

## 도시 수자원으로서의 상수·우수, 하수에 대한 열적 포텐셜의 평가

정용현·水野 掄·이현모<sup>\*</sup>·윤종호<sup>\*\*</sup>·오은주  
大阪大學 環境工學科·동의공업대학 환경공업과<sup>\*</sup>·신성대학 환경공업과<sup>\*\*</sup>

### Evaluation on Thermal Potential of Tap Water, Rain Water, Waste Water as City Water System

Yong-Hyun Chung·Minoru Mizuno·Heon-Mo Lee<sup>\*</sup>·Jong-Ho Youn<sup>\*\*</sup>·Eun-Joo Oh  
*Department of Environmental Engineering, University of Osaka, Japan*  
*Department of Environmental Engineering, Donggeui Institute of Technology, Pusan, Korea<sup>\*</sup>*  
*Department of Environmental Engineering, Sinsung College, Chung Nam, Korea<sup>\*\*</sup>*

#### Abstract

It has been referred as a problem that heat source/sink is distance from heat demand area in using unused energy.

To solve the distance problem in using unused energy, the water from city water system like tap water, rain water, waste water used as unused energy. To survey the potential of the water of city water system, it is developed that the calculation method of the potential using unit method. The amount of theoretical unused energy and energy saving in the Osaka City, Japan were estimated by using that method.

#### I. 서 론

물은 인간생활에 불가결한 자원으로 각 용도로 사용되어지고 있고, 그와 관련된 인프라시스템의 정비로 도시에서 대량으로 소비되고 있다. 그러나, 현재 도시에서의 수자원의 확보에 대한 문제가 많은 상태이고, 가격 또한 상승하고 있는 실정이다. 한편, 물은 무해하고 안전한 유체로서 각종의 기능을 가지고 있으므로 수자원의 안정적인 사용에 대하여, 새로운 대책과 합리적인 이용 방법 등이 필요하고, 경제의 고도화, 생활 수준의 향상, 라이프 스타일의 변화 등에 따라서 종래 형태의 물 사용 방법뿐만 아니라, 물의 질적인 특성을 살린 물의 다목적 이용의 궁리가 필요하다. 물의 질적

이용의 일례로서 수자원의 미 이용에너지로서의 이용을 생각할 수 있다. 급후, 열원으로서의 이용은 히트펌프 등의 열 이용 기기의 효율향상과 더불어 그 중요성이 높아질 것으로 기대된다. 따라서, 지금까지 열원으로서 이용되지 않았던 수자원을 열원으로서의 사용에 대한 가능성의 평가를 본 연구에서 실시한다.

미 이용에너지원에는 열원으로 사용하는 것에 따라 종래의 에너지 소비효율을 높이는 것(저레벨 열원)과 자체 열원만으로 수요를 만족할 수 있는 것(고레벨 열원)과 같이 두 종류로 나눌 수 있다. 미 이용에너지 가운데서도 수계의 열원들은 온도차 에너지로 불리우며, 여름철에는 수온이 기온보다 낮고, 겨울철에는 높은 온도를 유지하는

특징을 이용하여, 히트펌프의 열원으로 사용함으로써 전력소비를 절약하는 것이다. 이는, 일반적으로 물은 공기보다도 전열특성이 좋으므로, 예를 들어 같은 온도에서도, 수 열원은 공기열원에 대하여 에너지 절약의 효과를 가진다.

한편, 지구 온난화 현상의 주요원인인 CO<sub>2</sub> 저감 대책 및 환경부하의 저감대책의 일환으로 선진국에서는 미 이용에너지에 대한 관심과 그 활용이 진행되고 있다. 도시에서의 미 이용에너지의 활용 가능성은 지역특성에 의존하는 이유에서 많은 도시에서의 조사가 되어지고 있다.<sup>1-3)</sup> 이상의 결과에 의하면 미 이용에너지는 상당히 많은 양이 존재하지만 지역에서의 열수요지와 열원지간의 지리적인 불일치가 큰 문제점으로 지적되어지고 있다.

본 연구에서는, 이러한 문제점을 해결하기 위해, 도시 수자원중 상수, 우수, 하수를 열수요지와 열원지를 지리적으로 일치시키는 열원으로서 활용하였다. 이에 대한 열원으로서의 포텐셜을 평가하기 위해, 원단위법을 제안하고, 오사카시를 대상으로 한 결과를 중심으로 평가하는데 목적이 있다.

