

나노압입을 이용한 케이블 강재의 릴랙세이션 분석 및 구조물 유지관리 기법 개발 연구 최종보고서

2021. 02. 16.

주관연구기관 / 세종대학교 산학협력단
위탁연구기관 / 경남대학교 산학협력단

국토교통부
(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

Infrastructure R&D Report

나노압입을 이용한 케이블 강재의 릴랙세이션

분석 및 구조물 유지관리 기법 개발 연구

2021

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

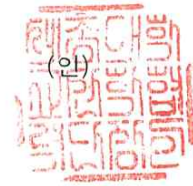
제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘나노압입을 이용한 케이블 강재의 릴랙세이션 분석 및 구조물 유지관리 기법 개발 연구’(연구개발 기간 : 2019. 04. 15 ~ 2020. 12. 31) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2021. 02. 16.

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 (이수용)



주관연구기관책임자: 김 승 억

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C151 846-01	해당 단계 연구 기간	2020.01.01. -2020.12.31	단계구분	2차년도/ 2차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부과제명	나노압입을 이용한 케이블 강재의 릴랙세이션 분석 및 구조물 유지관리 기법 개발 연구			
연구책임자	김승억	해당단계 참여연구원 수	총: 13명 내부: 9명 외부: 4명	해당단계 연구비	정부:206,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:206,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16명 내부: 12명 외부: 4명	총 연구비	정부:370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 경남대학교 산학협력단			연구책임자: 김정중	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안등급의 분류 : 일반 결정 사유 : 보안등급 해당 없음
-------------------------	-------------------------------------

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고 서 원문	연구시 설·장 비	기술 요약 정보	소 프 트 웨 어	화합 물	생명자원		신품종	
								생 명 정 보	생 물 자 원	정 보	실 물
등록· 기탁 번호	https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103089	10-2020-01 41899	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105482		-	-	-	-	-	-	-	-	-
	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119926		-	-	-	-	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

■ 요약

보고서 면수 : 75

✓ 연구목표

- 나노압입 실험으로 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식을 산정하여 케이블 구조물의 유지관리 기법 개발

✓ 핵심성과물

- 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정
 - 케이블 강재의 기계적 특성 도출을 위한 인장실험 수행
 - 압입공정을 시뮬레이션하기 위한 FE모델 수립 및 FE해석 수행
 - 변위제어 나노압입 실험 수행
 - 압입결과를 통해 응력 릴랙세이션-시간 관계 도출
 - 역 알고리즘을 사용하여 릴랙세이션 속도-시간 관계 도출
 - 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증
 - 실험결과를 회귀분석하여 응력 릴랙세이션 방정식 결정
 - 나노압입에 의해 결정된 응력 릴랙세이션 방정식과 비교 검증
 - 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립
 - 나노압입 실험으로 피로실험 후 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정
 - 강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 상관관계 도출
 - 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석
 - 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 사장교의 유한요소해석 모델 개발
 - 응력 릴랙세이션 방정식의 계수 변화에 대한 구조물의 장기거동 민감도 분석
 - 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발
 - 릴랙세이션 방정식 계수 변화에 따른 장기거동 변화 분석
 - 유지관리 알고리즘 제시
-

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	✓ 본 연구의 최종목표는 나노압입 실험으로 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식을 산정하여 케이블 구조물의 유지관리 기법을 개발하는 것임 ✓ 본 연구의 연차별 목표는 다음과 같음 • 1차년도: A. 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 도출 기법 개발 • 2차년도: B. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 장기거동을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발 ✓ A1. 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정 • 케이블 강재의 기계적 특성 도출을 위한 인장실험 수행 • 압입공정을 시뮬레이션하기 위한 FE모델 수립과 다양한 하중에 대한 FE해석 수행 • 변위제어 나노압입 실험 수행 • 10가지 하중에 대한 FE해석을 수행하여 다양한 응력 수준에서의 부피 분율을 계산 • 압입결과를 통해 응력 릴랙세이션-시간 관계 도출 • 역 알고리즘을 사용하여 릴랙세이션 속도-시간 관계 도출 ✓ A2. 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증 • 케이블 강재의 릴랙세이션 실험 수행 • 실험결과를 회귀분석하여 응력 릴랙세이션 방정식 결정 • 나노압입에 의해 결정된 응력 릴랙세이션 방정식과 비교 검증 ✓ B1. 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립 • 3가지의 반복하중에 대하여 피로 실험 수행 • 나노압입 실험으로 피로 실험 후 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정 • 강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 상관관계 도출 ✓ B2. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석 • 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 사장교의 유한요소해석 모델 개발 • 응력 릴랙세이션 방정식의 계수 변화에 대한 구조물의 장기거동 민감도 분석 ✓ B3. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발 • 유지관리 시점에서 재산정된 강재의 릴랙세이션을 고려하여 구조물의 장기거동 관리지표 산정 • 릴랙세이션 방정식 계수 변화에 따른 장기거동 변화 분석 • 유지관리 알고리즘 제시
연구개발성과	✓ 본 연구를 통해 3편의 SCI급 논문 및 1건의 특허를 출원함 • 1차년도 - (논문 1건) 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정 • 2차년도 - (논문 1건) 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립

	- (논문 1건) 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기 거동 해석 - (특허출원 1건) 케이블 강재의 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지 관리 기법				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	✓ 활용계획 • 개발될 유지관리 기법이 적용될 수 있는 구조물은 ① PSC 긴장재, ② 엑스트라도즈도교, ③ 사장교, ④ 현수교, ⑤ 케이블 건축물, ⑥ PC 교 등이 있음 • 본 연구를 통하여 개발 예정인 케이블 구조물의 응력 릴랙세이션을 고려한 유지관리 기법은 구조물의 유지관리에 활용 • 케이블 구조물의 사용기간에 따른 장기거동을 파악할 수 있으며, 릴랙세이션 손실을 고려하여 설계시 반영할 수 있음 ✓ 기대효과 • 압입반응(비파괴 방법)을 통해 케이블의 장기 릴랙세이션을 예측하는 체계적인 기술을 개발함 • 케이블 구조물의 장기거동을 예측하는 정보를 제공함 • 케이블 강재의 릴랙세이션을 고려함으로써 구조물을 안전하게 설계할 수 있음 • 일반적인 릴랙세이션 실험은 시간이 많이 걸리는 반면에, 본 연구에서는 릴랙세이션 속도를 추정할 때 비파괴 압입방법을 적용하여 실험 비용과 시간을 줄일 수 있음 • 응력 릴랙세이션을 고려한 케이블 구조물의 유지관리를 안정적으로 시행함으로써 인명과 재산 손실을 방지하고 심리적 안정감 확보				
국문핵심어 (5개 이내)	나노압입	릴랙세이션	유지관리	케이블 강재	장기거동
영문핵심어 (5개 이내)	nano indentation	relaxation	maintenance	cable steel	long term behavior

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	7
가. 연구개발 목적	7
(1) 연구개발의 배경	7
(2) 기술의 정의	9
나. 연구개발의 필요성	10
다. 연구개발 범위	11
(1) 연구개발 단계	11
(2) 연구개발 목표	11
(3) 연차별 연구개발 목표 및 내용	12
2. 연구수행내용 및 성과	22
가. 연구성과별 세부추진내용	22
(1) 연구개발 흐름도	22
(2) 연구개발 단계에 따른 세부연구내용	23
나. 단계별 연구수행 내용	25
(1) 주요 연구내용	25
다. 연구개발 성과	63
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	64
가. 목표	64
(1) 연구 성과목표 및 성과지표	64
(2) 연차별 성과목표 및 성과지표	65
(3) 연도별 주요 추진 일정	66
나. 목표 달성여부	67
(1) 연구개발 목표 달성도	67
(2) 핵심성과물별 세부 설명	68
다. 관련 분야 기여도	71
(1) 연구개발 핵심성과	71
4. 연구개발성과의 활용 계획	72
가. 연구결과의 활용방안	72
나. 기대효과	72
(1) 기술적 측면	72
(2) 경제적 · 산업적 측면	72
(3) 사회적 측면	73
붙임. 참고 문헌	74

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

(1) 연구개발의 배경

- 케이블은 장대교량 등 주요 구조물에 사용되므로 케이블의 릴랙세이션을 분석하는 것은 매우 중요함
- 본 연구는 케이블 구조물의 장기거동을 고려한 유지관리 기법의 원천기술 확보를 목적으로 함
- 또한 본 연구는 릴랙세이션을 예측하여 데이터를 확보한 상태에서 모니터링 결과와 비교 평가하여 구조물의 건전성을 평가하는 것을 목적으로 함
- 아래와 같이 각종 케이블교량 손상 및 붕괴 사고가 보고되고 있음



(a) 서해대교 케이블 파단



(b) 내부순환로 내부 강선 파단



(c) 이탈리아 케이블교량 붕괴

그림1. 케이블교량 손상 및 붕괴 사고사례

- 인장력을 받는 케이블 강재는 고정된 변형률에서 시간에 따라 응력이 감소하는 릴랙세이션(relaxation) 현상이 발생함
- 그림2와 같이 서로 다른 변형률 하에서 릴랙세이션이 발생한 강재의 미세구조가 변함을 볼 수 있음
- 큰 변형률(0.3) 하에서 릴랙세이션이 발생한 강재의 평균 덤플 크기(d)가 릴랙세이션을 겪지 않거나 (a), 상대적으로 작은 변형률 (0.1)하에서 릴랙세이션이 발생한 강재의 평균 덤플 크기보다 커졌음을 볼 수 있음

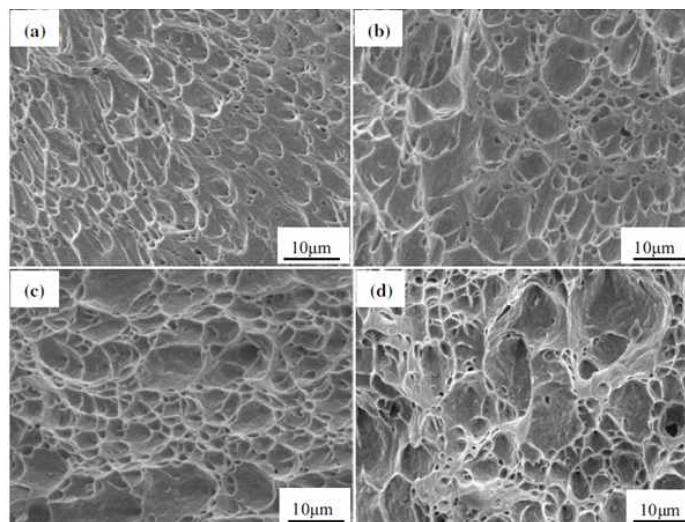


그림2. (a) 릴랙세이션이 발생하지 않은 강재, (b) 변형률 0.1, (c) 변형률 0.2, (d) 변형률 0.3 에서 릴랙세이션이 발생한 강재의 미세구조 SEM이미지

- 강재의 릴랙세이션은 재료의 점탄성(viscoelastic) 특성으로 점성과 탄성을 고려한 다양한 레올로지(rheology) 모델을 사용하여 구조 설계에 반영하고 있음
- 강재의 릴랙세이션에 대한 대표적인 레올로지 모델은 그림3과 같이 3개의 요소(2개의 스프링과 1개의 감쇠)를 가진 일반화된 맥스웰 (Generalized Maxwell) 모델을 바탕으로 릴랙세이션 손실 r 을 식(1)과 같이 계산함

$$r(\%) = r_{\lim} \left[1 - e^{-\frac{t}{t_r}} \right] \quad (1)$$

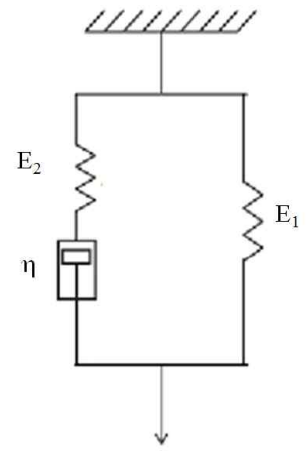


그림3. 일반화된 맥스웰 모델

- 식(1)에서 r 은 릴랙세이션 손실(%)로 응력 감소량을 초기 재하응력으로 나눈 값이며, $r_{\lim} = 100E_2/(E_1 + E_2)$ 와 $t_r = \eta/E_2$ 은 매개변수임
- 릴랙세이션 손실은 강재의 미세구조 변화에 따라 달라지며, 이는 식(1)에서 예로든 손실 r 의 변화, 즉 매개변수 $r_{\lim}$ 와 t_r 의 변화로 나타냄
- 케이블의 사용기간 동안 케이블 내에 발생하는 다양한 응력과 변형률의 변화로 강재의 미세구조는 변할 것이며, 이로 인해 릴랙세이션 손실량도 변할 것임
- 결론적으로 본 연구에서는 케이블 강재의 릴랙세이션 방정식을 나노압입으로 결정하고, 릴랙세이션 방정식을 고려한 구조해석을 수행함으로써 구조물의 장기거동을 업데이트할 수 있으며, 이를 활용한 구조물의 유지관리 기법을 개발하고자 함
- 본 연구의 개요를 그림4에 나타냄

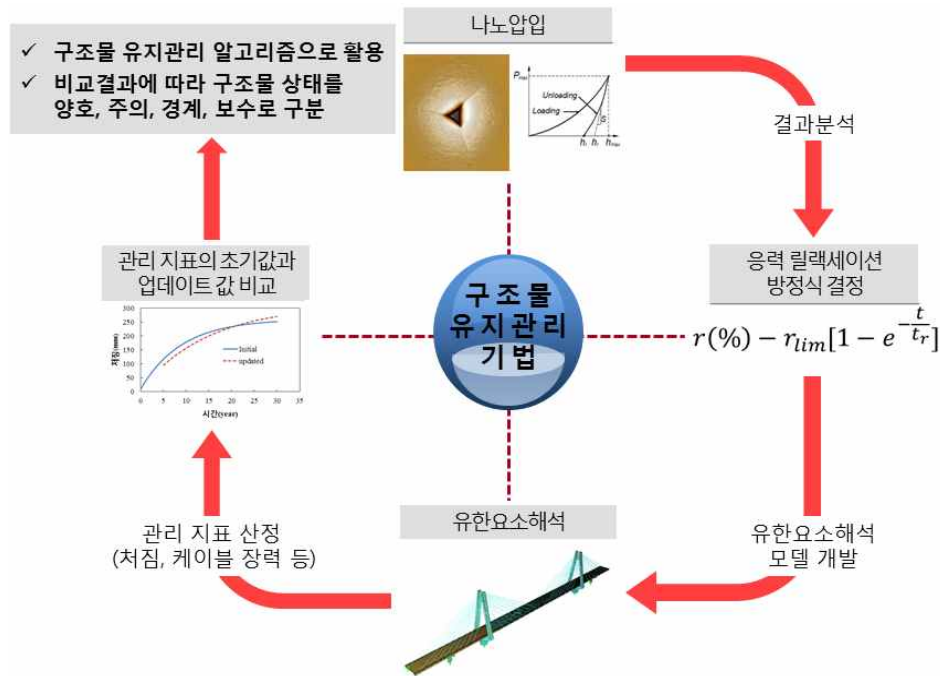


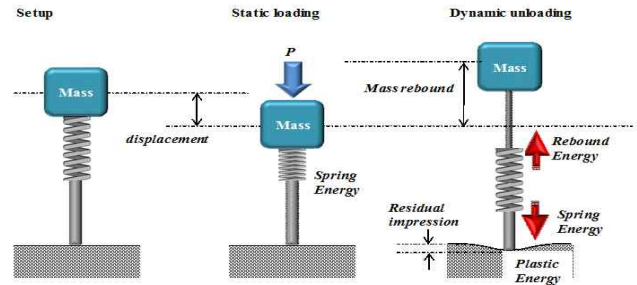
그림4. 연구개요

(2) 기술의 정의

- 표면경도를 이용하여 재료의 기계적 성질을 규명하는 기법을 압입(indentation)기법이라고 함
- 건설 분야에서 우리에게 가장 친숙한 압입기법은 그림5와 같이 슈미트 햄머를 이용하여 콘크리트의 강도를 측정하는 것임
- 슈미트 햄머를 이용한 압입기법은 동적인 하중을 재하 하여 표면경도와 강도사이의 관계를 이용하여 강도를 측정하는 방법임



(a) 슈미트 햄머를 이용한 강도측정



(b) 슈미트 햄머를 이용한 강도측정 원리

그림5. 슈미트 햄머를 이용한 강도측정 및 원리

- 나노압입기법은 Sub-micron 범위에서 다른 기계적 실험 방법과 비교했을 때 매우 작은 흔적만 남기는 비파괴 검사법이며, 나노압입결과를 분석하여 재료의 탄성계수, 경도, 항복강도, 경화계수를 산정할 수 있음
- 나노압입기는 시편 표면의 압입을 통해 재료의 경도를 조사하는데 사용하는 전문 장비임
- CSM Instruments와 CSEM(Swiss Center for Electronics and Microtechnology)에서 만든 장비임
- 인텐터 팁은 산업용 다이아몬드로 만들어진 베르코비치 인텐터 팁을 사용함
- 인텐터 팁의 포아송비와 탄성계수는 각각 0.07 및 $1,140\text{ GPa}$ 임
- 따라서 구조용 강재를 구성하는 미세구조인 페리트(ferrite), 펄라이트(pearlite), 시멘타이트(cementite)의 탄성계수, 항복강도 등을 산출할 수 있으며, 이러한 결과를 분석하여 강재의 기계적 특성을 도출할 수 있음

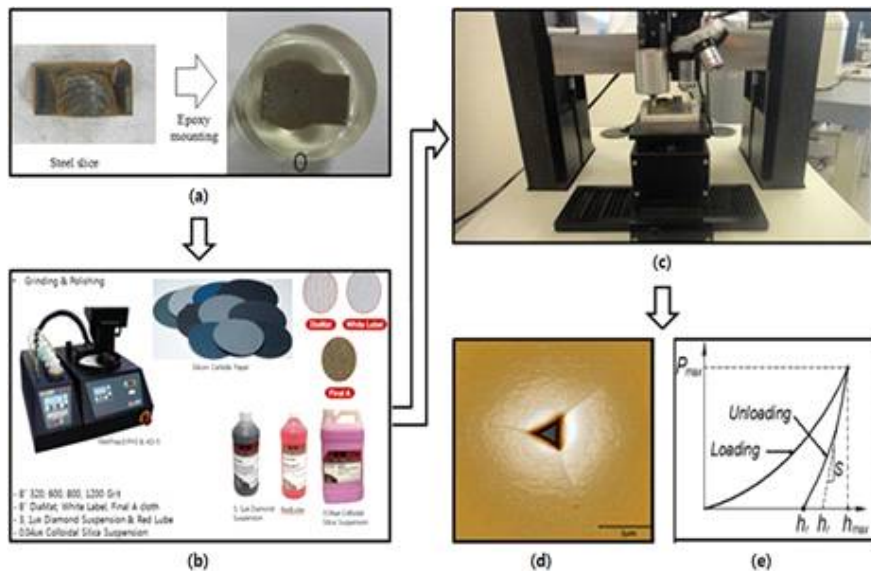
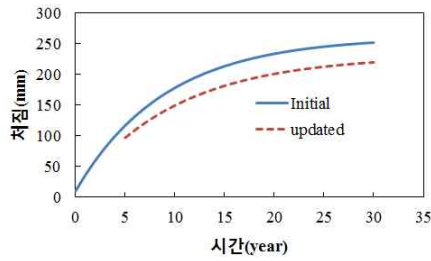


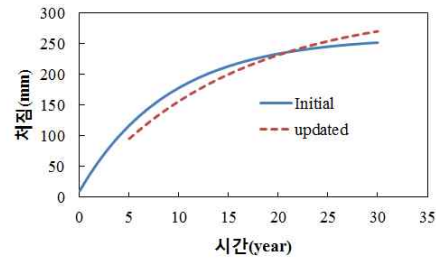
그림6. 나노압입기법 (a) 샘플 준비, (b) 샘플 연마, (c) 나노압입 실험, (d) 압흔, (e) P-h 곡선 도출

- 구조물 설계 시 강재의 릴랙세이션을 고려하여 산정된 구조물의 장기거동 관리 지표 (처짐, 내하력, 케이블 하중 등)에 대하여 해당 시점에서 재산정된 강재의 릴랙세이션을 고려하여 구조물의 장기거동 관리 지표를 산정함
- 설계 시 산정된 관리지표와 업데이트된 관리 지표를 비교하여 구조물의 유지관리에 활용할 수 있음



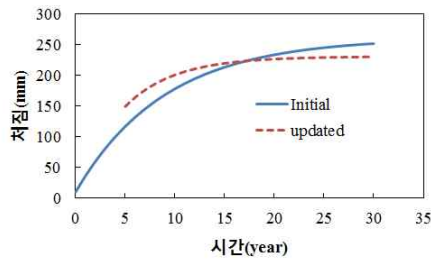
(a) 초기 예측 대비

작은 실측값과 작은 30년 예측값



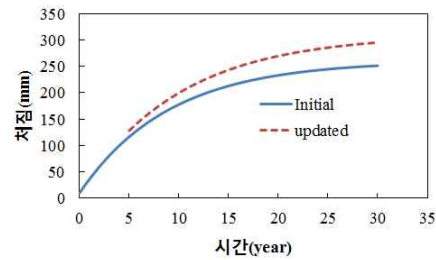
(b) 초기 예측 대비

작은 실측값과 큰 30년 예측값



(c) 초기 예측 대비

큰 실측값과 작은 30년 예측값



(d) 초기 예측 대비

큰 실측값과 큰 30년 예측값

그림7. 프리스트레스트 콘크리트 보의 처짐에 대한 초기 예측값에 대하여
사용 5년 후 실측값과 장기거동 산정 시나리오

나. 연구개발의 필요성

- 본 연구가 필요한 이유는 기존 케이블의 재원에 따른 릴랙세이션 양은 1,000시간에 대해서만 제시되어 있으나 본 연구에서는 50년에 대해서 예측한 값을 제시하는 것임
- 본 연구는 나노압입 기술을 케이블 강재의 릴랙세이션 방정식 도출에 적용하는 창의적인 연구이며, 나노압입 기술을 이용한 재료의 기계적 성질 산정 기법은 이론적 측면과 실험적 측면에서 검증이 된 단계이므로 지금이야말로 건설 분야에 사용되는 강재에 대한 기계적 성질 산정에 적용이 필요한 기초원천기술 개발의 최적 시기임

다. 연구개발 범위

(1) 연구개발 단계

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

최종성과물	기술성숙도(TRL)		설정근거
	연구시작시	연구종료시	
나노압입 실험으로 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식을 적용한 케이블 구조물의 유지관리 기법	2	3	(연구시작시) 강재의 릴랙세이션 상태를 파악하여 구조물의 유지관리 기법에 활용하는 기술적 개념을 정립하는 단계로 TRL 2로 설정하였음 (연구종료시) 2년간 성공적으로 연구가 마무리 될 경우 강재의 릴랙세이션 상태를 파악하여 구조물의 유지관리하는 기법이 개발될 것이며, 실험적으로 증명된 상태로 TRL 3으로 설정함

(2) 연구개발 목표

(가) 최종목표

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	나노압입 실험으로 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식을 산정하여 케이블 구조물의 유지관리 기법 개발
세부 목표	- 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 도출 기법 개발 - 케이블 강재 응력 릴랙세이션의 장기거동을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발

(3) 연차별 연구개발 목표 및 내용

(가) 연구목표 및 내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 도출 기법 개발	- 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정 - 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증
2차년도	케이블 강재의 응력 릴랙세이션 장기거동을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발	- 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립 - 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석 - 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발

(나) 1차년도 주요 연구내용

■ 개발목표 : A. 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 도출 기법 개발

✓ 주관연구기관 (세종대학교)

- 나노압입에 의한 케이블 강재의 릴랙세이션 방정식 결정 및 검증

✓ 위탁연구기관 (경남대학교)

- 역 알고리즘을 사용하여 릴랙세이션 속도-시간 관계 도출

■ 개발 내용 및 범위

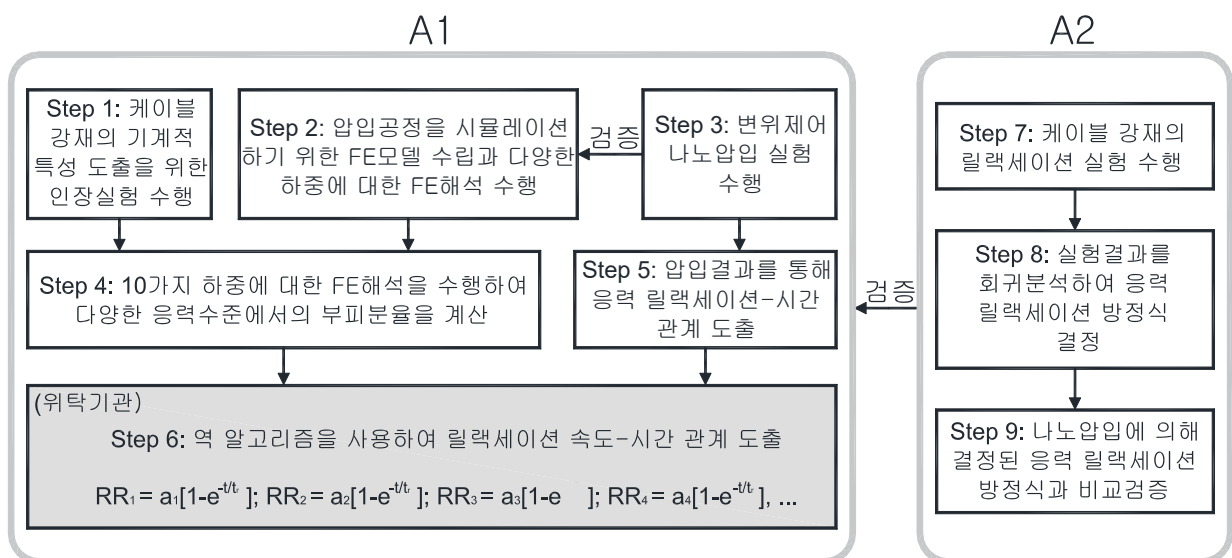


그림8. 1차년도 개발 흐름도

✓ 주관연구기관 (세종대학교)

- A1. 나노압입에 의한 케이블 강재의 릴랙세이션 방정식 결정 및 검증

Step1 케이블 강재의 기계적 특성 도출을 위한 인장실험 수행

- 인장실험은 재료의 기계적 특성을 도출하기 위해 수행할 것임
- 케이블 강재로는 직경 12.70mm, 항복강도 1,860MPa를 가지는 ISO6934-1991 강선을 사용할 것임

Step2 압입공정을 시뮬레이션하기 위한 FE모델 수립과 다양한 하중에 대한 FE해석 수행

- 다른 모양의 인덴터 팁(indenter tip)을 가진 압입공정의 3-D 유한요소모델을 그림9와 같이 제안할 것임
- FE모델은 8600 CAX4R-사변형 요소를 사용하여 시뮬레이션 예정임
- Berkovich 및 구형 tip은 $1,140\text{ GPa}$ 의 탄성 계수와 Poisson비가 0.07이며, 압입공정을 시뮬레이션 하는데 사용할 것임
- 변형영역(샘플 표면 근처)에서 작은 요소를 사용하여 압입반응을 정확하게 확인할 것임

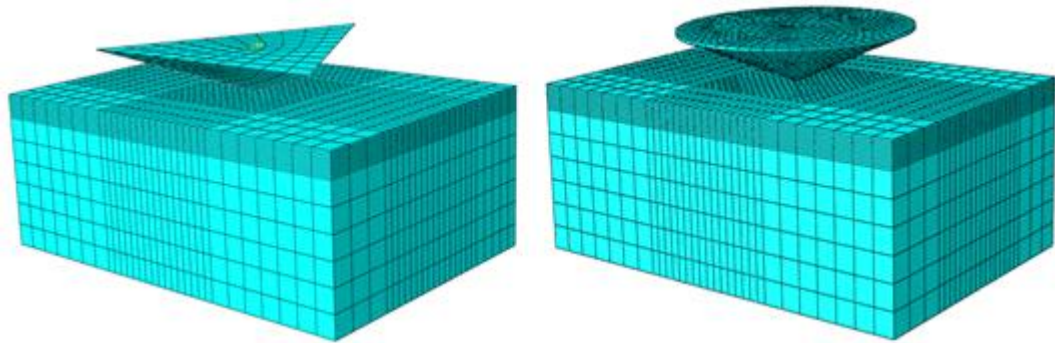


그림9. 압입공정의 FE모델

Step3 변위제어 나노압입 실험 수행

- FE 모델을 검증하기 위해 나노압입 실험을 수행할 것임

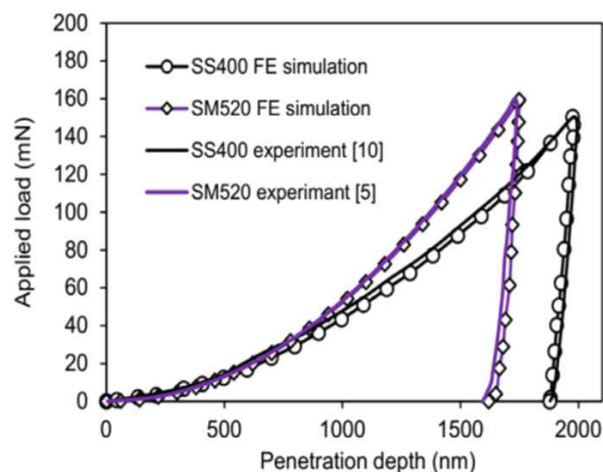
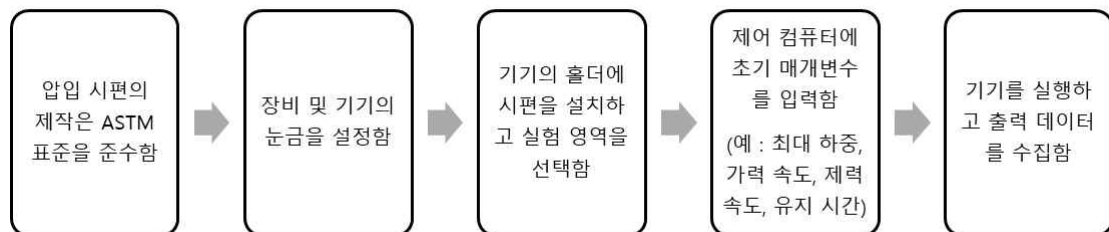


