

(옆면)

(앞면)

19CTAP-
C143249-
02

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 19CTAP-C143249-02

콘크리트 교량의 내하력 평가를 위한 고정하중 응력계측 기술 개발

최종보고서

2019

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

콘크리트 교량의 내하력 평가를 위한 고정하중 응력계측 기술 개발

최종보고서

2020.02.21.

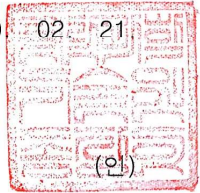
주관연구기관 / 울산과학기술원
공동연구기관 / 서울시립대학교 산학협력단

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘콘크리트 교량의 내하력 평가를 위한 고정하중 응력계측 기술 개발’ (연구개발 기간 : 2018. 04. 17. ~ 2019. 12. 31.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2020. 02. 21. 

주관연구기관명 : 울산과학기술원

(대표자) 이용훈

공동연구기관명 : 서울시립대학교 산학협력단

(대표자) 김강수



주관연구기관책임자: 이영주

공동연구기관책임자: 조수진

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C143 249-02	해당 단계 연구 기간	2019.01.01. ~2019.12.31	단계구분	2단계/2단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전과제 기초원천분야			
연구과제명	대과제명	콘크리트 교량의 내하력 평가를 위한 고정하중 응력계측 기술 개발			
	세부과제명	콘크리트 교량의 내하력 평가를 위한 고정하중 응력계측 기술 개발			
연구책임자	이영주	해당단계 참여연구원 수	총: 9 명 내부: 9 명 외부: 0 명	해당단계 연구비	정부: 100 천원 민간: - 천원 정부외: - 천원 상대국: - 천원 계: 100 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 9 명 내부: 9 명 외부: 0 명	총 연구비	정부: 150 천원 민간: - 천원 정부외: - 천원 상대국: - 천원 계: 150 천원
연구기관명 및 소속 부서명	주관: 울산과학기술원 도시환경공학부 공동: 서울시립대학교 산학협력단 토목공학과			참여기업명: -	
국제공동연구 위탁연구	상대국명: - 연구기관명: -			상대국 연구기관명: - 연구책임자: -	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제
-------------------------	------

9대 성과 등록·기탁번호

[illegible]

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

[illegible]

요약	보고서 면수
2축 고정응력 계측 알고리즘 개발 - 홀드릴링법에 DIC기법을 적용하여 응력을 계산하는 알고리즘 - 응력계측 기술의 현장 적용성 향상기술 개발 - 카메라 떨림에도 변위를 계측할 수 있는 기술 - 고정하중 응력을 활용한 내하력 평가기술 개발 - 내하력 평가에 계측된 고정하중 응력을 활용	89

국문 요약문

연구의 목적 및 내용	콘크리트 교량의 내하력 평가를 위한 DIC 기반 고정하중 응력계측 기술 개발																			
연구개발성과	1. 2축 고정하중 응력계측 기술 ○ 홀드릴링법에 전 영역 변위장을 활용하여 1축 고정하중 응력을 계측하는 알고리즘 ○ 홀드릴링법에 전 영역 변위장을 활용하여 2축 고정하중 응력($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$)을 계측하는 알고리즘 ○ 수치검증 · 시편실험을 통한 고정하중 응력계측 알고리즘 검증 ○ 응력이완 유도용 최적의 홀 직경 · 깊이 결정을 위한 파라미터 스터디 2. 고정하중 응력계측의 현장 적용성 향상을 위한 시스템 ○ DIC 기술을 통한 변위장 계측 시 카메라 진동에 의한 변위장의 오차를 줄이는 이미징 시스템 ○ 홀드릴링 과정에 카메라 이동으로 유발되는 오차를 최소화하여 응력계산이 가능한 알고리즘 ○ 수치검증 · 시편실험을 통한 고정하중 응력계측 알고리즘 검증 3. 고정하중 응력을 활용한 향상된 콘크리트 교량 내하력 평가기술 ○ 콘크리트 교량의 내하력 평가에 고정하중 응력을 추가적으로 도입하여 기존 평가기술 대비 38% 성능이 향상된 교량 내하력 평가기술 < 연구개발성과 유형 > <table> <tr> <th>구분</th><th>논문</th><th>특허</th><th>보고서 원문</th><th>연구 시설 · 장비</th><th>기술요약 정보</th><th>소프트 웨어</th></tr> <tr> <td>성과</td><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td>-</td><td>-</td><td>2</td></tr> </table>						구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	성과	5	2	1	-	-	2
구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어														
성과	5	2	1	-	-	2														
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 고정응력을 계측할 수 있는 기술로써 실구조물의 응력계측을 통한 유지관리 효율성 향상이 기대됨 ○ 카메라 이동이 가능하므로 현장에서 카메라 고정 없이 사용할 수 있어 실용성 증대됨 ○ 향상된 내하력 평가기술로 국내 교량의 80%를 차지하는 콘크리트 교량의 유지관리 신뢰도가 높아지고, 안전한 사회 구축이 가능할 것으로 기대됨 ○ 철로, 강합성교 등 다양한 토목구조물에서 고정응력을 통한 유지관리 기술 개발을 촉진할 것으로 기대됨																			
핵심어 (5개 이내)	내하력 평가	고정하중 응력	DIC 기술	콘크리트 교량	홀-드릴링															

SUMMARY

Purpose & Contents	Development of DIC-based static stress measurement system for improved load carrying capacity of concrete bridges																			
Results	1. Static stress measurement algorithm for concrete bridges ◦ Uniaxial stress measurement algorithm by means of 2D displacement field ◦ Biaxial stress measurement algorithm by means of 2D displacement field ◦ Numerical and experimental validation ◦ Parameter study on optimal hole size 2. Static stress measurement system with the improved field applicability ◦ Field applicable imaging system for the DIC-based displacement field measurement ◦ Stress estimation tailored to field application in disregard of error induced by the camera motion during hole-drilling ◦ Numerical and experimental validation 3. Load carrying capacity assessment method by using the static stress ◦ Improved load carrying capacity evaluation method by using live load-induced stress and static stress (performance improvement:38%) < Research achievement > <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th><th>Journal</th><th>Patent</th><th>Project report</th><th>Equipment</th><th>Technical report</th><th>Software</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Achievement</td><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td>–</td><td>–</td><td>2</td></tr> </tbody> </table>						Category	Journal	Patent	Project report	Equipment	Technical report	Software	Achievement	5	2	1	–	–	2
Category	Journal	Patent	Project report	Equipment	Technical report	Software														
Achievement	5	2	1	–	–	2														
Expected Contribution	◦ Field application of the Static stress measurement method for the structural health monitoring ◦ Improved field applicability by providing camera movement during the hole-drilling ◦ Improved load capacity evaluation technology to increase the reliability of maintenance of concrete bridges, which account for 80% of domestic bridges ◦ Expected to promote the development of maintenance technology through fixed stress in various civil structures such as railway and steel composite bridge																			
Keywords	Load carrying capacity	Static stress	Digital image correlation	Concrete bridge	Hole-drilling															

< Index >

1. Overview of R & D project	1
2. Technical trend of R & D	5
3. Content and result of R & D	9
4. Research achievements	77
5. Plan for application of R & D	80
6. Technical information collected from abroad	82
7. Security level of R & D project	85
8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Information System	85
9. Performance of safety measures implemented by laboratories in accordance with R & D projects	86
10. Representative R & D outcomes	88

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	5
3. 연구수행내용 및 성과	9
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	77
5. 연구개발성과의 활용 계획	80
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	82
7. 연구개발성과의 보안등급	85
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	85
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	86
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	88

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 필요성

○ 연구개발의 개요

□ 연구목표: 콘크리트 교량의 내하력 평가를 위한 DIC 기반 고정하중 응력계측 기술개발

- 콘크리트 교량을 대상으로 DIC 기반 고정하중 응력계측 기술을 개발하기 위하여 홀-드릴링 방법을 이용, 응력이완 변형 영상을 취득하고, 초정밀 DIC 기반 변위장 계측을 통해 고정하중 응력계측 최적화 알고리즘을 개발하여 고정하중 응력을 계측하고자 함



그림 1. 연구과제의 개요

○ 노후화된 콘크리트 교량의 증가

□ 노후화된 콘크리트 교량의 현황 및 향후 전망

- 교량은 국가의 경제 활동에 필수적인 사회기반 시설물로, 국내에서는 1970년대에 집중적으로 건설된 이후 해마다 총 교량개소가 약 2~4%로 꾸준히 증가하고 있음
- 2016년 기준으로 국내 총 교량 수는 32,326개소이며, 이 중 콘크리트 교량은 총 26,398개소로 전체 교량의 약 82%를 차지하고 있음
- 이 중 공용연수가 30년 이상인 노후교량의 수는 3,543개소로 전체 교량의 약 13%에 달하며(2017년 기준), 이러한 노후교량의 수는 10년 후 약 10,878개소로 3배 이상 크게 급증할 것으로 예상됨
- 교량 노후화의 급격한 증가에 효과적으로 대응하기 위한 체계적인 유지관리가 필요한 실정임

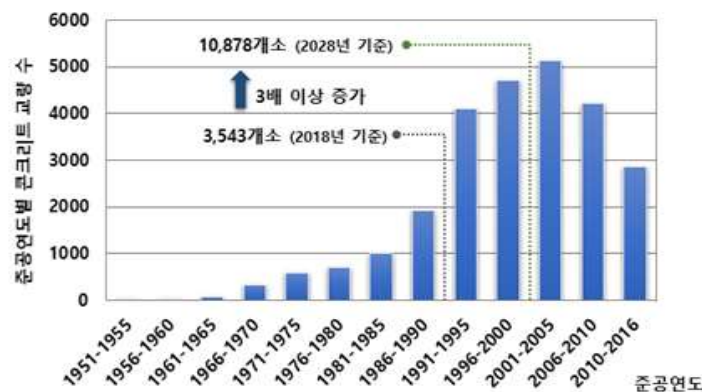


그림 2. 국내 교량 및 노후교량 현황

(출처: 국토교통부, 2017 도로교량 및 터널 현황)

○ 콘크리트 교량용 고정하중 응력계측 필요성 증대

□ 콘크리트 교량 유지관리 기술 현황 및 한계점

- 콘크리트 교량의 내구수명은 초기품질, 환경적 요인 및 유지관리 등의 영향을 받음
- 현재 콘크리트교의 상태 및 내구성을 평가하기 위한 내하력 평가는 육안점검, 비파괴시험 및 재하 시험 등을 통해 정기적으로 이루어지고 있으나, 이러한 시험은 주로 활하중에 의한 응력 효과에만 국한됨^{1),2)}

□ 고정하중 응력계측의 필요성

- 콘크리트 교량에서 고정하중에 의해 발생하는 철근과 콘크리트의 응력은 내하력을 평가하기 위한 중요한 요소임. 특히, RC슬래브 교량의 경우 총 설계하중에서 고정하중에 의해 발생하는 주철근 응력이 허용응력의 50~70%를 차지하여 고정하중이 상대적으로 더 중요한 요인이 됨³⁾
- 그러나 고정하중에 의한 교량의 내하력 평가는 주로 설계 단면이나 단순한 현장실측 자료에 의한 이론적인 구조계산에 의존하고 있음
- 특히, 노후교량은 현재 상태에서 요구되는 내하력을 유지하고 있는가의 여부가 매우 중요한 평가 요소이나, 이론적 구조계산은 균열, 부식, 구성 재료의 내구성 저하 및 크리프 변형 등 실질적인 상태 반영의 부재로 정확한 평가가 어려움⁴⁾
- 최근 급증하고 있는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 경우 콘크리트의 압축력 실측이 필수적이거나, 기술의 부재로 압축력을 가하는 텐던의 장력의 추정하여 교량의 상태를 간접적으로 평가하고 있음
- 사용중인 교량의 내하력을 실질적으로 평가하기 위해서는 고정하중 응력의 정확한 평가가 요구됨



그림 3. 콘크리트 고정하중 응력계측 기법의 응용 예

□ 콘크리트 교량용 고정하중 응력계측 기술 부재 이유

- 현재 지름 50mm~200mm 정도의 크기로 콘크리트 손상을 가한 후 고정하중 응력을 계측하는 기술이 개발되었으나, 실제 교량에 사용할 경우 구조적 손상을 야기할 수 있어 적용이 어려운 실정임
- 또한 콘크리트에 손상이 가해진 후 이완되는 응력을 계측하기 위해 변형률계를 주로 이용하나, 손상을 가하는 중 변형률계가 손상될 위험이 있어 정확한 고정하중 응력의 계측이 어려움
- 최근 국외에서 콘크리트 시편을 이용하여 50mm 이상의 손상으로 1축 고정하중 응력을 계측하는 기술이 개발되었으나, 2축 주응력을 계측해야 하는 실제 교량에의 적용은 어려운 실정임
- 따라서 실제 콘크리트 교량에 적용할 수 있는 고정하중 응력계측기술의 개발이 필요함

1) 이학은, 윤영수, 이병철, 김영민, 정우용 (1998) "국내 콘크리트 교량에 적합한 비파괴 시험법 적용에 관한 연구," 한국콘크리트 학회 1998년도 가을 학술발표대회 논문집: 737 - 742

2) 심형섭, 강보순 (2007) "구조물 진단에 있어 비파괴 시험법의 성능평가," 구조물진단학회지, 11(3): 167 - 175

3) 전남대공업기술연구소 1994(a) 영천교 구조안전진단 보고서. CNU/SEL 94-03

4) 오출환 (2010) "공용중인 콘크리트 교량의 내하력 평가 방법 비교", 석사학위논문, 전남대학교 중앙도서관

2. 제안하는 기술의 개요

○ 제안 기술: 초정밀 DIC 기반 콘크리트 교량용 고정하중 응력계측 기술개발

- 응력이완법과 DIC 기반 변위장 계측 기법을 활용하여, 공용중인 콘크리트 교량의 고정하중 응력을 계측하는 기술을 개발하고자 함
- 기반이 되는 고정하중 응력계측 프로세스는 아래와 같음

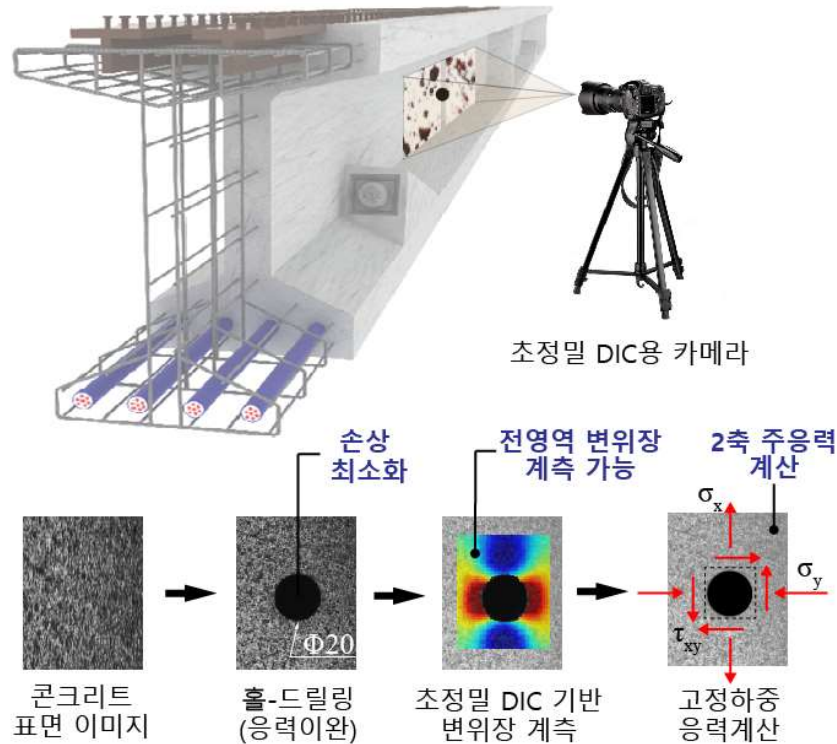
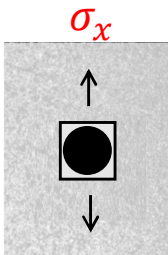
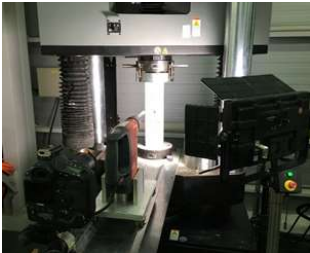
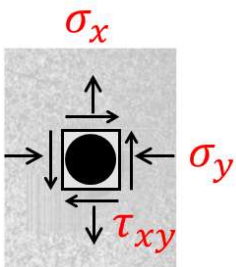


그림 4. DIC를 이용한 고정하중 응력계측 프로세스

- 기존 기술의 한계점과 제안하는 기술은 다음과 같음

	고정하중 응력계측 축방향	카메라 진동 허용 유무	실험의 범위
기 존 기 술	 1축 고정하중 응력계측	 카메라 진동 허용 X	 실내 시편 실험
제 안 하 는 기 술	 2축 고정하중 응력계측	 카메라 진동 허용 0	 실외 폐교량 실험

○ 제안 기술의 필요성 및 기존 연구와의 차별성

□ 차별화 방안 1 : 변위장 계측을 통한 2축 고정하중 응력계측 기술 개발

- 선행연구과제에서는 고정하중 응력계측 시 변형률을 이용한 1축 고정하중 응력계산에 국한되었고 낮은 계측 정확도를 보임
- 유한요소모델을 이용하여 응력을 계산하므로 비효율적으로 고정하중 응력을 계산함
- 본 연구가 제안하는 기술은 콘크리트 표면의 수평/수직의 전 영역 변위장을 계측하여 응력계측에 활용하며, 2축 고정하중 응력을 계산하므로 높은 계측 정확도를 보임. 또한 물리적 현상을 직접 이용하므로 효율적인 계산이 가능함

□ 차별화 방안 2 : 고정하중 응력계측 기술의 현장 적용성 향상

- 선행연구과제에서는 카메라 진동에 따른 높은 계측오차를 보였고, 계측 소프트웨어의 부재로 인해 기술 보급에 어려움이 있었음
- 본 연구가 제안하는 기술은 현장 적용성을 향상시키기 위하여 외부 진동으로 인해 생기는 카메라 위치변동에 상관없이 고정하중 응력을 계측할 수 있고, 고정하중 응력계측 소프트웨어를 개발하여 카메라와 드릴만으로 간편하게 고정하중 응력계측이 가능함

□ 차별화 방안 3 : 폐교량을 활용하여 실교량 구조물에 적용 검증

- 선행연구과제에서는 실험실 규모에서 1축 방향의 응력만 측정하였고, 계측된 고정하중 응력의 활용도에 대해서는 연구하지 않았음
- 본 연구가 제안하는 기술은 실교량 구조물에서 2축 주응력을 계측하고, 계측된 고정하중 응력을 활하중과 함께 교량의 내하력 평가에 이용하여 신뢰도 높은 교량 유지관리 기술을 유도함

○ 기술개발 성숙도

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

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

○ 콘크리트용 고정하중 응력계측 기술

- 콘크리트 교량의 고정하중 응력계측을 수행한 사례가 한 차례 보고된 바 있음⁵⁾
- 변형률계 양쪽에 응력차단홈(500mm간격 150mm깊이)을 만든 뒤, 계측되는 1축 변형을 변화로 1축 고정하중 응력을 추정함

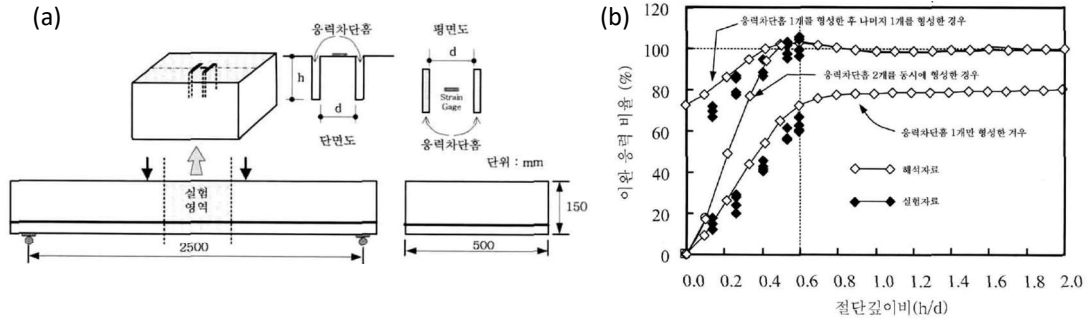


그림 5. 절단법을 이용한 콘크리트 교량의 고정하중 응력 측정 기술 개발
(a) 절단법을 이용한 고정하중 응력 실험 방법, (b) 실험결과와 해석 결과의 비교

- 본 방법을 이용해 3경간 콘크리트 교량을 대상으로 고정하중 응력을 추정한 결과, 이론값과 비교하여 오차율이 최대 39%로 나타났음

2. 국외 현황

○ 응력이완법을 통한 잔류응력 계측기술

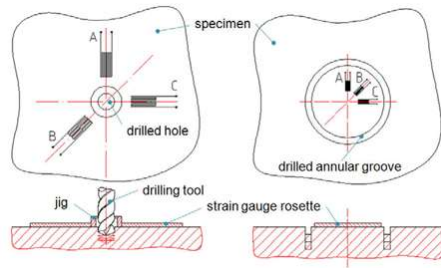
- 응력이완법은 손상을 가해 응력을 이완시키고 이완되는 응력을 계측하는 기술로 1930년대 Mathar에 의해 개발되어 현재에는 제품 생산 시 잔류응력 측정에 많이 활용됨^{6), 7)}



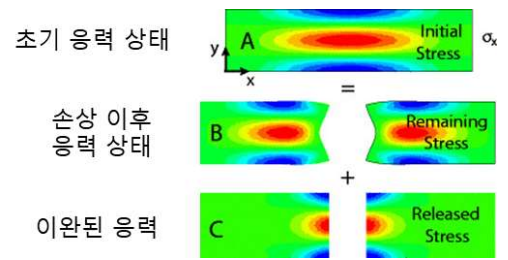
그림 6. 시중에 판매되는 홀드릴링용 RS200 Milling Guide

5) 박대성, 김우. (2006) “콘크리트 교량의 고정하중 응력에 관한 실험적 측정방법,” 대한토목학회 논문집, 26(4): 701-706
 6) Mathar, J. (1934) “Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes,” Transaction of ASME, Iron & Steel, 56: 249-254
 7) Schajer, G.S. (2010) “Relaxation methods for measuring residual stresses: techniques and opportunities,” Experimental Mechanics, 50: 1117-1127

- 응력이완 방식으로 홀-드릴링 방법, 코어-드릴링 방법, 딥-홀 방법, 슬릿 방법 등이 개발되었으며, 홀-드릴링 방법과 코어-드릴링 방법이 가장 많이 쓰임⁸⁾



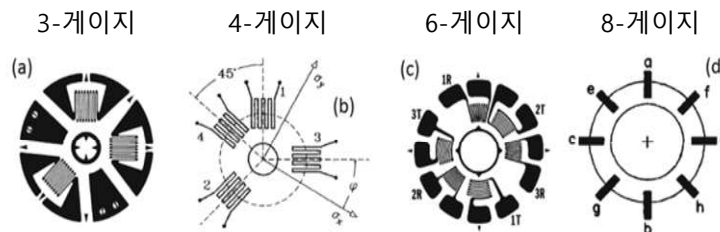
(a) 홀-드릴링 방법(좌) & 코어-드릴링 방법(우)



(b) 이완된 응력

그림 7. 응력이완법에 사용되는 손상종류 및 이완된 응력

- 이완되는 응력은 손상부위 주위에 부착된 변형률계를 이용하여 계측되며, 1950년에 3개의 Rosette 변형률계(3-게이지)를 이용하여 이완되는 응력을 계측하기 시작하였으며⁹⁾, 더 많은 변형률계(4-게이지, 6-게이지, 8-게이지)를 이용하여 정확도를 높이기 위한 방법이 제안되었음¹⁰⁾



(a) 응력이완법을 위한 Rosette 변형률계 종류



(b) 실제 적용 예시

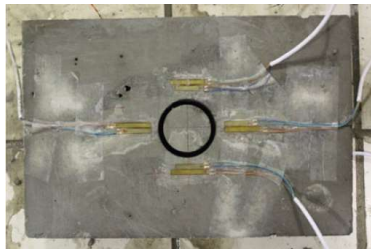
그림 8. 응력이완법에 사용되는 변형률계

- 지속적 발전으로 1981년 ASTM 기준(ASTM E837)¹¹⁾이 마련되었으며, 그 적용 범위, 절차, 조건, 잔류응력 계산법 등이 규정되어 있음

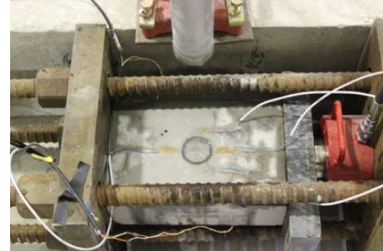
8) Šarga, P., and Menda, F. (2013) "Comparison of ring-core method and hole-drilling method used for determining residual stresses," American Journal of Mechanical Engineering, 1(7): 335-338
 9) Soete, W. and Vancrombrugge, R. (1950) "An Industrial method for the determination of residual stresses," Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, VIII(1): 17-28
 10) Schajer, G.S. (2010) "Advances in hole-drilling residual stress measurements," Experimental Mechanics, 50: 159-168
 11) ASTM. (2008) Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method. Standard test method E837-08. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA

○ 콘크리트에 적용된 잔류응력계측기술

- 1993년에 ASTM 표준 3 게이지 Rossette 변형률계를 이용한 홀-드릴링 방법을 처음으로 콘크리트 구조물 고정하중 측정에 적용하였음¹²⁾, ¹³⁾. 슬릿 방법¹⁴⁾과 코어-드릴링 방법¹⁵⁾에 관한 연구도 진행되었으며, 추가적으로 손상 부위에 계측기를 부착한 강재를 삽입하여 응력을 측정하는 시도도 수행되었음¹⁶⁾
- 중국 연구그룹에서는 2015년에 지름 52.78mm의 링-코어로 손상 가하여 응력이완하고, 손상부위 주위에 설치된 4개 수평방향 변형률계를 이용하여 1축 하중에 대한 응력을 10% 이내의 오차율로 계측함¹⁷⁾



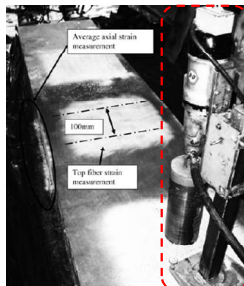
(a) 콘크리트 시편 실험 셋업



(b) 실험 진행 모습

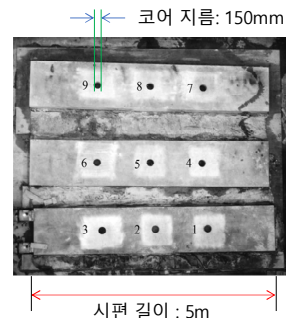
그림 9. 고정하중 응력계측 실험모습(2015)

- 미국에서는 2011년에 지름 150mm 크기의 코어로 콘크리트 시편을 160mm 깊이까지 손상을 가한 뒤, 손상부위 주위의 세 방향 변위를 이용하여 5m 크기의 콘크리트 시편에서 약 10% 정도의 오차로 1축 고정하중 응력을 추정함¹⁸⁾



사용된 코어 드릴

(a) 실험 셋업



(b) 코어-드릴링 후 시편 모습

그림 10. 고정하중 응력계측 실험모습(2011)

- 12) Owens, A. (1993) "In-situ stress determination used in structural assessment of concrete structures," Strain, 29(4): 115-124
- 13) Owens, A., Begg, D.W., Gratton, D.N., and Devene, M.A. (1994) "A new in-situ stress determination technique for concrete bridges," Proceedings of the Centenary Year Conference on Bridge Assessment, Management and Design, Cardiff, Amsterdam: 423-428
- 14) Abdunur, C. (1993) "Direct access to stresses in concrete and masonry bridges," Proceedings of the Second International Conference on Bridge Management, University of Surrey, Guildford, UK
- 15) Mehrkar-Asl, S. (1996) "Concrete stress-relief coring: theory and application," Proceedings of FIP Symposium on Post-tensioned Concrete Structures, London, UK: 569-576
- 16) Ryall, M.H. (1994) "The measurement of in-situ stresses in concrete bridge decks using an instrumented hard inclusion technique," Proceedings of the Centenary Year Conference on Bridge Assessment, Management and Design, Cardiff, Amsterdam, Netherlands: 417-422
- 17) Ruan, X., and Zhang, Y. (2015) "In-situ stress identification of bridge concrete components using core-drilling method," Structure and Infrastructure Engineering, 11(2): 210-222
- 18) Trautner, C., McGinnis, M., and Pessiki, S. (2011) "Application of the incremental core-drilling method to determine in-situ stresses in concrete," ACI Materials Journal, 108(3): 290-299

3. 국내외 기존 콘크리트 고정하중 응력계측 연구의 한계점

○ 변형률계 기반 기술 - 응력이완을 위한 큰 손상 필요

- 응력 이완을 위하여 지름 50mm-200mm 수준의 큰 홀 드릴링이 필요함
- 충분한 응력이완을 위해서는 깊이 150mm 이상의 큰 손상이 필요함
- 정확한 변형률계의 위치 및 부착 방향 정보가 필요하며, 소수의 지점(8개이지 이용시 최대 8지점)에서의 변형률을 활용하기 때문에 한 변형률계의 오차에 취약함

○ DIC 기반 기술 - 카메라 움직임에 의한 어려

- 시편과 카메라 사이에서 홀드릴링이 일어나지만, 드릴링 중에 발생하는 진동으로 인해 카메라가 떨리게 되며, 이로 인해 어려가 유발됨
- 카메라 움직임은 계측되는 변위장을 왜곡시키며, 이로 인해 정확한 응력값 추정이 어려워짐

○ 고정하중 응력의 실구조물 유지관리 활용방안 부족

- 기존 기술은 1축 고정하중 응력만 추정이 가능하며, 2축 고정하중에 대한 기술검증이 이루어지지 않음
- 계측되는 고정하중 응력을 내하력 평가기술 개선 등에 활용하는 실질적인 유지관리 기술 개발이 부족함

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 연구개요

1-1. 최종 목표

구분	내용
최종 목표	콘크리트 교량의 내하력 평가를 위한 DIC 기반 고정하중 응력계측 기술 개발
세부 목표	세부목표 1: 콘크리트 교량용 변위장을 이용한 고정하중 응력계측 알고리즘 개발 ○ 변위장을 활용한 2축 고정하중 응력계측($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) 알고리즘 개발 ○ 파라미터 스터디를 통한 최적화된 콘크리트 홀 직경 및 깊이 분석 ○ 시편 실험을 통한 고정하중 응력계측 프로세스 검증 세부목표 2: 고정하중 응력계측의 현장 적용성 향상을 위한 시스템 개발 ○ 고정하중 응력계측의 현장 적용성 향상을 위한 DIC 기술 기반 정밀 변위장 계측 기술 개발 ○ 실험교량용 고정하중 응력계측 시스템(하드웨어 및 소프트웨어) 개발 및 제작 ○ 시편 실험을 통한 실험교량용 응력 계측 시스템 성능평가 및 개선 세부목표 3: 고정하중 응력을 활용한 향상된 콘크리트 교량 내하력 평가기술 개발 ○ 재하시험 시 활하중에 의한 교량의 응답과 고정하중 응력계측 결과를 동시에 이용한 향상된 콘크리트 교량 내하력 평가 기법 개발 ○ 폐교량 실험을 통한 고정하중 응력을 활용한 교량 내하력 평가 기술 검증

