

논문 2011-5-15

페트리 넷을 이용한 DES 모델링에 관한 연구

Research for Modeling Method of DES Using Petri Nets

이은주*, 김삼택**

Sam-Taek Kim, Eun-Joo Lee

요약 본 연구는 이산사건 시스템인 제조 시스템에 대하여 사용자 명세서에 따라 충실하게 동작하는 제어기를 설계하는 것이 목적이다. 특히, W. M. Wonham의 감독제어 이론을 기반으로 병렬처리가 가능한 페트리 넷을 이용한 제어기를 설계하는 것이다. 또한, 페트리 넷을 이용한 설계 시 고려해야 할 문제 중 공유하는 자원의 할당에 관한 문제를 다루고자 한다. 공유자원에 대한 처리를 사용자 명세서로 제시하고 제시한 페트리 넷으로 모델링하여 합성하면 제어기가 생성된다. 이렇게 생성된 제어기는 공유하는 자원이 있는 경우에 발생가능한 교착상태(deadlock)와 기아상태(Starvation)에 대한 제어가 가능하다. 선행연구에서는 페트리 넷의 두 모델을 합성하는 방법으로 동기식 도달성 그래프를 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 그 결과를 이용하여 교착상태와 기아상태를 예방한 제어된 시스템을 설계하여 제시하고자 한다.

Abstract In this paper, our goal is to design the controller which operates a manufacturing system, discrete event system, guaranteeing user specification. In specially, based on supervisory control theory W. M. Wonham, our work consists in performing the controller using Petri nets possible parallelism. In addition, we consider the problem of allocation for resources sharing of the issues to consider when designing using Petri net. The controller can be generated by synthesis of user specification model and plant model after giving the management for the resource sharing. This created controller can control the deadlock and starvation which can occur in the case with resource sharing. Previous studies proposed the Constrained Synchronous Reachability graph to synthesis of the two Petri nets models. Therefore, we provide the controlled system which forbids a deadlock and starvation using the result of previous studies.

Key Words : 페트리 넷, DES(Discrete Event System), Supervisory Control, 자원공유

1. 서 론

P. J. Ramadge와 W. M. Wonham은 이산사건 시스템에 대한 제어시스템을 설계하는 방법으로 감독제어 이론(Supervisory Control Theory)을 1987년에 처음 소개하였다.^[1] 감독제어 이론은 공장설비 모델(plant model)과 사용자 명세서 모델(user specification model)을 합성하여

제어기를 생성하고, 이 생성된 제어기를 이용하여 공장 설비를 폐-루프(closed-loop) 제어하는 것이다. W. M. Wonham은 감독제어 시스템을 설계하는 방법으로 유한 오토마타를 이용한다.^[2] 오토마타를 이용하여 두 모델을 합성하면, 그 결과에 대한 상태들의 수가 많아져서 실제의 대규모 제조시스템에 대한 제어시스템을 설계할 때 계산량이 기하학적인 숫자가 될 수 있다. 이것은 대규모 시스템에 대한 설계로 적절하지 않음을 나타낸다.

반면, 페트리 넷(Petri Nets)은 두 모델의 합성 시 플레이스(places)의 증가가 없으므로 대규모 제조시스템에 대

*정희원, 우송대학교 컴퓨터정보학과

**정희원, 우송대학교 컴퓨터정보학과(교신저자)

접수일자 2011.7.19, 수정일자 2011.9.7

게재확정일자 2011.10.14

한 모델링 도구로 적합하다. 따라서, G. Alpan은 제조시스템의 모델링과 감독제어 시스템 구축에 패트리 넷을 사용했다.^[3] 그러나, G. Alpan의 연구에서는 사용자 명세서(user specification)와 감독(supervision)의 구축에 오토마타를 이용했으며, 감소 알고리즘을 사용하여 모델의 크기를 줄여서 제어시스템 설계가 가능하게 하였다. K. Yamalidou는 사용자 명세서의 모델링에 패트리 넷의 불변량 플레이스(places invariants)를 사용하여 제어 시스템구축에 패트리 넷을 이용했지만, 그의 연구는 플레이스와 연결(arcs)에 집중되어 트랜지션(transitions)에 대한 제어가 결여되었다.^[4]

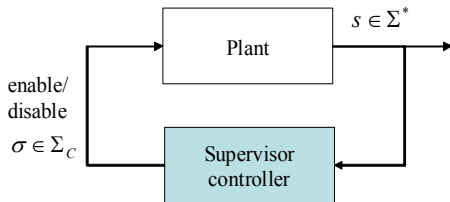
본 연구에서는 대규모 제조시스템 설계에 적합한 패트리 넷만을 이용하여 제어 시스템을 설계하고자 한다. 패트리 넷을 이용한 제어 시스템 설계에는, 공유하는 자원의 할당에 관한 모델링, 사용자 설계명세서의 구현방법 및 최적의 감시를 위한 (supervision)설계와 제어장치들의 합성에 관한 문제 등을 고려하여야 한다.

