

케이블지지교량의 케이블진동 저감용 댐퍼개발 및 기준연구

2008. 07. 30

주관연구기관 / 케이블텍(주)
협동연구기관 / 현대건설(주)
(주)유신코퍼레이션

Construction & Transportation R&D Report

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “케이블지지교량의 케이블진동 저감용 댐퍼개발 및 기준연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2008. 07. 30

주관연구기관 : 케이블텍(주)
대표이사 변 문 주
협동연구기관 : 현대건설(주)
대표이사 이 종 수
: (주)유신코퍼레이션
대표이사 조 수 원

■ 총괄연구책임자 / 상 무 박 경 준 총괄책임

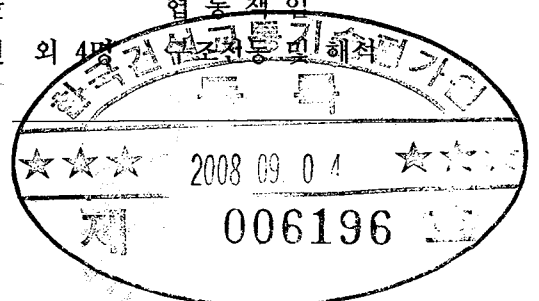
■ 주관연구기관 참여연구원 / 이 사 이 진 수 외 9명 기술개발

■ 협동연구기관 참여연구원 / 상 무 이 명 재 협동책임
/ 이 사 권 호 철 외 6명 설계기준 및 세부기술
/ 책임연구원 정 지 만 협동책임
/ 책임연구원 서 주 원 외 4명 구조기준 및 해석

KICTEP



RPO2602



요 약 문

I. 제 목

케이블지지교량의 케이블진동 저감용 댐퍼개발 및 기준연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

가. 연구개발의 필요성

최근 10년간 우리나라는 영종대교를 시작으로 주경간장 200m급 케이블 교량을 건설하면서 케이블 장대교량의 중흥기를 맞이하게 되었으며, 앞으로도 500m 이상의 긴 경간장을 가진 케이블 교량이 현재 설계 및 시공중이거나 앞으로 건설계획 중에 있어 케이블 장대교량의 수요는 급격하게 증가할 것으로 예상된다. 이처럼 2000년대 들어서면서 우리나라의 케이블 장대교량의 건설이 증가하면서 케이블 진동에 대한 관심이 대두되고 있으며 앞으로 교량의 규모와 기술 양측면 모두에서 수준 높은 교량 건설이 이루어질 것으로 기대된다.

현재 시공완료된 교량이나 시공계획중인 교량들은 대부분 섬과 섬, 혹은 섬과 육지를 연결하는 해상교량으로서 바람에 의해 큰 영향을 받는 케이블 교량이다. 따라서, 설계단계부터 풍동실험 등 내풍 안전성 검토가 필수적이고 특히, 중앙경간 길이가 500m를 넘어서게 되면 바람이 설계 지배인자가 된다.

한편, 바람이 교량 전체에 미치는 영향과는 별도로 케이블 부재 자체는 상시 바람에 의해 끊임없이 진동하면서 케이블 수명단축, 피로파단, 케이블 정착부 파손, 통행자 불안감 조성 등 많은 문제를 야기한다. 주부재인 케이블의 파손 및 파단은 교량 안전에 치명적일 수 있으며, 그에 따른 보수와 교체비용, 교통통제 등 직·간접 피해 비용도 적지 않은 것으로 알려져 있다. 이에 따라 케이블 진동에 대한 피해를 줄이기 위해 케이블 타이 설치, 케이블 표면처리, 케이블 댐퍼설치 등 진동제어를 위한 제진장치를 설치하고 있으며, 이 중에서 성능이 가장 확실하고 미관과 유지관리 측면에서도 선호되는 케이블 댐퍼설치가 가장 많이 사용되고 있다. 따라서, 케이블 댐퍼가 케이블 부재의 설계에 있어서 중요한 요소중의 하나로 인식되어 이에 대한 관심이 대두되고 있으며 케이블 댐퍼 개발 및 관련 제반 기준의 확립은 케이블 제진 대책의 핵심 문제로 국내외적으로 큰 이슈임에 틀림이 없다.

그러나, 아직까지 우리나라 설계기준은 케이블 제진에 대한 명확한 제시 규정이 없으며 적정 시방규정에 근거한 국산 케이블 댐퍼의 상용화가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 또한 현재 사용되고 있는 외국사의 댐퍼는 국내 실정에 맞지 않거나 국내설계기준과 상호검증 과정을 거치지 않고 제작되므로 그 성능이 의심스럽고 기술 해외의존과 자본 해외유출 등의 측면에서도 몹시 우려되고 있다. 따라서, 본 연구를 통하여 케이블 댐퍼의 설계지침과 국산 케이블 댐퍼를 개발한다면 국내 실정에 맞는 케이블 제진에 대한 설계기준을 세워 케이블 댐퍼의 최적 성능 구현을 보장할 수 있게 되며 대부분 수입에 의존하고 있는 해외 케이블 댐퍼에 대한 수입 의존도를 낮추고 장대교량에 대한 효율적이고 체계적인 유지관리를 할 수 있을 것으로 기대된다.

나. 연구개발목표

본 연구는 케이블텍(주), 현대건설(주), (주)유신코퍼레이션 및 서울대학교(위탁기관)의 4개의 산·학·연 공동연구 체제에 의하여 국산 케이블 댐퍼개발을 통한 실용화 및 기준정립을 하고자하는 최종목표를 가지고 있다.

본 연구는 총 3차년도에 걸친 연구기간을 통하여 국산 케이블 댐퍼 및 설계지침개발을 목표로 하고 있다. 1차년도의 연구목표는 케이블 댐퍼 및 설계지침 개발을 위한 기초연구로써 현재 사용중인 국·내외 케이블 댐퍼 및 이에 대한 설계기준 등을 조사·분석하여 케이블 댐퍼 개발을 위한 기본체계를 정립하고자 한다. 2차년도 연구에서는 케이블 댐퍼의 기본체계를 바탕으로 개발하고자 하는 케이블 댐퍼의 시제품을 제작하여 그 성능을 검증하고, 케이블 댐퍼에 적용되는 설계지침에 대한 세부내용의 정립을 목표로 한다. 그리고, 마지막 3차년도 연구에서는 개발된 국산 케이블 댐퍼의 최종 검증 및 현장에의 적용을 통하여 실용화를 할 계획이며 이와 더불어, 이에 적용할 설계지침 제시를 최종 목표로 하고 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구의 연구기간은 2006.12.20 ~ 2009.12.16까지 총 2년 10개월(2차년도 협약전 2개월 공백)이며, 연차별 연구내용 및 범위는 다음과 같다.

1. 연구목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	- 케이블 댐퍼 개발을 위한 기초 연구 - 케이블 댐퍼 설계지침 관련 기초 연구	국, 내외 케이블 댐퍼 관련 조사 및 분석
		기존 국산 댐퍼 성능 평가
		기존 케이블 제진댐퍼 유효성 평가
		케이블 동특성 분석 및 평가
		케이블 고유감쇠비 추정을 위한 알고리즘 개발
		케이블 댐퍼 관련 설계기준 조사 및 분석
2차년도	- 케이블 댐퍼 시제품 제작 - 케이블 댐퍼 개발을 위한 실험 및 해석적 연구 - 케이블 댐퍼 설계 기준관련 상세연구	시제품 고안 및 제작
		케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램 개발 및 실험
		새그를 고려한 케이블 고유진동수의 해석적 산정기법 개발
		케이블 댐퍼 성능별 설치 위치 분석
		케이블 댐퍼 설계법 도출
3차년도	- 케이블 댐퍼 검증 및 실용화 - 케이블 댐퍼 설계지침 개발	시제품에 대한 실내 검증실험
		개발 케이블 댐퍼의 상용화 검증을 위한 현장 실험
		케이블 댐퍼 제작기준 개발
		케이블 댐퍼 시공/품질관리 지침 개발
		케이블 댐퍼 유지관리 지침 개발
		케이블 댐퍼 적용 설계 예제 작성

2. 1차년도

- 연구내용 및 범위

연구 내용	세부 내용 및 범위
국내외 케이블댐퍼 관련 조사 및 분석	• 국내외 개발된 케이블댐퍼 현황조사 • 국내 일반 댐퍼 현황 조사 • 현장조사를 통한 국외 케이블댐퍼의 장단점 연구 • 수동댐퍼의 거동에 관한 문헌조사
케이블 댐퍼관련 설계기준 조사 및 분석	• 케이블 댐퍼관련 해외설계기준 조사 및 분석 • 케이블 댐퍼설계 관련 국내외 연구성과 조사 및 분석
케이블 댐퍼개발 기초연구	• 케이블 댐퍼 개발을 위한 기존 일반 국산 댐퍼의 성능 분석 • 기존 케이블 댐퍼의 성능 평가를 통해 각각의 제진 성능을 비교 분석
설계관련 기초연구	• 케이블의 동특성인 고유감쇠비와 고유진동수를 분석하고 평가하기 위해 실험수행 • 케이블 감쇠비 추정용 프로그램 개발을 효과적으로 하기 위하여 알고리즘을 개발

3. 2차년도

- 연구내용 및 범위

연구 내용	세부 내용 및 범위
케이블 댐퍼 시제품 개발	• 기존 국내 기술을 활용한 케이블 댐퍼를 고안하여 시제품 제작 • 다학제적 연구진에 의한 케이블 댐퍼 고급 기술 개발 및 이에 대한 시제품 제작
케이블 댐퍼 설계관련 해석 및 실험적 연구	• 케이블 감쇠비 추정을 위해 개발된 알고리즘을 이용하여 프로그램 개발 • 프로그램 검증에 위한 비교실험 • 해석적 방법을 이용하여 새그를 고려한 케이블 고유진동수 산정기법 도출
케이블 댐퍼 설계법 도출	• 케이블 댐퍼의 최적 설치위치를 결정하기 위한 합리적인 방안 도출 • 과거 자료를 분석하고, 실험 및 해석적 연구를 수행하여 케이블 댐퍼 설계법 정립
케이블 가진을 위한 가진기 개발	• 케이블 및 댐퍼의 동특성 실험을 위한 케이블 가진기 개발

4. 3차년도

- 연구내용 및 범위

연구 내용	세부 내용 및 범위
케이블 댐퍼의 실용화	• 시제품 실내외 검증 실험 • 개발 케이블 댐퍼의 상용화를 위한 현장적용 • 개발 케이블 댐퍼의 현장 적용성 검토 및 보완
케이블 댐퍼 관련기준 및 지침 개발	• 케이블 댐퍼 적용 설계기준 개발 • 케이블댐퍼의 제작 기준, 시공/품질관리 지침개발 • 케이블댐퍼의 유지관리 지침 개발
설계참고도서 작성	• 실용화 및 설계실무 참고를 위한 설계예제 작성

IV. 연구개발결과

다음은 1,2차년도 연구개발 결과에 대한 내용이다.