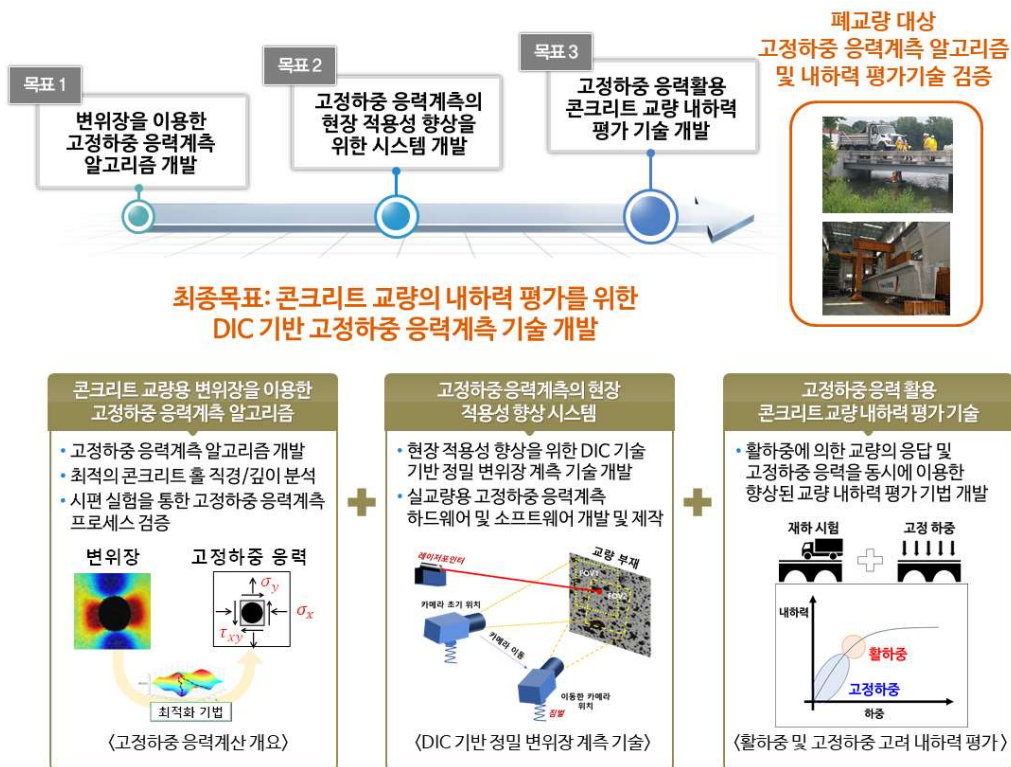


그림 11. 연구개발의 최종목표 및 세부목표

1-2. 1차년도 개발 목표 및 결과

구분(연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2018)	콘크리트 교량용 변위장을 이용한 고정하중 응력계측 알고리즘 개발 (CTE1)	2차원 고정하중 응력 계측 알고리즘 개발	전영역 변위장 기반 고정하중 응 력 계측 알고리즘 개발	알고리즘 개발 완료
		최적화 콘크리트 홀 직경 및 깊이 분석	수치해석 기반 파라미터 스터디를 통한 최적화된 콘크리트 홀 직경 및 깊이 결정	최적의 홀 직경 및 홀 깊이 결정 완료
		시편 실험을 통한 고정하중 응력 계측 프로세스 검증	콘크리트 시편에 UTM으로 하중재 하 후 고정하중에 따른 응력을 계 측하는 실험 수행	시편실험 수행 및 결 과 보고서 작성
	고정하중 응력 계측 시스템의 현장 적용성 향상기술 개발 (CTE2)	카메라 떨림 영향 최소화 하드웨어 설계	카메라 케이지, 로드(rod), 릴리 즈, 렌즈 부착식 조명으로 구성된 하드웨어 설계	하드웨어 제작 완료
		카메라 위치변경 오차 최소화 알고리즘 개발	카메라 위치변경에 따른 오차 원 인 분석 및 오차 최소화 알고리즘 개발	카메라의 In-plane 모 션에 대한 오차 분석 및 보정기술 개발완료



그림 12. 1차 연도 연구기관별 연구개요

1-3. 2차년도 개발 목표 및 결과

구분(연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 연도 (2019)	고정하중 응력계측 시스템의 현장 적용성 향상기술 개발 (CTE2)	실교량용 고정하중 응력계측 시스템 개발	실교량용 고정하중 응력계측 하드웨어를 활용한 카메라 이동이 가능한 고정하중 응력계측 알고리즘 개발	카메라 이동이 가능한 고정하중 응력계측 알고리즘 개발완료
		실교량용 고정하중 응력계측 시스템 검증	카메라 이동이 가능한 고정하중 응력계측 기술의 수치검증	실교량용 응력계측 시스템의 수치검증 완료
			카메라 이동이 가능한 고정하중 응력계측 기술의 실내실험 검증	EVA 소재를 활용한 응력계측 시스템의 실내 실험 검증완료
	콘크리트 교량용 변위장을 이용한 고정하중 응력계측 알고리즘 개발 (CTE3)	활하중 및 고정하중 응력 활용 교량 내하력 평가기술 개발	설계도면상 내하력과 실교량 응력계측 시나리오를 이용한 내하력 평가 정확도 비교	MIDAS CIVIL을 이용한 구조해석을 통하여 실제 응력계측으로 산정된 내하력의 우수성 검증
		폐교량을 이용한 고정하중 응력계측 알고리즘 및 내하력 평가기술 검증	폐교량에서 홀 드릴링간 발생 가능한 위험으로 인해 PSC 거더를 이용한 실내 고정하중 응력계측 실험 수행	개발된 알고리즘의 카메라 흔들림 보정 알고리즘 및 변위장을 이용한 응력계측 성능 검증 진행중



그림 13. 2차 연도 연구기관별 연구개요

2. 연구수행내용

2-1. 콘크리트 교량용 변위장을 이용한 고정하중 응력계측 알고리즘 개발(CTE1)

○ 1축 고정하중 응력계측 (FEM 이용)

□ 1축 고정하중 응력계측 - 개요

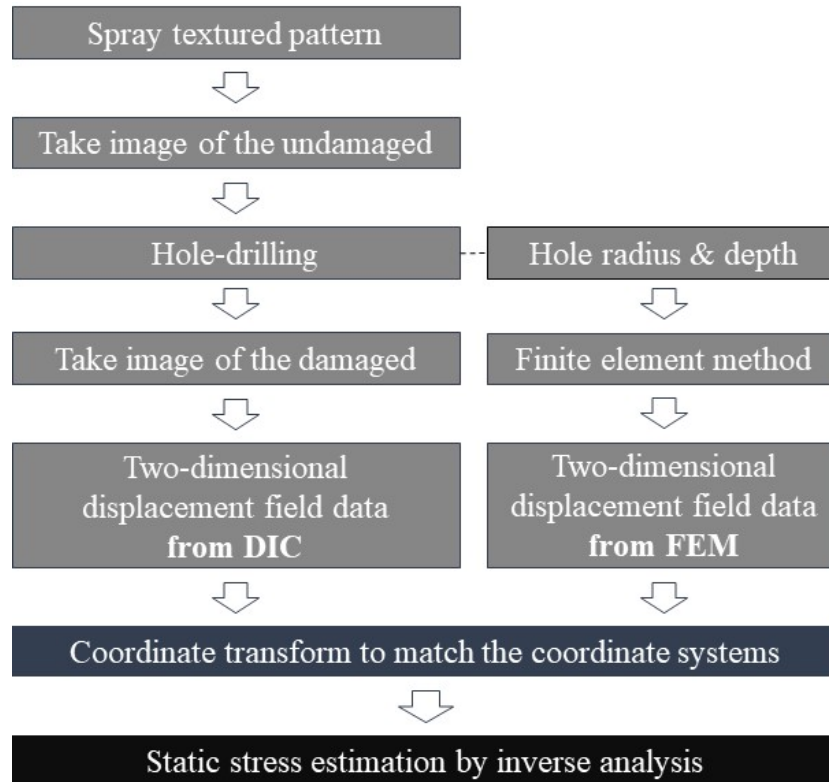


그림 14. 1축 고정하중 응력계측 프로세스

- DIC 기반 고정하중 응력계측 프로세스는 크게 DIC를 활용한 변위장 계측 부분과 유한요소방법(FEM)을 통한 기준 변위장 생성으로 구성되고, 두 변위장 간의 비교를 통해 고정 응력을 계산함
- DIC를 활용한 변위장 계측 부분은 무작위 패턴 생성, 홀 드릴링 전의 이미지 촬영, 홀 드릴링을 통한 응력이완, 홀 드릴링 후의 이미지 촬영으로 나뉨
- FEM을 통한 기준 변위장 생성 부분은 홀 드릴링 시 사용된 홀의 직경과 깊이 정보를 바탕으로 홀드릴링을 묘사한 FE 모델을 구성함. FE 모델에서는 1MPa의 기준응력에서 홀드릴링 시 이루어지는 변위장을 계산함
- DIC로 계측된 실 변위장과 FEM을 통해 계산된 기준 변위장(단위: mm/MPa)은 원점이 서로 다르므로 좌표계를 동일하게 맞춰줌
- 실 변위장을 기준 변위장으로 나눔으로써 고정하중 응력을 계산함

□ 1축 고정하중 응력계측 - DIC를 이용한 변위장 계측 방법

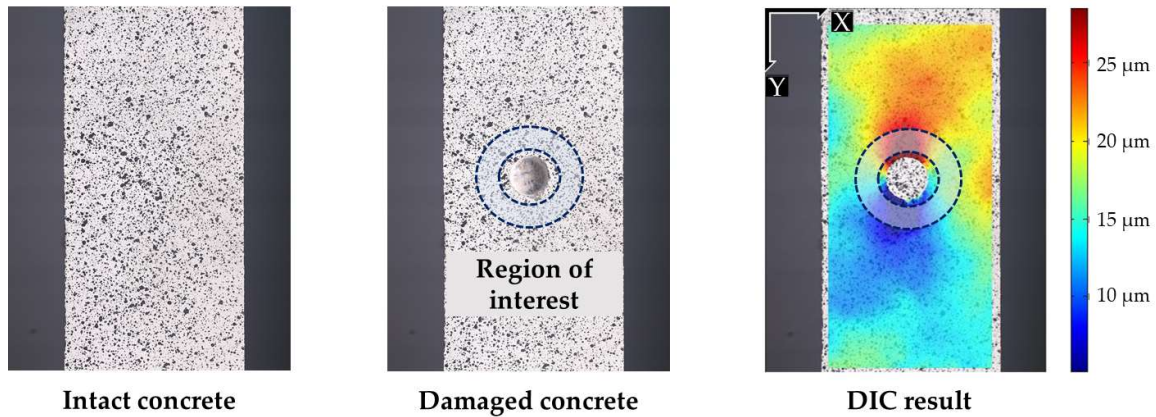


그림 15. DIC 변위장

- 고정된 카메라로 홀드릴링 전과 후의 콘크리트 표면의 이미지를 촬영함
- 시편에 홀드릴링으로 이완되는 변위장을 DIC 기술로 계측함
- 홀에서 일정 거리에 떨어진 변위장만 1축 고정하중 응력계측에 활용함



그림 16. Ncorr를 이용한 변위장 계산

- 오픈소스 소프트웨어인 Ncorr를 활용하여 변위장을 계산함
- 본 소프트웨어에는 Reference Image와 Current Image에 각각 홀 드릴링 전과 후의 이미지를 로드함
- Subset 사이즈는 10으로 설정하여 10x10 수준의 윈도우를 subset으로 이용함
- Subset spacing은 1로 하여 각 픽셀에서의 변위장이 계산될 수 있도록 함

□ 1축 고정하중 응력계측 - FEM을 통한 기준 변위장 생성

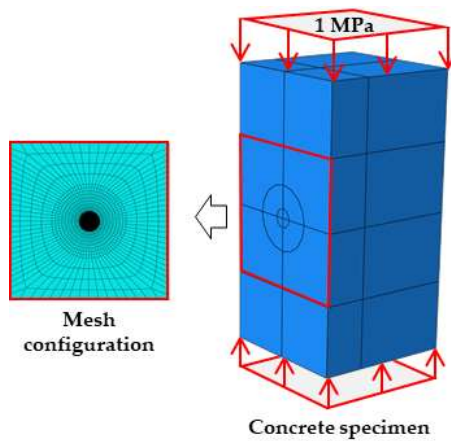


그림 17. 아바쿠스(FEM 소프트웨어)를 통한 홀드릴링 구현

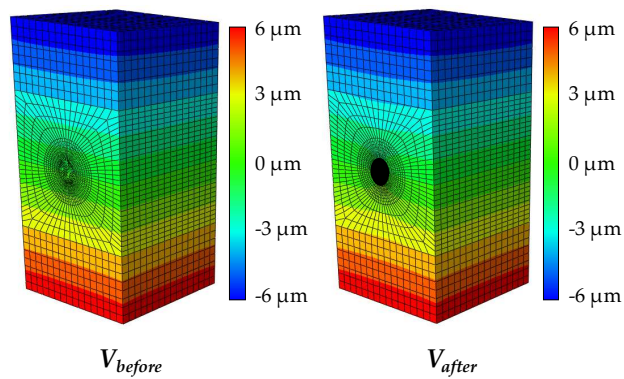


그림 18. 아바쿠스(FEM 소프트웨어)를 통한 홀드릴링 전 후의 변위장 계산

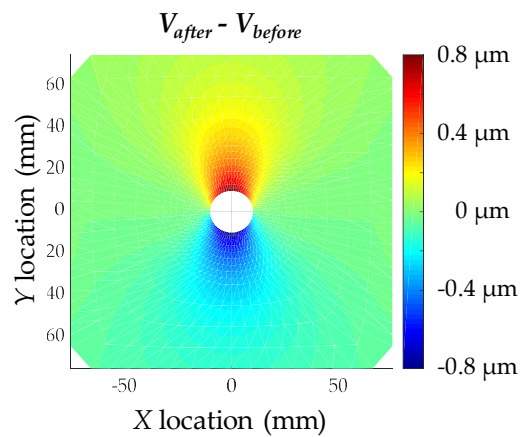


그림 19. FEM을 통한 기준 변위장 생성

- 1MPa의 이완 응력이 작용하고 있는 콘크리트 시편을 FE로 생성함
- 홀드릴링 전후의 변위장을 구한 뒤, 두 변위장 간의 차이를 통해 기준 변위장을 구축함

□ 1축 고정하중 응력계측 - 1축 고정응력 계측 알고리즘

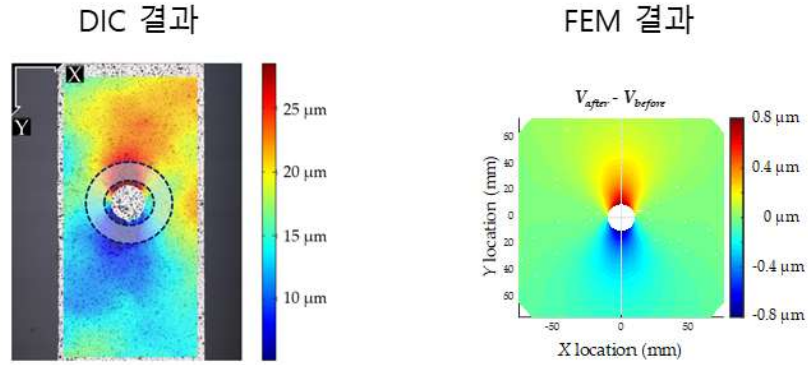


그림 20. 기준 좌표계 비교

- DIC 결과의 기준 좌표계는 주로 위와 같이 왼쪽 위를 원점인 (0,0)이 됨
- FEM 결과의 기준 좌표계는 사용자에게 따라 다르게 설정되며, 주로 위와 같이 홀 중심을 (0,0)으로 설정할 수 있음
- 따라서 두 기준 좌표계를 동일하게 하는 좌표계 변환 과정이 필요함

$$V_{FEM}(x', y') = V_{FEM}(x - x_0, y - y_0)$$

$$V_{DIC}(x', y') = V_{DIC}(u - u_0, v - v_0)$$

표기	의미
V_{FEM}	기준 변위장 (FE모델로 계산된 변위장)
V_{DIC}	계측 변위장 (홀드릴링에 의한 응력 이완에 따른 변위장)
x	x축 좌표
y	y축 좌표
x_0	홀 중심의 x축 좌표
y_0	홀 중심의 y축 좌표
u	DIC 변위장의 기준이되는 이미지 좌표계의 x축 좌표
v	DIC 변위장의 기준이되는 이미지 좌표계의 y축 좌표
u_0	이미지 좌표계의 상에서 홀 중심의 x축 좌표
v_0	이미지 좌표계의 상에서 홀 중심의 y축 좌표
x'	좌표계 변환 후의 좌표계에서 x축 좌표
y'	좌표계 변환 후의 좌표계에서 y축 좌표

- DIC로 측정된 변위장은 (x,y) 로 구성된 좌표계에서 표현되며, 좌표계 변환을 통해 기준 좌표계를 (x',y') 로 변환함. 이때 홀 센터인 (x_0, y_0) 은 원점 $(0,0)$ 이 됨
- FEM으로 계산된 기준 변위장은 (u,v) 로 구성된 좌표계에서 표현되며, 좌표계 변환을 통해 기준 좌표계를 (x',y') 으로 변환함. 이때 홀 센터인 (x_0, y_0) 은 원점 $(0,0)$ 이 됨
- 좌표변환된 두 변위장은 응력에 따른 비례관계를 가지며, 이러한 관계를 통해 측정된 변위장에서 응력을 환산하게 됨

$$\frac{V_{DIC}(x',y') - V_{DIC}(0,0)}{\sigma} = \frac{V_{FEM}(x',y') - V_{FEM}(0,0)}{\sigma_0}$$

표기	의미
$V_{DIC}(0,0)$	(0,0)에서의 변위 (Rigid Body Motion; Unknown)
$V_{FEM}(0,0)$	(0,0)에서의 변위 (Rigid Body Motion; Known)
σ	고정응력
σ_0	기준응력 (e.g. 1MPa)

- 구속조건에 따라 응력이 가해지고 있는 시편은 홀 드릴링으로 인해 Rigid Body Motion을 보임. 홀 드릴링은 홀 센터의 응력변화를 유발하지 않으므로, 홀 센터인 $V_{DIC}(0,0)$ 와 $V_{FEM}(0,0)$ 에서 보이는 변위는 Rigid Body Motion임
- $V_{DIC}(0,0)$ 은 실제 시편의 rigid body motion을 알기 어려우므로 변수임
- $V_{FEM}(0,0)$ 은 FE모델 설계 과정에서 알 수 있음
- 위의 관계식에서 알려진 변수(known variables)는 $V_{DIC}(x',y')$, $V_{FEM}(x',y')$, $V_{FEM}(0,0)$, σ_0 임
- 위의 관계식에서 미지수(unknowns) $V_{DIC}(0,0)$ 와 σ 이며, 알려진 변수를 통해서 Linear regression을 통해 계산 가능함

$$\begin{Bmatrix} V_{DIC}(0,0) \\ \sigma/\sigma_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & V_{FEM}(x'_1, y'_1) - V_{FEM}(0,0) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & V_{FEM}(x'_n, y'_n) - V_{FEM}(0,0) \end{bmatrix}^+ \begin{Bmatrix} V_{DIC}(x'_1, y'_1) \\ \vdots \\ V_{DIC}(x'_n, y'_n) \end{Bmatrix}$$

- 위의 식에서 +는 Psuedo inverse임
- n개의 점에서 측정된 V_{DIC} 와 계산된 V_{FEM} 을 이용하여 고정응력인 σ 를 계산할 수 있음

□ 1축 고정하중 응력계측 - 시편실험

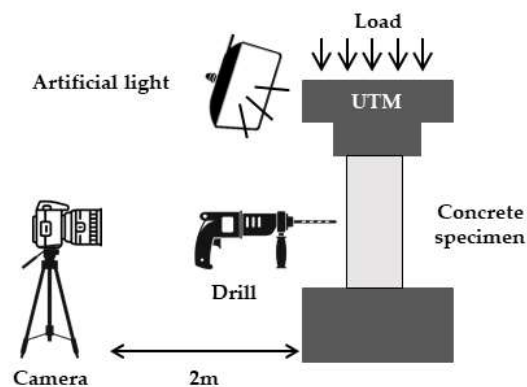
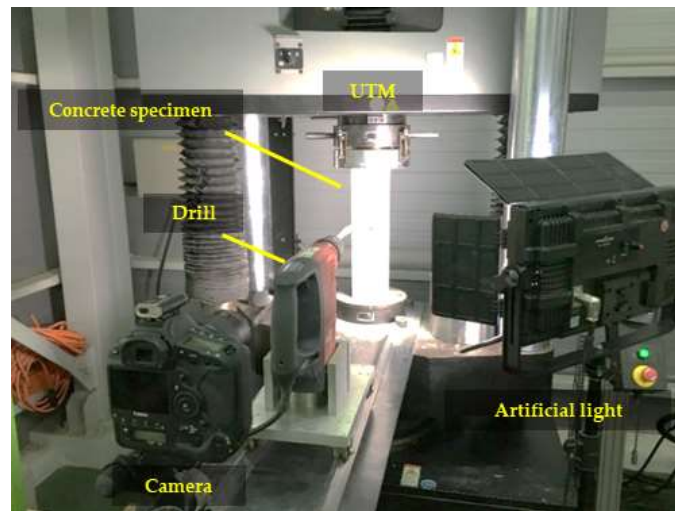


그림 21. 고정하중 응력계측 기술의 실내실험 모습 및 도식

- 위와 같이 카메라, 드릴, 조명을 준비하여 실험 수행함
- UTM을 통해 콘크리트 시편에 1축 응력을 가한 뒤, 응력 상태에서 얼마만큼의 응력이 가해졌는지를 DIC와 FEM을 통해 계산함
- 계산된 응력은 UTM으로 가해진 응력과 비교 검증함

시편 사이즈	Type A: 100 mm × 400 mm × 100 mm
	Type B: 150 mm × 300 mm × 150 mm
Elastic modulus	24.4 GPa
Poisson's ratio	0.17

표 1. 콘크리트 시편 특성

- 시편은 위와같이 사이즈가 다른 두가지 시편 타입으로 준비함

Test Number	Specimen Type	Applied Stress (MPa)	Estimated Stress (MPa)	Estimation Error (%)	MSE ($\times 10^{-8}$)
1	B	14.70	15.53	5.67	99.3
2	A	14.10	15.24	8.07	163.1
3	B	14.48	10.45	27.83	234.9
4	A	13.80	15.92	15.36	739.8
5	B	14.00	9.92	29.13	781.2

표 2. 콘크리트 시편실험 결과

$$Estimation\ Error = \frac{|\sigma_{estimated} - \sigma_{applied}|}{\sigma_{applied}} \times 100$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V'_{DIC}(x'_k, y'_k) - V'_{FEM}(x'_k, y'_k)^2$$

표기	의미
$\sigma_{estimated}$	DIC로 계산한 응력
$\sigma_{applied}$	UTM이 가한 응력
MSE	Mean Squared Error (변위장 사이의 차이의 제곱의 합)

- 총 5번의 실험에서 위와 같이 최대 5.67% 오차율로 은 결과위와 같이 카메라, 드릴, 조명을 준비하여 실험 수행함
- MSE가 높으면 오차율도 높은 경향이 있으므로, 낮은 MSE를 보이는 실험 결과를 이용하는 것을 추천함

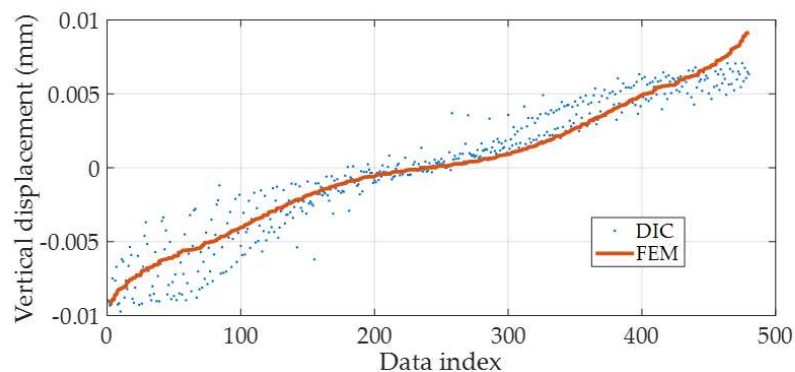


그림 22. Test1에 대한 DIC/FEM 변위장의 비교

- 오차율이 낮은 데이터의 경우 DIC와 FEM에서 위와 같이 유사한 변위 경향성을 보임

○ 2축 고정하중 응력계측

□ 2축 고정하중 응력계측 - 개요

- 계측되는 2차원 변위장을 이용하여 2차 고정하중 응력을 계산하는 알고리즘은 아래와 같은 최적화 문제를 풀어서 계산함

$$\underset{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}}{\text{Min}} |\Delta x_{measured}(x,y) - \Delta u(x,y;\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})|^2 + |\Delta y_{measured}(x,y) - \Delta v(x,y;\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})|^2$$

표기	의미
σ_x	X directional normal stress
σ_y	Y directional normal stress
τ_{xy}	Shear stress
$\Delta x_{measured}(x,y)$	X directional displacement at (x,y) (measured)
$\Delta y_{measured}(x,y)$	Y directional displacement at (x,y) (measured)
$u(x,y;\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$	X directional deformation at (x,y) (Analytically derived by the stresses)
$v(x,y;\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$	Y directional deformation (Analytically derived by the stresses)

- 계측되는 변위장은 1축 응력계측 기술과 동일한 방식으로 DIC 기술을 이용함
- Airy stress function¹⁹⁾을 통해 응력에 따라 이완되는 변위장을 계산함

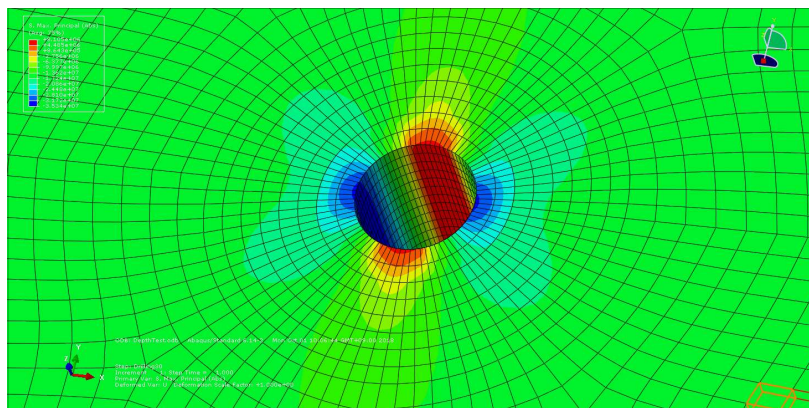


그림 23. 홀 드릴링으로 이완되는 변위장 예시

- Airy function으로 위와 같은 변위장을 해석적으로 계산할 수 있으며, 응력($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$)에 따라 유일한 변위장을 보임

19) Sadd, M. H. (2005) Elasticity: Theory, Applications, and Numerics, Elsevier, p. 364

□ 2축 고정하중 응력계측 - 알고리즘

- 홀 드릴링에 따라 콘크리트에 가해지고 있던 정적응력이 이완됨
- 이완되는 응력에 따라 변위장도 이완이 되며, 이완되는 변위장 크기 및 모양은 문헌 조사를 통해 얻을 수 있음²⁰⁾²¹⁾²²⁾
- 평면응력상태(Plane stress)라고 가정된 평면상에서 응력의 종류는 다음 그림과 같음

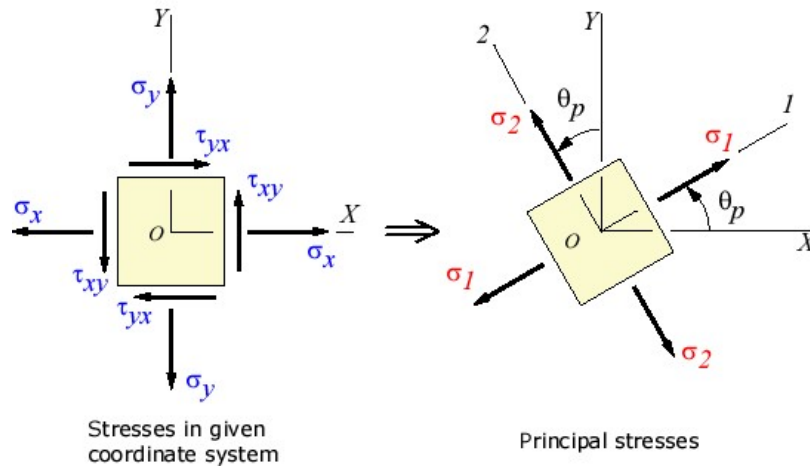


그림 24. 2축 응력

- 홀 드릴링으로 인해 이완되는 변위장은 아래 식과 같음

$$u = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) A + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) B \cos \theta_p + \tau_{xy} B \sin 2\theta_p$$

$$v = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) C \sin 2\theta_p - \tau_{xy} C \cos 2\theta_p$$

표기	의미
σ_x	X directional normal stress
σ_y	Y directional normal stress
τ_{xy}	Shear stress
A, B, C	Stress-independent constants at (x,y)

- 20) Pessiki, S., & Turker, H. T. (2003). Theoretical Development of the Core-Drilling Method for Non destructive Evaluation of Stresses in Concrete Structures.
- 21) McGinnis, M., Pessiki, S., & Turker, H. (2004). Application of 3D Image Correlation Photogrammetry and Classical Photogrammetry to the Core-Drilling Method for Measuring In-Situ Stresses in Concrete Structures.
- 22) McGinnis, M. J., Pessiki, S., & Turker, H. (2005). Application of three-dimensional digital image correlation to the core-drilling method. Experimental Mechanics, 45(4), 359.

