

# 흡수식 냉온수기 고온재생기 액면 거동과 제어

신 영 기<sup>\*\*</sup>, 콧 민 수, 조 현 옥, 남 상 철, 정 진 희

세종대학교 기계공학과, <sup>\*</sup>(주) LS엠트론

## Level Dynamics and Control of the Solution in the High Temperature Generator of an Absorption Chiller

Younggy Shin<sup>\*\*</sup>, Min Soo Kwak, Hyun Wook Cho, Sang Chul Nam, Jin Hee Jeong

Department of Mechanical Engineering, Sejong University, Seoul 134-747, Korea

<sup>\*</sup>LSMtron Co., Gyeonggi-do 431-848, Korea

(Received July 26, 2010; revision received October 6, 2010)

**ABSTRACT:** In an absorption chiller, solution is circulated by a solution pump with an inverter to vary flow rate depending on operating conditions. For optimal operation, the solution level in the high temperature generator should be kept constant. However, a sensor for measuring continuous level is not available because of varying solution concentration. Instead, level switches are used and hence feedforward control associated with limit checking is a common practice. In the study, inverter frequencies are estimated from a dynamic simulation model and pump performance. Designed frequencies are compared with those implemented in real chillers. It was found that the frequencies used in real chillers are larger than those needed in circulation flow rates. It was intended to prevent system shut-off caused by dry-out. However, it is necessary to minimize the excessive frequency setting in order to reduce frequent pump stops and the range of solution level for continuous pump operation.

**Key words:** Absorption(흡수식), Dynamic model(동특성 모델), Solution pump(용액펌프), Level control(액위 제어)

### 기 호 설 명

|            |                               |
|------------|-------------------------------|
| $C_V$      | : 유량계수(flow coefficient)      |
| $dP$       | : 펌프 입출구 차압 [kPa]             |
| $\Delta p$ | : 유량 밸브 전후 압력차 [ <i>psi</i> ] |
| $F$        | : 유량 [US gallons per minute]  |
| $freq$     | : 인버터 주파수 [Hz]                |
| $\dot{Q}$  | : 체적유량 [ $m^3/h$ ]            |
| $SG$       | : 비중(물의 경우 1)                 |
| $T$        | : 온도 [ $^{\circ}C$ ]          |

$x$  : LiBr-H<sub>2</sub>O 중 LiBr 질량 분율

### 하첨자

|           |                  |
|-----------|------------------|
| $CWI$     | : 냉각수 입구         |
| $HTG$     | : 고온 재생기         |
| to $COND$ | : 고온재생기에서 응축기로   |
| to $LTG$  | : 고온재생기에서 저온재생기로 |

### 1. 서 론

이중효용 흡수식 냉온수기에 충전된 용액량이 많으면 열용량이 커져 요구부하에 대응하는 응답속도

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-3408-3284; fax: +82-2-3408-4333

E-mail address: ygshin@sejong.ac.kr

가 늦다. 느린 반응속도는 제어 안정성을 해치므로 급격한 부하 변동이 발생하는 경우 고온재생기(HTG; high temperature generator) 내 용액이 과열되어 시스템이 정지할 수도 있다. 또한 고온재생기 내 용액량이 변동하면 입열량에 대한 시스템 능력의 비례관계를 변동시켜 시스템 비선형성을 증가시키므로 제어 불안정성의 한 원인이 된다.

따라서 빠르고 안정된 이상적인 제어를 위해서는 고온재생기 내 용액량을 열교환이 가능한 범위에서 최소량으로 일정하게 유지해야 한다.

일정한 액면제어를 위해서는 액면 레벨을 연속으로 측정할 수 있는 센서가 있어야 하는데 흡수식 냉온수기에는 적용된 사례가 없다. 물을 대상으로 하는 보일러의 경우에는 정전용량식 액위센서가 제품화되고<sup>(1)</sup> 보일러 제어에 적용되고 있다.<sup>(2)</sup> 그러나 흡수식 냉온수기의 경우 LiBr 수용액의 농도가 변하고 염류 농도가 정전용량에 미치는 영향이 크기 때문에 LiBr 수용액의 액위를 측정할 수 있는 센서는 제품화되지 않은 것으로 판단된다.

