

3cm

15TBIP-
C074137
-02

4cm

발 간 등 록 번 호

11-1613000-001371-01

3cm

0.5cm

R&D / 15TBIP-C074137-02

2.5cm

9cm

(건고덕31p)

5cm

고정점이 필요없는 변위 계측시스템 개발
최종보고서

(0.1cm)

2016. 6. 1.

0.15cm

(건고덕15p)

주관연구기관 / 씨티씨주식회사

2cm

(건고덕 15.5p)

3cm

고
정
점
이

필
요
없
는

변
위
계
측
시
스
템

개
발

최
종
보
고
서

(건고덕
14p)

2016

(건고덕13p)

국
토
교
통
부

(건고덕
17p)

국토교통부 R&D Report

(건고덕
25p)

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()
국토교통기술사업화 지원사업 최종보고서(건고덕 13p)

국토교통부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

(건고덕 20p)

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘고정점이 필요없는 변위 계측시스템 개발’(연구개발 기간 : 2014. 6. ~ 2016. 6.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2016. 6. 1.

주관연구기관명 : 씨티씨주식회사 (이희현) (인)

주관연구기관책임자 : 전 준 창

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15TBIP-C074137-02	해당 단계 연구 기간	2015. 6. 2 - 2016. 6. 1	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술사업화 지원사업			
	세부사업명	중소기업 보유품 기술 사업화 분야			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	고정점이 필요없는 변위 계측시스템 개발			
연구책임자	전 준 창	해당단계 참여 연구원 수	총: 14명 내부: 8명 외부: 6명	해당단계 연구개발비	정부: 81,000천원 기업: 54,000천원 정부 외: 0천원 계:135,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 28명 내부: 16명 외부: 12명	총 연구개발비	정부:161,942천원 기업:107,962천원 정부 외: 0천원 계:269,904천원
연구기관명 및 소속 부서명	씨티씨주식회사			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: (주)델타텍코리아			연구책임자: 기우용	
· 본 연구는 고정점이 필요없는 변위 계측기술을 개발하고, 이를 실교량의 변위 계측에 적용하는 것을 최종목표 설정 · 개발 기술의 현장 적용을 위해 해석적인 방법으로 속도/변형률을 이용한 변위 추정 알고리즘에 관한 일련의 연구를 통해 요소기술 및 현장적용기술을 도출 · 교량 변위 계측용 센서로서 요구되는 정확성 및 사용성 등 주요 항목에 대해서는 실내실험을 통해 품질을 검증하고, 전처리 및 후처리 기능을 갖는 사용자 중심의 변위 계측 전용프로그램 및 시스템을 개발 · 구조계의 변위와 변형률 관계를 이용하여 측정 변형률로부터 변위를 추정하는 알고리즘을 모형실험 및 현장실험 결과에 적용하였으며, 추정 변위는 실측 변위 대비 평균 편차 5% 미만으로 양호한 추정결과를 나타냄. · 속도 및 변형률 신호를 동시에 이용하여 변위를 추정하는 알고리즘을 모형실험 결과에 적용한 결과, 추정 변위는 실측 변위 대비 평균 편차 1% 미만으로 매우 양호한 추정결과를 나타냄.				보고서 면수: 124	

〈 요약 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구는 고정점이 필요없는 변위 계측기술을 개발하고, 이를 실교량의 변위 계측에 적용하기 위해 실시되었다. 연구내용은 다음과 같다. · 속도계를 이용한 변위 계측 알고리즘 개발 및 해석적 검증 - 신호처리기술 연구 - 기본 알고리즘 구성 및 프로그램화 - 주파수 대역별 속도신호의 보정기술 개발 - 해석적 방법에 의해 교량의 동특성에 따른 개발기술의 적용성 검증 및 보완 · 개발된 변위 계측 알고리즘의 실험적 검증 및 시제품 제작 - 모형실험체에 대한 개발기술의 적용성 검증 및 보완 - 실교량에 대한 개발기술의 적용성 검토 - 속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 계측 전용 프로그램 및 시스템 개발				
연구개발성과	· 교량의 하부조건(수심이 깊은 하천, 해상, 도로/철도 횡단, 다리밑 공간이 높은 경우)에 무관하게 교량의 변위 측정이 가능 · 레이저 변위계와 같은 비접촉식 센서에 비해 측정 정밀도 향상 · 기존 교량의 안전진단시 주요 측정항목인 변위와 변형률을 변형률 센서만으로 획득 가능 · 비교적 간단한 연산을 통해 변형률 또는 속도/변형률 신호로부터 변위 추정이 가능한 새로운 알고리즘 개발 · 변위계 설치를 위한 부대비용 감소로 경제성 향상				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	· 사회간접자본시설인 교량구조물의 안전성 제고 · 교량구조물의 효율적 유지관리 · 기존 센서를 사용하는 것에 비해 교량 변위 측정이 용이하여 측정작업 효율성 향상 · 개발기술의 수출				
핵심어 (5개 이내)	변위 추정	변형률 응답	속도 응답	교량	변위-변형률 관계

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	This study is conducted to develop the displacement estimation system without requiring a fixed reference point and to apply the system to real bridge structures. Contents of this study are as follows; ・ Development of displacement estimation algorithm using geophone and its analytical verification – Study on signal processing – Preparing and programming of basic algorithm – Development of calibration technology of velocity signals in frequency domain – Verification of applicability of developed technology regarding the characteristics of bridges by analytical method ・ Experimental verification of developed displacement estimation algorithm and production of prototype – Verification of applicability of developed technology to beam specimens – Investigation of applicability of developed technology to real bridge structures – Development of displacement measuring program and system using velocity and strain signal				
Results	・ Displacement measurement of bridges is possible regardless of the lower part condition of bridges ・ Measurement precision can be improved in comparison with noncontact sensor like a laser displacement transducer ・ Displacement and strain can be measured only strain sensor ・ New algorithm is developed which can estimate the displacement of bridge using strain or velocity/strain signal by relatively simple mathematical operations ・ Economical efficiency can be improved by reduction of incidental expense for installation of displacement transducer				
Expected Contribution	・ Safety of bridge structures can be enhanced ・ Efficient maintenance of bridge structure is expected ・ Displacement can be effectively measured comparing to existing displacement transducer ・ Exportation of developed system				
Keywords	Displacement estimation	Strain response	Velocity response	Bridge	Displacement-strain relationship

< CONTENTS >

1. Outline of Research	1
2. Current State of Domestic and Foreign Technology Development	3
3. Contents and Results of Research	6
4. Achievement of Objective and Contribution of related Research Field	112
5. Plan of Practical Use of Research Results	115
6. Foreign Scientific Technology Informations collected in Research Process	117
7. Security Grade of Research Results	118
8. Facilities and Equipments eegistered in NSTI system	119
9. Performance Results of Safety Action for Research	120
10. Representative Achievements	121
11. Etc.	122
12. References	123

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	3
3. 연구 수행 내용 및 성과	6
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	112
5. 연구개발성과의 활용 계획	115
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	117
7. 연구개발성과의 보안등급	118
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	119
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	120
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	121
11. 기타 사항	122
12. 참고문헌	123

제1장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

본 연구는 고정점이 필요없는 변위 계측기술을 개발하고, 이를 실험교량의 변위 계측에 적용하는 것을 최종목표로 하고 있다.

개발 기술의 현장 적용을 위해 해석적인 방법으로 속도/변형률을 이용한 변위 추정 알고리즘에 관한 일련의 연구를 통해 요소기술 및 현장적용기술을 도출하고, 교량 변위 계측용 센서로서 요구되는 정확성 및 사용성 등 주요 항목에 대해서는 실내실험을 통해 품질을 검증하고자 한다. 또한, 전처리 및 후처리 기능을 갖는 사용자 중심의 변위 계측 전용프로그램 및 시스템을 개발함으로써 실용화 및 사업화를 실현하고자 한다.

2. 연구개발의 필요성

현재 국내에서는 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」에 따라 1, 2종 시설물에 해당하는 교량에 대해 주기적으로 정밀안전진단을 실시하고 있다. 교량의 정밀안전진단을 위한 주요 계측항목은 변위를 비롯하여 변형률과 가속도 등이다. 교량의 변위는 여러 계측항목 중 구조물의 전체적인 상태를 직접적으로 나타낼 뿐만 아니라 구조계의 강성(stiffness)과 관련되므로 중요하게 취급된다. 그러나 여러 제약조건에 의해 현재 일반적으로 사용되는 센서를 이용한 변위 계측에 어려움이 있는 것이 현실이다.

교량의 변위를 계측하기 위한 기존의 방법은 그림 1.1에 나타낸 변위계를 사용한다. 그림 1.1(a)는 바 타입(bar type)으로서 가장 일반적으로 사용되는 형태이며, 그림 1.1(b)는 링 타입(ring type)으로서 다리밑 공간이 높아 바 타입 변위계를 설치하기 곤란한 경우에 적용된다.



그림 1.1 기존 변위계

기존 변위계는 변위를 계측하기 위해 고정점이 필수적으로 요구되며, 설치 사례는 그림 1.2와 같다. 바 타입 변위계를 이용하는 경우는 고정점을 확보하기 위해 교량 하부에 작업대를 설치하고, 그 위에 변위계가 놓이게 된다. 링 타입 변위계는 교량 하부의 지면을 고정점으로 사용하기 위해 피아노선(piano wire)을 이용하여 설치된다. 그림 1.2에서 알 수 있는 바와 같이 정밀안전진단을 실시하는 현장여건은 실험실과 달리 매우 열악하여 변위계를 계측하고자 하는 방향과 완벽하게 일치시켜 설치하는 것이 용이치 않으며, 설치된 변위계는 바람 및 교량 하부를 통행하는 차량의 진동 등에 의해 영향을 받아 계측오차가 수반된다. 물론, 교량 하부에 하

천, 도로, 철로 등이 있거나 다리밑 공간이 30m 이상되는 경우에는 기존의 변위계를 이용한 변위 계측은 거의 불가능하다. 따라서 고정점을 사용하지 않고 변위를 계측할 수 있는 기술은 오래 전부터 실무에서 필요로 해 왔던 기술이다.



(a) 바 타입 변위계



(b) 링 타입 변위계

그림 1.2 기존 변위계의 설치 사례

이를 해결하기 위한 관련 연구 및 특허의 유형은 크게 세 가지로 분류된다. 첫 번째는 본 연구와 유사하게 변위가 아닌 물리량, 즉 변형률, 속도 또는 가속도를 측정하고 이로부터 변위를 추정하는 방법, 두 번째는 영상처리기법을 이용하는 방법 그리고 세 번째는 레이저 또는 GPS 등과 같은 장치를 이용하는 방법이다. 첫 번째와 두 번째 유형의 방법은 해석적 또는 실험적 검증단계에 머무르고 있어 실용화되어 있지 않다. 또한, 세 번째 방법은 가격이 고가이고 정밀도가 낮다는 문제가 있어 해상의 장대교량 유지관리계측시스템을 제외하고는 일반 교량에 대한 적용실적은 거의 없다.

3. 연구개발 범위

본 연구의 내용 및 범위는 다음과 같다.

- 속도계를 이용한 변위 계측 알고리즘 개발 및 해석적 검증
 - 신호처리기술 연구
 - 기본 알고리즘 구성 및 프로그램화
 - 주파수 대역별 속도신호의 보정기술 개발
 - 해석적 방법에 의해 교량의 동특성에 따른 개발기술의 적용성 검증 및 보완
- 개발된 변위 계측 알고리즘의 실험적 검증 및 시제품 제작
 - 모형실험체에 대한 개발기술의 적용성 검증 및 보완
 - 실교량에 대한 개발기술의 적용성 검토
 - 속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 계측 전용 프로그램 및 시스템 개발

제2장 국내외 기술 개발 현황

1. 국가연구개발사업 유사연구

본 연구와 유사한 성격을 갖는 기존의 국가연구개발과제 현황을 표 2.1에 나타내었으며, 검토결과를 요약하면 다음과 같다.

표 2.1 국가연구개발사업 유사연구 현황

부처명	사업명	과제명	예산(억원)	비 고
중소기업청	산학연 공동기술개발 컨소시엄사업	3D 스테레오 카메라를 활용한 비접촉식 자동 변위측정시스템 개발	-	
한국과학재단	기초연구지원 (특정기초)	교량 거동계측에 의한 고속이동하중 추정 알고리즘 개발 및 실험적 검증	-	
교육과학기술부	기초연구사업	다중영상처리기법을 이용한 처짐 및 회전변위계측과 이를 활용한 교량 건전성 평가	0.768	
중소기업청	산학 공동기술개발 지원사업	장거리 변위 감지기 기술 개발	-	

· 3D 스테레오 카메라를 활용한 비접촉식 자동 변위측정시스템 개발[1]

3차원 형상인식 스테레오 카메라와 레이저 거리측정기를 활용하여 목표 인식, 추적 변위 측정장비 개발을 목표로 하며, 이를 이용하여 난방 및 가스배관, 화학플랜트 등의 가동상태를 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템을 구축하는 연구과제이다. 이 과제는 형상인식기술을 이용하여 배관 등의 가동상태 제어 및 모니터링을 대상으로 하므로 본 연구과제와는 차이가 있다.

· 교량 거동계측에 의한 고속이동하중 추정 알고리즘 개발 및 실험적 검증[2]

교량 상을 고속으로 이동하는 차량의 차축하중을 교량의 동적거동 계측 데이터를 사용하여 역추정하는 방법에 관한 연구로서 가속도신호와 변형률신호를 이용한 변위 추정 알고리즘이 연구내용 중의 하나이다. 이 과제는 웨이브릿(wavelet) 변환 기법으로 동적 변위를 추정하므로 분석에 사용하는 물리량 및 분석기법에 있어서 본 연구과제와는 차이가 있다.

· 다중영상처리기법을 이용한 처짐 및 회전변위계측과 이를 활용한 교량 건전성 평가[3]

교량의 건전성 평가에 있어서 중요한 평가항목인 변위를 다중영상처리기법을 이용하여 계측하는 연구내용을 포함하고 있으며, 본 연구과제와는 접근방법 자체에 있어서 차이가 있다.

· 장거리 변위 감지기 기술 개발[4]

광 송수신용 광학계, 반사판, 정렬용 광학계 및 변위 감지기를 이용하여 기존의 수입제품보다 정밀도가 높은 변위계측 기기 개발을 목표로 하며, 본 연구과제와는 접근방법 자체에 있어서 차이가 있다.

2. 국내외 관련 기술 및 특허 동향

가. 관련 기술 동향

구조물 또는 구조계의 변위를 간접적으로 추정하는 방법에 관한 기존 연구내용과 본 연구의 차이점을 표 2.2에 정리하여 나타내었다. 유사연구의 유형은 크게 두 가지로 분류된다. 하나는 본 연구와 유사하게 변위가 아닌 물리량, 즉 변형률 또는 가속도를 측정하고 이로부터 변위를 추정하는 방법이며, 다른 하나는 영상처리기법을 이용하는 것이다.

표 2.2 관련 기술 동향

연구명	연구자	연구내용	차이점
측정변형률을 이용한 RC구조물의 변위 응답 특성분석에 관한 실험적 연구[5]	박홍석 등	단순보의 곡률과 변위의 관계에 선형회귀분석, 이중적분 및 경계조건을 고려하여 변형률로부터 변위를 추정하는 방법을 제안	분석방법
FBG 변형률센서를 이용한 현수교의 정적 처짐형상 추정[6]	조남소 등	보의 곡률과 변위관계로부터 변형률을 이용하여 변위를 추정하는 방법을 제안	분석방법
FBG센서를 이용한 교량의 동적변위 추정[7]	신수봉 등	FBG센서로 변형률을 계측하고 추정 가능한 일부 저차모드를 중첩하여 교량의 동적변위를 추정하는 알고리즘을 제안	분석방법
교량상부구조의 가속도신호를 이용한 변위응답의 추정[8]	정범석 등	측정된 가속도신호의 주파수영역 적분에 의한 변환변위응답의 평가와 구조물의 동적응답이 무재하부분과 자유진동부분을 포함하고 있을 때 변환응답을 보정하여 초기치문제를 해결할 수 있는 방법을 제안	분석에 사용하는 물리량 및 분석방법
가속도 계측 자료를 이용한 콘크리트 교량의 처짐 산정[9]	윤영균 등	모드중첩법에 의한 비감쇠 강제진동 이론을 이용하여 등속도로 이동하는 동적 주행하중에 의한 콘크리트 교량의 변위 산정방법을 제안	분석에 사용하는 물리량 및 분석방법
Recovering bridge deflections from collocated acceleration and strain measurements[10]	M. Bell 등	주행차량에 의한 교량의 변위를 평가하기 위해 측정된 가속도 및 변형률 신호를 이용하는 내부모델 기법을 제안	분석방법
영상처리기법을 이용한 다중 변위응답 측정 알고리즘의 검증[11]	김성완 등	구조물의 지점 및 다중 변위응답 계측을 위해 상업용 디지털 캠코더를 기반으로 하는 영상처리 분석을 통한 비접촉식 변위응답 계측방법을 제안	연구분야 및 접근방법
일반 점검사진에서 교량의 정적 변위 추출을 위한 영상처리기법[12]	조준상 등	일반 점검용 사진으로 촬영되어 저장되어 있는 D/B의 이미지에서 목표물의 색, 형태 및 공간이동 정보를 수치해석적으로 접근하여 교량의 변위를 산출하는 비접촉, 비타겟 방식의 영상처리기법을 제안	연구분야 및 접근방법

나. 관련 특허 동향

본 연구와 유사한 성격을 갖는 특허에 대해 검토하였으며, 검토결과를 표 2.3에 정리하여 나타내었다. 관련 특허의 유형은 크게 세 가지로 분류된다. 첫 번째는 본 연구와 유사하게 변위가 아닌 물리량, 즉 변형률 또는 가속도를 측정하고 이로부터 변위를 추정하는 방법, 두 번째는 영상처리기법을 이용하는 방법 그리고 세 번째는 레이저 또는 GPS 등과 같은 장치를 이용하는 방법이다.

표 2.3 관련 특허 동향

특허명	등록번호	특허내용	차이점
구조물의 측정 진동가속도를 이용하여 동적 변위 및 속도이력을 측정하는 측정방법 및 측정장치[13]	10-0972278	구조물의 측정 가속도를 이용하여 구조물의 동적 변위와 속도이력을 측정하는 방법 및 장치에 관한 것으로서 구조부재의 형상함수 및 이에 대한 미분을 이용	분석에 사용하는 물리량 및 분석방법
초기속도 추정 방식을 이용한 변위 결정 장치 및 그 방법[14]	10-0477711	측정 가속도 신호를 이용하여 초기속도를 추정하고, 이를 통해 변위를 산정하기 위한 초기속도 추정 방식을 이용한 변위 결정 방법 및 장치	분석에 사용하는 물리량 및 분석방법
변형률 측정을 이용한 장대 교량 구조물의 변위측정방법과, 이를 이용한 장대 교량구조물의 변위측정장치[15]	10-2012-0106038	구조물에 작용하는 하중에 의해 발생하는 변형률을 변형률 센서를 이용하여 계측하고, 측정된 변형률로부터 구조물의 변위를 추정하는 방법	분석방법
가속도 및 변형률 측정값에 기반한 구조물의 다 지점 변위 추정 방법[16]	10-2015-0004127	구조물의 가속도 및 변형률 측정값에 기반한 융합 목표 함수를 통해 원하는 지점에서의 변위를 추정할 수 있는 지점 변위 추정 방법	분석방법
구조물 변위 측정 시스템 및 방법[17]	10-1387876	스트레오 카메라를 구조물의 소정 지점별로 기설정된 간격으로 일렬 배치하여 촬영하고, 촬영된 영상의 변화를 통해 카메라별 설치된 지점의 변위 변화량을 측정하는 방법	연구분야 및 접근방법
동영상을 이용한 부유 구조물의 변위 측정 시스템 및 방법[18]	10-1480955	주파수영역에서의 신호처리를 통해 단일 동영상으로 부유 구조물의 3차원 변위를 측정할 수 있는 변위 측정 시스템 및 방법	연구분야 및 접근방법
카메라 이미지를 이용한 진동변위 측정방법[19]	10-1434393	측정대상체에서 획득된 이미지에 대하여 향상된 실수형 에지 좌표값을 산출하여 이미지의 픽셀해상도 이상의 측정해상도를 얻을 수 있도록 한 카메라 이미지를 이용한 진동변위 측정방법	연구분야 및 접근방법
구조물 변위 측정 시스템 및 방법[20]	10-1217186	비전 및 레이저거리측정센서를 이용하여 거대 구조물의 변위를 정밀하고 용이하게 측정할 수 있는 구조물 변위 측정 시스템 및 방법	연구분야 및 접근방법
구조물의 동적 변위 측정장치 및 그 방법[21]	10-1488134	건설 구조물의 변위 측정을 위해 설치한 GPS 수신기의 3차원 위치 좌표를 정밀하게 추정하는 구조물의 동적 변위 측정장치 및 방법	연구분야 및 접근방법

제3장 연구 수행 내용 및 성과

1. 속도계를 이용한 변위 계측 알고리즘 개발 및 해석적 검증

가. 신호처리기술 연구

우리 주위에 주기적 또는 불규칙적으로 진동하는 현상이 발생하는 것을 보거나 느낄 수 있다. 예를 들면 차량의 주행, 바람 및 지진 등에 의해 발생하는 교량의 진동이 진동현상의 일종이다. 이러한 물리적인 진동현상을 전기신호로 변환하여 오실로스코프 등에 의해 눈에 보이는 형태로 파형을 관측할 수 있으며, 이러한 파형을 신호(signal)라고 한다. 한편, 처리(processing)라는 것은 원래의 신호만으로는 의도하는 작업을 달성하기 어려운 경우가 대부분이므로 사용하기 편리하게 또는 알기 쉽게 가공하는 작업을 의미한다.

원하는 정보를 추출, 전달, 축적하거나 시스템을 관측, 제어할 수 있도록 신호에 어떠한 가공을 하는 것이 신호처리(signal processing)이다. 이러한 신호처리를 컴퓨터나 전용 하드웨어를 이용하여 디지털 형식으로 처리하는 기술을 디지털 신호처리(digital signal processing, DSP)라고 한다. 그림 3.1은 정보추출을 통하여 의미있는 정보로 만들어내는 신호처리 과정의 일례이다.

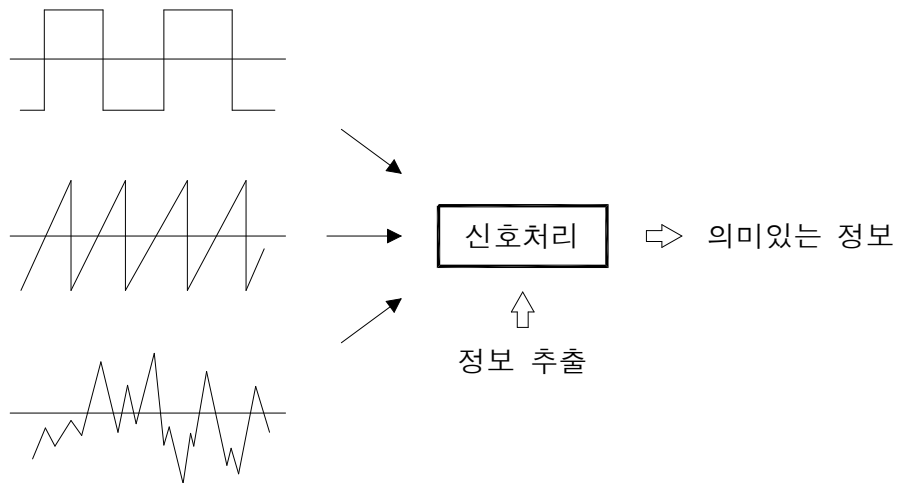


그림 3.1 신호처리의 예

그림 3.2에 나타난 바와 같이 Fourier 변환, 주파수영역에서의 응답보정, 주파수영역에서의 적분 그리고 Fourier 역변환의 순차적인 과정을 거쳐 속도신호로부터 변위를 추정하는 본 연구 과제에서는 주파수 분석에 관한 신호처리인 Fourier 변환 및 필터링(filtering) 기법에 대해 검토하였다.

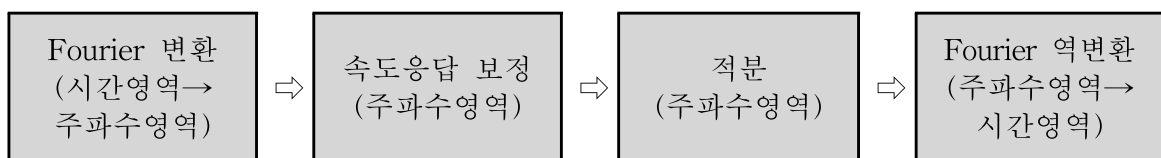


그림 3.2 속도신호로부터 변위를 추정하는 과정

(1) Fourier 변환

Fourier 변환은 진동을 유발하는 주기적인 외력이나 외력을 받아 발생하는 운동의 응답은 하나의 단순한 조화함수 또는 여러 개의 주기가 동일하지 않은 단조화함수의 합, 즉 비조화함수로 표현할 수 있다는 Fourier 급수에 기초한다. 본 연구에서는 Fourier 변환의 특수한 형태인 고속 Fourier 변환(Fast Fourier Transform, FFT) 방법을 이용하여 주파수 분석을 실시하였다. FFT 분석에 관한 내용은 다수의 교재[22, 23]에 상세히 언급되어 있으므로 본 보고서에는 수록하지 않았다.

FFT 분석은 이산시간신호(discrete time signal)를 대상으로 하므로 분석에 사용하는 시계열 데이터의 시간간격 Δt 및 총 수 N 에 영향을 받는다. 주파수 해상도(frequency resolution) 및 Nyquist 주파수는 각각 식(3.1) 및 식(3.2)와 같이 정의된다.

$$\Delta f = 1/(N\Delta t) \quad (3.1)$$

$$f = 1/(2\Delta t) \quad (3.2)$$

그림 3.3은 4.9Hz와 15.0Hz의 진동성분을 갖는 시간함수에 대한 FFT 분석결과이다. 그림 3.3(a)는 $\Delta t=0.01\text{sec}$, $N=256$ 개에 대한 것이며, 그림 3.3(b)는 $\Delta t=0.05\text{sec}$, $N=256$ 개에 대한 것이다. 그림 3.3(a)에서는 시간함수가 갖는 본래의 주파수와는 약간 다른 5.08Hz와 14.84Hz의 진동성분이 검출되는데, 이는 주파수 해상도가 0.39Hz로 다소 크기 때문이다. 한편, 그림 3.3(b)의 경우는 주파수 해상도가 작아 첫 번째 주파수에 대한 분석결과는 그림 3.3(a) 보다는 오차가 감소하는 반면에 Nyquist 주파수가 10Hz이므로 두 번째 진동성분은 검출되지 않는다. 따라서, FFT 분석을 통해 구조계의 동특성을 추정하기 위해서는 미리 구조계의 진동특성을 파악하여 데이터의 시간간격 Δt 및 총 수 N 을 적절히 선정할 필요가 있다.

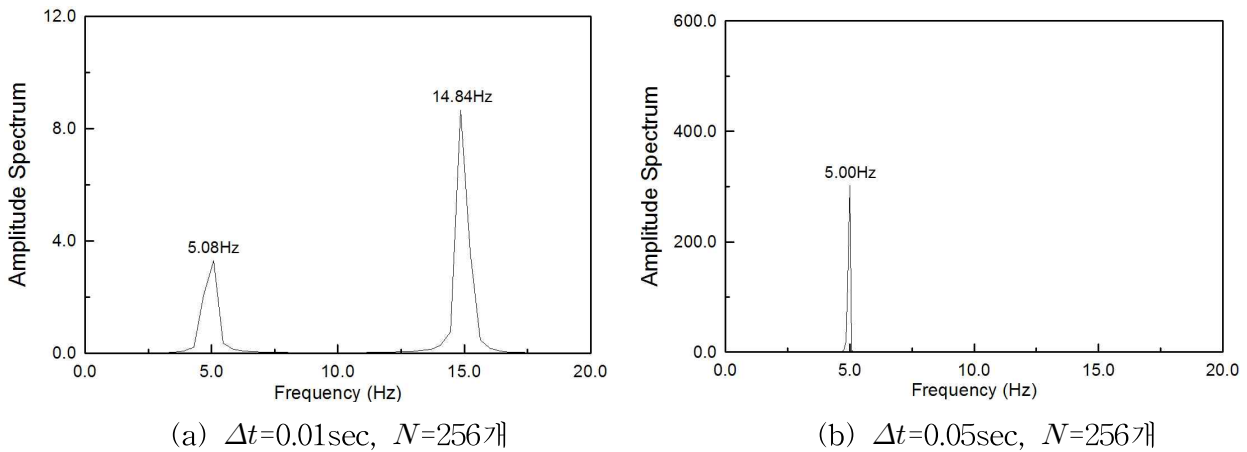


그림 3.3 데이터의 시간간격 Δt 에 따른 FFT 분석 결과

(2) 필터링

(가) 개요

신호처리의 가장 기본적인 목적중의 하나는 본래의 신호에 잡음이 첨가될 경우에 주어진 측정신호로부터 본래의 신호를 찾아내는 것이다. 이러한 경우, 측정된 신호에 어떠한 처리를 하여 그 중에서 필요한 성분만 추출해 내어야 하는데 이와 같은 처리를 필터링 또는 필터처리라고 한다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 얻어진 디지털 신호 또는 측정신호를 A/D 변환하

여 얻어진 디지털 신호에 대해 필터링 기법을 적용하므로 디지털 필터를 대상으로 한다.

디지털 필터는 귀환의 유무에 의해 재귀형(recursive filter)과 비재귀형(nonrecursive filter)으로 분류할 수 있다. 한편, 시간영역특성에서 임펄스응답이 유한인가 무한인가라는 관점에서 FIR(Finite Impulse Response)과 IIR(Infinite Impulse Response) 디지털 필터로 분류하기도 한다.

분석에 사용하는 신호파형의 형태가 문제가 되는 경우에 필터링에 의해 파형이 가급적 왜곡되지 않도록 해야 하는데, 이와 같은 경우에 선형위상특성을 갖는 필터를 이용하여야 한다. 선형위상이란 필터의 입출력 위상차가 신호의 주파수에 비례하는 것을 의미한다. 즉, 군지연 특성이 주파수에 관계없이 일정하다. 선형위상특성은 IIR 디지털 필터로도 근사화가 가능하지만 FIR 디지털 필터가 가장 효과적이므로 본 연구에서는 FIR 디지털 필터에 대해 검토하였다. FIR 디지털 필터는 귀환이 없으므로 항상 안정하다는 장점이 있는 반면에 주파수영역에서 급준한 감쇠특성을 실현하기 위해서는 높은 차수의 필터가 필요하다.

디지털 필터의 주파수 특성에 따라 다음과 같이 통과역(pass band)과 저지역(stop band)으로 구분할 수 있다.

- 통과역 : 디지털 필터의 진폭특성 $|H(e^{j\omega T})| \simeq 1$ 인 주파수 영역으로 입력신호가 그대로 출력된다.
- 저지역 : $|H(e^{j\omega T})| \simeq 0$ 로 되는 주파수 영역으로 입력신호가 감쇠되어 출력신호가 나오지 않는다.

한편, 디지털 필터의 진폭특성을 분류하면 저역통과 필터(low pass filter), 고역통과 필터(high pass filter), 대역통과 필터(band pass filter) 그리고 대역저지 필터(band stop filter)로 나눌 수 있으며, 4 종류 필터의 이상적인 진폭특성을 그림 3.4에 나타내었다.

- 저역통과 필터 : 그림 3.4(a)에 나타난 바와 같이 통과역이 $\omega = 0$ 에서 ω_0 까지이고, ω_0 이상은 저지역으로 되는 필터
- 고역통과 필터 : 저역통과 필터의 역으로 주파수 ω 가 $\omega = 0$ 에서 ω_0 까지는 저지역이고, ω_0 이상은 통과역으로 되는 필터
- 대역통과 필터 : 주파수 ω_1 에서 ω_2 까지는 통과역이고, 그 이외의 주파수에서는 저지역으로 되는 필터
- 대역저지 필터 : 대역통과 필터의 역으로 ω_1 에서 ω_2 까지는 저지역이고, 그 이외의 주파수에서는 통과역으로 되는 필터

그림 3.4와 같이 통과역으로부터 저지역, 저지역으로부터 통과역으로 급격히 변화하는 특성을 갖는 필터를 실현한다는 것은 매우 어렵다. 따라서, 저지역과 통과역 사이의 천이역(transition band)에서 감쇠량을 얼마나 이상화 하는냐가 중요하며, 결국 필터의 설계문제는 필터계수(전달함수)의 결정으로 귀착된다. 본 연구에서는 주파수 영역에서 FIR 필터의 계수를 구하는 가장 일반적인 방법인 창함수법(window function method)을 이용하여 필터링 기법에 대해 검토하였다.

FIR 디지털 필터의 주파수응답 $H(e^{j\omega T})$ 는 주기 $\omega_s (= 2\pi/T)$ 로 반복되는 주기함수이므로 식 (3.3)과 같이 Fourier 급수로 표현할 수 있다. 식(3.3)에서 $h(nT)$ 는 Fourier 계수로서 식(3.4)와 같다.

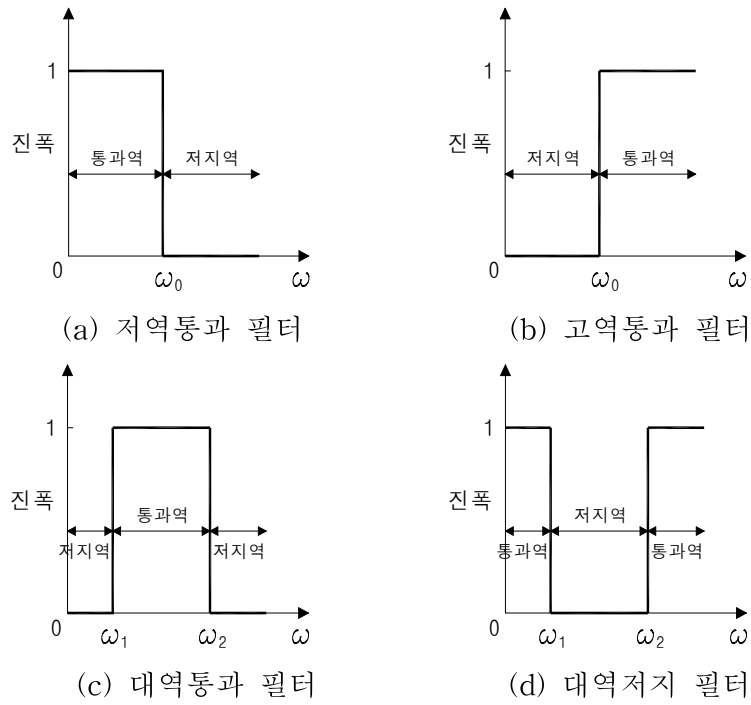


그림 3.4 필터의 이상적인 진폭특성

$$e^{j\omega T} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(nT) e^{-j\omega T} \quad (3.3)$$

$$h(nT) = \frac{1}{\omega_s} \int_{-\omega_s/2}^{\omega_s/2} H(e^{j\omega T}) e^{-jn\omega T} d\omega \quad (3.4)$$

Fourier 급수 전개에 의한 필터설계에서 주파수응답은 $\omega_s = 2\pi/T$ 마다 반복되므로 식(3.4)의 $h(nT)$ 의 값은 무한한 값이 된다. 그러나 이러한 경우에 무한한 필터 차수를 필요로 하므로 인과성을 만족하기 위해 식(3.5)와 같은 조건에 대해 이론을 전개한다. 따라서 Fourier 급수 전개법의 경우, M 개에서 Fourier 급수를 급격하게 자르게 되므로 깁스(Gibbs) 현상이 발생한다.

$$h(nT) = 0, \quad |n| > M \quad (3.5)$$

창함수에 의한 필터설계는 Fourier 급수 전개법으로 구한 Fourier 계수, 즉 임펄스응답 $h(nT)$ 에 미리 적당한 창함수를 곱하여 진폭특성의 맥동을 줄이는 방법이다. 창함수법에 의한 필터계수 및 주파수응답을 각각 식(3.6) 및 식(3.7)에 나타내었다.

$$h(nT) = \omega(nT) h(nT), \quad n=0, 1, 2, \dots, M \quad (3.6)$$

$$H_\omega(e^{j\omega T}) = Z[\omega(nT) h(nT)]_{z=e^{j\omega T}} \quad (3.7)$$

창함수에는 여러 가지가 있는데, 본 연구에서는 방형창(rectangular window), 삼각형창(triangular window), 해닝창(Hanning window), 해밍창(Hamming window) 및 블랙맨창(Blackman window)을 대상으로 하였으며, 식(3.8)~식(3.12)에 창함수를 나타내었다.

• 방 형 창 : $w_n = 1, \quad 0 \leq n \leq M$ (3.8)

• 삼각형 창 : $w_n = 1 - |1 - \frac{2n}{M}|, \quad 0 \leq n \leq M$ (3.9)

• 해 닝 창 : $w_n = 0.5[1 - \cos(2n\pi/M)], \quad 0 \leq n \leq M$ (3.10)

• 해 밍 창 : $w_n = 0.54 - 0.46[\cos(2n\pi/M)], \quad 0 \leq n \leq M$ (3.11)

• 블랙맨 창 : $w_n = 0.42 - 0.50[\cos(2n\pi/M)] - 0.08[\cos(4n\pi/M)], \quad 0 \leq n \leq M$ (3.12)

(나) 필터링 기법 검토

FIR 필터의 통과대역에 따른 필터링 결과를 알아보기 위해 그림 3.5와 같이 4, 10, 25 및 40Hz의 주파수를 갖는 시간함수를 0.01sec 간격으로 생성하고, 이에 대해 아래에 나타낸 조건으로 저역통과, 고역통과, 대역통과 및 대역저지 필터를 적용하였다. 필터링에 사용한 창함수는 가장 간단한 형태인 방형창이고, 분석에 사용된 필터차수 및 데이터 수는 각각 100 및 8192개이다.

- 저역통과 필터 : 15Hz 이하 대역 통과
- 고역통과 필터 : 15Hz 이상 대역 통과
- 대역통과 필터 : 8~30Hz 대역 통과
- 대역저지 필터 : 8~30Hz 대역 저지

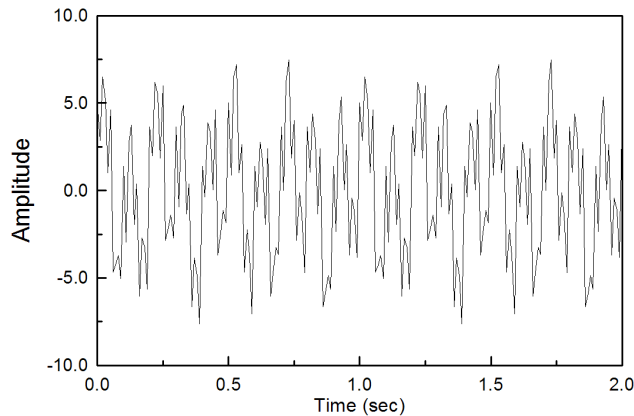
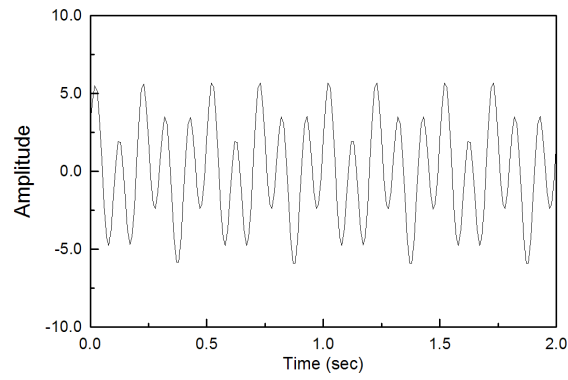


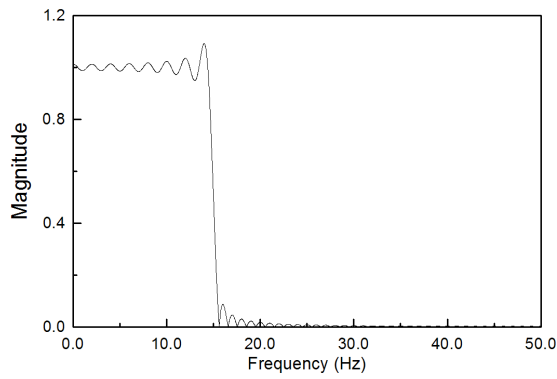
그림 3.5 4, 10, 25 및 40Hz의 주파수를 갖는 시간함수

$$(f(t) = 2 \cdot \cos(4 \cdot 2\pi t) + 4 \cdot \sin(10 \cdot 2\pi t) + 1 \cdot \sin(25 \cdot 2\pi t) + 3 \cdot \cos(40 \cdot 2\pi t))$$

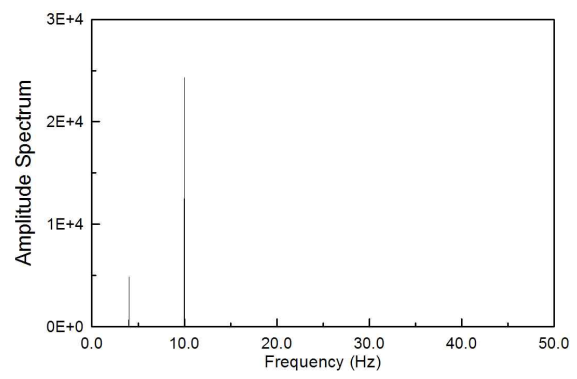
그림 3.5에 대한 통과대역에 따른 필터링 결과를 그림 3.6~그림 3.9에 나타내었다. 각각의 그림에서 (a)는 필터링된 시간함수, (b)는 필터의 진폭응답 그리고 (c)는 필터링된 시간함수의 FFT 분석결과이다. 그림 3.6~그림 3.9에 의하면 천이역에서 다소의 깁스(Gibbs) 현상이 나타나지만 통과대역에 따른 필터링 결과는 매우 양호함을 알 수 있다.



(a) 필터링된 시간함수

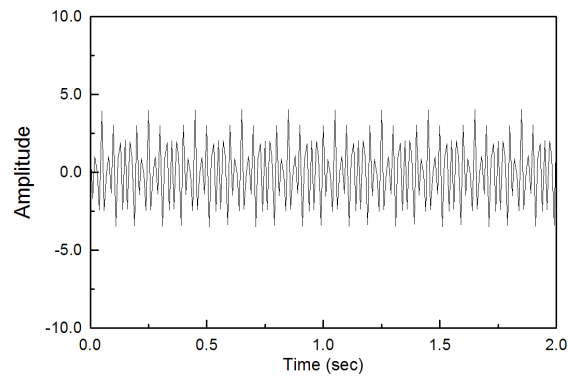


(b) 필터의 진폭응답

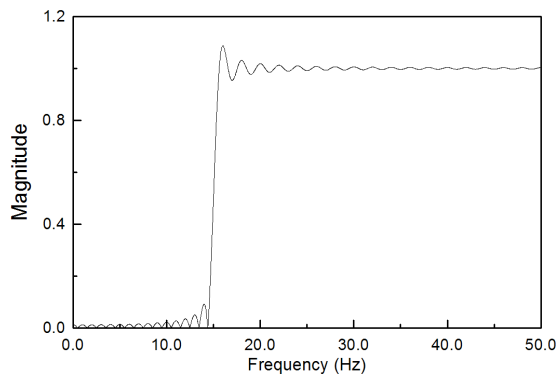


(c) FFT 분석결과

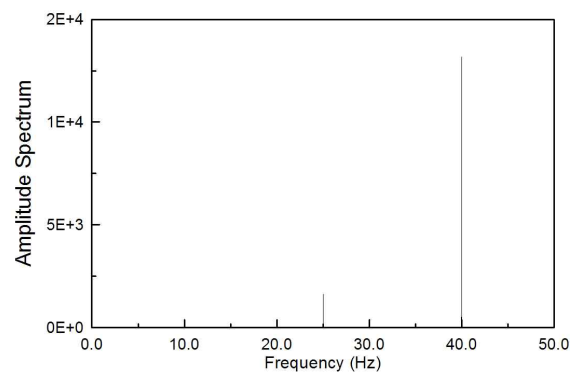
그림 3.6 저역통과 필터에 의한 필터링 결과



(a) 필터링된 시간함수

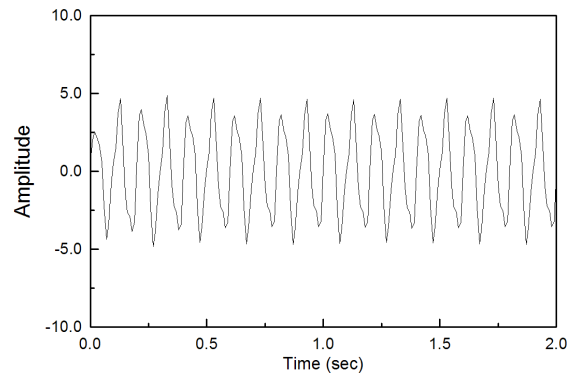


(b) 필터의 진폭응답

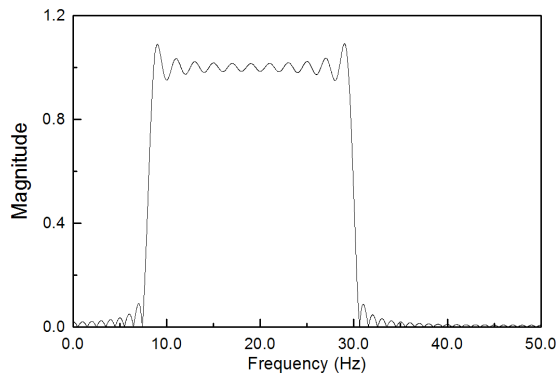


(c) FFT 분석결과

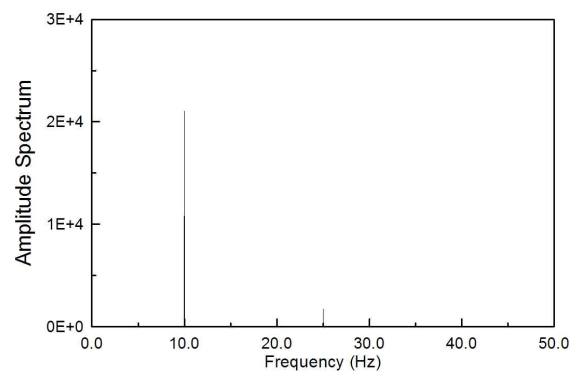
그림 3.7 고역통과 필터에 의한 필터링 결과



(a) 필터링된 시간함수

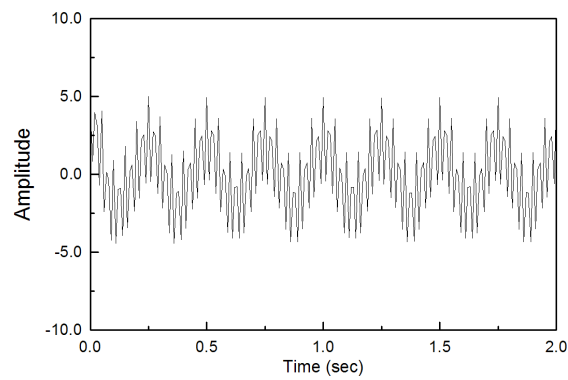


(b) 필터의 진폭응답

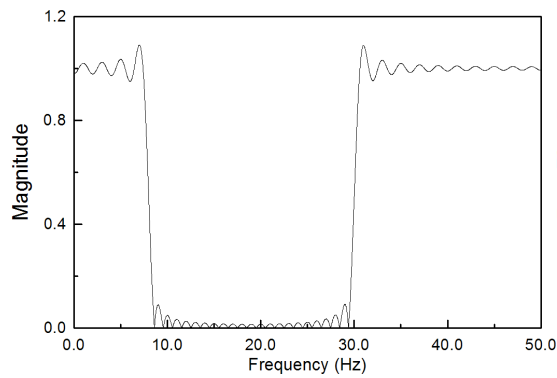


(c) FFT 분석결과

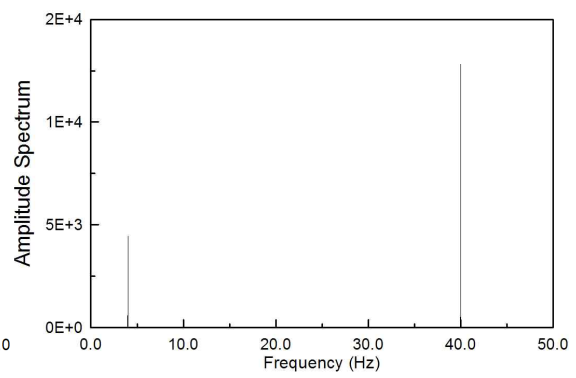
그림 3.8 대역통과 필터에 의한 필터링 결과



(a) 필터링된 시간함수



(b) 필터의 진폭응답



(c) FFT 분석결과

그림 3.9 대역저지 필터에 의한 필터링 결과

본 연구에서는 필터링 결과에 영향을 미치는 창함수의 종류, 필터차수 및 주파수 해상도에 대해 매개변수해석을 통해 검토하였다. 매개변수해석을 위한 분석조건은 다음과 같다.

- 창함수의 종류 : 방형창, 삼각형창, 해닝창, 해밍창, 블랙맨창
- 필터차수 : 10, 20, 30, 50, 100, 200, 500, 1000
- 주파수 해상도 : $f = 0.01221, 0.02441, 0.06104, 0.12207\text{Hz}$
($\Delta t = 0.01, 0.005, 0.002, 0.001\text{sec}$)

그림 3.5에 나타난 시간함수에 대한 창함수 종류에 따른 매개변수해석결과를 그림 3.10 및 표 3.1에 나타내었다. 그림 3.10은 창함수 종류에 따른 필터의 진폭응답이며, 표 3.1은 주파수 10Hz에 대한 스펙트럼 진폭을 정리하여 나타낸 것이다. 창함수 종류 이외에 필터링 분석조건은 8~12Hz의 대역통과, 필터차수 100, 데이터 수 8192개로서 모두 동일하다.

그림 3.10에 의하면 방형창과 삼각형창은 주파수 10Hz에서 진폭응답이 다소 과소평가되며, 해닝창과 해밍창은 진폭이 거의 1.0으로서 유사하다는 것을 알 수 있다. 깁스(Gibbs) 현상은 방형창의 경우에만 나타났다.

필터링된 신호에 대한 FFT 분석을 통해 얻어진 주파수 10Hz에 대한 스펙트럼 진폭을 비교하여 나타낸 표 3.1에 의하면 해밍창에 의한 필터링결과가 원래 신호의 스펙트럼 진폭과 가장 유사한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 그림 3.10의 필터 진폭응답과도 일치한다. 이상의 결과는 해밍창에 의한 필터링이 원 신호의 왜곡을 최소화할 수 있다는 것을 의미한다.

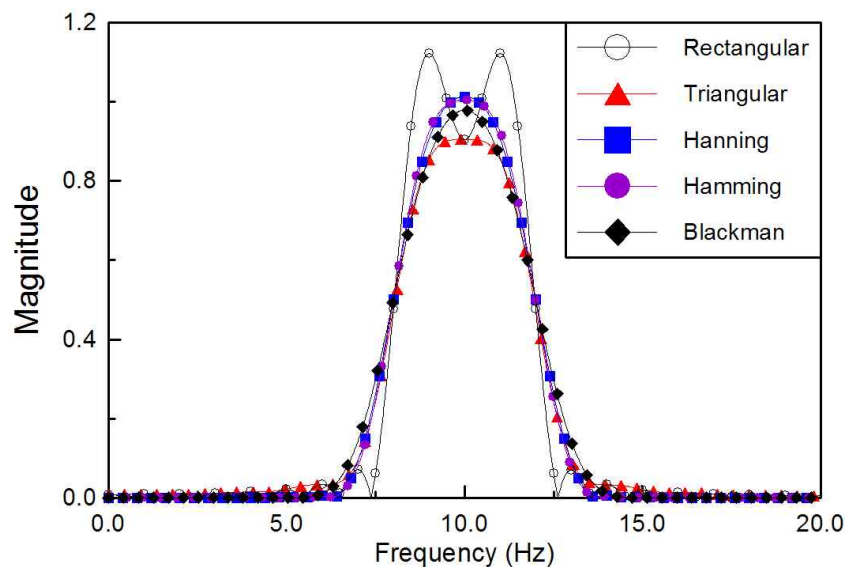


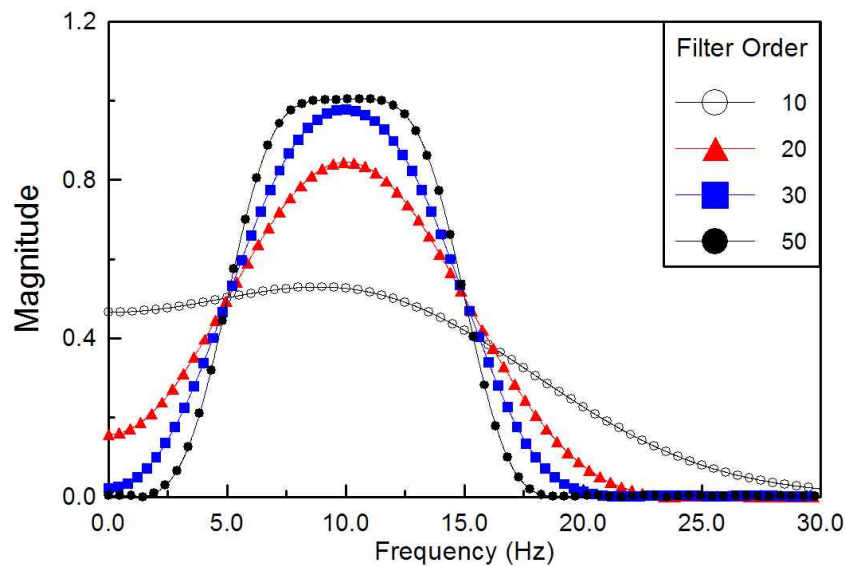
그림 3.10 창함수 종류에 따른 필터의 진폭응답

표 3.1 주파수 10Hz에 대한 스펙트럼 진폭

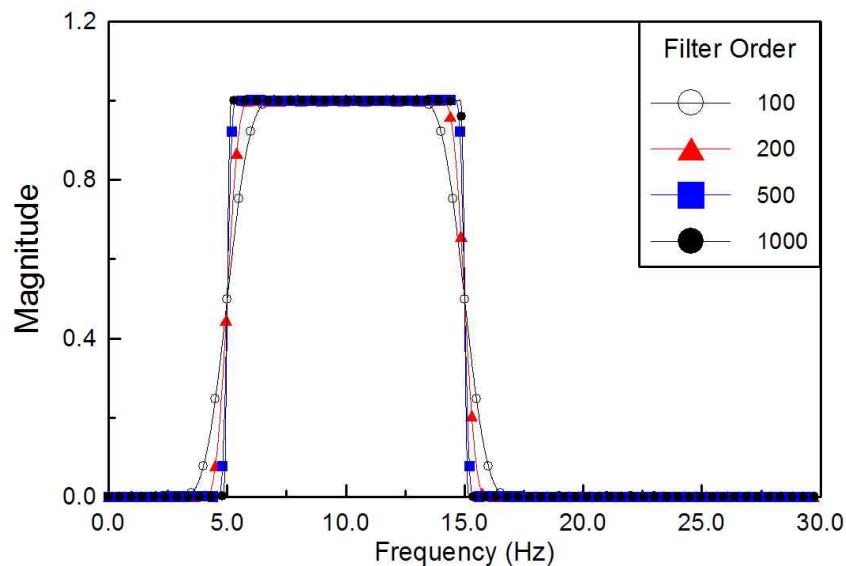
구분	원 신호 ^①	필터링된 신호 ^②				
		방형창	삼각형창	해닝창	해밍창	블랙맨창
스펙트럼 진폭	23505	19002	18991	23823	23418	22240
②/①× 100 (%)	–	80.8	80.8	101.4	99.6	94.6

필터차수가 필터링 결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 그림 3.5의 시간함수를 대상으로 필터차수를 10에서 1000까지 변화시켜가며 매개변수해석을 수행하였다. 필터차수 이외에 필터링 분석조건은 해밍창을 이용한 5~15Hz의 대역통과, 데이터 수 8192개로서 모두 동일하다.

