

미생물연료전지가 전력생산에 영향을 미치는 요인들에 대한 상호관계 분석

(Analysis of Influence Factors of Interaction on the Electric Power of Microbial Fuel Cell)

이승근* · 김일주 · 이규화 · 유규선 · 송영채

(Song-Keun Lee · Il-Ju Kim · Kyu-Hwa Lee · Kyu-Seon Yoo · Young-Chae Song)

요 약

미생물 연료전지(MFC: Microbial Fuel Cell)는 미생물을 사용하여 유기물의 산화에서 전기를 일으키는 장치이다. 현재 MFC는 많은 곳에서 연구되고 있으며 신재생 에너지로도 많은 관심을 받고 있다. 기존의 연구에서는 전력생산에 영향을 미치는 각각의 요인에 관련된 연구가 많이 진행되었으나, 요인들의 상호관계에 관한 연구는 많지 않았다. 본 논문에서는 기존의 MFC를 개선하기 위해 전력의 생산을 좌우하는 요인을 조사하였으며, 요인들의 상호관계를 효율적으로 증명하기 위해 새로운 반응조를 제작하였다. 실험을 통해 얻어진 데이터를 기초로 MFC에서 전력생산에 영향을 미치는 요인들을 분석하였으며 이를 바탕으로 하폐수처리 시스템에 MFC를 적용하여 하폐수처리 및 전력을 생산한다는 새로운 개념의 에너지생산 하폐수처리 시스템을 제안하였다.

Abstract

Microbial fuel cell (MFC) is a device to produce a electricity from the oxidation of organic materials using microorganism. Recently many researchers have been studying MFC which is focused as regeneration energy source. Previews studies have focused every each factor that influence the production of electric power. However they didn't study a lot about the correlation among the factors. In order to improve the MFC, we analysed the factors which influencing the generation of electric power of MFC. Also, we made a new compartment to verify the correlations among the factors efficiently. Based on the result obtained from the experiments in the laboratory, we analysed the factors and we suggested a new concept of waste water treatment system to produce electrical energy during the treatment of waste water.

Key Words : MFC, Microbial Fuel Cell, Waste Water Treatment System, Electric Power, Compartment

* 주저자 : 전주대학교 전기전자정보통신공학부
부교수

Tel : 063-220-2723, Fax : 063-220-2056

E-mail : songklee@gmail.com

접수일자 : 2009년 9월 10일

1차심사 : 2009년 9월 15일, 2차심사 : 2009년 10월 30일

심사완료 : 2009년 11월 10일

1. 서 론

우리나라는 세계 10대 에너지 소비국으로서 석유 소비에 있어서 세계 6위를 기록하고 있으며 세계에

미생물연료전지가 전력생산에 영향을 미치는 요인들에 대한 상호관계 분석

서 4번째로 많은 양의 석유를 수입하고 있는 대표적인 에너지 과소비 국가로서, 석유의존도 50.6[%], 중동 의존율이 77[%]에 달하고 있다. 이에 따라 청정 에너지나 신재생에너지에 대한 연구와 개발이 요구되고 있다[1].

현재 미생물 연료전지가 지속적인 전력을 사용할 수 있는 최대 전력 계산 연구 및 PEM과 전극 크기의 영향을 분석하여 전력량을 구한 연구도 진행되었다. 하지만 실험 세트의 구조상 전극의 위치에 대한 영향을 고려할 수 없었다.

본 논문에서는 종래에 연구했던 미생물 연료전지(MFC)의 연구 성과를 개선하고자 새로운 방식의 반응조를 제작하여 전력생산에 대해 검토하였으며 하폐수 처리시스템에 적용하였을 경우에 대해 전력생산량을 예측해 보았다.

제안된 하폐수 처리시스템은 일반적으로 하폐수 처리에 필요한 많은 양의 에너지를 미생물 연료전지를 적용하여 고가의 처분비용이 필요한 과잉슬러지의 생산을 감소시키고 전력을 생산할 수 있다.

2. 미생물 연료전지(MFC)

미생물 연료전지(Microbial Fuel Cell)는 녹색식물의 광합성에 의해 생산된 유기물을 미생물을 이용하여 전기에너지로 전환하는 장치이다. 유기물로부터 미생물을 이용한 전력생산은 1962년 Davis와 Yarbrough에 의해 최초로 연구된 이래 실용적인 미생물 연료전지가 보고된 것은 Allen과 Benneto(1993)에 의해서라고 할 수 있다.

