

논문 2012-49SC-2-4

준설토 탈수에 적합한 PVDF Film Actuator 구동용 파워 드라이버 개발

(Development of Power Driver for PVDF Film Actuator Applied to
Dehydration of Dredged Sediment)

김대선*, 김민규*, 김영욱**, 김정국***

(Daesun Kim, Minkyu Kim, Young Uk Kim, and Jungkuk Kim)

요약

본 연구에서는 준설토 탈수를 촉진시키기 위하여, 크기와 구동 주파수에 따라 임피던스 값이 크게 변화는 PVDF film을 진동시키는 파워 드라이버를 개발하였다. PVDF film actuator를 구동하기 위한 파워 드라이버는 IGBT를 이용하여 Full-Bridge 회로로 구현하였으며, R-L-PVDF film으로 구성된 임피던스 정합 회로를 구현하여 PVDF film에 최대한 많은 전력이 인가될 수 있도록 설계하였다. 개발한 파워 드라이버로 PVDF film actuator를 구동하여 준설토의 탈수 실험을 진행한 결과, 자연 탈수와 비교할 때 탈수 시작 후 30분 동안 약 3배 빠른 탈수 효과를 확인할 수 있었고, 개발한 PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버를 이용하여 진동을 유발하는 준설토 탈수 장치에 적용할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this study, a power driver for actuating PVDF film that has the characteristic of dramatic impedance change caused by size and operating frequency variation was developed to enhance dehydration rate of dredged sediment. In order to supply maximum energy to the PVDF film, a full-bridge circuit implemented using IGBT with a R-L-PVDF film impedance matching circuit was designed and constructed. The dehydration capabilities of the PVDF film actuated by the developed power driver was tested for dredged sediment. It was found that the PVDF film actuated by the developed driver clearly enhanced dehydration, about three times faster during the first 30 minutes, compared to natural dehydration. The result of the experiment confirmed that the developed power driver for actuating PVDF film could be used effectively for dehydration of dredged sediment.

Keywords : PVDF Film, Piezoelectric, dredged sediment, Amplifier, Actuator

I. 서론

현재 4대강 정비사업, 경인 운하 사업, 항만을 포함한 연안개발, 항로, 정박지 조성 및 개량, 매립공사를 위한 토사채취, 해저의 퇴적된 오염물질 제거에 의한 환경유

지 및 개선, 하천 개수 및 수로 조성 등으로 준설공사가 증대되고 있으며, 4대강 마스터플랜의 하천 준설토 처리 계획에 의하면, 가까운 장래에 준설토량은 남산부피의 11.5배 수준인 5.7억[m³]에 다다를 것으로 판단되고 있다.

현재 준설토 처리는 런던 협약(PIANC, 1996)등 국제 조약의 비준으로 해양 투기가 불가능하며 기존 매립지의 용량 부족 및 탈수/건조 등의 중간 처리 비용 문제, 주변 환경오염 문제 등에 따른 준설토의 효과적인 처리 및 재활용이 어려운 실정이다.

따라서 다양한 방법을 이용하여 준설토를 탈수/건조

* 정회원, *** 정회원-교신저자, 명지대학교 전자공학과
(Dept. of Electronic Engineering
Myongji University)

** 정회원, 명지대학교 토목환경공학과
(Dept. of Civil and Environmental Engineering
Myongji University)

접수일자: 수정완료일:

시키는 방법이 제안되어 있으며^[1~2], 특별히 PVDF Film을 진동 Actuator로 사용한 결과의 효용성이 보고되고 있다^[3].

본 연구에서는 준선토 활용가치의 증대 및 효과적인 처리를 위하여 제안된 PVDF film actuator를 효과적으로 구동하기 위한 파워 드라이버를 제안한다.

연구에서 사용한 Polyvinylidene Fluoride (PVDF) film은 $(-CH_2-CF_2-)$ 를 반복 단위로 하는 고분자 재료로, 외부 압력 신호에 대한 넓은 주파수 대역과 빠른 주파수 응답 특성을 가지며, 기존의 수정이나 세라믹 압전 소재에 비해서 유연성이 뛰어나 복잡한 형태의 Actuator나 센서로 제작이 가능하므로 작은 기계를 제어하는 Actuator 제작이나 Piezoelectric actuator의 제어를 돕기 위한 센서로 많이 사용되고 있으며, 일반적으로 PVDF film actuator를 동작시키기 위한 증폭기 또는 파워 드라이버의 기본적인 요구사항이 Piezoelectric actuator와 같다.

Piezoelectric actuator를 동작시키기 위해서는 적게는 수 Voltage(V)에서 많게는 수백 Voltage(V)의 출력 성능을 갖는 전압 증폭기가 요구된다^[4~6]. 기존의 연구된 증폭기들은 증폭기의 효율을 보상하는 에너지 보상 증폭기와^[7~8] 증폭기의 효율을 높이고 압전 소재의 히스테리 현상을 줄일 수 있는 CLASS-B 아날로그 증폭기가 있으며^[9], 고전압과 대 전류를 동시에 압전 소재에 인가할 수 있는 Hybrid 증폭기가 있다^[10].

에너지 보상 증폭기의 경우, 여러 개의 증폭 단을 이용하여 압전 소재에 인가되는 전압을 유지시켜 준다는 장점이 있으나, 압전 소재에서 소비되는 전력만큼만 증폭 단을 통해서 보상하기 때문에 높은 전압을 인가하기가 어려운 단점이 있다. CLASS-B 아날로그 증폭기의 경우, 높은 효율과 히스테리시스 현상을 효과적으로 줄이는 장점이 있으나 증폭 범위가 포화되면 더 이상 증폭할 수 없는 단점을 가진다. Hybrid 증폭기는 높은 전압과 대 전류를 압전 소재에 인가할 수 있기 때문에 vibration actuator로써 사용될 때 큰 효용성을 발휘한다. 그러나 압전 소재의 특성에 따라서 주변 소자들을 적절하게 선정해야하며, 증폭기의 특성보다는 드라이버의 특성을 갖는 것이 특징이다.

Piezoelectric actuator 구동용 파워 드라이버로는 소형이면서도 비교적 가격이 저렴한 MOSFET으로 구성된 Op Amp에 대한 연구가 진행되고 있으나^[11~12], Piezoelectric actuator 증폭기 또는 파워드라이버와는

달리 현재까지 연구된 PVDF film actuator 구동용 증폭기는 빠른 응답 속도와 정밀 제어를 할 수 있는 PVDF film Sensor용 증폭기가 연구되었고^[13], PVDF film을 vibration actuator로 사용하기 위한 증폭기 또는 파워 드라이버는 앞서 언급한 것처럼 별도로 존재하지 않는다. 그 이유는 PVDF film이 vibration actuator로 사용될 때 고려해야 하는 다음과 같은 문제점 때문이다.

