

## 저온 지하저장소 주변 물/얼음 상변화 감시용 비접촉식 전도도 센서 시험결과

정현기, 한공창, 정소걸, 신중호 (한국지질자원연구원)  
김호영 (SK건설(주))

### 1. 서론

LNG 지하 저장은 지상 탱크 저장에 비해 안전, 보안, 경제성, 환경 문제 등에 있어 유리하여 1990년대 이후 여러 시도가 진행되고 있다. LNG 지하저장 기술개발 시도에 있어 저장소 주변 모니터링 시추공에서 국내외 전례 없는 지하수의 온도 및 물성 상변화(물/얼음)를 특수조건 현장상황 모니터링 계측이 검토된다. 이 의미는 최초 냉각 Ice ring 형성 시 저장소에서 멀어지는 시추공 내 선상에 4개 이상의 센서를 매설하고 관측한다면 냉각 확산 속도를 현지 암석 물성상관 추정할 수 있고, 저장소의 본격 가동 시 원치 않은 예측불허의 상황이 발생하였을 때 실시간으로 현장 포착하여 빠른 시간 내에 대처할 수 있는 모니터링 시스템을 구축하는 것이다. 이때 시추공 내 지하수 유무 변화나 포화상태를 육안 확인할 수 없으므로 온도뿐만 아니라 전기전도도 모니터링도 시도되며, 물/얼음 상변화 상황을 고려한 특수 계측이 필요하다. 직접 접촉방식 전극에 의한 전기전도도 계측은 얼음 상황이나 공내 오염 물질 등으로 장기 측정에 부적합하므로 온도만의 변화가 아닌 저장소 주변 지하수의 상변화 물성을 전기전도도 계측에 의해 감시한다면 보다 확실한 상황을 파악할 수 있다. 또한 우기 및 건기의 현장 주변 상황 지하수 흐름과 관련한 추가정보도 전기전도도 관측치는 보조적으로 제공할 수 있다. 본 연구에서는 계측 항목, 센서 인터페이스, Data Logger, 원격 계측 등에 대해 중요 계측사항을 검토한 후 실험실내 가능성 검증시험 및 결과를 토의한다.

### 2. 물/얼음 상변화 시추공 탐지기법 개발용 전기전도도/온도 계측

어떠한 물리량을 관측하더라도 계측은 적합한 센서와 계측기를 용도에 맞게 선정, 주의 깊게 설치 운용하여야 소기의 목적을 경제적으로 달성할 수 있으며, 그렇지 못하면 계측을 행하지 않음만 못하다. 시추공 내 각종 정밀 안정 계측 센서에 대해 중요한 점들만 항목별로 우선 검토한 후 실험 및 결과 토의를 기술하고자 한다.

온도를 측정하는 방식에는 여러 가지가 있으며 측정 정밀도, 가격, 고속측정, 센서크기, 측정온도 범위 등에 따라 센서를 선정한다. 그림 1은 각종 온도 측정 센서들의 장단점 특성과 적용성을 상세히 보여준다. 시추공 내 모니터링에서는 대개 RTD 백금센서를 사용하여 0.1° 정밀도를 측정하며 pH나 전기전도도 측정치의 온도변화 보상을 위해서도 필수적이다. RTD는 온도가 증가하면 비례하여 저항이 증가하는 원리를 이용하므로 사실상 저항을 정밀 측정하는 것이다. 저항측정을 위해서는 전류를 다소 흘려주어야 하는데 과다하면 이자체가

전열기가 되어 피 대상체의 온도보다 높게 측정될 수 있으므로 주의하여야 한다. 서미스터 센서에 비해 저항 변화치가 미소하므로 센서까지의 연결선의 길이가 문제가 되며 따라서 실제계측에서는 3선식 혹은 4선식을 사용한다.

