

직교배열표를 이용한 다목적 퍼지제어 알고리즘 개발 및 응용 Development of Fuzzy Control Algorithm for Multi-Objective Problem using Orthogonal Array and its Applications

김추호 · 박성호 · 이종원 · 변증남*

Kim, Choo-Ho, Park, SungHo, Lee, Chong-Won and Bien, Zeungnam*

한국과학기술원 기계공학과
* 한국과학기술원 전자전산학과

ABSTRACT

In this paper, a control algorithm suitable for multi-objective control problems is proposed based on the orthogonal array which is normally used in statistics and industrial engineering. And a newly defined Nth-certainty factor is suggested, which can effectively exclude the less confident rules. The Nth-certainty factor is defined by the F-values of the ANOVA(analysis of variance) table. It is shown that the algorithm can be successfully adopted to the design of controller for an active magnetic bearing system.

1. 서 론

퍼지 논리 제어기(FLC)는 퍼지 if-then 규칙들을 기반으로 하고 있으며, 이들 퍼지 제어 규칙을 구축하는 대표적인 방법으로는 첫째, 인터뷰 등을 통한 휴먼 컨트롤러의 직접적인 퍼지 모델링이고, 둘째는 제어 대상의 입출력 데이터 관찰을 통한 시스템의 정성적 특성분석에 의한 것, 셋째는 자기구성 제어기(Self-Organizing Controller)가 있다.

퍼지 제어 규칙을 구축하는데 있어 다수의 의사 결정자가 관여되거나 생성되는 룰이 다목적(multiple objective)을 동시에 만족하도록 할 경우는 제어 규칙들 간에는 결일관성(Inconsistency)이 존재하기 마련이다. 이러한 결일관성이 존재하는 퍼지 제어 규칙을 그대로 사용하면 바이어스 제어 출력(biased control output)을 초래하거나 전체 제어 성능을 저하시킬 수 있다. 즉, 제어 규칙들을 구축하는 것 만큼, 모든 제어 목적을 만족할 수 있도록 제어 규칙들을 정제하는 것이 필요하다[2].

이러한 한계를 극복하기 위해 그 동안 몇몇 퍼지 논리 제어기(FLC) 설계 기법들이 제시되어 왔다. 그러나 이들 대부분은 단일 목적함수에 적합하거나 체계적이지 못하고 복잡하여 다목적 제어문제에 범용으로 적용하기에는 부적합하였다[2]. 또한 이런 단점을 보완하기 위해 결일관성 측정 및 다목적 제어문제에의 응용 방법을 제시하기도 하였는데[2], 이는 크게 3 단계 과정 즉, 각 제어 규칙들의 그룹화(집단화), 그룹과 목적 함수 간의 결함(matching), 그리고 모든 제어

목적의 향상시키기 위한 조정(adjustment)단계로 구성 되어 있다. 그러나 이 또한 마지막 조정 단계에서는 주관적인 확신도(certainty factor) 조율에 따라 각 목적 함수의 성능을 변동시켜 적정선에서 타협하는, 일련의 시행착오 기법에 의존하고 있다.

본 연구에서는 다목적 제어 문제를 다루는 방법으로 직교배열표(orthogonal array)를 이용한 실험 통계적인 방법을 제안하였다. 이를 이용하면 별도의 감도 해석(sensitivity analysis) 없이 분산분석(analysis of variance)을 통해 각 제어 규칙들의 목적 함수들에 대한 기여도를 정량적으로 도출할 수 있다. 아울러 분산 분석을 통해 얻은 F값을 응용한 N차 확신도(Nth-certainty factor)를 이용하면 목적 함수에 기여도가 낮은 퍼지 규칙들을 룰 베이스(rule base)에서 효율적으로 배제시킬 수 있다.

2. 본 론

2.1 알고리즘 개발

다음과 같이 N개의 퍼지 규칙과 M(<N)개의 목적함수들을 가진 제어 문제를 고려해 보자.

$$R_i: \text{If } x \text{ is } X_i, \text{ then } u \text{ is } U_i, \quad i = 1, 2, \dots, N$$
$$Q_k = q_k(x(\cdot), u(\cdot)), \quad k = 1, 2, \dots, M$$

이는 목적함수를 최대화(최소화)하는 문제로 귀착될 수 있다. 제어 입력 U를 변경하면 목적함수 Q_k값이 변할 것이고, 이 때 모든 제어 입력에 대한 목적 함수 각각의 변화량을 체계적으로 도출할 수만 있다면

각각의 제어규칙 R_k 가 목적함수 Q_k 에 얼마나 기여하는지를 정량적으로 분석할 수 있을 것이다. 그런데, 문제는 그 조합의 수가 너무 많아 획기적인 방법이 요구되어야 한다는 것이다.

