



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

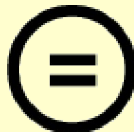
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

유연성 탄소나노튜브 센서 기반의
구조물 건전성 감시를 위한 스트레인
발생 위치 추정 시스템



2011년 2월 25일

부 경 대 학 교 대 학 원

메 카 트 로 닉 스 공 학 전 공

김 진 호

공 학 석 사 학 위 논 문

유연성 탄소나노튜브 센서 기반의
구조물 건전성 감시를 위한 스트레인
발생 위치 추정 시스템



지도교수 강 인 필

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2011 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

메 카 트 로 닉 스 공 학 전 공

김 진 호

김진호의 공학석사 학위논문을 인준함

2011년 2월 25일



주	심	공학박사	백	운	경	인
위	원	공학박사	정	영	석	인
위	원	공학박사	강	인	필	인

목 차

Abstract -----	ii
I . 서 론 -----	1
1. 연구배경 -----	1
2. 연구목적 및 내용 -----	3
II . CFSS 제작 및 특성 -----	4
1. CFSS 제작 -----	4
2. CFSS 특성 파악 실험 -----	5
2.1 CFSS의 정확성 -----	5
2.2 CFSS의 감도 -----	8
2.3 CFSS의 선형성 -----	10
2.4 CFSS의 히스테리시스 -----	13
2.5 CFSS의 반복성 -----	15
2.6 CFSS의 제로드리프트 -----	16
2.7 CFSS의 온도특성 -----	19
2.8 CFSS의 응답특성 -----	22
2.9 CFSS의 동적특성 -----	23
III . ANS 개발 -----	24
1. ANS 정의 및 필요성 -----	24
2. ANS 제작 -----	24
2.1 CFSS를 이용한 3×3 Array 형태의 인공 신경망 제작 -----	24
2.2 인공신경망의 신호처리 회로 구성 -----	28
3. ANS에 가해진 외력의 위치 추정 알고리즘 SPA 개발 -----	40
3.1 SPA 정의 및 필요성 -----	40
3.2 CFSS의 특성을 이용한 SPA 설계 -----	40
3.3 Labview 기반의 ANS에 가해진 외력의 위치 추정 시스템 -----	46
IV . 결론 -----	56
참고 문헌 -----	58

A Strain Positioning System using Carbonnanotube Flexible Sensors For Structural Health Monitoring

Jin-Ho Kim

*Department of Mechanical Engineering,
The Graduate School,
Pukyong National University*



Abstract

In this study, a carbon nanotube (CNT) flexible strain sensor (CFSS) was fabricated with CNT based rubber composite for the strain sensing of structural health monitoring (SHM). The CFSS is a biomimetic flexible continuous strain sensor by means of piezoresistivity in CNT/EPDM (Ethylene Propylene Diene M-class) composite. For the application of the CFSS of SHM, an artificial neuron network system (ANS) was developed using an array of CFSS for a signal processing system of the sensor and applied to a flexible membrane. Moreover, a strain positioning algorithm (SPA) was developed to find the localized strain information of ANS in Labview environments.

Key Words : Artificial neuron network system, Carbon nanotube , Flexible sensor, Strain sensor, Structural Health Monitoring

I . 서 론

1. 연구배경

오늘날 우리 생활의 편리함을 위해 사용하는 자동차, 비행기, 배등의 첨단 기술 분야뿐만 아니라 일상생활에 쓰이는 가전제품 및 스포츠, 레저 용품에 가볍고 강하면서 내구성도 좋은 재료를 원하게 됨에 따라 나노복합(nanocomposite) 재료의 필요성이 대두 되었다. 나노 복합재료는 나노 크기를 가지는 서로 다른 성질을 가진 미세한 물질들이 함께 섞여있거나 결합을 이루고 있는 형태를 말한다. 특히 나노복합(nanocomposite) 재료의 첨가재로 활용할 수 있는 탄소나노튜브(carbon nanotube, cnt)는 일본의 Iijima에 의해 발견된 탄소로 이루어진 탄소동소체로서 탄소 6개로 이루어진 육각형들이 서로 연결돼 벌집무늬로 결합되어 원통 형태를 이루는 물질이다.[1] 탄소나노튜브의 특징으로는 높은 강도 및 탄성계수 낮은 마찰계수 등 우수한 기계적 특성들을 가지고 있어 고강도 구조용 소재분야에 그 활용성 검토가 활발히 이루어져 왔다. 또한 나선성(chirality)이나 꼬임의 정도에 따라 전기를 통하여 구리와 같은 금속성 전극이 될 수 있는 우수한 전기적 특성을 가지고 있다.[2] 이러한 특성을 바탕으로 최근에는 에너지, 바이오분야 및 융합된 센서분야에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 자연재해 혹은 노후로 인한 구조물 및 기계의 손상을 감지하는 구조물 건전성 감시(Structural Health Monitoring, SHM)용 센서 개발 연구가 이루어지고 있다.[3-5] 이처럼 탄소나노튜브를 이용한 SHM용 센서 개발이 이루어지는 이유는 현재 사용되는 센서들의 연구 사례를 통해 알 수 있다. SHM에 활용되는 센서들을 연구한 사례들은 2007년 J.L.F. Freire의 연구팀은 송유관이나 가스 수송관의 부식정도를 확인하기 위해서 스트레인 게이지를 사용해서 수리해야 할 수분의 강도를 측정하는데 사용하였고[6] 2006년 Kim 등은 항공우주용 구조물의 건전성 모니터링 기술을 스트레인게이지를 사용하여 연구하였다.[7] 또한 2004년 Lee 등은 force sensing resistor (FSR)을 격자 구조의 그물망 형태로 구성하여 센서에 가해진 압력 분포에 따른 크랙의 위치를 추정하는 연구를 수행하였다.[8] 그리고 2007년 Park 등은 복합재 보강판에 영구히 부착된 배열 압전(PZT)센서를 사용하여 저속 충격 손

상을 탐지 할 수 있는 연구를 수행 하였으며[9] 2008년 Mousumi Majumder 연구팀과 F. Necati Catbasa 등은 광섬유 브래그 격자(fiber bragg grating, FBG) 센서를 이용하여 건물 및 다리의 안전성을 실시간으로 탐지해주는 기술을 연구하였다.[10-11] 그 외 유연한 구조물의 건전성 판별을 위한 압전 필름인 PVDF를 이용한 연구가 수행되어 왔다.[12-15]

위 연구들에 사용된 센서들은 대부분 포인트 방식의 센서로서 구조물의 크기가 큰 교량, 건물, 비행기, 선박 등 복잡한 구조물은 손상 영역이 넓어 이를 계측하기 위해 충분하게 센서를 배치하면 데이터 처리에 따른 복잡한 배선 및 측정비용의 상승으로 인하여 대형 구조물에 적용이 어려울 수가 있다. 또한 스트레인게이지의 경우 금속 저항선으로 구성이 되어 외부의 압력이 크면 쉽게 부러질 수 있는 내구성의 단점과 유연성 구조물에 적용이 쉽지 않은 문제점이 있고 FBG 센서를 사용한 경우에는 유연성 구조물에 사용할 수 있으며 연속형 센서로서의 사용이 가능하여 적은 센서의 사용으로 인한 신호처리 비용 감소 및 산화 부식에 강한 내구성 역시 좋아 구조물 건전성 감시용 센서로 많은 연구들이 수행 중에 있다. 하지만 광 측정 장비 사용으로 인한 계측 시스템의 고비용성과 브래그의 위치 이탈로 인한 오류 신호 생성 및 미소 굽힘에 의한 광 누출 현상으로 출력 감소가 발생하는 현상이 발생한다.

따라서 앞서 기술한 내용처럼 기존 센서들의 단점을 보완하는 센서의 개발을 통하여 유연성을 지니며 대변형의 구조물에 적용할 수 있는 실시간 안전성 평가 시스템 개발이 필요하다.

2. 연구목적 및 내용

구조물 건전성 감시(Structural Health Monitoring, SHM)는 다양한 센서들을 활용하여 대상 구조물의 상태를 진단하거나 감시하는 기술이다. SHM의 개발은 자연재해 혹은 노후로 인한 구조물 및 기계의 손상을 감지하여 재해를 미리 예방하거나 유지 보수에 따른 비용 절감을 기대 할 수 있다. 그러나 구조물의 크기가 큰 교량, 건물, 비행기, 선박 등 복잡한 구조물은 손상 영역이 넓어 이를 계측하기 위해 충분하게 센서를 배치하면 데이터 처리에 따른 복잡한 배선 및 측정 비용의 상승으로 인하여 대형 구조물에 적용이 어려울 수가 있다.[16] 따라서 본 논문에서는 일반적으로 SHM을 위하여 많은 수의 센서와 이들을 위한 다 채널 시스템의 복잡성과 경제적 문제를 개선하기 위해 새로운 연속형 센서를 이용한 시스템을 연구하였다. 본 연구에서는 탄소나노튜브와 고무의 합성을 통하여 탄소나노튜브 유연성 스트레인 센서(carbon nanotube flexible strain sensor, CFSS)를 제작하고 이를 여러 개의 센싱 노드(sensing node)를 가지는 연속형 센서(continuo sensor)로 개발하였다. 이렇게 개발된 센서를 실시간으로 구조물의 안정성을 검증하는 시스템에 적합한 센서임을 보이기 위해 현재 SHM에 널리 사용되고 있는 스트레인 게이지와 특성 평가를 통하여 그 가능성을 연구 하였다. 그리고 구조물의 건전성 진단에 대한 고비용의 신호처리 문제는 CFSS를 격자로 배치하여 넓은 면적을 적은 수의 센서로 데이터를 처리 할 수 있는 신호처리 시스템인 인공뉴런 네트워크 시스템(artificial neuron network system, ANS)을 개발하고 이를 통하여 경제성과 효율성을 향상 시키고자 하였다. 또한 스트레인에 대한 출력 값은 인지하나 스트레인이 발생한 위치를 알지 못하는 단일 CFSS를 그물망 형태로 제작하여 ANS에 발생한 스트레인에 따른 위치를 CFSS의 출력 신호의 강도 비교를 통해 추정하는 알고리즘인 SPA(strain positioning algorithm)를 Labview 환경에서 개발하여 구조물의 안전성을 실시간으로 평가 할 수 있는 시스템을 개발하였다.

II . CFSS 제작 및 특성

1. CFSS 제작

CFSS는 EPDM(Ethylene Propylene Diene M-class)을 기저재료(matrix)로 하고 합성기법으로 제조된 다중벽 탄소나노튜브(Aldrich,677248)와 나노클레이(Southern Clay Products, Cloisite 15A)를 함량비(wt%) 10% 내외의 전도성 충전재(filler)로 이용하고 고무 기반의 나노 복합 소재를 이용하여 혼합 제작 하였다.[16] 이 복합소재는 유연성과 전기 전도성을 지니고 있을 뿐만 아니라 스트레인을 측정 할 수 있는 전왜성(piezoresistivity)을 지니고 있다. 따라서 이를 적당한 크기로 절단하고 전극을 연결하여 Fig. 1과 같이 유연성 스트레인 센서를 제작 하였다.

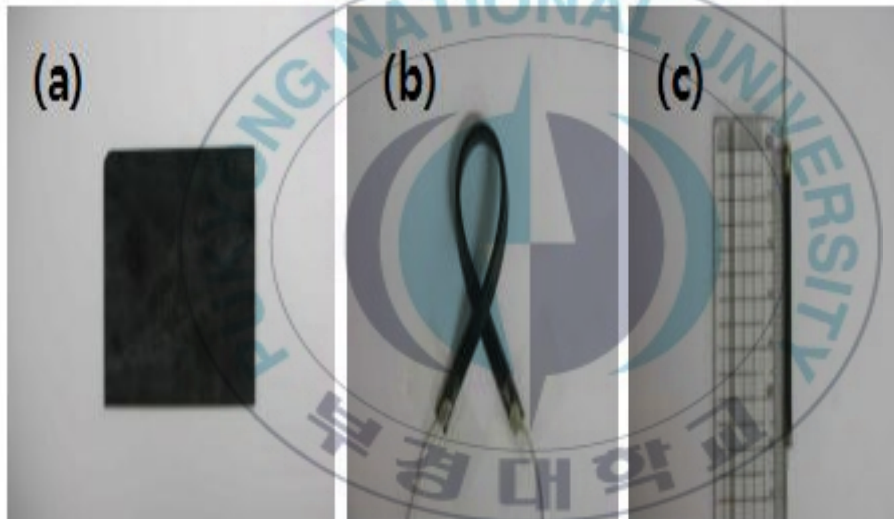


Fig. 1 CNT/EPDM Strain Sensor :

- (a) CNT/EPDM 전도성 고무 패드(250mm×250mm×2mm)
- (b) 대변형량 측정을 위한 유연 스트레인 센서(150mm×6mm×2mm, 123k Ω)
- (c) 생체모방 유연 인공신경 센서(60mm×3mm×2mm, 90k Ω)

2. CFSS의 특성 파악 실험

CFSS를 구조물에 작용하는 하중이나 변형을 측정하는 센서로 사용하기 위해서는 기존의 스트레인과 하중을 측정하는 스트레인 게이지와 같은 센서들처럼 물리적인 변형을 전기적 신호로 변환해 주어야 한다. CFSS는 선행 연구자에 의하여 전왜성을 지닌 특성과 스트레인이 인장과 압축에 대해 선형적으로 변하는 것이 확인되어 구조물의 변형을 측정 할 수 있는 센서로서의 가능성이 제시되었다.[5,16] 하지만 구조물에 작용하는 하중이나 변형을 좀 더 정확히 측정하기 위해 고려되어야 할 센서의 정적 및 동적 특성 파악이 아직 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 CFSS의 특성을 파악하는 정적인 특성 실험과 동적인 특성 실험을 10회의 반복실험을 통한 평균값을 사용하여 센서 특성으로부터 발생할 수 있는 왜곡된 신호의 발생을 보상하여 구조물의 안전 진단을 정확히 수행 할 수 있도록 센서의 특성 파악에 대한 선행적 연구를 수행하고 그에 대한 결과를 고찰하였다.

2.1 CFSS의 정확성(Accuracy)

정확성이란 센서가 얼마나 정확한지를 표현하는 방법으로, 센서 출력의 참값과 실제값의 차이, 즉 센서의 오차 중 가장 큰 수치를 퍼센트로 나타낸다.[17-18] 따라서 CFSS의 정확성을 구하기 위해 CFSS를 30mm×10mm×2mm의 크기로 제작하여 Fig. 2에 표현한 것처럼 스틸자에 에폭시 본드를 이용하여 부착하고 전극은 실버에폭시를 이용하여 만들고 그 위에 전선을 부착하여 제작해 센서의 기능을 갖게 하였다. 제작된 CFSS를 C클램프를 이용하여 실험대에 고정 시킨 후 하중에 대한 출력 전압을 측정하기 위하여 CFSS의 저항 값을 전압값으로 바꿔주는 휘스톤 브리지 회로를 이용하여 출력 신호를 전압의



Fig. 2 스틸자에 부착된 CFSS

신호로 바뀌 주었다. 본 실험의 환경은 실온에서 진행이 되었고 하중에 대한 출력 신호를 측정하기 위해 스틸자 끝에 추를 50g에서 400g까지 50g씩 증가 시키면서 CFSS에서 하중에 대한 출력 전압을 측정하였고 특성 파악의 신뢰성을 높이기 위해 10회의 반복 실험을 통해 데이터를 수집하여 측정된 데이터에 평균값을 도입하여 CFSS 특성값의 신뢰성을 높였다. 또한 스트레인파 하중을 측정할 수 있는 상용화된 스트레인게이지(CAS, AP-11-S30N-120)를 동일한 실험을 통하여 CFSS의 성능을 확인하여 보았다. 이렇게 실험을 통해 측정된 데이터를 표. 1에 나타내었다.

표. 1 CFSS와 Strain Gage의 하중에 대한 출력 전압

CFSS		Strain Gage	
하중(g)	출력전압(mV)	하중(g)	출력전압(mV)
50	0.5	50	0.1
100	1.5	100	0.5
150	1.9	150	0.8
200	2.5	200	1.2
250	3.1	250	1.4
300	4	300	1.8
350	4.5	350	2.1
400	5.2	400	2.4

위 데이터에서 확인 할 수 있듯이 하중의 증가에 비례하게 두 센서의 출력이 증가하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 외팔보 상에서 CFSS가 인장에 대하여 원래의 스틸자의 길이에 대해 늘어 난 것을 출력 값으로 표시해주므로 구조물의 변형을 감지할 수 있는 스트레인 센서로 사용이 가능하다는 것을 확인 할 수 있다. 또한 위 데이터를 이용하여 각 센서의 정확성을 알아보면 먼저 센서 출력의 참값을 알아본다. 참값은 입력과 출력 사이의 관계식을 선형으로 가정하면 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$V_{\text{true}} = \frac{V_{\text{full scale}}}{\text{Load}_{\text{full scale}}} \times \text{Load} \quad (1.1)$$

여기서 $V_{\text{full scale}}$ 는 측정된 데이터의 최대 출력값이며 $\text{Load}_{\text{full scale}}$ 는 최대 하중을 말한다.[18] 따라서 식 1.1에 표. 1에서 측정된 데이터를 이용하여 참값을 계산 한다. 참값을 계산하기 위해 가정했던 센서의 입력에 대한 출력이 선형적으로 비례하게 나온다는 전제에 따라 각 센서의 하중에 대한 출력값의 증가율을 계산하고 평균값을 계산하여 $V_{\text{full scale}}$ 값을 구하여 참값을 구했다. 계산된 참값의 결과와 실제 각 센서의 하중에 대한 출력값의 차를 구하여 오차를 구하고 이 오차값에 일정하게 증가시킨 하중의 용량을 곱하여 각 센서의 %FSO(full scale output)의 정확도를 표. 2에 나타내었다.

표. 2 CFSS와 Strain Gage의 정확성

CFSS					Strain Gage				
하중 (g)	출력 (mV)	참값 (mV)	오차 (mV)	정확도 (%FSO)	하중 (g)	출력 (mV)	참값 (mV)	오차 (mV)	정확도 (%FSO)
50	0.5	0.67	0.17	8.5	50	0.1	0.33	0.23	11.5
100	1.5	1.34	-0.16	-8	100	0.5	0.66	0.16	8
150	1.9	2.01	0.11	5.5	150	0.8	0.99	0.19	9.5
200	2.5	2.68	0.18	9	200	1.2	1.32	0.12	6
250	3.1	3.35	0.25	12.5	250	1.4	1.65	0.25	12.5
300	4	4.02	0.02	1	300	1.8	1.98	0.18	9
350	4.5	4.69	0.19	9.5	350	2.1	2.31	0.21	10.5
400	5.2	5.36	0.16	8	400	2.4	2.64	0.24	12

표. 2에서 알 수 있듯이 CFSS와 스트레인게이지의 정확도는 250g의 하중에서 가장 좋지 않은 정확성을 가지고 있는 것으로 나타났고 또한 상용화된 스트레인게이지와 CFSS의 정확성 서로 비슷한 결과를 나타내고 있다.

전체적으로 CFSS는 5.75%FSO의 정확성을 나타내고 스트레인게이지는 9.875%FSO의 정확성을 가지고 있다. 따라서 CFSS는 스트레인게이지 보다 더 좋은 정확성을 가지고 있다고 사료된다.

2.2 CFSS의 감도(Sensitivity)

감도는 감지하고자 하는 대상, 즉 센서의 입력이 Δx 만큼 변화하였을 때 출력이 Δy 만큼 변화했다면 감도는 다음과 같이 주어진다.

$$S = \frac{\text{출력값}}{\text{입력값}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.2)$$

즉 감도는 측정대상 양이 변화했을 때 센서의 출력이 얼마나 많이 변화하느냐를 나타내는 것으로 측정 정밀도 및 정확도를 결정하는 중요한 요소이다.[18-19]

CFSS의 감도를 측정하기 위해 표.1의 데이터를 Fig.3과 같이 도시하고 도시된 데이터 값이 직선의 기울기를 갖는다고 가정하여 CFSS의 감도를 구한다. 감도는 최소제곱법을 사용하여[19] 근사직선을 구한 후 X축인 전체 하중의 분포를 Δx 로 정하고 Δy 는 입력값에 대한 출력값인 Y축으로 하여 1.2식에 각 데이터를 대입하여 감도를 구하였다.

