

18CTAP
-C142184
-01

UV 경화형 고분자 화학수지(Resin) 전해질 기반 고강도
전기변색 접합유리 원천기술 개발

2018

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

보안 과제 (), 일반 과제 (O) / 공개 (O), 비공개 () 발간등록번호 ()

국토교통기술촉진 연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 18CTAP-C142184-01

UV 경화형 고분자 화학수지(Resin) 전해질 기반 고강도 전기변색 접합유리 원천기술 개발

최종보고서

2020. 02. 03.

주관연구기관 / 한양대학교 에리카산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'UV 경화형 고분자 화학수지(Resin) 전해질 기반 고강도 전기변색 접합유리 원천기술 개발'(연구개발 기간 : 2018. 04 . 17. ~ 2019 . 12. 31.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2020 . 02. 03.

주관연구기관명 : 한양대학교 에리카산학협력단

(대표자) 박태준



주관연구기관책임자: 태 성 호

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP -C142184-01	해당 단계 연구 기간	2018.04.17.~ 2019.12.31.	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	UV 경화형 고분자 화학수지(Resin) 전해질 기반 고강도 전기변색 접합유리 원천기술 개발			
연구책임자	태 성 호	해당단계 참여연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부:220,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계:220,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 11명 내부: 11명 외부: 0명	총 연구비	정부:370,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계:370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한양대학교 에리카산학협력단			참여기관명 (재)한국건설생활환경시험연구원	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 전자부품연구원			연구책임자: 한승호	

요약

본 연구는 UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)와 리튬염(LiClO₄)가 혼합된 전해질을 이용하여 이온전도가 가능하고 건축용 접합안전유리 품질기준(KS L 2004)을 만족하는 “전기변색 접합유리 원천기술 개발”을 목적으로 함

- [소재기술] UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)계 고강도 전해질 원천기술 개발
건축용 안전접합유리 수준의 강도를 갖는 UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)와 리튬염(LiClO₄)가 혼합된 전해질 원천기술 개발 및 시작품 개발
- [제조기술] 고강도 전기변색 접합유리 소재 코팅 및 접합 제조 원천기술 개발
UV 경화형 고분자 화학수지계 전해질에 적합한 투명전도막(ITO), 변색층(WO₃), 이온저장층(NiWO) 코팅 공정 최적화 및 UV 경화형 접합 공정 최적화 원천기술 개발 및 시작품 개발
- [성능평가 기술] 고강도 전기변색 접합유리 성능평가
전기변색 접합유리 소재 특성(변색효율, 이온전도도, 응답속도), 건축자재로서의 광학 및 열적 특성(KS L 2514), 구조적 특성(KS L 2004) 성능평가를 통한 건축용 유리 적용 가능성 평가
- [품질관리 기술] 전기변색 접합유리 품질관리기준 및 품질 가이드라인 개발
전기변색 접합유리에 관한 국제 품질기준(ISO 18543) 기반 평가방법론 분석을 통한 한국형 전기변색 접합유리 품질기준(KS ISO 18543) 제안 및 품질관리 가이드라인 제안

본 연구는 변색특성을 가지고, 건축용 안전접합유리 품질기준(KS L 2004)를 만족하는 전기변색유리 국산화 원천기술 개발 연구로서 연구개발 성과물은 다음과 같음

- [1] 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 원천기술 실물 시작품 및 국내외특허
- [2] 고강도 전기변색 접합유리 실물 시작품 및 국내외특허
- [3] 고강도 전기변색 접합유리 시험성적서(7건)
- [4] 전기변색 접합유리 품질관리기준(KS ISO 18543) 및 품질 가이드라인

보고서 면수

〈 국문 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구는 UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)와 리튬염(LiClO₄)가 혼합된 전해질을 이용하여 <u>이온전도가 가능하고 건축용 접합안전유리 품질기준(KS L 2004) 을 만족하는 “전기변색 접합유리 원천기술 개발”</u>을 목적으로 함 1. [소재기술] UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)계 고강도 전해질 원천기술 개발 <u>건축용 안전접합유리 수준의 강도를 갖는 UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)와 리튬염(LiClO₄)가 혼합된 전해질 원천기술 개발 및 시작품 개발</u> 2. [제조기술] 고강도 전기변색 접합유리 소재 코팅 및 접합 제조 원천기술 개발 UV 경화형 고분자 화학수지계 전해질에 적합한 <u>투명전도막(ITO), 변색층(WO₃), 이온저장층(NiWO) 코팅 공정 최적화 및 UV 경화형 접합 공정 최적화 원천기술 개발 및 시작품 개발</u> 3. [성능평가 기술] 고강도 전기변색 접합유리 성능평가 전기변색 접합유리 <u>소재 특성(변색효율, 이온전도도, 응답속도), 건축자재로서의 광학 및 열적 특성(KS L 2514), 구조적 특성(KS L 2004) 성능평가를 통한 건축용 유리 적용 가능성 평가</u> 4. [품질관리 기술] 전기변색 접합유리 품질관리기준 및 품질 가이드라인 개발 전기변색 접합유리에 관한 국제 품질기준(ISO 18543) 기반 평가방법론 분석을 통한 <u>한국형 전기변색 접합유리 품질기준(KS ISO 18543) 제안 및 품질관리 가이드라인 제안</u>				
연구개발성과	본 연구는 변색특성을 가지고, 건축용 안전접합유리 품질기준(KS L 2004)를 만족하는 전기변색유리 국산화 원천기술 개발 연구로서 연구개발 성과물은 다음과 같음 [1] 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 원천기술 실물 시작품 및 국내외특허 [2] 고강도 전기변색 접합유리 실물 시작품 및 국내외특허 [3] 고강도 전기변색 접합유리 시험성적서(7건) [4] 전기변색 접합유리 품질관리기준(KS ISO 18543) 및 품질 가이드라인				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	활용방안 ■ 국내외 건축용 판유리 제조 및 창호 업계와 연계로 UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 고강도 전기변색 접합유리 국산 원천기술 보급을 통한 에너지 저감형 스마트 창호 상용화 및 사업화 제품 개발에 활용 기대효과 ■ 건축용 안전접합유리수준(KS L 2004)을 갖는 전기변색 접합유리 원천기술을 개발함으로써 <u>세계 최고 수준의 국산 전기변색 접합유리 기술력을 확보</u> 할 수 있어, 상용화 제품 연계 시 세계적으로 차별성을 갖춘 전기변색 접합유리 제품이 될 수 있음 ■ <u>차별성을 갖춘 전기변색 접합유리 제품</u>으로서, 건축물 적용 시 <u>1) 대면적화가 가능하고, 2) 박리에 의한 하자 발생이 없으며, 3) 낙하에 의한 안전사고 발생이 없는</u> 유일한 전기변색 접합유리로 <u>세계 시장을 선점</u>할 수 있으며, 국내 스마트 유리 기업의 성장을 견인할 수도 있음 ■ 원천기술 개발 후 상용화를 통해 <u>국내 제로에너지 건축물의 핵심 기술로 적용</u>이 가능하며, <u>고부가가치의 스마트 창호 제품 생산</u>으로 창호 시장의 성장을 견인하고, <u>고용창출 발생 효과</u>를 얻을 수 있음				
핵심어 (5개 이내)	전기변색	접합유리	자외선 경화형	고분자화학수지	전해질

＜ SUMMARY ＞

Purpose & Contents	The purpose of this study is to develop the original technology of laminated electrochromic glass which is possible to conduct ion through electrolyte and to meet the criteria for the safety glass quality of building contact (KS L 2004) by using UV hardening polymer chemical resin and lithium salt (LiCLO 4). 1.[Original Material Technology]Development of UV hardening polymer chemical resin type High Strength Electrolyte Source Technology Development of electrolyte source technology and work process for Electrolyte (LiClO4) Mixed with UV hardened polymer solution for meeting the criteria for safety laminated glass and conducting ion. 2.[Manufactural Technology] Development of Manufactural Technology of Coating and Lamination for High Strength Laminated Electrochromic Glass Development of transparent conductive film (ITO), electrochromic colored layer (WO3), ion storage layer (Ni WO) coating process optimization and UV hardening lamination process suitable for UV hardening polymer electrolyte. 3. Performance Evaluation Technology of High Strength Laminated Electrochromic Glass Evaluation of laminated electrochromic glass material properties (efficiency, ion conducting performance, response speed), optical and thermal characteristics as Building Materials (KS L 2514), and Structural Properties (KS L 2004). 4. Development of the Quality Regulations and Guideline for Laminated Electrochromic Glass Proposal of quality Standards (KS ISO 18543) and quality Guideline for laminated electrochromic glass by analyzing the International Quality Criteria (ISO 18543).				
Results	[1] Actual product and domestic and international patents for polymer-chemical resin-based electrolye [2] Actual product of high strength laminated electorhcomic glass and patents [3] Test report for high strength laminated electrochromic glass (7 cases) [4] Quality Regulations and Guideline for laminated electrochromic glass				
Expected Contribution	Application Plan Development of product for commercialization through supplying UV hardening electrolyte based high strength laminated electrochromic glass to glass manufacturing company(international and domestic) and window manufacturing company. expectation effectiveness We can get world best technologies in terms of architectural electrochromic glass by developing high strength laminated electrochromic glass and electrolyte.				
Keywords	Electrochromic	Laminated glass	UV hardening	Resin polymer	Electrolyte

< 목 차 >

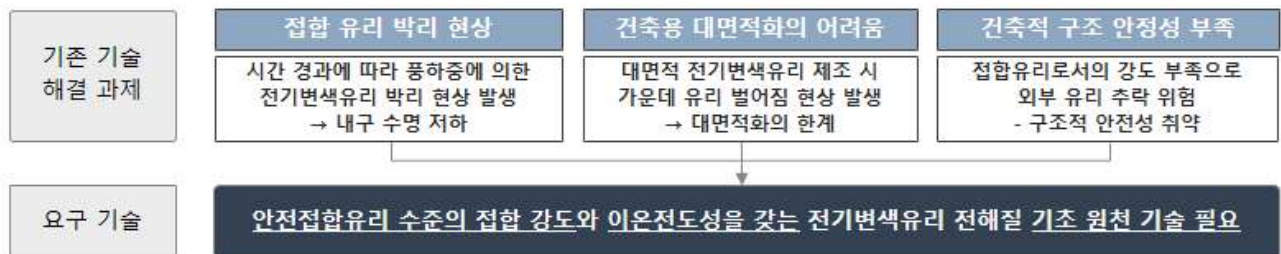
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구 수행 내용 및 성과	10
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	110
4. 참고 문헌	117
[부록] 전기변색유리 성능평가 방법 및 품질관리 가이드라인 ...	120

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 필요성

1-1. 연구개발의 개요

- 제로에너지 건축물의 구현을 위한 핵심기술로 에너지 저감형 일사 조절 **스마트 창호의 필요성이 증대**되고 있고, 세계적으로 **전기변색유리 시장이 가파르게 성장**하고 있으며, 세계적 유리 제조 기업에서 **전기변색유리 상용화 제품 출시를 확대**하고 있음
- 따라서 **우리나라도** 전기변색유리에 대해 **세계적 수준의 차별화된 국산 상용화 원천기술이** 요구되며, 차별화된 기술로 상용화 제품의 출시가 필요함
- **기존 젤(Gel) 전해질 기반 전기변색 접합유리**의 문제점은 전해질의 접합 강도가 낮아, **박리현상**으로 인한 이온전도도 상실, 건축용 **대면적화 시 유리 중심부 들뜸 현상**으로 하자 발생, 접합유리의 강도 부족으로 건물 적용 시 **유리 추락 위험으로 인한 안전사고 발생** 가능성이 있음
- 따라서 본 연구에서는 **안전 접합유리 수준의 접합강도와 이온전도성을 갖는 전기변색 접합유리 기초 원천기술을 개발**코자, “UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 고강도 전기변색 접합유리 원천기술 개발”을 하고자 하며, 최종 성과물로는 **고분자 화학수지(Resin)계 전해질** 시작품, **고강도 전기변색 접합유리** 시작품, **전기변색유리 품질관리 기준**을 제안하고자 함



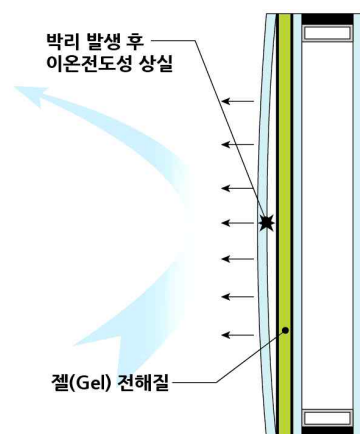
[UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 고강도 전기변색 접합유리 원천기술개발 전체 개요도]

- 본 연구는 **고분자 화학수지(Resin)와 리튬염(LiClO₄)와 가교제(UV 경화형)**를 포함하는 **전기변색 접합유리용 전해질을 개발**하여 건축용 안전접합유리(KS L 2004) 수준의 **접합강도와 이온전도 특성**을 동시에 갖도록 함에 첫 번째 목적이 있고, 두 번째로 고분자 화학수지(Resin)계 전해질과 변색 소자(투명전도막, 변색층, 이온저장층) 간의 소재 매칭을 통해 **최종적으로 고강도 전기변색 접합유리를 개발하고자 함에 목적이 있음**
- 본 연구는 기존 젤(Gel) 전해질 타입 전기변색 접합유리의 낮은 접합강도로 인해 **박리로인한 1)이온전도도 상실, 2)대면적화의 어려움, 3)유리 낙하로 인한 안전사고 발생가능성**의 문제점을 해결하고자 함에 목적이 있고, 건축용 전기변색 접합유리 상용화를 위해서는 국내외적으로 반드시 해결되어야 할 문제점이기에 **본 연구를 통해 접합강도 향상을 위한 원천기술을 개발하고자 함**

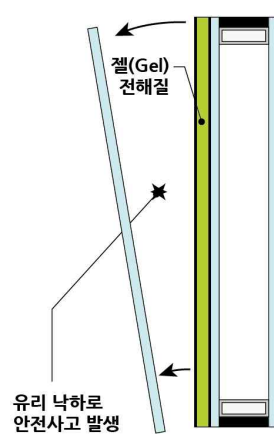
구 분	기존 기술	본 연구개발 기술
적용 대상	젤(Gel) 전해질 타입 전기변색 접합유리	고분자 화학수지(Resin)계 전해질 타입 고강도 건축용 전기변색 접합유리
주요 특징	- 기존 젤 전해질 타입 전기변색 접합유리는 이온전도성 특성을 보유하고 있으나, 접합강도가 낮아 작은 충격에 민감하고, 풍하중에 의해 유리 처짐 발생 시 변색층과 전해질 층의 박리로 인한 이온전도성을 상실하여 전기변색 특성을 잃을 수 있음 - 건축용 유리로 사용하기 위해서는 대면적화가 요구되나, 대면적 접합유리 제작 시 유리 중심부위 들뜸 현상으로 인한 이온전도 특성을 보장할 수 없어 품질에 문제가 됨 전기변색 접합유리는 복층화 후 가장 실외측에 설치됨에 따라 낙하에 의한 안전성을 보장해야하지만, 낮은 접합강도로 인한 유리 낙하로 인한 안전사고 가능성이 있음	- 전기변색유리의 이온 전해질 역할을 하는 리튬염(LiClO₄)와 건축용 안전접합유리 제작 시 사용되는 고분자 화학수지(Resin)을 혼합한 전해질을 개발하여 박리에 의한 이온전도성 상실 문제를 해결할 수 있음 - UV 경화형 접합공정으로 열경화 방식에 비해 장비에서 소비되는 에너지 사용을 최소화 할 수 있어 공정 단가 절감 가능 - 고 접합 강도 특성으로 건축용 대면적 전기변색유리를 생산이 가능해, 상용화 제품의 건축 시장 진입 가능성을 높일 수 있음 - Resin을 활용한 전기변색 접합유리는 안전접합유리의 접합 강도를 갖기 때문에 고층사무소 건물 설치 후 낙하에 의한 안전사고를 예방 할 수 있음

기존 젤(Gel) 전해질 타입 전기변색 접합유리의 문제점

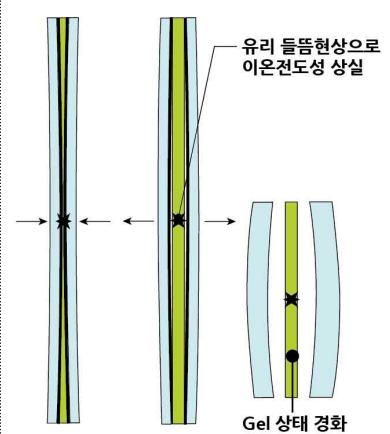
1) 풍하중에 의한 전해질 박리로 이온전도도 상실



2) 유리 하중에 의한 탈락으로 낙하 안전사고



3) 대면적 전기변색 접합유리의 유리 중심부 들뜸현상



안전접합유리 수준의 접합강도와 변색 특성을 갖는 **고강도 전기변색 접합유리 원천기술 개발**

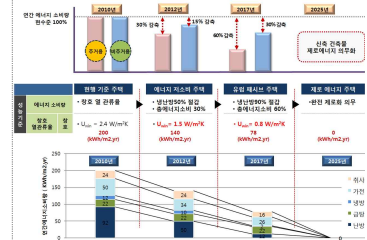
1-2. 연구개발 대상의 국내외 현황

- 국내는 2025년 제로에너지 건축물 로드맵에 따라 점차 **건물외피의 에너지 관련 법규가 강화**되고 있으며, 이에 따라 **고성능 유리 및 창호시장의 규모가 점차 증대**되고 있음
- 하지만 현재 건물 외피 시장은 대부분 Low-e 유리와 고단열 창호가 주를 이루고 있어 단열성능 향상에는 기여하지만 **일사조절을 위한 스마트창호에 대한 시장은 아직 형성되어 있지 않음**
- 세계적으로 **스마트창호 시장은 급격한 성장률**을 나타내고 **시장 규모가 점차 확대**되고 있음에 따라 국외의 연구소 및 기업들은 전기변색유리에 대한 **원천기술 연구가 활발히 진행**할 뿐만 아니라 **상용 화제품을 지속적으로 출시**하고 있음
- 따라서 국내 연구 및 산업계에서도 기초원천에 대한 기술을 통해 상용화 제품으로 연계하여 국내 뿐만 아니라 세계 **스마트창호 시장에 대응할 국내 기술 확보 및 상용화 제품에 대한 준비가 필요**함

○ 국내 현황

■ 국내 건물외피 에너지 관련 법규 강화

- 2000년대 초반 창호의 열관류율 기준이 $3.3\text{W/m}^2\text{K}$ 에서 현재 2018년 기준 비주거용 건축물은 $1.2\text{W/m}^2\text{K}$, 주거용 건축물은 $1.0\text{W/m}^2\text{K}$ 로 **20년간 70% 급격하게 외피 단열성능 법규가 강화**되고 있음
- 2015년부터는 비주거 건물의 차양장치 설치 의무화가 되고, 창세트 일사획득계수 평가 기준이 마련되는 등 단열성능 뿐만 아니라 **일사획득계수에 대한 기준도 강화**되고 있음



[건물외피 에너지 관련 법규 강화]
※ 참조 : 건설기술연구원 발표자료, 2017

■ 고성능 유리 및 창호 시장 형성과 한계점

- 국내 건축물 외피에 대한 법규가 강화되면서 고성능 유리 시장의 규모는 2016년 전체 판유리 시장 중 23.9%인 800억 규모로 성장하였고, 2017년 44.4%인 1,600억 규모, 2018년에는 61.5%인 2,400억을 차지할 것으로 예상되고 있음
- **고성능 유리 시장의 대부분은 Low-e 유리가 차지**하고 있는데, Low-e 유리가 처음 출시되었을 때 일반 유리에 비해 **2배 이상 높은 단가로 소외**되었으나 **최근 신축 건축물에는 필수적으로 적용되고 있음**
- Low-e 유리와 더불어 Argon 가스, 삼중유리, 진공유리 등 단열성능을 높이기 위한 고성능 유리가 출시되고 있지만, **한계점은 냉난방부하의 70%이상을 차지하는 일사 조절 성능에 대한 제품 시장과 관련 법규 및 기준이 부족한 실정**임



[고성능 유리 및 창호시장의 확대]
※ 참조 : 통계청+유리신문, 2012

■ 스마트 창호 원천기술 및 상용화 가능 기술 개발의 필요성

- 특히 창면적비가 큰 사무소 건물외피의 경우 일사에 의한 에너지 부하에 대한 영향이 크고, **우리나라와 같이 하절기와 동절기 구분이 뚜렷한 기후 조건에서는 제로에너지 건축물 구현을 위해 일사 조절 창호 기술 개발이 시급**함
- 해외 세계적 기업들은 스마트 창호 상용화 제품을 출시하고 있지만, 국내의 경우 아직 상용화 제품이 출시되지 않고 있어 **국내 시장 형성 및 세계 시장 선점**을 위한 원천기술 및 상용화 제품에 대한 기술 개발이 시급한 상황

오피스 건물

커튼월 건물의 일사제어를 위한 장치 및 방안 의무화 법적 추진

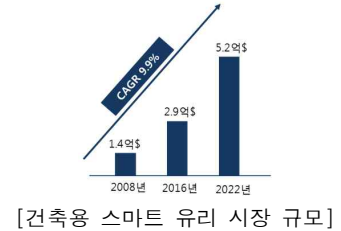
오피스건물 부문의 저감대책

- 국토부는 신축 커튼월 건물 중 향 면적비가 50%이상인 건물에 대해서 일사차단 장치의 설치를 의무화하는 법적 추진
- 광학성능 제어 시스템 요구
- 커튼월 방식 건물의 냉방부하 저감에 대한 관심이 점차 증가
- 고성능, 고단열, 차양장치의 복합적 필요성 증대

[일사제어를 위한 창호기술 필요]
※ 참조 : 녹색성장위원회보고서, 2009

■ 스마트 창호 시장의 급격한 성장률 및 시장 규모 확대

- BCC Research에 따르면 세계 스마트 유리시장의 규모는 2008년 10.3억 달러에서 2022년 38.6억 달러로 **연간 성장률을 9.9%로 전망**하고 있음
- 이중 건축용 스마트 유리시장이 13.4%를 차지할 것으로 예상되며, **건축용 스마트 유리시장은 2008년 1.4억 달러에서 2022년 5.2억 달러로 전망**하고 있음
- 9.9%의 높은 연간 성장률을 나타내고 있고, 전 세계적으로 제로에너지 건축물에 대한 로드맵을 제시하고 있는 상황에서 **기존 상용화 유리의 에너지 저감 한계를 극복하기 위해서는 스마트 유리에 대한 수요가 점차 증가 할 것으로 예상** 됨
- 전기변색유리 원천 기술 확보로 건축 외피 시장 뿐만 아니라 **자동차, 항공기, 선박, 인테리어 시장 진입 시 세계 시장 선점 가능**

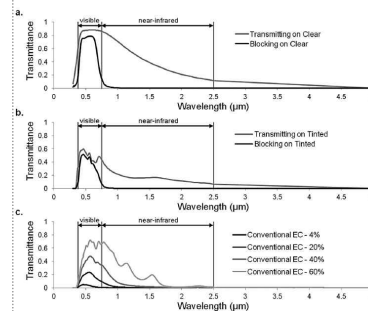


[스마트 유리 시장의 규모]

※참조 : Smart Glass : Technology and Global Market, bcc Research (2009)

■ 스마트창호 기초원천 기술 개발 주력

- 스마트 창호 시장 선점을 위해 세계적으로 **변색 소자, 이온저장층 소자, 전해질 원천기술 개발에 주력**하고 있음
- 최근에는 가시광선 영역대의 광학특성은 고정 시키고 **근적외선(NIR) 영역대의 투과율만 조절할 수 있는 원천 기술이 개발**되어, 걸모양은 일반유리와 동일하면서 동절기에는 투명유리, 하절기에는 Low-e 유리나 유사한 광학적 특성을 갖는 전기변색유리가 개발되는 등 **전기변색유리 상용화를 위한 원천 소재 기술 개발 주력**
- 그 외에도 투명전도막(TCO)와 변색층의 특수 코팅을 통한 **응답속도 향상 원천 기술을 활용하여 일본 (HALIO)에서 상용화 제품을 출시**하였고, 4차 산업혁명에 맞춰 **태양전지 Cell과 IoT 디바이스를 연계한 응용 제품 원천기술 개발에도 주력**하고 있음

[NIR 영역 투과율 조절 원천기술
Environmental Energy
Technologies Division, LBNL]

[스마트창호 원천기술 개발 주력]
※참조 : Building and Environment, 2015

■ 세계적인 판유리 제조 기업들의 스마트 창호 상용화 제품의 지속적인 출시

- 세계적인 판유리 제조 기업들은 스마트 창호의 시장 확대 및 성장을 대비하여, 상용화 제품을 지속적으로 출시하고 있음
- 대표적으로 **미국의 Sage Glass**는 오랜 기간 전기변색 원천기술을 보유하고, 연구 끝에 **상용화 제품을 가장 먼저 출시**하였으며, 현재 프랑스의 세계적인 판유리 제조 기업인 **Saint Gobain에서 인수 하여 사업화를 진행** 중
- **일본의 대표적 판유리 제조업체인 아사히 글라스 (AGC)**는 응답속도 5분 이내로 변색이 가능한 변색층 및 전해질 원천기술을 토대로 **Halio 상용화 제품을 출시**하고 사업화를 진행 중
- 그 외에도 **독일의 Gesimat**는 PVB 필름과 전해질을 **융합한 원천기술**을 토대로 전기변색 접합유리를 상용화하였으며, **미국의 E-Control**은 **젤 전해질 기반 건축용 전기변색유리 원천기술**로 상용화 제품을 출시하고 사업화 진행 중



[프랑스Saint gobaine사의 Sage Glass]



[일본 아사히글라스(AGC)사의 HALIO Glass]

[세계적 기업의 스마트창호 출시]

기존연구 동향	본 연구
전기변색 소자에 대한 원천기술 개발과 기능성 (응답속도, 변색효율, 유연성), 응용기술 (태양광 융합, 써모크로믹 융합)에 대한 연구가 치중되어 있으며, 건축물 적용을 위한 고 접합 강도 전해질에 대한 연구는 이뤄지지 않음	본 연구는 전기변색유리의 건축 적용을 위한 기본적인 구조성능인 접합강도를 향상 시킬 수 있는 고분자 화학수지(Resin)계 전기변색 접합유리 개발 로 차별성이 있고 중복성이 없음

연구책임자/ 주관기관	과제명(기간)	내용	본 연구와의 차이점
김남훈/ 조선대학교	스마트윈도우 적용을 위한 저전력 고속 고변색효율 칼코게나이드 전기변색 소자 개발 (2017.06 ~ 2020.05)	칼코게나이드 변색소자를 활용한 저전력, 응답속도, 변색효율 향상에 관한 연구	변색 소자에 관한 연구로 기능성 향상(응답속도, 변색효율) 향상에 중점을 둔 연구 로 건축 적용을 위한 기본적인 구조성능인 접합강도 향상을 위한 전해질 개발 과 차별됨
주용태 /(주)영도유리산업	젤 전해질 기반 차량용 전기변색 거울 개발 (2017.05~2018.04)	젤 전해질을 활용한 차량용 유리 거울 개발관련 연구	차량용 거울에 활용하고자하는 전기변색유리로 젤 전해질을 활용한 연구 로, 고강도 고분자 화학수지계 전해질을 개발 하는 본 개발과 차별됨
김혜경 /영남대학교	유연투명전극 기반 플렉시블 전기변색 스마트 윈도우 필름 (2015.11 ~ 2018.10)	투명전극이 코팅된 유연한 기판위에 변색 소자를 코팅한 플렉시블한 제품 개발 연구	플렉서블한 투명전극 기판 위에 전기변색층을 구성하여 기능성(유연성)을 향상시키고자 하는 연구 로, 구조적 성능(접합강도) 향상을 위한 본 연구 와는 차별됨
나윤채 /한국기술교육대학교	초고속 동작의 전기변색 소재 및 소자 개발 (2015.11 ~ 2018.10)	응답속도 향상을 위한 전기변색 소자 기초원천 기술 개발 연구	응답속도 향상을 위한 기능성(동작속도) 소자와 관련된 연구 로, 구조적 성능(접합강도) 향상을 위한 본 연구 와는 차별됨
최동수 /성균관대학교	전기변색-열변색 동시 구현이 가능한 에너지 절감형 하이브리드 스마트 윈도우 (2015.11~2018.10)	일렉트로크로믹 특성과 써모크로믹 특성을 결합한 스마트 윈도우 기술개발 연구	전기변색 소자인 일렉트로크로믹과 온도에 반응하는 써모크로믹을 융합한 응용기술에 해당하며 기능성에 중점을 둔 연구 로, 건축적 측면에서 기본적인 구조성능에 관련된 본 연구 와 차별됨
이선영 /한양대학교 에리카산학협력단	전기 변색이 되는 스마트 폴리머 태양전지 윈도우에 관한 연구 (2013.12~2016.11)	일렉트로크로믹과 태양전지의 특성을 결합한 스마트 창호 기술 개발 연구	일렉트로크로믹과 태양전지 특성을 결합한 응용기술로 투과율 조절과 전력생산이 가능한 기능성에 관한 연구 로, 구조적 성능 확보와 이온전도성을 동시에 갖는 본 연구 와 차별됨
최주환 /전자부품연구원	능동제어형 대면적 윈도우 모듈제작 (2009.10~2011.09)	젤 전해질 및 고체전해질 기반 300mmX300mm 대면적 전기변색유리 기술개발 연구	젤 전해질과 고체전해질을 연구하고, 대면적화(300X300)를 연구했던 연구로 전기변색 이론에 대한 실물 제품개발 초기 연구 로, 건축용 대면적 유리(1,500X1,800)를 제조 가능한 본 연구 와는 차별됨

본 연구의 차별성

기존 소재분야의 연구에서 전기변색유리 개발 시 주로 사용되는 젤 전해질이 이온전도성을 갖지만 건축 자재 활용 측면에서 접합강도가 낮아 박리, 대면적화 어려움, 낙하 위험성의 문제점을 해결하고자 안전접합유리에서 사용되는 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 전기변색 접합유리 개발하려는 건축적 접근을 한 것에 차별성이 있음

○ 기술개발 성숙도

- 본 연구에서 개발되는 “UV 경화형 고분자 화학수지(Resin) 전해질 기반 고내구성 건축용 전기변색 접합유리 원천기술”은 이론적 연구단계를 거쳐 기술적으로 개념이 정립된 단계로 TRL 2 단계에 해당 함
- 본 연구과제를 통해 본 기술의 실험 및 성능평가단계를 거쳐 원천 기술에 대한 성능을 증명하여 기술개발 성숙도를 TRL 4단계까지 완료할 계획이며, 연구기간 내 최종성과물을 실물 시작품으로 개발하여 상용화 제품 개발을 위한 기반을 구축할 예정임.

구분	연구 착수	연구 종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	☐	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	☒	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	☒	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	TRL 6 유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	TRL 9 현장적용/사업화 단계

- [TRL2→TRL3] 본 연구과제의 1차년도에서는 실험을 통한 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 최적 구성을 도출하고 전기변색층(WO3) 및 이온저장층(NiWO) 매칭을 통해 본 기술의 각 소재(전해질, 전기변색층, 이온저장층)를 최적화 접합 유리로 구현하여 TRL 3단계 수준까지 향상시킬 예정임.
- [TRL3→TRL4+α] 본 연구과제의 2차년도에서는 국내 접합유리 KS 기준, ISO 전기변색 접합유리에 대한 성능평가를 수행하고, 광학 및 열적 특성 DB를 구축하여 향후 상용화 제품 구현에 활용할 예정이며, 전기변색 접합유리 최적 제어 알고리즘을 도출하여 향후 IoT 디바이스와 연계가 가능한 DB를 제공하고, ISO 18543 기반 KS ISO 18543 표준안 및 품질 관리지침을 제안하여 기술개발의 성숙도를 TRL 4단계 수준까지 증대시킬 예정이며, 최종성과물을 실물 시작품으로 개발하여 TRL 5(시작품 단계) 진입을 위한 기반을 구축할 예정임.

차년도	현재	1차년도	2차년도
단계	TRL 2단계	TRL 3단계	TRL 4단계
기술수준	기술적 개념 및 아이디어 정립 단계	실험적 증명 단계	실험실 성능평가 단계
기술수준 향상전략	-	■ 고분자 화학수지계 전해질 최적 구성 ■ 전기변색층 및 이온저장층 매칭 ■ 응답속도, 이온전도도, 변색효율, 접합강도 최적화 접합 유리 개발	■ 전기변색 접합유리 전기 및 구조적 평가 ■ 광학 및 열적 특성 평가 DB 구축 ■ 최적 광학특성 제어 알고리즘 도출 ■ KS ISO 18543 표준안 및 품질관리지침

1-3. 연구개발의 중요성

국토교통 R&D 중장기 전략 기술 녹색건축 창호기술개발	본 연구과제는 국토교통 R&D 중장기전략으로 추진 중인 <u>녹색건축 창호기술 개발에 부합되며, 향후 4차 산업 기술인 사물인터넷(IoT) 및 인공지능(AI) 기술과 접목되어 스마트 창호로서 활용될 수 있음</u>
2025년 제로에너지 건축물 적용을 위한 원천기술 개발 시의성	국내 제로에너지 로드맵 상 <u>2025년까지 신축건축물에 대한 제로에너지 건물을 의무화</u> 할 시기가 도래함에 따라 능동적으로 일사조절이 가능하면서, 건축용으로 구조적 측면에서 안정적인 대면적 전기변색 접합유리를 <u>원천기술을 2019년 개발 완료하고 상용화제품을 개발할 수 있어 시의성이 매우 높음</u>
건축용 전기변색 접합유리 국산 원천기술 중요성	<u>건축용 안전유리 접합강도와 이온전도성을 갖는 전기변색유리 실용적 원천 기술로서 전기변색 소자 기술과 접목하여 세계적 수준의 상용화 제품 출시가 가능하며, 전기변색유리 시장이 커짐에 따라 국내외 시장 선점이 가능한 국산 원천기술 확보가 가능한 연구</u>

○ 국토교통 R&D 중장기 전략인 녹색건축 창호기술개발

- 본 연구과제는 건물에너지 저감 및 건축 환경(빛환경, 열환경) 개선을 위한 전기변색 접합유리 원천기술 개발로써 국토교통 R&D 중장기 전략으로 녹색건축 창호기술개발과 부합되며, 특히 고성능 창호로서 활용되고 있는 Low-e 유리를 대체할 차세대 첨단 유리로서 일사 차단과 유입이 조절되는 스마트 창호 기술임
- 본 연구과제는 최근 이슈화되고 신 성장 동력인 4차 산업 기술과 융합이 가능한 기술로서, 사물인터넷(IoT)과 융합하여 실내외 환경조건에 따라 능동적으로 외피의 광학특성을 조절 할 수 있고, 인공지능(AI) 디바이스와 결합되어 HVAC 시스템, 조명 장치와 연동한 지능형 제어가 가능하여 궁극적인 스마트 창호로 활용 될 수 있음

○ 2025년 제로에너지 건축물 적용을 위한 원천기술 개발 시의성

- 본 연구과제는 국내 제로에너지 로드맵에서 제시하고 있는 2025년 신축 건축물에 대한 제로에너지 건물 의무화 시기에 맞춰, 연구개발 완료 시기상 2019년 원천기술 개발 완료 후 2022년 상용화 제품 출시를 통해 제로에너지 건축물에 적용할 수 있는 핵심기술로 활용 될 수 있음
- 2025년 제로에너지 건축물 적용을 위해서는 전기변색 소자의 변색효율, 이온전도도, 응답속도 등 기능적인 부분이 중요하지만, 건축용으로 적용되기 위해서는 구조적으로 안전하고 내구 수명이 확보되는 전기변색유리의 개발이 시급하기에 본 원천기술 개발은 시의 적절함

○ 건축물 구조 성능 확보 가능 전기변색 접합유리 국산 원천기술 중요성

- 본 연구과제는 건축용 안전유리 접합강도와 이온전도성을 갖는 전기변색 접합유리의 실용적 원천 기술로서 전기변색 소자 기술과 접목하여 국내외 유일한 원천기술이 될 수 있고, 세계적으로 차별성을 갖는 전기변색 접합유리 상용화 기술이 될 수 있음
- 세계적으로 전기변색유리 시장 성장률이 높고, 시장 규모가 커져감에 따라 본 건축용 구조적 안정성을 갖는 전기변색 접합유리 원천기술은 향후 세계적 수준의 상용화 제품 출시가 가능하고, 국내외 시장 선점이 가능한 국산 원천기술 확보가 가능한 연구임

1-4. 선행 연구 내용 및 결과

- 본 연구진이 수행한 선행연구 과제는 소재적 관점에서 전기변색유리의 변색층, 이온저장층, 투명전도막, 젤(Gel) 전해질에 대한 이론을 토대로 건축용 대면적 실물 시작품을 실현하기 위한 기술개발 연구로서, 본 연구과제에서 목표로 하는 건축적 관점에서 상용화 시 해결되어야 할 구조적 성능을 향상시키는 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 고강도 전기변색 접합유리 개발과 차별성이 있음
- 본 연구진은 기존의 선행 연구를 통해 확보된 젤 전해질 기반 전기변색유리 제조 기술을 토대로 확보한 기술적 노하우와 연계하여 건축용으로 적합한 고강도 전기변색 접합유리 기술 개발을 통해 실제 건축 분야에서 상용화가 가능한 실용적인 원천기술을 개발할 계획임

○ 선행연구 과제

- 본 연구진이 수행한 선행연구 과제는 ICT 기반의 스마트창호 시스템 기술개발로서 건축용 대면적 전기변색유리 창호를 개발과 ICT 기술을 접목한 통합 상용화 제품을 개발하는 것이 목적이었음
- 기존 소재 연구 분야에서 사용하는 젤(Gel) 전해질을 기반한 전기변색유리를 개발하였으나, 개발 과정 중 건축적 입장에서 젤전해질의 불안한 구조적 특성을 발견하고 향 후 건축 유리화하기 위해서는 접합강도가 개선된 전해질 기반 전기변색 접합유리의 개발이 반드시 필요함을 인식

부처명	사업명	과제명	예산	비 고
산업통상자원부	에너지기술개발사업	ICT 기반 스마트창호 시스템 기술 개발	620 백만원	2017년 종료

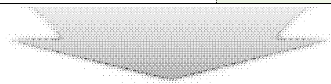
“ICT 기반 스마트창호 시스템 기술 개발” 선행연구 내용				
기술 분류	① 스퍼터링 장비	② 변색 소자		③ 전해질
선행연구내용	국내 최초 건축용 대면적(1,500×1,800) 스퍼터링(Sputtering) 방식 변색 소자 코팅 가능 장비 구축	투명전도막	ITO 타겟 구축 및 최적화	UV경화형 젤(Gel)타입 전해질(LiClO4) 개발
		변색층	WO3 타겟 구축 및 최적화	
		이온저장층	NIWO 타겟 구축 및 최적화	
주요 특징	100nm~500nm 두께로 투명전도막, 변색층, 이온저장층에 사용되는 변색 소자를 자유롭게 코팅이 가능하고, 대면적(1,500×1,800mm) 장비 구축으로 건축용으로 활용이 가능함			UV 경화가 가능하고 이온전도성을 갖는 젤 타입 전해질 개발
개선 요구사항	전기변색 유리 생산 속도 향상을 위한 타겟(Target) 수량 증대 필요			건축물 적용을 위한 대면적화 및 박리방지, 내구 수명 향상 향상이 가능한 <u>고 접합강도를 갖는 전해질 개발</u> <u>시급</u>
개선 방향	생산량 및 생산속도 향상을 위하여 기업 투자를 통한 타겟 수량 확보 가능			<u>전기변색 접합 유리용 전해질 (이온전도성 + 고 접합강도) 원천기술 개발이 요구됨</u>

이온전도성과 고 접합강도를 전해질 기반 전기변색 접합 유리 원천기술개발 후속 연구 과제 필요

○ 연구개발과제의 차별화 방안

- 본 연구과제에서는 **건축적 관점**에서 고분자 화학수지(Resin)계 전해질을 기반의 전기변색 접합유리 원천기술 개발로 **기존 선행연구의 전기변색유리 전해질은 이온전도특성만 갖지만 본 원천기술은 안전접합유리 품질기준(KS L 2004)를 만족하면서 이온전도성을 가짐**에 따라 차별성이 있음.
- 고분자 화학수지(Resin)계 전해질을 기반한 전기변색 접합유리를 구현하기 위해 **제조기술(코팅막, 접합유리)에 대한 최적화 연구**가 수행되어야하고, **광학 및 열적특성, 구조적성능, 품질기준안 제안 등 차별화된 성능 평가**가 수반되어야 함에 따라 기존 선행연구와 차별화 됨

연구개발의 차별성										
	선행연구 과제					제안된 연구				
연구의 관점	소재적 관점					건축적 관점				
전해질 소재 핵심 기술	전해질의 <u>이온전도도 확보</u>					전해질의 <u>이온전도도 + 접합강도 동시 확보</u>				
전해질 성능확보 주안점	응답 속도	변색 효율	이온 전도도	투과율	접합 강도	응답 속도	변색 효율	이온 전도도	투과율	접합 강도
	◎	◎	◎	◎		◎	◎	◎	◎	●
코팅막 제조기술	젤(Gel) 전해질에 최적화 된 투명전도막, 변색층, 이온저장층 코팅막 제조기술					고분자 화학수지(Resin)계 전해질에 최적화된 <u>코팅막 제조기술(타겟 소재 종류, 두께, 온도, 진공도) 연구 필요</u>				
접합유리 제조기술	젤 타입 소재 전해질의 점도에 최적화된 접합유리 제조기술					접합 유리내 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 주입을 위한 <u>소재 가교제 혼합 특성(점도, 유동성, 기포발생도) 연구 필요</u>				
광학 및 열적특성 평가연구	젤 전해질 타입 전기변색유리 광학 및 열적 특성 확보					고분자 화학수지(Resin)계 전해질 타입 전기변색 접합유리의 <u>광학 및 열적특성 분석 및 복층화 시 특성 평가 연구 필요</u>				
구조적 성능평가	건축용 접합유리(KS L 2004) 성능평가 미수행					건축용 <u>안전접합유리(KS L 2004) 품질기준 통과 목표</u>				
품질기준안	품질기준안 없음					<u>전기변색유리 품질기준(ISO 18543) 성능평가</u> , KS ISO 18543 품질 기준 제안				
연구의 궁극적 목표	전기변색 소재 <u>이론의 기술 현실화</u>					<u>건축용 유리 적용을 구조성능관련 필수 소재 원천기술개발</u>				



선행연구와 제안된 원천기술연구 융합을 통한 기대효과	선행 연구의 <u>국내최초 대면적 전기변색소자 스퍼터링 코팅기술</u> 과 제안된 연구의 건축적 관점에서의 <u>고강도 전기변색 접합유리 전해질 원천기술 개발의 융합</u> 을 통해 <u>상용화 제품의 조기출시</u> , <u>세계 최초 고강도 전기변색유리 상용화 제품 출시</u> 및 <u>세계시장 선점 가능</u>
-------------------------------------	---

제2장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구개발 목표

구분	내용	
최종 목표	본 연구는 <u>건축적 관점에서 전기변색 접합유리의 낮은 접합강도를 현장 적용 시 문제점으로</u> 바라보고, 이를 <u>해결하기 위해 안전접합유리 수준의 접합강도와 이온전도도를 갖는 고분자 화학수지(Resin)계 전해질을 활용한 전기변색 접합유리 원천기술을 개발하는 것</u> 에 최종 목적이 있음	
	TRL 2단계 → TRL 4단계 + α	
주요 연구 내용	[OT] 소재 기술	고분자 화학수지(Resin)계 고강도 전해질 원천기술 및 시작품 개발
		UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 원천기술 및 시작품 개발 ① 고분자 화학수지 전해질 조성 별 이온전도도 및 접합강도 특성 DB구축 ② 상용화 공정 조건을 고려한 고분자 화학수지 전해질 특성 개선 ③ 고분자 화학수지 전해질 제조 조건 확립 ④ 고분자 화학수지 전해질 시작품 제작 및 장기 신뢰성 평가
	[MT] 제조 기술	고강도 전기변색 접합유리 소재 코팅 및 접합 제조 원천기술 및 시작품 개발
		UV 경화형 고분자 화학수지계 전해질에 적합한 투명전도막, 변색층, 이온저장층 최적화 및 UV경화형 접합 공정 최적화를 통한 접합유리 시작품 개발 ① 변색층 소재 전해질 매칭을 위한 박막 조성 조건 구축 ② 전기변색 소재 증착 공정 기술 최적화를 통한 소재 안정화 ③ 전기변색 접합유리 제조공정(전해질 주입, UV 경화) 기술 최적화 ④ 전기변색 접합유리 시작품 제작 및 장기 신뢰성 평가 ⑤ 건축물 에너지 저감을 위한 최적 투과율 제어 알고리즘 개발
	[ET] 성능평가	고강도 전기변색 접합유리 성능 평가
		전기변색 접합유리의 소재, 접합유리에 대한 변색 소재 특성, 광학 및 열적 특성, 구조적 특성 성능평가를 통한 건축용 유리 적용 가능성 평가 ① 소재특성(이온전도도, 응답속도, 변색효율) 성능평가 ② 건축용 광학 및 열적특성(태양스펙트럼 투과율, 열관류율) 성능평가 ③ 건축용 안전접합유리 구조특성(KS L 2004) 성능평가 ④ 전기변색유리 품질기준(ISO 18543) 성능평가
최종성과물	[QS] 품질관리 지침 수립	전기변색 접합유리 품질관리기준 및 품질 가이드라인 개발
		전기변색 접합유리에 관한 ISO 18543 품질기준기반 한국형 KS ISO 18543 품질기준 제안 및 품질관리 가이드라인 구축
		[1] 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 원천기술 시작품 및 시험성적서 [2] 고강도 전기변색 접합유리 시작품 및 시험성적서 [4] 전기변색 접합유리 품질관리기준 (KS ISO 18543) 및 품질 가이드라인

OT : Original Technology of Electrolyte

MT : Manufacturing technology of Laminated Electrochromic Glass

ET : Evaluation Technology of Laminated Electrochromic Glass

QS : Quality Standard for Korean Electrochromic Device

2. 연차별 연구 수행 내용

■ 본 연구과제는 최종 목표인 “UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 고내구성 건축용 전기변색 접합유리 원천기술 개발”을 달성하기 위해 하기와 같이 연차별 연구개발 목표를 “1차년도 : 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 전기변색 접합유리 코팅 및 접합 기술 개발”, “2차년도 : 고분자 화학수지계 전해질 기반 전기변색 접합유리 기술 시작품 개발 및 성능평가”로 수립하고 최종성과물인 “[1] 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 원천기술(시작품, 국내외특허)”, “[2] 고강도 전기변색 접합유리 시작품”, “[3] 고강도 전기변색 접합유리 시험성적서”, “[4] 전기변색 접합유리 품질관리기준(KS ISO 18543) 및 품질 가이드라인”에 따라 주요 연구내용을 구성함

구 분	1차년도	2차년도
연구목표	고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 전기변색 접합유리 원천기술 개발	고분자 화학수지계 전해질 기반 전기변색 접합유리 기술 시작품 개발 및 성능평가
	TBL 2단계 → TBL 3단계	TBL 3단계 → TBL 4단계+α
주관연구기관 (한양대)	OT 고분자 화학수지(Resin)계 고강도 전해질 원천기술 및 시작품 개발	
전해질 소재기술개발	① 전해질 조성조건 및 상용화 선행연구 사례 조사 ② 고분자 화학수지 전해질 조성 별 이온전도도 및 접합강도 특성 DB구축 ③ 상용화 공정 조건을 고려한 고분자 화학수지 전해질 특성 개선	① 고분자 화학수지 전해질 제조 조건 확립 ② 고분자 화학수지 전해질 시작품 제작 및 가혹조건 신뢰성 평가
주관연구기관 (한양대) + 위탁연구기관 (전자부품연 구원)	MT 고강도 전기변색 접합유리 소재 코팅 및 접합 제조 원천기술 및 시작품 개발	
소재 코팅 및 접합 제조기술개발	① 변색층 소재의 전해질 매칭을 위한 박막 조성 조건 구축 ② 전기변색 소재 증착 공정 기술 최적화를 통한 소재 특성 확보	① 전기변색 접합유리 제조공정(전해질 주입, UV 경화) 기술 최적화 ② 전기변색 접합유리 시작품 제작 (디바이스 크기 150X150mm) 및 가혹조건 신뢰성 평가
공동연구기관 (한국건설생 활환경시험 연구원)	ET 고강도 전기변색 접합유리 성능 평가	
전기변색 접합유리 성능평가, 품질관리기준 가이드라인 개발	① 건축용 안전접합유리(KS L 2004) 및 건축용 광학 및 열적특성(KS L 2514, 2525, 2003) 성능평가 방법 분석 ② 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 및 변색층 소재특성(이온전도도, 응답속도, 변색효율) 성능평가	① 시작품 전해질 및 변색층 소재특성 (이온전도도, 응답속도, 변색효율) 성능평가 ② 건축용 광학 및 열적특성(태양스펙트럼 투과율, 열관류율) 성능평가 ② 건축용 안전접합유리 구조특성(KS L 2004) 성능평가 ② 전기변색유리 품질기준(ISO 18543) 성능평가
	QS 전기변색 접합유리 품질관리기준 및 품질 가이드라인 개발	
	① 전기변색유리 품질기준(ISO 18543) 평가방법론 분석	① 전기변색 접합유리에 관한 ISO 18543 품질기준기반 한국형 KS ISO 18543 품질기준 제안 및 품질관리 가이드라인 구축

1. [OT] 고강도 전기변색 접합유리 전해질 원천기술 및 시작품개발

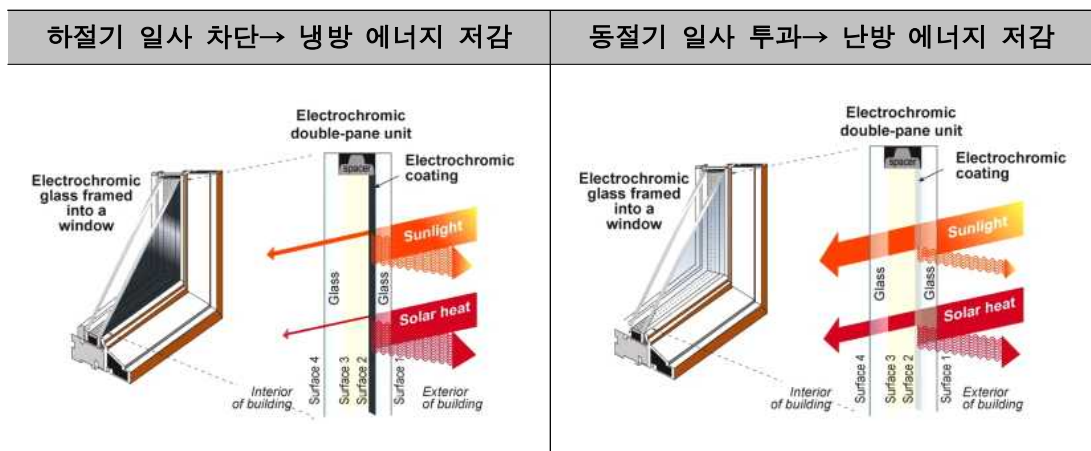
① 전해질 조성 조건 및 상용화 선행연구 사례 조사

- ✓ 전기변색유리의 개요 및 장단점 조사
- ✓ 상용화 및 연구되고 있는 전기변색유리의 전해질 조성에 대한 선행연구 사례 조사
- ✓ 전기변색유리 구성에 대한 선행연구 사례 조사

(1) 전기변색유리(Electrochromic Glass) 의 기술 개요 및 기능

- 태양광 투과율을 자유롭게 조절할 수 있는 물질을 유리에 적용하여 건축물의 냉난방 에너지 절감 시킬 수 있는 스마트 원도의 한 종류로 약 0.5Wh/m^2 의 에너지를 가하여 태양광의 투과율을 조절할 수 있는 유리
- 여름철에는 반투명 모드(Colored Mode)로 태양광을 차단하여 냉방에너지 저감
- 동절기에는 투명 모드(Bleached Mode)로 태양광을 획득하여 난방에너지 저감
- 건물 외부 환경에 따라 사용자가 창의 투과도 조절을 통한 조명에너지 저감 가능
- NREL(National Renewable Energy Lab, 2010)의 실증 건물 실험 결과에 따르면 냉방 전력 소비량 최대 20% 저감, 전력 피크부하 26% 저감, 조명에너지 최대 50% 저감 가능한 것으로 분석

표 1-1. 전기변색유리의 특성

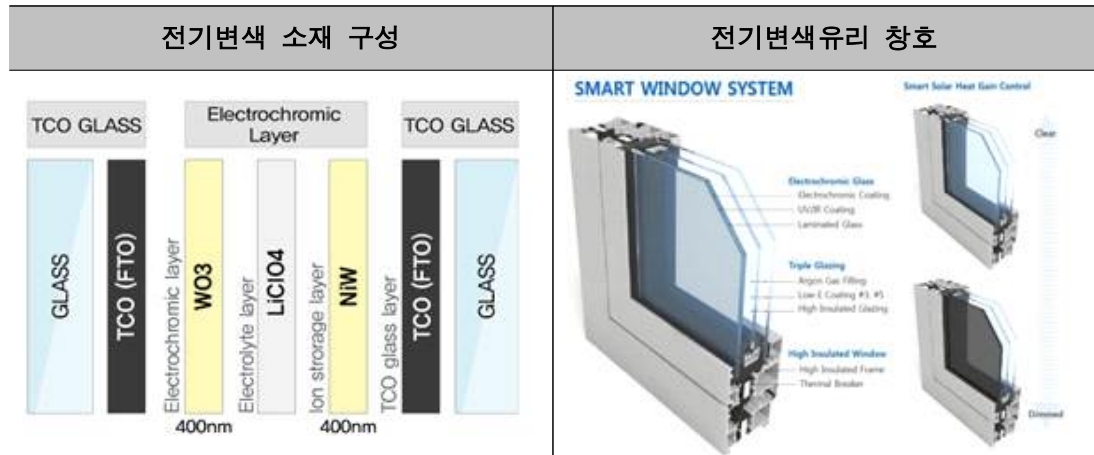


(2) 전기변색 소재의 구성

- 리튬 이온(Li+)의 이동에 의해 전기변색층의 색이 변하는 현상을 이용
- 전기변색유리 소재는 크게 4가지 구성으로 구분됨
- 전기변색소재(Electrochromic Layer)로 주로 텅스텐 옥사이드(WO₃)가 사용되며, 이온저장층(Ion Storage Layer)로 NiX 계열이 사용됨.
- 전해질은 액상을 주입하여 경화시키는 젤전해질과 증착하는 방식인 고체전해질이 사용

됨.

- 유리에 전기 전도가 가능하도록 하는 투명전도막(TCO, Transparent Conductive Object)로 ITO, FTO가 주로 사용되지만, 다양한 소재가 활용될 수 있음.



(3) 전기변색 소재의 주요 재료

- 전기변색유리는 전해질을 중심으로 변색층과 이온저장층의 산화, 환원 반응에 의해 변색이 이뤄짐.
- 변색층 소재로는 주로 WO3가 사용되며, 그 외에도 여러 가지 소재를 이용해 전기변색이 가능하고, 소재의 종류에 따라 색상을 다양하게 구현이 가능함.
- 이온저장층도 NiX 계열이 가장 많이 사용되지만, 전기변색이 가능한 여러 소재가 있으며, 다양한 색상 구현이 가능함.
- 소재 선택 시 색상 구현 뿐만 아니라 변색 특성 및 광학적 성능을 통합 고려하여 선택이 필요함.

환원착색(Cathode)		산화착색(Anode)	
WO3	투명 ↔ 청색	Ir(OH)x	투명 ↔ 흑색
MoO3	황색 ↔ 보라색, 청색	Ni(OH)2	투명 ↔ 갈색
TiO2	투명 ↔ 청색	Rh2O3	황색 ↔ 녹색, 갈색, 보라색
Nb2O5	투명 ↔ 청색	CoOx	적색 ↔ 보라색, 회색, 흑색
V2O5	황색 ↔ 청색, 녹색, 흑색		
Polyaniline	다양한 색		
Polythiophene	다양한 색		
반응예	$WO_3 + xH^+ + xe^- \leftrightarrow H_xWO_3$	반응예	$Ni(OH)_2 \leftrightarrow NOOH + xH^+ + xe^-$

(4) 전기변색유리의 기술개발 동향

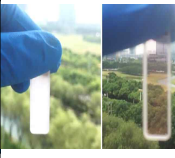
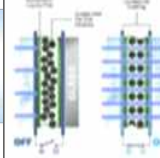
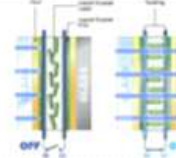
- 국내의 경우 알루이엔씨가 2017년 9월 상용화 기술 및 시제품 출시
- 이외에도 오리온전자, 성문전자 등 국산화 기술개발을 위한 연구개발을 진행 중에 있음
- 국내 기업이 보유하고 있는 세부 기술은 밝혀지지 않음
- 국외의 경우 미국의 SAGE Electrochromic Inc.가 가장 활발하게 제품개발을 진행 중에 있으며, 현재 프랑스의 Saint Gobain 사가 인수하여, 사업화를 진행 중에 있음
- 독일의 Gesimat GmbH 사는 PVB 타입 전해질을 개발하여 건축용 유리를 상용화 시켰으며, 현재 본 연구진이 개발코자 하는 전해질 소재와 가장 유사

업체명	크기	투과율	열관류율	일사획득계수	Cycle 특성	비고
-----	----	-----	------	--------	----------	----

		태양	가시 광선		(SHGC)		
SAGE (USA)	1080×1500	1.5~40	3.5~62	1.65	0.09~0.48	100,00	- WO3 based - 동작전압 : 5 V (DC) - 응답속도 : 3~5 min.
Eicibtrik-Glas s (Germany)	1200×2200	15~50	-	1.1	0.12~0.36	10년 보증	- WO3 based - 동작전압 : 5 V(DC) - 동작전력 : 0.5Wh/m²
		14~45	-	0.5	0.10~0.30	-	- WO3 -EC based - 동작전압 : 2.2V(DC) - 동작전력 : 0.04Wh/m²
Gesimat (Germany)	800×1200	6~52	8~75	-	-	10년 보증	- 동작전압 : 1.5 V(DC) - 동작전력 : 0.1Wh/m² - 자동차용 스마트윈도우
Saint Gobain (France)	-	2~20	4~40	-	-	-	자동차용 스마트윈도우
ChromoGeni cs (Sweden)	Unrevealed						WO3 and NiO based
IP Glass (Natherlands)							
GEMTEX (USA)							자동차용 스마트윈도우
AJJER LLC (USA)							- 자동차용 거울 - 건물용 창호

(5) 건축용 스마트 유리 기술개발 동향

- 전 세계적으로 건축분야의 에너지 저감을 위한 연구와 기술개발이 활발히 이뤄지고 있음.
- 건물 에너지와 관련된 규제도 점차 강화되고 있고, 특히 건물 외피는 냉방 및 난방, 조명에너지와 직접적인 관련이 있기 때문에 단열, 기밀, 일사 조절 등 건물 외피와 관련된 다양한 분야에서 에너지 저감 기술을 연구 및 개발되어 왔음
- 최근에는 유리 자체로 투과율 제어가 가능한 일사 조절 스마트 유리에 대한 기술개발이 활발히 진행 중에 있음.
- 스마트유리의 종류로는 Electrochromic(EC), Thermochromic(TC), Photochromic(PC), Polymer dispersed liquid crystal(PDLC) 등 다양한 제품이 개발되고 있음.
- 이러한 스마트 유리의 특징은 현재 건물에서 주로 사용되고 있는 블라인드, 롤셰이드와 같은 차양 장치 없이 유리 자체로 투과율을 제어 할 수 있고, 전기적 신호에 따라 쉽게 투과율을 제어 할 수 있는 장점.
- 현재 개발 중인 스마트유리들은 각각의 장단점을 가지고 있는데, Electrochromic 유리는 착색과 탈색에 따른 태양스펙트럼 전체의 투과율의 범위가 크고, 5V 이하의 낮은 전압에서 구동이 가능하며, 투과율 변화 시만 전기를 인가하면 원하는 투과율에 도달했을 때 전기를 인가하지 않아도 상태를 유지하는 장점.
- Thermochromic 유리는 주변의 온도에 따라 투과율이 변화되는 특징을 가지고 있고, Photochromic 유리는 주변의 밝기에 따라 투과율이 변화되는 특징을 가지고 있음.
- Thermochromic 과 Photochromic 의 장점은 별도의 전원 장치 필요 없이 투과율을 조절할 수 있는 장점이 있는 반면에 사용자가 원하지 않는 경우에도 스스로 투과율이 제어 되는 단점이 있음.
- PDLC는 1초 이내의 빠른 응답속도를 가지고 있고 Electrochromic 와 같이 태양스펙트럼 전체의 투과율 범위가 크지 않지만 가시적으로 투명과 불투명 상태를 구현할 수 있어, 프라이버시 확보 측면에서 좋은 기술.
- 또한 PDLC는 Electrochromic 와 달리 투명한 상태를 유지하기 위해서는 지속적으로 전기를 인가해야 하는 단점.

구분	Passive		Active		
	PC (Photochromic)	TC (Thermochromic)	EC (Electrochromic)	SPD (Suspended Particle Display)	PDLC (Polymer Dispersed Liquid Crystal)
제품					
원리	AgCL, 유기물(광여기)	상전이	전하이동	분극분자 배열	분극분자 배열
구동전압	×	×	저 전류 DC (1~5V)	고 전압 AC (30~100V)	고 전압 AC (30~100V)
태양광 평균 투과율	60~80	10~40	5~80	5~70	40~80
에너지 효율	△	◎	●	○	△
크기	●	◎	△	○	○
제조비용	●	●	△	○	○
내구성	○	○	●	○	△
비고	에너지 효율 향상 기능 약함	수동 변색 투과율 조절 불가	- 저 에너지 소비 가능 (메모리효과) - 변색 농도 조절 가능	변색을 위해 계속적 인가 전압 필요	- Haze 특성 단점 - 농도조절 불가 - 낮은 투과도

※ ● : 우수, ◎ : 양호, ○ : 보통, △ : 미약

- 이러한 스마트유리 가운데 투과율 조절의 범위가 크고, 상태 유지를 위해 지속적으로 전기를 인가하지 않아도 되며, 사용자가 원하는 투과율로 조절이 가능한 전기변색유리가 차세대 건축용 일사조절 유리로서 기대가 되고 있어 활발한 연구가 진행되고 있고, 시제품들이 출시되고 있는 상황.
- 전기변색유리와 관련된 연구를 살펴보면, 오피스 건물 전기변색유리 적용에 따른 건물에너지 저감 효과와 관련된 연구에 따르면 전기변색유리 적용 및 제어에 따라 20%의 에너지 절감효과가 있음을 밝히고 있고, 적절한 전기변색유리 제어를 통해 기존 건축용 유리보다 에너지 저감 효과가 크며 기후 지역에 따라 차이는 있지만 지중해 기후에서는 54% 이상 에너지를 절감시킬 수 있는 것으로 연구되었음.
- 전기변색유리 적용에 따라 열 및 시각적 쾌적성에 연구도 진행 중에 있으며, 전기변색유리의 광학 특성 분석을 통해 건물 용도별, 기후조건별 최적 투과율 도출에 대한 연구와 시뮬레이션을 통한 건물에너지, 빛환경에 대한 분석 연구도 진행 중에 있음.
- 또한 최근에는 열적인 역할만 하고 시각적으로 보이지 않는 근적외선 영역만 선택적으로 제어할 수 있는 전기변색유리에 대한 연구도 진행중에 있음.
- Photovoltaic과 연계한 전기변색유리도 개발되고 있는데, photovoltaic에서 생산되어 battery에 충전된 전력으로 변색을 하기 때문에 별도의 전력공급이 필요 없어 운영에너지 소비가 없는 기술.
- 또한 사물인터넷(IoT)와 연계하여 Wi-Fi를 통한 스마트폰으로 전기변색유리를 제어 할 수 있어 기존의 Shading Devices에 비해 편리한 기능을 제공해 주고 있음.
- 응답속도가 느린 점은 전기변색유리의 가장 큰 단점인데, 이와 관련하여 최근 전기변색유리의 코팅면에 눈에 잘 보이지 않는 전극을 얇은 금속을 mesh 형태로 적용하여 전기가 빠르게 흘러 응답속도를 향상시킬 수 있는 제품도 개발되어 출시되고 있음.
- 전기변색유리는 전기적 신호에 의해 투과율을 쉽게 제어할 수 있는 일사조절장치로 활용될 수 있음.