- A, B, C 는 다음과 같이 결정됨

$$A = \frac{a^2}{2Er}$$

$$B = \frac{a^2 r^2 (1 + \nu) - a^2}{2Er^3}$$

$$C = \frac{a^2 r^2 (1 - \nu) - a^2}{2Er^3}$$

표기	의미
a	홀 반지름
r	계산되는 지점의 radius 좌표 (홀 중심에서의 거리)
E	Young's modulus
ν	Poisson ratio

- 위의 식에서 알 수 있듯이 이완되는 변위장은 홀 중심으로부터의 거리에 의존적이며, 거리가 멀수록 이완되는 변위장이 줄어듦
- 무한대 평면이라고 가정하면 A, B, C 는 결국 0으로 수렴하게 됨
- 위의 식에서 알 수 있듯이 드릴링하는 홀의 반지름이 클수록 큰 변위장이 이완됨을 알 수 있음
- 위의 식에서 알 수 있듯이 응력이 일정한 값을 가진다고 할 때 낮은 E 를 가진 물체에 서 큰 변위장이 이완됨
- 즉, 고정응력으로 인해 탄성변형을 크게 겪고 있을수록 홀 드릴링에 따라 이완되는 변위장도 커짐

- 응력장과 변위장 사이의 관계는 Cartesian 좌표계에서 표현될 수 있음

$$u(x,y) = P_u \sigma_x + Q_u \sigma_y + R_u \tau_{xy}$$

$$v(x,y) = P_v \sigma_x + Q_v \sigma_y + R_v \tau_{xy}$$

표기	의미
P_u	σ_x 와 u 사이의 상수
Q_u	σ_y 와 u 사이의 상수
R_u	τ_{xy} 와 u 사이의 상수
P_v	σ_x 와 v 사이의 상수
Q_v	σ_y 와 v 사이의 상수
R_v	τ_{xy} 와 v 사이의 상수

- 위의 상수(P_u , Q_u , R_u , P_v , Q_v , R_v)는 아래와 같음

$$P_u = [A + (B + C)\cos(2\theta) - C]\cos(\theta)$$

$$Q_u = [A - B\cos(2\theta)]\cos(\theta) + C\sin(2\theta)\sin(\theta)$$

$$R_u = 2[(B + C)\cos(2\theta) + B]\sin(\theta)$$

$$P_v = [A + (B + C)\cos(2\theta) + C]\sin(\theta)$$

$$Q_v = [A - (B + C)\cos(2\theta) - C]\sin(\theta)$$

$$R_v = -2[(B + C)\cos(2\theta) - B]\cos(\theta)$$

표기	의미
θ	angle in Polar coordinate system

- 2축 응력은 계측된 변위와 아래의 식을 통해 계산 가능

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P_u(x_1, y_1) & Q_u(x_1, y_1) & R_u(x_1, y_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_u(x_n, y_n) & Q_u(x_n, y_n) & R_u(x_n, y_n) \\ P_v(x_1, y_1) & Q_v(x_1, y_1) & R_v(x_1, y_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_v(x_n, y_n) & Q_v(x_n, y_n) & R_v(x_n, y_n) \end{bmatrix}^+ \begin{Bmatrix} u(x_1, y_1) \\ \vdots \\ u(x_n, y_n) \\ v(x_1, y_1) \\ \vdots \\ v(x_n, y_n) \end{Bmatrix}$$

- n 개의 포인트에서의 변위장을 통해 우측 $2n \times 1$ 의 벡터를 구성함
- 각 점에서 상수($P_u, Q_u, R_u, P_v, Q_v, R_v$)는 수치적으로 계산할 수 있음. 이를 통해 좌공되는 행렬을 계산함
- 따라서 위의 식을 통해 응력을 계산할 수 있음

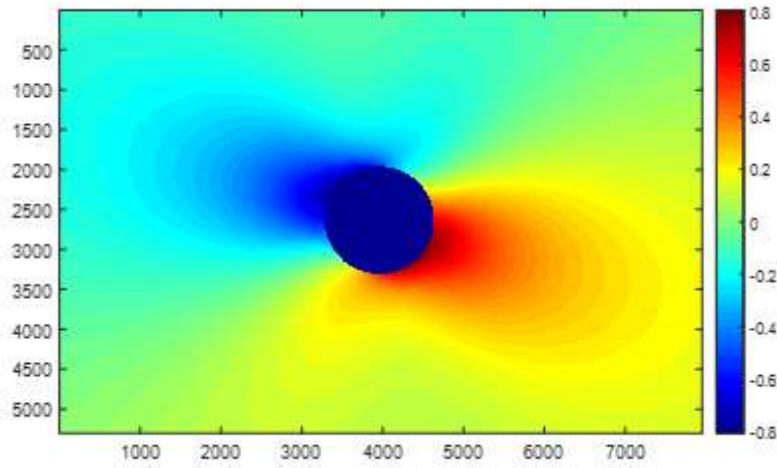


그림 25. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (5, -15, 7)$ MPa에서의 x방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

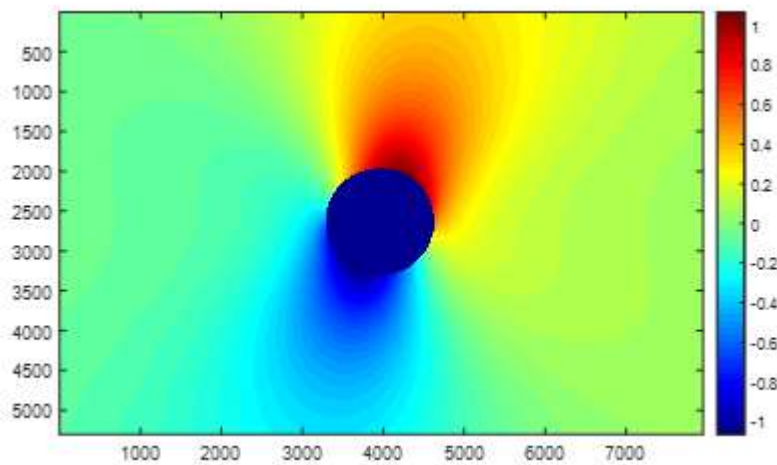


그림 26. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (5, -15, 7)$ MPa에서의 y방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

□ 2축 고정하중 응력계측 - 변위장 수치 분석

- 응력 조합에 따른 변위장을 분석함

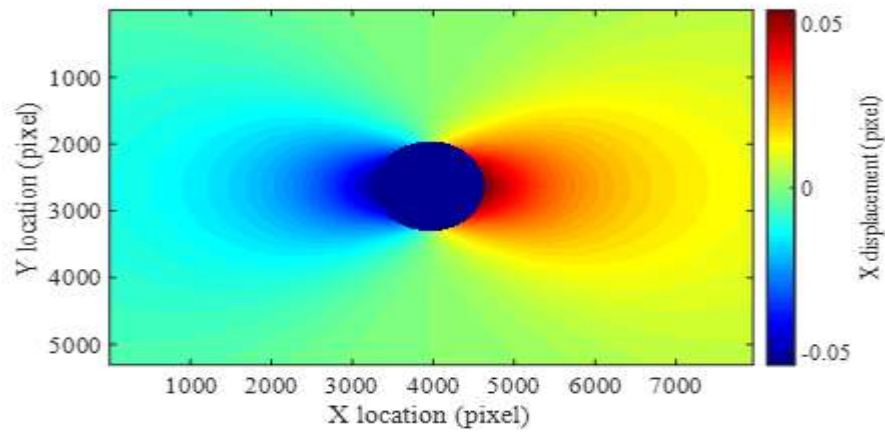


그림 27. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (1, 0, 0)$ MPa에서의 x방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

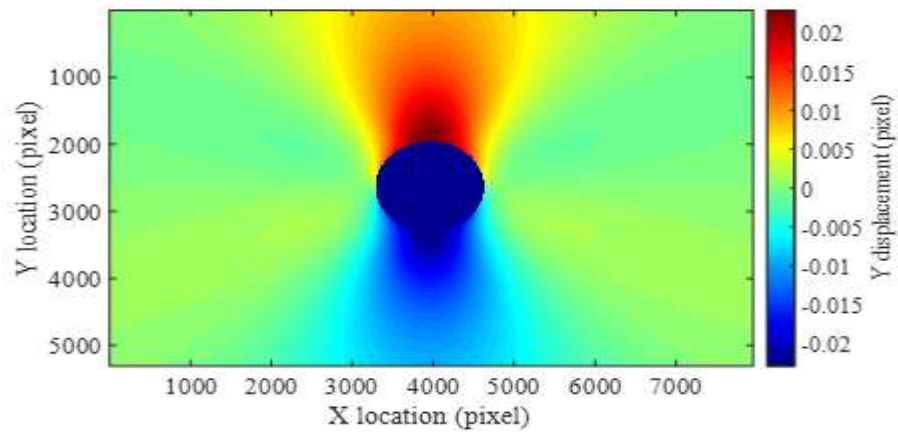


그림 28. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (1, 0, 0)$ MPa에서의 y방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

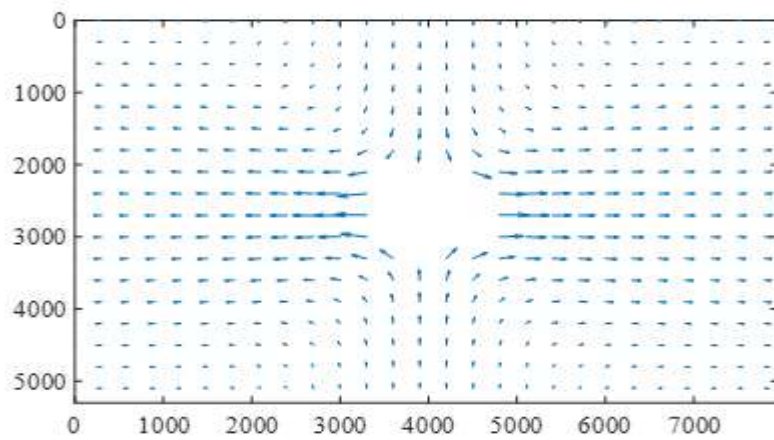


그림 29. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (1, 0, 0)$ MPa에서의 변위장 벡터플롯 예시

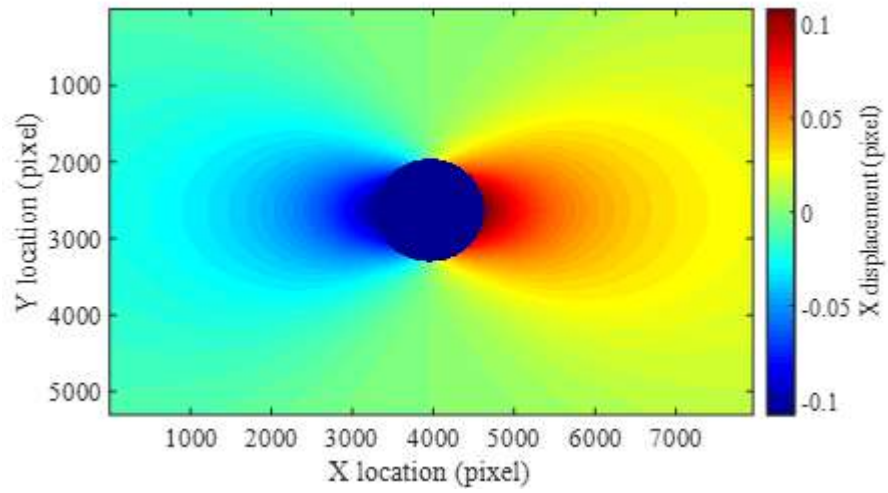


그림 30. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (2, 0, 0)$ MPa에서의 x방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

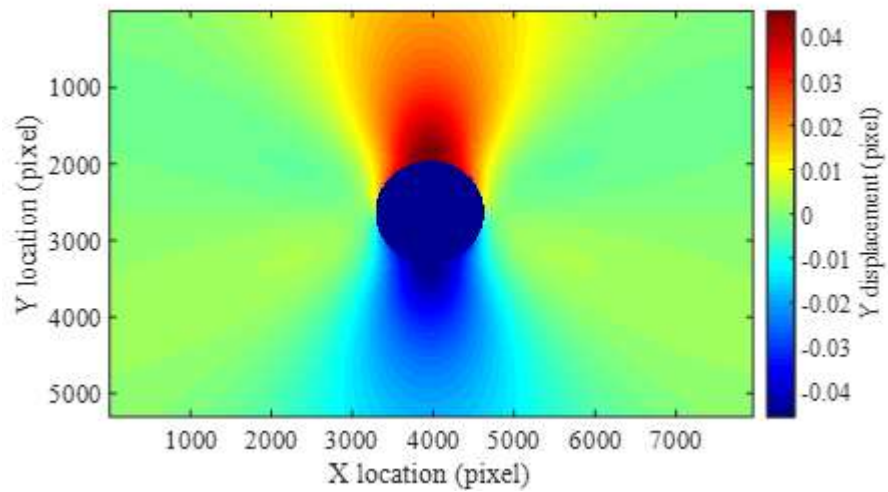


그림 31. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (2, 0, 0)$ MPa에서의 y방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

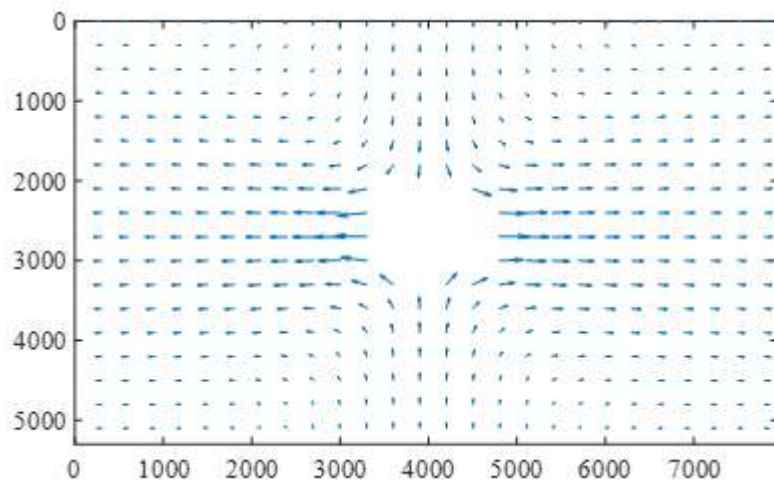


그림 32. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (2, 0, 0)$ MPa에서의 변위장 벡터플롯 예시

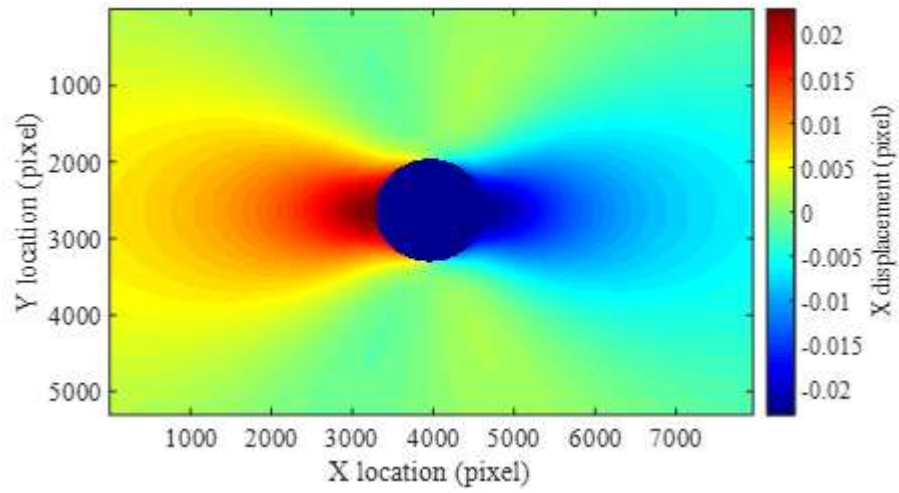


그림 33. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 1, 0)$ MPa에서의 x방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

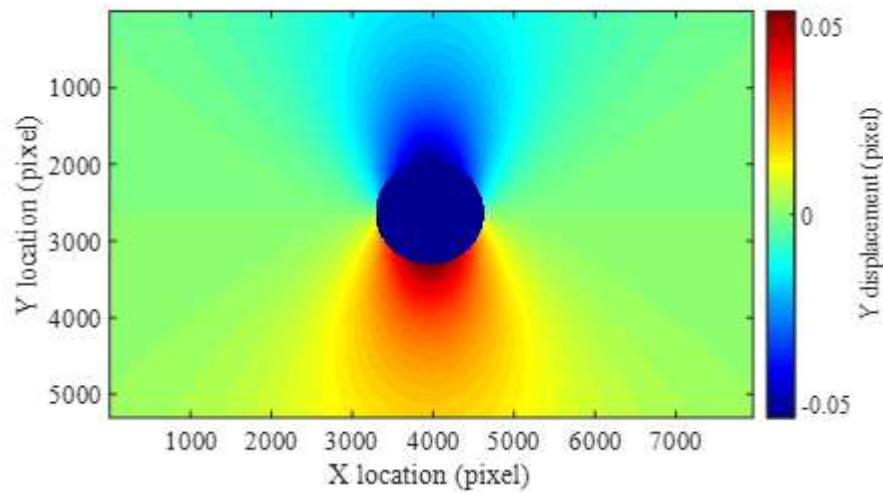


그림 34. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 1, 0)$ MPa에서의 y방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

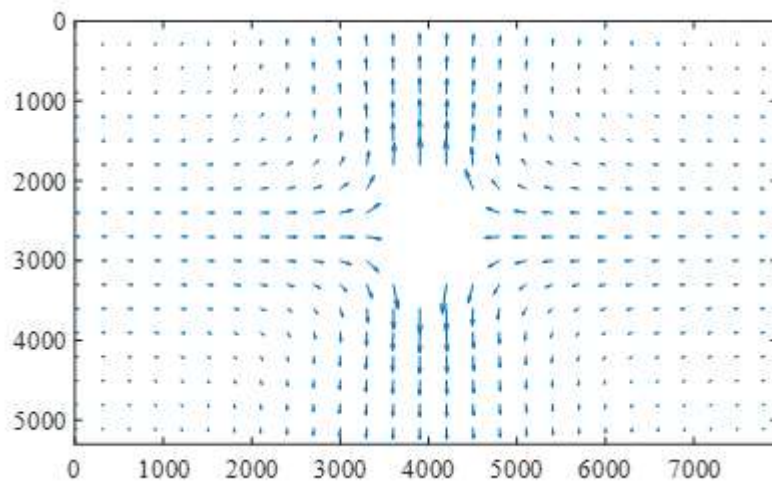


그림 35. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 1, 0)$ MPa에서의 변위장 벡터플롯 예시

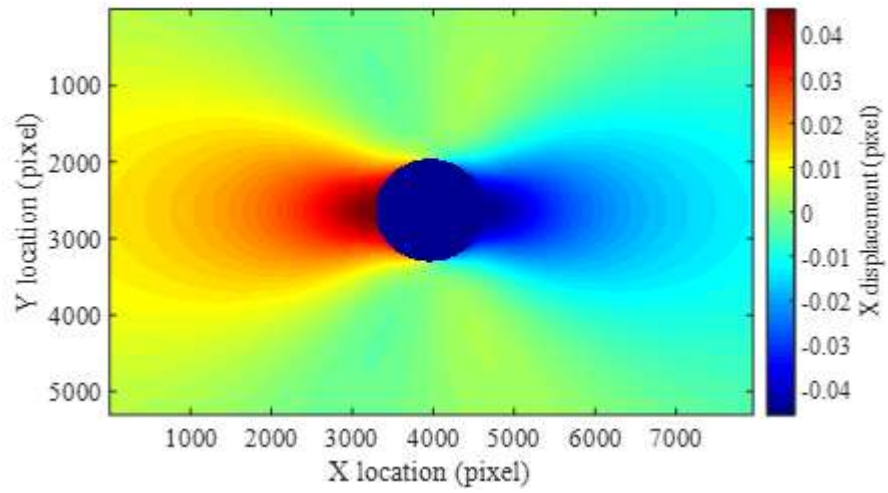


그림 36. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 2, 0)$ MPa에서의 x방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

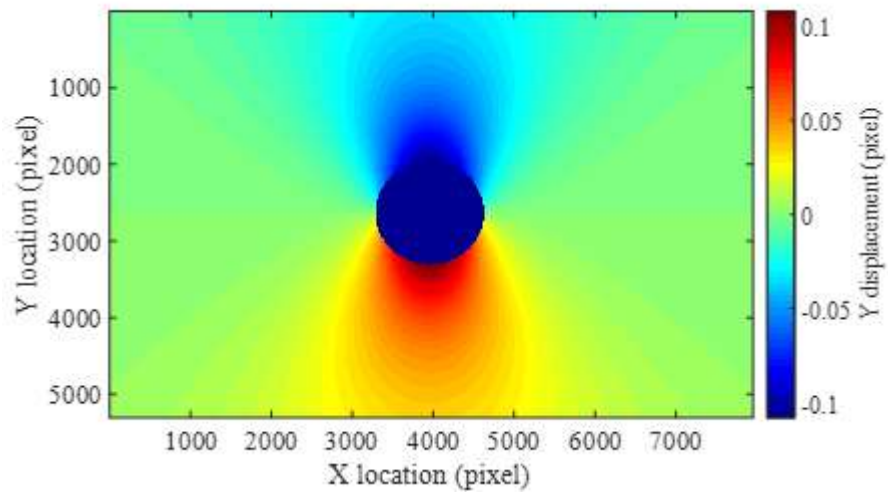


그림 37. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 2, 0)$ MPa에서의 y방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

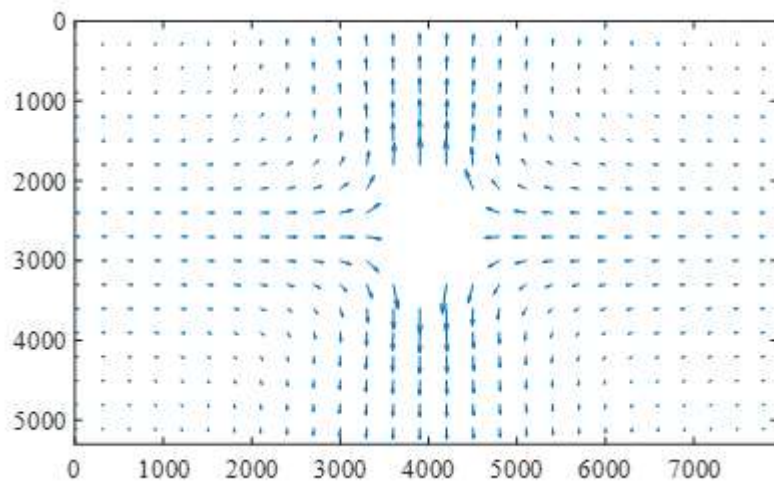


그림 38. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 2, 0)$ MPa에서의 변위장 벡터플롯 예시

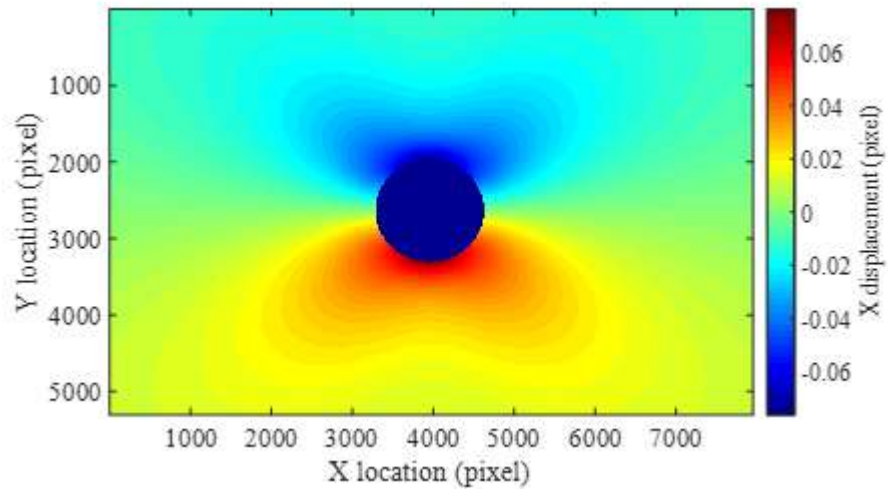


그림 39. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 0, 1)$ MPa에서의 x방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

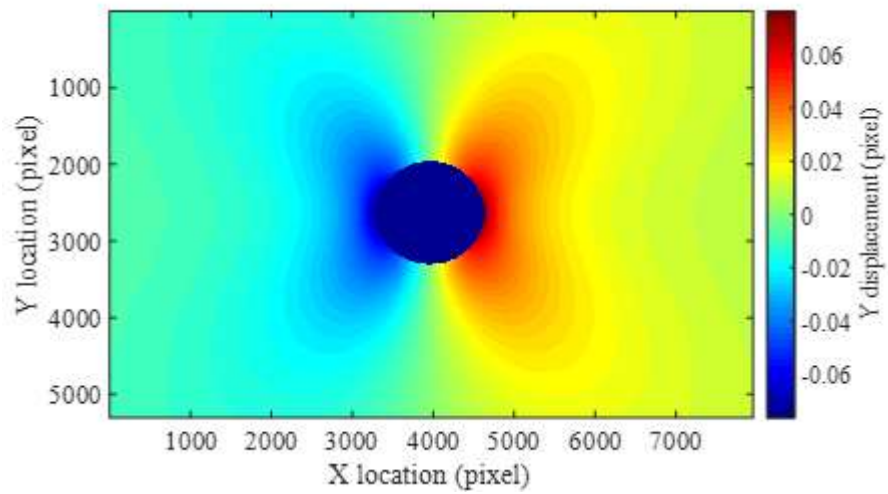


그림 40. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 0, 1)$ MPa에서의 y방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

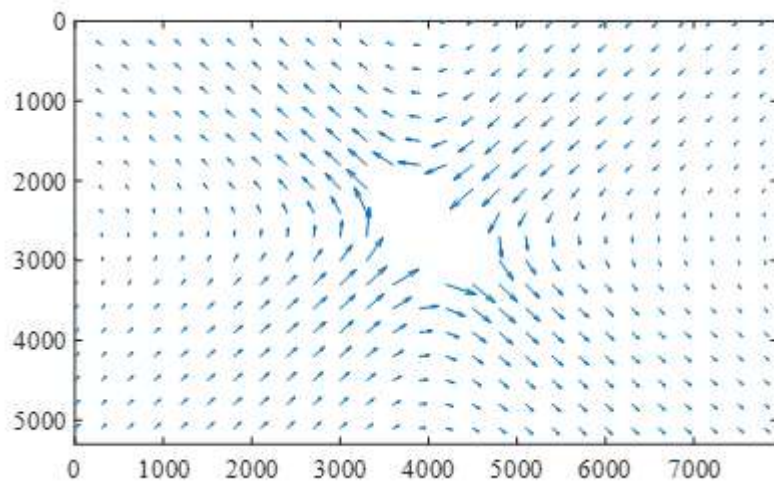


그림 41. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 0, 1)$ MPa에서의 변위장 벡터플롯 예시

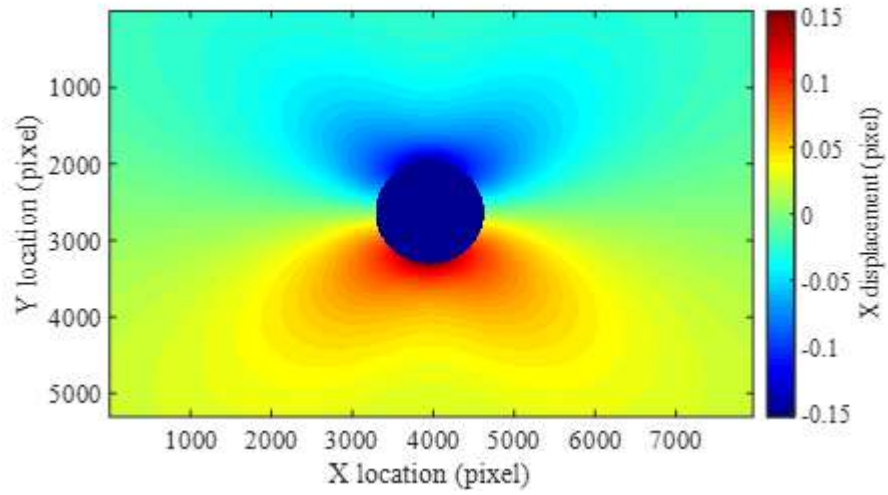


그림 42. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 0, 2)$ MPa에서의 x방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

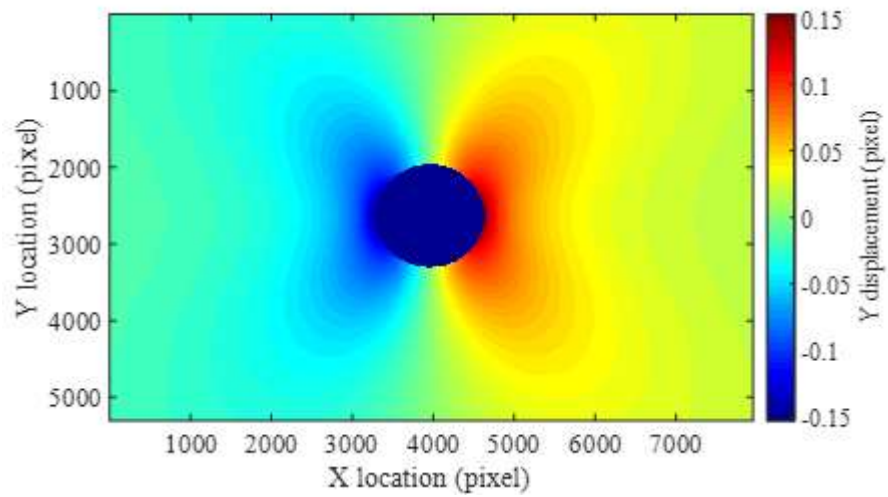


그림 43. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 2, 0)$ MPa에서의 y방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

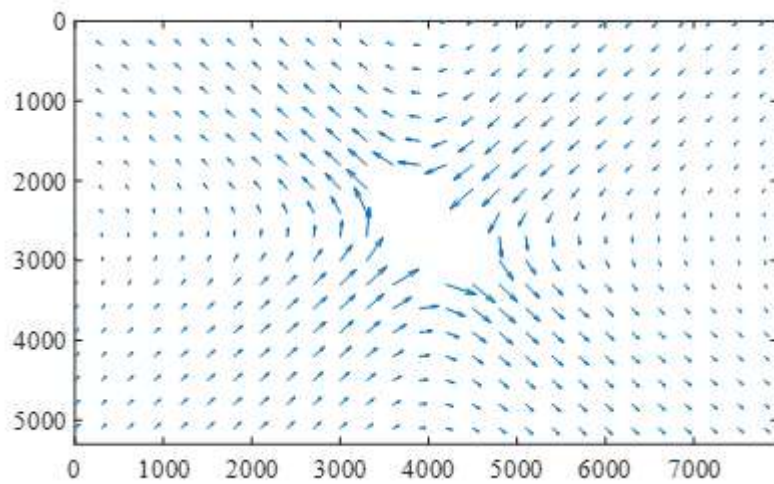


그림 44. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (0, 2, 0)$ MPa에서의 변위장 벡터플롯 예시

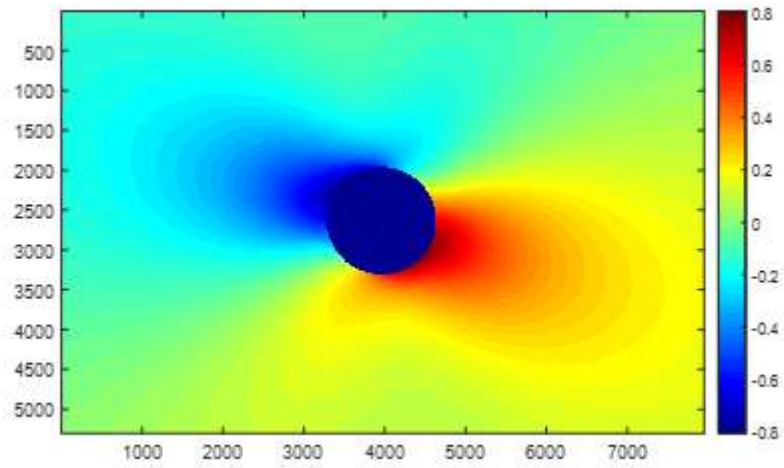


그림 45. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (5, -15, 7)$ MPa에서의 x방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

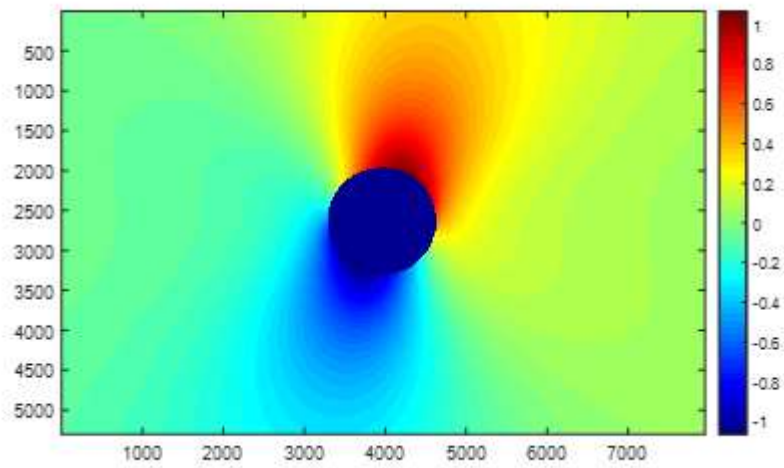


그림 46. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (5, -15, 7)$ MPa에서의 y방향 변위장 예시 (단위 : Pixel)

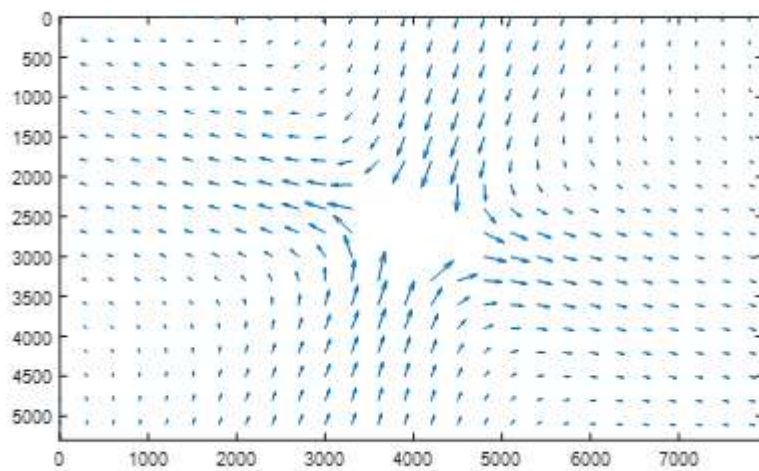


그림 47. $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (5, -15, 7)$ MPa에서의 변위장 벡터플롯 예시