그림10. 나노압입 실험 절차와 실험적 검증을 통해 제안된 FE모델의 검증

Step4 10가지 하중에 대한 FE해석을 수행하여 다양한 응력 수준에서의 파괴분율을 계산

- 나노압입은 케이블 강재에 수행되며, $10\text{ mN} \sim 300\text{ mN}$ 의 10가지의 하중에 대하여 각각

10번의 나노압입을 수행할 것임

- 여러 하중에 대한 FE해석을 수행하여, 다양한 응력 수준에서의 파괴분율을 계산할 것임
- FE모델의 정확성을 검증한 후, 표1과 같이 10mN에서 300mN까지의 하중에 대한 해석결과 데이터를 확보할 것임
- 결론적으로 각 경우에 대한 다양한 응력 수준의 파괴는 AutoCAD 또는 기타 소프트웨어를 사용하여 결정할 것임

표1. FE해석의 10가지 경우

응력	10mN	20mN	...	250mN	300mN
F_y	50%	60%	...	66%	70%
$0.9 F_y$	30%	25%	...	22%	20%
...	...	...	...	...	...
$0.1 F_y$	5%	2%	...	2%	2%

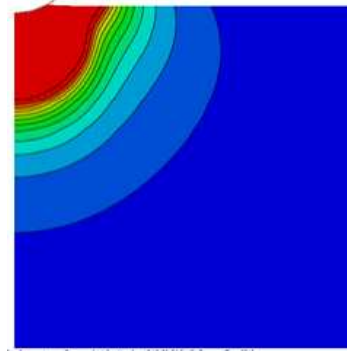


그림11. 다양한 하중에 따른 유한요소해석

Step5 압입결과를 통해 응력 릴랙세이션-시간 관계 도출

- 그림12와 같이 하중-변위 관계를 도출하기 위해 여러 나노압입 릴랙세이션 실험을 해당 하중에서 수행할 것임

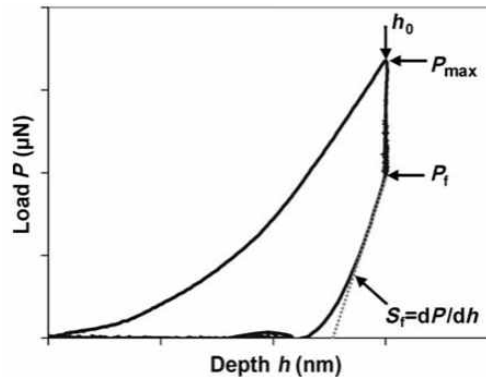


그림12. 하중-압입 깊이 곡선

- 압입 반응으로부터 최대하중 P_m , 하중곡률 $C = P/h^k$, 접촉강성 $S = \frac{dP_u}{dh} \bigg|_{h=h_m}$, $= mB(h_m - h_r)^{m-1}$ 접촉면적 $A_c = C_0 h_c^2 + C_1 h_c^1 + C_2 h_c^{0.5} + C_3 h_c^{0.25} + C_4 h_c^{1/8} + C_5 h_c^{1/16}$ 을 도출할 것임
- 최대하중과 접촉면적과 같은 압입반응으로부터 응력 릴랙세이션을 추정하는 방법을 제안할 것임
- 결론적으로 그림13과 같이 하중에 대한 응력 릴랙세이션-시간 관계는 제안된 방법을 통해 결정할 수 있음

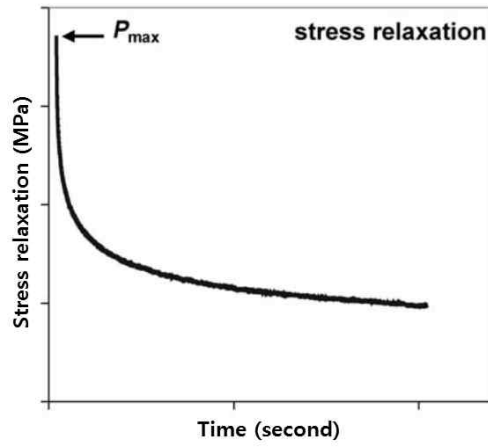


그림13. 응력 릴랙세이션-시간 곡선

- 나노압입 실험 시스템은 그림14와 같으며, 시편의 준비는 ASTM 표준을 따를 것임
- 식(2)에서 i 는 최대압입하중으로 $10mN$ 에서 $300mN$ 까지 10개 정도의 압입 하중에 대한 해석을 수행할 예정이며, j 는 압입 강재에 작용하는 응력으로 $0.1F_y$ 부터 F_y 까지 10단계로 나누어 분석할 예정임

$$r_i [1 - e^{-\frac{t}{t_i}}] = \sum_{j=1}^N V_{ij} r_{ij} [1 - e^{-\frac{t}{t_{ij}}}] \quad (2)$$

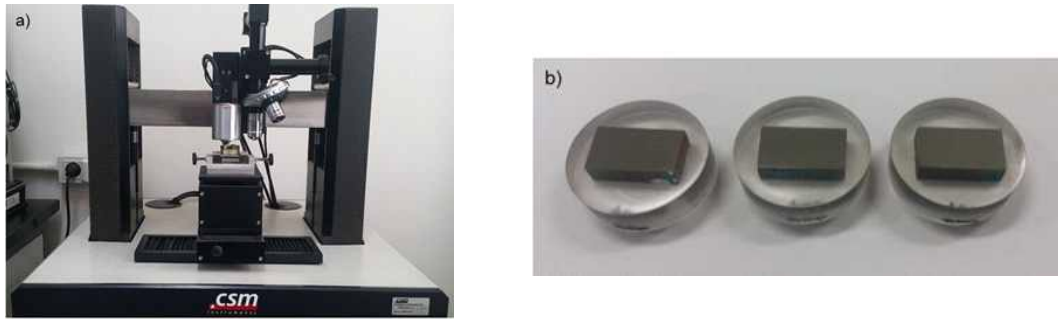
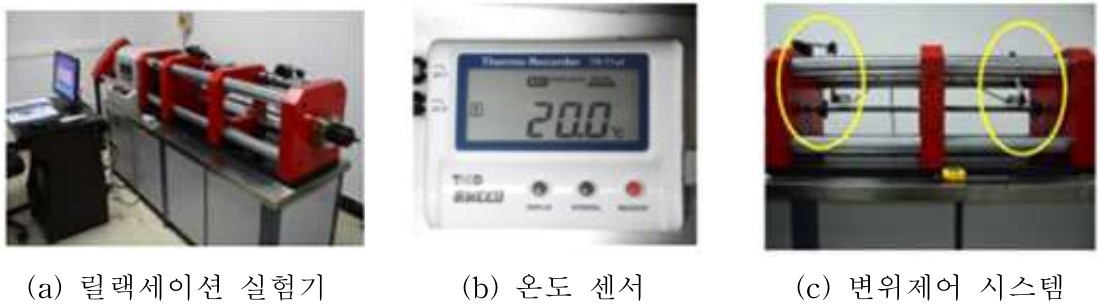


그림14. 나노압입 실험 시스템 (a)나노압입기, (b)실험 시편

- A2. 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증

Step7 케이블 강재의 릴랙세이션 실험 수행

- 릴랙세이션 실험은 제안된 알고리즘으로부터 추정된 결과를 검증하기 위해 케이블 강재에서 수행할 것임



(a) 릴랙세이션 실험기

(b) 온도 센서

(c) 변위제어 시스템

그림15. 릴랙세이션 실험 시스템

Step8 실험결과를 회귀분석하여 응력 릴랙세이션 방정식 결정

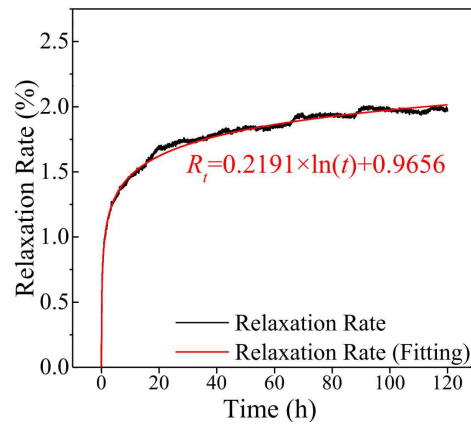


그림16. 실험결과를 통한 응력 릴랙세이션 방정식 결정 (예시)

Step9 나노압입에 의해 결정된 응력 릴랙세이션 방정식과 비교 검증

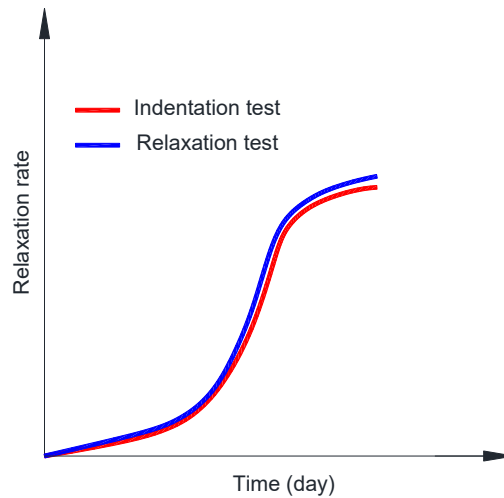


그림17. 제안된 모델의 결과와 릴랙세이션 실험의 비교

✓ 위탁연구기관 (경남대학교)

Step6 역 알고리즘을 사용하여 릴랙세이션 속도-시간 관계 도출

- 10가지 하중에서 릴랙세이션 속도를 추정하는 역 알고리즘을 제안할 것임
- FE해석결과와 압입 반응 결과로부터, 차원 해석을 사용하여 역 알고리즘을 제안할 것임
- 하중에 대한 릴랙세이션 속도는 압입결과로부터 결정할 수 있음

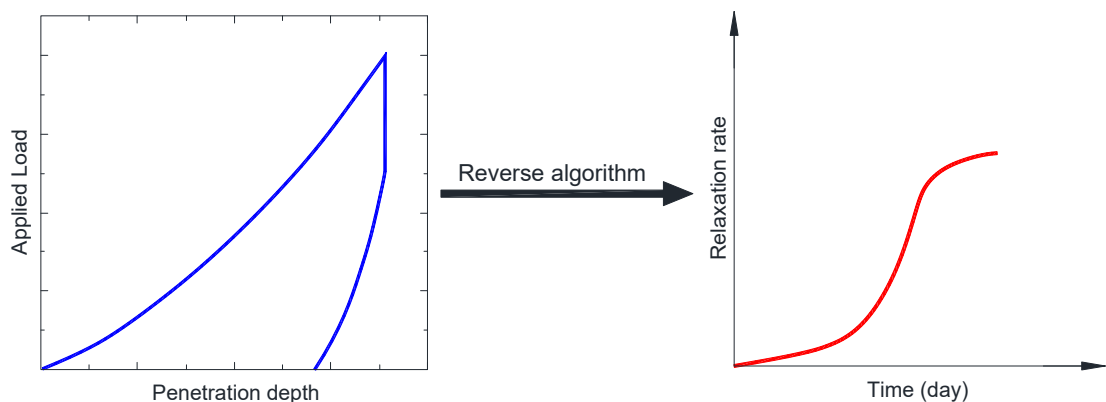


그림18. 제안된 역 알고리즘의 원리

(다) 2차년도 주요 연구내용

■ 개발목표 : B. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 장기거동을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발

✓ 주관연구기관 (세종대학교)

- 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립
- 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동

✓ 위탁연구기관 (경남대학교)

- 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발

■ 개발 내용 및 범위

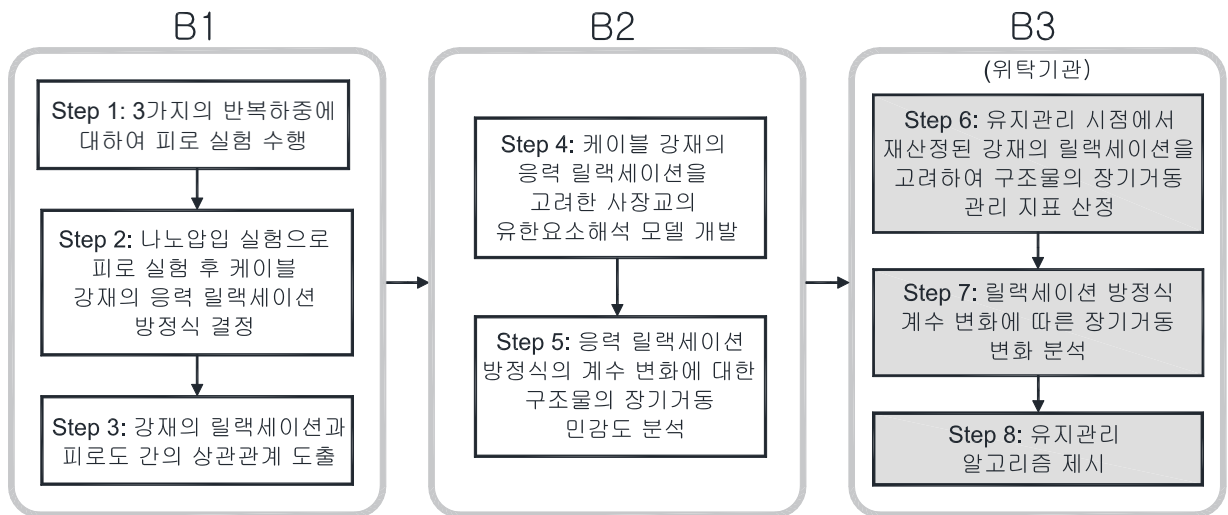


그림19. 2차년도 개발 흐름도

✓ 주관연구기관 (세종대학교)

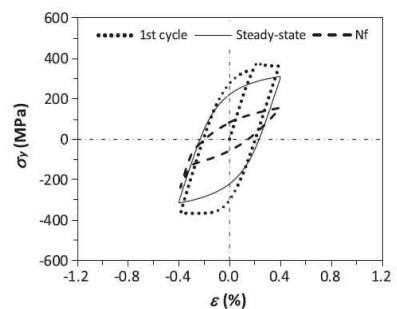
- B1. 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립

Step1 3가지의 반복하중에 대하여 피로 실험 수행

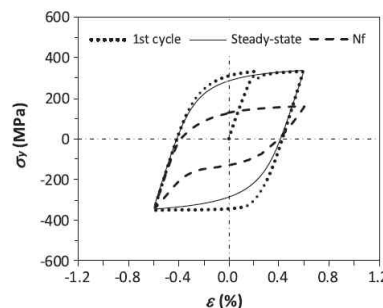
- 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도의 관계를 수립할 것임
- 피로 실험은 3가지의 반복하중(예: 500, 2,000 및 10,000)에 대하여 수행할 것임



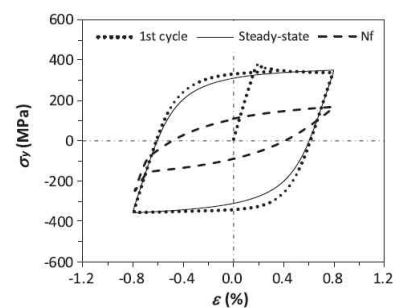
(a) 피로 실험 시스템



(b) 반복하중 500일 때의 응력-변형률 선도



(c) 반복하중 2,000일 때의 응력-변형률 선도



(d) 반복하중 10,000일 때의 응력-변형률 선도

그림20. 피로 실험 시스템 및 응력-변형률 선도 (예시)

Step2 나노압입 실험으로 피로 실험 후 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정

- 나노압입 실험에 의한 피로 실험 후 강재의 릴랙세이션 방정식을 결정할 것임
- 피로 실험 후 시편은 3가지 반복하중 하에서 피로 실험을 실시한 후 각 시편의 중간 부분을 절단함
- 이 압입 시편들은 폴리 다이아몬드 입자, 탄화 규소 종이 및 콜로이드 실리카를 사용하여 연마하며, 7단계의 연마공정을 거쳐서 최종적으로 40nm의 표면 정밀도로 가공됨

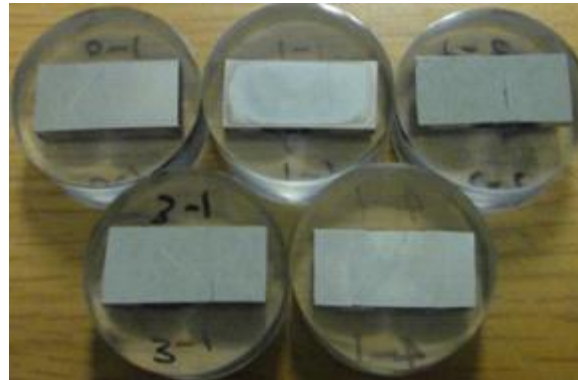


그림21. 나노압입 실험을 위한 피로 파괴 시편

- 시편의 표면에서 압입실험을 수행하여 하중-깊이 곡선 관계를 측정할 것임
- 결론적으로 응력 릴랙세이션-시간 관계는 이전의 A1-Step5를 이용하여 결정할 것임
- 회귀분석을 통해 $RR_t = a(1 - e^{-t/t_r})$, $RR_t = 100\%(\sigma_t - \sigma_0)/\sigma_0$ 와 같은 멱법칙 방정식 (power-law equation)을 도출하며, 응력 릴랙세이션-시간 관계로부터 실험 값과 맞출 것임

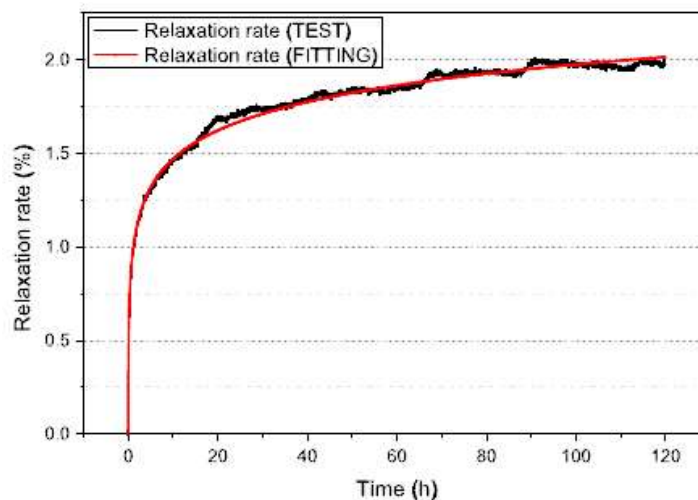
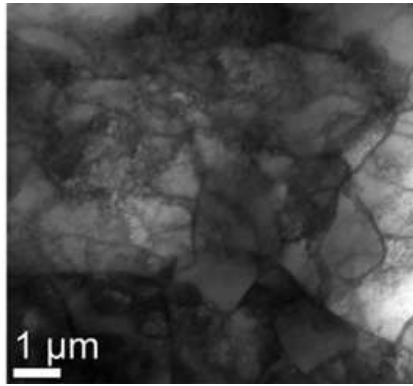
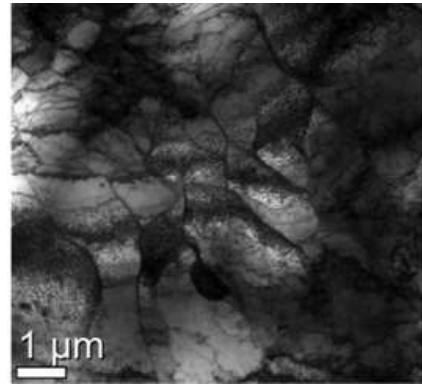


그림22. 응력 릴랙세이션 방정식의 결정

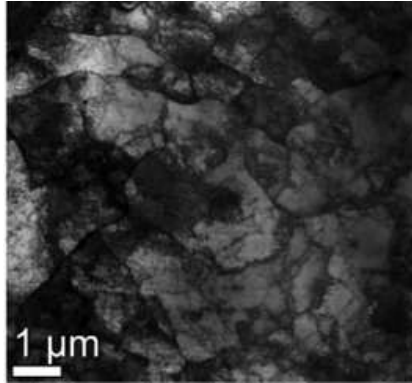
- 3가지의 반복하중에 대한 응력 릴랙세이션 방정식을 수립할 것임
- 피로 파괴 시편은 SEM(scanning electron microscope)과 TEM(transmission optical microscope)을 사용하여, 미세구조 변화를 관찰할 것임
- 다른 피로조건 하에서 응력 릴랙세이션 방정식의 변화를 분석하기 위하여 마이크로 메커니즘을 사용할 것임



(a) 반복하중 500일 때의 미세구조



(b) 반복하중 2,000일 때의 미세구조



(c) 반복하중 10,000일 때의 미세구조

그림23. 피로 실험을 통한 미세구조 변화 (예시)

Step3 강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 상관관계 도출

- 각 경우의 반복하중 하에서 압입곡선과 응력 릴랙세이션 방정식을 도출하기 위해 압입실험은 3가지 피로 파괴 시편의 표면에서 수행할 것임
- 이 방정식들은 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 관계를 조사하는데 사용될 것임
- 응력 릴랙세이션-시간 곡선의 형태와 크기에 영향을 미치는 반복하중 효과를 분석할 것임

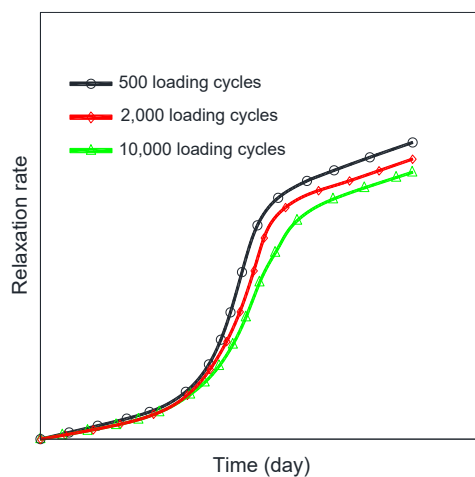


그림24. 강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 관계

- B2. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석

Step4 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 사장교의 유한요소해석 모델 개발

- 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동을 분석할 것임
- 유한요소해석/PAAP를 사용하여 응력 릴랙세이션 방정식을 만족하는 사장교를 모델링 할 것임
- ABAQUS 6.14 상용 소프트웨어/PAAP 프로그램은 응력 릴랙세이션 방정식을 고려하여 사장교의 구조를 분석하는데 사용될 것임

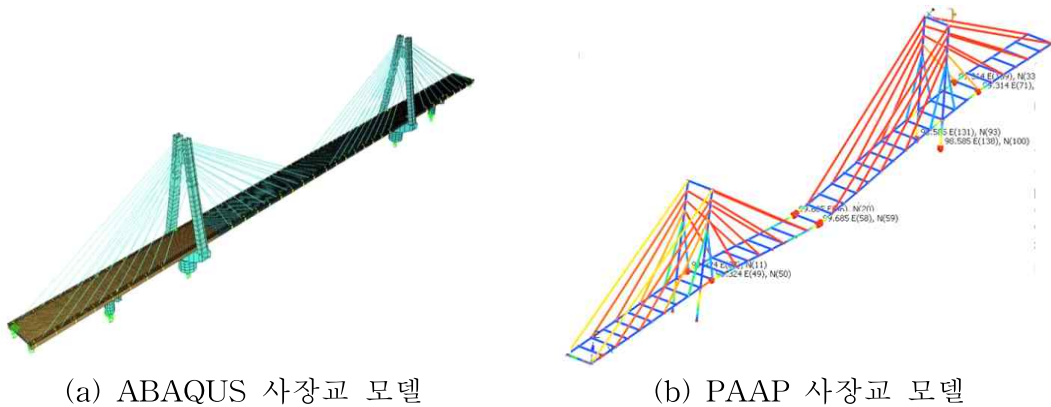


그림25. 사장교 모델

Step5 응력 릴랙세이션 방정식의 계수 변화에 대한 구조물의 장기거동 민감도 분석

- 응력 릴랙세이션 방정식 매개변수를 변경하여 구조물의 장기거동에 대한 민감도 분석을 할 것임

✓ 위탁연구기관 (경남대학교)

- B3. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발

Step6 유지관리 시점에서 재산정된 강재의 릴랙세이션을 고려하여 구조물의 장기거동 관리 지표 산정

- 구조물 설계 시 강재의 릴랙세이션을 고려하여 산정된 구조물의 장기거동 관리 지표(처짐, 내하력, 케이블 하중 등)에 대하여 해당 시점에서 재산정된 강재의 릴랙세이션을 고려하여 구조물의 장기거동 관리 지표를 산정할 것임
- 설계 시 산정된 관리지표와 업데이트된 관리 지표를 비교하여 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리에 활용할 수 있음

Step7 릴랙세이션 방정식 계수 변화에 따른 장기거동 변화 분석

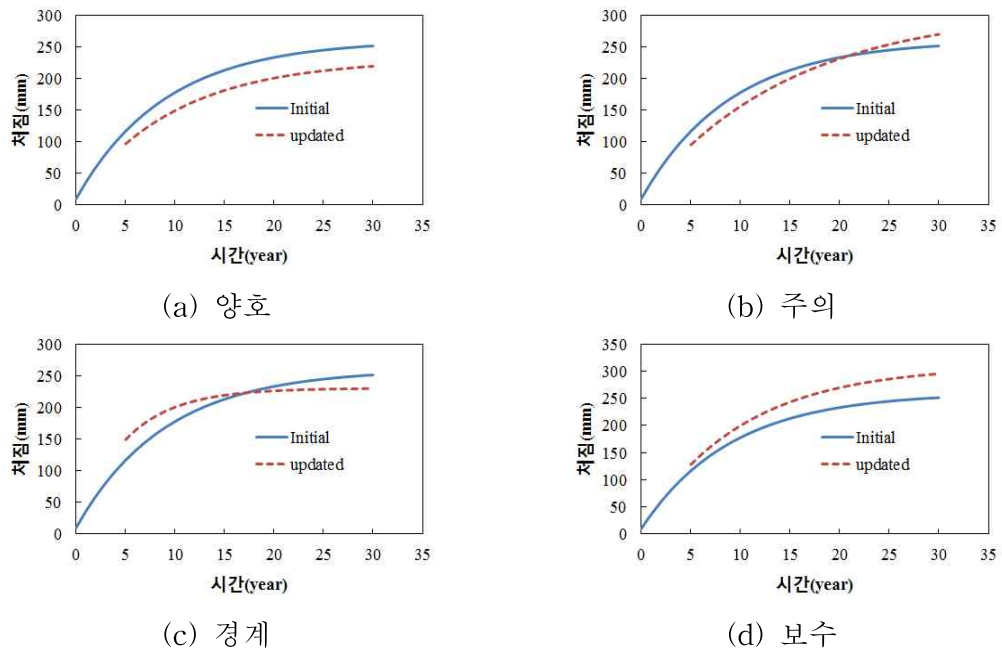


그림26. PSC 보의 처짐에 대한 구조물 유지관리 지표 예

- 구조물 유지관리 알고리즘으로 활용, 비교 결과에 따라 구조물 상태를 ‘양호’, ‘주의’, ‘경계’, ‘보수’로 구분할 것임
- 구조물 상태 내에서 예측값의 차이에 따라 3단계로 세분화 하여 구조물 유지관리 지표로 활용할 것임
- 그림26 (a)의 경우는 ‘양호’로 판정하며, 30년 예측값의 차이에 따라 ‘매우 양호’, ‘보통 양호’, ‘약간 양호’로 세분화하여 관리할 것임

Step8 유지관리 알고리즘 제시

- 유지관리 알고리즘을 도출하는 과정은 아래와 같음



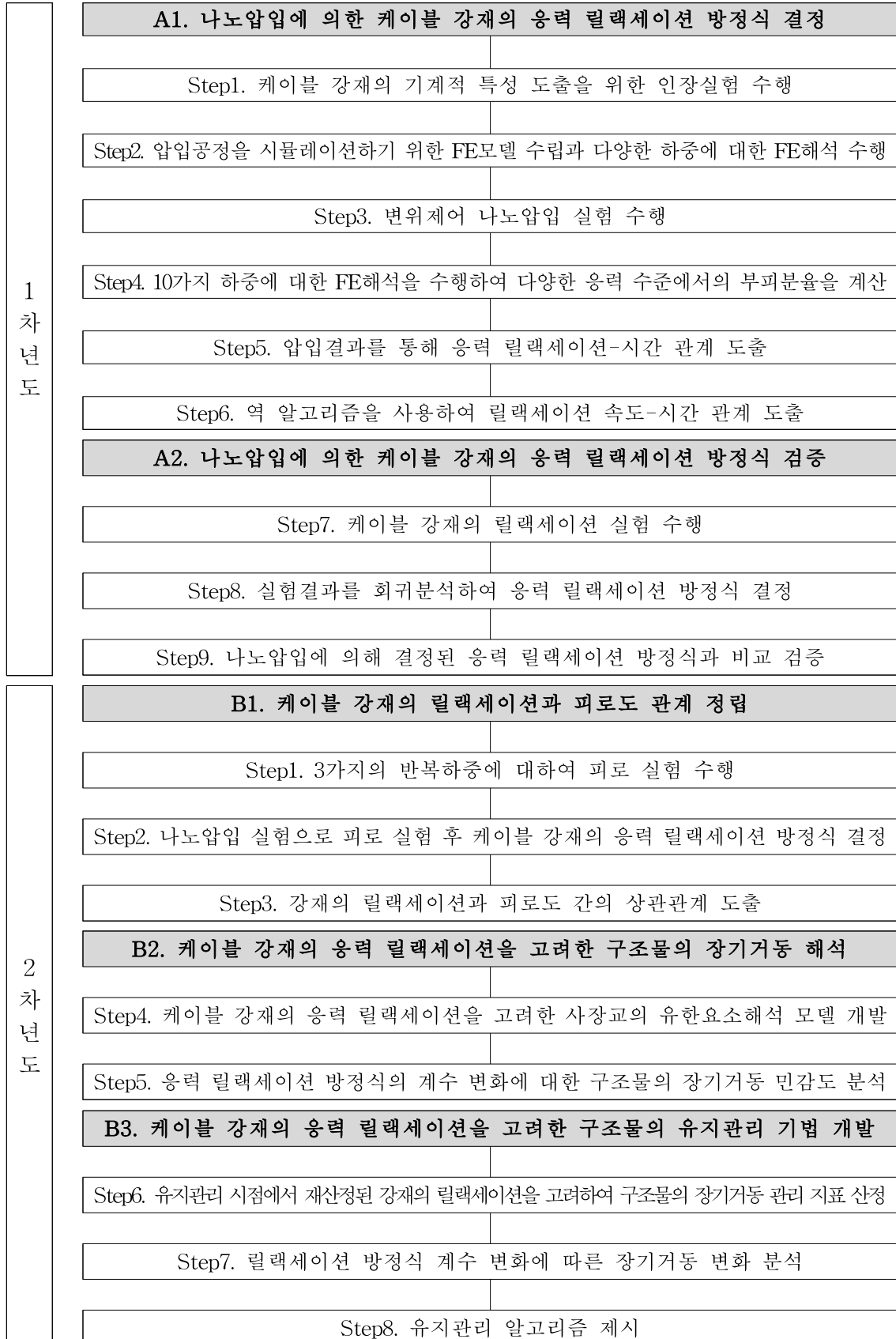
그림27. 유지관리 알고리즘 도출 과정

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구성과별 세부추진내용

(1) 연구개발 흐름도

- 본 연구는 실험적 증명 단계로써, 연구개발 흐름도는 아래와 같음



(2) 연구개발 단계에 따른 세부연구내용

기간	단계별 주요 연구활동	세부추진내용
A1. (’19.04 -’19.10)	Step1. 케이블 강재의 기계적 특성 도출을 위한 인장실험 수행	• 실험을 위한 3개 시편제작 • 3개 케이블 시편의 인장실험 수행
	Step2. 압입공정을 시뮬레이션 하기 위한 FE모델 수립과 다양한 하중에 대한 FE해석 수행	• 압입공정의 FE 시뮬레이션 모델 제안 • 다른 모양의 인덴터 팁(Indenter tip)을 가진 압입공정의 3-D 유한요소모델 제안
	Step3. 변위제어 나노압입 실험 수행	• 나노압입 실험을 위한 5개 시편제작(수압절단) • 나노압입 시편 진처리 수행 • 나노압입 실험 수행
	Step4. 10가지 하중에 대한 FE 해석을 수행하여 다양한 응력 수준에서의 파괴분율을 계산	• 10mN~300mN의 10가지 하중에 대한 유한요소해석 수행
	Step5. 압입결과를 통해 응력 릴랙세이션-시간 관계 도출	• 나노압입 결과 해석 • 압입반응으로부터 응력 릴랙세이션 추정하는 방법 제안
	Step6. 역 알고리즘을 사용하여 릴랙세이션 속도-시간 관계 도출	• 응력 릴랙세이션 방정식 도출 • 릴랙세이션 속도 도출을 위한 알고리즘 제안
A2. (’19.07 -’19.12)	Step7. 케이블 강재의 릴랙세이션 실험 수행	• 릴랙세이션 실험방법 연구 • 인장강도의 70%, 60%, 50%의 응력에 대한 3번의 릴랙세이션 실험 수행
	Step8. 실험결과를 회귀분석하여 응력 릴랙세이션 방정식 결정	• 회귀분석을 통해 케이블 강재의 릴랙세이션 실험 결과 해석
	Step9. 나노압입에 의해 결정된 응력 릴랙세이션 방정식과 비교 검증	• 릴랙세이션 실험과 나노압입 결과로부터 도출한 릴랙세이션 속도 비교 검증 수행

