

# 이중 효율과 일중 효율을 복합한 다단 재생 고효율 흡수식 냉동 사이클 개발

## Development of High Efficiency Cycle by Combining Double-Effect with Single-Effect Absorption Chiller Systems

윤상국(Sang Kook Yun)<sup>†</sup>

한국해양대학교 기계공학부

Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 52852, Korea

(Received March 26, 2017; revision received May 5, 2017; Accepted: May 10, 2017)

**Abstract** Recently, development efforts of triple-effect absorption chiller have been increased in order to improve the efficiency of double-effect absorption chiller. However, triple-effect absorption chiller has some disadvantages, including high corrosion characteristic of LiBr solution at high temperature of 200°C. Moreover, it is necessary to develop new components for operation under high pressure of 2 bars even though COP is increased to 1.6 or 1.7. The objective of this study was to introduce a new system by combining double effect absorption chiller with single effect absorption chiller with multi-generators using bypass flow of LiBr dilute solution to 3<sup>rd</sup> generator to overcome the disadvantages of triple-effect chiller and improve energy efficiency. Results indicate that the new absorption cycle had a much higher efficiency than double-effect chiller system, showing significant improvement when bypass solution flow rate of 25% was applied to the 3<sup>rd</sup> generator using the main dilute solution of the absorber. The COP of the new chiller system was found to be 1.438, which was 21.7% higher than that (1.18) of the present double-effect system. The COP was decreased when solution by-pass rate to the 3<sup>rd</sup> generator was increased. In addition, lower cooling water temperature caused higher COP. Therefore, the multi-generator system with by-pass solution might be an excellent chiller alternative to triple-effect absorption chiller with higher efficiency.

**Key words** Triple-effect absorption chiller(삼중 효율 흡수식 냉동기), Multi-generator system(다단 재생 시스템), LiBr solution by-pass flow rate(LiBr 용액 분지 흐름율)

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: skyun@kmou.ac.kr

### 1. 연구배경 및 목적

흡수식 냉동기는 전기 에너지에 의해 구동되는 압축식과 달리, 가스의 연소열이나 온수, 냉매 증기의 열을 이용하여 대용량의 냉난방을 제공이 가능하여 국내 널리 보급되고 있다. 특히 흡수식 냉동기는 천연가스를 연소시켜 냉방을 하므로 하절기 냉방 전력 피크를 크게 감소시킬 수 있고, 감소하는 하절기 가스 수요를 증가시켜 LNG 설비 이용율을 향상시키는 장점을 제공한다. 이러한 흡수식 냉동기는 효율이 낮기 때문에 성능 향상을 위한 많은 모델 제안과 개발이 수행되고 있다. 일반적으로 널리 보급되고 있는 흡수식 냉동기는 일중 효율 흡수식 냉동기와 이중 효율 흡수식 냉동기가 있으며, 최근 Woo et al.<sup>(1)</sup>은 흡수식 냉동기의 성능을 향상시키기 위한 삼중 효율 흡수식 냉동기의 개발이 진행 중임을 발표된 바 있다. Kim et al.<sup>(2)</sup>은 시뮬레이션을 통하여 삼중 효율의 직렬형과 병렬형, 역병렬 흐름식 등 다양한 사이클의 적용성 연구를 수행한 바 있다. 국내 이중 효율의 고효율화 연구로는 Yang et al.<sup>(3)</sup>의 다중열원을 이용한 삼중발전 시스템용 고효율 이중 흡수식 사이클의 해석

등<sup>(4)</sup>이 있다. 국외 경우는 다양한 해석 연구가<sup>(5)-(7)</sup> 수행되고 있으며, 일본을 중심으로 KAWASAKI사 등에서 변형 역흐름형 등을 채택하여 개발한 삼중 효용 흡수식 냉동기가 제작되어 발표되고 있다.<sup>(1)</sup>

삼중 효용 흡수식 냉동기는 이중 효용 흡수식 냉동기에 재생기 및 열교환기가 추가된 것으로, 고온 재생기의 온도는 200℃, 압력은 2 bar 내외가 되어, 고온으로 냉매인 수증기 발생량이 증가하면서 COP가 1.6~1.7정도로 상승하게 된다. 그러나 삼중 효용 흡수식 냉동기는 고온으로 급격한 부식 발생의 우려가 있어서 새로운 부식 억제제의 개발이 필요하고, 내구성을 향상시키기 위하여 핵심요소 설비인 고양정 펌프, 고압용 열교환기 등의 개발이 필요하게 된다.

