



## 액티브형 유리 재료의 건축디자인 적용과 특성에 관한 연구

### *The Application and Characteristics of Active Glass Materials to Architectural Design*

조종수\* · 김영민\*\*

Jong-Soo Cho\* · Young-Min Kim\*\*

\* Professor, Dept. of Architecture, Konkuk Univ., South Korea (profcho@konkuk.ac.kr)

\*\* Corresponding author, Senior Manager, Technology Division, GS E&C, South Korea (ymkim01@gsenc.com)

#### ABSTRACT

**Purpose:** The purpose of this study is to analyze the application effect of active smart glass in contemporary architecture. In modern times, glass was used as a symbol of modern architecture with industrial revolution. architects tried to express purity and rationalism through the transparency of glass. On the other hand, contemporary architects try to realize various sensuous images based on contemporary philosophy which is Merleau-Ponty and Gilles Deleuze. Recently, sensory materials that respond to the environment such as 'smart materials' are being studied. Smart materials can be classified into passive materials that do not require power supply and active materials that require external power supply. This study analyzes the material properties of active materials and the image effects that appear when applied as architectural design elements. **Method:** Active materials include electrochromic materials, transparent conductive heating materials, and piezoelectric devices. This study analyzes the application effect, durability, price, and needs aspects of active-type environmentally responsive materials as a study target. Among the materials, materials with high applicability are selected, and the effect of application to each material is analyzed through mock-up tests and simulations for the selected materials. **Result:** This study examined the technical characteristics analysis and architectural design applicability for environmentally responsive materials. As a result of the test, it was found that energy of 50 W/m<sup>2</sup> is required to keep the surface temperature the same as the room temperature for condensation prevention, and 300 W/m<sup>2</sup> of power is required to maintain the surface temperature above 40° C. for heating. Electrochromic glass has a transmittance of 70% when power is supplied, and has a transmittance of 2% when power is turned off, which is effective in protecting privacy.

#### KEYWORD

환경반응형 소재  
발열유리  
전기 변색 유리  
압전소자

Smart Material  
Heatable glass  
Electrochromic Glass  
Piezoelectric Element

#### ACCEPTANCE INFO

Received Nov. 3, 2020  
Final revision received Nov. 19, 2020  
Accepted Nov. 24, 2020

© 2020. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

일반적으로 사물을 인식하는 이미지는 모든 감각기관을 통해 형성되지만 그중에서 '시각'을 통한 이미지의 구현이 다른 감각기관들에 비하여 우선하게 된다. 이는 빛의 존재와 인간의 행태 및 심리 변화와 밀접한 관계성을 가지고 있으며, 건축에서도 형태 및 입면 그리고 공간과 색채 구성에서 중요한 표현기법이다. 빛을 다루는 요소는 건축에서 가장 다양하고 효과적인 표현방식이며, 특히 유리재료는 투명성을 통해 이미지를 창출하는 가장 대표적인 건축재료이다. 역사적으로 우리는 고대로부터 오랜 기간에 걸쳐 사용되어왔으나 기계문명의 시작인 산업혁명을 통해 강도와 기능이 다양하게 진화되며 오늘날 현대건축의 다양한 이미지를 구축하고 있다. 현대건축의 유리재료는 근대건축의 순수성과 이성주의로부터 벗어나 일방향적 종속관계를 해체함으로써 현대사회의 다양성, 다원성 및 유동성 등 디지털시대의 차별화된 현상들을 다양한 기법으로 디자인에 적용하고 있다. 산업혁명 이후 대두된 디지털혁명은 현대사회의 관습과 욕

구에 대한 패러다임을 변화시키고 이에 대응되는 진보된 디지털 기술들은 순수한 수동적 재료에서 다원화된 능동적 재료들의 생산을 창출하였다. 이와 같은 새로운 재료는 다변하는 현대 시장의 요구에 따라 '스마트'라는 새로운 트렌드에 따라 자동차, 전자기기, 디스플레이, 의료 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 스마트 재료는 기존의 유리를 포함한 재료들이 주어진 환경변화에 대한 1차원적인 수동적 대응을 넘어 유기체처럼 다차원적으로 주위 환경변화에 반응하거나 첨단 장치에 의해 능동적으로 환경을 조절할 수 있음을 의미하며, 이와 같은 점에서 급격히 변화되고 있는 산업시장 요구에 긍정적으로 대응될 것으로 예상된다[1].

스마트 소재란 과거 지능형 소재와 유사한 개념으로 광, 온도, pH, 전기, 자성, 압력 등과 같은 외부 환경의 작은 변화에도 반응하여 모양/부피가 변하거나 기계적, 광학적, 전기적, 화학적 특성 등이 가역적으로 바뀌는 소재를 의미한다[2]. 스마트 소재는 온도와 같은 매우 기초적인 기능 수준에서 작동할 수 있을 뿐만 아니라, 추가적인 기능과 물성을 조합함으로써 복잡한 기계적 시스템에도 사용될 수 있다[3]. 건축분야에서도 이와 같은 스마트 재료를 적용하여 현대건물에 새로운 이념과 이미지를 구현하는 도구로 활용되고 있으며 패시브적 측면과 액티브적 측면 모두에서 새로운 환경반응형 소재들이 서로 다른 특성을 기반으로 개발되고 있다. 이에 본 연구에서는

스마트 소재를 기후조건(온습도, 일사 등)에 대응할 수 있는 소재로 판단되어 환경반응형 소재로 명명하고, 건축물에 적용할 수 있는 환경반응형 유리 소재를 대상으로 기능적 특성과 디자인에 대한 적용성을 검토하고자 한다.

### 1.2. 연구의 방법 및 범위

환경에 적용하는 방식을 기준으로 환경반응형 소재는 외부로부터 전원공급이 필요 없는 Passive형 소재와, 외부로부터 전원공급이 필요한 Active형 소재로 분류할 수 있다. 이는 건축에 적용되는 방식과 기능에 따라 다양하게 활용된다.

