

# 국립해양생물자원관 지열시스템 설계사례

강한기

(주)엔티이 연구소장/공학박사

## 1. 서론

우리나라도 1980년대 이후 산업발전과 더불어 생활수준이 향상되면서, 점차적으로 생활의 질에 많은 관심을 가지게 되었다. 의식주가 해결되면서 그 외의 문제들 즉, 편리하고, 쾌적하게 삶을 영위할 수 있는 방법을 찾게 되었고, 이는 자동차 보급의 급증, 냉방설비 증가로 공해 및 여름철 피크 수요전력이 매년 최고치를 경신하고 있는 현상을 야기 시켰다.

인간은 산업발전에 따른 문명의 혜택을 받고 있으나, 이로 인해 환경은 점차 오염되어가고 있기 때문에 전 세계적으로 지구에 발생하는 환경오염을 막기 위한 노력을 진행하고 있다. 현재 지구온난화 방지를 위해 제정한 도쿄 프로토콜이 발효되어 선진 국가들은 자국 내의 CO<sub>2</sub> 배출량을 프로토콜 기준에 맞추기 위한 작업을 진행 중이다. 이제는 CO<sub>2</sub> 배출량도 거래가 되는 시대가 열렸다. 즉, 화석연료를 사용하여 CO<sub>2</sub>를 발생시키는 생산설비 및 자동차, 냉방설비 등을 운영하기 위해서는 다른 나라에서 절감한 CO<sub>2</sub> 배출권을 사서 운영해야 하는 상황이 발생할 수도 있을 것이다.

국내의 경우에는 현재 도쿄 프로토콜에 제약을 받지 않고 있으나, 2013년부터는 CO<sub>2</sub> 발생 저감에 동참해야 하는 실정이다. 따라서 국내에서도 CO<sub>2</sub> 배출량을 저감하기 위해 하이브리드 자동차,

신재생에너지 설비 등 친환경에 큰 관심을 기울이고 있으며, 많은 예산을 녹색환경에 투자하고 있다.

국내 지열시스템은 2003년을 기점으로 하여 그 보급이 크게 증가하기 시작했는데, 그 이유는 정부가 2003년에 공공의무화사업(공공기관 또는 정부투자기관에서 신축건물을 지을 때 의무적으로 표준건축공사비의 5%를 신재생에너지설비에 투자하는 사업)을 시작했기 때문이다.

지열시스템은 타 신재생에너지 설비에 비해 설치위치 및 기후에 제한을 받지 않고, 건물에 적용성이 우수해 그 보급량 크게 증가하였고, 이에 따라 지열시스템을 공급하는 업체 또한 기하급수적으로 늘어나게 되었다. 그러나 무분별한 업체의 난립으로 인해 설계 및 시스템 성능에 대한 문제가 제기 되었고, 이를 해결하기 위해 정부에서는 공공의무화사업 시행시 사전 열전도테스트를 통해 지중열교환기의 성능을 확인하고, 설치된 후에도 모니터링 시스템을 통해 지속적인 지열시스템의 시스템 성능을 검토하고 있다.

이러한 시스템 성능 개선과 모니터링을 통해 지열에 대한 신뢰성을 높이고 있으며, 이를 바탕으로 지열시스템 설계가 지속적으로 이루어지고 있다.

본고에서는 지열시스템 설계가 어떻게 진행되고 있는지를 서천에 들어서게 되는 '국립 해양생물 자원관' 지열시스템 설계사례를 들어 알아보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 건물개요

천에 들어서게 되는 국립 해양생물자원관은 교육시설로 건물 연면적은 29,785.25 m<sup>2</sup>이며, 지상 4층, 지하 1층으로 이루어진 건물이다.

본 건물은 정부에서 시공하는 것으로 공공의무화에 해당되며, 이에 따라 신재생에너지를 의무적으로 일정부분 이상을 설치해야 한다. 이에 따라 신재생에너지 설비 종류와 용량을 산정하여야 하는데, 이는 정부에서 매년 발표하는 표준건축공사비(2009년 1,580,000원/m<sup>2</sup>)와 연면적 등을 이용하여, 신재생에너지 설비 투자금액과 용량 등을 산정하게 된다.

