

# 미래의 불확실한 냉방부하에 대한 아이스슬러리를 이용한 지역냉방시스템 및 경제성 평가

이 윤 표<sup>†</sup>, 안 영 환, 윤 석 만<sup>\*</sup>

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터, \*한국지역난방공사 연구개발실

## A District Cooling System using Ice Slurry for the Uncertain Cooling Load of the Future and its Economic Evaluation

Yoon Pyo Lee<sup>†</sup>, Young Hwan Ahn, Seok Mann Yoon<sup>\*</sup>

Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science & Technology, Seoul 136-791, Korea

<sup>\*</sup>Department of Research & Development, Korea District Heating Corporation, Seoul 135-886, Korea

(Received June 8, 2006; revision received August 25, 2006)

**ABSTRACT:** A new district cooling system using ice slurry for the uncertain cooling load of the future is presented. The chilled water produced by the absorption chillers is used for the base cooling load. The temperature of the chilled water is reduced by mixing of ice slurry depending on increasing of the cooling load. Finally, IF of the ice slurry is increased up to 10% at the peak load. The transporting mass flow rate is decreased down to 44.7%, and the diameter of the main pipe is decreased down to 66.7%, but the diameter of the branched pipe is designed as the same size of the chilled water.

**Key words:** Ice slurry(아이스슬러리), District cooling(지역냉방), Ice fraction(얼음의 질량분율), Uncertain cooling load(불확실한 냉방부하)

### 기 호 설 명

$c_p$  : 비열 [W/kg K]  
 $h_f$  : 얼음의 잠열 [kJ/kg]  
 $M$  : 질량유량 [kg/s]  
 $\dot{Q}$  : 단위시간당 수송냉열 [W]  
 $T$  : 온도 [K]  
 $V$  : 체적유량 [ $m^3/s$ ]  
 $x$  : Ice fraction [wt%]

### 하첨자

$r$  : 회수  
 $s$  : 공급

### 1. 서 론

지역냉방시스템은 일정 공간에서 집단적으로 냉열을 생산하여 냉수나 고밀도 전달물질을 이용하여 개개의 수요처로 공급하는 냉열공급시스템이다. 개개의 건물에 냉방을 위한 기계실을 별도로 설치할 필요가 없어서 공간활용이 자유로워 미국<sup>(1,2)</sup> 및 일본<sup>(3)</sup>뿐 아니라 국내에서도 상암 DMC<sup>(4)</sup>에 보급되어 있다. 냉열수송 배관은 일단 매설된 이후에는 수정이 어려우므로 미래의 냉방수요를 정

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5672; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: yplee@kist.re.kr

확히 예측하여 배관경을 설정하여야 한다. 그러나 미래의 냉열수요는 여러 가지 변수에 의해서 변할 수 있으므로 가급적 냉열공급 열용량을 최대한 변화시킬 수 있는 시스템을 채택하여야 한다. 일반적으로 냉열을 수송할 때의 관계식은 다음과 같다.

$$Q = Mc_p(T_r - T_s) + Mxh_f$$

냉열수송량은 수송매질의 질량유량, 비열, 공급온도와 회수온도의 온도차에 의해 결정된다. 여기서 질량유량, 온도차 등을 증가시키는 것은 한계가 있으므로 아이스슬러리를 수송을 채택하면 80 kcal/kg이라는 매우 큰 열용의 잠열을 이용하므로 냉열수송 열용량을 크게 변화시킬 수 있다.

본 연구에서는 수요처의 냉열용량 상태에 따라 때로는 7°C의 냉수로, 때로는 아이스슬러리의 IF (Ice fraction)를 증가시킴으로써 미래의 불확실한 냉열수요에 탄력적으로 대응할 수 있는 지역냉방 시스템을 제시한다.

## 2. 부하 특성 및 아이스슬러리에 의한 유량 감소 효과

구체적인 냉열부하를 입수할 수 있는 B 지구를 그 적용대상으로 선정한다. B 지구는 백화점, 호텔, 오피스 건물 및 위락시설 등 다양한 용도의 건물로 이루어져 있으며, 2007년부터 개발되기 시작하여 2018년에 포화되는 것으로 예정하고 있다. 그 냉방부하의 증가추이는 Fig. 1과 같다.<sup>(5)</sup>

일반적으로 신도시가 건설될 때 냉열부하가 일시에 형성되는 것이 아니라 2007년부터 시작하여

2018년에 이르면서 점차로 증가하는데 하루 중 15시에 최대부하가 나타나고 부하가 점차 증가하여 2018년에 포화되는 것으로 예상된다.