□ 2축 고정하중 응력계측 - 응력 크기별 변위장 비교

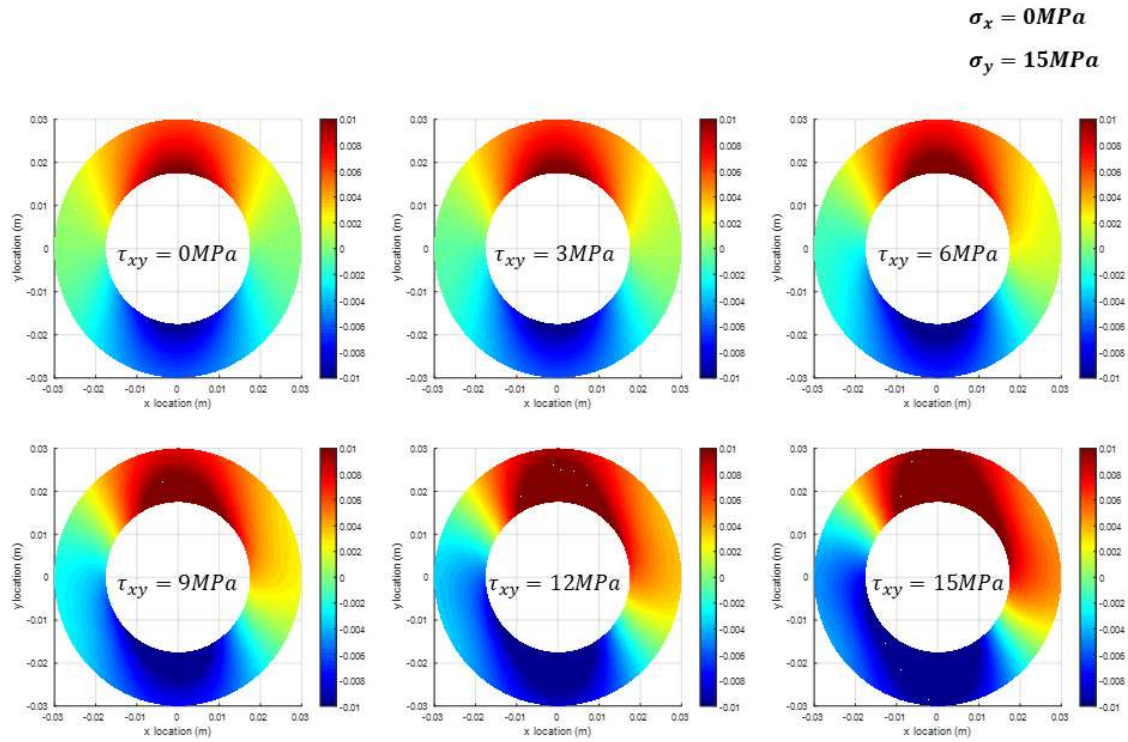


그림 48. $\sigma_x=0MPa$, $\sigma_y=15MPa$ 일 경우 τ_{xy} 에 따른 변위장

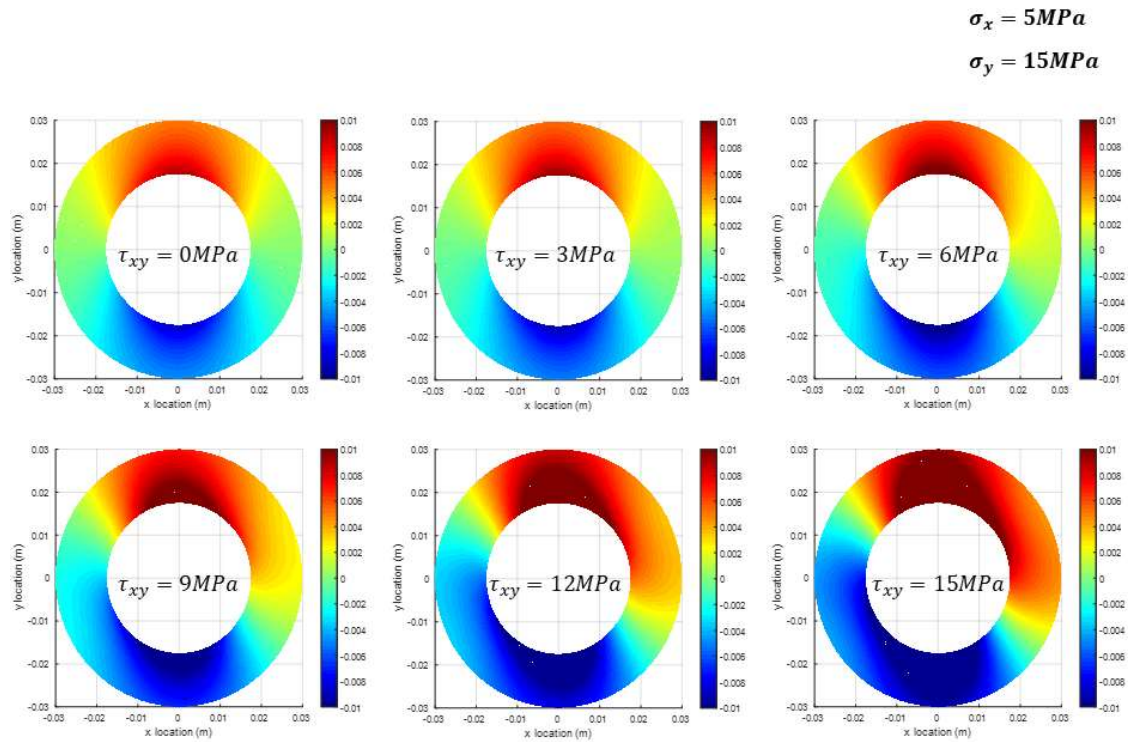


그림 49. $\sigma_x=5MPa$, $\sigma_y=15MPa$ 일 경우 τ_{xy} 에 따른 변위장

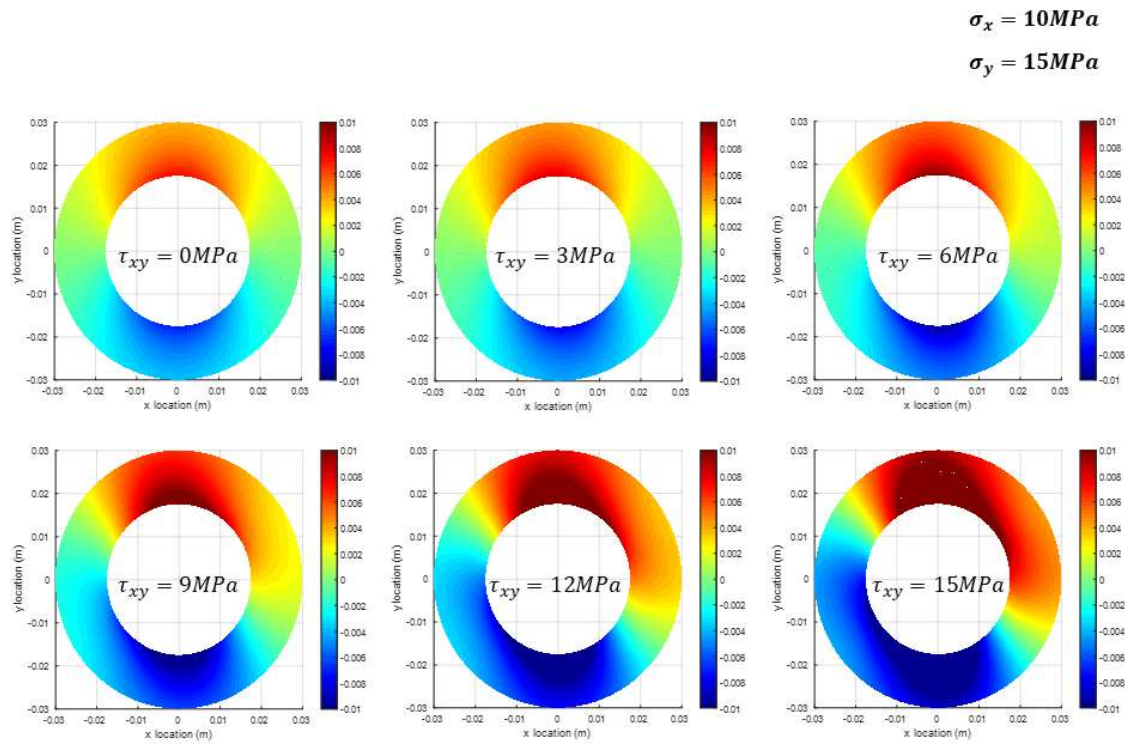


그림 50. $\sigma_x=10MPa$, $\sigma_y=15MPa$ 일 경우 τ_{xy} 에 따른 변위장

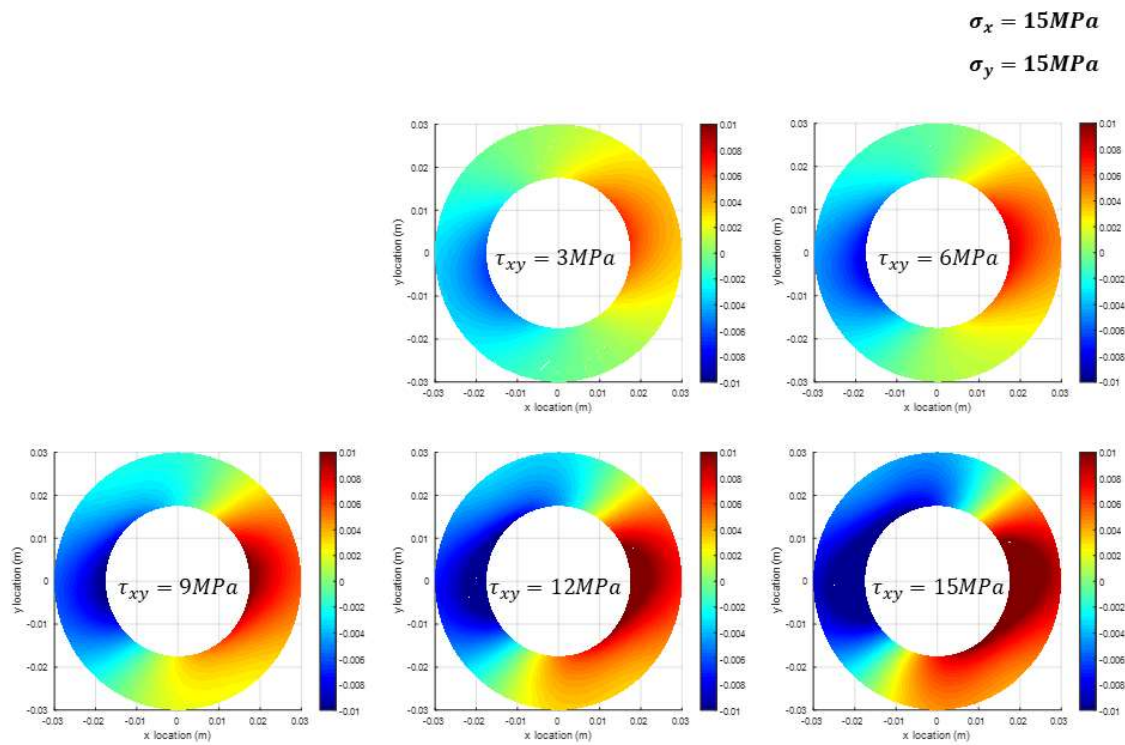


그림 51. $\sigma_x=15MPa$, $\sigma_y=15MPa$ 일 경우 τ_{xy} 에 따른 변위장

□ 2축 고정하중 응력계측 - FE모델과 이론식 비교

- FEM 해석 프로그램인 ABAQUS를 통해 홀 드릴링 과정을 묘사하여 이완되는 변위장을 추출함
- 위 아래 직육면체 블록은 변형되지 않는 강판이며, UTM기계에서 압축하는 과정을 묘사함
- 가운데 블록은 콘크리트 시편이며, 해석 중에 홀에 해당하는 부위를 제거할 수 있도록 설정함
- 콘크리트와 강판 사이에 Friction을 고려하여 푸아송 효과를 줄이는 효과도 구현함
- 해석 과정은 15MPa의 압축력을 가한 뒤 기준 변위장을 추출한 뒤, 홀에 해당하는 부위를 제거하여 이완되는 변위장을 추출함

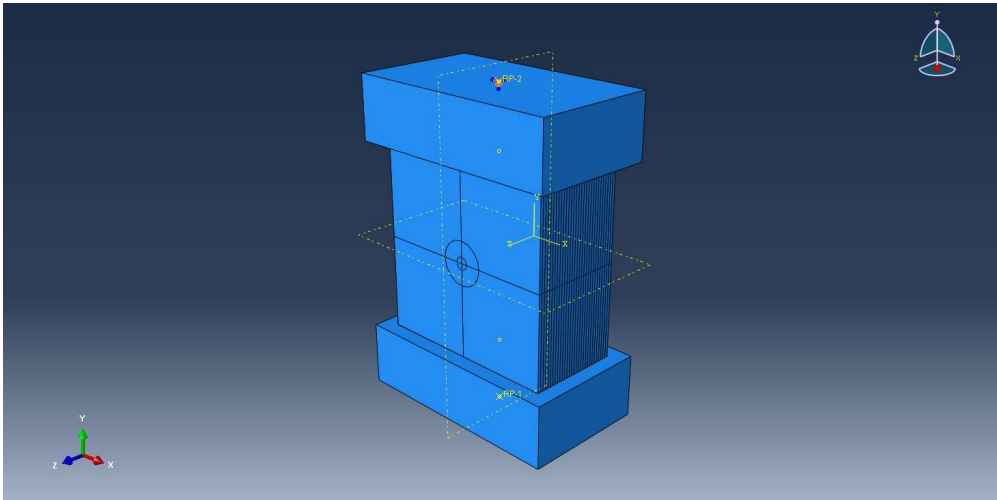


그림52. ABAQUS를 통한 홀 드릴링 묘사

- 추출된 변위장은 아래와 같이 element의 위치와 x,y축 변위장으로 나타남

Programmer's Notepad - [1. wo300x300.rpt]

File Edit Search View Tools Window Help

1. wo300x300.rpt

Probe Values Report, written on Thu Sep 27 15:54:16 2018

Source

ODB: C:/Users/SHW-JUNA/Desktop/2018.09.17 Check per hold depth/DepthTest/DepthTest.odb

Step: Load

Frame: Increment 6: Step Time = 1.000

Variable: U, All direct

Probe values reported at nodes

Part Instance	Node ID	X	Orig. Coords Y	Z	Def. Coords X	Y	Z
C 100x100x150-1	2	1.00000000E-002	0.00000000E+000	1.50000000E-001	1.00010000E-002	9.01518000E-005	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	3	0.00000000E+000	1.00000000E-002	1.50000000E-001	4.58011000E-013	1.00840000E-002	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	25	0.00000000E+000	-1.00000000E-002	1.50000000E-001	1.61787000E-012	-9.98369000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	26	3.50000000E-002	0.00000000E+000	1.50000000E-001	3.50034000E-002	9.01518000E-005	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	29	0.00000000E+000	-3.50000000E-002	1.50000000E-001	8.52456000E-013	-3.48840000E-002	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	33	-3.50000000E-002	0.00000000E+000	1.50000000E-001	-3.50034000E-002	9.01518000E-005	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	37	0.00000000E+000	3.50000000E-002	1.50000000E-001	1.48357000E-012	3.50687000E-002	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	511	-1.00000000E-002	0.00000000E+000	1.50000000E-001	-1.00010000E-002	9.01518000E-005	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	551	9.96917000E-003	7.84591000E-004	1.50000000E-001	9.97015000E-003	8.74260000E-004	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	552	9.87686000E-003	1.56434000E-003	1.50000000E-001	9.87785000E-003	1.63533000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	553	9.72370000E-003	2.33445000E-003	1.50000000E-001	9.72465000E-003	2.42317000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	554	9.51057000E-003	3.09017000E-003	1.50000000E-001	9.51150000E-003	3.17842000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	555	9.23800000E-003	3.82683000E-003	1.50000000E-001	9.23970000E-003	3.91463000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	556	8.91007000E-003	4.53991000E-003	1.50000000E-001	8.91094000E-003	4.62726000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	557	8.52640000E-003	5.22499000E-003	1.50000000E-001	8.52724000E-003	5.31192000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	558	8.09017000E-003	5.87785000E-003	1.50000000E-001	8.09096000E-003	5.96439000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	559	7.60406000E-003	6.49448000E-003	1.50000000E-001	7.60480000E-003	6.58064000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	560	7.07187000E-003	7.07187000E-003	1.50000000E-001	7.07176000E-003	7.15627000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	561	6.49440000E-003	7.60406000E-003	1.50000000E-001	6.49511000E-003	7.60953000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	562	5.87785000E-003	8.09017000E-003	1.50000000E-001	5.87843000E-003	8.17534000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	563	5.22499000E-003	8.52640000E-003	1.50000000E-001	5.22550000E-003	8.61131000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	564	4.53991000E-003	8.91007000E-003	1.50000000E-001	4.54035000E-003	8.99473000E-003	1.50000000E-001
C 100x100x150-1	565	3.82683000E-003	9.23800000E-003	1.50000000E-001	3.82733000E-003	9.31233000E-003	1.50000000E-001

[1:1] : 10103 ANSI CR+LF INS Ready

그림53. ABAQUS를 통해 추출되는 변위장 데이터

- 아바쿠스와 이론식으로 계산되는 변위장을 비교함
- 두 변위장 간의 차이는 매우 미미하며, 1/1000 수준의 에러는 DIC에서 무시해도 되는 정도의 차이임

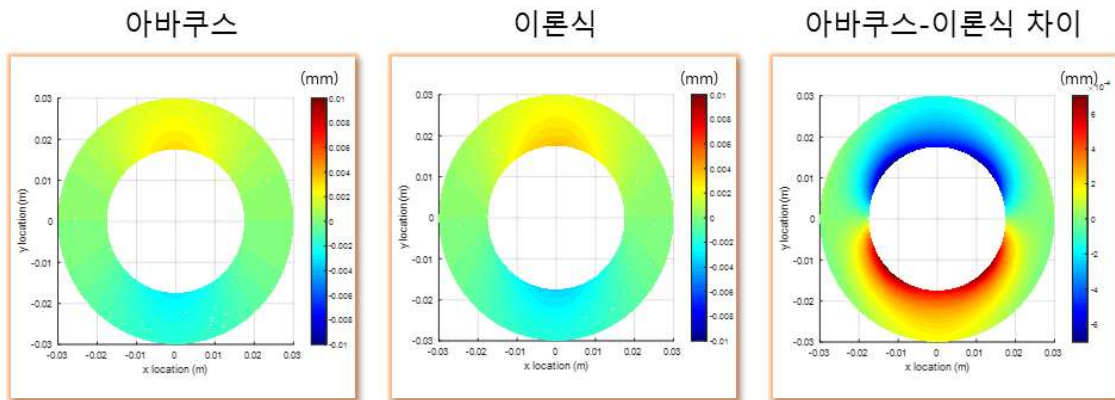


그림54. ABAQUS와 이론식의 y 변위장 비교($\sigma_y=5\text{MPa}$)

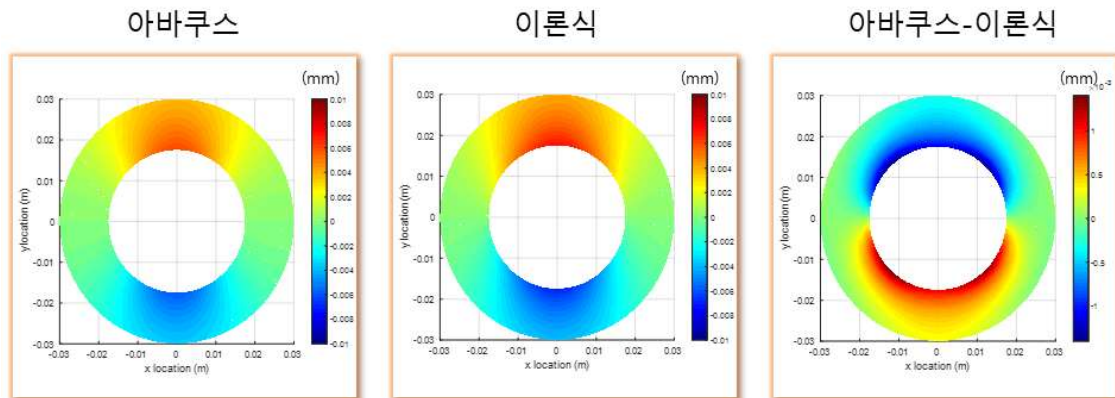


그림55. ABAQUS와 이론식의 y 변위장 비교($\sigma_y=10\text{MPa}$)

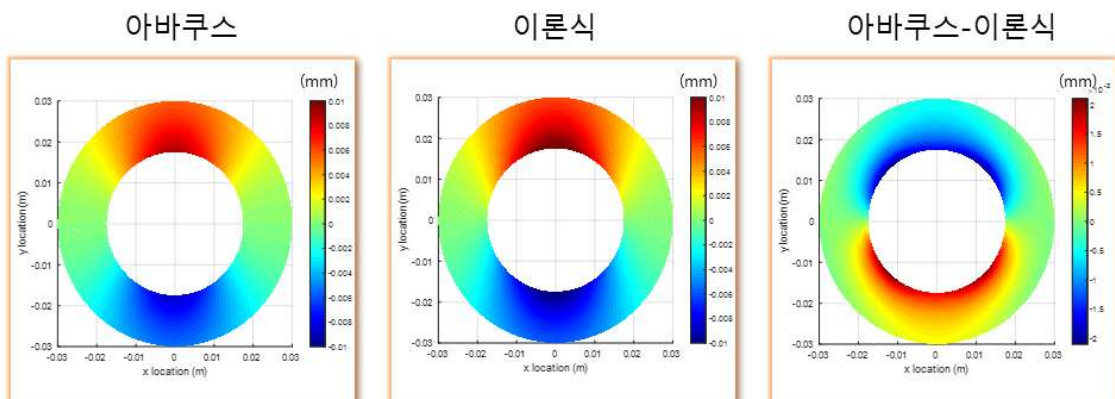


그림56. ABAQUS와 이론식의 y 변위장 비교($\sigma_y=15\text{MPa}$)

□ 2축 고정하중 응력계측 - FE모델과 이론식 비교 (시편 사이즈별)

- 아바쿠스와 이론식으로 계산되는 변위장을 시편 사이즈별로 비교함
- 이론식에서는 무한대의 평면을 가정하고 있으며, 무한대로 가정해도 되는 시편 사이즈 결정을 위해 시편 사이즈별로 FE모델과 이론식을 비교함
- 아래와 같이 총 5개의 서로 다른 시편 사이즈별로 아바쿠스와 이론식을 비교함 (350mm×350mm보다 큰 시편은 mesh 수가 많아 해석 시간이 오래걸려 생략함)

테스트 넘버	시편 사이즈(mesh size 고정)
1	100mm×100mm
2	150mm×150mm
3	200mm×200mm
4	250mm×250mm
5	300mm×300mm

표 3. 콘크리트 시편 특성

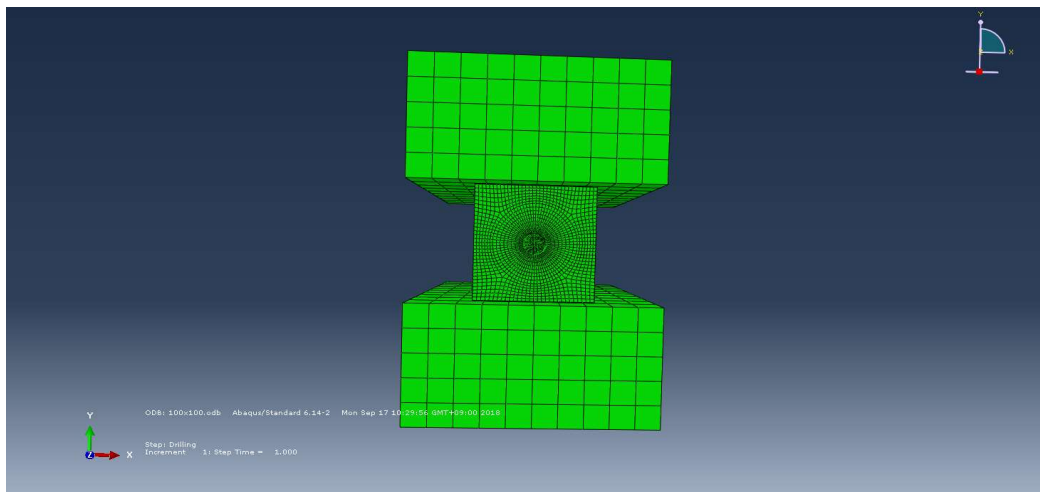


그림57. 시편 사이즈별 ABAQUS와 이론식 비교 (시편 사이즈 100mm×100mm)

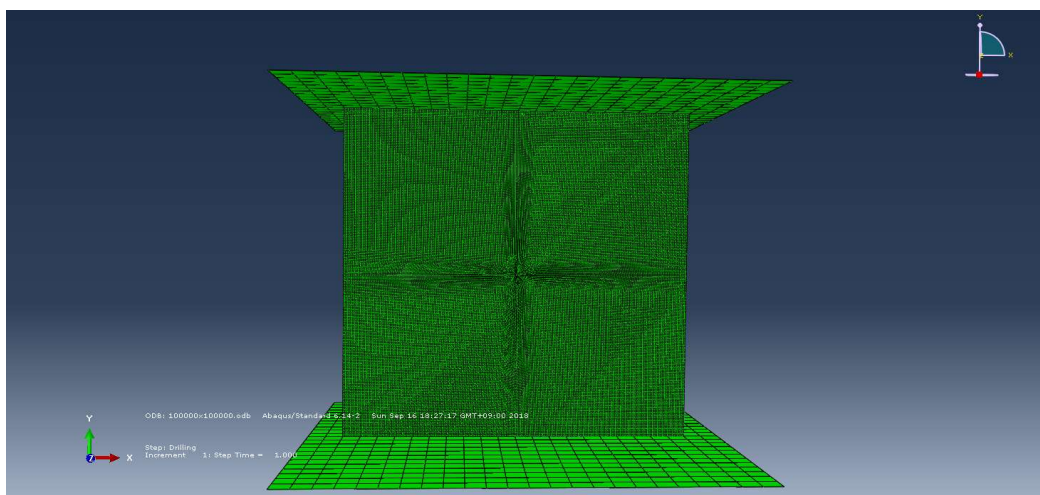


그림58. 시편 사이즈별 ABAQUS와 이론식 비교 (시편 사이즈 100m×100m)

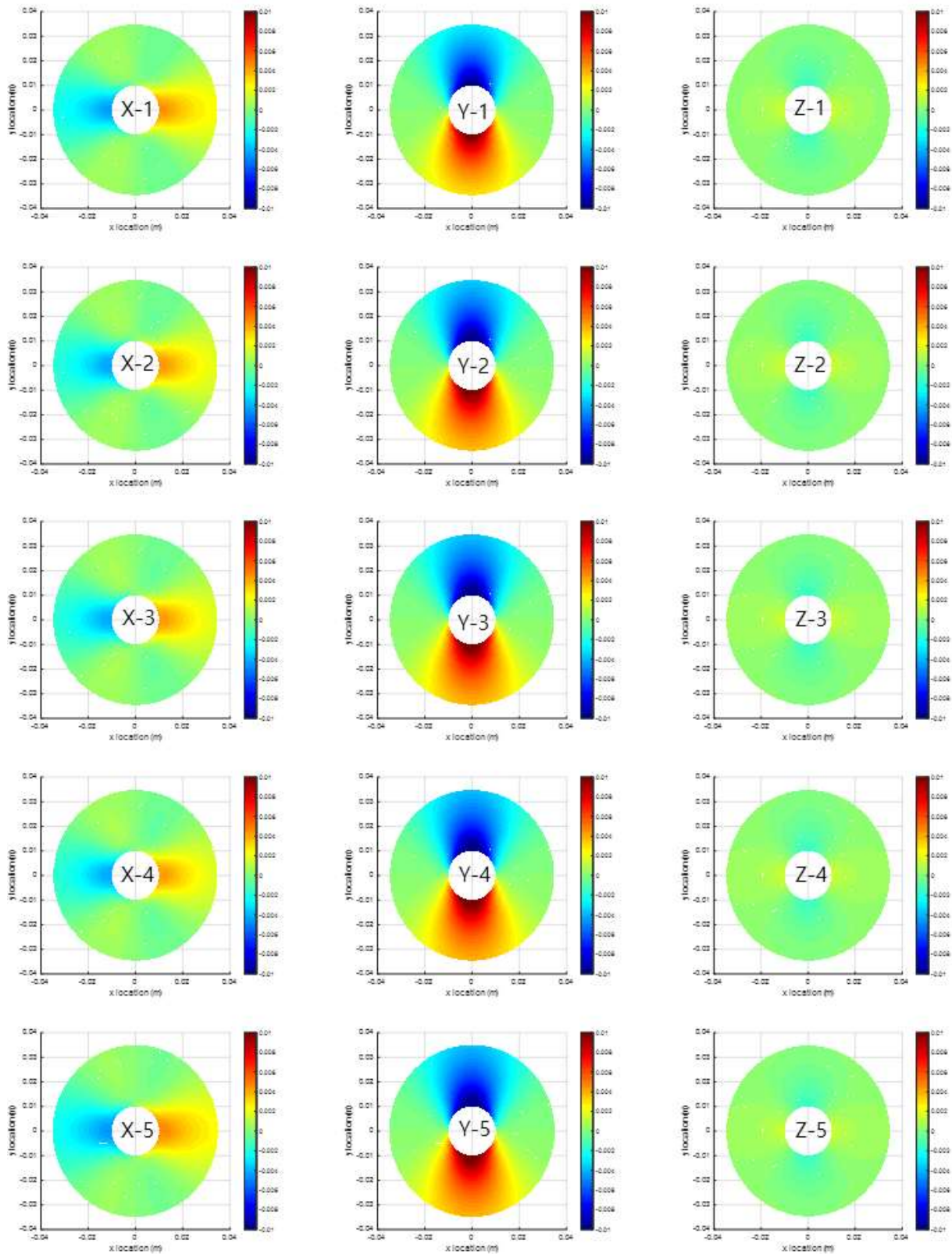


그림59. 시편 사이즈별 ABAQUS 변위장 결과 (1~5 테스트별 X,Y,Z 변위장)

- 위 그림과 같이 시편 사이즈별로 X,Y,Z축 방향 변위장을 비교함
- 시편 사이즈에 의한 영향은 매우 적은 것으로 나타남

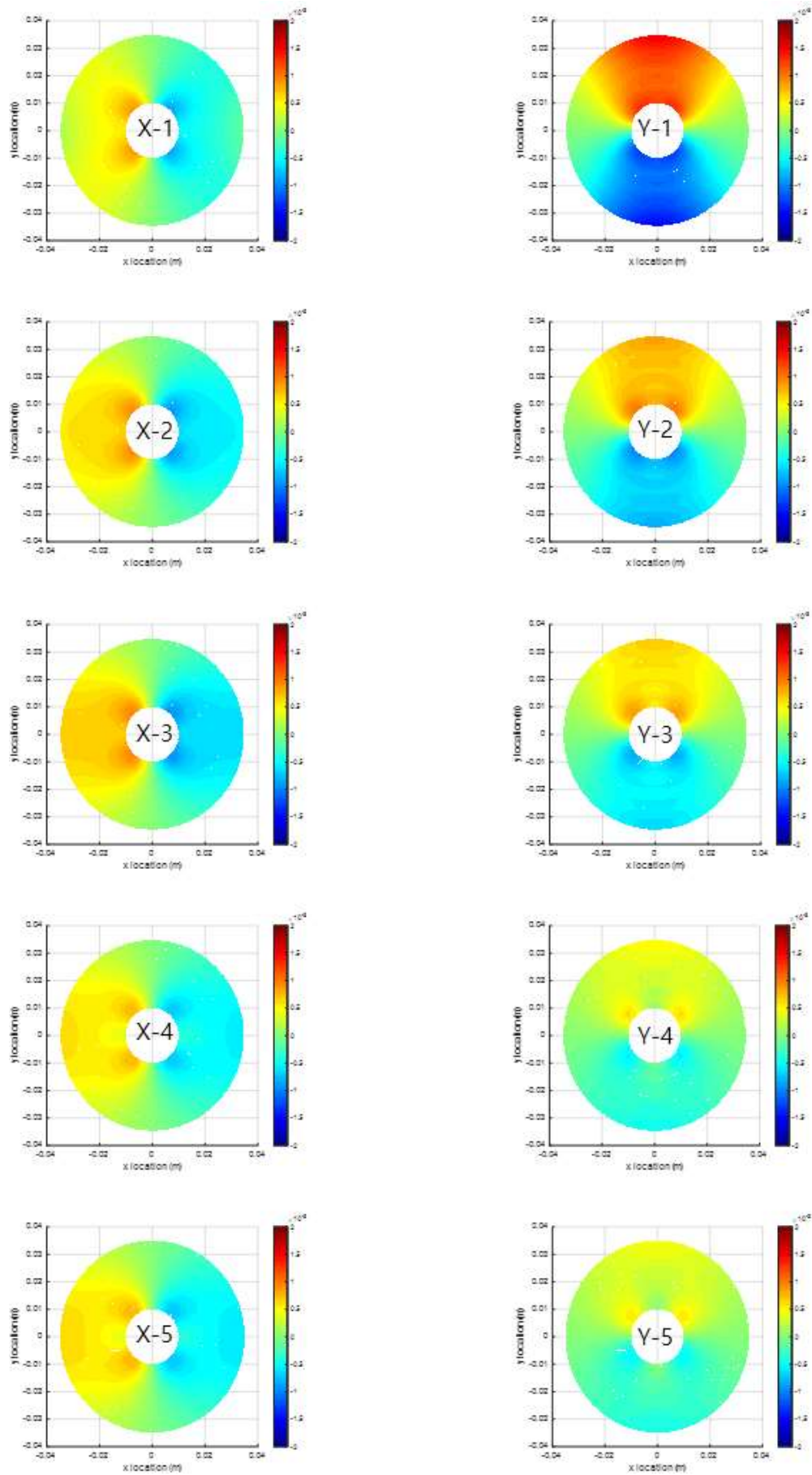


그림60. 시편 사이즈별 ABAQUS 변위장과 이론값 차이

- ABAQUS 결과를 이론값과 비교한 결과
- 연 초록색에 가까울수록 에러가 없음을 의미함
- 시편 사이즈가 커질수록 X축 변위장 에러는 미미하게 커지고, Y축 변위장 에러는 작아짐을 알 수 있었으며, 이는 X축 구속력이 없어 생기는 차이일 것으로 판단됨