일례로 25개의 제어규칙($N=25$)이 구축되었다고 가정하자. 그리고 각각의 규칙에 대해 제어 입력 U 를 1번씩 바꾸어 본다면(2 수준) 그 조합의 수는 $2^{25} = 33,554,432$ 가 된다. 1가지 경우에 대해 실험을 하는데 5분이 소요된다고 가정하면 이는 약 319년이라는 시간이 필요하다. 그러나 표준 직교배열표 $L_{32}(2^{31})$ 를 사용하면 단, 32번의 조합(약 3시간)으로 통계적으로 대등한 실험 결과를 얻을 수 있다.

직교배열표를 통한 다목적 퍼지제어 알고리즘은 다음과 같이 6단계로 순서화 할 수 있다.

- 1) 구축된 퍼지 규칙의 제어 입력 U_i 수준 결정, 및 직교배열표 선정
- 2) 제어 규칙 R_i 를 직교배열표에 할당.
- 3) 각 실험 조건에서의 목적 함수 Q_k 계산
- 4) 실험데이터의 분산 분석 및 제어규칙 R_i 의 목적 함수 Q_k 에 대한 기여도 분석
- 5) 각 제어 규칙 R_i 에 대한 N 차 확신도 계산
- 6) 최적수준 및 N 차 확신도하에서의 확인실험

여기서 i 번째 제어규칙 R_i 에 대한 N 차 확신도 $\epsilon_{n,i}$ 는 분산 분석 결과 얻어진 F_i 값(실험오차에 대한 i 번째 제어 규칙의 상대적인 기여도)으로부터 다음과 같이 정의하였다.

$$\epsilon_{n,i} = \max\{\max[1 - (1/F_{ik}^n)], 0\}, n = 1, 2, \dots, 6$$

여기서 F_k 는 k 번째 목적 함수에 대한 i 번째 F 값이다. N 차 확신도를 그래프로 나타내면 Fig. 1과 같다. 이 그래프를 살펴보면 차수가 증가함에 따라 F 값에

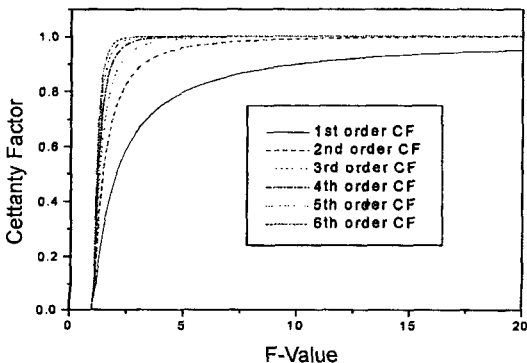


Fig. 1. Nth certainty factor w.r.t. F-value

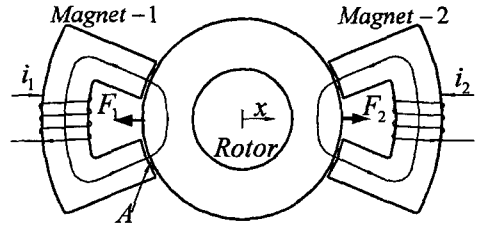


Fig. 2. A simplified model of a double-acting magnetic bearing system

따른 가중치 증가율이 달라짐을 알 수 있다. 즉, 이를 이용하면 분석된 F 값의 분포에 따라 차수를 조정하여 각각의 목적함수에 기여도가 작은 제어규칙을 배제시킬 수 있다. 보통 F 값의 분포가 5이상 많을 경우 차수 $n=1$ 또는 2, 그 분포가 1~5사이에 주로 있을 경우도 5차 또는 6차이면 충분할 것으로 판단된다.