그러므로 본 연구에서는 삼중 효용 흡수식 냉동기의 이러한 문제들을 해결하면서 현재 널리 보급되는 이중 효용 흡수식 냉동기의 성능계수를 크게 향상시킬 수 있는 공정을 새로이 제안하였다. 이는 이중 효용 흡수식 냉동기에 일중 효용 흡수식 냉동기를 조합한 공정으로, 이중 효용 시스템에 재생기를 1개 더 추가하고 제1 재생기에 유입되는 흡수용액을 분지하여 제3 재생기에 유입시키는 공정을 구성하였다. 또한 본 해석에서는 이중 효용의 성능을 향상시키기 위한 배열회수 이용 등의<sup>(8)</sup> 추가 고려 인자들은 고려하지 않았다.

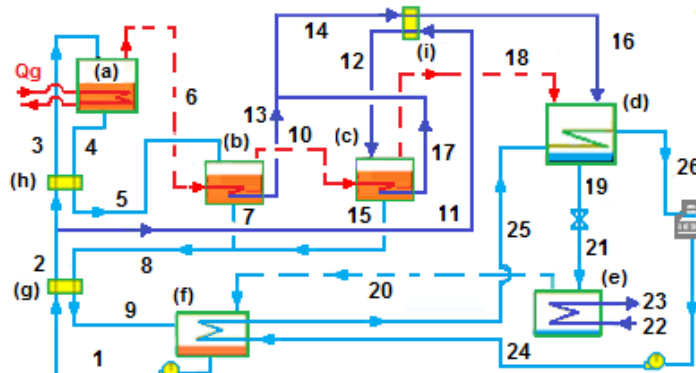
본 연구에서는 본 개발 공정의 제1 재생기 적용 온도를 이중 효용과 동일하게 하는 것을 기준하여, 공정의 온도, 압력, 열량, 성능 변화를 분석하였다. 또한, 성능에 영향을 미치는 인자들인 제3 재생기로의 분지 용액 흐름량의 변화, 열교환량, 냉각수 온도 변화 등의 변화에 따른 성능 계수의 변화 등을 분석하여 새로운 고성능의 흡수식 사이클의 적용 가능성을 분석하였다.

## 2. 다단 재생기를 적용한 흡수식 냉동기 해석

### 2.1 사이클 구성

본 개발 흡수식 냉동기는 용액 분지식 3단 재생기를 적용한 공정으로, 이중 효용 흡수식 냉동기에 하나의 재생기를 추가하고, 고온의 제1 재생기에 주입되는 흡수용액을 분지시켜 추가되는 제3 재생기에 주입하는 공정이다. 삼중 효용 흡수식 냉동기는 효율 향상을 위하여 200℃의 고온과 2 bar의 고압이 필요한 반면, 본 다단 재생기를 적용한 흡수식 냉동기는 2중 효용 흡수식 열펌프와 동일하게 150℃ 정도를 최고 온도로 적용하였다.