## II. 연구방법

### 1. 열 포텐셜 계산을 위한 원 단위 계산법

마크로 평가는, 원 단위법을 이용하면 간편하게 계산할 수 있다. 이하로부터 일반적인 수자원의 열적 포텐셜에 관한 원단위법에 관하여 기본적인 검토를 실시하고, 본 연구의 대상인 상수의 열원으로 이용에 대한 평가수법을 제안한다.

### 1.1. 이용가능열량의 원 단위법

수자원을 열원으로 사용하면 온도가 변화하므로 수온변화를  $\Delta T^{\circ}\text{C}$ 로 정하고, 이때 이용할 수 있는 열량을 이용 가능량으로 정의한다. 다만 히트펌프의 경우에는 열원 측과 수요 측 열량의 양자가 존재하나, 여기서는 이용가능열량을 수요 측의 열량으로 지칭한다. 그러므로, 냉난방의 경우는 수 열원으로 처리할 수 있는 냉난방부하가 이용가능 열량이 된다. 한편, 냉방 폐열은 급탕 부하의 감소에 이용할 수가 있다.

수자원의 포텐셜은 냉방, 난방, 급탕의 모드에 의해 달라지므로 모드에 따른 고찰을 실시 했다. 어떤 온도의 수자원 1 m<sup>3</sup>/h에 대한 이용가능열량의 원단위법에 대하여 고찰한다.

1.1.1. 냉방열원으로서 수자원을 이용하는 경우  
냉방모드에서의 히트펌프의 열평형식을 Fig. 1.에 표시하였다. 여기에서 냉방부하를  $Q_c$  [kJ/h], 히트펌프 투입전력을  $E$  [kJ/h]로 두면, 열평형식 (1)과 (2)로부터 이용가능열량의 원단위로 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$Q_c + E = R \times c \times \Delta T \quad (1)$$

$$E = Q_c / \text{COP}_c \quad (2)$$

$$Q_c / R = c \times \Delta T \times \text{COP}_c / (\text{COP}_c + 1) \quad (3)$$

여기서,  $R$ 은 수사용량[m<sup>3</sup>/h],  $\Delta T$ 는 수온의 변화량[ $^{\circ}\text{C}$ ],  $c$ 는 물의 비열[kJ/(m<sup>3</sup>  $^{\circ}\text{C}$ )], 냉방시의 히트펌프 성적계수를  $\text{COP}_c$ 로 한다.

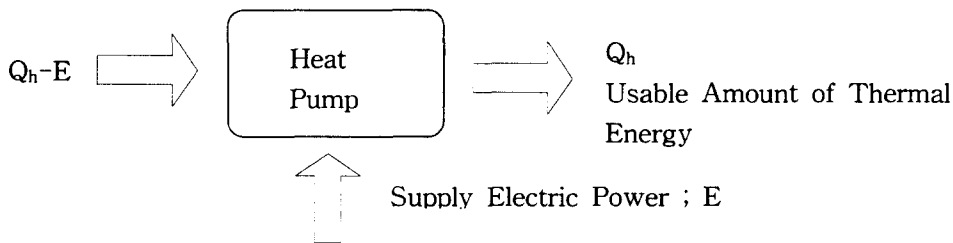


Fig. 1. The heat balance on cooling mood.

1.1.2. 냉방 폐열을 급탕 열원으로 이용하는 경우 상수를 냉방 열원으로 사용하는 경우는 수온이 상승하기 때문에, 급탕용의 에너지 절약이 이루어진다. 특히, 호텔이나 주택 등에서는 급탕 수요가 많기 때문에 이에 따른 에너지 절약의 이점을 계산할 필요가 있다. 급탕의 열원으로 이용가능한 열량  $Q_w$  [kJ/h]는 식(4)와 같다.

$$Q_w/R = (Q_c + E)/R = (Q_c/R) \times (1 + 1/COP_c) \quad (4)$$

1.1.3. 난방열원으로서 수자원을 이용할 경우 난방부하를  $Q_h$ 로하여 열 평형식 (5)를 얻을 수 있다. 난방시의 히트펌프의 성적계수를  $COP_h$ 로하여 식(6)을, 이 식으로부터 난방시의 이용가능열량단위로서 식(7)을 얻을 수 있다.