(5) 전기변색유리 상용화 기술과 개발기술 비교 분석

- 이러한 스마트유리 가운데 투과율 조절의 범위가 크고, 상태 유지를 위해 지속적으로 전기를 인가하지 않아도 되며, 사용자가 원하는 투과율로 조절이 가능한 전기변색유리가 차세대 건축용 일사조절 유리로서 기대가 되고 있어 활발한 연구가 진행되고 있고, 시제품들이 출시되고 있는 상황.
- 전기변색유리와 관련된 연구를 살펴보면, 오피스 건물 전기변색유리 적용에 따른 건물에너지 저감 효과와 관련된 연구에 따르면 전기변색유리 적용 및 제어에 따라 20%의 에너지 절감효과가 있음을 밝히고 있고, 적절한 전기변색유리 제어를 통해 기존 건축용 유리보다 에너지 저감 효과가 크며 기후 지역에 따라 차이는 있지만 지중해 기후에서는 54% 이상 에너지를 절감시킬 수 있는 것으로 연구되었음.
- 전기변색유리 적용에 따라 열 및 시각적 쾌적성에 연구도 진행 중에 있으며, 전기변색유리의 광학 특성 분석을 통해 건물 용도별, 기후조건별 최적 투과율 도출에 대한 연구와 시뮬레이션을 통한 건물에너지, 빛환경에 대한 분석 연구도 진행 중에 있음.

구분	SAGE	EControl	Gesimat	View	본 기술
제품 구조					
작동전압(V)	<5	<5	<2.2	<5	<2
사용연한	20 yrs (100,000 cycle)	20 yrs (100,000 cycle)	15 yrs (100,000 cycle)	10 yrs (100,000 cycle)	20yrs (100,000 cycle)
TCO (면저항/투과도)	ITO (10Ω/sq./85%)	ITO (10Ω/sq./85%)	FTO (15Ω/sq./82%)	ITO (10Ω/sq./85%)	ITO (12Ω/sq./85%)
변색물질	WO3/LiNiZrVOX	WO3/NiO	Zn doped TiO2/NiO	WO3/NiO	WO3/NiO
전해질 타입	젤타입 전해질 (10 ⁻⁴ S/cm)	젤타입 전해질 (10 ⁻⁴ S/cm)	젤타입 전해질(PVB) (5×10 ⁻⁶ ~2×10 ⁻⁵ S/cm)	젤 전해질 (10 ⁻⁸ ~10 ⁻³ S/cm)	UV 경화형 고강도 젤 전해질 (3×10 ⁻⁶ S/cm)
탈/착색률	60/1	50/10	77/8	58/4	65/20
제조 크기 (m)	1.52 x 3.05	1.35 x 3.30	1.2 x 0.8	1.52 x 3.05	0.15×0.15
제조 가격 (Dollar/m ²)	~1,200	~1,000	~1,000	~1,200	~500

(6) 전해질 조성 조건 사례 조사

- 초기에 프로토 타입의 전기변색 소자가 산 전해질을 이용해 사용되어져 옴.
- 이 타입은 산 전해질에서 텅스텐 산화물과 같은 전이금속 산화물의 용해 때문에 장기 성능에 큰 문제점을 가지고 있었음.
- 이것을 극복하기 위해 많은 연구자들은 LiClO_4 +Propylene carbonate와 같은 비 수용액성 전해질을 사용하였음.
- 그러나 H^+ 이온과 비교했을 때, Li^+ 이온의 낮은 Mobility 때문에 전기변색 소자의 낮은 반응 속도를 나타냄.
- 이러한 이유로, 액체 전해질에 의해 야기되어진 문제점들을 해결하기 위해 전 고상 전기변색 소자가 등장하게 되었음.
- 그러나 무기물 전해질은 낮은 이온 전도도($10^{-9} \sim 10^{-5} \text{S/cm}$) 때문에 전기변색 전해질의 요구사항을 완전히 충족시키지 못함.
- 최근에 액상 전해질과 무기물 전해질의 단점을 극복할 수 있는 고체 고분자 전해질을 사용하기 시작하였고, 이 고체 고분자 전해질은 Plasticity, Elasticity, 낮은 무게와 좋은 이온전도도 ($10^{-3} \sim 10^{-1} \text{S/cm}$)라는 특징을 보임.
- 이러한 고체 고분자 전해질을 이용한 연구가 지속적으로 수행되어왔으며, 아래 표에 정리되어 있음.

No	Lamiated EC devices	
	Proton-based structure	Li ion-based structure
1	G/ITO/WO ₃ :Mo/PPSA-H ⁺ /ITO/G	G/ITO/WO ₃ /PMMA-Li ⁺ /V ₂ O ₅ /ITO/G
2	G/ITO/WO ₃ /PAMPS/PB/ITO/G	G/ITO/WO ₃ /HEMA-NPG-Li ⁺ /PB/ITO/G
3	G/ITO/PVA/PANI/ITO/G	G/ITO/WO ₃ /PMMA-PC-Li ⁺ /NiO/ITO/G
4	P/ITO/WO ₃ /BPEI-H ⁺ /FI/ITO/P	G/ITO/WO ₃ /PVB-Li ⁺ /TiO ₂ -CeO ₂ /ITO/G
5	G/ITO/WO ₃ -PMMA/BPEI-H ⁺ /PANI/Au/P	G/ITO/V ₂ O ₅ /Silane-Li ⁺ /TiO ₂ -CeO ₂ /ITO/G
6	G/ITO/WO ₃ (EC)/ZrP-electrolyte/WO ₃ (PR)/NiO x H _y /ITO/G	G/ITO/WO ₃ /PEO-Li ⁺ /PODS/ITO/G
7	-	P/ITO/WO ₃ /PMMA-PC-Li ⁺ /V ₂ O ₅ /ITO/P
8	-	G/ITO/dye-TiO ₂ /electrolyte/WO ₃ /ITO/G

② 고분자 화학수지 전해질 조성별 이온전도도 및 접합강도 특성 DB 구축

- ✓ 고강도 전기변색유리용 전해질 개발
- ✓ UV 경화 타입 전해질 개발
- ✓ WO₃ 및 NiW 변색층 레이어에 변색이 가능한 성능 만족
- ✓ 기존 UV 경화형 젤 전해질 대비 접합성능이 우수한 전해질 개발
- ✓ 1차년도 전해질 대비 Cycle 특성, 이온전도도, 변색효율 향상 조건 개발

(1) UV 경화형 고강도 전해질 기술개발 개요

■ 기존 젤(Gel) 전해질의 문제점

- 기존의 젤 전해질의 경우 이온전도성 특성을 보유하고 있으나 접합강도가 낮아 작은 충격에 민감.
- 풍하중에 의해 유리 처짐 발생 시 변색층과 전해질 층의 박리로 인한 이온전도성 상실하여 전기변색의 특성을 잃음.
- 건축용 유리로 사용하기 위해서는 대면적화 요구되지만, 대면적 접합유리 제작 시 유리 중심부위 들뜸 현상으로 인한 이온전도 특성을 보장할 수 없어 품질에 문제가 됨.
- 전기변색 접합유리는 복층화 후 가장 실외 측에 설치됨에 따라 낙하에 의한 안전성을 보장해야함.
- 하지만 기존 젤 전해질의 경우 낮은 접합강도로 인한 유리 낙하로 안전사고 가능성 높음

■ 구조적 안전성 확보를 위한 "UV 경화형 고강도 전해질" 기술개발 개요

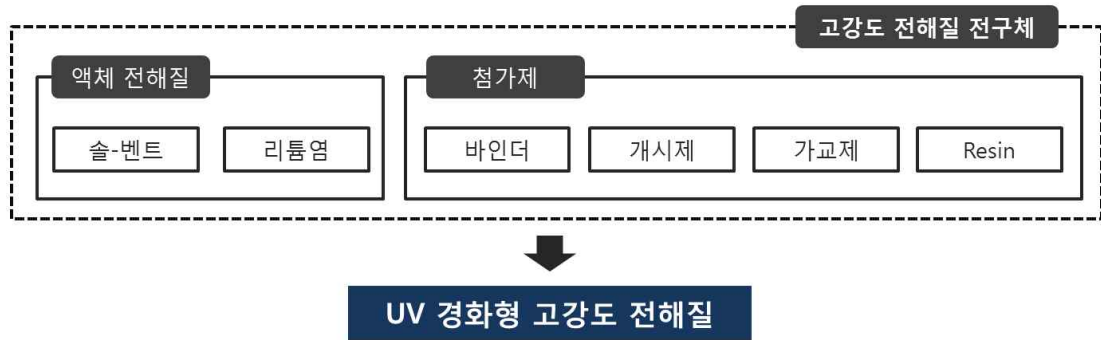
- 전기변색유리의 이온 전해질 역할을 하는 리튬염(LiClO₄)와 건축용 안전접합유리 제작 시 사용되는 고분자 화학수지(Resin)을 혼합한 전해질을 개발하여 박리에 의한 이온전도성 상실 문제를 해결할 수 있음
- UV 경화형 접합공정으로 열경화 방식에 비해 장비에서 소비되는 에너지 사용을 최소화할 수 있어 공정 단가 절감 가능
- 고 접합 강도 특성으로 건축용 대면적 전기변색유리를 생산이 가능해, 상용화 제품의 건축 시장 진입 가능성을 높일 수 있음
- Resin을 활용한 전기변색 접합유리는 안전접합유리의 접합 강도를 갖기 때문에 고층 사무소 건물 설치 후 낙하에 의한 안전사고를 예방 할 수 있음

분류	기존 기술과의 차별성		
	기존 젤(Gel)전해질		UV 경화형 고강도 전해질
주요 관점	소재적 관점에서 접근		건축적 관점에서 접근
개발 시 중점 고려 사항	이온전도도, 변색효율에 초점		구조적 안전성에 초점
본 전해질 기술개발의 주요 목적	전기변색유리 상용화 제품 개발 시 변색 효율과 이온전도도도 중요하지만, 실제 현장에서 적용 하기 위해서는 접합강도를 향상시켜 구조적으로 안전하고 내구성을 갖는 전해질 개발 목적		
이온전도도(S/cm)	젤전해질	10 ⁴ (독일/EControlGlas)	>3×10 ⁻⁶
	고체전해질	10 ⁶ (미국/Sage)	
변색효율(cm ² /C)	30(미국/Sage)		>25
탈색 투과율(%)	>70(미국/Sage)		>65
착색 투과율(%)	<15(미국/Sage)		<20
박리강도	0.178Mpa		0.364Mpa

(2) UV 경화형 고강도 고분자 전해질 Formulation 개발

■ 1차년도 개발된 고강도 고분자 전해질 Formulation 개요

- 전기변색유리의 전해질은 이온 전도성 확보와 변색이 가능하며, 구조적 강도를 확보하기 위한 소재, 공정 개발이 필수적임
- 이온전도 특성을 담당하는 액체 전해질 조성(유기용매 + 리튬염) 개발
- 구조적 신뢰성을 확보할 수 있도록 가교제 및 개시제 개발이 동시에 이뤄져야하고, 소량의 첨가제 도입을 통한 성능 및 물성 조정이 필수적임



■ 1차년도 최종 고강도 고분자 전해질 Formulation

- 최적의 유기용매 조성을 위해 PC 기반의 전해질 시스템을 선정함
- 최종적으로 Base 전해액으로 “LiClO₄ in PC”로 선정하였음
- Base 전해액으로 “1M LiClO₄ in PC”로 선정하였음
- 광개시제는 2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPAP)을 사용함
- 본 연구에 있어서는 고분자로는 가교율과 접착성능을 높이기 위하여 폴리우레탄아크릴레이트를 합성하여 사용하였음
- 최종 최적화 Formulation은 6(LiClO₄) : 4 (polymer)의 비율로 제작함.
- 아래 그림은 최종 개발된 고강도 고분자 전해질을 나타냄



[1차년도 개발 고분자 전해질]

■ 2차년도 최종 고강도 고분자 전해질 Formulation 변경

1) 1차년도 전해질 해결 과제

- 1차년도 개발된 전기변색유리의 경우 Cycle 특성에 있어서 문제가 발생
- 1차년도 전해질 대비 이온전도도 및 변색효율 향상 필요

2) 2차년도 전해질 Formulation

- 유기용매 조성을 위해 PC 기반의 전해질 시스템을 선정함
- Base 전해액으로 “LiClO₄ in PC”로 선정하였음

- 광개시제는 2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPAP)을 사용함
- 본 연구에 있어서는 고분자로는 가교율과 접착성능을 높이기 위하여 폴리우레탄아크릴레이트를 합성하여 사용하였음
- 최종 최적화 Formulation은 6(LiClO₄) : 4 (polymer)의 비율로 제작함
- 추가적으로 이온전도도 개선 및 사이클링 특성 확보를 위해 이온성 액체 적용
- 이온성 액체의 종류에 따라 3종의 전해질 개발



[2차년도 개발된 고분자 전해질 3종]

분류	고분자 전해질 특성			
	1차년도 전해질	2차년도 전해질		
		H-EC	M-EC	L-EC
Solvent	Polycarbonate	Polycarbonate	Polycarbonate	Polycarbonate
Lithium Salt	LiClO ₄	Li-TFSI	Li-TFSI	Li-TFSI
광개시제	2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPAP)	2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPAP)	2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPAP)	2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPAP)
가교제	폴리우레탄아크릴레이트	폴리우레탄아크릴레이트	폴리우레탄아크릴레이트	폴리우레탄아크릴레이트
Formulation	6(LiClO ₄) : 4(Polymer)	6(Li-TFSI) : 4(Polymer)	6(Li-TFSI) : 4(Polymer)	6(Li-TFSI) : 4(Polymer)
이온성액체	-	EMIM-TFSI	BMIM-TFSI	1-Butyl-2,3-dimethylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)amide

[연구기간 중 개발된 고분자 전해질 특성]

(3) 고강도 전기변색 접합유리의 박리강도 및 이온전도도 DB 구축

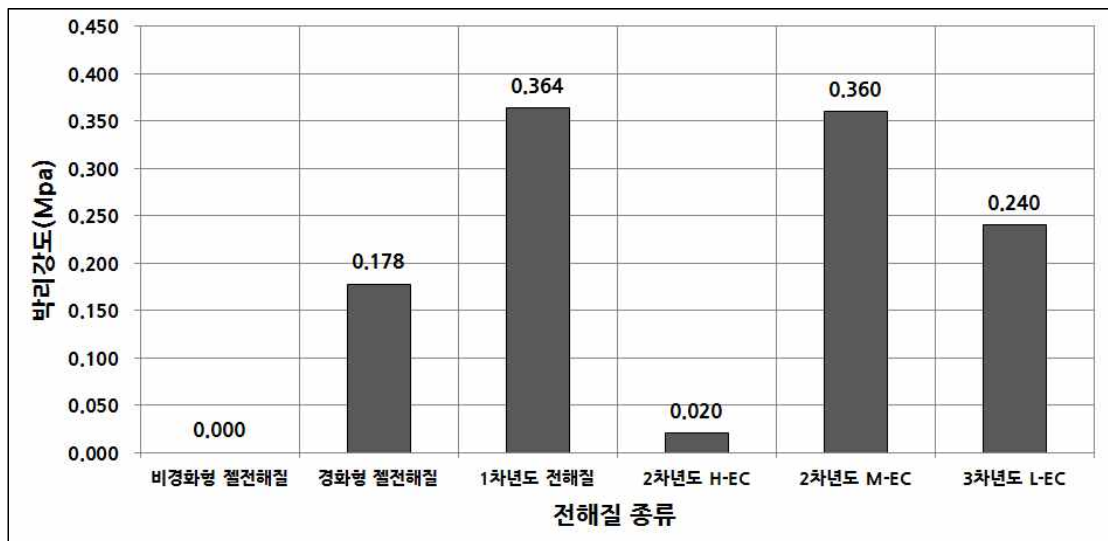
■ 고강도 전해질 박리강도 성능 향상

- 전기변색유리의 박리강도에 관한 기준은 국내에 없는 상황
- 따라서 본 연구에서는 KS F 4042 “콘크리트 구조물 보TN용 폴리머 시멘트 모르타르”

표준을 인용하여 부착강도 시험을 통해 박리강도를 평가함

- 비경화형 젤 전해질의 경우 완전한 젤 상태임에 따라 박리강도 측정이 불가 하였음
- 박리강도 시험 결과, 기존 경화형 젤 전해질의 경우 0.178 Mpa의 박리강도를 나타내었고, 1차년도 전해질의 박리강도는 0.364 Mpa를 나타냄
- 2차년도 이온성액체를 포함하는 젤전해질은 H-EC가 0.020Mpa, M-EC가 0.360Mpa, L-EC가 0.240Mpa로 나타났음
- 박리강도는 1차년도 전해질과 2차년도 M-EC 전해질이 우수한 성능을 나타냄을 확인
- 여기서 박리강도 성능 시험 시 시험체의 크기는 150mm×150mm 임

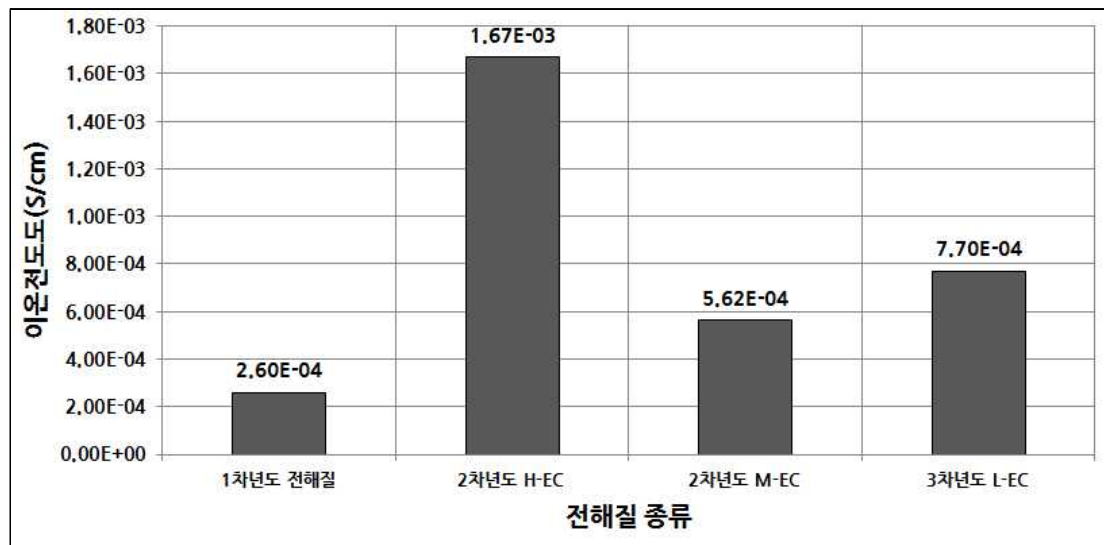
구분	전해질 종류별 접합강도 성능 평가 결과					
	비경화형 젤 전해질	경화형 젤 전해질	1차년도 전해질	2차년도 전해질		
				H-EC	M-EC	L-EC
박리강도	측정불가	0.178Mpa	0.364 Mpa	0.020 Mpa	0.360 Mpa	0.240 Mpa



■ 고강도 고분자 전해질 이온전도도 특성 확인

- 고강도 고분자 전해질의 이온전도 특성을 확인하기 위해 전기화학 측정장비 (Solartron SI 1287, SI 1255)를 통해 이온전도도를 시험 평가함
- 1차년도 개발 전해질의 경우 2개의 시료를 제작해 분석한 결과, 첫 번째 시료는 $2.73 \times 10^{-4} \text{S/cm}$, 두 번째 시료는 $2.41 \times 10^{-4} \text{S/cm}$ 로 분석되었고, 평균 $2.57 \times 10^{-4} \text{S/cm}$ 의 이온전도도 특성 결과를 확인함
- 2차년도 개발 전해질도 2개의 시료를 제작해 분석하였음
- H-EC의 경우 $1.67 \times 10^{-3} \text{S/cm}$ 로 나타나 이온전도도가 상당히 높아짐을 확인함
- M-EC의 경우 $5.62 \times 10^{-4} \text{S/cm}$ 로 1차년도 전해질에 비해 이온전도도가 향상됨을 확인함
- L-EC의 경우 $1.77 \times 10^{-4} \text{S/cm}$ 으로 1차년도 전해질에 비해 이온전도도가 향상됨을 확인함
- 따라서 이온성액체를 Formulation에 추가함으로써 이온전도도 향상효과가 있는 것으로 나타남

분류		Thickne ss (mm)	Diamet er (mm)	Area (cm ²)	Resistanc e (Ohm)	Conductivit y (S/cm)	Average Conductivit y (S/cm)
1차년도 전해질		2.36	16	2.011	430.7	2.73×10^{-4}	2.60×10^{-4}
		2.09	16	2.011	431.1	2.41×10^{-4}	
2차년도 전해질	H-EC	2.45	16	2.011	83.2	1.47×10^{-3}	1.67×10^{-3}
		2.54	16	2.011	92.4	1.37×10^{-3}	
	M-EC	2.07	16	2.011	186.4	5.51×10^{-4}	5.62×10^{-4}
		3.10	16	2.011	269.7	5.72×10^{-4}	
	L-EC	2.64	16	2.011	710.0	1.85×10^{-4}	1.77×10^{-4}
		2.37	16	2.011	701.1	1.68×10^{-4}	



2. [MT] 고강도 전기변색 코팅 소재 및 접합유리 개발

① 변색층 소재의 전해질 매칭을 위한 박막 조성 조건 구축

- ✓ 전기변색유리 소재의 요구사항
- ✓ 전기변색유리의 개발 기술 개요 및 기능

(1) 전기변색유리 소재의 요구 사항

■ 가시광선 색 변화(CR)

- 가시광선 색 변화(CR)는 전기변색 시스템에서 중요한 특징 중에 하나이고, 이 시스템에서 얼마나 색이 변하 는지를 아는 것은 소재를 결정하는 중요한 판단요인이 됨.
- 가시광선 색변화 식은 다음과 같음.

$$CR = \frac{R_0}{R_x}$$

- 여기에 Rx는 변색된 상태에서 반사된 빛의 세기를 나타내고, R0는 탈색된 상태에서 반사된 빛의 세기를 나타냄.
- 만약에 CR의 값이 크다면, 그 것은 전기변색 소재의 광 투과도의 차이가 크다는 것을 의미함.

■ 광 흡수도

- CR과 함께 광 흡수도를 통해서도 전기변색 소재의 특성을 파악할 수 있음.
- 일반적으로 광 흡수도는 Beer Lambert law를 통해 얻을 수 있음.
- 빛 세기의 비에 log를 취한 흡수도는 농도와 샘플의 optical path way에 비례함.
- 전기변색 시스템에서도 Beer-Lambert law에서 유도된 식과 유사하게 표현할 수 있는데 단위 면적당 injection된 전하(charge)와 관련을 지을 수 있고, 그 이유는 전하의 양이 색 변화에 비례하기 때문이고, 그 식은 다음과 같음.

$$Beer-Lambert law: A = \log\left(\frac{T_b}{T_c}\right) = \epsilon cl$$

- 전기변색 시스템에서 광 흡수도는 다음과 같이 유도됨

$$A = \log\left(\frac{T_b}{T_c}\right) = \eta Q$$

- 여기에서 A는 흡수도이고, Tc는 변색 상태에서의 투과된 빛의 세기이고, Tb는 탈색된 상태에서 투과된 빛의 세기이고, η는 전기변색 소재의 변색 효율(coloration efficiency (CE))을 나타냄.
- 그러므로 변색 효율은 광 변화(optical density (ΔOD))와 단위 면적당 전하량(Q)에 비례하고, 그 식은 다음과 같음.

$$\eta = \frac{\Delta OD}{Q} [cm^2/C]$$

$$\Delta OD(\lambda) = \log \frac{T_b}{T_c}$$

- 변색효율이 높은 전기변색 소재는 적은 전하량으로 광 투과도가 많이 변하는 물질이고, 이것은 에너지면에서도 유리한 소재라고 할 수 있음.
- 전기변색에서 가장 많이 사용되고 있는 WO3나 NiO는 30~60cm²/C을 나타내고, 유기물 전기변색 소재는 100cm²/C 이상의 변색효율을 나타냄.

■ 응답속도

- 또 하나의 전기변색 소재를 판할 수 있는 방법은 응답 속도(response time)임.
- 즉, 탈색/착색된 상태에서 착색/탈색이 되는지 시간을 측정하여 전기변색의 응답 속도를 측정하는 것임. 보편적인 기준은 탈색/변색까지 90% 지점까지 도달하는 데 걸리는 시간을 측정.
- 일반적으로 액정(LCD)이나 cathode raytube (CRT)보다는 느린 반응속도를 나타내는 데, 그 이유는 전해질의 확산 속도, 투명전극의 저항, 전기변색 물질의 전기 전도도 때문.
- 하지만, 최근에 viologen을 TiO2에 담지 시킨 유-무기물 하이브리드 전기변색 소재는 10msec이하의 반응속도를 나타내고 있어 큰 관심을 모으고 있음.
- 이 소재는 다양한 display에 응용이 될 것으로 예상됨.
- 전기변색 소재의 특징 중에 하나는 memory effect 가 있다는 것임.
- 이것은 한번 전기를 가하였을 경우 더 이상전기를 가하지 않아도 변색/탈색이 가능하다는 것을 의미하고, 에너지 효율 면에서 매우 유리한 소재라 할 수 있음.
- 보통 WO3나 NiO의 경우 10시간 동안 memory effect가 있는 것으로 알려져 있음.
- 유리에 전기 전도가 가능하도록 하는 투명전도막(TCO, Transparent Conductive Object)로 ITO, FTO가 주로 사용되지만, 다양한 소재가 활용될 수 있음.

② 전기변색 소재 증착 공정 기술 최적화

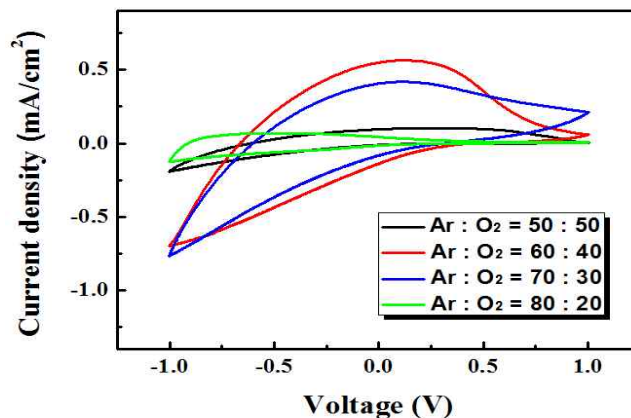
- ✓ Electrochromic 소재 및 공정 최적화
- ✓ WO3 및 NiO 박막의 최적조건 탐색 및 half cell의 전기화학적/광학적 특성 평가

- ✓ Full cell 에 대한 투과도 변화 분석
- ✓ 전기변색유리 Full cell 에 대한 변색 속도 분석
- ✓ 전기변색유리 Full cell에 대한 OD 및 CE 값 분석
- ✓ 전기변색유리 Full cell에 대한 투과율 변화폭 분석

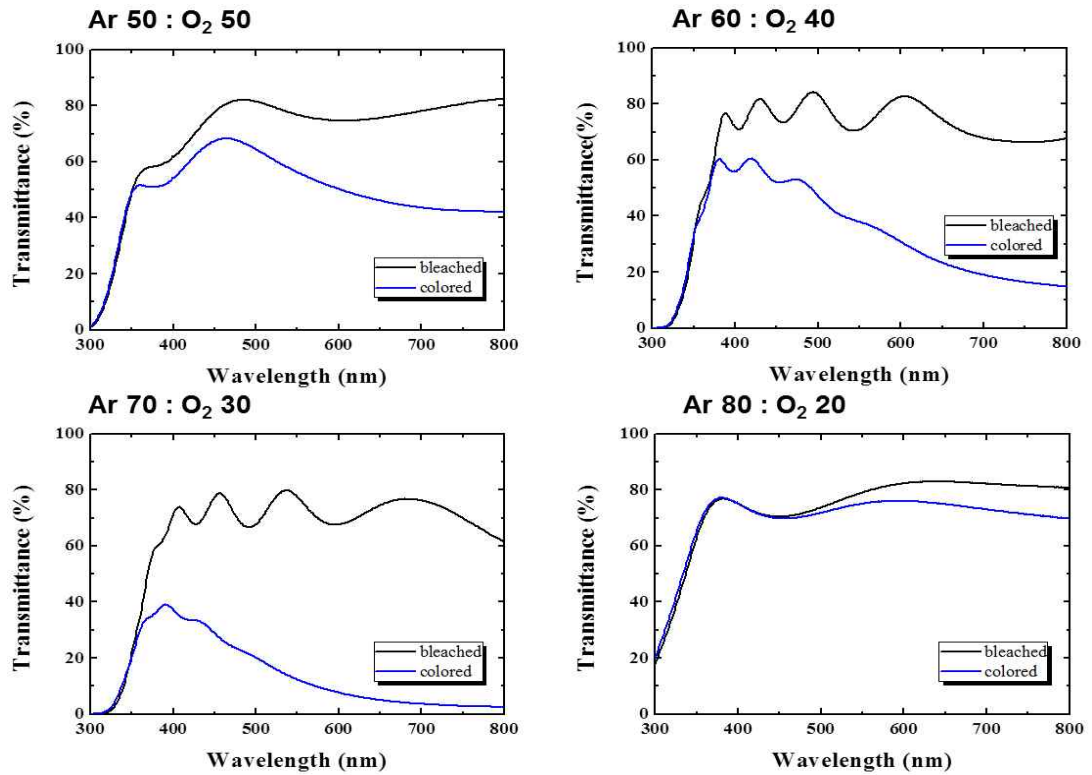
(1) 변색층 소재 및 공정 최적화

■ 변색층 중 텅스텐 옥사이드(WO₃) 소재 및 공정 최적화

- 변색 층 가운데 WO₃ 에 대한 소재 및 공정 조건에 대해 최적화에 대해 실험 진행
- 실험 시 시험체의 크기는 70mm×70mm 임(광학특성 및 전기화학적 특성 시험 가능 최대 크기 기준)
- 텅스텐 옥사이드(WO₃) 증착 조건 확립이 주요한 목적
- 스퍼터링 진공 증착 시 주로 아르곤(Ar)과 산소(O₂) 비율을 주요한 변수로 산정하게 됨
- 아르곤, 산소의 비율 100% 기준으로 아르곤(Ar)과 산소(O₂)의 비율을 달리 적용
- 아래 그림은 아르곤(Ar)과 산소(O₂)의 비율에 따른 전압-전류 밀도 그래프를 나타내고 있음
- 그래프에서 면적이 넓을수록 많은 전류 밀도를 가짐을 나타내고, 아르곤(Ar)과 산소(O₂) 60:40비율일 때가 가장 전류 밀도가 가장 높은 것을 확인 할 수 있음
- 아르곤(Ar)과 산소(O₂) 분합 비가 70:30 비율일 때 두 번째로 전류 밀도가 높은 것을 확인이 가능함.



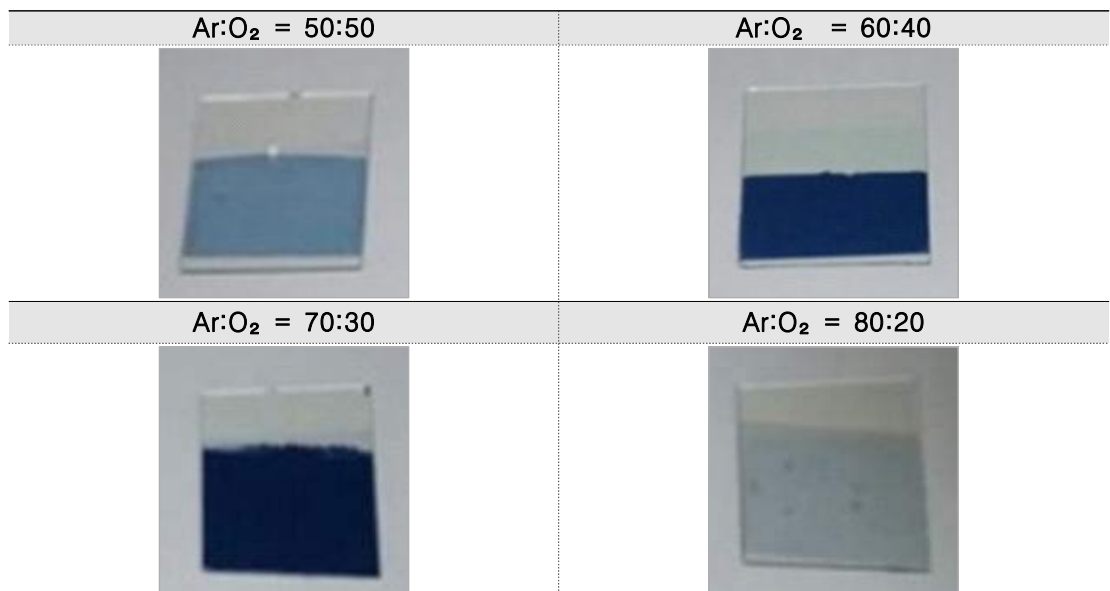
- 전류 밀도가 높다는 것은 전해질의 Li⁺이온 전하의 이동이 많음을 나타냄
- Y축을 기준으로 0이하의 경우 변색될 때의 Charge 되는 조건 0이상의 + 경우 탈색 될 때의 조건을 나타내고, +와 -의 면적은 유사함.
- Q는 절대적인 전하량을 나타내고, OD(Optical Density)는 탈색과 변색의 투과율의 차이가 얼마나 큰지를 나타냄.
- CE(Coloration Efficiency)는 변색효율을 나타내고, 전하량의 투입 대비 투과도의 변화량을 나타냄.
- OD는 $\Delta OD(\lambda) = \log \frac{T_b}{T_c}$ 를 의미하며, CE는 OD를 Q로 나눈 값을 나타냄.
- 결국 CE가 크다는 것은 투입된 전하량 대비 더 변색의 투과도 변화량이 큰 것을 나타냄에 따라 변색효율이 좋음을 의미함.
- 아래 그림은 산소 분합도에 따른 투과율 변화를 나타낸 그래프 임.
- 가장 투과도 변화가 큰 것은 아르곤(Ar)과 산소(O₂)의 비율이 70:30 인 것을 알 수 있음



- 아래 그래프를 보면, OD 값은 70:30비율이 가장 우수한 성능을 나타냄.
- 반면 Q 값은 60:40이 가장 많은 전하량이 이동하는 것을 확인 할 수 있음
- CE 분석결과에 따르면 70:30 이 29.8cm²/C로 변색효율이 가장 높은 것을 알 수 있음
- 따라서 본 연구에서 WO₃의 알곤-산소분합비는 70:30으로 선정하였음

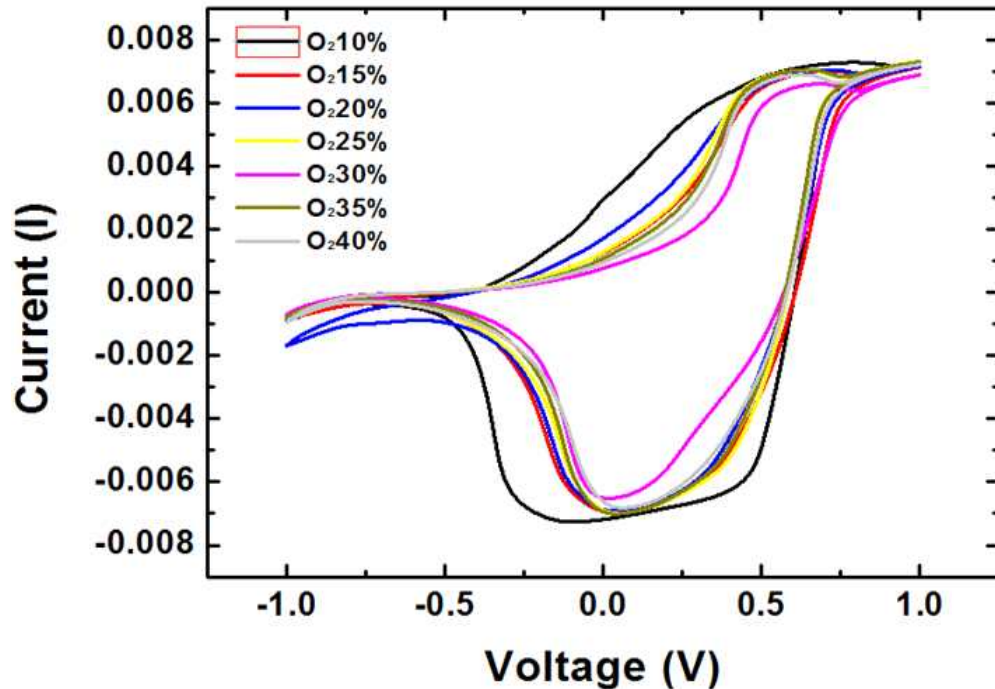
Ar : O ₂	Q (C/cm ²)	Transmittance (%)		dT (%)	dOD	CE (cm ² /C)
		Colored	Bleached			
50 : 50	0.0057	56.17	76.72	20.55	0.135	23.5
60 : 40	0.0287	37.85	70.82	32.97	0.272	9.5
70 : 30	0.0268	12.32	77.49	65.17	0.799	29.8
80 : 20	0.0037	74.98	79.05	4.07	0.023	6.2

- 다음 그림은 산소분합비에 따른 착색 시 시료의 상태를 나타냄.
- 그림과 같이 70:30 산소분합비의 경우 변색이 가장 잘 되고 있는 것을 확인 할 수 있음

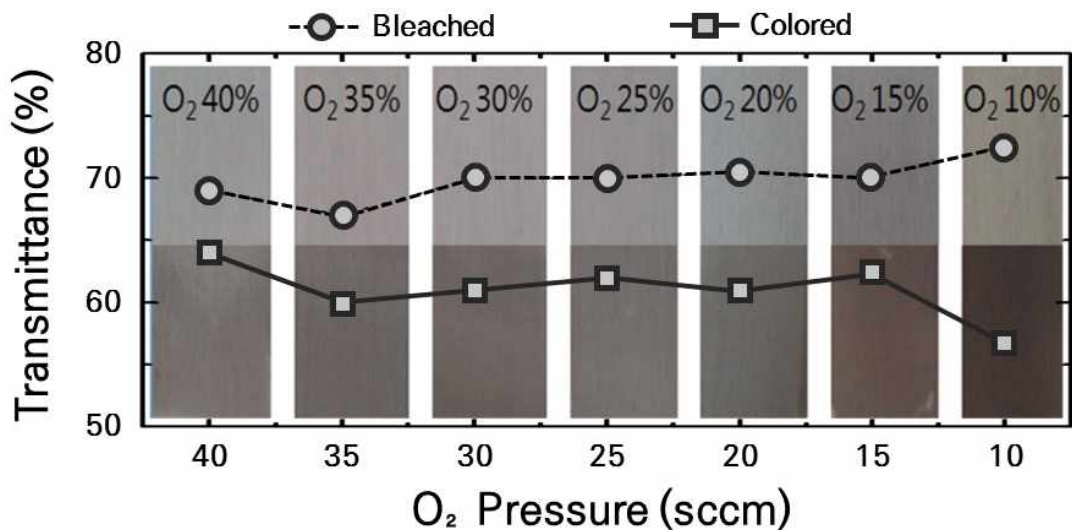


■ 변색층 중 니켈 옥사이드(NiO) 소재 및 공정 최적화

- 변색 층 가운데 NiO 에 대한 소재 및 공정 조건에 대해 최적화에 대해 실험 진행
- 실험 시 시험체의 크기는 70mm×70mm 임(광학특성 및 전기화학적 특성 시험 가능 최대 크기 기준)
- 니켈 옥사이드(WO3) 증착 조건 확립이 주요한 목적
- 아르곤, 산소의 비율 100% 기준으로 아르곤(Ar)과 산소(O₂)의 비율을 달리 적용



- 위의 그림은 아르곤(Ar)과 산소(O₂)의 비율에 따른 전압-전류 밀도 그래프를 나타내고 있음
- 그래프에서 면적이 넓을수록 많은 전류 밀도를 가짐을 나타내고, 아르곤(Ar)과 산소(O₂) 90:10 비율일 때가 가장 전류 밀도가 가장 높은 것을 확인 할 수 있음
- 아래 그림은 산소 분합비에 따른 투과율을 나타냄
- 그래프를 중심으로 위는 탈색, 아래는 착색상태를 나타내고 있음
- 이를 통해 산소(O₂) 90:10비율일 때가 가장 투과율 변화도가 큰 것을 확인 할 수 있음



- 아래 표는 산소 분합비에 따른 투과율 변화 폭과 OD 값을 나타내고 있음
- OD는 투과율 변화량에 대한 log 값으로, $\Delta OD(\lambda) = \log \frac{T_b}{T_c}$ 를 의미함.

- 투과율 변화 폭과 OD 값을 확인 했을 때, 아르곤(Ar)과 산소(O₂) 90:10비율일 경우 투과율 변화율이 가장 큰 것을 확인 할 수 있음
- 따라서 본 연구에서 NiO의 산소분합비는 90:10으로 선정 하였음.

Ar : O ₂	Transmittance (%)		dT (%)	dOD
	Colored	Bleached		
60 : 40	69.4	64.2	5.2	0.034
65 : 35	67.2	60.0	7.2	0.049
70 : 30	69.8	60.8	9.0	0.059
75 : 25	70.0	62.4	7.6	0.050
80 : 20	70.5	60.9	9.6	0.063
85 : 15	69.7	62.3	7.4	0.049
90 : 10	72.6	56.7	15.9	0.107

(2) WO₃ 및 NiO 박막의 최적조건 탐색 및 half cell의 전기화학적/광학적 특성 평가

1) 실험목적

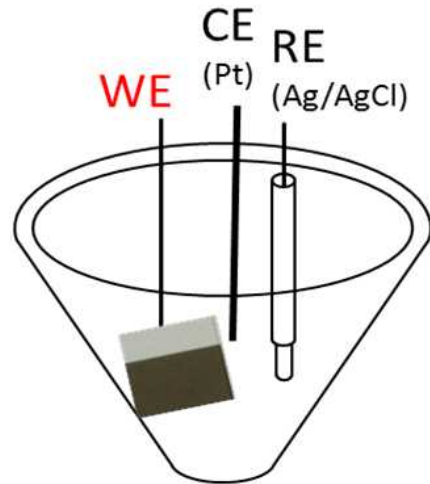
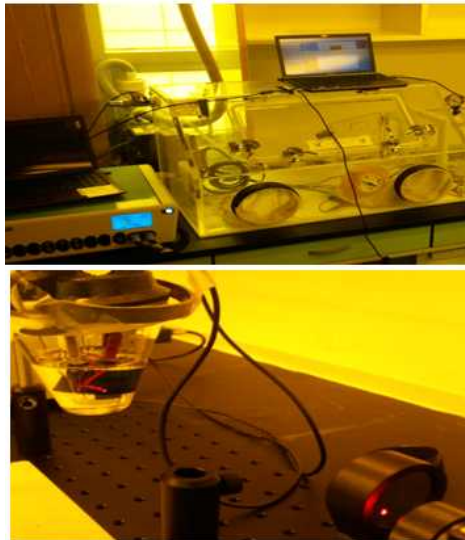
- 전기변색 소자구현을 위한 WO₃ 및 NiO 박막의 최적조건 탐색 및 half cell의 전기화학적/광학적 특성 평가

2) 방법 개요

- Sputtering 장비를 활용하여 WO₃ 및 NiO를 증착하였음
- 증착을 위한 분위기 조건은 WO₃의 경우 아르곤-산소 분합비 70:30

Sputtering 장비	Sputtering 조건		
	WO ₃		
		Ar : O ₂	70:30
		Power	500W
		증착 속도	35nm/1min
	NiO ₂		
		Ar : O ₂	90:10
		Power	500W
		증착 속도	40nm/1min

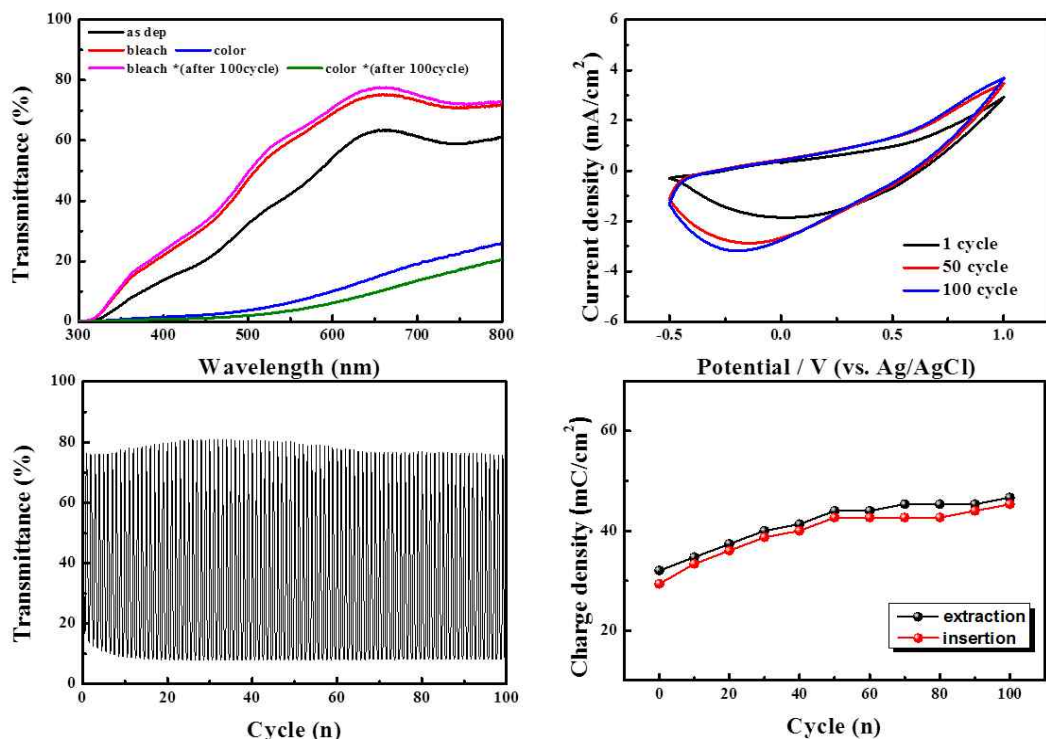
- ITO glass (10 ohm/sq) 위 Ni-metal / W-metal target을 사용하여 deposition
- Sputtering power는 500W로 고정하였고, pre-sputtering을 각각 10분씩 진행
- Ni-metal oxide와 W-metal oxide의 경우 Ar:O₂ 비율 90:10, 70:30에서 가장 우수한 transmittance modulation을 나타내어 최적조건으로 ITO glass 위에 각각 증착하여 특성 평가



[Autolap을 통한 3-electrode 측정]

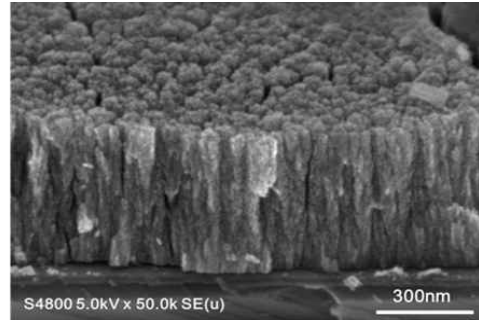
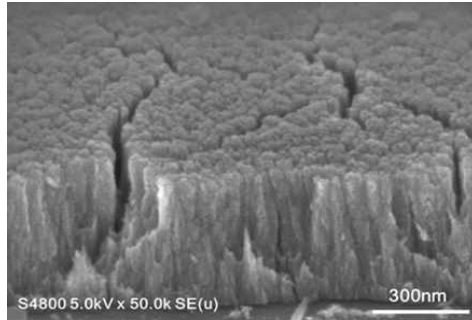
- 각 박막의 전기화학 분성을 위해 Autolap 의 Potentiaostat/Galvanostat을 측정
 - scan rate 50mV/s, -0.5 ~ 1V range에서 CV cycling test를 1000cycle 동안진행
- 실시간 투과도 변화량은 wavelength 532 laser를 통해 CV cycle과 동일하게 측정
- 초기 bleach, color 상태와 cycle 이후 투과도 변화량을 측정
- -1 V at a scan rate of 50 mV/s를 통해 cycle 안정성을 평가
- working electrode로 glass/ITO/Ni-W를 사용하였고, Pt grid and Ag/AgCl 을 counter electrode 와 reference electrode로 각각 사용하였음

3) NiO 박막의 평가



[NiO 박막의 평가]

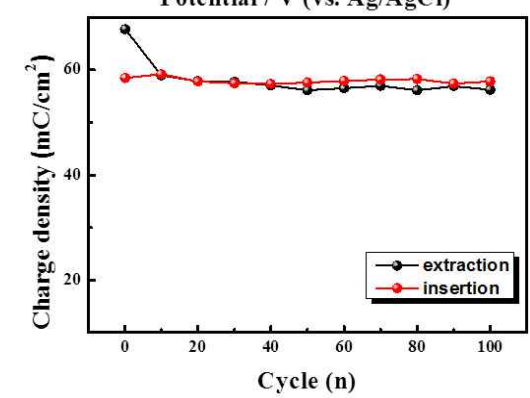
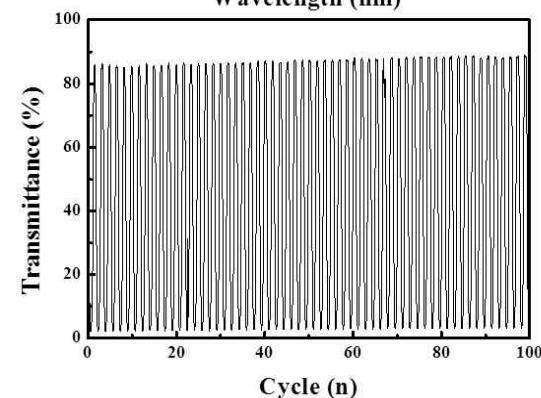
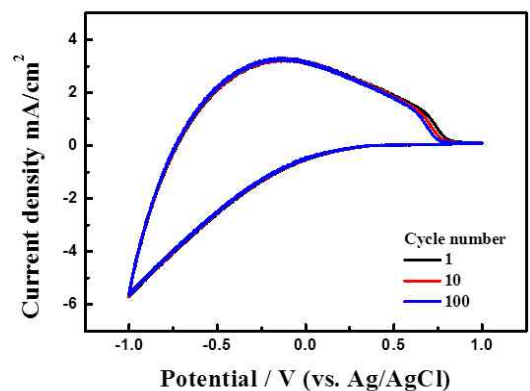
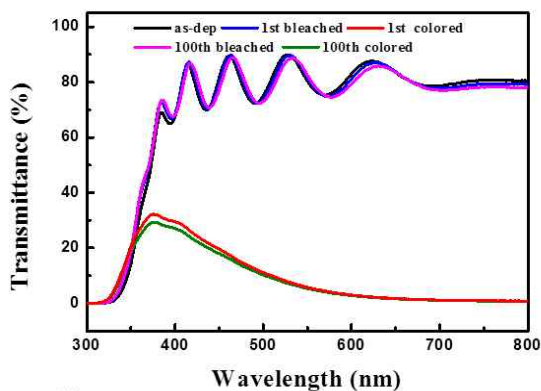
- Wavelength 300–800nm에서 초기 bleach/color상태와 100cycle 이후 bleach/color 투과도 변화량 자체가 일정하게 측정되어 안정적인 특성을 나타냄
- 100cycle간의 CV cycling test 동안 점진적인 shape 의 증가와 함께 안정적인 cycling 특성을 나타냄
- wavelength 550nm 기준 -0.5 ~ 1V 간의 half cell test도중 투과도 변화량도 약 ΔT 65%이상으로 측정됨
- charge density 측정결과 cycle이 반복될수록 박막 내부에 이온을 저장 할 수 있는 능력이 증진됨을 확인. 이는 충/방전이 됨에 따라 ionic path의 생성과 연관이 있음을 확인



[NiO 박막의 SEM Image]

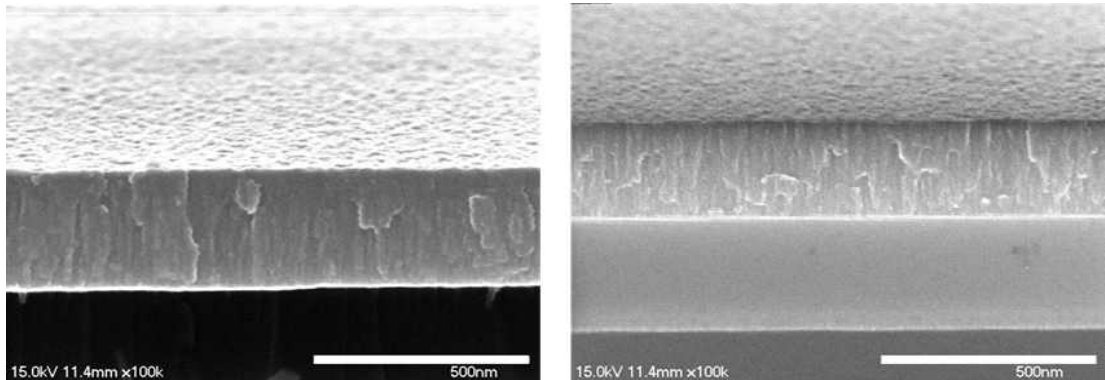
- cross-section SEM 이미지 분석 결과, 각 샘플은 각각 400nm로 Si-wafer 위에 deposition
- Electrochromic 의 ion-storage layer 사용되는 Ni-W 박막의 특성은 표면 거칠기에 영향을 받을 것이라 판단함
- 박막과 이온의 접촉하는 면적이 클수록 반응 할 수 있는 site가 많기 때문에, 변색 효율에 영향을 끼침
- 이온을 저장할 수 있는 공간이 많아지면 Cell 의 memory effect 특성이 향상될 것이라 판단함

4) WO₃ 박막의 평가



[WO₃ 박막의 평가]

- WO₃ half cell 박막 분석결과 -1V ~ 1V 기준 wavelength 550nm 기준 약 ΔT 70%이 상으로 측정됨을 확인
- CV cycling test 결과 이온 충/방전에 따라 100동 매우 안정적인 shape이 측정됨을 확인
- 532 laser를 통한 cycle test 결과 100전/후 안정적인 transmittance modulation을 나타냄

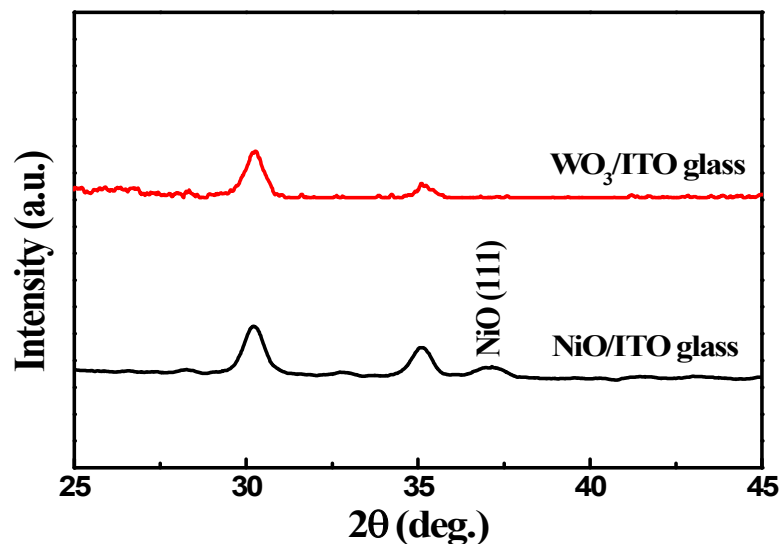


[WO₃ 박막의 SEM Image]

- cross-section SEM 이미지 분석 결과, 각 샘플은 각각 350nm로 Si-wafer 위에 deposition하여 분석

5) XRD(X-Ray Diffraction)

- 변색층에 대한 XRD 분석을 통해 증착 상태 확인
- ITO 유리 위에 증착한 WO₃의 경우 비정질화 된 상태임에 따라 XRD 레이저가 산란됨
- 아래 그림에서 WO₃ 증착면의 경우 35도의 ITO 증착을 확인할 수 있고 텅스텐 메탈은 비정질화 되어 증착되어 레이저가 산란됨을 확인할 수 있음
- 이 때, 텅스텐 메탈이 비정질 상태로 증착되면서 ITO의 Intensity가 Broad해지는 특성을 나타내고 있음
- NiO의 경우 37.5도에서 픽이 발생하여 증착이 잘된 상태임을 확인할 수 있음



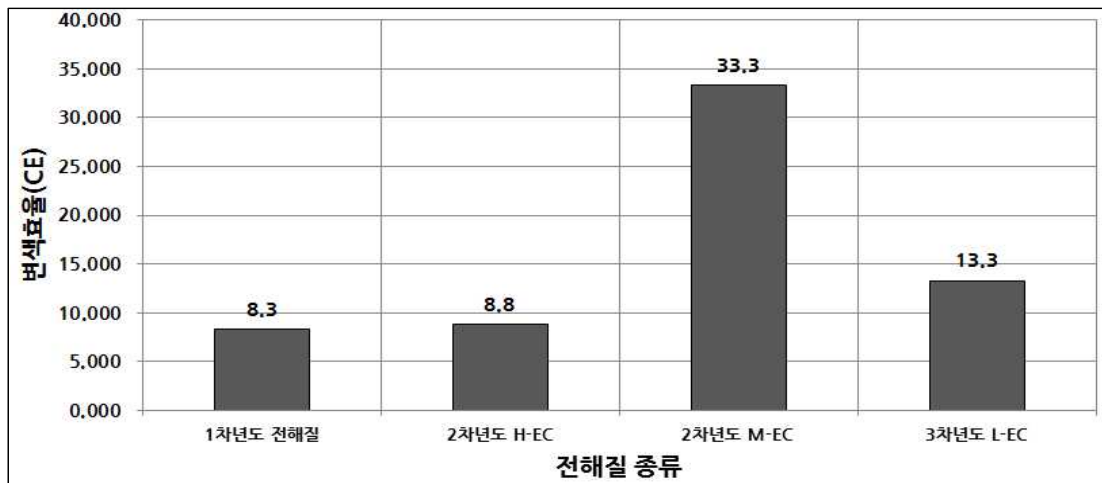
(3) 전기변색유리 Full cell에 대한 OD 및 CE 값 분석

- 고강도 성능을 확보하면서 우수한 변색효율을 확보하는 것이 주요한 목적
- 실험 시 Full cell에 대한 시험체의 크기는 70mm×70mm 임(광학특성 및 전기화학적 특성 시험 가능 최대 크기 기준)

- 전류 밀도(Q, Charge density)가 높다는 것은 전해질의 Li+이온 전하의 이동이 많음을 나타냄
- Y축을 기준으로 0이하의 경우 변색될 때의 Charge 되는 조건 0이상의 + 경우 탈색 될 때의 조건을 나타내고, +와 -의 면적은 유사함.
- Q는 절대적인 전하량을 나타내고, OD(Optical Density)는 탈색과 변색의 투과율의 차이가 얼마나 큰지를 나타냄.
- CE(Coloration Efficiency)는 변색효율을 나타내고, 전하량의 투입 대비 투과도의 변화량을 나타냄.
- OD는 $\Delta OD(\lambda) = \log \frac{T_b}{T_c}$ 를 의미하며, CE는 OD를 Q로 나눈 값을 나타냄.
- 결국 CE가 크다는 것은 투입된 전하량 대비 더 변색의 투과도 변화량이 큰 것을 나타냄에 따라 변색효율이 높음을 의미함.
- 아래 표는 전해질 종류에 따른 투과율 변화, OD, 전류밀도(Q, Charge density), 변색효율(CE)를 나타내고 있음

분류		Charge density (mC/cm ²)	Transmittance (%)		dOD	CE (cm ² /C)
			Colored	Bleached		
1차년도 전해질		7.8	16.6	73.9	0.65	8.3
2차년도 전해질	H-EC	0.4	11.4	25.8	0.35	8.8
	M-EC	2.3	13.2	76.2	0.76	33.3
	L-EC	2.1	18.3	34.4	0.27	13.3

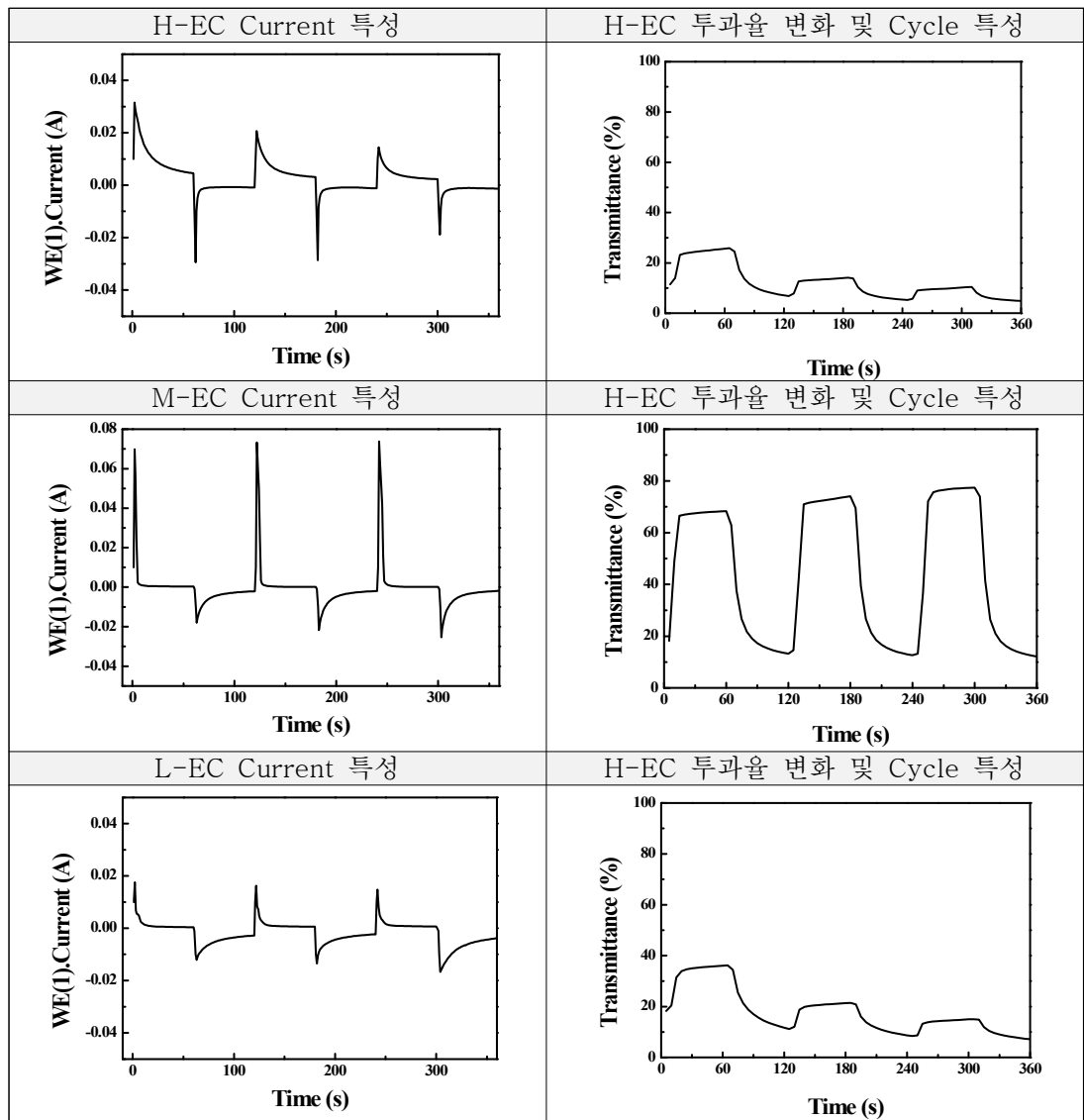
※ 1차년도 전해질 CE 평가 결과 오류 수정



- 분석결과, 1차년도 전해질의 경우 CE 값이 8.3, 2차년도 전해질 중 H-EC가 8.8cm²/C, **M-EC가 33.3cm²/C**, L-EC 가 13.3cm²/C으로 나타남
- M-EC의 경우 변색효율 목표 25cm²/C 성능을 만족하는 것으로 나타났음