용액 분지식 3단 재생기 적용 흡수식 냉동기 사이클 흐름도는 Fig. 1과 같다. 공정의 구성을 보면, 제1 재생기(a), 제2 재생기(b), 제3 재생기(c), 응축기(d), 증발기(e), 흡수기(f), 그리고 열교환기가 3개로 구성된다. 용액의 흐름을 보면 흡수기로부터 저온 열교환기(g)를 거친 57.4%의 물은 용액은 제1 재생기에 주입되기 전 지점 2에서 일부가 분지되어 배관 11로 제3 재생기에 주입된다. 냉매인 수증기의 발생을 보면, 제1 재생기에서 이중 효용과 동일한 조건에서 가스 등 열원 Qg에 의하여 냉매가 발생하며 이는 제2 재생기의 열원으로 유입된다. 제2 재생기에서는 고온 열교환기(h)를 거친 중간 농도의 용액이 제1 재생기의 냉매 수증기(6)에



(a) 1<sup>st</sup> generator, (b) 2<sup>nd</sup> generator, (c) 3<sup>rd</sup> generator, (d) Condenser, (e) Evaporator, (f) Absorber, (g) 1<sup>st</sup> Heat Exchanger, (h) 2<sup>nd</sup> Heat Exchanger, (i) 3<sup>rd</sup> Heat Exchanger, (j) Cooling Tower

Fig. 1 Flow diagram of multi-generator absorption chiller.

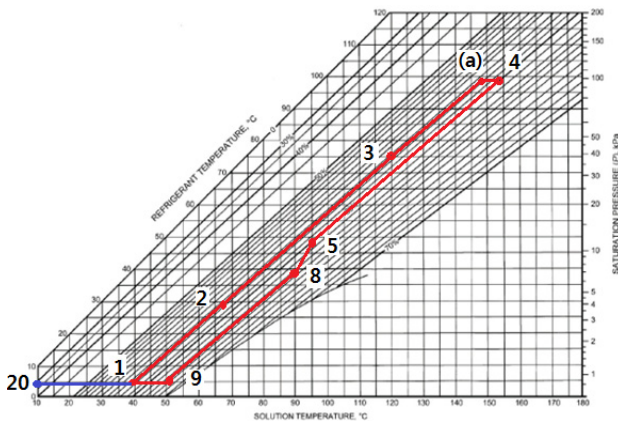
의하여 가열되어 수증기(10)를 추가 발생시키면서 62.4%의 고농도가 된다. 이 공정까지의 흐름이 이중 효율과 동일한 공정이 되고, 추가되는 공정은 일중 효율 공정으로 제2 재생기에서 증발한 수증기가 제3 재생기의 열원이 되는 공정이다. 제3 재생기에서는 100.5℃의 제2 재생기의 수증기(10)가 열원이 되어 분지되어 유입되는 묽은 용액을 가열하여 냉매(17)를 발생시키고 고농도가 되어 제2 재생기의 진한 용액과 합류(8)되어 흡수기로 돌아간다. 제3 재생기에 유입되는 분지된 묽은 용액(11)은 제3 저온 열교환기(i)에서 제2 재생기와 제3 재생기로부터 응축기에 유입되는 냉매 물(13+17)에 의하여 추가 가열된다.

분석에 의하면 이중 효율 흡수식 열펌프에 재생기를 1개 추가하고 흡수용액을 분지 유입시킴으로써 종래 이중 효율의 저온 재생기에서 증발한 수증기의 열을 추가된 재생기의 흡수용액 가열에 사용함으로써 성능이 크게 개선된다. 또한 이 공정은 이중 효율 흡수식 열펌프의 효율을 향상시키고 삼중 효율 흡수식 열펌프의 고온 고압의 문제를 해결하게 된다.