본 연구에서는 외부로부터 전원이 공급되는 Active형 소재에 대하여 재료적 특성과 건축 디자인 요소로서 효과에 대하여 분석한다. 연구수행 방법은 Table 1.과 같다. 현재 개발되어 있는 Active형 소재에 대하여 적용효과, 내구성, 가격, Needs 측면을 분석하고 이 중에서 적용성이 높은 아이টে임을 선정하여 적용 효과를 분석하고자 한다.

## 2. 근·현대건축 표현

### 2.1. 근대건축의 이념과 표현기법

산업혁명은 기계문명을 통한 새로운 세계관과 함께 인구집중과 도시화 현상을 불러왔다. 이러한 사회 현상은 건축에 새로운 형식과 양식 그리고 기법을 요구하게 되었고, 이를 구축하기 위하여 새로운 공학적 기법을 급진적으로 수용함으로써 건축은 새로운 요구와 기술을 기반으로 모던 양식의 태동을 가능하게 하였다. 따라서 급속한 산업의 기계화에 따른 생산기반 시설인 공장 및 창고와 같은 새로운 유형이 요구되었고 건축가들은 대량생산에 의한 철, 유리, 콘크리트와 같은 새로운 재료를 건축적 대안으로 제시하였다. 여기서 새로운 재료란 물질 그 자체가 새로운 것을 의미하는 것이 아니라 생산기술이 공업화되기 위하여 새롭게 되었음을 의미한다. 이는 1820년대 프랑스의 아방가르드운동 이래 반복적으로 나타나 계몽주의를 거쳐 소위 낭만적주의적 모더니즘에 이르렀으나 기계문명의 시대적 특성으로 낭만주의는 사라지고 급진적 모던의식이 태동하게 된 시대적 배경과 일맥상통한다[4].

제1차 세계대전의 종전과 함께 에콜 데 보자르 전통에 정면으로 반기를 든 다다이즘, 큐비즘, 표현주의, 구성주의, 데 스틸 등을 통해 건축양식은 새로운 전기를 마련하였으며, 1920년대를 거치면서 전제주의를 부정하는 시대적 요구를 바탕으로 이성적이며 도덕적 측면에서 간결성으로 귀결해야 한다는 미학적 구축을 토대로 건축의 시대성이 형성되었다. 이와 같은 기계문명의 시대성을 중심으로 모더니즘에 나타난 건축적 특성은 기계 및 장치의 미학을 탐구하고 합목적 기능중심의 공간 및 형태구성 그리고 재료의 순수성 강조를 통

해 장식의 배제와 추상적 미학을 통한 시적표현 등이 중요한 표현기법으로 활용되었다.

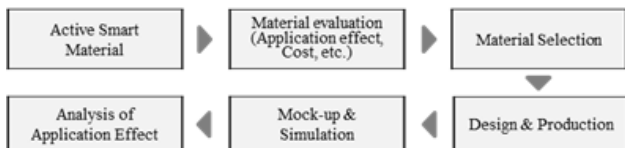
### 2.2. 현대건축의 이념과 표현기법

현대사회와 문화의 변화는 디지털혁명을 통한 정보화 사회의 구현이다. 이는 인간에 대한 중심적 가치 기준을 흔들며 불확정적이고 유동적인 새로운 개념의 디지털 문화를 형성하였다. 새로운 사회에서 인간행태는 아날로그 방식의 전달과 차별화된 디지털 매체들을 통한 새로운 방식의 전달을 바탕으로 외부정보를 일 방향으로 습득하지 않고 이를 첨가 및 변형 등을 통해 다양한 가상적 세계를 용이하게 구축하여 현실에 적용시킬 수 있는 디지털기술을 바탕으로 다양하고 다원적이며 유동적인 새로운 사회패턴을 형성하였다. 이와 같은 디지털 매체의 출발은 5G를 통한 가상현실의 차원적 구현 등 새로운 정보의 전달과 소통의 방식과 표현기법을 재해석하여 건축의 언어로 구축하고 있다.

이러한 새로운 과거와 차별화된 사회 현상은 메트로-폰티와 들뢰즈 등 현대철학자들로부터 제기된 현대 사회구조의 특성과 시대정신에 대한 이론을 바탕으로 시대성을 정립하였다. 들뢰즈는 펠릭스 가타리(Felix Guattari)와 공저한 ‘What is Philosophy, 1994’를 통해 욕망이론, 사건개념 등에 의한 다양성과 이질성의 흐름을 리즘적 구조로 제안하였다. 리즘은 줄기가 뿌리와 비슷하게 땅속으로 뻗어 나가는 땅속줄기 식물을 가리키는 식물학에서 온 개념으로 철학자 들뢰즈(Deleuze)와 가타리(Guattari)에 의해 수목으로 표상되는, 이분법적인 대립에 의해 발전하는 서열적이고 초월적인 구조와 대비되는 내재적이면서도 배척적이지 않은 관계들의 모델로서 사용되었다. 리즘은 수평으로 자라면서 덩굴들을 뻗는데 이는 다시 새로운 식물로 자라나며, 이는 다시 새로운 줄기를 뻗는 방식으로 중심 또는 깊이가 없이 불연속적인 표면으로 형성되어 있기 때문에 리즘형과 수목형은 '관계 맺기'의 두 방식의 예로서 설명되었다. 즉 리즘형과 수목형이 따로 존재하는 것이 아니라 리즘형에 좀더 많은 규정들이 들어갈 경우 수목형으로 화하고 반대의 경우 리즘형으로 화함을 의미한다. 따라서 리즘은 관계를 맺는 방식이 보다 자유로운 쪽으로 갈 때 성립하고 수목형은 관계 맺는 방식이 이항대립적 방식으로 화할 때 성립함을 의미한다. 이를 통해 들뢰즈는 인간과 자연의 등가적인 관계 속에서 생성하는 상호간의 관계 맺기에 의한 존재를 바탕으로 현대사회의 특성을 분석하였고, 이러한 생성적 사유 방식은 근대건축의 일 방향적이고 결정론적이며 위계적 구성방법에 대한 비판에도 영향을 미쳐, 비위계적이며 생성적 관계 속에서 불확정적이며 유동적인 현대사회를 건축디자인에 반영하려는 방법들을 모색하는 계기가 되었다. 이러한 현상은 후기 구조주의 철학에 바탕을 두고 있었으며 이는 해체주의라는 새로운 현대건축의 흐름으로 발전하였다.