본 연구에서는 감독제어 이론을 기반으로 공유하는 자원의 할당을 제어하는 제어장치를 패트리 넷으로 모델링하여 설계하는 방법을 제안 하였다.^[5]

II. 감독 제어시스템과 자원공유

1. 감독제어 시스템

감독제어 시스템은 공장설비와 사용자 명세서를 모델링 하고, 이 두 모델을 합성하여야 한다. 그림 1은 Ramadge와 Wonham의 감독제어에 관한 개요를 설명한 것이다.



Alphabet of event labels : $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u$
 Controllable event : Σ_c Uncontrollable event : Σ_u
 Language environment Σ^* = all finite strings of symbols from Σ
 Plant "behavior" is a sublanguage of Σ^*

그림 1. 감독제어의 개요^[2]
 Fig. 1. Schema of Supervisory Control^[2]

그림에서 알 수 있듯이 사건은 제어 가능한 사건들과 제어 불가능한 사건들로 분류되며 제어기는 제어 가능한 사건들만 관리할 수 있다.

P. J. Ramadge와 W. M. Wonham의 감독제어 이론을 그림 2의 생산자-소비자 시스템을 이용하여 설명하고자 한다.

각각 병렬의 상태로 동작하는 두 기계 Machine 1과 Machine 2를 하나의 스톡으로 연결하여 각각 생산자 (Machine 1)와 소비자(Machine 2)의 역할을 부여하여 하나의 시스템으로 재구성하고자 한다. 첫 번째 기계가 동작하여 가공한 부품을 스톡에 저장하면, 두 번째 기계가 스톡에 저장된 이 부품을 다시 가공하여 제품을 완성한다.

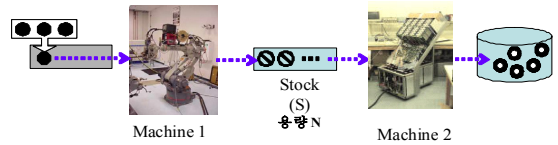


그림 2. 생산자-소비자 모델
 Fig. 2. Producer-consumer system

이와 같이 시스템을 구축하기 전에 두 개의 기계와 스톡은 연결되지 않았다. 감독제어의 목표는 다음의 사용자 명세서에 따라 동작하도록 제어기를 설계하는 것이다.

- 1) 머신1은 스톡이 비어 있을 경우에만 동작한다.
- 2) 머신2는 스톡에 부품이 있을 경우에만 동작한다.
- 3) 스톡의 용량은 하나의 부품만 저장 가능하다.

사용자 명세서에 맞게 공장설비가 작동하도록 제어기를 설계하기 위하여 제어가 가능한 사건들은 'a', 'c'로 제어 불가능한 사건들은 각각 'b', 'd'로 표기하였다. 두 개의 오토마타 모델을 통합하기 위하여 벡터적 (Cross Product)을 하면 그림 3와 같은 제어기를 획득할 수 있다.

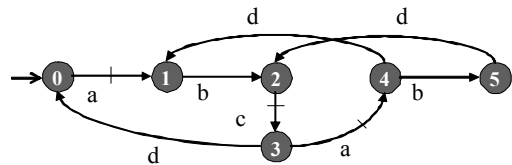


그림 3. Ramadge와 Wonham의 오토마타 기반 제어기
 Fig. 3. The automata-based controller obtained by Ramadge and Wonham theory

