

발전플랜트를 위한 분산다단계-다중모델 적응제어기의 설계

論 文

48A-9-9

Design of Decentralized Multilevel-Multiple Model Adaptive Controller(DM-MMAC) for Power Plant

崔善旭* · 李恩鎬** · 朴溶植*** · 金永喆§

(Sun-Wook Choi · Eun-Ho Lee · Yong-Sik Park · Young-Chol Kim)

Abstract - In this paper, a decentralized multilevel-adaptive controller for a boiler-turbine system is designed by using multiple model adaptive method. It is applied to the drum type boiler-turbine system which is simplified from Boryung T/P #1,2 model. A linearized model is decomposed into three subsystems by means of linear transformation. Then the DMC based on such subsystem is designed and a Multiple Model Adaptive Control(MMAC) scheme is applied for the purpose of the good tracking to variable load demands of the thermal power plant. The good performance of the designed controller is shown by simulations in various conditions that have the large step and ramp change of power demand.

Key Words : Boiler-Turbine system, DMC, MMAC

1. 서 론

보일러-터빈시스템은 드럼내의 증기압과 수위 및 전기적 출력이 안정된 부하추종, 드럼의 과열방지 및 적절한 증기압을 유지하도록 제어되어야 한다. 시스템의 제어기 구성방식은 대규모 다변수 제어기법을 적용하는 집중제어방식과 각 기능별로 여러 부 시스템으로 분할하여 개별 및 총괄제어를 조합한 분산제어방식으로 구분된다. 집중화된 제어기 설계방식은 시스템 성능 면에서 분산제어방식보다는 우위에 있으나 발전플랜트, 화학공정 등과 같은 실제 산업현장에서의 통신채널의 거리, 과도한 연산량 및 설치시의 고려사항들로 인한 제약조건들로 인하여 실제 적용에 많은 제한이 있다[1]. 분산제어방식은 더 복잡한 설계문제를 갖지만, 각 제어기의 계산량 감소 및 다양한 측정신호 및 제어신호의 전송이 단순하기 때문에 일반적으로 구현이 용이하며 한 국부 시스템의 불안정요인을 다른 국부 시스템에 파급되는 것을 방지하여 전체 시스템의 안정도를 높일 수 있다.

본 논문에서는 화력발전소 보일러-터빈시스템의 분산제어기 설계에 있어 건설성 및 집중제어방식에 비하여 저하되는 성능을 개선하기 위한 설계기법으로 다단계 적용분산제어기를 설계한다. 대상 플랜트로서 보령T/P(Thermal power Plant) 1호기의 간략화 시킨 4차 비 선형 분포정수 모델[부록]을 이용하였으며, 5개의 출력상태에 대응하는 동작점에서의 선형화 모델을 근거로 하여 전개하였다. 먼저, B-T(Boiler-Turbine)선형화 시스템을 분산 다단계제어방식에 의해 3개의 부 시스템 즉, 연소제어계, 출

력제어계, 드럼 수위제어계로 입력 비집중화 방식을 통하여 분산화 한다. 분산다단계제어(DMC)방식[3,4]은 외란이나 부하변동 등이 없는 대규모 시스템의 분산/협조제어 방식으로 유용하다. 국부 제어칙(local control law)과 범 제어칙(global control law)의 조합으로 구성되며, 범 제어칙의 이득은 각 부 시스템간의 상호간섭을 최소화하도록 설계하게 된다. 그러나 B-T 모델처럼 높은 비선형 동특성으로 인해 출력상태에 따라 모델특성이 변하는 경우에는 부하 추종성능면에서 다소 불리하다.

이를 보완하기 위해 각 부 시스템의 제어기는 다중모델적용제어(MMAC)기법[5,6]을 DMC와 조합한 분산다단계-다중모델 적응제어(Decentralized Multilevel - Multiple Model Adaptive Control : DM-MMAC)방식을 제안하여 설계한다. 비선형 보일러-터빈 모델에 대해 출력을 계획변수(scheduling variable)로 하고 선형화 모델군의 파라미터가 계획변수의 함수로 표현할 수 있다면 이득계획제어(gain scheduling control)방식도 적응제어의 하나로 적용 가능하다. 그런데 부록의 식(A.1)~(A.2)에서 알 수 있듯이 이러한 모델식의 표현이 용이치 않아 본 논문에서는 MMAC를 적용하기로 한다.

MMAC는 제어대상이 되는 시스템이 적용 가능한 유한모델군에 속하거나 프로세스가 유한수의 모델들에 의해 근사화된다는 가정 하에 구현된다. 이와 같은 다중모델 표현에 대한 가정은 영향이 적은 파라미터나 외부적인 영향을 고려하지 않음으로서 동작영역을 분할할 수 있는 B-T시스템과 같은 많은 산업공정과 일치한다는 점에 근거한다[7]. 비선형 다변수 시스템의 B-T시스템을 한 동작 점에서 선형화 시킨 모델에 근거하여 제어기를 설계하게 되는 DMC가 만족할만한 추종성능을 보장하기 어려움으로 동특성의 변화를 다수의 모델군으로 표현하고 확률적 가중치에 의해 적용시킴으로서 요구출력의 변동폭이 큰 경우에도 추종성능을 향상시키도록 하였으며 시뮬레이션을 통해 유용성을 보이고자 한다.

논문의 구성은 2절에서 보일러-터빈시스템의 분산모델을 요약

* 正 會 員 : 忠北大 大學院 電子工學科 博士課程

** 準 會 員 : 박택(株)

*** 正 會 員 : 明知大 電氣制御計測工學部 副教授 · 工博

§ 正 會 員 : 忠北大 工大 電氣電子工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1998年 12月 3日

最終完了 : 1999年 7月 28日

하고, 3절에서는 B-T시스템을 위한 분산 다단계-다중모델적용 제어를 제안한다. 4절에서는 보령T/P 1호기를 대상 플랜트로 한 시뮬레이션을 통하여 제안한 제어기의 유용성을 고찰하고 끝으로 5절에서는 결론이 요약된다.

