

논문 2015-10-32

차량 구동 시스템의 구조에 따른 resilience 분석

(Resilience Evaluation of Vehicle Driving System Depending on System Architecture)

변 성 일, 이 동 익*

(Sungil Byun, Dongik Lee)

Abstract : The vehicle has lots of embedded systems. Each of systems has its own role. In case of the vehicle, simple failure of system can be critical to driver. Therefore all of embedded system should be managed based on importance factors to be effective. In this paper, we consider the resilience as the importance factor for the driving system with ACC(Adaptive Cruise Control). We propose metrics to calculate the resilience of the embedded system. To get the resilience of system, we calculate the reliability and the resilience of nodes in the system using its failure rate. The resilience of whole system can be presented by the resilience of nodes and its weight. We calculate the resilience and compare the centralized structure and the distributed structure.

Keywords : Architecture, Driving system, Evaluation, Resilience, Vehicle

1. 서 론

전자공학의 발달로 인해 자동차 내에서 사용되는 임베디드 시스템의 수가 기하급수적으로 증가하고 있다. 이러한 차량 내 임베디드 시스템들은 기존의 유압식 시스템을 대체할 뿐만 아니라 차량 내 새로운 기능들을 지원하기 위해 사용된다[1]. 차량에서 차량 바디, 파워트레인, 섀시, 조향장치, 편의성 안전장치 등이 임베디드 시스템으로 구성되고, 각 시스템을 연결하기 위한 통신규격으로 CAN(Controller Area Network)와 LIN(Local Interconnect Network)가 사용된다[2].

차량 바디용 임베디드 시스템인 차체제어모듈은 파워 윈도우, 파워 미러, 에어컨, 도난방지장치 등 차량 바디에 부착된 전자장치들을 제어하고 감시한

다. 파워트레인에 사용되는 임베디드 시스템으로는 엔진 제어 시스템, 변속기 제어 시스템, 모터 제어 시스템, 배터리 관리 시스템 등이 있다. 엔진 제어 시스템은 엔진의 효율적인 제어를 위한 전자 제어 장치로 연료량, 점화 시기, 공기 유입량 등을 제어한다. 변속기 제어 시스템의 경우 자동차의 변속기를 제어하고, 모터 제어 시스템은 하이브리드 차량이나 연료 전지 차량의 동력원인 모터를 제어하며, 마지막으로 배터리 관리 시스템은 모터에 에너지를 공급하는 배터리를 관리한다. 이외에도 섀시에 사용되는 잠금 방지 제동장치, 조향에 관련된 구동력 제어장치, 전자식 안정성 제어장치, 적응순항제어와 안전장치인 에어백에도 또한 임베디드 시스템이 사용되고 있다. 이와 같이 차량에는 수많은 임베디드 시스템들이 존재한다. Safety-critical 시스템인 차량의 경우 높은 수준의 안정성이 요구되므로 이를 구성하는 임베디드 시스템들 또한 높은 안정성을 유지하기 위해 견고한 관리가 필요하다[3].

최근 이러한 시스템들의 안정성을 유지하기 위한 resilience 공학이 주목을 받고 있다. Resilience란 시스템의 내외부적인 혼란을 회피하고, 그러한 영향으로부터 살아남고 복구할 수 있는 능력을 말한다[4]. 이와 함께 resilience 공학은 시스템이 계속해서 동작하기 위해서 다양한 상황에 대처할 수

*Corresponding Author(dilee@ee.knu.ac.kr)

Received: 4 Aug. 2015, Revised: 29 Aug. 2015,

Accepted: 20 Sep. 2015.

S. Byun, D. Lee: Kyungpook National University

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT융합고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2015-H8601-15-1002)

있도록 시스템을 유지하는데 초점을 맞춘 안전 관리 패러다임이다[5]. 이러한 resilience 공학을 통해 시스템의 안정성을 구현하기 위해서 시스템은 자체적으로 시스템의 내외부적인 위험요소들을 예측하고 대처할 수 있는 능력을 지녀야 한다[6]. 시스템의 resilience 특성을 구현하기 위해서는 시스템의 운영 환경에서 시스템의 resilience를 분석하며 모니터링을 수행하여야 한다. 또한 설계 초기에 시스템의 resilience를 향상시키기 위한 여러 설계 기법들이 적용되어야 하며, resilience를 향상시키기 위한 의사결정으로 인해 생길 수 있는 단기 및 장기 영향력을 모델링하고 예측할 필요성이 있다[7].

