

# 모델 기반 설계 기법을 이용한 지능형 공조 장치의 이중 안전성 로직 연구

## A Study on the Fail Safety Logic of Smart Air Conditioner using Model based Design

김지호<sup>1,✉</sup>, 김병우<sup>2</sup>  
Ji Ho Kim<sup>1,✉</sup> and Byeong Woo Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 울산대학교 전기공학과 대학원 (Graduate School, Department of Electrical Engineering, Ulsan Univ.)

<sup>2</sup> 울산대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Ulsan Univ.)

✉ Corresponding author: kgh1531@paran.com, Tel: 052-259-1571

Manuscript received: 2011.6.24 / Revised: 2011.8.31 / Accepted: 2011.9.5

*The smart air condition system is superior to conventional air condition system in the aspect of control accuracy, environmental preservation and it is foundation for intelligent vehicle such as electric vehicle, fuel cell vehicle. In this paper, failure analyses of smart air condition system will be performed and then sensor fusion technique will be proposed for fail safety of smart air condition system. A sensor fusion logic of air condition system by using CO sensor, CO<sub>2</sub> sensor and VOC, NO<sub>x</sub> sensor will be developed and simulated by fault injection simulation. The fusion technology of smart air condition system is generated in an experiment and a performance analysis is conducted with fusion algorithms. The proposed algorithm adds the error characteristic of each sensor as a conditional probability value, and ensures greater accuracy by performing the track fusion with the sensors with the most reliable performance.*

Key Words: Sensor Fusion (센서 융합), Model based Design (모델 기반 설계), Smart Air Condition System (지능형 공조 장치), Fault Injection (결함 제거)

### 1. 서론

자동차의 전자화가 급격히 진행되면서 자동차 안전 및 편의성 확보 차원에서 지능형 자동차에 대한 개발 필요성이 증대되고 있다. 지능형 자동차는 차량제어기술, 센서, 구동기 기술, HMI 기술, 정보 통신 기술 등의 요소기술을 바탕으로 차량 지능화와 차량정보화에 관계되는 선진 안전 차량, 선진항법시스템, 차량 정보 통신 시스템, 운전자정보시스템을 포함하는 자동차이다. 그 가운데 센서, 구동기 기술은 아날로그와 기계적인 부분에서 현재에는 디지털과 전자적인 부분으로 바뀌고 있는 추세이다. 본 디지털과 전자화의 대표적인 장치로

는 지능형 램프, 자동차 공조기 등이 있다.

자동차 공조 장치는 차내의 승객과 운전자의 쾌적성을 향상시키는 장치로 차내 환경을 결정하는 중요 부분이다. 이 시스템은 차량의 주행상태 및 다양한 외부 환경에 따라서 공조 부하가 크게 변하기 때문에 가정용 에어컨과 같은 정지형 시스템에 비하여 동적 제어가 중요한 시스템이다.

기존 연구에서는 자동차용 공조기 센서의 최적 위치설정 및 공조기용 대체 냉매의 성능 평가 등 공조기 자체에 대해 연구를 실시하였다.<sup>1,2</sup> 이와 함께, 공조기의 제어적인 측면에서도 연구가 활발해지고 있다. 공조기 제어는 사용자 편의, 에너지 낭비와 수명단축을 방지하여 효율을 위해서 반드시

필요하다. 기존 제어 방식의 C 코딩 개발은 수동적인 개발 방식을 중심으로 연구가 진행되고 있어서 최근 급변하는 자동차 업계의 안전규제 및 환경 규제를 빠르게 대응하지 못하고 있다.<sup>3</sup> 따라서 최근에는 개발 기간과 비용의 단축과 엔지니어들의 정보 공유를 위하여 모델기반설계(Model based design)기술에 대한 적용범위가 점차 확대되고 있다.