필터차수에 따른 필터의 진폭응답을 그림 3.11에 나타내었다. 그림 3.11은 필터차수가 증가할수록 천이역의 대역이 감소하며, 통과대역의 진폭특성이 1.0에 수렴하는 것을 나타낸다. 필터의 차수가 낮아 천이역의 범위가 넓어지면 필터링의 효과는 감소하며, 원 신호를 왜곡시키는 결과를 초래하게 된다. 그림 3.12 및 표 3.2에 각각 필터차수에 따라 필터링된 시간이력 및 진폭의 RMS(Root Mean Square)를 나타내었다. 한편, 필터링된 시간이력에 대한 FFT 분석결과는 그림 3.13과 같다. 그림 3.12 및 표 3.2에 의하면 필터차수가 낮은 경우에 원 신호의 파형이 왜곡되며, 진폭도 실제와 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 3.13에 나타낸 바와 같이 필터의 차수가 낮아 천이역의 범위가 넓어지면 의도하지 않은 주파수성분이 포함될 수 있다. 따라서, FIR 디지털 필터를 사용하는 경우에 신호처리에 따른 신호의 왜곡을 최소화하기 위해서는 높은 차수의 필터를 사용하여야 한다.



(a) 필터차수 10, 20, 30, 50



(b) 필터차수 100, 200, 500, 1000

그림 3.11 필터차수에 따른 필터의 진폭응답

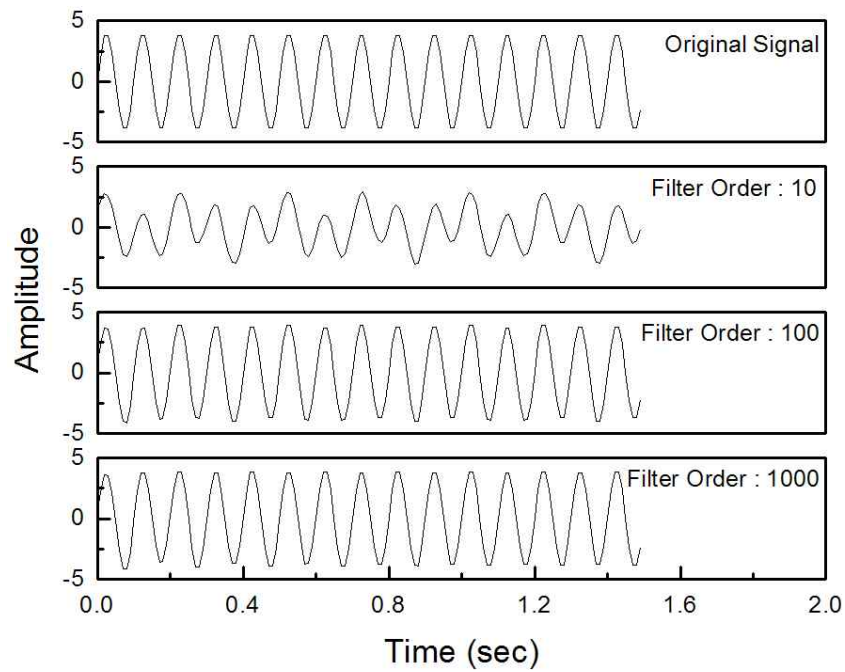


그림 3.12 원 신호와 필터차수에 따른 시간이력의 비교

표 3.2 원 신호와 필터차수에 따른 시간이력 진폭의 RMS

구분	원 신호 ^①	필터링된 신호(필터차수) ^②							
		10	20	30	50	100	200	500	1000
RMS	2.828	1.643	2.452	2.808	2.859	2.837	2.824	2.830	2.827
②/①× 100 (%)	—	58.1	86.7	99.3	101.1	100.3	99.9	100.1	100.0

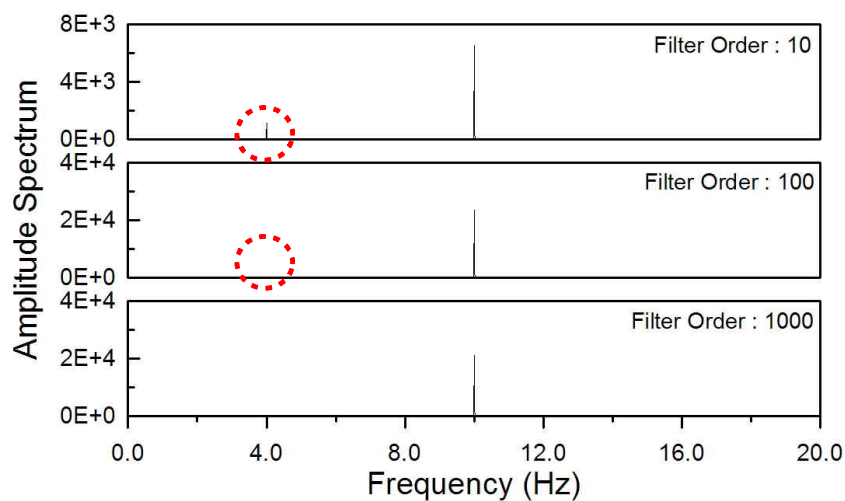


그림 3.13 필터링된 시간이력에 대한 FFT 분석결과

창함수법을 이용하여 주파수 영역에서 FIR 필터의 계수를 구하므로 주파수 해상도에 따른 필터링 결과를 분석하기 위해 주파수 해상도에 대한 매개변수해석을 수행하였다. 분석대상 시

간함수의 주파수 특성은 그림 3.5의 시간함수와 동일하며, 단지 시간함수의 시간간격 t 를 0.01, 0.005, 0.002 및 0.001sec로 변화시켰다. 주파수 해상도는 시간함수의 시간간격 Δt 에 따라 결정되므로 0.01221~0.12207Hz의 범위에 대해 검토하였으며, 필터링 분석조건은 해밍창을 이용한 5~15Hz의 대역통과, 필터차수 100, 그리고 데이터 수 8192개이다.

주파수 해상도에 대한 매개변수해석을 통해 얻어진 필터의 진폭응답을 그림 3.14에 나타내었다. 주파수 해상도에 따른 필터의 진폭응답은 주파수 해상도가 작아질수록 천이역의 대역이 감소하며, 통과대역의 진폭특성이 1.0에 수렴하는 것을 나타낸다. 이러한 현상은 앞서 검토한 필터차수가 커지는 경우와 경향이 유사하다.

주파수 해상도에 따라 필터링된 시간이력 및 진폭의 RMS를 원 신호와 비교하여 그림 3.15 및 표 3.3에 나타내었으며, 이에 의하면 주파수 해상도가 커질수록 필터링에 의해 원 신호와는 다른 진폭을 갖는 신호가 추출되므로 주파수 해상도는 가급적 작게 취하는 것이 바람직하다.

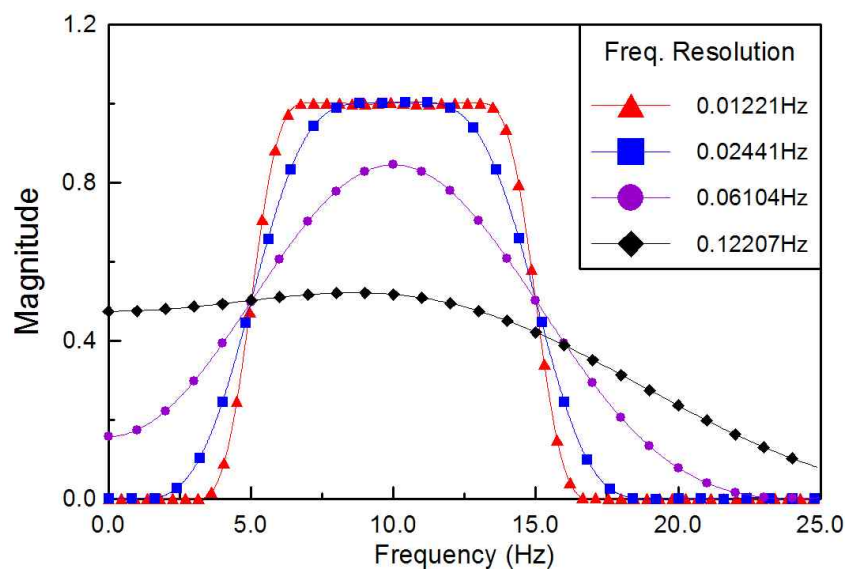
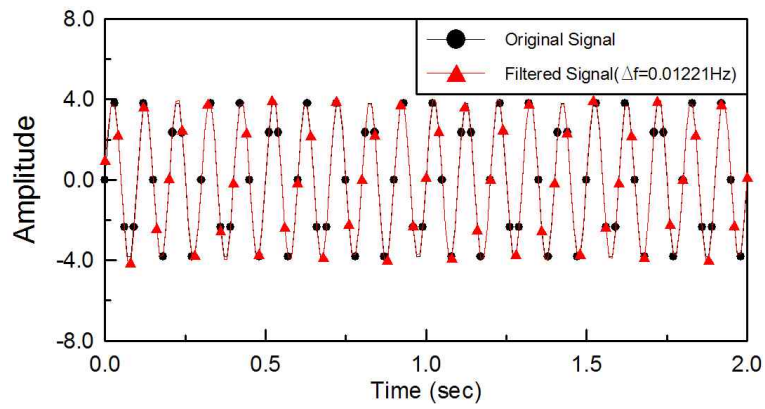


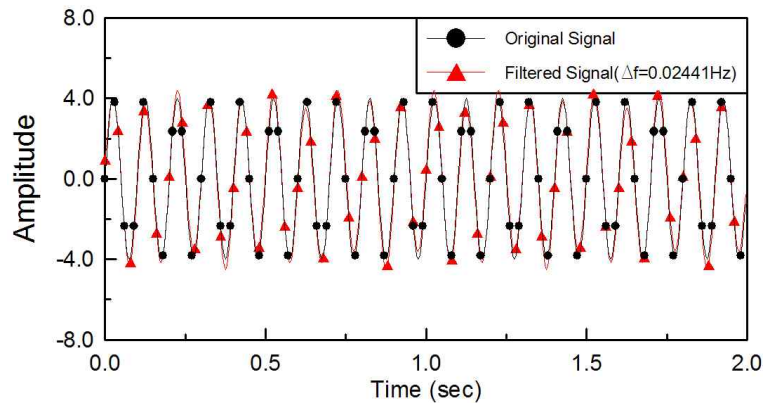
그림 3.14 주파수 해상도에 따른 필터의 진폭응답

표 3.3 원 신호와 주파수 해상도에 따른 시간이력 진폭의 RMS

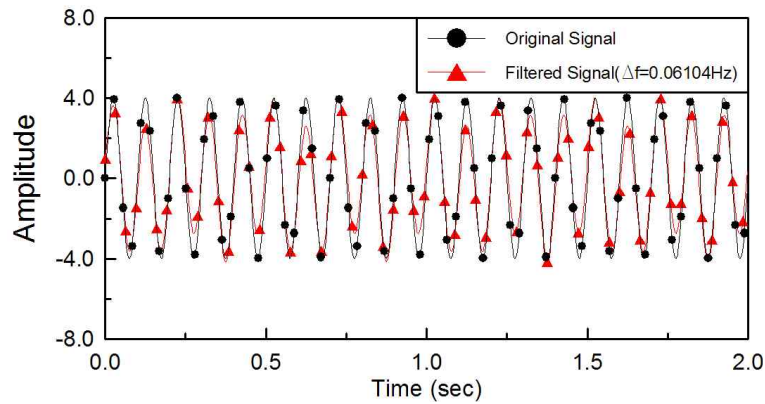
구분	주파수 해상도							
	0.01221Hz		0.02441Hz		0.06104Hz		0.12207Hz	
	원 신호 ^①	필터링 ^②	원 신호 ^①	필터링 ^②	원 신호 ^①	필터링 ^②	원 신호 ^①	필터링 ^②
RMS	2.828	2.837	2.828	2.856	2.828	2.453	2.830	1.623
②/①× 100 (%)	—	100.3	—	101.0	—	86.7	—	57.3



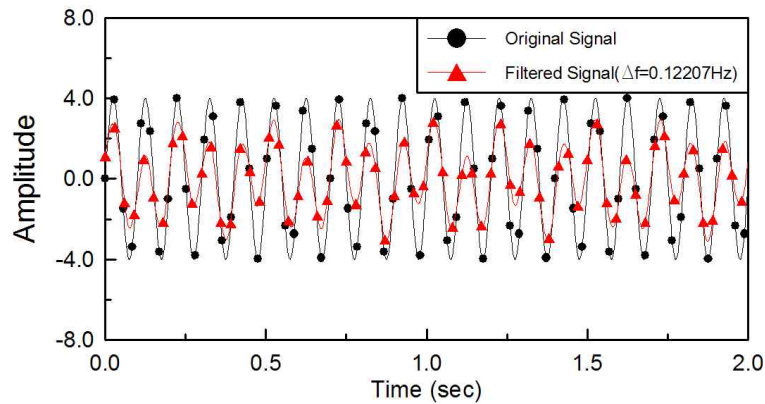
(a) 주파수 해상도 0.01221Hz



(b) 주파수 해상도 0.02441Hz



(c) 주파수 해상도 0.06104Hz



(d) 주파수 해상도 0.12207Hz

그림 3.15 원 신호와 주파수 해상도에 따른 시간이력의 비교

나. 기본 알고리즘 구성 및 프로그램화

(1) 속도신호를 이용하여 변위를 구하는 알고리즘

본 연구에서는 고정된 기준점이 필요없는 속도계를 사용하여 구조물의 속도를 측정하고 이를 이용하여 변위를 추정하는 기술을 개발하고자 한다. 속도신호로부터 변위를 추정하기 위해 그림 3.16에 나타난 바와 같이 크게 4단계를 거치게 되며, 각 단계에 대한 개략적인 설명은 다음과 같다.

Time history of geophone

Voltage, volts
(in time domain)

(b)

1. Fourier Transform

Linear Spectrum of

Voltage, volts
(in freq. domain)

(c)

2. Conversion by Calibration Factor

Linear Spectrum of

Velocity, m/sec
(in freq. domain)

3. Integration

Linear Spectrum of deflections

Deflection, m
(in freq. domain)

4. Inverse Fourier Transform

Time history of deflections

Deflection, m
(in time domain)

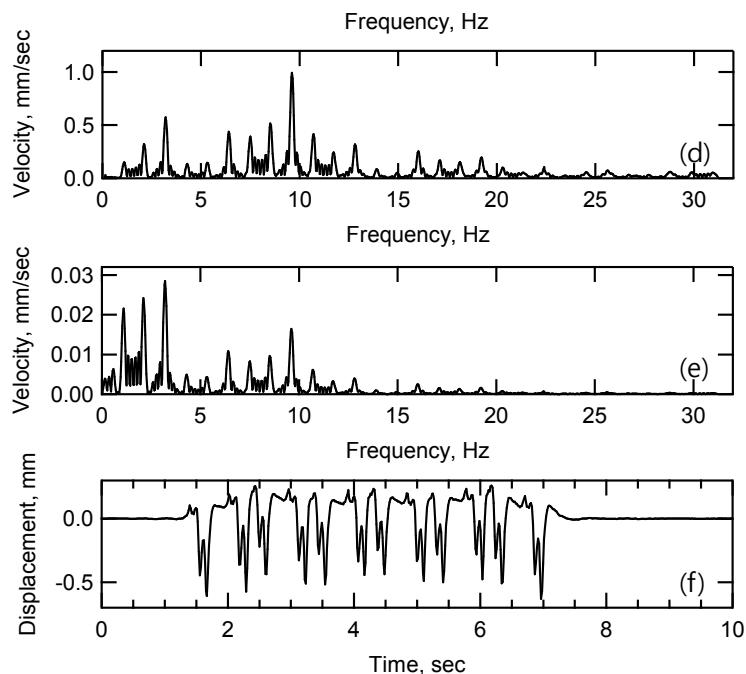


그림 3.16 속도신호를 이용하여 변위를 구하는 알고리즘

· 제1단계 : Fourier 변환

측정된 속도신호에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해 시간영역의 신호를 주파수영역의 속도스펙트럼으로 변환시킨다.

· 제2단계 : 주파수 대역별 속도스펙트럼의 보정

속도계를 이용하여 측정된 응답은 가속도계와 달리 저주파대역에서 응답이 일정하지 않은 특성이 있으므로 실내실험을 통해 속도계의 보정곡선을 도출하여야 하며, 이를 이용하여 주파수 대역별로 속도스펙트럼의 진폭 및 위상각을 보정하여야 한다. 이에 대한 내용은 ‘다. 주파수 대역별 속도신호의 보정기술 개발’에서 상세히 언급하였다.

· 제3단계 : 주파수영역에서의 적분

응답이 보정된 속도스펙트럼에 대해 주파수영역에서 적분을 실시하여 변위스펙트럼으로 변환시킨다. 주파수영역에서의 적분방법은 ‘(2) 주파수 영역에서의 적분 알고리즘’에서 상세히 언급하였다.

· 제4단계 : Fourier 역변환

마지막 단계로서 주파수영역의 변위스펙트럼에 대해 역 FFT 분석을 실시하여 시간영역의 변위시간이력을 도출한다.

(2) 주파수 영역에서의 적분 알고리즘[24]

$f(t)$ 를 시간함수, $F(\omega)$ 를 주파수함수에 대한 Fourier 변환이라고 하여 식(3.13)과 같이 표현한다. 식(3.13)에서 기호 $f(t)$ 는 시간영역의 $f(t)$ 와 주파수영역의 $F(\omega)$ 가 짝을 이루고, 서로 Fourier 변환 또는 Fourier 역변환 관계에 있음을 의미한다.

$$f(t) \Leftrightarrow F(\omega) \quad (3.13)$$

다음 식(3.14)와 식(3.15)의 관계를 만족하는 시간함수 $\phi(t)$ 의 Fourier 변환을 $\Phi(\omega)$ 라고 한다.

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (3.14)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = f(t) \quad (3.15)$$

$$\phi(t) \Leftrightarrow \Phi(\omega) \quad (3.16)$$

Fourier 변환 관계식의 양변을 시간 t 에 대해 미분하고 정리하면 식(3.17)과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{d\phi(t)}{dt} \Leftrightarrow i\omega\Phi(\omega) \quad (3.17)$$

식(3.15)와 식(3.17)에 의해 식(3.18)과 같은 관계가 성립하고, 식(3.18)과 식(3.13)을 비교하면 $F(\omega)$ 및 $\Phi(\omega)$ 는 각각 식(3.19) 및 식(3.20)과 같이 표현된다.

$$f(t) \Leftrightarrow i\omega\Phi(\omega) \quad (\text{II.18})$$

$$F(\omega) = i\omega\Phi(\omega) \quad (\text{II.19})$$

$$\Phi(\omega) = \frac{F(\omega)}{i\omega} \quad (\text{II.20})$$

식(3.14)와 식(3.20)을 식(3.16)에 대입하면 식(3.21)과 같고, 식(3.21)은 시간영역에서의 적분이 주파수영역에서는 $i\omega$ 로 나눈 것에 대응한다는 것을 나타낸다.

$$\int_{-\infty}^t x(t) dt \Leftrightarrow \frac{1}{i\omega} X(\omega) \quad (3.21)$$

이산치를 다루기 위해 식(3.22)에 나타낸 유한 Fourier 근사를 이용한다.

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \left[A_k \cos \frac{2\pi kt}{N\Delta t} + B_k \sin \frac{2\pi kt}{N\Delta t} \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \frac{2\pi(N/2)t}{N\Delta t} \quad (3.22)$$

식(3.22)에 대해 부정적분을 취하면 다음과 같다. 식(3.23)에서 C 는 적분상수이다. 식(3.23)에서 $t = 0$ 으로 두면 식(3.24)와 같은 적분의 초기치를 구할 수 있다.

$$\int \bar{x}(t) dt = \frac{A_0}{2} t + \sum_{k=1}^{N/2-1} \frac{N\Delta t}{2\pi t} \left[A_k \sin \frac{2\pi kt}{N\Delta t} - B_k \cos \frac{2\pi kt}{N\Delta t} \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \frac{\Delta t}{\pi} \sin \frac{2\pi(N/2)t}{N\Delta t} + C \quad (3.23)$$

$$v_0 = - \frac{N\Delta t}{2\pi} \sum_{k=1}^{N/2-1} \frac{B_k}{k} + C \quad (3.24)$$

따라서 적분상수 C 는 식(3.25)와 같고, 식(3.25)를 식(3.23)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$C = v_0 + \frac{N\Delta t}{2\pi} \sum_{k=1}^{N/2-1} \frac{B_k}{k} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \int_0^t \bar{x}(t) dt &= v_0 + \frac{N\Delta t}{2\pi} \sum_{k=1}^{N/2-1} \frac{B_k}{k} + \frac{A_0}{2} t \\ &+ \frac{N\Delta t}{2\pi} \sum_{k=1}^{N/2-1} \left[\frac{A_k}{k} \sin \frac{2\pi kt}{N\Delta t} - \frac{B_k}{k} \cos \frac{2\pi kt}{N\Delta t} \right] \\ &+ \frac{A_{N/2}}{2} \frac{\Delta t}{\pi} \sin \frac{2\pi(N/2)t}{N\Delta t} \end{aligned} \quad (3.26)$$

적분한 값도 시간간격 Δt 마다의 시간 $t = m\Delta t$ 에 있어서 N 개의 이산치로 주어지고, 적분의 이산치를 식(3.27)과 같이 간략하게 표현하면 식(3.26)은 식(3.28)과 같이 정리된다.

$$\left(\int_0^t x dt \right)_m = \int_0^{t=m\Delta t} x(t) dt \quad m=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \left(\int_0^t x dt \right)_m &= \frac{N\Delta t}{2\pi} \left[\frac{2\pi v_0}{N\Delta t} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \frac{B_k}{k} + \frac{\pi A_0}{N} m \right. \\ &\left. + \sum_{k=1}^{N/2-1} \frac{A_k}{k} \sin \frac{2\pi km}{N} - \frac{B_k}{k} \cos \frac{2\pi km}{N} \right] \end{aligned} \quad (3.28)$$

식(3.28) 괄호 안의 제1항과 제2항은 m 과는 무관한 상수이므로 a 로 표현하고, 유한 Fourier

계수 A_k, B_k 와 유한복소 Fourier 계수 C_k 사이의 관계를 나타내는 식(3.29) 및 식(3.30)을 이용하여 복소 Fourier 계수형태로 나타내면 식(3.31) 및 식(3.32)와 같다. 식(3.32)에서 기호 *는 공액복소수를 의미한다.

$$C_k = \frac{A_k - iB_k}{2}, \quad C_k^* = \frac{A_k + iB_k}{2} \quad k=0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (3.29)$$

$$A_k = 2\Re(C_k), \quad B_k = -2\Im(C_k) \quad k=0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (3.30)$$

$$\frac{2\pi v_0}{N\Delta t} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \frac{B_k}{k} = \sum_{k=0}^{N-1} E_k e^{1(2\pi km/N)} \quad m=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.31)$$

$$E_0 = \frac{2\pi v_0}{N\Delta t} - 2 \sum_{k=1}^{N/2-1} \frac{\Im(C_k)}{k} \quad (3.32a)$$

$$E_k = 0, \quad E_{N-k} = E_k^* \quad k=1, 2, \dots, N/2-1 \quad (3.32b)$$

$$E_{N/2} = 0 \quad (3.32c)$$

식(3.28) 괄호 안의 제3항은 $(\pi A_0/N)m$ 인데, m 에 의해 선형적으로 증가하므로 복소 Fourier 계수는 식(3.33) 및 식(3.34)와 같다.

$$\frac{\pi A_0}{N} m = \sum_{k=0}^{N-1} P_k e^{1(2\pi km/N)} \quad m=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.33)$$

$$P_0 = \frac{\pi(N-1)C_0}{N} \quad (3.34a)$$

$$P_k = \frac{\pi C_0}{N} [-1 + i \cot(\pi k/N)], \quad P_{N-k} = P_k^* \quad k=1, 2, \dots, N/2-1 \quad (3.34b)$$

$$P_{N/2} = -\frac{\pi C_0}{N} \quad (3.34c)$$

한편, 식(3.28) 괄호 안의 마지막 항을 복소 Fourier 계수로 표현하면 식(3.35)와 식(3.36)과 같다.

$$\sum_{k=1}^{N/2-1} \left\{ \frac{A_k}{k} \sin \frac{2\pi km}{N} - \frac{B_k}{k} \cos \frac{2\pi km}{N} \right\} = \sum_{k=0}^{N-1} Q_k e^{1(2\pi km/N)} \quad m=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.35)$$

$$Q_0 = 0 \quad (3.36a)$$

$$Q_k = -\frac{iC_k}{k}, \quad Q_{N-k} = Q_k^* \quad k=1, 2, \dots, N/2-1 \quad (3.36b)$$

$$Q_{N/2} = 0 \quad (3.36c)$$

이로서 식(3.28) 우변의 괄호 안의 모든 항이 각각 Fourier 역변환의 형태로 표현되었으며, 각각의 복소 Fourier 계수는 식(3.32), 식(3.34) 및 식(3.36)과 같이 구해졌다.

시간영역에서 이산치로 주어진 시간함수 $x_m (m=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 의 적분은 먼저 x_m 을

Fourier 변환하여 주파수영역에서 복소 Fourier 계수 $k=1, 2, \dots, N/2-1$ 를 구하고, 식 (3.38)에 의해 계수 $S_k(k=1, 2, \dots, N/2-1)$ 를 계산한 후 식(3.37)의 Fourier 역변환에 따라 시간영역으로 되돌아온다.

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_m = \frac{N\Delta t}{2\pi} \sum_{k=0}^{N/2-1} S_k e^{1(2\pi km/N)} \quad m=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.37)$$

$$S_0 = \frac{2\pi v_0}{N\Delta t} - 2 \sum_{k=1}^{N/2-1} \frac{\Im(C_k)}{k} + \frac{\pi(N-1)C_0}{N} \quad (3.38a)$$

$$S_k = \frac{\pi C_0}{N} [-1 + i \cot(\pi k/N)] - \frac{i C_k}{k}, \quad S_{N-k} = S_k^* \quad k=1, 2, \dots, N/2-1 \quad (3.38b)$$

$$S_{N/2} = -\frac{\pi C_0}{N} \quad (3.38c)$$

식(3.38a)의 v_0 는 일반적으로 $t=0$ 일 때의 적분 초기치를 주는 것으로서 속도를 적분하여 변위를 구하는 경우는 $v_0=0$ 이다.

앞서 기술한 주파수영역에서의 적분기법과 FFT 및 역 FFT 알고리즘을 이용하여 속도신호를 적분하여 변위를 추정하는 프로그램을 작성하였다.

다. 주파수 대역별 속도신호의 보정기술 개발

본 연구에서 사용하는 속도계는 지진센서(seismic sensor)의 일종으로서 지반진동을 지반의 입자속도에 비례하는 볼트(voltage)로 변환하여 지반진동을 측정한다. 속도계의 응답은 가속도계와 달리 저주파대역에서 응답특성이 일정하지 않으므로 속도신호를 이용하여 변위를 추정하기 위해서는 반드시 주파수별 응답 보정이 필요하다. 속도계를 이용하여 신호를 측정할 때, 속도신호는 진동 주파수마다 각기 다른 보정계수로 측정되는 특징이 있으므로, 속도신호를 측정하여 변위를 구하기 전에 우선적으로 수행되어야 하는 것은 속도신호의 보정이다.

속도계에 대한 주파수 보정을 위해 실내실험이 필요하며, 속도계의 응답을 평가하기 위한 기준으로서 가속도계가 사용된다. 기준으로 사용되는 가속도계는 PCB사의 지진가속도계(모델명 PCB-393B31)이다. 가속도계의 감도(sensitivity)는 $1.02V/m/sec^2$ 이며, $1.0\sim 200Hz$ 범위에서 진폭 및 위상각은 일정한 특성을 갖는다.

Sercel사의 속도계(모델명 L-22E)의 주파수 대역별 응답 보정곡선을 얻기 위한 실험장비 세팅 광경은 그림 3.17과 같다. 가진을 위해 동적 신호분석기가 주파수를 $0.3\sim 200Hz$ 의 범위내에서 선형적으로 증가시켜가며 조화 정현신호를 증폭기로 보내어 실험이 수행된다.

실내실험을 통해 동적 신호분석기에 의해 주파수별 주파수 응답($H_{21}(f)$)이 측정되는데, $H_{21}(f)$ 은 가속도 출력값에 대한 속도 출력값의 비이다. 한편, 주파수별 가속도 $\ddot{U}(f)$ 에 대한 속도 $\dot{U}(f)$ 의 비는 식(3.39)와 같이 정의된다. 또한, 속도와 가속도는 식(3.40)과 같은 관계를 갖는다.

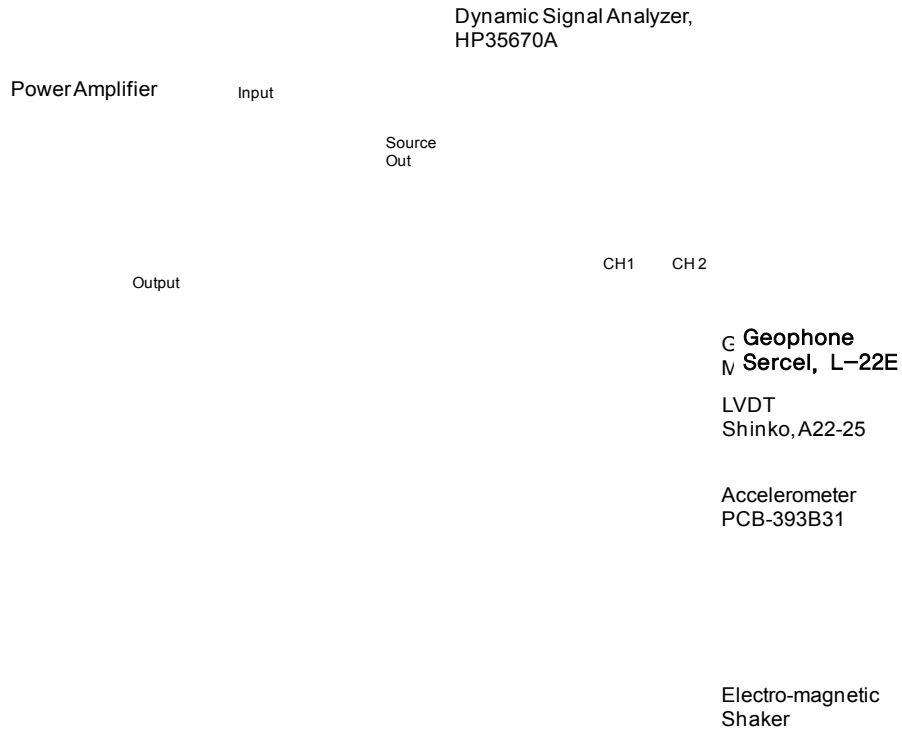


그림 3.17 속도계의 보정곡선 도출을 위한 실험장비 세팅 광경

$$\frac{\dot{U}(f)}{(f)} = \frac{V_g(f)/C_g(f)}{V(f)/C_a} = \frac{V_g(f)}{V_a(f)} \cdot \frac{C_a}{C_g(f)} = H_{21}(f) \cdot \frac{C_a}{C_g(f)} \quad (3.39)$$

여기서, $V_g(f)$: 속도계 출력값

$V_a(f)$: 가속도계 출력값

$C_g(f)$: 속도계 보정계수

C_a : 가속도계 보정계수

$$\frac{\dot{U}(f)}{\ddot{U}(f)} = \frac{\dot{U}(f)}{-j\omega \cdot \dot{U}(f)} = \frac{1}{-j\omega} \quad (3.40)$$

식(3.39)와 식(3.40)에 의해 속도계의 주파수별 보정계수는 식(3.41)과 같이 정의된다.

$$C_g(f) = -j\omega \cdot C_a \cdot H_{21}(f) \quad (3.41)$$

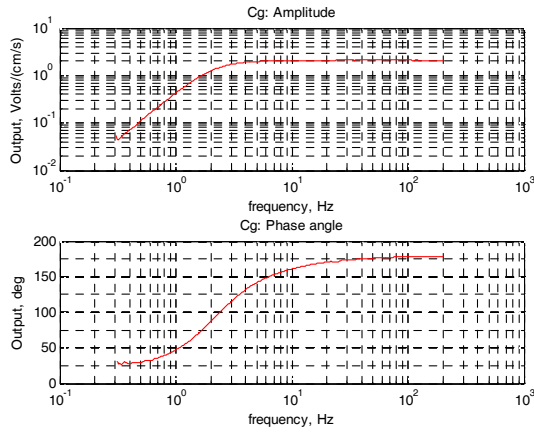
식(3.41)에 의해 속도계의 진폭 및 위상각은 각각 식(3.42) 및 식(3.43)과 같이 표현된다.

$$|C_g(f)| = \omega \cdot C_a \cdot |H_{21}(f)| \quad (3.42)$$

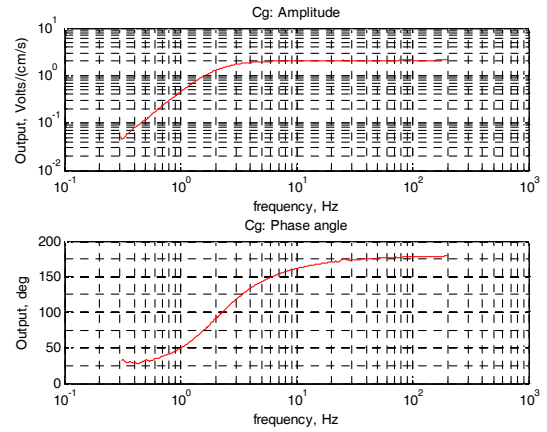
$$\phi(C_g(f)) = \phi(H_{21}(f)) - \frac{\pi}{2} \quad (3.43)$$

위상각의 경우, 주파수별 주파수 응답($|G(f)|$)에 대한 전형적인 경향은 주파수가 증가함에 따라 180° 에서 0° 로 감소하므로 속도계에 대한 위상각은 270° 에서 90° , 또는 -90° 에서 90° 로 변화한다.

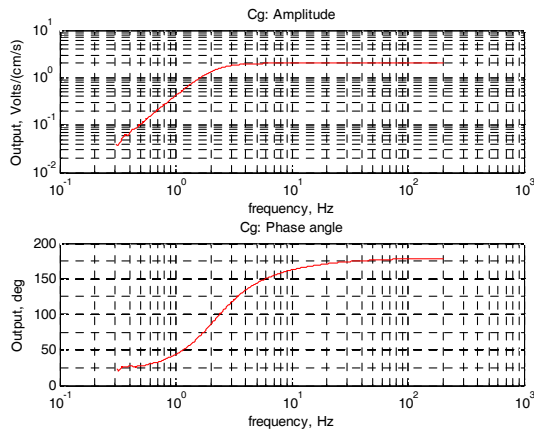
총 4개의 속도계에 대해 실내실험을 실시하였으며, 이로부터 얻어진 속도계의 주파수 대역별 보정곡선을 그림 3.18에 나타내었다.



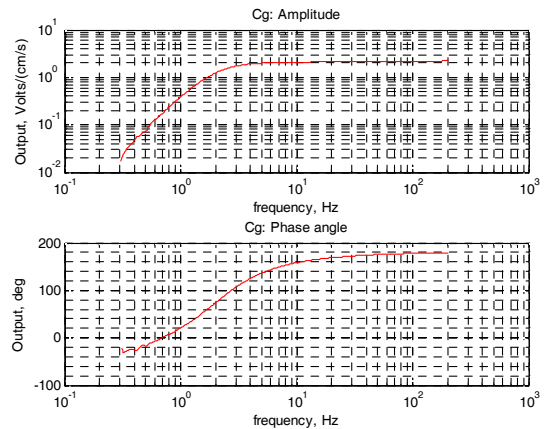
(a) 속도계 #1



(b) 속도계 #2



(c) 속도계 #3



(d) 속도계 #4

그림 3.18 속도계의 진폭 및 위상각 보정곡선

라. 해석적 방법에 의해 교량의 동특성에 따른 개발기술의 적용성 검증 및 보완
(1) 개요

속도신호를 이용하여 변위를 추정하는 알고리즘을 검증하기 위해 수치해석을 실시하였다. 총 6개의 해석대상 교량에 대한 이동하중에 의한 시간이력해석을 통해 주행차량에 의해 발생하는 속도신호를 산정하고, 이에 대해 변위 추정 알고리즘을 적용하여 결과를 분석하였다. 분석에 사용된 속도신호는 수치해석을 통해 얻어진 결과이므로 주파수 대역별 응답 보정 단계는 생략하였다.

변위 추정결과에 영향을 미칠 것으로 판단되는 총 6개의 변수를 선정하여 변수에 따른 변위 추정 결과를 검토하였다. 수치해석에 반영된 매개변수는 다음과 같다.

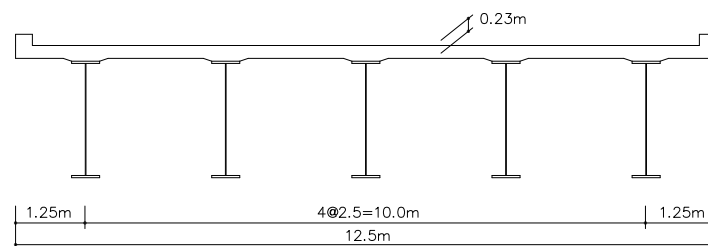
- 교량의 고유진동수 : 1.52, 3.05, 4.04, 5.02, 6.95, 10.48Hz
- 교량의 감쇠비 : 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05
- 신호에 대한 잡음비 : 0.00, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.50
- 차량의 주행속도 : 5, 10, 60km/h
- 데이터 sampling rate : 10, 30, 100, 500, 1000Hz
- 기준선(baseline) 편기 비율 : RMS 대비 0, 5, 10, 20, 40%

(2) 해석대상 교량

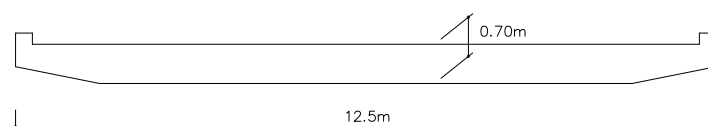
본 연구에서는 수치해석적으로 속도신호를 이용한 변위 추정 알고리즘을 검증하기 위해 표 3.4와 같이 강합성 플레이트 거더교 및 RC 슬래브교를 해석대상 교량으로 선정하였다. 장대교량인 현수교 및 사장교 등을 제외한 일반적인 거더교 또는 슬래브교의 경간길이를 고려하여 해석대상 교량의 경간길이를 10~60m의 범위로 하였으며, 구조계의 강성을 적절히 조절하여 교량의 고유진동수는 약 1~10Hz의 범위가 되도록 하였다. 한편, 해석대상 교량의 폭원은 표준적인 2차로 교량을 대상으로 하였다. 그림 3.19 및 표 3.5는 각각 해석대상 교량의 횡단면도 및 단면제원이다.

표 4.4 해석대상 교량 현황

구 분	단순/연속	구조형식	경간길이	고유진동수
RCS-10	단순교	RC 슬래브교	10m	10.48Hz
SPG-20		강합성 플레이트 거더교	20m	6.95Hz
SPG-30		강합성 플레이트 거더교	30m	5.02Hz
SPG-40		강합성 플레이트 거더교	40m	3.05Hz
SPG-60		강합성 플레이트 거더교	60m	1.52Hz
SPG-100	연속교	강합성 플레이트 거더교	30+40+30=100m	4.04Hz



(a) 강합성 플레이트 거더교



(b) RC 슬래브교

그림 3.19 해석대상 교량의 횡단면도

표 3.5 해석대상 교량의 단면 제원

구 분	바닥판(W× t)	상부플랜지(W× t)	복부판(W× t)	하부플랜지(W× t)
RCS-10	12500× 700	—	—	—
SPG-20	12500× 230	500× 40	1800× 12	500× 40
SPG-30	12500× 230	500× 40	1800× 12	500× 40
SPG-40	12500× 230	500× 32	2000× 12	500× 36
SPG-60	12500× 230	500× 20	2500× 12	500× 22
SPG-100	12500× 230	500× 32	2000× 12	500× 36

(3) 이동하중에 의한 시간이력해석

해석대상 교량에 대해 이동하중에 의한 시간이력해석을 수행하여 주행차량에 의해 발생하는 속도신호를 산출하였다. 이동하중에 의한 시간이력해석은 식(3.44)와 같이 표현되는 운동방정식을 Newmark의 직접적분법으로 수행하였다. 식(3.44)에서, C , K 는 각각 구조계의 질량, 감쇠 및 강성행렬이며, x , $\dot{x}$, $\ddot{x}$ 및 $P(t)$ 는 각각 가속도, 속도, 변위 및 하중벡터이다. 이동하중에 의한 시간이력해석 프로그램[25]의 흐름도를 그림 3.20에 나타내었다. 시간이력해석에 사용된 프로그램은 외력에 대해 변위, 속도, 가속도 및 각종 단면력을 출력할 수 있는 기능이 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P(t) \quad (3.44)$$

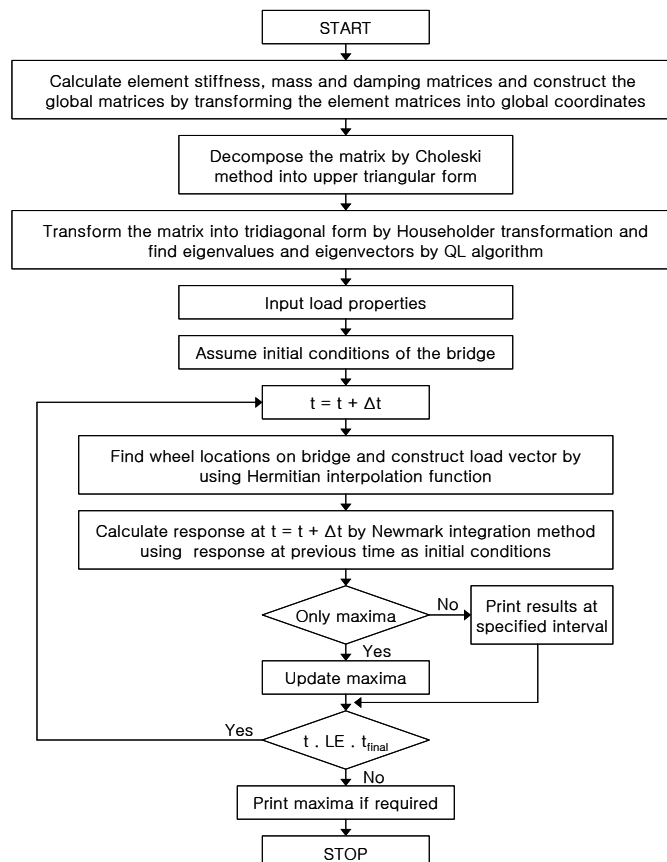
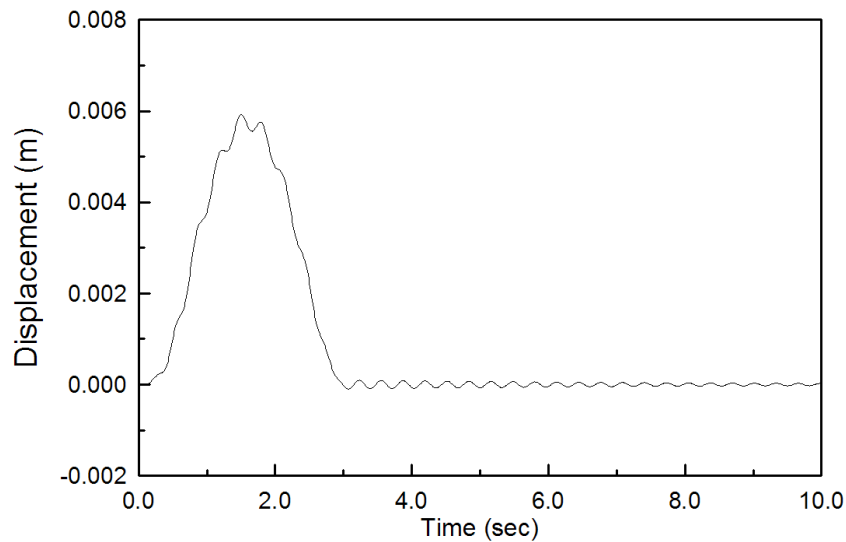


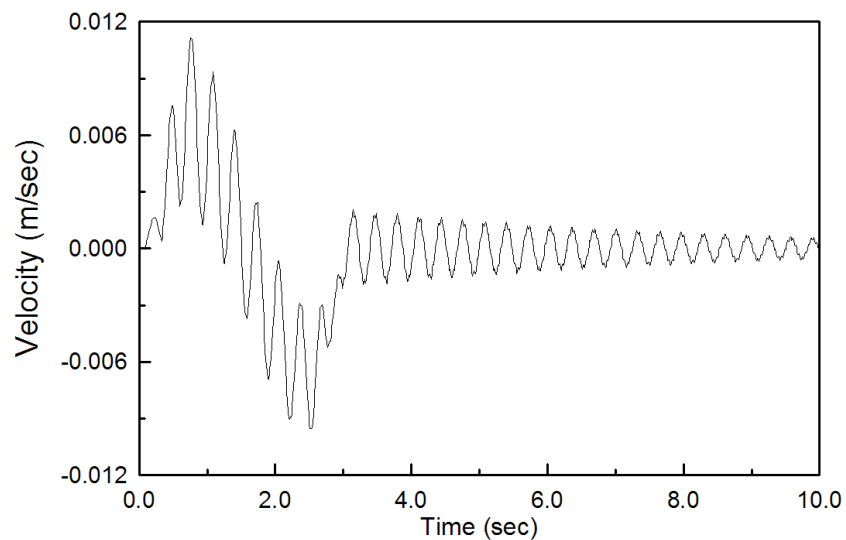
그림 3.20 이동하중에 의한 시간이력해석 프로그램의 흐름도

이동하중에 의한 시간이력해석을 위해 해석대상 교량을 프레임요소(frame element)를 이용하여 모형화하였다. 주행차량은 1등교의 설계활하중인 DB-24(총 중량 432kN)를 3축의 주행하중(moving force)으로 모형화하였다. 해석조건으로서 차량의 주행속도는 60km/h, 해석시간간격은 0.01sec 그리고 감쇠비는 강교의 경우에 0.01, 콘크리트교의 경우에 0.03을 적용하였다.

이동하중에 의한 시간이력해석을 통해 얻어진 해석대상 교량 경간 중앙부의 변위 및 속도 시간이력곡선의 일례를 그림 3.21에 나타내었다. 그림 3.21에서 약 3초 까지가 차량이 교량 상에 위치하는 강제진동 상태이며, 3초 이후에는 자유진동 상태이다. 해석을 통해 얻어진 속도 시간이력에 대해 본 연구의 알고리즘을 적용하여 변위를 추정하게 되며, 추정된 변위는 시간이력 해석에 의해 직접 구한 변위와 비교하여 변위 추정 알고리즘을 검증할 계획이다. 표 3.6에는 해석대상 교량의 최대 변위 및 최대 속도를 정리하여 나타내었다.



(a) 변위



(b) 속도

그림 II.21 SPG-40의 경간 중앙부의 시간이력곡선

표 II.6 해석대상 교량의 최대 변위 및 최대 속도

구 분	최대 변위(mm)	최대 속도(m/sec)	고유진동수(Hz)
RCS-10	0.64	0.00359	10.48
SPG-20	0.78	0.00297	6.95
SPG-30	2.78	0.00647	5.02
SPG-40	5.92	0.01117	3.05
SPG-60	16.47	0.01602	1.52
SPG-100	2.87	0.00472	4.04

(4) 해석매개변수

수치해석적으로 본 연구에서 개발한 변위 추정 알고리즘을 검증하기 위해 변위 추정결과에 영향을 미칠 것으로 판단되는 인자를 고려하여 매개변수해석을 수행하였다. 해석에 고려된 매개변수는 교량의 고유진동수 및 감쇠비, 신호에 대한 잡음비(Noise-to-Signal Ratio, NSR), 차량의 주행속도, 데이터 sampling rate 그리고 기준선 편기 비율이며, 이하에 이에 대한 내용을 기술하였다.

(가) 교량의 고유진동수 및 감쇠비

구조계의 동적 거동은 구조계가 가지고 있는 동특성에 의해 지배되며, 대표적인 동특성은 고유진동수와 감쇠비이다. 본 연구는 기본적으로 동적 신호를 대상으로 하므로 교량구조물의 동특성에 따른 변위 추정 알고리즘의 적용성을 검토하기 위해 고유진동수 및 감쇠비를 매개변수로 선정하였다.

장대교량을 제외한 일반 교량의 고유진동수는 약 1~10Hz 범위이므로 해석대상 교량의 고유진동수가 해당 범위에 들어가도록 경간길이에 따라 구조계의 강성을 적절히 조절하여 고유진동수가 1.52, 3.05, 4.04, 5.02, 6.95, 10.48Hz가 되도록 하였다.

한편, 교량의 감쇠비는 구조계의 재료에 따라 차이가 있는데, 강교(강합성교 포함)는 약 0.01~0.03, 콘크리트교는 약 0.03~0.05의 범위이다. 따라서, 본 연구에서는 감쇠비를 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05로 변화시켜가며 수치해석을 수행하고, 결과를 검토하였다.

(나) 신호에 대한 잡음비(Noise-to-Signal Ratio, NSR)

현장실험을 통해 측정된 자료에는 측정센서의 응답특성, 주변 환경 및 수치화 과정 등 다양한 요인에 의해 유발되는 잡음이 필연적으로 포함된다. 잡음이 포함된 속도신호에 변위 추정 알고리즘을 적용하는 경우에 변위 추정 결과의 적정성을 검토하고자 신호에 대한 잡음비를 매개변수로 선정하였다.

잡음신호를 생성시키기 위해 IMSL(International Mathematical and Statistical Libraries) 라이브러리(library)[26]를 이용하여 균일한 분포를 갖고 평균이 0인 의사난수(pseudorandom number)를 발생시켰다. 생성된 잡음신호와 이에 대한 FFT 분석결과를 그림 3.22에 나타내었다. 그림 3.22(b)에 나타낸 잡음신호의 스펙트럼 특성은 백색잡음과 유사함을 알 수 있다.

