

차량용 연료전지 스택의 절연열화 진단을 위한 원통형 정전용량-전기전도도 센서개발

논문
59P-3-13

Development of Cylindrical Capacitive-Conductive Sensor to Evaluate Insulating Degradation for FCEV Stack

김재훈* · 김주한** · 김윤형*** · 최강월§ · 한상옥† · 용기중§§

(Jae-Hoon Kim · Ju-Han Kim · Yoon-Hyung Kim · Jiang-Yue Cui · Sang-Ok Han · Gee-Joong Yong)

Abstract - It was used as measuring system to diagnose insulating condition, by which was kept a insulating resistance of inner stack and at the same time was cooled electrochemical heat of reaction of FCEV(fuel cell electric vehicle) stack that used a compressed hydrogen gas reacting with oxygen in accordance with variation on thermal degradation of nonconductive heat transfer fluid. Consequently it was developed a cylindrical multi-terminal capacitive-conductive sensor that could be attached to the internal surface of cooling system pipe to evaluate capacitance and conductivity of heat transfer fluid.

Key Words : FCEV, Stack, Heat Transfer Fluid, Cylindrical Capacitive-Conductive Sensor

1. 서론

경제규모의 확대와 더불어 생활수준이 향상됨에 따라 에너지에 대한 수요는 필연적으로 증가하고 있으나, 현재 주 에너지 자원으로 활용되고 있는 화석연료는 1970년대의 유류과동 이래로 부존량의 한계에 따른 자원고갈과 고유가로 인해 대체 에너지에 대한 필요성이 지속적으로 대두되어 왔다. 특히 화석연료 연소 시 발생하는 각종 유해 화합물은 지구환경파괴의 주요인으로 작용하고 있는 실정이다. 따라서 미국, 일본 등의 선진국들을 중심으로 미래의 대체 에너지로서 자원고갈과 환경오염 문제가 적은 태양광, 풍력, 수소연료전지 등과 같은 신·재생에너지원에 대한 기술개발에 전력을 다하고 있으며, 국내 역시 신·재생 에너지 기술개발과 실용화에 많은 지원을 하고 있다[1-3].

신·재생 에너지 분야 중 수소연료전지는 가장 중점을 두고 개발 중인 분야로서 수소를 연료로 하여 대기 중의 산소와 전기화학적 반응을 거쳐 직류전원을 생산하는 일종의 발전장치로 기존 내연기관에 비해 2배 이상의 높은 시스템 효율과 유해가스 배출이 거의 없는 저공해, 고효율의 차세대 에너지원으로 주목받고 있다[4].

대표적인 수소연료전지 자동차는 유해 배출가스가 없는 친환경 무공해 차량이라는 장점을 가지고 있지만 기존 내연기관 차량과 달리 주 동력원으로 수십 내지 수백 [kW] 급

연료전지를 사용하므로 고전압·대전류 환경의 비접지식 대전력 설비를 차량에 탑재하기 때문에 차량 및 운전자에 대한 전기적 안전성 확보가 필수적이라 할 수 있다.

이러한 수소연료전지 자동차에서 사용되는 열매체유의 주요 성분은 1차 냉매로 탈이온수를 사용하며, 탈이온수의 냉동력을 강화시키고 빙점을 낮추기 위해 탄화수소계 화합물인 에틸렌 글리콜, 프로필렌 글리콜과 소량의 부식 억제제를 첨가한 유기화합물을 탈이온수와 적절히 혼합하여 2차 냉매로 활용하고 있는데 사용 중에 연료전지의 전기화학적 반응열로 인해 열분해 및 산화에 의한 경년변화를 일으켜 초기 특성이 저하하므로 전기전도도가 상승하게 된다. 열매체유의 전기적 성능저하는 연료전지 스택의 절연저항을 저하시키므로 차체의 누설전류는 증가하게 되고, 누설전류는 차량에 탑재된 수많은 전자제어 장비에 오동작을 일으켜 차량 주행 안전성에 심각한 영향을 주며, 무엇보다 누설전류가 일정 수준 증가하게 되면 차량을 운전하거나 정비하는 인체에 대한 감전 사고가 발생할 수 있다[5,6].

현재 차량용 연료전지 스택의 절연저항을 평가하기 위해 액체의 전기적 특성을 분석하는 비전도도 측정기법을 통해 열매체유의 절연상태를 평가하고 있는데, 이는 용액 내의 불순물, 즉 금속 및 비금속 이온과 같은 전해질 등의 증가에 따른 용액 중의 이온성 전기전도 기구를 평가한다. 하지만 열매체유와 같이 열분해 및 탄화생성물이 형성되는 유기화합물 희석용액은 경년변화를 겪음에 따라 유기화합물의 화학적 성질이 변화하고 여러 파생물이 형성되므로 단순히 이온성 전도기구만으로 열매체유의 절연상태를 판단하는 것은 분명 한계를 가지고 있다.

따라서 비전도도 변화에 비해 비유전을 변화폭이 매우 큰 특성을 이용한 액체 유전체의 경년변화에 따른 화학적 상태는 유전체의 유전을 및 정전용량 변화를 감지할 수 있는 정전용량 센서를 적용할 경우 측정감도 확보에 매우 유리할 수 있게 된다.

* 주저자, 정회원 : 충남대학교 전기공학과 공학박사

** 정 회원 : 충남대학교 전기공학과 공학박사

*** 정 회원 : 충남대학교 전기공학과 박사과정

§ 준 회원 : 충남대학교 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 충남대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : sohan@cnu.ac.kr

§§ 비 회원 : 한국자동차성능연구소 수석연구원 · 공박

접수일자 : 2010년 5월 11일

최종완료 : 2010년 6월 17일

본 논문에서는 차량용 수소연료전지 스택의 전기화학적 반응열에 대한 냉각역할과 함께 스택 내부의 절연저항을 유지해 주는 비전도성 열매체유, 즉, 냉각수의 절연상태를 진단하기 위한 측정장치로서 냉각수의 정전용량과 전기전도도를 측정할 수 있고 차량의 냉각시스템 배관에 부착이 가능한 원통형 다전극식 정전용량-전기전도도 센서를 개발하였다.