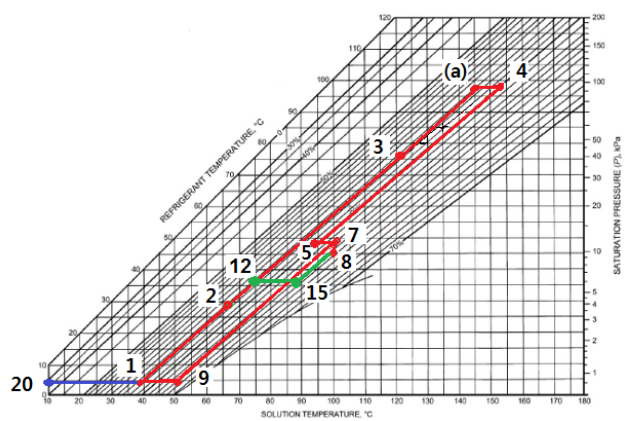
## 2.2 사이클의 비교

Fig. 2는 2중 효율 흡수식 사이클과 본 고안의 분지식 다단 재생기 적용 흡수식 사이클의 듀링(Durling) 선도를 비교한 것이다. Fig. 2(a)는 분지부가 없는 현재의 2중 효율 사이클만의 선도를 나타낸 것으로, 흡수기의 38℃, 57.4% 묽은 용액(Fig. 2의 지점 1)은 저·고온 열교환기(2, 3)를 거치면서 67℃, 120.6℃가 되어 고온 재생기(a)에 유입된다. 고온 재생기에서는 흡수용액이 153℃, 59.96% 중간 농도(4)가 되어 저온 재생기로 유입된다. 이 때 고온 재생기의 가열량은 용액 1kg/s를 기준하면 170.04 kW가 된다. 저온 재생기에서는 62.4%, 90.3℃의 농용액(8)이 생성되어 저온 열교환기를 거친 후 56.4℃(9)로 흡수기에 유입된다. 응축기에는 고온재생기의 생성 냉매 0.042695 kg/s와 저온재생기의 추가 생성 냉매 0.037433 kg/s가 합체되어 증발기에서 200.9 kW의 저온을 제공하게 된다. 이 기준에 의한 2중 효율의 COP는 1.1815가 된다.

Fig. 2(b)는 본 고안 공정의 듀링 선도로 2중 효율과 차이점은 저온 열교환기(지점 2)의 67℃, 57.4% 묽은 용액의 일부가 분지된 후 제3 열교환기(i)에서 74.5℃(12)로 가열되어 제3 재생기에 주입되는 것이다. 추가된 제3 재생기에서는 제2 재생기의 수증기 냉매의 상변화 열량에 의하여 냉매가 추가 생성되고 용액은 고농도인 62.81%, 온도 87.9℃(15)가 되어 제2 재생기의 고농도 흡수용액(7)과 혼합되어 97℃, 62.48%(8)로 저온 열교환기를 거쳐 흡수기에 주입된다. 일부가 분지되고 남은 67℃, 57.4% 묽은 용액(2)은 2중 효율공정과 동일하게 고온 열교환기(3)를 거치면서 120.6℃가 되어 고온 재생기(a)에 유입된다. 고온 재생기에서는 153℃, 59.96% 중간 농도(4)가 되어 저온 재생기로 유입된다. 이 때 고온 재생기의 가열량은 용액 1 kg/s를 기준하면 127.53 kW가 되며 증발기의 능력은 183.39 kW가 된다. 이와 같이 본 고안의 성능 향상은 제3 재생기에서 제2 재생기의 수증기에 의하여 냉매가 추가 생성되고, 고온 재생기의 유입량이 지점 2에서 분지된 양 만큼 감소함으로써 고온 재생기 가열량이 감소하게 되어 COP가 2중 효율 공정보다 증가됨을 알 수 있다.



(a) Durling diagram of double-effect cycle



(b) Durling diagram of multi-generator cycle

Fig. 2 Comparison of Durling diagrams of each cycle.

Table 1 Design conditions for the cycle

Element		1 <sup>st</sup> generator	2 <sup>nd</sup> generator	3 <sup>rd</sup> generator	Absorber	Condenser	Chilled water	Cooling water
LiBr solution temperature[°C]	Inlet	120.6	94.1	74.3	52.2	80.5	12.5	32
	Outlet	153.1	100.5	87.9	38			
Refrigerant temperature[°C]	Inlet		153.1	87.9, vapor		39.7	7	38
	Outlet	153.1	100.5	85.0, Liquid				
Evaporated refrigerant enthalpy(kJ/kg)		2782.8	2668.0	2664.9				