이에 본 연구에서는 MBD 기법을 적용하여 센서 융합을 통한 공조기 시스템의 제어 알고리즘을 개발 하고 오프라인 시뮬레이션을 통해 제어 로직을 검증하였다. 자동차 공기질 평가를 위한 센서 계측 자료의 상호 연관성을 파악할 수 있는 센서 융합 로직을 개발하였으며, 이를 통하여 센서 결합에 의한 피해를 최소화시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

**2. 모델 기반 로직 설계**

본 연구에서는 V-cycle 에 의한 MBD 기법을 적용하여 공조기 시스템의 제어 알고리즘 설계를 수행하였다. MBD 기법을 이용함으로써 기존 제어방식의 C 코딩의 문제점을 보완하여 개발기간과 비용이 단축되고 다른 엔지니어와 정보를 쉽게 공유할 수 있을 것으로 보여진다. 그리고 V-cycle 은 현재 자동차 업계에서 많이 사용하는 cycle 로 총 5 단계로 이루어져 있다. 제어기 설계에서부터 보정까지 체계적으로 개발하는 cycle 이며, 최근에는 소프트웨어 신뢰성부분에서 많이 두각이 되어지는 개발 프로세스이다.

본 연구에서는 V-cycle 3 단계까지 수행하였으며, V-cycle 1 단계에서는 Fig. 1 과 같이 Simulink 및 Stateflow 를 이용한 제어 알고리즘 설계와 Simulink 환경에서 가상의 시스템 테스트 시나리오를 통한 오프라인 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, Open loop 시스템에 대한 알고리즘의 수정 및 성능 검증 과정을 거쳤다. 제어기의 정상 동작 유무의 검증을 통하여 제어 알고리즘 테스트를 실시하고 자동코드생성 방식으로 코드를 생성시키는 RCP (Rapid control prototyping) 환경을 구현하였다. 이를 통해 실시간 운영체제 기반의 페루프 시스템에서 제어 알고리즘의 실제 플랜트의 동작과 상호 연관성을 분석하고 정확한 실시간 제어가 가능하도록 하였다. 이와 같은 개발 환경을 이용하게 되면 제어 알고리즘의 설계 단계와 구현 단계를 유기적으

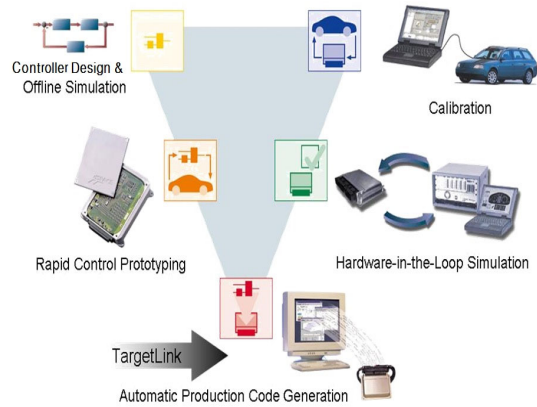


Fig. 1 Model based design using V-cycle

로 연계할 수 있으며, 설계한 제어 알고리즘을 제어기 플랫폼에서 빠르게 구현하여 실제 작동환경에서 제어기 성능을 검증할 수 있다.<sup>3</sup>

RCP 환경에서 실제 플랜트 구현을 통한 가상 제어기의 성능 검증이 완료되면 실제 플랜트의 동작 특성을 가지는 가상의 플랜트를 모델화하여 소프트웨어 시스템을 구성하였다. 그리하여 MBD 제어기 모델과 가상의 플랜트 모델을 실시간으로 제어하는 SILS(Software in the loop simulation) 환경을 구현하였다. 이를 통하여 실제 플랜트가 없더라도, 시뮬레이션을 통해서 제어기 설계가 가능하도록 하였다.

**3. 시스템 모델링**

**3.1 알고리즘 개발**

**3.1.1 전체 알고리즘**

MBD 기법을 이용하여 V-cycle 을 이용하기 위해서는 전체 로직을 설계하여야 한다. 본 연구에서는 공조기의 제어 뿐 아니라 센서 융합을 구현하기 위해서 로직을 설계하였다. 센서 융합은 한 센서의 결함으로 제어기가 작동을 정지하는 것이 아니라 다른 센서에서 받은 정보를 가지고 결함을 보완하는 이중 안전장치를 뜻한다.