따라서 공공기관 건축물 설비설계 진행시 제일 우선시 되는 것이 신재생에너지 설비를 정하는 것이고, 후에 나머지 열원설비를 구성하게 된다.

본 건물의 표준 건축공사비는 약 230억 원이며, 이 중 5%에 해당되는 금액(11.6억 원)을 신재생에너지설비에 투자해야 한다. 이에 신재생에너지 투자금액 중 67%(7.8억 원)정도를 건물 냉난방

을 수행할 수 있는 지열시스템으로 확정하였으며, 나머지 금액은 태양광과 집광채광으로 시스템을 선정하였다.

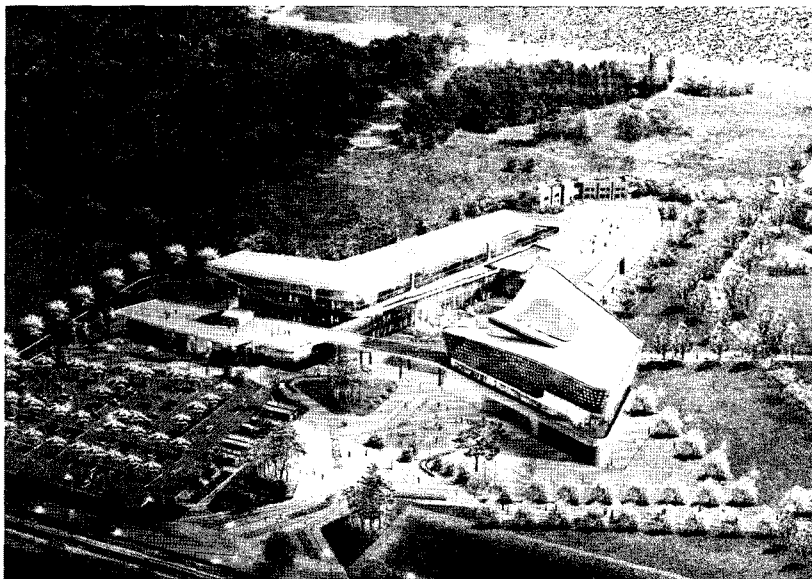
### 2.2 냉난방 열원 구성

#### 2.2.1 전체 열원계통

냉난방 설비인 지열시스템 용량이 결정된 후 건물 냉난방 부하 중 지열용량을 제외한 나머지 부하에 대해 열원시스템을 선정하게 된다.

본 건물의 총 냉방부하는 1,310 RT이며, 이 중 260 RT는 지열시스템이 담당하도록 설계하였다. 이 때 지열시스템은 수축열과 결합된 축열식 지열시스템으로 설계를 진행하였으며, 히트펌프 용량은 160.9 RT로 선정되었다. 그리고 지열시스템 특성상 난방시 온수 공급온도가 50로 타 열원에 비해 낮기 때문에 다른 열원과 배관구성을 통합하지 않고, 독립적으로 수장 연구시설에만 공급하는 것으로 열원을 구성하였다.

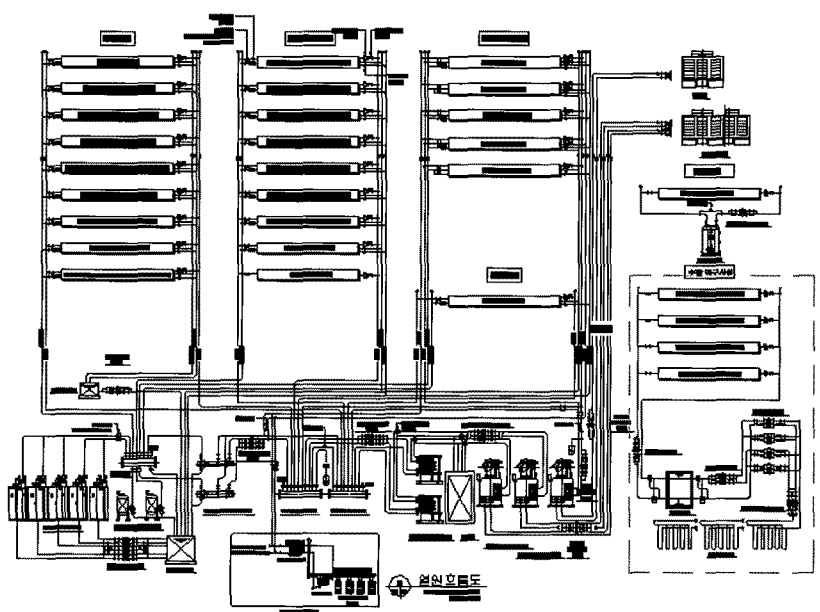
그림 2는 전체적인 냉난방 열원 계통을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 축열식 지열시스템은