2018년 7월 후반부의 최대부하를 3°C 공급, 13°C 회수의 냉수공급으로 감당할 경우 9,508 m<sup>3</sup>/h의 유량이 공급되어야 하므로 이에 맞추어 수송배관을 매설하면 간단하다. 그러나 예상대로 개발이 이루어지지 않을 경우 과잉투자가 될 수도 있다. 반면 미래 수요를 소극적으로 예상하여 소규모의 배관을 매설한 후 개발수요가 증가되면 배관을 추가로 매설하여야 할 상황이 발생할 수도 있다. 따라서 미래의 냉방수요를 정확히 예측하지 않고 배관을 매설하여도 미래의 냉방수요가 변화함에 따라 탄력적으로 냉열을 공급할 수 있는 방법이 있으면 매우 편리할 것이다. 이러한 방법이 부하가 적을 때는 냉수로 공급하고 부하가 증가하면 아이스슬러리의 함량을 증가시켜 냉열을 공급하는 것이다. 즉, IF 10%로 공급할 경우 공급유량은 4,131 m<sup>3</sup>/h이 되어 냉수만 공급할 때보다 공급유량이 43.4% 수준에 불과하며, IF 15%를 공급할 경우 공급유량은 3,520 m<sup>3</sup>/h로 감소시킬 수 있다.

## 3. 시스템 구성

적절한 아이스슬러리를 직접수송 지역냉방시스템을 선정하기 위하여 3가지 시스템을 비교 검토하고자 한다.

### 3.1 시스템 A

시스템 A는 Fig. 2와 같이 용량대비 흡수식 40%, 터보식 40%를 각각 직렬로 연결하고 정적형

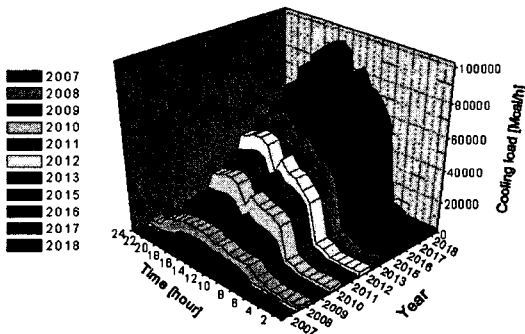


Fig. 1 Cooling load depending on the years.

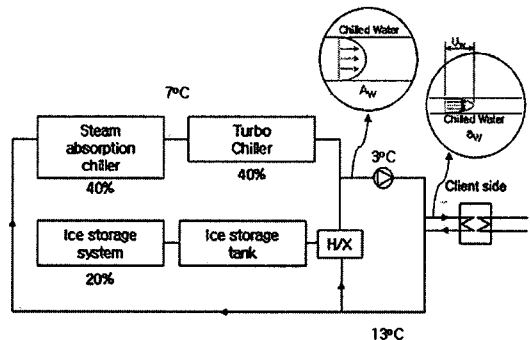


Fig. 2 Schematic diagram of system A.

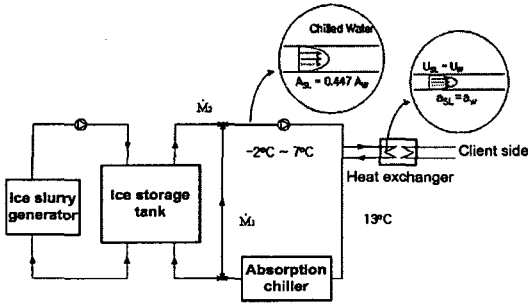


Fig. 3 Schematic diagram of system B.

빙축열설비 20%를 병렬로 조합하여 시스템을 구성한다. 공급온도는 3°C이며, 회수온도 13°C이다. 회수온도 13°C는 흡수식 냉동기에서 7°C로 터보냉동기에 의해 다시 3°C로 낮춰져 수용가로 공급된다. 한편 병렬로 연결되는 정적형 빙축열은 축열조에서 나온 물이 열교환기에서 간접 열교환하여 3°C로 낮춰져서 공급된다.

