

흡후드 시스템의 면 풍속 자동 제어기 개발

김호걸*, 정규원⁺

(Manuscript received: Feb, 25, 2013 / Revised: Mar, 15, 2013 / Accepted: Mar, 18, 2013)

Development of an Automatic Face Velocity Controller for a Fume Hood System

Hogeol Kim*, Kyuwon Jeong⁺

Abstract

In chemical, medical or biology laboratories Fume Hoods are basic facilities which can protect researchers from dangerous gas as blowing the contaminated air outside. After the air inside the laboratory room is sucked into the fume hood, then, it is blown out by a fan rotated by an AC induction motor. In addition, a damper controls the inside opening of a duct, which the air flows through. The face velocity, air velocity through the front door, have to be kept constant as the set value even though the opening of the door is varied. However, conventional fume hood used to be operated by operator's manual switches. So that, in this paper an automatic control system is developed which controls the face velocity by adjusting the rotating speed of the blow motor and the opening of the damper. Experiments show that this developed system can be used at such laboratories.

Key Words : Fume hood(흡후드), Blower(블로워), Face velocity(면풍속), Automatic control system(자동제어)

1. 서론

인체에 유해하거나 환경을 오염시킬 수 있는 각종 화학약품을 사용하는 실험실에서는 실험자를 보호하고, 실내 공기의 오염을 방지하기 위하여 흡후드(fume hood)를 사용하고 있으며, 그 내부에서 실험을 진행한다. 흡후드는 전면부에 시약 및 시료의 출입을 가능하도록 개폐 가능한 문이 설치되어 있고, 상부에 덕트를 통하여 블로워 팬이 설치되어 실험실내의 공기가 전면부의 문을 통하여 흡후드 내부로 흡입된 후에 팬을 통하여 외부로 배출되는 구조를 갖고 있다. 대부분의 흡후드는 전면에 조작

용 스위치들이 장착되어 있으며, 이 스위치를 조작하여, 조명 등, 자외선 살균등, 배기 블로워 등을 동작시킨다⁽¹⁾. 실험실뿐만 아니라 일반 가정의 주방용 후드 및 상업용 주방에 사용되는 후드들이 개발되어 많이 사용되고 있으며, 이들의 성능을 향상시키기 위한 연구들이 진행되었다⁽²⁻⁴⁾. 이러한 연구들은 후드 형상에 따라 공기의 유동을 해석하여 효율적으로 배기가 될 수 있는 구조 설계에 관한 것들이다. 앞에서 언급한 바와 같이 화학약품을 사용하는 실험실에서는 주방에서 발생되는 가스에 비하여 더욱 유해한 가스가 발생되므로 더욱 배기가 잘 되도록 하여야 한다. 이와 같은 경우에 대비하여 미국 ANSI에서는 흡

* LG화학 광학소재 CS1팀

⁺ 교신저자, 충북대학교 기계공학부

주소: 361-763 충북 청주시 흥덕구 내수동로 52

✉ Corresponding Author E-mail: jeong@chungbuk.ac.kr

후드에 관한 규정을 제정하여 권고하고 있으며, 흡후드 정면을 통하여 흐르는 평균 풍속 즉, 면 풍속(face velocity)이 일정 값 이상이 되어야 한다고 규정하고 있다⁽¹⁾. 그러나 국내의 일반 화학 실험실에서는 적절한 면 풍속으로 완전 개방일 때 0.25~0.3 m/s, 반 개방일 때 0.5 m/s로 설정하여 사용하고 있다.