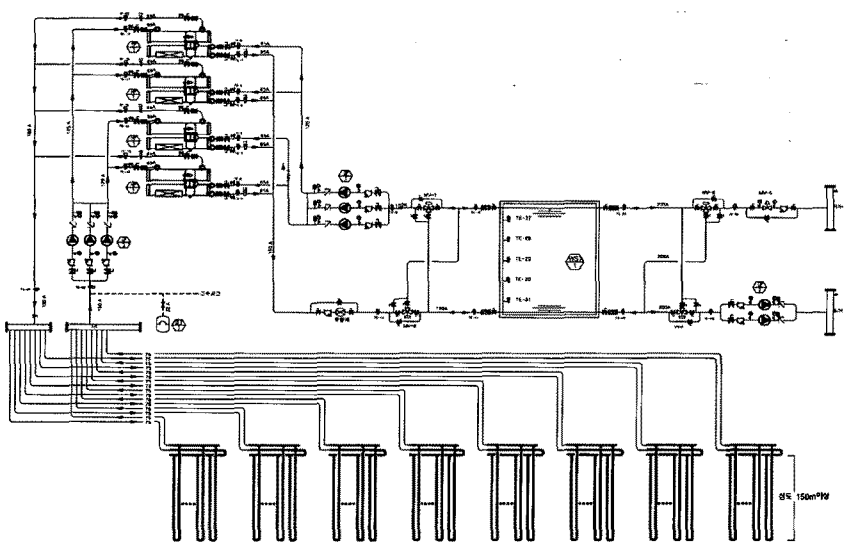
[그림 1] 국립 해양생물자원관 조감도

단독으로 구성되어 있으며, 나머지 열원을 살펴보면 냉방은 빙축열시스템(850 RT), 스크류 냉동기(200 RT)로 설계되었으며, 난방열원은 관류형 보일러(2 ton/h) 5대로 구성되었다.

2.2.2 축열식 지열시스템 계통 및 특징  
그림 3과 같이 축열식 지열히트펌프는 히트펌프와 부하측 사이에 냉온수를 저장할 수 있는 수축열조를 연결한 시스템으로 심야시간대에 값싼 심



[그림 2] 열원흐름도



[그림 3] 축열식 지열시스템 계통

야전력을 이용하여 히트펌프를 가동하여 저장된 냉온수를 전력값이 비싼 주간에 사용하기 때문에 연간 운전비를 절감할 수 있다. 또한 전체 일일부하량 중 일부를 수축열조가 담당하게 됨으로써, 일반지열시스템으로 설치할 경우보다 약 40% 이상 히트펌프 용량을 감소시켜, 초기투자비, 유지관리비용을 절감할 수 있다.

### 2.3 지열시스템 설계

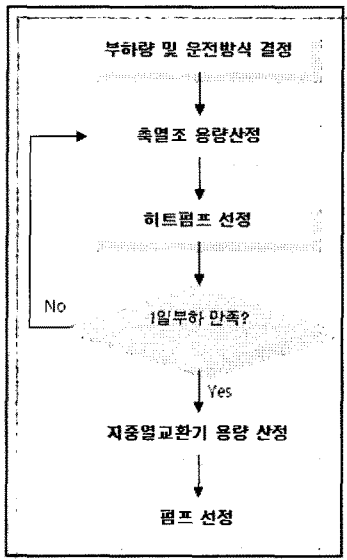
본 건물에 적용된 지열시스템은 수축열조와 결합된 축열식 지열히트펌프시스템으로 설계단계는 그림 4과 같은 순서로 진행된다.