전기전도도(Conductivity)는 전기가 잘 통하는 정도를 나타내며 전기비저항(Resistivity)의 역수이다. 전기전도도의 단위는  $\text{mho}=\text{Siemen}$ 이고,  $1 \text{ mS} = 1000 \mu\text{S}$ 이며, 전기비저항의 단위는  $\text{Ohm}(\Omega)$ 이다. 따라서  $20 \mu\text{S}$ 의 전기전도도 물질은  $50,000 \Omega$ 의 전기비저항 물질이라 말할 수 있다. 전기전도도의 측정은 원리적으로 두 개의 특수 전극판을 사용하여 전류를 흘려 보내(실용적으로는 직류가 아닌 수백 Hz의 구형파사용) 측정하나 실제적으로는 전극판 자체의 접촉저항이 문제되기 때문에 전류전극과 전위전극을 별도로 사용하며 정사각형 전극판 대신에 4개의 링형 전극을 사용하는데 이때 고정된 전류 및 전위전극 형상(고유의 프로브 상수 주어짐)은 피검액의 전기전도도와는 무관한 성질을 가지고 있다. 전기전도도 또한 온도의 변수이므로 온도보정을 하여야 하며 그 상수는 대개  $0-2.5\%/^{\circ}\text{C}$ 의 범위이다. 이는 용액 종류, 농도, 물의 점도 등에 좌우되는데 보통의 경우  $2\%/^{\circ}\text{C}$  정도이다. pH계측과 마찬가지로 전기전도도 계측도 표준용액을 사용하여 Calibration을 행하여야 한다. 자연수에서의 TDS(Total Dissolved Solids)는 용해된 여러 가지 염이나 광물질의 농도가 비교적 전기전도도에 일정하게 비례하므로 전기전도도를 측정하면 바로 TDS로 환산할 수 있다. 그림 2는 Cell Constant = 1.0의 경우 전기전도도 센서의 이론적 Cell 상수의 설명을 도식적으로 보여주는 것이며, 그림 3은 직접 접촉식이 아닌 비접촉 무전극 전자유도방식 Toroid Coil 송수신 센서의 모식도로써 본 연구에서 채택된 특수한 전기전도도 측정 방식이다. 한편 직접 접촉식 전기전도도 측정은 pH측정과 같이 전극이 대지와 접지되는데 측정 시스템의 접지가 공통 접지되면 회로가 결성되어 예측할 수 없는 오류(전압강하 혹은 잡음유도)를 범할 수 있다. 이 경우 Optical-isolation 회로를 사용하거나 릴레이 시분할 측정 등이 고려된다.

센서 인터페이스에 있어 모든 센서는 대개 계측 물리량의 변화에 따른 전압을 내거나 저항치가 변하는데 이 경우는 전류를 흘려보아 전위를 측정하여 그 값을 관측한다. 최근의 센서모듈들은 전원(대개 DC12V)을 필요로 하며 그 출력은 전압(DC 0-5V), 펄스열(Pulse Train), 전류, 주파수방식(V/F), 디지털 수치 등이다. 계측기까지의 거리는 짧을수록 정밀한 측정이 가능하므로 요즘은 아예 센서에 직접 회로를 부착하여 출력을 제공하는 추세인데 이 경우는 보다 고가이다. 한편 모든 계측시스템에서 유의하여야 할 사항은 접지(Ground)회로인데 이를 피하는 가장 좋은 방법은 분리전원에 의한 광학적 분리(Optical-Isolation) 기법이다. 이에 의해 잡음(Noise)의 극복이나 전압 강하 문제가 해결된다. 야외 센서와의 연결 시벼락으로 인한 회로파손방지를 위해 다양한 Surge Absorber를 사용하기도 한다.

데이터 로거란 센서로부터의 출력을 일정시간 간격으로 그 디지털 수치를 프로그래밍에 의해 자동연속 저장하는 것이다. 대개 여러 개의 센서를 멀티채널로 기록하며 동시에 LCD에 표시하기도 한다. 소형 배터리에 의해 초저전력으로 장기간(예 1개월) CMOS SRAM IC 칩에 기록하기도 하고, AC 전원에 의해 PC 디스크에 저장하기도 한다. 내장 IC칩의 경우 PC나 노트북의 시리얼포트를 이용하여 한꺼번에 전송 받는다. AC 전원의 경우 정전시를 대비하여 UPS를 사용한다.

원격 계측을 위해 감시시추공에 4계절용 Data Logger를 설치하고 유선 혹은 무선으로 사무실에서 원할 때마다 자료를 가져오기도 한다. 이것이 원격계측인데 대개 3~4개의 시추공을 하나의 PC가 제어 및 자료수집, 저장, 디스플레이 한다. 여기에는 RS-232, RS-422,

RS-485 방식이 있는데 RS-232는 1:1교신으로 전송거리가 최대 10m정도이고, RS-422는 n:1 교신으로 최대 1000m까지 가능하며, RS-485는 n:n 교신으로 역시 최대 1000m까지 가능함과 동시에 단지 twisted 2선만이 필요한 장점이 있으나 각 계측기에 고유번호를 부과한 후 별도의 디지털 하드웨어 제어선을 동원하여 소프트웨어적으로 추가 제어가 필요하다. 주어진 전선 종류에 대해 전송속도는 거리에 반비례하나 대개 9600bps는 무난하다. 근래에는 고주파 무선 방식이 안정적으로 사용되는 추세에 있는데 사용자 쪽에서는 RS-232 계측관련 소프트웨어를 수정할 필요가 없는(user transparent) 모듈들이 제공되고 있다. RS-422와 RS-485 방식은 일련의 거쳐 가는 배선연결만이 필요하나 양 종단에 사용 케이블의 임피던스 특성에 맞는 종단저항(200Ω 정도)을 반드시 설치하여야 한다. 외국의 경우 광역 무인 측정 장소에서 중요한 자료인 경우 인공위성을 활용하기도 하나 최근 휴대폰이 저가격 보편화되고 있으므로 섬과 같은 경우 필요시 태양전지에 의한 시스템 개발도 검토해 볼만하다. 전화선을 이용한 모뎀 원격제어계측 시스템은 중앙본소에서 현장에 가지 않고 자료를 수집할 수 있다. 그러나 현장 PC에서도 자료수집 및 저장이 가능하면서 동시에 원격 제어할 수 있는 특별한 소프트웨어가 필요하다.