그 결과 CFSS는 약 0.013[mV/g]의 감도를 갖고 스트레인게이지의 감도는 약 0.006[mV/g]의 감도를 갖는 것으로 확인 되었다. 두 센서의 감도를 비교한 결과 0.007[mV/g] 차이를 보였고 감도는 크면 민감한 반응을 측정하는 곳에 적합하므로 본 연구의 목적인 구조물의 건전성 감시에 적합하다고 할 수 있다. 또한 감도가 높으면 잡음의 영향도 받기 쉬운 특성이 있는데 이 특성은 본 실험의 결과에서 나타난 것처럼 CFSS와 스트레인게이지는 잡음의 영향을 심하게 받기에는 무리가 있다고 사료된다. 또한 측정된 CFSS의 게이지 율(Gage Factor, Sg)은 약 3.4이고 스트레인게이지는 $2.1 \pm 0.5\%$ 의 게이지 율을 보이고 있어 CFSS가 스트레인 게이지보다 좀 더 민감한 곳에 사용이 가능하다고 사료된다.

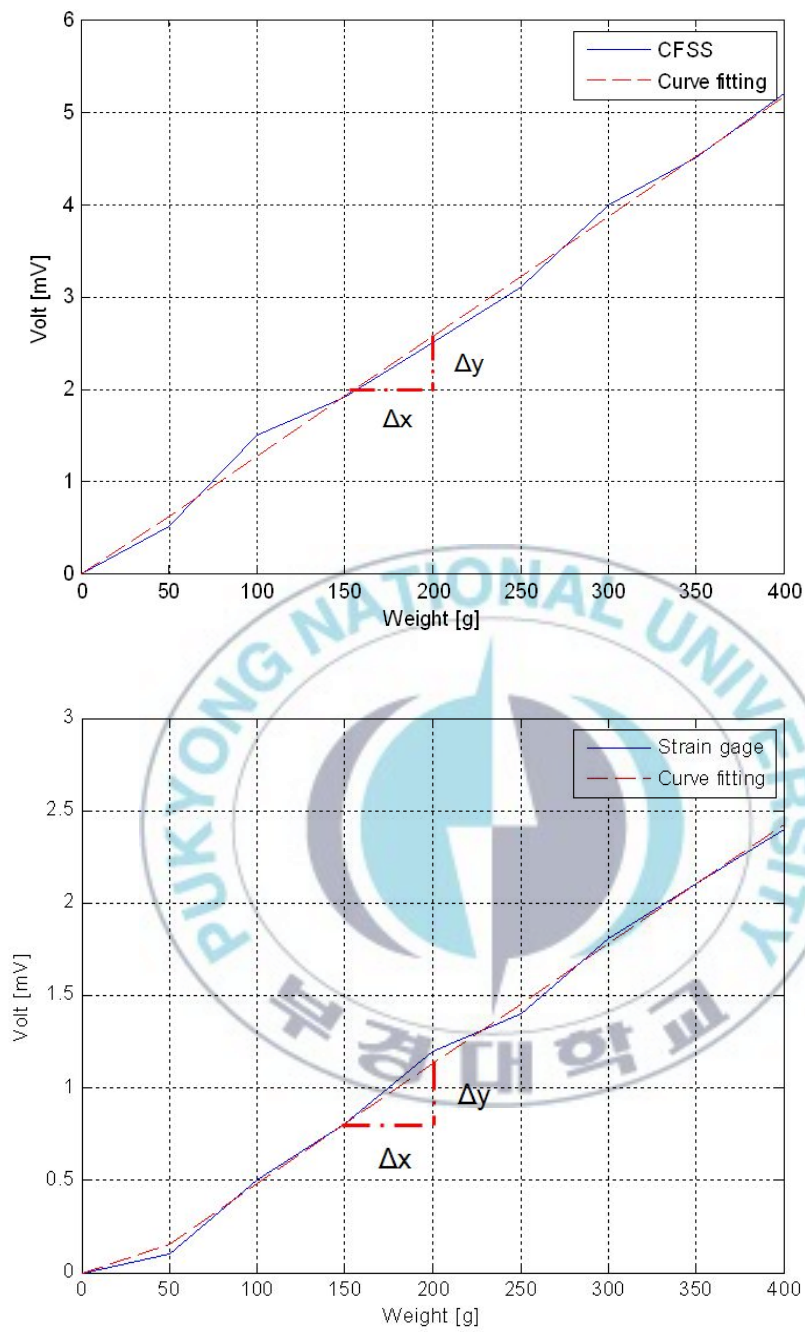


Fig. 3 CFSS와 Strain Gage의 감도 특성

2.3 CFSS의 선형성(Linearity)

이상적인 센서의 경우 입력값과 출력값의 관계는 원점을 지나는 직선으로 나타내어진다. 그러나 실제 센서는 그렇지 못한 경우가 대부분인데 이때 실제 입력과 출력의 관계가 이러한 직선에 얼마나 가까운가를 수치로 나타낼 필요가 있다. 이를 센서의 선형성(Linearity)이라고 하며 이를 정의하는 방법은 매우 다양한 방법이 있지만 본 연구에서는 최소제곱법(least square method)을 사용하여 CFSS 및 스트레인게이지의 선형성을 고찰 한다. 최소제곱법은 측정된 데이터에 가장 적합한 근사 함수를 구하는 방법으로 오차는 주어진 자료와 근사 함수 값과의 차이를 제곱하여 모두 합한 것이다.[19] 먼저 주어진 자료에 가장 적합한 근사직선을 구하는 것을 생각한다. 즉 측정된 데이터에서 i 번째 값을 y_i , 근사적인 i 번째 값을 $\alpha x_i + \beta$ 라 하면 근사 직선을 구한다는 것은

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - \alpha x_i + \beta]^2 \quad (1.3)$$

을 최소로 하는 α 와 β 를 구하는 것이다. 따라서 식 1.3을 이용하여 α 와 β 를 구하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad \beta = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1.4)$$

따라서 표.1에서 정리된 CFSS와 스트레인게이지의 하중에 대한 출력전압 데이터를 이용하여 위 1.4식에 대입하면 CFSS와 스트레인게이지의 근사직선의 방정식을 유도 할 수 있다.[19] CFSS의 유도된 방정식은

$$y = 0.013x - 0.036 \quad (1.5)$$

과 같고 스트레인 게이지의 근사직선 방정식은

$$y = 0.007x - 0.175 \quad (1.6)$$

이다. 식 1.5와 식 1.6을 통하여 각 센서의 근사 직선을 구한 것을 Fig. 4에 도시하였다. 도시된 각 센서의 근사 직선을 이용하여 선형성 도출하면 CFSS는 100g의 입력값에서 근사 직선과 가장 큰 차이가 나타나므로 선형성은 4.56%FSO로 나타내었고 스트레인게이지는 200g의 입력값에서 가장 큰 차이를 보이므로 선형성은 3.09%FSO로 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 이상적으로 FSO가 100%의 기준을 갖는다고 가정했을 때 이상적인 결과는 도출되지 않았지만 100%에 가까운 95.44%와 96.91%의 선형성을 가지고 있어 각 센서의 선형성이 우수한 것으로 사료된다. 이 결과를 바탕으로 입력에 대한 출력의 예측 값을 확인할 수 있어 외력의 발생으로 인한 구조물의 변형을 예측 할 때 출력 신호에 선형성을 적용하여 입력값을 보다 정확히 예측 할 수 있을 것으로 사료된다.



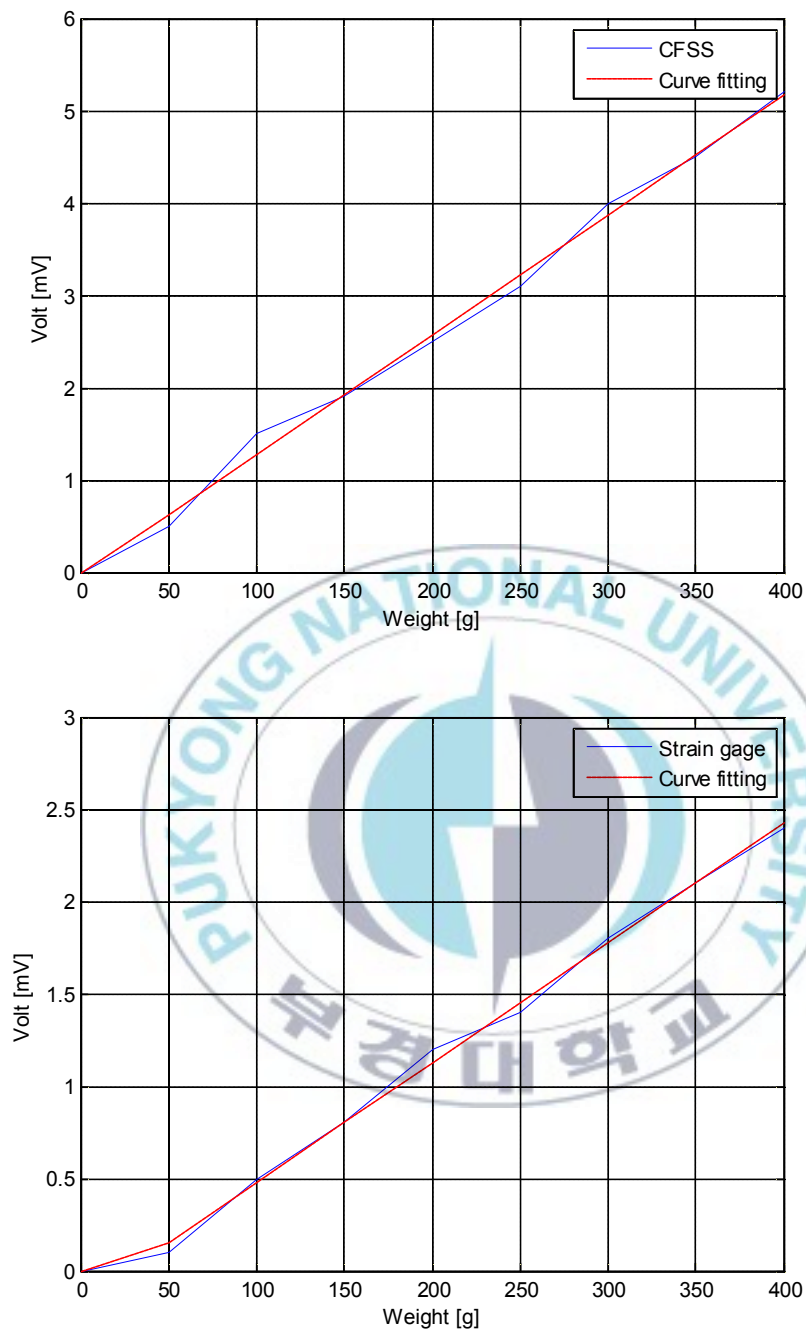


Fig. 4 CFSS와 Strain Gage의 선형성

2.4 CFSS의 히스테리시스(Hysteresis)

정도의 차이는 있지만 대부분의 센서에 있어서 같은 입력을 인가한 경우라도 작은 값에서부터 증가시키면서 인가한 경우와 큰 값에서부터 감소시키면서 인가한 경우의 출력값이 다르게 된다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 어떤 입력값에 대한 출력값은 그전에 인가된 입력의 값과 무관하지 않기 때문이다. 이러한 특성을 히스테리시스라 하며 히스테리시스는 증가시의 값과 감소시의 값의 차이 중 가장 큰 값을 %FSO로 나타내게 된다.[17-18]

CFSS와 스트레인게이지의 히스테리시스에 대한 특성을 파악하기 위해 앞서 기술한 방법을 통하여 센서의 하중의 값을 증가와 감소의 구간으로 나누어 실험을 한 후 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 도시된 CFSS와 스트레인게이지의 증가와 감소 구간 중 가장 큰 히스테리시스 차이를 보이는 200g의 하중 구간에서 감소구간의 하중에 대한 출력값을 y_1 이라고 하고 증가 구간의 하중에 대한 출력값을 y_2 라고 정하여 두 구간의 차를 측정하여 각 센서의 히스테리시스를 측정하였다. 측정한 결과 CFSS는 13.5%FSO의 오차를 갖고 스트레인게이지는 8.3%FSO의 히스테리시스 오차를 나타내었다. 이것은 히스테리시스가 환경의 조건에 따라 센서의 재질이 영향을 받는 성질이 있으므로 고무(EPDM)를 기저재료로 사용한 CFSS의 경우에는 탄성이 스트레인게이지보다 뛰어나기 때문에 좀 더 많은 재료적 영향을 받아 위와 같은 결과가 나타났다고 사료된다. 또한 이 결과를 통하여 아주 우수한 히스테리시스 특성을 갖는다고 언급할 수 없지만 상용화된 스트레인게이지에 비하여 큰 차이의 오차를 보이지 않아 구조물의 변형을 측정할 수 있는 센서로서 충분히 사용할 수 있다고 사료된다.

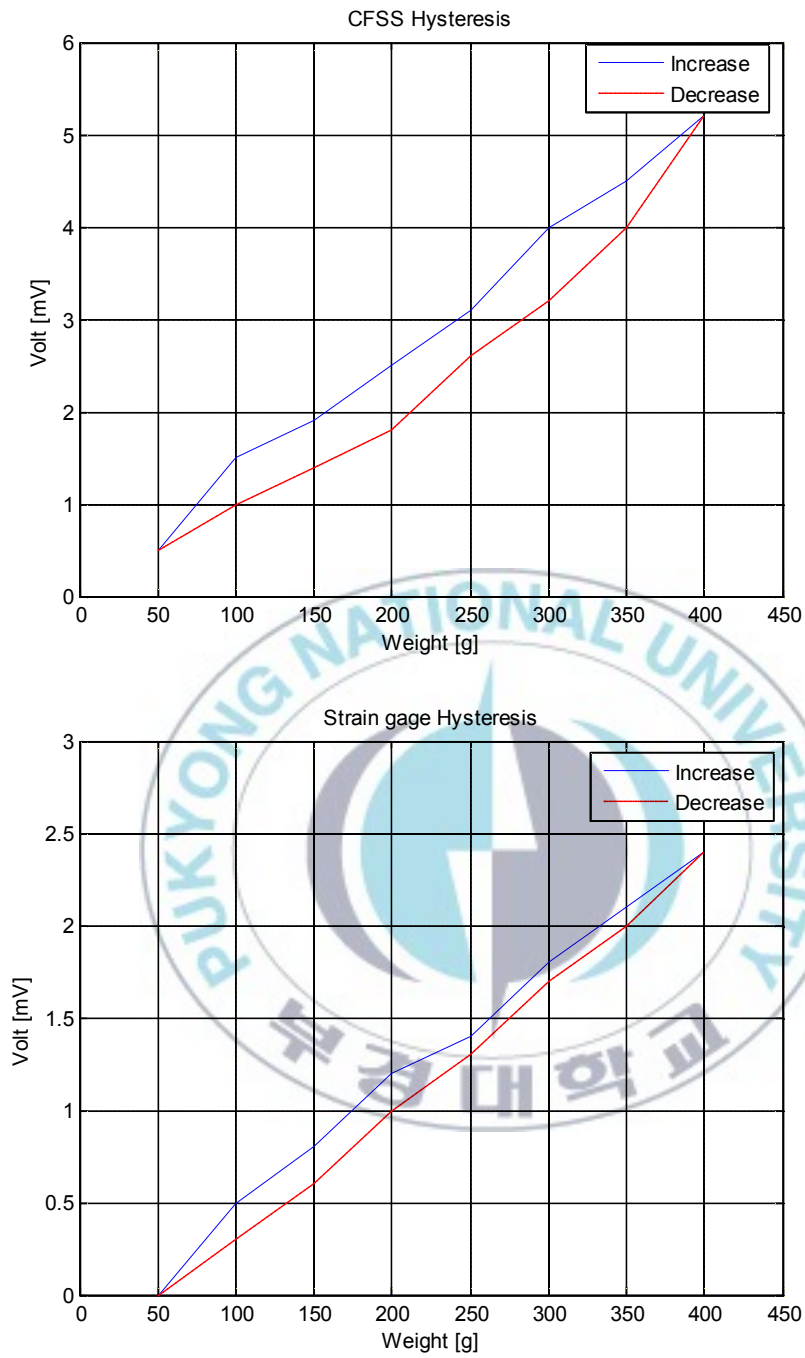


Fig. 5 CFSS와 Strain Gage의 히스테리시스

2.5 CFSS의 반복성(Repeatability)

반복성은 센서에 같은 크기의 입력을 여러 번 반복해서 인가하였을 때 출력 값이 지정된 값에서부터 얼마나 많이 변화하는지를 나타내는 척도이며 정확도와 유사한 정밀도 개념으로 재현성이라고 표현되기도 한다.[17-18]

반복성은 센서의 특징 중 가장 중요한 특징으로써 정확성이 떨어지는 센서의 경우에는 Calibration에 의해서 그 특징을 보완하여 개선할 수 있으나, 반복도가 떨어지는 센서의 경우에는 개선을 하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 센서의 사용에 있어서 가장 필요하고 중요한 것은 일관성 있는 동작 특성이므로 이러한 특성을 관찰하기위해 다음과 같이 CFSS의 반복성 측정 실험을 구성고 동일한 조건의 실험을 통한 스트레인게이지의 반복성 특성과 비교 하였다.

CFSS를 부착한 스틸자를 실험대에 C클램프로 고정하여 외팔보를 만들고 200g의 추를 메달아 입력 하중에 대한 CFSS의 출력 값을 1분 간격으로 10회 동안 실온의 조건에서 CFSS의 입력에 대한 출력 값의 반복 실험을 휘스톤 브리지를 이용한 신호처리 회로를 통해 실행하였다. 또한 동일한 방법으로 스트레인게이지의 반복성 실험을 진행하였고 그 결과를 표.3에 나타내었다.

표. 3 CFSS의 반복성 실험 결과

시행 횟수	CFSS	Strain Gage
	Output(mV)	
1	2.1	1.4
2	2.1	1.4
3	2.1	1.5
4	2.1	1.5
5	2.1	1.5
6	2.2	1.5
7	2.2	1.5
8	2.2	1.5
9	2.2	1.5
10	2.2	1.5

CFSS의 반복성 특성은 표.1에 나타난 것처럼 최소값은 2.2mV이고 최대값은 2.2mV이며 평균값은 2.15로 나타났다. 이것은 평균값 2.15에 대해 측정값의 분포가 크지 않아서 반복성이 좋다고 할 수 있다. 또한 CFSS의 성능을 비교하기 위해 사용한 스트레인게이지의 반복성 특성은 최소값 1.4, 최고값 1.5, 평균값 1.48의 결과를 나타내었고 평균값에 대한 측정값의 분포가 CFSS의 결과보다 크지 않아 반복성이 좀 더 좋은 결과를 확인 할 수 있었다. 하지만 상용화되어 나온 스트레인게이지의 성능에 많이 뒤떨어지지 않는 결과를 보이는 것을 확인하여 같은 외부 입력이 들어왔을 때 계속 똑같은 출력 측정값을 나타낼 수 있으므로 스트레인 센서로서 사용이 가능할 것으로 사료된다.

2.6 CFSS의 제로 드리프트(Zero Drift)

제로 드리프트란 외부 입력이 없을 때 측정 출력값이 zero가 되는데 일정 시간 사용하면 입력이 없는 상태에서도 출력값이 zero가 아닌 다른 값으로 벗어나는 정도를 말한다.[17] 이러한 특성은 구조물의 건전성을 실시간으로 감시를 시스템을 개발하고자하는 본 연구에서는 센서의 사용이 단기간의 사용이 아니라 장기적 사용을 목적으로 하는 센서의 개발이므로 장기간 입력값이 없는 상태에서 센서의 일정한 출력의 확보가 필요하다고 사료된다. 따라서 CFSS의 제로 드리프트 실험을 다음과 같은 방법으로 시행하였다.