Table 2 Simulation results

Element		1 <sup>st</sup> generator	2 <sup>nd</sup> generator	3 <sup>rd</sup> generator	Absorber	Condenser	Evaporator
Mass flow-rate (kg/s)	LiBr Solution inlet	0.75	0.717979	0.25	0.921696		
	Refrigerant	0.032021	0.024742	0.021540	0.078304	0.078303	0.078304
LiBr Concentration	Inlet	0.574	0.5996	0.574	0.6248		
	Outlet	0.5996	0.621	0.6281	0.574		
Q(kW)		127.53					183.39

### 2.3 사이클 해석 방법

다단 재생기 적용 흡수식 냉동기 사이클의 정상상태 해석을 위하여 공정 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 분석하였다. 냉매 수증기의 열역학 값은 Refprop 9.0을 사용하였으며, LiBr 수용액의 농도와 온도에 따른 엔탈피 값은 프로그램화하여 적용하였다. 모든 장치의 해석은 질량 보존, 에너지 보존의 식을 적용하였으며, 열교환기 등의 열손실은 없는 것으로 해석하였다. 제1 재생기에 유입되는 흡수용액 흐름량을 1 kg/s로 기준하여 시스템을 해석하였으며, Table 1은 3단 재생기의 각 용액과 냉매의 입출 온도, 냉매 수증기의 엔탈피 값을 나타낸다. 냉수, 냉각수, 모든 요소 설비들의 온도, 압력 등의 조건은 통상의 이중 효율과 일중 효율 사이클의 조건을 기준한 것이며, 전열 관계식, 농도 관계식, COP 관계식 등은 참고문헌들의 식과<sup>(9)-(12)</sup> 동일하게 적용하였다.

## 3. 다단 재생 흡수식 냉동기 해석결과

### 3.1 다단 시스템 사이클 해석 결과

Table 2는 재생기가 3개 적용된 다단 재생 시스템에 있어서 제3 재생기에 분지 유입되는 묽은 용액(11)의 흐름율이 25%일 때의 해석결과로, 주요 요소 설비의 질량유량, 농도 그리고 제1 재생기의 주입 열량, 증발기의 흡입 열량 및 COP를 나타낸다. 본 시스템의 제1 재생기 기준 온도는 이중 효율과 동일하게 153.1°C로 하였으며, 일중 효율에 해당하는 제3 재생기의 경우는 저온 열교환기 후 분지된 66.9°C의 용액이 제3 열교환기(i) 후 74.3°C로 상승하여 주입되어 87.9°C의 냉매 증기와 용액이 발생한다. 이 때 용액의 농도는 62.81%가 되고, COP는 1.438로 동일조건인 이중 효율 1.1815를 비교하면 COP가 21.7%가 향상되고 삼중 효율 흡수식 시스템과 이중 효율 흡수식 성능의 중간 성능이 얻어진다.

### 3.2 제3 재생기 흐름을 변화에 따른 효율 변화

Fig. 3은 저온 열교환기에서 분지되어 제3 재생기로 흐르는 용액(11)의 양에 따른 COP의 변화를 나타낸다. LiBr 묽은 용액의 제3 재생기로의 분지율이 25%일 때 COP가 최대 1.438로 얻어졌으며, 흐름량이 증가할수록

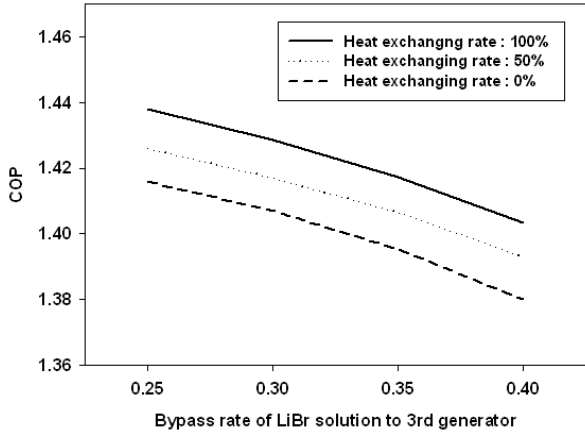


Fig. 3 COP variation with bypass flow-rate of LiBr solution to 3<sup>rd</sup> generator.