제일 먼저 담당부하와 운전시간(12시간) 및 운전방식을 결정한 후 총 부하량의 40% 이상을 담당하도록 축열조 용량을 선정하게 된다.

축열조 용량을 결정한 후 히트펌프 용량이 산정되며, 히트펌프 용량에 맞게 지중열교환기 수량을 산출하게 된다.

#### 2.3.1 부하량 및 운전방식

수축열조 적용에 따라 주간 냉난방시 축열조와



[그림 4] 축열식 지열히트펌프 설계순서

히트펌프를 이용할 수 있는 부분축열방식을 채택하였고, 일일부하량은 다음과 같은 방식으로 선정하였다.

- 1) 냉방부하 : 263.5 RT (796,824 kcal/h)
- 2) 난방부하 : 543 Mcal/h
- 3) 냉방시간 : 12시간
- 4) 부하율 : 78%
- 5) 일일냉방부하량 : 2,470 RT-h

#### 2.3.2 수축열조 설계

수축열조 용량은 부분축열 방식으로 전체 일일부하량의 40% 이상을 담당하도록 규정하고 있다. 또한 수축열조 용량을 증가시킬수록 주간 지열히트펌프 가동시간을 감소시켜, 냉난방운전비를 절감시킬 수 있으나, 수축열조 면적 및 초기투자비가 증가하게 된다. 따라서 수축열조 용량은 공간 및 경제성 측면에서 가장 유리한 비율인 일일부하량의 40 ~ 50%로 설계하는 것이 바람직하다.

본 설계에서 축열조 용량은 앞서 구한 일일냉방부하(2,470 RT-h)의 45%인 1,112 RT-h로 선정하였다. 이 때 수축열조 유효체적(저장수량)은 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\text{유효체적} = \frac{\text{축열조 용량}(1,112 \text{ RT-h} \times 3,024 \text{ kcal/RT-h})}{\text{물의 밀도}(1,000 \text{ kg/m}^3) \times \text{축열조 저장 온도차}(12^\circ\text{C} - 7^\circ\text{C}) \times \text{단열효율}(0.95)} = 505 \text{ m}^3$$

최종 수축열조 체적은 600 m<sup>3</sup>[가로(12m) × 세로(10m) × 높이(5m)]이며, 이 때 유효 수위 높이는 4.21 m 이다.

#### 2.3.3 히트펌프 설계

히트펌프 용량은 심야시간(23:00 ~ 09:00)대에 수축열조 용량을 저장할 수 있어야하며, 수축열조와 함께 피크부하 및 일일부하량을 만족할 수 있는 것으로 선정하며, 또한 공공의무화 사업시 에너지관리공단에서 인증 받은 히트펌프 제품을 사용해야 한다.

이와 같은 조건을 토대로 선정된 히트펌프 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1의 세부사양을 살펴보면, 지열시스템 히트펌프 용량 설계시 냉수저장온도는 5℃, 온수저장온도는 50℃로 하였으며, 열원측 온도조건은 시스템 사용에 따른 열매체 온도변화를 고려하여, 냉방시에는 31℃, 난방 때는 5℃ 열매체가 히트펌프로 공급된다.

**2.3.4 지중열교환기 설계**

지열시스템에서 가장 중요한 부분이 지중열교환기로서, 그 용량 및 수량에 따라 히트펌프 효율이 크게 변경될 수 있다. 따라서 가장 신중하고 정확하게 지중열교환기를 설계해야 시스템의 신뢰성을 증대시킬 수 있다.

초기 지열시스템의 지중열교환기, 특히 수직형 (Vertical type) 설계시 외국자료(미국 지열학회 자료 등)를 인용하여 용량 및 수량을 설계하였다. 하지만 이는 운영시간, 지질조건, 히트펌프 조건 등에 상관없이 때문에 실제 운영시 히트펌프 용량과 일치하지 않는 문제가 발생하기도 하였다.