실험 중에는 흡후드 전면 문을 자주 열고 닫으므로 이에 따라 개방면을 통과하는 면풍속이 변동하게 된다. 따라서 실험자가 수시로 배기 속도를 조절하여야 하므로, 실험 중에 실험자의 주의를 분산된다. 그러므로 실험자가 실험에 집중할 수 있도록 하고, 유해한 가스가 누설되었을 경우에 즉시 배출을 함으로써 실험자의 안전을 도모하여야한다. 또한 동절기 또는 하절기에 냉난방이 가동되는 경우에 급배기 과정에서 냉난방된 실내공기를 과도하게 배기할 경우 에너지 손실을 가져오므로 적절한 면풍속을 유지하는 제어장치가 필요하다. 그러므로 흡후드는 건물 전체 공조 제어시스템과 연계할 수 있고, 자동으로 흡후드 내부의 공기의 상태를 검출하여 배기 블로워, 실내 공기 공급 블로워 등을 자동으로 동작시킬 수 있어야한다. 이를 위하여 본 논문에서는 흡후드의 면 풍속을 측정하고, 댐퍼와 배기 블로워를 조작하여 설정된 면 풍속을 자동으로 조절할 수 있는 흡후드용 디지털 제어기를 개발한다. 이 제어기는 추후에 흡 후드 내부의 가스 농도, 온도 측정 센서, 흡후드 배기 블로워, 실내 공기 공급 블로워 등을 연계할 수 있는 기능을 갖도록 하였다. 또한 개발된 제어기를 이용하여 자동으로 풍속이 조절되는 상태를 실험으로 확인하도록 한다.

2. 흡후드(Fume Hood) 제어 시스템

흡후드 제어 시스템은 앞에서 언급한 것과 같은 기능을 발휘하도록 개발되었다. 본 논문에서 개발된 흡 후드 제어 시스템의 전체 구성도를 Fig. 1에 보였다. 그림에서 보듯이 흡 후드에 제어기가 설치되어 있고, 여기에 면 풍속 감지기, 댐퍼, 가변 유량 블로워가 연결된다. 댐퍼는 배기관로 중간에 설치되며, 관로 내의 댐퍼 판의 각도를 변경하여 관로의 개구량을 조절한다. 이를 위하여 댐퍼 판의 각도를 조절하는 제어기가 설치되어 있다. 가변 유량 블로워는 AC 유도모터를 사용하는 팬으로서 주파수 제어에 의하여 회전속도가 제어된다. 또한 이 제어 장치들은 Fig. 2에서 보듯이 대규모 실험실에서 다양한 센서와 기기들을 연결하여 사용할 수 있도록 확장성을 갖도록 한다. 제어시스템에서 각각의 장치는 다수 장치가 서로 통신할 수 있는 RS-485 통신 방식을 사용하여 연결된다.

이를 위하여 본 논문에서 센서와 블로워 등의 장치의 특성을 분석하고, 통신 방법을 확정하였으며, 고성능 마이크로 콘트롤러를 사용한 디지털 제어기를 설계, 제작하였다. Fig. 3에 본 논문에서 사용된 전체 시스템을 보였다.

2.1 흡후드 주 제어기

2.1.1 주제어기 하드웨어

흡후드 주제어기는 본 논문에서 개발된 흡후드 제어시스템의 가장 중추적인 역할을 하는 장치이다. 주제어기는 조작자와 교류할 수 있도록 키보드와 LCD를 갖추고 있으며, 풍속 측정센서 신호를 받을 수 있도록 아날로그 디지털 변환기를 갖추고 있으며, RS-485 통신 방식을 갖고 있어서 블로워 인버터와 댐퍼 제어기, IBM-PC와 디지털 통신을 한다.

주제어기의 구성은 Fig. 4와 같으며, 고성능의 Micro Controller Unit(MCU)인 Atmega128을 사용하고 여기에 LCD 표시기를 연결하여 시스템의 동작 상태와 설정 상태를 보여주도록 한다. 이를 구동하기 위한 소프트웨어는 C 언어를 사용하여 개발한다⁽⁵⁾. Fig.5에 개발된 주제어기를 보여주고 있으며, 주제어기가