**3.2 시스템 B**

시스템 B는 Fig.3과 같이 증온수 흡수식 냉동 시스템과 아이스슬러리 제조시스템을 연계하여 시스템을 구성한다. 냉방부하가 낮을 경우 축열조를 거치지 않고 증온수 흡수식 냉동기만을 가동하여 냉수를 공급한다. 냉방부하가 상승하면 축열조에서 아이스슬러리가 일부 추출되어 흡수식에서 추출된 냉수와 섞임으로써 수용가에는 7°C보다 낮은 냉수가 공급된다. 냉열부하가 더욱 상승하면 더 많은 양의 아이스슬러리가 추출되어 흡수식을 통과한 냉수와 섞여서 보다 낮은 온도의 냉수가 수용가로 공급된다. 냉열부하가 더욱 증가하면 -2°C보다 낮은 냉수가 필요하게 되는데 프로필렌글리콜 7%(동결점 -2°C)<sup>(6)</sup>를 첨가할 경우 -2°C 이하는 어려우므로 이 이후부터는 아이스슬러리의 함유량, 즉 IF를 증가시켜 수용가로 공급한다.

**3.3 시스템 C**

시스템 C는 시스템 B와 개념은 동일하나 증온수 흡수식의 구동원을 Fig.4와 같이 폐열을 이용한다. 시스템 C의 운전비를 산출할 때 비록 폐열을 이용한다 하더라도 어느 정도의 비용을 지불하여야 할 것이다. 그러나 여기서는 운전비의 최

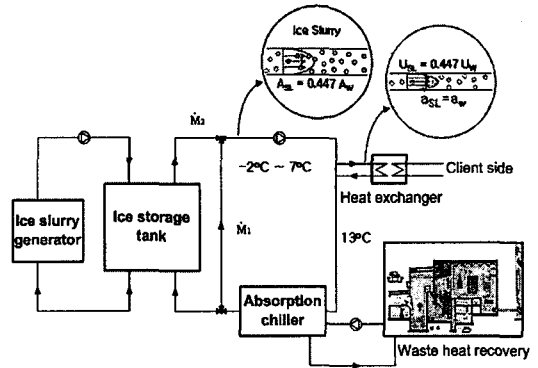


Fig. 4 Schematic diagram of system C.

소값을 보여주기 위하여 운전비 산출에서 증온수 구동열원비용을 전혀 산정하지 않았다.

**3.4 배관설계방법**

포화년도인 2018년의 오후 3시 최대부하에서 아이스슬러리 10%로 공급할 수 있는 배관면적을 산출하면 3°C 냉수공급, 13°C 회수의 냉수공급조건에 비하여 냉수수송 질량유량은 44.7%, 주배관경은 66.7%로 줄일 수 있다. 그러나 분기관의 경우 부하가 충분히 형성되기 전에도 냉수수송만으로도 수용가의 부하를 충족시켜야 하므로 분기관은 냉수만으로 냉방이 이루어지는 시스템의 배관조건과 동일한 크기로 설계한다. 따라서 과도기의 냉수공급시 배관 내 유속조건은 Fig.3과 같이 냉수만으로 냉방이 이루어지는 시스템과 동일하다.

그러나 아이스슬러리가 공급되면 분기관의 경우 냉수를 기준으로 설계되었으므로 10% 아이스슬러리 공급시 100/66=1.51, 즉 151%의 배관으로 გადა 설계되고 면적은 229% 증가하므로 Fig.4의 배관 내 유속에서의와 같이 유속 저하가 발생한다. 아이스슬러리의 안정된 수송조건을 보장할 수 있는 유속범위가 0.5~2.5 m/s이므로 분기관에서 냉수의 유속은 1.14~5.7 m/s 범위로 설계하여야 한다.