그 결과 일반적인 연속 피드백 제어가 불가능하여 냉온수기 작동 조건에 따른 용액 순환량을 예측하여 용액 펌프 인버터 주파수를 설정하고 공급량과 순환량의 오차 누적으로 인해 HTG 액위가 일정 범위를 벗어나면 액위 스위치로 검출하여 용액펌프를 최대부하로 운전하거나 시스템 자체를 정지시키는 교정운전을 수행한다. 따라서 용액 순환량 예측 모델이 부정확하면 유량오차가 커져 교정운전이 빈번해지므로 시스템 안정성을 해치고 HTG 내 용액 액위의 큰 변동으로 인하여 제어의 비선형성이 증대한다.

액위제어에 관해 발표된 학술연구 사례를 찾기 어려우나 흡수식 냉온수기 제어의 중요한 부분을 차지하고 향후 제어 성능 개선을 위해 필수적인 분야이므로 본 연구에서는 HTG 액위 제어 원리를 규명하고 개선된 제어 알고리즘 도출을 위한 토대를 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 시스템 구성

Fig. 1은 용액 액위센서가 장착된 고온재생기 구조를 나타낸다. 노통의 연소가스는 HTG 열교환기를 통해 HTG 내 용액과 열교환 한다. 정상운전 상

태에서 200 RT 용량의 흡수식 냉온수기의 경우 최대 약 300리터의 용액이 고온재생기에 존재한다. 이 중 절반은 액위센서에 의해 제어되는 특성에 따라 가변될 수 있다.

Fig. 1에서 액위센서들은 접지점(reference ground)을 기준으로 용액에 잠겨 있는지 여부를 판단하는 일종의 리미트 스위치 센서이다. Fig. 1의 경우 3개의 액위를 검지할 수 있으며 이 정보를 근거로 액위를 적정 범위 내로 제어한다.

고온재생기 내 용액은 고온의 배기가스로 가열되어 온도와 압력이 증가하고 그 결과 발생한 수증기(냉매)는 저온재생기 용액과 열교환하여 잠열을 잃고 응축기에서 응축된다. 또한 압력이 증가한 고온재생기 내 용액은 압력차에 의해 유량조절 밸브를 거쳐 저온재생기로 이송된다. 이렇게 고온재생기를 빠져나간 용액량을 보충하기 위해 흡수기 출구에 설치된 회용액 펌프가 가동된다.

### 2.2 액위 제어 알고리즘

액위 제어를 위해서는 액위 정보가 연속적으로 제공되어야 하나 그러한 센서가 구비되어 있지 않으므로 일반적인 PID 제어는 불가능하다. Fig. 2는 액위 스위치 센서를 적용한 일반적인 제어 알고리즘의 구성을 나타낸다. 액위가 Max와 Min 액위 사이에 위치하면 고온재생기 및 냉각수 입구온도의

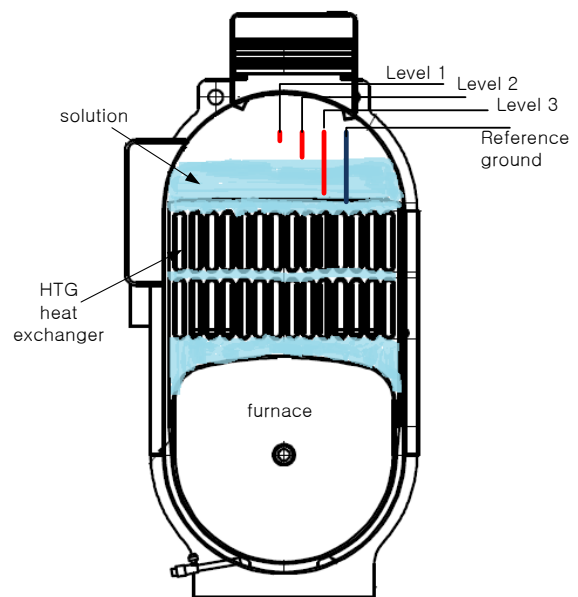


Fig. 1 Schematic of HTG and level sensor locations.

