

## 메탄올 자열 개질 반응기에서의 온도제어

김송주 · 남지훈 · 이지태<sup>†</sup> · 김동현

경북대학교 화학공학과  
702-701 대구시 북구 산격동 1370  
(2006년 9월 26일 접수, 2006년 12월 13일 채택)

### Temperature Control in Autothermal Reforming Reactor

Song Joo Kim, Ji Hoon Nam, Jietae Lee<sup>†</sup> and Dong Hyun Kim

Department of Chemical Engineering, Kyungpook National University, 1370 Sankyuk-dong, Buk-gu, Daegu 702-701, Korea  
(Received 26 September 2006; accepted 13 December 2006)

#### 요 약

Copper-Zinc Oxide를 촉매로 사용하는 메탄올 자열 개질 반응기의 온도제어 연구를 하였다. 반응기 hot-spot에서 1 cm 벗어난 지점의 반응기 내부 온도를 피제어변수로, 공기 유량을 조작변수로 사용하였다. 일차 시간 지연 모델을 얻었으며, 이로부터 IMC-PI 법을 적용하여 제어기 값을 구할 수 있었다. 이 제어기로 100시간 이상 개질 반응기 내부의 온도를  $\pm 5^\circ\text{C}$  내에서 제어할 수 있었다. 촉매활성의 저하로 인한 hot-spot 지점의 변화를 조사하여, 적응 제어의 설계에 이용할 수 있게 하였다.

**Abstract** – Temperature control of an autothermal methanol reforming reactor which uses the copper-zinc oxide catalyst was studied. Temperature at 1cm below the hot-spot point in the reactor was used for the controlled variable, and the air flow rate was used for the manipulated variable. A first order plus time delay model was identified and controller parameters were obtained by applying the IMC-PI tuning rule to the identified model. With this controller, we could control the reforming reactor temperature within  $\pm 5^\circ\text{C}$  over 100 hours. Change of the hot-spot point due to the catalyst degradation was investigated and it could be used to design an adaptive controller.

Key words: Reformer, Temperature Control, Autothermal, Methanol, Copper-Zinc Oxide Catalyst

#### 1. 서 론

최근 환경문제, 대체 에너지 개발, 에너지 절약 등의 주위 여건과 더불어 중소 규모의 전원인 열병합, 연료전지, 전지 전력 저장, 소수력, 태양광, 풍력 발전 시스템 등이 개발되거나 적용되고 있다. 이 가운데 연료전지 발전 시스템은 천연가스, 메탄올, 석유, 석탄 등의 연료로 수소 등의 합성가스를 생성하고 공기 중의 산소와 전기 화학적으로 반응시켜 직접 전기를 얻어내는 방식을 택하고 있다. 이 방식은 부하 상태와 관계없이 발전 효율이 높고, 대기오염 물질의 방출이 적으며, 다양한 연료를 이용할 수 있고, 부하 추종성도 좋으므로 대체 에너지의 일환으로 많은 연구가 이루어지고 있다[1, 2].

연료전지 시스템의 한 중요한 부분으로, 수소를 LPG LNG 혹은 메탄올로부터 생산하는 개질기에 관한 연구도 연료전지 시스템의 중요성에 비추어 매우 활발히 진행되고 있다. 탄화수소에서 수소를 만들어 내는 과정은 흡열 반응이다. 여기에 필요한 반응열은 탄화수소의 산화 반응 혹은 연료전지 내에서 발생하는 반응열로부터 얻

을 수 있다. 이들 열을 잘 통합하여 손실을 얼마나 줄일 수 있는가가 연료전지 시스템의 효율을 결정짓는 핵심이 된다[1, 3]. 개질기의 설계도 열의 손실을 최대한 줄이는 방법에 초점이 맞춰지고 있다. 최근 본 학과 반응공학 연구실에서 개질 반응과 산화 반응이 동시에 한 촉매에서 일어나도록 하는 반응기를 고안하여 운전하고 있다[1]. 열적 통합이 매우 우수한 설계로 기존의 매우 복잡한 구조를 피할 수 있다.