2.2 능동자기베어링 (AMB) 시스템에의 적용

2.2.1 능동자기베어링 시스템의 비선형 모델링

Fig. 2는 단순화된 능동 자기 베어링 시스템(AMB)을 나타내고 있다. 실제 사용되는 시스템은 대개 5자유도이지만, 1자유도 모형에 대한 검증으로 5자유도 시스템으로 확장 가능하므로 간단한 1자유도 모형을 선택하였다. 이때 회전체(rotor)의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} = F_2 - F_1 \tag{1}$$

여기서 m , x 는 각각 회전체(rotor)의 질량과 변위이며, 전자석-1,2에 작용하는 전자기력 F_1 , F_2 는 자기에너지(magnetic co-energy)를 변위에 대해 미분함으로써 얻을 수 있으며 그 결과는 식 (2)와 같다.

여기서 음의 부호는 흡인력을 표시하며, μ_0 는 공기에서의 투자율, A 는 극면적, N 은 권수, $\cos\theta$ 는 형상계수, i_n 는 권선에 흐르는 전류이고 k 는 등가 강성계수이다.

$$F(i, x) = \frac{\mu_0 AN^2 \cos\theta}{4} \left(\frac{i}{x}\right)^2 = -k \left(\frac{i}{x}\right)^2 \tag{2}$$

이제 식 (2)를 이용하여 공칭공극(nominal air-gap)을 g_0 로 표시하면 식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$m\ddot{x} = -k \left(\frac{i_1}{g_0 + x}\right) + k \left(\frac{i_2}{g_0 - x}\right)^2 \tag{3}$$

여기서 i_1 , i_2 는 각각 전자석 권선-1, 2에 흐르는 전류를 의미한다. 또한 시뮬레이션에 사용된 시스템 매개

Table 1. Parameters of the simulation model

Parameters	Values
Rotor mass, m	1.13 kg
Number of turns, N	200
Pole face area, A	1600 mm ²
Nominal air-gap, g_0	1.0 mm
Shape factor	0.924
Time constant of amplifier	9.27×10^{-4}
Operating range	± 0.7 mm

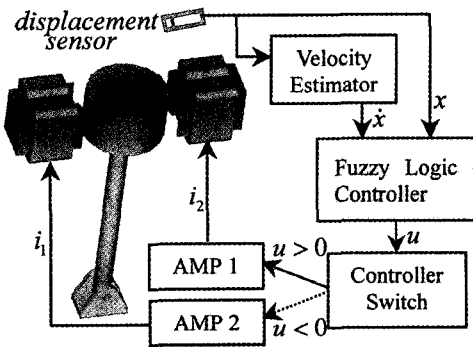


Fig. 3. Schematic diagram of AMB with fuzzy controller

변수들은 Table 1에 나타내었다. 코일에 전류를 공급하는 전력증폭기는 전류 귀환을 통해 응답 속도를 향상시킬 수 있으며, 약 200 Hz에서 절점주파수를 갖는 1차 시스템으로 모형화하였다. 이에 대한 전체적인 제어 흐름도는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

2.2.2 퍼지제어기 설계

이제 비선형 1자유도로 모형화한 능동 자기 베어링 시스템을 초기 조건, $x(0) = -0.7$ 상태에서 기준점($x = 0$)으로 제어하는 문제로 기술하였고, 이와 관련된 목적 함수는 다음과 같이 4가지를 설정하였다.

$$Q_1 = \max \left[\frac{x_{steady}}{t_{steady}} \right] \quad (4)$$

$$Q_2 = \min \left[\frac{\sup\{x\} - x_{steady}}{x_{steady}} \right] \times 100\% \quad (5)$$

$$Q_3 = \min \left[\frac{x_{ref} - x_{steady}}{x_{ref}} \right] \times 100\% \quad (6)$$

$$Q_4 = \min \left[\int_0^{t'} |u| dt \right] \quad (7)$$

여기서 x_{ref} 는 기준점 0을, x_{steady} 는 평형상태변위, t_{steady}

Table 2. Fuzzy control rule base

CE \ E	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB(U_1)	PB	PB	PS	ZO(U_5)
NS	PB(U_6)	PB	PS	ZO	NS(U_{10})
ZO	PB(U_{10})	PS	ZO	NS	NB(U_{15})
PS	PS(U_{16})	ZO	NS	NB	NB(U_{20})
PB	ZO(U_{20})	NS	NB	NB	NB(U_{25})