2. 보일러 - 터빈시스템의 분산모델

보일러-터빈(B-T) 시스템은 대규모, 각종 파라미터의 분포성, 각종 동작조건, 지연시간요소, 비선형성등으로 인해 비교적 정확한 모델을 수학적으로 표현하기란 대단히 어렵다. 특히 출력변동에 따른 모델의 변화는 불가피하다.

본 논문에서는 대상 모델로 보령화력 1,2호기의 B-T 모델[2] (부록참조)을 이용하고자 하며, 이 모델은 실제 사양과 운전 데이터로부터 얻어진 비선형모델로서, 넓은 동작범위에 걸쳐 실제 플랜트와 잘 일치한다. 다음은 과열기 부분이 간략화된 드럼형 B-T 모델의 상태방정식이다(상세한 수식표현은 [2],부록을 참조한다).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= g(x, u) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $x^T = [P_{dr} \ V_w \ X_r \ q_s]$, $u^T = [Q \ P_{cv} \ q_{fw}]$, $y^T = [P_{so} \ MW \ V_w]$ 이다. P_{dr} 는 드럼의 증기압력 [MPa], V_w 은 드럼내의 물의 부피[m³], X_r 은 상승관내의 증기질, q_s 은 증기흐름율(steam flow rate)[kg/sec], Q 는 열량[KJ/sec], q_{fw} 는 급수유량[Kg/sec], P_{cv} 는 주증기의 제어밸브(throttle valve)위치[%], P_{so} 는 주증기 압력, MW 는 출력[MW]을 나타낸다.

B-T 모델 식(1)을 한 동작점 $[x^0, u^0, y^0]$ 에서 Taylor 급수의 1차식으로 선형근사화 시키면 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}(t) &= F \Delta x(t) + G \Delta u(t) \\ \Delta y(t) &= D \Delta x(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\Delta x = x - x^0$, $\Delta u = u - u^0$, 그리고 $\Delta y = y - y^0$ 이다.

이제 문제는 분산제어방식을 적용하기 위해서 식(2)를 어떻게 분산화 시키는 가이다. 모델분할기법에는 시스템의 물리적 성질과 내부구조를 고려하여 이루어지는 물리적 분할(physical decomposition)과 수학적인 방식 2 가지로 나누어진다. 본 연구에서는 선형변환(linear transform)기법을 이용한 B-T시스템의 입력 분산모델(input decentralized model)을 제시하고자 한다.

치환행렬(permutation matrix) M 을 이용하여 $z = Mx$ 에 의해 식(2)의 변수순서를 바꾸고 간략히 나타내기 위하여 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} S : \dot{z} &= Az + B \Delta u \\ \Delta y(t) &= Cz \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, $A = MFM^{-1}$, $B = MG$, $C = HM^{-1}$,

$$\begin{aligned} z^T &= [\Delta P_{dr} \ \Delta q_s \ \Delta V_w \ \Delta X_r], \Delta u^T = [\Delta Q \ \Delta P_{cv} \ \Delta q_{fw}] \\ \Delta y^T &= [\Delta P_{so} \ \Delta MW \ \Delta V_w] \quad A \in R^{4 \times 4}, B \in R^{4 \times 3} \text{이다.} \end{aligned}$$

식(4)의 파라미터 행렬 A, B는 시 불변이고 {A, B}는 가제어 (controllable)라고 가정한다. 모든 시스템이 하나의 독립된 입력

을 가질 수 있으면 그 시스템을 입력분산시스템(input decentralized system)이라 한다. 여기서 고려하는 B-T 모델은 3개의 제어입력을 가지며, 연소제어계, 출력제어계, 드럼수위제어계의 3개 부 시스템으로 분할하기로 한다.

즉, 각 부 시스템의 제어기능은 다음과 같다.

연소제어계 : 보일러에 공급되는 열량과 보일러가 터빈에 공급하는 과열증기의 총 엔탈피 사이에 에너지 평형이 이루어지도록 주증기의 압력(P_{so})을 일정하게 유지하여야 하며 이를 위해 보일러에 공급되는 열량(Q)을 제어한다.

출력제어계 : 보일러의 출력은 주증기가 갖고 있는 총 엔탈피로 터빈을 거쳐 전력(MW)으로 변환된다. 총 엔탈피는 주증기량에 의해 결정되며 주증기의 온도 압력이 일정하게 유지하도록 유량제어밸브(P_{cv})로 주증기량을 제어한다.

수위제어계 : 드럼수위(V_w)의 동작점 변화에 수반되는 외란 하에서도 정해진 상하한치를 벗어나지 않도록 드럼에 공급되는 급수량(q_{fw})을 제어한다.

이제 식(4)에 대해 등가변환 $\bar{z} = Tz$ 를 이용하여 입력분산모델(input decentralized model)로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{S} : \dot{\bar{z}} &= \bar{A} \bar{z} + \bar{B} \Delta u \\ \Delta y &= \bar{C} \bar{z} \end{aligned} \quad (5)$$

이때 정칙 변환행렬 T는 \bar{B} 가 다음 형태가 되도록 선택된다.

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{B}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{B}_3 \end{bmatrix} \quad \bar{B}_1=1, \bar{B}_2=1, \bar{B}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

\bar{B} 를 다시 쓰면,

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\bar{z} = Tz$ 에 의해 S와 \bar{S} 에는 다음 관계가 있다.

$$\bar{A} = TAT^{-1}, \bar{B} = TB, \bar{C} = CT^{-1} \quad (9)$$

식(8), (9)로부터 선형변환 T를 다음과 같이 구할 수 있다

$$\begin{aligned} T &= \Psi^{-1} \\ \Psi &= [B : \eta] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\eta \in R^4$ 는 Ψ 가 정칙이 되도록 임의로 선택한다.

