-101063-8, 1973.
- [6] Gudmundsson, J. S., "Direct Uses of Geothermal Energy, 1984", International Symposium on Geothermal Energy International, Volume C, Stone(ed.), Geothermal Resources Council, Davis, California, U. S. A., pp. 302-308, 1985.
- [7] Gunnar Stensland and Dag B. Tjostheim, "Optimal Decisions With Reduction of Uncertainty over Time - An Application to Oil Production", in Stochastic Models and Option Values, pp. 267-291, North Holland, 1991.
- [8] Harrison, R., Mortimer, N. D., and Smarason, O. B., Geothermal Heating, Part III, Pergmon press, 1990.

- 
- [9] John Haraden, "Cost-Benefit Analysis for the Development of Magma Power", ENERGY ECONOMICS, Vol. 17, No. 4, October, 1995.
- [10] Martin L. Weitzman, "Sequential R&D Strategy for Synfuels", The Bell Journal of Economics, Vol. 12, pp. 574-590, 1981.
- [11] Merrow, E. W., Chapel, S. W., and Worthing, C. A., Review of Cost Estimation in New Technologies: Implications for Energy Process Plants, R-2481-DOE, Santa Monica, Ca., Rand Corporation, 1979.
- [12] Roberts, K and Weitzman, M. L., "Funding Criteria for Research, Development, and Exploration Projects". Econometrica, Vol. 49, No. 5, September, 1981. pp. 1261-1288.
- 

97년 8월 최초 접수, 98년 1월 최종 수정