2. 자원공유

초기 제조시스템은 단일 품종을 대량으로 생산하는데 유리하도록 설계되었다. 그러나 사회가 복잡해지고 소비자의 취향이 다양화함에 따라 다양한 품종을 생산할 수 있는 유연생산 시스템(FMS: Flexible Manufacturing System)으로 발전하였다. 유연생산 시스템은 일반적으로 여러 대의 기계와 여러 대의 이동 로봇을 사용하여 유연성을 높인다. 그러나 이런 자원은 한정된 양만을 이용할 수 있으므로 자원과 자원들의 연결 방법의 선택에 따라 생산의 효율이 크게 달라진다. 한정된 자원들로부터 최대의 효율을 내기 위해서 자원들을 연결하는 문제가 스케줄링이고, 이러한 효율성 높은 스케줄링의 연구와 함께 중요한 부분을 차지하고 있는 교착상태(deadlock)와 기아상태(starvation)에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^{6,7)}

교착상태란 다중 태스크 처리에 있어서 상대방이 점유하고 있는 자원을 서로 요구하는 처리가 동시에 발생하게 되면 어느 자원도 해제되지 못하여 처리가 진행되지 않거나 지연되는 상태이며, 기아상태란 결코 사용할 수 없는 자원을 무한정 기다리는 상태를 말한다. 유연생산 시스템에서 자원공유문제를 해결하여 교착상태 및 기아상태에 빠지지 않도록 하는 것은 매우 중요한 과제이다.

그림 4는 자원공유에 대한 문제를 패트리 넷으로 모델링한 것이다. 공유자원은 플라이스 'r'로 공유자원을 필요로 하는 동작은 트랜지션 't1'과 't2'으로 모델링하였다.

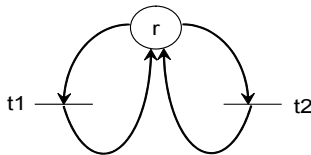


그림 4. 자원공유
Fig. 4. Resource sharing

공유자원이 하나이고 트랜지션 't1'과 't2'이 이 공유자원을 동시에 요구하게 되면 교착상태가 되며, 계속해서 하나의 트랜지션에만 할당되면 기아상태가 된다. 그 결과로 자동생산시스템이 중단되는 심각한 결과가 발생하게 된다. 이러한 공유자원에 대하여 사용 순서를 사용자 명세서로 미리 명시하고 이에 따른 감동제어 시스템을 구축한다면 공유자원에 따른 문제를 예방할 수 있다.

III. 패트리 넷 기반 DES 모델링

1. 패트리 넷

1960년대 C.A. Petri에 의해 처음 개발된 패트리 넷은 오토마타와 유사한 점이 많고, 실제로 오토마타는 패트리 넷으로 표현이 가능하다. 패트리 넷은 동시성(concurrency)과 동기적인 사건(synchronized Event)을 표현할 수 있으며, 가시적으로 표현(Visuality)이 가능하여 이해하기 편리하다는 장점이 있다.¹⁷⁾

패트리 넷은 (P, T, Ai, Ao, M) 의 5요소로 구성된다.

여기서,

P : 플라이스 집합,

T : 트랜지션 집합,

Ai : 트랜지션에서 플라이스로 연결하는 아크의 가중치 행렬,

Ao : 출력 아크, 플라이스에서 트랜지션으로 연결하는 아크의 가중치 행렬,

M : 초기 마킹.

플라이스는 시스템의 행동 혹은 조건을 나타내며 그림에서 원으로 표시한다. 트랜지션은 시스템의 상태를 변화시키는 행동을 나타내며 그림에서 선분으로 표시한다. 아크(arcs)는 흐름으로 화살표로 표시하고, 토큰은 플라이스의 조건의 진위 또는 시스템의 가용자원을 나타낸다. 토큰은 시스템의 동적이며 병행적인 동작의 특성을 나타내기 위해 사용된다. 행동이 일어나도록 하는데 필요한 조건을 만족할 경우 플라이스에 토큰을 위치시킴으로써 표현한다. 트랜지션은 자신에게로 입력되는 모든 플라이스가 토큰을 보유하고 있어야 점화될 수 있다. 트랜지션이 점화되면 자신의 각 입력 플라이스로부터 각 아크의 가중치만큼의 토큰을 제거하고 각 출력 플라이스의 아크의 가중치만큼 토큰을 첨가한다. 따라서 토큰의 수와 위치는 패트리 넷을 실행하는 동안 바뀌게 된다.

2. 공유자원이 있는 시스템의 패트리 넷 기반 DES모델링

그림 4는 트랜지션 t1과 트랜지션 t2가 동시에 공유자원 r을 요구하고 있다. 공유자원의 개수가 1개인 경우에 주어진 순서로 공유자원 r을 할당하는 것이 가능하다. 몇 가지 예를 들면 다음과 같다.

