

미래의 불확실한 냉방부하에 대한 아이스슬러리를 이용한 지역냉방시스템

이윤표[†], 안영환, 윤석만*

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터, *한국지역난방공사 연구개발실

A District Cooling System using Ice Slurry for the Uncertain Cooling Load of the Future

Yoon Pyo Lee[†], Young Hwan Ahn, Seok Mann Yoon*

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, IPF 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), IPF(얼음의 질량분율), Uncertain cooling load(불확실한 냉방부하)

기호설명

- \dot{Q} : 단위시간당 수송 냉열 [W]
- \dot{M} : 질량유속 [kg/s]
- c_p : 비열 [W/kg K]
- T_r : 회수온도 [K]
- T_s : 공급온도 [K]
- ρ : 밀도 [kg/m³]
- V : 체적유량 [m³/s]
- x : IPF
- h_f : 얼음의 잠열 [kJ/kg]
- IPF : 얼음의 질량분율(Ice Packing Factor)

- SL : Slurry 수송
- W : 냉수수송
- HW : 증온수 흡수식 냉동기
- cogen : 폐열이용

1. 서론

지역냉방 시스템은 일정 공간에서 집단적으로 냉열을 생산하여 냉수나 고밀도 전달물질을 이용하여 개개의 수요처로 공급하는 냉열공급시스템이다. 개개의 건물에 냉방을 위한 기계실을 별도로 설치할 필요가 없어서 공간활용이 자유로와 미국^(1, 2) 및 일본⁽³⁾ 뿐 아니라 국내에서도 상암 DMC⁽⁴⁾에 보급되어 있다. 냉열수송 배관은 일단 매설된 이후에는 수정이 어려우므로 미래의 냉방 수요를 정확히 예측하여 배관경을 설정하여야 한다. 그러나 미래의 냉열수요는 여러 가지 변수

[†]Corresponding author
Tel.: +82-2-958-5672; fax: +82-2-958-5689
E-mail address: yplee@kist.re.kr

에 의해서 변할 수 있으므로 가급적 냉열공급 열 용량을 최대한 변화시킬 수 있는 시스템을 채택하여야 한다. 일반적으로 냉열을 수송할 때의 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{Q} = \dot{M}c_p(T_r - T_s) + \dot{M}x h_f$$

냉열 수송량은 수송 매질의 질량유속, 비열, 공급온도와 회수온도의 온도차에 의해 결정된다. 여기서 질량유속, 온도차 등을 증가시키는 것은 한계가 있으므로 아이스슬러리 수송을 채택하면 80 kcal/kg 이라는 매우 큰 얼음의 잠열을 이용하므로 냉열수송열용량을 크게 변화시킬 수 있다.

본 연구에서는 수요처의 냉열용량 상태에 따라 때로는 7℃의 냉수로 때로는 아이스슬러리의 IPF(Ice Packing Factor)를 증가시킴으로써 변화하는 냉방부하에 대처할 수 있음으로써 미래의 불확실한 냉열 수요에 탄력적으로 대응할 수 있는 아이스슬러리를 이용한 지역냉방 시스템을 제시한다.

2. 부하 특성 및 Ice Slurry 에 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 이뤄져있으며 2007년부터 개발되기 시작하여 2018년에 포화되는 것으로 예정하고 있

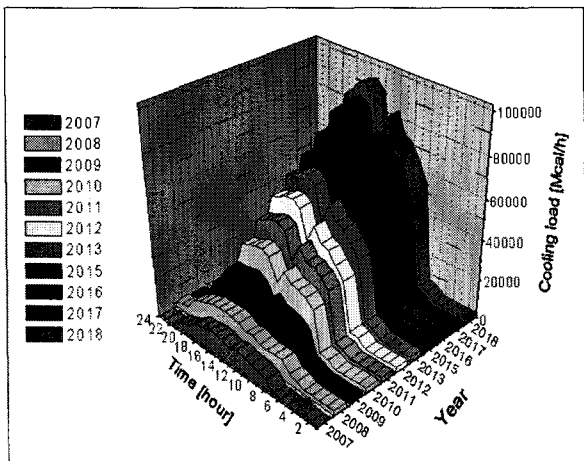


Fig. 1 Cooling Load depending on the years.

다. 그 냉방부하의 증가 추이는 Fig. 1 과 같다.⁽⁵⁾

일반적으로 신도시가 건설될 때 냉열부하가 일시에 형성되는 것이 아니라 2007년부터 시작하여 2018년에 이르면서 점차로 증가하는데 하루 중 15시 에 최대부하가 나타나고 부하가 점차 증가하여 2018년에 포화되는 것으로 예상된다.

