

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.4.379

JCCT 2018-11-50

## 옵토커플러의 절연을 이용한 멀티채널 아날로그 신호의 디지털 전송

### Digital Transmission and Isolation of Multichannel Analog Signals using a Single Optocoupler

남진문\*

Jim Moon Nam\*

**요약** 본 논문은 절연된 환경에서 멀티채널 아날로그 신호의 정확하고 안전한 전송을 위해 옵토커플러를 활용한 신호의 전송과 절연에 대해 다룬다. 신호의 전송 과정에서 절연 소자의 온도 의존성과 비선형성에 의한 신호의 왜곡을 최소화하고 우수한 잡음 여유도를 확보하기 위해 디지털 절연을 이용한 디지털 전송을 연구한다. 옵토커플러를 적용한 디지털 전송에 대한 이론적 고찰을 토대로 멀티채널 아날로그 신호의 전송 회로를 제안하였고 디지털 데이터의 직렬 전송 프레임도 설계하였다. 이론적 고찰과 일치하는 실험 결과를 통하여 제안하는 회로와 구현된 프로그램이 절연 장벽을 극복하고 멀티채널 아날로그 신호를 정확히 전송할 수 있음을 증명하였다.

**주요어** : 멀티채널, 아날로그 시그널, 디지털 변환, 옵토커플러, 절연

**Abstract** The transmission of analog signals through Galvanic isolators often results in signal distortion. Optocoupler gain is temperature dependent and also varies considerably, which would cause deformations of analog signals. Digital isolators have better noise immunity than analog, and digital transmission is a cost-effective noise rejection method for multichannel analog signals, which can solve temperature-induced signal distortion problems. Digital data, converted from multichannel analog signals, can be transmitted through a single optocoupler. We proposed advanced circuits and data frame for robust transmission of multichannel analog signals. Numerical experiments were performed to investigate distortion of multichannel analog signals during transmission.

**Key words** : Multichannel, Analog Signal, Digital Conversion, Optocoupler, Isolation

#### 1. 서론

최근에 전기적 절연(electrical isolation)의 중요성이 크게 부각되고 있다. 절연의 장점이 다양한 목적으로 활용되기 때문이다. 널리 알려진 절연의 장점은 노이즈

의 차단과 안정성 확보이지만 정전기나 고전압으로부터 전자기기를 보호하기 위해 절연을 이용할 수 있다 [1][2]. 이와 같이 전기적 차단이 목적인 경우도 있지만 반대로 서로 떨어진 위치에서 절연된 상태로 정보를 전달해야 하는 경우도 있다. 전기적 절연 상태를 유지하

\*정회원, 평택대학교 피어선칼리지  
접수일: 2018년 8월 22일, 수정완료일: 2018년 9월 27일  
게재확정일: 2018년 10월 9일

Received: August 2, 2018 / Revised: Septmeber 27, 2018

Accepted: October 9, 2018

\*Corresponding Author: namjm@ptu.ac.kr

Dept. of Pierson College, Pyeongtaek Univ., Korea

면서 정보 전송의 물리적 경로를 제공하는 갈바닉 절연 (Galvanic isolation)이 필요한 이유이다.

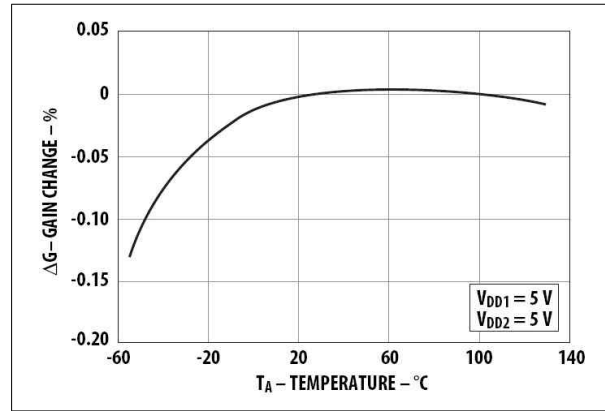
표 1에서 다양한 갈바닉 절연의 장단점을 비교하여 보여준다. 전기적 용량결합(capacitive coupling), 전자 유도(electromagnetic induction), 전파(radio frequency)와 같이 검증된 물리적 현상을 이용하여 갈바닉 절연을 구현할 수 있지만 다음 표와 같이 각 방식별로 단점이 있으며 특별한 조건이 필요하다[1][2][3][4].