### 3. 실내 실험계측 가능성 검증시험 및 결과토의

저장소 주변 시추공 내에서 물성 변화를 실시간 감시할 수 있는 시스템을 현장 적용하기 전에 실험실 내에서 그 적용 타당성을 검증하였다. 온도 및 물성 변화를 계측하기 위한 시스템 구축을 현장 실용화를 전제로 하여 수십 가지 이상의 기존 센서류를 검토한 결과 온도 센서로는 Pt 1000 RTD 정밀 백금 온도센서를 선정하였고, 전기전도도 센서를 위해서는 토로이드 코일 모양의 비접촉 전자유도방식 센서를 최종 채택하여 실험실 내 검증을 수행하였다. 이는 철저히 현장 적용을 전제로 한 것으로 정밀도 및 calibration 그리고 방수 내수압 등을 고려한 것이다. 센서 인터페이스 및 signal conditioning 회로와 분리 출력 및 멀티플렉스 그리고 AD conversion 회로를 종합한 후 산업용 CPU 보드 데이터 로거에 보편적인 RS232C 방식의 디지털 전송 소프트웨어를 작성하였다. 한편, 측정 자료는 비휘발성 플래쉬 메모리에 임의 측정시간 간격 프로그래밍으로 디지털 자동연속 저장되게 하였다. 그림 4는 실험실내 검증을 위한 개발 계측제어 시작품 시스템의 개요를 항목별로 보여준다. 각 부분의 모든 전원은 DC 12V 단일 사용으로 가능하게 설계 제작되어 있다.

그림 5는 채택된 비접촉 전자유도방식 전기전도도 센서 및 연결 특수 케이블의 모습(정밀 백금 온도센서가 함께 내장되어 있어 온도 자동 보상이 가능), 시작품 계측 시스템 전체 모습, 본 연구에서 제작 사용된 광분리 제어 2채널 저전력 멀티플렉서, 영하 11℃ 결빙실험시의 얼음속 센서 모습으로 비커가 얼음 팽창으로 일부 파괴된 모습, 영하 5℃ 결빙실험시의 얼음속 센서 모습으로 용기 파괴를 방지하기 위해 PET병 하부를 잘라 활용한 모습, 0℃ 해빙시점의 얼음속 센서 모습 등을 보여준다. 전기전도도 측정치는 온도 측정치에 비해 일정 시간 지연 후 급격한 변화가 관측되었다. 결빙은 영하 15℃까지 가능한 일반 가정용 대형 냉장고의 냉동칸을 최강으로 설정하여 실험에 이용하였다.

그림 6은 물의 상변화에 따른 전기전도도/온도의 실험실내에서 비커를 사용하여 상온에서 영하 11℃까지 결빙 및 해빙 한 계측결과이다. X축은 20초 간격 측정이나 일부 불연속

측정구간이 존재하며 실험편의상 결빙/해빙이 비선형적이었으나 실내검증 목적으로는 상관 없다. 결빙점 온도하강 일정 시간 후 전기전도도의 급격한 0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에의 수렴이 뚜렷하며, 해빙점 이후에도 일정 시간 경과 후 전기전도도의 급상승 현상이 뚜렷하게 보인다. 해빙 시에는 측정 시간 편의상 온수통에 담아 실험하였다. 그림 7은 그림 6의 실험과 동일한 조건이나 용기파괴를 피하기 위해 PET병을 잘라 실험한 예로써 비슷한 재현성 결과를 반복하여 얻었고 영하 5 $^{\circ}\text{C}$ 까지 결빙되었다. 요약하건데, 실험 결과 온도가 0 $^{\circ}\text{C}$ 이하로 하강하여 얼음 상태로 들어갈 경우 전기전도도는 급격히 하강하여 추후 현장적용 가능성을 확실히 제시하였다. 한편, 해빙 시의 결과도 마찬가지였다.