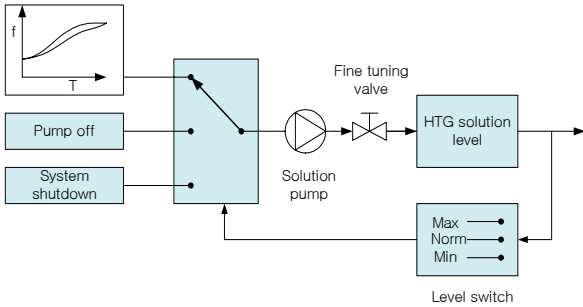


Fig. 2 Conventional control algorithm of HTG solution level.

함수로 설정되어 있는 인버터 주파수로 용액 펌프를 운전한다. 액위가 연속적으로 피드백 되지 않으므로 공급된 유량과 HTG를 빠져 나간 유량의 오차가 누적되어 HTG 내 액위가 Max 액위에 도달하게 되면 펌프 구동이 정지된다. 한동안 용액이 빠져나가 액위가 Fig. 1의 Level 2에 도달하게 되면 용액 펌프가 다시 작동하여 Fig. 2의 HTG 용액 및 냉각수 입구 온도 함수인 인버터 주파수로 운전된다. 공급되는 유량이 작아 용액 액위가 계속 낮아져 최저 액위센서(Fig. 1의 Level 3)에 감지되면 시스템에 이상이 발생한 것으로 판단하고 냉온수기 전체를 정지시킨다. 현장에서의 유량 조절을 위해 밸브개도의 수동 고정이 가능한 Fine tuning valve가 Fig. 2에 구비되어 있다.

이러한 알고리즘의 취약점은 인버터 주파수에 의한 유량 공급이 HTG에서의 실제 순환량과 차이가 클수록 액위 변동이 심해지고 그 결과 용액펌프가 자주 정지할 수 있다는 점이다. 용액 펌프의 빈번한 정지는 바람직하지 않으므로 가능한 한 연속운전이 되도록 제어해야 한다. 연속운전을 오래 유지하기 위해서는 Fig. 2의 최고와 최저 액위 차이를 크게 하면 되지만 이는 HTG 내 액위 변동을 크게 하고 흡수기에 소요되는 용액량을 증가시키므로 충전 용액량 절약의 차원에서 바람직하지 않다. 따라서 액위 변동을 줄이면서 펌프의 연속운전을 가능하게 하려면 운전조건 별 용액순환량을 예측하고 이를 공급하기 위한 용액펌프 인버터 주파수를 최적으로 설계해야 한다.

2.3 용액순환량에 영향을 미치는 인자

HTG 내 용액은 LTG 압력과의 차이로 유량 밸브를 거쳐 LTG로 이송된다. 또한 HTG 내 냉매증기는 응축기 압력과의 차이로 유량 밸브를 거쳐 응

축기로 이송된다. 그런데 재생기와 응축기는 냉매 증기 확산이 자유로운 격벽으로 구분되어 있으므로 압력이 동일하다. HTG 용액순환량은 밸브의 유량 계수 및 HTG 용액 포화압력과 응축기 냉매 포화압력에 의해 결정된다. HTG 내 압력은 용액의 포화압력에 해당하며 이는 용액 온도와 농도의 함수이므로 HTG 용액순환량은 다음 변수들의 함수로 정리될 수 있다.

$$Q_{HTG} = fn(T_{HTG}, x_{HTG}, T_{COND}, C_{V to LTG}, C_{V to COND}) \tag{1}$$

