첨단도시개발사업

11첨단도시C02

최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력 변화 예측 시스템 개발 최종보고서

2014 . 04.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 금오공과대학교 산학협력단
공동연구기관 / 경북대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "첨단도시개발에 관한 연구"과제(세부과제 "최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템 개발"에 관한 연구)의 보고서로 제출합니다.

2014 . 7.

주관연구기관명 : 금오공과대학교
주관연구책임자 : 장 일 영
연 구 원 : 이 창 준
연 구 원 : 강 용 학
연 구 원 : 강 충 현
연 구 원 : 이 준 철
연 구 원 : 김 성 태
연 구 원 : 김 성 겸
연 구 원 : 전 기 용
연 구 원 : 천 우 영
연 구 원 : 강 성 준
연 구 원 : 이 수 정
연 구 원 : 신 동 철
연 구 원 : 최 현 국
연 구 원 : 김 법 종

협동연구기관명 : 경북대학교
협동연구책임자 : 김 지 식
연 구 원 : 손 기 선
연 구 원 : Timilsina Suman
연 구 원 : 이 진 웅
연 구 원 : 조 민 영

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>11첨단도시
C02</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>3차년도
2013. 5. 1.
~2014. 4. 30.</td><td>단 계
구 분</td><td>(3차년도)/
(3차년도)</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">첨단도시개발사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의
응력변화 예측 시스템 개발</td></tr>
<tr><td>단위과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>장일영</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 41명
내부 : 33명
외부 : 8명</td><td>총
연구비</td><td>정부 :824,000천원
기업 :278,000천원
계 :1,102,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">금오공과대학교
토목공학과
경북대학교
신소재공학과</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">㈜신도이엔아이,
이엔이건설(주)</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요 약</td><td>보고서
면수</td><td>102</td></tr>
</table>

본 연구의 최종목표는 콘크리트 구조에 최적화된 압광페인트를 새롭개 개발하고 이를 콘크리트 균열 검출 및 감시에 활용함으로써 세계 최초로 콘크리트 구조물의 시각적 균열검출 및 균열 활동성 평가를 가능케 하는 모니터링 시스템의 개발에 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 주요 연구성과를 이루었다. ① 과년도의 연구수행 결과 압광소재의 기초요소 기술이 확립됨에 따라 개발, 향상 된 페인트의 제작과 동시에 실제 구조물에 적용할 시 발생가능한 재료의 내구성과 내후성 평가에 대한 연구를 수행하였다. 결과적으로 현재 조성의 개량을 통하여 콘크리트 구조용 압광페인트는 적용 대상 구조물 자체의 피로한도를 충분히 소화가능하며, 실 구조물이 갖는 환경적 변화요인에 있어서도 일반적인 환경에서 압광소재의 발광 특성이 열화되는 현상은 관찰되지 않았다. ② 압광페인트를 이용한 구조물의 균열 안전진단 장치는 기존 고비용의 복잡한 장비사용을 요구하는 진단방법 대신 상용제품(CCTV, DVR 등)을 활용한 상시 자동화된 모니터링 시스템이다. 이를 위한 구성으로 크게 영상 촬영 장치, 가이드 레일, UV조사 장치, 영상 분석 소프트 웨어를 개발하였다. 실제적이고 가시적인 구조물의 건전성 모니터링이 가능해짐에 따라 구조물의 비정상적인 결함을 조기에 진단하고 조치할 수 있을 것으로 판단된다. ③ 실제 구조물에 압광페인트를 적용하기 위해 페인트의 대면적 도포 시공은 필수적이며 이는 곧 재료 물성의 개량을 의미한다. 본 연구에서는 최종적으로 페인트 바인더 및 물성의 조정을 통해 공기압을 이용한 분사식 스프레이 공법으로 실제 구조물의 대면적 페인트 도포에 성공하였다. 이를 통해 적용된 페인트는 균질한 품질관리를 바탕으로 성능향상에 기여 하였다.

<table>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td>압광소재, 압광페인트, 응력 및 균열, 구조물건전성 감시</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td>Mechano-luminescence material,
Mechano-luminescence paint, Stress & Crack, Structural health monitoring</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

시각은 인간이 갖는 감각 중 가장 발달되어 있는 기관이며, 이를 통해 사물이나 현상을 인지, 분별하고 사고하여 판단의 결과를 나타낸다. 그러나 지구상에서 발생하는 일상의 많은 물리, 화학, 전기적 변화 및 현상들을 시각적으로 가시화 할 수 있는 정도가 극히 제한되어 있다. 실체의 존재는 잘 알고 있으나 직접적으로 볼 수 없는 많은 현상 중 가장 대표적인 것 중 하나가 응력(stress)에 대한 존재이다. 이론을 바탕으로 구조물의 변형을 통해 대략적인 추론 및 예측은 가능하나 매우 작은 변형이라면 응력의 실체를 인지하기는 매우 어렵다. 따라서 실제 구조물에서는 균열 검출 또는 균열 첨단에서의 응력 인지를 위해 복잡한 장치가 따르는 간접적 방법들을 이용하고 있다. 예를 들어 균열 또는 균열 첨단에서의 응력을 가시화하기 위해 strain gauge, 초음파, X-ray등이 이용되고 있으나, 이러한 방법들은 모두 고비용의 복잡한 기기 장치를 요구한다는 단점이 있으며, 직접 볼 수 있는 것과는 차원이 다른 일종의 간접 측정이다.

본 연구에서는 상술한 근본 문제들을 일거에 해결하기 위해 구조 콘크리트용 압광 페인트(Mechanoluminescence or triboluminescence paint) 를 새롭게 개발하고 이를 콘크리트 균열 검출 시스템에 적용함으로써 도시 인프라 구조물의 시각적 균열 검출을 위한 혁신적인 방법을 개발하고자 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

□ 연구개발의 세부목표

- 콘크리트에 최적화된 압광 페인트의 내피로 / 내후 특성 평가
- 압광페인트를 활용한 균열 검출 시스템 구축 및 영상처리 소프트웨어 개발

□ 연구개발의 범위

① 저가형 균열 검출 시스템 구축 및 압광 영상처리 시스템 소프트웨어 개발
고성능의 고가장비를 벗어난 저가형, 보급형 장비의 적용으로 시스템 구축 및 활용
SW를 통한 실시간 영상처리 및 계측 방법 개발

② 압광페인트 내구성 및 내후성 평가
압광 분말 및 페인트 내피로 특성, S-N 및 da/dN vs ΔK 곡선 평가
압광 분말 및 페인트 내후 열화 특성 평가 및 피로/내후 환경 복합 특성 평가

③ 실 구조물 적용 기술 개발
실제 구조물에 대한 현장 적용 및 성능 평가
실내, 외 구조물에 대한 압광페인트 적용시 시공 방법 및 공정 개발

Ⅳ. 연구개발결과

□ 저가형 균열 검출 시스템 구축 및 압광 영상처리 시스템 소프트웨어 개발
- 실시간 압광 영상처리 및 균열 검출 SW 개발
- 저가형 저조도 압광탐지 시스템 구축 및 적용

□ 압광페인트 내구성 및 내후성 평가
- 압광페이트 내피로 특성평가
- 압광페인트 내후성 특성평가

□ 실 구조물 적용 기술 개발
- 구조형식에 따른 적용성 평가
- 압광페인트 대면적 적용 공법 개발

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

압광소재를 이용한 비파괴 검사기술은 일반 건설분야에 한정되어 있지 않다. 기타 산업재료에 비해 비교적 비균질한 콘크리트 재료에서의 성공적인 적용은, 건설이외 타분야에서의 기술적용을 담보한다. 중요한 소형 기계부품 등의 균열 모니터링 물론이고, 특히 플렌트 등의 대규모 시설의 안전성 모니터링을 위한 연구와 연계 가능하다. 또한 압광 재료가 기본적으로는 형광 재료로부터 출발하므로 국내 디스플레이 산업에서 요구하는 고휘도 형광체 분야의 연구개발에도 연계 가능할 것으로 생각한다.

SUMMARY

Ⅰ. Title

Development of stress evaluation system on the infra structure by using Mechano-Luminescent technology

Ⅱ. The Purpose and necessity of research

The vision is one of the most developed institutions in the human sense. it is allowed to recognize the objects, phenomenon and judge the results of the accident. However, visualize such as physics, chemistry, electrical changes on Earth is limited.

phenomenon that is aware of the existence but can not be seen directly is "stress" .it can be infered and predicted based on the deformation theory of structure. but if deformation is a very small, it is so difficult to recognize the reality of stress. Therefore, people have been using indirect methods using a complex device to recognize the crack detection or crack edge in the actual structure. For example, strain gauge, ultrasound, X-ray, etc. have been used to visualize the crack detection or crack edge of stress. but all these methods require expensive complicated equipments and can not be viewed directly. In short, it is a kind of indirect measurement

In this study, Mechanoluminescence or triboluminescence paint for concrete will be newly developed and applied to the system of crack detection to solve problems

Ⅲ. The scope of research topic

□ Objectives of the research

- To evaluate optimized Mechano-Luminescent paint for concrete fatigue / weather resistance characteristic
- Applied Mechano-Luminescent paint monitoring system for crack detection technology and image processing software application

□ The scope of research

① Build a low-cost system for crack detection and Software development of Mechano-Luminescent image processing system

Development of measurement methods and real-time image processing from the SW, utilization of system construction by equipment of low-cost, except the expensive equipment of high performance

② Weather resistance and durability evaluation of Mechano-Luminescent paint

Characteristics in the Mechano-Luminescent powder and paint endothelial, S-N and da/dN vs △K Curve evaluation Evaluation of Mechano-Luminescent powder and paint weathered characterization, Evaluation of Fatigue / weather resistance environment complex characterization

③ The development of applied technology to the real structure

Performance evaluation and field application of the actual structure, Development of process construction methods applying the Mechano-Luminescent paint about inside, outside of the actual structure

Ⅳ. Result

□ Build a low-cost system for crack detection and Software development of Mechano-Luminescent image processing system
- Real-time Mechano-Luminescent image processing and crack detection SW development
- Building and application for low-cost low-light Mechano-Luminescent detection system

□ Weather resistance and durability evaluation of Mechano-Luminescent paint
- Characteristic evaluation of fatigue of Mechano-Luminescent Paint
- Characteristic evaluation of weather resistance of Mechano-Luminescent Paint

□ The development of applied technology to the real structure
- Applicability estimation in accordance with structural type
- Development of large-area application method of Mechano-Luminescent Paint

Ⅴ. Application

A non-destructive inspection techniques Using Mechano-Luminescent is not limited to the general construction sector. successful application of concrete which is more heterogeneous than other industrial materials will allow application of techniques in other field. it is possible to conduct with study for the safety monitoring applied to large-scale facilities such as Plant and crack monitoring applied to small machine. In addition, it can be used to high-brightness phosphor required in display industry

CONTENTS

Chapter 1. Summary of research ····· 1
1.1 Goal of research ····· 1
1.2 Needs of research ····· 1
1.3 Characteristic of research ····· 3
1.4 Status of technology Internal and External ····· 4
1.5 Position a result of research in the related fields ····· 8

Chapter 2. Research and results ····· 12
2.1 Research strategies and methods ····· 12
2.2 Main research content and result ····· 15

Chapter 3. The final research results and application ····· 154
3.1 Description of each research ····· 154
3.2 Result of critical technology elements ····· 156
3.3 Major research results ····· 158
3.4 Market outlook at Internal and External of the results ····· 164

Chapter 4. Achieved objective of research and effect ····· 167
4.1 Achievement of the final goal of research and development ····· 167
4.2 Technical analysis ····· 172
4.3 Financial analysis ····· 174
4.4 Policy analysis ····· 176

Chapter 5. Utilize research and need for further research ····· 179
5.1 Application plan of research ····· 179
5.2 Need for further research ····· 180
5.3 Total research and future technology roadmap management plan ····· 181

Chapter 6. Reference ····· 182

목 차

제1장 연구개발과제 개요 ····· 1
제1절 연구개발의 목적 ····· 1
제2절 연구개발 필요성 ····· 1
제3절 연구개발의 특징 ····· 3
제4절 국내외 기술개발 현황 ····· 4
제5절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치 ····· 8

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 12
제1절 연구수행 전략 및 방법 ····· 12
제2절 연구수행 내용 및 결론 ····· 15

제3장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 154
제1절 개별 연구성과 설명 ····· 154
제2절 핵심요소기술(Critical Technology Elements)별 성과물 ····· 156
제3절 주요 연구성과 ····· 158
제4절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 ····· 164

제4장 연구목표 달성 및 효과 ····· 167
제1절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 167
제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 172
제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석 ····· 174
제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 176

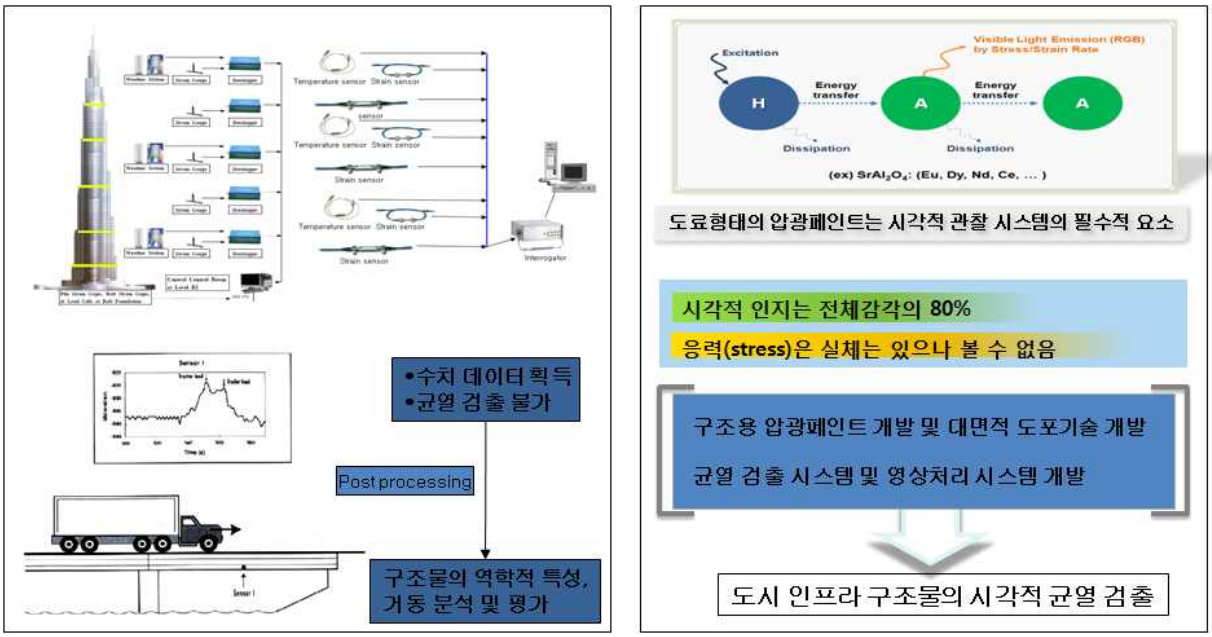
제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 179
제1절 연구성과 향후 활용방안 ····· 179
제2절 추가연구 필요성 ····· 180
제3절 전체 연구 및 향후 기술 관리방안 로드맵 ····· 181

제6장 참고문헌 ····· 182

제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구개발의 목적

본 연구의 최종 목표는 구조 콘크리트에 최적화된 압광 페인트를 새롭게 개발하고 이를 콘크리트 균열 검출 및 감시에 적용함으로써 세계 최초로 구조용 콘크리트 구조물에서의 경제적인 시각적인 균열 검출 기법 및 균열 활동성 평가 시스템을 산업적으로 개발하는 것이다. 최종 목적을 달성하기 위한 당해연도의 목적은 구조 콘크리트에 최적화된 압광 페인트를 개발하고 이를 콘크리트에 적합한 투명페인트로 제작하여 우선 예비도포를 통하여 대략적인 성능을 표준화하는 것이다.



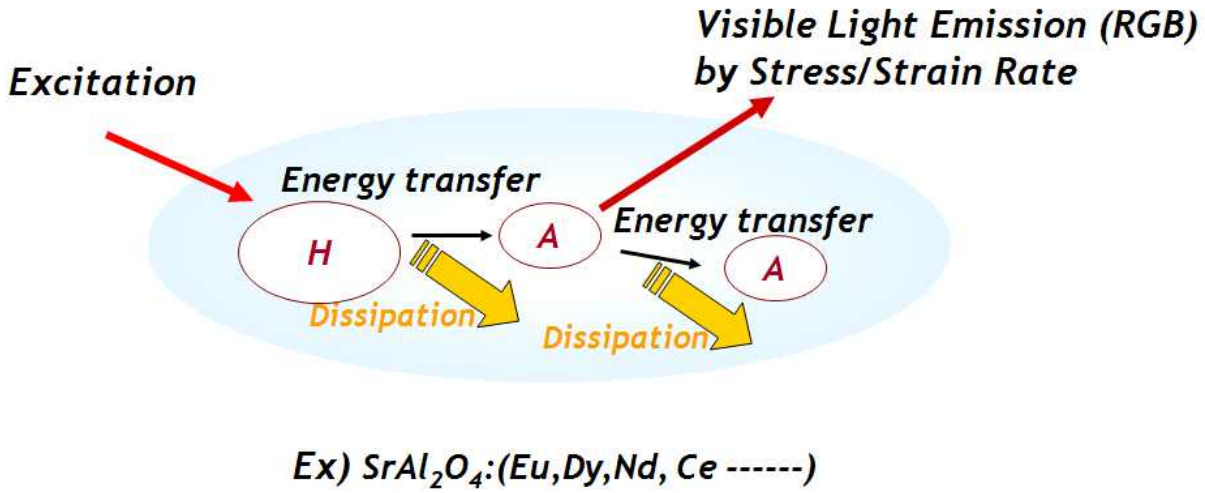
<기존의 모니터링 시스템과 시각적 구조물 건정성 모니터링 계측시스템의 비교>

제2절 연구개발의 필요성

인간이 특정 현상을 이해하는데 있어서 시각적인 인지는 전체의 감각의 약 80% 를 차지한다. 시각은 인간이 갖는 감각 중 가장 발달되어 있는 기관이며 이를 통해 사물이나 현상을 인지, 분별하고 사고하여 판단의 결과를 나타낸다. 그러나 지구상에서 발생하는 일상의 많은 물리, 화학, 전기적 변화 및 현상들을 시각적으로 가시화 할 수 있는 정도가 극히 제한되어 있다. 실체의 존재는 잘 알고 있으나 직접적으로 볼 수 없는 많은 현상 중 가장 대표적인 것 중 하나가 응력(stress)에 대한 존재이다. 이론을 바탕으로 구조물의 변형을 통해 대략적인 추론 및 예측은 가능하나 매우 작은 변형이라면 응력의 실체를 인지하기는 매우 어렵다. 따

라서 실제 구조물(또는 그 외 산업현장)에서는 균열 검출 또는 균열 첨단에서의 응력 인지를 위해 복잡한 장치가 따르는 간접적 방법들을 이용하고 있다. 예를 들어 균열 또는 균열 첨단에서의 응력을 가시화하기 위해 strain gauge, 초음파, X-ray등이 이용되고 있으나, 이러한 방법들은 모두 고비용의 복잡한 Instrumentation을 요구한다는 단점이 있으며, 직접 볼 수 있는 것과는 차원이 다른 일종의 간접 측정이다.

본 연구에서는 상술한 근본 문제들을 일거에 해결하기 위해 구조 콘크리트용 압광 페인트(Mechanoluminescence or triboluminescence paint) 를 새롭게 개발하고 이를 콘크리트 균열 검출 시스템에 적용함으로써 도시 인프라 구조물의 시각적 균열 검출을 위한 혁신적 방법을 개발하고자 한다.



<압광소재의 외부 자극에 의한 에너지(가시광선) 방출>

압광 페인트은 분말형태의 압광소재와 도료형태의 바인더로 구성되는데, 이중 압광소재는 그림1에서 보이는 바와 같이 외부로 부터의 자극(응력)를 받을 경우 가시광선의 형태로 에너지 방출을 하는 물질로서 그 실용화 기술이 비교적 최근에 개발된 물질이다. 이러한 압광 현상은 자연계에 존재하는 현상이나 대부분 물질이 방출하는 에너지량(가시광선)의 크기가 미미하여, 이 현상을 공학 분야에서 응용하기 위해서는 효율이 좋은 압광물질의 합성이 필수적이며, 이를 다시 바인더와 혼합하여 도료형태로 개발해야만 한다. 도료형태의 압광페인트는 본 연구과제에서 목표로 하고 있는 콘크리트 구조물의 표면에 도포하여, 균열의 발생 등의 관찰을 시각적으로 할 수 있는 시스템을 구축하는데 필수적인 요소이다.

본 연구에서 제시하는 가시적 접근방법은 기술적인 측면에서도 전술한 레이져 광탄성(laser-photoelasticity) 등과 같은 고가의 복잡한기기를 수반하는 방법들이나, 음향 특성에 기반을 둔 음향 방출법 등에 비해 탁월한 재현성과 안정성 및 작업 접근성을 가지며, 압광페인트의 경우 상대적으로 부가응력에 비례하여 작동하는 형광센터의 여기가 유일한 발광 기구이므로 균열의 검출 및 활동성 예측과 그 산업적 표준적용 정립에 보다 유리한 독창적 방법임은 불문가지일 것이다.

특히, 본 연구자들의 경우 지난 10 여 년간의 집중적인 연구를 통하여 구조 세라믹 소재용 압광 박막 및 페인트를 세계 최초로 개발하여 이를 일반적인 구조용 알루미나 소재의 취성 파괴 가시화 및 파괴현상 모사에 성공적으로 적용한 바 있으므로, 국토 해양부의 산하 한국건설교통기술 평가원의 지원 아래 기존의 연구 경험을 살려 콘크리트 소재용 압광 페인트 개발 및 적용 기술을 순조롭게 개발할 경우 산업적 측면에서 혁신적인 저가형 콘크리트 구조물에서의 균열 및 균열 활동성 검출 기법과 그 표준 시스템을 세계 최초로 제시할 수 있을 것이다.

제3절 연구개발의 특징

1. 저비용 콘크리트 구조물 건전성 모니터링

현재 콘크리트 구조를 비롯한 건설 구조물은 대형화 및 장수명화 함에 따라, 기존의 비파괴 시험법 등의 기술로는 피로 균열과 같은 결함부를 검출하는 것이 기술적, 경제적으로 매우 어려워지고 있는 현실이며, 압광소재 기술은 저비용의 건전성 모니터링 시스템을 구현하는데 필요한 기술적 경제성을 제공한다.

2. 사회 기반시설 구조물의 안전성 확보

저비용의 구조물 건전성 모니터링이 가능함에 따라, 주어진 비용으로 보다 많은 사회 기반시설 구조물의 안전점검이 가능하며, 따라서 이들 대형 중요 구조물들의 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하고 적절한 조치를 취함으로서 사회 경제적 파장이 큰 대형 사고를 미연에 방지할 수 있다.

3. 콘크리트 균열 거동 연구의 중요성

학문적인 관점에서도 콘크리트 소재의 균열 시스템 변화에 따른 여러 가지 문제들 즉, 준-동적 파괴시의 균열길이 변화에 따른 정확한 평면변형 파괴인성 값의 측정이나 균열 전파 시에 보고되고 있는 브리징 현상에 대한 정성적/정량적 해석 문제등도 일거에 해결할 수 있다.

4. 관련기술 선도로 국가 경쟁력 향상

압광소재 기술은 그 성능상 우수성에도 불구하고 현재 이를 연구하고 있는 국내외 연구팀은 매우 희소하며, 현재 그 연구 성과가 본격적으로 나오기 시작하는 시점임. 건설구조물에 적용한 사례는 현재 없으며, 성공적인 과제 수행의 결과는 압광소재를 이용한 구조물 안전성 평가라는 분야에서 국내외 선두의 기술을 확보할 수 있다.

제4절 국내외 기술개발 현황

1. 국내 기술 및 산업 동향

현재까지 국내에서의 압광 관련 연구 결과들은 본 연구 그룹에 의해 진행된 연구 성과들이 유일하며, 기술적인 측면에서 알루미나 및 지르코니아와 같은 구조 세라믹스 소재용 압광 박막 및 압광 페인트 개발과 이의 적용을 통한 파괴응력 해석에 성공한바 있다. 그러나 산업적인 견지에서 압광 관련 기술 개발의 최종목표는 콘크리트 구조물용 압광 페인트 개발을 통하여 응력을 받고 있는 콘크리트 소재의 표면에 압광 페인트를 적용함으로써 실시간으로 가해지는 균열 첨단에서의 응력 및 전파거동을 가시적으로 표시하고자 하는 것이다. 이를 위해서는 우선 콘크리트 소재용 최적 압광 분말 조성 및 투명 도료 개발과 더불어 페인트 도포 및 적용 기술 그리고 최종적으로 저가형 발광 검출 기법 및 시스템 구성 기술을 개발 하여야 한다. 최종적으로 이러한 기술적 진보를 기반으로 저비용, 고효율 화상 균열 감시 시스템이 구축될 경우 비파괴 및 안전 진단 분야의 산업 활성화에 크게 기여할 것으로 판단된다.

2. 국외 기술 및 산업 동향

지난 10년 동안 이루어진 압광 관련 연구 분야에 있어서의 관련기술 동향은 압광 소재 개발에 매진해온 일본 산업과학 기술 연구소 Dr. C.N. Xu 연구단과 더불어 압광을 이용한 응력 해석에 집중해온 본 연구 그룹이 각각 화학 및 물리 기반에서의 독보적인 연구 성과들을 유이하게 지속적으로 발표 해오고 있다. 따라서 현재 양 그룹의 기술력 및 노하우는 각 분야에서 세계 최고 수준이며, 2009 년부터 진행되어온 양 그룹간의 상호 기술교류는 관련 분야에서의 지속적인 기술 우위를 가능케 하고 있다. 다만 일본의 경우 지진, 해일 등의 사태로 인해 교량 및 콘크리트 구조물의 점검 주기가 짧고 상대적으로 한국에 비해 보수 기준이 엄격하므로 산업적인 측면에서 균열 탐지 및 전파 모니터링을 위한 저비용 기술 개발에 적극적이어서 올해부터 압광을 이용한 구조물 응력 및 탐지 관련 연구가 활성화될 예정이다. 따라서 한국이 동 분야에서의 기술 우위 유지 및 산업화 선점을 위해 기술 투자가 시급한 실정이라 할 수 있다. 현재 압광 재료와 관련된 연구는 국내에서는 본 연구그룹에서 2000년도부터 독자적 연구에 착수한 것을 제외하면 전무한 실정이며, 국제적으로도 그간의 연구 성과들을 고려해 볼 때 1999 년부터 연구를 시작한 일본의 C. N. Xu 그룹 (AIST; 일본 산업기술 종합연구소) 과 본 연구그룹이 단연 독보적인 우위를 점하고 있다고 단언할 수 있다. 특히, 최근 들어 고무적인 것은 구미 선진국은 물론 인도등과 같은 저개발 국가들에서도 동 기술의 산업적 파급력을 인지한 다수의 연구자들이 압광 연구 분야에 뛰어들면서 연구 저변이 급속히 확대대고 있다는 점이다. 이에 본 연구그룹에서는 기존의 기술적 우위를 지속적으로 점유하고 동 연구 분야에 대한 정보 교류를 통한 연구 시너지 효과를 극대화하기 위해 C. N. Xu 그룹과의 장기적인 연구 교류를 시행하여 왔다. 상술한 계획의 일환으로 우선 양 그룹간의 연구원 상호 방문 및 공동 세미

나 개최와 함께, 압광 관련 국제학술지 및 학술대회 개최 등을 본 연구 책임자가 주관하는 IMID (Int. meeting on inf′n display) 등 에서 지속적으로 정례화 시킴으로써 압광 연구의 확산에 크게 일조 하였다. 특히, 2010 년 이전까지의 연구에서는 본 연구 그룹이 압광 소재의 구조 재료 응용에 주안점을 두고 있는 반면 C. N. Xu 그룹의 경우 압광 소재의 기능적 측면에 주력하여 왔으므로 양 연구 그룹의 상호 교류가 압광 소재 연구의 지속적 기술우위 확보라는 측면에서 원할히 진행되어온 것은 주지의 사실이다.

그러나 2010년부터 양 연구 그룹 모두 압광 기술의 건축 구조물 적용을 위한 콘크리트 소재에의 압광 기술 적응 연구로 방향을 돌림에 따라, 점차 경쟁적인 분위기가 조성되면서 연구 교류의 어려움이 발생되고 있다. 이러한 환경변화에도 불구하고 최근에 파악된 AIST 소속의 C. N. Xu 그룹에서의 연구 방향은, 현재 진행되고 있는 본 연구와 유사한 목적 하에 추진된 2010-2012 년의 연구들을 통해 도출된 결과들을 바탕으로 교량 및 건축물과 같은 다양한 실 구조물 적용 결과들을 도출하기 위한 노력과 함께, 개발된 압광 패치 및 압광 페인트 소재의 피로 및 내후성 특성 평가에 매진하고 있는 것으로 알려지고 있다. 이러한 연구 패러다임의 변화는 압광 기술의 상업적 판로를 고려할 때 지극히 당연한 수순으로 판단되며, 특히 압광 기술의 기초 요소 기술이 확립됨에 따라 개발품의 내구성 및 내후성 평가가 상업화의 마지막 걸림돌로 작용 할 것은 이미 1, 2 차년도 연구내용 점검에서 평가 위원들로부터도 수차례 지적된 바 있다. 특히, 압광 세라믹 소재의 반복 발광 동작에 의한 특성 열화 및 투명 페인트 바인더 자체의 내 피로 특성 문제 뿐만 아니라, 건축물의 외부 빗물 노출, 교량의 강물 침식등과 같은 내후 특성에 있어 습기 중에 존재하는 수소의 영향으로 인해 압광 소재의 발광 특성이 급격히 열화될 가능성이 강하게 대두됨에 따라 내피로, 내후성 및 양자의 복합 특성열화 현상에 대한 평가는 실 구조물 적용시 반드시 선행되어야 할 것으로 판단된다. 최근에 파악된 AIST 소속의 C. N. Xu 그룹에서의 연구 방향은, 현재 진행되고 있는 본 연구와 유사한 목적 하에 추진된 2010-2012 년의 연구들을 통해 도출된 결과들을 바탕으로 교량 및 건축물과 같은 다양한 실 구조물 적용 결과들을 도출하기 위한 노력과 함께, 개발된 압광 패치 및 압광 페인트 소재의 피로 및 내후성 특성 평가 쪽으로 급격히 전환되었다.



< 압광 소재에 대한 한국과 일본의 기술 동향 >

3. 특허 동향

현재 압광 재료 연구 관련 특허의 경우 C.N. Xu 박사에 의해 최초 개발된 SAO 계 압광 분말의 경우 동 연구자에 의해 특허 등록을 거쳐 일본의 대표적 전자회사인 소니사에 이전된 상태에 있다. 본 연구진의 경우 이러한 기존 압광 분말 특허를 회피하기 위하여 이미 SAO 계 압광 소재에 타 원소를 첨가하여 특허 회피된 압광 성분을 개발해본 경험이 있으며, 특히 이러한 성분을 세라믹 소재용 투명 페인트 바인더와 혼합하여 압광 페인트 개발에 성공함으로서 관련 특허를 아래와 같이 출원한 바 있다.

1) 특허출원 :10-2005-0115989 에폭시 레진을 이용한 압광 페인트
2) 특허출원 :10-2005-0115990 우레탄 레진을 이용한 압광 페인트

다만, 콘크리트 소재용 투명 페인트 바인더의 개발 및 적용은 향후 성분조정을 통해 본 연구에서 새롭게 개발 되어야 하며, 다양한 성분 조정을 통해 개발된 최적성분을 중심으로 특허 출원할 계획이다. 특히 관련 특허가 아직 구체적으로 출원된 바 없으므로 개발과 함께 선점하는 것이 중요할 것이다. 또한 압광 분말 자체의 경우에도 저가형 균열 검출시스템 구축을 위해서는 기존 압광 분말의 휘도 향상이 필수적이므로 콘크리트용 페인트 바인더 개발에 더하여 압광 분말 자체의 조성 향상을 통한 추가 물질 특허 확보가 필요한 것으로 판단된다.

4. 정부지원정책 현황

가. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

사회기반 시설 구조물의 안전성 확보와 관련하여 아래 표와 같은 법령 및 지침 등이 시행되고 있다.

구분	내용
시설물의 안전관리에 관한 특별법	[시행 2009.12.29] [법률 제9849호, 2009.12.29, 일부개정] [국토해양부(시설안전과)] 시설물의 안전점검과 적정한 유지관리를 통하여 재해, 재난 예방 및 시설물의 효용을 증진
도로기반시설물의 정보 및 시스템 유지관리 지침	[시행 2009.8.24] [국토해양부훈령 제377호, 2009.8.24, 일부개정] [공간정보기획과] 도로기반시설물의 도형 및 속성정보를 효율적으로 유지하고 시설물의 범용 및 통합정보시스템을 원활히 운영 · 관리하는데 필요한 사항을 규정

나. 정부지원 정책사업 종류와 현황

구분	내용
교량・터널 등 구조물 안전관리 (2010-11-25)	- 교량 및 터널의 안전점검 및 개축・보수보강 시행 - 특수교량(현수교・사장교)의 위탁관리 - 국도상 저등급 교량(DB18이하, 416개교) 성능개선 추진 - 내진설계 미반영된 국도상 교량(682개교)의 보수・보강 추진 - 홍수시 교량 안전대책 추진 - 교량관리 전문직원 양성
건설교통 R&D 사업현황 (2010-11-22)	- 건설기술혁신사업: 건설생산성 향상을 위한 첨단 건설재료개발, 프로세스 혁신 및 고속도로·교량 등 기존 시설물 고도화, - 재해대응을 위한 물관리시스템 혁신 등 건설기술 전반의 혁신 도모
시설물 안전관리 제도 (2010-11-22)	- 시설물별 안전 및 유지관리체계 - 시설물의 적정한 안전 및 유지관리를 위한 조직·인원 및 장비의 확보에 관한 사항 - 안전점검 및 정밀안전진단의 실시에 관한 사항 - 안전 및 유지관리에 필요한 비용 및 예산의 확보에 관한 사항 - 긴급사항 발생시 조치체계에 관한 사항 - 시설물의 설계·시공·감리 및 유지관리 등에 관련된 설계도서의 수집 및 보존에 관한 사항 - 시설물별 안전 및 유지관리실적에 관한 사항

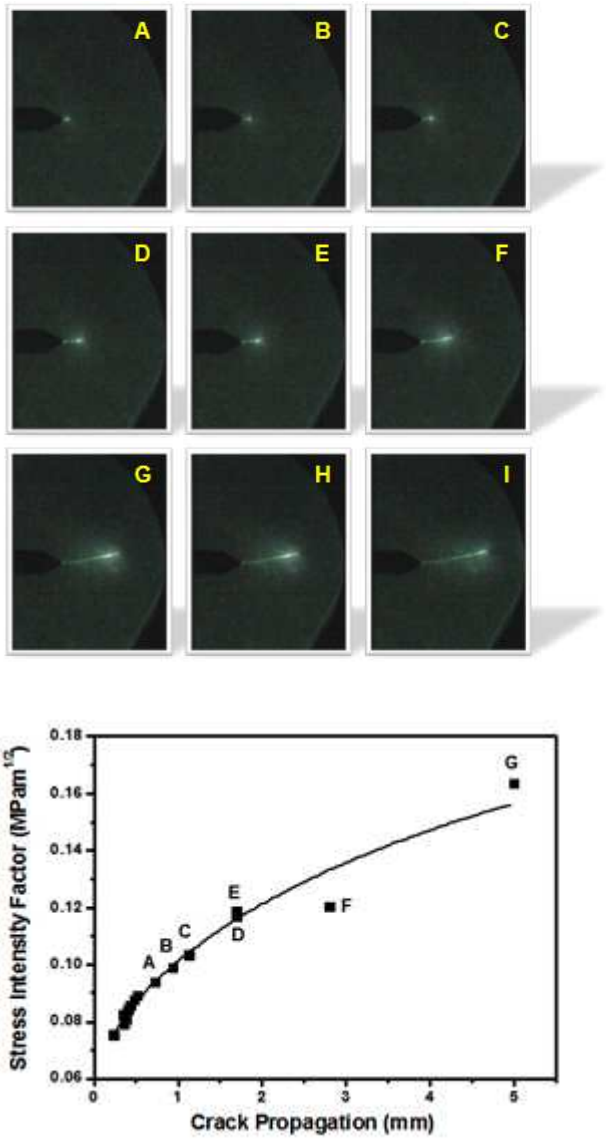
제5절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

1. 연구개발 결과

현재 본 연구자들에 의해 개발된 압광소재 관련 연구실적은 크게 아래 표와 같이 알루미나 구조 세라믹 및 지르코니아 구조 세라믹 관련 연구 성과들로 요약될 수 있다.

구분	연구개발실적
구조용 알루미나 소재연구	알루미나 구조 세라믹 소재용 압광 박막 개발
	알루미나 구조 세라믹 소재용 압광 페인트 개발
	알루미나 구조 세라믹 소재용 균열 검출 시스템 개발
	알루미나 구조 세라믹 소재용 브리징 응력 평가 기법 개발
구조용 지르코니아 소재연구	지르코니아계 구조 세라믹 소재용 압광 페인트 개발
	지르코니아계 구조 세라믹 소재용 브리징 응력 검출 기법 개발
	지르코니아계 구조 세라믹 소재용 브리징 응력 평가 기법 개발

구조용 알루미나 소재 관련 연구들 에서는 압광 세라믹 재료를 이용하여 일반적인 속도로 전파되는 구조용 알루미나 소재에서의 준-동적 균열을 시각적으로 검출하는 새로운 기법을 개발함으로서, 동 소재에 있어 균열 영향부에서의 브리징 거동과 관련된 파괴 기구를 새롭게 밝혀내었다. 구조용 지르코니아 소재 관련 연구에서는 압광 기술을 이용하여 동 소재의 장-균열 시스템 조건하에서 발생되는 급작스러운 준-동적 균열 전파현상을 매크로 영역에서 측정하고, 동시에 파괴 시 수반되는 변태 영역의 발생을 연속적으로 촬영하여 가시화하였다. 특히, 압광 화상에 대한 적분 분석 기법을 새롭게 개발함으로써 정확한 균열 위치를 선정하여, 준-동적 상태에서 수 십 m/sec. 수준으로 전파되는 고속 균열의 R-곡선 거동을 정량적으로 제시하였다.



세라믹 시편의 균열진전의 고속촬영 영상 및 stress intensity factor
(김지식외, Acta Mater. 51 6437 (2003)

위의 압광소재 관련 연구들은 세라믹 재료에 적용된 기술이며, 이를 콘크리트 재료에 적용하기 위해서는 콘크리트 재료 특성과 구조 및 진단 등에 관한 전문적인 지식이 필요하며, 이와 관련된 본 연구진의 대표적인 연구 실적은 다음과 같다.

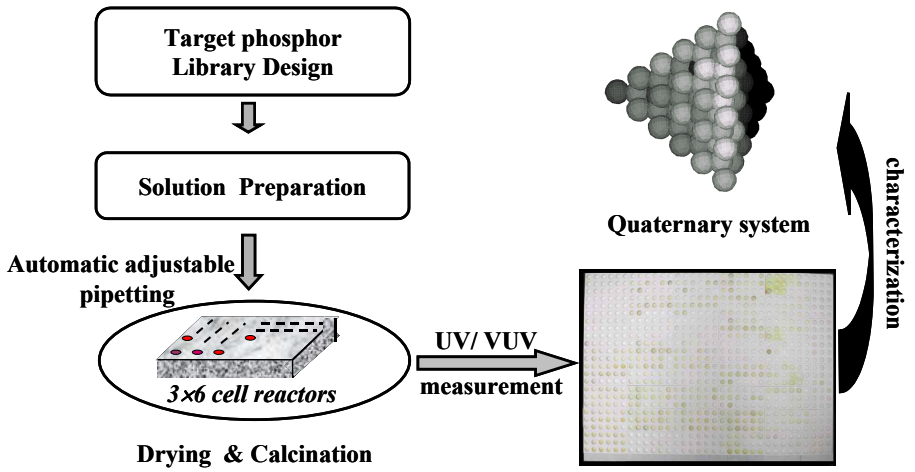
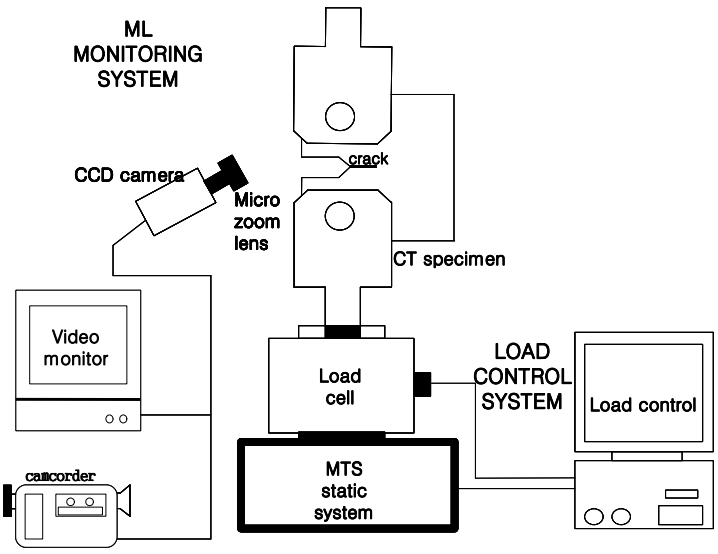
구분	연구개발실적
콘크리트 재료 및 구조 분야	An Accurate and Quick Measuring Method for Mix Proportion of Concrete Paste in Construction Site [8]
	Property Research of Carbon Fiber Reinforced High Performance Concrete Containing Limestone Powder[11]
	탄소섬유보강콘크리트의 일축 압축재하시의 역학적 특성에 관한 실험적 연구[22]
	구속응력에 따른 연성특성에 주목한 3축 응력상태의 콘크리트 구성모델[24]
구조물 센싱 및 건전성 평가 분야	Research on Early Age Deformation of High Performance Concrete by Fiber Bragg Grating Sensor[18]
	System identification of a building structure using wireless MEMS and PZT sensors[28]
	Stuctural damage detection in continuum structures using successive zooming genetic algorithm[29]
	Estimation modal of loads using structural response[30]

2. 연구진의 인적 능력

기술개발내용	연구진 인적 구성
압광소재를 이용한 콘크리트 압광 페인트 개발	▪ 압광 페인트 기술 개발을 위한 최적 인적구성은 압광 소재 분야 3년 이상 연구개발 경험을 가진 전문가로, 압광소재 자체기술과 바인더와의 결합을 통한 페인트 개발 기술을 보유한 전문가 각 1명 이상 필요함. ▪ 현재 압광소재 및 압광페인트 개발 관련 국내 연구 인력은 본 연구진 구성원인 경북대 김지식교수와 순천대 손기선교수가 유일함. 이들은 재료 특성 분야에서 가장 권위있는 Chem. Mater. [IF=5.104][16] 등에 다수의 논문을 게재하는 등 관련 분야에서 뛰어난 국제적인 연구 이력을 보유[22-24]하고 있음. 특히 이들은 세계 최초로 구조용 세라믹용 압광 페인트 개발에 성공하였으며, 동 페인트를 구조용 세라믹에 성공적으로 적용한 바 있음.
압광 페인트를 이용한 콘크리트 구조물 응력평가 기술 개발	▪ 압광 페인트를 이용한 콘크리트 응력 응력평가 기술개발을 위해서는 5년 이상의 경험을 가진 콘크리트 시공 및 구조 전문가가 2인 이상 필요함. ▪ 경북대 김지식 교수는 압광 페인트를 이용한 응력평가 관련 연구에 있어서 기계적 특성분야 분야의 해당 저널 중 가장 권위있는 Acta materialia [IF=3.549][12] 등에 다수의 논문을 게재하는 등 관련 분야에서 아래와 같은 국제적인 연구 이력을 보유 [17-21]하고 있음. ▪ 금오공대 장일영 교수는 콘크리트 구조해석, 재료 및 시공 분야 연구에 있어서 20여년의 이상의 경력을 가지고 있으며, 해당 분야에 뛰어난 연구성과를 보유하고 있음[36-47].

3. 연구기기·장비·시설 구축 수준

본 연구의 성공적인 수행을 위해서는 기본적으로 크게 콘크리트 소재에 적합한 고-반응성 압광 페인트 바인더의 개발 시스템과 함께 콘크리트 소재에 적용된 압광 페인트로부터 발광 현상을 관찰 기록하기 위한 기초적인 화상기록 시스템이 필수적이라 할 수 있다. 본 연구팀은 선행 연구를 통하여 아래의 두 가지 개발/평가 기본 시스템을 구축한 상태에 있으며, 그 운용에 있어서도 여타 구조용 알루미나 소재의 평가에 성공적으로 적용한 바 있다.

<table>
<tr><td rowspan="2">재료화학
및 합성
분야</td><td>본 연구에서 채택한 <u>용액 조합 화학 시스템</u>은 미리 의도한 대로 구현된 라이브러리와 연결되어 컴퓨터로 자동제어 되는 용액분사 기능을 이용하여 다양한 화학조성물을 합성 평가하고, 그 결과를 다시 라이브러리로 재구성하여 제시하는 자동 기능으로 설계되었다.</td></tr>
<tr><td> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="2">건축물리
특성평가
분야</td><td><u>화상 기록 시스템</u>의 경우는 그 기능에 있어서는 마이크로 줌 렌즈가 부착된 저 조도용 초고속 카메라를 이용하여 균열 길이 및 형상의 변화와 이에 따른 균열 첨단에서의 압광 특성 변화를 총체적이고 또한 세부적이며, 연속적으로 기록할 수 있도록 설계되었다.</td></tr>
<tr><td> 
</td></tr>
</table>

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구수행 전략 및 방법

1. 1차년도 연구수행 전략 및 방법

연 차	연구 내용	연구 결과
1차 년도	기존의 $SrAl_2O_4$:Eu 압광분말의 활성촉진인자로 란탄계열 원자들 중 형광특성 개선에 효과적인 것으로 알려진 Dy 및 Nd가 0 에서 0.02몰까지 첨가된 SAO 압광분말을 고상법으로 제조한 후 실제 압광특성을 평가하였다.	비교적 압광특성이 재현성 있게 개선된 조성을 결정할 수 있게 되었으며, Dy 및 Nd의 첨가 비용 등을 고려해 고상법에 의한 압광분말의 최적 조성은 $SrAl_2O_4$: $Eu_{0.01}$, $Dy_{0.01-0.015}$, $Nd_{0-0.01}$ 구간으로 판단된다.
	발광 특성이 향상된 고상 합상 압광분말을 페인트 형태로 제조하기 위하여 본 연구에서는 콘크리트 전용 투명 페인트를 추가적으로 개발하였다.	페인트의 영율은 2.5~3.2 GPa 로 세라믹소재용페인트 대비 약 15%이상 성능이 개선되고, 인장강도가 40 - 70 MPa, 최대 2.5% 내외의 허용연신율을 가졌다.
	폭넓은 범위의 하중 및 하중속도조건에서 발광 현상을 정량적으로 측정하고, 이를 수학적 예측 모델을 기반으로 하여 매크로한 관점에서 발광기구와 연관하여 예측할 수 있는 이론적/실험적 기반을 동시에 확립하고자 하였다.	SAO 소재의 발광현상은 동적 하중변화에 의해 발광강도가 변화하한 반면, 정적 하중의 역할은 제한적이었다. 그리고 압광 현상을 기술하는 가장 적절한 모델은 하중속도 항을 포함하는 형태의 속도방정식으로 판단되며, 실험결과 또한 계산된 속도방정식 결과와 일치 하였다.
	압광 재료를 이용하여 파괴실험 시 콘크리트의 균열진행과정을 시각화하였으며, 그 실험 데이터를 바탕으로 하중-변위 곡선과 하중변화에 따른 균열진행과정 및 시간에 따른 균열진행에 대해 검토하였다.	매우 빠르게 진행되는 균열을 시각화할 수 있었으며 균열이전의 균열선단에서의 미세균열도 확인할 수 있었고, 실험체별로 고속카메라로 촬영된 이미지에 대하여 하중 및 변위 값을 동기화할 수 있었으며, 그에 따른 균열길이도 측정할 수 있었다. 또한, 균열 진행속도에 비해 하중이 감소하는 속도가 현저하게 느리다는 것을 알 수 있었다.

2. 2차년도 연구수행 전략 및 방법

연 차	연구 내용	수행 전략 및 방법
2차년도	기존의 에폭시 및 우레탄 기반형 압광 페인트 제품에 이어 기존 압광 페인트 보다 소재 적용 범위가 높고(현장 적용성이 우수) 가격 경쟁력이 있는 아크릴 기반형 압광 페인트를 추가적으로 개발함으로써 기존 페인트의 주요 3 가지 성분에 기반하는 콘크리트용 압광형 페인트 개발을 연구하였다.	아크릴 수지형 압광 페인트의 경우, 압광 분말과 페인트 사이의 흡착력을 증가 시키고, 페인트 층과 적용 소재 사이의 접착력을 증가 시킴으로서 강도 및 탄성계수 감소에 따른 상대적인 발광량 감소를 충분히 저지 할 수 있다. 여기에 더하여 아크릴 수지형 압광 페인트의 경우, 연성이 기존의 에폭시 레진형 압광 페인트에 비해 2 배 가량 개선 되었으므로, 이러한 장점이 금속 및 폴리머와 같은 고연성 소재에서의 적용에 있어 유리한 점으로 작용할 수 있다.
	압광 분말 및 수지 사이의 밀착력 개선 공정을 통해 새롭게 개발된 아크릴 레진 기반형 압광 페인트를 이용하여 콘크리트 소재에 적용 가능한 1-2 $MPam^{1/2}$ 수준의 저 응력 확대 계수 범위에서도 균열 첨단 응력장 관찰이 가능한 정지 균열 탐지 기술을 연구하였다.	압광 분말 및 수지 사이의 밀착력 개선을 통해 콘크리트 소재에 적용 가능한 1-2 $MPam^{1/2}$ 수준의 저 응력 확대 계수 범위에서의 균열 첨단 응력장 관찰이 가능한 정지 균열 탐지 기술이 개발되었다.
	압광 페인트를 이용한 파괴실험을 통해 콘크리트의 균열진행과정을 시각화하고, 그 실험 데이터를 바탕으로 하중-변위 곡선과 하중 변화에 따른 균열길이, 균열양상, 균열속도, 균열위치 등을 검토하여 영상처리 프로그램을 통하여 균열의 역학적 특성을 쉽게 찾을 수 있도록 연구하였다.	압광페인트의 발광현상에 의해 계측된 균열양상과 실제 실험체의 균열양상을 비교한 결과 균열의 형상이나 위치가 거의 일치하는 것을 확인하였으며, 검출된 균열은 영상처리 프로그램을 통해 균열 속도를 정확하게 측정함은 물론, 육안에 의해 계측된 균열의 길이 및 위치보다 더 정확하고 정밀하게 측정할 수 있었다. 압광페인트를 철근 콘크리트 구조물의 표면에 적용하여 균열에 대한 해석을 이전의 방법보다 더욱 정확하게 할 수 있었으며, 이는 저비용의 건전성 모니터링 시스템을 구축하는 계기를 마련하였다.
	기존의 균열 관찰을 위해 사용되었던 초고속 균열 화상 획득 시스템의 경우 연구용으로써 많은 장점을 가지고 있으나, 장비가격 자체가 상당히 고가이며, 장비 구동에 아주 숙련된 사용자가 필요함은 물론 장비의 중량 및 부피가 현장에서 사용하기에는 적합하지 않다. 본 연구를 통해 실험실은 물론 현장에서 사용하기에 적합한 성능을 확보하는 소형 중고속 균열 관찰 시스템을 연구하였다.	실험실은 물론 현장 계측용으로 사용하기에 적합한 성능을 가지는 소형 중고속 균열 관찰 시스템을 구축하였다. 현재 개발된 시스템은 실험실 수준에서 사용가능하게 개발, 완료 단계에 있으며 구동 프로그램의 안전화 작업이 진행 중이다. 구동 프로그램의 안정화 작업이 완료된 후 실험실 수준의 균열 검출 실험에 투입을 할 예정이다.

3. 3차년도 연구수행 전략 및 방법

연 차	연구 내용	수행 전략 및 방법
3차년도	실시간 압광 영상처리 및 균열 검출 SW개발	- MatLab, LabView를 활용한 응용 프로그램 개발 - 획득한 영상을 디지털 신호로 변환하여 영상간의 연산을 통한 영상품질의 개선 및 특성의 극대화 실현 - 균열(패턴)의 정확한 위치 및 발광량에 따른 응력의 변화를 수치적으로 표현
	저가형 저조도 압광탐지 시스템 구축 및 적용	- 기존 상용품 수준의 저가형 저조도 CMOS CCTV 카메라와 24Ch 독립형 영상저장장치를 활용 - 가이드레일과 촬영모듈의 기계적 연결을 통한 자동화 시스템 구축 - 원격제어가 가능하여 연속 및 정지 상태에서 모니터링 가능 - 카메라에 렌즈 부착시 전역 및 국부지역 모니터링 가능
	압광페인트 내피로 특성 평가	- 압광분말 및 페인트 내피로 특성 - S-N 및 da/dN vs ΔK 곡선 평가
	압광페인트 내후성 특성 평가	- 압광분말 및 페인트 내후 열화 특성 평가 - 피로/내후 환경 복합 특성 평가
	구조형식에 따른 적용성 평가	- 현장적용 수준의 대형부재 제작 및 적용 - 구조물의 수직면 및 천장면 도포 - 평면 및 곡선부에 대한 가능성 평가
	압광페인트 대면적 적용 공법 개발	- 스프레이 분사장치 도입 - 분사조건 및 형식, 도포성능 평가 - 분사 가능한 형태의 페인트 물성조정 - 분사 후 부착력 및 발광 성능 확인

제2절 연구수행 내용 및 결론

1. 1차년도 연구수행 내용 및 결론

가. 콘크리트 소재용 압광 페인트 개발

(1) 서 론

본 연구는 압광소재를 이용한 구조물의 균열 안전진단장치 및 그 방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 고비용의 복잡한 기계사용을 요구하는 각종 측정 및 진단방법 대신에 저비용으로 구조물 건전성 모니터링이 가능함에 따라 이들 대형 중요 구조물들의 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하고 이에 따른 적절한 조치를 취함으로써 사회 경제적 파장이 큰 대형사고를 미연에 방지할 수 있는 압광소재를 개발하고 이를 이용한 구조물의 시각적인 균열 안전진단장치 및 그 방법을 새롭게 제시하고자 하는 것이다[1-3]. 주지하다시피 일반적으로 인간이 현상을 이해하는데 있어서 시각적인 인지는 전체의 감각의 약 80%를 차지한다. 즉 무엇이든지 눈으로 확인하려는 본능이 있다. 그러나 우리가 다루고 있는 여러 물리현상들은 볼 수 없는 것들이 대다수를 차지한다.

그 실체의 존재는 익히 잘 알고 있으나 직접적으로 볼 수 없는 물리 현상 중에 가장 대표적인 것이 응력(stress)이다. 물론 변형을 통해 대략적인 추론은 가능하나 눈으로 식별하기 어려울 정도의 작은 변형이라면 응력의 실체를 인지하기는 매우 어려울 것이다. 따라서 실제 연구현장이나 산업현장에서는 응력인지를 위해 복잡한 부수 장치가 따르는 간접적 방법들을 이용하고 있다. 예를 들어 응력을 가시화하기 위해 변형률 게이지(strain gauge), 초음파, X-선(X-ray)등이 이용되고 있으나, 이러한 방법들은 모두 고비용의 복잡한 장치(Instrumentation)을 요구한다는 문제점이 있으며. 더욱이 직접 볼 수 있는 것과는 차원이 다른 일종의 간접 측정이라는 문제점이 있었다[3-10]. 특히, 콘크리트 구조를 비롯한 건설 구조물은 대형화 및 장수명화함에 따라 기존의 비파괴 시험법 등의 기술로는 피로 균열과 같은 결함부위를 검출하는 것이 기술적, 경제적으로 매우 어려워지고 있는 현실에 있다. 본 연구는 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 고비용의 복잡한 기계사용을 요구하는 각종 측정 및 진단 방법 대신에 저비용으로 구조물 건전성 모니터링이 가능함에 따라 이들 대형 중요 구조물들의 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하고 이에 따른 적절한 조치를 취함으로써 사회 경제적 파장이 큰 대형사고를 미연에 방지할 수 있고, 콘크리트 소재의 균열 시스템 변화에 따른 준-동적 파괴시의 균열길이 변화에 따른 정확한 평면변형 파괴인성 값의 측정이나 균열전파 시에 보고되고 있는 프로세스 영역 등에 대한 정성적/정량적 해석문제 등을 일거에 해결할 수 있는 압광소재를 이용한 구조물의 시각적 균열 안전 진단장치 및 그 방법을 제공함에 그 목적이 있다[10-16].

현재까지의 주목할 만한 관련 연구결과들은 본 연구자들에 의해 압광분말을 폴리싱용 레진과 혼합하거나 직접 압광분말을 소결하여 만든 벌크형 압광재료들을 다루는 방식, 또는 구조

세라믹용 압광 페인트 적용을 통한 파괴인성 정량적 측정 등이, 진행된 것이 거의 전부라 할 수 있다[17-24]. 그러나 이러한 형태의 연구들은 그 적용성에 있어서 발광에 필요한 임계 응력[17], 기초적인 파괴현상의 가시화등과 같은 매우 학술적인 목적에만 제한되며[19], 상용화를 위한 실제 콘크리트 구조물의 평가에 이용하고자 하는 것은 사실상 본 연구를 통해 진행되어야 하는 시작단계에 있는 실정이다.

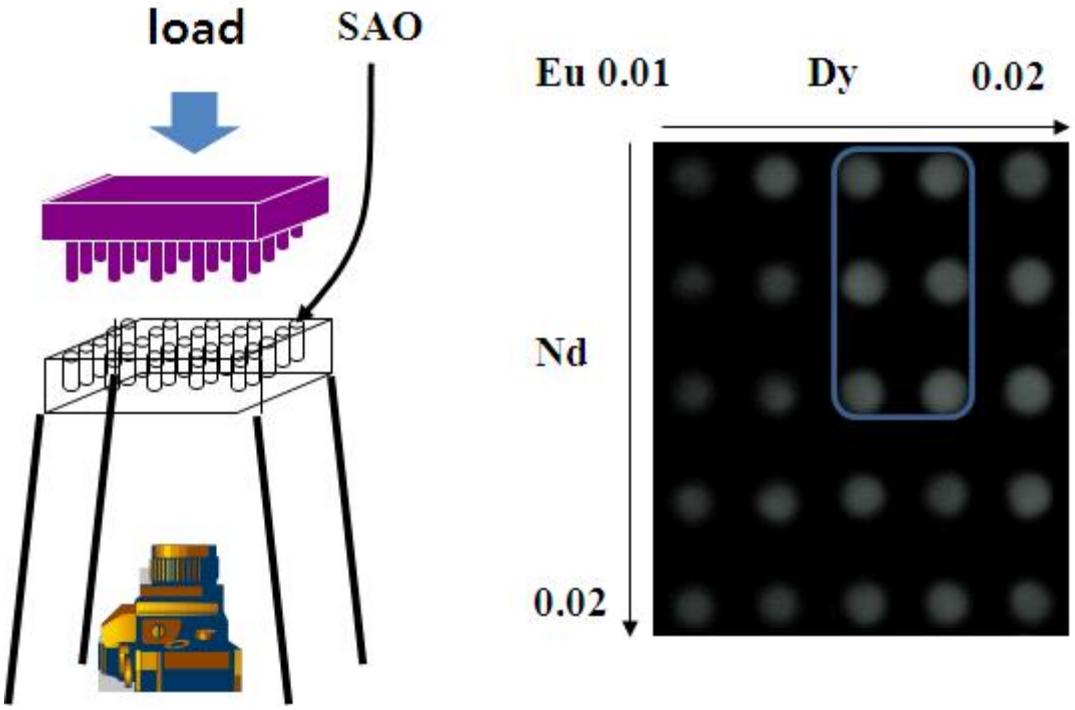
특히, 압광재료가 콘크리트용 압광박막 또는, 페인트의 형태로 건축 구조용 재료의 표면에 적용될 수만 있다면 다양한 재료로 구성된 실 구조물의 안정성을 총체적으로 평가 가능하다는 점에서, 콘크리트용 압광 페인팅 기술의 개발은 상업적으로 매우 유용하다 할 것이다[24-32]. 따라서 본 연구에서는 콘크리트용 고효율 압광분말의 조성을 최적화함으로써 여기-압광(Photo-Mechano- Luminescent; P-M-L) 효율을 개선하고, 이를 콘크리트 소재용 투명 페인트에 혼합함으로써 콘크리트 소재용 압광페인트를 새롭게 개발하고자 하였다. 궁극적으로는 이를 콘크리트 파괴 시험편의 표면에 육성함으로써, 외부에서 가해진 응력장과 그로 인해 발생되는 콘크리트 시편의 동적 균열전파 현상을 가시화 해보고자 하였다.

(2) 압광분말 조성 최적화

상술한 목적 하에 본 연구에서는 우선 기존의 SrAl2O4:Eu 압광분말에 활성 촉진 인자로써 란탄계열 원자들 중 형광 특성 개선에 효과적인 것으로 알려진 Dy 및 Nd 가 0 에서 0.02 몰까지 첨가된 SAO 압광분말을 기존의 액상법이 아 닌 고상 법으로 제조한 후 실제 압광 특성을 평가하기 위하여 그림 1 (a) 와 같은 평가 시스템을 구축하였다. 압광 발광 평가 시스템은 그림에서 살펴 볼 수 있듯이 여러 조성의 압광분말을 한 번에 평가할 수 있도록 각 조성에 해당되는 독립적인 5x5 열의 총 25 개 컨테이너로 구성되어 있으며, 기존의 인장 압축 시험기에 장착되어 5x5 열의 총 25 개 누름 판으로 구성된 가압 상판이 조성 컨테이너 내부의 압광분말에 압축 응력을 가하도록 설계되어 있다. 이때 발광 현상을 효율적으로 기록하기 위하여 조성 컨테이너는 투명 재질로 제작되었으며 컨테이너 하부에 설치된 4 개의 지지대가 하부 응력을 지탱토록 하고, 동시에 컨테이너 하부의 빈 공간에서 디지털 카메라로 발광 현상을 기록하도록 설계되었다[33-34].

동 시스템을 이용하여 5kN 하중 하에서의 실측된 압광분말 발광 특성은 그림 1 (b) 에 나타내었는데 주목할만한 점은 기존의 용액 합성 방법에 의해 제조된 분말 특성과 비교적 일치하는 결과를 보였다. 일반적으로 액상법에 의해 제조된 형광 및 압광분말의 경우 재현성 및 대량 합성에 있어 심각한 결함을 보여 왔으며, 이러한 제조 공정상의 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 1300°C 의 질소 및 수소 분위기에서 SrO Al2O3 Eu2O3 Dy2O3 Nd2O3 혼합 분말을 고상 소결하였다. 따라서 상술한 결과로부터 대량 합성에 적합하며 동시에 기존AO 형 압광분말에 비해 비교적 압광 특성이 재현성 있게 개선된 조성을 결정할 수 있게 되었다. 보다 상세한 결과는, 그림 1 (b) 에서 살펴 볼 수 있듯이 Eu 0.01 몰 조성에 Dy 0.01 몰이상 첨가될 경우 압광 성능이 월등히 개선되었으며, 특히 Dy 의 경우 0.02 몰 첨가시까지 지속적인 특성 향상이 관찰되었다. 다만 Dy 의 경우 0.01 몰 첨가까지의 특성 향상에 비해 0.01에서 0.02 몰

구간에서의 특성 개선은 두드러지지 않는 것으로 생각되었다, 한편, Nd의 경우에는 0 에서 0.01 몰 구간에서의 압광 성능이 비교적 완만하게 상승되어 0.005 몰에서 0.01 구간에서 비슷하게 측정되었으며, 특히 0.015 몰 이상 첨가될 경우 압광 성능이 오히려 감소하는 결과를 보였다. 따라서 Dy 및 Nd 의 첨가 비용등을 고려할 때 고상법에 의해 제조된 압광분말의 최적 조성은 SrAl2O4:Eu0.01,Dy0.01-0.015,Nd0-0.01 구간으로 판단된다.



(a) (b)

그림 1 Equipment and measurement of ML-intensity in SAO powder produced by solid state reaction.

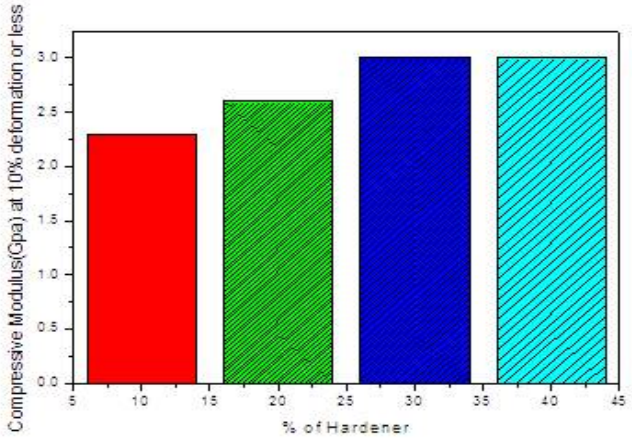
(3) 콘크리트용 투명 페인트 바인더 개발

발광 특성이 향상된 고상 합상 압광분말을 페인트 형태로 제조하기 위하여 본 연구에서는 콘크리트 전용 투명 페인트를 추가적으로 개발하였으며, 특히 콘크리트 표면에서의 응력 전달시 균열 탐지가 용이하도록 기존의 구조 세라믹 소재용 투명 페인트 보다 기계적 성능이 개선된 콘크리트 소재용 레진 투명 페인트에 주안점을 두어 합성하였다. 상술한 목적으로 레진형 압광 페인트 소재로는 주로 30~90% 중량의 에폭시 레진과, 아민 경화제 계열의 제파민 또는 이를 포함하는 9~30% 중량의 경화제와, 1~30 중량%의 SrAl2O4(Eu, Dy, Nd) 압광세라믹 분말과, 10% 중량 이하로 UV 흡수제, 스립 및 레벨링제, 가소제, Xyele, Kocosol 100, Toluene, Butyle Acetate, Pigment로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상인 기타성분으로 조제하였다. 이때 상기 압광세라믹 분말 중량:(레진 중량+경화제 중량)의 비가 0.5:9.5 ~ 5:5의 범위내로 조절되어진 경우에 콘크리트 구조물의 균열탐지가 가능한 것으로 판단된다. 이때, 압광분말의 중량비가 0.5 이하일 때 는 압광특성이 눈에 보일 정도가 되지 못하므로 감지가 불가능하

며, 5 이상이면 분말량이 지나치게 많아져서 페인트에 잘 섞이지 않고 덩어리로 뭉치게 되어 스프레이나 붓질이 잘 되지 않았다. 상기 기타 성분은, Tinuvin 293와 같은 UV 흡수제, EFKa LP 3033과 같은 스립 및 레벨링제, 10% DBTDL/Butyl Cellesolve와 같은 가소제, Xyele, Kocosol 100, Toluene, Butyle Acetate, Pigment와 같은 압선안료로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상인 것이 좋으나 전반적인 페인트 특성에 미치는 영향은 미미하였다. 이들 기타 성분의 대부분은 Pigment가 차지를 하며 나머지 성분들의 함량은 상대적으로 미량이다. 상기 경화제는 제파민인 것이 바람직하였다. 즉, 에폭시 레진과 제파민은 각각 주재료와 경화제로 작용하는데, 주재료인 에폭시 레진의 함량이 증가하고 경화제인 제파민의 함량이 감소하는 경우 페인트의 강도가 감소하게 된다. 반대로 주재료인 에폭시 레진의 함량이 감소하고 경화제인 제파민의 함량이 증가하면 페인트의 강도가 증가하게 된다. 보다 자세한 기계적 특성 변화는 그림 2 및 그림 3에서 살펴 볼 수 있는데, 압광 페인트의 영율은 인장 영율의 경우 그림 2 (a)에서 나타났듯이 경화제 비율에 따라 크게 변화하지 않았으나 가장 중요한 압축 영율의 경우 약 30% 첨가 수준까지 증가되어 이후포화 되는 것을 알 수 있다. 이러한, 페인트 영율을 페인트를 최종적으로 도포하게 되는 모재의 강도와 비례하도록 조절 후에 파괴 실험을 하면 가장 좋은 압광특성이 얻어지게 되므로 인장 및 압축 영율의 조절이 향후 페인트 적용 시 균열탐지의 성패 여부를 결정하게 되며, 콘크리트 소재의 특성을 고려햐여 본 연구에서는 영율 개선에 주안점을 두어 투명 페인트 개발을 시도하였다. 그 결과 본 연구에서의 페인트의 영율은 대개 2.5 ~3.2 GPa 사이에서 변화하였으며 기존의 세라믹 소재용 투명 페인트 대비 약 15% 이상의 성능 개선이 이루어졌음을 알 수 있다. 여기에 더하여, 두 성분의 비율로 페인트 강도 및 연성 또한 조절하게 되는데, 페인트 인장강도 또한 페인트를 최종적으로 도포하게 되는 모재의 강도와 비례하도록 조절 후에 파괴 실험을 하면 가장 좋은 압광특성이 얻어질 수 있다. 특히 본 연구에서 개발된 페인트의 인장강도는 대개 6000 ~ 10000 PSI (40 - 70 MPa)수준 이므로 순수 콘크리트 소재의 균열 전파에 소요되는 8 MPa 을 상회하므로 강도적 측면에서 균열 탐지에 충분히 적용 가능할 것으로 판단되었다. 연성적 측면에서도 에폭시 레진:경화제의 비를 대략 3:1내외로 조절하는 경우, 최대 2.5% 내외의 허용 연신율을 가지게 되므로 콘크리트에서 발생되는 균열 첨단에서의 프로세스 존뿐만 아니라 직 균열에서의 파괴 과정을 충분히 측정할 수 있을 것으로 예상되었다.

따라서 대략 30% 정도의 포함된 레진형 콘크리트용 투명 페인트가 압광분말에 응력이 가장 효과적으로 전달되어 가장 바람직한 페인트 성능을 나타내게 된다. 아울러, 더욱 바람직하게는, 압광분말 중량:(레진 중량 + 경화제 중량)의 비가 목적에 따라 1:9 ~ 3:7 구간인 경우에 가장 우수한 압광 특성을 발휘 하였다. 또한, 레진형 콘크리트 압광 도료와 함께 도포 성능이 개량된 우레탄형 콘트리트용 압광 페인트 소재로(20)는 10~75중량%의 우레탄 레진과 Desmodur N-330, Xylene, Toluene으로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상으로 4~30 중량%의 경화제 및 1~30 중량%의 SrAl2O4(Eu, Dy, Nd) 압광 세라믹 분말, 그리고 20~40 중량% 이하로 UV흡수제, 스립 및 레벨링제, 가소제, Xyele, Kocosol 100, Toluene, Butyle Acetate, Pigment로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상인 기타성분을 구비하는 성분으로 조합되어, 스프레이 도포형 압광 페인트를 사용할 수도 있음은 물론이다. 이때, 우레탄형 도료 또한

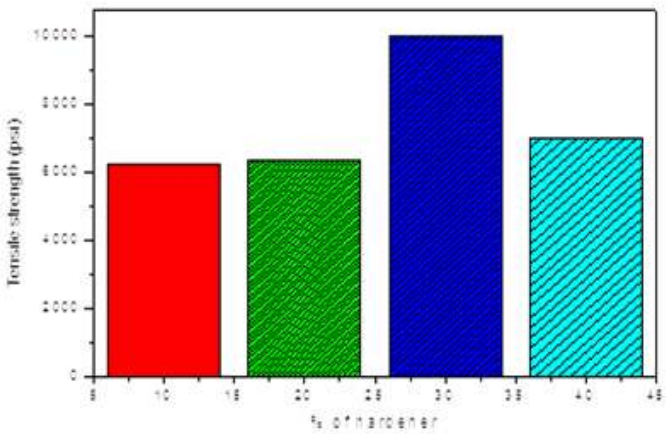
레진형 대비 상기 압광분말의 중량비의 하한 값 이하에서는 압광 특성이 눈에 보일 정도가 되지 못하므로 감지가 불가능하며, 상한 값 이상에서는 분말량이 지나치게 많아져서 페인트에 잘 섞이지 않고 덩어리로 뭉치게 되어 스프레이나 붓질이 잘 되지 않는 유사한 특성을 보였으나, 전반적으로 압광 성능이 레진형에 비해 저조하였다.



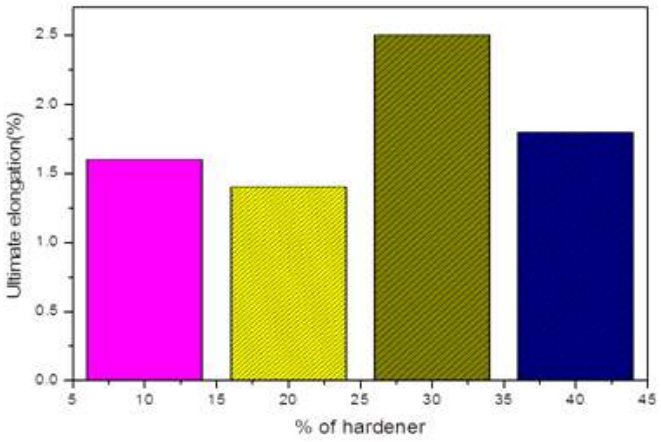
(a)

(b)

그림 2 Elastic modulus of transparent ML paint in compression and tension.



(a)



(b)

그림 3 Ultimate tensile strength and elongation of transparent ML paint in tension

(4) 요약

(가) 기존의 SrAl2O4:Eu 압광분말에 활성촉진인자로써 란탄계열 원자들 중 형광특성 개선에 효과적인 것으로 알려진 Dy 및 Nd가 0 에서 0.02 몰까지 첨가된 SAO 압광분말을 기존의 액상법이 아닌 고상 법으로 제조한 후 실제 압광특성을 평가한 결과, 비교적 압광특성이 재현성 있게 개선된 조성을 결정할 수 있게 되었으며, Dy 및 Nd 의 첨가 비용 등을 고려할 때 고상법에 의해 제조된 압광분말의 최적 조성은 SrAl2O4 : Eu 0.01, Dy 0.01-0.015, Nd 0-0.01 구간으로 판단된다.

(나) 발광특성이 향상된 고상합성 압광분말을 페인트 형태로 제조하기 위하여 본 연구에서는 콘크리트 전용 투명 페인트를 추가적으로 개발하였으며, 페인트의 영율은 대개 2.5~3.2 GPa 사이에서 변화하여 기존의 세라믹 소재용 투명 페인트 대비 약 15% 이상의 성능 개선이 이루어졌을 뿐 아니라, 인장강도가 40 - 70 MPa 수준에 최대 2.5% 내외의 허용 연신율을 가지게되어 순수 콘크리트 소재의 발생되는 균열 첨단에서의 프로세스 존 뿐만 아니라 직 균열에서의 파괴 과정을 충분히 측정할 수 있을 것으로 예상되었다.

나. SAO 압광 소재의 발광 현상 및 그 기구에 대한 정량적 해석

(1) 서 론

SAO 소재의 경우 녹색 형광 (Green Phospher; GP), 장-잔광 (Long Phosphorescent; LP), 열여기-형광 (Thermo-luminescent; TL), 압광 특성 (Mechano-luminiscence; ML) 등 다양한 물성으로 인하여 다수의 응용분야에서 많은 주목을 받아왔다[35-42]. 특히, 동 재료의 압광 특성은 외부에서 가해진 응력수준에 비례하여 가시적인 발광특성을 나타냄으로써, 극히 최근에 들어서야 응력상태 표시기로서의 가능성에 기초하여 본격적인 연구가 시작된 분야이다[35-37]. 이러한 압광 재료 개발의 최종 목표는 형광 페인트나 박막 형태로 제조되어, 응력을 받고 있는 소재의 표면에 적용됨으로써 실시간으로 가해지는 응력과 변형의 정도 및 그 변화를 가시적으로 표시 하고자 하는 것이다[43-48]. 상술한 목적 하에 최근 5-6 년 동안 압광 박막 및 압광 페인트의 개발과 이를 적용한 세라믹 파괴 관련 연구 분야에서는 괄목할 만한 진전들이 보고되어 왔다[49-54]. 그러나 이러한 압광 관련 응용 기술의 급격한 발전에도 불구하고 여전히 압광 소재의 발광 기구 자체에 대한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다. 이는 압광 기구 규명 관련 연구의 자체적인 어려움과 함께, 보다 향상된 성능의 압광 소재 및 압광 복합 소재 개발에 관련 연구가 집중되는 경향이 맞물려 발생된 현상으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 기존의 응용 연구에 더하여 상대적으로 주목 받지 못한 압광 기구 규명 관련 연구들을 활성화시키기 위하여, 보다 폭넓은 범위의 하중 및 하중속도 조건 하에서 발광 현상을 정량적으로 측정하고, 이를 수학적 예측 모델을 기반으로 하여 매크로한 관점에서 발광 기구와 연관하여 예측할 수 있는 이론적/실험적 기반을 동시에 확립하고자 하였다.

(2) 발광 기구

본 실험에 사용되어온 SAO 소재의 경우 응력 또는 변형에 의해 유발된 트랩 방출 과정이 발광 기구의 해석에 주로 사용되어 왔으며, 그림 1 에 이러한 압광 기구의 전체 모식도를 기술하였다[55-56]. 동 그림에서 압광 현상에 있어 가장 주요한 활성인자인 Eu2+이온들은 통상 외부 에너지의 공급 (UV 램프 조사 등) 에 의해 광-여기 현상을 일으키며 충만대로의 홀 방출을 일으키게 된다. 방출된 홀은 Dy3+이온들이 충만대 (valence band) 직 상의 홀 트랩 에너지 준위를 구성하게 되므로 결과적으로 Dy4+에 의해 트랩 될 수밖에 없다. 이때 하중이 외부에서 부가되면, 트랩된 홀은 그림 1의 터널링 및 충만대를 경유하는 두 가지 경로에 의해 방출되어 Eu^{+} 활성인자와 재결합함으로써, Eu^{2+} 여기 상태를 만들게 되며, 그 즉시 즉각적인 기저상태로의 전환에 의해 압광현상을 유발시키게 된다[55].

(3) 실험방법

현재까지 압광 현상과 관련된 대부분의 연구들은 괴 또는 구형의 압광재료들을 직접 굽힘

또는 압축시험 하는 방법으로 응력장 분포를 관찰 하려는 수준에 머무르고 있으며, 그 결과 시험장치와 시료 간 접촉 영역에서의 과도한 발광량으로 인해 실제 응력이 집중되는 시편 중심부에서의 휘도 분포를 정확히 관찰하는 것이 불가능하여 왔음은 주지의 사실이다[57-65]. 따라서 본 연구에서는 우선 실험적인 측면에서 인장시편 형태로 제작된 압광재료 시편을 이용함으로써, 게이지 부위에서의 보다 정확한 압광현상 및 발광 분포를 가시화하고 이를 정량적으로 측정하는 기술적 진보를 이루고자 하였다.

상술한 기술적 목적 하에, 본 연구에서는 압광 인장 시편의 준비를 위해 에폭시 레진형 투명 페인트에 중량비 10% 의 SAO 분말을 혼합한 후, 특수 코팅된 유리 컨테이너에 주입하여 판형으로 소성하였다. 제조된 판형 시료는 2차 기계 가공을 통하여 그림 2 의 게이지 길이 12mm, 폭 및 두께 4 mm 의 인장시편으로 최종 제조되었다. 이 후 인장 시편은 본격적인 시험을 위해 만능 시험기의 하중 부가 장치에 장착된 후, 암실 조건에서 365nm 파장의 고밀도 자외선에 5 분간에 걸친 여기 (excitation) 및 1 분간의 장 잔광 (long phosphorescence) 완화 처리를 거쳤다. 실제 인장시험은 각기 다른 3 종류의 고정된 크로스 헤드 속도 즉, 일정 초기 변형속도 (Constant initial strain rates = $2x10^{-2}$,$4x10^{-2}$,and$2x10^{-1}$sec.$^{-1}$)조건 하에서 실시 되었으며, 이때 각 하중 부가 단계에서의 압광 현상 및 발광량 정량 측정을 위하여 인장 시험기에 고속 디지털 카메라 및 광량 측정장비(photomultiplier tube) 를 추가로 설치하였다. 특히 인장시험기의 로드셀로부터 측정된 하중 값과 각 하중 값에서의 게이지부 압광 현상 및 발광량 연동을 위해 다채널 데이터 링크(MCDL) 장치를 이용함으로써 하중, 발광량 및 발광 디지털 영상간의 데이터 동기화를 가능케 하였다.

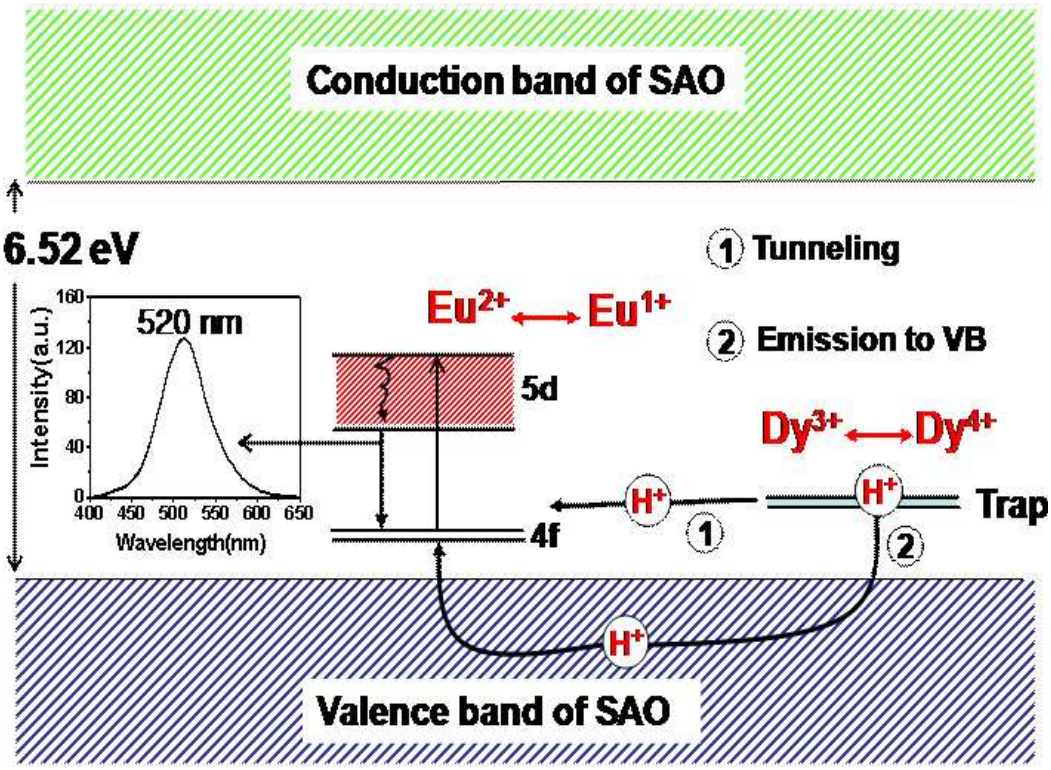


그림 1 Schematic diagram showing the trap-releasing (recombination) process for ML.

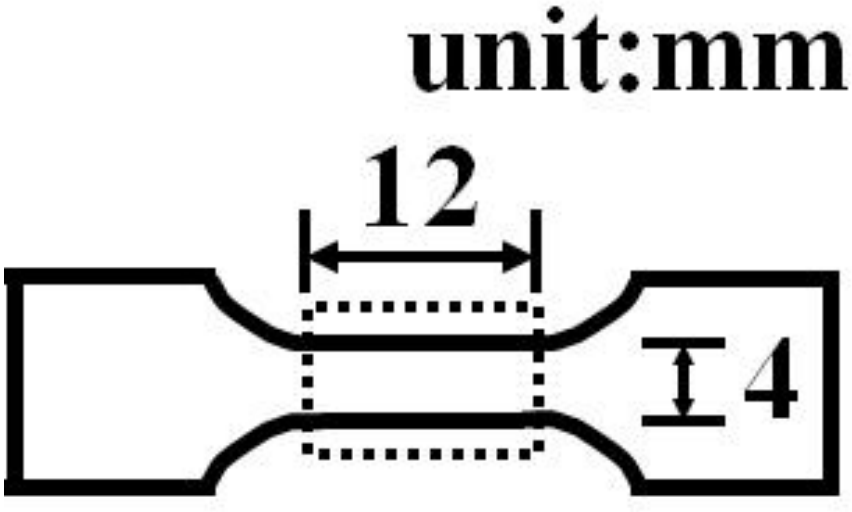


그림 2 Schematic diagram showing the trap-releasing (recombination) process for ML.

(4) 결과 및 고찰

그림 3 은 각기 다른 3 종류의 일정 초기 변형속도 (Constant initial strain rates = 2x10-2,4x10-2,and2x10-1sec.-1)또는 하중 부가 속도 조건 하에서 고속 카메라를 이용하여 실험적으로 측정된 부가 하중과 압광 발광 강도 간의 직접적인 상관관계를 연속적으로 기록한 일련의 압광 사진을 이용하여 가시적으로 보여 주는 결과이다. 동 그림의 발광사진 결과로부터 알 수 있듯이 압광 발광량이 부가 하중에 비례하여 증가됨을 쉽게 관찰할 수 있다. 그러나 주요한 점은 인장시편의 변형속도 즉, 하중부가 속도가 증가됨에 따라 발광량이 더욱 두드러지게 증가되었다는 점이다.