따라서 해체주의는 근대건축의 이분법적 가치기준의 비판으로부터 출발하여, 일방향적 종속관계를 가지는 사유를 전면 해체함으로써 현대사회를 반영한 새로운 건축적 가능성을 시대적 특성으로부터 찾고자 하였다. 이를 위하여 현대철학에 기반을 둔 생성적 관계 맺기를 통한 다양한 해석과 접근 방식을 통해 현대사회의 다양성, 다원성 및 유동성 등 시대적 현상들을 디자인에 적용하고 반영하고자 시도함으로써 근대건축과 차별화되는 새로운 표현기법들을 구축하였다[5].

Table 1. Process of Study



### 2.3. 근·현대건축과 유리재료

기계문명을 통해 대량화 되어진 유리는 다양한 건축의 재료로 활용되며 근대건축의 특성을 가장 잘 나타낸 재료이다. 유리의 가장 기본적인 성질은 투명성을 유지하면서 기능적으로 외피의 역할인 바람과 비를 막고 자연광을 실내공간으로 끌어들이며 공간을 연출하는 것이며, 공간을 구획하는 요소인 내부벽체의 투명성을 통해 가변적 공간에 대한 시각적 이미지를 구축하는 동시에 소음과 열에너지를 제어하는 통합 기능을 건축구축의 방법으로 활용하였다. 이는 기능주의를 근간에 두고 있는 산업사회의 표상이자 근대건축의 '재료의 순수성을 통한 합목적적이며 이성적 건축의 절대적 표현기법'이다.

유리의 재료적 특성은 빛 투과, 방음, 단열, 일정한 범위의 내화를 통해 내부 벽체 또는 외피에 요구되는 강도를 확보할 수 있었기에 과거 건축과 차별화된 새로운 근대건축의 이념을 실현할 수 있었다. 반면 앞서 2.2에서 언급한 바와 같이 현대건축에의 유리는 발전된 과학과 기술을 바탕으로 본연의 순수성을 초월하여 비물질화로 진화하게 되었으며, 이는 다양하고 유동적인 비결정적 이미지를 통해 새로운 건축표현 기법으로 활용되었다.

이와 같은 현대건축에서의 비물질화는 근대 이후 전개되는 시각적 패러다임의 변화와 연관되어진다. 근대 이전에 등장하는 시각적 모델은 데카르트적 사고로부터 기인하며 주체가 대상으로서의 세계를 지향할 때 가능한 원리로서 사유하는 주체로서의 나(ego cogito)는 자아중심적으로써 주체의 감정적 상황에 따라 다양한 해석이 가능해진다. 20세기에 접어들어 샤르트르는 사물에 대한 단순한 시각으로써의 시각(light sense)으로부터 차별되는 시선(regard)을 통해 시각적 패러다임을 설명하였다. 이는 외관상 또는 시각에 의한 판단을 나타내며 '시선'에 의해 발생하는 거리를 둔 '주체'와 '대상'과의 관계를 설명하는 것으로써, 시선은 주체의 지향성을 포함하고 지향성을 통해 의미작용 속으로 대상을 끌어들이는 눈의 시각작용을 통한 시각의 헤게모니에 의한 주체성을 의미한다. 또한 이를 주체-대상의 구도를 상호주관적 관계들로 제시하기에 이는 사유의 주체와 대상인 객체를 명확히 구별짓는 데카르트의 자아중심적 주체성과 차별화된다. 이후 메를로-퐁티는 시각이라는 개념을 인식적 현상으로 판단하여 행동 속에 체험될 수 있는 현상적 개념으로, 시각은 대상이 망막에 투영됨으로써 주체가 시각적 조망으로부터 발생하는 것으로 보았다. 즉 고정된 정신의 눈이 아니라 움직이는 육체의 안구로 바라보는 것이 시각으로 정의하면서 정적인 시선을 동적인 시각의 차원으로 시선을 설명한 것이다.

들뢰즈는 인체의 감각을 통해 인식론적 차원의 시각(Perception)과 구별하고자 하였다. 즉 메를로-퐁티의 시각이 몸이라는 주체성과 세계라는 객관성에 근거한 체험적 인식론이라면 들뢰즈의 감각은 인식과는 무관한 유물론적 존재론으로서 시각이 감각을 통한 정보를 정신으로 전달하는 인식적 현상이라면 감각은 감각에서 직접 몸으로 체험되는 존재적 사건으로 보았다. 시각에서 시각되는 대상(Object)과 시각하는 주체(Subject)가 상황에 따라 분리 혹은 공존하지만, 감각에서는 대상과 주체의 구분이 없다는 것이다. 이는 고대의 '눈의 만지는 시각'을 들뢰즈가 '만지기'라는 시각의 촉각적 기능으로 재구성한 것이라 할 수 있는데, 이는 과거 기술의 발전과 함

께 나타난 시각의 합리화 과정에서 잊혀진 '눈의 만지기 시각'을 20세기에 들어 다시 시각에 내재된 촉각적 기능이 강조된 시각적 패러다임으로 변화한 것으로 볼 수 있다[6][7].

