

사
회
기
반
시
설
물
M
P
a
정
밀
도
)

상
태
평
가
를
원
천
기
술
절
대
응
력

위
한
모
니
터
링
최
종
보
고
서
(
2
0
2
0

2020

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

국
토
교
통
부

사회기반시설물 상태평가를 위한 초음파와 머신러닝 기반의 절대응력 모니터링 (20 MPa 정밀도) 원천기술 개발 최종보고서

2020.02.19.

주관연구기관 / 한국과학기술원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘사회기반시설물 상태평가를 위한 초음파와 머신러닝 기반의 절대응력 모니터링 (20 MPa 정밀도) 원천기술 개발’(연구개발 기간 : 2018.04. ~ 2019.12.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020. 02. 19.

주관연구기관명 : 한국과학기술원 (대표자) 신성철



주관연구기관책임자: 김기영

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C141 649-02	해당 단계 연구 기간	2019.01.01. ~ 2019.12.31	단계구분	2 / 2 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구분야			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	사회기반시설물 상태평가를 위한 초음파와 머신러닝 기반의 절대응력 모니터링 (20 MPa 정밀도) 원천기술 개발			
연구책임자	김 기 영	해당단계 참여연구원 수	총: 7 명 내부: 7 명 외부: 0 명	해당단계 연구비	정부: 165,000 천원 민간: - 천원 정부외: - 천원 상대국: - 천원 계: 165,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 8 명 내부: 8 명 외부: 명	총 연구비	정부: 265,000 천원 민간: - 천원 정부외: - 천원 상대국: - 천원 계: 265,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원 건설 및 환경공학과			참여기업명	-
국제공동연구	상대국명: -			상대국 연구기관명: -	
위탁연구	연구기관명: -			연구책임자: -	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	1	1				1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

본 연구에서는 단축하중이 가해지는 부재 (강봉, 알루미늄 평판)에 대하여 초음파와 머신러닝 기반 절대응력 모니터링 원천기술을 개발하고 성능검증 (20 MPa 정밀도)을 목표로 함

- 절대응력과 초음파 전파특성 상호관계파악 및 응력에는 민감하나 손상의 영향을 받지 않는 초음파 전파특성 추출
- 추출된 초음파 전파특성을 인공신경망의 입력으로 한 절대응력 모니터링 원천기술 개발
- 절대응력 모니터링을 위한 초음파 가진 및 센싱 시스템 구성 및 최적화

보고서 면수

39

〈 국문 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	연구 개발 목표 ▪ 단축하중이 가해지는 강 부재(평판)에 대하여 초음파와 머신러닝 기반 절대응력 모니터링 원천기술을 개발하고 개발 기술 성능 검증 (20 MPa 정밀도) 연구 개발 내용 ▪ 문헌조사 및 실험을 통한 절대응력과 초음파 전파특성(전파속도, 주파수변화, 비선형(조화/변조) 성분 발생 등) 간의 상호관계 규명 ▪ 초음파 전파특성들 중 응력에 민감하나 부재 손상의 영향을 받지 않는 전파특성을 추출 ▪ 초음파의 생성 및 계측을 위한 모니터링 시스템 구성 ▪ 센서가 부착된 부재 시편을 하중시험기에 설치하고, 하중을 가하여 그로 인해 발생한 응력을 계측하는 실험 수행 ▪ 추출된 초음파 전파특성을 인공지능망의 입력으로 한 절대응력 모니터링 원천기술 개발 ▪ 응력계측 정밀도에 영향을 미치는 인자 (계측 시스템 성능, 센서 형상 및 위치, 계측 파라미터, 신호처리 파라미터)를 조사하고, 이들 인자들을 최적화 하여 절대응력 정밀도 향상 ▪ 하중시험기를 이용하여 20 MPa 단위로 실험시편에 단축하중을 가해 목표 정밀도 달성 여부 검증				
연구개발성과	▪ 단축하중이 가해지는 강 평판 부재에 대한 초음파와 인공지능망 기반 절대응력 모니터링 원천기술(세계 최초/최고수준) ▪ 절대응력 상시 모니터링을 위한 초음파 생성 및 계측 시스템				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	활용계획 ▪ 구조물 절대응력 모니터링 기법에 대한 원천기술 확보 및 기술선점 ▪ 센서 네트워크를 구성하여 초음파 방향별 전파특성 계측을 통한 다중하중에 의한 복합응력 계측 기술 개발 ▪ 센서 그리드 구성을 통한 최대응력 발생위치 추정 및 응력 시각화 기술 개발 ▪ 대형 사회기반시설물 부재 절대응력 모니터링을 위한 추가 연구 개발 및 현장 적용 ▪ 원자력발전소의 배관, 선박, 철도레일 등의 다양한 구조물의 절대응력 모니터링에 활용 ▪ 초음파 기반 손상진단 시스템과 통합하여 구조물의 손상진단과 절대응력 모니터링을 동시 수행 기대효과 ▪ 구조물 절대응력 모니터링 원천기술을 확보하고 추가 연구개발을 통해 국내뿐만 아니라 해외 구조물 유지관리 시장 진출 ▪ 신속하고 정확한 구조물 상태평가로 사회기반시설물의 안전성과 국민의 안전에 대한 요구 충족				
핵심어 (5개 이내)	절대응력	구조물상태모니터링	압전소자	초음파	머신러닝

＜ SUMMARY ＞

Purpose & Contents	Purpose - Development of an ultrasonic and machine learning based absolute stress monitoring technique and examination of the performance (20 MPa resolution) Contents - Investigation of the relationship between ultrasonic propagation characteristics and absolute stress through literature reviews and experiments. - Extraction of absolute stress sensitive ultrasonic propagation characteristics - Development of absolute stress monitoring technique using the extracted stress sensitive ultrasonic propagation characteristics as input of an artificial neural network - Examination of the performance of developed technique for a plate-like structure under uniaxial loading applied by a Mechanical Testing System (MTS) - Investigation of the data acquisition system specifications and data acquisition parameters for absolute stress monitoring resolution and improvement of the resolution by optimization - Examination of the target resolution (20 MPa) with 20 MPa increment using the MTS				
Results	- Ultrasonic and machine learning based absolute stress monitoring technique for a plate-like structure under uniaxial loading (World first and best) - Ultrasonic generation and acquisition system for absolute stress monitoring				
Expected Contribution	- Patent application of research products - Multi-axial loading monitoring technique by investigating ultrasonic propagation characteristics in each direction using a sensor network - Identification of the maximum loading location and stress visualization using a sensor network - Application to various structures such as nuclear power plants, ships and railway structures. - Additional research for absolute stress monitoring for large infrastructures and field application - Unification of ultrasonic based structure damage monitoring system - New market development in structure maintenance technologies				
Keywords	Absolute stress	Structural health monitoring	Piezoelectric transducer	Ultrasonic	Machine learning

< CONTENTS >

1. Outline of R & D Project	7
2. Technology Development Review at Domestic and Abroad	11
3. Contents and Performance of Research	12
4. Achievement of Goal and Contribution of Related Fields	32
5. Utilization plan of R & D performance	37
6. Overseas science and technology information collected during research	38
7. Security level of R & D performance	
8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Information System	38
9. Performance of safety measures implemented by laboratories according to R & D projects	38
10. Representative research results of R & D projects	38
11. Others	38
12. Reference	38

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	11
3. 연구수행내용 및 성과	12
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	32
5. 연구개발성과의 활용 계획	37
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	38
7. 연구개발성과의 보안등급	38
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	38
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	38
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	38
11. 기타 사항	38
12. 참고 문헌	38

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

○ 최종목표

- 단축하중이 가해지는 강 부재(평판)에 대하여 선형/비선형 초음파와 머신러닝 기반 절대응력 모니터링 원천기술 (세계최초)을 개발하고 성능 검증 (20 MPa 정밀도, 세계최고)

○ 세부목표

- 절대응력과 초음파 선형/비선형 전파특성 상호관계파악 및 응력에는 민감하나 손상의 영향을 받지 않는 초음파 전파특성들 추출
- 추출된 초음파 선형/비선형 전파특성들을 인공신경망의 입력으로 한 절대응력 모니터링 원천기술 개발
- 절대응력 모니터링을 위한 선형/비선형 초음파 가진 및 센싱 시스템 구성 및 최적화

2. 연구개발의 필요성

○ 사회기반시설물 부재의 절대응력 모니터링의 필요성

- 교량과 같은 대형 사회기반시설물의 부재는 차량 등에 의해 가해지는 운용하중 이외에 구조물의 자중과 계절에 따른 온도변화에 의한 부재의 팽창 수축으로 인한 응력을 기본적으로 받고 있음.
- 특히 오래 사용되었거나 지진과 같은 재난에 노출된 구조물의 경우, 부재에 가해지는 응력의 분포가 설계치에서 변화할 수 있으며, 이 응력이 허용응력을 넘어 구조물의 안전성을 위협할 가능성이 있음.
- 부재의 절대응력의 변화는 부재의 변형, 균열 및 갑작스러운 파괴의 주 원인으로 구조물의 안전성과 사용수명에 큰 영향을 미치므로 절대응력을 지속적으로 모니터링 하는 기술의 개발이 필요함.
- 철도 레일의 경우, 계절에 따른 온도변화로 인해 팽창과 수축이 발생하며 이로 인해 국부적으로 높은 응력이 발생하고 국부좌굴로 이어지는 경우가 있어 철도차량의 안전운행을 위해 레일에 발생하는 절대응력의 계측 및 모니터링이 매우 중요함. 한국뿐만 아니라 세계적으로 이에 대한 많은 연구들이 수행되었으나 실제 철도 레일에 적용할 수 있는 기술이 개발되지는 않음.
- 지진, 선박 및 항공기의 충돌과 같은 큰 하중이 구조물에 가해질 경우, 구조물의 안전성을 신속히 진단하고 사용여부를 판단하는 것은 사회 및 경제적으로 매우 중요한 문제이며, 구조물에 센서를 부착하여 부재의 절대응력을 모니터링 하는 것은 이러한 문제를 해결하는데 필요한 기술임.
- 구조물에 가해지는 하중 및 응력을 모니터링하기 위해 설치하는 변형률계의 경우, 센서를 설치할 때의 응력 및 변형률을 기준으로 변형률의 변화를 계측하기 때문에 절대응력을 측정하지는 못함.
- 재료의 용접, 열처리 및 가공과정에서 재료 내부에 발생하여 외부 하중이 존재하지 않는 상태에서도 남아 있는 국부적인 잔류응력을 측정하기 위한 다양한 기법들이 개발되고 사용되고 있으나, 대부분 고가의 대형 장비를 사용하여 실험실 수준에서 측정이 가능하여 공용 중인 사회기반시설물 부재의 상시 모니터링에는 활용이 불가능함.

○ 절대응력 계측 기술개발 현황

- 절대응력을 계측하는 문제는 재료의 잔류응력을 계측하는 문제와 유사한 문제로, 재료의 잔류응력과 절대응력을 계측하기 위해 많은 연구가 진행되었고 대표적으로 다음과 같은 기법들이 알려져 있음.
- **Hole drilling 기법**
 - 대상 부재에 변형률계를 설치하고 구멍을 뚫어 구멍의 주변 응력 및 변형률의 변화를 측정하여 잔여응력을 측정하는 방법.
 - 구조물에 구멍을 뚫는 파괴적인 방법으로, 응력 계측을 위해 뚫은 구멍으로 인한 균열 및 구조물의 안정성에 영향을 줄 가능성이 있으며, 반복측정이 불가능해 상시 모니터링에는 부적합함.

■ X-선 회절 기법

- 재료에 응력이 가해지면 응력에 의해 재료 결정격자의 간격이 변화함. 재료 표면에 X-선을 가하면 재료의 결정격자로 인해 회절이 발생하는데, 회절각을 측정하여 결정격자의 간격을 측정하고 이를 이용하여 응력을 측정할 수 있음.
- 비파괴적인 방법으로 응력을 측정할 수 있어 기계 및 재료 분야에서 많이 활용되고 있으나, 실험실 수준의 부품 및 시편에 대해서만 측정이 가능하며 방사선의 문제가 있어 공용 중인 사회기반시설물 부재의 응력 모니터링에는 부적합함.

■ 분광 기법

- X-선 회절 기법과 유사하게 재료에 레이저를 가하고 재료에서 산란되는 빛의 파장 변화를 분석하여 응력을 측정하는 기법.
- 비파괴적인 방법으로 응력을 측정할 수 있으나 검사장비가 상대적으로 커 휴대가 어려우며, 지속적인 모니터링에는 부적합함.

■ 초음파 기법

- 재료 또는 부재에 초음파를 가하면 응력에 따라 초음파의 전파속도, 주파수변화 및 비선형 성분이 발생하고(Acoustoelastic effect) 이를 계측하여 응력을 측정하는 기법.
- 응력에 민감한 초음파 종류 (종파, 횡파, Lamb 파, Rayleigh 파 등)에 대한 분석 및 응력에 따른 초음파의 선형/비선형 전파 특성에 대한 연구가 많이 진행 중이나 아직 그 관계가 명확히 밝혀지지 않은.
- 초음파의 선형/비선형 전파특성은 응력에 따라 변화하나, 부재의 균열과 같은 손상에도 변화함.

■ 총평

- 절대응력 및 잔여응력 측정과 관련해서는 오래전부터 기계부품 및 재료수준의 연구가 진행되었으나 사회기반시설물과 같은 대형 구조물의 절대응력을 상시적으로 모니터링하기 위한 기술은 연구가 부족하며 원천기술의 개발이 필요함.

○ 사회기반시설물 부재의 절대응력 계측 기술 개발 전망

- 대형 사회기반시설물 부재의 절대응력 계측 기술은 다음과 같은 방향으로 개발되어야 함.
- 비파괴적인 기법
 - 구조물에 구멍을 뚫는 등의 파괴적인 방법은 구조물에 추가적인 손상을 야기할 위험이 있으므로, 비파괴적인 기법의 개발 및 적용이 필요함.
- 상시 모니터링
 - 사람 또는 무인검사장비가 대형 구조물의 각 부재에 접근하여 절대응력을 측정하는 방법은 상시 모니터링이 불가능하고, 재난이 발생하였을 때 구조물의 신속한 검사 및 진단이 불가능하므로, 구조물에 센서를 설치하고 상시적으로 응력을 모니터링 할 수 있어야 함.

3. 연구개발 범위

○ 1차년도 개발목표

- 주관연구기관(한국과학기술원)
 - 응력에 따른 초음파 선형/비선형 전파특성 조사 및 추출
 - 선형/비선형 초음파 계측 시스템 구성

○ 1차년도 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국과학기술원)
 - 문헌조사 및 실험을 통한 응력에 영향을 받는 초음파 선형/비선형 전파특성 조사 (그림 1). 간단한 문헌조사 결과 초음파의 전파속도 변화, 주파수 변화 및 비선형(조화/변조) 성분의 발생 등을 활용하여 응력을 계측한 사례가 있어 이들을 고려할 계획이며, 실험 및 문헌조사를 통해 추가적인 초음파 선형/비선형 전파특성을 찾을 계획임.

- 센서가 부착된 부재 시편을 하중시험기에 설치하여 하중을 가하여 응력을 발생시키고 이로 인한 초음파 전파특성들의 응력에 대한 민감도를 평가하고 부재의 손상에 영향을 받지 않는 초음파 전파특성을 추출함.
- 시편에 가해지는 응력은 1) 하중시험기의 로드셀, 2) 시편에 부착된 스트레인게이지, 3) Digital Image Correlation (DIC) 기법 등을 이용하여 측정할 수 있음.
- 초음파 기반 절대응력 계측을 위한 계측 파라미터 조사 및 계측 시스템 구성 (그림 2). National Instrument (NI) 사의 PXI 시스템 (그림 2 (a))을 활용할 계획이며, 선형/비선형 초음파를 계측하기 위한 NI PXI 시스템은 기본적으로 파형생성기(AWG), 디지털타이저 (DIG) 및 컨트롤러로 구성됨. AWG는 구조물에 초음파를 가진하며 DIG는 센서로부터 계측된 신호를 신호처리를 위한 디지털 데이터로 변환함. 전체 시스템은 컨트롤러가 제어하며 Lab View 소프트웨어를 이용해 사용자가 목적에 맞게 시스템을 구성하고 제어할 수 있음.
- 초음파의 가진과 센싱을 위해 압전센서가 사용됨. 압전센서는 전기적인 신호를 기계적인 신호로, 기계적인 신호를 전기적인 신호로 변환시키는 소재로써, 초음파의 가진과 센싱에 널리 활용되고 있음. 또한, 가격이 저렴하고 무게가 가벼우며 크기가 작아 구조물의 손상을 모니터링하는데 사용되고 있음.
- 추후 계측 정밀도 향상을 위한 응력계측 정밀도에 영향을 미치는 인자 (계측 시스템 성능, 센서 형상 및 배치, 계측 파라미터, 신호처리 파라미터)를 조사.