상술한 결과들을 보다 정량적으로 살펴보기 위하여, 본 연구에서는 상기의3가지 변형속도 또는 하중 부가 속도 조건 하에서 광량 측정장비를 이용하여 부가 하중과 압광 발광 강도 간의 직접적인 상관관계를 정밀 측정하였다. 그림 4 는 실험적으로 측정된 부가 하중 변화에 따른 발광량 곡선으로써 압광 사진 판독 결과와 동일하게 부가 응력 및 응력 속도에 비례하여 발광 강도가 증가됨을 알 수 있다. 그러나, 실험결과로부터 알 수 있듯이 하중과 압광 발광량 사이에는 단순 직선 관계가 성립하지 않는다는 점을 분명하게 관찰 할 수 있다. 또한, 변형속도 또는 하중속도와 압광 발광량과의 상관관계도 일견 하중속도의 증가에 따라 직선적으로 발광량이 증가되는 것처럼 보이나, 실험 조건에서 살펴 볼 수 있듯이 고정된 크로스 헤드 속도 조건 하에서도 변형속도 또는 하중 부가 속도가 일정한 상수가 아니므로, 실제 하중 부가 속도는 그림 3의 실험 결과로부터 정교한 연산을 거친 후에 계산된 결과를 고려해 볼 때, 완전히 직선적으로 비례하지는 않는 것으로 판단되었다. 따라서 상술한 내용을 모두 고려하여, 하중 및 하중속도와 발광 강도 사이에 상관관계를 정리하면, 비록 직선적인 비례 특성을 나타내지는 못하였으나, 현상학적인 관점에서 볼 때 하중이 증가되거나 혹은 하중 속도가 빠를수록 높은 발광 강도를 나타내는 비례 관계가 성립된다고 할 수 있다.

그러나 상술한 현상학적 결과로부터 본 연구에서의 최종 목적인 압광 발광 모델을 기반으로 한 수학적 모델을 제시하고자 함에 있어 한 가지 유의할 점은, 그림 1의 압광 발광 모델의 경우 엄밀히 말해 압광현상은 기구학적인 관점에서 정적 하중이 아닌 동적 하중 부가 속도 (부가 하중의 변화 값) 에 의해서만 촉발 되어야 한다는 점이다. 특히 이러한 기본 가정이, 본 실험에서 측정된 하중 값과 압광에 의한 발광량 사이의 비례관계 및 하중 속도 값과 압광에 의한 발광량 사이의 비례관계 결과인 현상학적 결과와 부합되어야 함은 물론이다. 다만, 압광 현상이 탄성영역 내에서 발생되므로, 부가 하중은 트랩에 작용되는 응력 또는 변형량 모두에 비례하는 것으로 고려될 수 있으므로 하중 부가 속도 또한 변형 속도 및 응력 속도에 비례하는 것으로 규정할 수 있을 것이다.

따라서 상술한 가정 하에 본 연구자들은 하중 속도에 따른 압광 현상의 시간적 변화를 정량적으로 밝히기 위하여 그림 1의 트랩 방출 과정에 기반한 새로운 속도 식을 유도하였다. 기본적으로, 압광현상을 기술할 수 있는 가장 적절한 수학적 모델은 속도 방정식 형태로 구성 되어야 하여, 특히 홀을 붙잡고 있는 트랩의 수가 감소됨에 따라, 여기 되어 빛을 방출하는 활성인자들이 증가 된다는 점은 명백하다. 따라서 압광 현상을 기술하는 속도 방정식은 다음과 같이 주어 질 수 있다.

$$\frac{dN_{Eu^{*2+}}}{dt} = K_T \frac{dP}{dt} N_{Eu^{+}} N_{Dy^{4+}} - K_P N_{Eu^{*2+}}$$

$$\frac{dN_{Eu^{2+}}}{dt} = K_P N_{Eu^{*2+}}$$

$$\frac{dN_{Eu^{+}}}{dt} = \frac{dN_{Dy^{4+}}}{dt} = -\frac{dN_{Dy^{3+}}}{dt} = -K_T \frac{dP}{dt} N_{Eu^{+}} N_{Dy^{4+}}$$

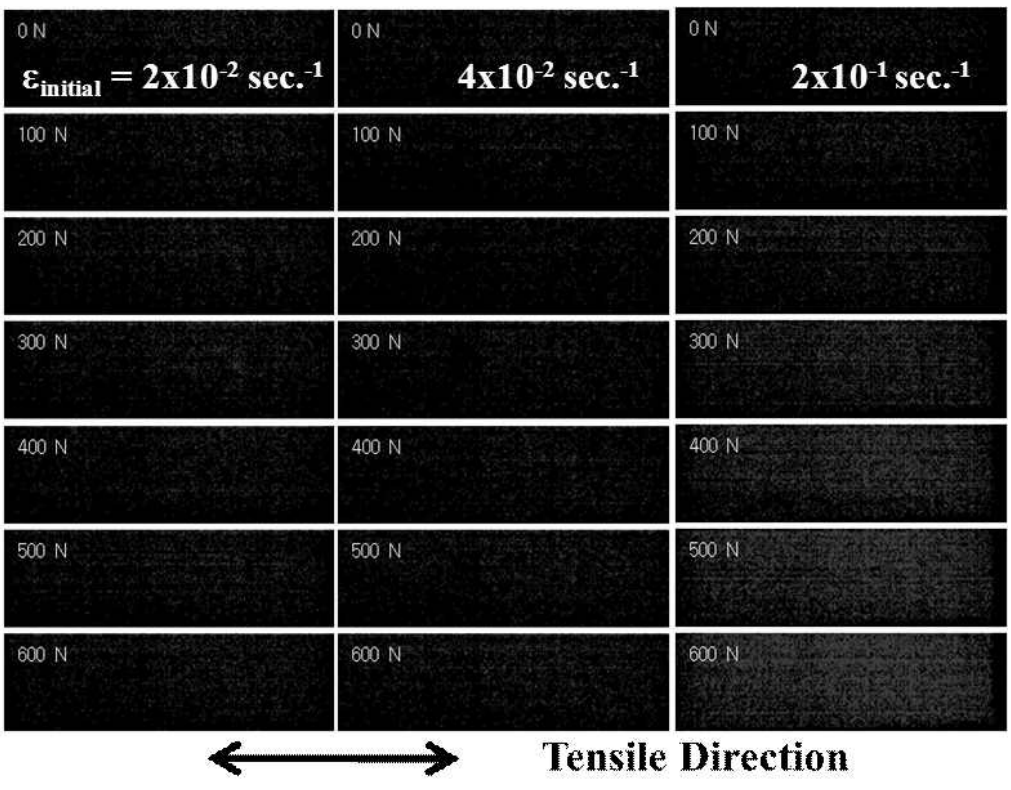


그림 3 Visualized profiles of applied load and ML intensity with three different initial constant strain rates.

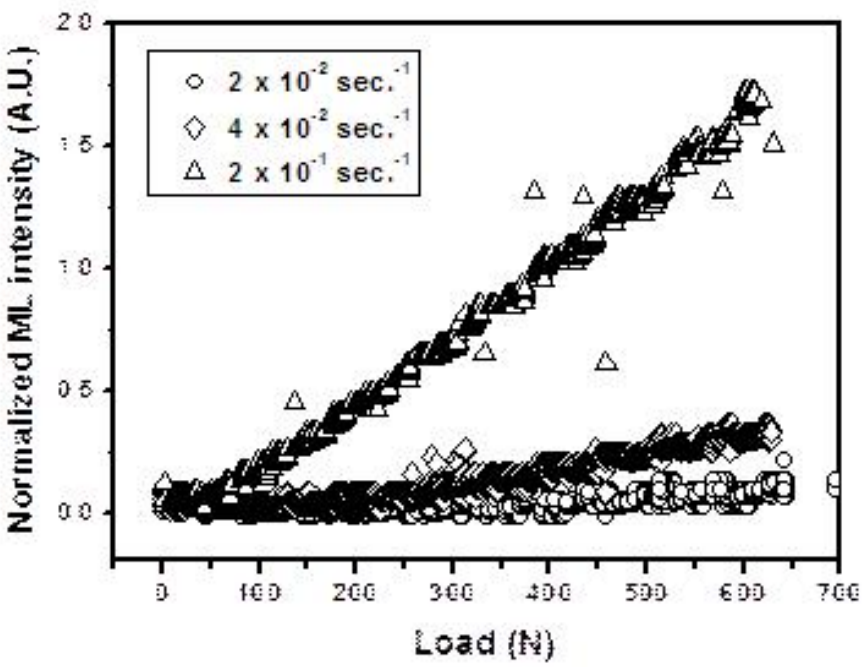


그림 4 Effects of applied load and loading rate on the Normalized ML intensity.

위의 식에서 $N_{Eu^{*2+}}$ 및 N_{Eu2+} 는 각각 2가 Eu 활성 인자의 여기 상태 및 기저 상태 밀도 수를, NEu+ 는 1 가 Eu 활성인자의 밀도 수를, NDy3+ 와 NDy4+ 는 3 가 및 4 가 Dy 이온의 밀도 수를 나타낸다. 또한, P 는 부가 하중을 나타내며, 전술 했듯이 탄성 영역에서의 압광 거동을 측정하였으므로 하중 P 는 응력 및 변형량에 거의 직선적으로 비례한다고 할 수 있다. 마지막으로, KT는 상호작용 혹은 재결합 항의 속성을 나타내는 상수이며, KP는 무 하중 상태에서 측정된 장 형광 속도 상수이다.

윗 식을 그림 1의 기구학적인 관점과 연관지어 살펴볼 때 부가 하중 속도 dP/dt는 인장 시험에 의해 측정된 하중-시간 곡선으로 부터 미분 연산에 의해 얻어진 값들이며, 비선형 항은 홀을 붙잡은 트랩 (4가 Dy 이온들) 과 이온화된 활성인자들 (1가 Eu 이온들) 사이의 상호작용을 의미하게 된다. 특히, 이러한 상호작용은 충만대로의 방출 또는 직접 터널링에 의한 재 결합으로 이어져 최종적인 발광 현상이 구현되는 것으로 볼 수 있다.

윗 식을 이용하여 본 연구에서는 기존의 접근법들과 달리 부가 하중 속도가 압광 속도 식의 수치 연산에 사용되었으므로, 이러한 하중 부가 속도의 포함은 발광 속도 식의 해석적 연산이 불가능하게 만든다[66-67]. 따라서 이러한 계산상의 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 압광 현상을 기술하는 속도 방정식을 이용한 발광량 예측을 위해 잘 알려진 Runge-Kutta 법을 이용하였다[55,68]. 이때, 실 연산에 사용된 초기 조건은 다음과 같이 기술될 수 있다.

t = 0 에서

$N_{Eu^{*2+}} = 0$, $N_{Eu2+} = (1-m)/2$, $N_{Eu+} = m/2$,

N_{Dy3+} =(1-m)/2, N_{Dy4+} = m/2 이고,

N_{Eu*2+} +N_{Eu2+} +N_{Eu+} +N_{Dy3+} +N_{Dy4+} =1 이다.

위 조건에서 m 은 홀을 붙잡은 트랩 및 이온화된 활성인자들의 초기 분율을, M 값은 초기 자외선 여기 강도, 자외선 노출 시간 및 완화 시간에 의존하는 값이다. 여기서 완화 시간은 자외선 조사 후 하중 부가 전까지 걸린 시간을 말한다.

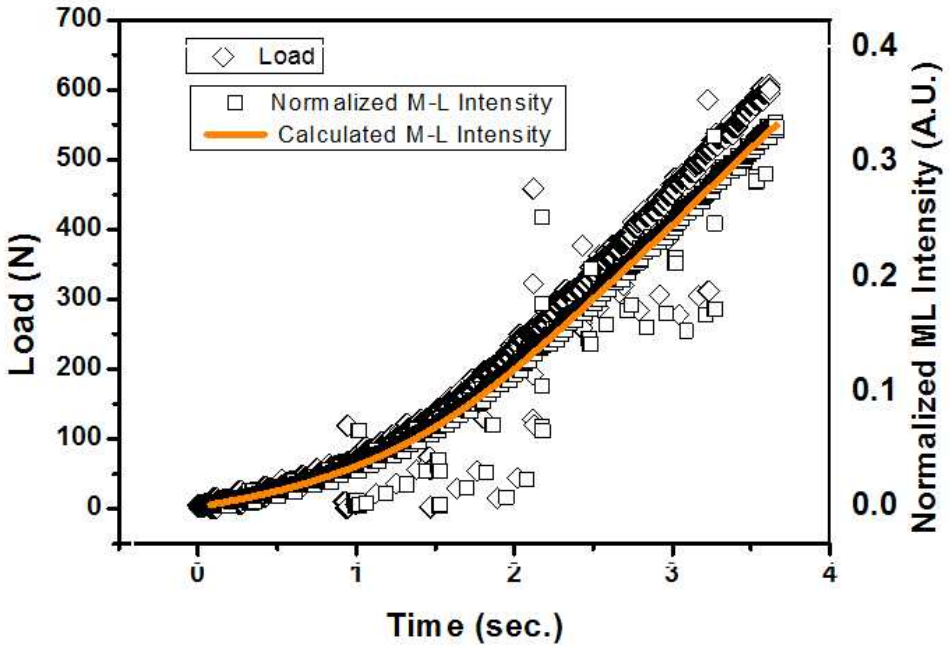


그림 5 Experimental and calculated ML intensities based on rate equation

그림 5 는 상술한 연산을 위해 사용된 시간에 따른 하중 변화 실측 곡선과, 계산 후 얻어진 압광 강도 값 (NEu*2+) 을 인장 시험 시 광도계로부터 측정된 압광 강도 결과와 함께 보여주고 있다. 두 예측 및 실측 결과에서 살펴 볼 수 있듯이, 아래로 볼록한 형태의 NEu*2+ 계산 곡선과 측정된 압광 강도 곡선이 비교적 잘 일치 함을 알 수 있다. 결론적으로, 본 연구에서는 SAO 소재의 압광 현상을 예측하기 위하여 부가 하중 속도의 함수로 비교적 간단한 형태의속도식을 유도하였으나, 압광 발광강도에 대한 하중 부가 속도의 영향을 밝혀줄 유용한 수학적 모델임을 감안할 때, 이러한 수학적 접근방법이 향후 SAO 소재의 발광 기구에 대한 보다 완벽한 이해를 가져다 줄 것으로 생각한다.

(5) 요약

(가) SAO 소재의 발광 현상은 부가 하중의 변화 즉, 하중 속도에 의해 촉발 되었으며 동적 하중 변화에 의해 발광 강도가 변화 하였다. 이와는 달리 발광 현상에 있어 정적 하중의 역할은 제한적이었음을 알 수 있었다.

(나) 압광 현상을 기술할 수 있는 가장 적절한 수학적 모델은 발광 강도가 하중 속도 항을 포함하는 형태의 속도 방정식으로 판단되며, 실험 결과 또한 계산된 속도 방정식 예측 결과와 잘 일치하였다.

다. 압광소재를 이용한 콘크리트 파괴실험 시 균열진행의 시각화

(1) 서론

건설재료로 널리 사용되고 있는 콘크리트는 균열과 손상이 발생하기 쉬운 재료적인 특성을 가지고 있다. 보통 콘크리트는 취성재료라고 생각하는 경우가 많은데 실제로는 대부분의 첨단 세라믹 재료보다 더 높은 인성을 가지는 준취성재료(Quasi-Brittle)이다. 그리고 콘크리트는 재료의 불균질성으로 인하여 금속과는 달리 균열선단에서 파괴진행영역이라는 비선형영역이 크게 존재하고, 이러한 비선형영역은 점진적인 미세균열의 진전으로 인해 발생하며 골재의 큰 입자에 의해 이 영역이 상당히 크게 나타난다. 또한 미세균열 영역에서 균열선단이 불확실하기 때문에 실제 균열길이와 균열진행과정을 파악하는 어려움이 있다. 실제로 균열과 균열진행과정을 직접적으로 눈으로 볼 수 있는 방법이 어려워 이론을 바탕으로 추론 및 예측은 가능하였으나 매우 작은 균열 및 변형은 인지하기가 어렵다. 따라서 균열 검출 또는 균열 첨단에서의 응력 인지를 위해 복잡한 장치가 따르는 간접적 방법들을 이용하고 있다. 예를 들어 균열 또는 균열 첨단에서의 응력을 가시화하기 위해 Strain gauge, 초음파, X-ray 등이 이용되고 있으나, 이러한 방법들은 모두 고비용의 복잡한 장비를 요구하며, 직접 볼 수 있는 것과는 달리 일종의 간접적인 측정방법이 사용 되고 있다. 또한, 이러한 방법들은 파괴실험 시 매우 빠르게 파괴되는 균열과정을 직접적으로 시각화하기에는 매우 어려운 실정이며, 연구활동도 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 콘크리트의 균열이전과 이후의 군열진행상태를 시각화하기 위해서 압광소재인 Mechano-Luminescent(ML) 페인트를 이용하여 콘크리트의 균열진행과정을 분석하는 것을 목적으로 하고 있다. 나아가 압광소재를 이용한 콘크리트 구조물의 균열검출방법 개발에 기여하고자 한다. 또한, 실험에서 골재의 크기에 따라 기존에 알려져 있는 파괴실험 시 콘크리트 골재에 대한 브리징(Bridging) 현상을 시각적으로 확인하고 분석하는 것을 목적으로 하고 있다.

본 연구의 압광소재를 이용한 연구를 통해 콘크리트 소재의 파괴 시 균열길이 변화에 따른 정확한 평면변형 파괴인성 값의 측정이나 균열 전파시에 보고되고 있는 브리징(Bridging) 현상에 대한 명확한 고찰을 통하여 콘크리트 구조물의 균열진전에 대한 이해를 높일 수 있다. 또한 현재 콘크리트 구조물을 비롯한 구조물에서의 기존의 비파괴 검사법 등의 기술로는 피로 균열과 같은 결함부를 검출하는 것이 기술적, 경제적으로 어려움이 있다. 따라서 본 연구는 압광소재를 이용한 모니터링 시스템을 구현하는데 기술을 제공할 수 있다. 저비용의 건전성 모니터링이 가능하게 된다면 경제적으로 사회 기반시설 구조물의 안전점검이 가능하며, 조기에 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하고 적절한 조치를 취할 수 있다. 그리고 압광소재를 이용한 건설

구조물의 안전성평가 분야에서 국내의 선두의 기술력을 확보 할 수 있는 계기가 될 수 있다.

본 연구는 콘크리트 파괴실험 시 상대적으로 빠른 균열진행과정을 압광소재인 Mechano-Luminescent(ML)페인트를 이용하여 시각화하고 측정데이터를 바탕으로 콘크리트의 파괴 역학적 특성을 분석하는 것을 목적으로 한다. 실험을 위해 50㎜의 노치가 있는 50×100×400㎜의 휨 실험체를 3가지 서로 다른 크기의 골재입자를 가진 실험체를 제작하였다. 그리고 초고속 카메라를 사용하여 균열과정을 촬영하고 3-Point Bending Test와 CMOD / Displacement Gauge를 통해 하중-처짐, 하중-균열길이 및 콘크리트의 균열진행과정을 분석하였다.

(2) 실험계획

(가) 실험개요

콘크리트는 균열과 손상이 발생하기 쉬운 재료적인 특성을 가지고 있다. 즉 취성이 매우 강한 특성 때문에 파괴실험 시 균열진행속도가 상대적으로 빨라 콘크리트의 균열진행과정을 시각적으로 관찰하는데 어려움이 있었다.

본 연구에서는 압광소재 Mechano-Luminescent(ML) 페인트를 이용하여 매우 빠르게 진행되는 콘크리트의 균열 진행과정을 시각화 하고 측정데이터를 바탕으로 콘크리트의 균열 진행 특성을 조사 및 분석하고자 한다.

(나) 사용재료

① 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 국내산 H사의 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 재료적 성질은 다음 표 1과 같다.

표 1 시멘트의 재료적 성질

비중 (g/㎤)	분말도 (㎠/g)	안정도 (%)	응결시험		압축강도			감열감량 (%)	MgO (%)	SO3 (%)
			초결 (분)	종결 (시간분)	3일	7일	28일			
3.15	3.420	0.06	230	4:50	28.4	39.5	54.5	1.21	2.50	2.12

② 골재

본 실험에 사용된 골재는 최대치수 10mm와 5mm의 굵은 골재와 표준사를 사용하였으며 골재의 물리적 성질은 다음 표 2, 표 3과 같다.

표 2 굵은 골재의 물리적 성질

골재종류	비중 (g/㎤)	골재 최대치수 (mm)	단위 용적중량 (kg/㎥)	흡수율 (%)	조립율 (FM)
굵은골재	2.64	10	1593	2.98	6.06
	2.63	5	1495	1.52	4.40

표 3 표준사의 물리적 성질

골재종류	입자 크기(Standard Test Size) (%)				단위 용적중량 (kg/㎥)
	850μ	600μ	300μ	clay	
표준사 (잔골재)	1.0↓	95.0↑	-	0.4↑	1530~1600

(다) 콘크리트 배합방법

① 콘크리트 배합표

본 실험에 사용한 배합기준은 압축강도 24㎫를 기준으로 3가지 종류의 실험체를 제작하였으며 A와 B 실험체는 물시멘트비 54.4%, 잔골재율 50%를 기준으로 각각 10㎜와 5㎜ 굵은골재를 사용하였고, C 실험체는 물시멘트비 54.4%, 시멘트와 잔골재 1:3 비율로 실험체를 제작하였다. 배합표는 다음 표 4와 같다.

표 4 콘크리트 배합표

실험체명	물시멘트비(%)	잔골재율 (%)	물 (kg/㎥)	시멘트 (kg/㎥)	잔골재 (kg/㎥)	굵은골재 (kg/㎥)
A	54.4	50	195.23	356.63	839.68	859.21
B	54.4	50	195.23	356.63	839.68	855.96
C	54.4	-	195.23	356.63	1069.89	-

※ A : 굵은골재 10㎜ 사용, B : 굵은골재 5㎜ 사용, C : 표준사만 사용

② 실험체 제작방법

본 실험에 사용된 실험체는 그림 1과 같이 50×100×400㎜ 휨 실험체에 노치 50mm를 만들어 제작하였다. 그림 2의 실험체 제작을 위한 배합 순서에 따라 잔골재와 굵은 골재를 1분 정도 건비빔을 하고 시멘트를 추가하여 다시 1분 정도 건비빔을 한 후 배합수를 추가하여 5분 이상 배합을 실시하였다. 50㎜의 노치를 만들기 위해 미리 휨 몰드에 두께 1㎜의 스틸 케이싱을 삽입한 후 타설을 실시하였다. 실험체는 24시간 동안 25℃, 습도 50% 정도의 환경에서 건조 후 탈형하여 빠른 시일 내 강도를 확보하기 위하여 100℃, 습도 100%상태에서 하루 동안 증기양생을 실시하였다.

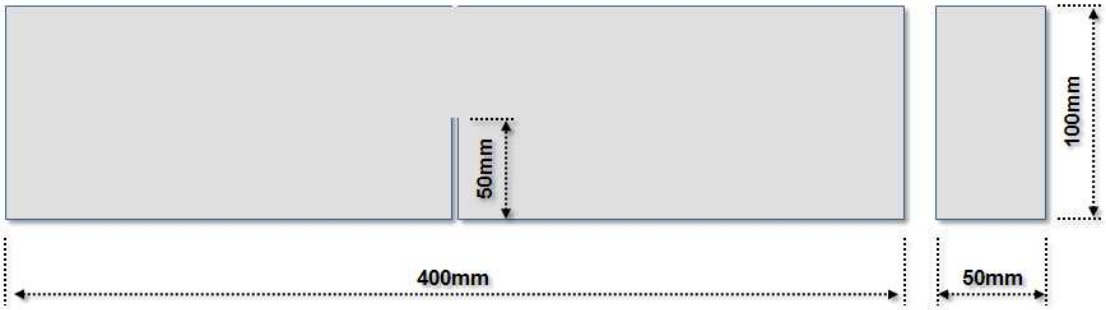


그림 1 실험체 크기

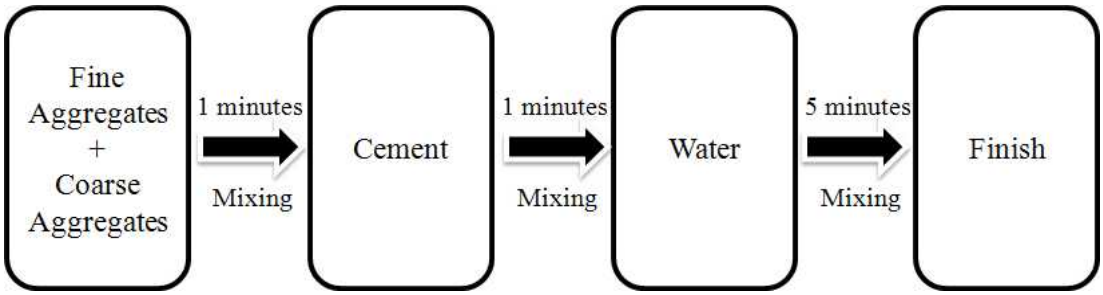


그림 2 콘크리트 배합 순서

(라) 실험방법

① 실험준비

실험 전 미리 양생한 그림 3과 같이 콘크리트 노치 상단부에 크기 50×50㎜, 두께 약 2㎜ 정도로 ML Paint를 얇게 도포를 한 후 하루정도 건조를 시킨다. 그 후 균열에 따른 콘크리트의 변위를 측정하기 위하여 CMOD gauge와 Displacement gauge를 설치를 하였다. CMOD gauge는 Knife edges를 이용하여 10㎜ 정도의 간격을 두고 노치 아랫부분에 설치를 하였고, Displacement gauge는 제작한 지그를 이용하여 실험체 뒷면에 설치를 하였다.



그림 3 ML Paint 도포

② 하중재하방법과 데이터 수집

그림 4는 전체적인 실험의 다이어그램을 나타낸다. ML Paint와 센서를 설치한 실험체를 3-Point Bending Test를 이용하여 실험을 실시하였다. 보통 콘크리트 파괴 실험은 변위제어를 이용하여 진행한다. 노치를 둔 콘크리트 보 실험체의 3-Point Bending Test와 같은 모드 1 파괴 실험은 변위 제어신호로 이용한다. 제어된 파괴실험은 완전한 하중-변위, 하중-균열길이 등을 획득 할 수 있다. 여기서 얻은 데이터로부터 중요한 재료의 파괴 성질을 파악할 수 있다. 비록 제어 파괴 실험이 안정적인 균열 진행과 더불어 측정데이터를 얻는데 필수적이지만, 실제 콘크리트 구조물은 외부 하중에 의해 지배 받으며 일정수준 이상의 하중이 구조물에 가해짐에 따라 구조물은 구성하는 재료는 불안정해지며 균열이 최조 발생 후 매우 빠르게 진행한다.

따라서 본 실험에서는 최대하중 이후 센서를 통한 변위제어를 하지 않고 지속적으로 하중을 재하 하는 방법을 통하여 콘크리트 파괴실험을 실시하였다. 이와 같은 방법을 이용하여 콘크리트 파괴실험 시 고속데이터 측정 장치(High Speed Data Logger)를 사용하여 전 영역에 걸친 하중-변위 관계를 획득할 수 있을 있었다. 실험 진행은 도포한 ML Paint에 자외선램프를 이용하여 5분 동안 에너지를 축적시킨 후 2kN/min의 속도로 하중을 가한다. 또한, 초고속카메라를 이용하여 250frame/sec의 속도로 콘크리트의 균열진행과정을 촬영하였다. 데이터 수집방법은 다음 그림 5와 같으며 촬영된 이미지, 하중 그리고 Displacement gauge의 데이터를 동기화시켜 한 PC에서 측정 하고 또다른 PC에서 하중과 CMOD gauge 데이터를 측정 하였다.

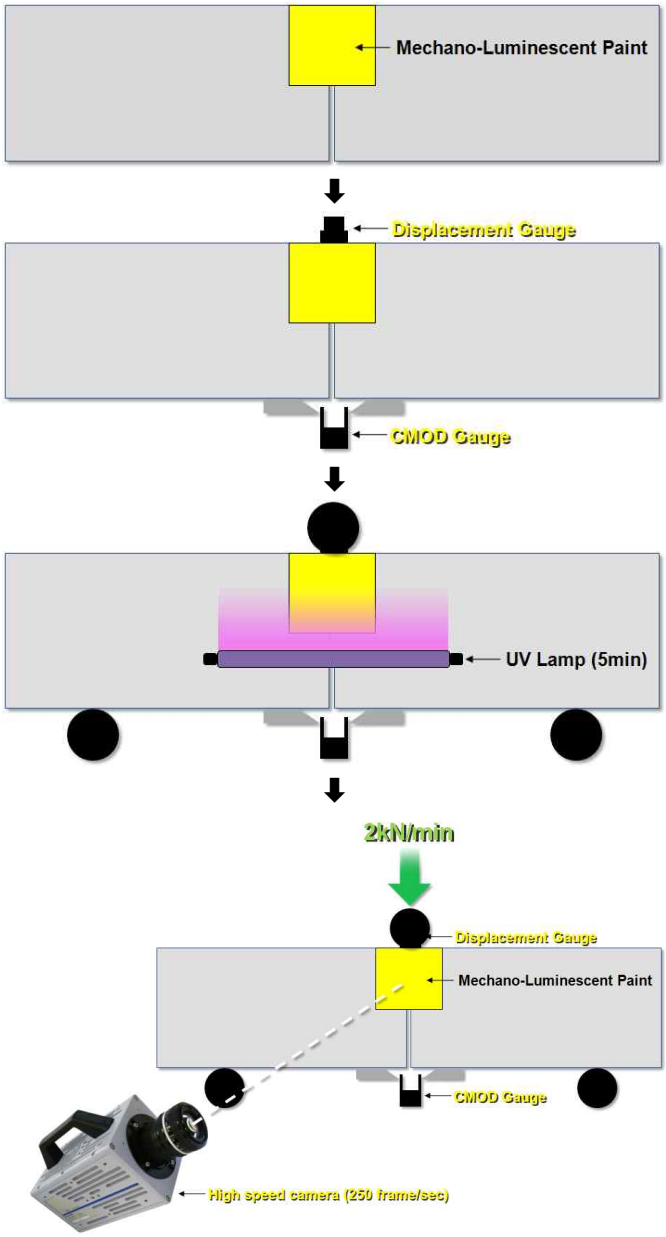


그림 4 전체적인 실험 다이어그램

그림 5 데이터 수집 방법

(3) 실험결과

(가) 실험체별 하중-변위 및 균열길이 측정 결과

① A 실험체

표 5는 A 실험체의 하중-변위와 균열길이 실험값을 나타냈다. 실험값은 최대하중에 도달하기 전의 하중 재하 상태에서부터 제어되지 않는 상태의 하중재하 구간의 균열진행 상태를 초고속 카메라로 촬영된 이미지와 동기화시켜 1번부터 12번까지 번호를 부여하였으며, 각 연속적인 이미지에 대하여 균열길이를 측정하여 나타냈다.

그림 6은 A 실험체에 대한 하중-CMOD 측정값과 하중-Displacement gauge 측정값을 나타내었으며, 약간의 실험오차가 발생하였지만 거의 비슷한 양상을 나타냈다. 또한 그림 7은 균열진행에 대한 연속적인 이미지를 나타냈다. 이미지의 순서는 그림 6의 하중-CMOD 그래프의 번호에 해당하는 것이다. A 실험체에서는 1번부터 3번까지는 하중 재하 상태를 나타내며 각 이미지기간의 시간차는 대략 1.5초이다. 4번부터 12번까지는 제어되지 않은 상태의 하중재하 구간을 나타내며 이지미간의 시간차는 0.004초 이다. 이미지 1번과 2번에서는 바탕의 노이즈에 의해 명확하지는 않지만 Micro-Crack을 시각적으로 확인할 수 있다. 여기서 주목할 점은 이미지 1번과 2번에서 최고하중과 아주 근접해 있다는 것이다. 이는 일반적으로 알려진 최고하중 직전의 Micro-Crack의 시작과도 상통하는 결과이다. 균열의 형성은 이미지 3번에서 더욱 명확하며 이는 하중-변위 곡선에서 최대하중을 해당하는 이미지이다. 이후 순차적으로 이미지 4번부터 12번까지 균열이 진행되는 과정을 명확히 확인할 수 있다.

표 5 A 실험체 하중-변위 / 균열길이 측정 실험값

이미지번호	A 실험체				
	균열길이 (㎜)	하중-CMOD		하중-Displacement Gauge	
		하중(kN)	변위(㎜)	하중(kN)	변위(㎜)
1	0.00	1.40	0.05	1.40	0.04
2	0.00	1.45	0.06	1.45	0.05
3	4.52	1.49	0.07	1.50	0.06
4	5.66	1.48	0.07	1.49	0.06
5	11.02	1.47	0.07	1.47	0.06
6	12.17	1.48	0.08	1.49	0.06
7	12.77	1.46	0.08	1.47	0.07
8	17.53	1.43	0.09	1.44	0.07
9	19.88	1.40	0.10	1.42	0.08
10	24.88	1.32	0.12	1.32	0.10
11	32.11	1.11	0.17	1.11	0.14
12	38.49	0.71	0.27	0.77	0.21

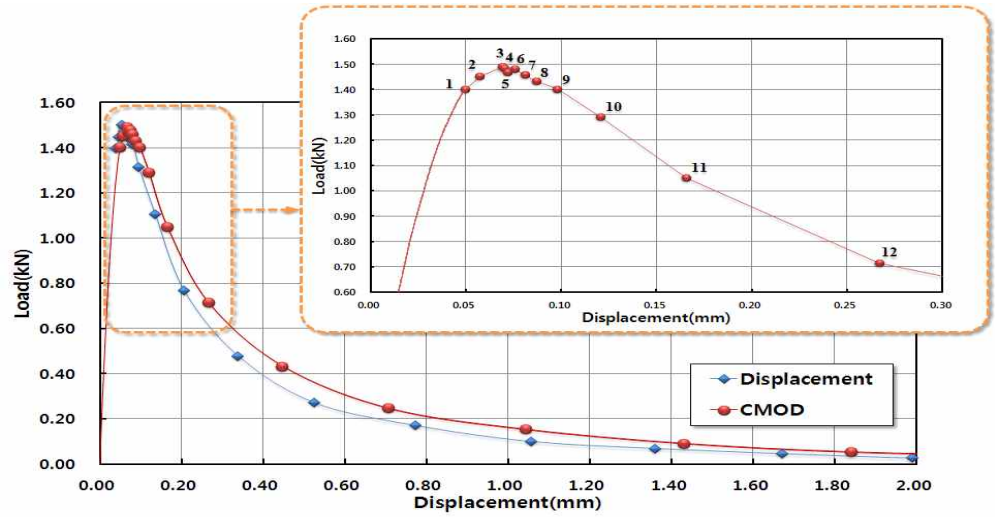


그림 6 A 실험체의 하중-변위 그래프

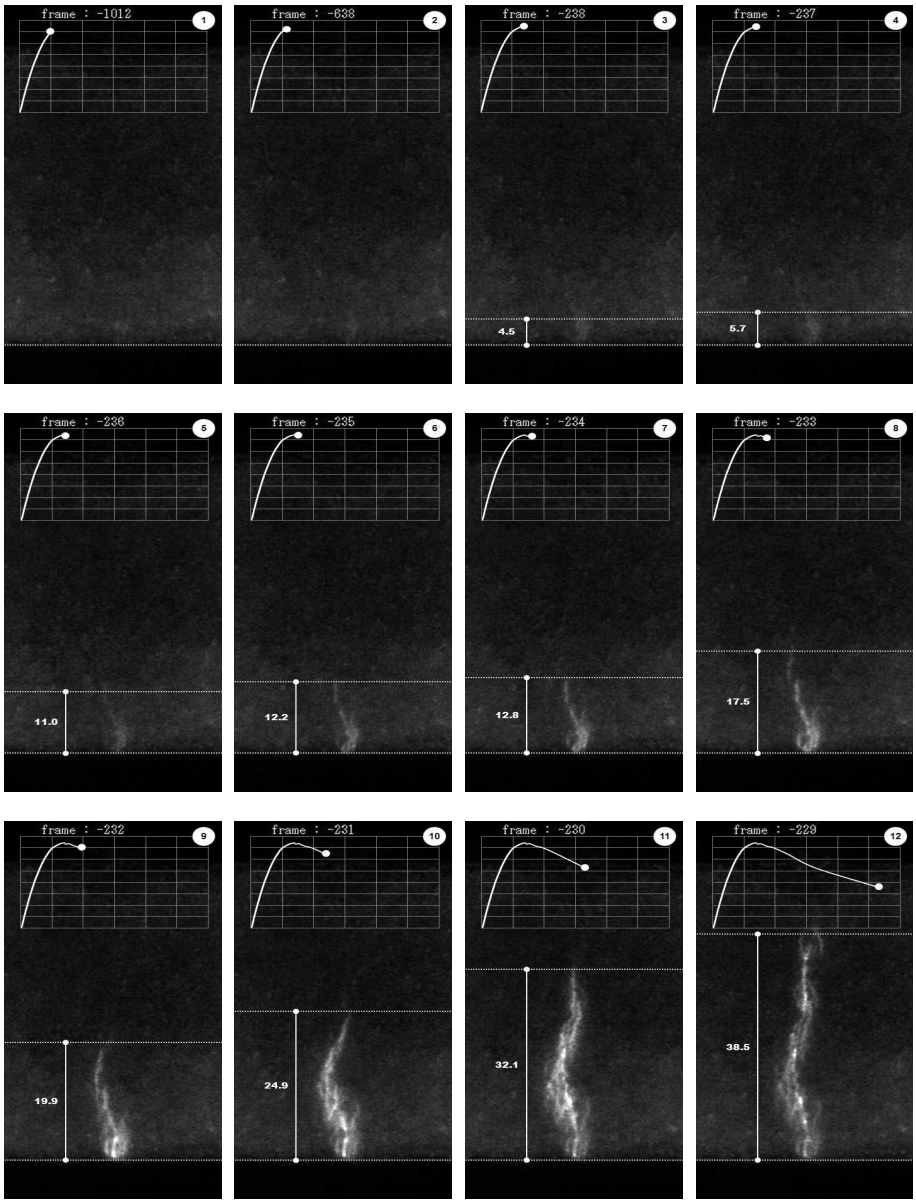


그림 7 A 실험체의 균열진행 과정

그림 8은 A 실험체의 하중변화에 따른 균열 진행을 나타냈다. 이 그래프에서 주목할 점은 균열 진행속도가 하중이 감소되는 속도에 비해 훨씬 빠르다는데 있다. 예를 들어 그래프의 10번 위치에서 이미지상의 균열길이는 25㎜로서 대략 균열 발생가능 최고치인 50㎜의 50%에 해당한다. 반면에, 이 시점에서의 하중은 1.3kN으로서 최고하중의 90% 정도로 단지 10%정도의 하중감소만 발생하였다. 이는 상대적으로 균열이 많이 진전되었더라도 하중 감소영역에서의 잔여 하중 용량이 상당히 높다는 것을 의미한다. 그리고 10번 이후에서의 하중의 감소와 균열 진행은 급격하게 진행된다는 것을 알 수 있다. 그림 9는 실험 후 A실험체의 단면을 나타냈다.

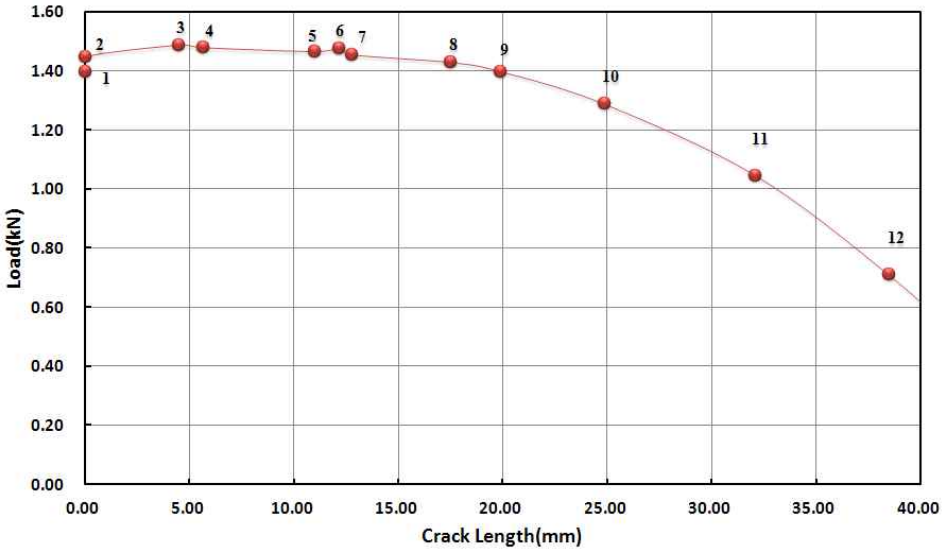


그림 8 A 실험체의 하중에 따른 균열진행 그래프

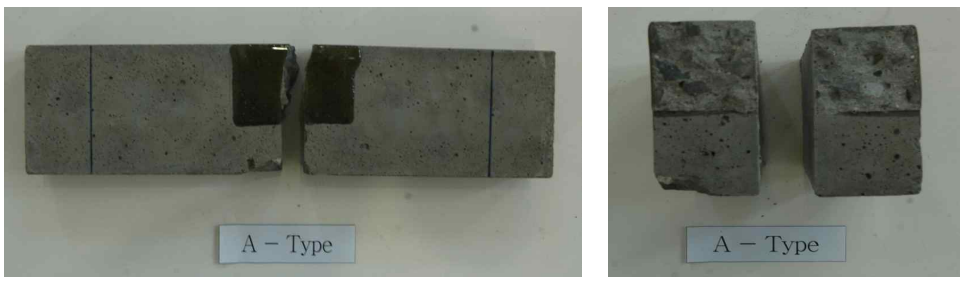


그림 9 A 실험체 사진

② B 실험체

표 6는 B 실험체의 하중-변위와 균열길이 실험값을 나타냈다. A실험체의 실험방법과 마찬가지로 실험값은 최대하중에 도달하기 전의 하중 재하 상태에서부터 제어되지 않는 상태의 하중재하 구간의 균열진행 상태를 초고속 카메라로 촬영된 이미지와 동기화시켜 1번부터 12번까지 번호를 부여하였으며, 각 연속적인 이미지에 대하여 균열길이를 측정하여 나타냈다.

표 6 B 실험체 하중-변위 / 균열길이 측정 실험값

이미지번호	B 실험체				
	균열길이 (㎜)	하중-CMOD		하중-Displacement Gauge	
		하중(kN)	변위(㎜)	하중(kN)	변위(㎜)
1	0.00	1.14	0.04	1.15	0.04
2	6.22	1.24	0.07	1.25	0.06
3	6.22	1.24	0.07	1.25	0.06
4	6.44	1.24	0.07	1.25	0.06
5	6.89	1.24	0.08	1.25	0.07
6	12.89	1.22	0.08	1.23	0.07
7	13.78	1.22	0.09	1.23	0.08
8	14.78	1.21	0.09	1.21	0.08
9	15.78	1.19	0.10	1.19	0.09
10	20.68	1.14	0.11	1.12	0.10
11	26.46	1.07	0.13	0.97	0.13
12	36.62	0.84	0.18	0.70	0.18

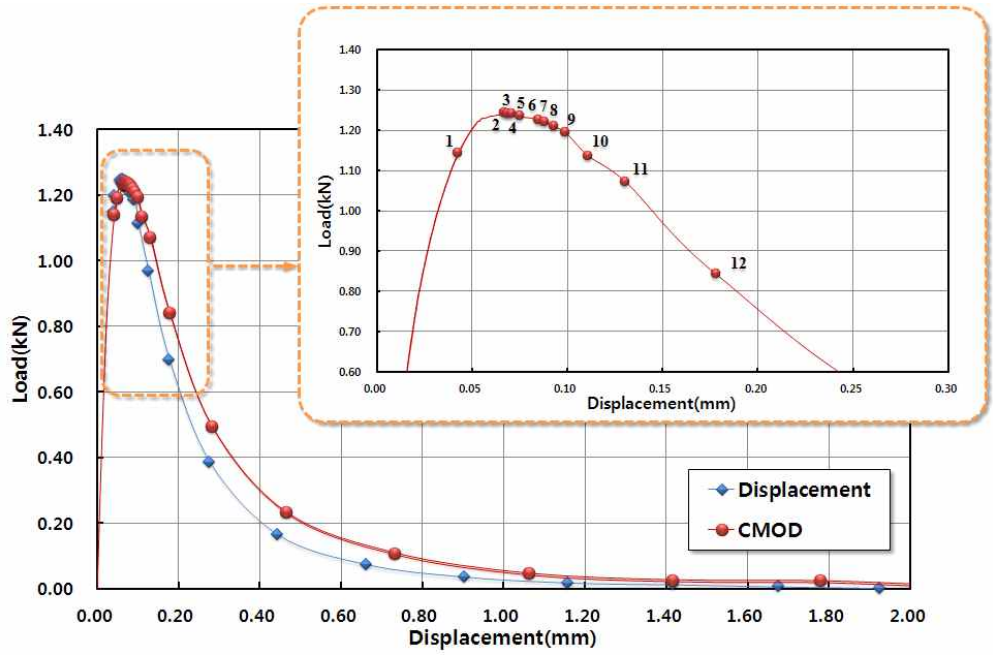


그림 10 B 실험체의 하중-변위 그래프

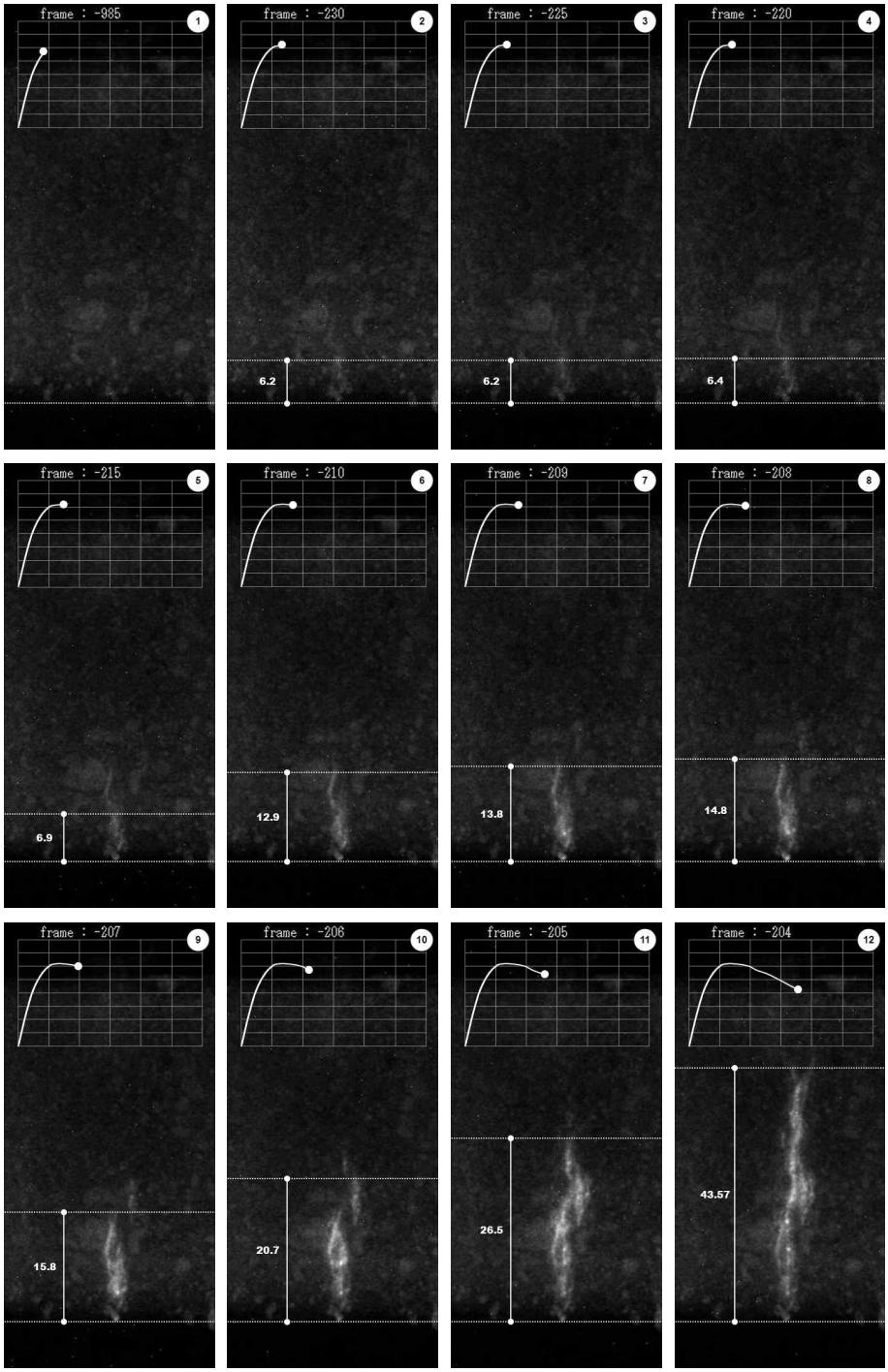


그림 11 B 실험체의 균열진행 과정

그림 10는 B 실험체에 대한 하중-CMOD 측정값과 하중-Displacement gauge 측정값을 나타내었다. 또한 그림 11은 균열진행에 대한 연속적인 이미지를 나타냈다. 이미지의 순서는 그림 10의 하중-CMOD 그래프의 번호에 해당하는 것이다. B 실험체에서는 1번부터 2번까지는 하중재하 상태를 나타내며 각 이미지기간의 시간차는 대략 3초이다. 그리고 3번부터 5번까지는 하중변화가 거의 나타나지 않는 상태이며 각 이미지간의 시간차는 0.02초이다. B 실험체에서도 이미지 1번에서 Micro-Crack을 확인 할 수가 있으며, 6번부터 12번까지는 순차적으로 균열진행을 확인할 수 있으며 시간차는 0.004초이다. A 실험체보다 B 실험체는 최대하중이 약

0.25kN 정도 낮았는데 이는 굵은 골재의 크기가 실험체의 강도에 영향을 주었을 것이라고 사료된다.

그림 12는 B 실험체의 하중변화에 따른 균열 진행을 나타냈다. 이 그래프에서도 A 실험체와 마찬가지로 균열 진행속도가 하중이 감소되는 속도에 비해 훨씬 빠르다. 그래프의 10번 위치에서 이미지상의 균열길이는 약 20㎜로서 하중은 1.1kN으로서 최고하중의 90% 정도로 단지 10%정도의 하중감소만이 발생하였다. 이 또한 A 실험체의 실험결과와 마찬가지로 상대적으로 균열이 많이 진전되었더라도 하중 감소영역에서의 잔여 하중 용량이 상당히 높다는 것을 의미한다. 그리고 10번 이후에서의 하중의 감소와 균열 진행은 모두 급격하게 진행된다는 것을 알 수 있다.

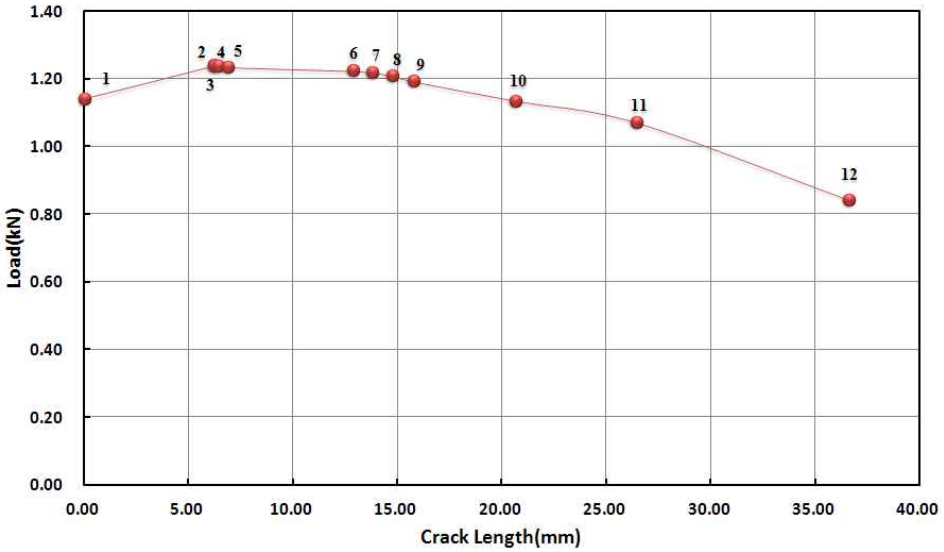


그림 12 B 실험체의 하중에 따른 균열진행 그래프

그림 13은 실험 후 B실험체의 단면을 나타냈다.

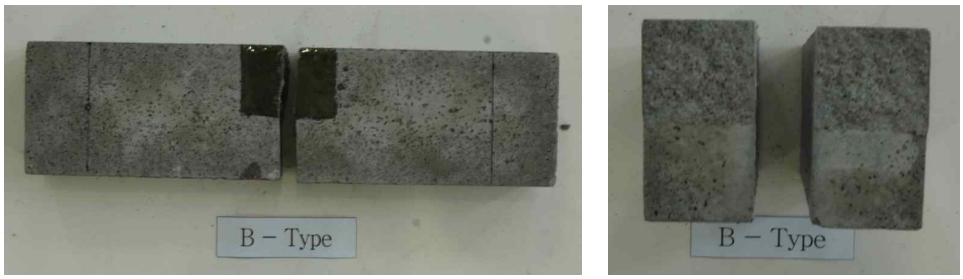


그림 13 B 실험체 사진

③ C 실험체

표 7은 C 실험체의 하중-변위와 균열길이 실험값을 나타냈다. 실험값과 측정방법은 위 다른 실험체의 실험방법과 동일하며 최대하중에 도달하기 전의 하중 재하 상태에서부터 제어되지 않는 상태의 하중재하 구간의 균열진행 상태를 초고속 카메라로 촬영된 이미지와 동기화시켜

1번부터 12번까지 번호를 부여하였으며, 각 연속적인 이미지에 대하여 균열길이를 측정하여 나타냈다.

표 7 C 실험체 하중-변위 / 균열길이 측정 실험값

이미지번호	C 실험체				
	균열길이 (㎜)	하중-CMOD		하중-Displacement Gauge	
		하중(kN)	변위(㎜)	하중(kN)	변위(㎜)
1	0.00	0.93	0.03	0.95	0.03
2	5.23	1.04	0.05	1.06	0.04
3	6.14	1.04	0.05	1.06	0.05
4	7.27	1.04	0.06	1.06	0.05
5	8.18	1.03	0.06	1.05	0.05
6	9.09	1.03	0.06	1.04	0.05
7	10.91	1.02	0.06	1.04	0.05
8	12.48	1.02	0.07	1.04	0.05
9	13.41	1.01	0.07	1.03	0.06
10	15.23	0.99	0.08	1.00	0.06
11	19.10	0.96	0.09	0.96	0.07
12	30.24	0.83	0.11	0.83	0.10

그림 14는 C 실험체에 대한 하중-CMOD 측정값과 하중-Displacement gauge 측정값을 나타내었다. 또한 그림 15는 균열진행에 대한 연속적인 이미지를 나타냈다. 이미지의 순서는 그림 14의 하중-CMOD 그래프의 번호에 해당하는 것이다. C 실험체에서는 1번부터 2번까지는 하중재하 상태를 나타내며 각 이미지기간의 시간차는 대략 3초이다. C 실험체는 3번부터 9번까지는 하중이 감소하는 속도가 매우 느리지만 10번 이후부터 순차적으로 하중 감소가 급격하게 나타났다. 균열의 진행은 하중이 감소함에 따라 꾸준하게 증가하는 경향을 보이다가 10번 이후부터 급격하게 증가하는 현상을 나타냈다. C 실험체의 최대하중은 시험체중 가장 낮게 나타났으며, A 실험체와 비교하여 약 0.5kN정도 낮았다. 이는 B 실험체와 마찬가지로 골재의 종류 및 크기가 실험체의 강도에 영향을 주었을 것이라고 사료된다.

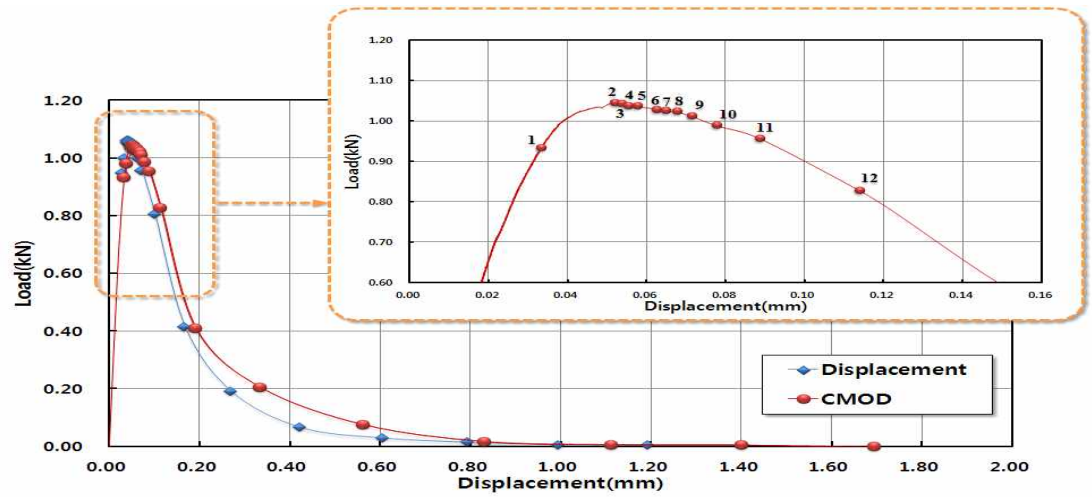


그림 14 C 실험체의 균열진행 과정

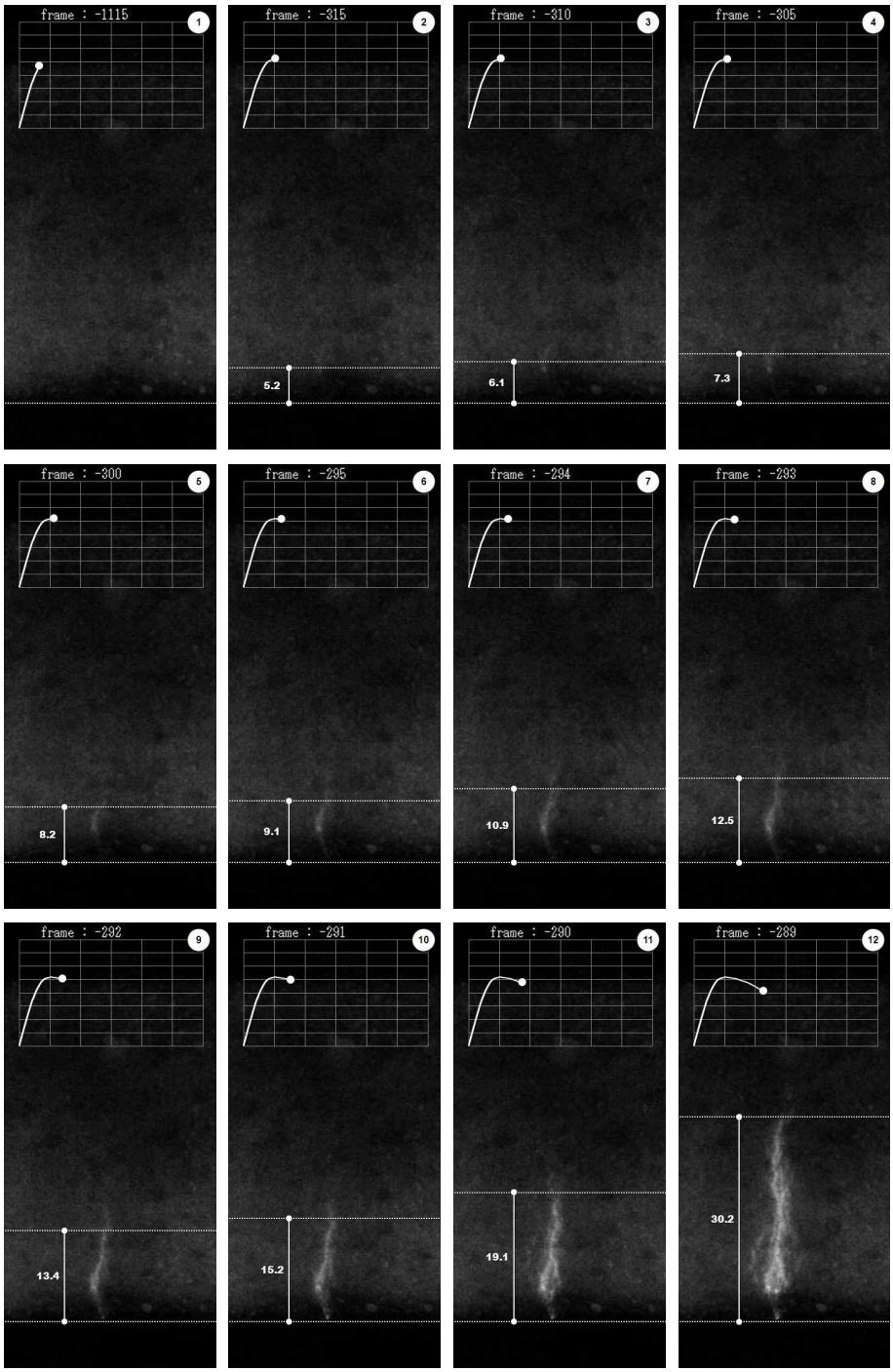


그림 15 C 실험체의 균열진행 과정

그림 16은 C 실험체의 하중변화에 따른 균열 진행을 나타냈다. 이 그래프에서도 A, B 실험체와 마찬가지로 균열 진행속도가 하중이 감소되는 속도에 비해 훨씬 빠르다.

A, B 실험체의 실험결과와 마찬가지로 상대적으로 균열이 많이 진전되었더라도 하중 감소영역에서의 잔여 하중 용량이 상당히 높다는 것을 알 수 있으며, 10번 이후에서의 하중의 감소와 균열 진행은 모두 급격하게 진행된다는 것을 알 수 있다. 그림 17는 실험 후 C 실험체의 단면을 나타냈다.

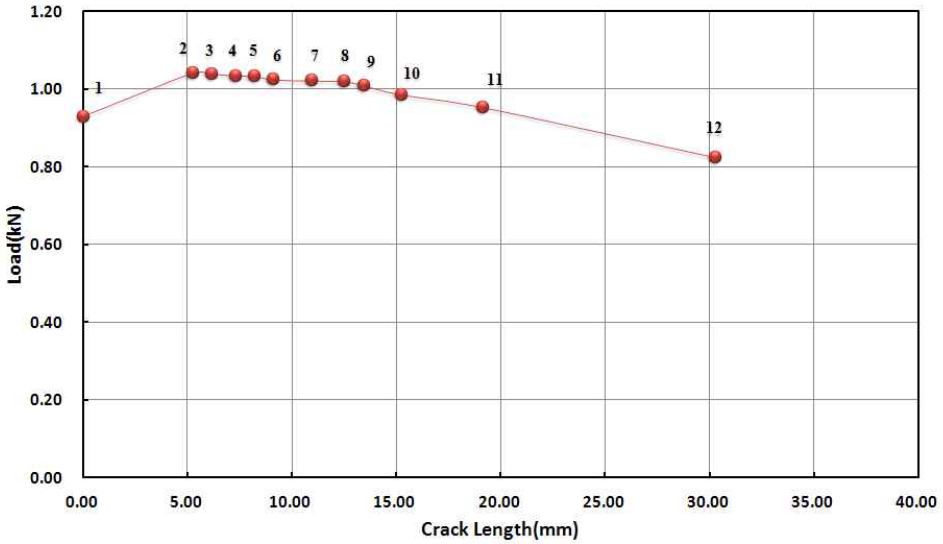


그림 16 C 실험체의 하중에 따른 균열진행 그래프

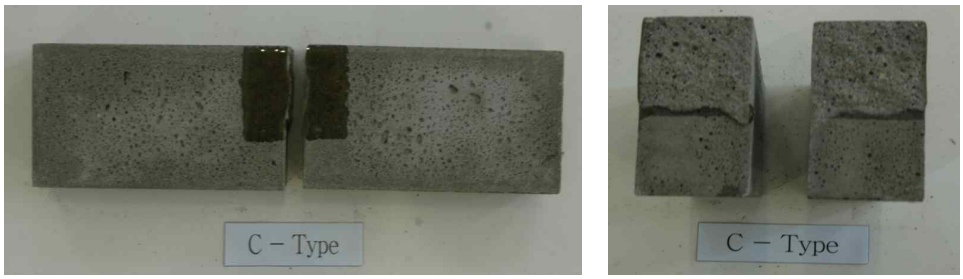


그림 17 C 실험체 사진

(나) 하중-변위 곡선

3-Point Bending Test를 이용한 휨 실험에서 하중-변위 곡선을 그림 18에서 볼 수 있다. 일반적으로 비교적 강성이 낮은 실험 장비를 사용하면 콘크리트가 최대하중에 도달하면 바로 파괴가 일어나기 때문에 하중-변위 곡선의 하강영역을 측정하는 것이 불가능하다. 이 하강영역 측정하기 위해서는 강성이 높은 장비를 사용해야 한다. 이러한 장비는 많은 야의 에너지를 흡수하여 시편이 최대 응력에 도달 한 이후에 그 에너지를 시편에 되돌리지 않아야 하고 시편에서 오는 응력제어가 아닌 변위제어 피드백 신호에 반응하여 하중을 감소시킬 수 있어야한다. 이러한 실험방법을 Closed-loop test라고 한다. 그러나 본 실험은 Closed-loop test가 아닌 하중제어 방법으로 진행되었지만, 하중-변위 곡선은 일반강도 콘크리트의 Closed-loop test의 변위제어를 통한 실험결과와 유사한 형태를 보인다. 즉 하중-변위 곡선에서 각 실험체별로 최대하중까지는 하중이 급격히 증가하며, 이후 서서히 하중이 감소하는 것을 알 수 있다.

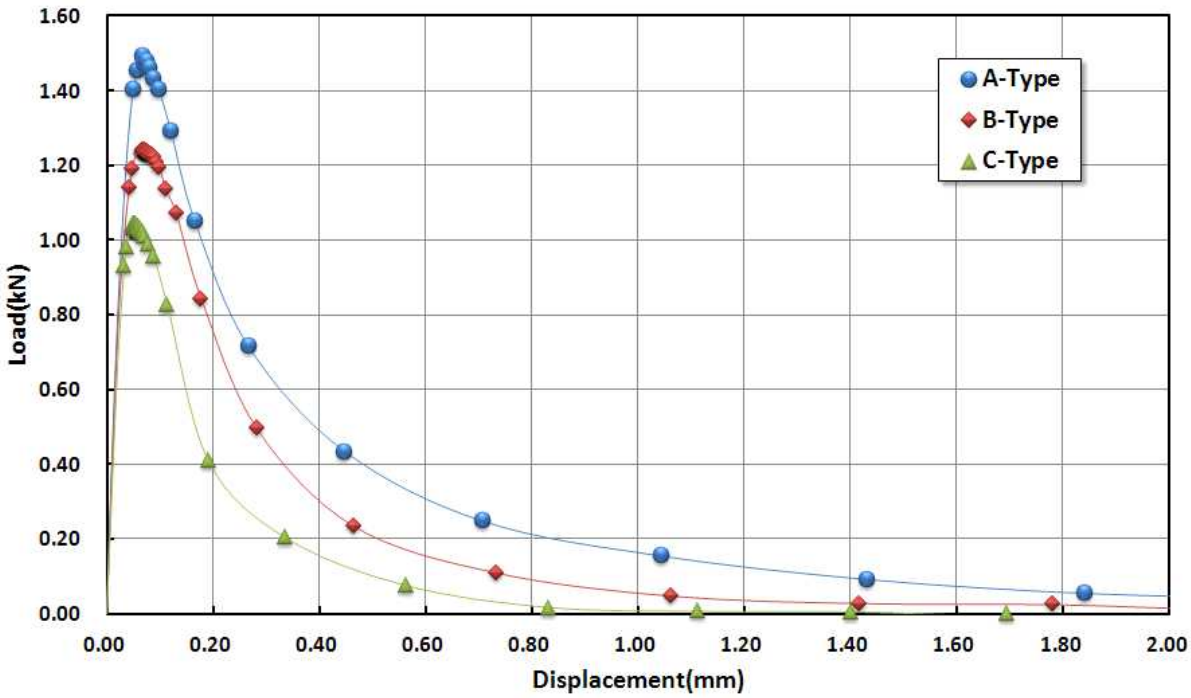


그림 18 전체 실험체의 하중-변위곡선

따라서 본 실험에서 하중-변위 곡선을 살펴보면 최대하중까지는 실험소요 시간이 2kN/min 속도로 선형적으로 증가하지만, 최대하중 점을 지나는 순간 균열이 발생함에 따라 이 하중 속도는 더 이상 제어되는 상태가 아니다. 따라서 최대하중 이후의 실험소요 시간은 그 이전에 비해 아주 짧다는 것 이다. 이를 표 8과 같이 최대하중까지 하중제어를 통한 재하시간과 최대하중이후 제어되지 않은 상태에서 하중이 0이 되는 시간을 나타냈다. A 실험체가 조금 더 빠르게 나타났지만, 대체적으로 비슷한 결과를 나타냈다.

다음 표 9는 각 실험체의 최대하중 값을 나타냈으며, A 실험체가 1.49kN으로 가장 높게 나타났으며 B, C 실험체 순으로 낮아지는 경향을 보였다. 이는 골재의 크기의 차이에서 나타난 결과라고 사료된다.

표 8 하중제어를 통한 하중재하시간

구 분	하중제어를 통한 최대하중까지 재하시간 (sec)	최대하중부터 하중이 0이 되는 시간 (sec)
A 실험체	44.812	0.080
B 실험체	37.248	0.132
C 실험체	31.144	0.128

표 9 각 실험체 최대하중과 변위 값

구 분		A 실험체	B 실험체	C 실험체
1	최대하중(kN)	1.49	1.24	1.04
	CMOD(㎜)	0.07	0.07	0.05
2	최대하중(kN)	1.50	1.25	1.06
	Displacement Gauge(㎜)	0.06	0.06	0.04

다음 그림 19는 하중-변위곡선의 형상을 실험체별로 상대비교를 하기 위해 각 하중과 변위를 최대하중과 최대하중 시의 변위를 바탕으로 정규화(Normalized)하였다. 그 결과 3-Point Bending Test을 통해 각 실험체별로 최대하중의 차이는 뚜렷하게 나타났지만, 하중-변위 곡선의 형상은 큰 차이가 없다는 것을 그래프를 통해 알 수 있었다. 이는 골재의 크기는 최대하중에는 영향을 주었지만, 하중감소에 따른 변위의 변화는 모든 실험체가 비슷한 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있었다. 그러나 상대적으로 정규화 시킨 하중-변위 곡선에서도 A 실험체의 파괴에너지가 가장 높게 나타났다.

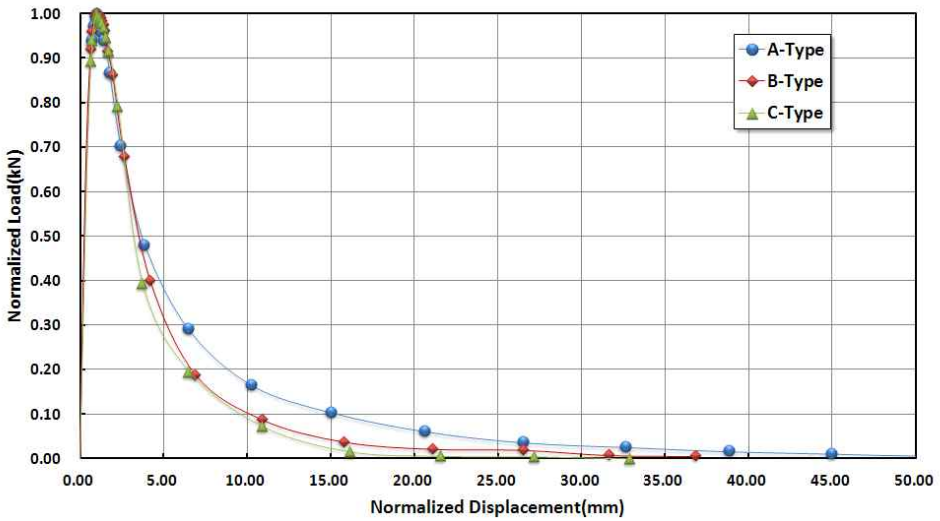


그림 19 전체 실험체의 Normalized 하중-Normalized 변위곡선

(다) 하중-균열길이 실험결과

위에서 각 실험체별로 하중-변위 곡선에 따른 균열길이 변화를 고속카메라로 촬영한 이미지를 바탕으로 분석하였다. 그 결과 우리는 각 이미지에서의 하중과 변위 값을 나타낼 수 있었으며, 균열이 진행되는 과정을 하중-변위 곡선과 동기화 시킬 수 있었다. 이를 바탕으로 본 장에서는 각 실험체별 하중 감소에 따른 균열길이변화 형상을 그림 20과 같이 나타낼 수 있었다. 각 실험체를 비교한 결과에서 알았듯이 최대하중의 차이를 볼 수 있다. A 실험체의 강도가 가장 높게 나타났으며, 그 다음 B, C 실험체 순이다.

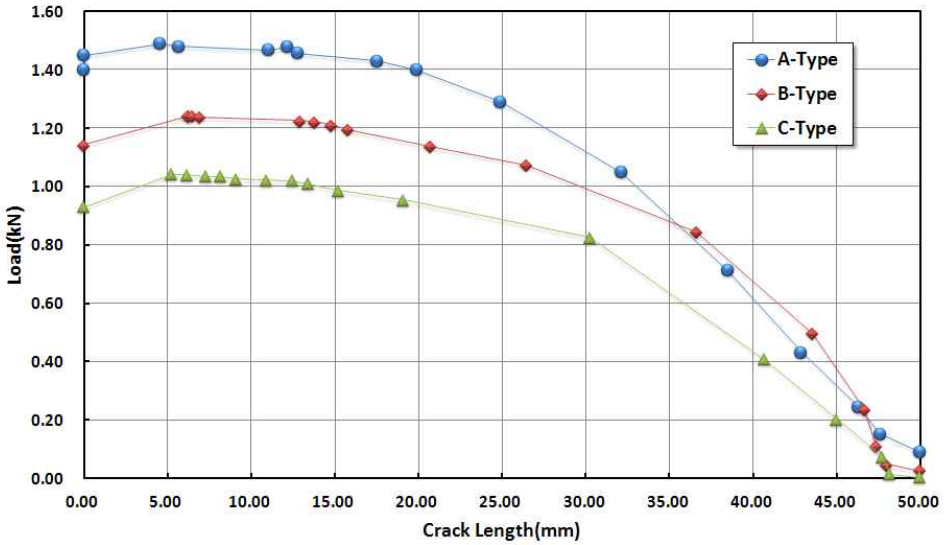


그림 20 실험체별 하중-균열갈이 그래프

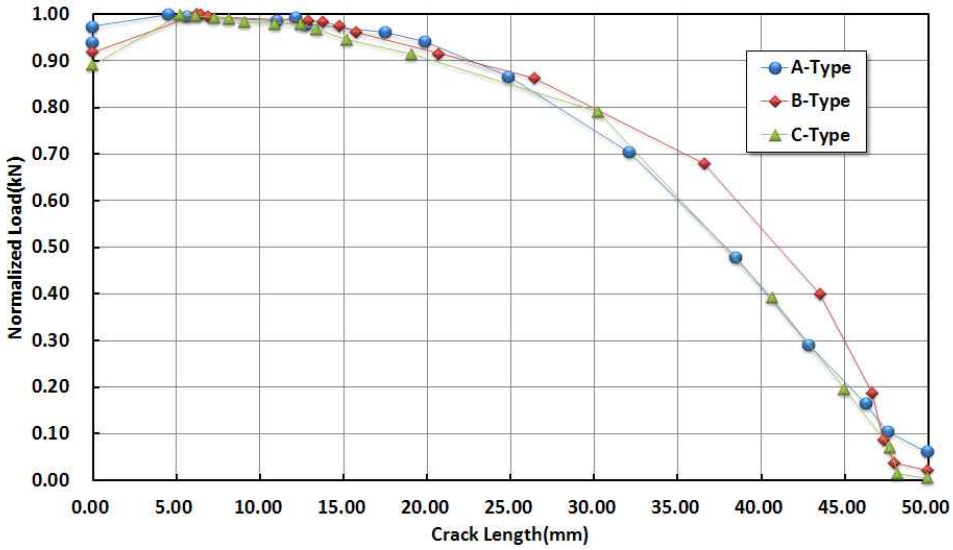


그림 21 실험체별 Normalized 하중-균열길이 그래프

따라서 하중변화에 따른 균열길이의 변화를 실험체별로 상대비교를 하기 위해 하중 값을 정규화(Normalized)하였다. 그 결과 하중변화에 따른 균열길이 변화의 형상은 그림 21과 같이 나타났고, 하중-변위 곡선과 마찬가지로 거의 비슷한 형상이 나타난다는 것을 알 수 있었다. 여기서 주목할 점은 골재의 종류와 크기가 다르더라도 각 실험체는 최대하중이후 균열이 시작할 때부터 50㎜까지 균열이 끝날 때 까지 하중감소에 따른 균열길이 변화는 모두 비슷한 경향을 보인다는 것이다. 그리고 표 10은 앞에서 각 실험체별로 12개의 이미지를 샘플링 한 결과를 바탕으로 균열이 시작한 이후로부터 균열이 끝날 때까지 시간을 나타냈으며, A 실험체가 B, C실험체 보다 2배 정도 빠른 시간인 0.06초로 진행되었다는 것을 알 수 있었다.

표 10 균열시작 이후 균열 진행 시간

구 분	균열시작 시간 (sec)	균열이 끝나는 시간 (sec)	균열진행시간 (sec)
A 실험체	44.812	44.872	0.060
B 실험체	37.248	37.372	0.124
C 실험체	31.144	31.268	0.124

(라) 시간에 따른 균열진행 실험결과

앞서 하중에 따른 균열길이 변화에 대해서 알아보았다. 그 결과를 바탕으로 균열이 시작되는 시점 즉, 하중이 감소하는 시점의 시간에 따라 균열길이의 변화를 표 9와 그림 22와 같이 나타냈다. 3-Point Bending Test를 통해서 측정된 데이터를 바탕으로 균열이 시작된 시점부터 0.02초의 시간차를 두고 10개의 이미지와 데이터를 추출한 후 그 시간에 따라 균열길이의 변화를 나타냈다.

표 11과 그림 22에서 보듯이 최대하중에 도달한 시점부터 균열이 시작이 되며, 모든 실험체는 최대하중에 근접하더라도 일정시간동안에는 균열이 진행되지 않고 미세균열(Micro-Crack)이 발생한다. 그러나 B, C 실험체는 A 실험체보다 균열이 빨리 진행되며, 약 0.06초 먼저 균열이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 A 실험체가 최대하중에 도달하더라도 굵은 골재의 사용이 일정시간동안 균열진행에 대한 저항성을 B, C 실험체보다 높일 수 있다고 사료된다. 하지만 균열이 진행하기 시작하면 A 실험체의 균열진행속도는 B, C 실험체 보다 현저하게 빨라지며, 가장 먼저 균열 50㎜에 도달하게 된다. 일반적으로 콘크리트의 균열진행에 있어서 가장 효과적으로 골재의 사용이 골재의 브리징(Bridging) 현상으로 인해 상대적으로 균열의 진행을 저지한다. 하지만 본 실험에서 나타나듯이 균열 진행 이후 그림 22에 표시된 지점부터 10㎜ 굵은 골재를 사용한 A 실험체가 균열진행이 가장 빠르게 나타났으며, 그 다음으로 5㎜ 굵은 골재를 사용한 B 실험체, 표준사를 사용한 C 실험체 순으로 균열이 진행하였다. 이는 그림 23~25에서처럼 최대하중에 도달할 때 까지 변형에너지(Strain-Energy)량과 관련이 있다고 사료된다. 변형에너지는 변형된 탄성체에 저장되는 일종의 위치에너지를 가리키는 것으로 물체에 외력이 가해지면 변형이 되면서 이 힘이 한일이 일이 물체에 저장되며, 이후 물체가 파괴되면 그 에너지를 방출하게 된다. 이와 같이 표 12에 각 실험체별 최대하중에 도달할 때 까지 축적된 변형에너지 값을 나타냈다. A 실험체의 변형에너지의 값이 70.68N·㎜으로 B(59.56N·㎜), C(35.78N·㎜) 실험체보다 높게 나타났다. 따라서 A 실험체는 균열진행은 가장 늦게 시작했지만, 균열이 시작하게 되면 높은 변형에너지의 방출로 인해서 균열진행속도가 가장 빨리 진행되었다고 사료된다. B 실험체도 A 실험체보다는 균열진행속도가 느렸지만, C실험체 보다는 빠른 균열진행속도를 나타냈다.

표 11 시간에 따른 균열길이 변화 실험값

시간 (sec)	A 실험체			B 실험체			C 실험체		
	재하 시간 (sec)	하중 (kN)	균열 길이 (㎜)	재하시간 (sec)	하중 (kN)	균열 길이 (㎜)	재하 시간 (sec)	하중 (kN)	균열길이 (㎜)
0.00	44.712	1.48	0	37.208	1.23	0	31.104	1.04	0
0.02	44.732	1.49	0	37.228	1.24	0	31.124	1.04	0
0.04	44.752	1.49	0	37.248	1.24	6.22	31.144	1.04	5.23
0.06	44.772	1.49	0	37.268	1.24	6.22	31.164	1.04	6.14
0.08	44.792	1.49	0	37.288	1.24	6.44	31.184	1.04	7.27
0.10	44.812	1.49	4.52	37.308	1.24	6.89	31.204	1.03	8.18
0.12	44.832	1.43	17.53	37.328	1.22	12.89	31.224	1.03	9.09
0.14	44.852	0.43	42.89	37.348	1.07	26.46	31.244	0.96	19.10
0.16	44.872	0.04	50.00	37.368	0.05	48.01	31.264	0.02	48.19
0.18	44.892	0.00	50.00	37.388	0.00	50.00	31.284	0.00	50.00

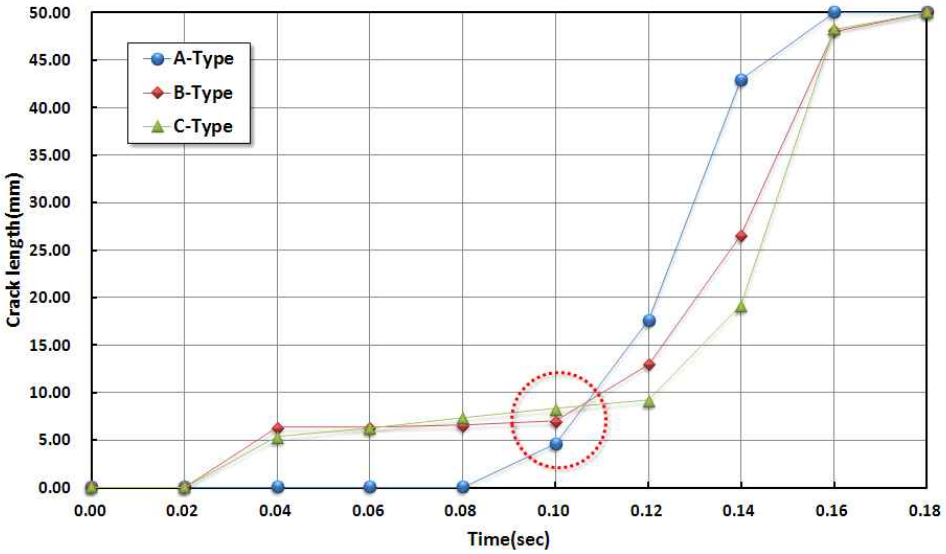


그림 22 시간에 따른 균열길이 변화 그래프

표 12 실험체별 최대하중까지 축적된 변형에너지(Strain Energy)

구분	A 실험체	B 실험체	C 실험체
최대하중까지 축적된 Strain Energy (N・mm)	70.68	59.56 (A실험체 대비 84.5%)	35.78 (A실험체 대비 50.7%)

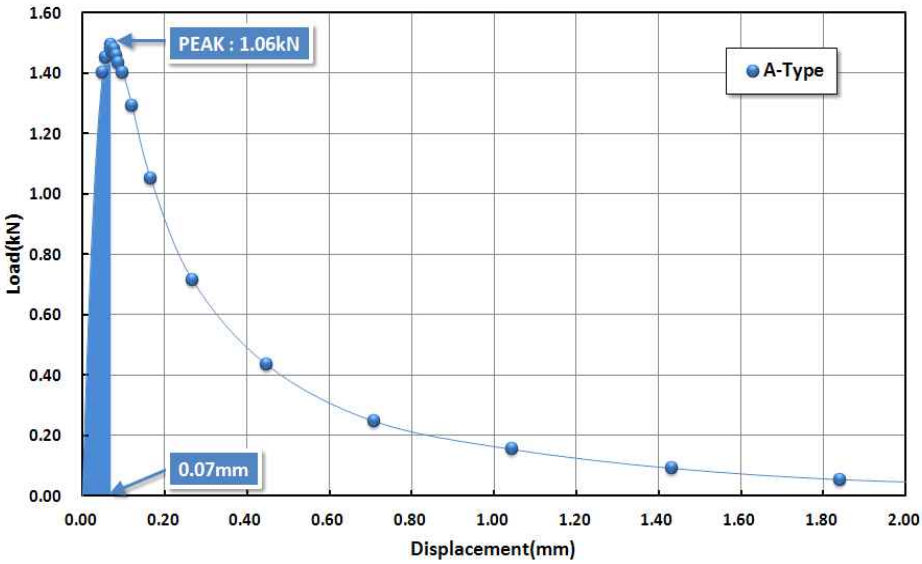


그림 23 A 실험체 변형에너지

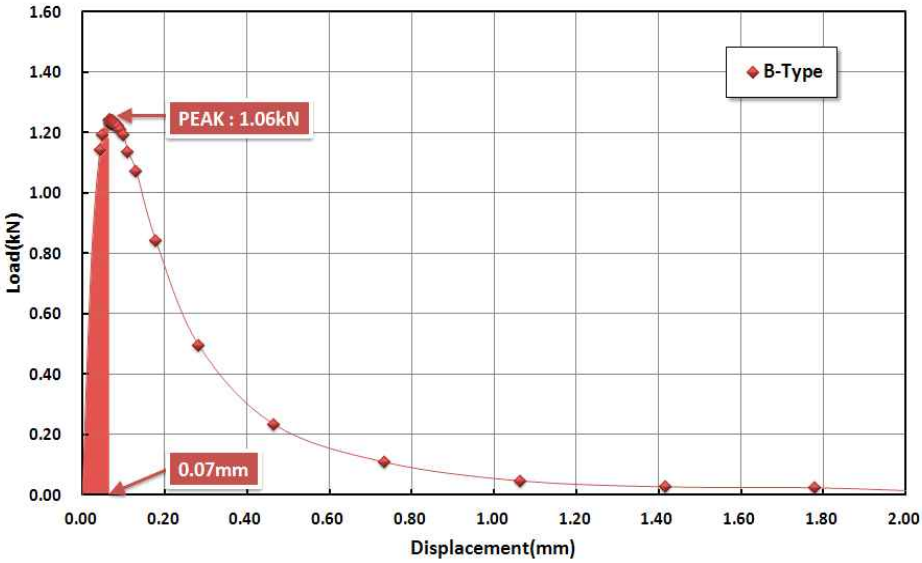


그림 24 B 실험체 변형에너지

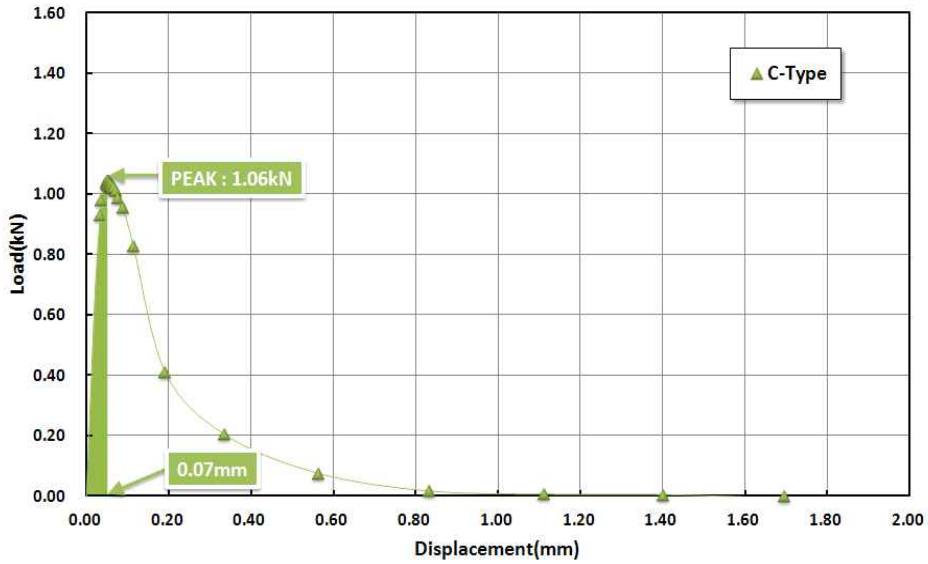


그림 25 C 실험체 변형에너지

(4) 요약

본 연구에서는 압광 재료를 이용하여 파괴실험 시 콘크리트의 균열진행과정을 시각화하였으며, 그 실험 데이터를 바탕으로 하중-변위 곡선과 하중변화에 따른 균열진행과정 및 시간에 따른 균열진행에 대한 실험결과를 나타냈다. 그 결과는 크게 다음 4가지로 요약할 수 있다.