속도시간이력신호에 포함될 잡음의 비율은 식(3.45)와 같이 정의되는 NSR(Noise-to-Signal Ratio)을 이용하여 조정하였으며, 본 연구에서 고려한 NSR은 0.00, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30 및

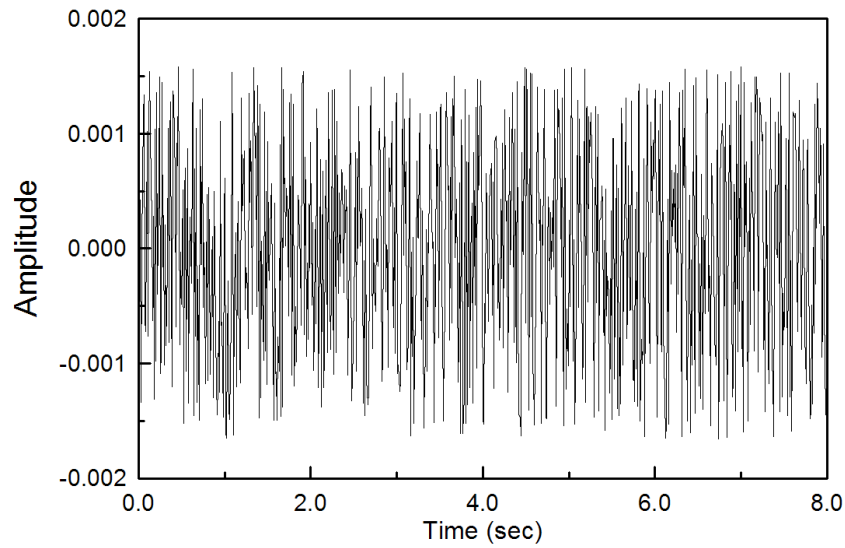
0.50이다. 그림 3.23에 NSR이 0.00인 경우와 0.20인 경우의 속도시간이력신호를 비교하여 나타내었다.

$$SR = \frac{\left(\sum_{i=1}^N \frac{n_i^2}{N} \right)^{1/2}}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{v_i^2}{N} \right)^{1/2}} \quad (3.45)$$

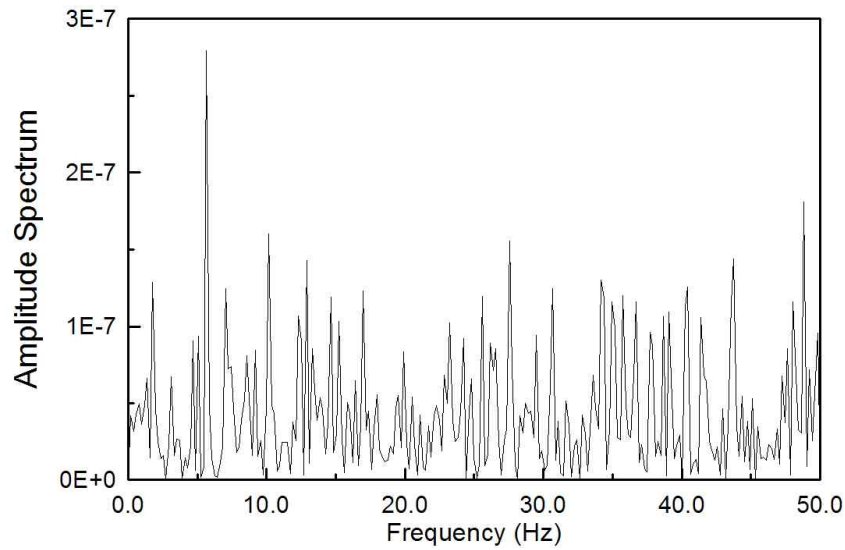
여기서, N : 분석자료의 총 수

n_i : i 번째 의사난수

v_i : i 번째 속도신호

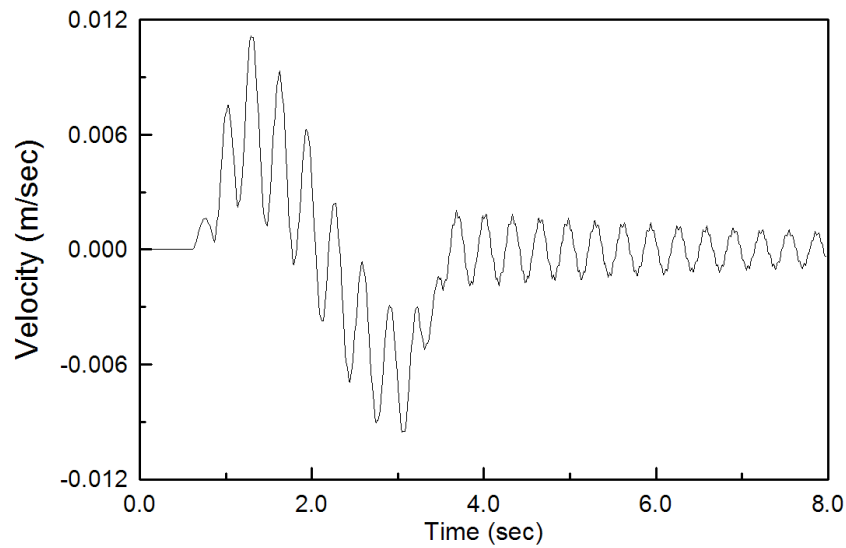


(a) 생성된 잡음신호

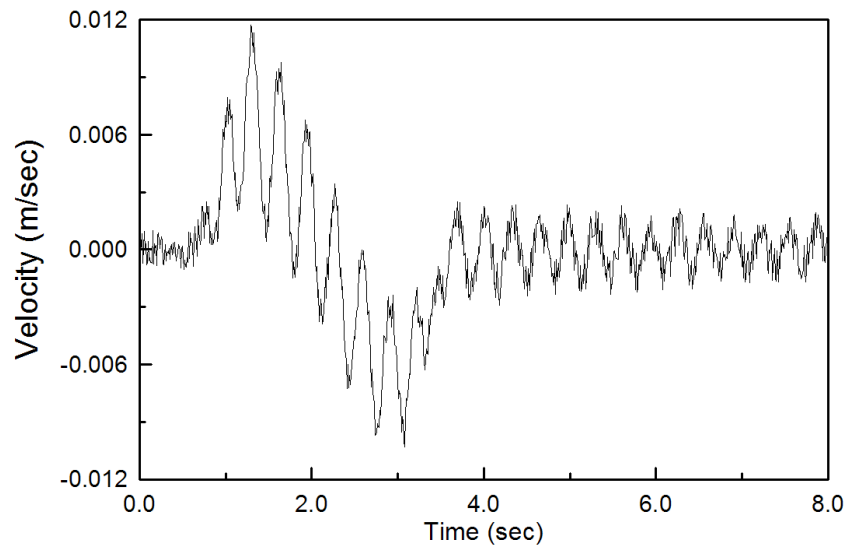


(b) 잡음신호의 Fourier spectrum

그림 3.22 생성된 잡음신호와 이에 대한 FFT 분석결과



(a) NSR=0.00



(b) NSR=0.20

그림 3.23 원신호와 잡음이 포함된 신호의 비교

(다) 차량의 주행속도

차량이 교량 위를 일상적인 속도로 주행하면 교량은 동적으로 거동하지만 차량의 주행속도가 약 5km/h 이하로 서행하게 되면 동적인 영향은 거의 사라지게 되며, 이러한 상태를 일반적으로 의사정적(pseudostatic) 상태라고 한다. 그림 3.24에 차량의 주행속도가 60km/h인 경우와 5km/h인 경우에 교량 경간 중앙부의 변위시간이력곡선을 비교하여 나타내었다. 교량의 정밀한 진진단시 실시하는 동적주행시험에서도 차량이 약 5km/h로 서행할 때 측정된 응답을 정적인 응답으로 간주하고, 이를 이용하여 충격계수를 산출한다.

일상적인 주행속도하에서 측정된 속도신호를 이용하여 추정된 변위는 동적인 성분이 포함되는데, 경우에 따라서는 동적 변위가 아닌 정적 변위가 필요한 경우도 있으므로 차량 주행속도를 매개변수로 선정하였다. 수치해석시 고려한 차량의 주행속도는 5, 10 및 60km/h로서 총 3가지 경우이다.

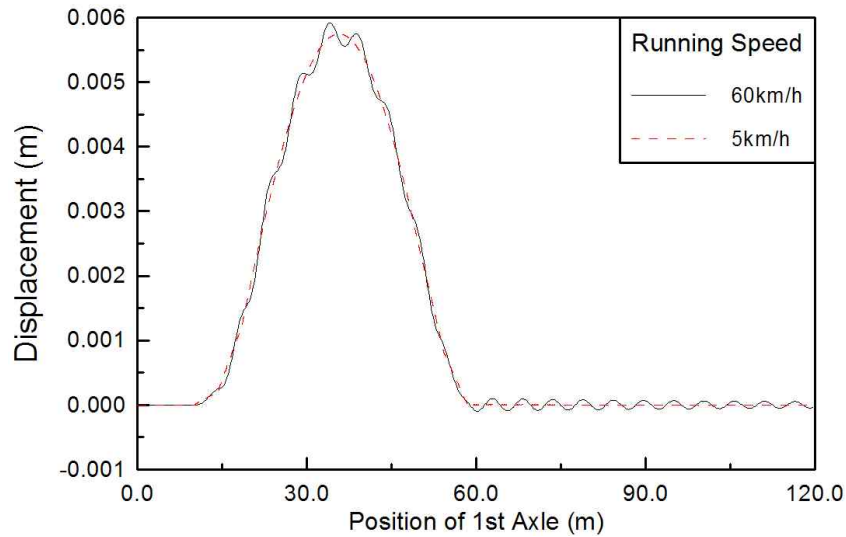


그림 3.24 주행속도에 따른 변위시간이력곡선 비교

(라) 데이터 sampling rate

현장실험을 통해 동적인 신호를 측정하는 경우, sampling rate는 통상 100Hz(시간간격 0.01sec) 내외로 설정한다. 측정이 단시간에 종료되는 경우에는 sampling rate를 크게 하여도 문제가 없지만 1주일 또는 1개월 이상의 장기측정시에는 데이터 파일의 용량이 커지게 되며, 이에 따라 처리해야하는 데이터의 양도 방대해진다. 한편, sampling rate가 너무 작아지면 측정된 디지털 신호가 교량의 거동을 반영하지 못하는 문제가 있을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 sampling rate를 10, 30, 100, 500 및 1000Hz로 변화시켜가며 수치해석을 실시하고, 그 결과를 검토하였다.

(마) 기준선(baseline)의 편기

장기간에 걸쳐 측정이 이루어지거나 예기치 못한 충격하중 또는 외부적 환경요인에 의해 기준선이 편기된 신호가 측정될 수 있다. 그림 3.25는 기준선이 편기된 측정신호의 일례이다.

기준선이 편기되는 측정오차는 주파수 영역에서의 적분과정을 거쳐 변위를 추정하는 알고리즘에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 본 연구에서는 기준선 편기를 매개변수로서 고려하였다. 기준선 편기량은 속도신호의 RMS 대비 0, 5, 10, 20 및 40%로 하였다. 기준선의 편기 형태는 선형으로 가정하였으며, 차량이 교량을 진입한 시점에서부터 통과한 시점까지의 강제진동 구간만을 분석대상으로 하였다.

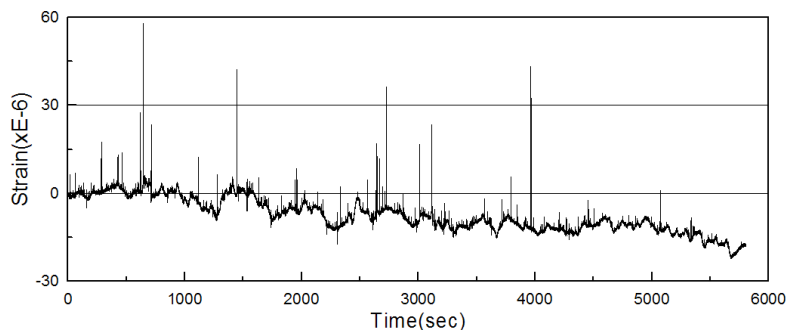


그림 3.25 기준선이 편기된 측정신호

(5) 속도신호를 이용한 변위 추정 결과

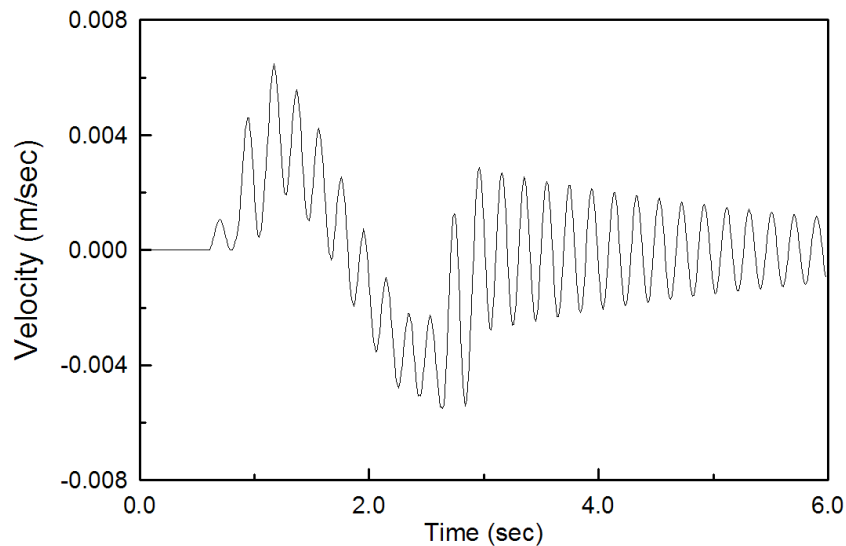
(가) 교량의 고유진동수

교량의 고유진동수에 따른 변위 추정결과를 검토하기 위해 표 3.7과 같은 조건에 대해 수치 해석을 실시하였다. 이동하중에 의한 시간이력해석을 통해 얻어진 속도신호를 이용하여 변위를 추정하였으며, 추정된 변위를 수치해석에 의한 변위와 비교하였다. 수치해석에 의한 속도 및 변위시간이력곡선과 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 추정한 변위시간이력곡선의 일례를 그림 3.26에 나타내었다.

추정 변위와 해석 변위를 비교하여 나타낸 표 3.8을 살펴보면 추정치와 해석치 사이의 오차는 1.0% 미만이며, 시간이력도 거의 일치하는 것으로 나타나 교량의 고유진동수와 무관하게 변위 추정 알고리즘의 적용이 가능하다.

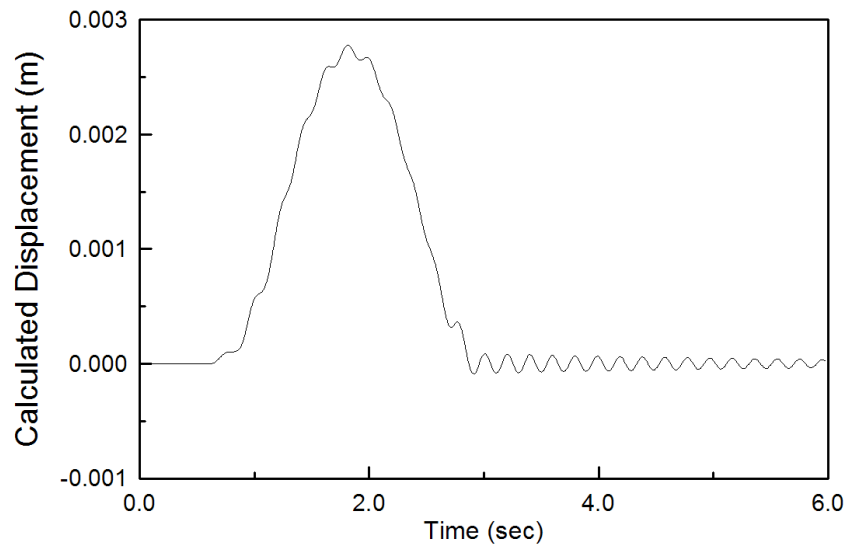
표 3.7 교량의 고유진동수에 대한 해석조건

구 분	고유진동수(Hz)						비 고
	1.52	3.05	4.04	5.02	6.95	10.48	
F1	○						• 감쇠비 : 0.01 • NSR : 0.00 • 주행속도 : 60km/h • sampling rate : 100Hz • 기준선 편기 : 0%
F2		○					
F3			○				
F4				○			
F5					○		
F6						○	

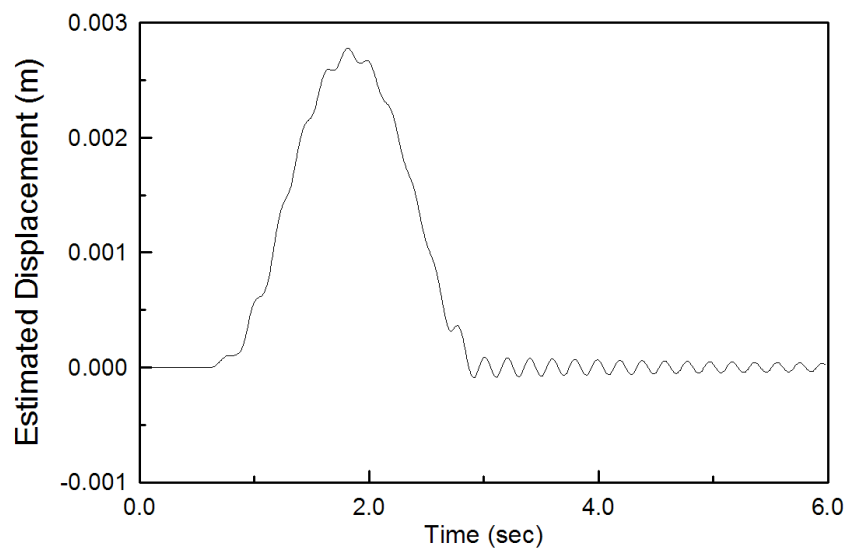


(a) 수치해석에 의한 속도시간이력곡선

그림 3.26 해석치와 추정치 비교(해석경우 F4)(계속)



(b) 수치해석에 의한 변위시간이력곡선



(c) 속도신호를 이용하여 추정된 변위시간이력곡선
그림 3.26 해석치와 추정치 비교(해석경우 F4)

표 3.8 교량의 고유진동수에 따른 변위 추정결과

구 분	최대 변위(mm)		오차율(%)	비 고
	추정치	해석치		
F1	16.474	16.474	0.00	
F2	5.923	5.922	0.02	
F3	2.871	2.871	0.00	
F4	2.778	2.777	0.04	
F5	0.777	0.776	0.13	
F6	0.645	0.644	0.16	

(나) 교량의 감쇠비

교량의 감쇠비에 따른 변위 추정결과를 검토하기 위해 표 II.9와 같은 조건에 대해 수치해석을 실시하였으며, ‘(가) 교량의 고유진동수’와 동일한 방법으로 속도신호를 이용하여 변위를 추정하였다.

추정 변위와 해석 변위를 비교하여 나타낸 표 3.10을 살펴보면 추정치와 해석치 사이의 오차는 거의 없는 것으로 나타나 교량의 감쇠비와 무관하게 변위 추정 알고리즘의 적용이 가능하다.

표 II.9 교량의 감쇠비에 대한 해석조건

구 분	감 쇠 비					비 고
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	
D1	○					· 고유진동수 : 3.05Hz · NSR : 0.00 · 주행속도 : 60km/h · sampling rate : 100Hz · 기준선 편기 : 0%
D2		○				
D3			○			
D4				○		
D5					○	

표 II.10 교량의 감쇠비에 따른 변위 추정결과

구 분	최대 변위(mm)		오차율(%)	비 고
	추정치	해석치		
D1	5.923	5.922	0.02	
D2	5.885	5.884	0.02	
D3	5.854	5.854	0.00	
D4	5.830	5.830	0.00	
D5	5.811	5.810	0.02	

(다) 신호에 대한 잡음비, NSR

신호에 대한 잡음비(NSR)에 따른 변위 추정결과를 검토하기 위해 표 3.11과 같은 조건에 대해 수치해석을 실시하였으며, ‘(가) 교량의 고유진동수’와 동일한 방법으로 속도신호를 이용하여 변위를 추정하였다.

수치해석에 의한 변위시간이력곡선과 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 추정한 변위시간이력곡선의 일례를 그림 3.27에 나타내었으며, 모든 해석경우에 대한 최대 변위를 표 3.12에 정리하였다.

추정 변위와 해석 변위를 비교하여 나타낸 표 3.12를 살펴보면 NSR이 증가할수록 오차가 증가하는 경향을 나타내지만, NSR이 0.50인 경우에도 최대 변위의 오차율은 약 6%로서 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 인공적으로 생성한 잡음신호가 평균이 0이고, 주파수 특성이 없는 백색잡음이기 때문으로 판단된다. 한편, 그림 3.27에 나타낸 시간이력에 의하면 시간의 경과에 따라 잡음에 의한 적분오차의 영향으로 인하여 자유진동구간에서는 추정 변위신호가 다소 왜곡되어 나타나는 것을 알 수 있다.

표 3.11 신호에 대한 잡음비에 대한 해석조건

구 분	신호에 대한 잡음비, NSR						비 고
	0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.50	
N1	○						• 고유진동수 : 3.05Hz • 감쇠비 : 0.01 • 주행속도 : 60km/h • sampling rate : 100Hz • 기준선 편기 : 0%
N2		○					
N3			○				
N4				○			
N5					○		
N6						○	

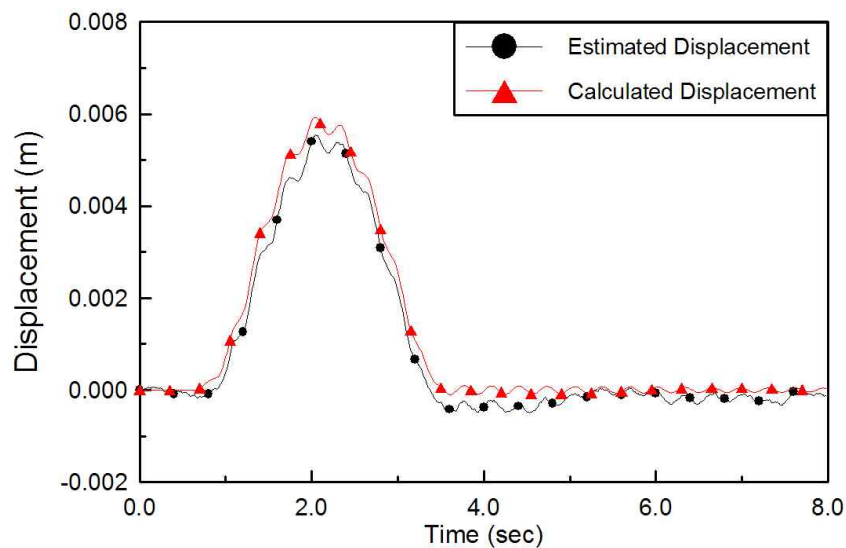


그림 3.27 해석치와 추정치 비교(해석경우 N6)

표 3.12 신호에 대한 잡음비에 따른 변위 추정결과

구 분	최대 변위(mm)		오차율(%)	비 고
	추정치	해석치		
N1	5.923	5.922	0.02	
N2	5.902	5.922	0.34	
N3	5.942	5.922	0.34	
N4	5.830	5.922	1.55	
N5	5.833	5.922	1.50	
N6	5.541	5.922	6.43	

(라) 차량의 주행속도

차량의 주행속도에 따른 변위 추정결과를 검토하기 위해 표 3.13과 같은 조건에 대해 수치 해석을 실시하였으며, ‘(가) 교량의 고유진동수’와 동일한 방법으로 속도신호를 이용하여 변위를 추정하였다. 차량의 주행속도에 따른 속도시간이력곡선을 그림 3.28에 나타내었다.

추정 변위와 해석 변위를 비교하여 나타낸 표 3.14를 살펴보면 추정치와 해석치 사이의 오차는 1.0% 미만이며, 시간이력도 거의 일치하여 차량의 주행속도와 무관하게 변위 추정 알고리즘의 적용이 가능한 것으로 나타났다.

표 3.13 차량의 주행속도에 대한 해석조건

구 분	주행속도(km/h)			비 고
	5	10	60	
V1	○			• 고유진동수 : 3.05Hz • 감쇠비 : 0.01 • NSR : 0.00 • sampling rate : 100Hz • 기준선 편기 : 0%
V2		○		
V3			○	

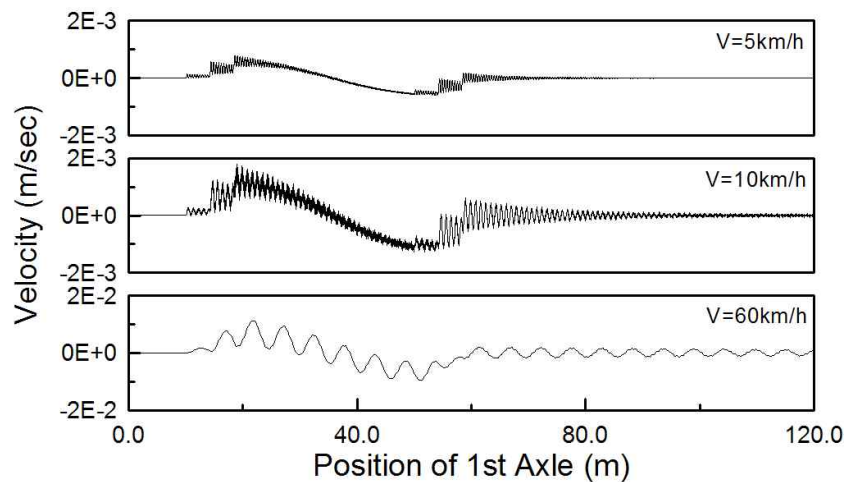


그림 3.28 차량의 주행속도별 속도시간이력곡선

표 3.14 차량의 주행속도에 따른 변위 추정결과

구 분	최대 변위(mm)		오차율(%)	비 고
	추정치	해석치		
V1	5.923	5.922	0.02	
V2	5.747	5.747	0.00	
V3	5.750	5.749	0.02	

(마) 데이터 sampling rate

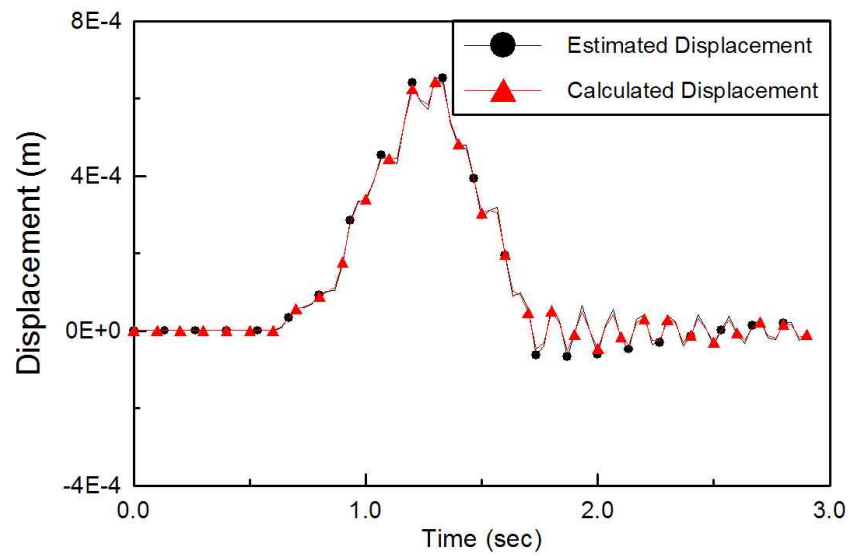
데이터 sampling rate에 따른 변위 추정결과를 검토하기 위해 표 3.15와 같은 조건에 대해 수치해석을 실시하였으며, ‘(가) 교량의 고유진동수’와 동일한 방법으로 속도신호를 이용하여 변위를 추정하였다.

수치해석에 의한 변위시간이력곡선과 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 추정한 변위시간이력곡선을 데이터 sampling rate에 따라 비교하여 그림 3.29에 나타내었으며, 모든 해석 경우에 대한 최대 변위를 표 3.16에 정리하였다.

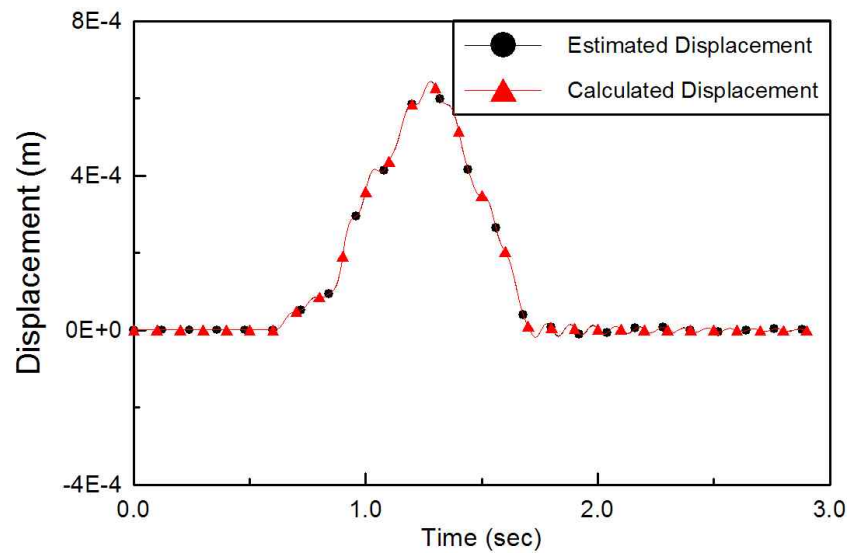
추정 변위와 해석 변위를 비교하여 나타낸 표 3.16을 살펴보면 정적인 측정상태와 유사하게 sampling rate를 10Hz로 취하는 경우에는 오차율이 10%를 초과하는 것으로 나타났다. sampling rate가 30Hz인 경우, 오차율은 약 1%로서 크지 않지만 시간이력이 왜곡되어 나타나므로 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 따라서, 속도신호를 현장에서 측정하는 경우에는 100Hz 이상으로 데이터를 취득하는 것이 바람직하다.

표 3.15 데이터 sampling rate에 대한 해석조건

구 분	sampling rate(Hz)					비 고
	10	30	100	500	1000	
S1	○					• 고유진동수 : 10.48Hz • 감쇠비 : 0.03 • NSR : 0.00 • 주행속도 : 60km/h • 기준선 편기 : 0%
S2		○				
S3			○			
S4				○		
S5					○	

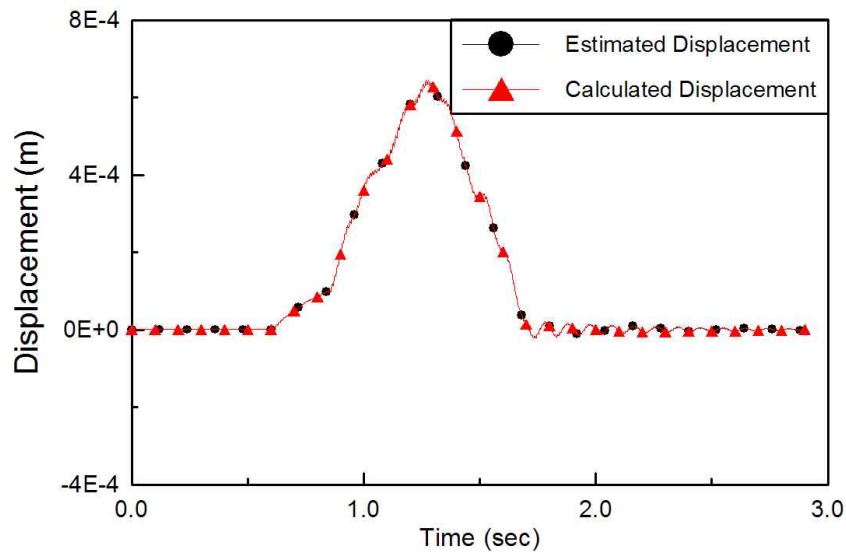


(a) sampling rate 30Hz



(b) sampling rate 100Hz

그림 3.29 sampling rate에 따른 해석치와 추정치 비교(계속)



(c) sampling rate 1000Hz

그림 3.29 sampling rate에 따른 해석치와 추정치 비교

표 3.16 데이터 sampling rate에 따른 변위 추정결과

구 분	최대 변위(mm)		오차율(%)	비 고
	추정치	해석치		
S1	0.731	0.662	10.42	
S2	0.652	0.643	1.40	
S3	0.645	0.644	0.16	
S4	0.643	0.643	0.00	
S5	0.645	0.644	0.16	

(바) 기준선의 편기

기준선 편기에 따른 변위 추정결과를 검토하기 위해 표 3.17과 같은 조건에 대해 수치해석을 실시하였으며, ‘(가) 교량의 고유진동수’와 동일한 방법으로 속도신호를 이용하여 변위를 추정하였다. 표 3.17에 나타난 기준선 편기 비율은 자체 신호의 RMS(Root Mean Square)에 대한 비율이다.

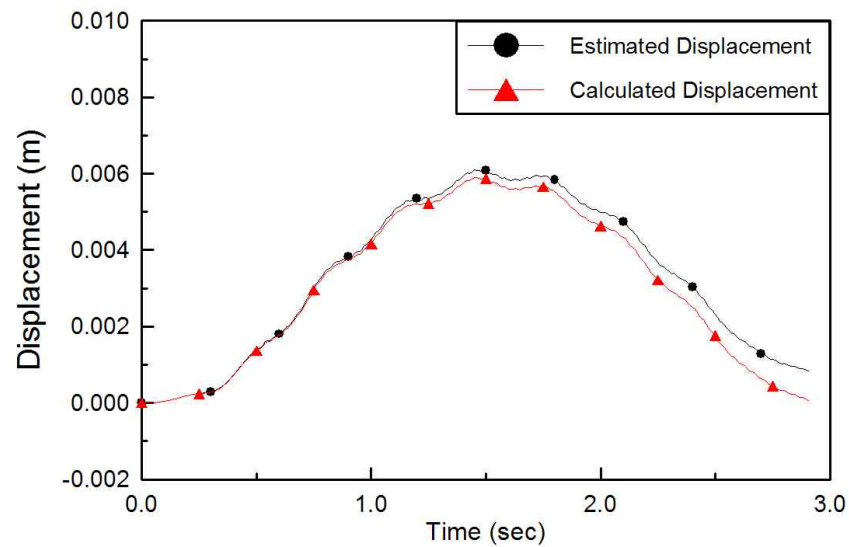
수치해석에 의한 변위시간이력곡선과 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 추정한 변위시간이력곡선을 기준선 편기 비율에 따라 비교하여 그림 3.30에 나타내었으며, 모든 해석경우에 대한 최대 변위를 표 3.18에 정리하였다.

추정 변위와 해석 변위를 비교하여 나타난 표 3.18을 살펴보면 기준선 편기 비율이 증가할수록 오차율도 증가하는데, 이는 기준선 편기에 의한 적분오차가 누적되어 나타나는 현상이다. 기준선 편기에 의한 측정오차는 신호처리에 의해 제거하기 어렵기 때문에 현장측정시 주의가 필요하다.

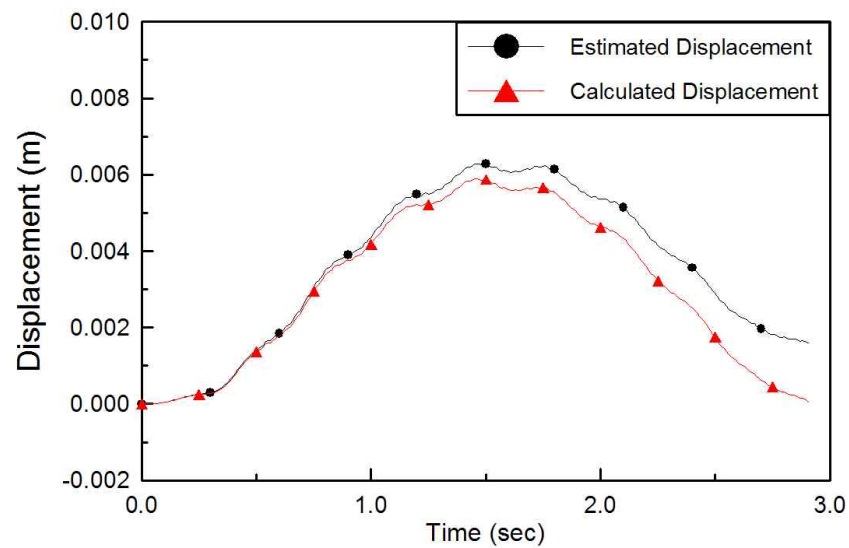
표 3.17 기준선 편기에 대한 해석조건

구 분	기준선 편기 비율*(%)					비 고
	0	5	10	20	40	
B1	○					• 고유진동수 : 3.05Hz • 감쇠비 : 0.01 • NSR : 0.00 • 주행속도 : 60km/h • sampling rate : 100Hz
B2		○				
B3			○			
B4				○		
B5					○	

※RMS(Root Mean Square)에 대한 비율

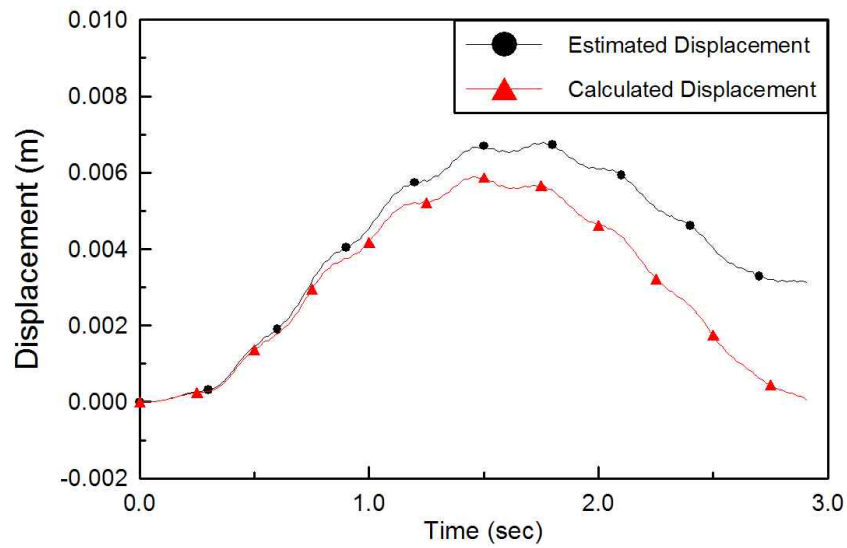


(a) 기준선 편기 10%



(b) 기준선 편기 20%

그림 3.30 기준선 편기 비율에 따른 해석치와 추정치 비교(계속)



(c) 기준선 편기 40%

그림 3.30 기준선 편기 비율에 따른 해석치와 추정치 비교

표 3.18 기준선 편기 비율에 따른 변위 추정결과

구 분	최대 변위(mm)		오차율(%)	비 고
	추정치	해석치		
B1	5.901	5.894	0.12	
B2	5.997	5.894	1.75	
B3	6.093	5.894	3.38	
B4	6.287	5.894	6.67	
B5	6.798	5.894	15.34	

2. 개발된 변위 계측 알고리즘의 실험적 검증 및 시제품 제작

가. 변형률 신호를 이용한 변위 추정 기법

그림 3.31과 같이 휨강성이 전체 지간길이에 대해 일정한 단순보의 임의의 위치에 집중하중 P 가 작용하는 경우, 중앙점의 변위 δ_c 와 변형률 ε_c 는 식(3.46) 및 식(3.47)과 같이 표현된다.

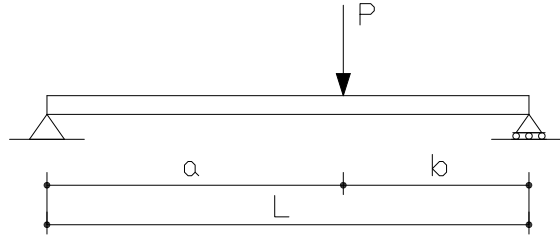


그림 3.31 임의의 위치에 집중하중을 받는 단순지지 보

$$\delta_c = \frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48EI} \quad \text{for } a \geq b \quad (3.46)$$

$$\varepsilon_c = \frac{Pby}{2EI} \quad (3.47)$$

여기서, P : 집중하중의 크기

EI : 보의 휨강성

L : 보의 지간길이

y : 보 단면 중립축으로부터의 연단거리

a, b : 집중하중의 작용위치를 나타내는 상수

식(3.46)과 식(3.47)을 EI 에 대해 정리하고 등치시키면 식(3.48)과 같이 표현되며, 식(3.48)을 중앙점 변위 δ_c 에 대해 정리하면 식(3.49)와 같다.

$$\frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48\delta_c} = \frac{Pby}{2\varepsilon_c} \quad (3.48)$$

$$\delta_c = \frac{(3L^2 - 4b^2)}{24y} \cdot \varepsilon_c \quad (3.49a)$$

$$\delta_c = \alpha_1 \cdot \varepsilon_c \quad \text{where, } \alpha_1 = \frac{(3L^2 - 4b^2)}{24y} \quad (3.49b)$$

식(3.49)에 나타난 바와 같이 중앙점 변위 δ_c 와 중앙점 변형률 ε_c 는 계수 α_1 에 의해 선형적으로 비례하지만 계수 α_1 이 상수가 아닌 변수 b 의 함수로 주어지므로 집중하중의 작용점 위치에 따라 계수 α_1 은 서로 다른 값을 갖는다. 이는 변위와 변형률의 관계를 일정한 하나의 상수를 이용하여 정의할 수는 없지만 하중이 특정한 위치에 작용하는 경우에는 L, y, b 에 의해 계산되는 계수 α_1 에 의해 변형률을 변위로 환산할 수 있다는 것을 의미한다. 예를

들어 $L = 10m$, $y = 0.4m$ 인 경우에 집중하중의 위치 b 에 따른 계수 α_1 은 다음 표 3.19와 같다. 1축의 집중하중이 보의 중앙점인 $L/2$ 위치에 작용하는 경우에는 중앙점 변형률 ε_c 에 20.8을, 보의 $L/4$ 위치에 작용하는 경우에는 중앙점 변형률 ε_c 에 28.7을 곱하면 중앙점 변위 δ_c 를 구할 수 있다.

표 3.19 집중하중의 위치에 따른 계수 α_1

b	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
α_1	31.3	31.2	30.8	30.3	29.6	28.7	27.5	26.2	24.6	22.8	20.8

작용하중이 1축이 아닌 2축 이상인 경우에도 중첩의 원리에 의해 식(3.49)의 개념은 동일하게 적용될 수 있다. 식(3.50)에 서로 다른 하중을 갖는 2축 하중의 경우에 대해 중앙점 변위 δ_c 와 중앙점 변형률 ε_c 의 관계를 나타내었다. 계수 α_2 가 다소 복잡하게 표현되어 있지만, L, y, P_1, P_2, c 는 모두 기지의 상수이므로 계수 α_2 는 집중하중의 작용위치에 따른 상수이다. 또한, 식(3.49) 및 식 (3.50)에서는 중앙점의 응답을 대상으로 하였지만 식(3.49)와 식(3.50)의 개념은 중앙점 뿐만 아니라 임의의 위치에 대해서도 성립한다.

$$\delta_c = \frac{[P_1 b(3L^2 - 4b^2) + P_2(b - c)(3L^2 - 4(b - c)^2)]}{24[P_1 b y + P_2(b - c)y]} \cdot \varepsilon_c \text{ for } a \geq b \quad (3.50a)$$

$$\delta_c = \alpha_2 \cdot \varepsilon_c \text{ where, } \alpha_2 = \frac{[P_1 b(3L^2 - 4b^2) + P_2(b - c)(3L^2 - 4(b - c)^2)]}{24[P_1 b y + P_2(b - c)y]} \quad (3.50b)$$

여기서, P_1, P_2 : 첫 번째 및 두 번째 축의 하중 크기

c : 첫 번째와 두 번째 축의 축간 거리

식(3.49)와 식(3.50)에 나타낸 계수 α_1 및 α_2 는 휨강성이 일정한 단순보를 대상으로 하므로 비교적 간단하게 계산되지만, 보의 휨강성이 일정하지 않거나 작용하중의 형태가 복잡한 경우에는 변위와 변형률의 관계를 나타내는 계수 α 를 수계산으로 산출하기는 용이하지 않다. 따라서, 앞서 설명한 방법을 일반화시키기 위해 식(3.51)에 나타낸 바와 같이 계수 α 를 범용 구조해석프로그램을 이용한 구조해석으로부터 얻어지는 변위와 변형률의 비로서 정의하고자 한다.

$$\alpha = \delta_{analyzed} / \varepsilon_{analyzed} \quad (3.51)$$

여기서, $\delta_{analyzed}$: 구조해석에 의한 변위

$\varepsilon_{analyzed}$: 구조해석에 의한 변형률

구조해석을 통해 얻어지는 변위와 변형률을 이용하여 계산된 계수 α 를 식(3.52)와 같이 실

측 변형률에 곱하면 실제 변위를 추정할 수 있다. 여기서, 계수 α 는 작용하중의 위치에 따라 달라지므로 반드시 변형률이 측정된 하중경우를 대상으로 계산되어야 한다. 또한, 하중의 작용위치별로 계수 α 가 계산되는 경우에는 동적 응답에도 적용 가능하므로 본 연구에서 제안하는 방법은 실측 정·동적 변형률을 이용하여 정적 뿐만 아니라 동적 변위도 추정할 수 있다.

$$\delta_{estimated} = \alpha \cdot \varepsilon_{measured} \quad (3.52)$$

여기서, $\delta_{estimated}$: 추정 변위

$\varepsilon_{measured}$: 실측 변형률

나. 모형실험체의 응답을 이용한 변위 추정

(1) 모형실험 방법 및 결과

본 연구에서 제안하는 변위 추정 방법을 실험적으로 검증하기 위해 모형실험체에 대한 실내실험을 수행하였다. 모형실험체는 그림 3.32에 나타난 바와 같이 폭 250mm의 강판을 이용하여 단순보(지간길이 2.0m)와 연속보(지간구성 1.2+2.0+1.2=4.4m) 형태로 제작하였다. 모형실험체의 상세한 단면 제원 및 단면특성을 표 3.20 및 표 3.21에 각각 정리하여 나타내었다. 표 3.20 및 표 3.21에서 보강부는 800×40mm(L×W)의 제원을 갖는 강판을 2열로 배치하고 볼트를 이용하여 체결한 단면을 의미한다.

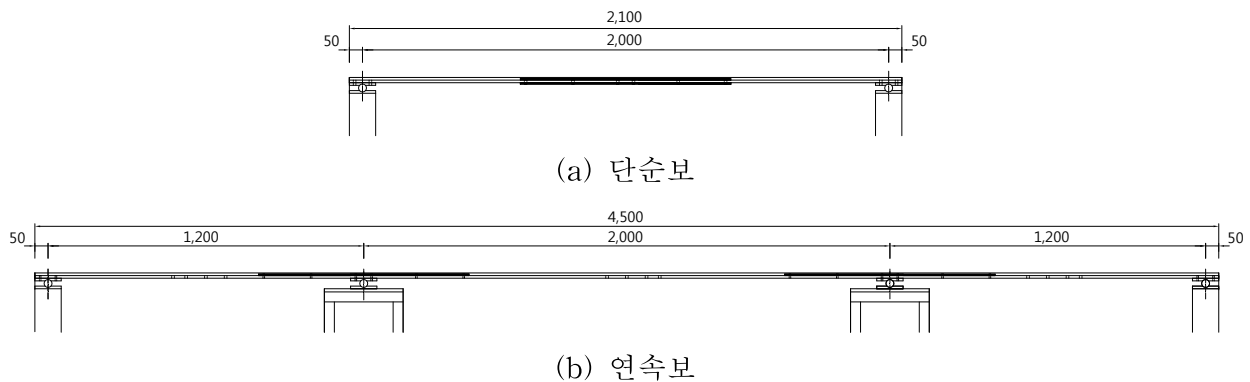


그림 3.32 모형실험체 제원

모형실험체 상면에는 차량을 모사한 2축 카트(cart)가 모형실험체 횡단면의 중앙을 주행할 수 있도록 아크릴(acrylic) 소재의 가이드 레일(guide rail)을 그림 3.33에 나타난 바와 같이 설치하였다. 모형차량의 축간거리는 120mm이며, 모형차량에 적재하는 중량물(강재 블록)은 모형실험체의 휨강성에 따라 96~192N의 범위에서 적절히 조절하였다.

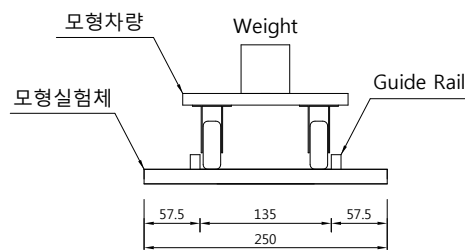


그림 3.33 모형차량 주행을 위한 가이드 레일

표 3.20 모형실험체 단면 제원

실험체 Id.		판 폭 (mm)	판 두께 (mm)		단면형상
			일반부	보강부	
단순보	S-7.7-0	250	7.7	7.7	
	S-7.7-1.8	250	7.7	9.5	
	S-7.7-3.6	250	7.7	11.3	
	S-9.7-0	250	9.7	9.7	
	S-14.7-0	250	14.7	14.7	
	S-14.7-3.6	250	14.7	18.3	
	S-14.7-7.2	250	14.7	21.9	
연속보	C-9.7-7.9	250	9.7	17.6	
	C-9.7-15.1	250	9.7	24.8	

※ 실험체 Id. : A-B-C

A : S(단순보), C(연속보)

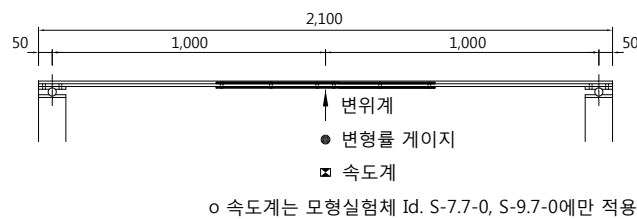
B : 일반부 판 두께(mm)

C : 보강판 두께(mm)

표 3.21 모형실험체 단면특성

실험체 Id.		일반부		보강부	
		단면적 (mm ²)	단면2차모멘트 (mm ⁴)	단면적 (mm ²)	단면2차모멘트 (mm ⁴)
단순보	S-7.7-0	1,925	9,511.1	1,925	9,511.1
	S-7.7-1.8	1,925	9,511.1	2,069	12,572.9
	S-7.7-3.6	1,925	9,511.1	2,213	16,086.9
	S-9.7-0	2,425	19,014.0	2,425	19,014.0
	S-14.7-0	3,675	66,177.6	3,675	66,177.6
	S-14.7-3.6	3,675	66,177.6	3,963	85,857.3
	S-14.7-7.2	3,675	66,177.6	4,251	115,023.8
연속보	C-9.7-7.9	2,425	19,014.0	3,057	52,785.5
	C-9.7-15.1	2,425	19,014.0	3,633	116,509.5

모형차량에 의한 모형실험체의 응답을 측정하기 위해 그림 3.34와 같이 변위계, 속도계 및 변형률 게이지를 부착하였다. 속도계는 모형실험체 S-7.7-0 및 S-9.7-0에만 부착하여 대림대학교의 양경택 교수팀에서 별도로 동적재하실험을 진행하였다. 부착된 각종 센서는 데이터 로거에 연결하여 모형차량의 재하에 의한 응답이 측정되도록 하였다.



(a) 단순보



(b) 연속보

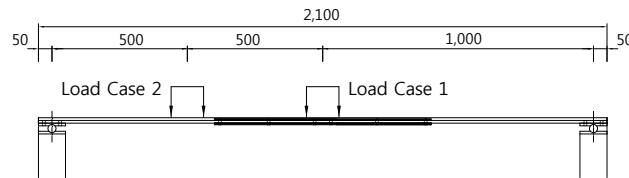
그림 3.34 모형실험체의 센서 부착위치

실내실험은 정적재하실험과 동적재하실험으로 구분하여 실시하였다. 표 3.22에 모형실험체 별 실험방법을 나타내었다. 단순보에 대한 정적재하실험은 실험체의 L/4 위치와 L/2 위치에 모형차량을 각각 재하한 후, 단순보 중앙점의 변위 및 변형률을 측정하였다. 한편, 연속보에 대해서는 첫 번째 경간 L/2 위치와 두 번째 경간 L/2 위치에 모형차량을 각각 재하한 후, 각 경간 중앙점의 변위 및 변형률을 측정하였다. 단순보 및 연속보에 대한 정적재하실험시의 하중재하 위치를 그림 3.35에 나타내었다. 동적재하실험은 모형차량을 인력으로 끄는 방식으로 하여 주

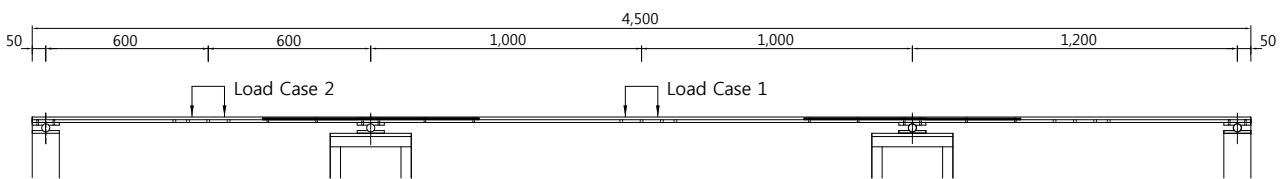
행시켰으며, 주행속도는 모형실험체마다 다소의 편차는 있지만 대략 0.2~1.0m/sec 범위이다. 모든 실내실험은 3회씩 반복하였으며, 실험실 전경을 그림 3.36에 나타내었다.

표 3.22 모형실험체별 실험방법

실험체 Id.		정적재하실험	동적재하실험	비고
단순보	S-7.7-0	×	○	
	S-7.7-1.8	×	○	
	S-7.7-3.6	×	○	
	S-9.7-0	×	○	
	S-14.7-0	○	○	
	S-14.7-3.6	○	○	
	S-14.7-7.2	○	○	
연속보	C-9.7-7.9	○	○	
	C-9.7-15.1	○	○	



(a) 단순보



(b) 연속보

그림 3.35 정적재하실험을 위한 하중재하위치

단순보 및 연속보 모형실험체에 대한 실내실험을 통해 얻어진 정·동적재하실험 결과를 표 3.23~표 3.26에 정리하여 나타내었다. 표 3.24에는 대림대학교에서 수행된 실험결과도 함께 수록하였다. 대림대학교의 실험결과가 씨티씨의 실험결과 보다 다소 크게 나타나는 것은 대림대학교에서 실험을 위한 보조장치를 모형차량에 추가로 적재하였기 때문이다. 표 3.25와 표 3.26의 동적재하실험 결과는 중앙경간과 측경간 중앙점의 최대 변위 및 최대 변형률을 나타낸 것이다. 그림 3.37 및 그림 3.38에는 정·동적재하실험 결과의 일례를 나타내었다.