연료전지 시스템의 기술적 우위를 확보하는 데에는 그 효율과 수명을 얼마나 늘릴 수 있는가가 관건이다. 이를 위해 개질기를 포함한 연료전지 시스템 각 부분들은 서로 물리적으로나 열적으로 잘 통합되도록 설계되고 있다. 이렇게 복잡하게 얽힌 시스템의 제어는 매우 어려운 문제이며, 물질과 열을 어느 정도 낭비해도 큰 손실이 되지 않았던 기존의 공정 제어에 적합한 제어 이론을 바로 응용하기가 어렵다. 연료전지 연구의 어느 한 부분이 아닌 독립적인 연료전지 제어 시스템에 관한 연구가 병행되어야 할 필요성이 있다[4].

개질기는 고온에서 반응이 일어나며 이는 촉매의 성능 저하를 가져온다. 촉매의 성능이 떨어지더라도 어느 정도까지는 개질기 운전이 될 수 있도록 제어가 되어야하고, 제어를 통해 개질기 수명을 늘

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: jtleee@knu.ac.kr

릴 수 있다. 촉매의 성능 변화는 공정의 동특성을 바꾸며 제어기의 변수는 여기에 따라 변해야 하므로 적응제어가 필요하다[4, 5].

큰 폭의 공정 운전 조건 변화는 비선형 공정 동특성 모델을 필요로 한다. 그러나 본 개질기 공정은 분산매개변수 공정으로 정확한 모델링은 매우 어렵다. 최적화 혹은 공정의 설계를 위해서는 이런 모델이 필요하지만, 여기에 필요한 자료를 얻기 위해서는 안정적인 운전이 필요하고 이를 위한 제어에는 엄밀한 모델대신 실험적으로 얻을 수 있는 간단한 모델로 충분하다. 따라서 먼저 실험적 모델을 얻기 위한 시스템 동특성 확인과 그에 따른 제어기 설계를 통해서 개질기의 안정한 운전을 시도하였고, 촉매의 성능 변화를 알아 보기 위해 hot-spot의 위치와 온도의 변화를 관찰하였다.

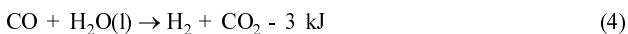
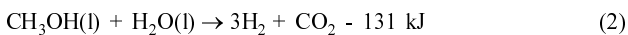
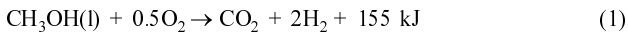
## 2. 자열 개질 반응 공정

연료전지의 연료로서 메탄올은 수소나 천연가스를 사용하는 것에 비해 수송이나 저장, 재주입이 용이하고 에너지 밀도가 높으며 여러 가지 형태로 공급받을 수 있는 상용 화학 물질이기 때문에 다른 탄화수소에 비해 많이 사용되어지고 있다.

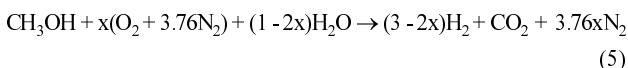
메탄올을 이용한 개질 반응으로는 수증기 개질 반응(steam reforming)과 자열 개질 반응(autothermal reforming)이 있다[6-8]. 이 중에서 자열 개질 반응은 수증기 개질 반응에 비해 열교환기가 사용되지 않아 작고 가벼운 반응기를 설계 할 수 있고, 촉매의 공기에 대한 노출을 우려하지 않아도 된다. 그러나, 생성되는 수소의 농도는 수증기 개질 반응기가 75% 정도인데 비해 자열 개질 반응기는 최고 56% 정도이다. 또한, 자열 개질 반응기는 연료전지의 미반응 수소와 산소를 재사용하지 않기 때문에 전지의 연료 활용도가 낮아 질수록 전체 효율 저하도 커지는 단점이 있다. 본 논문에서는 자열 개질 반응을 선택하여 실험을 수행하였으므로 자열 개질 반응만을 고려한다.

### 2-1. 자열 개질 반응(autothermal reforming reaction)

자열 개질 반응이란 산화 반응에 의해서 생성된 열을 수증기 개질 반응에 사용함으로써 별도의 외부 열교환기 없이 일어날 수 있는 반응을 말한다. 흔히 부분 산화 개질 반응(partial-oxidation reforming)이라고도 한다. 기본 반응은 다음과 같다[1, 3, 7].