이와 같이 '보는 것' 즉 시각은 시대의 형성과정에서 변화하여 왔으며 철학적 사유들의 변화와 함께 건축물을 표현하기 위한 방식 또한 순수한 형태를 지향하는 방법과 달리 추출 혹은 고립을 통해 순수형상을 추구하고자 한 현대회화와 같이 현대건축에서도 외부정보를 일방향적으로 습득하지 않고 이를 첨가 및 변형 등을 통해 '보는 것'을 시각의 촉각적 기능을 통해 현상으로 나타나도록 다양한 가상적 세계를 구축하여 현실에 적용시킴으로서, 다양하고 다원적이며 유동적인 표현을 위한 다차원의 환경반응형 소재 등 새로운 재료의 개발이 다양하게 진행되고 있다.

## 3. 환경반응형 소재 조사 및 검증 아이템 선정

### 3.1. Active형 환경반응형 소재

#### 1) 전기변색 소자

전기변색소자란 전압을 인가하였을 때 색이 변하는 현상을 의미한다. 이러한 특성을 이용하면 평판 표시 소자, 태양광 투과 제어 소자 및 메모리 소자 등에 응용이 가능하기 때문에 전기변색 재료에 대한 연구들이 수행되고 있다. 최근에는 Fig. 1.과 같이 전기변색 특성을 이용하여 건축물, 자동차, 항공 산업 분야에서 적용 가능한 전기변색 스마트 윈도우에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전기변색소자를 이용한 스마트 윈도우는 일사 조절을 통한 에너지 절약, 투과율 변화를 통한 사생활 보호는 물론, 주거 및 사무환경(온열환경, 프라이버시 등) 개선을 통해 다양한 측면에서 삶의 질적 향상을 가능하게 한다.

위와 같이 장점을 가진 전기변색소자의 경우 자외선에 의한 내구성 문제, 투명성 부족, 색변화에 대한 응답성 등의 이유로 실용화가 쉽지 않았으나, 지속적인 연구개발을 통해 단점을 보완할 수 있는 전기변색소자가 개발되고 있다.

전기변색 소자는 21세기 에너지·환경·자원 등의 보존 및 절약을 위해 해결하기 위해 중요한 역할을 하는 동시에 현대건축에서 '보는 것'을 시각의 촉각적 기능을 통해 현상으로 나타나도록 유도하는 다양한 이미지의 구축에도 활용될 수 있다.



Fig. 1. Applications of PDLC[Source:DM Display]

2) 투명 전도성 발열 소재

최근 디스플레이 및 태양전지의 기술 발전으로 소자의 형태 및 특성을 유지하면서 형태를 자유롭게 변화시킬 수 있는 전도성 박막 제품이 개발되고 있다. 플렉시블 박막을 구현하기 위해서는 고분자 기판 위에 성장시킬 수 있는 고품위의 투명전도성 박막이 필요하다. 앞에서 언급한 플렉시블한 박막을 구현하기 위한 대표적인 물질이 인듐 주석 산화물(ITO: Indium Tin Oxide)이다. ITO는 산화 인듐( $In_2O_3$ )과 산화 주석( $SnO_2$ )이 섞여져 있으며, 일반적으로 90% 산화 인듐과 10% 산화 주석으로 되어 있으며 가시광 영역에서 80% 이상의 높은 투과율을 보이며, 높은 전기적 전도성을 가지고 있어 투명 디스플레이 분야와 태양전지의 투명전극으로 활용되고 있다[8].

ITO의 특성을 이용하여 제품화된 사례를 보면 Fig. 2.와 같이 투명토스터기, 의료건조기, 난방기구 등이 있으며, 우수한 전도성 특성을 활용하여 자동차 산업에서 발열 유리에 적용 가능한 필름으로 제작되고 있다.

건설분야에서도 발열 유리를 창호에 적용함으로써 단열이 취약한 유리에 결로 방지는 물론 난방까지 가능함으로 실내의 쾌적성을 확보할 수 있다.



Fig. 2. Applications of Heatable glass [Source: TNB Nano Electric]

3) 압전 소자

압전 소자(피에조 소자)란 Fig. 3.과 같이 기계적인 외력이 가해지면 전압이 발생하거나 반대로 전압이 걸리면 기계적인 변형이 발생하는 소자를 의미한다. 압전소자의 경우 기계적인 외력을 가하여 일그러짐이 생기면 유전분극(전기분극)을 일으켜 전기가 발생하는 것을 직접효과 또는 1차 압전효과라고 하며, 역으로 전기를 가하면 일그러짐이 생기는 것을 역압전효과 또는 2차 압전효과라고 한다. 직접효과 또는 1차 압전효과는 주로 외부응력이나 진동을 전기적 신호(또는 에너지)로 변환하여 착화를 하거나 각종 센서를 만드는데 응용되며, 역압전효과 또는 2차 압전효과는 액추에이터나 모터 등에 사용된다.

압전 소자는 산업계나 제조업뿐만 아니라 의료업, 자동차산업, 정보통신산업 등에서 다양한 방법으로 응용되고 있다. 우리 생활에서 압전소자가 이용된 제품으로 흔히 볼 수 있는 것은 전기라이트와 마이크 등을 들 수 있다. Fig. 4.와 같이 전기라이트의 경우, 손으로 누르면 전기스파크가 발생하여 가스에 불을 붙이게 되는데 이는 가스 버너나 가스레인지 등도 모두 유사한 원리가 적용되어 있다. 마이크나 확성기의 경우에는 소리의 진동을 전기에너지로 변환하여 기계적으로 감지할 수 있도록 하는 압전소자를 이용한 센서가 내장되어 있다. 그 외에도 압전소자는 초음파를 투과하고 이를 되받을 수 있어서 초음파센서의 프로브(probe)나 여군탐지기 등으로 사용되거나 정밀제어가 가능한 액추에이터 등에 사용되기도 한다.