1) 트랜지션 t1에 할당 후 트랜지션 t2에 할당,

- 2) 트랜지션 t2에 할당 후 트랜지션 t1에 할당,
 - 3) 트랜지션 t1에 2번 할당 후 트랜지션 t2에 할당.
- 3) 번의 요구사항을 예로 들면 그림 5와 같이 사용자 명세서 모델링이 가능하다.

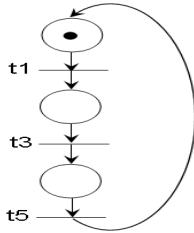


그림 5. 사용자 명세서: 그림 4에 대한 t1→t1→t2 동작
Fig. 5. User specification : t1→t1→t2 for Fig. 4

그림 5의 사용자 명세서 패트리 넷 모델과 그림 4의 공장설비 모델에 관한 동기식 도달성 그래프를 생성하여 다음과 같이 기대 동작(expected behavior), 금지 동작(forbidden behavior), 사이클 동작(cycle behavior)에 관한 식을 만들고 각 금지 동작에 대한 제어 플레이스를 생성한다.

1) 기대 동작

$$M0(pc) \geq 0$$

$$M1(pc) = M0(pc) + C(pc, t1) \geq 0$$

$$M3(pc) = M0(pc) + C(pc, t1) + C(pc, t1) \geq 0$$

2) 금지 동작

$$M2(pc1) = M0(pc1) + C(pc1, t2) < 0$$

$$M4(pc2) = M0(pc2) + C(pc2, t1) + C(pc2, t2) < 0$$

$$M5(pc3) = M0(pc3) + C(pc3, t1) + C(pc3, t1) + C(pc3, t1) < 0$$

3) 사이클 동작

$$C(pc, t1) + C(pc, t1) + C(pc, t2) = 0$$

생성된 제어 플레이스 'c'를 추가하여 사용자 명세서에 의한 공유자원 문제를 해결한다. 그림 6은 공유자원에 대하여 사용자 명세서에 따른 제어를 그림 4에 추가한 시스템의 일부본이다.

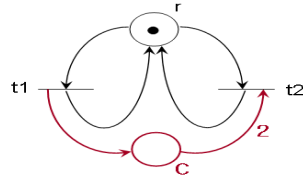


그림 6. 제어된 자원공유
Fig. 6. Controlled resource sharing

IV. 실험 및 결과

3장에서 설명한 공유자원에 대한 제어를 같은 크기의 금속조각에 두 가지 타입으로 구멍을 뚫는 제조 셀을 이용하여 적용하였다. 그림 7의 제조 셀은 입력 컨베이어(P1), 두 가지 타입(A, B)의 드릴머신(P2, P3), 두 개의 로봇 머니플레이터(P4, P5), 4개의 저장 공간(S1, S2, S3, S4), 출력 컨베이어(P6), 입력버퍼와 출력버퍼로 구성 된다.

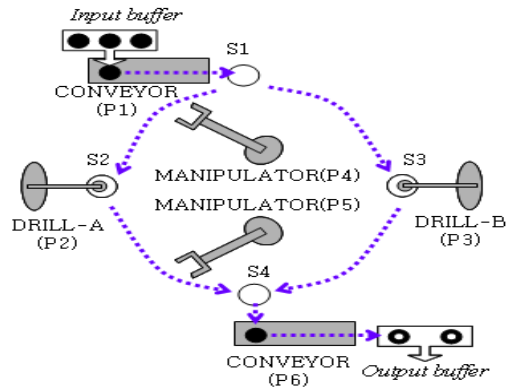


그림 7. 제조 셀
Fig. 7. Manufacturing Cell

제조 셀은 다음과 같이 동작한다. 입력버퍼(input buffer)에 적재되어 있는 부품을 하나씩 입력 컨베이어를 이용하여 저장 공간 S1에 두면, 로봇 머니플레이터 P4는 S1에 있는 부품을 드릴머신이 가공할 수 있도록 저장 공간 S2 또는 S3로 옮긴다. 드릴머신으로 가공한 부품은 로봇 머니플레이터 P5가 저장 공간 S2 또는 S3에서 저장 공간 S4로 옮긴다. 출력 컨베이어는 S4에 있는 가공된 부품을 출력버퍼(out buffer)로 이동한다. 제조 셀에서 로봇 머니플레이터 P4는 입력 컨베이어(P1), 드릴머신(P2, P3)의 연결된 동작을 위한 공유 자원이며 로봇 머니플레

이터 P5는 드릴머신(P2, P3)과 출력 컨베이어(P6)의 연결된 동작을 위한 공유 자원이다.