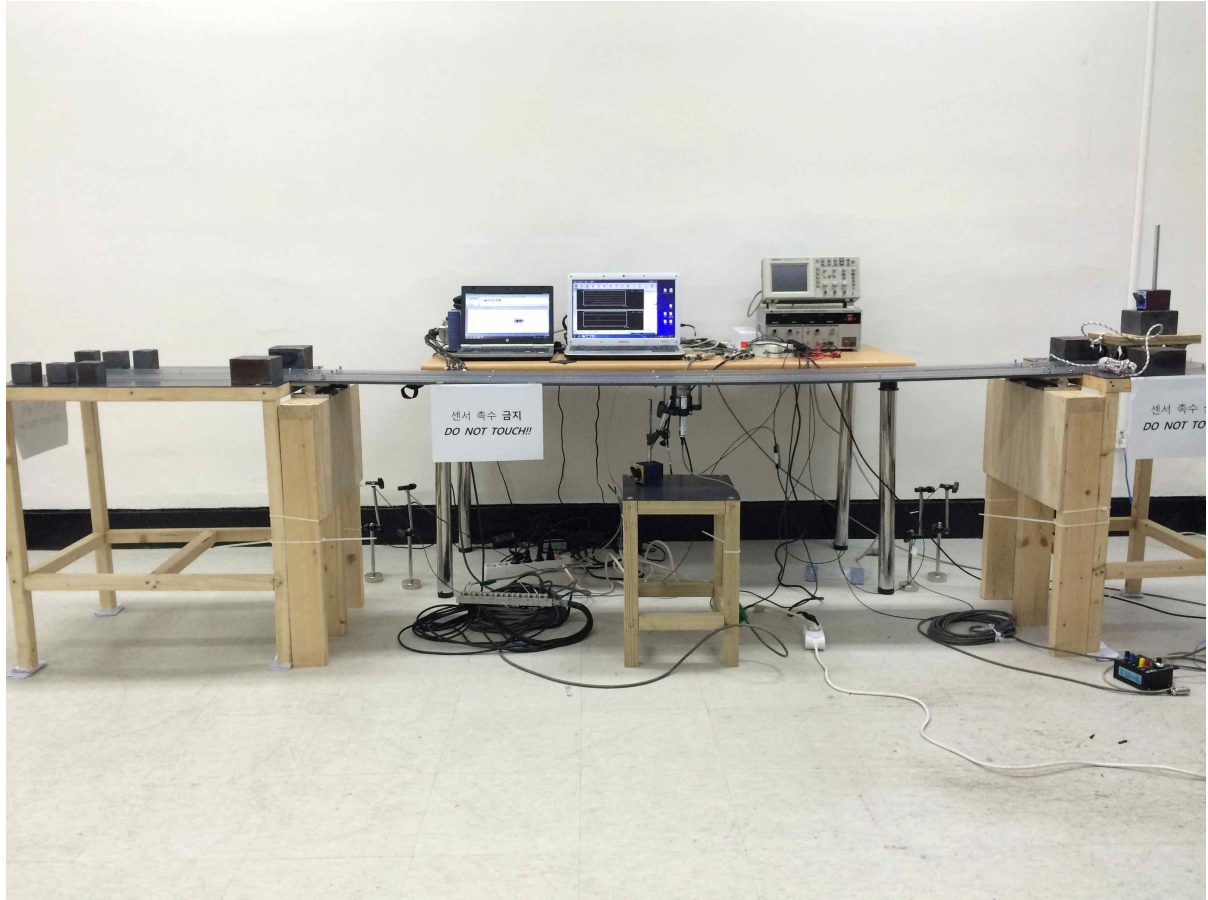


그림 3.36 모형실험체에 대한 정적재하실험 전경

표 3.23 단순보 모형실험체의 정적재하실험 결과

구 분		Load Case 1 (L/2)		Load Case 2 (L/4)	
		변위 (mm)	변형률 ($\times 10^{-6}$)	변위 (mm)	변형률 ($\times 10^{-6}$)
S-14.7-0	#1	2.53	55.8	1.70	28.7
	#2	2.53	55.3	1.71	29.0
	#3	2.56	55.6	1.71	29.0
	평균	2.54	55.6	1.71	28.9
S-14.7-3.6	#1	2.11	42.8	1.47	21.6
	#2	2.13	43.3	1.48	21.8
	#3	2.12	43.0	1.46	21.9
	평균	2.12	43.0	1.47	21.8
S-14.7-7.2	#1	1.84	34.0	1.28	17.1
	#2	1.84	33.9	1.30	17.0
	#3	1.83	33.7	1.30	17.0
	평균	1.84	33.9	1.29	17.0

표 3.24 단순보 모형실험체의 동적재하실험 결과

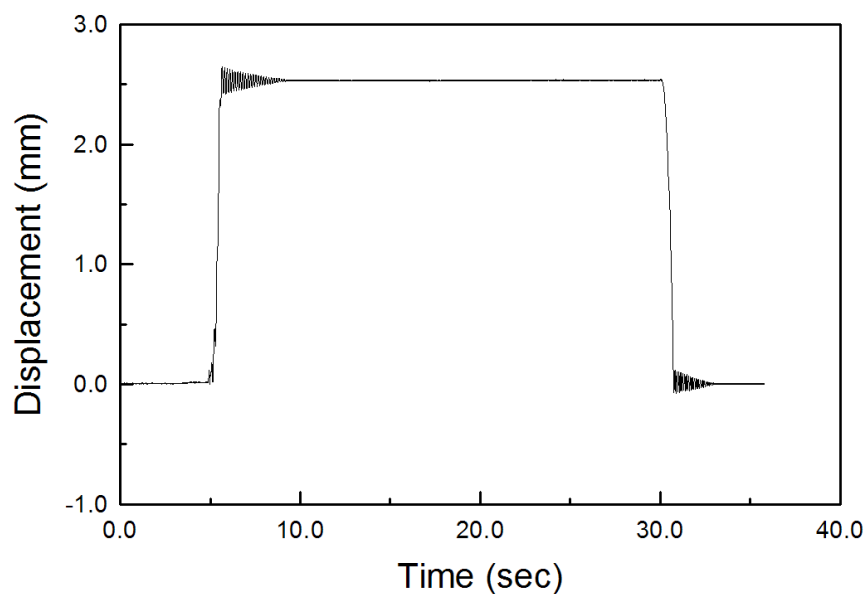
구 분		최대 변위 (mm)	최대 변형률 ($\times 10^{-6}$)	평균 주행속도 (m/sec)	비고
S-7.7-0	#1	4.81	54.8	0.76	씨티씨 수행
	#2	4.63	53.6	0.41	
	#3	4.73	53.9	0.49	
	평균	4.72	54.1	-	
	#1	5.80	67.5	0.76	대림대 수행
	#2	5.59	65.1	0.68	
	#3	5.50	64.2	0.74	
	평균	5.63	65.6	-	
S-7.7-1.8	#1	4.04	39.2	0.46	씨티씨 수행
	#2	3.93	38.4	0.45	
	#3	3.85	37.5	0.51	
	평균	3.94	38.4	-	
S-7.7-3.6	#1	3.47	32.9	0.51	씨티씨 수행
	#2	3.36	32.5	0.53	
	#3	3.37	32.3	0.56	
	평균	3.40	32.6	-	
S-9.7-0	#1	4.41	60.2	0.30	씨티씨 수행
	#2	4.40	60.3	0.21	
	#3	4.36	60.8	0.19	
	평균	4.39	60.4	-	
	#1	4.86	65.7	1.05	대림대 수행
	#2	4.84	65.4	0.91	
	#3	4.84	65.4	1.01	
	평균	4.85	65.5	-	
S-14.7-0	#1	2.63	57.8	0.62	씨티씨 수행
	#2	2.67	58.6	0.60	
	#3	2.61	57.4	0.61	
	평균	2.64	57.9	-	
S-14.7-3.6	#1	2.25	46.1	0.59	씨티씨 수행
	#2	2.26	46.1	0.67	
	#3	2.24	46.2	0.59	
	평균	2.25	46.1	-	
S-14.7-7.2	#1	2.06	39.1	0.66	씨티씨 수행
	#2	2.04	39.6	0.70	
	#3	2.05	39.8	0.68	
	평균	2.05	39.5	-	

표 3.25 연속보 모형실험체의 정적재하실험 결과

구 분		Load Case 1		Load Case 2	
		중앙경간		측경간	
		변위 (mm)	변형률 ($\times 10^{-6}$)	변위 (mm)	변형률 ($\times 10^{-6}$)
C-9.7-7.9	#1	3.54	70.1	1.37	56.9
	#2	3.54	69.8	1.37	57.4
	#3	3.51	69.7	1.36	56.9
	평균	3.53	69.9	1.37	57.1
C-9.7-15.1	#1	2.70	59.5	1.26	52.6
	#2	2.70	59.3	1.26	52.9
	#3	2.70	59.3	1.25	52.9
	평균	2.70	59.4	1.26	52.8

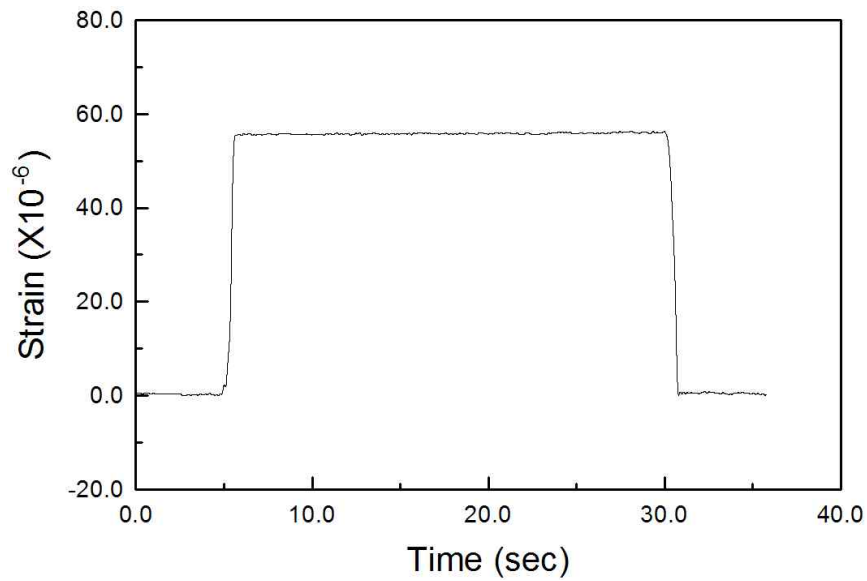
표 3.26 연속보 모형실험체의 동적재하실험 결과

구 분		중앙경간		측경간		평균 주행속도 (m/sec)
		최대 변위 (mm)	최대 변형률 ($\times 10^{-6}$)	최대 변위 (mm)	최대 변형률 ($\times 10^{-6}$)	
C-9.7-7.9	#1	3.71	74.2	1.40	60.8	0.38
	#2	3.69	72.7	1.39	60.6	0.39
	#3	3.63	73.1	1.38	60.0	0.48
	평균	3.68	73.3	1.39	60.5	-
C-9.7-15.1	#1	2.79	62.6	1.28	57.3	0.49
	#2	2.79	62.1	1.26	55.6	0.44
	#3	2.78	62.2	1.27	56.0	0.49
	평균	2.79	62.3	1.27	56.3	-



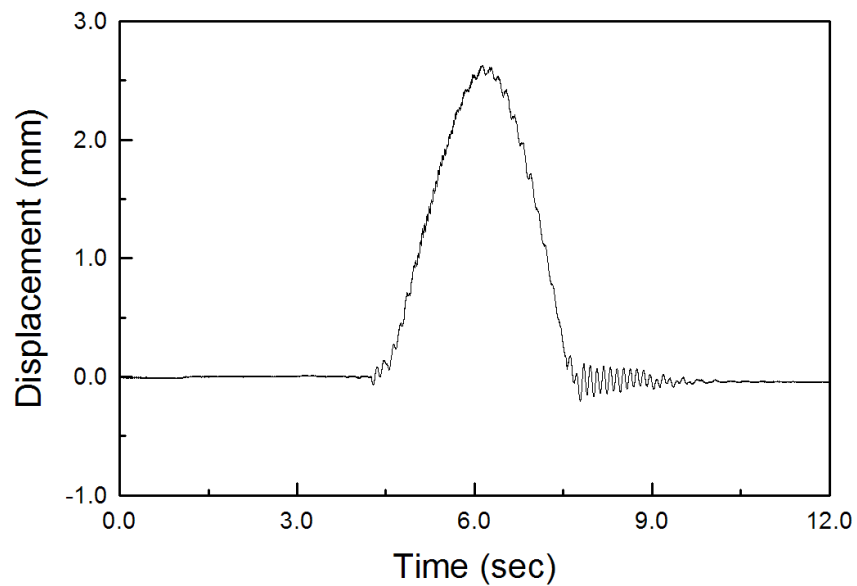
(a) 변위

그림 3.37 정적재하실험결과의 일례(모형실험체 Id. : S-14.7-0, Load Case 1)(계속)

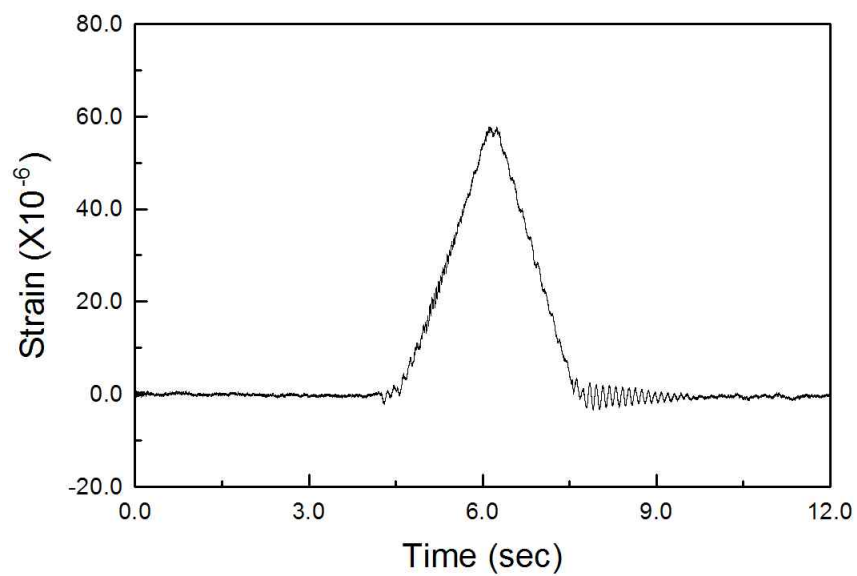


(b) 변형률

그림 3.37 정적재하실험결과의 일례(모형실험체 Id. : S-14.7-0, Load Case 1)



(a) 변위 시간이력곡선



(b) 변형률 시간이력곡선

그림 3.38 동적재하실험결과의 일례(모형실험체 Id. : S-14.7-0)

(2) 변형률 신호를 이용한 정적 변위 추정

우선 정적재하실험 대상 모형실험체 중에서 보의 전체 길이에 걸쳐 휨강성이 일정하여 비교적 용이하게 수계산이 가능한 모형실험체 S-14.7-0에 대해 식(3.50)을 이용하여 변위를 추정하고자 하며, 나머지 모형실험체에 대해서는 구조해석결과를 이용하기로 한다.

모형실험체 S-14.7-0의 정적 변위를 추정하기 위해 식(3.50)을 이용하여 계수 α_2 를 계산하였으며, 그 결과를 표 3.27에 나타내었다. 표 3.27의 α_2 와 실측 변형률을 이용하여 추정한 변위를 나타낸 표 3.28을 살펴보면 실측 변위에 대한 추정 변위의 편차는 5% 내외로서 비교적 정확하게 정적 변위를 추정하고 있음을 알 수 있다. 이 이후에 나타낸 모든 편차는 특별한 언급이 없는 경우, 실측치에 대한 추정치의 편차를 의미한다.

표 3.27 식(3.50)을 이용하여 계산된 계수 α_2

하중경우	P_1, P_2 (N)	L (mm)	b (mm)	c (mm)	y (mm)	α_2 ($\times 10^6$ mm)
Load Case 1	48	2,000	940	0	7.35	0.04799
Load Case 2	48	2,000	560	120	7.35	0.06211

표 3.28 모형실험체 S-14.7-0의 정적 변위 추정 결과

하중경우	α_2 ($\times 10^6$ mm)	실측 변형률 ($\times 10^{-6}$)	실측 변위 (mm)	추정 변위 (mm)	편 차 (%)
Load Case 1	0.04799	55.8	2.53	2.68	5.93
		55.3	2.53	2.65	4.74
		55.6	2.56	2.67	4.30
Load Case 2	0.06211	28.7	1.70	1.78	4.71
		29.0	1.71	1.80	5.26
		29.0	1.71	1.80	5.26

모형실험체 S-14.7-0을 제외한 나머지 모형실험체에 대해서는 범용구조해석프로그램인 MIDAS Civil 2012[27]를 이용하여 계수 α 를 계산하고, 이를 이용하여 정적 변위를 추정하였다. 계수 α 를 계산하기 위한 구조해석결과의 일례를 그림 3.39에 나타내었다. 구조해석을 통해 얻어진 휨모멘트는 식(3.53)에 의해 변형률로 환산된다. 단순보 및 연속보 모형실험체의 구조해석결과와 계수 α 를 표 3.29 및 표 3.30에 나타내었다.

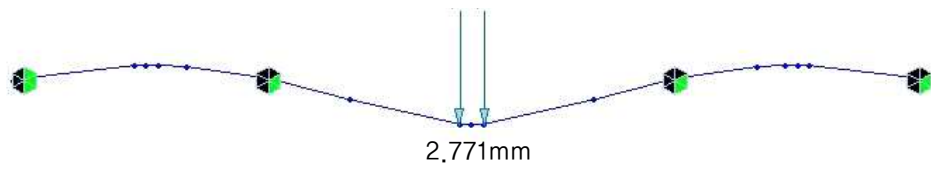
$$\varepsilon_{analyzed} = \frac{M}{EI} y \quad (3.53)$$

여기서, M : 구조해석에 의한 휨모멘트

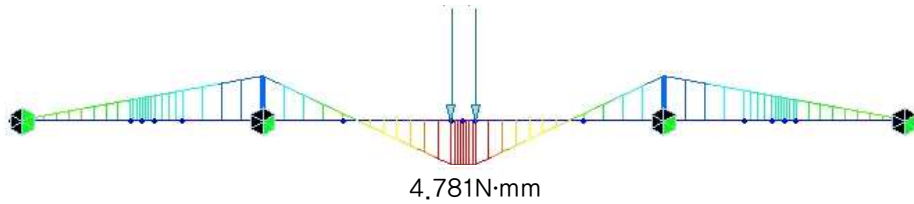
E : 보의 탄성계수

I : 보의 단면2차모멘트

y : 보 단면 중립축으로부터의 연단거리



(a) 변위선도



(b) 휨모멘트선도

그림 3.39 구조해석결과의 일례(모형실험체 Id. : C-9.7-7.9, Load Case 1)

표 3.29 단순보 모형실험체의 구조해석결과와 계수 α

구 분		M (N · mm)	$\varepsilon_{analyzed}$ ($\times 10^{-6}$)	$\delta_{analyzed}$ (mm)	α ($\times 10^6$ mm)
S-14.7-3.6	LC 1	9.400	38.32	1.957	0.05107
	LC 2	5.000	20.38	1.378	0.06762
S-14.7-7.2	LC 1	9.400	28.61	1.593	0.05568
	LC 2	5.000	15.22	1.153	0.07576

표 3.30 연속보 모형실험체의 구조해석결과와 계수 α

구 분			M (N · mm)	$\varepsilon_{analyzed}$ ($\times 10^{-6}$)	$\delta_{analyzed}$ (mm)	α ($\times 10^6$ mm)
C-9.7-7.9	LC 1	중앙경간	4.781	58.09	2.771	0.04770
	LC 2	측경간	4.156	50.49	1.169	0.02315
C-9.7-15.1	LC 1	중앙경간	4.208	51.13	2.227	0.04356
	LC 2	측경간	3.895	47.32	1.071	0.02263

표 3.23, 표 3.25, 표 3.29 및 표 3.30에 나타난 단순보 및 연속보 모형실험체의 실측 변형률 및 계수 α 를 이용하여 추정한 정적 변위를 표 3.31 및 표 3.32에 나타내었다. 표 3.31 및 표 3.32에 나타난 정적 변위 추정결과를 살펴보면 모형실험체별로 다소의 편차는 있지만 최대 편차가 6% 이내로 나타나 변형률 신호를 이용한 변위 추정기법은 타당하다고 판단된다.

표 3.31 단순보 모형실험체의 정적 변위 추정 결과

구 분		α ($\times 10^6 \text{mm}$)	실측 변형률 ($\times 10^{-6}$)	실측 변위 (mm)	추정 변위 (mm)	편 차 (%)
S-14.7-3.6	LC 1	0.05107	42.8	2.11	2.19	3.79
			43.3	2.13	2.21	3.76
			43.0	2.12	2.20	3.77
	LC 2	0.06762	21.6	1.47	1.46	0.68
			21.8	1.48	1.47	0.68
			21.9	1.46	1.48	1.37
S-14.7-7.2	LC 1	0.05568	34.0	1.84	1.89	2.72
			33.9	1.84	1.89	2.72
			33.7	1.83	1.88	2.73
	LC 2	0.07576	17.1	1.28	1.30	1.56
			17.0	1.30	1.29	0.77
			17.0	1.30	1.29	0.77

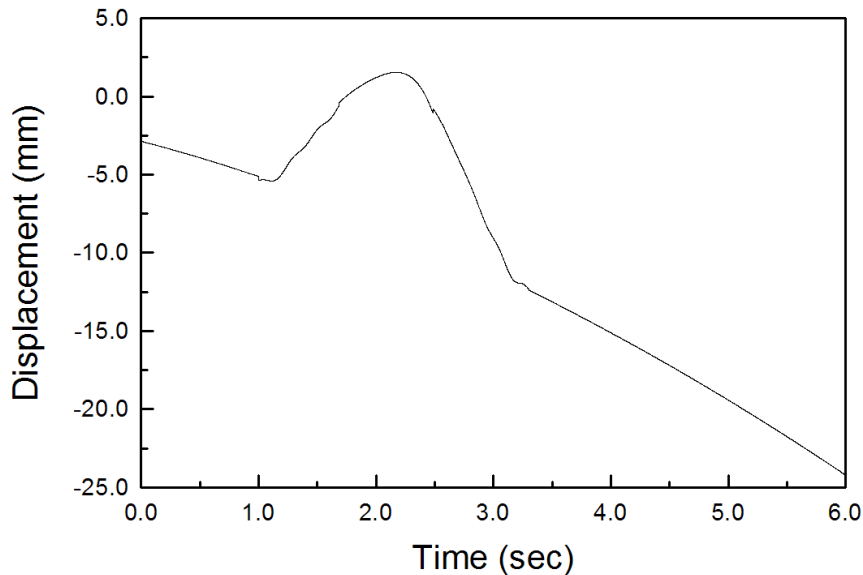
표 3.32 연속보 모형실험체의 정적 변위 추정 결과

구 분			α ($\times 10^6 \text{mm}$)	실측 변형률 ($\times 10^{-6}$)	실측 변위 (mm)	추정 변위 (mm)	편 차 (%)
C-9.7-7.9	LC 1	중앙 경간	0.04770	70.1	3.54	3.34	5.65
				69.8	3.54	3.33	5.93
				69.7	3.51	3.32	5.41
	LC 2	측 경간	0.02315	56.9	1.37	1.32	3.65
				57.4	1.37	1.33	2.92
				56.9	1.36	1.32	2.94
C-9.7-15.1	LC 1	중앙 경간	0.04356	59.5	2.70	2.59	4.07
				59.3	2.70	2.58	4.44
				59.3	2.70	2.58	4.44
	LC 2	측 경간	0.02263	52.6	1.26	1.19	5.56
				52.9	1.26	1.20	4.76
				52.9	1.25	1.20	4.00

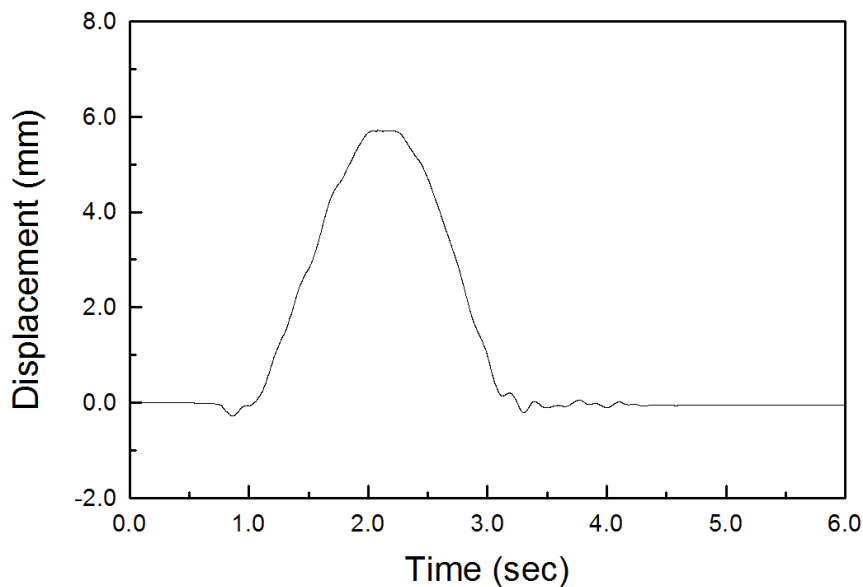
(3) 동적 변위 추정

(가) 속도 신호를 이용한 변위 추정

모형실험을 통해 얻어진 속도 신호를 이용하여 변위를 추정하기 위해 1차년도의 연구결과인 주파수영역의 적분 알고리즘을 모형실험체 S-7.7-0의 실험결과에 적용하였으며, 추정된 변위 시간이력곡선의 일례를 변위계에 의한 실측치와 비교하여 그림 3.40에 나타내었다. 그림 3.40(a)에 나타낸 속도 신호로부터 추정된 변위 시간이력곡선에는 실측치와 달리 1차 함수 형태의 시프트(shift)가 발생하는 것을 알 수 있는데, 이는 모형차량이 모형실험체에 진입할 때 초기 조건(속도)이 0이 아니고 속도계 센서 자체의 DC 시프트가 존재하기 때문으로 판단된다.



(a) 추정 변위 시간이력곡선



(b) 실측 변위 시간이력곡선

그림 3.40 실측 및 추정 변위 시간이력곡선 비교(모형실험체 Id. : S-7.7-0)

1차 함수 형태의 시프트 발생을 억제하기 위해 측정된 속도 신호의 평균을 구하고, 이를 원 신호에서 빼는 방법으로 센서의 DC 시프트를 강제적으로 제거한 후 재차 변위를 추정하였으

며, 그 결과를 그림 3.41에 나타내었다. 신호처리를 통해 센서 자체의 DC 시프트를 제거하여도 추정된 변위 시간이력곡선에는 전체적으로 저주파의 형상이 나타나게 되며, 이는 Fourier 변환된 데이터 영역에서 양단의 경계조건을 만족하지 못하기 때문이다. 또한, 추정된 최대 변위도 실측 최대 변위보다 약 50% 이상 과대평가하는 문제가 있다.

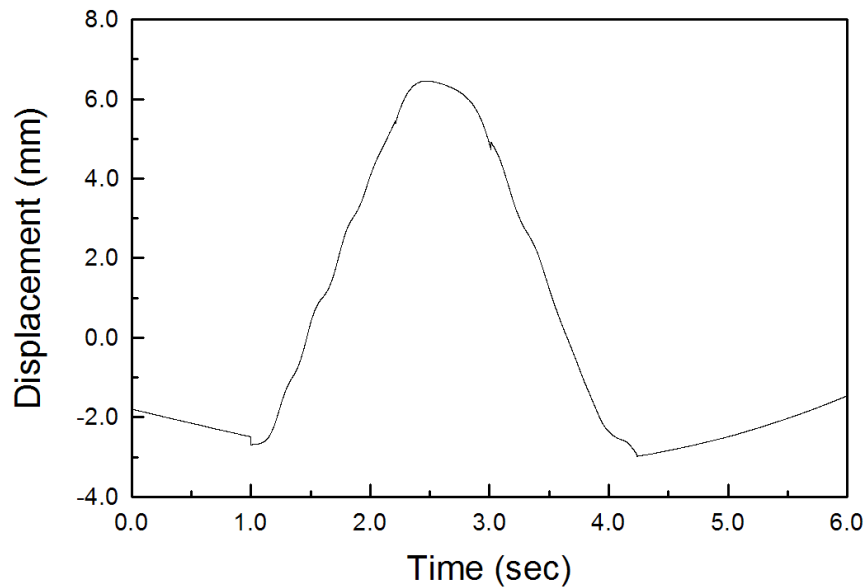


그림 3.41 센서의 DC 시프트의 영향을 배제한 속도 신호에 대한 추정 결과

충격 문제와 같이 초기조건이 0이거나 정상상태(steady state)가 아니고, 초기조건이 결부된 천이영역(transient region)이 있는 이동하중 문제에서는 속도 신호를 이용한 변위 추정에 다소 문제가 있는 것으로 판단된다. 모형차량이 모형실험체 위를 주행하는 이동하중 문제에서는 정적 변위에 해당하는 매우 낮은 주파수 성분이 존재하는데, 센서의 특성상 저주파 영역의 게인(gain)이 작아 정적 변위성분을 속도 신호로 재현하기에는 많은 어려움이 따르게 된다.

(나) 변형률 신호를 이용한 변위 추정

① 정적해석 결과를 이용한 변위 추정

차량이 교량 위를 주행하는 상태에서 측정된 동적 변형률로부터 변위를 추정하기 위해서는 차량 재하위치마다 계수 α 가 우선적으로 계산되어야 한다. 일반적으로 동적재하실험은 100Hz 이상으로 데이터를 샘플링(sampling)하므로 실측 변형률 시간이력곡선을 변위 시간이력곡선으로 변환하기 위해서는 차량이 교량의 시점부터 종점까지 주행하는 동안 최소 0.01sec 간격으로 차량 위치에 따른 계수 α 를 계산하여야 하는데, 이를 수계산 또는 범용 정적구조해석프로그램을 이용하여 수행하기에는 매우 많은 시간 및 노력이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 이동하중에 의한 시간이력해석 전용 프로그램[25]을 사용하여 모형차량의 재하위치별 검토대상 위치의 변위 및 변형률을 구한 후, 이를 이용하여 계수 α 를 계산하였다. 이동하중에 의한 시간이력해석 프로그램은 Newmark의 직접적분법에 의해 식(3.54)와 같은 운동방정식의 해를 구한다.

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = P(t) \quad (3.54)$$

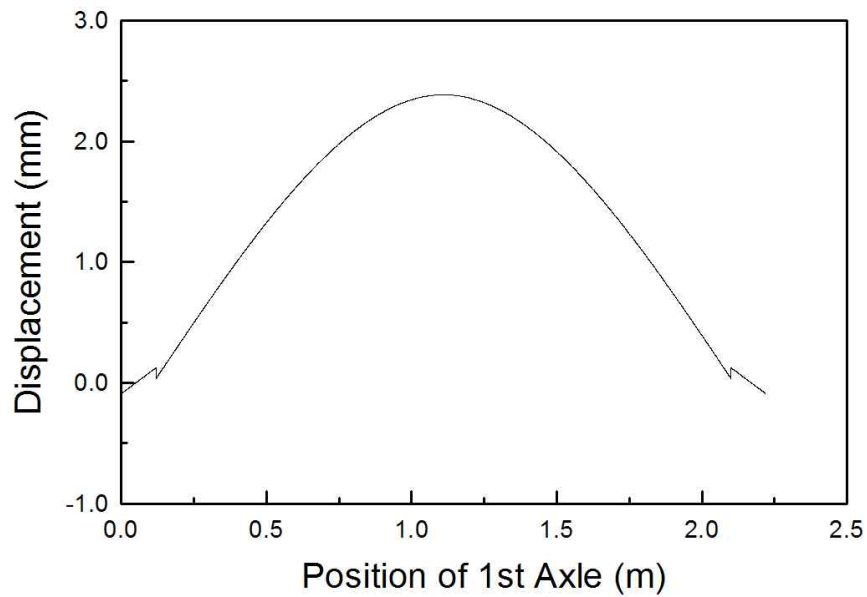
여기서, M , C , K 는 각각 구조물의 질량, 감쇠 및 강성매트릭스이며, u 와 $P(t)$ 는 각각 절점변위와 하중벡터이다. 식(3.54)에서 ‘ $\cdot$ ’는 시간에 관한 미분을 의미한다.

본 연구에서는 우선 모형실험체 S-14.7-0에 대해 정적해석 결과를 이용한 동적 변위 추정 결과를 검토하고자 한다. 이를 위해 이동하중에 의한 시간이력해석시 동적 영향은 배제하고 정적 응답만 산정되도록 하는 옵션(option)을 사용하였다. 또한, 동적 영향이 배제된 상태이므로 모형차량이 모형실험체에 재하되는 경우, 즉 강제진동상태만을 해석대상으로 하였다.

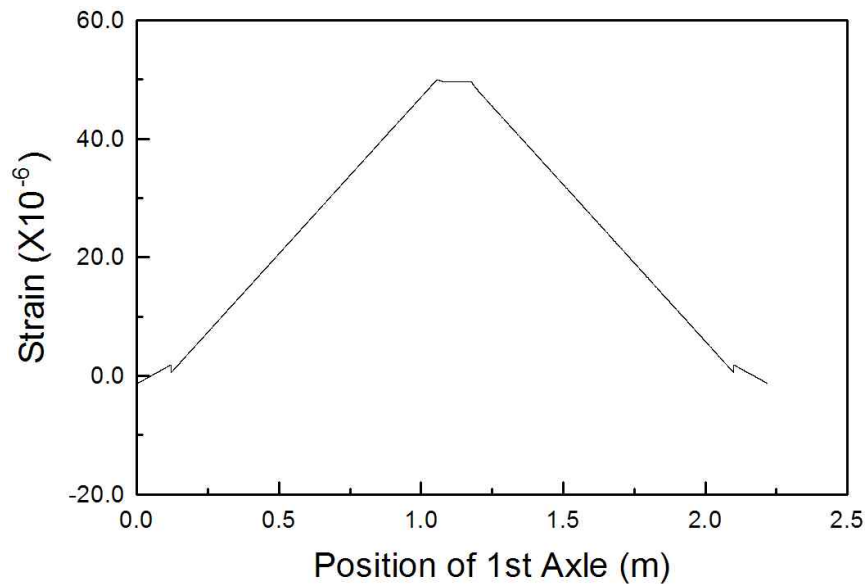
모형실험체 S-14.7-0을 프레임요소로 모형화하여 이동하중에 의한 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석을 통해 얻어진 강제진동상태하의 해석모형 중앙점의 변위 및 변형률 시간이력곡선을 모형차량의 속도로 정규화하여 그림 3.42에 나타내었다. 그림 3.43에는 구조해석을 통해 얻어진 변위 및 변형률 시간이력곡선을 이용하여 계산된 모형차량의 재하위치에 따른 계수 α 를 나타내었다.

그림 3.43에 나타난 모형차량의 재하위치별 계수 α 와 실내실험을 통해 얻어진 모형실험체 S-14.7-0의 실측 변형률(그림 3.44 참조)의 강제진동 성분을 이용하여 추정된 변위 시간이력곡선을 실측 변위와 비교하여 그림 3.45에 나타내었다. 모형실험체 S-14.7-0 중앙점의 실측 최대 변위와 추정 최대 변위를 표 3.33에 비교하여 나타내었다.

실측을 통해 얻어진 변위와 정적해석에 의한 계수 α 로부터 추정된 변위를 비교하여 나타낸 그림 3.45를 살펴보면 모형차량이 모형실험체의 중앙부 부근을 통과할 때 다소의 편차가 발생한다는 점을 제외하면 실측 변위와 추정 변위는 매우 유사한 경향을 나타내며, 최대 변위의 편차도 5% 내외로서 만족할 만한 수준이라고 판단된다. 모형차량이 모형실험체의 중앙부를 통과할 때 발생하는 편차의 발생 원인은 그림 3.43의 계수 α 는 동적재하실험시의 평균 주행속도를 이용하여 계산되는 반면에 모형차량은 모형실험체 위를 주행할 때 동일한 속도를 유지하지 못하였기 때문이다. 즉, 해석과 실험에 있어서 모형차량의 재하위치가 완전히 일치하지 않아 편차가 발생된 것으로 판단된다. 그림 3.43에 나타난 계수 α 의 형상을 살펴보면 중앙부의 기울기가 시·종점부에 비해 가파르다는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 모형실험체 중앙부에서의 모형차량 재하위치의 미세한 차이가 편차를 유발시킨 것으로 추정된다.



(a) 속도로 정규화한 변위 시간이력곡선



(b) 속도로 정규화한 변형률 시간이력곡선

그림 3.42 모형실험체 S-14.7-0에 대한 정적해석 결과

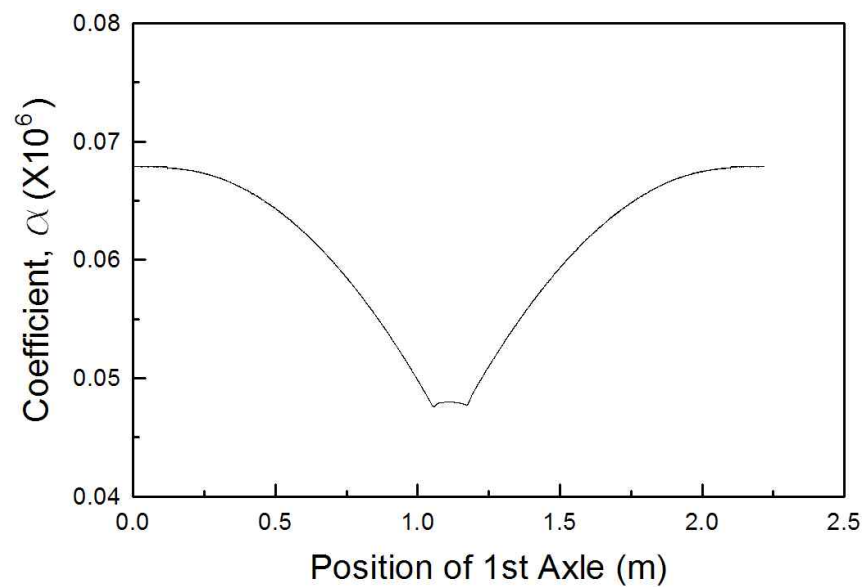
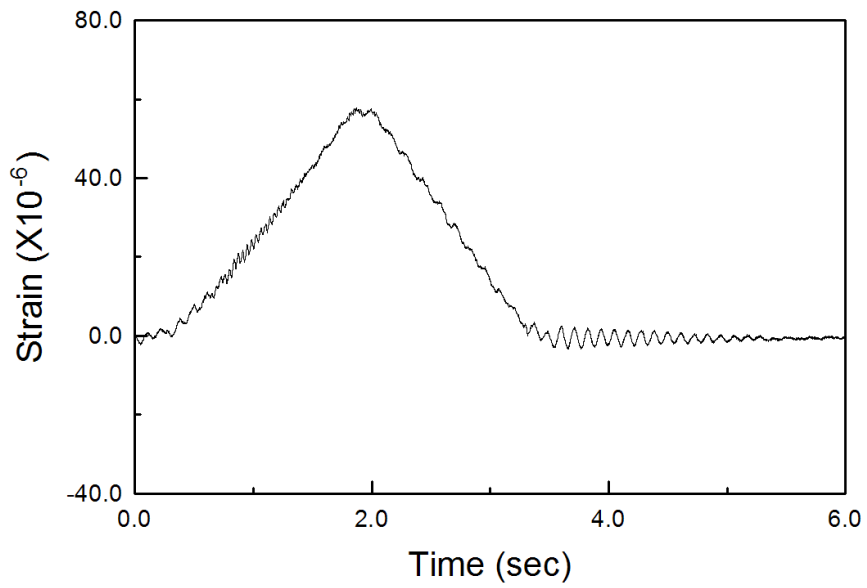
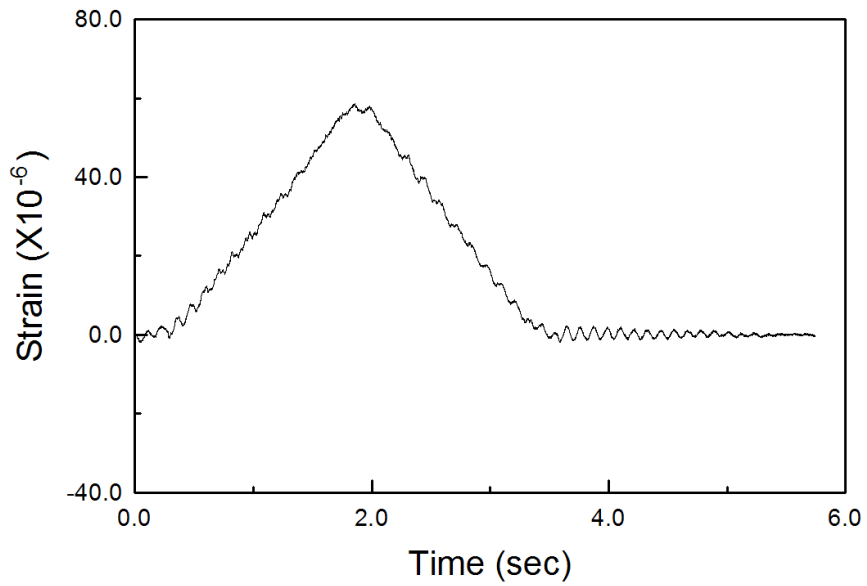


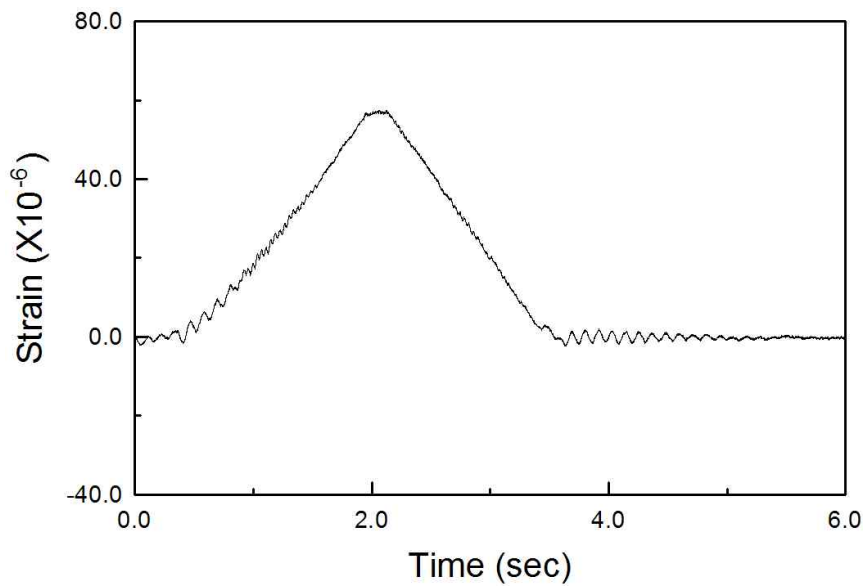
그림 3.43 모형차량의 재하위치에 따른 계수 α (모형실험체 Id. : S-14.7-0)



(a) Test No. : #1

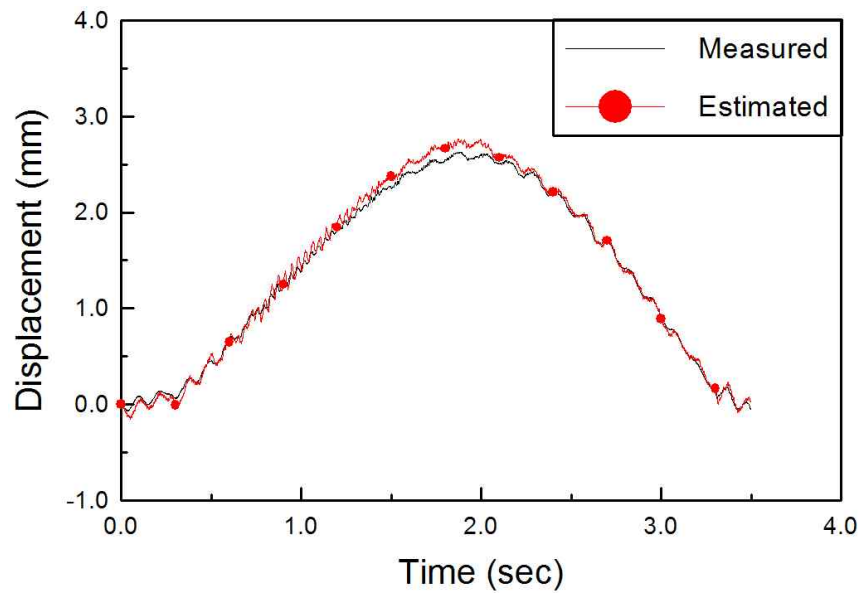


(b) Test No. : #2

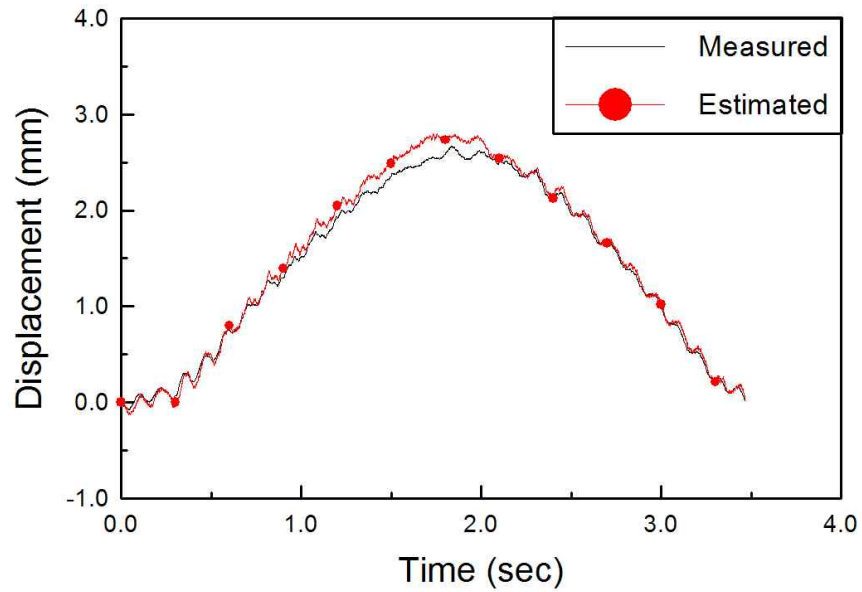


(c) Test No. : #3

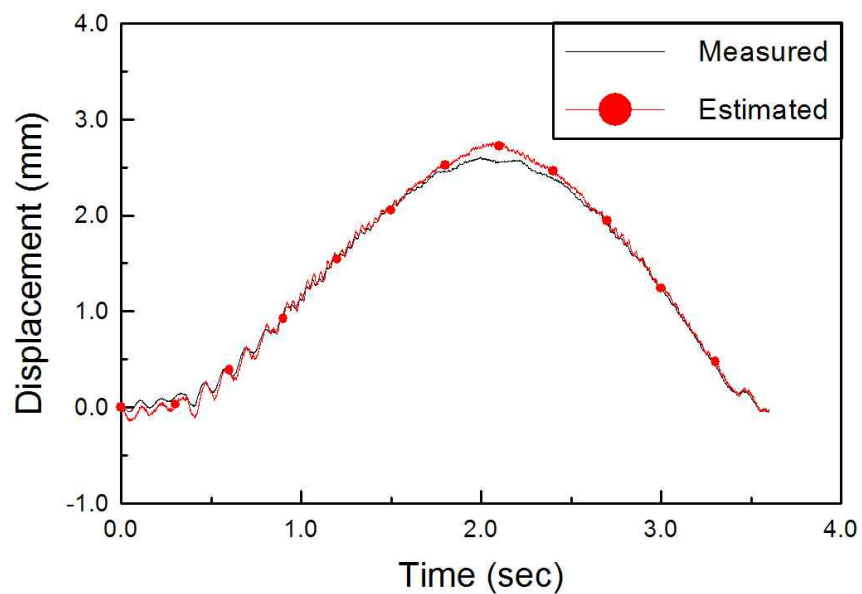
그림 3.44 모형실험체 S-14.7-0 중앙점의 실측 변형률 시간이력곡선



(a) Test No. : #1



(b) Test No. : #2



(c) Test No. : #3

그림 3.45 실측 및 추정 변위 시간이력곡선 비교

표 3.33 모형실험체 S-14.7-0의 실측 최대 변위와 추정 최대 변위 비교

구 분		실측 최대 변위 (mm)	추정 최대 변위 (mm)	편 차 (%)
S-14.7-0	#1	2.63	2.76	4.94
	#2	2.67	2.80	4.87
	#3	2.61	2.76	5.75

② 동적해석 결과의 적용성 검토

앞 절의 ‘① 정적해석 결과를 이용한 변위 추정’에서는 정적해석을 통해 얻어진 모형차량의 재하위치별 계수 α 를 이용하여 변위를 추정하였는데, 이는 일반적으로 정적해석이 동적해석에 비해 용이하다는 점을 고려한 것이다. 주행차량에 의한 단순보의 변위 시간이력곡선의 일례를 나타낸 그림 3.46을 살펴보면 차량이 교량의 시점부터 종점까지 주행할 때의 강제진동상태(forced vibration state)와 차량이 교량을 통과한 후의 자유진동상태(free vibration state)로 구분되는 것을 알 수 있다. 정적해석은 구조계에 하중이 재하되어 있는 경우만을 대상으로 하므로 자유진동상태에 대한 해석이 불가능하고, 이에 따라 정적해석 결과를 이용한 변위 추정은 강제진동상태에 대한 변위 추정에 국한된다. 따라서, 본 연구에서는 주행차량에 의한 교량의 강제진동 뿐만 아니라 자유진동상태의 변위를 추정하기 위해 동적해석을 적용하여 변위를 추정하고자 한다.

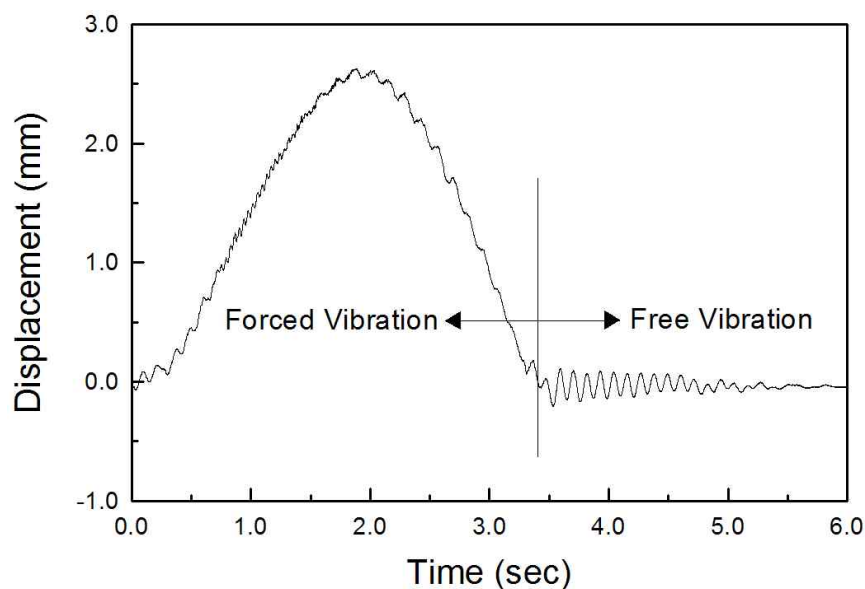
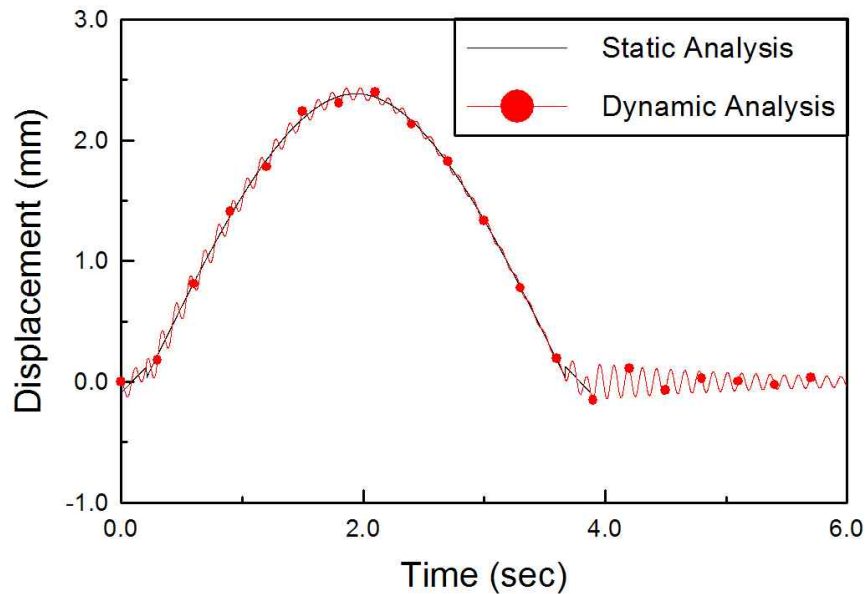


그림 3.46 교량의 변위 시간이력곡선 일례

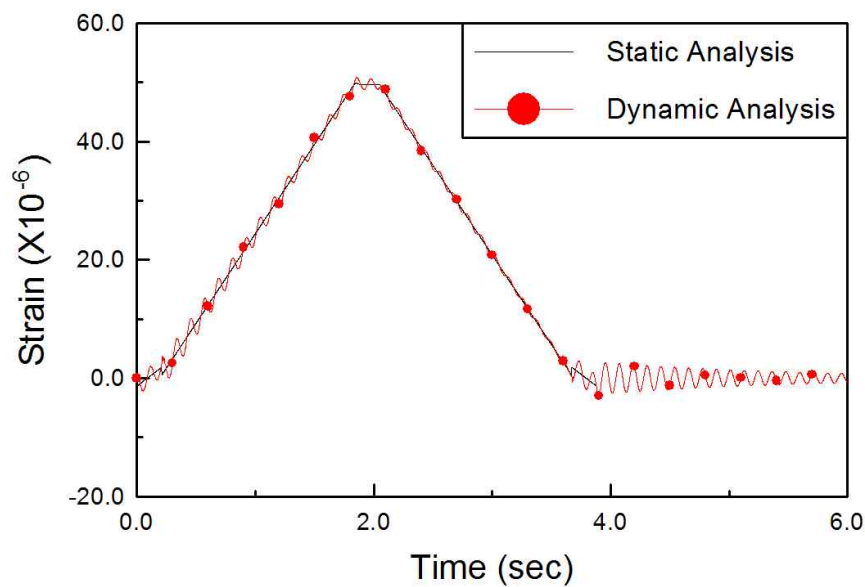
우선 동적해석 결과를 이용한 변위 추정 방법의 적정성을 검토하기 위해 앞 절에서 정적해석 결과를 이용하여 변위를 추정한 모형실험체 S-14.7-0의 실측 변형률(그림 3.44 참조)에 동적해석에 의한 계수 α 를 적용하였다.

모형실험체 S-14.7-0에 대한 동적해석(이동하중에 의한 시간이력해석)을 통해 얻어진 해석 모형 중앙점의 변위 및 변형률 시간이력곡선을 정적해석 결과와 비교하여 그림 3.47에 나타내었다. 그림 3.47에 의하면 강제진동상태에서는 모형차량에 의한 동적 영향이 나타나며, 모형차

량이 모형실험체를 통과한 후의 자유진동상태가 존재하는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 3.48에는 동적해석에 의한 모형차량의 재하위치별 계수 α 를 정적해석에 의한 결과와 비교하여 나타내었다. 그림 3.48을 살펴보면 동적해석에 의한 계수 α 는 정적해석에 의한 결과와는 달리 모형차량이 모형실험체의 시·중점부에 위치할 때 변동 폭이 크며, 그 외의 위치에서는 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 모형차량이 모형실험체의 시·중점부에 위치하는 경우에는 중앙점의 응답이 작아 작은 차이에 의해 변동 폭이 커지는 것이다.