Fig. 2 에서는 로직의 전체적인 Flow chart 를 나타내고 있다. 각 센서의 전압을 측정하여 최저 허용전압과 최대 허용전압에 맞게 결함을 판단하고, 결함이 되면 Fail Safety 모드에서 작동하여, 사용자에게 알려준다. 반대로 결함이 아닌 경우에는 정상 작동하게 되어 있다.

Fig. 3 는 모델기반의 전체 로직 설계 모델을 보

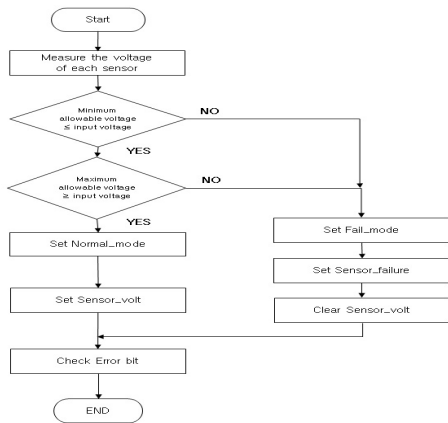


Fig. 2 Flow chart of smart control module

여주고 있다. 센서 입력으로는 자동차 내부로 유입되는 공기질인 CO, CO<sub>2</sub>, VOC, NO<sub>x</sub> 의 4 가지와 환경에 의한 오차를 줄이기 위한 온도와 습도의 2 가지로서 총 6 가지를 제공받는다. 온도와 습도는 공기질의 데이터 제공 오차를 줄이기 위한 보정 방안으로 이용하였다. 수집된 입력 값들은 지능형 모듈에서 센서 융합 로직 모델링을 이용하여 센서 결함을 판단하였다. 또한, 적용 센서의 Fail safety 를 판단함으로써 공기질의 정확 여부를 결정하였다. 검출 결과가 기준 값보다 높게 되면 지능형 공조 시스템 로직에서는 제어대상으로 판단하게 되고 기준 값 이하에서는 지속적인 공기질 모니터링만을 실시하게 된다.

지능형 공조 시스템 로직은 지능형 모듈을 검증하기 위한 것으로 공조제어의 기본 판단 로직이 된다. 기본 로직은 Matlab 을 이용한 Truth table 로 구현하였으며, 에러 보정 기능을 추가하였다. 지능형 공조 시스템의 제어기 제어 로직은 공기질 센서에서 제공된 정보를 바탕으로 내기 및 외기에 관련된 모터를 동작시켜 설정된 공기질을 유지시키도록 하였다.

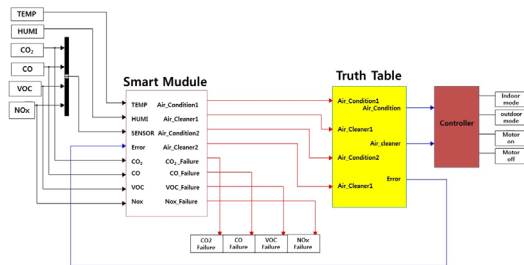
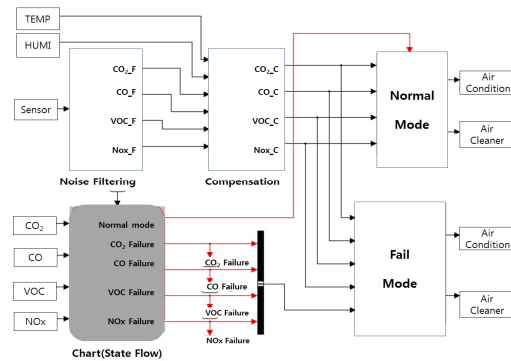