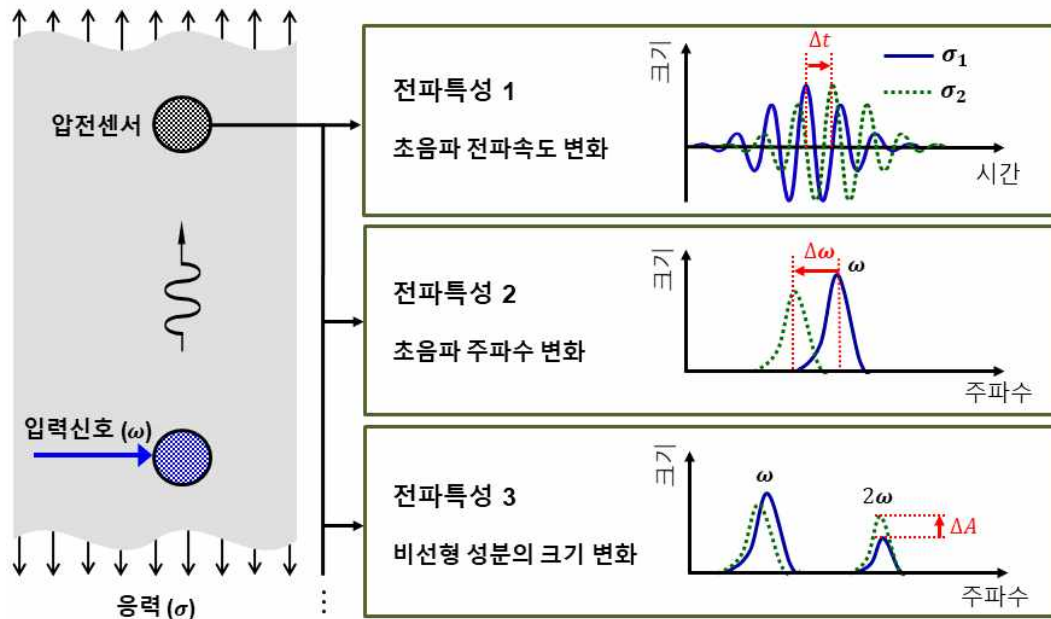
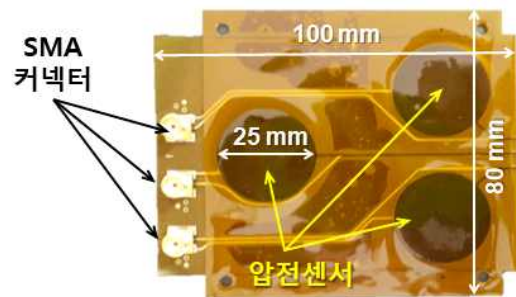


그림 1 응력에 민감한 초음파 선형/비선형 전파특성 조사 및 추출



(a) NI PXI 시스템



(b) 패키지화된 압전센서 예시

그림 2 초음파 기반 절대응력 계측을 위한 계측 시스템 구성

○ 2차년도 개발 목표

- 주관연구기관(한국과학기술원)
 - 인공지능망 기반 절대응력 모니터링 기술 개발
 - 선형/비선형 초음파 계측 시스템 최적화
 - 개발 기술의 성능 검증

○ 2차년도 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한국과학기술원)
 - 1차년도에서 추출된 다양한 초음파 선형/비선형 전파특성을 인공지능망의 입력으로 한 절대응력 추정 및 모니터링 기술 개발 (그림 3). 최근 컴퓨터 하드웨어의 비약적인 발전으로 대량의 연산을 고속으로 수행할 수 있으며, 기존 인공지능망이 가지고 있는 기술적 난제들이 해결되면서, 다양한 분야에서 인공지능망을 이용한 사물 인식, 분류 등에 대한 연구가 활발히 진행 중임.
 - 인공지능망은 이론적으로 비선형 회귀분석 방법 중 하나이므로 분류문제뿐만 아니라, 회귀문제에도 활용될 수 있음. 본 과제에서는 먼저, 인공지능망을 구성하고 다양한 응력에서 계측된 초음파 선형/비선형 전파특성들을 이용하여 인공지능망을 학습시킨 후, 학습된 인공지능망에 응력을 모르는 부재에서 계측된 초음파 선형/비선형 전파특성을 입력으로 넣어 절대응력을 추정 및 모니터링함.

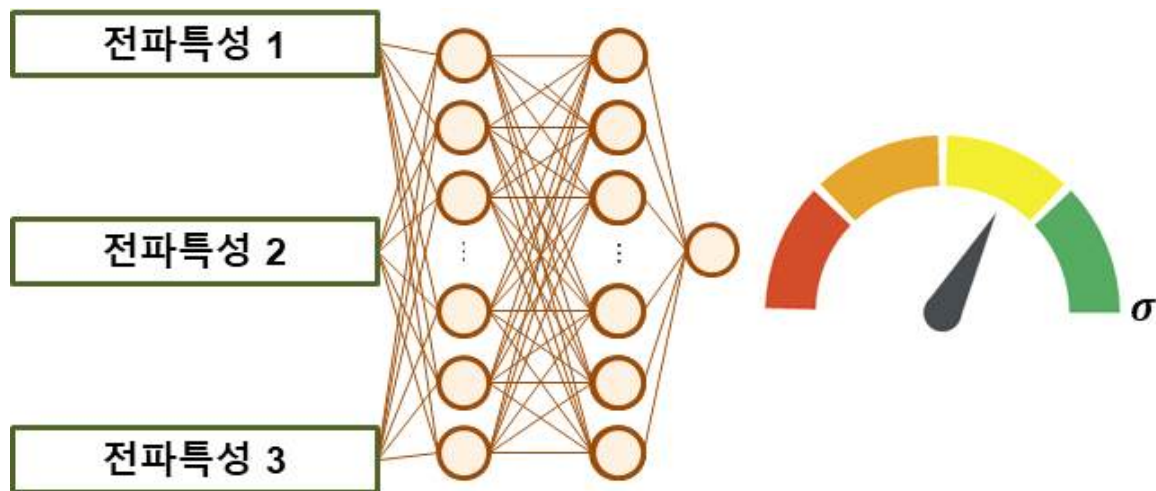


그림 3 다양한 초음파의 선형/비선형 특성을 입력으로 한 인공지능망 기반 절대응력 모니터링

- 추출된 초음파 선형/비선형 전파특성만을 계측할 수 있도록 1차년도에 개발된 시스템의 계측 파라미터 및 시스템을 최적화 할 계획임. 또한, 1차년도에 조사된 응력계측 정밀도에 영향을 미치는 인자들을 최적화하여 응력계측 정밀도를 향상시키고자 함.
- 1차년도 연구에서 진행된 절대응력 계측을 위한 압전센서의 최적 크기, 형상 및 배치에 따라 압전센서를 패키지화 할 계획임 (그림 2 (b)). 패키지화된 압전센서는 압전센서의 케이블, 커넥터 부분을 패키지화하여, 연결부의 접촉불량으로 인한 잡음을 줄이고, 외부 온도 및 습도에 대한 내구성을 높여 사회기반시설물 현장환경에 용이하게 적용할 수 있음.
- 단축하중이 가해지는 평판 강부재에 대하여 개발 기술을 검증할 계획임. 인공지능망의 학습에 사용된 재료와 동일한 재료의 시편을 제작하고, 임의의 하중을 가한 후, 초음파의 선형/비선형 전파특성을 계측한 후 이를 이용하여 응력을 추정함.
- 개발 기술의 성능검증을 위해 로드셀, 스트레인게이지 및 DIC 기법 등으로부터 측정된 응력값과 개발기술을 이용한 측정값의 비교를 수행함.
- 목표 정밀도 (20 MPa) 달성 검증을 위해, 센서가 부착된 부재 시편을 하중시험기에 설치하고 하중시험기로 20 MPa 단위로 하중을 가하여 응력증가를 계측할 수 있는지 검증을 수행할 계획임.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내 현황

- 충남대학교에서는 라만 분광법을 이용하여 공용 중인 구조물의 절대응력 계측 기법 및 검사자가 휴대 가능한 계측 장비를 개발하는 국가연구과제를 수행 중임 (한국연구재단, 2015~2018).
- 세종대학교에서도 라만 분광법을 이용하여 철도 레일 용접부의 응력을 계측하는 연구를 수행한 바 있으며, 현재 비접촉식으로 절대응력 모니터링이 가능한 콘크리트 부재 개발과 관련된 연구를 수행하고 있으나 해외에 비해 많은 연구가 진행되고 있지는 않음.
- 분광법의 경우, 계측 장비의 휴대가 불가능하여 휴대용으로 제작하려는 연구를 진행 중이나 측정하고자 하는 부재에 검사자가 접근하여 검사를 수행해야하기 때문에 응력의 상시 모니터링 및 지진과 같은 재난 후 신속하게 응력의 변화를 측정하는데 한계가 있음.
- 분광법 이외에 국내에서 공용 중인 구조물의 절대응력 모니터링과 관련된 연구가 진행되고 있지 않는 것으로 파악됨.

○ 국외 현황

- 미국 University of California San Diego (UCSD)에서는 공용 중인 철도 레일의 온도변화로 발생한 응력에 의한 국부좌굴을 방지하고자 절대응력 계측 및 모니터링에 대한 많은 연구를 수행하고 있음. 응력으로 인해 재료의 비선형성이 증가하고 이에 의한 초음파 비선형(조화) 성분의 증가를 이용하여 철도 레일의 절대응력을 모니터링 하는 기술을 개발함. 최근에는 철도 파괴적인 방법으로 철도 레일에 구멍을 뚫고 주변의 응력변화를 계측하여 (Hole drilling 기법) 응력을 측정하는 기술을 개발한 바 있음.
- 미국 University of California San Diego (UCSD)에서도 UCSD와 유사한 연구를 수행 중임. 특히 UIUC 연구진은 재료의 표면을 통해 전파되는 Rayleigh wave와 재료에 가해진 응력에 의해 초음파의 산란 형태 변화를 이용하는 Coda wave를 이용하여 콘크리트 부재의 응력 계측에 대한 연구 또한 진행하고 있음.
- 호주 The University of Adelaide 에서는 평판 구조물에 전파되는 Lamb wave의 속도변화 및 비선형 조화성분의 크기 변화를 이용한 응력계측 연구를 수행하고 있음.
- 중국 Harbin Institute of Technology에서는 강 부재의 응력으로 인한 초음파의 주파수 변화를 이용하여 실험실 수준 (시편크기: $60 \times 30 \times 20 \text{ mm}^3$)에서 절대응력 모니터링 기술을 개발하였으며, 최근에는 초음파 속도변화를 이용하여 2축 응력을 받는 부재에 대하여 응력 계측 기술을 개발하였음.
- 프랑스 Ecole des Mines de Douai에서는 응력에 의한 선형 초음파의 속도변화를 이용하여 프리캐스트 콘크리트 강연선의 응력을 모니터링 하는 기술을 개발하고 약 500 mm 길이의 시편에 대해 실험실 수준에서 검증한 바 있음.
- 이들 기술은 응력에 민감한 단일 초음파 전파특성을 이용한 기술들이며, 이들 전파특성은 구조물의 손상에도 영향을 받을 수 있음.
- 세계적으로 공용 중인 구조물의 절대응력 모니터링 기술 개발이 진행 중이나, 현재까지 응력과 초음파의 선형/비선형 특성 파악 및 실험실 수준의 검증단계에 있으며 실구조물의 모니터링에 적용된 바는 없음.

○ 기술개발 성숙도

- 절대응력 모니터링 기술과 관련하여 전 세계적으로 연구가 진행 중이나 응력과 초음파의 선형/비선형 특성 파악 및 실험실 수준의 검증단계 (TRL 4단계)에 있으나 실구조물의 모니터링에 적용된 바는 없으며, 국내에서는 관련 연구가 전무함.

제3장. 연구수행내용 및 성과

연구개발 목표

구분	내용
최종 목표	하중이 가해지는 강 부재 (평판)에 대하여 초음파기반 절대응력 모니터링 원천기술 (세계최초)을 개발하고 성능 검증 (20 MPa 정밀도, 세계최고)
세부 목표	- 인공신경망을 이용하여 사전에 초음파 계측을 통해 수립된 응력-초음파 지연시간 관계 (Calibration)을 이용하지 않고 현재 계측된 초음파 신호만으로 응력계측이 가능한 절대응력 모니터링 원천기술 개발 - 절대응력 모니터링을 위한 초음파 계측 시스템 개선 및 최적화

1. 연구개발 추진전략

- 초음파 계측 시스템의 경우, 기존에 한국과학기술원 건설및환경공학과에서 보유 중인 National Instruments 사의 PIX 장비를 우선적으로 활용할 계획임. Lab View 소프트웨어를 이용하여 계측 시스템을 절대응력 모니터링을 위한 다양한 초음파 선형/비선형 전파특성 계측이 가능하도록 구성할 수 있으며 계측 파라미터도 장비의 성능 범위 안에서 사용자가 임의로 설정하여 사용할 수 있음.
- 응력에 따른 초음파 선형/비선형 전파특성 조사 분석 및 실험실 수준 검증을 위해서는 하중시험기가 필요함. 본 과제를 수행하기 위해 한밭대학교 공동실험실습관(국제공인시험기관 인증)과 명지대학교 하이브리드 구조실험센터(국제공인시험기관 인증)에서 하중실험을 진행할 계획임.
- 센서가 부착된 부재 시편을 하중시험기에 설치하여 하중을 가하여 응력을 발생시키고 이로 인한 초음파 전파특성 변화를 조사 및 분석하여 하중계측 기술을 개발함.
- 개발 기술의 목표 정밀도 (20 MPa) 달성을 위해 과제수행 과정에서 응력계측 정밀도에 영향을 미치는 인자들 (계측 시스템 성능, 센서 형상 및 위치, 계측 파라미터, 신호처리 파라미터)를 조사하고 이들 인자들을 최적화하는 방향으로 정밀도를 향상시키고자 함.
- 목표 정밀도 검증과 관련해서는 하중시험기로 20 MPa 단위로 하중을 가하여 개발기술이 응력변화를 계측할 수 있는지 검증을 수행할 계획임. 시편에 가해지는 응력은 하중시험기의 로드셀을 이용하여 측정하며, 이 측정값과 개발 기술에 의해 계측된 값을 비교하는 방법으로 검증을 수행함.
- 1차년도 연구 성과들을 활용하여 인공신경망 기반의 절대응력 모니터링 알고리즘 개발을 우선적으로 수행함. 이후 인공신경망 기반 알고리즘에 대한 실용성 검토를 수행하여 향후 개발 기술의 실구조물에 대한 적용성을 높일 계획임.
- 개발 기술의 실구조물 적용성 향상을 위해 알루미늄뿐만 아니라 강재에 대한 응력계측 연구도 함께 수행할 계획임. 또한 재료에 도포된 도막, 표면손상 등의 강재 표면상태가 응력계측에 미치는 영향을 조사하고 이를 최소화 하는 연구를 수행할 계획임.

3. 연구개발 내용 및 결과

3-1. 응력에 민감한 초음파 전파특성 조사 분석

- 문헌조사 결과, 응력에 의해 초음파 전파속도가 미세하게 (10^{-8} s 단위)로 변하거나, 가진 주파수의 변화 (Frequency shift) 및 가진 주파수의 조화 및 변조 (비선형) 성분의 크기가 변화하는 현상이 발생함을 확인함.
- 초음파 가진 주파수 변화의 경우, 평판 구조물에 전파되는 Lamb wave에 대한 적용은 어려움.

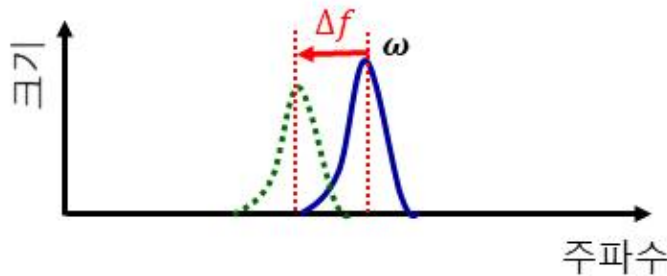


그림 4. 응력에 의한 주파수 변화

- 비선형 성분의 경우, 응력변화뿐만 아니라 재료에 발생한 미소 손상에 의해서도 변화하기 때문에 향후 실구조물 및 복잡구조물 적용에 대한 실용성이 떨어짐.

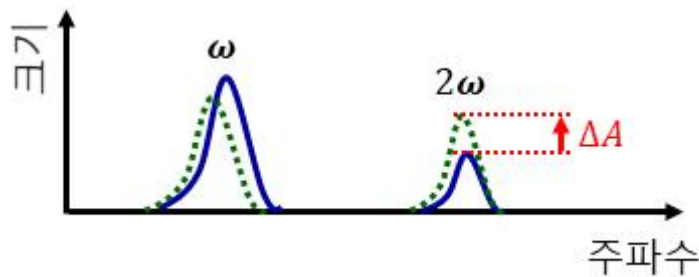


그림 5. 응력에 의한 비선형 조화 성분의 크기 변화

- 초음파의 전파속도 변화는 평판 구조물 적용이 가능하며, 100 kHz 이하의 저주파를 활용할 경우, 미소 손상에 대한 영향을 최소화 할 수 있어 본 연구에서는 이를 활용하여 응력 모니터링 기술 개발을 실시함.

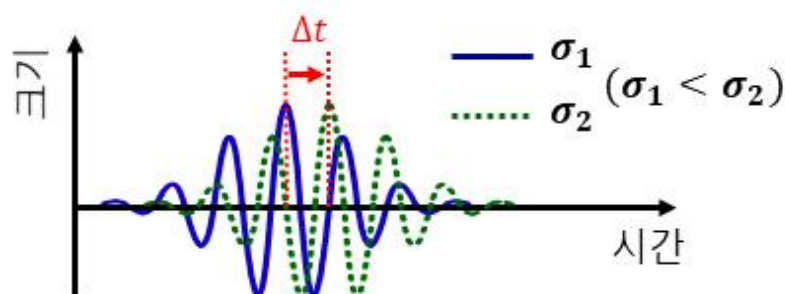


그림 6. 응력에 의한 초음파 전파 속도 변화

3-2. 평판 구조물에서의 응력에 따른 초음파 속도 관계 조사

- 사회기반시설물에는 평판 구조물이 많고, 구조물들은 단축하중을 많이 받으므로 평판에 단축하중이 작용할 때의 초음파 속도 변화에 대하여 조사함.
- 평판에는 초음파 중에서 Lamb wave 발생하며, Lamb wave는 긴 거리를 이동하면서 높은 정밀도로 응력 추정이 가능하다는 장점이 있음.