밸브유량계수들은 조절밸브 미세조정을 통해 조절이 가능하나 현장 커미셔닝(commissioning) 후에는 일정하게 고정된다. 문제는 유량계수 값을 알 수 없다는 점이다. 또한 HTG 용액농도  $x_{HTG}$ 도 직접 측정이 불가능하고 운전 중인 흡수식 시스템의 기계적 특성을 반영한 복잡한 연산을 거쳐야만 간접적으로 알 수 있는 값이다. 측정 가능한  $T_{HTG}$ 와  $T_{COND}$ 만으로는 순환유량 예측이 불가능하다. HTG 용액순환량은 흡수식 시스템 설계단계에서 운전조건 별 정상상태 질량 및 에너지 평형해석 프로그램으로부터 얻어야 한다. 유량계수  $C_V$ 는 다음의 유량계수 정의에 의해 설계유량으로 대체하여 표현할 수 있다.

$$C_V = F \sqrt{\frac{SG}{\Delta p}} \tag{2}$$

흡수식 시스템 설계단계에서 최대 용량 및 용액 순환비 등이 결정되면 식(2)의 유량계수들도 고정된다. 식(1)에서  $x_{HTG}$ 는 직접 측정할 수 없으므로 직접 측정이 가능한  $T_{HTG}$ 와  $T_{COND}$ 에 대한  $Q_{HTG}$  관계를 그래프로 표현하여 간단한 경험식을 구성할 수 있는 지 검토해 본다.

Fig. 3~Fig. 6은 Shin et al.<sup>(3)</sup>이 기동 및 정지를 포함하여 약 3시간 40분에 걸쳐 이중효용 흡수식 냉온수기를 운전한 실험데이터를 재구성한 것이다. 과도상태가 포함되어 데이터 편차가 존재하나 HTG 용액 온도에 대하여 HTG 용액순환 유량과 HTG 농도가 함수적으로 연관되어 있음을 추정할 수 있다. Fig. 5는 응축기 냉매온도와 냉각수 입구온도  $T_{CWI}$ 의 관계를 나타낸 것으로 강한 함수관계를 보여준다. 이는 냉각수 온도가 냉매 응축온도에 지배적 영향을 미친다는 사실로부터 이해될 수 있다.

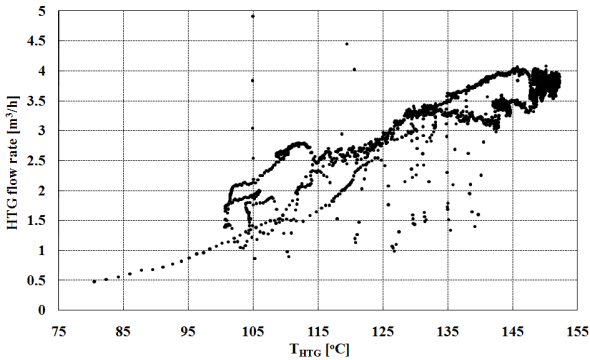


Fig. 3 HTG solution temperature versus solution flow rate through HTG.

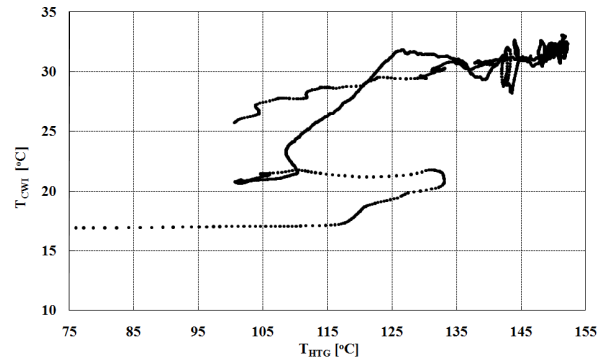


Fig. 6 HTG solution temperature versus coolant inlet temperature.