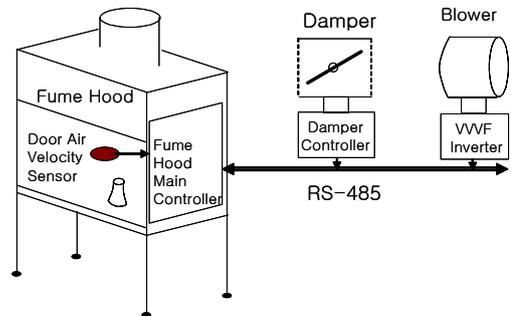


Fig. 1 Fume Hood Control System

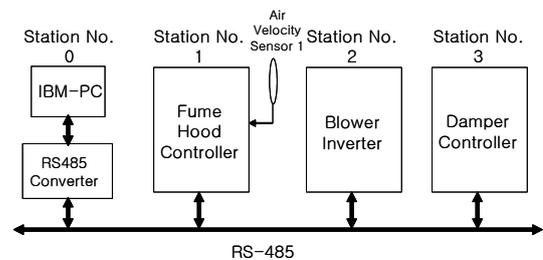


Fig. 2 Fume Hood Face Velocity Control System Diagram

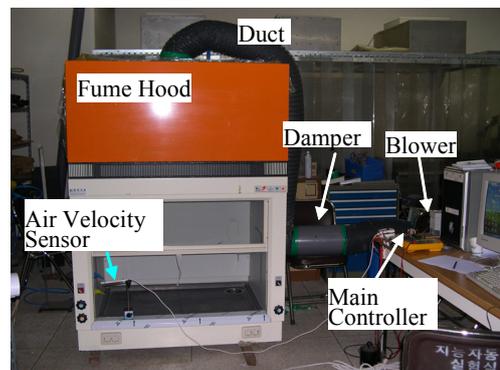


Fig. 3 Experimental fume hood system

Table 1 Specifications of CTV100-AOD 150

Terms	Values
Measuring ranges	0 ~ 5 m/s, 0 ~ 10 m/s, 0 ~ 15 m/s, 0 ~ 20 m/s, 0 ~ 30 m/s,
Unit of measurement	m/s, fpm
Accuracy	± 3% of reading ± 0.3 m/s
Response time	1/e (63%) 2 sec.
Resolution	0.1 m/s
Type of Fluid	air and neutral gases
Type of sensor	PT100 class A as per DIN IEC751
Output	active 0~10 V or 4~20 mA

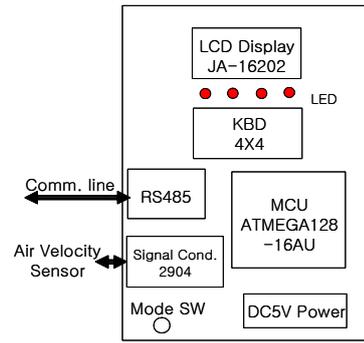


Fig. 4 Block Diagram of Fume Hood Main Controller (FHMC)

갖는 기능을 요약하면 다음과 같다.

- i) 시스템 설정
블로워 모터 회전 속도, 댐퍼 각도, 면 풍속 설정, 자동 운전에 사용되는 계인 들을 조작자가 최적의 값으로 설정하는 기능.
- ii) 상태 표시 기능
면 풍속, 블로워 모터 회전 속도, 댐퍼 각도, 오류 상태 등을 표시 하는 기능.
- iii) 하부 장치(블로워, 댐퍼 및 외부기기) 등과의 통신
다수의 장치가 국번을 사용하여 서로 통신할 수 있는 방식인 RS-485 방식을 사용하여 다양한 장치들을 사용할 수 있는 기능.
- iv) 면 풍속 제어기능
면 풍속은 흡후드 전면 문을 통과하는 공기의 평균 속도로서 이를 수동 또는 자동으로 조절할 수 있는 기능.

2.1.2 풍속과 풍속 센서 출력

풍속센서는 프랑스 KIMO Constructeur 사의 CTV100-ADO 모델을 사용하며, Table 1에 주요 사양을 보였다⁽⁶⁾. 이 센서는 4 ~ 20 mA 아나로그 신호를 출력하므로, 이 전류 신호를 부하저항 $R_L = 200\Omega$ 사용하여 전압으로 변환하면, 풍속센서전압 = 0.8 ~ 4.0 V이 된다. 풍속 V_{air} 과 풍속 전압 V의 관계는 다음과 같다.

$$V = \frac{(4-0.8)}{r V_{air}} \cdot V_{air} + 0.8 \tag{1}$$

$$V_{air} = \frac{(V-0.8)}{(4-0.8)} \cdot r V_{air} \tag{2}$$

이를 이용하여 계산하면, 풍속 $V_{air} = 0.5m/s$, 부하저항 $R_L = 200\Omega$ 이 사용되었을 때, 풍속전압 V는 위의 식에 따라 1.12 V가 발생한다. 그러나 부하저항 $R_L = 195\Omega$ (오차 2.5 %)



Fig. 5 Developed Fume Hood Main Controller Face Velocity Control System Diagram

이 사용되었다면, 풍속전압 V는 위의 식에 따라 1.092 V가 발생한다. 이를 이상적인 것으로 간주하여, 풍속을 계산하면 $u_{air} = 0.45625m/s$ 가 된다. 오차는 $-0.04375m/s$ 이며, 오차율은 0.875 %이다. 이는 흡후드를 실용적으로 사용하는 데 충분한 정밀도이다.

