

## 전기변색 전극촉매분야 최신 연구동향



한국과학기술연구원 유성중

전기변색을 이용한 에너지 효율성 윈도우의 개발은 대체에너지 활용을 통한 화석연료 배출가스의 발생량 감소와 에너지 절약에 기여하고, 나아가 지구 환경 보존에 큰 공헌을 하게 될 것이다. 또한 능동적 기능 조절이 가능한 신개념의 윈도우 개발은 주거문화 및 사무환경 개선을 통한 삶의 질적 상승을 예상케 한다.

최근 투과율 자체 조절이 가능한 변색유리(chromic glass)가 연구 개발되고 있다. 투과율 가변유리의 종류에는 크게 전기변색 (Electrochromic), Suspended Particle Device (SPD), 액정, Photochromic, 그리고 Thermochromic이 있다. 능동형 투과율 가변유리는 전기변색, SPD, 액정 등의 방식으로 전기를 인가함으로써 투과율의 인위적 조절이 가능하다. 그러나 Photochromic이나 Thermochromic은 임의 조절이 불가능한 수동형태로 특정 파장의 빛이나 온도변화에 반응하여 투과율이 달라진다.

- Electrochromics
- Photochromics
- Suspended Particle Device (SPD)
- Liquid Crystals
- Thermochromics
- Gaschromics
- Switchable Mirrors
- Electrophoretic Particles

전기변색, SPD, 액정에 의한 능동형 투과율 가변유리는 각기 나름대로 장단점을 가지고 있다.(표 1) 전기변색의 경우, 내구성 및 수명 측면에서 뛰어나고(100,000 사이클의 스위칭, 수명이 최소 10년; SAGE) 저전압에서 작동되나(1 ~ 3V) 응답속도가 느리고(수초 ~ 수십초) 가격이 비싸며(1000 \$/m<sup>2</sup>) 산화물 박막의 경우 폴리머 필름화에 어려움이 있다. 따라서 솔-젤법을 이용한 electrochromic coating 등 가격을 100 \$/m<sup>2</sup> 에 맞추기 위한 연구가 진행되고 있다. 또한 나노 포러스 필름을 제작하여 응답속도를 낮추기 위한 연구도 진행되고 있다. SPD의 경우 폴리머 필름제작이 용이하며, 응답속도가 1초 이하로 빠르고 제작이 용이하다는 장점을 가지고 있고 투과율도 5 ~ 70 %로 조절이 가능하다. 그러나 편광입자의 응축 및 장시간 사용 시 열화하는 특성으로 내구성 및 수명에 문제점이 있다. 액정의 경우 투과율이 40 ~ 80 %내에서 조절 가능하고 응답속도가 역시 빠르나 haze 현상이 있으며 내구성이

약하고 온도 변화에 민감하며 액정가격이 비싸다는 단점이 있다.

전기변색소재의 원리를 간략하게 설명하면 대표적인 환원착색 물질인  $WO_3$ 로 Li이나 수소이온과 전자가 주입되면 청색으로 착색되고 방출 시는 투명하게 되며, 반대로 산화착색 물질인 경우 수소이온과 전자가 방출되면 착색되고 주입되면 투명하게 되는 것이다.(그림 1) 대표적인 전기변색재료를 아래 표 2에 나타내었다.

Table 1. 각종 조광기술의 종류 및 특성 비교.

조광기술	Electrochromic	LCD		SPD	Photochromic	Thermo chromic
		Capsule	G-H			
원리	전하이동	분극분자 배향	분극분자 배향	분극분자 배향	광여기	상전이
대표 예	$WO_3$ /EL/PB유기물	Capsule Nematic 액정	G-H Nematic 액정+2색 성색소	편광입자	AgCl, 유기물	Mo doped $VO_x$
구동전압	전압 AC 1~3 V	전압 AC 30~100 V	전압 AC 3 V	전압 AC 30~100 V	광(UV)	열 30~40 °C
응답속도 (30 cm <sup>2</sup> )	~ 1 min	10 msec	10 msec	100 msec	~ 5 min	~ 3 min
태양광 평균투과율 (%)	5~80	70~80	40~80	5~70	60~80	10~30
내구성 및 수명	우수 10년이상	미약	보통	보통	보통	보통