표 1. 갈바닉 절연의 종류와 장단점 비교  
Table 1. Comparisons of Galvanic isolations

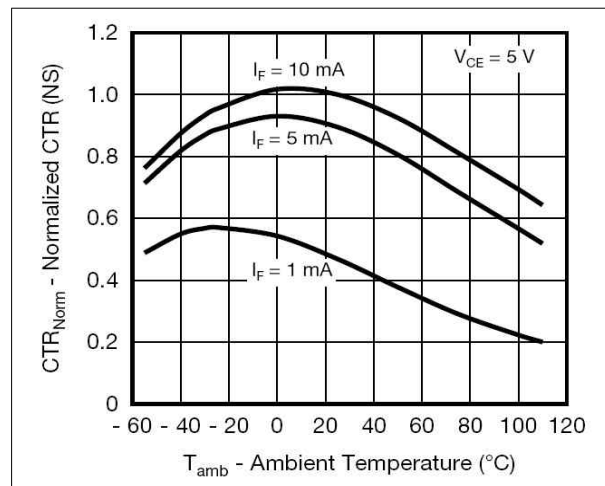
Methods Comparisons	Isolation Amplifier	Capacitive Coupler	Transformer	Radio Frequency	Nonlinear Optocoupler
Interference	Robust	Sensitive to load mismatching	Sensitive to fields	Sensitive to fields	Robust
Low Freq. Performance	Good	Degradation	Degradation	Degradation	Good
Cost and Distortion	Expensive (High linearity)	Relatively cheap	Expensive	Expensive	Cheapest
Compatible with	Analog Circuits	Digital Only	Both	Both	Both
Gain Drift	Stable Gain Characteristics	Can use stable Capacitors	Temperature Dependent	Temperature Dependent	Temperature Dependent
For Input	Requires none	Can include modulation	Can include modulation	Requires modulation	LED in same package
For Output	Offers amplifier output	Can include demodulation	Can include demodulation	Requires demodulation	Offers transistor output
Power Consumption	Low	Low	Low	Increases with data rate	Low
Size	Single chip packages	Compact	Can be in same package	Divided in two	Smallest

위에 나타난 옵토커플러(optocoupler)는 광학적 결합(optical coupling)을 이용하여 정보를 전달한다. 소자 내부에 전기신호 입력용 발광다이오드(LED)와 전기신호 출력용 포토트랜지스터(phototransistor)가 존재하므로 전기적 연결을 완전히 배제하고 절연을 유지할 수 있다. 또한 절연증폭기(isolation amplifier)는 신호의 진폭에 따른 증폭도 변화, 즉 선형성(linearity)이 우수하여 신호의 왜곡을 최소화하는 장점이 있다[5].

그림 1은 신호의 전송 과정에서 왜곡(distortion)을 초래하는 온도 의존성에 대한 절연증폭기와 옵토커플러의 비교이다. 그림 1(a)에서 절연증폭기는 온도 변화에 따른 증폭도 변화(gain drift with temperature)에서 우수한 안정도를 보여준다[5]. 그래프에서 -20°C 이상에서 -0.05% 이내의 작은 변화를 보인다. 반면에 그림 1(b)에서 옵토커플러의 온도 변화에 따른 전류 전달률 CTR(current transfer ratio)은 0°C 이상에서 -40%의 변화를 보여 절연증폭기에 비해 월등히 불안정함을 알 수 있다[6]. 이는 옵토커플러 주변의 온도 변화가 초래하는 증폭도 왜곡이 절연증폭기에 비하여 약 800배 크다는 것을 의미한다.



(a) Gain temperature change of an isolation amplifier[5]



(b) CTR temperature change of an optocoupler[6]

그림 1. 절연 소자의 온도특성 비교

Fig. 1. Comparison of temperature dependence

다음 식의 전류 전달률 CTR은 옵토커플러 내부에서 다이오드 순방향 전류  $I_F$ 를 기준으로 발생하는 포토트랜지스터 콜렉터 전류  $I_C$ 의 비율이다[3][6]. 다음 절에서 CTR이 전송 신호의 증폭도에 관여함을 다룬다.

$$I_C = [I_F CTR + I_{CEO}]_{I_{CEO} \approx 0}, \quad (1a)$$

$$I_C = [I_F CTR]_{Optocoupler}. \quad (1b)$$

누설전류  $I_{CEO}$ 는 제조사에서 시험한 옵토커플러 CNY117의 사양서를 기준하여 무시할 수 있다[6].

앞에서 살펴본 전류 전달률 CTR의 높은 온도 의존성은 아날로그 신호의 처리에서 왜곡을 초래하는 결정적인 원인이 된다. 따라서 저비용으로 우수한 절연성능을 제공할 수 있는 옵토커플러를 아날로그 전송(analog transmission) 회로에 직접 적용하지 않고 디지털 전송

(digital transmission)으로 전환하여 활용하는 방안을 본 논문에서 연구한다.