- Lamb wave는 symmetric (S)와 anti-symmetric (A) 모드, 두 종류의 초음파가 있으며 초음파의 속도는 주파수와 평판의 두께에 따라 달라짐.
- 평판 구조물에서의 응력에 따른 Lamb wave의 이론식은 다음과 같음.

$$D_{11}G_1\cot(\gamma\alpha_1)+D_{13}G_3\cot(\gamma\alpha_3)+D_{15}G_5\cot(\gamma\alpha_5)=0 \quad \text{S 모드 이론식}$$

$$D_{11}G_1\tan(\gamma\alpha_1)+D_{13}G_3\tan(\gamma\alpha_3)+D_{15}G_5\tan(\gamma\alpha_5)=0 \quad \text{A 모드 이론식}$$

- 응력과 평판에 전파되는 초음파의 이론식을 Matlab을 이용하여 수치해석하는 프로그램을 개발하고, 알루미늄 6061-T6 에 대한 초음파 가진 주파수에 따른 전파속도의 변화 (분산곡선)를 계산함.
- S 모드와 A 모드 중에서 속도가 가장 빠른 S0와 A0 모드의 응력에 따른 속도 변화를 각각 확인함.
- 그 결과 (그림 7), S0 모드의 전파속도가 A0 모드에 비해 응력에 더욱 민감한 것을 확인하였으며, 인장 응력이 증가할수록 초음파 속도가 느려짐 (강의 경우, 물성치가 잘 알려져 있지 않음).

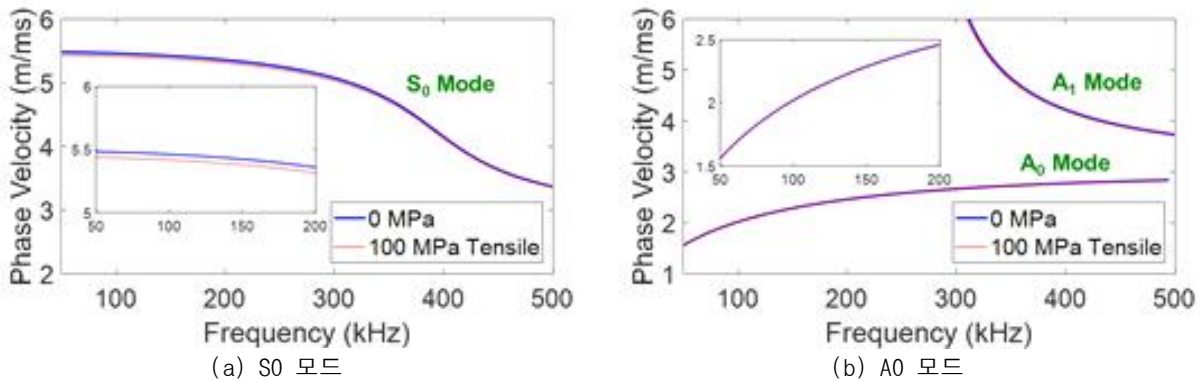
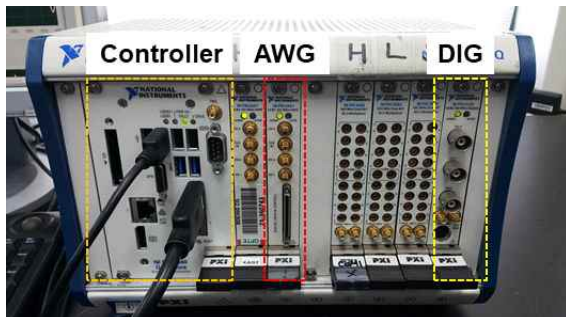


그림 7. 3 mm 두께 알루미늄 6061-T6 모드별 응력 (100 MPa 인장) 에 따른 분산곡선 변화 수치해석 결과

3-3. 평판 구조물의 응력 모니터링을 위한 초음파 가진 및 센싱 시스템 구성

- National Instrument (NI) PXI 시스템을 이용하여 초음파 생성 및 계측 하드웨어를 구성함. 하드웨어는 초음파를 구조물에 가진하기 위한 16-bit 파형생성기 (AWG, NI-PXI 5421), 초음파 신호 계측을 위한 14-bit 디지털타이저 (DIG, NI PXI-5122) 및 AWG와 DIG를 제어하기 위한 컨트롤러로 구성되어 있음.
- 컨트롤러에서는 Lab View 소프트웨어를 통해 사용자가 하드웨어 시스템을 임의로 제어할 수 있으며, 본 연구의 초음파 가진 및 계측을 위해 Lab View 기반의 계측 소프트웨어를 개발함.
- 개발된 소프트웨어를 이용하여 구조물에 가진되는 초음파의 주파수, 파형 등을 선택할 수 있으며, 측정되는 초음파의 sampling rate, number of experiments, 측정 시간 등을 선택할 수 있음.



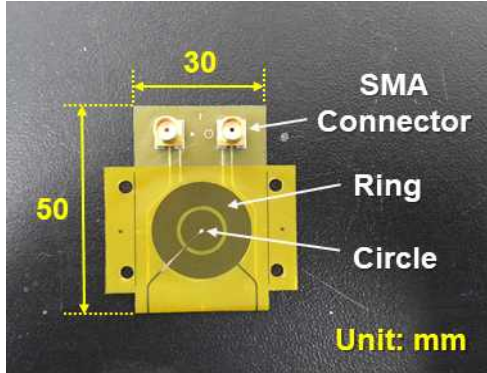
(a) 초음파 계측 하드웨어
(NI PXI 시스템)



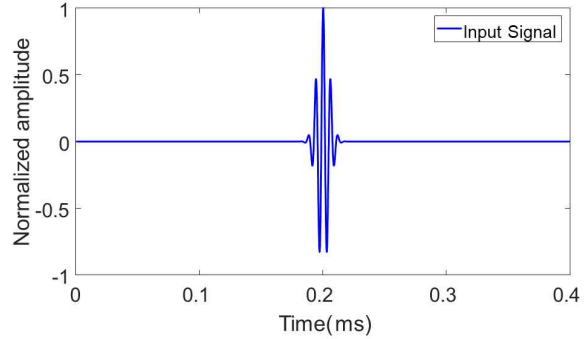
(b) 초음파 계측 소프트웨어
인터페이스 (Lab View)

그림 8. 응력 계측을 위한 초음파 가진 및 센싱 시스템 구성

- 이중 동심원형 압전센서는 초음파의 S0 모드와 A0 모드를 선별적으로 추출할 수 있으므로, 본 연구에서는 다양한 압전센서들 중에서 이중 동심원형 센서를 사용함. 또한, 외부 환경에 대한 내구성을 높이고 노이즈를 줄이기 위하여 압전센서를 패키징화하여 실험을 수행함.
- 초음파 가진 신호로는 5-cycle tone burst 신호를 사용함.



(a) 패키징화된 이중 동심원형 압전센서



(b) 5-cycle tone burst 신호

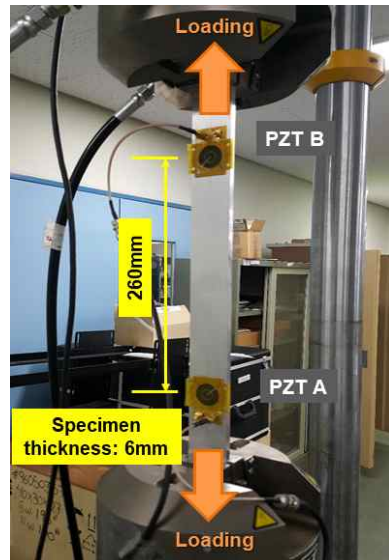
그림 9. 실험에 사용된 초음파 센서와 가진 신호

3-4 평판 구조물의 응력에 민감한 초음파 전파특성 선택

- 수치해석에 사용된 알루미늄 6061-T6를 사용하여 길이 500 mm, 두께 6 mm의 실험 시편을 제작하고, 시편에 두 개의 패키징된 이중 동심원형 압전센서를 부착함.
- 한밭대학교 공동실험실습관의 MTS 장비에 시편을 설치하고 2kN (8.33 MPa) 단위로 정적 인장 하중을 가해 초음파를 계측함. 이때 시편에 가해지는 하중은 MTS 장비의 로드셀을 통해 실시간으로 제어되고 계측됨.



(a) 실험 시편 제작 및 압전센서 설치



(b) 시편 설치 및 하중 도입

그림 10. 실험 시편 제작 및 하중 도입

- PZT A는 초음파 신호를 구조물에 가지는 역할을 하며, PZT B는 구조물에 전파된 초음파를 계측하는 역할을 함.
- 초음파의 가진 주파수는 전파속도 분석을 위해 파형 구분이 쉬운 주파수를 선택함.
- 본 연구에서는 80 kHz의 5-cycle tone burst 신호를 가진 초음파로 사용하였으며, 10 MHz의 sampling rate로 전파된 초음파를 계측함. 또한, 노이즈 제거를 위하여 초음파 생성 및 계측을 20번 반복하여 측정된 신호들을 평균하였음.
- 측정된 초음파에서 S0 모드와 A0 모드를 추출하여 응력 변화에 따른 초음파 속도 변화를 확인함.

- 응력에 의한 미세한 전파속도 변화를 측정해야 하므로 높은 시간 분해능이 필요함. 따라서 본 연구에서는 데이터 계측을 수행한 후, 측정된 초음파를 Interpolation 하여 보다 높은 시간분해능 (10^{-9} s)을 확보하고 초음파 속도 변화를 분석함.

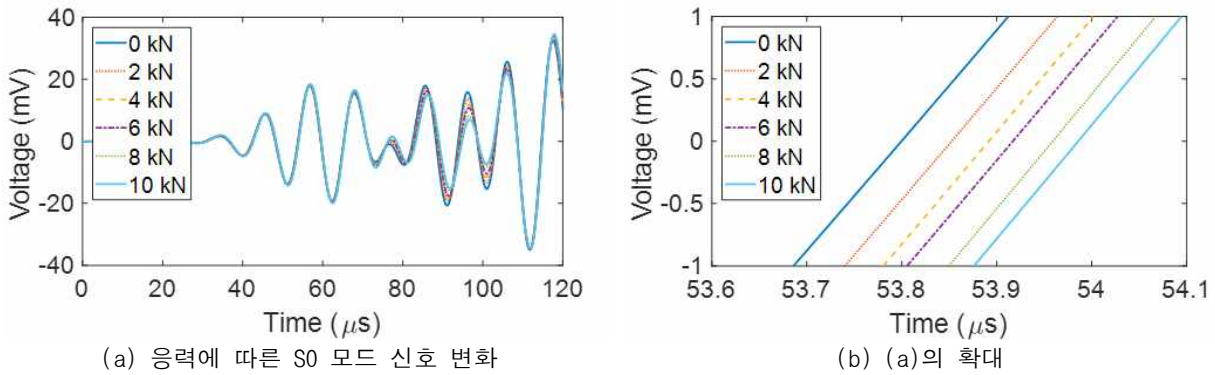


그림 11. 응력에 따른 S0 모드 초음파 신호

- 각 하중에서 측정된 초음파에서 S0 모드를 추출하였고, 추출된 S0 모드를 확대하여 속도 변화를 확인하였음.
- 그 결과, 하중이 증가함에 따라 속도가 감소하는 것을 확인함. 이는 개발된 수치해석 프로그램 결과와 동일한 결과를 나타냄.

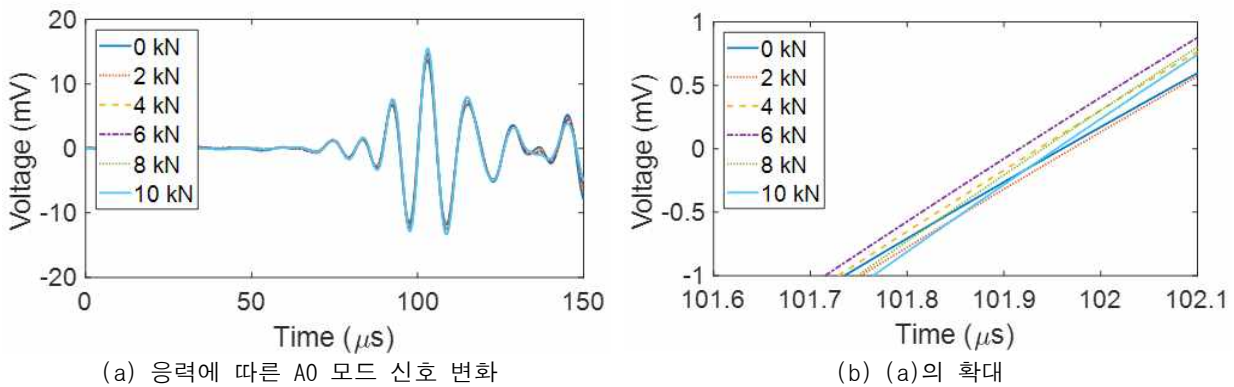


그림 12. 응력에 따른 A0 모드 초음파 신호

- S0 모드와 마찬가지로 측정된 초음파에서 A0 모드를 추출하였고 추출된 A0 모드를 확대한 결과, S0 모드와 달리 하중이 증가함에 따라 일관된 초음파 속도 변화가 나타나지 않으므로 A0 모드를 이용한 응력 모니터링 기술 개발은 어려움.
- 따라서, 본 연구에서는 S0 모드를 이용하여 응력 모니터링 기술 개발을 실시함.

3-5. 초음파 속도 변화를 이용한 평판 구조물 응력 모니터링 기술 개발

- MTS 장비에 시편을 설치하고 0~20 kN 까지 2 kN (8.33 MPa) 단위로 정적 인장 하중을 가해 초음파를 계측함. 이때 시편에 가해지는 하중은 MTS 장비의 로드셀을 통해 실시간으로 제어되고 계측됨.
- 가진 신호, 초음파 주파수, sampling rate 등의 실험 조건과 변수들은 이전 실험과 동일한 값들을 사용하였음.
- S0 초음파 신호의 속도 변화 추정을 위해 다양한 방법 (Cross correlation, Zero crossing 및 Peak tracking)이 검토되었으며, 그 중 cross correlation을 이용하는 방법이 가장 성능이 좋게 나타남.
- cross correlation은 기준 신호를 선택하여 다른 신호들과의 파형 상관관계를 분석하여 초음파의 시간 지연을 자동으로 계산함.
- 응력과 시간 지연 사이의 관계 (선형 함수)를 수립하였으며, 관계식의 R square 값을 계산한 결과

0.9928로 높은 유용성을 가짐.

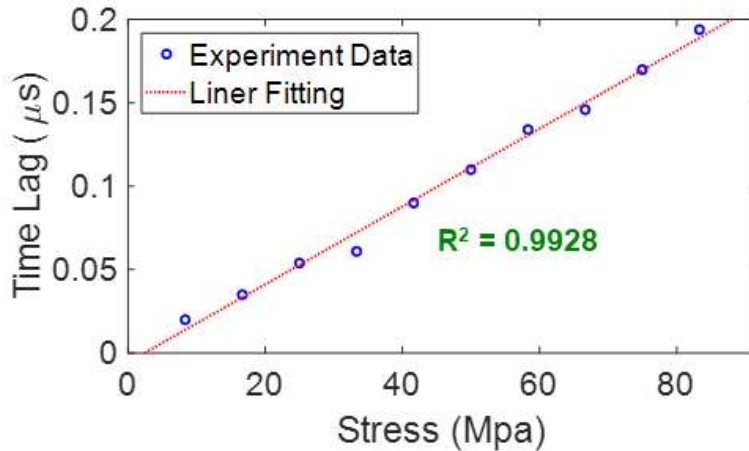


그림 13. 응력과 초음파의 지연정도 관계 수립

- 수립된 관계식을 이용하여 0~20kN 사이의 임의의 정적 인장 하중 (1~19 kN, 2 kN 단위, 선행 실험에서 응력과 초음파 시간 지연 관계 수립 시에 측정되지 않은 응력)을 가하고, MTS 장비의 로드셀에 기록된 하중으로부터 계산된 응력과 초음파 신호로부터 추정된 응력의 비교를 수행함. 그 결과 응력 추정 최대 오차가 3.5 MPa로 약 4 MPa 정밀도로 응력 모니터링이 가능함을 확인함.