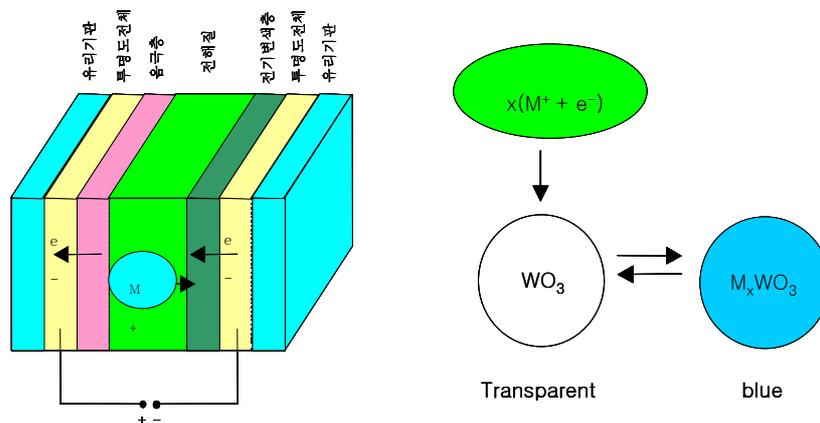


Figure 1. 전기변색 윈도우 구조와 전기변색 윈도우의 착색 (coloration) 과 탈색 (bleach)원리.

Table 2. 대표적인 전기변색재료.

Cathode(환원착색)		Anode(산화착색)	
WO <sub>3</sub>	투명 ⇔ 청색	Ir(OH) <sub>x</sub>	투명 ⇔ 흑색
MoO <sub>3</sub>	황 ⇔ 보라색, 청색	Ni(OH) <sub>2</sub>	투명 ⇔ 갈색
TiO <sub>2</sub>	투명 ⇔ 청색	Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	황 ⇔ 녹색, 갈색, 보라
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	투명 ⇔ 청색	CoO <sub>x</sub>	적 ⇔ 보라, 회색, 흑색
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	황 ⇔ 청색, 녹색, 흑색		
Polyaniline	다양한 색		
Polythiophene	다양한 색		
반응예: WO <sub>3</sub> +xH <sup>+</sup> +xe <sup>-</sup> ⇔ H <sub>x</sub> WO <sub>3</sub>		Ni(OH) <sub>2</sub> ⇔NiOOH+xH <sup>+</sup> +xe <sup>-</sup>	

전기변색을 이용하여 주택이나 건물의 유리창으로 사용되는 예는 그림 2로 나타낼 수 있다.

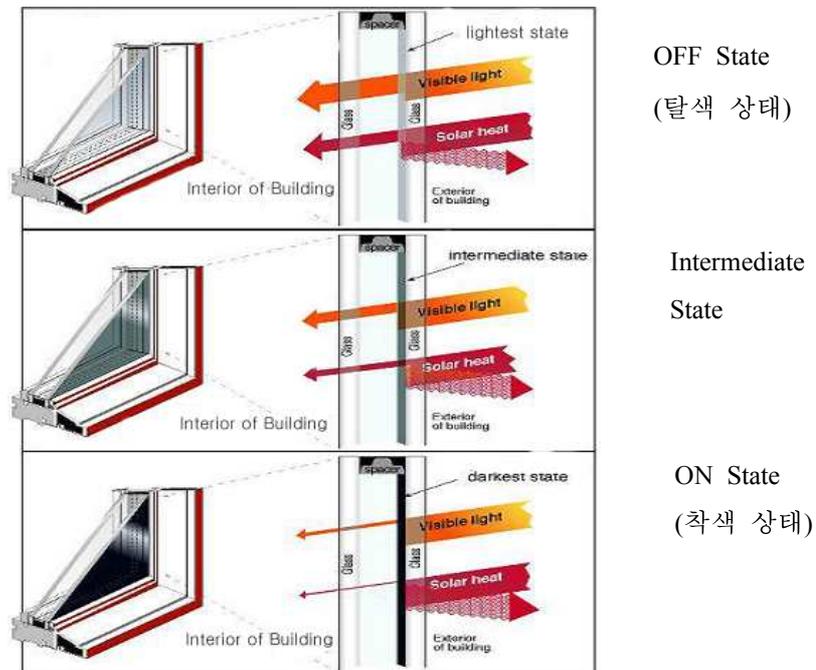


Figure 2. 전기변색 윈도우의 작동예.