그림 2는 절연증폭기를 이용한 전원과 신호의 절연, 즉 완전한 전기적 단절을 보여준다. 증폭기에 적용되는 전원  $V_{pwr1}$  과 전원  $V_{pwr2}$  는 서로 절연되어 그라운드 가 분리되어 있다. 증폭기에 입력되는 아날로그 신호는 증폭기 내부에서 물리적 신호로 변환되어 전기적 절연 장벽(isolation barrier) 또는 기준 전위의 차이(electric difference of ground potential)를 극복하고 신호의 정보를 전송할 수 있다[7][8]. 절연증폭기는 이미 성능과 신뢰성이 검증되었고 비교적 간단하게 회로에 적용할 수 있지만 소자의 비용이 높다. 이는 절연증폭기가 멀티채널 신호의 전송에 부적합 하여 다른 대안을 찾아야 하는 첫 번째 이유이다.

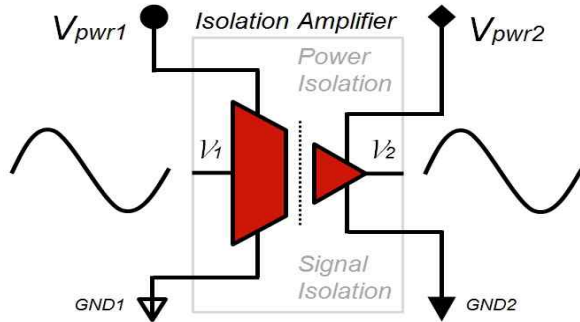


그림 2. 절연증폭기를 이용한 전원과 신호의 절연  
 Fig. 2. Power and signal isolation using an amplifier

그림 3은 다수의 절연증폭기를 사용하여 아날로그 절연(analog isolation)을 구현한 멀티채널 직렬 전송의 예를 보여준다. 채널별로 서로 절연된 별도의 전원을 사용하면 채널 간에도 독립된 절연을 유지할 수 있는 구조이다. 민감한 센서의 소신호(small signal)를 전력 회로의 노이즈로부터 분리 독립하여 처리하는 초단의 증폭기에 적합하다.

하지만 신호가 증폭된 이후의 전송에는 아날로그 절연보다 디지털 절연(digital isolation)이 적합하다. 아날로그 신호를 디지털 기반으로 변환하여 전송하면 잡음 여유도(noise immunity)가 상승하고 외부로부터 유입되는 다양한 노이즈로부터 신호를 안전하게 보호하여 전송할 수 있다. 결과적으로 외란에 강한 시스템을 구축할 수 있다. 이는 신호의 전송에서 아날로그 소자인 절연증폭기를 대신하여 디지털 절연을 구현하는 소자가 필요한 두 번째 이유이다.

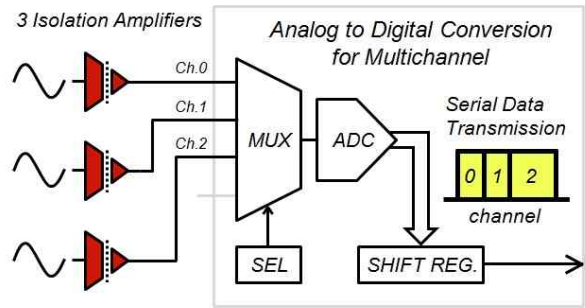


그림 3. 멀티채널 직렬 전송의 아날로그 절연  
 Fig. 3. Analog isolation of multichannel signals

이제 멀티채널 아날로그 신호의 개선된 전송과 절연을 다룬다. 외란에 강하며 온도 변화에 따른 신호의 왜곡을 회피하는 디지털 전송을 구현하기 위해 디지털 절연을 채택한다. 다음 절에서 비용대비 가장 효율적인 디지털 절연을 제공하는 옵토커플러를 적용하여 디지털 데이터가 정확하게 전송될 수 있음을 증명한다.

## II. 옵토커플러를 이용한 디지털 절연

이제 옵토커플러의 전기적 절연을 통과하는 디지털 전송에 대하여 이론적 분석을 시작한다. 앞에서 살펴본 신호 왜곡의 원인을 회피하여 디지털 신호가 전송됨을 증명하기 위해 포토트랜지스터의 식 (1b)와 동일한 전류 증폭 모델을 갖는 NPN 양극성 접합 트랜지스터(bipolar junction transistor)의 동작을 이론적으로 상세히 분석한다[9].