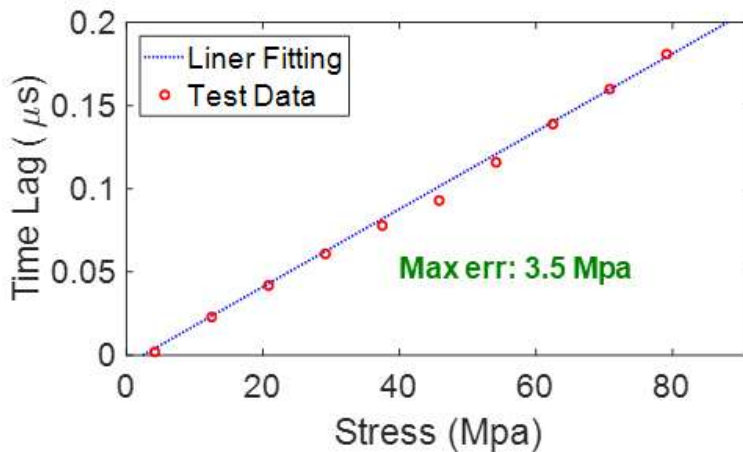


그림 14. 정적 하중 하에서 초음파 기반 응력 모니터링 결과

- 동일한 방법으로 동적하중(일정진폭 반복하중) 하에서 일정 시간 간격 (1s) 으로 초음파 신호를 여러 번 측정한 후 이를 평균하여, 시편에 가해진 평균응력을 모니터링하는 실험을 수행함. 실험 결과의 신뢰도 검증을 위해 동일한 실험을 10회씩 반복 수행함.
- 실험결과, 평균횟수가 증가할수록 평균응력 모니터링 오차가 감소함을 확인하였고, 이때 응력 추정 최대 오차는 약 4 MPa로 확인됨.

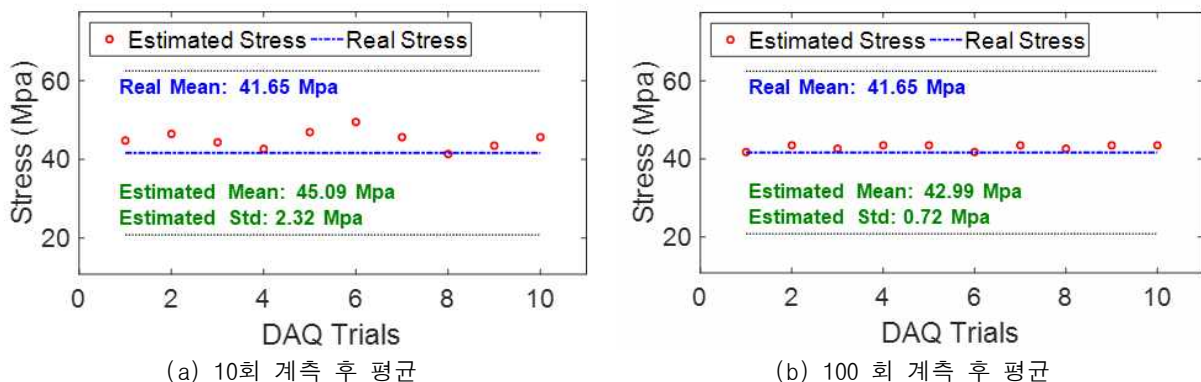


그림 15. 평균하중 10 kN (41.65 MPa), 진폭 5 kN (20.83 MPa), 0.1 Hz 일정 반복하중 실험결과

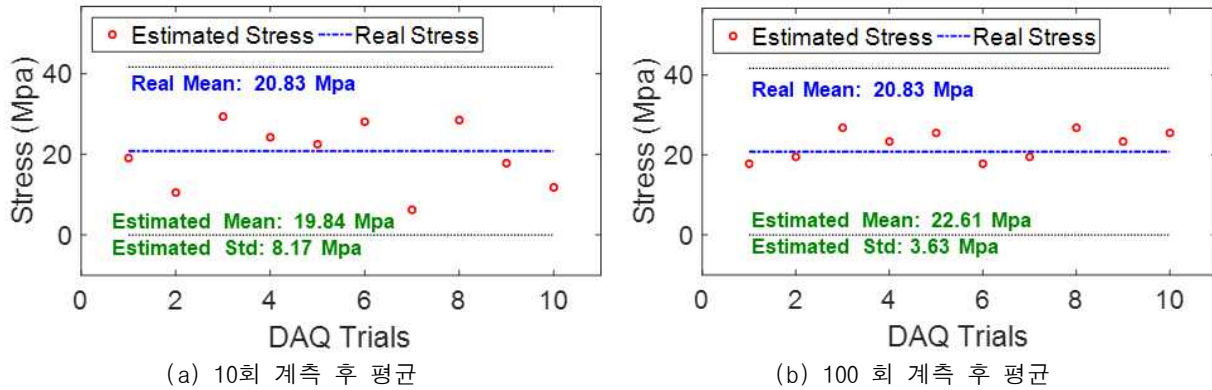


그림 16. 평균하중 5 kN (20.83 MPa), 진폭 5 kN (20.83 MPa), 3 Hz 일정 반복하중 실험결과

3-6. 인공신경망을 이용한 평판 구조물 응력 모니터링 기술 개발

- 인공신경망을 구축하기 위한 문헌 조사 결과, 일반적으로 사용되고 있는 Multi-layer Neural Network의 경우, 데이터의 형상을 고려하지 않고, raw data를 직접 처리하기 때문에 많은 양의 학습데이터가 필요하고 가중치, 편향, 레이어 구성 등 설정하는 파라미터의 개수가 많아지는 문제가 있음.
- 따라서, 초음파 신호와 같이 서로 밀접하게 연결된 데이터를 처리하는데 매우 우수하고 다른 인공신경망들과 비교하여 학습 파라미터가 적은 Convolutional Neural Networks (CNN)을 이용함. 실제로, CNN은 같은 레이어 크기의 Multi-layer Neural Network와 비교해 볼 때, 학습 파라미터 양은 20% 규모이며, 은닉층이 깊어질수록 학습 파라미터의 차이는 더 벌어짐.
- CNN은 인공신경망을 구성하는 수십, 수백 개의 계층이 각각 서로 다른 특징을 감지하도록 학습할 수 있음. 필터는 각 학습에서 서로 다르게 적용되며, 필터의 출력은 다음 계층의 입력으로 활용됨. 또한, 필터는 매우 단순한 특징에서 시작하여 객체만의 고유한 특징으로 더 복잡하게 발전이 가능함.
- 또한, CNN은 다른 인공신경망들과 비교하여 더 작은 학습 파라미터로 더 높은 인식률을 제공하며, 네트워크 처리 속도가 빠르다는 장점이 있음.
- 추출된 초음파 특성과 인공신경망을 이용하여 응력을 모니터링하기 위해서 Convolutional Neural Network (CNN) 알고리즘을 개발함.

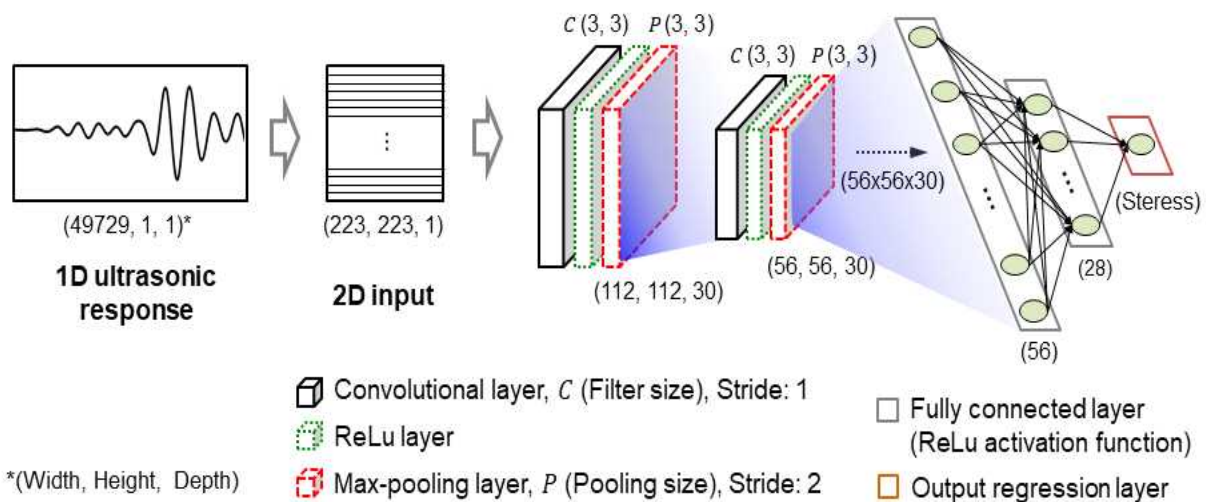


그림 17. 응력 추정을 위한 CNN 알고리즘

- CNN은 다른 인공신경망과 마찬가지로 입력 계층, 출력 계층 및 두 계층 사이의 여러 은닉 계층으로 구성됨. 각 계층은 해당 데이터만이 갖는 특징을 학습하기 위해 데이터를 변경하는 계산을 수행함. 본연구에서는 Convolutional, ReLu, Pooling, Fully connected layer를 이용하여 은닉 계층을 구성하였음.

- Convolutional layer는 filter를 사용하여 공유 파라미터 수를 최소화하면서 신호의 특징을 찾으며, ReLu layer는 인공신경망의 비선형성을 부여하는 역할을 함. Pooling layer는 추출된 신호의 특징을 강화하고 모으는 역할을 하며, Fully connected layer는 추출된 특징을 이용하여 응력 모니터링을 실시함.
- Convolutional layer에서는 3x3 크기의 30개 filter를 이용하여 2D input을 합성곱하고 합성곱의 합을 feature map으로 만들었음. 이 때, stride는 1을 사용함. 또한, 특징을 추출하는 과정에서 특징 유출을 방지하기 위하여 입력값 주위에 zero padding을 사용하였음.
- Convolutional layer를 거쳐서 추출된 특징들은 연산에 들어가는 컴퓨팅 리소스를 줄이고 오버피팅을 방지하기 위하여 Max-pooling layer를 이용하여 출력 데이터의 크기를 줄이고 특정 데이터를 강조하였으며, Convolutional layer와 마찬가지로 3x3 크기의 filter와 zero padding을 사용하여 알고리즘을 개발하였음.
- 응력 모니터링의 오버피팅과 언더피팅을 방지하고 결과의 신뢰성 확보를 위하여 각각의 layer를 두 개씩 배치하여 알고리즘을 개발하였음.
- 신호의 수용성 확보를 위하여 측정된 S0 초음파 신호(49729,1,1)은 2D (223,223,1)로 변환하여 CNN 알고리즘의 input으로 사용하였으며 인공신경망의 output으로는 초음파가 측정될 때의 구조물에 작용하는 응력이 도출됨.
- Mean square error를 최소화하기 위하여 gradient descent optimization 알고리즘을 이용하였으며, 학습에 사용된 learning rate는 1e-6이며 5,000번의 iterations이 끝난 후에 인공신경망의 학습을 종료함.

3-7. 인공신경망을 이용한 평판 구조물 응력 모니터링 실시

- MTS 장비에 알루미늄 평판 시편을 설치하고 0~20 kN 까지 2 kN (8.33 MPa) 단위로 정적 인장 하중을 가해 초음파를 측정함. 이때 시편에 가해지는 하중은 MTS 장비의 로드셀을 통해 실시간으로 제어되고 측정됨.
- 인공신경망 학습을 위하여 각 하중당 17개의 training data를 사용하였으며, 인공신경망이 잘 학습되었는지 확인하기 위하여 3개의 validation data를 사용함.

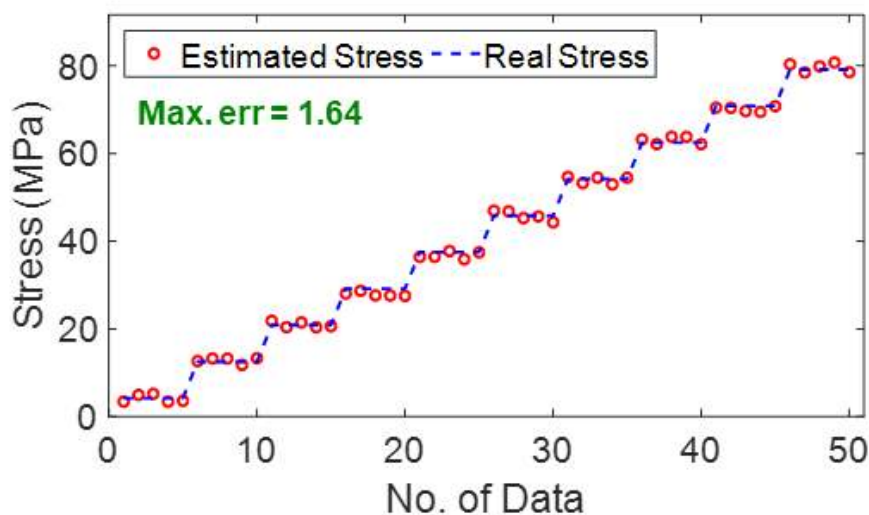


그림 18. 인공신경망을 이용한 정적 응력 추정 결과

- 이전과 동일하게 0~20kN 사이의 임의의 정적 인장 하중 (1~19 kN, 2 kN 단위, 선행 실험에서 응력과 초음파 지연시간 관계 수립 시에 측정되지 않은 응력)을 가하고, MTS 장비의 로드셀에 기록된 하중으로부터 계산된 응력과 초음파 신호와 인공신경망으로부터 추정된 응력의 비교를 수행하여 개발된 인공신경망의 성능 테스트를 실시함.

- 각 하중 당 5개의 test data를 만들어 응력 모니터링을 실시하였음. 로드셀에 기록된 응력과 인공신경망의 응력과 비교 결과, 응력 추정 최대 오차가 1.64 MPa로 약 2 MPa 정밀도로 응력 모니터링이 가능함을 확인함.
- 인공신경망을 이용한 방법이 응력과 초음파 신호 지연 사이의 관계를 이용한 방법보다 약 2 MPa 높은 정밀도를 가짐을 알 수 있음.
- 또한, 인공신경망을 이용하면 초음파 신호의 시간 지연을 계산하지 않고도 응력 모니터링이 가능한 장점이 있음.

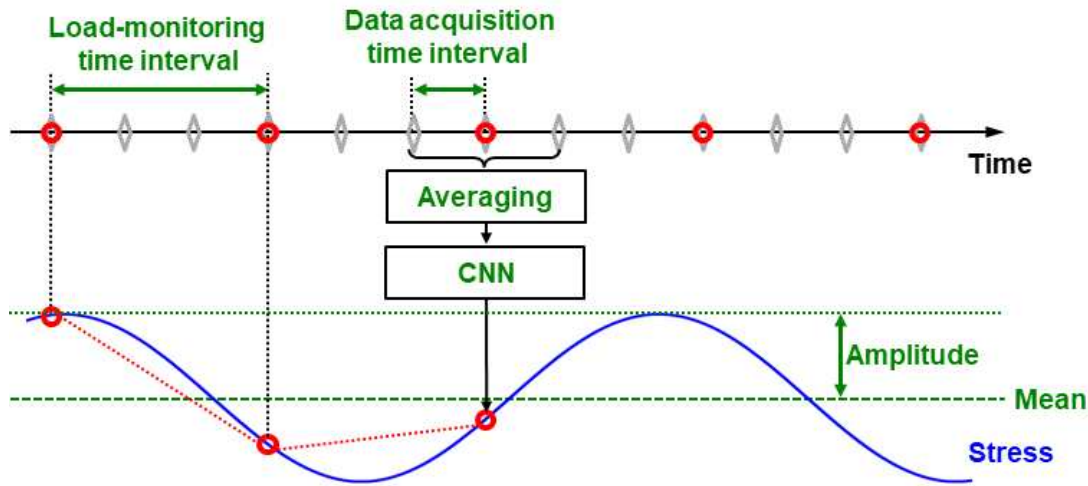


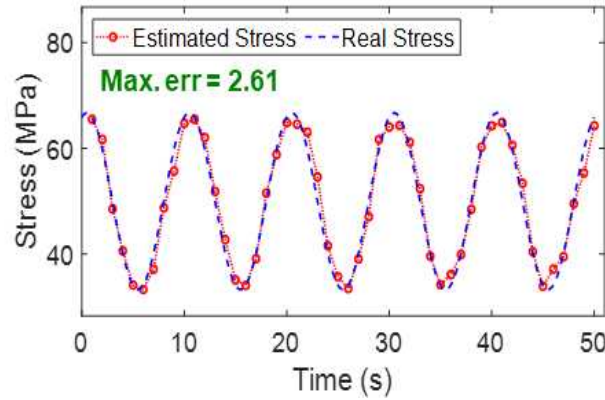
그림 19. 동적 응력 추정을 위한 데이터 획득 개요도

- 이전과 동일한 방법으로 동적하중(일정진폭 반복하중) 하에서 일정 시간 간격으로 초음파 신호를 여러 번 계측한 후, CNN을 학습시켜 추정한 동적 응력과 MTS 장비의 로드셀에 기록된 하중으로부터 계산된 응력과의 비교를 수행함.
- Load-monitoring time interval은 응력 모니터링의 주기이며, Data acquisition time interval은 초음파 신호를 측정한 주기를 나타냄.
- 응력 모니터링 정밀도와 signal-to-noise의 향상을 위하여 Load-monitoring time interval동안 측정한 초음파 신호를 평균하여 응력 모니터링을 실시함.
- 성능 확인을 위하여 조건을 다르게 하여 3번의 실험을 진행하였으며, 각각의 조건은 다음과 같음.