최근에는 Fig. 5.와 같이 운동화에 압전 소자를 달아서 걸어갈 때마다 전기를 만들어 휴대폰 충전 등에 사용하는 응용기술이나, 도로에 압전 소자를 적용하여 차량이나 사람이 지나갈 때 마다 전기를 생성시키거나, 또는 바닥에 압전 소자를 적용하여 전기를 생산하는 방법 등 발전 분야에서 압전 소자를 응용하는 기술에 관한 특허출원이나 기사가 종종 언급되고 있다. 하지만 아직까지 압전 소자를 발전의 용도로 사용하기에는 기술적인 한계가 있다. 실제로 운동화에 압전

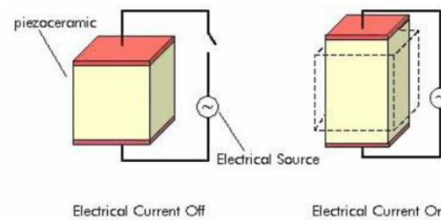


Fig. 3. Piezoelectric Effect [Source: Research Gate]

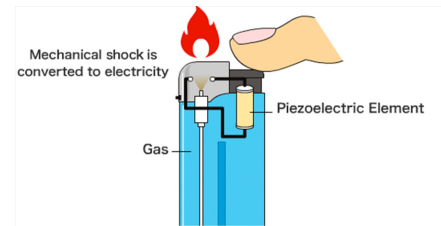


Fig. 4. Piezoelectric Actuator of Lighter [Source: www.spectrose.com]

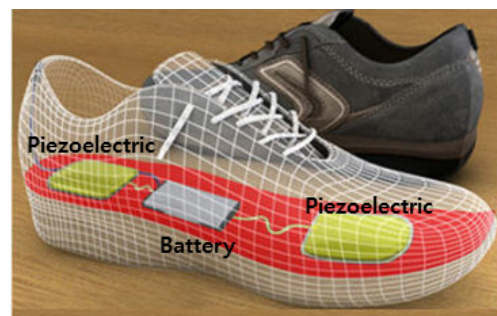


Fig. 5. Sneakers with Piezoelectric Element [Source: Renewable Energy Followers]

소자를 구비하여 발전을 하는 기술이 소개된 적이 있는데, 이렇게 만들어진 전기를 이용하여 소형 배터리를 충전하는데도 70~80시간 가량이 소요된다고 한다. 따라서 스마트폰을 충전하는 데에는 몇 배의 시간이 더 걸릴 것이기 때문에 현실적으로 실용성이 떨어진다.

다만, 최근에 국내 연구진에 의하여 개발된 압전소자의 경우는 기존의 압전소자보다 최대 36배의 효율을 보이고 있다. 이처럼 압전소자의 효율을 향상시키면 언젠가는 걸어 다니면서 전기를 만들어서 휴대폰을 충전하거나 고속도로에서 발전을 하는 것이 실현될 수 있을 것이다.

### 3.2. 환경반응형 소재 검증 아이템 선정

앞에서 언급한 환경반응형 소재에 대하여 건물을 대상으로 적용성이 높은 아이템 선정하기 위해 적용부위, 적용효과, 내구성, 가격, Needs 측면에서 우선순위를 평가하였다.

본 평가는 설계 담당자, 시공담당자, 기술담당자 등 실무경험이 많은 전문가의 의견과 업체 및 기술 조사를 통해 이루어졌다. 평가결과는 Table 2.와 같다. 본 연구에서는 평가대상에서 우선순위가 높은 ‘투명전도성 발열체를 이용한 유리’와 ‘전기변색유리인 PDLC 유리’ 2 가지 기술을 선택하여 기술적 특성과 적용성에 대하여 분석하였다.

## 4. 환경반응형 소재 적용성 검토

### 4.1. 개발 및 검증 방법

앞에서 소개된 환경반응형 소재 중 전원공급에 의해서 환경에 반응하여 계절별 에너지절약이 가능한 Active 아이টে에 대하여 적용부위, 적용효과, 내구성, 가격, Needs 측면에서 적용성이 높은 상위 2가지 아이টে에 선정하였다.

발열유리는 제품 개발, 시뮬레이션 평가, 및 Mock-up 테스트를 통한 적용성 평가를 진행하였으며, 전기변색유리는 상용화되어 있는 제품에 대하여 Mock-up 테스트를 통해 내구성 및 적용효과를 검증하였다.

시뮬레이션 평가를 위해 해석 Tool인 Physibel을 활용하였으며, Mock-up 테스트는 G건설 연구동에서 진행하였다.

### 4.2. 발열유리

초기에 발열유리는 자동차의 성능을 제거하기 위한 방법으로 개발되었으며, 이를 건물의 창호 시스템에 적용하여 환경적 절로방지는 물론 보조 난방용으로도 활용이 가능할 것으로 판단되므로, 건축 디자인에 환경반응형 요소로 적용이 가능하다.

#### 1) 발열유리 제작 방식에 따른 종류

발열유리에 사용되는 발열체의 경우 투명 면상 발열체로 유리 또는 필름에 전도성이 높은 물질을 코팅함으로써 전원공급 시 빠른 열전도를 통해 유리전체에 고르게 온도를 분포시켜주는 것이 중요한 기술요소이다.

발열유리 제작 방식에는 크게 2가지 방식으로 나눌 수 있는데, 첫

째는 유리면에 전도성 물질을 도포하여 발열유리를 만드는 방식이며, 다른 하나는 필름에 전도성 물질을 도포하여 유리에 필름을 접합시키는 방식이다. 유리에 코팅하는 방식은 가격적인 측면에서는 유리하나, 내구성이나, 파손의 우려가 발생할 수 있어 필름방식이 적용성이 우수하며, 상용화도 필름 방식으로 되고 있다.

#### 2) 시뮬레이션을 통한 발열 성능 검토

발열유리의 적용성을 테스트하기 위해 먼저 컴퓨터 프로그램인 Physibel을 이용하여 열전달 해석을 수행하였다.

열전달 해석은 정상상태(Steady state)와 비정상상태(Unsteady state)로 분류된다. 본 연구에서는 정상상태 조건의 3차원 열전달 해석을 수행하였다[9]. 시뮬레이션 조건은 외기 -15°C, 실내온도 25°C로 설정하였으며 창 열관류율은 1.2W/m²K인 창을 이용하였다.