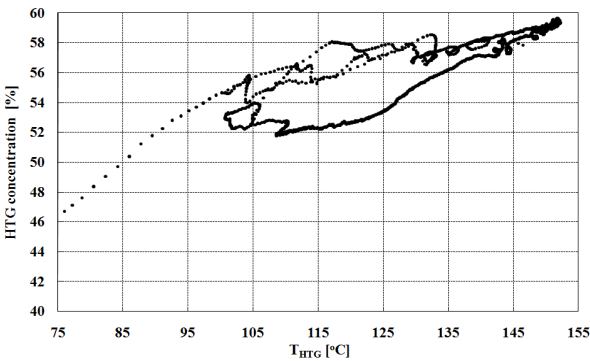


Fig. 4 HTG solution temperature versus HTG concentration.

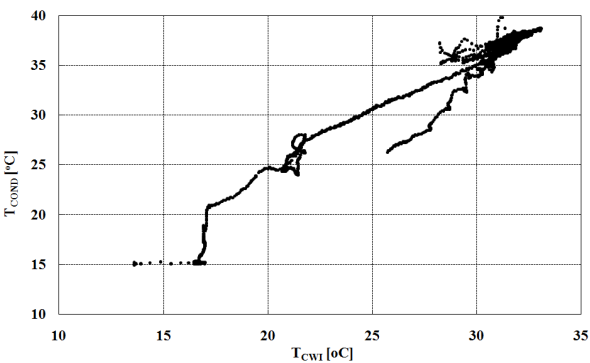


Fig. 5 Coolant inlet temperature versus refrigerant temperature in condenser.

Fig. 6은 HTG 용액온도와 냉각수 입구온도의 관계를 나타낸다. 함수적 연관성이 상대적으로 적음을 알 수 있다. 식(1)에서 HTG 용액농도는 독립변수로 설정되어 있지만 Fig. 3에 의해 HTG 용액온도에 함수적으로 종속되어 있다고 근사할 수 있다. Fig. 4에 의해 냉매응축온도는 냉각수 입구온도에 종속되어 있으며 냉각수 입구온도는 시스템에 가해지는 외란을 나타내는 변수이므로 제어의 신속한

대응을 위해 반응이 느린 냉매응축온도보다 실용적으로 선호된다. 이상의 결과로부터 식(1)은 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$\dot{Q}_{HTG} \cong fn(T_{HTG}, T_{CWI}, C_{V\ to\ LTG}, C_{V\ to\ COND}) \quad (3)$$

### 3. 용액순환량 예측과 인버터 주파수 설계

냉온수기 제조사들은 식(3)에서 밸브 개도가 고정된 조건 하에서 Fig. 7과 같은 용액 순환량 예측 그래프를 적용한다.<sup>(4)</sup> Fig. 7은 예측된 용액 순환량을 회용액 펌프의 인버터 주파수로 환산한 것이다. 본 연구에서는 Fig. 7과 같은 그래프 특성이 타당한 설계인지 판단하고 합리적인 인버터 주파수 설계방안을 제시하고자 한다.

Fig. 8은 Shin et al.<sup>(3)</sup>의 직렬식 200 RT급 이중효용 흡수식 냉온수기 프로그램을 이용하여 냉각수 입구온도별로 HTG 용액순환량을 계산한 결과를 나타낸다. Fig. 3과 유사한 유량을 나타내고 있으며 냉각수 입구온도가 순환유량에 미치는 영향을 파악할

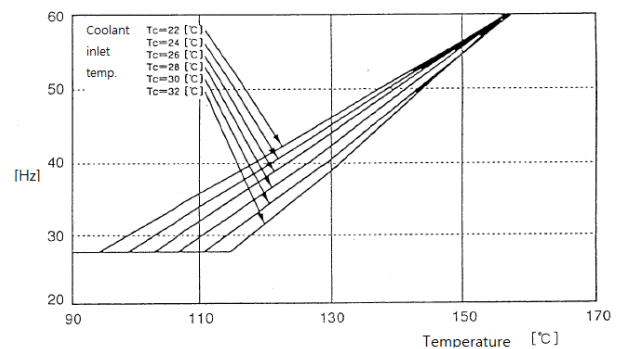


Fig. 7 Sanyo's case of inverter frequency design.