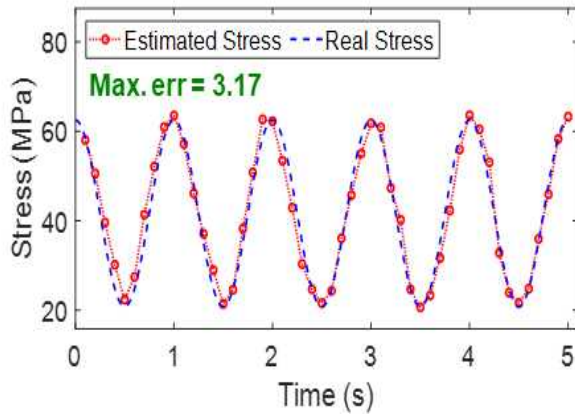
실험 조건

Load Case	Mean (MPa)	Amplitude (MPa)	Frequency (Hz)	Load-monitoring time interval (s)	Data acquisition time interval (s)	No. of averaging
1	50.00	16.67	0.1	1 (1 Hz)	0.25 (4 Hz)	4
2	41.67	20.83	1	0.1 (10 Hz)	0.025 (40 Hz)	4
3	20.83	16.67	5	0.025 (40 Hz)	0.0125 (80 Hz)	2

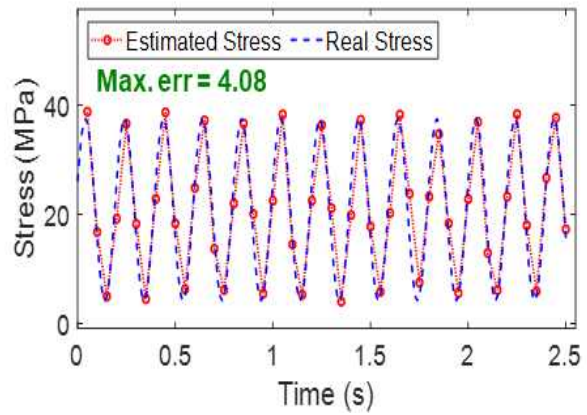
- CNN의 성능확인을 위하여 부재에 작용하는 응력 범위, 주기, 초음파 계측 주기를 다르게하여 3번의 실험을 수행한 결과, 각각 최대 오차가 2.61, 3.17, 4.08 MPa로 높은 정밀도를 가짐.



(a) Load case 1 : 50.00±16.67 MPa, 0.1Hz)



(b) Load case 1 : 41.67±20.83 MPa, 1Hz)



(c) Load case 3 : 20.83±16.67 MPa, 5Hz)

그림 20. 인공신경망을 이용한 동적 응력 추정 결과

- 응력과 초음파 지연시간을 이용한 방법은 정밀도를 높이기 위하여 초음파의 평균횟수를 증가시켜야하는 단점이 있지만, 인공신경망을 이용하면 평균횟수를 증가시키지 않아도 되는 장점이 있음.

3-8 강봉 구조물의 응력에 따른 초음파 속도 관계 조사

- 개발 기술의 실구조물 적용성 향상을 위해 알루미늄뿐만 아니라 강 재질의 구조물을 대상으로 응력 모니터링 연구를 수행함.
- 구조물에 사용 중인 강 재질의 다양한 부재에 대해서 조사를 실시하였음. 그 중에서 실제 구조물에 많이 사용되며 구조물의 성능 유지를 위한 주요한 부재이나 응력 모니터링 기술이 부족한 강봉을 대상으로 응력 모니터링 기술 개발을 실시함.
- 강봉에서의 초음파에 대한 문헌조사 결과, 단축응력이 강봉에 작용할 때 C11, C12, C13, C21, C22, C23 모드의 초음파가 존재하며 응력에 의해 초음파 전파속도가 미세하게 (10^{-8} s 단위)로 변하는 것을 확인함.
- 응력에 따른 각각의 초음파의 이론식은 다음과 같음.

$$\rho_0 c_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right] \quad \text{C11 모드 이론식}$$

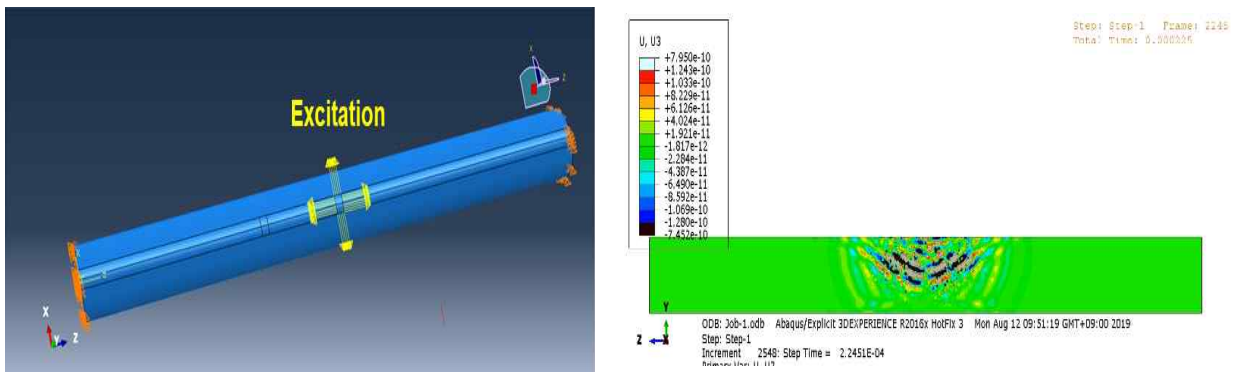
$$\rho_0 c_{12}^2 = \rho_0 c_{13}^2 = \mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu \right] \quad \text{C12, C13 모드 이론식}$$

$$\rho_0 c_{22}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right] \quad \text{C22 모드 이론식}$$

$$\rho_0 c_{21}^2 = \mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right] \quad \text{C21 모드 이론식}$$

$$\rho_0 c_{23}^2 = \mu + \frac{\sigma_{11}}{3K} \left[m - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - 2\lambda \right] \quad \text{C23 모드 이론식}$$

- ABAQUS 프로그램을 이용하여 구조물에 주로 사용되는 SM570 steel 재질의 길이 1200mm, 지름 110 mm 크기의 강봉을 모델링 하였으며, 응력에 따른 C11, C12, C13, C21, C22, C23 모드의 속도 변화를 확인함.
- 시뮬레이션 결과, C11 모드의 전파속도가 응력에 가장 민감하며, C23 모드의 전파속도는 응력에 의해 거의 변하지 않음. 따라서, 본 연구에서는 응력에 가장 민감한 C11 모드를 이용한 응력 모니터링을 실시함.



(a) 시뮬레이션을 위한 강봉 모델링

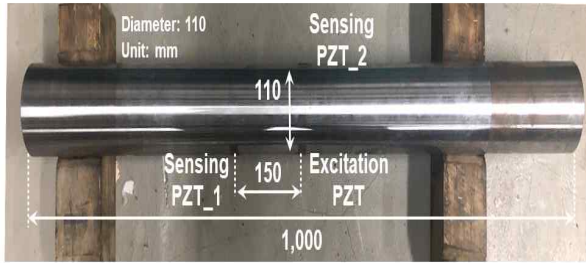
(b) 단면에서의 초음파 전파

그림 21. 초음파 전파 분석을 위한 시뮬레이션 결과

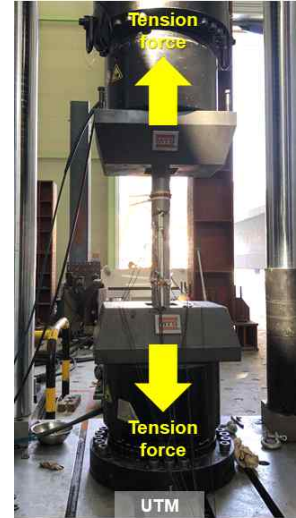
- 평판 구조물 응력 모니터링에 사용한 하드웨어와 소프트웨어를 이용하여 강봉을 대상으로 초음파 생성 및 계측을 수행함.
- 강봉에는 곡률이 존재해 이중 동심원형 압전센서 사용에는 한계가 있음. 따라서, 곡면에도 부착이 가능한 Macro Fiber Composite (MFC) 압전센서를 사용함. 특히, P1 타입 MFC와 P2 타입 MFC 중에 초음파의 가진과 센싱이 모두 가능한 P2 타입의 MFC를 사용하여 실험을 수행하였으며, 사용된 센서의 크기는 가로 28mm 세로 14mm임.

3-9 강봉 구조물의 응력에 민감한 초음파 전파특성 추출

- 실제 영종대교의 앵커리지 시스템에 사용 중인 로드와 동일한 규격 (길이 1200mm, 지름 110 mm)의 SM570 재질의 강봉을 제작하고, 강봉의 표면에 초음파 가진과 센싱을 위한 세 개의 P2 타입의 MFC 센서를 부착함.
- 명지대학교 하이브리드 구조실험센터의 500ton급 UTM 장비에 강봉 시편을 설치하고 정적 인장 하중을 가해 초음파 전파속도 변화를 계측함. 이때 시편에 가해지는 하중은 500ton급 UTM 장비의 로드셀을 통해 실시간으로 제어되고 계측됨.
- Excitation PZT는 초음파 신호를 구조물에 가진하는 역할을 하며, Sensing PZT_1과 PZT_2는 구조물에 전파된 초음파를 계측하는 역할을 함.
- Sensing PZT_1에는 C11, C12, C13 모드의 초음파가 계측되며, Sensing PZT_2에는 C21, C22, C23 모드의 초음파가 계측됨.



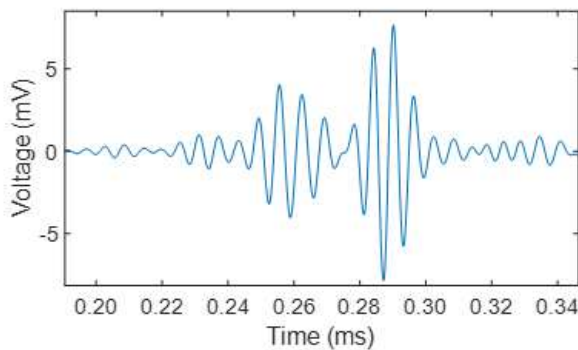
(a) 실험 시편 제작 및 압전센서 설치



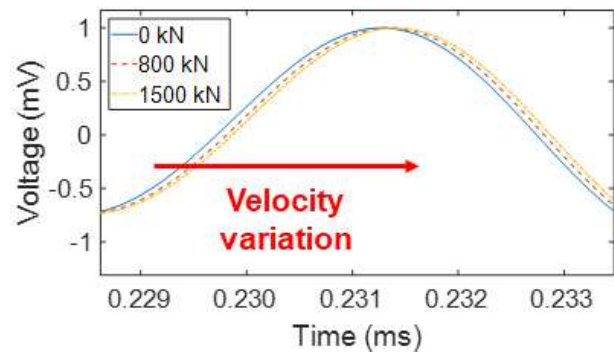
(b) 시편 설치 및 하중 도입

그림 22. 실험 시편 제작 및 하중 도입

- 초음파 가진 주파수는 전파속도 분석을 위해 파형 구분이 쉬운 주파수를 선택함. 응력에 의한 미세한 전파속도 변화를 측정해야 하므로 높은 시간 분해능이 필요함. 본 연구에서는 10 MHz의 샘플링 주파수 (10^{-7} s 시간 분해능)로 데이터 계측을 수행한 후, 이를 Interpolation 하여 보다 높은 시간분해능 (10^{-9} s)을 확보함.



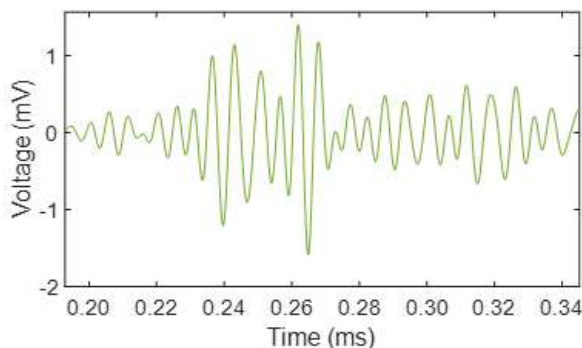
(a) 응력에 따른 C11 모드 신호 변화



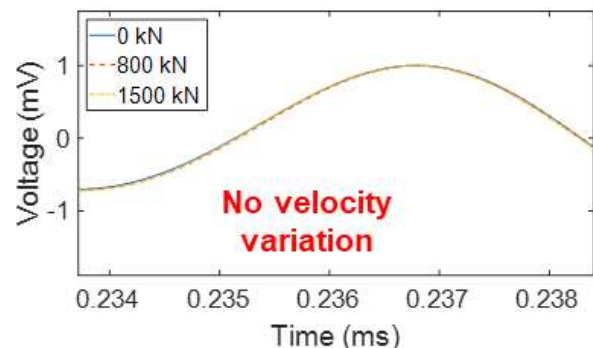
(b) (a)의 확대

그림 23. 하중에 따른 C11 모드 초음파 신호

- 계측된 초음파로부터 C11 모드를 추출하였고, 추출된 C11 모드를 확대하여 하중에 따른 초음파 속도 변화를 확인함.
- 그 결과, 하중이 증가함에 따라 속도가 감소하는 것을 확인함. 이는 시뮬레이션 프로그램 결과와 동일한 결과를 나타냄.



(a) 응력에 따른 C23 모드 신호 변화



(b) (a)의 확대

그림 24. 하중에 따른 C23 모드 초음파 신호

- C11 모드와 마찬가지로 초음파 신호에서 C23 모드를 추출하였고 추출된 C23 모드를 확대한 결과, C11 모드와 달리 하중이 증가하여도 초음파 속도가 변화지 않고 일정하였음.
- 따라서, 본 연구에서는 C11 모드를 이용하여 응력 모니터링을 실시하였고 응력 외에 다른 영향으로 인한 초음파 속도 변화를 C23 모드를 이용하여 보정하는 기술을 개발하였음.

3-10. 초음파 속도 변화를 이용한 강봉 구조물 응력 모니터링 기술 개발

- 이전 실험과 마찬가지로 UTM 장비에 시편을 설치하고 0~1500 kN 까지 100 kN (10.52 MPa) 단위로 정적 인장 하중을 가해 초음파를 계측함. 이때 시편에 가해지는 하중은 UTM 장비의 로드셀을 통해 실시간으로 제어되고 계측됨.
- 가진 신호, 초음파 주파수, sampling rate 등의 실험 조건과 변수들은 이전 실험과 동일한 값들을 사용 하였음.
- 초음파 신호의 속도 변화 추정을 위해 cross correlation을 이용하였으며, 하중이 없을 때 (0 MPa) 계측된 초음파 신호를 기준으로 응력 계측 시에 측정된 초음파 신호 파형의 상관관계를 분석하여 신호의 시간 지연을 자동으로 계산함.
- 응력과 C11 모드의 시간 지연 사이의 관계 (선형 함수)를 수립하였으며, 관계식의 R square 값을 계산한 결과 0.9991로 높은 유용성을 가짐

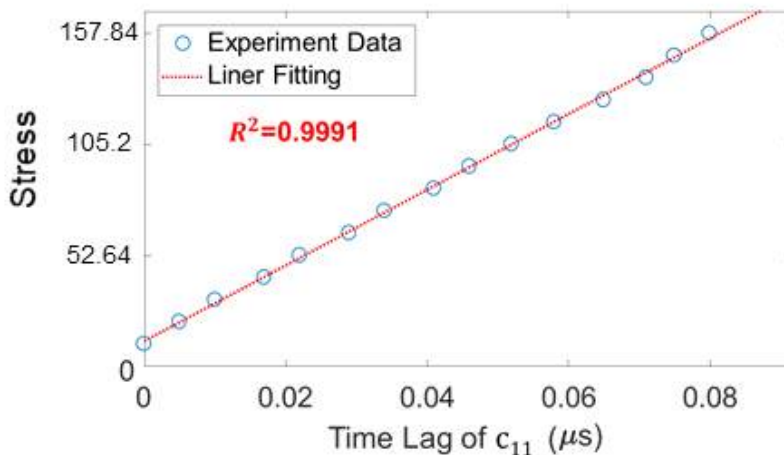


그림 25. 응력과 C11 모드의 시간 지연 사이의 관계 수립

- 알루미늄 평판뿐만 아니라 강봉에서도 응력과 초음파의 시간지연 사이에 높은 선형성이 있는 것을 알 수 있음.

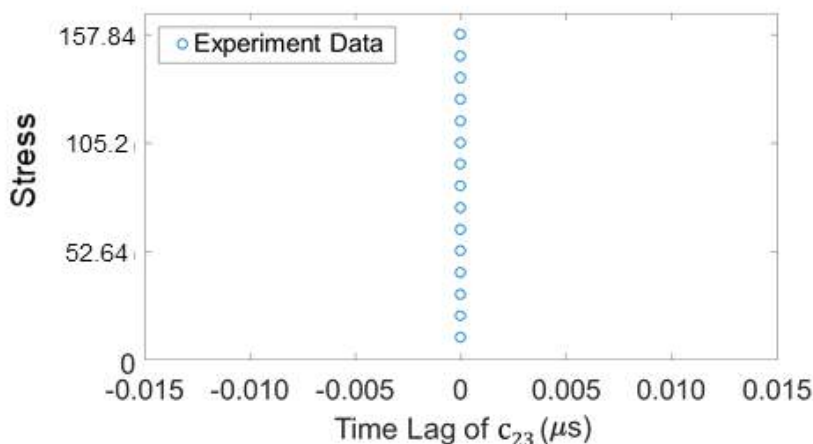


그림 26. 응력과 C23 모드의 시간 지연 사이의 관계 수립

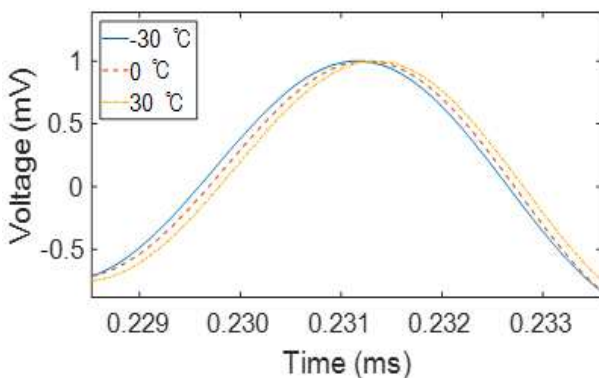
- C23 모드도 C11 모드와 마찬가지로 상관관계를 이용하여 응력에 따른 신호의 시간 지연을 계산한 결과 (0 kN에서 측정한 신호를 기준으로 시간 지연을 계산함), C23 모드는 응력이 증가하여도 시간 지연은 0으로 계산됨.
- 따라서, C23 모드의 속도 변화는 응력 이외의 다른 영향에 의해서만 변함. 이를 이용하여 응력 이외의 다른 영향으로 인한 C11 모드의 시간 지연을 C23 모드를 이용하여 보정이 가능함.