그림에서 보는 바와 같이 전기변색 윈도우를 사용하였을 때 Off 상태에서는 투명한 상태로 가시광선과 태양에너지를 실내에 많이 투과시킬 수 있지만, 중간상태에서는 가시광선의 투과율과 전달되는 태양에너지 양을 연속적으로 조절이 가능하다. On시에는 가시광선과 태양에너지의 투과량을 최소로 줄일 수 있다. 또한 유리판을 두 장으로 하고 그 사이에 아르곤과 같은 기체를 주입하여 전달되는 에너지양

을 최소로 하는 절연창을 실현할 수 있다. 이러한 창문을 실현함으로써 건물 내부와 외부의 온도차에 상관없는 절연효과를 통하여 건물에 들어가는 냉난방비를 절약할 수 있다.

전기변색 소재의 경우 투과율은 약 5 ~ 80 % 가변 할 수 있으며 이에 상응하여 태양열 이득계수(창문유리를 통해서 들어오는 태양에너지 비율)는 0.1에서 0.5사이에서 연속적으로 조절이 가능하다.(그림 3) 따라서 여름철의 경우는 가시광선 투과를 차단하고 들어오는 태양에너지를 줄여줌으로써 건물에 들어가는 냉방에너지를 줄일 수 있고 겨울에는 반대로 건물에서 밖으로 나가는 에너지를 줄여서 난방에너지를 줄일 수 있다.

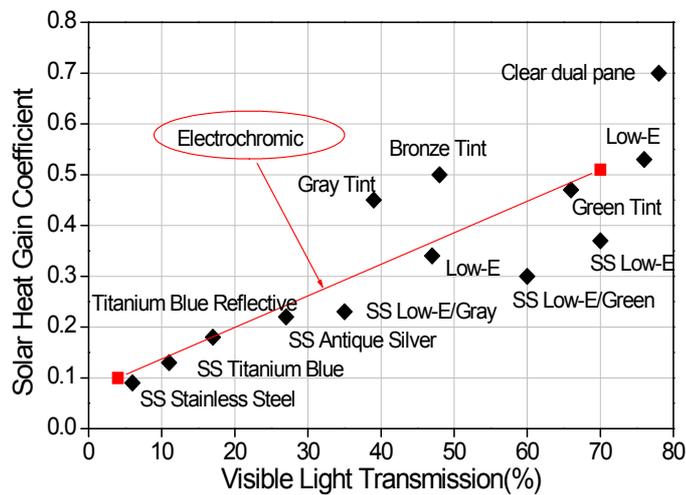


Figure 3. 전기변색소재 및 각종 유리의 가시광선 투과율과 태양에너지 이득계수차트.



Figure 4. 전기변색 윈도우의 실제 적용 예.

전기변색의 응용 및 상품화는 1차적으로 다음 그림에서와 같은 예들을 들 수 있다.



Figure 5. 전기 변색을 이용한 상품의 예.

아울러 이에 더해 다양한 응용 상품이 가능하다.

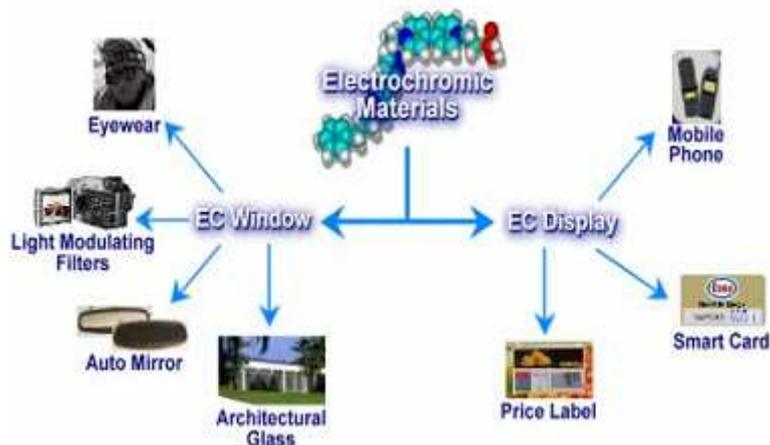


Figure 6. 전기 변색 소자의 다양한 응용 분야.