본 논문에서는 시스템을 구성하는 각 노드의 안정성을 기반으로 하여 노드의 resilience를 구하고 이를 통합하여 전체 시스템의 resilience를 구하고자 한다. ACC 기능을 내장한 차량 구동 시스템을 대상으로 resilience 평가 방법을 검증하고자 한다.

II. 관련 연구

Resilience 공학에서는 시스템 평가, resiliency 설계 기법 그리고 구조적 최적화 & 의사결정에 대한 연구가 이루어지고 있다. 최근 5년 사이의 논문들에서는 대부분 시스템 평가에 대한 연구가 이루어지고 있고, 그 다음으로는 시스템 설계 기법에 대한 연구가 이루어지고 있다. 마지막으로 앞의 연구들을 토대로 시스템이나 네트워크 및 기반 시설의 구조적 최적화나 의사결정에 관한 연구가 이루어지고 있다[8].

시스템 평가는 대상 시스템의 resilience 특성, 즉 고장이 발생했을 때 얼마만큼 기존의 성능을 복구할 수 있는지에 대한 정량적 분석을 수행한다[9]. 정량적 분석은 여러 가지 방법으로 이루어지는데 첫 번째 방법은 시스템의 성능을 수치화할 수 있는 수식을 제안하거나 시스템을 모델링하여 확률론적 방법을 통해 시스템의 resilience 표현하는 방법이 있다[10]. Uday는 resilience-critical 시스템을 중심으로 한 resilience 분석의 한 가지 방법으로 SIMS(System Importance Measures)를 제안하였다[11].

Resiliency 설계 기법에 대한 연구는 두 가지 방식으로 나뉘어 이루어지고 있다. 시스템의 resilience를 향상시키기 위한 원리 원칙을 정의하는 것과 실제 설계 기법들을 적용하는 연구가 진행

되고 있다[12]. Carter는 시스템의 고장이나 변화를 탐지하고 견뎌내며 동작하는 것을 resilience라고 설명하며, 계층 간 설계를 통해 시스템의 resilience를 구현하였다[13]. 계층 간 resilience 설계 기법은 시스템 스택의 다양한 계층에 한 개 이상의 resilience 기법들이 구현되는 방법이다.

III. Resilience 평가 기법

1. 임베디드 시스템의 resilience

일반적으로 임베디드 시스템은 여러 종류의 구성요소로 이루어져 있다. 각각의 구성요소들이 서로 다른 역할들을 수행함으로써 시스템은 고유의 기능을 발휘할 수 있다. 이러한 임베디드 시스템에서 resilience는 여러 가지 방법으로 구현될 수 있다. 시스템을 구성하는 요소들을 대체할 수 있는 여분의 부품들을 추가하거나 시스템에 쓰이는 기존의 부품이 고장난 부품의 역할을 대체할 수 있도록 시스템을 설계함으로써 시스템이 resilience 특성을 가질 수 있다.

본 논문에서는 차량 구동 시스템의 resilience를 구하기 위한 새로운 평가 기법을 제안한다.

2. Resilience 평가 기법

임베디드 시스템의 resilience를 구하기 위해서는 먼저 시스템을 이루고 있는 부품 각각의 신뢰도를 구해야 한다. 이를 토대로 각 부품들의 관계를 분석하여 부품마다의 resilience를 구하고, 구해진 값들을 통합하여 전체 시스템의 resilience를 구할 수 있다.

시스템을 구성하는 최소 단위 부품의 신뢰도를 구하는 식은 다음과 같다.

$$r = 1 - q \quad (1)$$

여기서 r 은 신뢰도를 나타내고 q 는 비신뢰도를 나타낸다. 본 논문에서는 부품의 고장확률을 비신뢰도로 사용하여 각 부품들의 신뢰도를 계산한다.