2018년 7월 후반부의 최대부하를 3℃ 공급, 13℃ 회수의 냉수공급으로 감당할 경우 9,508 m³/h의 유량이 공급되어야 하므로 이에 맞추어 수송배관을 매설하면 간단하다. 그러나 예상대로 개발이 이루어지지 않을 경우 과잉투자가 될 수도 있다. 그러나 미래 수요를 소극적으로 예상하여 소규모의 배관을 매설한 후 개발이 활발히 되면 배관을 추가로 매설하여야 할 상황이 발생할 수도 있다. 따라서 미래의 냉방 수요를 정확히 예측하지 않고 배관을 매설하여도 미래의 냉방수요가 변화함에 따라 탄력적으로 냉열을 공급할 수 있는 방법이 있으면 매우 편리할 것이다. 이 방법이 때로는 냉수로 공급하고 부하가 증가함에 따라 아이스슬러리의 함량을 증가시켜 냉열을 공급하는 것이다. 즉 IPF 10%를 공급할 경우 최대 공급유량은 4,131 m³/h 이 되어 냉수공급에 비해 43.4% 수준에 불과하며 IPF 15%를 공급할 경우 최대 공급유량은 3,520 m³/h로 감소시킬 수 있다.

3. 시스템 구성

적절한 아이스슬러리 직접수송 지역냉방 시스템을 선정하기 위하여 3가지 시스템을 비교 검토하고자 한다.

3.1 Mixed + W

Mixed+W 시스템은 Fig. 2 와 같이 용량대비 흡수식 40%, 터보식 40%를 각각 직렬로 연결하고 병축열 설비 20%를 병렬로 조합하여 시스템을 구성한다. 공급온도는 3℃ 이며 회수온도 13℃ 이다. 회수온도 13℃ 는 흡수식 냉동기에서 7℃ 로 낮춰지고 터보냉동기로 다시 3℃ 로 낮춰져 수용가로 공급된다. 한편 병렬로 연결되는 병축열은 축열조에서 나온 물이 열교환기를 통하여 3℃ 로 낮춰져서 공급된다.

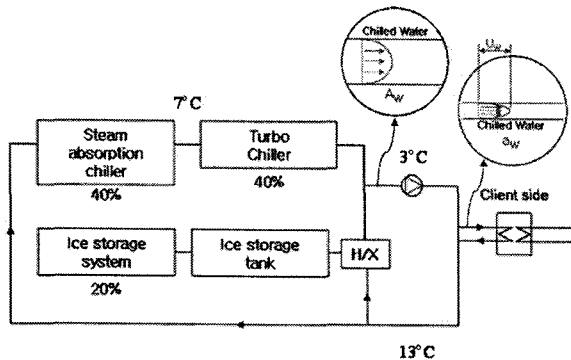


Fig. 2 Schematic diagram of Mixed+W.

3.2 SL+HW+SL

SL+HW+SL 시스템은 Fig. 3 과 같이 중온수 흡수식 냉동 시스템과 아이스슬러리 제조시스템을 연계하여 시스템을 구성한다. 냉방부하가 낮을 경우 축열조를 거치지 않고 중온수 흡수식 냉동기만을 가동하여 냉수를 공급한다. 냉방부하가 상승하면 축열조에서 아이스슬러리가 일부 추출되어 흡수식에서 추출된 냉수와 섞임으로써 수용가에는 7°C 보다 낮은 냉수가 공급된다. 냉열부하가 더욱 상승하면 더욱 많은 양의 아이스슬러리가 추출되어 흡수식을 통과한 냉수와 섞여서 더욱 낮은 온도의 냉수가 수용가로 공급된다. 냉열부하가 더욱 증가하면 -2°C 보다 낮은 냉수가 필요하게 되는데 프로필렌글리콜 7%를 첨가할 경우 -2°C 는 어려우므로 이 이후부터는 아이스슬러리의 함유율 즉 IPF 를 증가시켜 수용가로 공급한다.