일반적인 미생물 연료전지의 기본원리는 그림 1과 같다. 양성자 교환막(PEM: Proton Exchange Membrane)에 의해 전자 수용체와 유기물이 공간적으로 분리된 상태의 혐기성조건에서 미생물은 유기물을 산화시키고 이때 발생한 전자는 전기화학적으로 활성을 가진 미생물에 의해 음극으로 전달된다.

이 과정에서 음극 반응조에서는 양성자가 생성되어 전하수지가 유지된다. 이들 양성자는 양성자 교환막을 통하여 양극반응조로 이동하며, 양극에서 양성자는 음극으로부터 회로를 통하여 이동한 전자와 산소가 결합하여 물을 생산한다. 음극에서 발생된

전하량과 음극과 양극의 전위차에 의하여 전기에너지를 생산한다[2-3].

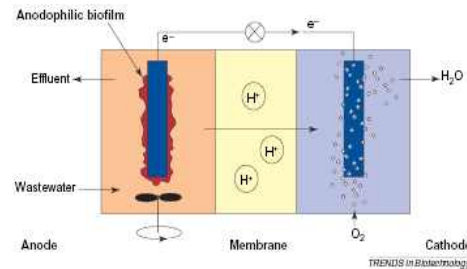


그림 1. 미생물 연료전지
Fig. 1. Microbial fuel cell

3. 기존의 MFC 연구 및 문제점

지금까지의 MFC 연구는 MFC에서 전력을 생산하는데 장애를 가져오는 각각의 요인들을 알아내고자 하는 것이 지금까지의 연구 방향이었다.

그림 2는 기존의 연구에서 사용한 미생물 연료전지의 반응조로서 항온조 내에 설치된 모습이다.



그림 2. 기존의 반응조를 이용한 실험
Fig. 2. Experiments using existing compartment

Joseph Menicucci의 논문 Procedure for Determining Maximum Sustainable Power Generated by Microbial Fuel Cell에서는 지속적인 전력을 사용할 수 있는 최대 전력을 계산을 위하여 짧은 시간 동안 외부 저항을 변화시키면서 데이터를 측정하여 Anode의 변화에 대하여 외부저항에 의하여 제한을 받는 영역과 내부저항 혹은 전자의 움직임에 의하여

제한을 받는 영역이 존재한다는 것을 증명하였다. 이는 내부의 조건이 변하면 전력이 변한다는 것이다 [4]. 또한 Sang-Eun Oh의 논문 Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells 에서는 PEM과 전극 크기의 영향을 분석하였고 Cathode를 고정하고 Anode의 변화에 대한 전력량을 구하였다. 하지만 이 논문에서는 실험 세트의 구조상 전극의 위치를 바꿀 수 없어 전극의 위치에 대한 영향을 고려할 수 없었다[5].

기준에 사용하던 반응조는 직경 3.3[cm], 길이 5 [cm]의 PVC 관을 1[ℓ] 용량의 플라스틱 용기(유효 용량 900[ml])의 벽면에 부착한 2개의 플라스틱 실험 용기를 반응조로 사용하였다. 각각의 반응조에는 전극으로 사용하기 위하여 겉보기 표면적이 154[cm²]인 흑연펠트판을 각각 설치하였으며, 각 용기에 설치된 흑연펠트는 피복된 구리선과 외부저항(5[kΩ]±5%) 이 연결된 전선으로 직렬 연결하여 회로를 구성하였다. 회로에 설치된 외부저항에 흐르는 전위와 전류를 실시간으로 측정하기 위하여 Digital Multimeter 를 설치하였다. Digital Multimeter (키슬리사의 2700 Series Multimeter)는 전압 100[nV]-1[kV] 및 전류 1[μA]-3[A]를 측정할 수 있으며 200개의 차동 입력채널을 구성할 수 있다[1,6].

미생물 연료전지의 가장 큰 문제점은 낮은 전기 생산이다. 이를 해결하기 위해서는 다양한 조건에서의 실험이 필요하다.

4. 새로운 반응조를 이용한 실험

미생물 연료전지에서 전력 생산에 영향을 미치는 요인들의 알아보기 위하여 새로운 반응조를 제작하였다. 여러 상황에서 반응조의 전력 생산 데이터를 비교하였으며, 실험 결과에 따른 향후 제작될 하폐수처리 시스템의 전력량을 예측하였다.