$$Q_h - E = R \times c \times \Delta T \quad (5)$$

$$E = Q_h / COP_h \quad (6)$$

$$Q_h / R = c \times \Delta T \times COP_h / (COP_h - 1) \quad (7)$$

**1.2. 에너지 절약량의 원단위법**

수자원 1[m<sup>3</sup>/h] 이용에 대한 에너지 절약량은 대조되는 히트펌프시스템과의 비교에 의하여 얻을 수 있다. 대조시스템으로 공기열원 히트펌프를 이용하였으며, 냉난방의 경우에 있어서, 에너지 절약량의 원단위는 수열원과 공기열원의 소모전력의 차를 발전효율을 고려한 1차에너지로 환산한 식 (8)로 정의 한다.

$$\Delta E_c / R = Q_u \times (1 / COP_a - 1 / COP_w) \times 1 / (0.351 \times R) \quad (8)$$

여기서,  $\Delta E_c$ 는 에너지 절약량[kJ/h],  $Q_u$ 는 이용 가능열량[kJ/h],  $COP_a$ 는 공기 열원 히트펌프의 성적 계수,  $COP_w$ 는 수 열원 히트펌프의 성적계수이다.

냉방폐열을 급탕에 이용하는 경우의 에너지 절약량은 가열용가스가 삭감가능한 것으로 하여 계산하였으며, 보일러 효율  $\eta_b$ 을 0.8로 설정하여, 다음의 식으로 에너지 절약량을 계산한다.

$$\Delta E_h / R = Q_u / (\eta_b \times R) \quad (9)$$

여기서,  $\Delta E_h$ 는 에너지 절약량[kJ/h],  $Q_u$ 는 이용

가능열량[kJ/h]을 나타낸다.

**1.3. COP 모델**

히트펌프의 COP에 영향요인으로 열원의 온도 (입구온도, 이용온도차), 열원의 종류(물, 공기등)을 고려할 필요가 있다.金地<sup>4)</sup>는 기기의 실제 자료를 이용, 카르노사이클을 기본으로 한 경험식을 만들어, 이러한 변수의 효과를 평가할 수 있는 실용적인 온도차-효율모델을 제안하고 있으므로 본연구에서는 상기의金地모델을 평가에 이용하였다.

**1.4. 열원의 이용온도차**

히트펌프는 열원의 이용에 대하여 보통 5℃가 변화되도록 설계되어 있다. 이것은 경험치로서의 최적치이지만, 에너지 절약을 높이기 위해, 온도차의 최적치는 변화 될 수 있다. 따라서, 히트펌프를 이용한 에너지 절약의 평가는 이용온도차가 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 온도차를 종래형의 5℃ 이용의 경우와 열원이 가진 에너지 절약 포텐셜을 최대한 이용하는 경우 (이후 한계이용이라고 칭한다)의 양자에 대한 계산을 대상으로 한다. 특히, 후자의 경우는 어떤 온도의 공기 열원과 같은 COP값이 되는 수열원의 온도까지 수열원을 활용할 수 있으나, 난방의 경우에는 온도가 저하함에 따라 동결의 위험이 있으므로, 열원측 출구 온도를 최저 5℃로 설정하였다. 이로 인해 열원수의 온도가 낮은 경우에는 이용 온도차  $\Delta T$ 가 제약을 받게된다.

**2. 오사카시에서 상·하수,우수의 열적포텐셜의 평가**

실제 도시에서의 상·하수,우수의 열적포텐셜의 부존량을 파악하기 위해, 오사카시를 모델도시로 이용하여, 전술하였던 원단위법으로 각열원에 대한 포텐셜을 평가하였다. 평가에 대한 추정순서도를 Fig. 2.에 표시하였다.

열적포텐셜에 대한 각 지역에서의 부존량의 분포는 격자단위(250 m × 250 m)로 추정하였으며, 계산에 필요한 건물의 바닥면적을 오사카시 계획국 작성(1993년)의 건물 바닥면적 조사 결과를 이