- 1차년도

연구목표	세부목표	연구개발결과
케이블 댐퍼 개발을 위한 기초 연구	특허출원(국내외)	기존형식을 응용한 케이블 댐퍼 특허출원 (고감쇠고무댐퍼 : 1건)
	시제품 출시	고감쇠 고무댐퍼 시제품 제작
	번 역	케이블 댐퍼 관련 번역(3건)
	연구시설 고도화	연구시설 업그레이드(PWS케이블 설치)
	주요 연구시설 이용	PWS 케이블 이용
	연구시설 운영여건 구축	운영전반에 관한 전문관리요원 확보 (현대건설 : 2명)
	산학연 강좌	기술 세미나 개최 (AT Center) - 2007. 5. 16
	학술회의 발표논문	한국 소음진동 공학회 춘계학술대회 (5. 10 ~ 5.11) : 1건
	공공 서비스 제공	웹기반 자료 공유 시스템구축 (홈페이지 구축)
케이블 댐퍼 설계지침관련 기초연구	학술지 게재 논문	총 2건 - 대한토목학회 접수완료 : 현재 심사중 - 한국소음진동 공학회 논문집 : 게재 준비중

- 2차년도

연구목표	성과지표	목표치	실적치	성과물 명칭
▪ 케이블 댐퍼 시제품 고안 및 제작	댐퍼 시제품 출시건수	1건	1건	고강쇠 고무댐퍼시제품
	특허출원건수	1건	1건	특허 출원중
▪ 케이블 댐퍼 개발을 위한 실험 및 해석적 연구	실험을 통한 검증	전문가 타당성 확보	-	전문가 타당성 확보 (계획중)
	학술지 게재 논문건수	1건	1건	에너지방정식에 기초한 사장 케이블 기본진동수 추출 (대한토목학회논문집 제28권 제1A호, pp.125~133)
▪ 케이블 댐퍼 설계 기 준관련 상세연구	전문가 타당성 확보	1건	1건	댐퍼도입에 의한 사장 케이 블의 제진설계 (대한토목학회논문집 제28권 제1A호, pp.51~58)
▪ 케이블 고유감쇠비 추 정용 역해석 프로그램 개발	프로그램	1건	1건	케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램
▪ 실규모 케이블 가진을 위한 가진기 개발	가진기	1건	0.5건	2-3차년도에 걸쳐 연구수행

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통하여 개발된 국산화 케이블 댐퍼는 현재 시공중이거나 앞으로 건설계획이 되어 있는 케이블 교량에 모두 적용될 수 있다. 본 연구과제를 바탕으로 용도에 따른 케이블 댐퍼를 여러 종류 개발하게 된다면 현재 시공되어 있는 교량의 케이블 댐퍼를 국산화로 교체할 수 있으며, 이로써 교체 및 유지비용을 현재보다 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 케이블 댐퍼와 더불어 마련된 설계지침은 앞으로 국내에 적용되는 케이블 댐퍼의 설계에 중요한 기초자료로 활용될 것이며 국내 댐퍼 산업에 활기를 불어넣어 교량 뿐만아니라 다른 케이블 구조물에도 소중한 자료로 활용될 것이다.

Summary

I. Title

Standard Research & Damper Development on Cable Vibration of Cable Support Bridge

II. Goals and Needs for Research Development

A. Needs for Research Development

In the decade, Korea revives Cable big bridges construction as building bridges with main span of 200m started from the Yongjong bridge, and actually numerous Cable bridges with spans longer than 500m are in progress and plan to construct, also we expect the demands for them will be rapidly getting higher. With increasing Cable bridges construction, Korea shows more interests on Cable vibration since 2000, and in the future, we look forward to have more bridge constructions with largely advanced technology and scale. Most of bridge construction in progress or completion is marine bridges to connect between islands or a land and a island, and they are Cable bridges affected by wind. So that, wind is the main subject even from design as stormproof safeness is necessary if the middle span is over 500m. On the other hand, by wind, short length of use, exhausted fatigue, damage of Cable stayable part, and passenger's feeling of insecurity are given raised beside wind is affected on bridges. Damage of Cable can be deathblow to bridge safety, and according to the deathblow, costs of replacement and traffic control are known to affect hardly on it.

Accordingly, to minimize the damages occurred by Cable vibration, TMD(tuned mass damper) such as Cable tie, Cable surface treatment , and Cable damper installation etc. is in progress to be constructed, and among them, Cable damper

is most known for its capability, outside beauty and commonly used.

Therefore, Cable damper is recognized as one of the most essential materials for Cable design, and Cable damper development and setting up standard method relating to these are definitely becoming a big issue inside and outside of the world. However, not until now, Korea do not have definite design standard of non-vibrating Cable, and Korea is in the situation where local Cable damper is not able to commercialized based on regulation. Also, foreign company's dampers do not fit to local, and applying foreign dampers is in danger of technology and capital reliance on overseas. They also are in doubt for being capability due to ignore the local design standard. Therefore, through this research if the design guide of Cable and local Cable damper are developed, it makes Cable damper guarantee to maximize for local damper's qualification to minimize the dependences on foreign cable dampers.

B. Goals for Research Development

This research has a final goal to establish the standard and for practical uses through development of local Cable damper by four Cabletek Co.,Ltd, Hyundai Co.,Ltd, Yooshin Corporation & Seoul University (approved center).

This research aims to expand local Cable dampers and to standardize design guide with 3 years investigation in total. For the 1st year, we research and analysis the design standard of local and foreign Cable damper in use for basis study to develop Cable damper and standard. For the 2nd year, we manufacture and probate the capacity of tentative experiment of Cable damper based on the basic standard and be able to detail design guide applied to Cable damper. Additionally, for the 3rd year, we put to practical uses by applying the final verification on field and finally bring up to the design standard.

III. Ranges and Contents of Research Development

The period of this study is December 20, 2006 ~ December 16, 2009 total 2 years and 10 months (2 months are in gap right before 2nd year's agreement), and annual research's ranges and contents are as below.

1. Plan and Content of Research

Year	Research Plan	Main Research Content
1st Year	- Basic study for development of Cable damper - Basic study relating to design standard of Cable damper	Investigate and analysis relating to local and foreign Cable damper
		Evaluate the capacity of current local damper
		Evaluate the effectiveness of current non-vibrating Cable damper
		Evaluate and analysis the dynamic characteristic of Cable
		Develop the algorithms for assumption of Cable damped ratio
		Investigate and analysis relating to Cable damper
2nd Year	- Produce tentative experiment of Cable damper - Analytical study and experiment for Cable damper development - Detail researches relating to the standard of design of Cable damper	Produce design for tentative experiment
		Program development and experiment for backward translation for Cable damped ratio
		develop analytical calculation for vibration rate concerned to Sage
		analysis location of Cable damper for each quality
		Draw method of design of Cable damper
3rd Year	- Test and put Cable damper into practical uses - Develop the standard design for Cable damper	Study indoor probations for tentative experiment
		Field study to testify the developed Cable damper for commercializing
		Develop the standard production of Cable damper
		Develop the manual of control of construction/quality for Cable damper
		Develop the manual of support control for Cable damper
		Write examples of applied design of Cable damper

2. The 1st Year

- Ranges and Contents of Research

Content of Research	Detailed contents and ranges
Analysis and study relating to local and foreign Cable damper	• Survey the Cable damper developed locally and internationally • Investigate the general damper in local • Study advantages and disadvantages of foreign Cable damper through field study • Study literature relating to movement of manual damper
Analysis and study the design standard relating to Cable damper	• Study and analysis the foreign design standard relating to Cable damper • Study and analysis the actual result of local and foreign research relating to Cable damper design
Basic study for Cable damper	• Analysis capacity of existing local damper for Cable damper development • Compare and analysis vibration rate for each Cable damper to evaluate the existing Cable damper
Basic study relating to design	• Performance the study to classify and testify the vibration rate and damped ratio for the dynamic characteristic of Cable • Develop the algorithms to maximize the effect of program of Cable support bridge