Fig. 3 Model based design of smart control module

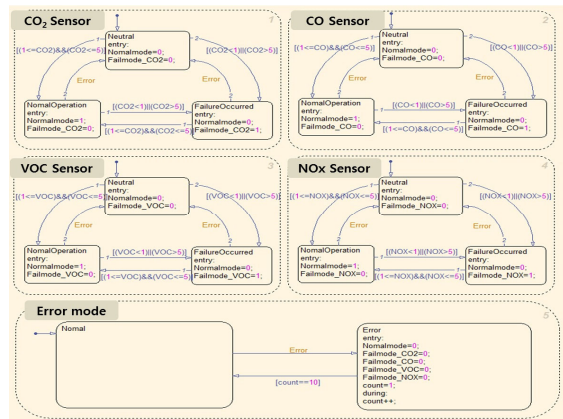
### 3.1.2 MBD 기반 지능형 제어 모듈

공조용 지능형 제어 모듈에서는 각 상황에서 대하여 State flow 를 이용하여 결함 검지 및 경고 지시 명령을 수행하도록 로직을 구현하였다. Fig. 3(a)는 Smart module 로직을 나타내고 있으며, Fig. 3(b)에서는 State flow 를 표현하고 있다.

공기가 들어오게 되면 센서에서 Flow Chart 에서 센서의 결함 여부를 확인하고, 다른 센서에서 받은 정보를 공유할지를 판단한다. 만약에 결함이라고 판단이 되면 Fail mode 로 가서 작동하고 결함 아니면 Normal mode 에서 공조기가 작동을 한다. 그리고 mode 에서는 Noise filtering 로직 및 Compensation 로직에서 보정을 받는다. Noise filtering 에서는 센서에서 받아서 오는 신호 노이즈에 의한 오차를 보정받고, Compensation 에서는 온도와 습도 등의 환경에서 생기는 오차를 보정을 받아 다른 요인에 의한 오차를 최소화 한 후에 공조기를 작동시키게 로직을 설계하였다.



(a) Normal mode and Fail mode in smart control module

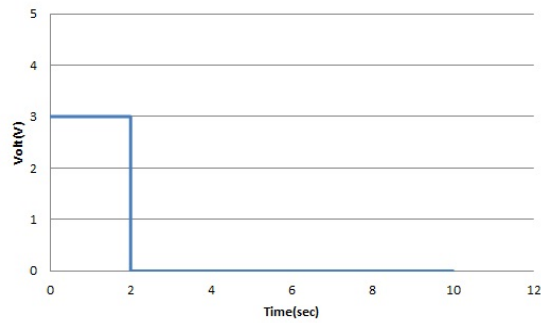


(b) State flow in smart control module for fault detection

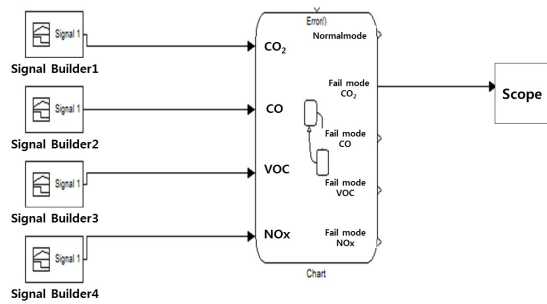
Fig. 4 Logic of Smart control module

### 3.1.3 결함 검지 시뮬레이션

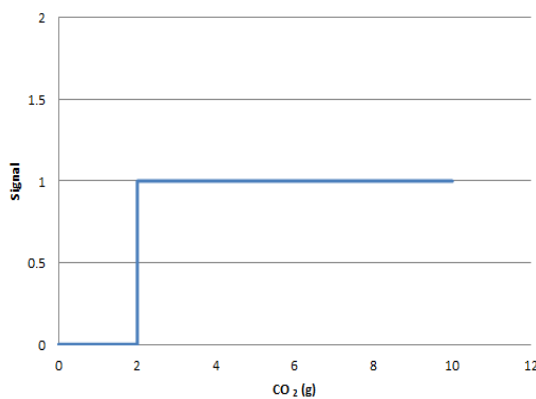
센서 결함 검지 로직은 3V 를 기준 전압으로 설정하였는바, 이 기준 값에서 일정 에러 범위를 초과하게 되면 결함으로 출력되게 된다. 이 때, 설정된 기준 전압은 작동 공기가 오염되지 않은 이상적인 공기질을 기준으로 설정하였다. 이를 바탕으로 CO<sub>2</sub> 를 받아서 로직을 검증하였다.