2. 연료전지용 열매체유의 특성

2.1 열매체유의 특성

연료전지 스택의 절연상태를 유지하는 요소 중 하나인 연료전지용 열매체유는 그림 1과 같이 다수의 단위전지로 구성된 연료전지 스택 내부를 관통하여 분리판 상에 형성된 유로채널을 따라 전기화학적 반응열을 냉각함과 동시에 다수의 단위전지간의 전위차를 유지해주는 매우 중요한 역할을 수행하고 있다. 일반적으로 수소연료전지의 최소단위인 단위전지는 하나의 양성자 교환막 및 막/촉매 집합체(MEA, membrane electrode assembly)와 한 쌍의 도전성 분리판으로 구성되어 있다. 이때 분리판에 있어 MEA와 접하는 면은 가스채널이 형성되어 각각 수소와 포화 가습된 산소 가스를 공급하게 되고, 그 배면은 냉각채널이 형성됨으로써 MEA에서의 전기화학적 반응열을 냉각하게 되는 것이다. 연료전지용 열매체유 성분은 표 1과 같다.

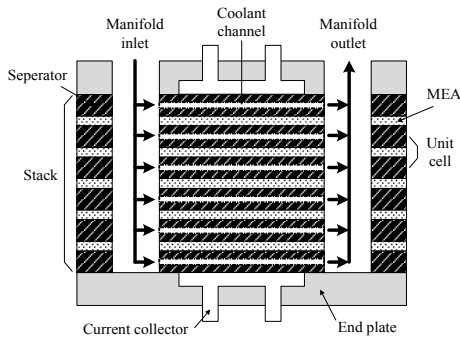


그림 1 연료전지 내 열매체유의 유동
Fig. 1 The flow of heat transfer fluid in fuel cell

표 1 열매체유의 주요 성분
Table 1 Components of heat transfer fluids for fuel cell

Component	Synonyms	CAS No.	Content[%]
Ethylene glycol	1, 2-Ethanediol	107-21-1	20~50
Propylene glycol	1, 2-Propanediol	57-55-6	20~50
Deionized Water	Dihydrogen Oxide	7732-18-5	30~50
Corrosion inhibitor	-	-	0.1~1.0

열매체유는 사용 중에 전기화학적 반응열로 인해 유기화합물 성분이 경년변화를 겪어 초기 특성이 변화하게 되며, 냉각 시스템을 구성하는 각종 금속재료들은 열매체유의 구성물인 탈이온수와와의 접촉으로 부식 생성물을 형성하고, 열매체유 교체 시 혹은 사용 중에 냉각 시스템 내부로 이물질 등이 혼입되므로 전기전도도가 상승하여 필연적으로 절연능이 저하하게 된다. 이러한 연료전지 열매체유의 전기적

성능저하는 결과적으로 스택의 절연저항 저하와 누설전류의 증가를 불러오게 된다. 따라서 현행 연료전지 시스템에서는 열매체유를 통해 흐르는 이온성 전도 즉, 분류전류 혹은 누설전류를 억제하기 위해 이온화장치 등을 활용해 열매체유의 상태를 관리하고 있으며 이를 위해 비전도도 측정을 통해 절연상태를 확인하고 있다.

2.2 열매체유의 열화메커니즘

에틸렌 글리콜과 프로필렌 글리콜은 만족스러운 열전달 특성과 열용량, 탈이온수와 완벽한 혼합을 이루는 등 냉매재로서 많은 장점을 가지고 있지만 열 열화가 진행됨에 따라 차츰 본래의 성질을 잃게 되며, 특히 열분해로 인해 유기산과 도전성 탄화 슬러지 등을 생성하게 된다. 이때 용액 내에 부유하는 탄화 슬러지는 열효율 저하뿐만 아니라 용액의 전기전도도를 상승시킨다. 특히 유기산 생성으로 인해 열매체유의 pH가 낮아지므로 금속성 구성물의 부식이 가속되고 금속 양이온이 용출되어 전기전도도가 상승된다[7,8].

또한 열매체유 내의 불순물 입자는 초기 유전특성에 지대한 영향을 끼치게 된다. 즉, 유극성 분자인 에틸렌 글리콜과 프로필렌 글리콜의 화학적 변화는 배향분극 기구에 영향을 끼치게 되며, 각종 불순물로 인한 계면 혹은 공간전하 효과는 계면분극 기구에 영향을 미치므로 유전율의 변화가 나타나게 된다.

그림 2는 열매체유의 개략적인 열화기구와 각각의 열화요인에 따른 전기적 특성변화에 대해 보여주고 있다.

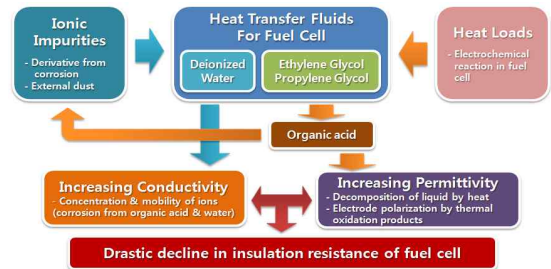


그림 2 열매체유의 열화 메커니즘
Fig. 2 Degradation mechanism of heat transfer fluids for fuel cell module

3. 열매체유의 전기전도도 및 정전용량 측정

3.1 전기전도도 측정

액체의 전기전도도를 측정하기 위해 통상 2개 이상의 전극이 사용되며, 전극 사이에 형성된 공간에 위치하는 이온들의 농도를 측정하게 된다. 이때 측정 전극 간에 전압을 가해주면 인가된 전압에 따라 이온들이 전극 사이를 이동하게 되며, 그 결과 이온들이 재분포하는 정도, 즉, 전류를 측정함으로써 전극 사이에 존재하는 수용액의 전기전도도 혹은 저항을 측정할 수 있다. 따라서 전극 간 인가전압과 흐르는 전류의 크기를 통해 계산된 전기전도도는 그림 3과 같이 전극의 대향면적과 전극간 거리에 따라 달라지므로 식 (1)과 같이 비전도도로 표현할 수 있다.

$$\sigma = \frac{J}{E} \tag{1}$$

이를 전극의 형상에 관계된 상수와 인가된 전계에 의한 전기전도도로 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Conductivity}[S/cm] = \text{Cell constant}[cm^{-1}] \times \text{Conductance}[S] \quad (2)$$

이때 용기상수는 마주보는 전극간의 거리와 대향면적의 비를 나타낸다. 즉, $\text{Cell constant}[cm^{-1}] = \text{Distance}[cm] / \text{Area}[cm^2]$ 이며, 이는 측정전극의 기하학적 형상으로 결정되는 상수이다.