3. The 2nd Year

- Ranges and Contents of Research

Content of Research	Detailed contents and ranges
Develop tentative experiment of Cable damper	• Produce tentative experiment designed and applied for existing local technology of Cable damper • Produce tentative experiment and develop advanced technology of Cable damper by interdisciplinary researchers
Experimental study and analysis relating to Cable damper design	• Develop program using the algorithms advanced for Cable support bridge • Compare and study for Program probation • Derive calculation method of Cable vibration rate concerned Sage due to use analytical method
Derive design method of Cable damper	• Deduce rational method for deciding the optimum installation location of Cable damper • Definite design method of Cable damper due to performance analytical study and experiment of past documents
Exciter development for Cable Excitation	• Cable Excitation development for study of dynamic characteristics of Cable and Damper

4. The 3rd Year

– Ranges and Contents of Research

Content of Study	Detailed contents and ranges
For practical use of Cable damper	• Testify tentative experiment indoor and outdoor • Apply in field for practical use of developed Cable damper • Supply and test field capacity of developed Cable damper
Develop the standard relating to Cable damper	• Develop the design standard applying to Cable damper • Develop the standard production and the manual of control of construction/quality for Cable damper ▪ Develop the manual of support control for Cable damper
Draw up reference of drawing	▪ Write examples of applied design of Cable damper for practical use and design

IV. Result of Research Development

- The 1st Year

Research Plan	Detailed Plan	Result of Research Development
Basic study for Cable Damper Development	Patent Application (local and foreign)	Patent Application for Cable damper applied existing form (High damping Rubber damper : 1 case)
	Release of tentative experiment	Produce tentative High damping Rubber damper
	Translation	Translation relating to Cable damper (3cases)
	Maximize study facility	Upgrade study facility (PWS Cable Installation)
	Use the main study facility	Use PWS Cable
	Construct study facility	Ensure professional staff for operation (Hyundai Construction : 2 staffs)
	Lecture for industry and school	Technology Seminar (AT Center) - May 16, 2007
	Science Conference and Presentation	The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Spring scientific competition (May. 10 ~ May.11) : 1 case
	Public Service	Public system service for web-based security (Homepage)
Basic study for design standard of Cable damper	Issue scientific journal	Total 2 cases - applied to Korean society of civil engineer: now it's in progress of reviewing - The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Technology's magazine : now it's printing

- The 2nd Year

Study Goal	Result Index	Goal Aiming	Actual Outcome	Designation of Achievement
Design & Production of Cable Damper Prototype	D a m p e r Prototype	1	1	High-damping Rubber Damper Prototype
	P a t e n t Applied	1	1	Progressing
Analytical Research and Study for Cable Damper Development	Verifying through Study	Confirmed by Expert	-	Confirmed by Expert (planning)
	Publicized Essays	1	1	Normal Vibration Rate Abstraction of Cable-stayed Bridge based on Energy Equation
Detailed Study related to standards of Cable Damper Design	Confirmed by Expert	1	1	Unconstrained Design of Cable-stayed Bridge by applying Damper (pp.51~58, No1A, No. 28 of Korean Society of Civil Engineers Essay)
Development of Inverse Analysis Program for Cable Intrinsic attenuation Rate Assumption)	Program	1	1	Inverse Analysis Program for Cable Intrinsic attenuation Rate Assumption
Exciter Development for Actual sized Cable Excitation	Exciter	1	0.5	Study through 2-3rd year

V. Utilization Plan of result of Research Development

Through this research, the developed local Cable damper is now capable for practical use in fields of Cable bridge in progressing and planning in the future. If several kinds of Cable Dampers are developed by its uses, the cable dampers

already done are switchable with local dampers based on the outcomes of this study, and it reduces in budgets for maintenance and replacement. Also, the achieved design standard of Cable damper will be used as the essential basic data for local Cable dampers in the future. Additionally, all the results from this research will be fundamental materials for all bridge Cables including for all Cable structures.

목 차

제 1 장 서론.....	1
1절 연구개발의 개요	1
2절 연구개발의 중요성	11
제 2 장 국내·외 기술개발 현황.....	18
1절 국내 기술 및 산업동향	18
2절 해외 기술 및 산업동향	26
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과.....	30
1절 연차별 연구목표 및 내용	30
2절 협동과제의 연구개발 목표 및 내용	37
3절 연구대상기술의 개발 가능성	39
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도.....	41
1절 연구목표 및 연구성과	41
2절 연구개발의 목표치 대비 실적치	42
3절 연구개발 주요내용	54
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획.....	85
1절 연구결과의 활용방안	85
2절 연구성과의 기대효과	88
제 6 장 참고 문헌	91

Contents

Chapter 1. Introduction	1
Verse 1. Introduction of Research Development.....	1
Verse 2. Importance of Research Development.....	10
 Chapter 2. Status of Local and International Technology Improvement ..	17
Verse 1. Trend of Local technology and Industry.....	17
Verse 2. Trend of International Technology and Industry.....	24
 Chapter 3. Details & Contents of Study Development Performance	28
Verse 1. Annual Research Plan & Contents.....	28
Verse 2. Plan & Contents of Research Development of Cooperation Task.....	35
Verse 3. Development Possibility of Research Subject Technology.....	36
 Chapter 4. Contribution to Achievement Rate for Research Development	
Plan and Relating Task	38
Verse 1. Research Outcome and Plan.....	38
Verse 2. Compared Actual Results of the Current Year's Research Plan.....	39
Verse 3. Principal Content of the Current Years's Research Development.....	44
Verse 4. Achievement Rate of the Current Year's Study Plan.....	67
 Chapter 5. Practical Use for Study Development Result	69
Verse 1. Program for Practical Use for Study Result.....	69
Verse 2. Expectation Result.....	71
 Chapter 7. References.....	67

제 1 장 서 론

1절. 연구개발의 개요

1. 연구배경

우리나라는 30년전 남해대교를 시작으로 돌산대교, 진도대교를 건설하면서 케이블 장대교량 태동기를 거쳤으며 최근 10년동안 영종대교, 서해대교, 광안대교 등 케이블 교량을 건설하였고, 현재 주경간장 800m로써 국내 최장대 사장교인 인천대교가 시공 중에 있다. 뿐만아니라 주경간장 500m 이상의 여러 사장교와 현수교가 건설계획중에 있으며, 건설 또는 계획중인 아치교까지 포함하면 상당히 많은 수의 케이블 교량을 보유하게 된다. 이로써 우리나라도 규모면에서는 케이블 장대교량 강국의 반열에 다가가고 있다고 볼 수 있으며, 앞으로 더 많은 시공을 바탕으로 교량의 규모와 기술 양측면 모두에서 수준 높은 교량이 건설될 것으로 기대된다.

현재 설계 및 시공 중이거나 앞으로 건설계획중인 케이블 교량은 전라남·북도 해상라인을 중심축으로 하여 상당수에 이를 것으로 전망된다. 대표적인 국가 도로망 계획으로 서남해안 일주도로(국도 77호선) 및 신안, 진도, 완도권, 그리고 여수산업단지 진입도로를 꼽을 수 있다.