앞서 언급한 실험 방법과 동일하게 센서의 물리적 변화를 전기적 신호로 바뀌주는 신호처리 회로를 구성하고 이것을 각 5분, 15분, 30분 간격으로 5회의 반복 실험을 거쳐 데이터를 획득하고 이 데이터에 평균값을 적용하여 신뢰성을 확보한 데이터의 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 오랜 시간 데이터를 획득하기 위한 실험 장치로 NI Labview 장비를 이용하여 각 센서의 출력 신호데이터를 획득하였다. 도시된 결과에서 알 수 있듯이 아무런 입력을 주지 않고 각 센서의 출력 값을 측정한 CFSS의 경우 5분 동안의 실험에서는 특별한 출력값의 변화가 나타나지 않았지만 15분과 30분의 데이터를 보면 일정 시간이 지나면서 출력값의 드리프트 현상이 발생하는 것을 확인하였다.

이것은 제작된 센서의 전도성 재료인 탄소나노튜브의 특성상 넓은 온도 범위와 변화 압력 및 특정 화학 환경으로 인해 이상의 변경 사항이 발생된다.

스트레인 센서로 사용하기 위해 도어진 특성 실험의 결과에서 확인 할 수 있듯이 짧은 시간의 스트레인 측정을 하기에는 아무런 보상값의 적용 없이 수행 할 수 있을 것으로 사료되지만 CFSS의 드리프트가 많이 발생하는 10분과 15분 이상의 구간에서는 신호처리 회로를 통한 보상값의 설정을 통하여 출력 값에 대한 안정화를 구현할 필요가 있다고 사료된다.

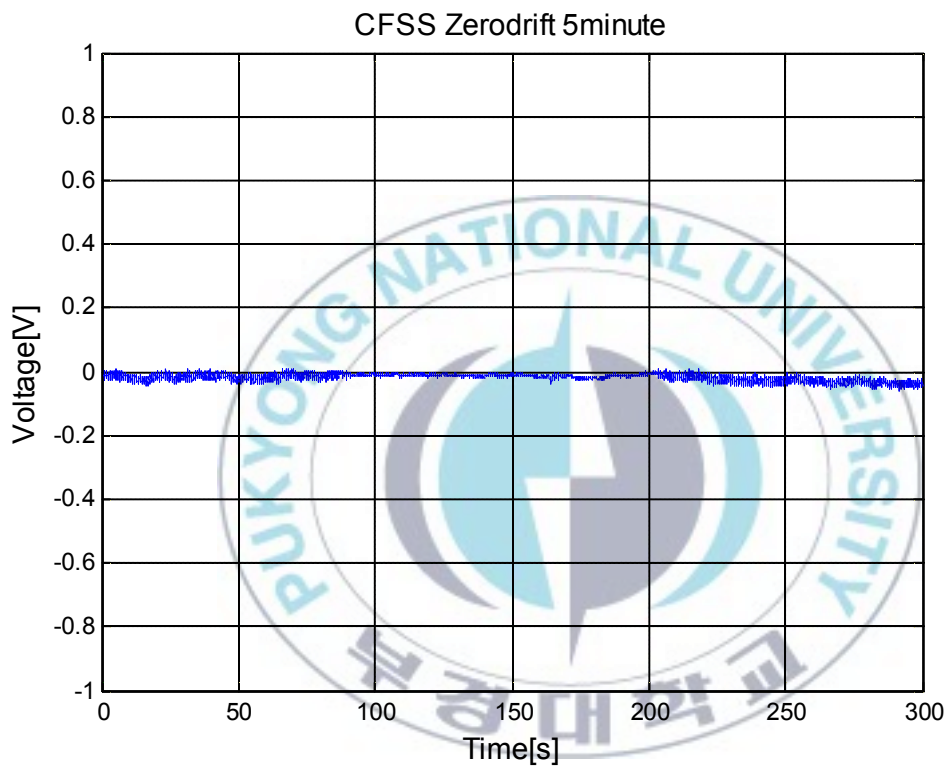


Fig. 6 CFSS의 zero drift 특성

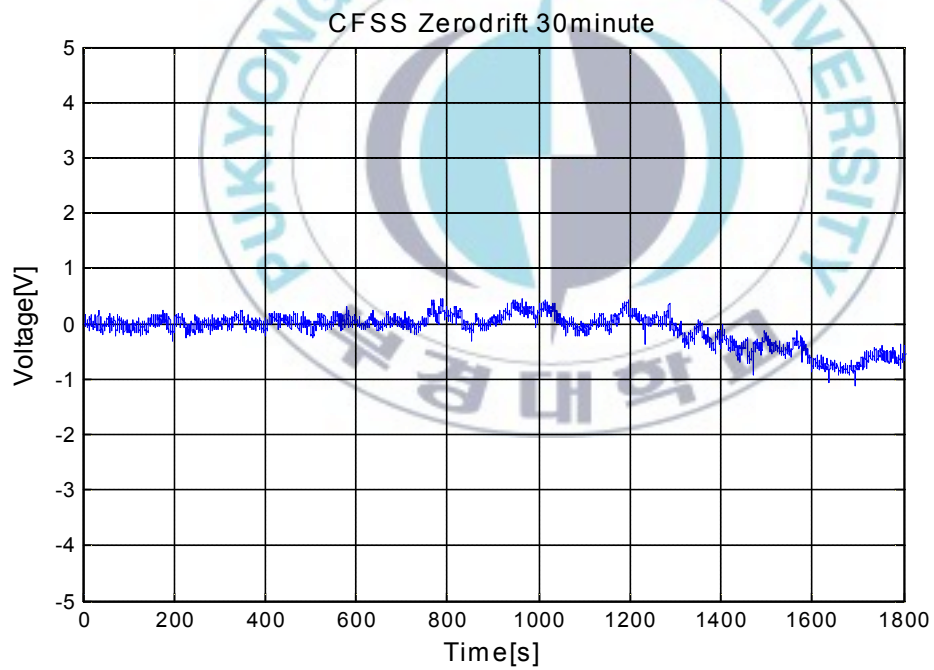
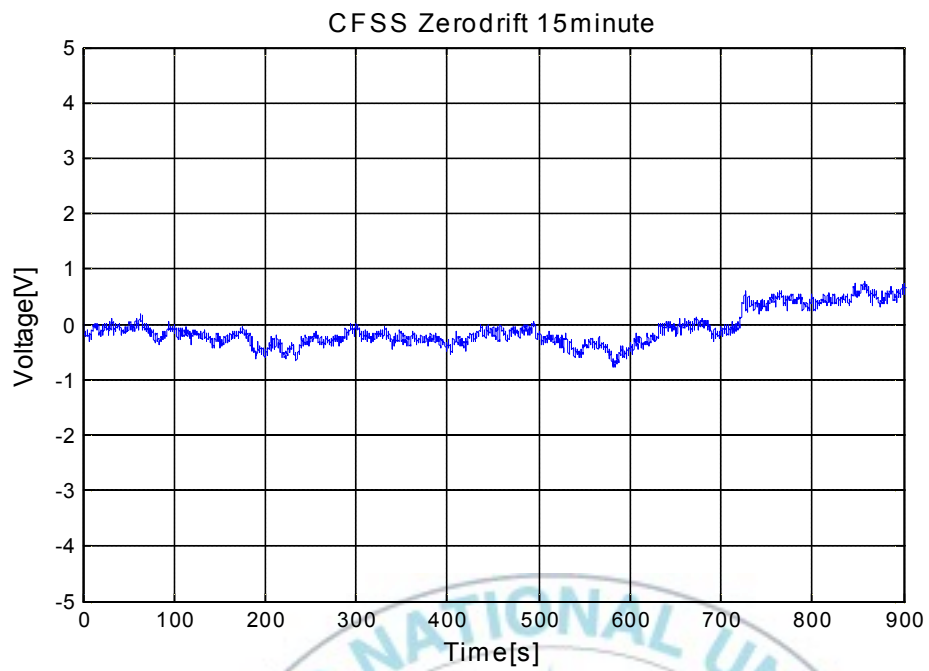


Fig. 6 CFSS의 zero drift 특성

2.7 CFSS의 온도 특성

센서의 성능과 밀접한 관계가 있는 온도 특성은 센서를 구성하는 재료의 성질에 따라 온도에 반응하는 특성이 다르며 이 특성의 영향을 받아 센서의 출력값에 영향을 미쳐 센서의 출력값의 오류를 발생하기도 한다. 이러한 특성이 CFSS에서도 발생하여 출력값에 영향을 주어 구조물의 정확한 안전 진단의 오류를 발생 시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 온도에 대한 CFSS의 특성을 실험하고 또한 스트레인게이지와 비교하여 어떠한 특성이 발생하는지 고찰하고자 한다.

각 센서의 온도 특성 실험을 수행하기 위해 스틸자에 부착한 CFSS와 스트레인게이지를 C클램프로 실험대에 고정 시키고 온도의 증가와 감소에 대한 각 센서의 반응을 확인하기 위해 신호처리 회로를 이용하여 출력 전압값을 얻고 온도의 증감을 정확히 정량적으로 줄 수 있는 온도 발생기가 없어 온도의 증가는 핫플레이트를 이용하여 센서에 온도를 가할 수 있도록 하였다. 여기서 온도의 증가는 고정된 센서를 기준으로 일정 간격을 두어 온도의 차이를 유발하였다. 즉 글루건의 열전대가 센서에 가까우면 온도가 가장 크고 센서와의 거리가 멀어 질수록 온도가 떨어지는 현상을 이용하여 실험을 진행하였다. 또한 온도의 감소를 측정하기 위해서는 냉장 시설을 이용하여 앞서 기술한 동일한 방법을 적용해 실험을 진행하였다. 온도의 측정은 K-Type의 써모커플을 이용한 온도 계측기(Extech-EA11A)를 사용하여 온도를 측정하였고 모든 실험은 상온에서 실행되었다. 실험 구성을 앞서 기술한 내용으로 진행하여 Fig. 7에 결과를 도시하였다. 도시된 결과로부터 알 수 있듯이 CFSS는 온도의 변화에 따라 출력 전압의 값이 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 산업계에서 사용되는 흡기 온도 센서와 같은 온도 센서의 특성처럼 높은 온도에 대하여 센서의 출력 전압값이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 이와는 반대로 낮은 온도에서는 출력 전압이 증가하는 형태의 특성을 보인다. 이것은 CFSS에 사용된 기저재료 EPDM이 고무이기 때문에 높은 온도를 받게 되면 센서가 늘어져 CNT의 전기전도성이 좋아지므로 출력 전압값이 떨어지는 현상이 나타나고 온도가 낮은 경우는 앞서 기술한 내용의 반대가 되기 때문에 출력전압이 높아진다고 사료된다. 그리고 스트레인 게이지도 비슷한 현상으로 인하여 온도에 영향을 받는다고 사료된다.

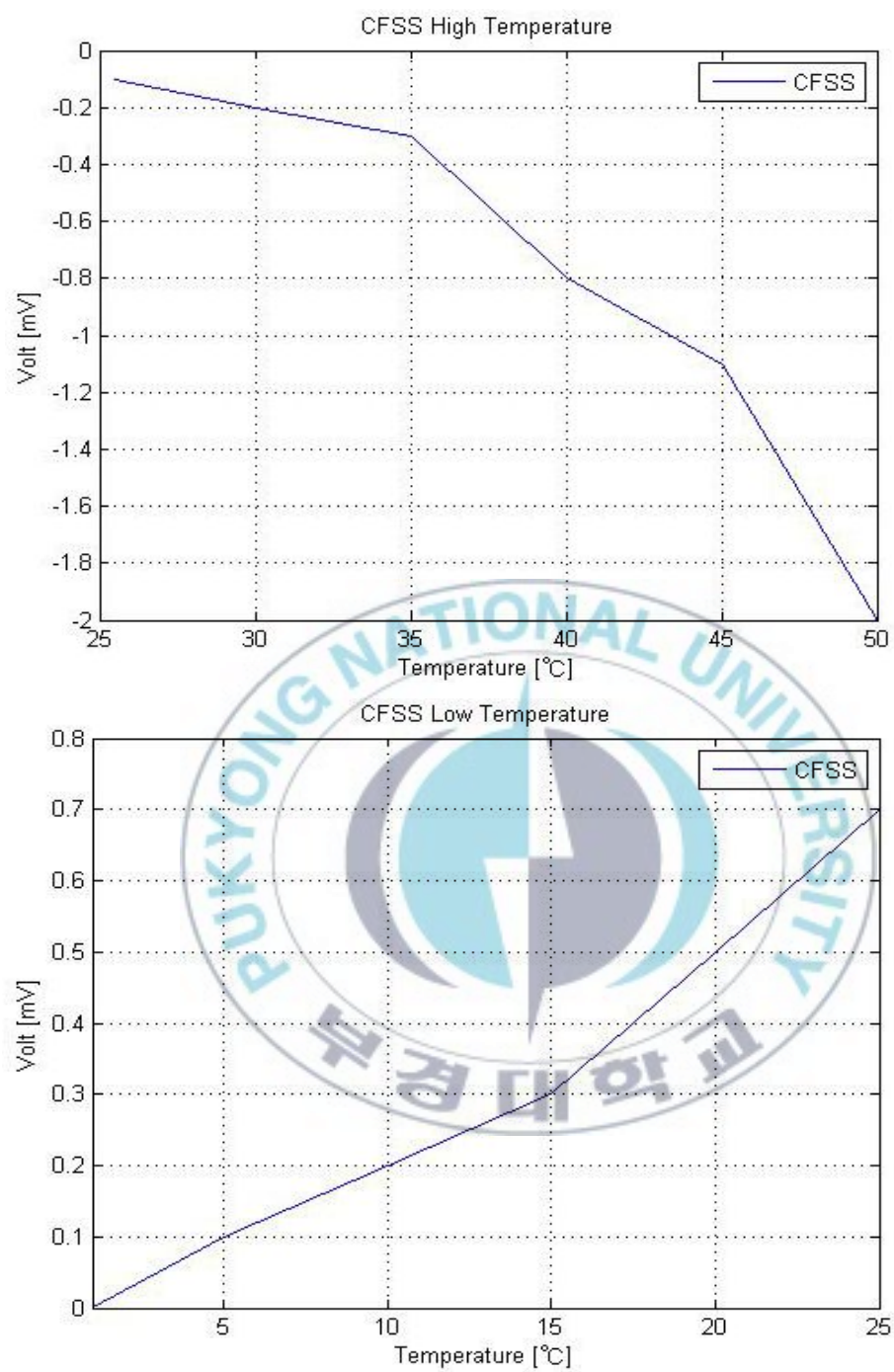


Fig. 7 CFSS의 온도 특성

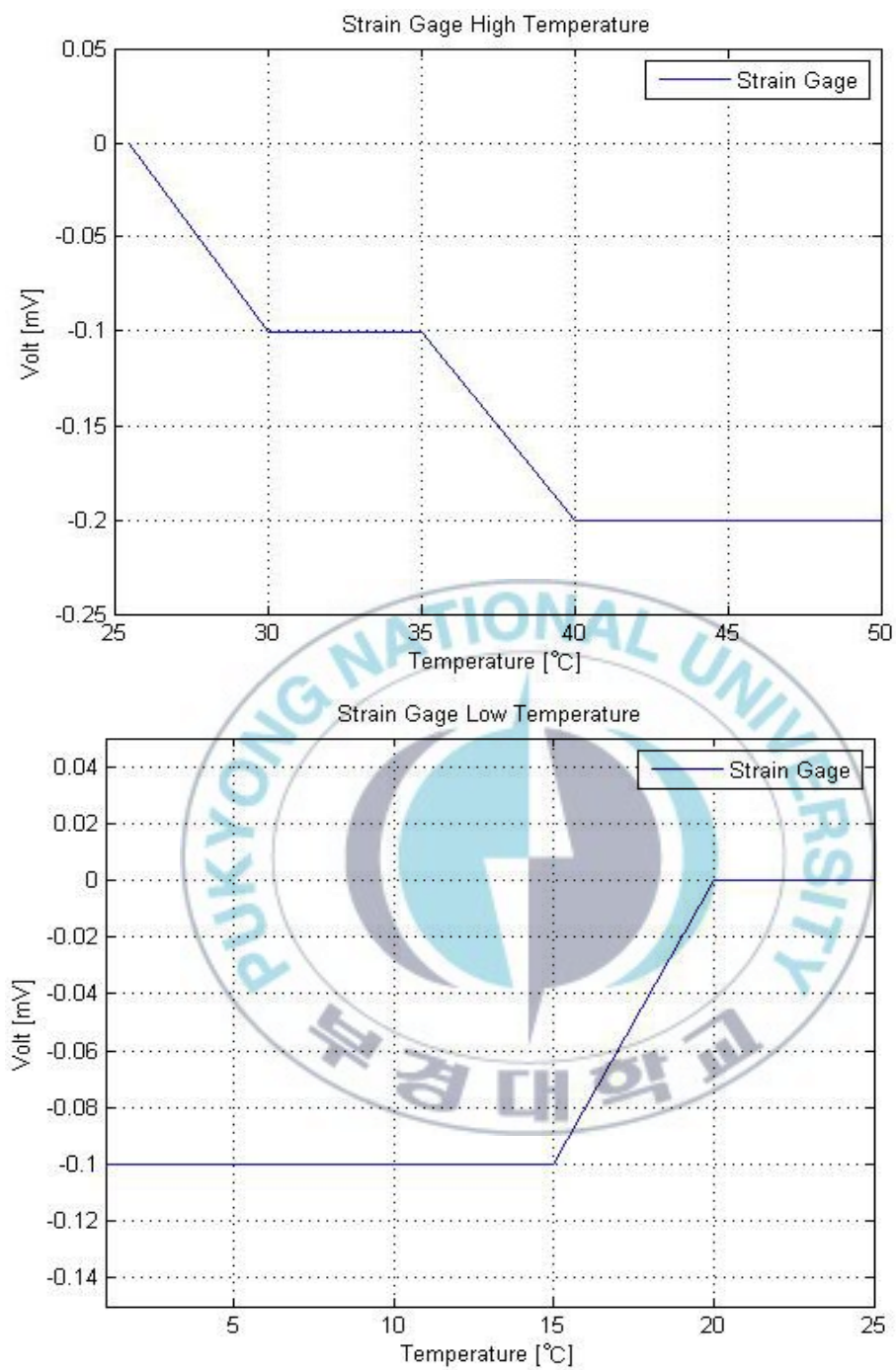


Fig. 8 Strain Gage의 온도 특성

2.8 CFSS의 응답특성

구조물의 변형을 계측하기 위해서는 센서가 외력에 대해 얼마나 빨리 반응을 하는 것이 중요한 요소가 된다. 안전을 진단하는 목적에서는 응답이 빠른 센서를 사용하여야 정확하게 변형된 값을 파악 할 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 변형을 빠르게 계측하여 안전 진단의 신속성을 확보하기 위하여 CFSS와 스트레인 게이지의 응답에 대한 특성을 실험을 통해 고찰하고자 한다.

CFSS와 스트레인 게이지의 응답 특성 확인을 위해 앞서 기술한 실험 방법처럼 동일하게 실험환경을 꾸미고 외팔보로 구성된 CFSS와 스트레인 게이지의 끝단에 계단 입력을 가하여 데이터를 획득하였다. 이렇게 획득한 CFSS와 스트레인 게이지의 응답특성을 Fig. 9에 도시하였다. 도시된 결과에서 알 수 있듯이 CFSS의 상승시간은 0.38초의 시간이 걸리고 시정수는 0.14초로 측정 되었다.[20] 또한 스트레인 게이지는 상승시간은 0.46초의 시간이 걸리고 시정수는 0.24초로 측정 되었다. 따라서 CFSS가 스트레인 게이지보다 약 0.6배 빠른 응답을 보인 것을 확인 할 수 있다. 이것은 CFSS가 구조물에 발생한 변형을 좀 더 빠르게 계측할 것으로 사료된다.