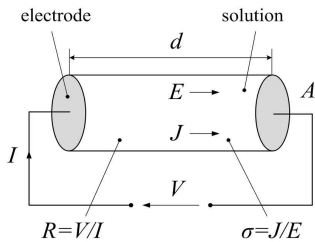


그림 3 전기전도도의 측정원리
Fig. 3 The principle of measurement of electrical conductivity

3.1.1 접촉식 전기전도도 측정

접촉식은 2개 이상의 전극으로 구성된 측정용 전극을 피측정물과 직접 접촉하여 교류전압을 가한 후 이때 흐르는 교류전류의 크기를 측정하는 방식이다. 하지만 피측정물 속에는 많은 유기물이 포함되어 있을 우려가 있으며, 통전에 의해 이온 교환이 행해지면 전극면 상에 비도전성 유기물이 부착하거나 흡착하여 저항을 증가시키므로 정확한 측정을 할 수 없게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전극면의 빈번한 세척을 필요로 하게 된다. 접촉식 전극은 피측정물로부터 부식, 산화 등의 우려가 있으므로 피측정물과 접촉하여도 산화되지 않고, 전극면의 유효면적을 넓게 함으로써 측정의 안정성을 확보하고자 백금의 미립으로 이루어지는 백금혹 혹은 단순히 백금, 백금 도금, 금 도금한 도전금속이나, 스테인레스 스틸과 같은 내산화, 내부식성 도전 금속 혹은 내화확성이 강한 그래파이트를 주재료로 사용하고 있다.

접촉식 전기전도도 측정전극은 크게 2-전극방식과 4-전극방식으로 구분되는데, 2-전극방식은 일반적인 형태의 전극구조로 한쌍의 전극 양단에 흐르는 전류의 크기로 비전도도를 측정하는 방식이다. 접촉식 측정전극은 용액과 금속전극이 계면을 형성함에 따라, 전극에 가해진 전위로 인해 용액 내의 전도성 이온이 전극면으로 이동하여 전자를 잃거나 얻음으로 전극면상에 축적되거나 절연성 오염물 등이 부착됨으로써 전극면 상에서 일종의 절연장벽으로 작용하게 된다. 따라서 이와 같은 전극면 오염은 전극의 유효면적을 감소시키고 전극면으로의 이온 이동을 방해하여 추가적인 분극저항(R_{el})이 형성된다. 이로 인해 실제 용액의 저항에 비해 더 큰 저항이 측정되므로, 2-전극방식은 분극저항과 같은 측정오차가 실제 용액의 저항(R_{sol})이 더해지므로 용액의 저항을 정확히 알 수 없는 단점을 가지고 있다[9].

4-전극방식은 저저항 측정 시 측정용 전선의 선저항과 전극 및 전선 접촉부의 접촉저항으로 인해 발생하는 전압강하를 최소화할 수 있는 4-wire 기법을 응용한 것으로 그림 5(a)와 같이 4개의 전극을 일렬로 배치하여 외측의 구동전극(1,4)에 정전압원을 가하여 전류를 흘려주어 내측 감지전

극(2,3)에서 구동전류에 의한 전압강하분을 측정하는 방식이다. 이때 흐르는 시험전류의 크기는 용액의 전도도에 비례하며 내측 감지전극 사이의 전압강하로 인한 전위차에 의해 흐르는 전류는 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 감지용 전극면은 분극현상에서 자유로울 수 있다.

그림 5(b) 형태는 4개의 전극이 일렬로 배열되는 구조와 달리 한 쌍의 구동전극과 감지전극이 각각 대향하고 있는 형태이다. 2-전극방식의 경우 피측정물의 전기전도도를 측정하면 측정용 전선이 가지는 선저항과 전극-전선-계측기간의 접촉저항이 측정분에 더해지게 되지만 4-전극방식의 경우, 4-wire 기법을 적용하므로 이러한 부수적인 측정 오차 요소를 최소화할 수 있다. 따라서 낮은 전도도를 가지는 액체의 측정에 적합한 구조이며, 전극의 구조에 따라 함침형, 유액형으로 활용이 가능하므로 피측정물의 상태가 흐르고 있는 유체일지라도 측정이 가능하다.

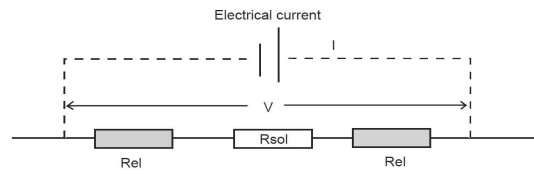
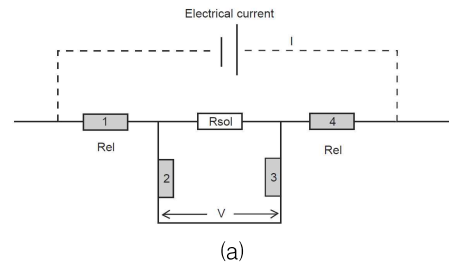
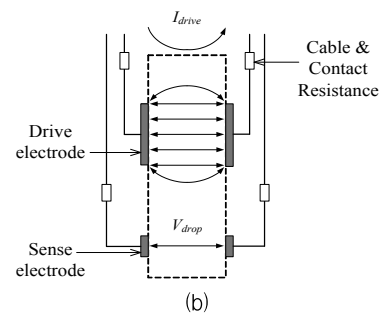


그림 4 2-전극방식 전기전도도 측정전극의 원리
Fig. 4 Diagram of 2-cell type for measuring conductivity