일반적인 임베디드 시스템의 경우 여러 개의 노드들로 구성되어 있으며, 노드는 여러 개의 부품들로 이루어져 있다. 노드가 올바르게 동작하기 위해서는 노드를 구성하고 있는 모든 부품들이 안정적이어야 하므로 해당하는 노드의 신뢰도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r = r_1 \times r_2 \times \dots \times r_{n-1} \times r_n = \prod_{i=1}^n r_i \quad (2)$$

시스템을 구성하는 노드들의 resilience를 계산하기 위해서는 위에서 계산한 노드들의 신뢰도와 각 노드들 간에 미치는 영향력을 나타낼 가중치가 필요하다. 시스템이 resilience 특성을 지닐 경우, 하나의 노드가 고장 났을 때 다른 노드들의 데이터나 기능을 활용하여 고장난 노드의 성능을 회복할 수 있다. 그러므로 각각의 노드들이 서로의 성능에 미칠 수 있는 가능성을 가중치로 표현할 수 있다.

$$\omega_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{P_i} \quad (3)$$

여기서 $\omega_{i,j}$ 는 노드 i 에 대한 노드 j 의 가중치를 나타내며, P_i 는 노드 i 의 정상상태 성능, $P_{i,j}$ 는 노드 j 로 인해 회복되는 노드 i 의 성능을 나타낸다.

위에서 구한 노드의 신뢰도와 가중치를 사용하여 각 노드의 resilience를 구할 수 있다. 개별 노드의 resilience를 구하는 계산식은 다음과 같다.

$$R_i = r_i + \sum_{j=1}^n \omega_{i,j} \cdot r_j \quad (4)$$

여기서 R_i 는 노드 i 의 resilience를 나타낸다. 노드 i 의 resilience는 노드 i 의 신뢰도와 노드 i 에 영향을 미칠 수 있는 노드들의 신뢰도와 가중치의 곱의 합으로 계산할 수 있다.

각 노드의 resilience를 구한 이후에 이를 이용하여 전체 시스템의 resilience를 계산할 수 있다. 전체 시스템의 resilience를 구하기 위해서는 시스템을 구성하는 각 노드들이 전체 시스템에 미치는 영향력을 고려하여야 한다. 노드에 따라서 노드의 고장에 시스템에 미치는 영향이 다를 수 있기 때문이다. 따라서 각 노드들의 가중치를 구하고 위에서 얻은 각 노드들의 resilience를 활용하여 전체 시스템의 resilience를 도출하게 된다. 시스템의 resilience를 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$R_{sys} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot R_i \quad (5)$$

여기서 α_i 는 노드 i 가 시스템에 미치는 영향력을 나타내는 가중치이다. 가중치 α_i 는 가중 인자 값 u_i 를 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n u_i} \quad (6)$$

여기서 u_i 는 2004년에서 2010년까지 발생한 차량 결함요인별 고속도로 교통사고 횟수의 합으로써, 가

중치 α_i 는 해당 차량결함에 따라 발생한 교통사고의 비율을 나타낸다[14].

IV. 시뮬레이션

본 논문에서는 resilience 평가 방법을 검증하기 위하여 자동차 내의 임베디드 시스템 중의 하나인 스토틀과 브레이크 시스템을 대상으로 resilience 평가를 수행한다. 이 시스템은 스토틀과 브레이크를 조절하여 선행차량과의 안전거리와 속도를 자동적으로 제어할 수 있는 적응순항제어기능을 제공한다[15].

1. 시스템 구조

시스템의 구조는 크게 두 가지로 나뉠 수 있다. 첫 번째로 시스템의 기능들을 수행하는 노드로, 각 노드들은 해당하는 기능을 수행하기 위해 센서 및 액추에이터를 관리한다. 두 번째로는 노드들 간의 명령 및 데이터를 전송하기 위한 CAN 버스가 있다. 본 논문에서는 중앙집중형과 분산형이라는 두 가지 형태의 시스템 구조를 대상으로 resilience를 분석하고자 한다.