첫째로, PVDF film은 크기와 인가되는 구동 주파수에 따라서 임피던스가 크게 변하기 때문에 증폭기의 출력 단에 부하로 사용하게 되면 부하 변동이 심하게 발생되어 출력을 쉽게 예상하기 어렵다.

둘째로, PVDF film은 온도가 70도 이상이 되면 PVDF film가 변형되는 특성이 있기 때문에 PVDF film의 온도 변화에 대처할 수 있는 대비책이 필요하다.

셋째로, PVDF film은 인가되는 전압의 크기가 최대 200[KV/mm]까지 가능하나 PVDF film에 과도한 전압이 인가되거나 전류가 흐르게 되면 PVDF film에 그려진 온도선과 연결 단자가 파손되는 문제점이 있다.

따라서 PVDF film을 vibration actuator로 사용할 때는 이러한 문제점들을 보완할 수 있는 별도의 전압 증폭기를 필요로 하게 된다^[14].

본 논문에서는 PVDF film 특성에 적합한 PVDF film Actuator 구동용 파워 드라이버를 개발하기 위하여 PVDF Film의 특성을 조사하고, 앞서 언급한 문제점들을 보완할 수 있는 PVDF Film Actuator 구동용 파워 드라이버를 개발하였다. 또한, 준선토 탈수 실험을 통하여 개발된 PVDF Film Actuator 구동용 파워 드라이버가 준선토의 탈수 장치로 이용 가능함을 확인하였다.

II. PVDF Film 특성 연구

1. PVDF Film 특성

본 연구에서 사용한 PVDF film은 α 형의 PVDF film을 β 형의 결정 구조로 형 전이한 것으로, 제작 공정은 연신 과정 시 온도를 80-120도 적용하고, 4배 이상의 길이를 잡아당기는 과정을 거쳤으며 7[KV]에서 8[KV] 사이의 분극 과정을 거쳐 결정구조를 안정화함으로써 제작된 소재이다. 그림 1은 사용한 PVDF film의 결정 구조로 여러 분역이 존재하는 특징을 보인다^[15].

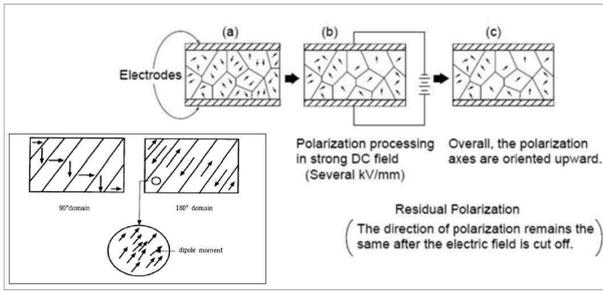


그림 1. 분극 처리된 PVDF Film 결정 구조 배열
Fig. 1. Crystal structure arrangement of PVDF film processed by polarization.

2. PVDF Film 평형 회로 모델

일반적인 Piezoelectric 진동기의 평형 회로는 그림 2(a)에 보인 것처럼 R, L, C 그리고 평행으로 연결된 C₀로 구성된다. 그림 2(b)는 Piezoelectric 진동기의 임피던스(Z) 크기를 R_e와 X_e로 표현한 회로 모델이고, 그림 2(c)는 Piezoelectric 진동기의 어드미턴스 크기(Y)를 G와 B로 표현한 회로 모델이다^[16].

PVDF film actuator를 진동 actuator의 회로 모델로 표현할 때, PVDF film의 일반적인 모델링인 커패시터로 표현하고^[17], PVDF film에 그려진 은도선을 저항성분으로 정의하여 그림 3에 보인바와 같이 R_s와 C_s로 구

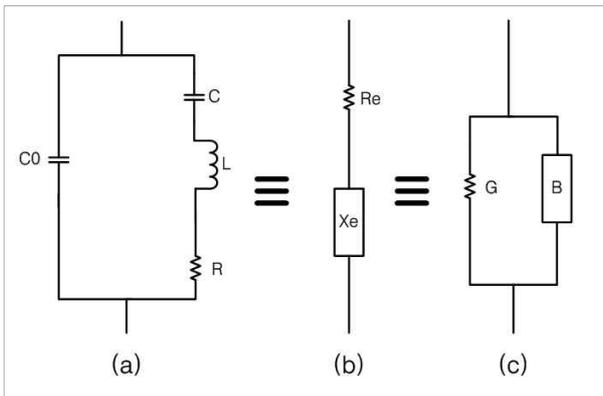


그림 2. Piezoelectric 진동기 회로 모델
Fig. 2. Equivalent electric circuit model of piezoelectric vibrator.

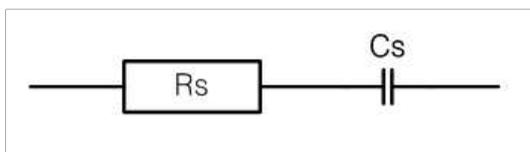


그림 3. PVDF film 평형 회로 모델
Fig. 3. Equivalent electric circuit model of PVDF film.

성된 평형 회로로 모델링하였다. 여기서 R_s는 전압을 인가할 수 있도록 PVDF film 표면에 그려 넣어진 은도선과 PVDF film 내부에서 갖는 저항 성분이고 C_s는 PVDF film의 커패시터 성분이다.

3. PVDF Film 시편 제작 및 특성

평형 회로 모델에 의한 PVDF film 특성 조사를 위하여 사용한 시편 제작 사양을 표 1에 보인다. 실험에서 사용한 PVDF film은 세 부분으로, 전압을 인가하기 위하여 PVDF film 표면에 그려진 은도선과 PVDF film, 그리고 은도선의 산화를 막고 PVDF film의 외부 표면의 손상을 막기 위한 래미네이트 코팅으로 이루어진다.