(a)



(b)

그림 5 4-전극방식 전기전도도 측정전극의 원리
Fig. 5 Diagram of 4-cell type for measuring conductivity

3.1.2 비접촉식 전기전도도 측정

비접촉식 전극은 자기유도현상을 응용하여 그림 6과 같이 용액과의 직접적인 접촉을 방지하기 위해 코팅 처리된 한 쌍의 유도 코일을 시료 내에 위치시키고 구동 코일(drive coil)에 교류전압을 가한 후 탐지코일(pick-up coil)에 유도되는 전류의 크기가 시료의 전도도에 비례하는 것을 응용한 방식이다. 다만 이러한 비접촉식은 접촉식 전극에 비해 측

정감도가 낮으며, 전극의 부피가 커진다는 단점을 가지고 있다. 또한 탐지코일에 유도되는 전류는 용액 중의 이온에 의한 것이므로 탐지코일 주변으로 이온이 원활하게 흐르게 하기 위해 측정공간이 필연적으로 커지게 된다.

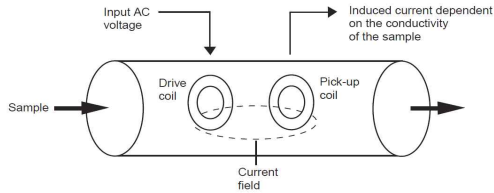


그림 6 비접촉식 전극
Fig. 6 Non-contacting style conductivity cell

3.2 정전용량 측정

유전체로 채워진 두 전극 간에 전압을 인가하였을 때 나타나는 정전용량은 이론적으로 전극의 기하학적 구조 즉, 전극 간의 대향면적, 전극 간 거리와 같은 형상 및 배치상태와 더불어 유전체의 유전율에 의해 결정된다. 따라서 전극의 면적, 형상, 배치 등이 일정할 경우 전극 간의 정전용량 변화는 전적으로 물질의 유전을 변화에 의해 결정된다고 할 수 있다. 일반적인 정전용량 측정 전극구조는 2개의 평판전극을 일정한 거리로 띄우고 그 사이에 시료를 삽입하여 측정하는 2-전극 방식과 별도의 가드 전극을 추가한 3-전극 방식이 있다.

3.2.1 2-단자 정전용량 측정

그림 7과 같은 2-전극 방식의 전극구조를 살펴보면 유전율이 일정한 등방성 매질 내에 2개의 전극을 위치하고 전극으로부터 무한대로 떨어진 지점을 가상구로 하여 영전위라 가정 한 후, 양 전극간 전하밀도 차이로 인한 전위차가 형성되면 전극 간에 유도되는 정전용량 C_{12} 는 각각의 전극과 영전위의 무한대 지점까지의 정전용량 C_1, C_2 의 대수합으로 나타낼 수 있다.

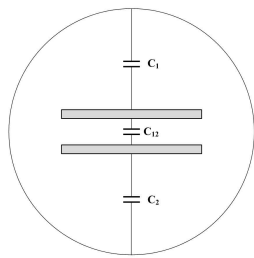


그림 7 2-전극 방식의 정전용량 측정 전극
Fig. 7 Capacitance of two parallel plate electrodes at infinite sphere

하지만 실제 2-전극 구조에서 평행평판 전극 간에 유도되는 정전용량은 전극의 대향면적과 전극 간 거리로부터 유도되는 이론적인 순 정전용량뿐만 아니라 전극의 두께면에서 형성된 누설 전기장에 의해 각 전극의 두께면 간에 유도되는 누설 정전용량이 추가적으로 발생하게 되는데, 이러한 현상을 모서리 효과라 한다. 이외에도 전극의 배면으로부터 형성된 부유 전기장으로 인해 유도되는 부유 정전용량도 측정값에 더해지게 되므로 각 시험규격에서는 이를 보상하도록 제안하고 있다[10].

3.2.2 3-단자 정전용량 측정

정전용량 측정용 전극의 모서리 효과는 전극단부에서 누설 정전용량을 유도함에 따라 기하학적 구조에 맞는 이론적인 정전용량과 일치하지 않는 특성을 보이게 되며, 전극 배면 간에도 전기장이 형성됨에 따라 부유 정전용량이 발생하여 전극 외부 공간에 존재하는 물질에 의해 측정값이 변하게 되므로 측정의 재현성을 확보하기가 어렵게 된다. 반면 그림 8과 같은 가드 전극을 가지는 3-단자 전극구조에서는 측정 전극간의 누설 정전용량을 배제할 수 있는 구조로 이와 같은 문제점을 보완할 수 있어 유전체의 유전을 측정해 있어 3-전극 구조를 활용한 시험을 권장하고 있다[10].

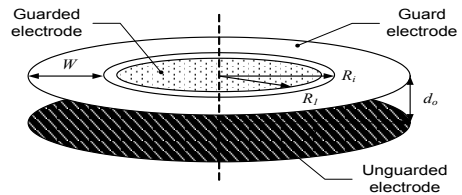
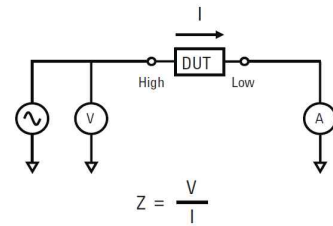


그림 8 3-전극 방식의 정전용량 측정 전극
Fig. 8 Construction of circular 3-terminal electrodes

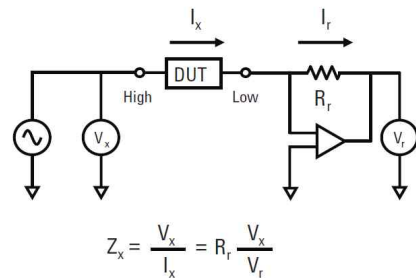
4. 원통형 정전용량-전기전도도 센서 제작

4.1 측정 회로

열매체유의 정전용량 및 전기전도도와 같은 임피던스 성분을 정확히 측정하기 위해서 정전용량과 함께 직병렬 등가 저항을 측정할 수 있고 위상감지 기능을 갖춘 측정장비가 필요하며, 이러한 미상의 임피던스를 측정하기 위해서는 그림 9와 같이 피측정물에 인가된 시험전압과 이를 통해 흐르는 전류의 크기를 알아야 하므로, 임피던스 측정회로는 전압원, 전압계, 전류계로 구성된다.