3.3 SL+HW+SL(cogen)

SL+HW+SL(cogen)시스템은 SL+HW+SL 과

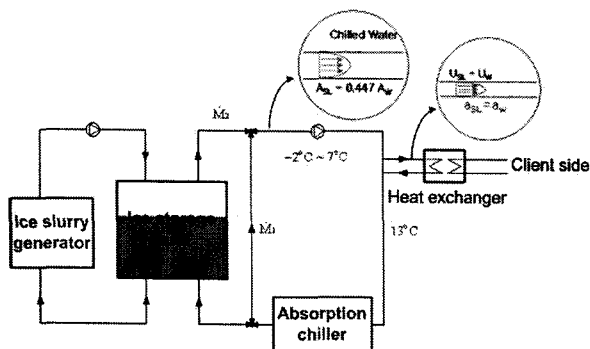


Fig. 3 Schematic diagram of SL+HW+SL.

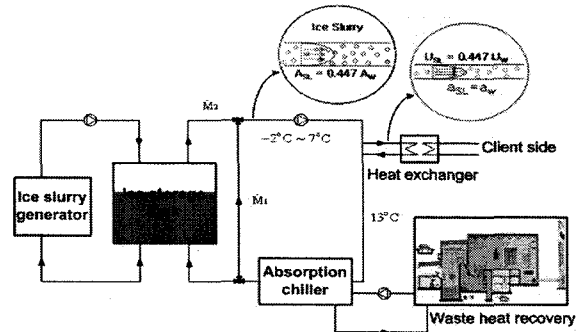


Fig. 4 Schematic diagram of SL+HW+SL(cogen).

개념은 동일하나 중온수 흡수식의 구동원을 Fig. 4 와 같이 폐열을 이용한다. SL+HW+SL(cogen)의 운전비를 산출할 때 비록 폐열을 이용한다 하더라도 어느 정도의 비용을 지불하여야 할 것이다. 그러나 여기서는 극한값을 보여주기 위하여 중온수 구동열원비용을 전혀 산정하지 않았다.

4. 기기 투입 및 운전 방법

포화년도인 2018년까지 냉열부하가 점차적으로 상승하므로 냉열부하를 공급할 수 있는 기기도 일시에 투입하지 않고 점차적으로 투입한다. 즉 냉수만이 공급되는 Mixed+W 의 경우 터보냉동기, 증기흡수식, 정적형 빙축열이 3 대씩 동시에 투입되어야 한다. 그러나 초기부하에서는 중온수 흡수식에 의한 냉수만이 공급되는 SL+HW+SL 의 경우는 중온수 흡수식 냉동기가 먼저 투입되고 Ice Slurry 설비는 점차 투입된다. 기기 투입 현황은 Table 1 에 정리하였다.

또한 냉동기 운전현황은 Table 2 에 정리되어 있다. 포화년도인 2018년 7월 후반부에서 최고 냉열부하 시간대인 15시에는 생산량이 95,032 Mcal/h이므로 IPF는 10%까지 상승한다. 하지만

Table 1 Supplying Plan of Facilities

Items		2007	2009	2011	2013	2015	total
Mixed	Turbo	3	3		2		8+1
	Absorption	3	3		2		8+1
	Static Ice Storage	3					3
SL+HW+	Absorption	5	6				11+1
SL	Ice Slurry		1	5	3		12+1