B1. (’20.01 -’20.06)	Step1. 3가지의 반복하중에 대하여 피로 실험 수행	3가지의 반복하중에 대해 피로 실험 수행 - 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도의 관계 수립
	Step2. 나노압입 실험으로 피로 실험 후 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정	- 나노압입 실험을 수행하여 하중-깊이 곡선 관계 측정 3가지의 반복하중에 대한 응력 릴랙세이션 방정식 수립 - SEM과 TEM을 사용하여, 미세구조 변화 관찰
	Step3. 강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 상관관계 도출	응력 릴랙세이션-시간 곡선의 형태와 크기에 영향을 미치는 반복하중 효과 분석
B2. (’20.07 -’20.09)	Step4. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 사장교의 유한요소해석 모델 개발	- 케이블 응력 릴랙세이션을 위한 유한요소 (FE) 모델을 개발 - ABAQUS에서 일반화 된 Maxwell 모델을 사용하여 실험에서의 응력 릴랙세이션을 모델링 - 강사장교의 구조 부재에서 응력 재분배를 평가하기 위해 사장교의 케이블 응력 릴랙세이션을 위한 FE모델을 적용
	Step5. 응력 릴랙세이션 방정식의 계수 변화에 대한 구조물의 장기거동 민감도 분석	강사장교의 장기거동에 대한 응력 릴랙세이션 방정식의 일부 계수의 효과를 평가
B3. (’20.07 -’20.12)	Step6. 유지관리 시점에서 재산정된 강재의 릴랙세이션을 고려하여 구조물의 장기거동 관리 지표 산정	- 릴랙세이션 함수 결정 - 릴랙세이션 함수를 고려한 구조물의 유한요소 해석으로 시간에 따른 처짐량 산정 - 산출된 처짐결과와 비교하여 유지관리지표 산출
	Step7. 릴랙세이션 방정식 계수 변화에 따른 장기거동 변화 분석	- 구조물 상태 내에서 예측값의 차이에 따라 3단계로 세분화 - 계산 예제 제시
	Step8. 유지관리 알고리즘 제시	유지관리 알고리즘 도출 및 제시

나. 단계별 연구수행 내용

(1) 주요 연구내용

A. 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 도출 기법 개발

A1. 나노 압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정

Step1 케이블 강재의 기계적 특성 도출을 위한 인장실험 수행

- 이 연구의 주요 목표를 달성하기 위해 케이블 강재의 중요한 물질 특성을 얻기 위한 정적 인장실험을 수행
- 이 실험은 ZWICK Z600E 기계를 사용하여 수행
- 공학적 응력-공학적 변형 곡선은 그림28과 표2와 같이 기록됨
- 실험을 수행한 후 결과는 직경이 $7mm$ 에서 $6.91mm$ 로 감소한 것으로 나타났으며 또한 파단 위치에서 단면은 $38.48mm^2$ 에서 $37.54mm^2$ 로 감소
- POSCABLE-86 강재는 탄성계수 $193.59GPa$, 항복 응력 $1,768MPa$ 및 인장강도 $1,896GPa$ 임
- 이러한 물질 특성은 압입 공정의 유한요소해석을 수행하는데 필요함

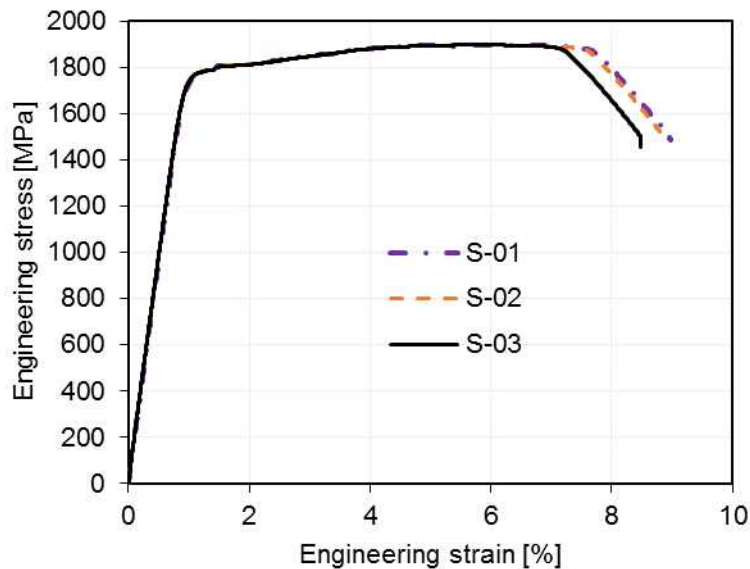


그림28. 인장실험에서 얻은 엔지니어링 응력-엔지니어링 변형 곡선

표2. 정적 인장실험에서 얻은 케이블 강재의 물질 특성

	Length of gage (mm)	Original D (mm)	Diameter (mm)	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)
S-01	100	7.0	6.91	190.41	1,767.78	1,896.60
S-02	100	7.0	6.91	195.75	1,765.71	1,895.66
S-03	100	7.0	6.91	194.61	1,768.53	1,895.79
Average	100	7.0	6.91	193.59	1,767.34	1,896.02

Step2

압입공정을 시뮬레이션하기 위한 FE모델 수립과 다양한 하중에 대한 FE 해석 수행

- 인텐터 팁(indenter tip) 아래 물질의 응력 상태를 조사하기 위해 유한요소(FE)해석을 이용하여 압입 공정을 시뮬레이션
- 표2에서 조사 된 물질의 기계적 특성은 압입 실험의 FE 모델의 입력 데이터로 사용
- 예상되는 깊이의 면적은 그림29와 같이 70.3°의 반정점(SEMI-APICAL) 각도를 갖는 표준 베르코비치 인텐터 팁(Berkovich indenter tip)으로 작용
- 문헌 [14]는 원뿔형과 베르코비치 인텐터 팁(Berkovich indenter tip)의 하중 변위 반응이 마이크로 또는 나노 스케일에서 거의 동일하다는 것을 입증
- 이 연구에서 분석의 복잡성과 해석시간을 줄이기 위해 2D 원추형 인텐터 팁(conical indenter tip)을 사용하여 그림30과 같이 압입 공정을 시뮬레이션
- 제안된 모델의 정확성에 대한 입증은 이전 작업 [15]에서 수행되었거나 문헌 [14, 16]에서 찾을 수 있음
- 대칭 조건을 고려하여 압입 실험을 시뮬레이션하기 위해 축 대칭 2차원 FE모델을 개발
- 매트릭스는 8576개의 4-노드 이선 축대칭 사변형 요소(four-node bilinear axisymmetric quadrilateral elements)를 사용하여 모델링
- 접촉 영역 근처의 미세한 메시와 접촉 영역에서 더 멀리 떨어진 점진적으로 굵은 메시는 수치 정확도를 보장하고 계산 시간을 절약하기 위해 설계
- 최대하중에서 접촉 영역의 최소 접촉 요소 수는 각 FE 해석에서 반드시 20개 이상의 요소를 갖도록 해야 함
- 기하학적 경계 조건은 아래와 같이 적용됨
- Y축 (회전 축)을 따라 있는 노드는 축 자체를 따라서만 움직일 수 있으며 모든 노드는 메시 하단에 고정되어있음
- 압입은 움직일 수 있는 강체 면으로 모델링 되었고 압입과 매트릭스 표면 사이의 접촉은 마찰이 없는 것으로 가정 [14]
- 변위 제어로 압입 공정이 수행되었기 때문에 가력(loading)과 제력(unloading) 단계는 다음과 같이 설계
- 적용 하중은 30초만에 최대하중까지 증가한 후 0에 해당하는 초기 위치로 돌아감

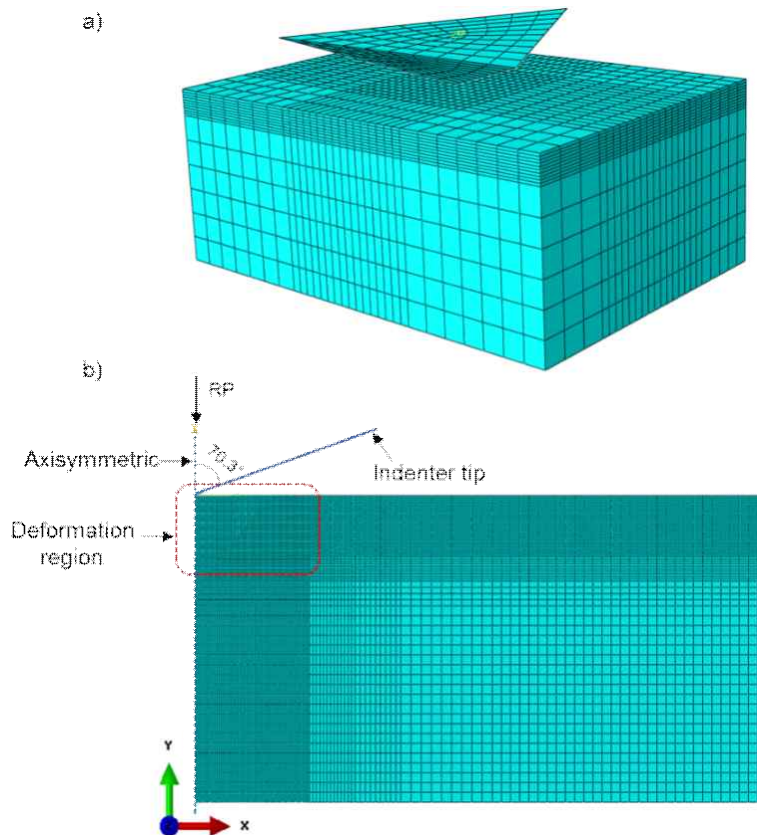


그림29. a) 베르코비치 인덴터 팁(Berkovich indenter tip)의 3D FE모델
b) 베르코비치 팁(Berkovich tip)에 70.3°에 해당하는 반각 양상을 갖는
원뿔형 인덴터 팁 (indenter tip)의 FE모델

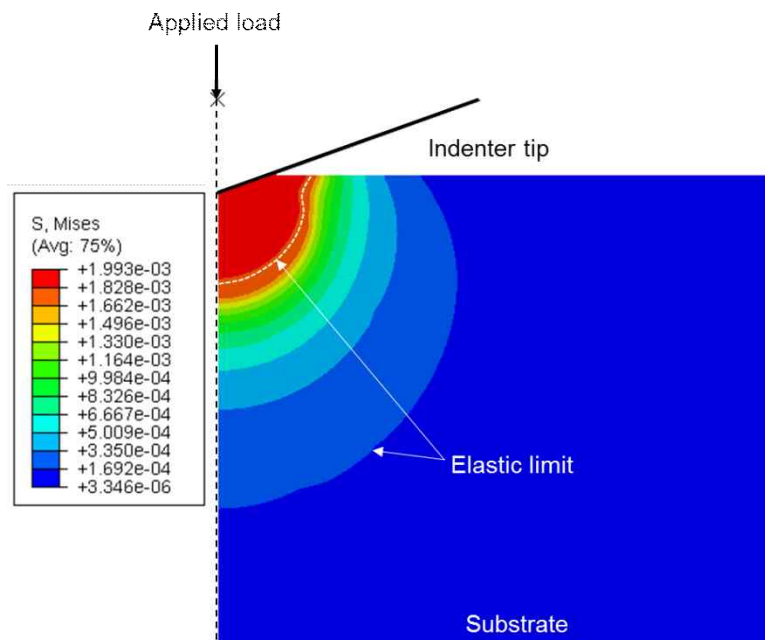


그림30. ABAQUS 소프트웨어를 이용하여 압입 공정의 FE 시뮬레이션

Step3 변위 제어 나노압입 실험 수행

- 응력 수준 추정에 대한 또 다른 중요한 입력 데이터는 나노압입을 이용하여 가력 (loading) 및 제력(unloading) 과정 동안 압입의 전체 릴랙세이션 손실을 결정하는 것임
- 압입 실험은 표3에 나열된 해당하는 적용 하중으로 상온에서 수행
- 압입 실험 동안 모든 적용 하중에 대해 300mN/min의 가력(loading) / 제력(unloading) 속도와 1,000초의 유지시간이 설정됨
- 그림31과 같이 압입 반응이 잘 기록됨
- 최대 변위 h_m , 최대 하중 P_m , 접촉 강성 S 와 하중 유지단계에서 감소 된 하중 변화량 $\Delta P(t)$ 같은 압입 매개변수를 기반으로 압입 응력 σ_{ind} 는 최대 하중을 접촉면적으로 나눈 값으로 정의할 수 있음 [17]
- 릴랙세이션으로 인해 하중 유지시간이 0초에서 1,000초로 증가할 때 하중 유지단계에서의 압입 응력은 감소하는 것을 관찰
- 각 하중에 대한 시간 t 에서의 릴랙세이션 속도 $R(t)$ 는 다음과 같이 계산됨

$$R(t) = \frac{\sigma_0 - \sigma(t)}{\sigma_0} \quad (3)$$

- 식(3)에서 σ_0 와 $\sigma(t)$ 는 각각 초기 응력과 시간 t 에서의 응력을 나타냄
- 그림32에 적용된 하중 수준에 대한 감소 된 응력과 시간 사이의 관계를 나타냄
- 압입 응력 손실과 시간 사이의 관계는 로그함수인 $R^{ind}(t) = a \ln(t) + b$ 를 사용하여 설명되었으며, 여기서 a 와 b 는 상수 매개변수임

표3. 초기응력수준에 대한 부피분율 계산

	10mN	20mN	50mN	70mN	100mN	120mN	150mN	170mN	200mN	250mN
$0.95f_u$	0.0348	0.0350	0.0360	0.0355	0.0360	0.0372	0.0380	0.0382	0.0389	0.0406
$0.8f_u$	0.0049	0.0034	0.0033	0.0037	0.0036	0.0036	0.0042	0.0038	0.0038	0.0039
$0.7f_u$	0.0038	0.0048	0.0046	0.0043	0.0043	0.0046	0.0046	0.0049	0.0049	0.0050
$0.6f_u$	0.0055	0.0052	0.0058	0.0061	0.0058	0.0062	0.0067	0.0062	0.0065	0.0067
$0.5f_u$	0.0086	0.0082	0.0083	0.0085	0.0088	0.0093	0.0092	0.0092	0.0090	0.0098
$0.4f_u$	0.0129	0.0127	0.0136	0.0131	0.0135	0.0138	0.0144	0.0135	0.0147	0.0151
$0.3f_u$	0.0216	0.0232	0.0233	0.0245	0.0242	0.0242	0.0226	0.0255	0.0251	0.0257
$0.15f_u$	0.9079	0.9076	0.9051	0.9044	0.9037	0.9012	0.9004	0.8987	0.8970	0.8931

표4. 여러 적용 하중에 대한 압입 응력 손실 계산

	50mN	70mN	100mN	120mN	150mN	170mN	200mN	250mN
Parameter	0.74223	0.74177	0.74131	0.73967	0.7392	0.7381	0.7369	0.7344
Parameter	7.44927	7.4445	7.43997	7.42318	7.4184	7.4071	7.3956	7.3699

* a 와 b 의 값은 표4에 나열된 회귀분석을 수행하여 결정

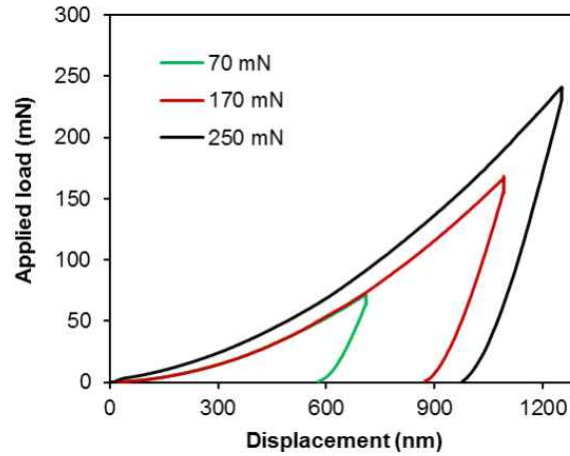


그림31. 릴랙세이션 모드를 사용하여 압입 실험에서 측정된 P-h 곡선

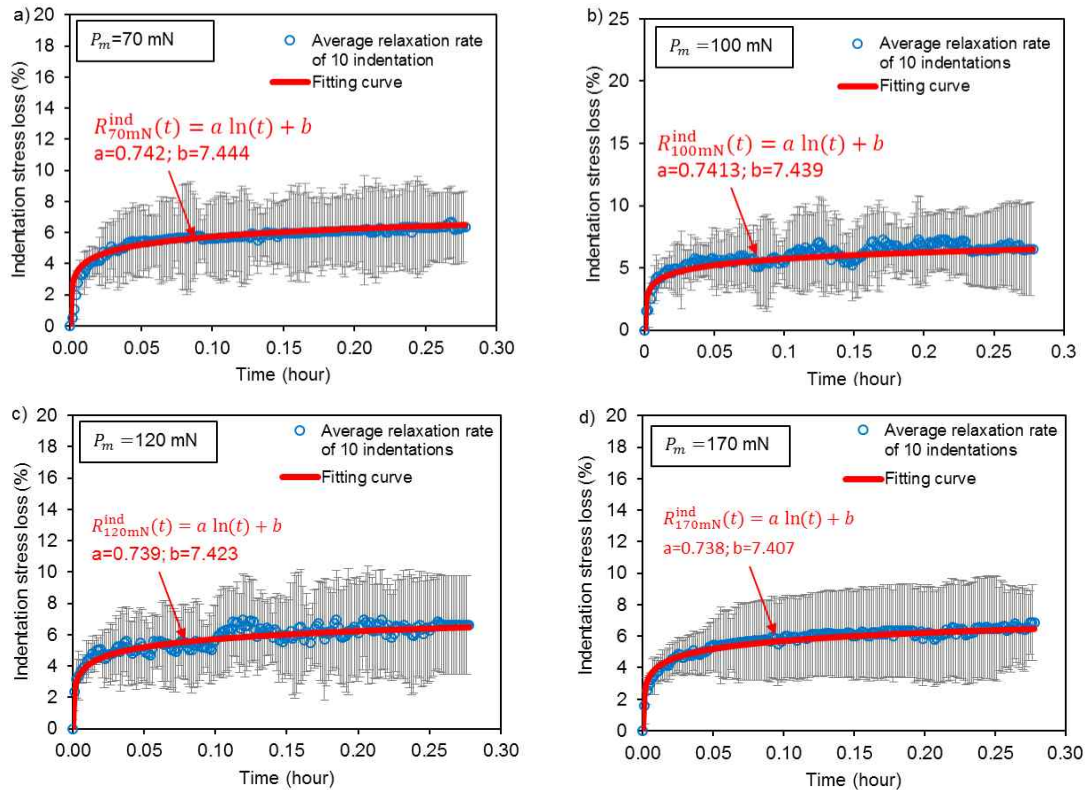


그림32. (a) 70mN의 P_{max} , (b) 100mN의 P_{max} , (c) 120mN의 P_{max} , (d) 170mN의 P_{max} 에 대한 압입 반응으로부터 압입 응력 손실 추정 (대수 공식은 적용된 하중 수준의 모든 경우에 대한 압입 응력 손실을 설명하는데 사용, 각 경우에 대한 실험데이터는 10개의 압입에서 계산된 평균값임)

- 가력(load) / 유지(holding) / 제력(unloading) 곡선을 포함하는 압입 곡선 간의 차이는 그림31에 나와 있음

Step4 10가지 하중에 대한 FE해석을 수행하여 다양한 응력 수준에서의 파괴분율을 계산

- 적용된 하중 수준에서의 릴랙세이션 속도와 인덴터 팁(indenter tip) 아래의 응력 단계 사이의 관계를 나타내는 10개의 방정식을 구성하기 위해서 10개의 적용된 하중 수준 (예를 들어, 10mN, 20mN, 50mN, 70mN, 100mN, 120mN, 150mN, 170mN, 200mN, 250mN)에 대해 FE해석 수행
- 그림30에서 인덴터 팁 (indenter tip) 아래의 응력 단계가 매우 복잡하고 여러 응력 수

준으로 나눌 수 있음을 알 수 있음.

- f_u 에서 $0.85f_u$ 까지 응력 범위 구간은 $0.9f_u$, $0.75f_u$ 에서 $0.85f_u$ 까지 응력 범위 구간은 $0.8f_u$, $0.65f_u$ 에서 $0.75f_u$ 까지 응력 범위 구간은 $0.7f_u$, $0.65f_u$ 에서 $0.55f_u$ 까지 응력 범위 구간은 $0.6f_u$, $0.45f_u$ 에서 $0.55f_u$ 까지 응력 범위 구간은 $0.5f_u$, $0.35f_u$ 에서 $0.45f_u$ 까지 응력 범위 구간은 $0.4f_u$, $0.25f_u$ 에서 $0.35f_u$ 까지 응력 범위 구간은 $0.3f_u$, $0.0f_u$ 에서 $0.25f_u$ 까지 응력 범위 구간은 $0.15f_u$ 라고 가정
- 응력 단계는 각 응력 수준의 부피분율을 결정하기 위해 2D로 표현
- 계산은 몇 가지 적합한 소프트웨어를 사용하여 수행되었으며 그 결과는 그림33에 나와 있음

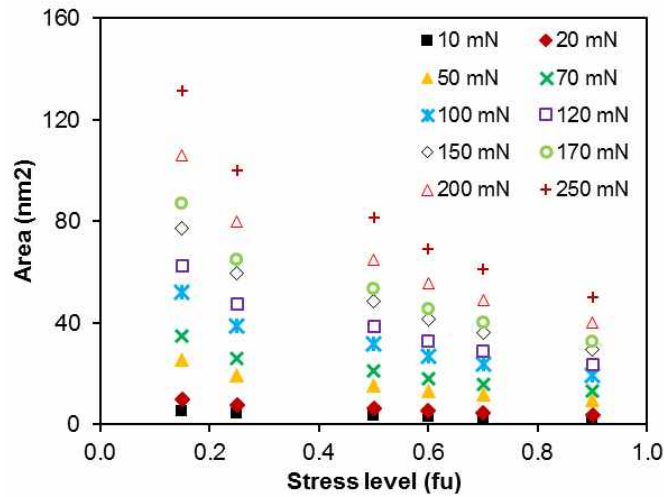


그림33. 응력-면적 관계

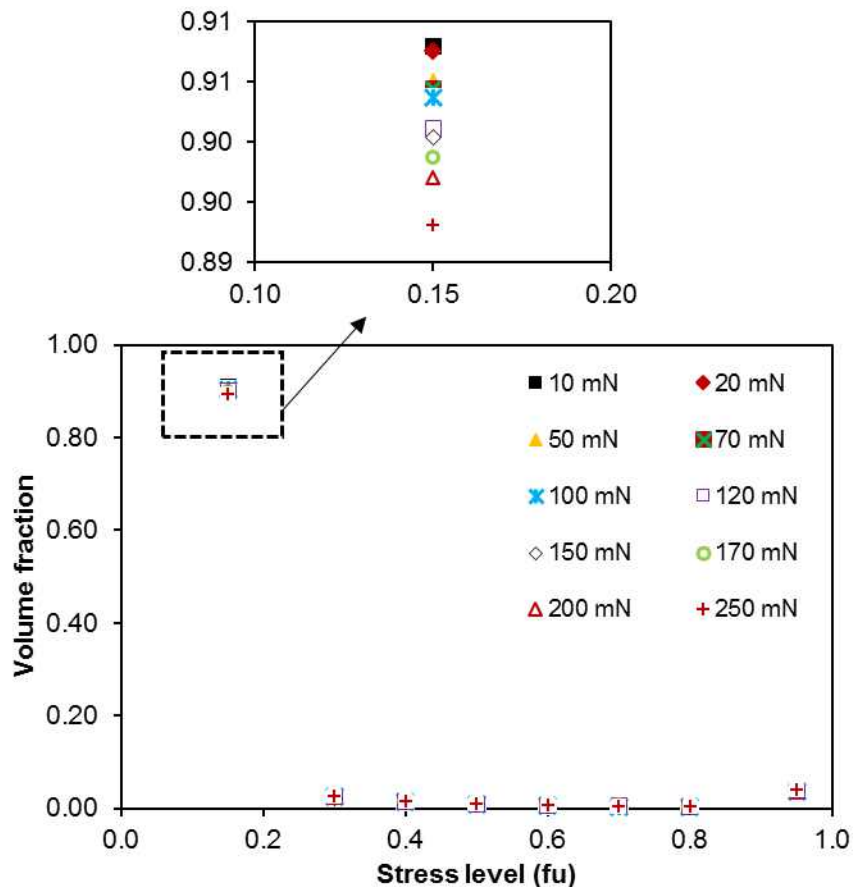


그림34. 응력수준에 따른 부피분율

- 여러 적용된 하중 수준에 대한 면적 및 부피분율의 결과를 그림33-34 및 표3에 나타냄
- 이러한 부피분율은 $0.95f_u$, $0.8f_u$, $0.7f_u$, $0.6f_u$, $0.5f_u$, $0.4f_u$, $0.3f_u$ 및 $0.15f_u$ 와 같은 여러 응력 수준의 릴랙세이션 속도를 결정하는데 더 유용함

Step5 압입결과를 통해 응력 릴랙세이션-시간 관계 도출

- 표3에 나열된 부피분율과 그림32의 압입 실험에서 릴랙세이션 속도를 기반으로 10개의 방정식이 아래와 같이 구성

$$\sum_{i=1}^N V_{i,j}^{FE} R_i^E(t) = R_j^{ind}(t) \quad (4)$$

- 여기서 N , $V_{i,j}^{FE}$ 와 $R_i^E(t)$ 는 각각 von Mises 응력 상태에서 분할된 응력 수준의 수, 부피분율 및 응력 수준 i 의 릴랙세이션 속도임
- 모든 응력 수준의 부피분율의 합은 1과 같아야함 ($\sum_{i=1}^N V_{i,j}^{FE} = 1$)
- 그렇지 않으면, 위와 같이 식(4)를 쓸 수 있음

$$\begin{aligned} & V_{95\%,j}^{FE} R_{95\%}^E(t) + V_{80\%,j}^{FE} R_{80\%,j}^E(t) + V_{70\%,j}^{FE} R_{70\%}^E(t) + V_{60\%,j}^{FE} R_{60\%}^E(t) + V_{50\%,j}^{FE} R_{50\%}^E(t) \\ & + V_{40\%,j}^{FE} R_{40\%}^E(t) + V_{30\%,j}^{FE} R_{30\%}^E(t) + V_{15\%,j}^{FE} R_{15\%}^E(t) = R_j^{ind}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

- 식(5)에서의 j 는 적용된 하중 수준이며, $V_{70\%,j}^{FE}$ 와 $R_{70\%}^E(t)$ 은 각각 적용된 하중인 j 에 대한 $0.7f_u$ 응력 수준에서 산정되는 부피분율 및 릴랙세이션 속도임
- 적용된 각각의 하중 수준에 따라 $R_j^{ind}(t)$ 는 릴랙세이션 모드를 사용한 압입 실험에서 기록된 압입 반응을 기반으로 결정될 수 있음
- $V_{i,j}^{FE}$ 는 압입 과정을 시뮬레이션하여 FE해석을 통해 결정
- 식(5)에 알려지지 않은 8개의 $R_i^E(t)$ 이 있기 때문에, 알려지지 않은 릴랙세이션 속도 $R_i^E(t)$ 를 결정하기 위해 해당하는 8개의 하중에 대해 최소 8개의 릴랙세이션 방정식을 구성해야 함
- 이 방정식은 압입 곡선의 특성, 부피분율 및 하중 수준의 릴랙세이션 속도 간의 관계를 보여줌