포토트랜지스터는 전류와 전압의 관계에서 NPN 트랜지스터와 동일한 활성 영역(active region), 포화 영역(saturation region), 차단 영역(cutoff region)의 특성을 보인다[6][9]. 트랜지스터의 동작에서 콜렉터에 흐르는 전류  $I_C$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다. 트랜지스터의 베이스로 입력되는 전류  $I_B$ 에 전류 증폭률  $h_{FE}$ 가 작용하여 콜렉터 전류가 발생된다.

$$I_C = [I_B h_{FE}]_{Transistor} \quad (2)$$

위의 식은 트랜지스터가 활성 영역에서 동작할 때 증폭도를 계산하기 위해 활용할 수 있다. NPN 트랜지스터의 콜렉터와 전원  $V_{pwr2}$  사이에 부하 저항  $R_2$  가 연결된 공통 에미터(common emitter) 회로에서 트랜지스터에 적용되는 동작식은 다음과 같다. 회로의 전원

$V_{pwr2}$ 가 저항  $R_2$ 의 전압 강하를 통과한 후 트랜지스터의 콜렉터와 에미터 간의 전압  $V_{CE}$ 에 나타나며 식 (2)를 대입할 수 있다.

$$V_{CE} = V_{pwr2} - R_2 I_C, \quad (3a)$$

$$V_{CE} = V_{pwr2} - R_2 I_B h_{FE}. \quad (3b)$$

이 때 식 (4a)에서 콜렉터 전압  $V_{CE}$ 가 식 (4b)와 같이 충분히 0V에 근접하는 조건을 찾을 수 있다. 즉 베이스 전류  $I_B$ 를 고려하여 저항  $R_2$ 의 용량을 결정하면 트랜지스터를 포화 영역에서 동작시킬 수 있으며 디지털 신호 0을 전송할 수 있다.

$$V_{CE} = [V_{pwr2} - R_2 I_B h_{FE}]_{V_{pwr2} \leq R_2 I_B h_{FE}}, \quad (4a)$$

$$V_{CE} \cong [0]_{V_{pwr2} \leq R_2 I_B h_{FE}}. \quad (4b)$$

또한 식 (5a)에서 베이스 전류  $I_B$ 가 0mA로 낮아지면 콜렉터 전압  $V_{CE}$ 에는 회로의 전원  $V_{pwr2}$ 가 그대로 전해진다. 즉 베이스 전류  $I_B$ 를 차단하면 트랜지스터를 차단 영역에서 동작시킬 수 있으며 식 (5b)와 같이 디지털 신호 1을 전송할 수 있다.

$$V_{CE} = [V_{pwr2} - R_2 I_B h_{FE}]_{I_B = 0}, \quad (5a)$$

$$V_{CE} = [V_{pwr2}]_{I_B = 0}. \quad (5b)$$

이제 동일한 전류 증폭 모델을 갖는 포토트랜지스터에서 디지털 동작을 구현하기 위해 앞에서 분석한 공통 에미터 회로를 적용한다. 여기서 옵토커플러의 다이오드 전류  $I_F$ 와 전류 전달률  $CTR$ 은 각각  $I_B$ 와  $h_{FE}$ 에 해당 하므로 식 (4b)와 (5b)에서 이를 대치하면 다음 식과 같다. 따라서 포토트랜지스터의 출력 전압은 포화 영역과 차단 영역에서 각각 식 (6a), (6b)와 같다.

$$V_{CE} \cong [0]_{V_{pwr2} \leq R_2 I_F CTR}, \quad (6a)$$

$$V_{CE} = [V_{pwr2}]_{I_F = 0}. \quad (6b)$$

위 식에서 신호의 왜곡을 초래하는 변수의 개입이 전혀 없기 때문에 옵토커플러는 정확하게 디지털 신호 (0, 1)를 전송함을 확인할 수 있다. 따라서 옵토커플러가 항상 포화 영역 또는 차단 영역에서 디지털 신호를 전송한다면 온도 의존성과 비선형성이 신호의 전송 과

정에 영향을 미칠 수 없음이 증명된다.

### III. 멀티채널 디지털 전송

이제 절연된 상태에서 3채널 아날로그 신호를 전송하는 개선된 회로를 제안한다. 디지털 절연을 이용하여 아날로그 신호를 안전하고 정확하게 전송할 수 있도록 회로를 설계하였다. 회로에서 아날로그 신호는 디지털로 변환되어 전송된다. 앞에서 살펴본 이론적 고찰과 같이 옵토커플러는 디지털 신호의 처리 과정에서 신호의 왜곡 원인을 완전히 배제하여 신호를 전송할 수 있다. 따라서 일반적인 저비용의 옵토커플러를 적용하여 디지털 절연을 구현할 수 있다.