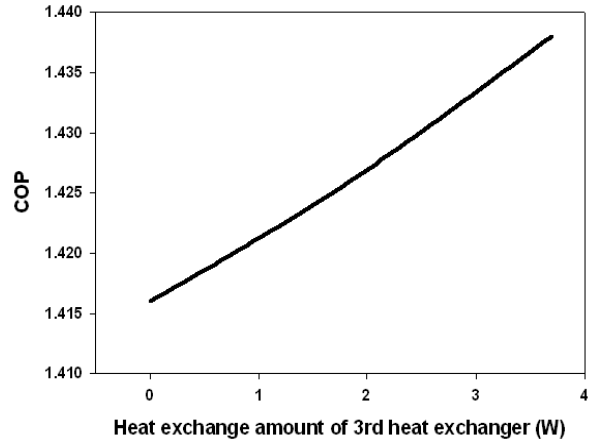


Fig. 4 COP variation with heat exchange amount of 3<sup>rd</sup> heat exchanger.

COP가 감소하였다. 흐름이 25%보다 감소하면 제3 재생기에서 용액의 농도가 짙어져 결정화 발생을 고려하여야 한다. 제3 재생기로의 흐름이 없게 되면 2중 효율과 동일한 공정이 된다.

### 3.3 제3 열교환기 열교환량 변화에 따른 효율 변화

Fig. 4는 제3 재생기에 유입되는 분지된 용액이 제2 재생기에서 배출되는 냉매액과 제3 열교환기(i)에서 열교환되어 가열되는 열량에 따른 성능 변화를 나타낸다. 제2 재생기로부터 열교환기에 유입되는 냉매액이 유입되는 분지액(11)의 온도보다 5도 높게 배출되는 기준 즉 72℃로 할 때 최대 열교환량은 3.695 kW가 되었다. 이 열교환을 제거하면 COP는 1.4225로 1.08% 미량 감소하였다.

### 3.4 제3 재생기 발생 냉매증기 조건에 따른 효율 변화

Fig. 5는 응축기 온도 변화에 의한 제3 재생기에서 발생하는 냉매 증기와 흡수용액의 변화를 보여준다. 분석 기준으로는 응축기 온도 36℃ 기준으로 냉매 증기 온도 87.9℃, 압력 7.63 kPa, 엔탈피 값을 2,664.9 kJ/kg으로 한 것이다. 응축기 냉각수의 온도가 강하되어 응축기 온도가 32℃로 낮아지면 발생 냉매량이 증가하면서 COP는 1.454로 32℃ 경우 보다 1.1% 증가하였다.

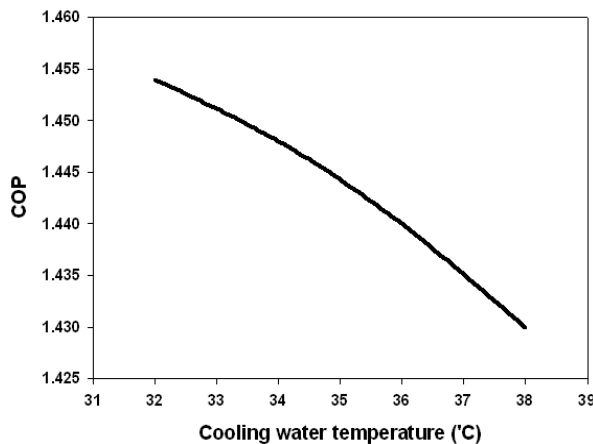


Fig. 5 COP variation with discharge temperature of LiBr solution from 3<sup>rd</sup> generator.