(a) The simplest model for impedance measurement



(b) Impedance measurement using an operational amplifier

그림 9 자동평형 브리지법의 원리
Fig. 9 Principle of auto-balancing bridge method

또한 그림 10과 같은 자동 평형 브리지법을 사용하는 계측기의 경우, 100[kHz] 이하의 저주파수 측정범위에서는 그림 9(b)와 같이 I-V 컨버터용 단순 연산 증폭기를 이용하게 된다.

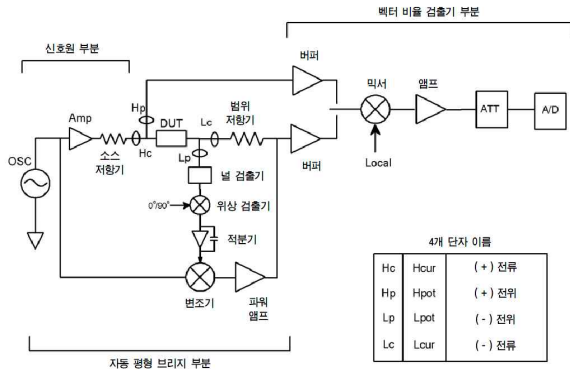


그림 10 자동평형 브릿지법의 개략도
Fig. 10 Schematic diagram of automatic balancing bridges

피측정물을 통해 흐르는 전류 I_x 는 I-V 컨버터용 연산 증폭기의 피드백 저항 R_r 에도 흐르게 된다. 즉, 피드백 전류 I_r 와 피측정물에 흐르는 전류 I_x 의 크기는 같으므로 서로 평형을 이루게 되며, 이로 인해 연산증폭기의 입력단인 Low 점의 전위는 가상 접지로 인해 0[V]를 유지하게 된다. 이때 연산증폭기의 출력전압 V_r 은 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_r = I_r \times R_r = I_x \times R_r \quad (3)$$

여기서 피측정물에 흐르는 전류 I_x 의 크기는 피측정물의 미상의 임피던스 Z_x 와 그로 인해 발생하는 전압강하분 V_x 를 통해 알 수 있다.

$$I_x = \frac{V_x}{Z_x} \quad (4)$$

따라서 식 (3)과 (4)를 통해 피측정물의 임피던스 Z_x 는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$Z_x = \frac{V_x}{I_x} = R_r \frac{V_x}{V_r} \quad (5)$$

이때, 계측회로의 전압계를 통해 측정된 V_x 와 V_r 와 연산증폭기의 피드백 저항은 저항 R_r 은 알려져 있는 값이므로 피측정물의 임피던스 Z_x 는 식 (5)와 같은 수식을 통해 얻어질 수 있으며 임피던스 측정 범위를 결정하는 역할을 하게 된다. 또한 대부분의 계측기는 V_x 와 V_r 를 검출하기 위한 전압계를 단일 구성하여 교대로 신호를 검출함으로써 트레이킹 오류를 피할 수 있게 된다.

임피던스 측정을 위한 자동 평형 브릿지 회로를 기능적으로 분류하면 신호원 부분과 자동 평형 브리지 부분, 위상을 검출할 수 있는 전압계로 구성된 벡터 비율 검출기 부분으로 나뉜다.

(1) 신호원

신호원 부분은 피측정물에 인가되는 시험 전압원을 인가하는 부분으로 마이크로 프로세서로 제어되는 주파수 합성기를 사용하게 된다. 발생 신호원은 그림 11의 출력단인 H_c 단자에 연결된 소스 저항을 가로질러 피측정물에 인가된다.

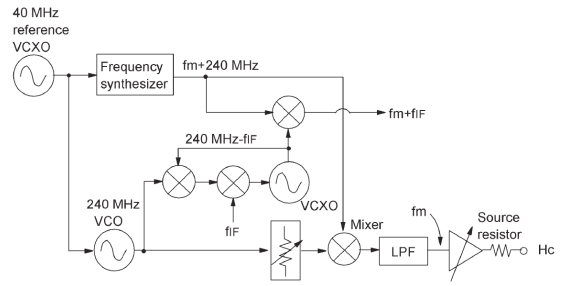


그림 11 발생 신호원 부분의 블록도
Fig. 11 Signal source section block diagram

(2) 자동 평형 브릿지

자동 평형 브릿지 부분은 연산 증폭기의 Low 단자(- 입력부)의 전위를 0[V]로 유지함으로써 범위 저항기에 흐르는 전류와 피측정물에 흐르는 전류의 평형을 맞춰주는 부분이다. 그림 12는 자동 평형 브릿지의 동작을 나타내는 간단한 배치도이다. 범위 저항기에 흐르는 전류 I_r 과 피측정물에 흐르는 전류 I_x 가 불평형을 이루게 되면 불평형, 즉 오차전류 $I_x - I_r$ 는 L_p 단자를 통해 널 검출기로 흐르게 된다. 이때 불평형 전류는 피측정물에 흐르는 전류 I_x 와 피드백 저항 즉, 범위 저항기에 흐르는 전류 I_r 간의 크기와 위상각의 차이를 표현하게 된다. 널 검출기는 불평형 전류를 검출함과 동시에 OSC2 출력신호의 크기와 위상을 제어하여 검출된 전위가 0[V]가 되도록 한다.