먼저 제한한 평형 회로 모델이 PVDF film 특성에 적절한지 확인을 위하여 LCR 미터기 [LCR-8110G, GWInstek, Taiwan]를 이용하여 임피던스 값, R_s값, C_s값, D값, 그리고 θ값을 측정하였고, 그 결과를 다음 수식에 적용하여 비교하였다^[18].

$$Z_s = R_s - \frac{j}{\omega C_s} \tag{1}$$

$$D = \omega C_s R_s \tag{2}$$

$$R_s = |Z_s| \cos \theta \tag{3}$$

$$C_s = \frac{D}{\omega R_s} \tag{4}$$

실험은 정현파를 1KHz에서 10KHz까지 1KHz씩 증가시키면서 진행하였다. 표 2는 LCR 미터기로 구한 PVDF film의 특성을 보인다. 측정 결과 주파수가 증가할수록 임피던스 값은 감소하며, 평형 회로를 구성하는 C_s값과 R_s값도 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 주파수가 증가할수록 소자 자체의 ESR에 의한 열 손실 비율을 의미하는 소산율(D)은 점차 증가하고 커패시터의 손실을 의미하는 Loss Angle(θ)은 점차 커지는 결과를 얻을 수 있었다.

표 1. PVDF Film 시편 제작 (1)
Table 1. PVDF Film sample design (1).

| 필름 명 | 도선 두께 | PVDF Film 두께 | 필름 크기 가로 | 필름 크기 세로 | 코팅 크기 가로 | 코팅 크기 세로 |
|------|-------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| RT10 | 2 mm | 80 μm | 128 mm | 165 mm | 129 mm | 168 mm |

표 2. LCR 미터기를 이용한 PVDF film 특성 측정 결과

Table 2. Measurement Result of PVDF film Characteristic with LCR meter.

| Freq. (KHz) | Cs(nF) | D | Z(KΩ) | θ(°) | Rs(Ω) |
|-------------|--------|-------|-------|--------|-------|
| 1 | 30.78 | 0.040 | 5.17 | -87.70 | 207.3 |
| 2 | 30.60 | 0.068 | 2.60 | -86.13 | 175.8 |
| 3 | 30.45 | 0.096 | 1.75 | -84.55 | 166.1 |
| 4 | 30.40 | 0.135 | 1.32 | -82.31 | 176.6 |
| 5 | 29.88 | 0.147 | 1.08 | -81.65 | 156.1 |
| 6 | 29.85 | 0.174 | 0.90 | -80.14 | 154.3 |
| 7 | 29.21 | 0.191 | 0.79 | -79.24 | 147.7 |
| 8 | 29.09 | 0.213 | 0.70 | -78.03 | 144.9 |
| 9 | 28.90 | 0.231 | 0.63 | -77.03 | 140.8 |
| 10 | 28.69 | 0.251 | 0.57 | -75.98 | 138.4 |

표 2에 측정된 값들을 이용하여 수식(1)에서 수식(4)까지 주파수에 따라 대입하고 계산하였을 때 그 값이 모두 만족하였다. 따라서 PVDF film의 평형 회로 모델은 그림 3에 보인바와 같이 저항성분과 커패시터 성분으로 구성된 평형 회로 모델을 가지는 것을 확인 할 수 있었으며, Piezoelectric 진동기 회로 모델 중 그림 2(b)에 보인 회로 모델 구조와 유사하기 때문에 vibration actuator로 사용할 수 있다.

PVDF film 의 기본적인 특성 조사에 이어서 크기에 따라 임피던스와 커패시터 값의 변화가 있는지를 확인하기 위해 추가적으로 PVDF film 특성 조사를 수행하였으며, 그에 따른 시편 제작 사양은 표 3에 보인다.

제작한 시편들의 모양은 사각형 타입으로 제작하였

표 3. PVDF Film 시편 제작 (2)

Table 3. PVDF Film sample design (2).

| | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 | RT8 |
|-------------|-----|------|------|------|-------|-------|--------|------|
| 내경크기 가로 | 10 | 19 | 39 | 59 | 19 | 29 | 49 | 99 |
| 내경크기 세로 | 10 | 20 | 30 | 50 | 9.5 | 19.5 | 29.5 | 50 |
| 도선두께 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| PVDF 크기 가로 | 17 | 29 | 48 | 68 | 27 | 38 | 59 | 108 |
| PVDF 크기 세로 | 17 | 29 | 39 | 59 | 17 | 29.5 | 39 | 59 |
| 코팅크기 가로 | 21 | 35 | 55 | 73.5 | 31 | 43 | 64 | 114 |
| 코팅크기 세로 | 21 | 34 | 45 | 66 | 23 | 36 | 45 | 65 |
| 면적 (내경기준) | 100 | 380 | 1170 | 2950 | 180.5 | 565.5 | 1445.5 | 4950 |
| 면적 (PVDF크기) | 289 | 841 | 1872 | 4012 | 459 | 1121 | 2301 | 6372 |
| 면적 (코팅크기) | 441 | 1190 | 2475 | 4851 | 713 | 1548 | 2880 | 7410 |

크기 단위: (mm), 면적단위:(mm)

표 4. PVDF Film의 크기에 따른 임피던스 특성

Table 4. Impedance characteristic by size of PVDF film.

| Freq. (KHz) | Z(kΩ) |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 | RT8 |
| 1 | 375.7 | 129.8 | 57.39 | 27.13 | 240.2 | 99.72 | 47.23 | 17.29 |
| 2 | 189.0 | 65.29 | 28.88 | 13.74 | 121.1 | 50.18 | 23.81 | 8.96 |
| 3 | 126.5 | 43.72 | 19.35 | 9.29 | 81.43 | 33.61 | 16.00 | 6.26 |
| 4 | 95.14 | 32.91 | 14.58 | 7.08 | 61.59 | 25.32 | 12.09 | 4.96 |
| 5 | 76.34 | 26.42 | 11.72 | 5.77 | 49.71 | 20.34 | 9.76 | 4.18 |
| 6 | 63.77 | 22.09 | 9.82 | 4.90 | 41.77 | 17.03 | 8.21 | 3.67 |
| 7 | 54.81 | 19.00 | 8.45 | 4.28 | 36.12 | 14.66 | 7.10 | 3.41 |
| 8 | 48.06 | 16.68 | 7.44 | 3.83 | 31.87 | 12.89 | 6.28 | 3.05 |
| 9 | 42.81 | 14.87 | 6.64 | 3.47 | 28.57 | 11.51 | 5.64 | 2.82 |
| 10 | 38.62 | 13.43 | 6.01 | 3.19 | 25.93 | 10.41 | 5.13 | 2.63 |

고, PVDF film 자체의 두께는 80[μm]를 사용하였다.

실험 방법은 PVDF film에 인가되는 전압을 2Vrms로 고정하고 주파수를 1KHz에서 10KHz까지 1KHz씩 변동하면서 PVDF film의 임피던스와 커패시터 값을 LCR 미터기를 이용하여 측정하였으며, 실험을 통해 얻은 크기에 따른 PVDF film의 임피던스 측정값과 커패시터 값은 표 4와 표 5에서 볼 수 있다.