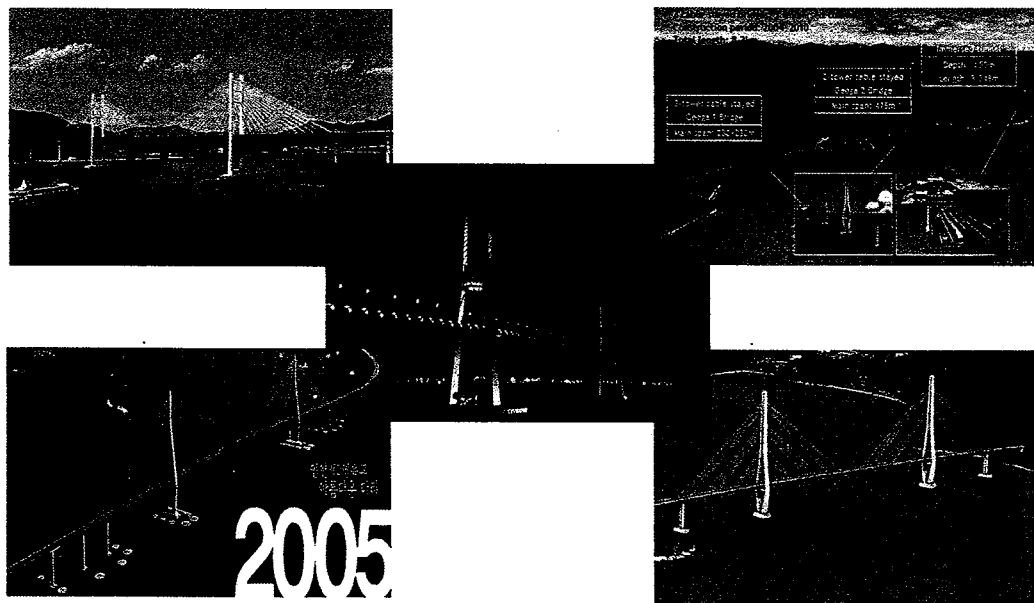


그림 1.1.1 시공·건설계획중인 해상교량

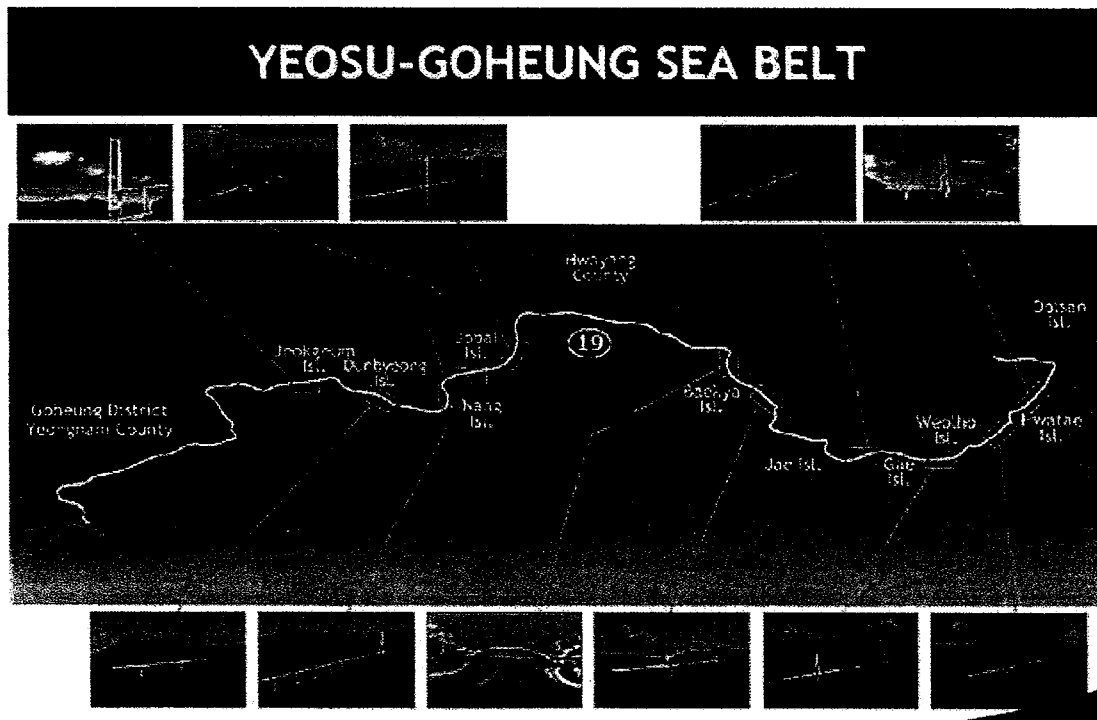


그림 1.1.2 여수-고흥간 특수교량 계획

먼저, 여수-고흥 교량군은 전라남도에서 2002년 국제현상공모를 거쳐 2003년 기본계획을 실시하였으며, 국제 교량 박물관 조성이라는 목표아래 현재 한창 설계 및 시공이 진행 중에 있다.

또한, 다도해가 많은 서남해안에는 약 40개소의 연륙·연도교가 건설 예정에 있으며 이중 70% 이상이 케이블 교량으로 예상된다.



그림 1.1.3 여수산단 진입도로 건설 (사장교 760m, 현수교 1,760m)

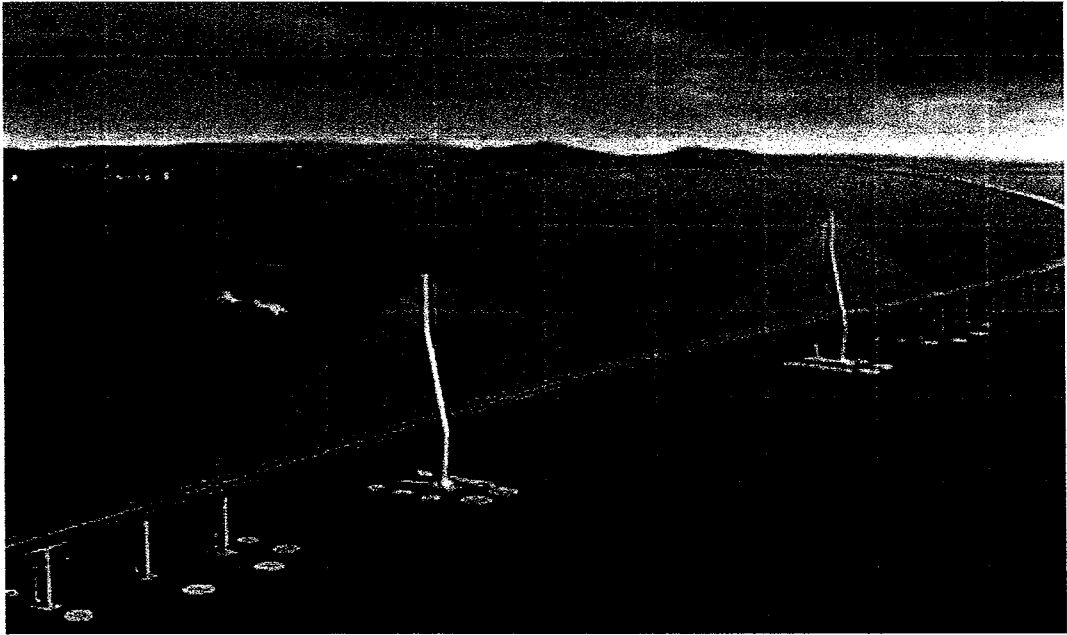


그림 1.1.4 국내 최대 사장교인 인천대교 (주경간장 800m)

그리고, 광양만권 경제자유구역 설비투자여건 개선을 목적으로 한 주변 SOC 확충 계획의 일환으로 여수·광양 산업단지 진입도로가 현재 한창 설계 중에 있다.

이처럼 서남해안에 집중적으로 건설 계획 중인 교량은 대부분 섬과 섬, 혹은 섬과 육지를 연결하는 해상교량으로서 바람에 의해 큰 영향을 받는 케이블 교량이 대부분이다. 게다가 지리적으로 1년 주기 태풍이 가장 많이 내습하는 지역이라 바람에 대한 안전성 및 사용성 확보에 기술적으로 세심한 주의가 필요하다.

2. 케이블 진동 원인 및 피해 양상

케이블 교량은 케이블을 주요 지지부재로 이용하여 중앙경간 길이를 획기적으로 길게 한 교량으로서 경간 길이에 비해 교폭이 작아 바람의 영향에 취약한 구조적 특징이 있다. 따라서, 설계단계부터 풍동실험 등 내풍 안전성 검토가 필수적이고 특히, 중앙경간 길이가 500m를 넘어서게 되면 바람이 설계 지배인자가 된다고 한다.

한편, 바람이 교량 전체에 미치는 영향과는 별도로 케이블 부재 자체는 상시 바람에 의해 끊임없이 진동하면서 케이블 수명단축, 피로파단, 케이블 정착부 파

손, 통행자 불안감 조성 등의 많은 문제를 야기한다. 주부재인 케이블의 파손 및 파단은 교량 안전에 치명적일 수 있으며, 그에 따른 보수와 교체비용, 교통통제 등 직간접 피해 비용도 적지 않은 것으로 알려져 있다.

케이블 진동 종류와 피해양상 그리고 실제 피해사례는 다음과 같다.

표1.1.1 케이블 진동의 원인과 피해양상

진동 종류	원 인	피 해 양 상
풍우진동 (Rain-Wind Vibration)	빗물에 의한 케이블 표면 비대칭이 원인, 특정모드와 lock-in 현상 발생	평상시와 다른 진폭발생 가능 케이블 및 정착부 파손 유발
와류진동 (Vortex Shedding)	낮은 풍속에서 발생하는 고주기, 저진폭 진동	진폭이 제한적이나 케이블 및 정착부 피로문제 유발, 가시설물의 안전 문제 와 작업자의 안전 및 작업 능률문제유 발, 통행자의 심리적 불안감 유발
겔로핑 (Galloping)	케이블 단면의 비대칭성에 의한 자려진동	풍우진동보다 높은 풍속에서 발생하나 일단 발생시 수m의 진폭발생 케이블 및 정착부 파손 유발
웨이크 겔로핑 (Wake Galloping)	인접한 케이블에 의해 발 생된 와류에 의해 가진되 는 진동	케이블 및 정착부 피로 또는 파손 유발
지점가진 공진	차량이나 바람에 의하여 구조물이 진동할 때, 비슷 한 주기를 갖는 케이블에 서 발생	차량이나 바람의 특정 진동 모드와 케 이블의 모드의 lock-in 현상에 의해 발 생하며 케이블 및 정착부 피로문제 유 발

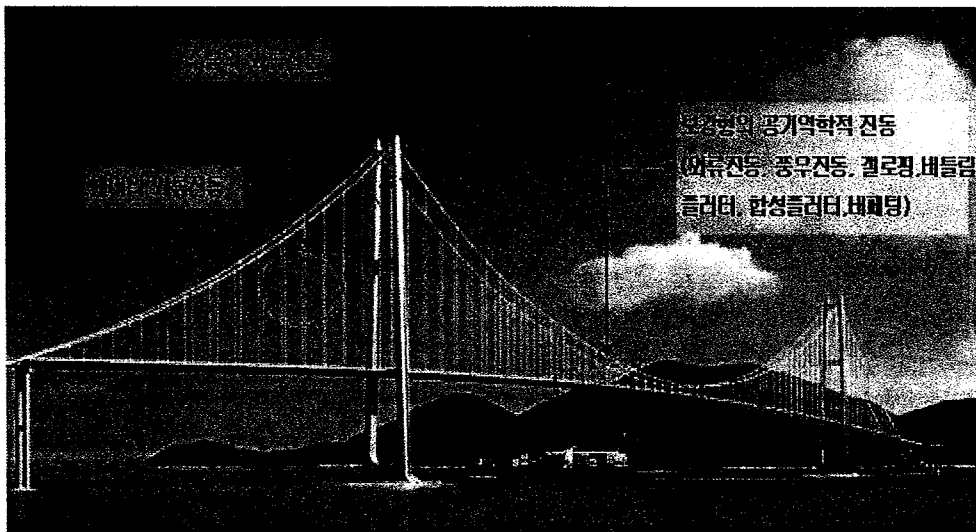
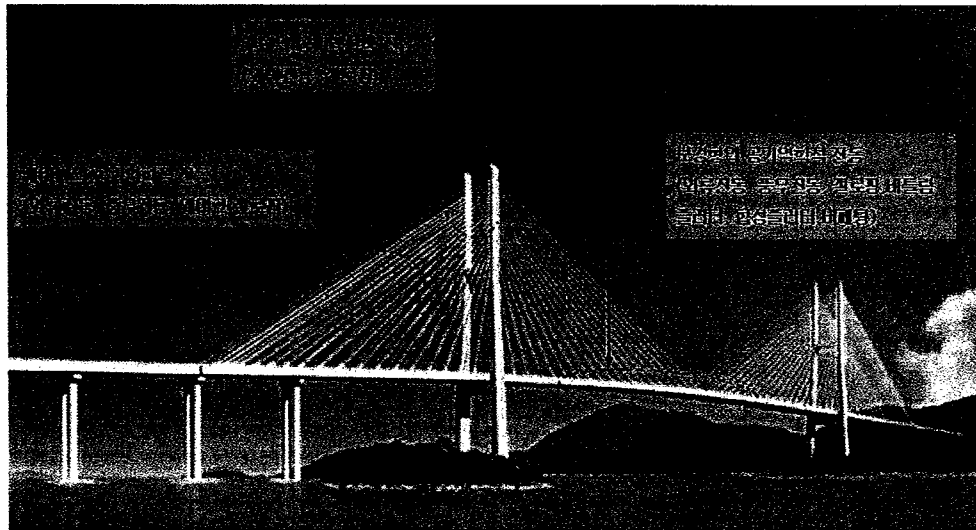