#### 4. 결 언

저온저장소 주변 시추공 내에서 물성 변화를 실시간 감시할 수 있는 시스템을 현장 적용하기 전에 실험실 내 그 적용성을 검증하였다. 온도 및 물성변화를 계측하는 시스템 구축을 현장 실용화 문제 해결을 전제로 다수 TDR을 포함한 수십가지 기존 센서류를 검토한 결과 온도 센서로는 Pt 1000 RTD 정밀 백금 센서를 선정하였고, 전기전도도 센서를 위해서는 토로이드 코일 모양의 비접촉 무전극 전자유도방식 센서를 최종 채택하여 실험실 내 검증을 수행하였다. 이는 철저하게 현장 적용을 전제하여 정밀도 및 calibration 그리고 방수 내수압 등을 고려한 것이다. 더구나 육안 확인이 불가능한 시추공 내 상황에서 물/얼음 상변화를 포착하여야하고 나아가통상의 전극방식 전기전도도 센서는 장기간에 걸쳐 원치 않는 오염물질이 센서에 부착될 경우 센서 특성이 급격히 저하됨을 충분히 고려한 것이다. 센서 인터페이스 및 signal conditioning 회로와 분리 출력 및 멀티플렉스 그리고 AD conversion 회로를 종합한 후 산업용 CPU 보드 데이터 로거에 보편적인 RS232 방식의 디지털 전송 소프트웨어를 작성하였다. 한편, 측정 자료는 비휘발성 플래쉬 메모리에 임의 측정시간 간격 프로그래밍으로 자동연속 저장되게 하였다. 실험 결과 온도가 0 $^{\circ}\text{C}$ 이하로 하강하여 얼음 상태로 들어갈 경우 전기전도도는 급격히 하강하여 추후 현장적용 가능성을 확실히 제시하였다.

상기 실험실 내 검증 결과를 바탕으로 추후 현장 실규모 저장공동 적용을 위한 주요 제안을 제시하면, 센서류의 현장 적용을 위해서는 내수압, 내잡음, 온도/압력 변화를 고려한 특수재질 밀봉, Ice ring 경계지점 전후 미회수 반영구적 매설을 전제로 한 시추공 내 소형화 등의 추가 개발을 고려한다면 안정적인 시추공 내 감시가 보장될 것이고, 센서의 보다 적합한 기구설계, 안정측정을 고려한 송수신 코일 배열의 확장 고안해야할 것이며, 단순 지하수에 대한 상변화 감지 실험뿐만 아니라 흙, 모래, 자갈, 시멘트류 등의 수분함량변화에 대한 기초 실험도 추가로 행해질 필요가 있다. 현장 모니터링 시스템 현장 적용을 위해서는 멀티채널의 확장, 시스템 저잡음화, 광분리 제어, 센서의 low self-heating 및 CMOS 저전력 소모 회로, 간편 단순한 계측제어 디지털 저장 소프트웨어의 추가 개발 등이 필요하고, 전기전도도 측정치는 정확한 온도 보정을 요구함으로 automatic temperature calibration의 보장 및 센서까지의 수백 미터 전선 길이 확장에 따른 송신 전류 및 수신 신호의 계측 고도화 등이 필수적으로 세심하게 필요하며, 원격 계측을 위해서는 무선 방식 혹은 모뎀 방식 등이 검토될 수 있다. 센서 직접 부착 시그널 컨디셔닝 회로 및 A/D가 가능하다면 다채널 디지털 계측 전송은 1000미터 이상 거리도 쉽게 구축될 것이다.

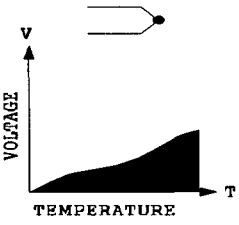
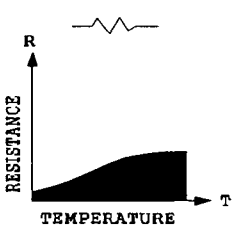
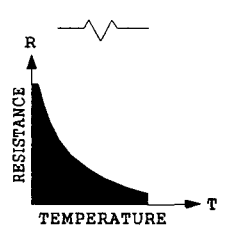
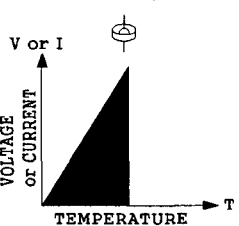
	Advantages	Disadvantages
<b>Thermocouple</b> 	<input type="checkbox"/> Self-powered <input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Rugged <input type="checkbox"/> Inexpensive <input type="checkbox"/> Wide variety <input type="checkbox"/> Wide temperature range	<input type="checkbox"/> Non-linear <input type="checkbox"/> Low voltage <input type="checkbox"/> Reference required <input type="checkbox"/> Least stable <input type="checkbox"/> Least sensitive
<b>RTD</b> 	<input type="checkbox"/> Most stable <input type="checkbox"/> Most accurate <input type="checkbox"/> More linear than thermocouple	<input type="checkbox"/> Expensive <input type="checkbox"/> Current source required <input type="checkbox"/> Small $\Delta R$ <input type="checkbox"/> Low absolute resistance <input type="checkbox"/> Self-heating
<b>Termister</b> 	<input type="checkbox"/> High output <input type="checkbox"/> Fast <input type="checkbox"/> Two-wire ohms measurement	<input type="checkbox"/> Non-linear <input type="checkbox"/> Limited temperature range <input type="checkbox"/> Fragile <input type="checkbox"/> Current source required <input type="checkbox"/> Self-heating
<b>I.C. Sensor</b> 	<input type="checkbox"/> Most linear <input type="checkbox"/> Highest output <input type="checkbox"/> Inexpensive	<input type="checkbox"/> $T < 200^{\circ}\text{C}$ <input type="checkbox"/> Power supply required <input type="checkbox"/> Slow <input type="checkbox"/> Self-heating <input type="checkbox"/> Limited configurations