Step6 역 알고리즘을 사용하여 릴랙세이션 속도-시간 관계 도출

- 각 응력 수준에 대한 릴랙세이션 속도를 결정하기 위해 회귀분석을 수행
- 릴랙세이션 속도를 산정하는 과정이 그림35에서 제안함
- 본 연구의 주요 목적은 여러 응력 수준의 릴랙세이션 속도를 추정하는 것이기 때문에 그림35와 같은 알고리즘을 제안
- 제안된 알고리즘은 릴랙세이션 모드에서 10개의 적용된 하중에 대한 압입 실험을 수행하는 것으로 시작함
- 각각의 적용된 하중에 대한 릴랙세이션 속도가 도출되고, $R_i(t) = a \ln(t) + b$ 와 같은 로그 함수를 사용하여 실험 시간에 따른 릴랙세이션 속도 방정식을 도출
- 각각의 적용된 하중에 대한 부피분율을 결정하기 위해 FE해석을 수행
- 10개의 방정식 도출
- 회귀분석을 통해 다른 응력 수준에 대한 릴랙세이션 속도가 결정됨

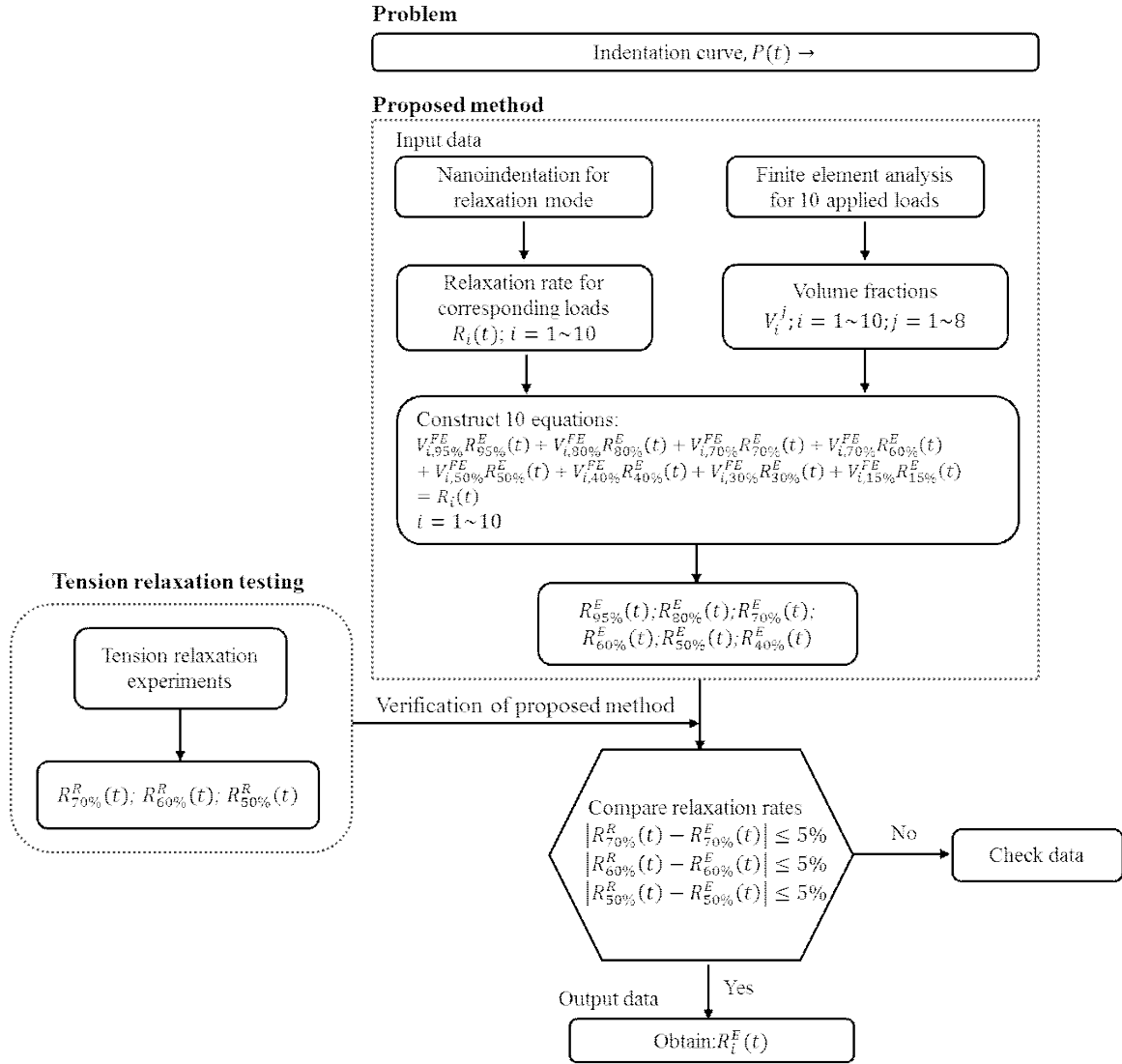


그림35. 나노 압입 실험을 통한 릴랙세이션 속도 산정 알고리즘

- 제안한 방법의 정확도를 판단하기 위해 초기 응력 $0.7f_u$, $0.6f_u$, $0.5f_u$ 에 대한 인장 릴랙세이션 실험을 수행
- 인장 릴랙세이션 실험으로부터 얻은 릴랙세이션 속도와 나노 압입을 통해 도출된 릴랙세이션 모델을 비교하고, 상대오차를 계산
- 상대 오차가 5%보다 작으면 릴랙세이션 속도가 정확하다고 판단하고, 상대 오차가 5%보다 크면 초기 데이터의 확인이 필요

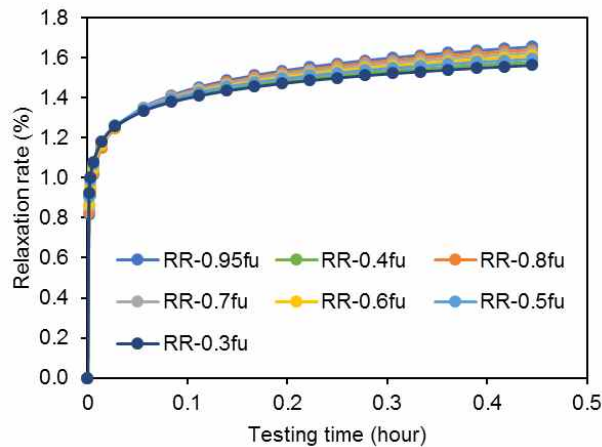


그림36. 다양한 응력 수준에 대한 릴랙세이션 속도 추정

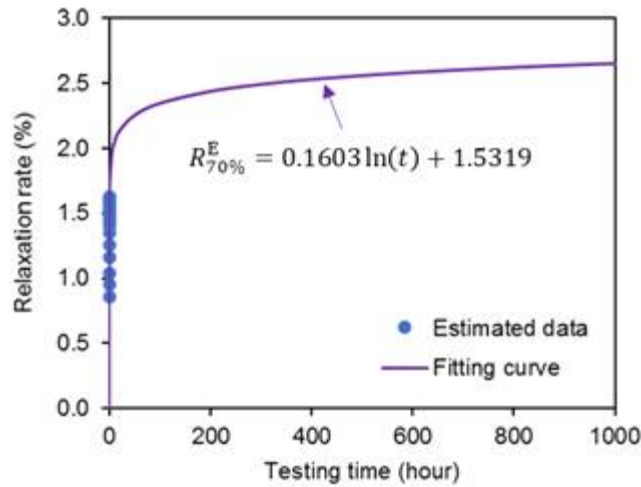


그림37. 장기간일 때의 릴랙세이션 속도 추정

- 제안된 방법은 다양한 응력 수준에서 릴랙세이션 속도를 추정하기 위해 적용
- 결과는 시간이 길어질수록 릴랙세이션 속도가 증가하는 경향을 보였으며, 응력 수준이 높을수록 릴랙세이션 속도가 높았음
- 문헌 [18]은 $0.7f_u$, $0.55f_u$, $0.4f_u$ 와 같은 응력 수준에서의 여러 유형의 케이블 강재에 대해 릴랙세이션 실험을 수행
- 이 연구는 릴랙세이션의 발달이 높은 초기 응력 수준에서 응력 변화에 민감하다는 것을 보여줌
- 120시간의 실험 시간에서 릴랙세이션 속도는 초기 응력이 증가함에 따라 증가하는 경향이 있음
- 이는 현재의 결과가 문헌 [18-20]에서 여러 유형의 케이블 강재에 대해 보고 된 일반적인 경향과 일치함을 의미
- 릴랙세이션 속도와 실험 시간의 관계를 설명하기 위해 로그함수 도입
- 로그함수 $R_{0.7f_u} = 0.1603 \ln(t) + 1.5319$, $R_{0.6f_u} = 0.1664 \ln(t) + 1.4370$ 및 $R_{0.5f_u} = 0.1353 \ln(t) + 1.334$ 는 그림36과 같이 $0.7f_u$, $0.6f_u$ 및 $0.5f_u$ 의 응력 수준에 대해 회귀분석을 사용하여 구성됨
- 이 방정식은 그림37과 같이 장기간(100년)동안의 릴랙세이션 속도를 예측하는데 사용할 수 있음
- 제안된 방정식을 통해 1,000시간과 100년에서 각각 2.80%와 3.85%의 릴랙세이션 속도 추정

A2. 나노 압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증

Step7 케이블 강재의 릴랙세이션 실험 수행

- 제안된 방법의 정확성을 입증하기 위해 $0.7f_u$, $0.6f_u$, $0.5f_u$ 와 같은 서로 다른 응력 수준에 대해 상온에서 인장 릴랙세이션 실험을 실시
- 그 결과, 그림38과 표4에서와 같이 세 가지의 릴랙세이션 속도와 시간의 관계를 기록
- 그림38(a), 38(b) 및 38(c)는 충분히 긴 지속시간에 걸친 일정한 변형률 수준에 해당하는 실험에서 측정된 대표적인 릴랙세이션-시간 곡선을 제시
- 이러한 곡선은 공학적 환경 온도에서 두 가지 다른 특징적 단계로 구성
- 첫 번째 특징적 단계는 케이블 릴랙세이션 실험의 짧은 시간(2-3시간)에서 자주 발생하는 일시적인 릴랙세이션 [18]
- 두 번째 특징적 단계는 안정적인 비율을 보이고 비교적 긴 실험 기간에 걸쳐 지속되는

2차 릴랙세이션

- Poscalbe-86 고강도 강선은 1차 릴랙세이션 단계에서 릴랙세이션 증가율이 높은 반면 그 후의 안정단계(2차 릴랙세이션 단계)에서는 느린 릴랙세이션 증가 속도를 관측할 수 있음

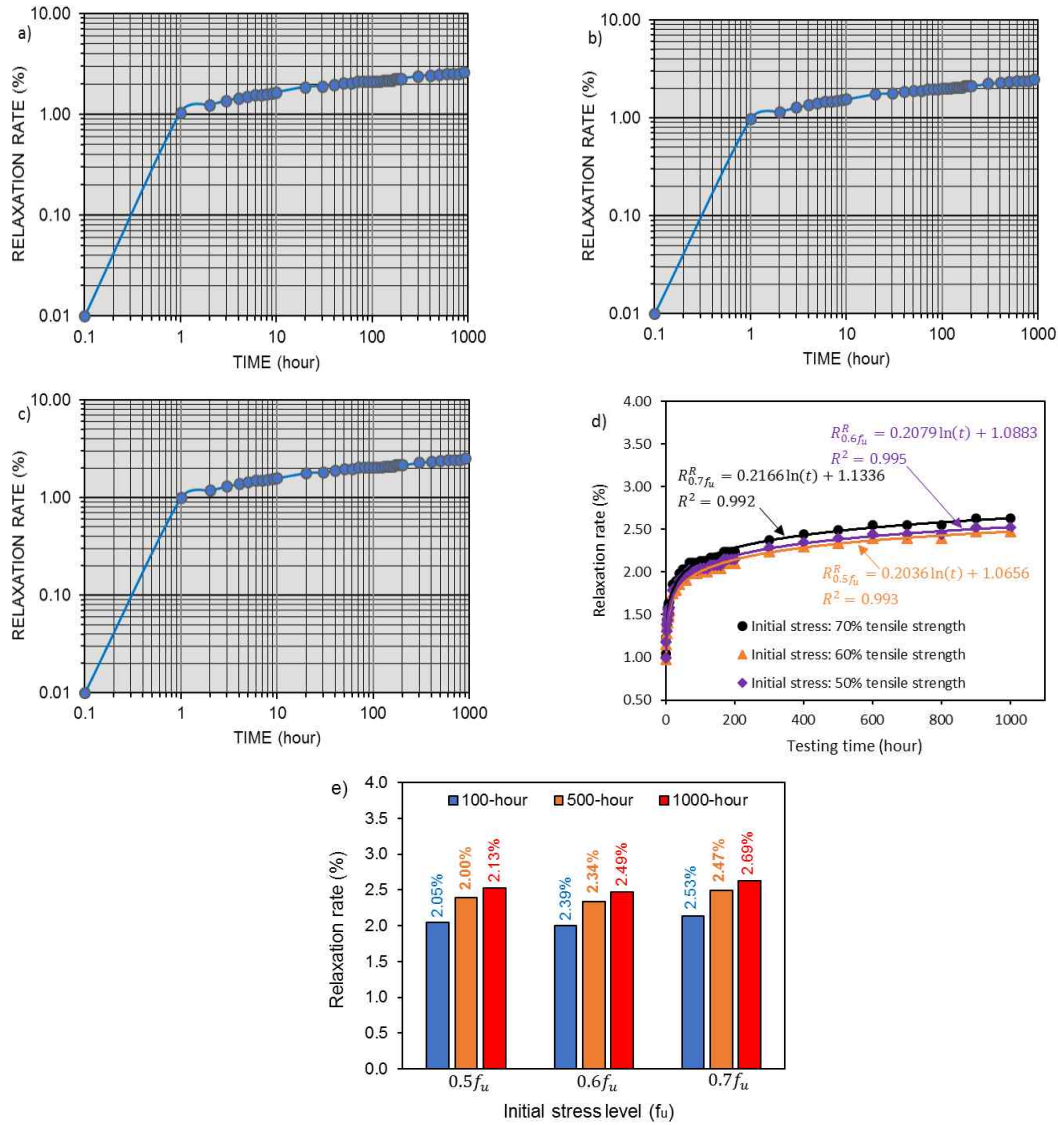


그림38. POSCABLE-86 강재의 릴랙세이션 속도; (a) 0.5 f_u 초기 응력 (b) 0.6 f_u 초기 응력; (c) 0.7 f_u 초기 응력; (d) 회귀분석 결과; (e) 100시간, 500시간 및 1,000시간의 릴랙세이션 상태 비교

Step8 실험결과를 회귀분석하여 응력 릴랙세이션 방정식 결정

- EN ISO [1]는 릴랙세이션 속도와 시간 사이의 관계를 설명하기 위해 대수적 표현을 권고
- 그 결과, 대수적 표현은 식(6)에 제시된 바와 같이 이 연구에서 실험한 물질의 릴랙세이션 속도를 설명하기 위해 채택되었음

$$R_i^R(t) = A x \ln(t) + B, i = 1 \sim 3 \quad (6)$$

- 식(6)에서 A와 B는 실험데이터에서 추정된 상수 매개변수이며, i 는 응력 수준 (예를 들어, $0.7f_u$, $0.6f_u$, $0.5f_u$)임
- 상수 매개변수 A와 B의 값은 표6과 그림38에 제시된 회귀분석을 사용하여 초기 응력의 세 가지 수준에 대해 추정

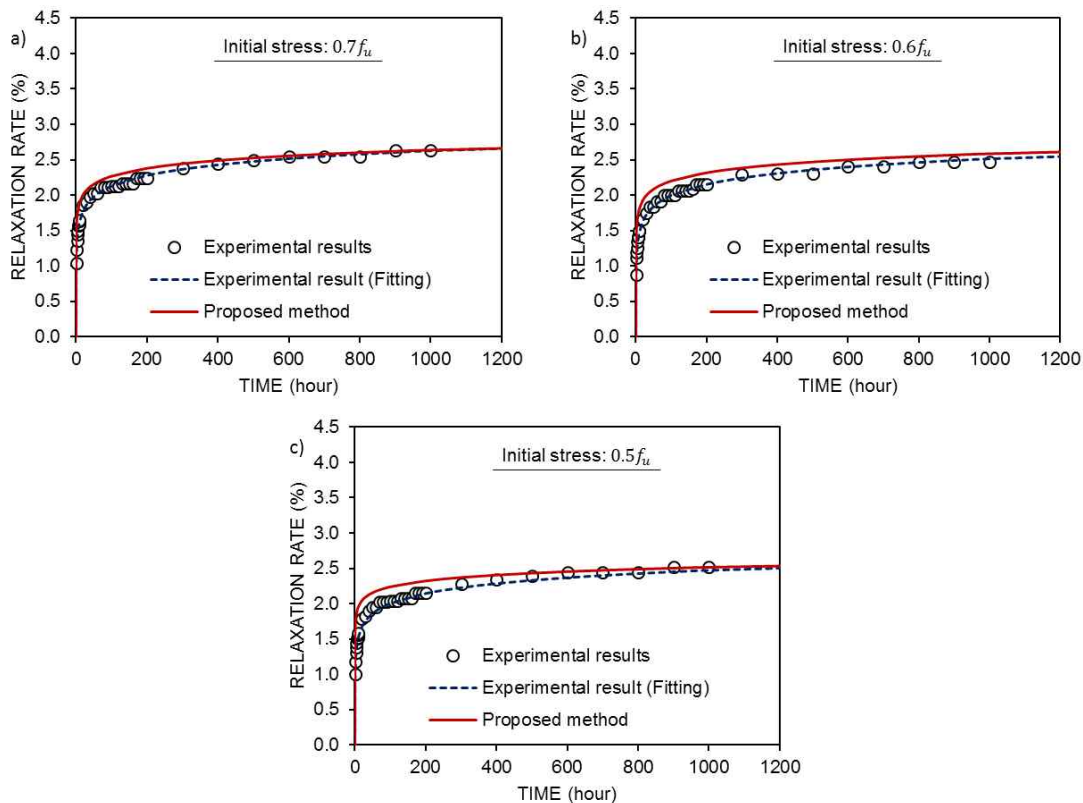


그림39. 나노 압입을 이용한 실험데이터와 추정데이터의 릴랙세이션 속도 비교

- 세 가지 다른 응력 수준의 결과는 모든 응력 수준의 릴랙세이션 속도가 100시간 지속 시간 동안 2% 이내와 1,000시간 동안 3% 이내에서 제한되는 반면 낮은 초기 응력 수준의 케이블은 안정 단계로 더 빠른 전환을 보임
- 초기 응력 수준이 높을 때 케이블은 동시에 릴랙세이션 속도가 높았지만, 그림38(d)에 제시된 안정 단계에 도달하는 데 실험 지속시간이 더 오래 걸림
- 한편, 적용된 초기 응력 수준이 증가했을 때 릴랙세이션 속도의 증가는 그림38(e)에서 관찰한 바와 같이 선형적이지 않음
- 즉, 케이블 인장 릴랙세이션 실험에서 적용 초기 응력이 가해질 때 릴랙세이션 속도가 매우 민감하다는 것을 의미
- 문헌 [18]에서는 높은 초기 응력의 경우에 안정 단계에서의 릴랙세이션 속도 증가가 낮은 초기 응력보다 높았던 케이블의 릴랙세이션 속도 발전에 온도와 초기 응력 모두 중요한 역할을 했다고 언급
- 따라서, 현재 결과가 문헌 [18]에서 언급한 여러 유형의 케이블 강재에 대해 보고된 일반적인 경향과 완전히 일치한다는 것이 증명됨

- 제안된 방법의 정확성을 입증하기 위해 세 가지의 실험적인 릴랙세이션 속도-시간 관계의 결과를 사용
- 따라서 케이블 릴랙세이션 실험에서 측정하고 계산한 릴랙세이션 속도와 제안된 방법을 비교한 결과는 그림39와 같이 나타남

표5. 릴랙세이션 실험 결과

Time (hour)	(%)	(%)	(%)
1	1.04	0.87	0.83
2	1.23	1.12	0.99
3	1.36	1.19	1.1
4	1.44	1.26	1.1
5	1.5	1.35	1.18
6	1.57	1.41	1.18
7	1.57	1.41	1.26
8	1.59	1.41	1.26
9	1.63	1.5	1.26
10	1.65	1.5	1.37
20	1.86	1.66	1.48
30	1.9	1.75	1.56
40	1.98	1.84	1.56
50	2.03	1.84	1.64
60	2.03	1.91	1.64
70	2.11	1.91	1.75
80	2.11	2	1.75
90	2.11	2	1.75
100	2.13	2	1.75
110	2.13	2	1.83
120	2.13	2.06	1.83
130	2.17	2.06	1.83
140	2.17	2.06	1.83
150	2.17	2.06	1.83
160	2.17	2.09	1.83
170	2.24	2.15	1.83
180	2.24	2.15	1.83
190	2.24	2.15	1.83
200	2.24	2.15	1.83
300	2.38	2.29	1.88
400	2.44	2.31	1.96
500	2.49	2.31	1.96
600	2.55	2.4	1.96
700	2.55	2.4	2.1
800	2.55	2.47	2.1
900	2.63	2.47	2.1
1000	2.63	2.47	2.18

표6. 회귀분석결과

Stress level	A	B	R^2
$0.7f_u$	0.2166 ± 0.0032	1.1336 ± 0.015	0.992
$0.6f_u$	0.2239 ± 0.002	0.9688 ± 0.001	0.994
$0.5f_u$	0.1832 ± 0.004	0.8925 ± 0.0025	0.985

- 이 비교는 제안된 방법의 릴랙세이션 속도가 응력 릴랙세이션 실험의 릴랙세이션 속도와 일치한다는 것을 나타냄
- 실제로 짧은 실험 시간에 모든 초기 응력($0.7f_u, 0.6f_u, 0.5f_u$)의 비교가 결과에 나타남
- 1,000시간의 기간에 $0.7f_u$ 응력 수준의 제안된 방법에서 얻은 릴랙세이션 속도와 응력 릴랙세이션 실험에서 얻은 릴랙세이션 속도는 각각 2.64%, 2.62%로 상대적 오차는 -0.36%임
- 마찬가지로 $0.6f_u$ 의 경우 제안된 방법에서 얻은 릴랙세이션 속도와 실험에서 얻은 릴랙세이션 속도가 각각 2.58%, 2.47%로 상대적 오차가 -4.63%임
- $0.5f_u$ 초기 응력의 경우 제안된 방법에서 얻은 릴랙세이션 속도는 2.27%인 반면 응력 릴랙세이션 실험에서 얻은 릴랙세이션 속도는 2.18%임
- 위와 같이, 세 가지 초기 응력 경우의 모든 상대적 오차는 5% 미만이며 제안된 방법으로부터의 릴랙세이션 속도가 정확하고 신뢰할 수 있음을 나타냄
- 그러나 여전히 약간의 차이는 일시적인 상태에서 안정적 릴랙세이션 상태로 전환될 때 관찰됨
- 이는 케이블 릴랙세이션 실험 설정의 불완전성으로 인해 발생할 수 있음
- 또 다른 이유는 압입 실험이 마이크로스케일로 수행되는 반면 응력 릴랙세이션 실험은 더 큰 스케일로 진행되어 시편 크기의 영향을 받기 때문임
- 닉스(Nix)와 가오(Gao)(1998)는 크기가 구조 강도뿐만 아니라 일반적으로 다른 스케일에서 결정되는 물질의 기계적 특성(예 : 매크로스케일, 메소스케일, 마이크로스케일, 나노스케일)에도 영향을 미친다는 것을 입증
- 더 큰 스케일에서 E, 인장 신율(tensile elongation), 인장강도는 시편 크기에 따라 달라지는 경향을 보여줌
- 인장 신율(tensile elongation)과 인장강도는 게이지 길이(시편 크기)가 증가할 때 감소하는 경향이 있는 반면 E는 증가하는 경향을 보임 [21]
- 이것이 그림39의 비교에서 차이가 나는 이유일 수 있음
- 또한, 압입 반응은 결정 입계 효과, 결정 구조 효과, 인덴터 팁(indenter tip)의 무덤, 샘플 표면의 산화물 및 기타 효과와 같은 여러가지 요인에 의해서도 영향을 받음
- 델린세(Delince)(2006)는 결정 입계가 가력(loading)/제력(unloading) 곡선과 실험 물질의 기계적 특성 추정에 약간 영향을 미쳤다고 언급
- 제안된 방법에는 위와 같은 제한이 있지만, 제안된 방법과 케이블 릴랙세이션 실험에서 모두 추정된 릴랙세이션 거동의 일관성은 고강도 강선의 릴랙세이션 추정에 있어 제안된 접근방식의 정확성과 신뢰성을 알 수 있음
- 케이블이나 케이블 가닥들의 릴랙세이션 실험은 장기간에 걸친 환경 온도 조절뿐만 아니라 시간의 한계 때문에 주로 단기간 실험으로 수행
- 따라서 릴랙세이션 실험은 보통 60시간, 120시간, 1,000시간에 걸쳐 실시
- 본 연구의 경우, 실험한 케이블의 릴랙세이션 속도를 측정하는데 높은 정확도를 보장하기 위해 1,000시간의 실험 기간을 적용
- 장기간 릴랙세이션 속도(10년, 20년, 50년 또는 100년)의 경우, 1,000시간의 릴랙세이션 속도를 기준으로 $R_{long-term} = R(1,000h)(t/1,000)^K$ 의 모델을 제안하였고, 여기서 $K = \log[R(1,000)/R(100)]$ 으로 결정되는 요소임
- 이에 따라 장기간에 걸친 10년, 20년, 50년의 고강도 강선의 $0.7f_u$ 에서의 릴랙세이션 속도는 각각 4.23%, 4.54%, 4.98%임
- $0.6f_u$ 에서의 장기간에 걸친 10년, 20년, 50년의 고강도 강선의 릴랙세이션 속도는 각각 3.72%, 3.97%, 4.31%로 예측

- 반면에 $0.5f_u$ 에서의 장기간에 걸친 10년, 20년, 50년의 고강도 강선의 릴랙세이션 속도는 각각 3.34%, 3.57%, 3.89%임
- 릴랙세이션 속도가 모든 경우에서 극한값에 근접할 조짐이 보이지 않는다는 것을 알 수 있음

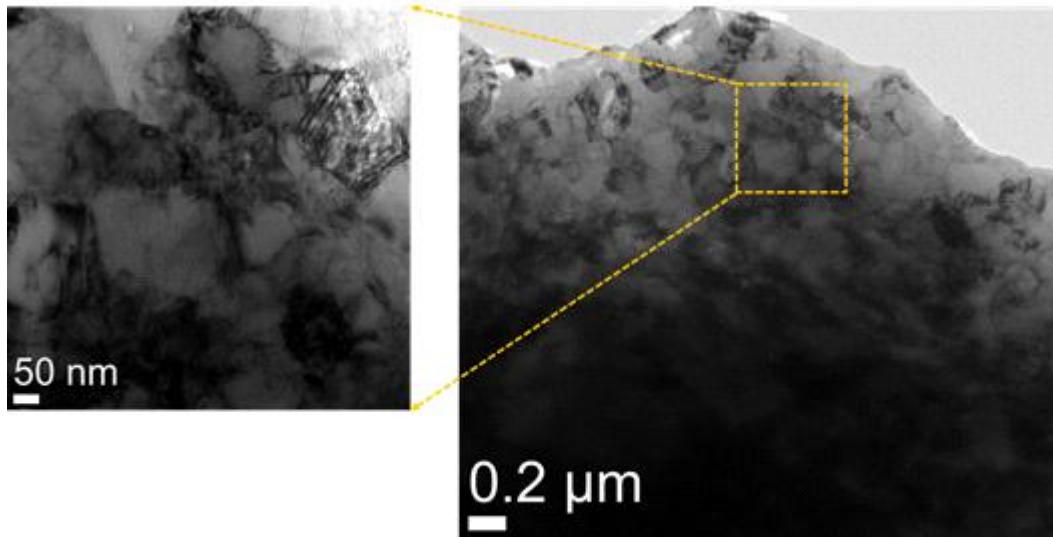


그림40. 초기 시편의 미세구조를 보여주는 TEM 사진. 초기 미세구조는 주로 전위밀도가 낮은 전위선으로 구성

- 고강도 강선은 장기간의 인장 응력으로 인해 응력 릴랙세이션에 취약하며, 장기간 유동학 기계적 특성이 구조물의 와이어에 영구적인 변형을 발생시킬 수 있으므로, 각각 다른 초기 응력 릴랙세이션에 따라 변형된 시편에서 미세구조의 진화는 TEM 검사를 사용하여 관찰됨 [22]
- TEM 검사를 위한 시편은 응력 릴랙세이션으로 변형된 시편의 중간 부위에서 절취되었으며, 이전 부분에서 제시한 바와 같이 시편을 준비
- 따라서 $0.5f_u$, $0.6f_u$, $0.7f_u$ 에서 미세구조의 결과는 각각 그림41, 42, 43에 나타냄
- 초기 시편의 미세구조(그림40)도 비교목적으로 제시

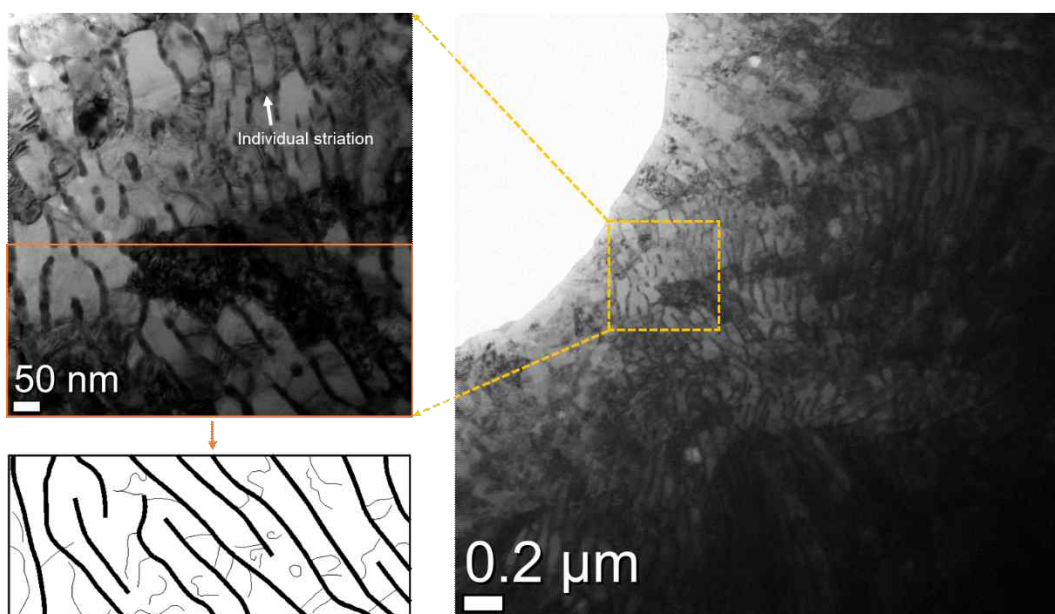


그림41. $0.5f_u$ 의 초기 응력에서 응력 릴랙세이션에 의해 변형된 시편의 전위구조.