3-11. 강봉 구조물의 온도에 의한 초음파 속도 변화 보정

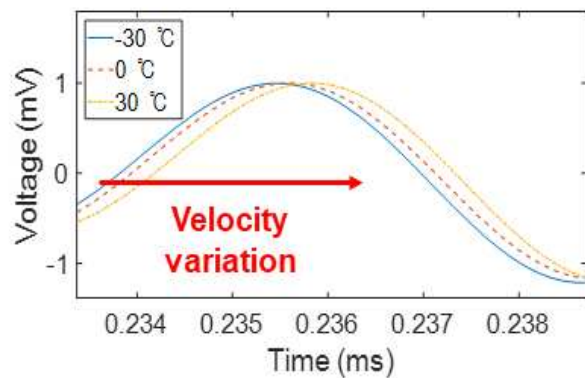
- 문헌조사 결과, 초음파 전파속도는 응력뿐만 아니라 온도에 의해서도 변화하여 실구조물에 적용이 어려움이 있음.
- 실제로 온도 챔버를 이용하여 강봉의 온도를 변화시키면서 강봉 시편의 초음파 전파속도 변화를 측정한 결과, 온도가 증가함에 따라 C11 모드와 C23 모드의 초음파 전파속도 속도가 응력이 증가할 때와 마찬가지로 감소함을 확인함.
- 따라서, 온도가 변화하는 현장에 적용하기 위해서는 C11 모드 초음파 속도 변화의 온도 보정이 필수적임.



(a) 온도변화를 위한 온도챔버



(b) C11 모드의 전파속도 변화



(c) C23 모드의 전파속도 변화

그림 27. 온도에 따른 무도막 시편 초음파 전파속도 실험

- 0°C에서 측정된 초음파 신호를 기준으로 온도 변화에 따른 측정된 초음파 신호 파형의 상관관계를 분석하여 C11 모드와 C23모드의 시간 지연을 자동으로 계산함 (온도가 증가할수록 시간 지연이 증가하는 결과가 나타남).
- 온도에 따른 C11 모드와 C23 모드의 시간 지연 사이의 관계를 선형 회귀 분석을 실시하였고, 선형 회귀 분석 결과를 평가하기 위하여 R square 값을 계산한 결과, 0.9985로 높은 선형성을 가지는 것을 확인하였음.

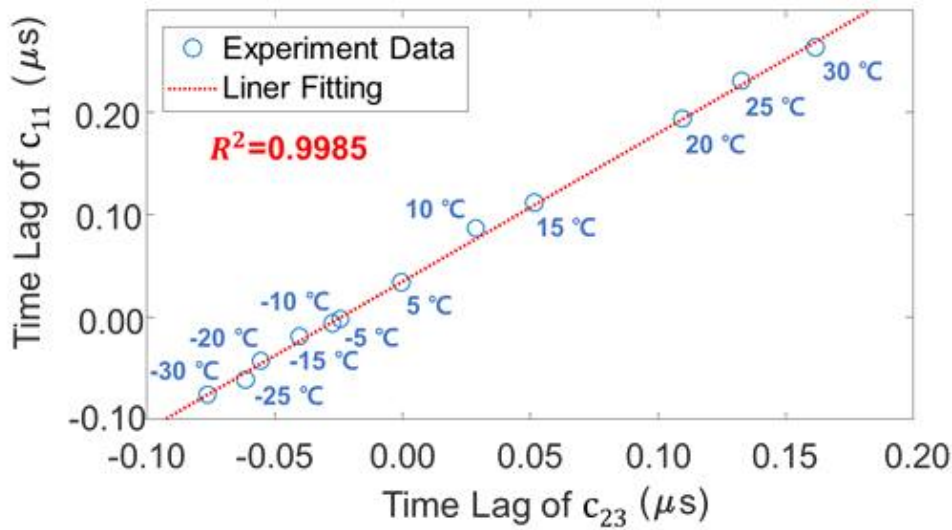


그림 28. C11 모드와 C23 모드의 시간 지연 사이 관계 수립

- C23 모드는 응력에 영향을 받지 않고 오직 외부환경에 의해 전파속도가 변화함. 따라서, C23 모드와 C11 모드의 시간 지연 사이의 상관 관계식을 이용하여 C11 모드의 응력에 의한 시간 지연과 외부환경에 의한 시간 지연으로 구분이 가능함.
- 온도에 의한 초음파 전파속도 변화로 실구조물 적용에 어려움이 있었지만, 본 과제에서 개발한 온도보정 방법을 이용하면 실구조물에 적용이 가능하며, 온도뿐만 아니라 다른 영향에 의한 초음파 속도 변화도 보정이 가능함.

3-12 초음파 온도 보정을 통한 강봉 응력 모니터링 기술 개발

- 초음파의 온도 보정 및 강봉 부재 응력 모니터링을 위하여 알고리즘을 개발함.

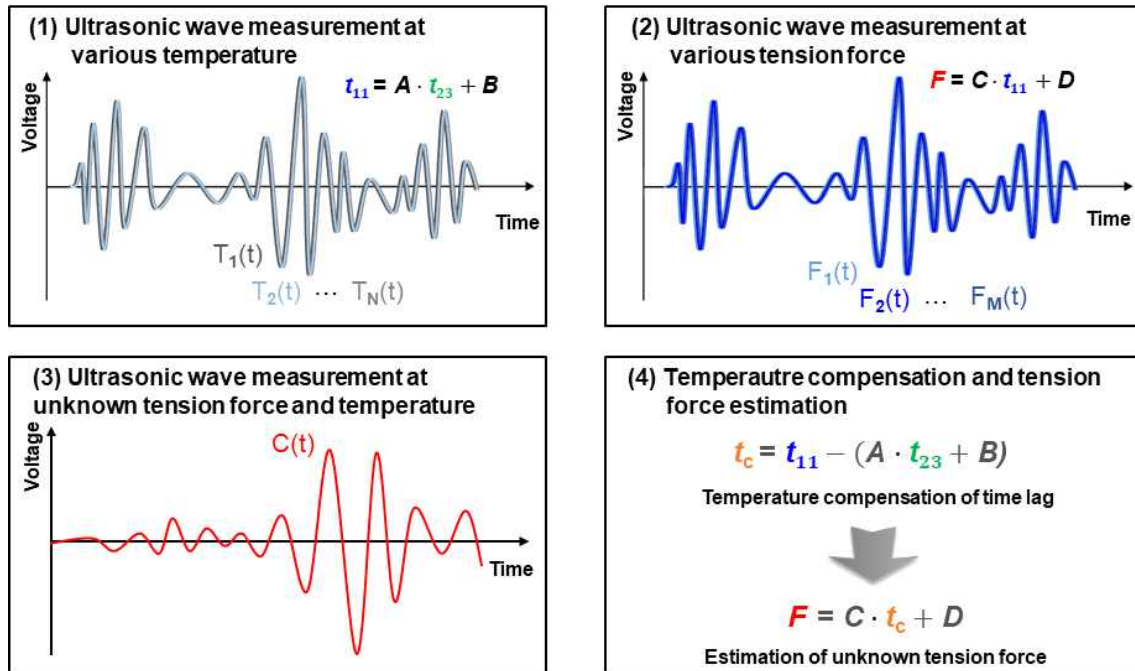
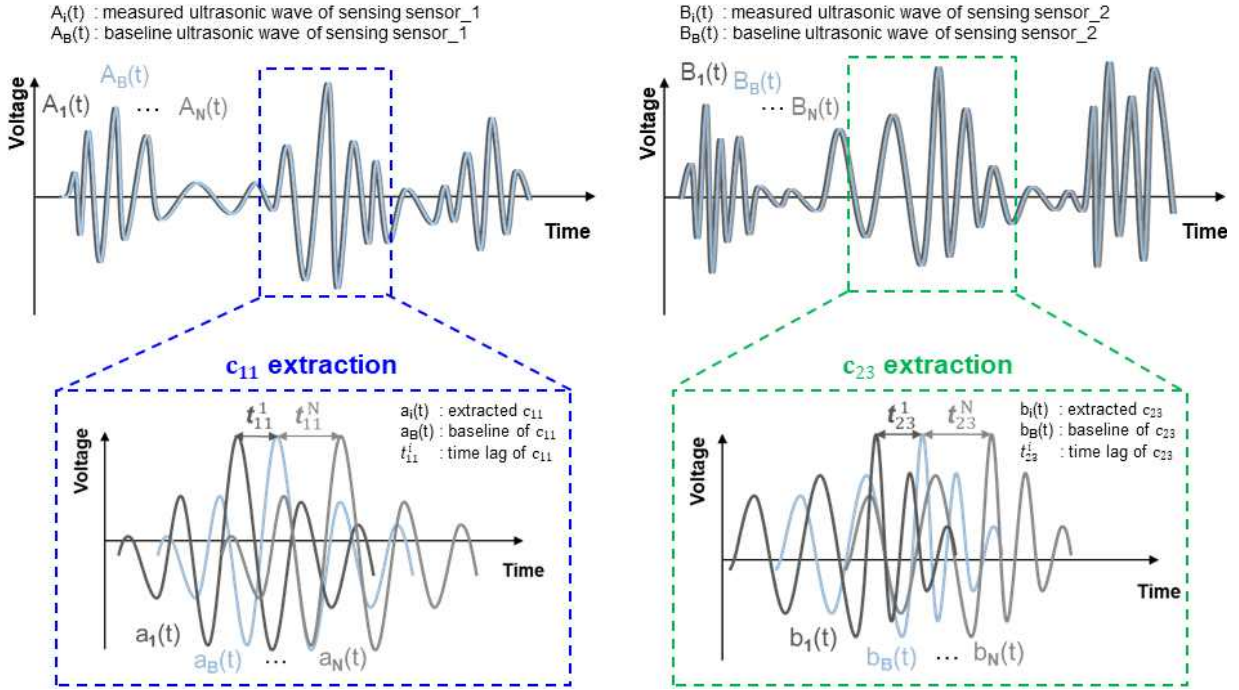
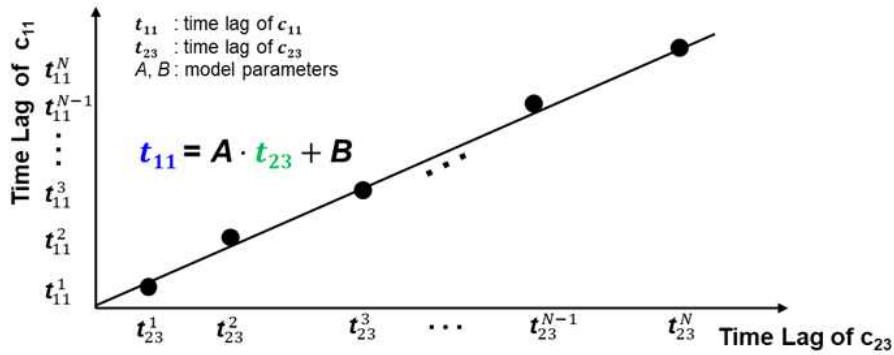


그림 29. 초음파 온도 보정 및 응력 모니터링을 위한 알고리즘

- 알고리즘은 4개의 단계로 구성됨.
- 1 단계 : 다양한 온도에서 초음파 계측, 2 단계 : 다양한 응력에서 초음파 계측, 3 단계 : 온도와 응력을 모르는 상태에서 초음파 계측, 4 단계 : 초음파 온도 보정 및 응력 모니터링 실시



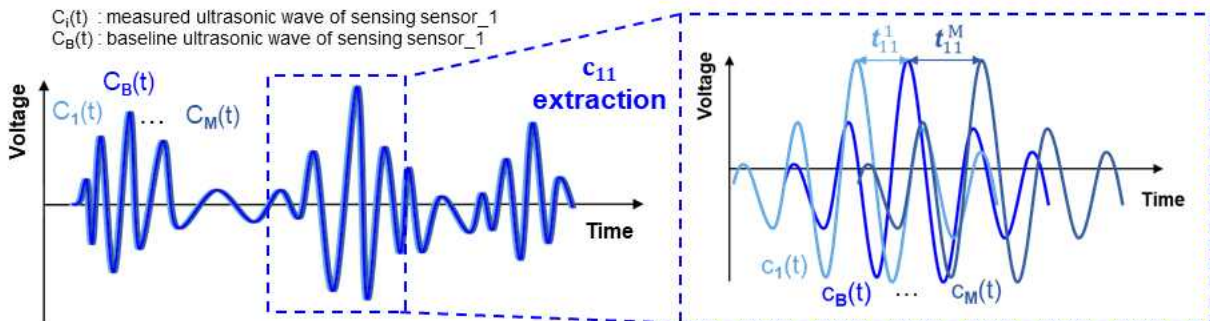
(a) 다양한 온도에서 초음파 계측 및 신호 분리



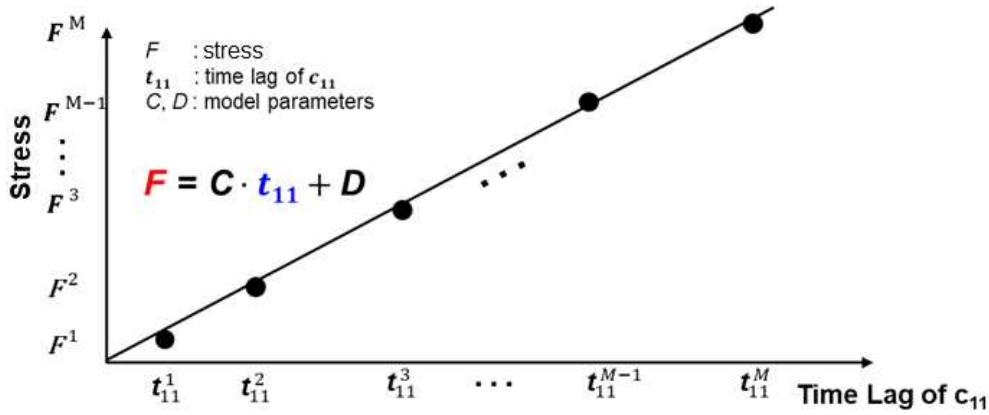
(b) C11 모드와 C23 모드 사이의 온도 관계식 수립

그림 30. 알고리즘 1 단계

- 1 단계: 다양한 온도에서 초음파 계측 실시
- 온도를 바꿔가면서 초음파 신호를 측정하고 측정된 신호로부터 C11 모드와 C23 모드를 추출함.
- 추출된 신호들 중에서 기준 신호를 선택하고 cross correlation을 이용하여 다른 신호들과의 시간 지연을 계산함. 이 때, C11 모드와 C23 모드의 기준 신호는 동일한 온도에서 측정한 신호를 선택함.
- 그 후, 선형회귀분석을 이용하여 계산된 C11 모드와 C23 모드 시간 지연 사이의 관계식을 수립함.



(a) 다양한 응력에서 초음파 계측 및 신호 분리



(b) C11 모드와 응력사이의 관계식 수립

그림 31. 알고리즘 2 단계

- 2 단계 : 다양한 응력에서 초음파 계측
- 온도를 일정하게 유지시킨 상태에서 응력 변화에 따른 초음파 신호를 측정하고 C11 모드를 추출함.
- 이전 단계와 마찬가지로, 추출된 신호들 중에서 기준 신호를 선택하고 cross correlation을 이용하여 다른 신호들과의 시간 지연을 계산함.
- 그 후, 선형회귀분석을 이용하여 계산된 C11 모드 시간 지연과 응력 사이의 관계식을 수립함.