(a) Input signal of CO<sub>2</sub> sensor



(b) Decision logic of CO<sub>2</sub> sensor



(c) Output signal of CO<sub>2</sub> sensor

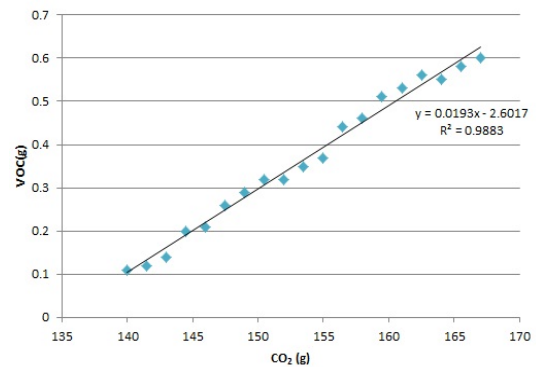
Fig. 5 Fail logic process at CO<sub>2</sub> Sensor

Fig. 5(a)의 결과에서 CO<sub>2</sub> 센서가 2 초에 0V 로 결함이 발생하였다. Fig. 5(b)의 로직에 3V → 0V 입력을 주게 되고 Fig. 5(c)의 결과에 결함 신호인 1 을 전송하게 된다. 검출 가스 CO<sub>2</sub> 뿐만 아니라 다른 공기질인 CO, VOC, NO<sub>x</sub> 에서도 기준 전압을 넘지 않게 되면 결함 신호를 통보하여 결함 검지가 가능하도록 하였다.

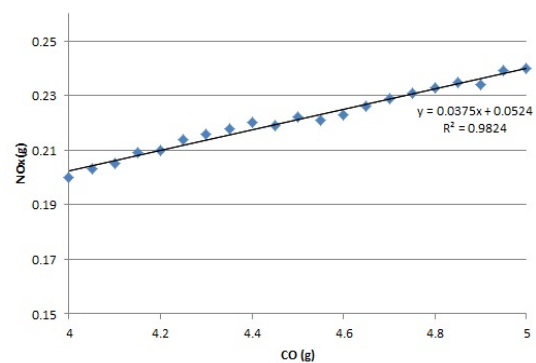
### 3.2 Fail safety 방안 연구

자동차에 적용되는 공기질 검지 센서는 검지 대상 물질 이외의 것에는 반응하지 않는 것이 이상적이다. 그러나 실제 적용되는 검지 센서에서는 검지 대상 이외의 검지 가스 성분에 일부 반응하는 것이 현실이다. 본 연구에서는 이 같은 검지 센서의 특성을 활용하여 적용 센서가 발생되었을 때, 적용 센서의 Fail safety 방안을 모색하였다.

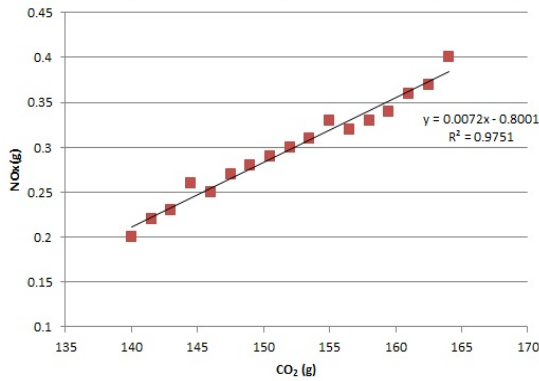
Fig. 6(a)는 CO<sub>2</sub> 와 VOC 의 연관 특성, Fig. 6(b)는 CO 와 NO<sub>x</sub> 의 연관 특성, Fig. 6(c)는 CO<sub>2</sub> 와 NO<sub>x</sub> 의 연관 특성을 분석하였다.