그림 1. 각종 온도 측정 센서들의 장단점 특성과 적용성.

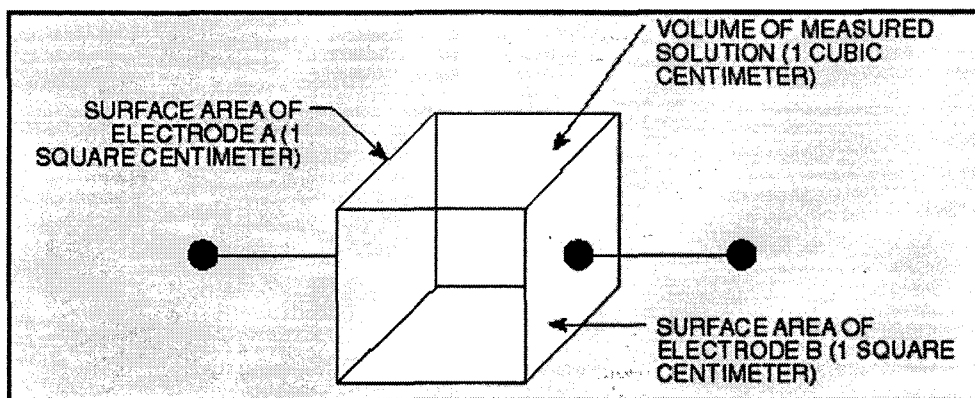


그림 2. 전기전도도 센서의 이론적 Cell 상수의 설명(Cell Constant = 1.0의 경우).

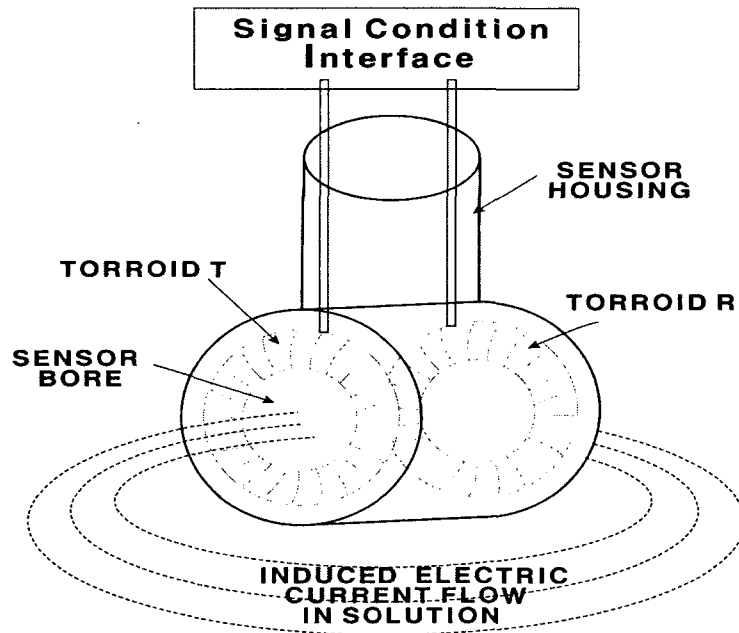


그림 3. 비접촉 전자유도방식 Toroid Coil 송수신 센서의 모식도.