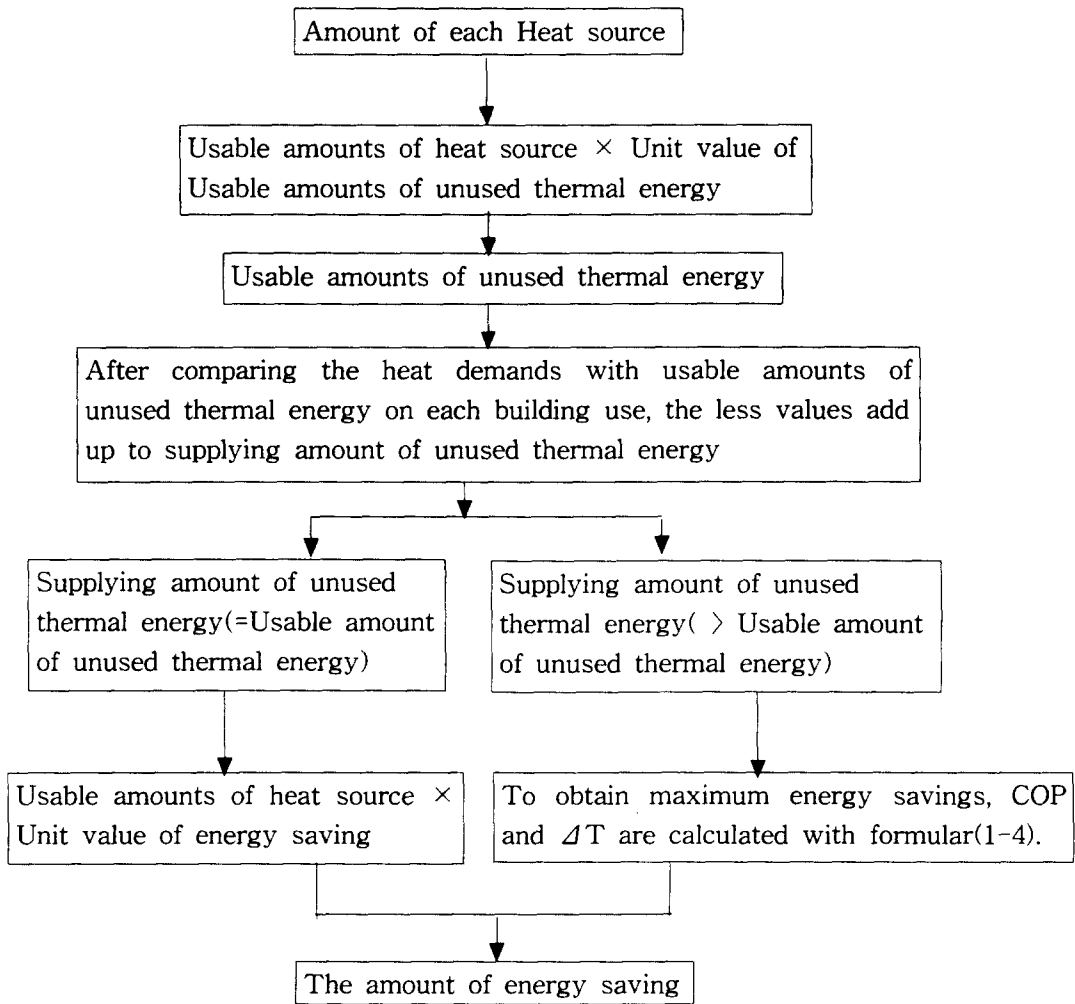


Fig. 2. The evaluation flow on thermal potential of unused heat source

용했고, 열수요, 물의수요에 관한 원단위는 尾島<sup>5)</sup>의 자료를 이용하였다. 건물분류는 주택, 사무소, 점포, 유흥오락, 숙박, 미술관 및 박물관, 종합병원, 의료시설, 관공서를 이용하였다.

**2.1. 수량, 열수요량의 평가**

상·하수, 우수의 온도차 에너지를 히트펌프의 열원으로 이용하며, 5월부터 10월을 냉방기, 11월부터 4월을 난방기로 하였다. 계산에 필요한 기온은, 오사카시의 기상자료의 평년치를 이용하고, 상수온은 오사카시의 정수장 출구 온도를 이용했

다.<sup>6)</sup> 우수량은 우수의 집수면적을 지붕면적과 동일하게 하고, 오사카시의 연평균강수량을 곱하여 계산했다. 하수량(급탕 이용분만을 대상으로 하였다)은, 급탕 사용량이 많은 주택만 계산하였으며, 상수 사용량에서 화장실용수(18%가정)를 제외한 값을 이용하였다. 하수온도는 급탕수의 약 70%로 설정하였다.<sup>7)</sup>

**2.2 공급가능 열량의 평가**

이용가능 열량은 열원에 사용된 수자원을 전부 활용한 경우에 얻을 수 있는 열 부하로, 만약 실

제의 열 부하 보다 이용가능열량이 많을 경우에 이용되지 못하고 남는 경우가 발생한다. 이러한 경우에, 각 지역에서의 에너지 절약량을 계산하기 위하여 실제 열 부하에 이용된 이용가능 열량을 필요로 하며, 이를 공급가능열량으로 정의 하였다. 본연구에서의 상수열원은, 수요지에서 직접 이용 가능한 열원으로서 분산이용을 기본으로 하는 열원이다. 이점으로부터, 종래의 열원에서는 전용도의 합계에서 열 공급 가능 열량을 계산하고 있음에 반하여, 각 건물용도의 열 수요와 이용 가능량을 비교하여 적은 쪽을 공급가능 열량으로 하고, 그 값을 더하여 계산하였다. 왜냐하면, 종래의 열원에서는 열수요와 열원의 수량에 직접관계가 없는데 반하여, 각 건물 용도의 수사용량과 열수요의 균형이 결정되기 때문이다.