(a) Relation of CO<sub>2</sub> and VOC gas



(b) Relation of CO and NO<sub>x</sub> gas



(c) Relation of CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> gas  
 Fig. 6 Relation of vehicle emissions gas

X 축과 Y 축은 공기질 센서의 상호 의존성 및 연계성 관계를 확인하기 위한 변수를 나타낸 것이다. R<sup>2</sup> 은 결정계수로서 1 에 가까울수록 회귀모형의 적합도가 높아진다는 뜻이다.

실험을 통해 구한 수식의 R<sup>2</sup> 은 1 에 근접하기 때문에 특정 공기질 센서가 결함이 발생되더라도 일정 적합도를 갖는 센서를 통하여 지속적인 공기질 모니터링이 가능함을 확인하였다.

차량에서 대기중의 공기질에서 임의의 공기질 의투여에 따른 공기질 사이의 연관 특성 실험을 통해서 [CO<sub>2</sub> - VOC], [CO - NO<sub>x</sub>], [CO<sub>2</sub> - NO<sub>x</sub>]의 상호 관계를 파악하였다. 자동차에서 발생할 수 있는 대상 가스 사이에는 절대 값 기준으로 크다고 할 수 없으나 상호 비례적인 반응 관계식을 얻을 수 있었다. Fig. 6 에서 알 수 있듯이, 대상 공기질에 포함된 각 검지 가스는 함유된 산소 성분의 영향으로 대상 가스 사이에 상호 비례적인 관계를 확인하였다. 이 같은 현상은 본 연구에서 대상으로 설정한 가스에 공히 나타나고 있는데, 이는 산소 성분의간섭 현상에 기인하는 것으로 판단 된다.

이 같은 대상 센서의 출력 신호 간섭의 상관관계를 정리하면 다음 식(1), (2), (3)과 같다.

$$[CO_2 - VOC] \quad Y = 0.0193x - 2.6017 \quad (1)$$

$$[CO - NO_x] \quad Y = 0.0375x + 0.0524 \quad (2)$$

$$[CO_2 - NO_x] \quad Y = 0.0072x - 0.8001 \quad (3)$$

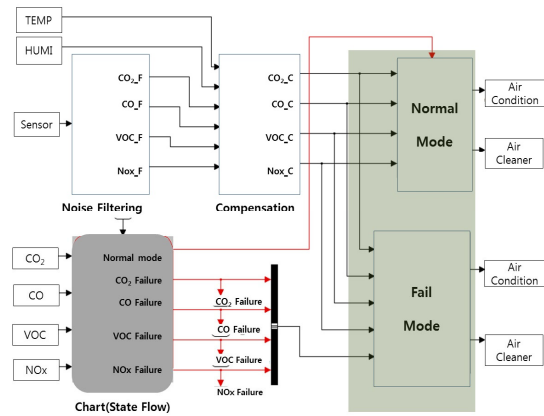


Fig. 7 Fail safety method on the smart module

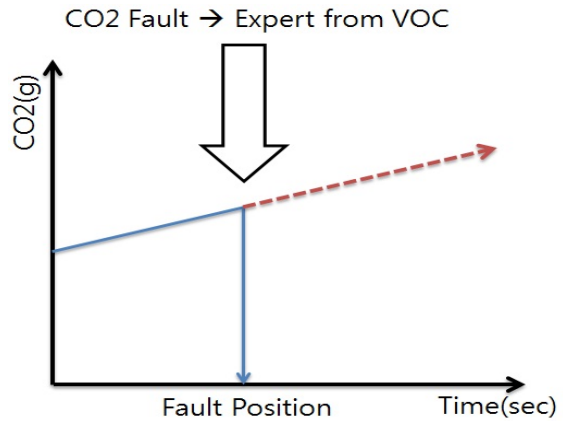


Fig. 8 Result of CO<sub>2</sub> fault condition

Fig. 8 에서 확인할 수 있듯이, CO<sub>2</sub> 검지 센서가 결함이 생기게 되면 운전자에게 센서 결함을 통보하게 된다. 그리고, 계속 CO<sub>2</sub> 센서가 결함이 발생되면 Fig. 6(a)와 (c)에서 도출한 연관식을 이용한 VOC 나 NO<sub>x</sub> 로 CO<sub>2</sub> 의 농도로부터 지능형 공조기는 계속 작동하게 될 것이다.