이러한 건물특성, 지질조건, 열원장비의 차이에서 발생하는 설계오차를 방지하기 위해 최근에는 외국에서 그 성능이 입증된 지중열교환기 설계 프로그램을 이용하여 그 용량 및 수량을 산정하고 있다.

본 시스템 설계에서도 미국에서 개발되고 상용화된 프로그램인 GLD(Ground Loop Design)을 이용하여 지중열교환기 깊이 및 수량을 산출하였다.

GLD 프로그램을 이용하여 수직형 지중열교환기 설계방법은 다음과 같이 7단계의 창에 토양이 가지는 물성치, 토양의 평균온도, 열교환기 설치 방법 및 건물의 특성(운영시간, 부하패턴 등), 히트펌프 사양을 입력하여 최종으로 지중열교환기 깊이 및 수량을 산출하게 된다(그림 5 참조).

그림 6은 GLD 프로그램을 이용하여 수직형 지중열교환기 수량 산출을 수행한 결과를 보여주고 있다.

그림을 살펴보면, 히트펌프 총 냉방용량이 565 kW(160 RT)일 때 총 열교환기 길이는 11,943 m가 필요하며, 이를 깊이 150 m 수직형 지중열교환기로 설치할 경우에는 약 80공(히트펌프 대당 20공)을 설치하는 것으로 나타났다.

이 때 열매체의 히트펌프 유입온도는 냉방시 31℃이며, 난방시에는 5℃로 하였다.

지중순환펌프를 고려한 전체 시스템의 냉방효율 (COP)은 약 3.5 정도이다.

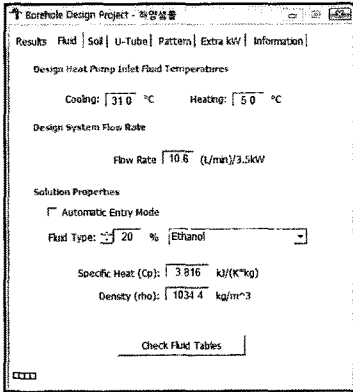
이와 같이 프로그램으로 산출된 수직형 지중열교환기 수량을 본 건물에 적용하고자 그림 7과 같이 평면 배치도에 그 위치를 나타내었다.

지중열교환기를 배치할 때는 충분한 설치면적이 있을 경우에는 바둑판 배열이 아닌 최대한 길이 방

<표 1> 히트펌프 세부사양

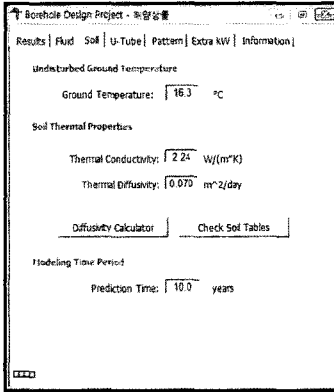
용량	냉방(USRt)	40.23	소비전력	냉방	37.1	중량	제품(kg)	836			
	난방(Mcal/h)	146.3	(kW)	난방	52.15		운전(kg)	-			
수량(대)		4				크기(m)		L 1.4 × W 0.7 × H 1.8			
형식		지열히트펌프				사용냉매		R-410A			
기동방식		직입기동				전원		3상 380V 60Hz			
냉수	순환유량(lpm)	510				냉각수 (지열)	순환유량(lpm)	510			
	입구온도	냉방	9.0℃	난방	45.0℃		입구온도	냉방	31.0℃	난방	5.0℃
			출구온도		5.0℃				49.8℃		출구온도
	손실수두(mAq)	2.6					손실수두(mAq)	3.5			
	접속구경(A)	50					접속구경(A)	50			

1) 순환유체 입력창



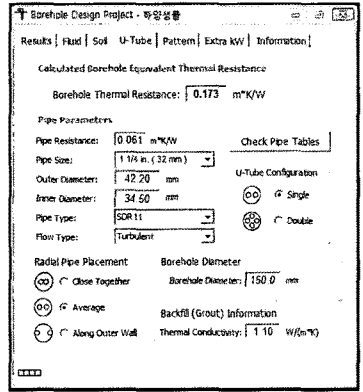
- (1) 히트펌프로 유입 열매체 온도
- (2) 유체 유량
- (3) 유체 성분 및 특성