**2.3. 에너지 절약량의 평가**

상·하수, 우수를 열원으로서 이용에 따른 에너

지 절약량은 식(8), (9)의 에너지 절약 원단위를 이용하여 계산하였다. 그러나, 공급가능열량에 대한 에너지 절약량은 공급가능열량과 이용가능열량의 상대적 관계에 좌우된다.

a) 공급가능열량 = 이용가능열량의 경우에는 원단위를 이용한 계산이 가능하다.

b) 공급가능열량 < 이용가능열량의 경우에는 열원으로 이용되는 수자원이 남을 경우이므로 여기서는, 수자원의 열원으로서의 이용의 방법에 따라 에너지 절약량이 달라진다. 예를 들면, 5℃ 이용의 경우는 수량의 일부를 이용하여 5℃ 조건을 따르면 원단위를 이용한 계산이 가능하다. 그러나, 이용온도차를 바꾸어 전수량을 열원으로 이용한다면, 히트펌프의 성능이 향상되어, 보다 많은 에너지 절약효과를 얻을 수 있다. 공급가능열량에 대하여 에너지 절약량을 계산할 때는, 후자가 합리적이므로 이 경우에는 원단위를 사용하지 않고 식 (1), (2) 난방시에는 식(5), (6)로부터 이용온도차를

Table 1. Heat potential of each heat source on cooling(July) (TJ/Month)

Heat source	Theoretical usable amount of unused Thermal energy	Theoretical amount of energy saving	Supplying amount of unused thermal energy	Energy saving
River water	2716	644	288	66
Sea water	363	101	14	4
Incineration plants	527	462	2	2
Treated sewage water	1157	238	2	1
Sum	4763	1446	307	73
Tap water (Using to 5 degree)	659	138	659	138
Tap water (Using to limit)	2395	252	2195	257
Rain water (Using to 5 degree)	106	27	106	27
Rain water (Using to limit)	445	57	445	57
Waste water (Using to 5 degree)	350	40	350	40
Waste water (Using to limit)	860	49	860	49
Sum	4815	563	4615	568

Table 2. Heat potential of each heat source on heating(January) (TJ/Month)

Heat source	Theoretical usable amount of unused Thermal energy	Theoretical amount of energy saving	Supplying amount of unused thermal energy	Energy saving
River water	2119	332	301	47
Sea water	579	101	13	2
Incineration plants	657	565	2	2
Treated sewage water	1404	339	3	1
Power plants	2976	722	0	0
Transformer substations	62	25	51	21
Subway tunnels	74	9	70	8
Cold storage warehouses	88	36	30	12
Sum	7958	2130	469	93
Tap water (Using to 5 degree)	644	106	659	138
Tap water (Using to limit)	644	106	2195	257
Rain water (Using to 5 degree)	0	0	106	27
Rain water (Using to limit)	0	0	445	57
Waste water (Using to 5 degree)	510	175	510	176
Waste water (Using to limit)	2124	549	1712	480
Sum	3922	936	3510	868

계산하고, 히트펌프의 COP를 계산한 후 에너지 절약량을 계산하였다.

### III. 결과 및 고찰

저자 등의 결과<sup>1)</sup>에 대한 종래의 미 이용열원의 열적 포텐셜의 값과 본 연구에서의 상·하수, 우수의 계산결과를 Table 1. 및 2.에 나타냈으며, 각각 7월의 냉방이용, 1월의 난방이용에 대한 오사카시 전체의 값을 표시함으로써 열적 포텐셜을 비교했다. 냉방이용(7월)의 경우, 상수의 한계이용에서 하천수의 정도, 5°C이용에서는 쓰레기 소각장

에 필적하는 포텐셜을 나타내고 있다. 우수의 한계이용에서, 해수와 비슷한 정도로 낮은 포텐셜을 보이고 있으며 하수의 경우는 하수처리장보다 낮은 포텐셜을 보이고 있다. 그러나, 열수요를 고려한 공급 가능열량에서 보면 상수, 하수, 우수의 포텐셜은 종래의 미 이용에너지와 비교해볼 때, 높은 포텐셜을 보이고 있고, 이는 종래 미 이용에너지의 수요지와의 거리적 미스매치에 의한 것으로 판단된다.