FHMC의 MCU인 Atmega128의 A/DC를 10 bit, 5V 범위에서 사용하면, A/DC 값 N_{ADC} 는 $Fx(\frac{V}{5}1024)$ 이다.

2.2 댐퍼 제어기

2.2.1 댐퍼 제어기 하드웨어

Fig. 6은 개발된 댐퍼제어기의 주요 구성을 보여주고 있으며, Fig. 7은 제작된 댐퍼제어기이다. 댐퍼제어기는 댐퍼의 회전각도를 측정할 수 있는 포텐서미터와 DC모터 드라이버를 장착하고 있으며, 제어 기능은 점퍼의 설정에 따라 수동 스위치 제어, 수동 가변저항 제어, 통신제어 기능을 선택할 수 있으며, KIMO CTV100-AOD 풍속 센서를 연결할 수 있도록 아나로그 디지털 변환기를 갖고 있다. MCU로서 PIC16F73를 사용하였다⁽⁷⁾.

2.3 블로워 모터 드라이버

본 연구에 사용된 블로워의 인버터는 상용으로 시판되는 LS 산전의 SV008iG5A-2을 사용하였으며, RS 485 통신을 이용하여 주제어기와 연결되어 있다⁽⁸⁾. 이 인버터는 가변 전압 가변 주파수(VVVF) 방식으로 동작하며, 주제어기의 명령에 따라 블로워 팬 모터의 회전 속도가 조절된다.

2.4 블로워 모터 인버터 드라이버와 댐퍼 제어 코드

블로워 모터에 사용되는 인버터와 댐퍼는 다음과 같은 코드를 사용하여 주제어기와 명령과 상태정보를 주고받는다.

- (1) 인버터 회전 방향, 정지, 운전 방식 제어 코드
 ENQ, 0,2,W,0,0,0,6,1,1,3,C,2,xx,EOT
 1,3,C,2: 정방향 운전, 운전지령: 통신운전,
 주파수 지령정보: 통신운전
- (2) 인버터 상태 읽음 코드
 ENQ,0,2,R,0,0,0,0,1,xx,EOT

- (3) 인버터 주파수 제어 코드
 ENQ, 0,2,W,0,0,0,5,1,yyyy,xx,EOT
 * yyyy; 주파수를 나타내는 Hex-ASCII이다.

- (4) 댐퍼 각도 제어 코드
 ENQ,0,3,W,0,0,0,0,1,yyyy,xx,EOT
 * yyyy; 댐퍼 각도를 나타내는 Hex-ASCII이다.

3. 면 풍속 제어 실험

3.1 블로워 특성 실험

흡후드 면 풍속을 제어하기 위한 기초 시험으로 블로워의 특성을 시험하였다. 블로워는 모터의 회전 속도에 따라 유량이 결정되므로, 인버터 드라이버에 주어지는 주파수 명령에 따라 변하는 블로워 출구 공기 속도를 측정하였다. 블로워는 많이 사용되는 2가지 모델에 대하여 측정된 결과를 Fig. 8에 보였다. VVVF 인버터의 주파수가 0 ~ 60Hz 까지 변화할 때 블로워 출구에서 공기 유속을 보였다. 그림에서 보듯이 공기의 속도가