수 있다.

순환유량을 공급하기 위해서는 회용액 펌프 성능 곡선을 알아야 한다. Fig. 9는 전형적인 펌프 유량 성능에 대하여 식(4), 식(5)를 적용하여 인버터 주파수가 유량과 차압에 미치는 영향을 계산한 결과이다.

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_1 \times \left( \frac{freq_2}{freq_1} \right) \quad (4)$$

$$dP_2 = dP_1 \times \left( \frac{freq_2}{freq_1} \right)^2 \quad (5)$$

Fig. 10은 냉각수 입구온도와 HTG 용액온도에 따라 펌프 양단에 걸리는 차압을 Shin 등<sup>(3)</sup>의 프로그램으로 계산한 결과를 나타낸다. Fig. 8과 Fig. 10의 유량과 차압으로부터 인버터 주파수를 계산한

결과는 Fig. 11과 같다. 비교를 위하여 Sanyo사의 설계 주파수를 함께 도시하였다.

HTG 용액온도 110~140°C 범위에서는 인버터 주파수가 비슷함을 알 수 있다. 동일 용액온도에서 냉각수 온도에 따른 주파수 민감도도 비슷하며 이는 냉각수 온도에 의한 차압의 변화가 주파수 민감도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다. Sanyo 설계 주파수는 110°C 이하 영역에서는 27 Hz 이상을 유지하도록 인위적으로 cut-off하였는데 이는 낮은 주파수 영역에서 펌프 유량이 선형성을 벗어나고 유동저항 비중이 상대적으로 높아지므로 안전한 유량확보를 위해 보수적으로 설계한 결과이다. 마찬가지로 140°C 이상의 고온에서는 이론적인 유량보다 많은 유량을 확보하여 HTG가 고온에서 dry-out되는 가능성을 회피하고자 실제보다 높은 주

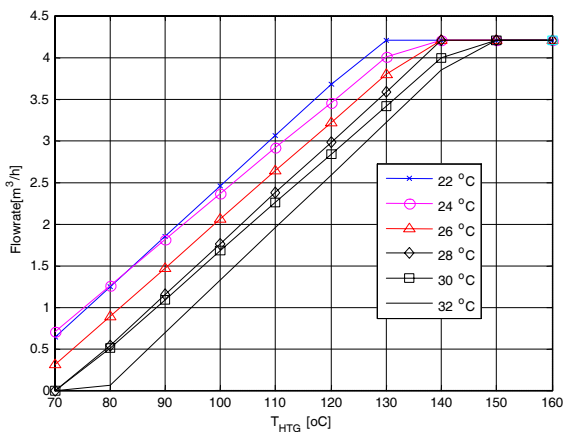


Fig. 8 Simulated HTG solution flow rate according to HTG and coolant inlet temperatures.

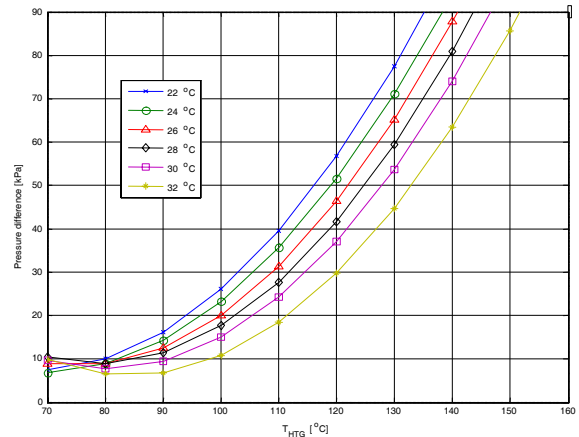


Fig. 10 HTG solution temperature versus pressure difference between HTG and absorber.