## 4. 결 론

본 연구에서는 삼중 효율 흡수식 냉동기의 개발에 필수적인 고온, 고압 및 부식 문제 등을 해소하면서 현재의 이중 효율 흡수식 냉동기의 성능을 크게 향상시키고자 이중효율 냉동기와 일중 효율 냉동기를 조합한 시스템에 재생기 LiBr 용액을 분지 주입하는 시스템을 고안하였으며, 이에 따른 COP 향상과 영향을 미치는 주요 인자에 대하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제3 재생기에 주입되는 분지율이 25%일 때 COP가 1.438로 최대가 얻어졌으며 이는 동일 조건의 이중 효율 냉동기의 21.7%가 향상되었다.
- (2) 분지 용액이 제3 재생기에 주입되기 전에 제2 재생기에서 배출되는 응축 냉매액으로 예열하면 COP가 최대 1.1% 증가하였다.
- (3) 제3 재생기로 분지된 용액의 주입을 위하여는 용액 펌프의 양정의 증가가 필요하나, 제1 재생기로 부터 유출되는 고압의 LiBr 용액을 일부 혼입함으로써 문제 해결이 가능하고, 이 때 COP는 1% 정도 미량 감소한다.

## References

1. Woo, S. M., Kim, H. S., Kim, K. Y., and Lee, S. Y., 2016, Development of Triple Effect Gas Fired Absorption Chiller, Proceedings of the Air-conditioning and Refrigeration Engineering Summer Annual Meeting, pp. 156-159.
2. Ryu, J. S., Kim, C. G., Lee, Y. S., Song, H. G., and Park, J. H., 2015, Development of Single effect/Double Lift Absorption Chiller and Heater with Domestic Hot Water for a District Heating Net Work, Proceedings of the Air-conditioning and Refrigeration Engineering Summer Annual Meeting, pp. 644-648.
3. Park, J. M. and Jeong, S. Y., 2016, Comparative Simulation of Triple-Effect Absorption Chiller Cycles with Various Solution Flows, Proceedings of the Air-conditioning and Refrigeration Engineering Summer Annual Meeting, pp. 145-148.
4. Shin, Y. G., Seo, J. A., Cho, H. W., Nam, S. C., and Jeong, J. H., Development of a Dynamic Model for Double-Effect LiBr-H<sub>2</sub>O Absorption Chillers and Comparison with Experimental Data, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 12, pp. 781-788.
5. Mori, Kiyoyuki, Oka, Masahiro, 2003, Development of Triple-effect Absorption Chiller-Heater, 22<sup>nd</sup> World Gas Conference, Tokyo.
6. Solanki, A., Singh, S. K., and Pal, Y., 2015, Performance Evaluation of Triple Effect Vapour Absorption Cooling System, International Conference on Science, Management, Engineering and Technology, pp. 53-59.
7. Azhar, M. and Siddiqui, M. A., 2013, Thermodynamic Analysis of a Gas Operated Triple Effect Absorption Cycle, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 2, No. 5, pp. 1610-1616.
8. Park, C. W., 2006, A Study on the COP Improvement of Absorption Chillers by Recovering Heat from the Condenser, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 9, pp. 738-745.
9. Yoon, J. S., Kwon, O. K., Cha, D. A., Bae, K. J., Kim, I. G., Kim, M. S., and Park, C. W., 2017, Effects of Operation Conditions on the Performance of Type II LiBr-H<sub>2</sub>O Absorption Heat Pump, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 7-14.
10. Yang, M. N., Jung, C. W., and Kang, Y. T., 2015, Development of High Efficiency Cycles for the Double-Effect Absorption Cycles Using Multi-heat Source for Trigen Application, Proceedings of the Air-conditioning and Refrigeration Engineering Summer Annual Meeting, pp. 27-30.
11. Kim, S. S., Oh, M. K., Jeon, S. H., and Kang, Y. T., 2003, Simulation and Cost Estimation of Energy Transportation at Ambient Temperature Using an Absorption System, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 1028-1034.
12. Park, J. M. and Jeong S. Y., 2016, Comparative Simulation of Triple-Effect Absorption Chiller Cycles with Various Solution Flows, Proceedings of the Air-conditioning and Refrigeration Engineering Summer Annual Meeting, pp. 145-148.