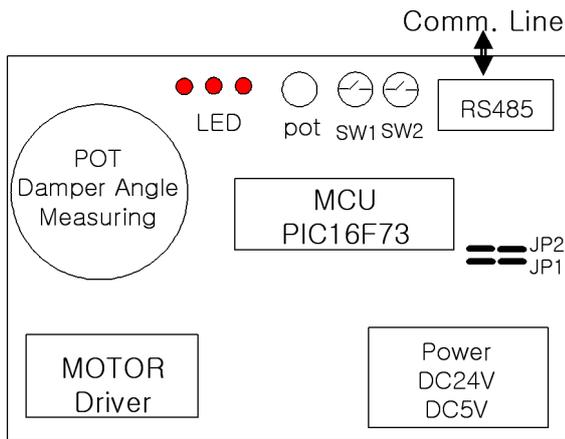


Fig. 6 Block Diagram of the Damper Controller

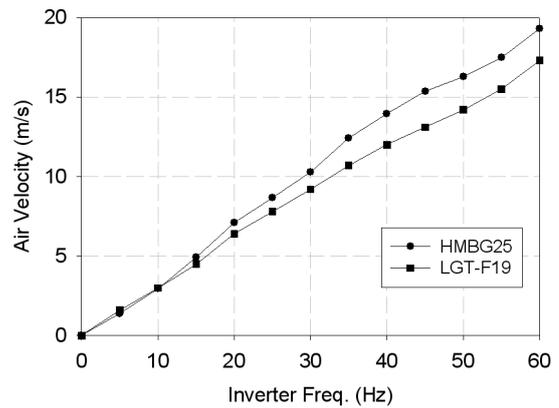


Fig. 8 Exit air velocity of blowers with VVVF inverter frequency

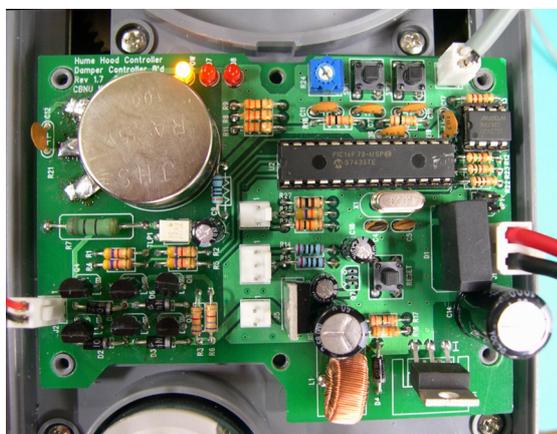


Fig. 7 Developed Damper Controller

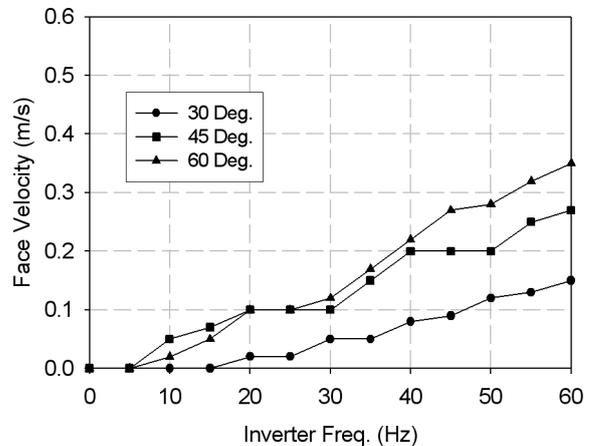


Fig. 9 Face velocity with VVVF inverter frequency

주파수와 근사적으로 비례함을 알 수 있다.

Fig. 9에 블로워를 흡후드에 연결하여 면풍속을 인버터의 주파수를 변경하여 가면서 측정한 결과를 보였다. 이 실험에는 흡후드의 전면 문은 완전히 개방한 상태로, 블로워는 상용의 LGT-F19DTA를 사용하고, 댐퍼의 개구량은 30도, 45도, 60도의 3가지 경우에 대하여 실험결과를 얻었다. 면 풍속 조건은 완전 개방일 때 0.25~0.3 m/s, 반 개방일 때 0.5 m/s의 풍속을 갖도록 요구되는 데, 그림에서 알 수 있듯이 주파수 55Hz 이상, 댐퍼 개구량 45도 이상일 때 요구조건을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 당연하지만 댐퍼의 각도를 90도로 완전히 열었을 경우에 더 낮은 주파수에서도 요구하는 풍속을 얻을 수 있다.

3.2 흡후드 면 풍속 제어 시스템 자동운전

3.2.1 자동 면 풍속 제어 실험 방법

개발된 제어기를 이용하여 흡후드의 면 풍속을 측정하는 실험을 Fig. 10과 같이 시스템을 결합하여 수행하였다. 흡후드의 자동운전 기능은 주제어기의 설정 스위치를 자동운전으로 설정하면 시작된다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 자동 면풍속 제어는 폐회로 제어 방식에 의하여 실행된다⁽⁹⁾. 일차적으로 개방회로 제어 상태에서 설정된 면 풍속에 해당하는 인버터 주파수를 전방향 비례게인 K를 곱하여 f_f 를 구한다. 본 과제에서는 $K=80 \sim 130$ 이다.