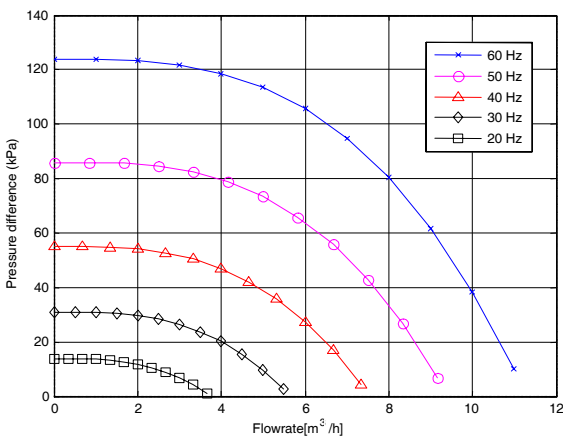


Fig. 9 Performance curves of solution pump according to inverter frequency.

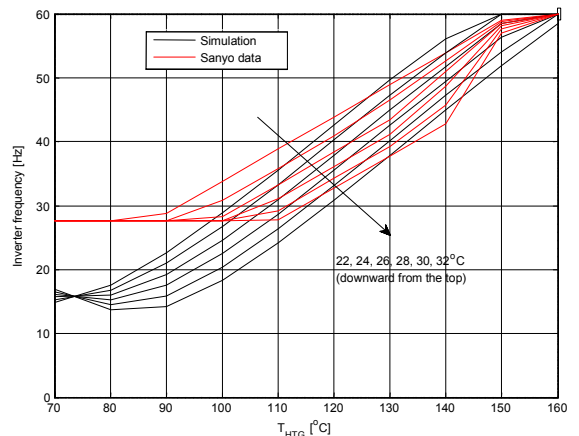


Fig. 11 Inverter frequencies by simulation and those by Sanyo's design.

파수로 설계한 것으로 판단된다.

Fig. 11과 같이 HTG 용액온도와 냉각수 입구온도만으로 펌프 인버터 주파수를 결정하게 되면 액면 오차가 누적되어 액면이 Max 또는 Min의 위치에 도달하는 경우가 자주 발생할 수 있으므로 현장에서는 Fig. 2의 수동조절밸브로 자주 운전되는 영역에서 펌프 정지가 최소화되도록 조정한다. 그러나 이 방법은 연속운전을 위해 액위는 Max와 Norm 레벨 사이에서 변동을 허용하는 제어이므로 허용되는 변동 폭만큼 용액량을 추가해야 하고 입열량에 따른 냉방능력의 선형성이 훼손된다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 Fig. 12와 같이 4개의 레벨센서를 두고 MaxNorm과 MinNorm 범위 내를 유지하도록 게인  $K_v$ 를 피드백 제어한 결과 Fig. 13과 같은 양호한 제어 성능을 얻을 수 있었다. 제어 시험은 Shin et al.<sup>(3)</sup>의 프로그램을 사용하였으며 냉각수 입구온도 32°C에 대하여 그림과 같이 부하변동을 주었다.  $K_v$ 는 Fig. 11에서 정해진 인버터 주파수에 곱해지는 보정계수이다. 액면이 Max-Norm을 넘으면  $K_v$ 가 초당 1/300씩 감소하고 Min-Norm보다 낮으면 초당 1/300씩 증가하도록 하였다. 운전 초기에 액면이 0.9이상인 이유는 초기 250초 동

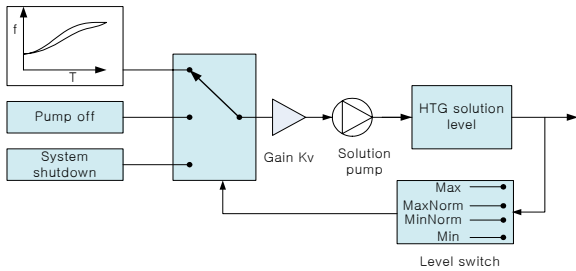


Fig. 12 Control algorithm with 4 level sensors.