우선 절로 방지효과를 보기 위한 테스트를 진행하였으며 이에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 7.과 같다. 전원을 공급하지 않을 경우 표면온도는 13.8~18.0°C의 분포를 보였으며, 20W/m²를 공급했을 때 표면온도는 15.6~19.9°C의 분포를 보여 약 1.9°C 상승되었다. 50W/m²를 공급했을 때 표면온도는 18.4~22.6°C의 분포를 보여 약 4.6°C 상승되었다. 따라서 10W/m² 에너지를 공급할 때 약 1°C 표면온도 상승의 효과를 볼 수 있다.

다음으로는 보조난방으로 사용가능한지에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 난방의 효과를 보기위해서는 40°C 이상의 표면온도가 유지되기 위해서는 얼마의 에너지를 공급해야 하는지에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 앞에서 제시된 값을 근거로 300W/m²의 에너지를 공급한다는 가정 하에 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 Fig. 8.과 같이 40.3~45.2°C의 온도분포를 보였다.

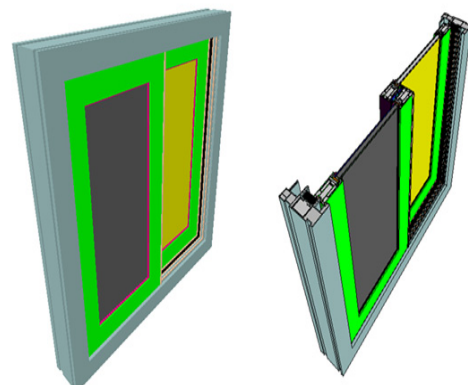


Fig. 6. Modeling for Simulation

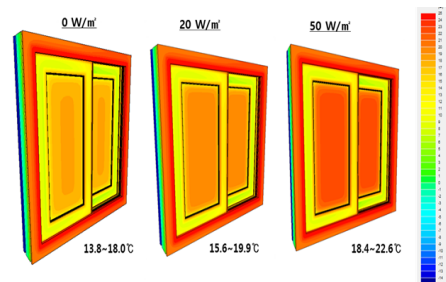


Fig. 7. Heatable glass Test for Anti-condensation

Table 2. Selection of Smart Materials

Applications		Effect	Durability	Cost	Needs	Priority
Photochromic Dye	Window	○	○	○	○	3
Transparent Conductive Film	Window	◎	○	△	○	2
	Heating /Hot Water	△	○	△	X	4
Piezoelectric	Cooling /Lighting	○	△	X	X	5
PDLC	Window	◎	○	X	◎	1

◎ : Point 3, ○ : Point 2, △ : Point 1, X : Point 0

따라서 결로방지용으로 약 표면온도를 실내온도와 유사하게 유지하기 위해서는 50~100W/m<sup>2</sup> 정도의 에너지 필요하며, 보조 난방용으로 40°C 이상 표면온도를 유지하기 위해서는 300W/m<sup>2</sup>의 고전력이 필요하다는 것을 알 수 있다.

3) Mock-up을 통한 발열유리 테스트

시뮬레이션을 토대로 표면온도를 40°C 이상으로 올릴 수 있도록 발열필름을 제작하여 Fig. 9.와 같이 G건설 실험동 창호에 설치하였다.

테스트는 발열유리 적용 유무에 따른 유리표면온도와 실내온도를 비교하였다. Fig. 10.과 같이 보조난방으로 사용할 수 있을 정도로 에너지는 약 300W/m<sup>2</sup>를 공급하였으며, 이때의 실내 표면온도는 49°C로 유지되었다. 발열유리를 적용하지 않았을 경우 유리 표면온도는 평균 20°C였다. 창호 인접 실내온도의 경우 발열유리를 적용하지 않았을 경우 평균 25°C로 유지되었으나, 발열유리를 적용한 경우는 약 30°C로 5°C 상승되었다. 이에 발열유리를 적용할 경우 실내 창부위와 실내측과의 온도차를 일정하게 유지시킬 수 있어 실내 쾌적성 측면에서 매우 효과적이다.

4.3. 전기 변색 유리

전기 변색 유리는 전원 인가에 따라 투과율이 변화되는 성질을 지닌 물질을 필름에 코팅하여 필요시 유리의 투과율을 변화시킬 수 있도록 만든 제품이다.

1) 전기변색유리 종류

일반적으로 전원이 공급되면 투과율이 변화되는 형태이며, 현재 상용화 되어 있는 제품의 경우 전원을 공급할 경우 투명도가 높아지며, 전원을 차단할 경우 투과율이 낮아지는 방식이다.

이는 Fig. 11.과 같이 PDLC(polymer dispersed liquid crystal: 고분자 분산형 액정) 방식으로 디스플레이 혹은 고대비가 필요한 소자에 적용할 수 있는 액정과 고분자 소재의 복합재료로서 다양한 연구가 수행되고 있다.

PDLC의 경우 상대적으로 다른 소재들보다 가격이 저렴하고, 생산이 쉬워 윈도우 셔터, 디스플레이 분야, 홀로그램 미디어등에서 주로 사용되는 소재이며, 이는 전기를 인가하게 되면 불투명한 상태에서 투명한 상태로 변화된다.

또 다른 방식은 아직 Lab Test 단계로 상용화 단계까지는 아직 시간이 필요한 기술이다. 이는 앞에서 언급된 PDLC방식과는 달리 전원을 인가하면 자유롭게 투과율을 조절 가능한 기술로 사용자가 필요에 따라 투과율을 자유롭게 설정할 수 있으며, 전원을 차단하면 그 상태로 유지되는 성질을 지니고 있다. 이 제품의 특징은 전원이 지속적으로 필요하지 않기 때문에 에너지 절감은 물론 자유롭게 투과율 변경이 가능하여 여러 사람의 기호에 맞출 수 있어 적용성이 매우 높을 것으로 예측된다.