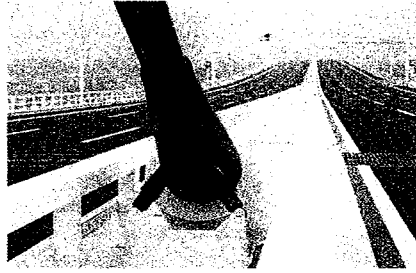
그림 1.1.5 케이블 교량(사장교, 현수교)의 바람에 의한 진동 특성

표1.1.2 케이블 진동에 의한 손상 일례

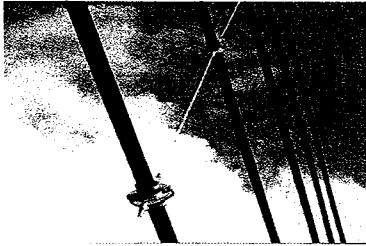
교 량	사 장 교 (독일,1974 준공)	사 장 교 (덴마크-스웨덴, 2000 준공)
경간구성	97.5 + 325.0 + 97.5 = 520.0 m	총연장 7,845m (사장교구간 1,092m)
사고내용	준공 수년후 케이블 부식이 발생되고 일부 케이블 하단 정착부 부근에서 강선 일부가 파단됨(최대 12% 파단)	 과도한 진동에 의한 댐퍼파손
원인분석	케이블 방식상의 결함 등으로 발생한 강선 노치가 부식과 활하중 및 바람에 의한 응력변동의 상호작용으로 인해 강선 취성파단으로 이어짐(진동부식)	부적절한 케이블 진동설계로 인하여 케이블에 과도한 진동이 발생하여 케이블 댐퍼가 심하게 파손됨.
보수내용	▪ 부식방지 개선을 위해 폴리우레탄 피복추가 ▪ 정착부 보강 및 정착부 부근 케이블 충전 ▪ 케이블 진동방지용 댐퍼 설치	진동 재설계에 의한 대규모 댐퍼 교체작업 시행

3. 케이블 제진 대책 현황

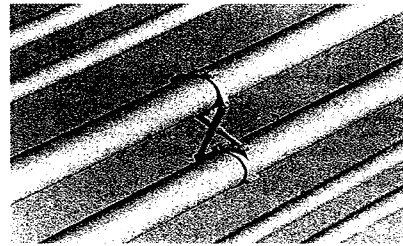
현재까지 주로 인용되고 있는 케이블 교량의 설계기준 및 각종 연구 자료를 종합해보면 일반적으로 길이 80 m이상의 케이블은 바람에 의한 진동이 문제되므로 댐퍼 설치, 케이블 타이 설치, 케이블 표면처리 등을 통해 유해한 진동을 제어하도록 하고 있다. 이에 따라 주경간 길이 180 m 이상의 사장교 대부분과 일부 아치교의 행어 케이블에는 케이블 제진 장치가 필수적이라 할 수 있다.



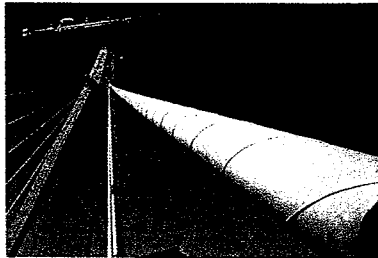
케이블 제진댐퍼



윈드케이블 제진



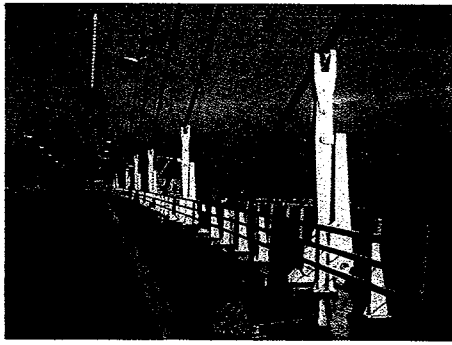
웨이크겔로핑 제어



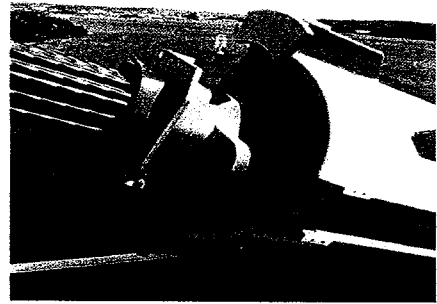
표면처리를 통한 진동제어

그림1.1.6 종류별 케이블 제진 대책

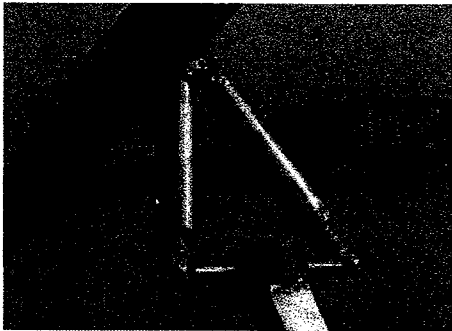
이중 성능이 가장 확실하고 미관과 유지관리 측면에서도 선호되는 방법이 케이블 댐퍼를 사용하는 것이다. 따라서, 장대 케이블 교량 기술의 전제조건이자 케이블 제진 대책의 핵심 기술인 케이블 댐퍼 개발 및 관련 제반 기준의 확립은 국내·외적으로 큰 이슈가 아닐 수 없다. 다음은 국내외에 적용된 대표적인 댐퍼 형식이다.



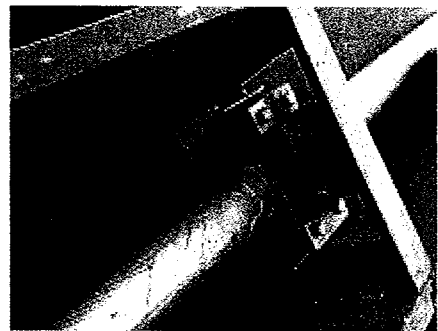
노르망디교(프랑스) 외부 유압식 댐퍼



우데발라(스웨덴) 마찰형 댐퍼



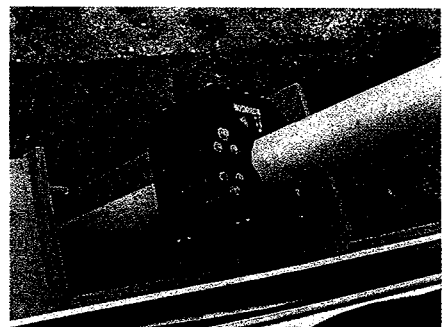
동팅호교(중국) MR 댐퍼



진도대교(한국-현대건설) 고감쇠 고무댐퍼



메가미대교(일본) 고감쇠댐퍼



제2진도대교(한국-현대건설) 탄소성댐퍼

그림 1.1.7 국내·외 케이블 댐퍼 형식

그러나, 아직까지 우리나라 설계기준은 케이블 제진에 대한 명확한 제시 규정이 없으며 적정 시방규정에 근거한 국산 케이블 댐퍼의 상용화가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 또한 학계 및 연구기관의 지속적인 연구가 이루어지고 있고 중·장기적인 연구단의 활동도 있지만 대부분 실용화 기술과는 거리가 먼 것이 현실이다. 지금 이 순간에도 국내 실정에 맞지 않거나 국내설계기준과 상호검증 과정을 거치지 않고 제작된 외국사의 댐퍼를 국내 기술진에 의한 기술적 검토 없이 단순 도입하여 설치하고

있어 그 성능이 의심스럽고 기술 해외의존과 자본 해외유출 등의 측면에서도 몹시 우려되고 있다.

4. 국산 상용 케이블 댐퍼 개발 방향

이에 케이블텍(주), (주)유신코퍼레이션, 현대건설(주)의 연구 컨소시엄은 케이블 교량에 대한 전반적인 이해와 설계·시공경험, 케이블 진동과 감쇠에 대한 이론 및 실험적 경험, 그리고 그동안의 지속적인 관심과 열의를 바탕으로 실용화할 수 있는 기술개발이란 목표 아래 다음과 같이 연구개발 방향을 정하였다.