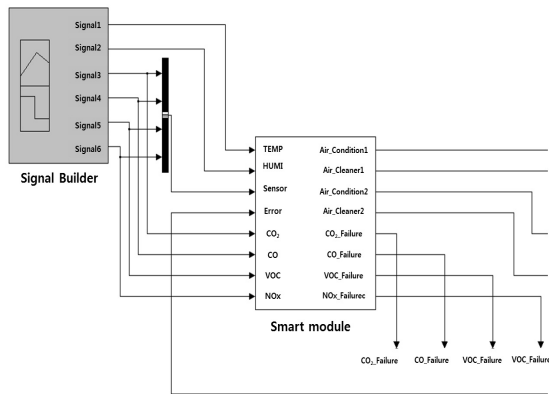
#### 4. 로직 최적화 방안 연구

결함 검지 로직을 최적화하는 방안으로 Signal mapping, Function testing, Structured testing 등을 수행하였다.

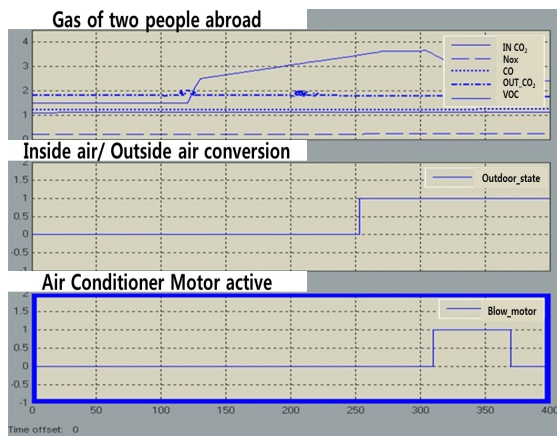
Signal mapping 은 Signal Builder 를 이용하여 임의의 신호를 만들어 로직에 맞게 매핑을 하고, 여기서 만든 신호를 바탕으로 전체 로직에서 Function testing 을 실시하였다. 기본적인 신호 뿐

아니라 극단적인 상황에서의 신호에서도 로직이 다른 요인에 의한 오차가 없는지 확인을 하였다. 마지막으로 Structured testing 은 만든 로직 블럭들의 최적화를 실시하였다. Structured testing 을 통하여 만든 로직들 중에서 필요한 로직과 필요없는 로직을 구분할 수 있었으며, 이를 바탕으로 로직을 수정 보완할 수 있었다.

Fig. 9(a)는 차량내부에서 일어날 수 있는 특정 신호를 생성시키는 것과 다양한 조건에서 제어 알고리즘의 결함 검출 결과를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 9(b)은 Functional testing logic 을 나타내고 있으며, 앞서 생성한 특정 신호를 활동하였다. 특정 신호는 자동차 공조기에서 나타나는 2 명 탑승, 내기/외기 전환, 공조기 모터 동작에서의 신호이다.



(a) Input signal for Functional testing



(b) Logic for functional testing

Fig. 9 Results of Functional testing

Summary

Model Hierarchy/Complexity	Test1		
	D 1	C 1	MCDC
1. Model Based Design of Air Condition	67 69%	75%	50%
2. Smart Module	66 69%	75%	50%
3. Noise Filtering	56 66%	75%	63%
4. Compensation	27 55%	NA	NA
5. Signal Builder	26 55%	NA	NA
6. Chart	26 55%	NA	NA
7. State flow	7 33%	NA	NA
8. Normal mode	7 58%	NA	NA
9. Fail mode	10 94%	NA	NA
10. Truth Table	10 94%	NA	NA
11. Air_Condition	8 100%	NA	NA
12. Air_Cleaner	6 100%	NA	NA
13. Error	19 65%	75%	63%
14. Controller	18 65%	75%	63%
15. Motor on	15 65%	75%	63%
16. Motor off	3 67%	NA	NA
17. Indoor/outdoor Mode	10 92%	75%	33%