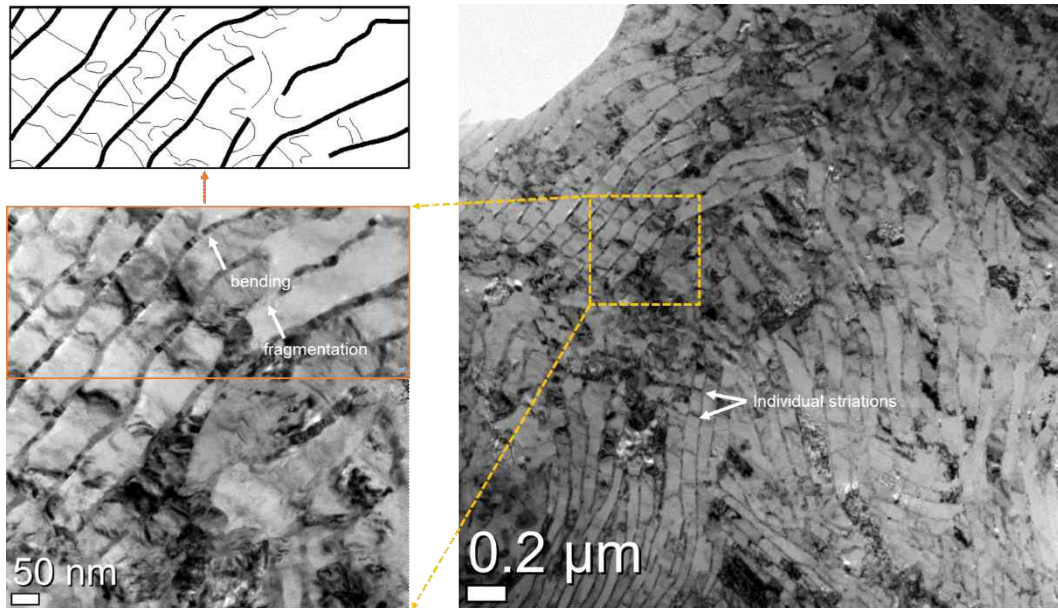


그림42. $0.6f_u$ 의 초기 응력에서 응력 릴랙세이션에 의해 변형된 시료의 전위구조.

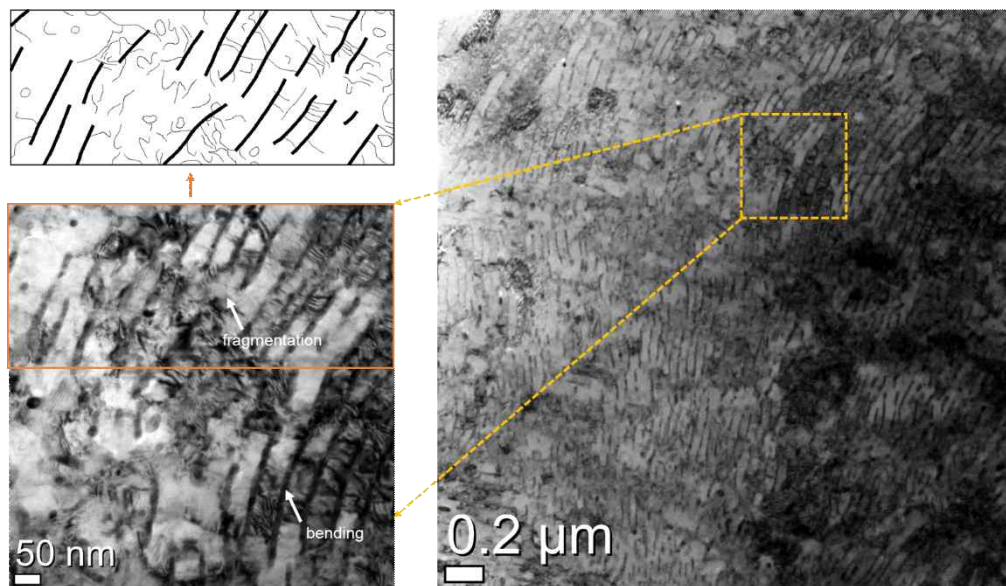


그림43. $0.7f_u$ 의 초기 응력에서 응력 릴랙세이션에 의해 변형된 시료의 전위구조.

- 그림40은 초기 시편의 전위구조를 나타냄
- TEM 결과를 보면 초기 미세구조는 주로 전위밀도가 낮은 전위선으로 구성
- 그림41, 42 및 43은 응력 릴랙세이션에 의해 변형된 시편에서 가장 자주 나타나는 특징적 미세구조를 나타냄
- 낮은 초기 응력 릴랙세이션($0.5f_u$)일 때, 시멘타이트(cementite)/페라이트 박층(ferrite lamellae)는 초기 응력 릴랙세이션 적용에 따라 부분적으로 발달
- 원래의 알갱이들은 강제적으로 깨져 시멘타이트(cementite)/페라이트 박층(ferrite lamellae)와 전위 파편의 형성으로 이어지지만 박층(lamellae) 경계를 명확히 구분하기는 상당히 어려움
- 무작위로 배열된 전위는 페라이트 박층 ferrite lamellae)의 내부 영역에서 영향을 미침
- 어떤 경우에는 그림41과 같이 시멘타이트 박층(cementite lamellae)과 직각 방향을 갖는 개별적인 줄무늬를 관찰할 수 있음
- 그런 다음 $0.5f_u$ 에서 전위밀도를 전위선의 교차점 수와 표면도를 기준으로 계산 [23]
- X-ray와 TEM 검사를 사용하여 전위밀도에 달성하는 방법에는 두 가지가 있다는 점에

유의해야 함

- 연구의 복잡성을 줄이기 위해 TEM 사진에서 $\rho = N_{Intersection}/A$ 로 전위밀도를 계산하고 여기서, $N_{Intersections}$ 과 A 는 각각 전위 수와 실험된 면적임
- 결과적으로 $19.16 \times 10^{13} m^{-2}$ 의 전위밀도가 $0.5f_u$ 에서 잘 계산됨
- 이 연구에서의 전위밀도는 세 가지 다르게 실험된 면적에서 얻은 평균값이라는 점에 유의해야 함
- 실험 중 강선의 응력은 탄성 상태이며 제력(unloading) 후 복구 단계가 이루어지지만, 장기간의 응력 릴랙세이션이 영구 변형률을 유발할 수 있는 점 때문에 영구 변형이 여전히 관찰됨
- 높은 초기 응력($0.6f_u$)에서 시멘타이트(cementite)와 페라이트 박층(ferrite lamellae)이 완전히 발달
- 적용 응력이 증가하기 때문에 일정한 초기 변형률은 $0.5f_u$ 보다 높아져 강선의 인장이 커지게 됨
- 그 결과, 미세 구조물은 그림42에 나타낸 것과 같이 $0.5f_u$ 에서의 값에 비하여 전위밀도 ($31.26 \times 10^{13} m^{-2}$)가 더 높음
- 페라이트 박층(ferrite lamellae) 안에 개별적인 줄무늬의 존재가 더 빈번
- 이렇게 되면 그림42의 전위 구조 그림에서 볼 수 있듯이 시멘타이트 박층(cementite lamellae)가 휘어지고 파편화될 수 있으며, 따라서 시멘타이트 박층(cementite lamellae)의 파편화는 전위 슬립 거리(경계 사이의 거리)나 층간 간격을 넓힐 수 있음
- 가장 높은 초기 응력 릴랙세이션($0.7f_u$)에서 미세 구조물은 파편화된 시멘타이트(cementite)/페라이트 박층(ferrite lamellae)을 포함
- 시멘타이트 박층(cementite lamellae)이 초기 응력의 증가로 인해 휘어지고 파편화되기 때문에 시멘타이트 박층(cementite lamellae)의 분열이 그림43에 있는 전위 구조의 사진처럼 빈번히 나타남
- 이로 인해 층간 간격/전위 슬립 거리가 더욱 증가
- 그림43의 또 다른 흥미로운 특징은 $0.7f_u$ 에서의 전위 구조가 낮은 초기 응력 수준일 때에 비해서 가장 높은 전위 밀도($53.45 \times 10^{13} m^{-2}$)를 가짐
- 미세구조 변화로부터 전위 밀도는 증가하는 반면에 전위 슬립 거리(경계 사이의 거리)나 층간 간격은 그림41, 42, 43에서 관찰한 바와 같이 응력 릴랙세이션 하에서 시멘타이트 박층(cementite lamellae)의 휨과 파편화에 의해 넓어지는 경향이 있다고 추정할 수 있음

Step9 나노압입에 의해 결정된 응력 릴랙세이션 방정식과 비교 검증

- 릴랙세이션 조건에 따른 고강도 강선의 기계적 특성 변화는 나노 압입 실험과 인장 재하 실험 모두를 사용하여 연구
- 먼저 15mm 길이의 응력 릴랙세이션 실험의 변형된 시편에서 나노압입 시편을 잘라냄
- 이 시편들은 지름 25mm의 원형 예폭시 모드에 고정된 후 여러 다이아몬드 카바이드로 연마하여 증가하는 7단계의 분말도의 증가를 구함
- 이 과정은 마지막 단계가 40nm인지 반드시 확인해야 함 [24, 25]
- 표면 산화의 영향을 줄이기 위해 샘플 표면을 연마한 후 가능한 한 빨리 나노압입 실험을 수행하기 위해 연마된 시편을 사용해야 함 [26]
- 나노압입 시편의 준비는 ASTM 기준을 준수 [27]
- 최대 하중이 190mN이고 가력/loading)/제력(unloading) 속도가 300mN/min인 하중 제

어 모드에서 나노압입 실험을 수행

- 응력 릴랙сей션이 고강도 강선의 플라스틱 성질에 미치는 영향을 특징을 나타내기 위해 응력 릴랙сей션 실험의 변형된 시편으로 인장 하중 실험을 실시
- 인장 하중 실험의 과정은 이전 부분에서 제시된 것과 동일하지만, 시편은 응력 릴랙сей션 실험의 변형된 시편에서 잘라낸다는 점에 유의
- 시편의 치수도 비교목적으로 동일하게 유지

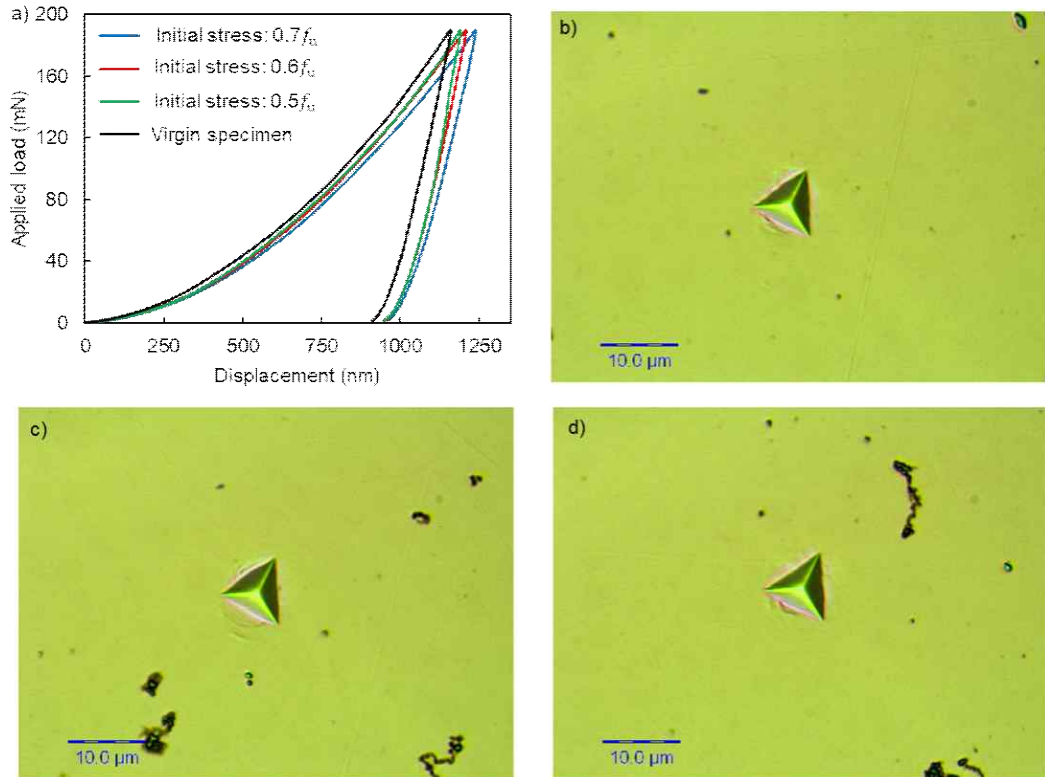


그림44. (a) 초기 응력 릴랙세이션에 따른 가력(loading)/제력(unloading) 곡선의 변화 (b) 초기 응력 $0.5f_u$ 에서 압입의 현미경 사진 (c) 초기 응력 $0.6f_u$ 에서 압입의 현미경 사진 (d) 초기 응력 $0.7f_u$ 에서 압입의 현미경 사진

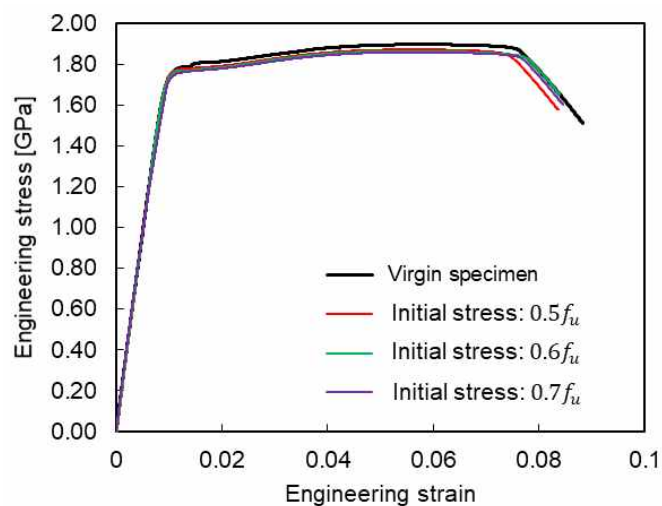


그림45. 다른 초기 응력 수준에 따른 공학적 응력-공학적 변형 설계 곡선의 변화

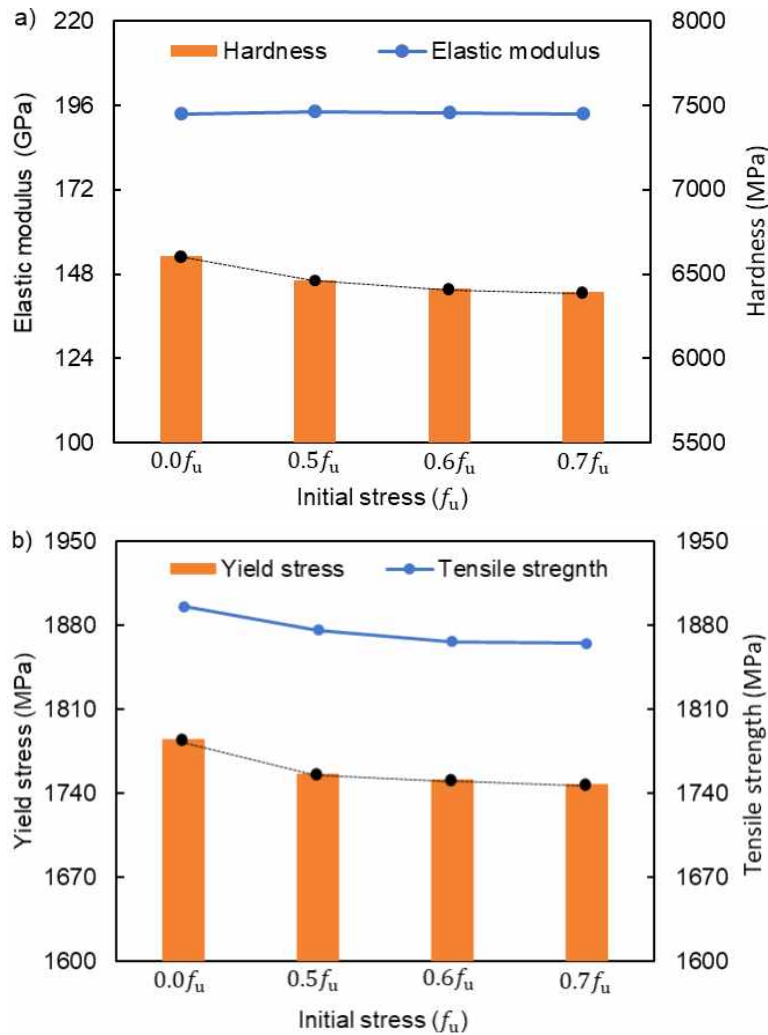


그림46. (a) 응력 릴랙세이션이 탄성 계수 및 경도에 미치는 영향. (b) 응력 릴랙세이션에 따른 항복강도 및 인장강도의 저하

- 그림44(a)는 가력/loading)/제력(unloading) 곡선을 나타내고, 그림44(b), 44(c), 44(d)는 각각 $0.5f_u$, $0.6f_u$ 및 $0.7f_u$ 에서 압입의 현미경 사진을 보여줌
- 이 결과는 릴랙세이션 조건의 변화에 따른 압입 곡선의 변화는 중요하고 차이가 있음을 나타냄
- 초기 응력 릴랙세이션은 형태뿐만 아니라 가력/loading)/제력(unloading) 단계의 규모에도 영향을 미침
- 실제로 초기 응력 릴랙세이션이 $0.5f_u$ 에서 $0.7f_u$ 로 증가할 때 h_m 은 증가하는 경향이 있는 반면에 P_m 은 모든 나노 압입에 대해 일정하게 유지되어 압입 정도의 저하로 이어짐(그림46(a) 참조)
- 단, 그림46(a)에 나타낸 것과 같이 초기 응력이 더 증가할 때 탄성계수의 변화는 없음
- 왕(Wang et al.) [18]은 가력/loading)/제력(unloading) 계수는 거의 동일하며, 응력 상태는 강선과 케이블의 탄성계수 거동에 미치는 영향이 미미하다고 언급
- 그것은 현재의 결과가 문헌에 보고된 결과와 잘 일치한다는 것을 의미
- 또한 인장 하중 실험은 그림45와 46(b)에 나타낸 것처럼 초기 응력 릴랙세이션이 소성 특성에 미치는 영향을 연구하기 위해 수행
- 인장실험 결과는 $0.5f_u$, $0.6f_u$ 및 $0.7f_u$ 에서의 탄성계수 값이 각각 $194.23 GPa$, $193.86 GPa$ 및 $193.47 GPa$ 로 잘 측정되었음을 나타냄
- 이것은 탄성 부분이 초기 응력 릴랙세이션의 변화에 독립적인 것으로 보이는 것을 의미
- 탄성 계수에 따른 인장 결과는 그림46(a)의 나노압입 실험결과를 확인시켜줌

- 게다가, 탄성 성질의 저하는 응력 릴랙сей션 하에서 분명하게 관찰
- 그림46(b)에 나타낸 것과 같이 초기 응력 릴랙сей션이 $0.5f_u$ 에서 $0.7f_u$ 로 증가할 때 항복강도와 인장강도는 모두 감소
- 응력 릴랙сей션에 따른 고강도 강선의 기계적 특성 저하는 응력 릴랙сей션에 의한 영구 변형에 영향을 줄 수 있음
- 실제로 재료 강도에 대한 페라이트/시멘타이트 박층(ferrite/cementite lamellae)의 기여는 항복강도, 전위 이동을 막는 경계 사이의 거리 d 와 관련된 결정 입계 보강(Hall-Petch 보강)에 근거하여 다음과 같은 방정식으로 설명할 수 있음 [28]

$$\sigma_y = \sigma_o + k_1 \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (7)$$

- 식(7)에서 σ_o 및 k_1 는 각각 페라이트(ferrite) 마찰 응력과 상수 인자임
- 이 Hall-Petch 보강은 다결정 금속의 경우에 유효하며, 이 경우 경계 사이의 거리는 입자 크기임 [28, 29]
- 이 방정식을 펄라이트 강에 적용하면, 경계 간격은 평균 전위 자유 행로로 이는 층간 간격의 두 배와 같음 [28, 30, 31]
- 따라서 항복강도와 층간 간격의 관계는 문헌 [30, 32, 33]으로 설명할 수 있음

$$\sigma_y = \sigma_o + k_2 \frac{1}{\sqrt{2ILS}} \quad (8)$$

- 여기서 ILS 와 k_2 는 각각 층간 간격과 상수 인자임
- Tabor의 관계에 기초하여 경도를 $H = M\sigma_y = M(\sigma_o + k_2 \frac{1}{\sqrt{2ILS}})$ 처럼 항복강도 또는 인장강도 함수로 나타낼 수 있음
- 여기서 M 은 물질 상수 [34 - 36]

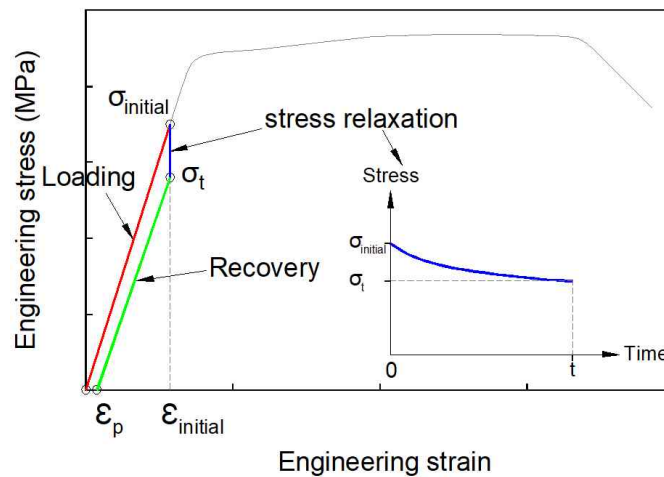


그림47. 물질의 응력 릴랙сей션을 이해하기 위한 도식

- 앞에서 언급한 바와 같이, 릴랙сей션 실험의 재하 중 그림47에 나타낸 것과 같이 일정한 초기 변형률($\epsilon_{initial}$)에 도달하기 위해 초기 응력 ($\sigma_{initial}$)을 적용
- 원래 입자는 응력이 가해져 부서져 그림41과 같이 시멘타이트(cementite)/페라이트 박층(ferrite lamellae)이 형성됨
- 강선의 응력 릴랙сей션으로 인해 긴 실험 시간 동안 강선의 응력이 감소하는 것으로 관찰됨
- 릴랙сей션 실험 중 강선의 응력이 탄성 상태에 있고, 하중 제거 후 물질이 복구되지 만, 이전 부분에서 언급한 응력 릴랙сей션 효과 때문에 영구 변형이나 영구 변형률

(ϵ_p)은 여전히 관찰됨 (그림41, 42 및 43 참조)

- 초기 응력 릴랙세이션이 증가하면 시멘타이트(cementite)/페라이트 박층(ferrite lamellae)이 완전히 발달하고, 더 높은 전위밀도, 상당한 휨 및 시멘타이트 박층(cementite lamellae)의 파괴를 관찰할 수 있음
- 일반적으로 시멘타이트 파편과 뒤엎힌 안쪽은 식(8)에 나타난 것처럼 강선 강도에 관한 경계에 기인함 [28]
- 고강도 강선이 비틀림 변형 상태 전에 있을 때, 박층(lamellae)의 상당한 굽힘과 파편이 펄라이트(perlite) 집단 안에서 일어났음 [30]
- 귀(Guo) [30]은 시멘타이트 박층(cementite lamellae)의 분열에 의해 야기되는 완전한 박층상 단층(lamellar monolayer)으로부터의 편차가 펄라이트(perlite) 층간 간격을 넓힐 것이라고 언급
- 본 연구에서는 그림41, 42 및 43과 같이 미세구조 변화과정 동안에 응력 릴랙세이션 하에서 실험한 고강도 강선에서 시멘타이트 박층(cementite lamellae)의 파편이 관찰됨
- 그 결과 응력 릴랙세이션에 따른 시멘타이트 박층(cementite lamellae)의 파편으로 인해 층간 간격 ILS (또는 경계 사이 거리)가 넓어지는 경향이 있음
- 따라서 그림41, 42 및 43에 나타난 미세구조 변화를 추정할 수 있음
- 그리고 시멘타이트/페라이트 박층(cementite/ferrite lamellae)의 파편에 의해 발생하는 판 형태(lamellar morphology)의 Hall-Petch 보강 메커니즘은 경계 보강 영향의 저하를 유발하는 초기 응력이 증가할 때의 경계 또는 층간 간격 ILS 사이의 거리를 넓히는 원인
- 이 주장은 응력 릴랙세이션시 압입 정도(그림46(a)), 항복강도 및 인장강도(그림46(b))의 감소를 검증

B. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 장기거동을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발

B1. 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립

Step1 3가지의 반복하중에 대하여 피로 실험 수행

- 이 파트에서는 $430MPa$ 에서 $850MPa$ 의 피로 응력 범위에서 고강도 강선의 피로 특성을 제시하려고 함
- 모든 고주기 피로 실험은 MTS 250kN 기계를 사용하여 상온에서의 $7mm$ 직경의 고강도 강선에서 수행
- 각 피로 응력 범위 수준에 대해 최소 3개의 실험을 실시함
- 고주기 피로 실험의 자세한 내용은 1번 부분에서 확인할 수 있음
- 실험결과는 다음과 같이 나타남

표7. Poscable-86 강선의 피로실험 데이터

Specimen No.	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	ΔS (MPa)	R (-)	N (Cycles)	Status
1	1,417	567	850	0.4	28,973	Broken
2	1,417	567	850	0.4	35,561	Broken
3	1,417	567	850	0.4	35,617	Broken
4	1,108	443	665	0.4	40,304	Broken
5	1,108	443	665	0.4	50,595	Broken
6	1,108	443	665	0.4	91,285	Broken
7	792	317	475	0.4	99,110	Broken
8	792	317	475	0.4	161,579	Broken
9	792	317	475	0.4	131,398	Broken
10	742	297	445	0.4	181,233	Broken
11	742	297	445	0.4	765,823	Broken
12	742	297	445	0.4	1,000,000	unbroken
13	711	284	430	0.4	1,000,000	unbroken
14	711	284	430	0.4	1,000,000	unbroken

$\sigma_{\max}$: 최대 응력

$\sigma_{\min}$: 최소 응력

ΔS : 응력 범위

R : 응력 비율

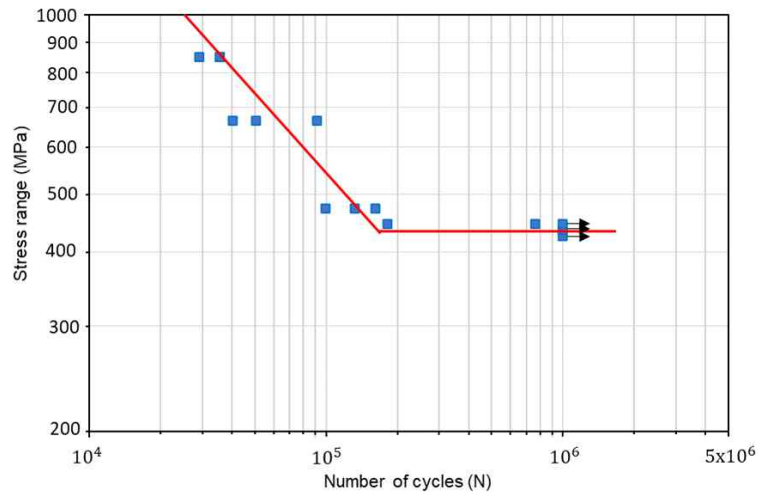


그림48. 응력 범위와 사이클 수 사이의 관계를 보여주는 Poscable-86 고강도 강선의 피로 수명

- 그 결과, Poscable-86 고강도 강선의 피로 수명은 그림48에 잘 나타나 있음
- 사이클의 응력-수(S-N)곡선은 물질의 피로 저항을 특징화하기 위한 기본 데이터라는 것은 잘 알려져 있음
- 표7과 그림48의 실험데이터에서 보듯이, 실험 물질은 양호한 피로 수명을 보여주었는데, 이 경우 응력 수준이 감소에 따라 S-N 곡선은 감소하는 경향이 있으며, 430MPa의 ΔS 와 같이 낮은 피로 응력 범위에서 피로 수명은 길어짐

- 나아가 피로 수명이 두 부분으로 이루어져 있음을 쉽게 알 수 있음
- 첫 번째 부분은 시작부터 피로 한계 이전까지의 실험데이터임
- 이 부분은 균열 개시-확장에 의한 균열 시편의 실험자료에 해당함
- S-N 데이터의 또 다른 부분은 낮은 응력 범위 수준에서의 피로 수명으로, 시편의 균열을 관찰할 수 없었음