**4. 기기투입 및 운전방법**

포화년도인 2018년까지 냉열부하가 점차적으로 상승하므로 냉열부하를 공급할 수 있는 기기도 일시에 투입하지 않고 점차적으로 투입한다. 즉 냉수만이 공급되는 시스템 A의 경우 터보냉동기, 증

Table 1 Supplying plan of facilities (Unit: EA)

Items		2007	2010	2014	Total
System A	Turbo (4,536 Mcal/h/EA)	3	3	3	9
	Absorption (4,536 Mcal/h/EA)	3	3	3	9
	Static ice storage (Cooling: 4,536 Mcal/h/EA)	3			3
System B, C	Absorption (1,560 Mcal/h/EA)	4	4	4	12
	Ice slurry (Cooling: 4,536 Mcal/h/EA)	5	4	4	13

기흡수식, 정적형 빙축열이 3대씩 동시에 투입되어야 한다. 그러나 초기부하에서는 증온수 흡수식에 의한 냉수만이 공급되는 시스템 B, C의 경우는 증온수 흡수식 냉동기가 먼저 투입되고 아이스슬러리 설비는 점차 투입된다. 기기 투입현황을 Table 1에 정리하였다. 또한 냉동기 운전현황은 Table 2에 정리되어 있다. 포화년도인 2018년 7월 후반부에서 최대 냉열부하 시간대인 15시에는 생산량이 95,032 Mcal/h이므로 IF는 10%까지 상승한다. 하지만 IF 10% 시간대는 15시, 16시의 두 시간에 불과하고 17시 이후에는 다시 IF가 줄어들어 19시에는 수송배관에 아이스슬러리가 공급되지 않는다. 여기서 제빙기는 22시부터 익일 07시까지 12대가 가동되며 여기서 만든 아이스슬러리는 축열조에 저장하여 공급냉수의 온도를 낮추거나 아이스슬러리를 공급하는 데 사용된다. 주간시간대의 제빙기는 냉각운전을 하여 11대가 운전된다. Fig.5는 연도에 따른 연중 최대 부하에서의 공급온도 및 IF의 변화를 나타낸다. 냉방부하가 증가함에 따라 공급 냉수온도가 낮아지다가 2011년과 2012년 사이에 아이스슬러리가

공급되기 시작하여 2018년에 10%까지 상승하고 있음을 보여주고 있다.

### 5. 경제성 분석

본 연구에서는 각 기기가 차지하는 면적이 동일하다는 가정 하에 기기 투입대수에 비례하여 부지면적을 산출하였다. 시스템 A의 경우 터보냉동기 9대, 증기흡수식 냉동기 9대, 정적형 빙축열 3대로 구성되어 있는데 시스템 B 및 시스템 C의 경우 증온수 흡수식 12대, 아이스슬러리 설비 13대로 구성되어 있다. 시스템 A의 경우 총 기계대수는 총 9+9+3=21대인 반면, 시스템 B의 경우 총 12+13=25대로 구성되어 있으므로 25/21=1.19의 산술적인 계산으로부터 토목공사비 및 건설비를 시스템 A에 비하여 시스템 B의 경우 최대 1.2배로 산정한다.

터보냉동기를 100으로 할 때 빙축열설비는 128, 증온수흡수식 132, 아이스슬러리 140의 비율로 기기비를 산정하였다.<sup>(7)</sup>

이로부터 초기투자비는 시스템 A가 82,061백만원이 소요되며, 시스템 B는 93,032백만원이 된다. 두 시스템은 각각 한국전력의 지원금으로 시스템 A인 경우 1,215백만원, 시스템 B의 경우 5,389백만원을 지원받을 수 있으므로 초기투자비는 시스템 A의 경우 80,846백만원, 시스템 B의 경우 87,643백만원이 된다. 따라서 시스템 A의 초기투자비 100%로 놓았을 때 시스템 B의 초기투자비는 Fig.6에서와 같이 108.4%로 나타났다.

초기투자비를 구성하는 세부내역은 Fig.7과 같이 나타낼 수 있다. Fig.7에서 알 수 있듯이 초기투자비에 가장 큰 영향을 미치는 것은 기계비용이며 아이스슬러리가 적용됨으로써 배관비용이 줄어들기는 하나 배관길이가 8.2km에 불과하므로 배관비가 전체 초기투자비에서 차지하는 비율은 그리 크지 않다.

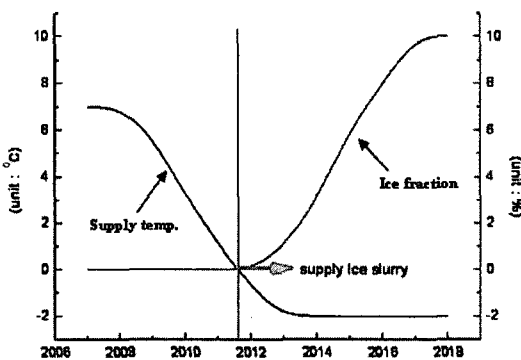


Fig. 5 Supplying temperature and IF depending on the years (Second half of July, 15 O'clock).