측정된 값으로부터 알 수 있듯이 PVDF film의 임피던스는 크기가 클수록 반비례하여 작아지는 반면에 커패시터 값은 PVDF film 크기에 비례하여 커진다. 또한, 주파수 변화가 저주파수 대역에서 고주파수 대역으로 변동하게 될 때 임피던스 값은 급격히 감소하는 반면에 커패시터 값은 서서히 감소하는 특징을 보인다.

표 5. PVDF Film의 크기에 따른 커패시터 값 특성

Table 5. Capacitor characteristic by size of PVDF film.

| Freq. (KHz) | C(nF) |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | RT1 | RT2 | RT3 | RT4 | RT5 | RT6 | RT7 | RT8 |
| 1 | 0.424 | 1.226 | 2.774 | 5.875 | 0.663 | 1.596 | 3.371 | 9.257 |
| 2 | 0.421 | 1.219 | 2.758 | 5.816 | 0.658 | 1.587 | 3.348 | 9.040 |
| 3 | 0.420 | 1.214 | 2.746 | 5.755 | 0.653 | 1.580 | 3.326 | 8.768 |
| 4 | 0.419 | 1.210 | 2.735 | 5.690 | 0.648 | 1.574 | 3.306 | 8.453 |
| 5 | 0.418 | 1.207 | 2.724 | 5.615 | 0.643 | 1.569 | 3.286 | 8.132 |
| 6 | 0.417 | 1.203 | 2.714 | 5.535 | 0.639 | 1.563 | 3.264 | 7.829 |
| 7 | 0.416 | 1.200 | 2.705 | 5.455 | 0.634 | 1.557 | 3.242 | 7.329 |
| 8 | 0.415 | 1.196 | 2.695 | 5.374 | 0.630 | 1.552 | 3.218 | 7.143 |
| 9 | 0.414 | 1.193 | 2.686 | 5.298 | 0.625 | 1.546 | 3.194 | 6.906 |
| 10 | 0.414 | 1.190 | 2.675 | 5.220 | 0.621 | 1.540 | 3.169 | 6.685 |

따라서 크기와 구동 주파수에 따라서 임피던스 값이 크게 변하는 PVDF film actuator를 vibration actuator로 사용하기 위해서는 적절한 임피던스 정합이 필요하며 이를 고려한 전압 증폭기의 개발이 필요함을 알 수 있다.

III. PVDF Film actuator 구동용 파워 드라이버

1. PVDF Film actuator 구동용 파워 드라이버 구성

개발한 파워 드라이버는 PVDF film을 vibration actuator로 사용할 때 효과적으로 동작할 수 있도록 설계된 PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버로 주파수가 변화할 때 임피던스 값의 변화가 발생하여도 파워 드라이버가 PVDF film에 최대한 많은 전력을 공급할 수 있도록 설계하였다. 그림 4는 개발한 PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버의 블록 다이어그램으로, 크게 입력 전압 증폭부, 출력 전압 증폭부, 그리고 파워 드라이버 제어부로 구성된다.

입력 전압 증폭부는 Boost Converter 블록으로 구성되며 파워 드라이버 제어부로부터 PWM (Pulse-Width Modulation) 신호를 받아서 입력 전압 +48Vdc를 약 +200Vdc까지 증압시킨다.

출력 전압 증폭부는 IGBT 4개를 이용한 Full-Bridge 회로와 R-L-PVDF film 직렬 임피던스 정합 회로로 구성되며 파워 드라이버 제어부로부터 PWM 신호를 받아서 구동한다. 발생하는 전압은 입력되는 PWM 신호 주기를 갖는 펄스 파형의 전압으로 약 400[V_{p-p}]까지 발생되며, 출력 전압과 전류를 정현파로 변환하는 R-L-PVDF film 직렬 임피던스 정합 회로를 이용하여 PVDF film에 약 400[V_{p-p}]의 정현파를 인가한다.

마지막으로 파워 드라이버 제어부는 마이크로컨트롤

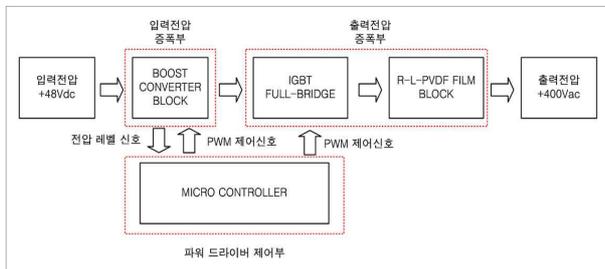


그림 4. PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버 구성도

Fig. 4. Block diagram of power driver for PVDF film actuation.

러와 파워 드라이버의 동작 상태를 표시할 수 있는 LCD (Liquid Crystal Display)로 구성되며 입력 전압 증폭부의 PWM 제어, 출력 전압 증폭부의 PWM 제어, 그리고 파워 드라이버의 과전압 충전을 제어한다.

2. 입력 전압 증폭부

그림 5의 회로는 사용한 입력 전압 증폭부로 +48 [Vdc]의 입력전압을 약 +200[Vdc]까지 증압시키는 비절연형 부스트 컨버터 방식을 사용하였다.

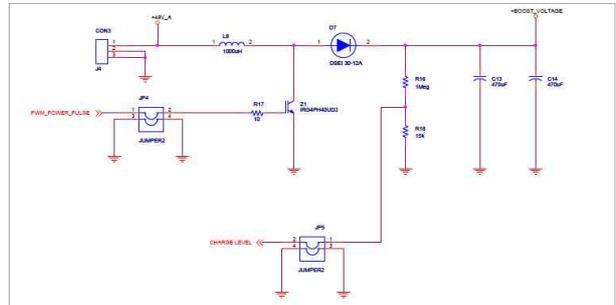


그림 5. 입력 전압 증폭부 회로
Fig. 5. Circuit diagram of input voltage amp.

부스트 컨버터는 DC-DC 컨버터의 한 종류로 입력 전압을 인덕터에 저장하였다가 스위치의 on/off 동작을 통해서 인덕터에 저장된 에너지를 출력으로 내보내는 방식으로, 항상 입력 전압보다 출력 전압이 높은 특징을 갖는다.

또한 입력 전압 증폭부는 인덕터, IGBT, FRD, 그리고 커패시터로 구성되어 있으며 파워 드라이버 제어부로부터 PWM 신호를 받아 IGBT를 스위칭 함으로써 인덕터의 저장된 전압을 커패시터로 저장하여 높은 출력 전압을 발생할 수 있도록 회로를 구현하였다.