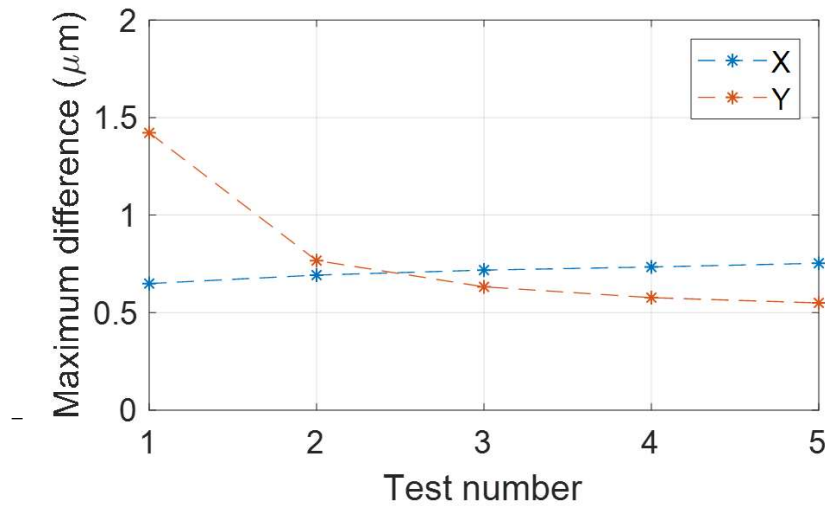


그림61. 시편 사이즈별 ABAQUS 변위장과 이론값 차이

- 시편 사이즈가 커짐에 따른 ABAQUS와 이론값 사이의 차이는 위 그림과 같음
- 시편이 커짐에 따라 X축 변위장의 에러는 미소하게 커지고, Y축 변위장의 에러는 급속히 작아짐
- 변위장 에러는 시편이 커지면서 150mm×150mm 크기에서는 일정한 값에 수렴함
- 이에 따라 본 과제에서는 150mm×150mm부터 무한대 평면이라 가정함

□ 2축 고정하중 응력계측 - 수치 검증

- 2축 응력에 따른 변위장을 생성한 뒤, 변위장에서 응력을 추정하는 방식으로 수치검증을 수행함
- 수치검증에서 고려한 응력은 다음과 같음
- test 1-10에서는 -20MPa에서 20MPa로 x축 응력을 키워가며 수치검증을 수행함
- test 11-20에서는 -20MPa에서 20MPa로 y축 응력을 키워가며 수치검증을 수행함
- test 21-30에서는 -20MPa에서 20MPa로 전단응력을 키워가며 수치검증을 수행함
- test 31-50에서는 -20MPa ~ 20MPa 사이의 랜덤한 변수를 응력으로 사용하여 수치검증을 수행함

Test	Stress (MPa)		
	σ_x	σ_y	τ_{xy}
1-10	[-20, 20]	0	0
11-20	0	[-20, 20]	0
21-30	0	0	[-20, 20]
31-50	<i>unif(-20, 20)</i>		

표 4. 수치검증 시나리오

```
%% stress estimation
% input
m2pxl = 100; % pixel/mm <--Manually selected
r0 = 6*m2pxl; % hole radius (pixel)
E = 206*1e9; % Elastic modulus (Pa)
nu = 0.3; % Poisson ratio

% estimate
tic;
[SIG(i,1), SIG(i,2), SIG(i,3)] = stress_est4(X4, Y4, r0, E, nu);
toc;
```

그림 63. 수치검증 코드

- 위 코드에서 알 수 있듯이 변위장 (X4, Y4)와 홀 사이즈(r0), Young' s Modulus (E), Poisson' s ratio(nu)를 stress_est4에 입력하면 2축 응력을 계산함

- 특정한 응력에서 생성되는 변위장을 비교함
- 응력: $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (20, -5, 2)$ MPa

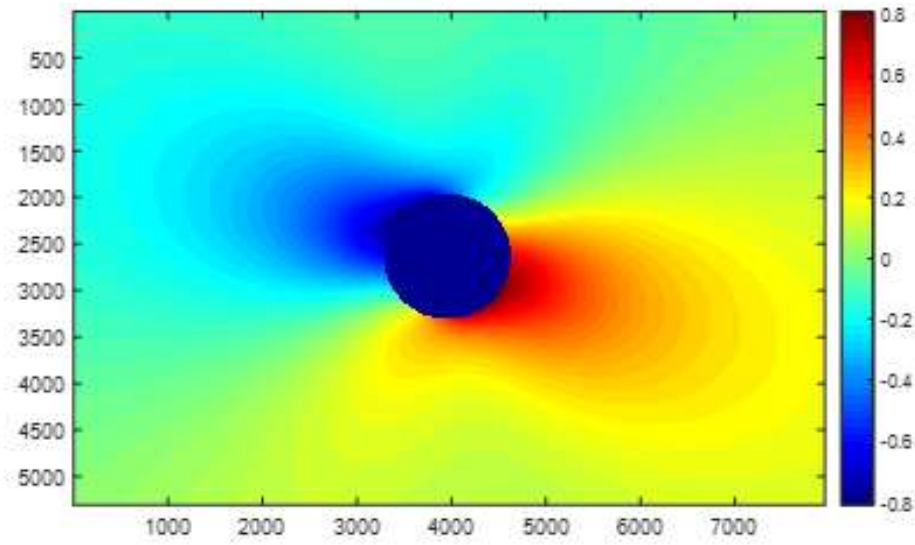


그림 64. 수치검증으로 생성된 x축 변위장

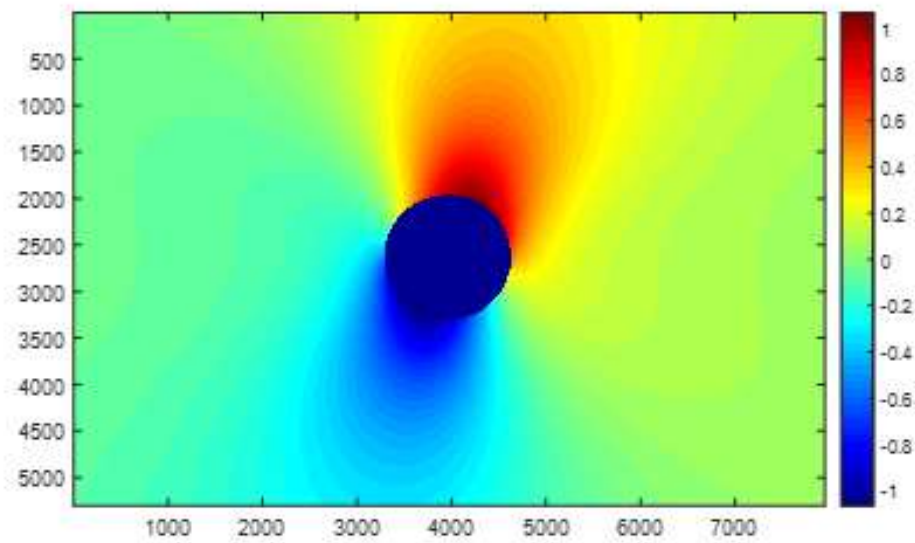


그림 65. 수치검증으로 생성된 y축 변위장

- 수치검증 최종 결과는 다음과 같으며, 가한 응력과 매우 유사한 경향성을 보임

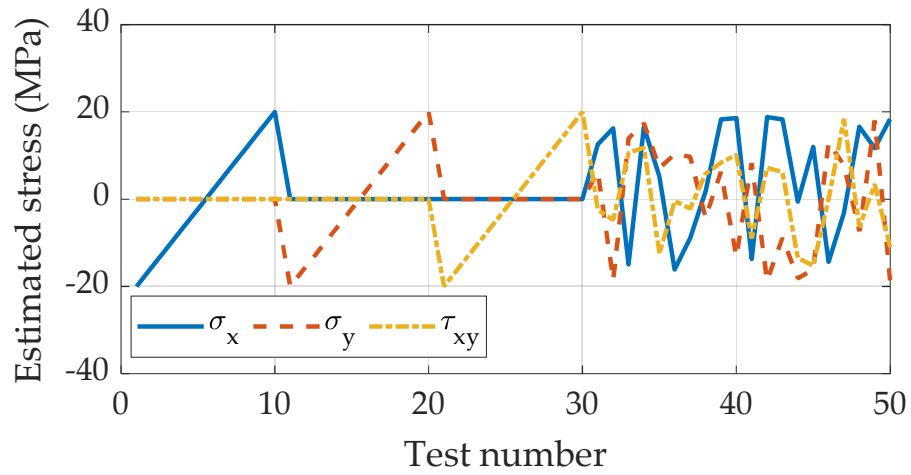


그림 66. 응력 추정 결과 (수치검증)

- 실제응력과 추정응력 사이의 차이를 비교함

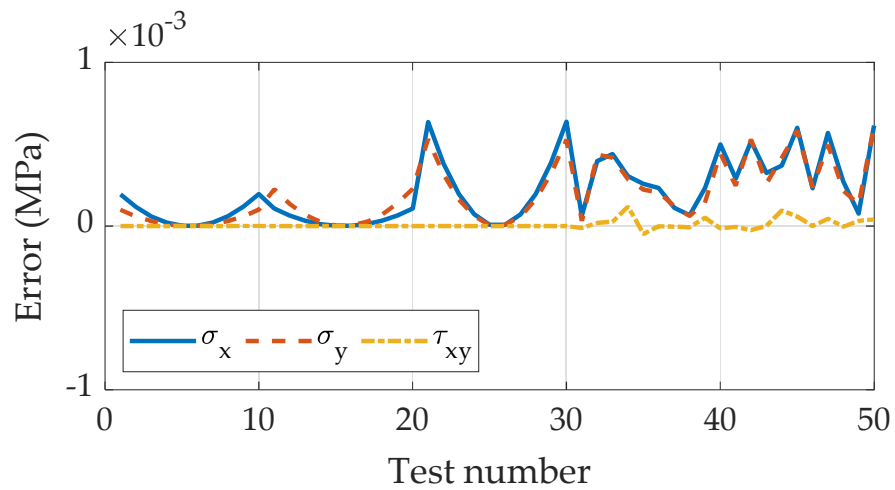


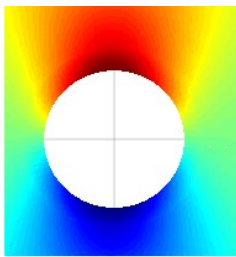
그림 67. 응력 추정 결과 (수치검증)

- 수치검증 결과 1KPa 이내(0.5% 이내)의 낮은 오차율로 응력을 추정함을 알 수 있음

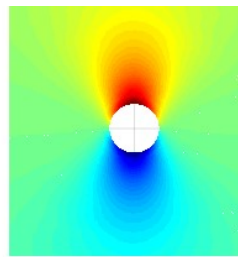
○ 최적의 홀사이즈 결정을 위한 파라미터 스터디

□ 최적의 홀사이즈 결정을 위한 파라미터 스터디 - 최적의 홀 직경 결정

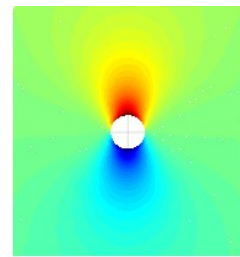
- 홀 드릴링시 홀 직경이 크면 클수록 이완되는 변위가 크기 때문에 좋지만, 한 이미지 내에 홀이 차지하는 면적이 커져 응력을 계산하는 데에 필요한 데이터가 줄어들음
- 홀 직경이 작을수록 이완되는 변위가 작지만, 한 이미지 내에 홀이 차지하는 면적이 작아서 응력을 계산하는 데에 필요한 데이터가 많아짐
- 적당한 홀 사이즈를 통해 이완되는 변위를 크게 하고, 응력계산에 사용할 수 있는 변위 값을 많이 쓸 수 있도록 해야함
- 본 섹션에서는 응력계산이 용이한 적당한 홀 직경을 정의함



홀 직경이 큰 경우



홀 직경이 적당한 경우



홀 직경이 작은 경우

그림68. 홀 직경에 따른 한 이미지 내의 변위장 예시

- 최적의 홀 직경은 카메라 스펙과 직접적으로 연관이 있음
- 카메라 스펙 중 홀 직경 분석에 필요한 변수는 분해능, 촬영영역임
- 분해능(단위: mm/pixel) 값은 낮을수록 상세한 변위장을 계측할 수 있어서 좋음
- 촬영영역은 넓을수록 다수의 픽셀을 응력계산에 활용할 수 있어 좋음
- 분해능과 촬영영역은 아래와 같은 관계를 가지고 있음

$$\text{픽셀 수} \times \text{분해능} = \text{촬영영역}$$

- 픽셀 수가 특정한 값을 가질 경우, 분해능과 촬영영역은 서로 Inverse 관계에 놓임
- 따라서 최적의 홀 직경을 찾기 위해서는 픽셀수를 먼저 특정하고, 고정된 픽셀수에 따른 최적의 분해능과 촬영영역을 찾아야 함



모델명	캐논 EOS 5Ds	니콘 D850	소니 a7R II
센서크기	풀프레임(1:1)	풀프레임(1:1)	풀프레임(1:1)
화소수	8688 x 5792	8256 x 5504	7952 x 5304
가격	3,000,000원	3,000,000원	2,000,000원

그림 69. 시중에 판매되는 고해상도 카메라 종류

- 시중에서 판매되는 카메라 모델의 카메라 해상도는 약 8,000 × 6,000 수준임
- 해상도가 높은 카메라를 사용하여 낮은 분해능에 넓은 촬영영역을 촬영해야 함

	소니 A6300		콜픽스 P900s
렌즈 종류	일반용	매크로용	-
픽셀 분해능	24.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	3.9 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	30.0 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
DIC 분해능	0.490 μm	0.078 μm	0.600 μm
X축 촬영범위	147.0 mm	23.4 mm	138.2 mm
Y축 촬영범위	82.7 mm	13.1 mm	103.6 mm

그림 70. 카메라와 렌즈 조합에 따른 분해능 및 촬영영역 예시

- 카메라 해상도가 정해졌을 경우, 매크로 렌즈와 촬영거리를 조절하여 분해능과 촬영영역을 정함
- 카메라를 피사체에 최대한 가까이 둔 상태에서 계측할 경우, 소니 A6300에 50mm F2.4 macro렌즈를 이용하여 3.9 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 의 고분해능을 얻을 수 있음
- 최대 3.9 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 의 고분해능을 얻을 수 있지만, 동시에 촬영범위가 23.4mm × 13.1mm로 줄어들음
- 카메라와 피사체 사이의 거리를 조절하여 최적의 분해능과 촬영범위를 찾는 과정이 필요함

- 카메라와 렌즈가 정해지면, 카메라와 피사체 사이의 거리를 조절하여 최적의 분해능과 촬영범위를 찾아야 함
- 이하 카메라와 렌즈가 준비됐을 경우, 최적의 홀 사이즈를 찾는 과정을 보임



하드웨어	스펙
카메라(Sony A6300)	- 2420만화소 - APS-C(1:1.5크롭)
렌즈(50mm 매크로 렌즈)	- F2.8 - 최단촬영거리: 16cm

그림 71. 최적의 홀 직경을 찾는 과정에 사용된 카메라와 렌즈 스펙

- 먼저 아래와 같이 레이저 거리계를 활용하여, 촬영거리에 따른 카메라 분해능과 촬영영역을 계산함



그림 72. 카메라 분해능, 촬영거리 확인용 실험

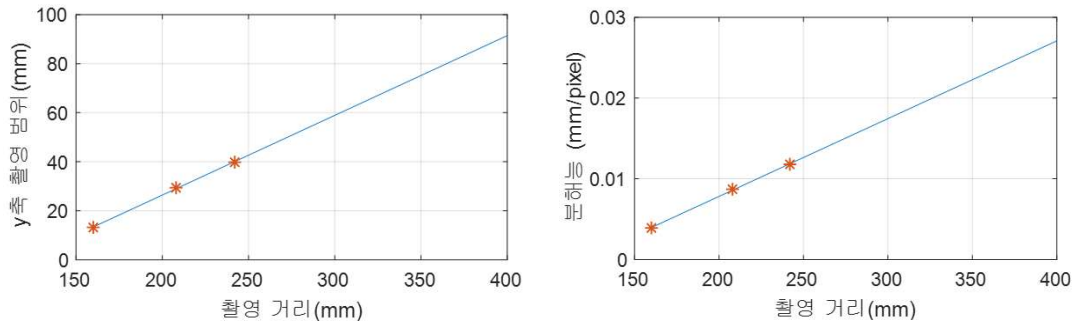
- 피사체로부터 임의로 선택된 3가지 거리(160mm, 220mm, 240mm)에서 촬영한 뒤, 각 거리에서 촬영되는 범위를 기록함

<u>거리 160mm</u>	<u>거리 208mm</u>	<u>거리 242mm</u>
<u>2552pixel/10mm</u>	<u>1148pixel/10mm</u>	<u>848pixel/10mm</u>
<u>촬영범위 13.2mm</u>	<u>촬영범위 29.4mm</u>	<u>촬영범위 39.8mm</u>

그림 73. 자를 촬영한 사진들

- 핀홀 카메라 모델에 따라 촬영 거리와 촬영영역 · 분해능 사이에는 선형 관계를 가짐

- 3점을 통해 선형회귀를 통해 아래 그림과 같은 선형 관계를 얻었고, 선형회귀를 통해 촬영거리와 분해능 사이의 관계식을 구함



$$\text{분해능} = 0.0001 \times \text{촬영거리} - 0.0114$$

그림 74. 카메라 분해능, 촬영거리 관계

- 이미지로 구분 가능한 최소 변위는 픽셀당 mm크기로 표현되는 분해능이며, 디지털 이미지 상관관계(DIC) 기술은 분해능의 1/50까지 변위를 구분할 수 있음.²³⁾
- 본 보고서에서는 DIC에서 구분되는 최소 변위값을 DIC분해능이라 부름. 예를 들어 DIC 분해능이 $1\mu m$ 라고 하고, 한 픽셀에서 $6\mu m$ 의 변위가 발생했다고 하면 6번의 DIC분해능으로 감지할 수 있음
- 본 보고서에서는 DIC로 분해되는 변위량의 총합을 아래 식과 같이 계산함

$$D = \sum_{i=1}^n [\text{floor}(|u(x_i, y_i)|/q) + \text{floor}(|v(x_i, y_i)|/q)]$$

표기	의미
D	DIC로 분해되는 변위량 총합
n	DIC로 계산되는 변위장의 픽셀 수
q	DIC분해능 (단위: mm/pixel)
$\text{floor}(\cdot)$	내림 함수

- D 값을 통해 DIC를 통해 분해되는 변위량을 알 수 있음. 즉, 홀드릴링으로 유도되는 변위는 D 값이 클수록 정밀하게 예측되는 것임

23) Schajer, G. S. (2010). Advances in hole-drilling residual stress measurements. Experimental mechanics, 50(2), 159-168.

- 홀 직경 및 이완되는 응력에 따른 변위장 감지수(D)를 분석함
- 홀 직경이 4mm ~ 20mm일 경우에 대한 분석을 진행하였으며, 아래 그림은 홀 직경이 12mm, 20mm일 경우 응력에 따른 변위장 감지수(D)를 분석함
- 또한 각 홀 직경에서 촬영거리를 바꿔가며 분석함

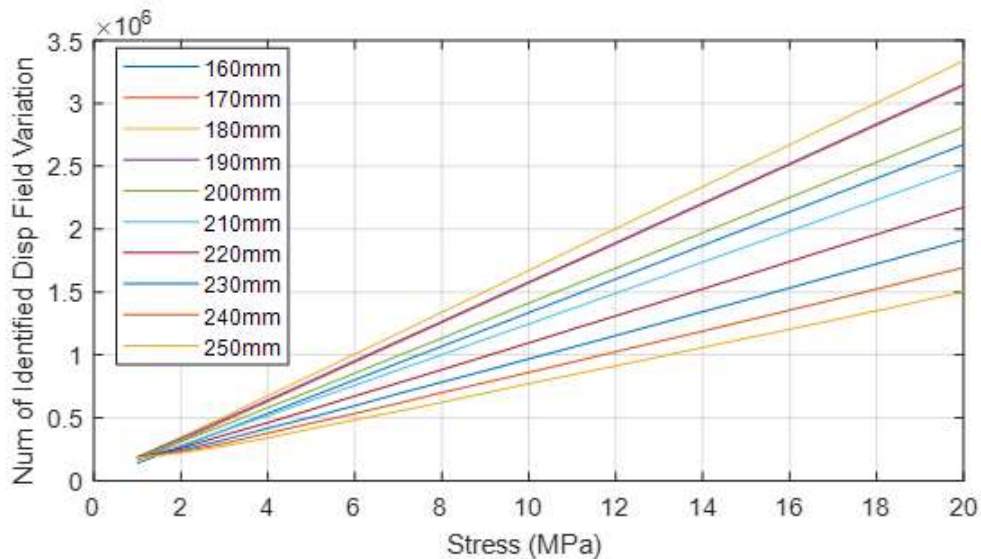


그림 75. 홀 직경 12mm에서 응력에 따른 변위장 감지 수 (범례: 촬영거리)

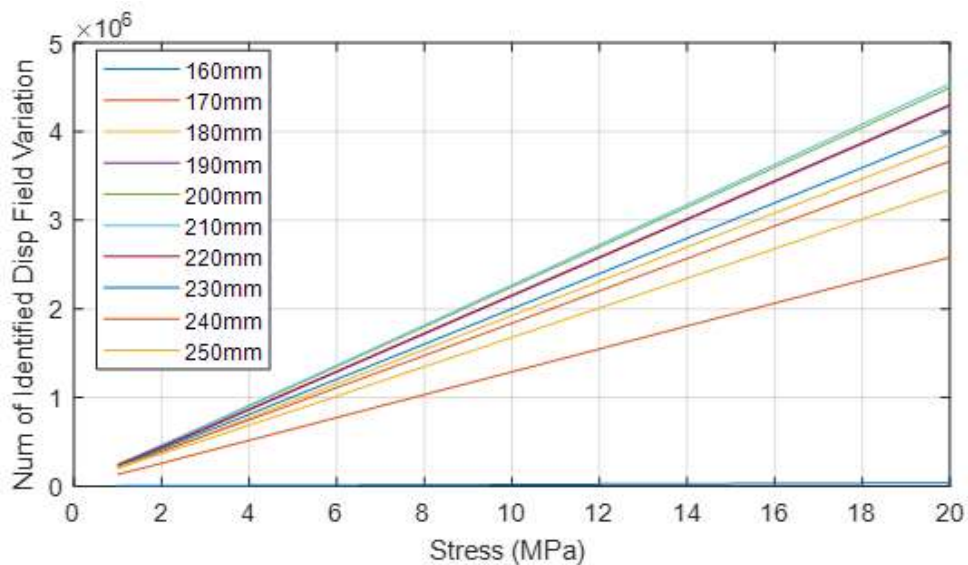


그림 76. 홀 직경 20mm에서 응력에 따른 변위장 감지 수 (범례: 촬영거리)

- 위 그림과 같이 홀 직경이 커지면서 이완되는 변위가 커져 변위장 감지 수가 선형적으로 늘어남. 여기서 기울기는 응력에 따른 변위장 감지 수 변화로, 기울기가 클수록 응력 변화를 잘 감지함
- 본 보고서에서는 위의 기울기를 응력 분해능이라 정의함. 홀 직경이 20mm일 때가 12mm일 때보다 기울기가 크므로, 홀 직경이 20mm일 때 응력 분해능이 좋음
- 따라서 최적의 홀 직경은 응력분해능이 좋은 직경임
- 최적의 홀 직경을 구하기 위해 다양한 홀 직경(4mm ~ 20mm)에서 촬영거리를 바꿔가며 아래 그림과 같이 응력 분해능을 계산함

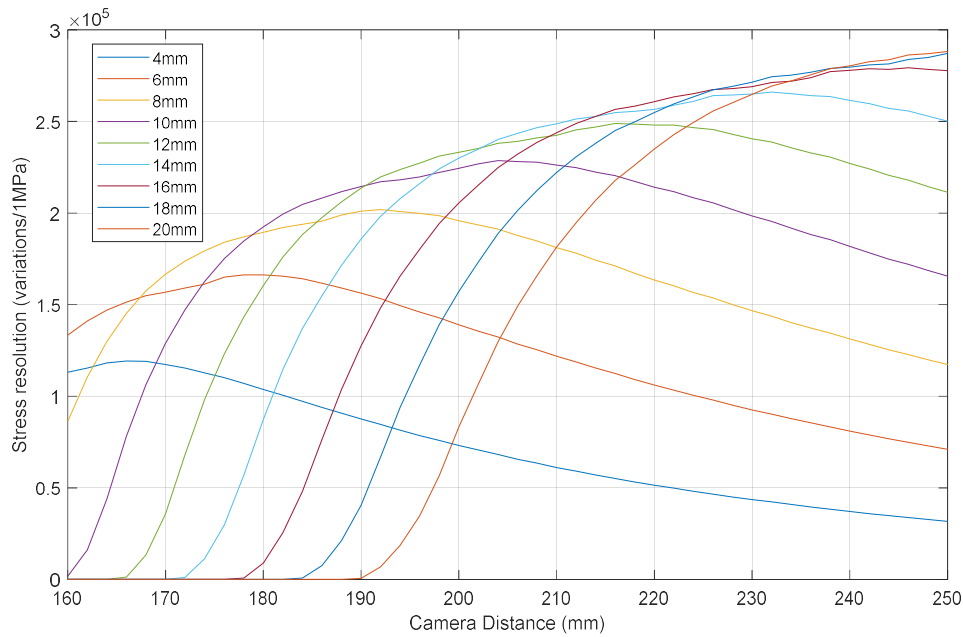


그림 77. 촬영거리에 따른 응력 분해능 (범례: 홀 반지름)

- 위의 그림을 통해 촬영거리가 정해져 있을 경우 최적의 홀 직경을 구할 수 있음. 촬영거리가 정해져 있는 상태에서 가장 응력 분해능을 높게 하는 홀 직경이 곧 최적의 홀 직경이 됨. 예를 들어 190mm-200mm의 촬영거리에서 촬영할 경우, 홀 반지름이 12mm(초록선)일 때 최대의 응력 분해능을 얻을 수 있으므로, 190mm-200mm의 촬영거리에서는 12mm의 홀 반지름이 최적의 홀 크기가 됨
- 반대로 홀 직경이 정해져 있을 경우 최적의 촬영거리를 구할 수 있음. 예를 들어 드릴 비트 직경이 8파이(반지름 4mm)일 경우, 최적의 촬영 거리는 160mm-170mm임을 알 수 있음
- 최대 응력 분해능을 보이는 홀 직경-촬영거리도 구할 수 있음. 위 그림과 같이 홀 직경-촬영거리가 커짐에 따라 응력 분해능이 커지지만 일정한 값에 수렴하므로, 수렴되는 최적의 홀 직경-촬영거리를 계산하여 최대 응력 분해능을 보이는 홀 직경-촬영거리를 구함
- 실 구조물의 응력 계측 시 큰 홀 직경을 이용하기보다 작은 홀로 효율적인 계측을 수행하는 것이 중요함. 직경 20mm가 넘어가면 얻을 수 있는 응력 분해능이 크지 않으므로 최적의 홀 직경은 20mm라고 볼 수 있음
- 앞서 설명된 최적의 홀직경 및 촬영거리는 해상도 6000 x 4000의 카메라에 50mm 매크로 렌즈를 장착하여 200mm 거리에서 $8.6\mu\text{m}$ 의 분해능을 보일 경우에 대해 분석한 결과이다. 분해능이 n배 높아지면(분해능 값이 낮아지면) 그림 77의 Stress resolution이 n배 높아짐
- 본 보고서에서는 Homogeneous material에 대한 분석을 진행하였으며, 골재의 분포, 응력 교란 등 실제 콘크리트 환경에 대한 최적의 홀 직경 분석을 위한 후속 연구과제가 필요함

□ 최적의 홀사이즈 결정을 위한 파라미터 스터디 - 홀 깊이 결정

- 최적의 콘크리트 홀 깊이를 수치해석을 통해 분석함
- 이론식에서는 관통 홀(through hole)에 의해 이완되는 변위장이 계산되지만, 실 구조물에서 관통 홀을 뚫기란 많은 제약이 있어 어려움
- 따라서 관통 홀에 수렴하는 홀 깊이를 파악함
- 본 보고서에서는 ABAQUS와 이론식 간의 비교를 통해 최적의 홀 깊이를 파악함
- 본 보고서에서는 Homogeneous material에 대한 분석을 진행하였으며, 추후 골재의 분포, 철근 등 실제 콘크리트 환경에 대한 분석을 위한 후속 연구과제가 필요함

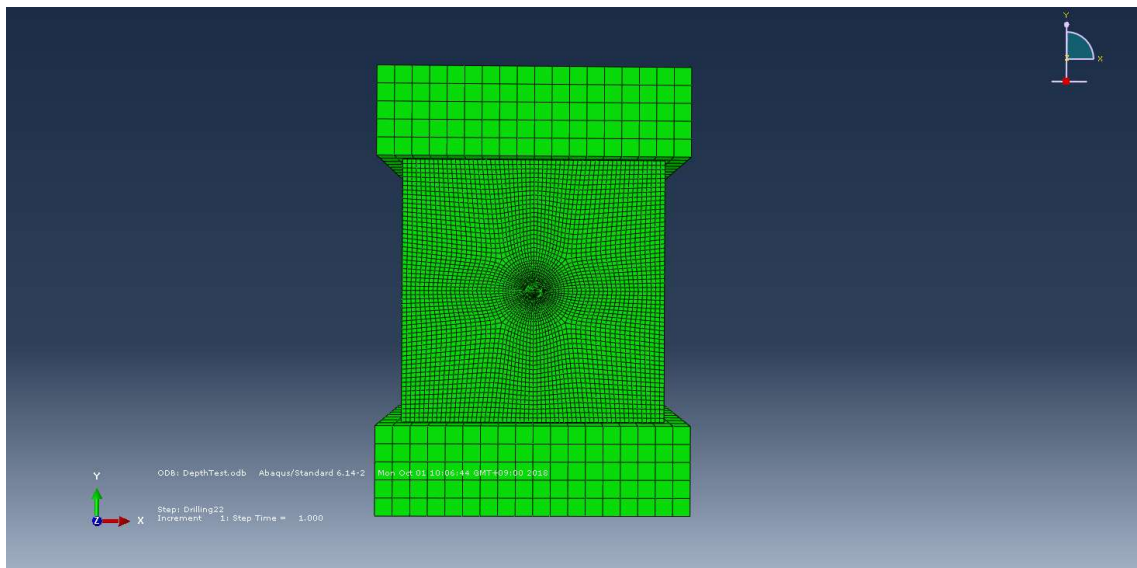


그림 78. ABAQUS를 통한 홀 드릴링 모델링 (관통 전)