$c_B(t)$: c_{11} baseline of step (2)
 $c_U(t)$: extracted c_{11} at unknown condition

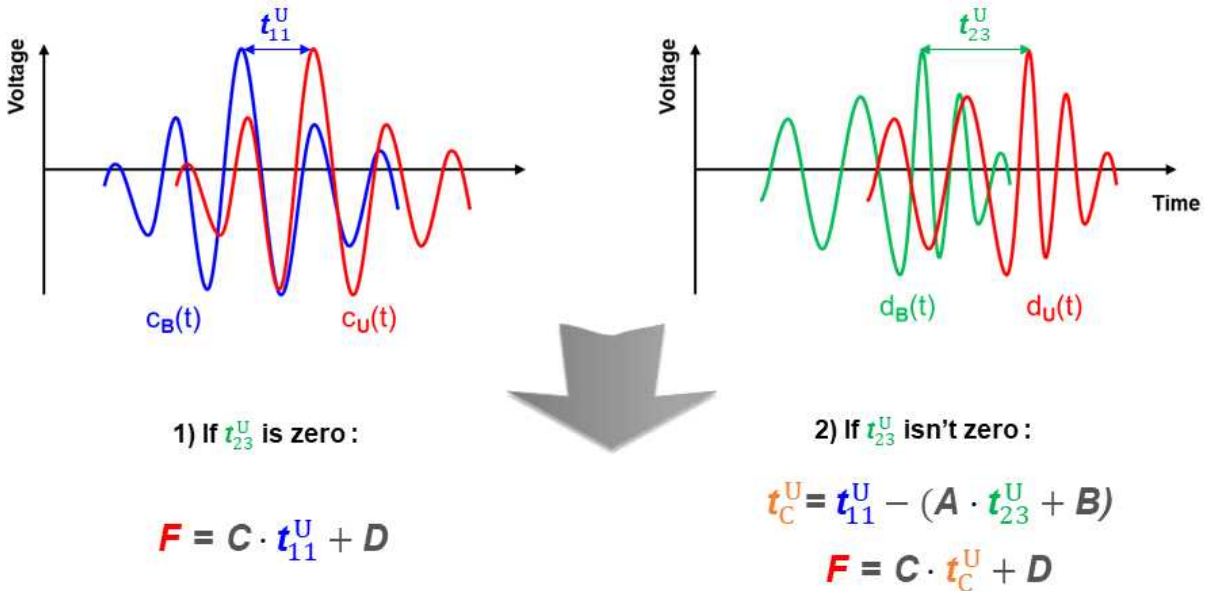


그림 32. 알고리즘 3 단계, 4 단계

- 3 단계, 4단계: 온도와 응력을 모르는 상태에서 초음파 계측 후, 초음파 온도 보정 및 응력 모니터링 실시
- 두 개의 관계식이 수립되면 온도와 응력 조건을 모르는 상태에서 초음파 신호를 계측하고 C11 모드와 C23 모드를 추출함.
- 그 후, 2 단계에서 사용한 기준 신호를 이용하여 C11 모드와 C23 모드의 시간 지연을 계산함.
- 2 단계에서의 온도와 비교하여 온도 변화가 없었다면 C23 모드의 시간 지연은 0이 될 것이며, C11 모드 시간 지연의 온도 보정 없이 응력 모니터링을 실시함.
- 그러나, C23 모드의 시간 지연이 0이 아닐 경우에는 온도 변화가 발생했다는 것을 의미하므로 C11 모드 시간 지연의 온도 보정을 실시한 후에 응력 모니터링을 실시함.

3-13 초음파 온도 보정을 통한 강봉 응력 모니터링 기술 성능 검증 실시

- 이전과 동일한 시편, 하드웨어, 소프트웨어를 이용하여 실험을 진행하였음.
- 온도 관계식 수립을 위하여 온도 챔버를 이용하여 -30 °C~30 °C까지 5 °C 간격으로 온도를 증가시키며 각 온도에서 초음파 생성 및 계측을 수행하였음.
- 0 °C에서 측정한 신호를 기준 신호를 선택하였고 다른 신호들과의 시간 지연을 계산한 후에 C11 모드와 C23 모드의 온도 관계식을 수립함.

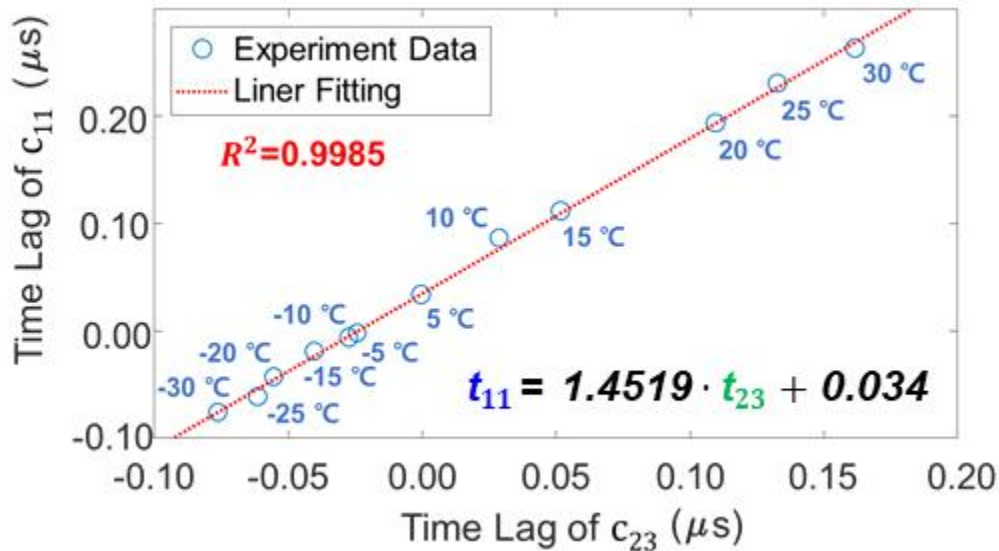


그림 33. 수립된 온도 관계식

- 온도 관계식을 수립하고 응력 변화 따른 관계식 수립을 위하여 시편을 UTM 장비에 설치하고 0 kN~1500 kN까지 100 kN (10.52 MPa) 간격으로 하중을 증가시키며 각 하중에서 초음파 생성 및 계측을 수행하였음.
- 0 kN에서 측정한 신호를 기준 신호를 선택하였고 다른 신호들과의 시간 지연을 계산한 후에 C11 모드 시간 지연과 응력 사이의 관계식을 수립함.

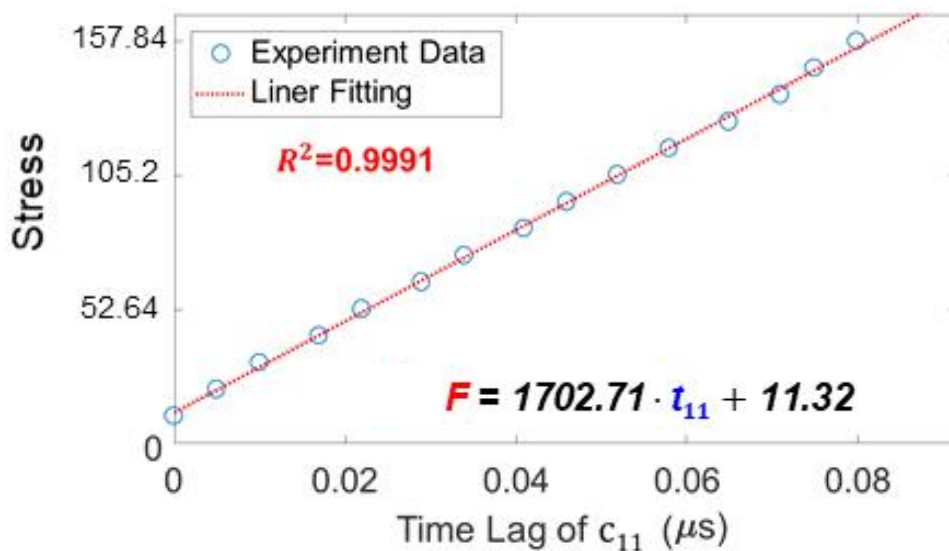
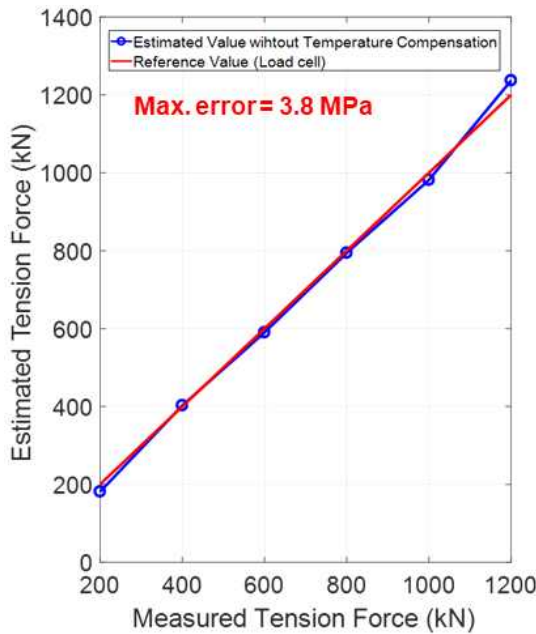


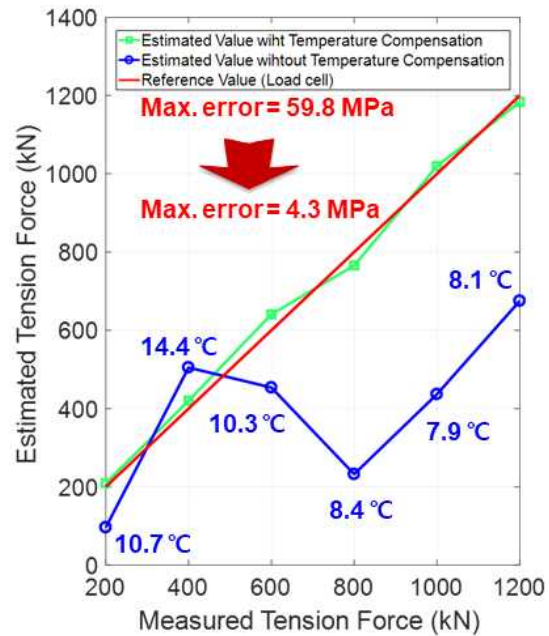
그림 34. 수립된 응력 관계식

- 두 개의 관계식을 수립하고 개발된 기술의 성능 테스트를 위하여 온도와 응력이 동시에 변하는 조건에서 두 번의 실험을 진행하였음.

- 첫 번째 실험은 UTM 장비를 이용하여 200 kN~1000 kN까지 200 kN (21.04 MPa) 간격으로 하중을 증가시켰고, 두 번째 실험은 50 kN~1450 kN까지 100 kN (10.52 MPa) 간격으로 증가시키면서 각 하중에서 초음파 생성 및 계측을 수행하였음.
- 온도 변화를 위하여 시편을 외부에 노출시켜 일교차에 의한 온도 변화를 주었으며, 실험 절차와 조건들은 이전 실험과 동일하게 진행하였음.



(a) 온도 변화가 없을 때



(a) 온도 변화가 있을 때

그림 35. 첫 번째 실험 결과

- 온도 변화가 없을 때는 온도 보정 없이도 추정된 값이 로드셀로 계측된 값을 성공적으로 추적하여 최대 응력 오차가 3.8 MPa로 높은 정밀도를 가짐.
- 하지만, 온도가 변하게 되면 온도 보정 없이 추정된 값의 최대 응력 오차는 59.8 MPa로 큰 오차가 발생하게되며, 이를 통해 온도 변화가 응력 모니터링에 얼마나 큰 영향을 주는지 알 수 있음.
- 온도 문제를 해결하기 위하여 온도 보정을 실시하고 응력 모니터링을 실시한 결과, 최대 응력 오차가 4.3 MPa로 약 93 % 감소하였음.

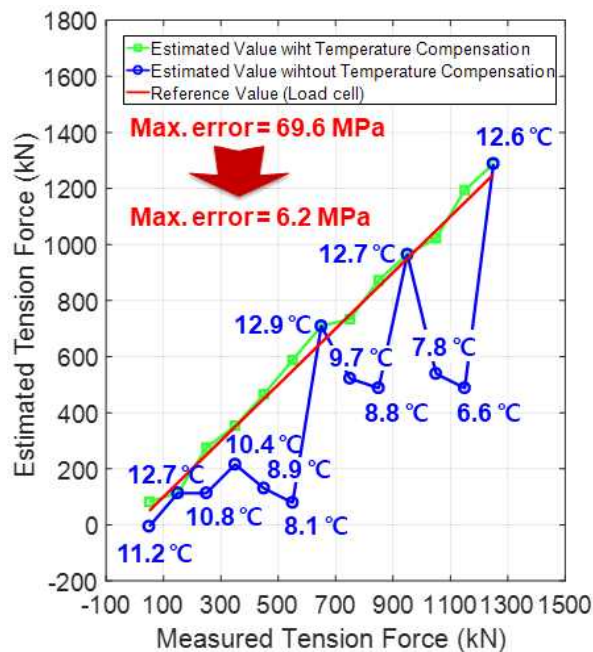


그림 36. 두 번째 실험 결과

- 두 번째 실험에서도 온도 보정을 하지 않으면 최대 응력 오차가 69.6 MPa로 큰 오차가 발생하였으며, 온도 보정 실시 후에 응력 모니터링을 실시한 결과, 최대 응력 오차가 6.2 MPa로 약 90% 감소하였음.

3-14 시편의 도막 영향 검토

- 현장에 실제 사용되는 강봉은 표면에 도막 처리가 되어있으므로 현장 적용성 검토를 위하여 도막이 있는 시편을 제작하여 초음파 속도 변화 검토함.
- 이전과 동일한 재료와 규격의 시편에 도막을 불균일하게 도포하였음.

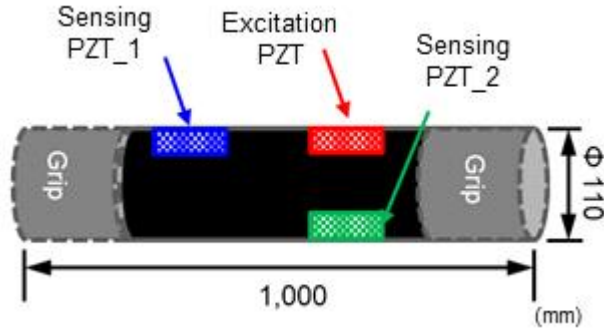
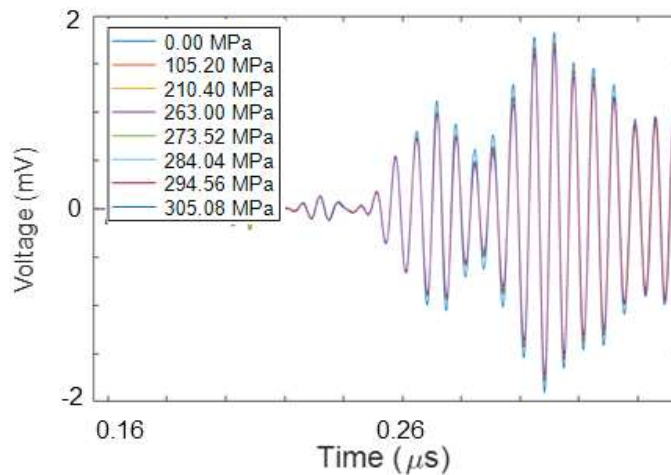
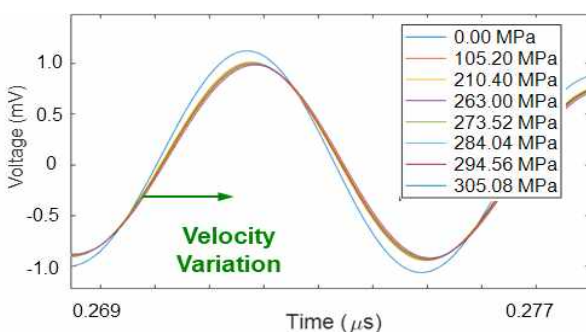


그림 37. 도막 시편 제작

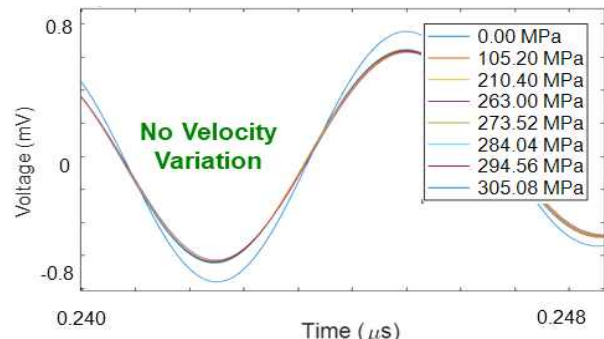
- 무도막 시편과 마찬가지로 초음파 생성 및 계측을 위한 MFC 센서 3개를 부착하였으며, UTM 장비에 시편을 설치하고 정적 인장 하중을 가해 초음파를 계측함.
- 초음파 가진 주파수는 전파속도 분석을 위해 파형 구분이 쉬운 주파수를 선택함. 응력에 의한 미세한 전파속도 변화를 측정해야 하므로 높은 시간 분해능이 필요함. 본 연구에서는 10 MHz 의 샘플링 주파수 (10^{-7} s 시간 분해능)로 데이터 계측을 수행한 후, 이를 Interpolation 하여 보다 높은 시간분해능 (10^{-9} s)을 확보함.
- 무도막 시편과 마찬가지로 측정된 신호에서 C11 모드와 C23 모드를 추출하여 속도 변화를 확인함.



(a) 응력에 따른 도막 시편의 초음파 신호 변화



(b) (a)의 C11 모드 확대



(c) (a)의 C23 모드 확대

그림 38. 응력에 따른 도막 시편 초음파 신호

- 무도막 시편과 마찬가지로 응력이 증가함에 따라 측정된 초음파에서 추출된 C11 모드의 속도는 감소하였고 C23 모드의 속도는 변화가 없는 것을 확인함.
- Cross correlation을 이용하여 C11 모드와 C23 모드의 시간 지연을 계산하였으며, 기준 신호로는 0 MPa에서 측정한 신호를 사용하였음.