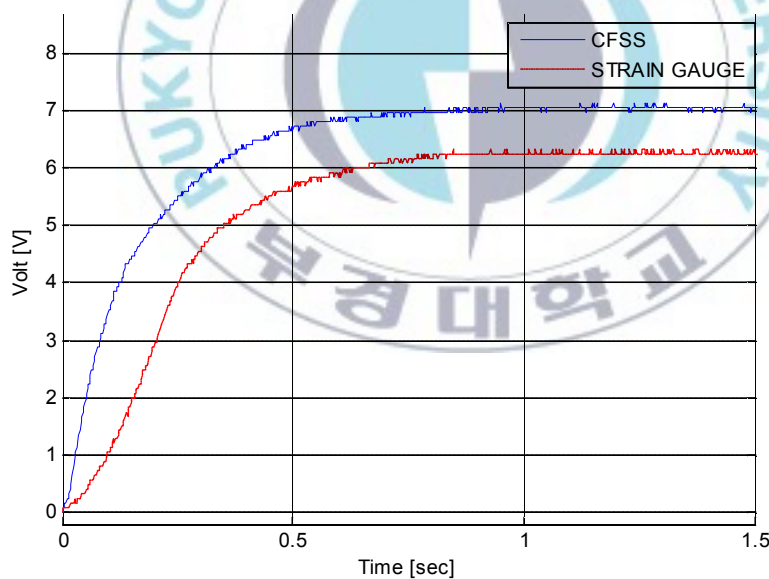


Fig. 9 CFSS와 Strain Gage의 응답 특성

2.9 CFSS의 동적 특성

센서의 가해진 입력의 변화에 따라 센서의 응답이 변화된 입력에 비례하게 변화하는 것은 구조물의 변형이 연속적으로 발생했을 때 그 변화값을 충실히 응답하므로 안전성을 평가하는 시스템의 적용에는 센서의 중요한 성능으로 인식된다. 따라서 본 연구에서는 실시간으로 구조물의 변형을 계측 할 수 있는 CFSS의 성능을 자유진동 테스트를 통하여 고찰하고 또한 상용화된 스트레인 게이지와 비교를 통하여 입력의 변화에 대한 비례적인 출력값을 획득하는지 관찰하고 고찰하고자 한다.

CFSS와 스트레인게이지의 동적인 특성 실험을 진행하기 위해 앞서 기술한 내용의 실험 구성을 하여 자유 진동에 따른 각 센서의 출력 값을 Fig. 10에 도시하였다. 자유 진동하는 외팔보에 장착된 각 센서의 결과는 입력의 변화에 대해 비례적으로 출력을 내보내 주는 것으로 확인되었고 이 특성을 이용하여 외력 발생에 의한 구조물의 변형이 응답 신호의 크기와 위상을 변화시켜 구조물의 변형을 확인 할 수 있을 것으로 사료된다.

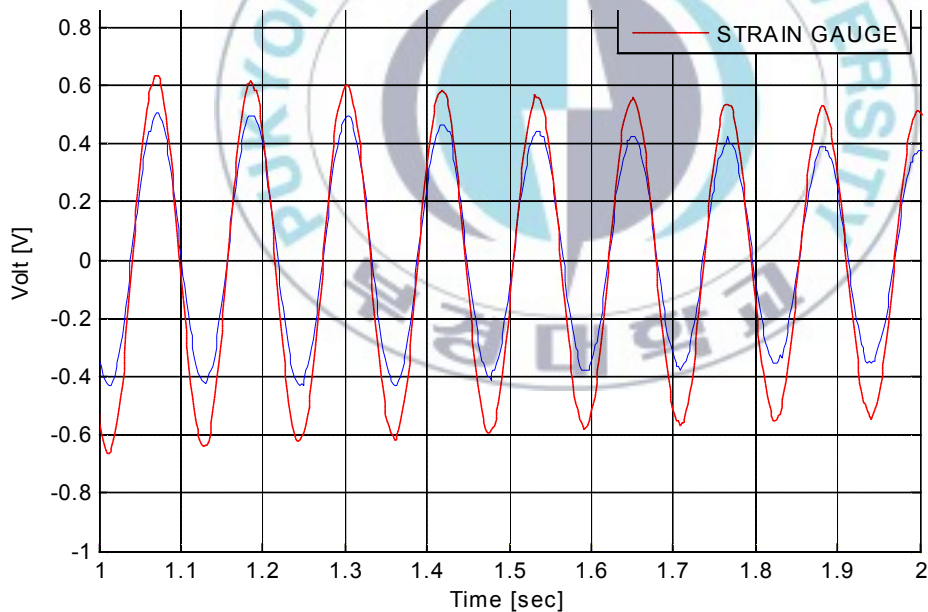


Fig. 10 CFSS와 Strain Gage의 동적 특성

Ⅲ. ANS 개발

1. ANS 정의 및 필요성

구조물 건전성 감시에 적용되고 있는 포인트 방식의 센서들은 유연 구조물의 적용이 어렵고 대면적의 측정 대상 부분에 있어 SHM을 위해 충분한 센서들을 배치하면 데이터의 처리를 위해 복잡한 배선과 많은 측정 장비의 사용으로 인한 신호처리 비용 상승의 경제적인 문제가 발생한다.[6-15] 이러한 문제점을 하나의 센서가 여러 개의 센싱 노드를 가지고 유연성을 지닌 CFSS를 array 형태의 membrane 로 제작하여 넓은 면적을 적은 수의 센서로 데이터를 처리 할 수 있는 신호처리 시스템인 인공뉴런 네트워크 시스템(artificial neuron network system, ANS)을 개발하여 데이터의 신호처리를 위해 기존 센서보다 적은 수의 센서 사용으로 복잡하지 않은 배선과 간단한 신호처리 회로의 구성으로 시스템의 비용 절감을 통해 기존 센서의 문제점을 보완하는 ANS를 개발 하였다.

2. ANS 제작

2.1 CFSS를 이용한 3×3 Array 형태의 인공 신경망 제작

실제 구조물 건전성 감시에 적용할 수 있는 형태로 센서를 구성하기 위해 복합재료 구조물에 센서를 그물망 형태로 배치를 하였다. 또한 여러 개의 센싱 노드를 가지는 연속형 센서의 형태로서의 신호처리 시스템이므로 센서를 격자 구조로 구성하였다. 이렇게 구성된 센서를 유연성 구조물에 적용하기 위해 주변에서 흔히 구할 수 있는 주방용 유연성 패드를 사용하여 센서 크기에 맞게 Fig. 1의 (a)에 도시된 CFSS 패드를 85mm×85mm의 크기로 절단하여 제작한 후 CFSS를 3행(sensor no.1, no.2, no.3)과 3열(sensor no.4, no.5, no.6)의 격자 형태의 인공 신경망으로 유연성 CFSS 패드를 Fig. 11 에 도시한 것처럼 구성하였다. 또한 실제로 제작된 유연성 CFSS 패드를 Fig. 12 에 도시하였다.

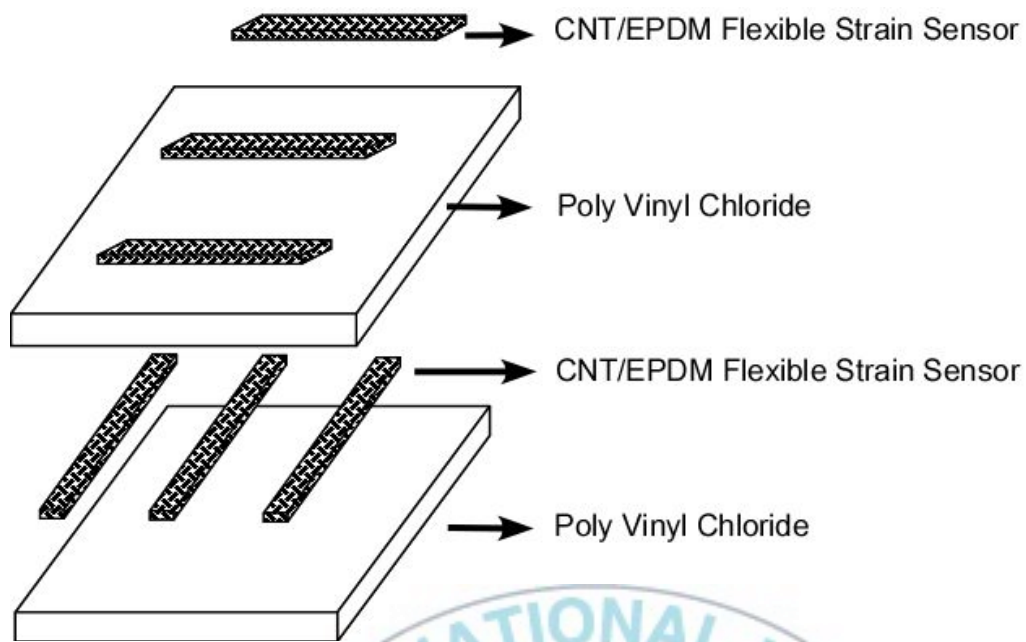


Fig. 11 두 개의 유연성 패드를 사용한 3×3 array 형태의 유연성 CFSS 조합



Fig. 12 실제 제작된 두 개의 유연성 패드를 사용한 유연성 CFSS 조합

센서를 격자 구조로 구성함에 있어 센서의 교차점에서 발생될 수 있는 신호 왜곡의 요소에 대한 우려를 절연 스프레이와 유연성 패드의 센서가 삽입되는 층과 층 사이에 공간을 만들어 미리 왜곡 신호의 원인 요소를 차단하였다. 그리고 CFSS와 CFSS 사이의 간격을 25mm×25mm 정사각형 형태로 구성하여 하나의 신호가 단절이 되어도 일정한 구역을 나눠 CFSS를 배열 한다면 단절된 구역 주변에 위치한 CFSS의 신호 강도를 이용하여 위치를 추정할 수 있으므로 일정한 규격의 정사각형 형태로 유연성 패드를 제작하였다. ANS에 가해진 외력의 위치를 추정하기 위해 ANS에 집중하중을 가하는 실험이 진행될수록 유연성 패드에 센서를 부착시키기 위해 사용하였던 에폭시 본드의 접착력이 떨어져 유연성 CFSS 패드는 집중하중에 따른 정확한 스트레인 발생 위치를 ANS를 통해 정확하게 신호를 보내지 못하게 되는 오류를 발생하게 되었다. 발생한 문제점을 해결하기 위해 유연성 CFSS 패드를 기존의 방식과 다르게 하나의 유연성 패드 양면에 CFSS를 array로 삽입하여 제작하였다. Fig. 13는 처음 제작된 유연성 CFSS 패드의 단점을 보완한 것을 도시한 것이고 Fig. 14는 문제점을 해결한 실제 유연성 CFSS 패드를 도시하였다.



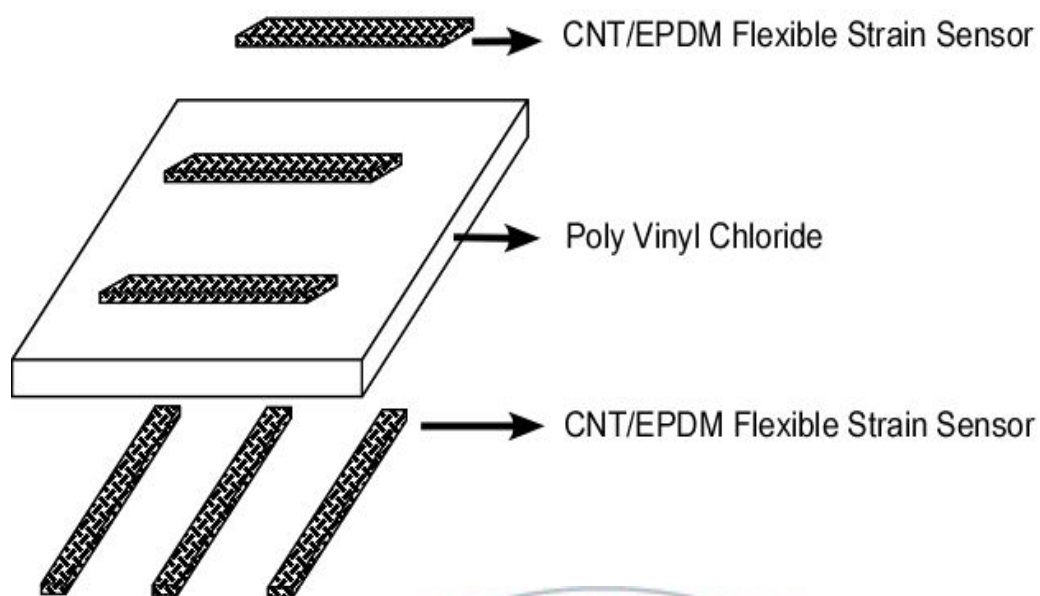


Fig. 13 한 개의 유연성 패드를 사용한 3×3 array 형태의 유연성 CFSS 조합

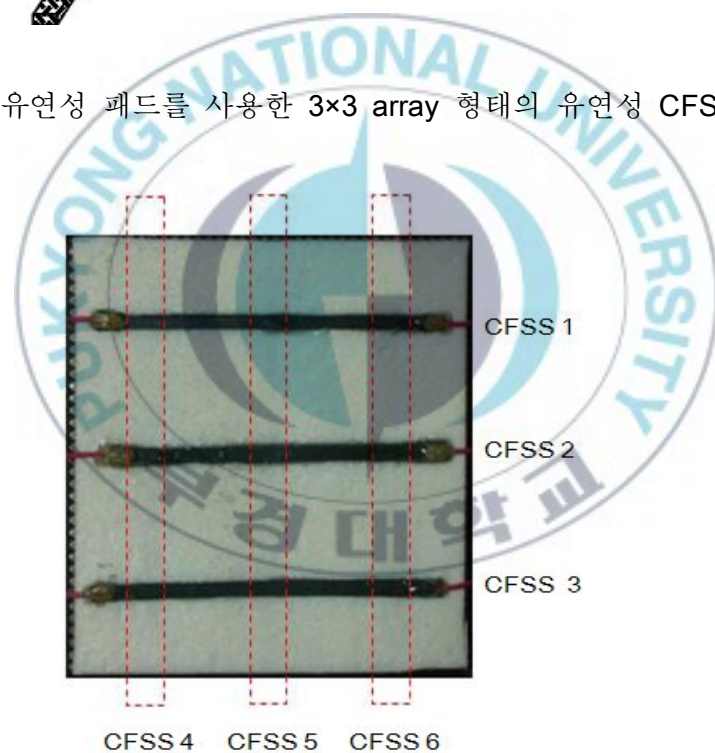


Fig. 14 실제 개선된 유연성 패드를 사용한 3×3 array 형태의 CFSS 조합

2.2 인공신경망의 신호처리 회로 구성

ANS에 가해진 외력에 따른 변형량을 CFSS의 전왜성에 의하여 변화되는 저항값으로 측정하여 전압 신호로 바꾼다. 이를 위하여 휘스톤 브리지를 직접 설계하고 여기서 발생하는 전압의 차와 노이즈를 제거하는 필터회로를 제작하여 ANS에 발생한 스트레인의 위치를 추적하는 신호처리 회로를 구성하였다.

2.2.1 휘스톤브리지(Wheatstone Bridge)를 이용한 센서의 신호 추출

ANS에 가해진 외력의 신호를 추출하기 위해 CFSS가 가지고 있는 저항값의 작은 변화를 정확히 측정할 수 있어야 한다. 작은 저항 변화를 정확히 측정하기 위해 사용되는 가장 일반적인 회로는 직류 전압을 구동 전압으로 갖는 4개의 저항 network으로 구성된 휘스톤 브리저이다. 이 휘스톤 브리저는 가장 안정적으로 압력의 변화에 센서의 출력값을 표현해 주는 대표적인 신호 변환 회로이므로 압력의 변화를 이용하는 ANS에 적합하다고 사료된다. 따라서 CFSS의 스트레인에 따른 출력값의 변화를 다음의 휘스톤 브리저 원리를 이용하여 추출하였다.

센서의 출력 신호를 검지 할 수 있는 방법인 휘스톤 브리저의 원리를 Fig. 15를 통하여 표현하면 CFSS를 R_1 으로 정하고 R_2 와 R_3 는 CFSS의 측정된 저항 값에 대한 더미 저항(dummy resistance)이고 R_4 는 저항치를 표시할 수 있는 정밀 스케일을 가지고 있는 정밀 전위차계(가변저항)이다. 브리지가 평형이 되게 하기 위해 가변저항이 V_0 가 0이 될 때까지 조절한다. 이것은 평형된 브리지에 외부 변형으로 발생된 CFSS의 저항값이 변화하면 브리지의 평형이 깨지면서 발생된 값을 출력값으로 표현하는 원리를 이용하는 것이다. 다시 말하면 CFSS의 저항 R_1 의 변화는 출력 전압의 변화로부터 결정될 수 있다는 것이다. 출력전압은 각 저항을 지나는 전류의 향으로 다음과 같이 표현할 수 있다.[21-22]

$$V_{out} = i_1 R_1 - i_2 R_2 = -i_4 R_4 + i_3 R_3 \quad (1.7)$$

그리고 구동 전압은 같은 전류 향으로 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$V_{ex} = i_1(R_1 + R_4) = i_2(R_2 + R_3) \quad (1.8)$$

이 식들로부터 전류 향을 제거하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$V_{out} = V_{ex} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \quad (1.9)$$

브릿지가 평형을 이룰 때 V_{out} 은 0이고 R_1 은 알려진 값을 가진다. CFSS가 변형됨에 따라 R_1 값이 변할 때 식 1.9를 이용하여 이 전압변화 ΔV_{out} 과 저항변화 ΔR_1 의 관계를 알 수 있다.[21-22]

위에서 언급한 휘스톤 브리지 회로를 적용하기 위해 ANS에 사용한 CFSS의 고유 저항치를 디지털 멀티미터(YOKOGAWA TY530)를 사용하여 측정한 결과 약 120K Ω 을 나타내었다. 하지만 CFSS는 입력을 주지 않아도 변화하는 특성을 가지고 있어 상용화되어 나온 스트레인게이지처럼 안정된 값을 가지고 있지 않다.

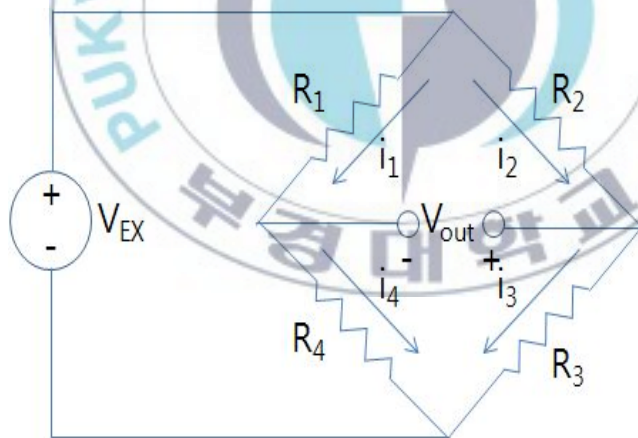


Fig. 15 휘스톤 브리지 회로

따라서 휘스톤 브리지의 사용을 위해 회로의 R2와 R3 더미 저항을 가변저항으로 교체하여 CFSS의 가변 특성에 따라 회로의 밸런스를 맞춰 줄 수 있도록 유기적으로 구성하였다. 이렇게 구성한 회로에 구동 전압값으로 단전압 10V를 사용하고 CFSS의 저항값 약 120KΩ에 대한 나머지 가변 저항 소자를 200KΩ의 용량으로 유동성을 갖게 설정하여 휘스톤 브리지 회로를 꾸며 CFSS의 변화에 대한 출력 전압값을 실험하였다. CFSS의 저항값이 120KΩ일 때 나머지 가변저항의 값도 120KΩ으로 맞추고 식 1.9를 적용하여 계산한 결과 휘스톤 브리지의 출력전압이 0이 되어 평형이 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 그리고 CFSS에 인위적으로 압력을 주었을 때 CFSS의 변화된 저항값을 측정하고 식 1.9를 사용하여 계산한 결과 CFSS에 가해진 스트레인의 크기에 따라 출력값이 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 이것으로 대면적 유연 구조물에 발생한 외력에 따른 CFSS 변형 출력 신호를 감지 할 수 있는 신호처리 회로를 구성하였다.