Fig. 10 Results of structure testing

Fig. 10 Structure testing 구조를 최적화 할 수 있었다. 이 과정은 시뮬레이션을 실시한 후 Coverage report 를 수행하는 최적화 과정이다. 이를 통해 로직상에서 smart module 과 motor 부분, fail mode 부분에서 사용도가 높고 중요한 것을 알 수 있고, 다른 부분에서는 로직을 수정하여 간단하게 설계할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결론

본 논문에서는 Simulink 및 Stateflow 를 이용하여 모델기반 제어기 설계를 통해 센서 융합을 통한 지능형 자동차 공조기의 제어 알고리즘을 구현하였고, 최적화를 수행하였다. 오프라인 시뮬레이션과 실측을 통하여 제어 알고리즘의 정상적인 동작 유무를 확인하였다.

1) 본 연구를 통해서 [CO<sub>2</sub> - VOC], [CO - NO<sub>x</sub>], [CO<sub>2</sub> - NO<sub>x</sub>] 상관관계를 알 수 있었고, 본 공기질 가스간의 상관관계를 활용하여 결함 센서를 대체할 수 있는 Fail safety 기능을 구현하였다.

2) 자동차 공기질 검지 대상에서 CO - NO<sub>x</sub> 검지 센서는 가스 상호에 반응하는 기울기(Y = 0.0375x + 0.0524)가 상대적으로 크게 나타났다. 이는 대상 검지 가스 출력대비 타 가스에 작용하는 산소 성분의 출력에 기인하는 현상이라 판단된다.

3) 본 연구를 통하여 구현된 제어 로직은 SILS 연계가 가능함을 확인하였고 본 모델기반 설계를

활용하여 일반적인 지능형 공조장치의 표준화된 개발방법으로 활용할 수 있을 것이다.

4) MBD 를 이용한 제어 로직 개발을 통하여 기존의 C 코딩 방식보다 빠르고 정확하게 제어 로직을 개발할 수 있는 방법을 제안하였다. 향후에는 MBD 기반의 제어 로직 연구에서 수행하였던 로직의 최적화 정도 향상에 대한 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 과학기술교육부에서 지원하고 있는 지역혁신인력양성사업과 지식경제부의 부품소재 개발사업 지원을 받았음.

## 참고문헌

1. Park, J.-K., Hong, K.-H., Lee, J.-I. and Ha, O.-N., "A Study on Optimum Position of In-car Sensor in the Automobile Air-conditioner," SAREK of Winter Conference, pp. 750-756, 2000.
2. Baek, I.-C., Park, K.-J., Shim, Y.-B. and Jung, D., "Performance of Alternative Refrigerants for R12 and R 134a in Automobile Air-Conditioner," Journal of SAREK, Vol. 19, No. 5, pp. 401-403, 2007.
3. Ban, D.-H., Kim, Y., Kim, S. and Wang, B.-H., "Anti-Algorithm for Sunroof System Using Fuzzy Logic," International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp. 1041-1046, 2005.
4. Erkkinen, T., "Model Style guidelines for Production Code Generation," SAE World Congress, Paper No. 2005-01-1280, 2005.
5. Hodge, G., Ye, J. and Stuart, W., "Multi-Target Modeling for Embedded Software Development for Automotive Application," SAE Technical Paper Series, Paper No. 2004-010269, 2004
6. Kim, S. Y., Kim, S. M. and Kim, H. K., "Trend and test method for TVOC regulation of the vehicle interior's environment," Proc. of KSAE Autumn Conference, pp. 2054-2059, 2005.
7. Kwon, O. Y. and An, Y. S., "In-vehicle Pollution under Various Driving Conditions," Proc. of the 43<sup>rd</sup> Meeting of KOSAE, pp. 564-565, 2006.
8. Tian, C. and Fu, L., "The design of temperature control system on air-condition suit," International Conference on MACE, pp. 2388-2390, 2010.