(a) 변위 시간이력곡선



(b) 변형률 시간이력곡선

그림 3.47 동적해석 및 정적해석 결과의 비교

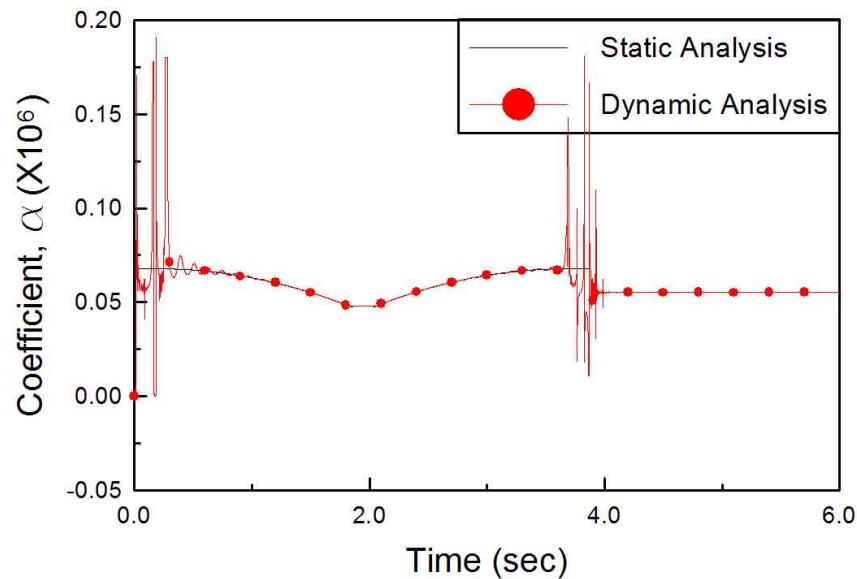
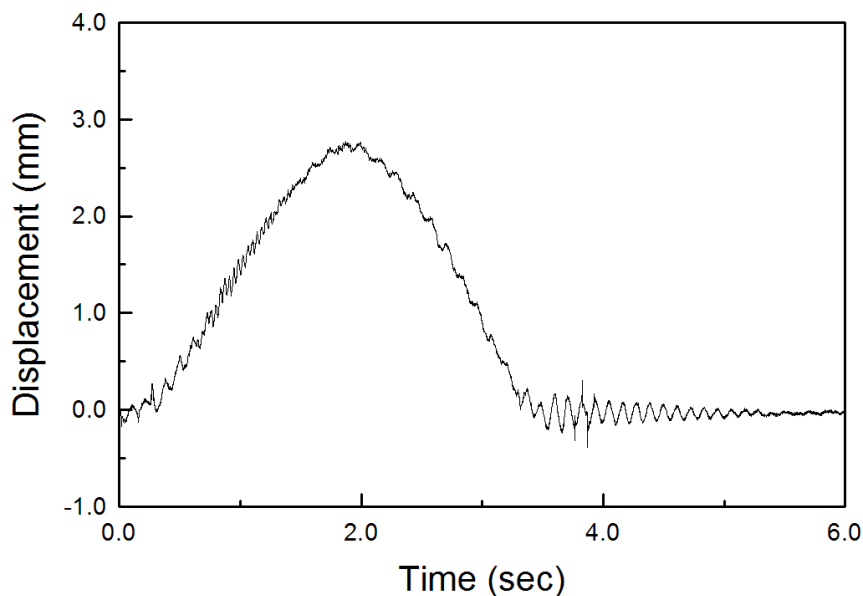


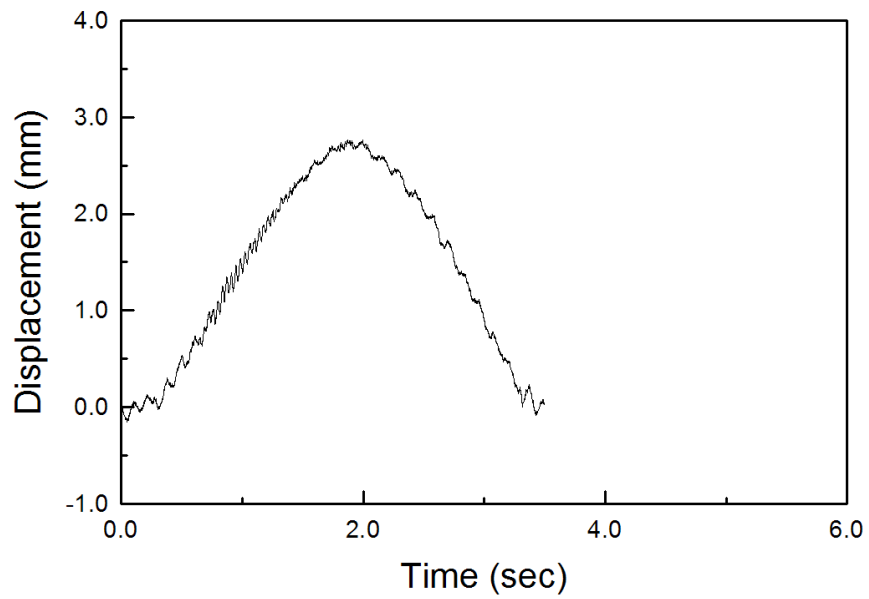
그림 3.48 동적해석 및 정적해석에 의한 계수 α 의 비교

동적 및 정적해석에 의한 계수 α 를 이용하여 추정한 변위 시간이력곡선을 그림 3.49에, 최대 변위를 표 3.34에 나타내었다. 그림 3.49 및 표 3.34에 의하면 동적해석과 정적해석에 의한 강제진동상태하의 추정 변위 시간이력곡선의 차이를 육안으로 확인하기는 매우 어렵고, 최대 변위의 편차도 1% 미만임을 알 수 있다. 또한, 동적해석에 의한 자유진동 파형의 극히 일부분에서 노이즈 형태의 피크(peak)가 형성되는 것을 제외하면 정상적인 것으로 판단된다. 이와 같이 동적해석에 의한 계수 α 를 변위 추정 방법에 적용하더라도 충분히 만족할 만한 결과를 얻을 수 있으므로 동적재하실험을 실시한 모든 모형실험체에 대해 동적해석 결과를 이용하여 변위를 추정하기로 한다.

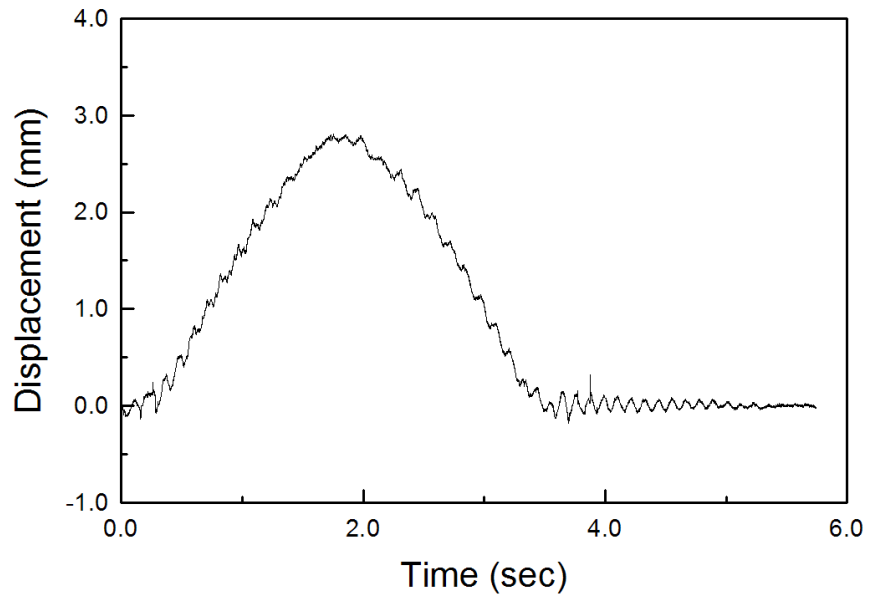


(a) Test No. : #1(동적해석)

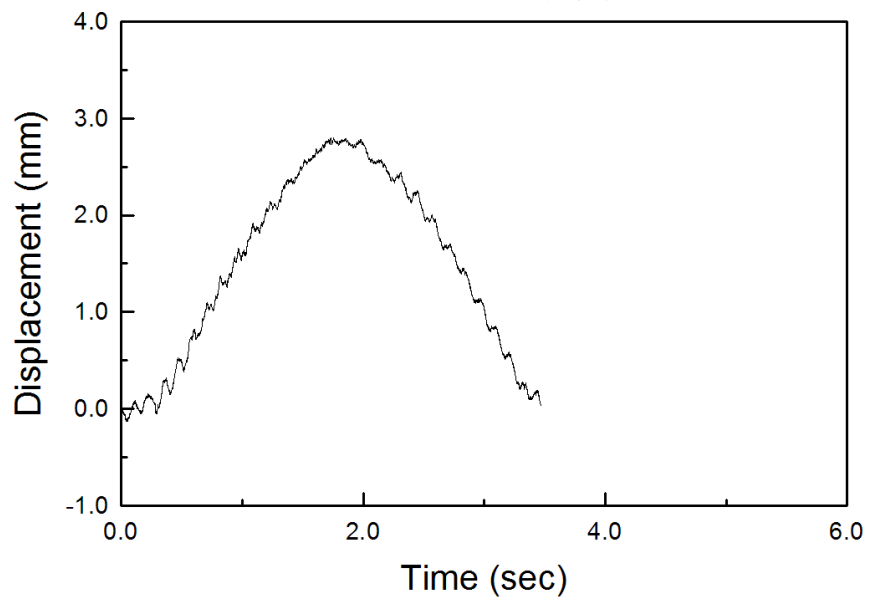
그림 3.49 동적 및 정적해석 결과를 이용하여 추정한 변위 시간이력곡선 비교(계속)



(b) Test No. : #1(정적해석)

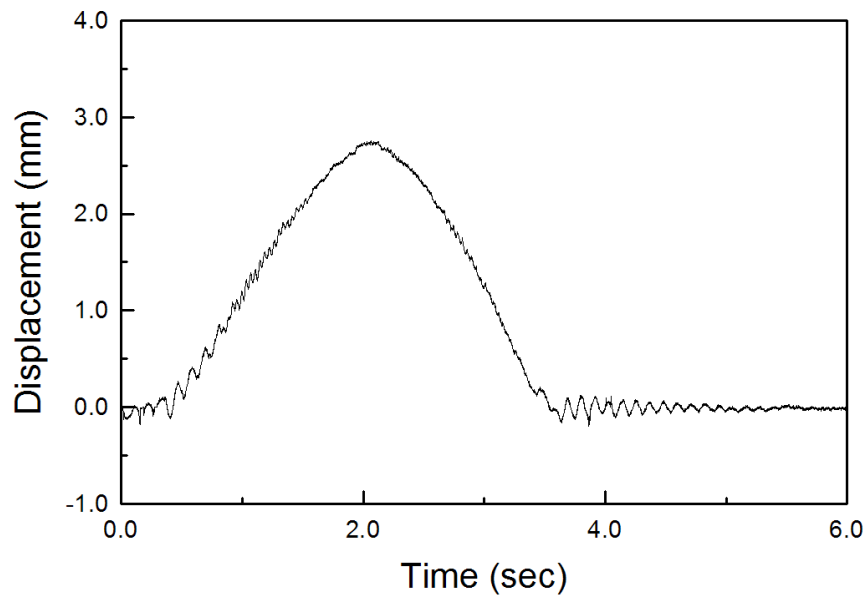


(c) Test No. : #2(동적해석)

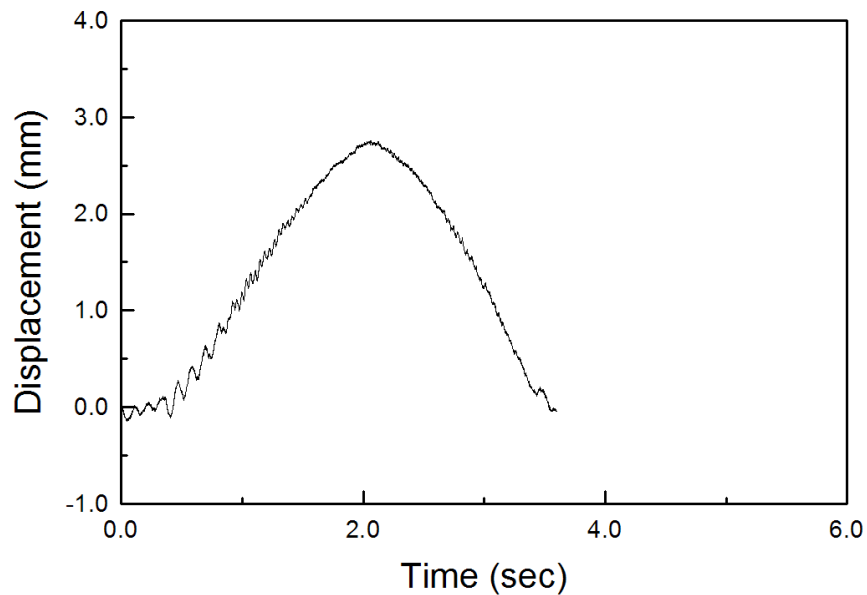


(d) Test No. : #2(정적해석)

그림 3.49 동적 및 정적해석 결과를 이용하여 추정한 변위 시간이력곡선 비교(계속)



(e) Test No. : #3(동적해석)



(f) Test No. : #3(정적해석)

그림 3.49 동적 및 정적해석 결과를 이용하여 추정한 변위 시간이력곡선 비교

표 3.34 동적 및 정적해석 결과를 이용하여 추정한 최대 변위 비교

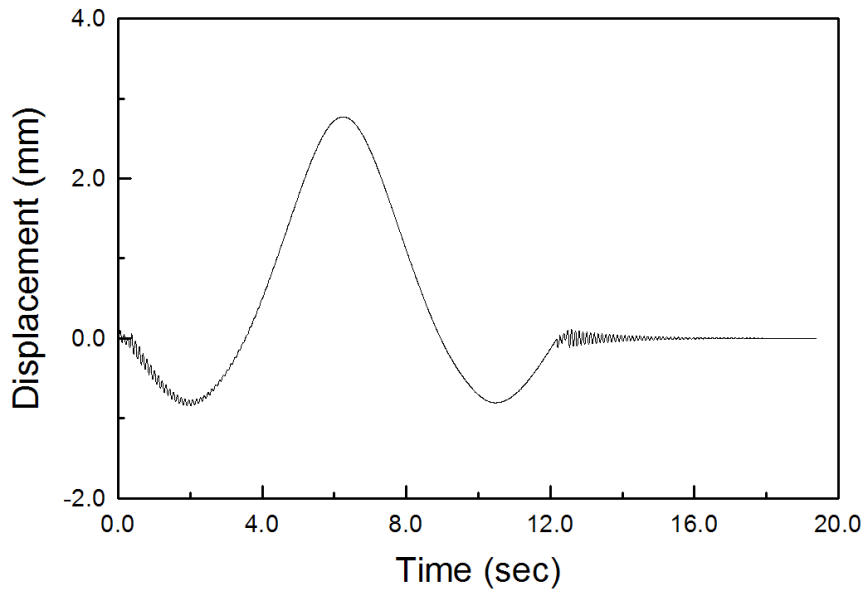
구 분		추정 최대 변위 (mm)		편 차* (%)
		동적해석	정적해석	
S-14.7-0	#1	2.77	2.76	0.36
	#2	2.81	2.80	0.36
	#3	2.75	2.76	0.36

※ 정적해석에 대한 동적해석의 편차

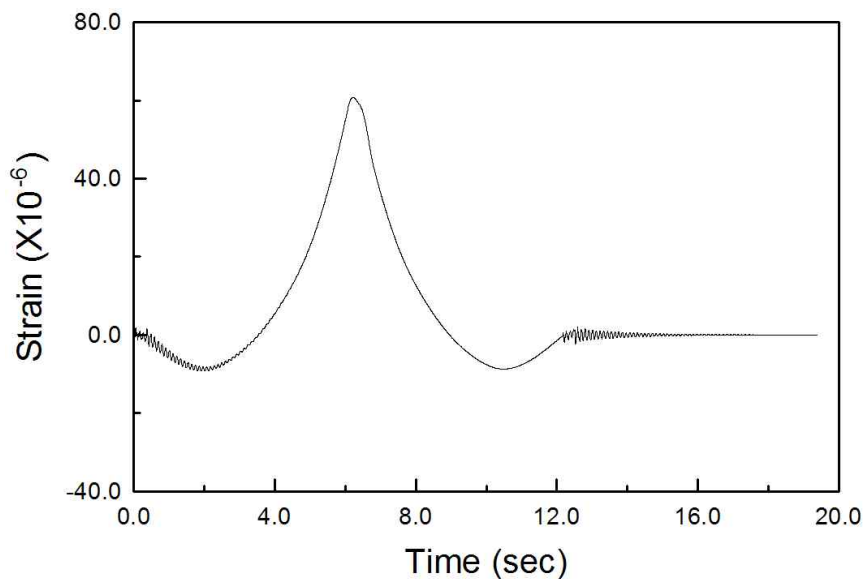
③ 동적해석 결과를 이용한 변위 추정

동적재하실험을 실시한 모든 모형실험체에 대해 이동하중에 의한 시간이력해석을 수행하였으며, 이를 통해 얻어진 변위와 변형률 시간이력곡선 및 계수 α 의 일례를 그림 3.50에 나타내었다. 그림 3.50(c)의 계수 α 를 살펴보면 연속교의 특성으로 인해 모형차량이 모형실험체의 시·종점부 뿐만 아니라 내측 지점부에 위치하는 경우에도 피크가 형성되는 것으로 나타났다.

모형실험체에 대한 동적해석 결과를 이용하여 산정한 계수 α 및 실측 변형률 시간이력곡선으로부터 변위 시간이력곡선을 추정하였다. 각 모형실험체에 대한 실측 변형률 시간이력곡선의 일례는 그림 3.51~그림 3.59와 같다.

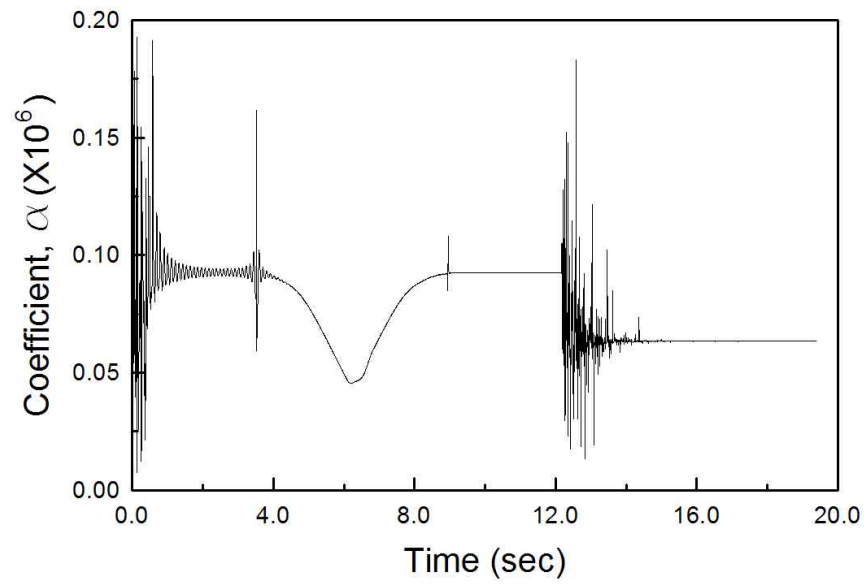


(a) 변위 시간이력곡선



(b) 변형률 시간이력곡선

그림 3.50 동적해석 결과의 일례(모형실험체 Id : C-9.7-7.9, 중앙경간 중앙점)(계속)



(c) 계수 α

그림 3.50 동적해석 결과의 일례(모형실험체 Id. : C-9.7-7.9, 중앙경간 중앙점)

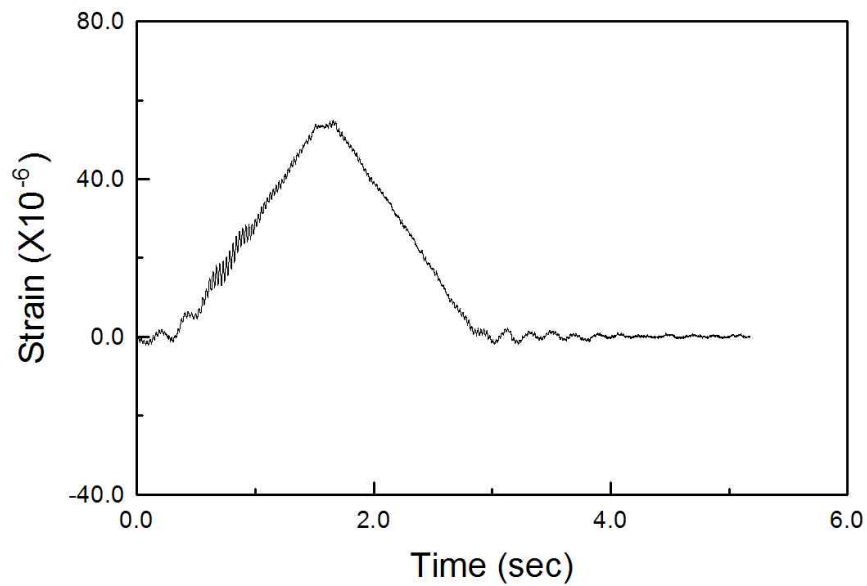


그림 3.51 모형실험체 S-7.7-0의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)

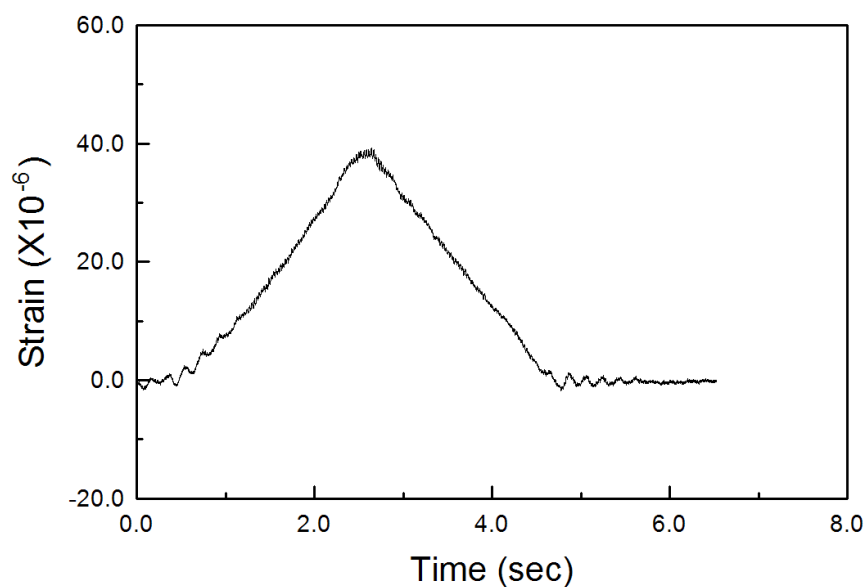


그림 3.52 모형실험체 S-7.7-1.8의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)

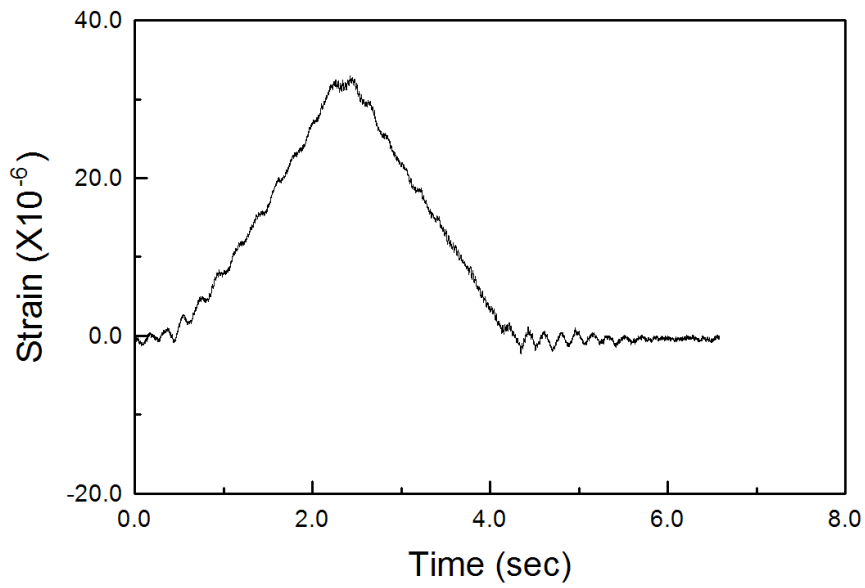


그림 3.53 모형실험체 S-7.7-3.6의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)

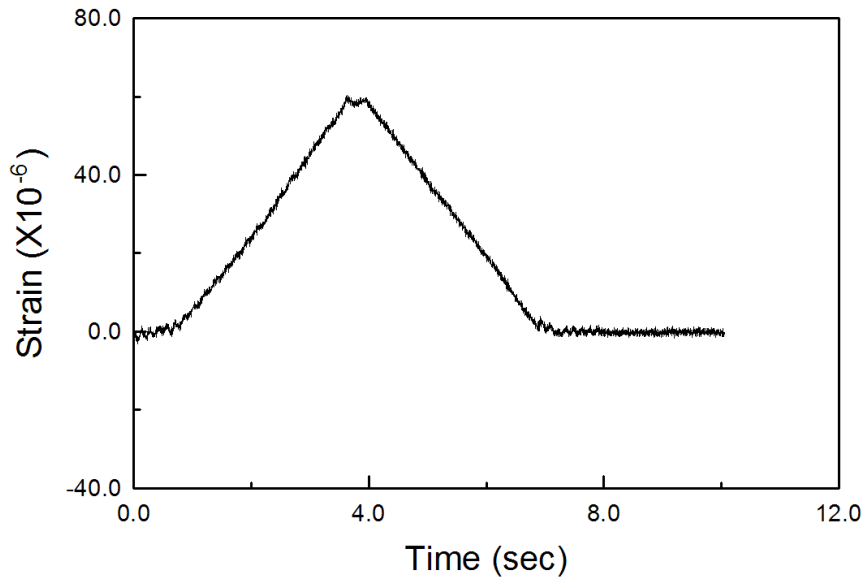


그림 3.54 모형실험체 S-9.7-0의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)

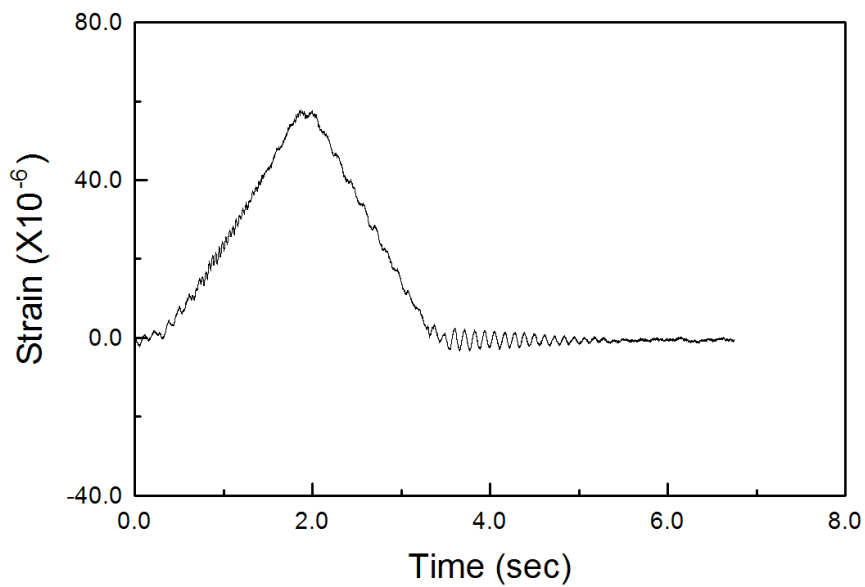


그림 3.55 모형실험체 S-14.7-0의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)

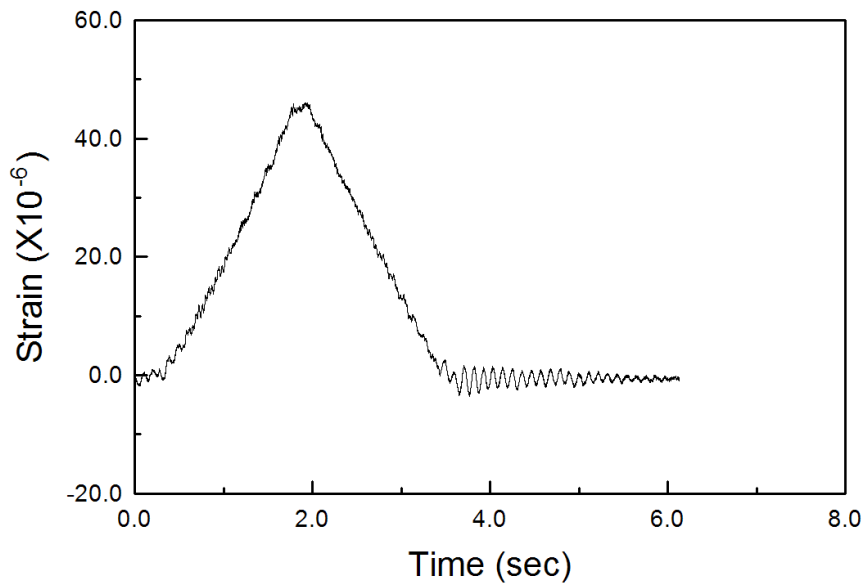


그림 3.56 모형실험체 S-14.7-3.6의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)

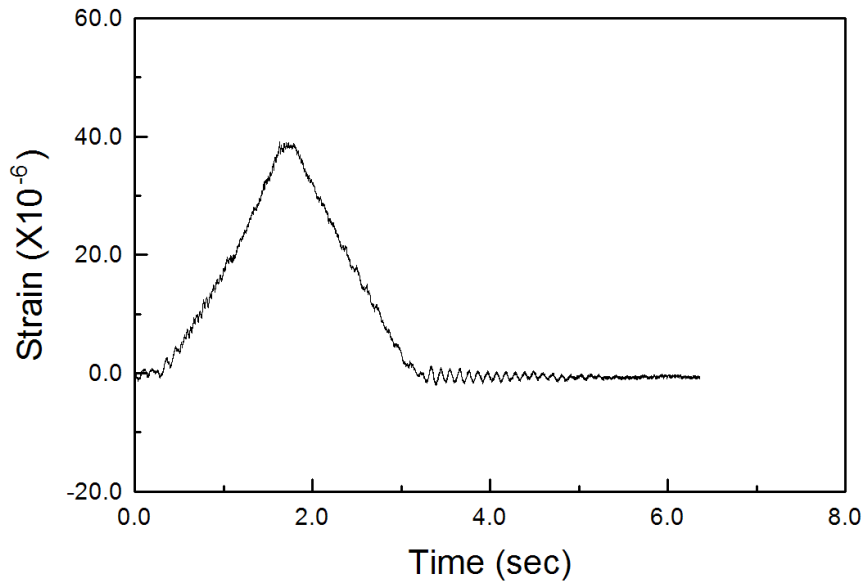
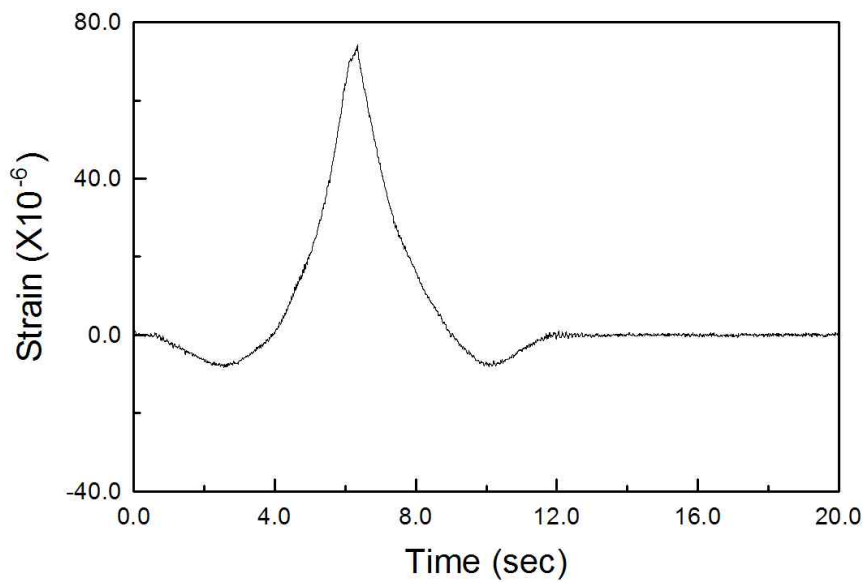
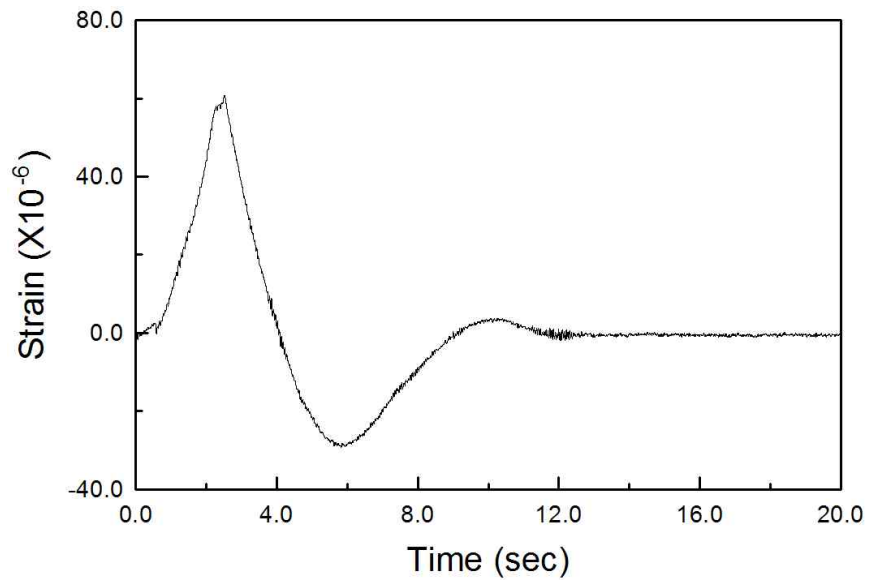


그림 3.57 모형실험체 S-14.7-7.2의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)



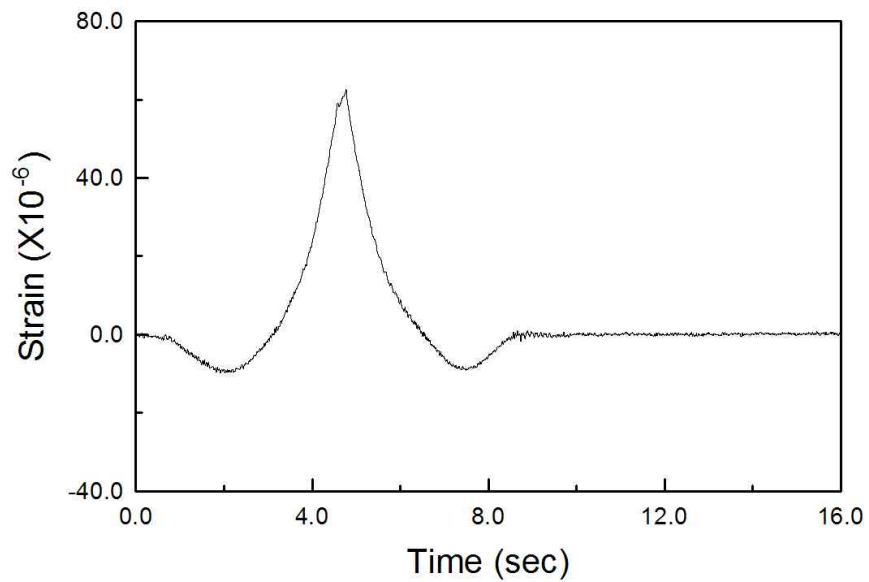
(a) 중앙경간

그림 3.58 모형실험체 C-9.7-7.9의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)(계속)

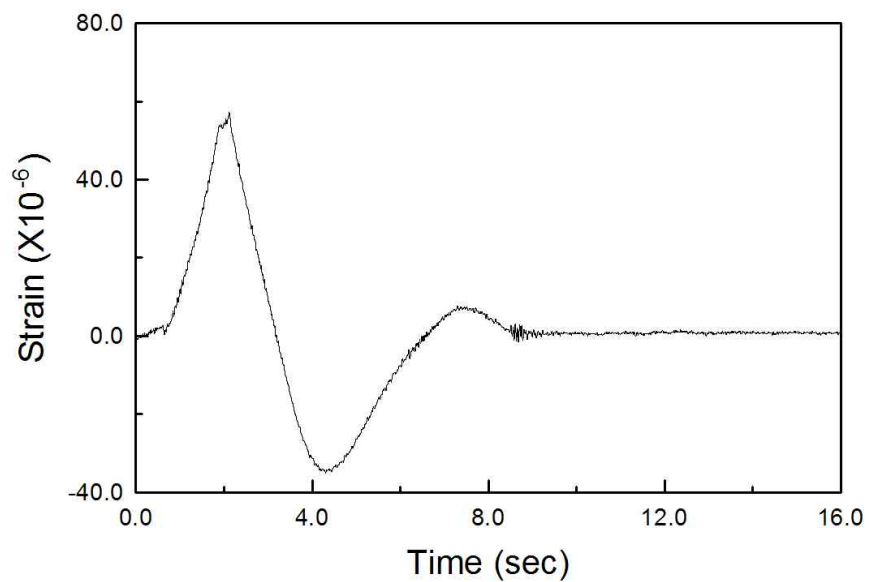


(b) 측경간

그림 3.58 모형실험체 C-9.7-7.9의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)



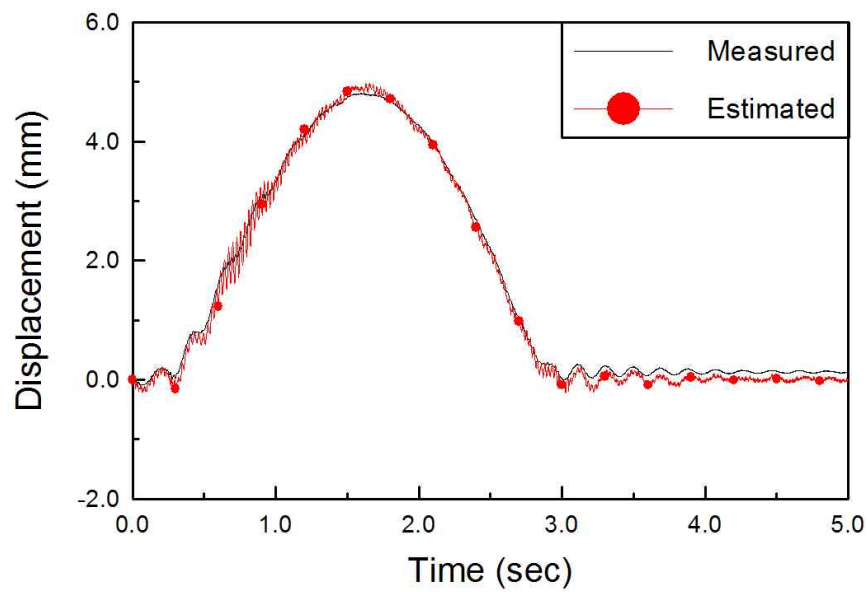
(a) 중앙경간



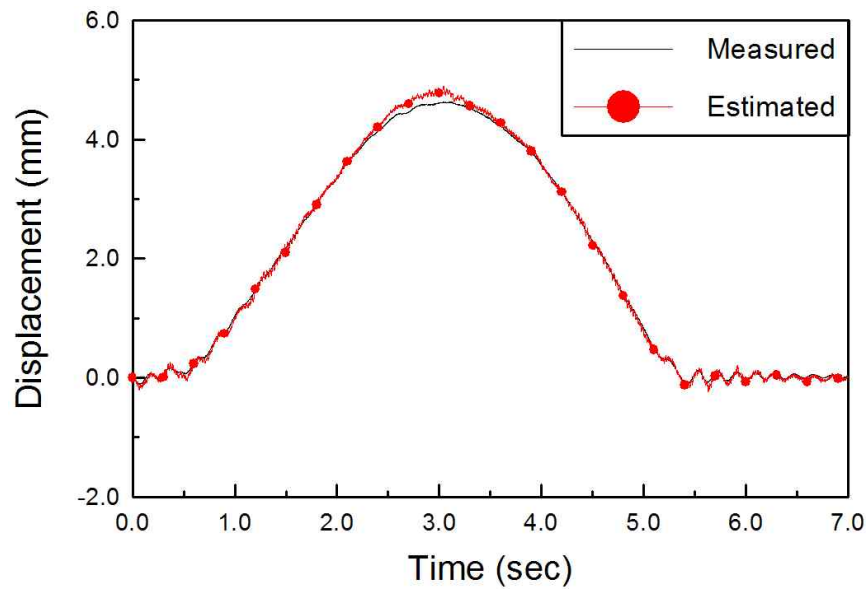
(b) 측경간

그림 3.59 모형실험체 C-9.7-15.1의 실측 변형률 시간이력곡선(Test No. : #1)

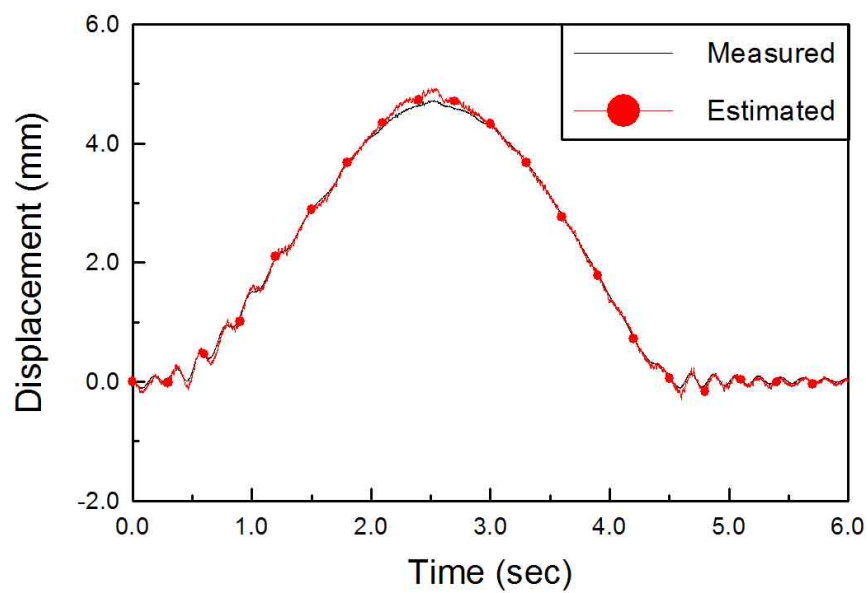
모든 실험경우에 대해 추정된 결과를 실측 변위 시간이력곡선과 비교하여 그림 3.60~그림 3.68에 나타내었다. 또한, 추정 최대 변위와 실측 최대 변위를 단순보 모형실험체에 대해서는 표 3.35에, 연속보 모형실험체에 대해서는 표 3.36에 정리하여 나타내었다. 그림 3.60~그림 3.68, 표 3.35 및 표 3.36에 의하면 모형실험체마다 다소의 차이는 있으나 대체로 실측 변형률로부터 추정된 변위 시간이력곡선은 실측치와 비교하여 형상 및 크기가 유사하며, 최대 변위 기준으로 최대 편차가 10% 미만, 평균 편차가 5% 미만으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 변형률 신호를 이용한 변위 추정 기법은 타당한 것으로 사료된다.