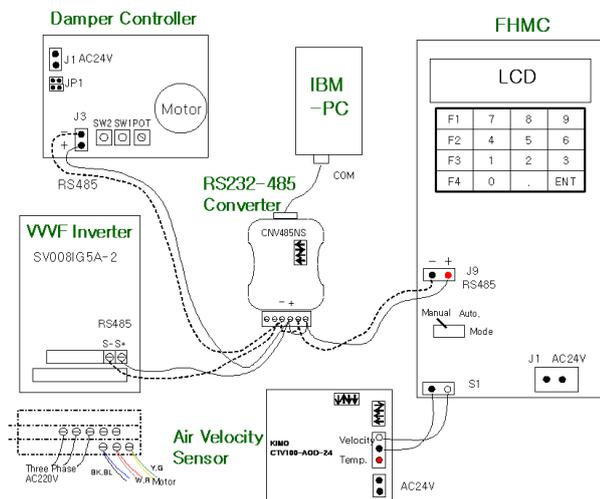


Fig. 10 Connection Diagram of the FH Air Velocity Control System

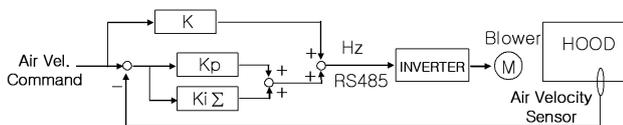


Fig. 11 Control Scheme for the Fume Hood Face Velocity

그러나 흡후드의 문을 개방하는 정도에 따라 면 풍속이 달라지므로 면 풍속의 오차가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 비례게인 K_p 와 적분게인 K_i 를 사용한다. 설정된 면 풍속과 풍속 센서에서 측정된 풍속을 비교하여 풍속오차를 구하고, 여기에 비례게인과 적분게인을 곱하여 주파수 변동분 Δf 을 계산한다. 인버터에 주어지는 주파수 명령은 $f(Hz) = f_f + \Delta f$ 이다.

3.2.2 자동 면 풍속 제어 실험(댐퍼 완전 개방) 결과

자동 면풍속 제어 실험은 댐퍼를 완전히 개방된 상태로 진행하였으며, 실험에 사용된 장치들로는 블로워는 LGT-F19DTA를 사용하였고, Fume Hood는 HMB-B-1200이며, 전면 문은 1/2 개방하고, 인버터는 SV008iG5A-2을 사용하였다.

Fig. 12 ~ 14에 실험 결과를 보였으며, 목표 면 풍속은 0.3 m/s 이며, 샘플링 주기는 0.1초이다. Fig. 12는 $K_i = 5$, $K_p = 50$ 일 때, 전방향 게인 K의 변화에 따른 면 풍속의 변화를 보여준다. 전방향 게인이 증가할수록 목표값에 도달하는 상승시간 (rise time)이 빨라지나, 과대할 경우 과도응답이 나타난다. 80회 샘플링 이후에 목표값의 오차범위 이내에 도달하는 것을 볼 수 있다.