1.1 노드

각 노드들은 CPU, RAM 및 ROM으로 구성되어 있으며, 연결된 센서와 액추에이터를 관리한다. 시스템의 구조에 따라서 노드들이 구성하는 형태가 달라진다. 그림 1과 같이 중앙집중형 구조에서는 관련된 기능들이 동일한 노드에 연결되어 있다. 운전

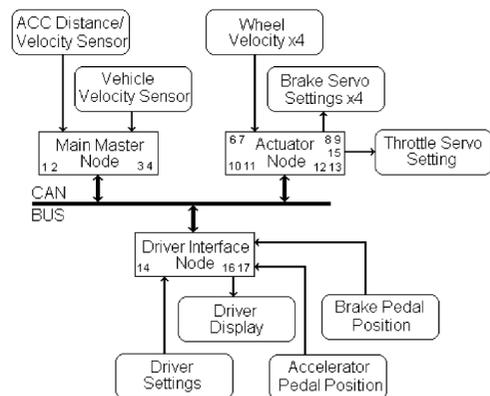


그림 1. 중앙집중형 구조[16]
Fig. 1 Centralized Structure[16]

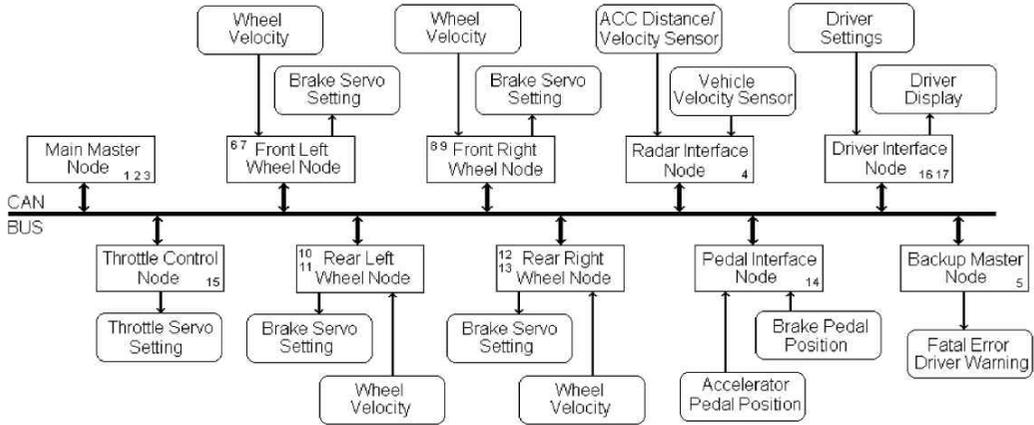


그림 2. 분산형 구조[16]

Fig. 2 Distributed Structure[16]

표 1. 각 부품의 고장확률[17, 18]

Table 1. Failure rates of Each Component[17, 18]

Component	Failure rate($\times 10^{-5}$)	Component	Failure rate($\times 10^{-5}$)
CPU	0.075	CAN Link	0.100
RAM	0.025	ROM	0.016
Servo	0.220	Pedal position	0.290
Driver setting	1.110	Driver display	1.650
CAN bus section	0.100	Driver warning	1.650
Vehicle velocity sensor	2.530	Wheel velocity sensor	0.150

자 인터페이스 기능과 관련된 I/O들이 운전자 인터페이스 노드에 연결되어 있고, 잠김 방지 제동장치와 스톱 제어시스템과 관련된 I/O들은 액추에이터 노드에 연결되어 있다. 마지막으로 적응순항제어 시스템은 메인 마스터 노드에 연결되어 있다. 반면에 그림 2와 같은 분산형 구조에서는 차량 내 기능들이 물리적으로 분산되어 있다. 각각의 바퀴들은 고유의 잠김 방지 제동장치 제어를 내장하고 있고, 페달 인터페이스의 경우 운전자 인터페이스 노드에서 분리되어 독립적으로 존재한다[16].

1.2 CAN 버스

노드들 간의 데이터를 전송하는 역할을 수행한다. CAN 버스의 경우 각각 노드와 연결되어 있

면서 노드의 우선순위에 따라 순서대로 메시지를 전송한다. CAN 버스에서는 CAN 버스와 노드들 간의 연결이 끊어질 수 있고, CAN 버스의 고장으로 메시지 전송 실패가 발생할 수 있다.

2. 시뮬레이션 셋업

노드에서 고장이 발생할 수 부품은 CPU, RAM, ROM 그리고 노드에 연결되어 있는 센서와 액추에이터라고 가정한다. CAN 버스의 경우, CAN과 노드를 연결하는 CAN Link와 CAN 버스 자체의 고장을 고려한다. 마지막으로 각 센서와 액추에이터의 고장을 고려할 때, 시뮬레이션에서 사용되는 고장확률은 다음 표 1과 같다[17, 18].