#### 1. 아날로그 신호의 디지털 변환

제안된 그림 4의 회로에는 ADC(analog to digital converter)가 채택된다. 멀티채널 아날로그 신호는 옵토커플러로 입력되기 전에 디지털 데이터로 변환된다. 신호  $A_{in0}$ ,  $A_{in1}$ ,  $A_{in2}$ 는 Microcontroller(PIC12F675, Microchip)의 ADC에서 각각 4-bit, 4-bit, 10-bit의 디지털 데이터로 변환된다.

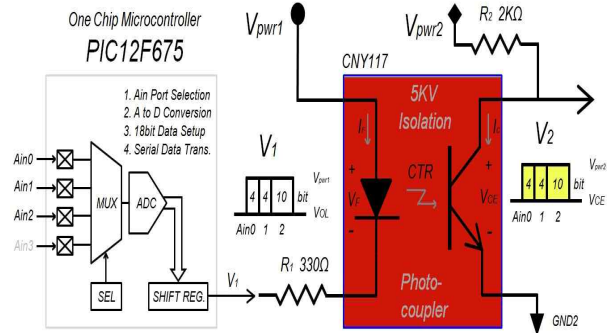


그림 4. 제안한 멀티채널 아날로그 신호 디지털 전송[6][10]  
Fig. 4. A proposal for multichannel signal transmission[6][10]

3채널 디지털 데이터는 옵토커플러 CNY117(Vishay Semiconductors)의 디지털 절연을 통하여 직렬 전송된다. 앞에서 살펴본 옵토커플러의 디지털 동작 조건인 식 (6a)를 기준하여 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 를 정하였으며 전원  $V_{pwr1}$ 과  $V_{pwr2}$ 에는 일반적으로 적용되는 5V를 적용하였다. 따라서 옵토커플러는 신호의 처리 과정에서 잡음 여유도가 우수한 디지털 전송을 수행한다. 회로의 설계에 적용한 ADC와 CNY117의 상세한 기능 및 특성은 제작사에서 제공한 사양서를 참조하였다[6][10].

## 2. 멀티채널 데이터 전송 프레임

이제 디지털 데이터를 직렬로 전송하기 위해 맞춤형 전송 프레임(transmission frame)을 설계한다. 프레임은 비동기 직렬 전송에 적용되며 채널의 순서와 비트 수는 용도에 따라 다르게 수정할 수 있도록 하였다. 제안된 회로에서 디지털로 변환된 병렬 데이터를 옵토커플러를 통하여 직렬 전송하기 위해 그림 5와 같이 18-bit의 전송 프레임을 제안한다.

프레임은 아날로그 신호 Ain0, Ain1, Ain2의 디지털 데이터 3채널로 구성된다. 프레임의 구성에서 채널의 순서는 4-bit의 Ain0과 Ain1이 연속되며 뒤 따르는 포즈(pause)에 의해 10-bit 채널 Ain2와 분리된다. 비동기 직렬 전송에서 데이터 길이(data length)에 비례하여 증가하는 전송 에러를 줄이기 위해 프레임의 모든 비트와 포즈가 동기 플래그(synchronous flag) 다음에 위치하며 고유한 지속 시간을 유지하도록 설계하였다. 비트 데이터 1과 0의 비트 시간(bit time)과 포즈 시간(pause time)은 그림 5와 같으며 MSB(most significant bit)가 선두에서 전송된다.

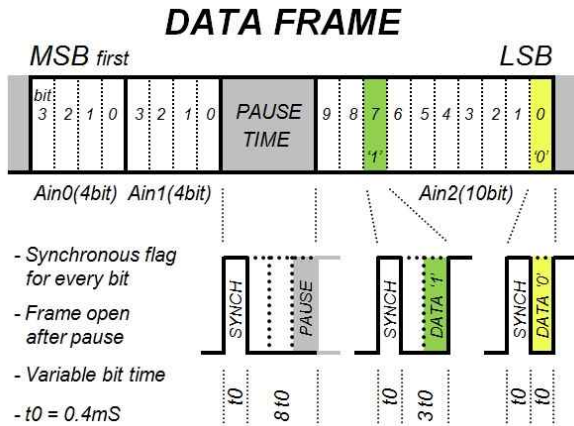


그림 5. 제안한 멀티채널 데이터 전송 프레임  
 Fig. 5. Proposal of multichannel transmission frame

제안하는 데이터 전송 프레임은 프로그램 기반으로 동작하기 때문에 다양한 멀티채널 전송에 대비할 수 있다. 멀티채널 데이터의 유연한 전송을 위해 각 채널의 우선 순위, 디지털 해상도, 전송 빈도 등을 조절하는 프로그램을 수정할 수 있다. 또한 멀티채널 데이터의 전송 효율을 높이기 위해 프레임에서 각 채널의 위치를 고정하였다. 송신과 수신에서 주소의 생성, 전송, 검출에 회로의 자원을 낭비할 필요가 없으며 필요한 정보만 빠르게 전송할 수 있다.