2) 토양특성 입력창



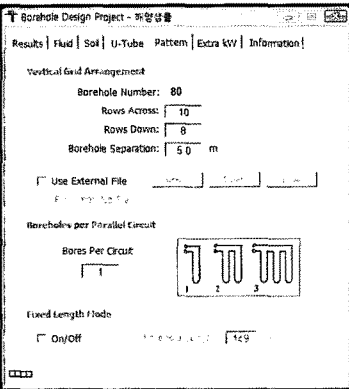
- (1) 토양의 평균온도
- (2) 토양의 열전달 및 열확산률

3) 지중 열교환기 입력창



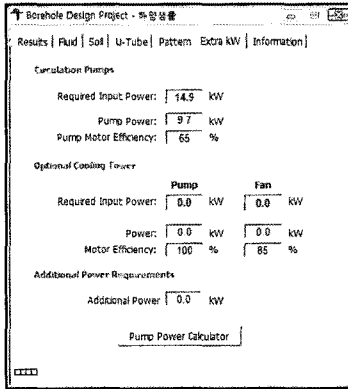
- (1) 보어홀의 열저항
- (2) 파이프 특성
- (3) U 튜브 설치방법

4) 지중열교환기 설치 입력창



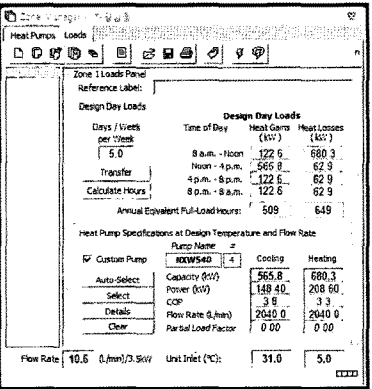
- (1) 지중열교환기 배치
- (2) 지중열교환기 이격거리
- (3) 지중열교환기 회로 구성

5) 지열순환펌프 입력창



- (1) 지열순환펌프 동력
- (2) 하이브리드 시스템의 경우 냉각탑 동력

6) 부하 및 히트펌프 입력창



- (1) 건물의 운영특성
- (2) 부하패턴
- (3) 히트펌프 사양

7-1) 냉방부하패턴

Month	Total (kWh)	Peak (kW)	Monthly Load Factor
January	0.0	0.0	0
February	0.0	0.0	0
March	0.0	0.0	0
April	0.0	0.0	0
May	0.0	0.0	0
June	21098.0	282.9	0.10
July	52031.8	565.8	0.22
August	146177.4	565.8	0.35
September	28559.1	282.9	0.14
October	0.0	0.0	0
November	0.0	0.0	0
December	0.0	0.0	0
<b>Total/Max:</b>	<b>287876.3</b>	<b>565.8</b>	<b>Clear</b>
Full-Load Hours:	509	hr	Modify

7-2) 난방부하패턴

Month	Total (kWh)	Peak (kW)	Monthly Load Factor
January	123329.4	680.3	0.24
February	99931.4	680.3	0.22
March	62645.3	348.3	0.24
April	13407.5	0.0	0
May	0.0	0.0	0
June	0.0	0.0	0
July	0.0	0.0	0
August	0.0	0.0	0
September	0.0	0.0	0
October	0.0	0.0	0
November	32835.9	273.0	0.17
December	109450.0	680.3	0.22
<b>Total/Max:</b>	<b>441593.9</b>	<b>680.3</b>	<b>Clear</b>
Full-Load Hours:	649	hr	Modify

[그림 5]

Borehole Design Project - 해양생물

Calculate	COOLING	HEATING
Total Length (m):	11943.0	8774.6
Borehole Number:	80	80
Borehole Length (m):	149.3	109.6
Ground Temperature Change (°C):	+0.3	-0.4
Unit Inlet (°C):	31.0	5.0
Unit Outlet (°C):	37.4	2.5
Total Unit Capacity (kW):	565.8	830.0
Peak Load (kW):	565.8	830.0
Peak Demand (kW):	163.3	242.5
Heat Pump COP:	3.8	3.0
System COP:	3.5	3.0
System Flow Rate (L/min):	1697.1	2040.6