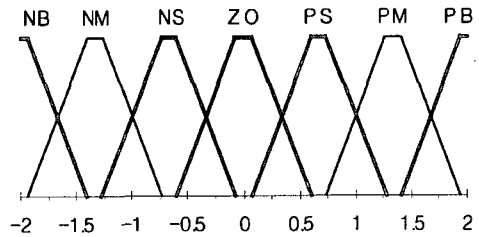


Fig. 4. Membership shape of output variables, U

는 평형상태가 시작되는 점의 시간을, $|u|$ 는 제어입력 즉, 전류의 크기를 나타낸다. 그리고 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 는 각각 초기 기울기, 최대 오버슈트, 정상 오차 및 전류 소비량을 나타낸다.

또한 제어 규칙은 입력 변수로 오차(E)와 오차 변화율(CE)을, 출력변수로는 U 를 사용하여 PD-like 퍼지 룰을 구축하였다(Table 2). 여기서 오차와 오차 변화율은 각각 5개의 퍼지 집합(NB, NS, ZO, PS, PB)으로 구성하고 출력변수의 퍼지집합은 다음의 Fig. 4와 같이 정의하였다.

이제 알고리즘을 적용하기 위해 다음과 같은 과정을 수행하였다.

Step-1) 제어 입력 U 의 수준을 2수준, 직교배열표는 $L_{32}(2^{31})$ 을 택하였다.

수준 1은 Table 2에 나타난 바와 동일하고 수준 2의 경우 PB, PS 는 PM 로, ZO 는 PS 로, NB, NS 는 NM 로 설정하였다. 이때 각각의 퍼지 함수는 등 간격으로 배분하는 것이 중요하다고 판단된다.

Step-2) 각 제어 규칙 R 는 직교배열표 상의 1열부터 25열까지 배치하고 나머지는 오차열로 할당하였다.

Step-3) 각각의 목적함수 Q 에 대해서 모든 실험조건마다 목적 함수 값을 계산하면 다음의 Table 3과 같다.

Step-4) Table 3에 나타난 실험 결과에 대해 분산 분석을 용이하게 하기 위해 제공값에 상용로그를 취한 후 목적함수를 최대화하는 문제로 전환하였다.

$$\text{Max } \eta_{ij} = -10 \log(\gamma_{ij}^2), \quad i = 1, \dots, 4 \quad (8)$$

Table 3. Rules assignment and performance values

No	R ₁	...	R ₂₅	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
1	1	...	1	26.21	7.09	0.01	0.026
2	1	...	2	20.91	6.90	-0.09	0.032
3	1	...	2	25.76	9.68	13.87	0.025
4	1	...	1	20.47	5.13	7.61	0.045
5	1	...	1	34.07	14.99	13.86	0.028
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	2	...	1	22.80	1.47	0.03	0.021
31	2	...	1	16.55	11.51	7.81	0.207
32	2	...	2	33.72	25.10	13.77	0.042

Table 4. F-values and Nth-certainty factor

	F _{i1}	F _{i2}	F _{i3}	F _{i4}	ε _{6,i}
R ₁	7.71	3.19	0.13	2.612	1.00
R ₂	0.00	0.30	0.14	0.109	0.00
R ₃	1.35	1.00	0.18	0.251	0.83
R ₄	0.06	0.01	0.15	0.061	0.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
R ₂₂	45.94	0.51	0.18	0.103	1.00
R ₂₃	0.09	0.19	4.16	0.005	1.00
R ₂₄	0.05	0.00	0.13	0.003	0.00
R ₂₅	0.00	0.01	0.13	0.002	0.00

Table 5. Modified fuzzy control rule base

E	NB	NS	ZO	PS	PB
PB	PB(U ₁)	.	PB	.	ZO(U ₅)
PS	.	.	PM(U ₈)	.	.
ZO		PM(U ₁₂)	ZO		.
PS	PS(U ₁₆)	ZO	NS	NB(U ₁₉)	.
PB		NM(U ₂₂)	NB	.	.

<주> 음영 부분은 변경된 제어규칙을 의미함

여기서 y_{ij} 는 Q_i 에 대한 j 번째 실험값이며, Q_1 에 대해서는 $y_{ij} = 1/y_{ij}$ 로 대신한다. η_{ij} 값을 이용해 분산분석을 하고, F -값을 구하면 Table 4와 같다.