(a) Test No. : #1

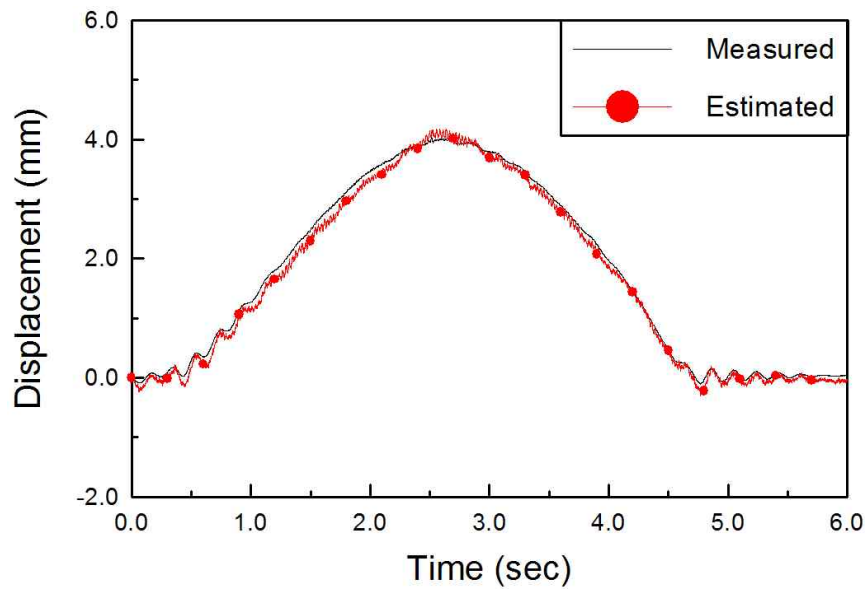


(b) Test No. : #2

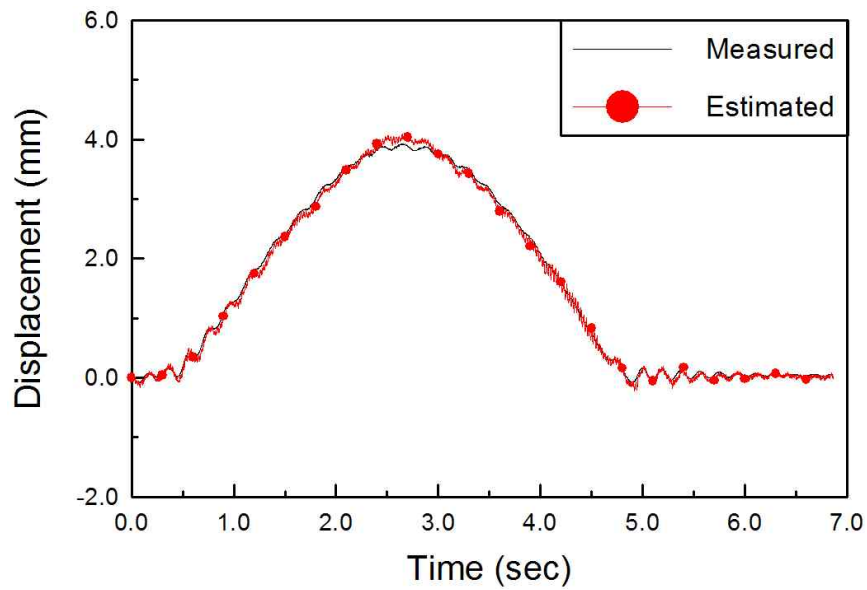


(c) Test No. : #3

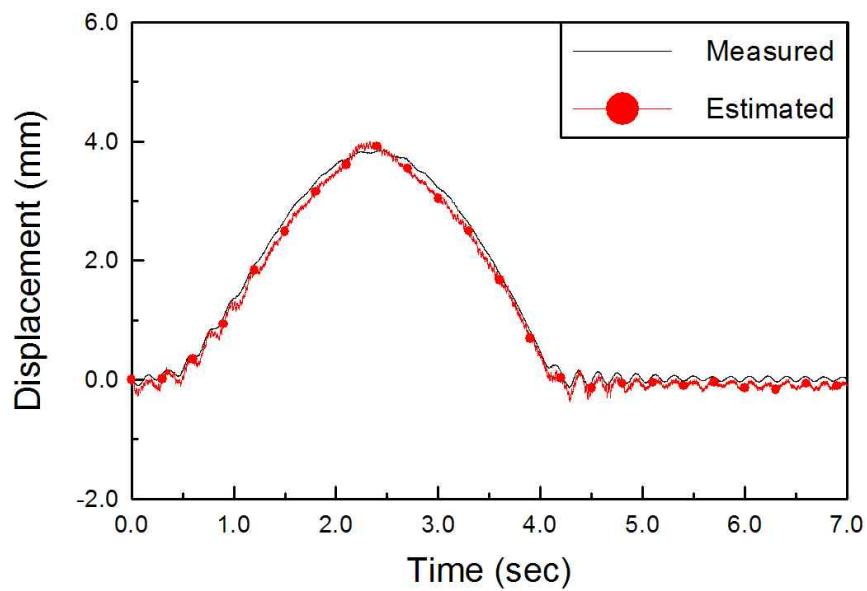
그림 3.60 모형실험체 S-7.7-0의 변위 추정 결과



(a) Test No. : #1

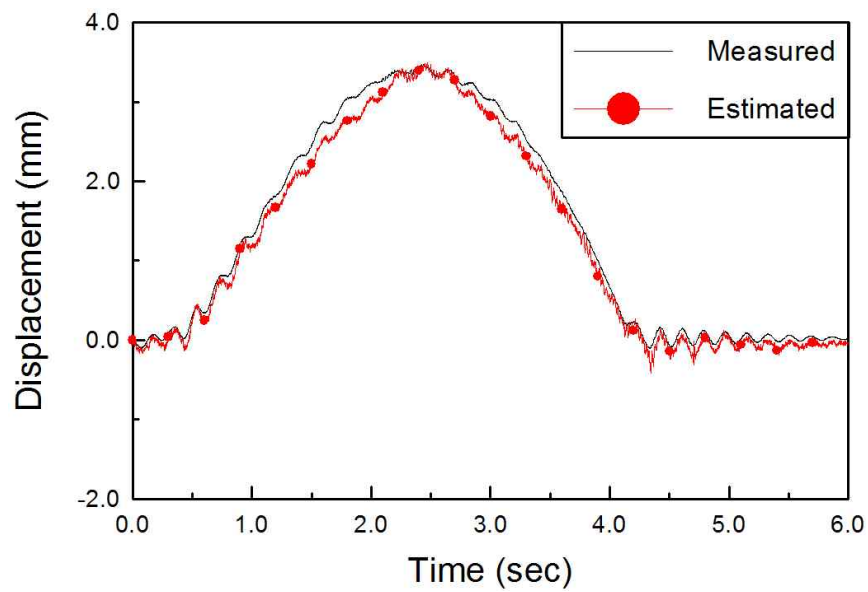


(b) Test No. : #2

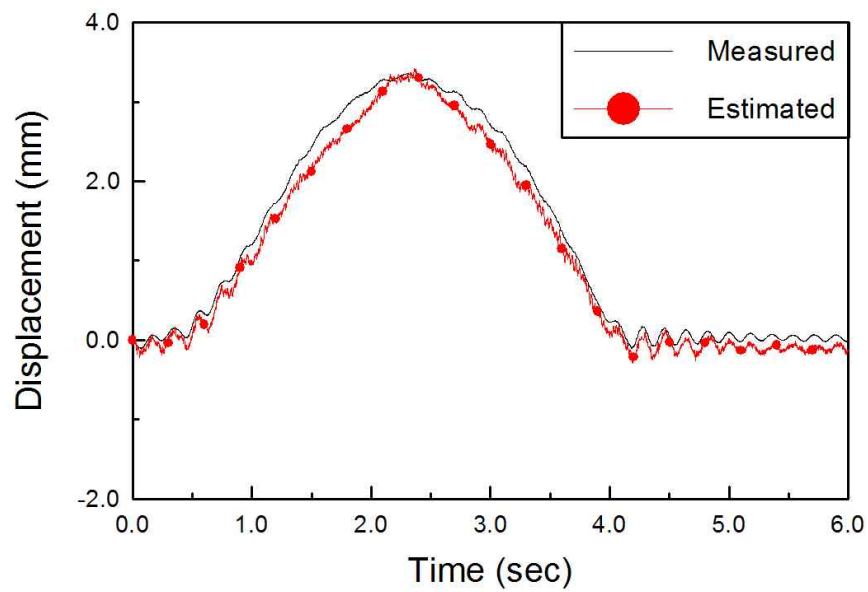


(c) Test No. : #3

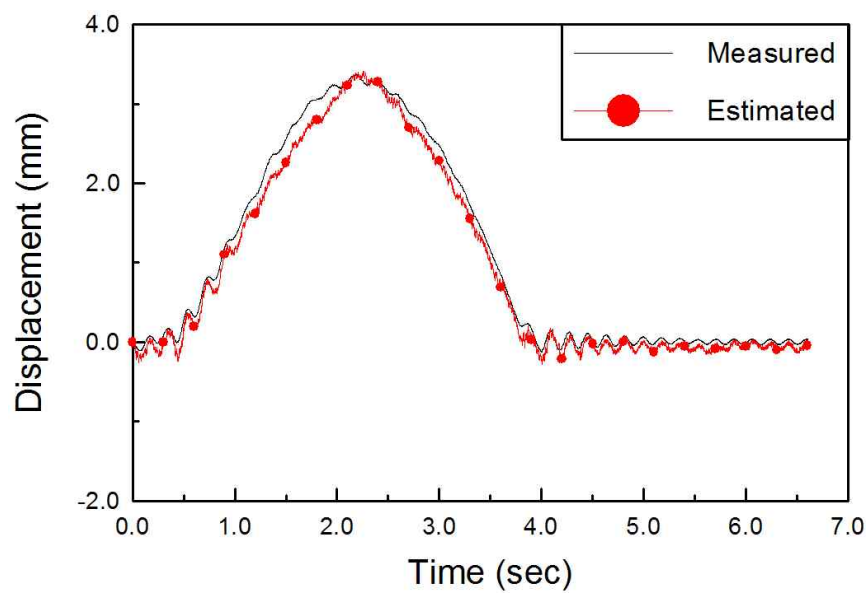
그림 3.61 모형실험체 S-7.7-1.8의 변위 추정 결과



(a) Test No. : #1

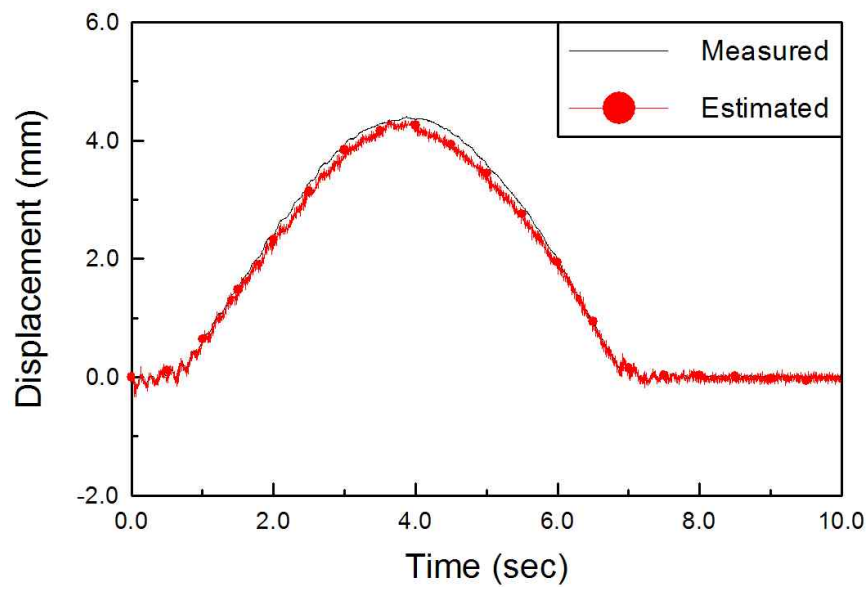


(b) Test No. : #2

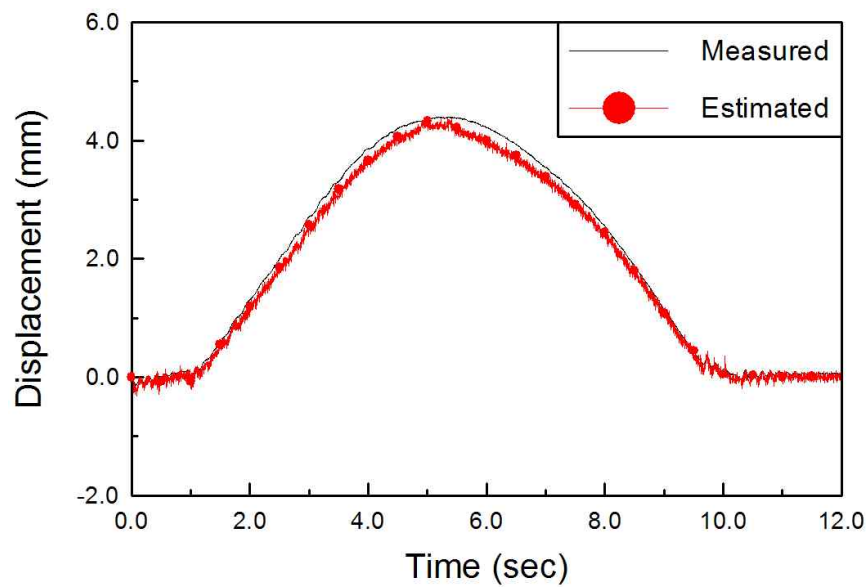


(c) Test No. : #3

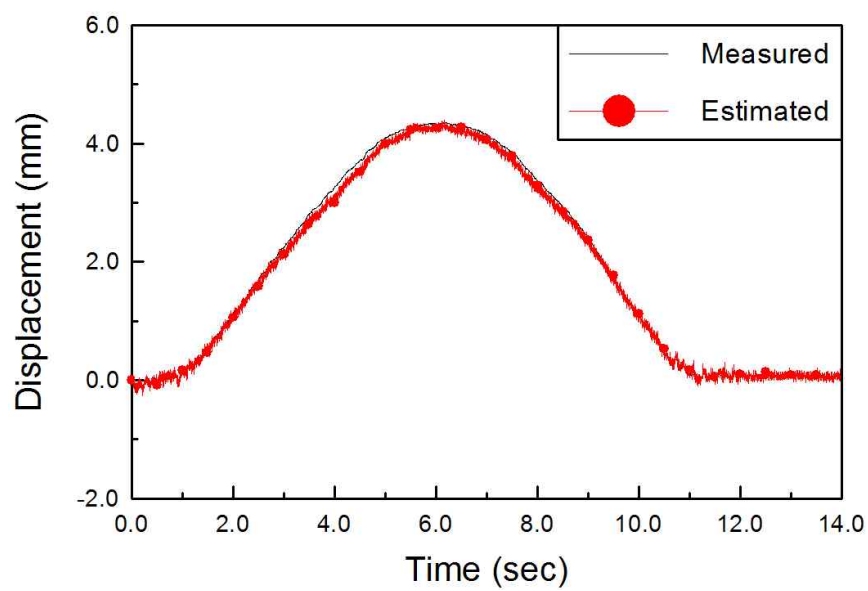
그림 3.62 모형실험체 S-7.7-3.6의 변위 추정 결과



(a) Test No. : #1

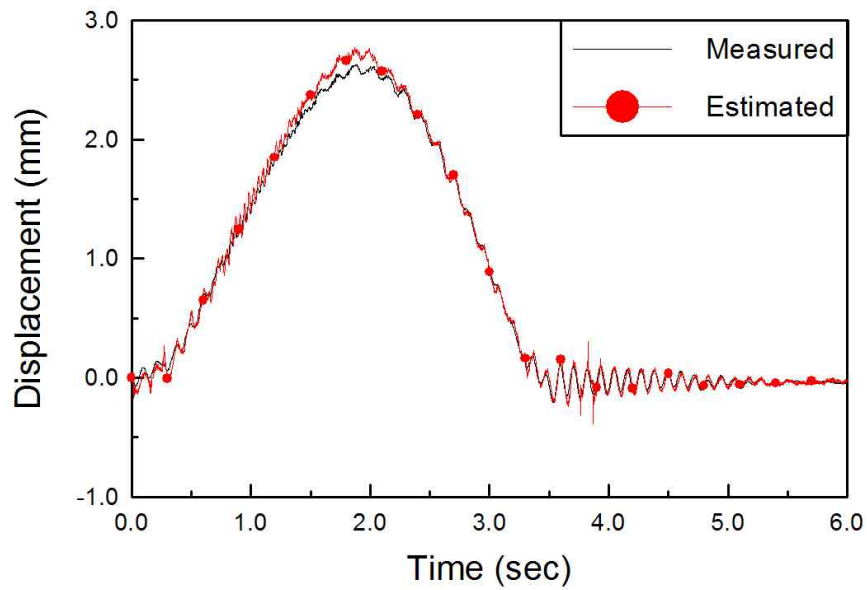


(b) Test No. : #2

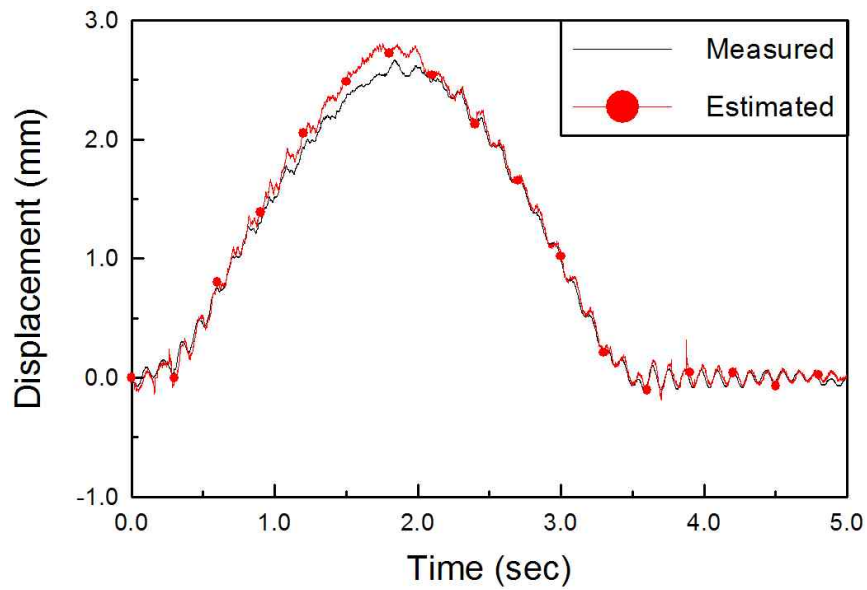


(c) Test No. : #3

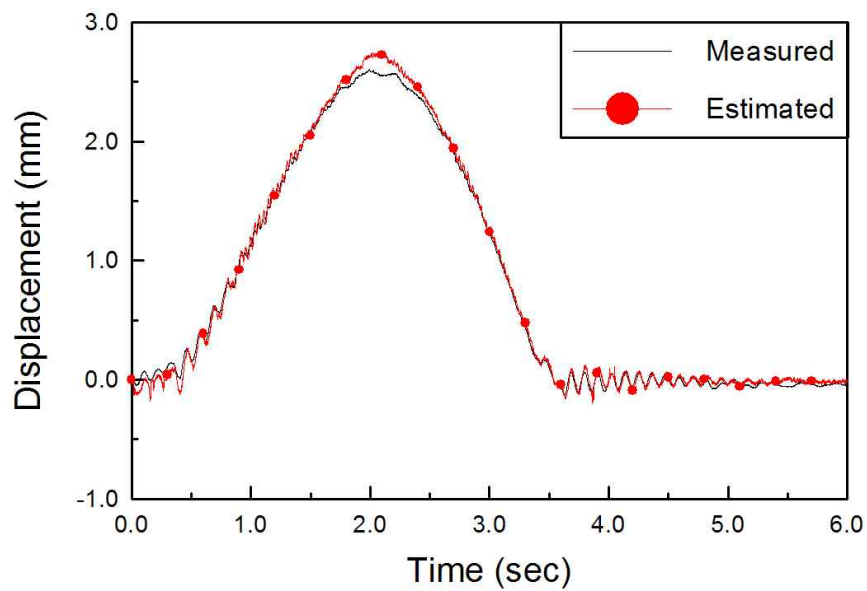
그림 3.63 모형실험체 S-9.7-0의 변위 추정 결과



(a) Test No. : #1

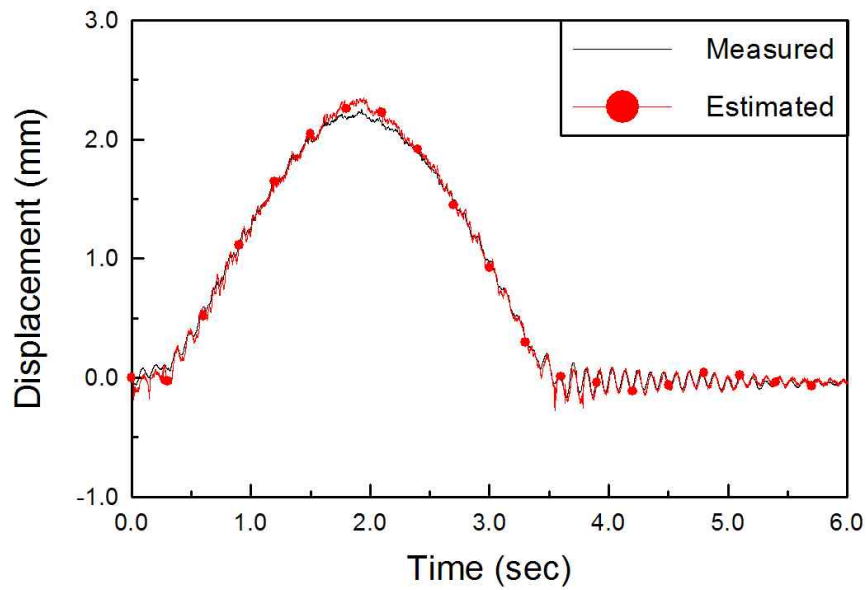


(b) Test No. : #2

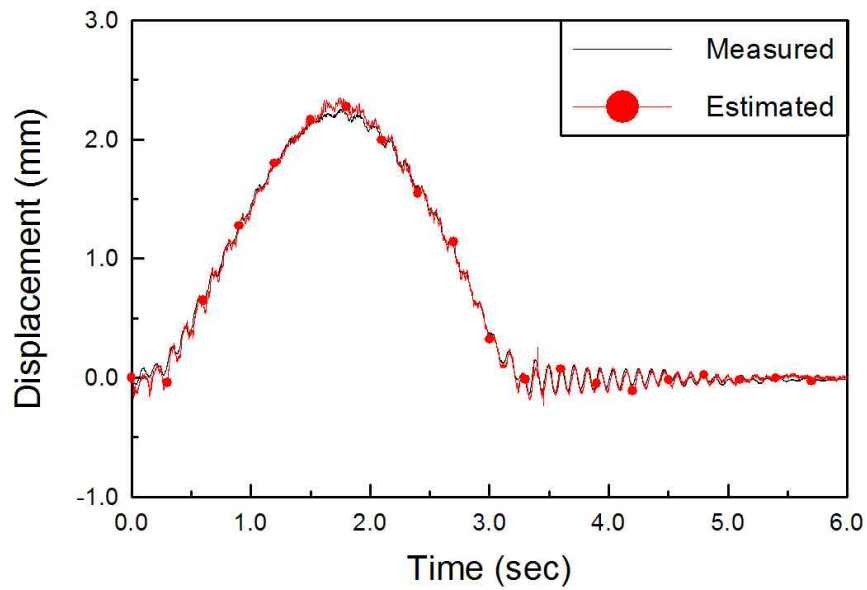


(c) Test No. : #3

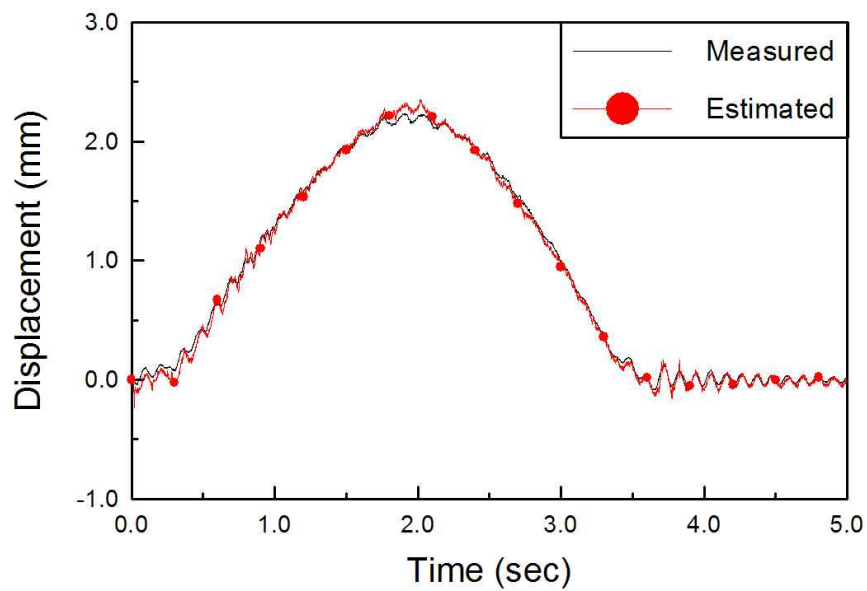
그림 3.64 모형실험체 S-14.7-0의 변위 추정 결과



(a) Test No. : #1

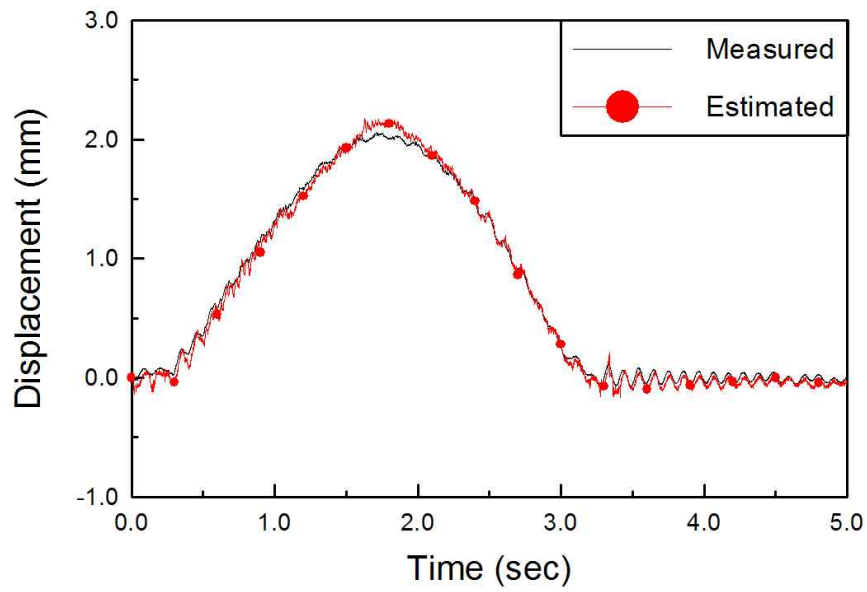


(b) Test No. : #2

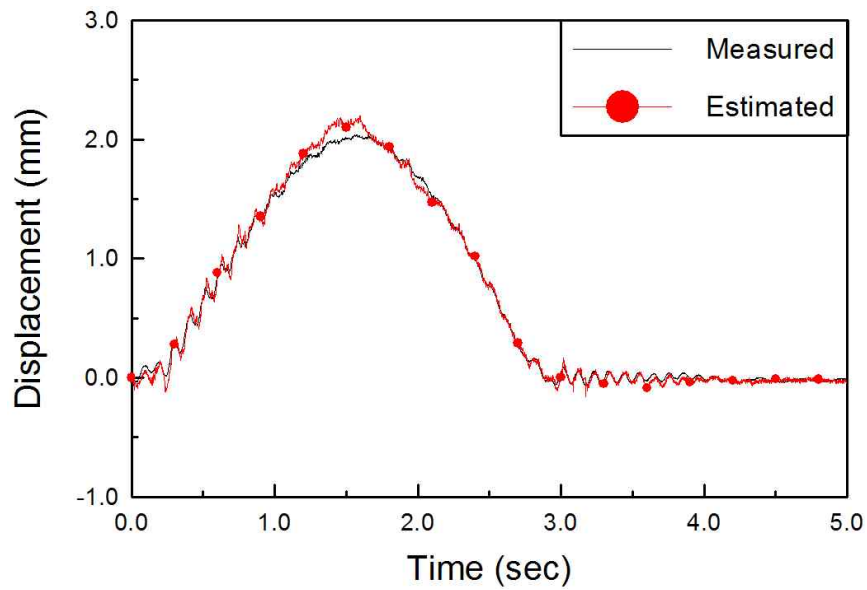


(c) Test No. : #3

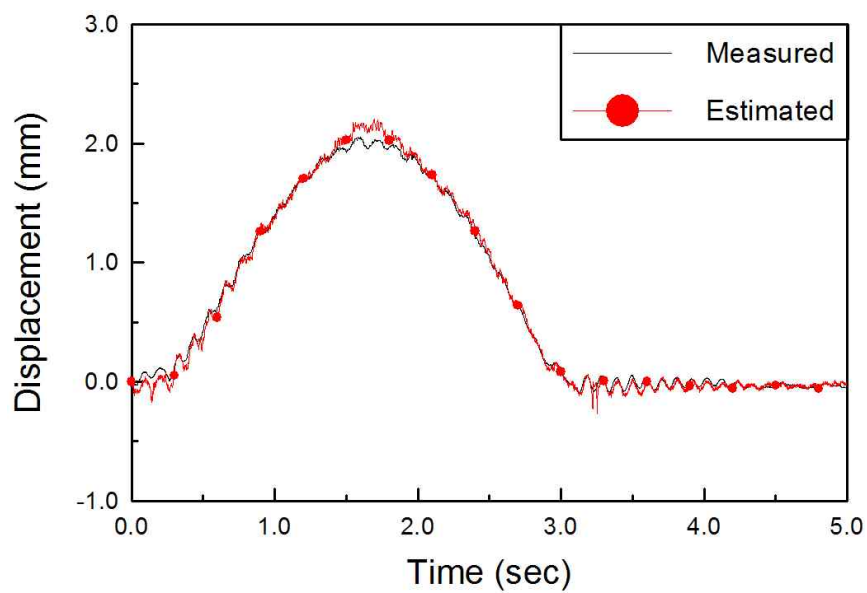
그림 3.65 모형실험체 S-14.7-3.6의 변위 추정 결과



(a) Test No. : #1

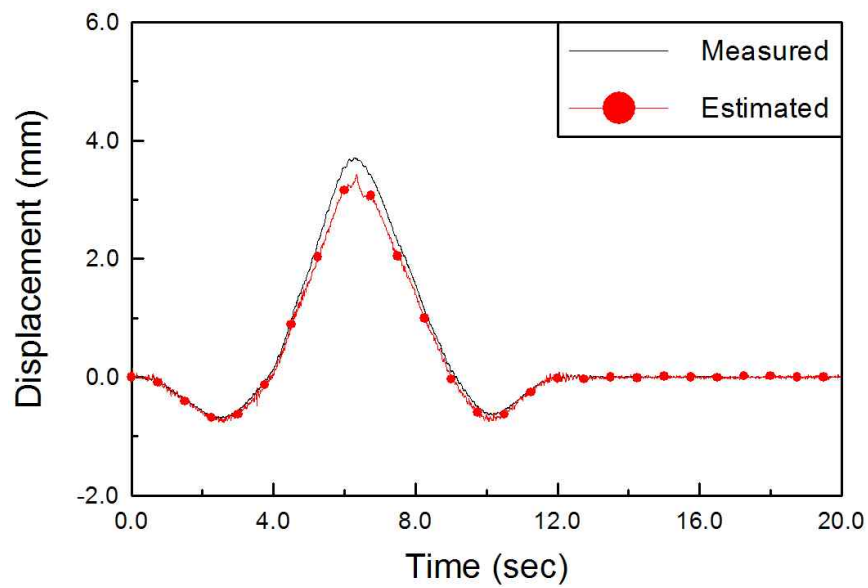


(b) Test No. : #2

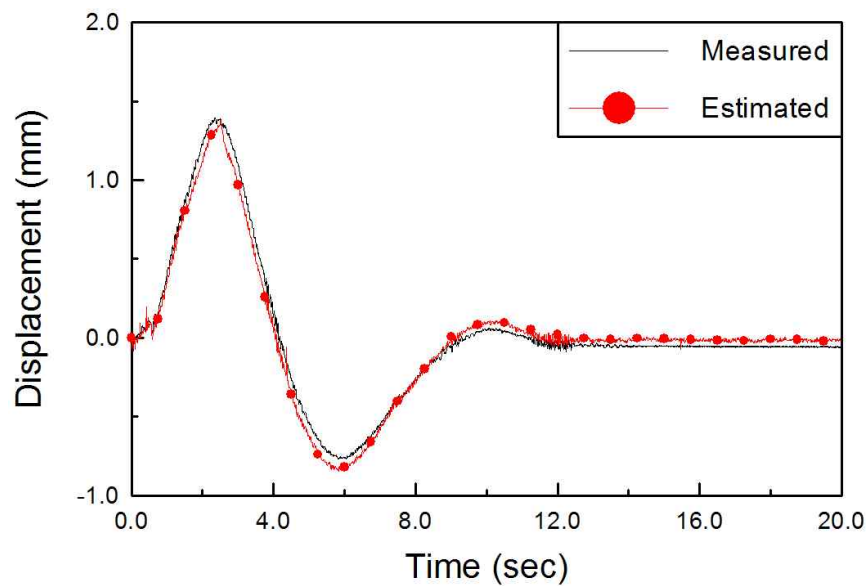


(c) Test No. : #3

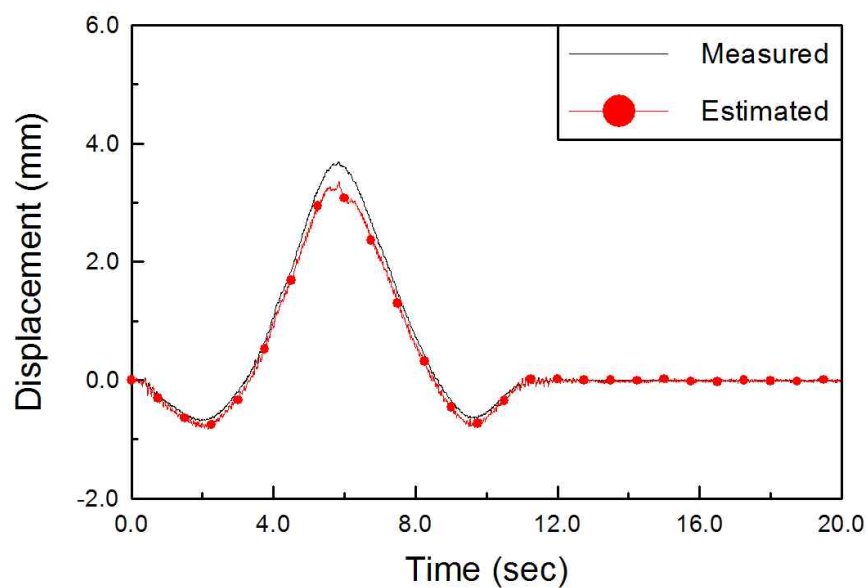
그림 3.66 모형실험체 S-14.7-7.2의 변위 추정 결과



(a) Test No. : #1(중양경간)

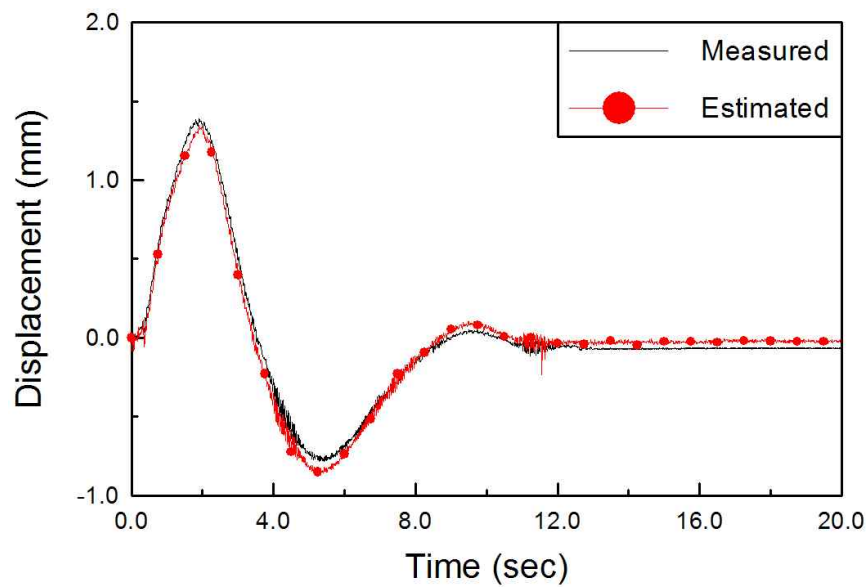


(b) Test No. : #1(측경간)

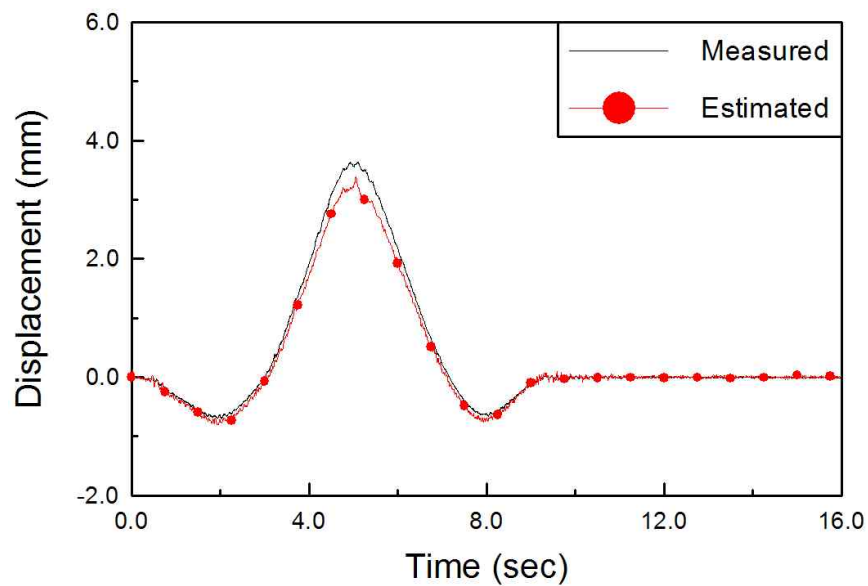


(c) Test No. : #2(중양경간)

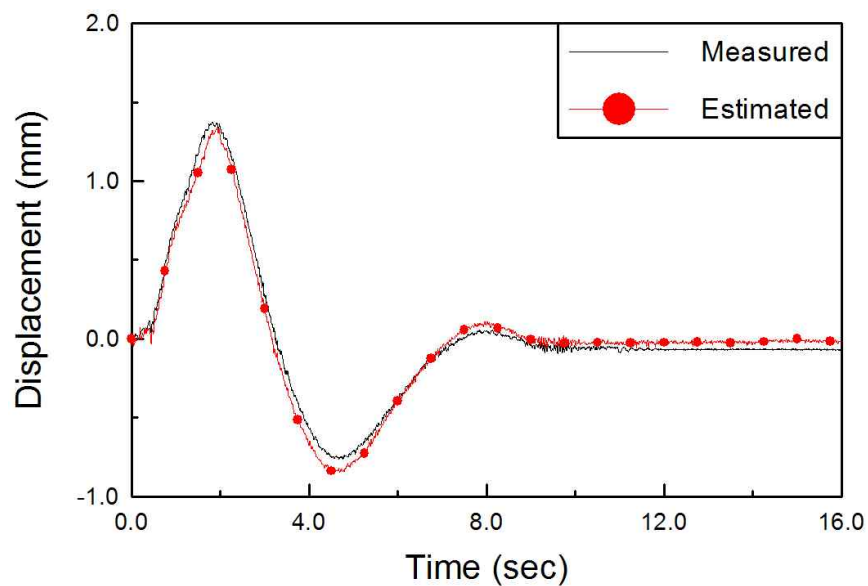
그림 3.67 모형실험체 C-9.7-7.9의 변위 추정 결과(계속)



(d) Test No. : #2(측경간)

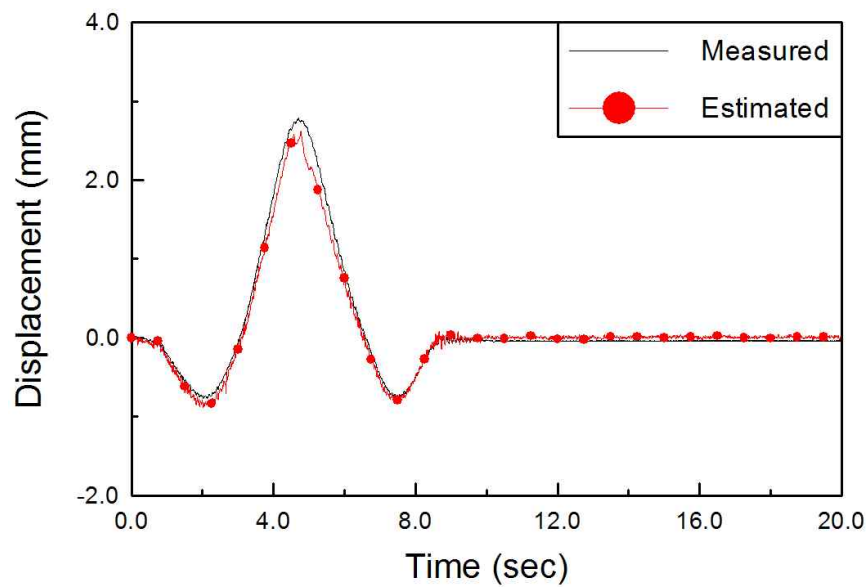


(e) Test No. : #3(중앙경간)

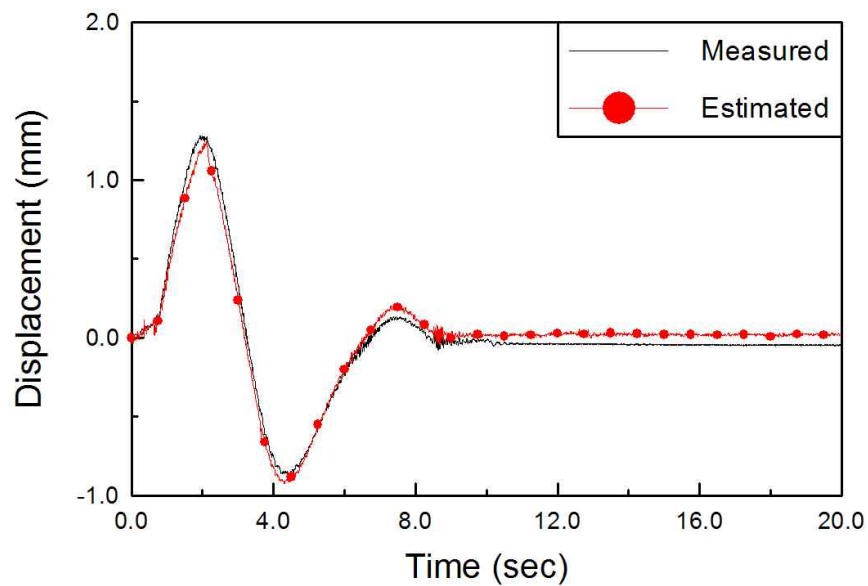


(f) Test No. : #3(측경간)

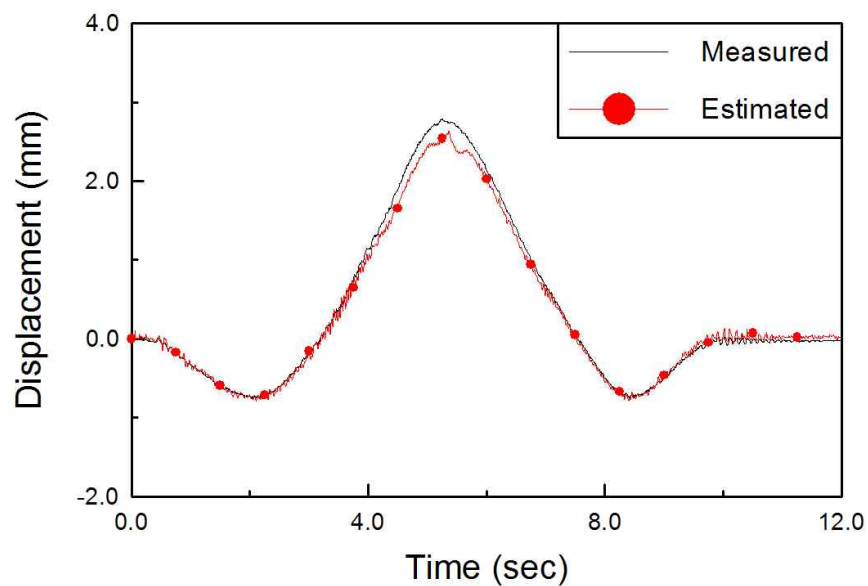
그림 3.67 모형실험체 C-9.7-7.9의 변위 추정 결과



(a) Test No. : #1(중양경간)

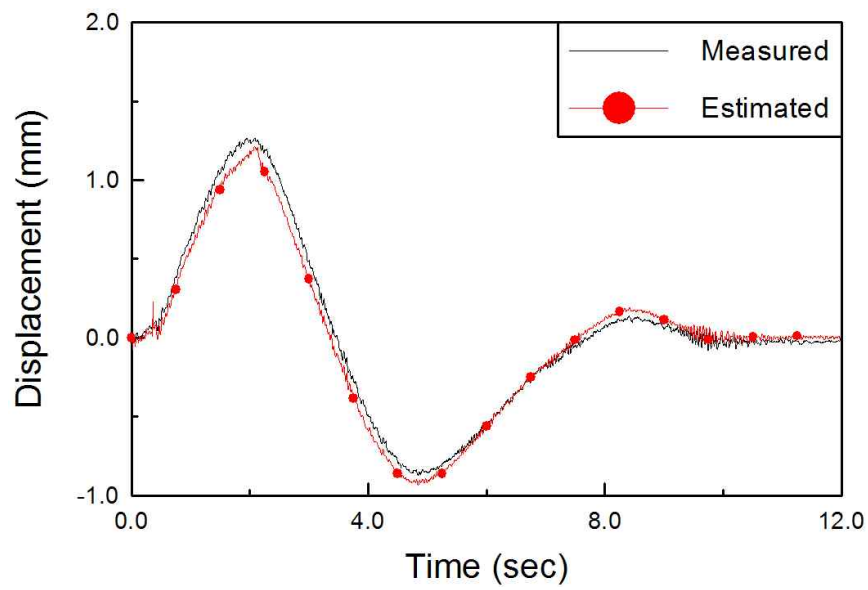


(b) Test No. : #1(측경간)

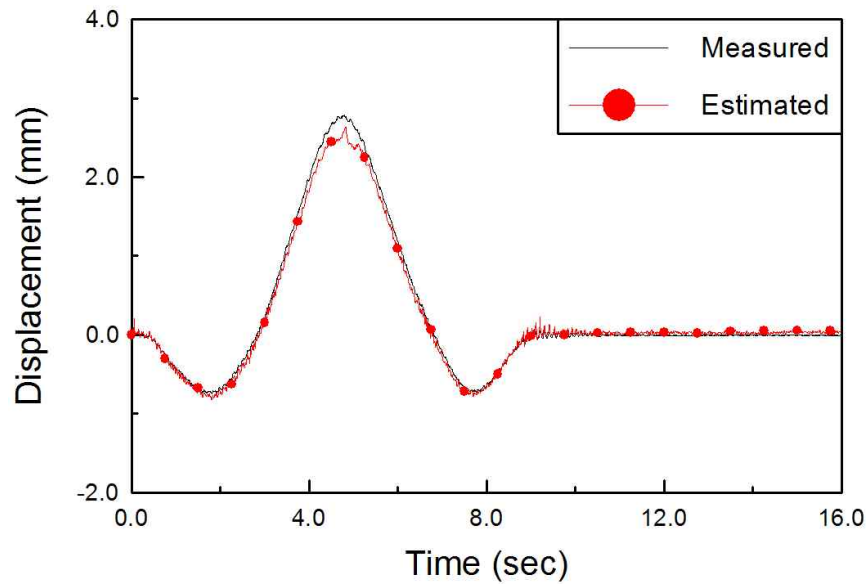


(c) Test No. : #2(중양경간)

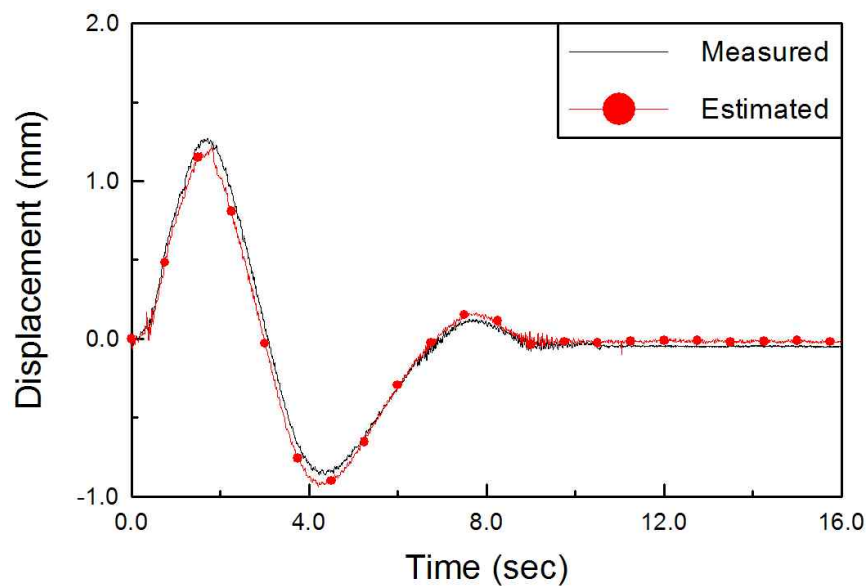
그림 3.68 모형실험체 C-9.7-15.1의 변위 추정 결과(계속)



(d) Test No. : #2(측경간)



(e) Test No. : #3(중앙경간)



(f) Test No. : #3(측경간)

그림 3.68 모형실험체 C-9.7-15.1의 변위 추정 결과

표 3.35 단순보 모형실험체의 실측 최대 변위와 추정 최대 변위 비교

구 분		실측 최대 변위 (mm)	추정 최대 변위 (mm)	편 차 (%)
S-7.7-0	#1	4.81	4.98	3.53
	#2	4.63	4.90	5.83
	#3	4.73	4.93	4.23
S-7.7-1.8	#1	4.04	4.18	3.47
	#2	3.93	4.10	4.33
	#3	3.85	4.00	3.90
S-7.7-3.6	#1	3.47	3.49	0.58
	#2	3.36	3.42	1.79
	#3	3.37	3.41	1.19
S-9.7-0	#1	4.41	4.35	1.36
	#2	4.40	4.38	0.45
	#3	4.36	4.40	0.92
S-14.7-0	#1	2.63	2.77	5.32
	#2	2.67	2.81	5.24
	#3	2.61	2.75	5.36
S-14.7-3.6	#1	2.25	2.35	4.44
	#2	2.26	2.35	3.98
	#3	2.24	2.35	4.91
S-14.7-7.2	#1	2.06	2.18	5.83
	#2	2.04	2.20	7.84
	#3	2.05	2.21	7.80

표 3.36 연속보 모형실험체의 실측 최대 변위와 추정 최대 변위 비교

구 분			실측 최대 변위 (mm)	추정 최대 변위 (mm)	편 차 (%)
C-9.7-7.9	중앙경간	#1	3.71	3.43	7.55
		#2	3.69	3.35	9.21
		#3	3.63	3.39	6.61
	측경간	#1	1.40	1.38	1.43
		#2	1.39	1.35	2.88
		#3	1.38	1.34	2.90
C-9.7-15.1	중앙경간	#1	2.79	2.62	6.09
		#2	2.79	2.63	5.73
		#3	2.78	2.64	5.04
	측경간	#1	1.28	1.25	2.34
		#2	1.26	1.21	3.97
		#3	1.27	1.22	3.94

(다) 속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정

앞 절에서는 속도 신호를 이용한 변위 추정 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정에 대해 살펴보았다. 속도 신호만을 이용하여 변위를 추정하는 경우에는 저주파의 정적 변위 성분이 왜곡되었으며, 변형률 신호만을 이용하는 경우에는 강제진동 성분은 비교적 양호한 수준으로 추정되었으나 자유진동 파형의 일부분에서 노이즈 형태의 피크(peak)가 형성되었다. 따라서, 본 절에서는 정상상태(steady state)와 유사한 동적 변위 성분은 속도 신호를 이용하고, 저주파의 정적 변위 성분은 변형률 신호를 이용하여 추정한 후 두 성분을 합성하는 방법에 대해 검토하고자 한다.

변형률 신호에 대해서는 변위와 변형률의 관계로부터 정적 변위 성분을 구하기 위해 저역통과 필터(low pass filter)를, 속도 신호에 대해서는 정적 변위 성분이 제거된 동적 변위 성분만을 얻기 위해 고역통과 필터(high pass filter)를 적용하였다. 그림 3.69에 속도 및 변형률 신호를 동시에 사용하여 변위를 추정하는 과정을 흐름도로 나타내었다.

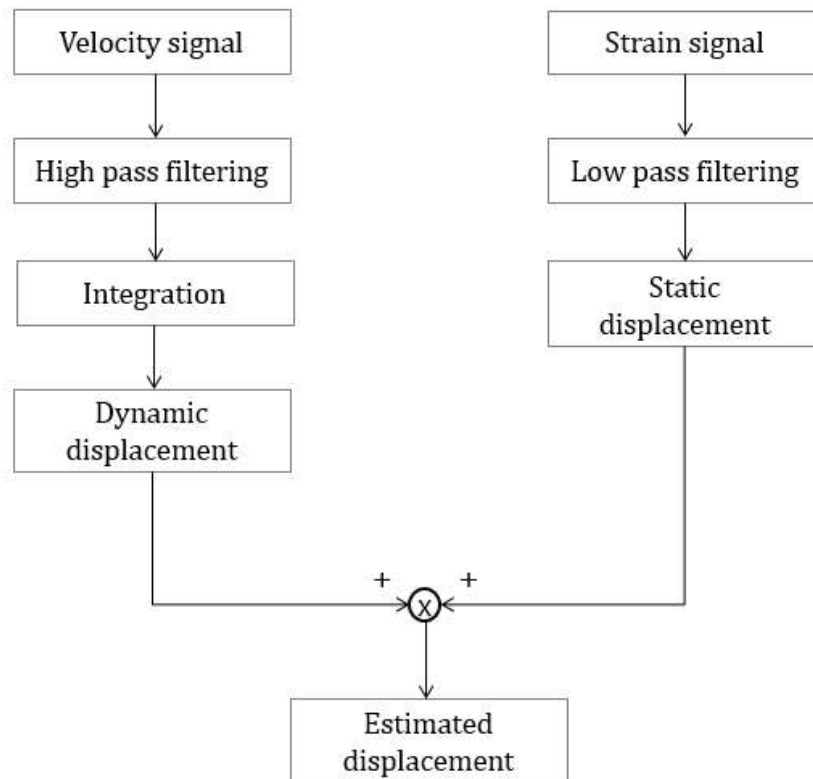
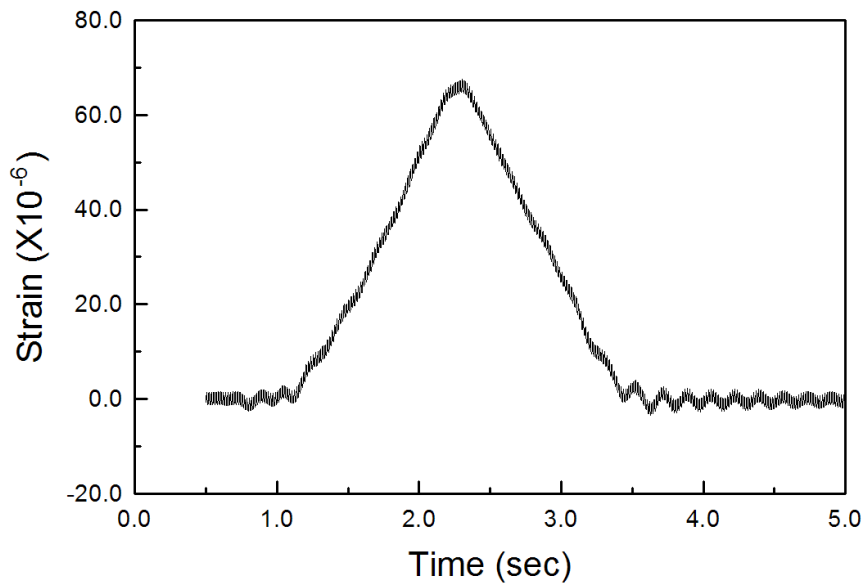


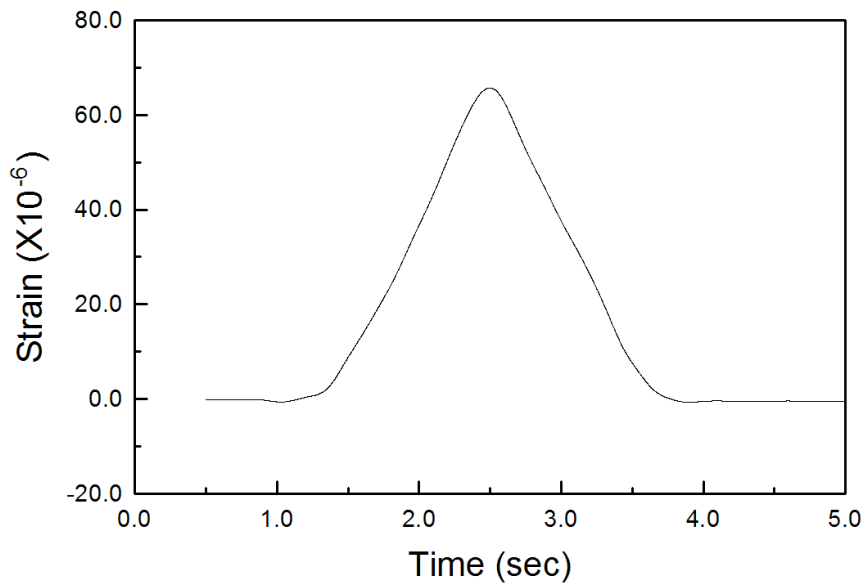
그림 3.69 속도 및 변형률 신호를 동시에 사용하여 변위를 추정하는 과정

속도 및 변형률 신호를 동시에 사용하여 변위를 추정하는 알고리즘의 적정성을 검토하기 위해 모형실험체 S-7.7-0 및 S-9.7-0에서 측정된 응답을 분석하였다. 우선 속도와 변형률 신호를 필터링하기 위해 모형차량의 주행속도 및 모형실험체의 고유진동수를 고려하여 속도 신호에 대한 고역통과 필터 주파수는 2Hz 이상, 변형률 신호에 대한 저역통과 필터 주파수는 1Hz 이하를 적용하였다. 그림 3.70에 필터링 전, 후의 변형률 시간이력곡선의 일례를 나타내었다.

저주파 성분이 제거된 속도 신호에 대한 주파수 영역의 적분 결과와 변위-변형률 관계를 이용하여 변형률 신호로부터 추정된 정적 변위 성분의 일례를 모형실험체별로 그림 3.71 및 그림 3.72에 나타내었다.

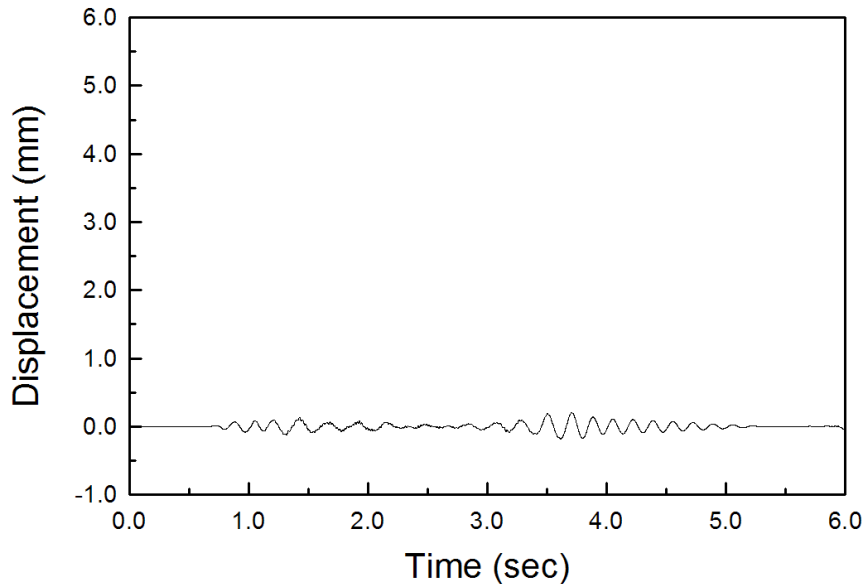


(a) 필터링 전



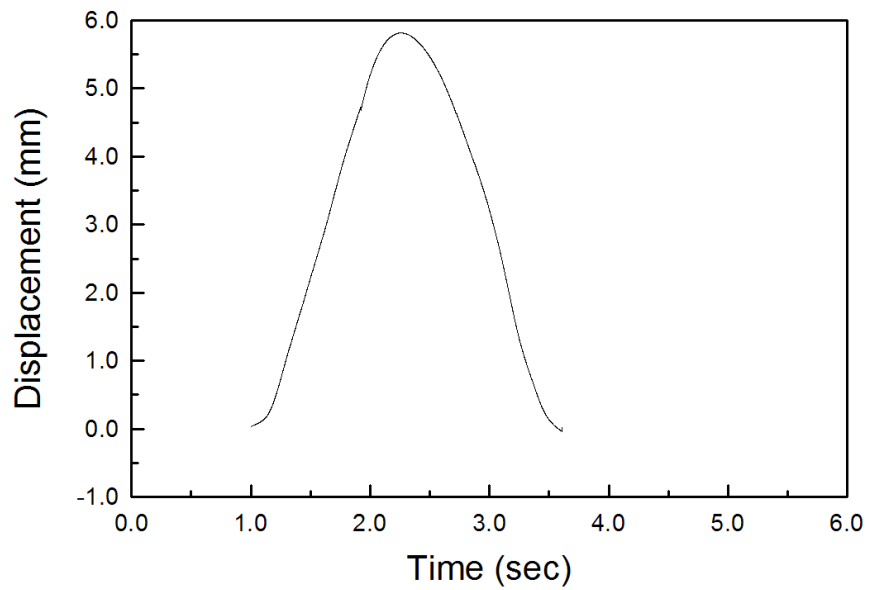
(b) 필터링 후

그림 3.70 필터링 전, 후의 변형률 시간이력곡선(모형실험체 Id. : S-7.7-0, Test No. : #1)



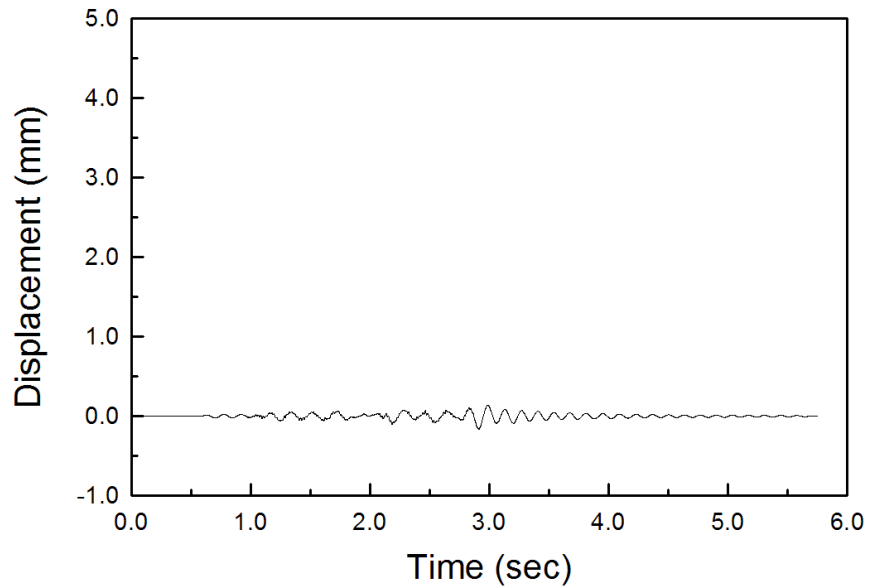
(a) 동적 변위 성분

그림 3.71 모형실험체 S-7.7-0에 대해 추정된 동적 및 정적 변위 성분(Test No. : #1)(계속)

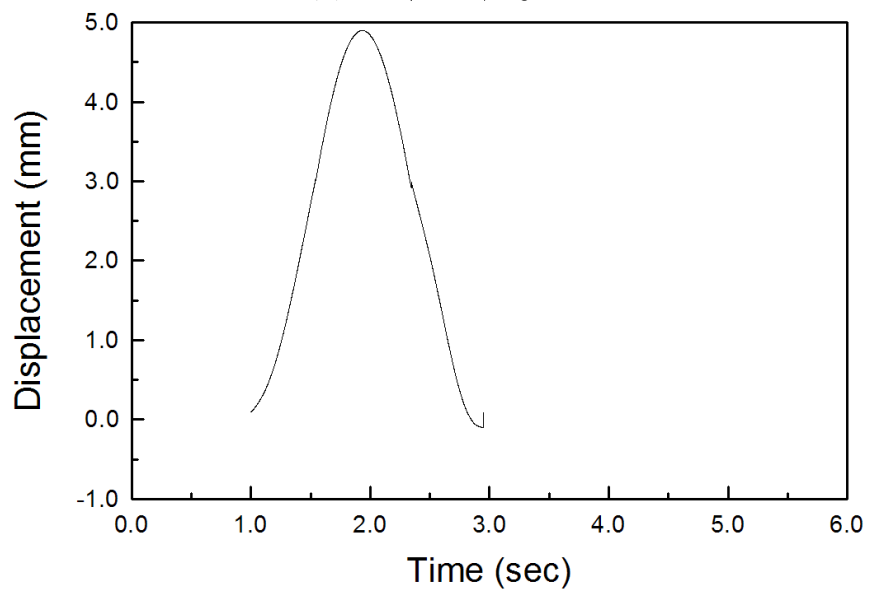


(b) 정적 변위 성분

그림 3.71 모형실험체 S-7.7-0에 대해 추정된 동적 및 정적 변위 성분(Test No. : #1)



(a) 동적 변위 성분



(b) 정적 변위 성분

그림 3.72 모형실험체 S-9.7-0에 대해 추정된 동적 및 정적 변위 성분(Test No. : #1)

그림 3.71 및 그림 3.72에 나타난 정·동적 변위 성분을 합성하여 최종적으로 추정된 변위 시간이력곡선을 변위계에 의한 실측치와 비교하여 그림 3.73 및 그림 3.74에 나타내었다. 표 3.37에는 총 3회씩 반복한 모든 실험경우에 대한 최대 변위를 비교하여 나타내었다.