(4) 전기변색유리 Full cell에 대한 Current 값 및 Cycle 특성 분석

- 전기변색유리 변색효율의 경우 투입량 대비 투과율 변화폭을 나타냄
- Current 및 Cycle 특성은 전기변색유리의 내구성과 연관있음
- 이에 따라 전류 변화량에 대한 분석 결과, H-EC의 경우 전류 투입량이 가장 많은 것으로 나타났음
- M-EC의 경우 전력 인가 후 짧은 시간동안 전류가 투입되고, 투과율 목표치에 도달 후 전류 공급량이 크게 감소됨
- L-EC의 경우 H-EC와 M-EC의 중간 정도에 해당하는 전류량이 공급됨
- Cycle 특성은 전기변색유리에서 내구성 특성을 평가할 수 있음
- H-EC, L-EC의 경우 Cycle 진행에 따라 점차 투과율 변화폭이 줄어들어 변색특성을 잃어감을 확인
- 반면 M-EC의 경우 Cycle이 진행되면서 점차 투과율 변화폭이 커짐을 확인함
- 장기적인 관점에서 M-EC의 Cycle 특성이 가장 우수한 것으로 분석됨



(5) 전기변색유리 Full cell에 대한 투과율 변화폭 분석

- 전기변색유리 Full cell 제작 후 한국유리공업 기관을 활용하여 가시광선 투과율을 측정함
- 시험방법은 KS L 2514:2011 규격에 따라 분광투과율 측정을 수행하였음
- 시험장비는 한국유리공업에서 보유하고 있는 UV-VIS-NIR Spectrophotometer, Perkin-Elmer, Lambda 1050(USA)를 활용하였음
- 시험 조건은 시료 제작 후 첫 번째 Cycle을 기준으로 하였음
- 분석결과 1차년도 전해질 기반 전기변색유리는 탈색 시 16.6%, 착색 시 73.9%, 투과율 변화폭은 57.3%를 나타냈음
- 2차년도 전해질은 H-EC가 탈색 시 15.5%, 착색 시 76.7%, 투과율 변화폭은 61.2%를 나타냈고, M-EC는 탈색 시 15.4%, 착색 시 76.5%, 투과율 변화폭은 61.1%를 나타냈으며, L-EC는 탈색 시 18.5%, 착색 시 76.4%, 투과율 변화폭은 57.9%를 나타냈음
- 첫 번째 Cycle을 대상으로 분석한 가시광선 투과율의 경우 과제 목표를 모두 달성하였지만, 앞서 분석했던 Cycle 특성을 고려했을 때 가능성 있는 전해질은 M-EC가 유일함

		Transmittance (%)		투과율 변화폭 (%)
		Bleached	Colored	
1차년도 전해질		16.6	73.9	57.3
2차년도 전해질	H-EC	15.5	76.7	61.2
	M-EC	15.4	76.5	61.1
	L-EC	18.5	76.4	57.9

③ 전기변색유리 전해질 및 접합유리 제조 조건 확립 및 시작품 제작

- ✓ 전기변색유리 전해질 및 접합유리 제조 조건 확립
- ✓ UV 경화형 고강도 전해질 기반 접합유리 제조 공정 및 150×150mm 시작품 제작
- ✓ 전기변색유리 Full cell에 대한 OD 및 CE 값 분석

(1) 전기변색유리 전해질 및 접합유리 제조 조건 확립

■ WO3 박막 증착 조건 확립

- WO3의 경우 아르곤-산소 분합비 별 분석결과 광학밀도(dOD) 및 변색효율(CE)값이 가장 높은 70:30 분위기 조건에서 진공 증착 시 가장 성능이 우수함

Ar : O ₂	Q (C/cm ²)	Transmittance (%)		dT (%)	dOD	CE (cm ² /C)
		Colored	Bleached			
50 : 50	0.0057	56.17	76.72	20.55	0.135	23.5
60 : 40	0.0287	37.85	70.82	32.97	0.272	9.5
70 : 30	0.0268	12.32	77.49	65.17	0.799	29.8
80 : 20	0.0037	74.98	79.05	4.07	0.023	6.2

■ NiO 박막 증착 조건 확립

- NiO의 경우 아르곤-산소 분합비 별 분석결과 광학밀도(dOD)가 가장 높은 90:10 분위기 조건에서 진공 증착 시 가장 성능이 우수함

Ar : O ₂	Transmittance (%)		dT (%)	dOD
	Colored	Bleached		
60 : 40	69.4	64.2	5.2	0.034
65 : 35	67.2	60.0	7.2	0.049
70 : 30	69.8	60.8	9.0	0.059
75 : 25	70.0	62.4	7.6	0.050
80 : 20	70.5	60.9	9.6	0.063
85 : 15	69.7	62.3	7.4	0.049
90 : 10	72.6	56.7	15.9	0.107

■ 전기변색 접합유리 전해질 제조 조건 확립

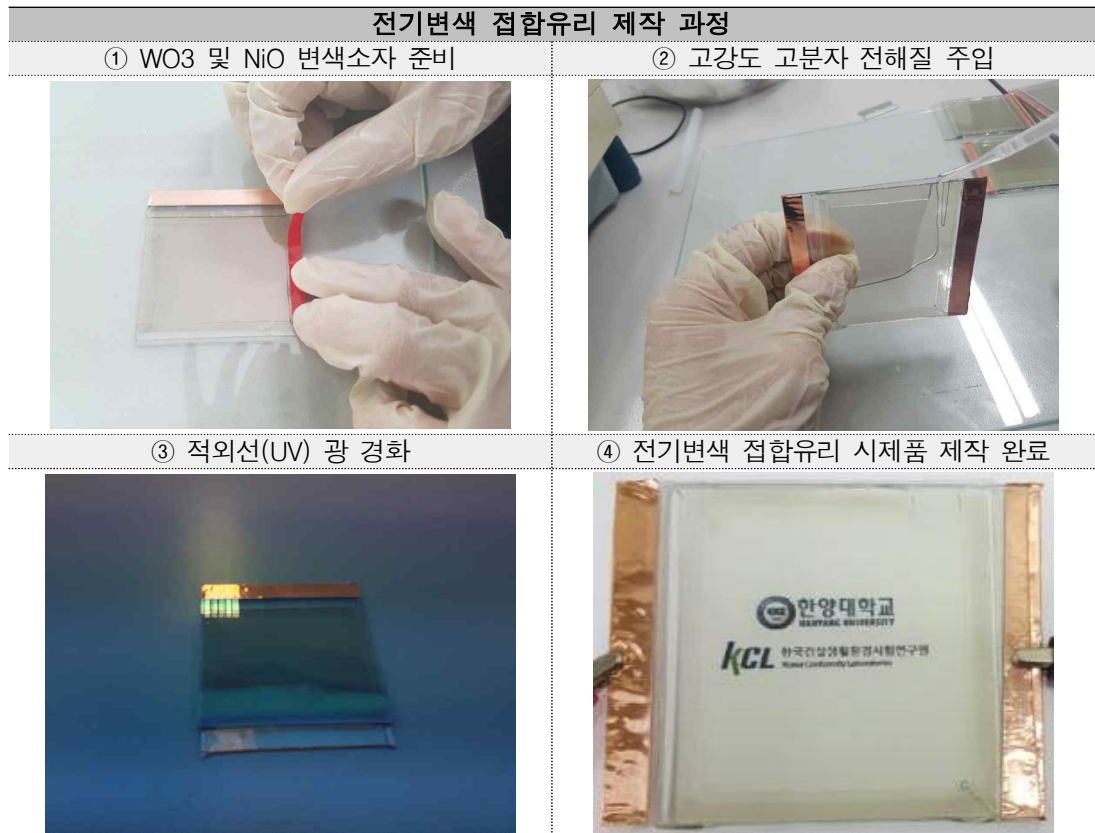
- 전해질 Formulation 별로 성능평가를 수행한 결과, 변색효율, 전류밀도, 투과율 변화폭, Cycle 특성을 모두 만족하는 M-EC 전해질이 가장 우수한 성능을 나타냄

Ar : O ₂		박리강도 (Mpa)	변색효율 (cm ² /C)	Charge Density (mC/cm ²)	투과율 변화폭	Cycle 특성
1차년도 전해질		8.3	0.364	7.8	57.3	실패
2차년도 전해질	H-EC	8.8	0.020	0.4	61.2	실패
	M-EC	33.3	0.360	2.3	61.1	성공
	L-EC	13.3	0.240	2.1	57.9	실패

(2) UV 경화형 고강도 전해질 기반 접합유리 제조 공정 및 150×150mm 시작품 제작

■ 고강도 전해질 기반 전기변색 접합유리 제작 공정

- 고강도 전기변색 접합유리 제작과정은 우선 WO₃와 NiO 변색층 소자를 준비하고, 접합을 위한 구조용 테이프를 부착하고 전해질 주입을 위한 틈을 구성함
- 변색층 두장의 유리를 부착한 후 전해질을 주입함
- 전해질 주입 후 실링(Sealing)제로 틈을 메우고, UV 경화 시킴
- 최종적으로 고강도 전기변색 접합유리 제작 완료



(4) UV 경화형 고강도 전해질 기반 접합유리 150×150mm 시작품 제작

- 변색층 박막 증착 조건 및 전해질 성능평가 결과를 바탕으로 최적화된 M-EC 전해질 기반 150×150mm 전기변색접합유리 시작품을 제작하였음



④ 전기변색 접합유리 가혹조건 신뢰성 평가

- ✓ 전기변색 접합유리의 가혹조건(국내기후조건, 가혹기후조건) 신뢰성 평가
- ✓ 전기변색 접합유리의 실험모형 제작 후 온도 성능 및 내후성 평가

(1) 전기변색 접합유리의 가혹조건(국내기후조건, 가혹기후조건) 신뢰성 평가

1) 실험목적

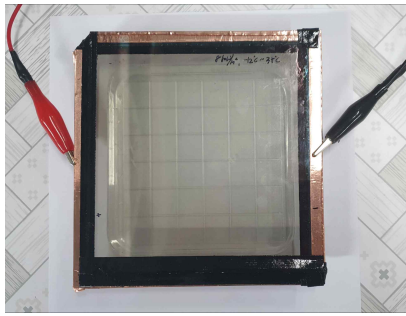
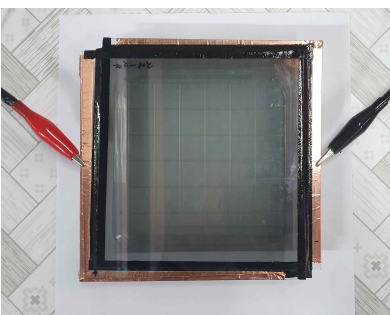
- 전기변색유리 내구성 검증을 위한 가혹조건 신뢰성 평가 수행

2) 방법 개요

- 실험 시 Full cell에 대한 시험체의 크기는 150mm×150mm 임
- ISO 18543에 의한 전기변색유리 성능평가 기준은 있지만, 현재 국내에서 ISO 18543에 대한 평가를 수행할 수 있는 기관이 없음
- ISO 18543의 경우 분위기 온도 및 일사량 조건을 제시하고 있으며, 이에 대한 성능평가가 필요함
- 이에 따라 국내에서 시험 가능한 유사 규격인 DIN 75220에 따라 가혹조건 신뢰성 평가를 수행하였음
- 본 연구에서는 -20℃, +80℃ 조건에서의 내구성 만족을 목표로하고 있음
- 이에 따라 서울 기상데이터를 기준으로 국내기후조건 및 연구 개발목표인 가혹기후조건으로 분류하여 가혹조건 신뢰성 평가를 수행하였음

No	분류	온도 조건	일사량 조건
1	국내 기후조건	-12℃~35℃	860W/m ²
2	가혹 기후조건	-20℃~80℃	-

- 상기 조건에 따라 가혹 조건 신뢰성 평가 후 전기변색작동 유무 확인
- 전기변색 작동 유무 확인 결과 모두 만족하였음

분류	가혹조건 신뢰성평가 전	가혹조건 신뢰성평가 후
국내 기후조건 (-12℃~35℃)		
분류	가혹조건 신뢰성평가 전	가혹조건 신뢰성평가 후
가혹 기후조건 (-20℃~80℃)		

(2) 전기변색 접합유리의 실험모형 제작 후 온도 성능 및 내후성 평가

1) 실험목적

- 전기변색유리의 옥외폭로를 통한 내후성 평가 및 전기변색유리 적용에 따른 실내 공기온도, 유리표면온도 특성 분석

2) 방법 개요

- 전기변색유리(M-EC) 시료 제작 및 실험모형 제작 후 유리 실내외 표면온도, 실내공기온도, 외기온도 측정을 위한 센서 설치
- 실험 시 Full cell에 대한 시험체의 크기는 150mm×150mm 임

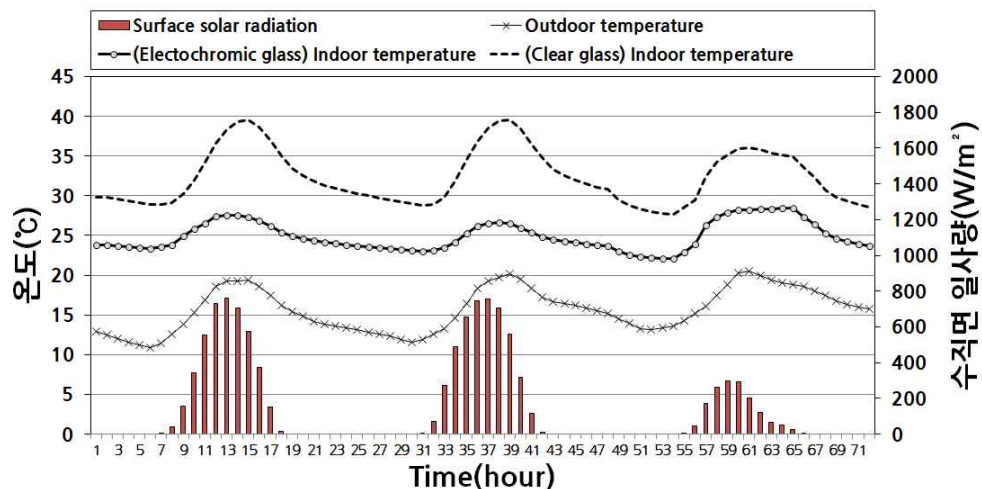


3) 실험 결과

■ 실내 공기온도 분석 결과

- 2019년 10월 7일부터 지속적으로 실험 진행중
- 2019년 11월 21일부터 23일 데이터를 기반으로 데이터 도출
- 실험 결과, 실내공기온도의 경우 전기변색유리 설치 시 평균 7.5℃ 온도 저감 효과가 있는 것으로 분석됨
- 실험 일자가 10월 중으로 완전한 하절기 기온은 아니지만, 온도 저감 경향을 기반으로 하절기 냉방 부하 저감에 기여할 수 있을 것으로 분석됨

분류	외기온 (℃)	수직면일사량 (W/m ²)	실내 공기온도(℃)	
			전기변색유리	투명유리
평균	15.7	148.1	24.9	32.4
최대	20.5	761.7	28.4	39.6
최소	10.9	0.0	22.1	27.7



[전기변색유리와 일반투명유리의 실내 공기온도 변화, 2019.10.21~2019.10.23)]

3) 고강도 전기변색유리 광학특성 기반 전기변색유리 최적 제어 방법 도출

① 전기변색유리 사무소건물 적용에 따른 건물에너지 성능평가

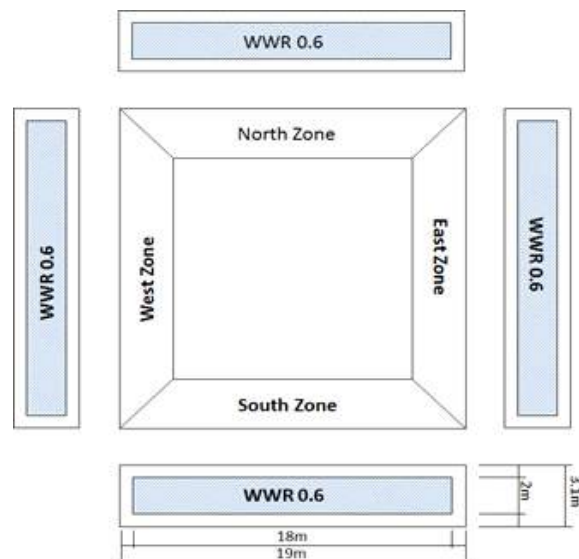
- ✓ 전기변색유리는 탈색과 착색 상태의 태양투과율(T_{sol})과 가시광선투과율(T_{vis})의 차이가 극명하기 때문에 냉방 및 난방기간에 각각 필요한 투과율 특성을 나타낼 수 있어 창호 외장재로서 건물 에너지절감에 기여할 수 있음.
- ✓ 이에 본 연구에서는 국내 기후조건(서울 지역) 하에서 전기변색유리의 사무소건물 적용에 따른 건물에너지성능을 분석

(1) 연구의 방법

- 전기변색유리의 창호 적용에 따른 건물에너지 성능 효과를 분석하기 위한 기초단계로 분광분석기를 이용하여 전기변색유리의 스펙트럼 영역대별 투과율, 반사율, 흡수율을 측정.
- 도출된 데이터를 LBNL Optic5와 Window7.2 프로그램에 입력하여 복층 유리의 가시광선 투과율 및 일사획득계수를 도출.
- 전기변색유리의 건물에너지성능 분석을 위해 Energyplus 8.2 프로그램을 활용하여 정방형의 사무소건물 해석모델을 구축하고, 전기변색유리, 일반 투명창호, 로이창호, 색유리 창호, 블라인드 적용에 따른 난방, 냉방에너지 절감률을 분석하여 전기변색유리 창호의 에너지절감 성능을 분석.

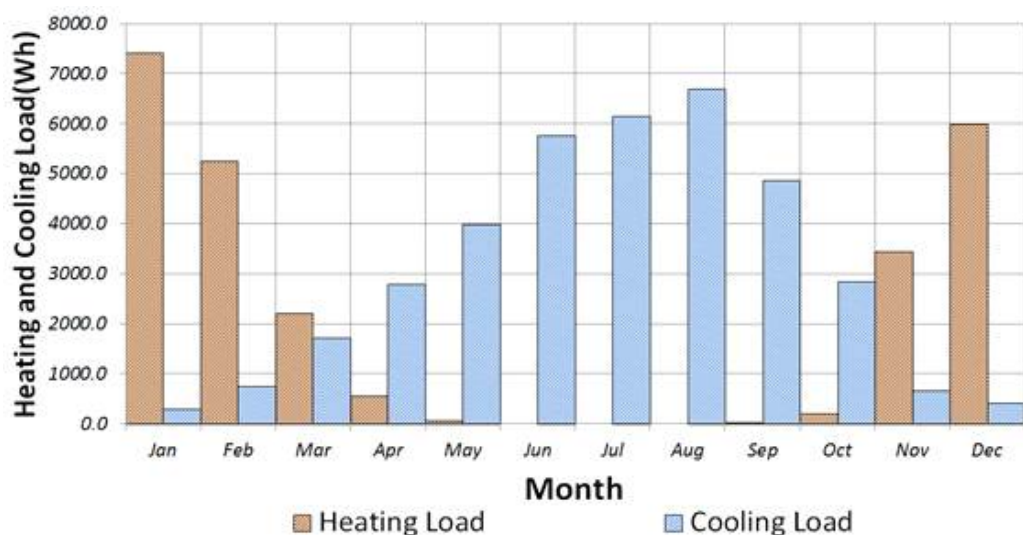
(2) 건물에너지 성능평가를 위한 사무소건물 해석모델

- 전기변색유리의 냉·난방 부하 성능 평가를 위해 Energyplus8.2 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 아래 그림과 같이 정방형의 사무소건물 해석모델을 구축.
- Energyplus는 열평형(heat balance) 방정식에 기반하여 창호에 대한 세부적인 전도, 대류, 복사에 의한 열전달과 일사(Solar radiation)에 대한 투과, 반사, 흡수 특성에 대한 계산이 가능한 장점이 있어 전기변색유리 탈색과 착색에 의한 건물 에너지 영향을 평가하는데 적합.
- 사무소건물 해석모델은 가로, 세로 19m이며, 외벽으로부터 4.5m거리 이내에 방위별 4개의 내주부 공간으로 구성하였고, 창면적비(WWR)는 60%로 설정.



- 기상데이터는 서울지역 기상데이터를 활용.
- 서울지역의 climatic conditions은 겨울에는 대륙의 한랭한 고기압, 여름에는 고온다습한 해양기단의 영향을 받아 기온의 연교차가 30℃에 이르는 대륙성 기후를 나타내는 특징.
- 부하분석을 위하여 EnergyPlus에서 제공하는 IdealLoadAirSystem을 적용하였고, 난방 및 냉방 설정온도는 건축물의 에너지절약설계기준 상 냉난방설비 용량계산을 위한 실내 온도 기준을 따라 각각 20℃, 27℃로 설정.

Division	Materials	U-Value (W/m²K)	SHGC	Tvis
Exterior Wall	M01 100mm brick M15 200mm heavyweight concrete 125mm insulation board Air space 19mm gypsum board	0.429		
Exterior Floor	125mm insulation board 200mm heavyweight concrete	0.513		
Interior Floor	Acoustic tile Ceiling Air Space 125mm insulation board 100mm lightweight concrete	1.186		
Roof	100mm lightweight concrete 220mm insulation board Ceiling air space Acoustic tile	1.186		
Glazing	24mm Double Glazing (6Clear+12Air+6Clear)	2.543	0.695	0.777



- 해석모델 불투명 외벽의 구성은 건물에너지 절약설계기준(2016)의 단열기준을 따랐고, 적용된 기준 유리의 물성은 열관류율 2.543W/m²K, 일사획득계수 0.695, 가시광선투과율 0.777의 복층유리(6mm Clear + 12mm Air + 6mm Clear)를 적용.
- 해석모델에 기준유리를 적용한 조건에서 냉난방 부하분석을 한 결과, 난방 40.5%, 냉방 59.5%로 냉방의 비중이 더 큰 건물인 것으로 나타남.

- 본 해석모델을 바탕으로 유리의 종류를 변화시키며 냉난방부하를 비교 분석.

Division	Heating Load	Cooling Load
Total(Wh)	25078.7	36855.4
Rate(%)	40.5%	59.5%

(3) 성능 비교평가를 위한 유리 구성 도출

- 본 연구에서는 전기변색유리의 냉난방부하저감 성능 수준을 파악하기 위해, 기존에 상용화되고 있는 유리 및 차양장치와 성능을 비교 분석.
- 색유리, Low-e유리, 롤셰이드, 외부루버, 전기변색유리 종류별로 복층화한 뒤 단열성능 및 광학적 특성을 도출.
- 전기변색유리는 탈색상태에서는 색유리, 착색상태에서는 외부 루버와 유사한 수준의 SHGC를 갖는 것을 확인할 수 있음.
- 따라서 전기변색유리는 우리나라와 같이 동절기와 하절기의 구분이 뚜렷한 기후 조건에서 건물의 냉난방 부하를 저감시킬 수 있는 일사조절장치로서 충분한 가능성을 가지고 있음을 알 수 있음.

Division	U-Value	SHGC	Tvis
Clear+Clear(Baseline)	2.543	0.695	0.777
Green+Clear	2.543	0.505	0.666
Blue+Clear	2.543	0.459	0.508
Grey+Clear	2.543	0.463	0.390
Single Low-e+Clear	1.619	0.499	0.698
Double Low-e+Clear	1.477	0.378	0.708
Single Low-e+Clear+Rollshade 10%	1.620	0.293	0.195
Single Low-e+Clear+Rollshade 30%	1.620	0.338	0.187
Single Low-e+Clear+Rollshade 50%	1.620	0.385	0.181
Ext Louver(45°)+Single Low-e+Clear	1.620	0.120	0.125
EC+Single Low-e(Bleached)	1.618	0.429	0.549
EC+Single Low-e(Colored)	1.618	0.140	0.101

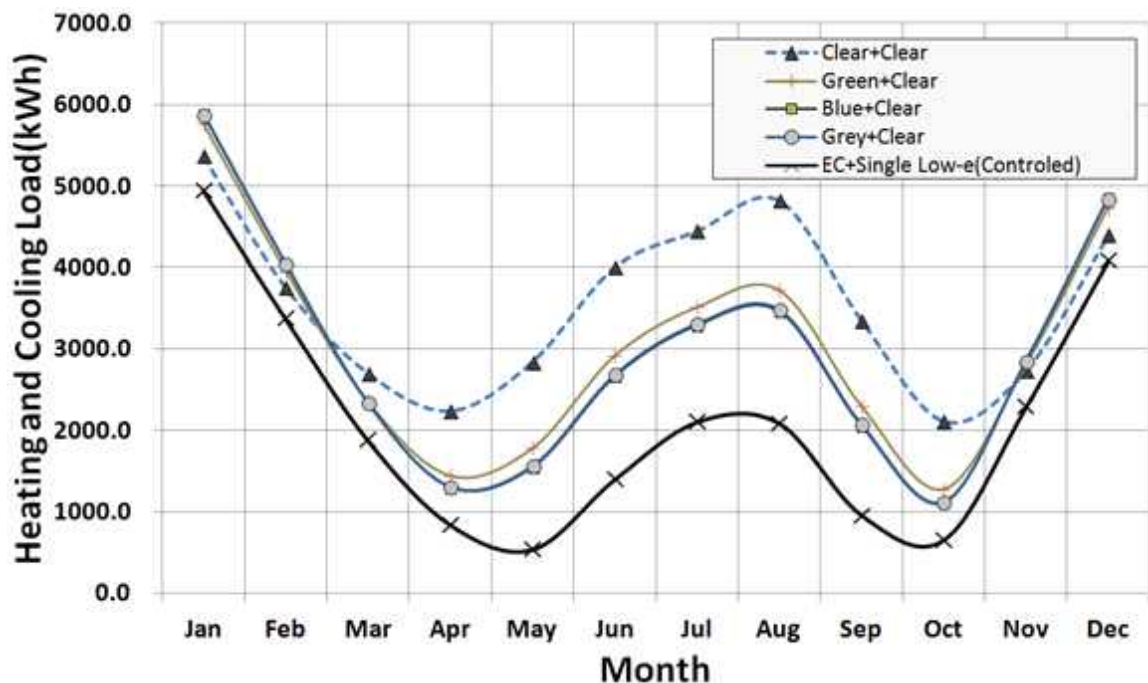
- 기존 문헌에 따르면 국내의 대부분의 사무소건물에서 일사조절장치는 고정된 상태로 사용하고 있는 것으로 나타났음.
- 본 연구에서 적용된 기존 일사조절장치인 롤셰이드와 외부루버는 고정시킨 상태로 사용한다고 가정하였으며, 롤셰이드는 종류가 다양함에 따라 투과율을 10%, 30% 50%로 구분하여 적용.
- 반면, 전기변색유리는 건물의 냉난방 부하만을 고려하여 동절기(Nov~Mar)에는 탈색, 하절기(Apr~Oct)에는 착색시키는 조건으로 가정

(4) 연간 냉난방 부하 분석 결과

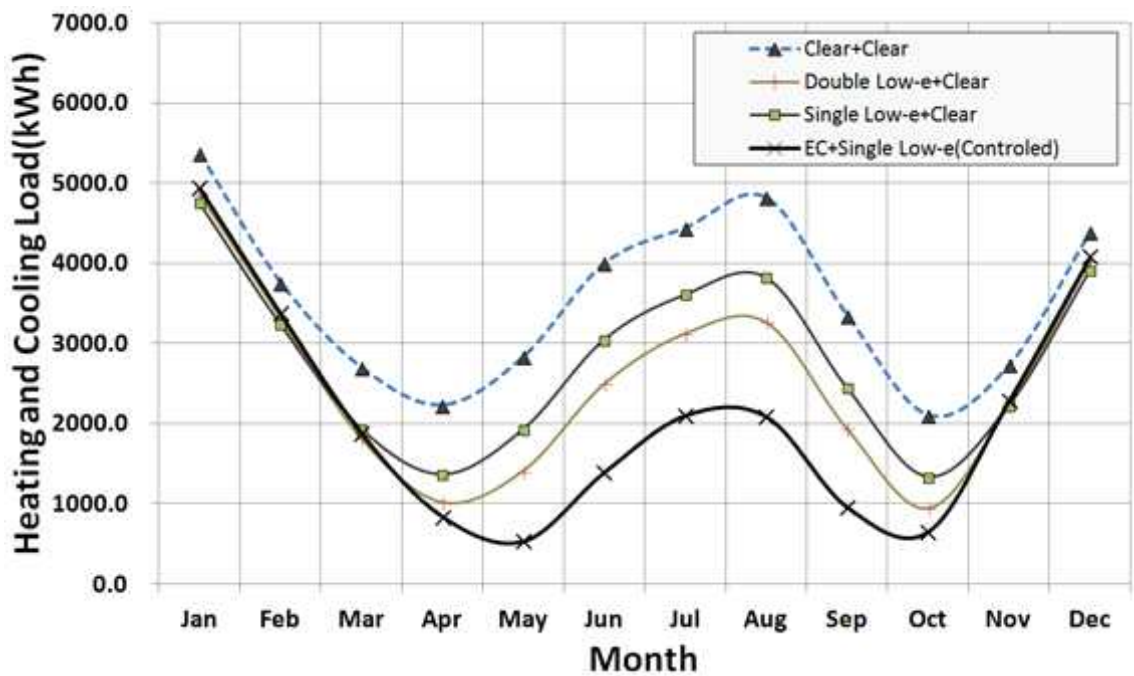
- 본 장에서는 앞서 유리 종류 별 연간 냉난방부하 분석을 통해 전기변색유리의 부하저감 성능에 대해 알아보하고자 함.
- 연간 냉난방부하는 남측, 동측, 서측, 북측 외주부 공간에 대해서만 분석하였으며, 분석 그룹의 분류는 색유리, Low-e유리, 롤셰이드, 외부루버 4가지로 구분했고 각 그룹별 유리 구성과 전기변색유리의 냉난방 부하량을 각각 비교

- 우선 첫 번째로색 유리와 전기변색유리의 냉난방부하를 비교 분석한 결과를 나타냄.
- 전기변색유리가 25140.1Wh로 가장 낮은 냉난방 부하량을 나타내 성능이 가장 우수한 것으로 분석 됨.
- 냉방부하측면에서 살펴보면, 색유리는 투명유리에 비해 일사획득계수가 낮기 때문에 냉방부하저감이 비교적 우수하나 전기변색유리가 착색되었을 때 보다는 성능이 좋지 않은 것으로 나타남.
- 난방부하측면에서는 색유리가 일사 차단율이 높아 투명유리보다 오히려 부하가 많이 발생하는 것으로 나타남.
- 반면, 전기변색유리는 탈색상태에서 투명유리보다 일사획득계수가 높지만 기본적으로 Low-e유리가 적용되어 있기 때문에 열관류율이 낮아 난방부하측면에서도 가장 우수한 것으로 나타남.

Division	Clear+Clear (Wh)	Green+Clear (Wh)	Blue+Clear (Wh)	Grey+Clear (Wh)	Controlled EC Double Glazing (Wh)
Jan	5370.7	5761.0	5888.8	5876.3	4942.0
Feb	3758.0	3955.2	4052.4	4042.8	3373.9
Mar	2699.3	2352.2	2337.6	2337.9	1879.5
Apr	2232.9	1443.5	1301.2	1313.6	840.2
May	2837.9	1781.3	1547.9	1569.1	534.9
Jun	4002.5	2915.5	2665.8	2688.6	1395.9
Jul	4444.6	3511.8	3291.6	3311.8	2103.1
Aug	4818.6	3721.3	3462.8	3486.9	2087.9
Sep	3348.9	2299.7	2059.8	2081.7	957.4
Oct	2105.1	1278.8	1112.5	1127.0	653.3
Nov	2731.8	2806.4	2853.6	2848.8	2289.3
Dec	4394.1	4739.8	4858.7	4847.4	4082.9
Total	42744.4	36566.5	35432.6	35531.9	25140.1

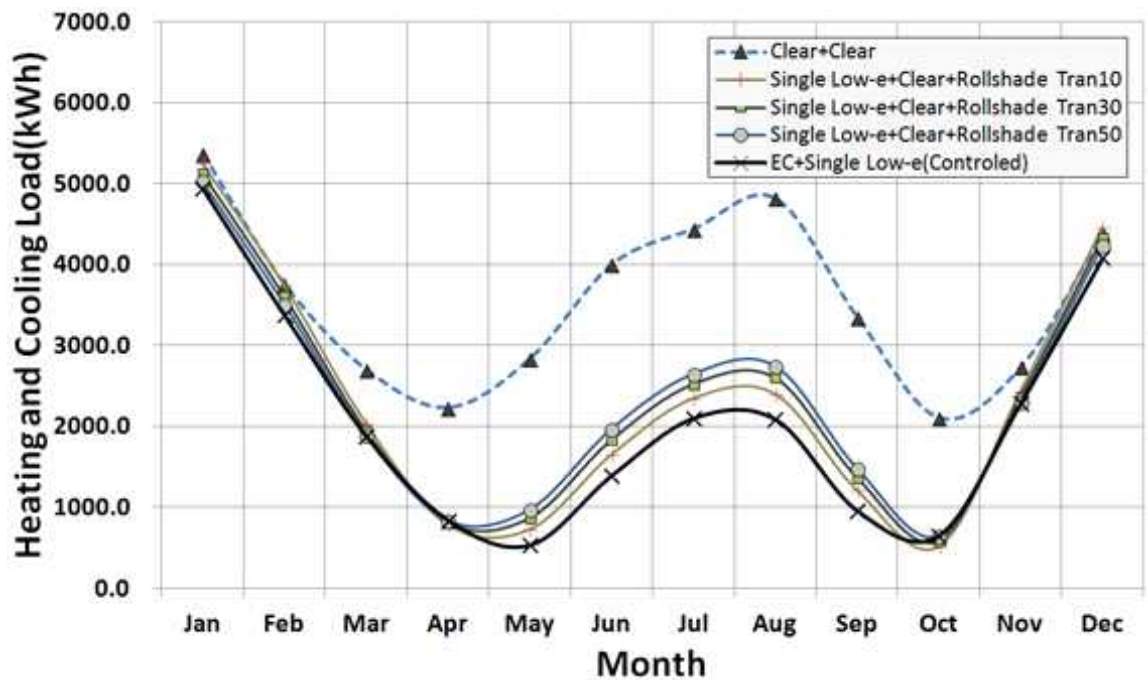


Division	Single Low-e + Clear (Wh)	Double Low-e + Clear (Wh)	Controlled EC Double Glazing (Wh)
Jan	4759.1	4861.9	4942.0
Feb	3239.6	3320.6	3373.9
Mar	1933.4	1813.5	1879.5
Apr	1366.6	1020.2	840.2
May	1929.8	1409.5	534.9
Jun	3049.7	2491.3	1395.9
Jul	3610.5	3118.8	2103.1
Aug	3824.1	3261.6	2087.9
Sep	2447.3	1933.1	957.4
Oct	1336.5	942.0	653.3
Nov	2228.5	2224.7	2289.3
Dec	3912.1	4026.2	4082.9
Total	33637.2	30423.3	25140.1



- 세번째로 Roll Shade와 전기변색유리의 냉난방 부하를 비교한 데이터를 나타내고 있음.
- Roll Shade는 한국의 사무소건물에서 가장 많이 사용되고 있는 Shading device.
- Roll shade의 종류가 다양함에 따라 본 연구에서는 투과율별로 10%, 30%, 50% 세 종류의 roll shade를 적용하여 분석 함.
- 분석결과 세 가지 종류의 roll shade에 비해 전기변색유리의 성능이 가장 우수한 것으로 나타남.
- 냉방부하 측면에서, roll shade가 투명유리에 비해 냉방부하를 크게 저감시킬 수 있지만 roll shade보다 전기변색유리의 일사확득계수가 낮기 때문에 전기변색유리가 조금 더 유리한 것으로 나타남.

Division	Single Low-e + Clear + Roll shade 10% (Wh)	Single Low-e + Clear + Roll shade 30% (Wh)	Single Low-e + Clear + Roll shade 50% (Wh)	Controlled EC Double Glazing (Wh)
Jan	5249.6	5123.4	5030.2	4942.0
Feb	3740.5	3604.8	3508.9	3373.9
Mar	2037.1	1942.8	1882.2	1879.5
Apr	791.8	807.9	832.8	840.2
May	730.8	862.8	970.3	534.9
Jun	1654.9	1829.7	1967.6	1395.9
Jul	2348.3	2517.9	2647.6	2103.1
Aug	2402.2	2596.3	2744.5	2087.9
Sep	1215.6	1363.1	1481.7	957.4
Oct	518.6	584.3	642.5	653.3
Nov	2438.4	2358.6	2303.9	2289.3
Dec	4461.3	4328.6	4232.5	4082.9
Total	27589.2	27920.1	28244.6	25140.1

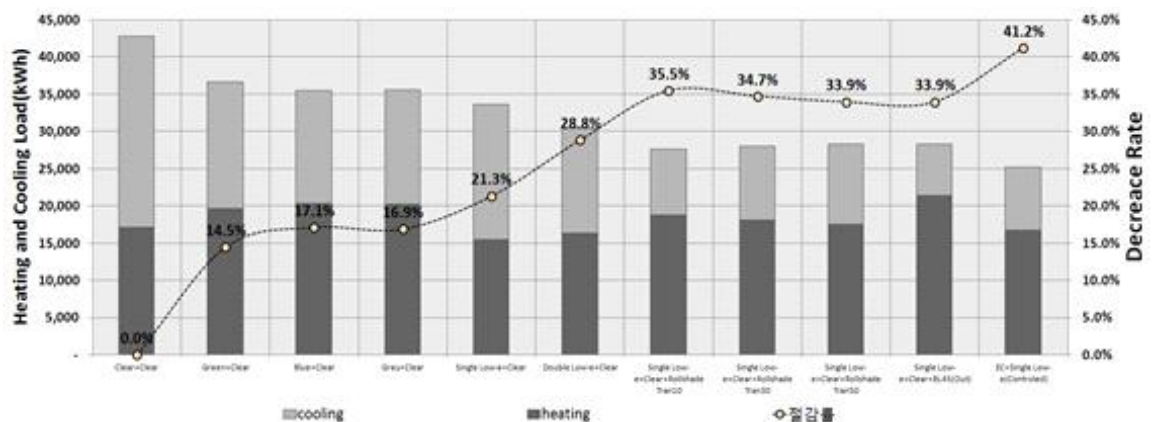
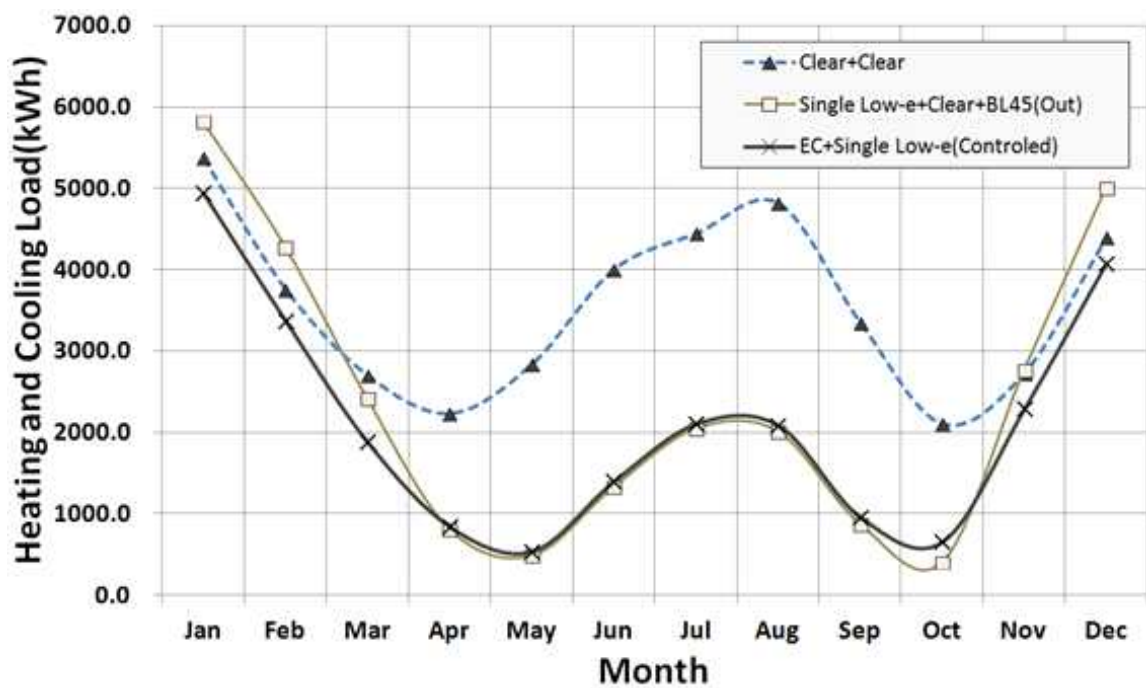


- 난방부하 측면에서는, 항상 닫혀있는 roll shade에 비해 전기변색유리는 탈색되어 일사를 유입 시킬 수 있어 난방부하를 저감시키는데 더 기여할 수 있는 것으로 나타남.
- 앞서 냉방부하측면에서 롤셰이드에 비해 전기변색유리가 일사획득계수가 낮을 수 있는 이유는, roll shade는 실내측에 설치되어 일사를 차단하여 외부로 빠져나가지 못하는 일부 장파복사로 인해 온실효과가 발생하지만 전기변색유리는 가장 실외측에서 일사를 차단함에 따라 일사차단효과가 큰 것으로 판단 됨.
- 네 번째로 외부 루버와 전기변색유리를 비교한 결과를 나타내고 있음.
- 외부루버는 가장 일사 차단율이 높은 shading device로 알려져 있음.
- 분석결과를 보면, 냉방부하 측면에서 전기변색유리가 외부루버와 유사한 성능을 나타내고 있는 것을 확인 할 수 있음.
- 난방부하 측면에서 외부 루버는 동절기에도 일사차단율이 지속적으로 높기 때문에 난방부하측면에서 성능이 좋지 않은 것으로 나타나고 있지만 전기변색유리는 동절기

에 탈색이 되면서 일사를 유입해 외부루버와 성능차이가 크게 발생하는 것을 알 수 있음.

- 따라서 외부루버에 비해서도 전기변색유리는 성능이 우수함을 확인 할 수 있음.

Division	Exterior Louver + Single Low-e + Clear (Wh)	Controlled EC Double Glazing (Wh)
Jan	5249.6	4942.0
Feb	3740.5	3373.9
Mar	2037.1	1879.5
Apr	791.8	840.2
May	730.8	534.9
Jun	1654.9	1395.9
Jul	2348.3	2103.1
Aug	2402.2	2087.9
Sep	1215.6	957.4
Oct	518.6	653.3
Nov	2438.4	2289.3
Dec	4461.3	4082.9
Total	27589.2	25140.1

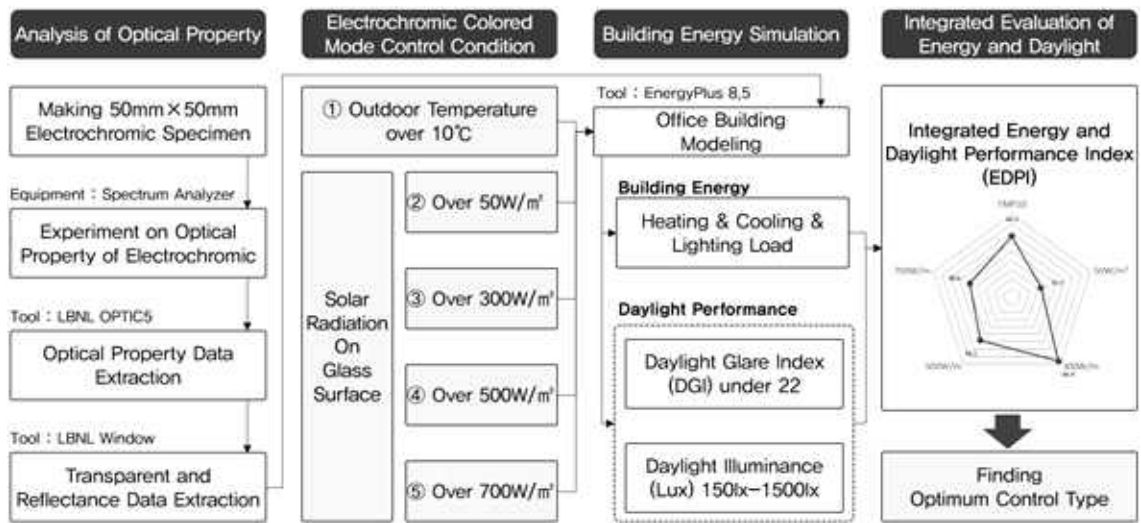


- 위 그래프는 색유리, Low-e유리, roll shade, 외부루버를 종합적으로 비교한 결과를 나타내고 있음.
- 분석결과, 투명유리를 기준으로 했을 때 전기변색유리가 41.2%의 냉난방부하를 저감시킬 수 있어 성능이 가장 우수한 것으로 나타남.
- 본 연구의 목적은 본 연구진이 개발한 전기변색유리를 한국의 사무소건물에 적용했을 때 냉난방 부하 저감성능이 기존에 사용되고 있는 색유리, Low-e유리, roll shade, 외부루버와 비교하여 어느 정도 수준인지를 평가함에 있음.
- 본 연구에서 찾은 결론은 아래와 같음.
- 첫 번째로, shading device가 없는 색유리와 Low-e유리에 비해 전기변색유리는 자체적인 광학특성 조절이 가능하기 때문에 별도의 shading device 없이도 냉난방 부하를 저감시키는데 큰 효과가 있는 것으로 분석됨.
- 두 번째로, 기존에 한국에서 가장 많이 사용되고 있는 roll shade와 비교했을 때 전기변색유리는 착색 시 일사획득계수가 roll shade보다 더 낮아 냉방부하 저감 성능이 우수할 뿐만 아니라, 동절기 탈색 상태를 유지할 경우 항상 차폐시킨 상태로 유지시키는 한국의 보편적인 roll shade 운영방식 보다 난방 부하측면에서도 우수한 것으로 나타남.
- 세 번째로, 일사 차단율이 가장 우수하다고 알려져 있는 외부 루버와 비교했을 때, 전기변색유리의 착색상태는 외부루버와 유사한 성능을 나타내는 것으로 분석되어 일사 조절 장치로 충분히 가능성이 있음을 확인 함.

② 전기변색유리 광학특성 최적제어 방안 도출

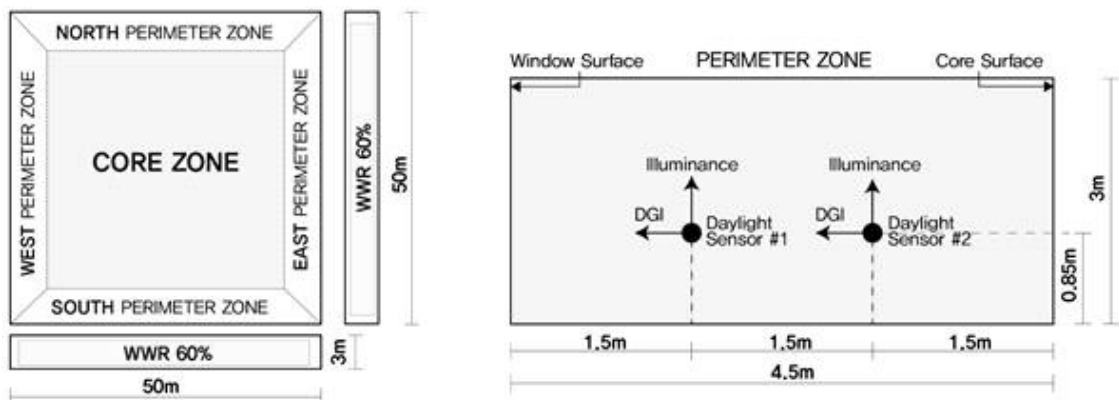
(1) 연구의 방법

- 연구방법은 우선본 연구진에 의해 개발된 전기변색유리의 탈색과 착색상태에서의 투과율 데이터 확보를 위해 전기변색유리 시료(50mm×50mm)를 제작하고 분광분석기를 이용하여 광학특성을 분석하는 실험을 수행함.
- 분광분석기를 통해 도출된 광학 데이터를 바탕으로 LBNL의 Optic 프로그램으로 태양 투과율, 태양 반사율, 가시광선 투과율, 가시광선 반사율을 도출한 뒤, LBNL의 Window 프로그램을 활용하여 Glass의 투과율 및 반사율 데이터를 확보.
- 이렇게 구성된 투과율 및 반사율 데이터를 건물에너지 해석 프로그램 인 EnergyPlus 시뮬레이션 툴에 입력하여 전기변색유리 투과율 제어조건별로 사무소건물의 건물에너지와 빛환경성능을 분석함.
- 전기변색유리의 투과율 제어범위는 1) 실외온도 10℃를 중심으로 이상일 경우 착색, 이하일 경우 탈색으로 제어하는 온도제어 방식과 유리면에 도달하는 일사량이 2) 50W/m², 3) 300W/m², 4) 500W/m², 5) 700W/m² 넘을 때 착색이 되는 일사량 제어 방식으로 총 5개의 제어조건을 가정함.
- 각 제어조건에 따라 사무소 해석 모델의 하절기 및 동절기 대표일과 월별 냉방, 난방, 조명에너지를 도출하여 에너지 소비 총량의 차이, 에너지 소비 경향, 에너지 소비 총량의 차이에 대한 원인을 분석
- 또한 각 제어조건별로 DGI(Daylight Glare Index)를 분석하여 사무소 기준 DGI 22이하를 만족하는 연간 총 시간의 비율, 사무소 건물의 실내 적정조도인 150lx-1500lx의 범위에 들어오는 연간 총 시간의 비율을 분석하여 불쾌현황, 실내조도에 대한 데이터 분석을 통해 빛환경 성능을 평가하였음.
- 최종적으로 에너지소비량과 빛환경성능을 통합 평가하기 위해서로 단위가 다른 에너지소비량, DGI, 실내적정조도 각각의 결과 값을 백분위로 단일 지수화하여 electrochromic 제어 최적안을 도출.
- 그림 1은 본 연구의 방법 및 범위를 Flow chart로 나타내고 있음.



(2) 건물에너지 성능평가를 위한 사무소건물 해석모델

- 본 연구에서는 건물에너지 해석 시뮬레이션 도구로 미국 DOE(Department of Energy)에서 개발한 EnergyPlus 8.5를 사용함.
- EnergyPlus는 열평형(heat balance)방정식에 기반하여 창호에 대한 세부적인 전도, 대류, 복사에 의한 열전달과 일사(Solar radiation)에 대한 투과, 반사, 흡수 특성에 대한 계산이 가능한 장점이 있어 전기변색유리 탈색과 착색에 의한 건물 에너지 영향을 평가하는데 적합.
- EnergyPlus는 건물 에너지에 대한 해석 뿐만 아니라 본 연구에서 분석하고자 하는 Daylight Performance에 대한 분석이 가능.
- EnergyPlus에서 Daylight sensor를 해석모델의 Zone에 적용함으로써 Daylight sensor 설치 위치에서 재실자가 창면을 바라봤을 때의 현휘(Glare)의 정도를 평가할 수 있는 DGI(Daylight Glare Index)지수에 대해 분석이 가능한 Component를 제공하고, Daylight sensor를 통해 실내 조도 분석과 Illuminance Map을 그리드 형태로 적용하여 실내 조도 분포에 대해 Detail 한 분석이 가능한 장점을 가지고 있음.
- 시뮬레이션을 위한 해석모델은 아래 그림과 같이 50m x 50m의 바닥 면적과 층고 3m, 창면적비 60%의 사무소건물.
- 시뮬레이션 해석모델의 층수는 총 3개 층으로 구성하였으며, 중간층에 대해 분석을 수행.
- 외벽을 기준으로 4.5m이내의 공간은 외주부로서 방위별로 공간을 구분하였고, 남측, 동측, 서측의 외주부공간에 대하여 건물에너지와 빛환경성능을 분석함.



- 불투명 외벽은 건물에너지절약설계기준(2016)의 단열기준을 따라 구성.
- 해석모델에 적용된 유리의 물성은 앞서 도출한 전기변색유리의 광학특성데이터를 기반으로 LBNL의 Window Tool을 사용하여 건물에너지절약설계기준에 따라 삼중 전기변

색유리로 구성하였고, 유리의 구성은 8mm Electrochromic Glass +12mm Air + 6mm Clear Glass + 12mm Air + 6mm Low-e Glass 으로 열관류율 1.192W/m²K의 열적 특성을 갖고 있음.

- 삼중 전기변색유리의 광학적 특성은 탈색상태에서 SHGC(Solar Heat Gain Coefficient) 0.357, Tvis(Visible Transmittance) 0.463의, 착색상태에서는 SHGC 0.107, Tvis 0.085의 특성을 나타냄.

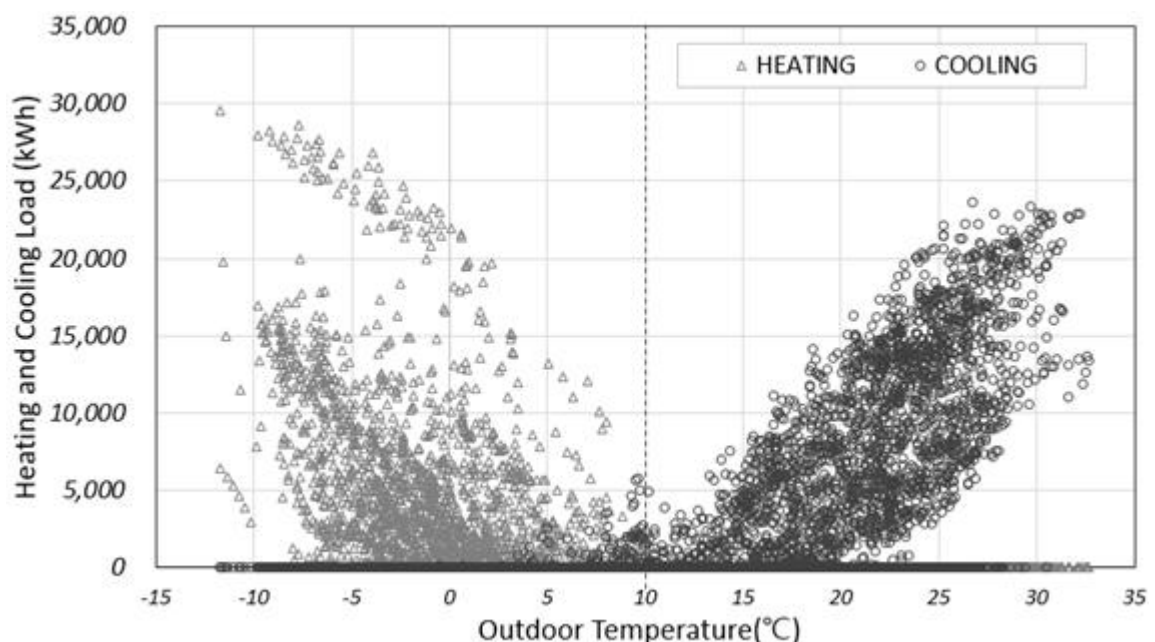
Division	Materials	Thermal & Optical Properties	
Exterior wall	200 mm concrete 155 t insulation 19 mm gypsum board	U-value 0.202 W/m²K	
Exterior Floor	105 mm insulation 200mm concrete	U-value 0.291 W/m²K	
Exterior Roof	100mm concrete 220mm insulation Ceiling air space Acoustic tile	U-value 0.136 W/m²K	
Glazing	44 mm Triple glazing (8mm Electrochromic + 12 air + 6mm clear glass + 12mm air + 6mm low-e glass))	Bleached	Colored
		SHGC 0.357 Tvis 0.463 U-value 1.192	SHGC 0.107 Tvis 0.085 U-value 1.192

- 해석모델의 설정온도는 건축물의 에너지절약설계기준 상 냉난방설비 용량 계산을 위한 실내온도 기준을 따라 각각 20℃, 26℃로 설정 하였고, HVAC 시스템은 시스템변수에 의한 간섭을 최대한 배제한 부하 분석을 위하여 EnergyPlus에서 제공하는 IdealLoadsAirSystem을 적용.
- IdealLoadsAirSystem은Zone에서 요구된 냉방 및 난방부하가 무한 용량의 가상 공조 시스템에 의해 처리되며, 지정된 공급 공기와 혼합(환기+외기)공기의 엔탈피차에 의해서만 부하계산을 수행 하게 됨.
- 내부 열취득은 ASHRAE Fundamentals (2009)의 기준에 따라 Overhead lighting 10.8W/m², Peak occupancy 22.3m²/person, Equipment 8.6W/m²을 적용.
- 인체, 조명, 기기의 내부 열취득 스케줄은 EnergyPlus의 DataSets의 Schedules에서 제공하는 Office Schedule를 적용하였고, 외기도입량은 건축물 에너지효율등급 인증제도 운영규정에 따라 1.1m³ /m² h를 적용.
- 기상데이터는 한국의 인천지역 기상데이터를 활용.
- 인천지역의 climatic conditions는 겨울에는 대륙의 한랭한 고기압, 여름에는 고온다습한 해양기단의 영향을 받아 기온의 연교차가 30℃에 이르는 대륙성 기후를 나타내는 특징.
- EnergyPlus는 그림 4의 Daylight sensor를 이용하여 Step 방식, Continuous 방식 Continuous/off 방식으로 조명을 Dimming control 할 수 있는 Component를 제공.
- 본 연구에서는 전기변색유리의 투과율 제어에 따른 조명에너지 저감 성능을 평가하기 위해 실내 조도 700lx를 기준으로 Dimming control을 함.
- Dimming control 방식은 0lx일 때 100% 조명에너지가 소비되고 700lx가 되면 조명에너지를 사용하지 않으며, 0lx부터 700lx까지 continuous한 방식으로 제어되도록 설정.
- 2개의 Daylight sensor에서 실내 조도를 감지하도록 하였고, 각각의 Daylight sensor에 의해 방위별 외주부 조명을 50%씩 담당하도록 설정.

(3) 전기변색유리 제어 조건

- 전기변색유리는 유리의 투과율을 조절할 수 있어 일사조절장치로서 활용될 수 있음.

- 건물에서의 일사 조절 목적은 에너지 관점에서 냉방, 난방, 조명에너지를 저감 시키는 것이고, 건축환경 측면에서 눈부심 발생 감소와 실내 적정 조도를 유지하기 위함
에 있음.
- 따라서 에너지와 건축 환경을 만족시킬 수 있도록 외부환경 조건에 따라 적절한 투
과율로 전기변색유리를 제어하는 것이 중요.
- 또한 전기변색유리를 제어하기 위해 외부환경 조건을 감지 해야하는데 조건에 해당
하는 변수를 최대한 간소화할 필요.
- 만약 제어 방법 개발 시 최적 알고리즘이 복잡한 조건에 의해 전기변색유리를 제어
하게 된다면 센서의 종류가 다양해지고 컨트롤러의 하드웨어 및 소프트웨어 개발이
어려울 뿐만 아니라 컨트롤러 비용이 증가해 경쟁력을 잃을 수 있음.
- 또한 복잡한 제어 알고리즘은 형태, 방위, 기상조건 등 다양한 변수가 존재하는 건
물을 대응하기 위해서는 case별로 재 개발이 필요함에 따라 상용화에 어려움이 있을
수 있음.
- 본 연구에서는 상용화 단계에 있는 전기변색유리의 제어 변수를 최소화할 수 있으면
서 건물 에너지와 건축환경 측면에서 모든 조건을 최대한 만족시키기 위한 제어 방
법을 연구하고자 함.
- 제어 변수 최소화를 위해 본 연구에서는 전기변색유리 제어 방식 개발의 초기 단계
로, 외부환경 조건의 범위를 외기 온도와 일사량 변수로 한정.
- 첫 번째로 외기 온도 조건에 따른 변색 유리 제어 방법으로, 외기 온도 10℃를 기준
으로 10℃보다 높을 경우 착색, 10℃보다 낮을 경우 탈색이 되는 제어 조건을 설정
하였음.
- 온도에 따른 제어 조건을 도출한 배경은, 사무소건물 해석모델을 기준으로 외기 온
도 조건에 따른 냉방 및 난방 부하 사용 패턴을 산점도로 분석한 결과, 10℃를 기준
으로 냉방과 난방 부하 발생이 나뉘는 것을 확인 할 수 있었음.
- 따라서 냉방 부하가 발생하는 외기 온도 범위에서는 전기변색유리를 착색시켜 일사
에 의한 부하를 저감시키고, 난방 부하가 발생하는 외기 온도 범위에서는 전기변색
유리를 탈색시켜 일사 유입을 통한 난방 부하를 저감시키고자 하는 의도로 외기 온
도 제어 조건을 설정.



- 두 번째로 유리면에서 감지된 일사량에 따른 변색 유리 제어 방법으로, 50W/m², 300W/m², 500W/m², 700W/m² 4가지 조건을 설정하였고, 각각의 일사량 조건 이하일
경우 탈색, 일사량 조건 이상일 경우 착색이 되도록 하였음.
- 일사조절장치의 기본적인 역할 중 하나는 창면을 바라봤을 때 눈부심을 억제하는 것

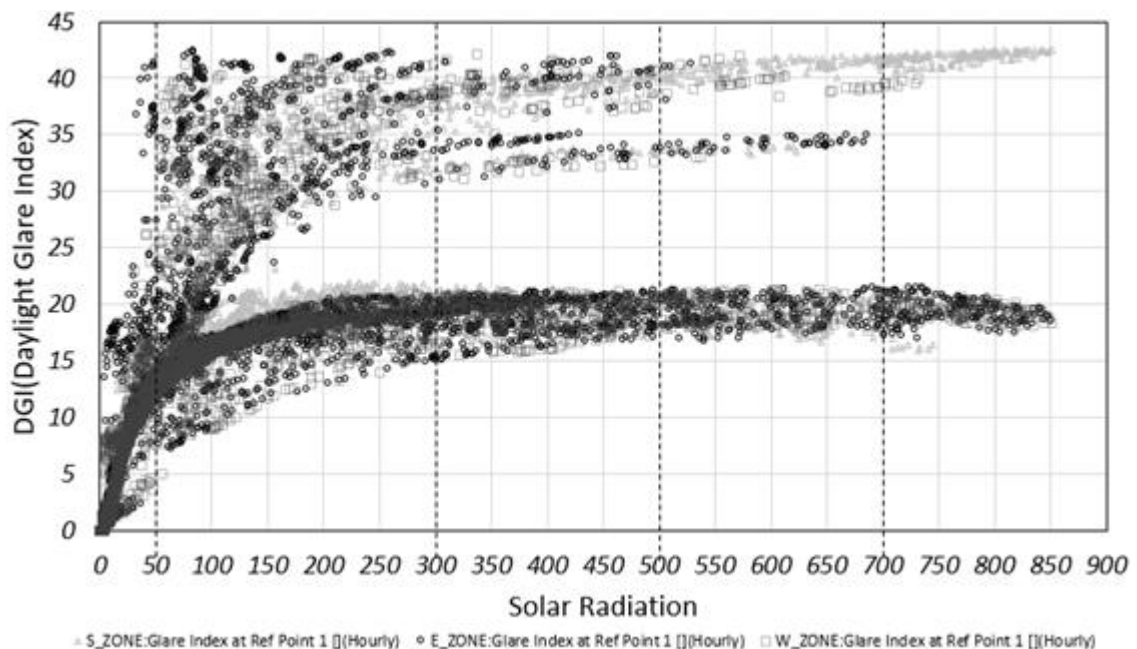
임.