4.1 새로운 반응조

기존의 실험에서 사용되었던 반응조는 원통형의 구조로 전극의 위치나 PEM의 크기 변경이 용이치

않았다.

본 연구에서는 여러 상황의 조건에서 실험할 수 있도록 새로운 반응조를 제작하였다.

그림 3은 새로 제작된 반응조의 사진이다. 부피는 26×13×13[cm]로 제작하였으며 양성자 교환막(PEM)의 설치를 위한 홀의 크기는 각각 2, 3, 4, 6[cm]로 제작하였다. PEM의 고정 및 누수를 방지하기 위해 고무패킹 및 플라스틱 볼트, 너트를 사용하였다.



그림 3. 새로운 반응조
Fig. 3. New compartment

4.2 실험 및 결과

PEM의 크기, 전극의 간격, 전극의 크기가 전력생산에 어떠한 영향이 미치는지 알아보는 실험을 하기 위하여 새로 제작한 반응조에 표 1과 같이 실험 요인 변화값을 적용하였다.

표 1. MFC의 요인값
Table 1. The factors of MFC

요 인	변화값
PEM 크기	2, 3, 4, 6 [cm]
Anode 전극면적	86.5, 105, 136 [cm ²]
Cathode 전극면적	86.5, 105, 136 [cm ²]
Cathode Substrate	400, 600 [mg/ℓ]
전극간격	5, 10, 15 [cm]

그림 4는 새로운 반응조를 이용하여 항온조 내에서 실험하고 있는 사진이다.

미생물연료전지가 전력생산에 영향을 미치는 요인들에 대한 상호관계 분석

실제 반응물의 부피는 900[ml]로 양극 반응조와 음극 반응조는 양성자 교환막(PEM)으로 연결하였고, Soft graphite felt를 전극으로 사용하였다. Anode측의 Biomass는 2000[mg/l] substrate는 1000[mg/l]로 Cathode측의 biomass는 1000[mg/l]로 고정하였고 stirrer의 속도는 200[rpm]으로 하였다. MFC의 각 실험은 매 3분마다 발생하는 전압을 측정하여 컴퓨터에 저장하였다.

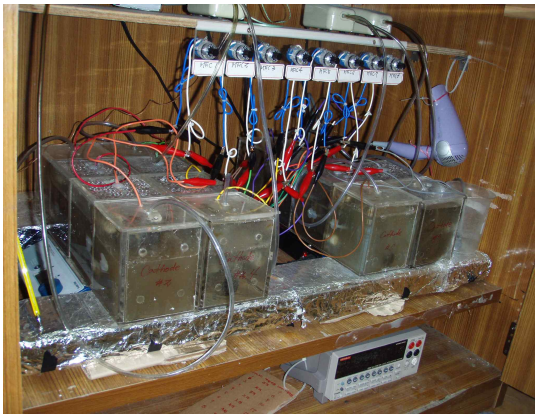


그림 4. 새로운 반응조를 이용한 실험
Fig. 4. Experiments using new compartment

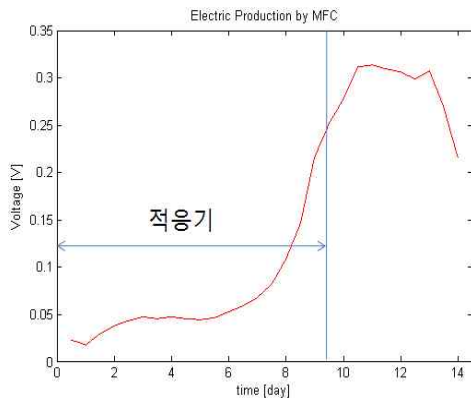


그림 5. MFC실험의 출력전압
Fig. 5. Output voltage of MFC experiments

그림 5는 한 실험에서 얻은 측정 전압의 결과 값을 나타낸 것이다. 각 실험의 전압은 미생물이 환경 적응기를 고려하여 적응기가 끝나는 시점부터 발생하는 전압을 미생물 연료전지의 발생전압으로 보았다.

본 논문에서는 31번의 실험을 수행하여 얻은 전압들을 그래프를 이용하여 분석하였고 실험에서 얻은 전압값 들을 요인별로 분류하여 요인에 의한 전압평균의 영향을 분석하였다.

다른 요인들을 무시하였을 경우 그림 6에서 PEM의 크기와 전력발생량은 선형성을 갖는다고 볼 수 있다.