Table 2 Operating data of the year 2018

Period	Classification	Time	Number of days	Output	Calculation of flowrate				Supply of sensible heat				Supply of latent heat		Ice making operation		Absorption operation		Cooling operation		Variation of ice	IPF		
					Supply flowrate	Supply temp.	Return temp.	IPF	Demand load	Absorption	Cooling operation	Ice slurry making	Amount of demand ice	Demand load	Amount of demand ice	Ice slurry making	Number of machine	Operation load	Number of machine	Cooling load			Number of machine	
					Mcal/h	m ³ /h	°C	%	Mcal/h	Mcal/h	Mcal/h	Mcal/h	m ³ /h	Mcal/h	m ³ /h	Mcal/h	EA	Mcal/h	기	Mcal/h			기	m ³ /h
Later half of July	Weekday	1	11	3,422	570	7.00	13.00	0	3,422	3,422	0	0	0	0	0	0	42,024	12	3,422	2	0.00	0	1,576	13.8
		2	11	3,256	543	7.00	13.00	0	3,256	3,256	0	0	0	0	0	0	42,024	12	3,256	2	0.00	0	2,101	18.4
		3	11	3,113	519	7.00	13.00	0	3,113	3,113	0	0	0	0	0	0	42,024	12	3,113	2	0.00	0	2,627	23.0
		4	11	3,047	506	7.00	13.00	0	3,047	3,047	0	0	0	0	0	0	42,024	12	3,047	2	0.00	0	3,152	27.6
		5	11	3,029	505	7.00	13.00	0	3,029	3,029	0	0	0	0	0	0	42,024	12	3,029	2	0.00	0	3,677	32.2
		6	11	5,732	1,122	7.00	13.00	0	6,732	6,732	0	0	0	0	0	0	42,024	12	6,732	3	0.00	0	4,202	38.8
		7	11	7,558	1,323	7.00	13.00	0	7,936	7,936	0	0	0	0	0	0	42,024	12	7,936	4	0.00	0	4,726	41.4
		8	11	59,886	4,131	-0.53	13.00	0	59,886	24,786	21,777	9,333	117	0	0	0	21,776.94	6	4,611	40.3	0	0	4,431	38.8
		9	11	54,864	4,131	-2.00	13.00	1	61,422	24,786	25,645	10,581	137	3,442	43	0	24,786	11	25,644.87	7	4,431	38.8	0	0
		10	11	72,143	4,131	-2.00	13.00	3	80,957	24,786	24,889	10,581	132	12,066	151	0	24,786	11	24,889.46	7	4,431	38.8	0	0
		11	11	74,012	4,131	-2.00	13.00	4	58,706	24,786	24,444	10,476	131	14,308	179	0	24,786	11	24,444.14	7	3,938	33.6	0	0
		12	11	83,763	4,131	-2.00	13.00	7	57,874	24,786	23,162	9,828	124	25,819	324	0	24,786	11	23,161.71	6	3,360	28.8	0	0
		13	11	62,763	4,131	-2.00	13.00	1	61,628	24,786	26,769	11,053	138	2,125	27	0	24,786	11	25,799.30	7	3,225	28.2	0	0
		14	11	91,223	4,131	-2.00	13.00	9	56,419	24,786	22,185	8,508	118	34,744	434	0	24,786	11	22,185.14	6	2,872	23.4	0	0
		15	11	56,032	4,131	-2.00	13.00	10	55,765	24,786	21,685	9,284	116	33,261	481	0	24,786	11	21,685.27	6	2,065	18.1	0	0
		16	11	39,524	4,131	-2.00	13.00	10	56,042	24,786	21,873	9,377	117	37,511	469	0	24,786	11	21,879.30	6	1,478	12.9	0	0
		17	11	83,260	4,131	-2.00	13.00	8	58,849	24,786	22,444	9,619	120	32,401	405	0	24,786	11	22,444.11	6	953	8.3	0	0
		18	11	82,226	4,131	-2.00	13.00	7	57,692	24,786	22,871	9,845	123	27,533	345	0	24,786	11	22,871.15	6	486	4.2	0	0
		19	11	47,772	4,131	1.44	13.00	0	47,772	24,786	16,090	6,696	86	0	0	0	24,786	11	16,090.14	4	989	3.5	0	0
		20	11	41,522	4,131	2.85	13.00	0	41,522	24,786	11,955	5,141	94	0	0	0	24,786	11	11,954.95	3	334	2.9	0	0
		21	11	24,546	4,100	7.00	13.00	0	24,546	24,546	0	0	0	0	0	0	24,546	11	0.00	0	334	2.9	0	0
		22	11	4,968	908	7.00	13.00	0	4,968	4,968	0	0	0	0	0	0	4,968	3	0.00	0	334	2.9	0	0
		23	11	4,501	750	7.00	13.00	0	4,501	4,501	0	0	0	0	0	0	42,024	12	4,501	2	0.00	0	525	4.5
		24	11	3,655	985	7.00	13.00	0	3,655	3,655	0	0	0	0	0	0	42,024	12	3,655	2	0.00	0	1,051	9.2
Total				1,026,756	42			797,322	390,527	284,756	122,038	1,525	229,436	2,088	378,216	390,527	173	284,756		3,132,321				
				11,294,361				8,770,542			3,132,321	1,342,423	16,780	2,923,788	31,547	4,180,376								

IPF 10% 시간대는 15시, 16시의 두 시간에 불과하고 17시 이후에는 다시 IPF가 줄어들어 19시에는 수송배관에 아이스슬러리가 공급되지 않는다. 여기서 제빙기는 22시부터 7시까지 12대가 가동되며 여기서 만든 아이스슬러리는 축열조에 저장하여 공급냉수의 온도를 낮추거나 아이스슬러리를 공급하는데 사용된다. 주간시간대의 제빙기는 냉각운전을 하여 11대가 운전된다. Fig. 5는 연도에 따른 년중 최대 부하에서의 공급온도 및 IPF의 변화를 나타낸다. 냉방부하가 증가함에 따라 공급 냉수온도가 낮아지다가 2011년과 2012년 사이에 아이스 슬러리가 공급되기 시작하여 2018년에 10%까지 상승하고 있음을 보여주고 있다.