- 따라서 일사량에 따른 제어 조건에서는 앞서 외기 온도에 따른 제어 조건과 달리 냉방 및 난방부하뿐만 아니라 눈부심도 함께 고려하여 조건을 설정.
- 눈부심을 고려하여 일사 조건 설정 방법은 일사량에 따른 DGI 분석 결과를 토대로 눈부심을 최소화할 수 있는 일사량을 도출.
- 창면을 바라봤을 때 눈부심에 대해 지수화 한 지표로서 DGI가 있는데, DGI 지표에서는 사무소건물의 경우 22이하를 만족해야 한다고 정의.
- 따라서 일사량에 따른 변색유리 제어 조건 설정 시, 우선 유리면 일사량에 따른 DGI를 그림 6과 같이 산점도로 분석한 뒤, DGI 22를 넘어가기 시작하는 일사량인 50 W/m²을 최소 기준으로 선정하였음.
- 50 W/m²의 일사 조건은 일사가 발생하면 바로 착색이 되는 조건이기 때문에 현휘를 최소화하고 냉방부하 저감에 효과가 있을 것으로 예상.

Temperature / Solar Radiation	Consideration Factor			
	Glare Reduction	Heating Load Reduction	Cooling Load Reduction	Lighting Energy Reduction
10℃	△	●	●	△
50W/m ²	●	△	●	△
300W/m ²	◎	△	●	◎
500W/m ²	△	◎	◎	◎
700W/m ²	△	●	△	●

●:Excellent ◎:Normal △:Weak

- 나머지 일사량 조건은 표 3과 같이 300W/m², 500W/m², 700W/m² 3단계로 구분되며, 현휘, 냉방, 난방, 조명 부하 중 중점적으로 저감시켜야 할 각각의 요소 고려하여 일사량 조건을 설정하였음.
- 일사량 조건 중 300W/m²는 냉방 부하 저감과 주요 목적으로 설정하였고, 조명 에너지와 눈부심 발생 저감을 일부 기대.
- 500 W/m²은 냉방, 난방, 조명에너지를 균형적으로 저감시키는 목적으로 하였음.
- 700 W/m²은 난방과 조명에너지 저감에 목적을 두고 제어 조건을 설정.
- 이처럼 온도와 일사량에 따른 각 5가지 조건은 기대하는 효과가 모두 다르기 때문에 사무소건물 해석모델을 대상으로 제어 조건에 따라 전기변색유리를 제어 했을 때 냉방 및 난방 부하, 조명에너지, DGI, 실내 조도에 대하여 동적 건물에너지 시뮬레이션 Tool인 EnergyPlus 8.5를 활용하여 분석하고자 함.

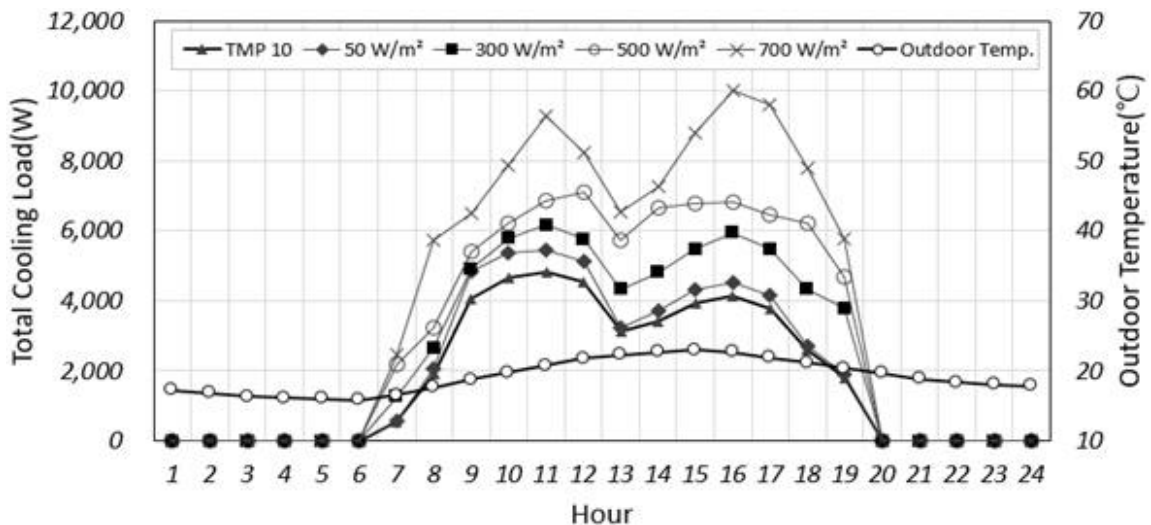


(4) 전기변색유리 제어 조건에 따른 건물에너지 소비량 분석결과

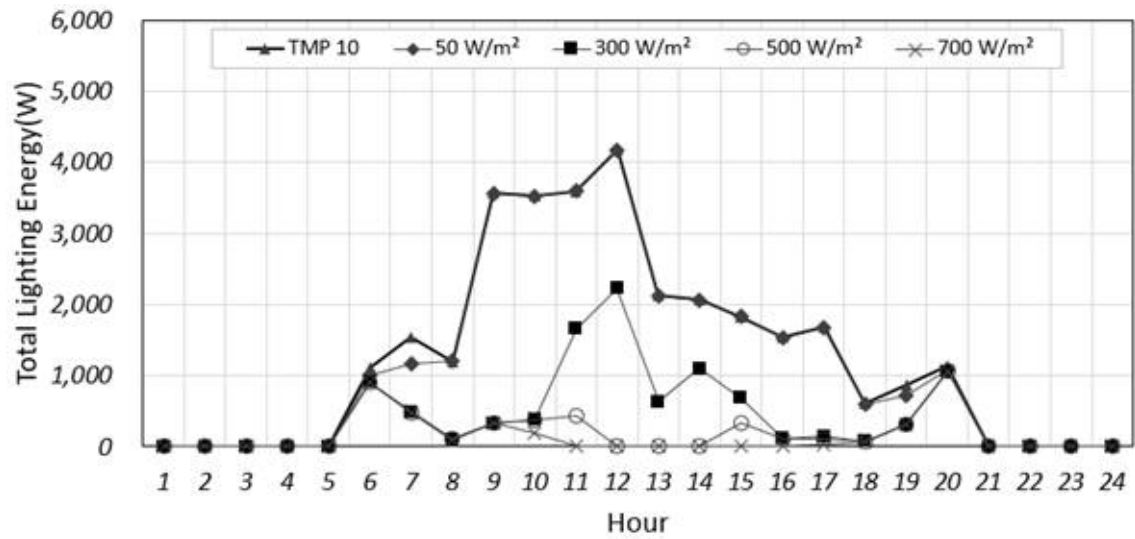
가) 제어 조건에 따른 시간별 에너지 소비량 분석

- 본장에서는 전기변색유리의 투과율 제어조건에 따라 냉방 및 난방 부하, 조명에너지 소비량의 차이를 평가하기 위해 하절기와 동절기 대표일에서의 시간별데이터를 집중적으로 분석하였음.
- 대표일 선정은 인천지역 기상데이터 분석을 통해 하절기 대표일은 6월부터 8월 중 일사량이 가장 높은 날(6월 10일), 동절기 대표일은 11월부터 1월 중 일사량이 가장 높은 날(12월 21일)을 기준으로 선정.
- 냉방 및 난방 부하는 앞서 전기변색유리 제어조건에 따라 EnergyPlus 8.5의 IdealLoadAirSystem 모델을 사용하여 냉난방 설정온도 20℃와 26℃에 도달 하기 위해 필요한 냉난방 부하를 계산하게 됨.
- 조명 에너지는 700lx를 기준으로 Dimming control 되는 조건 임에 따라 실내 조도에 따라 조명에너지 소비량에 차이가 발생하게 됨.
- 그림 7과 표 4는 하절기 대표일의 냉방 부하를 나타내고 있음.
- 분석 결과, 온도에 의해 제어되는 전기변색유리가 가장 냉방 부하 저감 효과가 뛰어난 것으로 나타났고, 일사량에 의한 제어는 일사량이 낮은 상태에서 착색이 되는 조건일수록 냉방 부하 저감 성능이 우수한 것으로 분석되었음.
- 온도 제어 방식이 가장 성능이 우수한 이유를 분석해보면, 그림 7에 나타난 바와 같이 하절기 대표일의 외기온은 항상 10℃ 이상 임에 따라 10℃ 이상에서 착색되는 온도 제어 방식은 하절기 대표일에 항상 착색이 되기 때문에 일사 차단 성능이 가장 우수한 것을 알 수 있음.
- 반면 조명에너지 소비량은 온도제어 방식이 가장 에너지를 많이 사용하는 특징을 나타냄.
- 앞서 설명한 바와 같이 하절기 대표일에서 온도제어 방식은 항상 착색이 되어 있기 때문에 투과되는 태양 빛의 양이 적어 실내 조도가 다른 조건에 비해 낮으며, 조명이 Dimming control되는 조건이기 때문에 조명 에너지 소비량이 가장 많은 것으로 분석됨.

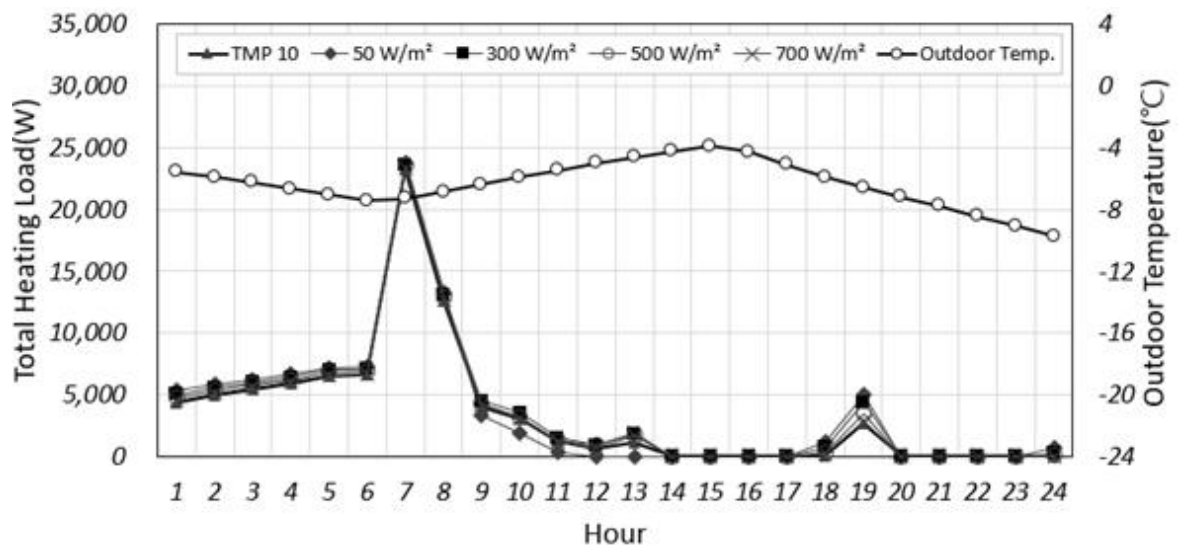
Heating Load(kWh)	TMP 10	50W/m ²	300W/m ²	500W/m ²	700W/m ²
South Zone	7.2	11.5	15.5	20.7	22.0
East Zone	20.1	20.2	25.5	29.5	39.6
West Zone	16.1	16.2	19.7	24.1	34.3
Total Heating Load	47.6	48.0	60.7	74.3	95.9



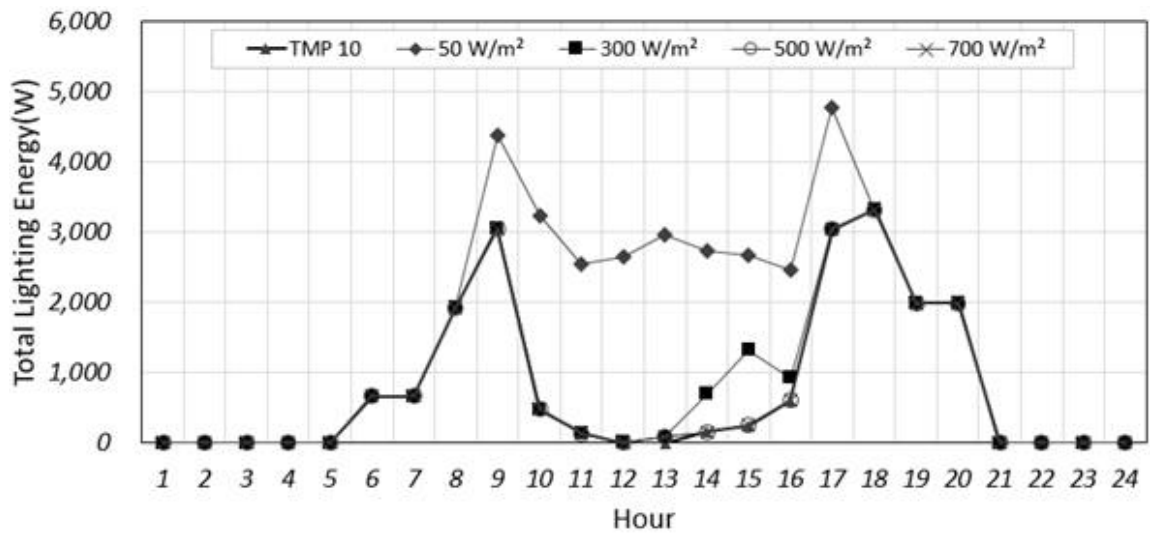
Lighting Energy(kWh)	TMP 10	50W/m²	300W/m²	500W/m²	700W/m²
South Zone	11.5	11.2	4.9	1.0	1.0
East Zone	8.1	8.0	3.0	1.8	1.2
West Zone	11.0	11.0	2.3	1.8	1.3
Total Lighting Energy	30.5	30.0	10.2	4.6	3.5



Heating Load(kWh)	TMP 10	50W/m²	300W/m²	500W/m²	700W/m²
South Zone	22.3	27.2	26.8	25.2	23.1
East Zone	28.6	31.6	30.9	29.8	29.2
West Zone	31.6	34.2	33.9	32.7	32.1
Total Heating Load	82.5	93.0	91.6	87.7	84.5



Lighting Energy(kWh)	TMP 10	50W/m²	300W/m²	500W/m²	700W/m²
South Zone	5.2	7.8	5.6	5.3	5.3
East Zone	6.8	15.8	6.8	6.8	6.8
West Zone	6.3	15.3	7.9	6.3	6.3
Total Lighting Energy	18.3	39.0	20.3	18.4	18.4



- 동절기 대표일에서의 난방 부하로서 난방 부하 측면에서도 온도에 의한 전기변색유리 제어가 가장 성능이 우수한 것으로 분석되었음.
- 온도 제어 방식은 외기온이 10℃ 이하일 경우 탈색이 되는 조건인데, 그림 9에 나타난 바와 같이 외기온이 항상 10℃ 이하임에 따라 탈색상태를 유지하여 태양일사 유입이 가장 많기 때문인 것으로 분석됨.
- 일사량에 의한 전기변색유리 제어는 일사량이 높은 상태에서 착색이 되는 조건일수록 난방 부하 저감 성능이 우수한 것으로 분석되었음.
- 조명에너지 소비량은 온도제어 방식이 동절기 대표일의 외기온이 항상 10℃이상이기 때문에 탈색 상태를 유지하여 가장 에너지를 적게 사용하는 특징을 나타내고 있음.
- 하절기와 동절기 대표일의 시간별 데이터 분석을 종합해보면 분석결과, 냉방 부하 측면에서는 온도 제어와 일사량 50 W/m² 제어 방식이 유리 것으로 나타났고, 난방 부하 측면에서는 온도 제어와 일사량 700 W/m² 제어 방식이 우수한 성능으로 분석되었음.
- 조명 에너지 소비량 측면에서는 하절기에는 일사량 500, 700 W/m² 제어 방식, 동절기에는 온도 제어 방식이 유리한 것으로 나타남.
- 본 장에서는 시간별 데이터 분석을 통해 각각의 제어 조건에 따라 냉방 및 난방 부하와 조명에너지 소비 경향에 대해 알아보았고, 성능평가 결과, 각 제어 조건이 냉방, 난방, 조명 중 어느 것에 유리한지를 파악할 수 있었음.
- 본 분석 결과는 향후 전기변색유리 상용화를 위한 제어 조건 개발 시 기초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 판단됨.

Temperature / Solar Radiation	Consideration Factor			
	Heating Load Reduction	Cooling Load Reduction	Lighting Energy Reduction	
			Cooling Period	Heating Period
10℃	●	●	△	●
50W/m²	△	●	△	△
300W/m²	△	◎	◎	◎
500W/m²	◎	△	●	●
700 W/m²	●	△	●	●

●:Excellent ◎:Normal △:Weak

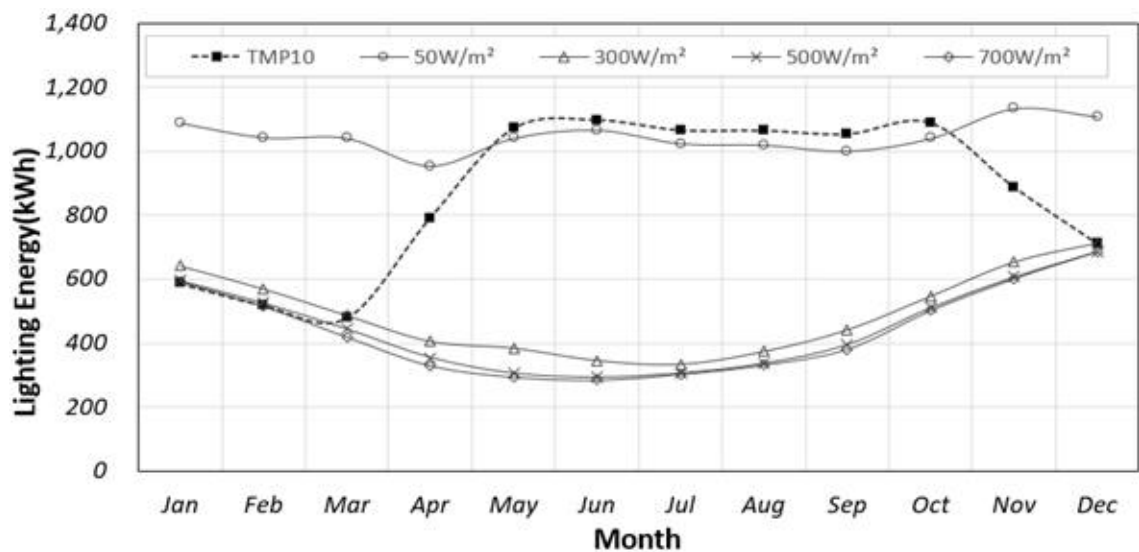
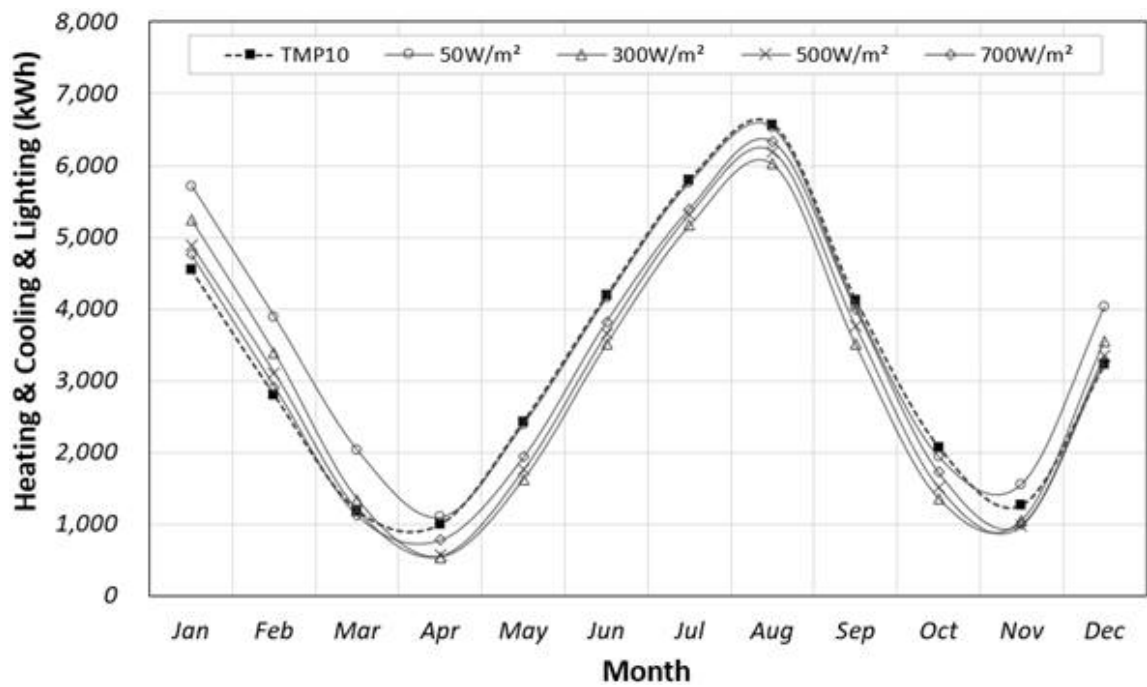
(5) 제어 조건에 따른 연간 에너지 소비량 분석

- 시간별 데이터를 통해서는 제어 조건별로 하절기 및 동절기에서 냉방 및 난방 부하,

조명 에너지 소비에 대한 개별적인 특성과 경향은 파악할 수 있지만, 연간 건물에너지 총량을 예측하는데 어려움이 있음.

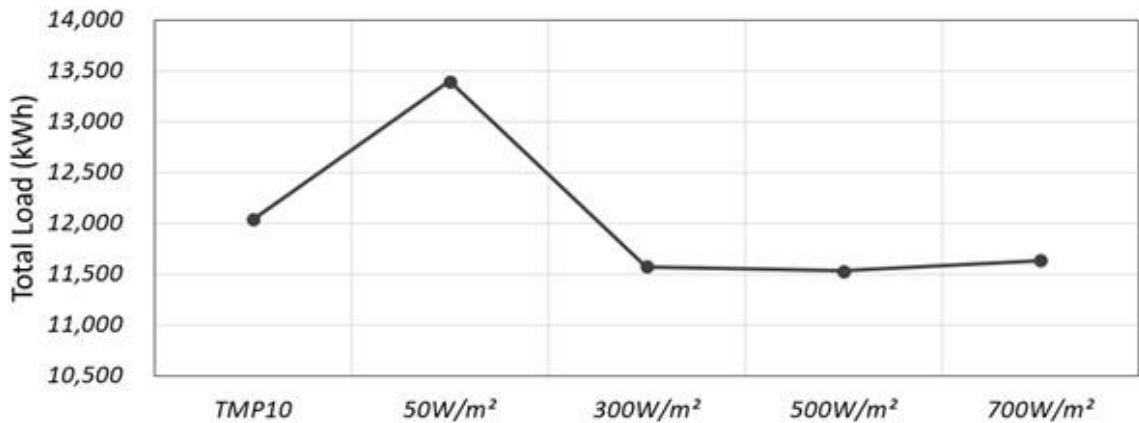
- 단편적으로 온도 제어 방식과 일사량 700 W/m² 제어 방식의 시간별 데이터 분석 결과를 살펴보면, 온도 제어 조건은 냉방 및 난방 부하와 동절기 조명 에너지 저감에 효과적이고, 일사량 700 W/m² 제어 방식은 난방 부하 저감과 동절기 및 하절기의 조명 에너지 저감에 효과적임.
- 이처럼 두 제어 조건 모두 3개 부분에서 우수한 성능을 나타내고 있는 경우 성능의 우수함을 판별하는데 어려움이 있음.
- 따라서 본 장에서는 제어 조건별로 연간 냉방 및 난방 부하, 조명에너지 총량에 대해 종합적으로 분석하고, 건물에너지 측면에서 전기변색유리 최적 제어 조건을 도출하고자 함.
- 연간 냉방 및 난방 부하, 조명에너지 소비량을 합한 월별 데이터를 나타내고 있고, 월별 데이터를 냉방 기간(April~October)과 난방 기간(November~March)으로 나누어 경향을 분석하였음.
- 냉방 기간에는 일사량 300 W/m² 제어 조건이 가장 우수한 성능으로 나타났다. 앞서 시간별 데이터에서는 일사 차단율이 높은 온도 제어 방식과 일사량 50 W/m²가 냉방 부하측면에서 우수한 편에 속하기는 했지만 냉방 부하와 조명에너지를 통합한 데이터에서는 일사량 300 W/m² 제어 조건이 가장 우수해 다른 경향이 나타남.
- 원인을 살펴보면, 온도 제어 방식과 일사량 50 W/m²이 하절기 동안 착색 상태 유지 빈도가 높음에 따라 조명에너지 소비량이 많았기 때문임을 알 수 있음.
- 냉방 부하 측면에서 가장 우수하지는 않지만 우수한 편에 속했던 일사량 300W/m² 제어 조건과 취약한 편에 속했던 500W/m², 700 W/m² 제어 조건들은 조명 에너지 소비량 측면에서는 우수한 편에 속한 그룹이었음.
- 따라서 이 그룹은 냉방 기간 동안에 조명에너지 사용량을 감소시킴으로써 오히려 건물에너지 총량에서는 온도 제어조건과 일사량 50W/m² 조건보다 우수한 성능을 나타내는 것으로 분석되었음.
- 난방 기간에는 일사량 온도 제어 조건이 가장 우수한 성능으로 나타남.
- 앞서 시간별 데이터에서도 일사 차단율이 높은 온도 제어 방식이 난방 부하 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났었음.
- 원인을 살펴보면, 온도 제어 방식은 동절기 동안 탈색되어 있는 상태를 유지함에 따라 다른 제어 방식에 비해 일사 투과량도 가장 많고, 실내 조도도 항상 높아 난방 부하와 조명에너지를 가장 많이 저감 시킬 수 있기 때문으로 분석됨.
- 일사 제어 방식도 시간별 데이터와 유사한 경향이 나타나 일사 조건이 높을수록 에너지 소비량이 적은 것으로 나타남.

Month		TMP 10	50W/m ²	300W/m ²	500W/m ²	700W/m ²
Cooling Period (kWh)	Apr	991.5	1097.5	543.7	564.4	780.3
	May	2422.2	2394.9	1630.6	1761.7	1936.9
	Jun	4184.4	4152.3	3514.8	3658.0	3822.7
	Jul	5799.7	5757.0	5169.6	5319.2	5393.9
	Aug	6570.2	6519.3	6026.4	6193.1	6327.2
	Sep	4118.5	4040.9	3505.4	3762.2	3999.8
	Oct	2065.2	1947.0	1360.0	1520.3	1723.7
	Total	26151.6	25908.8	21750.4	22778.9	23984.5
Heating Period (kWh)	Nov	1258.3	1559.4	1050.3	982.1	1002.3
	Dec	3224.8	4032.0	3555.3	3353.9	3268.9
	Jan	4539.3	5712.9	5245.7	4884.2	4754.4
	Feb	2794.6	3888.1	3391.0	3111.3	2914.7
	Mar	1185.4	2029.7	1341.9	1200.0	1118.6
	Total	13002.5	17222.0	14584.2	13531.6	13058.9



- 연간 냉방 및 난방 부하와 조명에너지 소비량의 총량을 나타낸 데이터로서 조명 제어를 적용한 사무소건물의 경우 일사량을 300W/m² 이상의 조건에서 착색시키는 제어 방법이 총 에너지 소비량을 저감시키는데 유리한 것으로 분석되었음.
- 이러한 특징이 나타나는 원인은 본 연구에서 구축한 해석모델의 전체 건물에너지 중 25% 정도 차지하는 조명에너지의 영향이 크기 때문임.
- 온도에 의한 제어 방식과 50 W/m²의 낮은 일사량에서 착색시키는 조건은 조명에너지가 다른 제어 조건에 비해 2배정도 많은 것으로 분석되었음.
- 반면 일사량 300W/m² 이상의 조건은 냉방 및 난방 부하 저감 성능이 보통에 해당하지만 다른 제어 조건과 약 2000kWh 정도로 차이가 적고, 약 5000kWh의 에너지를 Dimming control으로 저감시킬 수 있어 조명에너지의 영향이 큰 것을 알 수 있음.
- 따라서 건물에너지 저감을 위해서는 냉방 및 난방 부하 저감을 위한 전기변색유리 제어 방법 도출도 중요하지만 조명에너지를 통합 고려한 제어 전략이 요구됨을 확인할 수 있음.

Energy Consumption (kWh)	TMP 10	50W/m ²	300W/m ²	500W/m ²	700W/m ²
Heating Load	9777.4	11928.1	11573.2	10689.5	10192.9
Cooling Load	19152.4	18909.7	18988.4	20379.3	21725.8
Lighting Energy	10224.3	12293.0	5773.1	5241.7	5124.7
Total Load & Energy	39154.1	43130.8	36334.7	36310.5	37043.4

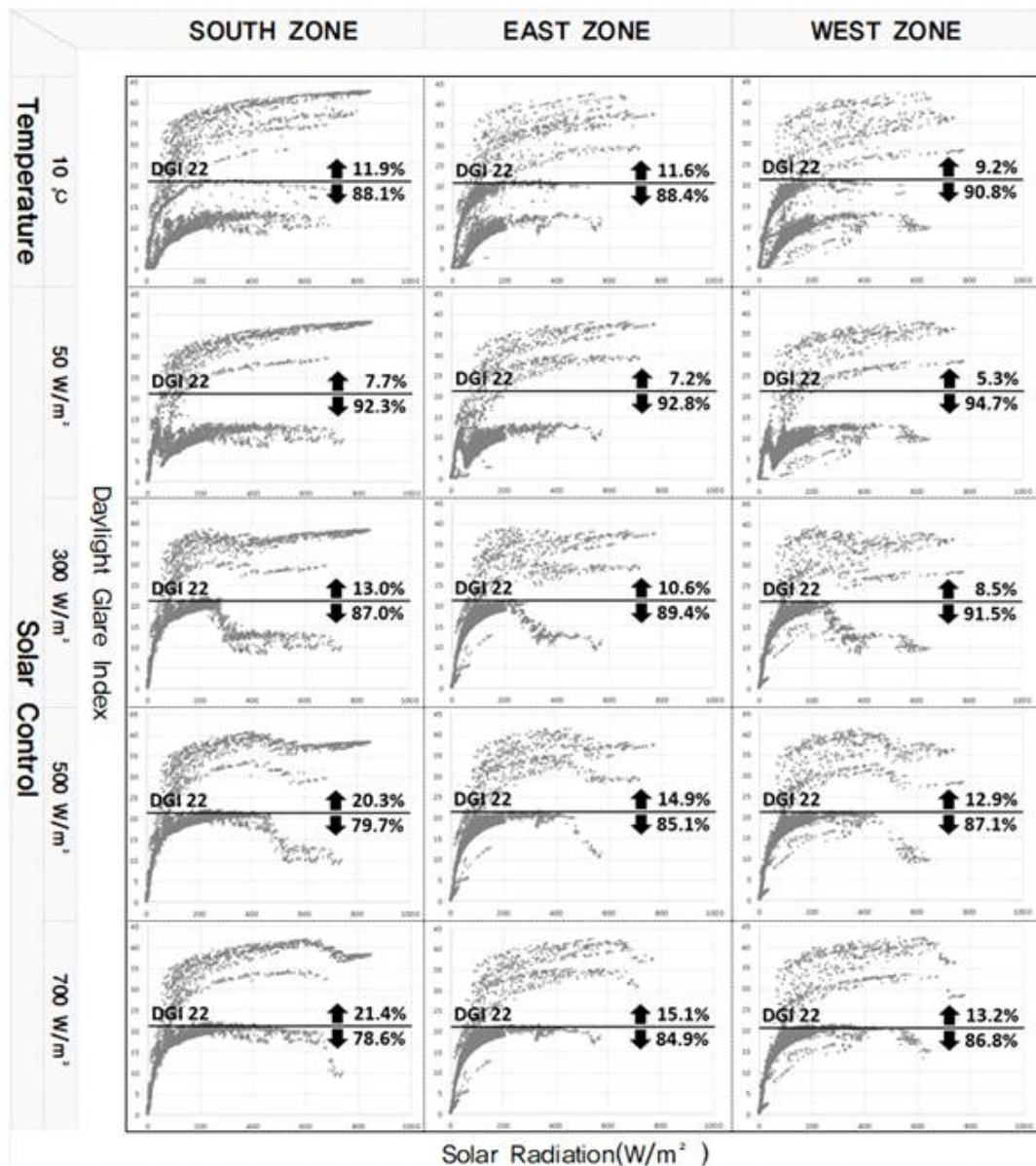


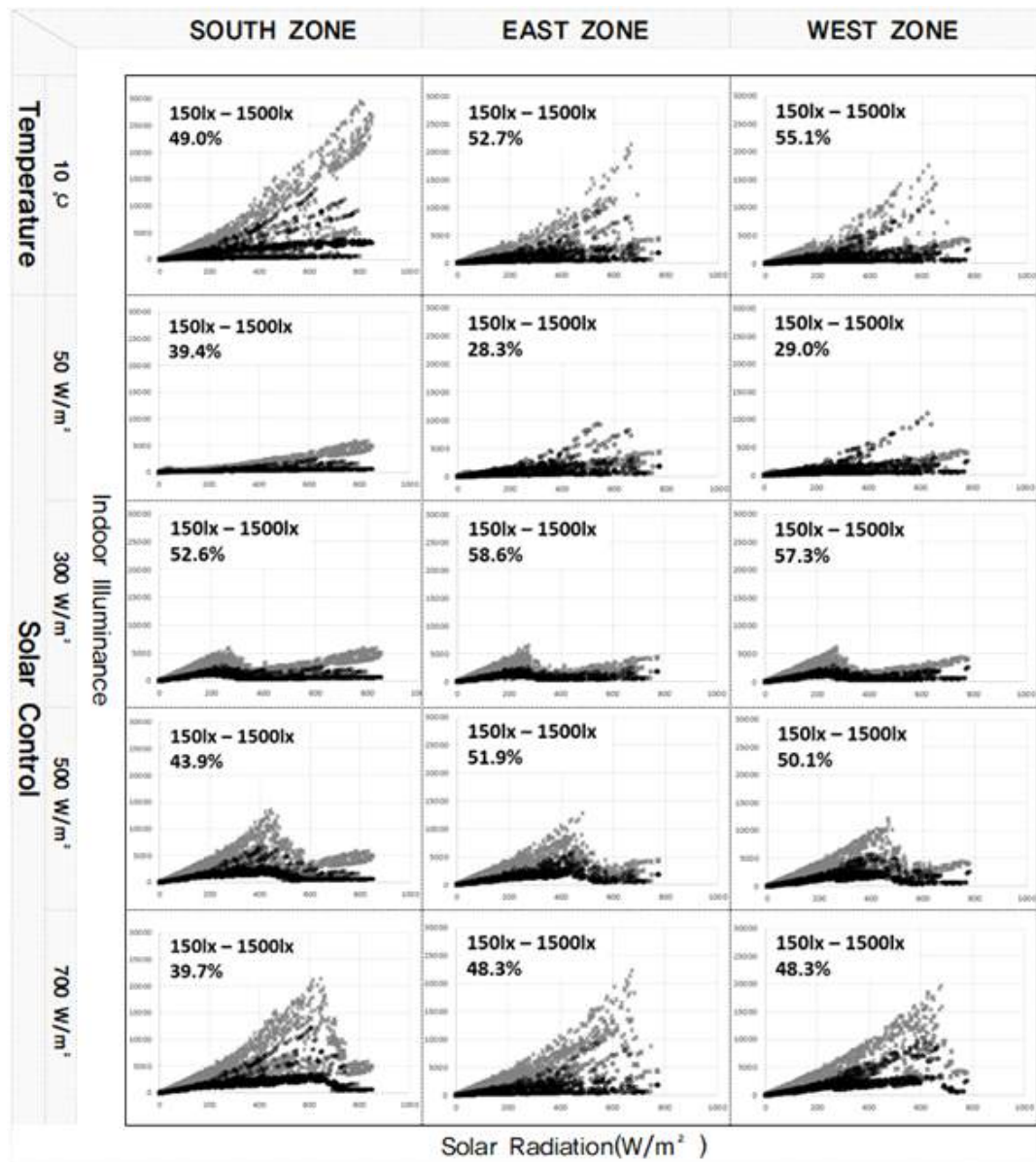
(6) 제어 조건에 따른 DGI 및 실내 조도 분석

- 건물에서 일사조절장치는 에너지를 저감시키는 것도 중요하지만 건축 환경 측면에서 눈부심을 억제 시키고, 자연광에 의한 적정 실내 조도를 확보하는 것도 중요함.
- 따라서 본 장에서는 전기변색유리 제어 조건 별로 창면을 바라봤을 때 눈부심의 정도를 파악할 수 있는 DGI 지수 분석과 연간8760시간 중 실내 적정 조도 범위 안에 들어오는 시간의 비율 분석을 통해 빛환경 성능을 분석하고자 함.
- DGI는Hopkinson이 제안한 지표로서 사무소 건물의 경우 22이하를 만족하는 것을 권장하고 있음.
- 그림 14는 전기변색유리 제어 조건 별로 DGI를 분석한 그래프로, 일사량에 따른 DGI 지수 산점도를 나타내고 있음.
- 그래프 상에서 위쪽 화살표와 퍼센트로 표기된 데이터는 연간 DGI 22를 초과하는 시간의 비율을 나타내고, 아래쪽 화살표와 퍼센트로 표기된 데이터는 연간 DGI 22이하를 만족하는 시간의 비율을 나타냄.
- DGI 분석 결과, 눈부심의 발생 빈도가 가장 적은 조건은 일사량 50W/m²에서 착색되는 조건으로 분석되었다. 온도 제어 방식의 경우, 하절기에는 착색이 됨에 따라 눈부심을 억제할수 있지만, 동절기에는 탈색 상태를 유지함에 따라 눈부심이 발생하게 됨.
- 특히 동절기에는 태양 고도가 낮기 때문에 창면에서의 눈부신 정도가 크기 때문에 눈부심 측면에서는 효과적인 제어 방법이 아님.
- 일사량 제어 방식의 경우, 전기변색유리 착색 제어를 위한 일사량 조건이 높아질수록 눈부심이 발생하는 빈도가 증가하는 것으로 나타남. 즉, 에너지 측면에서 우수하게 분석되었던 500W/m²에서는 눈부심의 비율이 20% 이상으로 증가되면서 사용자의 건축환경 측면에서의 만족도를 감소시킬 수 있는 요인으로 작용할 수 있을 것으로 분석 됨.
- 즉, 전기변색유리에 대한 사용자 만족과 상용화의 성공을 위해서는 에너지 저감 뿐만 아니라 건축환경 측면에서 눈부심도 동시에 고려한 제어 방법이 요구됨을 알 수 있음.
- 아래 그래프는 전기변색유리 제어 조건 별로 연간 실내 적정 조도 범위에 들어오는

시간의 비율을 나타낸 그래프임.

- 적정 조도 범위의 산정 기준은 한국의 KS(Korean Industrial Standard)의 KS A 3011 기준에서 제시하고 있는 사무소건물의 적정 조도 150lx~1500lx 범위로 산정.
- 분석 결과, 연간 적정 조도 범위에 들어오는 시간의 비율이 가장 높은 제어 방법은 일사량 300W/m² 조건으로 분석되었음.
- 일사량 조건은 높아질수록 KS에서 제시하는 적정 조도 이상의 데이터가 많아지면서 오히려 실내 조도의 질이 떨어지는 것으로 나타났고, 일사량 50W/m² 제어 조건은 적정 조도보다 낮은 데이터가 많아 지속적으로 어두운 실내가 유지되는 것으로 분석되었음.
- 온도 제어의 경우 동절기에는 높은 실내 조도를 유지하고, 하절기에는 낮은 실내 조도가 유지되어 연간 실내 조도가 연속적이지 않고 균일성이 떨어져 질적으로 취약한 특성을 갖는 것으로 분석되었음.





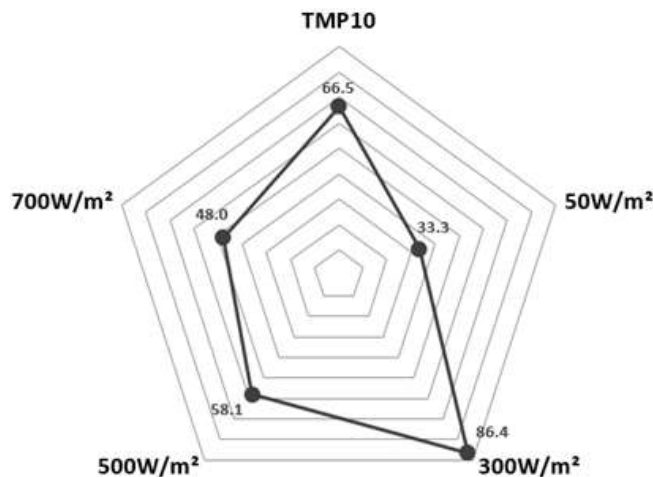
(7) 에너지 및 빛환경을 고려한 최적 제어 조건 도출

- 에너지 성능과 빛환경 성능을 분석하면서, 각각의 전기변색유리 제어 조건별로 장단점을 확인 할 수 있었음.
- 하지만 제어 방법을 선정하기에는 서로 다른 특징을 나타내고 있어 통합 평가할 수 있는 방법론이 필요함.
- 따라서 본 장에서는 에너지와 빛환경 분석 결과 데이터를 하나의 지표로 통일하여 통합 성능평가를 수행하였음.
- 성능 평가 지수는 EDPI(Integrated energy and daylight performance index)로서, EDPI는 에너지, DGI, 실내 조도 각 구성요소 별로 실제값을 최대값과 최소값 비교를 통해 백분위화하여 성능의 정도를 평가하게 됨.
- 즉, 온도 제어 방식의 냉방 및 난방, 조명에너지의 총합을 로 변환하게 되면, 구성요소 i값은 냉방 및 난방, 조명에너지의 총합이 되고, j 조건은 온도제어방식이 됨.
- 여기서, 위의 표의 데이터를 기반으로 는 39154.1kWh, 는 36310.5kWh, 는 43130.8kWh로서 수식 1을 활용하여 성능의 정도를 도출하게 됨.
- 이렇게 각 요소별로 도출된 데이터를 합한 뒤 평균값을 도출하면 통합 성능을 평가할 수 있음.

$$EDPI_{ij} = \frac{Actual X_{ij} Value - Minimum X_{ij} Value}{Maximum X_{ij} Value - Minimum X_{ij} Value} \times 100 \quad ---- (1)$$

- EDPI 통합 지수로 분석한 결과, 일사량 300W/m² 조건이 가장 우수한 것으로 분석되었고 결과 값은 아래 표와 그림을 통해 확인할 수 있음.
- 일사량 300W/m² 조건이 가장 우수한 이유를 살펴보면 냉방 및 난방 부하와 조명 에너지 측면, 실내적정조도 유지 측면에서 우수한 결과를 나타냈고, DGI 측면에서 50W/m²에 이어 두 번째로 우수하지만 다른 조건과 비교했을 때 중간 정도의 성능을 나타냈음.
- 통합 성능 지표인 EDPI 값을 나타낸 아래 표의 분석을 통해 모든 조건을 완벽히 만족하는 제어 방법은 없음.
- 따라서 EPDI 지수를 통해 완벽할 수는 없지만 가장 최선의 조건을 도출하는데 유용한 방법으로 판단되며, 건물 용도별로 요구되는 중요 성능이 다르기 때문에 후속 연구를 통해 가중치를 적용한 EDPI 지수를 개발하고자 함.

Temp / Solar Radiation		Element (i)			Total	Average
		Heating & Cooling & Lighting (kWh)	DGI Over 22	LUX 150lx-1500 lx		
Raw Data (j)	10℃	39154.1	89.1%	52.3%		
	50W/m ²	43130.8	93.3%	32.3%		
	300W/m ²	36334.7	89.3%	56.2%		
	500W/m ²	36310.5	84.0%	48.6%		
	700 W/m ²	37043.4	83.4%	45.4%		
EDPI	10℃	58.3	57.6	83.7	199.6	66.5
	50W/m ²	0.0	100.0	0.0	100.0	33.3
	300W/m ²	99.6	59.6	100.0	259.2	86.4
	500W/m ²	100.0	6.1	68.2	174.3	58.1
	700 W/m ²	89.3	0.0	54.8	144.1	48.0



- 본 연구에서는 최근에 한국에서 개발된 전기변색유리의 광학특성 데이터 분석결과를 바탕으로 온도와 일사량에 따른 5가지 투과율 제어 조건을 설정하고 건물 에너지와 빛환경성능 측면에서 최적화된 제어 조건을 도출하는 연구를 수행하였음.
- 분석결과를 요약하면 다음과 같음.
- 분광분석기를 통한 광학 특성 분석결과, 전기변색유리시료의태양투과율은 탈색 시 48.1%에서 착색 시6.5%까지41.6% 범위로 조절할 수 있고, 가시광선 투과율의 경우 탈색 시64.8%에서 착색 시12%까지52.8% 범위로 조절이 가능한 것으로 분석되었음.

- 또한 LBNL의 Optic과 Window tool을 활용하여 건축용 삼중유리로 구성된 뒤 광학특성 분석한 결과에서도 열관류율은 $1.19 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 단열성능이 우수하고, 태양투과율이 탈색 시 35.7%에서 착색 시 10.7%까지 25% 범위로 조절할 수 있고, 가시광선 투과율은 탈색 시 46.3%에서 착색 시 8.5%까지 37.8%로 조절이 가능하여 일사조절장치로 충분한 가능성을 나타냈음.
- 광학특성 데이터 분석결과를 바탕으로 온도와 일사량에 따른 5가지 투과율 제어 조건에 따라 사무소건물을 대상으로 하절기 및 동절기 대표일에서 시간별 냉방 및 난방 부하, 조명에너지 소비량을 평가하였음.
- 분석 결과, 냉방 부하 측면에서는 하절기 동안 착색 상태의 유지 비율이 높은 온도 제어와 일사량 50W/m^2 제어 방식이 유리한 것으로 나타났고, 난방 부하 측면에서는 동절기 동안 탈색 상태의 유지 비율이 높은 온도 제어와 일사량 700W/m^2 제어 방식이 우수한 성능을 나타냈음.
- 조명에너지 소비량 측면에서는 하절기에는 일사 투과량이 많은 500, 700W/m^2 제어 방식, 동절기에는 탈색 상태를 지속하는 온도 제어 방식이 유리한 것으로 나타남.
- 시간별 데이터 분석을 통해 냉방 및 난방, 조명 에너지 소비에 대한 개별적인 특성과 경향을 파악할 수 있어 전기변색유리 사용화를 위한 제어 조건 개발 시 기초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대 됨.
- 제어 조건별로 연간 냉방 및 난방 부하, 조명에너지 총량 데이터를 통해 건물에너지 측면에서 전기변색유리 최적 제어 조건을 분석한 결과, 일사량 300W/m^2 이상의 조건에서 착색시키는 제어 방법이 총 에너지 소비량을 저감시키는데 유리한 것으로 분석되었음.
- 이러한 특징을 나타내는 원인은 본 연구에서 조명을 Dimming control 하면서 조명에너지가 연간 건물 에너지 총량에 큰 영향을 미쳤기 때문으로 분석 됨.
- 연간 건물에너지 데이터를 분석해 보면 제어 조건 별로 냉방 및 난방 부하의 차이(약 2000kWh 범위)보다 조명 제어를 함에 따라 전체 건물에너지의 25%를 차지하는 조명에너지의 차이(약 5000kWh 범위)가 큰 것으로 나타나 전기변색유리 제어 전략 구축 시 조명에너지에 대한 고려가 반드시 필요함을 확인할 수 있었음.
- 건축 환경 측면에서 빛환경 성능에 해당하는 DGI와 실내 조도에 대한 분석을 수행하였음.
- DGI 지수 분석 결과, 연중 착색상태 유지 비율이 가장 높은 일사량 50 W/m^2 제어 조건이 가장 우수한 것으로 나타났고, 일사량 500W/m^2 제어 조건 이상에서는 눈부심 비율이 20% 이상으로 증가되면서 사용자의 건축환경 측면에서 만족도를 감소시킬 가능성이 높은 것으로 분석되었음.
- 또한 온도 제어 방식은 태양고도가 낮은 동절기에 탈색 상태를 유지함에 따라 질적으로 좋지 않은 눈부심 발생이 클 것으로 분석되어 효과적인 제어 방법이 아님을 확인하였음.
- 실내 조도 분석 결과, 연간 적정 조도 범위에 들어오는 시간의 비율이 가장 높은 제어방법은 일사량 300W/m^2 제어 조건으로 분석되었고, 온도제어 조건은 연간 실내 조도의 연속적 균일성이 떨어지며, 일사량 50W/m^2 조건은 KS 적정 조도 기준보다 너무 낮은 실내 조도, 일사량 500W/m^2 조건 이상은 너무 높은 실내 조도의 데이터가 많이 도출되어 빛환경 성능 측면에서 불리한 것으로 분석되었음.
- 건물에너지와 빛환경 성능을 모두 고려한 평가를 하기 위해 EDPI 지표를 통해 통합 성능 평가를 수행하였음.
- EDPI 지수는 에너지(냉방 및 난방 부하, 조명에너지) 총합, DGI, 실내 조도 각 구성요소 별로 실제값을 최대값과 최소값 비교를 통해 백분위하여 성능의 정도를 평가하는 지표.
- EDPI 지표는 모든 조건을 만족하는 제어 조건을 도출하는 것이 아니라 가장 최선의 조건을 도출하게 됨.
- EDPI 지표 분석결과 300 W/m^2 조건이 가장 우수한 것으로 분석되었고, 우수한 이유

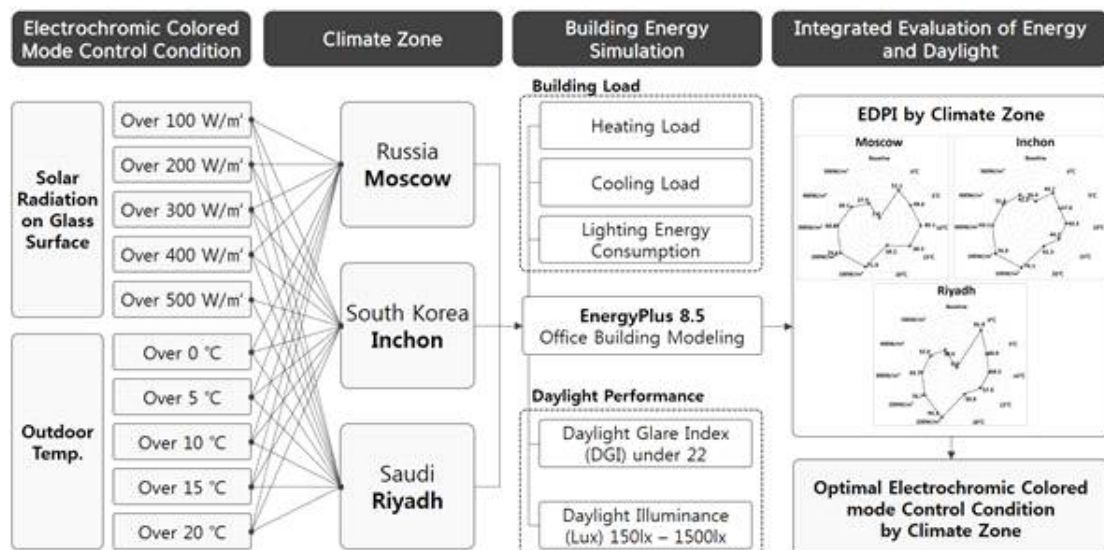
를 살펴보면 냉방 및 난방 부하와 조명에너지 측면, 실내 적정 조도 유지 측면에서 우수한 결과를 나타냈고, DGI 측면에서 다른 조건과 비교해 중간 정도의 성능을 나타내 종합 평가 결과 성능 정도가 가장 최적인 것으로 분석되었음.

- 본 연구에서는 한국의 인천지역 기상데이터를 기반으로 특정한 형태의 사무소건물을 대상으로 전기변색유리의 온도와 일사량에 따른 5가지 투과율 제어 시 에너지와 빛환경 성능에 대해 EDPI 지표로 통합 성능평가를 수행하였음.

③ 기후지역별 전기변색유리 광학특성 최적제어 방안 도출

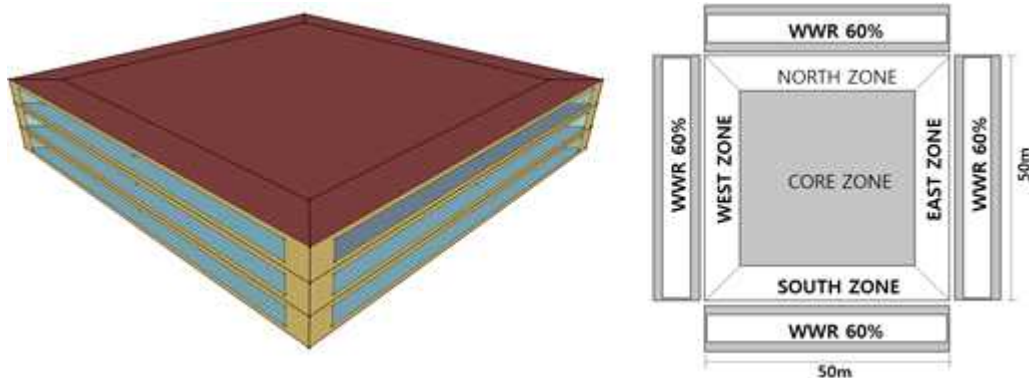
(1) 연구의 방법

- 연구방법은 우선 선행 연구에 의해 도출된 전기변색유리시료(50mm×50mm)의 탈색과 착색상태에서의 광학특성 데이터를 기반으로 LBNL의 Window 7.4 프로그램을 활용하여 복층유리의 투과율 및 반사율 데이터를 도출하였음.
- 이렇게 구성된 투과율 및 반사율 데이터를 건물에너지 동적 해석 프로그램인 EnergyPlus 8.5 시뮬레이션 툴에 입력하여 전기변색유리 제어 조건별로 사무소 건물의 건물에너지 및 빛환경 성능을 분석하였음.
- 성능 평가를 위한 기후지역은 건물에너지 측면에서 동절기 영향이 큰 1) 러시아 모스크바, 동절기와 하절기 영향이 유사한 2) 한국 인천, 하절기 영향이 큰 3) 사우디아리야드로 선정하였고, EnergyPlus 웹사이트에서 제공하는 기상데이터를 활용하였음.
- 전기변색유리의 투과율 제어 방법은 일사량에 따라 각각 1) 100W/m², 2) 200W/m², 3) 300W/m², 4) 400W/m², 5) 500W/m² 이상이 되면 착색되는 조건, 외기 온도에 따라 6) 0℃, 7) 5℃, 8) 10℃, 9) 15℃, 10) 20℃ 이상이 되면 착색되는 조건으로 선정하였음.
- 전기변색유리 제어를 위한 외부환경 변수는 단순화 되어야 제어 알고리즘 및 하드웨어 개발 시 실용화 하는데 유리함.
- 따라서 본 연구에서 냉방 및 난방, 조명부하와 건물외피간에 가장 밀접한 관계가 있는 일사량과 외기 온도로 제어 변수를 단일화하였고, 단일화된 일사량 및 외기 온도 제어 변수에 의한 최대 에너지 저감 효과를 얻을 수 있는 방안을 도출하고자 하였음.
- 본 연구에서는 최종적으로 제어 조건에 따라 각 기후 조건 별로 냉방, 난방, 조명부하의 총량과 연간Daylight Glare Index(DGI)가 22이하 해당 시간, 연간 실내 적정조도(150~1500lx) 해당 시간을 분석 한 뒤, 건물 부하와 빛환경 성능을 통합 분석하기 위해 선행연구에서 개발한 Energy and Daylight Performance Index(EDPI)를 이용하여 기후 지역별 최적 제어 조건을 도출하였음.
- 아래 그림은 연구 방법에 대한 전체적인 설명을 나타내고 있음.



(2) 해석모델 개요

- 본 연구에서는 건물에너지 해석 시뮬레이션 도구로 미국 DOE(Department of Energy)에서 개발한EnergyPlus 8.5를 사용하였음.
- 시뮬레이션을 위한 해석모델은 아래와 같으며, 해석모델은 3개층으로 구성된 사무소 건물임.
- perimeter zone과 core zone으로 나뉘며 본 연구에서는 중간층을 대상으로 하였고, 일사의 영향을 받는 남측, 동측, 서측의 perimeter zone을 대상으로 분석을 수행하였음.
- 해석모델의 바닥면적은50m×50m이며, 층고는 3m, 창면적비는 60%로 설정하였음.
- 해석모델의 외벽은 건물에너지절약설계기준(2016)의 단열기준을 따라 구성하였고, 유리의 물성은 LBNL의 Window Tool을 사용하여 도출한 전기변색 복층 유리를 적용하였음.
- 해석모델의 설정온도는 건축물의 에너지절약설계기준 상 냉난방설비용량계산을위한 실내온도기준을따라 각각20℃, 26℃로 설정하였고, HVAC은 시스템 변수에 의한 간섭을 최대한 배제한 부하 분석을 위하여EnergyPlus에서 제공하는IdealLoadsAirSystem을 적용하였음.
- 내부 열취득은ASHRAE Fundamentals (2009)의 기준에 따라 Overhead lighting 10.8W/m², Peak occupancy 22.3m²/person, Equipment8.6W/m²을 적용하였음.
- 인체, 조명, 기기의 내부 열취득 스케줄은EnergyPlus의DataSets의Schedules에서 제공하는Office Schedule를 적용하였고, 외기도입량은 건축물 에너지효율등급 인증제도 운영규정에 따라1.1m³ /m² h를 적용하였음.
- 본 연구에서는 건물에너지 분석 시 전기변색유리의 투과율 제어에 따른 조명에너지 저감 성능도 함께 평가하기 위해 실내 조도 700lx를 기준으로 Dimming control을 하였음.



Division	Materials	Thermal & Optical Properties	
Exterior wall	200 mm concrete 155 t insulation 19 mm gypsum board	U-value 0.202 W/m²K	
Exterior Floor	105 mm insulation 200mm concrete	U-value 0.291 W/m²K	
Exterior Roof	100mm concrete 220mm insulation Ceiling air space Acoustic tile	U-value 0.136 W/m²K	
Glazing	26 mm double glazing (8mm Electrochromic + 12 air + 6mm low-e glass)	Bleached	Colored
		SHGC 0.408	SHGC 0.127
		Tvis 0.521	Tvis 0.096
		U-value 1.639	U-value 1.639

- 본 연구에서 사용한 기상데이터는 EnergyPlus 웹사이트에서 제공하는 것을 사용하였음.
- 기상데이터는 cold climate zone대표 지역으로 1) 러시아 모스크바, hot & cold climate zone 대표 지역으로 2) 한국 인천, hot climate zone 대표 지역으로 3) 사우디 리야드를 선정하였음.
- 러시아 모스크바 지역의 기후는 대륙성 기후에 속하지만 같은 위도상의 유럽 주요 도시들에 비하면 기후 변동폭이 큰 편이며 겨울에 특히 추운 기후 특성을 나타냄.
- 한국 인천지역의 climatic conditions은 겨울에 대륙의 한랭한 고기압, 여름에는 고온다습한 해양기단의 영향을 받아 기온의 연교차가 30℃에 이르는 대륙성 기후를 나타내는 특징을 가지고 있어 여름과 겨울이 공존하는 기후를 가지고 있음.
- 사우디의 리야드 지역은 사막성 기후로 기온은 평균 32~38℃이고 최고 48℃를 기록하며, 건조하고 무더우며 대륙성 기후 영향으로 여름에 해가지면 서늘하며 때때로 강한 북동풍이 불어 많은 먼지와 모래바람을 동반하는 특징을 가지고 있음.
- 아래 표는 각 기후 지역별 EnergyPlus 웹사이트에서 제공하는 기상데이터를 분석한 결과를 나타내고 있음.
- 연중 최고온도는 모스크바30.5℃, 인천32.6℃, 리야드45.6℃, 연중 최저온도는 모스크바-25.0℃, 인천-11.7℃, 리야드 4.0℃로 리야드 지역의 기온이 가장 높고, 모스크바지역이 가장 낮은 것을 확인할 수 있음.
- 평균기온 역시 리야드 지역이 가장 높고, 인천, 모스크바 순으로 나타났으며, 일사량도 리야드가 가장 높고 인천이 중간, 모스크바가 가장 낮은 것으로 분석되었음.
- 이렇게 분석된 서로 다른3개의 기후지역의 특성을 바탕으로 후술 될 전기변색유리 제어 조건에 따른 에너지 및 빛환경 성능에 대한 분석을 수행하게 됨.

Division		Moscow	Inchon	Riyadh
Outdoor Temperature	Max	30.5	32.6	45.6
	Min	-25.0	-11.7	4.0
	Average	5.5	11.9	26.2
Direct Solar Radiation	Max	873.4	1013.7	935.3
	Min	-	-	-
	Average	74.6	86.7	258.5

- 본 연구에서는 상용화 단계에 있는 전기변색유리의 제어 변수를 최소화할 수 있으면서 건물 에너지와 빛환경 성능 측면에서 모든 조건을 최대한 만족시키기 위한 제어 방법을 도출하고자 함.
- 제어 변수 단순화를 위해 본 연구에서는 외부환경 조건의 범위를 외기 온도와 일사량 변수로 한정하였음.
- 첫 번째 조건은 수직면 일사량에 따른 전기변색유리 제어 방법으로, 수직면 일사량 1) 100W/m² 2) 200W/m², 3) 300W/m², 4) 400W/m², 5) 500W/m² 5가지 조건으로 선정함.
- 전기변색유리는 각 설정 일사량 이상이 되면 착색이 되고 이하가 되면 탈색이 됨.
- 두 번째 조건은 외기 온도에 따른 변색 유리 제어 방법으로, 외기 온도 6) 0℃, 7) 5℃, 8) 10℃, 9) 15℃, 10) 20℃ 5가지 조건으로 선정하였음.
- 전기변색유리는 각 설정 온도 이상이 되면 착색이 되고 이하가 되면 탈색이 된다.
- 수직면 일사량과, 외기 온도에 따른 10가지 조건을 선정하였고, Baseline은 전기변색유리를 탈색시킨 상태를 유지하였음.
- 도출된 10가지 제어 조건에 따라 EnergyPlus 해석모델을 활용하여 다음 장에서는 기후 지역별 에너지 및 빛환경성능에 대한 분석을 수행하게 됨.