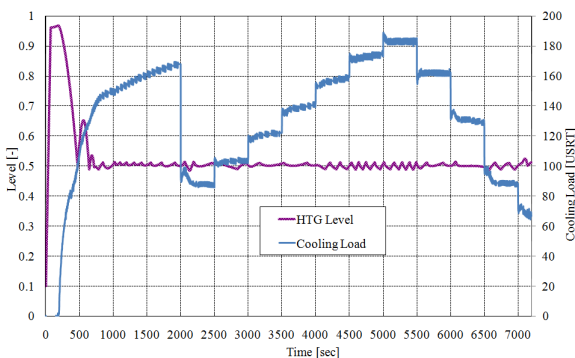


Fig. 13 Level control performance against rapidly varying loads.

안은 HTG에 용액 충전을 위해 60 Hz로 가동하고 0.9로 설정된 Max 레벨에서 운전이 제한되었기 때문이다.

결과에서 알 수 있듯이 초기 운전의 상한인 0.9를 0.5근처로 내리고 정상제어 범위를 0.5근처로 설정한다면 냉온수기는 기동부터 정지 시까지 액면을 0.5근처로 유지하면서 운전이 가능함을 알 수 있다. 이러한 제어가 가능해지면 적어도 0.6이상으로 액면이 상승할 이유가 없으므로 잉여의 용액을 충전하지 않아도 되고 그 결과 용액 절약 및 제어의 선형 응답성 개선결과를 가져올 수 있다.

#### 4. 결 론

이중효용 직렬식 흡수식 냉온수기 HTG 액위거동 및 제어에 관한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유량조절 밸브 개도가 고정되어 있는 경우, HTG 용액 순환량을 결정하는 지배인자는 HTG 용액온도와 냉각수 입구온도로 근사될 수 있다.
- (2) HTG 용액온도와 냉각수 입구온도에 따른 HTG 용액 순환량은 예측이 가능하며 인버터 주파수에 따른 펌프 유량곡선을 계산하면 순환량에 상응하는 인버터 주파수를 계산할 수 있다.
- (3) Sanyo의 인버터 주파수는 HTG 용액 저온영역을 27 Hz에서 Cut-off하였는데 이는 낮은 주파수에서 펌프의 비선형적으로 적어져 유량공급이 부족하게 되는 상황을 방지하기 위한 안전대책이다.
- (4) Sanyo의 인버터 주파수가 HTG 용액 고온영역(140°C 이상)에서 예측된 주파수보다 높게 설계된 이유는 예상치 않은 요인들에 의해 유량 공급이 부족해져 시스템이 정지되는 상황을 피하기 위한 안전대책이다.
- (5) 레벨센서가 3개인 기존방식보다 1개를 추가한 제어알고리즘을 적용한 결과 액면위치를 원하는 범위 내에서 제어하는 것이 가능하여 용액 충전량을 줄이고 일정 액위 유지에 따른 제어응답의 선형성을 개선할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(KETEP No. 2008EBD11P0500002009).

**참고문헌**

1. Spiraxsarco, 2010, LP20 Capacitance Level Probe, TI-P402-39 AB Vol. 8.
2. Daeyeol Boiler Co. Ltd., 2010, Low Carbon Low Nox Condensing Boiler, [www.dylboiler.co.kr](http://www.dylboiler.co.kr).
3. Shin, Y., Seo, J. A., Cho, H. W., Nam, S. C. and Jeong, J. H., 2009, Simulation of Dynamics and Control of a Double-Effect LiBr-H<sub>2</sub>O Absorption Chiller, Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 2718-2725.
4. Sanyo Electric Ltd., 1995, Control device of an absorption chiller, Korea intellectual property office, patent registration 10-0343695.