그림 8은 제조 셀의 저장 공간의 용적이 모두 1인 경우의 제조 셀을 패트리 넷으로 모델링하고, 그림 9는 제조 셀의 공유자원인 두 개의 로봇 머니플레이터의 동작을 사용자 명세서로 하여 모델링한 것이다. 그림 9의 사용자 명세서는 공유자원인 로봇 머니플레이터의 우선 순위를 모델링한 것이다. 로봇 머니플레이터 P4는 입력 컨베이어에서 운반된 부품을 A타입과 B타입의 드릴 머신에 순차적으로 한 번씩 운반한다. 로봇 머니플레이터 P5는 A타입과 B타입의 드릴머신으로 가공된 부품을 순차적으로 출력 컨베이어를 통해 출력버퍼로 운반될 수 있도록 이동한다.

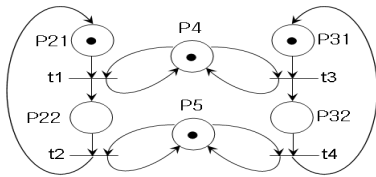


그림 8. 제조 셀의 패트리 넷 모델
Fig. 8. Petri nets models of manufacturing cel

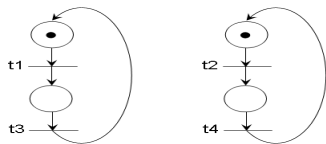


그림 9. 사용자 명세서 패트리 넷 모델
Fig. 9. Petri nets models of user specification

그림 8과 그림 9의 동기식 도달성그래프를 생성한 후 도출된 기대 동작(expected behavior), 금지 동작(forbidden behavior), 사이클 동작(cycle behavior)에 관한 식은 다음과 같다.

1) 기대 동작

$$\begin{aligned}
 M0(pc) &\geq 0 \\
 M1(pc) &= M0(pc)+C(pc, t1) \geq 0 \\
 M3(pc) &= M0(pc)+C(pc, t1)+C(pc, t2) \geq 0 \\
 M4(pc) &= M0(pc)+C(pc, t1)+C(pc, t3) \geq 0 \\
 M6(pc) &= M0(pc)+C(pc, t1)+C(pc, t2)+C(pc, t3) \geq 0 \\
 M8(pc) &= M0(pc)+C(pc, t1)+C(pc, t2)+C(pc, t3)+ \\
 &\quad C(pc, t1) \geq 0
 \end{aligned}$$

2) 금지 동작

$$\begin{aligned}
 M2(pc1) &= M0(pc1)+C(pc1, t3) < 0 \\
 M5(pc) &= M0(pc)+C(pc, t1)+C(pc, t2)+C(pc1, t1) < 0 \\
 M7(pc) &= M0(pc)+C(pc, t1)+C(pc, t3)+C(pc1, t4) < 0 \\
 M9(pc) &= M0(pc)+C(pc, t1)+C(pc, t2)+C(pc, t3)+ \\
 &\quad C(pc, t1)+C(pc, t2) < 0
 \end{aligned}$$

3) 사이클 동작

$$C(pc, t1) + C(pc, t2) + C(pc, t3) + C(pc, t4) = 0$$

4개의 금지 동작에 대한 최적의 제어 플래이스를 계산하면 두 개의 제어 플래이스를 계산할 수 있다. 제어 플래이스 'c1', 'c2', 'c3'를 추가하여 사용자 명세서에 의한 공유자원 문제를 해결한 결과는 다음의 그림 10과 같다.

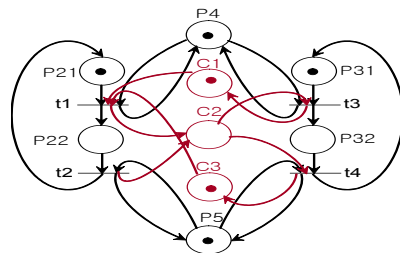


그림 10. 그림 8의 제어된 패트리 넷 모델
Fig. 10. Controlled Petri nets models of Fig 8

자원공유 부분에 대한 제어를 패트리 넷 시뮬레이션 S/W인 PIPE^[9]로 검증한 결과는 그림 11과 같다.