Table 2 Operating data of the year 2018 (Period: Later half of July/Weekday)

Time	Number of days	Output		Calculation of flowrate			Supply of sensible heat				Supply of latent heat			Ice making operation		Absorption operation		Cooling operation		Ice fraction	
		Mcal/h	m <sup>3</sup> /h	Supply flowrate	Supply temp.	Ice fraction	Demand load	Absorption	Cooling operation	Ice slurry making	Amount of demand ice	Demand load	Amount of demand ice	Ice slurry making	Number of machine	load	Number of machine	Cooling load	Number of machine		Variation of ice
				m <sup>3</sup> /h	°C	%	Mcal/h	Mcal/h	Mcal/h	Mcal/h	Mcal/h	m <sup>3</sup> /h	Mcal/h	m <sup>3</sup> /h	Mcal/h	ea	Mcal/h	ea	Mcal/h	%	
1	11	3,422	570	0	7.00	0	3,422	3,422	0	0	0	0	42,024	12	3,422	2	0	0	1,576	13.8	
2	11	3,256	543	0	7.00	0	3,256	3,256	0	0	0	0	42,024	12	3,256	2	0	0	2,101	18.4	
3	11	3,117	519	0	7.00	0	3,117	3,117	0	0	0	0	42,024	12	3,117	2	0	0	2,627	23.0	
4	11	3,047	508	0	7.00	0	3,047	3,047	0	0	0	0	42,024	12	3,047	2	0	0	3,152	27.6	
5	11	3,029	505	0	7.00	0	3,029	3,029	0	0	0	0	42,024	12	3,029	2	0	0	3,677	32.2	
6	11	6,732	1,122	0	7.00	0	6,732	6,732	0	0	0	0	42,024	12	6,732	3	0	0	4,202	36.8	
7	11	7,936	1,323	0	7.00	0	7,936	7,936	0	0	0	0	42,024	12	7,936	4	0	0	4,728	41.4	
8	11	55,886	4,131	-0.53			55,886	24,786	21,777	9,333	117	0			24,786	11	21,776	6	4,611	40.3	
9	11	64,864	4,131	-2.00		1	61,422	24,786	25,645	10,991	137	3,442	43		24,786	11	25,644	7	4,431	38.8	
10	11	72,143	4,131	-2.00		3	60,057	24,786	24,689	10,581	132	12,086	151		24,786	11	24,689	7	4,147	36.3	
11	11	74,012	4,131	-2.00		4	59,706	24,786	24,444	10,476	131	14,306	179		24,786	11	24,444	7	3,838	33.6	
12	11	83,783	4,131	-2.00		7	57,874	24,786	23,162	9,926	124	25,909	324		24,786	11	23,161	6	3,390	29.6	
13	11	63,763	4,131	-2.00		1	61,628	24,786	25,789	11,053	138	2,135	27		24,786	11	25,789	7	3,225	28.2	
14	11	91,223	4,131	-2.00		9	56,479	24,786	22,185	9,508	119	34,744	434		24,786	11	22,185	6	2,672	23.4	
15	11	96,032	4,131	-2.00		10	55,765	24,786	21,685	9,294	116	39,267	491		24,786	11	21,685	6	2,065	18.1	
16	11	93,554	4,131	-2.00		10	56,042	24,786	21,879	9,377	117	37,511	469		24,786	11	21,879	6	1,478	12.9	
17	11	89,250	4,131	-2.00		8	56,849	24,786	22,444	9,619	120	32,401	405		24,786	11	22,444	6	953	8.3	
18	11	85,235	4,131	-2.00		7	57,602	24,786	22,971	9,845	123	27,633	345		24,786	11	22,971	6	485	4.2	
19	11	47,772	4,131	1.44		0	47,772	24,786	16,090	6,896	86	0	0		24,786	11	16,090	4	399	3.5	
20	11	41,922	4,131	2.85		0	41,922	24,786	11,995	5,141	64	0	0		24,786	11	11,994	3	334	2.9	
21	11	24,646	4,108	7.00		0	24,646	24,646	0	0	0	0	0		24,646	11	0	0	334	2.9	
22	11	4,968	828	7.00		0	4,968	4,968	0	0	0	0	0		4,968	3	0	0	334	2.9	
23	11	4,501	750	7.00		0	4,501	4,501	0	0	0	0	42,024	12	4,501	2	0	0	525	4.6	
24	11	3,655	609	7.00		0	3,655	3,655	0	0	0	0	42,024	12	3,655	2	0	0	1,051	9.2	
Total		1,026,756	42				797,322	390,527	284,756	122,038	1,525	229,435	2,868		390,527	173	284,756				
		11,294,321					8,770,542	3,132,321	3,132,321	1,342,423	16,780	2,523,780	31,547		4,160,376		3,132,321				