표 1의 값들을 사용하여 각 노드의 안정성 및 resilience를 구할 수 있다. 그 이후에 전체 시스템의 resilience를 구하기 위해서는 각 노드들이 가지는 시스템에 대한 비중이 필요하다. 각 노드의 가중치는 표 2와 표 3과 같다.

3. 시뮬레이션 결과

각 부품들의 고장확률을 기반으로 하여 각 구별 구성 노드들의 안정성을 계산하였다. 그 이후 각 노드들 간의 성능 가중치를 사용하여 노드들의 resilience를 계산하였다. 그 결과는 표 4와 표 5에서 확인할 수 있다.

중앙집중형 구조에서는 대체 불가능한 노드의 경우 각 노드의 resilience와 안정성이 동일하게 나타났다. 반면에 서로의 역할을 대체할 수 있는 분산형 구조에서는 각 노드의 resilience가 안정성보

표 2. 중앙집중형 구조에서 각 노드의 가중치
Table 2. Weights of Each Node in Centralized Structure

Node	Weight
Main master	0.051998074
Wheel velocity	0.619162253
Brake servo setting	0.144920558
Throttle servo setting	0.121810303
Driver interface	0.062108811

표 3. 분산형 구조에서 각 노드의 가중치
Table 3. Weights of Each Node in Distributed Structure

Node	Weight
Main master	0.034183919
Actuator	0.025999037
Driver interface	0.027924892
Radar interface	0.191020703
Backup master	0.191020703
Front left wheel	0.191020703
Front right wheel	0.191020703
Rear left wheel	0.012518055
Rear right Wheel	0.121810303
Pedal interface	0.013480982

표 4. 중앙집중형 구조에서 각 노드의 안정성과 resilience
Table 4. Reliability and Resilience of Each Node in Centralized Structure

Node	Reliability	Resilience
Main master	0.99994624	0.99994624
Wheel Velocity	0.99999530	3.99998136
Brake servo	0.99999460	3.99997856
Throttle servo	0.99999460	0.99999464
Actuator	0.99997984	3.17812624
Driver interface	0.99996344	0.99996344

다 높은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 위에서 표 2와 표 3으로 제시된 가중치와 각 노드들의 resilience 계산 결과 값인 표 4와 표 5를 기반으로 구한 각 구조별 시스템의 resilience은 다음 표 6과 같다.

표 6과 같이 분산형 구조의 resilience가 중앙집중형 구조의 resilience보다 더 높게 나온 것을 확인할 수 있다. 이는 분산형 구조가 중앙집중형 구조보다 고장으로부터 시스템의 성능을 복구할 가능성이 높다는 것을 나타낸다.

표 5. 분산형 구조에서 각 노드의 안정성과 resilience
Table 5. Reliability and Resilience of Each Node in Distributed Structure

Node	Reliability	Resilience
Main master	0.99999684	1.39998786
Radar interface	0.99994624	1.79994075
Backup master	0.99998034	1.79997443
Front left wheel	0.99999314	3.99997256
Front right wheel	0.99999314	3.99997256
Rear left wheel	0.99999314	3.99997256
Rear right Wheel	0.99999314	3.99997256
Pedal interface	0.99999104	1.99999104
Throttle control	0.99999464	0.99999464
Driver interface	0.99996924	0.99996924

표 6. 각 구조별 시스템 resilience
Table 6. The resilience of Each Structure

Structure	Resilience
Centralized	2.929581982
Distributed	3.361554386

V. 결론

본 논문에서는 적응순항제어 기능이 내장된 차량 구동 시스템을 대상으로 resilience 분석을 수행하였다. 차량 구동 시스템을 두 가지 구조로 표현하고, 노드 및 시스템 구조의 resilience를 구하는 방법을 제안하였다. 이를 통해 각 구조의 resilience를 계산한 결과, 고장 대처 능력이 있는 분산형 구조의 resilience가 중앙집중형 구조의 resilience보다 높게 나온 것을 확인할 수 있었다.

향후 실질적인 실험을 통하여 각 부품의 안정성과 가중치를 구하여 실질적인 차량 구동 시스템의 resilience를 구할 예정이다.