(3) 일사량 제어에 따른 냉방, 난방, 조명 부하 분석 결과

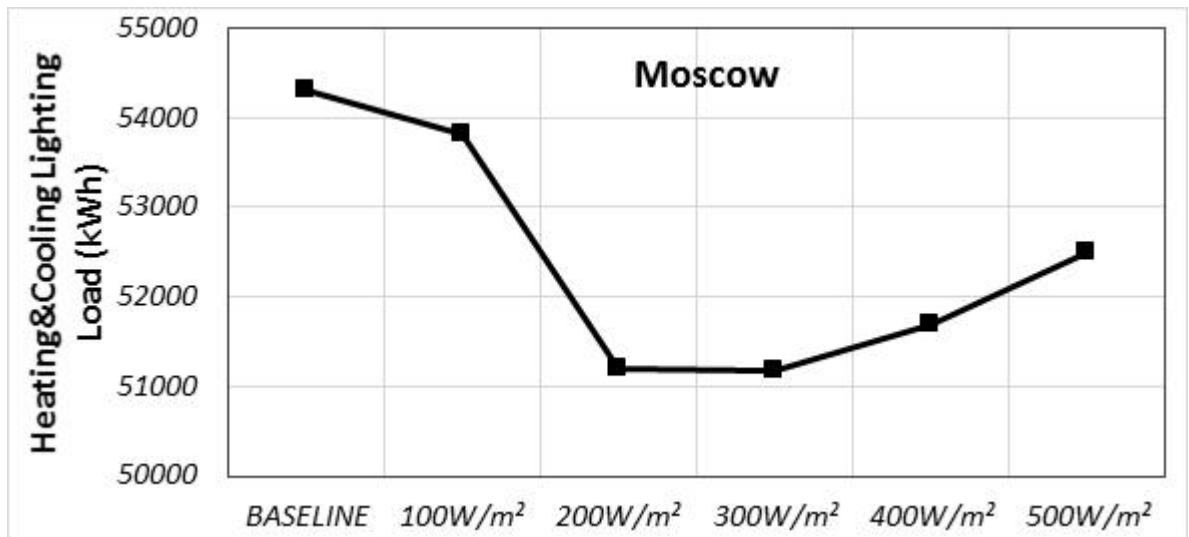
- 건물에서 유리는 유일하게 일사를 투과시킬 수 있는 부분으로 냉방, 난방, 조명부하

에 직접적인 관련이 있는 부분임.

- 특히 일사조절 스마트유리의 주요한 기능은 실내로 유입되는 일사량을 제어하는데 있기 때문에, 일사량은 전기변색유리 제어 시 가장 기본적으로 고려되어야 할 제어 변수임.
- 따라서 본 장에서는 일사량을 제어변수로 선정하였고, 러시아 모스크바, 한국 인천, 사우디 리야드 각 기후 지역별로 일사량에 따른 전기변색유리 제어를 통해 연간 냉방, 난방, 조명 부하 합을 계산한 뒤, 결과값의 차이를 분석하여 기후지역별 최적 일사량 제어 조건을 도출하였음.
- 일사량은 유리가 설치되는 면을 기준으로 수직면 일사량을 감지하게 되고, 일사량의 수준 이상이 되면 전기변색유리가 착색되는 제어 방법을 적용하였음.
- 냉방 및 난방 부하는 전기변색유리 제어조건에 따라 EnergyPlus 8.5의 IdealLoadAirSytem 모델을 사용하여 냉난방 설정온도 20℃와 26℃에 도달 하기 위해 필요한 부하를 계산하게 됨.
- 본 연구에서는 조명제어를 적용하였는데, 이는 실내 적정 조도를 유지하기 위해 필요한 조명 부하도 냉난방 부하와 더불어 함께 검토하기 위함임.
- 여기서, 조명 제어는 실내 조도 700lx를 기준으로 continuous 방식으로 dimming control 하여 전기변색유리 투과율 변화에 따른 조명 부하의 영향을 평가할 수 있도록 하였음.

일사량 제어에 따른 모스크바냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

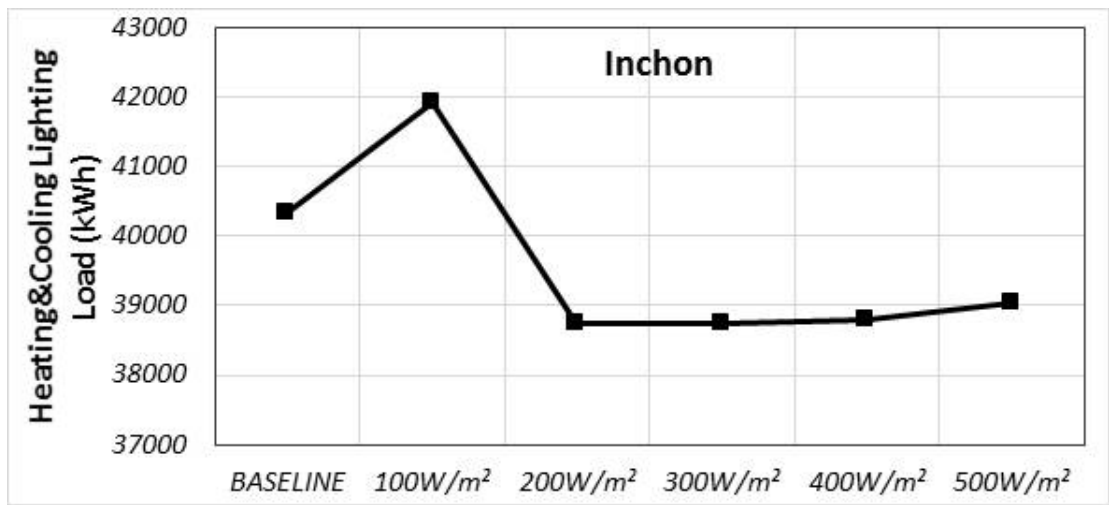
Load(kWh)	Baseline	100 W/m ²	200 W/m ²	300 W/m ²	400 W/m ²	500 W/m ²
Heating	32729.3	35059.3	34730.3	34335.5	33930.0	33592.6
Cooling	15149.9	8899.4	9196.9	9993.8	11144.9	12391.7
Lighting	6424.0	9853.9	7273.5	6841.2	6610.2	6504.2
Total	54303.2	53812.6	51200.6	51170.5	51685.1	52488.5



일사량 제어에 따른 모스크바 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

일사량 제어에 따른 인천 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

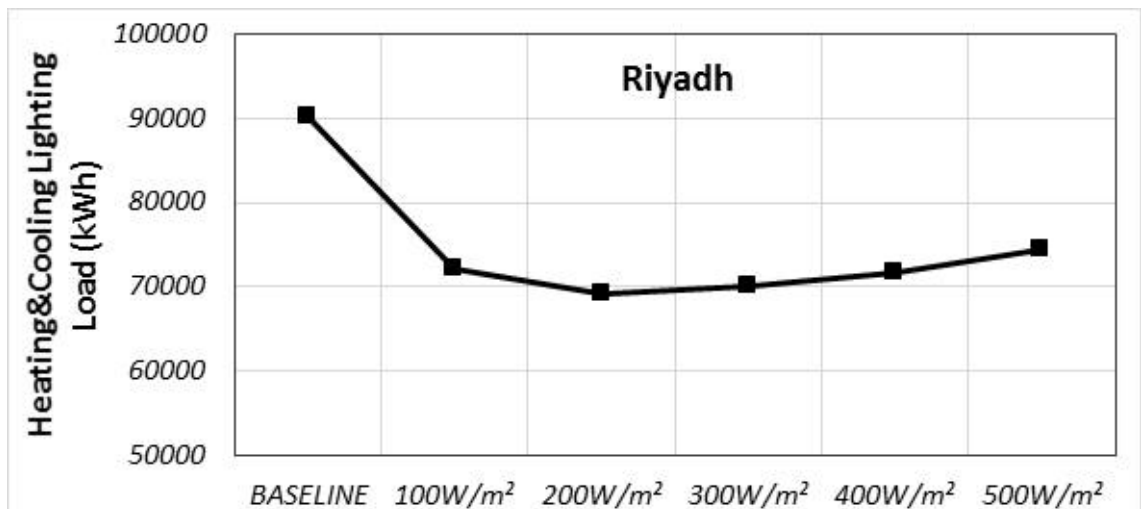
Load(kWh)	Baseline	100 W/m ²	200 W/m ²	300 W/m ²	400 W/m ²	500 W/m ²
Heating	10966.1	13915.5	13547.1	13153.4	12548.4	12078.9
Cooling	24608.2	18912.5	19410.1	20301.6	21261.5	22102.7
Lighting	4770.1	9099.3	5786.6	5274.8	4993.0	4855.9
Total	40344.4	41927.3	38743.8	38729.8	38803.0	39037.6



일사량 제어에 따른 인천 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

일사량 제어에 따른 리야드 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

Load(kWh)	Baseline	100 W/m²	200 W/m²	300 W/m²	400 W/m²	500 W/m²
Heating	0.0	0.9	0.6	0.4	0.2	0.0
Cooling	86239.4	62334.7	63139.6	64756.4	66827.2	69896.1
Lighting	4040.4	9727.1	5987.0	5232.9	4782.3	4461.2
Total	90279.8	72062.7	67127.2	69989.6	71609.6	74357.4

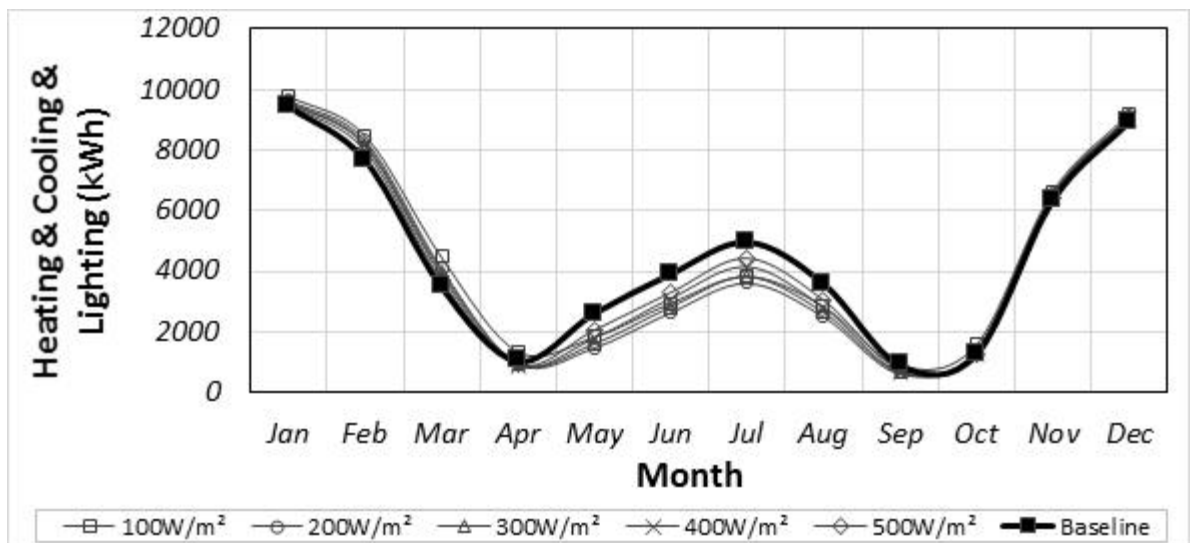


일사량 제어에 따른 리야드 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

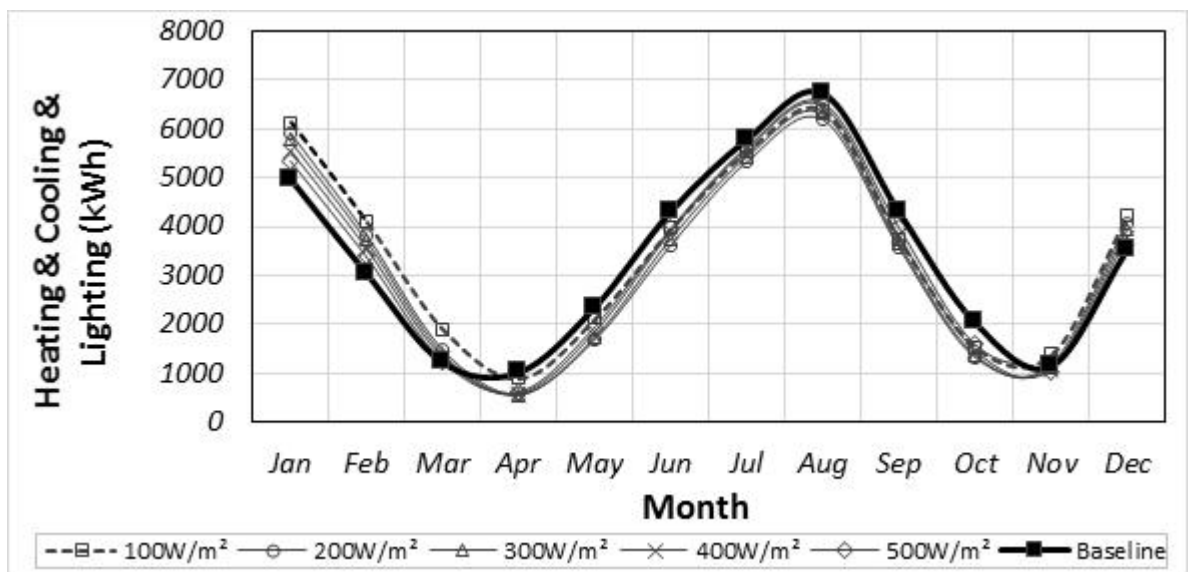
- 우선 첫 번째로 러시아 모스크바 지역 분석 결과를 살펴보면, 일사량에 따라 전기변색유리 제어를 하게 되면 Baseline 대비 모든 일사량 제어 조건이 연간 부하량을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났음.
- 모스크바는 전기변색유리 제어 조건 중 100W/m²은 감소량이 가장 미비한 것으로 나타났고, 300W/m²일 때 가장 부하 감소량이 큰 것으로 분석되었음.
- 모스크바 지역의 총 연간 부하량은 전기변색유리 제어에 따른 냉방 부하량 차이에 의해 영향을 크게 받는 것을 알 수 있었음.
- 그림6은 모스크바 지역의 월별 부하를 나타낸 그래프로서, 일사량에 따른 전기변색유리 제어 시, 동절기 보다는 하절기에 냉방 부하에 더 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있음.
- 두 번째로 한국 인천 지역 분석 결과를 살펴보면, 전기변색유리 제어 조건 중 100W/m²를 제외한 나머지의 경우 감소하였고, 300 W/m² 조건일 때 부하 감소효과가 가장 큰 것으로 분석되었음.
- 100W/m² 조건은 일사량에 따라 제어했음에도 불구하고 오히려 연간 부하량이 증가하

는 것으로 나타났는데, 원인을 살펴보면 일사투과량이 적기 때문에 그림7의 그래프와 같이 $100\text{W}/\text{m}^2$ 조건은 동절기에 난방 부하가 크고, 하절기에도 낮은 실내 조도를 유지하여 조명 부하량이 커 총 연간 부하가 증가한 것으로 분석됨.

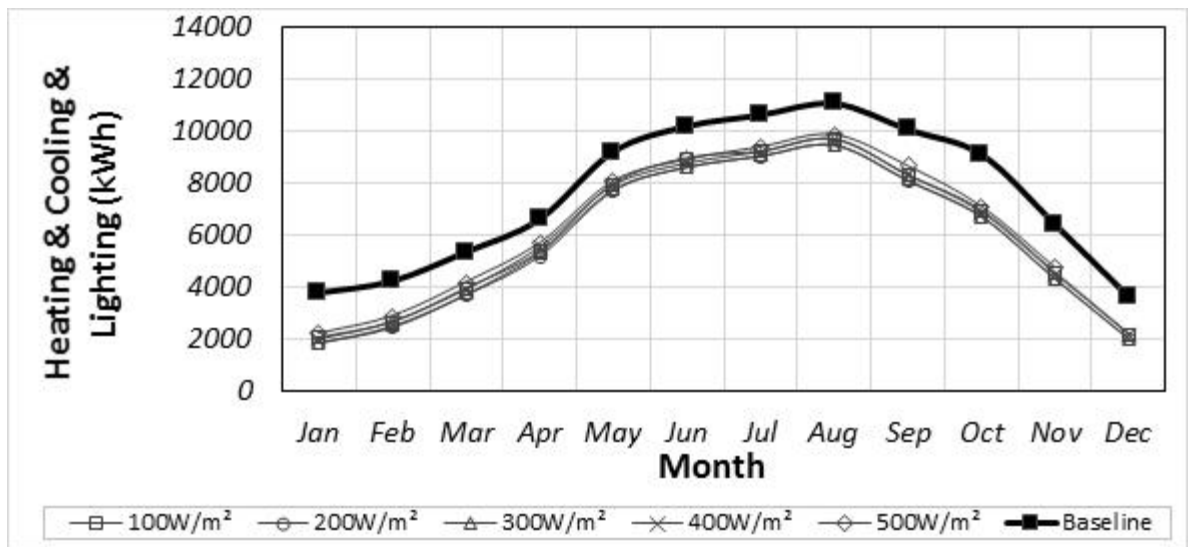
- 세 번째로 사우디 리야드 지역 분석 결과를 살펴보면, 전기변색유리 제어조건 모두 Baseline 보다 연간 총 부하가 적은 것으로 나타났고, $200\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 부하 감소량이 가장 큰 것으로 분석되었음.
- 그림8을 통해 리야드 지역은 모스크바, 인천과 달리 연중 부하저감 효과가 있는 것으로 나타났음.
- 이는 냉방 위주의 기후 패턴을 나타내는 리야드의 특성에 의한 것으로, 일사차단을 통해 냉방부하 저감에 따른 영향이 커 연간 총 부하를 낮출 수 있는 것으로 분석됨.
- 전기변색유리 일사량 제어에 따른 연간 총 부하량 분석결과를 종합해보면, 모스크바는 $300\text{W}/\text{m}^2$, 인천 $300\text{W}/\text{m}^2$, 리야드는 $200\text{W}/\text{m}^2$ 에서 가장 작은 부하량을 나타냄.
- 특히, 리야드 지역은 $200\text{W}/\text{m}^2$ 조건에서 23.4%의 부하를 감소시켜 가장 효과가 좋은 것으로 분석되었고, 인천은 $300\text{W}/\text{m}^2$ 조건에서 4.0%, 모스크바는 $300\text{W}/\text{m}^2$ 조건에서 5.8% 부하저감 효과가 있는 것으로 나타났음.
- 따라서 전기변색유리는 리야드와 같이 냉방위주의 기후 패턴을 나타내는 지역에서 효과가 가장 큰 것을 알 수 있었고, 3가지 기후 지역을 종합했을 때 부하 측면에서 $200\text{W}/\text{m}^2 \sim 300\text{W}/\text{m}^2$ 범위에서 전기변색유리를 착색하는 조건이 적절함을 확인할 수 있었음.



일사량 제어에 따른 모스크바 냉방, 난방, 조명 총 월별 부하



일사량 제어에 따른 인천 냉방, 난방, 조명 총 월별 부하



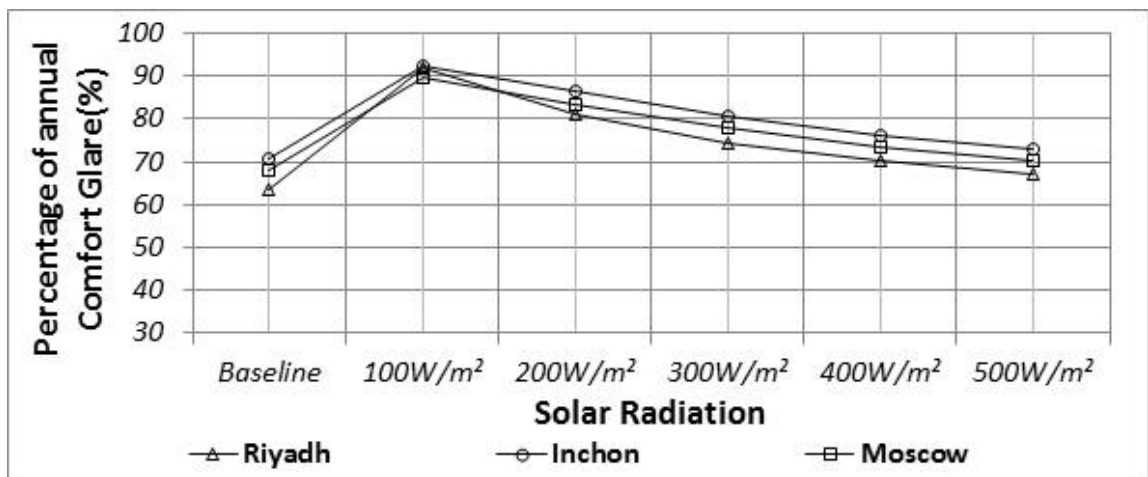
일사량 제어에 따른 리야드 냉방, 난방, 조명 총 월별 부하

(4) 일사량 제어에 따른 빛환경 성능 분석 결과

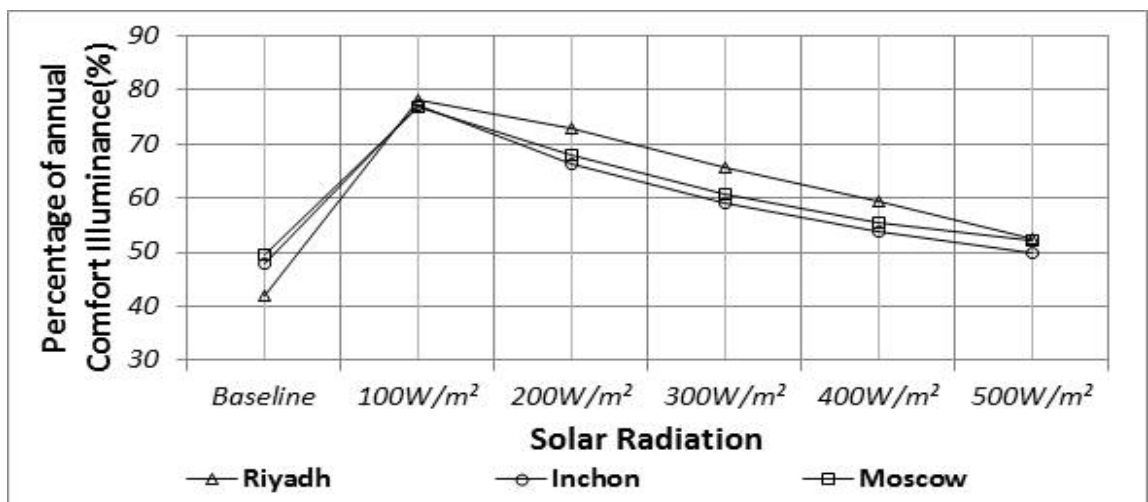
- 일사조절 스마트 유리는 냉방, 난방, 조명 부하를 저감 시키는 것도 중요하지만, 사용자 입장에서 glare 발생을 방지하고, 적정 실내 조도를 확보하는 것도 중요함.
- 따라서 본 연구에서는 EnergyPlus 8.4 시뮬레이션을 통해 전기변색유리 제어에 따른 glare와 관련된 DGI 지수 분석과, 실내 조도 분석을 수행하고자 함.
- DGI는Hopkinson이 제안한 지표로서 사무소 건물의 경우 22이하를 만족하는 것을 권장하고 있음.
- DGI 분석 방법은 EnergyPlus 8.4 시뮬레이션 도구를 활용하여 연간 8760시간 중DGI 22 이하에 해당하는 시간을 분석하였음.
- 적정 조도 범위의 산정 기준은 한국의 KS(Korean Industrial Standard)의 KS A 3011 기준에서 제시하고 있는 사무소건물의 적정 조도 150lx-1500lx 범위로 산정하였음.
- 조도 분석 방법은 연간8760 시간 중 실내 적정 조도 범위(150lx-1500lx) 안에 들어오는 시간의 비율을 분석하였음.
- 조도 분석 시 인공조명에 의한 조도는 배제하고 자연광만을 고려한 실내 조도 분석을 수행하였음.
- 아래 그래프 및 표는 DGI 분석 및 실내조도 분석결과를 표와 그래프로 나타내고 있음.
- DGI 분석 결과, 일사량에 따른 제어 조건 모두baseline 대비 성능이 우수한 것으로 나타났음.
- 모스크바, 인천, 리야드 모두100W/m² 조건이 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 일사량 조건이 높아질수록DGI 측면에서 불리한 것으로 나타남.
- 실내 조도 분석결과, 일사량에 따른 전기변색유리 제어조건 모두baseline 대비 성능이 우수한 것으로 나타났고, DGI 분석결과와 마찬가지로 모스크바, 인천, 리야드 모두100W/m² 조건이 가장 우수한 것으로 분석되었음.
- DGI 및 실내조도 측면에서100W/m² 조건이 모두 우수한 성능을 나타냈는데, 앞서 분석된 냉방, 난방, 조명 부하측면에서 100W/m² 조건을 살펴보면, 모스크바는 다른 조건에 비해 부하 저감량이 적었고, 인천은 오히려baseline 보다 증가했으며, 리야드도 가장 우수한 조건은 아니었음.
- 따라서 냉방, 난방, 조명 부하와 빛환경 성능에 대하여 종합적인 평가가 필요할 것으로 판단됨.

일사량 제어조건에 따른 DGI 22 이상 및 적정조도 범위 해당 시간 비율

Division	DGI under 22 (%)			Daylight Illuminance 150lx~1500lx (%)		
	Moscow	Inchon	Riyadh	Moscow	Inchon	Riyadh
Baseline	67.9	70.8	63.5	49.7	48.0	42.1
100 W/m ²	89.6	92.2	91.7	76.7	77.1	78.1
200 W/m ²	83.5	86.4	80.9	67.8	66.2	73.0
300 W/m ²	78.0	80.5	74.2	60.7	59.1	65.8
400 W/m ²	73.6	76.1	70.4	55.6	53.8	59.5
500 W/m ²	70.5	73.1	67.4	52.2	50.0	52.5



일사량 제어에 따른 연간 DGI 22 이상 해당 시간 비율



일사량 제어에 따른 연간 적정 조도 범위 해당 시간 비율

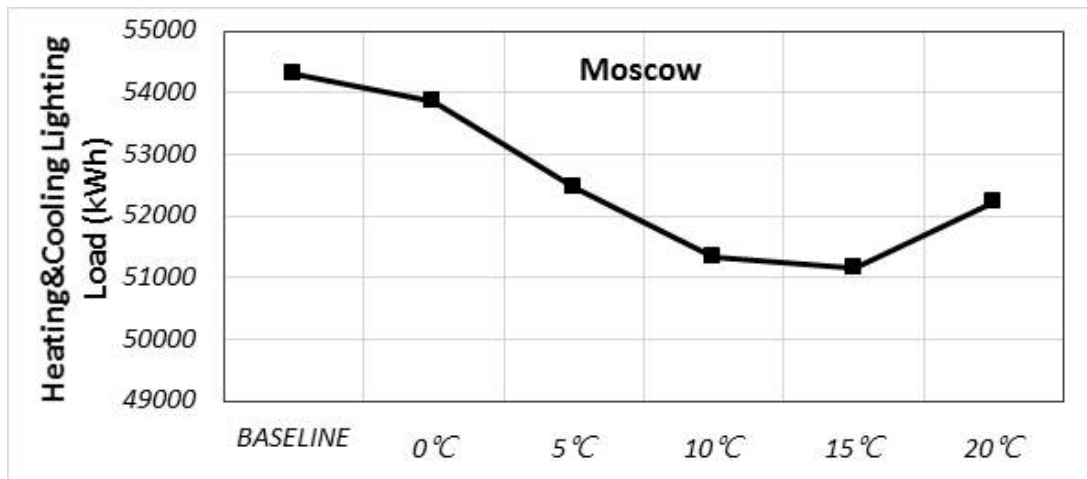
(5) 온도 제어에 따른 냉방, 난방, 조명 부하 분석 결과

- 본 장에서는 러시아 모스크바, 한국 인천, 사우디 리야드 각 기후 지역별로 온도 제어에 따른 연간 냉방, 난방, 조명 부하 합의 차이를 분석하였음.
- 일사량과 마찬가지로 외기온도는 건물에너지에 직접적인 영향을 미치는 대표적인 요인 중에 하나임.
- 외기온도가 증가하면 실내 냉방 부하가 증가하게 되는데, 이 때 전기변색유리를 착색시켜 일사를 차단하여 냉방 부하량을 차단시켜 건물에너지를 저감시키고자 하는 것에 본 온도 제어의 목적임.
- 하지만 기후 지역 별로 어느 정도 외기 온도 조건에서 전기변색유리를 착색시켜 일

사를 차단해야하는지 모르기 때문에 본 장에서는 온도 조건을 0℃, 5℃, 10℃, 15℃, 20℃의 5가지 종류로 가정하고 소모적 탐색법으로 최적 제어 온도를 도출하였다.

온도 제어에 따른 모스크바 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

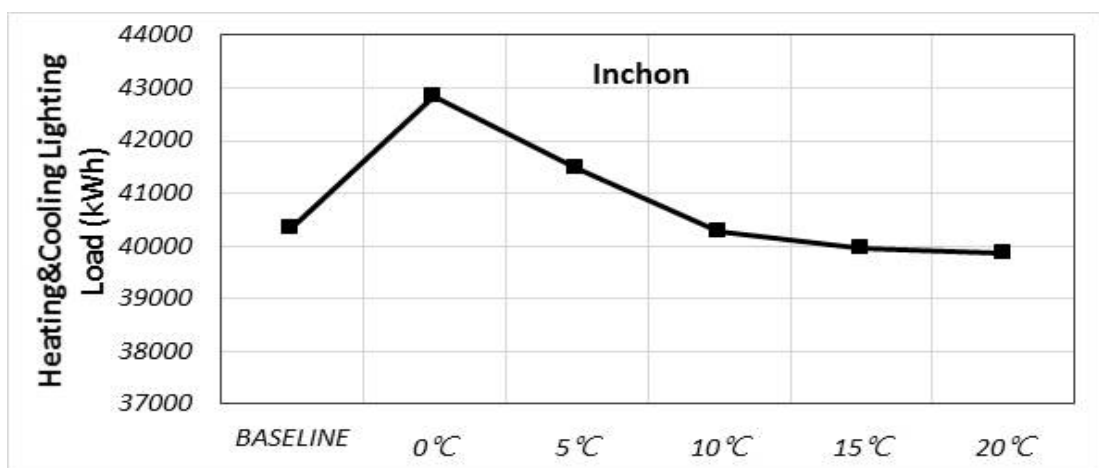
Load(kWh)	Baseline	0℃	5℃	10℃	15℃	20℃
Heating	32729.3	33391.8	33062.1	32784.4	32734.9	32730.2
Cooling	15149.9	8870.6	8893.6	9131.0	10060.2	12293.6
Lighting	6424.0	11600.8	10517.3	9431.9	8368.7	7202.4
Total	54303.2	53863.2	52473.1	51347.2	51163.8	52226.2



온도 제어에 따른 모스크바 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

온도 제어에 따른 인천 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

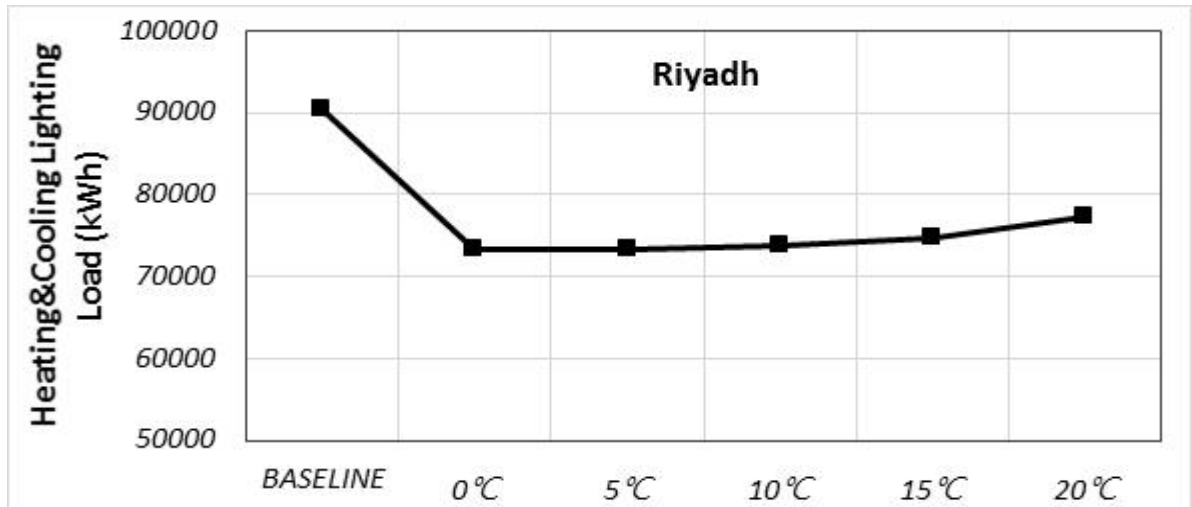
Load(kWh)	Baseline	0℃	5℃	10℃	15℃	20℃
Heating	10966.1	12080.7	11443.0	11035.0	10967.4	10966.6
Cooling	24608.2	19372.0	19398.2	19648.8	20351.8	21599.7
Lighting	4770.1	11386.2	10625.3	9577.9	8641.7	7306.9
Total	40344.4	42838.9	41466.4	40261.6	39960.9	39873.2



온도 제어에 따른 인천 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

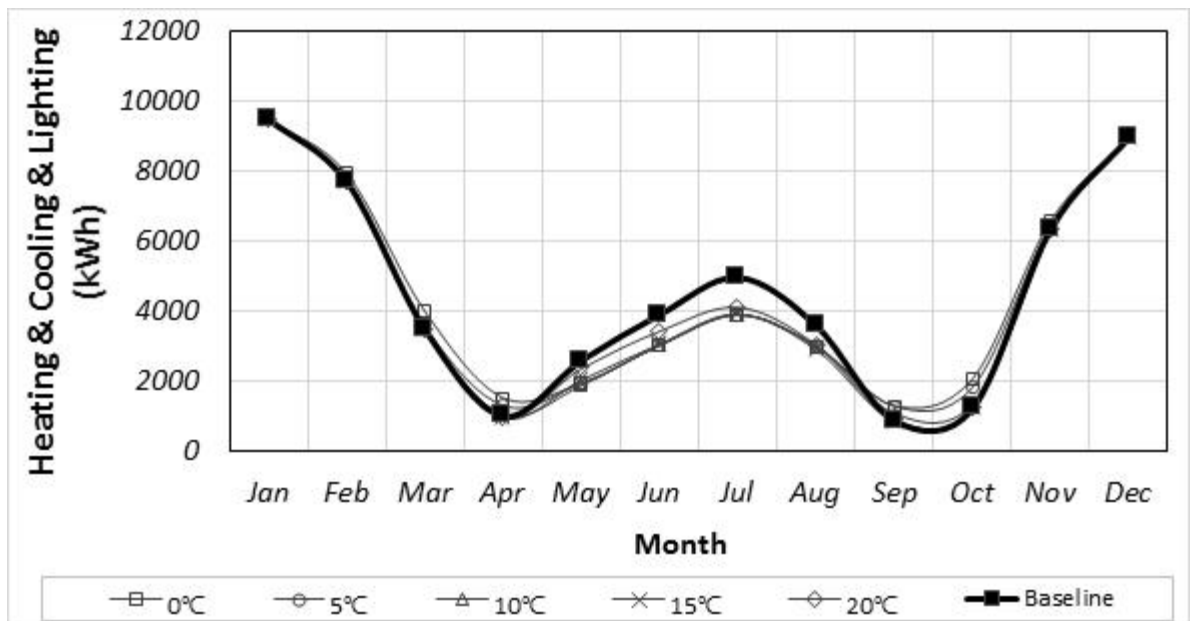
온도제어에 따른 리아드냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

Load(kWh)	Baseline	0℃	5℃	10℃	15℃	20℃
Heating	0.0	1.1	1.1	0.3	0.0	0.0
Cooling	86239.4	62429.1	62439.8	62866.7	64477.8	67819.5
Lighting	4040.4	10899.0	10897.0	10828.1	10333.8	9511.3
Total	90279.8	73329.1	73337.9	73695.1	74811.6	77330.8

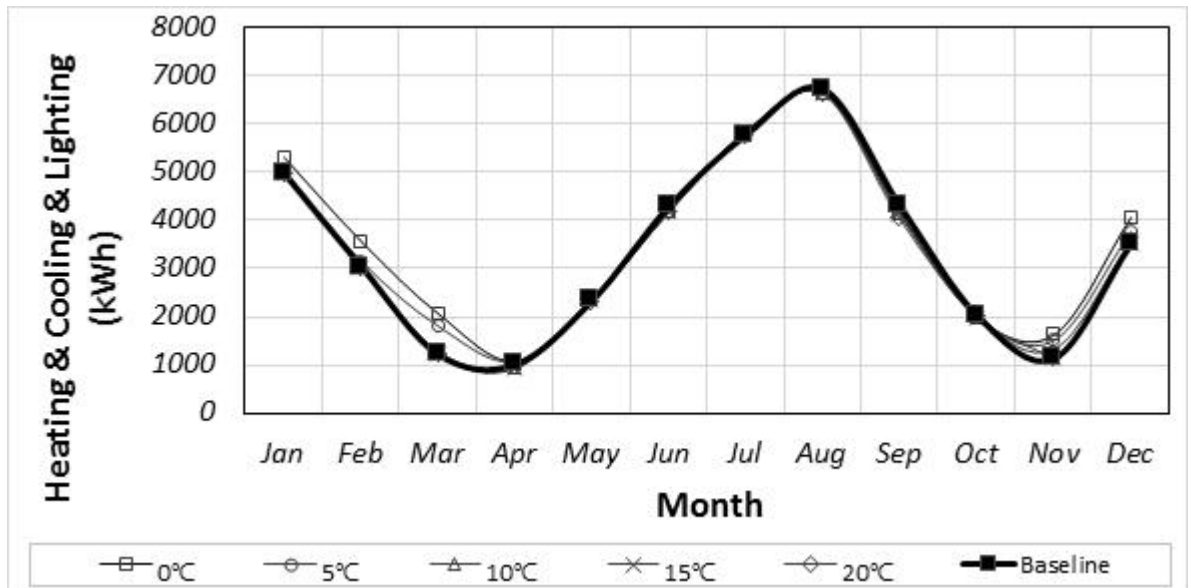


온도제어에 따른 리야드 냉방, 난방, 조명 총 연간 부하

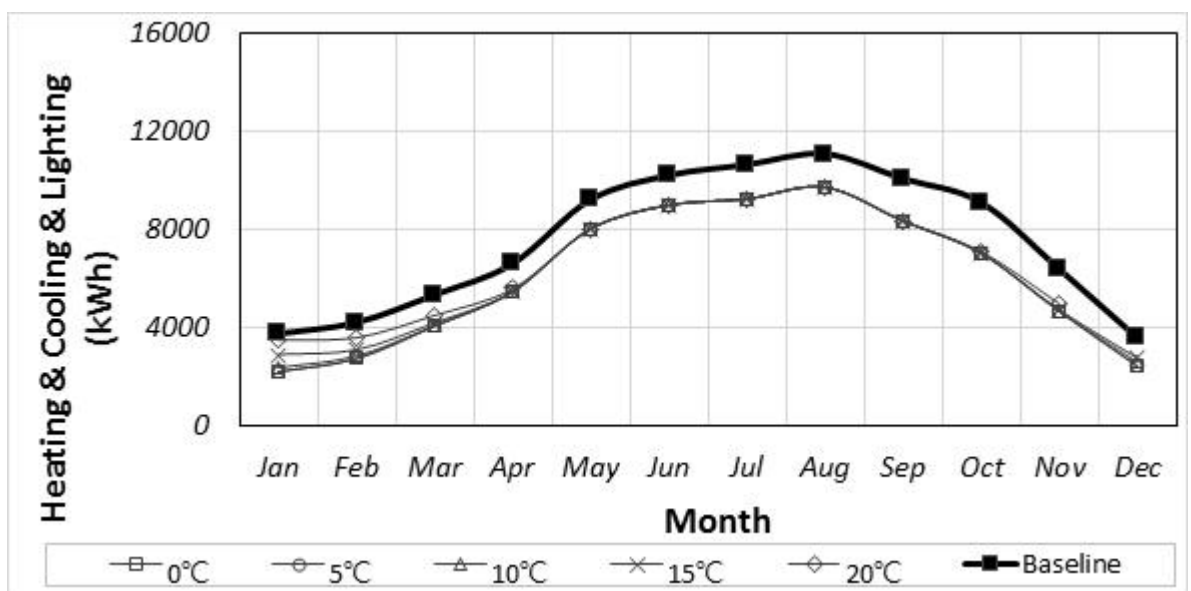
- 분석결과, 첫 번째로 러시아 모스크바 지역에 대하여 살펴보면, 온도에 따라 전기변색유리 제어 하에 Baseline 대비 온도 제어 조건 모두 연간 부하량을 감소시킬 수 있는 것으로 나타남.
- 모스크바는 전기변색유리 제어 조건 중 0°C가 감소량이 가장 미비한 것으로 나타났고, 15°C일 때 가장 부하 감소량이 큰 것으로 분석되었음.
- 모스크바 지역의 총 연간 부하량은 일사량 제어 조건과 마찬가지로 전기변색유리 제어에 따른 냉방 부하량 차이에 의해 영향을 크게 받는 것을 알 수 있었음.
- 두 번째로 한국 인천 지역 분석 결과를 살펴보면, 전기변색유리 제어 조건 중 0°C, 5°C는 baseline 대비 오히려 부하가 증가하였고, 10°C, 15°C, 20°C는 감소하였음.
- 이 가운데 20°C 조건일 때 부하 감소효과가 가장 큰 것으로 나타났음.
- 0°C, 5°C 조건은 오히려 부하량이 증가하는 것으로 나타났는데, 원인을 살펴보면 0°C, 5°C 조건은 일사를 가장 적게 받아들이기 때문에 난방부하와 조명부하가 크게 됨.
- Baseline과 10°C, 15°C, 20°C 조건은 연중 비슷한 부하패턴을 나타내고 있는데, 인천은 동절기에 10°C 이하를 유지하기 때문에 항상 투명한 상태를 유지해 baseline과 유사하고, 하절기에는 일사차단을 통해 냉방부하를 저감시키지만 조명부하 증가에 의한 영향이 더 커 저감된 냉방부하를 상쇄시키기 때문으로 분석됨.
- 세 번째로 사우디 리야드 지역 분석 결과를 살펴보면, 전기변색유리 제어조건 모두 Baseline 보다 연간 총 부하가 적은 것으로 나타났고, 0°C 조건 부하 감소량이 가장 큰 것으로 분석되었음.
- 리야드 지역은 모스크바, 인천과 달리 연중 부하저감 효과가 있는 것으로 나타났는데, 이는 냉방 위주의 기후 패턴을 나타내는 리야드의 특성에 의한 것으로, 일사차단을 통해 냉방부하를 줄임으로써 연간 총부하량을 낮출 수 있는 것으로 분석됨.
- 전기변색유리 온도 제어에 따른 연간 총 부하량 분석결과를 종합해보면, 모스크바는 15°C, 인천 20°C, 리야드는 0°C 에서 가장 작은 부하량을 나타냄.
- 특히, 리야드 지역은 0°C 조건에서 18.8%의 부하를 감소시켜 가장 효과가 좋은 것으로 분석되었고, 인천은 20°C 조건에서 1.2%, 모스크바는 15°C 조건에서 5.8% 부하 저감 효과가 있는 것으로 나타났음.



온도제어에 따른 모스크바 냉방, 난방, 조명 총 월별 부하



온도제어에 따른 인천 냉방, 난방, 조명 총 월별 부하



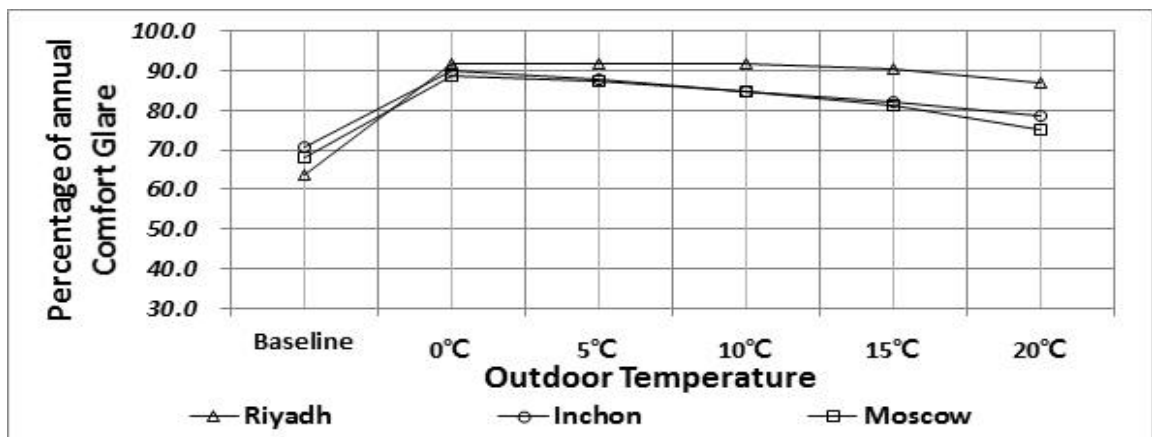
온도제어에 따른 리야드 냉방, 난방, 조명 총 월별 부하

(6) 온도 제어에 따른 빛환경 성능 분석 결과

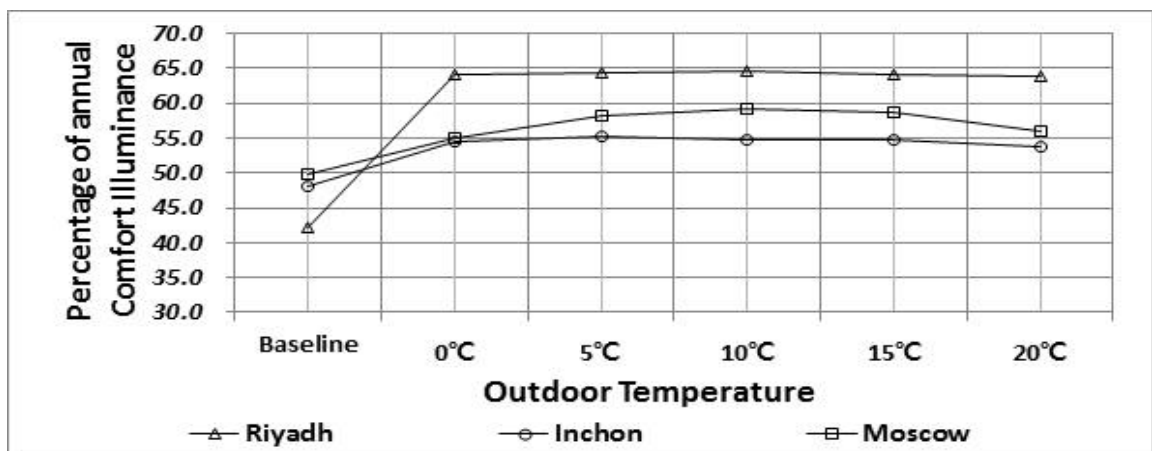
- 아래 그림 및 표는 DGI 분석 및 실내조도 분석결과를 표와 그래프로 나타내고 있음.
- DGI 분석 결과, 온도에 따른 전기변색유리 제어조건 모두baseline 대비 성능이 우수한 것으로 나타났음.
- 모스크바, 인천, 리야드 모두 0℃ 제어 조건이 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 온도가 높아질수록DGI 측면에서 불리한 것으로 나타남.
- 하지만 실내 조도 분석결과에는 DGI와 다른 경향을 나타냈는데, 모스크바는 10℃, 인천은 5℃, 리야드는 10℃ 제어 조건이 실내 조도 측면에서 우수한 성능을 나타남.
- 냉방, 난방, 조명부하 분석결과에 따르면 모스크바는 15℃, 인천은 20℃, 리야드는 0℃제어 조건이 가장 성능이 좋았지만, DGI 측면에서 모든 지역이 0℃ 제어조건 성능이 가장 우수하게 나타났고, 실내조도 측면에서는 모스크바 10℃, 인천 5℃, 리야드 10℃ 제어조건이 성능이 우수한 것으로 분석되었음.
- 일사량 제어 조건과 마찬가지로 에너지와 빛환경 측면에서 가장 최적의 제어조건을 도출하기 위해서는 통합적인 평가를 통한 분석이 필요함.
- 따라서 본 연구에서는 다음4.5장에서는 냉방, 난방, 조명의 연간 총 부하와 DGI, 실내조도를 통합적으로 분석한 EDPI 지표를 활용하여 통합 성능평가를 수행하고자 함.

온도 제어조건에 따른DGI22 이상 및 적정조도 범위 해당 시간 비율

Division	DGI under 22 (%)			Daylight Illuminance 150lx~1500lx (%)		
	Moscow	Inchon	Riyadh	Moscow	Inchon	Riyadh
Baseline	67.9	70.8	63.5	49.7	48.0	42.1
0℃	88.6	89.9	91.8	55.1	54.4	64.2
5℃	87.5	87.9	91.8	58.2	55.2	64.3
10℃	84.9	84.9	91.7	59.2	54.8	64.6
15℃	81.2	82.3	90.6	58.6	54.7	64.1
20℃	75.2	78.6	87.0	56.0	53.7	63.8



온도제어에 따른 연간 DGI 22 이상 해당 시간 비율



온도제어에 따른 연간 적정 조도 해당 시간 비율

(7) 에너지 및 빛환경을 통합 고려한 최적 제어 조건 도출

- 냉방, 난방, 조명부하와 DGI, 실내조도에 대한 빛환경 성능을 분석하면서, 기후지역별로 전기변색유리 제어 조건에 따른 장단점을 확인 할 수 있었음.
- 하지만 기후지역별 최적 제어 방법을 선정하기에는 서로 다른 특징을 나타내고 있어 통합 평가할 수 있는 방법론이 필요함.
- 따라서 본 장에서는 선행연구를 통해 개발된 EDPI(Integrated energy and daylight performance index) 지표를 활용하여 에너지와 빛환경에 대한 통합 성능평가를 수행하였음.
- 통합 성능 평가 지수인 EDPI 는 수식 1과 같이 연간 냉방, 난방, 조명부하의 총합, 연간 DGI 22 이하 해당 시간 비율, 연간 실내 적정조도 해당 시간 비율에 대해 각 구성요소 별로 실제값을 최대값과 최소값 비교를 통해 백분위화하여 성능의 정도를 평가하게 됨.
- 예를 들어, 모스크바 지역에서 온도 제어 조건의 연간 DGI 22 이하 해당 시간 비율을 로 계산할 때, 구성요소 i값은 온도와 일사량제어 조건의 DGI 22 이하 해당 시간 비율 데이터들을 의미하고, j 조건은 온도와 일사량 제어 모든 조건이 해당 됨.
- 여기서, 본 페이지에서 가장 가까이 있는 표를 통해 연간 DGI 22 이하 해당 시간 비율 데이터로 예를 들면, 모스크바 5℃ 제어 조건의 점수를 산정 할 때, 는 87.5%, 는 67.9%, 는 89.6%(일사량 조건 중 100 W/m²의 실제 값)로서 수식 1을 활용하여 값을 계산하면 90.4를 도출하게 됨.
- 모스크바 지역 온도 제어 조건의 연간 DGI 22이하 해당 시간 비율의 는 90.4임을 확인 할 수 있음.
- 이렇게 연간 냉방, 난방, 조명 부하의 총합과 연간 DGI 22 이하 해당 시간 비율, 연간 적정조도 해당 시간 비율의 를 각 기후 지역별 전기변색유리 제어조건에 따라 도출한 뒤, 도출된 데이터의 평균값을 계산하면 통합 성능을 평가가 이뤄지게 됨.

$$EDPI_{ij} = \frac{Actual X_{ij} Value - Minimum X_{ij} Value}{Maximum X_{ij} Value - Minimum X_{ij} Value} \times 100 \text{ ---- (1)}$$

- EDPI 통합 지수로 분석한 결과, 첫 번째로 모스크바에 대해 살펴보면, 일사량 200W/m² 조건이 가장 우수한 것으로 나타났음.
- EDPI를 살펴보면, 부하측면에서는 상위 수준으로 2번째에 해당하는 부하저감 성능을 나타냈고, 빛환경 측면에서는 불쾌현회를 방지하는데 10개 조건 중 4 번째로 우수한 성능을 나타내었으며, 연간 실내 적정조도 해당 시간 비율도 2 번째로 우수한 성능을 나타냄.
- 부하와 빛환경 측면에서 최고 점수를 획득한 요소는 없었지만 복합적인 요인을 통합 고려하여 상위 수준 해당하는 조합을 통해 가장 성능이 우수한 조건은 200W/m² 인 것으로 분석되었음.
- 두 번째로 인천지역을 분석해보면, 모스크바와 동일하게 일사량 200W/m² 조건이 가장 우수한 것으로 나타남.
- EDPI 를 살펴봤을 때, 일사량 200W/m² 조건은 냉방, 난방, 조명 부하와 연간 DGI 22 이하 해당 시간 비율, 연간 적정 조도 범위 해당 시간 비율에서 모두 상위 2번째로 우수한 성능을 나타내고 있음.
- 100W/m² 조건의 경우 빛환경성능 측면에서는 100점으로 가장 우수하지만 부하 측면에서는 10개 조건 가운데 9번째 성능을 나타내고, 300W/m² 조건의 경우 부하 측면에서 가장 우수하지만 빛환경 성능 측면에서는 하위권의 점수를 획득하고 있는 것을 알 수 있음.
- 즉, 인천지역 역시 복합적인 요인을 통합 고려하여 상위 수준 해당하는 조합을 통해 가장 성능이 우수한 조건은 200W/m² 인 것으로 분석되었음.

- 세 번째로 리야드 지역을 살펴보면, 모스크바와 인천지역과 달리 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 가장 우수한 것으로 분석되었음.
- 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ 조건은 리야드 지역에서 부하 저감 성능이 10개의 조건 중 4번째로 우수하고, 빛환경 성능 측면에서 연간 DGI 22 이하와 적정 조도 해당 시간 비율에서 10개 조건 중 가장 우수한 성능을 나타내고 있음.
- 두 번째로 우수했던 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$ 조건과 비교해보면 부하 측면에서 가장 우수한 성능을 나타내고 빛환경 성능은 연간 DGI 22 이하 해당 시간 비율이 10개 조건 중 5번째, 연간 적정 조도 해당 시간 비율이 10개 조건 중 2번째로 우수한 것으로 분석되었음.
- $200\text{W}/\text{m}^2$ 조건도 성능이 우수한 편이나 종합적으로 평가했을 때, 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 95.4, 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 82.5의 점수를 획득해 리야드 지역의 최적 제어 조건은 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ 조건인 것으로 분석 되었음.
- 종합적으로 분석해보면, 모스크바와 인천지역은 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 최적 제어 조건으로 나타났고, 리야드 지역은 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 최적 제어 조건인 것으로 분석되었음.
- 기후 지역 별 상위 30%에 해당하는 조건을 살펴보면, 모스크바는 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$ (EDPI 79.2), 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ (EDPI 71.9), 온도 10°C 제어 조건 (EDPI 69.3) 순으로 나타났고, 인천은 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$ (EDPI 78.4), 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ (EDPI 74.1), 일사량 $300\text{W}/\text{m}^2$ 제어 조건 (EDPI 61.2) 순으로 분석되었음.
- 리야드 지역은 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ (EDPI 95.4), 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$ (EDPI 82.5), 온도 5°C 제어 조건 (EDPI 80.6) 순으로 나타남.
- 즉, 모든 기후 지역별로 분석해봤을 때, 외기 온도에 따른 제어보다는 수직면 일사량에 따른 제어 방법이 우수한 것을 확인할 수 있었다.
- 본 연구에서는 기후 지역을 크게 3가지, 러시아 모스크바, 한국 인천, 사우디 리야드 지역으로 구분하고, 온도와 일사량에 따른 10가지 전기변색유리 제어 조건을 설정하여 냉방, 난방, 조명부하와 빛환경 성능 측면에서 최적화된 제어 조건을 도출하는 연구를 수행하였음.
- 전기변색유리 일사량 제어에 따른 연간 총 부하량 분석결과, 모스크바는 $300\text{W}/\text{m}^2$, 인천 $300\text{W}/\text{m}^2$, 리야드는 $200\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 우수한 것으로 분석되었음.
- 리야드 지역은 $200\text{W}/\text{m}^2$ 조건에서 23.4%의 부하를 감소시켜 가장 효과가 좋은 것으로 분석되었고, 인천은 $300\text{W}/\text{m}^2$ 조건에서 4.0%, 모스크바는 $300\text{W}/\text{m}^2$ 조건에서 5.8% 부하 저감 효과가 있는 것으로 나타남.
- 전기변색유리 일사량 제어에 따른 빛환경성능 분석결과, 연간 DGI 22 이하 해당 시간 비율은 모스크바, 인천, 리야드 모두 $100\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 일사량 조건이 높아질수록 DGI 측면에서 불리한 것으로 나타남.
- 연간 실내 적정 조도 해당 시간 비율 분석결과, 모스크바, 인천, 리야드 모두 DGI 분석결과와 동일하게 $100\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 가장 우수한 것으로 분석되었음.
- 전기변색유리 온도 제어에 따른 연간 총 부하량 분석결과, 모스크바는 15°C , 인천 20°C , 리야드는 0°C 에서 가장 우수한 성능을 나타남.
- 특히, 리야드 지역은 0°C 조건에서 18.8%의 부하를 감소시켜 가장 효과가 좋은 것으로 분석되었고, 인천은 20°C 조건에서 1.2%, 모스크바는 15°C 조건에서 5.8% 부하 저감 효과가 있는 것으로 나타남.
- 전기변색유리 온도 제어에 따른 빛환경 성능 분석결과, 연간 DGI 22 이하 해당 시간 비율은 모스크바, 인천, 리야드 모두 0°C 제어 조건이 가장 우수한 것으로 분석되었음.
- 하지만 실내 조도 분석결과와 DGI와 다른 경향을 나타냈는데, 모스크바는 10°C , 인천은 5°C , 리야드는 10°C 제어 조건이 실내 조도 측면에서 우수한 성능을 나타냄.
- 기후 지역별로 전기변색유리 제어 조건에 따른 장단점을 확인 할 수 있었지만 냉방, 난방, 조명 부하와 빛환경성능을 통합 평가할 수 있는 방법론이 필요함.
- 따라서 본 연구에서는 EDPI 지표를 활용하여 에너지와 빛환경에 대한 통합 성능평가를 수행하였음.
- EDPI 지표를 통해 종합적으로 분석해본 결과, 모스크바와 인천지역은 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 최적 제어 조건으로 나타났고, 리야드 지역은 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ 조건이 최적 제어 조건인

것으로 분석되었음.

- 기후 지역 별 상위 30% 에 해당하는 조건으로, 모스크바는 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$, 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$, 온도 10°C 제어 조건 순으로 나타났고, 인천은 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$, 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$, 일사량 $300\text{W}/\text{m}^2$ 제어 조건 순으로 분석되었음.
- 리야드 지역은 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$, 일사량 $200\text{W}/\text{m}^2$, 온도 5°C 제어 조건 순으로 나타났다. 즉, 모든 기후 지역별로 분석해봤을 때, 외기 온도에 따른 제어보다는 수직면 일사량에 따른 제어 방법이 우수한 것을 확인할 수 있었고 $100\text{W}/\text{m}^2 \sim 200\text{W}/\text{m}^2$ 수준이 적절한 제어 방법인 것으로 분석되었음.