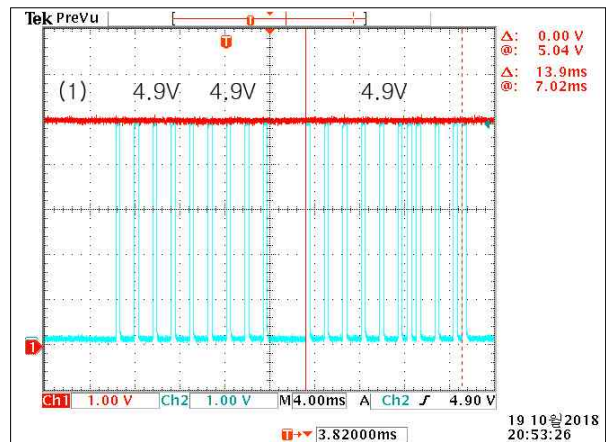
## IV. 실험 및 결과 분석

이제 제안된 회로의 제작과 프로그램의 구현을 통하여 실험의 결과를 분석하고 앞의 이론적 고찰과 일치함을 증명하고자 한다. 그림 4에 나타난 멀티채널 아날로그 신호의 디지털 변환, 그림 5의 멀티채널 전송 프레임 구현, 옵토커플러로의 데이터 직렬 전송에 관련한 모든 프로그램은 PIC12F675에서 동작하도록 직접 작성하여 실험하였다.

### 1. 멀티채널 디지털 전송의 실험 결과

제안된 그림 4의 회로 실험에서 3채널 아날로그 신호가 18-bit 디지털 데이터로 변환된 후 옵토커플러를 통하여 수신된 파형  $V_2$ 의 측정 결과는 그림 6과 같다. 프로그램으로 작성된 3채널 데이터 전송 프레임을 회로에서 전송 및 수신한 결과를 오실로스코프(oscilloscope, TDS3034, Tectronix)로 측정된 것이다. 그림의 좌측부터 아날로그 신호 Ain0, Ain1, Ain2가 순서대로 각각 4-bit, 4-bit, 10-bit의 디지털 데이터로 변환되어 전송 및 수신되었음을 나타낸다. 그림에서 측정된 시간이 동기 플래그, 비트 데이터 1, 0, 포즈의 순으로 각각 0.4ms, 1.2ms, 0.4ms, 3.2ms 이므로 디지털로 변환된 데이터의 수신 결과가 그림 5의 전송 프레임 설계와 정확히 일치함을 보여 준다.

참고로 각 측정 결과에는 좌측부터 Ain0, Ain1, Ain2 채널의 순서로 아날로그 값을 표기하였으며 적색 신호는 Ain2의 아날로그 입력 신호를 변환 전에 측정된 것이다. 파란색 디지털 파형은 데이터 전송 프레임이 옵토커플러를 통하여 수신된 결과를 나타내며 제안된 회로에서  $V_2$ 를 측정된 것이다.