2.2.2 외력에 의한 CFSS의 미소 출력신호 증폭

앞서 기술한 휘스톤 브리지를 이용한 스트레인에 따른 CFSS의 출력신호가 $\mu V \sim mV$ 단위를 갖는 미소한 값으로 출력 되는데 이렇게 작은 출력값을 이용하여 스트레인에 따른 위치를 추정하기에는 한계가 있다. 따라서 위치를 추정하기 위해 개발될 알고리즘에 편리한 데이터 값을 제공하기 위해 CFSS의 미소한 출력 전압값을 증폭 시켜주는 장치가 필요하게 되었다. 일반적으로 센서의 미소한 출력값을 증폭시켜 주는 장치로 연산 증폭기(Operational amplifier, OPAMP)가 많이 사용되고 있다.[23-24] 원하는 값의 증폭된 데이터 값을 추출하기 위해서는 하나의 OPAMP로 구성된 기본적인 증폭기로는 출력값을 증폭 시킬 수 없다. 따라서 센서용 증폭기의 구성은 계장 앰프로 불리고 있는 Instrument OPAMP를 많이 사용한다. 이 계장 앰프는 보통 2단으로 구성하는데 1단계는 입력 신호와 단일저항으로 구성하여 이득을 얻는 높은 임피던스로 구성하고 2단계는 출력용 마이너스 피드백을 얻도록 구성한다. 또한 접지 연결이 가능하도록 차동증폭기를 이용한다. 이러한 계장 앰프를 Fig. 16에 도시하였다.[24]

Fig. 16에 도시된 계장 앰프는 기본적으로 3개의 연산증폭기와 7개의 저항으로 구성되며 저항 R_f 만으로도 증폭기의 이득을 조절 할 수 있다. 이 계장 앰프는 전형적인 차동증폭기인 **A3**에서 가상 접지 조건 때문에 비반전 입력단자와 반전 입력 단자 간에 다음과 같은 식이 성립된다.

$$v_- \approx v_+ \quad (1.10)$$

그러므로 연산 증폭기 **A3**의 반전 입력 단자에서 KCL을 적용하면

$$\frac{V_{11} - v_+}{R_3} + \frac{V_0 - v_+}{R_4} = 0 \quad (1.11)$$

이 되고 연산 증폭기 **A3**의 비반전 입력 단자 전압은 높은 입력 임피던스를 만들기 위해 사용한 연산 증폭기 **A2**의 출력 전압 V_{22} 가 저항 R_5 와 R_6 로 분압

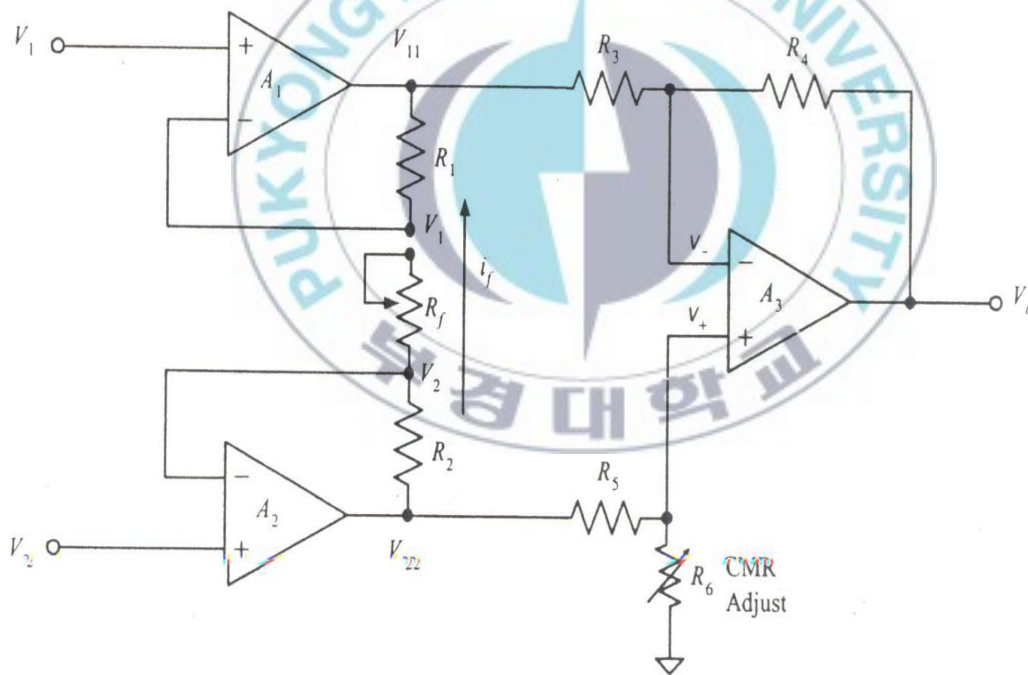


Fig. 16 센서의 출력신호 증폭용 계장 앰프

되어 인가되므로 식 1.12와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_+ = \frac{R_6}{R_5 + R_6} V_{22} \quad (1.12)$$

그러므로 식 1.12을 식 1.11에 대입하여 정리하면

$$V_0 = \frac{R_3 + R_4}{R_5 + R_6} \frac{R_6}{R_3} V_{22} - \frac{R_4}{R_3} V_{11} \quad (1.13)$$

이 된다. 만일 식 (1.13)에서 $R_3 = R_5$ 이고 $R_4 = R_6$ 가 되면 출력 전압은 다음과 같이 보다 간단하게 나타낼 수 있다.

$$V_0 = \frac{R_4}{R_3} (V_{22} - V_{11}) \quad (1.14)$$

또한 연산 증폭기의 출력 전압 V_{11}, V_{22} 는 R_f 에 흐르는 전류 i_f 로부터

$$i_f = \frac{V_2 - V_1}{R_f} = \frac{V_d}{R_f} \quad (1.15)$$

이므로

$$V_{22} - V_{11} = i_f (R_1 + R_2 + R_f) = \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_f}\right) (V_2 - V_1) \quad (1.16)$$

가 된다. 만일 식 (1.16)에서 $R_1 = R_2$ 라고 놓으면

$$V_{22} - V_{11} = (1 + \frac{2R_1}{R_f})(V_2 - V_1) \quad (1.17)$$

가 되고 식(1.17)을 식(1.14)에 대입하여 정리하면

$$V_o = \frac{R_4}{R_3}(1 + \frac{2R_f}{R_f})(V_2 - V_1) \quad (1.18)$$

가 된다. 만일 식 (1.18)에서 $R_3 = R_4$ 라고 하면 연산증폭기 A3의 출력 전압은 다음과 같이 간단하게 표현된다.[24]

$$V_o = (1 + \frac{2R_1}{R_f})(V_2 - V_1) \quad (1.19)$$

여기서 계측용 차동 증폭기의 전압 이득은 $A_v = 1 + (2R_1/R_f)$ 이 되고 저항 R_1 은 이미 결정된 값이므로 가변저항 R_f 만을 이용하여 차동 입력 전압 $V_2 - V_1$ 을 증폭하는데 필요한 이득을 조정할 수 있다. 이것은 상호 대칭된 2개의 저항 R_1, R_2 를 동시에 가변하여 조정할 수 있으나 2개의 저항이 동일한 값을 가지거나 변화되는 비율이 같지 않으면 측정 정도를 악화 시키는 원인이 되므로 공통으로 연결된 이득 조정용 저항 R_f 만을 가변하는 것이 이득을 향상 시키는데 유리하다.[24]

위에서 언급한 내용을 바탕으로 Analog Device 사의 양 전압을 구동전압으로 사용하는 범용 OPAMP OP07C 모델을 가지고 계장 앰프를 설계하여 휘스톤브리지를 통해 출력된 CFSS의 변형 값을 증폭하여 오실로스코프(Tektronix Model : TDS2014B)에서 출력된 파형을 관찰하였다. 출력된 파형은 외부 환경으로 인한 노이즈가 섞여 CFSS에 가해진 외력에 대한 출력신호를 보기에 한계가 있다. 따라서 출력되고 있는 신호를 보기 위해 KROHN-HITE 사의 Model:3382 필터 장비를 이용하여 Low Pass Filter 30Hz로 필터링하여 CFSS의 출력신호를 확인하였다. 그 결과 휘스톤브리지에서 출력된 신호값이

디지털 멀티미터를 통해 약 1mV로 측정이 되었고 이 미소하게 출력된 전압값을 알고리즘 구성의 편리성을 확보하기 위해 약 1000배의 증폭률로 만들어 출력 값을 오실로스코프를 통해 확인 하였다. 이 과정에서 60dB의 게인 (Gain)을 갖는 앰프를 설계하였으나 실제로 증폭되어 나오는 값이 이상적이었던 값보다 약 15%의 차이가 있었다. 이것의 원인으로 아날로그 회로의 특성상 3개의 OPAMP 조합으로 구성하여 제작된 회로의 각 소자를 연결해주는 배선의 영향과 OPAMP 고유의 offset 값 영향으로 신호의 왜곡이 나타났으며 설계 시 이론값으로 정확히 증폭률을 계산되어 나올 수 있는 저항 소자의 용량을 구성하지 못한 한계로 게인 값 설정의 오류가 발생했다고 사료된다.

앞서 기술한 오류를 줄이기 위해 3개의 OPAMP를 독립적으로 사용하지 않고 하나의 IC 타입으로 구성된 계장 앰프(TI INA128P)를 선택하게 되었다. INA 128P 계장 앰프는 낮은 offset 전압과 높은 동상신호제거비(CMMR)를 가지고 있고 또한 넓은 범위의 공급전압을 가지고 있어 센서의 출력을 향상시킬 수 있는 앰프이다. 이 계장 앰프의 사양을 표. 4에 도시하였다.[25]

표. 4 INA128P의 사양

항목	성능
LOW OFFSET VOLTAGE	50 μ V max
LOW DRIFT	0.5 μ V/C max
LOW INPUT BIAS CURRENT	5nA max
HIGH CMR	120dB min
WIDE SUPPLY RANG	2.25V to 18V
LOW QUIESCENT CURRENT	700 μ A
CHIP TYPE	8-PIN PLASTIC DIP, SO-8

선택한 계장 앰프를 가지고 60dB의 증폭률을 얻기 위해 계장 앰프 매뉴얼에서 제공한 공식($G = 1 + 50k\Omega/R_G$)를 이용하여 이득 조절용 저항 R_G 값을 계산하였다. 증폭률 60dB의 이득을 갖는 R_G 값은 계산 결과 약 50Ω이었으며 약 50Ω의 저항을 사용하여 회로를 구성하려 했으나 구비된 소자의 한계로 인하여 오차를 1%인 탄소피막저항 51Ω을 사용하여 증폭률 60dB의 계장 앰프를 설계하였다.

앞서 기술한 휘스톤브리지를 이용하여 출력된 CFSS의 미소신호를 Fig. 17에 도시된 회로에서 비반전 증폭기 입력 단인 INA 128P의 2번 핀과 3번 핀에 배선하고 출력 단인 6번 핀에 프르브(probe)를 물려 출력 값을 확인한 결과 증폭률이 목표한 60dB의 값에 거의 근접하게 나오는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 정확하게 증폭된 출력값을 얻지 못하였다. 그 이유는 회로의 증폭률 설계상 사용했던 탄소피막저항의 용량이 설계했던 용량 값의 소자에 대한 구비 한계로 인하여 근사치의 저항을 사용한 것이 오차를 발생시킨 원인이라고 사료된다. 또한 OPAMP 사양에 나타난 $\pm 0.5\%$ 의 gain error의 영향으로 오차를 발생 시킨 것으로 사료된다.

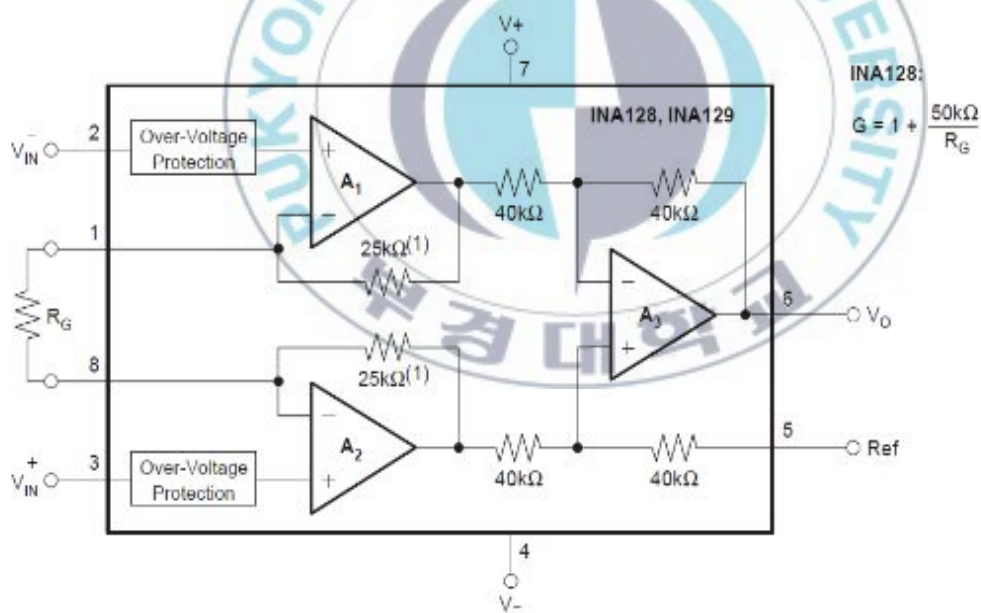


Fig. 17 IC 타입으로 구성된 계장 앰프(INA 128P)

2.2.3 센서의 출력신호 노이즈 제거를 위한 필터

ANS에 발생한 외력에 따른 각 CFSS의 출력 신호를 얻기 위하여 앞에서 기술한 휘스톤브리지와 정량화된 IC 타입의 계장 앰프를 사용하면 CFSS의 출력 값을 얻을 수 있다. 하지만 출력된 신호의 값에 외부 영향으로부터 발생된 노이즈로 인하여 외력에 의한 정확한 스트레인 발생의 결과 값을 얻을 수가 없게 된다. ANS는 포지션 별로 정해진 포인트에 각 CFSS를 교차시켜 배치한 그물망 구조의 형태이므로 스트레인의 위치를 추정하기 위해서는 정확한 CFSS의 출력 신호가 필요하게 된다. 따라서 디지털 필터링 장비인 KROHN-HITE사의 필터 장비(KH3382)를 이용하여 CFSS의 cutoff frequency를 10Hz로 정하여 높은 주파수 성분은 제거하고 낮은 주파수만 통과 시키는 Low Pass Filter로 설정한 후 CFSS의 출력신호가 노이즈가 없이 깨끗하게 출력 되는 것을 확인하였다. 여기서 CFSS의 cutoff frequency를 10Hz로 정한 것은 CFSS가 자유진동을 할 때 초당 약 10번의 cycle도 완성하지 못하는 것으로 Fig. 10에 도시한 것에서 확인할 수 있기 때문이다.

ANS에 발생된 스트레인은 CFSS의 출력 신호를 통해 알 수 있었지만 디지털 필터를 이용한 신호의 필터링은 신호처리 장비의 채널수의 한계로 인하여 다채널의 CFSS 신호를 처리하기 위해서는 보다 많은 디지털 필터 장비가 필요하게 된다. 하지만 추가의 장비 사용으로 발생하는 신호처리 비용 상승이 경제적으로 저가의 신호처리 방법을 연구하고자 하는 연구목표와는 상반된 결과를 가져오게 되므로 저가의 신호처리를 할 수 있는 1차 RC 필터를 이용한 신호처리 방법이 고안 되었다. CFSS의 노이즈가 없는 신호를 얻을 수 있는 cutoff frequency는 앞서 언급한 이유로 10Hz의 차단주파수를 정하였고 이 주파수를 얻기 위해 1차 저역통과 필터의 차단 주파수를 구하는 다음 식을 사용하여 주파수를 설정하였다.[26]

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1.20)$$

식 1.20은 R소자와 C소자를 이용하여 주파수를 설정하는데 소자의 선택은 일반적으로 흔히 사용되는 1% 탄소피막저항과 전해 콘덴서를 사용하였고 10Hz의 차단주파수를 설정하기 위해 $1k\Omega$ 과 $100\mu F$ 용량을 식 1.20에 대입하여 차단 주파수를 설정하였다. 다채널 CFSS의 신호처리를 처리하기 위해 설계한 필터의 성능을 테스트하기 위해 동일한 용량을 가진 스트레인게이지를 이용하여 두 개의 신호처리 회로를 꾸미고 설계된 RC 필터와 상용화된 필터 장비를 이용한 스트레인게이지의 출력 신호를 비교하여 Fig. 18에 도시하였다. 도시된 스트레인 게이지의 출력 파형에서 알 수 있듯이 상용화된 필터 장비와 거의 같은 노이즈 제거 성능을 보여 주었다. 다만 약간의 오차가 있는 것은 상용화된 장비를 사용한 것 보다 필터 구성 소자가 가지고 있는 고유의 오차율과 소자와 소자를 연결하는 와이어의 길이에 대한 부하의 영향으로 노이즈가 발생하여 오차를 발생한다고 사료된다. 따라서 Analog filter의 사용으로도 충분히 외부 노이즈에 인한 신호의 영향을 제거 할 수 있는 것을 확인하여 대변형 유연 구조물의 외력에 따른 스트레인 변화를 추정 할 수 있는 신호처리 회로를 적용할 수 있게 되었다. 이러한 CFSS의 이득 조절용 스위치를 달아 유동성 있는 증폭 기능을 삽입한 전체 신호처리 회로도를 Fig. 19에 도시하였다. 또한 전체 신호처리 시스템을 Fig. 20에 도시하였다.