그림 3.73 및 그림 3.74에 나타난 속도 및 변형률 신호로부터 추정된 변위 시간이력곡선을 살펴보면 모형차량의 실제 주행속도와 구조해석시의 주행속도가 정확히 일치하지 않아 미세하게 부분적인 왜곡이 발생하지만, 전체적인 형상은 추정치와 실측치가 거의 정확히 일치하고 있다. 또한, 표 3.37의 실측 최대 변위에 대한 편차도 2% 미만으로서 매우 만족스러운 결과를 나타내고 있다.

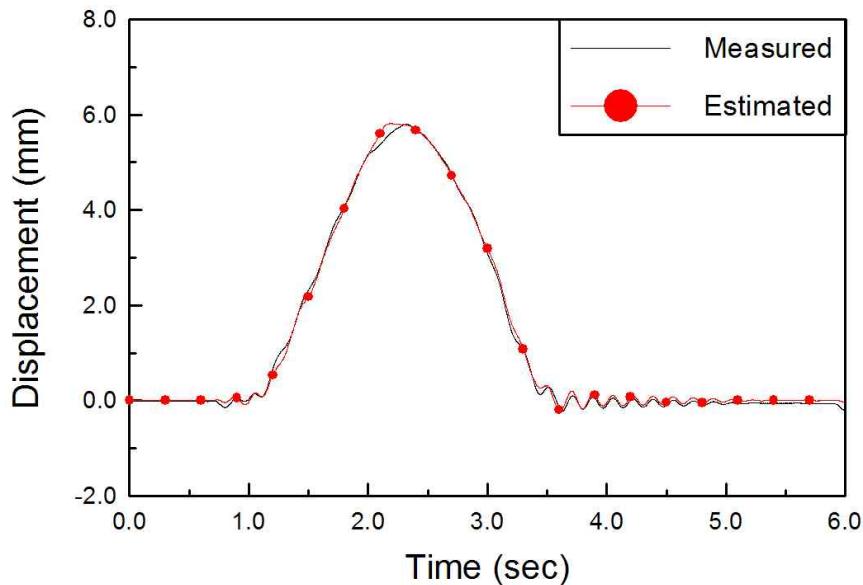


그림 3.73 모형실험체 S-7.7-0의 변위 추정 결과(Test No. : #1)

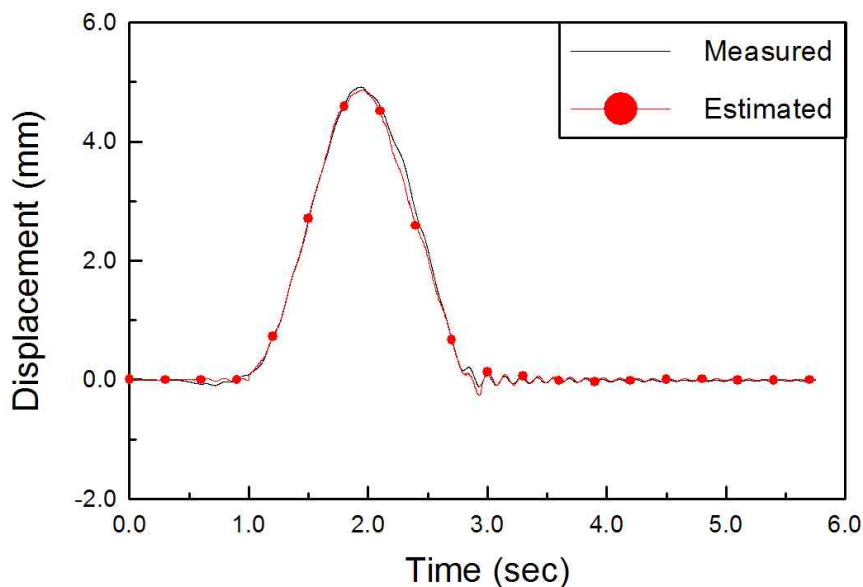


그림 3.74 모형실험체 S-9.7-0의 변위 추정 결과(Test No. : #1)

표 3.37 속도 및 변형률 신호로부터 추정된 최대 변위와 실측 최대 변위 비교

구 분		실측 최대 변위 (mm)	추정 최대 변위 (mm)	편 차 (%)
S-7.7-0	#1	5.80	5.83	0.52
	#2	5.59	5.61	0.36
	#3	5.50	5.55	0.91
S-9.7-0	#1	4.86	4.88	0.41
	#2	4.84	4.93	1.86
	#3	4.84	4.92	1.65

다. 실험교량의 응답을 이용한 변위 추정

(1) 실험교량의 현장재하실험 및 결과

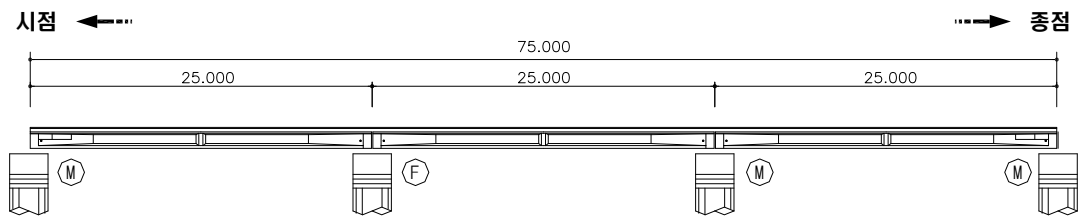
‘나. 모형실험체의 응답을 이용한 변위 추정’에서는 정적 변위에 대해서는 변형률 신호만을 이용하였으며, 동적 변위에 대해서는 아래에 나타낸 3가지의 기법에 대해 검토하였다. 동적 변위를 추정하는 3가지 기법을 검토한 결과에 의하면 ‘속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정 기법’이 가장 정확한 결과를 나타내고는 있지만, ‘변형률 신호를 이용한 변위 추정 기법’이 비교적 간단하고 분석결과도 공학적 측면에서 무리가 없다고 판단되므로 본 절에서는 실험교량의 변형률 신호로부터 정적 및 동적 변위를 추정하고자 한다.

- 속도 신호를 이용한 변위 추정 기법
- 변형률 신호를 이용한 변위 추정 기법
- 속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정 기법

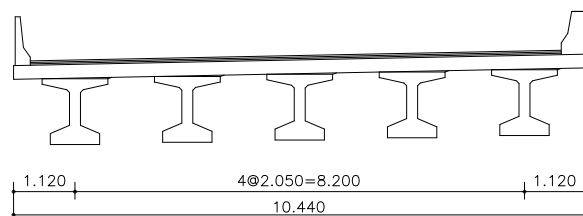
실험교량의 응답을 측정하기 위해 두 개의 교량을 대상으로 A교에 대해서는 정적재하실험을, B교에 대해서는 정·동적재하실험을 수행하였다. 실험대상 교량의 일반 현황은 표 3.38과 같고, 각 교량의 종·횡단면도는 그림 3.75 및 그림 3.76에 나타내었다.

표 3.38 현장재하실험 대상 교량

교량명	구조형식	경간구성 (m)	폭원 (m)	용 도	실험방법
A교	IPC 거더교	3@25=75.0m	10.44	도로 교량	정적재하실험
B교	강박스 거더교	3@40=120.0m	7.95	경전철 교량	정·동적재하실험

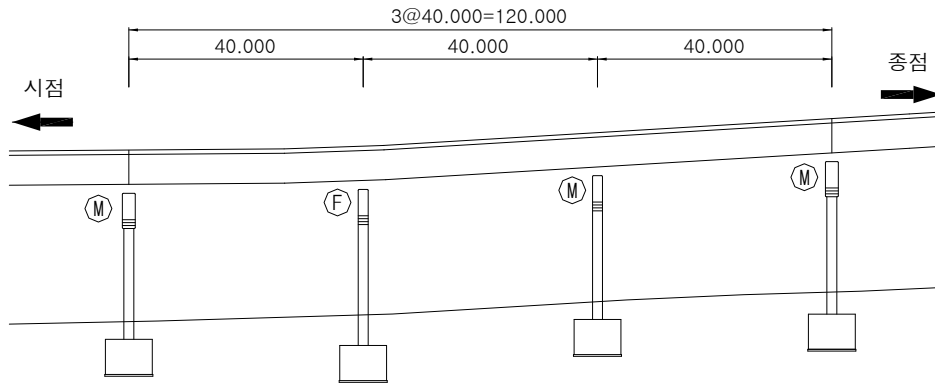


(a) 종단면도

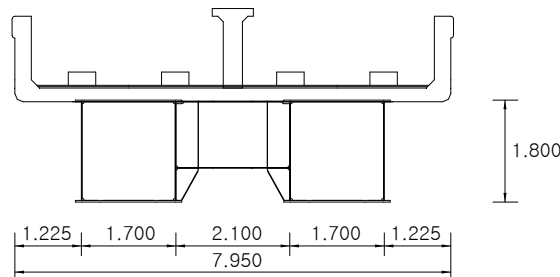


(b) 횡단면도

그림 3.75 A교의 종·횡단면도



(a) 종단면도

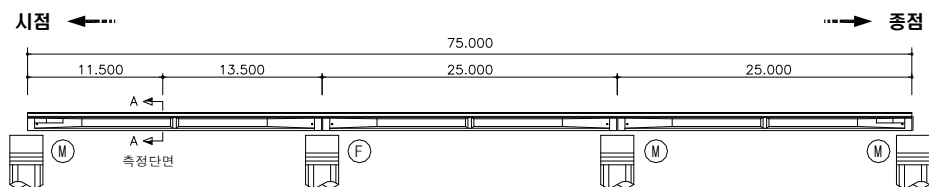


(b) 횡단면도

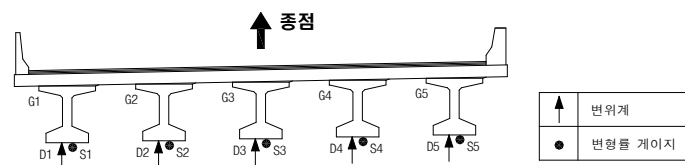
그림 3.76 B교의 종·횡단면도

(가) A교의 현장재하실험 및 결과

3경간 연속 IPC 거더교 형식의 A교에 대해 정적재하실험을 실시하였다. 측정단면의 위치인 첫 번째 경간 중앙부에 대해 그림 3.77과 같이 변위계 및 변형률 게이지를 부착하고, 정적 데이터 로거를 이용하여 응답을 측정하였다. 재하차량은 토사를 만재한 3축 덤프트럭이며, 중량 및 축간거리는 그림 3.78과 같다. 하중재하는 그림 3.79에 나타난 바와 같이 재하차량의 중륵이 측정단면 위치에 놓이도록 하고, 교축직각방향의 위치를 바꾸어가며 4가지의 하중경우에 대해 정적으로 2회씩 재하하였다.



(a) 측정단면 위치



(b) 측정단면(단면 A-A)의 센서 부착 위치

그림 3.77 A교의 센서 부착 현황

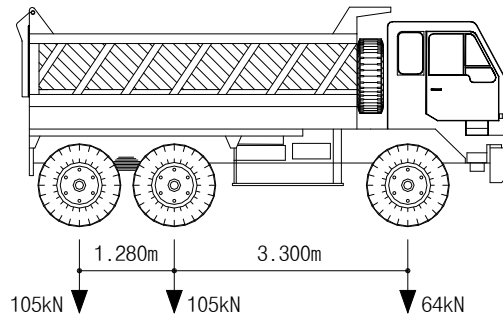
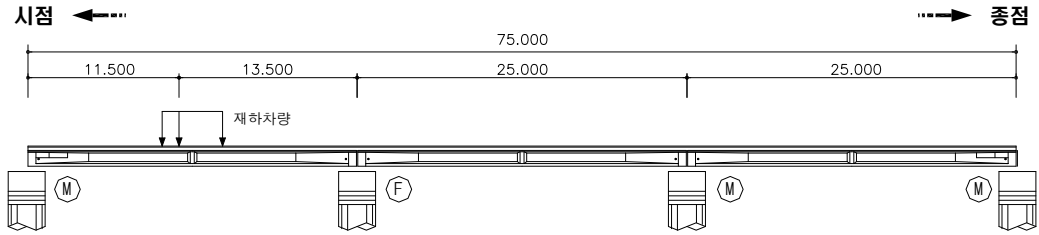
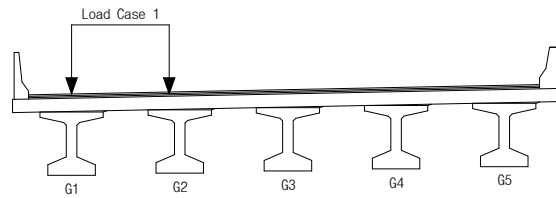


그림 3.78 A교의 재하차량 중량 및 축간거리

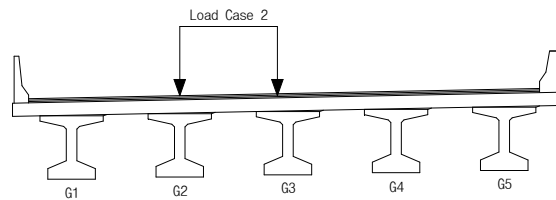


(a) 교축방향 위치

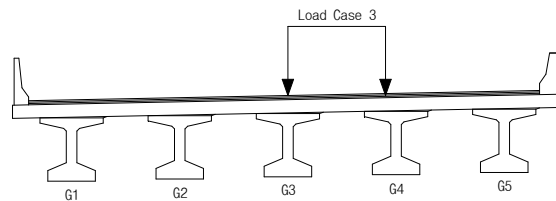
↑ 종점



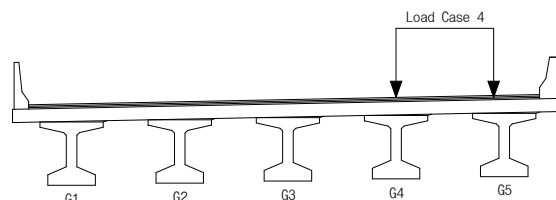
(b) 교축직각방향 위치(Load Case 1)



(c) 교축직각방향 위치(Load Case 2)



(d) 교축직각방향 위치(Load Case 3)



(e) 교축직각방향 위치(Load Case 4)

그림 3.79 A교의 하중경우별 재하위치

4가지의 하중경우에 대한 정적재하실험을 통해 얻어진 응답 중에서 재하차량이 직접 재하되는 위치의 거더에서 측정된 변위 및 변형률을 각각 표 3.39 및 표 3.40에 정리하여 나타내었다.

표 3.39 A교의 정적 변위 측정결과

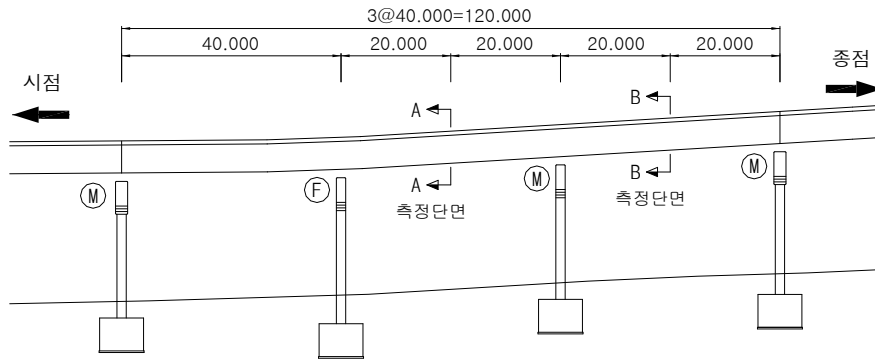
하중경우		실측 변위 (mm)				
		D1	D2	D3	D4	D5
LC 1	#1	1.87	1.34	-	-	-
	#2	1.79	1.32	-	-	-
LC 2	#1	-	1.13	1.04	-	-
	#2	-	1.13	1.04	-	-
LC 3	#1	-	-	1.02	1.08	-
	#2	-	-	1.03	1.10	-
LC 4	#1	-	-	-	1.09	1.25
	#2	-	-	-	1.12	1.24

표 3.40 A교의 정적 변형률 측정결과

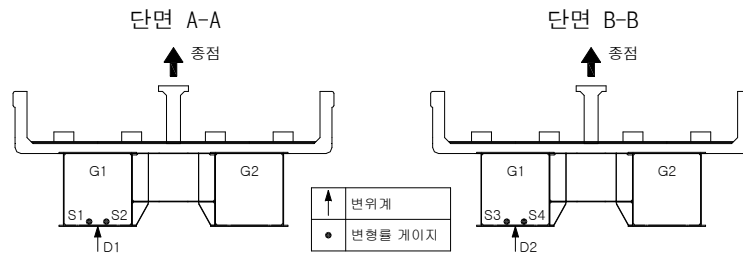
하중경우		실측 변형률 ($\times 10^{-6}$)				
		S1	S2	S3	S4	S5
LC 1	#1	41	27	-	-	-
	#2	37	25	-	-	-
LC 2	#1	-	23	21	-	-
	#2	-	22	22	-	-
LC 3	#1	-	-	21	23	-
	#2	-	-	24	23	-
LC 4	#1	-	-	-	22	28
	#2	-	-	-	26	28

(나) B교의 현장재하실험 및 결과

3경간 연속 강박스 거더교 형식의 B교에 대해 정적 및 동적재하실험을 실시하였다. 재하차량에 의한 정·동적 응답을 측정하기 위해 그림 3.80과 같이 두 번째와 세 번째 경간 중앙부에 변위계 및 변형률 게이지를 부착하였다. 그림 3.80에서 게이지 Id. S2와 S4는 정적 응답만을 측정하기 위한 센서이다. 재하차량은 6량 1편성의 고무차륜형식 경전철 차량이며, 중량 및 축간거리는 그림 3.81과 같다.



(a) 측정단면 위치



(b) 측정단면의 센서 부착 위치

그림 3.80 B교의 센서 부착 현황

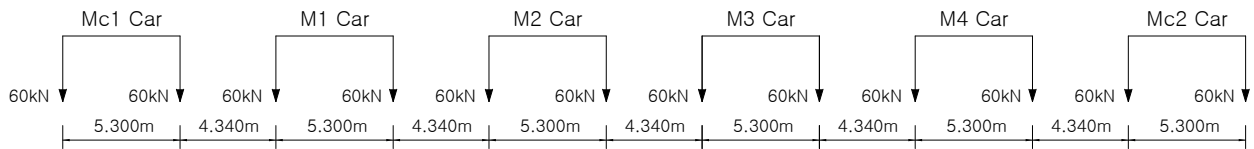
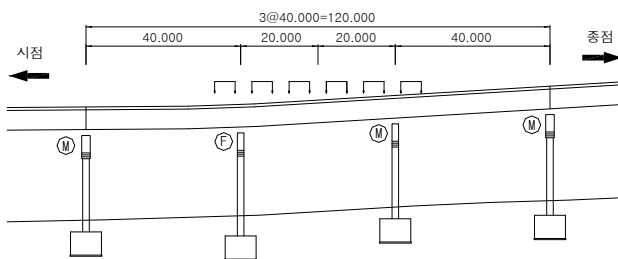
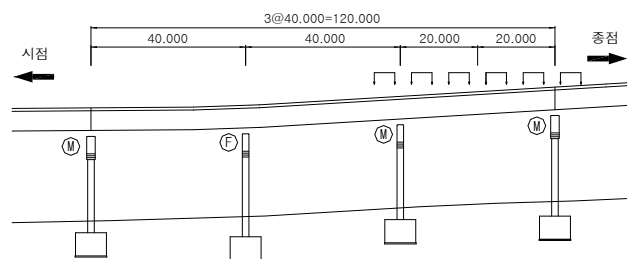


그림 3.81 B교의 재하차량 중량 및 축간거리

정적재하실험은 그림 3.82에 나타난 바와 같이 재하차량의 중심이 각각의 측정단면 위치에 놓이도록 하여 총 2가지의 하중경우에 대해 실시하였다. 한편, 동적재하실험은 재하차량을 종점측에서 시점측으로 주행시켰으며, 주행속도는 50, 60 및 70km/h이다.



(a) Load Case 1



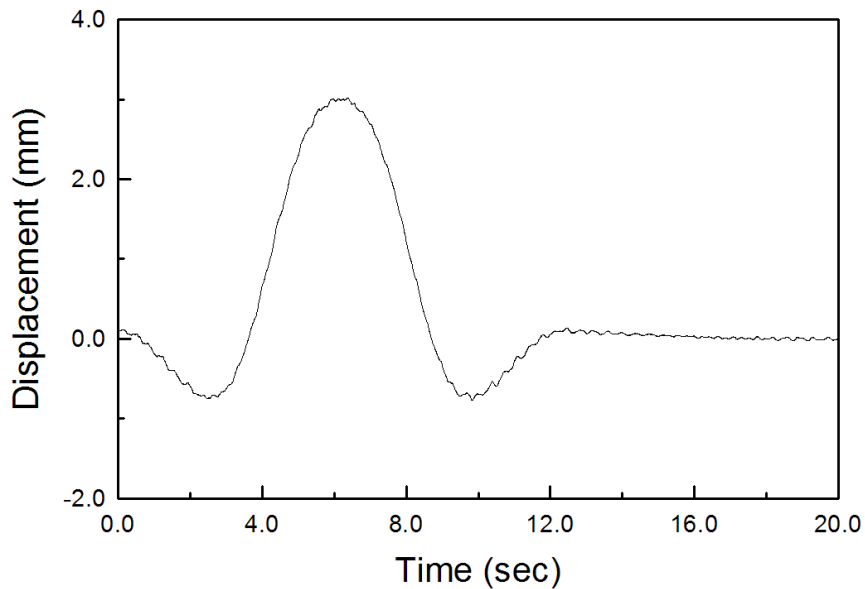
(b) Load Case 2

그림 3.82 B교의 하중경우별 재하위치

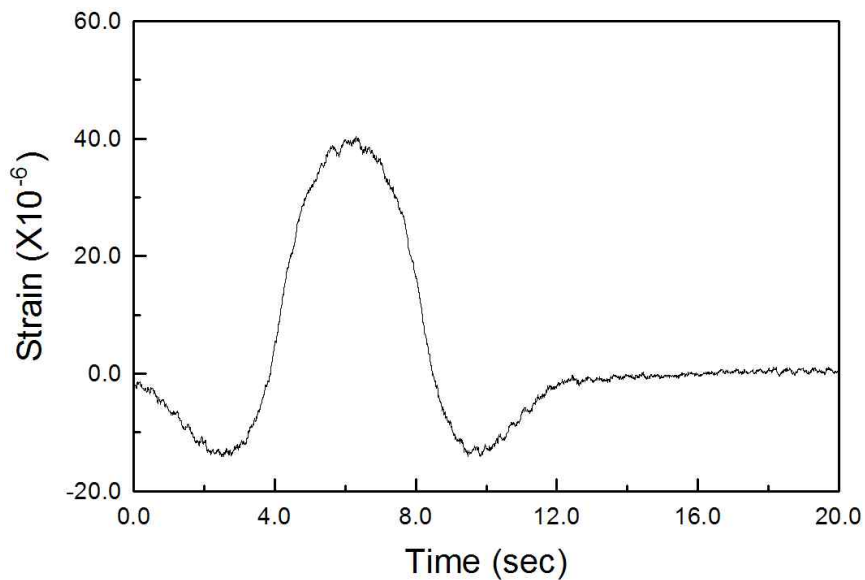
정적재하실험 결과를 표 3.41에 나타내었다. 동적재하실험을 통해 얻어진 변위 및 변형률 시간이력곡선의 일례는 그림 3.83과 같다.

표 3.41 B교의 정적재하실험 결과

하중경우	실측 변위 (mm)		실측 변형률 ($\times 10^{-6}$)			
	D1	D2	S1	S2	S3	S4
LC 1	3.00	-	40	38	-	-
LC 2	-	3.60	-	-	45	46



(a) 변위 시간이력곡선



(b) 변형률 시간이력곡선

그림 3.83 B교의 동적재하실험 결과의 일례(주행속도 50km/h, 중앙경간 중앙부)

(2) A교의 정적 변형률을 이용한 변위 추정

A교의 정적재하실험을 통해 얻어진 정적 변형률로부터 변위를 추정하기 위해 범용 구조해석프로그램인 MIDAS를 이용하여 정적 구조해석을 수행하였다. 정적 구조해석에 사용된 A교의 재료 및 단면특성은 표 3.42 및 표 3.43과 같다.

표 3.42 A교의 재료특성

구 분		재 료 특 성
콘크리트	거더	설계기준강도 40MPa, 탄성계수 $3.00 \times 10^4 \text{MPa}$
	바닥판, 가로보	설계기준강도 27MPa, 탄성계수 $2.67 \times 10^4 \text{MPa}$
PS 강재		규격 SWPC 7B($\phi 15.2 \text{mm} \times 15 \text{EA}$), 탄성계수 $2.0 \times 10^5 \text{MPa}$

표 3.43 A교의 단면특성

구 분		단면적 (m^2)	단면2차모멘트 (m^4)
외측 거더 (G1, G5)	단면 #1	1.5976	0.3109
	단면 #2	1.4562	0.2970
	단면 #3	1.1937	0.2715
	단면 #4	1.0727	0.2598
내측 거더 (G2~G4)	단면 #5	1.5763	0.3055
	단면 #6	1.4348	0.2920
	단면 #7	1.1723	0.2674
	단면 #8	1.0513	0.2562

The diagram illustrates the cross-section of the bridge deck. It shows five girders labeled G1, G2, G3, G4, and G5. The deck width is 24.550m. The spacing between the outer girders G1 and G5 is 2.000m. The section locations are marked as 단면 #1 to 단면 #8. The diagram also shows the dimensions for the deck width (24.550m) and the girder spacing (2.000m).

범용구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2012[27]를 이용하여 A교를 격자구조로 모형화하였다. 4가지의 하중경우에 대한 정적 구조해석을 수행하였으며, 구조해석 결과 중 하중경우 LC 1에 대한 A교의 변위 형상을 그림 3.84에 일례로서 나타내었다.

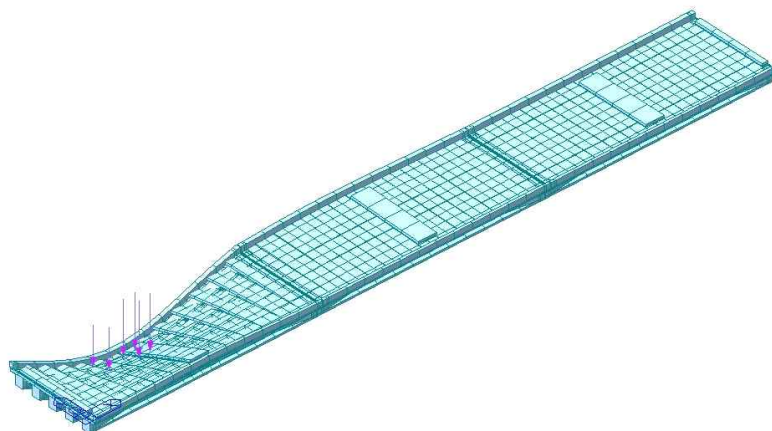


그림 3.84 A교의 정적 구조해석 결과의 일례(하중경우 LC 1, 변위)

A교에 대한 정적 구조해석 결과로부터 산정한 계수 α 는 표 3.44와 같다. 표 3.44의 계수 α 와 실측 변형률을 이용하여 추정한 변위를 실측 변위와 비교하여 표 3.45에 나타내었다. A교의 정적 변위 추정 결과를 나타낸 표 3.45에 의하면 실측 변위에 대한 추정 변위의 편차가 연구목표치인 10%를 약간 초과하는 경우(표 3.45에 음영으로 표현된 부분)도 있으나 평균적으로는 약 5%의 편차를 가지고 추정이 가능하다는 것을 알 수 있다. A교에 대한 정적 변위 추정 결과가 모형실험체에 대한 결과(최대 편차 6% 미만, 평균 편차 4% 미만(표 3.31, 표 3.32 참조))에 비해 다소 정밀도가 저하되는 것으로 나타났는데, 이러한 결과의 원인은 현장제하실험의 실험환경이 열악하여 측정오차가 커질 개연성이 크다는 점 및 구조해석을 위한 구조계의 모형화 과정에서 이상화, 단순화 등을 들 수 있다. 구조해석을 위한 이상화 및 단순화를 논외로 하면, 현장여건이 허락하는 범위 내에서 반복실험을 통해 다수의 측정데이터를 확보하여 변위를 추정하는 것이 추정 정밀도를 향상시킬 수 있는 하나의 방안이라고 판단된다.

표 3.44 A교의 구조해석결과와 계수 α

구 분	하중경우	$\varepsilon_{analyzed}$ ($\times 10^{-6}$)	$\delta_{analyzed}$ (mm)	α ($\times 10^6$ mm)
G1 중앙	LC 1	46.43	2.184	0.04704
G2 중앙	LC 1	28.43	1.565	0.05505
	LC 2	27.31	1.284	0.04702
G3 중앙	LC 2	25.38	1.181	0.04653
	LC 3	25.56	1.188	0.04648
G4 중앙	LC 3	28.57	1.350	0.04725
	LC 4	34.62	1.650	0.04766
G5 중앙	LC 4	46.61	2.217	0.04756

표 3.45 A교의 정적 변위 추정 결과

구 분			α ($\times 10^6$ mm)	실측 변형률 ($\times 10^{-6}$)	실측 변위 (mm)	추정 변위 (mm)	편 차 (%)
G1 중앙	LC 1	#1	0.04704	41	1.87	1.93	3.12
		#2		37	1.79	1.74	2.79
G2 중앙	LC 1	#1	0.05505	27	1.34	1.49	11.19
		#2		25	1.32	1.38	4.55
	LC 2	#1	0.04702	23	1.13	1.08	4.42
		#2		22	1.13	1.03	8.85
G3 중앙	LC 2	#1	0.04653	21	1.04	0.98	5.77
		#2		22	1.04	1.02	1.92
	LC 3	#1	0.04648	21	1.02	0.98	3.92
		#2		24	1.03	1.12	8.74
G4 중앙	LC 3	#1	0.04725	23	1.08	1.09	0.93
		#2		23	1.10	1.09	0.91
	LC 4	#1	0.04766	22	1.09	1.05	3.67
		#2		26	1.12	1.24	10.71
G5 중앙	LC 4	#1	0.04756	28	1.25	1.33	6.40
		#2		28	1.24	1.33	7.26

(3) B교의 정·동적 변형률을 이용한 변위 추정

B교의 현장재하실험을 통해 얻어진 정·동적 변형률로부터 변위를 추정하기 위해 이동하중에 의한 시간이력해석 전용 프로그램[25]을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 정적 변위를 추정하기 위한 구조해석에서는 동적 영향을 배제하고 정적 응답만 산정되도록 하는 옵션(option)을 사용하였다. 시간이력해석에 사용된 B교의 재료 및 단면특성을 표 3.46 및 표 3.47에 나타내었다.

표 3.46 B교의 재료특성

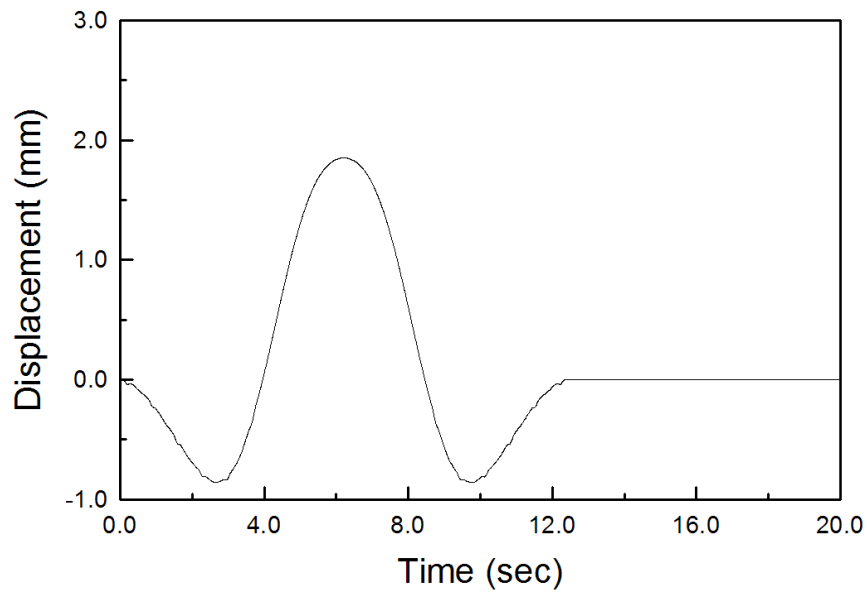
구 분		재료특성
강재	주거더	규격 SM490($F_y=315\text{MPa}$), 탄성계수 $2.05 \times 10^5 \text{MPa}$
	가로보	규격 SM400($F_y=235\text{MPa}$), 탄성계수 $2.05 \times 10^5 \text{MPa}$
콘크리트(바닥판)		설계기준강도 27MPa , 탄성계수 $2.67 \times 10^4 \text{MPa}$

표 3.47 B교의 단면특성

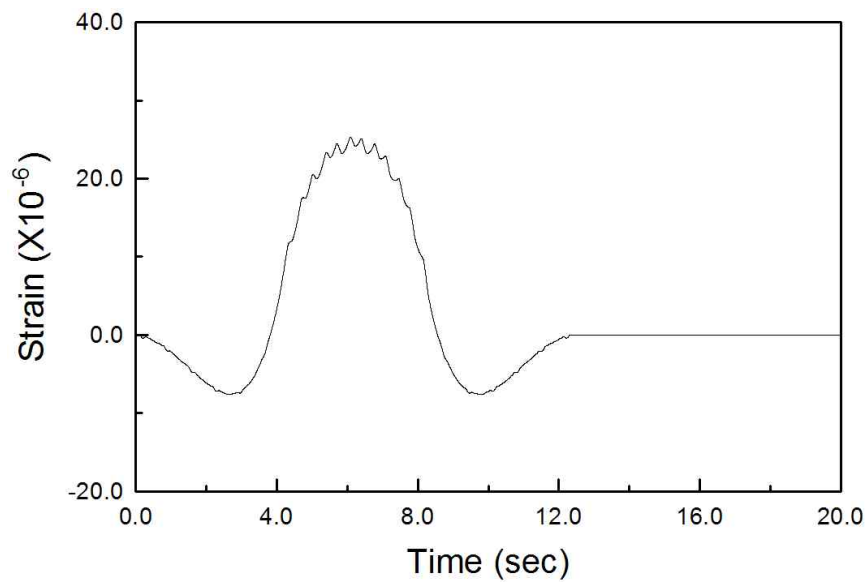
구 분	단면적 (m^2)	단면2차모멘트 (m^4)
단면 #1	0.3765	0.2539
단면 #2	0.3807	0.2672
단면 #3	0.4117	0.3181
단면 #4	0.2654	0.1645
단면 #5	0.2964	0.1971
단면 #6	0.3765	0.2672

B교를 격자구조로 모형화하여 정적 및 동적 시간이력해석을 수행하였으며, 구조해석 결과 중 주행속도 50km/h인 경우의 중앙경간 중앙부의 변위 및 변형률 시간이력곡선을 그림 3.85에 일례로서 나타내었다.

B교에 대한 정적 구조해석 결과로부터 산정한 계수 α 는 표 3.48과 같다. 표 3.48의 계수 α 와 실측 평균 변형률을 이용하여 추정한 변위를 실측 변위와 비교하여 표 3.49에 나타내었다. B교의 정적 변위 추정 결과를 나타낸 표 3.49에 의하면 실측 변위에 대한 추정 변위의 편차가 최대 4% 미만으로서 거의 정확한 추정 결과를 나타내고 있다.



(a) 변위 시간이력곡선



(b) 변형률 시간이력곡선

그림 3.85 B교의 구조해석 결과의 일례(주행속도 50km/h, 중앙경간 중앙부)

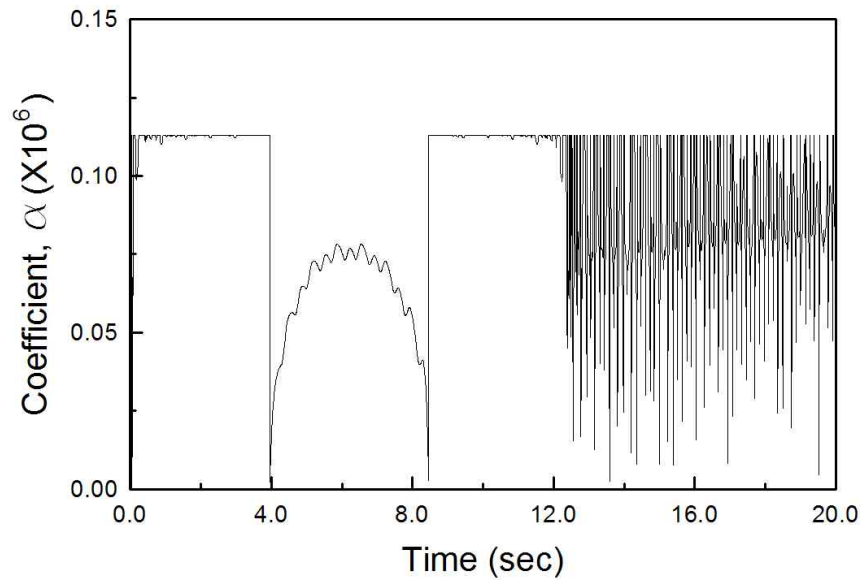
표 3.48 B교의 정적 구조해석결과와 계수 α

구 분	하중경우	M (N · mm)	$\varepsilon_{analyzed}$ ($\times 10^{-6}$)	$\delta_{analyzed}$ (mm)	α ($\times 10^6$ mm)
중앙경간 중앙	LC 1	6.941E7	24.12	1.852	0.07678
측경간 중앙	LC 2	8.722E7	30.31	2.493	0.08225

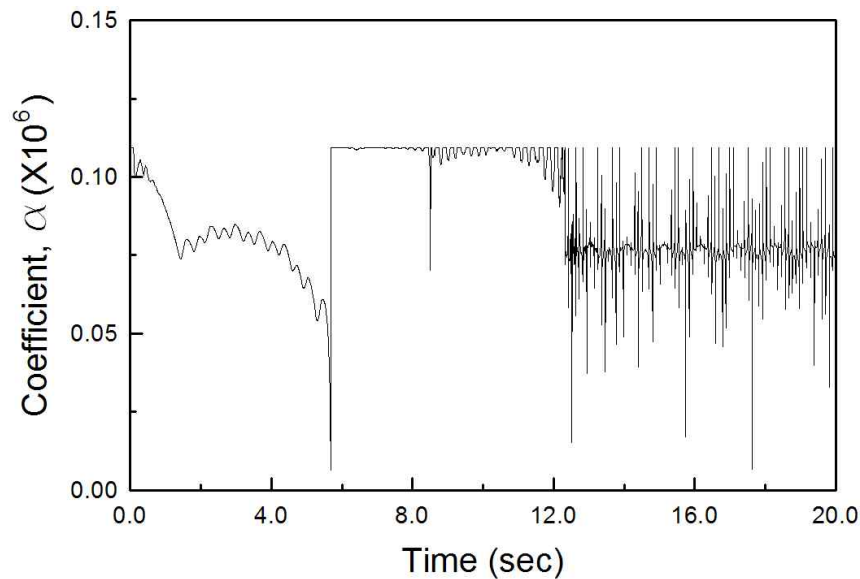
표 3.49 B교의 정적 변위 추정 결과

구 분		α ($\times 10^6\text{mm}$)	실측 평균 변형률 ($\times 10^{-6}$)	실측 변위 (mm)	추정 변위 (mm)	편 차 (%)
중앙경간 중앙	LC 1	0.07678	39.0	3.00	2.99	0.33
측경간 중앙	LC 2	0.08225	45.5	3.60	3.74	3.89

B교에 대한 동적해석 결과를 이용하여 산정한 계수 α 의 일례를 그림 3.86에 나타내었는데, 연속교의 특성으로 인해 일부 위치(그림 3.86(a)의 4.0sec와 8.5sec, 그림 3.86(b)의 5.7sec와 8.5sec)에서 급격한 불연속점이 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 불연속점은 재하차량에 의한 측정대상 위치의 응답이 거의 발생되지 않는 하중상태인 경우에 발생한다. 그림 3.50(c)에 나타낸 연속보 모형 실험체의 계수 α 에 비해 불연속성이 크게 나타나는 이유는 경전철 교량의 특성상 재하차량의 길이가 상당히 길기 때문으로 판단된다. 한편, 주행속도 50, 60 및 70km/h에 대한 실측 변형률 시간이력곡선은 그림 3.87~그림 3.89와 같다.

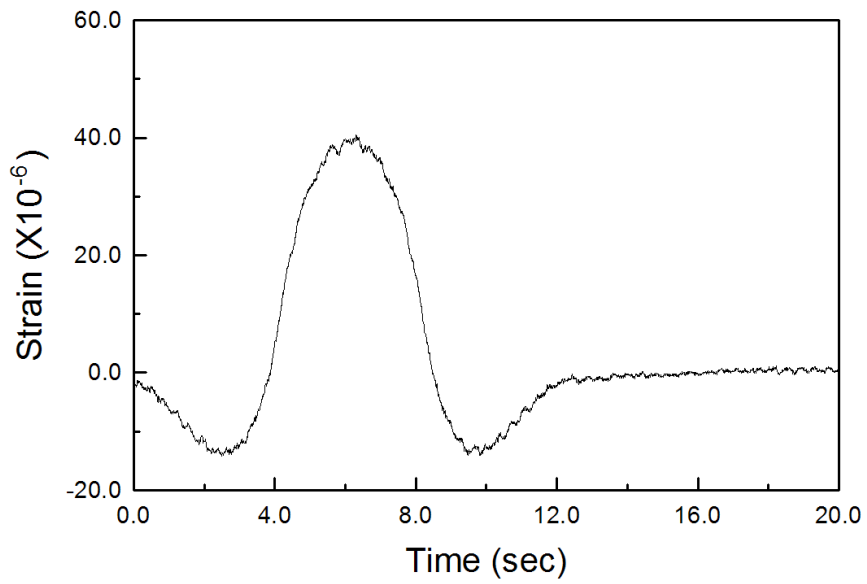


(a) 중앙경간 중앙점

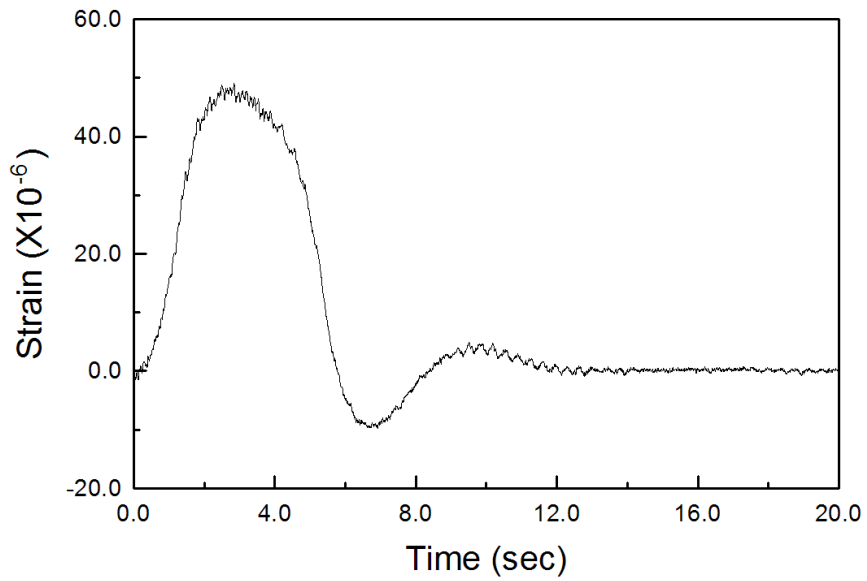


(b) 측경간 중앙점

그림 3.86 B교의 동적해석에 의한 계수 α (주행속도 50km/h)

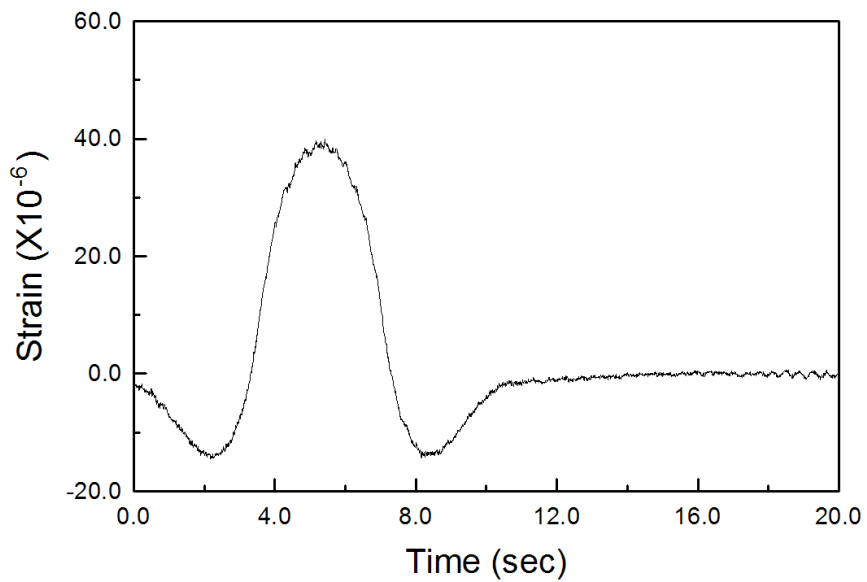


(a) 중앙경간 중앙점



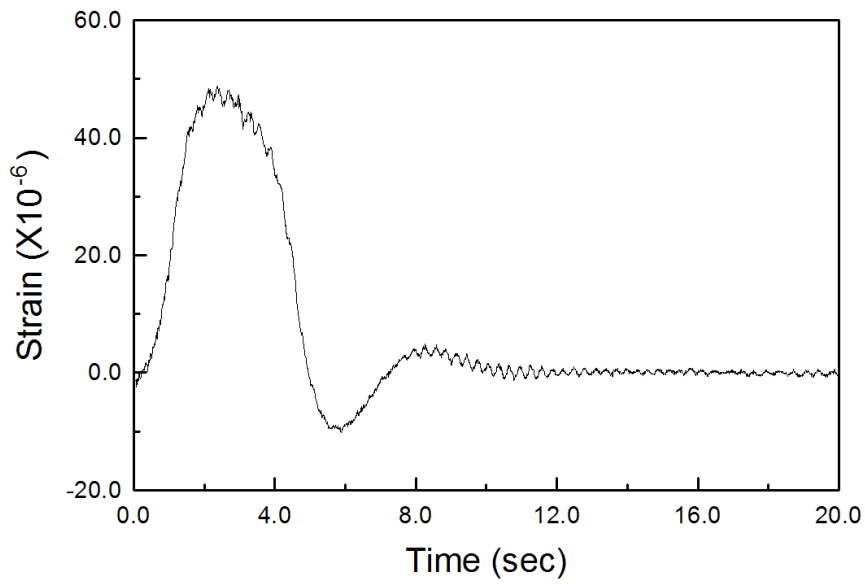
(b) 측경간 중앙점

그림 3.87 B교의 실측 변형률 시간이력곡선(주행속도 50km/h)



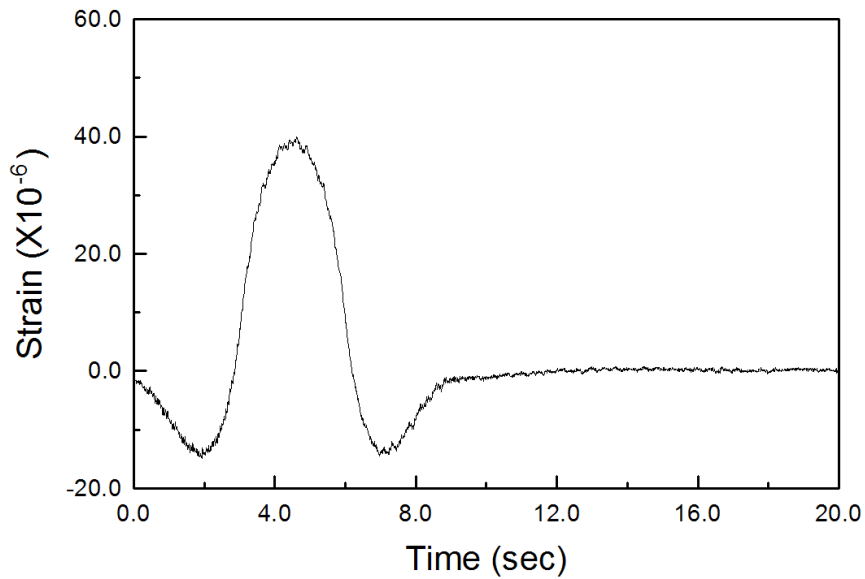
(a) 중앙경간 중앙점

그림 3.88 B교의 실측 변형률 시간이력곡선(주행속도 60km/h)(계속)

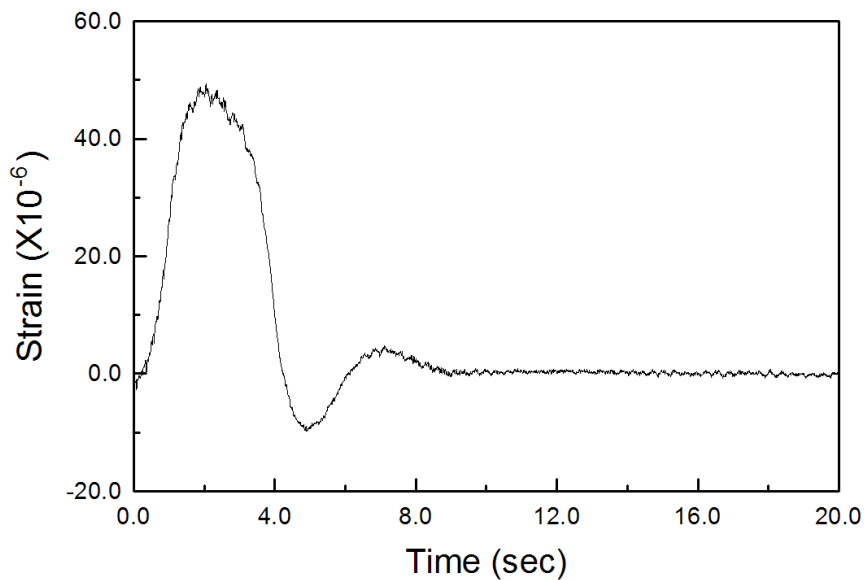


(b) 측경간 중앙점

그림 3.88 B교의 실측 변형률 시간이력곡선(주행속도 60km/h)



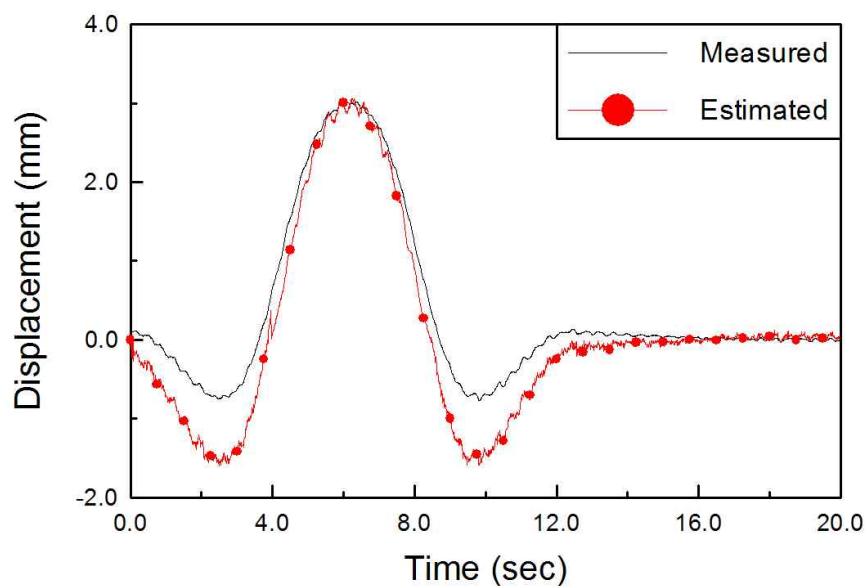
(a) 중앙경간 중앙점



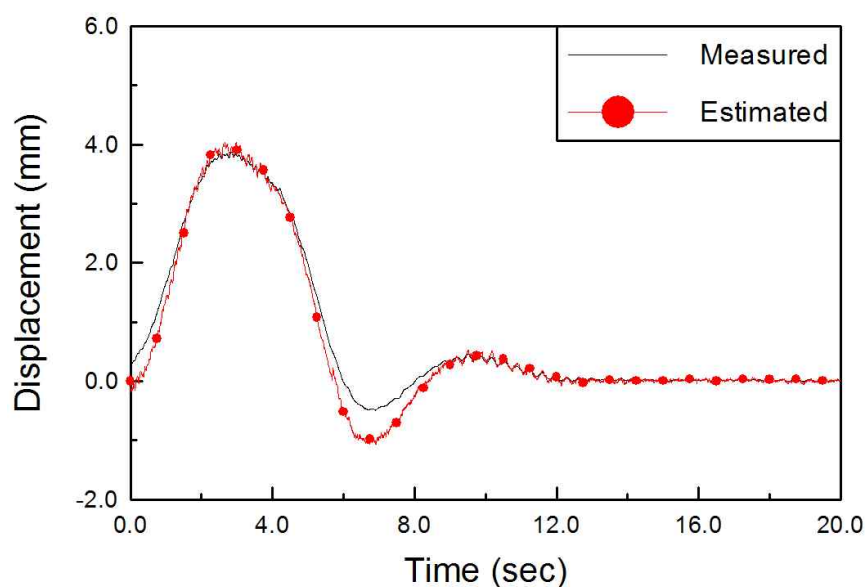
(b) 측경간 중앙점

그림 3.89 B교의 실측 변형률 시간이력곡선(주행속도 70km/h)

동적해석에 의한 계수 α 및 실측 변형률 시간이력곡선으로부터 추정된 변위 시간이력곡선을 실측 변위 시간이력곡선과 비교하여 그림 3.90~그림 3.92에 나타내었다. 또한, 주행속도별 추정 최대 변위와 실측 최대 변위를 표 3.50에 정리하여 나타내었다. 그림 3.90~그림 3.92 및 표 3.50의 주행속도별 변위 추정 결과를 살펴보면 재하차량에 의한 측정대상 위치의 응답이 거의 발생되지 않는 하중상태인 경우(그림 3.86의 불연속점에 해당)에 비정상적인 피크가 형성된다는 점과 재하차량이 측정대상 경간이 아닌 인접 경간에 위치할 때 응답이 과대평가되는 점을 제외하면 대체로 만족할 만한 결과라고 판단된다. 비정상적인 피크가 형성되는 것은 재하차량의 길이가 상당히 길어서 나타나는 현상이므로 연속교의 특성이라기 보다는 경전철 및 철도 교량의 특성으로 간주할 수 있다. 한편, 재하차량이 측정대상 경간이 아닌 인접 경간에 위치할 때 응답이 과대평가되는 것은 1차적으로 구조해석과 관련된 것으로 판단되지만 향후 보다 많은 교량에 대한 현장재하실험을 통해 원인을 분석할 필요가 있다.