국제 기술 동향을 보면 다음과 같다. 미국에서는 DOE (Department of Energy) Electrochromic Initiative 프로젝트를 수행중이다. Donnelly Corp.와 OCL I(Santa Rosa, CA)는 EIC Labs (Norwood, MA)와 Anderson Windows (St. Paul, MN)와 파트너십을 갖고 대면적 전기변색 디바이스를 개발하기로 되어있고, 3M (St. Paul, MN)과 SAGE Corp. (Piscataway, NJ)는 미국 상공부의 NIST 지원 하에 플라스틱 위에 전기변색을 개발중이고, LBNL (Lawrence Berkeley National Lab.)에서는 리튬과 양성자 저장을 위한 폴리머 이온 저장 층을 개발중이고, Southwall Technologies (Palo Alto, CA)에서는 폴리에스테르 위에 텅스텐 옥사이드/ITO 전기변색 전극개발 중이다. NREL (National Renewable Energy Lab.)에서는 전기변색 윈도우의 내구성 연구 및 전기변색 표준화 작업을 수행중이다.

영국에서는 대규모 Joule 11 Commission of the European Communities(CEC) 프로젝트를

시작하였다. Pilkington PLC에서는 Joule 11 프로그램 하에서 다층 전기변색 글레이징 수행중이고, University of Oxford에서는 전기변색 NiO에 관한 연구진행 중이고, 변색성과 내구성이 뛰어난 결과를 발표하고 있다. Flachglas는 최근 0.80 in × 1.2 in의 프로토 타입 변색 글레이징을 선보이고 있고, 이 윈도우는  $T_{bleached} = 65 \sim 20 \%$  영역의 투과율을 보였고,  $T_{colored} = 45 \sim 10 \%$ 를 보이면서, 동시에 응답속도는 수 분 수준을 기록하였다. 또한 14 %의  $T_{colored}$ 를 갖는 46 cm×78 cm의 자동차용 프로토 타입 선루프 제작을 기획중인 것으로 알려져 있다. 웁살라대학(스웨덴)의 Granqvist 그룹은 Coat AB(스웨덴)와 Leybold AG(독일)와 연구를 수행중이며,  $WO_3$ 와 NiO로 구성된 전기변색 소자 개발을 진행하고 있다.

이웃나라 일본에서는 에너지 Saving 빌딩 프로그램의 일환으로 Sunshine 프로젝트를 시행중이다. 일본 최대 유리 업체인 Asahi Glass에서는  $LiWO_3/metal\ oxide/NiO$ 를 기초로 한 전기변색 프로토 타입 전기변색 윈도우 (0.4 in × 0.6 in, 0.6 in × 0.8 in) 개발하고 있는데, 이 시스템은 에 기초, 약 200장의 프로토 타입 전기변색 윈도우(0.4 in × 0.4 in)가 Seto Bridge Museum (Kojima, Okayama-Pref., Japan)에 설치되었다.

전기변색 및 광전변환 소재 윈도우 산업은 일반유리/착색유리의 저부가가치 유리, 진공코팅반사유리, 열선 반사유리 (Low-E glass), 투과율가변유리 (전기변색, SPD, 액정)중에서 투과율가변유리에 속하여 고부가가치의 유리이므로 고부가가치로 인한 경제 산업적 측면에서의 높은 부가가치가 기대된다. 인텔리전트 유리/필름의 기술투자를 통한 실용화가 가능할 것이다. 태양광에 의한 에너지절약에 따른 에너지 사용 감소의 경제적 효과가 예상된다. 에너지효율성 윈도우의 사용에 의해서 전세계 에너지소비량의 3 %를 절감할 수 있는 것으로 예측되며, 이는 경제적으로 환산하면 263억불, 한화로 30조원이 넘는 금액이며, 국내는 연간 석유수입액이 100억 불 이상인 것을 감안할 때 연간 3,500억원에 달하는 외화를 절감할 수 있을 것으로 기대된다. 전기변색 소자는 21세기 에너지·환경·자원등의 보존 및 절약을 위해 반드시 해결해야 할 중요한 연구과제이기 때문에 국내뿐 아니라 전 세계적으로 큰 의의를 갖는다. 체계적인 연구활동에 의한 유리/필름 소자의 제작은 이 분야의 기술 선점을 이룸으로써 고부가가치 국가산업을 창출하여 경제 산업적으로 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다. 전극소재의 국산화 및 기술선점을 통한 국제시장 공략도 가능할 것이고, 이와 관련하여 산업체와의 기술협력 혹은 벤처 창업 등을 생각할 수 있을 것이다.