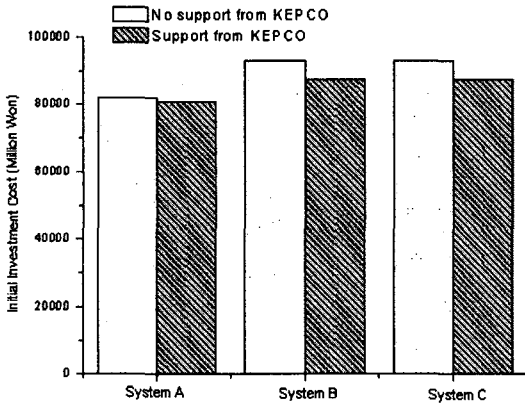


Fig. 6 Initial investment cost at the each system.

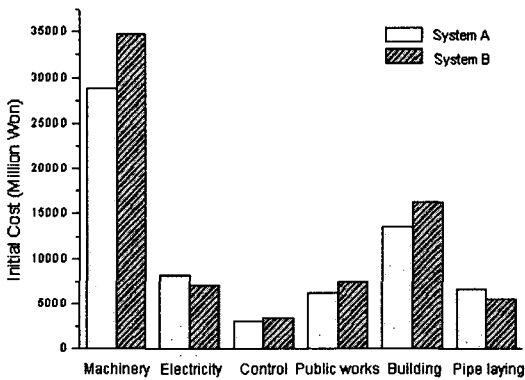


Fig. 7 Comparison of each item in the initial costs.

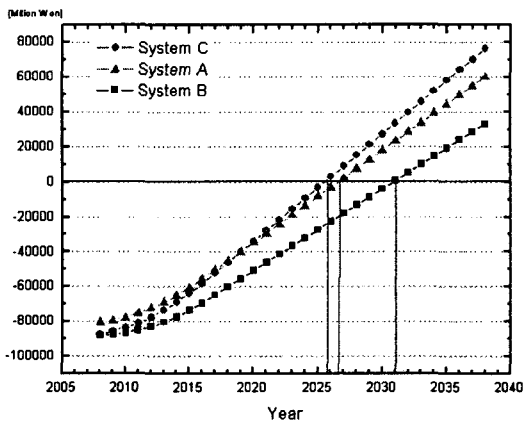


Fig. 8 Accumulated net profit from 2008 to 2038.

포화년도인 2018년을 기준으로 에너지 지출내역을 살펴보면 시스템 A의 경우 지출액은 2,714백만원이며, 시스템 B는 3,064백만원으로 계산되어 시스템 A에 비해 지출이 350백만원 많다. 하지만, 시스템 C는 시스템 B의 주된 비용인 수열비가 지불되지 않기 때문에 1,607백만원으로 운전비가 가장 작게 소요된다.

누계 순이익을 나타내면 Fig. 8과 같다. 누계 순이익(누계 열판매이익-초기투자비-누계 에너지비소용-누계 기타 비용)은 시스템 A의 경우가 60,215백만원, 시스템 B의 경우가 33,309백만원, 시스템 C의 경우 76,445백만원으로 시스템 C가 가장 유리하며 그 다음이 시스템 A, 시스템 B 순으로 나타난다.