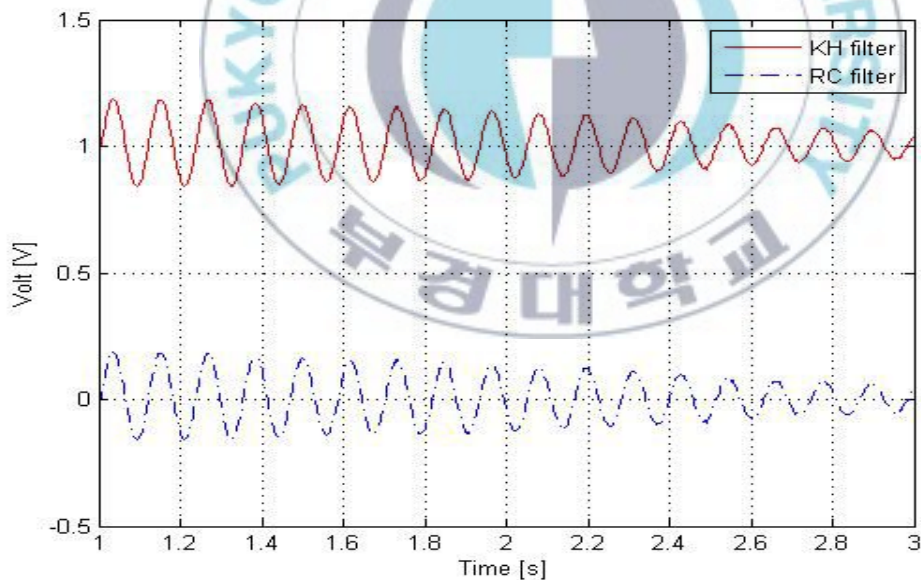


Fig. 18 상용화된 필터 장비와 RC 필터의 성능 비교 그래프

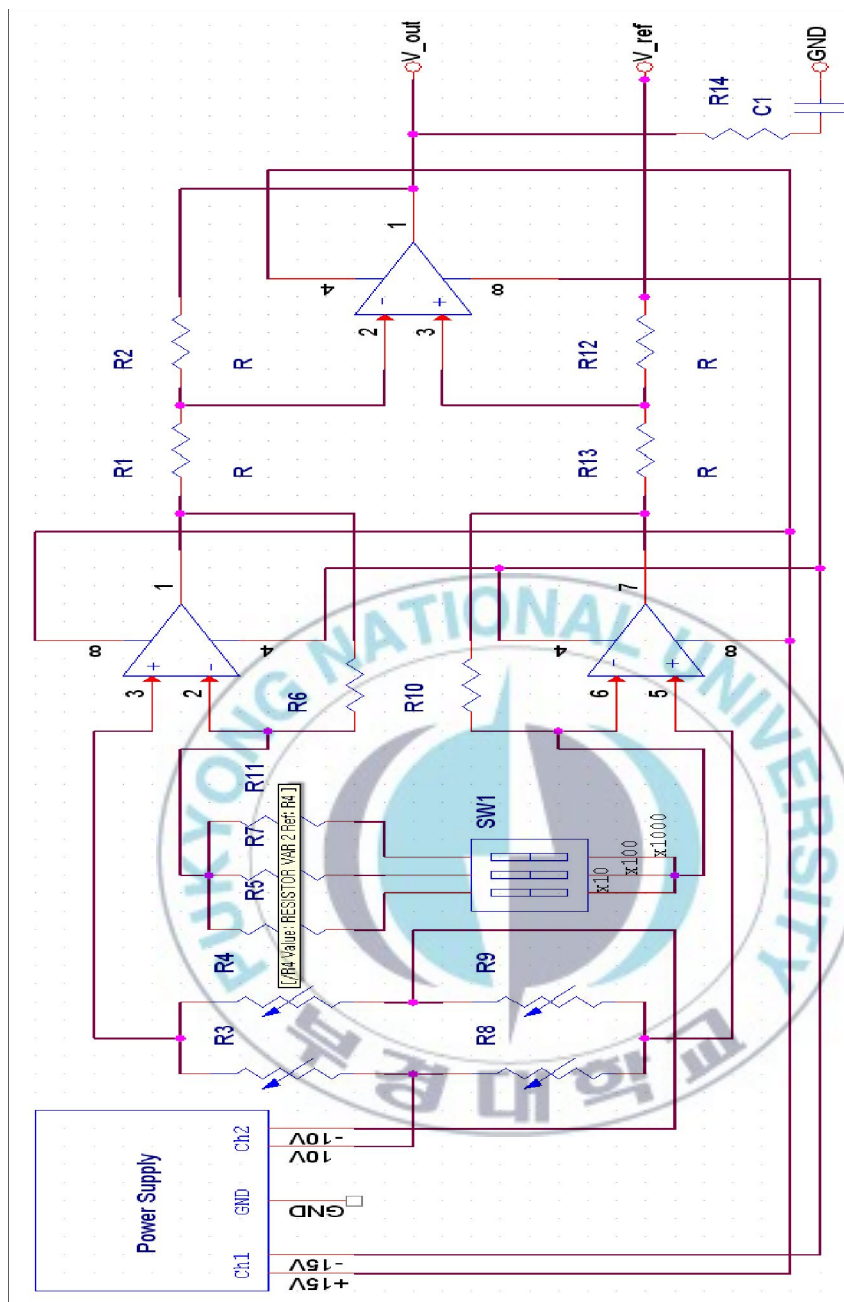


Fig. 19 CFSS의 신호처리 회도로

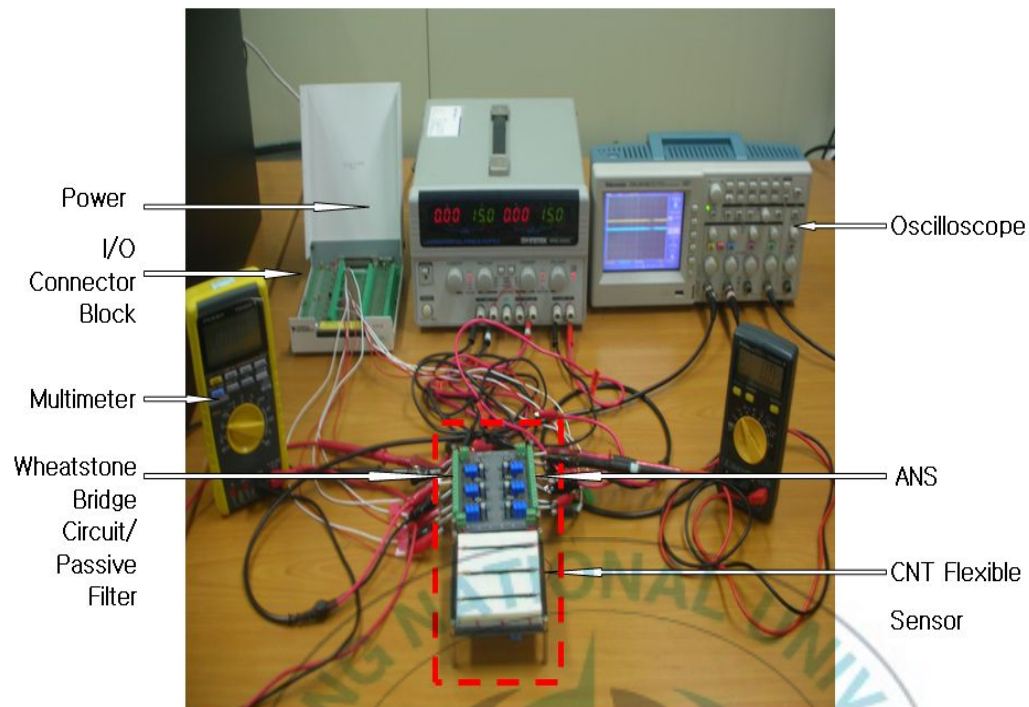


Fig. 20 ANS에 가해진 집중하중에 대한 각 CFSS의 신호처리 시스템

3. ANS에 가해진 외력의 위치 추정 알고리즘 SPA 개발

3.1 SPA 정의 및 필요성

CFSS는 장신의 연속형 센서로서 어느 위치에 하중을 가해도 하중에 대한 스트레인 값만 출력되고 스트레인이 발생한 위치의 정보는 얻을 수가 없다. 따라서 CFSS의 위치에 따른 하중의 발생 정보를 알아내기 위하여 CFSS를 array 형태의 network으로 구성하여 위치를 추정 할 수 있는 시스템이 필요하다. 이러한 필요성을 기반으로 ANS에 가해진 집중하중의 신호를 network로 구성된 CFSS에서 신호를 인지하고 CFSS의 조합으로 이루어진 위치에서 가장 근접하게 발생한 스트레인을 상대적으로 신호의 크기를 비교하여 ANS에 가해진 집중하중의 발생된 포인트를 찾는 알고리즘인 SPA를 개발하였다.

3.2 CFSS의 특성을 이용한 SPA 설계

ANS는 Fig. 21에서 도시한 것처럼 행의 CFSS와 열의 CFSS가 서로 만나는 교차점(intersecting point)을 갖게 된다. 그리고 그 표면에 집중 하중이 발생하면 CFSS의 교차점에서는 이를 감지하고 각각의 CFSS들은 그 스트레인에 비례하는 전압 신호를 앞서 기술한 신호처리 회로를 통하여 출력 시킨다. 이때 각 CFSS에 의한 전압 크기는 발생된 집중 하중의 거리 차로 인한 강도의 크기에 비례한다. 즉 CFSS 2와 CFSS 6의 교차점에 집중하중이 가해지면 CFSS 2와 CFSS 6의 출력 전압 값이 가장 크게 나타나고 이 교차점에서부터 가까운 순서대로 CFSS에서 출력되는 전압 값이 커지는 것을 나타낸다. 이것은 유연성 소재의 특성상 집중이 발생한 곳에 따른 크기만 나타내는 것이 아니라 마치 물체의 충격을 주면 진동이 전이되는 현상과 같이 집중 하중의 발생 지점 주변에 영향을 미치는 것과 같은 현상으로 표현할 수 있다. 따라서 집중하중의 거리의 차에 비례한 CFSS의 출력 전압의 크기를 이용하여 Fig. 22에 도시한 것처럼 ANS에 가해진 집중하중에 따른 스트레인 위치 추정 알고리즘을 설계하였다.

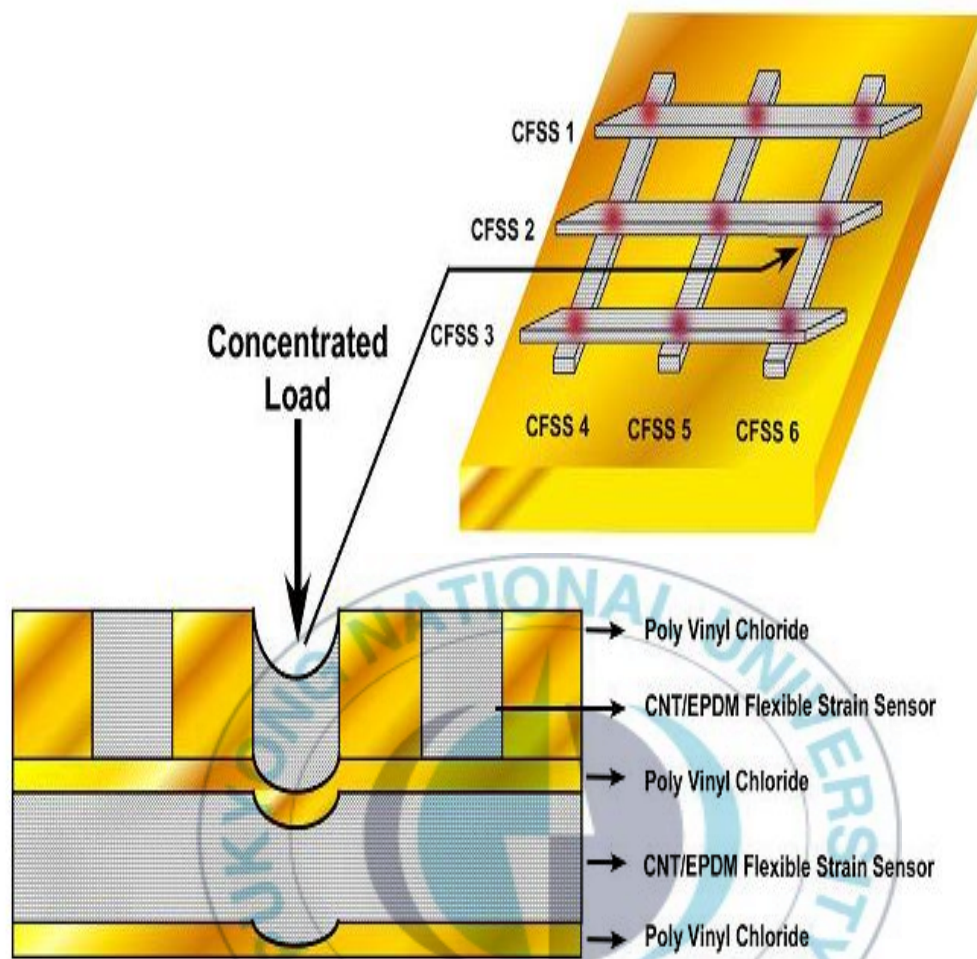


Fig. 21 ANS에 가해진 집중하중

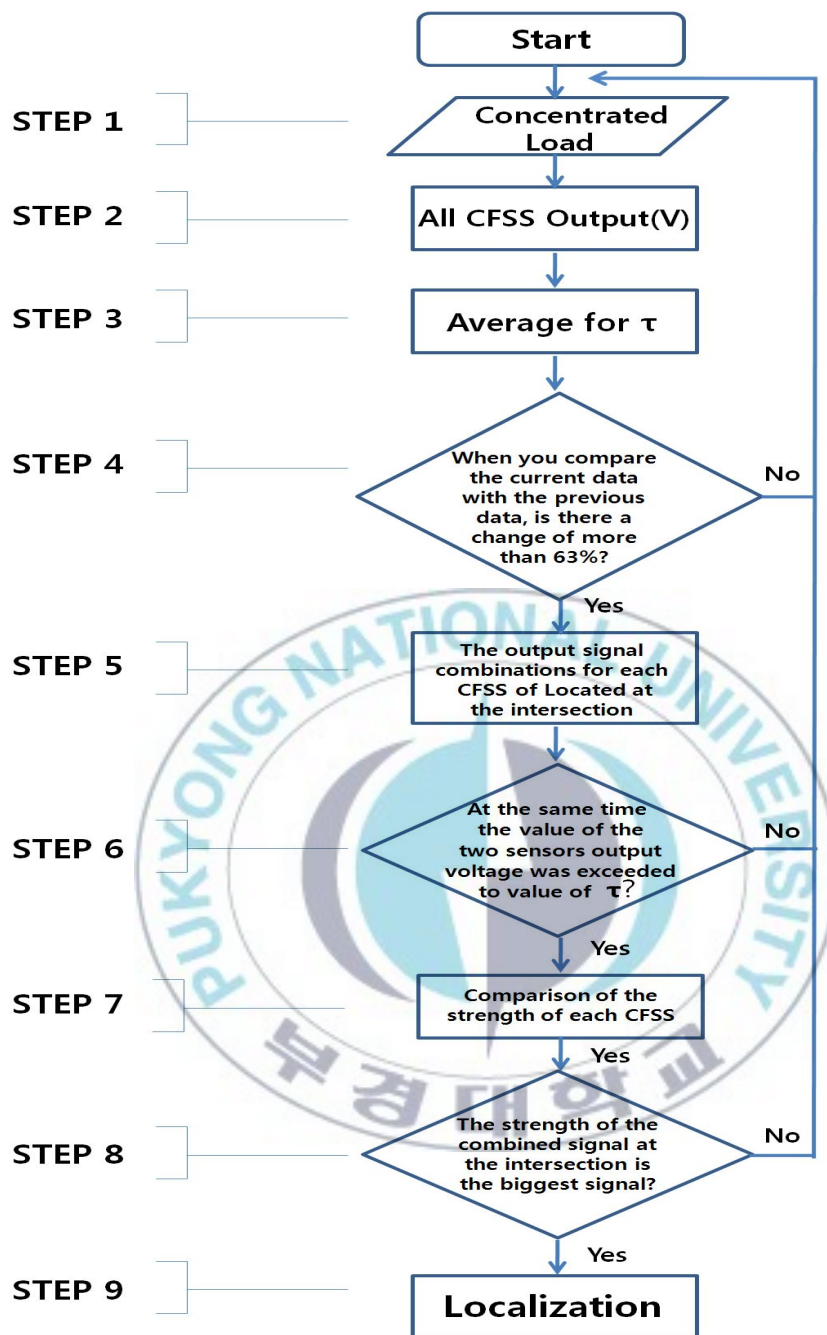


Fig. 22에 가해진 스트레인 위치 추정 알고리즘

설계된 Fig. 22의 알고리즘은 다음과 같이 구성하였다.

단계 1. ANS 표면에 집중하중 발생

집중하중이 적용된다.

단계 2. CFFS의 출력 전압을 측정

집중하중 발생으로 ANS에 삽입된 모든 CFFS에 물리적인 변화가 발생한다. 외력으로 인한 CFFS의 물리적인 신호를 측정하기 위해 물리량을 전기적 신호로 변환하는 신호처리 회로를 통하여 모든 CFFS의 출력 전압을 측정한다.

단계 3. CFSS의 미세 출력값에 따른 CFFS 출력 전압값의 신뢰성 확보

출력된 CFFS의 전압값이 주변 환경의 영향으로 발생한 미세한 노이즈와 Fig. 23에서 보여지는 것과 같이 CFFS의 고유 특성인 전기적 가변성으로 인한 미세한 출력값의 변화를 Fig. 24에서 계측된 시정수 구간 동안 측정된 출력 전압값의 평균을 구하여 계측된 신호의 신뢰성을 확보 한다.

단계 4. 집중하중에 따른 각 CFSS의 스트레인 발생 인식

외력의 발생 위치를 찾기 위해 각 CFSS의 상승 구간동안 출력 전압 값을 임시로 저장하여 이 저장된 값과 외력이 발생했을 때 출력된 데이터를 비교하여 그 변화가 63%를 초과하면 스트레인이 발생됐다고 인식한다.

단계 5. 구조물에서의 스트레인 검출 위치 선정

격자로 구성된 ANS에서 각 교차점마다 CFSS의 출력 신호를 조합하여 하나의 위치로 표현된다.

단계 6. 조합된 위치에서 통일된 스트레인 발생 인지

CFSS 조합 위치에서 조합된 CFSS의 출력 신호가 동시에 비교된 값의 63%를 초과하면 그 위치에서 fluctuation이 발생했다고 감지하게 된다.

단계 7. 스트레인 발생 위치의 정확성을 높이기 위한 신호의 강도차이 적용

위치 추정의 정확성을 높이기 위하여 각각의 CFSS의 출력 값들을 서로 비교하여 출력 전압 값이 발생한 지점의 CFSS 출력 값과 발생하지 않은 곳의 CFSS 출력 값의 강도 차이를 알아낸다.

단계 8. 강도차이를 이용한 위치 추정의 정확성 향상

ANS에 발생한 집중하중의 위치를 교차점의 CFSS의 출력 전압 값이 비교된 데이터의 63%를 동시에 초과하고 그 강도의 차이가 가장 큰 값을 반영하여 위치 추정의 정확성을 높인다.

단계 9. 최종 위치 추정

앞서 기술한 내용을 모두 만족 시키면 ANS의 발생한 집중하중의 위치라고 추정하여 출력한다.

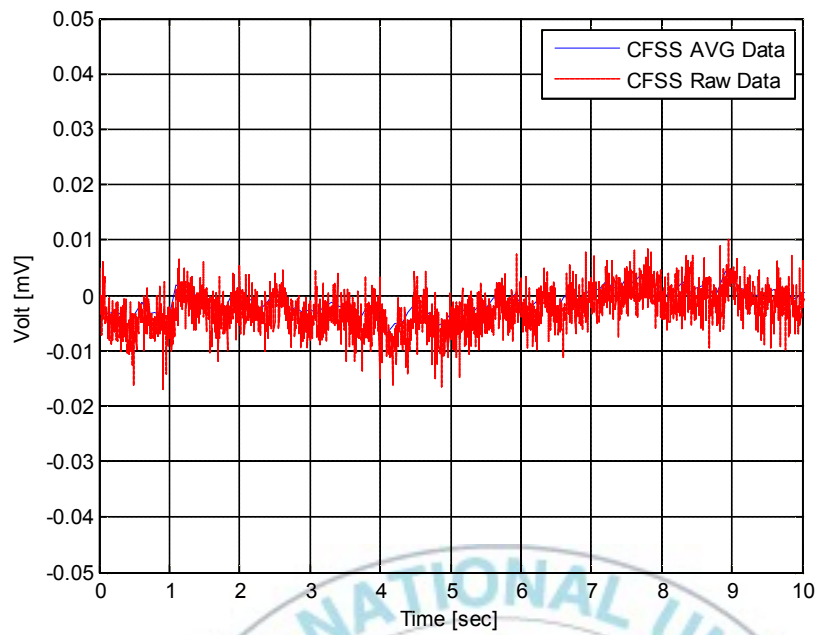


Fig. 23 CFSS 고유의 전기적 가변성으로 인한 출력 전압

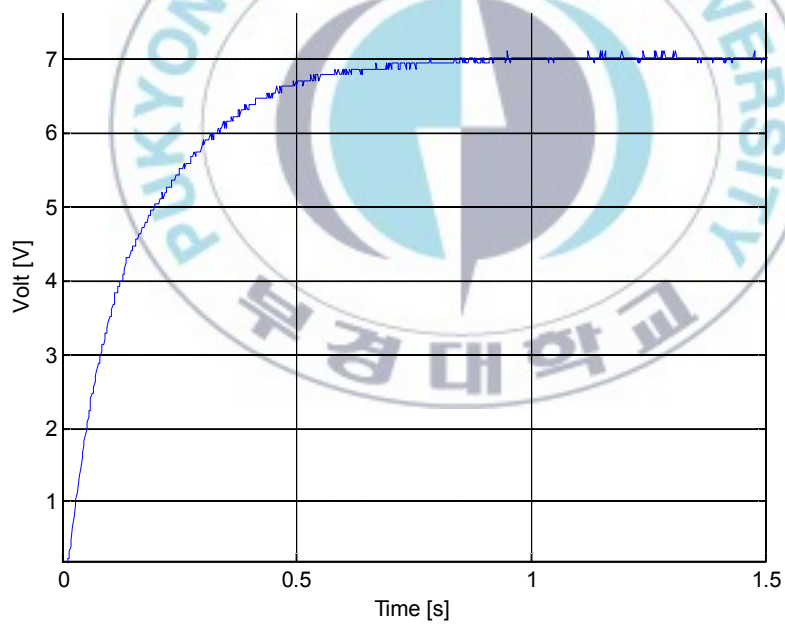


Fig. 24 계단 입력에 따른 CFSS의 응답 특성

3.3 Labview 기반의 ANS에 가해진 외력의 위치 추정 시스템 개발

ANS에 가해진 외력의 위치를 실시간으로 추정하기 위해서는 실시간으로 감지 할 수 있는 프로그램이 요구된다. 따라서 ANS 표면에 집중 하중이 발생하면 위치를 추정 할 수 있는 신호처리 및 위치 추정 인터페이스 프로그램을 NI Labview 환경에서 개발 하였다.