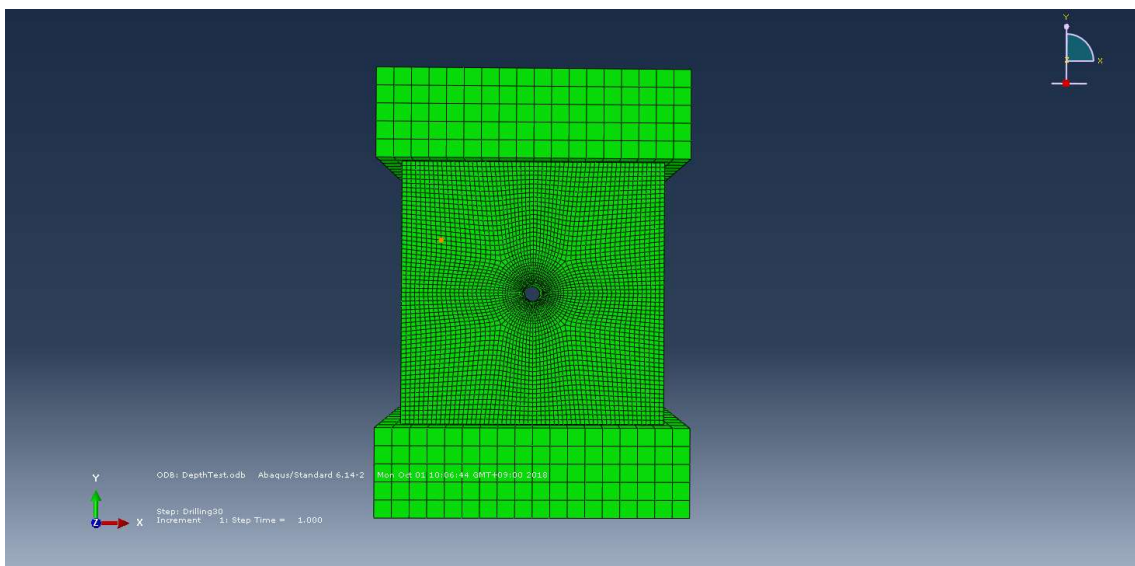


그림 79. ABAQUS를 통한 홀 드릴링 모델링 (관통 후)

- ABAQUS로 300mm×300mm 표면 면적에 150mm 두께의 콘크리트 시편을 모델링함
- 이 시편에 홀을 5mm씩 깊이 파며 이완되는 변위장을 습득함
- 습득된 변위장과 이론식으로 계산된 변위장 사이의 차이를 비교 분석함

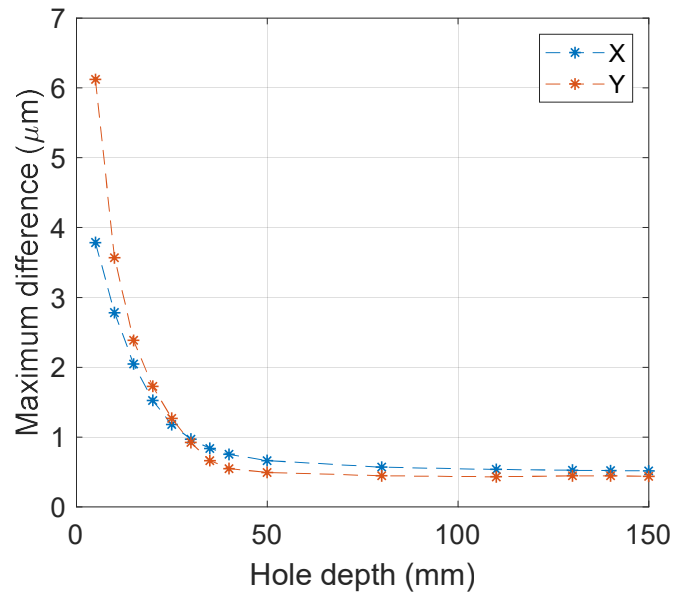


그림 80. ABAQUS를 통한 홀 드릴링 모델링 (홀 깊이 별)

- 위 그림은 홀 깊이에 따른 모델과 이론식 사이의 오차를 보임
- 홀 깊이가 관통 홀(홀 깊이 150mm)에 가까워지면서 ABAQUS가 이론식에 근접해짐을 알 수 있음
- 홀 깊이 35mm 이후로는 에러가 거의 수렴했음을 알 수 있음
- 따라서 손상을 최소화하면서 관통 홀에 가까운 홀 깊이 35mm가 최적의 홀 깊이임을 알 수 있음

2-2. 고정하중 응력계측의 현장적용성 향상기술(CTE2)

○ 카메라 떨림 영향 최소화 하드웨어 설계

□ 카메라 떨림 영향 최소화 하드웨어 설계 - 하드웨어 설계 및 제작

- 홀 드릴링에 의한 카메라 떨림 영향을 최소화하는 이미징 시스템을 설계함
- 아래 그림과 같이 콘크리트 표면에서 일정한 거리에서 이미지 촬영을 할 수 있는 장치를 개발함
- 홀 드릴링 중에 카메라를 치워도 되기 때문에 홀 드릴링에서 생기는 카메라 떨림을 미리 방지할 수 있음



(a) 이미징 시스템 앞모습



(a) 이미징 시스템 사용 모습

그림 81. 카메라 떨림 영향 최소화 하드웨어

- 아래와 같은 하드웨어로 구성함

하드웨어	품명
로드	SmallRig 15mm Rod Aluminum Alloy Rod with M12 Female Thread 40cm 16 Inches Long - 1054 (Pack of 2)
카메라 케이지	Filmcity Power DSLR Video Camera Cage Mount Rig (FC-CTH) Cage Kit at Best Price
라이트	Sony Alpha a6000 / a6300 / a6500 Macro LED Ring Light/Flash
유선 릴리즈	Pixel tw-283 S2 Wireless Shutter Release Timer Remote Control for Sony Alpha A58 A7 A7R A7RII A3000 A6000 HX300RX100II
카메라	Sony A6300
렌즈	Sony 50mm F2.4 macro

○ 카메라 떨림 영향 최소화 알고리즘 개발

□ 카메라 떨림 영향 최소화 알고리즘 개발 - 오차 최소화 알고리즘

- 아래 그림과 같이 홀 드릴링을 위해서 카메라는 멀리 떨어져서 계측되므로 미소한 움직임에도 큰 변위장 오차를 유발함
- 홀 드릴링 공간이 필요하므로 카메라를 가까이 위치하지 못해 정밀한 변위장 계측이 어려움
- 따라서 카메라 이동이 가능한 고정하중 응력계측 기술이 필요함

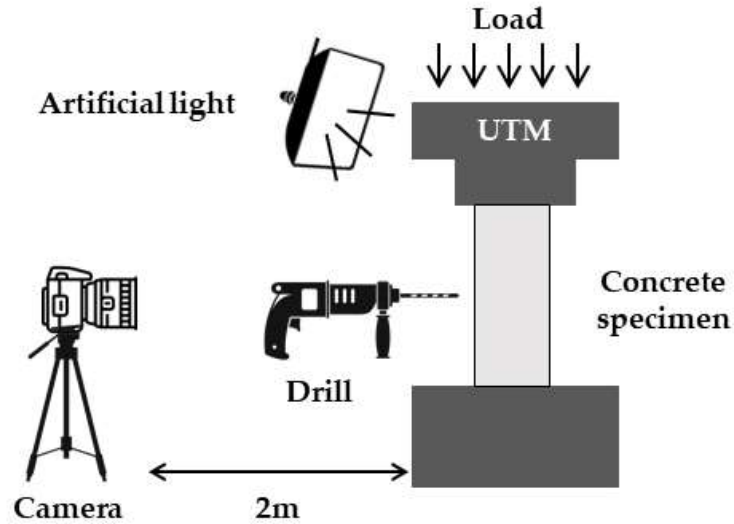


그림 82. 홀드릴링과 DIC가 결합된 실험 모습도

- 홀 드릴링으로 유도되는 변위장은 다음과 같이 homography-dependent와 homography-independent로 구분할 수 있음

$$\begin{Bmatrix} u(x_i, y_i) \\ v(x_i, y_i) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{uh}(x_i, y_i) + P_{uh'}(x_i, y_i) \\ P_{vh}(x_i, y_i) + P_{vh'}(x_i, y_i) \end{Bmatrix} \sigma_x + \begin{Bmatrix} Q_{uh}(x_i, y_i) + Q_{uh'}(x_i, y_i) \\ Q_{vh}(x_i, y_i) + Q_{vh'}(x_i, y_i) \end{Bmatrix} \sigma_y + \begin{Bmatrix} R_{uh}(x_i, y_i) + R_{uh'}(x_i, y_i) \\ R_{vh}(x_i, y_i) + R_{vh'}(x_i, y_i) \end{Bmatrix} \tau_{xy}$$

표기	의미
uh	homography-dependent scaling factor for u
uh'	homography-dependent scaling factor for v
vh	homography-independent scaling factor for u
vh'	homography-independent scaling factor for v

- 전 영역 변위장을 활용하여 $P_{uh'}, Q_{uh'}, R_{uh'}, P_{vh'}, Q_{vh'}, R_{vh'}$ 를 구한 뒤, 아래 식을 통해 응력을 계산할 수 있음

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{uh'}(x_1, y_1) & Q_{uh'}(x_1, y_1) & R_{uh'}(x_1, y_1) \\ P_{vh'}(x_1, y_1) & Q_{vh'}(x_1, y_1) & R_{vh'}(x_1, y_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{uh'}(x_n, y_n) & Q_{uh'}(x_n, y_n) & R_{uh'}(x_n, y_n) \\ P_{vh'}(x_n, y_n) & Q_{vh'}(x_n, y_n) & R_{vh'}(x_n, y_n) \end{bmatrix}^+ \begin{Bmatrix} u_{h'}(x_1, y_1) \\ v_{h'}(x_1, y_1) \\ \vdots \\ u_{h'}(x_n, y_n) \\ v_{h'}(x_n, y_n) \end{Bmatrix}$$

표기	의미
$u_{h'}$	homography-independent u
$v_{h'}$	homography-independent v

- 특정 카메라와 렌즈를 사용한다고 가정하고, 아래와 표와 같이 다양한 카메라 모션과 다양한 응력에 대해서 수치검증을 수행함

장비	스펙
Camera	모델명: Sony a7R II 해상도: $7,952 \times 5,304$
Lens	초점거리: 50mm

표 5. 수치검증에서 가정된 카메라 시스템

Test	Stress (MPa)			Rotation (mrad)			Translation (mm)		
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	r_x	r_y	r_z	t_x	t_y	t_z
1-10	20	-5	2	[-10, 10]	0	0	0	0	0
11-20				0	[-10, 10]	0	0	0	0
21-30				0	0	[-10, 10]	0	0	0
31-40				0	0	0	[-5, 5]	0	0
41-50				0	0	0	0	[-5, 5]	0
51-60				0	0	0	0	0	[-5, 5]
61-100	unif(-50, 50)			unif(-10, 10)			unif(-5, 5)		

표 6. 수치검증 시나리오

- 고정응력 계측 도중 카메라가 움직일 경우 생기는 변위장은 다음과 같음
- 응력: $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = (20, -5, 2)\text{MPa}$
- 카메라 모션: $(r_x, r_y, r_z) = (3, -5, 5)\text{mrad}$, $(t_x, t_y, t_z) = (3, -2, -5)\text{mm}$

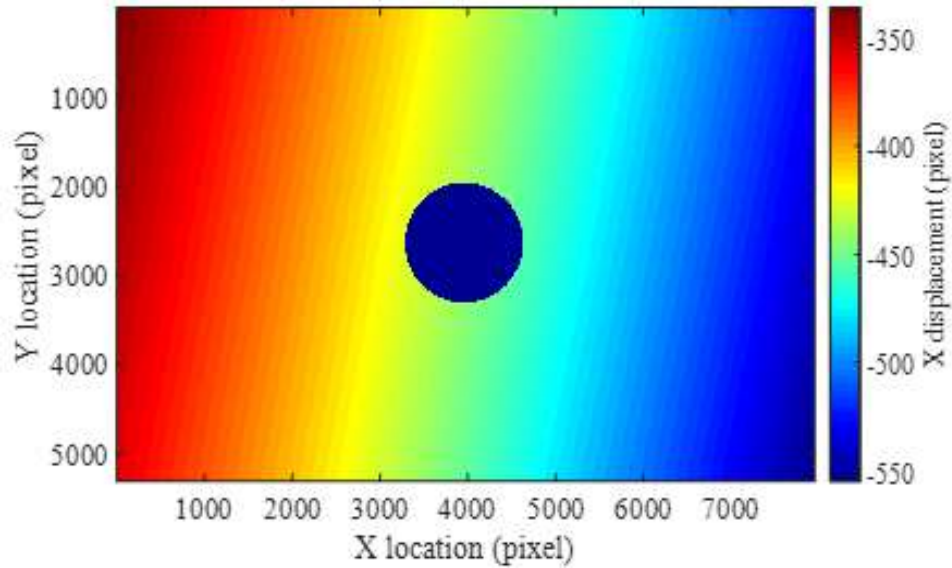


그림 83. 수치검증을 통해 생성된 x축 변위(홀드릴링+카메라모션)

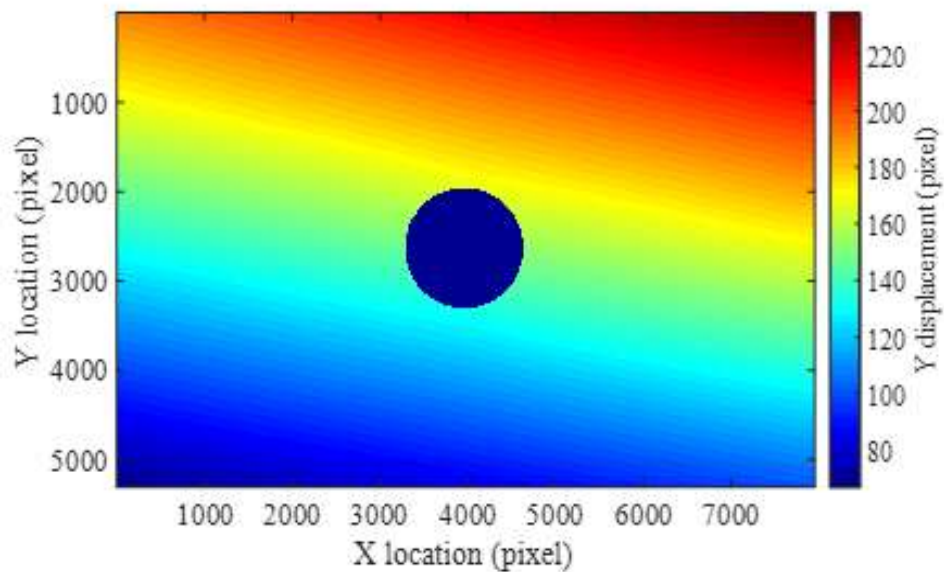


그림 84. 수치검증을 통해 생성된 y축 변위(홀드릴링+카메라모션)

- 위 그림과 같이 응력에 의한 변위장 패턴이 보이지 않음
- 카메라 이동에 의한 패턴이 주로 나타나게 됨
- 따라서 카메라 이동에 의한 변위장을 제거하는 작업이 필요하며, 이는 homography-independent term인 u_H 와 v_H 를 추출함으로써 수행할 수 있음

- 카메라 모션을 제거한 term인 u_H 와 v_H 은 다음과 같음
- 응력에 의한 패턴이 보이기 시작함
- 이를 이용하여 카메라 모션에 무관한 변위장을 통해 응력을 계산할 수 있음

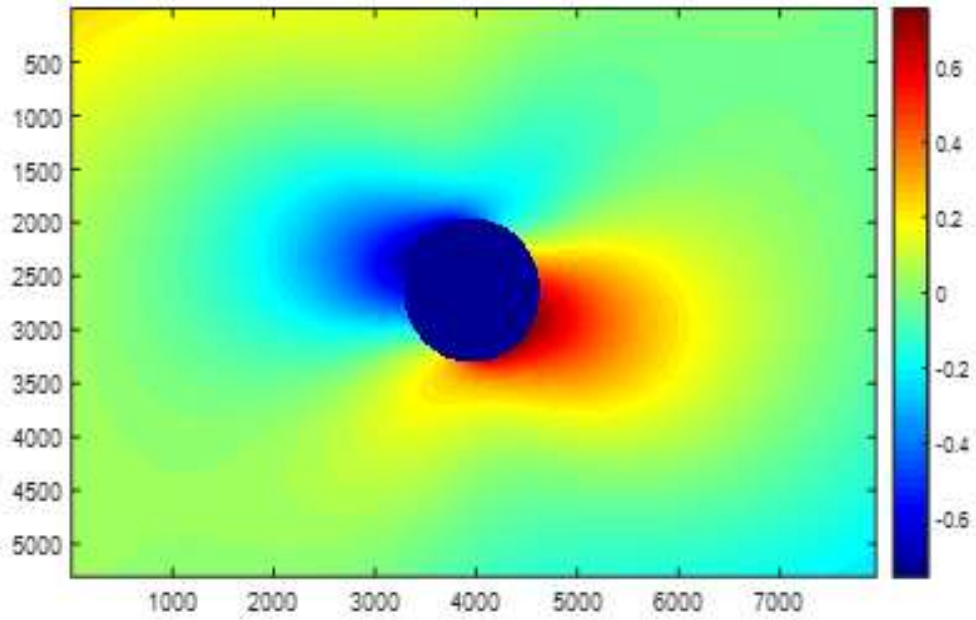


그림 85. 수치검증을 통해 생성된 u_H (카메라모션 제거)

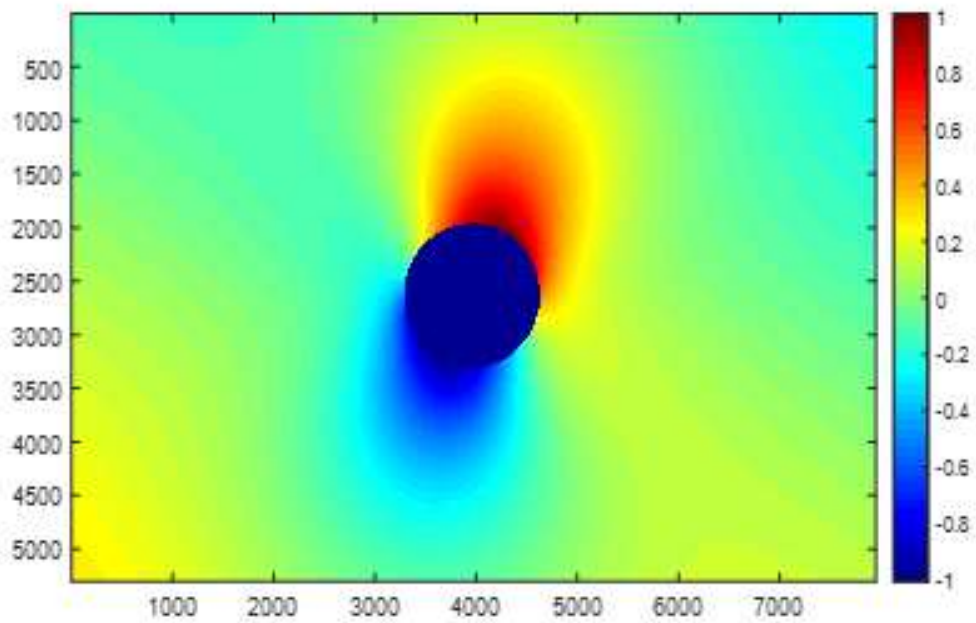


그림 86. 수치검증을 통해 생성된 v_H (카메라모션 제거)

- 수치검증 최종 결과는 다음과 같음

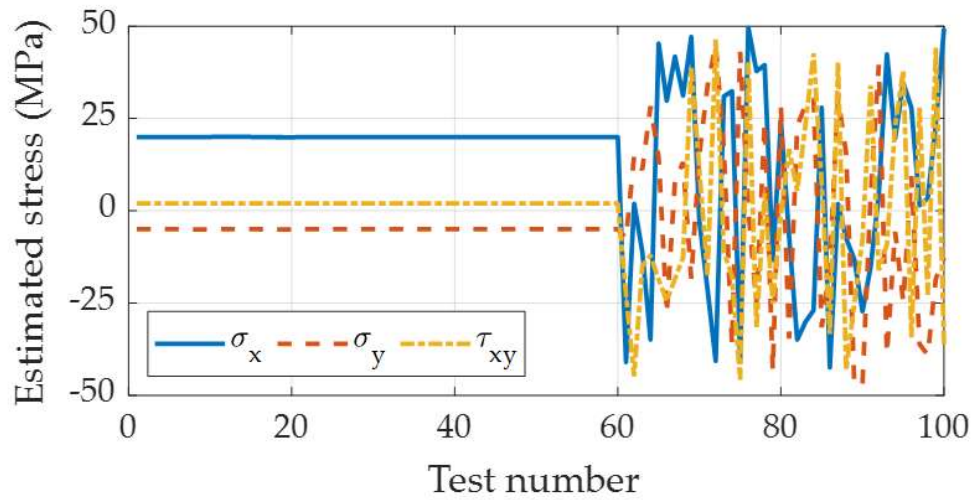


그림 87. 변위장을 통해 추정된 응력

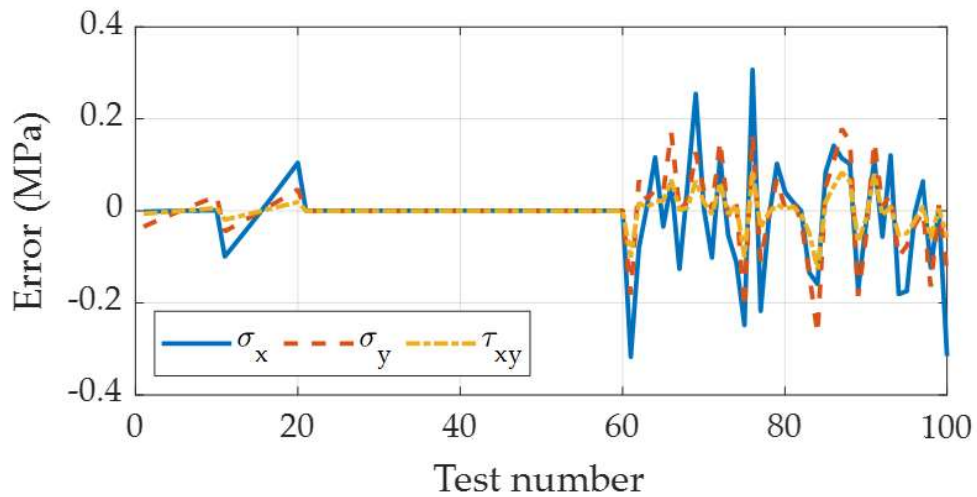


그림 88. 추정응력과 실제응력 사이의 차이

- 최대 0.63% 에러로 응력을 계산함
- 회전 모션에서 에러가 유발되지만, 1% 이내의 오차로 무시할 수 있을 정도임
- 따라서 본 과제를 통해 개발된 고정하중 응력계측 기술을 통해 카메라 이동에도 응력을 계측할 수 있음을 알 수 있음

□ 카메라 떨림 영향 최소화 알고리즘 개발 - 실내 시편실험 검증

- UTM을 활용하여 시편실험을 수행함
- EVA와 Cork로 이루어진 물질로 이루어진 시편을 활용함
- 물질의 특성, 홀 크기 및 카메라는 다음 표와 같음

Property	Value
Young's modulus	2.46 MPa
Poisson's ratio	0.1
Dimension (height × width × depth)	230 mm × 150 mm × 75 mm
Hole diameter	14 mm
Pixel resolution	7,952 × 5,304
Scaling factor	108.26 pixel/mm

표 7. 실내실험 정보

- 실내실험에서는 UTM을 통해 100KPa의 압축력을 가함
- 개발된 기술을 통해 계측되는 응력과 UTM을 통해 가한 응력을 비교함

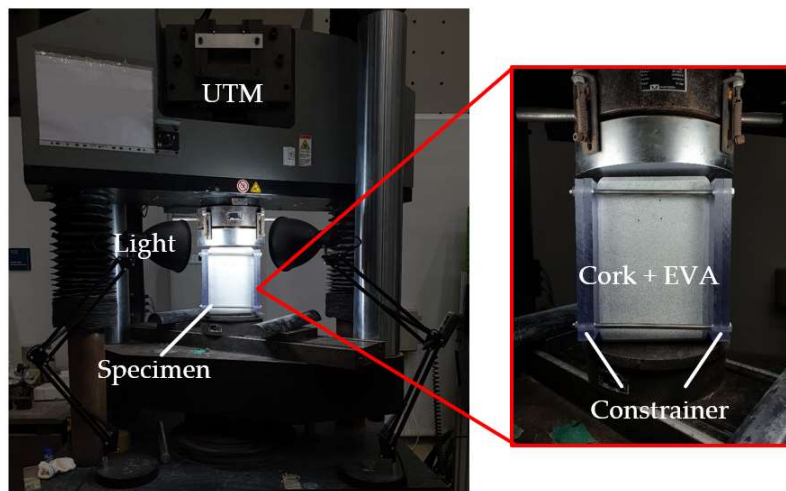


그림 89. 실내실험

- 홀 드릴링 전후의 이미지를 오픈소스로 기상용화된 기존 소프트웨어인 Ncorr를 통해 변위장을 계산함. 계산된 변위장은 카메라가 움직이면 안되지만, 본 기술은 카메라 움직임에 의해 생기는 오차를 보정하는 기술이 적용되므로 움직임을 허용함
- 기상용화된 소프트웨어는 최대 0.02픽셀의 오차로 변위장을 계측할 수 있으며, 응력 정밀도 향상을 위해서는 픽셀정밀도(픽셀/mm)를 높일 수 있는 카메라-렌즈 조합을 활용해야함

- 계측된 변위장은 다음과 같음

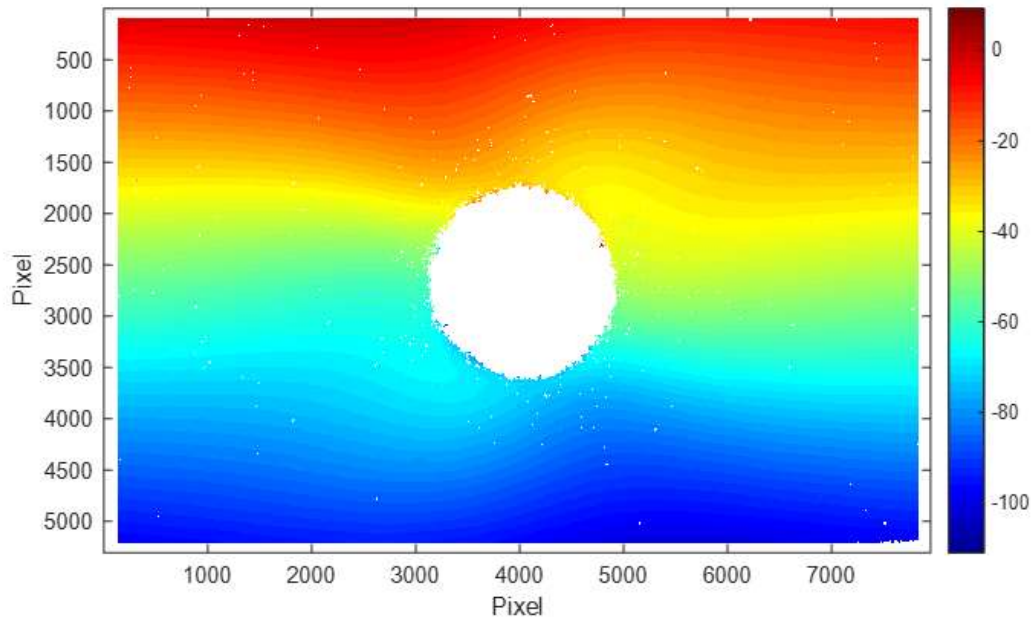


그림 90. 실내실험 변위장 (x축)

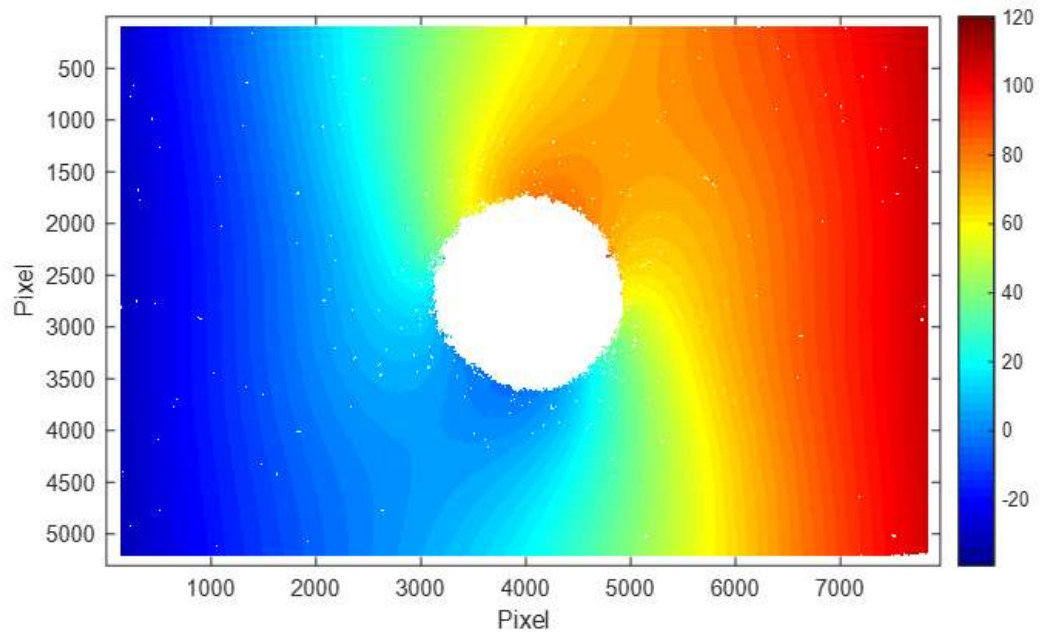


그림 91. 실내실험 변위장 (y축)

- 위 그림과 같이 응력에 의한 변위장 패턴이 보이지 않음
- 카메라 이동에 의한 패턴이 주로 나타나게 됨
- 따라서 카메라 이동에 의한 변위장을 제거하는 작업이 필요하며, 이는 homography-independent term인 u_H 와 v_H 를 추출함으로써 수행할 수 있음

- 카메라 모션을 제거한 term인 u_H 와 v_H 은 다음과 같음
- 응력에 의한 패턴이 보이기 시작함
- 이를 이용하여 카메라 모션에 무관한 변위장을 통해 응력을 계산할 수 있음

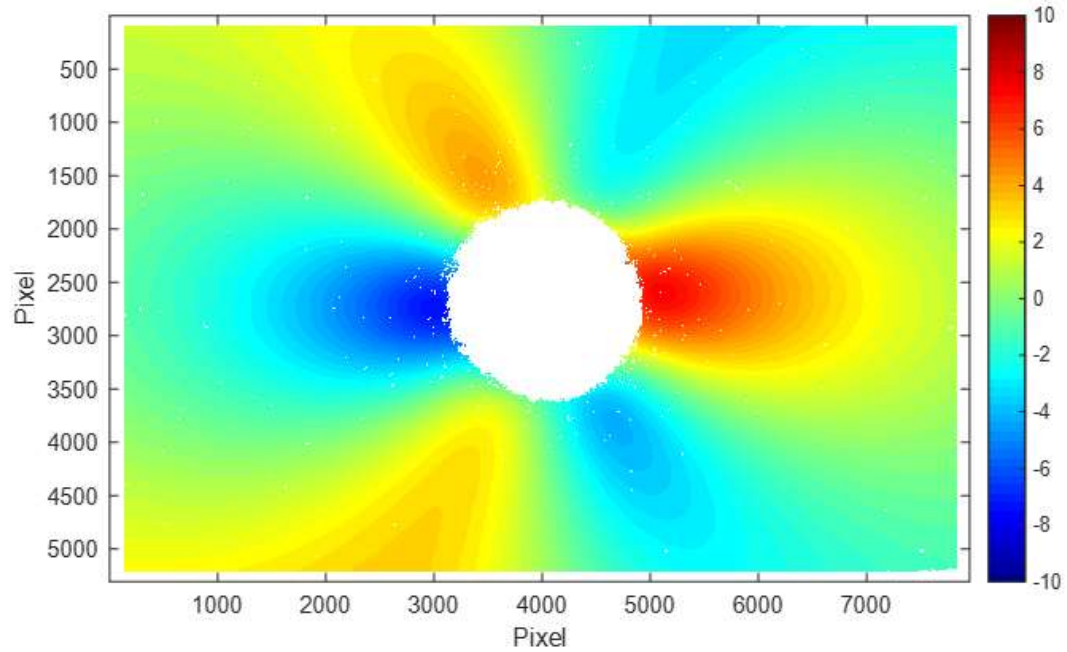


그림 92. 실내실험 변위장 u_H (카메라모션 제거)