(가) 압광 페인트를 이용한 콘크리트의 균열진행과정을 시각화하여 성공적으로 그 적용가능성을 보여주었다. 기존의 균열과 균열진행에 대한 검출방법은 이미 진행된 균열이나 아주 느리게 진행되는 균열만을 시각화하고 측정할 수 있었으나, 본 연구는 이전에 선행된 국내외 연구와 논문과 달리 매우 빠르게 진행되는 균열을 시각화 할 수 있었으며 균열이전의 균열선단에서의 미세균열도 확인 할 수 있었다.

(나) 각 실험체별로 고속카메라로 촬영된 이미지에 대하여 하중 및 변위 값을 동기화할 수 있었으며, 그에 따른 균열길이도 측정할 수 있었다. 또한, 균열 진행속도에 비해 하중이 감소하는 속도가 현저하게 느리다는 것을 알 수 있었다.

(다) 정규화(Normalized)시킨 하중-변위 곡선과 하중-균열길이 곡선은 실험체 골재의 크기에 상관없이 비슷한 형상을 나타냈다. 그러나 상대적으로 정규화 시킨 하중-변위 곡선에서도 A 실험체의 파괴에너지가 가장 높게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

(라) 일반적으로 콘크리트의 균열진행에 있어서 가장 효과적으로 골재의 사용이 골재의 브리징(Bridging) 현상으로 인해 상대적으로 균열의 진행을 저지한다. 이처럼 시간에 따른 균열진행과정을 통해서 10㎜ 굵은 골재를 사용한 A 실험체가 균열발생 이후 균열진행이 가장 늦을 것이라는 생각과 달리 A 실험체가 균열이 시작된 이후 가장 빠르게 균열이 진

행한다는 것을 알 수 있었다. 이는 최대하중에 도달하기 까지 축적된 변형에너지(Strain Energy)량 때문이라 사료된다.

이 연구 가치는 앞으로 압광 재료를 이용하여 건설 분야의 활용성은 다양할 것이라고 생각된다. 본 논문에서처럼 매우 빠르게 진행되는 균열진행과정의 시각화하여 손쉽게 균열유무를 파악하고, 콘크리트 구조물에서의 눈에 잘 띄지 않는 미세한 균열검출을 통해 구조물의 안정성 평가에 효과적으로 적용할 수 있을 것이다. 이러한 미세균열 검출은 작은 외부 하중 변화에 따른 균열선단에서의 높은 응력, 변형율의 변화로서 검출이 가능 할 것이라고 보인다. 또한 나아가 압광 재료를 이용한 콘크리트 구조물의 균열검출방법 개발에 충분히 기여할 수 있을 것이라고 사료된다.

한편, 이후 압광 재료를 이용하여 다양한 실험체에 대한 실험을 필요할 것이며, 더불어 콘크리트의 균열이전의 응력분포를 보다 정확하게 시각화 하기위한 연구를 진행하는 것 또한 중요한 과제이다.

2. 2차년도 연구수행 내용 및 결론

가. 아크릴 레진을 이용한 균열 탐지용 압광 페인트 개발

(1) 서론

본 연구는 압광 페인트에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 균열 발생 및 전파 과정을 시각적으로 감시할 수 있는 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트에 관한 것이다. 주지하다시피 일반적으로 인간이 현상을 이해하는데 있어서 시각적인 인지는 전체의 감각의 약 80%를 차지한다. 즉 무엇이든지 눈으로 확인하려는 본능이 있다. 그러나, 우리가 다루고 있는 여러 물리현상들은 볼 수 없는 것들이 대다수를 차지한다. 그 실체의 존재는 익히 잘 알고 있으나 직접적으로 볼 수 없는 물리 현상 중에 가장 대표적인 것이 응력(stress)이다. 물론 변형을 통해 대략적인 추론은 가능하나 눈으로 식별하기 어려울 정도의 작은 변형이라면 응력의 실체를 인지하기는 매우 어려울 것이다. 따라서 실제 연구현장이나 산업현장에서는 응력인지를 위해 복잡한 부수장치가 따르는 간접적 방법들을 이용하고 있다. 예를 들어 응력을 가시화하기 위해 변형률 게이지(strain gauge), 초음파, X-선(X-ray)등이 이용되고 있으나, 이러한 방법들은 모두 고비용의 복잡한 장치(Instrumentation)을 요구한다는 문제점이 있으며. 더욱이 직접 볼 수 있는 것과는 차원이 다른 일종의 간접 측정이라는 문제점이 있었다. 특히, 콘크리트 구조를 비롯한 건설구조물은 대형화 및 장수명화 함에 따라 기존의 비파괴 시험법 등의 기술로는 피로 균열과 같은 결함부를 검출하는 것이 기술적, 경제적으로 매우 어려워지고 있는 현실에 있다. 본 연구는 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 고비용의 복잡한 기계사용을 요구하는 각종 측정 및 진단 방법 대신에 저비용으로 구조물 건전성 모니터링이 가능한 균열 탐지용 압광 페인트를 개발 함으로써, 대형 중요 구조물들의 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하고 이에 따른 적절한 조치를 취함으로써 사회 경제적 파장이 큰 대형 사고를 미연에 방지하는데 그 목적이 있다, 또한 학술적인 측면에서도 콘크리트 소재의 균열 시스템 변화에 따른 준-동적 파괴시의

정확한 응력확대계수 값의 측정이나 균열 전파시에 보고되고 있는 프로세스 영역 등에 대한 정성적/정량적 해석문제 등을 일거에 해결할 수 있는 압광형 페인트를 개발하는데 있다. 특히, 본 연구에서는 1 차년도의 에폭시 및 우레탄 기반형 압광 페인트 제품에 이어 기존 압광 페인트 보다 소재 적용 범위가 높고 가격 경쟁력이 있는 아크릴 기반형 압광 페인트를 추가적으로 개발함으로써 기존 페인트의 주요 3 가지 성분에 기반하는 콘크리트용 압광형 페인트 개발을 완료하고자 하였다.

구체적으로는 크게 다음의 네가지 목적하에 아크릴 기반형 압광 페인트를 개발하고자 하였다. 첫째 목적은 안전 검사를 위해 대면적을 실시간 감시할 수 있는 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트를 제공하는 것이다. 둘째 목적은 육안 관찰이 쉽게 이루어져 안전 검사 비용을 감소시킬 수 있는 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트를 제공하는 것이다. 셋째 목적은 균열 발생 또는 전파 부위의 보수 후에 덧바를 수 있어 안전 검사용 페인트의 유지 보수 비용을 감소시킬 수 있는 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트를 제공하는 것이다. 넷째 목적은 시멘트, 철재, 목재 등 다양한 소재에 적용할 수 있는 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트를 제공하는 것이다.

(2) 실험방법

당해 년도에 새롭게 개발된 아크릴 기반 압광 페인트의 성능 시험을 통해 동 재료의 균열 탐지여부를 확인하고자 본 연구에서는 우선 원주형 공시체를 제작하여 양생하였다. 시험을 위해 제작된 원주형 공시체의 배합설계 강도는 25MPa 이며, 사용된 실린더 몰드의 제원은 직경 10 cm, 높이는 20cm이다. 그림 1 은 공시체 제작 모습을 보여주고 있다. 한편, 배합설계는 콘크리트 표준시방서를 참고하여 설계하였으며 배합 설계표는 표 1 과 같다.



그림 1 원주형 콘크리트 공시체 제작 과정

표 1. 콘크리트 배합 설계표

설계 강도 (MPa)	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위(%)	물-시멘트 비(%)	잔골재율 S/a(%)	단위량(kg/m^3)				
						물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은골재 G	혼화제 (g/m^3)
30	25	12	4.5	43		185	430	775	967	-
50	25	12	4.5	32		138	430	775	967	43

실제 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트는 전체 중량의 60-99%인 투명 페인트 바인더 및 상기 투명 페인트 바인더에 혼합되어, 전체 중량의 1-40%인 압광 분말을 포함시켰다. 또한 상기 투명 페인트 바인더는 투명 페인트 바인더 중량의 30-40%인 아크릴 레진을 포함할 수 있도록 설계 하였다. 특히, 상기 투명 페인트 바인더는 바인더 중량의 51-60%인 물을 포함할 수 있으며, 투명 페인트 바인더 중량의 1-10%인 기타 첨가제를 포함하도록 성분을 조정 하였다. 기타 첨가제는 2-Methylpropanoic acid monoester with 2,2,4- trimethyl-1,3-pentanediol; Texanol, Methyl carbitol을 포함할 수 있다. 마지막으로 압광 분말은 $SrAl_2O_4$:Eu를 포함할 수 있으며, 0-0.02몰의 Dy 및 0-0.02몰의 Nd을 포함하도록 개발 하였다.

새롭게 개발된 아크릴 기반 압광 페인트의 성능 시험을 위해 본 연구에서는 브라질리언 시험을 수행 하였다. 시험 방법은 원통형 시험편을 그림 2 와 같이 길이 방향으로 눕힌 다음 측면의 위 아래 부분을 만능시험기로 압축하는 형태로 진행하였다. 이때 시험편에 부가되는 응력은 원통형 내부에서는 인장응력이 걸리게 되며, 원통형 표면 부위에서는 압축응력이 발생되게 된다. 그 결과 통상 원통 내부 중심부에서 균열이 발생되어 아래위로 균열이 전파되거나, 한쪽으로 치우친 균열발생 후에 쐐기 모양의 균열이 다른 방향으로 전파되어 파단되는 2 가지 형태의 파괴 양상을 보이게 된다.

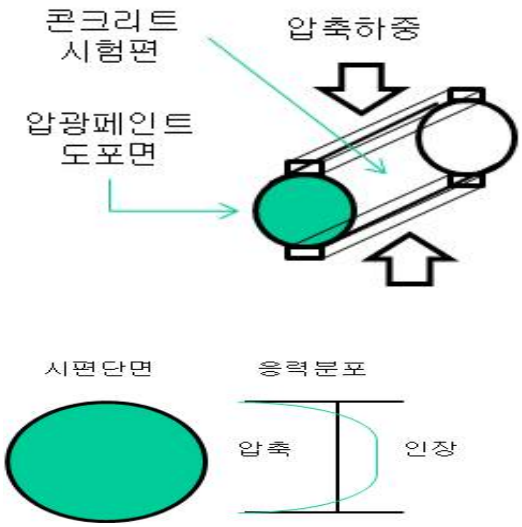


그림 2 브라질리언 시험법 및 시편단면 응력분포

(3) 결과 및 고찰

본 연구에서 개발된 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트의 특징을 요약하면 크게 첫째로, 안전 검사를 위해 대면적을 실시간 감시할 수 있다. 둘째, 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트에 의하면 육안 관찰이 쉽게 이루어져 안전 검사 비용을 감소시킬 수 있다. 셋째, 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트에 의하면 균열 발생 또는 전파 부위의 보수 후에 덧바를 수 있어 안전 검사용 페인트의 유지 보수 비용을 감소시킬 수 있다. 넷째, 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트에 의하면 시멘트, 철재, 목재 등 다양한 소재에 적용할 수 있다.

(가) 아크릴 기반 페인트 개발

2012 년에 새롭개 개발된 아크릴 수지 기반형 압광 페인트의 조성은 표 2 로 요약될 수 있다.

표 2. 아크릴 수지 기반형 압광 페인트의 조성

구분		명칭	함유량(%)	
			개별	혼합시
투명 페인트 바인더	주재료	Water	51~60%	60-99%
	부재료	아크릴 에멀젼 수지	30~40%	
	기타 첨가제	2-Methylpropanoicacid monoesterwith 2,2,4-trimethyl-1, 3-pentanediol ; Texanol Methyl carbitol 등	1~10%	
압광분말	주재료	SrAl204:Eu	나머지	40-1%
	부재료	Dy	0-0.02 몰	
		Nd	0-0.02 몰	

기본적으로 표 2에서 살펴볼 수 있듯이 주요 성분으로 60-99%의 투명 페인트 바인더 및 40-1%의 압광 분말을 포함할 수 있다. 구체적으로 투명 페인트 바인더가 전체 중량 대비 60%일 때 압광 분말은 전체 중량 대비 40%로 혼합되며, 투명 페인트 바인더가 전체 중량 대비 99%일 때 압광 분말은 전체 중량 대비 1%로 혼합될 수 있다. 상기 투명 페인트 바인더는 안료 입자끼리 또는 안료 입자를 도장면에 접착하여 페인트 막을 형성하는 접착제 역할을 하며, 투명 페인트 바인더는 물, 아크릴 레진 및 기타 첨가제들이 혼합되어 만들어질 수 있다. 상기 물은 투명 페인트 바인더의 중량 대비 51-60%가 혼합될 수 있다. 또한, 아크릴 레진은 투명 페인트 바인더의 중량 대비 30-40%가 혼합될 수 있다. 상기 아크릴 레진은 기본적으로 내알칼리성 및 내후성이 뛰어나 시멘트, 철재, 목재 등 건축용 도료에서 가장 많이 사용되는 수지이다. 그러므로 아크릴 레진을 혼합함으로써 세라믹, 금속, 폴리머 등 거의 모든 재료에 적용 가능하며, 연성이 향상되어 소성 변형이 많이 일어나는 소재에 대해서도 적용할 수 있다.

또한, 기타 첨가제는 투명 페인트 바인더의 중량 대비 1-10%가 혼합될 수 있다. 상기 기타 첨가제는 2-메틸프로판 산 모노에스테르 함유 2,2,4-트리메틸-1,3 펜탄디올;텍사놀(2-Methylpropanoic acid monoester with 2,2,4-trimethyl-1,3-pentanediol; Texanol) 또는 메틸 카비톨(Methyl carbitol) 등을 포함할 수 있다. 구체적으로 2-메틸프로판 산 모노에스테르 함유 2,2,4-트리메틸-1,3 펜탄디올;텍사놀은 가소제로서, 도료에 첨가되어 도막의 탄성 및 유연성을 증가시킬 수 있다. 이러한 첨가제에 의해 페인트는, 습도 및 부식에 강한 특성을 나타내며, 용제에 잘 용해될 수 있다. 또한, 메틸 카비톨은 용제로서, 도료 중 안료를 제외한 액상 성분으로 묽고 균일한 도장을 가능케 하여 다공성 재료에서는 공극을 채워 단단해지며 내구성 및 불투수성의 막을 형성할 수 있다. 이와 같이 투명 페인트 바인더는 물, 아크릴 레진 및 기타 첨가제의 혼합에 의해 만들어 질 수 있다. 예를 들어 투명 페인트 바인더의 중량을 100으로 가정할 때, 물은 60, 아크릴 레진은 30 및 기타 첨가제는 10으로 조성될 수 있다. 마지막으로, 투명 페인트 바인더에 혼합되는 압광분말은 $SrAl_2O_4$:Eu를 포함할 수 있다. $SrAl_2O_4$:Eu는 유로퓸

(europium) 이온을 활성화시킨 스트론튬 알루마트로서, 외부로부터의 자극(응력)을 받을 경우 가시광선의 형태로 에너지를 방출하는 물질이다. 이다. 상기 $SrAl_2O_4$:Eu압광 분말에는 활성 촉진 인자로서 란탄계열 원자들 중 형광 특성특성 개선에 효과적인 Dy(dysprosium) 및 Nd(neodymuim)이 첨가될 수 있다. 이때 Dy 및 Nd는 각각 0-0.02 몰이 포함될 수 있다. 예를 들어, 압광 분말 전체를 1몰로 가정할 때, Dy이 0.02몰, Nd이 0.02몰 포함된다면, $SrAl_2O_4$:Eu는 0.96몰 포함될 수 있다. 이와 같이 압광 분말을 도료에 첨가함으로써, 균열의 발생 및 전파를 가시적으로 확인할 수 있다. 또한, 도료가 대면적에 도포되었을 경우에도 안전 검사를 실시간으로 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트는 압광 분말 및 페인트 사이의 흡착력을 증가시키고, 페인트 층과 적용 소재 사이의 접착력을 증가시킴으로써 강도 및 탄성계수 감소에 따른 상대적인 발광량 감소를 충분히 저지할 수 있었다. 게다가, 연성이 향상되어, 금속 및 폴리머와 같은 고연성 소재에서의 적용이 가능하며, 내알카리성 및 내후성이 뛰어나 시멘트, 철재, 목재 등 다양한 소재에 적용 가능하다.

(나) 페인트 표준 시공방법 개발

실시예에 따른 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트의 다음과 같이 도포될 수 있다. 그림 3 은 실시예에 따른 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트가 콘크리트 시편에 도포된 상태를 나타낸다. 그림 3 을 참조하여, 상기 압광 페인트를 콘크리트 시편에 최대 1㎜ 이하의 두께로 골고루 발라준 후에 2-3일 정도 건조시킬 수 있다. 실시예에 따른 아크릴 레진을 이용하는 압광 페인트를 이용하여 도포 시 주의 사항은 표 3 과 같다. 표 3 을 참조하여, 아크릴 레진을 이용하는 압광 페인트는 건축물 내부의 콘크리트, 시멘트몰탈, 철골 구조물, 목재 등에 도포될 수 있다. 이때, 아크릴 레진은 투명 페인트 바인더의 약 30% 포함될 수 있다. 예를 들어, 아크릴 레진이 투명 페인트 바인더의 약 30% 포함될 경우, 물은 약 60%, 기타 첨가제는 약 10% 포함될 수 있다. 그리고 압광 분말은 SrAl2O4:Eu에 Dy 및 Nd이 각 0.01몰씩 첨가되어 만들어질 수 있다. 이후 아크릴 레진을 포함하는 투명 페인트 바인더 및 압광 분말이 각각 중량비 8:2로 혼합하여 최종 페인트로 제조될 수 있다. 이와 같이 제조된 페인트는 콘크리트 시편에 약 100㎛ 두께로 1회 도포 후 건조될 수 있다. 이때 건조도막두께는 100㎛이며, 다양한 방법으로 건조도막두께가 측정될 수 있다. 예를 들어, 직접 마이크로미터나 현미경으로 측정하거나, 화학적으로 피막을 용해하여 피막 질량으로부터 도막 두께를 계산하거나, 전기 화학적으로 피막을 전해 박리하여 전위의 시간적 변화를 조사하여, 피막 용해에 소비한 전기량으로부터 계산하는 방법 등이 있다. 또한, 도장은 1회 이상할 수 있으며, 이론도포면적은 13.8㎡/L이다. 이때 이론도포면적은 페인트의 사용량을 나타낼 수 있으며, 13.8㎡/L는 페인트 1L당 13.8㎡ 또는 약 4평을 도포할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 20℃에서 건조할 경우, 고화건조가 1시간 이내에 이루어질 수 있다. 고화건조란, 엄지와 인지 사이에 시편을 물리되 도막이 엄지 쪽으로 가게 하여 힘껏 눌렀다가(비틀지 않고) 떼어 내어 부드러운 헝겊으로 가볍게 문질렀을 때 도막에 지문 자국이 없는 상태를 말하며, 이러한 상태에서는 급할 경우 사람 정도는 밟고 지나갈 수 있다.

아크릴 레진을 이용한 압광 페인트를 도포한 후 2-3일 정도가 될 경우, 도막을 손톱이나 칼끝으로 긁었을 때 흠이 나지 않고 힘들다고 느껴지게 될 수 있는 완전 건조 상태가 될 수 있다. 또한, 재도장 시 간격은 25℃ 기준으로 3시간이 될 수 있다. 이때 재도장 간격은 도장된 도막이 충분히 건조되기 위해 유지되어야 하는 시간이며, 이 경우에는 1번 도장을 하고 3시간 이후에 재도장 가능하다.

표 3. 페인트 표준 시공방법

피도면	건축물 내부의 콘크리트, 시멘트몰탈, 철골 구조물, 목재 등
아크릴 레진 성분	투명 페인트 바인더의 약 30%
건조도막두께	100(㎛)
도장횟수	1 회 - 수 회
이론도포면적	13.8㎡/L
건조시간(20도)	고화건조 : 1시간 이내
재도장 시 간격(25도)	3시간 이후

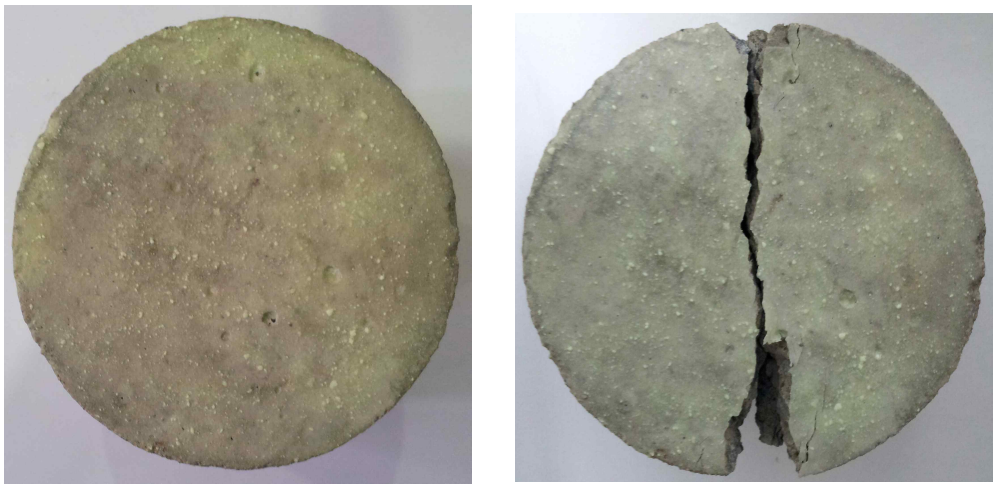


그림 3 아크릴형 압광 페인트 도포상태 및 균열 전파 시험 후 파괴상태

이와 같이 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트를 콘크리트 시편에 도포하여 건조시킴으로써, 콘크리트 시편 표면부는 페인트 도포 후에도 굴곡이나 형상이 투과되어 보일 정도로 투명도가 높고 얇은 박막 상태로 잘 도포될 수 있다. 이상에서는 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트 및 도포방법에 대하여 설명하였으며, 이하에서는 이를 통하여 얻은 실험 결과에 대하여 설명될 것이다.

(다) 압광 페인트 성능 평가

본 시험에서는 압광 페인트 성능 평가를 위해 투명 바인더의 경우 100%를 기준으로 물 60%, 아크릴 에멀젼 30%, 기타 첨가제 10% 의 조성으로 제작 하였다. 한편 압광 분말의 경우 $SrAl_2O_4$:Eu 에 Dy 및 Nd 가 각 0.01 몰씩 첨가된 조성으로 합성되었다. 이후 아크릴 형 투명 바인더 및 압광 분말은 각각 중량비 8:2 로 혼합하여 최종 페인트로 제조하였다. 제조된 페인트는 콘크리트 시편에 약 100um 두께로 1 회 도포 후 건조 시켰다. 압광 페인트가 도포된 콘크리트 시편은 만능시험기로 야간에 브라질리언 시험을 수행하였으며, 이때 콘크리트 균열전파와 함께 발생되는 압광 페인트에서의 발광 현상은 초당 60 프레임의 속도로 동영상 형태로 기록한 후 필요에 따라 사진으로 추출 하였다. 그림 2(a) 및 (b)는 실시예에 따른 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트가 도포된 콘크리트 시편의 브라질리언 시험 및 시험 결과를 나타낸다. 그

림 2(a)를 참조하여, 원통형 콘크리트 시편(T)을 길이 방향으로 눕힌 다음 측면의 위 아래 부분에 만능시험기로 압축 하중(F)을 작용시킬 수 있다. 그림 2(b)를 참조하여, 이때 시편에 부가되는 응력은 원통형 내부에서는 인장응력이 걸리게 되며, 원통형 표면 부위에서는 압축응력이 발생되게 될 수 있다. 그 결과, 원통 내부 중심부에서 균열이 발생되어 아래위로 균열이 전파되거나, 한쪽으로 치우친 균열 발생 후에 쐐기 모양의 균열이 다른 방향으로 전파되어 파단되는 2 가지 형태의 파괴 양상을 보이게 될 수 있다.

그림 3은 실시예에 따른 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트가 도포된 콘크리트 시편의 파괴된 상태를 나타낸다. 그림 3을 참조하여, 파괴 후 콘크리트 시편으로부터 콘크리트 균열 전파 부위의 페인트 및 모재 간 박리가 전혀 일어나지 않은 상태로 균열이 전파되었음을 알 수 있으며 이는 기본적으로 아크릴계 페인트의 향상된 모재 밀착력 및 연성 특성에 기인한다. 그림 4는 실시예에 따른 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트가 도포된 콘크리트 시편의 가시화된 균열전파 영상을 나타낸다. 그림 4를 참조하여, 실시예에 따른 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트가 균열전파 현상을 가시화하는데 충분한 양의 발광현상을 확보할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 균열 영상의 기록 속도가 초당 60프레임이므로 대략 6 프레임 만에 시편 아래 부위에서 균열이 발생되어 전체 시편을 관통하여 전파되는 전 과정을 기록하고 있으므로, 1㎜ 정도로 전파되는 비교적 빠른 균열 전파 상태에서도 균열 움직임을 충분히 감지할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

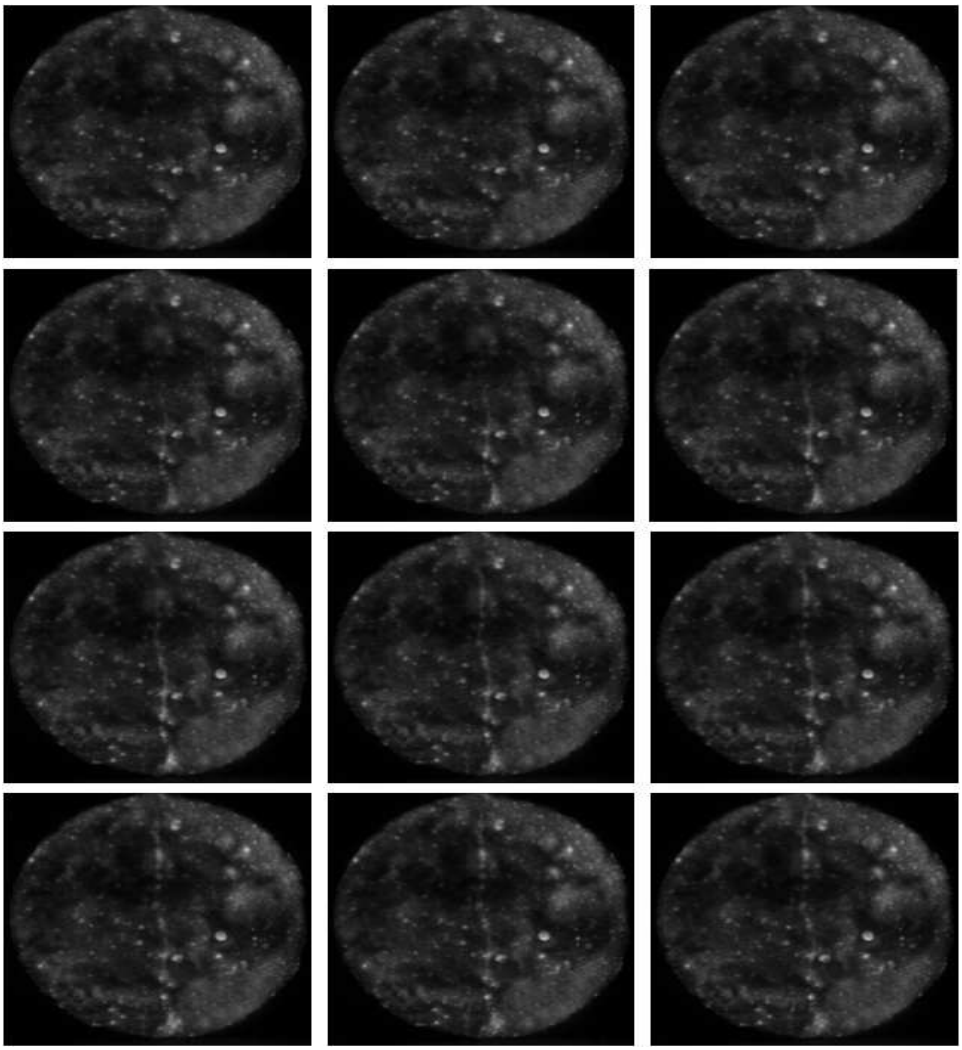


그림 4 콘크리트 소재의 아크릴형 압광페인트를 이용한 균열 가시화 탐지

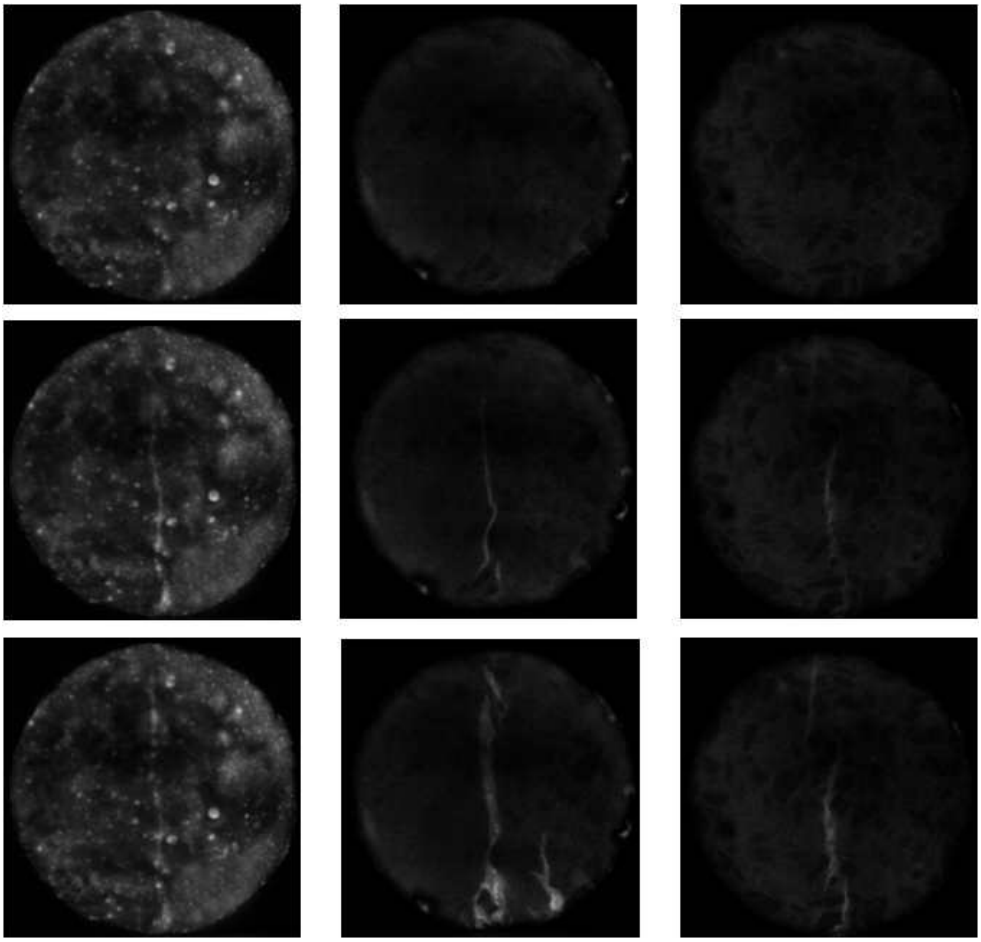


그림 5 콘크리트 소재의 아크릴, 우레탄, 에폭시형 압광 페인트를 이용한 균열 가시화 탐지

마지막으로 그림 5에서 살펴볼 수 있듯이 기존의 우레탄 레진 및 에폭시 레진형 압광 페인트와 비교할 때 아크릴 레진 기반형 압광 페인트 성능 감소가 두드러지게 나타나지 않았으므로, 이와 같이 실시예에 따른 아크릴 레진을 이용한 압광 페인트를 이용하여, 육안 관찰이 쉽게 이루어져 안전 검사 비용을 감소시킬 수 있으며 안전 검사를 위해 대면적을 실시간 감시할 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 개발 도료의 장점을 정리 하면 다음과 같다.

① 넓은 적용 범위 : 기본적으로 아크릴 수지의 경우 내알카리성 및 내후성이 뛰어나 시멘트, 철재, 목재등 건축용 도료에서 가장 많이 사용되는 수지이다. 따라서 기존에 개발되었던 에폭시 및 우레탄 레진형 압광 페인트에 비하여 다양한 소재에의 적용이 가능하다.

- 아크릴 : 시멘트, 철재, 목재 등 세라믹, 금속, 폴리머 등 거의 모든 소재에 적용가능
- 에폭시 : 콘크리트 및 세라믹 소재 위주
- 우레탄 : 철재 및 금속 소재 위주

② 향상된 기계적 성질 : 아크릴 수지형 투명 페인트 바인더의 경우 에폭시 및 우레탄형 투명 페인트 바인더에 비하여 강도 및 탄성계수는 상대적으로 떨어지나 연성이 개선되어 소성변형이 많이 일어나는 소재에 대해서도 적용 가능하다는 장점이 있다.

- 아크릴 : 저강도, 고연성 (최대 인장강도 6000 psi, 연신율 5% 이하)
- 우레탄 : 중강도, 중연성 (최대 인장강도 8000 psi, 연신율 3.5% 이하)
- 에폭시 : 고강도, 저연성 (최대 인장강도 10000 psi, 연신율 2.5% 이하)

(4) 결론

일반적으로 투명 페인트의 기계적 성질 중에서 강도와 이에 비례하는 탄성계수 값이 감소하는 경우 압광 분말에 전달되는 응력값이 감소하여 발광량이 감소하는 결과를 초래하게 된다. 그러나 일정 강도 수준 까지는 강도 감소에 따른 발광량 검출이 불가능할 정도의 대대적인 광량 감소가 나타나지 않는 것으로 이미 기존의 에폭시 레진형 압광 페인트 실험에서 밝혀진 바 있다. 또한 이러한 발광량 감소는 본 연구에서 개발된 아크릴 수지형 압광 페인트의 경우, 압광 분말과 페인트 사이의 흡착력을 증가 시키고, 페인트 층과 적용 소재 사이의 접착력을 증가시킴으로서 강도 및 탄성계수 감소에 따른 상대적인 발광량 감소를 충분히 저지 할 수 있다. 여기에 더하여 아크릴 수지형 압광 페인트의 경우, 연성이 기존의 에폭시 레진형 압광 페인트에 비해 2 배 가량 개선 되었으므로, 이러한 장점이 금속 및 폴리머와 같은 고연성 소재에서의 적용에 있어 유리한 점으로 작용하게 된다. 마지막으로 아크릴 수지형 압광 페인트의 경우, 내알카리성 및 내후성이 뛰어나 시멘트, 철재, 목재 등, 기존에 개발되었던 에폭시 및 우레탄 레진형 압광 페인트에 비하여 다양한 소재에의 적용이 가능하다.

나. 아크릴 레진형 페인트를 이용한 정지 균열 탐지 및 응력 확대 계수 평가기법 개발

(1) 서론

응력확대 계수 (stress intensity factor; SIF) 값이 균열 첨단과 전형적인 균열 첨단 근처에서의 등색곡선(isochormatic) 패턴에서 주어진 프린지 루프상의 최원점 사이의 거리 및 균열 연장선과 최원점 사이의 회전각으로부터 계산 가능하다는 것이 Irwin 에 의해 밝혀진 이후, 다수의 연구자들에 의해 균열 첨단 응력장 근처에서의 정적 및 동적 문제들을 해석하기 위하여 등색곡선 패턴으로부터의 파괴인성 (mode I fracture toughness; K_I) 값 측정 시도들이 활발하게 이루어져 왔다. 여기에 더하여 유사한 목적으로 응력확대계수 값을 평가하기위한 광학적인 방법들이 탄성 및 소성역에서의 균열 현상 연구들을 통해 개발되어왔다. 구체적으로는 광학적인 방법, 모아레 패턴에 기반한 방법, 변형된 표면에서의 외곡현상을 이용한 방법, 광학 간섭법, 홀로그래피법, 광학현미경을 이용한 방법, 광학 간섭법, 홀로그래피법, 광학현미경을 이용한 소성역의 부식기법 등을 포함한 금속학적 접근법등을 들 수 있다. 그 결과 균열 첨단 근처의 응력장을 제어하는 변수인 응력확대계수는 다양한 광학적 방법에 의해 도출된 등강도 응력 프린지 패턴과 이론적으로 예측된 값 사이의 상호 비교를 통해 비교적 성공적으로 결정될 수 있었다. 그러나 상술한 모든 광학적 기법들은 고비용의 다루기 힘든 장치나 복잡한 시편준비 혹은 데이터의 후 처리 과정 등을 요구하거나, 미소 영역에서의 변형장을 결정하기에 불충분한 해상도를 제공하거나, 또는 동적 균열 전파 혹은 일반적인 균열 전파 과정에서의 측정에도 미치지 못하는 상대적으로 느린 반응 특성 등을 가지는 문제점들을 고스란히 노출하였다.
따라서, 최근 이러한 문제점들을 근본적으로 모두 회피할 수 있는 가능성을 내재한 압광 (Mechano -luminescence) 기술을 이용한 일련의 대체적 연구 시도들이 본 연구진에 의해 파

괴 역학 분야에서 균열 첨단 근처에서의 응력 분포를 평가하기 위한 목적으로 성공적으로 진행되어 왔다. 즉, 인장, 압축, 마찰 및 파괴 등을 포함하는 모든 종류의 기계적 응력 부가에 반응하여 가시광을 방출하는 압광 현상을 이용하여 인장 압축 및 파괴시의 기계적 특성을 가시적인 방법으로 정량적으로 또 체계적으로 평가하여 왔다.

결과적으로, 본 연구진들은 압광 현상을 이용한 균열첨단 응력장의 직접적인 관찰, 다양한 구조용 세라믹소재에서의 준동적 균열전파 및 브리징 응력의 가시화, 가시광 방출에 의한 기계적 응력의 감지를 위한 펄스 레이져 증착 코팅 혹은 압광 페인트 등의 인공 표면막 등을 개발하였으며, 여기에 더하여 응력 센서로서의 응용을 위한 SAO 압광 소재의 발광 기구에 기반한 응력 속도식 즉, 압광 특성의 구성방정식도 정량적으로 제시한 바 있다.
이러한 사전 연구 성과를 기반으로 본 연구에서는 우선 학문적인 관점에서 압광 현상을 이용한 모드 I 에서의 혁신적인 응력 확대 계수 측정 기법을 새롭게 제시하고자 하였다. 구체적으로는 CT 시편의 모드 I 인장 응력 부가를 통해 얻어진 균열 첨단에서의 응력속도 변화 및 누적 응력장을 압광 기술을 이용하여 측정한 후, 이를 기존의 마이크로 발광 기구인 트랩 방출 과정에 기반한 두 가지 서로 다른 정수압 및 편차 응력 기준 하에서 응력확대계수 값을 계산하여 ASTM E399 에 의해 측정된 실측치와 상호 비교 평가 하였다. 이때 응력확대 계수 계산에 필수적으로 요구되는 균열 첨단에서의 유효응력 및 누적 압광 강도 간의 상관관계를 외부 부가 하중 변화에 따라 실험적으로 도출하기 위하여 인장 시편에서의 일축 인장을 통한 압광 특성 평가 또한 추가적으로 수행 하였다.
한편 산업적인 측면에서 기존의 1 차년도 연구를 통하여 에폭시 및 우레탄 레진 기반의 압광 페인트를 콘크리트 소재에 적용하여 균열 전파현상을 가시적으로 관찰하는데 성공하였으나, 균열 첨단에서의 응력장 관찰은 낮은 응력확대계수 값으로 인하여 일반적인 카메라 시스템에서 정적인 상태의 균열 조건에서는 관찰하는데 실패 하였다. 따라서 본 연구에서는 압광 분말 및 수지 사이의 밀착력 개선 공정을 통해 새롭게 개발된 아크릴 레진 기반형 압광 페인트를 이용하여 콘크리트 소재에 적용 가능한 1-2 $MPam^{1/2}$ 수준의 저 응력 확대 계수 범위에서도 균열 첨단 응력장 관찰이 가능한 정지 균열 탐지 기술을 개발해 보고자 하였다.

(2) 실험 방법

본 연구에서는 CT 형태의 시편 제조를 위해서 중량비 70% 의 레진과 30% 의 SAO 압광 분말을 혼합 후 가열 가압 성형하였다. 이 후 기계가공에 의해 완성된 CT 형태의 압광 시편은 직경 30mm 두께 3mm 크기로서, 예리한 균열의 도입을 위한 중심부 가공 파괴 균열의 곡률 및 응력 전달을 위한 핀홀의 크기는 각각 50um와 5.6mm로 제작되었다. 기계가공에 의해 형성된 균열 첨단부에서의 자연 균열의 생성 및 전파를 위해 사용된 예비 하중 전달판(loading stage)은 하중 전달의 정확한 제어를 위해 특수 설계된 모터와 2 중 감속 기어를 사용하여 제작되었다. 본격적인 기계적 시험은 상술한 예비 하중 전달판을 이용하여 시험전에 2mm 길이의 자연 균열을 도입한 후 CT 시편 그립에 장착 후 수행 하였다.
CT 시편을 이용한 모드 I 인장 시험은 하중 부가 전에 365-nm 파장의 고밀도 자외선에 5분간의 여기와 1 분 동안의 완화과정을 거친 후 목표 하중에 노출하였다. 이 후 압광 현상을 이용한 낮은 응력 확대 계수 조건에서의 균열첨단 응력장 가시화를 위해 CT 시편은 80N/sec. 의 속도록 최대 하중 61N 까지 균열 전진이 일어나지 않도록 조절하여 부가하였다. 시편의 균

열 첨단부는 고속 디지털 카메라를 이용하여 60 frame/sec. 의 저속으로 연속적으로 촬영되었으며, ASTM E399의 규정에의한 응력 확대 계수(stress intensity factor)의 변화는 하중 전달판에 장착된 로드셀(load cell)로부터 시편에 가해진 하중을 측정하여, 일반적인 방법에 따라 계산되었다.[8]

표 1 Quantified cumulative ML intensities of two successive contour lines near from the crack tip with respect to the variation of applied load.

Applied Load (N) Intensity of ML	45N	51N	57N	61N
Contour 1	0.24571	0.372076	0.518242	0.686808
Contour 2	0.17481	0.287976	0.420642	0.575208

CT 시편 결과의 보완을 위해, 본 연구에서는 압광 인장 시편을 추가적으로 준비 하였다. 이를 위해 아크릴 레진형 투명 페인트에 중량비 30% 의 SAO 분말을 혼합한 후, 동일한 과정을 거쳐 판형으로 소성하였다. 제조된 판형 시료는 2 차 기계 가공을 통하여 게이지 길이 12mm, 폭 및 두께 4 mm 의 인장시편으로 최종 제조되었다. 이 후 인장 시편은 본격적인 시험을 위해 만능 시험기의 인장 하중 부가 장치에 장착된 후, 암실 조건에서 365nm 파장의 고밀도 자외선에 5 분간에 걸친 여기 (excitation) 및 1 분간의 장 잔광 (long phosphorescence) 완화 처리를 거쳤다. 실제 인장 시험은 240N/sec. 의 속도록 400N 까지 항복 응력 이하 수준으로 탄성역 범위에서 시행되었다. 이때 각 하중 부가 단계에서의 압광 현상 및 발광량 정량 측정을 위하여 인장 시험기에 고속 디지털 카메라 및 다채널 데이터 링크(MCDL) 장치를 추가로 설치하였다. 특히 다채널 데이터 링크(MCDL) 장치를 이용함으로써 인장시험기의 로드셀로부터 측정된 하중 값과 각 하중 값에서의 게이지부 압광 현상 및 발광 디지털 영상간의 데이터 동기화를 가능케 하였다.

(3) 실험결과

(가) CT 시편에서의 균열 첨단 응력 속도 가시화

그림 1 (a-e) 는 압광 CT 시편의 외부 하중 부가 속도가 80N/sec. 로 일정한 조건하에서 균열첨단부에 대한 응력 속도 상태를 고속 카메라를 이용하여 초당 60 프레임의 속도로 가시화한 결과들을 보여주고 있다. 특히, Fig. 1 (a) 는 응력이 가해지기 직전의 초기 조건 시편으로 희미한 정적 형광 흔적만을 보이고 있다. 반면에, 외부 응력이 45, 51, 57 및 61N 으로 증가된 그림 1 (b-e)의 균열첨단 부위에서는 명백한 타원형의 발광 현상을 공통적으로 관찰할 수 있다. 또한 기본적으로 발광량은 하중 속도에 비례하므로, 동 그림에서의 발광량 변화는 비록 크지 않으나, 외부 응력의 증가에 따라 발광량이 미약하게나마 증가 되는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 압광소재의 발광량이 하중부가속도에 직선적으로 비례하지는 않는다는 사실을 어느정

도 미리 예측할 수 있는 결과라 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 균열 첨단에서의 응력장을 압광에 의해 측정된 발광량의 항으로 표시하기 위하여, 주어진 하중까지의 총 누적 발광량을 MATLAB 소프트웨어를 이용하여 그림 2 (a) 의 파괴시편 도면과 함께 그림 2 (b-e) 에 등강도 곡선으로 표시하였다. 이때 압광에 의한 발광량이 응력 속도에 비 선형적으로 비례함을 고려하면, 부가 하중의 변화에 따른 균열 첨단에서의 응력 상태를 표시 하기 위해서는 0 에서 부가 하중까지의 모든 발광량을 적분하는 것이 가장 간단한 방법임을 쉽게 짐작할 수 있다. 따라서 그림 1에서 살펴 볼 수 있듯이 본 실험에서는 CT 시편이 하중 부가 속도 80N/sec. 의 조건으로 최대 61N 까지 인장 되면서 초당 60 프레임의 속도로 기록되었으므로, 0에서부터 61N 까지 총 60 프레임의 발광 사진이 획득되었음을 알 수 있다. 따라서 그림 2 (b)에서 45N 의 외부 하중이 부가된 경우의 균열 첨단 응력장을 누적 압광량으로 표시하기 위해서는 0에서 41N 까지 총 31 장의 발광 사진이 적분되었음을 알 수 있다. 유사한 방법으로 그림 2 (c-e) 에 해당되는 51, 57, 및 61 N 조건에서의 결과는 36, 41, 및 46 프레임의 압광 사진 누적 결과로부터 얻어질 수 있었다.

그림 2 의 정적 하중 부가 과정에서 누적 압광 프린지 패턴의 변화를 보다 상세히 살펴보면, 그림 1 의 단순 비 누적 압광 결과와는 달리 모든 패턴에서의 개별적인 등고선들은 대부분 동일한 형태로 유지되는 반면, CT 시편의 인장에 따른 전역 압광 누적 강도는 급격히 증가됨을 관찰할 수 있다. 이러한 현상을 보다 상세히 살펴보기 위하여 표 1 에 부가 하중 변화에 따른 균열 첨단에서의 최단 등고선 1, 2 번 선에 대한 누적 강도 값을 정량적으로 표시하였다. 기본적으로 외부 응력에 의해 발생된 응력 확대 계수 값에 비례하는 등고선 1 에서의 유효 응력값은 등고선 2 에서의 값에 비해 상대적으로 높은 것이 당연하므로 등고선 1 의 발광 강도값이 등고선 2 에 비해 상대적으로 높게 측정되었음은 명백하다 할 것이다. 또한 부가 하중의 증가에 따라 균열 첨단에서의 유효응력 집중이 증가되어야 하므로 균열 첨단으로부터 대략 1mm 정도의 위치에서 측정된 각 사진의 등고선 1 의 발광 강도가 0.25에서 0.69 로 증가되는 현상을 보여 주었다. 상술한 결과들로부터 압광 기술에 의해 측정된 균열 첨단에서의 응력장 변화가 Irwin 의 제안에 기초한 등강도 패턴으로부터 모드 I 파괴 인성 값을 결정함에 있어 정적 균열 첨단에서의 이론적 및 실험적 선행 결과들과 잘 일치됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 압광 기술을 이용한 CT 시편의 외부 하중 부가에 따른 균열 첨단 영역에서의 하중 속도 변화 및 응력 분포 가시화 시도는 매우 성공적 있었음을 알 수 있다.

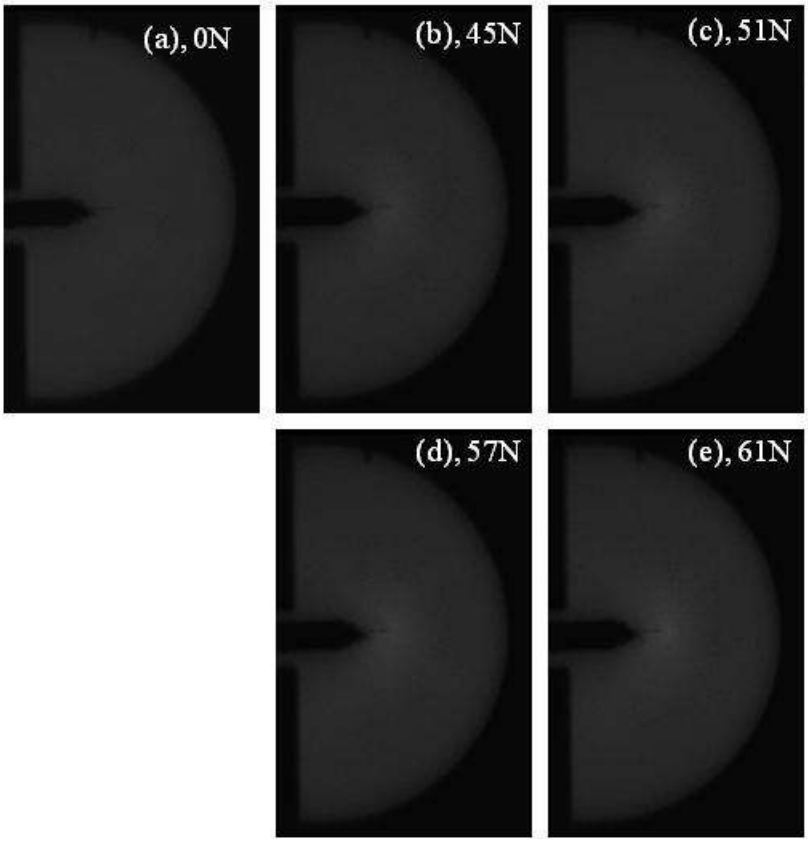


그림 1 Sequence of ML images recorded by a high-speed imaging system, exhibiting real-time images of stress rate at the close vicinity of cark tip of the CT specimen loaded at a constant loading rate (80 N/s).

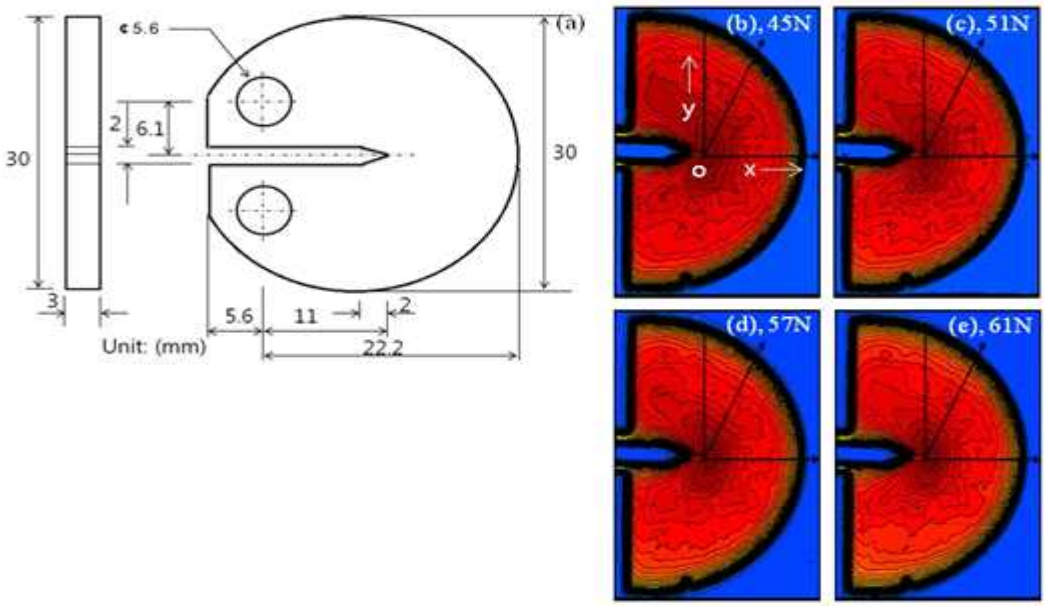


그림 2 Sequence of contour lines plots extracted from the accumulated ML images with the aid of MATLAB SOFTWARE, illustrating the cumulative iso-stress contour patterns at the close vicinity of cark tip of the CT specimen in terms of ML with a schematic dimension of CT specimen.

(나) 인장 시편에서의 유효응력 가시화

그림 3 은 인장 시편에서의 단순 일축 인장 하중의 변화에 따른 응력 속도의 변화를 압광 강도로 측정한 결과를 보여주고 있다. 그림 3 (a-e)는 0, 100, 200, 300, 및 400N 의 부가 하중조건에서 기록된 이장 시편의 발광 사진에 해당된다. 전반적으로 CT 시편에서 시험결과와 비교해 볼 때, 인장 시편 전체 게이지 영역에서의 균등한 하중속도 조건으로 인한 균일 발광 분포 현상을 제외하면 압광 현상에서의 두드러진 변화는 관찰 되지 않았다. 다만, 실험적인 측면에서는 인장시험의 경우 240N/sec. 의 비교적 높은 하중 속도로 응력이 부가 되었는데, 이는 80N/sec. 의 조건으로 인장된 CT 시편에서 상대적으로 빠른 균열 첨단 영역의 하중 부가 속도를 모사하기 위하여 인위적으로 시험 속도를 높인 결과이다. 물론 이론적으로는 하중속도 변화에도 불구하고 측정하려는 시편 영역에서의 최종적으로 부가될 유효 응력 수준이 동등하다면, 총 누적 압광량은 동일하여야 한다. 이는 응력 또는 변형에 의해 기계적으로 축적된 에너지가 에너지 보존 법칙 하에서 가시적인 포톤으로 변환되어 방출 되어야 하기 때문에 물리적으로 매우 타당한 가정이라 할 수 있다. 그러나 가시화 시스템의 민감도 및 SAO 압광 소재의 포톤 누설에 의한 완화 현상 등을 고려할 때 CT 및 단순 인장 시험에서의 서로 다른 형태의 시편으로부터 발광량을 측정함에 있어 두 개의 서로 다른 영역에서 하중 부가 속도를 유사한 수준으로 유지하는 것이 실험적인 오차를 최소화 할 수 있는 방안으로 선택 되었다.

그림 4 는 이러한 인장시편 게이지 부에서의 응력장을 압광량으로 평가하기 위하여 압광 강도를 누적하여 유효 응력의 값으로 나타낸 결과이다. 기본적으로, 인장 시편에서의 발광량 누적 과정은 전술한 CT 시편에서의 누적 방법과 완전히 동일하며, 0에서부터 특정 하중 까지의 모든 가시화 사진을 적분한 후 게이지 부에서의 전체 픽셀에 대한 평균 누적 강도 값을 계산하였다. 이러한 과정은 다채널 데이터 링크 시스템에 기록된 모든 하중 값에 대하여 개별적으로 수행되었으며, 이후 각각의 하중 값은 시편 단면적을 고려하여 응력 값으로 변환함으로써 그림 4 의 유효 응력과 누적 발광량 사이의 상관관계를 실험적으로 제시하였다.

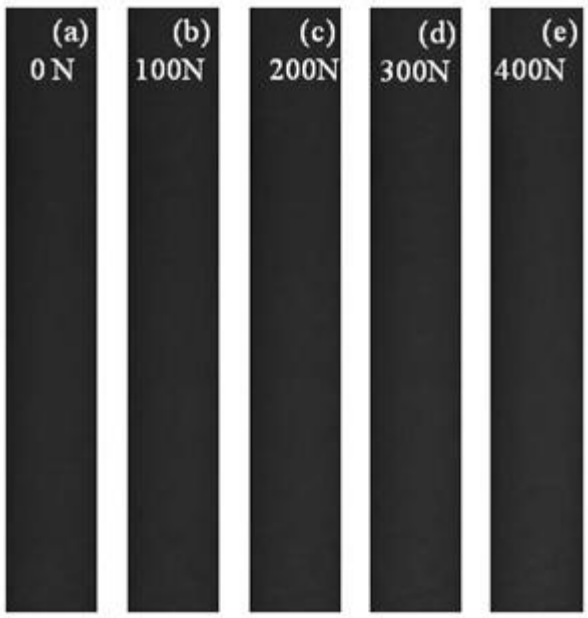


그림 3 Sequential ML images recorded by a high-speed imaging system, illustrating real-time images of stress rate in terms of ML in a gauge length of the tensile specimen loaded at a constant loading rate (240 N/s).

그림 4 Calibrated relationship between accumulated ML intensity and effective stress.

결과적으로 본 연구에서는 상술한 과정을 거쳐 얻어진 그림 4 의 도움으로 표 1에서 측정된 등강도 패턴의 압광 측정치에 대응되는 유효 응력값을 표 2 에서와 같이 표시 할 수 있게 되었다.

사실, 특정 누적 압광 강도에 대응되는 유효 응력의 이론적 계산이 불가능한 것은 아니다. 전년도 연구에서 트랩 방출 과정에 기반하여 압광 강도를 주어진 응력속도의 함수로 정량화 하는데 성공하였으므로, 이러한 관계로부터 해석적인 방법으로 압광 강도로부터 유효 응력을 예측하는 것이 가능하게 되었다. 그러나, 인장 시험편에서와는 달리 CT 시편의 경우 외부 하중 부가시 응력속도가 균열 첨단부 위치에 따라 급격히 변화되며, 고정된 위치에서도 응력 속도가 일정하게 유지되지 못하게 된다. 게다가 누적 압광강도 및 응력 사이의 상관관계를 정량적으로 예측하기 위해서는, 여기과정에 따라 달라지는 초기조건 및 압광 기구에 의존적인 재료 상수등이 적분과정에서 명확히 요구되므로 현실적으로 매우 까다로운 선택이 될 수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 단순 인장 시편의 결과로부터 얻어진 압광 누적량에 대한 유효 응력값을 CT 시편 결과에 치환시킴으로써 압광 현상의 해석에 보다 유리한 환경을 조성하고자 하였다.

표 2 The corresponding effective stresses according to cumulative ML intensities of table 1, extracted from calibration curve between effective stress and accumulated ML intensity as illustrated in fig. 4.

Applied Load (N) Stress (N)	45N	51N	57N	61N
Contour 1	13.71	17	19.97	23
Contour 2	11.69	14.76	18.24	21

(4) 고찰

일반적으로 압광을 포함한 형광 소재의 특성을 해석하기 위해 현재 다수의 기구들이 제시되고 있으나, 미소 단위에서의 접근법에서는 변형에 의해 유발되는 트랩 방출 과정이 SAO 소재의 압광 특성을 해석하는데 주로 사용되어 왔다. 이러한 트랩 방출 기구 중에서도 가장 대표적인 것은 Matsuzawa 등에 의해 제시된 형광 특성에 기반한 발광 기구이다. 동 기구를 간략히 살펴보면, 기본적으로 압광 현상에 있어 가장 주요한 활성인자인 Eu^{2+} 이온들이 통상 외부 에너지의 공급 (UV 램프 조사 등) 에 의해 광-여기 현상이 일어나면 충만대로의 홀 방출을 발생 시키게 된다. 이 후 방출된 홀은 Dy^{3+}이온들이 충만대 (valence band) 직 상의 홀 트랩 에너지 준위를 구성하게 되므로 결과적으로 Dy^{4+}에 의해 트랩 될 수 밖에 없다. 이때 하중이 외부에서 부가되면, 트랩된 홀은 터널링 및 충만대를 경유하는 두 가지 경로에 의해 방출되어 Eu^{+}활성인자와 재결합 함으로써, Eu^{2+}여기 상태를 만들게 되며, 그 즉시 즉각적인 기저 상태로의 전환에 의해 압광 현상을 유발시키게 되는 것으로 알려져 있다.

그러나 마크로한 관점에서 살펴보면, 실제 압광 현상을 유발하는 것, 보다 상세히는 트랩으로부터 홀을 방출하여 활성인자와의 재결합을 일으키게 하는 것은 정적 하중이 아니라 하중변화 즉 하중속도에 해당된다는 것이 실험적으로 밝혀졌다. 사실 압광에 의한 발광 현상이 대부분 공학적인 탄성 범위 내에서 발생되므로 실험적으로는 응력 또는 응력속도는 변형 혹은 변형속도로 치환될 수는 있다. 이러한 현상학적 결과들을 구조적으로 해석하기 위해, 실 하중 속도와 연관된 압광 변화를 예측할 수 있는 속도 방정식이 최근에 본 연구진에 의해 제시되었으며, 결과적으로 압광에 의해 발생된 발광 강도를 마크로한 관점에서 정적 하중이 아닌 하중속도의 항으로 모사하는데 성공하였다.

여기에 더하여 본 연구에서는 응력 속도에 의해 유발되는 SAO 소재를 구성하는주 결정구조 및 활성 인자의 왜곡이나 변형 거동이 어떻게 트랩 방출 과정의 시작에 기여 하는가를 추가적으로 밝혀 보고자 하였다. 즉, 이러한 접근을 통해 마크로한 영역에서의 하중 속도 부가와 마이크로한 범위에서의 광자 방출 과정 사이의 상관관계를 보다 정확히 파악하여, 그 결과로 부터 기존에 제시되어온 다수의 마이크로한 트랩 방출 기구들 중에서 현실성 있는 발광 기구를 선택적으로 판별해 내거나 혹은 완전히 새로운 형태의 기구를 새롭게 제시할 수 있는 기초 근거를 확보 하고자 하였다. 이러한 견지에서 먼저 마크로한 응력 성분을 구분해 보면, 일반적으로 외부 하중에 의해 유발되어 SAO 소재에 부과되는 응력의 역할은 크게 순수 인장 또는 압축 응력 성분들만을 포함하는 정수압 응력과 전단 응력 성분을 대표하는 편차응력 성분으로 나눌 수 있다. 따라서, SAO 소재의 발광 기구를 기술함에 있어 트랩방출을 촉발하는 원인이 정수압 응력인가 혹은 편차응력인가에 대한 논의는 그 기구 규명에 있어 주요한 관심사로 부각될 수밖에 없음은, 압광 현상에 대한 기계적인 접근법을 고려해 볼 때 쉽게 예측 가능하다. 본 연구에서는 이러한 두 종류의 응력이 발광 현상에 미치는 영향을 개별적이고 정량적으로 밝혀내기 위하여, 누적 압광 패턴으로부터 응력확대 계수를 결정하기 위한 구성 방정식을 정수압 응력 및 편차응력의 기반하에 개별적으로 유도하여 이를 실험 결과에 적용하여 보았다. 특히, 이러한 시도를 통해 SAO 소재의 응력확대계수를 여타 변수들의 영향을 최소화하면서 단순한 유효응력의 함수로 유도해 냄으로써, 압광 강도에 대한 응력 상태 효과를 밝히는 개별 모델들이 SAO 소재의 압광 기구를 이해하는데 주요한 단초를 제공할 것으로 판단된다.

(가) 편차 응력에 기반한 압광 패턴으로 부터의 응력확대계수 결정

균열 첨단에서의 부과응력 수준이 선형 탄성 영역이고 시편의 두께가 평면 응력조건을 만족할 만큼 얇다고 가정하면 압광 등강도 곡선을 이용한 CT 시편에서의 응력확대 계수값 연산은 아래의 간단한 수식 전개를 따르게 된다. 먼저 균열 첨단에서의 응력장은 아래 식들로 기술될 수 있으며,

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} cos\frac{\theta}{2}[1 - \sin\frac{\theta}{2} sin\frac{3\theta}{2}] \qquad (1a)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} cos\frac{\theta}{2}[1 + \sin\frac{\theta}{2} sin\frac{3\theta}{2}] \qquad (1b)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} cos\frac{\theta}{2} sin\frac{\theta}{2} cos\frac{3\theta}{2} \qquad (1c)$$

여기서 σx, σy, 및 σxy 는 Fig. 3의 x-y 좌표축을 중심으로 x, y 방향 및 xy 면에서의 응력값들을 표시하며, K_I 은 모드 I 에서의 응력확대계수, Θ는 x 축으로부터 반시계 방향으로의 각도, r 은 균열첨단으로부터의 거리를 나타낸다. 식 1 은 다시 아래의 주 응력 형태의 식으로 변환 될 수 있다.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_x + \sigma_y)^2}{4} + (\sigma_{xy})^2} \qquad (2)$$

여기서, 편차 응력의 변화가 형광 특성을 유발한다고 가정하면, 누적 임계 압광 강도에 비례하는 임계 유효 유발 응력은 소성 변형에 필요한 항복 조건과 유사한 식 3 의 형태로 결정될 수 있다. 전위 움직임이 압광 재료의 발광에 일차적인 요인으로 작용한다고 가정할 때 이러한 항복 조건의 사용은 매우 타당한 것으로 판단된다.

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

그런데, 인장 시편에 단순 일축 응력이 부가되는 경우 측정된 압광 강도는 σ_3 및 σ_3 가 0 이므로 측정된 압광 강도는 아래 식 3 (a) 와 같이 인장 시험기에 의해 부가된 일축응력 σ_1 에 비례하게 된다.

$$\sigma_c = \sigma_{1,T} \qquad (3a)$$

한편 CT 시편의 경우에는 평면 응력 조건을 가정하면 σ_3 =0 이므로, CT 시편 특정 위치에서의 주응력을 각각 $\sigma_{1,F}$ $\sigma_{2,F}$ 라 하면 식 3 은 아래 식 3 (b) 로 표시될 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_{1,F} - \sigma_{2,F})^2 + (\sigma_{1,F})^2 + (\sigma_{2,F})^2]^{\frac{1}{2}} \qquad (3b)$$

식 3 (a) 와 식 3 (b) 를 조합하면 다음의 식 4 에서와 같이, 디스크 형태의 CT 시편 균열 첨단 영역에서 가시화된 등강도 압광 곡선을 실험적으로 측정된 단순 일축 인장에서의 응력값으로 치환할 수 있다.

$$\sigma_{1,T} = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_{1,F} - \sigma_{2,F})^2 + (\sigma_{1,F})^2 + (\sigma_{2,f})^2] \qquad (4)$$

최종적으로 식 4 에 식 2 의 주응력과 식 1 의 균열첨단 응력장 식을 도입하면 아래와 같은 식 5 의 응력 확대 계수식을 유도할 수 있게 된다.

$$K_{Id} = \frac{\sigma_{1,T}\sqrt{2\pi r}}{\cos\frac{\theta}{2}[1+3\sin^2\frac{\theta}{2}]^{\frac{1}{2}}} \qquad (5)$$

여기서 K_{Id} 는 모드 I 조건에의서 편차 응력 항으로부터 유도된 응력확대계수 값을 나타낸다.

윗 식을 이용한 실제 연산과정 즉, CT 시편의 균열 첨단에서 가시화된 압광 강도로부터 K_{Id} 값을 얻기 위해서는, 우선 표 2에서 살펴 볼 수 있듯이 그림 2 의 일정 강도에 해당되는 주어진 등강도 곡선에 대응되는 동일 압광 강도의 인장 응력을 그림 4 로부터 추출하여야 한다. 이후 그림 2 의 등강도 곡선으로부터 수 혹은 수십 개의 점을 선택하여 (r, Θ)의 극좌표 값을 표 3 에서와 같이 측정 한다. 이때 기본적으로 하나의 극좌표 값으로부터 응력확대계수 값을 계산하는 것이 가능하지만, 본 연구에서는 거친 등강도 곡선결과로부터 도입될 수 있는 연산상의 오차를 줄이기 위하여 22 개의 좌표 값을 실 연산에 이용하였다. 특히, 압광 강도로 부터의 응력확대 계수값 계산은 최소자승법에 의해 수행 되었으며, 계산 값의 타당성 비교를 위해 ASTM E-399 에 의해 규정된 아래의 디스크 형 CT 시편에서의 응력확대계수 측정방법 (식 6) 을 이용하여 실측된 응력확대 계수 값도 추가적으로 표 3 에 병기 하였다.

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f(\frac{a}{w}) \qquad (6)$$

$$f(\frac{a}{w}) = \frac{(2+\frac{a}{W})(.076+4.8\frac{a}{W}-11.58(\frac{a}{W})^2+11.43(\frac{a}{W})^3-4.08(\frac{a}{W})^4}{(1-\frac{a}{W})^{\frac{3}{2}}}$$

표 3에서 압광 기법에 의해 측정된 응력확대계수 값(K_{Id})을 일반적인 ASTM 방법에 의해 실측된 값(KI)과 비교 고찰하는 것은 매우 흥미롭다. 우선 실험적인 측면에서 시편에 45N 이 외부에서 부과된 경우 K_{Id} 및 K_I 값이 각각 1.11 및 1.41MPam$^{1/2}$ 로써, 두 계산 및 실측치 사이의 오차는 21% 정도의 약 0.3MPam$^{1/2}$ 값을 나타내었다. 이 후 CT 시편에 부가 응력이 증가됨에 따라 실측 및 계산에 의한 응력확대 계수값들은 모두 증가 하였으나, 두 값 사이의 오차는 0.27MPam$^{1/2}$ 정도로 일정하게 유지되면서 상대적인 편차비는 14% 까지 감소하였다. 이러한 결과는 본 연구가 가시화된 누적 등강도 압광 곡선으로부터 응력 확대계수 값을 측정하려는 최초의 시도 임을 감안할 때, 외부 하중의 증가에도 불구하고 일정한 값을 보이는 오차값이 이론적 균열에 비해 상대적으로 무딘 실제 CT 시편에서의 균열 특성 혹은 압광 현상을 기록하기 위한 화상 시스템에서의 광센서 민감도 등과 같은 하나 혹은 두 개 정도의 중요하지 않은 비

구조화된 시험상의 문제들로부터 기인한 것으로 판단된다.

Table 3. Comparison of SIFs calculated on the basis of two different stress criterions of deviator and hydrostatic with conventionally measured SIF by ASTM.

Contour lines plot	Angles ±θ	Positive y-axis		Negative y-axis		Calculated SIF (K_{Id}) $MPam^{1/2}$	Calculated SIF (K_{Ih}) $MPam^{1/2}$	Measured SIF (K_I) $MPam^{1/2}$
		r_1 mm	r_2 mm	r_3 mm	r_4 mm			
(b) 45N	0	1.15	1.81			1.11	1.97	1.41
	15	1.22	1.88	1.05	1.64			
	30	1.33	2.16	1.05	1.60			
	45	1.57	2.06	1.01	1.60			
	60	1.43	2.34	0.98	1.92			
	90	1.47	2.65	0.73	2.2			
(c) 51N	0	1.12	1.47			1.31	2.34	1.59
	15	1.12	1.64	1.05	1.47			
	30	1.19	1.74	1.01	1.60			
	45	1.36	1.92	0.98	1.43			
	60	1.19	1.88	0.91	1.47			
	90	1.40	2.09	0.66	1.47			
(d) 57N	0	1.08	1.43			1.51	2.71	1.81
	15	1.08	1.53	1.01	1.33			
	30	1.15	1.71	0.91	1.33			
	45	1.19	1.74	0.87	1.36			
	60	1.15	1.74	0.87	1.26			
	90	1.15	1.78	0.70	1.12			
(e) 61N	0	1.05	1.40			1.67	3.00	1.94
	15	1.05	1.47	0.98	1.29			
	30	1.12	1.53	0.87	1.22			
	45	1.12	1.67	0.84	1.29			
	60	1.08	1.60	0.84	1.22			
	90	1.01	1.64	0.56	1.05			

특히, 이론 균열에 비해 상대적으로 균열 첨단이 무딘 실제 CT 시편의 경우, 보다 적은 응력 집중을 유발함 으로써 균열 첨단에서의 낮은 압광 발광을 초래하여 실측치에 비해 낮은 응력 확대 계수 값이 유도되었을 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 그림 5 에서는 응력 확대계수 값에 더하여 균열 첨단에서의 응력장 형태를 비교하기 위해 식 5 에 의해 유도된 이론 곡선과 압광에 의해 실측된 등강도 곡선을 상호 비교 하였다. 이러한 이론적인 등강도 곡선들은 표 2 의 응력 값들과 표 3 에서의 응력 확대 계수 값을 이용하여 식 5 로부터 예측된 값을 도시한 결과라 할 수 있다. 그림 5에서 가장 두드러진 점은 두 예측 및 실측 곡선이 비록 완벽히 일치하지는 못하였으나 그 크기와 형태가 허용 오차 범위 내에서 일반적인 균열 첨단 현상들을 설명하기에 충분한 정도로 비교적 잘 일치 하였다는 점이다. 특히, 이론 및 실측 곡선 모두 외부 하중 증가에 따라 확대 되는 결과를 보여 주었는데, 이는 균열 첨단에서의 응력집중에 따른 실제 현상을 잘 반영한 결과라 할 수 있다. 다만, 실험적으로 측정된 등강도 곡선의 경우 약간의

비대칭 형태를 띠면서 음의 y 축 방향에 비해 양의 y 축 방향으로 다소 확대된 양상을 보여주었는데, 이는 사전 자연 균열 도입시 발생된 균열 첨단의 틸팅 효과에 기인한 것으로 판단된다. 또한 실험적으로 측정된 등강도 곡선의 경우 시각 시스템에서의 가시화 과정에서 도입되는 노이즈 효과도 포함하여 다소 매끄럽지 못한 굴곡된 곡선형을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 예비 균열의 틸팅효과 및 가시화 과정의 노이즈현상에도 불구하고, 결과적으로 실험적으로 측정된 곡선과 이론적 예측 곡선은 ± 45도 범위 안에서 완벽에 가까운 일치를 보여 주었다. 따라서 본 연구에서 제시된 결과 및 예측들을 고려해 볼때 편차 응력에 기반한 압광 곡선으로부터 응력확대 계수값을 결정하는 것이 보다 실제의 균열 현상에 가까운 것으로 결론지을 수 있다.

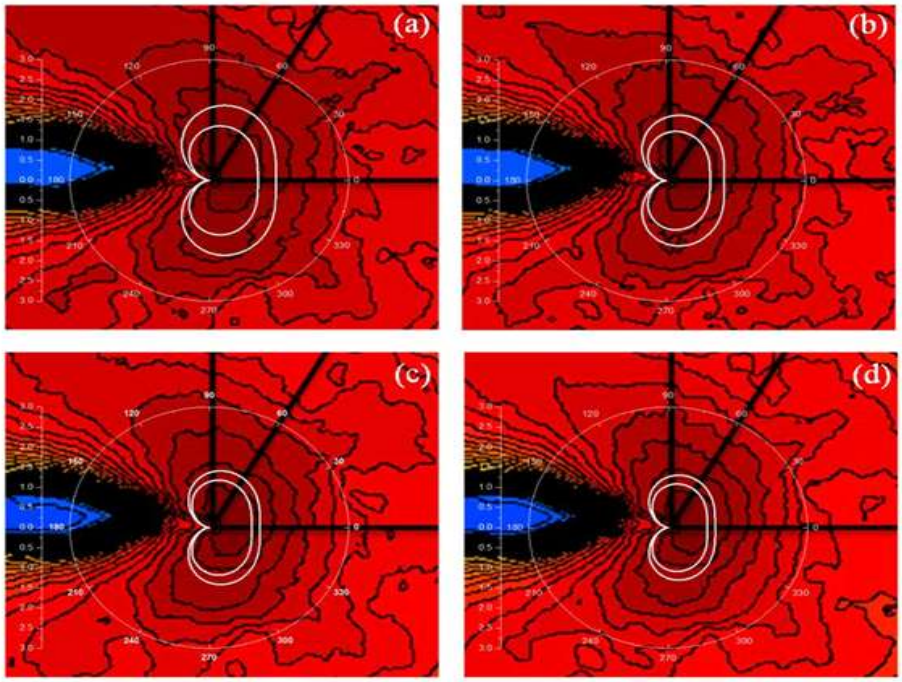


Fig. 5 Comparison between theoretically obtained iso-stress contour patterns from the deviator stress criterion and experimentally obtained iso-stress contour patterns in terms of ML at the close vicinity of crack tip of the CT specimen.

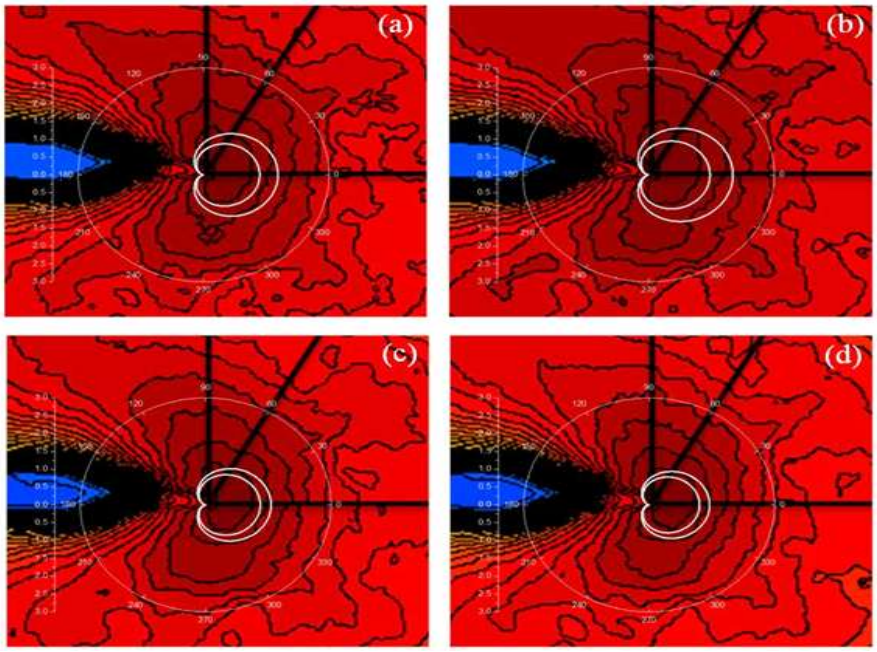


Fig. 6 Comparison between theoretically obtained iso-stress contour patterns obtained from the hydrostatic stress criterion and experimentally obtained iso-stress contour patterns in terms of ML at the close vicinity of crack tip of the CT specimen.

(나) 정수압 응력에 기반한 압광 패턴으로 부터의 응력확대계수 결정

정수압 응력의 변화가 형광 특성을 유발한다고 가정하면, 누적 임계 압광 강도에 비례하는 임계 유효 유발 응력은 탄성 변형에서 체적 변화를 유발하는 조건과 유사한 식 7 의 형태로 결정될 수 있다. SAO 압광 소재의 결정격자 왜곡이 압광 재료의 발광에 일차적인 요인으로 작용한다고 가정하면, 이러한 임계 정수압 응력 조건의 사용은 타당한 것으로 판단할 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \qquad (7)$$

그런데, 인장 시편에 단순 일축 응력이 부가되는 경우 측정된 압광 강도는 σ_2 및 σ_3 가 0 이므로 측정된 압광 강도는 아래 식 7 (a) 와 같이 인장 시험기에 의해 부가된 일축응력 σ_1 에 비례하게 된다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{1,T}}{3} \qquad (7a)$$

한편 CT 시편의 경우에는 평면 응력 조건을 가정하면 $\sigma_3 = 0$ 이므로, CT 시편 특정 위치에서의 주응력을 각각 σF,1 σF,2 라 하면 식 7 은 아래 식 7 (b) 로 표시될 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{(\sigma_{1,F} + \sigma_{2,F})}{3} \qquad (7b)$$

식 7 (a) 와 식 7 (b) 를 조합하면 다음의 식 8 에서와 같이, 디스크 형태의 CT 시편 균열 첨단 영역에서 가시화된 등강도 압광 곡선을 실험적으로 측정된 단순 일축 인장에서의 응력값으로 치환할 수 있다.

$$\sigma_{1,T} = \sigma_{1,F} + \sigma_{2,F} \qquad (8)$$

최종적으로 식 8 에 식 2 의 주응력과 식 1 의 균열첨단 응력장 식을 도입하면 아래와 같은 식 9 의 응력 확대 계수식을 유도할 수 있게 된다.

$$K_{Ih} = \frac{\sigma_{1,T}\sqrt{2\pi r}}{2\cos\frac{\theta}{2}} \qquad (9)$$

여기서 K_{Ih} 는 모드 I 조건에의서 정수압 응력 항으로부터 유도된 응력확대계수 값을 나타낸다. 본 연구에서는 정수압 응력 가설에 기반한 압광 유발 현상의 해석을 위해 식 9 를 이용하여 K_{Ih} 값 및 그 균열 첨단 등강도 곡선의 이론적 예측을, 편차응력을 이용한 해석 기법과 동일한 방식으로 시도하였다. 그러나 표 3 에 정리된 결과들을 살펴 볼 때, 정수압 응력으로부터 예측된 K_{Ih} 값은 ASTM 에 의해 측정된 실측 K_I 값과 일치하지 못할뿐더러 편차 응력에 의해 유도된 K_{Id} 값과도 상당한 차이를 보여 주었다.

우선 외부로부터 최소 하중이 부과된 조건에서도, K_{Ih} 및 K_I 값의 편차값이 0.56MPam$^{1/2}$ 로써, 두 계산 및 실측치 사이의 오차가 40% 정도의 차이를 나타내었으며 이는 K_{Id} 및 K_I 값의 편차에 비해 2 배 이상 증가된 수치에 해당된다. 더우기 CT 시편에 부가 응력이 증가됨에 따라 실측 및 계산에 의한 두 값 사이의 오차는 1.06MPam$^{1/2}$ 까지 지속적으로 증가 되었다. 그림 6 에 나타낸 이론 및 실측 등강도 응력장 비교에서도, 정수압 응력 가설에 의해 유도된 식 9 를 이용한 이론적 등강도 응력장은 압광에 의해 실측된 등강도 곡선 패턴을 전혀 예측하지 못하였다.

무엇보다도 정수압 응력 가설에 의한 예측 곡선의 경우 실측 곡선에 비해 보다 반원형에 가까운 응력장 형태를 나타내었으며 이는 여타의 방법으로 측정 혹은 예측된 실제 균열첨단의 응력장 형태와도 상당한 거리를 보여주는 비현실적 결과임을 알 수 있다. 따라서 이상의 결과들로부터 SAO 소재에서의 발광 촉발 인자로써 임계 정수압 응력을 이용하는 것은 압광에 의한 균열첨단 응력장 해석에 적합하지 않으며, 소성 변형의 항복 조건에서 주로 사용되어온 편차 응력이 본 연구 결과에 잘 부합되는 것으로 최종 결론 내릴 수 있다.