전체 반응식은 다음과 같다.



여기서 x는 산소와 메탄올의 몰 비가 되고 (1-2x)는 일산화탄소가 이산화탄소로 완전히 전환되는 데에 필요한 물의 양이다. x=0일 때에는 반응 (5)는 흡열 반응인 수증기 개질 반응 (2)가 되고, x=0.5일 때에는 발열 반응인 산화 반응 (1)이 된다. 열적 평형을 이루기 위해서는 x는 0.23 정도가 되어야 하지만 열 손실을 감안하면 0.23 보다는 높아야 한다. 0.28에서 0.32사이의 값이 적당하지만, 이 실험에서는 조작기의 제어 범위를 고려해서 0.26으로 선택하였다.

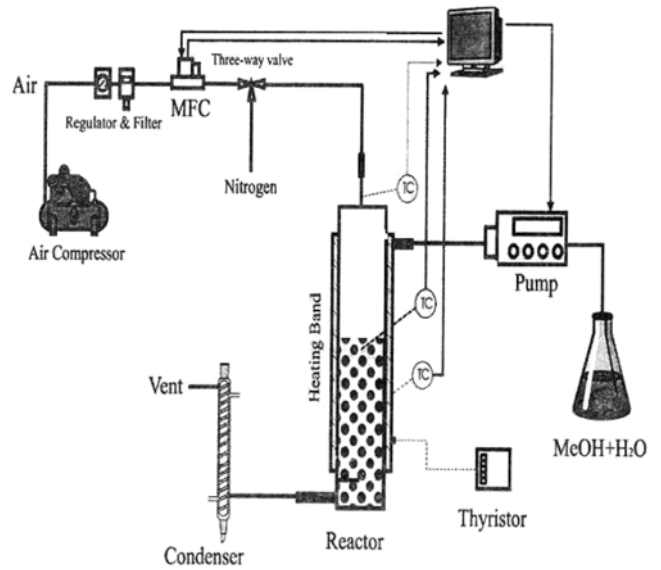


Fig. 1. Experimental apparatus for the autothermal reforming system.

### 2-2. 실험 장치

자열 개질 반응기 실험 장치는 Fig. 1에 나타나 있다[4]. 개질기 부분은 내부 개질 부분과 외부 기화 부분으로 나뉘어 진다. 내부 개질 장치는 직경 25 mm, 길이 360 mm이고, 외부 기화 장치는 직경 35 mm, 길이 320 mm이다. 외부 기화 부분에서는 start-up에 사용되는 열량을 공급하기 위해 열선으로 반응기 표면 전체를 고르게 감았으며, 열 손실을 최소화시키기 위해 유리 섬유와 단열테이프를 단열 시켰다. 액상 반응물은 외부 기화 부분으로 유입된다. 외부 기화 부분은 열전달 효율을 높이기 위해서 유리 bead가 채워져 있고, 또한 핀 형태로 되어 있다. 외부 기화 부분을 빠져 나온 액상 반응물은 대부분 기화되어서 개질 반응기로 재순환하여 들어간다.

메탄올 자열 개질 반응에 사용된 촉매는 copper-zinc oxide 촉매이다. Copper-zinc oxide 촉매는 운전 조건인 400 °C 정도의 온도에서 sintering이 일어나고 성능 저하가 일어난다. 이런 촉매의 성능 저하가 일어나는 상황에서 반응기를 최대한 오래 운전할 수 있도록 제어기를 설계하고자 한다. 실험에 사용된 촉매는 copper-zinc oxide의 일종인 ICI 53-1로서 물성치와 성분비가 참고문헌[4]에 나타나 있다. 촉매는 질량이 65 g이고, 내부 개질기 부피의 30% 만큼 채웠다. 즉, 내부 개질기 높이가 36 cm이고 촉매의 높이는 11 cm이다.