정칙 등가변환 T에 의해 S를 \bar{S} 로 변환하여도 두 시스템의 $\Delta u - \Delta y$ 간 전달함수는 불변이라는 것은 잘 알려져 있다. 식(5), (6)으로부터 각 부 시스템의 동특성 식을 나타내면 다음과 같다.

$$\text{부시스템 } \bar{S}_1 : \dot{\bar{z}}_1 = \bar{a}_{11} \bar{z}_1 + \sum_{j=2}^4 \bar{a}_{1j} \bar{z}_j + \Delta u_1 \quad (12)$$

$$\Delta y_1 = \sum_{j=1}^4 \bar{c}_{1j} \bar{z}_j = \sum_{j=1}^4 c_{1j} z_j \quad (13)$$

$$\text{부시스템 } \bar{S}_2 : \dot{\bar{z}}_2 = \bar{a}_{22} \bar{z}_2 + \sum_{i \neq j}^4 \bar{a}_{ij} \bar{z}_j + \Delta u_1 \quad (14)$$

$$\Delta y_2 = \sum_{j=1}^4 \bar{c}_{2j} \bar{z}_j = \sum_{j=1}^4 c_{2j} z_j \quad (15)$$

부시스템 \bar{S}_3 :

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{z}}_3 \\ \dot{\bar{z}}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{33} & \bar{a}_{34} \\ \bar{a}_{43} & \bar{a}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{z}_3 \\ \bar{z}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{z}_1 \\ \bar{z}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u_3 \quad (16)$$

$$\Delta y_3 = \sum_{j=1}^4 \bar{c}_{3j} \bar{z}_j = \sum_{j=1}^4 c_{3j} z_j \quad (17)$$

식(12)~(17)은 (4)가 3개의 부시스템으로 분산화 되었음을 보여 준다.

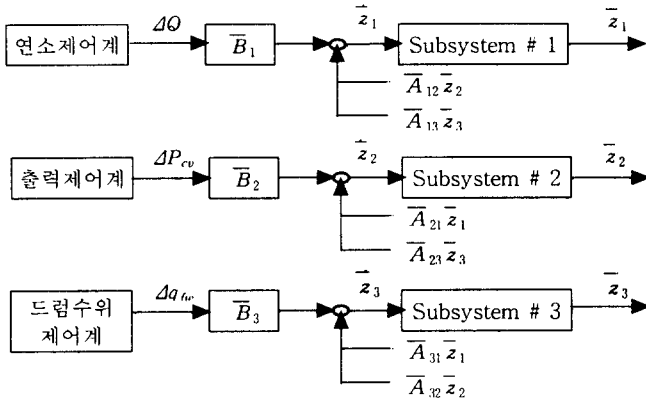


그림 1 B-T 시스템의 3-Subsystem 모델
Fig. 1 3-Subsystem models of B-T system

표 1 출력의 여러 동작점에서 선형화 모델계수행렬
Table 1 Linearized model constant matrixes in various operating points of output

동작점 (출력 %)	A	B	C
110 %	4.41e-3 -2.67e-4 1.90e-10 -2.02e-8 3.95e-1 -3.33e-2 0 0 8.23e-3 6.90e-3 6.17e-9 -3.37e+1 3.09e-4 7.79e-5 8.97e-11 -3.30e-1	2.61e-7 0 -5.20e-5 0 1.14e-1 0 4.80e-7 0 -9.77e-5 1.83e-8 0 -2.78e-5	1.151 -4.43e-3 0 0 7.834 0 0 0 0 0 1 0
100 %	4.20e-3 -2.67e-4 1.25e-11 -1.23e-9 3.78e-1 -3.33e-2 0 0 7.93e-3 6.91e-3 3.91e-10 -3.22e+1 2.91e-4 7.73e-5 5.61e-12 -3.18e-1	2.60e-7 0 -5.19e-5 0 1.14e-1 0 4.88e-7 0 -9.73e-5 1.80e-8 0 -2.74e-5	1.142 -4.36e-3 0 0 8.312 0 0 0 0 0 1 0
95 %	3.80e-3 -2.74e-4 -4.23e-10 4.45e-8 3.60e-1 -3.33e-2 0 0 7.44e-3 7.19e-3 -1.32e-8 -3.31e+1 2.50e-4 7.76e-5 -1.83e-10 -3.15e-1	2.61e-7 0 -5.01e-5 0 1.13e-1 0 4.90e-7 0 -9.38e-5 1.74e-8 0 -2.50e-5	1.139 -4.40e-3 0 0 8.792 0 0 0 0 0 1 0
75 %	2.91e-3 -2.76e-4 -8.82e-11 9.93e-9 2.88e-1 -3.33e-2 0 0 5.52e-3 7.40e-3 -2.78e-9 -2.90e+1 1.75e-4 7.44e-5 -3.54e-11 -2.57e-1	2.60e-7 0 -4.84e-5 0 1.12e-1 0 4.86e-7 0 -9.05e-5 1.56e-8 0 -2.36e-5	1.099 -4.15e-3 0 0 1.093e+1 0 0 0 0 0 1 0
50 %	1.78e-3 -2.81e-4 1.43e-10 -1.79e-8 1.90e-1 -3.33e-2 0 0 3.33e-3 7.75e-3 4.54e-9 -2.29e+1 9.07e-5 6.94e-5 5.06e-11 -1.82e-1	2.59e-7 0 -4.50e-5 0 0.11e-1 0 4.81e-7 0 -8.54e-5 1.31e-8 0 -2.03e-5	1.056 -3.66e-3 0 0 1.332e+1 0 0 0 0 1 0 0