가. 현재 케이블 교량에 적용되는 케이블 댐퍼는 모두 외국산 제품으로 설계 철학, 시공조건, 풍환경 및 유지관리 전반에 걸쳐 상이한 조건에 대해 품질을 확보하지 못하고 있는 바, 국내 여건을 감안한 한국형 케이블 댐퍼를 개발하여 추후 유지관리시 보수·보강이 편리하며 장치조달이 용이한 시스템을 구축할 것이다. 이를 통해 부수적으로 기술자립화와 수입대체효과를 기대할 수 있다.

나. 국내의 건설규정에 있어 케이블 댐퍼의 성능을 평가할 수 있는 시방규정과 설계에 반영하기 위한 성능사양의 제시가 필요하다. 이를 위해 케이블 댐퍼 개발 시제품에 대해 길이 및 단면치수를 파라미터로 하는 성능실험을 실내, 실외에서 수행하여 장치표준시방서를 작성하고 이를 국내 품질인증기관의 인정을 득할 것이다.

다. 케이블교량 설계시 바람에 의한 진동을 제어하는 설계기준이 아직 제시되어 있지 않아 관용적으로 국외규정들을 일부 혼용 적용하여 일관성이 결여된 설계를 수행하고 있는 점을 감안하여, 그간 시공시 발견되었던 문제점을 토대로 합리적인 설계지침을 제시할 것이다. 국산 케이블 댐퍼 개발이 하드웨어적 기술이라고 한다면 이에 대한 설계지침 마련은 소프트웨어적 기술로서 댐퍼의 최적 성능 구현을 보장할 것이다.

라. 현재 우리나라에서 건설되는 중·장대 케이블 지지 교량의 시공은 케이블텍(주)을 제외하고는 모두 외국계 기업이 전문적으로 활동하고 있으며 케이블 댐퍼에 대한 핵심기술과 제품은 모두 이들 기업이 전량 독점하고 있어 기술자립화 및 국산화를 통한 수입대체가 절실한 실정이다. 따라서, 본 연구에서 중·소규모 케이블 지지교량용 케이블 댐퍼(고무댐퍼)와 중·장대 케이블 지지교량용 케이블

댐퍼(가스 또는 마찰댐퍼) 개발을 목적으로 국산화 양산에 최종목표를 둔다. 이에 따라 본 연구를 통하여 개발된 제품은 현재 건설중인 몇몇 케이블 지지교량(최소 2개소)에 적용함으로써 짧은 시일내에 그 효과를 기대할 수 있으리라 전망된다.

2절. 연구개발의 중요성

1. 기술적 측면

가. 제반 지방 규정이 명확한 케이블 댐퍼의 개발

(1) 심각한 기술 해외의존 탈피

국내 건설분야 R&D는 2004년도 기준 국가전체 R&D 예산의 1.2%에 불과하여 과기부나 산자부의 6% 수준에 그칠 뿐만 아니라, 연구개발주체도 대학이나 연구소에 편중되어 실용화·산업화와는 거리가 멀고 그 결과 민간부분의 연구개발 투자는 제조업이나 농림수산업에도 미치지 못하는 수준에 있다. 이러한 현상은 기술개발과 수익창출의 연결고리가 약하다는 산업구조적인 특성에 기인한 바가 크지만, 장기적으로는 국제경쟁력 확보에 적신호가 아닐 수 없다.

케이블 댐퍼는 이러한 국내상황을 대표적으로 반영한다고 볼 수 있는데, 케이블 진동에 대한 이론과 설계능력은 대학과 연구소 주도로 상당수준에 이르렀으나 이를 실용화 기술로 연결시킨 실적은 거의 전무하여 거의 대부분 외국제품이 시공 반영되어 댐퍼에 대한 기술적 노하우 확보가 요원한 상황이다.

(2) 선결 기술력 확보에 대한 지속적인 요구

케이블 진동대책은 장대교량의 내풍기술의 일환으로서 초장대 교량 현실화의 선결 기술과제이므로 지금의 교량 장대화 경향으로 볼 때 그에 상응하는 기술적인 요구는 더욱 높아 가리라 판단된다. 따라서, 선진국과의 기술격차를 줄이고 독자적인 기술력 확보를 위해서는 우선 중장대 교량의 제진 기술에 대한 노하우 확보가 시급하다.

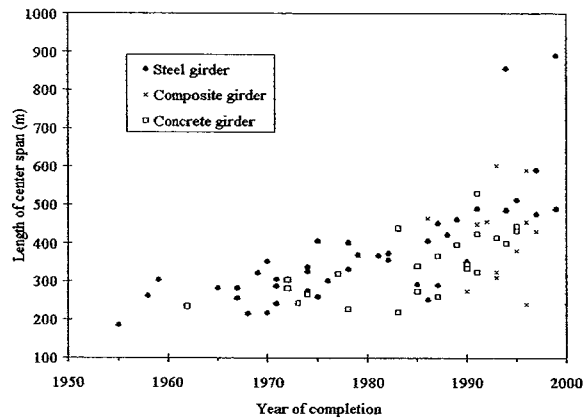


그림 1.2.1 사장교 주경간 길이 증가추세

(3) 국내 기술개발 여건의 개선

국내 케이블 댐퍼 개발 여건을 보면 제어하고자 하는 케이블 진동의 종류와 크기, 설치위치 등에 대하여 설계적 한계, 댐퍼성능에 대한 기술적 한계, 제품화 단계에서의 한계 등으로 인해 최적화된 맞춤형 제품이 개발되지 않고 있으며 또한, 이러한 한계를 제품 자체에 대한 기술력 확보 및 개발 대신 전혀 새로운 형식을 구상하는 등 아이디어에만 의존하려는 경향이 있어 오히려 기술 담보의 원인이 되고 있다.

(4) 연구개발 성공을 위한 전략적 역할 분담책 마련

앞서 밝힌 바와 같이 궁극적인 연구목적이 장치개발과 제품화에 있으므로 설계기술개발이나 이론연구와 달리 장치특성에 대한 노하우와 반복적인 실험과 검증이 요구되며 학제간 협동연구가 필요하다는 점에서 기존의 장대교량 연구와는 차별화된 연구과제로 볼 수 있다. 따라서, 다음과 같은 연구협력관계 구성은 그 어느 때보다 기술개발에 가능성을 높인다고 판단된다.

(가) 일방적인 외국산 댐퍼를 도입하여 기술료 및 유지관리의 불편함을 개선

하기 위해 국내 케이블 전문업체는 연구단을 소집하고 케이블 엔지니어링 기술을 바탕으로 장치기술 개발에 주력한다.

(나) 케이블 교량 설계시 바람에 의한 진동 대책을 강구하기 위해 케이블 댐

퍼를 설계에 반영할 수 있는 설계지침과 이에 포함되는 각종 설계상수(케이블 고유진동수, 고유감쇠비)의 일반화식의 개발은 케이블 전문업체와의 상호 협력하에 설계회사가 담당한다.

(다) 시공사는 개발된 댐퍼의 시공반영에 협조하며 부속연구소는 이론 및 실험적 연구를 통해 기술개발의 초석을 제공하고 장치기술력 확보에 일조한다.

나. 케이블 댐퍼 적용기준의 핵심기술 연구

(1) 제진 설계용 케이블 설계 상수 일반화

케이블 교량의 제진 설계시 CIP등의 외국규정에서는 케이블 고유진동수와 고유감쇠비를 필요로 한다. 이때, 사용 케이블의 기하학적 형상(길이, 단면적)과 케이블 종류가 파라미터가 되며 그에 따른 진동수 및 감쇠비를 몇 개의 카테고리로 분류하여 제시하고 있다. 그러나 케이블 교량의 규모가 커짐에 따라 사용 케이블의 규모는 다양해지며 이로 인해 카테고리 분류 수의 증가는 필연적이다.

본 연구에서는 시스템 확인기법(System Identification)에 의해 케이블의 물성치를 해석적 방법으로 도출해내는 방법을 적용하고자 한다. 이를 위해 실내·외 실험을 통해 제안된 알고리즘을 검증하고 설계정수를 위한 일반식을 도출한다.

(2) 케이블 경계조건의 고려한 댐퍼 위치의 최적화

케이블은 보강형과 주탑에 정착부라는 연결조건을 가지고 축력으로서 힘을 전달하는 매개체이다. 이때, 케이블의 연결부는 강절과 힌지의 중간 정도로 거동을 하게 되며 이를 해석적 측면으로 구현한다는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서는 현실 가능한 댐퍼 설치 위치를 제시하고 그 바운드 내에서 댐핑 효과가 최대가 되는 댐퍼용량을 결정하고, 댐퍼의 종류에 따른 동특성에 의한 모드와 변위의 의존적 특성을 분석하여 최대의 감쇠성능을 구현한다.

(3) 케이블 댐퍼 성능 규정 정립

현행 외국에서 수입되는 케이블 댐퍼의 성능규정은 주로 자체 실험과 많은 시공실적을 통해 입증하고 있다. 국내의 여천상 케이블 댐퍼의 공급시 품질보증이 공인기관의 승인을 통해 이루어지므로 개발된 제품은 공인기관의 인증을 받는 것을 원칙으로 한다.

본 연구에서는 이를 위해 공인기관에서 인정할 수 있는 성능 규정을 정립하고 이를 만족하는 각종 테스트를 수행하여 객관적인 품질보증을 할 수 있는 시스템을 구축한다.

2. 경제·산업적 측면

가. 산업 여건의 특수성

국내설정과 제품의 특성상 교량용 케이블 댐퍼는 자금력과 교량시공에 대한 노하우가 풍부한 대형 건설회사로서는 제품개발과 생산라인의 구축은 채산성 측면에서 실익이 없어 개발 투자를 기대할 수 없으며, 장치 기술력이 있는 중소기업으로서도 교량설계 및 시공에 대한 경험과 엔지니어링이 부족하다는 한계가 있다. 또한, 학계 및 연구기관의 경우도 이론적 배경은 탄탄하나 엔지니어링과 장치 기술적인 문제를 동시에 다루기에는 한계가 있고 무엇보다 상품화하는데 한계가 있다. 따라서, 교량 설계 및 시공에 대한 경험과 노하우가 풍부한 관련 전문업체가 종합 컨소시엄을 구성하여 실용화에 초점을 둔 연구개발을 수행하고자 한다.