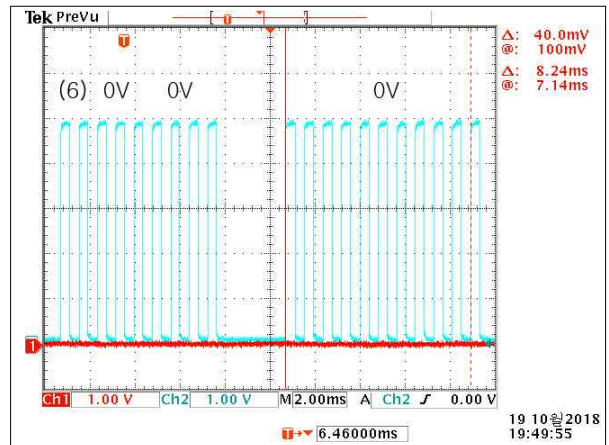
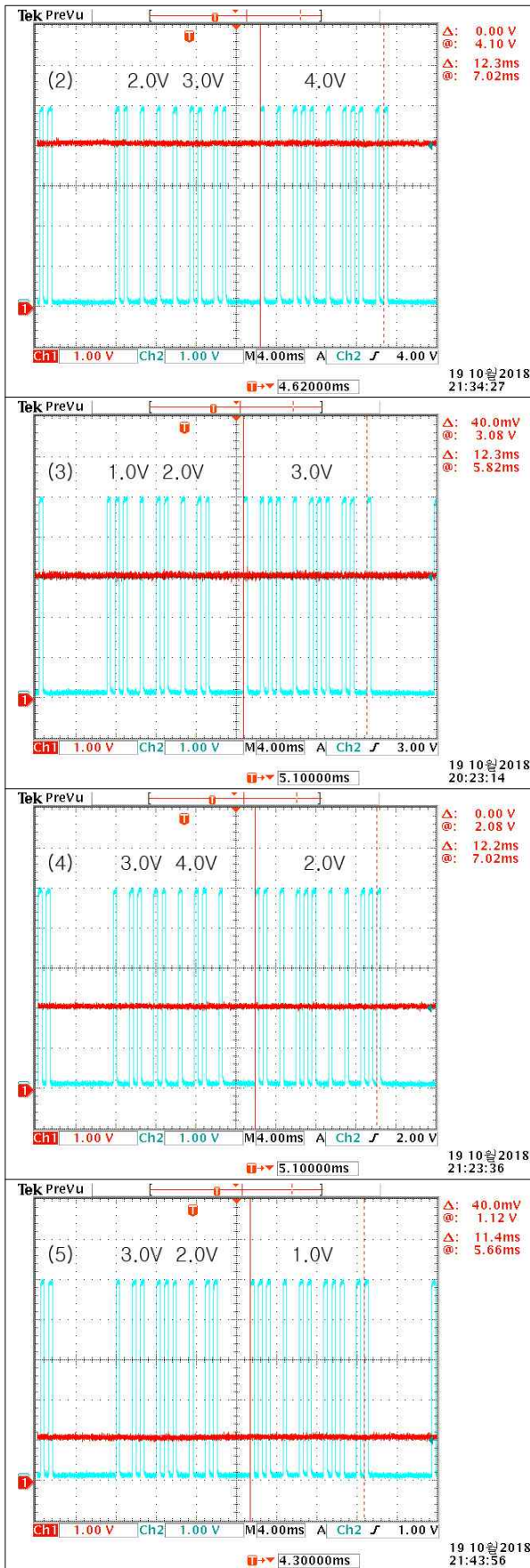


그림 6. 멀티채널 디지털 데이터 전송 결과  
Fig. 6. The results of digital data transmission

## 2. 디지털 전송 결과의 오차 분석

실험에서 수신된 파형의 측정 결과를 분석하여 이론적 오차와 비교한다. 다음의 식 (7a)와 (7b)는 4-bit와 10-bit로 변환된 디지털 데이터의 이론적 최대 양자화 오차(maximum quantization error)이다.

$$Error_4 = \left[ \frac{1}{2^{N-1}} \times 100 \right]_{N=4} = 6.667\% , \quad (7a)$$

$$Error_{10} = \left[ \frac{1}{2^{N-1}} \times 100 \right]_{N=10} = 0.098\% . \quad (7b)$$

표 2는 앞의 실험에서 측정된 디지털 수신 결과의 변환 전의 아날로그 입력과 비교한 오차를 나타낸다. 회로의 실험에서 전원  $V_{pwr1}$ 과  $V_{pwr2}$ 에 일반적으로 적용되는 5V를 적용하였기 때문에 실험에 채택한 아날로그 입력 신호는 전원을 초과하지 않는 4.9V이하로 제한하였다. 그림 6의 사진에서 보여주는 순서에 맞추어 실험 결과의 오차를 추출하여 표에서 배치하였다.

제한한 회로에서 수신된 디지털 신호  $V_2$ 를 아날로그 입력신호  $A_{inX}$ 와 비교하는 식 (8)을 이용하여 오차를 계산하였다. 4-bit로 변환된 데이터의 전송 결과가 이론적 최대 양자화 오차(6.667%) 이내로 측정되므로 제한한 회로의 동작이 정확한 것으로 판단할 수 있다. 또한 10-bit로 변환된 데이터는 최대 0.528% 이하의 오차를 보인다. 이는 신뢰성이 검증된 절연증폭기 HCPL-7850의 사양서[5]에서 제시하는 5%의 증폭도 오차(gain tolerance)와 비교하여 양호한 것으로 판단된다.

$$Error = \frac{(V_2 - A_{inX})}{5} \times 100. \quad (8)$$

앞에서 실험한 결과를 통하여 3채널 아날로그 신호가 정확하게 디지털 데이터로 변환되었고 옵토커플러 CNY117의 절연을 통한 디지털 직렬 전송도 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다.