제어기 부분 중 AD-DA 변환기로는 본 연구실에서 자체 제작한 저잡음 고정밀도(16 bit)를 사용하였다. 측정된 물리량으로는 반응기 내부벽의 온도, 외부벽의 온도, 반응기 입구의 온도, 공기의 유속, 액상 반응물의 액위가 있으며, 측정 장치로는 K-type 열전쌍과 MFC(mass flow controller), 압력센서(DP-cell)를 사용하였다. 조작된 물리량으로는 반응기로 유입되는 공기의 유속과 액상 반응물의 유속, 그리고 열선(heating band)의 열량이 있으며, 조작기로는 MFC, 펌프, 그리고 Thyristor를 사용하였다. 모든 장치는 PC와 인터페이스가 되어 있고, 수동 조작도 가능하다.

### 2-3. 실험 방법

자열 개질 반응은 반응 개시 조건으로, 반응기 내부벽 온도가

150 °C 이상이 되도록 반응기 외부벽을 전열선으로 가열하는 작업을 필요로 한다. Thyristor의 전압을 조작하여 열선으로 들어가는 전력을 조절하여 원하는 온도로 맞춘 후에 반응기내로 반응물을 투입하기 시작한다. 액상 반응물을 먼저 투입하고 난 후, 기상 반응물인 공기를 투입한다. 투입된 액상 반응물의 유속은 0.6 g/min이고 기상 반응물의 유속은 650 mL/min 정도이다. 이것은 식 (5)에서  $x$ 가 0.26에 해당하는 값이다. Start-up이 정상적으로 되었다면, 100초 이내에 반응기 내부벽의 급작스런 온도 상승으로 온도가 500 °C 정도에 이른다. 반응기 내부벽의 온도가 정상 상태가 되도록 조작기로 공기유량을 조절한다.

입력은 액상 반응물의 유속을 결정하는 펌프의 RPM과 공기의 유속을 결정하는 MFC로 주어진다. 펌프는 직렬 통신을 통해 PC와 인터페이스되고, MFC는 PC와 연결된 DA(digital-to-analog) 신호를 통해 입력이 가해진다. 반응기 내로 투입하는 액상 반응물은 수 mL/min 정도로 소량 공급해야 하므로 균등한 유속으로 투입하는 것이 반응기 내부의 온도에 중요한 역할을 한다.

### 3. 공정 동특성 확인 및 제어기 튜닝

피제어 변수로는 반응기 내의 적절한 지점의 온도로 하였고, 조작변수로는 공기의 유량으로 하였다. 공정 모델을 실험적으로 얻기 위해서는 동특성 확인(identification) 작업이 필요하다. 여기에는 여러 가지 방법이 있지만, 본 연구에서는 가장 간단하며 이해하기 쉬운 계단 응답으로부터 면적을 이용하여 공정 동특성을 확인하는 방법을 사용하였다. 방법은 대부분의 공정제어 교과서[5]에 소개되어 있다. 공정 모델은 일차시간지연 모델로 정하였다. 즉

$$\frac{RIT(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (6)$$

RIT(s): 반응기 내부 온도

U(s): 공기 유량

따라서 실험적으로 구하는 매개변수는 공정이득  $k$ , 시간상수  $\tau$ , 그리고 시간지연  $\theta$  등 세 개다.

제어기는 이상 PID 알고리즘의 velocity 형태로 구성하였으며[5], 샘플링 시간은 0.1초로 하였다. 이 제어기 구현 형태는 anti-reset windup의 효과가 있고, 수동모드에서 자동모드로 전환할 때 초기화 작업이 필요가 없다. 공기 유속에 대한 입력 변수인  $u$ 는 선형성과 안전을 고려해서 300과 3,000사이의 값으로 제한하였다. 즉, 제어기 출력 상한값과 하한값이 각각 3,000과 300이다. 제어기 튜닝은 IMC 튜닝 규칙을 사용하였다[5].