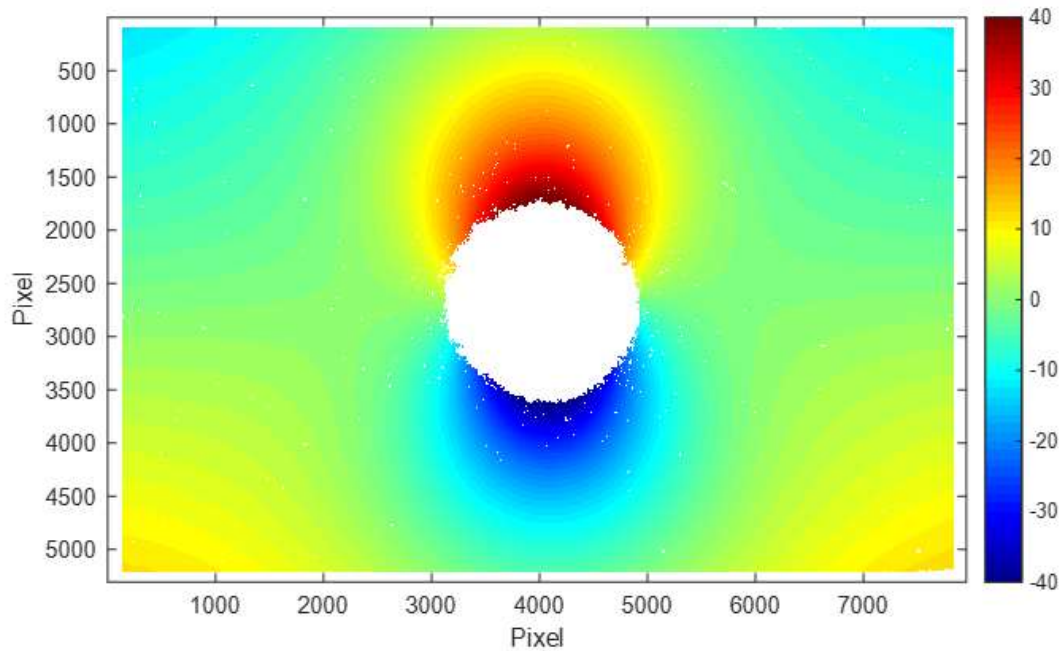


그림 93. 실내실험 변위장 v_H (카메라모션 제거)

- 실내실험 최종 결과는 다음과 같음

Test	True stress (KPa)	Estimated stresses (KPa)			Error (KPa)
	$\sigma_{y,true}$	σ_x	σ_y	τ_{xy}	$\sigma_y - \sigma_{y,true}$
1	-100.0	-29.3	-101.3	+1.2	-1.3
2	-100.0	-21.6	-103.1	-3.7	-3.1
3	-100.0	-39.2	-107.1	-3.0	-7.1

표 8. 실내실험 결과

- 총 3번의 시편실험에서 최대 7.1% 에러로 응력을 계산함
- 본 보고서에 수록된 실험은 동종재료(Homogeneous material)에 대한 실험결과를 보이며, 실제 콘크리트 시편에 대한 응력계측을 수행할 경우 골재에 의한 영향에 대한 평가가 필요함. 골재의 분포에 의해 응력계측 오차가 발생할 수 있으나, 전영역 변위장을 종합적으로 활용하여 응력을 계산하므로 확률적인 오차가 상당부분 해소될 수 있음
- DIC 기반 고정응력 계측기술의 현장적용성 향상을 위해 고려해야할 사항으로는 1. 카메라 설치, 2. 홀 드릴링 방식, 3. 응력계산 알고리즘의 유효성이 있음
- 본 기술은 1번에 해당하는 카메라 설치에 대한 문제를 해결하여 현장 적용성을 향상시킨 고정응력 계측기술이며, 추후 크랙이 생성되지 않으면서 응력장의 교란을 최소화하는 홀 드릴링 방식과 비등방재료(Anisotropy material)/비등종재료(Non-homogeneous material)에 대한 응력계산 알고리즘 개발을 위한 후속연구가 필요함
- 따라서 본 과제를 통해 개발된 고정하중 응력계측 기술을 통해 카메라 이동에도 응력을 계측할 수 있음을 알 수 있음

2-3. 고정하중 응력을 활용한 차세대 내하력평가기술(CTE3)

○ 차세대 내하력 평가기술 개발

□ 차세대 내하력 평가기술 개발 - 고정하중 불확실성에 의한 기존 기술 한계 검증

- 현재 교량의 내하력은 아래의 식(허용응력법)을 이용하여 평가됨
- 공용내하력 $P_n = RF \times K \times P_r$

$$K = K_s(\text{응력보정 계수}) = \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \times \frac{1 + i_{\text{계산}}}{1 + i_{\text{실측}}}$$

$$\text{또는 } K_s(\text{처짐보정 계수}) = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \times \frac{1 + i_{\text{계산}}}{1 + i_{\text{실측}}}$$

$$RF(\text{내하율}) = \frac{f_a - f_d}{f_L(1 + i)}$$

여기서, f_a = 실측 허용응력 f_d = 실측 고정하중에 의한 응력
 f_L = 설계 활하중에 의한 응력 (충격고려)
 i = 도로교 표준시방서의 설계 충격계수

- 현재 내하력 평가방법은 내하율을 산정할 때, 실측 고정하중 응력을 사용할 것을 제안하고 있으나, 현존 고정하중 응력 계측 방법이 없기 때문에 유한요소 모델 해석에 의한 고정하중 응력을 사용하고 있는 실정
- 따라서 본 연구에서 고정응력 계측이 가능할 때를 가정하여 아래와 같이 총 세 가지 경우의 내하율 평가 실험을 진행
- 1) 실측된 고정하중 응력 대신 설계도면에 근거한 고정하중 응력을 이용한 내하율 평가
- 2) 실교량 시나리오 1. 설계도면상 가정보다 낮은 단위 중량을 가지는 콘크리트로 시공
 → 실제 교량이 일반적으로 설계도면에서 사용되는 콘크리트 단위중량 2500kg/m^3 보다 낮은 값인 2300kg/m^3 으로 건축된 경우
- 3) 실교량 시나리오 2. 신축이음부 고결로 인한 발생 지점부 추가적인 휨저항 발생
 → 양단에 휨저항($500,000\text{kN/m}$)이 발생하여 중앙부의 휨모멘트에 의한 영향 감소

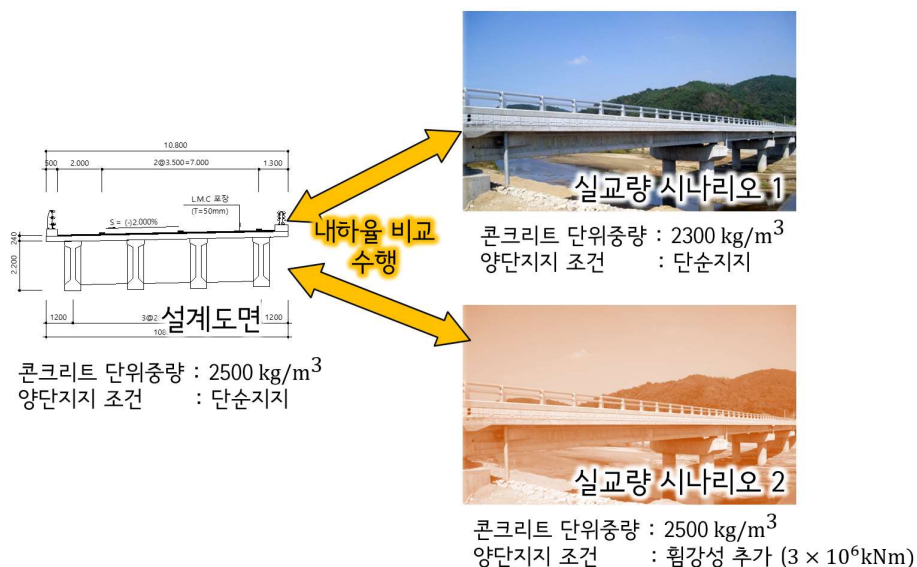


그림 94. 설계도면과 실교량 시나리오를 이용한 내하율 산정 결과 비교

□ 실제 교량을 이용한 내하력 평가 절차

- 교량 내하력 평가는 도로교설계기준에 근거한 구조물 해석방법을 이용하여 수행되었으며 내하력 평가 절차는 아래 그림에 나타난 것과 같이 수행되었음

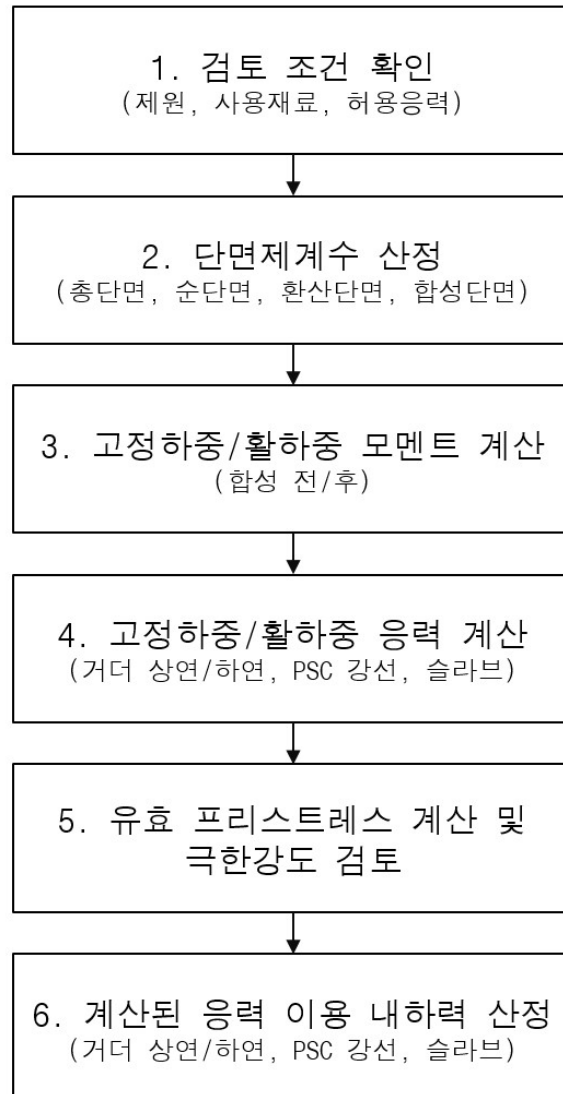


그림 95. 교량 내하력 평가 절차

□ 실제 교량 설계도면에서 내하력 검토 조건 확인

- 내하력 평가 대상으로 총연장이 $2 \times (4 \times 35.0) = 280.0\text{m}$ 이고, 폭원은 10.800m 인 1형 프리스트레스 교량을 선정
- 도로교설계기준을 적용한 구조 계산서를 이용하여 제5경간의 1/2단면에서 공용내하력 검토
- 대상 교량에 대한 상세 정보는 아래 그림과 표를 참고
- 대상 교량에서 시나리오 1의 조건 1, 2와 시나리오 2의 조건 1, 2를 적용하여 내하율을 평가 및 비교

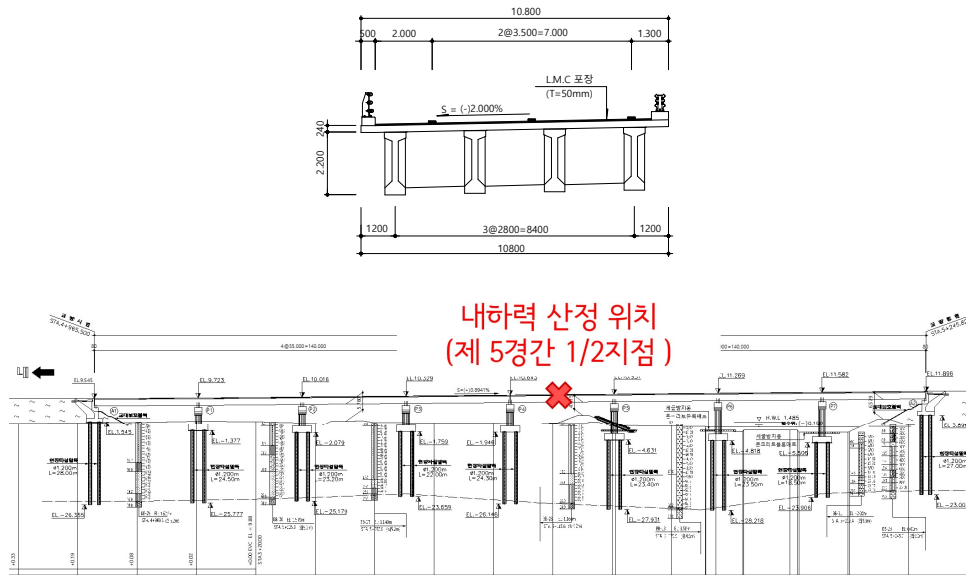


그림 96. 내하력 평가 대상 프리스트레스 교량의 종·횡단면도

표 9. 내하율 평가 대상 교량의 설계도면상 콘크리트 및 철근 재료 특성

구 분		바닥판	가로보	PSC Beam
콘크리트 설계 압축강도(f_{ck})		30 MPa	30 MPa	40 MPa
철근 항복강도(f_y)		400 MPa	300 MPa	300 MPa
구 분		PSC Beam	구분	P.S강선 (12.7mm 7연선)
프리스트레스 도입시		32.0 MPa	극한강도	1900 MPa
프리스트레스 도입 직후의 응력	허용휨 압축응력	15.4 MPa	항복응력	1600 MPa
	허용휨 인장응력	1.4 MPa	Jacking에 의한 최대긴장응력	1440 MPa
설계하중 작용시 (손실후)	허용휨 압축응력	16.0 MPa	Prestress 도입직후	1328 MPa
	허용휨 인장응력	1.581 MPa	설계하중 작용시	1280 MPa

□ 교량 설계도면에 근거한 교량 단면제계수 산정

- 설계 도면에 근거하여 평가 대상 교량의 단면제계수(총단면, 순단면, 환산단면, 합성 후 단면)은 아래 표와 같이 계산됨

표 10. 설계도면에 근거하여 계산된 단면제계수

단면 구분	부재 구분	단면적 (mm ²)	중립축 거리		단면2차모멘트 (mm ⁴)	단면제수 (mm ³)
			상단 (mm)	하단 (mm)		
총단면	주 거더	806,700	1,142.7	1,057.3	479,505,379,262	419,630,409
순단면	주 거더	789,595	1,122.6	1,077.4	464,353,922,729	413,658,701
환산단면	주 거더	827,319	1,165.8	1,034.2	496,809,219,547	426,136,394
합성 후 단면	내측주형	1,458,327	609.5	1,590.5	1,091,713,692,936	1,285,172,032
	외측주형	1,413,255	632.7	1,567.3	1,066,748,510,068	1,222,307,435

□ 유한요소모델 해석을 통한 고정하중 및 활하중에 의한 휨모멘트 계산

- 대상 교량의 모델링은 상용 구조해석 프로그램 MIDAS CIVIL을 이용하여 수행되었음
- 공용중의 교량특성을 파악하기 위해 합성 전, 후 단면을 아래 그림과 같이 모델링하였으며, 바닥판에 의한 활하중 횡분배를 실제와 유사하게 모사하기 위해 슬라브는 플레이트 요소, PSC Beam은 빔요소를 사용

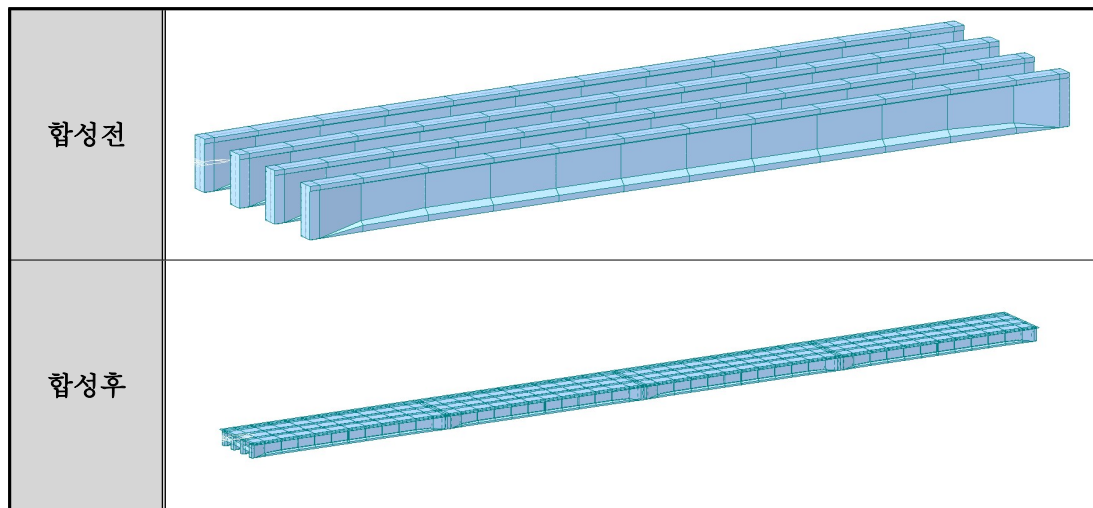


그림 97. MIDAS CIVIL을 이용한 대상 교량 모델링도

- 대상 PSC 교량 유한요소 모델에 도로교설계기준을 적용하여 합성 전/후의 고정하중 및 활하중에 의한 모멘트를 계산

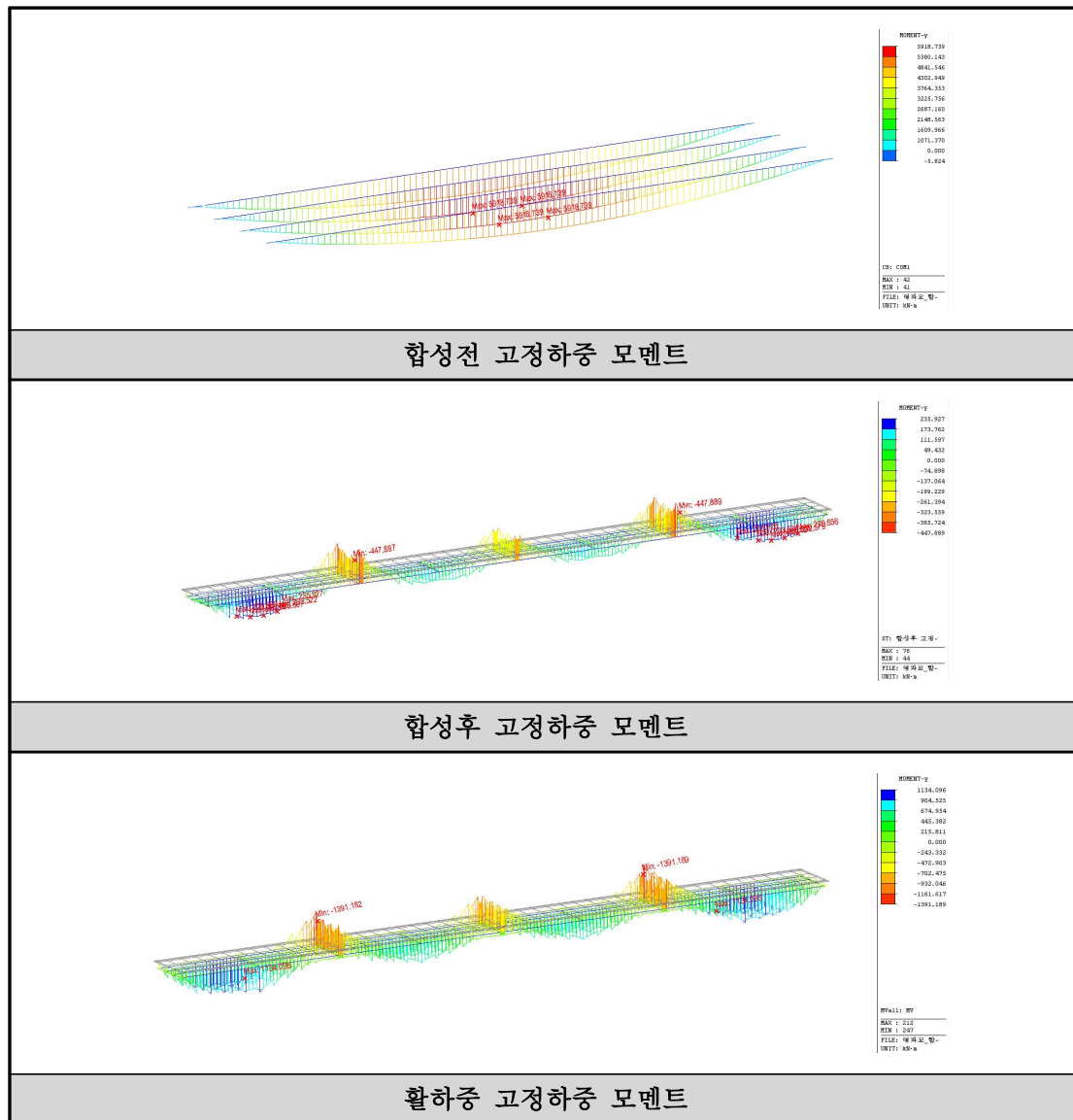


그림 98. MIDAS CIVIL을 이용한 대상 교량 유한요소 모델 해석 예시

- 실교량 1의 경우 콘크리트 단위하중을 제외한 모든 조건을 동일하게 적용하였으며, 실교량 2의 경우 양단지지 조건을 제외한 모든 조건을 동일하게 적용하였음
- 실교량 1, 2의 각 조건별로 계산된 합성 전/후 고정하중 및 활하중 모멘트는 아래 표와 같이 계산되었음

표 11. MIDAS CIVIL을 이용한 각 조건별 휨모멘트 계산 결과

구 분			내하율 산정 지점 휨모멘트 (kN·m)		
			설계도면	실교량 1	실교량 2
합성전	고정하중	BEAM 자중	2902.2	2722.6	2154.9
	고정하중	슬래브, 가로보	3016.6	2831.9	2266.6
합성 후	고정하중	포장, 난간	235.9	235.9	203.1
	활하중	DB-24	1012.0	1012.0	958.4

□ 고정하중 및 활하중 모멘트에 의한 부재의 응력 계산

- 고정하중 및 활하중 모멘트에 의한 단면의 응력 계산은 슬라브 등 합성 후 하중이 크게 발생하는 내측 거더에서 상연, 하연, PS 강재, 슬래브에 대하여 수행되었음
- 거더 상연과 하연의 응력 계산은 순단면을 사용하였으며, PS 강재 응력과 슬래브 응력은 합성단면을 이용하여 계산되었음
- 각 시나리오에 대하여 계산된 응력은 아래 표와 같음

표 12. 고정하중 및 활하중 모멘트에 의한 부재별 응력 계산 결과(설계도면 조건 이용)

설계도면			응력(MPa)			
			BEAM		SLAB	PS강선
			상 부	하 부		
합성전	고정하중	BEAM 자중	7.01	6.73	-	46.07
	고정하중	슬래브, 가로보	7.06	6.22	-	42.26
합성후	고정하중	포장, 난간	0.15	0.35	0.20	2.49
	활하중	DB-24	0.63	1.48	0.86	10.57
합 계			14.85	14.78	1.06	101.39

표 13. 고정하중 및 활하중 모멘트에 의한 부재별 응력 계산 결과(실교량 계측 시나리오 1)

실교량 시나리오 1			응력(MPa)			
			BEAM		SLAB	PS강선
			상 부	하 부		
합성전	고정하중	BEAM 자중	6.58	6.32	-	43.27
	고정하중	슬래브, 가로보	6.63	5.84	-	39.70
합성후	고정하중	포장, 난간	0.15	0.35	0.20	2.49
	활하중	DB-24	0.63	1.48	0.86	10.57
합 계			13.99	13.99	1.06	96.03

표 14. 고정하중 및 활하중 모멘트에 의한 부재별 응력 계산 결과(실교량 계측 시나리오 2)

실교량 시나리오 2			응력(MPa)			
			BEAM		SLAB	PS강선
			상 부	하 부		
합성전	고정하중	BEAM 자중	5.21	5.00	-	34.26
	고정하중	슬래브, 가로보	5.30	4.67	-	31.78
합성후	고정하중	포장, 난간	0.13	0.30	0.17	2.10
	활하중	DB-24	0.60	1.40	0.82	10.02
합 계			11.24	11.37	0.99	78.16

□ 유효프리스트레스 계산 및 극한 강도 검토

- 프리스트레스가 가해진 후 발생할 수 있는 마찰 손실, 정착 손실, 탄성수축 손실, 건조 수축에 의한 손실, 크리프에 의한 손실, 릴렉세이션에 의한 손실을 모두 고려하여 긴장재에 가해지는 프리스트레스 응력 계산
- 프리스트레스가 가해지는 조건은 각 시나리오별로 동일하여 본 계산 결과를 일괄 적용
- 허용응력법에 의한 내하율 계산에서 극한 강도 검토는 직접적인 영향을 미치지 않음으로 서술 생략(첨부된 계산서 참조)

표 15. 프리스트레스의 손실 및 유효계수 요약

구 분		내측빔 (MPa)	
초기인장응력	허용치	1,260.00	1,440
마찰에 의한 손실		52.04	
정착장치 활동에 의한 손실		100.30	
탄성수축에 의한 손실		76.92	
합성후 응력	허용치	1,030.74	1,330
건조수축에 의한 손실		36.40	
크리프에 의한 손실		207.39	
릴렉세이션에 의한 손실		11.48	
모든 손실후 응력	허용치	775.47	1,280
유효계수		0.752	

표 16. 프리스트레스 응력 요약

구 분		프리스트레스응력 (MPa)	유효율(η)	유효프리스트레스응력 (MPa)
내측빔	상 연	-6.28	0.752	-4.72
	하 연	21.18		15.93

□ 계산된 응력을 이용한 내하율 산정

- 최종적으로 교량의 외측 거더와 내측 거더의 상연, 하연, PSC 강선, 슬라브에서 발생한 설계도면상 유효프리스트레스, 거더 자중에 의한 응력, 슬라브 자중에 의한 응력, 추가 사하중(도로 포장 등)에 의한 응력, 활하중에 의한 응력(충격 고려)을 이용하여 내하율을 산정하였음

$$\text{내하율: } RF = \frac{f_a - f_d}{f_L(1+i)} = \frac{f_a - f_p - f_b - f_s - f_{ad}}{f_L(1+i)}$$

여기서, f_p = 유효프리스트레스시 부재에 발생하는 응력

f_b = 거더 자중에 의한 응력 f_s = 슬라브 자중에 의한 응력

f_{ad} = 추가 사하중에 의한 응력 f_L = 활하중에 의한 응력

i = 도로교 표준시방서의 설계 충격계수

- 거더 하연에서 가장 보수적인 값을 얻을 수 있었으므로 거더 하연에서 각 시나리오별로 계산된 내하율을 비교
- 아래와 같이 설계도면상 내하율은 3.284, 실교량 계측 시나리오 1의 내하율은 3.706, 실교량 계측 시나리오 2의 내하율은 5.341로 나타났음
- 설계도면상 조건을 이용하여 내하율을 산정하였을 때, 실제 내하율보다 다소 낮은 값으로 평가되는 결과가 확인되었음
- 개발된 고정하중 응력계측을 이용하여 실제 고정하중의 응력을 계측할 시, 실교량 시나리오 1에서는 11.39%, 실교량 시나리오 2에서는 **38.52%의 내하율 평가 정확도 향상**이 기대됨

응력집계(MPa)

구 분	f _p	f _b	f _s	f _{ad}	f _L
설계도면	15.97	-6.73	-6.22	-0.35	-1.48
실교량 시나리오 1	15.84	-6.73	-5	-0.37	-3.73
실교량 시나리오 2	15.78	-5	-4.67	-0.3	-1.4
구 분	f _a	f _d	f _L (1+i)	RF (내하율)	
설계도면	-3.162	2.67	-1.776	3.284	
실교량 시나리오 1	-3.162	3.42	-1.776	3.706	
실교량 시나리오 2	-3.162	5.81	-1.68	5.341	

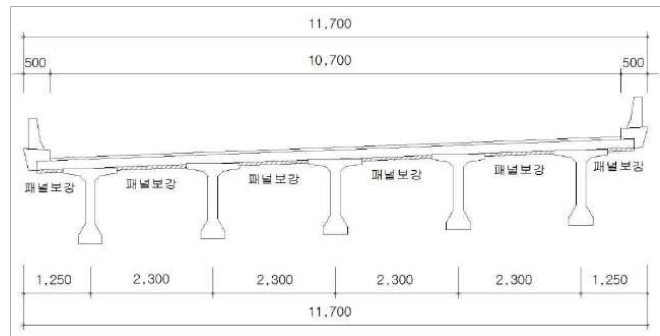
□ 차세대 내하력 평가기술 개발 - 폐교량 실험

<군성강교 폐교량 실험>

- 교량명 : 군성강교
- 교량위치 : 강원도 강릉시 강동면 모전리 국도 7호선(강동초등학교)
- 교량형식 : PSC-I, 교폭 11.7m, 교장 60.9m
- 보강여부 : 하부 슬래프 FRP 보강(6단면)



군성강교 전경



군성강교 거더 단면

그림 107. 군성강교 전경 및 횡단면 제원

- 군성강교에서 응력계측 실험을 수행하였으나, 30톤 트럭의 정적 하중재하의 어려움이 있어 계측되는 응력에 대한 검증이 불가능하였음. 추후 10톤, 20톤, 30톤 트럭을 차례로 재하하면서 유발되는 응력 변화량을 검토하는 방식으로 본 기술을 검토하는 후속 연구과제가 필요함



그림 108. 군성강교 응력계측 실험 모습

- 명지대 하이브리드 실험센터에서 수행된 폐교량 파괴실험과 연계하여 응력계측 실험을 수행함. 하지만 폐교량을 이용한 응력계측 실험은 응력 정해량을 알기 어려워 계산되는 응력의 정확도를 검증하기 어려웠음. 따라서 후속 과제를 통해 실험교량 규모의 실험연구를 수행하여야 함



그림 109. 군성강교 실내 파괴실험 실험 모습

<PSC 거더의 응력계측 실험>

- 폐교량 실험의 대안으로 PSC 거더에 대한 응력계측 실험을 수행함
- 제작된 PSC거더의 도면 및 실제 모습은 다음과 같음
- 높은 응력이 작용 중인 곳을 중심으로 계측을 수행해야 함. (예: 중앙부)