References

- [1] D. Kum, J. Hong, S. Jin, J. Cho, "Testing System for Automotive Software Using a General Purpose Development Board," IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 7, No. 1, pp. 17-24, 2012 (in Korean).
- [2] Embedded World 2007, Techworld, 2007.

- [3] Vehicle and Embedded systems, <http://ambroaes.tistory.com/entry/>
- [4] S. Jackson, *Architecting Resilient Systems: accident avoidance and survival and recovery from disruptions*. Hoboken, NJ: Wiley Series in Systems Engineering and Management, 2010.
- [5] L. Labaka, J. Hernantes, J.M. Sarriegi, "Resilience framework for critical infrastructures: An empirical study in a nuclear plant," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 141, No. 1, pp. 92-105, 2015.
- [6] E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson, *Resilience Engineering: concepts and precepts*, Aldershot, UK, Ashgate, 2006.
- [7] T.A. Saurin, G.C. Carim Junior, "Evaluation and improvement of a method for assessing HSMS from the resilience engineering perspective: A case study of an electricity distributor," *Safety Science*, Vol. 49, No. 2, pp. 355-368, 2011.
- [8] A.W. Righi, T.A. Saurin, P. Wachs, "A systematic literature review of resilience engineering: Research areas and a research agenda proposal," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 141, No. 1, pp. 142-152, 2015.
- [9] K. Minami, T. Tanjo, H. Maruyama, "Evaluating Resilience Strategies Based on an Evolutionary Multi-agent System," *Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Intelligence and Cybernetics*, 2013.
- [10] P. Uday, K.B. Marais, "Resilience-based System Importance Measures for System-of-Systems," *Procedia Computer Science*, Vol. 28, pp. 257-264, 2014.
- [11] K.S. Trivedi, D.S. Kim, R. Ghosh, "Resilience in Computer Systems and Networks," *Proceedings of International Conference on Computer-Aided Design*, 2009.
- [12] J.P.G. Sterbenz, D. Hutchison, E.K. Cetinkaya, A. Jabbar, J.P. Rohrer, M. Scholler, P. Smith, "Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines," *Computer Networks*, Vol. 54, No. 8, pp. 1245-1265, 2010.
- [13] N.P. Carter, H. Naeini, D.S. Gardner, "Design techniques for cross-layer resilience," *Proceedings of Conference on Design, Automation and Test in Europe*, 2010.
- [14] Korea Transportation Safety Authority 2011, *Research of the correlation between the failure of car inspection and traffic accident*, Gyeonggi, Korea Transportation Safety Authority (in Korean).
- [15] W. Lee, Y. Kim, "Behavioral Adaptation to an Adaptive Cruise Control System," *Transactions of KSAE*, Vol. 14, No. 6, pp. 82-88, 2006 (in Korean).
- [16] M. Short, M.J. Pont, J. Fang, "Assessment of performance and dependability in embedded control systems: Methodology and case study," *Control Engineering Practice*, Vol. 16, No. 11, pp. 1293-1307, 2008.
- [17] M. Short, M.J. Pont, "Assessment of high-integrity embedded automotive control systems using hardware in the loop simulation," *Journal of Systems and Software*, Vol. 81, No. 7, pp. 1163-1183, 2007.
- [18] IEEE Std 500-1984, *IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating stations*, Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc., N.Y., 1984.

Sungil Byun (변 성 일)

He received B.S. and M.S. degrees in Electronics Engineering from Kyungpook National University, Korea, in 2011 and 2013 respectively. He is currently a

Ph.D. student in Electronics engineering from Kyungpook National University, Korea. His current research interests include reliability evaluation and system design.

Email: bsi880705@naver.com

Dongik Lee (이 동 익)

He received B.S. and M.S. degrees in Electronics Engineering from Kyungpook National University, Korea, in 1987 and 1990 respectively. He worked as

researcher at Agency for Defense Development from 1990 to 1997. He received Ph.D. degree in Department of Automatic Control and Systems Engineering at the University of Sheffield, England, 2002. He worked as common founder and CTO at DRTS Ltd England from Jan. 2002 to March 2005. He is currently an associate professor with Electronics Engineering at Kyungpook National University, Korea from 2005.

Email: dilee@ee.knu.ac.kr