난방이용(1월)에 관해보면, 우수는 거의 이용불가능함을 알 수 있다. 이는 우수의 온도가 낮음으로 인하여, 이용 온도차에 제한을 받기 때문이다. 이에 반하여, 하수는 수온이 높으므로 한계이

Table 3. Heat potential of hot water supply

(TJ/Month)

Month	Heat Demand	Using to 5 degree		Using to limit	
		Theoretical usable amount of unused Thermal energy	Theoretical amount of energy saving	Supplying amount of unused thermal energy	Energy saving
5	254	35	43	110	137
6	254	37	46	124	155
7	222	45	56	167	209
8	209	51	64	187	234
9	219	51	64	150	188
10	247	46	58	123	154
Sum	1406	264	330	862	1077

용시의 값은 하천수에 필적 할 정도로 큰 값을 알 수 있다. 또한, 종래의 미이용 에너지는 이용 가능 열량과 공급 가능 열량의 차가 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 열원과 수요지의 지리적인 미스매치를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 시점에서 평가 한다면, 상·하수 및 우수는 열원과 수요지와의 미스 매치가 없는 열원으로 중요한 의미를 가짐을 알 수 있다.

다음으로, Table 3.에서와 같이 급탕 이용면을 보면 급탕 이용을 행한 냉방기를 통하여 급탕 열수요에 대한 평가를 보면, 5℃이용에서 18.8%, 한계이용에서 61.3%를 충족시키는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

1. 상·하수 및 우수의 열원이용을 산정하고, 열적 포텐셜을 원단위방법을 이용하여 평가하는 방법을 제안하였다. 열적 포텐셜의 원단위법은 열원의 온도, 비교대상으로서 기온, 이용 온도차에 의한 함수로 그에 따른 계산 모델을 제시 하였다.
2. 상·하수 및 우수는 종래의 연구와 같은 하천수 등의 열원과는 달리, 열원으로서 이용할 수 있는 수량(각 건물용도의 수사용량)이 건물용도에 따라 다르므로 공급가능 열량을 계산 할 때는 각 건물용도에 따라서

계산한 값들을 가산 해야 되어야 할 것으로 평가되었다. 또한, 이용가능 열량이 열 수요량보다 클 때에 열원수로서 남는 양이 존재하고, 전수량을 이용한 에너지 절약 포텐셜을 높일 수 있음을 확인하였으며, 이와 같이 열원수가 남을 경우는 원단위법에 의한 계산 방법으로 평가가 불가능하므로, 열원이 가진 포텐셜을 최대한 이용에 대한 한계 이용법으로 계산하였다.

3. 오사카시를 대상으로 한 평가에서 상, 하수 및 우수의 이용가능 열량은 종래 연구되어져 온 미 이용열원에 새로운 열원으로서의 가치가 충분히 검토되어 졌다. 특히, 열원과 열수요지와의 거리적 미스매치를 극복할 수 있는 가치있는 미이용에너지원으로 평가 할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. 下田, 水野 등: 도시 미이용에너지의 활용 가능성 평가수법에 관한 연구(1), 일본 공기조화 위생공학회 논문집, 67~76, 1996.
2. 下田, 水野 등: 阪中地區의 도시 미이용에너지 지도의 작성에 관한 연구, 일본건축학회대회 학술강연집, 1333~1334, 1992.
3. 센추리 리서치 센터: 저온폐열 자원의 종합적

- 용에 관한 연구, 종합연구개발기구, 1985.
4. 金地, 水野 등: 미이용에너지 활용가능성평가를 위한 열원 기기 성능모델의 검토(속보), 일본 공기조화 위생공학회 近畿지부학술연구발표회 논문집, 47~50, 1994.
  5. 尾島俊雄: 건축의 광·열·수 원단위(동경판), 早稻田대학 출판부, 1995.
  6. 국립천문대: 理科年表, 1996.
  7. 水野, 内田, 中村 등: 특정지역 급탕 주택단지의 폐수특성과 보유에너지의 평가에 관한 연구, 일본 공기조화 위생공학회 논문집, 1992.
5. 尾島俊雄: 건축의 광·열·수 원단위(동경판),