표 2. 아날로그 신호의 전송 오차  
 Table 2. Transmission errors of analog signals

Analog Signal Ain0	Digital Signal V2				
	Value(V)	ADC(Binary)	Decimal	Value(V)	Error(%)
(1)	4.900	1111	15	5.000000	2.000
(2)	2.000	0111	7	2.333333	6.667
(3)	1.000	0011	3	1.000000	0.000
(4)	3.000	1010	10	3.333333	6.667
(5)	3.000	1010	10	3.333333	6.667
(6)	0.000	0000	0	0.000000	0.000

(a) Transmission errors of the channel Ain0

Analog Signal Ain1	Digital Signal V2				
	Value(V)	ADC(Binary)	Decimal	Value(V)	Error(%)
(1)	4.900	1111	15	5.000000	2.000
(2)	3.000	1010	10	3.333333	6.667
(3)	2.000	0110	6	2.000000	0.000
(4)	4.000	1101	13	4.333333	6.667
(5)	2.000	0110	6	2.000000	0.000
(6)	0.000	0000	0	0.000000	0.000

(b) Transmission errors of the channel Ain1

Analog Signal Ain2	Digital Signal V2				
	Value(V)	ADC(Binary)	Decimal	Value(V)	Error(%)
(1)	4.900	1111100110	998	4.877810	-0.444
(2)	4.000	1100110010	818	3.998045	-0.039
(3)	3.000	1001100101	613	2.996090	-0.078
(4)	2.000	0110011100	412	2.013685	0.274
(5)	1.000	0011010010	210	1.026393	0.528
(6)	0.000	0000000000	0	0.000000	0.000

(c) Transmission errors of the channel Ain2

## V. 결 론

논문에서 제안한 회로와 프로그램을 구현한 실험의 결과에서 멀티채널 아날로그 신호가 옵토커플러를 통하여 디지털로 정확히 전송되었다. 이는 아날로그 신호의 디지털 전송에서 옵토커플러에 적용한 이론적 고찰이 맞음을 실험적으로 증명한다. 따라서 비용 대비 효율적인 옵토커플러를 적용하여 잡음 여유도가 높은 디지털 절연을 구현할 수 있으며 신호의 왜곡을 초래하는 온도 의존성과 비선형성을 회피하여 멀티채널 아날로그 신호를 정확히 전송할 수 있음이 확인되었다.

앞으로 멀티채널 아날로그 신호의 전송 속도 향상에 대한 추가적인 연구를 추진할 계획이다.

## References

- [1] Adrian Zsombor Amanci, Harry E. Ruda and Francis P. Dawson, "Galvanic Isolation for High-Frequency Applications Using an Integrated Dielectric Structure," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 8, pp. 5797-5804, Aug. 2016.
- [2] National Instruments, "Isolation Types and Considerations When Taking a Measurement," <http://www.ni.com/instrument-fundamentals>.
- [3] Lars Johansson, "Galvanically isolated transmission of analog control signals and study of commercial state of the art technology for satellites and launchers," Master's thesis in Electrical Engineering, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2015.
- [4] Avago Technologies, "High Speed Digital Isolators, HCPL9000, HCPL-9031 and HCPL-901J," <http://www.avagotech.com>, Doc. no. AV02-0137EN, May 30, 2011.
- [5] Avago Technologies, "Hermetically Sealed Analog Isolation Amplifier, ACPL-785E, HCPL-7850 and HCPL-7851," <http://www.avagotech.com>, Doc. no. AV02-3479EN, October 1, 2012.
- [6] Vishay Semiconductors, "Optocoupler CNY117, Phototransistor Output, with Base Connection, 110°C Rated," <http://www.vishay.com>, Doc. no. 83876, Rev. 1.6, January 16, 2012.
- [7] Thomas Kugelstadt, "Industrial Interface, RS-485 Ground Potential Differences or When Good Grounds turn Bad," Texas Instruments, October 2010.
- [8] Renesas Electronics Corporation, "Application note, Ground Potential Differences, Origin and Remedies," <http://www.renesas.com>, Doc. no. AN1980, Rev. 0.00, July 29, 2016.
- [9] Fairchild Semiconductor Corporation, "NPN Epitaxial Silicon Transistor, BU406," <http://www.fairchildsemi.com>, Doc. no. BU406, Rev. 1.2.1, September 2012.
- [10] Microchip Technology Inc., "8-Pin, Flash-Based 8-Bit CMOS Microcontrollers, PIC12F629/675 Data Sheet," <http://www.microchip.com>, Doc. no. DS41190G, January 5, 2010.