뒤에 3장에서 DM-MMAC에 적용할 때 계수, 변수의 표현남용을 줄이기 위해 식(12), (14), (16)을 하나의 식으로 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\bar{S}_i : \bar{z}_i = \bar{A}_i \bar{z}_i + \sum_{j=1}^3 \bar{A}_{ij} \bar{z}_j + \bar{B}_i \Delta u_i, \quad i=1,2,3 \quad (18)$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{A}_{12} & \bar{A}_{13} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_2 & \bar{A}_{23} \\ \bar{A}_{31} & \bar{A}_{32} & \bar{A}_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서, $\bar{z}_1, \bar{z}_2 \in R$, $\bar{z}_3 = \begin{bmatrix} \bar{z}_3 \\ \bar{z}_4 \end{bmatrix} \in R^2$,

$$\bar{A}_{ii} = \bar{a}_{ii} \in R, \quad i=1,2$$

$$\bar{A}_3 = \begin{bmatrix} \bar{a}_{33} & \bar{a}_{34} \\ \bar{a}_{43} & \bar{a}_{44} \end{bmatrix} \in R^{2 \times 2}, \bar{A}_{12} = \bar{a}_{12}, \bar{A}_{21} = \bar{a}_{21} \in R$$

$$\bar{A}_{31} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{31} \\ \bar{a}_{41} \end{bmatrix}, \bar{A}_{32} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{32} \\ \bar{a}_{42} \end{bmatrix}, \bar{A}_{13} = [\bar{a}_{13} \quad \bar{a}_{14}], \bar{A}_{23} = [\bar{a}_{23} \quad \bar{a}_{24}].$$

위 결과를 각 부 시스템별로 정리하면 그림 1과 같다.

정격출력의 50, 75, 95, 100, 110 %의 5개 동작점[부록 표 A.1]에 대해 구한 식(4)의 계수행렬은 표 1과 같다.

3. B-T 시스템을 위한 분산다단계-다중모델 적응제어

분산 다단계 제어방식은 각 부 시스템의 안정화를 위한 국부 안정기와 상위레벨에서 부 시스템간 상호연관을 조정해주도록 작용하는 범 안정기를 조합한 제어구조를 가지며 LQR 또는 극 배치 방식을 이용하면 설계가 용이하다. 보일러-터빈 시스템과 같이 다 변수, 비선형 및 불안정성이 높은 분포정수 시스템은 분산제어방식이 안정성 및 고장 신뢰성 면에서 다 변수 제어기 법보다는 유리한 면을 갖는다. 그러나 외란, 동작점 변동에 따른 부하추종능력이 다소 약하기 때문에 본 절에서는 이를 개선하기 위하여 DMC에 부가적으로 견실한 적응 특성을 갖는 MMAC기법을 결합시킨 DM-MMAC기법을 제시한다.

다중모델 적응제어(Multiple Model Adaptive Control: MMAC) 방식[5,6]은 플랜트 파라미터의 변화를 실시간 식별(real-time identification)에 의해 적용하는 것이 아니라 불확실성을 갖는 파라미터의 범위를 분할하여 유한개의 집합으로 표현하고, 파라미터의 실제값이 분할된 특정 값과 가까질 가설의 확률을 각 모델로부터 구해지는 잔차(residual)를 이용하여 식별하므로써 실시간 적용하는 구조를 갖는다. 이러한 이유로 실제 응용시 큰 강인성(robustness)을 갖는다.

시스템에 대한 다중모델은 출력변동에 따른 동작조건을 고려하여 다중모델을 구성하여야한다. 이때 MMAC의 적용구조는 제어기뱅크의 한 제어기가 실제모델에 대해 가장 높은 조건부확률(conditional probability)을 갖는다는 가정에서 제어기가 선택되어지는 것이다. 이를 위한 절차로는 첫째, 플랜트와 동작점에 대해 분할된 모델출력사이에서 발생하는 잔차(residual)를 각 모델들의 가중치 $W_i(t)$ 로 변환한다. 둘째로 모델의 가중치들이 제어기출력과 결합하여 제어기출력의 확률가중평균으로 최종제어입력을 얻게 된다.

식(18)에서와 같이 다단계 분산제어방식에 의해 연소제어계, 출력제어계, 드럼수위제어계의 3개 부 시스템으로 분할된 B-T 시스템은 동작점에 따라 각각 5개의 다중모델로 표현한다.

$$\bar{S}_i : \bar{z}_i = \bar{A}_k^i \bar{z}_i + \sum_{j=1}^3 \bar{A}_{kj}^i \bar{z}_j + \bar{B}_k^i \Delta u_i, \quad (20)$$

$$i=1,2,3, j=1,2,3, k=1,2,\dots,5$$

여기서, A_k^i, B_k^i 는 각 부 시스템에 대해 K번째 다중모델로 구

성된 플랜트 모델행렬을 나타낸다.

식 (12)~(19)와 (11)로부터 각 부 시스템에 대해 다중모델을 구성하면 다음과 같다.

- 연소제어 부 시스템에 대한 다중모델

$$\bar{z}_1 = \bar{a}_k^1 \bar{z}_1 + \bar{a}_k^{12} \bar{z}_2 + \bar{A}_k^{13} \bar{z}_3 + \Delta u_1, \quad k=1,2,\dots,5 \quad (21)$$

$$\Delta y_1 = \sum_{j=1}^3 \bar{c}_{1j} \bar{z}_j \quad (22)$$

- 출력제어 부시스템에 대한 다중모델

$$\bar{z}_2 = \bar{a}_k^2 \bar{z}_2 + \bar{a}_k^{21} \bar{z}_1 + \bar{A}_k^{23} \bar{z}_3 + \Delta u_2, \quad k=1,2,\dots,5 \quad (23)$$

$$\Delta y_2 = \sum_{j=1}^3 \bar{c}_{2j} \bar{z}_j \quad (24)$$

- 드림수위제어 부시스템에 대한 다중모델

$$\bar{z}_3 = \bar{A}_k^{33} \bar{z}_3 + \bar{A}_k^{31} \bar{z}_1 + \bar{A}_k^{32} \bar{z}_2 + \Delta u_3, \quad k=1,2,\dots,5 \quad (25)$$

$$\Delta y_3 = \sum_{j=1}^3 \bar{c}_{3j} \bar{z}_j \quad (26)$$

여기서, $\bar{A}_k = \begin{bmatrix} \bar{a}_k^1 & \bar{a}_k^{12} & \bar{A}_k^{13} \\ \bar{a}_k^2 & \bar{a}_k^{21} & \bar{A}_k^{23} \\ \bar{A}_k^{31} & \bar{A}_k^{32} & \bar{A}_k^{33} \end{bmatrix} \quad k=1,2,\dots,5$

위와같이 B-T시스템이 3개 부 시스템으로 분할되었을 때 분산 다단계 제어기법은 각 부시스템의 국부안정화를 위한 국부 제어칙(local control law)와 부 시스템간 상호영향을 감소시키기 위한 범제어칙(global control law)의 조합으로 구성한다. 즉,

$$\Delta u_i = \Delta u_i^l + \Delta u_i^g, \quad i=1,2,3. \quad (27)$$

여기서 Δu_i^l 은 i번째 부시스템의 국부 제어칙이고, Δu_i^g 는 범 제어입력이다.