EDPI 지표를 통한 에너지 및 빛환경 통합 성능평가

Division		EDPI				EDPI Chart
		DGI Under 22	Lux 150lx – 1500lx	Total Load (kWh)	Average	
Moscow	Baseline	0.0	0.0	0.0	0.0	
	100 W/m^2	100.0	100.0	15.6	71.9	
	200 W/m^2	71.8	67.0	98.8	79.2	
	300 W/m^2	46.8	40.7	99.8	62.4	
	400 W/m^2	26.3	21.9	83.4	43.8	
	500 W/m^2	11.9	9.3	57.8	26.3	
	0 $^\circ\text{C}$	95.5	20.0	14.0	43.2	
	5 $^\circ\text{C}$	90.4	31.5	58.3	60.0	
	10 $^\circ\text{C}$	78.5	35.2	94.2	69.3	
	15 $^\circ\text{C}$	61.5	33.0	100.0	64.8	
	20 $^\circ\text{C}$	33.7	23.3	66.2	41.1	
Inchon	Baseline	0.0	0.0	60.7	20.2	
	100 W/m^2	100.0	100.0	22.2	74.1	
	200 W/m^2	73.0	62.5	99.7	78.4	
	300 W/m^2	45.6	38.1	100.0	61.2	
	400 W/m^2	24.8	19.9	98.2	47.7	
	500 W/m^2	10.9	6.9	92.5	36.8	
	0 $^\circ\text{C}$	89.6	22.0	0.0	37.2	
	5 $^\circ\text{C}$	80.0	24.7	33.4	46.0	
	10 $^\circ\text{C}$	65.9	23.4	62.7	50.7	
	15 $^\circ\text{C}$	53.8	23.0	70.0	48.9	
	20 $^\circ\text{C}$	36.3	19.6	72.2	42.7	
Riyadh	Baseline	0.0	0.0	0.0	0.0	
	100 W/m^2	100.0	100.0	86.1	95.4	
	200 W/m^2	61.7	85.8	100.0	82.5	
	300 W/m^2	37.7	65.8	95.9	66.5	
	400 W/m^2	24.5	48.3	88.3	53.7	
	500 W/m^2	13.7	28.9	75.3	39.3	
	0 $^\circ\text{C}$	100.0	61.4	80.1	80.5	
	5 $^\circ\text{C}$	100.0	61.7	80.1	80.6	
	10 $^\circ\text{C}$	99.7	62.5	78.4	80.2	
	15 $^\circ\text{C}$	95.8	61.1	73.1	76.7	
	20 $^\circ\text{C}$	83.1	60.3	61.2	68.2	

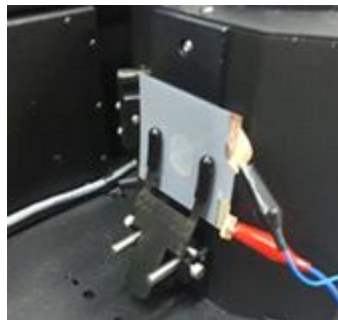
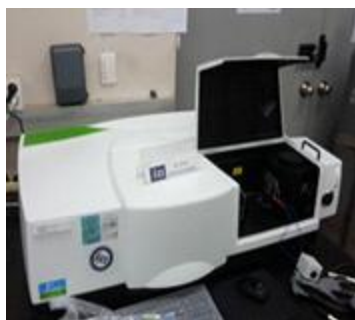
④ PDLC와 Electrochromic 복층유리의 건물에너지 저감 성능 비교평가

(1) 연구의 방법

- 본 연구에서는 PDLC 필름을 이용하여 노후 사무소건물의 커튼월 리모델링 방안으로 2가지 방식을 제안하였음
- 첫 번째는 기존 노후 커튼월의 유리에 필름을 부착하는 방식, 두 번째는 PDLC 필름을 유리 기판 사이에 Lamination한 후 창호 형태로 구성하여 기존 노후 커튼월에 덧대는 방식임
- 2가지 리모델링 방식에 대한 성능 평가는 PDLC 필름 광학특성 분석 실험 데이터를 기반으로 하여 시뮬레이션을 통해 건물에너지 및 빛환경 성능평가를 수행하였음
- PDLC 필름에 대한 광학특성 분석 실험 방법은 우선 태양스펙트럼 투과율 특성에 따라 4가지 종류로 제작을 하였고, Spectrometer를 활용하여 txt 확장자 형태의 광학특성 데이터를 수집하였음
- 도출된 PDLC 필름의 광학특성 데이터를 LBNL의 Optic 6를 활용하여 스펙트럼 영역 (300nm~2500nm) 에 대한 평균 투과율, 반사율, 흡수율, 방사율 데이터를 도출하였음
- 첫번째 리모델링 방식을 구현하기 위해 Optic 6를 활용하여 기존 노후 커튼월의 유리 데이터를 LBNL의 IGBD에서 추출하고, 분석된 PDLC 필름 광학특성 데이터를 활용하여 PDLC 필름이 부착된 유리의 광학 및 열적 특성 데이터를 도출하였음
- 두 번째 PDLC 창호를 덧대는 리모델링 방식을 구현하기 위해서 LBNL의 IGBD 데이터와 PDLC 필름 광학특성 데이터를 이용해 Lamination된 유리의 광학 및 열적 특성 데이터를 도출하였음
- 이렇게 PDLC 필름이 부착된 유리와 접합유리의 광학 및 열적 특성 데이터를 LBNL의 Window 7.4, Therm 7.4를 활용하여 프레임이 포함된 커튼월 형태로 구성한 뒤, 리모델링 된 두 가지 방식 커튼월의 광학 및 열적 특성 데이터를 도출하였음
- 건물에너지 및 빛환경 성능 평가를 위해 본 연구에서는 EnergyPlus 8.5 시뮬레이션을 활용하였으며, LBNL의 Window 7.4, Therm 7.4에 의해 도출된 데이터를 입력하여 기존 노후 커튼월 대비 냉방 및 난방에너지, 불쾌현황, 실내 적정조도 해당 비율에 대한 성능 개선 효과에 대하여 분석을 수행하였음

(2) 전기변색유리 및 PDLC 유리의 광학특성 분석

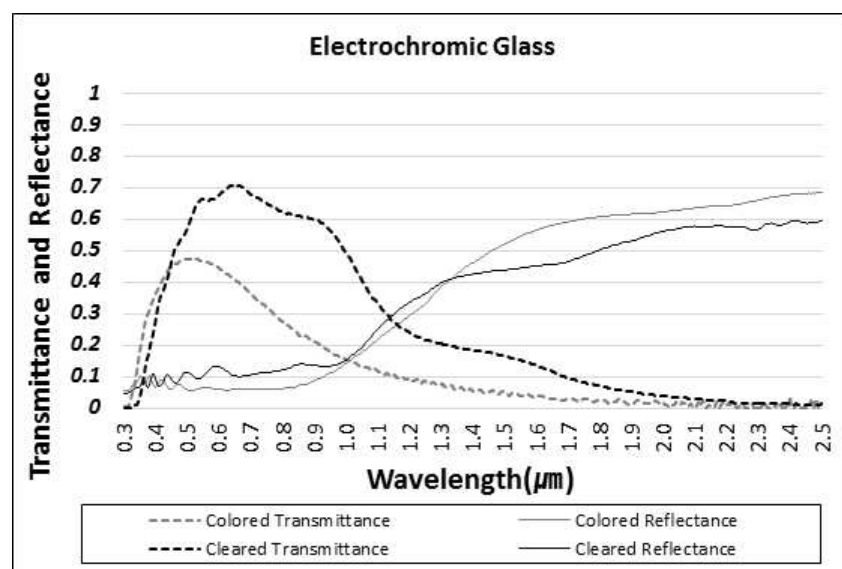
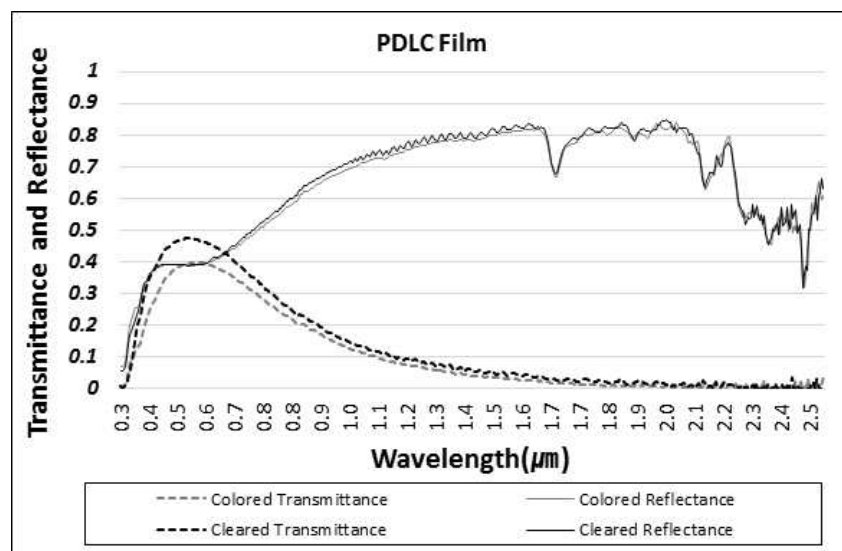
- 본 연구진은 전기변색유리 및 PDLC의 광학특성 분석을 위하여 70mm × 70mm 크기의 시료를 제작하였고 분광분석기(Spectrometer)를 이용하여 실험을 수행하였음



- 광학특성 분석은 0.3 μ m~2.5 μ m 범위의 태양스펙트럼 파장대에서 시료의 전·후면 투과율과 반사율을 측정하였음
- 광학특성 분석 결과, 전기변색유리는 착색(Colored) 상태에서 태양투과율이 6.5%, 탈색(Cleared) 상태에서 태양투과율이 48.1%로 태양투과율 변화폭이 41.6%로 분석되었고, PDLC의 태양 투과율은 착색 상태 23.0%, 탈색 상태 27.3% 태양투과율 변화폭이 4.3%로 나타났음
- 가시광선 투과율은 전기변색유리가 착색 상태에서 12.0%, 탈색 상태에서 64.8%로 변화폭 52.8%로 나타났고, PDLC는 착색 상태에서 38.9%, 탈색 상태에서 45.9%로 7.0%의 변화폭을 나타냈음

- 이에 따라 전기변색유리는 PDLC에 비해 태양 및 가시광선 투과율의 변화폭이 크기 때문에 일사조절 성능이 우수하며, 착색 시 투과율도 낮아 일사차단에 더 효과적일 것으로 예상됨
- 아래 그림은 광학특성 분석데이터에 대한 그래프로써 태양 전체 스펙트럼상에서 투과율 변화폭 및 반사율을 나타내고 있음

Division		Electrochromic glass		PDLC film	
		Colored	Cleared	Colored	Cleared
Solar	front	0.065	0.481	0.230	0.273
transmittance	back	0.065	0.481	0.230	0.273
Solar	front	0.181	0.214	0.552	0.561
reflectance	back	0.168	0.190	0.552	0.561
Visible	front	0.120	0.648	0.389	0.459
transmittance	back	0.120	0.648	0.389	0.459
Visible	front	0.074	0.128	0.397	0.398
reflectance	back	0.062	0.111	0.397	0.400



- 본 연구에서는 시뮬레이션 도구를 활용하여 전기변색유리, PDLC 적용에 따른 건물에너지 및 빛환경 성능을 분석하고자함
- 건물에너지 시뮬레이션을 위해서 광학특성 데이터를 이용하여 건축용 복층유리 구성 시 열관류율, 일사획득계수, 가시광선 투과율 도출이 필요하였음

- 이에 따라 본 연구에서는 우선 첫 번째로 필름형태로 분광분석 한 PDLC를 접합유리화 하기 위해 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory) Optic 6 프로그램을 활용하여 Table 2 와 같이 재구성(4mm clear+PLDC film+4mm clear)하여 광학특성을 도출하였음

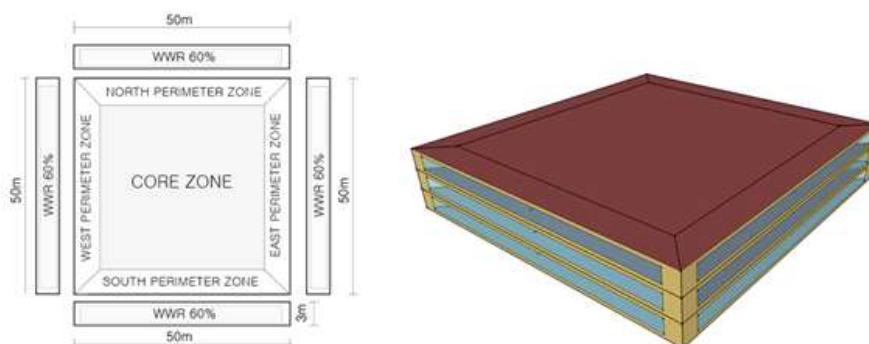
Division		PDLC film		PDLC laminated glass	
		Colored	Cleared	Colored	Cleared
Solar	front	0.230	0.273	0.211	0.250
transmittance	back	0.230	0.273	0.211	0.250
Solar	front	0.552	0.561	0.432	0.438
reflectance	back	0.552	0.561	0.552	0.561
Visible	front	0.389	0.459	0.379	0.447
transmittance	back	0.389	0.459	0.379	0.447
Visible	front	0.397	0.398	0.379	0.380
reflectance	back	0.397	0.400	0.397	0.399

- 두 번째로 LBNL의 Window 7.4 프로그램을 활용하여 전기변색 및 PDLC 유리를 건축용 복층유리(8mm EC or PDLC+12mm air+6mm Low-e glass)로 구성하였고, 위의 표와 같이 열관류율, 일사확득계수, 가시광선 투과율을 도출하였음
- 시뮬레이션 조건은 KS F 2278 기준을 따랐으며, 고온 측 공기온도 20℃, 저온 측 공기온도 0℃, 실내표면열전달계수 9.09W/m² K, 실외표면열전달계수 20.0W/m² K 조건에서 열 및 광학특성을 도출하였음
- 이렇게 도출된 전기변색 및 PDLC 복층유리의 열 및 광학특성 분석결과를 바탕으로 다음 장에서는 건물에너지 및 빛환경 성능평가를 수행하고자 함

(3) 건물에너지 및 빛환경 성능평가

1) 시뮬레이션 해석모델

- 본 연구에서는 시뮬레이션 도구로 미국 DOE(Department of Energy)에서 개발한 EnergyPlus 8.5를 사용하였음
- EnergyPlus는 실내외 환경 변화에 따라 유리의 투과율을 제어할 수 있는 Switchable glazing component를 제공하고 있어 스마트 윈도우에 대한 건물에너지 분석이 용이함
- 또한 EnergyPlus는 Hopkins에 의해 개발된 DGI(Daylight glare index) 지표를 활용하여 창면의 눈부심(glare)에 대해 분석이 가능하도록 component를 제공하고 있고, daylight sensor를 통해 실내 조도를 평가할 수 있는 장점을 가지고 있음
- 아래 그림은 시뮬레이션을 위한 해석모델 평면 및 건물 입면의 구성을 나타내고 있음
- 해석모델의 평면 구성은 아래 그림의 좌측과 같으며 바닥 면적은 50m×50m, 층고는 3m, 창면적비는 60%로 설정하였음
- 평면의 구성은 core zone과 perimeter zone으로 구분되며, 본 연구에서는 일사의 영향을 직접적으로 받는 남측, 동측, 서측의 perimeter zone을 대상으로 분석을 수행하였음
- 아래 그림의 오른쪽은 Openstudio를 활용한 Energyplus 8.5 해석 모델을 나타내고 있으며, 3개층으로 구성된 사무소 건물을 모델링 하였고, 중간층을 대상으로 분석을 수행하였음



Division	Materials	Properties
Exterior wall	200 mm concrete	U-value 0.202W/m²K
	155 t insulation	
	19 mm gypsum board	
Exterior Floor	105 mm insulation	U-value 0.291W/m²K
	200mm concrete	
Exterior Roof	100mm concrete	U-value 0.136W/m²K
	220mm insulation	
	Ceiling air space	
	Acoustic tile	

- 해석모델의 외벽은 위의 표와 같으며 건축물에너지절약설계기준(2019)에 따라 구성하였고, 해석모델의 설정온도는 건축물의 건축물에너지절약설계기준 상 냉난방설비 용량계산을 위한 실내 온도 기준을 따라 각각 20℃, 26℃로 설정하였음
- HVAC은 시스템 변수에 의한 간섭을 최대한 배제한 부하 분석을 위하여 EnergyPlus에서 제공하는 IdealLoadsAirSystem을 적용하였음
- 내부 열취득은 ASHRAE Fundamentals (2009)의 기준에 따라 Overhead lighting 10.8W/m², Peak occupancy 22.3m²/person, Equipment 8.6W/m²을 적용하였음
- 인체, 조명, 기기의 내부 열취득 스케줄은 EnergyPlus의 DataSets의 Schedules에서 제공하는 Office Schedule를 적용하였고, 외기도입량은 건축물 에너지효율등급 인증제도 운영규정에 따라 1.1m³ /m² h를 적용하였음
- 기상데이터는 겨울에 대륙의 한랭한 고기압, 여름에는 고온다습한 해양기단의 영향을 받아 기온의 연교차가 30℃에 이르는 대륙성 기후를 나타내는 인천지역 기상데이터를 사용하였으며, 본 기상데이터는 EnergyPlus 웹사이트에서 제공하는 데이터를 사용하였음

2) 일사조절 유리의 제어 방법

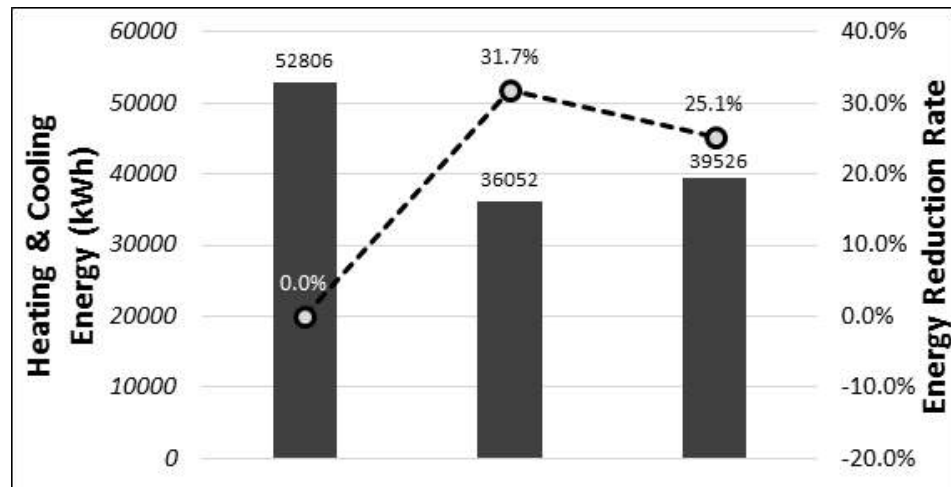
- 스마트 유리 제어 방법으로는 사용자에 의한 수동 제어, 외부 환경에 따른 자동제어로 구분될 수 있음
- 자동제어 시 변수로는 시간, 외기온도, 실내온도, 외부 일사량, 외부 조도 등 다양한 변수가 있음
- 본 연구에서는 우리나라와 같이 하절기와 동절기의 구분이 명확한 기후 조건을 대상으로 하절기에는 일사 차단, 동절기에는 일사 유입을 통해 건물에너지 저감을 목적으로 하는 제어 방식으로 선정하였음
- 이에 따라 본 연구는 하절기를 5월~10월, 동절기를 11월~4월로 구분하였고, 하절기에는 일사조절유리를 착색, 동절기에는 일사조절유리를 탈색 시키는 조건으로 성능평가를 수행하였음

3) 건물에너지 성능평가 결과

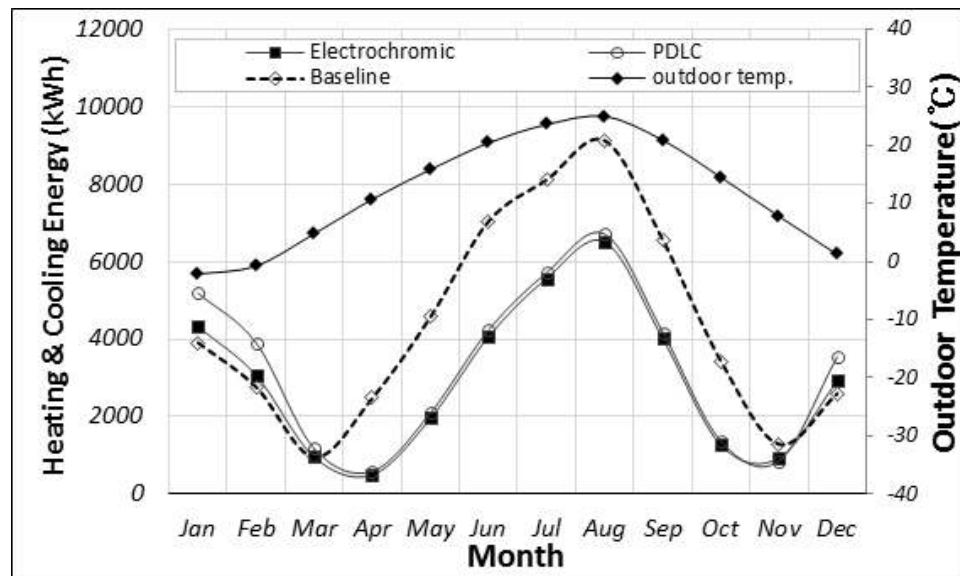
- 전기변색 복층유리 및 PDLC 복층유리를 사무소 건물에 적용 후 냉방기와 난방기로 구분하여 투과율 제어 시 기존 Low-e 복층유리 대비 에너지 소비량을 알아보고자 함
- 우선 건물에너지에 직접적으로 영향을 미치는 Solar heat gain coefficient를 살펴 보면 전기변색유리는 착색상태에서 0.127, 탈색상태에서 0.411로 투과율 변화폭은 0.284의 차이를 나타냄
- PDLC 복층 유리는 착색상태에서 0.222, 탈색상태에서 0.252로 투과율 변화폭이 0.030로 나타나 전기변색 복층유리에 비해 투과율 변화폭이 적은 것으로 나타났음
- 두 종류의 일사 조절이 가능한 유리의 특성으로 볼 때, 냉방기, 난방기로 구분해 투과율을 제어하게 되면 전기변색유리의 에너지 저감 성능이 PDLC에 비해 높을 것으로 예상할 수 있음
- 아래 표는 각 복층유리를 사무소 건물 적용 시 에너지 소비량을 나타낸 표다. 총 에너지소비량을 보면, Baseline인 Low-e 복층유리는 연간 52806.1kWh, 전기변색 복층유리는 36052.0kWh, PDLC 복층유리는 39526.0kWh로 나타나 예상과 같이 전기변색 복층유리의 성능이 가장 우수한 것으로 분석되었음

- 아래 그래프는 Baseline 대비 에너지소비량 저감률을 나타낸 그래프임
- 저감률을 살펴보면, 전기변색 복층유리는 31.7%, PDLC 복층유리는 25.1%를 저감 시킬 수 있는 것으로 분석되었음
- 전기변색 복층유리가 PDLC 복층유리 대비 상대적으로 성능이 우수하지만, 두 유리 모두 일반 Low-e 복층유리보다 25% 이상 에너지를 저감할 수 있어 일사조절 유리로서 우수한 성능을 나타냈음

Month	Baseline	Electrochromic	PDLC
Jan	3904.4	4320.1	5183.9
Feb	2758.7	3061.7	3898.2
Mar	954.9	950.9	1168.5
Apr	2476.0	496.1	590.3
May	4570.5	1953.8	2091.8
Jun	7042.1	4065.6	4237.4
Jul	8114.1	5568.7	5715.9
Aug	9121.7	6509.9	6708.0
Sep	6552.5	4010.5	4174.6
Oct	3429.4	1261.6	1363.0
Nov	1287.2	932.1	855.4
Dec	2594.7	2921.1	3539.2
Total	52806.1	36052.0	39526.0



- 아래 그림은 각 복층유리별 에너지 소비량을 월별로 나타낸 그래프임
- 본 그래프를 통해 계절별 에너지소비 경향을 파악할 수 있는데, 우선 동절기 난방에너지 소비량을 살펴 보면 일사확득계수가 낮은 전기변색 및 PDLC 복층유리가 Low-e 복층유리보다 에너지소비량이 높은 것을 알 수 있음
- 탈색 시 투과율이 낮은 PDLC가 에너지 소비량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 전기변색유리, Low-e 복층 유리 순으로 에너지 소비가 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있음
- 하절기 냉방에너지 소비량을 살펴보면, 전기변색 및 PDLC 복층유리 적용을 통해 에너지 소비량을 크게 저감 시킬 수 있는 것을 알 수 있음
- 복층유리의 일사확득계수는 0.578로 높은 편이지만, 착색 상태로 전환을 통해 일사확득계수를 전기변색 유리는 0.127, PDLC 복층유리는 0.222까지 낮춰 투과되는 일사량을 차단 할 수 있기 때문으로 분석됨



- 아래 표는 계절별 에너지 소비량을 표로 나타내었음
- 아래 표를 통해 Low-e 복층 유리 대비 하절기에 전기변색 복층 유리는 34.6% 저감이 가능하고, PDLC 복층유리는 전기변색 복층유리와 근소하게 32.4% 저감이 가능한 것으로 나타났음
- 중간기는 다른 계절에 비해 저감율이 큰 것으로 나타났고, 전기변색 복층 유리가 56.0% 저감, PDLC 복층유리가 52.3% 저감이 가능해 유사한 성능으로 나타났음
- 동절기는 전기변색 복층유리가 Low-e 복층유리 대비 11.3% 증가하지만, PDLC 복층유리는 36.3% 증가해 약 25.0%가량 차이가 나는 것을 확인할 수 있음
- 연간 에너지 소비량 측면에서 전기변색 복층유리는 31.7%, PDLC 복층유리는 25.1% 저감이 가능해 일사조절을 통한 에너지 저감에 효과가 있는 것으로 나타났음
- 다만, PDLC 복층유리의 에너지 저감율이 낮은 이유는 PDLC 복층유리의 광학특성 상 투과율 변화 폭이 적고, 탈색 시 전기변색 복층유리에 비해 투과율이 낮음으로써 동절기 에너지소비량 차이에 의한 것으로 분석되었음

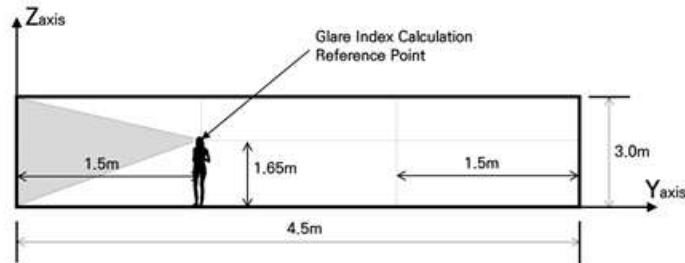
Division	Baseline	Electrochromic		PDLC	
	Energy (kWh)	Energy (kWh)	Reduction Rate compared to Baseline	Energy (kWh)	Reduction Rate compared to Baseline
Summer	30830.3	20154.7	-34.6%	20835.9	-32.4%
Middle term	12718.0	5594.5	-56.0%	6069.0	-52.3%
Winter	9257.8	10302.9	+11.3%	12621.2	+36.3%
Total	52806.1	36052.0	-31.7%	39526.0	-25.1%

4) 빛환경 성능평가 결과

- 본 장에서는 전기변색 복층유리 및 PDLC 복층유리를 사무소 건물에 적용 후 냉방기와 난방기로 구분하여 투과율 제어 시 기존 Low-e 복층유리 대비 빛환경 성능 향상이 가능한지에 대해 알아보고자 함
- 우선 건물에너지에 직접적으로 영향을 미치는 가시광선 투과율을 살펴보면 전기변색유리는 착색 상태에서 0.096, 탈색상태에서 0.521로 투과율 변화폭은 0.425의 차이를 나타냄
- PDLC 복층 유리는 착색상태에서 0.316, 탈색상태에서 0.373으로 투과율 변화폭이 0.057로 나타나 전기변색 복층유리에 비해 투과율 변화폭이 적은 것으로 나타났음
- 본 연구에서는 연간 불쾌현황 발생 비율과 연간 실내 적정조도 해당 비율에 대해 분석하여 빛환경 성능 평가를 수행하였음
- 우선 연간 불쾌현황 발생 비율을 분석하기 위해 아래 그림과 같이 시뮬레이션 해석모델의 창을

기준으로 1.5m 떨어진 거리, 1.65m 높이에 reference point를 설치하였음

- 이 reference point에서 창면을 바라봤을 때의 불쾌현황 분석은 energyplus 시뮬레이션 툴에서 제공하는 DGI(Daylight glare index) 지표를 통해 분석을 수행하였음
- DGI는 Hopkinson에 의해 개발되었으며, 눈부심이란 주관적 빛환경 성능을 지표화 한 것으로 아래 표와 같이 건물의 용도별로 추천하는 값을 제공하고 있음
- 본 연구는 사무소건물을 대상으로 빛환경 성능을 분석하였기 때문에 DGI 22를 기준으로 설정하였음
- Reference point는 실내 조도 분석 시에도 활용 되었으며, 조도 분석 시 Reference point의 위치는 1.5m 간격으로 2point를 설정하였음



Division	Recommended value
Art galleries	16
Hospital wards	18
Museums, School classroom	20
Laboratories, Offices	22

- 아래 표는 방위별 연간 DGI 22를 초과하는 시간의 비율을 나타내고 있음
- 아래 표의 방위별 평균 값을 살펴보면 Low-e 복층유리 대비 연간 불쾌현황 해당비율을 전기변색 복층유리는 64.6% 저감, PDLC 복층유리는 78.5% 저감이 가능한 것으로 나타났음
- 전기변색 복층유리가 착색 시 가시광선 투과율은 가장 낮지만, 동절기에 탈색 상태로 제어될 경우 전기변색 복층유리의 가시광선 투과율은 PDLC에 비해 높기 때문에 연간 불쾌현황 저감 측면에서는 전기변색 복층유리 보다 PDLC 복층유리가 유리한 것으로 나타났음
- 즉, 동절기 탈색, 하절기 착색 상태로 제어하게 되면 전기변색 복층유리가 에너지 저감 측면에서는 유리하지만, PDLC 복층유리는 가시광선 투과율 변화폭이 적고, 탈색 시 투과율이 낮은 특성으로 인해 불쾌현황 저감 효과가 더 높은 것으로 분석되었음

Zone	Baseline	Electrochromic		PDLC	
		Yealy corresponding time greater than DGI 22	Reduction Rate compared to Baseline	Yealy corresponding time greater than DGI 22	Reduction Rate compared to Baseline
South zone	45.4 %	15.2 %	-66.5%	10.0 %	-78.0%
East zone	40.3 %	15.2 %	-62.3%	9.2 %	-77.2%
West zone	38.6 %	13.5 %	-65.0%	7.6 %	-80.3%
Average	41.4%	14.6%	-64.6%	8.9%	-78.5%

- 아래 표는 방위별 연간 적정조도 해당 시간의 비율을 나타내고 있음
- 적정 조도의 기준은 KS(Korean Industrial Standard)의 KS A 3011 기준에서 제시하고 있는 사무 소건물의 적정 조도인 150lx ~1500lx 범위로 산정하였음
- 연간 실내 적정조도 해당 시간 범위 분석 결과, Low-e 복층유리 보다 전기변색 및 PDLC 복층 유리 적용에 따라 적정조도 해당 시간이 증가함을 알 수 있었음

- Low-e 복층 유리 35.6% 보다 연간 적정조도 해당 시간 비율이 전기변색 복층유리는 54.4%로 155.2% 증가하였고, PDLC 복층유리도 52.5%로 149.1% 증가해 빛환경 성능 개선이 가능한 것으로 분석되었음

Zone	Baseline	Electrochromic		PDLc	
		Yealy corresponding time within 150lx-1500lx	Increasing Rate compared to Baseline	Yealy corresponding time within 150lx-1500lx	Increasing Rate compared to Baseline
South zone	28.5 %	50.7 %	177.9%	46.9 %	164.6%
East zone	40.2 %	56.5 %	140.5%	56.1 %	139.6%
West zone	38.1 %	56.1 %	147.2%	54.6 %	143.3%
Average	35.6%	54.4%	155.2%	52.5%	149.1%

(4) 소결

- 본 연구에서는 전기변색 및 PDLC 복층유리 2가지 종류의 일사조절 유리를 대상으로 사무소 건물 적용에 따른 건물에너지 및 빛환경 성능에 대해 분석을 수행하였음
- 우선 두 종류 일사조절 유리 및 필름에 대한 광학특성 분석 후 LBNL Window 7.4 툴을 활용하여 두 종류 일사조절 유리의 복층유리로서의 열 및 광학적 특성을 분석 한 결과, 전기변색유리의 일사확득계수 및 가시광선 투과율 변화폭이 PDLC에 비해 큰 것으로 분석되었음
- 따라서 우리나라와 같이 하절기와 동절기의 구분이 명확한 기후 조건에서는 전기변색 복층유리의 에너지 저감 성능이 클 것으로 예상되었음
- 이러한 가정을 바탕으로 사무소건물의 해석모델을 구축하고, 제어 조건은 하절기(6월-9월), 동절기(10월-5월)로 구분하여 하절기에는 착색, 동절기에는 탈색 시키는 조건으로 건물에너지 및 빛 환경 성능을 분석하였음
- 건물에너지 성능 분석 결과, Low-e 복층유리 대비 전기변색 복층유리가 31.7% 에너지 저감이 가능하고, PDLC 복층유리가 25.1% 저감이 가능한 것으로 나타났음
- 전기변색 복층유리가 PDLC 복층유리 대비 상대적으로 성능이 우수하지만, 두 유리 모두 일반 Low-e 복층유리보다 25% 이상 에너지를 저감 시킬 수 있어 일사조절 유리로서 우수한 성능을 나타냈음
- 빛환경에 해당하는 불쾌현황 저감 성능 분석 결과, 전기변색 복층유리에 비해 가시광선 투과율 변화폭이 적고, 탈색 시 투과율이 낮은 특성으로 인해 불쾌현황 저감 효과가 더 높은 것으로 나타났음
- 이는 동절기 탈색 상태를 유지할 때 가시광선 투과율이 더 낮은 PDLC 복층유리가 더 불쾌현황 저감 측면에서 유리하기 때문으로 분석되었음
- 빛환경에 해당하는 적정조도 해당 시간 비율 분석 결과, Low-e 복층유리 35.6% 보다 전기변색 복층유리가 54.4%로 155.2% 증가하였고, PDLC 복층유리도 52.5%로 149.1% 증가해 실내 적정조도 해당 비율을 향상시키는 것으로 나타났음
- 근소한 차이로 전기변색 복층유리가 더 우수한 것으로 나타났지만, 값이 차이가 크지 않으므로 큰 의미는 없을 것으로 판단되며, 두 일사조절 유리 모두 빛환경 성능 개선에 효과적인 것으로 사료됨

4. [ET] 고강도 전기변색 접합유리 성능평가

① 건축용 안전 접합유리 및 건축용 광학, 열적 특성 성능평가 방법 분석

- ✓ 건축용 접합유리 성능평가(KS L 2004) 시험 방법 분석
- ✓ Full cell의 박리강도 시험방법 개발
- ✓ 건축용 유리의 광학 및 열적 특성 성능평가 방법 분석

(1) 건축용 안전 접합유리 성능평가 방법(KS L 2004) 분석

■ 건축용 접합유리의 범위

- 건축물 내 안전을 요하는 주요부로 출입문, 쇼윈도우, 전시장, 승강기, 난간대, 천장, 계단, 바닥, 캐노피, 교육시설의 창 등에 사용되는 접합유리에 대하여 규정함
- 접합유리란 2장 이상의 재료 판유리를 중간막으로 전면 접착한 것으로서, 외력의 작용으로 파손되어도 중간막에 의해 파편이 대부분 떨어지지 않도록 한 것
- 중간막이란 재료 판유리 사이에 양자를 접착할 목적으로 끼우는 합성수지의 층을 말함

■ 접합유리의 종류 및 기호

- 모양에 따른 종류
 - 1) 평면접합유리
 - 2) 곡면접합유리
- 낙구 충격 박리특성 및 쇼트백 충격 특성에 따른 종류 및 기호

종류	기호	특성		
		시험 대상	시험 통과 규정	
			시험통과 규정	합불 판정
I 류	LI	평면 접합유리 곡면 접합유리	낙구 충격 박리특성	통과
II-1류	LII-1	평면 접합유리	낙구 충격 박리특성 쇼트백 충격 특성	통과 낙하높이 120cm 통과
II-2류	LII-1	평면 접합유리	낙구 충격 박리특성 쇼트백 충격 특성	통과 낙하높이 75cm 통과
III류	LIII	16mm 이하 평면 접합유리	낙구 충격 박리특성 쇼트백 충격 특성	통과 통과

■ 낙구 충격 박리 특성 평가 방법

- 평면 접합유리의 낙구 충격 시험은 다음과 같음
 - 1) 시료는 제품과 같은 재료 판유리 및 같은 중간막을 사용하여 비슷한 방법으로 제조하거나 제품에서 잘라 낸 약 610mm×610mm의 치수로 평면 및 평면에 가까운 접합유리로서, 시험 직전까지 적어도 4시간 동안 (23±2) °C의 실내에서 유지한 것을 사용
 - 2) 시료는 아래 그림에 표시한 철제틀로 시료가 수평이 되도록 함
 - 3) 다른 두께의 종류 재료 판유리를 사용한 접합유리는 얇은 쪽 재료 판유리를 충격면으로 함
 - 4) 다만, 무늬 접합유리, 망 무늬 판유리 및 선 무늬 판유리를 사용하는 접합 유리에서는 원칙적으로 충격면은 무늬 무양이 없는 면으로 함
 - 5) KS B 2001에 규정하는 호칭 2 1/2의 강구 중에서 무게 (1040±10)g 인 것을 골라서, 이것을 시료 표면에서 120cm 높이에 놓고 정지 상태에서 힘을 가하지 않고 시료면의 중심점을 향해서 1회 낙하시켜서 구성하는 유리가 1장 이상 파괴되었을 때의 파괴 상태를 봄
 - 6) 파괴되지 않은 경우에는 아래 표의 낙하 높이의 순서에 따라 높이를 점차 올려서 1회 낙하

하여 구성하는 유리판이 1장 이상 파괴되었을 때의 파괴 상태를 봄

7) 그래도 파괴되지 않는 경우에는 KS B 2001에 규정하는 호칭 3 1/4의 강구에서 무게 (2260 +30, -20)g 의 것을 사용하여, 앞의 조작을 하여 구성하는 유리판이 1장 이상 파괴되었을 때 파괴의 상태를 봄

8) 또한 파괴되지 않는 경우에는 KS B 2001에 규정하는 강구 중 적당히 무게가 많이 나가는 것을 사용하여 같은 조작에 의해 충격을 가하고, 구성하는 유리판이 1장 이상 파괴되었을 때 파괴의 상태를 봄

9) 충격점은 시료면의 중심점에서 25mm 이하의 범위에 들어가도록 하고, 시험은 상온에서 함



분류	낙구충격 낙하 높이(cm)						
낙하 높이	120	150	190	240	300	380	480

(2) 전기변색유리 Full cell의 박리강도 평가 방법

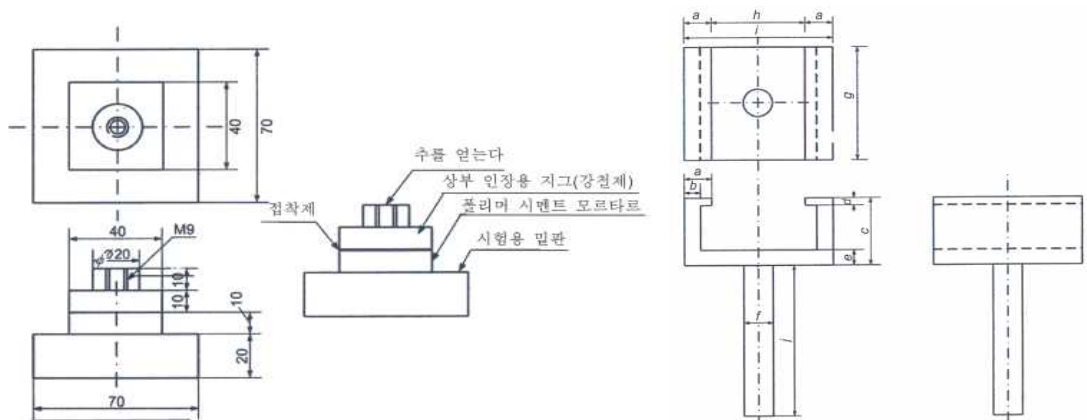
■ 박리강도 평가 방법 산정

- 전기변색유리 Full cell에 대한 박리강도 평가 방법 부재
- 따라서 KS F 4042 “콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르” 표준을 인용하여 6장의 부착강도 시험을 변형한 평가방법을 산정 함.

■ 박리강도(부착강도) 평가를 위한 전기변색유리 시험체의 제작

- KS F 4716의 5장 시험용 밀판 제작방법에 따라 금속제 또는 합성수지제 형틀을 놓고, 제작한 전기변색유리 Full cell 시료의 윗면과 아래 면에 접착제를 바른 후 형틀에 고정
- 아래 그림의 폴리머 시멘트 모르타르 대신 전기변색유리 Full cell 시료를 적용

상부 인장용 지그(좌), 하부 인장용 지그(우)



■ 박리강도(부착강도) 평가 방법

- 표준 상태에서 1시간 이상 놓아 둔 시험체를 하부 인장용 지그(강철제) 및 강철제 받침판을 사용해서 시표면에 대해 수직 방향으로 인장력(파단될 때까지 하중 속도는 1500~3000 N/min)을 가해 최대 인장 하중을 구함
- 박리 강도는 다음 식에 의해 산출 하고 시험체 3개의 평균값으로 하여 소수점 이하 한 자리로 끝맺음 함

$$\sigma_a = \frac{T}{1600}$$

- 여기에서 σ_a 는 박리강도(N/mm²), T는 최대 인장 하중(N)을 나타냄
- 시험에 사용하는 인장 시험기의 물리개는 자동 중심 조심형이 바람직함.
- 접착제는 시험체에 침투하기 어려운 고점도의 것으로, 예를 들면 무용제형인 2액형 에폭시 수지 접착제를 사용하는 것이 좋음.

(3) 건축용 유리의 광학, 열적 특성 성능평가 방법 분석

■ 건축용 유리의 광학 및 열적 특성 평가 범위

- 건축용 판유리에 대한 가시광선 투과율, 반사율 및 태양방사의 투과율, 반사율, 흡수율과 상온 열방사의 방사율을 분광 측광기를 이용하여 평가하고, 건물의 창에 사용하였을 때의 태양열 취득률을 계산하는 방법

■ 건축용 유리의 광학, 열적 특성 평가 항목 및 용어

- 가시광선 투과율(가시광선 반사율) : 유리면에 수직으로 입사되는 일광의 광속에 대하여 투과 광속(반사 광속)의 입사 광속에 대한 비율
- 일광이란 국제조명위원회(CIE:International Commission on Illumination)가 정한 CIE 일광을 의미하고, CIE 일광에서는 관측 데이터를 기초로 흑체 방사의 색온도와 같은 색온도 일광의 분광 조도 분포를 파장 560nm의 값에 대한 상대값으로 나타내고 있음
- 광속(Luminous Flux)이란 방사의 파장별 방사속(Radiant Energy Flux)과 시감도 값의 곱의 수치를 파장에 대하여 적분한 것을 의미
- 태양방사 투과율(태양방사 반사율) : 유리면에 수직으로 입사하는 태양방사의 방사속에 대하여 투과 방사속(반사 방사속)의 입사 방사속에 대한 비율
- 여기서 태양방사란 직접 도달하는 태양방사, 즉 대기권을 투과하여 지상에 직접 도달하는 근자외선, 가시광선 및 근적외선의 파장영역(300~2500nm)의 방사를 말함
- 방사율 : 유리판이 공간에 방사하는 열방사 방사력(radiant power)의 같은 온도의 흑체가 방사하는 열방사 방사력에 대한 비율
- 태양열 취득률 : 창유리면에 수직으로 입사하는 태양방사에 대하여 유리 부분을 투과하는 태양방사의 방사속과 유리에 흡수되어 실내 쪽으로 전달되는 열류속을 합한 것의, 입사하는 태양방사의 방사속에 대한 비

■ 분광 투과율 및 분광 반사율의 평가 방법

- 분광 측광기
 - 측정에 사용하는 분광 측광기는 일반 화학 분석용 근자외선, 가시광선, 근적외선 파장여기 분광 광도계에 수광용 적분구가 부착된 것으로 하고 다음 조건을 만족하여야 함
 - 파장 범위 : 파장 눈금의 범위는 (300~2500)nm 로 하고 (300~2100)nm 의 범위의 경우 4)의 측광 정밀도를 가진 것으로 함
 - 분해능 : 분해능은 380nm 미만의 파장에서는 5nm 이하, (380~780)nm 의 파장에서는 10nm 이하, 780nm를 넘는 파장에서는 50nm 이하로 함
 - 측광 정밀도 : 780nm 이하의 파장 범위에서는 측광값의 정확도는 최대 눈금의 1% 이

하이그, 반복 정밀도는 0.5% 이하, 780nm를 넘는 파장 범위에서는 각각 2% 이하 및 1% 이하로 함.

5) 파장 정밀도 : 분광 측광기의 파장 눈금의 치우침은 780nm 이하의 파장 범위에서는 분광기의 투과 파장 대역의 중심 파장에서 1nm 이하, 780nm를 넘는 파장 범위에서는 5nm 이하로 함.

■ 평가 방법

1) 분광투과율 측정

- 시료면의 법선 방향에서 분광 측광기의 사출 슬릿에서 나오는 평행에 가까운 광선속을 입사시켜 그 투과광의 방향에서 분광 투과율을 측정함.
- 표준 시료는 광로 안에 시료를 삽입하지 않는 경우의 공기층으로 하고 그 분광 투과율을 1로 함.

2) 분광 반사율의 측정

- 뒷면에 광트랩을 장착한 시료의 면에 대하여 15° 를 초과하지 않는 입사각으로 분광 측광기의 사출 슬릿에서 나오는 평행에 가까운 광선속을 입사시키고 정반사광을 적분구로 받아서 분광 반사율을 측정함.
- 시료의 표면 반사광과 뒷면에서의 1차 반사광 사이의 광축의 어긋남은 2mm 이하이어야 함.
- 반사율의 값은 표준 시료의 반사율 값과 비교하여 정함.
- 기준 거울면 반사체는 절대 반사율 측정법에 따라 반사율을 정한 거울면 반사체로 함.
- 비교용 표준 시료로는 기준 거울면 반사체 또는 그것과 비교하여 반사율을 정한 거울면 반사체를 사용함.

■ 가시광선 투과율 및 가시광선 반사율의 평가

- 분광 투과율 및 분광 반사율의 값에 찬 일광 D_{65} 의 스펙트럼과 CIE 밝기의 비시감도의 파장 분포에서 얻어지는 가중 계수를 곱하여 가중 평균하고 가시광선 투과율 및 가시광선 반사율을 구함.
- 분광 투과율 및 분광 반사율의 값은 유리판의 측정값을 딸고, 복층유리에 대해서는 그 재료의 유리판에 대하여 규정한 방법으로 측정한 값에서 유리판 사이의 다중 반사를 고려하여 계산한 값으로 함.
- 자세한 기초식은 KS L 2514의 5장을 따름.

■ 태양방사 투과율, 태양방사 반사율 및 태양방사 흡수율의 평가

- 분광 투과율, 분광반사율의 측정값 및 그것으로부터 유도되는 분광 흡수율 값에 태양방사의 표준 스펙트럼 분포를 나타내는 가중 계수를 곱하여 가중 평균하여, 태양방사 투과율, 태양방사 반사율 및 태양방사 흡수율을 구함.
- 분광 투과율, 분광 반사율 및 분광 흡수율의 값은 유리판에 대한 측정값으로 하고, 복층유리에서는 그 재료의 유리판에 대하여 측정한 값에서 유리판 사이의 다중 반사를 고려하여 계산한 분광 투과율, 분광 반사율 및 복층 유리 내에서의 각 유리판의 분광 흡수율의 값으로 함.
- 자세한 기초식은 KS L 2514의 6장을 따름.

■ 태양열 취득률 평가

- 유리판의 실외 및 실내 표면열 전달률과 태양방사 흡수율에서 유리에 흡수되어 실내로 전달되는 열류의 입사하는 태양방사에 대한 비율을 계산함.
- 계산된 결과에 태양방사 투과율을 더하여 태양열 취득률로 함.

- 복층유리에서는 각 유리판 사이의 열저항을 구하고 실내외 표면열 전달률 및 태양방사 흡수율에서 각 유리판에 흡수되어 실내로 전달되는 열류의 입사하는 태양방사에 대한 비율의 합계를 구하여 태양방사 투과율을 더하여 태양열 취득률로 함.
- 자세한 열저항 계산 식 및 실내외 표면열 전달률 계산 식은 KS L 2514의 8장을 따름.

■ 자외선(UV) 투과율 평가

- 평판유리의 UV 투과율은 300nm에서 380nm(300nm에서 315nm 범위의 UV-B와 315nm에서 380nm 범위의 UV-A) 범위에서 평판유리에 의해 투과되는 입사태양광 복사의 일부부임.
- UV 투과율을 계산하기 위해 사용한 상대 분광 분포는 KS B ISO 9845-1:2003에 주어진 지구 태양복사로부터 유도됨.
- 자세한 UV 투과율 계산 식은 KS L 2514의 9장을 따름

② 고분자 화학수지계 전해질 및 변색층 소재 특성 성능평가

- ✓ 전기변색유리의 이온전도도 성능 평가
- ✓ 전기변색유리의 변색효율 성능 평가
- ✓ 전기변색유리의 응답속도 성능 평가
- ✓ 전기변색유리의 광학특성(가시광선투과율) 성능 평가

(1) 전해질의 이온전도도 성능평가

■ 전해질의 이온전도도 성능평가 개요

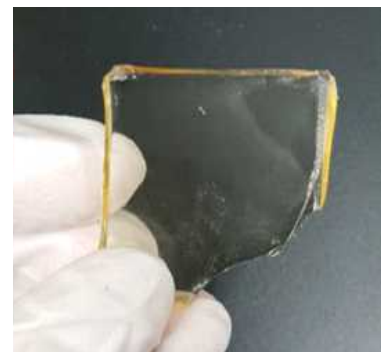
- 1차년도 및 2차년도 연구를 통해 개발된 전해질 용액을 UV 경화 과정을 통해 필름을 제작 후 이에 대한 이온전도도 측정용 Cell로 제작하여 아래 표의 평가항목에 따라 시험을 진행하고 목표치와 비교하여 성능을 확인하였음
- 실험 시 전해질 유지의 시험체 크기는 70mm×70mm 임

평가항목	단위	목표치
전해질 이온전도도	S/cm	3×10^{-6}

■ 전해질의 이온전도도 성능평가 과정

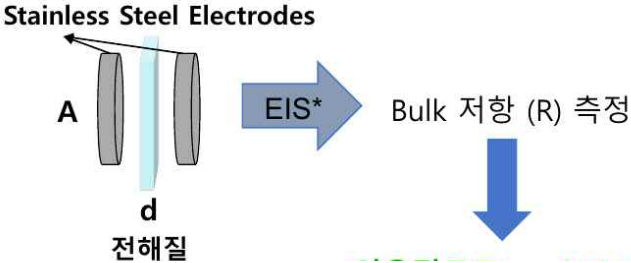
- 우선 전해질을 유지로 제작한 틀에 넣고 UV를 조사하여 필름형태로 제작 하였음

UV Lamp(좌), 제조된 필름(우)



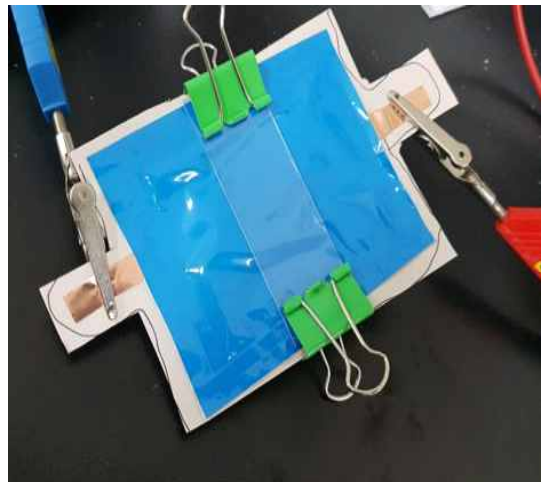
- 필름형태의 전해질을 이용하여 아래 그림과 같은 방법으로 Cell을 제작하였음.

이온전도도 평가를 위한 Cell 제작

Cell 제작 방법	제작된 Cell 형태
Stainless Steel Electrodes  A → EIS* → Bulk 저항 (R) 측정 전해질	

- 제작된 Cell을 아래 그림의 전기화학 측정 장비인 Solartron SI 1287와 SI 1255로 전해질의 이온전도도를 측정함.
- 측정 조건은 Reference Electrode로 Stainless Steel Electrodes (Diameter : 16mm, Area : 2.011 cm²)을 사용하였고, Working Electrode : Stainless Steel Electrodes (Diameter : 16mm, Area : 2.011 cm²)을 사용하였음.
- 주파수 범위는 1.0MHz~1.0kHz를 사용하였으며 진폭은 10.0mV 적용.

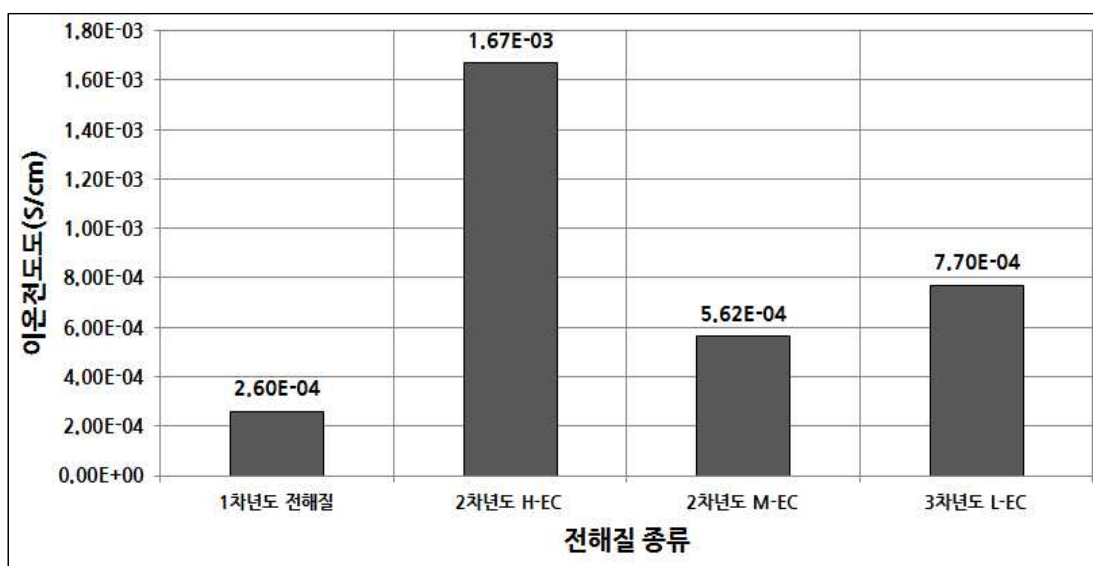
전기화학 측정장비 (Solartron SI 1287, SI 1255) (좌), 및 제작된 Cell (우)



■ 고강도 고분자 전해질 이온전도도 특성 확인

- 고강도 고분자 전해질의 이온전도 특성을 확인하기 위해 전기화학 측정장비 (Solartron SI 1287, SI 1255)를 통해 이온전도도를 시험 평가함
- 1차년도 개발 전해질의 경우 2개의 시료를 제작해 분석한 결과, 첫 번째 시료는 $2.73 \times 10^{-4} \text{S/cm}$, 두 번째 시료는 $2.41 \times 10^{-4} \text{S/cm}$ 로 분석되었고, 평균 $2.57 \times 10^{-4} \text{S/cm}$ 의 이온전도도 특성 결과를 확인함
- 2차년도 개발 전해질도 2개의 시료를 제작해 분석하였음
- H-EC의 경우 $1.67 \times 10^{-3} \text{S/cm}$ 로 나타나 이온전도도가 상당히 높아짐을 확인함
- M-EC의 경우 $5.62 \times 10^{-4} \text{S/cm}$ 로 1차년도 전해질에 비해 이온전도도가 향상됨을 확인함
- L-EC의 경우 $1.77 \times 10^{-4} \text{S/cm}$ 으로 1차년도 전해질에 비해 이온전도도가 향상됨을 확인함
- 따라서 이온성액체를 Formulation에 추가함으로써 이온전도도 향상효과가 있는 것으로 나타남

분류		Thickness (mm)	Diameter (mm)	Area (cm ²)	Resistance (Ohm)	Conductivity (S/cm)	Average Conductivity (S/cm)
1차년도 전해질		2.36	16	2.011	430.7	2.73×10^{-4}	2.60×10^{-4}
		2.09	16	2.011	431.1	2.41×10^{-4}	
2차년도 전해질	H-EC	2.45	16	2.011	83.2	1.47×10^{-3}	1.67×10^{-3}
		2.54	16	2.011	92.4	1.37×10^{-3}	
	M-EC	2.07	16	2.011	186.4	5.51×10^{-4}	5.62×10^{-4}
		3.10	16	2.011	269.7	5.72×10^{-4}	
	L-EC	2.64	16	2.011	710.0	1.85×10^{-4}	1.77×10^{-4}
		2.37	16	2.011	701.1	1.68×10^{-4}	



■ 참고 문헌

- M.-H. Ryou, Y.M. Lee, K.Y. Cho, G.-B. Han, J.-N. Lee, D.J. Lee, J.W. Choi, and J.-K. Park, *Electrochim. Acta* 60 (2012) 23-30.
- D. Yeon, Y. Lee, M.-H. Ryou, and Y.M. Lee, *Electrochim. Acta* 157 (2015) 282-289.
- H. Jeon, D. Yeon, T. Lee, J. Park, M.-H. Ryou, and Y.M. Lee, *J. Power Sources* 315 (2016) 161-168

(2) 전해질의 변색효율 성능평가

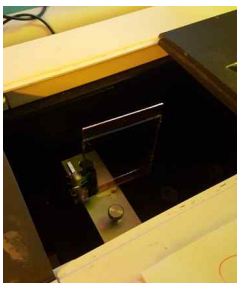
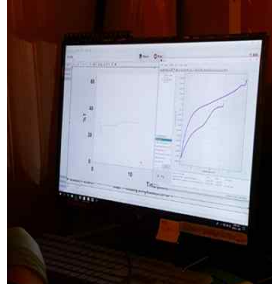
■ 전기변색유리의 변색효율 성능평가 개요

- 전류 밀도(Q, Charge density)가 높다는 것은 전해질의 Li+이온 전하의 이동이 많음을 나타냄
- Y축을 기준으로 0이하의 경우 변색될 때의 Charge 되는 조건 0이상의 + 경우 탈색 될 때의 조건을 나타내고, +와 -의 면적은 유사함.

- Q는 절대적인 전하량을 나타내고, OD(Optical Density)는 탈색과 변색의 투과율의 차이가 얼마나 큰지를 나타냄.
- CE(Coloration Efficiency)는 변색효율을 나타내고, 전하량의 투입 대비 투과도의 변화량을 나타냄.
- OD는 $\Delta OD(\lambda) = \log \frac{T_b}{T_c}$ 를 의미하며, CE는 OD를 Q로 나눈 값을 나타냄.
- 결국 CE가 크다는 것은 투입된 전하량 대비 더 변색의 투과도 변화량이 큰 것을 나타냄에 따라 변색효율이 높음을 의미함.

■ 전기변색유리의 변색 효율 성능평가 방법

- 전기변색유리의 성능평가 방법은 전자부품연구원에서 보유하고 있는 분광광도계(Cary 60 UV-Vis, Agilent, USA)를 활용하였음
- 실험 시 Full cell에 대한 시험체의 크기는 70mm×70mm 임(광학특성 및 전기화학적 특성 시험 가능 최대 크기 기준)
- 분광광도계의 가시광서투과율 측정 범위는 550nm로 한정하였음
- 변색효율 측정을 위하여 C-V 커브 측정장비를 활용하였음

변색 효율 평가과정		
시료 삽입	투과율 및 C-V 커브 측정	C-V 커브 측정 과정
		

■ 전기변색유리의 변색 효율 성능평가 결과

- H-EC의 시료의 변색효율 측정 결과는 다음과 같음

시료크기	가로(cm)	세로(cm)	면적(cm ²)	유효면적(cm ²)
	7	8	56	48
전하밀도 (Charge density) [C/Cm ²]	투과율 [@550nm, %]		광학밀도 (ΔOD)	변색 효율(CE) [cm ² /C]
	탈색 시	착색 시		
0.040	25.8	11.4	0.35	8.8

- M-EC의 시료의 변색효율 측정 결과는 다음과 같음

시료크기	가로(cm)	세로(cm)	면적(cm ²)	유효면적(cm ²)
	7	8	56	48
전하밀도 (Charge density) [C/Cm ²]	투과율 [@550nm, %]		광학밀도 (ΔOD)	변색 효율(CE) [cm ² /C]
	탈색 시	착색 시		
0.040	76.2	13.2	0.76	33.3

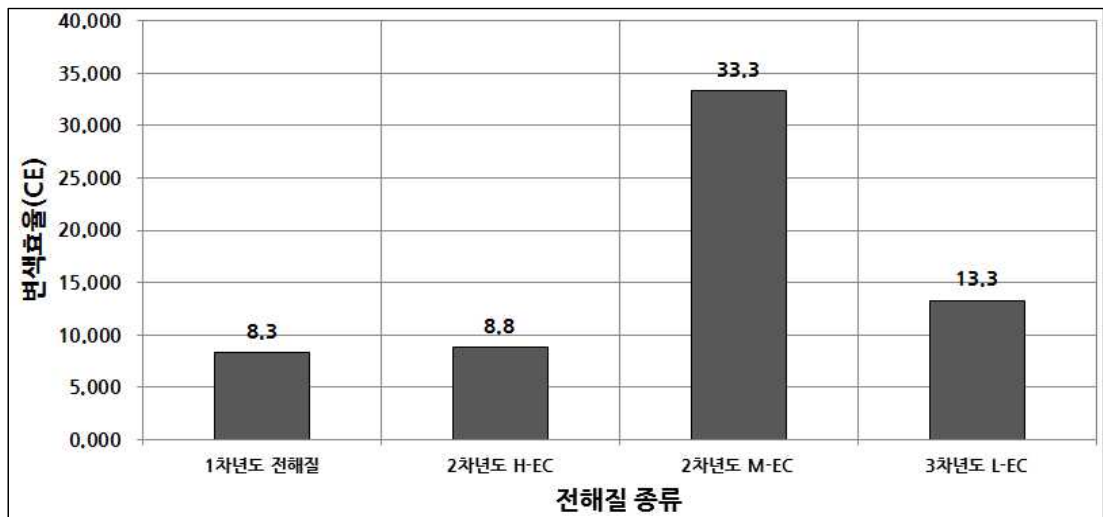
- L-EC의 시료의 변색효율 측정 결과는 다음과 같음

시료크기	가로(cm)	세로(cm)	면적(cm ²)	유효면적(cm ²)
	7	8	56	48
전하밀도 (Charge density) [C/Cm ²]	투과율 [@550nm, %]		광학밀도 (△OD)	변색효율(CE) [cm ² /C]
	탈색 시	착색 시		
0.021	34.4	18.3	0.27	13.3

- 아래 표는 전해질 종류에 따른 투과율 변화, OD, 전류밀도(Q, Charge density), 변색효율(CE)를 나타내고 있음

분류		Charge density (mC/cm ²)	Transmittance (%)		dOD	CE (cm ² /C)
			Colored	Bleached		
1차년도 전해질		7.8	16.6	73.9	0.65	8.3
2차년도 전해질	H-EC	0.4	11.4	25.8	0.35	8.8
	M-EC	2.3	13.2	76.2	0.76	33.3
	L-EC	2.1	18.3	34.4	0.27	13.3

※ 1차년도 전해질 CE 평가 결과 오류 정정



- 분석결과, 1차년도 전해질의 경우 CE 값이 8.3, 2차년도 전해질 중 H-EC가 8.8cm²/C, M-EC가 33.3cm²/C, L-EC가 13.3cm²/C으로 나타남
- M-EC의 경우 변색효율 목표 25cm²/C 성능을 만족하는 것으로 나타났음

(3) 전해질의 응답속도 성능평가

■ 전기변색유리의 응답속도 성능평가 개요

- 전기변색유리의 경우 전기 인가 후 목표 투과율까지 변색되기까지 시간이 소요됨
- 이에 따라 본 장에서는 목표 투과율까지 소요되는 시간에 대한 성능평가를 수행함
- 응답속도 성능평가의 경우 규격 및 기준이 마련되어 있지 않음
- 이에 따라 목표 투과율(과제 목표, 탈색 시 >65%, 착색 시 <20%)을 선정하고 목표치까지 소요

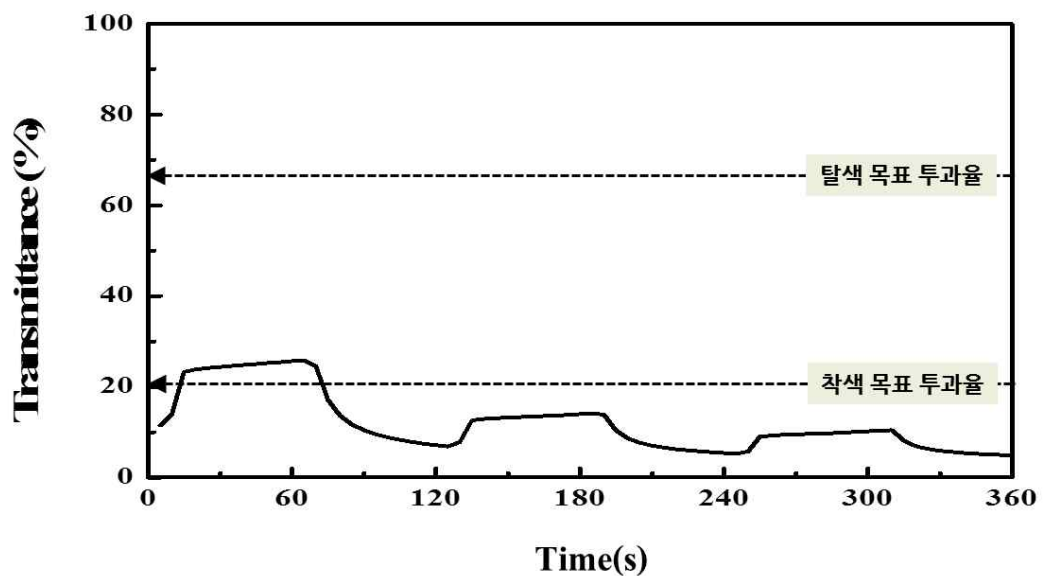
■ 전기변색유리의 응답속도 성능평가 방법

- 전기변색유리의 응답속도 성능평가 방법은 전자부품연구원에서 보유하고 있는 분광광도계(Cary 60 UV-Vis, Agilent, USA)를 활용하였음
- 실험 시 Full cell에 대한 시험체의 크기는 70mm×70mm 임(광학특성 및 전기화학적 특성 시험 가능 최대 크기 기준)
- 분광광도계의 가시광투과율 측정 범위는 550nm로 한정하였음

■ 전기변색유리의 응답속도 성능평가 결과

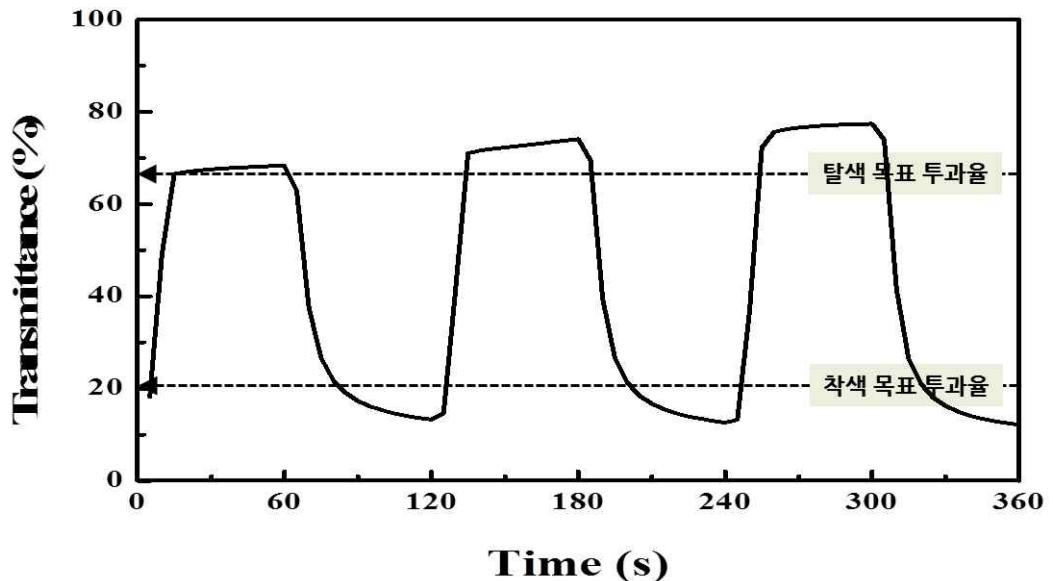
1) H-EC 응답속도 성능평가 결과

- H-EC의 경우 탈색 및 착색 Cycle에 따라 투과율 측정된 결과, 투과율 목표를 만족하지 못함



2) M-EC 응답속도 성능평가 결과

- M-EC의 경우 탈색 및 착색 Cycle에 따라 투과율 측정된 결과, H-EC의 경우 투과율 목표를 만족하였음
- M-EC는 아래 3번째 Cycle을 기준으로 목표치를 상회하는 최대투과율 76.2%, 최소투과율 13.2%를 기준으로 응답속도를 산정하였음



탈색 시			착색 시		
투과율 최대/최 소	진행시간 [초]	투과율 [@550nm, %]	투과율 최대/최 소	진행시간 [초]	투과율 [@550nm, %]
최소	0	13.2	최대	25	74.1
	5	36.8		30	69.5
	10	72.2		35	39.4
	15	75.6		40	26.6
최대	20	76.2		45	21.4
				50	18.5
				55	16.7
				60	15.5
				65	14.6
				70	14.0
				75	13.4
			최소	80	13.0

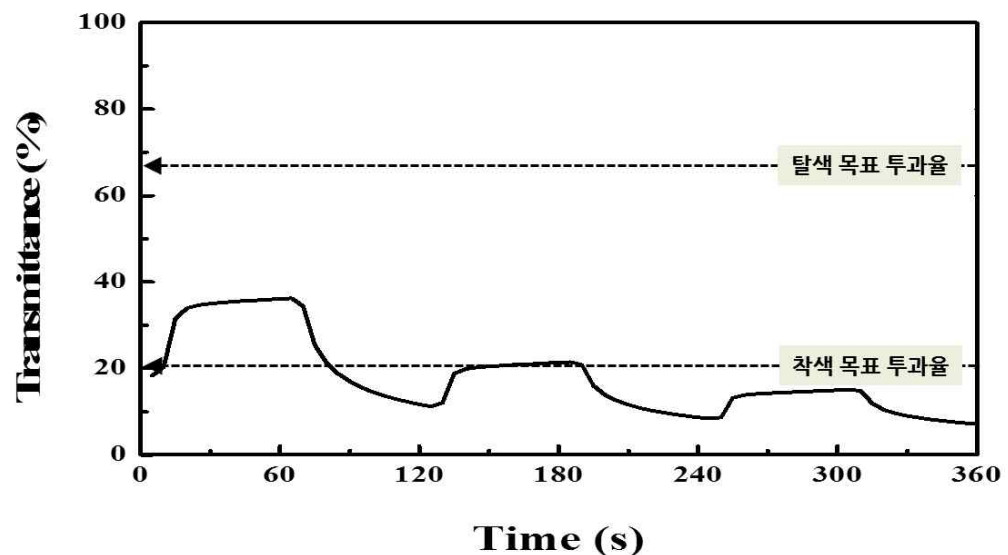
탈 색	응답시간	최소투과율	최대투과율	착 색	응답시간	최대투과율	최소투과율
	산출				산출		
	해당투과율	13.2	76.2		해당투과율	74.1	13.0
	변화				변화		
응답속도	응답속도(초)*			응답속도	응답속도(초)*		
	20				60		

응답속도	80초
------	-----

- M-EC의 응답속도 성능평가 결과, 최대투과율 76.2%, 최소투과율 13.2%를 기준으로 탈색 시 20초, 착색 시 60초로 나타났음
- 착색부터 탈색까지 전체 응답속도는 80초로 연구개발 최종목표 15분 이내를 만족하는 것으로 분석되었음

3) L-EC 응답속도 성능평가 결과

- L-EC의 경우 탈색 및 착색 Cycle에 따라 투과율 측정한 결과, 투과율 목표를 만족하지 못함



(4) 전기변색유리의 광학특성(가시광선투과율) 성능 평가

■ 분광 투과율 및 분광 반사율의 평가 방법

▪ 분광 투과율 평가 방법

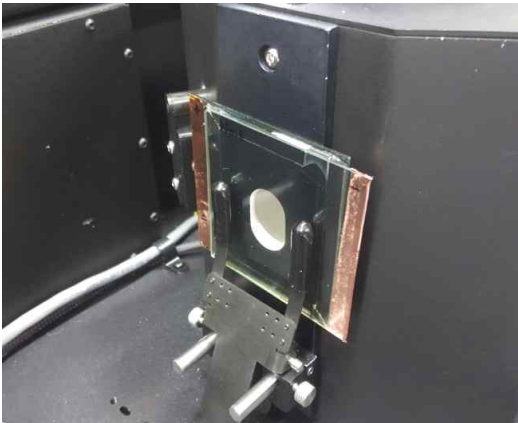
- 시료면의 법선 방향에서 분광 측광기의 사출 슬릿에서 나오는 평행에 가까운 광선속을 입사시켜 그 투과광의 방향에서 분광 투과율을 측정함
- 표준 시료는 광로 안에 시료를 삽입하지 않는 경우의 공기층으로 하고 그 분광 투과율을 1로 함

■ 가시광선 투과율 및 가시광선 반사율의 평가

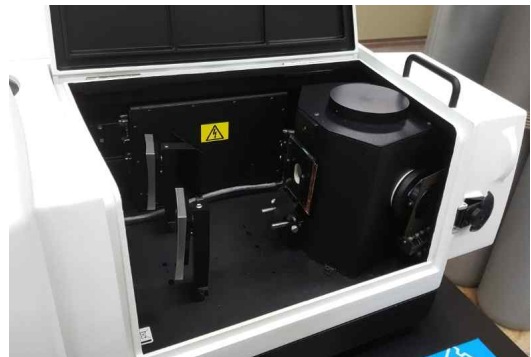
- 분광 투과율 및 분광 반사율의 값에 찬 일광 D_{65} 의 스펙트럼과 CIE 밝기의 비시감도의 파장 분포에서 얻어지는 가중 계수를 곱하여 가중 평균하고 가시광선 투과율 및 가시광선 반사율을 구함.
- 실험 시 Full cell에 대한 시험체의 크기는 70mm×70mm 임(광학특성 시험 가능 최대 크기 기준)
- 분광 투과율 및 분광 반사율의 값은 유리판의 측정값을 뺀 후, 복층유리에 대해서는 그 재료의 유리판에 대하여 규정한 방법으로 측정한 값에서 유리판 사이의 다중 반사를 고려하여 계산한 값으로 함.
- 자세한 기초식은 KS L 2514의 5장을 따름.