Petri net simulation results		
Place	Average number of tokens	95% confidence interval (+/-)
P1	0.51485	0.07696
P2	0.48515	0.07696
P3	0.51485	0.07696
P4	0.48515	0.07696
P5	1	0
P6	0.9901	0
P7	0.91089	0.12316
P8	0.53465	0.06158
P9	0.53465	0.06158

그림 11. 그림 10의 검증
Fig. 11 Verification of Fig 8

그림 11의 결과로 자원공유에 대하여 완벽하게 제어하고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 병렬처리가 가능한 패트리 넷을 이용한 제어기 설계에서 고려해야할 여러 가지 문제 중 공유하는 자원의 할당에 관한 문제를 다루고 있다.

P. J. Ramadge와 W. M. Wonham의 감독제어 시스템의 설계방법을 기반으로 논문^[5]에서 제안한 동기식 도달성그래프를 생성하는 방법을 이용하여 제어기를 설계하였다. 공유자원에 대한 처리를 미리 사용자 명세로 제시하고 제시한 명세서와 공장설비를 모두 패트리 넷으로 모델링하여 공유하는 자원이 있는 경우에 발생가능한 교착상태(deadlock)와 기아상태(Starvation)에 대하여 예방하였다.

본 연구의 목적인 최적의 제어장치를 설계하기위해서 앞으로의 과제는 서론에서 언급한 패트리 넷을 이용한 제어 시스템 설계에는 고려해야할 몇 가지 문제들을 해결하는 새로운 방법을 제공하는 것이다. 우선, 상세설계 명세서를 패트리 넷으로 명확하게 구현하는 방법을 연구하여 제공하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] P. J. RAMADGE and W. M. WONHAM, "Supervisory control of a class of Discrete Event Processes", SIAM J. Control and Optimization, vol. 25, No. 1, January 1987.
- [2] W. M. WONHAM, "Notes on Control of Discrete-Event Systems: ECE 1636F/1637S",

2009-2010.

- [3] G. Alpan and M. A. Jafari, "Synthesis of a Closed-Loop Combined Plant and Controller Model," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, 2002.
- [4] K. YAMALIDOU, J. MOODY, M. LEMMON & P. ANTSAKLIS, "Feedback control of petri nets based on place invariants", Automatics, vol.32, No.1, pp.15-28, 1996.
- [5] E. J. Lee, A. Toguyeni and N. Dangoumau, "A Petri Net based Decentralized Synthesis Approach for the Control of Flexible Manufacturing Systems," CESA 2006 world congress: The International Association for Mathematics and Computers in Simulations, pp. 1497-1503, Beijing, China, 4-6 October 2006.
- [6] 송유진, 이종근, "행렬을 이용한 FMS에서의 교착 상태 탐지 및 회피 알고리즘에 대한 연구", 제어·로봇·시스템학회 논문지, pp. 344-352, 11권 4호, 2005.4.
- [7] B. TROUILLET, "Sur l'évaluation du comportement logique des systèmes de production manufacturière par méthodes exactes," thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2003.
- [8] T. Murata, "Petri Nets: Properties, Analysis and Applications," Proc. of the IEEE, vol. 77, no. 4, Apr. 1989.
- [9] <http://pipe2.sourceforge.net/>

저자 소개

김 삼 택(정회원)



- 1985년 한남대학교 전자계산학과 학사학위
- 1987년 중앙대학교 전자계산학과 석사학위
- 2005년 중앙대학교 컴퓨터공학과 박사학위
- 1995년 3월 ~ 2007년 8월 우송정보대학 컴퓨터정보통신계열 교수

• 2007년 9월 ~ 현재 우송대학교 컴퓨터정보학과 교수
<주관심분야 : 유/무선 네트워크링, VoIP, 모바일 컴퓨팅, ITS>

이 은 주(정회원)



- 1993년 국립창원대학교 전자계산학과 학사
- 1999년 국립창원대학교 전자계산학과 석사
- 2007년 프랑스 Ecole Centrale de Lille 박사
- 2007년 9월 ~ 2009년 2월 한양대학교 산업공학과 POST-DOC

• 2009년 3월 ~ 현재 우송대학교 컴퓨터정보학과 교수
<주관심분야 : Supervisor Control, Petri Net, DES, FMS control>