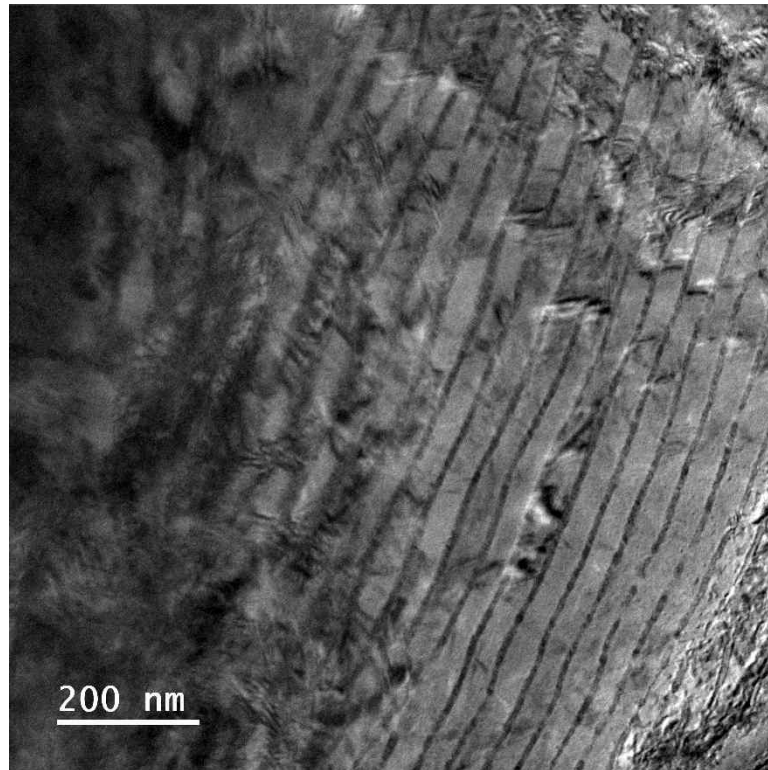


그림49. 427MPa의 응력 범위에서 반복하중에 의해 변형된 시편의 미세구조적 변화

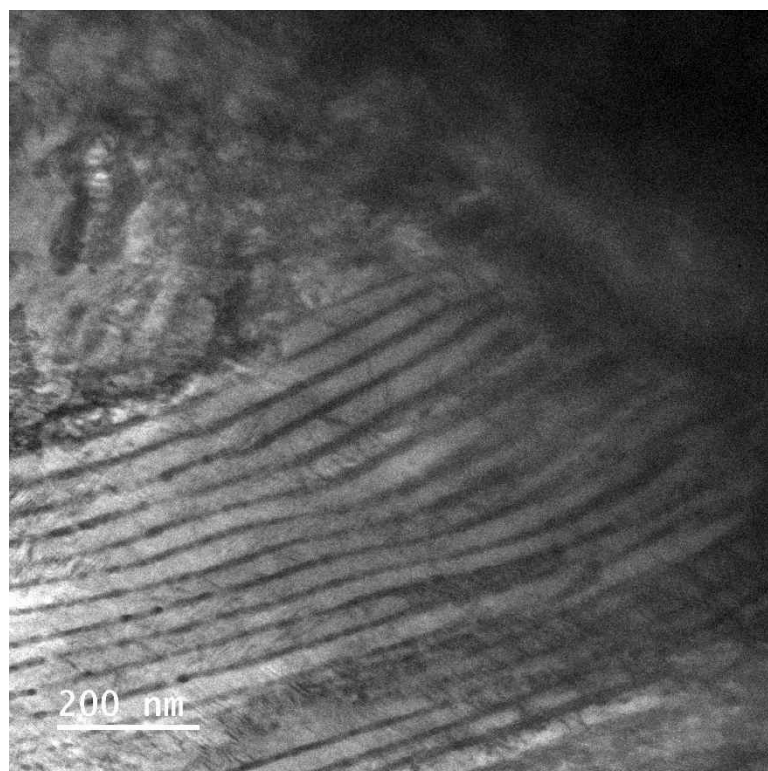


그림50. 446MPa의 응력 범위에서 반복하중에 의해 변형된 시편의 미세구조적 변화

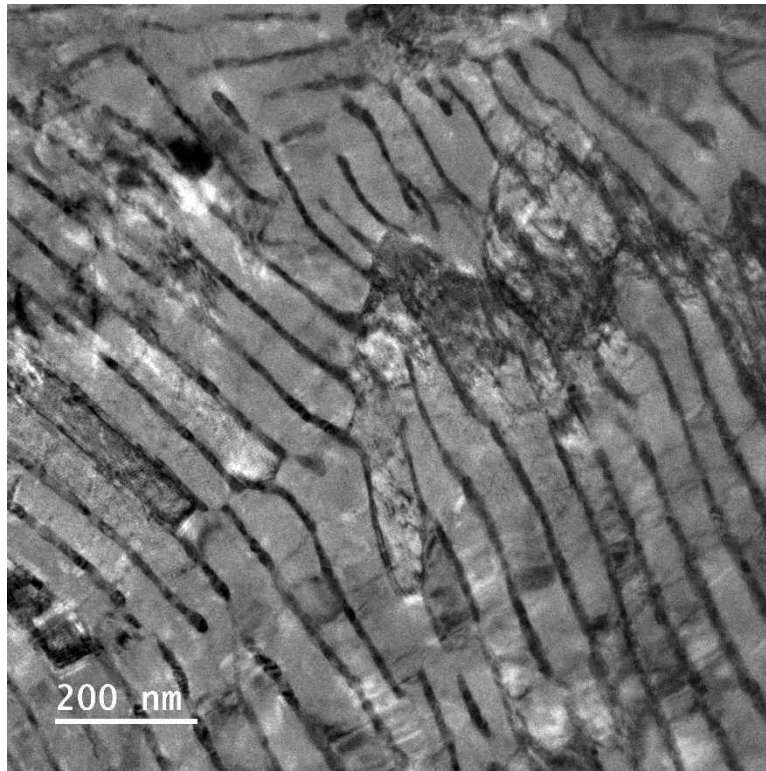


그림51. 664MPa의 응력 범위에서 반복하중에 의해 변형된 시편의 미세구조적 변화

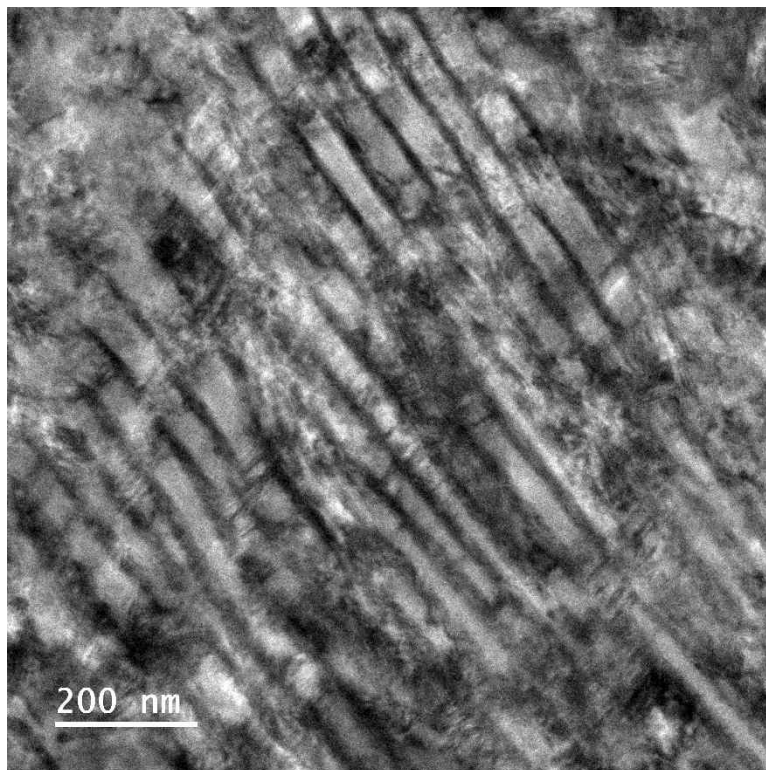


그림52. 850MPa의 응력 범위에서 반복하중에 의해 변형된 시편의 미세구조적 변화

- 반복하중에 의해 변형된 재료의 변화는 TEM 검사를 사용하여 관찰됨
- 그 결과는 그림49-52에 나와 있음
- 그 결과 시멘타이트(cementite) 안쪽이 서로 평행하게 작용하는 경향을 보이는 낮은 반복하중 하에서 시멘타이트(cementite)/페라이트 층(ferrite lamella)이 잘 발달 되는 것으로 나타남
- 전위선의 이동을 내장한 큰 경계로 여겨지는 시멘타이트 층(cementite lamella)으로 인해 전위선은 주로 페라이트 박층(ferrite lamellae) 부분에서 발달

- 더 높은 응력 범위 수준(즉, $445MPa$ 의 S_a)에서 시멘타이트(cementite)/페라이트 층(ferrite lamella)이 잘 발달 되었지만, 불연속적인 시멘타이트 박층(cementite lamellae)을 더 명확하게 관찰할 수 있었음
- 전위선은 더 자주 형성되어 전위밀도가 높아짐
- 피로 응력 범위의 가장 높은 수준(즉, $850MPa$ 의 S_a)에서 복잡한 미세구조적 변화가 발달 됨
- 이러한 각각의 줄무늬들은 더 자주 두꺼운 두께로 나타나며, 시멘타이트(cementite) 층에 침투하여 불연속 시멘타이트 박층(cementite lamellae)을 발생시킴
- 불연속 시멘타이트(cementite) 경계는 전위 이동의 특징으로서, 낮은 응력 범위 수준에 비해 가장 높은 전위밀도에 이르게 할 수 있음
- 고주기 피로에 의해 변형된 시편의 시멘타이트(cementite)/페라이트 박층(ferrite lamellae) 변화에서 시멘타이트(cementite)/페라이트 박층(ferrite lamellae)이 반복하중 하에서 잘 형성되었음을 추정할 수 있음
- 각각의 줄무늬의 존재에 기인한 불연속적인 시멘타이트 박층(cementite lamellae)으로 인해 피로 응력 범위가 더 증가함에 따라 전위밀도는 증가하는 경향을 보임

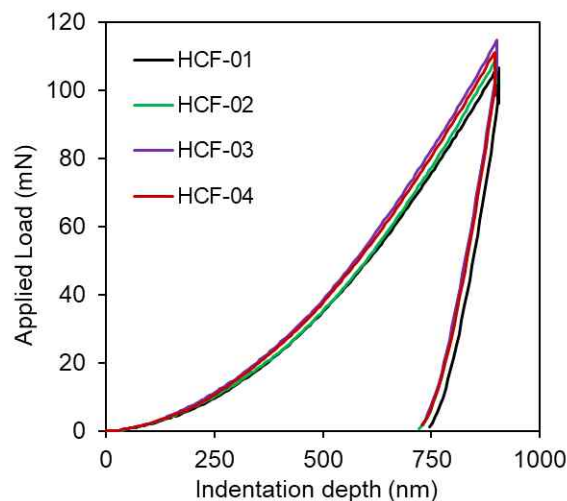


그림53. HCF-01, HCF-02, HCF-03 및 HCF-04의 여러 피로 조건에 대한 릴랙세이션 모델을 사용한 압입 반응

Step2 나노 압입 실험으로 피로 실험 후 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정

- 교량 내 고강도 강선/케이블은 교량 구조물의 고장력 하중을 지지하도록 설계된 프리스트레스 요소로 자주 사용됨
- 높은 인장강도 강선은 긴 시간 동안의 인장 하중으로 인해 응력 릴랙세이션에 취약함
- 따라서 나노압입 실험을 이용하여 피로 조건에서 고강도 강선의 압입 응력 릴랙세이션 거동을 연구할 필요가 있음
- 이를 위해 $1,800nm$ 의 h_m , $300mN/min$ 의 가력(loading)/제력(unloading), $25Hz$ 의 주파수, $1,000$ 초의 릴랙세이션 유지시간 등 몇 가지 매개변수로 릴랙세이션 모드에서 반복 하중에 의해 변형된 시편에 대해 나노압입 실험을 실시
- 나노 압입 실험의 결과는 그림53에 나와 있음

Step3 강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 상관관계 도출

- 앞에서 언급한 바와 같이 P_m 은 응력 범위가 더욱 증가함에 따라 특성적으로 증가하는 경향을 보임
- 그 결과 모든 나노압입 실험에서 h_m 이 일정하게 제어되었기 때문에 C 와 W_t 가 증가함
- 그림53과 같이 압입 응력 릴랙세이션에 대해서 동일한 거동이 발견됨
- 실제로 P_m 에서 고정 부분이 고려되는 반면 h_m 은 일정하게 제어됨
- 이로 인해 압입 변형률이 일정하게 제어됨
- 고강도 강선은 응력 릴랙세이션에 취약한 것으로 간주 되기 때문에, 모든 피로 수준에 대해 그림54와 같이 응력 릴랙세이션으로 인해 유지기간 동안 가해진 적용 하중이나 압입 응력이 저하되는 것으로 관찰됨

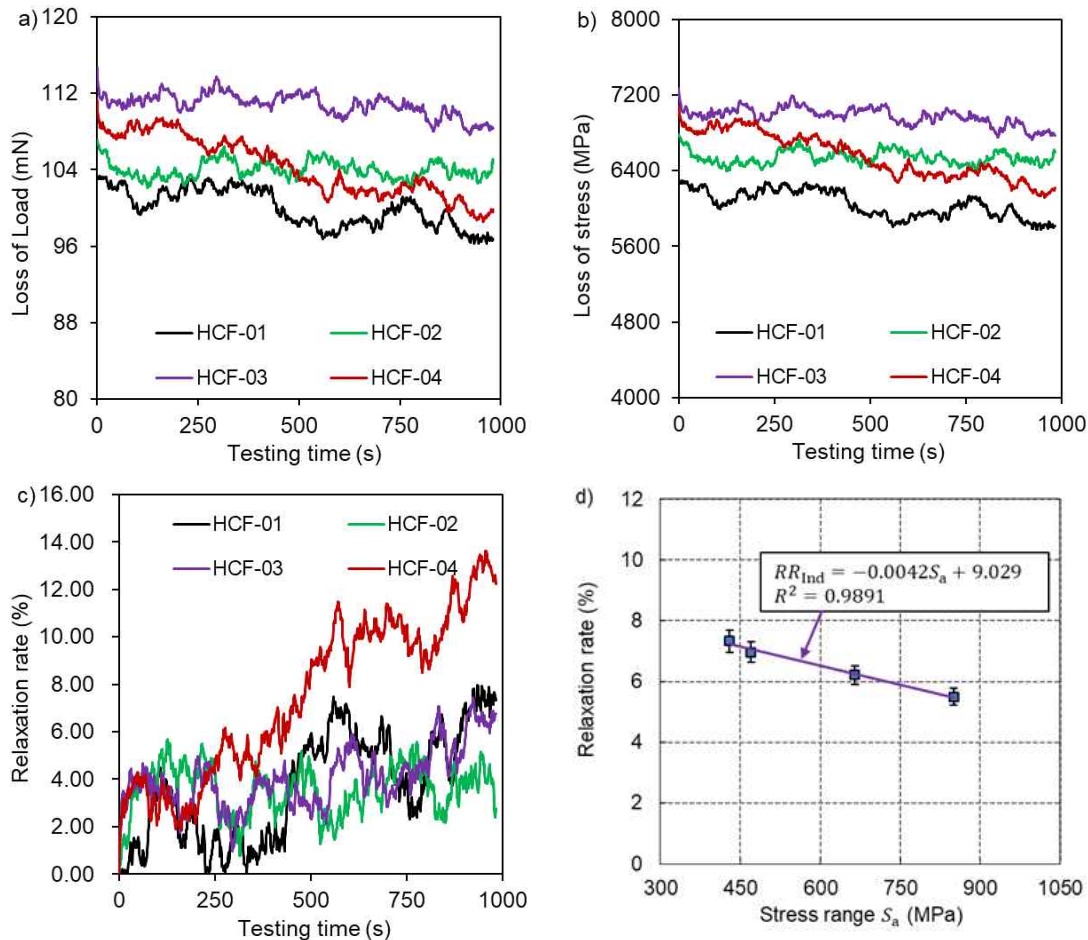


그림54. 피로 조건이 Poscable-86 고강도 강선의 압입 응력의 응력 손실에 미치는 영향 (a) 압입 응력-유지시간 관계 (b) 압입 응력 릴랙세이션-고주기 피로 조건의 관계 (c) 피로 조건에서의 릴랙세이션 속도-시간 (d) 릴랙세이션 속도와 피로 조건의 관계

- 예를 들어 0~1,000초 범위에서 유지시간이 증가하면 압입 응력이 감소할 것으로 예상됨
- 압입 응력의 저하는 선형적이지 않음
- 그림53과 54에서 실험결과의 또 다른 흥미로운 특징은 압입 응력의 감소가 높은 피로 조건에서보다 낮은 피로 응력 범위에서 더 높은 것을 보인다는 것임
- 즉, 피로 조건이 증가함에 따라 압입 응력의 저하는 감소하는 경향이 있다는 것을 의미함
- 그림54에 제시된 응력 릴랙세이션에 따른 압입 응력의 저하는 응력 릴랙세이션에 따른

응력 감소 비율을 보여주는 릴랙세이션 속도의 일반적인 정의로 특징지어질 수 있음

- 릴랙세이션 속도는 다음과 같이 설명할 수 있음

$$RR = \frac{\sigma_0 - \sigma(t)}{\sigma_0} \quad (9)$$

- 여기서 σ_0 와 $\sigma(t)$ 은 각각 초기 응력과 시간 t 에서의 응력임
- 따라서 나노압입 기법에 대한 릴랙세이션 속도(RR_{Ind})는 다음과 같이 계산됨

$$RR = \frac{\sigma_{Ind}(0) - \sigma_{Ind}(t)}{\sigma_{Ind}(0)} \quad (10)$$

- 여기서 $\sigma_{Ind}(0)$ 와 $\sigma_{Ind}(t)$ 는 각각 초기 압입 응력과 시간 t 에서의 압입 응력임
- 따라서 나노압입 실험에서의 릴랙세이션 속도 거동은 그림54에서 보여주듯이 잘 계산됨
- 보다시피 RR_{Ind} 는 피로 응력 범위가 $430MPa$ 에서 $850MPa$ 로 증가하면 감소하는 경향이 있음
- RR_{Ind} 의 값은 강선의 응력 릴랙세이션 실험을 통해 얻은 값과 비교하여 상당히 높았음
- 이는 실험 조건의 차이뿐만 아니라 나노 압입 실험의 압입 크기의 영향에서 비롯될 수 있음
- 첫째, 두 가지 유형의 실험에서 실험 시편의 크기 차이가 릴랙세이션 속도의 상당히 다른 값을 발생시킬 수 있음
- 알려진 바와 같이 응력 릴랙세이션은 일반적으로 더 큰 규모의 강선이나 케이블에 대해 실시 됨
- 예를 들어 시편의 총 길이는 실험 기계 종류에 따라 거의 $1.0m$ 이상이며, 나노 압입 실험은 나노 스케일에서 수행
- 더스트(Durst) [37] 및 Nguyen & Kim [38]은 압입 크기가 인덴터 팁(indenter tip) 아래에 있는 물질의 압입 과정 동안 응력/변형률 상태에 강한 영향을 미친다는 것을 언급
- 실험결과는 압입 크기가 증가함에 따라 압입 응력이 감소하는 경향이 있다는 것을 보여줌
- 따라서 나노압입 실험의 시편 크기가 작을수록 릴랙세이션 속도가 높아질 수 있다고 규정할 수 있음
- 또 다른 이유는 예를 들어 실험 설정의 불완전성, 온도, 바닥 진동 및 기타 환경 조건 등과 같은 실험 환경에 있음
- 나노 압입 기법에 의한 물질의 응력 릴랙세이션 거동은 릴랙세이션 실험과 비교하여 아직 몇 가지 차이점이 있지만, 이 연구 결과는 응력 압입 릴랙세이션 중 물질의 압입 응력/변형률 상태를 이해하는 데 타당함

B2. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석

Step4 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 사장교의 유한요소해석 모델 개발

- 이 연구에서는 강사장교의 응력 재분배를 연구하기 위해 구조물의 케이블 응력 릴랙세이션을 위한 유한요소(FE)모델을 개발함
- 연구의 세부 사항은 다음과 같이 시행됨
- 케이블 응력 릴랙세이션에 대한 해석을 수행하기 위해 상용 프로그램이 사용됨
- ABAQUS를 사용하여 케이블 응력 릴랙세이션에 대한 해석을 시행함
- 제안된 FE모델의 릴랙세이션 모델에는 (ABAQUS에 통합된) 일반적인 맥스웰모델이 사용됨

- 단일 고강도 강선 Poscable-86의 응력 릴랙세이션 실험결과를 바탕으로 케이블 응력 릴랙세이션에 대한 FE모형을 개발함
- 70%, 55%, 40%의 극한 인장강도와 같은 세 가지 초기 응력 수준이 동일한 기울기 간격으로 채택됨
- 실제 작동 온도 상태를 고려하기 위해 상온 $20 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 를 온도 변수로 선택함
- 세 가지 다른 초기 응력 수준에서 릴랙세이션 속도를 추정하기 위해 120시간의 실험 시간이 선택됨
- 단일 고강도 강선 Poscable-86에 대한 실험 및 FEA 모델의 결과는 그림55에 나와 있음

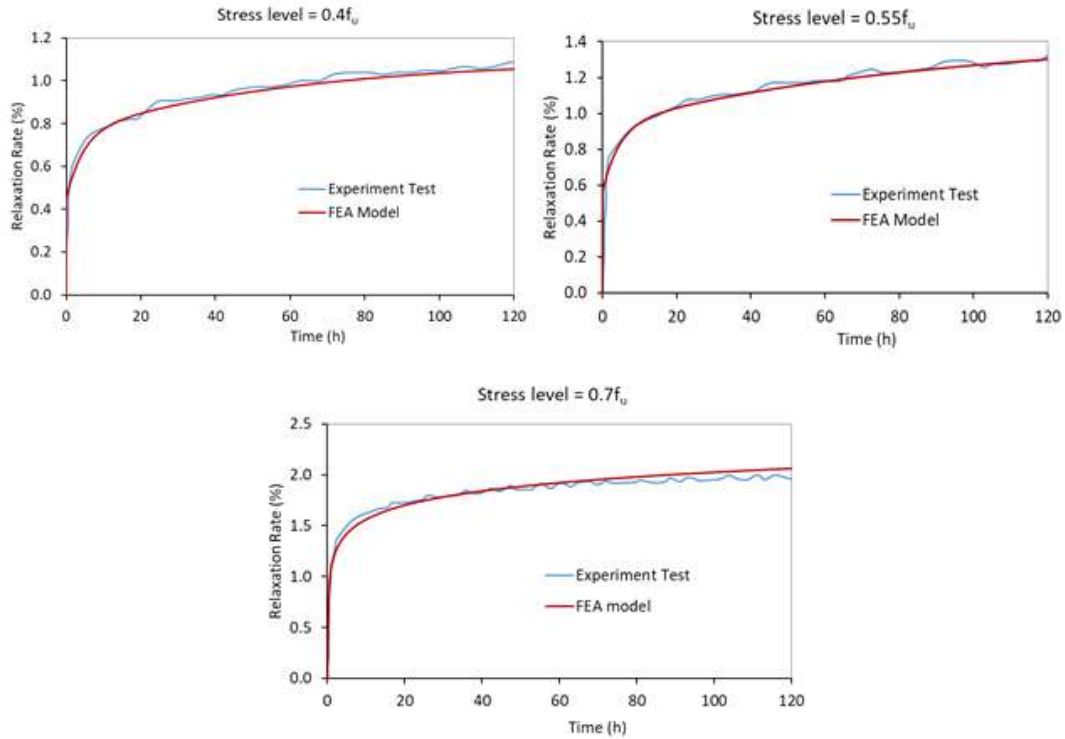


그림55. 케이블 응력 릴랙세이션 속도와 시간 비교

- 제안된 FE모델과 릴랙세이션 속도에 대한 실험의 비교는 제안된 FE모델 결과가 실험 결과에 가깝다는 것을 보여줌
- 다음 단계에서는 사장교의 모든 케이블 요소에 케이블 응력 릴랙세이션을 위해 제안된 FE모델을 적용함
- 실험 조건의 어려움으로 인해 대부분의 릴랙세이션 실험은 단기 릴랙세이션 실험임
- CEB-FIB 방정식 (식(11))을 사용하여 장기간의 릴랙세이션을 예측함

$$R(t) = R(1,000)x(t/1,000)^K \quad (11)$$

- 여기서 $R(t)$ 는 t 시간 후의 릴랙세이션 속도, t 는 릴랙세이션 시간(h), $t \geq 1,000h$, K 는 계수, $K = \log(R(1,000)/R(100))$, $R(1,000)$ 은 1,000시간에서의 릴랙세이션 속도이고, $R(100)$ 은 100시간에서의 릴랙세이션 속도임

표8. 방정식에 의해 계산된 장기간 릴랙세이션 속도

Specimen number	Relaxation rate $t = 1,000h$ (%)	K	Relaxation rate $t = 10y$ (%)	Relaxation rate $t = 30y$ (%)	Relaxation rate $t = 50y$ (%)
POS86-40	1.3161	0.0967	2.0283	2.2557	2.3699
POS86-55	1.5878	0.0942	2.4193	2.6829	2.8151
POS86-70	2.4901	0.0895	3.7160	4.1000	4.2917

- FE 모델에 대한 입력 매개변수는 실험결과 및 표8과 함께 식(12)의 응력 릴랙세이션에 맞춰서 결정
- $t = 8h$, $t = 120h$, $t = 87,600h$, $t = 262,800h$ 및 $t = 438,000h$ 에서 적합한 점을 이용하여 각 케이블의 FE 모델에 대한 입력 매개변수를 계산
- 그림56은 케이블 요소 603에 대한 FE 모델의 릴랙세이션 속도와 실험 및 CEB-FIB 방정식의 릴랙세이션 속도의 비교를 나타냄
- 그 결과 적합한 점에서의 릴랙세이션 속도에 대한 오류가 0%이고, 다른 지점의 오류가 약 1%임
- 다른 케이블 요소의 릴랙세이션 속도 오류는 케이블 요소(603)의 릴랙세이션 속도 오류와 거의 동일

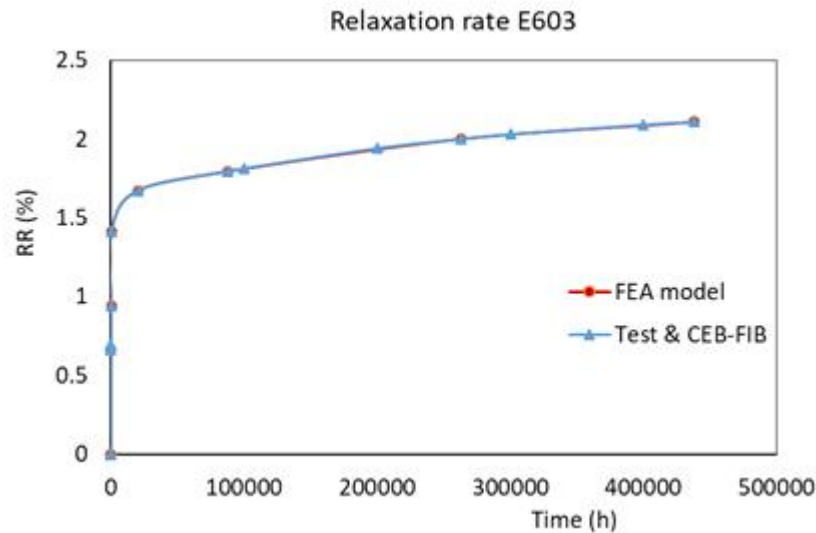


그림56. 장기간 케이블 응력 릴랙세이션 속도 비교

- 사장교의 모든 케이블 요소에 케이블 응력 릴랙세이션을 위해 제안된 FE모델을 적용함
- 동시에 모든 케이블의 응력 릴랙세이션으로 인한 구조 부재의 응력 재분배를 확인하기 위해 강사장교 기준 [12]를 사용하여 해석함
- 단면적 특성을 가진 강사장교의 구성은 그림57에 나와 있음
- 보-기둥 부재의 응력-변형률 곡선은 탄성계수가 $207GPa$ 이고 항복 응력이 $248MPa$ 인 탄성-완전 소성이라고 가정하였고, 케이블 부재의 응력-변형률 곡선은 탄성계수가 $193.6GPa$, 항복 응력이 $1,767MPa$, 인장강도가 $1,896MPa$ 인 탄성-완전 소성이라고 가정하였으며 이를 표9에 나타냄
- 케이블 응력 릴랙세이션은 사하중에 의해 유도되므로 케이블 응력 릴랙세이션 해석을 위해 적용된 사하중만 관리함

표9. 강사장교 유한요소(FE)모델 해석시 사용된 재료상수

Element type	Cross-sectional shape	Cross-sectional area (mm^2)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Cables	circle	2,694	1,768	1,896	193.6
Pylons	rectangular tube	290,000	248	248	207
Girders	square tube	190,000	248	248	207
Cross beams	W21x44	8,245	248	248	207

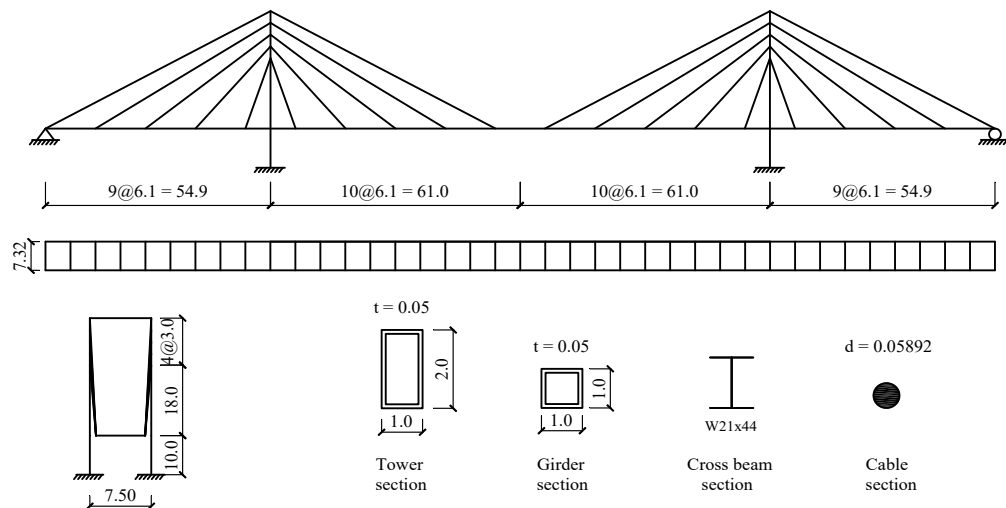


그림57. 강사장교 (단위 : m)