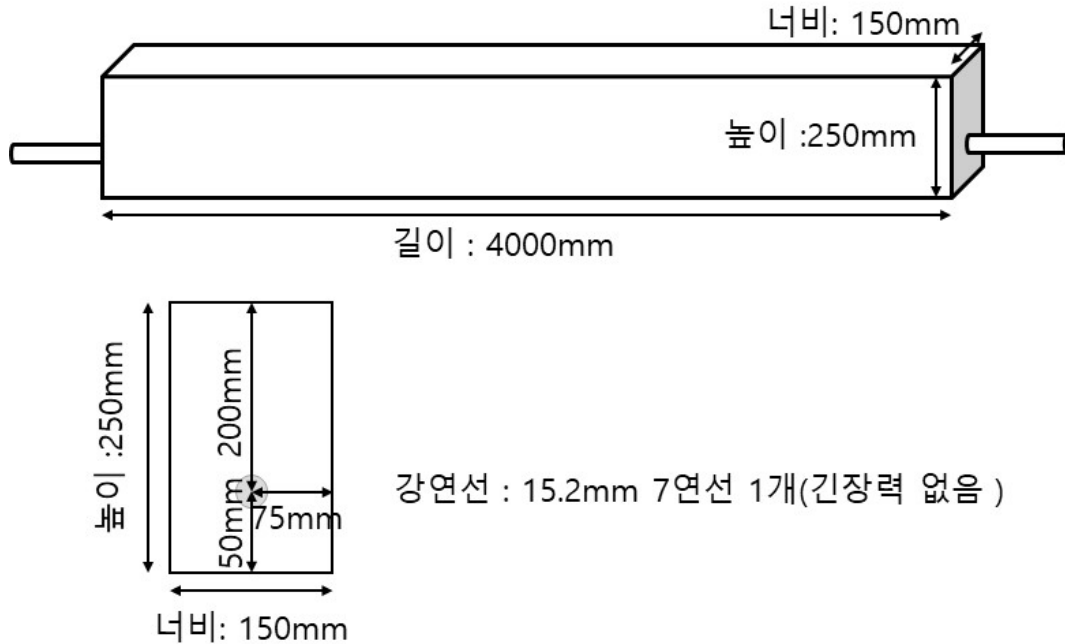


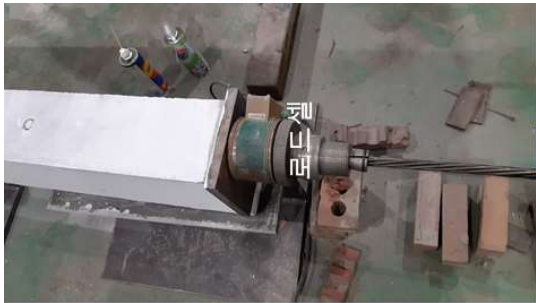
그림 99. 폐교량 대체용 PSC 거더 도면



그림 100. 폐교량 대체용 PSC 거더 거치 모습

- 실험 프로세스는 다음과 같음

1. 텐던에 15톤급 장력을 도입
2. 흰색 페인트로 PSC 거더 표면 도색
3. 스프레이를 통한 랜덤스페클 패턴을 만들
4. 카메라로 거더 표면 촬영
5. 홀 드릴링
6. 카메라로 거더 표면 촬영



장력 도입 (15톤)



흰색 페인트칠



사진 촬영



검정 페인트칠 (랜덤 스페클 패턴 그림)



홀 드릴링



사진 촬영

그림 101. PSC 거더 실험 모습

- PSC거더를 통한 응력계측 실험 결과

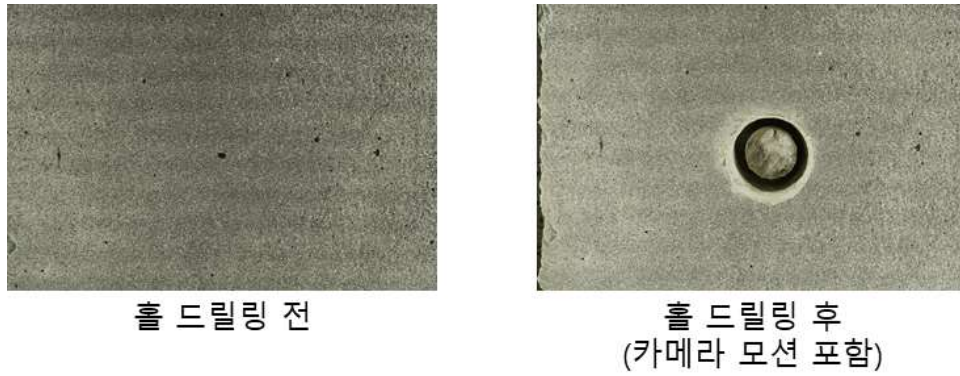


그림 102. DIC로 변위장 계측에 사용될 이미지 예시

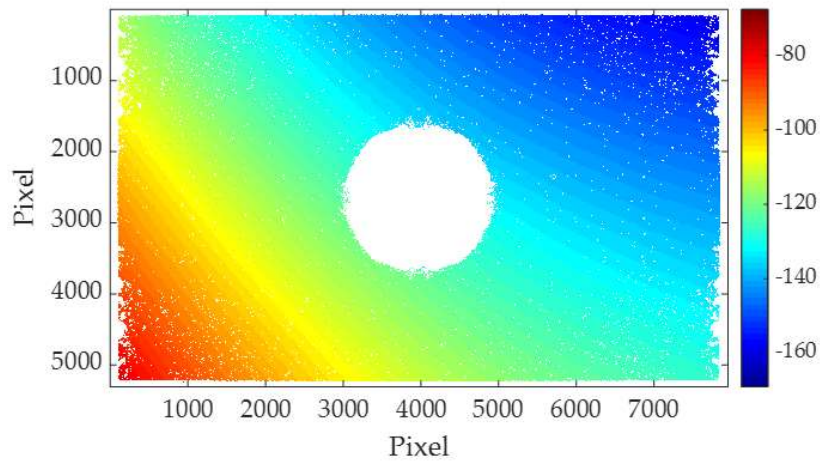


그림 103. 카메라 모션 제거 전 x축 변위장

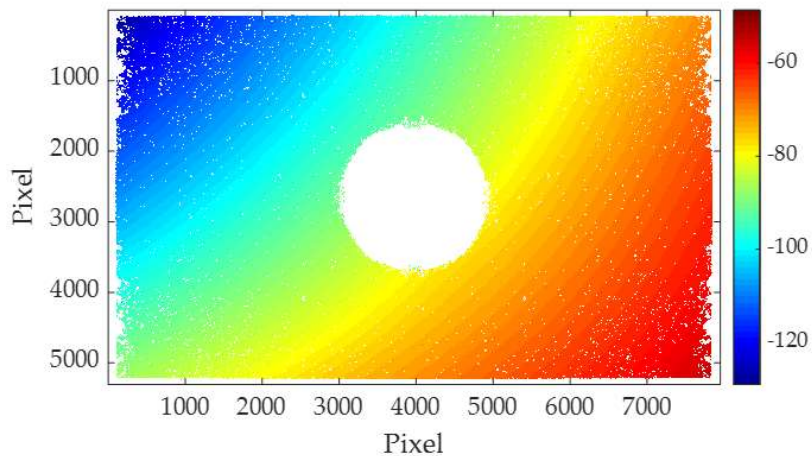


그림 104. 카메라 모션 제거 전 y축 변위장

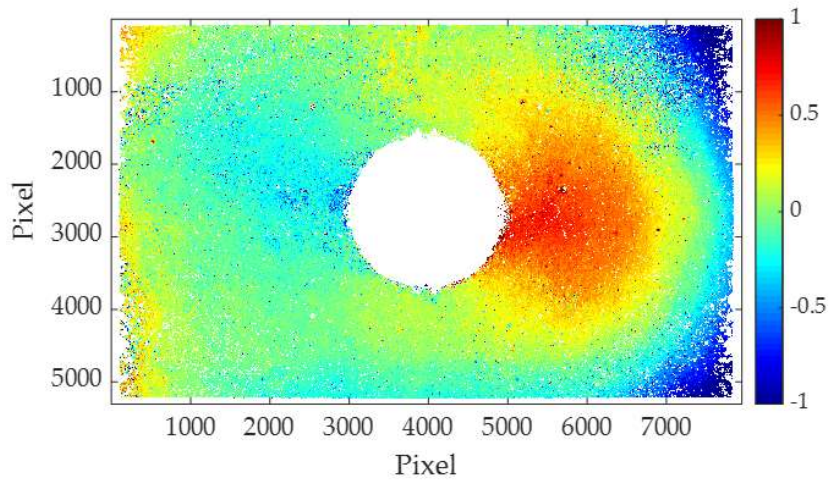


그림 105. 카메라 모션 제거 후 x축 변위장

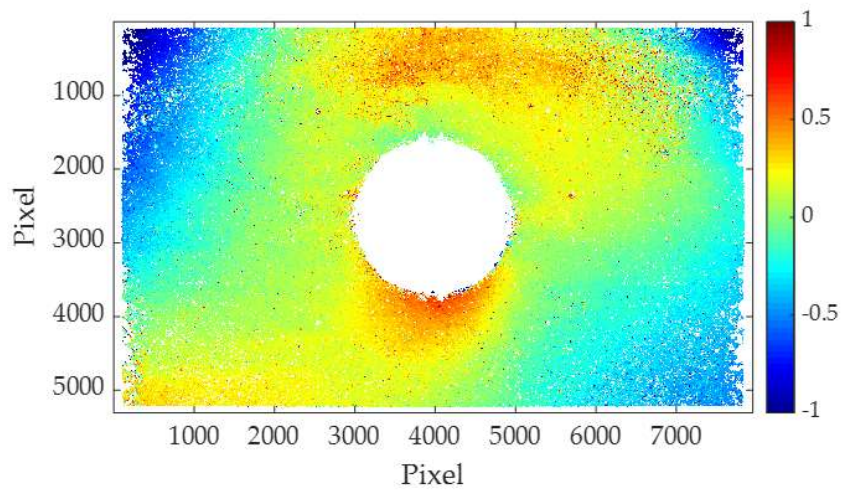


그림 106. 카메라 모션 제거 후 y축 변위장

- 실험량(폐교량) 실험의 경우, 측정하고자 하는 현재 응력값의 정해를 알 수 없으므로, 그 대안으로 실험실에서 PSC 거더 축소모형에 대해 응력계측 실험을 수행하였음
- 홀 드릴링 과정에서 콘크리트 표면에 균열이 발생하여 응력이완에 따른 변위장을 계측하는데 어려움이 있었음. 홀 드릴링 과정에서 균열이 발생하는 조건 파악 및 균열을 억제할 수 있는 홀 드릴링 기법에 대한 추후 연구가 필요한 것으로 사료됨

3. 연구 성과물

3-1. 국내 · 외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	Uniaxial Static Stress Estimation for Concrete Structures Using Digital Image Correlation	Sensors	Junhwa Lee, Eun Jin Kim, Seongwoo Gwon, Soojin Cho, Sung-Han Sim	19(2)	스위스	MDPI	SCI	2019.01.15.
2	Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures	Structural control and health monitoring	Younghui An, Eleni Chatzi, Sung-Han Sim, Simon Laflamme, Bartłomiej Blachowski, Jingping Ou	26(10)	유럽	Wiley	SCI	2019.07.19.
3	Automated peak picking using region-based convolutional neural network for operational modal analysis	Structural control and health monitoring	Hyunjun Kim, Sung-Han Sim	26(11)	유럽	Wiley	SCI	2019.08.18.
4	Prediction Model for Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete Using Artificial Neural Network	Materials	Jin Young Yoon, Hyunjun Kim, Young-Joo Lee, Sung-Han Sim	12(17)	스위스	MDPI	SCI	2019.08.22.
5	Stress Estimation Using Digital Image Correlation with Compensation of Camera Motion-Induced Error	Sensors	Junhwa Lee, Seunghoo Jeong, Young-Joo Lee, Sung-Han Sim	19(24)	스위스	MDPI	SCI	2019.12.12

* 연구 개발 성과 관리 · 유통 전담 기관에 등록된 번호 기재

3-2. 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	ACEM18	심성한	2018.08.28.	인천	대한민국
2	iDICs2018	심성한	2018.10.15.	항주	중국
3	전산구조공학회	이준화	2019.04.03.	부산	대한민국
4	진단학회	이준화	2019.04.10.	강릉	대한민국
5	EMI2019	윤진영	2019.06.20.	LA	미국

3-3. 생명자원(생물자원)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물명	등록/기탁 번호*	등록/기탁 기관	발생 연도
1	-	-	-	-

* 연구 개발 성과 관리·유통 전담 기관에 등록/기탁한 번호 기재

3-4. 지식재산권(특허, 실용신안, 디자인, 상표, 신제품 등)

번호	지식재산권 등 명칭	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
1	특허	콘크리트 구조물의 2축 절대응력 계측 시스템	심성한, 이준화	2018. 11. 27	10-2018-0148415	1615010296	-	-	-	-	100
2	특허	2차원 변위장 계측 장치	심성한, 이준화	2018. 11. 27	10-2018-0148416	1615010296	-	-	-	-	100

* 연구 개발 성과 관리·유통 전담 기관에 등록한 번호 기재

3-5. 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호*	저작권자명	기여율
1	카메라와 레이저 포인터를 이용한 구조물 변위 계측 시스템	2018.10.24	서울시립대학교 산학협력단	2018.11.08	C-2018-031239	서울시립대학교 산학협력단	100
2	DIC(디지털 이미지 코릴레이션) 기반 절대응력 계측기	2019.11.11	울산과학기술원	2019.11.18	C-2019-033982	울산과학기술원	100

* 연구 개발 성과 관리·유통 전담 기관에 등록한 번호 기재

3-6. 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	졸업완료	2019	-	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-
2	졸업예정	2020	1	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-

3-7. 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원
1	-	-	-	-	-	-

3-8. 기술 거래(이전) 등

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	-	-	-	-	-	-

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

4-1. 목표 달성도

○ 성과 목표

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	4건	2건
일반학술지게재(1점)		
특허출원(1점)	2건	1건
특허등록(2점)		
디자인 등록(1점)		
소프트웨어(1점)	2건	2건
하드웨어(1점)		
기타(1점)		
소계(점수)	12점	7점

○ 성과기준점검표

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과	성과점검기준							양적 성과 건수
				질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중 치	
주관	1	콘크리트 교량용 변위장을 이용한 고정하중 응력계측 알고리즘 개발	1-1 고정하중 응력계측 알고리즘 개발	①	2축 응력계측	2축 계측	-	시편실험	최종보고서	10	특허: 출원 1 건 논문: 2 건
				②	응력 이완을 위한 홀 직경	20mm 이내	-	시편실험	최종보고서	10	
				③	응력 이완을 위한 홀 깊이	35mm 이내	-	시편실험	최종보고서	15	
				④	계측 오차율	10% 이내	-	시편실험	최종보고서	15	
	3	고정하중 응력을 활용한 향상된 콘크리트 교량 내하력 평가기술 개발	3-1 고정하중 응력을 이용한 교량의 내하력 평가 기술 개발	①	기존 내하력 평가 기술 대비 성능 향상을	20%	-	폐교량 실험	내하력 비교검증	10	논문: 1 건 SW: 1 건
공동	2	고정하중 응력 계측 시스템의 현장 적용성 향상기술 개발	2-1 고정하중 응력계측시 카메라 고정이 불필요한 기술 개발	①	변위장 계측 정밀도	10μm 이내	-	실내실험	최종보고서	20	특허: 출원 1 건 논문: 1 건 SW: 1 건
			2-2 DIC 기반 고정하중 응력계측 시스템 개발	①	소프트웨어 개발	100%	-	폐교량 실험	최종보고서	20	
	계										100

○ 양적 성과 달성도

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	4	125	초과달성
	비SCI	-	-	
	계	4	125	
국내 논문 게재	SCI	-	-	
	비SCI	-	-	
	계	-	-	
특허 출원	국내	2	100	
	국외	-	-	
	계	2	100	
특허 등록	국내	-	-	
	국외	-	-	
	계	-	-	
인력 양성	석사	1	성과목표 부재	2020년 2월 졸업예정 초과달성
	박사	1	성과목표 부재	
	계	2	성과목표 부재	
기술 이전	계약 건수	-	-	
	계약액	-	-	
	징수액	-	-	
국제 표준화	기고서 제출	-	-	
	기고서 채택	-	-	
	표준안 채택	-	-	
국내 표준화	기고서 제출	-	-	
	기고서 채택	-	-	
	표준안 채택	-	-	
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문		-	-
	연구시설·장비		-	-
	기술요약정보		-	-
	생명자원	생명정보	-	-
		생물자원	-	-
		신품종	-	-
	소프트웨어		2	100
기타	화학물		-	-
	시제품		-	-
	성과 홍보		-	-
	일자리 창출		-	-

○ 질적 성과 달성도

성과 목표	달성도(%)	자체 평가
2축 응력계측 알고리즘	100	2축 응력계측 알고리즘을 개발 완료했으며, 수치해석을 통해 검증함
응력 이완을 위한 홀 직경 (목표치: 20mm 이내)	100	수치해석을 통해 24MP급 카메라를 이용하여 250mm~270mm 거리에서 촬영할 경우 최적의 홀 직경은 20mm로 나오는 것을 확인함
응력 이완을 위한 홀 깊이 (목표치: 35mm 이내)	100	수치해석을 통해 홀 깊이 35mm 이후로는 관통홀에 수렴함을 확인함
2축 응력계측 오차율 (목표치: 10% 이내)	100	EVA계열의 시편을 통한 실내실험을 통해 7% 수준으로 2축 응력계측 실험을 수행함
기존 내하력 평가 기술 대비 성능 향상을 (목표치: 20%)	100	기존 기술에서 산정되는 내하력보다 38% 정밀하게 내하력을 계산함
변위장 계측 정밀도 (목표치: 10 μ m 이내)	100	카메라 진동을 피하는 하드웨어를 설계하고, 위치변경에 따른 오차를 줄이는 DIC 알고리즘을 개발하여 목표치 달성
소프트웨어 개발	100	소프트웨어 개발 완료

○ 목표 미달성 원인

성과 목표	미달성 원인
-	-

제5장. 연구개발성과의 활용계획

5-1. 연구 활용 계획

□ 기술 수요처

- 국내의 교량은 대부분 한국도로공사와 지방국토관리청, 지방자치단체에서 나누어 관리하고 있으며, 이들이 가장 큰 수요처가 될 것으로 예상됨
- 향후 시스템 개발 및 실용화가 완료될 경우, 오래된 교량이 많은 미국, 일본 등의 선진국과 최근 교량을 많이 건설하고 있는 중국 등의 신흥국가의 교량 관리주체 역시 큰 수요처가 될 것임
- 아파트와 같은 주거 구조물의 경우, 고정하중 측정을 통하여 오래된 건물의 하중상태 평가뿐만 아니라 증축 안전도 평가가 가능하므로, 주거 구조물 관리 주체의 수요도 급성장할 것으로 예상됨

□ 실용화 방안

- 본 기술은 향후 교량의 관리주체 및 건설회사 등의 협조를 얻어 현장에서 추가적인 실험을 수행한 뒤, 그 결과를 바탕으로 건설회사 또는 안전진단 전문업체에 기술이전을 수행함으로써 실제 안전 사회 구축에 활용 가능하도록 지속적으로 개발할 예정임
- 가장 큰 수요처인 교량관리주체의 지원과 협력을 통하여 추가기술 개발 및 기술이전을 수행함으로써, 미래의 수요를 선형 확보할 수 있음

□ 현장적용 방안

- 위의 기술수요처의 의견을 수렴하고 테스트베드를 제공받아 개발된 기술의 신뢰도를 높이기 위한 연구를 지속할 예정임
- 테스트베드 교량에서는 기존의 변형률계를 이용하여 장기적으로 응력 변화를 계측하고, 본 개발 기술을 이용하여 정기적으로 계측한 고정하중의 변화와 비교함으로써 본 기술의 장기적인 성능을 평가하고 우수성을 홍보할 예정임
- 특히 안전진단 등급 D이하의 노후 교량의 성능 평가를 위하여 최우선으로 본 기술을 활용할 수 있도록 할 예정임

5-2. 기대효과

□ 기술적 측면

- 콘크리트 교량의 고정하중 응력을 계측하는 기술은 전 세계적으로 기술개발 초기 단계에 머물러 있으며 실제 활용단계까지 개발된 바 없어, 빠른 연구개발을 통하여 원천기술 확보가 가능함
- 본 연구는 완전히 새로운 기술을 개발하는 연구로서 많은 학술논문 작성이 가능하여, 국내 건설관련 학문의 발전과 국제경쟁력을 제고함
- 본 연구에서 개발하는 기술은 콘크리트 구조물의 거동에 대한 이해뿐만 아니라 영상 장비, 이미지 프로세싱, 데이터 처리와 같은 ICT 관련 기술을 함께 활용하는 융합기술로서, 본 연구의 수행과 성과를 통하여 토목분야에서 건설과 IT기술의 융합연구를 독려하는 효과가 있음

□ 경제/산업적 측면

- 다수의 콘크리트 교량의 보수보강 시점을 효과적으로 파악하고 시기적절한 조치를 취함으로써, 안전한 사회를 구축하기 위한 비용을 절감할 수 있음
- 새로운 안전진단 기법의 개발을 통하여 구조물 안전진단 산업의 신뢰도가 상승함
- 국내의 영상 장비 및 토목/건축 구조물 유지관리 산업의 촉진을 유도함
- 해외에서도 콘크리트 교량의 유지관리는 가장 중요한 이슈로서, 향후 해외로의 기술 수출이 가능함

□ 교육적 측면

- 본 연구에 참여하는 연구원들은 구조기술, 콘크리트 재료기술과 영상처리 기술 등의 ICT 기술을 함께 이해하고 활용가능한 연구인력으로 양성될 예정임
- 최근 다양한 분야에서 사용 중인 영상 장치가 토목구조물에 활용되는 사례로 학생들에게 교육함으로써, 학생들에게 건설 분야에 대한 흥미 유발과 건설관련 인력으로서의 자부심 고취를 유도함
- 본 연구를 통하여 얻은 영상자료는 구조물의 거동을 직관적으로 이해시킬 수 있는 시각 교육자료로 활용할 예정임

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

6-1. 2축 응력 계산식

- 홀 드릴링으로 인해 이완되는 변위장은 Airy stress function을 이용하여 계산할 수 있음²⁴⁾
- 홀 드릴링으로 인해 이완되는 변위장은 아래 식과 같음

$$u = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)A + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)B\cos\theta_p + \tau_{xy}B\sin2\theta_p$$

$$v = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)C\sin2\theta_p - \tau_{xy}C\cos2\theta_p$$

표기	의미
σ_x	X directional normal stress
σ_y	Y directional normal stress
τ_{xy}	Shear stress
A, B, C	Stress-independent constants at (x,y)

- A, B, C 는 다음과 같이 결정됨

$$A = \frac{a^2}{2Er}$$

$$B = \frac{a^2r^2(1+\nu) - a^2}{2Er^3}$$

$$C = \frac{a^2r^2(1-\nu) - a^2}{2Er^3}$$

표기	의미
a	홀 반지름
r	계산되는 지점의 radius 좌표 (홀 중심에서의 거리)
E	Young's modulus
ν	Poisson ratio

24) Baldi, A. (2014). Residual stress measurement using hole drilling and integrated digital image correlation techniques. Experimental Mechanics, 54(3), 379-391.

- 응력장과 변위장 사이의 관계는 Cartesian 좌표계에서 표현될 수 있음

$$u(x,y) = P_u \sigma_x + Q_u \sigma_y + R_u \tau_{xy}$$

$$v(x,y) = P_v \sigma_x + Q_v \sigma_y + R_v \tau_{xy}$$

표기	의미
P_u	σ_x 와 u 사이의 상수
Q_u	σ_y 와 u 사이의 상수
R_u	τ_{xy} 와 u 사이의 상수
P_v	σ_x 와 v 사이의 상수
Q_v	σ_y 와 v 사이의 상수
R_v	τ_{xy} 와 v 사이의 상수

- 위의 상수(P_u , Q_u , R_u , P_v , Q_v , R_v)는 아래와 같음

$$P_u = [A + (B + C)\cos(2\theta) - C]\cos(\theta)$$

$$Q_u = [A - B\cos(2\theta)]\cos(\theta) + C\sin(2\theta)\sin(\theta)$$

$$R_u = 2[(B + C)\cos(2\theta) + B]\sin(\theta)$$

$$P_v = [A + (B + C)\cos(2\theta) + C]\sin(\theta)$$

$$Q_v = [A - (B + C)\cos(2\theta) - C]\sin(\theta)$$

$$R_v = -2[(B + C)\cos(2\theta) - B]\cos(\theta)$$

표기	의미
θ	angle in Polar coordinate system

6-2. DIC 기술

- DIC 기술이란 이미지 상관관계를 이용하여 구조물 표면의 변형 전후의 움직임을 이용하여 변위 및 변형률을 측정할 수 있는 기술임
- DIC 기술은 1975년 측량을 목적으로 처음 제안되었다가 이후 1980년대에 물체의 표면에 페인트로 speckle 패턴을 생성하여 변위 및 변형률을 산정하는 기술로 발전함²⁵⁾

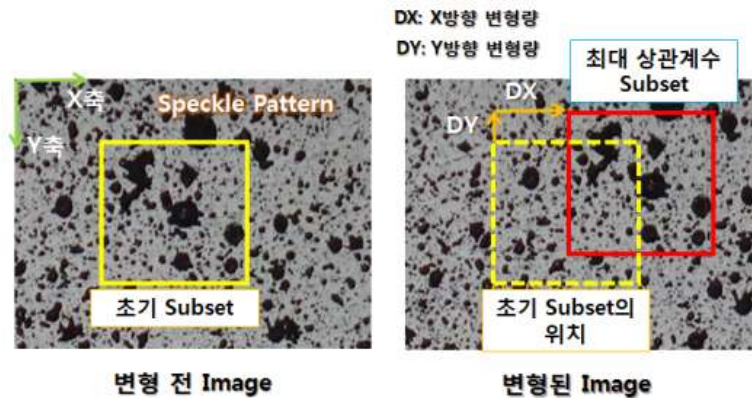


그림 4. DIC와 표면 Speckle을 이용한 물체의 변형 측정

- 현재는 나노 스케일의 미소한 변형 계측²⁶⁾부터 대형 구조물의 변형 계측²⁷⁾까지 다양한 분야에서 DIC가 활용되고 있으며, 고가의 카메라를 활용할 경우 최적 조건 하에서 $10\mu\epsilon$ 수준의 변형률까지 계측이 가능함²⁸⁾

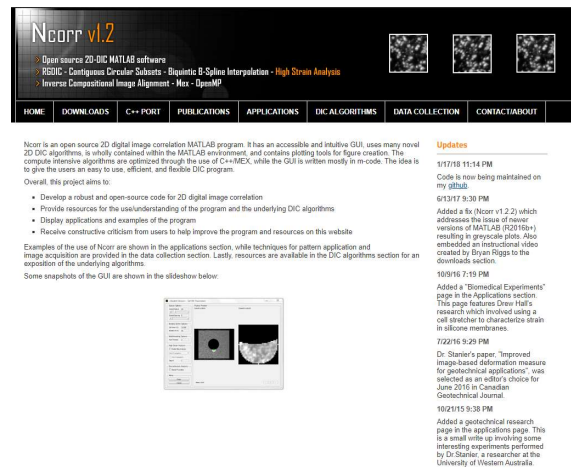


그림 4. Ncorr 홈페이지(ncorr.com)

- 매트랩 기반 오픈소스인 Ncorr를 통해 무료로 DIC 계측이 가능함

25) Keating, T.J., Wolf, P.R., and Scarpacci, F.L. (1975) "An improved method of digital image correlation," Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 41(8): 993-1002

26) Pritchard, R.H., Lava, P., Debruyne, D., and Terentjev, E. M. (2013). "Precise determination of the Poisson ratio in soft materials with 2D digital image correlation," Soft Matter, 9(26): 6037-6045

27) Kim, S.W., and Kim, N.S. (2011) "Multi-point displacement response measurement of civil infrastructures using digital image processing," Procedia Engineering, 14: 195-203

28) Correlated Solutions (2018) VIC-3D System Specifications, available at: <http://correlatedsolutions.com/vic-3d/>

제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반 과제.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

9-1. 주관연구기관(울산과학기술원) 연구실 안전조치 이행계획

순	항 목	적 용 범 위	관련기관	비고
가	연구실 일일안전점검 (매일)	과학기술분야 모든 연구실	연구실사용자	UNIST 연구실 안전환경관리자 UNIST 시설팀 (정): 한지우 운영사 (부): 이동찬
	연구실 정기안전점검 (년 1회)	과학기술분야 모든 연구실	안전진단 전문업체	
	연구실 정밀안전진단 (2년 1회 이상)	유해물질 및 유해인자 취급 연구실 정기점검 결과 추가점검 필요 연구실	안전진단 전문업체	
다	연구활동종사자 안전교육	과학기술분야 연구활동종사자 (학기별 6시간이상)	국가과학기술 인력개발원(KIRD)	
라	연구종사자 건강검진 (매년 실시)	유해물질 취급 연구활동종사자	특수건강 검진기관	
마	연구실 안전공제 (매년 가입)	과학기술분야 연구활동종사자	교육시설 재난공제회	

■ 연구실 정기 안전점검, 정밀안전진단

○ 대상 연구실

- 과학기술분야 모든 연구실
- 연구개발활동에 「유해화학물질 관리법」 제2조제7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실
- 연구개발활동에 「산업안전보건법」 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실
- 연구개발활동에 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실

■ 연구실 안전교육

○ 교육대상

- 과학기술분야 연구실에 종사하는 연구활동종사자 전원
- 연구실(실험실습실)을 출입하는 자(대학생, 대학원생, 교수, 연구원)

○ 안전교육 시간

- 학기별 6시간 과학기술분야 전문 교육기관(국가과학기술인력개발원)을 통한 온라인 교육 시행

■ 연구활동종사자 건강검진

○ 검진대상자 및 검진대상 물질

- 산업안전보건법에 따른 유해인자 (메탄올외 176종)취급 연구활동종사자

○ 건강검진 종류

- 학생 일반검진
- 유해인자별 건강검진 : 특수검진

■ 연구실 안전공제 보험가입

○ 가입대상: 연구활동종사자 중 대학생, 대학원생

- 전임교원: 사학연금(재해보상금)/비전임교원, 연구원: 산재보험

○ 보상범위

- 사망, 후유장애 : 1억원 한도
- 상해 : 1천만원 한도

9-2. 서울시립대학교 연구실 안전관리 항목

- 본 연구 수행 중 위험이 수반하는 부분은 UTM을 사용하는 실내실험과 폐교실험으로써, 이를 위해 연구 책임자는 실험에 참여하는 연구원들에게 보호장구(헬멧, 고글, 스틸토작업화, 안전조끼) 착용을 의무화 하고 실험을 수행할 예정임
- 본 교는 다음과 같은 “연구실 안전관리 규정”을 통해 연구실 안전관리를 시행하고 있음
 - 과학기술분야 모든 연구실 및 실험, 실습실은 정기적 안전점검, 정밀안전진단을 수행하여야 함
 - 연구실 및 실험, 실습실의 안전관리 주 담당자(책임교수)와 부담당자(학생 중 1명 지정)는 위험한 물품, 기구, 약품등의 활용에 대해 안전관리 부서(시설과)에 신고하여야 하며, 기타 연구실 일상점검, 안전관리 교육 및 지도, 안전사고 예방을 위한 조치 등을 취해야 함
 - 연구활동종사자는 법령이 정하는 바에 따라 안전교육을 이수하여야 하며, 이수한 자에게 연구실 안전 교육 이수증명서를 교부하고 미이수한 자에 대해 연구실 출입을 제한함
 - 각 연구실 안전관리담당자는 안전관리 규정을 게시 또는 비치하고, 연구활동종사자에게 알려야 함
 - 안전사고 발생시 위원장은 안전관리부서와 협의하여 관계자로 사고조사반을 구성하여 신속히 사고처리를 하고, 그 결과를 연구실 안전관리위원회(위원장: 행정처장)에 보고하여야 함
 - 전임교원은 사망 및 재해보상금을 수령하는 보험에 자동으로 가입되며, 기타 연구원 들은 사망, 후유장애 시 1억원, 상해 시 1천만원 한도를 보장하는 보험에 가입하여야 함

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기 타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향 력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Uniaxial Static Stress Estimation for Concrete Structures Using Digital Image Correlation	울산과학기술원	주저자, 교신저자	Sensors	3.031	2019.01.15.	단독 사사	SCle
2	논문	Automated peak picking using region-based convolutional neural network for operational modal analysis	울산과학기술원	주저자, 교신저자	Structural control and health monitoring	3.740	2019.08.18.	단독 사사	SCle
3	논문	Prediction Model for Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete Using Artificial Neural Network	울산과학기술원	주저자, 교신저자	Materials	2.972	2019.08.22.	단독 사사	SCle
4	논문	Stress Estimation Using Digital Image Correlation with Compensation of Camera Motion-Induced Error	울산과학기술원	주저자, 교신저자	Sensors	3.031	2019.12.12	단독 사사	SCle
5	논문	Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures	울산과학기술원	공동저자 (3저자)	Structural control and health monitoring	3.740	2019.07.17	공동 사사	SCle
6	특허	2차원 변위장 계측 장치	울산과학기술원	출원인	대한민국	-	2018.11.27	단독 사사	
7	특허	콘크리트 구조물의 2축 절대응력 계측 시스템	울산과학기술원	출원인	대한민국	-	2018.11.27	단독 사사	

주 의

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