입력 전압 증폭부에 사용한 소자들은 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 L 값과 C값은 구하였다. 이 때 소자 선정시 기준이 되는 스위칭 주파수는 50KHz, 출력 전압 리플은 200mV, 출력 전류의 범위는 전류는 0.1A에서 1A까지로 정하였다.

$$L = \frac{V_i}{2I_{omin}} D(1-D)T_s \tag{5}$$

$$C = \frac{I_{omax}}{\Delta v_o} DT_s \tag{6}$$

3. 출력 전압 증폭부

출력 전압 증폭부는 IGBT 4개를 이용하여 제작한 Full-Bridge 회로와 PVDF film 임피던스 정합 회로로 구성되며 파워 드라이버 제어부로부터 PWM 신호를 받아서 구동한다. Full-Bridge 회로에서는 입력되는 PWM 신호 주기를 갖는 펄스 파형의 고전압 출력이 발생되며 이때 발생하는 출력은 약 $400[V_{p-p}]$ 까지 낼 수 있도록 설계하였다. 그림 6은 전형적인 Full-Bridge 회로를 보인다. Full-Bridge 회로는 Unipolar 전압 출력을 Bipolar의 전압으로 출력할 수 있기 때문에 입력 전압 증폭부에서 Unipolar 전압만 만들어도 되는 장점이 있다.

그림 7은 개발한 출력 전압 증폭부 회로를 보인 것으로 IGBT와 MOSFET Driver, R-L-PVDF film 직렬 정합 회로를 보이며 Full-Bridge 회로에 입력 전압 증폭부에서 발생시킨 Unipolar 전압을 사용하도록 회로를 구현하였다.

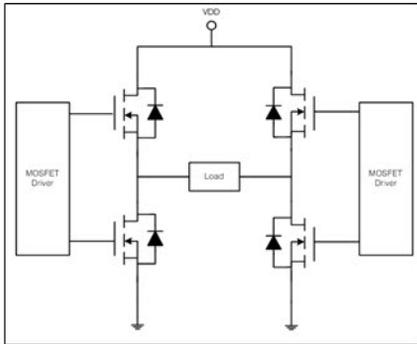


그림 6. Full-Bridge 회로
Fig. 6. Full-Bridge Circuit diagram.

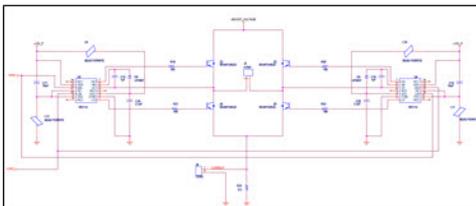


그림 7. 출력 전압 증폭부 회로
Fig. 7. Circuit diagram of output voltage amplifier.

4. PVDF film 임피던스 정합 회로

그림 8에서 보인 바와 같이 PVDF film은 커패시터



그림 8. PVDF Film 양단에 인가되는 전압
Fig. 8. Applied voltage across PVDF film terminals.

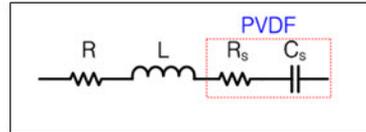


그림 9. R-L-PVDF film 직렬회로
Fig. 9. R-L-PVDF film series circuit model.

의 특성을 갖기 때문에 Full-Bridge에서 발생한 펄스 전압이 인가되면 전압 레벨이 바뀌는 시간에만 전류가 흐르는 현상이 발생한다. 또한, 순간적인 피크 치의 전류가 흐르기 때문에 과전류로 인하여 PVDF film이 손상될 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 PVDF film 양단에 인가되는 구형파의 전압을 정현파로 변화시키고 전류의 파형도 순간 피크 치만 발생하는 파형에서 정현파로 변경시키는 PVDF film 임피던스 정합 회로를 그림 9에 보인다.

PVDF film 임피던스 정합 회로로 R-L-PVDF film 직렬 회로를 이용하였기 때문에 R값과 L값 그리고 PVDF film의 크기에 따라서 전류가 불안정하게 흐를 수 있을 수 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 식 (7)에 보인 것처럼 R-L-C 직렬 회로 방정식을 세워 전류를 안정하게 공급할 수 있는 R값과 L값을 구하였다.

$$L \frac{di(t)}{dt} + (R + R_s)i(t) + \frac{1}{C_s} \int i(t)dt = V \quad (7)$$

$$\frac{d^2i(t)}{dt^2} + \frac{(R + R_s)}{L} \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC_s} i(t) = 0 \quad (8)$$

또한 전류 $i(t)$ 의 해를 구하기 위하여 특성 방정식을 세우고 해의 범위를 구하면 식 (9)와 식 (10)으로 전류

$i(t)$ 가 가질 수 있는 해의 범위를 얻을 수 있었다.

$$\left(\frac{R+R_s}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC_s} < 0 \tag{9}$$

$$\left(\frac{R+R_s}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC_s} \geq 0 \tag{10}$$

식 (9)의 범위를 갖는 해의 경우를 Under damped라고 하며 시스템에 단위 계단 응답을 넣었을 때 출력 값이 감쇠 진동하는 경우로 R-L-PVDF film 직렬 회로에서 전류 $i(t)$ 가 감쇠한다. 식 (10)의 범위를 만족하는 해의 경우는 Critical damped와 Over damped 의 경우로 R-L- PVDF film 직렬 회로에서 안정적으로 전류 $i(t)$ 가 흐를 수 있다. 따라서 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로에 안정적인 전류를 흐를 수 있는 R값과 L값을 구하기 위하여 아래 식(11)을 이용하였다.

$$f_{pvd} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}} \tag{11}$$

표 6은 PVDF film 임피던스 정합 회로의 최적 값을 찾기 위하여 주파수에 따라 변하는 PVDF film의 특성 값 중 PVDF film 평형 회로 모델을 구성하는 R_s 값과 C_s 값을 LCR 미터기로 측정한 결과이다.

PVDF film을 vibration actuator로 사용하기 때문에 인가해주는 주파수에서 PVDF film이 최대한 많은 진동 에너지를 발생할 수 있도록 공진 주파수를 만족하는 인덕터 값을 구하였다. 인가해주는 주파수를 공진 주파수 (f_{pvd})로 정하고 표 6에서 보이는 C_s 값을 식 (11)에 대입하여 인덕터 값을 구한 결과는 표 7에서 보인다.