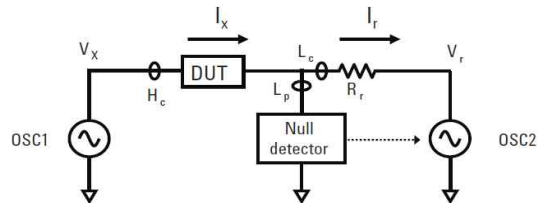


그림 12 자동 평형 브리지 동작도
Fig. 12 Operation image of the auto-balancing bridge

한편, 100[kHz] 이하의 저주파수 측정을 위한 계측기는 그림 13과 같이 OSC2와 널 검출기를 대신하는 단순한 연산 증폭기를 사용하며, 이러한 회로 구성은 연산 증폭기의 동작 특성의 제한으로 인해 100[kHz] 이상의 측정 주파수에서는 사용할 수 없다. 반면, 100[kHz] 이상의 측정 주파수 범위에서는 그림 14와 같이 널 검출기, 위상 검출기, 벡터 변조기로 구성되며, 널 검출기를 통해 불평형 전류가 검출되면 위상 검출기를 통해 불평형 전류의 0°, 90°의 벡터 성분을 분리하여 출력하게 된다. 이때 위상 검출기의 출력신호는 0°, 90°의 벡터 성분을 구동하기

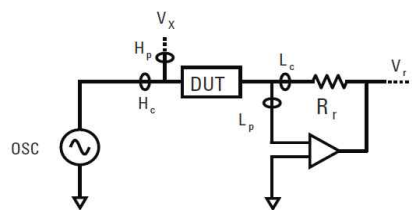


그림 13 100[kHz] 이하 주파수에서 자동 평형 브리지 동작도
Fig. 13 Auto-balancing bridge for frequency below 100[kHz]

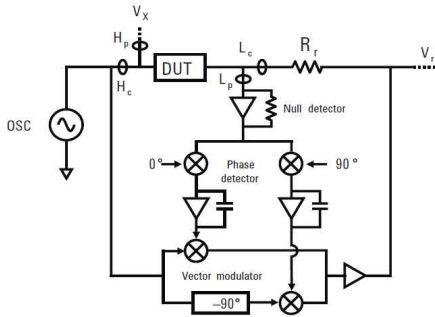


그림 14 100[kHz] 이상 주파수에서 자동 평형 브리지 동작도
Fig. 14 Auto-balancing bridge for frequency above 100[kHz]

위해 루프 필터(적분기)를 통과하여 벡터 변조기에 인가되며, 발생하는 신호는 증폭되고 범위 저항기를 통해 피드백되어 피측정물을 통해 흐르는 전류 성분을 상쇄하게 된다. 따라서 상기 과정을 통해 널 검출기에는 불평형 전류가 흐르지 않게 된다.

(3) 벡터 비율 검출기

벡터 비율 검출기는 그림 15와 같이 피측정물 양단의 전압, 즉 신호전류로 인해 발생하는 전압강하분 V_x 와 범위 저항기 R_r 양단전압 V_r 를 측정하는 부분이다. 범위 저항기는 그림에서와 같이 하나의 입력 선택 스위치(S)와 위상 검출기, A-D 컨버터로 구성되며, 측정된 V_x 와 V_r 은 식 (6)과 같이 피측정물의 임피던스 Z_x 를 산출하기 위해 사용된다.

$$\frac{V_x}{V_r} = \frac{a + jb}{c + jd} = \left(\frac{ac + bd}{c^2 + d^2} \right) + j \left(\frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \right) \quad (6)$$

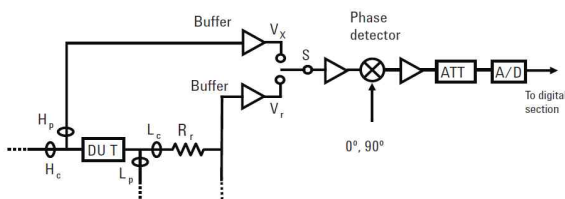


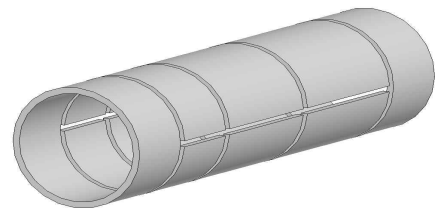
그림 15 벡터 비율 검출기의 블록도
Fig. 15 Vector ratio detector section block diagram

4.2 센서의 구조 및 기판제작

본 연구에서는 기존의 이온성 전도기구만을 관찰하는 전기 전도도 측정기법에서 탈피하여 탄화수소계 화합물의 열열화에 의한 성질변화를 유전특성을 통해 진단하는 기법을 병행하고자 하였다. 즉, 측정용 센서의 전극 내부로 열매체유가 주입되었을 때 액체의 유속 및 온도, 측정전극의 기하학적 배치가 일정할 경우 측정 전극 간의 정전용량 변화는 열매체유의 유기화합물(PG, EG 등) 성분의 화학적 변화 혹은 그로 인한 유전특성 변화에 기인한다는 것을 이용하는 것이다. 그러므로 열매체유의 상태진단용 측정센서는 차량의 냉각배관 시스템에 부착하여 열매체유의 전기전도도와 정전용량을 안정적으로 측정이 가능한 구조로 고안하였다. 즉, 가요성이 좋은 기판 위에 다수의 전극을 배치하여 필요에 따라 유전율과 전기전도도 변화를 선택적으로 감지할 수 있는 다전극식으로 정전용량을 측정할 경우에는 가드링을 갖는 3-전극 방식으로

전극 단부에서 발생하는 모서리 효과를 적절히 제어하도록 하였으며, 전기전도도를 측정할 경우엔 전극면의 분극효과나 오염물에 의한 측정오차가 비교적 적고 넓은 측정범위를 가지는 4-전극 방식으로 전극 형태를 설계하였다. 또한 차량의 열매체유가 흐르는 배관에 직접 연결이 가능하도록 금속배관 내부에 측정전극이 설치된 기판을 부착하여 전극 내부로 열매체유가 원활히 유동할 수 있도록 함으로써 사용여부에 따라 실시간으로 진단이 가능한 구조를 가진다.

그림 16은 고안된 다전극 방식의 측정센서의 기본 구조를 나타내고 있다. 측정 센서는 하나의 기판 위에 8개의 전극이 배치되어 있는 형태로 센서의 말단부는 한쌍의 가드링 전극으로 구성되어 있으며, 가드링 전극 내부의 6개의 전극은 각각 정전용량과 전기 전도도를 측정하기 위한 측정 전극부이다.