전기변색유리 광학적 특성 평가 과정

① 전기변색 접합유리 시료 장착



② 분광 측광기



③ 전기변색유리 전압 인가 및 탈/착색



■ 전기변색유리의 광학 및 열적 특성 평가 결과

- 전기변색유리 Full cell 제작 후 한국유리공업 기관을 활용하여 가시광선 투과율을 측정함
- 시험방법은 KS L 2514:2011 규격에 따라 분광투과율 측정을 수행하였음
- 시험장비는 한국유리공업에서 보유하고 있는 UV-VIS-NIR Spectrophotometer, Perkin-Elmer, Lambda 1050(USA)를 활용하였음
- 시험 조건은 시료 제작 후 첫 번째 Cycle을 기준으로 하였음
- 분석결과 1차년도 전해질 기반 전기변색유리는 탈색 시 16.6%, 착색 시 73.9%, 투과율 변화 폭은 57.3%를 나타냈음
- 2차년도 전해질은 H-EC가 탈색 시 15.5%, 착색 시 76.7%, 투과율 변화폭은 61.2%를 나타냈고, M-EC는 탈색 시 15.4%, 착색 시 76.5%, 투과율 변화폭은 61.1%를 나타냈으며, L-EC는 탈색 시 18.5%, 착색 시 76.4%, 투과율 변화폭은 57.9%를 나타냈음
- 첫 번째 Cycle을 대상으로 분석한 가시광선 투과율의 경우 과제 목표를 모두 달성하였지만, 앞서 분석했던 Cycle 특성을 고려했을 때 가능성 있는 전해질은 M-EC가 유일함

		Transmittance (%)		투과율 변화폭 (%)
		Bleached	Colored	
1차년도 전해질		16.6	73.9	57.3
2차년도 전해질	H-EC	15.5	76.7	61.2
	M-EC	15.4	76.5	61.1
	L-EC	18.5	76.4	57.9

③ 전기변색 접합유리의 박리강도 및 접합강도(KS L 2004) 성능평가

- ✓ 전기변색 접합유리의 박리강도 평가
- ✓ 전기변색 접합유리의 접합강도(KS L 2004) 성능평가

(1) 전기변색 접합유리의 박리강도 성능평가

■ 박리강도 평가 방법 산정

- 전기변색유리 Full cell에 대한 박리강도 평가 방법 부재
- 따라서 KS F 4042 “콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르” 표준을 인용하여 부착강도 시험을 변형한 평가방법을 산정 함.
- 여기서 박리강도 성능 시험 시 시험체의 크기는 150mm×150mm 임

■ 박리강도(부착강도) 평가를 위한 전기변색유리 시험체의 제작

- KS F 4716의 5장 시험용 밀판 제작방법에 따라 금속제 또는 합성수지제 형틀을 놓고, 제작한 전기변색유리 Full cell 시료의 윗면과 아래 면에 접착제를 바른 후 형틀에 고정
- 아래 그림의 폴리머 시멘트 모르타르 대신 전기변색유리 Full cell 시료를 적용

접합강도 성능 평가 과정

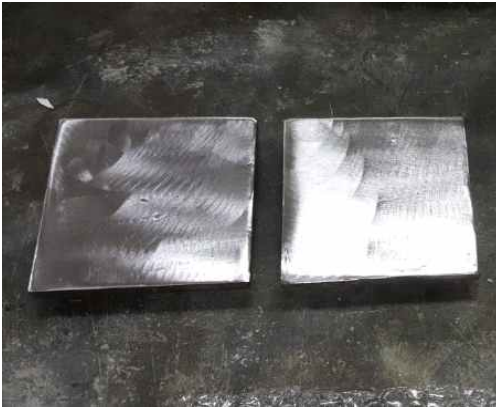
① 접합 유리 시료 준비
(좌: 기존 젤 전해질, 우: 고강도 전해질)



② 2액형 에폭시 수지 접착제 준비



③ 상/하부 인장용 지그 준비



④ 2액형 에폭시 수지 접착제 혼합



⑤ 지그에 에폭시 접착제 바름



⑥ 하부 지그에 접합유리 부착



⑦ 상부 지그 접합유리 부착



⑧ 인장력 시험기에 지그 장착



■ 박리강도(부착강도) 평가 방법

- 표준 상태에서 1시간 이상 놓아 둔 시험체를 하부 인장용 지그(강철제) 및 강철제 받침판을 사용해서 시표면에 대해 수직 방향으로 인장력(파단될 때까지 하중 속도는 1500~3000 N/min)을 가해 최대 인장 하중을 구함.
- 박리 강도는 다음 식에 의해 산출 하고 시험체 3개의 평균값으로 하여 소수점 이하 한 자리로 끝맺음 함.

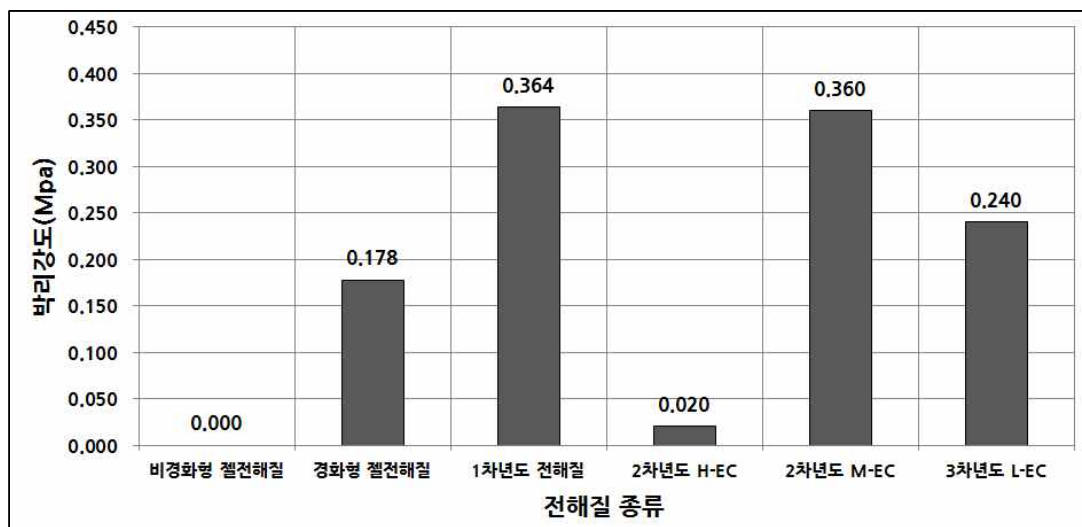
$$\sigma_a = \frac{T}{1600}$$

- 여기에서 σ_a 는 박리강도(N/mm²), T는 최대 인장 하중(N)을 나타냄.
- 시험에 사용하는 인장 시험기의 물리개는 자동 중심 조심형이 바람직함.
- 접착제는 시험체에 침투하기 어려운 고점도의 것으로, 예를 들면 무용제형인 2액형 에폭시 수지 접착제를 사용하는 것이 좋음.

■ 고강도 전해질 박리강도 성능 평가

- 전기변색유리의 박리강도에 관한 기준은 국내에 없는 상황
- 따라서 본 연구에서는 KS F 4042 “콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르” 표준을 인용하여 부착강도 시험을 통해 박리강도를 평가함
- 비경화형 젤 전해질의 경우 완전한 젤 상태임에 따라 박리강도 측정이 불가 하였음
- 박리강도 시험 결과, 기존 경화형 젤 전해질의 경우 0.178 Mpa의 박리강도를 나타내었고, 1차년도 전해질의 박리강도는 0.364 Mpa를 나타냄
- 2차년도 이온성액체를 포함하는 젤전해질은 H-EC가 0.020Mpa, M-EC가 0.360Mpa, L-EC가 0.240Mpa로 나타났음
- 박리강도는 1차년도 전해질과 2차년도 M-EC 전해질이 우수한 성능을 나타냄을 확인

구분	전해질 종류별 접합강도 성능 평가 결과					
	비경화형 젤 전해질	경화형 젤 전해질	1차년도 전해질	2차년도 전해질		
				H-EC	M-EC	L-EC
박리강도	측정불가	0.178Mpa	0.364 Mpa	0.020 Mpa	0.360 Mpa	0.240 Mpa



(2) 전기변색 접합유리의 접합강도(KS L 2004) 성능평가

■ 접합강도 성능평가 개요

- 전기변색 접합유리 개발 후, 최종적으로 국내 접합유리 시험기준인 KS L 2004 기준에 만족할 수 있는지 여부를 평가함

■ 접합강도 평가 방법 산정

- 접합강도 평가 방법은 KS L 2004의 낙구충격시험으로 진행하였음
- 시험 방법은 아래와 같음
- 시료는 제품과 같은 재료 판유리 및 같은 중간막을 사용하여 비슷한 방법으로 제조하거나 제품에서 잘라 낸 약 610mm×610mm의 치수로 평면 및 평면에 가까운 접합유리로서, 시험 직전까지 적어도 4시간 동안 (23±2) °C의 실내에서 유지한 것을 사용
- 시료는 아래 그림에 표시한 철제틀로 시료가 수평이 되도록 함
- 다른 두께의 종류 재료 판유리를 사용한 접합유리는 얇은 쪽 재료 판유리를 충격면으로 함
- 다만, 무늬 접합유리, 망 무늬 판유리 및 선 무늬 판유리를 사용하는 접합 유리에서는 원칙적으로 충격면은 무늬 무양이 없는 면으로 함
- KS B 2001에 규정하는 호칭 2 1/2의 강구 중에서 무게 (1040±10)g 인 것을 골라서, 이것을 시료 표면에서 120cm 높이에 놓고 정지 상태에서 힘을 가하지 않고 시료면의 중심점을 향해서 1회 낙하시켜서 구성하는 유리가 1장 이상 파괴되었을 때의 파괴 상태를 봄
- 파괴되지 않은 경우에는 아래 표의 낙하 높이의 순서에 따라 높이를 점차 올려서 1회 낙하하여 구성하는 유리판이 1장 이상 파괴되었을 때의 파괴 상태를 봄
- 그래도 파괴되지 않는 경우에는 KS B 2001에 규정하는 호칭 3 1/4의 강구에서 무게 (2260+30,-20)g 의 것을 사용하여, 앞의 조작을 하여 구성하는 유리판이 1장 이상 파괴되었을 때 파괴의 상태를 봄
- 또한 파괴되지 않는 경우에는 KS B 2001에 규정하는 강구 중 적당히 무게가 많이 나가는 것을 사용하여 같은 조작에 의해 충격을 가하고, 구성하는 유리판이 1장 이상 파괴되었을 때 파괴의 상태를 봄
- 충격점은 시료면의 중심점에서 25mm 이하의 범위에 들어가도록 하고, 시험은 상온에서 함

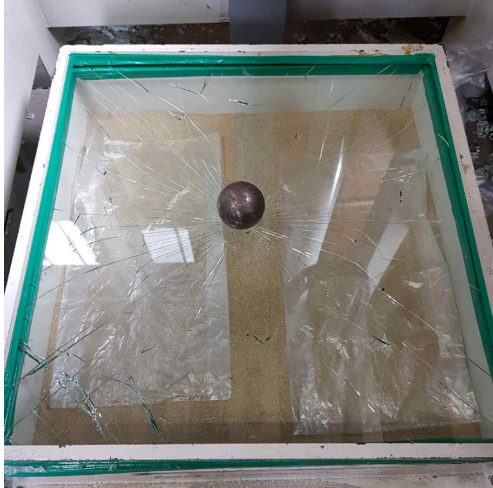
■ M-EC 전해질 기반 전기변색 접합유리 KS L 2004 낙구충격 시험 진행

- KS L 2004 접합유리 규격에 따라 KS L 2004 낙구충격 시험을 진행함
- 시료의 크기는 610mm × 610mm로 총 3종의 시료로 낙구충격 시험을 진행하였음
- 시료의 구성은 4mm 투명유리 + 0.8mm 고분자 화학수지(Resin) 전해질 + 4mm 투명유리로 구성하였음
- 낙하높이는 120cm부터 480cm까지 7단계로 낙구충격 시험을 진행하였음

분류	내용						
시험방법	KS L 2004(접합유리), 낙구충격시험						
시료 수량	3종						
시료 구성	4mm 투명유리 + 0.8mm 고분자 화학수지(Resin) 전해질 + 4mm 투명유리						
시료 크기	610mm× 610mm						
낙하 높이 (cm)	최소	----->					최대
	120	150	190	240	300	380	480

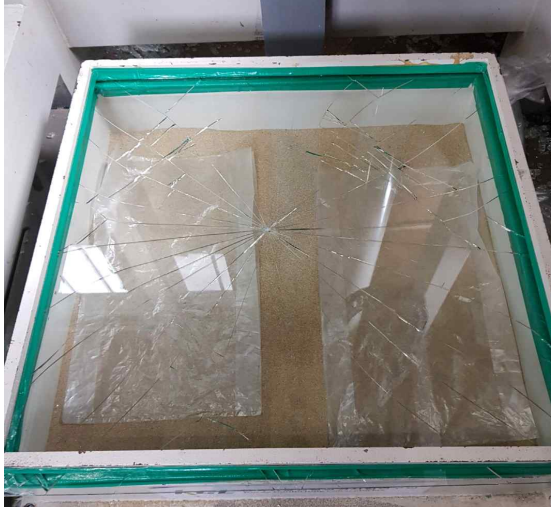
■ M-EC 전해질 기반 전기변색 접합유리 KS L 2004 낙구충격 시험 결과

- KS L 2004(접합유리) 낙구충격시험 규격에 따라 아래 그림과 같이 시험을 진행하였음
- 낙구충격 시험은 120cm부터 480cm 까지 단계별로 높이를 높여가며 유리가 깨지는 시점에 낙구에 의한 천공, 구의 통과가 발생하는지 여부를 판단함
- 아래 그림은 낙구 전부터 낙구 후 유리가 깨지는 시점의 상태를 나타내고 있음

낙구충격 시험 진행 방법	
낙구 전	낙구 후
	

- 낙구충격 시험 결과 3장의 시료 중 2장은 150cm, 1장은 190cm에서 유리 깨짐 현상 발생
- 유리의 깨짐은 접합유리를 구성하고 있는 유리의 상태에 따라 결정이 됨
- 현재 적용된 유리의 경우 4mm 일반유리가 적용되어 있으며, 일반적으로 4~6mm 일반 유리의 경우 150cm~190cm 사이에서 깨짐 현상 발생
- 하지만 유리가 깨지더라도 유리의 천공, 낙구의 통과가 발생하지 않았음
- 즉, 전해질의 경우 유리깨짐이 발생하더라도 유리의 천공이 발생하지 않음으로 안전성을 확보함

낙구충격 시험 결과			
분류	시험결과		낙구 후 양상
시료 01	유리 깨짐 높이	150	
	유리 깨짐 발생 시 상태	유리 결락에 따른 노출부 없음	

시료 02	유리 깨짐 높이	150	
	유리 깨짐 발생 시 상태	유리 결락에 따른 노출부 없음	
시료 03	유리 깨짐 높이	190	
	유리 깨짐 발생 시 상태	유리 결락에 따른 노출부 없음	

④ 전기변색 접합유리의 내후성 및 내구성 성능평가

- ✓ 전기변색 접합유리의 가혹조건 신뢰성 평가
- ✓ 전기변색 접합유리의 실험모형 제작 후 온도 성능 및 내후성 평가

(1) 전기변색 접합유리의 가혹조건 신뢰성 평가

1) 실험목적

- 전기변색유리 내구성 검증을 위한 가혹조건 신뢰성 평가 수행

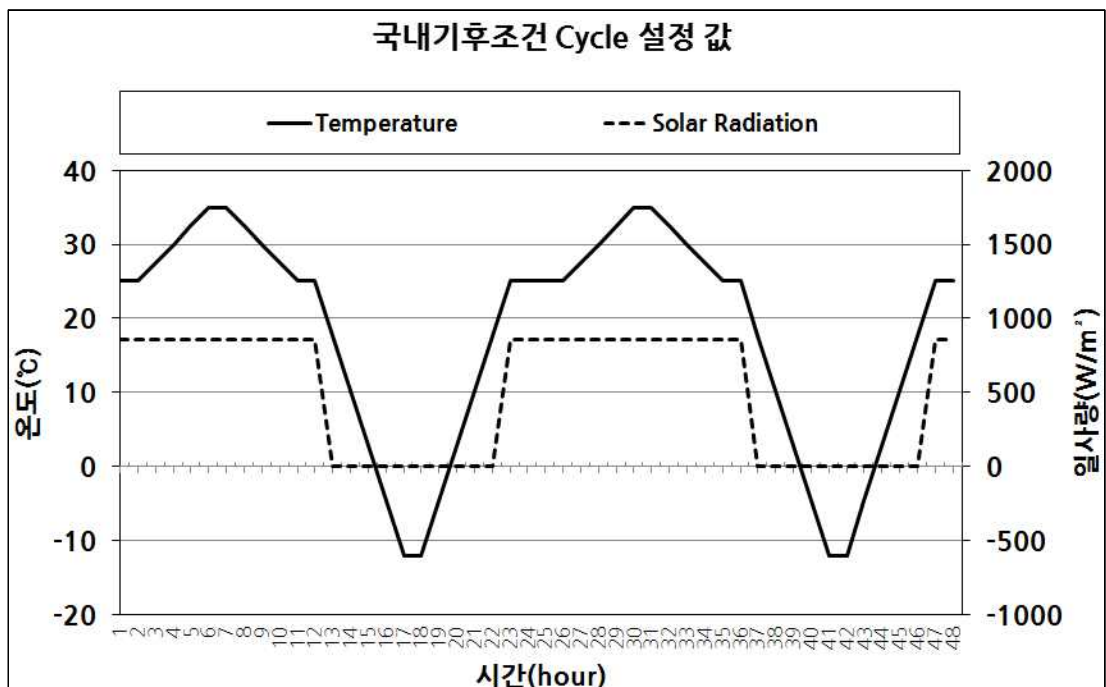
2) 실험방법 개요

- ISO 18543에 의한 전기변색유리 성능평가 기준은 있지만, 현재 국내에서 ISO 18543에 대한 평가를 수행할 수 있는 기관이 없음
- ISO 18543 규격에서는 온도조건과 일사량 조건을 동시에 제공하고 있음
- 이에 따라 온도 조건 설정 및 일사량 조건 설정이 가능한 DIN 75220(Aging of Automotive Components in Solar Simulation Unit) 규격을 준용하여 시험을 진행하였음
- 본 연구에서의 정성적 목표는 80℃, -20℃ 조건에서의 내구성능을 확인하는데 있음

분류	조건1	조건2
	국내기후조건	가혹기후조건
최대온도	35℃	80℃
최소온도	-12℃	-20℃
일사량	860W/m ²	-

- 이에 따라 2가지 조건으로 가혹조건 신뢰성 평가를 수행하였음
- 국내기후조건인 경우 서울지역 표준기상데이터를 기반으로 하여 최대온도 35℃, 최소온도 -12℃로 설정하였고, 일사량 기준을 860W/m²으로 설정하였음
- 가혹기후조건은 과제 정량적 목표로서 최대온도 80℃, 최소온도 -20℃로 설정하였음
- 가혹기후조건인 경우 일사량 인가 시 80℃를 상회함에 따라 제외 하였음
- 국내기후조건 Cycle 설정값은 아래와 같음
- 아래와 같은 Cycle로 7일 간 신뢰성 평가 수행
- 실험 시 Full cell에 대한 시험체의 크기는 150mm×150mm 임

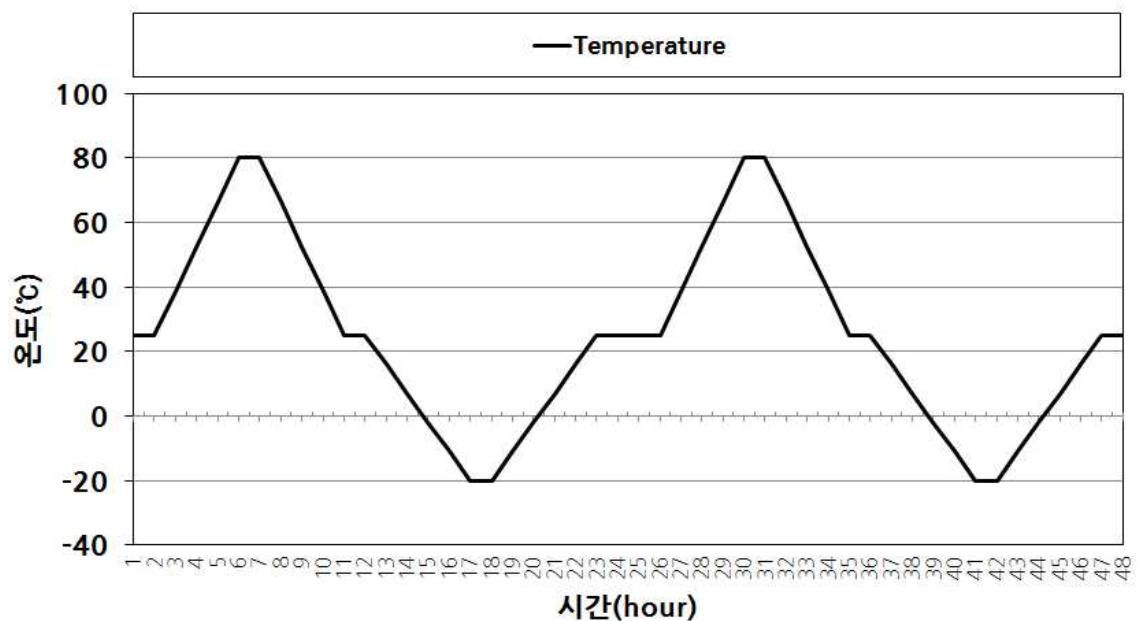
국내기후조건 Cycle 설정 값			
시간		온도(℃)	일사량(W/m ²)
0.5	12.5	25	860
1.0	13.0	25	860
1.5	13.5	27.5	860
2.0	14.0	30	860
2.5	14.5	32.5	860
3.0	15.0	35	860
3.5	15.5	35	860
4.0	16.0	32.5	860
4.5	16.5	30	860
5.0	17.0	27.5	860
5.5	17.5	25	860
6.0	18.0	25	860
6.5	18.5	17.6	0
7.0	19.0	10.2	0
7.5	19.5	2.8	0
8.0	20.0	-4.6	0
8.5	20.5	-12	0
9.0	21.0	-12	0
9.5	21.5	-4.6	0
10.0	22.0	2.8	0
10.5	22.5	10.2	0
11.0	23.0	17.6	0
11.5	23.5	25	860
12.0	24.0	25	860



- 가혹기후조건 Cycle 설정값은 아래와 같음
- 아래와 같은 Cycle로 7일 간 신뢰성 평가 수행

가혹기후조건 Cycle 설정 값			
시간		온도(℃)	일사량(W/m ²)
0.5	12.5	25	860
1.0	13.0	25	860
1.5	13.5	27.5	860
2.0	14.0	30	860
2.5	14.5	32.5	860
3.0	15.0	35	860
3.5	15.5	35	860
4.0	16.0	32.5	860
4.5	16.5	30	860
5.0	17.0	27.5	860
5.5	17.5	25	860
6.0	18.0	25	860
6.5	18.5	17.6	0
7.0	19.0	10.2	0
7.5	19.5	2.8	0
8.0	20.0	-4.6	0
8.5	20.5	-12	0
9.0	21.0	-12	0
9.5	21.5	-4.6	0
10.0	22.0	2.8	0
10.5	22.5	10.2	0
11.0	23.0	17.6	0
11.5	23.5	25	860
12.0	24.0	25	860

가혹기후조건 Cycle 설정 값



3) 실험 과정

- 실험 과정은 DIN 75220 규격을 시험할 수 있는 Solar Simulator를 이용하여, 시료 제작 후 챔버 내 시료 안착 후 각 기후조건 Cycle에 따라 내후성 평가를 수행하였음
- 실험 시 사용된 전기변색유리 시료는 M-EC를 사용하였음
- 실험과정은 아래 그림과 같음

전기변색 접합유리 가혹조건 내후성 실험 과정

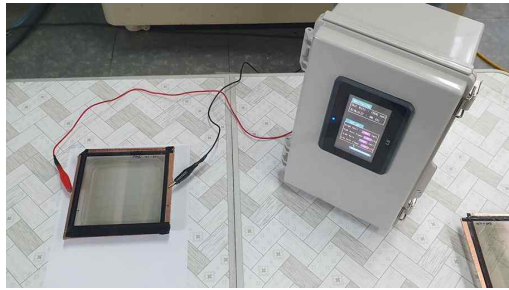
Solar simulator

전기변색유리 챔버내 설치



전기변색유리 작동여부 확인

전기변색유리 챔버내 설치



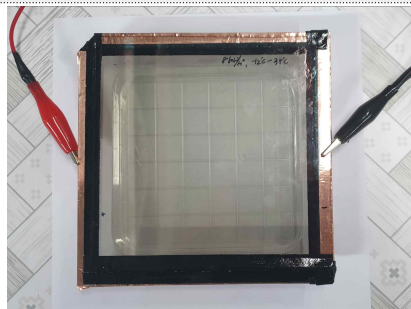
4) 실험 결과

- 국내기후조건 및 가혹기후조건 하에서 내후성 시험을 각 7일간 수행하였음
- 내후성 시험 후 전기변색유리(M-EC)의 작동여부를 확인함
- 작동여부 확인 결과 국내기후조건 및 가혹기후조건에서의 내후성 시험 후 작동에 문제가 없음을 확인함

M-EC 시료 국내기후조건 내후성 시험 후 작동여부 확인

탈색

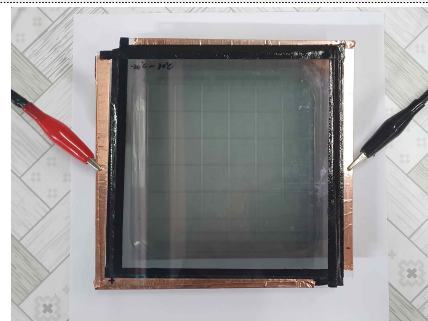
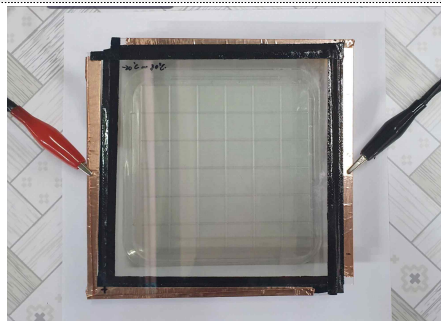
착색



M-EC 시료 가혹기후조건 내후성 시험 후 작동여부 확인

탈색

착색



(2) 전기변색 접합유리의 실험모형 제작 후 온도 성능 및 내후성 평가

1) 실험목적

- 전기변색유리의 옥외폭로를 통한 내후성 평가 및 전기변색유리 적용에 따른 실내 공기온도, 유리표면온도 특성 분석

2) 방법 개요

- 전기변색유리(M-EC) 시료 제작 및 실험모형 제작 후 유리 실내외 표면온도, 실내공기온도, 외기온도 측정을 위한 센서 설치
- 기상조건 반영을 위한 외부 일사량계 및 외기온도 센서 설치
- 전기변색유리 제어를 위한 컨트롤러 설치
- 실험 환경조건 조성 후 온도 측정 및 장기 내후성 실험 진행
- 실험 시 Full cell에 대한 시험체의 크기는 150mm×150mm 임

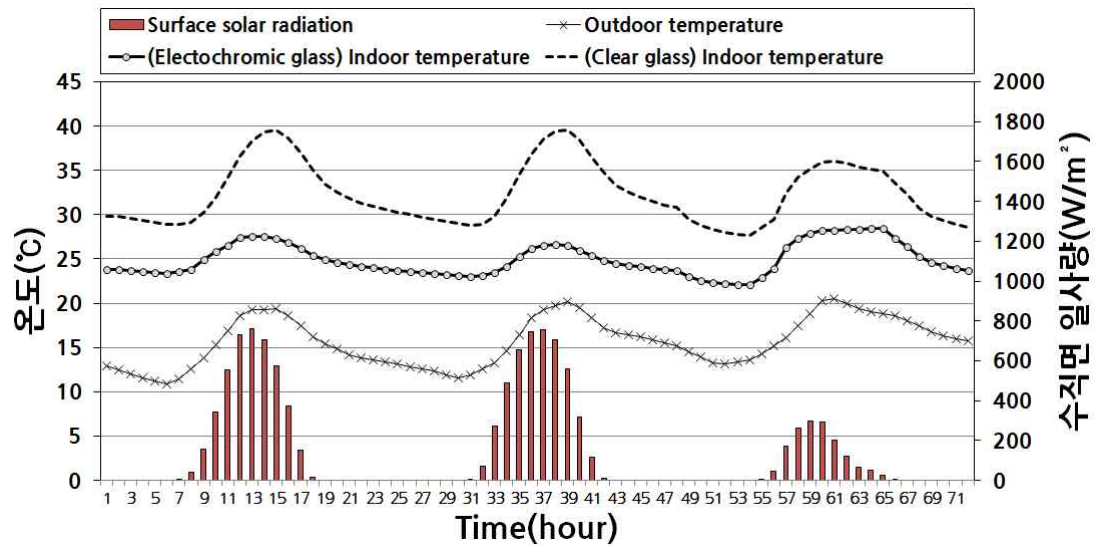
실험모형 제작	데이터 로거
	
기상데이터 수집	전기변색유리 컨트롤러 제작
	

3) 실험 결과

■ 실내 공기온도 분석 결과

- 2019년 10월 7일부터 지속적으로 실험 진행중
- 2019년 11월 21일부터 23일 데이터를 기반으로 데이터 도출
- 실험 결과, 실내공기온도의 경우 전기변색유리 설치 시 평균 7.5℃ 온도 저감 효과가 있는 것으로 분석됨
- 실험 일자가 10월 중으로 완전한 하절기 기온은 아니지만, 온도 저감 경향을 기반으로 하절기 냉방 부하 저감에 기여할 수 있을 것으로 분석됨

분류	외기온 (℃)	수직면일사량 (W/m ²)	실내 공기온도(℃)	
			전기변색유리	투명유리
평균	15.7	148.1	24.9	32.4
최대	20.5	761.7	28.4	39.6
최소	10.9	0.0	22.1	27.7

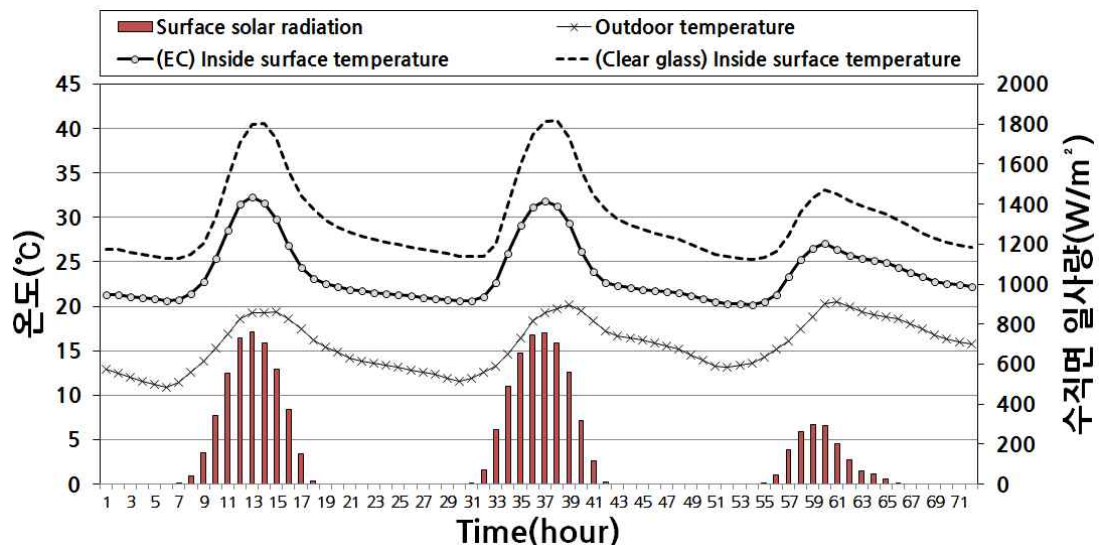


[전기변색유리와 일반투명유리의 실내 공기온도 변화, 2019.10.21~2019.10.23)]

■ 실내 유리 표면온도 분석 결과

- 2019년 10월 7일부터 지속적으로 실험 진행중
- 2019년 11월 21일부터 23일 데이터를 기반으로 데이터 도출
- 실험 결과, 실내 유리표면온도의 경우 전기변색유리 설치 시 평균 6.1℃ 온도 저감 효과가 있는 것으로 분석됨
- 실험 일자가 10월 중으로 완전한 하절기 기온은 아니지만, 유리 표면온도 저감 경향을 기반으로 하절기 실내 열쾌적 성능에 향상 효과가 있을 것으로 분석됨

분류	외기온 (℃)	수직면일사량 (W/m ²)	실내 유리표면 온도(℃)	
			전기변색유리	투명유리
평균	15.7	148.1	23.7	29.8
최대	20.5	761.7	32.3	40.9
최소	10.9	0.0	20.2	25.3



[전기변색유리와 일반투명유리의 실내 유리표면온도 변화, 2019.10.21~2019.10.23)]

2) 접합유리 품질관리기준

① 전기변색유리 품질기준(ISO 18543) 평가방법론 분석

✓ 전기변색유리 품질기준(ISO 18543) 평가 방법론 분석

(1) 전기변색유리 품질기준(ISO 18543) 평가방법론 분석

■ ISO 18543 전기변색유리 평가방법론 개요

- 전기변색유리는 건물외피에서 아래와 같은 주요 기능을 하게 됨.
 - 일사획득 최소화
 - 태양에너지 획득
 - 시각적 투과율 제어
 - 열패적 및 태양열 획득 제어, 건물에너지 및 조명에너지 효율 향상, 불쾌현황 제어
 - 건축 디자인적 요소기술 제공
- 상기와 같은 기능을 하는 전기변색유리에 대해 ISO 18543에서는 내구성을 평가하는 방법을 제공하고 있음
- 내구성 평가방법 내용은 아래와 같음.
 - 1) 착색 및 탈색 상태의 사이클링 성능 평가
 - 2) 태양 노출 및 고온 시험 조건에서의 내후성 시험

■ 전기변색유리 평가의 범위

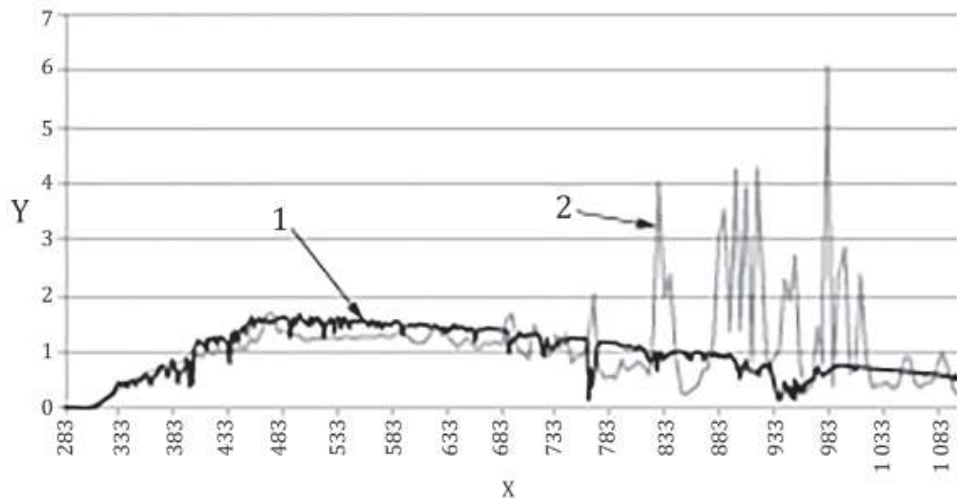
- 평가의 범위는 가속 내구성 시험과 전기변색유리의 요구사항에 대해 규정
- 본 평가 방법은 열에 의해 반응하는 Thermomchromic, 빛에 의해 반응하는 Photochromic 계열의 유리에는 적용할 수 없음
- 본 평가 방법은 창호, 천창, 외벽 등 태양에 노출되는 모든 전기변색유리(복층유리, 접합유리)를 대상으로 함
- 전기적으로 투과율 변화가 가능한 전기변색유리의 구성은 유기물 혹은 무기물이 될 수 있음.

■ 전기변색유리 평가 관련 용어 및 정의

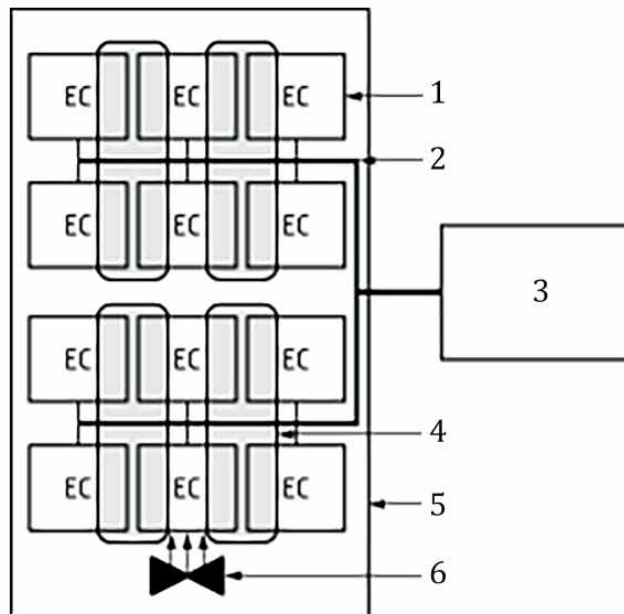
- 발색성 유리(Chromogenic glazing) : 발색성 유리는 전압, 전류의 전기적 자극, 일사량, 외기온도 등 외부의 자극에 따라 반응하여 가시광선, 태양광선에 대해 투과율을 변화가 가능한 유리를 말함
- 전기변색소자(Electrochromic, EC) : 전기변색유리는 전압과 전류에 의해 반응하여 가시광선 및 태양광선의 투과율을 조절할 수 있는 유리를 말함
- 전기변색유리(Electrochromic glazing, EC glazing) : 전기변색유리란 한 장 혹은 그 이상의 유리로 구성된 유리로 전기변색소자의 특성을 가지고 있는 유리.
- 고 투과 상태 : 전기변색유리의 가시광선 투과율이 최대인 상태.
- 고 투과 상태를 탈색상태(Clear state or Bleached state)라고 불리기도 함.
- 저 투과 상태 : 전기변색유리의 가시광선 투과율이 최소인 상태.
- 저 투과 상태를 착색상태(Tinted state, Da가 state)라고 불리기도 함.
- 변색 시간 : 전기변색유리가 하나의 투과율 상태에서 다른 투과율 상태로 변할 때 시간
- 고 투과 상태에서 저 투과 상태, 저 투과 상태에서 고 투과 상태로 변할 때 각각의 변색 시간이 필요 함
- 변색 사이클 : 저 투과 상태에서 고 투과 상태로 변할 때 가시광선 투과율에 대한 변화 범위를 말함.

■ 전기변색유리 평가 장비

- 온도가 제어 되고 자외선(UV), 가시광선(Visible), 근적외선(NIR) 파장 영역에 걸쳐 태양 복사의 스펙트럼 분포를 시뮬레이션 하기 위해 적절히 필터링 된 제논 아크 램프(Xenon arc lamps)가 포함 됨.
- 아래 그림은 AM 1.5 스펙트럼과 비교하여 적절히 필터링 된 제논 아크 소스의 스펙트럼을 나타내고 있음.

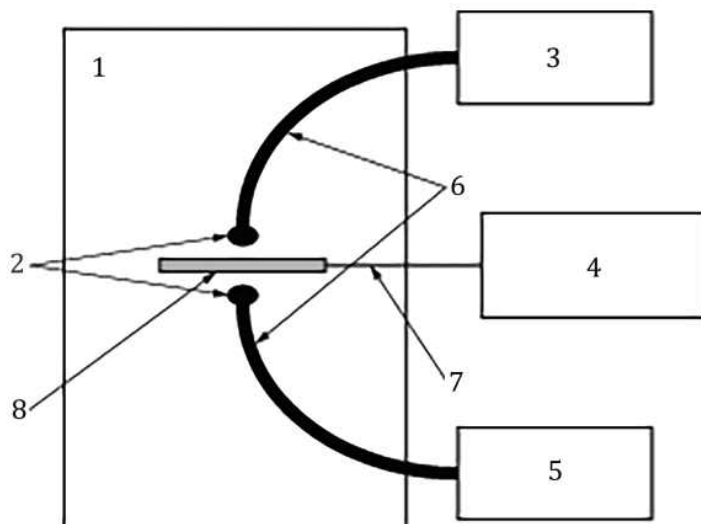


- 여기서 X는 스펙트럼 분포를 nm 단위로 나타내고, Y는 복사량을 $W/m^2 /nm$ 단위로 나타내며, 1은 태양 복사량을 Air Mass(AM 1.5)에서의 스펙트럼을 나타내고, 2는 적절히 필터링 된 제논 아크 소스의 스펙트럼 분포를 나타냄.
- 아래 그림은 시험 챔버의 필수적인 기능에 대한 설명을 나타내고 있음
- 시험 챔버의 구성은 전기변색유리 시료 설치와 제논 아크램프의 위치, 전선 배선으로 구성됨.
- 사이클링 컨트롤이 가능하며 데이터의 수집이 가능한 컴퓨터가 포함되어야 함.
- 챔버의 크기는 모든 시료를 포함할 수 있을 정도로 커야함.
- 제논 아크램프의 조사 강도는 조절이 되어야하며, 균일성을 확보하여야 함



- 위의 챔버에서 1은 전기변색유리를 의미하고, 2는 열전대, 3은 사이클링 및 데이터 수집이 가능한 컴퓨터 시스템, 4는 제논 아크 램프, 5는 챔버의 덮개, 6은 공기온도 조절 시스템을 나타내고 있음
- 시험 챔버 내 온도조절시스템이 반드시 필요하며, 공기온도는 $20^{\circ}C \sim 95^{\circ}C$ 로 조절이 가능하여야하며 챔버내의 상대습도는 60%를 초과할 수 없음.
- 제논 아크 램프에 의한 복사량은 수냉식 으로 6500W의 긴 형태의 아크램프가 적용되어야하며, 시험 챔버의 천정부분에 적용되어야 함.

- 적절한 필터를 적용한 램프는 Air Mass 1.5에서의 300nm부터 900nm 까지 스펙트럼 범위의 태양 복사를 모사할 수 있어야 함.
- 수냉식 램프는 열부하를 줄이기 위한 근적외선 흡수필터가 적용되어야함.
- 챔버 시편에 도달하는 복사는 $(1000 \pm 40) \text{ W/m}^2$ 의 복사강도가 요구되며, 300nm-3000nm의 스펙트럼 범위가 도달하도록 설계되어야 함.
- 시료에 도달하는 복사량의 균일성은 $\pm 8\%$ 를 넘지 않아야 함.
- 전기변색유리 시편은 제논 램프 아래의 평면 거치대에 놓여야 함.
- 시험 챔버의 배선은 챔버 내부에서 바깥쪽으로 통과하도록 하여 온도 모니터링과 전기변색유리의 전력 제어가 가능하도록 하여야 함.
- 적합한 제논 아크 램프 및 필터의 조합은 3500W/6500W의 제논 램프(부품번호 20-6500-00)과 내부 석영 필터(부품번호 20650600)과 CIDA.Sodalime 외부 필터 (부품번호 2065200)이며 아틀라스(Atlas)社 로부터 조달이 가능함.
- 시험 챔버와 오븐에서 시험편과 챔버의 온도를 측정하기 위해 열전대를 사용하여야 함.
- 전기변색유리 사이클링 장치는 전압 및 전류를 반복적으로 변화 시켜 전기변색유리의 투과율을 변화시키여 함.
- 분광측정기는 고투과율과 저투과율 상태에서의 380nm에서 780nm 스펙트럼 범위의 광학특성에 대한 투과율 데이터를 저장할 수 있어야함.
- 분광측정기의 램프는 텅스텐 램프 또는 그 외의 램프를 이용하여 380nm에서 780nm 스펙트럼 범위를 제공할 수 있어야 함.
- 분광측정기에는 광섬유 케이블이 사용되는데, 광섬유 케이블은 램프에서 전기변색유리 시료로, 전기변색유리 시료에서 다시 분광측정기로 전달 됨.
- 즉, 한쪽의 광섬유 케이블은 램프에서 전기변색유리로, 한쪽 광섬유 케이블은 전기변색유리를 투과한 빛이 분광측정기로 전달된 후 컴퓨터를 활용하여 데이터를 저장하게 됨.
- 두 개의 광섬유는 적절하게 정렬되어 광학적으로 결합되어야 함.
- 분광측정기를 통해 고투과 및 저투과 상태를 반복하기 위한 스위칭 컨트롤 시스템은 컴퓨터에 내장된 다채널 전위차계 혹은 제조자가 제공 한 제어시스템에 의해 수행될 수 있음.
- 전기변색유리의 광학 측정 수행 시 오븐을 사용하게 되는데, 선택된 시험 온도로 가열 할 nt 있어야 함.
- 최대의 전기변색 시료를 시험하기에 충분한 크기여야하고 전기변색유리 시험 온도에 도달할 수 있어야 함.
- 또한 오븐은 광학측정을 위해 사이클링장치와 분광측정기를 사용할 수 있도록 설계되어야 하며, 전기변색유리 시험 온도로 유지될 수 있어야 함.



위의 그림에서 1은 오븐을 의미하고, 2는 광섬유의 렌즈, 3은 분광측정기의 램프, 4는 전기변색유리 스위칭 컨트롤 시스템, 5는 분광측정기, 6은 광섬유, 7은 열전대, 8은 전기변색유리 시료를 의미 함.

- 시험 과정에 대한 이미지를 측정 및 기록하기 위해 디지털 카메라와 비디오카메라가 사용됨.

■ 전기변색유리 시료 준비

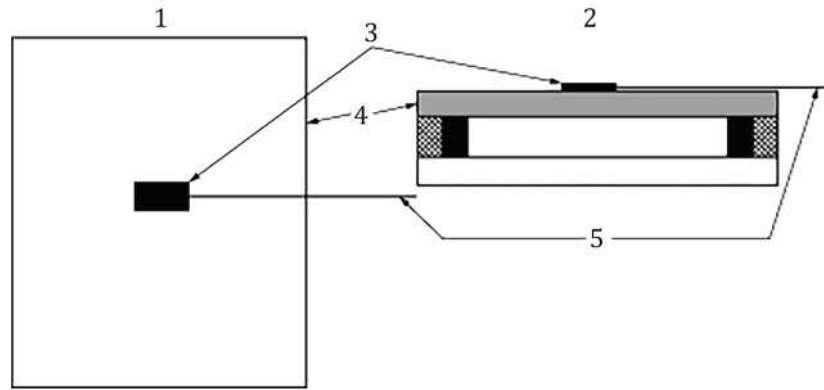
- 시험을 위한 전기변색유리 시료는 제조자에 의해 설정되고 명시하게 됨.
- 최소 시험편의 크기는 $(250 \pm 5) \text{ mm} \times (250 \pm 5) \text{ mm}$ 이어야 함.
- 5개의 시료를 제출하고 4개의 샘플을 시험하여야 함.
- 복층유리 시료의 경우 모세관 튜브를 활용하여 압력을 완화할 수 있고, 가장자리 마감을 알루미늄 테이프와 같은 재료로 보호 할 수 있음(유리 가장자리에서 최대 16mm).

■ 전기변색유리 성능 시험 방법

- 시험방법 개요
 - 전기변색유리 시료는 챔버 안에서 모의 태양복사에 노출되어야하고, 시험 온도에 노출되어야 하며, 스위칭 사이클을 아래 표와 같이 만족 해야함.

시험 조건	Class 1	Class 2
시료의 온도	$(85 \pm 7)^\circ\text{C}$	$(65 \pm 7)^\circ\text{C}$
스위칭 사이클 횟수	50 000	30 000
노출 시간	$\geq 5\,000 \text{ h}$	$\geq 5\,000 \text{ h}$

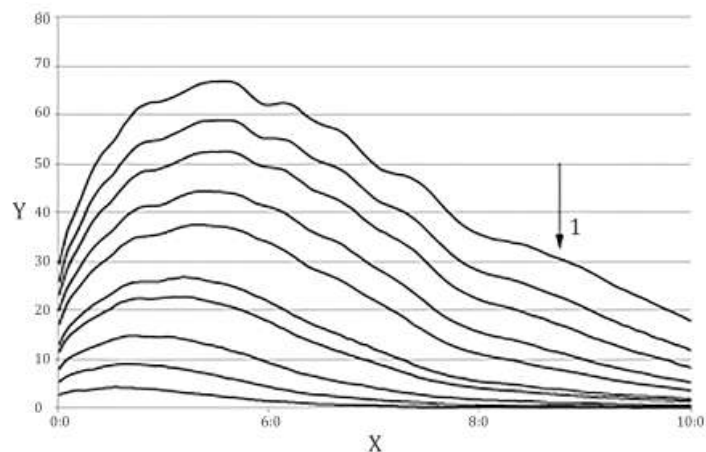
- 전기변색유리 시료는 챔버 안에서 모의 태양복사에 노출되어야하고, 시험 온도에 노출되어야 하며, 스위칭 사이클을 아래 표와 같이 만족 해야함.
 - 전기변색유리는 제조자가 규정한 제어 방법에 따라 저투과 상태와 고투과 상태 사이를 주기적으로 전환해야 함.
 - 전기변색유리 시료는 초기 성능을 결정하기 위해 상온에서 광학적 특성이 결정되어야 함.
 - 상온 광학특성 결정 후, 시료를 오븐에 넣어 시험온도 상태에서 광학적 특성을 측정하고, 저투과 상태와 고투과상태로 전환되는 시간을 결정해야 함.
 - 동일한 장비 내에서 고투과 상태의 광학 특성을 측정해야 함.
 - 시험 챔버를 통해 노출 시켜 시험 후 실온에서 처음과 동일한 방식으로 광학적 특성을 측정한 후 전기변색유리 상태 변화에 대한 데이터를 제조자에게 제공해야 함.
- 전기변색유리 시료의 준비
 - 전기변색유리 중앙에 열전대(지름 0.13mm)를 8mm×8mm 크기의 알루미늄 테이프로 부착 함.
 - 열전대가 알루미늄 테이프에 의해 모의 태양 복사에서 최대한 차폐되도록 주의해야함.
 - 아래 그림에서 1은 전기변색유리 샘플, 2는 전기변색유리 단면, 3은 알루미늄 테이프, 4는 전기변색유리, 5는 열전대를 나타냄
 - 시험 과정
 - 시험자가 전기변색유리 시료를 받게 되면 육안 검사를 우선 실시해야 함.
 - 전기변색유리 시료의 결함의 사진은 고투과 및 저투과 상태에서 측정되어야 하며 반드시 기록되어야 함.
 - 실온에서 전기변색유리의 초기 광학적 특성은, 오븐 내의 약 22°C 의에서 측정해야하며, 전기변색유리의 온도는 전기변색유리 표면에 부착된 열전대로 모니터링 되어야 함.



- 전기변색유리의 최고 투과율 및 최저 투과율, 스위칭 속도는 다음과 같이 결정됨.

- 1) 전기변색유리 시료의 최고 투과율 및 최저 투과율은 유리의 중앙부위에서 측정되며 적어도 380nm에서 780nm의 범위에서 측정되어야 함. 100% 및 0%의 투과율에 대한 기준 스펙트럼은 5nm 증분을 사용하여야 함. 측정 시 열전대가 부착되어 있는 부위로부터 멀리 떨어져 있는지 확인해야함
- 2) 전기변색유리의 광투과율은 분광 광도 효율을 가중인자로 사용하여 380nm에서 780nm의 파장 범위에서 스펙트럼을 적분하여 얻어지고, 통합 절차는 ISO 9050에 따름
- 3) 시료는 측정 중 최고 투과율과 최저 투과율 상태에 도달하여야 하며, 변색되는 제어 프로토콜 상태는 제조업체가 지정한대로 적용되어야 함. 시료가 최고 혹은 최저 상태에 도달하기 위해 투과율 변화율에 도달할 때까지 30분을 기다리거나, 투과율 변화폭이 0.4% 이하가 될 때까지 기다려야 함.

※ 아래 그래프에서 X는 스펙트럼, Y 는 가시광선 투과율, 1은 투과율 감소 방향을 나타냄.



- 시험 온도에서 시간의 함수로서의 광 투과율 측정

- 1) 시험온도에서 장기간 사이클링 시험은 전기변색유리 제조사 또는 제조자의 제어시스템에 명시된 대로 적용되어야 함.
- 2) 각 전기변색유리는 지정된 시험 온도의 오븐에서 가열해야함.
- 3) 최고 투과상태에서 시작해서, 최고 투과상태로 돌아가는 투과비(PTR)을 얻기 위한 전환시간은 분광계를 사용하여 시간의 함수로 투과율을 측정하여 결정하여야 함.

■ 전기변색유리 성능 시험 요구사항

- 전기변색유리 시료는 Class 1 조건일 경우 5000 사이클, Class 2 조건일 경우 3000 사이클, 최소 5000h 이상 시험 조건을 통과하여야 함.
- 통과 기준은 가시광선 투과율로 결정 하며 변색 전 후 최고 및 최저 투과율의 차이가 $\pm 5\%$ 이내의 범위에 들어와야 함.

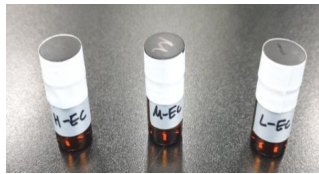
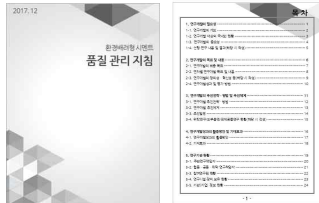
제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 질적 성과목표 달성도

■ 본 연구는 당초 핵심 연구목표로 계획된 “[OT] 고분자 화학수지(Resin)계 고강도 전해질 원천기술 및 시작품 개발”, “[MT] 고강도 전기변색 접합유리 소재 코팅 및 접합 제조 원천기술 및 시작품 개발”, “[ET] 고강도전기변색 접합유리 성능평가”, [QS] 전기변색 접합유리 품질관리기준 및 품질 가이드라인 개발“ 등의 연구개발 성과를 모두 달성함.