상술한 결과를 기반으로, 이제 SAO 소재에서의 트랩 방출 과정에 대한 촉발이 어떻게 외부 응력에 연관되어 있는가를 논의해 보는 것은 매우 흥미롭다 할 것이다. 일반적으로 여러 가지 다양한 임계 조건들 중에서 응력과 관련된 대표적인 두 가지 임계 조건으로써 통상 정수압 및 편차 응력이 제시되어 온 것은 주지의 사실이다. 그런데 정수압 응력 가설에 의한 압광 현상 해석이 실제의 균열 첨단 응력장 형상 및 강도 등을 예측하지 못함에 따라, SAO 소재를 구성하는 주 결정 격자에서의 체적 왜곡 변형 또는 이를 유발하는 평균 응력의 변화는 자연스럽게 트랩 방출 과정에 대한 촉발 인자 요소에서 제외될 수 있었다.

반면에 외부 응력 변화에 의해 발생된 편차 응력 항의 변화가 트랩 방출 과정의 촉발 인자로 부각됨에 따라 활성화 인자와의 재결합을 직접적으로 제어하는 것은 트랩 및 활성화 인자에 대한 전단응력 변화인 것으로 추측될 수 있다. 사실 이러한 기구학적 측면에서 지금까지의 연

구결과를 살펴보면, 트랩 방출과정의 촉발 인자로써 마이크로한 관점에서 고착 전위의 굽힘, 상자성 도메인 경계의 이동, 또는 압전장 등 다양한 기구들이 제시되어 왔으나, 직접적인 증거를 제시하는데 사실상 실패하였다.

따라서, 본 연구에서 최초로 시도된 마크로한 방식의 압광 특성 평가를 통해 편차 응력이 발광 기구에 주요한 역할을 초래한다는 주요한 단초를 제공함으로써, 비록 실제 트랩 방출 요소로써의 발광 기구를 100% 명확히 제시하지는 못하였으나 향후 압광 기구 규명에 있어서의 유효한 접근 방식을 제공하였다는 점에서 큰 의의가 있다 할 것이다.

마지막으로 본 연구에서 새롭게 시도된 상술한 접근법이 사실 발광기구의 임계 조건으로 적절한 기준만 제시된다면, 압광 기구에 대한 완전한 이해 없이도 모드 I 에서의 응력확대계수 값 혹은 파괴인성 값을 계산할 수 있는 가능성을 보여 주었다는 점에서 매우 큰 의의를 가진다 할 것이다. 특히, 본 연구에서 목표하였던 압광 분말 및 수지 사이의 밀착력 개선 공정을 통해 새롭게 개발된 아크릴 레진 기반형 압광 페인트를 이용하여 콘크리트 소재에 적용 가능한 1-2 $MPam^{1/2}$ 수준의 저 응력 확대 계수 범위에서도 균열 첨단 응력장 관찰이 가능한 정지 균열 탐지 기술이 성공적으로 개발된 것은 산업적 측면에서 매우 중요한 기술적 진보라 할 수 있을 것이다.

따라서, 향후 동 소재를 측정하려는 어떤 재료의 표면에 적용하여 발광에 의한 응력 가시화가 가능한 응력 표시기로써 이용한다면, 압광 기술이, 비록 시편의 표면 또는 내부 효과에 따라 달라질 수는 있으나, 최소한 벌크 시편에서의 표면 혹은 전체 시편을 관통하는 통합적인 정보를 제공하는 대안적 파괴/비파괴 기술로써 제시 가능할 것이다. 게다가 이러한 새로운 압광 기술의 경우 반응 시간이 전자의 이동속도에 의해 제약되므로 (통상 1 usec. 이하) 일반 적인 균열 전진뿐만 아니라 동적 조건에서의 균열 전파 특성까지 해석 가능할 것으로 판단된다. 특히, 현재까지 몇 몇 구조용 세라믹 소재에서의 준 동적 파괴 현상들을 해석한 결과들이 성공적으로 제시되고 있으므로 이는 매우 현실성 있는 예측이라 할 수 있다. 물론, 동 분야의 연구에 있어 고속으로 전파되는 균열의 탐지가 여타의 방법으로 불가능 한것은 아니나, 사실 레이져를 이용한 광학 기법, 전기 저항 측정, 변형 게이지 부착 기법등과 같은 기술들은 공통적으로 고가의 복잡한 장치들을 이용하여야 한다는 단점을 내재하고 있음에 반해, 압광 기술의 경우 보다 저비용의 단순한 기술적 요구들로 인해 향후 적용범위가 넓어질 수 있을 것으로 판단된다. 특히 이러한 저비용 및 높은 기술 접근성에 더하여 응력 또는 변형율 변화에 대한 전역 반응 특성, 빠른 반응시간, 비접촉 특성과 같은 내재적 장점등을 고려해 볼 때, 압광 페인트 및 박막과 같은 인공 표면을 다양한 소재의 표면에 적용함으로써 향후 구조용 재료의 안정성 평가에 획기적인 전기를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

다. 압광페인트를 이용한 철근콘크리트의 균열 검출 및 해석

(1) 서론

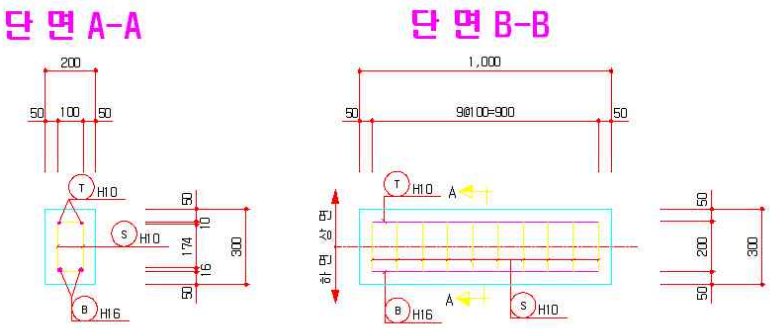
본 연구의 압광소재를 이용한 연구를 통해 콘크리트의 균열 진행 과정과 균열 속도, 균열 길이 등에 대한 이해를 높일 수 있다. 또한 콘크리트 구조물의 대형화 및 노후화 됨에 따라, 기존의 비파괴 시험법 등의 기술로는 피로 균열과 같은 결함부를 검출하는 것이 기술적, 경제적으로 매우 어려워지고 있는 현실이다. 압광소재에 대한 연구는 저비용의 건전성 모니터링 시스템을 구현하는데 필요한 기술적 경제성을 제공할 수 있으므로 저비용의 구조물 건전성 모니터

링이 가능함에 따라, 주어진 비용으로 보다 많은 사회 기반 시설 구조물의 안전점검이 가능하게 하여 대형 중요 구조물들의 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하고 적절한 조치를 취함으로서 사회 경제적 파장이 큰 대형 사고를 미연에 방지할 수 있는 기술을 제공할 수 있다. 압광소재에 대한 연구는 그 성능상 우수성에도 불구하고 현재 이를 연구하고 있는 국내외 연구팀은 매우 희소하며, 연구 성과가 본격적으로 나오기 시작하는 시점이다. 현재까지 건설구조물에 적용한 사례는 없으며, 압광소재를 이용한 구조물 안전성 평가 분야에서 국내외 선두의 기술을 확보할 수 있는 계기기 될 수 있다.

본 연구는 압광소재인 압광페인트(Mechano-Luminescent Paint)를 이용하여 콘크리트의 균열 진행과정을 시각적으로 검출이 가능하게 하고 실험을 통하여 얻은 데이터와 영상처리를 통하여 얻은 데이터를 바탕으로 콘크리트 균열에 대한 역학적 특성을 분석하는 것이 목적이다. 실험은 압광페인트와 센서를 설치한 실험체를 3-Point Bending Test를 이용하여 실험을 실시한다. 압광페인트가 도포된 실험체를 프레임에 거치 시킨 후 균열에 따른 콘크리트의 변형률과 변위를 측정하기 위하여 콘크리트용 스트레인 게이지와 LVDT를 설치한다. 실험체에 도포한 압광페인트에 자외선램프를 이용하여 에너지를 축적시킨 후 하중을 재하하고 초저조도 초고속 카메라를 이용하여 콘크리트의 균열진행과정을 촬영한다.

(2) 실험계획

(가) 실험체 설계 철근 콘크리트 부재에서 압광페인트의 균열발생 여부를 확인하기 위해 [그림 2.1]과 같은 부재치수와 단면을 갖는 실험체를 설계하였다. 콘크리트의 강도는 30MPa, 50MPa이며, 전단스팬비는 2로 하였다. [그림 2.1]은 실험체의 설계도면을 나타내며 [표 2.1]은 실험체의 철근 재료표를 나타낸다. 배합설계는 콘크리트 표준시방서를 참고하여 설계하였으며 배합 설계표는 [표 2.2]와 같다.



[그림 2.1] 실험체 설계 도면

[표 2.1] 실험체의 철근 재료표

전단스팬비 (a/d)	항목	직경	길이(m)	개수(개당)	총길이
2	주철근	D16	1	2	2
	스트럽	D10	0.7	10	7
	상부철근	D10	1	2	2

[표 2.2] 실험체 배합 설계표

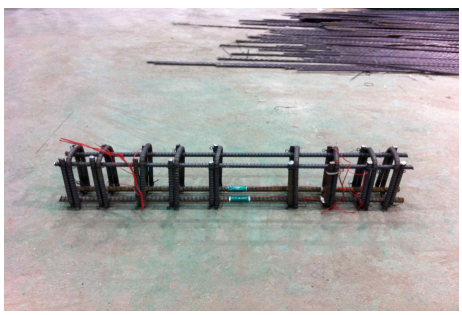
구분	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	물-시멘트 비 (%)	잔골재율S/a (%)	단위량(kg/m3)				
						물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은골재 G	혼화제 (g/m3)
30	25	12	4.5	43	63	185	430	775	967	-
50	25	12	4.5	32	63	138	430	775	967	4.3

(나) 실험체 제작

본 연구에서 사용될 실험체를 제작하기 위하여 먼저 실내에서 실험체의 거푸집을 제작하였다. [그림 2.2]의 (a)는 거푸집 제작 모습을 나타내며 (b)는 완성된 철근 케이지를 나타낸다. 센서는 실험체의 주철근 중앙에 2개, 스트럽에 2개 설치하였다. 완성된 철근 케이지를 거푸집에 거치하고 30MPa, 50MPa 강도의 콘크리트를 타설하였다. [그림 2.2]의 (c)는 거푸집에 철근 케이지를 거치한 모습이며 [그림 2.2]의 (d)는 타설 후 모습을 나타낸다. 타설 후 28일 동안의 양생기간을 거쳐 실험을 실시하였다.



(a) 거푸집 제작

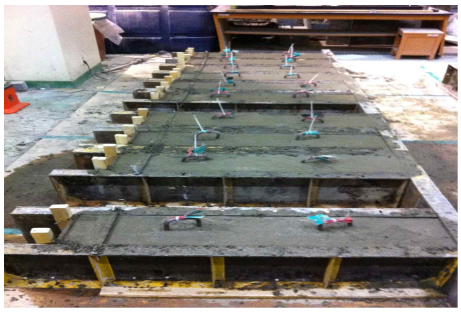


(b) 완성된 철근 케이지

[그림 2.2] 실험체 제작 과정



(c) 철근케이지 거푸집 배치



(d) 타설 후 모습

[그림 2.2] 실험체 제작 과정(계속)

(다) 압광페인트 제작

압광페인트를 제작하기 위한 재료와 양은 [표 2.3]과 같다. [표 2.3]은 에폭시 100g을 기준으로 필요한 하드너, 첨가제, 파우더의 양을 표현한 것이다. [그림 3.3]은 압광페인트를 제작하는 장면을 차례대로 나타냈다. [그림 2.3]의 (a)와 같이 종이컵에 에폭시와 하드너를 기준량에 따라 썩은 후 잘 저어준다. 그 다음에 첨가제를 첨가한 후 [그림 2.3]의 (c)와 같이 파우더를 넣고 잘 섞이도록 저어준 후에 거품이 발생하면 다른 컵에 천천히 부어 옮긴 후 거품을 제거한다.

[표 2.3] 압광페인트 제작 재료

에폭시	하드너	첨가제	파우더
100g	30g	2g	19.5g



(a) 에폭시와 하드너 혼합



(b) 첨가제 첨가



(c) 파우더 첨가



(d) 거품 제거

[그림 2.3] 압광페인트 제작 과정

(라) 압광페인트 도포

제작한 압광페인트를 [그림 2.4]의 (a)와 같이 2mm정도의 두께로 골고루 발라준 후에 2~3일 정도 건조시킨다. 압광페인트는 기온이 낮을수록 경화되는데 시간이 오래 걸리므로 충분한 온도를 유지시켜 주어야 한다. [그림 2.4]의 (b)는 실험체에 압광페인트 도포를 완료한 상태를 나

타낸다.



(a) 압광페인트 도포



(b) 압광페인트 도포 완료

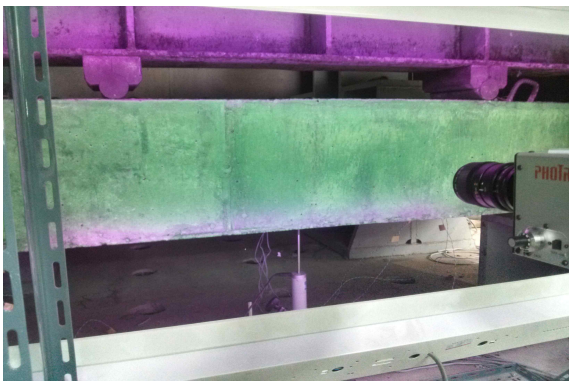
[그림 2.4] 압광페인트 도포 장면

(마) 실험

[그림 2.5]는 실험시 전경을 나타낸다. 실험을 위한 실험체는 총 4개로 변수는 콘크리트 강도 30MPa, 50MPa로 두고 실험을 진행하였다. 모든 실험체의 하중 가력은 실험체 중앙에서 재하하는 3점실험으로 진행하였으며 실험체의 변위를 측정하기 위한 LVDT(linear variable differential transformer)는 실험체 중앙 아래에 설치되었다. 또한 실험이 진행되는 동안 실험체의 거동을 살펴보기 위하여 철근 중앙에 2개의 스트레인게이지를 부착하였다. 모든 데이터는 데이터 로거(data logger)를 이용하여 실험이 종료될 때까지 실험체 중앙부에서의 처짐과 철근 및 콘크리트의 변형률을 하중단계별로 측정하였다. 또한 실험체의 발광현상을 알아보기 위하여 프레임 전체에 암막을 설치하여 암실조건에서 실험을 진행하였다. 실험 시작전 압광페인트의 발광현상을 가시화하기 위하여 [그림 2.6]과 같이 압광페인트에 BLB램프로 10분정도 에너지를 충전시킨 후에 실험을 실시하였다. 실험시 재하하중은 엑츄에이터로 변위제어를 통하여 재하하였으며, 실험체의 초기균열과 균열 진행상황 등을 관찰하기 위하여 초저조도 초고속 카메라를 설치하여 영상으로 기록하였다. [표 2.4]는 실험에 사용한 초저조도 초고속 카메라의 주요사양을 나타냈다. 실험의 개요도는 [그림 2.7]과 같다.



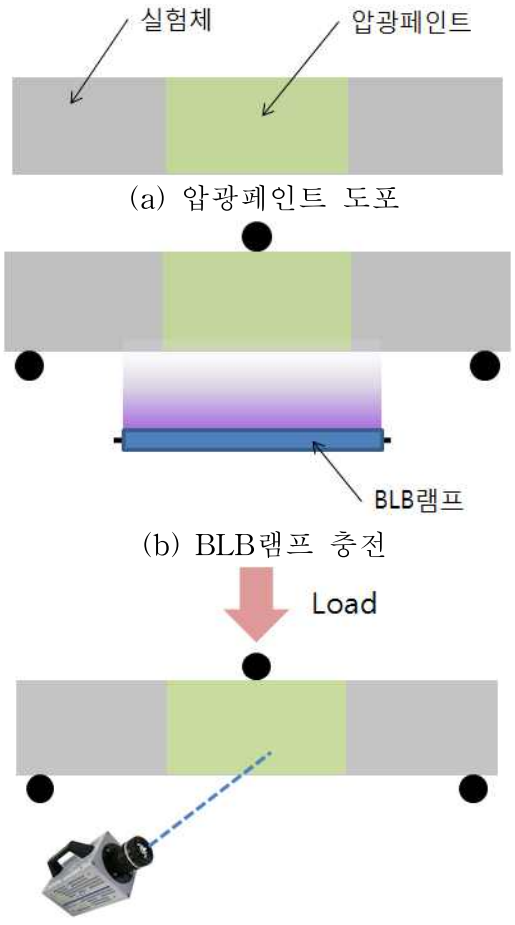
[그림 2.5] 실험 전경



[그림 2.6] 실험전 BLB램프 충전 모습

[표 2.4] 초저조도 초고속 카메라 사양

구 분		내 용
장비명 (모델명)	한글	- 초저조도 초고속 카메라 장비
	영문	- Ultra high gained and speed camera
제작업체	제작국가	일본
	제작사	photron
장비 주요 용도		초저조도 초고속 압광 영상 획득
주요사양		- 카메라 속도 : 20,000 fps at 1000*500 최대 300,000 fps - PC 기반 제어, MCDL 운용가능 - 가변 트리거 모드, NTSC 방식 - 광량 증폭성능 : Gain x2 -x1,000



(a) 압광페인트 도포

(b) BLB램프 충전

(c) 실험

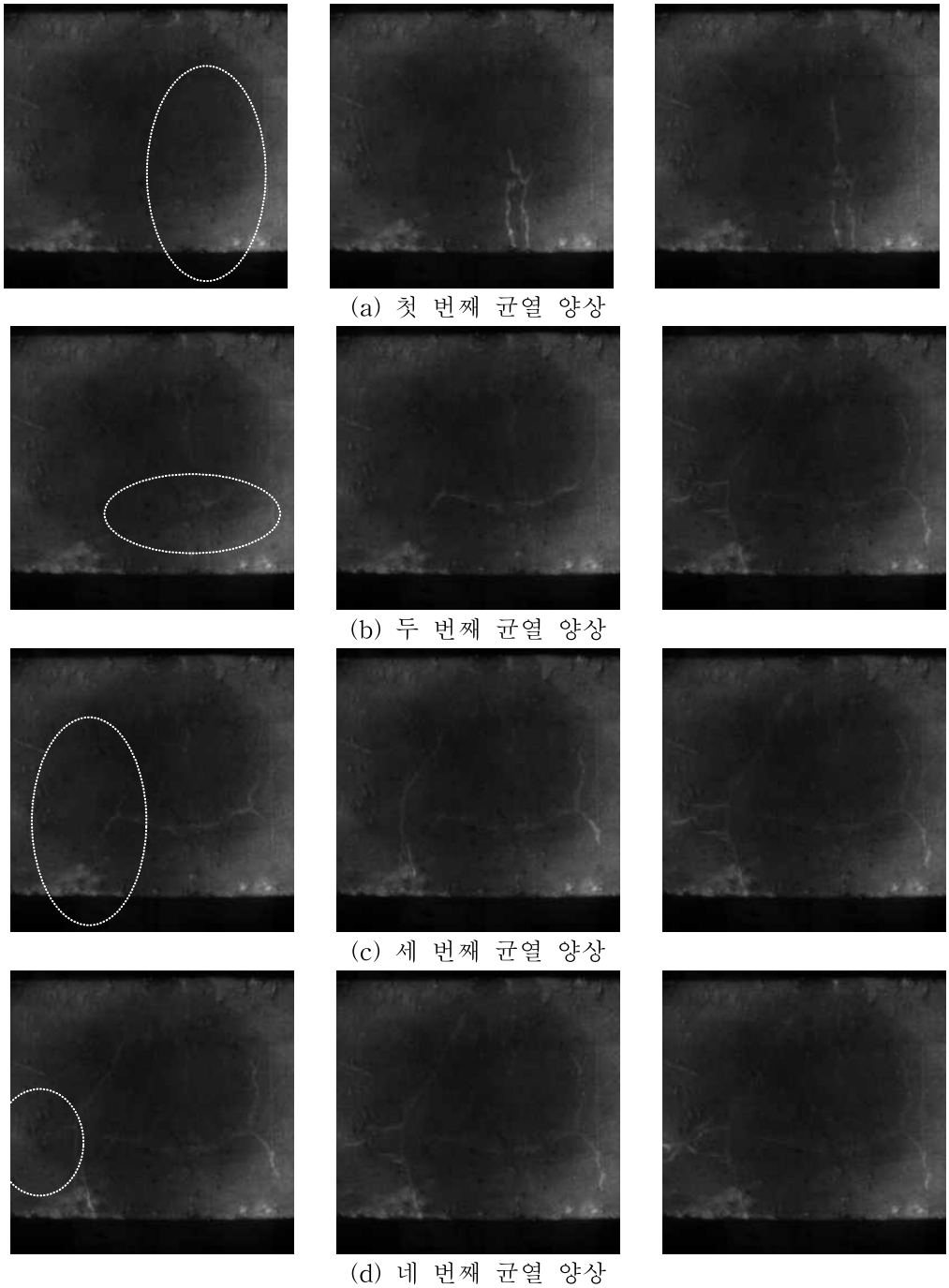
[그림 2.7] 실험 개요도

(3) 실험결과

(가) 균열양상

총 4개의 실험체 중 A-1실험체와 B-1실험체의 데이터를 이용하여 균열양상을 비교 분석하였다. 실험시 초저조도 초고속 카메라를 이용하여 얻은 동영상을 PFV(Photron Fastcam Viewer) 프로그램을 통하여 균열이 발생하는 시간대와 하중을 기록하고 이미지를 추출하였다. 추출한 이미지와 실험이 종료된 후의 사진과 비교하였다.

① A-1실험체



(a) 첫 번째 균열 양상

(b) 두 번째 균열 양상

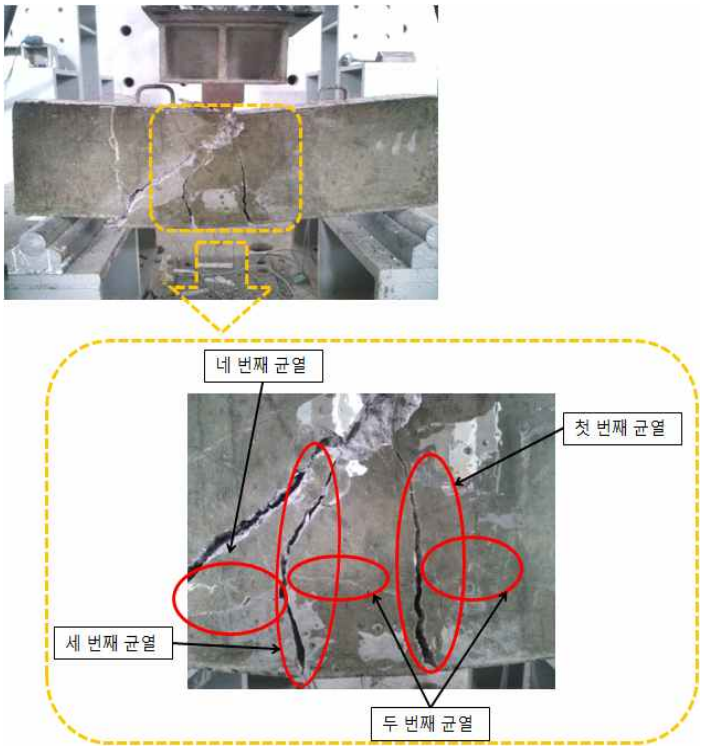
(c) 세 번째 균열 양상

(d) 네 번째 균열 양상

[그림 3.1] A-1실험체 균열 진행과정 (카메라 영상)

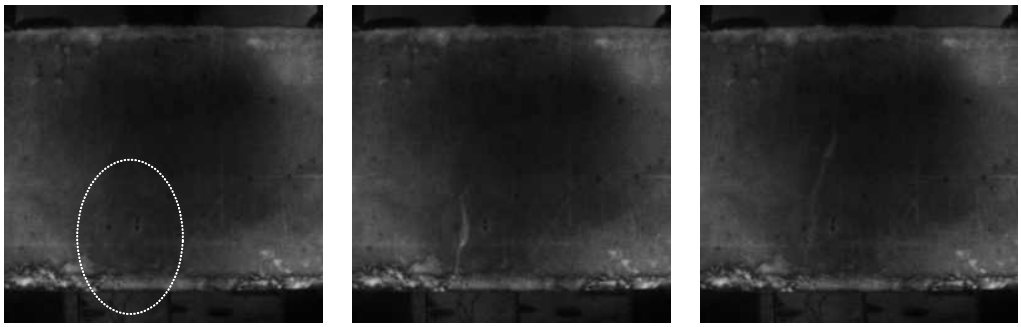
[표 3.1] A-1실험체의 균열 발생 시간, 하중, 진행 시간

구 분		재하후 균열 발생 시간 (s)	균열발생시 하중 (kN)	균열 진행 시간 (s)
첫 번째 균열	1-1	12.8	96.5	2.2
	1-2	13.2	100.6	
	1-3	15.0	120.9	
두 번째 균열	2-1	17.3	144.7	7.8
	2-2	20.6	173.6	
	2-3	25.1	211.3	
세 번째 균열	3-1	21.1	178.4	4.1
	3-2	22.6	192.0	
	3-3	25.2	212.2	
네 번째 균열	4-1	23.7	198.2	1.5
	4-2	24.9	209.4	
	4-3	25.2	212.2	



[그림 3.2] A-1실험체 최종파괴 후 균열양상

② B-1실험체



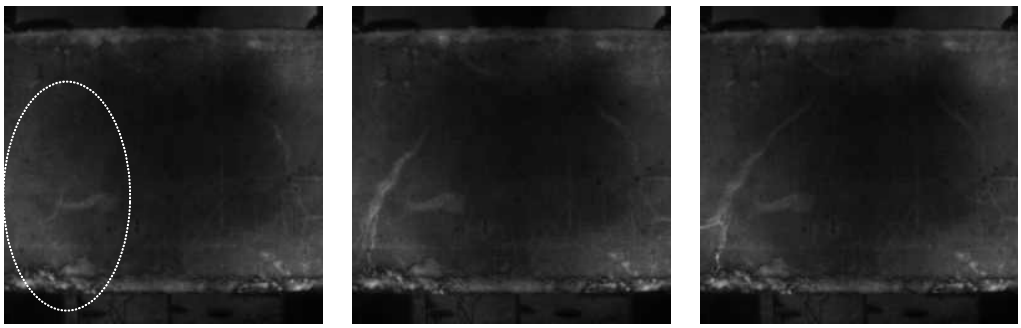
(a) 첫 번째 균열 양상



(b) 두 번째 균열 양상



(c) 세 번째 균열 양상



(d) 네 번째 균열 양상

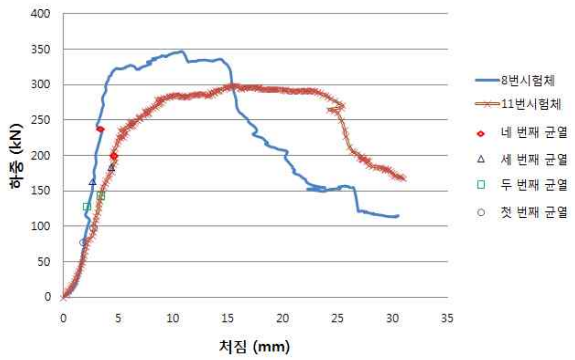
[그림 3.3] B-1실험체 균열 진행 과정 (카메라 영상)

[표 3.2] B-1실험체 균열 발생 시간, 하중, 진행 시간

구 분		재하후 균열 발생 시간 (s)	균열발생시 하중 (kN)	균열 진행 시간 (s)
첫 번째 균열	1-1	7.8	77.3	2.8
	1-2	8.6	86.8	
	1-3	10.6	106.8	
두 번째 균열	2-1	12.9	133.2	8.2
	2-2	14.7	154.3	
	2-3	21.1	237	
세 번째 균열	3-1	15.5	163.5	5.6
	3-2	19.4	214.5	
	3-3	21.1	237	
네 번째 균열	4-1	21.4	240.5	5.6
	4-2	25.8	288.4	
	4-3	27	299.3	

③ 실험체 균열양상 비교

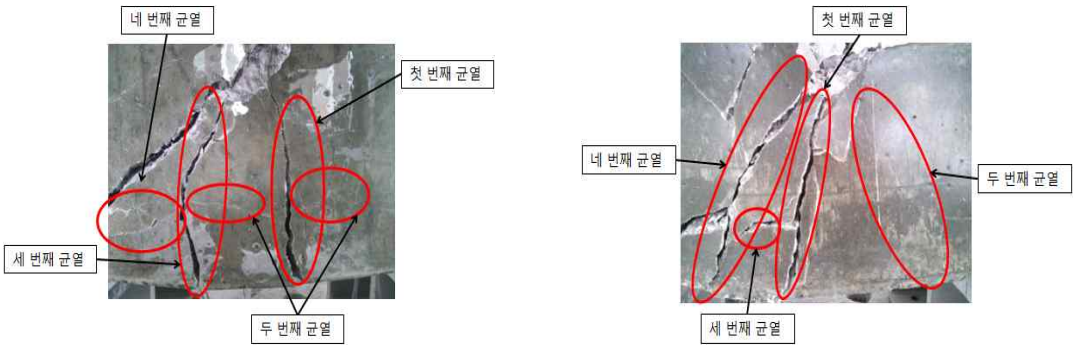
[표 3.3]는 두 실험체간의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험체간의 강도차이로 인하여 B-1실험체의 최대하중이 더 크게 나타났으며 첫 번째 균열이 발생하는 시간도 B-1실험체가 0.4초정도 빠르게 발생하였다. 하지만 첫 번째 균열이 발생하는 시점에서 B-1실험체의 하중이 A-1실험체의 하중보다 19.2kN이 적은 시점에서 균열이 발생하였다. A-1실험체의 첫 번째 균열은 최대하중의 32%의 하중에서 균열이 발생하였으며, B-1실험체는 최대하중의 23%의 하중에서 균열이 발생하였다. [그림 3.4]는 두 실험체의 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 두 실험체간의 균열양상은 대체로 비슷한 균열양상을 보였으며 [그림 3.5]은 두 실험체 간의 균열양상을 비교하여 나타냈다.



[그림 3.4] A-1실험체와 B-1실험체의 하중-처짐 곡선의 비교

[표 3.3] A-1실험체와 B-1실험체의 결과 비교

구분			첫 번째 균열	두 번째 균열	세 번째 균열	네 번째 균열
균열 발생 시간 (s)	A-1		12.8	17.3	21.1	23.7
	B-1		7.8	12.9	15.5	21.4
하중 (kN)	A-1	균열 발생시 하중	96.5	144.7	178.4	198.2
		균열 발생시 하중과 최대하중의 비	0.32	0.49	0.60	0.67
	B-1	균열 발생시 하중	77.3	133.2	163.5	240.5
		균열 발생시 하중과 최대하중의 비	0.23	0.39	0.48	0.70
균열 진행 시간 (s)	A-1		2.4	7.8	4.1	1.5
	B-1		2.8	8.2	5.6	5.6



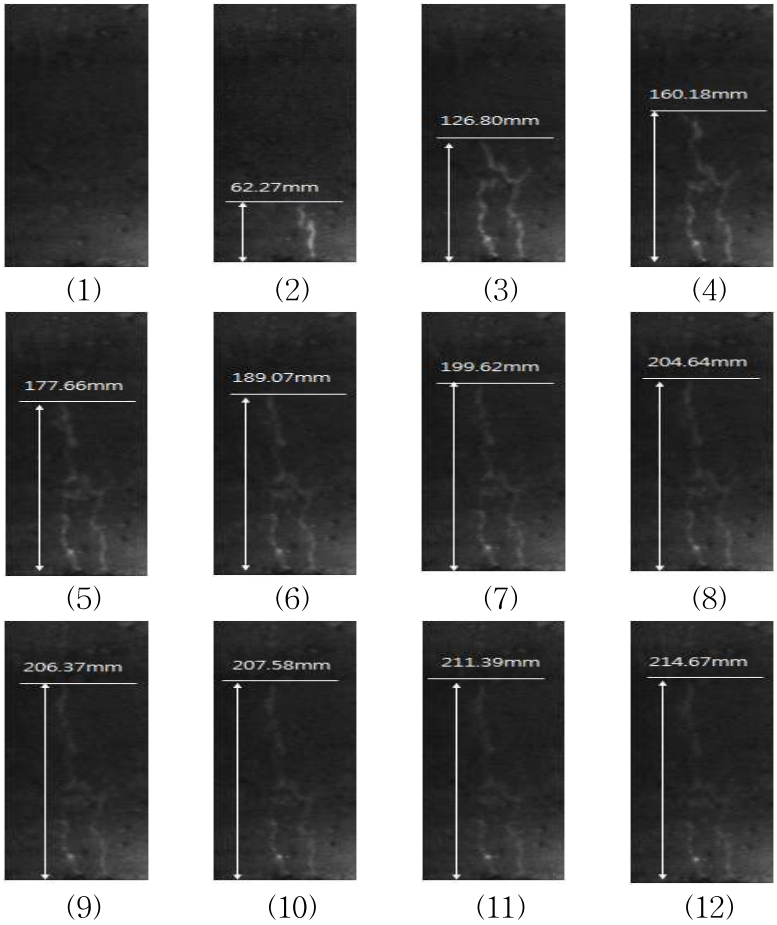
(a) A-1실험체의 균열양상 (b) B-1실험체의 균열양상

[그림 3.5] 실험체간의 균열양상 비교

(나) 균열길이

균열이 발생하기 전부터 0.2초 간격으로 이미지를 추출하고 픽셀의 RGB값이 증가하는 위치를 분석하여 균열길이를 측정하였다. 실험시 데이터로거 데이터와 초저조도 초고속 카메라의 데이터를 비교하여 하중, 변위 값을 동기화하고 균열이 발생하기 전부터 0.2초 간격으로 총 12장의 이미지를 추출하였다.

① A-1실험체

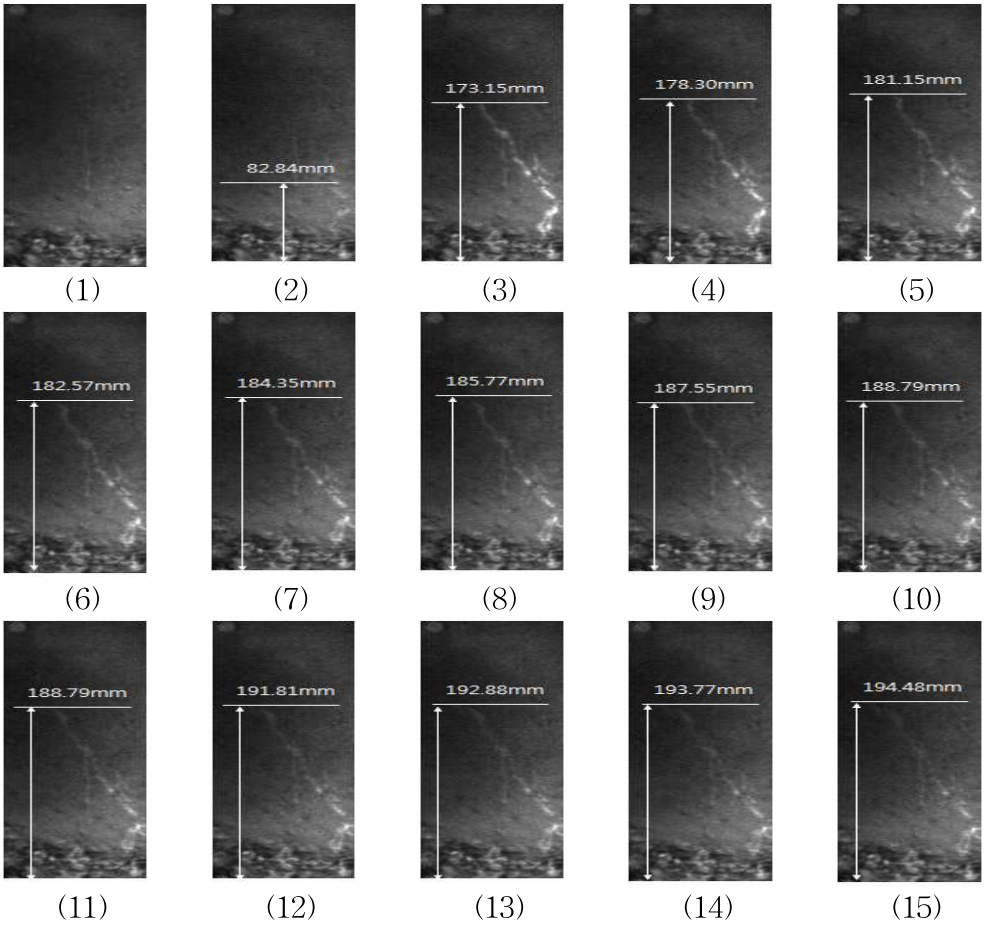


[그림 3.6] A-1실험체의 첫 번째 균열진행 과정

[표 3.4] A-1실험체의 균열길이, 하중, 처짐 비교

이미지 번호	균열 발생시간(s)	시간(s)	균열길이 (mm)	균열속도 (mm/s)	하중 (kN)
1	12.8	0	0	0	96.5
2	13	0.2	62.27	311.35	98.4
3	13.2	0.4	126.8	322.65	100.6
4	13.4	0.6	160.18	166.9	104.2
5	13.6	0.8	177.66	87.4	106.5
6	13.8	1	189.07	57.05	108.2
7	14	1.2	199.62	52.75	110.7
8	14.2	1.4	204.64	25.1	113
9	14.4	1.6	206.37	8.65	114.5
10	14.6	1.8	207.58	6.05	117.3
11	14.8	2	211.39	19.05	119.3
12	15	2.2	214.67	16.4	120.9

② A-2실험체

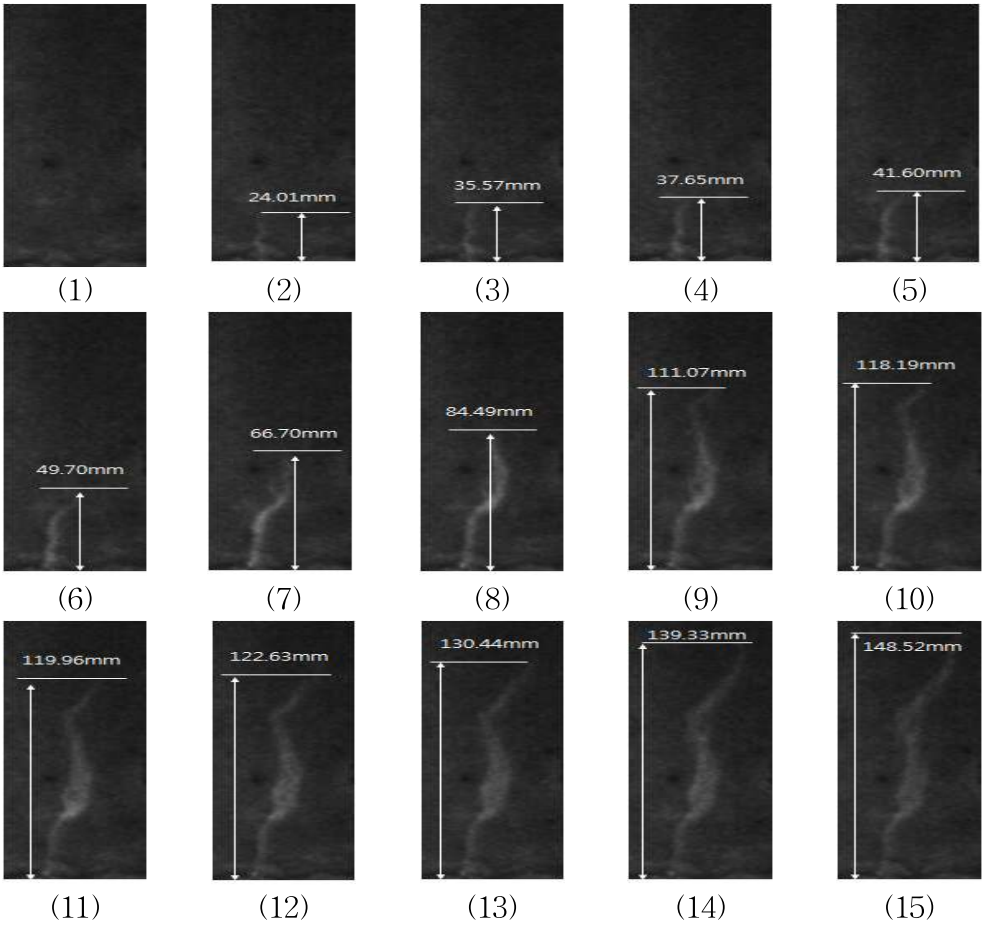


[그림 3.7] A-2실험체의 첫 번째 균열 진행 과정

[표 3.5] A-2실험체의 균열길이, 하중, 처짐 비교

이미지 번호	균열 발생시간(s)	시간(s)	균열길이 (mm)	균열속도 (mm/s)	하중 (kN)
1	18.9	0	0	0	165.9
2	19.1	0.2	82.84	414.21	168.8
3	19.3	0.4	173.15	451.54	170.7
4	19.5	0.6	178.30	25.78	172.2
5	19.7	0.8	181.15	14.22	172.2
6	19.9	1.0	182.57	7.11	173.8
7	20.1	1.2	184.35	8.89	175.5
8	20.3	1.4	185.77	7.11	178.7
9	20.5	1.6	187.01	6.22	181.0
10	20.7	1.8	187.55	2.67	183.0
11	20.9	2.0	188.79	6.22	186.1
12	21.1	2.2	191.81	15.11	189.9
13	21.3	2.4	192.88	5.33	192.2
14	21.5	2.6	193.77	4.44	194.0
15	21.7	2.8	194.48	3.56	196.5

③ B-1실험체

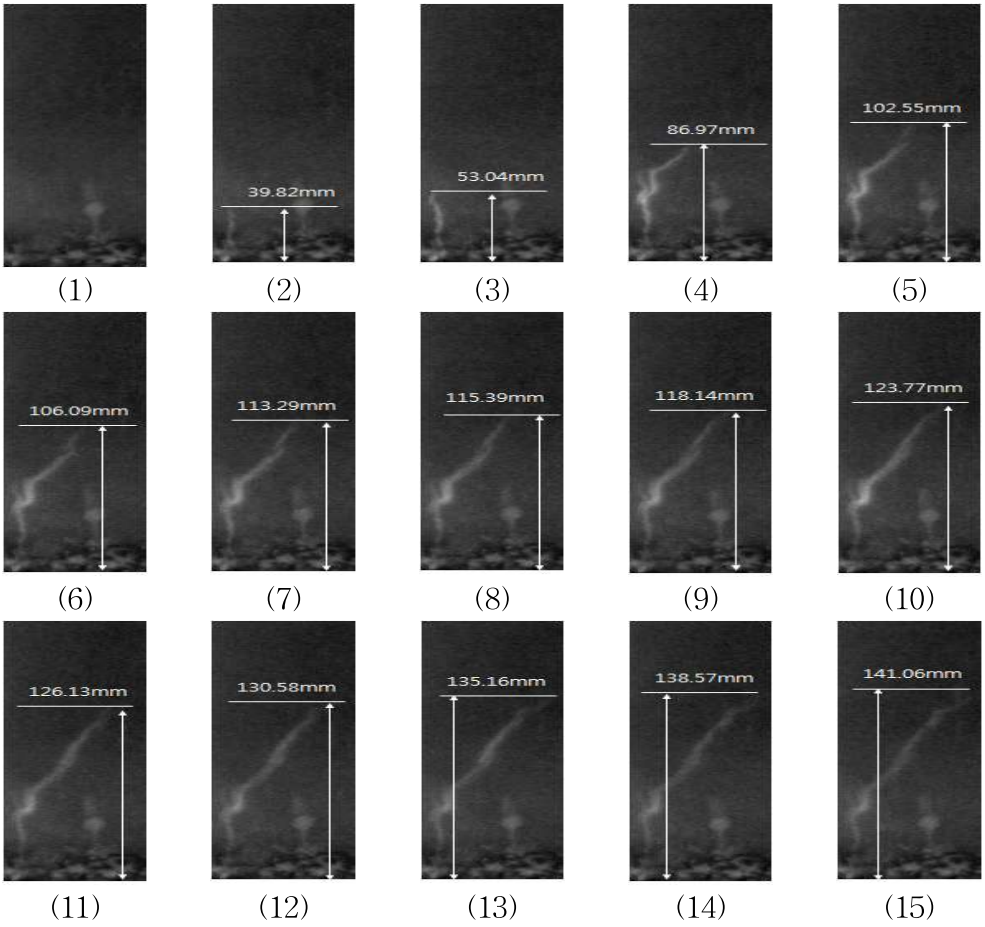


[그림 3.8] B-1실험체의 첫 번째 균열진행 과정

[표 3.6] B-1실험체의 시간대별 균열길이, 하중 비교

이미지 번호	균열 발생시간(s)	시간(s)	균열길이 (mm)	균열속도 (mm/s)	하중 (kN)
1	7.8	0	0.00	0	77.3
2	8.0	0.2	24.01	120.05	80.4
3	8.2	0.4	35.57	57.8	82.7
4	8.4	0.6	37.65	10.4	84.1
5	8.6	0.8	41.60	19.75	86.8
6	8.8	1.0	49.70	40.5	88.7
7	9.0	1.2	66.70	85	90.1
8	9.2	1.4	84.49	88.95	92.1
9	9.4	1.6	111.07	132.9	94.2
10	9.6	1.8	118.19	35.6	95.7
11	9.8	2.0	119.96	8.85	98.1
12	10.0	2.2	122.63	13.35	100.2
13	10.2	2.4	130.44	39.05	102.1
14	10.4	2.6	139.33	44.45	104.8
15	10.6	2.8	148.52	45.95	106.8

④ B-2실험체



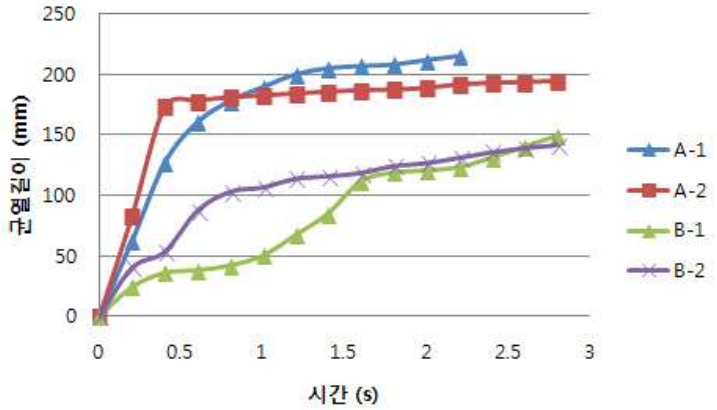
[그림 3.9] B-2실험체의 첫 번째 균열진행 과정

[표 3.7] B-2실험체의 균열길이, 하중, 처짐 비교

이미지 번호	균열 발생시간(s)	시간(s)	균열길이 (mm)	균열속도 (mm/s)	하중 (kN)
1	12.6	0	0	0	97.0
2	12.8	0.2	39.82	199.08	97.2
3	13	0.4	53.04	66.14	99.9
4	13.2	0.6	86.97	169.61	103.3
5	13.4	0.8	102.55	77.93	105.7
6	13.6	1.0	106.09	17.68	107.3
7	13.8	1.2	113.29	36.02	109.8
8	14	1.4	115.39	10.48	111.7
9	14.2	1.6	118.14	13.75	113.1
10	14.4	1.8	123.77	28.16	115.3
11	14.6	2.0	126.13	11.79	117.2
12	14.8	2.2	130.58	22.27	118.4
13	15	2.4	135.16	22.92	121.2
14	15.2	2.6	138.57	17.03	123.5
15	15.4	2.8	141.06	12.44	125.0

⑤ 실험체별 결과 비교

[그림 3.10]은 실험체별 시간에 따른 균열길이를 그래프로 나타내며 [표 3.8]는 모든 실험체의 시간대별 균열길이의 값을 나타낸다. [그림 3.10]에서와 같이 A그룹의 실험체들의 균열길이의 값이 B그룹의 실험체들의 값보다 크게 나왔다. 균열길이의 크기는 A-1, A-2, B-1, B-2의 순으로 나타났으며 A그룹의 평균 균열길이는 204.57mm, B그룹의 평균 균열길이는 144.79mm이다. A그룹의 평균 균열길이가 B그룹의 평균 균열길이보다 약 60mm정도 길게 나타났다. 이는 강도의 영향으로 사료되며 강도가 높을수록 시간에 따른 균열의 길이가 짧은 것으로 나타났다.



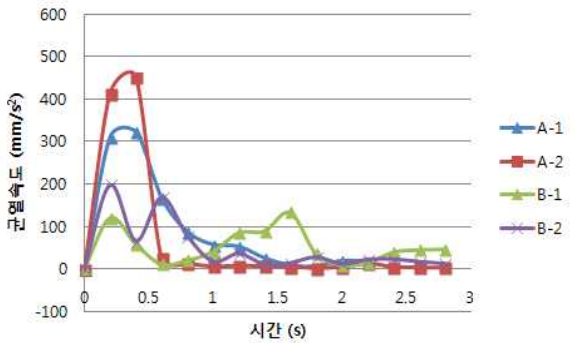
[그림 3.10] 실험체별 시간에 따른 균열길이

[표 3.8] 실험체별 시간에 따른 균열길이의 값 비교

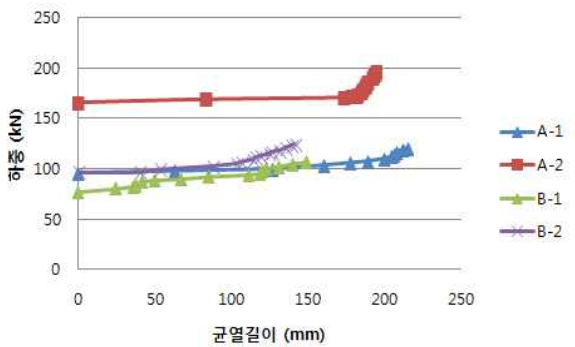
이미지 번호	시간 (s)	균열길이 (mm)			
		A-1	A-2	B-1	B-2
1	0	0	0	0	0
2	0.2	62.27	82.84	24.01	39.82
3	0.4	126.80	173.15	35.57	53.04
4	0.6	160.18	178.30	37.65	86.97
5	0.8	177.66	181.15	41.60	102.55
6	1	189.07	182.57	49.70	106.09
7	1.2	199.62	184.35	66.70	113.29
8	1.4	204.64	185.77	84.49	115.39
9	1.6	206.37	187.01	111.07	118.14
10	1.8	207.58	187.55	118.19	123.77
11	2	211.39	188.79	119.96	126.13
12	2.2	214.67	191.81	122.63	130.58
13	2.4	-	192.88	130.44	135.16
14	2.6	-	193.77	139.33	138.57
15	2.8	-	194.48	148.52	141.06

[표 3.9] 실험체별 시간에 따른 균열 속도 및 하중

시간 (s)	A-1		A-2		B-1		B-2	
	균열 속도 (mm/s2)	하중 (kN)	균열 속도 (mm/s2)	하중 (kN)	균열 속도 (mm/s2)	하중 (kN)	균열 속도 (mm/s2)	하중 (kN)
0	0	96.5	0	165.9	0	77.3	0	97.0
0.2	311.35	98.4	414.21	168.8	120.05	80.4	199.08	97.2
0.4	322.65	100.6	451.54	170.7	57.80	82.7	66.14	99.9
0.6	166.90	104.2	25.78	172.2	10.40	84.1	169.61	103.3
0.8	87.40	106.5	14.22	172.2	19.75	86.8	77.93	105.7
1	57.05	108.2	7.11	173.8	40.50	88.7	17.68	107.3
1.2	52.75	110.7	8.89	175.5	85.00	90.1	36.02	109.8
1.4	25.10	113	7.11	178.7	88.95	92.1	10.48	111.7
1.6	8.65	114.5	6.22	181.0	132.90	94.2	13.75	113.1
1.8	6.05	117.3	2.67	183.0	35.60	95.7	28.16	115.3
2	19.05	119.3	6.22	186.1	8.85	98.1	11.79	117.2
2.2	16.40	120.9	15.11	189.9	13.35	100.2	22.27	118.4
2.4	-	-	5.33	192.2	39.05	102.1	22.92	121.2
2.6	-	-	4.44	194.0	44.45	104.8	17.03	123.5
2.8	-	-	3.56	196.5	45.95	106.8	12.44	125.0



[그림 3.11] 실험체별 시간에 따른 균열속도 그래프



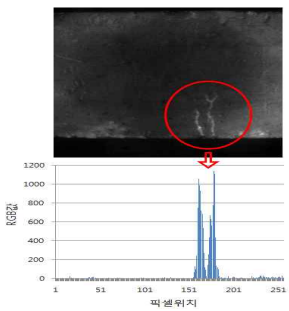
[그림 3.12] 실험체별 하중-균열길이 그래프

(다) 균열위치

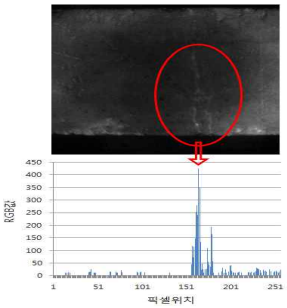
A-1실험체를 대상으로 균열이 발생하는 위치를 영상처리를 통하여 그래프로 분석하였다. 첫 번째 균열이 발생하는 시점을 기준으로 하여 0.3초간격으로 이미지를 획득하여 각 영상의 RGB값을 Erdas Imagine 프로그램을 통하여 추출하였다. 첫 번째 획득한 이미지를 기준으로 각 이미지들의 RGB값의 변화량을 구하고 세로축 픽셀들의 값을 합산하여 그래프로 나타내었다. [그림 3.13]은 추출한 이미지와 RGB값과 픽셀 위치의 관계 그래프를 나타낸다. [그림 3.13]의 (a)는 기준이 되는 균열 발생 전 이미지이다. 0.3초 후에 [그림 3.13]의 (b)에서와 같이 균열이 발생하면서 RGB값이 균열 발생 위치에서 1100이상으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 균열이 한 지점에서 발생하지 않고 두 지점에서 발생하는 것을 그래프를 통하여 확인할 수 있었다. [그림 3.13]의 (c)에서는 두 지점에서 발생한 균열이 합쳐져 진행되었으며 그래프에서 확인할 수 있듯이 균열 발생 위치에서 RGB값이 높은 것을 확인할 수 있었다. [그림 3.13]의 (d)에서는 균열이 발생한 뒤에 더 이상의 균열 발생이 없으므로 RGB값이 점점 낮아지는 것을 확인하였다. [그림 3.13]은 실험 시작부터 첫 번째 균열이 발생할 때까지 1초 간격으로 이미지를 추출하여 픽셀 위치에서의 누적RGB값을 그래프로 나타냈다. 그래프에서 균열이 발생하는 순간 균열 위치에서의 RGB값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. [그림 3.14]에서도 누적RGB값을 통하여 균열 발생 위치를 쉽게 확인할 수 있었다.



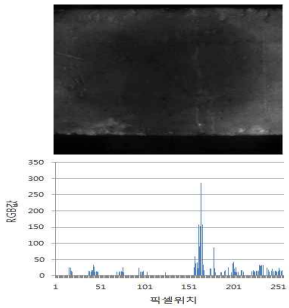
(a) 균열 발생전 이미지



(b) 0.3초 후 이미지와 그래프

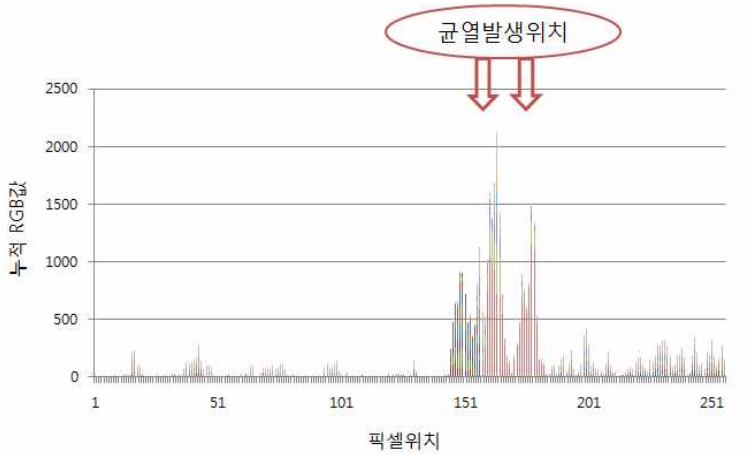


(c) 0.6초 후 이미지와 그래프



(d) 2.1초 후 이미지와 그래프

[그림 3.13] 추출한 이미지와 RGB값과 픽셀 위치의 관계 그래프



[그림 3.14] 누적RGB값과 픽셀 위치의 관계 그래프

(4) 결론

본 연구에서는 압광소재인 압광페인트를 이용하여 콘크리트의 균열을 검출하는 방법을 이용하여 균열양상과 초기 균열속도 및 균열위치를 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(가) A-1실험체와 B-1실험체의 균열양상을 압광페인트의 발광현상에 의하여 검출된 균열과 비교한 결과 균열의 형상이나 위치가 같은 것을 확인하였으며 이는 철근콘크리트 구조물에서도 충분히 적용할 수 있을 것이라고 사료된다.

(나) 압광페인트를 이용하여 검출된 균열을 영상처리 프로그램으로 균열 길이를 정확하게 측정할 수 있었으며, 이는 육안에 의해서 검출된 균열의 길이보다 더 정확하게 측정할 수 있을 것이라 사료된다.

(다) 압광페인트를 이용하여 검출된 균열을 영상처리 프로그램으로 균열의 위치를 그래프를 통해 쉽게 알 수 있었다.

(라) 위의 결과들을 종합하면 압광페인트를 철근 콘크리트에 적용하여 균열에 대한 해석을 정확하게 할 수 있었으며, 이는 저비용의 건전성 모니터링 시스템을 구축할 수 있는 계기가 될 수 있을 것이다.

압광소재에 대한 연구가 아직 시작단계이므로 앞으로의 더 많은 연구를 통하여 문제점을 보완한다면 향후 압광소재를 이용한 저가형 균열검출 시스템을 구축할 수 있을 것이다. 이러한 시스템이 구축된다면 어떠한 균열검출 시스템보다도 경제적이고 정확한 안정성 평가를 시행할 수 있을 것이라 사료된다.

3. 3차년도 연구수행 내용 및 결론

가. 저가형 균열 검출 시스템 구축 및 압광 영상처리 시스템 소프트웨어 개발

(1) 서론

본 연구의 압광소재를 이용한 연구를 통해 콘크리트의 균열 진행 과정과 균열 속도, 균열 길이 등에 대한 이해를 높일 수 있다. 또한 콘크리트 구조물의 대형화 및 노후화 됨에 따라, 기존의 비파괴 시험법 등의 기술로는 피로 균열과 같은 결함부를 검출하는 것이 기술적, 경제적으로 매우 어려워지고 있는 현실이다. 압광소재에 대한 연구는 저비용의 건전성 모니터링 시스템을 구현하는데 필요한 기술적 경제성을 제공할 수 있으므로 저비용의 구조물 건전성 모니터링이 가능함에 따라, 주어진 비용으로 보다 많은 사회 기반 시설 구조물의 안전점검이 가능하게 하여 대형 중요 구조물들의 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하고 적절한 조치를 취함으로서 사회 경제적 파장이 큰 대형 사고를 미연에 방지할 수 있는 기술을 제공할 수 있다. 압광소재에 대한 연구는 그 성능상 우수성에도 불구하고 현재 이를 연구하고 있는 국내외 연구팀은 매우 희소하며, 연구 성과가 본격적으로 나오기 시작하는 시점이다. 현재까지 건설구조물에 적용한 사례는 없으며, 압광소재를 이용한 구조물 안전성 평가 분야에서 국내외 선두의 기술을 확보할 수 있는 계기가 될 수 있다.

본 연구는 압광소재인 압광페인트(Mechano-Luminescent Paint)를 이용하여 콘크리트의 균열진행과정을 시각적으로 검출이 가능하게 하고 계측과 관련하여 이동식모니터링시스템을 구축하는 것이 목표이다. 또한 실시간 압광영상처리 및 균열검출 SW를 개발하여 구조물에서의 압광 신호 및 데이터를 수집하여 균열을 검출할 수 있음을 목표로 한다. 실험은 압광페인트와 센서를 설치한 실험체를 4-Point Bending Test를 이용하여 실험을 실시한다. 압광페인트가 도포된 실험체를 프레임에 거치 시킨 후 균열에 따른 콘크리트의 변형률과 변위를 측정하기 위하여 콘크리트용 스트레인 게이지와 LVDT를 설치한다. 실험체에 도포한 압광페인트에 자외선램프를 이용하여 에너지를 축적시킨 후 하중을 재하하고 저가형 초저조도 카메라를 이용하여 콘크리트의 균열진행과정을 촬영한다. 또한 계측장비의 자동화시스템 구축을 위해 자체이동이 가능한 장비를 제작한 후 초저조도 카메라를 이용한 이동식모니터링시스템을 구축해 실시간모니터링을 보다 적은 촬영기기로 하며 보다 경제적이고 효과적인 유지관리를 할 수 있다.

(2) 실시간 압광 영상처리 및 균열검출 SW 개발

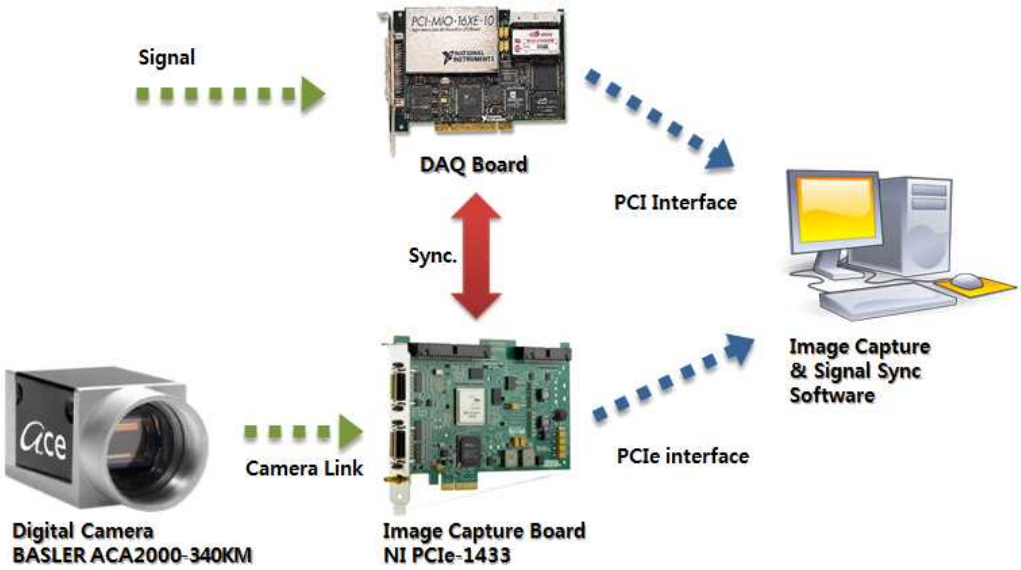
(가) 개발 목적

초고속 균열 화상 획득 시스템의 경우 실제 본 연구개발에서 요구되는 초당 화상 획득 능력을 초과하는 장비이다. 이 장비는 실험실에서 연구용으로 사용할 경우 초고속의 화상획득 및 미세 발광 검출 등 여러 가지 많은 장점을 가지고 있으나, 장비가격 자체가 상당히 고가이며, 장비 구동에 아주 숙련된 사용자가 필요함은 물론 장비의 중량 및 부피가 현장에서 사용하기에는 적합하지 않다. 따라서, 실제 현장 구조물에서의 압광 신호 수집을 위해서는 별도

의 SW 및 데이터 수집 방법의 구축이 필요하며, 본 연구에서는 실험실은 물론 현장에서 사용하기에 적합한 성능 가지는 소형 중고속 균열 관찰 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 구조물에서 발생하는 하중 데이터와 압광영상 신호의 동기화를 통하여 구조물의 균열을 검출하는 방법이 사용되었고, 재 측정 장비로 많이 이용되고 있는 National Instruments의 장비를 사용하여 소프트웨어인 LabVIEW를 사용하였다.

(나) 개발 내용

중고속 균열 관찰 시스템의 구성을 아래의 [그림 1.1]에 보인다. 시스템은 크게 디지털 카메라, 화상 획득 보드, 사용자 컴퓨터로 구성되어 있다. 각 구성요소의 구체적인 설명은 아래와 같다.



[그림 1.1] 중고속 균열 관찰 시스템의 구성

① 디지털 화상 카메라

중고속의 균열 관찰 시스템의 핵심 구성요소는 가시광선 화상을 획득할 수 있는 디지털 화상 획득용 카메라이다. 여러 가지 사용모델들이 있으나, 본 연구에서는 적절한 성능을 제공하면서 소형인 디지털 화상 획득 카메라로서 BASLER ACA2000-340KM 모델을 선택하였다.

이 모델의 경우, 일반 디지털 카메라 또는 아나로그 카메라가 제공하는 30FPS의 촬영속도에 비해 월등히 빠른 340FPS의 촬영속도를 확보해주며 동시에 2048x1024의 높은 해상도를 제공해 주기 때문에 본 연구의 목적에 적합한 것으로 판단하였다. 아래에 [표 1.1]에 본 디지털 카메라의 주요 성능사양을 보인다.

[표 1.1] 중고속 균열 관찰 시스템의 구성

Resolution horizontal/vertical	2048 pixels x 1088 pixels
Pixel Size horizontal/vertical	5.5 μm x 5.5 μm
Frame Rate	340 fps
Mono/Color	Mono
Interface	Camera Link
Pixel Bit Depth	8, 10, 12 bits
Synchronization	external trigger software free-run
Exposure Control	trigger width or timed
Housing Size (L x W x H) in mm	43.5 x 29 x 29
Weight (typical)	96 g
Sensor Technology	Progressive Scan CMOS, global shutter

본 카메라는 위의 사양에서 보이듯이 촬영 속도 및 높은 해상도와 더불어 부피(43.5x29x29mm) 및 중량(96g)의 작아서 현장설치에 적합하다. 또한 외부의 부가적인 신호와의 동기화에 필수적인 채널을 제공하여 주고 있다.

② 디지털 화상 획득 보드

디지털 화상 획득 보드는 네셔널인스트루먼트 사의 카메라링크 보드인 NI-PCIe1433을 사용하였다. NI-PCIe1433은 고속의 데이터 전송속도를 제공하는 CameraLink(TM) 인터페이스를 위해 개발된 모델이다.

③ 외부 신호 획득용 보드

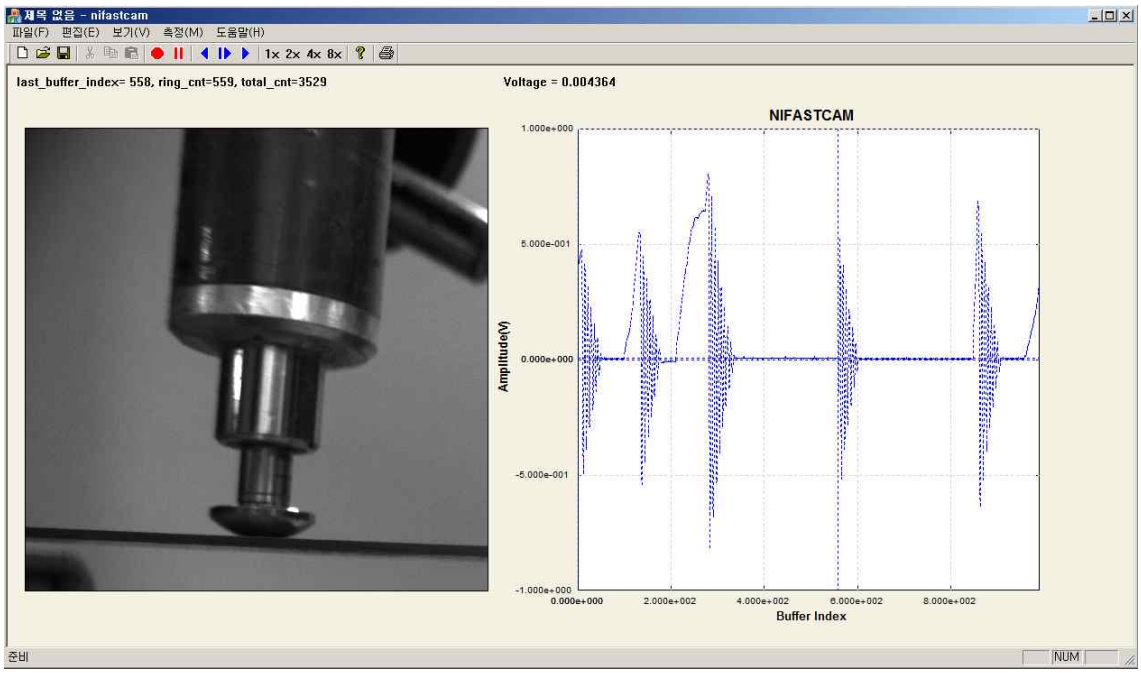
각 시간대의 디지털 이미지와 외부 신호(하중, 변위등에서 오는 전압신호)와의 동기화를 위해서는 부가적인 A/D(Analog to Digital)보드가 필요하다. 이를 위해 네셔널인스트루먼트의 범용 DAQ보드인 PCI-MIO-16XE-10보드를 사용하였다. 이 보드의 역할은 외부의 아나로그 신호(전압)를 사용자 컴퓨터에서 처리할 수 있는 디지털 신호로 변화를 해줌과 동시에 이 아나로그 신호와 촬영화상의 시간동기화를 위해 사용된다.

④ 디지털 화상 획득 및 외부신호 동기화 소프트웨어

균열의 디지털 화상 획득은 최종적으로 사용자 컴퓨터의 구동 프로그램에서 관리한다. 2048x1024의 고해상도 화상을 초당 340PFS의 속도로 획득하기 위해서는 대용량의 메모리가 필요하며, 실제 사용자 컴퓨터의 메모리의 한계에 따른 촬영시간의 제약을 받는다. 이 문제를 효율적으로 해결하기 위하여 프로그램 개발시 링버퍼를 사용하였으며, 프로그램은 촬영 종료

시각을 기준으로 정해진 수의 화상을 기록한다.

디지털 화상 획득 구동 프로그램은 Visual C++프로그램으로 작성이 되었으며, 화상 획득보드 제조사에서 제공하는 구동 드라이브 IMAQ를 이용하였다. 아래 [그림 1.2]에 이 디지털 화상 획득 구동 구동프로그램의 사용자 인터페이스를 보인다.



[그림 1.2] 디지털 화상 획득 구동 구동프로그램의 사용자 인터페이스

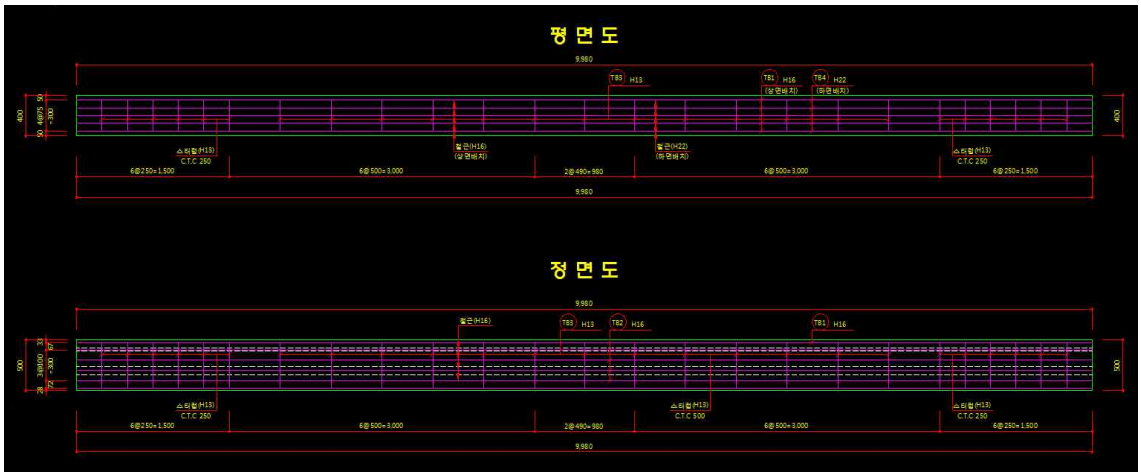
사용자 인터페이스의 좌측에 현재 획득중인 이미지를 보여주며, 우측 그래프에 외부 신호의 변화를 실시간으로 보여준다.

화면에 예시로 보여주는 이미지는 다음 그림에서 보이는 얇은 캔틸래버 보(금속 자)에 LVDT를 설치하여 캔틸레버 보가 진동할 때의 처짐 변위를 시간에 대한 함수로 측정하는 예시장면이다. 이 예시에서의 LVDT 변화 신호의 최종 형태는 전압의 변화이며, 실험시 화중측정을 위한 로드셀 신호 도는 변형률 측정을 위한 변형률 게이지 신호로 대체할 수 있다. 현재 프로그램은 한 개의 DAQ 입력 채널을 사용하고 있으나, 추후 다수의 DAQ 입력 채널을 사용할 수 있도록 개선할 예정이다.

(3) 실험계획

(가) 실험체 설계 및 제작

철근 콘크리트 부재에서 압광페인트의 균열발생 여부를 확인하기 위해 [그림 1.3]과 같은 부재치수와 단면을 갖는 실험체를 설계하여 제작하였다. 콘크리트의 강도는 30MPa, 50MPa 이다. [그림 1.3]은 실험체의 설계도면을 나타내며 배합설계는 콘크리트 표준시방서를 참고하여 설계하였으며 배합 설계표는 [표 1.2]와 같다.



[그림 1.3] 실험체 설계도면

[표 1.2] 실험체 배합 설계표

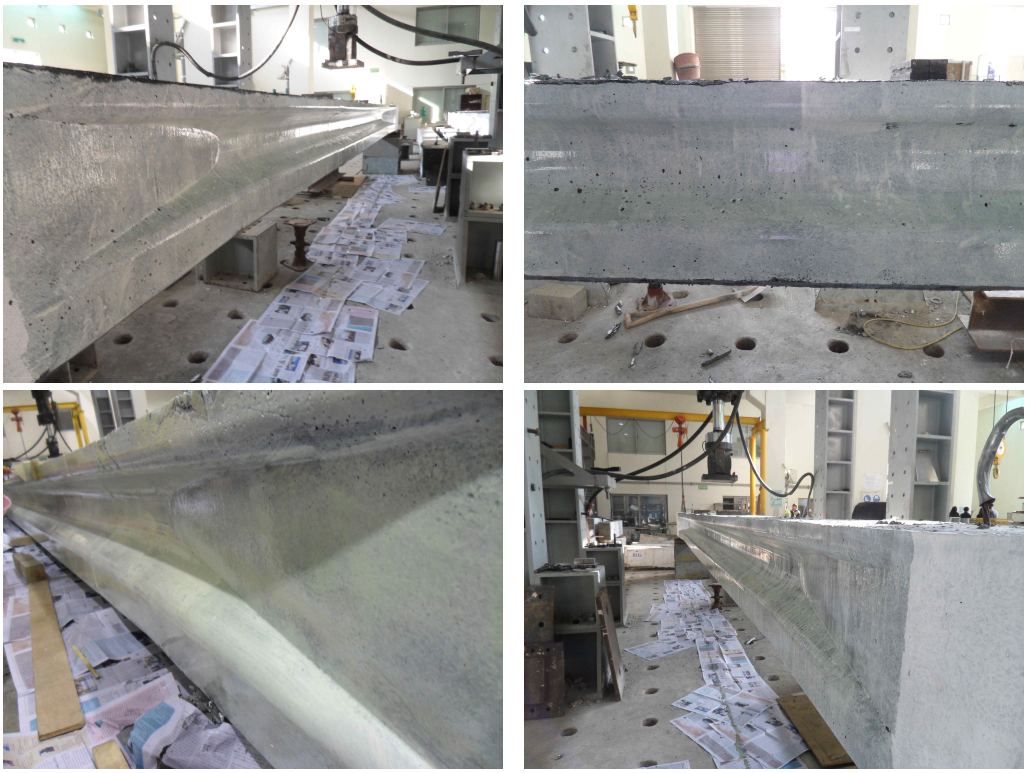
구분	굵은 골재의 최대 치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	물-시멘트 비 (%)	잔골재율 S/a (%)	단위량(kg/m3)				
						물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은 골재 G	혼화제 (g/m3)
30	25	12	4.5	43	63	185	430	775	967	-
50	25	12	4.5	32	63	138	430	775	967	4.3

(나) 압광페인트 도포

압광페인트를 제작하기 위한 재료와 양은 [표 1.3]과 같다. [표 1.3]은 에폭시 100g을 기준으로 필요한 하드너, 첨가제, 파우더의 양을 표현한 것이다. [그림 1.4]은 제작된 압광페인트를 실험체에 도포된 사진을 나타냈다.

[표 1.3] 압광페인트 제작 재료

에폭시	하드너	첨가제	파우더
100g	30g	2g	19.5g



[그림 1.4] 압광페인트 제작 과정

(다) 실험

[그림 1.5]는 실험시 전경을 나타낸다. 실험을 위한 실험체는 콘크리트 강도 30MPa, 50Mpa로 두고 실험을 진행하였다. 모든 실험체의 하중 가력은 실험체 중앙에서 재하하는 4점실험으로 진행하였으며 실험체의 변위를 측정하기 위한 LVDT(linear variable differential transformer)는 실험체 중앙 아래에 설치되었다. 또한 실험이 진행되는 동안 실험체의 거동을 살펴보기 위하여 철근 중앙에 5개의 스트레인게이지를 부착하였다. 콘크리트 게이지 또한 5개를 부착하여 진행하였다. 모든 데이터는 데이터 로거(data logger)를 이용하여 실험이 종료될 때까지 실험체 중앙부에서의 처짐과 철근 및 콘크리트의 변형률을 하중단계별로 측정하였다. 실험진행시 실험체의 발광현상을 알아보기 위하여 프레임 전체에 암막을 설치하여 암실조건에서 실험을 진행하였다. [그림 1.6]은 암실 내부의 카메라와 BLB램프를 나타낸 사진이다. 실험 시작전 압광페인트의 발광현상을 가시화하기 위하여 [그림 1.7]과 같이 압광페인트에 BLB램프로 20분정도 에너지를 충전시킨 후에 실험을 실시하였다. 실험시 재하하중은 엑츄에이터로 변위제어를 통하여 재하 하였으며, 실험체의 초기균열과 균열 진행상황 등을 관찰하기 위하여 초저조도 초고속 카메라를 설치하여 촬영했으며 DVR장치를 이용해 영상으로 기록하였다. [그림 1.8] (a)는 사용된 저가형 초저조도 카메라를 나타낸 것이며 (b)는 카메라와 하우징 결합상태를 나타낸 사진이다. 하우징 결합으로 인해 야외뿐만 아니라 악천후에서도 실시간 촬영이 가능하다. [표 1.4]는 실험에 사용한 초저조도 카메라의 주요사양을 나타냈으며 [표 1.5]는 영상기록장치인 DVR의 제원을 나타냈다. [그림 1.9]은 실험에 사용된 DVR장치를 나타낸것이며 [그림 1.10]은 시험에 사용된 DVR과 모니터링 시스템을 나타낸다. 실험의

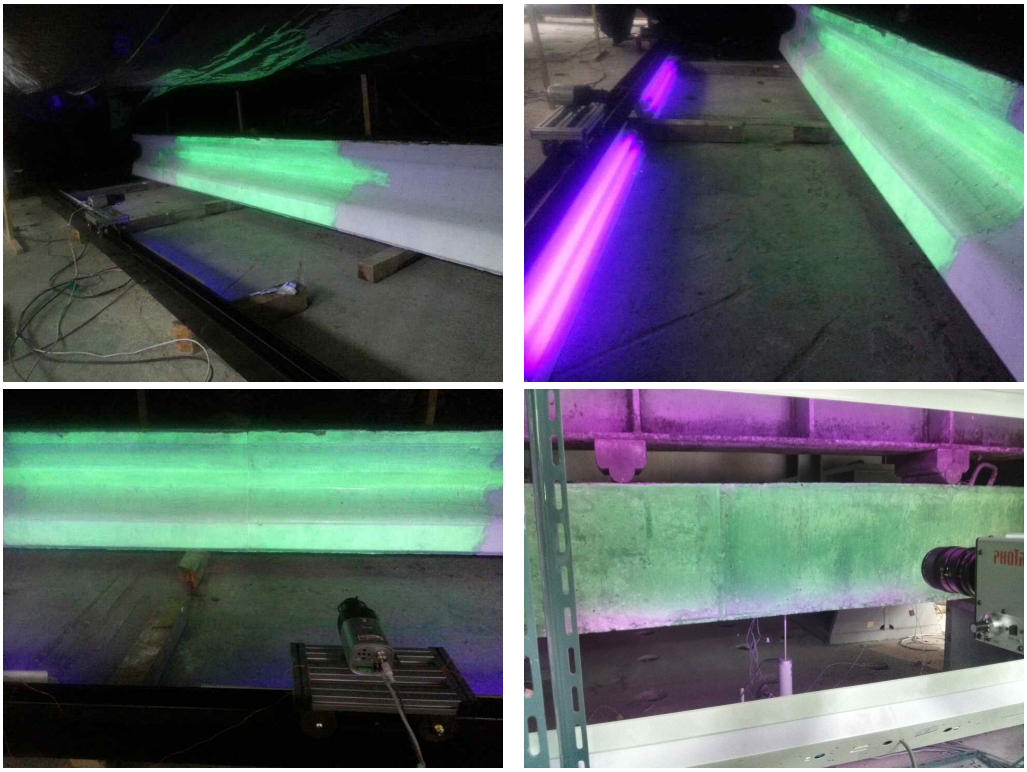
개요도는 [그림 1.11]과 같다.



[그림 1.5] 실험 전경



[그림 1.6] 암실 내부 모습



[그림 1.7] 실험전 BLB램프 충전 모습

[표 1.4] 초저조도 카메라 사양

구 분		내 용
장비명 (모델명)	한글	- 박스형 카메라 SCB-3003
	영문	- Boxed Camera SCB-3003
제작업체	제작국가	한국
	제작사	삼성
장비 주요 용도		초저조도 압광 영상 획득
주요사양		- 전자셔터 : 1/60~1/120,000 - 치저조도 : 0.00002Lux - 총화소 : 1,028(H) x 494(V) - 동작 온/습도 : -10℃~+55℃ - 하우징결합으로 야외에서도 촬영가능



(a) 카메라 상세도

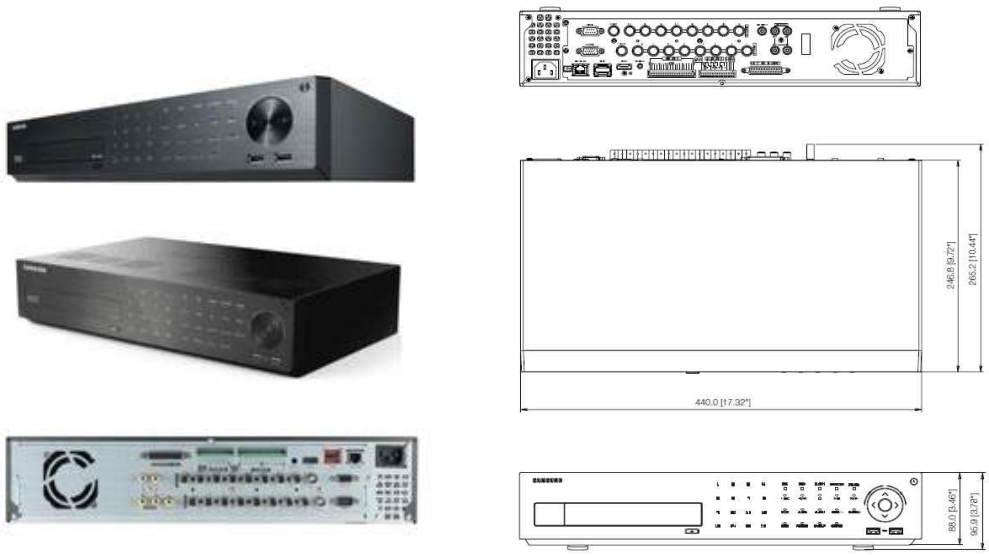


(b) 하우징과 결합상태

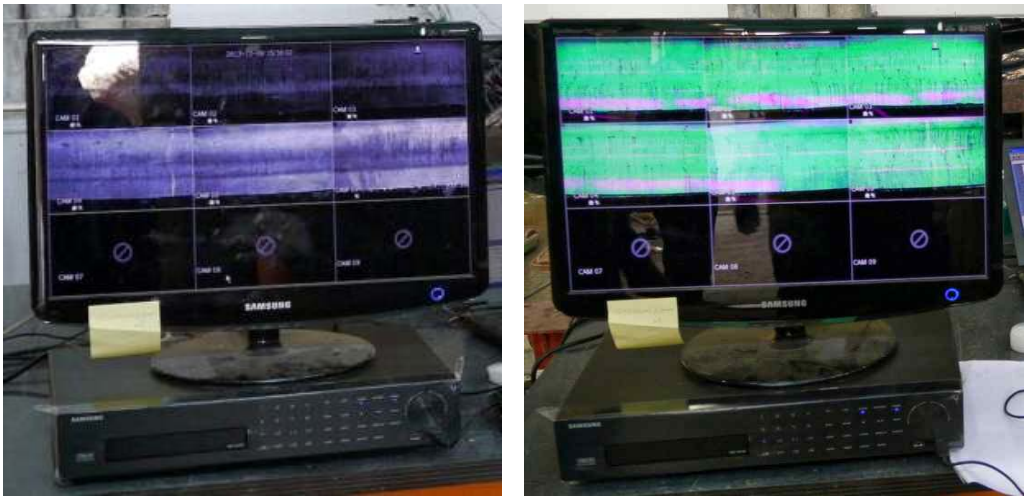
[그림 1.8] 저가형 초저조도 카메라

[표 1.5] DVR 사양

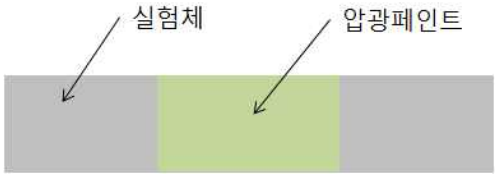
구 분		내 용
모델명		- SRD-1673D
제작업체	제작국가	한국
	제작사	삼성 테크윈
장비 주요 용도		초저조도 압광 영상 모니터링
주요사양		- 480fps 실시간 동영상 녹화 - HDMI출력 지원, 지능형 영상분석 기능(Tampering) - 네트워크 : 대역폭 최대 32Mbps, 츤(Smart Viewer) 모니터링



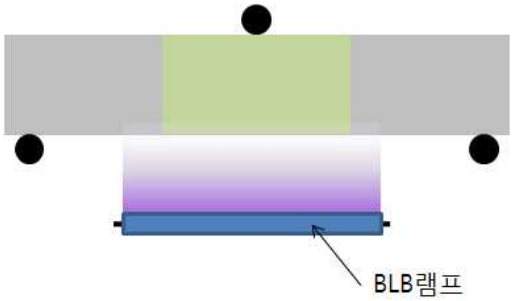
[그림 1.9] DVR 상세도



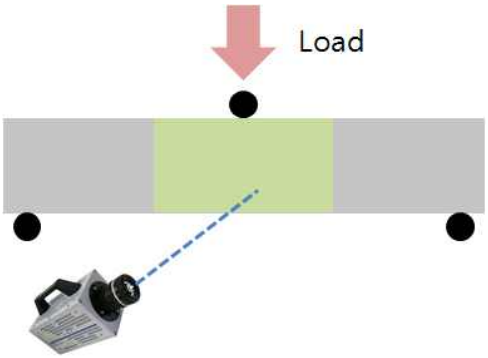
[그림 1.10] DVR 및 모니터링



(a) 압광페인트 도포



(b) BLB램프 충전



(c) 실험

[그림 1.11] 실험 개요도

(라) 모니터링시스템 구축

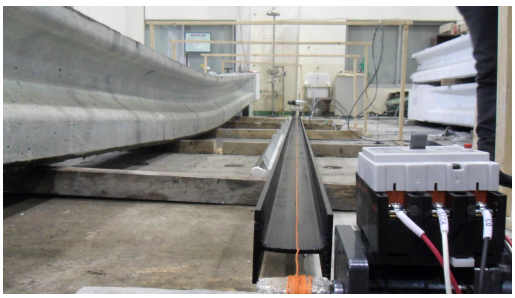
본 연구는 고비용의 복잡한 기계사용을 요구하는 각종 측정 및 계측방법 대신에 저비용으로 구조물 계측모니터링이 가능함에 따라 대형 중요 구조물의 결함 등을 조기에 발견하고 조치함으로써 대형사고를 미연에 방지할 수 있다. 또한 이동식모니터링시스템 구축을 통해 한 대의 카메라가 여러대의 역할을 하는 경제적 효과를 창출할 수 있다.