분산화된 3개의 부 시스템에 대해 MMAC를 적용하기 위하여 5개로 분할된 모델의 국부제어기는 LQR(Linear Quadratic Regulator)로 설계하였다. i 번째 부 시스템의 k 번째 모델에 대한 LQ 레귤레이터를 설계 시 가격함수(Cost function)는 다음과 같다.

$$J_k^i = \int_0^\infty (\bar{z}_k^i T Q_k^i \bar{z}_k^i + R_k^i (\Delta u_k^i)^2) dt \quad (28)$$

$i=1,2,3, \quad j=1,2,3, \quad k=1,2,\dots,5$

여기서 각 부 시스템의 국부 제어칙에 대한 가중행렬 Q_k^i, R_k^i 은 선형화된 모델의 값을 사용하여 각 동작조건에 대해 계산하였다. Q_k^i 는 대칭(symmetric), 반한정(positive semi-definite)행렬이며, R_k^i 는 상수이다.

DM-MMAC에 의해 보일러-터빈시스템에 가해지는 최종제어 입력은 다음과 같이 연소제어, 출력제어, 드림수위제어의 각 부 시스템을 다중모델로 구성하여 그에 대응하는 국부 및 범 제어 입력에 표준화된 확률가중치를 곱한 평균으로 주어진다.

$$u_i = u_i^o + \Delta u_i = u_i^o + \Delta u_i^l + \Delta u_i^g, \quad i=1,2,3 \quad (29)$$

$$\Delta u_i^g(t) = \sum_{k=1}^5 (-H_k^i \bar{z}_k^i(t)) \cdot W_k^i(t) \quad (30)$$

$$\Delta u_i^g = - \sum_{k=1}^5 \left(\sum_{j=1}^3 H_k^{ij} \bar{z}_k^j(t) \right) \cdot W_k^i(t) \quad (31)$$

여기서 u_i^o 는 u_i 의 한 동작점에서의 공칭치이다.

식(28)~(30)의 실제 계산은 등가변환 $\bar{z} = Tz$ 와 $z = Mx$ 를 이용하여 역변환함으로써 Δu_i 는 식(2)에 표현된 원래의 상태변수로 구해진다. 즉,

$$\bar{z} = TMx \quad (32)$$

다중 분산화된 시스템에 대한 제어기 행크를 구성하는 국부 제어이득은 다음과 같다.

$$H_k^i = (R_k^i)^{-1} \cdot (\bar{B}_k^i)^T \cdot P_k^i \quad (33)$$

$i=1,2,3, \quad k=1,2,\dots,5$

여기서, P_k^i 는 리카티 방정식의 해이다.

$$\dot{P}_k^i + P_k^i \bar{A}_k^i + (\bar{A}_k^i)^T P_k^i - P_k^i \bar{B}_k^i (R_k^i)^{-1} (\bar{B}_k^i)^T P_k^i + Q_k^i = 0 \quad (34)$$

범 제어이득은 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$H_k^j = ((\bar{B}_k^i)^T \bar{B}_k^j)^{-1} (\bar{B}_k^i)^T \bar{A}_k^j \quad (35)$$

$i=1,2,3, \quad j=1,2,3, \quad k=1,2,\dots,5$

위 식은 부 시스템들간의 상호작용의 영향이 최소화하기 위한 Sevastyanov-Kotelyanskii조건[3]을 만족하도록 선택된 것으로 $(\bar{B}_k^i)^T \bar{B}_k^j$ 는 \bar{B}_k^i 의 일반화된 Moore-Penrose 역이다.

위와 같은 결과에 의한 전체 상태 피드백 분산 제어기행크의 이득행렬은 아래 식과 같이 국부 제어이득과 범제어이득으로 구성되며, 표 2에 이득치를 나타내었다.

$$H = \begin{bmatrix} H_k^1 + H_k^{11} & H_k^{12} & H_k^{13} & H_k^{13} \\ H_k^{21} & H_k^2 + H_k^{22} & H_k^{23} & H_k^{23} \\ H_k^{31} & H_k^3 & H_k^3 + H_k^{33} & H_k^3 + H_k^{33} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$k=1,2,\dots,5.$

표 2 보일러-터빈시스템의 각 동작점에서의 분산제어 이득행렬
Table 2 Decentralized control gain matrixes of each operating points in B-T system

$H_{55\%}$	3.2161e+7 -5.5119e+4 -1.2685e+7 1.3015e+8 -5.9742e+1 2.8142e+1 3.3092e+1 -2.4063e+2 3.0769e+5 -5.1468e+2 -1.2140e+5 -1.9222e+5
$H_{75\%}$	5.7025e+7 -4.3823e+4 -2.1163e+7 1.2001e+8 -3.4911e+0 2.5965e+0 3.2398e+0 -2.9632e+2 3.4263e+5 -4.1827e+2 -1.2718e+5 -2.2056e+5
$H_{95\%}$	3.6299e+7 -3.7853e+4 -1.2911e+7 1.3429e+8 -2.7433e+0 2.5758e+0 3.2011e+0 -3.3507e+2 3.6295e+5 -3.6873e+2 -1.2883e+5 -2.4923e+5
$H_{100\%}$	3.7239e+7 -3.5246e+4 -1.2936e+7 1.3022e+8 -2.2142e+0 2.3421e+0 3.1261e+0 -3.3219e+2 3.5452e+5 -3.4737e+2 -1.2634e+5 -2.5810e+5
$H_{110\%}$	3.7357e+7 -3.4415e+4 -1.2979e+7 1.2677e+8 -1.5222e+1 8.4963e+0 9.9537e+0 -3.3544e+2 3.4919e+5 -3.2971e+2 -1.2008e+5 -2.7050e+5