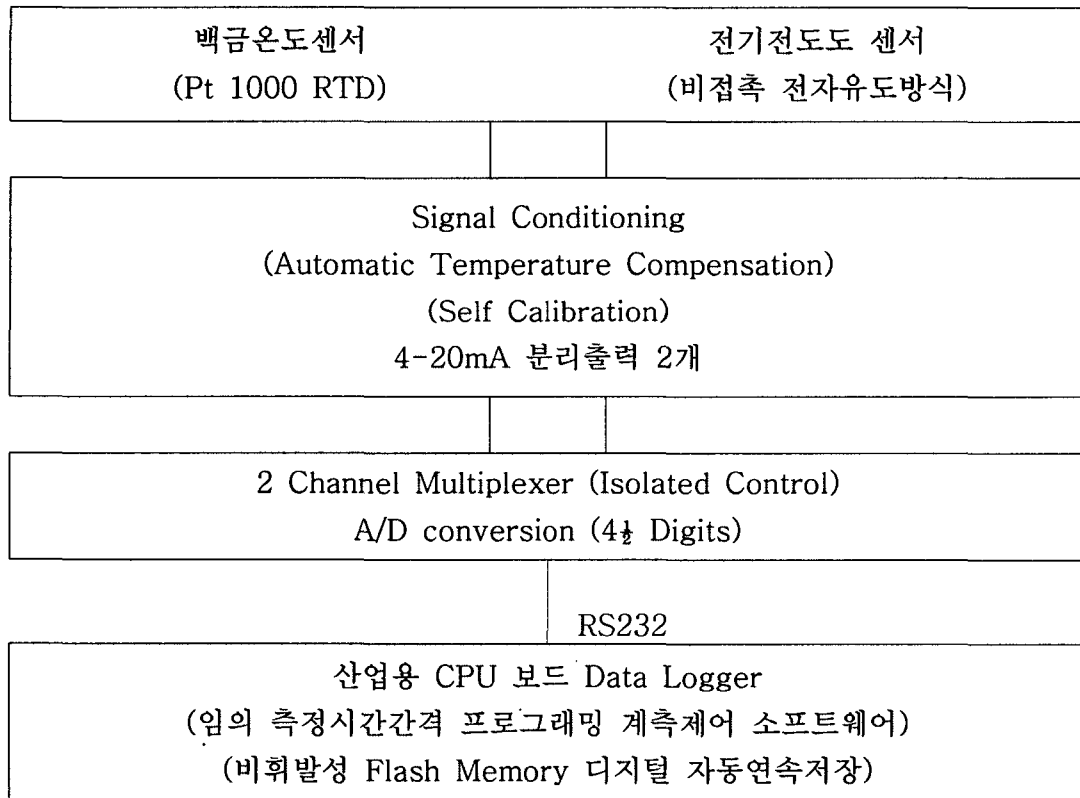


그림 4. 실험실내 검증을 위한 개발 계측제어 시작품 시스템의 개요(DC 12V 단일 전원)