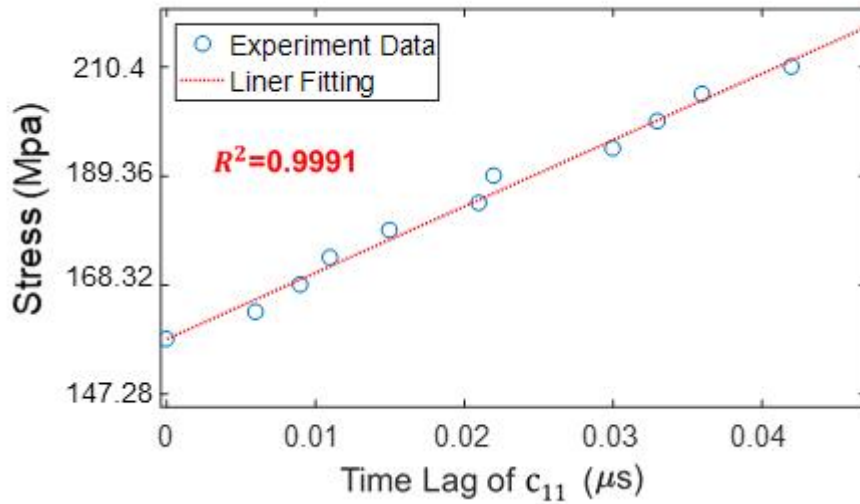


그림 39. 응력과 C11 모드의 시간 지연 사이의 관계 수립

- 도막 시편을 대상으로 응력과 C11 모드의 시간 지연 사이의 관계 (선형 함수)를 수립하였으며, 관계식의 R square 값을 계산한 결과 0.9991로 무도막 시편과 마찬가지로 높은 유용성을 가짐.
- 이를 이용하여, 무도막 시편처럼 응력 모니터링이 가능할 것으로 판단됨.

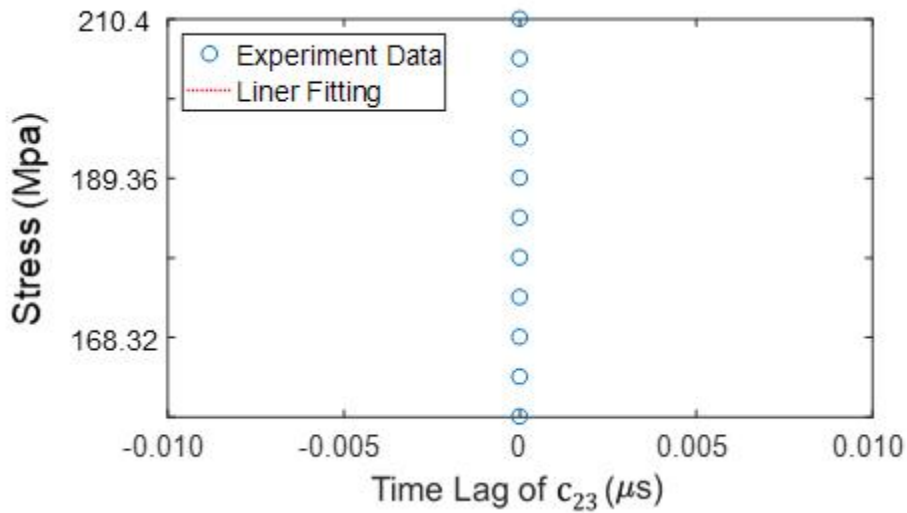


그림 40. 응력과 C23 모드의 시간 지연 사이의 관계 수립

- C23 모드의 응력에 따른 시간 지연을 계산한 결과 무도막 시편과 마찬가지로 0으로 계산됨. 따라서, 도막 시편을 대상으로도 개발된 알고리즘을 이용하여 초음파의 온도 보정 및 응력 모니터링이 가능할 것으로 판단됨.
- 부재의 도막 영향 유무를 검토한 결과, 도막이 있으면 초음파의 파형은 변하기는 하지만 무도막 시편과 마찬가지로 응력에 대한 초음파 전파속도 변화에 대한 선형성은 유지되는 것을 확인함.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ 연구개발 성과

- 본 연구는 당초 핵심 연구목표로 계획된 ‘사회기반시설물 상태평가를 위한 초음파와 머신러닝 기반의 절대응력 모니터링 (20 MPa 정밀도) 원천기술 개발’의 연구개발 성과를 달성하기 위해 성실하게 연구를 완료하였음

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	달성도
1	초음파와 머신러닝 기반 절대응력 모니터링 기법	- 응력에 따른 초음파 S0 모드의 속도변화와 Convolutional Neural Network를 이용한 정적 및 동적 하중 하에서 응력 모니터링 기법 Convolutional layer, C (Filter size), Stride: 1 ReLu layer Max-pooling layer, P (Pooling size), Stride: 2 Fully connected layer (ReLu activation function) Output regression layer *(Width, Height, Depth) - 정적 및 동적 단축 하중이 가해지는 시편에서 약 4Mpa 정밀도로 정적 및 동적응력 모니터링 가능 Stress (MPa) vs. No. of Data: Max. err = 1.64 Stress (MPa) vs. Time (s): Max. err = 4.08	100% 기술개발
2	절대응력 모니터링을 위한 초음파 생성 및 계측 시스템	- NI PXI 시스템을 이용하여 초음파 계측 시스템을 구성하였으며, 초음파를 구조물에 가진하기 위한 파형생성기 (AWG), 초음파 신호 계측을 위한 디지털라이저 (DIG) 및 AWG와 DIG를 제어하기 위한 컨트롤러로 구성 - 컨트롤러에서는 Lab View 소프트웨어를 통해 사용자가 하드웨어 시스템을 임의로 제어할 수 있으며, 본 연구의 초음파 가진 및 계측을 위해 Lab View 기반의 계측 소프트웨어를 개발	100% 기술개발

○ 성과점검기준표

■ 1차년도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수	
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관	1	초음파와 머신러닝 기반 절대응력 모니터링 기법	1-1	응력에 따른 전파특성 초음파 전파특성 조사 및 분석	①	응력과 초음파 전파특성 조사 및 분석	1건	1건	관련 문헌조사 및 실험 수행 후 보고서에 제시	초음파 전파특성 분석 조사 보고서	10	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> 0 </u> 건 S/W: <u> </u> 건
					②	응력 민감 초음파 전파특성 추출	1건	1건	응력에 민감한 초음파 전파특성 결정 및 추출	실험 보고서	40	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 S/W: <u> </u> 건
	2	절대응력 모니터링을 위한 초음파 생성 및 계측 시스템	2-1	절대응력 모니터링을 위한 초음파 생성 및 계측 시스템	①	계측 파라미터 조사	1건	1건	관련 문헌조사 및 실험 수행 후 보고서에 제시	계측 파라미터 보고서	10	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 S/W: <u> </u> 건
					②	계측 시스템 구성	1건	1건	응력 모니터링 을 위한 계측 시스템 구성	계측 시스템 구성 보고서	40	
계											100	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> 0 </u> 건 S/W: <u> </u> 건

■ 2차년도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수	
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관	1	초음파와 머신러닝 기반 절대응력 모니터링 기법	1-1	인공신경망 기반 절대응력 모니터링 기술	①	절대응력 추정 인공신경망 및 알고리즘	1건	1건	절대응력 모니터링 위한 인공신경망 과 알고리즘 개발 건수	인공신경망 및 알고리즘 보고서	60	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> 1 </u> 건 SW: <u> </u> 건
					②	절대응력 모니터링 정밀도	≤ 20 MPa	≤ 4 MPa	실험실 수준에서 하중시험기 로 20 MPa 단위로 하중을 가하여 응력증가를 계측하는 검성 시험 수행	기술 성능검증/평 가 실험 보고서	20	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> 0 </u> 건 SW: <u> 1 </u> 건
	2	절대응력 모니터링을 위한 초음파 생성 및 계측 시스템	2-1	절대응력 모니터링을 위한 초음파 생성 및 계측 시스템	①	절대응력 모니터링 정밀도	≤ 20 MPa	≤ 4 MPa	실험실 수준에서 하중시험기 로 20 MPa 단위로 하중을 가하여 응력증가를 계측하는 검성 시험 수행	기술 성능검증/평 가 실험 보고서	20	특허: 출원 <u> 1 </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
계											100	특허: 출원 <u> 1 </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> 1 </u> 건 SW: <u> 1 </u> 건

- SCI(E)급 학술지 게재 1편, 특허출원 1건, 소프트웨어 1건, 하드웨어 1건의 성과를 달성하여 최소 성과목표를 달성하였음. 그리고, 2차년도의 연구내용을 정리하여 1편의 학술지 (SCI급)을 준비 중임.
- 현재 강봉을 대상으로 초음파의 온도 보정 및 응력에 따른 초음파 속도 변화를 이용한 응력 모니터링이라는 주제로 SCI(E)급 학술지 1편을 작성 중이며, 3월 이내로 작성을 완료하여 제출 할 계획임.

성과지표	성과목표	최소성과목표	성과달성	예상되는 추가 달성
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	2건	1건	1건	1건
일반학술지게재(1점)				
특허출원(1점)	1건	1건	1건	
특허등록(2점)				
디자인 등록(1점)				
소프트웨어(1점)	1건	1건	1건	
하드웨어(1점)	1건	1건	1건	
기타(1점)				
소계(점수)	7점	5점	5점	2점

2. 관련 분야 기여도

○ 개발기술 독창성

- 비파괴적 절대응력 측정
 - 초음파는 대표적인 비파괴적인 응력계측 기법으로 구조물에 손상을 가하지 않고 절대응력을 측정할 수 있음.
- 머신러닝을 이용한 절대응력 추정
 - 최근 컴퓨터 하드웨어의 비약적인 발전과 기술적 난제들이 해결되면서 다양한 분야에 활용중인 인공신경망을 이용하여 응력에 민감한 초음파 전파특성을 입력으로 한 절대응력 모니터링이 가능함.
- 손상의 영향을 받지 않는 절대응력 모니터링
 - 초음파는 부재의 응력변화에 전파특성이 변화하지만 균열과 같은 손상에도 전파특성이 변화함. 본 과제에서는 초음파의 전파특성 중 응력에는 민감하나, 손상에는 민감하지 않는 전파특성을 추출하여 손상의 영향을 받지 않고 절대응력 모니터링이 가능함.
- 상시 모니터링
 - 초음파 발생과 계측에 사용되는 압전센서는 작게 제작할 수 있고 경량이기 때문에 구조물에 부착하여 상시 모니터링이 가능하며, 센서의 단가가 다른 계측기법 (X-선, 분광기법)에 비해 저렴해 경제적임.
- 다양한 분야 활용 가능성
 - 대형 구조물에 대한 절대응력 모니터링 기술은 교량과 같은 사회기반시설물뿐만 아니라 원자력발전소의 배관, 선박, 철도레일 등의 절대응력 모니터링에 활용될 수 있어 그 적용 범위가 매우 넓음.
 - 최근 초음파를 이용한 사회기반시설물 손상 모니터링 기법이 실구조물에 적용중임. 응력 계측에 활용하는 초음파센서와 계측 시스템이 손상 모니터링 시스템과 유사성이 많아 향후 이를 통합하여 단일 시스템으로 손상과 절대응력 모니터링이 가능함.

○ 기대효과

■ 기술적 측면

- 대형 사회기반시설물 부재의 절대응력 모니터링 기술을 구조물의 유지관리를 위해 꼭 필요한 기술이나 현재 연구가 거의 진행된 바가 없음.
- 교량과 같은 사회기반시설물뿐만 아니라 원자력발전소의 배관, 선박, 철도레일, 기계설비 등의 절대응력 모니터링에 활용될 수 있어 그 적용 범위가 매우 넓음.

■ 경제적·산업적 측면

- 본 과제를 통해 세계 최초/최고 수준의 원천기술을 확보하고 추가 연구개발을 통해 국내뿐만 아니라 해외 구조물 유지관리 시장에 진출할 수 있음.
- 지진, 선박 및 항공기의 충돌과 같은 큰 하중이 구조물에 가해질 경우, 구조물의 안전성을 신속히 진단하고 사용 여부를 판단하는 것은 구조물의 통제 시간을 단축시켜 교통과 물류에 그 파급효과가 큼.

■ 사회적 측면

- 구조물의 절대응력 모니터링을 이용한 신속하고 정확한 구조물 상태평가로 사회기반시설물의 안전성과 국민의 안전에 대한 요구를 충족할 수 있음.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 미래 사회기반시설물 상태 모니터링 및 유지관리를 위한 원천기술 확보

- 대형 사회기반시설물에 대한 절대응력 모니터링은 구조물의 안정성 평가 및 유지관리를 위해 꼭 필요한 기술이나 현재 많은 연구가 진행되지 않음.
- 본 과제를 통해 절대응력 모니터링 기법에 대한 세계 최초/최고 수준의 원천기술 확보 및 기술선점이 가능하며 향후 대형 사회기반시설물 부재의 절대응력 모니터링에 활용될 수 있음.

○ 다축하중이 가해지는 부재의 응력 모니터링 기술 개발

- 본 연구에서 개발한 초음파와 머신러닝 기반의 절대응력 모니터링 기술은 부재에 단축하중이 작용할 때만 응력 모니터링이 가능한 기술이므로 다축하중이 작용하는 구조물의 응력 모니터링에 한계가 존재함.
- 다양한 조건의 구조물에 적용하기 위해서는 다축하중에 대한 절대응력 모니터링 기술개발이 필요함.
- 본 과제를 통해 얻은 최종성과물 및 과제수행에서 얻은 경험을 이용하여 센서 네트워크 구축을 통한 초음파의 방향별 전파특성을 측정하는 방법으로 다축하중에 의한 절대응력 모니터링이 가능할 것으로 판단됨.

○ 사회기반시설물의 현장조건을 고려한 절대응력 모니터링 기법 개발

- 실제 구조물에는 반복적인 하중 작용으로 인한 피로 균열이 발생함. 피로 균열은 초음파의 속도에 영향을 주므로 균열에 의한 초음파 시간 지연과 응력에 의한 초음파 시간 지연 구분에 대한 연구가 필요함.
- 부재의 형상이 동일하더라도 부재의 두께에 따라 응력에 따라 초음파가 지연되는 시간이 달라지므로 부재의 두께별로 실험을 통한 관계식을 수립할 필요가 있음. 현장 적용성을 향상 시키기 위해서는 부재의 두께 변화와 초음파 지연 시간 사이의 관계에 대한 연구가 필요함.
- 초음파의 도장 영향을 검토하였으나, 실제 구조물에서는 도장을 실시하여도 부재에 부식이 발생할 수도 있으므로 초음파의 부식 영향에 대해서도 검토할 필요가 있음.
- 또한, 후속 연구로 여러 센서를 설치하여 그리드 (Grid)를 구성하고, 각 그리드에서 응력을 계측하는 방법으로 부재에서 최대응력이 발생하는 위치 추정 및 응력을 시각화 할 수 있음. 이를 이용하여 구조물의 응력집중부위를 추정하고 이들 위치에 대한 집중적인 모니터링을 통해 보다 신뢰도 높은 구조물 유지관리가 가능함.

○ 단축하중이 작용하는 구조물 적용

- 현수교나 사장교의 케이블 장력 유지를 위하여 앵커리지 시스템의 로드같은 경우는 단축하중만이 작용하므로 본 연구에서 개발된 기술 적용이 가능함. 따라서, 개발된 기술의 실구조물 적용을 통한 응력 모니터링에 적용이 가능함.
- 대형 교량뿐만 아니라 철도 레일, 프리스트레스 구조물의 텐던, 원자력발전소의 배관 등 같은 단축하중을 받는 구조물에 활용될 수 있어 그 적용 범위가 매우 넓음.

○ 구조물 손상진단 시스템과의 통합

- 사회기반시설물의 피로균열과 같은 손상진단을 위해 초음파 계측 시스템이 현장에 적용되고 있음.
- 초음파 기반 절대응력 모니터링은 초음파 기반 손상진단 기법과 비교하여 하드웨어 시스템에 유사성이 많고, 본 과제를 통해 개발될 절대응력 모니터링 기술을 부재의 손상에 영향을 받지 않으므로, 향후 이들을 단일 모니터링 시스템으로 통합하여 구조물의 손상진단과 절대응력 모니터링을 동시에 수행할 수 있음.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	- 지식 재산권 확보와 관련하여 기술 유출 가능성이 적음 - 국방 또는 안보관련 기술로 전용 가능한 연구가 아님 - 연구결과물 누설 시 소속 기관에 유무형의 손해를 끼칠 것으로 판단되지 않음 - 관계중앙행정기관의 장이 소관 분야의 산업경쟁력 제고 등을 위하여 국가핵심기술로 지정하거나 법령이 규정한 바에 따라 지정 또는 고시, 공고하는 기술 연구에 해당되지 않음	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 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

- 본 연구 수행에 따른 연구실 안전조치에 대해서는 주관연구기관인 한국과학기술원의 연구실 안전 정책을 충실히 따르도록 함.
- 하중 실험 시, MTS 장비 사용에 대해서는 한밭대학교 공동실험실습관의 전문 직원의 도움을 받아 안전을 확보한 상태에서 진행할 계획임.
- 실험 시편 제작을 위한 금속재료의 가공과 관련해서는 전문 업체에게 시편제작을 의뢰하여 안전사고 발생을 미연에 방지할 계획임.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Online Stress Monitoring Technique Based on Lamb-wave Measurement and a Convolutional Neural Network Under Static and Dynamic Loadings	한국과학기술원	저자	Experimental Mechanics	2.256	2019.10.28	단독 사사	SCI

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

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.