또한 각 목적 함수 Q_i 에 대한 제어 규칙의 수준별 기여도를 살펴보기 위해 대표적으로 Q_2, Q_3 에 대한 수준그래프(level graph)를 그려보면 Fig. 5와 같다.

위의 수준그래프에서 각 제어규칙에 해당하는 선도의 폭이 크면 클수록 F -값이 크고 그 목적함수에도 기여도가 크다는 것을 의미하며, 선도의 기울기가 양이면 수준-2, 음이면 수준-1이 목적함수값을 최대화한다는 의미이다. 일례로 제어규칙 R_{12} 의 경우 Q_2, Q_4 에 대한 기여도가 매우 크고, 수준-2가 최적 수준이므로 초기의 제어입력 값 PS (수준-1)를 PM (수준-2)로 변경하는 것이 바람직함을 의미한다.

Step-5) 또 각각의 목적 함수에 대해 계산된 F -값에 대해, 차수(n)가 6인 N 차 확신도를 계산하면 Table 4에 나타난 바와 같다.

Step-6) 이제 계산된 수준별 기여도와 N 차 확신도를 베이스에 반영하여 제어 규칙을 재구성하면 다음의 Table 5와 같다.

여기서 알 수 있듯이 본 알고리즘에 의해 재구성된 베이스는 각 목적함수별로 기여도가 낮은 제어 규칙이 배제되는 것 뿐만 아니라 수준별 기여도 정보를

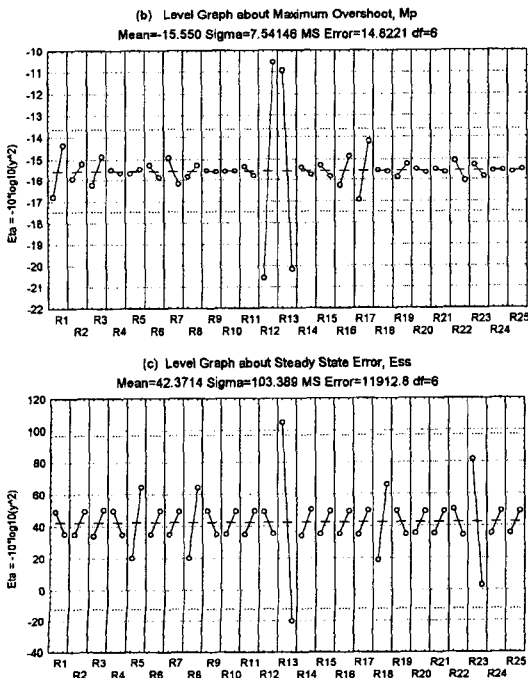


Fig. 5. Level graphs about objective Q_2 and Q_3

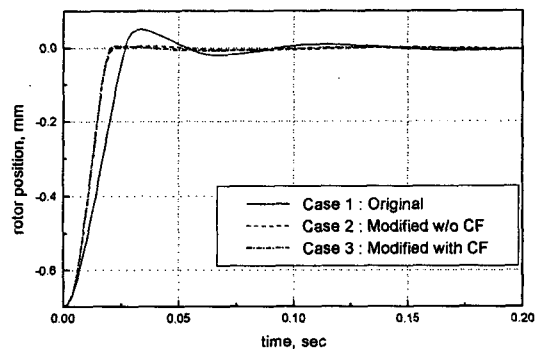


Fig. 6. Comparison of the performance between original and modification

Table 6. Comparison of the objective function values

	Max Q_1	Min Q_2 (%)	Min Q_3 (%)	Min Q_4
Original	26.21	7.09	0.01	0.03
Modified w/o CF	30.96	0.77	0.04	0.02
Modified with CF	34.46	0.73	0.06	0.02

활용하여 제어규칙 자체를 변경할 수 있다는 것이다.

이들 최종 결과를 반영하여 그 시뮬레이션 결과를 초기상태와 함께 비교하면 Fig. 6과 같다. 또한 본 알고리즘에 의한 퍼지논리제어기(FLC)의 성능을 알아보기 쉽게 목적 함수별로 성능을 정량화하여 나타내면 Table 6과 같다.