[그림 1.12]은 이동식모니터링시스템의 프로토타입을 나타낸 사진이다. (a)와 같이 초저조도 카메라에 이동식장치를 결합하여 가이드레일 위에 놓으며 (b)에서 보이는 바와 같이 모터와 이동식카메라를 연결한 후 일정한 속도로 이동하며 구조물의 균열 및 결함을 탐지할 수 있다. (b)에서 모터에 연결된 이동식카메라는 5.5cm/sec의 속도로 촬영할 수 있다. 이 방식을 이용하여 가이드레일에 설치된 이동식카메라를 주기적으로 왕복시켜 압광소재가 도포된 구조물을 촬영하고 영상데이터를 관리자단말기에 송부하여 압광소재 발광여부로 영상데이터를 분석할 수 있다.

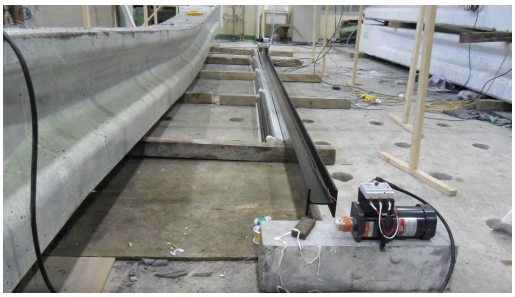
[그림 1.13]은 이동식모니터링시스템의 개요도를 나타낸 것이다.

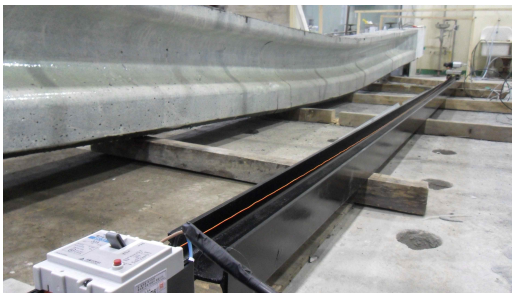


(a) 이동식 카메라 장치



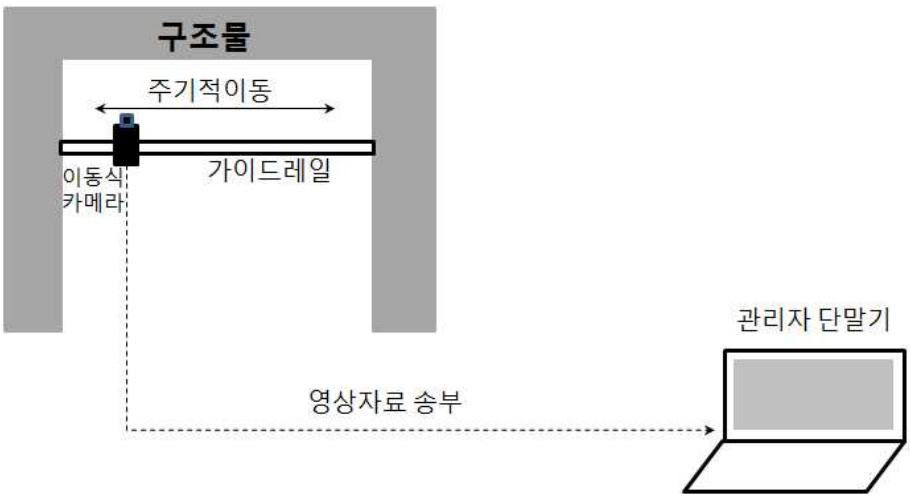
(b) 모터와 가이드레일





(c) 이동식 모니터링 시스템

[그림 1.12] 모니터링 시스템 Proto-Type



[그림 1.13] 이동식모니터링시스템 개요도

(4) 실험결과

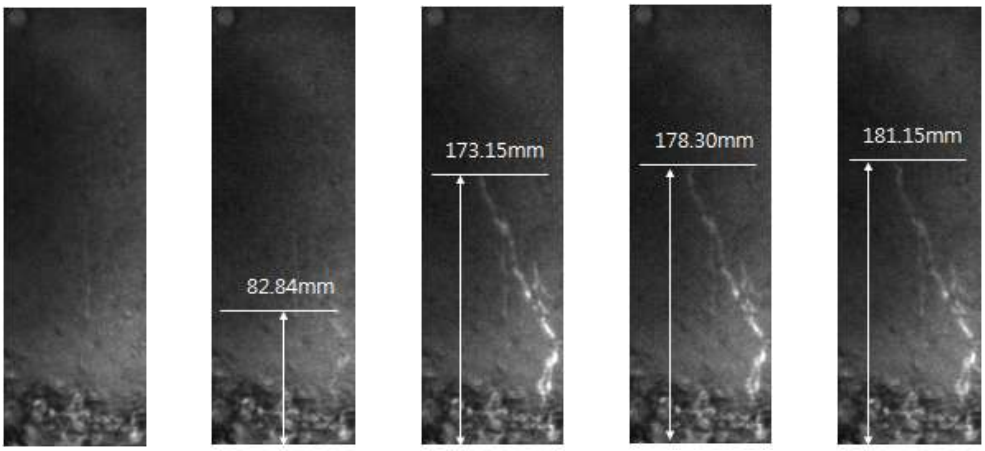
(가) 균열양상

총 2개의 실험체 중 A-1실험체와 B-1실험체의 데이터를 이용하여 균열양상을 비교 분석하였다. 실험시 초저조도 초고속 카메라를 이용하여 얻은 동영상을 PFV(Photron Fastcam Viewer) 프로그램을 통하여 균열이 발생하는 시간대와 하중을 기록하고 이미지를 추출하였다. 추출한 이미지와 실험이 종료된 후의 사진과 비교하였다.

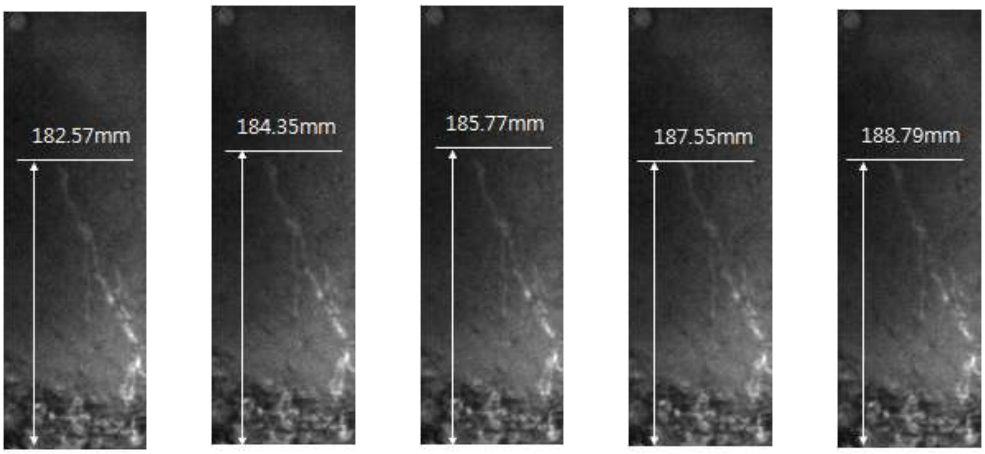
① A-1실험체

이미지 번호	균열 발생시간 (s)	시간 (s)	균열길이 (mm)	균열속도 (mm/s)	하중 (kN)
1	18.9	0	0	0	165.9
2	19.1	0.2	82.84	414.21	168.8
3	19.3	0.4	173.15	451.54	170.7
4	19.5	0.6	178.30	25.78	172.2
5	19.7	0.8	181.15	14.22	172.2
6	19.9	1.0	182.57	7.11	173.8
7	20.1	1.2	184.35	8.89	175.5
8	20.3	1.4	185.77	7.11	178.7
9	20.5	1.6	187.01	6.22	181.0
10	20.7	1.8	187.55	2.67	183.0
11	20.9	2.0	188.79	6.22	186.1
12	21.1	2.2	191.81	15.11	189.9
13	21.3	2.4	192.88	5.33	192.2
14	21.5	2.6	193.77	4.44	194.0
15	21.7	2.8	194.48	3.56	196.5

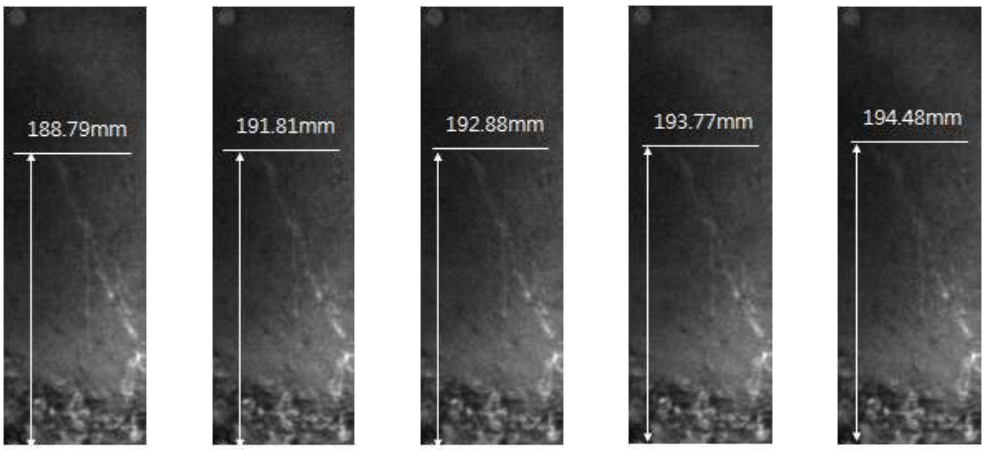
[표 1.6] A-1실험체의 균열길이, 하중, 처짐 비교



(1) (2) (3) (4) (5)



(6) (7) (8) (9) (10)



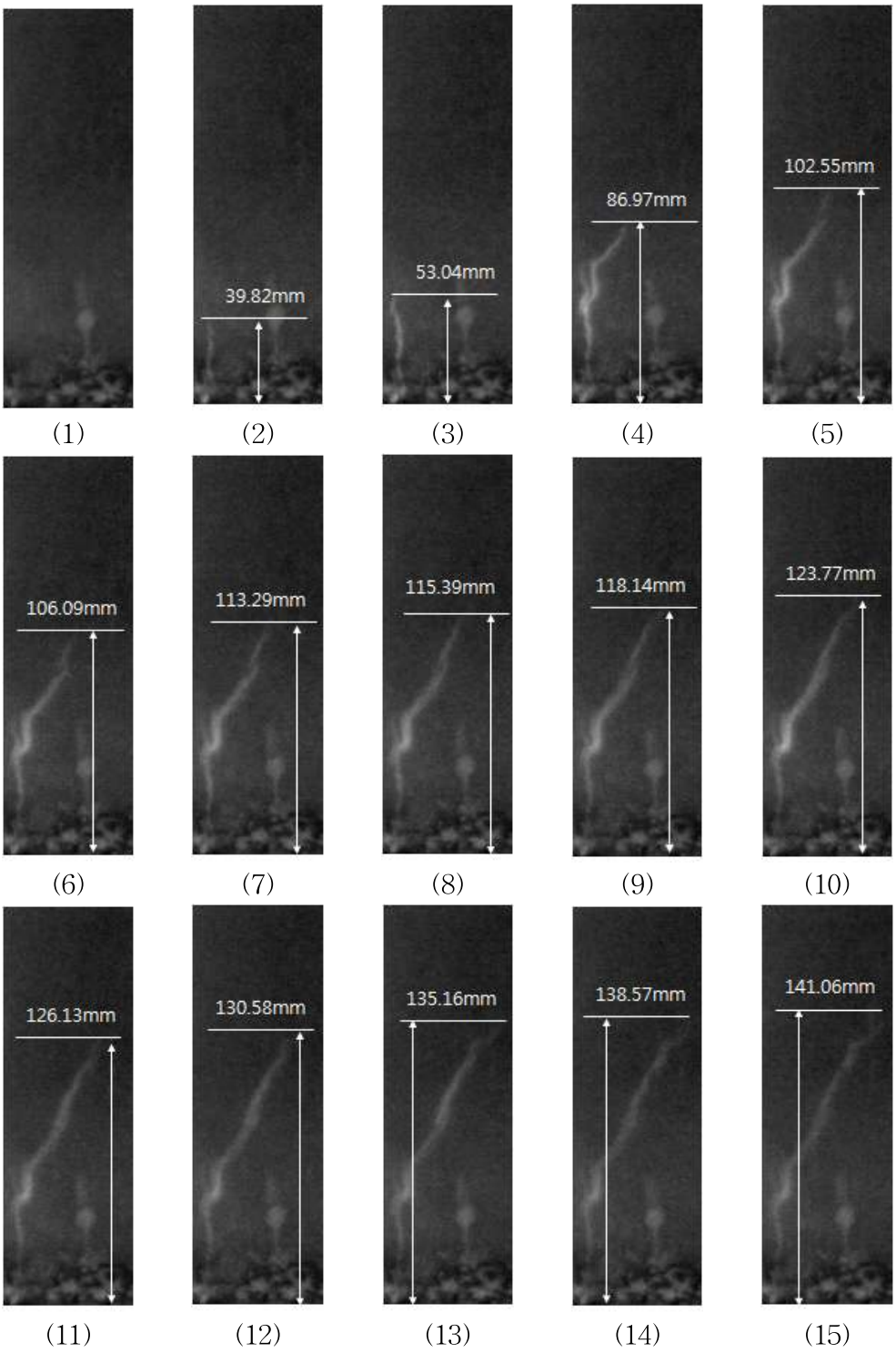
(11) (12) (13) (14) (15)

[그림 1.14] A-1실험체의 첫 번째 균열 진행 과정

② B-1실험체

이미지 번호	균열 발생시간 (s)	시간 (s)	균열길이 (mm)	균열속도 (mm/s)	하중 (kN)
1	12.6	0	0	0	97.0
2	12.8	0.2	39.82	199.08	97.2
3	13	0.4	53.04	66.14	99.9
4	13.2	0.6	86.97	169.61	103.3
5	13.4	0.8	102.55	77.93	105.7
6	13.6	1.0	106.09	17.68	107.3
7	13.8	1.2	113.29	36.02	109.8
8	14	1.4	115.39	10.48	111.7
9	14.2	1.6	118.14	13.75	113.1
10	14.4	1.8	123.77	28.16	115.3
11	14.6	2.0	126.13	11.79	117.2
12	14.8	2.2	130.58	22.27	118.4
13	15	2.4	135.16	22.92	121.2
14	15.2	2.6	138.57	17.03	123.5
15	15.4	2.8	141.06	12.44	125.0

[표 1.7] B-1실험체의 균열길이, 하중, 처짐 비교



(1) (2) (3) (4) (5)

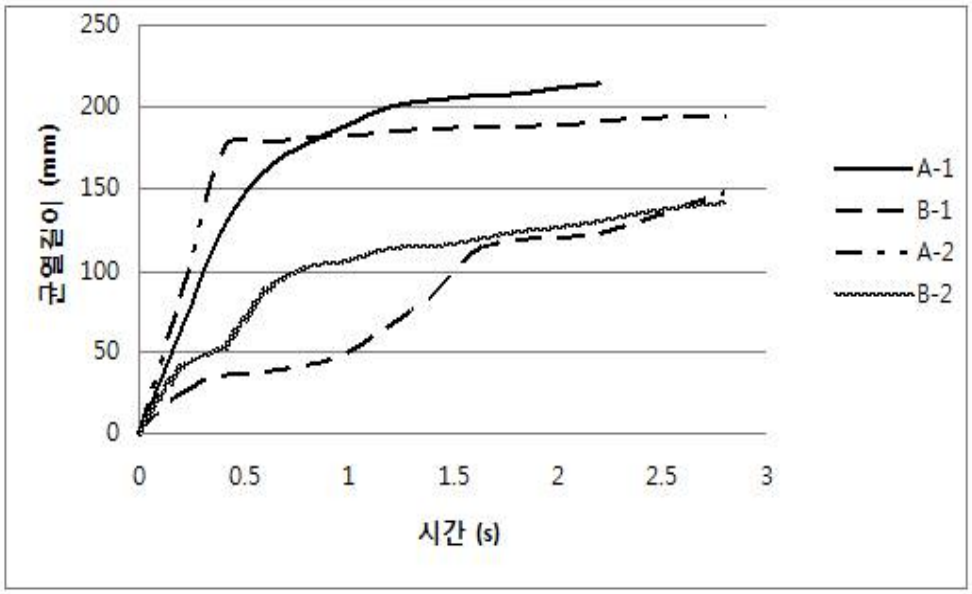
(6) (7) (8) (9) (10)

(11) (12) (13) (14) (15)

[그림 1.15] B-1실험체의 첫 번째 균열진행 과정

③ 실험체별 결과 비교

[그림 1.16]은 실험체별 시간에 따른 균열길이를 그래프로 나타내며 [표 1.8]는 모든 실험체의 시간대별 균열길이의 값을 나타낸다. [그림 1.16]에서와 같이 A 실험체 균열길이의 값이 B 실험체의 값보다 크게 나왔다. A의 균열길이가 B의 균열길이보다 약 60mm정도 길게 나타났다. 이는 강도의 영향으로 사료되며 강도가 높을수록 시간에 따른 균열의 길이가 짧은 것으로 나타났다.



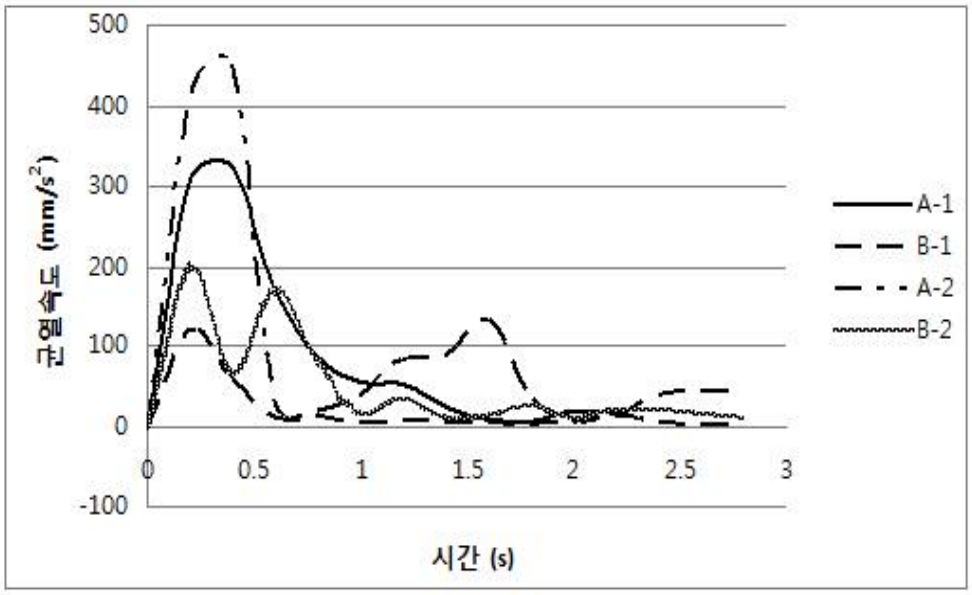
[그림 1.16] 실험체별 시간에 따른 균열길이 그래프

이미지번호	시간 (s)	균열길이	
		A-1	B-1
1	0	0	0
2	0.2	82.84	39.82
3	0.4	173.15	53.04
4	0.6	178.30	86.97
5	0.8	181.15	102.55
6	1	182.57	106.09
7	1.2	184.35	113.29
8	1.4	185.77	115.39
9	1.6	187.01	118.14
10	1.8	187.55	123.77
11	2	188.79	126.13
12	2.2	191.81	130.58
13	2.4	192.88	135.16
14	2.6	193.77	138.57
15	2.8	194.48	141.06

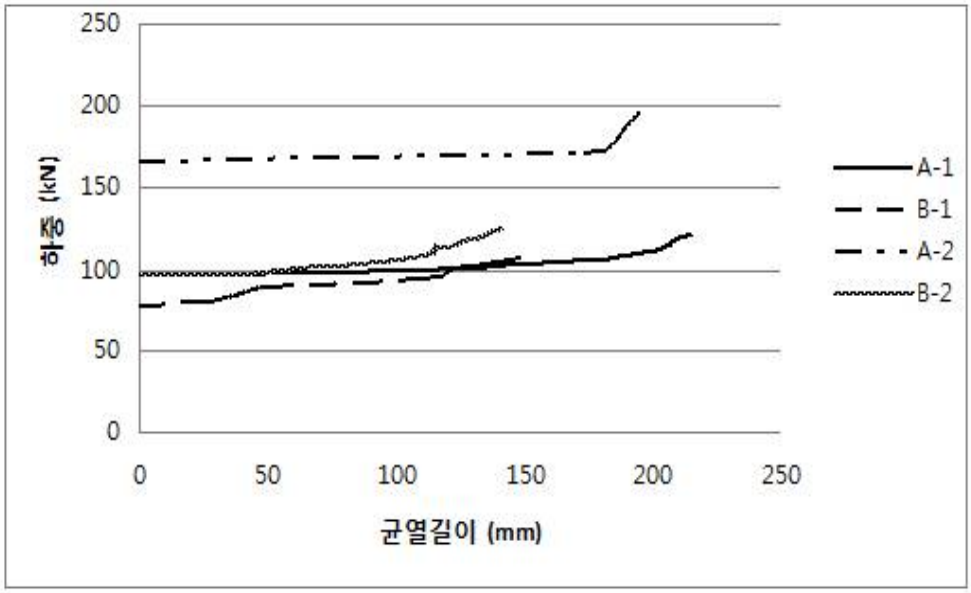
[표 1.8] 실험체별 시간에 따른 균열길이의 값 비교

시간 (s)	A		B	
	균열 속도 (mm/s2)	하중 (kN)	균열 속도 (mm/s2)	하중 (kN)
0	0	165.9	0	97.0
0.2	414.21	168.8	199.08	97.2
0.4	451.54	170.7	66.14	99.9
0.6	25.78	172.2	169.61	103.3
0.8	14.22	172.2	77.93	105.7
1	7.11	173.8	17.68	107.3
1.2	8.89	175.5	36.02	109.8
1.4	7.11	178.7	10.48	111.7
1.6	6.22	181.0	13.75	113.1
1.8	2.67	183.0	28.16	115.3
2	6.22	186.1	11.79	117.2
2.2	15.11	189.9	22.27	118.4
2.4	5.33	192.2	22.92	121.2
2.6	4.44	194.0	17.03	123.5
2.8	3.56	196.5	12.44	125.0

[표 1.9] 실험체별 시간에 따른 균열 속도 및 하중



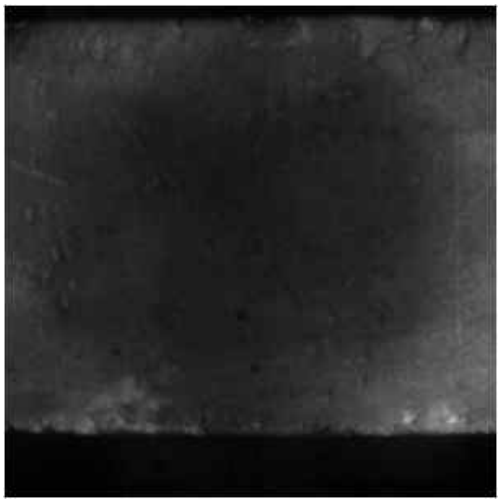
[그림 1.17] 실험체별 시간에 따른 균열속도 그래프



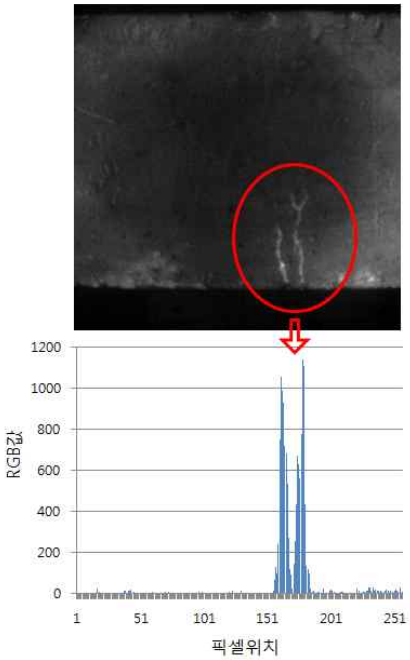
[그림 1.18] 실험체별 하중-균열길이 그래프

(나) 균열위치

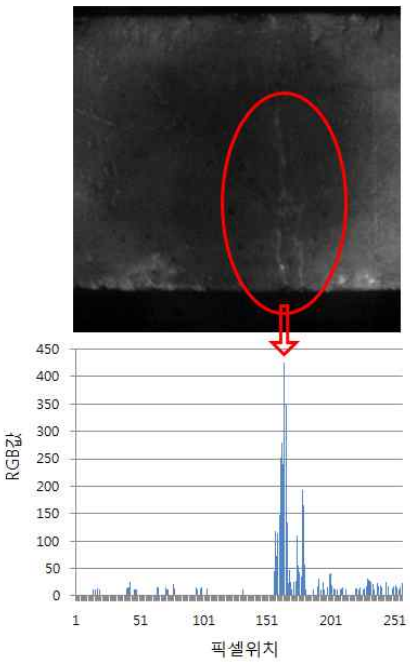
A-1실험체를 대상으로 균열이 발생하는 위치를 영상처리를 통하여 그래프로 분석하였다. 첫 번째 균열이 발생하는 시점을 기준으로 하여 0.3초간격으로 이미지를 획득하여 각 영상의 RGB값을 Erdas Imagine 프로그램을 통하여 추출하였다. 첫 번째 획득한 이미지를 기준으로 각 이미지들의 RGB값의 변화량을 구하고 세로축 픽셀들의 값을 합산하여 그래프로 나타내었다. [그림 1.19]은 추출한 이미지와 RGB값과 픽셀 위치의 관계 그래프를 나타낸다. [그림 1.19]의 (a)는 기준이 되는 균열 발생 전 이미지이다. 0.3초 후에 [그림 1.19]의 (b)에서와 같이 균열이 발생하면서 RGB값이 균열 발생 위치에서 1100이상으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 균열이 한 지점에서 발생하지 않고 두 지점에서 발생하는 것을 그래프를 통하여 확인할 수 있었다. [그림 1.19]의 (c)에서는 두 지점에서 발생한 균열이 합쳐져 진행되었으며 그래프에서 확인할 수 있듯이 균열 발생 위치에서 RGB값이 높은 것을 확인할 수 있었다. [그림 1.19]의 (d)에서는 균열이 발생한 뒤에 더 이상의 균열 발생이 없으므로 RGB값이 점점 낮아지는 것을 확인하였다. [그림 1.19]은 실험 시작부터 첫 번째 균열이 발생할 때까지 1초 간격으로 이미지를 추출하여 픽셀 위치에서의 누적RGB값을 그래프로 나타냈다. 그래프에서 균열이 발생하는 순간 균열 위치에서의 RGB값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. [그림 1.19]에서도 누적RGB값을 통하여 균열 발생 위치를 쉽게 확인할 수 있었다.



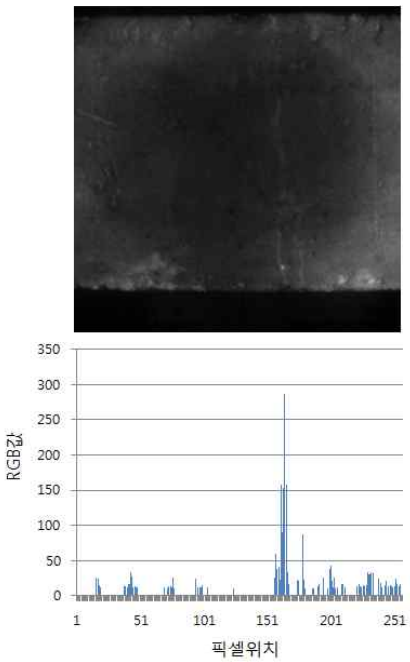
(a) 균열 발생전 이미지



(b) 0.3초 후 이미지와 그래프

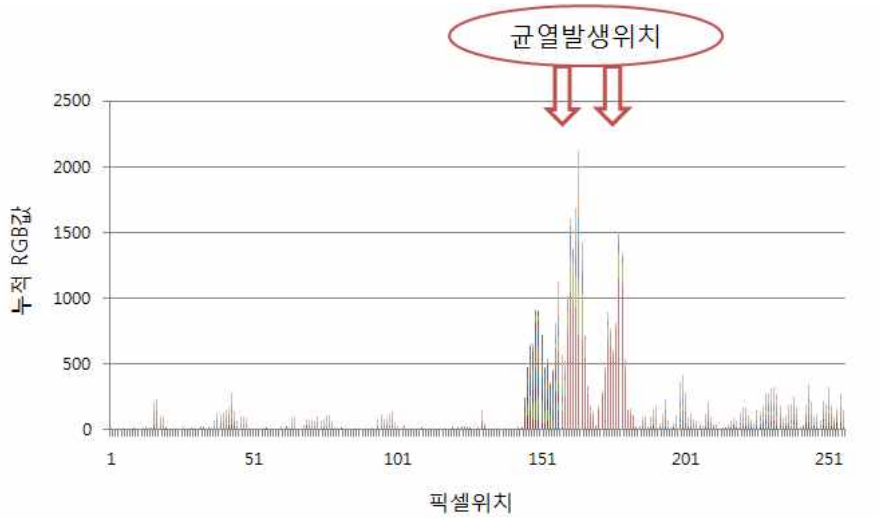


(c) 0.6초 후 이미지와 그래프



(d) 2.1초 후 이미지와 그래프

[그림 1.19] 추출한 이미지와 RGB값과 픽셀 위치의 관계 그래프



[그림 1.20] 누적RGB값과 픽셀 위치의 관계 그래프

(5) 결론

본 연구에서는 압광소재인 압광페인트를 이용하여 콘크리트의 균열을 검출하는 방법을 이용하여 균열양상과 초기 균열속도 및 균열위치를 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(가) A-1실험체와 B-1실험체의 균열양상을 압광페인트의 발광현상에 의하여 검출된 균열과 비교한 결과 균열의 형상이나 위치가 같은 것을 확인하였으며 이는 철근콘크리트 구조물에서도 충분히 적용할 수 있을 것이라고 사료된다.

(나) 압광페인트를 이용하여 검출된 균열을 영상처리 프로그램으로 균열 길이를 정확하게 측정할 수 있었으며, 이는 육안에 의해서 검출된 균열의 길이보다 더 정확하게 측정할 수 있을 것이라 사료된다.

(다) 압광페인트를 이용하여 검출된 균열을 영상처리 프로그램으로 균열의 위치를 그래프를 통해 쉽게 알 수 있었다.

(라) 위의 결과들을 종합하면 압광페인트를 철근 콘크리트에 적용하여 균열에 대한 해석을 정확하게 할 수 있었으며, 이는 저비용의 건전성 모니터링 시스템을 구축할 수 있는 계기가 될 수 있을 것이다.

압광소재에 대한 연구가 아직 시작단계이므로 앞으로의 더 많은 연구를 통하여 문제점을 보완한다면 향후 압광소재를 이용한 저가형 균열검출 시스템을 구축할 수 있을 것이다. 이러한 시스템이 구축된다면 어떠한 균열검출 시스템보다도 경제적이고 정확한 안정성 평가를 시행할 수 있을 것이라 사료된다.

나. 압광페인트 내구성 및 내후성 평가

(1) 압광 페인트를 이용한 준-동적 전파 균열 탐지 및 파괴인성 평가기법 개발

(가) 서론

응력확대 계수 (stress intensity facttor; SIF) 값이 균열 첨단과 전형적인 균열 첨단 근처에서의 등색곡선(isochormatic) 패턴에서 주어진 프린지 루프상의 최원점 사이의 거리 및 균열 연장선과 최원점 사이의 회전각으로부터 계산 가능하다는 것이 Irwin 에 의해 밝혀진 이후, 다수의 연구자들에 의해 균열 첨단 응력장 근처에서의 정적 및 동적 문제들을 해석하기 위하여 등색곡선 패턴으로부터의 파괴인성 (mode I fracture toughness; KI) 값 측정 시도들이 활발하게 이루어져 왔다. 여기에 더하여 유사한 목적으로 응력확대계수 값을 평가하기위한 광학적인 방법들이 탄성 및 소성역에서의 균열 현상 연구들을 통해 개발되어왔다. 구체적으로는 광학적인 방법, 모아레 패턴에 기반한 방법, 변형된 표면에서의 외곡현상을 이용한 방법, 광학 간섭법, 홀로그래피법, 광학현미경을 이용한 소성역의 부식기법등을 포함한 금속학적 접근법등을 들 수 있다. 그 결과 균열 첨단 근처의 응력장을 제어하는 변수인 응력확대계수는 다양한 광학적 방법에 의해 도출된 등강도 응력 프린지 패턴과 이론적으로 예측된 값 사이의 상호 비교를 통해 비교적 성공적으로 결정될 수 있었다. 그러나 상술한 모든 광학적 기법들은 고비용의 다루기 힘든 장치나 복잡한 시편준비 혹은 데이터의 후 처리 과정 등을 요구하거나, 미소 영역에서의 변형장을 결정하기에 불충분한 해상도를 제공하거나, 또는 동적 균열 전파 혹은 일반적인 균열 전파 과정에서의 측정에도 미치지 못하는 상대적으로 느린 반응 특성 등을 가지는 문제점들을 고스란히 노출하였다.

따라서 최근 이러한 문제점들을 근본적으로 모두 회피할 수 있는 가능성을 내재한 압광 (Mechano -luminescence) 기술을 이용한 일련의 대체적 연구 시도들이 본 연구진에 의해 파괴 역학 분야에서 균열 첨단 근처에서의 응력 분포를 평가하기 위한 목적으로 성공적으로 진행되어 왔다. 즉, 인장, 압축, 마찰 및 파괴 등을 포함하는 모든 종류의 기계적 응력 부가에 반응하여 가시광을 방출하는 압광 현상을 이용하여 인장 압축 및 파괴시의 기계적 특성을 가시적인 방법으로 정량적으로 또 체계적으로 평가하여 왔다. 결과적으로, 본 연구진들은 압광 현상을 이용한 균열첨단 응력장의 직접적인 관찰, 다양한 구조용 세라믹소재에서의 준동적 균열전파 및 브리징 응력의 가시화, 가시광 방출에 의한 기계적 응력의 감지를 위한 펄스 레이져 증착 코팅 혹은 압광 페인트 등의 인공 표면막 등을 개발하였으며, 여기에 더하여 응력센서로서의 응용을 위한 SAO 압광 소재의 발광 기구에 기반한 응력 속도식 즉, 압광 특성의 구성방정식도 정량적으로 제시한 바 있다.

이러한 사전 연구 성과를 기반으로 본 연구진의 경우 1, 2 차년도 연구기간 동안, 학문적인 관점에서 SAO 소재에서의 발광 현상을 이용한 압광 기술의 도움으로 모드 I 에서의 응력확대계수를 결정할 수 있는 새로운 광학적 기법을 제시하였다. 산업적인 측면에서도 압광 분말 및 수지 사이의 밀착력 개선을 통해 콘크리트 소재에 적용 가능한 1-2 MPam1/2 수준의 저

응력 확대 계수 범위에서의 균열 첨단 응력장 관찰이 가능한 정지 균열 탐지 기술을 개발한 바 있다.

따라서 3 차년도 연구에서는 우선 학문적인 관점에서 압광 현상을 이용한 모드 I 에서의 준-동적 전파균열에 대한 혁신적인 응력 확대 계수 및 파괴인성 측정 기법을 추가적으로 제시하고자 하였다. 구체적으로는 CT 시편의 모드 I 인장 응력 부가를 통해 얻어진 준-동적 균열 첨단에서의 응력속도 변화 및 누적 응력장을 압광 기술을 이용하여 측정한 후, 이를 기존의 마이크로 발광 기구인 트랩 방출 과정에 기반한 편차 응력 기준 하에서 응력확대계수 값 및 파괴인성 값을 계산하여 ASTM E399 에 의해 측정된 실측치와 상호 비교 평가 하였다. 이때 응력확대 계수 및 파괴인성 계산에 필수적으로 요구되는 준-동적 균열 첨단에서의 유효 응력 및 누적 압광 강도 간의 상관관계를 외부 부가 하중 변화에 따라 실험적으로 도출하기 위하여 인장 시편에서의 일축 인장을 통한 압광 특성 평가 또한 추가적으로 수행 하였다.

또한 산업적인 측면에서 기존의 1,2 차년도 연구를 통하여 에폭시 및 우레탄 레진 기반의 압광 페인트를 이용, 1-2 MPam1/2 수준의 저 응력 확대 계수 범위에서도 균열 첨단 응력장 관찰이 가능한 정지 균열 탐지 기술을 개발하는 데 성공하였다. 그러나 동 소재를 이용한 준-동적 전파균열 현상을 가시적으로 관찰하는데 성공하였으나, 준-동적 균열 첨단에서의 응력장 관찰은 낮은 응력확대계수 값으로 인하여 일반적인 카메라 시스템에서 준-동적 상태의 균열 조건에서는 관찰에 실패 하였다. 따라서 본 연구에서는 압광 분말 및 수지 사이의 밀착력 개선 공정을 통해 새롭게 개발된 아크릴 레진 기반형 압광 페인트를 이용하여 콘크리트 소재에 적용 가능한 1-2 MPam1/2 수준의 저 응력 확대 계수 범위에서도 준-동적 전파 균열 첨단 응력장 관찰이 가능한 준-동적 전파균열 탐지 기술도 개발해 보고자 하였다.

(나) 실험 방법

본 연구에서는 CT 형태의 시편 제조를 위해서 중량비 70% 의 레진과 30% 의 SAO 압광 분말을 혼합 후 가열 가압 성형하였다. 이 후 기계가공에 의해 완성된 CT 형태의 압광 시편은 직경 30mm 두께 3mm 크기로서, 예리한 균열의 도입을 위한 중심부 가공 파괴 균열의 곡률 및 응력 전달을 위한 핀홀의 크기는 각각 50um와 5.6mm로 제작되었다. 기계가공에 의해 형성된 균열 첨단부에서의 자연 균열의 생성 및 전파를 위해 사용된 예비 하중 전달판(loading stage)은 하중 전달의 정확한 제어를 위해 특수 설계된 모터와 2 중 감속 기어를 사용하여 제작되었다. 본격적인 기계적 시험은 상술한 예비 하중 전달판을 이용하여 시험전에 2mm 길이의 자연 균열을 도입한 후 CT 시편 그립에 장착 후 수행 하였다.

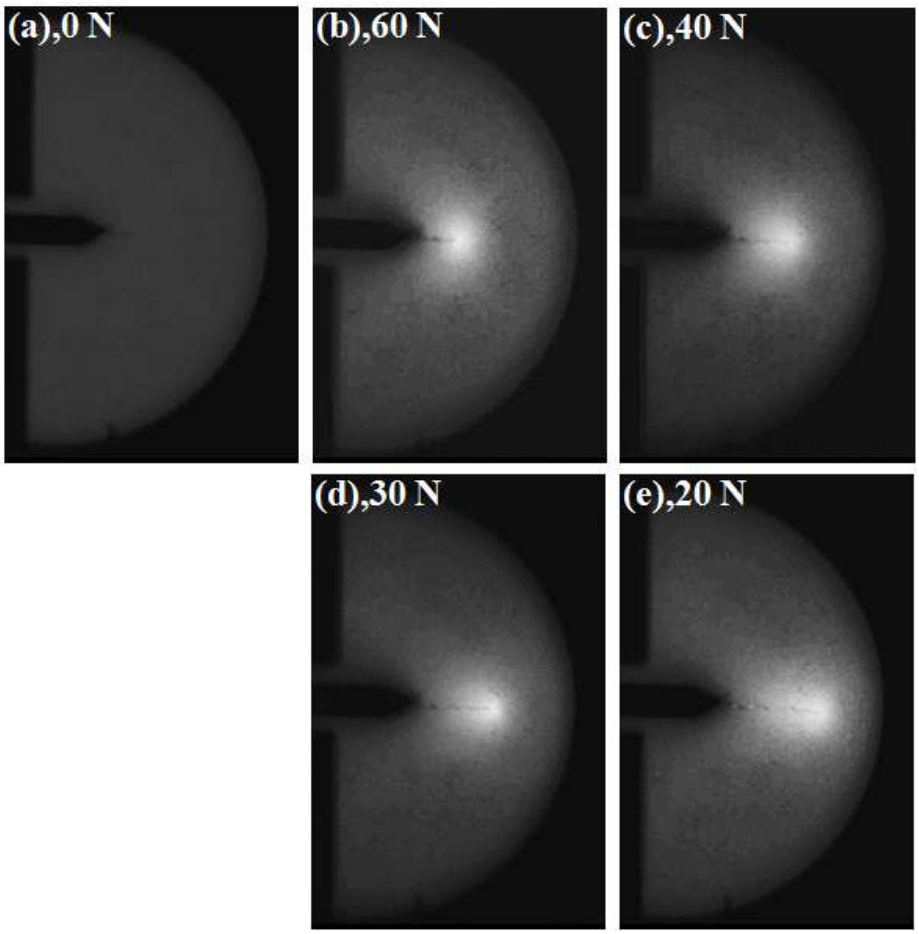
CT 시편을 이용한 모드 I 인장 파괴 시험은 하중 부가 전에 365-nm 파장의 고밀도 자외선에 5분간의 여기와 1 분 동안의 완화과정을 거친 후 목표 하중에 노출하였다. 이 후 압광 현상을 이용한 준-동적 균열전파 조건에서의 균열첨단 응력장 가시화를 위해 CT 시편은 0.5 mm/sec.의 속도로 파괴하중 까지 사전 균열 전진이 발생되도록 하중 부가하였다. 시편의 균열 첨단부는 고속 디지털 카메라를 이용하여 60 frame/sec. 의 저속으로 연속적으로 촬영되

었으며, 균열 길의의 비교를 위한 CMOD 게이지의 장착도 이루어졌다. 한편 ASTM E399의 규정에의한 응력 확대 계수(stress intensity factor) 및 파괴인성 값의 변화는 하중 전달판에 장착된 로드셀(load cell)로부터 시편에 가해진 하중을 측정하여, 일반적인 방법에 따라 계산되었다.

CT 시편 결과의 보완을 위해, 본 연구에서는 압광 인장 시편을 추가적으로 준비 하였다. 이를 위해 아크릴 레진형 투명 페인트에 중량비 30% 의 SAO 분말을 혼합한 후, 동일한 과정을 거쳐 판형으로 소성하였다. 제조된 판형 시료는 2 차 기계 가공을 통하여 게이지 길이 12mm, 폭 및 두께 4 mm 의 인장시편으로 최종 제조되었다. 이 후 인장 시편은 본격적인 시험을 위해 만능 시험기의 인장 하중 부가 장치에 장착된 후, 암실 조건에서 365nm 파장의 고밀도 자외선에 5 분간에 걸친 여기 (excitation) 및 1 분간의 장 잔광 (long phosphorescence) 완화 처리를 거쳤다. 실제 인장 시험은 전파 균열 첨단부의 응력 부가 속도에 맞추어 약 400N 까지 항복 응력 이하 수준으로 탄성역 범위에서 시행되었다. 이때 각 하중 부가 단계에서의 압광 현상 및 발광량 정량 측정을 위하여 인장 시험기에 고속 디지털 카메라 및 다채널 데이터 링크(MCDL) 장치를 추가로 설치하였다. 특히 다채널 데이터 링크(MCDL) 장치를 이용함으로써 인장시험기의 로드셀로부터 측정된 하중 값과 각 하중 값에서의 게이지부 압광 현상 및 발광 디지털 영상간의 데이터 동기화를 가능케 하였다.

(다) 실험결과

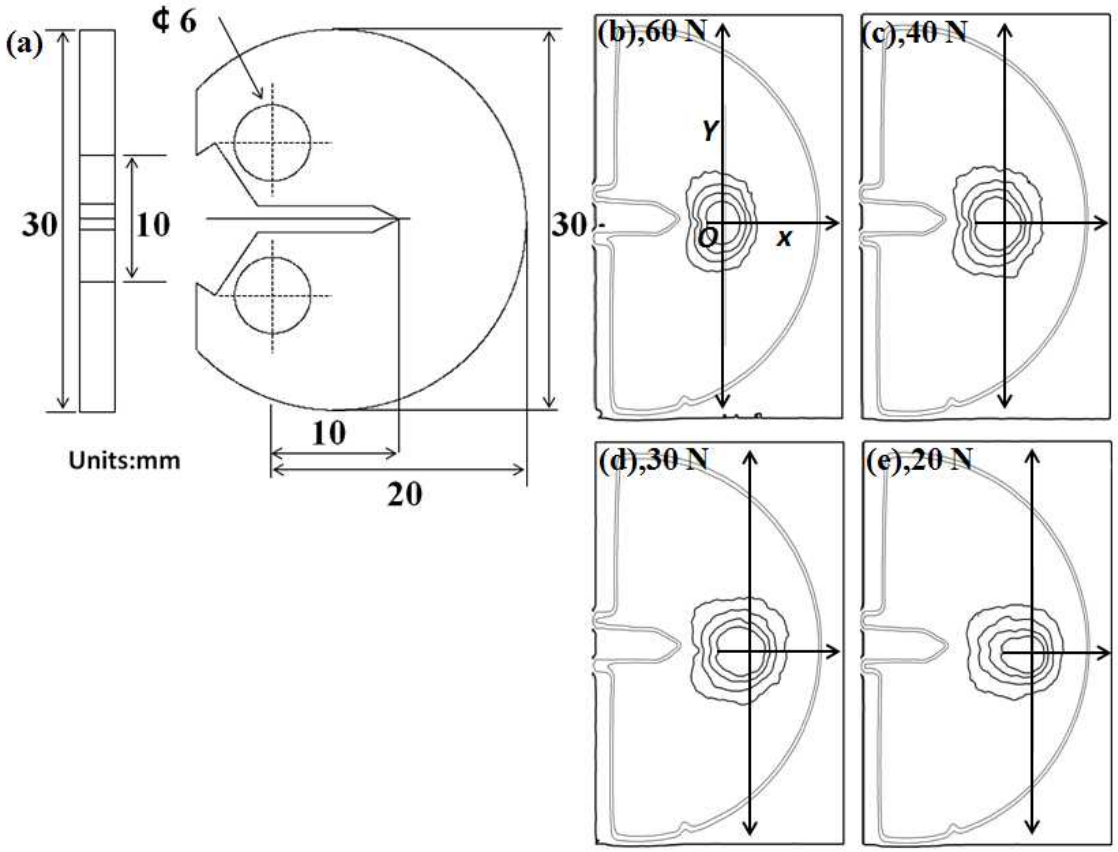
CT 시편에서의 균열 첨단 응력 속도 가시화



[그림 2.1.1] 응력 속도의 실시간 이미지를 나타내는 고속 이미징 시스템에 의해 기록 된 ML 이미지 시퀀스

[그림 2.1.1] (a-e) 는 압광 CT 시편 외부의 크로스 헤드 이동 속도가 0.5 mm/sec. 로 일정한 조건하에서 준-동적으로 전파되는 균열첨단부에 대한 응력 속도 상태를 고속 카메라를 이용하여 초당 60 프레임의 속도로 가시화한 결과들을 보여주고 있다. 특히, [그림 2.1.1] (a)는 응력이 가해지기 직전의 초기 조건 시편으로 희미한 정적 형광 흔적만을 보이고 있다. 반면에, 외부 응력의 부가 결과로 균열이 전파되고 있는 [그림 2.1.1] (b-e)의 균열첨단 부위에서는 명백한 타원형의 발광 현상을 공통적으로 관찰할 수 있다. 다만, [그림 2.1.1] (b) 는 파괴발생 직후의 초기 준-동적 균열전파 조건 시편으로 균열 첨단부의 명백한 타원형의 발광 현상만이 강하게 관찰되고 있는 반면에, 균열 전파에 의한 외부 응력이 40, 30, 및 20N 으로 감소된 [그림 2.1.1] (c-e)의 사진에서는 균열첨단 부위에서의 명백한 타원형의 발광 현상 뿐만 아니라 균열 뒷부분의 파괴 흔적을 나타내는 희미한 발광 흔적을 공통적으로 관찰할 수 있다. 그러나 동 사진들에서 균열첨단에서의 발광 강도는 균열 전파에 따른 하중감소와 관계없이 일정한 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이는 기본적으로 파괴시 인성증진 기구 등이 관여하지 않는다면, 균열 전파에 따른 균열길이의 증가 및 외부 부가 하중의 감소 효과가

서로 상쇄됨으로써, 일정한 응력확대계수 값을 유지하여야 하기 때문이다.

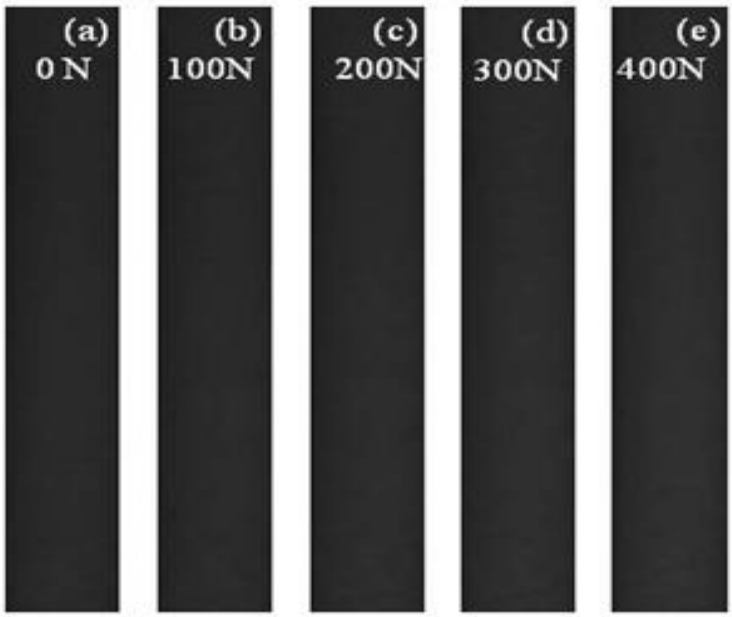


[그림 2.1.2] ML이미지에서 추출 된 등고선 플롯의 순서

본 연구에서는 이러한 균열 첨단에서의 응력장을 압광에 의해 측정된 발광량의 항으로 표시하기 위하여, 발광량은 하중 속도에 비례하므로, 주어진 하중까지의 총 누적 발광량을 MATLAB 소프트웨어를 이용하여 [그림 2.1.2] (a) 의 파괴시편 도면과 함께 [그림 2.1.2] (b-e) 에 등강도 곡선으로 표시하였다. 다만, 압광에 의한 발광량이 응력 속도에 비 선형적으로 비례함을 고려하면, 부가 하중의 변화에 따른 균열 첨단에서의 응력 상태를 표시 하기 위해서는 0 에서 부가 하중까지의 모든 발광량을 적분하는 것이 가장 간단한 방법임을 쉽게 짐작할 수 있다. 따라서 [그림 2.1.1]에서 살펴 볼 수 있듯이 본 실험에서는 CT 시편이 크로스헤드 이동 속도 약 0.5 mm/sec. 의 조건으로 0N에서 최대 60N을 거쳐 20N 까지 외부 하중이 감소되면서 초당 60 프레임의 속도로 기록되었으므로, 0 에서부터 20N 까지 총 60 프레임의 발광 사진이 획득되었다. 따라서 [그림 2.1.2] (b)에서 60N 의 외부 하중이 부가된 경우의 균열 첨단 응력장을 누적 압광량으로 표시하기 위해서는 0에서 60N 까지 총 30 장의 발광 사진이 적분되었음을 알 수 있다. 유사한 방법으로 [그림 2.1.2] (c-e) 에 해당되는 40, 30, 및 20 N 조건에서의 결과는 40, 50, 및 60 프레임의 압광 사진 누적 결과로부터 얻어질 수 있었다. [그림 2.1.2] 의 정적 하중 부가 과정에서 누적 압광 프린지 패턴의 변화를 보다 상세히 살펴보면, [그림 2.1.1]의 단순 비 누적 압광 결과와 동일하게, 모든 패턴에서의 균열 앞부분에 대한 개별적인 등고선들은 대부분 동일한 형태로 유지되면서, 균열 뒷부분의 등고선들은 균열전진의 흔적으로 인한 길이 증가가 관찰되고 있다. 상술한 결과들로부터 압광 기술에 의

해 측정된 균열 첨단에서의 응력장 변화가 Irwin 의 제안에 기초한 등강도 패턴으로부터 모드 I 파괴 인성 값을 결정함에 있어 정적 균열 첨단에서의 이론적 및 실험적 선행 결과들과 잘 일치됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 압광 기술을 이용한 CT 시편의 외부 하중 부가에 따른 준-동적 균열 전파조건 하에서 균열 첨단 영역에서의 하중 속도 변화 및 응력 분포 가시화 시도는 매우 성공적이었음을 알 수 있다.

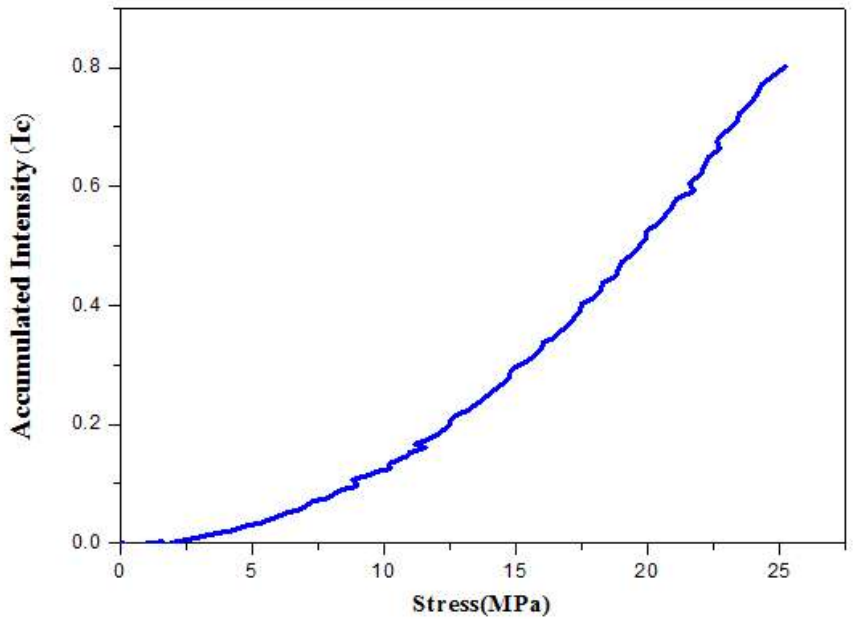
- 인장 시편에서의 유효응력 가시화 -



[그림 2.1.3] 일정한 하중속도(240N/s)에서 고속
이미징 시스템에 의해 기록 된 3연속 ML이미지

[그림 2.1.3] 은 인장 시편에서의 단순 일축 인장 하중의 변화에 따른 응력 속도의 변화를 압광 강도로 측정한 결과를 보여주고 있다. [그림 2.1.3] (a-e)는 0, 100, 200, 300, 및 400N 의 부가 하중조건에서 기록된 이장 시편의 발광 사진에 해당된다. 전반적으로 CT 시편에서 시험결과와 비교해 볼 때, 인장 시편 전체 게이지 영역에서의 균등한 하중속도 조건으로 인한 균일 발광 분포 현상을 제외하면 압광 현상에서의 두드러진 변화는 관찰 되지 않았다. 다만, 실험적인 측면에서는 인장시험의 경우 240N/sec. 의 비교적 높은 하중 속도로 응력이 부가되었는데, 이는 80N/sec.의 조건으로 인장된 CT 시편에서 상대적으로 빠른 균열 첨단 영역의 하중 부가 속도를 모사하기 위하여 인위적으로 시험 속도를 높인 결과이다. 물론 이론적으로는 하중속도 변화에도 불구하고 측정하려는 시편 영역에서의 최종적으로 부가될 유효 응력 수준이 동등하다면, 총 누적 압광량은 동일하여야 한다. 이는 응력 또는 변형에 의해 기계적으로 축적된 에너지가 에너지 보존 법칙 하에서 가시적인 포톤으로 변환되어 방출 되어야 하기 때문에 물리적으로 매우 타당한 가정이라 할 수 있다. 그러나 가시화 시스템의 민감도 및 SAO 압광 소재의 포톤 누설에 의한 완화 현상 등을 고려할 때 CT 및 단순 인장 시험에서의 서로 다른 형태의 시편으로부터 발광량을 측정함에 있어 두 개의 서로 다른 영역에서 하중 부가 속도를 유사한 수준으로 유지하는 것이 실험적인 오차를 최소화 할 수 있는 방안으로

선택 되었다.



[그림 2.1.4] 축적 된 ML의 강도와 유효응력 사이의 교정 관계

[그림 2.1.4] 는 이러한 인장시편 게이지 부에서의 응력장을 압광량으로 평가하기 위하여 압광 강도를 누적하여 유효 응력의 값으로 나타낸 결과이다. 기본적으로, 인장 시편에서의 발광량 누적 과정은 전술한 CT 시편에서의 누적 방법과 완전히 동일하며, 0에서부터 특정 하중 까지의 모든 가시화 사진을 적분한 후 게이지 부에서의 전체 픽셀에 대한 평균 누적 강도 값을 계산 하였다. 이러한 과정은 다채널 데이터 링크 시스템에 기록된 모든 하중 값에 대하여 개별적으로 수행되었으며, 이후 각각의 하중 값은 시편 단면적을 고려하여 응력 값으로 변환함으로써 [그림 2.1.4]의 유효 응력과 누적 발광량 사이의 상관관계를 실험적으로 제시하였다. 사실, 특정 누적 압광 강도에 대응되는 유효 응력의 이론적 계산이 불가능한 것은 아니다. 1, 2차년도 연구에서 트랩 방출 과정에 기반하여 압광 강도를 주어진 응력속도의 함수로 정량화 하는데 성공하였으므로, 이러한 관계로부터 해석적인 방법으로 압광 강도로부터 유효 응력을 예측하는 것이 가능하게 되었다. 그러나, 인장 시험편에서와는 달리 CT 시편의 경우 외부 하중 부가시 응력속도가 균열 첨단부 위치에 따라 급격히 변화되며, 고정된 위치에서도 응력 속도가 일정하게 유지되지 못하게 된다. 게다가 누적 압광강도 및 응력 사이의 상관관계를 정량적으로 예측하기 위해서는, 여기과정에 따라 달라지는 초기조건 및 압광 기구에 의존적인 재료 상수등이 적분과정에서 명확히 요구되므로 현실적으로 매우 까다로운 선택이 될 수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 단순 인장 시편의 결과로부터 얻어진 압광 누적량에 대한 유효 응력값을 CT 시편 결과에 치환시킴으로써 압광 현상의 해석에 보다 유리한 환경을 조성하고자 하였다.

(라) 고찰

균열 첨단에서의 부과응력 수준이 선형 탄성 영역이고 시편의 두께가 평면 응력조건을 만족할 만큼 얇다고 가정하면 압광 등강도 곡선을 이용한 CT 시편에서의 응력확대 계수값 연산은 아래의 간단한 수식 전개를 따르게 된다. 먼저 균열 첨단에서의 응력장은 아래 식들로 기술될 수 있으며,

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}}(F_1 K_I + F_2 K_{II}) + \sigma_{ox} \qquad (1a)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}}(F_3 K_I + F_4 K_{II}) \qquad (1b)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}}(F_4 K_I + F_5 K_{II}) \qquad (1c)$$

여기서 σx, σy, 및 σxy 는 [그림 2.3]의 x-y 좌표축을 중심으로 x, y 방향 및 xy 면에서의 응력값들을 표시하며, KI은 모드 I 에서의 응력확대계수, Θ는 x 축으로부터 반시계 방향으로의 각도, r 은 균열첨단으로부터의 거리를 나타낸다. 또한, 삼각함수 F1-F5 는 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$F_1 = \cos\frac{\theta}{2}\left[1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right] \qquad (1d)$$

$$F_2 = -\sin\frac{\theta}{2}\left[2 + \cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}\right] \qquad (1e)$$

$$F_3 = \cos\frac{\theta}{2}\left[1 + \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right] \qquad (1f)$$

$$F_4 = \sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2} \qquad (1g)$$

$$F_5 = \cos\frac{\theta}{2}\left[1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right] \qquad (1h)$$

식 1은 다시 아래의 주응력 형태의 식으로 변환 될 수 있다.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_x + \sigma_y)^2}{4} + (\sigma_{xy})^2} \qquad (2)$$

여기서, 편차 응력의 변화가 형광 특성을 유발한다고 가정하면, 누적 임계 압광 강도에 비례하는 임계 유효 유발 응력은 소성 변형에 필요한 항복 조건과 유사한 식 3 의 형태로 결정될 수 있다. 전위 움직임이 압광 재료의 발광에 일차적인 요인으로 작용한다고 가정할 때 이러한 항복 조건의 사용은 매우 타당한 것으로 판단된다.

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

그런데, 인장 시편에 단순 일축 응력이 부가되는 경우 측정된 압광 강도는 σ2 및 σ3 가 0

이므로 측정된 압광 강도는 아래 식 3 (a) 와 같이 인장 시험기에 의해 부가된 일축응력 σ1 에 비례하게 된다.

$$\sigma_c = \sigma_{1,T} \qquad (3a)$$

한편 CT 시편의 경우에는 평면 응력 조건을 가정하면 σ3 =0 이므로, CT 시편 특정 위치에서의 주응력을 각각 σF,1 σF,2 라 하면 식 3은 아래 식 3 (b) 로 표시될 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_{1,F} - \sigma_{2,F})^2 + (\sigma_{1,F})^2 + (\sigma_{2,F})^2]^{\frac{1}{2}} \qquad (3b)$$

식 3 (a) 와 식 3 (b) 를 조합하면 다음의 식 4 에서와 같이, 디스크 형태의 CT 시편 균열 첨단 영역에서 가시화된 등강도 압광 곡선을 실험적으로 측정된 단순 일축 인장에서의 응력 값으로 치환할 수 있다.

$$\sigma_{1,T} = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_{1,F} - \sigma_{2,F})^2 + (\sigma_{1,F})^2 + (\sigma_{2,f})^2] \qquad (4)$$

최종적으로 식 4 에 식 2 의 주응력과 식 1 의 균열첨단 응력장 식을 도입하면 아래와 같은 식 5 의 응력 확대 계수식을 유도할 수 있게 된다.

$$\sigma_{1,T} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\frac{\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3}{\pi r} + \sqrt{\frac{2}{\pi r}}(\beta_1+\beta_2) + \gamma\right]^{1/2} \qquad (5)$$

$$\alpha_1 = K_I^2[(F_1 - F_3)^2 + F_1F_3 + 3F_4^2]$$

$$\alpha_2 = K_{II}^2[(F_2 - F_4)^2 + F_2F_4 + 3F_5^2]$$

$$\alpha_3 = K_IK_{II}[(F_1 - F_3)(F_2 - F_4) + F_1F_2 + F_3F_4 + 6F_4F_5]$$

$$\beta_1 = K_I\sigma_{ox}[2F_1 - F_3]$$

$$\beta_2 = K_{II}\sigma_{ox}[2F_2 - F_4]$$

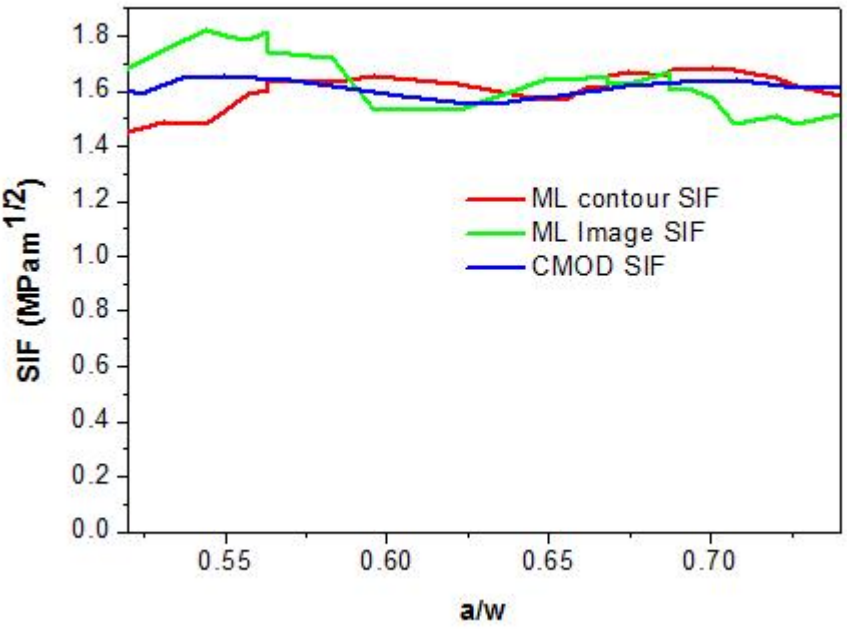
$$\gamma = 2\sigma_{ox}^2$$

여기서 KId 는 모드 I 조건에의서 편차 응력 항으로부터 유도된 응력확대계수 값을 나타낸다. 윗 식을 이용한 실제 연산과정 즉, CT 시편의 균열 첨단에서 가시화된 압광 강도로부터 KId 값을 얻기 위해서는, [그림 2.1.2] 의 일정 강도에 해당되는 주어진 등강도 곡선에 대응되는 동일 압광 강도의 인장 응력을 [그림 2.1.4] 로부터 추출하여야 한다. 이 후 [그림 2.1.2] 의 등강도 곡선으로부터 수 혹은 수십 개의 점을 선택하여 (r, Θ)의 극좌표 값을 측정 한다. 이때 기본적으로 하나의 극좌표 값으로부터 응력확대계수 값을 계산하는 것이 가능하지만, 본 연구에서는 거친 등강도 곡선결과로부터 도입될 수 있는 연산상의 오차를 줄이기 위하여

22개의 좌표 값을 실 연산에 이용하였다. 특히, 압광 강도로 부터의 응력확대 계수값 계산은 잘 알려진 뉴튼 랩슨법에 의해 수행 되었으며, 계산 값의 타당성 비교를 위해 ASTM E-399에 의해 규정된 아래의 디스크 형 CT 시편에서의 응력확대계수 측정방법 식 6 을 이용하여 실측된 응력확대 계수 값도 추가적으로 [표 2.1.1] 에 병기 하였다.

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f(\frac{a}{w}) \qquad (6)$$

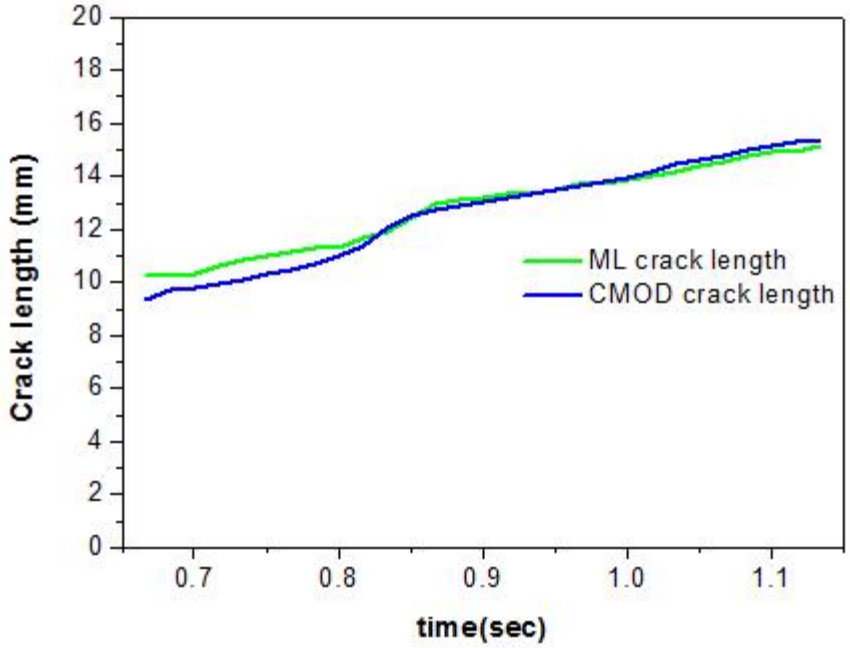
$$f(\frac{a}{w}) = \frac{(2+\frac{a}{W})(.076+4.8\frac{a}{W}-11.58(\frac{a}{W})^2+11.43(\frac{a}{W})^3-4.08(\frac{a}{W})^4}{(1-\frac{a}{W})^{\frac{3}{2}}}$$



[그림 2.1.5] 이미지 균열 길이, CMOD 균열 길이 ML과 윤곽선에 따라 산출 SIF비교

[표 2.1.1] CMOD 균열 길이와 ML등고선을 기초로 한 SIF값 비교

Contour lines plot	Crack length from image (mm)	Crack length from CMOD (mm)	Image SIF	CMOD SIF	ML Contour SIF
(a) 60N	11.3	10.7	1.81	1.65	1.60
(b) 40N	12.4	12.5	1.53	1.55	1.63
(c) 30N	13.9	14.0	1.60	1.64	1.67
(d) 20N	14.9	15.3	1.43	1.60	1.58



[그림 2.1.6] ML이미지와 CMOD로 계산 된 균열 길이의 비교

[그림 2.1.5] 및 [표 2.1.1] 에서 압광 기법에 의해 측정된 응력확대계수 값(KIcon)을 일반적인 ASTM 방법 및 CMOD 기법에 의해 실측된 값(KIimage & ICMOD)들과 비교 고찰하는 것은 매우 흥미롭다. [그림 2.1.5]에서 살펴볼 수 있듯이 측정 및 계산값들 사이의 전반적인 편차는 시편 초반부 및 후반부에서 대략 15% 이내로 비교적 정확한 일치를 보여 주었다. 이는 기본적으로 기존의 ASTM 방법 및 CMOD 기법에 견주어 압광에 의한 준-동적 균열 전파 과정에서의 응력확대계수 또는 파괴인성 측정에 대한 정밀도가 표준화 수준에 도달하여 있음을 반증하는 것이라 할 수 있다. 상술한 결과들을 바탕으로 각각의 측정값들을 상세히 비교해 보면 시편 초기 파괴 조건에서 ASTM 법 및 압광 방법이 CMOD 측정에 비해 다소 간 높거나 낮은 응력 확대계수 값을 보여 주었는데 이는 [그림 2.1.6] 의 전파 균열에 대한 균열길이 측정값이 다르게 계측 되었기 때문으로 판단된다. 특히, 압광 계측에 의한 균열길이 값이 직접적인 가시화 결과임에 반해, CMOD 계측의 경우 삼각법에 의한 균열 길이 계측과 같은 간접 측정 방법이므로 일반적인 관점에서 볼 때 CMOD 계측값이 오차를 포함하고 있을 확률이 더 높게 된다. 따라서 균열 길이에 관한한 압광 계측 결과가 [그림 2.1.6]에서 보듯이 CMOD 결과에 비해 보다 균열 길이 증가 속도가 일정하게 측정된 것을 알 수 있으며, 이러한 점으로 보아 CMOD 계측의 경우 직접적인 가시화 계측에 비해 정밀도가 떨어지는 것으로 판단해도 무방하리라 사료된다. 그럼에도 불구하고 응력 확대계수 값은 CMOD 계측의 경우 이론적으로 받아들여지고 있는 가장 일정한 상수값에 근접된 결과를 [그림 2.1.5]에서 보였는데, 상대적으로 압광 기술이나 압광 기술을 일부 차용한 ASTM 계측의 경우 초기 조건에서 약간 높거나 낮은 값을 보여주었다. 이러한 결과는 본 연구가 준-동적 균열전파 조건에서 가

시화된 누적 등강도 압광 곡선으로부터 응력 확대계수 값을 측정하려는 최초의 시도임을 감안할 때, 외부 하중의 증가에도 불구하고 일정한 값을 보이는 오차값이 이론적 균열에 비해 상대적으로 무딘 실제 CT 시편에서의 균열 특성 혹은 압광 현상을 기록하기 위한 화상 시스템에서의 광센서 민감도 등과 같은 하나 혹은 두 개 정도의 중요하지 않은 비 구조화된 시험상의 문제들로부터 기인한 것으로 판단된다. 다만 이러한 시험상의 오차가 균열전파과정에서 점점 줄어들면서 균열이 진전되는 대부분의 과정에서 매우 높은 측정 일치도를 보여주었다는 점은 고무적이라 할 수 있을 것이다.

본 연구에서 새롭게 시도된 상술한 접근법이 가지는 기술적 의의는 준-동적 전파 균열의 모드 I 에서의 응력확대계수 값 혹은 파괴인성 값을 계산할 수 있는 가능성을 보여 주었다는 점에서 매우 큰 의의를 가진다 할 것이다. 특히, 본 연구에서 목표하였던 압광 분말 및 수지 사이의 밀착력 개선 공정을 통해 새롭게 개발된 아크릴 레진 기반형 압광 페인트를 이용하여 콘크리트 소재에 적용 가능한 1-2 MPam1/2 수준의 저 응력 확대 계수 범위에서도 준-동적 균열 첨단 응력장 관찰이 가능한 동적 균열 탐지 기술이 성공적으로 개발된 것은 산업적 측면에서 매우 중요한 기술적 진보라 할 수 있을 것이다. 따라서, 향후 동 소재를 측정하려는 어떤 재료의 표면에 적용하여 발광에 의한 응력 가시화가 가능한 응력 표시기로써 이용한다면, 압광 기술이, 비록 시편의 표면 또는 내부 효과에 따라 달라질 수는 있으나, 최소한 벌크 시편에서의 표면 혹은 전체 시편을 관통하는 통합적인 정보를 제공하는 대안적 파괴/비파괴 기술로써 제시 가능할 것이다. 게다가 이러한 새로운 압광 기술의 경우 반응 시간이 전자의 이동속도에 의해 제약되므로 (통상 1 usec. 이하) 일반 적인 균열 전진 뿐만 아니라 동적 조건에서의 균열 전파 특성까지 해석 가능할 것으로 판단된다. 특히, 현재까지 몇몇 구조용 세라믹 소재에서의 준 동적 파괴 현상들을 해석한 결과들이 성공적으로 제시되고 있으므로 이는 매우 현실성 있는 예측이라 할 수 있다. 물론, 동 분야의 연구에 있어 고속으로 전파되는 균열의 탐지가 여타의 방법으로 불가능 한것은 아니나, 사실 레이져를 이용한 광학 기법, 전기 저항 측정, 변형 게이지 부착 기법등과 같은 기술들은 공통적으로 고가의 복잡한 장치들을 이용하여야 한다는 단점을 내재하고 있음에 반해, 압광 기술의 경우 보다 저비용의 단순한 기술적 요구들로 인해 향후 적용범위가 넓어질 수 있을 것으로 판단된다. 특히 이러한 저비용 및 높은 기술 접근성에 더하여 응력 또는 변형율 변화에 대한 전역 반응특성, 빠른 반응시간, 비접촉 특성과 같은 내재적 장점 등을 고려해 볼 때, 압광 페인트 및 박막과 같은 인공 표면을 다양한 소재의 표면에 적용함으로써 향후 구조용 재료의 안정성 평가에 획기적인 전기를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

(마) 요약

본 연구에서는 SAO 소재에서의 발광 현상을 이용한 압광 기술의 도움으로 준-동적 조건으로 전파되는 모드 I 균열에서의 응력확대계수 및 파괴인성 값을 결정할 수 있는 새로운 광학적 기법이 제시되었다. 이를 위해 준-동적 전파 균열 첨단에서의 응력속도 변화 및 누적 등강도 응력선 패턴을 압광 기술을 통해 가시화 하였으며, CT 인장에 있어 누적 발광량에

대응되는 유효 응력은 단순 일축 인장에 의해 얻어진 결과로부터 치환 되었다. 상술한 결과를 바탕으로 응력확대계수 및 파괴인성 값은 균열 첨단 등강도 압광 곡선 패턴에서 주어진 프린지 루프상의 극좌표를 측정함으로써 연산 가능하였다.

이를 바탕으로 동적 하중 부가 조건에서의 누적 압광 등강도 패턴 변화는 트랩 방출 과정을 유발하는 기구로써 편차 응력의 임계 조건에 기반하여 비교적 정확히 해석되었다. 이는, 편차 응력에 기반한 마크로한 방식의 압광 특성 평가를 통해 발광 기구에 주요한 역할을 초래한다는 주요한 단초를 제공함으로써, 압광 기구에 대한 이해를 증진 하였으며 향후 압광 기구 규명에 있어서의 유효한 접근 방식을 제시하였다. 산업적인 측면에서도 압광 분말 및 수지 사이의 밀착력 개선을 통해 콘크리트 소재에 적용 가능한 1-2 MPam1/2 수준의 저 응력 확대 계수 범위에서의 준-동적 전파 균열 첨단 응력장 관찰이 가능한 동적 균열 탐지 기술이 개발되었다.

(2) 압광 페인트의 반복응력 발광 및 피로특성 분석

(가) 서론

최근, SAO 소재는 장 잔광 (PPL)뿐 만 아니라 [1,2] 새롭게 발견된 압광 (ML) 현상으로 인해 대단히 흥미로운 재료로 주목받고 있다 [3-10]. 특히, 압광 현상은 Xu et al. [3] 등에 의한 최초의 SAO 발광 보고 이후로, 낮은 비용의 응력 (또는 부하) 센서의 이용 가능성에 착안하여 아주 흥미로운 연구 주제로 떠오르게 되었다. 이러한 응력 센서로써 SAO의 가장 유망한 장점은 모두 반복 가능하고 비파괴적인 발광 특성에서 기인한다. 다시 말해서, SAO 의 압광 과정은 탄성영역에서 일어나기 때문에 응력 부가 및 제거 과정에서 완벽하게 압광 특성이 재현되며, 탄성영역에서의 발광이 가능하므로 재료자체의 비파괴적 조건에서 발광을 지속적으로 반복할 수 있다는 특성을 지니게 되며, 따라서 이러한 장점을 부각하여 elastic luminescence [3-10] 라고 부르게 되었다. 이는 기존의 파괴(원자 결합의 절단)와 연속적인 플라즈마 방전을 동반한 fractoluminescence 또는 triboluminescence 와 비교하여 상대적으로 우수한 특성으로 평가받을 수 있다. 그런데 상술한 반복 재현적 특성은 주로 SAO의 ML은 기존의 형광체의 발광 과정을 지연시키는 carrier 트랩과 관련된 형광체의 발광으로부터 유래된다고 알려져 있다. 구체적으로 기존의 결함 및 결함 불순물의 종류로 간주 된 트랩에 의해 외부에서 자극된 응력 및 응력속도 변화에 비례하여 광입자의 방출이 이루어지며, 자외선 또는 가시 광선과 같은 간단한 조명에 의해 재충전 가능한 것으로 알려지고 있다. 다만 발광 과정이 트랩 방출 프로세스와 관련되 있지만 구체적으로 트랩의 식별과 에너지 수준의 차이점등을 기술함에 있어 여전히 SAO 장 잔광 및 압광 현상을 기술하기 위한 메커니즘에는 여전히 이견이 있는 것 또한 사실이다[1-2].

따라서 본 연구에서는 압광 기구에 대한 논란이 여전히 상존하는 미시적 접근을 배제하고, 기존의 연구 방법들에서 다루어지지 않았던 매크로 스케일에서의 압광 현상에 대한 실재적 접근 방식을 채택하였다. 구체적으로는 3 개의 서로 다른 주파수 조건 하에서 반복 하중을

채용하여 동적 상태에 도달한 압광 현상의 반복 발광 특성에 대해 정량적으로 평가함으로써, 기계적 접근법에 의한 발광 구성 방정식 및 그 기구에 대한 해석을 시도 하였다. 이러한 시도는 실제로 압광 도료 및 센서를 적용할 때, 스트레스 혹은 스트레인이 모두 동적 조건 하에서 동작 될 가능성이 높기 때문에, ML에 대한 동적 반복 하중의 채용은 또한 실용적인 관점에서 매우 유용하다. 여기에 더하여 반복하중 데이터와 관련된 압광 특성은 아직 자세한 해석이 전무한 상태이므로 본 연구를 통하여 동적 상태에서의 압광 기구를 지배하는 구성방정식을 기계적 접근법에 의해 추가적으로 제시해 보고자 한다.

또한 본 연구에서는 상기와 같은 반복하중 부가를 통한 피로시험을 추가적으로 적용함으로써 새롭게 개발된 압광 페인트에 대한 내구성 및 내후성 특성을 기본적으로 제시해 보고자 하였다. 이러한 연구 목표는 압광 기술의 상업적 판로를 고려할 때 지극히 당연한 수순으로 판단되며, 특히 압광 기술의 기초 요소 기술이 확립됨에 따라 개발품의 내구성 및 내후성 평가가 상업화의 마지막 걸림돌로 작용 할 것은 자명하다. 특히, 압광 세라믹 소재의 반복 발광 동작에 의한 특성 열화 및 투명 페인트 바인더 자체의 내 피로 특성 문제 뿐만 아니라, 건축물의 외부 빗물 노출, 교량의 강물 침식등과 같은 내후 특성에 있어 습기 중에 존재하는 수소의 영향으로 인해 압광 소재의 발광 특성이 급격히 열화될 가능성이 대두됨에 따라 내피로, 내후성 및 양자의 복합 특성열화 현상에 대한 평가는 실 구조물 적용 시 반드시 선행되어야 할 것으로 판단된다.

(나) 실험 방법

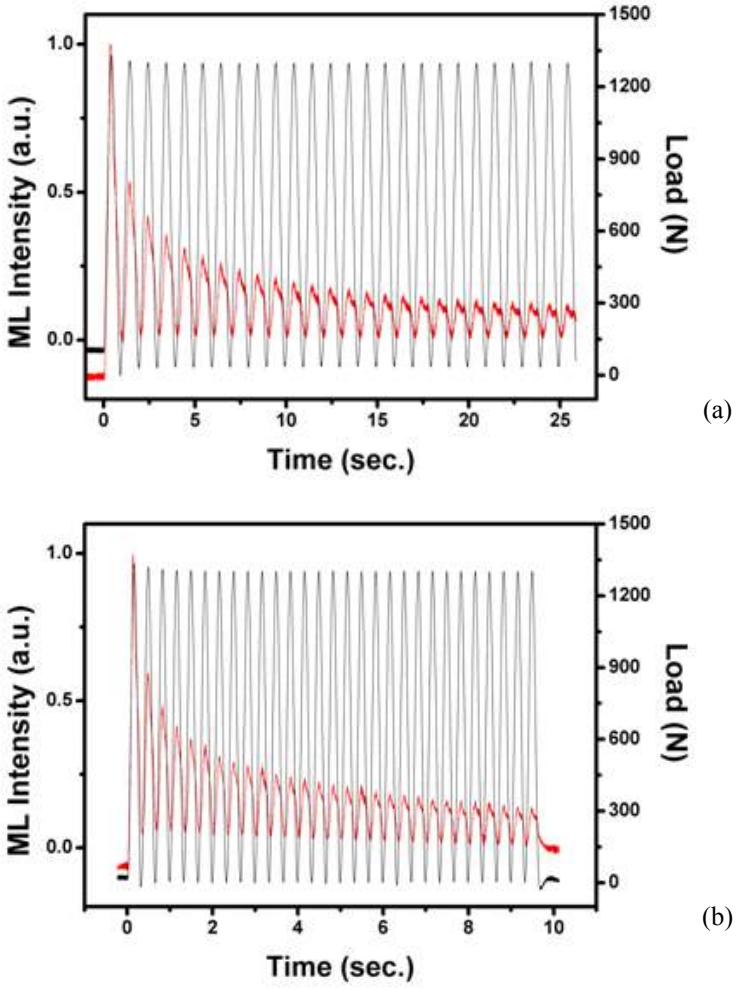
본 연구에서는 ASTM 인장 및 반복시험 시편 제조를 위해서 중량비 70% 의 레진과 30% 의 SAO 압광 분말을 혼합 후 판형으로 자연 건조 시켰다. 이 후 기계가공에 의해 완성된 압광 인장 시편은 게이지 부위의 길이 100 mm 폭 20mm 두께 3mm 크기로 제작되었다. 본격적인 압광 기계적 시험은 Instron 8801 대용량 유압식 만능 시험기를 이용하여 유압식 판상 웨지 그립에 장착 후 수행 하였다. 다만, 하중 부가 전에 365-nm 파장의 고밀도 자외선에 5 분간의 여기와 1 분 동안의 완화과정을 거친 후 목표 하중에 노출하였다. 인장 시편을 이용한 주파수 변조 시험은 1, 3 그리고 5 Hz 에서 인장 형태의 주기적인 하중과 0 ~ 1300N 사이의 하중 범위에서 완벽한 사인파 형태의 하중부가가 이루어지도록 수행 하였다. 시편의 반복하중 변화에 의한 압광 발광량은 MCDL 에 연계된 PMT 센서를 이용하여 로드셀에서 계측된 하중변화와 동기화 후 시간에 따라 순차적으로 변화량을 계측하였다.