스트레인에 따른 ANS의 실시간 위치 추정 시스템을 Labview 환경에서 개발하기 위해 ANS를 통하여 나오는 CFSS의 출력 신호를 표. 5에 나타낸 것과 같은 사양을 가지고 있는 데이터 수집 보드(data acquisition board, DAQ)를 선정하여 CFSS의 데이터를 수집하였다. 그리고 CFSS의 데이터 수집은 Fig. 25에 도시된 것처럼 다음의 과정을 통해 수집된다.[27-30]

표. 5 ANS에 가해진 CFSS의 출력 전압을 수집하기 위한 DAQ 보드 사양

Mode	NI 6229
Bus	PCI, PXI
Analog Inputs	32 ch
Analog Inputs Resolution(bits)	16
Analog Outputs	4 ch
Output Resolution(bits)	16
Max Output Rate(kS/s)	833
Analog Output Range(V)	± 10
Digital I/O	48
Correlated(clocked) DIO	32, up to 1 MHz

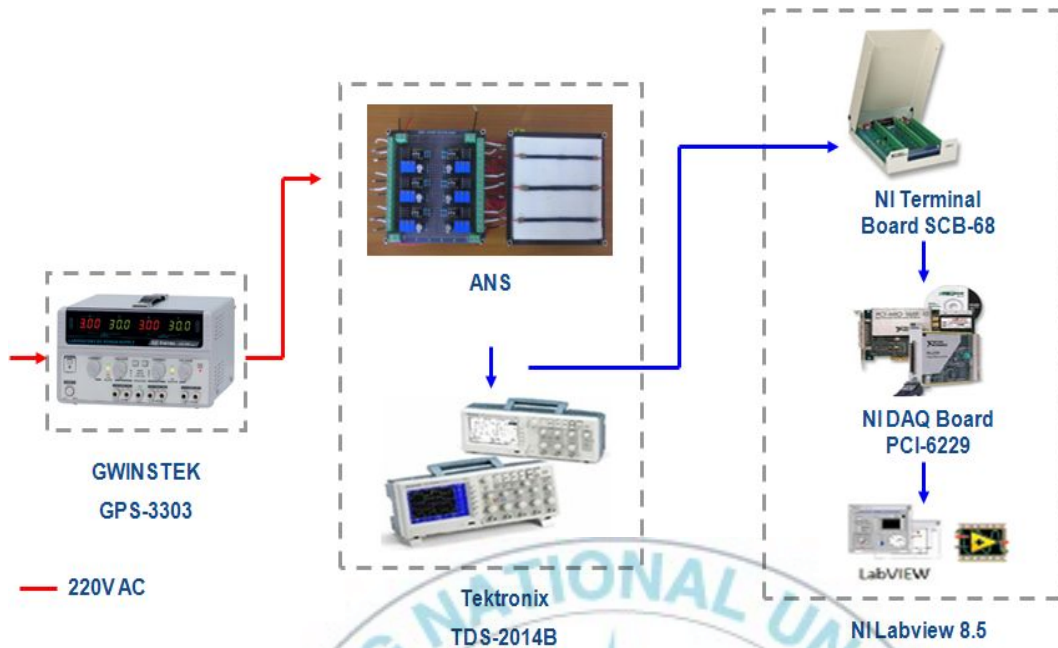


Fig. 25 ANS에 가해진 CFSS의 데이터 수집 순서도

ANS에서 발생한 신호를 수집하기 위해 DAQ 보드 사양 중 아날로그 입력의 개수를 고려하였다. 본 연구에서 사용하는 채널수는 6개이지만 대변형 유연 구조물에 적용을 한다면 본 연구보다는 보다 많은 데이터 수집 채널이 필요하기 때문에 채널수가 많은 사양의 DAQ 보드를 선정하였다. 그리고 CFSS에서 출력되는 전압 값을 외곡된 신호의 변화 없이 충분한 정확도를 갖게 하기 위한 샘플링 주파수의 선택이 필요하다. 샘플링 주파수는 측정 물리량이 시간적으로 변화할 때 어느 정도의 빠르기로 측정하면 충분한 정확도를 가지도록 측정할 수 있는가를 결정하는데 이때의 빠르기를 샘플링 주파수라고 한다.[27] 만약 적절하지 못한 샘플링 주파수를 선택한다면 원 신호와 전혀 다른 왜곡된 신호가 출력된다. 이러한 경우를 **aliasing**이라고 하는데 이렇게 왜곡된 신호를 디지털 전송에서 부호 간 간섭을 없애는 조건으로 입력 신호의 최고 주파수의 2배 이상의 주파수, 즉 원 신호보다 2배 이상의 주파수에서 표본화하

면 원 신호를 충실하게 재현할 수 있다는 Nyquist 정리를 이용하여 본 연구의 샘플링 주파수를 설정 하였다.[27] 설정된 주파수는 CFSS의 출력신호를 보여주는 Fig. 10에서 나타난 것처럼 10Hz의 주파수 영역을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 측정하고자 하는 신호는 일반적으로 본 연구대상 구조물의 측정 주파수 영역이 10Hz이내인 것을 감안하여 20Hz에서 30Hz로 설정하여 외력으로 발생한 ANS의 각 CFSS 출력 전압 값을 왜곡되지 않은 신호로 측정하여 앞서 기술한 알고리즘에 따라 스트레인 변화를 실시간으로 추정하는 시스템을 Labview 기반으로 구성하였다.

스트레인 위치 추정 시스템의 구성을 위해서 가장 기본적으로 measurement & automation explorer이라는 DAQ 하드웨어 설정 소프트웨어를 실행 시켰다. measurement & automation explorer는 편의상 약자를 써서 MAX라고 명명되고 MAX의 디바이스와 인터페이스 메뉴 및 채널과 테스트 관리 메뉴를 이용하여 파라미터 값들을 설정하였다.[28-29] 또한 디바이스와 인터페이스 메뉴에서 데이터를 수집하는 PCI-6229 하드웨어가 Labview 프로그램과 잘 연동이 되는지 확인 하였다. 그리고 Fig. 26에 도시된 것처럼 채널 및 테스트 관리 메뉴에서 CFSS의 출력 전압을 수집 할 수 있게 해주는 여러 파라미터들을 설정하였다.[28-29]

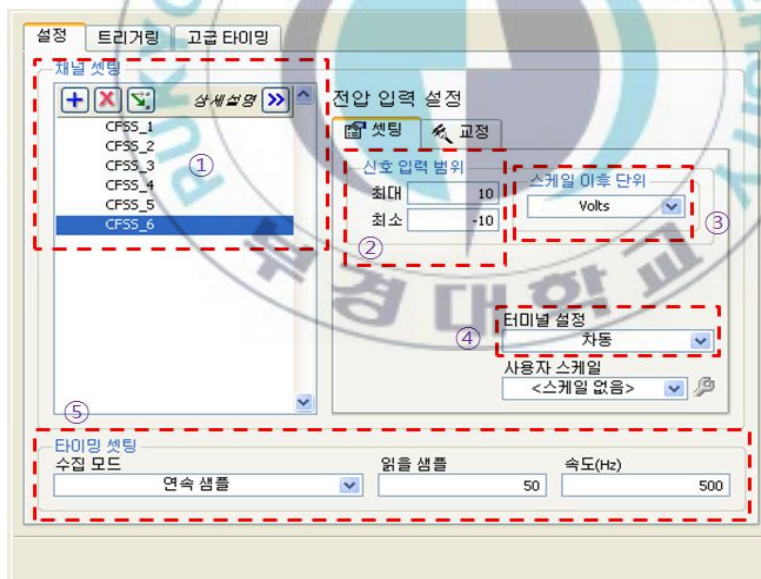


Fig. 26 외력에 따른 CFSS의 출력 전압을 수집하기 위한 파라미터 설정

단계 1. 측정 센서의 채널 설정

측정하고자하는 센서의 채널을 선택하는 창으로써 DAQ 어시스턴트를 이용하여 채널을 선택 할 수 있다. 또한 채널의 각 이름 설정을 달리하여 구분하기 쉽게 설정 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 6개의 채널을 사용하고 채널의 이름을 변경하여 구분할 수 있게 한다.[28-29]

단계 2. 입력 신호 범위 설정

입력 신호의 범위를 설정을 하는 곳이며 여기서 기본 값으로 $\pm 5V$ 로 설정이 되어있다. 하지만 본 연구에서 사용하는 CFSS의 출력 전압 값이 최대 +10 최소 -10로 출력 할 수 있어 신호의 입력 범위를 $\pm 10V$ 로 설정 한다.[28-29]

단계 3. 측정 단위 설정

전압을 측정하는 것을 목적으로 하기 때문에 Volt로 설정한다.[28-29]

단계 4 : 신호의 터미널 설정

측정 신호가 접지된 콘세트에 플러그를 꽂아 사용하는 것과 같은 접지신호(grounded)인가 아니면 건전지와 같은 유동(floating) 신호에 따라 접지 모드를 달리 선택해야 한다. 본 연구에 사용된 입력 신호는 접지가 있는 신호 이므로 한 개의 접지를 사용하는 차동모드를 선택하여 데이터의 수집을 시행한다. 차동모드에 따른 CFSS의 출력 신호 배선을 Fig. 25에서 표현한 terminal 보드(SCB-68)와 DAQ 보드를 연결하는 전용 케이블을 사용하여 DAQ 보드에 CFSS의 출력 전압 값을 보낸다. 여기에 사용된 터미널 보드의 배선법은 파라미터 설정의 연결 다이어그램을 통해 알 수 있다.[28-29]

단계 5. 샘플링 속도와 속도 및 수집모드 설정

샘플의 속도를 설정하기 위해 본 연구에서 측정하고자하는 측정 주파수를 앞서 기술한 내용을 통하여 10Hz로 정하였다. 이 측정 주파수는 DAQ 어시스턴트를 이용하여 웨이브폼으로 표현하기 위해 수집모드를 연속적인 모드로 구성하고 속도는 10Hz 보다 약 50배 정도를 입력한다. 따라서 속도는 500Hz로 정하고 읽을 샘플은 속도의 약 1/10을 입력 하므로 500Hz의 1/10 인 50개로 정하여 CFSS의 출력 전압을 측정한다.[28-29]

앞서 언급한 순서에 의한 파라미터 설정이 끝나면 Labview 아이콘을 이용하여 앞서 기술한 SPA를 구성한다. SPA는 DAQmx 함수를 이용하여 아날로그 입력 VI(virtual instrument)에 의하여 구성되었다. 가장 먼저 외력 발생으로 인한 CFSS의 출력 전압의 데이터를 획득하고 또한 그 변화를 웨이브폼을 이용하여 실시간으로 VI상에서 볼 수 있게 Fig. 27에 도시한 바와 같이 프로그래밍을 하였다. 제작된 프로그램은 태스크를 아날로그 입력 전압으로 설정하고 하드웨어의 타이밍 관련 매개변수를 지정하는 아이콘을 통해 앞서 기술한 샘플 속도, 읽을 샘플, 수집모드에 대하여 설정한 값을 입력하였고 측정된 데이터를 읽어 오는 함수를 통하여 6개 채널의 CFSS의 출력 값을 읽어드린 후 측정 파일에 쓰기를 통하여 데이터를 저장하고 연속적으로 웨이브폼에 변형된 출력 값을 실시간으로 출력 시킨다.

위 프로그램을 통하여 기본적으로 데이터의 값을 읽고 출력하는 프로그램을 구성하였다. 하지만 CFSS의 출력 전압 값이 하나로 통일되어 출력되므로 CFSS의 출력 전압의 강도 차이로 위치 추정의 정확성을 높이는 SPA에서 사용하기 적합하지 않다. 그러므로 CFSS의 데이터를 개별적으로 출력하여 서로 비교하는 과정이 필요하게 된다.

각 CFSS의 출력 전압 데이터를 개별적으로 추출하고 여기에 CFSS의 고유 특성인 전기적 가변성으로 인한 출력값 변화와 외부 노이즈로 인한 출력 신호의 신뢰성을 높이기 위해 시정수 구간동안의 평균값을 도입하여 프로그래밍을 한 것을 Fig. 28에 도시하였다.

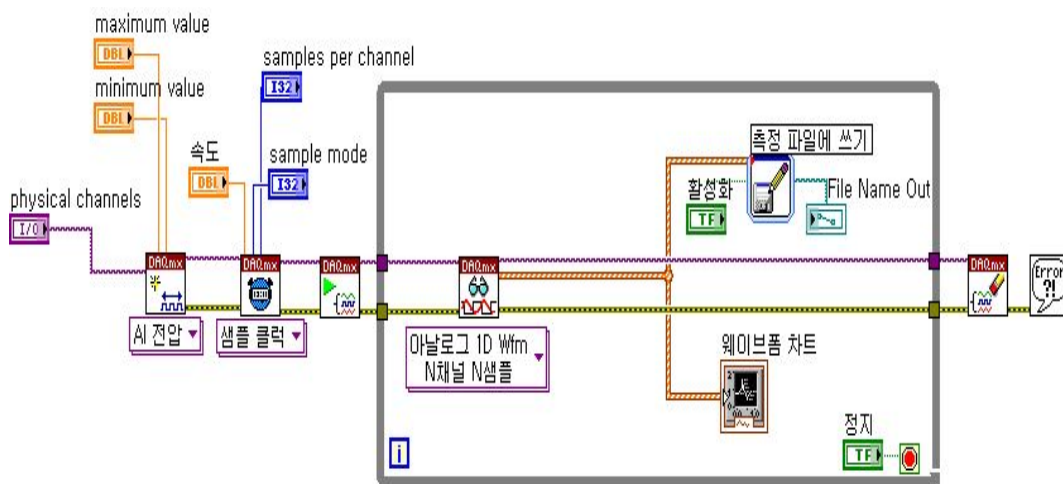


Fig. 27 CFSS의 연속적인 출력 전압 데이터를 획득하기 위한 프로그램

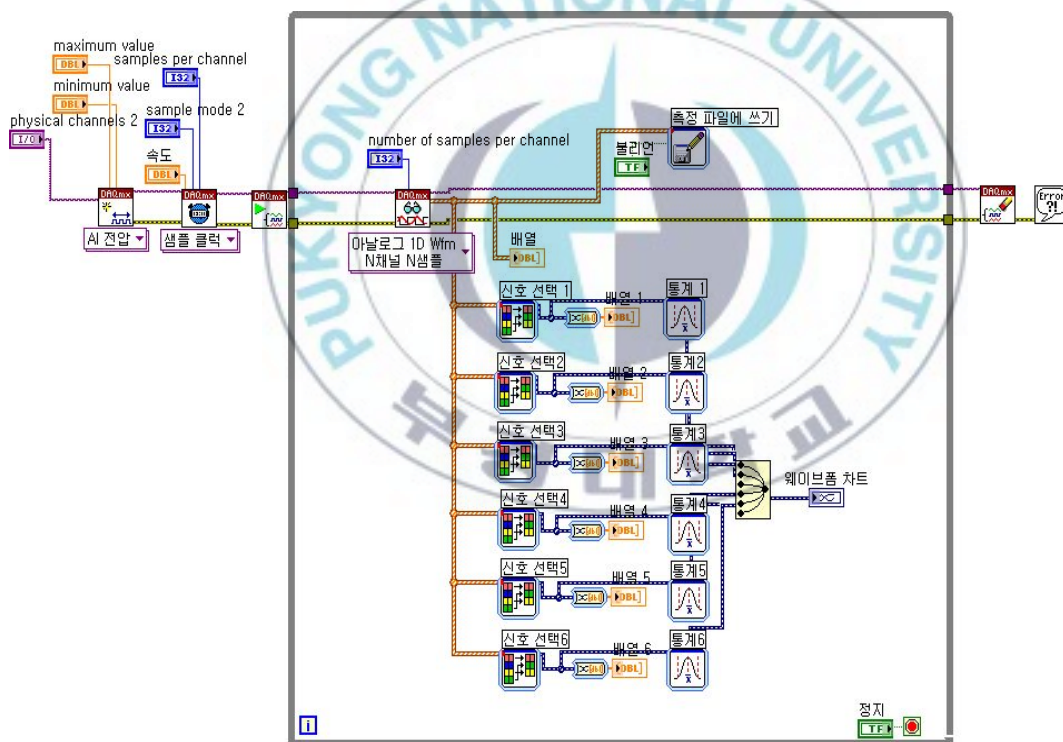


Fig. 28 CFSS의 출력 전압값의 신뢰성을 높이기 위한 평균값 도입 프로그램

시정수 구간 동안의 평균값 도입으로 신뢰성이 확보된 CFSS의 출력 전압 값을 배열로 받아낸다. Fig. 24에서 상승 구간은 약 0.4초인 것을 확인할 수 있고 샘플링 속도가 500Hz이므로 1초 동안의 데이터를 받는 개수는 500개이다. 또한 읽을 샘플링 개수가 50개이므로 0.4초 동안의 받을 수 있는 CFSS의 출력 데이터 값은 200개가 된다. 따라서 배열을 통하여 500개의 전체 데이터를 받고 그 중 상승 구간의 데이터 200개를 선택하여 평균값을 구한 후 외력에 대한 CFSS의 출력값을 임시로 저장하고 이 저장된 데이터와 출력 데이터의 변화가 발생된 데이터를 비교하여 비교된 데이터의 변화율이 63%의 비율을 초과하는 것이 확인되면 fluctuation이 발생하는 것으로 인식한다. 이것은 상승 구간마다 데이터의 상대적인 값을 도입하여 실시간으로 스트레인에 따른 위치를 추정 할 수 있게 한 것이다. 또한 교차점에 위치한 각 CFSS의 fluctuation이 동시에 발생했는지 비교하고 스트레인 위치 추정의 정확성을 높이기 위해 각 CFSS의 출력 신호의 강도를 비교한다. 이러한 내용에 따른 SPA를 Labview 기반으로 구성하여 Fig. 29에 도시 하였다.

위에서 언급한 내용의 Labview 기반의 SPA의 알고리즘을 바탕으로 Fig. 30에 도시한 것처럼 스트레인 위치 추정 시스템의 신호처리 전체 구성도를 도시 하였다. 여기서 CFSS 2와 CFSS 6의 교차점에 집중하중이 가해지면 ANS와 SPA를 통하여 Fig. 31에 도시한 바와 같이 각 CFSS에 의한 전압 크기는 발생된 집중 하중의 거리 차로 인한 강도의 크기에 비례한다는 것을 확인 할 수 있다. 이렇게 확인된 출력 값을 바탕으로 Fig. 32에 스트레인에 따른 위치 추정을 Labview 기반의 인터페이스 프로그램을 통하여 추정한 것을 확인 하였다. 단 위 시스템은 동시 신호는 발생하지 않는다는 전제 조건을 가지고 테스트를 진행한 결과이다.