Optional Cooling Tower/Boiler	Value	Unit
Condenser Capacity (kW):	0.0	Cooling Tower
Cooling Tower Flow Rate (L/min):	0.0	0 %
Cooling Range (°C):	5.6	5.6
Annual Operating Hours (hr/yr):	0	0 %
Boiler Capacity (kW):	0.0	Load Balance

[그림 6] 지중열교환기 설계결과

향으로 길게 배치하는 것이 지중열교환기가 갖는 용량을 최대한 이용할 수 있는 방법이다. 다른 지중열교환기로 둘러 쌓인 열교환기 수가 많을수록 열저항이 커져 지중과의 열교환 효율이 저하되고, 이에 따라 히트펌프 효율 저하의 원인이 될 수 있다.

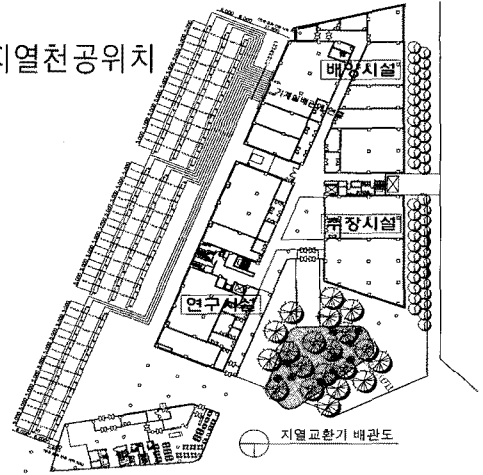
따라서 본 설계에서는 지열시스템의 효율 향상과 운영비 절감을 위해 지중열교환기 배치를 최대한 길게 배치되도록 하였다.

또한 시스템의 설계를 일반지열이 아닌 축열식 지열로 설계를 해서 총 부하 상당시간이 늘어나게 되며 이로 인해서 지열열교환기의 길이가 많이 늘어난 것을 볼 수 있다. 지열시스템을 설계하고 설치할 경우 부하율 및 사용시간에 따른 지열열교환기의 설치 길이가 많이 달라지게 되므로 이에 대한 예측을 잘 해서 추후 운전시에 문제가 발생하지 않도록 미리 설계시 많은 고려를 해야 한다.

### 3. 맺음말

본고는 공공의무화사업인 ‘국립 해양생물자원

### 지열천공위치



[그림 7] 지중열교환기 배치도

관’ 신축공사에 적용된 지열시스템에 대한 설계 사례를 설명하였다.

향후 국가 정책에 의해 지열시스템의 보급이 현재보다 더 증가될 것으로 예상되며, 이에 따라 시스템 운영의 안정성과 효율 증대에 더 많은 관심을 기울여야 할 것이다.

이에 지열시스템 특성상 지중열교환기는 한번 설치하며 보수 및 용량증대를 할 수 없기 때문에 설계 단계부터 정확하고, 신뢰성 있는 기술을 토대로 시스템을 설계해야 한다. 즉 건물의 특성, 부하패턴, 히트펌프 사양 등 여러 조건에 따른 정확한 지중열교환기 수량을 파악해야 하며, 산정된 지중열교환기를 건물 주위에 배치시킬 때도 바둑판배열이 아닌 길이 방향으로 배치시키는 것이 지중과의 열전달 효과를 높여, 히트펌프 효율 증대 및 에너지절감에 기여할 수 있다.

이런 엔지니어링에 대한 충분한 검토와 설계를 했을 경우에 지열이 진정으로 에너지 절약을 할 수 있는 시스템이 될 수 있으며 이는 지열시스템에 대한 신뢰를 확보할 수 있어 추후 시장이 확대될 것으로 판단된다. 특히 24시간 지열시스템을 사용하게 되는 시설들(하우스, 수장고, 서버실 등)에 지열시스템을 설치하는 것은 신중하게 검토를 요할 것으로 판단된다. ☺