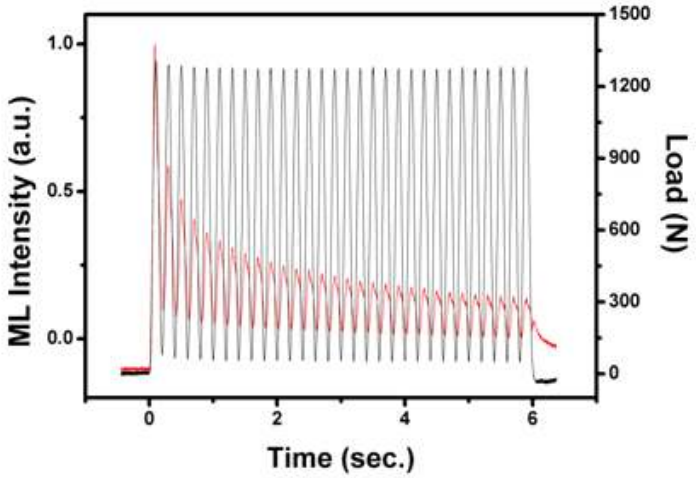
상술한 반복 발광 특성에 더하여 압광 페인트의 피로 특성 보완을 위해, 본 연구에서는 압광 피로 시편을 추가적으로 준비 하였다. 이를 위해 역시 중량비 30% 의 SAO 분말을 70% 의 레진과 혼합한 후, 동일한 과정을 거쳐 판형으로 소성하였다. 제조된 판형 시료는 2 차 기계 가공을 통하여 게이지 길이 12mm, 폭 6 mm 및 두께 3 mm 의 피로전용 시편으로 최종 제조되었다. 이 후 인장 시편은 본격적인 시험을 위해 Instron E3000 기계식 피로 시험기의 공압 그립 장치에 장착된 후, 피로시험을 수행하였다. 실제 피로 시험은 10Hz의 속도로 1000 에서 400 N 범위까지 항복 응력 이하 수준의 탄성역 범위에서 점차적으로 하중을 감소 시켜

가며 시행되었다. 이때 각 하중 사이클 부가 단계에서의 압광 현상 및 발광량 정량 측정을 위하여 인장 시험기에 고속 디지털 카메라 및 다채널 데이터 링크(MCDL) 장치를 추가로 설치하였다. 특히 피로 조건에서의 발광 특성 측정 시에도 암실 조건에서 365nm 파장의 고밀도 자외선에 5 분간에 걸친 여기 (excitation) 및 1 분간의 장 잔광 (long phosphorescence) 완화 처리를 거치도록 하였으며, 다채널 데이터 링크(MCDL) 장치를 이용함으로써 인장시험기의 로드셀로부터 측정된 하중 값과 각 하중 값에서의 게이지부 압광 현상 및 발광 디지털 영상 간의 데이터 동기화를 가능케 하였다[16].

(다) 실험결과

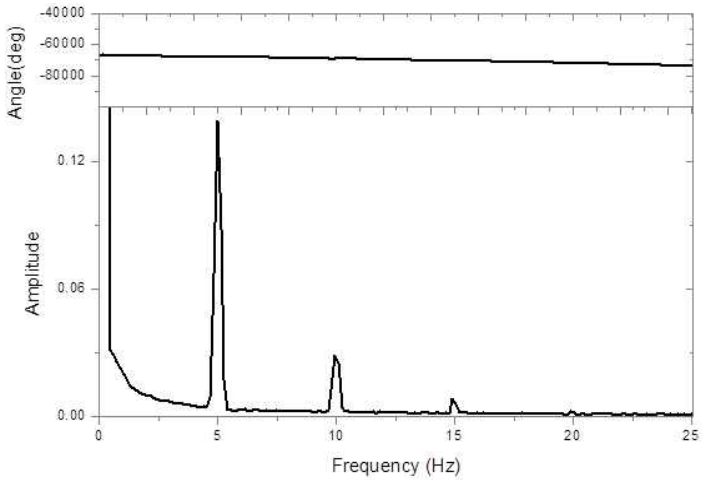
【인장 시편에서의 반복 압광 특성】



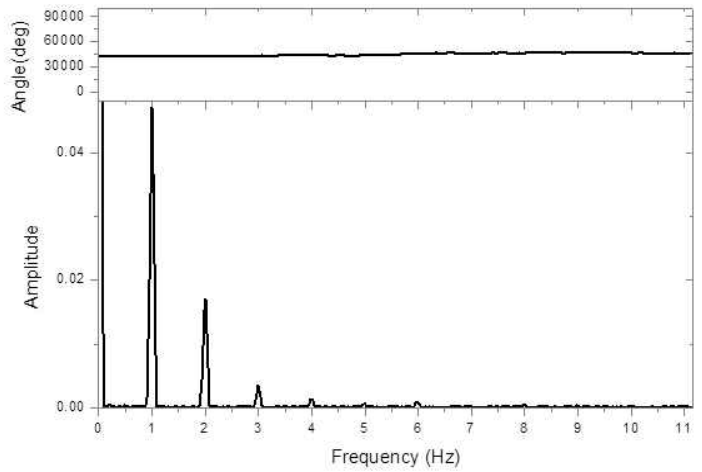


(c)

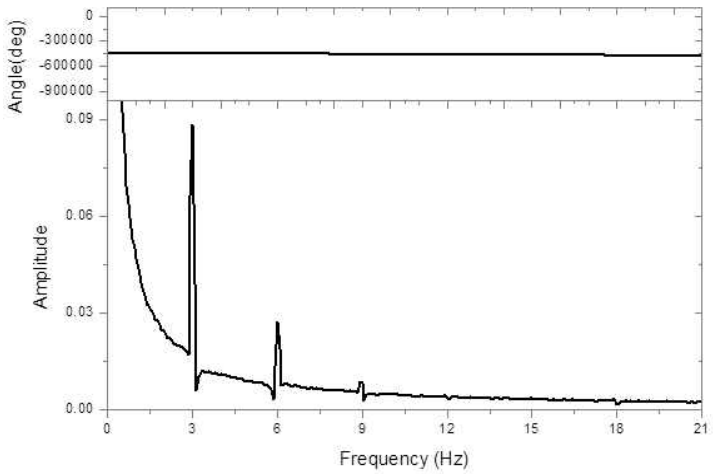
[그림 2.2.1] ML강도, 인가 하중과 함께 그림 1(a) 그림 3(b) 및 5Hz (c)의 주파수



(a)



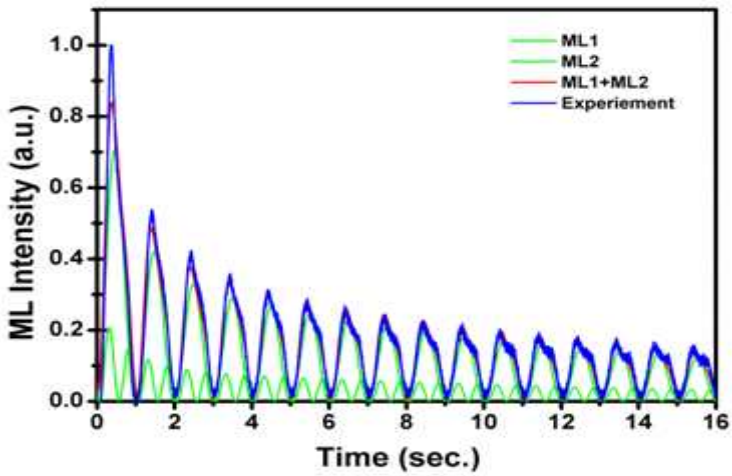
(b)



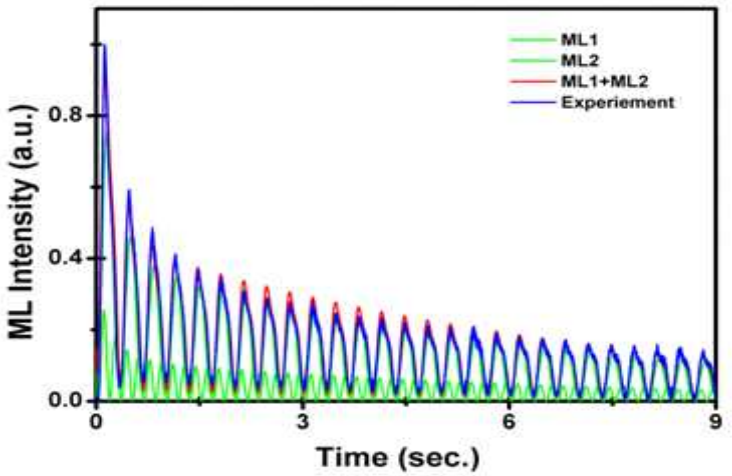
(c)

[그림 2.2.2] 1(a), 3(b) 및 5Hz에서 (c)의
주파수에서 측정 된 ML의 FFT분석

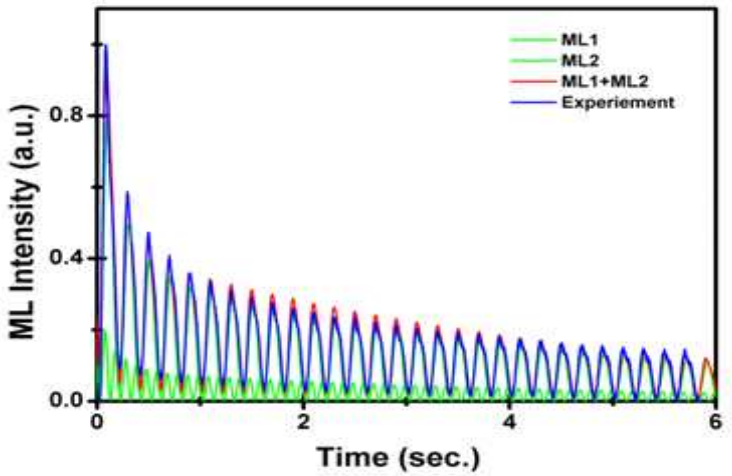
[그림 2.2.1] 은 1, 3 그리고 5 Hz의 주파수에 해당되는 사인 형상의 주기적인 부가 하중에 대해 SAO의 발광 현상을 시간의 변화를 통해 보여주는 그림으로써 ML 강도에 해당하는 결과를 붉은 반복 감쇄 그래프로 보여주고 있다. [그림 2.2.1]에서 가장 주목할 점은 ML의 응답은 하중이 정확한 단일 사인파 형태를 구성하는 경우에도 단조로운 사인파 형태가 아니며, 더 높은 주파수 항의 중첩에 의한 영향을 받고 있는 것처럼 보인다는 점이다. 자세히 살펴보면, ML 반응은 다른 주파수, 상 그리고 진폭과 함께 사인파형의 형상 중첩으로 이루어져 있음을 미리 짐작 할 수 있다. 이러한 예측은 ML의 The fast Fourier transform (FFT) 분석 결과인 [그림 2.2.2] 에서 보여주듯이 부가되는 하중과 대다수의 결합의 주파수 주변에 일련의 중요한 피크 분석 결과로부터 정량적으로 확인 가능하다. 동 그림에서 ML 강도 (진폭)는 두 배 이상의 주파수 피크 이하에서는 극단적으로 감소하고 있으며, 이러한 결과를 기반으로 본 연구에서는 2차 피크 이후의 결과를 배제한 1차 및 2차 고조파 형상을 기반으로 추가 분석을 실시하였다. 이것은 역 필터링 과정에 두 개의 삼각법 성분을 사용할 때 ML 강도의 역 필터링이 받아들여 질 수 있는 수준으로 진행되었음을 함축한다. 또한 본 연구에서는 시간에 따른 진폭 감쇠를 고려하기 위해 ML 감쇠 추이 분석을 추가적으로 수행하였다. 상술한 분석에서 일반적으로 적용 가능한 간단한 지수 함수적 감쇠는 본 결과의 적용에 불충분한 것으로 판단하여, 이중 지수 감쇠 함수를 채택하였다. 통상 이러한 감쇠는 ML 과정에서 중요한 역할을 하는 얕은 트랩에 포획된 소비 캐리어 (전자 또는 정공 중 하나)에 기인하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 미시적 접근법을 배재하고, ML의 주기적인 반응에 초점을 맞추어 발광 현상을 규명하려고 하였다. 이러한 이유로 본 연구에서는 압광 발광 주파수의 두 배 및 주기적 ML 응답의 감쇠 거동 (시간 지연)이 본 연구의 주요 관심사로 부각 되었다.



(a)

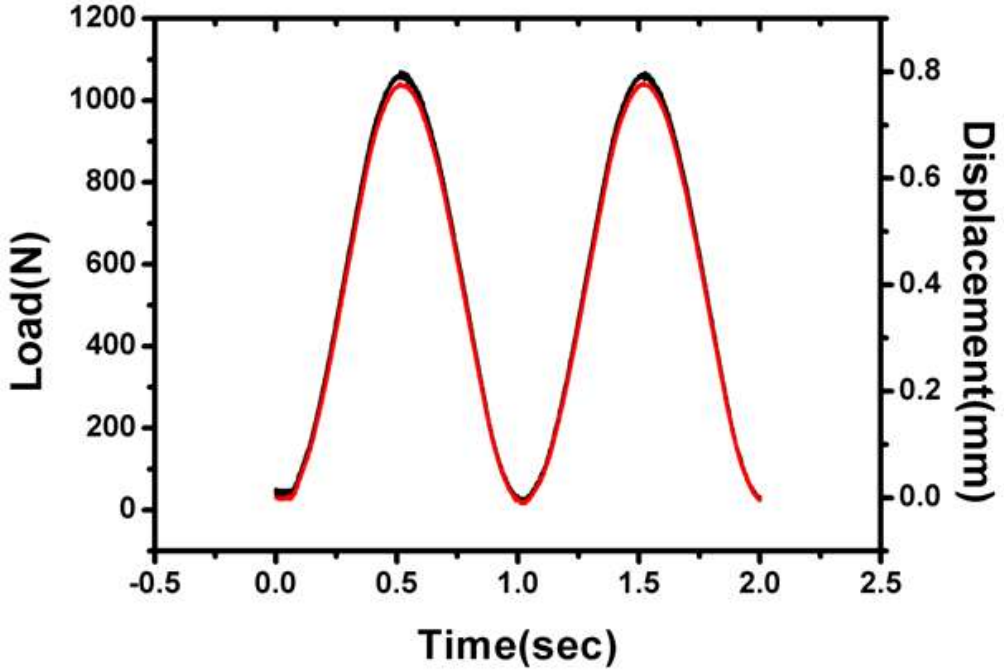


(b)



(c)

[그림 2.2.3] 1(a) 3(b) 및 5Hz (c)의 주파수에서 인가되는 주기적인 부하 및 그 디컨볼루션 결과에 ML반응



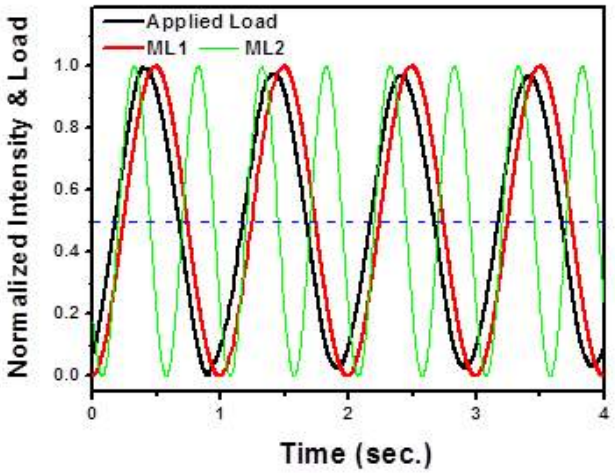
[그림 2.2.4] 1Hz의 주파수에서 로드 대 변위에서 완벽한 일치

[그림 2.2.3] 은 전술한 방법에 따라 1, 3 및 5 Hz 주파수에서의 인장형 순환 하중부가 SAO 시편에 대한 디컨볼류션 특성을 정량적으로 분석한 결과들을 나타낸다. 동 그림에서 하나의 구성 사인 ML1 성분의 주파수는 정확히 다른 ML2 성분의 절반에 해당됨을 알 수 있으며, 특히, 동 결과에서 역 필터링 처리에 의한 FFT 결과를 적용하지 않은 점에 주목할 필요가 있다. 그 결과 디컨볼류션 처리의 자유 매개 변수로 2 사인 함수의 주파수를 선정하여, 최적화된 예측값이 도출되었음은 본 연구의 성과라 자평할 수 있다. 특히, [그림 2.2.4]와 같이 시험을 통해 얻어진 하중이 측정 된 변위 값과 함께 위상 지연없이 완전히 일치하고 있는 것으로 확인 가능하므로, ML 결과의 측정에 의해 관찰된 2차 고조파의 출현이나 위상 지연 현상은 에폭시 수지 매트릭스의 점탄성 특성과 무관한 것으로 판단되었다. 따라서 두 성분의 ML 응답 (또는 2차 고조파의 출현)은 시험상의 인위적인 문제에 의한 것이 아닌, ML 프로세스 자체에서만 유래한다고 판단된다.

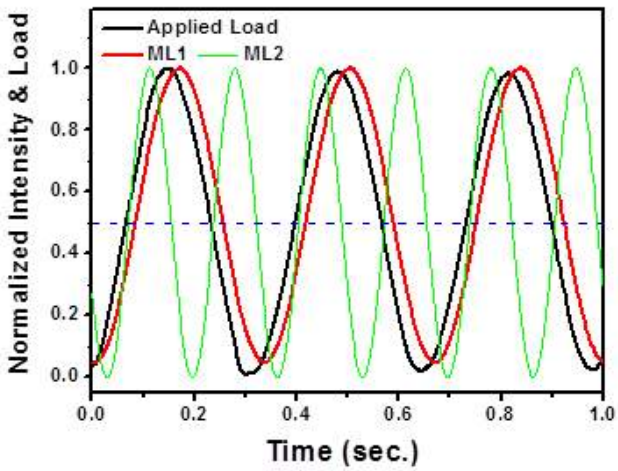
본 연구에서는 추가 하중 (기본 성분)과 동일한 주파수의 첫 번째 역 필터링 구성 요소를 ML1, 배의 주파수를 갖는 다른 성분 (소위 2차 고조파)을 ML2라고 지정하였다. 이때 ML1의 기여는 [그림 2.2.3]와 같이 ML1 진폭이 모든 주파수에 대해 ML2보다 높았다는 사실에 의해 ML2를 지배하였다라고 평가 할 수 있으며, 또한 상대적인 기여도 (ML1/ML2) 추세는 전체 주파수에 대해 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 전 ML1의 주파수가 부가된 하중과 잘 일치했다. 즉, ML1은 기본파 성분 소위 부가 하중에 대한 간단한 선형 응답 ($\alpha P(t)$) 이며, 두 배 주파수는 일반적인 2 차 고조파, ML2 의 ($\beta P(t)$) 해당된다. 따라서, 전체적인 ML 특성은 다음 식을 이용하여 정리할 수 있다.

$$ML(t) = [\alpha P(t) + \beta P(t)^2]D(t)$$
$$P(t) = e^{iwt}$$
$$D(t) = [\eta e^{-t/\tau_1} + (1-\eta)e^{-t/\tau_2}] \quad (1)$$
$$\alpha = \alpha_\tau - i\alpha_e, \delta_1 = \tan^{-1}(\alpha_e / \alpha_\tau)$$
$$\beta = \beta_\tau - i\beta_e, \delta_2 = \tan^{-1}(\beta_e / \beta_\tau)$$

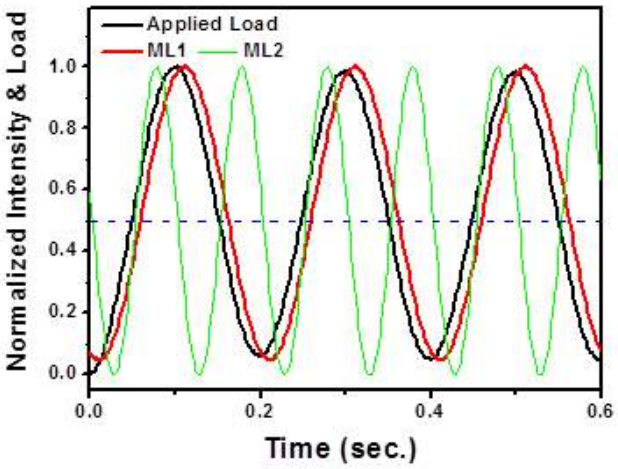
여기서, P(t)는 정규화 된 부하 하중이며, D(t)는 두 지수 감쇠 성분으로 이루어진 감쇠 함수이다. t1 및 t2는 기하 급수적으로 감쇠 성분의 각각의 감쇠 시간에 해당되며, w는 추가 된 하중의 각 주파수이다. d1 및 d2가 각각 가해지는 하중에 관해서 ML1과 ML2위한 단계이며, h간단한 진폭의 가중치 상수이다. 마지막으로 a 및 b 는 각각 d1 및 d2 관련 ML1과 ML2를 위한 복잡 상수에 해당된다. 이때 실제 로드는 인장 타입으로 부가되어, ML 응답이 양의 값을 가지도록 시험되었으므로, 최소 응력값이 거의 0이 되도록 인장형 반복하중 부가 시험이 수행되었다.



(a)



(b)



(c)

[그림 2.2.5] 1(a), 3(b) 및 5Hz (c)의 주파수에서
디컨볼루션 ML1과 ML2와 함께 가해지는 하중

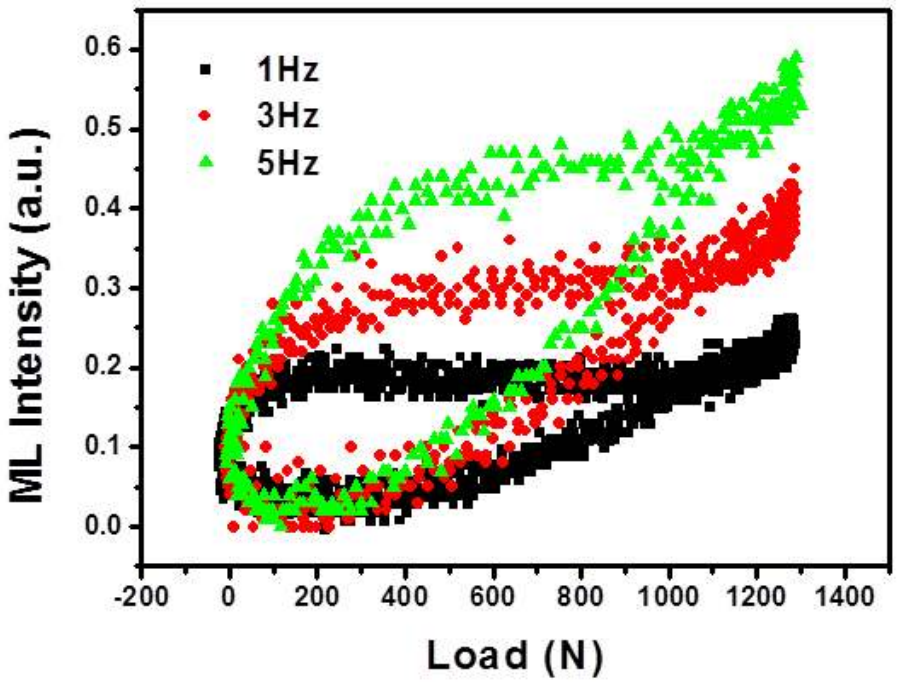
[그림 2.2.5]는 1, 3 및 5 Hz 주파수에서의역 필터링 ML1과 ML2 를 작용하는 하중과 함께 정량적으로 분리하여 나타낸 결과이다. 이 때 본 연구의 주요 관심사는 반복 하중 조건 하에서 나타내는 ML의 주기적인 특성 파악이므로, ML1 과 ML2 의 감쇠 특성은 사전에 제거하여 도시 하였다. 주요한 점은 선형 성분, ML1 이 부가 된 하중의 것과 그 주파수 및 모양에 있어 동일한 양상을 보인다는 점이다. 다만, 추가 된 하중 ML1 사이의 위상 변화가 관찰되었으며, 이것은 지연 정도와 비례하는 일반적인 감쇠 또는 손실이 ML 발광 과정에서 생성 된 것을 의미한다. 사실 점탄성 재료에 대한 복소 탄성률 (또는 준수)와 응력 - 변형 관계 관찰과 마찬가지로 일정한 조건 하에서 자극과 반응 사이의 같은 위상 지연 (감쇠 또는 손실)을 감지하는 것은 매우 자연스러우며, 전압 · 전류의 전기 회로에 대한 복잡한 임피던스 및 유전체 재료 등을 위한 복잡 감도를 가지는 전계 편광특성 등에서 나타는 위상 지연현상과 본질적으로 매우 유사하다 할 수 있다.

따라서 ML1과 ML2 및 부하 하중 사이의 위상 지연이 관찰된 것은 놀라운 일이 아니며, 이러한 위상 지연을 본 연구에서는 ML 손실로 명명하였다. 가해지는 하중에 응답시 발생된 ML1 의 정확한 지연 값은 각각 1,3 및 5 헤르쯔 조건에서 4.79, 3.89 및 3.01°에 해당되었다. 이 때 ML 손실의 시간 스케일은 측정에 사용한 계측 장비의 전체 시간 지연보다 압도적으로 훨씬 크기 때문에, 감지 된 ML 손실이 반드시 재료 중 ML 과정에서 생긴 것이 분명하다 판단된다.

다만, 손실 각 (위상 지연)이 인가되는 주기적인 하중의 주파수에 대해 다소간 감소하는 결과를 나타내었다. 주파수에 대한 손실 각과 같은 작은 변화로 부터 ML에 대한 덤핑 지배 (손실)의 메커니즘은 1-5 Hz의 주파수 범위에 대해 불변이라는 추측으로 이어질 수 있다. 특히, 이 주파수 범위는 에폭시 소재의 특정 공진 주파수에서 상대적으로 멀리 떨어져 있으며, 또한 상세한 감쇠기구는 자강 유전성 재료의 자벽전환 시 발생되는 손실 기구와 유사하다는 점에 유의해야 할 것이다. 그러나 전술 한 바와 같이 같은 트랩 방출에 의한 발광기구와 관련하여 ML 프로세스는 여전히 많은 논란이 남아 있기 때문에 동 프로세스에 대한 자세한 논

의는 본 연구에서는 생략하고자 한다. 주요한 점은, ML 손실은 일반적으로 점탄성에 에폭시 수지 중에 관찰되는 기계적인 손실에서 일어나지 않는다는 것을 확인했다는 것이다. 이것은 관찰된 ML 손실이 시험 온도 에서 유사한 주파수 조건의 응력이 부가 되었을 때, 에폭시 수지 재료의 기계적 손실과 관련된 전형적인 측정치 보다 훨씬 큰 값이 본 연구에서 얻어졌다는 점으로부터 알 수 있다 [17,18]. 즉, 대부분의 에폭시 수지의 최대화된 기계적 손실은 항상 100°C 이상의 온도에서 측정되고 있다[17, 18]. 이러한 점을 입증하기 위하여 [그림 2.2.4] 에서 1 Hz ML 실험과 같은 부하 조건 하에서 동일한 샘플을 사용하여 하중 - 변위 변화를 측정한 결과를 나타내었다. 즉, 이 보조 실험은 명백히 기계적인 손실이 동일한 시험 시료의 점탄성으로부터 기인하지 않았음을 나타내는 확실한 증거로써, 하중과 변위량 측정 사이에 위상 지연이 전혀 관찰되지 않은 결과를 보여주었다. 따라서 추가 된 하중에 대한 응답으로 ML1위한 위상 지연은 거의 ML 기구에서 유래하며, 에폭시 수지의 기계적 손실에 관련이 없었다.

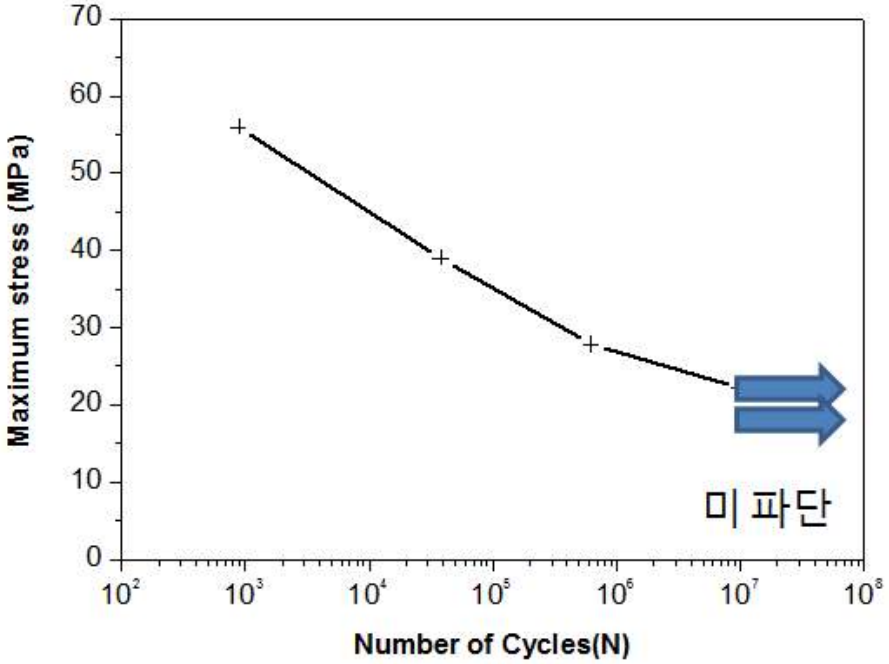
그러나 ML2 의 경우는 상대적으로 매우 큰 위상 지연이 관찰 되었는데, 2, 6 및 10 Hz 조건하에서 하중 부하의 제곱에 관련하여 223, 237 및 277°의 위상 지연 특성을 타나내었다. 사실 2차 고조파에 대한 이러한 큰 위상 지연 (또는 양의 위상 각)은 종종 비선형 광학의 경우에 관찰된다[19,20]. 특히 2차 고조파 (ML2)의 진폭은 기본 파 성분 ML1보다 훨씬 낮기 때문에 ML2를 위한 위상 지연이 손실 메커니즘은 무시할 수 있다. 더욱이 본 연구에서 사용된 부가 하중은 사인파 이므로 미분값을 취한 부가 하중 속도 값과 비교할 경우 코사인 형태의 함수로 변경 가능하다. 이러한 하중 변화 속도 값을 기반으로 ML2 와의 위상지연을 비교할 경우 그 값은 ML1 의 지연 손실 수준으로 급격히 감소하게 되며, 이러한 점들을 고려해 볼 때 ML2 값은 하중 변화 속도로부터 기인된 발광량임을 추측할 수 있다. 즉, 전체 발광량은 하중변화 값인 ML 1 및 하중 변화속도 값인 ML2 값의 함수로 규정될 수 있으며, 결과적으로 본 연구에서는 동적 하중 조건에서의 압광 발광량을 규정하는 구성방정식을 식 1 과 같이 새롭게 제시하는 성과를 제시 하였다.



[그림 2.2.6] 3차의 적재와 1, 3, 5Hz로 구성된 히스테리시스 곡선

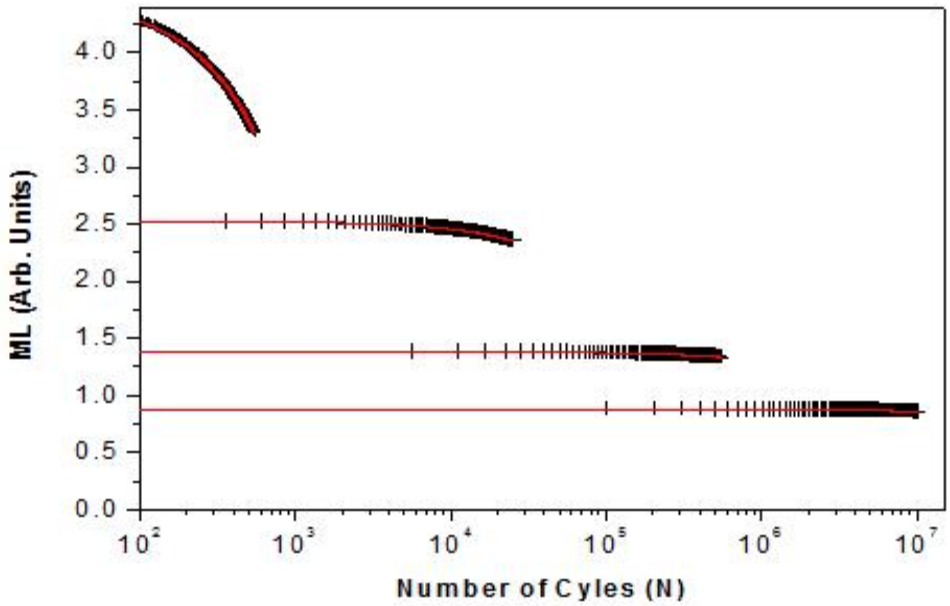
[그림 2.2.6] 은 상술한 압광 손실을 히스테리시스 거동의 관점에서 해석하여 도시한 결과이다. 히스테리시스 루프의 안쪽 영역은 손실 각 관련된 크기를 나타내며, 전체 과정은 로드 및 deloading 곡선 화살표로 표시 하였다. 그림에서 살펴 볼 수 있듯이, 감쇠 동작 때문에 전체 히스테리시스 루프는 ML 측정의 초기 단계에서 잘 일치하지는 않았으나, 강유전체 (압전 포함) 혹은 유사 재료 계에서 관찰 된 기존의 히스테리시스 곡선과 그 형태에 있어 매우 큰 동일성을 보여 주었다. 또한 최대 부하 근처에서 약간 크로스 오버가 관찰되었는데 이는 하중 부가속도인 ML2 구성 요소의 영향으로 생각된다. 이는 최근 찬드라에 의해 제안된 압전 - ML 복합 기여 기구로서 제안된 ZnS:Cu 계에서의 자가 여기 및 발광 기구의 손실 각 및 히스테리시스 거동 결과와 기본적으로 매우 유사한 결과로 판단된다.

피로 시편에서의 내구성 및 내후성 특성



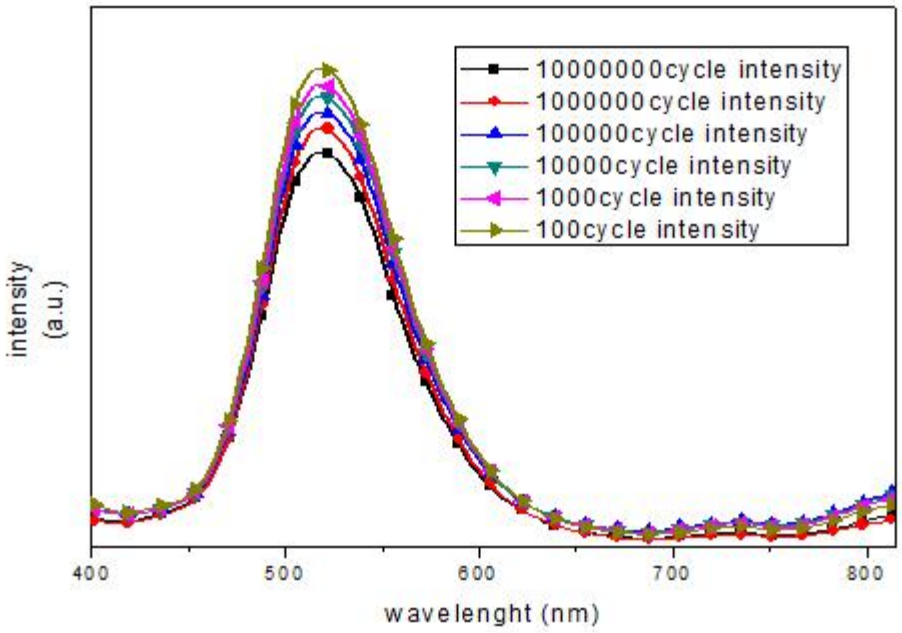
[그림 2.2.7] SAO의 메카 도료의 피로 한계를 나타내는 SN곡선

[그림 2.2.7] SAO의 메카 도료의 피로 한계를 나타내는 SN곡선은 압광 페인트의 피로 특성을 평가한 결과로서 부가하중별 파단까지의 소요 응력 사이클을 나타내고 있다. 그림에서 살펴 볼 수 있듯이 전반적인 시험결과는 응력값이 감소함에 따라 파단 사이클이 증가하는 전형적인 S-N 곡선을 나타내었다. 주목할 점은 28 MPa 근처의 부가 응력에서 파단 사이클 증가 속도가 변화하기 시작하여 22및 19 MPa 부가하중 시험 조건에서는 초당 10 Hz 응력 사이클 부가조건하에서 10일 이상이 소요되는 107 싸이클 반복 시험에서도 시험편의 파단이 관찰되지 않았다. 따라서 상용 구조용 재료의 피로 한도가 대개 107 - 108 싸이클 사이에서 결정됨을 감안할 때 본 페인트의 내구 한도는 대략 20 MPa 수준인 것으로 결론지을 수 있다. 이러한 피로한도는 일반 콘크리트 소재의 압축강도가 20-40 MPa 수준이고 피로한도가 대략 인장 혹은 압축강도의 절반 수준임을 고려하여, 콘크리트 소재의 피로한도가 10-20 MPa 수준이라 가정하면, 건축 구조용 콘크리트 구조물 자체의 피로한도를 충분히 커버할 수 있는 내구 한도라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 새롭게 제시된 압광 페인트의 경우 장기 사용에 따른 페인트 기계적 특성의 열화 현상은 충분히 요구 성능을 만족할 만한 수준으로 개발된 것으로 결론지을 수 있다.

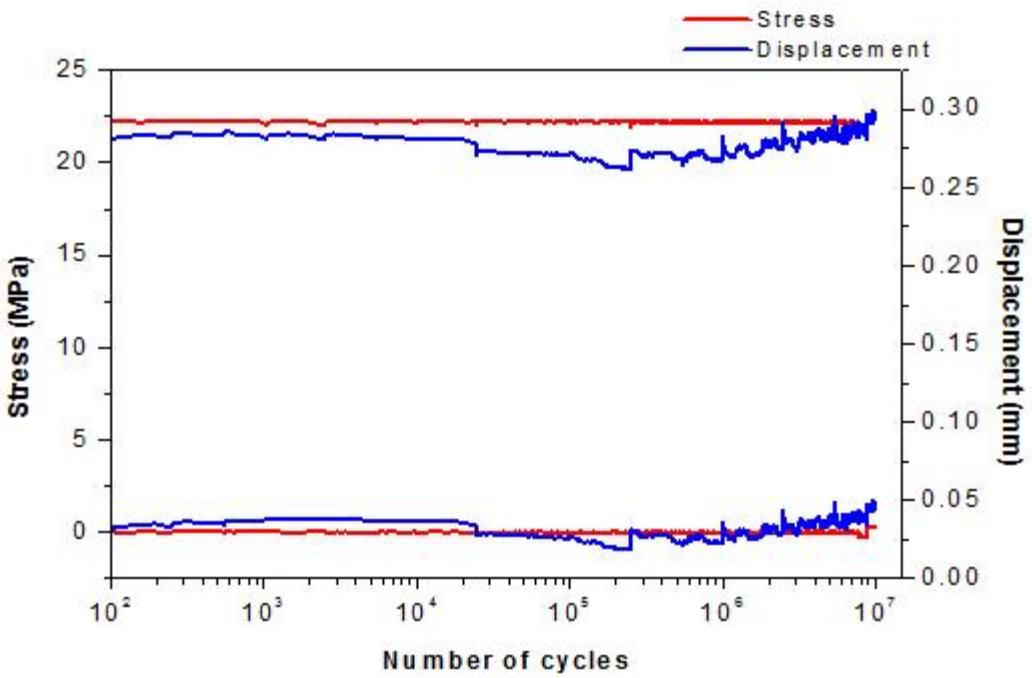


[그림 2.2.8] SAO의 메카 도료의 피로 한계를 나타내는 SN곡선 압광 방출물과 다양한 부하 응력 하에서 하중 싸이클의 변화에 대한 그래프

[그림 2.2.8] 은 각각의 부가 응력 조건하에서 압광 특성의 변화 양상을 응력 사이클의 증가에 따라 도시한 결과이다. 전반적으로 시편에 가해진 응력의 최대 값이 감소함에 따라 측정된 발광량도 감소하는 당연한 결과를 나타내었으며, 또한 고정된 부가 응력 조건하에서도 응력 사이클의 증가에 따라 발광량의 감소가 함께 관찰 되었다. 이러한 누적 응력 사이클 증가에 따른 압광량 감소는 특히 55 MPa 이상의 높은 부가응력 조건에 두드러지게 나타났으며, 부가 응력의 감소에 따라 점차적으로 압광 발광량 감소 정도도 작아짐을 알 수 있다. 일례로 55 MPa 이상의 고응력 조건에서는 초기 발광량 대비 파단시 약 28% 정도의 압광 조도 감소 현상이 관찰 되었으나, 가장 낮은 응력값인 22 MPa 조건의 콘크리트 피로 한도에 근처에서의 압광 발광 열화정도는 100 cycle 이하의 초기 발광량 대비 10000000 cycle 에서 95% 이상의 조도를 유지할 수 있었다. 결과적으로 10-20 MPa 수준인 일반 콘크리트 소재의 피로 한도를 고려해 볼 때, 본 압광 페인트의 실 사용 조건에서 발광량 열화에 따른 균열 및 전파 현상 탐지 성능 감소 등의 우려는 전혀 고려할 필요가 없는 것으로 판단된다.



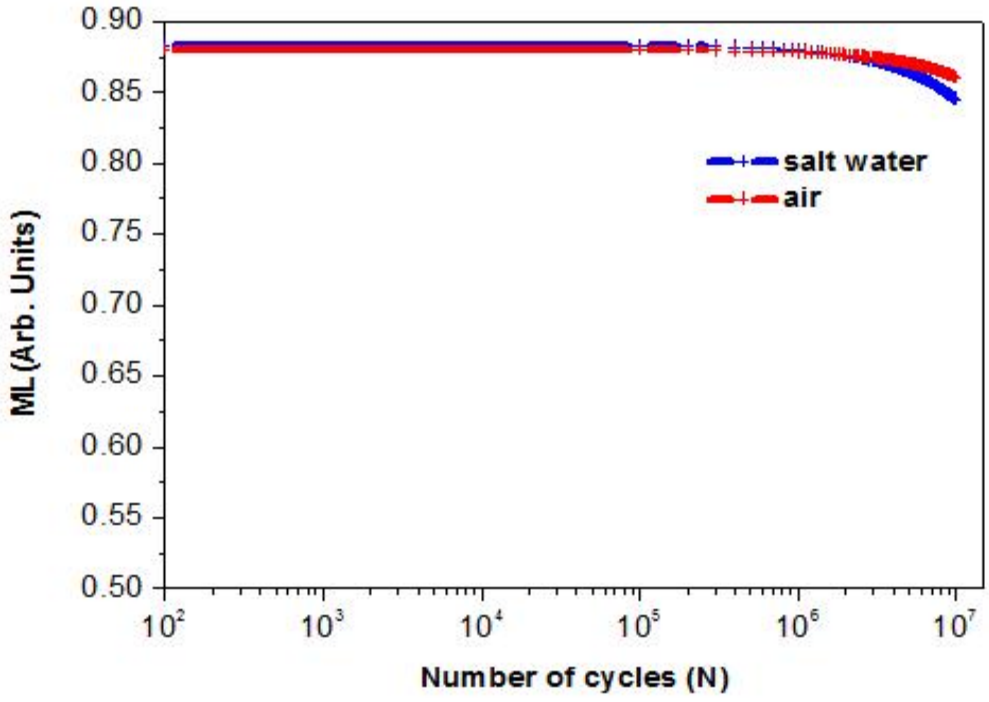
[그림 2.2.9] 22 MPa이하 하중 사이클의 변화에 대한 압광 스펙트럼



[그림 2.2.10] 22 MPa이하의 하중 사이클의 변화에 최대, 최소 응력의 최고점

[그림 2.2.9] 는 부가응력 22 MPa 의 콘크리트 피로 한도 근처에서의 응력 사이클 변화에 따른 형광 및 발광 스펙트럼 변화를 나타낸 결과이다. 본 연구에서는 [그림 2.2.8] 의 동일 부가 하중조건에서 응력 사이클 변화에 따른 발광량 감소가 극히 미미하였으므로 조도 감소 등의 문제는 해소되었으나, 반복사용에 의한 SAO 구조 왜곡으로부터 유발될 수 있는 발광 파

장 분포의 변화 유무를 살펴 보기 위하여 형광 분광계를 이용한 파장 분포 변화를 추가적으로 측정 하였다. 그 결과 그림에서 살펴 볼 수 있듯이 전체 파장 분포의 최대 피크점 및 파장 폭의 변화가 전혀 관찰 되지 않았으므로 반복 하중에 의한 압광 분말의 구조 왜곡 또한 실 사용시 고려할 필요가 없는 것으로 판단되었다. 다만 [그림 2.2.8]의 광증폭관 센서를 이용한 시험 조건과 달리 [그림 2.2.9]의 형광 분광계 시험에서는 자외선 조사 램프가 켜져있는 상태에서 형광 및 압광 발광 현상을 동시에 측정하였으며, 이러한 시험 조건의 변화에 따라 100 cycle이하의 초기 피크 발광량 대비 10000000 cycle 에서의 피크 발광량 감소가 대략 20% 정도 발생하는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 압광 특성 열화 (5% 내외) 에 비해 형광 조도의 감소가 15% 정도로 상대적으로 높게 나타났다는 결과로 해석할 수 있다. 상술한 형광 조도의 감소는 [그림 2.2.10]의 응력 사이클 변화에 따른 변위 변화 추이 그래프에서 살펴 볼 수 있듯이, SAO 압광 세라믹 분말 특성 열화 때문이 아니라 압광 페인트를 구성하는 레진성분의 기계적 열화에 따른 투명도 감소 때문으로 판단된다. 즉 반복 하중 부가에 따른 레진의 변위 변화가 유발한 레진 탁도 증가가 자외선 램프 조사 시 반응하는 SAO 분말의 흡광 및 형광 발광량을 효과적으로 차단함으로써 피크 파장에서의 형광 광량 감소로 이어진 것으로 판단된다.



[그림 2.2.11] 압광 방출물과 부하 응력에서 공기와 바닷물의 조건의 변화에 대한 그래프

[그림 2.2.11]은 건축물의 외부 빗물 노출, 교량의 강물 침식등과 같은 내후 특성에 있어 습기 중에 존재하는 수소의 영향으로 인해 압광 소재의 발광 특성이 급격히 열화될 가능성을 고려하여 내피로, 내후성 및 양자의 복합 특성열화 현상에 대한 평가를 실시한 결과이다. 그림에서 살펴 볼수 있듯이 전반적인 발광 특성의 변화는 대기중 시험과 거의 유사한 결과를 나타내었다. 압광 조도 측면에서도 100 cycle 이하의 초기 발광량 대비 10000000 cycle 에서 90% 이상의 조도를 유지하였으며, 형광 및 압광 스펙트럼 변화 또한 대기중 시험결과와 매우 유사한 특성을 나타내었다. 다만 3백만 싸이클 이후 분위기 영향으로 인한 광량감소가 미소하게 관찰되었으나 감소량이 5% 미만인 것으로 보아 압광 분말이 아닌 레진 성분의 열화에 의한 것으로 판단된다. 따라서 금속기 소재와 달리 압광 페인트의 경우 기본적으로 폴리머 소재가 압광 페인트를 보호하는 역할을 함으로써 기존의 압광 분말 시험결과에서와는 달리 내후성 평가 시 수소 등의 영향으로 인한 SAO 분말의 형광 및 압광 특성 열화는 관찰 되지 않았다. 결론적으로 정리하자면 압광 페인트의 경우 건축 구조용 콘크리트 구조물 자체의 피로한도를 충분히 커버할 수 있는 20 MPa 수준의 내구 한도를 가지며, 동 응력 부가 수준에서 압광 발광 열화정도가 100 cycle 이하의 초기 발광량 대비 10000000 cycle 에서 95% 이상의 조도를 유지하는 우수한 압광 내구특성을 나타내었을 뿐만 아니라, 전체 발광 파장 분포 또한 최대 피크점 및 파장 폭의 변화가 전혀 관찰 되지 않았고, 내후 특성 또한 매우 우수하였으므로, 반복 하중에 의한 압광 분말의 구조 왜곡 또는 건축물의 외부 빗물 노출, 교량의 강물 침식등과 같은 내후 특성은 실 사용 시 전혀 고려할 필요가 없는 것으로 판단되었다.

(라) 결론

본 연구에서는 우선, 압광 기구에 대한 논란이 여전히 상존하는 미시적 접근을 배제하고, 기존의 연구 방법들에서 다루어지지 않았던 매크로 스케일에서의 압광 현상에 대한 실재적 접근 방식을 채택하였다. 구체적으로는 3 개의 서로 다른 주파수 조건 하에서 반복 하중을 채용하여 동적 상태에 도달한 압광 현상의 반복 발광 특성에 대해 정량적으로 평가함으로써, 기계적 접근법에 의한 발광 구성 방정식 및 그 기구에 대한 해석을 시도 하였다. 이러한 시도는 실제로 압광 도료 및 센서를 적용할 때, 스트레스 혹은 스트레인이 모두 동적 조건 하에서 동작 될 가능성이 높기 때문에, ML에 대한 동적 반복 하중의 채용은 또한 실용적인 관점에서 매우 유용하다. 여기에 더하여 반복하중 데이터와 관련된 압광 특성은 아직 자세한 해석이 전무한 상태이므로 본 연구를 통하여 동적 상태에서의 압광 기구를 지배하는 구성방정식을 기계적 접근법에 의해 추가적으로 제시해 보고자 하였다. 이러한 시도를 통하여 본 연구에서는 전체 발광량을 하중변화 값인 ML 1 및 하중 변화속도 값인 ML2 값의 함수로 규정할 수 있으며, 최종적으로 동적 하중 조건에서의 압광 발광량을 규정하는 구성방정식을 식 1 과 같이 새롭게 제시하는 성과를 이루었다.

또한 본 연구에서는 상기와 같은 반복하중 부가를 통한 피로시험을 추가적으로 적용함으로써 새롭게 개발된 압광 페인트에 대한 내구성 및 내후성 특성을 기본적으로 제시 하였다. 이러한 연구 목표는 압광 기술의 상업적 판로를 고려할 때 지극히 당연한 수순으로 판단되며,

특히 압광 기술의 기초 요소 기술이 확립됨에 따라 개발품의 내구성 및 내후성 평가 차원에서 조사를 실시하게 되었다. 시험결과 압광 페인트의 경우 건축 구조용 콘크리트 구조물 자체의 피로한도를 충분히 커버할 수 있는 20 MPa 수준의 피로 한도를 가지며, 동 응력 부가 수준에서 압광 발광 열화정도가 100 cycle 이하의 초기 발광량 대비 10000000 cycle 에서 95% 이상의 조도를 유지하는 우수한 압광 내구특성도 나타내었다. 여기에 더하여 전체 발광 파장 분포 또한 최대 피크점 및 파장 폭의 변화가 전혀 관찰 되지 않았으므로 반복 하중에 의한 압광 분말의 구조 왜곡 등도 실 사용시 고려할 필요가 없는 것으로 판단되었다. 마지막으로, 건축물의 외부 빗물 노출, 교량의 강물 침식등과 같은 내후 특성에 있어 습기 중에 존재하는 수소의 영향으로 인해 압광 소재의 발광 특성이 급격히 열화될 가능성을 고려하여 내피로, 내후성 및 양자의 복합 특성열화 현상에 대한 평가도 실시하였으나, 일반적으로 수행되는 부식 분위기하 피로 시험 결과에서도 수소 등의 영향으로 인한 SAO 분말의 형광 및 압광 특성 열화는 관찰 되지 않았다.

(3) 실제 구조형식에 따른 대면적 적용 공법 개발

(가) 서론

본 연구에서는 구조형식에 따른 압광페인트의 적용성을 확인하고자 실제 구미시 금오산 교량에 사용되고 있는 10m길이의 보를 대상으로 현장모사실험을 계획하여 진행하였다. 또한 수작업으로 이루어지는 압광페인트의 기존 도포방식을 스프레이식으로 뿜칠하거나 균열이 발생할 것으로 예상되는 구역에 편리하게 도포하는 기법을 개발하여 효과적인 시공방법을 모색하는데 중점을 두었다.

본 연구에서 사용되는 압광페인트의 실제 구조물에 대한 현장 적용 및 가능성을 확인하기 위해 구조물의 위험단면, 주요부위, 취약지점, 집중관리가 필요한 부위를 대상으로 계측장비를 통해 구조형식에 대한 범용성을 확대하기 위하여 교량, 터널 등과 같은 실제 구조물에 적용할 계획이다.

또한 효과적인 뿜칠을 하기 위해서 대면적 살포용 압광페인트의 입자를 세밀하게 구성하고 바인더의 점성을 높여 페인트 도포가 용이하게 하여 대면적 도포 공정을 개발함으로써 대형구조물 및 시공이 어려운 구조물에 쉽게 도포 할 수 있다.

(4) 실험계획

(가) 실험체 설계

본 연구에서는 현장적용 가능성을 확인하기 위하여 현장모사 실험을 진행하였으며 실제 구미시 금오산에 사용되고 있는 10m교량과 동일한 실험체를 제작하였다. [그림 3.1]는 현재 사용되고 있는 구미시 금오산에 있는 교량을 나타내며 [그림 3.2]은 동일하게 제작된 실험체

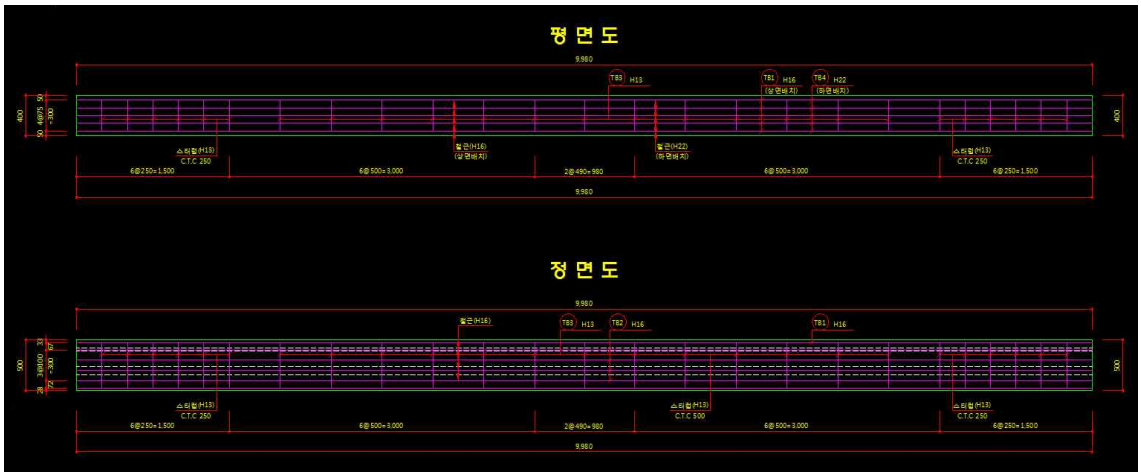
를 나타낸다. [그림 3.3]은 실험체의 설계도면을 나타낸 것이고 [표 3.1], [표 3.2]는 철근 재료와, 배합표를 나타냈다. 철근센서는 실험체의 주철근 중앙에 5개를 설치하였다. 완성된 철근케이지를 거푸집에 거치하고 30MPa, 50Mpa강도의 콘크리트를 타설하였다. 타설 후 28일 동안의 양생기간을 거쳐 실험을 실시하였다.

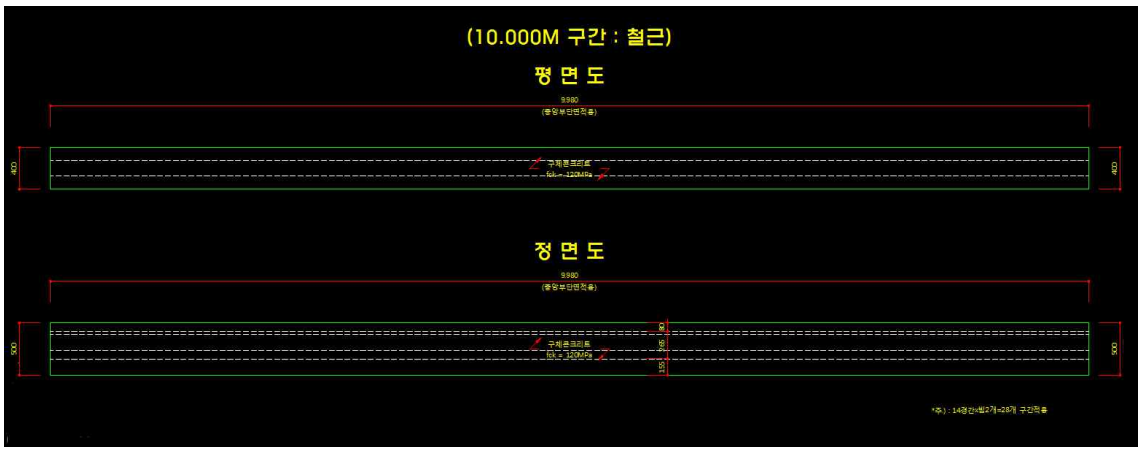


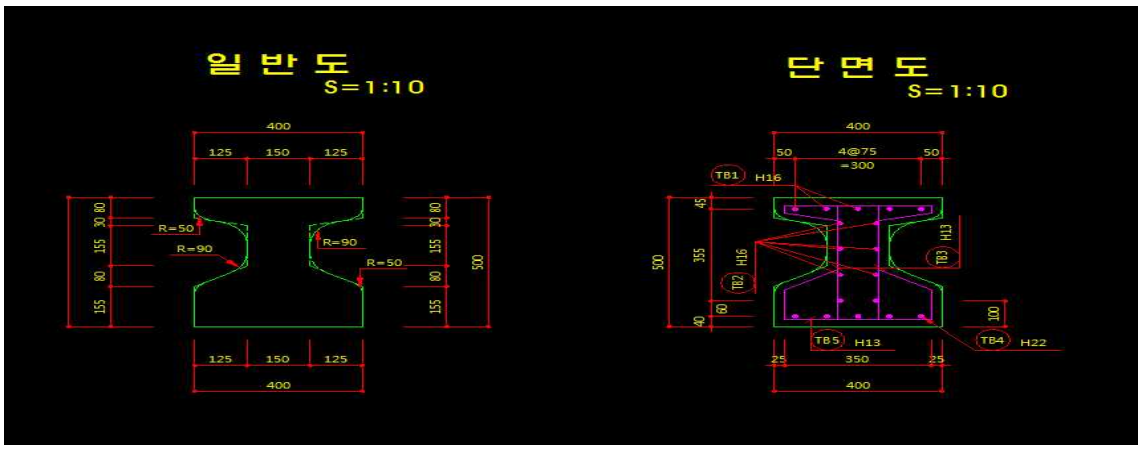
[그림 3.1] 현장적용 된 실험체



[그림 3.2] 동일하게 제작된 실험체







[그림 3.3] 실험체 설계도면

[표 3.1] 실험체의 철근 재료표

전단스팬비	항목	직경	길이(m)	개수(개당)	총길이
2	주철근	D16	1	2	2
	스트럽	D10	0.7	10	7
	상부철근	D10	1	2	2

[표 3.2] 실험체 배합 설계표

구분	굵은 골재의 최대 치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	물-시멘트 비 (%)	잔골재율 S/a (%)	단위량(kg/m3)				
						물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은 골재 G	혼화제 (g/m3)
30	25	12	4.5	43	63	185	430	775	967	-
50	25	12	4.5	32	63	138	430	775	967	4.3

(나) 실험체 제작

본 연구에서 사용될 실험체를 제작하기 위하여 먼저 실내에서 실험체의 거푸집을 제작하였다. [그림 3.4]의 (a)는 거푸집에 철근 케이지를 거치한 모습을 나타내며 (b)는 타설 후 모습을 나타낸다. 센서는 실험체의 주철근 중앙에 5개 설치하였다. 콘크리트는 30MPa, 50MPa 강도를 타설하였다. 타설 후 28일 동안의 양생기간을 거쳐 실험을 실시하였다. (c)는 완성된 실험체의 모습이다.



(a) 철근케이지 거푸집 배치



(b) 타설 후 모습





(c) 완성된 실험체

[그림 3.4] 실험체 제작과정

(다) 압광페인트 제조

압광페인트를 제작하기 위한 재료와 양은 [표 3.3]과 같다. [표 3.3]은 에폭시 100g을 기준으로 필요한 하드너, 첨가제, 파우더의 양을 표현한 것이다. [그림 3.8]은 압광페인트를 제작하는 장면을 차례대로 나타냈다. [그림 2.3]의 (a)와 같이 종이컵에 에폭시와 하드너를 기준량에 따라 썩은 후 잘 저어준다. 그 다음에 첨가제를 첨가한 후 [그림 3.8]의 (c)와 같이 파우더를 넣고 잘 섞이도록 저어준 후에 거품이 발생하면 다른 컵에 천천히 부어 옮긴 후 거품을 제거한다.

[표 3.3] 압광페인트 제작 재료

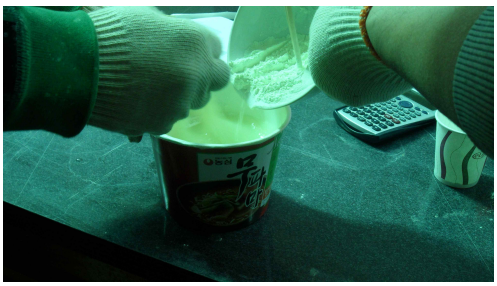
에폭시	하드너	첨가제	파우더
100g	30g	2g	19.5g



(a) 에폭시와 하드너 혼합



(b) 첨가제 첨가



(c) 파우더 첨가



(d) 거품 제거

[그림 3.8] 압광페인트 제작 과정

(5) 스프레이를 이용한 대면적 도포

(가) 페인트

압광페인트의 대면적 도포를 위해 2.3.1절에서 페인트의 배합에 따른 물성을 실험하여 최적의 배합비를 구하였다. 이렇게 제작된 압광페인트는 적절한 점도로 인해 고압분사장치로 뿜칠이 가능하다. [그림 3.9]는 제작된 압광페인트를 고압분사장치에 넣고 뿜칠이 가능한가를 테스트한 사진이다. 그림에서 보는바와 같이 적절한 점도로 인해 페인트가 분사됨을 확인하였다.



[그림 3.9] 압광페인트 분사

(나) 스프레이건

본 연구의 목적은 수작업으로 이루어지는 압광페인트의 기존 도포방식을 스프레이식으로 뿜칠하여 편리하고 효과적인 시공방법을 모색하는 것이 목표이다. 그에 따라서 스프레이를 이용하여 압광페인트를 분사해보았다. 스프레이는 2가지 종류가 있는데 [그림 3.10] (a)는 공기압을 통해 분사되는 흡상식 스프레이를 나타내며 [그림 3.10] (b)는 공기압과 중력을 이용한 중력식 스프레이를 나타낸 것이다.

본 연구에 사용된 스프레이의 사양은 [표 3.4]에 나타나 있으며 [그림 3.11]의 콤프레셔로 인해 고압분사가 가능함으로써 사람의 손으로 시공이 어려운 면적을 도포하는 것이 가능하다. [표 3.5]은 연구에 사용된 콤프레셔의 사양을 나타낸다. 스프레이를 사용한 도포방법은 넓은 분사로 작업의 효율성을 극대화 시키며 신속한 작업을 가능하게 하며 분사조절 장치로 인해 균일하고 일정한 양의 도포가 가능하다.



(a)흡상식 (b)중력식

[그림 3.10] 타입에 따른 스프레이 건

	흡상식	중력식
노즐사이즈	1.5mm	1.5mm
분사거리	180~200mm	180~220mm
분사에어압력	35psi	43psi
패턴길이	280mm	320mm
분사속도	250ml/min	270ml/min
에어소비량	220 ℓ /min	200 ℓ /min

[표 3.4] 스프레이건의 사양 비교

분당 air 생산량 (lpm)	480 ℓ /min
최대압력	0.8kgf/㎠ , 114/145psi
마력	HP: 4 kW: 3
분당회전수	1400rpm

[표 3.5] 콤프레셔의 사양



[그림 3.11] 콤프레셔

(다) 대면적 도포방법 비교

본 연구에서는 실제 구조물에 대해 압광페인트 대면적 적용 공법 개발이 주요 목표이다. 따라서 실제 구조물과 같은 실험체를 제작하여 수작업 도포방법과 흡상식, 중력식 스프레이를 이용한 도포방법에 대해 제작한 실험체에 직접 도포하여 어떤 방법이 효과적인 방법인가를 비교하고자 한다. [그림 3.12]는 수작업도포와 스프레이를 이용한 도포방법을 나타낸 사진이다.



(a) 수작업식 도포 장면



<흡상식>



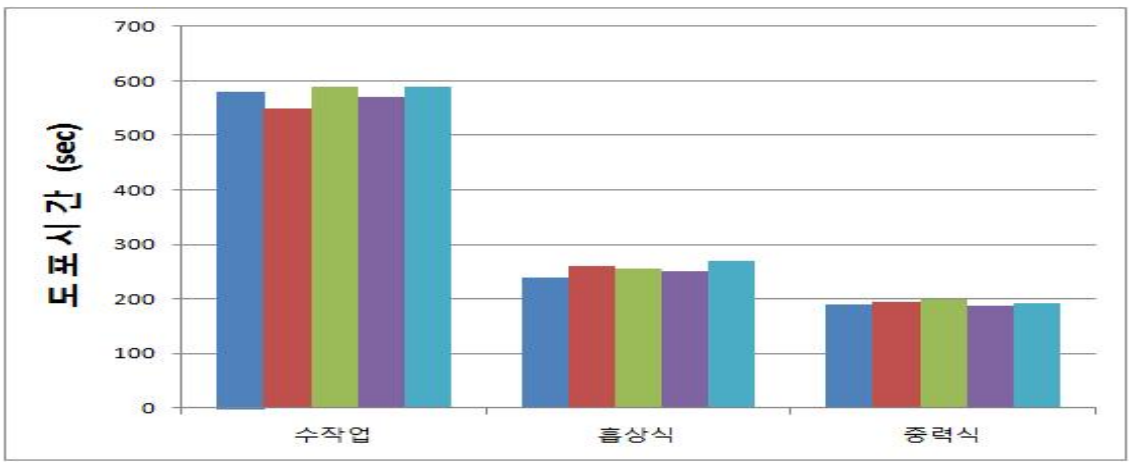
<중력식>

(b) 스프레이 분사식 도포 장면

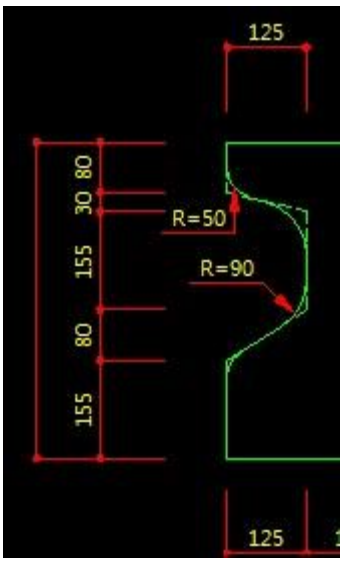
[그림 3.12] 압광페인트 도포 장면

① 도포시간 비교

도포 효율을 평가하기위해 우선 도포방법에 따른 소요시간을 측정하여 비교해 보았다. [그림 3.13]은 제작된 실험체에 압광페인트를 각각 도포했을 때 소요된 시간을 나타낸 그래프이다. [그림 3.14] 실험체의 단면에 각각 5번의 도포를 실시하였으며 도포면적은 약 66,700㎟ 이다. 도포시간은 스프레이 분사방법이 수작업 도포방식보다 2배 이상 효율적이었으며 중력식이 흡상식보다 30%정도 더 효율이 있는 것으로 나타났다. 이는 중력식 스프레이의 넓은 패턴길이로 인해 작업시간이 단축 되었다고 본다. [그림 3.15]는 흡상식과 중력식의 일정 분사거리에서의 패턴길이를 비교한 것이다.



[그림 3.13] 도포방법에 따른 도포시간비교



[그림 3.14] 도포단면 제원



(a) 흡상식 (b) 중력식

[그림 3.15] 도포면적 비교

형식별 도포 후 표면상태를 확인해보면 중력식 도포방식이 페인트면의 두께감과 발광특성을 충분히 나타낼수 있는 압광페인트의 두께로 적용되는 것을 확인할 수 있었다. 반면 흡상식은 저장통속에서 1차적으로 공기압이 교반되고 다시 노즐을 타고 외부분사시 2차교반이 일어나는 등 재료속 공기량이 많아져 페인트 자체에 기포가 상당수 포함되어 있으며 입자가 너무 곱게 되어 필요이상의 재료소모와 여벌의 도포가 필요한 상황이 발생하였다. 1회 도포시 흡상시보다 중력식이 양호한 표면과 두께를 나타내었다.

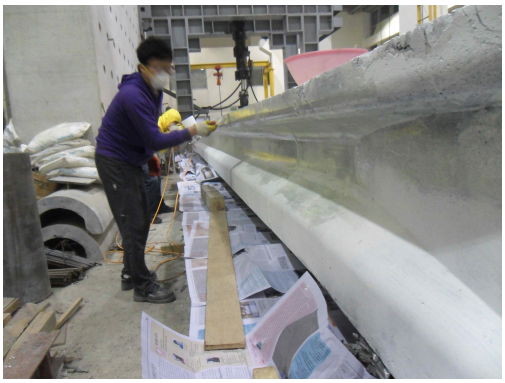
② 페인트 소모량

본 공법의 효율성을 확인하기 위하여 같은 면적에 각각의 방법으로 페인트를 도포해 소모량을 측정하였다. [그림 3.16]는 각각의 방법으로 20,000㎟ 만큼 도포하는 장면을 나타내는 사진이다. 각각의 도포방식에 따른 페인트 사용량은 [표 3.6]과 같다.

도포방법	페인트 소모량
수작업	608g
흡상식	572g
중력식	540g

[표 3.6] 도포방식에 따른 페인트 소모량

페인트 소모량을 비교해 본 결과 중력식 스프레이 도포방법이 타 도포방법보다 효율적인 것으로 나타났다.



(a) 수작업 도포



(b) 흡상식 스프레이 도포



(c) 중력식 스프레이 도포



(d) 도포완성

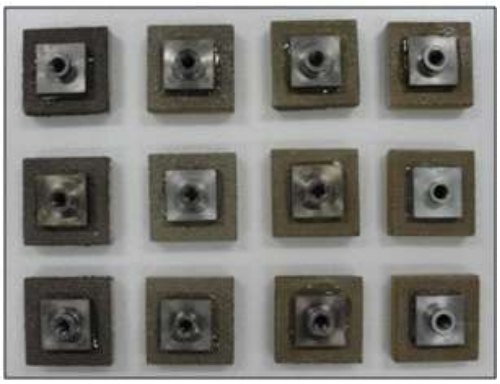
[그림 3.16] 도포방법에 따른 도포장면

④ 부착강도

본 실험에서는 도포방법에 따른 부착강도를 비교해 보고자 한다. 수작업 도포방식은 도포시간이나 재료사용량에 있어서 두 방식에 비해 비효율적이므로 본 실험에서는 흡상식, 중력식 스프레이를 이용한 도포방법에 따른 부착강도만 비교하도록 한다. [그림 3.17]은 부착강도 실험과 관련된 사진이며 [그림 3.18], [표 3.7]은 부착강도 실험 결과 값을 나타낸 것이다. 부착강도 시험 결과 중력식이 흡상식보다 콘크리트와의 부착성능이 월등히 우수함을 알 수 있었다.



(a) 부착강도 실험체 제작

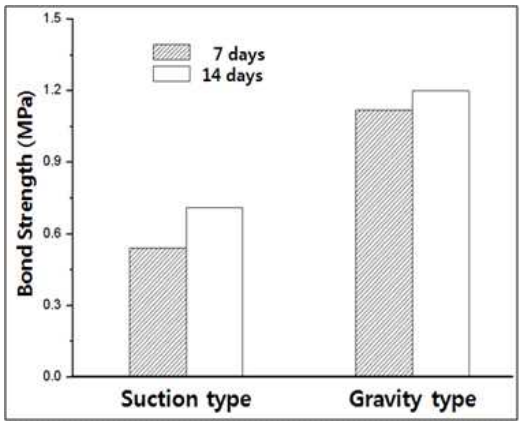


(b) 실험용 인장지그 부착



(c) 부착강도 실험

[그림 3.17] 부착강도 실험 과정



[그림 3.18] 흡상식과 중력식 부착강도

	흡상식	중력식
부착강도(7일)	0.5Mpa	1.1Mpa
부착강도(14일)	0.8Mpa	1.2Mpa

[표 3.7] 부착강도 실험결과

(라) 결론

수작업, 흡상식, 중력식 도포방식에 따라서 실제 구조물과 동일한 실험체에 도포를 해본 결과 수작업 도포보다 스프레이 분사 도포방식이 고르게 도포되었으며 도포 후에 흐름 자국이나 붓으로 칠했을 때의 자국이 없는 스프레이 분사 방식에서 균열검출이 더 용이했다. 또한 실구조물에 대해 압광페인트를 도포해 본 결과 현장적용이 가능하며 곡면뿐만 아니라 손으로 도포하기 힘든 지점이나 공극 까지 고압분사로 도포가 가능함을 확인하였다. 도포시간, 소모 페인트량, 부착강도 시험을 진행한 결과 수작업 도포방식 보다 스프레이를 이용한 도포방식이 효율성, 경제성 면에서 우수했으며 흡상식 스프레이보다 중력식 스프레이가 모든 면에서 더 효과 있음을 알 수 있었다.

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

제1절 개별 연구성과 설명

1. 저가형 균열 검출 시스템 구축 및 압광 영상처리 시스템 소프트웨어 개발

기존의 고비용의 복잡한 기계사용을 요구하는 각종 측정 및 진단방법 대신에 저비용으로 구조물 건전성 모니터링이 가능함에 따라 콘크리트 소재의 균열 시스템 변화에 따른 준-동적 파괴시의 균열길이 변화에 따른 정확한 평면변형 파괴인성 값의 측정이나 균열 전파시에 보고되고 있는 브리징 현상에 대한 정성적/정량적 해석문제 등을 일거에 해결할 수 있는 압광 소재를 이용한 구조물의 균열 안전진단장치 및 그 방법을 개발하였다. 압광페인트를 이용한 구조물의 균열 안전진단 장치는, ① 모니터링 대상 구조물과 ② 양단이 구조물에 고정, 결합되어 상기 구조물 표면과 인접되게 일정 간격의 길이방향 또는 폭방향으로 길게 설치되는 가이드레일, ③ 가이드레일에 슬라이딩 이동이 가능하게 결합된 상태에서 원격 또는 직접 조정에 의하여 이동 또는 정지가 가능한 모듈, ④ 일정구간에서 대상 구조물의 표면에 도포된 일정 두께의 압광소재를 관찰하며 구조물의 이상 유무 영상을 송출하는 마이크로 줌 또는 망원 렌즈가 부착되는 일반조도 및 저조도용 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 디지털 카메라, ⑤ 실시간 저장이 가능한 화상기록장치(DVR), ⑥ 구조물 표면의 압광소재에 자외선을 조사하는 UV LAMP, ⑦ 화상기록장치 및 UV LAMP를 직접 또는 원격조정하며 획득된 영상을 유선 또는 무선으로 받을 수 있는 소프트웨어로 구성되어 있다. 이러한 시스템을 통해 적용 구조물 표면에 도포된 압광소재의 발광부위를 탐지함으로써 대상 구조물의 균열 및 이상유무를 감지하여 구조물의 균열을 탐지하고 균열길이, 균열형상의 변화와 이에 따른 균열 첨단에서의 응력특성 변화를 연속적으로 기록하면서 분석하여 위험시 그 사실을 관리자에게 알려 주는 특징이 있다.

2. 압광페인트 내구성 및 내후성 평가

연구에서 반복하중 부가를 통한 피로시험을 적용함으로써 새롭게 개발된 압광 페인트에 대한 내구성 및 내후성 특성을 기본적으로 제시 하였다. 이러한 연구 목표는 압광 기술의 상업적 판로를 고려할 때 지극히 당연한 수순으로 판단되며, 특히 압광 기술의 기초 요소 기술이 확립됨에 따라 개발품의 내구성 및 내후성 평가 차원에서 조사를 실시하게 되었다. 시험결과 압광 페인트의 경우 건축 구조용 콘크리트 구조물 자체의 피로한도를 충분히 커버할 수 있는 20 MPa 수준의 피로 한도를 가지며, 동 응력 부가 수준에서 압광 발광 열화정도가 100 cycle 이하의 초기 발광량 대비 10000000 cycle 에서 95% 이상의 조도를 유지하는 우수한 압광 내구특성도 나타내었다. 여기에 더하여 전체 발광 파장 분포 또한 최대 피크점 및 파장 폭의 변화가 전혀 관찰 되지 않았으므로 반복 하중에 의한 압광 분말의 구조 왜곡 등도 실 사용시 고려할 필요가 없는 것으로 판단되었다. 마지막으로, 건축물의 외부 빗물 노출, 교량의 강물

침식등과 같은 내후 특성에 있어 습기 중에 존재하는 수소의 영향으로 인해 압광 소재의 발광 특성이 급격히 열화될 가능성을 고려하여 내피로, 내후성 및 양자의 복합 특성열화 현상에 대한 평가도 실시하였으나, 일반적으로 수행되는 부식 분위기하 피로 시험 결과에서도 수소 등의 영향으로 인한 SAO 분말의 형광 및 압광 특성 열화는 관찰 되지 않았다

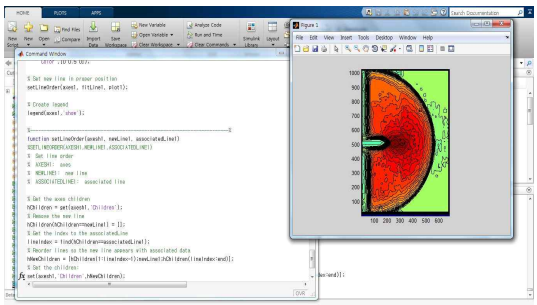
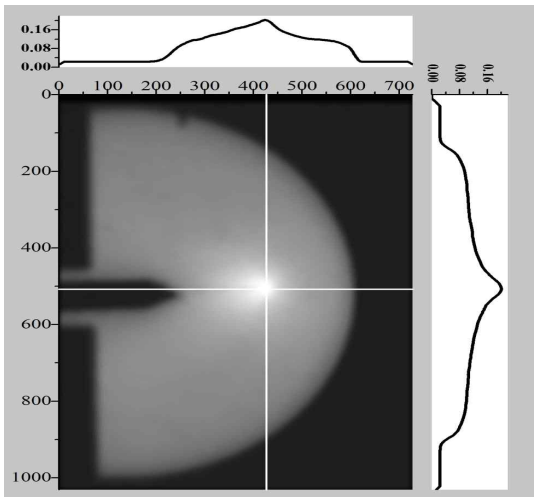
3. 실 구조물 적용 기술 개발

기존의 실내수준 실험체 규모에서 벗어나 실제 구조형식에 압광페인트를 적용시키기 위한 연구를 수행하였다. 기존의 연구수준인 소규모 실험체에 적용하였던 단순 붓칠과 같은 도포 형식으로는 실제 복잡하고 다양한 구조물에 효율적으로 적용하기 힘들고, 소요시간 및 품질에 대한 관리도 어려워진다. 이는 곧 제품의 성능저하와 함께 핵심요소인 압광페인트를 전체 시스템에 활용하고자 하는 의도와 멀어지게 된다. 이를 극복하고 해결하고자, 본 연구에서는 기존의 점성이 있는 액체 상태인 페인트 바인더의 조성분석 및 성분조절과 함께 범용적으로 대면적 페인트 도포에 사용되는 스프레이식 공법에 대한 적용성 연구를 수행하였다. 도포를 위한 장비는 공기압을 사용하는 방식의 스프레이를 사용하였으나 연구과정에서 형식별 효율성을 확인하였다. 무엇보다 중요한 것은 분사용 압광페인트의 성분조절인데 페인트의 바인더로는 10~75 중량%의 우레탄 레진과 Desmodur N-330, Xylene, Toluene으로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상으로 4~30 중량%의 경화제와 1~30 중량%의 SrAl2O4(Eu, Dy, Nd) 압광 세라믹 분말, 20~40 중량% 이하로 UV흡수제, 스립 및 레벨링제, 가소제, Xyele, Kocosol 100, Toluene, Butyle Acetate, Pigment로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상인 기타성분을 구비하는 압광 페인트를 사용한다. 이때, 우레탄 레진 대비 상기 압광 분말의 중량비의 하한값 이하에서는 압광 특성이 눈에 보일 정도가 되지 못하므로 감지가 불가능하며, 상한값 이상에서는 분말량이 지나치게 많아져서 페인트에 잘 섞이지 않고 덩어리로 뭉치게 되어 스프레이나 붓질이 잘 되지 않는다. 에폭시 레진과 이들 경화제는 각각 주재료와 경화제로 작용하는데, 주재료인 에폭시 레진의 함량이 증가하고 경화제의 함량이 감소하는 경우 페인트의 강도가 감소하게 된다. 반대로 주재료인 에폭시 레진의 함량이 감소하고 경화제의 함량이 증가하면 페인트의 강도가 증가하게 된다. 따라서, 두 성분의 비율로 페인트 점성을 조절하게 되는데, 스프레이 노즐을 통과하여 성능을 발현할 수 있는 페인트의 점성 및 강도를 최종적으로 도포하게 되는 모재의 특성을 고려하여 가장 최적의 압광특성을 발현할 수 있는 성분을 도출하여 스프레이 방식의 대면적 도포에 성공하였다. 기존의 붓칠 형식은 수직부재 및 중력방향의 표면에 적용하기 어려웠고, 페인트의 자중에 의한 중력의 영향을 받아 flow down 현상이 발생하여 균열 및 응력 탐지 시 불균일한 표면으로부터 데이터를 확인해야 하는 문제가 발생하였다. 반면, 이번 연구를 통해 수행된 분사형 스프레이식 공법은 노즐 지름의 조절에 따라 사용량, 도포시간, 입자의 입경 등을 조절하여 도포 후의 성능, 품질에도 우수한 성능효과를 보였으며, 도포대상면의 복잡하고 다양한 표면에 적용이 가능하였다. 또한, 패키지화 된 페인트를 휴대하여 장비를 이용한 도포로 시공시간 및 난이도를 현저히 감소시키면서 성능은 좋아진 것으로 보여진다.

제2절 핵심요소기술(Critical Technology Elements)별 성과물

1. 저가형 균열 검출 시스템 구축 및 압광 영상처리 시스템 소프트웨어 개발

과년도에서 수행한 연구내용을 바탕으로 실제 도시 인프라 구조물에 적용할 수 있는 형식의 구조물 건전성 모니터링 시스템(Hard Ware)과 실시간 영상의 이미지 프로세싱 및 검출 프로그램(Soft Ware)을 개발하였다.

<table>
<tr>
<td> 
  </td>
<td> 
  </td>
</tr>
<tr>
<td>저가형 균열 검출 시스템(H/W)</td>
<td>압광 영상처리 시스템(S/W)</td>
</tr>
</table>

2. 실 구조물 적용 기술 개발

콘크리트 구조용으로 성능과 시공성에 있어서 최적의 배합을 결정하여 압광페인트를 조성하였으며, 대면적 또는 다양한 표면에 압광페인트의 적용 및 시공이 가능하도록 장비를 구성하여 효율적인 대면적 도포기술을 성립하였다.