전류가 감쇠 진동하지 않고 일정하게 흐를 수 있는

표 6. PVDF film의 R_s 값과 C_s 값 측정 결과
Table 6. PVDF film R_s and C_s value measurement result.

| Freq. [KHz] | R_s [Ω] | C_s [nF] |
|-------------|--------------------|------------|
| 1 | 207.28905 | 30.776 |
| 3 | 166.07308 | 30.455 |
| 5 | 156.09496 | 29.881 |
| 6 | 154.29888 | 29.849 |
| 10 | 138.36564 | 28.690 |
| 15 | 130.03195 | 27.484 |
| 20 | 121.43095 | 26.317 |

표 7. PVDF film 임피던스 정합 회로의 최적 인덕터 값

Table 7. Optimal Inductor value for PVDF film Impedance matching.

| 인가 주파수 [KHz] | 공진 주파수 [KHz] | Inductance [mH] |
|--------------|--------------|-----------------|
| 1 | 1 | 822.1 |
| 3 | 3 | 92.3 |
| 5 | 5 | 33.9 |
| 6 | 6 | 23.5 |
| 10 | 10 | 8.8 |
| 15 | 15 | 4.1 |
| 20 | 20 | 2.4 |

표 8. PVDF film 임피던스 정합 회로의 최적 저항 값

Table 8. Optimal resistance values for PVDF film Impedance matching.

| 인가 주파수 [KHz] | 공진 주파수 [KHz] | Resistance [K Ω] |
|--------------|--------------|--------------------------|
| 1 | 1 | 10.331 |
| 3 | 3 | 3.480 |
| 5 | 5 | 2.128 |
| 6 | 6 | 1.775 |
| 10 | 10 | 1.108 |
| 15 | 15 | 0.771 |
| 20 | 20 | 0.604 |

저항 값을 구하기 위하여 R-L-PVDF film 직렬 회로에서 전류가 최대로 흐를 수 있는 조건인 식 (10)을 정리하면 다음과 같다.

$$R+R_s \geq \frac{2L}{\sqrt{LC_s}} \tag{12}$$

표 6과 표 7로부터 인가 주파수에 해당하는 R_s 값과 C_s 값 그리고 인덕터(L) 값을 식 (12)에 대입하여 R-L-PVDF film 직렬 회로에서 전류의 감쇠 진동을 막기 위한 저항 값을 구한 결과는 표 8에 보인다. 표 8에서는 R-L-PVDF film 직렬 회로에서 전류가 감쇠 진동을 하지 않고 일정하게 전류를 흐르게 할 수 있는 최적 저항 값을 PVDF film에 인가되는 주파수 별로 보인다.

5. 파워 드라이버 제어부

그림 10에 보인 파워 드라이버 제어부는 Micro controller와 파워 드라이버의 동작 상태를 표시할 수 있는 문자 LCD (Liquid Crystal Display)로 구성되며

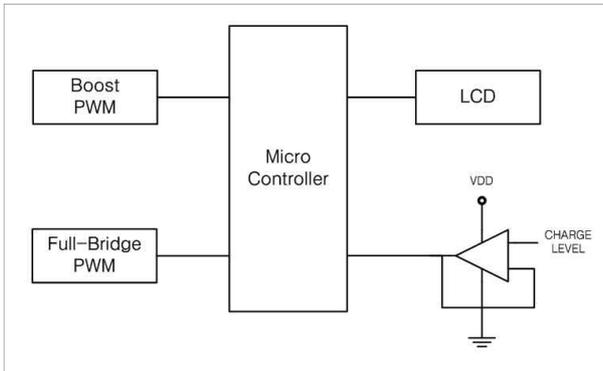


그림 10. 파워 드라이버 제어부
Fig. 10. Power driver Controller.

입력 전압 증폭부의 PWM 제어, 출력 전압 증폭부의 PWM 제어, 그리고 파워 드라이버의 과전압 충전을 제어하는 역할을 한다.

6. PVDF film Actuator 구동용 파워 드라이버 제작

그림 11은 PVDF film actuator를 효과적으로 구동하기 위하여 개발한 파워 드라이버의 구현을 보인다. 개발한 파워 드라이버는 앞서 설명한 바와 같이 입력 전압 증폭부, 출력 전압 증폭부, 드라이버 제어부로 이루어져 있으며, 전원 분리를 위해서 포토커플러와 절연형 DC-DC 컨버터를 사용하였다. 그림 11에서 보인 바와 같이 그림 좌측 상단부에는 ATmega128을 사용한 파워 드라이버 제어 보드가 위치하며, 좌측 하단부에는 PVDF film에 전압을 인가하는 출력 전압 증폭부 보드가 위치한다. 그리고 우측 하단부에는 입력 전압을 승압시키는 스위칭 보드와 승압된 전압을 저장하는 커패시터 보드로 구성된 입력 전압 증폭부가 위치하고 있다.



그림 11. PVDF film Actuator 구동용 파워 드라이버
Fig. 11. Power driver for PVDF film Actuator.

IV. 실험

1. 개발한 파워 드라이버의 성능 실험

PVDF film을 구동하기 위하여 개발한 파워 드라이버의 성능 실험 구성은 그림 12에 보인다. 성능 실험에서 개발한 파워 드라이버의 출력 전압 파형은 오실로스코프를 이용하여 측정하였고, PVDF film actuator에 흐르는 전류 측정은 전류 증폭기와 전류 프로브를 이용하여 측정하였다.

실험은 전압 증폭부에 주파수가 1KHz, 3KHz, 그리고 6KHz인 입력 신호를 인가하였으며, 각 해당 주파수에 따라서 PVDF film의 출력 파형과 출력 전류를 측정하였다.

PVDF film을 vibration actuator로 동작시킬 때 효과적으로 PVDF film에 전압과 전류를 인가하기 위하여 R-L-PVDF film 직렬 회로를 구성하였으며, 이 때 전류를 일정하게 공급하기 위하여 공진 주파수를 맞춘 R 값과 L값에 대한 소자 선정하였다. 실험에 사용한 임피던스 정합 회로 소자 값들은 출력 증폭부에서 사용한 각 파워 드라이버 소자들이 가진 특성의 한계점들을(발열, 전류, 소비전력, 크기 등) 고려하여 선정하였다.

표 9는 실험에 사용된 소자들의 값을 보인 것으로 내부 저항(R_s), 커패시터(C_s), 그리고 임피던스(Z)는 실험에서 사용한 PVDF film의 특성 값이다. L값과 R값은 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로를 구성하는 소자들로 전압 확대율 Q_c 의 값을 가능한 크게 하는 값으로 선정하였으며, 주파수가 증가할수록 그 값이 줄어드는 경향을 보이는 전압확대율 Q_c 와 Q_L 은 식 (13)과 식 (14)를 이용하여 구하였다.