5. 경제성 분석

본 연구에서는 각 기기가 차지하는 면적이 동

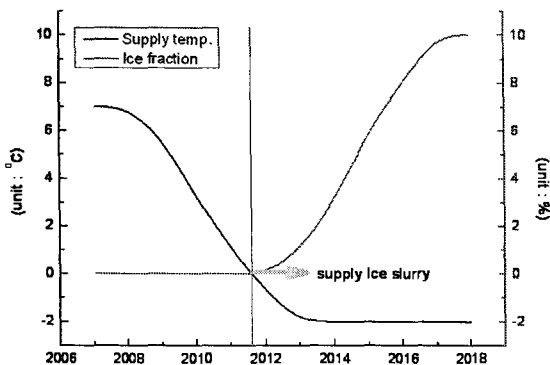


Fig. 5 Supplying temperature and IPF depending on the years. (Second half of July, 15 O'clock)

일하다는 가정 하에 기기 투입대수에 비례하여 부지면적을 산출하였다. Mixed+W의 경우 터보냉동기 9대, 증기흡수식 냉동기 9대, 정적형 빙축열 3대로 구성되어 있는데 SL+HW+SL 및 SL+HW+SL(cogen)의 경우 중온수 흡수식 12대, Ice Slurry 설비 13대로 구성되어 있다. Mixed+W 경우 총 기계 댓수는 총 9+9+3=21대인 반면 SL+HW+SL의 경우 총 12+13=25대로 구성되어 있으므로 25/21=1.19의 산술적인 계산으로부터 토목공사비 및 건설비를 Mixed+W에 비하여 SL+HW+SL의 경우 최대 1.2배로 산정한다.

이로부터 초기투자비는 Mixed+W가 82,061백만원이 소요되며, SL+HW+SL은 93,032백만원이 된다. 두 시스템은 각각 한국전력의 지원금으로 Mixed+W인 경우 1,215백만원, SL+HW+SL의 경우 5,389백만원을 지원받을 수 있으므로 초기 투자비는 Mixed+W의 경우 80,846백만원, SL+HW+SL의 경우 87,643백만원으로 Mixed+W의 가격을 100%로 놓았을 때 SL+HW+SL의 초기투자비는 Fig. 6에서와 같이 108.4%로 나타났다.

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

포화년도인 2018년을 기준으로 에너지 지출 내역을 살펴보면 Mixed+W의 경우 지출액은 2,714백만원이며, SL+HW+SL은 3,064백만원으로

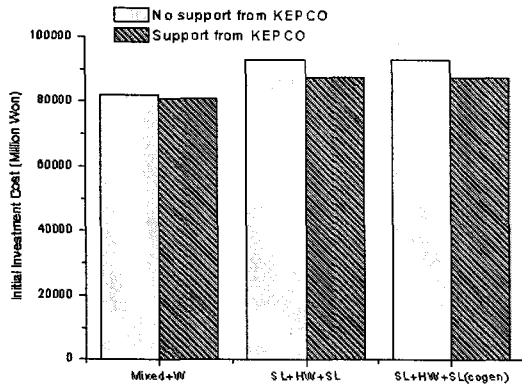


Fig. 6 Initial investment cost at the each system.

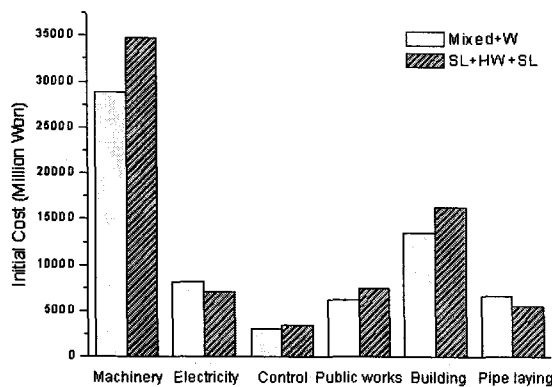


Fig.7 Comparison of each item in the initial costs.

계산되어 Mixed+ W에 비해 지출이 350백만원 많다. 하지만, SL+ HW+ SL(cogen)은 SL+ HW+ SL의 주된 비용인 수열비가 지불되지 않기 때문에 1,607백만원으로 운전비가 가장 작게 소비되었다.