<table>
<tr>
<td> 
</td>
<td> 


 </td>
</tr>
<tr>
<td>콘크리트 구조용 압광페인트</td>
<td>압광페인트용 공기압 분사식 스프레이 공법</td>
</tr>
</table>

제3절 주요 연구성과

1. 1차년도 주요 연구성과

가. 논문게재 성과

게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분	SCI구분
		주저자	교신저자	공동저자				
2012	질소산화물 제거를 위한 광촉매 성능 개선 연구	김화중	김경민	이창준, 전기용, 손승욱	대한건축학회	v.28 n.03(2012-03) p51~p58	국내	비SCI

나. 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2011.7.25	Visualization of Crack Propagation in Unmanipulated Concrete Fracture Test using Mechano-Luminescent Paint	김지식	The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Stuructures Technology	국외 (China Dalian)

다. 특허 성과

출원된 특허의 경우					등록된 특허의 경우				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	등록연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
2011	압광소재를 이용한 구조물의 균열 안전진단장치 및 그 방법	금오공과대학교 산학협력단	대한민국	특허-2011-0115822					

라. 기술료 징수 현황(연구개발과제에 참여한 협동연구기관 및 참여기관 포함)

(단위 : 백만원)

기 징수액	해당연도 징수액	향후 징수액	합계

마. 사업화 현황

(단위 : 백만원)

사업화명	사업화내용	사업화 업체 개요				기매출액	해당연도 매출액	매출액 합계
		업체명	대표자	종업원수	사업화형태			

바. 인력활용/양성 성과

(1). 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
5명		5명			5명				5명

(2) 장・단기 연수지원 성과

장기 (2개월 이상)		단기 (2개월 미만)	
국내	국외	국내	국외

(3) 산업기술인력 양성 성과

프로그램명	프로그램 내용	교육기관	교육 개최회수	총 교육시간	총 교육인원

2. 2차년도 주요 연구성과

가. 논문게재 성과

게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분	SCI구분
		주저자	교신저자	공동저자				
2012	SAO 압광 소재의 발광 현상 및 그 기구에 대한 정량적 해석	티밀시나 수만	김지식	이창준 장일영	한국소성가공학회	제21권 제4호	국내	비SCI
2013	Detection of Reinforced Concrete Crack Using Mechano-Luminescence Paint	장일영	김성겸	김지식 안기용 조창근	Applied Mechanics and Materials	Vols. 316-317 (2013)	국외	비SCI
2012	Measuring high speed crack propagation in concrete fracture test using mechanolumine scent material	김화중	이창준	이재민 김지식	Smart Structures and Systems	Vol. 10 No. 6	국외	SCIE
2012	압광 페인트를 이용한 콘크리트 파괴시험시 골재크기가 균열성상에 미치는 영향조사	이창준	전기용	김화중 김지식	한국안전학회	Vol. 27 No. 6	국내	비SCI

나. 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2012.11.08	콘크리트 소재용 압광 페인트의 개발	장일영	한국콘크리트학회 2012 가을 학술대회	국내
2012.11.08	압광페인트를 이용한 균열 검출에 관한 연구	장일영	한국콘크리트학회 2012 가을 학술대회	국내
2013.01.18	Detection of Reinforced Concrete Crack Using Mechano-Luminescence Paint	장일영	2013 International Conference on Energy Engineering and Environment Engineering(ICEEEE 2013)	국외

다. 특허 성과

출원된 특허의 경우					등록된 특허의 경우				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	등록연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
2013	아크릴 레진을 이용한 압광 페인트	경북대학교 산학협력단	대한민국	10-2013-0019741					

라. 기술료 징수 현황(연구개발과제에 참여한 협동연구기관 및 참여기관 포함)

(단위 : 백만원)

기 징수액	해당연도 징수액	향후 징수액	합계

마. 사업화 현황 (단위 : 백만원)

사업화명	사업화내용	사업화 업체 개요				기매출액	해당연도 매출액	매출액 합계
		업체명	대표자	종업원수	사업화형태			

바. 인력활용/양성 성과

(1). 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
2 명		2 명			1 명	1 명			2 명

(2) 장・단기 연수지원 성과

장기 (2개월 이상)		단기 (2개월 미만)	
국내	국외	국내	국외

(3) 산업기술인력 양성 성과

프로그램명	프로그램 내용	교육기관	교육 개최회수	총 교육시간	총 교육인원

3. 3차년도 주요 연구성과

가. 논문게재 성과

게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분	SCI구분
		주저자	교신저자	공동저자				
2013	Detection of Reinforced Concrete Crack Using Mechano-Luminescence Paint	장일영	김성겸	김지식	Applied Mechanics and Materials	Vols. 316-317 (2013)	국외	비SCI
2014	Mechanoluminescence of SrAl204:Eu2+, Dy3+ under cyclic loading	김지식	김지식	Suman Timilsina, 손기선, 박운배	OPTICS LETTERS	39(6)	국외	SCI
2013	Dynamic torsional response analysis of mechanoluminescent paint and its application to non-contacting automotive torque transducers	김지식	김지식	김기우	Measurement Science and Technology	25	국외	비SCI
2013	Mechanoluminescent determination of the mode I stress intensity factor in SrAl204:Eu2+, Dy3+	김지식	김지식	이광호, Suman Timilsina, 장일영	Acta Materialia	61	국외	SCI
2014 (심사중)	New non-contacting torque sensor based on the mechanoluminescence of ZnS:Cu microparticles	김지식	김지식	김기우	senseors and actuators A; physical	-	국외	-

나. 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2013.4.13.	압광페인트를 이용한 RC보의 균열특성에 관한 연구	장일영	한국구조물진단유지관리 공학회	국내
2013.5.15.	압광페인트를 이용한 철근콘크리트의 균열검출 시스템 개발	장일영	한국콘크리트학회	국내
2013.10.24.	압광페인트를 통한 철근 콘크리트 보의 강도에 따른 균열특성 평가	장일영	대한토목학회	국내
2013.6.12.	Visualization of Quasi-static Crack Propagation in Splitting Test of Concrete by Using Mechano-luminescence	김지식	The 9th International Conference on Fracture & Strength of solids	국외
2013.9.11.	Evaluation of crack property on different strength of RC beams by M-L Paint	장일영	The 2nd International Conference on Mechano luminescence and Novel Structual Health Diagnosis Program	국외

다. 특허 성과

출원된 특허의 경우					등록된 특허의 경우				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	등록연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
2013	응력 확대 계수 측정 방법	경북대학교 산학협력단	대한민국	10-2013-0113985	2013	압광소재를 이용한 구조물의 균열 안전진단장치 및 그 방법	금오공과대학교 산학협혁단	대한민국	10-2013-0050641

라. 기술료 징수 현황(연구개발과제에 참여한 협동연구기관 및 참여기관 포함)

(단위 : 백만원)

기 징수액	해당연도 징수액	향후 징수액	합계

마. 사업화 현황 (단위 : 백만원)

사업화명	사업화내용	사업화 업체 개요				기매출액	해당연도 매출액	매출액 합계
		업체명	대표자	종업원수	사업화형태			

바. 인력활용/양성 성과

(1). 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
8 명		5 명	3 명		6 명	2 명			8 명

(2) 장・단기 연수지원 성과

장기 (2개월 이상)		단기 (2개월 미만)	
국내	국외	국내	국외

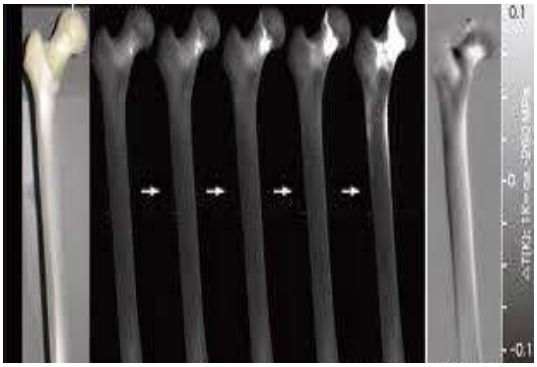
(3) 산업기술인력 양성 성과

프로그램명	프로그램 내용	교육기관	교육 개최회수	총 교육시간	총 교육인원

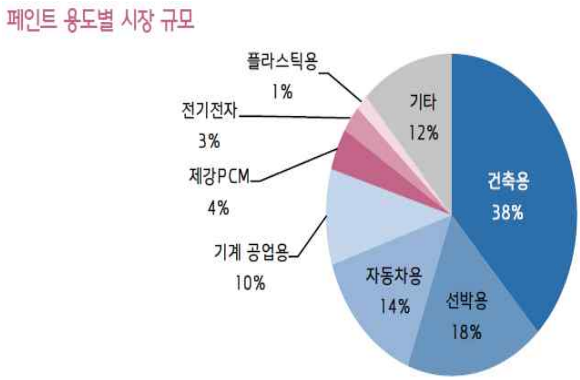
제4절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

1. 압광페인트의 시장 전망

페인트와 같은 도료제품은 1940년대 중반부터 중소기업을 중심으로 일반 건축용 도료 위주의 제품을 생산하기 시작하였으며, 1960년대 이후 중화학 공업의 발전에 따라 산업용도료를 생산하게 되었고, 1970년대 중반부터 국내도료 소비량의 대부분을 차지하던 대기업들이 자체 수요의 충당을 위해 도료생산에 참여, 이후 전방산업의 고도화에 따라 기술력이 주요 요인으로 부상하면서 대기업 위주로 시장구조가 변하게 되었다. 1980년대부터 전반적인 내수경기 호조와 올림픽 특수 등으로 급속히 성장해 왔으며, 1990년대에 들어서도 건설경기의 호황과 조선, 자동차, 전기전자 등 관련 산업의 성장에 힘입어 연평균 10% 내외의 꾸준한 성장세를 보여왔다. 그러나 외환위기에 따른 경기위축으로 1 9 9 8년 생산량은 전년 대비 약 28% 감소하였다. 1999년부터 회복세로 전환되어 2 0 0 0년까지 증가세는 유지하였으나, 건설경기 등 전방산업의 성장 정체로 성장세가 둔화되고 있다. 종합하면 국내 도료산업에서의 신규 진입은 국제적인 합작과 기술제휴를 통하여 성장하여 왔으며, 지배력 강화는 생산능력과 생산성 향상 및 고정거래처 확보를 통해 이루어져 왔다. 더불어 범용제품의 경쟁력 약화, VOC(Volate Organic Compounds: 휘발성 유기화합물) 규제 등의 환경변화로 양적인 성장에서 질적인 성장으로 전환을 시도하고 있는 상황이다. 압광 페인트는 질적인 성장에 관련하여 페인트 시장을 성장 시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 아직 성장단계로서 연구가 되고 있지만 여러 가지 성능을 통해 기술력이 입증되었고, 앞으로 더 많은 기술력을 통해 부족한 부분이 보완 될 예정이다. 압광 페인트는 여러 재료를 혼합하여 이전까지 부족했던 시각적 검출시스템을 보완해줄 수 있는 장점을 가지고 있다. 또 다른 방면에서 여러 산업분야에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.



< 압광 소재를 의학 분야에 이용 >

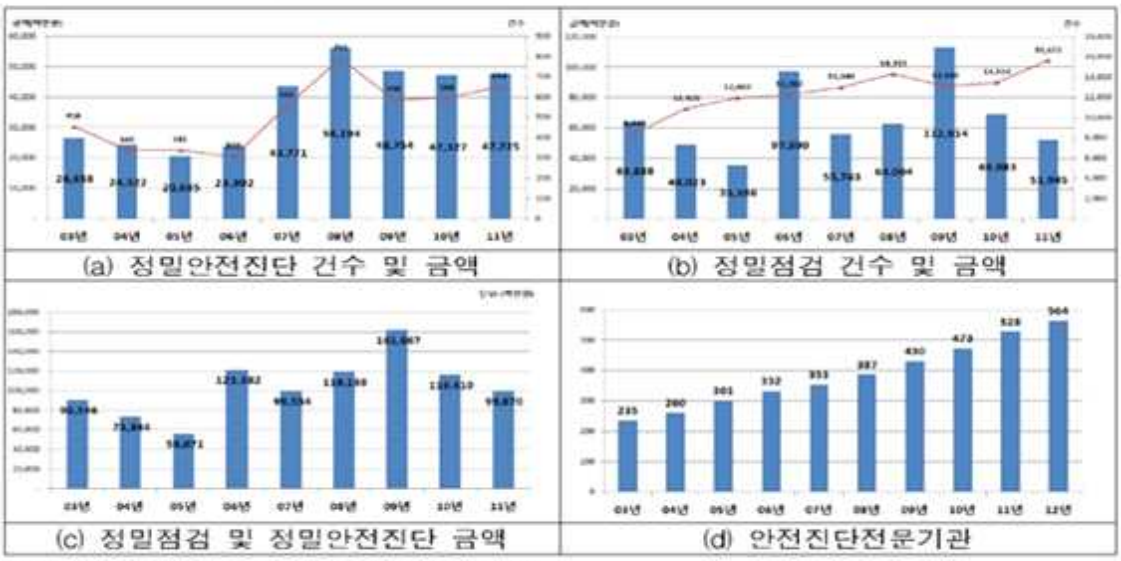


< 페인트 용도별 시장 규모 >

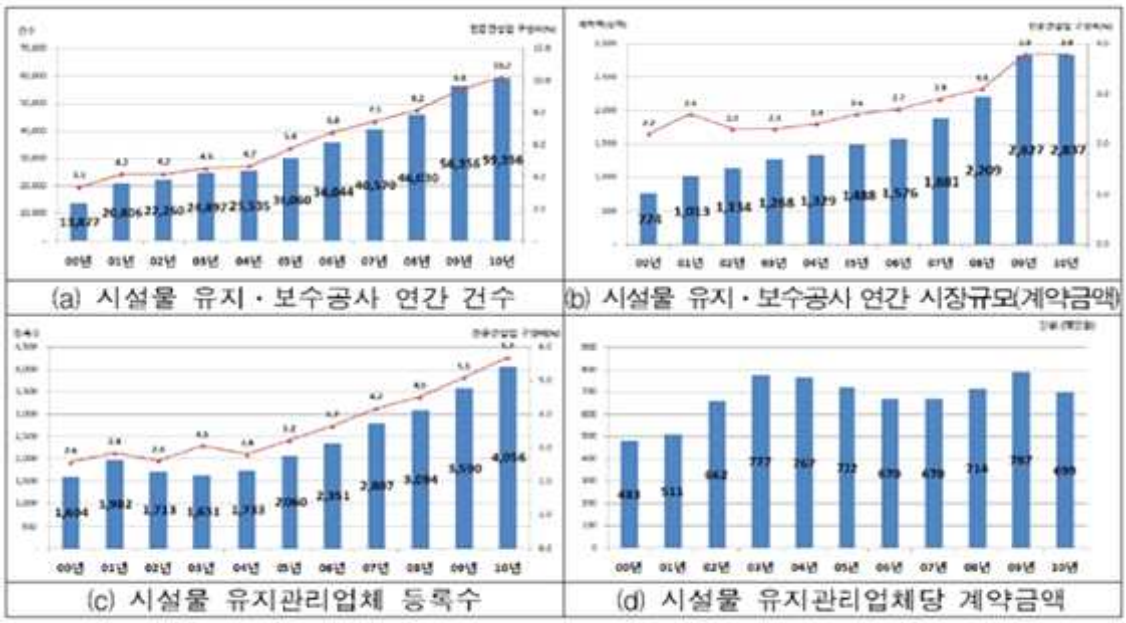
2. 모니터링 시스템의 시장 전망

가. 국내

국내 건물 안전진단 시스템 시장 규모는 2010년 1,030억원 규모에서 연평균 3.5% 성장하여, 2014년 1,223억원 규모로 확대될 것으로 예상된다. 그리고 진동이 많은 장소 또는 전자장(대형 전기기계, 고압선 근처 등)의 영향을 많이 받는 곳에 대한 방지책으로 건물 안전에 대한 민감도를 측정할 수 있는 시스템의 발전 관심도가 높아지고 있다.



< 안전점검 및 정밀안전진단 시장 >



※ 대한전문건설협회, 전문건설업 통계연보, 각 년도

< 시설물 유지관리 시장 >

나. 해외

세계 건물 안전진단 시스템 시장 규모는 2010년 52억 달러 규모에서 연평균 3.5% 성장하여, 2014년 59억 달러 규모로 확대될 것으로 예상된다. 해를 거듭할수록 많은 수의 해일, 지진 등 기상이변에 대한 건물의 붕괴, 화재 등을 미리 감지 할 수 있는 건물의 안전 센서의 기술 개발이 활성화 되고 있으며, 이에 따른 시장규모도 증가하고 있는 추세이다.

< 국내외 건물 안전진단 시스템 시장전망 >

구분	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	CAGR ('09~'15)
국내 (억원)	996	1,030	1,066	1,104	1,142	1,182	1,223	3.5%
세계 (억달러)	50	52	53	55	57	59	61	3.5%

제4장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

1. 1차년도

가. 정량적 성과지표 달성도

1차년도 성과지표 중 건설신기술 신청 1건은 기간상 다소 무리가 있는 것으로 판단되어 성과 달성은 하지 못하였지만 3차년도 성과지표로 옮겨놓았다.

연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치	달성치
압광(Mechano-luminescence) 소재를 이용한 콘크리트 소재용 압광도료 개발	국내논문게재	국내학술지게재 논문 2건	2건	20%	10%
	특허건수	국내 특허 출원 1건	1건	20%	20%
	건설신기술건수	건설신기술 신청 1건	1건	20%	0%
	인력양성	석사 2명	2명	40%(5명)	40%(5명)
총 계				100%	70%

나. 연구개발 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
고휘도 최적화 압광 성분 도출							■	■	■				10
최적화 성분 발광 기구 규명										■	■	■	10
최적 페인트 바인더 성분 도출							■	■	■				20
페인트 바인더 접착 특성 평가										■	■	■	15
압광 페인트 특성 예비 평가	■	■	■										10
응력속도 및 발광량 상관관계 정량화		■	■	■									35
총 진도율	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	100

■ 당초계획

——— 실 적

다. 연구개발 목표의 달성도

목 표	달성도 (%)	내 용
콘크리트용 고휘도 압광 소재 개발	20	▪ 고휘도 최적화 압광 성분 도출 ▪ 최적화 성분 발광 기구 규명
콘크리트용 투명 페인트 바인더 개발	35	▪ 최적 페인트 바인더 성분 도출 ▪ 페인트 바인더 접착 특성 평가
압광 페인트 예비도포 및 성능 표준화	45	▪ 압광 페인트 특성 예비 평가 ▪ 응력속도 및 발광량 상관관계 정량화

2. 2차년도

가. 정량적 성과지표 달성도

연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치	달성치
압광도료의 콘크리트 구조물 표면 도포 시공 및 응력평가 기술 개발	국내논문게재	국내학술지게재 논문 2건	2건	20%	20%
	국외논문게재	국내학술지게재 논문 1건	1건	20%	40%
	특허건수	국내 특허 출원 1건	1건	20%	20%
	인력양성	석사 3명	3건	40%	26.7%
총 계				100%	106.7%

나. 연구개발 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
압광 페인트 합성 및 도포 공정 개발					▒	▒	▒						20
압광 페인트 균열 특성 평가								▒	▒	▒			20
콘크리트 균열 검출 기법 개발					▒	▒	▒						20
콘크리트 균열 활동성 평가 기술 개발								▒	▒	▒			20
초고/저속 균열 검출 시스템 구축	▒									▒	▒	▒	10
압광 화상 처리 기법 개발		▒	▒	▒									10
총 진도율	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	▒	100

▒ 당초계획

▒ 실 적

다. 연구개발 목표의 달성도

목 표	달성도(%)	내 용
▪ 압광도료의 콘크리트 구조물 표면 도포 및 페인트 균열 특성 평가	40	▪ 압광 페인트 합성 및 도포공정 개발 ▪ 압광 페인트 균열 특성 평가
▪ 균열, 응력 등의 전체 거동평가 방법 표준화	40	▪ 콘크리트 균열 검출 기법 개발 ▪ 콘크리트 균열 활동성 평가기술 개발
▪ 연구용 균열 검출 시스템 개발	20	▪ 초고/저속 균열 검출 시스템 구축 ▪ 압광 화상 처리 기법 개발

3. 3차년도

가. 정량적 성과지표 달성도

연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치	달성치
최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템 개발	국내논문게재	국내학술지게재 논문 3건	3건	30%	-
	국외논문게재	국내학술지게재 논문 2건	2건	20%	50%
	소프트웨어	소프트웨어 개발 1건	1건	10%	10%
	건설신기술 신청	건설신기술 신청 1건	1건	20%	-
	인력양성	석사 4명, 박사 1명	5명	20%	16%
총 계				100%	76%

나. 연구개발 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
실시간 압광 영상처리 및 균열 검출 SW 개발					———	———	———	———	———	———			10
저가형 저조도 압광탐지 시스템 구축 및 적용	———	———	———								———	———	10
압광 페인트 내피로 특성 평가	———	———	———	———									20
압광 페인트 내후성 특성 평가	———	———	———	———								———	15
구조형식에 따른 적용성 평가					———	———	———	———	———	———			10
압광 페인트 대면적 적용 공정 개발	———								———	———	———	———	35
총 진도율	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	100

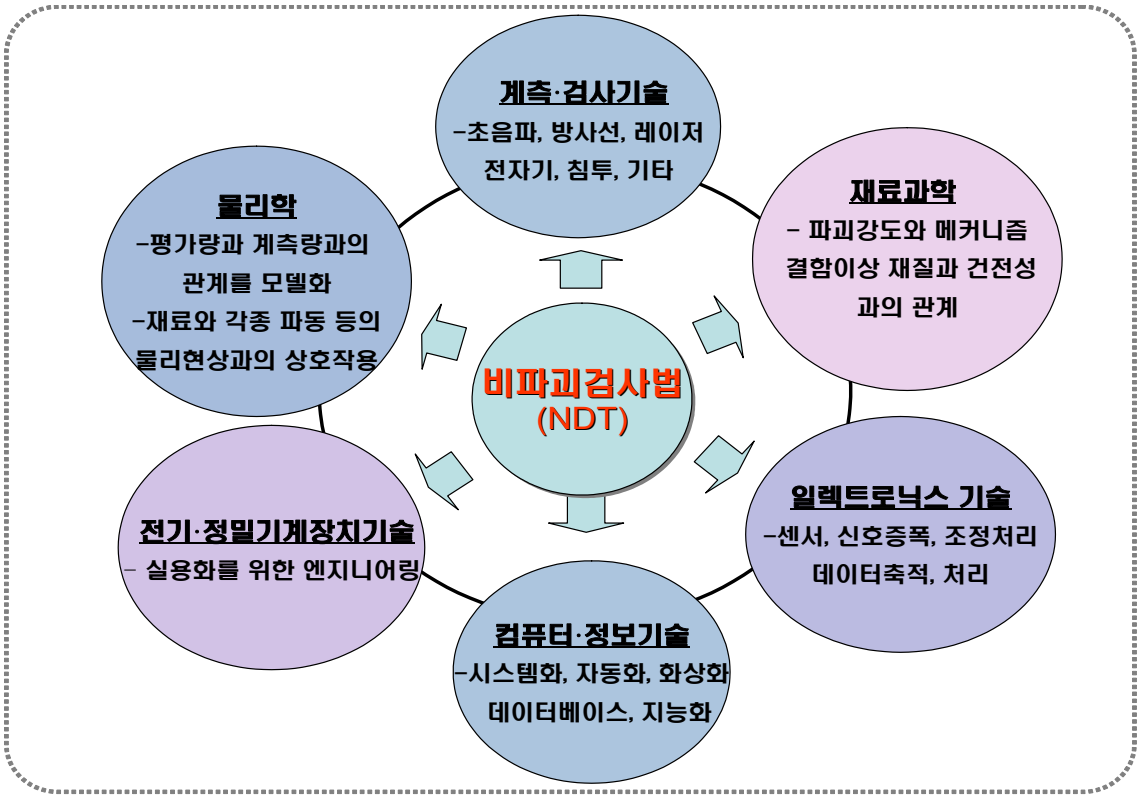
당초계획

실 적

다. 연구개발 목표의 달성도

목 표	달성도(%)	내 용
저가형 균열 검출 시스템 구축 및 압광 영상처리 시스템 소프트웨어 개발	90	▪ 실시간 압광 영상처리 및 균열검출 SW개발 ▪ 저가형 저조도 압광탐지 시스템 구축 및 적용
압광페인트 내구성 및 내후성 평가	90	▪ 압광페인트 내피로 특성 평가 ▪ 압광페인트 내후성 특성 평가
실 구조물 적용 기술 개발	90	▪ 구조형식에 따른 적용성 평가 ▪ 압광페인트 대면적 적용공정 개발

제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석



< 국내 비파괴검사법의 범위 >

기술적 관점에서 콘크리트 소재의 균열 시스템 변화에 따른 여러 가지 문제들 즉, 준-동적 파괴시의 균열길이 변화에 따른 정확한 평면변형 파괴인성 값의 측정이나 균열 전파 시에 보고되고 있는 결정립 브리징 현상에 대한 정성적/정량적 해석 문제 등도 일거에 해결할 수 있을 것이다. 이를 콘크리트 교량의 거더 및 덱 하단부, 응력상태가 복잡한 구조물의 기둥-보 접합부 등에 적용하여 구조물의 응력을 시각적으로 측정할 수 있을 것이다. 또한, 구조물의 최적 유지관리 및 사회적 안정성 보장, 경제성을 위한 구조물 연계 시스템이 될 것이며, 이

시스템은 고비용 저효율의 유선센서 기반의 기존 모니터링 시스템을 대체할 수 있는 새로운 기술이 될 것이다. 현재 재해에 대한 평가 및 예측은 대부분 기상정보, 수리/수문정보 등의 비구조적인 분야를 중심으로 이루어지고 있으며 구조물 유지관리를 위한 원천기술의 경우 선진국에 의존하고 있는 실정으로, 구조적 재해평가 및 예측 기술이 기대되며 국제 경쟁력을 확보할 수 있다. 이 시스템은 재난발생 초기에 구조물에 대한 복구를 신속히 시행함으로서 재난의 확산을 방지할 수 있는 중요한 기술이라 할 수 있다. 구조물 파손을 사전에 감지하기 위한 상시감시기술이며, 기존 비파괴검사의 한계를 극복하고, 진단의 신뢰도 향상을 위한 고감도・고기능의 신기술이라 할 수 있다. 본 연구가 성공적으로 수행될 경우 세계 최초로 구조용 콘크리트 구조물에서의 시각적 균열 검출 기법 및 활동성 평가 시스템을 모두 아우를 수 있는 새로운 학문적/산업적 표준을 제시할 것으로 기대 되며, 건설 구조물의 안전사고를 사전에 예방하여 국민의 생명을 보호하고, 안전관리의 기반이 되는 신호처리 기술을 첨단 IT 기술과 접목하여 유비쿼터스 컴퓨팅 기술에 적용함으로써 시설물 안전성 모니터링 기술을 선진국 수준으로 향상시킬 수 있다. 한국의 지능형 시설물 안전 및 유지관리 기술수준은 선진기술 국가 대비 76.2%에 불과하며 국내의 자격자에 대한 기술 능력은 전반적으로 50%이하로 파악되나,(기술격차 4.3년) 최첨단 압광소재를 활용한 IT 융복합 구조물 건전성 모니터링 시스템 개발은 선진국 기술과의 격차를 좁힐 수 있을 것으로 예상한다.

< 시설물 안전 및 유지관리 분야 지능형 기술수준 비교 >

국가	미국	EU	일본	한국	중국	세계 최고국 기술격차
기술수준	100.0%	99.7%	95.9%	76.2%	63.8%	4.3년

※ 국가 R&D 기술산업정보서비스에서 발췌('10년)

< 선진국과의 NDT 기술능력 비교 >

구분	검사기술	판독기술	설계능력	규격지식	장비수준	합계
미국	43	47.4	38.4	53.4	47.6	45.96
일본	40.6	42.1	34.9	44.5	46.2	41.66

< 압광소재를 이용한 의류 >



< 압광소재를 이용한 전구 >

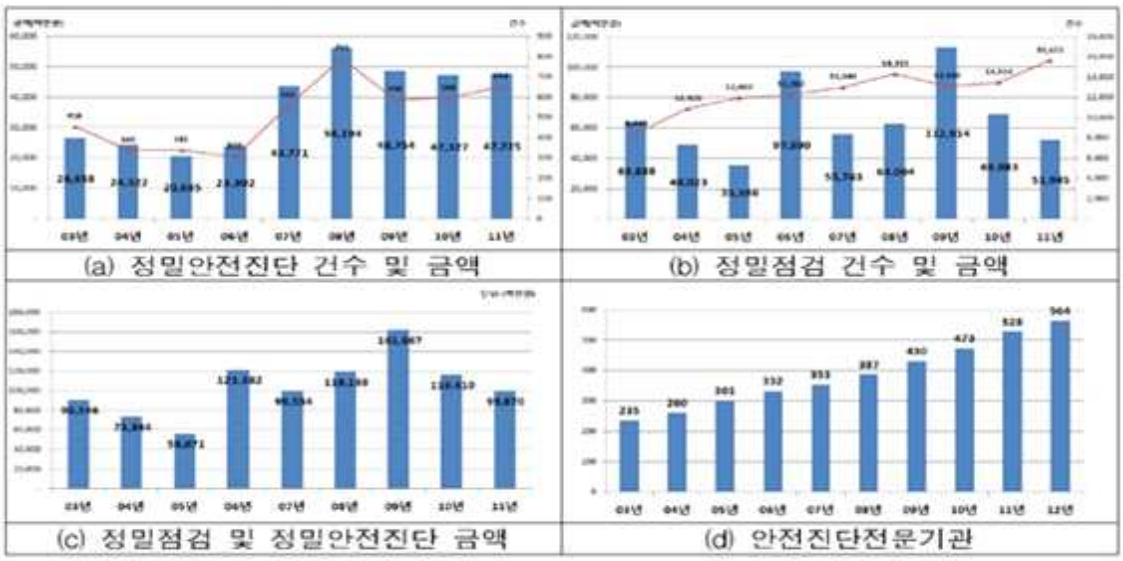


제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

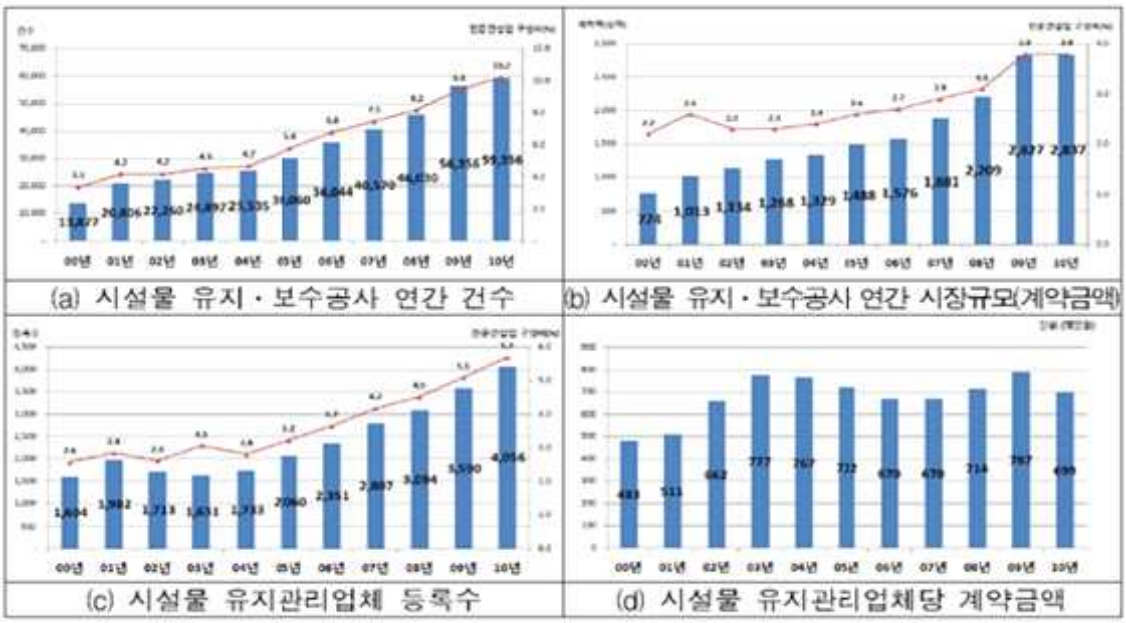
산업적인 측면에서 현재 구조용 소재들의 경우, 대부분의 응력을 지탱하는 구조물들이 대형화 또는 극박화 및 장수명화 함에 따라, 기존의 비파괴 시험법 등의 기술로는 피로 균열과 같은 결함 부를 검출하는 것이 기술적, 경제적으로 매우 어려워지고 있는 현실을 감안해 볼 때 압광 기술의 중요도는 간과할 수 없는 수준이다. 특히 기존의 연구현장 (또는 산업현장)에서 구조재의 안전을 확보하기 위하여 균열 또는 응력을 가시화하거나 균열을 검출할 수 있는 고비용의 복잡한 Instrumentation을 요구하는 방법들, 즉 strain gauge, 초음파, X-ray, 음향 방출법 등을 대체하여, 구조용 산업재료 분야에서 상당한 유지/보수비용의 절감을 가져올 수 있을 것이다. 다시 말해, 항상 가혹한 응력 조건에서 작동하는 기계부품이라든지 또는 큰 하중 하에 노출되어 있는 각종 구조물들의 신뢰성 평가를 위해 압광재료가 이용된다면 초저비용으로 안전진단을 실현할 수 있을 것은 자명한 일이다.

근본적으로는 균열 검출 및 균열 활동성 예측 기술 개발에 따른 중장기 고유기술 확보를

통해 국가주요기반 시설물의 안전관리 네트워크를 체계화함으로써 재해를 사전에 예방하여 피해 복구비의 사회적 재투자 유도를 할 수 있으며, 매년 시설물 유지관리(약 2조원/연)와 자연재해 피해복구(평균 5천억원/연)에 사용되는 비용을 절감할 수 있으며 기존 육안 검사 대비 투입 인력과 비용 등의 원가절감 효과와 공공시설, 기간산업설비 등의 안전성 검사로 대형사고 및 경제적 손실을 사전에 예방할 수 있다. 또한 기술능력 및 자질향상을 통해 인력의 전문성을 확보하고 신규 고용창출로 청년실업 문제 해소에 기여, 범용장비 및 첨단장비 개발을 통해 수입의존도가 높은 검사장비의 수입대체 효과 및 국제 시장진출을 견인, 기술개발과 첨단장비개발로 안전진단 및 검사 분야에 있어서 세계 5위 수준의 기술선진국으로 도약할 수 있는 발판을 마련할 수 있을 것이다.



< 안전점검 및 정밀안전진단 시장 >



※ 대한전문건설협회, 전문건설업 통계연보, 각 년도

< 시설물 유지관리 시장 >

제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

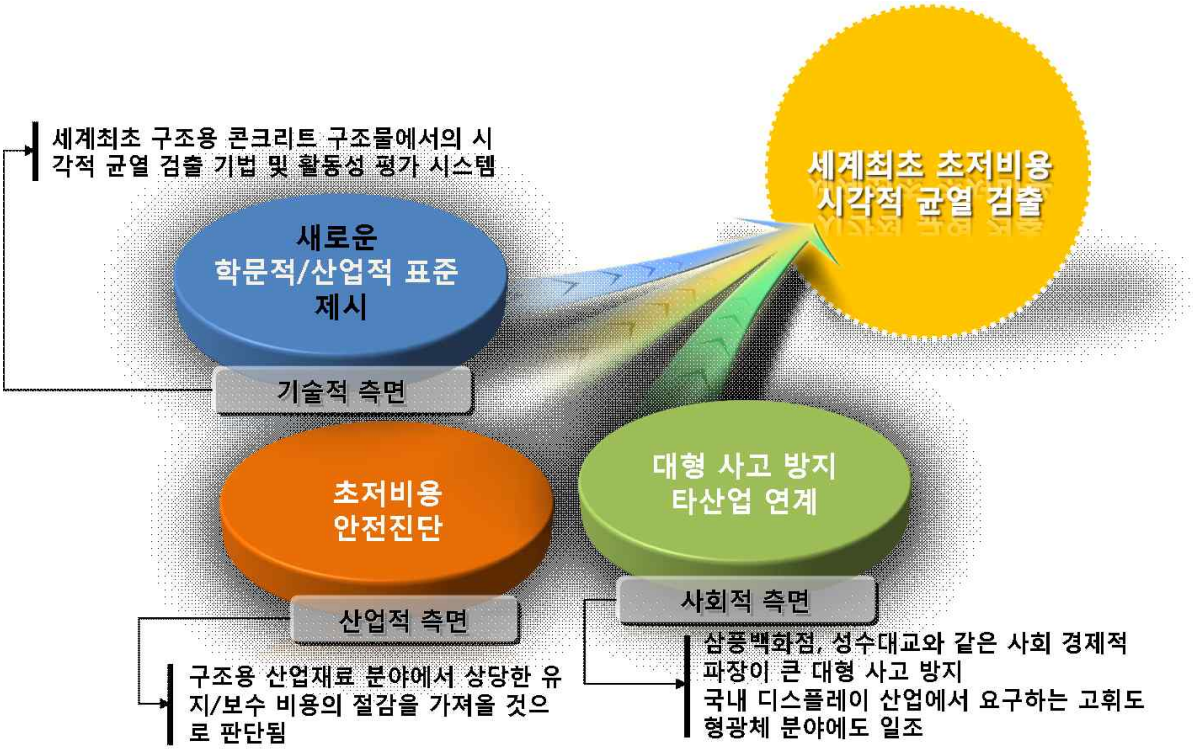
본 연구과제가 순조롭게 수행될 경우, 근본적으로는 균열 검출 및 균열 활동성 예측 기술 개발에 따른 중장기 고유기술 확보를 통해 대형 구조물들의 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하여 적절한 조치를 취하게 됨으로써, 삼풍백화점, 성수대교와 같은 사회 경제적 파장이 큰 대형 사고를 미연에 방지할 수 있을 것으로 기대된다. 세부적으로는 국내외의 페인트 관련 및 비파괴 검사 업체들과의 기술 개발 향상 및 발전이 가능하며, 국내 건설, 자동차 등 구조물/구조용 부품 등에 대한 건전성 및 안정성 계측, 평가 기술의 국제경쟁력 제고도 가능할 것으로 생각된다. 특히 본 연구 성과를 기반으로 강구조물 및 해양 플랜트 등의 안전진단 시스템 개발과 관련된 연구를 추가적으로 수행할 경우 현재 진행되고 있는 국가 간 자원개발 경쟁에서 상당한 우위를 점하게 할 수 있는 가능성이 매우 높다 할 것이다. 또한 압광 재료가 기본적으로는 형광 재료로부터 출발하므로 국내 디스플레이 산업에서 요구하는 고휘도 형광체 분야에도 일조할 수 있을 것으로 생각한다. 현재 관련 법에 명시된 비파괴검사기술위원회의 기능을 합리화하여 산·학·연·관 간 유기적 공조체제 구축과 이들 간 시너지 효과를 창출할 수 있다. 또한, 선진국 산업에 적용하고 있는 NDT 방법에 대한 국제규약 및 국제자격 등의 국내 적용체계와 기준이 미약한 실정이나, 국내의 IT산업과 연계하여 발전시키고 각기 다른 법령에 따라 기술기준이 되는 표준화된 모델이 될 것이다.

< 비파괴검사기술의 진흥 및 관리에 관한 법률 >

근 거
제4조, 동법 시행령 제4조에 의거, 위원장(과기부 차관)을 포함하여 11인 이상 15인 이하의 정부 및 민간위원으로 구성・운영

< 국내 NDT관련 법령 및 제도 >

구분	관련 법/제도	주관부처	비고
업종진입	• 비파괴기술진흥법 : 등록제 • 원자력법 : 허가제(일부 신고제)	과기부	법령제정
기술기준	• 도시가스사업법 • 고압가스안전관리법 • 액화석유가스안전 및 사업관리법 • 전기사업법 • 에너지이용합리화법 • 송유관안전관리법 • 집단에너지사업법 • 소방법 • 항만법 • 건설기술관리법 • 산업안전관리법 등 20여개	산자부, 건교부, 행자부, 해양부, 노동부 등	검사부위 및 물량, 검사방법
검사규격	• 한국산업규격(KS) : 58개 - 공통 4개, 방사선투과검사 20개, 초음파탐상검사 21개, 자분・침투탐상검사 8개, 와류탐상검사・기타 5개 • 국제표준화규격(ISO) : 76개 - 공통 8개, 방사선투과검사 20개, 초음파탐상검사 18개, 자분・침투탐상검사 19개, 와류탐상검사・기타 11개	산자부	결함판정 및 합부결정



< 연구개발 성과의 효과분석 >

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

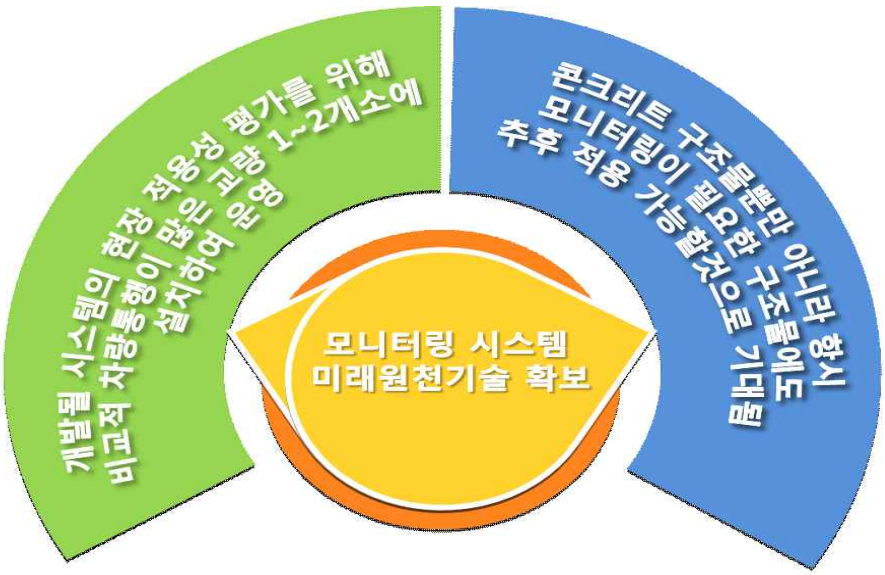
제1절 연구성과 향후 활용방안

본 연구과제의 성공적인 수행 후 확보될 수 있는 기술은 주지한 바와 같이, 콘크리트 재료에 최적화된 도료 형태의 압광 재료와 이를 이용한 콘크리트 구조물 표면의 균열 검출 및 응력분포의 가시화가 가능한 모니터링 시스템이다. 이들 결과물의 활용방안은 크게 현장 적용성과 미래원천기술 확보라는 두 가지 관점에서 그 중요성을 강조할 수 있다.

개발될 기술의 현장 적용은 구조물 안전성 모니터링 기술로 직접 연결된다. 예를 들어 콘크리트 교량 구조물의 표면 균열을 관찰하기 위해서는, 일반적으로 관찰자가 직접 구조물에 근접하여 육안 관찰 후 사진촬영 등으로 정보를 확보한다. 이러한 작업은 관찰자의 경험과 육안에 많은 의존을 하고 있으며, 작업의 난이성 (특히 교량 상판 하부의 경우) 때문에 많은 시간과 비용이 발생되며 또한 많은 경우 미세한 균열에 대한 정보를 확보하지 못하는 경우가 있다. 이러한 문제점들은 본 연구과제의 결과물인 모니트링 시스템으로 해결 되리라 생각되며, 개발될 시스템의 현장 적용성 평가를 위해 비교적 차량 통행이 많은 (AADT 5만대 이상 고속국도) 국내 콘크리트 교량 1~2개소에 이를 설치하여 운영한다면 기존 기술과의 경제성 평가와 원가계산, 현장적용 사례등을 바탕으로 신기술로의 가능성이 보인다.

또한, 참여기업(이엔이건설(주))과의 기술실시 계획도 고려할 수 있다. 다만 현재의 기술개발과 연구의 수준으로 미루어 볼 때, 신기술의 적용대상이나 적용환경, 사회적 중요성과 기술사용 목적을 고려한다면 현재의 연구개발 수준의 고도화 및 연구결과의 다양성, 기술적 노하우의 확보는 원천기술개발 단계에서의 상대적으로 미비한 실정임에 따라 정부 및 산학 주도의 다년간 집중적인 투자를 바탕으로 추가적인 연구개발이 필수라고 판단된다.

압광소재기술 개발은 미래원천기술 확보라는 관점에서 볼 때 그 중요성을 더욱 강조할 수 있다. 저가의 재료와 시스템으로 가능하게 되는 응력(또는 변형률)의 가시화 기술 자체가 구조물 안전성 모니터링 분야에서 오랜 동안 염원해 왔으며, 이는 기존에 존재하지 않았던 새로운 기술이다. 이 기술의 응용분야는 일반적인 콘크리트 구조물에 한정되지 않으며, 상시 모니터링이 필요한 구조물, 화학 플랜트, 원자력 구조물 등에도 추후 적용 가능할 것으로 기대한다. 이러한 관점에서 볼 때 기술 자체의 중요성은 부연할 필요 없이 중요하며, 현재 이 분야의 기술적 성숙도를 볼 때 본 연구진은 비교우위에 있으며, 이를 바탕으로 발전 가능한 미래 원천기술을 선점할 수 있다.



< 연구개발 성과의 활용방안 >

제2절 추가연구 필요성

본 연구개발 과제는 초기에 계획되어진 연구개발 계획서를 기준으로 진도 및 목표, 세부 연구내용을 수행하였으며 자료조사, 분석, 실험 등 연차별 목표를 만족하였다. 지속적인 연구개발을 통한 매 분기별 보고서를 작성하여 수행진도 및 내용, 목표를 주기적으로 검토하였으며, 이를 바탕으로 논문의 게재, 학술발표, 특허출원, 인력양성 등 현재 설정한 초기 목표치에 만족하는 정성적, 정량적인 연구개발 결과를 얻었다. 또한, 이러한 결과를 반영한 차년도 연구개발을 구성하여 연속적이고 지속가능한 연구개발 계획을 하였다. 현재, 1차년도 연구개발 목표인 자료조사 및 분석을 활용하여 콘크리트 구조용 압광소재바탕의 페인트를 개발하였으며 이를 통한 실내, 외 실험을 수행하고 분석하여 2차년도에 이르러 소재의 성능을 더욱 향상, 발전시켰고 콘크리트 구조물에 대한 적용성을 확인하였으며 3차년도에 이르러 경제성을 고려한 저가형 시스템 구축 및 실제 구조물 적용환경을 모사한 재료의 신뢰성 및 내구성, 시공성 등에 대한 연구를 수행하였다. 허나 본 기술은 첨단소재와 구조물 유지관리 기술을 바탕으로 개발된 첨단융합기술로서 국내는 물론 세계에서도 처음으로 시도하고 있는 연구개발이다. 따라서 이제 태동하기 시작한 첨단기술이며 문제점과 해결방안, 아이디어 또한 무궁무진하고 그에 따른 제반사항의 해결과 한계를 극복할 수 있는 연구과정도 충분히 필요한 실정이다. 압광관련 연구는 매년 관련학회가 증가하고 집회되며 적용분야(의학, 생물학, 기계, 건축, 우주, 소재 등)의 관련 연구논문이 증가, 발생하는 등 전 세계적으로 주목받고 있는 차세대 핵심기술 중 하나이다. 현재 그 선봉에는 일본의 막대한 자본력과 인력 구성으로 선점을 주도하고 있는 반면, 현재 국내에서는 소요기술에 대한 노하우를 갖는 국내 연구진의 추가연구가 투자에 부딪혀 정체되어 있는 실정이다. 충분한 연구인력과 기술, 노하우가 있기에 선두중인 연구팀과 충분히 경쟁력이 있다고 판단되며 추가적인 투자와 지원을 바탕으로 장기적으로 관련기술의 발전이 필수라고 판단된다.

제3절 전체 연구 및 향후 기술 관리방안 로드맵

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">구분 \ 년도</th><th colspan="3">1차년도('11.07.~'12.04.)</th><th colspan="4">2차년도('12.05.~'13.04.)</th><th colspan="4">3차년도('13.05.~'14.04.)</th><th rowspan="2">2014년</th><th rowspan="2">2015년</th><th rowspan="2">최종 성과물</th></tr>
<tr><th>3분기</th><th>4분기</th><th>1분기</th><th>2분기</th><th>3분기</th><th>4분기</th><th>1분기</th><th>2분기</th><th>3분기</th><th>4분기</th><th>1분기</th></tr>
<tr><td colspan="2">TRL 단계</td><td colspan="3">TRL 02</td><td colspan="4">TRL 03, TRL 04</td><td colspan="4">TRL 05</td><td>TRL 06 (계획)</td><td>TRL 07 (계획)</td><td rowspan="5">압광페인트를 이용한 콘크리트 구조물 균열 검출 시스템</td></tr>
<tr><td colspan="2">목표</td><td colspan="3">압광(Mechano-luminescence) 소재를 이용한 콘크리트 소재용 압광도료 개발</td><td colspan="4">압광도료의 콘크리트 구조물 표면도포, 시공 및 응력평가 기술 개발</td><td colspan="4">최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템 개발</td><td>고성능 압광페인트의 제조기술을 통한 현장적용 및 성능 평가</td><td>압광페인트를 이용한 콘크리트 구조물 균열 검출 시스템의 상용화</td></tr>
<tr><td colspan="2">콘크리트 재료에 최적화된 도료형태의 압광페인트
압광이론 기반 구조물 거동 평가 시스템
저가형 화상처리기반 상시 모니터링 시스템</td><td colspan="3">고휘도 최적화 압광 성분 도출
최적 페인트 바인더 성분 도출
페인트 바인더 접착 특성 평가
압광 페인트 특성 예비 평가
최적화 성분 발광기구 규명
응력속도 및 발광량 상관관계 정량화</td><td colspan="4">압광 페인트 합성 및 도포 공정 개발
압광 페인트 균열 특성 평가
콘크리트 균열 활동성 평가 기술 개발
초고/저속 균열 검출 시스템 구축
콘크리트 균열 검출 기법 개발
압광 화상 처리 기법 개발</td><td colspan="4">압광 페인트 내피로 특성 평가
압광 페인트 내후성 특성 평가
압광 페인트 대면적 적용 공정 개발
구조형식에 따른 적용성 평가
저가형 저조도 압광탐지 시스템 구축 및 적용
실시간 압광 영상처리 및 균열 검출 SW 개발</td><td>압광페인트 대량 제조시설 및 양산 시스템 구축, 재료 성능, 품질 향상 (성과 유형 : 재료 / 자재)
PILOT Test, 시작품 제작, 현장 적용, 품질관리, 공인인증 기관 성적 확보 (성과 유형 : 시스템)</td><td>신뢰성 평가 및 수요기업 평가, 경제성 경쟁력 확보, 표준화 및 가이드라인 제작 (사업화 / 상용화)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">내 용</td><td>핵심기술</td><td colspan="3">콘크리트 구조용 압광페인트 제조 및 배합 기술</td><td colspan="4">콘크리트 구조물 적용 및 해석 기술</td><td colspan="4">압광페인트를 이용한 콘크리트 구조물 균열 검출 시스템 구성 및 활용 기술</td><td>압광페인트 대량 제조 기술 및 현장적용 평가, 운영 기술</td><td colspan="2">사업화 및 상용화 기술</td></tr>
<tr><td>결과물</td><td colspan="3">논문게재 1건, 특허출원 1건, 전문인력양성 5명</td><td colspan="4">논문게재 4건, 특허출원 1건, 전문인력양성 2명</td><td colspan="4">논문게재 5건, 특허출원 1건, 전문인력양성 4명</td><td>특허등록 1건, 소프트웨어 개발 1건</td><td colspan="2">기술실시계약, 신기술 신청</td></tr>
<tr><td>수행기관</td><td colspan="3">금오공과대학교, 경북대학교, (주)신도이엔아이, 이엔이건설(주)</td><td colspan="4">금오공과대학교, 경북대학교, (주)신도이엔아이, 이엔이건설(주)</td><td colspan="4">금오공과대학교, 경북대학교, 이엔이건설(주)</td><td>금오공과대학교, 경북대학교, 이엔이건설(주)</td><td colspan="2">금오공과대학교, 경북대학교, 이엔이건설(주)</td></tr>
</table>

[참고 문헌]

[1] J. S. Kim, K. Kibble, Y. N. Kwon and K. S. Sohn, Opitical Letter 34 1915, 2009.

[2] J. S. Kim, Y. N. Kwon, N. Shin and K. S. Sohn, Appl. Phy. Lett. 90 241916, 2007.

[3] J. S. Kim, Y. N. Kwon, N. Shin and K. S. Sohn, “Visualization of fracture in alumina ceramics by mechanoluminesnence”, Acta Mater. 53 4337, 2005.

[4] Kaplan, M. F., ‘‘Crack Prop agation and the Fracture of Concrete,″ ACI Journal, Vol. 58, No. 5, pp.561-610, 1961.

[5] Jenq, Y. S. and Shah, S. P., “Fracture Tou ghness Criterion for Concrete,” Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 21, pp.1055-1069, 1985.

[6] Kobayashi, A. S., Hawkins, N. M., and Bradt, R. C., “Fracture Process Zone in Concrete and Ceramics a Matter of scaling,” in Toughening Mechanism Qu asi - Brittle Materials, edited by Shah, S. P., Kluwer Academic, pp.35-46, 1991.

[7] Cook, R. F., Fairbanks, C. J., Lawn, B. R., and Mai, Y.-W., “Crack Resistance by Interfacial Bridging: Its Role in Determining Strength Characterization,” Journal of Materials Research, Vol. 2, No. 3, pp.345-356, 1987.

[8] Cox, B. N. and Marshall, D.B., “Concepts in the Fracture and Fatigu e of Bridged Cracks,” ACTA Metallurgica et Materialia, 1994.

[9] 배성인, 한민구, “파괴역학 실험법”, 원창출판사, 1997.

[10] 김태식, 신동익, 진교홍, 진치섭, “초음파 기법을 활용한 콘크리트 구조물의 내부 균열 검출”, 부산대학교생산기술연구소, 생산기술연구소논문집, pp.55-62, 2002.

[11] G. R. Irwin, Rroc. Soc. exp. Stress Analysis, 16, 69-92 (1958).

[12] W. B. Bradley and A. S. Kobayashi, Exp. Mech., 10, 106-113 (1970).

[13] J. J. McGowan and C. W. Smith, Eng. Fracture Mech., M. A. Schroedl, 4, 801-809 (1972).

[14] C. W. Smith, Exp. Mech., 13, 539-544 (1973).

[15] P. S. Theocaris and E. E. Gdoutos , Eng. Fract. Mech., 7, 331-339 (1975).

[16] Elementary Engineering Fracture Mechanics, D.Broek, Martinus Nijhoff, Dordrecht, Neatherland, 1982.

[17] Walker CA, Exp Mech 34(4):281 - 299 (1994).

[18] H.P. Rossmanith, Exp. Mech. 19, 281-285 (1979).

[19] , Exp.Mech, [1], ().

[20] T.D. Dudderar and H.J. Gorman, Exp. Mech., 13, 145-149 (1972).

[21] Shan Q, Dewhurst RJ. Appl Phys Lett., 62, 2649 (1993).

[22] Nakano H, Nagai S. Jpn J Appl Phys, 32, 2540 (1993).

[23] Yoshimura T, Akiyama N, Yoshida M, Kobayashi T. Int J Jpn Soc Prec Eng., 29,

168 (1995).
[24] Zhang B, Li JB, Deng Y, Guan ZD. Smart Mater Struct., 10, 846 (2001).
[25] Kee-Sun Sohn, Soo Yeon Seo, Yong Nam Kwon, and Hee Dong Park, J. Am. Ceram. Soc., 85[3] 712-14 (2002).
[26] J.S. Kim, Y.N. Kwon, K.S. Sohn, Acta Mater., 51[20], 6437 - 6442 (2003).
[27] J.S. Kim, Y.N. Kwon, N. Shin, K.S. Sohn, Acta Mater., 53, 4337-4343 (2005),
[28] Kee-Sun Sohn, Duk Hyun Park, and Ji Sik Kimb, Journal of The Electrochemical Society,152[10], H161-H167 (2005).
[29] J.S. Kim, Y.N. Kwon, N. Shin, K.S. Sohn Appl. Phys. Lett., 90, 241916 (2007)
[30] J.S. Kim, K.Kibble, Y.N. Kwon, K.S. Sohn Opt. Lett., 34, 1915-1917 (2009),
[31] ASTM Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM E399, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
[32] Chandra BP 2011 Mechanoluminescence of Nanoparticles The Open Nanoscience Journal Vol. 5, pp. 45~ 58.
[33] T. Matsuzawa, Y. Aoki, N. Takeuchi, and Y. Murayama, J. Electrochem. Soc., 143, 2670-2673 (1996).
[34] T. Matsuzawa, Y. Aoki, N. Takeuchi, and Y. Murayama, J. Electrochem. Soc., 143, 2670 (1996).
[35] C.-N. Xu, H. Yamada, X. Wang, and X.-G. Zheng, Appl. Phys. Lett., 84, 3040 (2004).
[36] C. Li, Y. Adachi, Y. Imai, K. Nishikubo, and C.-N. Xu, J. Electrochem. Soc., 154, J362 (2007).
[37] F. Clabau, X. Rocquefelte, S. Jobic, P. Deniard, M.-H. Whangbo, A. Garcia, and T. LeMercier, Chem. Mater., 17, 3904 (2005).
[38] F. Clabau, X. Rocquefelte, T. Le Mercier, P. Deniard, S. Jobic, and M.-H. Whangbo, Chem. Mater., 18, 3212 (2006).
[39] B. P. Chandra and J. I. Zink, J. Chem. Phys., 73, 5933 (1980).
[40] B. P. Chandra, J. Lumin., 128, 1217 (2008).
[41] B. P. Chandra, S. K. Mahobia, P. Jha, R. K. Kuraria, S.R. Kuraria, R. N. Baghel, and S. Thaker, J. Lumin., 128, 2038 (2008).
[42] C.-N. Xu, M. Akiyama, P. Sun, and T. Watanabe, Appl. Phys. Lett., 70, 1639 (1997).
[43] C.-N. Xu, T. Watanabe, M. Akiyama, and X. G. Zheng, Appl. Phys. Lett., 74, 1236 (1999).
[44] H. Matsui, C.-N. Xu, and H. Tateyama, Appl. Phys. Lett., 78, 1068 (2001).
[45] Y. Liu and C.-N. Xu, J. Phys. Chem., B 107, 3991 (2003).

[46] C.-N. Xu, T. Watanabe, M. Akiyama, and X. G. Zheng, Appl. Phys. Lett., 74, 2414 (1999).

[47] H. Matsui, C.-N. Xu, Y. Liu, and H. Tateyama, Phys. Rev., B 69, 235109 (2004).

[48] H. Yamada, X. Fu, and C.-N. Xu, J. Electrochem. Soc., 154, J348 (2007)

[49] T. Matsuzawa, Y. Aoki, N. Takeuchi, and Y. Murayama, J. Electrochem. Soc. 143,2670(1996).

[50] F. Clabau, X. Rocquefelte, S. Jobic, P. Deniard, M.-H. Whangbo, A. Garcia, and T. LeMercier, Chem. Mater. 17,3904(2005).

[51] Y. Liu and C.-N. Xu, J. Phys. Chem. B 107,3991(2003),

[52] C.-N. Xu, H. Yamada, X. Wang and X.-G. Zheng, Appl. Phys. Lett. 84,3040-3042(2004)

[53] H. Yamada, X. Fu, and C.-N. Xu, J. Electrochem. Soc. 154,J362-J364(2007)

[54] B. P. Chandra, J. Lumin. 128,1217(2008).

[55] Walker CA, Exp Mech 34(4):281 - 299 (1994).

[56] B. P. Chandra, S. K. Mahobia, P. Jha, R. K. Kuraria, S. R. Kuraria, R. N. Baghel, and S. Thaker, J. Lumin. 128,2038(2008).

[57] ,K.-S. Sohn, S. Y. Seo, Y. N. Kwon and H. D. Park, J. Am. Ceram. Soc. 85,712(2002)

[58] J. S. Kim, Y. N. Kwon, N. Shin, and K.-S. Sohn, Appl. Phys. Lett. 90,241916.1(2007).

[59] A. J. Walton, Adv. Phys. 26,887(1977).

[60] B.T. Brady, and A. Glen, Nature 321,488(1986).

[61] J. I. Zink, G. E. Hardy, and J. E. Sutton, J. Phys. Chem. 80,248(1976).

[62] J. Botterman, K. Van den Eeckhout, I. De Baere c, D. Poelman,P.F. Smet, Acta Mater. 60,5494(2012).

[63] C.-N. Xu, in Encyclopedia of Smart Materials Vol.1, Schwarz M, ed. (Willey, New York, 2002), pp.190-201.

[64] J.S. Kim, Y.N. Kwon, K.S. Sohn, Acta Mater., 51[20], 6437 - 6442 (2003).

[65] J.S. Kim, Y.N. Kwon, N. Shin, K.S. Sohn, Acta Mater., 53, 4337-4343 (2005),

[66] Kee-Sun Sohn, Duk Hyun Park, and Ji Sik Kimb, Journal of The Electrochemical Society,152[10], H161-H167 (2005).

[67] J.S. Kim, Y.N. Kwon, N. Shin, K.S. Sohn Appl. Phys. Lett., 90, 241916 (2007)

[68] J.S. Kim, K.Kibble, Y.N. Kwon, K.S. Sohn Opt. Lett., 34, 1915-1917 (2009),

[69] ASTM Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM E399, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

[70] B. Harris , O. G. Braddell, D. P. Almon, C. Lefebvre, and J. Verbist, J. Mater. Sci.

28,3353(1993).
[71] J.D.Ferry, Viscoelasticpropertiesofpolymers(JohnWileyandSons,NewYork,1980).
[72] S. George, S. B. Mansoor, V. S. Eric, and A. Gaetano, Opt. Lett. 18,13(1993).
[73] H. Zhang, and S. A. Billings, Mechanical Systems and Signal Processing 9,657(1995).
[74] V. K. Chandra, B. P Chandra, and P. Jha, Appl. Phys. Lett. 102,241105.1(2013).
[75] 김광백 , “퍼지 추론 기법과 SOM 알고리즘을 이용한 콘크리트 슬래브 표면의 균열 추출”, 대한전자공학회, 전자공학회논문지, pp.38-43, 2012.
[76] Kyeong-Ho Yoon, Byung-Jae Choi, Kwang-Baek Kim, “영상 처리 기법을 이용한 콘크리트 슬래브 표면의 균열 추출 및 분석”, 한국지능정보시스템학회, 한국지능정보시스템학회 학술대회논문집, pp.327-335, 2006.
[77] 진치섭, 신동익, 장종철, “음향방출기법을 이용한 모르터와 콘크리트 보의 균열의 평가와 검출”, 부산대학교 생산기술연구소, 생산기술연구소논문집, pp.25-30, 2000.
[78] 류치영, 박중완, 권일범, 홍창선, 김천곤, “광섬유센서를 이용한 복합적층판의 모재균열 검출”, 한국복합재료학회, 한국복합재료학회지, pp.27-40, 1996.
[79] 변태보, “차영상기법을 이용한 균열검출시스템의 설계 및 구현”, 제주대학교 산업대학원, 2002.
[80] 이방연, “화상처리 기법과 신경회로망을 이용한 콘크리트 표면 균열 검출 시스템 개발”, 한국과학기술원, 2003.
[81] 한찬수, “콘크리트 균열의 특성길이”, 단국대학교, 2007.
[82] 티밀시나수만, 이창준, 장일영, 김지식, “SAO 압광 소재의 발광 현상 및 그 기구에 대한 정량적 해석”, 한국소성가공학회, 한국소성가공학회지, 제21권, 제4호, pp.246-251, 2012.
[83] 한국콘크리트학회, “콘크리트 표준시방서 해설”, pp.95-121, 2004.
[84] 이재민, “압광 소재를 이용한 콘크리트 파괴실험 시 균열진행의 시각화”, 경북대학교, 2012.

[부 록]

첨단도시개발사업 | 11첨단도시C02

최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 균열 및 응력변화 예측 시스템 매뉴얼

금오공과대학교, 경북대학교
연구책임자 : 장 일 영

목 차

TABLE OF CONTENTS

제 1 장 최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템의 개요 ····· 1

1.1 특징 ····· 1
1.2 구성 ····· 2
1.3 적용범위 ····· 4

제 2 장 최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템의 구성 ····· 5

2.1 압광페인트 성분 ····· 5
2.2 화상기록장치 구성 ····· 5
2.2.1 디지털 화상 카메라 ····· 5
2.2.2 디지털 화상 획득 보드 ····· 8
2.2.3 외부 신호 획득용 보드 ····· 8
2.3 UV LAMP ····· 9
2.4 Record ····· 9

제 3 장 최첨단 압광소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템의 상세사항 ····· 10

3.1 개요 ····· 10
3.2 압광페인트 제조 ····· 12
3.3 압광페인트 도포과정 ····· 13
3.4 가이드레일 설치과정 ····· 14
3.5 화상기록장치 설치과정 ····· 15
3.6 램프설치과정 ····· 16
3.7 균열데이터 분석과정 ····· 17
3.8 관리자 균열경고과정 ····· 17

제 4 장 최첨단 압광 신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템을 이용한 실험 ····· 19

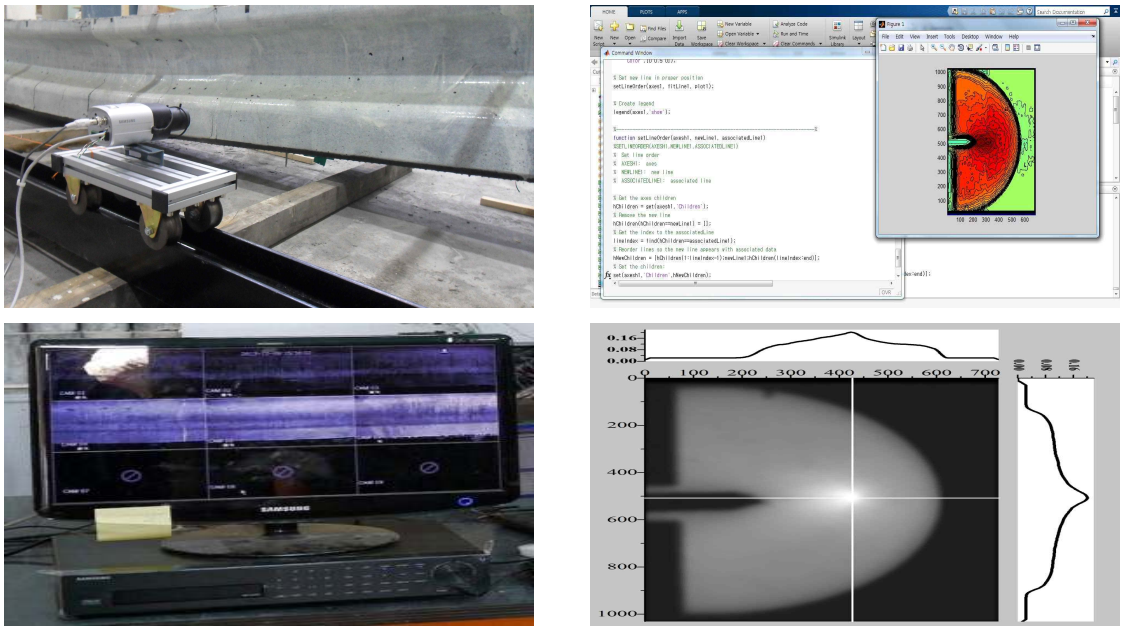
4.1 개요 ····· 19
4.2 실험체 제원 ····· 19
4.3 설치 및 계측 ····· 21
4.4 결과 ····· 24

제 5 장 최첨단 압광 신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의
응력변화 예측 시스템을 이용한 응력 및 균열해석 ····· 26
5.1 균열 첨단 응력 속도 가시화 ····· 26
5.2 인장 유효응력 가시화 ····· 28
5.3 응력확대계수 결정 ····· 30
5.3.1 편차응력 ····· 30
5.3.2 정수압 응력 ····· 33
5.3.3 균열 길이 ····· 34
5.3.4 균열 위치 ····· 35

제 6 장 무선프로그램을 이용한 데이터 획득 ····· 36

제 1장. 최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템의 개요

저가형 균열 검출 시스템과 압광 영상처리 시스템을 통해 실제 도시 인프라 구조물에 적용할 수 있는 형식의 프로그램을 개발하였다.



저가형 균열 검출 시스템(H/W) 압광 영상처리 시스템(S/W)

그림 1.1 저가형 균열 검출 시스템 및 압광 영상처리 시스템 소프트웨어

1.1 특징

● **저비용 콘크리트 구조물 건전성 모니터링**

현재 콘크리트 구조를 비롯한 건설 구조물은 대형화 및 장수명화 함에 따라, 기존의 비파괴 시험법 등의 기술로는 피로 균열과 같은 결함부를 검출하는 것이 기술적, 경제적으로 매우 어려워지고 있는 현실이며, 압광소재 기술은 저비용의 건전성 모니터링 시스템을 구현하는데 필요한 기술적 경제성을 제공한다.

● **사회 기반시설 구조물의 안전성 확보**

저비용의 구조물 건전성 모니터링이 가능함에 따라, 주어진 비용으로 보다 많은 사회 기반 시설 구조물의 안전점검이 가능하며, 따라서 이들 대형 중요 구조물들의 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하고 적절한 조치를 취함으로서 사회 경제적 파장이 큰 대형 사고를 미연에 방지할 수 있다.

● **콘크리트 균열 거동 연구의 중요성**

학문적인 관점에서도 콘크리트 소재의 균열 시스템 변화에 따른 여러 가지 문제들 즉, 준-동적 파괴시의 균열길이 변화에 따른 정확한 평면변형 파괴인성 값의 측정이나 균열 전파 시에 보고되고 있는 브리징 현상에 대한 정성적/정량적 해석 문제등도 일거에 해결할 수 있다.

● **관련기술 선도로 국가 경쟁력 향상**

압광소재 기술은 그 성능상 우수성에도 불구하고 현재 이를 연구하고 있는 국내외 연구팀은 매우 희소하며, 현재 그 연구 성과가 본격적으로 나오기 시작하는 시점임. 건설구조물에 적용한 사례는 현재 없으며, 성공적인 과제 수행의 결과는 압광소재를 이용한 구조물 안전성 평가라는 분야에서 국내외 선두의 기술을 확보할 수 있다.

1.2 구성

(1) 중고속 균열 관찰 시스템

시스템은 크게 디지털 카메라, 화상 획득 보드, 사용자 컴퓨터로 구성되어 있다.

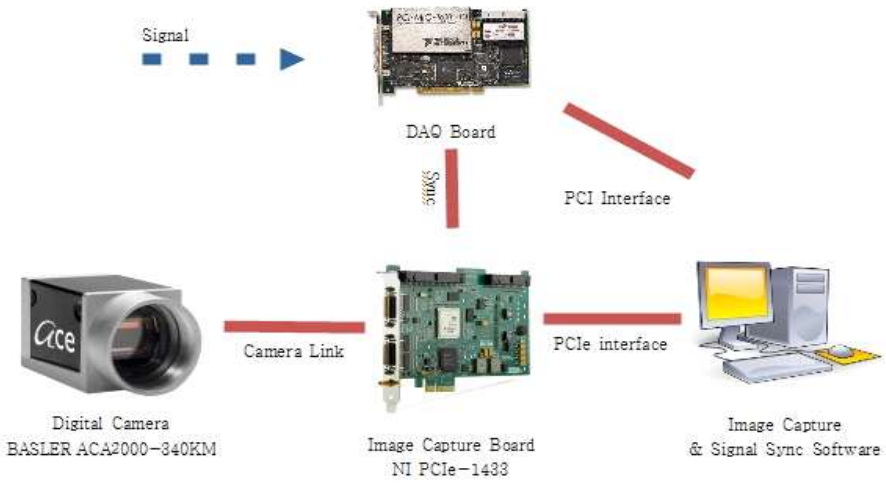


그림 1.2 중고속 균열 관찰 시스템의 구성

(2) 디지털 화상 획득 및 외부신호 동기화 소프트웨어

균열의 디지털 화상 획득은 최종적으로 사용자 컴퓨터의 구동 프로그램에서 관리한다. 2048x1024의 고해상도 화상을 초당 340PFS의 속도로 획득하기 위해서는 대용량의 메모리가 필요하며, 실제 사용자 컴퓨터의 메모리의 한계에 따른 촬영시간의 제약을 받는다. 이 문제를

효율적으로 해결하기 위하여 프로그램 개발시 링버퍼를 사용하였으며, 프로그램은 촬영 종료 시각을 기준으로 정해진 수의 화상을 기록한다.

디지털 화상 획득 구동 프로그램은 Visual C++프로그램으로 작성이 되었으며, 화상 획득보드 제조사에서 제공하는 구동 드라이브 IMAQ를 이용하였다. 아래 [그림 1.2]에 이 디지털 화상 획득 구동 구동프로그램의 사용자 인터페이스를 보인다.

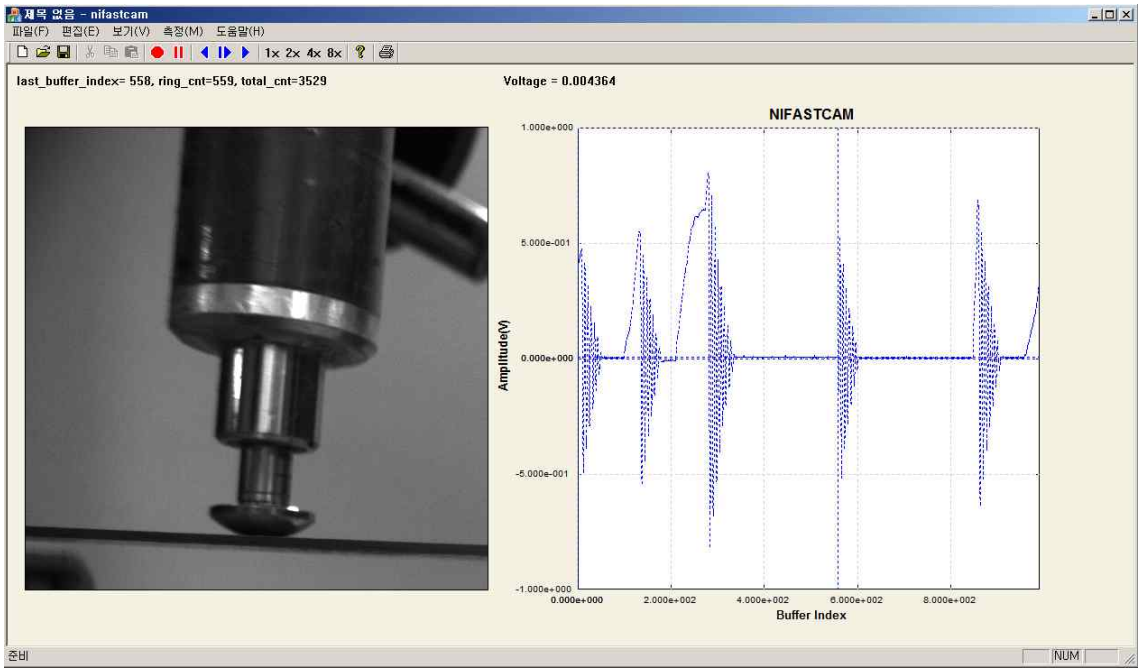


그림 1.3 디지털 화상 획득 구동 구동프로그램의 사용자 인터페이스

사용자 인터페이스의 좌측에 현재 획득중인 이미지를 보여주며, 우측 그래프에 외부 신호의 변화를 실시간으로 보여준다.

화면에 예시로 보여주는 이미지는 다음 그림에서 보이는 얇은 캔틸래버 보(금속 자)에 LVDT를 설치하여 캔틸레버 보가 진동할 때의 처짐 변위를 시간에 대한 함수로 측정하는 예시장면이다. 이 예시에서의 LVDT 변화 신호의 최종 형태는 전압의 변화이며, 화중측정을 위한 로드셀 신호 도는 변형률 측정을 위한 변형률 게이지 신호로 대체할 수 있다.

1.3 적용범위

(1) 기술적 적용범위

콘크리트 소재의 균열 시스템 변화에 따른 여러 가지 문제들 즉, 준-동적 파괴시의 균열길이 변화에 따른 정확한 평면변형 파괴인성 값의 측정이나 균열 전파 시에 보고되고 있는 결정립 브리징 현상에 대한 정성적/정량적 해석 문제 등도 일거에 해결할 수 있을 것이다. 이를 콘크리트 교량의 거더 및 덱 하단부, 응력상태가 복잡한 구조물의 기둥-보 접합부 등에 적용하여 구조물의 응력을 시각적으로 측정할 수 있을 것이다. 성공적으로 수행될 경우 세계 최초로 구조용 콘크리트 구조물 에서의 시각적 균열 검출 기법 및 활동성 평가 시스템을 모두

아우를 수 있는 새로운 학문적/산업적 표준을 제시할 것으로 기대 된다.

(2) 산업적 적용범위

현재 구조용 소재들의 경우, 대부분의 응력을 지탱하는 구조물들이 대형화 또는 극박화 및 장수명화 함에 따라, 기존의 비파괴 시험법 등의 기술로는 피로 균열과 같은 결함 부를 검출하는 것이 기술적, 경제적으로 매우 어려워지고 있는 현실을 감안해 볼 때 압광 기술의 중요도는 간과할 수 없는 수준이다. 특히 기존의 현장에서 구조재의 안전을 확보하기 위하여 균열 또는 응력을 가시화하거나 균열을 검출할 수 있는 고비용의 복잡한 Instrumentation을 요구하는 방법들, 즉 strain gauge, 초음파, X-ray, 음향 방출법 등을 대체하여, 구조용 산업재료 분야에서 상당한 유지/보수비용의 절감을 가져올 수 있을 것이다. 다시 말해, 항상 가혹한 응력 조건에서 작동하는 기계부품이라든지 또는 큰 하중 하에 노출되어 있는 각종 구조물들의 신뢰성 평가를 위해 압광재료가 이용된다면 초저비용으로 안전진단을 실현할 수 있을 것은 자명한 일이다.

(3) 사회적 적용범위

근본적으로는 균열 검출 및 균열 활동성 예측 기술 개발에 따른 중장기 고유기술 확보를 통해 대형 구조물들의 비정상적인 결함 등을 조기에 진단하여 적절한 조치를 취하게 됨으로써, 삼풍백화점, 성수대교와 같은 사회 경제적 파장이 큰 대형 사고를 미연에 방지할 수 있을 것으로 기대된다. 세부적으로는 국내외의 페인트 관련 및 비파괴 검사 업체들과의 기술 이전 및 지도가 가능하며, 국내 건설, 자동차등 구조물/구조용 부품 등에 대한 평가 기술의 국제경쟁력 제고도 가능할 것으로 생각된다. 또한 압광 재료가 기본적으로는 형광 재료로부터 출발하므로 국내 디스플레이 산업에서 요구하는 고 휘도 형광체 분야에도 일조할 수 있을 것으로 생각한다.

제 2장. 최첨단 압광신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템의 구성

최첨단 압광소재를 활용하여 콘크리트 구조물의 균열을 탐지하고 균열길이, 균열형상의 변화와 이에 따른 균열 첨단의 응력상태를 압광소재의 특성변화를 통하여 총제적, 세부적이고 연속적으로 기록할 수 있는 장치이다.

2.1 압광페인트 성분



그림 2.1 압광페인트 성분

압광소재는 30~90중량%의 에폭시 레진과 제파민 또는 이를 포함하는 9~30중량%의 경화제와 1~30중량%의 SrAl2O4(Eu, Dy, Nd) 압광 세라믹 분말과 10중량%이하로 UV 흡수제, 스립 및 레벨링제, 가소제, Xyele, Kocosol 100, Toluene, Butyle Acetate, Pigment로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상인 기타성분으로 이루어지며 상기 압광 세라믹 분말 중량(레진 중량+경화제 중량)의 비가 0.5:9.5 ~ 5:5의 범위내인 압광 페인트이고 구조물로는 콘크리트를 사용한다.

2.2 화상기록장치 구성

2.2.1 디지털 화상 카메라

균열 관찰 시스템의 핵심 구성요소는 가시광선 화상을 획득할 수 있는 디지털 화상 획득용 카메라이다. 여러 가지 사용모델들이 있으나, 적절한 성능을 제공하면서 소형인 디지털 화상 획득 카메라로서 BASLER ACA2000-340KM과 SAMSUNG Boxed SCB-3003 모델을 사용하였다.

(1) SAMSUNG Boxed SCB-3003



그림 2.2 디지털 화상 카메라 상세도



그림 2.3 하우징과 결합상태

표 2.1 초저조도 카메라 사양

구 분		내 용
장비명 (모델명)	한글	- 박스형 카메라 SCB-3003
	영문	- Boxed Camera SCB-3003
제작업체	제작국가	한국
	제작사	삼성
장비 주요 용도		초저조도 압광 영상 획득
주요사양		- 전자셔터 : 1/60~1/120,000 - 치저조도 : 0.00002Lux - 총화소 : 1,028(H) x 494(V) - 동작 온/습도 : -10℃~+55℃ - 하우징결합으로 야외에서도 촬영가능

(2) BASLER ACA2000-340KM



그림 2.4 BASLER
ACA2000-340KM

이 모델의 경우, 일반 디지털 카메라 또는 아나로그 카메라가 제공하는 30FPS의 촬영속도에 비해 월등히 빠른 340FPS의 촬영속도를 확보해주며 동시에 2048x1024의 높은 해상도를 제공해 주기 때문에 적합한 것으로 판단하였다. 아래에 표 2.2에 본 디지털 카메라의 주요 성능사양을 보인다.

표 2.2 중고속 균열 관찰 시스템의 구성

Resolution horizontal/vertical	2048 pixels x 1088 pixels
Pixel Size horizontal/vertical	5.5 μm x 5.5 μm
Frame Rate	340 fps
Mono/Color	Mono
Interface	Camera Link
Pixel Bit Depth	8, 10, 12 bits
Synchronization	external trigger software free-run
Exposure Control	trigger width or timed
Housing Size (L x W x H) in mm	43.5 x 29 x 29
Weight (typical)	96 g
Sensor Technology	Progressive Scan CMOS, global shutter

본 카메라는 위의 사양에서 보이듯이 촬영 속도 및 높은 해상도와 더불어 부피(43.5x29x29mm) 및 중량(96g)의 작아서 현장설치에 적합하다. 또한 외부의 부가적인 신호와의 동기화에 필수적인 채널을 제공하여 주고 있다.

2.2.2 디지털 화상 획득 보드

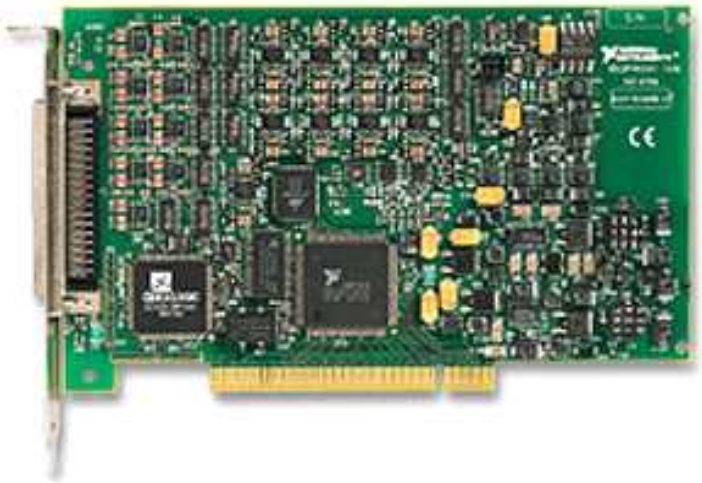


그림 2.5 디지털 화상 획득 보드

디지털 화상 획득 보드는 네셔널인스트루먼트 사의 카메라링크 보드인 NI-PCIe1433을 사용하였다. NI-PCIe1433은 고속의 데이터 전송속도를 제공하는 CameraLink(TM) 인터페이스를 위해 개발된 모델이다.

2.2.3 외부 신호 획득용 보드

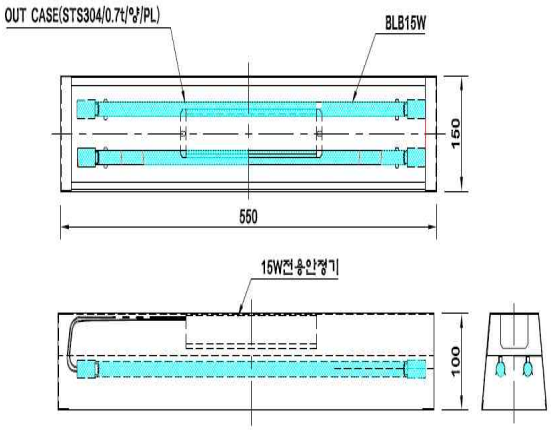


- 2개의 16비트 아날로그 출력, 8개의 디지털 I/O 라인, 2개의 24비트 카운터, 아날로그 트리거링
- NIST 추적 가능 교정 인증 및 70개 이상의 신호 컨디셔닝 옵션
- 우수한 통합 -- LabVIEW, CVI 및 Visual Basic과 Visual Studio .NET용 Measurement Studio
- 기존의 NI-DAQ (레거시) 드라이버 소프트웨어 포함

그림 2.6 외부 신호 확득용 보드 제원

각 시간대의 디지털 이미지와 외부 신호(하중, 변위등에서 오는 전압신호)와의 동기화를 위해서는 부가적인 A/D(Analog to Digital)보드가 필요하다. 이를 위해 네셔널인스트루먼트의 범용 DAQ보드인 PCI-MIO-16XE-10보드를 사용하였다. 이 보드의 역할은 외부의 아나로그 신호(전압)를 사용자 컴퓨터에서 처리할 수 있는 디지털 신호로 변화를 해줌과 동시에 이 아나로그 신호와 촬영화상의 시간동기화를 위해 사용된다.

2.3 UV LAMP



- Line Power : 220V/60HZ
- Lamp Wattage : 15W
- Lamp Current : 0.30A
- Wave Length : 360nm
- Useful Life : 3,000Hrs
- UV Output : 2,5W

그림 2.7 UV LAMP 상세사항

화상기록장치 일측에 고정결합 되거나 또는 상기 가이드레일에 슬라이딩 이동가능하게 결합되어 상기 화상기록장치가 관찰하는 상기 구조물 표면의 압광소재에 자외선을 조사한다.

2.4 Record

화상기록장치 및 UV LAMP를 직접 또는 원격조정하고, 상기 화상기록장치로부터 획득된 영상을 유선 또는 무선으로 받아 이를 직접 또는 별도의 소프트웨어를 이용하여 상기 구조물 표면에 도포된 압광소재의 발광부위를 탐지함으로써 상기 구조물의 균열을 탐지하면서 가시적인 응력장의 변화를 연속적으로 관찰하고 기록하며 균열의 성장시 이를 관리자 단말기의 디스플레이에 표시함과 동시에 유무선으로 관리자에게 통지하여 이에 따른 후속조치를 취하도록 유도함으로써 대형사고를 미연에 예방할 수 있게 된다.