MMAC 방식에서 실제 플랜트의 동작조건을 인식하기 위한 각 부 시스템의 다중모델 가중치는 다음과 같이 Bayesian rule을 이용한 사후확률(*posteriori probability*)의 확률식으로 부터 구할 수 있다.

$$W_k(t+1) = \frac{\exp\{-r_k^i(t+1)^2 / 2(V^i)^2\}}{\sum_{j=1}^N \exp\{-r_k^j(t+1)^2 / 2(V^j)^2\}} W_k(t) \quad (37)$$

$$r_k^i(t) := y(t) - \bar{y}_k^i(t) \quad i=1,2,3, k=1,2,\dots,5. \quad (38)$$

여기서 잔차 $r_k^i(t)$ 는 보일러-터빈 플랜트의 출력과 부 시스템 k 의 i 번째 다중모델간의 응답특성의 차에 의해 발생된다. 이차는 실제 플랜트가 다중화된 모델 중 어느 하나에 얼마나 가까있는가에 대한 정보를 제공하게 하며, 식(22)에 의해 가장 근접한 모델에 가중치를 크게 부가함으로써 모델을 식별하고 제어가 적용하게 된다. V^i 는 모델 식별 수렴률을 결정하는 상수 파라미터이다.

그림 2는 부 시스템 #1에 대한 DM-MMAC제어기의 구성을 나타내며 그림 3은 3개의 부 시스템을 갖는 전체 보일러-터빈 시스템에 대한 DM - MMAC방식의 구조를 나타낸다.

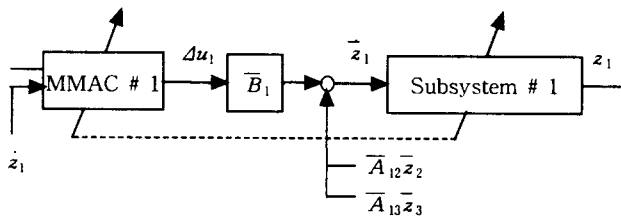


그림 2 부 시스템 #1에 대한 DM-MMAC의 구조
Fig. 2 The structure of DM-MMAC for subsystem #1

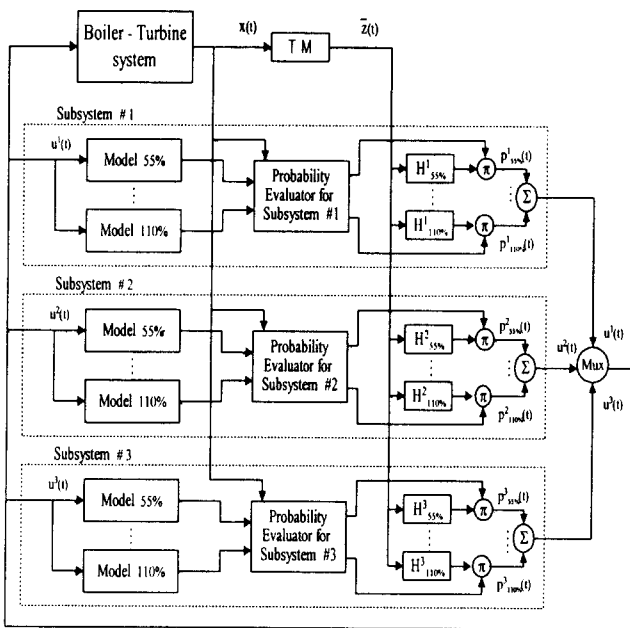


그림 3 DM-MMAC 제어기의 구조
Fig. 3 The structure of DM-MMAC controller

4. 시뮬레이션

설계된 DM-MMAC 제어기의 성능을 확인하기 위하여 실제의 동작상황을 고려한 램프함수 형태의 전력요구에 대한 추종성과 부 시스템에서의 다중모델 식별에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 극한 상황에 대한 응답을 가정한 계단함수형 전력요구 상황을 통해 제안된 DM-MMAC와 95% 출력 기준모델에서 설계된 DMC와의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션에 사용한 B-T 모델은 보령 T/P 1호기의 비선형 모델식[부록]을 이용하였다.

다중모델의 분할은 시스템 특성을 고려하여 50%, 75%, 95%, 110%의 선형화 모델을 설정하였다. 모델 식별 가중치의 수렴률을 결정하는 V 의 값은 0.1로 설정하였다.

그림 4는 B-T시스템의 출력이 20초에서 110초에까지 110% 운전중 50%부하로 램프 전력요구시의 응답특성을 보여준다. 또한 그림 4의 (d)에서 출력 부 시스템의 동작변화에 대한 확률식별 과정에서 보는 바와 같이, 전력요구에 대해 각 모델이 적절히 적용함을 보였다.

그림 5는 B-T시스템의 전기적 출력이 초기 30초 경과 후에 110% 운전에서 50%로 계단과 전력요구가 왔을 때 DM-MMAC와 DMC의 각 출력 응답특성을 나타낸다. 동특성 변화에 따른 주 증기 압력 밸브의 위치와 드럼내의 물의 부피 변화에 대한 출력뿐만 아니라 전기적 출력에서도 DM-MMAC가 DMC에 비해 속응특성을 가지며 추종성능 또한 우수함을 보였다.