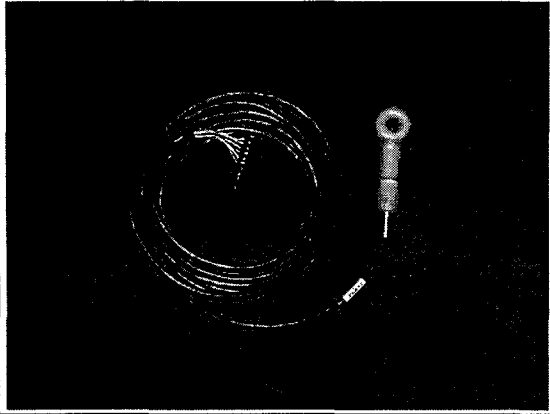
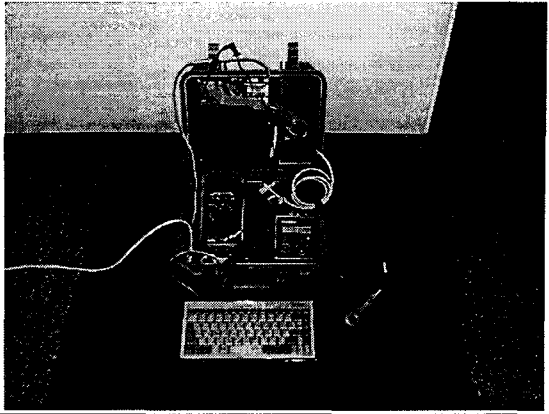
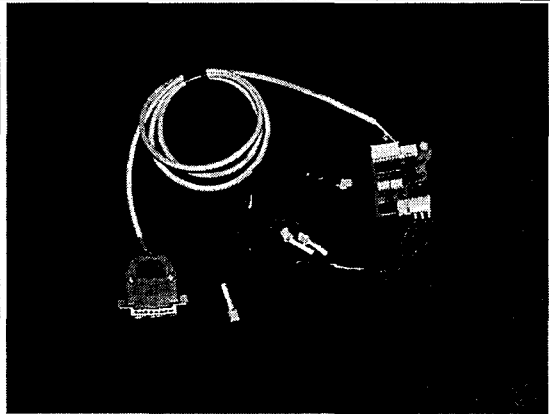
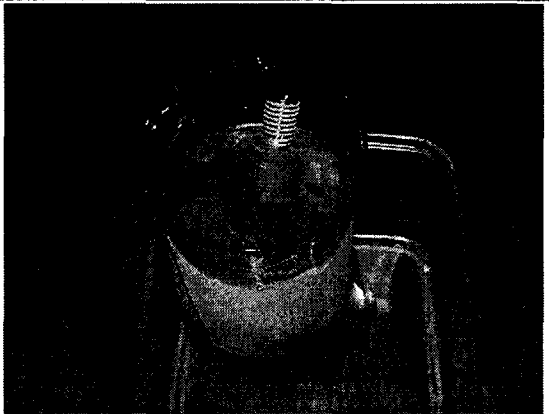
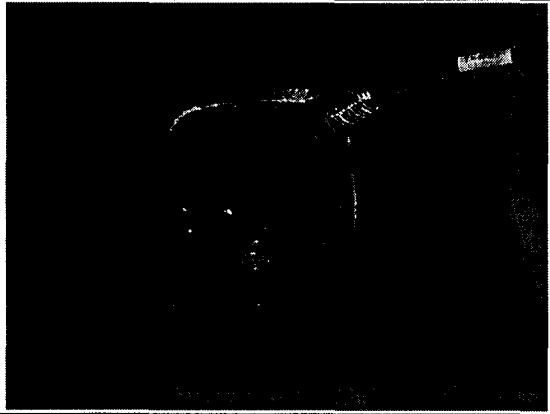
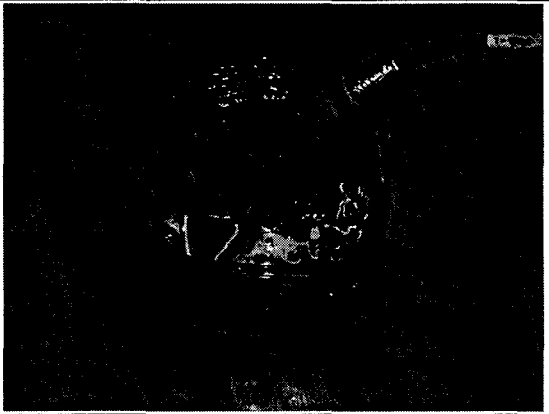
	
<p>비접촉 무전극 전자유도방식 전기전도도 센서 및 연결 특수 케이블의 모습. 정밀 백금 온도센서가 함께 내장되어 있어 온도 자동 보상이 가능함.</p>	<p>시작품 계측 시스템 전체 모습.</p>
	
<p>본 연구에서 제작 사용된 광분리 제어 2채널 저전력 멀티플렉서.</p>	<p>영하 11℃ 결빙실험 시의 얼음속 센서 모습. 비커가 얼음 팽창으로 일부 파괴되어 있음.</p>
	
<p>영하 5℃ 결빙실험 시의 얼음속 센서 모습. 용기 파괴를 방지하기 위해 PET 병 하부를 잘라 활용하였음.</p>	<p>0℃ 해빙시점의 얼음속 센서 모습. 전기전도도 측정치는 온도 측정치에 비해 일정시간 지연후 급격한 변화가 관측됨.</p>

그림 5. 계측 부속품류 및 실험관련 모습들.