위의 Table 6에 요약된 결과를 살펴보면 알 수 있듯이 새롭게 정의된 N 차 확산도와 분산분석 정보를 통해 획득된 12개의 제어규칙만으로도 25개의 제어규칙을 모두 사용한 경우보다 성능이 훨씬 우수한 제어를 구현할 수 있다. 결국, 정상오차는 모두가 우수하며, 제어 입력의 크기 즉, 전류 소비량은 줄이면서도 초기 기울기와 최대 오버슈트에 많은 개선을 할 수 있었다.

3. 결 론

이상으로 목적 함수가 여러 개인 경우, 직교배열표를 이용한 다목적 퍼지 제어기 설계알고리즘을 제안하였고, 각각의 목적 함수에 대해 기여도가 낮은 제어규칙을 룰 베이스에서 효율적으로 배제할 수 있도록 분산분석표의 F 값을 이용해 N 차 확산도를 제시하였다. 그리고 이를 비선형 능동 자기 베어링(AMB) 시스템의 퍼지 논리 제어를 구현하는데 적용하여 그

효율성과 유효성을 입증했다.

본 알고리즘은 기존의 다목적 제어 문제를 다루는 기법들보다 계산이 쉽고 빠르며, 목적함수에 대한 제어 규칙의 기여도를 정량적으로 가시화시켜줌으로써 설계자가 용이하게 접근할 수 있도록 체계적인 접근법을 제시하고 있다.

참고문헌

- [1] Madhav S. Phadke, *Quality Engineering using Robust Design*, Prentice Hall, 1989.
- [2] Taeseung Lim, Kyu-Hwan Chang, Wonseok Yu, Zeunam Bien, "Measurement of Inconsistency and its Application to Multi-Objective Control", *Fuzzy Systems, 1997., Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Vol. 2, 1997, pp. 743-747.*
- [3] J. Y. Hung, "Magnetic bearing control using fuzzy logic", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 31, No. 6, Nov., 1995, pp. 1492-1497.
- [4] A. Charara, J. De Miras, and B. Caron, "Nonlinear control of a magnetic levitation system without premagnetization", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 4, No. 5, Sep. 1996, pp. 513-523.
- [5] Y. Ariga, K. Nonami, and K. Sakai, "Nonlinear control of zero power magnetic bearing using Lyapunov's direct method", in *Proc. 2nd Japan-Korea Symp. of Frontiers in Vibration Science and Technology*, TMU, Hachioji, Japan, Sep. 1999, pp. 94-95.
- [6] M. S. de Queiroz, D. M. Dawson, and A. Suri, "Nonlinear control of a large-gap 2-DOF magnetic bearing system based on a coupled force model", *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 145, No. 3, May 1998, pp. 269-276.
- [7] Z. Bien, *Intelligent control lecture notes, 18th class, 2nd term*, 1999.
- [8] 변중남, 퍼지논리제어, 홍릉과학출판사, 1999.



김 추 호 (Choo-Ho Kim)
 1991년 : 고려대 기계공학과 졸업.
 1993년 : 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사)
 1993년~1998년 : 대우중공업(주) 근무
 1999년~현재 : 한국과학기술원 박사과정, 대우중공업
 관심분야 : 지능제어, 진동 제어 및 품질기법



박 성 호 (Sung-Ho Park)
 1995년 : 서울대 기계공학과 졸업
 1998년 : 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사)
 1999년~현재 : 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
 관심분야 : 퍼지 제어, 전자기 베어링 시스템, 전력전자



이 종 원 (Chong-Won Lee)
 1970년 : 서울대 기계공학과 졸업
 1972년 : 서울대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)
 1975년 : Yale Univ. 졸업(응용역학 석사)
 1980년 : Univ. of California, Berkeley 기계공학과 졸업(박사)
 관심분야 : 진동제어 및 회전체 역학



변 종 남 (Zeung-Nam Bieung)
 1969년 : 서울대 전자공학과 졸업
 1972년 : 미국 Electrical Engineering, The Univ. of Iowa(석사)
 1975년 : 미국 Mathematics, The Univ. of Iowa(석사)
 1975년 : 미국 Electrical Engineering, The Univ. of Iowa(박사)

관심분야 : Fault-tolerant Control에 중점을 둔 제어이론, 시스템 제어, 지능제어 방법론 중 특히 퍼지논리 지능제어, 로보틱스와 산업자동화