그림 12. PVDF film Actuator 구동용 파워 드라이버 실험
Fig. 12. Power driver for PVDF film Actuator experiment.

표 9. PVDF film 임피던스 정합 회로 선정 값
Table 9. Selection value for PVDF film Impedance matching circuit.

| Freq. | C_s (nF) | R_s (Ω) | Z (K Ω) | $L_{값}$ (mH) | R | Q_c | Q_L |
|-------|---------------|-----------------------|----------------------|-----------------|------|-------|-------|
| 1KHz | 30.78 | 207.3 | 5.17 | 800 | 4000 | 1.23 | 1.19 |
| 3KHz | 30.45 | 166.1 | 1.75 | 100 | 1600 | 0.99 | 1.07 |
| 6KHz | 29.85 | 154.3 | 0.90 | 20 | 1800 | 0.45 | 0.39 |

$$Q_c = \frac{1}{2\pi f(R_s + R)C_s} \quad (13)$$

$$Q_L = \frac{2\pi fL}{(R_s + R)} \quad (14)$$

그림 13은 Full-Bridge 회로의 출력 파형으로 최대 출력은 약 400[V_{pp}]이며 R-L- PVDF film 임피던스 정합 회로에 인가된다. 아래 파형 그림에서 채널 1은 회로에서 출력되는 전압 파형이며, 채널 2는 전류 파형이다.

그림 14는 입력되는 주파수가 1KHz일 때 PVDF film 양단에 인가되는 전압이 R-L-PVDF film 임피던스



그림 13. Full-bridge 회로의 출력 전압
Fig. 13. Output voltage of Full-bridge circuit.



그림 14. PVDF film의 출력 파형 측정 (1KHz)
Fig. 14. Measured output signal of PVDF film (1KHz).

스 정합 회로를 통하여 구형파에서 정현파 형태로 전환되는 것을 보이며, 그림 14에서 채널 1은 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로를 통해 PVDF film에 전달되는 전압 파형을 보이며, 채널 2는 R-L-PVDF film 임피던스 정합회로에 흐르는 전류 파형을 보인다.

이 때 PVDF film에 전달되는 전력을 구하기 위하여 식 (15)를 이용하면 PVDF film에서 소비되는 전력은 8.98W임을 알 수 있다.

$$P_{pdf} = V_{rms} \times I_{rms} \quad (15)$$

그림 15와 그림 16은 파워 드라이버 제어부로부터 입력되는 PWM 스위칭 주파수가 변화될 때 R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로를 통해서 PVDF film가 소비하는 전력의 변화를 보인다. 그림 15는 파형 측정기의 주기를 200[μ s]로 설정하고 PWM 스위칭 주파수를 3KHz 인가할 때의 PVDF film에 전달되는 전압 파형(채널 1)과 전류 파형(채널 2)를 보인다.

그림 16은 파형 측정기의 주기를 100[μ s]로 설정하고 PWM 스위칭 주파수를 6KHz를 인가하였을 때 PVDF film에 전달되는 전압 파형(채널 1)과 전류 파형(채널



그림 15. 3KHz에서의 PVDF film 출력 파형 측정
Fig. 15. Measured output signal of PVDF film at 3KHz.



그림 16. 6KHz에서의 PVDF film 출력 파형 측정
Fig. 16. Measured output signal of PVDF film at 6KHz.

2)를 보인다. 입력 주파수에 따라 PVDF film에 전달되는 전력을 식 (15)를 이용하여 구하면 3KHz에서는 16.64W 그리고 6KHz에서는 7.87W의 전력을 소비하고 있음을 알 수 있다.

기존의 연구된 Piezoelectric Actuator 구동용 파워 드라이버^[11]가 15[V_{p-p}]의 80KHz의 입력과 바이어스 전압 -5V~+180V를 인가하였을 때 발생하는 출력이 300[V_{p-p}]인 것을 비교할 때 본 논문에서 제안한 PVDF film Actuator 구동용 파워드라이버는 기존 연구 결과보다 비교적 높은 전압을 출력하고 낮은 주파수에서 동작하는 특성을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.

2. PVDF Film을 이용한 준설토 탈수 실험

본 연구에서 개발한 파워 드라이버가 PVDF film actuator를 적절히 구동하여 준설토의 함수비를 효과적으로 낮출 수 있는지를 확인하는 탈수 실험을 수행하였다. 그림 17은 준설토의 탈수 실험을 진행하기 위한 모형지반을 보인다. 실험에 사용한 모형지반은 모형상자에 자갈로 배수 층을 조성하여 탈수 실험 시에 준설토가 유실되지 않도록 하였다.

실험에서 사용된 준설토의 무게와 물의 양은 표 10에서 보인 바와 같으며 준설토와 물의 함수비를 90%로 맞추기 위해서 준설토 550g을 모형 지반에 쌓고 500ml의 물을 부어 탈수량을 측정하였다.

실험 방법은 PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버를 이용하지 않은 자연 탈수 실험과 개발한 PVDF



그림 17. 준설토 탈수 실험을 위한 모형지반
Fig. 17. Geotechnical models for dredged sediment dehydration experiment.

표 10. 실험에서 사용된 준설토의 무게와 물의 양
Table 10. Weight of dredged sediment and the amount of water in experiment.

| 흙의 종류 | 준설토(g) | 물의 양(ml) |
|-------|--------|----------|
| 준설토 | 550 | 500 |

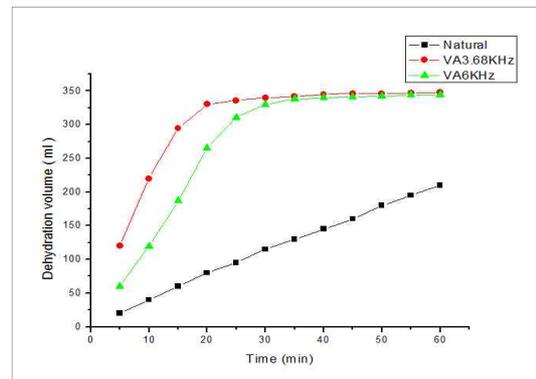


그림 18. 탈수 실험 결과 비교 그래프
Fig. 18. Graphical comparison of the result of dehydration experiment.

film actuator 구동용 파워 드라이버를 이용한 탈수 실험 순으로 진행하였다. 또한, PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버에 인가되는 입력 주파수를 출력이 가장 큰 3.68KHz와 출력이 낮은 6KHz 두 가지 주파수를 적용하여 실험을 진행하였다. 탈수량의 측정 방법으로는 5분 간격으로 60분 동안 메스실린더에 저장되는 물의 양을 측정하고 기록하였다. 실험은 3번 반복하였으며 그림 18은 평균한 결과를 보인다.