(a) 3D view of designed capacitive-conductive sensor



(b) side view of designed capacitive-conductive sensor

그림 16 정전용량-전기전도도 센서의 기본 구조

Fig. 16 Structure of designed capacitive-conductive sensor

이와 같은 열매체유의 정전용량 및 전기전도도 측정을 위한 다전극 방식의 측정센서는 냉각시스템 배관 내경면에 원통형으로 부착되어야 하므로 가요성이 좋은 Flexible PCB(FPC)로 제작하였다. 따라서 PCB의 기판재료는 두께가 얇더라도 기계적 강도가 우수하고, 가요성이 좋으며 열매체유의 높은 온도와 각종 유기 오염물 혹은 유기산 등으로 장시간 노출되더라도 안정적이어야 한다. 따라서 이러한 조건을 만족하기 위해 영하 260[°C]에서 영상 500[°C]의 극한 환경 하에서도 물성이 잘 변하지 않으며 내후성이나 내화학성이 강한 폴리이미드를 기판으로 사용하였다.

또한 정전용량-전기전도도 센서의 기판은 다층회로기판을 사용하여 폴리이미드 기판 상의 전면 측정부는 전극부가 위치하여 열매체유와 직접 접촉되도록 노출시키고 기판의 배면에는 각각의 전극과 전기적으로 연결된 배선을 실장한 후 배선 위에 다시 기판을 접착하여 배선과 배관 사이를 전기적으로 절연하도록 하였다. 즉, 측정부는 전기전도도의 측정 시 측정 전극 간에 가압된 전압에 의해 이온전도성 전류가 흐를 때, 그 전류의 크기를 측정하게 되므로 측정 전극의 표면이 도전성을 띄어야 한다. 따라서 전극면의 오염 및 부식방지를 위해 1/2 OZ의 동박 전극을 약 20[μm] 두께로 하고 그 위에 14[μm] 두께로 금도금 처리를 하여 전극부의 총 두께를 0.14[mm]를 가지도록 하여 가요성을 유지하였다. 또한

정전용량-전기전도도 센서의 배면에는 측정부에 가압되는 소스 전원과 측정된 신호원을 검출하기 위한 배선을 구성하도록 하여 전면의 측정부의 각 전극과 배면의 배선 간에 홀가공을 하여 도금에 의한 통전 처리를 한 후 말단부에 신호 검출용 단자부를 구성하였다. 제작된 Flexible PCB의 총 두께는 약 0.14[mm]이며, 치수는 길이 92[mm], 폭 72[mm]를 가진다. Flexible PCB의 사양은 표 2와 같다.

제작된 센서의 측정전극은 4-단자식 전기전도도 측정 시 용액의 전기저항분에 의한 전압 강하량을 측정하는 감지 전극부(Sense)와 신호전압을 인가하는 구동 전극부(Drive), 개방상태를 유지하는 부유 전극부(Float)와 가드 전극부(Guard)로 각각 한 쌍씩 구성되어 있다. 센서의 구동 전극부는 용액의 전기전도도에 따라 전극분극에 의한 불순물이 흡착될 우려가 있으므로 실효면적을 넓히기 위해 감지전극부에 비해 2배의 면적을 가지도록 함으로써 구동전류의 감소를 방지하고자 하였다. 제작된 센서의 실제 전극구성과 신호배선 및 단자의 배치는 그림 17과 같다.

표 2 Flexible PCB의 사양

Table 2 Detailed specification of Flexible PCB(FPC)

Specifications		Accounts
PCB Type		Double Side FPC
Material	Substrate	Polyimide
	Electrode	Copper, 1/2 OZ
Thickness	Electrode	20 μ m
	Finishing	17 μ m
	Total	0.14mm
Width/Height	Sense	34/10mm
	Float	34/16mm
	Drive	34/20mm
	Guard	34/72mm
	Total	20/92mm
Surface Finishing		Immersion Gold



그림 17 제작된 Flexible PCB 센서의 단면도
Fig. 17 Flexible PCB layout for capacitive-conductive sensor

4.3 원통형 센서제작

다음으로, 제작된 정전용량-전기전도도 센서를 부착하기 위한 실린더 하우징은 그림 18과 같이 외경 $\phi 30$, 내경 $\phi 23$ 의 알루미늄 파이프를 가공하였으며, 내경을 $\phi 23$ 로 가공한 것은 전극의 폭이 72[mm]로 하우징 내부의 원주길기와 정확히 일치하므로 내경면으로 어긋남 없이 부착될 수 있도록 하기 위함이다. 따라서 내부의 측정전극 간 혹은 구동전극 간의 대향면적을 균일하게 하여 전극 간 대칭성을 유지할 수 있게 된다. 또한 센서가 부착되는 내경면은 전극 부착 시 양호한 평평도를 유지하기 위해 래핑 가공을 하였으며, 이후 하우징의 내경면에 내열성 접착제를 일정 두께로 도포하여 Flexible PCB를

말아 넣은 후 열처리를 하여 접착제가 고르게 건조될 수 있도록 하였다. 그림 19는 이상의 공정을 통해 제작된 정전용량-전기전도도 센서 어셈블리를 보여주고 있다.

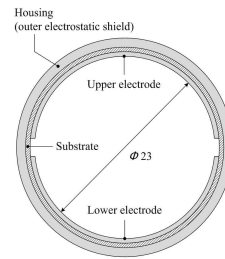


그림 18 정전용량-전기전도도 센서의 부착 단면
Fig. 18 Front cross-sectional view of capacitive-conductive sensor

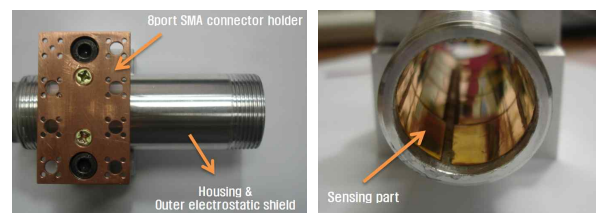


그림 19 실제 부착된 정전용량-전기전도도 센서
Fig. 19 Manufactured capacitive-conductive sensor assembly

5. 결 론

본 논문에서는 차량용 수소연료전지 스택의 전기화학적 반응열을 냉각함과 동시에 스택 내부의 절연저항을 유지해주는 비전도성 열매체유 의 경년변화에 따른 절연상태를 진단하기 위한 측정기법으로 유동하는 열매체유 의 정전용량과 전기전도도를 상시적으로 감시하기 위해 냉각시스템 배관에 부착 가능한 원통구조의 다전극식 유액형 정전용량-전기전도도 센서를 개발하였다.