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 정상 상태(steady state)

동특성 확인 실험을 하기 전에, 먼저 정상 상태를 확인해야 한다. Start-up 과정을 거친 후, 동일한 양을 계속해서 투입하면 반응기 내부의 온도는 정상 상태에 이르게 된다. 하지만, 실험 결과 엄밀한 의미에서의 정상 상태는 없었다. 그래서 약간의 진동을 감안해서 이 범위 안에 드는 것을 정상 상태로 간주하였다. 또한, 실험실 상온에서의 열 평형은 반응기 외부벽 온도가 70~80 °C, 반응기 입구의 온

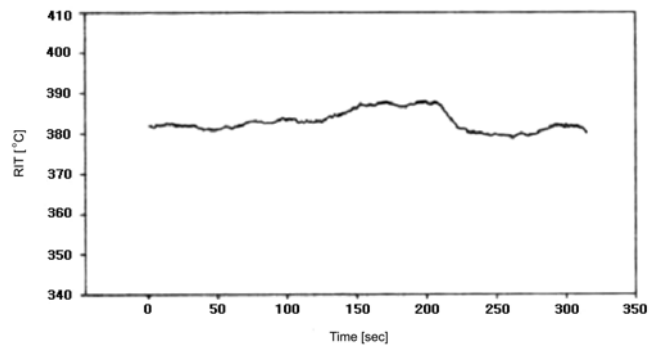


Fig. 2. A typical reactor temperature profile at 1 cm below the hot-spot point.

도가 40~50 °C에서 이루어졌다.

일단, 첫 번째 시도로 촉매층의 hot-spot 위치에서 반응기 내부벽의 온도가 정상 상태인지 확인해 보았다. 실험 결과, hot-spot 위치에서 진동이 상당히 심했으며, 그 범위는  $\pm 30$  °C 정도로 나타났다. 또한, 진동의 주기는 일정하지 않았으며, 진폭 또한 일정하게 나타나지 않았다. Hot-spot 위치에서 모델을 찾는 것은 매우 어려운 것임을 알 수 있었으며, 제어도 마찬가지로 판단된다. 그래서, 다음 시도로 촉매층의 hot-spot보다 1 cm 아래에서의 정상 상태를 확인해 보았다. Fig. 2에 반응기 운전 상황을 충분한 시간동안 일정하게 유지하였을 때의 반응기 온도 변화가 나타나 있는데,  $\pm 10$  °C의 진동을 보였다. 이를 정상 상태로 보고 동특성 확인 실험을 진행하였다. Hot-spot에서의 동특성곡선은 차이가 나겠지만, 제어에 필요한 적절한 모델을 얻을 수 있었다.

온도의 진동은 액상 반응물을 펌프로 직접 투입할 때 생기는 유량의 진동에 크게 영향을 받았다. 이 진동은 중간 완충 탱크를 사용하여 완화시킬 수 있을 것이다.

### 4.2. 일차시간지연 모델

기상 반응물(air)의 투입에 따른 반응기 내부의 온도 변화에 대한 동특성을 일차시간지연 모델로 표현하였다. DA 신호에 대해서 양의 계단입력을 주는 경우와 음의 계단입력을 주는 경우 각각에 대해서 모델링 작업을 하였다.

액상반응물의 공급을 일정하게 유지시키면서, MFC를 조작하여 공기의 입력에 대한 반응기 내부 온도의 변화를 살펴 보았다. Hot-spot보다 1 cm 밑에서의 동특성을 구하는데, 정상 상태보다 공기를 더 많이 넣었을 때와 더 적게 넣었을 때의 동특성 모델을 찾기 위한 실험을 하였다. Fig. 3에 계단 응답 결과가 나타나 있다.

양의 계단 입력으로부터 얻은 모델은

$$\frac{RIT(s)}{U(s)} = \frac{0.058e^{-10s}}{38.9s + 1} \quad (7)$$

이고, 음의 계단입력으로부터 얻은 모델은

$$\frac{RIT(s)}{U(s)} = \frac{0.1053e^{-6s}}{85.3s + 1} \quad (8)$$

이었다.