표 4.1 연구개발 성과 및 목표 달성도

핵심 연구목표	연구개발 주요 성과	달성도(%)
고분자 화학수지(Resin)계 고강도 전해질 원천기술 및 시작품 개발	■ 고분자 화학수지 전해질 조성 별 이온전도도 및 접합강도 특성 DB구축 ■ 고분자 화학수지 전해질 제조 조건 확립 ■ 고분자 화학수지 전해질 시작품	 [고강도 전기변색 전해질 시작품] 100
고강도 전기변색 접합유리 소재 코팅 및 접합 제조 원천기술 및 시작품 개발	■ 변색층 소재의 전해질 매칭을 위한 박막 조성 조건 구축 ■ 전기변색 소재 증착 공정 기술 최적화를 통한 소재 특성 확보 ■ 전기변색 접합유리 제조공정(전해질 주입, UV 경화) 기술 최적화 ■ 전기변색 접합유리 시작품 제작 (디바이스 크기 150X150mm) 및 가혹조건 신뢰성 평가	 [전기변색 접합유리 시작품] 100
고강도 전기변색 접합유리 성능 평가	■ 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 및 변색층 소재특성(이온전도도, 응답속도, 변색효율) 성능평가 ■ 건축용 광학 및 열적특성 성능평가 ■ 건축용 안전접합유리 구조특성(KS L 2004) 성능평가	 [전기변색 접합유리 시험성적서] 100
전기변색 접합유리 품질관리기준 및 품질 가이드라인 개발	■ 전기변색 접합유리에 관한 ISO 18543 품질기준기반 한국형 KS ISO 18543 품질기준 제안 및 품질관리 가이드라인 구축	 [전기변색 접합유리 품질 가이드라인] 100

나. 정량적 연구성과 목표 및 달성도

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	4	100	성과 달성
	비SCI	3	100	성과 달성
	계	4	100	성과 달성
국내 논문 게재	SCI	-	-	-
	비SCI	-	-	-
	계	-	-	-
특허 출원	국내	2	100	성과 달성
	국외	-	-	-
	계	2	100	성과 달성
특허 등록	국내	1	100	성과 달성
	국외	-	-	-
	계	1	100	성과 달성
인력 양성	석사	-	-	-
	박사	-	-	-
	계	-	-	-
기술 이전	계약 건수	-	-	-
	계약액	-	-	-
	징수액	-	-	-
국제 표준화	기고서 제출	-	-	-
	기고서 채택	-	-	-
	표준안 채택	-	-	-
국내 표준화	기고서 제출	-	-	-
	기고서 채택	-	-	-
	표준안 채택	-	-	-
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문		-	-
	연구시설·장비		-	-
	기술요약정보		-	-
	생명자 원	생명정 보	-	-
		생물자 원	-	-
		신품종	-	-
	소프트웨어		-	-
기타	화학물		-	-
	시제품		-	-
	성과 홍보		-	-
기타	일자리 창출		-	-

다. 성과 목표에 대한 자체 평가

- 본 연구는 건축적 관점에서 구조적 안전성을 확보할 수 있으면서 변색이 가능한 고강도 전기 변색 접합유리를 개발하고자 함에 목적이 있음
- 최종차년도 시작품으로 박리강도, 이온전도도, 변색효율 성능 확보 및 UV 경화 가능한 전해 질과 전기변색 접합유리를 개발하였음.
- 시작품의 변색 성능을 향상시키고, 공정을 안정화 시켜 상용화가 가능한 원천기술을 개발하였으며, KS F 2004 기준 시험을 통해 안전 접합유리 수준의 성능을 확보하였음

성과 목표	자체 평가
UV 경화형 고분자 화합수지 (Resin)계 전해질 원천기술 개발 (OT)	▪ 1차년도 개발된 전해질 Formulation 개선 및 이온성 액체를 첨가하면서 이온전도도 향상, 변색효율 향상, 접합강도 검증, Cycle 특성을 확보하였음 ▪ UV 경화가 가능한 첨가제(개시제와 가교제) DB 및 시작품 개발 및 점도를 향상 시키기 위한 바인더 DB 및 시작품 개발 완료 하였음 ▪ UV 경화 시 전해질의 접합강도 향상을 위한 Resin 소재에 대한 DB 구축 및 시작품 개발 완료 하였음 ▪ 시작품에 대한 박리강도, Cycle 특성 성능평가 결과, 성능이 우수함을 확인 ▪ 고강도 성능을 확보하면서 이온전도 및 변색이 가능하며, 이온전도도 및 변색효율에 대한 성능평가 수행 ▪ 2차년도에는 KS F 2004 기준 시험을 통해 안전접합유리 수준의 고강도 성능을 확인함
고강도 전기변색 소재 코팅 및 접합 제조 원천기술 및 접합유리 시작품 개발 (MT)	▪ 전기변색 접합유리의 변색층인 텅스텐 옥사이드(WO3)와 니클 옥사이드(NiO)의 투과율 변화폭(OD)과 변색효율(CE) 분석을 통해 최적 변색층 시작품 도출 ▪ 전기변색 접합유리 Full cell에 대한 전기화학적/광학적 특성평가를 통해 성능 수준 검토 ▪ 전기변색 접합유리의 Current 특성 및 Cycle 특성 검증 ▪ 1차년도 개발된 고강도 전해질과 매칭을 통해 변색효율, 변색속도, 투과도 변화에 대한 성능 확보 ▪ 고강도 전기변색 접합유리의 박리강도 시험 방법론 개발 및 성능평가를 통한 박리강도 DB 확보 ▪ 2차년도에는 이온성액체 첨가 및 Formulation 개선을 통해 변색층에 대한 변색효율 향상, 제조 조건 확립, 사이클링 특성 확보에 관한 연구를 수행 하였음
고강도 전기변색 접합유리 성능평가 (ET)	▪ 건자재로서 성능 평가 방법에 대한 연구를 수행하였으며, 착색 및 탈색 시 투과율에 대한 광학특성 평가, 박리강도 평가방법론 개발 및 평가, 이온전도도 성능평가 방법론 개발 및 평가를 수행하였음 ▪ 2차년도에는 KS F 2004 기준에 따른 안전접합유리에 대한 성능평가를 통해 건축용 접합유리로서 접합강도를 평가하였음
전기변색 접합유리 품질관리기준 및 가이드라인 (QS)	▪ 2017년에 신설된 ISO 18543 기준은 전기변색유리에 대한 유일한 평가방법 임. ▪ 국내에는 전기변색유리에 대한 기준이 마련되어 있지 않음 ▪ 따라서 1차년도에는 ISO 18543 기준에 대한 분석을 수행하였고, 별도로 박리강도 시험, 투과율 변화폭, 변색효율, 이온전도도에 대한 평가 방법을 고도화하는 연구를 진행하였음. ▪ 2차년도에는 국내 실정에 맞는 전기변색 접합유리의 품질관리 기준과 가이드라인을 구체화하여 개발 하였음

4. 연구개발성과

가. 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호
1	Deducing the Optimal Control Method for Electrochromic Triple Glazing through an Integrated Evaluation of Building Energy and Daylight Performance	Energies	Myunghwan Oh	11	스위스	MDPI	SCI	2018. 08.23.	doi:10.3390/en11092205
2	Evaluation of heating and cooling load according to applying electrochromic glass to office building envelope in South Korea	International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development	Myunghwan Oh	9	대한민국	Sustainable Building Research Center and Innovative Durable Building and Infrastructure Research Center	비SCI	2018. 09.	doi:10.12972/susb.20180015
3	Evaluation of Building Energy and Daylight Performance of Electrochromic Glazing for Optimal Control in Three Different Climate Zones	Sustainability	Myunghwan Oh	11	스위스	MDPI	SCI	2019. 01.08	doi.org/10.3390/su11010287
4	Evaluation of UV curing polymer electrolyte based electrochromic laminated glass	International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development	Myunghwan Oh	10	대한민국	Sustainable Building Research Center and Innovative Durable Building and Infrastructure Research Center	비SCI	2019. 09.	doi.org/10.22712/susb.20190016
5	Evaluation of Energy and Daylight Performance of Old Office Buildings in South Korea with Curtain Walls Remodeled Using Polymer Dispersed Liquid Crystal (PDLC) Films	Energies	Myunghwan Oh	12	스위스	MDPI	SCI	2019. 09.26	doi.org/10.3390/en12193679
6	Evaluation of building energy and daylight performance according to applying electrochromic and pdcl (polymer dispersed liquid crystal) to office building in South Korea	International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development	Myunghwan Oh	10	대한민국	Sustainable Building Research Center and Innovative Durable Building and Infrastructure Research Center	비SCI	2019. 12.	doi.org/10.22712/susb.20190024
7	Development of a Green Building Materials Integrated Platform Based on Materials and Resources in G-SEED in South Korea	Sustainability	Seongjo Wang	11	스위스	MDPI	SCI	2019. 11.20	doi.org/10.3390/su11236532

나. 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기 여 율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
1	전기변색 접합유리의 전극 연결장치	대한 민국	한양대 학교에 리카산 학협력 단	2018. 10.30	10-2018 -013087 4	-	-	-	-	-	100
2	전원 공급 장치 및 스마트 윈도우 시스템	대한 민국	한양대 학교에 리카산 학협력 단	2018. 11.06	10-2018 -013491 7	-	-	-	-	-	100
3	전원 공급 장치 및 스마트 윈도우 시스템	대한 민국	-	-	-	-	한양대 학교에 리카산 학협력 단	2019. 08.26.	10-2016 862	10-2016 862	100

* 연구개발성과 관리·유통 전담 기관에 등록한 번호 기재

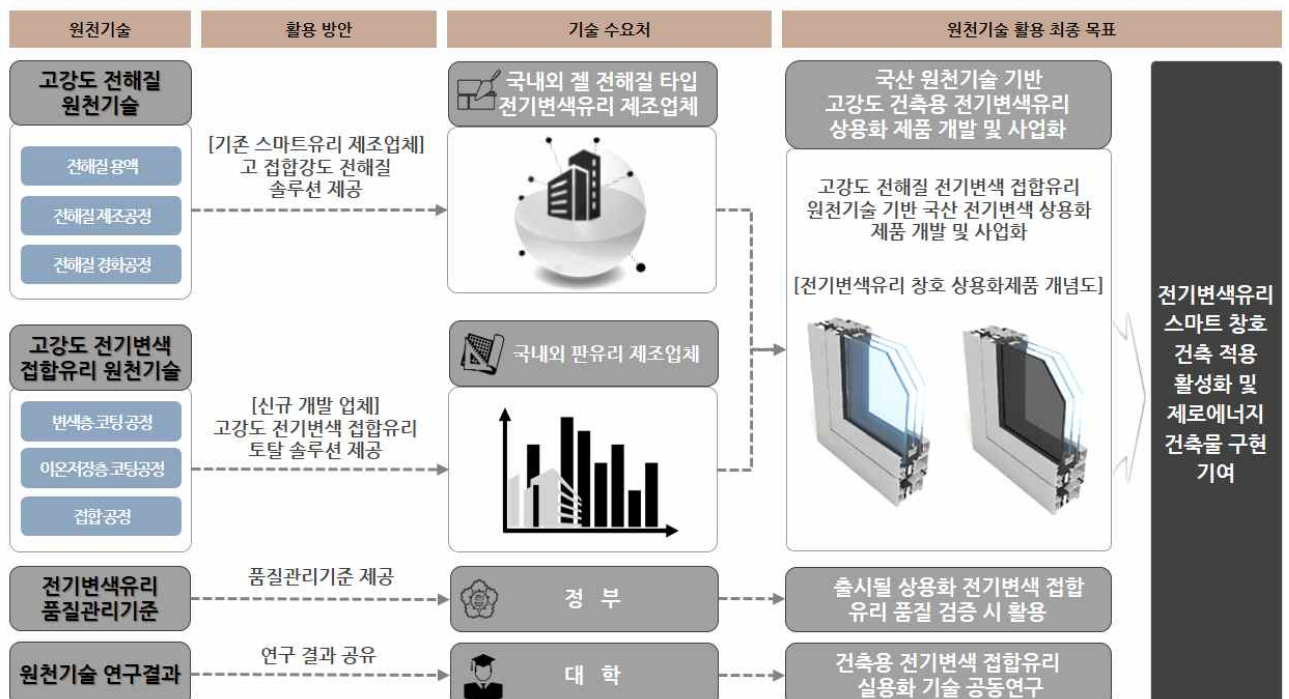
2. 관련 분야 기여도

■ 원천기술 개발 후 상용화를 통해 국내 제로에너지 건축물의 핵심 기술로 적용이 가능하며, 고부가가치의 스마트 창호 제품 생산으로 창호 시장의 성장을 견인하고, 고용창출 발생 효과를 얻을 수 있음

- 본 연구과제에서 개발되는 UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 고강도 전기변색 접합유리 원천기술은 건축용으로 전기변색유리를 개발하고자 하는 국내외 유리 제조업계에 접합강도를 확보할 수 있는 핵심기술로서 활용될 수 있음
- 정부기관은 KS ISO 18543을 통해 국내에서 출시 될 계획이 있는 전기변색 접합유리에 대한 품질을 검수할 수 있는 기준을 활용할 수 있고, 국내외 대학 및 연구소는 기존 전기변색 접합유리의 문제점을 학술적으로 공동 연구할 수 있고, 전기변색 접합유리 실용화 기술 공동 연구가 가능함

최종성과물	기술수요처	활용방안
UV 경화형 고분자 화학수지 (Resin)계 전해질 기반 고강도 건축용 전기변색 접합유리 원천기술	국내외 건축용 일반 판유리 제조업체	■ 국내외의 건축용 일반 판유리 제조업체는 Low-e 유리 생산을 위한 대규모 스퍼터링 장비를 구축하고 있어, 전기변색 접합유리 제조 공정에 대한 기술 이전을 통해 전기변색 소자 코팅 장비 구축이 가능하고, 고강도 전해질 원천기술 공급에 따라 건축용 대면적 전기변색 접합유리 제조 가능
	국내외 젤(Gel)전해질 타입 전기변색 유리 제조업체	■ 국내외 젤(Gel) 전해질 타입 전기변색 접합유리를 제조하고 있는 업체에 고강도 전해질 원천기술 공급을 통해 구조적으로 안정성을 갖는 전기변색 접합유리 생산이 가능하도록 할 수 있고, 기존 젤(Gel) 전해질 타입 전기변색유리의 대면적화의 한계를 극복할 수 있도록 기술 지원 가능
	정부기관/ 국내외 대학 및 연구소	■ 전기변색 접합유리 품질기준 제안을 통해 향후 국내 출시될 전기변색 접합유리에 대한 품질을 검수할 수 있는 기준을 정부기관에 제공 ■ 전기변색 소재에 대해 연구하고 있는 국내외 대학 및 연구소와 연구 결과 기술 공유를 통해 전기변색 접합유리의 문제점을 학술적으로 공동 해결하고, 건축용으로 활용 가능한 전기변색 접합유리 실용화 기술 공동 연구 가능

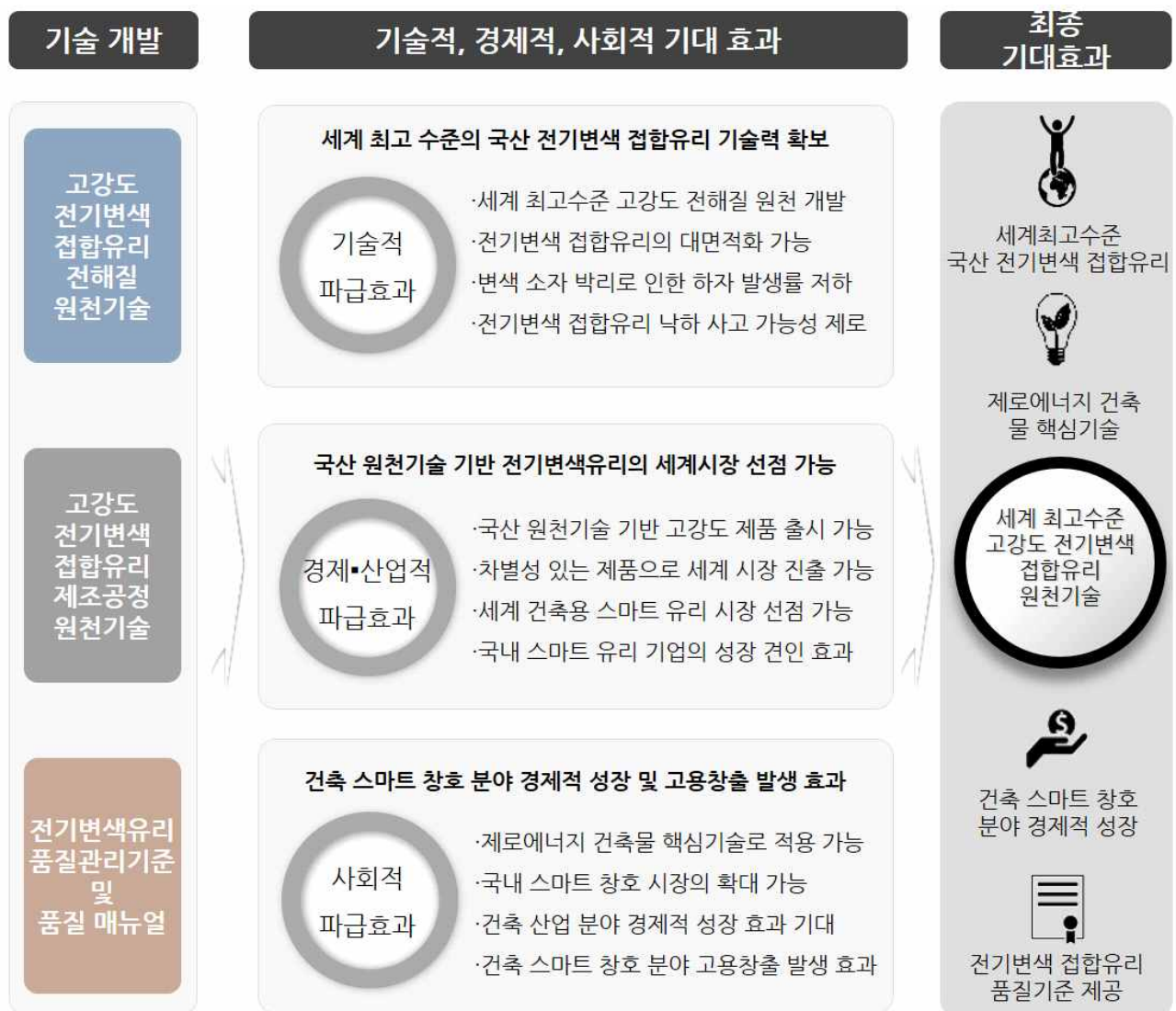
UV 경화형 고분자 화학수지(Resin)계 전해질 기반 고강도 전기변색 접합유리 원천기술 활용방안



제5장. 연구개발성과의 활용 계획

- 건축용 안전전합유리수준(KS L 2004)을 갖는 전기변색 접합유리 원천기술을 개발함으로써 **세계 최고 수준의 국산 전기변색 접합유리 기술력을 확보** 할 수 있어, 상용화 제품 연계 시 세계적으로 차별성을 갖춘 전기변색 접합유리 제품이 될 수 있음
- 차별성을 갖춘 전기변색 접합유리 제품으로서, 건축물 적용 시 1) **대면적화가 가능하고**, 2) **박리에 의한 하자 발생이 없으며**, 3) **낙하에 의한 안전사고 발생이 없는** 유일한 전기변색 접합유리로 **세계 시장을 선점**할 수 있으며, 국내 스마트 유리 기업의 성장을 견인할 수도 있음
- 원천기술 개발 후 상용화를 통해 **국내 제로에너지 건축물의 핵심 기술로 적용**이 가능하며, **고부가가치의 스마트 창호 제품 생산**으로 창호 시장의 성장을 견인하고, **고용창출 발생 효과**를 얻을 수 있음

기술적 측면	세계 최고 수준의 국산 전기변색 접합유리 기술력 확보
경제·산업적 측면	국산 원천기술 기반 전기변색유리의 세계시장 선점 가능
사회적 측면	건축 스마트창호 분야 경제적 성장 및 고용창출 발생 효과



[원천기술 성과의 기대효과]

붙임. 참고문헌

1. 정회영 외, 베네시안 블라인드 슬랫 조절에 따른 작업면 빛환경 향상 방안에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 제26권 제12호 통권 제 266호, 2010. 12
2. 이현정 외, 자동 베네시안 블라인드의 성능 평가를 위한 실험적 연구, 대한건축학회 추계 학술발표대회 논문집, 2008. 10
3. 이진숙 외, 창면 불쾌글레어 평가실험에 적용된 실험변수의 민감도 분석에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 제25권 제5호 통권 제187호, 2004. 5
4. 김덕우 외, 최적화 알고리즘을 이용한 실내 블라인드 최적제어 전략, 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회 논문집, 2008. 10
5. 김덕우 외, 실내/실외 블라인드 시스템의 제어전략, 석사학위논문, 2010
6. 구혜연 외, 하절기 베네시안 블라인드의 자동 제어 방안에 관한 연구, 대한건축학회 추계 학술발표대회 논문집, 2010. 10
7. 박영준 외, 하절기 자동 블라인드 적용에 따른 환경 성능에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, 2006. 10
8. 박상린 외, 블라인드 설계와 제어에 따른 연간, 항별 에너지 성능 분석, 한국생태환경건축학회 추계학술발표대회 논문집, 2010. 10
9. 김동균 외, 베네시안 블라인드의 각도 변화에 따른 시간별 일사 투과량 변동에 관한 연구, 한국건축친환경설비학회 춘계학술발표대회 논문집, 2011.
10. 이정근 외, 커튼월 건물의 내부블라인드 운영실태조사 분석, 대한건축학회 대전충남지회 추계학술발표대회 논문집, 2011. 12
11. Oh, M.H.; Lee, K.H.; Yoon, J.H. Automated control strategies of inside slat-type blind considering visual comfort and building energy performance. Energy Build.2012, 55, 728 - 737, doi:10.1016/j.solener.2016.04.022.
12. Ghosh, A.; Norton, B. Advances in switchable and highly insulating autonomous (self powered) glazing system for adaptive low energy buildings. Renew. Energy2018, 126, 1003 - 1031.
13. Ghosh, A.; Mallick, T.K. Evaluation of colour properties due to switching behaviour of a PDLC glazing for adaptive building integration. Renew. Energy2018, 120, 126 - 133
14. Rezaei, S.D.; Shannigrahi, S.; Ramakrishna, S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. Sol. Energy Mater. Sol. Cells2017, 159, 26 - 51, doi:10.1016/j.solmat.2016.08.026.
15. HALIO Glass, Asahi Glass Co. (AGC). Available online: <https://halioglass.com> (accessed on 9 June2018).
16. Reilly, S.; Arasteh, D.; Selkowitz, S.E. Thermal and optical analysis of switchable window glazings. Sol. Energy Mater1991, 22, 1 - 14, doi:10.1016/0165-1633(91)90002-3.
17. Piccolo, A.; Pennisi, A.; Simone, F. Daylighting performance of an electrochromic

- window in a small-scale test-cell. *Sol. Energy* 2009, 83, 832 - 844.
18. Fernandes, L.L.; Lee, E.S.; Ward, G. Lighting energy savings potential of split-pane electrochromic windows controlled for daylighting with visual comfort. *Energy Build.* 2013, 61, 8 - 20, doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.057.
 19. Lee, E.S.; Yazdanian, M.; Selkowitz, S. The Energy-Savings Potential of Electrochromic Windows in the US Commercial Buildings Sector, LBNL-54966; Lawrence Berkley National Laboratory: Berkley, CA, USA, 2004.
 20. Tavares, P.F.; Gaspar, A.R.; Martins, A.G.; Frontini, F. Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in Mediterranean climates. *Energy Policy* 2014, 67, 68 - 81, doi:10.1016/j.enpol.2013.07.038.
 21. Ajaji, Y.; André, P. Thermal comfort and visual comfort in an office building equipped with smart electrochromic glazing: An experimental study. *Energy Proc.* 2015, 78, 2464 - 2469, doi:10.1016/j.egypro.2015.11.230.
 22. Papaefthimiou, S.; Syrrakou, E.; Yianoulis, P. Energy performance assessment of an electrochromic window. *Thin Solid Films* 2006, 502, 257 - 264, doi:10.1016/j.tsf.2005.07.294.
 23. DeForest, N.; Shehabi, A.; Garcia, G.; Greenbalt, J.; Masanet, E.; Lee, E.S.; Selkowitz, S.; Milliron, D.J. Regional performance targets for transparent near-infrared switching electrochromic window glazings. *Build. Environ.* 2013, 61, 160 - 168, doi:10.1016/j.buildenv.2012.12.004.
 24. Granqvist, C.G.; Bayrak Pehlivan, I.; Niklasson, G.A. Electrochromics on a roll: Web-coating and lamination for smart windows. *Surf. Coat. Technol.* 2017, 6 - 11, doi:10.1016/j.surfcoat.2017.08.006
 25. Rottmann, M.; Kraft, A.; Heckner, K.H.; Hausler, T.; Fischer, U.; Stenzel, H. Large-area electrochromic safety glass; switching behaviour and transmission control of solar radiation. In *Proceeding sof the 9th International Glass Conference on Glass Processing Days, Tampere, Finland, 17 - 20 June 2005*.
 26. Myunghwan, O.; Sungho, T.; Sangkun, H. Analysis of heating and cooling loads of electrochromic glazing in high-rise residential buildings in South Korea. *Sustain. Sci.* 2018, 1121, doi:10.3390/su10041121.
 27. Nabil, A.; Mardaljevic, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factor. *Energy Build.* 2006, 38, 905 - 913
 28. LBNL. Available online: <https://windows.lbl.gov/software/optics> (accessed on 9 June 2018).
 29. EnergyPlus. EnergyPlus Input Output Reference. The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. 2012. Available online: <http://www.energyplus.gov> (accessed on 9 June 2018).
 30. Winkelmann, F. Modeling Windows in EnergyPlus. In *Proceedings of the 7th International IBPSA Conference, Rio di Janeiro, Brazil, 13 - 15 August 2001*.
 31. Arasteh, D.K.; Reilly, M.S.; Rubin, M.D. A versatile procedure for calculating heat

- transfer through windows, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Trans.1989, 95, 755 - 765.
32. Finlayson, E.U.; Arasteh, D.K.; Huizenga, C.; Rubin, M.D.; Reilly, M.S. WINDOW 4.0: Documentation of Calculation Procedures, LBNL-33943; Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkley, CA, USA, 1993.
 33. Arasteh, D.K.; Kohler, J.C.; Griffith, B.T. Draft, Modeling Windows in EnergyPlus with Only U, SHGC, and Optionally VT, LBNL-54966; Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkley, CA, USA, 2009.
 34. Winkelmann, F.; Selkowitz, S. Day-lighting simulation in DOE-2: Theory, validation and applications. In Proceedings of the Building Energy Simulation Conference, Seattle, WA, USA, 21 - 22 August 1985.
 35. Lomanowski, B.A.; Wright, J.L. Modeling fenestration with shading devices in building energy simulation: A practical approach. In Proceedings of the 11th International IBPSA Conference, Glasgow, UK, 27 - 30 July 2009.
 36. Chantrasrisalai, C.; Fisher, D.E. Comparative analysis of one-dimensional slat type blind models. In Proceedings of the SimBuild2004, Boulder, CO, USA, 4 - 6 August 2004.
 37. LBNL. Available online: <https://windows.lbl.gov/software/window> (accessed on 9 June 2018).
 38. The Korean Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Standard for Energy Saving Design in Buildings, 2017. Available online: <http://www.molit.go.kr> (accessed on 9 June 2018).
 39. EnergyPlus, EnergyPlus Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations. 2012. Available online: <http://www.energyplus.gov> (accessed on 9 June 2018).
 40. ASHRAE Fundamentals Handbook; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.: Atlanta, GA, USA, 2009.
 41. Hopkinson, R.G. Glare from daylighting in buildings. Appl. Ergon. 1972, 206 - 215, doi:10.1016/0003-6870(72)90102-0.
 42. KSCI. Available online: <https://standard.go.kr/> (accessed on 9 June 2018).
 33. Korean agency for technology and standards, KS (Korean Industrial Standard) A 3011 (Recommended levels of illumination). Available online: <https://standard.go.kr/> (accessed on 5 January 2019).

국토교통기술촉진 연구사업 - UV 경화형 고분자 화학수지(Resin) 전해질
기반 고강도 전기변색 접합유리 원전기술 개발

ISO 18543 기반 전기변색유리 성능평가 방법 및 품질관리 가이드라인

2020.02.03



한양대학교에리카산학협력단

목 차

1장 서론	1
1.1 전기변색유리의 기술개요 및 기능	1
1.2 전기변색 소재의 구성	2
1.3 용어 정의	4
2장 전기변색유리 평가 장비의 구성	6
2.1 전기변색유리 평가 장비	6
2.2 전기변색유리의 사이클링 장치	8
2.3 분광분석기	8
2.4 스위칭 컨트롤 시스템	8
2.5 오븐	9
2.6 이미지 저장 장치	9
3장 전기변색유리 시료 및 평가방법	11
3.1 전기변색유리 시료	11
3.2 전기변색유리 평가 방법	11
3.3 전기변색유리 시료의 준비	12
3.4 전기변색유리 평가 과정	12
3.5 최종평가	14
4장 성능 요건	16
4.1 가시광선 투과율	16
4.2 기타 요구사항	16
4.3 시험성적서 발행 시 검토사항	16
4.4 시험성적서 문서화 요구사항	16

제1장 서론

1.1 전기변색유리의 기술개요 및 기능

1.2 전기변색 소재의 구성

1.3 용어 정의

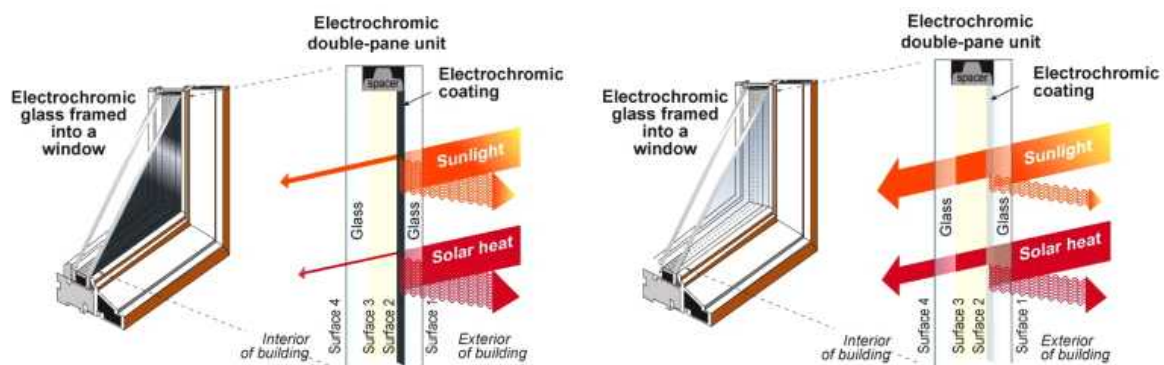
제1장 서론

1.1 전기변색유리(Electrochromic Glass)의 기술개요 및 기능

❖ 전기변색유리는 유리 자체의 투과율을 제어할 수 있어, 블라인드와 같은 기존 차양장치를 대체할 수 있는 차세대 일사조절 장치이다.

전기변색유리는 태양광 투과율을 자유롭게 조절할 수 있는 물질을 유리에 적용하여 건축물의 냉난방 에너지를 절감 시킬 수 있는 스마트 윈도우의 한 종류로 약 0.5Wh/m^2 의 에너지를 가하여 태양광의 투과율을 조절할 수 있는 유리이다. 여름철에는 반투명 모드(Colored Mode)로 태양광을 차단하여 냉방에너지 저감이 가능하고, 동절기에는 투명 모드(Bleached Mode)로 태양광을 획득하여 난방에너지 저감이 가능하다.

또한 건물 외부 환경에 따라 사용자가 창 의 투과도 조절을 통한 조명에너지 저감 가능하며 NREL(National Renewable Energy Lab, 2010)의 실증 건물 실험 결과에 따르면 냉방 전력 소비량 최대 20% 저감, 전력 피크부하 26% 저감, 조명에너지 최대 50% 저감 가능한 것으로 분석 전기변색유리는 건물외피에서 아래와 같은 주요 기능을 하게 된다.



[전기변색유리의 에너지 저감 특성 개요]

전기변색유리는 건물외피에서 아래와 같은 주요 기능을 하게 된다.

- 일사획득 최소화
- 태양에너지 획득
- 시각적 투과율 제어
- 열쾌적 및 태양열 획득 제어, 건물에너지 및 조명에너지 효율 향상, 불쾌현황 제어
- 건축 디자인적 요소기술 제공

1.2 전기변색 소재의 구성

- ❖ 전기변색유리 소재는 크게 투명전도막, 변색층, 이온저장층, 전해질 이렇게 4가지 구성으로 구분되며, 소재의 종류에 따라 다양한 특성을 나타낸다.

전기변색유리는 리튬 이온(Li^+)의 이동에 의해 전기변색층의 색이 변하는 현상을 이용하게 된다. 전기변색유리 소재는 크게 4가지 구성으로 구분이 되는데, 전기변색소재(Electrochromic Layer)로 주로 텅스텐 옥사이드(WO_3)가 사용되며, 이온저장층(Ion Storage Layer)로 NiX 계열이 사용된다.

전해질은 액상을 주입하여 경화시키는 젤전해질과 증착하는 방식인 고체전해질이 사용되고 있다. 더불어 유리에 전기 전도가 가능하도록 하는 투명전도막(TCO, Transparent Conductive Object)로 ITO, FTO가 주로 사용되지만, 다양한 소재가 활용될 수 있다.



[전기변색 소재의 구성]

전기변색유리는 전해질을 중심으로 변색층과 이온저장층의 산화, 환원 반응에 의해 변색이 이뤄진다. 변색층 소재로는 주로 WO_3 가 사용되며, 그 외에도 여러 가지 소재를 이용해 전기변색이 가능하고, 소재의 종류에 따라 색상을 다양하게 구현이 가능하다. 이온저장층도 NiX 계열이 가장 많이 사용되지만, 전기변색이 가능한 여러 소재가 있으며, 다양한 색상 구현이 가능하다. 소재 선택 시 색상 구현 뿐만 아니라 변색 특성 및 광학적 성능을 통합 고려하여 선택이 필요하다.

국내의 경우 알루이엔씨가 2017년 9월 상용화 기술 및 시제품을 출시한 적이 있고, 이외에도 오리온전자, 성문전자 등 국산화 기술개발을 위한 연구개발을 진행 중에 있다. 국내 기업이 보유하고 있는 세부 기술은 밝혀지지 않은 상황이며, 국외의 경우 미국의 SAGE Electrochromic Inc.가 가장 활발하게 제품개발을 진행 중에 있으며, 현재 프랑스의 Saint Gobain 사가 인수하여, 사업화를 진행 중에 있다. 독일의 Gesimat GmbH 사는

PVB 타입 전해질을 개발하여 건축용 유리를 상용화 시켰다.

업체명	크기	투과율		열관 류율	일사획득 계수 (SHGC)	Cycle 특성	비고
		태양	가시 광선				
SAGE (USA)	1080×1500	1.5~40	3.5~62	1.65	0.09~0.48	100,00	- WO₃ based - 동작전압 : 5 V (DC) - 응답속도 : 3~5 min.
Ecibtrik-Glass (Germany)	1200×2200	15~50	-	1.1	0.12~0.36	10년 보증	- WO₃ based - 동작전압 : 5 V(DC) - 동작전력 : 0.5Wh/m²
		14~45	-	0.5	0.10~0.30	-	
Gesimat (Germany)	800×1200	6~52	8~75	-	-	10년 보증	- WO₃ -EC based - 동작전압 : 2.2V(DC) - 동작전력 : 0.04Wh/m²
Saint Gobain (France)	-	2~20	4~40	-	-	-	- 동작전압 : 1.5 V(DC) - 동작전력 : 0.1Wh/m² - 자동차용 스마트윈도우
ChromoGenics (Sweden)	Unrevealed						WO₃ and NiO based
IP Glass (Natherlands)							
GEMTEX (USA)							자동차용 스마트윈도우
AJJER LLC (USA)							- 자동차용 거울 - 건물용 창호

[전기변색유리 개발 동향]

환원착색(Cathode)		산화착색(Anode)	
WO ₃	투명 ↔ 청색	Ir(OH)x	투명 ↔ 흑색
MoO ₃	황색 ↔ 보라색, 청색	Ni(OH) ₂	투명 ↔ 갈색
TiO ₂	투명 ↔ 청색	Rh ₂ O ₃	황색 ↔ 녹색, 갈색, 보라색
Nb ₂ O ₅	투명 ↔ 청색	CoOx	적색 ↔ 보라색, 회색, 흑색
V ₂ O ₅	황색 ↔ 청색, 녹색, 흑색		
Polyaniline	다양한 색		
Polythiophene	다양한 색		
반응예	WO ₃ + xH ⁺ + xe ⁻ ↔ H _x WO ₃	반응예	Ni(OH) ₂ ↔ NOOH + xH ⁺ + xe ⁻

[전기변색 소재 별 특징]

1.3 용어 정의

❖ 전기변색유리의 경우 다양한 소재가 사용되고 있으며, 평가 방법에 있어서도 다양한 용어가 사용되고 있음에 따라 용어를 정의하였다.

- 발색성 유리(Chromogenic glazing) : 발색성 유리는 전압, 전류의 전기적 자극, 일사량, 외기온도 등 외부의 자극에 따라 반응하여 가시광선, 태양광선에 대해 투과율을 변화가 가능한 유리를 말함
- 전기변색소자(Electrochromic, EC) : 전기변색유리는 전압과 전류에 의해 반응하여 가시광선 및 태양광선의 투과율을 조절할 수 있는 유리를 말함
- 전기변색유리(Electrochromic glazing, EC glazing) : 전기변색유리란 한 장 혹은 그 이상의 유리로 구성된 유리로 전기변색소자의 특성을 가지고 있는 유리.
- 고 투과 상태 : 전기변색유리의 가시광선 투과율이 최대인 상태.
- 고 투과 상태를 탈색상태(Clear state or Bleached state)라고 불리기도 함.
- 저 투과 상태 : 전기변색유리의 가시광선 투과율이 최소인 상태.
- 저 투과 상태를 착색상태(Tinted state, Da가 state)라고 불리기도 함.
- 변색 시간 : 전기변색유리가 하나의 투과율 상태에서 다른 투과율 상태로 변할 때 시간, 고 투과 상태에서 저 투과 상태, 저 투과 상태에서 고 투과 상태로 변할 때 각각의 변색 시간이 필요 함
- 변색 사이클 : 저 투과 상태에서 고 투과 상태로 변할 때 가시광선 투과율에 대한 변화 범위를 말함.

제2장 전기변색유리 평가 장비의 구성

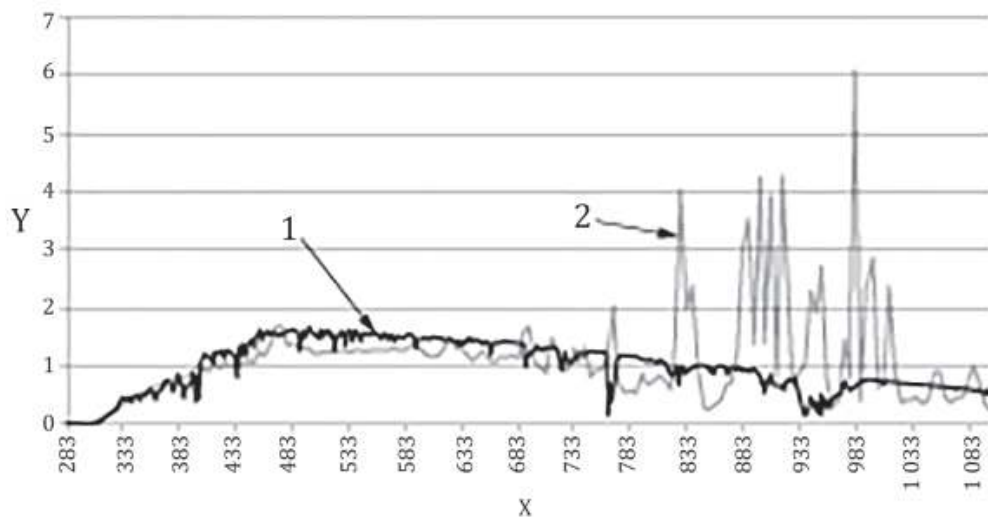
- 2.1 전기변색유리 평가 장비
- 2.2 전기변색유리의 사이클링 장치
- 2.3 분광분석기
- 2.4 스위칭 컨트롤 시스템
- 2.5 오븐
- 2.6 이미지 저장 장치

제2장 전기변색유리 평가 장비의 구성

2.1 전기변색유리 평가 장비

2.1.1 전기변색유리 평가용 챔버

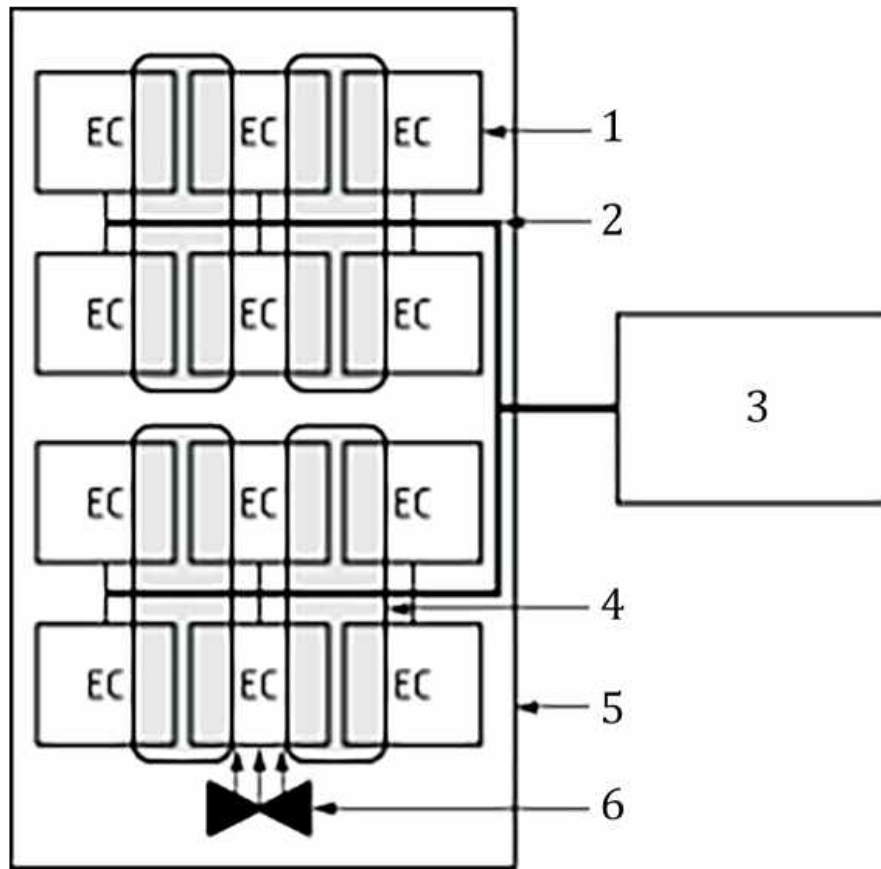
온도가 제어 되고 자외선(UV), 가시광선(Visible), 근적외선(NIR) 파장 영역에 걸쳐 태양 복사의 스펙트럼 분포를 시뮬레이션 하기 위해 적절히 필터링 된 제논 아크 램프(Xenon arc lamps)가 포함 된다. 아래 그림은 AM 1.5 스펙트럼과 비교하여 적절히 필터링 된 제논 아크 소스의 스펙트럼을 나타내고 있다.



[공기밀도(Air mass) 1.5 상태에서의 제논(Xenon) 아크소스(Arc source)의 스펙트럼]

여기서 X는 스펙트럼 분포를 nm 단위로 나타내고, Y는 복사량을 $W/m^2/nm$ 단위로 나타내며, 1은 태양 복사량을 Air Mass(AM 1.5)에서의 스펙트럼을 나타내고, 2는 적절히 필터링 된 제논 아크 소스의 스펙트럼 분포를 나타낸다.

아래 그림은 시험 챔버의 필수적인 기능에 대한 설명을 나타내고 있다. 시험 챔버의 구성은 전기변색유리 시료 설치와 제논 아크램프의 위치, 전선 배선으로 구성된다. 사이클링 컨트롤이 가능하며 데이터의 수집이 가능한 컴퓨터가 포함되어야 하며 챔버의 크기는 모든 시료를 포함할 수 있을 정도로 커야한다. 또한 제논 아크램프의 조사 강도는 조절이 되어야하며, 균일성을 확보하여야 한다.



[환경 챔버가 갖춰야할 필수 요건 예시]

위의 챔버에서 1은 전기변색유리를 의미하고, 2는 열전대, 3은 사이클링 및 데이터 수집이 가능한 컴퓨터 시스템, 4는 제논 아크 램프, 5는 챔버의 덮개, 6은 공기온도 조절 시스템을 나타내고 있다.

시험 챔버 내 온도조절시스템이 반드시 필요하며, 공기온도는 20℃~95℃로 조절이 가능하여야하며 챔버내의 상대습도는 60%를 초과할 수 없다. 제논 아크 램프에 의한 복사량은 수냉식 으로 6500W의 긴 형태의 아크램프가 적용되어야하며, 시험 챔버의 천정부분에 적용되어야 한다.

적절한 필터를 적용한 램프는 Air Mass 1.5에서의 300nm부터 900nm 까지 스펙트럼 범위의 태양 복사를 모사할 수 있어야 하며, 수냉식 램프는 열부하를 줄이기 위한 근적외선 흡수필터가 적용되어야 한다.

챔버 시편에 도달하는 복사는 $(1000 \pm 40) \text{W/m}^2$ 의 복사강도가 요구되며, 300nm~3000nm의 스펙트럼 범위가 도달하도록 설계되어야 하고, 시료에 도달하는 복사량의 균일

성은 $\pm 8\%$ 를 넘지 않아야 한다.

전기변색유리 시편은 제논 램프 아래의 평면 거치대에 놓여야 하며, 시험 챔버의 배선은 챔버 내부에서 바깥쪽으로 통과하도록 하여 온도 모니터링과 전기변색유리의 전력 제어 가능하도록 하여야 한다.

적합한 제논 아크 램프 및 필터의 조합은 3500W/6500W의 제논 램프(부품번호 20-6500-00)과 내부 석영필터(부품번호 20650600)과 CIDA.Sodalime 외부 필터 (부품번호 2065200)이며 아틀라스(Atlas)社로부터 조달이 가능하다. 시험 챔버와 오븐에서 시험편과 챔버의 온도를 측정하기 위해 열전대를 사용하여야 한다.

2.2 전기변색유리의 사이클링 장치

전기변색유리 사이클링 장치는 전압 및 전류를 반복적으로 변화시켜 전기변색유리의 투과율을 변화시키여 한다.

2.3 분광분석기

분광측정기는 고투과율과 저투과율 상태에서의 380nm에서 780nm 스펙트럼 범위의 광학특성에 대한 투과율 데이터를 저장할 수 있어야 한다.

2.3.1 분광분석기의 램프

분광측정기의 램프는 텅스텐 램프 또는 그 외의 램프를 이용하여 380nm에서 780nm 스펙트럼 범위를 제공할 수 있어야 한다.

2.3.2 분광분석기의 광섬유 케이블

분광측정기에는 광섬유 케이블이 사용되는데, 광섬유 케이블은 램프에서 전기변색유리 시료로, 전기변색유리 시료에서 다시 분광측정기로 전달 된다. 즉, 한쪽의 광섬유 케이블은 램프에서 전기변색유리로, 한쪽 광섬유 케이블은 전기변색유리를 투과한 빛이 분광측정기로 전달된 후 컴퓨터를 활용하여 데이터를 저장할 수 있어야하며, 두 개의 광섬유는 적절하게 정렬되어 광학적으로 결합되어야 한다.

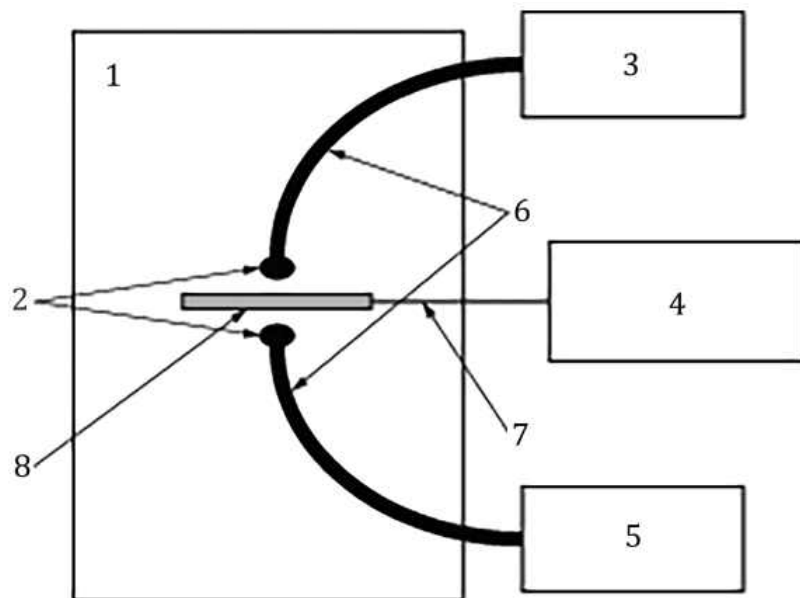
2.4 스위칭 컨트롤 시스템

분광측정기를 통해 고투과 및 저투과 상태를 반복하기 위한 스위칭 컨트롤 시스템은

컴퓨터에 내장된 다채널 전위차계 혹은 제조자가 제공 한 제어시스템에 의해 수행될 수 있어야 한다.

2.5 오븐

전기변색유리의 광학 측정 수행 시 오븐을 사용하게 되는데, 선택된 시험 온도로 가열할 수 있어야 한다. 최대의 전기변색 시료를 시험하기에 충분한 크기여야하고 전기변색 유리 시험 온도에 도달할 수 있어야 한다. 또한 오븐은 광학측정을 위해 사이클링장치와 분광측정기를 사용할 수 있도록 설계되어야 하며, 전기변색유리 시험 온도로 유지될 수 있어야 함.



[챔버 내 스위칭 사이클을 결정하기 위한 오븐 예시]

위의 그림에서 1은 오븐을 의미하고, 2는 광섬유의 렌즈, 3은 분광측정기의 램프, 4는 전기변색유리 스위칭 컨트롤 시스템, 5는 분광측정기, 6은 광섬유, 7은 열전대, 8은 전기변색유리 시료를 의미 함.

2.6 이미지 저장장치

시험 과정에 대한 이미지를 측정 및 기록하기 위해 디지털 카메라와 비디오카메라가 사용된다.

제3장 전기변색유리 시료 및 평가방법

3.1 전기변색유리 시료

3.2 전기변색유리 평가 방법

3.3 전기변색유리 시료의 준비

3.4 전기변색유리 평가 과정

3.5 최종 성능평가

제3장 전기변색유리 시료 및 평가방법

3.1 전기변색유리 시료

시험을 위한 전기변색유리 시료는 제조자에 의해 설정되고 명시하게 된다. 최소 시험편의 크기는 (250 ± 5) mm $\times$ (250 ± 5) mm 이어야 하며, 5개의 시료를 제출하고 4개의 샘플을 시험하여야 한다.

복층유리 시료의 경우 모세관 튜브를 활용하여 압력을 완화할 수 있고, 가장자리 마감을 알루미늄 테이프와 같은 재료로 보호(유리 가장자리에서 최대 16mm) 할 수 있다..

3.2 전기변색유리 평가 방법

전기변색유리 시료는 챔버 안에서 모의 태양복사에 노출되어야하고, 시험 온도에 노출되어야 하며, 스위칭 사이클을 아래 표와 같이 만족 해야 한다.

[수준별 평가 조건 요약]

시험 조건	Class 1	Class 2
시료의 온도	$(85\pm7)^{\circ}\text{C}$	$(65\pm7)^{\circ}\text{C}$
스위칭 사이클 횟수	50 000	30 000
노출 시간	$\geq 5\ 000\ \text{h}$	$\geq 5\ 000\ \text{h}$

전기변색유리 시료는 챔버 안에서 모의 태양복사에 노출되어야하고, 시험 온도에 노출되어야 하며, 스위칭 사이클을 위의 표와 같이 만족 해야한다. 전기변색유리는 제조자가 규정한 제어 방법에 따라 저투과 상태와 고투과 상태 사이를 주기적으로 전환해야 한다. 전기변색유리 시료는 초기 성능을 결정하기 위해 상온에서 광학적 특성이 결정되어야 한다. 상온 광학특성 결정 후, 시료를 오븐에 넣어 시험온도 상태에서 광학적 특성을 측정하고, 저투과 상태와 고투과상태로 전환되는 시간을 결정해야 하며, 동일한 장비 내에서 고투과 상태의 광학 특성을 측정해야 한다. 시험 챔버를 통해 노출 시켜 시험 후 실온에서 처음과 동일한 방식으로 광학적 특성을 측정한 후 전기변색유리 상태 변화에 대한 데이터를 제조자에게 제공해야 한다.

3.3 전기변색유리 시료의 준비

전기변색유리 중앙에 열전대(지름 0.13mm)를 8mm×8mm 크기의 알루미늄 테이프로 부착 한다. 열전대가 알루미늄 테이프에 의해 모의 태양 복사에서 최대한 차폐되도록 주의해야한다. 아래 그림에서 1은 전기변색유리 샘플, 2는 전기변색유리 단면, 3은 알루미늄 테이프, 4는 전기변색유리, 5는 열전대를 나타낸다.

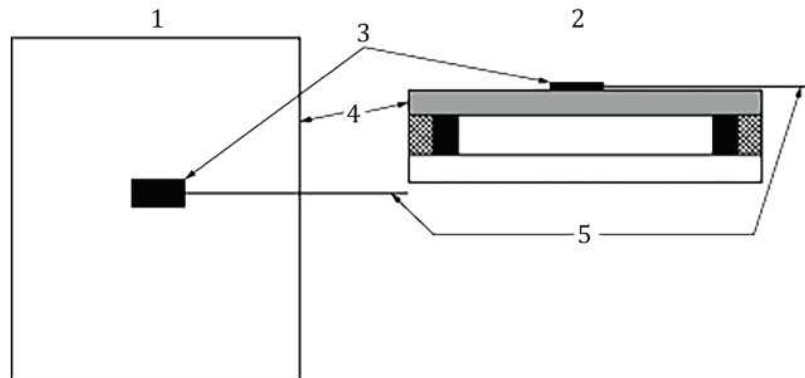
3.4 전기변색유리 평가 과정

3.4.1 전기변색유리 평가 과정 일반사항

시험자가 전기변색유리 시료를 받게 되면 육안 검사를 우선 실시해야 한다. 전기변색 유리 시료의 결함의 사진은 고투과 및 저투과 상태에서 측정되어야 하며 반드시 기록되어야 한다.

3.4.2 평가 전 실온상태 전기변색유리 초기 광학특성 측정

실온에서 전기변색유리의 초기 광학적 특성은, 오븐 내의 약 22℃의에서 측정해야하며, 전기변색유리의 온도는 전기변색유리 표면에 부착된 열전대로 모니터링 되어야 한다.



[전기변색유리 시료의 열전대 부착 위치]

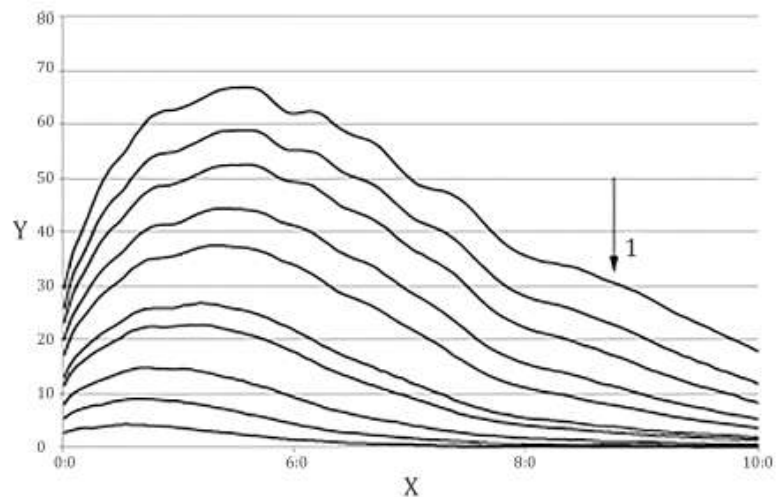
전기변색유리의 최고 투과율 및 최저 투과율, 스위칭 속도는 다음과 같이 결정 된다.

- 1) 전기변색유리 시료의 최고 투과율 및 최저 투과율은 유리의 중앙부위에서 측정되며 적어도 380nm에서 780nm의 범위에서 측정되어야 한다. 100% 및 0%의 투과율에 대한 기준 스펙트럼은 5nm 증분을 사용하여야 한다. 측정 시 열전대가 부착되어 있는 부위로부터 멀리 떨어져 있는지 확인해야 한다.

2) 전기변색유리의 광투과율은 분광 광도 효율을 가중인자로 사용하여 380nm에서 780nm의 파장 범위에서 스펙트럼을 적분하여 얻어지고, 통합 절차는 ISO 9050를 따른다.

3) 시료는 측정 중 최고 투과율과 최저 투과율 상태에 도달하여야 하며, 변색되는 제어 프로토콜 상태는 제조업체가 지정한대로 적용되어야 한다. 시료가 최고 혹은 최저 상태에 도달하기 위해 투과율 변화율에 도달할 때까지 30분을 기다리거나, 투과율 변화폭이 0.4% 이하가 될 때까지 기다려야 한다.

※ 아래 그래프에서 X는 스펙트럼, Y 는 가시광선 투과율, 1은 투과율 감소 방향을 나타냄.



[스위칭 사이클동안 대표적인 스펙트럼 투과율 기록]

3.4.3 평가 온도 조건에서의 광학적 특성 측정

시험 온도에서 사이클링하기 전에 전기변색유리 시료를 실온에서 사이클링하여 전자 제어 및 데이터 수집 시스템의 신뢰성과 전기 및 열전대 연결의 연속성을 검증해야 합니다.

시험편이 가장 높은 투과 상태에 있으면 크세논 아크 램프가 작동되어야 한다. EC 시험편이 원하는 시험 온도에 도달하면, 초기 오븐 사전 시험에 의해 얻어진 특정 시험 온도에서 전압 또는 전류 프로파일을 사용하여 EC 클레이징의 전압 사이클링을 시작해야 한다. 가장 낮은 투과 상태에서 흡수로 인한 시험편 온도의 불가피한 상승을 설명하기 위해 챔버 공기 온도를 조정해야 한다. 시험편 온도 및 사이클링 데이터는 데이터 수집 시스템을 사용하여 기록해야 하며, 시험실 및 관련 실험 장치의 적절한 작동을 보장하기 위해 주기적 모니터링을 수행해야 한다.

3.4.4 광학특성 중간 점검

전기변색유리의 사이클링 및 시험 챔버의 기능은 시험 동안 대략 2,000 시간마다 주기적으로 차단 될 수 있다. 챔버를 폐쇄 한 후, 케이블에서 시험편으로의 열전대 및 전기 도선을 분리하고, 시험편을 제거하고, 7.3.2에서와 같이 실온에서 최고 및 최저 전송 상태에서의 광 투과율을 다시 측정해야한다.

전기변색유리 시험편을 육안으로 검사하고 감지 가능한 열화를 디지털 카메라로 촬영해야 한다. 최고 및 최저 투과 상태에서 시험편의 시각적으로 감지 가능한 분해는 기록되어야한다.

EC 글레이징이 일정한 투과율로 유지 될 때 시각적 균일성 시험이 이루어져야한다. EC 글레이징의 균일성을 평가하기 위해 주어진 투과 상태를 확립하기 위해, 제조자는 제어 클래스 (전압, 전류, 시간) 또는 EC 글레이징의 최저 투과율을 지속적으로 변화시킬 제어 시스템을 제공해야 한다.

광학 측정 및 기타 관찰 내용을 기록해야 한다. 전기변색유리 시료는 다음 일련의 주기적 시험, 즉 추가 2,000 시간 동안 또는 시험이 적절하게 완료 될 때까지 시험 챔버에 재 장착되어야 한다.

3.5 최종 성능평가

3.5.1 최종 광학특성 평가

시험 조건에서 시험편이 50,000회의 스위칭 사이클(클래스 1의 경우) 또는 30,000회의 사이클(클래스 2의 경우), 최소 5,000 시간 이상 축적 된 후, 시험편은 실온에서 광학특성이 측정되어야 한다.

3.5.2 영상 데이터

내후성 시험 후 내후성 시험전의 시료와 동일한 위치에 배치된 상태에서 평가되어야 한다. 최고 투과율 및 최저 투과율 상태를 5회 스위칭한 사이클에 대해 영상 데이터를 기록해야 한다.

3.5.3 최종 육안 조사

최종 육안 검사를 수행하고 감지 가능한 저하의 모든 증거를 사진으로 기록해야 한다.

제4장 성능 요건

4.1 가시광선 투과율

4.2 기타 요구사항

4.3 시험성적서 발행 시 검토사항

2.4 시험성적서 문서화 요구사항

제4장 성능 요건

4.1 가시광선 투과율

최저 및 최고 투과율 상태의 광 투과율은 ISO 9050 : 2003에 따라 결정된다. 최고 투과 및 최저 투과 상태에서의 가시광 투과율은 $\pm 5\%$ T 절대 절대로 변하지 않아야 한다.

평가된 4 개의 시료 모두 위의 성능을 만족하여야 하지만, 적어도 3 개의 시료는 위에서 언급 한 요구 사항을 충족해야 한다.

4.2 기타 요구사항

전기변색 복층유리의 경우 ISO 20492 관련 요구 사항도 충족해야 한다.

4.2.1 전기변색 접합유리

전기변색 접합유리의 경우 아래 KS L 2004의 낙구충격 시험 관련 요구사항도 충족해야 한다.

전기변색 접합유리 낙구충격 시험

- a) 시료는 제품과 같은 재료 판유리 및 같은 중간막을 사용하여 비슷한 방법으로 제조하거나 제품에서 잘라 낸 약 610mm×610mm의 치수로 평면 및 평면에 가까운 접합유리로서, 시험 직전까지 적어도 4시간 동안 (23±2) °C의 실내에서 유지한 것을 사용
- b) 시료는 아래 그림에 표시한 철제틀로 시료가 수평이 되도록 함
- c) 다른 두께의 종류 재료 판유리를 사용한 접합유리는 얇은 쪽 재료 판유리를 충격면으로 함
- d) 다만, 무늬 접합유리, 망 무늬 판유리 및 선 무늬 판유리를 사용하는 접합 유리에서는 원칙적으로 충격면은 무늬 무양이 없는 면으로 함
- e) KS B 2001에 규정하는 호칭 2 1/2의 강구 중에서 무게 (1040±10)g 인 것을 골라서, 이것을 시료 표면에서 120cm 높이에 놓고 정지 상태에서 힘을 가하지 않고 시료면의 중심점을 향해서 1회 낙하시켜서 구성하는 유리가 1장 이상 파괴되었을 때의 파괴 상태를 봄
- f) 파괴되지 않은 경우에는 아래 표의 낙하 높이의 순서에 따라 높이를 점차 올려

- 서 1회 낙하하여 구성하는 유리판이 1장 이상 파괴되었을 때의 파괴 상태를 봄
- g) 그래도 파괴되지 않는 경우에는 KS B 2001에 규정하는 호칭 3 1/4의 강구에서 무게 (2260 +30,-20)g 의 것을 사용하여, 앞의 조작을 하여 구성하는 유리판이 1장 이상 파괴되었을 때 파괴의 상태를 봄
- h) 또한 파괴되지 않는 경우에는 KS B 2001에 규정하는 강구 중 적당히 무게가 많이 나가는 것을 사용하여 같은 조작에 의해 충격을 가하고, 구성하는 유리판이 1장 이상 파괴되었을 때 파괴의 상태를 봄
- i) 충격점은 시료면의 중심점에서 25mm 이하의 범위에 들어가도록 하고, 시험은 상온에서 함

단위 : cm

낙하 높이	120	150	190	240	300	380	480
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

4.3 시험성적서 발행 시 검토사항

다음과 같은 상황을 관찰하고 문서화해야 한다.

- 시료 파손
- 가장 높은 투과 상태에서 시각적으로 명백한 시료 분해
- 가장 낮은 투과 상태에서 시각적으로 명백한 시료 분해
- 최고 투과 상태의 사진에서 명백한 시편 분해
- 가장 낮은 투과 상태의 사진에서 명백한 시편 분해
- 가장 높은 전송 상태의 비디오에서 명백한 시편 성능 저하
- 가장 낮은 전송 상태의 비디오에서 명백한 시편 성능 저하

4.4 시험성적서 문서화 요구사항

다음 정보는 시험성적서에 제공되어야 한다.

- 시료의 크기, 시료의 구성, 제품명, 규격
- 의뢰자, 의뢰업체, 시료 수령일, 시험 완료일을 포함한 시험편에 대한 설명
- 시험에서 시편의 방향, 복층유리의 경우전 기변색유리가 램프로 향하고 있는지 여부
- 전집변색유리가 접합유리인 경우 가장자리 실링여부
- 시험 진행 한 시료 수, 4 개 샘플 모두의 성능을 보고 해야 하지만, 3 개 이상

이 성능 요구 사항을 충족해야 함

f) 초기 상온상태에서의 투과율 범위

g) 가속 시험 전후에 시편의 최저 및 최고 투과 상태에서의 가시광선 투과율

h) 평균 시험 온도

i) 시험 완료된 사이클링 횟수

j) 시험 완료된 시간

k) 시험에 대한 추가 측정 및 분석 결과

l) 4.3 에 따라 이루어진 모든 관찰

m) Class 1 또는 Class 2 조건에서 성능 요구 사항을 충족하는지 여부를 나타내는 적합성 선언

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.