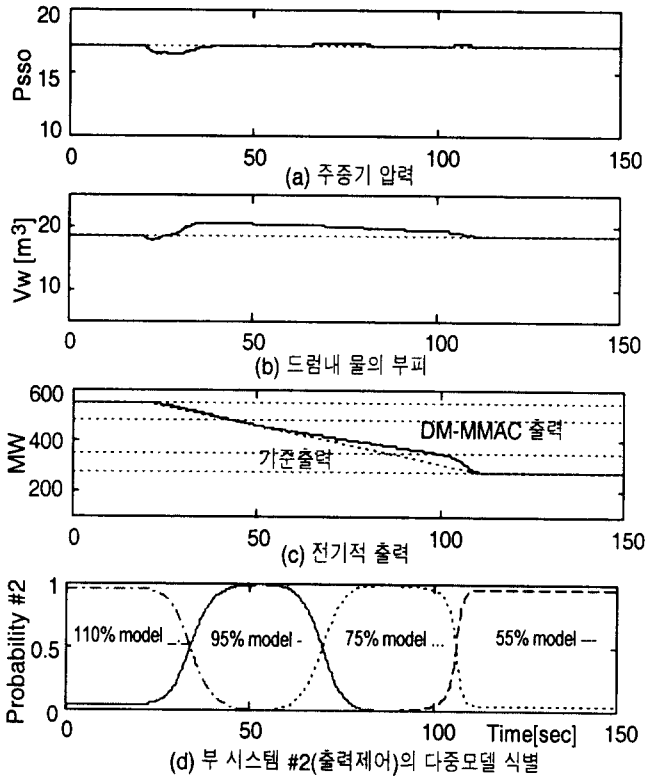


그림 4 램프형 전력요구에 대한 응답
Fig. 4 The response for ramp power requirement from 110% to 55%

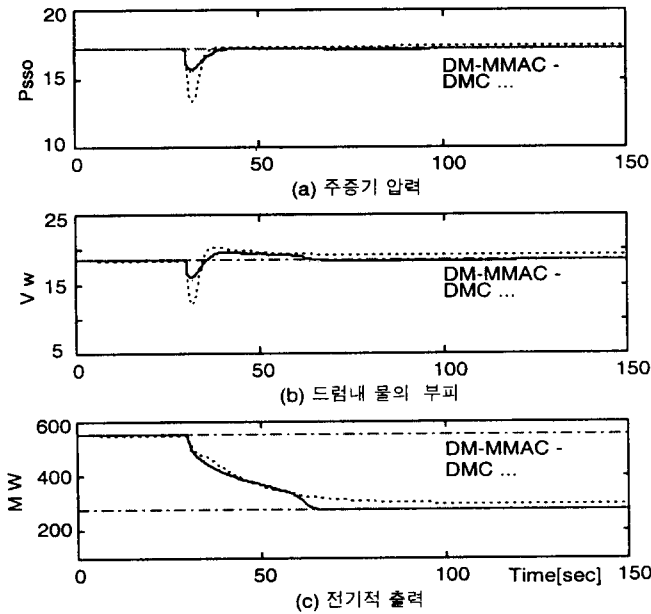


그림 5 계단파 전력요구 대한 DM-MMAC와 DMC의 응답
 Fig. 5 The responses of DM-MMAC and DMC for ramp power requirement from 110% to 55%

5. 결 론

본 논문에서는 선형화 분산모델에 대해 분산 다 단계 제어기의 설계기법을 제시하였다. 최근에 개발된 보령T/P의 보일러-터빈 모델을 기준으로 하여, 과열 증기계의 온도제어루프를 별도의 제어루프로 분리하고 간략화 시킨 보일러-터빈계의 선형화 모델로부터 (1)연소제어 (2)출력제어 (3)드럼수위제어의 3개 부시스템으로 분할하였다. 여기서, 각 부시스템은 한 개씩의 독립적인 입력을 갖도록 분산화되며 수학적 선형변환기법을 적용하였다. 그런데 DMC에 의한 B-T 시스템의 제어는 요구출력의 변동폭이 클 경우, 만족할 만한 제어성능 추종능력을 보장하기가 어렵다. 이러한 문제점은 기존의 PID 제어에서도 마찬가지로 나타나게 된다. 이는 B-T시스템의 동특성이 비선형 다변수계인 데서 기인하며, 한 동작점에서 선형화 시킨 모델에 근거하여 제어를 설계하는 비 적용 방식에서는 피할 수 없는 문제이기도 하다. 본 논문에서는 실시간 모델 파라미터 추정을 요구하지 않지만 동특성 변화를 다수의 모델군으로 표현하고 확률적 가중치를 구하여 적용시키는 구조를 갖는 다중모델적용제어기법을 DMC와 결합시킨 방식을 제안하고 이 방식을 DM-MMAC라 부른다. 부록의 보령 T/P #1호기 비선형모델에 적용한 시물레이션을 통해 제안한 DM-MMAC와 DMC간의 응답특성을 비교하고 제시한 방법이 50% - 110%의 부하변동에도 좋은 추종능력을 가짐을 보였다. 전체시스템의 안정도 해석은 대상 플랜트가 매우 복잡한 비선형시스템이어서, 설계한 DM-MMAC의 안정도는 여러 가지 동작조건에 대한 시물레이션을 통해 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의해 기초전력공학 공동 연구소 주관으로 수행되었음(관리번호 : 94-지-2)

참 고 문 헌

1. N. R. Sandell, P. Varaiya, M. Athans, M. Safonov, "Survey of Decentralized Control Methods for Large Scale Systems," *IEEE Trans. Auto. Contr.*, Vol. 23, pp 108-128, 1978.
2. 한전기술연구원, "보일러 계수추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발(I)," KRC-901-J03, 연구보고서, 1993.
3. D.D. Siljak, *Large Scale Dynamic Systems: Stability and Structure*, North Holland, 1978.
4. D.D. Siljak, *Decentralized Control of Complex System*, Academic Press, 1991.
5. K. Watanabe, *Adaptive Estimation and Control : Partitioning Approach*, Prentice-Hall, 1991.
6. P. S. Mayback, "Moving Bank Multiple Model Adaptive Estimation and Control Algorithm; An Evaluation," *Control & Dynamics*, Vol. 31, pp. 1-31, 1989.
7. K. J. Hunt, T. A. Johansen, " Design and analysis of gain-scheduled control using local controller networks," *Int. J. Control*, Vol. 66, pp 619-651, 1997.
8. 기초전력공학 공동연구소, 발전플랜트를 위한 컴퓨터 분산제어 알고리즘의 개발, 3차년도 최종보고서, 1997. 8.