그림의 결과에서 볼 수 있듯이 자연 탈수를 할 때보다 PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버를 사용할 때 탈수 시작 후 30분 동안 약 3배 빠른 탈수 효과를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 3.68KHz의 주파수를 사용할 때 6KHz의 주파수를 사용할 때 보다 초기에 더욱 효과적이었으나 30분 이후에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 준설토 탈수를 위하여 PVDF film을 vibration actuator로 사용할 때 효과적으로 구동하는 PVDF film 전용의 파워 드라이버를 제안하였다.

PVDF film의 특성 연구를 통하여 PVDF film이 크기와 인가되는 주파수 변화에 따라 임피던스 값이 크게 변하는 것을 확인하였고, PVDF film을 vibration actuator로 사용할 때 PVDF film에 특성에 적절한 임피던스 정합을 구현하여 PVDF film에서 최대의 출력을 낼 수 있도록 하였다.

개발한 PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버는 종래의 연구된 Piezoelectric 전압 증폭기 방식과는 다

르게 IGBT를 이용하여 Full-Bridge 회로를 구현하고 출력 전압으로 펄스파의 고전압을 만들었으며, R-L-PVDF film 임피던스 정합 회로를 사용하여 PVDF film에 최대한 많은 전력이 인가될 수 있도록 설계하였다.

개발한 PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버를 이용하여 준설토 탈수 실험을 수행한 결과 자연 탈수보다 본 연구에서 개발한 파워 드라이버로 구동한 PVDF film을 사용하였을 때, 탈수 시작 후 30분 내에 약 3배 정도 빠른 탈수 효과를 확인할 수 있었으며, 개발한 PVDF film actuator 구동용 파워 드라이버를 준설토 탈수 장치에 적용할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 송광섭 “준설토의 고화처리공법”, 대한토목공학회지, 기술기사, 제51권 제5호, 2003.
- [2] 김선미, 김영욱, 임명희, 김지형 “계면활성제와 초음파를 이용한 디젤오염토양의 수세효과”, 대한환경공학회 2006 추계학술연구발표회 논문집, 강릉대학교, pp.1499-1500, 2006.
- [3] Y. Kim, T. L. Hoang, J. Park, “Enhanced Drainage Capability Installed in Soft Clays due to Vibration Energy of PVDF (polyvinylidene fluoride) Film, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 30, pp.197-198, 18-20 Nov 2008.
- [4] Y. Zhang, X. Zhang, “Investigation of actuation characteristics of lamianted PVDF Actuator used on parabolodial shells”, Piezoelectricity, Acoustic Waves, Device Applications, Symposium on, pp. 129-133, 2010.
- [5] B. Dugal, “High-voltage amplifier drives piezo tubes”, EDN, 2004.
- [6] S. Robinson, “Drive Piezoelectric Actuators With Fast, High-Power Op Amps”, ED online, 11302, 2005.
- [7] T. Würtz, H. Janocha, M. Rassing, “Compact Lightweight Power Amplifier for Piezoelectric Actuators”, ACTUATOR 2008, 11th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, June 9-11, pp. 546-549, 2008.
- [8] M. A. Noras, J. Kieres, J. M. Mossi, K. K. Leang, “The Design of a High-Voltage Charge-Feedback Piezo amplifier”, ACTUATOR 2006, 10th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, June 14-16, pp. 553-555, 2006.
- [9] C. Wallenhauer, A. Kappel, B. Gottlieb, T. Schwebel, T. Lüth, “Efficient class-B analog amplifier for a piezoelectric acuator drive”, Mechatronics, 19(1), pp. 56-64, 2009.
- [10] C. Stiebel, H. Janocha “New Concept of a Hybrid Amplifier for Driving Piezoelectric Actuators”, in Proc. 1st IFAC Conf. Mechatronic Syst., pp. 379-384, 2000.
- [11] S. Robinson, “Drive Piezoelectric Actuators With Fast, High-Power Op Amps”, ED Online, 11302, 2005.
- [12] S. Robinson, “Driving Piezoelectric Actuators”, Power Electronics Technology, pp.40-44, 2005.
- [13] D. Williams, K. Donohue, B. O'hara, “Low-Frequency Amplifiers for PVDF Film Sensors”, IEEE southeastCon 08 Hjuntsville, Alabama April 3-6, pp.75-79, 2008.
- [14] 성광모, “PVDF를 이용한 초음파용 변환기”, 한국과학재단 연구보고서, 31쪽-51쪽, 1986년 4월
- [15] ㈜Fils, “Fils 교육자료 (Film OJT)”, 2011년 1월
- [16] IEEE, “Standard Definitions and Methods of Measurement for Piezoelectric Vibrators”, IEEE Std 177-1966, 1966.
- [17] Measurement Specialties, Inc., “Piezo Film Sensors Technical Manual”, Rev. D, pp. 15-16, March 2006.
- [18] GWinstek, “LCR-8000G Series user manual”.

저 자 소 개



김 대 선(정회원)
2006년 명지대학교 전자공학과
학사 졸업.
2005년~2009년 (주)다산네트웍스
하드웨어 개발실 연구원.
2011년 명지대학교 전자공학과
석사 졸업.

2011년~현재 (주)ISOL Technology 전임연구원.
<주관심분야 : 의료 및 산업용 시스템 설계, 시스
템 자동제어>



김 민 규(정회원)
2005년 명지대학교 전자공학과
학사 졸업.
2007년 명지대학교 전자공학과
석사 졸업
2009년~현재 명지대학교
전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 신호처리 및 분석 알고리즘, 시스
템 자동제어>



김 영 옥(정회원)
1989년 고려대학교 토목환경
공학과 학사 졸업.
1991년 고려대학교 토목환경
공학과 석사 졸업.
2000년 펜실베니아주립대학교
토목환경공학과
박사 졸업.

2001년~현재 명지대학교 토목환경공학과 교수
<주관심분야 : 초음파, 연약지반/슬러지처리, 비
파괴검사>



김 정 국(정회원)-교신저자
1982년 명지대학교 전자공학과
학사 졸업.
1984년 명지대학교 전자공학과
석사 졸업.
1993년 University of Illinois at
Chicago, Bioengineering
(Bioelectronics) 박사 졸업.

1994년~1999년 미국 Guidant Corp. Sr. Scientist
1999년~현재 명지대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 의료 및 산업용 시스템 설계, 이식
형 전자 의료기, 생체 신호 인식>