공정 이득을 살펴보면 식 (8)이 식 (7)의 것 보다 큰 것을 알 수

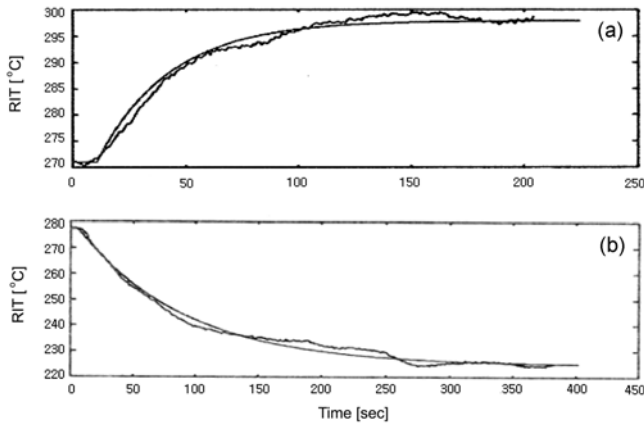


Fig. 3. Step responses for positive (a) and negative (b) input changes.

있다. 이것은 공기를 정상 상태보다 일정한 양만큼 줄일 때의 온도 하락폭이 늘릴 때의 온도 상승폭보다 큰 것을 나타낸다. 즉, 공기가 부족한 경우에 반응기 내부 온도가 더 민감하게 반응한다고 볼 수 있다. 그리고 시상수도 역시 식 (8) 쪽이 더 큰 것을 볼 수 있다. 시상수가 크다는 것은 새로운 정상 상태에 도달하는 데에 시간이 많이 걸리는 느린 반응임을 나타낸다.

제어기 값을 구하기 위해서는 하나의 모델이 되어야 한다. 그래서 세 파라미터 사이의 평균값으로 새로운 모델을 제시했다.

$$\frac{RIT(s)}{U(s)} = \frac{0.074e^{-8s}}{54.4s+1} \quad (9)$$

이 모델은 촉매의 교환 직후에 얻어진 것들이다. 촉매의 성능이 저하되면서 모델의 파라미터들은 변할 것으로 보인다.

공기의 유속을 바꿀 때에 x값이 열평형을 유지할 수 없을 정도로 낮아지면 반응이 갑자기 종결될 수 있다. 하지만, x가 0.23보다 낮더라도 일정 시간까지는 반응이 꺼지지 않고 위의 동특성을 가지는 반응을 보였다.

펌프의 조작에 의한 액상 반응물의 입력에 대해서 반응기 내부의 온도 변화를 살펴 보았다. 이 때 공기는 DA 출력 값으로 1,500에 고정시켰다. 액상 반응물의 유속 변화에 대한 반응은 공기의 유속 변화에 대한 반응과는 다른 양상을 보였다. 반응기 내부의 온도에 주는 영향이 적었으며, 액상 반응물 유량을 올렸을 때 진동이 더욱 심해졌으며, 반응이 정지되는 경우도 종종 발생하였다. 동특성 모델을 구하기가 곤란하였다. 따라서, 액상 반응물의 유속을 고정시키고 공기의 유속을 제어를 위한 입력 변수로 사용하였다.

### 4-3. Tuning

식 (9)에 주어진 일차시간지연 모델의 파라미터를 이용하여 PI 제어기 값을 IMC 튜닝 규칙으로 구하였다. 다른 제어기 튜닝 규칙도 적용해 보았지만 성능향상을 보이지 않았다. Fig. 4에 PI 제어 결과를 나타내었다.

설정치는 20초에서 300 °C이고, 400초에서 280 °C로 하였다. PI 제어기를 사용하였는데, IMC-PI를 위한 설계변수, 즉 페루프의 시간상수는 16초로 하였다. 전반적으로 ± 5 °C를 유지하면서 설정치에 이르렀다가도 외란에 의해 설정치를 벗어났다가 다시 돌아오는

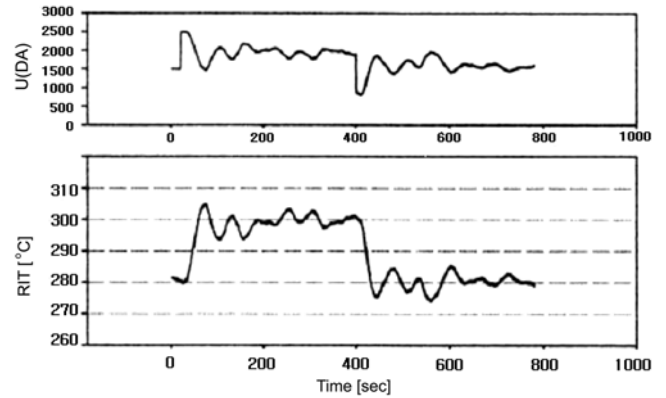


Fig. 4. PI control responses designed by the IMC-PI tuning rule.