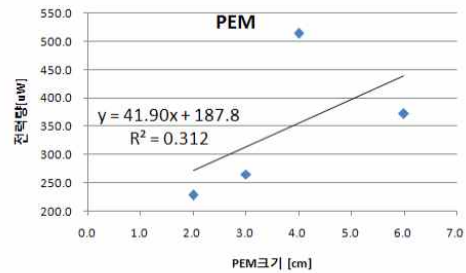


그림 6. PEM 크기 변화에 따른 전력발생량
Fig. 6. Power vs. PEM magnitude transition

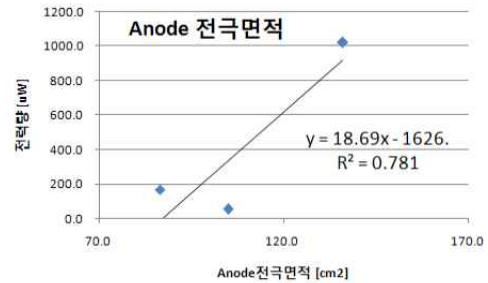


그림 7. 음극 전극면적의 변화에 따른 전력발생량
Fig. 7. Power vs. Anode Electrode Surface

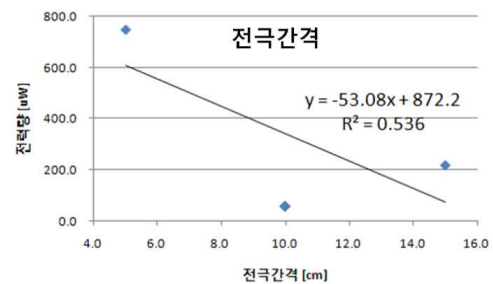


그림 8. 전극간격 변화에 따른 전력발생량
Fig. 8. Power vs. Electrode Gap Spacing

표 2. SPSS를 변량분석
Table 2. Analysis of variance using SPSS

		Correlations						
		PEM	ANODE	Substrate	separation	Resistor	Area	Mean
PEM	Pearson Correlation	1	-.141	-.040	.058	-.038	-.182	-.225
	Sig. (2-tailed)		.448	.831	.755	.840	.326	.223
	N	31	31	31	31	31	31	31
ANODE	Pearson Correlation	-.141	1	.443*	-.849**	.127	.837**	.123
	Sig. (2-tailed)	.448		.013	.000	.497	.000	.510
	N	31	31	31	31	31	31	31
Substrate	Pearson Correlation	-.040	.443*	1	-.440*	.287	.171	.244
	Sig. (2-tailed)	.831	.013		.013	.118	.357	.185
	N	31	31	31	31	31	31	31
separation	Pearson Correlation	.058	-.849**	-.440*	1	-.028	-.576**	.185
	Sig. (2-tailed)	.755	.000	.013		.879	.001	.318
	N	31	31	31	31	31	31	31
Resistor	Pearson Correlation	-.038	.127	.287	-.028	1	.049	.340
	Sig. (2-tailed)	.840	.497	.118	.879		.794	.061
	N	31	31	31	31	31	31	31
Area	Pearson Correlation	-.182	.837**	.171	-.576**	.049	1	.245
	Sig. (2-tailed)	.326	.000	.357	.001	.794		.184
	N	31	31	31	31	31	31	31
Mean	Pearson Correlation	-.225	.123	.244	.185	.340	.245	1
	Sig. (2-tailed)	.223	.510	.185	.318	.061	.184	
	N	31	31	31	31	31	31	31

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

그림 7은 발생하는 전압과 음극의 전극면적의 변화에 따른 전력발생량의 관계를 살펴보았으며 그림 8에서는 발생하는 전력량과 전극간격의 관계를 살펴 보았다.

위의 결과를 살펴보면 미생물 연료전지에서 발생하는 전력량은 PEM의 크기, 전극면적과 Substrate에 비례하고 전극간격에는 반비례한다는 것을 알 수 있다. 하지만 위의 결과로는 각각의 요인이 전력량에 미치는 영향을 알 수 없어서 변량분석과 회귀분석을 통하여 각각의 요인이 전력생산에 차지하는 비율을 살펴보았다.

표 2는 실험에서 얻은 데이터를 SPSS프로그램을 이용하여 변량분석한 결과이다. Anode 전극면적은 Cathode 전극면적과 정적 상관으로 높은 값을 가지고 전극간격과는 부적 상관인 높음을 나타내고 있다. 또한, Substrate는 Anode 전극면적과는 정적 상관인 높고 전극간격과는 부적 상관인 높음을 나타낸다. Cathode의 전극면적은 Anode의 전극면적과 정적상관이 있고 전극간격과는 부적 상관인 높음을 알 수 있다. 위의 경우들에서 보면 전극간격은 모든 다른

변위들과 상관이 높음을 알 수 있다.

표 3은 전압평균과 변위들과의 관계를 회귀분석한 결과이다. 표의 Adjusted R Square를 보면 0.337로 실험에서 사용된 모든 변위들을 가지고 전압평균의 변화를 33.7%로 나타냄을 알 수 있다.

표 3. SPSS를 이용한 회귀분석_1
Table 3. Regression analysis_1 using SPSS

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.685 ^a	.469	.337	.10015

a. Predictors: (Constant), Area, Resistor, PEM, Substrate, separation, ANODE

각각의 효과를 보기위해 가중치가 낮은 것으로 나타난 것을 차례로 빼는 방식을 이용하여 가중치가 높은 것을 찾았다. 그 결과 표 4에서와 같이 전극간격은 전압평균과의 R이 0.725이고 Anode의 전극면적은 전압평균과의 R이 0.583 그리고 Substrate는

미생물연료전지가 전력생산에 영향을 미치는 요인들에 대한 상호관계 분석

전압평균과의 R이 0.464의 상관을 보였다. 이는 전극간격이 낮을수록, Anode의 전극면적이 넓을수록, substrate가 클수록 전압평균이 커진다는 것을 알 수 있다.

표 4. SPSS를 이용한 회귀분석_2
Table 4. Regression analysis_2 using SPSS

Model	Standardized Coefficients	t	Sig
	Beta		
Substrate	0.464	2.754	0.010
전극간격	0.725	3.575	0.001
Cathode 전극면적	0.583	3.155	0.004

4.3 제안하는 하폐수처리 시스템과 전력량 예측

실험 결과 전극간격이 낮을수록, Anode의 전극면적이 넓을수록, substrate가 클수록 전압평균이 커진다는 것을 알 수 있었다. 이런 점을 고려하여 제안하는 하폐수처리 시스템은 그림 9와 같다. 제안하는 하폐수 처리 시스템은 전극간격이 좁고 전극의 면적을 넓게 활용할 수 있다는 장점이 있다.

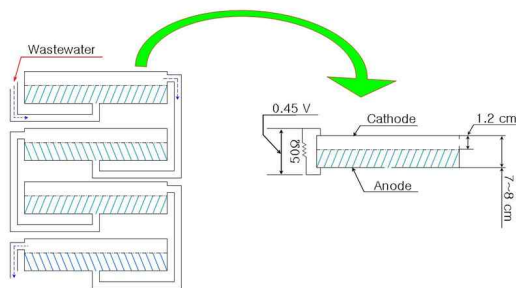


그림 9. 제안하는 하폐수 처리장 시스템
Fig. 9. Wastewater treatment plant system

제안하는 하폐수처리 시스템은 하폐수 처리장의 여건상 전극의 간격을 바꾸는 것은 불가능하므로 전력예측할 때 전극간격을 고려하지 않고 예측하였다. 또한, Cathode와 Anode 전극의 면적은 같은 결과 나왔기 때문에 Anode 전극의 면적만을 고려하였다.

Anode 전극면적의 변화에 따른 전력량의 변화를 실험에서 얻은 측정값으로부터 선형회귀분석을 이용하여 선형화된 식을 구하면 식(1)과 같다.

y 는 전력량[W]을 x 는 Anode의 전극면적[cm²]을 나타낸다.

$$y = 18.69x - 1626 \quad (1)$$

식(1)에 의하면 Anode전극면적 1[m²]당 1[ℓ]의 하폐수에서 발생하는 전력량은 0.185[W]이다[7].

1일 중·소규모의 폐수종말처리장의 처리용량은 1,000~20,000[m³/일]이다. 그러므로 중·소규모의 하폐수 처리장에서 발생시킬 수 있는 전력량은 음극 전극면적 1[m²]당 7.7~154[kwh]의 전기에너지를 생산한다. 새로이 제안한 하폐수 처리장 시스템은 그림 9와 같이 병렬운전을 할 경우 생산하는 에너지는 한 셀에서 발생하는 에너지량을 병렬운전수로 곱한 만큼 늘어나게 된다.

5. 결 론

하폐수, 슬러지, 연안저질 등과 같은 유기오염물을 함유한 폐수/폐기물의 처리하면서 전력생산이 가능한 미생물연료전지는 화학적 조건으로 고려하면 하나의 반응조에서 발생하는 전압은 약0.3[V]이다. 이는 미생물 연료전지 한 셀에서 발생하는 전압의 크기는 0.3[V]로 고려하여야 한다는 것을 의미한다. 미생물 연료전지에서 발생하는 전력량은 키우기 위해서는 반응조의 크기를 키우고 여러 반응조를 병렬로 운전하면 원하는 전압에 원하는 전력량을 구할 수 있을 것이다. 4.3에서 제안하는 하폐수 처리장 시스템은 이론상으로 효율적이고 경제적인 하폐수 처리장이 될 것이다. 미생물연료전지의 개발은 초기단계에서 발생하는 전력량이 미흡하지만 많은 요인들을 고려하면 신재생 에너지로써 또한 하폐수를 처리하는데 드는 비용을 절감시키면서 전력을 발생시키는 친환경적인 에너지원이 될 수 있을 것이다.

References

- [1] 유규선, 송영채, 이송근, 한학영. (2006) 미생물 연료전지의 양극 반응조 내 미생물 농도 변화에 따른 전류 발생 특성. 대한환경공학회 춘계 학술발표회 논문.
- [2] Z.He, S.D.Minteer, L.T.Angenent.(2005) Electricity Generation from Artificial Wastewater Using an Upflow Microbial Fuel Cell. Environ. Sci. Technol. 39. pp. 5262-5267.
- [3] Menicucci, J., BeyenalPro, H., Marsili, E., Veluchamy R.A., Demir, G., Lewandowski, Z., Procedure for Determining Maximum Sustainable Power Generated by Microbial Fuel Cell. Environ. Sci. Technol. 2006, 40, 1062-1068.
- [4] Joseph Menicucci; Haluk BeyenalPro; Enrico Marsili; Raakaraajan Angathevar veluchamy; Goksel Demir; Zbigniew Lewandowski, "Procedure for Determining Maximum Sustainable Power Generated by Microbial Fuel Cell" Environmental science & technology vol. 40, No. 3, 2006, 1062-1068.
- [5] Sang-Eun Oh; Bruce E. Logan, "Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells" Biotechnological products and process engineering, 2005, 162-169.
- [6] Song-keun Lee, Il-ju Kim, Kyu-seon Yoo, Young-dae Song, "Investigating the factor of the compartment to improve the performance of microbial fuel cell" ICEE2008.
- [7] Angenent, L.T., Karim, K., A-Dahhan1, M.H., Wrenn, B.A. and Domiguez-Espinosa, R. (2004) "Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater," Trends in Biotechnology, 22(9), 477-485.

◇ 저자소개 ◇

이송근 (李松根)

1962년 8월 29일생. 1988년 Universidade de SaoPaulo 전기공학 졸업. 1991년 서울대학교 대학원 전기공학 졸업(석사). 1997년 서울대학교 대학원 전기공학 졸업(박사). 1994년 일본 북해도대학연구원. 현재 전주대학교 전기전자통신공학부 부교수.

김일주 (金日柱)

1984년 11월 18일생. 2008년 전주대학교 전기전자정보통신공학부 졸업. 현재 전주대학교 대학원 전기전자공학 석사과정.

이규화 (李圭和)

1983년 12월 13일생. 2008년 전주대학교 전기전자정보통신공학부 졸업. 현재 전주대학교 대학원 전기전자공학 석사과정.

유규선 (兪奎善)

1967년 6월 21일생. 1993년 연세대학교 토목환경과 졸업. 1995년 한국과학기술원 토목환경 환경공학 졸업(석사). 1999년 한국과학기술원 토목환경 환경공학 졸업(박사). 1999년 한국과학기술원 응용과학연구소 연수연구원. 현재 전주대학교 토목환경공학과 부교수.

송영채 (宋永彩)

1966년 10월 23일생. 1989년 고려대학교 토목환경공학과 졸업 1991년 한국과학기술원 토목환경 환경공학 졸업(석사). 1995년 한국과학기술원 토목환경 환경공학 졸업(박사). 현재 한국해양대학교 건설·환경공학부 교수.