2) PDLC 제조사 현황 및 생산 가능성

국내에서 PDLC를 제작할 수 있는 업체는 4곳 정도로 한정적이며, 실제 프로젝트에 적용된 사례를 살펴볼 때 거의 1~2업체가 대부분

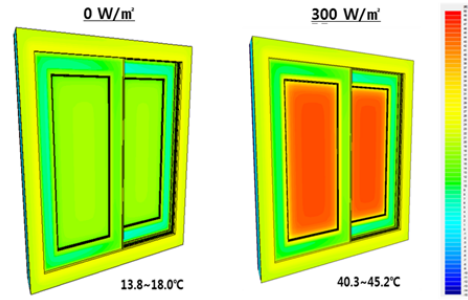


Fig. 8. Heatable glass Test for Auxiliary Heating System



Fig. 9. Mock-up for Field Test of Heatable glass

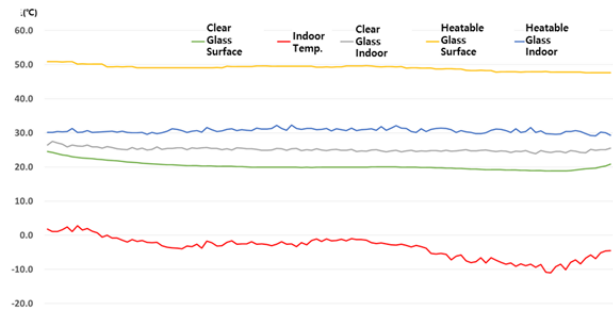


Fig. 10. Mock-up Test of Heatable glass

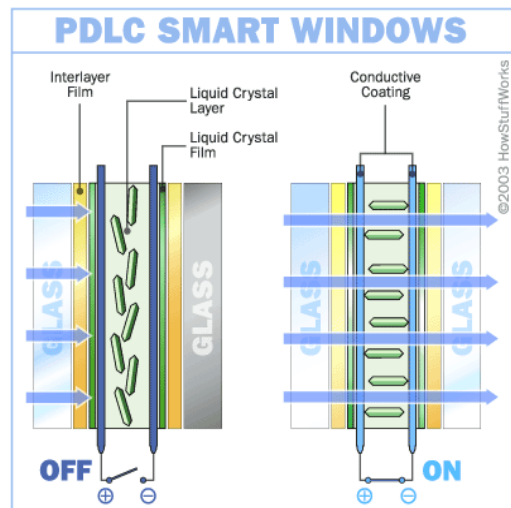


Fig. 11. PDLC(polymer dispersed liquid crystal) Principle[Source:DASH DOOR & GLASS]

분을 차지할 정도로 아직은 적용된 실적이 미흡한 상황으로서, 환경 반응형 소재로 건축 디자인에 보편적으로 적용하기 위한 상용화 단계는 미흡한 상황이다.

생산할 수 있는 업체인 Livicon, 베스트룸, Vitswell, DM display 를 통해 해당 업체의 프로젝트에 적용된 실적을 살펴보면, DM display가 대부분의 실적을 보유하고 있으며, 베스트룸의 경우는 필름만 생산하고 판매하는 방식이고 기타의 다른 업체의 경우는 필름 및 제작된 유리로도 판매는 가능한 상황이다. 따라서 시공실적이 가장 많은 DM display에서 샘플을 제작하여 Fig. 12.와 같이 G건설 실험동에서 기능에 대한 테스트를 진행하였다.

3) PDLC 성능 검증

Mock-up 시공을 통해 제작된 유리의 투과율 변화와 내구성에 대하여 테스트 실시하였다. 우선 내구성의 경우 100만회의 On/Off 를 진행하여 테스트 전과 후에 대해 자외선/적외선/가시광선 투과율 변화를 시험하였다. 초기상태에서 테스트 결과는 Table 3.과 같이, 전원공급 시 70%의 투과율을 나타내며, 전원차단시 2%로 거의 불투명하게 변화되어 프라이버시에 효과적으로 대응이 가능한 것으로 분석된다. 또한, 자외선의 경우100% 차단 가능하며, 적외선의 경우는 50%이상 차단되는 것으로 나타났다.

내구성 테스트를 위하여 50만번 On/Off를 실행하여 가시광선, 자외선, 적외선 투과율과 SHGC를 측정하였다. 그 결과 Table 4.와 같이 초기와 거의 동일하게 성능이 유지되는 것으로 시험결과 나타났다.

PDLC의 경우 유리의 기능을 가변적으로 제어할 수 있어 Fig. 13. 과 같이 회의실, 거실, 욕실, 주방 등 프라이버시를 강조하는 장소에 적용 시 매우 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 판단되며 여름철 일사를 차폐할 수 있어 에너지 사용량도 약 10%의 절감 효과가 가능하다. 하지만, 일사 및 프라이버시를 위해 투과율을 조절한다면 부족적으



Fig. 12. Mock-up for Field Test of PDLC

로 에너지가 사용되어야 한다. 따라서 건축적 측면에서 실의 기능에 따라 적용효과를 극대화 할 수 있는 공간에 적용하는 것이 기능적으로 타당하다. 이는 기능적 측면과 함께 정적인 공간이 성질을 공간을 둘러싸고 있는 외피의 성질을 변화하여 동적인 공간의 성질로 전환시킬 수 있는 유동적이며 능동적인 현대건축의 특성에 적합하다.

5. 결론

본 연구는 환경반응형 소재를 대상으로 기술적 특성 분석과 건축 디자인 적용성에 대하여 검토하였다. 사전 조사를 통해 선정된 2가지 아이টে에 대하여 Mock-up 및 평가 Tool을 이용한 실험 및 시뮬레이션 등을 실시하였으며 대상의 기능과 건축기법에 대해 다음과 같이 분석의 결과를 정리한다.