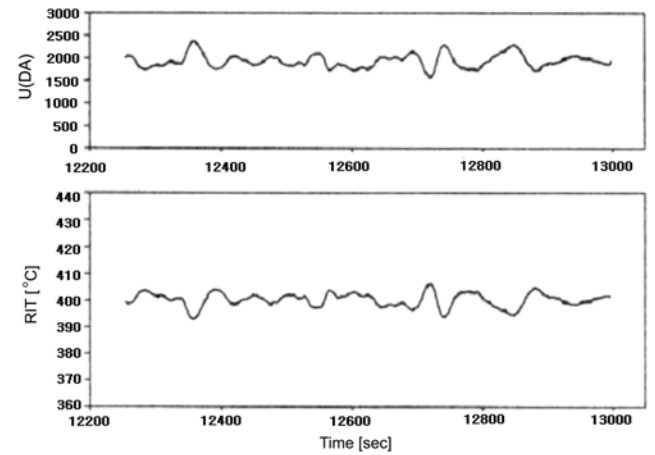


Fig. 5. Long-time operation under the PI control.

경향을 보였다. 액상 반응물의 불균등한 공급, 실제로 유입되는 공기의 불균등한 공급, 그리고 반응기의 구조 등이 외란을 주고 제어가 어렵게 되도록하는 요인으로 볼 수 있다. 주요 외란을 측정하여 feedforward 형태로 공급하면 더 나은 제어를 할 수 있을 것으로 보인다. PID 제어기도 적용하여 보았는데, 큰 성능 향상을 보이지는 않았다. 이는 식 (9)로부터 알 수 있듯이 시간 지연이 시간 상수에 비해 적어 제어에 미분 동작을 굳이 넣을 필요가 없기 때문으로 보인다. PI 제어기만으로 충분한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 장시간 동안 ± 5 °C의 오차 범위내로 온도 제어가 되는 결과를 보여 준다. 반응기 운전은 x값이 0.3정도로 유지되는 것을 볼 수 있으며, 외란의 주기가 일정하지 않은 것도 알 수 있다.

촉매를 교환해서 100여 시간 동안의 운전을 거친 후, 처음에 구한 모델을 사용하여 약 3시간 동안 제어성능 실험을 하여 보았다. Fig. 6에 결과를 나타내었다. 교환 직후의 정상 상태는 ± 5 °C의 진동을 보이지만, 100여 시간이 지난 후에는 진동이 ± 10 °C로 나타났으며, 순간적으로 온도가 떨어지는 현상도 보였다. 이는 촉매의 성능저하를 잘 보여주는 결과라고 할 수 있다. 모델 변화는 오랜 시간을 두고서 계속해서 동특성 확인을 해 본 결과, 공정 이득은 0.08~0.10, 시상수는 80~90 사이의 값으로 나왔으며, 시간 지연의 변화는 거의 없었다. 모델 파라미터의 변화와 시간과의 상관관계는 얻

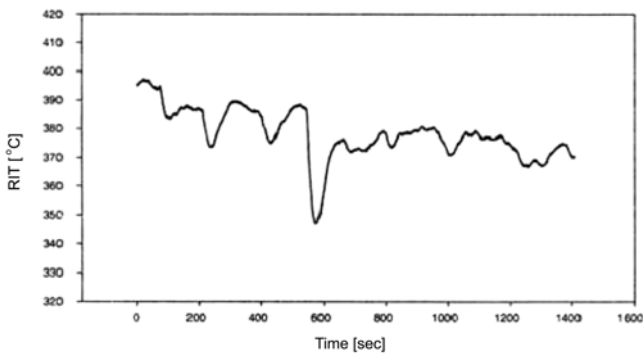


Fig. 6. Operation after 100 hours from loading new catalysts.