유동 열매체유 의 정전용량 및 전기전도도 측정을 위한 다전극식 센서는 가요성의 Flexible PCB 기판 상에 다수의 전극 구조를 가지는 다전극 방식으로서 열매체유 가 흐르는 배관 내경면에 부착하여 필요에 따라 정전용량과 전기전도도 변화를 선택적으로 측정할 수 있으며, 0.14[mm]의 박막두께로 열매체유 가 흐르는 배관의 내경면에 부착할지라도 열매체유 의 흐름을 방해하지 않으면서 실시간으로 측정이 가능하도록 하였다.

정전용량 측정 시에 가드링을 갖는 3-단자 전극구조로 전극 단부에서 발생하는 모서리 효과를 적절히 제어하도록 하였으며, 전기전도도를 측정할 경우 전극면의 분극효과나 오염물에 의한 측정오차가 비교적 적고 넓은 측정범위를 가지는 4-전극방식의 구조로 제작하였다.

제작된 정전용량-전기전도도 센서를 부착하기 위한 실린더 하우징은 외경 $\phi 30$, 내경 $\phi 23$ 의 알루미늄 파이프를 가공하였다. 또한 센서가 부착되는 내경면은 전극 부착 시 양호한 평평도를 유지하기 위해 래핑 가공을 하였으며, 이후 하우징의 내경면에 내열성 접착제를 일정 두께로 도포하여 Flexible PCB를 말아 넣은 후 열처리를 하여 접착제가 고르게 건조될 수 있도록 하였다.

따라서, 개발된 센서를 이용하여 실제 냉각 시스템에 적용하

면 열매체유의 전기저항과 비유전율을 동시에 측정할 수 있으며 열매체유의 성능변화를 가장 효과적으로 측정할 수 있다. 즉, 비전도도의 미소변화를 측정하기 위해 높은 측정정밀도를 유지해야 하는 전기전도도 측정센서와 달리 정전용량 변화를 통해 매우 우수한 측정 감도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 정전용량 측정시 전극면 상에 절연층이 존재할지라도 측정이 가능하므로 전극면의 오염 및 부식에 의한 영향을 배제할 수 있어, 열매체유 상태진단 요소로 정전용량 변화에 의한 측정기법의 유효성을 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 교통체계효율화사업 연구개발사업인 07-교통체계-미래 02의 연구비지원에 의해 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

[1] "Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program : Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan", Energy Efficiency and Renewable Energy, 2007.

[2] "Activities toward Commercialization of Fuel Cell/Hydrogen Technology in Japan", Government of Japan, 2006.

[3] "신재생에너지 워크샵 및 추계학술대회". 에너지관리공단 신재생에너지센터, 2005.

[4] "Handbook of Fuel Cells(Vol. 1~4)", Wolf Vielstich, Arnold Lamm, Hubert A. Gasteiger, John Wiley & Sons Ltd.

[5] IEC 62282-2, "Fuel cell technologies - Part 2: Fuel cell modules", 2007

[6] ISO 23273-3, "Fuel cell road vehicles -Safety specifications- Part 3: Protection of persons against electric shock", 2006

[7] Walter J. ROSSITER, Jr., McClure GODETTE, Paul W. BROWN and Kevin G. GALUK, "An Investigation of the degradation of aqueous ethylene glycol and propylene glycol solutions using ion chromatography", Solar Energy Materials, Vol. 11, pp. 455-467, 1985

[8] B. Hague, Alternating Current Bridge Methods. London, U.K.: Isaac Pitman, 1977

[9] Z. Moron, "Measurements of electrical conductivity of liquids at low frequencies"(in Polish), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.

[10] IEC 60746, "Expression of performance of electrochemical analyzers, Part 3: Electrolytic conductivity", IEC Publication, 2002

[11] 김주한 외, "전기 절연유의 열화 패턴에 따른 정전용량형 센서의 열화감지특성 평가", 대한전기학회 2004년도 하계학술대회 논문집 C, pp.1829-1831, 2004

[12] 최남호 외, "전기절연유의 열화진단을 위한 정전용량 센서개발", 대한전기학회 2003년도 하계학술대회 논문집 C, pp.1609-1611, 2003

저 자 소 개



김재훈 (金載勳)

1997년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1999~2003년 (주)진로산업기술연구소 주임연구원. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).
Tel : 042-821-7604
Fax : 042-821-8895
E-mail : geez011@cnu.ac.kr



김주한 (金周漢)

2003년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사)
Tel : 042-821-7604
Fax : 042-821-8895
E-mail : rykiel76@cnu.ac.kr



김윤형 (金潤亨)

2007년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2010년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 042-821-7604
Fax : 042-821-8895
E-mail : yoonhyoung@cnu.ac.kr



최강월 (崔姜月)

2009년 중국 시안전자과학기술대학교 전기공학과 졸업(학사). 2010년 현재 충남대학교 전기공학과 석사과정
Tel : 042-821-7604
Fax : 042-821-8895
E-mail : aurora@cnu.ac.kr



한상옥 (韓相玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기) 졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 1989년 일본 나고야대 객원교수. 2010년 현재 충남대학교 전기공학과 교수
Tel : 042-821-5655
Fax : 042-821-8895
E-mail : sohan@cnu.ac.kr



용기중 (龍淇重)

1978년 인하대학교 기계공학과 졸업. 1985년 인하대학교 기계공학과 졸업(공학박사). 1987년~현재 교통안전공단 자동차성능연구소 수석연구원
Tel : 031-369-0290
Fax : 031-357-4982
E-mail : dragyong@ts2020.kr