- FE모델에서 보, 거더, 주탑은 보(B31) 요소로 모델링 되었으며 케이블은 트러스(T3D2) 요소로 모델링 됨
- 케이블의 릴랙сей션 모델이 입증되었으며, 강사장교의 모든 케이블에 바로 적용됨
- 그림58은 케이블 응력 릴랙сей션으로 인한 응력 재분배의 추가적인 평가를 위해 배치된 요소 수와 함께 강사장교에 대해 제안된 FE모델을 보여줌
- 우리는 87,600시간(10년), 262,800시간(30년), 438,000시간(50년)의 기간으로 강사장교의 응력 릴랙сей션 해석을 수행함

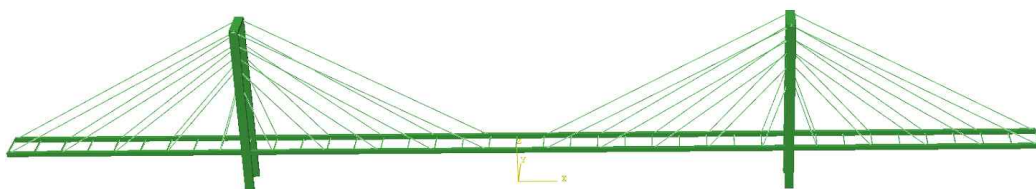
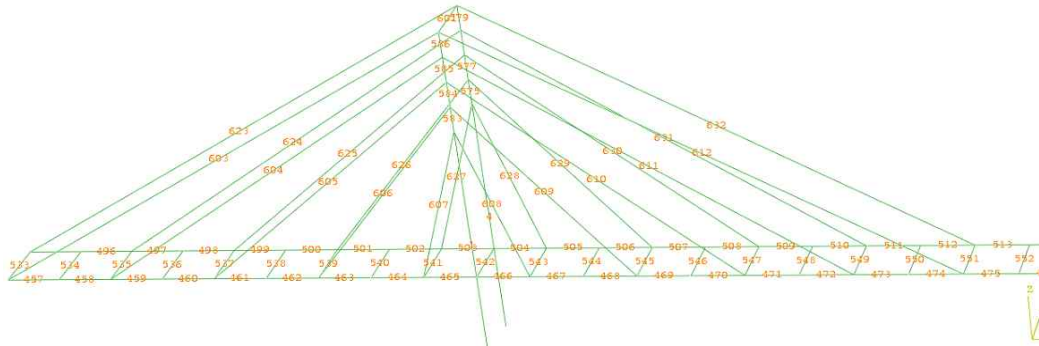
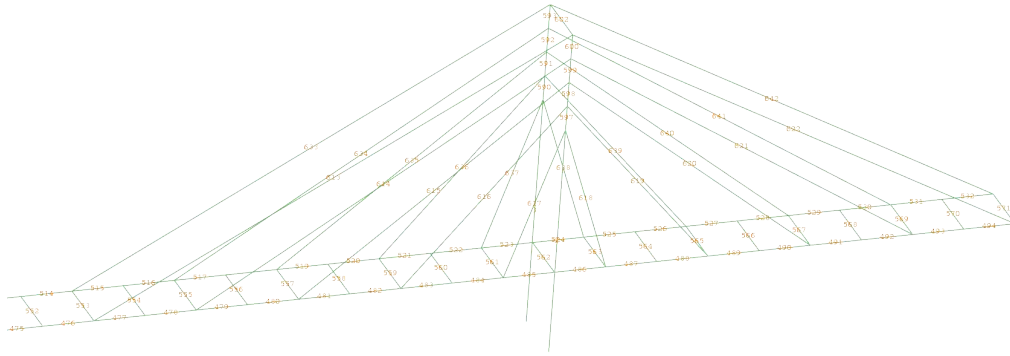


그림58. 강사장교의 FE모델



(a) 사장교 좌측 FE모델 요소 번호



(b) 사장교 우측 FE모델 요소 번호

그림59. 강사장교의 FE모델 요소 번호

- 결과는 케이블 응력 릴랙세이션으로 인해 강사장교의 구조 부재에서 복잡한 응력 재분배를 보여줌
- 일부 케이블은 일반적으로 케이블 응력 릴랙세이션으로 인해 응력이 감소하지만, 다른 케이블은 케이블의 응력 재분배로 인해 응력이 증가함
- 보, 거더 및 주탑과 같은 구조 부재에서는 케이블 릴랙세이션으로 인한 응력 재분배는 구하기 복잡함
- 사장구조의 교 대칭성으로 인해 보의 응력은 크게 변하지 않음
- 거더와 주탑의 응력은 많이 변함
- 거더 요소 472에서는 응력이 6.55%로 증가하고, 주탑 요소 1에서는 초기 응력 값에 비해 50년 후의 응력이 5.85%로 증가함
- 케이블 응력 릴랙세이션으로 인한 구조 부재의 응력 재분배 결과는 표10, 표11, 표12 및 표13에 나와 있음
- 구조 부재의 요소 번호는 그림59에 나타냄

표10. FE모델의 케이블 응력 릴랙세이션

Cable Element ID	Initial stress (MPa)	Stress at t = 10 years (MPa)	Relaxation rate at t = 10 years (%)	Stress at t = 30 years (MPa)	Relaxation rate at t = 30 years (%)	Stress at t = 50 years (MPa)	Relaxation rate at t = 50 years (%)
603	681.18	679.71	0.22	679.42	0.26	679.21	0.29
604	725.56	722.80	0.38	722.51	0.42	722.38	0.44
605	708.34	706.59	0.25	706.42	0.27	706.34	0.28
606	610.78	611.35	-0.09	611.39	-0.10	611.40	-0.10
607	485.28	485.80	-0.11	485.86	-0.12	485.90	-0.13
608	485.04	486.90	-0.38	487.11	-0.43	487.22	-0.45
609	651.16	653.30	-0.33	653.53	-0.36	653.65	-0.38
610	795.81	794.05	0.22	793.88	0.24	793.79	0.25
611	815.15	811.37	0.46	810.97	0.51	810.75	0.54
612	674.63	675.37	-0.11	675.36	-0.11	675.36	-0.11
613	675.45	676.23	-0.12	676.29	-0.12	676.32	-0.13
614	815.60	811.85	0.46	811.48	0.51	811.29	0.53
615	796.10	794.38	0.22	794.22	0.24	794.14	0.25
616	653.12	655.25	-0.33	655.48	-0.36	655.60	-0.38
617	490.65	492.34	-0.34	492.53	-0.38	492.62	-0.40
618	480.00	480.70	-0.15	480.78	-0.16	480.83	-0.17
619	608.87	609.41	-0.09	609.46	-0.10	609.49	-0.10
620	707.22	705.41	0.26	705.21	0.28	705.10	0.30
621	723.05	720.30	0.38	720.00	0.42	719.86	0.44
622	677.38	676.05	0.20	675.89	0.22	675.81	0.23

표11. 보의 응력 재분배

Beam Element ID	Initial stress (MPa)	Stress at t = 10 years (MPa)	Redistribution rate at t = 10 years (%)	Stress at t = 30 years (MPa)	Redistribution rate at t = 30 years (%)	Stress at t = 50 years (MPa)	Redistribution rate at t = 50 years (%)
533	0.00050	0.00050	-0.39	0.00050	-0.44	0.00050	-0.45
534	0.06997	0.06969	-0.39	0.06966	-0.43	0.06965	-0.45
535	0.30513	0.30395	-0.39	0.30383	-0.43	0.30377	-0.45
536	0.14988	0.14940	-0.32	0.14936	-0.35	0.14933	-0.37
537	0.37948	0.37852	-0.25	0.37843	-0.28	0.37838	-0.29
538	0.18084	0.18074	-0.05	0.18073	-0.06	0.18072	-0.06
539	0.45581	0.45628	0.10	0.45631	0.11	0.45631	0.11
540	0.21464	0.21485	0.10	0.21487	0.11	0.21488	0.11
541	0.53286	0.53339	0.10	0.53346	0.11	0.53350	0.12
542	0.23070	0.23128	0.25	0.23135	0.28	0.23138	0.30
543	0.53159	0.53367	0.39	0.53391	0.44	0.53404	0.46
544	0.21981	0.22064	0.38	0.22074	0.42	0.22079	0.44
545	0.48614	0.48779	0.34	0.48797	0.38	0.48806	0.40
546	0.19705	0.19717	0.06	0.19718	0.07	0.19719	0.07
547	0.42691	0.42590	-0.24	0.42581	-0.26	0.42576	-0.27
548	0.16446	0.16385	-0.37	0.16379	-0.41	0.16376	-0.43
549	0.33575	0.33412	-0.48	0.33395	-0.54	0.33386	-0.56
550	0.11873	0.11845	-0.23	0.11842	-0.26	0.11839	-0.28
551	0.22074	0.22104	0.14	0.22104	0.14	0.22104	0.14
552	0.09390	0.09406	0.17	0.09407	0.18	0.09407	0.18

표12. 거더의 응력 재분배

Beam Element ID	Initial stress (MPa)	Stress at t = 10 years (MPa)	Redistribution rate at t = 10 years (%)	Stress at t = 30 years (MPa)	Redistribution rate at t = 30 years (%)	Stress at t = 50 years (MPa)	Redistribution rate at t = 50 years (%)
457	7.47	7.63	2.11	7.65	2.33	7.66	2.45
458	8.86	9.29	4.94	9.34	5.43	9.36	5.67
459	5.70	5.15	-9.60	5.10	-10.53	5.07	-10.96
460	18.55	18.13	-2.25	18.09	-2.46	18.08	-2.55
461	39.57	39.41	-0.40	39.40	-0.43	39.39	-0.44
462	52.76	53.02	0.51	53.06	0.57	53.08	0.61
463	68.78	69.42	0.93	69.49	1.04	69.53	1.10
464	76.10	77.04	1.24	77.15	1.39	77.21	1.47
465	82.85	84.04	1.44	84.17	1.60	84.25	1.69
466	84.54	85.91	1.61	86.06	1.79	86.15	1.89
467	81.23	82.51	1.58	82.65	1.76	82.73	1.85
468	77.36	78.33	1.25	78.44	1.39	78.50	1.47
469	60.22	60.63	0.68	60.67	0.76	60.70	0.80
470	42.07	41.72	-0.83	41.69	-0.92	41.66	-0.97
471	7.64	6.70	-12.24	6.60	-13.64	6.54	-14.42
472	25.12	26.51	5.54	26.68	6.19	26.77	6.55
473	67.28	68.80	2.26	68.99	2.54	69.09	2.69
474	99.04	100.47	1.43	100.64	1.61	100.75	1.72
475	123.32	124.69	1.12	124.87	1.26	124.97	1.34

표13. 주탑의 응력 재분배

Column Element ID	Initial stress (MPa)	Stress at t = 10 years (MPa)	Redistribution rate at t = 10 years (%)	Stress at t = 30 years (MPa)	Redistribution rate at t = 30 years (%)	Stress at t = 50 years (MPa)	Redistribution rate at t = 50 years (%)
1	19.69	20.65	4.87	20.77	5.49	20.84	5.85
583	15.71	15.40	-1.96	15.36	-2.22	15.34	-2.37
584	15.07	14.83	-1.62	14.80	-1.82	14.78	-1.95
585	12.42	12.25	-1.33	12.23	-1.51	12.22	-1.61
586	7.22	7.17	-0.74	7.16	-0.84	7.16	-0.91

- 그림60은 50년 후 일부 전형적인 구조 부재의 케이블 응력 릴랙세이션으로 인한 응력 재분배를 보여줌

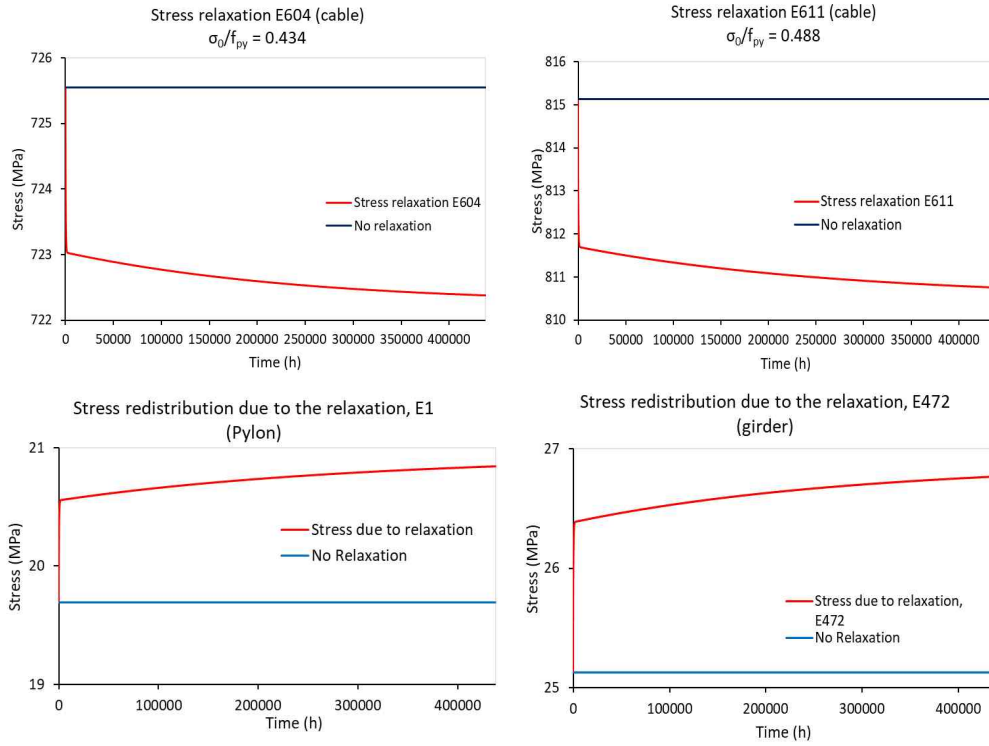


그림60. 일부 구조 부재의 응력 재분배

Step5 응력 릴랙세이션 방정식의 계수 변화에 대한 구조물의 장기거동 민감도 분석

- 케이블의 응력 릴랙세이션은 일반적인 Maxwell 모델을 기반으로 하며 응력 릴랙세이션은 다음 방정식으로 계산됨

$$\sigma(t) = E_{\infty} \varepsilon_0 + \sum_{i=1}^n E_i \varepsilon_0 \exp(-t/\tau_i) = \varepsilon_0 [E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i \exp(-t/\tau_i)] \quad (12)$$

- 여기서 E_{∞} 는 최종 계수 또는 평형 계수고, $E_0 = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i$ 는 순간 계수를 나타내며 E_i 및 τ_i 쌍은 Prony 쌍을 나타냄

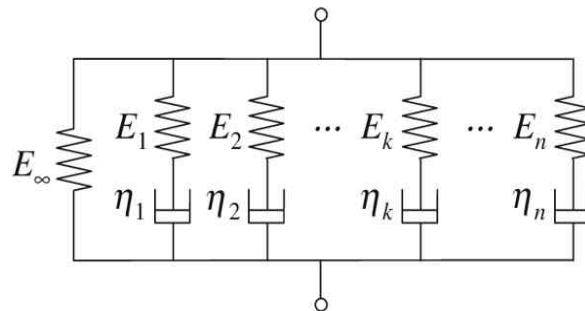


그림61. 릴랙세이션을 위한 일반적인 Maxwell 모델

E_{∞} 는 최종 계수를 나타냄

- 이 연구에서는 식(12)에서 E_i 와 τ_i 를 변경하여 강사장교의 장기거동에 대한 민감도 분석을 연구함
- 우리는 그림62와 그림63에서 강 사장교의 중간 경간에서 처짐의 민감도를 연구함
- E_i 와 τ_i 의 초기 값은 케이블 릴랙세이션 실험결과를 식(12)에 적용하면 각 케이블에 대해 계산됨
- E_i 및 τ_i 의 초기 값은 표14에 나와 있음

표14. 모든 케이블에 대한 FE모델의 입력 매개변수

Cable Element	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	E_∞ (MPa)	t_1 (h)	t_2 (h)	t_3 (h)
603	1,887.1	1,137.3	1,213.7	185,962.0	330.7	271,231.2	0.619563
604	2,124.1	1,263.5	1,424.2	185,388.2	329.8	268,820.8	0.619395
605	2,035.6	1,216.4	1,345.6	185,602.4	330.1	269,659.1	0.619408
606	1,440.4	899.6	817.1	187,043.0	333.4	277,817.1	0.619556
607	95.2	314.4	50.9	189,739.6	105.5	361,515.6	0.782359
608	94.7	313.1	46.3	189,745.9	127.6	362,300.7	0.000001
609	1,708.4	1,042.1	1,055.1	186,394.4	331.6	273,463.8	0.548706
610	2,445.2	1,434.7	1,709.3	184,610.7	328.8	266,288.3	0.548656
611	2,523.9	1,476.7	1,779.2	184,420.2	328.6	265,763.9	0.657395
612	1,849.4	1,117.2	1,180.2	186,053.2	330.9	271,665.6	0.663606
613	1,854.1	1,119.7	1,184.5	186,041.7	330.9	271,612.9	0.666815
614	2,525.7	1,477.7	1,780.8	184,415.9	328.6	265,752.6	0.657395
615	2,446.4	1,435.4	1,710.4	184,607.8	328.8	266,279.1	0.548656
616	1,720.6	1,048.6	1,065.8	186,365.0	331.6	273,285.7	0.548706
617	168.0	344.1	90.7	189,597.2	102.8	346,376.3	0.548795
618	30.0	285.3	2.8	189,881.8	1106.1	382,357.8	2.024641
619	1,426.8	892.3	805.0	187,075.9	333.5	278,062.5	0.619556
620	2,029.7	1,213.3	1,340.4	185,616.6	330.1	269,714.8	0.619408
621	2,111.4	1,256.8	1,412.9	185,418.8	329.8	268,935.2	0.619396
622	1,865.3	1,125.7	1,194.4	186,014.6	330.8	271,465.3	0.619563

- 각 케이블에 대한 E_i 및 τ_i 의 초기 값을 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%씩 증가 또는 감소시켜 각각 다른 E_i 와 τ_i 값에 대한 중간 경간 처짐의 민감도를 구함
- 각각 다른 E_i 값에 대한 중간 경간 처짐의 민감도는 그림62에 표시되어 있음
- E_i 값에 대한 중간 경간 처짐의 민감도는 거의 선형임
- E_i 값을 줄이면 처짐이 증가함

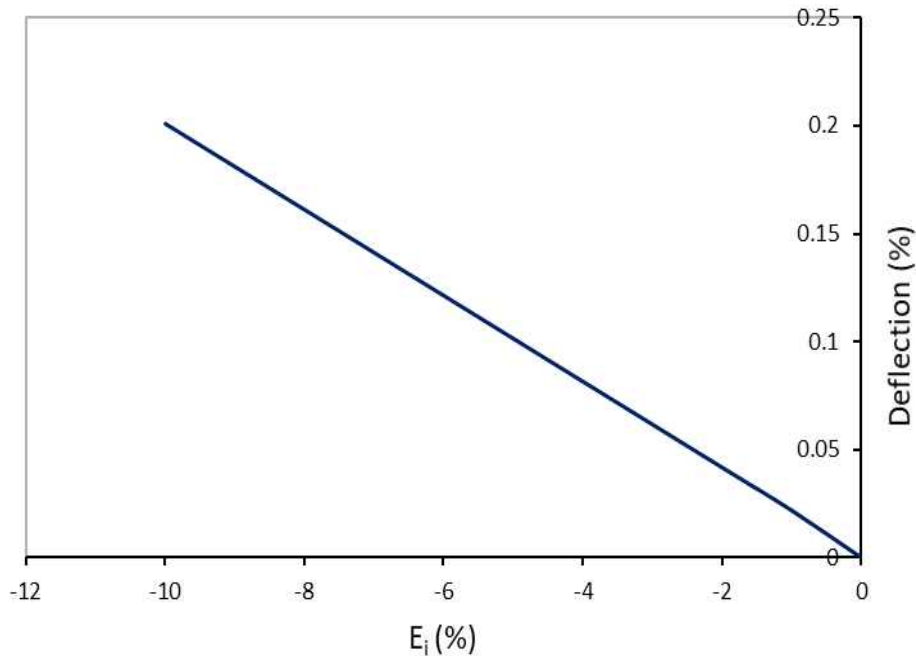


그림62. 각각 다른 E_i 의 값에 대한 중간 경간 처짐의 민감도

- 각각 다른 τ_i 의 값에 대한 중간 경간 처짐의 민감도는 그림63에 표시되어 있음
- τ_i 값에 대한 중간 경간 처짐의 민감도는 거의 선형임
- τ_i 값을 줄이면 처짐이 증가함

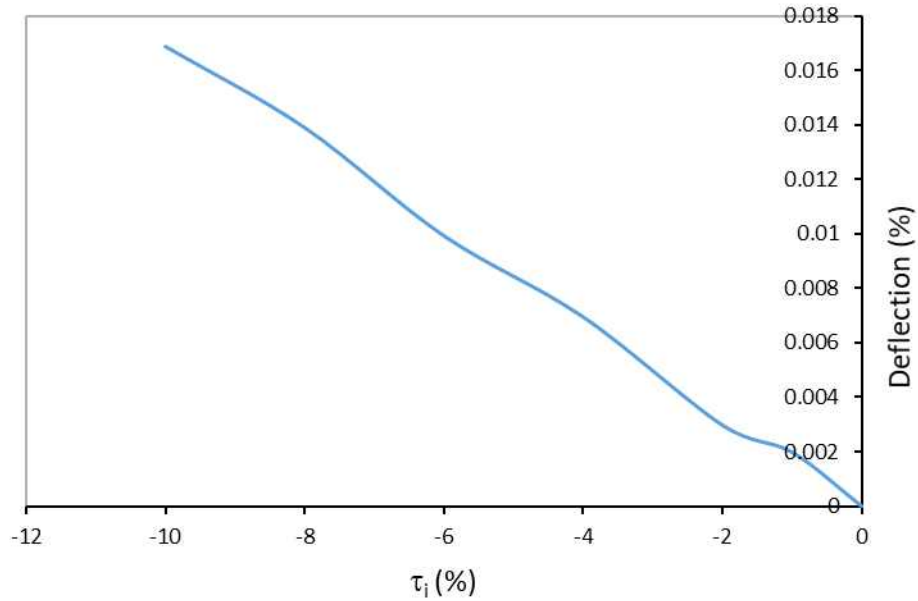


그림63. 각각 다른 τ_i 의 값에 대한 중간 경간 처짐의 민감도

- 그림62와 그림63에서 강사장교의 중간 경간 처짐이 각각 다른 E_i 및 τ_i 의 값에 크게 민감하지 않음을 알 수 있음
- 강사장교의 중간 경간 처짐은 E_i 및 τ_i 의 10%를 변화시켜도 크게 변화되지 않음
- 강사장교의 중간 경간 처짐은 τ_i 의 변화보다 E_i 의 변화에 더 민감함

B3. 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발

- 나노압입을 수행하고 릴랙세이션 함수를 결정

$$r(\%) = r_{\lim} \left[1 - e^{-\frac{t}{t_r}} \right] \quad (13)$$

- 식에서 r 은 릴랙세이션 손실(%)로 응력 감소량을 초기 재하 응력으로 나눈 값이며, $r_{\lim} = 100E_2/(E_1 + E_2)$ 와 $t_r = \eta/E_2$ 는 매개변수임
- 현재의 처짐량을 실측
- 위에서 구한 릴랙세이션 함수를 고려한 구조물의 유한요소해석으로 시간에 따른 처짐량을 산정
- 구조물 설계 시 산출된 처짐 결과와 비교하여 유지관리지표를 산출하여 구조물의 상태를 판단

$$R_n = \frac{\Delta_n}{\Delta_{d,n}} \quad (14)$$

$$R_{n+30} = \frac{\Delta_{n+30}}{\Delta_{d,n+30}} \quad (15)$$

- R_n 과 R_{n+30} 은 설계시 예측량에 대한 현시점에서의 측정값에 대한 비율을 계산하기 위한 변수임
- 식에서 R_n 은 설계시 현시점 (사용 후 n 년)의 예측 처짐량 $\Delta_{d,n}$ 에 대한 현재 처짐량 Δ_n 의 비이며, R_{n+30} 은 설계시 $n+30$ 년에서의 처짐량 $\Delta_{d,n+30}$ 에 대한 현재부터 30년 후의 처짐 예측량 Δ_{n+30} 의 비임

표15. 지표에 따른 구조물의 상태 평가

상태	R_n	R_{n+30}
양호	< 1.0	< 1.0
주의	< 1.0	> 1.0
경계	> 1.0	< 1.0
심각	> 1.0	> 1.0

- R_n 과 R_{n+30} 의 평균값 C_n 을 사용하여 표15와 같이 구조물의 상태를 세분화
- C_n 은 이 값들의 산술평균으로 상태의 정도(degree)를 표현하기 위한 변수임

$$C_n = \frac{R_n + R_{n+30}}{2} \quad (16)$$

표16. 지표 크기에 따른 구조물의 상태 평가 세분화

상태	강도	C_n
양호	매우	< 0.8
	보통	$0.8 \sim 0.9$
	약간	$0.9 \sim 1.0$
주의	매우	> 1.1
	보통	$1.0 \sim 1.1$
	약간	< 1.0
경계	매우	> 1.1
	보통	$1.0 \sim 1.1$
	약간	< 1.0
심각	매우	> 1.2
	보통	$1.1 \sim 1.2$
	약간	$1.0 \sim 1.1$

- (계산 예제 1) 측정 시점 $n = 5$ 년, 처짐 측정값 $171mm$, 초기 설계값 $218mm$, 나노압입에 의해 결정된 릴랙세이션 함수를 사용하여 예측된 35년에서의 처짐은 $326mm$, 초기 설계값은 $391mm$ 임

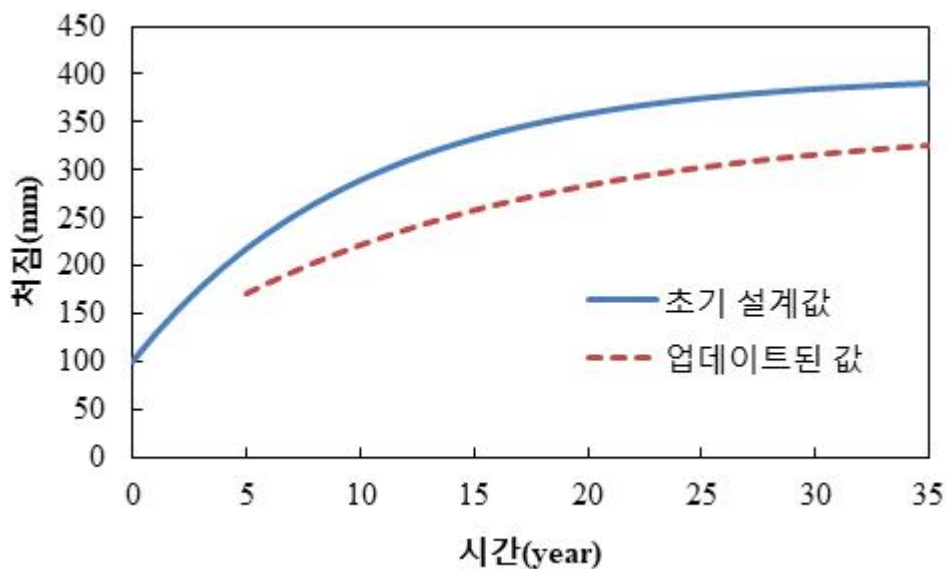


그림64. “양호” 상태에 대한 처짐 현황

- $R_n = \frac{\Delta_n}{\Delta_{d,n}} = \frac{171}{218} = 0.784 < 1.0$, $R_{n+30} = \frac{326}{391} = 0.834 < 1.0$ 표15로부터 “양호”로 상태 평가

- $C_n = \frac{R_n + R_{n+30}}{2} = \frac{0.784 + 0.834}{2} = 0.809 (> 0.8 \text{ and } < 0.9)$ 이므로 “보통 양호”상태로 결정
- (계산 예제 2) 측정 시점 $n = 5$ 년, 처짐 측정값 $199mm$, 초기 설계값 $218mm$, 나노압입에 의해 결정된 릴랙세이션 함수를 사용하여 예측된 35년에서의 처짐은 $416mm$, 초기 설계값은 $391mm$ 임

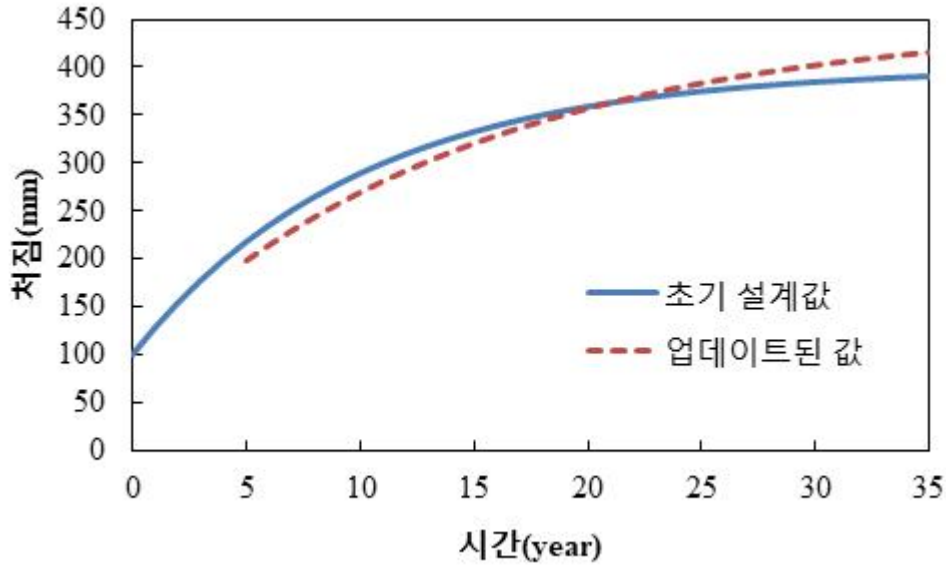


그림65. “주의” 상태에 대한 처짐 현황

- $R_n = \frac{\Delta_n}{\Delta_{d,n}} = \frac{199}{218} = 0.912 < 1.0$, $R_{n+30} = \frac{416}{391} = 1.064 > 1.0$ 표15로부터 “주의”로 상태 평가
- $C_n = \frac{R_n + R_{n+30}}{2} = \frac{0.912 + 1.064}{2} = 0.988 (< 1.0)$ 이므로 “약간 주의”상태로 결정
- (계산 예제 3) 측정 시점 $n = 5$ 년, 처짐 측정값 $258mm$, 초기 설계값 $218mm$, 나노압입에 의해 결정된 릴랙세이션 함수를 사용하여 예측된 35년에서의 처짐은 $350mm$, 초기 설계값은 $391mm$ 임