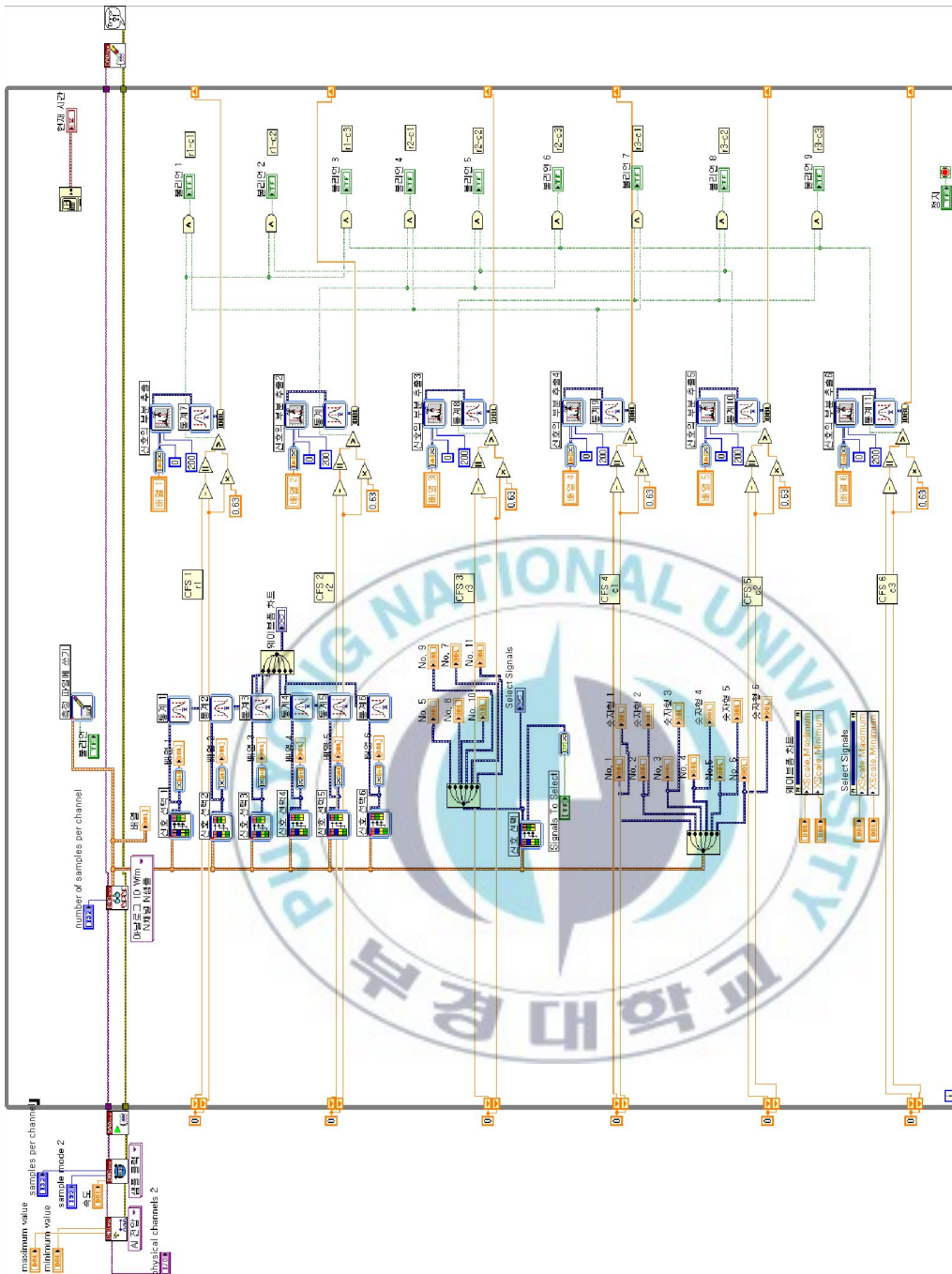


Fig. 29 Labview기반의 스트레인 위치 추정 알고리즘

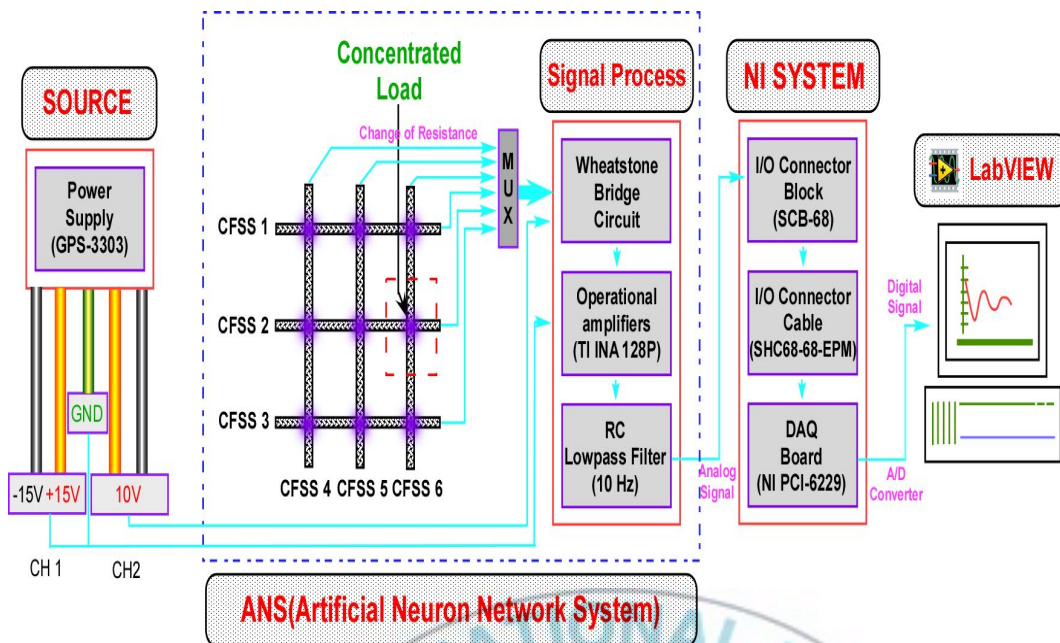


Fig.30 스트레인 위치 추정 시스템의 신호처리 전체 구성

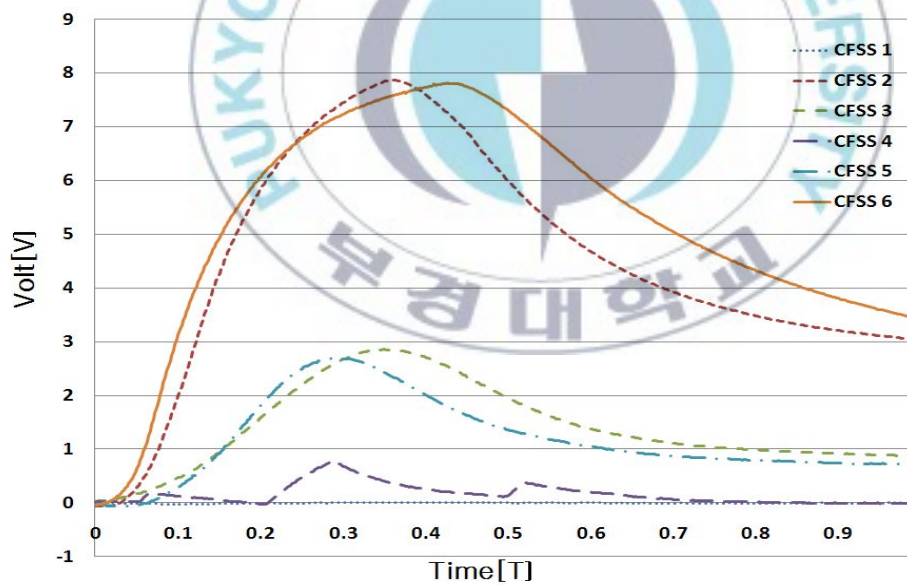


Fig. 31 외력에 따른 각 CFSS의 출력 전압의 강도

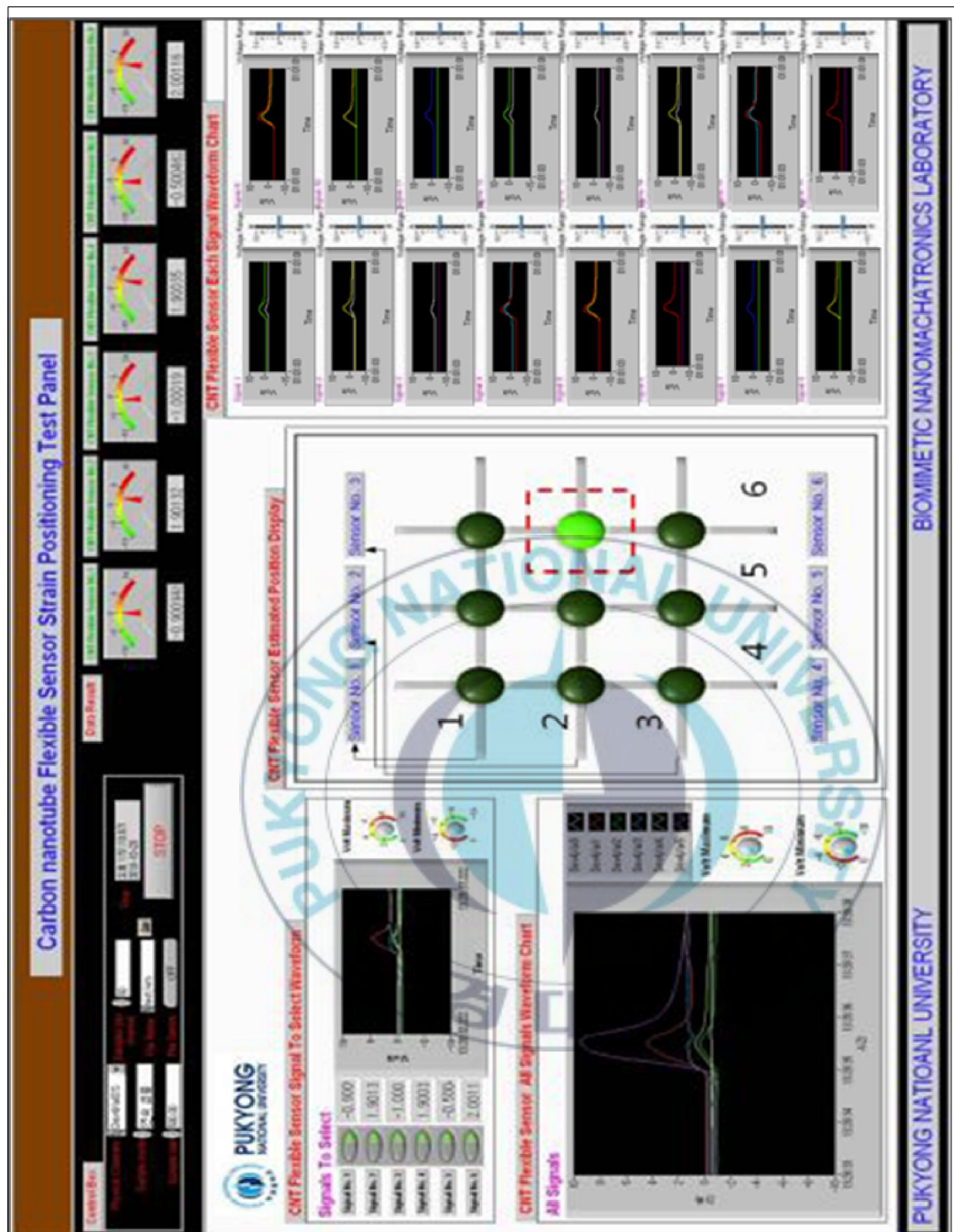


Fig. 32 스트레인에 따른 위치 추정을 Labview 기반의 인터페이스 프로그램

IV. 결론

본 연구에서는 CNT와 고무(EPDM) 기반의 유연성과 전왜성을 지닌 장신의 연속형 센서 CFSS를 제작하고 그 특성에 대하여 고찰하였다. 또한 CFSS를 격자 형태의 그물망 구조로 제작하여 넓은 면적을 적은 수의 센서로 데이터를 처리할 수 있는 ANS를 개발하여 일반적으로 사용되는 SHM의 신호처리 시스템보다 경제성과 효율성을 향상 시키고자 하였다. 그리고 하중에 대한 CFSS의 출력 신호는 예측되나 하중에 따른 스트레인의 위치는 추정하지 못하는 단일 CFSS를 격자로 배치하여 ANS에 가해진 집중하중의 위치를 CFSS의 출력 신호의 강도 비교를 통하여 추정하는 알고리즘인 SPA를 개발하여 구조물의 건전성을 실시간으로 감지 할 수 있는 시스템을 개발하였다.

본 논문에서 제작한 CFSS의 특성을 연구하기 위하여 상용 스트레인 게이지와 센서의 정확성, 감도, 선형성, 히스테리시스, 반복성, 제로드리프트, 온도 특성, 응답특성, 동적특성에 대하여 비교 분석을 하였다. 그 결과 CFSS는 상용 스트레인 게이지와 비교하여 전반적으로 동등하거나 우수한 특성을 보이고 있어 향후 새로운 스트레인 센서로 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

스트레인 센서로 사용 가능한 CFSS를 이용하여 구조물의 건전성을 실시간으로 감시할 수 있는 시스템을 구축하였다. CFSS를 3×3 격자 형태의 인공 신경망으로 구성하고 이들의 신호 처리를 위하여 휘스톤브리지, 증폭기 및 노이즈를 제거하기 위한 RC 필터 회로를 제작하여 넓은 면적을 적은 수의 센서 사용으로 신호처리 비용을 절감 할 수 있도록 하였다. 개발된 ANS와 외력에 따라 발생한 CFSS의 출력신호를 조합하고 그 신호의 강도를 비교하여 실시간으로 스트레인 위치를 추정하는 알고리즘인 SPA를 NI 시스템을 사용하여 개발하였다. 개발된 SPA를 통하여 ANS 표면에 발생한 집중 하중의 강도가 다른 위치에 배열된 각 CFSS의 출력된 신호의 강도가 가장 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있었고 이것을 통하여 스트레인의 발생된 위치와 그 크기를 성공적으로 추정 할 수 있었다.

향 후 CFSS의 특성 실험을 통해 파악된 결과를 활용하여 여러 환경적인 요인으로 왜곡되는 신호를 최소화한 안정적인 신호를 출력시킬 수 있는 보상회로의 연구가 필요하다. 또한 센서 고유의 저항 변화에 강인한 신호처리 회로의 개발과 스트레인 측정값에 기반한 압력의 분포 및 동시에 발생한 스트레인 신호를 추정할 수 있는 알고리즘의 추가 연구가 필요하다. 본 연구에서 제시한 시스템을 기반으로 앞으로 CNT/EPDM 복합소재의 유연성을 이용한 착용 가능(wearable) 센서 개발이나 지능형 로봇 등에 적용 가능한 로봇 인공피부에 적용을 기대 할 수 있을 것이다.



V . 참고 문헌

- [1] Iijima, S., Helical microtubules of graphitic carbon, Nature, (1991), 354, 56-58
- [2] 이영희, 탄소나노튜브의 물성과 응용, 한국물리학회지, (2005), pp.84~144.
- [3] 강인필, 이종원, 최연선, Mark J. Schulz, 나노 센서를 이용한 구조물 건전성 감시 기법, 한국지진공학회, (2006), pp.613~619.
- [4] 강인필, 구조물 건전성 감시용 생체모방형 탄소나노튜브 인공뉴런, 대한기계학회 바이오공학부문 춘계학술대회 논문집, (2008), pp.143~145.
- [5] Inpil Kang, Mark J. Schulz, Jay H Kim, Vesselin Shanov, Donglu Shi, A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring, Smart Material and Structure, (2006), pp.737~748.
- [6] J. L. C. Diniz, R. D. Vieira, J. T. Castro, A. C. Benjamin and J. L. F. Freire, Stress and Strain Analysis of Pipelines with Localized Metal Loss, Experimental Mechanics, (2006), Vol. 46, No. 6, pp.765-775.
- [7] 김인걸, 우종명, 원격 무선 시스템과 스마트 센서를 이용한 항공우주용 구조물의 건전성 모니터링 기술 개발, 한국과학재단, (2006)
- [8] Tae-Sung Lee, Yong-Moo Kwon, Hyoung-Gon Kim, Smart Location Tracking System using FSR, International Conference on Artificial Reality and Telexistence, (2004)
- [9] 박찬익, 김인걸, 이영신, 압전필름센서를 이용한 복합재 평판의 저속충격 손상개시 모니터링, 한국복합재료학회지, Vol. 15 No. 2 , pp.11 - 17

- [10] F. Necati Catbas,, Melih Susoy, Dan M. Frangopol, Structural health monitoring and reliability estimation: Long span truss bridge application with environmental monitoring data, *Engineering structures* , (2008), Vol. 30 No. 9 , pp.2347~2359
- [11] Majumder, M., Gangopadhyay, T.K., Chakraborty, A.K., Fibre Bragg gratings In structural health monitoring-Present status and applications, *Sensors and actuators. A, Physical* , (2008), Vol. 147 No. 1 , pp.150~164
- [12] De Rosa, I.M., Sarasini, F., Use of PVDF as acoustic emission sensor for in situ monitoring of mechanical behaviour of glass/epoxy laminates, *Polymer testing*, (2010), Vol. 29 No. 6, pp.749~758
- [13] Rathod, V.T., Mahapatra, D.R., Jain, A., Characterization of a large-area PVDF thin film for electro-mechanical and ultrasonic sensing applications, *Sensors and actuators. A, Physical* , (2010), Vol. 163, No. 1, pp.164~171
- [14] Yu, Y., Wang, Y., Dong, W., Strain properties analysis and wireless collection system of PVDF for structural local health monitoring of civil engineering structures, *International conference on smart materials and nanotechnology in engineering*, (2009), pp.7493
- [15] Min Seok Kim, Jong Ho Kim, Han Wook Song, Yon Kyu Park, Bio-mimic Electronic Artificial Skin based on Flexible Electronics, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, (2009), Vol.26 No.11, pp.29~34
- [16] Jin-Ho Kim, Young-Ju Kim, Woon Kyung Baek, Lim Kwon Taek, Inpil Kang, Flexible strain sensor based on carbon nanotube rubber composites, *SPIE* (2010), Vol.7646, pp.416

- [17] 박용균 저, 메카트로닉스의 기초, 두양사, (2004), pp.166~168.
- [18] 홍준희 저, 자동화를 위한 메카트로닉스, 시그마프레스, (2000), pp.58~81.
- [19] 추인선 저, 수치해석학, 교우사, (1998), pp.243~246.
- [20] 이희규 저, 계측 센서 공학, 형설출판사, (2004), pp.58~62.
- [21] 민남기 저, 현대 전기 전자 계측 공학, 동일출판사, (2006), pp.553~556.
- [22] 강철구 공역, 메카트로닉스와 계측시스템, 인터비전, (2008), pp.361~363.
- [23] 김동화 저, 신편 센서 공학, 태훈출판사, (2001), pp.443~450.
- [24] 권오규 저, 연산증폭기 회로설계 및 응용, 청문각, (2004), pp.103~106.
- [25] Texas Instrument Precision, Low Power Instrumentation OPAMP Manual
- [26] 신민생 저, 기초 계측 공학, 원창출판사, (2001), pp.42~45, pp.218~222.
- [27] 이병옥 저, Labview를 이용한 기초공학실험, Ohm사, (2004), pp.75~83.
- [28] 손혜영 저, Labview의 정석, 인피니티북스, (2009), pp.314~322.
- [29] 광두영 저, 컴퓨터 기반의 제어와 계측 LabviewTM, Ohm사, (2007), pp.314~322.
- [30] NI PCI-6229 Manual

감사의 글

먼저 항상 모자란 저를 열정적으로 지도해주신 강인필 지도교수님께 진심으로 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다. 또한 인생의 진로에 있어 항상 걱정과 격려로 저를 이끌어 주신 한국생산기술연구원의 박형기 수석연구원님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 공학도로서 사회에 공헌할 수 있도록 열심히 가르쳐 주신 메카트로닉스공학과 여러 교수님들께 깊은 감사를 드립니다.

처음 실험실 생활을 하면서 먼 타지생활에 외로움을 느끼지 않도록 도와준 친구 성명, 원정, 진혁이에게 정말 고마운 마음을 전하고 학위 과정동안 여러 과정에 많은 도움을 준 친구 준석, 학철이 그리고 후배 진석, 상훈이와 이일영 교수님 실험실의 세령, 제목씨에게 고마움을 전합니다. 그외 여러 도움을 주신 각 실험실의 선·후배님 및 기계자동차 후배들에게 정말 감사한 마음을 전합니다. 또한 어려운 상황에 실험실을 함께 열심히 이끌어 준 후배 종민, 주영, 상현, 유비에게 고맙고 미안한 마음을 전합니다.

꿈을 향해 열심히 학업에 열중하도록 고향에서 항상 든든한 지원군이 되어준 형제들 정희, 민섭, 대한, 용호, 회성, 무경, 민이에게도 정말 큰 고마움을 전하고 항상 슬픔과 기쁨을 함께 나눈 또 하나의 형제인 형식, 명철, 태웅이에게도 고마운 마음을 전합니다. 그리고 친구 도운, 인철, 영환이에게도 고마운 마음을 전합니다. 또한 학위 과정동안 항상 응원해준 한국생산기술연구원의 동기 및 최경락 수석연구원님, 이상원 연구원님 그 외 충청강원지원센터 생산자동화팀 박사님들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 항상 저를 믿어주시고 아낌없이 사랑해주시는 어머니와 아버지 그리고 항상 손자 끼니 걱정하시는 외할머니와 손자 걱정이 각별하신 친할머니께 진심으로 감사드리며 또 사랑한다고 전하고 싶습니다. 하늘에 계시는 두 할아버지께도 감사드리며 그 외 모든 가족에게도 미안한 마음과 감사의 말씀을 전합니다.

2010년도 12월

김 진 호 올림