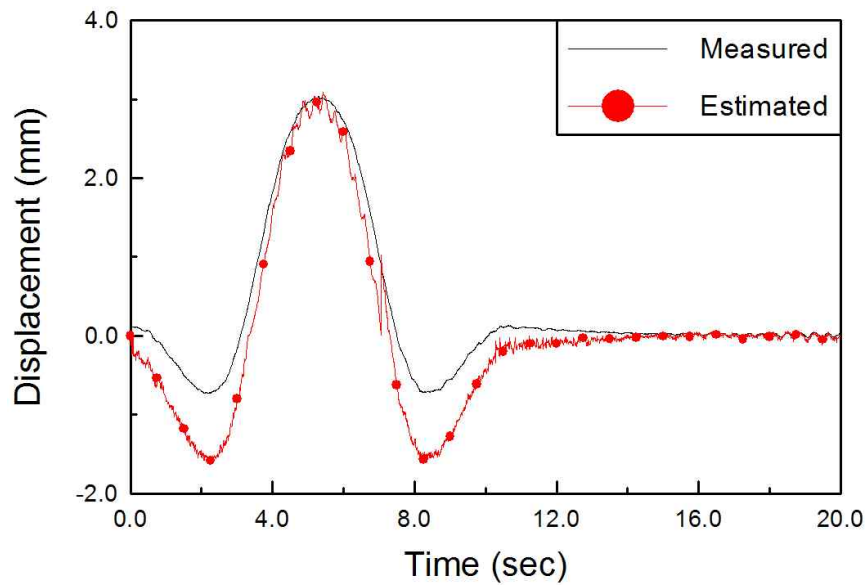


(a) 중앙경간 중앙점

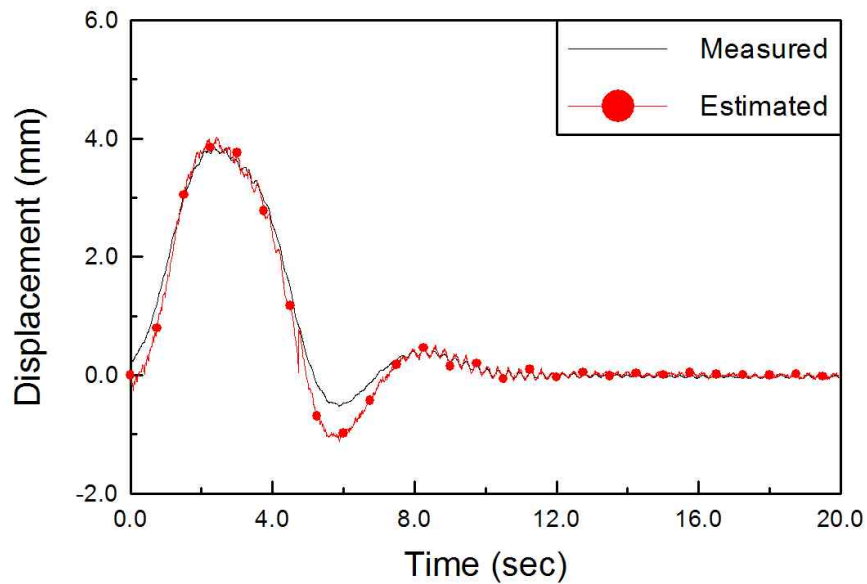


(b) 측경간 중앙점

그림 3.90 B교의 변위 추정 결과(주행속도 50km/h)

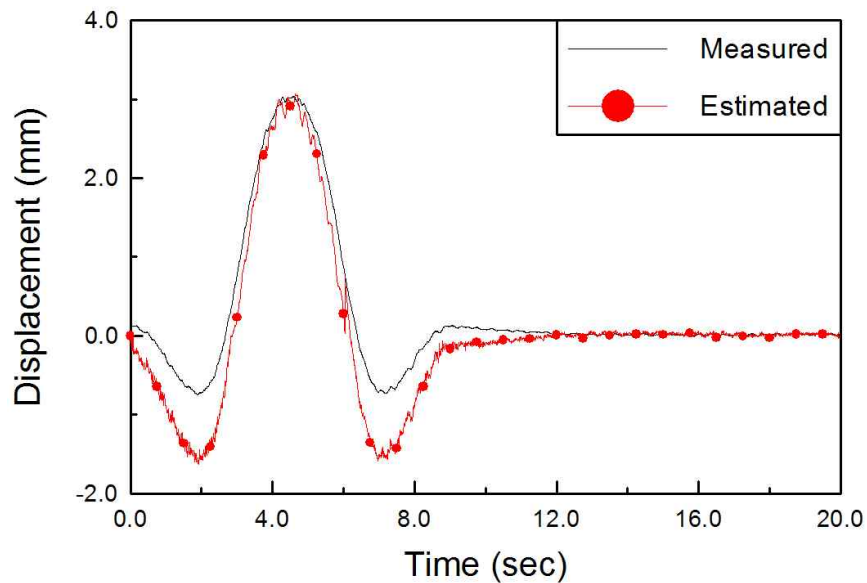


(a) 중앙경간 중앙점



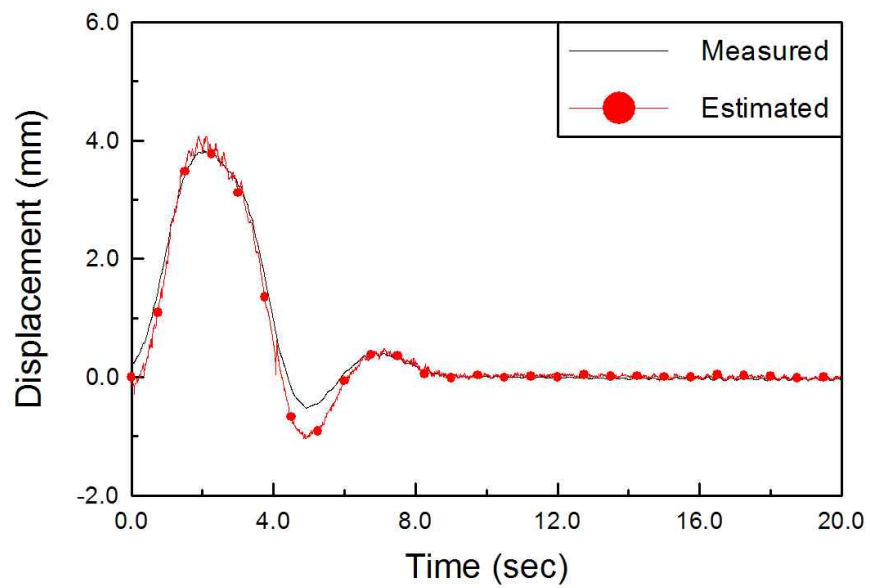
(b) 측경간 중앙점

그림 3.91 B교의 변위 추정 결과(주행속도 60km/h)



(a) 중앙경간 중앙점

그림 3.92 B교의 변위 추정 결과(주행속도 70km/h)(계속)



(b) 측경간 중앙점

그림 3.92 B교의 변위 추정 결과(주행속도 70km/h)

표 3.50 B교의 실측 최대 변위와 추정 최대 변위 비교

구 분		실측 최대 변위 (mm)	추정 최대 변위 (mm)	편 차 (%)
50km/h	중앙경간	3.02	3.06	1.32
	측경간	3.88	4.04	4.12
60km/h	중앙경간	3.04	3.09	1.64
	측경간	3.85	4.02	4.42
70km/h	중앙경간	3.04	3.07	0.99
	측경간	3.83	4.08	6.53

라. 프로그램 개발 및 시작품 제작

(1) 개요

교량 위를 주행하는 차량에 의해 발생하는 속도 성분에는 이동하중의 중량에 의한 저주파 성분과 구조계의 고유진동수에 의한 고주파 성분이 혼재하게 되는데, 이를 동시에 신호처리하여 변위 신호를 구하는 과정에서 속도계 센서의 주파수별 게인(gain)과 위상(phase)에 의한 문제점이 발생하게 된다. 특히 이동하중에 의한 정적 변위 성분에 대한 속도 신호는 매우 미세하며 측정 잡음이 발생하는 경우에는 많은 추정오차가 발생한다. 본 연구에서 개발하고자 하는 프로그램에서는 저주파의 속도 성분의 불확실성을 배제하기 위해 저주파 대역에서는 변형률 신호를 이용하여 이동하중에 의한 정적 성분을 추정한 다음, 속도계의 신호를 이용하여 고유진동에 관한 변위를 구하여 합성하는 방법을 채택하였다(그림 3.69 참조).

(2) 프로그램의 구성

본 프로그램은 DEWESoft[28]와 MATLAB[29]을 기반으로 신호 취득 및 처리가 되도록 작성되었으며, 외부에서 변형률 및 속도 신호를 A/D 변환하여 디지털 데이터(digital data)로 실시간으로 변위를 산정할 수 있도록 하였다. 데이터 sampling rate는 1000Hz를 기본으로 하고, 사용목적에 따라 사용자가 수정할 수 있도록 하였다. 입력은 총 8채널이 가능하고, 본 프로그램의 신호처리 알고리즘은 그림 3.93과 같다.

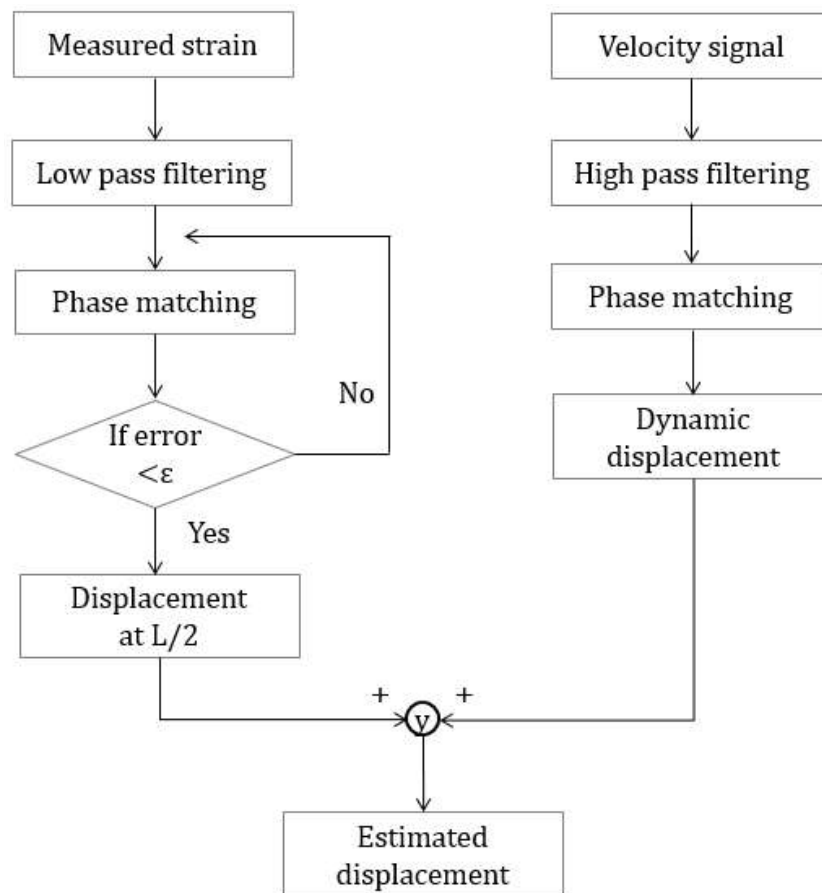


그림 3.93 신호처리 알고리즘

(3) 프로그램의 각 module별 기능

(가) 변형률 신호의 low pass filtering 및 phase matching module

이동하중에 의한 보 중앙점의 정적 변위를 구하기 위하여 변형률과 변위의 관계를 이용하게 되는데, 측정된 변형률 신호에는 보의 고유진동수 성분 및 측정 잡음이 존재하게 된다. 따라서, 이동하중에 의한 보의 정적 변위 성분을 구하기 위하여 low pass filtering을 수행한다. 이 경우 필터의 cut-off는 보의 길이 및 이동하중의 속도에 의해 결정되는데 대개의 경우 1Hz 이하의 저주파로 설정되며, 필요에 따라 필터 창에서 cut-off 값을 조정할 수 있도록 하였다.

digital low pass filtering을 수행하면 필터의 종류와 상관없이 필연적으로 위상차가 발생한다. 그림 3.94와 같이 측정된 변형률 신호와 필터링된 신호 사이에 시간 지연(time delay)이 발생하게 되므로 본 프로그램에서는 이로 인한 시간축 상의 오차를 제거하기 위하여 'shift1'이라는 변수를 설정하였다. 변수 'shift1'에 의해 필터링된 변형률 시간이력곡선은 recurve되어 자동적으로 phase matching이 되도록 하였다. 변수 'shift1'은 수동으로도 입력이 가능하다.

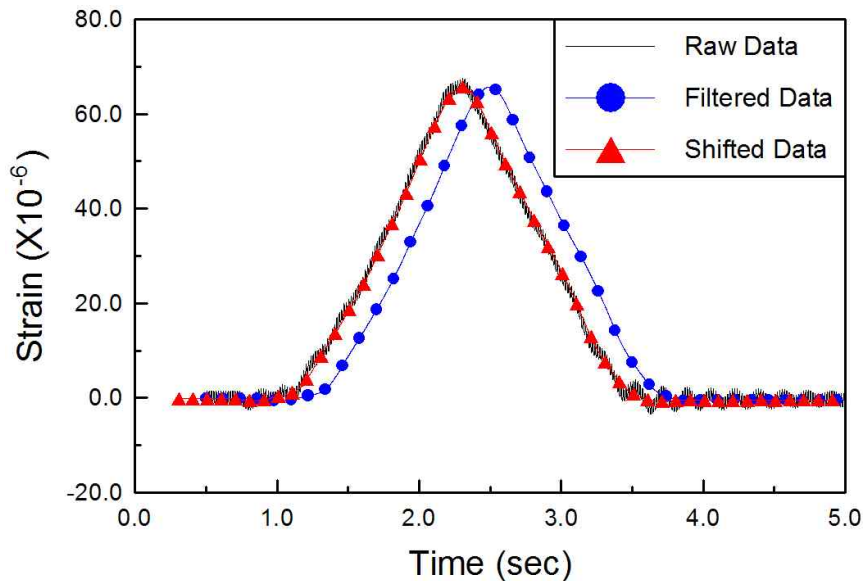


그림 3.94 Low pass filtering에 의한 위상차 및 phase matching

(나) 정적 변위 파형의 산정 module

그림 3.94에 나타낸 신호처리된 변형률 신호를 이용하여 해석적으로 보 중앙점의 변위를 구하기 위해 2축 하중이 휨 강성이 일정한 단순보 위를 주행하는 경우에 대한 변위와 변형률의 관계를 나타내는 식(3.50)을 이용하였다. 보의 전체길이에 걸쳐 휨 강성이 일정하지 않거나 연속보의 경우에는 별도의 구조해석을 통해 외부에서 입력하면 되며, 이러한 작업은 프로그램에 대한 간단한 수정을 거쳐 이루어질 수 있다.

이동하중을 모사한 모형차량이 보에 진입하거나 진출하는 시간을 측정하기 위하여 digital fiber optic 센서를 사용하였다. digital fiber optic 센서의 신호를 trigger 신호로 사용하였으며, trigger된 신호로부터 식(3.50)을 이용하여 정적 변위가 산정되도록 하였다. 그러나, 식(3.50)에 의한 계수 는 이동하중의 주행속도가 일정하다는 가정 하에 해석적으로 계산되는 반면에 실

제의 모형실험에서는 모형차량의 주행속도가 균일하지 않으므로 정적 변위 산정에 오차가 발생할 수 있다. 본 프로그램에서는 이러한 오차를 최소화하기 위해 진입, 진출부의 속도를 별도의 변수로 설정하여 연산토록 하였으며, 최대 정적 변위의 발생점을 맞추기 위하여 'shift 2'라는 변수를 도입하여 curve fitting을 수행하였다. 그림 3.95에 변형률 신호로부터 추정된 정적 변위의 일례를 나타내었다.

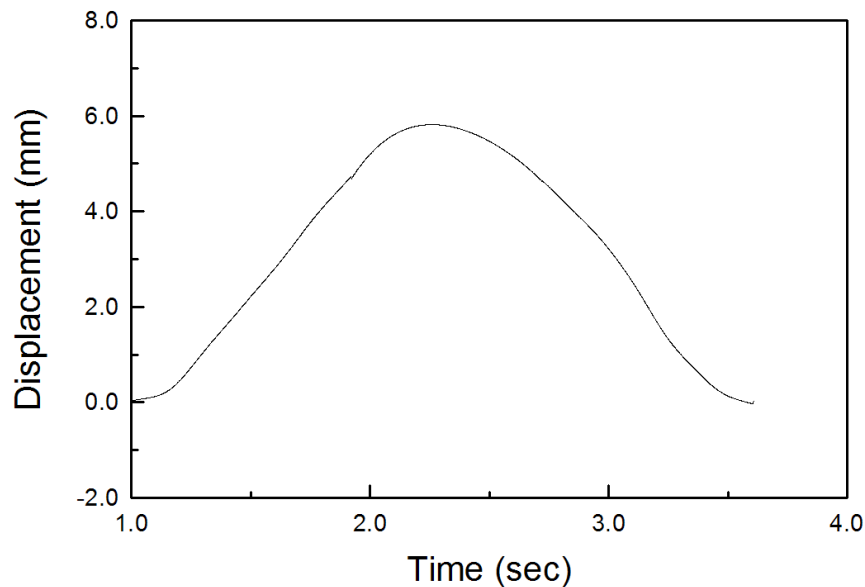
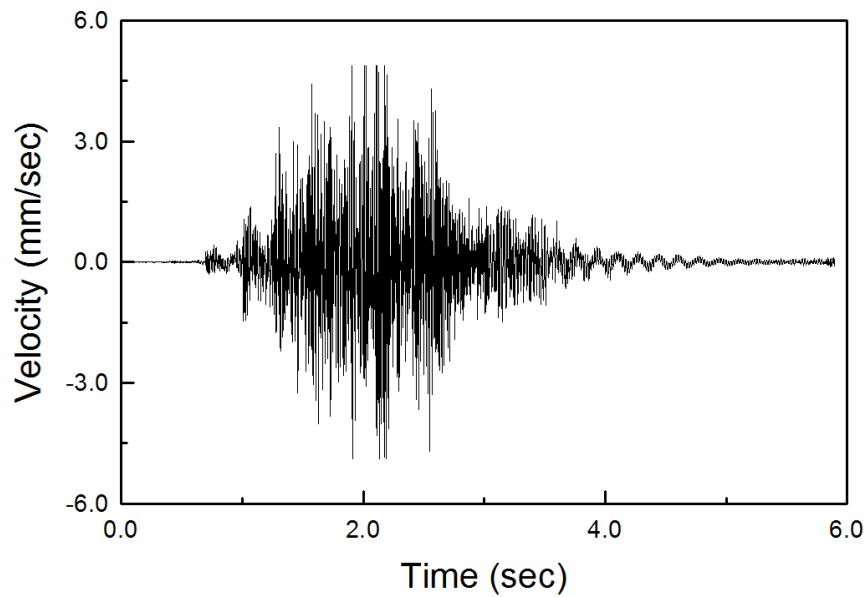


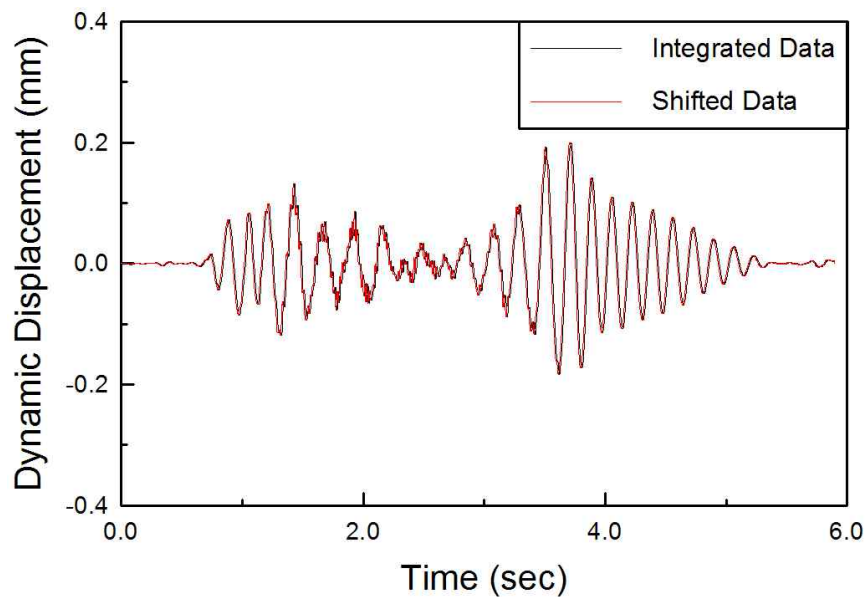
그림 3.95 변형률 신호로부터 추정된 정적 변위의 일례

(다) 속도 신호에 대한 신호처리 module

측정된 속도 신호에는 이동하중에 의한 정적변위의 성분 및 보의 고유진동수와 잡음 등의 동적성분이 혼재해 있다. 이러한 신호에 단일 적분 알고리즘을 적용하면 주파수 대역별 게인 (gain) 및 위상차(phase shift)에 의해 오차가 발생한다. 따라서, 본 프로그램에서는 정적 성분은 변형률 신호로부터 처리하고, 동적 성분은 속도 신호를 high pass filtering하여 적분하였다. 센서의 위상 특성을 고려하여 보의 고유진동수별로 'shift3'이라는 변수를 도입하여 그림 3.96과 같이 속도 신호를 적분하여 동적 변위 파형을 산출하였다. 주파수별 위상 보정은 기본적으로 센서의 성적서에 근거한 위상 정보를 이용할 수도 있고, 보 구조물의 충격실험을 통해 측정된 변위와 속도 관계에서 간접적으로 추출할 수도 있다.



(a) 측정된 속도 신호

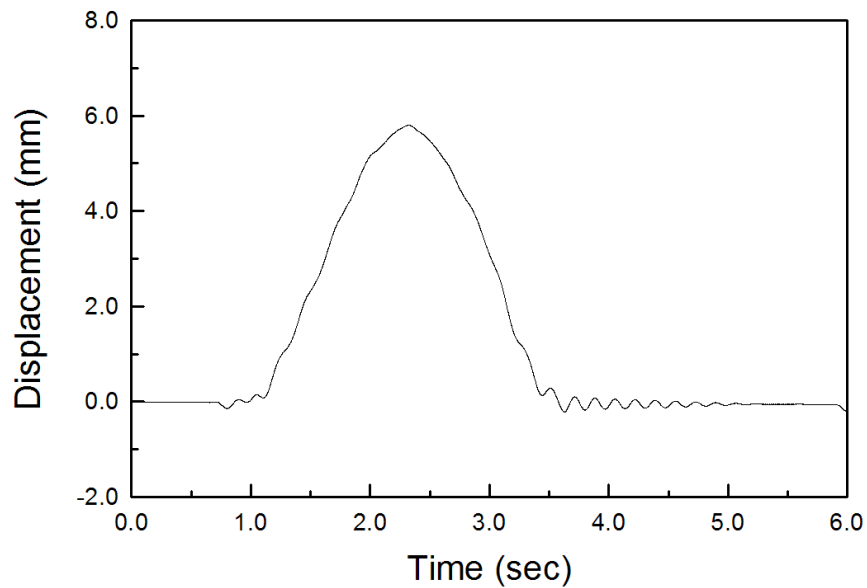


(b) 동적 변위의 위상 보정

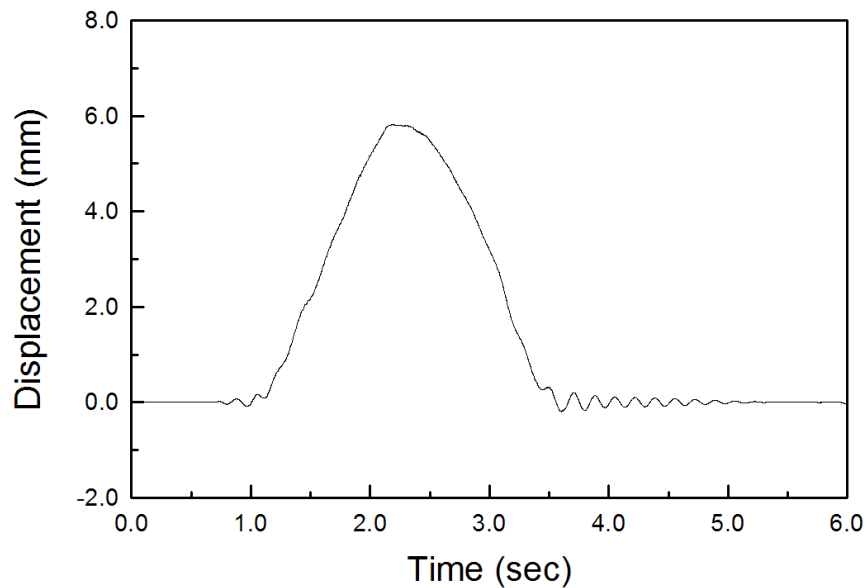
그림 3.96 측정된 속도 신호 및 동적변위의 위상 보정

(라) 변위계의 신호 및 추정된 변위 출력 module

본 프로그램의 기본 기능인 단순보 위를 이동하는 2축의 집중하중에 의해 발생하는 속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정결과에의 정확성을 평가하기 위하여 별도의 변위계를 장착하고, 변위계에 의한 결과와 속도 및 변형률 신호로부터 추정된 결과를 비교할 수 있도록 하였다. 프로그램의 최종 출력으로는 그림 3.97과 같이 변위계로 측정된 보 중앙점의 변위와 속도 및 변형률 신호를 이용하여 추정된 변위가 그림으로 도시된다. 또한, 최대 편차가 화면에서 출력되며, 이동하중의 속도도 진입시와 진출시로 구분하여 출력되도록 하였다.



(a) 실측 변위



(b) 추정 변위

그림 3.97 실측 변위와 추정 변위의 비교

(4) 프로그램 입력 변수 및 내부 변수

속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정 프로그램에 사용된 입력 변수명은 다음과 같다.

- coeff : strain amp의 출력을 변형률 단위로 변환하는 계수
- shift1 : low pass 필터링된 변형률의 위상차(자동설정)
- shift2 : 속도 차이에 의한 변곡점을 없애기 위해 fitting range 설정
(NN-shift2부터 NN+shift2까지)
- shift3 : 동적 적분 변위 dis1의 위상차(사전에 보의 고유진동수에 따라 설정)
- shift4 : 데이터 수의 보정을 위한 변수(약 200 정도)
- N : 총 데이터 수(=fix(max(t)×1000)+1)

- N1 : 차량 진입 시점의 데이터 번호(=1001, 1초 pre time)
- N2 : 차량 진출 시점의 데이터 번호(=N-3000, 3초 post time)
- L : 보의 길이(m)
- y : 보 단면 중립축으로부터의 연단거리(m)

속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정 프로그램에 사용된 내부 변수명은 다음과 같다.

- ost : original raw strain data(V)
- st : filtered raw strain data(V)
- strain : low pass 필터링된 변형률 신호(μ)
- strain1 : shift1만큼 보정된 변형률 신호
- strain2 : strain1에서 N1~N2까지 샘플링된 데이터
- d : strain2로부터 구한 정적 변위(N1~N2 구간)
- dis1 : 속도 신호를 적분한 동적 변위
- dis2 : 동적 변위 dis1에 대해 shift3만큼 위상을 보정한 데이터
- dis3 : 정적 변위와 동적 변위를 합성한 최종 추정 변위(=d+dis2)
- v : 차량의 주행속도(=L/((N2-N1)×0.001))

(5) 시작품 제작

본 연구에서는 속도 및 변형률 신호를 이용한 고정점이 필요없는 변위 계측 시스템을 개발하였으며, 개발 시스템의 상용화를 위한 기초작업으로서 운영프로그램, 데이터 로거 및 센서로 구성된 시작품을 제작하였다. 운영프로그램은 자체적으로 제작한 것으로서 센서 응답의 실시간 모니터링, 신호처리 및 변위 추정 기능 등을 갖는다. 한편, 데이터 로거 및 센서는 기존의 기성품을 활용하여 시작품을 구성하였다. 시작품을 구성하는 요소의 주요 기능 및 사양 등을 표 3.51에 나타내었다.

표 3.51 시작품의 주요 기능 및 사양

구분		모델명	주요 기능 및 사양	제조사
센서	속도계	L-22E	· 속도 신호 측정 · natural frequency : 2Hz · coil resistance : 8540Ω · sensitivity : 149.2V/m/s	Sercel
	변형률 게이지	FLA-5-11	· 변형률 신호 측정 · 변형률 한계 : 5%	TML
	변위계	CDP-25	· 변위 신호 측정 · sensitivity : $500 \times 10^{-6}/\text{mm}$ · 응답주파수 : 8Hz	TML
데이터 로거		DEWE-8024	· 속도, 변형률 및 변위 측정용 PCI A/D board · 채널 수 : 8 · 최대 sampling rate : 1MHz	DEWETRON
운영프로그램		DISPER	· 센서 응답의 실시간 모니터링 · 필터링 등 신호처리 · 속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정	CTC

3. 연구성과 요약

고정점이 필요없는 변위 계측시스템을 개발하기 위해 다양한 수치해석, 실내실험 및 현장실험을 수행하였으며, 이를 통해 얻어진 연구성과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고정점이 필요없는 변위 계측시스템과 관련하여 다음과 같은 변위 추정 알고리즘을 개발하였다.
 - 속도 신호를 이용한 변위 추정 알고리즘
 - 변형률 신호를 이용한 변위 추정 알고리즘
 - 속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정 알고리즘
- (2) 다양한 매개변수에 대한 이동하중해석을 통해 얻어진 속도 신호를 이용하여 변위를 추정한 결과, 해석 변위에 대한 추정 변위의 편차는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나, 모형실험을 통해 얻어진 속도 신호를 이용한 추정결과는 1차 함수 형태의 시프트가 발생 등 실제 측정 변위와는 다른 결과를 나타내었다. 이는 속도 신호를 주파수 영역에서 적분하여 변위를 추정하는 알고리즘 자체의 문제는 아니며, 속도계 센서의 저주파 영역 게인(gain)이 작아 이동하중 문제에서 나타나는 정적 변위에 해당하는 매우 낮은 주파수 성분을 재현하지 못하기 때문으로 판단된다.
- (3) 구조계의 변위와 변형률 관계를 이용하여 측정 변형률로부터 변위를 추정하는 알고리즘을 정·동적 모형실험 결과에 적용하였다. 정적 변형률을 이용하여 정적 변위를 추정한 결과, 실측 변위에 대한 최대 편차는 6% 미만, 평균 편차는 4% 미만으로서 매우 양호한 추정결과를 나타내었다. 동적 변형률로부터 추정된 동적 변위는 최대 변위를 기준으로 최대 편차 10% 미만, 평균 편차 5% 미만으로 나타나 정적 응답 추정결과보다는 정밀도가 다소 저하되지만 본 연구의 목표치인 10%는 만족하였다. 한편, 동적 변형률로부터 추정된 변위 시간이력곡선 중 자유진동 파형의 극히 일부분에서 노이즈 형태의 피크(peak)가 형성되는 경우가 있었으나, 이는 공학적 관점에서 무시할 수 있는 수준으로 판단된다.
- (4) 속도 및 변형률 신호를 동시에 이용하여 변위를 추정하는 알고리즘은 변형률 신호를 이용하여 이동하중에 의한 정적 성분을 추정한 다음, 속도 신호를 적분하여 고유 진동에 관한 변위를 구하여 합성하는 방법이다. 이 알고리즘의 타당성을 검토하기 위해 휨 강성이 일정한 단순보 모형실험체에 대한 실험결과에 적용하였다. 속도 및 변형률 신호로부터 추정된 변위 시간이력곡선에서 미세한 부분적 왜곡이 발생하는 것을 제외하면 전체적으로 추정치와 실측치는 거의 정확히 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 실측 최대 변위에 대한 편차도 2% 미만으로서 매우 양호한 결과를 나타내었다.
- (5) 실교량의 변형률 응답을 이용하여 변위를 추정하기 위해 두 개의 교량에 대한 현장재하실험을 실시하였다. 정적 재하실험에 대한 변위 추정결과는 연구목표치인 10%를 약간 초과하는 경우도 있었으나 평균적으로는 약 5%의 편차를 갖는 것으로 나타났다. 동적 변위의 경우에는 추정된 변위 시간이력곡선의 극히 일부분에서 비정상적인 피크가 형성되는 것과 하중이 인접 경간에 위치할 때 응답이 과대평가되는 점을 제외하면 시간이력곡선의 전체적인 형상 및 최대 변위의 편차(최대 7% 미만, 평균 4% 미만)는 비교적 만족스러운 결과를 나타내었다. 실교량의 응답을 이용한 변위 추정에 대해서는 향후 보다 많은 교량에 대한 현장재하실험을 통해 개발 알고리즘의 타당성 및 적용성을 분석하고 보완할 필요가 있다고 판단된다.

제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

본 연구의 목표 달성도를 표 4.1에 정리하여 나타내었다. 연구목표 중에서 속도 신호를 이용한 변위 추정 알고리즘의 실험적 검증을 제외하면 당초 계획한 연구목표를 모두 달성하였다. 속도 신호만을 이용하는 경우는 변위를 추정하는 알고리즘 자체의 문제는 아니며, 속도계 센서의 저주파 영역 게인(gain)이 작아 이동하중 문제에서 나타나는 정적 변위에 해당하는 매우 낮은 주파수 성분을 재현하지 못하기 때문이다.

표 4.1 연구목표 달성도

연구목표	연구목표 달성 정도	비고
속도 신호를 이용한 변위 계측 알고리즘 개발	- 속도 신호를 이용한 변위 계측 알고리즘 개발 - 주파수 영역에서의 적분을 이용	-
	- 변형률 신호를 이용한 변위 계측 알고리즘 개발 - 구조물의 변위와 변형률의 관계를 이용	추가된 연구내용
	- 속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 계측 알고리즘 개발 - 변형률 신호를 이용하여 이동하중에 의한 정적 성분을 추정한 다음, 속도 신호를 적분하여 고유 진동에 관한 변위를 구하여 합성하는 방법	추가된 연구내용
개발된 변위 계측 알고리즘의 해석적 검증(오차율 10% 이내)	- 다양한 매개변수에 대해 속도 신호를 수치해석적으로 시뮬레이션하고, 이를 이용하여 변위를 추정 - 오차율 1% 미만(측정잡음 혼재 등 비정상적인 상태를 가정하여 해석한 경우는 제외)	-
개발된 변위 계측 알고리즘의 실내 실험을 통한 실험적 검증(편차율 10% 이내)	속도 신호만을 이용하여 변위를 추정하는 경우, 속도계 센서의 저주파 영역 게인(gain)이 작아 정적 변위에 해당하는 매우 낮은 주파수 성분의 재현에 실패	고유진동 성분은 추정 가능
	- 실내실험에 의한 변형률 신호를 이용하여 변위를 추정하였으며, 편차율은 다음과 같음. - 정적 변위 : 최대 편차 6% 미만, 평균 편차 4% 미만 - 동적 변위 : 최대 편차 10% 미만, 평균 편차 5% 미만	-
	- 실내실험에 의한 속도 및 변형률 신호를 동시에 이용하여 변위를 추정하였으며, 편차율은 다음과 같음. - 동적 변위 : 최대 편차 2% 미만, 평균 편차 1% 미만	-
	- 현장실험에 의한 변형률 신호를 이용하여 변위를 추정하였으며, 편차율은 다음과 같음. - 정적 변위 : 최대 편차 12% 미만, 평균 편차 5% 미만 - 동적 변위 : 최대 편차 7% 미만, 평균 편차 4% 미만	반복 실험을 통해 추정 정밀도 향상 가능
개발기술의 사업화를 위한 시작품 제작	- 운영프로그램, 데이터 로거 및 센서로 구성된 시작품을 제작 - 운영프로그램은 주관기관에서 자체적으로 제작 - 데이터 로거 및 센서는 기존의 기성품을 활용하여 시작품을 구성 - 휨 강성이 일정한 단순보 모형실험체에 대한 실험결과에 적용하여 시작품의 정밀도를 검증(최대 편차 2% 미만, 평균 편차 1% 미만)	-

2. 관련 분야 기여도

변위를 직접 측정하지 않고 가속도 등 다른 물리량을 측정한 후, 이를 이용하여 변위를 간접적으로 추정하는 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 정범석 등[8]은 가속도, 속도 및 변위에 대한 변환응답(transformed response)을 주파수영역에서 정의하여 변위를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 응답변환 알고리즘을 실험교량에 적용하여 타당성을 입증하였으나, 변위 추정과정에서 초기시간(자유진동과 무재하 시간영역을 정의하는 변수) 설정에 따른 오차를 최소화시키기 위한 수렴조건을 만족하도록 하기 위해 복잡한 계산과정 및 방대한 계산량이 필요하였다. 윤영균과 유희중[9]은 측정된 가속도를 분석하여 얻어진 진동모드별 고유진동수를 모드중첩법에 적용하여 변위를 추정하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 일반 거더교량에서 분석이 용이치 않은 7차 진동모드까지의 고유진동수를 분석에 고려하였다.

가속도를 이용하여 변위를 추정하기 위해서는 2회의 적분이 필요하며, 이에 따라 적분오차가 누적된다는 점을 고려하여 속도신호로부터 변위를 추정하는 연구가 조성호 등[30]에 의해 시도된 바 있으나, 분석과정에서 속도계의 응답특성에 대한 보정이 필요할 뿐만 아니라 초기조건을 임의로 가정함으로써 추정결과에 다소의 오차가 내재되는 문제가 있었다.

주행차량에 의해 교량에서 발생하는 변위에는 정적 변위에 의한 상당히 낮은 저주파성분이 존재하는데, 이러한 성분은 가속도신호만을 분석하여 도출하기가 용이하지 않다. 정적 변위에 의한 저주파성분을 얻기 위해 가속도와 더불어 변형률 응답을 추가적으로 이용하는 연구[7, 10]가 수행된 바 있다. 신수봉 등[7]은 변형률 응답과 일부 저차 진동모드의 모드형상을 이용하여 모드중첩법과 곡률-변형률 관계로부터 변위를 추정하였다. 비교적 정확한 결과를 도출하기 위해서는 최소 7차 진동모드까지의 응답이 필요하였으며, 이에 따라 변형률 측정 수도 다수가 필요하였다. Bell 등[10]은 변형률과 1차 진동모드만의 응답을 이용하여 변위를 추정하는 개선된 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 해석적 연구에 국한되었으며, 다축 차량이 주행하는 경우에는 다소 발산하는 경향을 나타내었다.

변형률 응답만을 이용하여 변위를 추정하는 연구는 박홍석 등[5], 조남소와 김남식[6]에 의해 수행된 바 있다. 박홍석 등은 곡률-변형률 관계식을 이용하여 2중 적분에 의해 변위를 추정하는 알고리즘을 제안하였으며, 실험교량을 대상으로 제안한 방법의 타당성을 검토하였다. 한편, 조남소와 김남식은 FBG 변형률 센서를 이용하여 현수교의 정적 변위 형상을 추정하였다. 현수교의 처짐이론에 근거한 곡률-변형률 관계를 이용하였는데, 분석에 필요한 여러 변수의 가정치를 도출하기 위해 정밀한 구조해석이 필요하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 대부분의 기존 연구는 가속도 또는 변형률 응답을 주파수영역 또는 시간영역에서의 적분을 통해 변위를 추정하게 되는데, 적분에 의한 오차, 초기조건 가정, 방대한 계산량 및 여러 단계의 분석과정 등의 문제가 있어 연구로서의 가치는 인정되지만 현재까지 실용화된 사례가 없다.

본 연구에서 개발한 고정점이 필요없는 변위 계측시스템은 다음과 같은 두 가지의 알고리즘에 근거한다.

- 변형률 신호를 이용한 변위 추정 알고리즘
- 속도 및 변형률 신호를 이용한 변위 추정 알고리즘

변형률 신호를 이용한 변위 추정 알고리즘은 구조계의 변위와 변형률의 관계를 이용하여 실측 변형률을 변위로 환산한다. 기본적인 구조역학 지식을 이용하여 기본 개념을 도출하고, 해석적 방법을 부가적으로 도입하여 알고리즘을 일반화시켜 누구나 비교적 용이하게 변위를

추정할 수 있는 방법이다. 한편, 속도 및 변형률 신호를 동시에 이용하여 변위를 추정하는 알고리즘은 저주파 대역에서의 속도계 센서 문제점을 해결하기 위해 이동하중에 의한 저주파의 정적 변위 성분은 변형률 신호로부터 추정하고, 구조계의 고유진동에 의한 동적 변위 성분은 속도 신호를 이용하여 추정한 후, 두 성분을 합성하는 방법이다. 고주파 성분만을 갖는 속도 신호는 주파수 영역 또는 시간 영역에서의 적분을 통해 거의 정확히 변위로 변환이 가능하다는 것은 기존 문헌[24, 31]에서도 보고된 바 있다. 이와 같이 비교적 간단한 연산을 통해 변형률 또는 속도/변형률 신호로부터 변위의 추정이 가능하며, 추정 정밀도(실내실험의 최대 편차 10% 미만, 현장실험의 최대 편차 12% 미만)도 비교적 양호하므로 향후 관련 분야의 연구에 기여하는 바가 상당히 크다고 판단된다.

제5장 연구개발성과의 활용 계획

본 연구를 통해 개발된 고정점이 필요없는 변위 계측시스템은 구조계의 변형률 또는 속도/변형률 응답을 이용하여 변위 추정이 가능하다. 실교량의 경우, 변위계를 설치하기 위한 고정점을 확보하기 위해 별도의 작업대 또는 고소작업차 등의 장비가 필요하므로 여타 센서에 비해 설치에 많은 비용 및 시간이 소요된다. 수심이 깊은 하천이나 해상에 가설된 교량, 도로 및 철도를 횡단하는 교량 또는 다리밑 공간이 30m 이상으로 매우 높은 교량 등의 경우에는 고정점 확보 자체가 어려워 측량 등의 대체방안을 강구하거나, 변위 측정을 아예 생략하는 경우도 많다. 따라서, 고정점을 사용하지 않고 변위를 측정할 수 있는 기술은 오래 전부터 실무에서 필요로 해 왔던 기술이지만, 현재까지 상용화된 사례는 없다.

본 연구에서 개발한 기술은 비교적 간단한 연산과정을 거쳐 변형률 또는 속도/변형률 신호를 변위로 환산할 수 있을 뿐만 아니라 실교량에 대한 현장재하실험에서 거의 필수적으로 측정하는 물리량인 변형률을 변위 추정에도 이용할 수 있으므로 본 개발기술의 교량구조물에 대한 활용성은 매우 크다고 말할 수 있다.

철도에 부설되는 침목의 변위는 유지관리 및 열차의 주행안정성을 판단하는데 있어서 중요한 평가기준이지만, 변위계 설치가 용이하지 않아 변위 측정에 어려움이 있다. 고속으로 주행하는 열차하중을 받는 침목은 고주파 성분의 진동이 주를 이루므로 속도 신호를 이용한 변위 추정이 가능하다. 저주파 성분이 제거된 속도 신호는 변위로 환산할 수 있다는 것을 본 연구의 모형실험체에 대한 동적재하실험을 통해 확인한 바 있다. 이와 같이 본 개발기술의 주 활용분야는 교량구조물이며, 철도 침목의 변위 추정에도 적용가능하다.

고정점이 필요없는 변위 계측시스템의 활용계획을 표 5.1에 나타내었다. 개발된 기술의 최종목표는 상용화를 통한 사업화이지만, 현재 모형실험체 및 거더교 형식의 두 개 교량에 대해 실험적으로 검증한 상태이므로 개발기술의 상용화를 위해서는 부분적인 수정 및 보완이 필요한 상태이다. 따라서, 향후 약 3년간 다양한 구조형식의 실교량에 대한 검증, 구조해석프로그램과의 연계 등 시스템을 보완할 계획이다. 개발시스템에 대한 수정, 보완을 완료한 후에 국가기술표준원과 한국산업기술진흥협회에서 주관하는 NET(New Excellent Technology) 신기술 인증을 받고자 한다. 한편, 상용화를 위한 영업활동은 다음과 같다.

- 연구성과발표회, 전문학회 학술대회 및 세미나 등을 통하여 연구성과의 우수성 및 상품성에 대해 적극적인 홍보
- 개발기술 관련 홍보책자 작성 및 배포
- 개발기술 관련 홍보 이메일 발송
- 개발기술 관련 영업전담부서 신설
- 정밀안전진단 전문업체 및 계측 전문업체를 방문하여 개발기술 홍보와 계측관련 업무 컨설팅
- 신설교량 설계시 교량유지관리를 위해 개발기술이 반영되도록 교량설계용역사에 계측시스템설계기술 무상 지원
- 계측센서 및 계측기기의 안정적인 공급과 가격경쟁력 확보를 위해 판매 전문업체와 매매 조건에 대한 계약 체결

표 5.1 개발기술의 활용계획

구분	단계	주요 활동내용	비 고
종료 후 1년	기술 검증 및 보완 단계	· 운영프로그램 보완 · 구조해석프로그램과의 연계 · 연구성과를 이용한 논문 1편 게재 · 실험교량에 대한 현장재하실험 1회	
종료 후 2년	기술 검증 및 보완 단계	· 운영프로그램 보완 · 구조해석프로그램과의 연계 · 개발시스템의 사용자 매뉴얼 작성 · 실험교량에 대한 현장재하실험 2회	
종료 후 3년	기술 검증 및 보완 단계	· 연구성과를 이용한 SCI급 논문 1편 게재 · 실험교량에 대한 현장재하실험 3회	
종료 후 4년	실용화 추진 단계	· 교량 현장재하시험용역 입찰 4회 · NET 신기술 인증 · 개발기술 사업화를 위한 조직 구성 · 홍보 등 영업활동	
종료 후 5년	시장 수용 단계	· 도로교/철도교에 개발기술 적용하여 매출 발생	

제6장 연구과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당사항 없음.

제7장 연구개발성과의 보안등급

해당사항 없음.

제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

해당사항 없음.

제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

본 연구에서는 변형률 또는 속도/변형률 신호를 이용한 변위 추정 알고리즘을 실험적으로 검증하기 위해 모형실험체에 대한 실내실험을 실시하였으며, 대림대학교 메카트로닉스과의 실험실을 이용하였다. 본 연구를 위해 제작된 모형실험체는 비교적 소규모로서 인력으로 운반 및 취급이 가능하여 실험 중 안전사고 발생 개연성은 크지 않으나 만약의 상황을 대비하여 연구실 등의 안전조치에 관한 대림대학교의 규정을 준수하였다.

제10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부	특기 사항
1	논문	속도시간이력을 이용한 변위 추정 알고리즘에 관한 실험적 검증	씨티씨 (주)	100%	한국안전 학회지	0.23	2015. 08	단독 사사	비SCI
2	논문	단순지지 거더교의 실측 변형률 응답을 이용한 변위 추정 방법	씨티씨 (주)	100%	한국구조물 진단유지관리 공학회논문집	0.28	2016. 05	단독 사사	비SCI
3	특허	기설정된 변형률-변위 계수를 이용하여 실측 변형률을 변위로 추정하는 시스템 및 그 방법	씨티씨 (주)	100%	대한민국	-	2015. 10. 30	-	-
4	프로그램	DISPER(디스퍼)	씨티씨 (주)	100%	대한민국	-	2016. 05. 20	-	-

제11장 기타사항

해당사항 없음.

제12장 참고문헌

1. 한경대학교, 3D 스테레오 카메라를 활용한 비접촉식 자동 변위측정시스템 개발, 산학연 공동기술개발 컨소시엄사업, 중소기업청, 2008. 6.
2. 인하대학교, 교량 거동계측에 의한 고속이동하중 추정 알고리즘 개발 및 실험적 검증, 기초연구지원(특정기초), 한국과학재단, 2007. 11.
3. 세종대학교, 다중영상처리기법을 이용한 처짐 및 회전변위계측과 이를 활용한 교량 건전성 평가, 기초연구사업, 교육과학기술부, 2011. 4.
4. 인하대학교, 장거리 변위 감지기 기술 개발, 산학 공동기술개발 지원사업, 중소기업청, 2010. 6.
5. 박홍석, 박기태, 이규완, “측정변형률을 이용한 RC 구조물의 변위 응답 특성분석에 관한 실험적 연구”, 한국구조물진단유지관리공학회논문집, 제5권, 제3호, pp.173-180, 2001. 7.
6. 조남소, 김남식, “FBG 변형률센서를 이용한 현수교의 정적 처짐형상 추정”, 대한토목학회 논문집, 제28권, 제5A호, pp.699-707, 2008. 9.
7. 신수봉, 윤병구, 김재천, “FBG센서를 이용한 교량의 동적변위 추정”, 한국구조물진단유지관리공학회논문집, 제13권, 제3호, pp.101-109, 2009. 5.
8. 정범석, 신길용, 이창무, “교량상부구조의 가속도신호를 이용한 변위응답의 추정”, 대한토목학회논문집, 제21권, 제5A호, pp.677-686, 2001. 9.
9. 윤영균, 유희중, “가속도 계측 자료를 이용한 콘크리트 교량의 처짐 산정”, 한국구조물진단유지관리공학회논문집, 제15권, 제5호, pp.92-100, 2011. 9.
10. M. Bell, T.W. Ma, and N.S. Xu, "Recovering Bridge Deflections from Collocated Acceleration and Strain Measurements", Proceedings of SPIE, Vol.9435, 2015.
11. 김성완, 김남식, “영상처리기법을 이용한 다중 변위응답 측정 알고리즘의 검증”, 대한토목학회논문집, 제30권, 제3A호, pp.297-307, 2010. 5.
12. 조준상, 허영, “일반 점검사진에서 교량의 정적 변위 추출을 위한 영상처리기법”, 대한토목학회논문집, 제31권, 제3A호, pp.173-180, 2011. 5.
13. 서울대학교 산학협력단, “구조물의 측정 진동가속도를 이용하여 동적 변위 및 속도이력을 측정하는 측정방법 및 측정장치”, 대한민국등록특허, 10-0972278, 2010. 7.
14. 한국건설기술연구원, “초기속도 추정 방식을 이용한 변위 결정 장치 및 그 방법”, 대한민국등록특허, 10-0477711, 2005. 3.
15. 현대건설, “변형률 측정을 이용한 장대 교량 구조물의 변위측정방법과, 이를 이용한 장대 교량구조물의 변위측정장치”, 대한민국공개특허, 10-2012-0106038, 2012. 9.
16. 한국과학기술원, “가속도 및 변형률 측정값에 기반한 구조물의 다 지점 변위 추정 방법”, 대한민국공개특허, 10-2015-0004127, 2015. 1.
17. 인하대학교 산학협력단, “구조물 변위 측정 시스템 및 방법”, 대한민국등록특허, 10-1387876, 2014. 4.
18. 전남대학교 산학협력단, “동영상을 이용한 부유 구조물의 변위 측정 시스템 및 방법”, 대한민국등록특허, 10-1480955, 2015. 1.
19. 세안기술, “카메라 이미지를 이용한 진동변위 측정방법”, 대한민국등록특허, 10-1434393, 2014. 8.
20. 한국과학기술원, “구조물 변위 측정 시스템 및 방법”, 대한민국등록특허, 10-1217186, 2012.

12.

21. 창원대학교 산학협력단, “구조물의 동적 변위 측정장치 및 그 방법”, 대한민국등록특허, 10-1488134, 2015. 1.
22. S.D. Stearns, and R.A. David, Signal Processing Algorithms Using Fortran and C, P T R Prentice-Hall, Inc., 1993.
23. R.D. Strum, and D.E. Kirk, Discrete Systems and Digital Signal Processing, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1988.
24. 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版會, 1996.
25. H.H. Lee, J.C. Jeon, and K.S. Kyung, "Determination of a Reasonable Impact Factor for Fatigue Investigation of Simple Steel Plate Girder Railway Bridges", Engineering Structures, Vol.36, pp.316-324, 2012.
26. IMSL Users Manual, International Mathematical and Statistical Libraries, Inc., 1982.
27. MIDAS Civil 2012 Analysis Reference, 마이다스아이티, 2012.
28. DEWESoft User's Manual.
29. MATLAB User's Guide, The MathWorks, Inc..
30. 조성호, 전준창, 황선근, 이희현, “속도시간이력을 이용한 변위 추정 알고리즘에 관한 실험적 검증”, 한국안전학회지, 제30권, 제4호, pp.99-105, 2015. 8.
31. 박창호, 이동근, “주파수영역에서의 가속도 기록 보정”, 대한토목학회논문집, 제12권, 제4호, pp.71-79, 1992. 12.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화 지원사업의 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.