나. 불합리한 공사비 산출에 따른 예산 낭비

근래에 설계 및 시공되는 케이블 교량에 있어, 교량 설계기준상 제진 대책을 강구하도록 명시되어 있으나 현재 뚜렷한 설계기준이 제시되고 있지 않으며 또한 케이블 댐퍼의 시공 시 산출근거 자료가 빈약해 케이블공 전체 공사비의 5~7% 수준을 명확한 근거기준 없이 할당하고 있어 예산 낭비의 원인이 되고 있다.

다. 국산화를 통한 수입대체 효과

국내에 진출한 외국계 기업은 교량에 대한 체계적인 이해와 기계적 지식과 기술, 그리고 자본력을 바탕으로 국내의 케이블 진동 감쇠 장치 시장을 잠식하고 있는 실정이라 국산 제품 개발을 통한 수입대체가 시급하다. 수입대체효과는 비단 신설교량에만 국한되지 않으며 장치 특성상 유지관리 및 교체가 주기적으로 반복되므로 기존교량의 적용까지 고려하여 판단하여야 한다. 표 3은 국내 주요 케이블 교량에 적용한 댐퍼의 현황을 보여주며 제조사가 모두 외국인 점이 시사하는 바가 크다.

표 1.2.1 국내 주요 교량에 적용한 케이블 댐퍼 현황

구분	교량명	교량형식	연 도	케이블 댐퍼 제조사	비고
1	돌산대교	사장교	1984	없음	-
2	행주대교	사장교	1995	없음	-
3	올림픽대교	사장교	1990	없음	-
4	서해대교	사장교	2000	Fressynet(프랑스)	외국
5	영흥대교	사장교	2002	Fressynet(프랑스)	외국
6	삼천포대교	사장교	2003	없음	-
7	초양대교	아치교	2003	Nakaishoko(일본)	외국
8	제2진도대교	사장교	2005	로빈슨(뉴질랜드)	외국
9	어등대교	사장교	2005	없음	-
10	저도연육교	아치교	2004	없음	-
11	백야대교	아치교	2005	상해진동완화기구 (중국)	외국

국내 여건을 감안한 케이블 댐퍼의 개발은 외국사에서 조달받는 공사비에 포함된 기술료(로얄티)를 제거하고, 유지관리시 자주 발생하는 추가적 비용(기술료, 장치보수비등)에 대한 국내 기준을 마련할 수 있다는 점에서 큰 이점이 있다. 이는 기존에 시공된 제품에 대해서도 마찬가지로 적용될 수 있다.

라. 국가기술정책 및 타산업 파급효과

상술한 바와 같이 본 연구개발은 중소 전문업체가 주가 되어 개발을 주도해 갈 것이다. 중소기업이 개발하여 산업화에 성공한다면 이는 중소기업 육성을 통한 국가 경쟁력 확보라는 국가경제정책에 부합한다. 또한, 본 연구에서 다루는 진동문제는 비단 교량 케이블 분야에만 국한되지 않으므로 개발성과와 연구과정에서 획득한 기술력은 직간접적으로 교량구조물, 초고층빌딩, 스타디움이나 플랜트 구조물

그리고 제진이 필요한 기계분야 등에 응용될 경우 그 경제적 파급 효과는 더욱 커지리라 기대된다.

3. 사회·문화적 측면

가. 중대형 케이블 교량의 건설 증가 추세

중장기적인 건설정책에 따르면 SOC투자에 대한 중앙정부의 투자는 단기적으로 주춤할 것으로 예상되는 반면 지방 균형발전 추구, 비수도권 지역의 도시개발과 특히, 서남해안 관광시설 개발의 집중으로 해상장대교량의 대한 수요는 오히려 증가하리라 전망된다. 선진국 사례에서 국민소득 1만달러 수준에서는 건설경기 둔화의 경향을 보이다가 국민소득 2만달러 진입하면 다시 건설투자가 살아나는 경향을 보여왔다. 이러한 사회·정책적 분위기는 마야호로 장대교량에 대한 기술적 요구로 이어질 것이다.

표 1.2.2 서남해안 연육 연도교 건설계획 (2004년 기준)

위 치		신안-진도			완 도			고흥-여수		
형 식		케이블 교량	타형식	계	케이블 교량	타형식	계	케이블 교량	타형식	계
개 소	시공중	1	1	2	2	0	2	0	0	0
	계획	12	11	23	10	7	17	8	13	21

한편, 건설교통부 2006년 도로교 통계자료에 의하면 2005년 12월 현재 우리나라에는 총 22,937개소(가설중인 교량포함)의 교량이 있으며 선형개량 및 장대교량 건설로 최근 10년간 장대교량은 꾸준히 증가하고 있어서 이들 중 경간장 500m 이상 급이 개소기준으로 2.1%, 연장기준으로 23.6%에 이르고 있다.

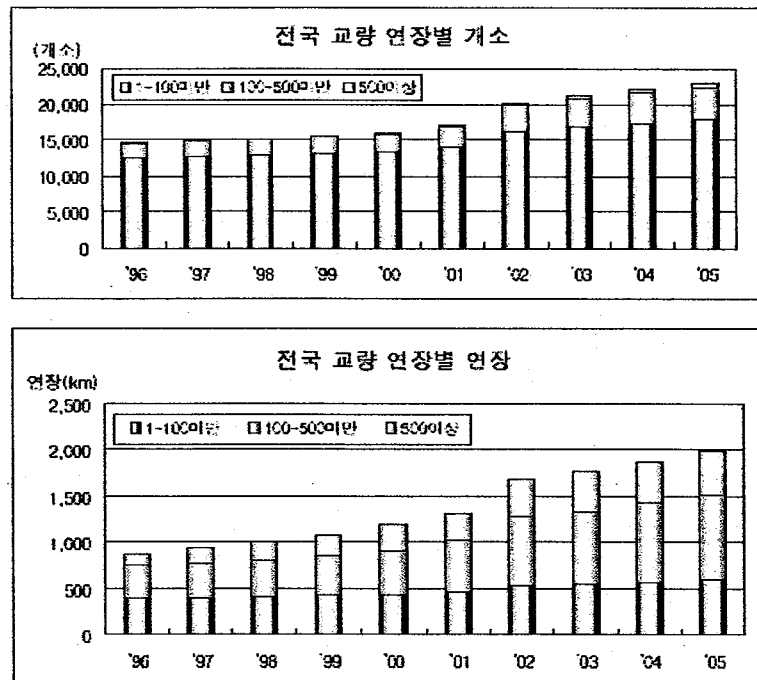


그림 1.2.2 전국 교량 연장별 개소 및 연장

최근의 기술적, 사회·문화적 교량 수요를 생각할 때에 이는 케이블 등을 사용한 특수교량의 증가 경향과 같이 한다고 볼 수 있다. 뿐만 아니라, ‘건설교통 R&D미래 전략’에 따라 초장대교량 건설 지원계획이 확립되고 있는 바, 장대교량의 개소와 주경간장 증가 추세는 보다 가속화될 전망이다.

나. 교량구조물에 대한 사회문화적 중요성

성수대교 붕괴 사고에서 경험하였듯이 교량의 안전성 확보는 그 성격상 물적·인적 피해와 그 사회적 파장을 고려할 때 다른 어느 시설물보다 중요하며, 심지어 대외적인 국가 이미지와도 결부되는 등 중요한 사안이 아닐 수 없다. 최근 들어 지난 십수년간 경쟁적으로 건설되어온 현수교, 사장교 등에서 케이블 진동에 의한 피해사례가 보고되어지고 있으나 현재로서는 뚜렷한 해결책을 제시하지 못한 채, 임시 방편적인 사후 처리에 급급하고 있다. 뿐만 아니라, 교량에 대한 안전 문제를 벗어나 사회적으로 심미성과 사용성에 대한 의식이 증대되고 있는 시점이라 진동·소음에 대한 친환경적 기술적 욕구가 점차 부각되고 있다.

제 2 장 국내 · 외 기술개발 현황

1절. 국내 기술 및 산업 동향

1. 국내 시장 현황 및 예측

가. 케이블 댐퍼는 정기적인 유지관리 및 교체가 필요한 제품으로 기존교량 시장과 신규교량 시장으로 구분할 수 있다.