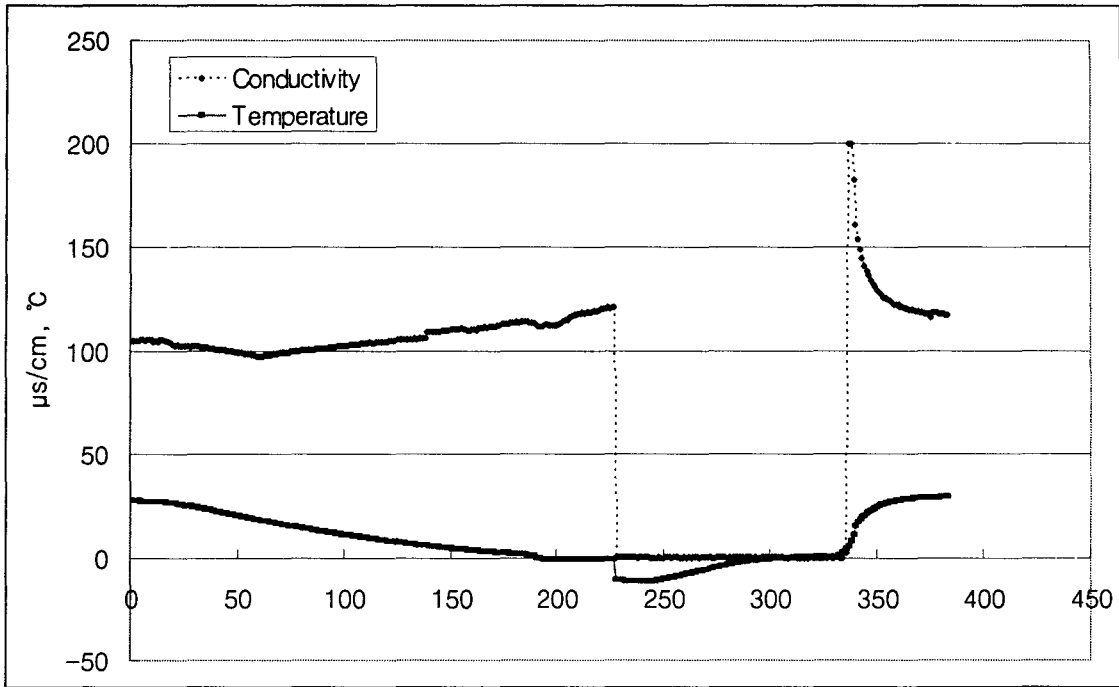


그림 6. 물의 상변화에 따른 전기전도도/온도의 실험실내 계측결과. X축은 20초 간격 측정이나 일부 불연속 측정구간이 존재하며 실험편의상 결빙/해빙이 비선형적이었으나 실내검증 목적으로는 상관없음. 결빙점 온도하강 일정시간 후 전기전도도의 급격한 0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에의 수렴이 뚜렷하며 해빙점 이후에도 일정시간 경과 후 전기전도도의 급상승 현상이 뚜렷이 보임. 해빙 시에는 측정 시간 편의상 온수통에 담아 실험하였음. 본 결과는 비커를 사용하여 상온에서 영하 11 $^{\circ}\text{C}$ 까지 결빙 및 해빙 한 실험결과임.

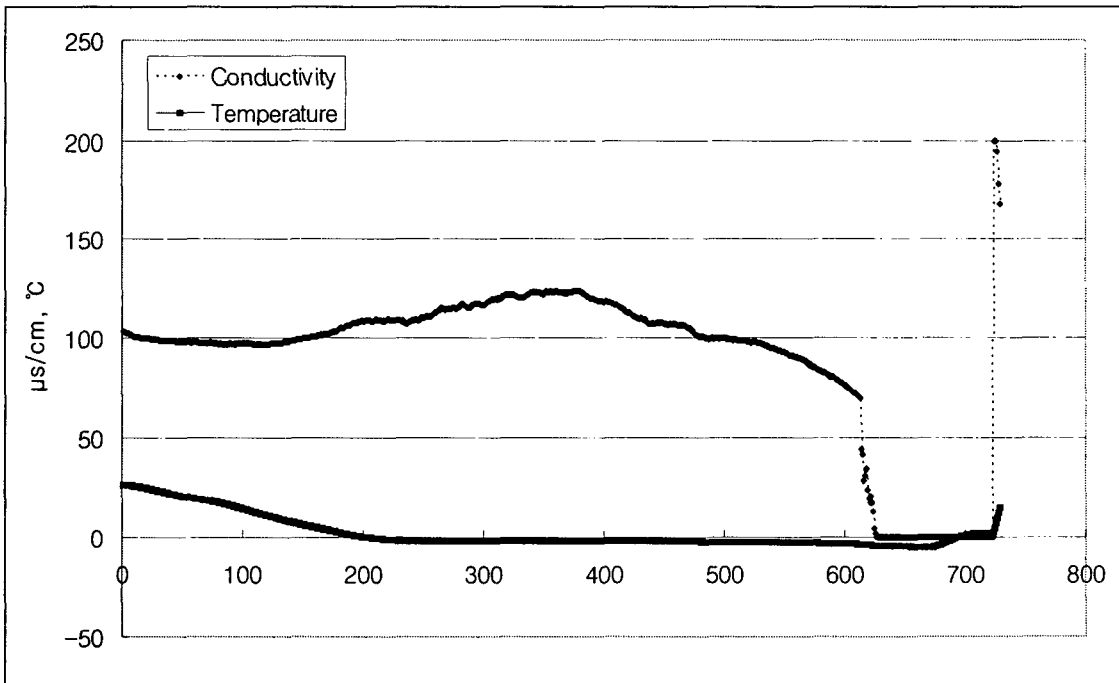


그림 7. 상기 그림 6의 실험과 동일한 조건이나 용기파괴를 피하기 위해 PET병을 잘라 실험한 예로써 비슷한 결과를 반복하여 얻었음. 영하 5 $^{\circ}\text{C}$ 까지 결빙되었음.