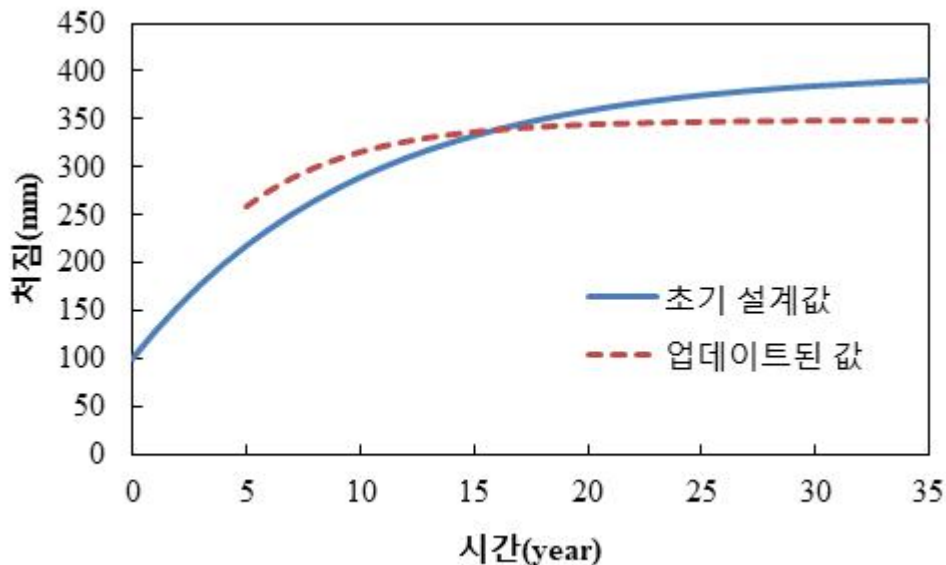


그림66. “경계” 상태에 대한 처짐 현황

- $R_n = \frac{\Delta_n}{\Delta_{d,n}} = \frac{258}{218} = 1.183 > 1.0$, $R_{n+30} = \frac{350}{391} = 0.895 < 1.0$ 표15로부터 “경계”로 상태 평가
- $C_n = \frac{R_n + R_{n+30}}{2} = \frac{1.183 + 0.895}{2} = 1.039 (> 1.0 \text{ and } < 1.1)$ 이므로 “보통 경계”상태로 결정
- (계산 예제 4) 측정 시점 $n = 5$ 년, 처짐 측정값 $321mm$, 초기 설계값 $218mm$, 나노 압

입에 의해 결정된 릴렉세이션 함수를 사용하여 예측된 35년에서의 처짐은 450mm, 초기 설계값은 391mm임

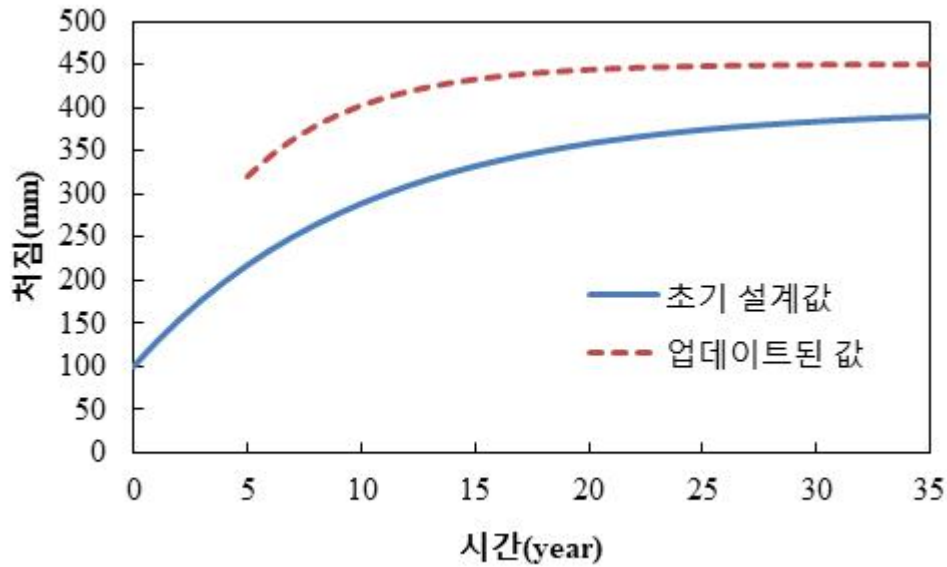


그림67. “심각” 상태에 대한 처짐 현황

- $R_n = \frac{\Delta_n}{\Delta_{d,n}} = \frac{321}{218} = 1.472 > 1.0$, $R_{n+30} = \frac{450}{391} = 1.151 < 1.0$ 표15로부터 “심각”으로 상태 평가
- $C_n = \frac{R_n + R_{n+30}}{2} = \frac{1.472 + 1.151}{2} = 1.311 (> 1.2)$ 이므로 “매우 심각” 상태로 결정
- 제안된 유지관리 기법이 의미하는 바는 비록 구조물의 현재 상태가 안전하다고 판단되더라도, 업데이트된 구조물의 장기거동을 고려할 경우 안전하지 않을 수도 있다는 것임
- 본 연구는 실험적 증명 수준인 TRL 3단계에 해당하는 유지관리기법을 개발하는 것으로 제안된 방법을 현장에 적용하기 위해서는 장기간에 걸쳐 계측된 처짐 자료 등을 활용하여 신뢰도를 향상시키는 것이 필요함

다. 연구개발 성과

구분 번 (논문 호/특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영 향 력 지 수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1 논문	Strain Rate -Dependent Behaviors of Mechanical Properties of structural steel investigated using indentation and finite element analysis	세종 대학교	Ngoc-Vinh Nguyen (제1저자) 김승억 (교신저자)	MECHANICS OF MATERIALS	2.993	2019.06.14.	O (단독)	SCI논문 JCR 기준 상위 23.8% (JCR 범주 MECHANICS)
2 논문	Experimental study to investigate microstructure and continuous strain rate sensitivity of structural steel weld zone using nanoindentation	세종 대학교	Ngoc-Vinh Nguyen (제1저자) 김승억 (교신저자)	International Journal of Mechanical Sciences	4.631	2020.05.15.	O (단독)	SCI논문 JCR 기준 상위 9.8% (JCR 범주 MECHANICS)
3 논문	An experimental study on stress relaxation behaviour of high strength steel wire : Microstructural evolution and degradation of mechanical properties	세종 대학교	Ngoc-Vinh Nguyen (제1저자) 김승억(교신 저자)	Construction and Building Materials	4.419	2020.11.20.	O (중복)	SCI논문 JCR 기준 상위 7.7% (JCR 범주 ENGINEERIN G, CIVIL)
4 특허	릴랙세이션에 의한 장기거동을 고려한 구조물 유지관리 지표 산출 시스템 및 방법	세종 대학교 산학 협력단, 경남 대학교 산학 협력단	발명자(김승 억, 김정중)	대한민국		2020.10.29.	O (단독)	출원번호 10-2020-01418 99

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

(1) 연구 성과목표 및 성과지표

(가) 총괄 성과목표 및 성과지표

구 분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준					해당 기관	예산 (백만원)	양적 성과목표	
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치				
주 관	A	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 도출 기법 개발	A-1	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정	①	방정식 신뢰도	95% 이상	SCI(E)급 논문 게재	논문 게재 여부	25	세종대학교	98	SCI(E)급 논문: 1건
			A-2	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증	①	방정식 오차	±5% 이하	릴랙세이션 실험	릴랙세이션 실험 결과와 비교 검증	15	세종대학교	66	-
	B	케이블 강재의 응력 릴랙세이션 장기거동을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발	B-1	케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립	①	해석결과 오차	±5% 이하	피로 실험	피로 실험 결과와 비교 검증	30	세종대학교	107	SCI(E)급 논문 : 1건
			B-2	케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석	①	해석결과 오차	±5% 이하	SCI(E)급 논문 게재	논문 게재 여부	15	세종대학교	50	SCI(E)급 논문 : 1건
			B-3	케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발	①	유지관리 기법 신뢰도	95% 이상	특허 출원	특허 출원 여부	15	세종대학교	49	특허 : 출원 1건
	계									100		370	SCI(E)급 논문 : 3건 특허 : 출원 1건

(2) 연차별 성과목표 및 성과지표

(가) 1차년도

구분	핵심연구성과 (level1)			단위 성과 (level2)		1차년도 성과점검기준					해당 기관	예산 (백만)	정량목표
						질적성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치			
주관	A	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 도출 기법 개발	A-1	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정	①	방정식 신뢰도	95% 이상	SCI(E)급 논문 게재	논문 게재 여부	62.5	세종대학교	98	SCI(E)급 논문: 1건
			A-2	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증	①	방정식 오차	±5% 이하	인장강도 실험	릴랙세이션 실험 결과와 비교 검증	37.5	세종대학교	66	-
계										100		164	SCI(E)급 학술지 : 1건

(나) 2차년도

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		2차년도 성과점검기준					해당 기관	예산 (백만)	정량목표	
					질적성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치				
주관	B	케이블 강재의 응력 릴랙세이 션 장기거동 을 고려한 구 조물의 유지관 리 기법 개발	B-1	케이블 강재의 릴랙세이 션과 피로도 관계 정립	①	해석결과 오차	±5% 이하	피로 실험	피로 실험 결과와 비교 검증	50	세종대 학교	107	SCI(E)급 논문 : 1건
			B-2	케이블 강재의 응력 릴 랙세이션을 고려한 구조 물의 장기거동 해석	①	해석결과 오차	±5% 이하	SCI(E)급 논문 게재	논문 게재 여부	25	세종대 학교	50	SCI(E)급 논문 : 1건
			B-3	케이블 강재의 응력 릴 랙세이션을 고려한 구조 물의 유지관리 기법 개 발	①	유지관리 기법 신뢰도	95% 이상	특허 출원	특허 출원 여부	25	세종대 학교	49	특허 : 출원 1건
			계							100		206	특허 : 출원 1건 SCI(E)급 학술지 : 2건

(3) 연도별 주요 추진 일정

구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄							370								
주관	나노압입을 이용한 케이블 강재의 틸락세이션 분석 및 구조물 유지관리 기법 개발 연구 (세종대학교)	A	A-1	A-1-①	케이블 강재의 기계적 특성 도출을 위한 인장 실험 수행	인장 실험결과	10								
					압입공정을 시뮬레이션하기 위한 FE모델 수립 고 다양한 하중에 대한 FE해석 수행	유한요소해석 모델	10								
					변위제어 나노압입 실험 수행	나노압입 실험결과	19.2								
					10가지 하중에 대한 FE해석을 수행하여 다양한 응력 수준에서의 파괴분율을 계산	다양한 응력 수준에서의 파괴분율	10								
					압입결과를 통해 응력 릴랙세이션-시간 관계 도출	응력 릴랙세이션과 시간 관계 도출	10								
		A-2	A-2-①		케이블 강재의 릴랙세이션 실험 수행	릴랙세이션 실험결과	36								
					실험 결과를 회귀분석하여 응력 릴랙세이션 방정식 결정	응력 릴랙세이션 방정식	15								
					나노압입에 의해 결정된 응력 릴랙세이션 방정식과 비교 검증	응력 릴랙세이션 방정식	15								
		B	B-1	B-1-①	3가지의 반복하중에 대하여 피로 실험 수행	피로 실험결과	57								
					나노압입 실험으로 피로 실험 후 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정	응력 릴랙세이션 방정식	25								
					강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 상관관계 도출	강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 상관관계	25								
			B-2	B-2-①	케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 사장교의 유한요소해석 모델 개발	사장교 유한요소해석 모델	25								
					응력 릴랙세이션 방정식의 계수 변화에 대한 구조물의 장기거동 민감도 분석	구조물의 장기거동 민감도	25								
위탁	나노압입을 이용한 케이블 강재의 틸락세이션 분석 및 구조물 유지관리 기법 개발 연구 (경남대학교)	A	A-1	A-1-①	역 알고리즘을 사용하여 릴랙세이션 속도-시간 관계 도출	릴랙세이션과 시간 관계 도출	38.8								
		B	B-3	B-3-①	유지관리시점에서 재산정된 강재의 릴랙세이션을 고려하여 구조물의 장기거동 관리 지표 산정	장기거동 관리 지표	17								
					릴랙세이션 방정식 계수 변화에 따른 장기거동 변화 분석	릴랙세이션 방정식 계수 변화에 따른 장기거동 변화	16								
					유지관리 알고리즘 제시	유지관리 알고리즘	16								

나. 목표 달성여부

(1) 연구개발 목표 달성도

(가) 핵심성과물 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정	100	- 케이블 강재의 기계적 특성 도출을 위한 인장실험 수행 - 압입공정을 시뮬레이션하기 위한 FE모델 수립과 다양한 하중에 대한 FE해석 수행 - 변위제어 나노압입 실험 수행 10가지 하중에 대한 FE해석을 수행하여 다양한 응력 수준에서의 부피분율을 계산 - 압입결과를 통해 응력 릴랙세이션-시간 관계 도출 - 역 알고리즘을 사용하여 릴랙세이션 속도-시간 관계 도출
나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증	100	- 케이블 강재의 릴랙세이션 실험 수행 - 실험결과를 회귀분석하여 응력 릴랙세이션 방정식 결정 - 나노압입에 의해 결정된 응력 릴랙세이션 방정식과 비교 검증
케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립	100	3가지의 반복하중에 대하여 피로 실험 수행 - 나노압입 실험으로 피로 실험 후 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정 - 강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 상관관계 도출
케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석	100	- 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 사장교의 유한요소해석 모델 개발 - 응력 릴랙세이션 방정식의 계수 변화에 대한 구조물의 장기거동 민감도 분석
케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발	100	- 유지관리 시점에서 재산정된 강재의 릴랙세이션을 고려하여 구조물의 장기거동 관리 지표 산정 - 릴랙세이션 방정식 계수 변화에 따른 장기거동 변화 분석 - 유지관리 알고리즘 제시

(2) 핵심성과물별 세부 설명

(가) 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정

정의	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정	
목적	강선의 응력 릴랙세이션과 압입 곡선의 관계를 나타내는 방정식 구성	
성능목표	(기존기술 수준) - 응력 릴랙세이션 실험을 사용하여 응력 릴랙세이션 방정식 결정 (개발기술 수준) - 나노압입 기법을 활용하여 릴랙세이션 방정식을 결정하는 방법으로 서 방정식의 신뢰도 95% 이상을 목표로 릴랙세이션 속도를 추정하는 새로운 방법(비파괴 진단 기술)을 개발	
성과달성 책임자 (소속기관)	김승억 (세종대학교)	
소요기간	2019.04 ~ 2019.10 (0년 7개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	• 릴랙세이션 방정식은 FE해석과 나노압입 실험결과를 기반으로 도출 • 응력 손실을 고려한 응력 릴랙세이션 방정식 결정 • 응력 릴랙세이션 방정식 신뢰도 97.18% 달성	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	국내 : 0건, 해외 : 0건
	논문	국내 : 0건, 해외 : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건
달성도 (%)	100	

(나) 나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증

정의	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증	
목적	Poscable-86 고강도 강선에 대한 릴랙세이션 실험을 사용하여 케이블 강재의 릴랙세이션 방정식 검증	
성능목표	(기존기술 수준) - Poscable-86 고강도 강선의 릴랙세이션 방정식을 결정하기 위해 응력 릴랙세이션 실험 사용 (개발기술 수준) - 나노압입 기법을 활용하여 릴랙세이션 방정식을 결정하는 방법으로 서 방정식의 오차 $\pm 5\%$ 이하를 목표로 릴랙세이션 속도를 추정하는 새로운 방법(비파괴 진단 기술)을 개발	
성과달성 책임자 (소속기관)	김승억 (세종대학교)	
소요기간	2019.07 ~ 2019.12 (0년 6개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	• 개발한 릴랙세이션 방정식을 릴랙세이션 실험과 비교 검증 • 응력 릴랙세이션 방정식 오차율 2.82% 달성	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	국내 : 0건, 국외 : 0건
	논문	국내 : 0건, 국외 : 0건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건
달성도 (%)	100	

(다) 케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립

정의	케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립	
목적	나노압입을 이용한 다양한 피로 조건에서의 케이블 강재의 거동 연구	
성능목표	(기존기술 수준) - 기존에 개발된 연구 없음 (개발기술 수준) - 케이블 강재의 피로실험 후 나노압입 실험으로 릴랙세이션 거동 도출 - 피로실험 결과와 비교 검증하여 해석결과 오차 $\pm 5\%$ 이하를 목표로 함	
성과달성 책임자 (소속기관)	김승억 (세종대학교)	
소요기간	2020.01 ~ 2020.06 (0년 6개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	• 논문 게재를 통하여 효율성 검증 • 강재의 릴랙세이션과 피로도 간의 상관관계 도출 • 해석결과 오차율 0.16% 달성	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	국내 : 0건, 국외 : 0건
	논문	국내 : 0건, 국외 : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건
달성도 (%)	100	

(라) 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석

정의	케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석	
목적	응력 릴랙세이션을 고려한 간단한 사장교의 유한요소해석 모델 개발	
성능목표	(기존기술 수준) - 기존에 개발된 연구 없음 (개발기술 수준) - 1차년도에서 개발한 방정식의 계수 변화에 대한 구조물의 장기거동 민감도 분석 - 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석결과 오차 $\pm 5\%$ 이하를 목표로 함	
성과달성 책임자 (소속기관)	김승억 (세종대학교)	
소요기간	2020.07 ~ 2020.09 (0년 3개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	• 논문 게재를 통하여 효율성 검증 • 유한요소해석 결과오차 1% 달성	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	국내 : 0건, 국외 : 0건
	논문	국내 : 0건, 국외 : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건
달성도 (%)	100	

(마) 케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발

정의	케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발	
목적	유지관리 시점에서 재산정된 강재의 릴랙세이션을 고려하여 구조물의 장기거동 관리지표 산정	
성능목표	(기존기술 수준) - 기존에 개발된 연구 없음 (개발기술 수준) - 유지관리 알고리즘 제시 - 유지관리 기법 신뢰도 95% 이상을 목표로 함	
성과달성 책임자 (소속기관)	김승억 (세종대학교)	
소요기간	2020.07 ~ 2020.12 (0년 6개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	• 특허 출원을 통하여 효율성 검증 • 유지관리 기법 신뢰도 95% 달성	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	국내 : 1건, 국외 : 0건
	논문	국내 : 0건, 국외 : 0건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건
달성도 (%)	100	

다. 관련 분야 기여도

(1) 연구개발 핵심성과

(가) 성과 리스트

연 번	핵심성과물	성과목표	성과달성	달성도 (%)	기여도 (%)
1	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 결정	SCI논문 : 1건	SCI논문 : 1건	100	100
2	나노압입에 의한 케이블 강재의 응력 릴랙세이션 방정식 검증				
3	케이블 강재의 릴랙세이션과 피로도 관계 정립	SCI논문 : 2건 특허 : 1건	SCI논문 : 2건 특허 : 1건	100	100
4	케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 장기거동 해석				
5	케이블 강재의 응력 릴랙세이션을 고려한 구조물의 유지관리 기법 개발				

- 1차 년도의 성과목표는 SCI논문 1건이며, 성과달성은 SCI논문 1건으로 100% 달성함
- 2차 년도의 성과목표는 SCI논문 2건 및 특허 출원 1건이며, 성과달성은 SCI논문 2건 및 특허 출원 1건으로 100% 달성함
- 게재된 논문 중 2건이 해당분야 상위 10%이내의 최고수준 저널에 게재되었음
- 국내뿐만 아니라 세계적으로도 나노기술에 대한 투자와 관심이 지속적으로 확대되고 있으나, 현재까지는 연구 진행이 많이 되지 않은 상황임. 이에 본 연구는 국·내외 적으로 이전에 없던 나노압입 기술을 구조용 강재에 적용하였다는 점에서 많은 기여를 함
- 건설 분야에 적용 가능한 나노기술 관련 원천기술의 확보가 시급한 실정에 본 연구는 앞으로의 기술 발전에서 시발점 역할을 함
- 본 연구를 통하여 케이블 강재의 릴랙세이션에 대한 데이터가 나노압입 수행으로 파악 가능하며, 본 연구는 Poscable-86 고강도 강선을 나노압입 수행하여 유지관리 기법을 개발할 수 있도록 데이터 축적을 완료하였음
- 추후 활용시 Poscable-86 고강도 강선을 제외한 케이블 강선에 대해 종류별로 나노압입을 수행하여 데이터를 축적하면 유지관리 기법을 개발할 수 있음
- 나노압입 결과는 진동과 표면 조도에 매우 민감하므로 매끄러운 표면의 시편을 무진동 테이블 위에서 압입 해야 하므로 현재의 기술로는 현장에서 채취한 미소량의 시편을 실험실에서 계측하는 방법이 유일하다고 할 수 있음
- 따라서 현장에서 시편을 채취하여 실험실에서 분석한 결과를 현장에 적용하므로 유사 환경실험(TRL 5단계)에서도 현재 실험 방법과 동일하게 적용할 수 있음

4. 연구개발성과의 활용계획

가. 연구결과의 활용방안

- 개발될 유지관리 기법이 적용될 수 있는 구조물은 ① PSC 긴장재, ② 엑스트라도즈드교, ③ 사장교, ④ 현수교, ⑤ 케이블 건축물, ⑥ PC교 등이 있음



(a) PSC 긴장재



(b) 엑스트라도즈드교



(c) 사장교



(d) 현수교



(e) 케이블 건축물



(f) PC교

그림68. 본 기술을 활용할 대상구조물

- 본 연구를 통하여 개발 예정인 케이블 구조물의 응력 릴랙세이션을 고려한 유지관리 기법은 구조물의 유지관리에 활용
- 케이블 구조물의 사용기간에 따른 장기거동을 파악할 수 있으며, 릴랙세이션 손실을 고려하여 설계시 반영할 수 있음
- 본 연구에서는 TRL 3단계로 실험적 증명과 실험 단계에서의 단가를 비교 검증하였으나, 실용적인 기술로 발전하기 위해서는 향후 다양한 환경·시공조건을 고려한 현장 시험·검증 후 활용할 수 있음

나. 기대효과

(1) 기술적 측면

- 압입반응(비파괴 방법)을 통해 케이블의 장기 릴랙세이션을 예측하는 체계적인 기술을 개발함
- 케이블 구조물의 장기거동을 예측하는 정보를 제공함
- 케이블 강재의 릴랙세이션을 고려함으로써 구조물을 안전하게 설계할 수 있음

(2) 경제적·산업적 측면

- 일반적인 릴랙세이션 실험은 1,000시간이 걸리며, 비용은 10건 기준으로 약 1,700만원이 소요되나 본 연구에서 이용한 나노압입 실험은 35시간이 걸리며, 비용은 10건 기준으로 약 850만원이 소요됨
- 일반적인 릴랙세이션 실험은 시간이 많이 걸리는 반면에, 본 연구에서는 릴랙세이션 속도를 추정할 때 비파괴 압입방법을 적용하여 실험 비용과 시간을 줄일 수 있음
- 응력 릴랙세이션 방정식은 인적 자원을 효율적으로 사용하여 유지관리 효율성을 극대화할 수 있음
- 연구 결과를 활용하여 비파괴 진단 장비 산업 발전에 기여할 수 있음

- 나노기술을 이용한 케이블 구조의 비파괴 검사 장비를 개발하여 수출 가능

(3) 사회적 측면

- 응력 릴랙세이션을 고려한 케이블 구조물의 유지관리를 안정적으로 시행함으로써 인명과 재산 손실을 방지하고 심리적 안정감 확보

붙임. 참고 문헌

- [1] EN ISO 15630-1, EN ISO 15630-1: Steel for the reinforcement and prestressing of concrete. Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire, Ital. Board Stand. 248 (2010)
- [2] GB/T10120-2013, Metallic materials-Tensile stress relaxation- Method of test, Beijing China. (2013)
- [3] ASTM E2546-07, Standard Practice for Instrumented Indentation Testing, 2007
- [4] ISO 14577, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 1: Test method, Int. Organ. Stand. Geneva, Switz. (2002)
- [5] KS B 0802, Method of Tensile Test for Metallic Materials, Korean Stand. Assoc. (n.d.) 1 - 10
- [6] S. Xue, R. Shen, W. Chen, R. Miao, Corrosion fatigue failure analysis and service life prediction of high strength steel wire, Eng. Fail. Anal. 110 (2020)
- [7] S. Fraga, G.K.R. Pereira, M. Freitas, C.J. Kleverlaan, L.F. Valandro, L.G. May, Loading frequencies up to 20 Hz as an alternative to accelerate fatigue strength tests in a Y-TZP ceramic, J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 61 (2016)
- [8] U.A. Mannan, M.R. Islam, R.A. Tarefder, Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies, Int. J. Fatigue. 78 (2015)
- [9] F. Petrini, P. Olmati, F. Bontempi, Coupling effects between wind and train transit induced fatigue damage in suspension bridges, Struct. Eng. Mech. 70 (2019)
- [10] C. Jiang, C. Wu, X. Jiang, Experimental study on fatigue performance of corroded high-strength steel wires used in bridges, Constr. Build. Mater. 187 (2018)
- [11] ASTM, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, E606/E606M-12. 96 (2004)
- [12] ASTM E466 - 15, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM Int. West Conshohocken, PA. 03.01 (2015)
- [13] N.V. Nguyen, T.H. Pham, S.E. Kim, Strain rate sensitivity behavior of a structural steel during low-cycle fatigue investigated using indentation, Mater. Sci. Eng. A. 744 (2019)
- [14] M. Lichinchi, C. Lenardi, J. Haupt, R. Vitali, Simulation of Berkovich nanoindentation experiments on thin films using finite element method, Thin Solid Films. 333 (1998)
- [15] N.V. Nguyen, J.J. Kim, S.E. Kim, Methodology to extract constitutive equation at a strain rate level from indentation curves, Int. J. Mech. Sci. 152 (2019)
- [16] M. Dao, N. Chollacoop, K.J. Van Vliet, T.A. Venkatesh, S. Suresh, Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation, Acta Mater. 49 (2001)
- [17] K.I. Schiffmann, Nanoindentation creep and stress relaxation tests of polycarbonate: Analysis of viscoelastic properties by different rheological models, Int. J. Mater. Res. 97 (2006)
- [18] X. Wang, Z. Chen, H. Liu, Y. Yu, Experimental study on stress relaxation properties of structural cables, Constr. Build. Mater. 175 (2018)
- [19] Y. Yamaoka, K. Hamada, H. Tsubono, H. Kawakami, Y. Oki, Y. Kawaguchi, Development of galvanized high-strength high-carbon steel wire., Trans. Iron Steel Inst. Japan. 26 (1986)
- [20] Y. Anderberg, Modelling Steel Behaviour, Fire Saf. J. 13 (1988)

- [21] A. V. Sergueeva, J. Zhou, B.E. Meacham, D.J. Branagan, Gage length and sample size effect on measured properties during tensile testing, *Mater. Sci. Eng. A.* 526 (2009)
- [22] X. Wang, Z. Chen, Y. Yu, H. Liu, An innovative approach for numerical simulation of stress relaxation of structural cables, *Int. J. Mech. Sci.* 131 - 132 (2017)
- [23] A.T. Jennings, M.J. Burek, J.R. Greer, Microstructure versus Size: Mechanical properties of electroplated single crystalline Cu nanopillars, *Phys. Rev. Lett.* 104 (2010) 1 - 4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.135503>.
- [24] T.H. Pham, S.E. Kim, Determination of mechanical properties in SM490 steel weld zone using nanoindentation and FE analysis, *J. Constr. Steel Res.* 114 (2015)
- [25] N.V. Nguyen, T.H. Pham, S.E. Kim, Characterization of strain rate effects on the plastic properties of structural steel using nanoindentation, *Constr. Build. Mater.* 163 (2018)
- [26] A.C. Fisher-Cripps, *Nanoindentation*, Third edit, Springer, (2011)
- [27] ASTM-E3, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM Int. (2011)
- [28] X. Zhang, A. Godfrey, X. Huang, N. Hansen, Q. Liu, Microstructure and strengthening mechanisms in cold-drawn pearlitic steel wire, *Acta Mater.* 59 (2011)
- [29] R. Armstrong, I. Codd, R.M. Douthwaite, N.J. Petch, The plastic deformation of polycrystalline aggregates, *Philos. Mag.* 7 (1962)
- [30] N. Guo, B. Luan, Q. Liu, Influence of pre-torsion deformation on microstructures and properties of cold drawing pearlitic steel wires, *Mater. Des.* 50 (2013)
- [31] M. Gensamer, E.B. Pearsall, W.S. Pellini, J.R. Low, The Tensile Properties of Pearlite, Bainite, and Spheroidite, *Metallogr. Microstruct. Anal.* 1 (2012)
- [32] K.K. Tang, Z.X. Li, J. Wang, Numerical simulation of damage evolution in multi-pass wire drawing process and its applications, *Mater. Des.* 32 (2011)
- [33] X. Zhang, N. Hansen, Y. Gao, X. Huang, Hall-Petch and dislocation strengthening in graded nanostructured steel, *Acta Mater.* 60 (2012)
- [34] D. Tabor, *The hardness of metals*, Oxford at the Clarendon press, (1951)
- [35] I.M. Hutchings, The contributions of David Tabor to the science of indentation hardness, *J. Mater. Res.* 24 (2009)
- [36] J.R. Cahoon, W.H. Broughton, A.R. Kutzak, The determination of yield strength from hardness measurements, *Metall. Trans.* 2 (1971)
- [37] D. Ye, F. Mi, J. Liu, Y. Xu, Y. Chen, L. Xiao, Use of instrumented indentation testing to study local mechanical properties of 304L SS welded joints subjected to low-cycle fatigue loadings, *Mater. Sci. Eng. A.* 564 (2013)
- [38] N. Hansen, Hall-petch relation and boundary strengthening, *Scr. Mater.* 51 (2004)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.