누계 순이익을 나타내면 Fig. 8 과 같다. 누계 순이익(누계 열판매이익-초기투자비-누계 에너지비소용-누계 기타비용)은 Mixed+ W의 경우가 60,215백만원, SL+ HW+ SL 의 경우가 33,309 백만원, SL+ HW+ SL(cogen)의 경우 76,445백만원으로 SL+ HW+ SL(cogen)이 가장 유리하며 그 다음이 Mixed+ W, SL+ HW+ SL 순으로 나타난다.

SL+ HW+ SL 의 경우 Mixed+ W 보다 초기 투자비면에서는 6,800 백만원 정도 비싸며 누적 에너지 비용면에서는 약 13,000 백만원 정도가 더 소요된다. 따라서 단순 경제성 면에서는 SL+ HW+ SL 시스템이 Mixed+ W 에 비하여 유리

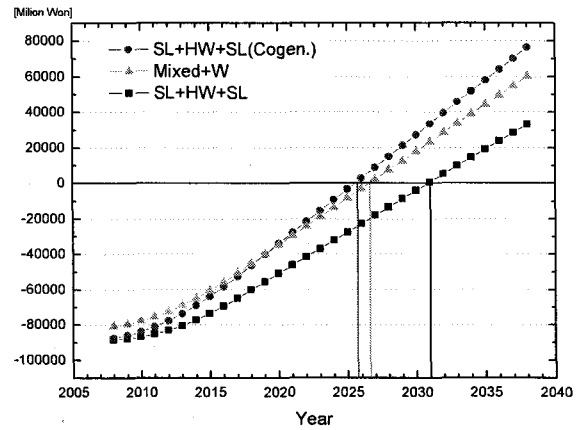


Fig. 8 Accumulated net profit from 2008 to 2038.

하지 않다. 그러나 앞서 서술하였듯이 에너지 비용 중 가장 큰 비중을 차지하는 수열비를 절감할 수 있는 SL+ HW+ SL(cogen)은 Mixed+ W에 비해서 29,692백만원이 낮게 나타난다. 따라서 2008년부터 2038년도까지 모두 합한 누계 순이익은 Mixed+ W인 경우 60,215백만원인데 반하여 SL+ HW+ SL 경우는 33,309백만원으로 Mixed+ W 보다 낮으나 SL+ HW+ SL(cogen)의 경우 76,309 백만원으로 Mixed+ W에 비해 16,230백만원 만큼 높게 나타난다.

Fig. 8 에서 누계 순이익이 양수로 되는 시점 즉 투자비를 회수하는 시기는 SL+ HW+ SL(cogen) 과 Mixed+ W 가 거의 비슷한 시기인 2018년도로부터 7년 후인 2025년이며 SL+ HW+ SL의 경우가 가장 늦은 2030년으로 평가되었다.

6. 결론

본 연구에서는 폐열을 이용하여 증온수 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 최대부하 시에만 아이스슬러리를 유동시키며, 그 외 부하에서는 아이스슬러리 유체 중 얼음입자가 차지하는 질량 비율의 비가 변화하므로 아이스슬러리가 일정시간 정체

함으로써 발생할 수도 있는 막힘 현상을 막을 수 있다.⁽⁶⁾ 또한 수송배관 면에서도 10%의 아이스 슬러리 수송의 경우 냉수의 동일 열량 수송에 대하여 배관 면적을 45% 이하로 감소시킬 수 있다.

본 연구에서 제안한 방법은 초기에는 냉수를 공급하고 부하가 형성됨에 따라 기기가 점차로 공급되므로 개발수요 도중에도 운영 가능한 지역 냉방 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 SL+HW+SL은 Mixed+W 보다 초기투자비가 높으므로 전체 순이익에 있어서는 Mixed+W 보다 불리하다. 그러나 SL+HW+SL(cogen)은 비록 초기투자비는 Mixed+W에 비해 높으나 에너지 비용 중 산업용 전기비율도 낮고 수열비도 절감할 수 있어 전체 에너지비용에서 유리하기 때문에 전체 순이익에서 가장 유리하다. 따라서 SL+HW+SL(cogen)의 경우 수열비에 해당하는 에너지 비용을 얼마만큼 절감할 수 있는지가 SL+HW+SL(cogen)의 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 Reearch 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. 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 SAREK, Vol. 14, No. 5, pp. 385-390.