제 3장. 최첨단 압광소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템의 상세사항

콘크리트 구조물에 실제적용을 위해서는 페인트의 도포, 가이드 레일, 카메라의 설치, UV 충전 및 영상획득과 분석에 이르기까지 일련의 과정과 구성을 통해 활용이 가능하다. 상대적으로 저비용의 시스템을 활용하여 콘크리트 구조물의 균열을 탐지하고 균열길이, 균열형상의 변화와 이에 따른 균열 첨단의 응력상태의 정보를 가시적으로 제공함으로 편리하고 정확하게 구조물의 상태를 확인할 수 있다.

3.1 개요

표면에 일정 두께로 도포되어 균열시 균열길이 만큼 발광되는 압광소재가 도포된 구조물과 양단이 상기 구조물에 고정결합되어 상기 구조물 표면과 인접되게 일정 간격 길이방향 또는 폭방향으로 길게 설치되는 가이드레일과 상기 가이드레일에 슬라이딩 이동가능하게 결합된 상태에서 원격 또는 직접 조정에 의하여 이동 또는 정지하면서 일정구간에서 상기 구조물의 표면에 도포된 일정 두께의 압광소재를 관찰하면서 그 영상을 송출하여 저장하는 마이크로 줌 또는 망원렌즈가 부착되는 일반조도 및 저조도용 CCD 또는 CMOS 디지털 카메라 및 비디오 중 어느 하나를 선택적으로 사용하는 화상기록장치와 상기 화상기록장치 일측에 고정결합되거나 또는 상기 가이드레일에 슬라이딩 이동가능하게 결합되어 상기 화상기록장치가 관찰하는 상기 구조물 표면의 압광소재에 자외선을 조사하는 UV LAMP와 상기 화상기록장치 및 유브이 램프를 직접 또는 원격조정하고, 상기 화상기록장치로부터 획득된 영상을 유선 또는 무선으로 받아 이를 직접 또는 별도의 소프트웨어를 이용하여 상기 구조물 표면에 도포된 압광소재의 발광부위를 탐지함으로써 상기 구조물의 균열을 탐지하면서 가시적인 응력장의 변화를 연속적으로 관찰하고 기록하며 균열의 성장시 이를 관리자 단말기의 디스플레이에 표시함과 동시에 유무선으로 관리자에게 위급한 상황을 통지하는 균열감지경보장치를 구비함으로써 상기 구조물의 균열을 탐지하고 균열길이, 균열형상의 변화와 이에 따른 균열 첨단에서의 압광 특성 변화를 총제적이고 또한 세부적이며 연속적으로 기록하면서 분석하여 위험시 그 사실을 관리자에게 알려 주는 압광소재를 이용한 구조물의 균열 안전진단장치에 관한 것이다.

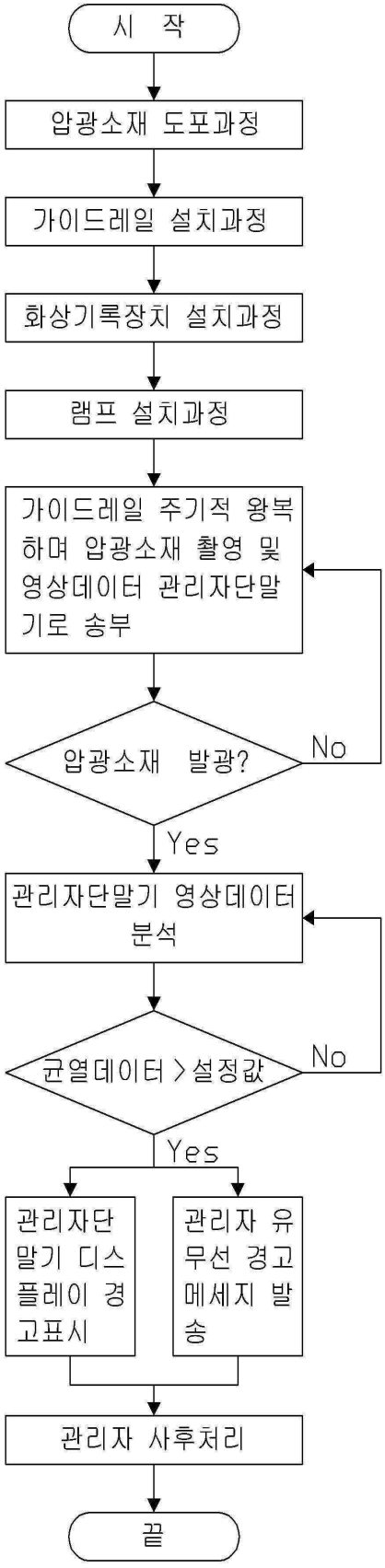


그림 3.1 시스템의 진단 프로세스

3.2 압광페인트 제조

표 3.1 압광페인트 제작시 재료의 중량 배합

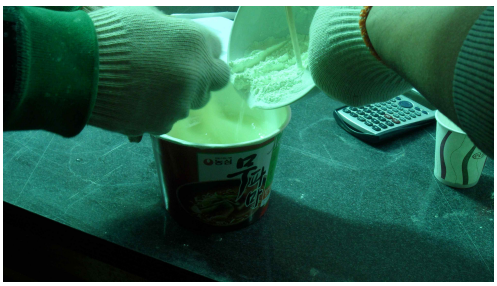
에폭시	하드너	첨가제	파우더
100g	30g	2g	19.5g



(a) 에폭시와 하드너 혼합



(b) 첨가제 첨가



(c) 파우더 첨가



(d) 거품 제거

그림 3.2 압광페인트 제작 과정

압광분말의 중량비가 0.5 이하일 때는 압광 특성이 눈에 보일 정도가 되지 못하므로 감지가 불가능하며, 5 이상이면 분말량이 지나치게 많아져서 페인트에 잘 섞이지 않고 덩어리로 뭉치게 되어 스프레이나 붓질이 잘 되지 않는다. Tinuvin 293와 같은 UV 흡수제, EFKa LP 3033과 같은 스립 및 레벨링제, 10% DBTDL/Butyl Cellesolve와 같은 가소제, Xyele, Kocosol 100, Toluene, Butyle Acetate, Pigment와 같은 압선안료로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상인 것이 좋다. 이들 기타 성분의 대부분은 Pigment가 차지를 하며 나머지 성분들의 함량은 상대적으로 미량이다. 상기 경화제는 제파민인 것이 바람직하다. 즉, 에폭시 레진과 제파민은 각각 주재료와 경화제로 작용하는데, 주재료인 에폭시 레진의 함량이 증가하고 경화제인 제파민의 함량이 감소하는 경우 페인트의 강도가 감소하게 된다. 반대로 주재료인 에폭시 레진의 함량이 감소하고 경화제인 제파민의 함량이 증가하면 페인트의 강도가 증가하게 된다. 따라서, 두 성분의 비율로 페인트 강도를 조절하게 되는데, 페인트 강도를 페인트를 최종적으로 도포하게 되는 모재의 강도와 비슷하게 맞춘 후에 파괴 실험을 하면 가장 좋은 압광특성이 얻어진다. 페인트의 강도 특성들 중에서 가장 중요한 영율(young's modulus)은 0.8~5GPa 사이로 조절되었다. 페인트 강도 특성들 중에서 가장 중요한 것이 영율이며 기존 페인트들인 2.6GPa 이하의 압광페인트는 실험용 카메라에서는 저강도 콘크리트 균열 검출이 가능하나, 최소 3Gpa 이상의 영율을 가지는 페인트가 일반 카메라에서도 균열 감지에 실제적으로 유용한 것으로 판단된다. 현재 최적 영율은 3~5 GPa 정도의 범위이다. 에폭시 레진:경화제의 비를 3:1로 조절하는 경우, 압광 분말에 응력이 가장 효과적으로 전달되어 가장 바람직한 페인트 성능을 나타내게 된다.

아울러, 더욱 바람직하게는, 압광 분말 중량:(레진 중량 + 경화제 중량)의 비가 3:7인 경우에 가장 우수한 압광 특성을 발휘한다.

3.3 압광페인트 도포과정



(a)흡상식 (b)중력식

그림 3.3 타입에 따른 스프레이 건

	흡상식	중력식
노즐사이즈	1.5mm	1.5mm
분사거리	180~200mm	180~220mm
분사에어압력	35psi	43psi
패턴길이	280mm	320mm
분사속도	250ml/min	270ml/min
에어소비량	220ℓ/min	200ℓ/min

표 3.2 스프레이건의 사양 비교

분당 air 생산량 (lpm)	480ℓ/min
최대압력	0.8kgf/㎠ , 114/145psi
마력	HP: 4 kW: 3
분당회전수	1400rpm

표 3.3 콤프레셔의 사양



그림 3.4 콤프레셔

스프레이는 2가지 종류가 있는데 그림 3.2 (a)는 공기압을 통해 분사되는 흡상식 스프레이를 나타내며 그림 3.2 (b)는 공기압과 중력을 이용한 중력식 스프레이를 나타낸 것이다.

그림 3.3의 콤프레셔로 인해 고압분사가 가능함으로써 사람의 손으로 시공이 어려운 면적을 도포하는 것이 가능하다. 표 3.2는 연구에 사용된 콤프레셔의 사양을 나타낸다. 스프레이를 사용한 도포방법은 넓은 분사로 작업의 효율성을 극대화 시키며 신속한 작업을 가능하게 하며 분사조절 장치로 인해 균일하고 일정한 양의 도포가 가능하다.

3.4 가이드레일 설치과정

가이드레일은 구조물 표면에서 도포된 압광소재와 인접되게 일정거리가 되게 하고 관찰대상과의 수평, 평행을 유지하여 카메라의 이동 또는 고정이 가능한 곳에 설치한다. 자동 및 수동조작이 가능하도록 원격제어 모터를 사용하였고 카메라 모듈에 진동을 제어 할 수 있는 별도의 장치 또는 기구의 구성이 필요하다.

카메라 모듈의 구성무게와 장치의 간편함을 볼 때 LM가이드 레일의 사용이 효과적이다. LM가이드 레일의 종류로는 볼리테이너 타입 LM가이드, 롤러리테이너 타입 LM가이드, LM가이드(총볼타입) 등이 있다. LM 가이드는 구름운동을 직선운동으로 변환하여주는 시스템으로 취부면의 오차를 흡수하여 부드러운 운동이 가능하며, 예압을 걸어도 구름저항의 증가가 거의 없고 고강성을 얻을 수 있다. 특히, 미끄럼 안내에 비하여 마찰계수가 작고, 로스트모션이 거의 발생하지 않아 위치결정 정도가 아주 좋다. LM 가이드를 사용하면 고정도, 고강성 기능과 에너지 효율성을 갖춘 수명이 긴 고속 가이드 레일의 구축이 가능하다.

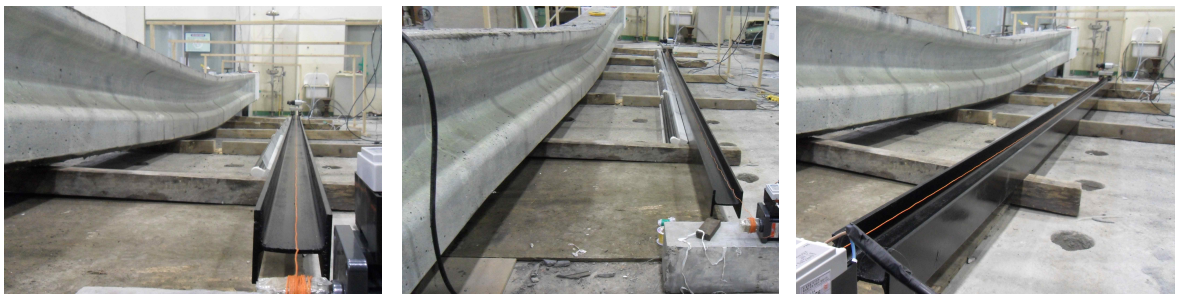


그림 3.5 가이드레일

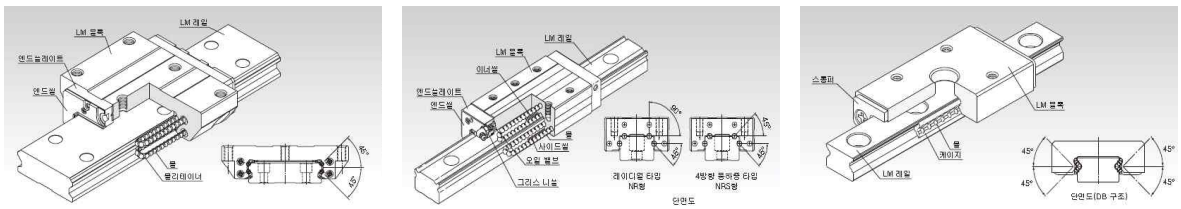


그림 3.6 LM가이드

3.5 화상기록장치 설치과정

가이드레일에 회동가능하게 결합되어 구조물의 특이사항을 압광소재를 활용해 촬영, 저장하고

영상데이터를 전송시키는 화상기록장치를 설치한다. 화상기록장치의 설치 가능한 곳은 기후의 영향을 받지 않는 안전한 위치여야 하고 장시간 계측을 위해 전력의 공급이 원활한 곳 이어야 한다. 또한 장치의 발열 특성을 고려하여 과열에 의한 피해가 발생 가능할 수 있으니 장치의 냉각 및 공조환경 조성에 주의해야 한다. 사용된 장치는 최대 20Ch의 직, 병렬 I/O가 가능하며, .avi 확장자를 지원한다. 구성 옵션으로 모션감지, 경보알림, 이벤트 저장, 대용량 HDD를 제공하며, 영상의 용량에 따라 저장용량을 결정하여야 한다.

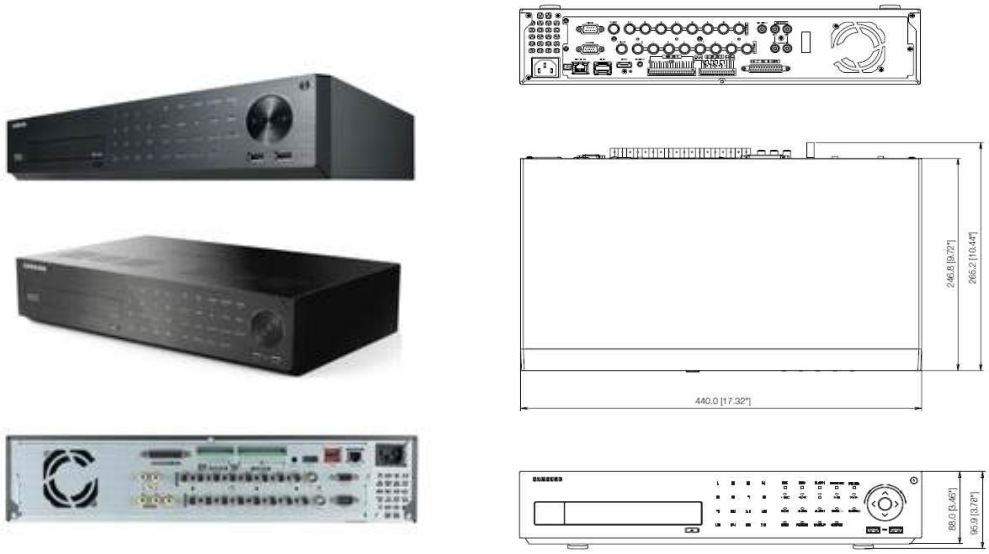


그림 3.7 화상기록장치 상세도

표 3.4 DVR 사양

구 분		내 용
모델명		- SRD-1673D
제작업체	제작국가	한국
	제작사	삼성 테크윈
장비 주요 용도		초저조도 압광 영상 모니터링
주요사양		- 480fps 실시간 동영상 녹화 - HDMI출력 지원, 지능형 영상분석 기능(Tampering) - 네트워크 : 대역폭 최대 32Mbps, 츤(Smart Viewer) 모니터링

3.6 램프설치과정

화상기록장치 일측 또는 가이드레일에 설치되어 화상기록장치가 관찰하는 요부로 자외선을 조사하는 유브이 램프(UV LAMP)를 설치한다. 구조물 표면에 도포된 압광소재와 인접되게 일정거리가 되게 하고 각도는 30°~60° 범위로 설치한다. 조사거리를 고려하여 최소 50cm~1m 범

위안에 위치하도록 한다. 조사시간은 획득영상의 품질 및 압광소재의 광량과 관계되어 발광의 Intensity에 영향을 주므로 상황에 따라 최소 10분에서 최대 30분으로 한다.

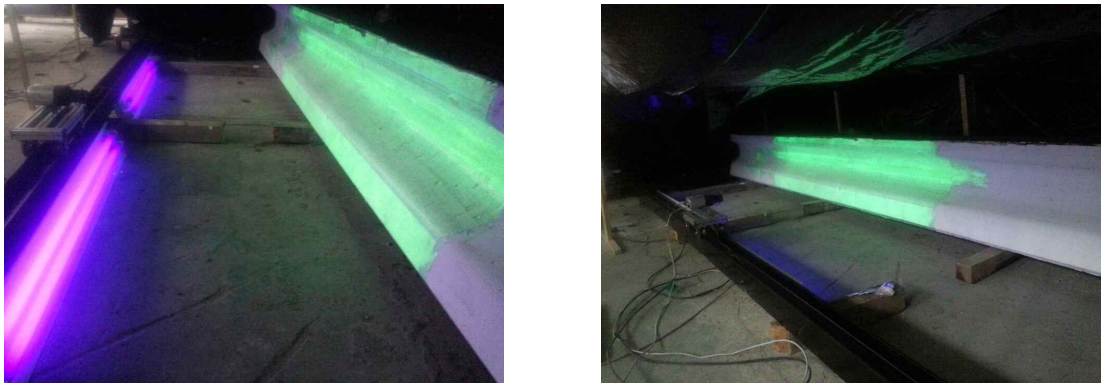


그림 3.8 UV LAMP 충전 모습

3.7 균열데이터 분석과정

가이드레일 상에서 화상기록장치를 일정시간 주기적으로 왕복 슬라이딩 이동시키면서 화상기록장치로부터 영상데이터를 받아 저장함과 동시에 영상 데이터로부터 구조특성을 분석한다. 구조물의 압광소재에서 자외선 조사로 인한 균열부의 압광소재에 의한 발광이 이루어지는지 확인한다. 균열부 압광소재의 발광으로 구조물의 균열 및 특이사항이 확인되면 이를 감지하여 균열의 길이나 균열 형상의 변화를 기록하고 분석하는 프로그램에 의해 확인이 이루어진다.

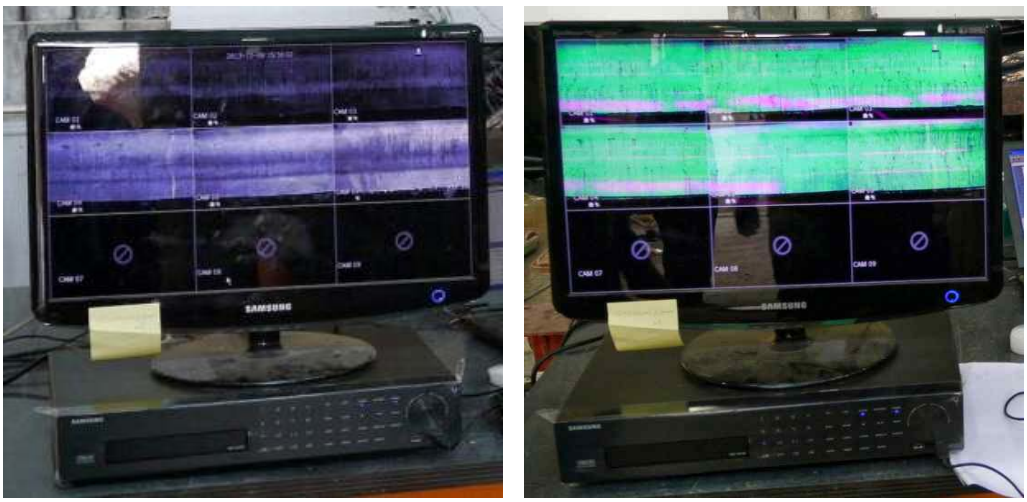


그림 3.9 관리자 단말기

3.8 관리자 균열경고과정

관리자단말기에서 균열데이터 분석과정을 통해 얻어진 분석 데이터가 미리 설정한 허용기준치를초과하여 구조물의 균열 위험성이 일정수준이상으로 커지면 이런 사실을 디스플레이 상에 표시함과 동시에 담당 관리자에게 유선이나 무선으로 경고 메세지를 전송하여 음성 또는 문자

로 알림으로써 이에 따른 적절한 후속조치를 담당 관리자가 취할 수 있도록 경고하는 균열감지경보장치를 갖는 관리자단말기에서 이루어진다.

제 4장. 최첨단 압광 신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템을 이용한 실험

실험실 규모의 성능검증과 실험적용을 위해 실제 구조물의 규모와 동일한 수준의 콘크리트 보에 적용성 실험을 수행하였다. 콘크리트 보의 거동특성과, 균열양상, 역학적 특성 등을 확인할 수 있었으며 기존의 방법과 비교하여 높은 신뢰도를 확인하였다.

4.1 개요

수작업으로 이루어지는 압광페인트의 기존 도포방식을 스프레이식으로 뿜칠하거나 균열이 발생할 것으로 예상되는 구역에 편리하게 도포하는 기법을 개발하여 효과적인 시공방법을 모색하였고, 압광페인트를 구조물의 위험단면, 주요부위, 취약지점, 집중관리가 필요한 부위를 대상으로 계측장비를 통해 구조형식에 대한 범용성을 확대하기 위하여 교량과 같은 실제 구조물을 제작하여 적용성을 확인하였다

4.2 실험체 제원



그림 4.1 실제구조물과 동일한 규모로 제작된 실험체 (400*500*1000, 보)

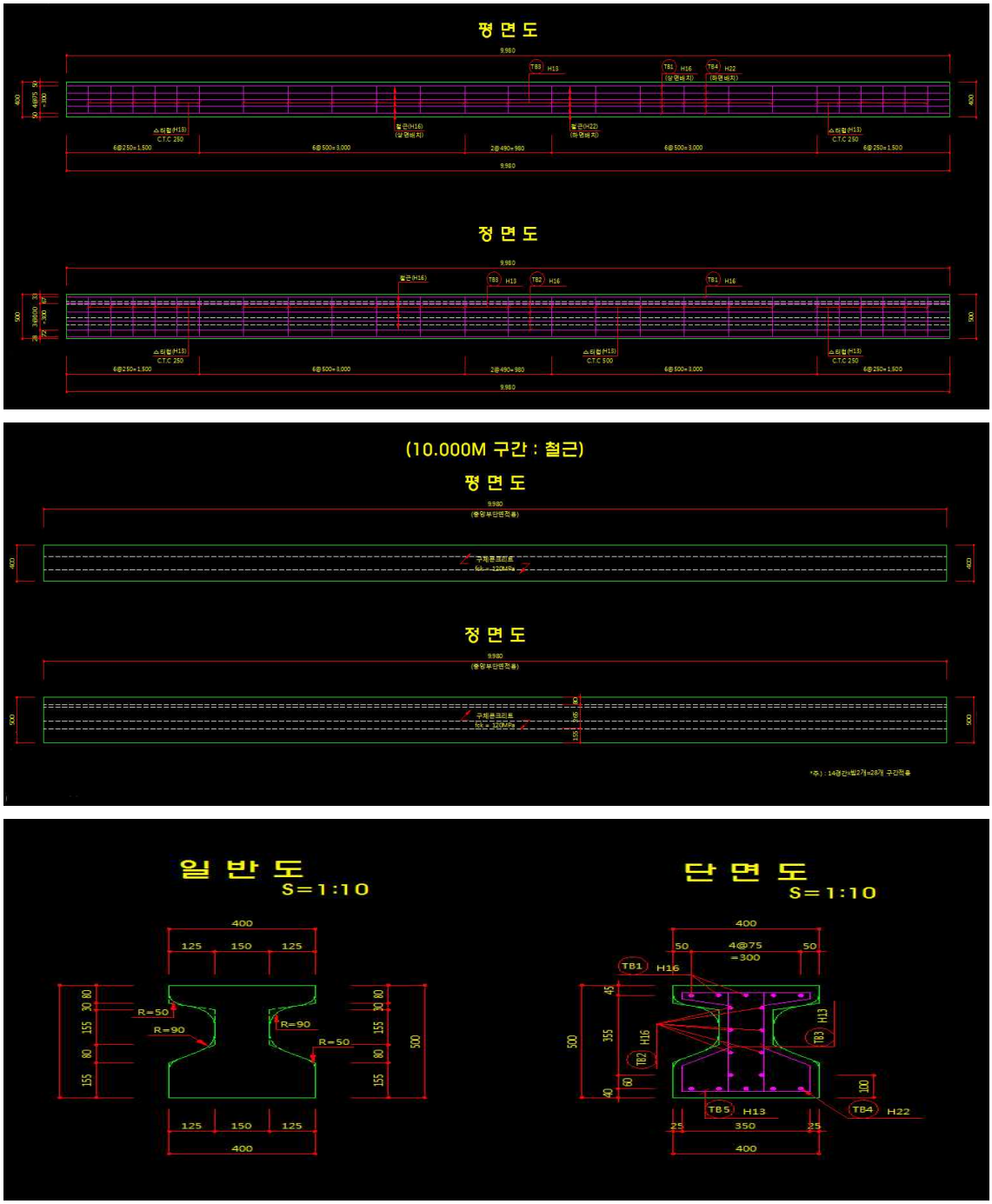


그림 4.2 실험체 설계도면

표 4.1 실험체 배합 설계표

구분	굵은 골재의 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	물-시멘트 비 (%)	잔골재율 S/a (%)	단위량(kg/m3)				
						물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은 골재 G	혼화제 (g/m3)
30	25	12	4.5	43	63	185	430	775	967	-
50	25	12	4.5	32	63	138	430	775	967	4.3

4.3 설치 및 계측

실험을 위한 실험체는 콘크리트 강도 30MPa, 50Mpa로 두고 실험을 진행하였다.

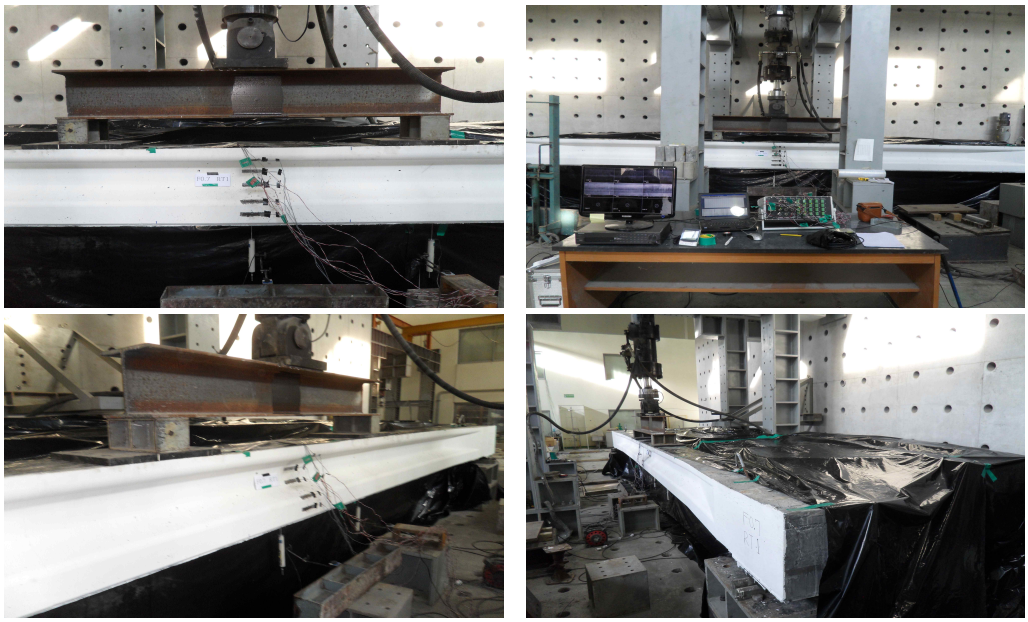


그림 4.3 실험 전경

모든 실험체의 하중 가력은 실험체 중앙에서 재하하는 4점실험으로 진행하였으며 실험체의 변위를 측정하기 위한 LVDT(linear variable differential transformer)는 실험체 중앙 아래에 설치되었다. 또한 실험이 진행되는 동안 실험체의 거동을 살펴보기 위하여 철근 중앙에 5개의 스트레인게이지를 부착하였다. 콘크리트 게이지 또한 5개를 부착하여 진행하였다. 모든 데이터는 데이터 로거(data logger)를 이용하여 실험이 종료될 때까지 실험체 중앙부에서의 처짐과 철근 및 콘크리트의 변형률을 하중단계별로 측정하였다.

실험진행시 실험체의 발광현상을 알아보기 위하여 프레임 전체에 암막을 설치하여 암실조건에서 실험을 진행하였다.

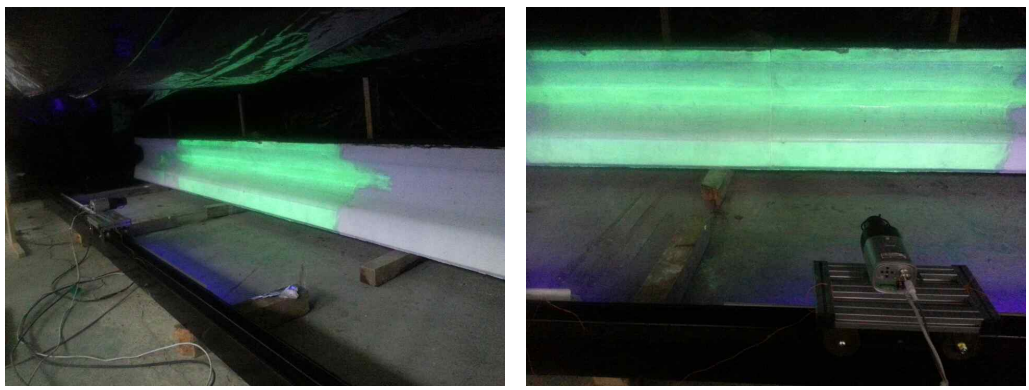
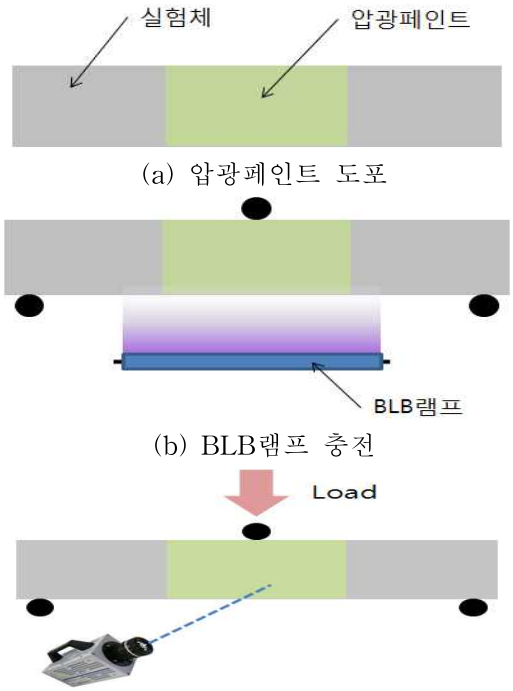


그림 4.4 실험전 BLB램프 충전 모습

실험시 재하하중은 엑츄에이터로 변위제어를 통하여 재하 하였으며, 실험체의 초기균열과 균열 진행상황 등을 관찰하기 위하여 초저조도 초고속 카메라를 설치하여 촬영했으며 DVR 장치를 이용해 영상으로 기록하였다. 실험의 개요도는 그림 4.6과 같다.



(a) 압광페인트 도포

(b) BLB램프 충전

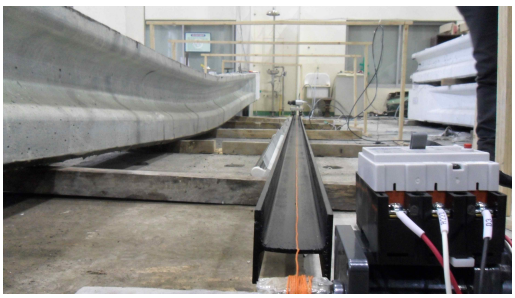
(c) 실험

그림 4.5 실험 개요도

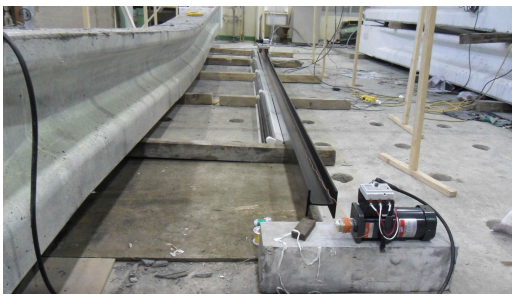
그림 4.7은 이동식모니터링시스템의 프로토타입을 나타낸 사진이다. (a)와 같이 초저조도 카메라에 이동식장치를 결합하여 가이드레일 위에 놓으며 (b)에서 보이는 바와 같이 모터와 이동식카메라를 연결한 후 일정한 속도로 이동하며 구조물의 균열 및 결함을 탐지할 수 있다. (b)에서 모터에 연결된 이동식카메라는 5.5cm/sec의 속도로 촬영할 수 있다. 이 방식을 이용하여 가이드레일에 설치된 이동식카메라를 주기적으로 왕복시켜 압광소재가 도포된 구조물을 촬영하고 영상데이터를 관리자단말기에 송부하여 압광소재 발광여부로 영상데이터를 분석할 수 있다.

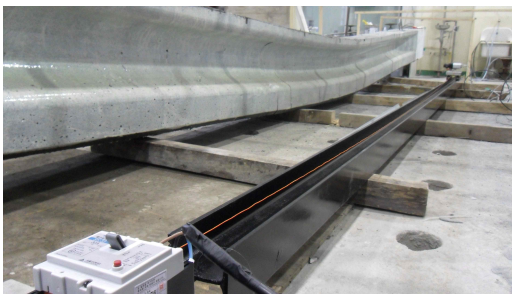


(a) 이동식 카메라 장치



(b) 모터와 가이드레일





(c) 이동식 모니터링 시스템

그림 4.6 모니터링 시스템 Proto-Type

그림 4.8은 이동식모니터링시스템의 개요도를 나타낸 것이다.

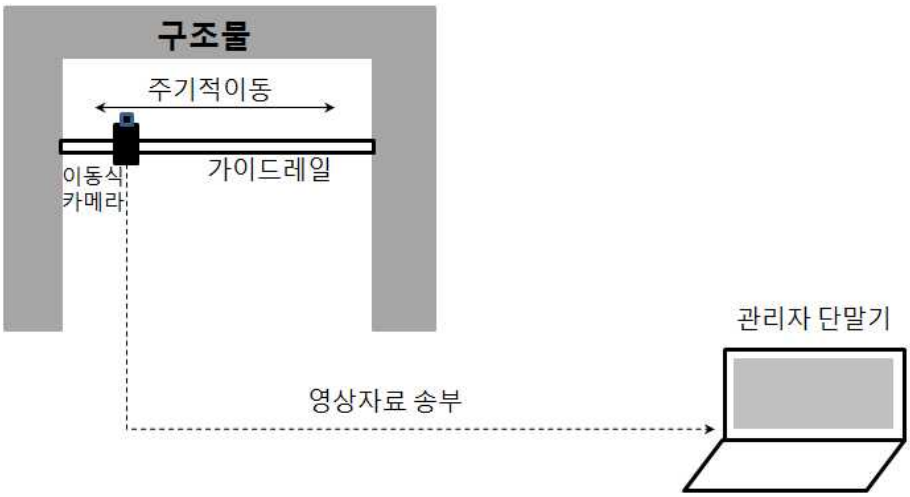


그림 4.7 이동식모니터링시스템 개요도

4.4 결과

실험체별 균열 속도 비교

시간 (s)	A-1		B-1	
	균열 속도 (mm/s2)	하중 (kN)	균열 속도 (mm/s2)	하중 (kN)
0	0	165.9	0	97.0
0.2	414.21	168.8	199.08	97.2
0.4	451.54	170.7	66.14	99.9
0.6	25.78	172.2	169.61	103.3
0.8	14.22	172.2	77.93	105.7
1	7.11	173.8	17.68	107.3
1.2	8.89	175.5	36.02	109.8
1.4	7.11	178.7	10.48	111.7
1.6	6.22	181.0	13.75	113.1
1.8	2.67	183.0	28.16	115.3
2	6.22	186.1	11.79	117.2
2.2	15.11	189.9	22.27	118.4
2.4	5.33	192.2	22.92	121.2
2.6	4.44	194.0	17.03	123.5
2.8	3.56	196.5	12.44	125.0

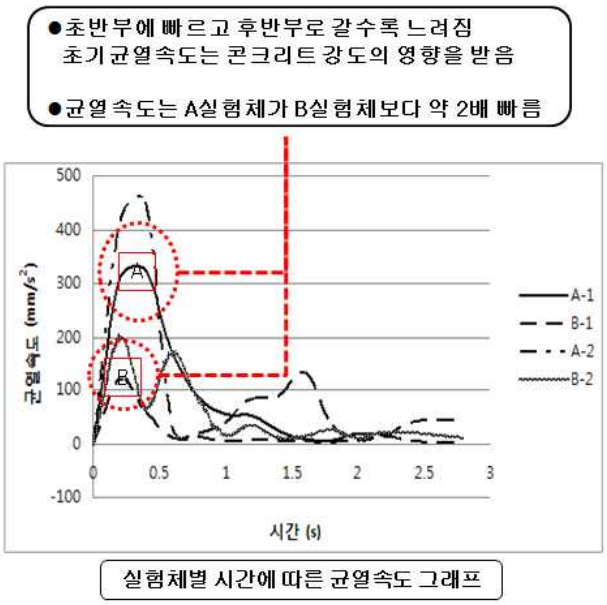


그림 4.8 실험체 별 균열 속도 비교

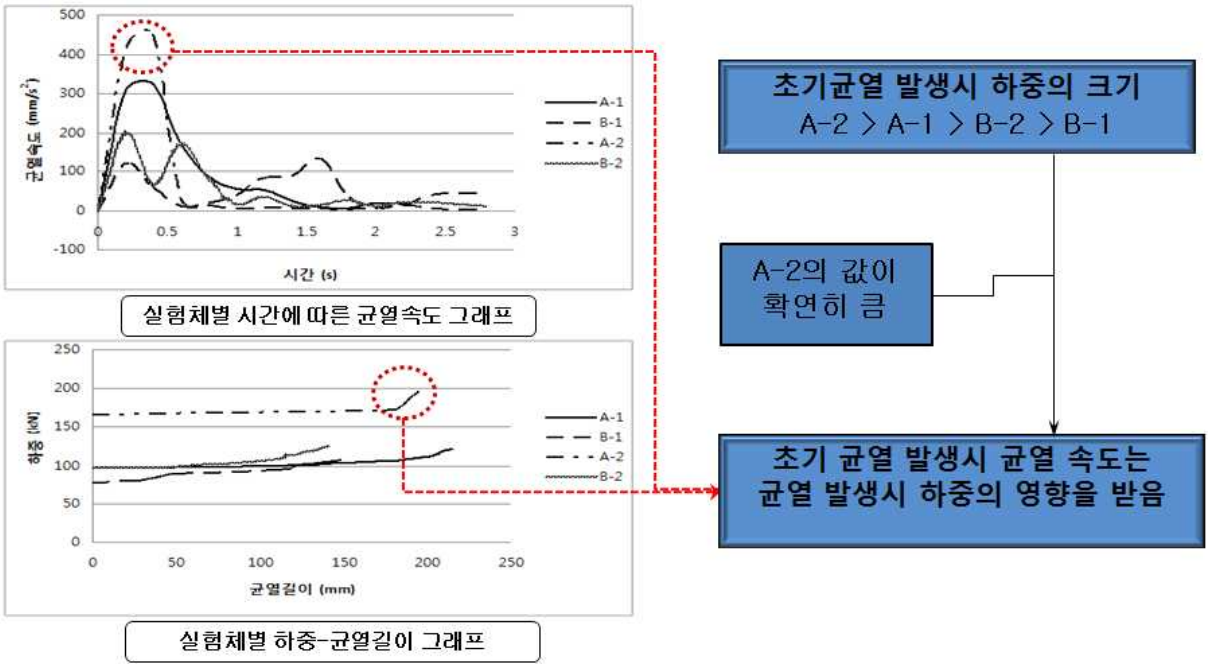


그림 4.9 실험체별 속도 그래프 비교

제 5장. 최첨단 압광 신소재를 이용한 도시 인프라 구조물의 응력변화 예측 시스템을 이용한 응력 및 균열해석

콘크리트 구조물의 거동시 정확한 역학적 특성과 정량적 결과를 얻기 위한 해석적인 방법으로, 본 시스템을 활용하여 영상 데이터로부터 구조물의 응력과 균열 특성을 확인 및 결정하기 위한 분석 모델을 제시하였다.

5.1 균열 첨단 응력 속도 가시화

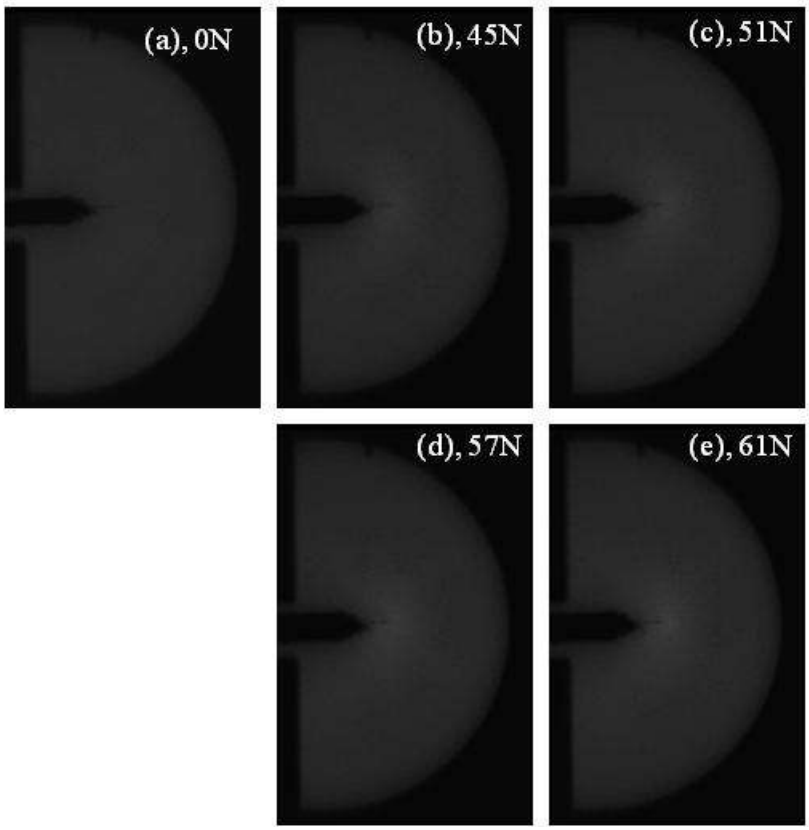


그림 5.1 응력 속도의 실시간 이미지를 나타내는 고속 이미징 시스템에 의해 기록 된 ML 이미지 시퀀스

그림 5.1 (a-e) 는 압광 CT 시편의 외부 하중 부가 속도가 80N/sec. 로 일정한 조건하에서 균열첨단부에 대한 응력 속도 상태를 고속 카메라를 이용하여 초당 60 프레임의 속도로 가시화한 결과들을 보여주고 있다. 특히, 그림 5.1 (a) 는 응력이 가해지기 직전의 초기 조건 시편으로 희미한 정적 형광 흔적만을 보이고 있다. 반면에, 외부 응력이 45, 51, 57 및 61N 으로 증가된 그림 5.1 (b-e)의 균열첨단 부위에서는 명백한 타원형의 발광 현상을 공통적으로 관찰할 수 있다. 또한 기본적으로 발광량은 하중 속도에 비례하므로, 동 그림에서의 발광량 변화는 비록 크지 않으나, 외부 응력의 증가에 따라 발광량이 미약하게나마 증가 되는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 압광소재의 발광량이 하중부가속도에 직선적으로 비례하지는 않는다는 사실을 어느

정도 미리 예측할 수 있는 결과라 할 수 있다. 부가 하중의 변화에 따른 균열 첨단에서의 응력 상태를 표시 하기 위해서는 0 에서 부가 하중까지의 모든 발광량을 적분하는 것이 가장 간단한 방법이다.

따라서 그림 5.1에서 살펴 볼 수 있듯이 본 실험에서는 CT 시편이 하중 부가 속도 80N/sec. 의 조건으로 최대 61N 까지 인장 되면서 초당 60 프레임의 속도로 기록되었으므로, 0에서부터 61N 까지 총 60 프레임의 발광 사진이 획득되었음을 알 수 있다. 따라서 그림 5.2 (b)에서 45N 의 외부 하중이 부가된 경우의 균열 첨단 응력장을 누적 압광량으로 표시하기 위해서는 0 에서 41N 까지 총 31 장의 발광 사진이 적분되었음을 알 수 있다. 유사한 방법으로 그림 5.2 (c-e) 에 해당되는 51, 57, 및 61 N 조건에서의 결과는 36, 41, 및 46 프레임의 압광 사진 누적 결과로부터 얻어질 수 있었다.

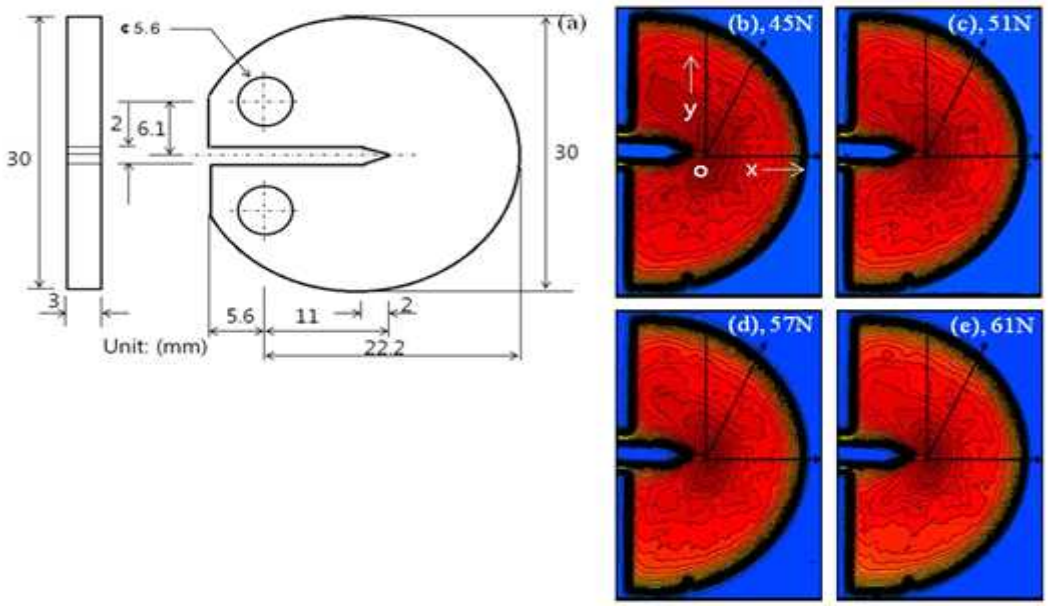


그림 5.2 ML이미지에서 추출 된 등고선 플롯의 순서

표 5.1 두 개의 연속 된 등고선 근처 적용된 부하의 변동에 관하여 균열 끝에서의 정량된 누적 ML Intensity

Applied Load (N) Intensity of ML	45N	51N	57N	61N
Contour 1	0.24571	0.372076	0.518242	0.686808
Contour 2	0.17481	0.287976	0.420642	0.575208

그림 5.2 의 정적 하중 부가 과정에서 누적 압광 프린지 패턴의 변화를 보다 상세히 살펴보면, 그림 5.1 의 단순 비 누적 압광 결과와는 달리 모든 패턴에서의 개별적인 등고선들은 대부분 동일한 형태로 유지되는 반면, CT 시편의 인장에 따른 전역 압광 누적 강도는 급격히 증가됨을 관찰할 수 있다. 이러한 현상을 보다 상세히 살펴보기 위하여 표 5.1 에 부가 하중 변화에 따른 균열 첨단에서의 최단 등고선 1, 2 번 선에 대한 누적 강도 값을 정량적으로 표시하였다. 부가 하중의 증가에 따라 균열 첨단에서의 유효응력 집중이 증가되어야 하므로 균열 첨단으로부터 대략 1mm 정도의 위치에서 측정된 각 사진의 등고선 1의 발광 강도가 0.25에서 0.69로 증가되는 현상을 보여 주었다. 결과들로부터 압광 기술에 의해 측정된 균열 첨단에서의 응력장 변화가 Irwin 의 제안에 기초한 등강도 패턴으로부터 모드 I 파괴 인성 값을 결정함에 있어 정적 균열 첨단에서의 이론적 및 실험적 선행 결과들과 잘 일치됨을 알 수 있다.

5.2 인장 유효응력 가시화

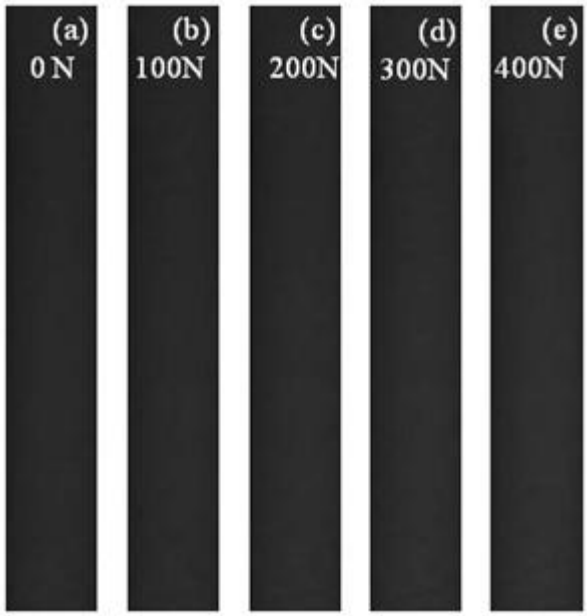


그림 5.3 일정한 하중속도(240N/s)에서 고속 이미징 시스템에 의해 기록 된 3연속 ML이미지

그림 5.3 은 인장 시편에서의 단순 일축 인장 하중의 변화에 따른 응력 속도의 변화를 압광 강도로 측정한 결과를 보여주고 있다. 그림 5.3 (a-e)는 0, 100, 200, 300, 및 400N 의 부가 하중조건에서 기록된 이장 시편의 발광 사진에 해당된다. 실험적인 측면에서는 인장시험의 경우 240N/sec. 의 비교적 높은 하중 속도로 응력이 부가 되었는데, 이는 80N/sec. 의 조건으로 인장된 CT 시편에서 상대적으로 빠른 균열 첨단 영역의 하중 부가 속도를 모사하기 위하여 인위적으로 시험 속도를 높인 결과이다. 물론 이론적으로는 하중속도 변화에도 불구하고 측정하려는 시편 영역에서의 최종적으로 부가될 유효 응력 수준이 동등하다면, 총 누적 압광량은 동일하여야 한다. 이는 응력 또는 변형에 의해 기계적으로 축적된 에너지가 에너지 보존 법칙 하에서 가시적인 포톤으로 변환되어 방출 되어야 하기 때문에 물리적으로 매우 타당한 가정이라 할 수 있다. 그러나 가시화 시스템의 민감도 및 SAO 압광 소재의 포톤 누설에 의한 완화 현상 등을 고려할 때 CT 및 단순 인장 시험에서의 서로 다른 형태의 시편으로부터 발광량을 측정함에 있어 두 개의 서로 다른 영역에서 하중 부가 속도를 유사한 수준으로 유지하는 것이 실험적인 오차를 최소화 할 수 있는 방안으로 선택 되었다.

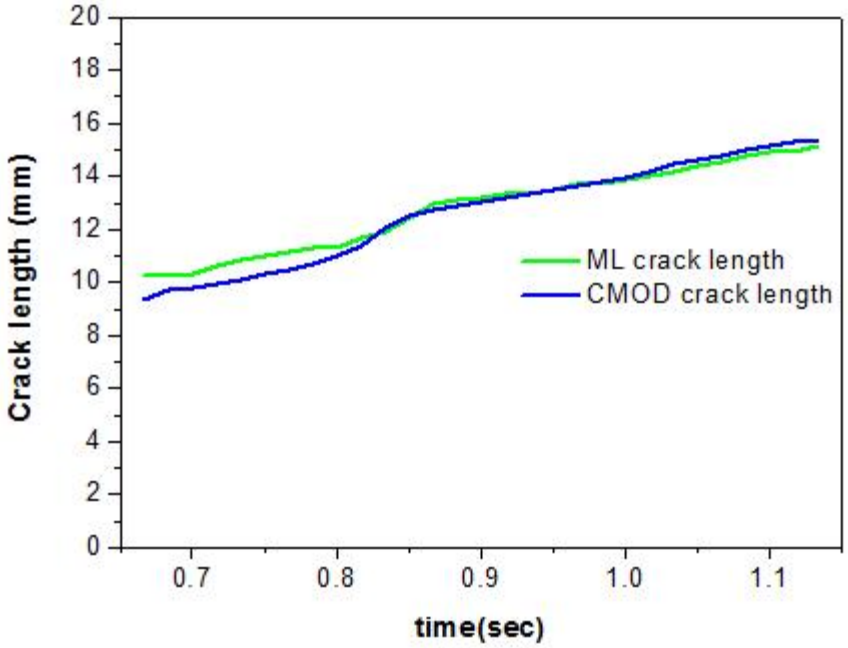


그림 5.4 ML이미지와 CMOD로 계산 된 균열 길이의 비교

표 5.2 그림 5.4로부터 추출한 유효응력에 따른 ML intensity

Applied Load (N) Stress (N)	45N	51N	57N	61N
Contour 1	13.71	17	19.97	23
Contour 2	11.69	14.76	18.24	21

그림 5.4 는 이러한 인장시편 게이지 부에서의 응력장을 압광량으로 평가하기 위하여 압광 강도를 누적하여 유효 응력의 값으로 나타낸 결과이다. 기본적으로, 인장 시편에서의 발광량 누적 과정은 전술한 CT 시편에서의 누적 방법과 완전히 동일하며, 0에서부터 특정 하중 까지의 모든 가시화 사진을 적분한 후 게이지 부에서의 전체 픽셀에 대한 평균 누적 강도 값을 계산하였다. 이러한 과정은 다채널 데이터 링크 시스템에 기록된 모든 하중 값에 대하여 개별적으로 수행되었으며, 이후 각각의 하중 값은 시편 단면적을 고려하여 응력 값으로 변환함으로써 그림 5.4 의 유효 응력과 누적 발광량 사이의 상관관계를 실험적으로 제시하였다.

5.3 응력확대계수 결정

5.3.1 편차응력

균열 첨단에서의 부과응력 수준이 선형 탄성 영역이고 시편의 두께가 평면 응력조건을 만족할 만큼 얇다고 가정하면 압광 등강도 곡선을 이용한 CT 시편에서의 응력확대 계수값 연산은 아래의 간단한 수식 전개를 따르게 된다. 먼저 균열 첨단에서의 응력장은 아래 식들로 기술될 수 있으며,

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} cos\frac{\theta}{2}[1 - \sin\frac{\theta}{2} sin\frac{3\theta}{2}] \qquad (1a)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} cos\frac{\theta}{2}[1 + \sin\frac{\theta}{2} sin\frac{3\theta}{2}] \qquad (1b)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} cos\frac{\theta}{2} sin\frac{\theta}{2} cos\frac{3\theta}{2} \qquad (1c)$$

여기서 σx, σy, 및 σxy 는 Fig. 3의 x-y 좌표축을 중심으로 x, y 방향 및 xy 면에서의 응력값들을 표시하며, KI 은 모드 I 에서의 응력확대계수, Θ는 x 축으로부터 반시계 방향으로의 각도, r 은 균열첨단으로부터의 거리를 나타낸다. 식 1 은 다시 아래의 주 응력 형태의 식으로 변환 될 수 있다.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_x + \sigma_y)^2}{4} + (\sigma_{xy})^2} \qquad (2)$$

여기서, 편차 응력의 변화가 형광 특성을 유발한다고 가정하면, 누적 임계 압광 강도에 비례하는 임계 유효 유발 응력은 소성 변형에 필요한 항복 조건과 유사한 식 3 의 형태로 결정될 수 있다. 전위 움직임이 압광 재료의 발광에 일차적인 요인으로 작용한다고 가정할 때 이러한 항복 조건의 사용은 매우 타당한 것으로 판단된다.

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

그런데, 인장 시편에 단순 일축 응력이 부가되는 경우 측정된 압광 강도는 σ3 및 σ3 가 0 이므로 측정된 압광 강도는 아래 식 3 (a) 와 같이 인장 시험기에 의해 부가된 일축응력 σ1 에 비례하게 된다.

$$\sigma_c = \sigma_{1,T} \qquad (3a)$$

한편 CT 시편의 경우에는 평면 응력 조건을 가정하면 σ3 =0 이므로, CT 시편 특정 위치에서의 주응력을 각각 σ1,F σ2,F 라 하면 식 3 은 아래 식 3 (b) 로 표시될 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_{1,F} - \sigma_{2,F})^2 + (\sigma_{1,F})^2 + (\sigma_{2,F})^2]^{\frac{1}{2}} \qquad (3b)$$

식 3 (a) 와 식 3 (b) 를 조합하면 다음의 식 4 에서와 같이, 디스크 형태의 CT 시편 균열 첨단 영역에서 가시화된 등강도 압광 곡선을 실험적으로 측정된 단순 일축 인장에서의 응력값으로 치환할 수 있다.

$$\sigma_{1,T} = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_{1,F} - \sigma_{2,F})^2 + (\sigma_{1,F})^2 + (\sigma_{2,f})^2] \qquad (4)$$

최종적으로 식 4 에 식 2 의 주응력과 식 1 의 균열첨단 응력장 식을 도입하면 아래와 같은 식 5 의 응력 확대 계수식을 유도할 수 있게 된다.

$$K_{Id} = \frac{\sigma_{1,T}\sqrt{2\pi r}}{\cos\frac{\theta}{2}[1 + 3\sin^2\frac{\theta}{2}]^{\frac{1}{2}}} \qquad (5)$$

여기서 KId 는 모드 I 조건에의서 편차 응력 항으로부터 유도된 응력확대계수 값을 나타낸다. 윗 식을 이용한 실제 연산과정 즉, CT 시편의 균열 첨단에서 가시화된 압광 강도로부터 KId 값을 얻기 위해서는, 우선 표 5.2에서 살펴 볼 수 있듯이 그림 5.2 의 일정 강도에 해당되는 주어진 등강도 곡선에 대응되는 동일 압광 강도의 인장 응력을 그림 5.4 로부터 추출하여야 한다. 이 후 그림 5.2 의 등강도 곡선으로부터 수 혹은 수십 개의 점을 선택하여 (r, Θ)의 극좌표 값을 표 5.3 에서와 같이 측정 한다. 이때 기본적으로 하나의 극좌표 값으로부터 응력확대계수 값을 계산하는 것이 가능하지만, 본 실험에서는 거친 등강도 곡선결과로부터 도입될 수 있는 연산상의 오차를 줄이기 위하여 22 개의 좌표 값을 실 연산에 이용하였다. 특히, 압광 강도로부터의 응력확대 계수값 계산은 최소자승법에 의해 수행 되었으며, 계산 값의 타당성 비교를 위해 ASTM E-399 에 의해 규정된 아래의 디스크 형 CT 시편에서의 응력확대계수 측정방법 (식 6) 을 이용하여 실측된 응력확대 계수 값도 추가적으로 표 5.3 에 병기 하였다.

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f(\frac{a}{w}) \qquad (6)$$

$$f(\frac{a}{w}) = \frac{(2 + \frac{a}{W})(.076 + 4.8\frac{a}{W} - 11.58(\frac{a}{W})^2 + 11.43(\frac{a}{W})^3 - 4.08(\frac{a}{W})^4}{(1 - \frac{a}{W})^{\frac{3}{2}}}$$

표 5.3 두 개의 다른 응력으로부터 결정한 SIF와 ASTM의 일반적인 정수압 계산으로 부터의 SIF 비교

Contour lines plot	Angles ±θ	Positive y-axis		Negative y-axis		Calculated SIF (K_{Id}) $MPam^{1/2}$	Calculated SIF (K_{Ih}) $MPam^{1/2}$	Measured SIF (K_I) $MPam^{1/2}$
		r_1 mm	r_2 mm	r_3 mm	r_4 mm			
(b) 45N	0	1.15	1.81			1.11	1.97	1.41
	15	1.22	1.88	1.05	1.64			
	30	1.33	2.16	1.05	1.60			
	45	1.57	2.06	1.01	1.60			
	60	1.43	2.34	0.98	1.92			
	90	1.47	2.65	0.73	2.2			
(c) 51N	0	1.12	1.47			1.31	2.34	1.59
	15	1.12	1.64	1.05	1.47			
	30	1.19	1.74	1.01	1.60			
	45	1.36	1.92	0.98	1.43			
	60	1.19	1.88	0.91	1.47			
	90	1.40	2.09	0.66	1.47			
(d) 57N	0	1.08	1.43			1.51	2.71	1.81
	15	1.08	1.53	1.01	1.33			
	30	1.15	1.71	0.91	1.33			
	45	1.19	1.74	0.87	1.36			
	60	1.15	1.74	0.87	1.26			
	90	1.15	1.78	0.70	1.12			
(e) 61N	0	1.05	1.40			1.67	3.00	1.94
	15	1.05	1.47	0.98	1.29			
	30	1.12	1.53	0.87	1.22			
	45	1.12	1.67	0.84	1.29			
	60	1.08	1.60	0.84	1.22			
	90	1.01	1.64	0.56	1.05			

5.3.2 정수압 응력

정수압 응력의 변화가 형광 특성을 유발한다고 가정하면, 누적 임계 압광 강도에 비례하는 임계 유효 유발 응력은 탄성 변형에서 체적 변화를 유발하는 조건과 유사한 식 7 의 형태로 결정될 수 있다. SAO 압광 소재의 결정격자 왜곡이 압광 재료의 발광에 일차적인 요인으로 작용한다고 가정하면, 이러한 임계 정수압 응력 조건의 사용은 타당한 것으로 판단할 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \qquad (7)$$

그런데, 인장 시편에 단순 일축 응력이 부가되는 경우 측정된 압광 강도는 σ2 및 σ3 가 0 이므로 측정된 압광 강도는 아래 식 7 (a) 와 같이 인장 시험기에 의해 부가된 일축응력 σ1 에 비례하게 된다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{1,T}}{3} \qquad (7a)$$

한편 CT 시편의 경우에는 평면 응력 조건을 가정하면 σ3 = 0 이므로, CT 시편 특정 위치에서의 주응력을 각각 σF,1 σF,2 라 하면 식 7 은 아래 식 7 (b) 로 표시될 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{(\sigma_{1,F} + \sigma_{2,F})}{3} \qquad (7b)$$

식 7 (a) 와 식 7 (b) 를 조합하면 다음의 식 8 에서와 같이, 디스크 형태의 CT 시편 균열 첨단 영역에서 가시화된 등강도 압광 곡선을 실험적으로 측정된 단순 일축 인장에서의 응력값으로 치환할 수 있다.

$$\sigma_{1,T} = \sigma_{1,F} + \sigma_{2,F} \qquad (8)$$

최종적으로 식 8 에 식 2 의 주응력과 식 1 의 균열첨단 응력장 식을 도입하면 아래와 같은 식 9 의 응력 확대 계수식을 유도할 수 있게 된다.

$$K_{Ih} = \frac{\sigma_{1,T}\sqrt{2\pi r}}{2\cos\frac{\theta}{2}} \qquad (9)$$

여기서 KIh 는 모드 I 조건에의서 정수압 응력 항으로부터 유도된 응력확대계수 값을 나타낸다.

5.3.3 균열 길이

A-1실험체의 균열 길이



B-1실험체의 균열 길이



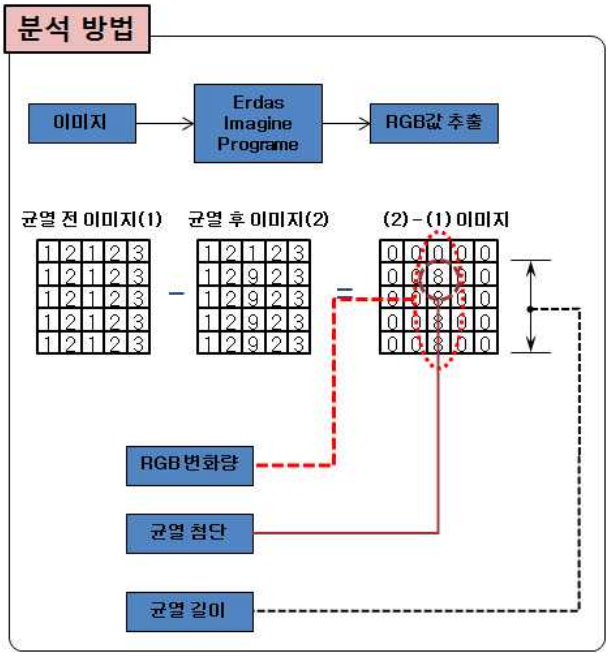


그림 5.5 실험체별 균열 길이 비교

실험체별 균열 길이 비교

이미지번호	시간 (s)	균열길이 (mm)	
		A-1	B-1
1	0	0	0
2	0.2	82.84	39.82
3	0.4	173.15	53.04
4	0.6	178.30	86.97
5	0.8	181.15	102.55
6	1	182.57	106.09
7	1.2	184.35	113.29
8	1.4	185.77	115.39
9	1.6	187.01	118.14
10	1.8	187.55	123.77
11	2	188.79	126.13
12	2.2	191.81	130.58
13	2.4	192.88	135.16
14	2.6	193.77	138.57
15	2.8	194.48	141.06

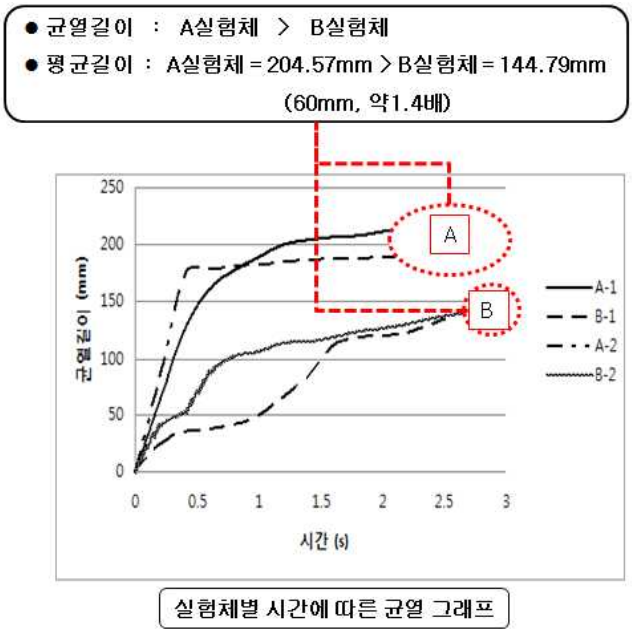


그림 5.6 실험체별 균열 길이 비교 그래프

5.3.4 균열 위치

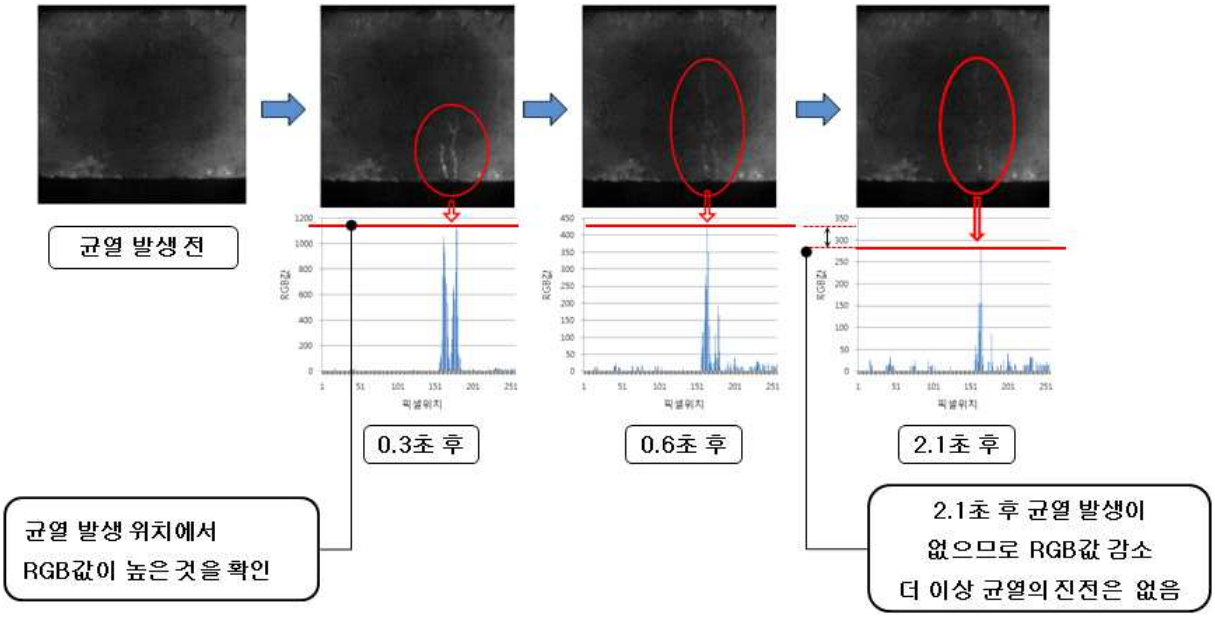


그림 5.7 실험체별 균열 위치

제 6장. 무선 프로그램을 이용한 데이터 획득

기존의 현장계측보다 편리하고 진보적인 시스템의 활용방안으로 IT융합의 계측시스템이 방전하고 있다. 계측데이터 및 영상을 현장에서 직접 획득하지 않고, 무선 시스템을 도입하여 실시간 원거리계측 및 활용이 가능하다. 하지만, 이 장에서는 이에 대한 이론적인 고찰 및 가능성에 대한 정보만을 취급하며 실제 적용을 위한 향후 연구가 준비중이다.

(1) 무선 계측 시스템의 구성은 센서, 데이터 수집, 송신부, 수신부 등으로 나눌 수 있으며 전체 구성은 그림 6.1과 같다.

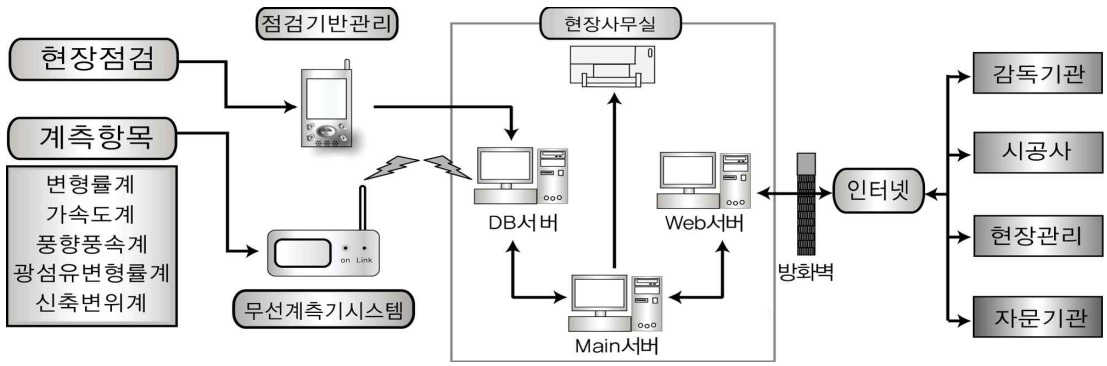


그림 6.1 무선 모니터링 시스템

(2) 구조물의 균열 안전진단장치 시스템을 무선으로 데이터를 획득할 경우에도 화상기록 장치로 수집한다. 이 데이터로거는 각각의 1ε 변형과 0.1℃ 의 온도변형의 파장을 교대로 받아들일 수 있다.

(3) National Instrument사의 NI 무선 센서 네트워크 (WSN) 플랫폼은 무선 모니터링 솔루션으로서 NI Labview와 저전력의 무선 측정 노드로 구성되어 있다. 무선 모니터링 적용에 무선 기술을 채택하는 사례가 증가 하면서 엔지니어들은 필요한 측정 품질 및 전력 관리와 장기간의 원격 배포를 위한 안정적인 하드웨어를 제공 받을 수 있는 통합 솔루션을 모색하고 있다. NI WSN 플랫폼은 30년 이상 축적된 NI 데이터 수집 시스템 기술 노하우를 활용하여 고품질의 측정 데이터를 제공할 뿐 아니라 전력 소비를 관리하는 유연함과 추가적인 기능을 추가하기 위해 무선 하드웨어를 직접 정의할 수 있는 기능을 제공한다. 다른 플랫폼과의 차별성은 Labview 소프트웨어로서 배터리로 구동되는 산업용 등급 NI WSN 측정 노드와 긴밀하게 통합되어 장기간 배포가 가능하다는 점이다. NI WSN 플랫폼은 Labview의 드래그 앤 드롭 프로그래밍 환경을 이용하여 무선 시스템을 구성하고 측정한 다음 분석을 수행하여 데이터를 표현할 수 있다. 또한 Labview는 자체적으로 웹 연결을 제공하기 때문에 무선 시스템과 원격 연동이 가능하다. National Instrument사는 두 개의 WSN 노드를 먼저 출시하고 NI WSN 플랫폼의 측정 기능을 확장할 계획이다. 무선 측정 노드는 네 개의 AA 배터리로 구동되며 최고 3년동안 작동이 가능하기 때문에 장기간 배포에 이상적이다. NI

WSN-3202는 4개의 채널에 ±10V 아날로그 입력 노드를 갖추고 있고 NI WSN-3212는 4개의 채널에 24 비트 열전쌍 노드와 네 개의 디지털 I/O 채널이 있어 입력, 싱킹 출력 또는 소싱 출력에 대한 구성이 가능하며 본 플랫폼은 측정 노드와 Labview를 연결하는 데 사용할 수 있는 NI WSN-9791 eternet 게이트웨이도 포함하고 있다.



그림 6.2 NI WSN flatform

(4) 송신장치는 화상기록장치에서 수집된 데이터를 컴퓨터로 보내는 장치로서 MW-9000N 무선공유기를 사용한다. 이 송신장치는 계측 데이터를 실시간으로 전송할 수 있도록 하여 컴퓨터를 통해 저장 및 실시간 모니터링 가능하다. 이 무선 공유기는 근거리용으로써 출력범위는 반경 400m이며, 2.4Ghz 대역과 5Ghz 대역의 전파를 사용해 최고 300Mbps를 지원한다. 이는 전파 도달 범위가 넓고 강하여 벽체나 주변 구조물의 방해에도 데이터의 소실이 적어 근거리 데이터 전송으로 적절하다. MW-9000N 무선공유기 사양은 다음 표 6.1과 같다.

표 6.1 무선송신장치의 사양

항목	사양
LAN Port	4×RJ45, 10/100Mbps (Auto MDI/MDIX)
WAN Port	1×RJ45, 10/100Mbps (Auto MDI/MDIX)
표준규격	Wireless IEEE 802.11n/11b/11g
데이터 속도	max physical rate up 300Mbps in 802.11n mode 6/9/12/18/24/36/48/54Mbps (IEEE802.11g) 1/2/4.4/11Mbps (IEEE802.11g)
무선대역	2.4GHz band width
적용범위	per cell indoore approx. 35-22 meters per cell outdoore up to 100-400 meters
채널	America/FCC : 2.412~2.462GHz (11 Channels) Japan/TELEC : 2.412~2.484GHz (14 Channels) Europe/ETSI : 2.412~2.472GHz (13 Channels)
안테나	Antenna 5dBi 3개
파워	AC 5V/2A
작동온도	0~40, Humidity 10%~90% non-condensing
운영체제	win 98 SE/Me/200/XP/VISTA/LINUX/MAC

(5) Zigbee는 저전력의 근거리 무선통신 기술로 무선 센서 네트워크, 무선 제어 네트워크에 적합한 무선 네트워크 기술이다. IEE 802.15.4와 ZigBee Alliance에서 국제표준 기술로 개발

하고 있는 근거리 무선 네트워크 기술로서 특징은 표 6.2와 같다.

표 6.2 근거리 무선 네트워크 기술의 특징 (ZigBee)

특징
- 비허가 주파수 대역 2.4 GHz (global), 915 Mhz (Americas), 868Mhz (Europe)의 동작 주파수 대역 - 데이터 전송속도는 20Kbps~250Kbps 지원
- 통신거리는 대략 30m 정도 - 전파규제의 허용정도에 따라 100m 이상의 통신도 가능
- 홈네트워킹, 센서 네트워킹에 알맞은 기술
- 저전력·저비용 장점으로 차별화

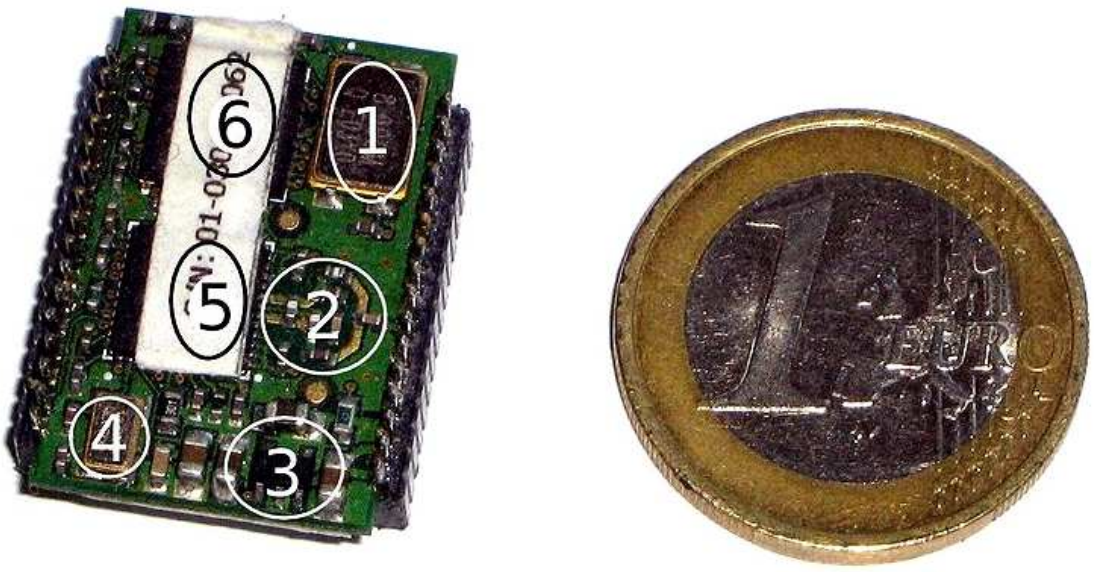


그림 6.3 ZigBee 네트워크 기술의 무선 계측장비



그림 6.4 ZigBee 이용분야

(6) 와이브로 (WiBro)는 Wireless Broadband Internet의 줄임말로 휴대형 단말기를 이용하여 정지 및 이동중에 언제, 어디서나 고속의 전송속도 (약 1Mbps급)로 인터넷에 접속하여 다양한 정보 및 콘텐츠 사용이 가능한 초고속 인터넷 서비스를 말한다. 즉, 실내의 유선 초고속 인터넷 서비스를 실외에서 이동 중에도 사용할 수 있도록 확장하는 개념인데, 이는 2.3GHz 주파수 대역을 이용하여 셀 반경 1Km이내, 이동시 최소 60Km/h 이상에서도 끊김 없는 무선 인터넷 서비스를 보장하고, 보다 저렴하게 무선 인터넷을 이용할 수 있는 새로운 서비스이다. 현재에는 70Km/H의 이동성과 가입자당 1Mbps의 전송속도까지 지원하는 수준으로 개발되었으며, 상용화되면 100Km/H 의 이동성과 3Mbps의 전송속도까지 가능할 것으로 전망된다.

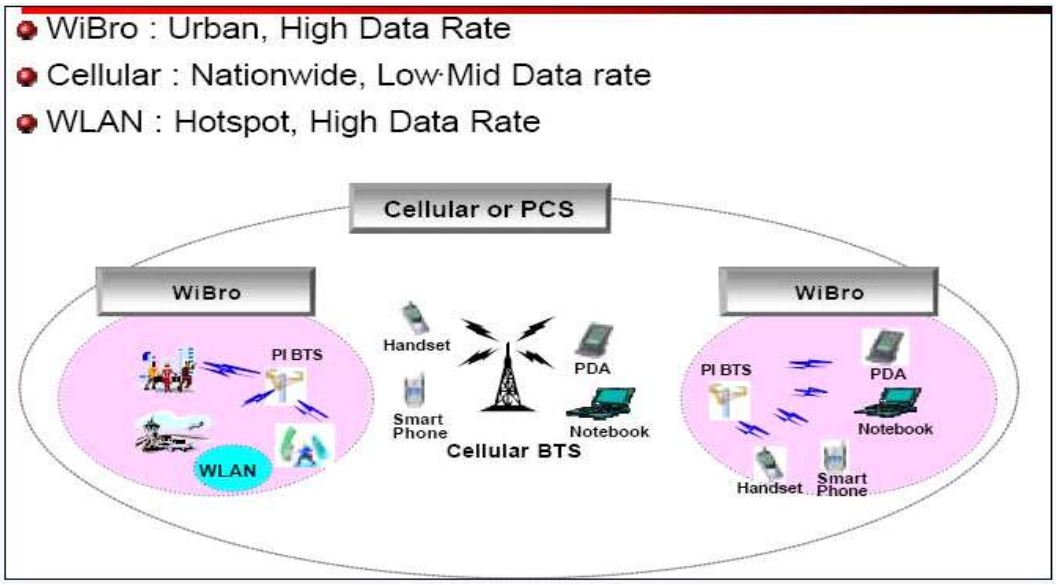


그림 6.5 Wibro 모니터링 시스템

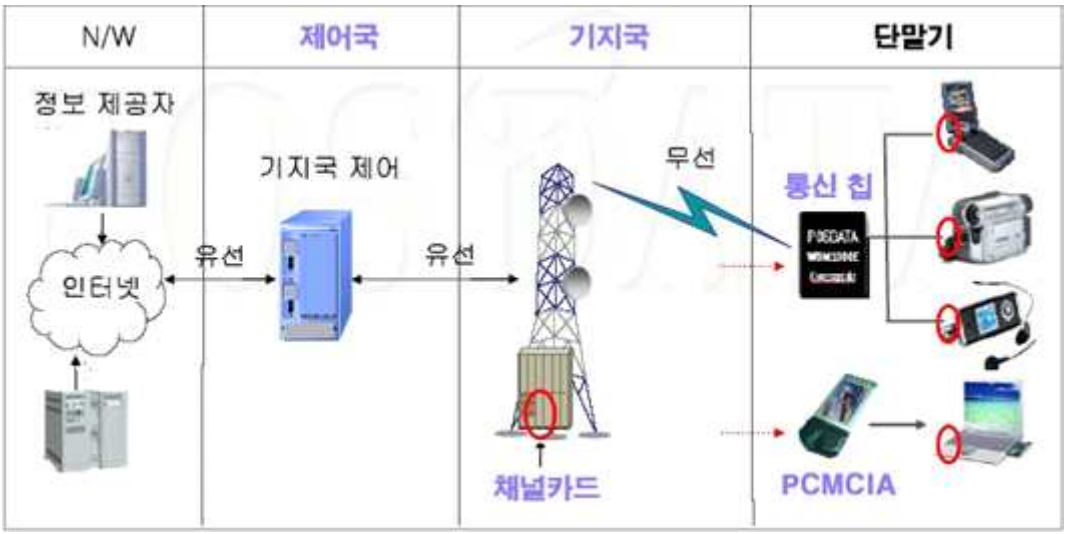


그림 6.6 와이브로 시스템 경로

● 휴대인터넷 와이브로 (WiBro)의 특징

1) 높은 전송속도

지금의 ADSL(약 1Mbps) 정도의 전송속도로 이동통신사의 무선 인터넷이나 3.5G HSDPA보다 데이터 전송에 유리하다.

2) 이동성

지금도 유선사업자가 제공하는 넷스팟과 같은 무선랜이나 기존 '코드분할다중접속(CDMA : Code Division Multiple Access)'을 이용해 무선 인터넷을 할 수 있다. 하지만 무선랜은 도달거리가 짧아서 이동 중일 때나 'AP(Access Point)'가 멀어지는 실외에서는 서비스가 되지 않는다.

3) 저렴한 요금

휴대전화상에서 사용 가능한 EV-DO 무선인터넷은 사용범위도 넓고 접속도 비교적 잘 되지만, 요금이 너무 비싸다. 하지만 휴대인터넷은 현재의 유선인터넷보다 약간 비싼 월 3~4만원 정도의 비용만 부담하면, 인터넷을 마음대로 사용할 수 있기 때문에 유선 인터넷과 이용료 차이가 크게 줄어든다.

4) 다양한 컨텐츠는 현재 CDMA무선 인터넷은 SK텔레콤 네이트나 네이트닷컴에 입점한 콘텐츠만 주로 볼 수 있지만 와이브로 단말기에서는 유선 초고속인터넷에서처럼 자유롭게 인터넷의 바다를 항해할 수 있다. 앞으로는 telematics나 홈네트워크와 연계된 컨텐츠도 나올 가능성이 있다.

표 6.3 WiBro의 특징

구분	특징	계측분야
WiBro	높은 전송속도	기존의 CDMA 방식으로 이용하던 계측 데이터 전송 방식을 대체 → 통신비용 저렴, 전송속도 증가, 상시계측 가능
	이동성	
	저렴한 요금	

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 첨단도시개발 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.