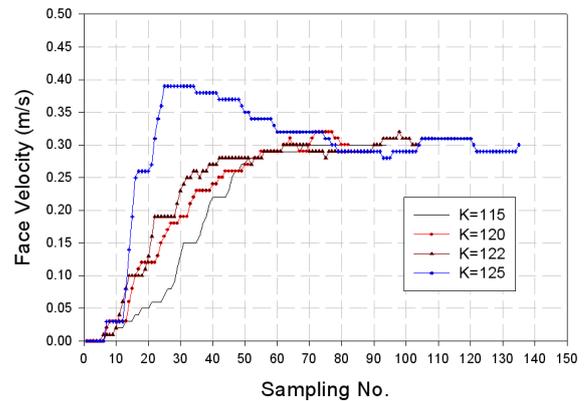


Fig. 12 Automatic control results with the gain K

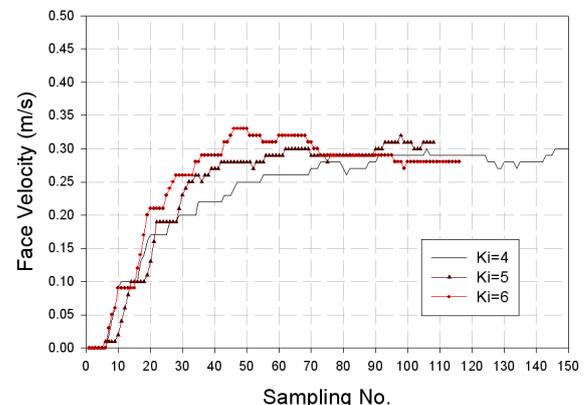


Fig. 13 Automatic control results with the gain K_i

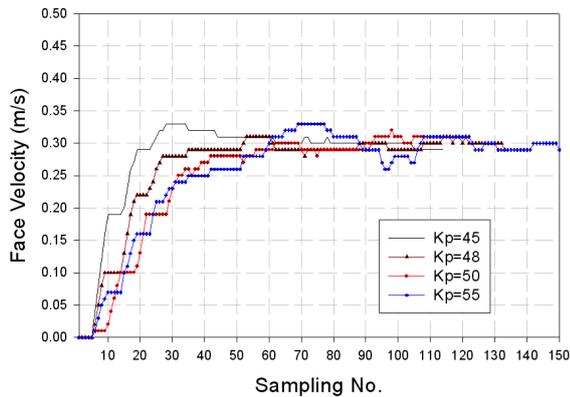


Fig. 14 Automatic control results with the gain Kp

Fig. 13은 앞의 실험결과에서 가장 좋은 응답을 보인 $K = 122$, $K_p = 50$ 일 때, 적분게인 K_i 의 변화에 따른 면 풍속의 변화를 보여준다. 앞의 실험결과와 유사하게 적분게인이 증가할수록 목표값에 도달하는 상승시간(rise time)이 빨라지나, 과대할 경우 과도응답이 나타난다. 80회 샘플링 이후에 오차범위 이내로 목표값에 도달하는 것을 볼 수 있다.

Fig.14는 $K = 120$, $K_i = 5$ 를 사용하고, K_p 의 변화에 따라 얻은 결과이다. 전체적으로 면 풍속은 K_p 가 작을수록 상승시간(rise time)이 빨라지고 있음을 알 수 있으나, 너무 작을 경우에는 과도응답이 발생하고 있다. 그러나 80회 샘플링 이후에 실용적인 범위 이내의 면 풍속을 유지하고 있다. 따라서 적절한 게인의 범위가 있음을 본 실험들을 통하여 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 화학적으로 위험한 물질을 다루는 실험실에서 실험자들이 안전하게 또한 실험에 집중할 수 있도록 자동으로 흡후드의 면 풍속을 제어하는 제어시스템을 개발하였다. 또한 이를 실험을 통하여 실용적으로 사용할 수 있음을 보였다. 더욱이 개발된 제어기는 최근에 많이 사용되는 저렴하면서도 고성능의 MCU를 사용하고, 시스템 내의 모든 구성품이 통신 기능에 의하여 연결되어 있으므로 소프트웨어 모듈만 추가하여 대규모 시스템으로 확대 적용이 가능하도록 하였다.

후 기

이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2011).

References

- (1) Lee, J. P., and Bae, C. H., 2010, "Laboratory Control and Safety Solution," *Proc. of the SAREK 2010 Summer Annual Conference*, SAREK, pp. 1100~1106.
- (2) Lim, K. B., Lee, K. S., and Lee, C. H., 2006, "A Numerical Study on the Flow Characteristics of Kitchen Hood System," *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 359~369.
- (3) Park, J. C., 2003, "A Study on the Improvement Strategies for Exhaust Performance in Commercial Kitchen Hood," *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 439~446.
- (4) Kim, Y. S., and Oh, Y. K., 2008, "A Study on Improvement of Industrial Hood in Ventilation System for Elimination of Harmful Material and Dust," *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 238~244.
- (5) Atmega128 data sheet, Atmel, Rev. 24670-AVR-10/06.
- (6) Kimocorea, n.d., viewed 6 Feb. 2013, <<http://www.kimocorea.com>>.
- (7) PIC16F7X data sheet DS30325B, 2002, Microchip Technology Inc.
- (8) SV-iG5A user guide, LSIS Co., Ltd., 2008.04.
- (9) Ogata, K., 2002, *Modern Control Engineering*, 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey.