

FET 센서 어레이를 이용한 이온 측정 시스템의 신뢰도 개선

최정태*, 이승협**, 김영진*, 이영철*, 조병욱*, 손병기*

Reliability improvement of an ion-measuring system
using FET sensor arrayJung-Tae Choi*, Seung-Hyup Lee**, Young-Jin Kim*, Young-Chul Lee*,
Byung-Woog Cho*, Byung-Ki Sohn*

요 약 문

일반적으로 FET형 전해질 이온 센서는 유리전극에 비하여 여러 가지 장점을 가지고 있으나 드리프트 및 기억효과가 있고 재현성이 부족한 단점을 가지고 있어 이온 측정 시스템에 적용할 경우 전체적인 시스템의 신뢰성 저하를 가져온다. 이러한 점을 개선하기 위하여 본 논문에서는 8개의 동종 FET형 전해질 이온 센서 어레이를 사용하여 높은 신뢰성을 가지며 4종류의 이온(H^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) 농도 측정이 가능한 시스템을 개발하였다. 개발된 측정 시스템은 전자식 스위치를 사용하여 단일의 신호 검출회로로 8개의 센서 신호를 검출하는 방법을 채택하였다. 또한 8개의 센서 신호를 삽입 정렬을 하여 신뢰성이 낮은 센서를 제외시키는 신호 처리 알고리즘을 개발하여 신뢰성을 향상시켰다. 제작된 시스템으로 3종류의 이온(H^+ , Na^+ , K^+) 농도를 측정한 결과 개발된 신호 처리 알고리즘은 여러 개의 센서 신호를 단순히 산술 평균을 취하는 방식에 비하여 오차의 범위를 더욱 줄일수 있는 것으로 나타났으며, 기존의 단채널 방식의 전해질 이온 측정 시스템과 비교해볼 때 우수한 신뢰성을 가짐을 알 수 있었다.

Abstract

In general cases, compared with glass electrode, FET type electrolyte sensors have many advantages. But the drift, memory effect and the poor reproducibility of the FET type electrolyte sensor cause the decrease of the reliability in the measurement system. To improve the reliability, an ion-measuring system using FET type electrolyte sensor array with 8 sensors has been developed. Developed system employed the electronic switches to connect a signal detecting circuit with 8 sensor array and the system can measure ion concentration of 4 different type electrolyte(H^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+}). The signal processing algorithm with insertion sorting method was adopted to enhance the reliability. We measured 3 different ion(H^+ , Na^+ , K^+) to evaluate the performance of developed system. The results show that the designed signal processing algorithm can reduce the error range in comparison with a simple arithmetic mean and the developed system has a good reliability over the previous single channel sensor system.

1. 서 론

* 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electronics & Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

** 경북대학교 센서공학과 (Dept. of Sensor Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

<접수일자 : 1999년 4월 1일>

ISFET(ion selective field effect transistor)는 ISE와 MISFET (metal insulator semiconductor field effect transistor)를 결합한 반도체 소자로서 ISE의 이온 감지 특성과 FET(field effect transistor)의 동작 특성을

함께 가지고 있으며, 반도체 집적 회로 공정기술로 제조되어 대량 생산 및 초소형화가 가능하며 ISE와 비교하여 많은 장점을 가지고 있다.^{11,21}

현재 ISFET 센서를 이용한 전해질 이온 농도 측정 시스템이 점차 상용화되고 있는 추세이나, 아직 국내에서는 ISFET의 우수한 특성과 장점에도 불구하고, 전해질 이온 농도 측정을 위한 ISFET 센서 시스템에 관한 연구 개발이 매우 미흡한 상태이다.^{13,41} 한편 단채널 형태의 ISFET 센서 시스템의 경우 그 신뢰성은 전적으로 센서에 의존하며 센서의 오동작이나 파손 또는 외부 잡음 요인 및 측정 도중의 감도 저하 등은 전체 측정 시스템의 신뢰성 저하에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 측정 시스템의 신뢰성을 높이기 위한 방법으로 다채널 또는 어레이 형태의 센서 시스템이 필수적이다.¹⁵¹

본 연구에서는 동종의 8 채널 ISFET 센서를 사용하여 높은 신뢰성을 가진 전해질 이온 농도 측정 시스템을 개발하였다. 먼저, 개발된 측정 시스템은 pH, pNa, pK 및 pCa-ISFET 센서¹⁰¹를 사용하여 모두 4 종류의 개별적인 전해질 이온 농도의 측정이 가능하며, 전자식 스위치를 사용하여 8 채널의 ISFET 센서와 단일의 센서 신호 검출 회로와의 전기적 연결을 순차적으로 전환하는 방법을 센서 신호 검출부에 도입하였다. 또한, 센서 신호의 노이즈 성분을 제거하기 위해 2차의 능동형 필터를 설계하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 특성을 검증하였다. 그리고, 8 채널의 센서 가운데 신뢰성이 낮은 센서를 평균 이온 농도 계산시 제외시키는 루틴을 가진 소프트웨어를 개발하여 측정 시스템의 전체적인 신뢰성을 향상시켰다. 마지막으로 표준 전해질 용액을 제작하여 개발된 측정 시스템의 성능을 평가하였으며, 그 결과를 기존의 단채널 ISFET형 전해질 이온 농도 측정 시스템과 비교·분석하였다.

II. 하드웨어의 설계

2-1. 하드웨어의 구성

하드웨어의 전체적인 구성도는 그림 1과 같다. 8 채널의 ISFET 센서 신호의 검출을 위하여 MPU(micro processor unit)로 제어되는 8개의 전자식 스위치를 사용하였다. ISFET 센서가 정상적인 동작을 할 경우 신호 검출 회로의 출력 전압은 대부분 -3V~-1V사이의 값을 나타내며, 자동 전압 조정 및 증폭 회로를 통과

면서 A/D 변환기가 읽을 수 있는 전압범위인 0V~5V 사이의 전압으로 조정된다.

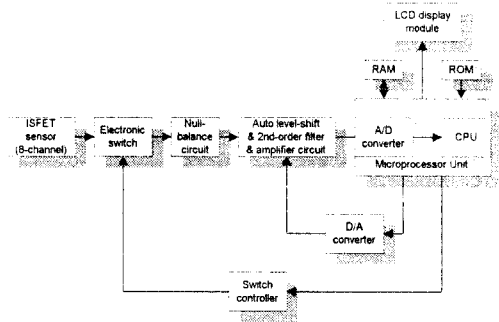


그림 1. 하드웨어 구성도

Fig. 1. Hardware block diagram.

센서의 잡음 및 교류신호 잡음을 제거하기 위해 2차 능동형 필터를 사용하였고, 필터를 거친 신호는 MPU에 내장된 A/D변환기로 들어가게 된다. 센서 신호 처리를 위하여 16-bit MPU (80C196KC)^{17,91}를 사용하였으며, 20×4 line의 LCD(liquid crystal display) 모듈을 사용하여 다양한 정보의 표시가 가능하도록 하였다.

2-2. ISFET 센서의 신호 검출

ISFET 센서 신호 검출시 많이 사용되는 null-balance 회로¹¹⁰¹는 그림 2와 같다. 일반적으로 다채널의 ISFET 센서 신호를 검출하기 위해서는 채널수 와 같은 수의 null-balance 회로가 필요하며, 이것은 측정 시스템의 소형화에 장애가 되며 또한 전력 소비의 증가를 가져오고 시스템의 제조 단가를 높이는 원인이 된다. 본 연구에서는 전자식 스위치를 사용하여 단일의 null-balance 회로로 8 채널의 ISFET 센서 신호를 순차적으로 검출하는 방식을 도입하였으며, 그 형태는 그림 3과 같다.

2-3. 자동 전압 조정 및 필터 회로

저농도 보정 용액 속에서 정상적인 ISFET 센서의 신호는 설계된 null-balance 회로를 통과하면 일반적으로 -3V~-1V사이의 출력 전압값을 갖게된다. 그러나, 이러한 전압값은 A/D변환기의 입력허용 범위인 0V~5V를 벗어난다. 따라서 보정 과정의 초기에 A/D변환기의 입력 전압을 허용 범위에 맞게 조정하는 과정이 필요하며 이를 위하여 그림 4에서와 같이 반전 가산기와 2차 저역통과 필터를 혼용한 형태의 회로를 적용하였다.^{111,131}

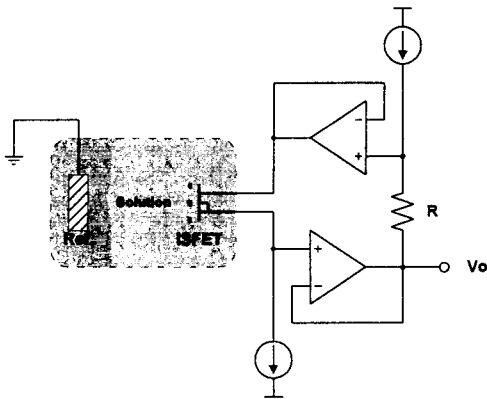


그림 2. ISFET 센서의 신호 검출 회로
Fig. 2. Signal detecting circuit for ISFET sensor.

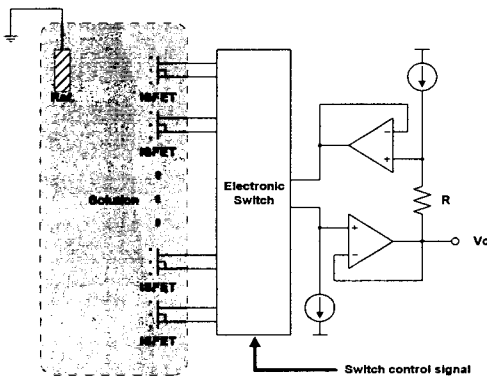


그림 3. 전자식 스위치를 이용한 다채널 ISFET 센서의 신호 검출 회로
Fig. 3. Signal detecting circuit for multi-channel ISFET sensor with a electronic switch.

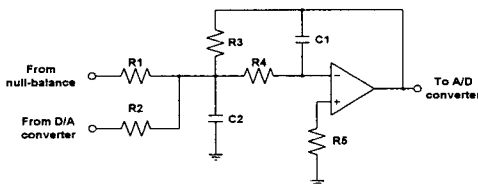


그림 4. 반전 가산기 및 2차 저역통과 필터
Fig. 4. Inverting type adder and 2nd order low pass filter.

ISFET 센서의 신호는 거의 직류 전압에 가깝기 때

문에 2차 저역통과 필터의 차단 주파수는 약 6Hz 정도로 설계하였으며 pCa 측정시에는 전압 이득을 20, 나머지 전해질 이온을 측정할 때에는 10으로 설계하였다. 또한 D/A변환기의 출력을 가산기의 입력으로 사용하여 A/D변환기로 들어가는 전압의 조정이 가능하다. 실제 측정시에는 전자식 스위치를 사용하여 피측정 이온의 종류에 따라 적절한 전압이득을 가진 필터가 선택되도록 하였다.

III. 소프트웨어의 설계

소프트웨어의 전체 흐름도는 그림 5와 같다. 초기에 프로그램이 시작되면 LCD 모듈, 마이크로프로세서 및 주변기기를 초기화한다. 초기화가 끝나면 신호검출 회로의 출력 전압을 A/D변환기가 읽을 수 있는 범위 내로 조정하기 위하여 D/A변환기의 출력값을 변화시키는 자동 직류 전압 조정을 하게된다. 만약 센서의 오동작으로 인하여 D/A변환기의 전압을 최대범위로 변화시켜도 A/D변환기의 입력전압이 프로그램에서 설정한 값으로 조정되지 않을 경우, 몇 번째의 채널에서 오류가 일어났는지 표시를 하고 처음으로 돌아간다.

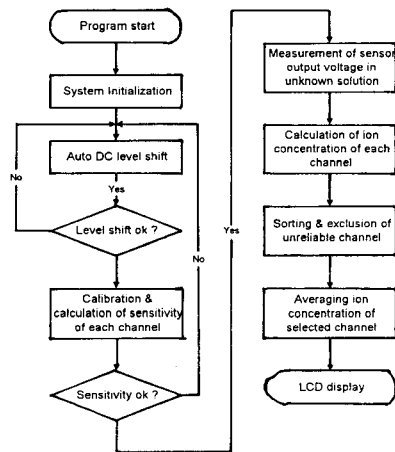


그림 5. 소프트웨어 흐름도
Fig. 5. Software flow-chart.

본 시스템의 보정은 3점 방식을 채택하였으며 저·중·고 농도의 순서로 이루어진다. 보정을 마친 후에는 감도를 검사하게 되며 이론치가 아닌 실제적인 센서의 평균 감도를 고려하여 정상적인 센서를 판단한다. 측정

시에는 각 센서에서의 출력 전압을 읽어 대수적 이온 농도로 환산한다. 신뢰성 향상을 위하여 설계된 소프트웨어 알고리즘은 그림 6과 같다.

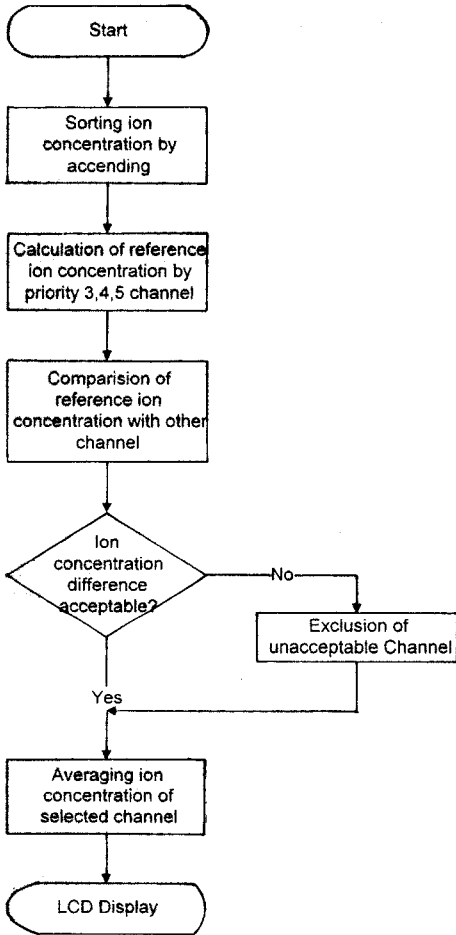


그림 6. 신뢰성 향상 알고리즘

Fig. 6. Algorithm for reliability improvement.

먼저 측정에서 환산된 8개의 농도값을 오름차순으로 정렬한다. 일반적으로 FET형 전해질 센서는 측정도중에 센서의 감도가 떨어지는 경우 센서 신호 검출 회로의 출력 전압이 낮아지며, 이것을 이온 농도로 환산하면 농도가 낮아지는 결과가 생긴다. 또한 센서가 오동작을 하는 경우 A/D변환기의 입력 전압이 허용범위인 0V~5V를 크게 벗어나므로 이온 농도값을 오름차순으로 정렬하면 오동작을 일으킨 센서의 이온 농도값이 정렬된 값중에 첫 번째 또는 마지막에 위치하게 된다. 따라서 측정도중 감도가 낮아진 센서가 나타내는 이온 농도는 정렬후 순위가 마지막 쪽에 가까워질 가능성이

높으며, 오동작을 일으킨 센서가 나타내는 이온 농도는 정렬후 처음 또는 마지막에 위치하게 되므로 중간 순위에서 조금 앞쪽의 순위에 있는 농도값들이 다른 순위의 농도값들 보다 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 이러한 사항을 고려하여 오름차순 정렬된 8개의 농도값 중 순위가 3, 4, 5번째인 이온 농도의 평균값을 기준 농도로 정한다. 기준농도를 나머지 1, 2, 6, 7, 8번째의 값들과 비교하여 정해진 범위 내에 포함되는 값들을 선택하고, 그렇지 않으면 제외시킨다. 마지막으로, 포함되는 채널의 농도값들의 합을 포함되는 채널수로 나누어 최종적인 평균 농도를 구하고 LCD모듈에 표시한다.

IV. 성능평가 및 고찰

제작된 다채널 이온 농도 측정 시스템의 성능 평가를 위하여 pH 및 pNa와 pK 표준용액의 농도를 5회 반복 측정하여 그 결과를 표 1과 표 2에 각각 나타내었다. 표 3과 표4는 각각 pH 및 pNa와 pK 표준용액의 농도를 개발된 신뢰성 향상 알고리즘을 사용하지 않고 산술 평균을 계산하는 알고리즘을 적용하여 측정한 값이다. 그리고 기존의 단채널 전해질 이온 측정 시스템으로 표준용액의 이온농도를 측정하여 표 5와 표 6에 나타내었다.

표 1. pH 표준 용액의 이온 농도 측정 결과
Table 1. The measurement result of the pH standard solution.

Solution # of meas.	Solution									
	pH3	pH4	pH5	pH6	pH7	pH8	pH9	pH10	pH11	
1	3.05	3.99	4.98	6.02	6.94	7.92	9.06	9.96	10.95	
2	3.08	3.99	4.99	6.05	7.07	7.98	9.01	10.08	11.07	
3	3.01	3.98	5.00	6.03	6.93	7.99	9.02	9.93	11.08	
4	3.02	4.09	5.05	6.08	7.08	8.03	9.07	10.04	10.93	
5	3.06	3.98	4.95	5.97	6.95	7.97	9.02	10.03	11.09	
error mean	0.04	0.03	0.03	0.04	0.07	0.03	0.03	0.05	0.07	

위의 표 1, 2를 표3, 4와 비교해보면 모든 이온 농도 측정에 있어서 본 시스템에 적용된 알고리즘이 단순한 산술평균을 취하는 알고리즘보다 오차범위가 좁다는 것을 알 수 있다. 또한 표 5, 6에서 알 수 있듯이 평균 오차가 비교적 큰 기존의 단채널 이온 농도 측정 시스템과 비교해 볼 때 본 측정 시스템이 높은 신뢰성을 가짐을 알 수 있다. 그러나, pH-ISFET의 경우 응답

속도가 수초 이내이며 8 채널의 센서 신호를 모두 검출하는데 약 15초가 걸리는 반면, 기타의 전해질 ISFET 센서는 8 채널의 센서 신호를 검출하는데 수분 이상이 소요되는 문제점은 향후에 개선이 필요할 것으로 보인다.

표 2. pNa 및 pK 표준 용액의 이온농도 측정결과
Table 2. The measurement result of the pNa and pK standard solution.

Solution # of meas.	pNa			pK		
	pNa 1.5	pNa 2.5	pNa 3.5	pK 1.5	pK 2.5	pK 3.5
1	1.50	2.49	3.44	1.49	2.44	3.40
2	1.50	2.48	3.47	1.51	2.52	3.48
3	1.51	2.47	3.43	1.48	2.43	3.51
4	1.52	2.49	3.47	1.53	2.37	3.45
5	1.51	2.51	3.48	1.49	2.41	3.43
error mean	0.01	0.02	0.04	0.02	0.07	0.05

표 3. pH 표준용액의 이온농도 측정결과(산술평균)
Table 3. The measurement result of the pH standard solution.(Arithmetic mean)

Solution # of meas.	pH3	pH4	pH5	pH6	pH7	pH8	pH9	pH10	pH11
	1	2.91	4.08	4.99	5.88	7.09	7.89	8.95	10.10
2	2.92	3.96	5.08	5.92	6.93	7.97	8.92	10.04	10.88
3	2.96	4.01	4.93	5.90	6.93	7.92	8.89	9.92	10.89
4	2.93	3.95	4.97	5.91	7.02	7.99	9.01	10.01	10.92
5	2.90	3.97	4.91	6.04	6.88	8.04	8.94	9.93	10.90

표 4. pNa 및 pK 표준용액의 이온농도 측정결과
Table 4. The measurement result of the pNa and pK standard solution.(Arithmetic mean)

Solution # of meas.	pNa			pK		
	pNa 1.5	pNa 2.5	pNa 3.5	pK 1.5	pK 2.5	pK 3.5
1	1.59	2.69	3.55	1.68	2.58	3.73
2	1.60	2.54	3.40	1.64	2.59	3.60
3	1.57	2.62	3.60	1.71	2.70	3.55
4	1.61	2.68	3.57	1.63	2.62	3.64
5	1.55	2.70	3.58	1.60	2.54	3.56

표 5. 단채널 시스템의 pH 이온 농도 측정 결과
Table 5. The measurement result of the pH solution with single channel system.

Solution # of meas.	pH3	pH4	pH5	pH6	pH7	pH8	pH9	pH10	pH11
	1	3.05	4.00	5.07	6.01	7.01	8.08	9.09	10.09
2	3.05	4.07	5.10	6.08	7.10	8.03	9.05	10.11	11.03
3	3.03	3.99	5.05	6.12	7.11	8.08	9.08	10.07	11.04
4	3.07	4.08	5.08	6.13	7.08	8.03	9.07	10.04	10.98
5	3.05	4.08	5.09	6.03	7.06	8.12	9.08	10.05	10.95
error mean	0.05	0.05	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.03

표 6. 단채널 시스템의 pNa 및 pK 이온농도 측정 결과
Table 6. The measurement result of the pNa and pK solution with single channel system.

Solution # of meas.	pNa			pK		
	pNa 1.5	pNa 2.5	pNa 3.5	pK 1.5	pK 2.5	pK 3.5
1	1.56	2.68	3.57	1.68	2.59	3.56
2	1.61	2.63	3.58	1.75	2.62	3.69
3	1.65	2.60	3.68	1.63	2.59	3.75
4	1.67	2.57	3.71	1.72	2.54	3.79
5	1.64	2.60	3.67	1.61	2.49	3.87
error mean	0.13	0.12	0.14	0.18	0.08	0.23

VI. 결 론

지금까지 개발된 ISFET형 전해질 측정시스템은 그 신뢰성을 전적으로 단채널의 센서에 의존하여 센서의 감도가 낮아지는 경우 측정시 신뢰성이 저하되는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 4 종류의 전해질 이온 농도 측정에 개별적으로 적용이 가능하며 신뢰성을 향상시킨 8 채널 ISFET형 전해질 측정 시스템을 개발하였다. 마이크로프로세서로 제어되는 전자 스위치를 사용하여 8채널의 센서를 순차적으로 구동하면서 신호를 검출하는 방식을 채택함으로써 다채널 센서의 신호 처리시 신호 검출부가 채널의 수만큼 증가하는 단점을 개선하여 시스템의 크기 및 전력소비를 감소시킬 수 있었다. 또한 오동작을 일으키거나 측정도중 감도가 떨어진 채널

을 판단하여 전체 채널의 평균 농도를 계산할 때 제의 시키는 소프트웨어적인 알고리즘을 사용하여 시스템의 신뢰성을 향상 시켰다. 제작된 다채널 전해질 이온 농도 측정 시스템은 기존의 단채널 전해질 이온 농도 측정 시스템에 비하여 모든 종류의 이온 농도 측정 있어서 매우 정확한 측정값을 나타내었다. 그리고 향후 측정하는 센서의 수가 증가하거나 하나의 반도체 칩에 구현된 어레이형의 ISFET가 사용될 경우 개발된 시스템에 쉽게 적용이 가능할 것이다. 또한 여러 가지 이온 농도를 동시에 측정 가능한 다기능 측정 시스템으로 응용하여 의료용 및 산업 분야에 널리 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] 손병기, "감이온 전장효과 트랜지스터," *대한전자공학회지*, vol. 18, no. 5, pp. 22-29, 1981.

[2] P. Vergveld, "Development, operation, and application of the ion-sensitive field-effect transistor as a tool for electro-physiology," *IEEE Trans., BME-19*, pp. 342-351, 1972.

[3] <http://www.orionres.com/>

[4] <http://www.deltatrak.com/>

[5] K. S. Chang, "Improvement of Reliability of an ISFET pH-Meter by Employing Multiple Sensors," *Thesis for the degree of master*, Kyungpook National University, 1996.

[6] 손병기, 이홍락, "FET형 반도체 마이크로센서 개발(I)," *센서기술연구소 연구보고서*, pp. 29-101, 1993.

[7] 정재륜, *ONE CHIP 8096/8097 MICRO-PROCESSOR*, 복두출판사, 1995.

[8] 김대근, 정순배, 김재희, *인텔 80C196KC의 모든 것*, 도서출판 OHM사.

[9] *8X196KC/80C196KD User's Manual*, Intel, 1992.

[10] J. F. Schench, "A transistor method for measuring changes in double layer potentials," *J. Colloid and Interface Science*, vol. 61, pp. 569-576, 1977.

[11] R. Kalvoda and E. Horwood, *OPERATIONAL AMPLIFIERS IN CHEMICAL INSTRUMENTATION*, Halsted Press, 1975.

[12] F. W. Hughes, *Op Amp Handbook*, PRT Prentice Hall, Inc., 1993.

[13] 손병기, 이홍락, "FET형 반도체 마이크로센서 개발(II)," *센서기술연구소 연구보고서*, pp.92-118, 1997.

著 者 紹 介



최 정 태 (崔正胎)
1973년 11월 10일생.
1997년 경북대학교 전자공학과 졸업(학사), 1999년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사), 주관심 분야 : 반도체 센서 응용 및 시스템 설계



이 승 협 (李承協)
1971년 11월 18일생.
1998년 경원대학교 물리학과 졸업(학사), (현) 경북대학교 센서공학과 석사과정, 주관심분야 : 반도체 센서, 반도체 공정 및 압전 재료

김 영 진 (金永鎭)
『센서학회지 제7권 제1호』 논문98-7-1-05, p.31 참조
(현) 경북대학교 전자공학과 박사과정

조 병 옥 (趙炳郁)
『센서학회지 제1권 제1호』 논문92-08, p.101 참조
경북대학교 전자공학과 박사 학위취득

이 영 철 (李永哲)
『센서학회지 제7권 제4호』 논문98-7-4-06, p.278 참조
(현) 경북대학교 전자공학과 박사과정

손 병 기 (孫炳基)
『센서학회지 제1권 제1호』 논문92-08, p.101 참조
(현) 경북대학교 전자·전기 공학부 교수
(현) 센서기술연구소 소장