(1) 발열유리를 건물 창호에 적용할 경우 결로방지는 물론 보조난방용으로 활용가능할 것으로 판단된다. 테스트 결과 결로방지용으로 약 표면온도를 실내온도와 동일하게 유지하기 위해서는 50W/m<sup>2</sup> 정도의 에너지 필요하며, 난방용으로 40℃ 이상 표면온도를 유지하기 위해서는 300W/m<sup>2</sup>의 전력이 필요한 것으로 나타났다.

Table 3. Initial Performance Test of PDLC

	Clear Glass	PDLC-Off	PDLC-On
Image			
Visible Light Transmission	74%	2%	70%
UV Protection	43%	0%	0%
Infrared Protection	46%	5%	50%
SHGC	0.64	0.10	0.59

Table 4. Long-term Durability Test of PDLC

	Clear Glass	PDLC-Off	PDLC-On
Visible Light Transmission	74%	3%	71%
UV Protection	43%	0%	0%
Infrared Protection	46%	6%	50%
SHGC	0.64	0.12	0.60



Fig. 13. Applications of PDLC

(2) 전기변색 유리의 경우 Fig. 13.과 같이 프라이버시를 요구하는 개구부로서 저층에 위치한 거실, 욕실, 드레스룸 등에 적용하는 것이 효과적이다. 이는 시험에 결과에 따라 전원공급 시 70%의 투과율을 나타내며, 전원 차단 시 2%로 거의 불투명하게 되는 특성을 통해 프라이버시에 효과적이다. 또한, 자외선 100% 차단, 적외선 50% 이상 차단할 수 있어 인체에도 유리하며, 유리의 기능을 가변적으로 제어할 수 있어 여름철 일사유입을 가변적으로 차단할 경우 냉방에너지 사용량도 절감 가능하다.

위에서 검토된 2가지 아이템의 경우 일반적으로 적용되고 있는 제품이 아니라 매우 고가인 것과 전원 공급이 필요하므로 추가적인 비용이 발생하는 것이 현 상황이다. 이에 본 연구에서 위에서 언급한 단점을 최소화하고 장점을 극대화 할 수 있는 적용부위 및 적용방안을 찾고, 적용효과 검증하고자 하였다.

현대사회에서 다원적이며 유동적인 현상은 결정론적 위계로부터 상호간의 관계 맺기에 의한 존재를 바탕으로 한 비위계적이며 생성적 관계가 건축디자인에 반영하고자 시도되고 있는 현실을 고려할 때, 환경반응을 통한 유리재료의 변화는 한 공간에서 발생하는 다양한 해석과 접근을 가능하게 하는 새로운 표현기법으로서 적용될 수 있다. 이는 현대건축에서 일방향적 관점에서 '보는 것'에 대한 방법으로부터 첨가 및 변형을 통한 시각의 촉각적 기능을 통해 현상을 표현하는 현대건축의 이념적 기법과 일맥 상통하기 때문에, 본 연구에서 검토한 발열유리와 전기변색유리 재료는 환경을 조절하기 위한 기능적 측면과 건축디자인의 이념적 측면에서 동시에 표현할 수 있는 재료로 여겨진다.

### Acknowledgement

이 논문은 2019년도 건국대학교 KU학술연구비 지원에 의한 논문임.

### Reference

[1] 조종수, 김영민, 현대건축에서 환경반응형 기능성 재료의 디자인 적용 효과 분석, 한국생태환경건축학회, 2019, pp.55-61. // (J.S. Cho, Y.M. Kim, Application Effect Analysis of Smart Material in Contemporary Architecture, KIEAE Journal, 2019, pp.55-61.)

[2] 유종수 외 4인, 광 응답형 스마트 고분자 소재, 한국고무학회, 2012, pp.282-291. // (J.S. Yu et al., Photo-responsive Smart Polymer Materials, Elastomers and Composites, 2012, pp.282-291.)

[3] 문수영, 열에 따라 색상이 변하는 건축 입면소재 개발을 위한 기초연구, 한국생태환경건축학회, 2015, pp.190-191. // (S.Y. Moon, Basic research for the development of a heat sensitive color changing building facade material, KIEAE, 2015, pp.190-191.)

[4] 조종수, 중저층 철골조 건축설계 매뉴얼, 현대제철, 2008, p.30. // (J.S. Cho, Mid Low Rise Steel Building Architectural Design Manual, 2015, p30.)

[5] 조종수, 근·현대 건축 외피디자인의 시대성과 표현기법에 관한 비교연구, 한국실내디자인학회, 2013, p.30. // (J.S. Cho, A Contemporary Study on Architectural Envelop Design between Modern and Contemporary, KIEAE 2013, p.30.)

[6] 김준, 유재우, 근대 이후 시각적 패러다임 변화에 따른 투명성 개념 해석에 관한 연구, 대한건축학회, 2006, pp.96-97. // (J. Kim, J.W. Yoo, A Study on Conceptual Analysis of Transparency through the Transition of Visual Paradigm since Modernism, KIA 2006, pp.96-97.)

[7] 조종수, 현대건축공간에 구축된 체험적 공간개념과 표현기법에 관한 연구, 대한건축학회, 2017, pp.22-24. // (J.S. Cho, A Study on the Experiential Space Concept and the Expression Method in Contemporary Architectural Space, KIA 2017, pp.22-24.)

[8] 강만일 외 3인, 자동차 전면유리용 ITO 박막의 발열특성, 새물리, 2016, pp.1343-1347. // (M.I. Kang et al., Exothermic Properties of ITO Thin Films for Front Windows in Automobiles, New Physics, pp. 1343-1347.)

[9] 이도형, 윤종호, 오명환, 실측실험과 3차원 정상상태 열전달 해석을 통한 발열유리의 온도 및 전열량 분석, 한국생태환경건축학회, 2015, pp. 111-116. // (D.H. Lee, J.H. Yoon, M.H. Oh, Analysis of Temperature and Total Heat of Heated Glass through Experimental Measurement and Three-Dimensional Steady-State Heat Transfer Analysis, KIEAE Journal, 2015, pp.111-116.)