부 록

본 논문에서 DM-MMAC 제어방식의 개발을 위해 이용된 대상 모델은 참고문헌[2]에 제시된 모델이다. 이 모델은 보령화력 1호기의 실제 사양과 운전 데이터로부터 얻어진 비선형모델로서, 넓은 동작범위에 걸쳐 실제 플랜트와 잘 일치한다. 다음은 과열기 부분이 간략화된 드럼형 B-T 모델의 상대방정식이다.

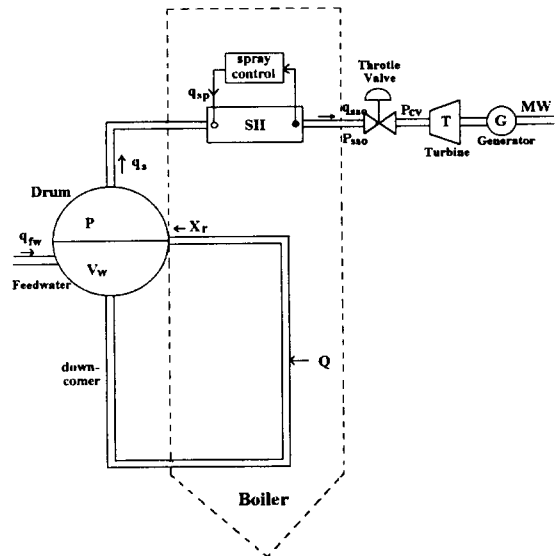


그림 A.1 드럼형 보일러-터빈 계동도

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{V}_w \\ \dot{X}_r \\ \dot{q}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

$$b_1 = h_c \rho_s q_{fw} + (\rho_w - \rho_s)(Q - (h_w - h_{fw})q_{fw}) - h_c \rho_w q_s$$

$$b_2 = q_{fw} - X_r q_r, b_3 = Q - (h_w - h_s)q_{fw} - h_c X_r q_r$$

$$b_4 = q_{sso} - q_s$$

$$a_{11} = V_{wt}(\rho_w^2 - \rho_w \rho_s) \frac{\partial h_w}{\partial P_{dr}} + V_{st}(h_c \rho_w \frac{\partial \rho_w}{\partial P_{dr}})$$

$$a_{21} = V_r a_m \frac{\partial \rho_w}{\partial P_{dr}} - V_r (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial P_{dr}}$$

$$a_{22} = \rho_w, a_{23} = -V_r (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial a_m}{\partial X_r}$$

$$a_{31} = V_r h_c (a_m \frac{\partial \rho_s}{\partial P_{dr}} + \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial P_{dr}}) + V_{wt} \rho_w \frac{\partial h_s}{\partial P_{dr}}$$

$$a_{33} = V_r h_c \rho_s \frac{\partial a_m}{\partial X_r}, a_{44} = \tau$$

$$a_m = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \times (1 - \frac{\rho_s}{(\rho_w - \rho_s) X_r} \ln(1 + \frac{(\rho_w - \rho_s) X_r}{\rho_s}))$$

출력관계식은 다음과 같다.

$$P_{sso} = P_{dr} - f \frac{q_s^n}{\rho_s} \quad (A.2)$$

$$q_{sso} = K_1 P_{cv} \sqrt{P_{sso}} + K_2 \sqrt{P_{sso}} \quad (A.3)$$

$$MW = a_1 P_{sso} q_{sso} + a_2 P_{sso} + a_3 q_{sso} + a_4 \quad (A.4)$$

여기서, P : 드럼의 증기압력 [MPa], V_w : 드럼내의 물의 부피 [m^3], X_r : 상승관내의 증기질 q_s : steam flow rate [kg/sec], Q : 열량 [KJ/sec], q_{fw} : 급수유량 [kg/sec], P_{cv} : 주증기의 제어밸브(throttle valve)위치 [%], P_{sso} : 주증기 압력, MW : 출력 [MW].

표 A.1 5개 동작점에서의 변수의 값[2]

동작점[%] 변수	50	75	95	100	110
P_{dr} [MPa]	17.1	17.5	17.75	18.1	18.12
V_w [m^3]	18.5	18.5	18.5	18.5	18.5
X_r	0.1872	0.2209	0.2435	0.2476	0.2518
q_s [Kg/sec]	195.00	303.14	393.00	410.95	430.00
Q [KJ/sec]	246022	378085	486492	503169	526156
P_{cv} [%]	1.3691	32.6481	58.3759	62.4702	67.9354
q_{fw} [Kg/sec]	195.0	303.14	393.00	410.95	430.00

저 자 소 개



최 선 옥 (崔善旭)

1969년 5월 19일생. 1993년 대전산업대 전자공학과 졸업. 1996년 충북대학교 전자공학과 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 박사과정.

Tel : (0431) 261-2475

E-mail : swchoi@cbcon.chungbuk.ac.kr



이 은 호 (李恩鎬)

1972년 1월 3일생. 1996년 충북대학교 전자공학과 졸업. 1998년 충북대학교 전자공학과 졸업(석사). 1998년~현재 빅텍(주) 연구원

Tel : (0343) 467-2091

E-mail : ehlee@cbcon.chungbuk.ac.kr



박 용 식 (朴溶植)

1958년 5월 30일생. 1981년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 8월 동 대학원 졸업(공학). 1988년~현재 명지대학교 전기 정보제어공학부 부교수.

Tel : (0335) 330-6472

E-mail : yspark@wh.myongji.ac.kr



김 영 철 (金永喆)

1954년 12월 29일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1992년~1993년 미국 Texas A&M Univ. Post-Doctoral Fellow. 1988년~현재 충북대 공대 전기전자공학부

교수. 1996년~1998년 당학회 편집위원

Tel : (0431) 261-2475

E-mail : yckim@cbucc.chungbuk.ac.kr