기 힘들었으며, 또한 정상 상태에서의 진동으로 인하여 정확한 모델링은 힘들었다.

적응 제어를 위한 자료 수집을 목적으로 hot-spot의 위치 변화 실험을 행하였다. 하루 평균 실험 시간이 8시간 정도 하였으며, 약 100시간 동안의 hot-spot 위치 변화를 측정하였다. 촉매 교환 후, 첫 실험에서 측정된 hot-spot 위치를 기준점으로 삼아 0 cm로 표시하였다. 12일째 실험에서 촉매층의 위치 변화는 3.3 cm 였으므로 평균 위치 변화 속도는 0.3 cm/day 정도이다. 이는 상당히 빠르게 촉매의 성능저하가 일어나는 것으로 제어 없이는 운전이 불가능 할 것으로 판단되며, 다른 촉매의 개발이 시급한 것으로 보인다.

## 5. 결 론

산화 반응과 수증기 개질 반응을 열적으로 긴밀하게 통합시킨 자율 개질 반응기를 제어하는 데 필요한 기본적인 연구를 행하였다. 개질 반응기를 안정적으로 운전하고 적응 제어를 위한 유용한 데이터를 수집하는데 주력하였다.

반응을 정상 상태로 만들기 위해서 이론에서 계산된 수치들을 근거로 실험에 적용하여 여러 번의 시행착오를 통해서 최적의 수치들

을 찾았다. 물론 여기에는 장치상의 문제나 실험실의 조건 등 여러 사항들이 고려되었다. 실험을 위한 기본적인 조건을 갖춘 후에, 온도 제어를 위한 여러 가지 시도를 하였다.

안정한 운전 조건을 찾기 위한 실험을 하였다. 첫 운전에서 동특성 확인을 통해서 얻은 모델을 이용해서 1 kW 급의 개질 반응기에서 최소한 100시간 이상 사용하는 동안 개질 반응기 내부의 온도를  $\pm 5^\circ\text{C}$  내에서 제어를 하였다. 또한, 장시간 동안 원하는 온도 유지를 하는 실험에서도 최소한 5시간 이상 무리 없이 개질 반응기를 운전하였다.

이 실험의 궁극적인 목표는 촉매의 활성저하가 되지 않는 낮은 온도에서 원하는 조성의 수소를 제조하는 것이다. 이를 위해서는 수소 조성의 측정과 이를 원하는 값에 유지하는 제어가 필요하며, 또한 이 실험에서는 입력의 역할을 하지 못했던 펌프의 공급 능력을 높여서 다변수제어 시스템으로 바꿀 필요가 있다. 개질 반응기의 scale-up에 따른 제어 시스템의 연구도 필요한 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. Kim, D. H., "A Study on Improvement of Fuel Cell Reformer," *Minis. Ener. Res.*, (1998-2003).
2. Pukrushpan, J. T., Stefanopoulou, A. G. and Peng, H., "Control of Fuel Cell Power Systems," Springer, London (2004).
3. Kim, J. Y., "The Production of Hydrogen for Fuel Cell by Methanol Partial Oxidation Reforming," MS Thesis, *Depart. Chem. Eng., Kyungpook Nat. Univ.*, (1999).
4. Kim, S. J., "Temperature Control in the Methanol Autothermal Reforming Reactor for the Production of Fuel Cell Hydrogen," MS Thesis, *Depart. Chem. Eng., Kyungpook Nat. Univ.*, (2000).
5. Seborg, D. E., Edgar, T. F. and Mellichamp, D. A., "Process Dynamics and Control," Wiley, New York (1989).
6. Dusterwald, H. G., Hohlein, B., Kraut, H., Meusinger, J., Peters, R. and Stimming, U., *Chem. Eng. Technol.*, **20**(7), 617 (1997).
7. Lattner, J. R. and Harold, M. P., *Appl. Catal. B: Environ.*, **56**(1-2), 149 (2005).
8. Lattner, J. R. and Harold, M. P., *Catal. Today*, **120**(1), 78 (2007).