시스템 B의 경우 시스템 A보다 초기투자비 면에서는 6,800백만원 비싸며, 누적 에너지비용 면에서는 약 13,000백만원 정도가 더 소요된다. 따라서 단순 경제성 면에서는 B 시스템이 시스템 A에 비하여 유리하지 않다. 그러나 앞서 서술하였듯이 에너지 비용 중 가장 큰 비중을 차지하는 수열비를 절감할 수 있는 시스템 C는 시스템 A에 비해서 에너지 비용 소계가 29,692백만원이 낮게 나타난다. 따라서 2008년부터 2038년도까지 모두 합한 누계 순이익은 시스템 A인 경우 60,215백만원인데 반하여, 시스템 B 경우는 33,309백만원으로 시스템 A보다 낮으나 시스템 C의 경우 76,309백만원으로 시스템 A에 비해 16,230백만원 만큼 높게 나타난다.

Fig. 8에서 누계 순이익이 양수로 되는 시점, 즉 투자비를 회수하는 시기는 시스템 C와 시스템 A가 거의 비슷한 시기인 2018년도로부터 8년 후인 2026년이며 시스템 B의 경우가 가장 늦은 2031년으로 평가되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 폐열을 이용하여 중온수 흡수식 냉동기에 의해 생산한 7℃의 냉수를 기저부하로 하고 냉열수요에 따라 아이스슬러리를 점차로 섞어 온도가 낮아지다가 최종적으로는 아이스슬러리가 수송되는 형태의 새로운 개념의 아이스슬러리 공급시스템을 제안하였다.

이와 같은 시스템은 최대부하시에만 아이스슬러리를 유동시키며, 그의 부하에서는 아이스슬러

리 유체 중 얼음입자가 차지하는 질량분율의 비가 변화하므로 아이스슬러리가 일정시간 정체함으로써 발생할 수도 있는 막힘 현상을 막을 수 있다.<sup>(8)</sup> 또한 수송배관 면에서도 10% 아이스슬러리 수송의 경우 냉수의 동일 열량수송에 대하여 배관면적을 45% 이하로 감소시킬 수 있다. 본 연구에서 제안한 방법은 초기에는 냉수를 공급하고 부하가 형성됨에 따라 기기가 점차로 공급되므로 개발수요 도중에도 운영 가능한 지역냉방 시스템이다. 또한 수용가가 충분히 형성되지 않아 예상했던 냉열부하가 형성되지 않을 때 축소된 배관에 냉수를 수송함으로써 과도기 냉열부하를 감당할 수 있으므로 미래의 불확실한 냉열수요에 대처할 수 있는 최선의 방법이라고 사료된다.

경제성 면에서는 시스템 B는 시스템 A보다 초기투자비가 높으므로 전체 순이익에 있어서는 시스템 A보다 불리하다. 그러나 시스템 C는 비록 초기투자비는 시스템 A에 비해 높으나 에너지비용 중 산업용 전기비율도 낮고 수열비도 절감할 수 있어 전체 에너지비용이 가장 적기 때문에 전체 순이익에서 가장 유리하다. 따라서 시스템 C의 경우 수열비에 해당하는 에너지비용을 얼마만큼 절감할 수 있는지가 시스템 C의 가장 큰 경제적 이익을 도출할 수 있는 요인이다.

## 후 기

본 연구는 한국지역난방공사 연구용역으로 수행된 내용의 일부이며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Committee on District Heat and Cooling Energy Engineering Board and Building Research Board, 1985, District Heating and Cooling in the United States Prospects and Issues, National Academy Press, Washing, D.C.
2. International Energy Agency, 1993, The Design and Operation of Ice-Slurry Based District Cooling Systems, Novem, BV Sittard, The Netherlands.
3. Inaba, H., 1996, Current status of research and new development in ice heat storage system technology, Refrigeration, Vol. 71, No. 830.
4. Korea District Heating Engineering Corp., Report on the Basic Design of District Heating and Cooling System in the Sang-Am digital media city, Korea District Heating Corp.
5. Korea District Heating Engineering Corp., 2003, Report on The Validity of Goyang Community Energy System, Korea District Heating Corp.
6. Paul, J., 2004, Short Lecture on Applications of Binary Ice, Korea Institute of Industrial Technology.
7. Dhillon, B. S., 1988, Life Cycle Costing Techniques, Models and Applications, Gordonm and Breach Science Publishers.
8. Lee, D. W., Yoon, C. I. and Yoon, S. E., 2002, Experimental study on flow patterns and pressure drop characteristics of ice slurry in small size pipe (1), The Magazine of SA-REK, Vol. 14, No. 5, pp. 385-390.

1. Committee on District Heat and Cooling