나. 기존교량 시장 (교체 및 유지관리 시장)

(1) 케이블 댐퍼 교체(전면교체) 수명

10년 (Average Guaranteed Lifetime)

(CEB-FIP 기준에 따라 케이블 부속물은 semi-permanent use로 구분되어 교체수명 2 ~ 15yr에 해당되며 이중 댐퍼 등은 소모품으로서 교체수명을 짧게 규정. 또한 국내의 경우 케이블교량이 대부분 극한 환경조건인 해안에 건설되므로 이를 고려하여 공용수명을 산정)

(2) 케이블 댐퍼 유지보수 비용

2.5년(CEB-FIP 기준에 따른 Deflection Guaranteed Time)이후 발생하며 교체수명이 10년이므로 연간 감가상각비용은 10% (제품단가대비)이고 필요 잔존가치는 75%. 따라서, 유지관리 목표를 보수적으로 산정하여 잔존가치 80%로 할 경우, 감가상각 보상비용은 7.5년간 $7.5 \times (10 + 5) \% = 112 \%$ (제품단가대비)

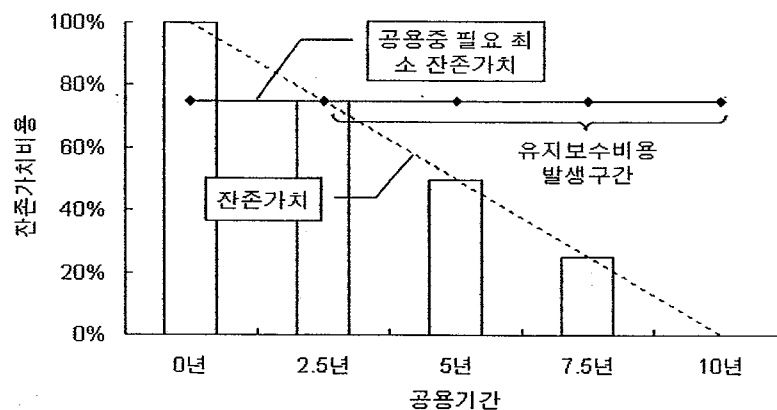


그림 2.1.1 공용기간 중 잔존가치 비용 그래프

표 2.1.1 기존교량(사장교,아치교)의 케이블 댐퍼 소요 개소

구분	교량명	형식	주경간장	케이블 개수			케이블 댐퍼 수량
1	돌산대교	사장교	280	56	장 케이블	0%	0
					단 케이블	100%	56
2	진도대교	사장교	344	68	장 케이블	24%	33
					단 케이블	76%	52
3	올림픽대교	사장교	300	24	장 케이블	8%	4
					단 케이블	92%	22
4	서해대교	사장교	470	144	장 케이블	49%	141
					단 케이블	51%	73
5	영흥대교	사장교	240	64	장 케이블	0%	0
					단 케이블	100%	64
6	삼천포대교	사장교	230	80	장 케이블	0%	0
					단 케이블	100%	80
7	제2진도대교	사장교	344	60	장 케이블	20%	24
					단 케이블	80%	48
8	어등대교	사장교	210	10	장 케이블	0%	0
					단 케이블	100%	10
사 장 교 (기존 8개 교량) 소계							607
9	초양대교	아치교	143.53	28	장 케이블	0%	0
					단 케이블	100%	28
10	저도연육교	아치교	181	28	장 케이블	0%	0
					단 케이블	100%	28
11	백야대교	아치교	183	30	장 케이블	0%	0
					단 케이블	100%	30
아 치 교 (기존 3개 교량) 소계							86
사장교 8개 및 아치교 6개에 대한 총계					607 + 2 x 86		779

※ 단, long length는 댐퍼설치위치를 고려하여 케이블당 2개 설치예상인 케이블

표 2.1.2 제품종류별 단가

(댐퍼 1개당)

종 류	제품단가 (단위:천원)	적용비율 (%)
정성댐퍼	6,000 ~ 10,000 (기준단가 8,000)	45
고강쇠고무댐퍼	2,000 ~ 4,000 (기준단가 3,000)	25
기타 신소재 댐퍼	6,000	30
제품 평균 단가	6,150	100
유지보수비용	6,888	
총비용 (10년간)	13,038	단가 + 유지보수
연평균 총비용	1,304	

표 2.1.3 해외업체의 국내시장에서의 댐퍼종류별 단가

(댐퍼 1개당)

업 체 (댐퍼종류)	제품단가 (단위:천원)
F사 유압댐퍼(IRD)	12,000
F사 유압댐퍼(IHD)	7,400
F사 고강쇠고무댐퍼(IED)	5,200
V사 마찰댐퍼(FRD)	25,000~30,000
F사 고강쇠고무댐퍼(IED)	5,900

- 따라서, 기존교량(사장교 및 아치교에 한함)에 대한 케이블 댐퍼 교체 및 유지보수 예상 비용은 다음과 같다.

$$\text{연평균 779 (개)} \times 1,304,000 = \text{약 } 1,020,000,000$$

(단, 교체 및 유지관리 시장은 매년 새로 건설되는 교량수에 따라 증가되며 위 금액은 연구개발이 완료되는 해 기준임.)

다. 신설교량 시장 (신규시장)

- (1) 장대교량 시장은 단위 프로젝트가 크고 발주물량이 적으며 국가 건설정책에 따라 변동성이 크므로 쉽게 예측이 불가능하다. 그러나, 국내 케이블의 신규 시장은 서남해안 연육교 건설계획이 2020년까지 큰 비중을 차지할 것으로 예상되어 산술적으로 연평균 2개소 건립이 예상되며(1장 표 서남해안 연육 연도교 건설계획 참조), 최근 발주 물량이 평균 4~5건인 점을 감안한다면, 향후 20년간 평균 3~4건의 건설이 진행될 것으로 예상된다.
- (2) 국내 기존 케이블 교량(사장교)에 대한 주경간장 대비 댐퍼수요는 다음과 같으므로 향후 건설될 교량의 평균 제원은 장경간화 추세를 반영하여 경간장 400m, 케이블 댐퍼 150개로 가정할 수 있다.

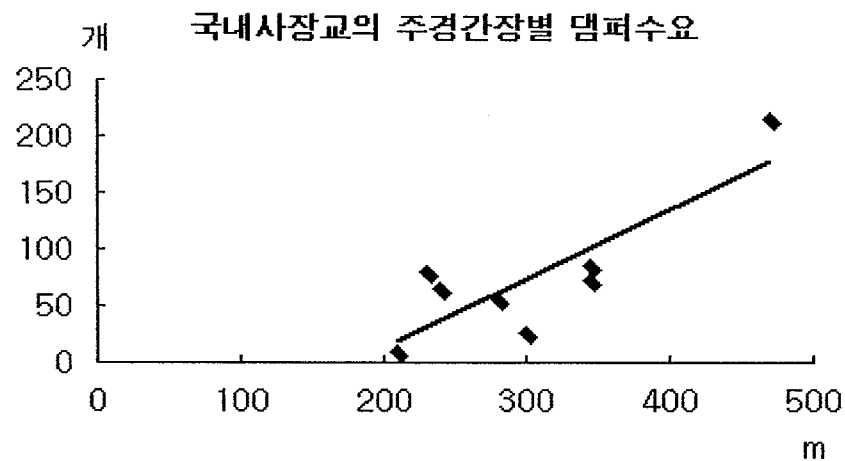


그림 2.1.2 국내 사장교의 케이블 및 댐퍼 수요 회귀 분석표

- 따라서, 향후 15년간 예상되는 연평균 시장규모(신설교량)는,

$$3\sim 4 \text{ (개 교량)} \times 150 \text{ (개소)} \times 6,150,000 = \text{약 } 3,230,000,000$$

라. 기존교량 및 신설교량에 대한 케이블 댐퍼의 향후 15년간 시장규모는 다음과 같다.

표 2.1.4 향후 15년간 국내 케이블댐퍼 시장 추이 (단위: 억원)

종 류	교체 및 유지관리 시장	신규 교량 시장	합 계
기준 연도	10	32	42
5년 후	23	32	55
10년 후	35	32	67
15년 후	48	32	80
15년 누적 총액	460	512	972

※ 단, 기준연도는 연구개발 종료시점인 2009년임

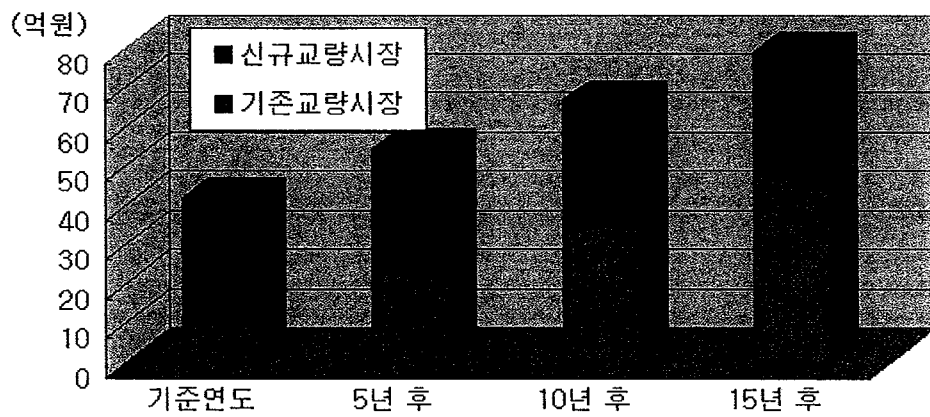


그림 2.1.3 연도별 케이블댐퍼 시장 추이 (향후15년간)

2. 국내 주요 관련 업체

국내 케이블 댐퍼를 설계·시공하는 업체는 다음과 같다.

표 2.1.5 국내 주요 케이블 댐퍼 관련 업체

업체명	업체별 능력	비 고
케이블텍(주)	케이블 시공 및 시공엔지니어링	
후레시네코리아	케이블 및 댐퍼 시공	댐퍼 수입 시공
현대건설(주)	케이블 교량 시공 다수	
대림산업(주)	케이블 교량 시공 다수	
(주)유신코퍼레이션	케이블 교량 설계 다수	
DM엔지니어링	케이블 교량 설계 다수	

3. 국내 전문가 및 연구기관 현황

국내 케이블 분야 전문가는 많지 않으나 케이블 교량 건설의 급증으로 관련분야의 전문가가 증가추세에 있다. 다음은 국내의 케이블 관련분야 전문가 현황을 나타낸 표이다.

표 2.1.6 국내 주요 케이블 분야 전문가 현황

항목	전문가	소속기관	기술개발현황	수준 (국외대비)
케이블 댐퍼 개발	안상섭	한국도로공사	점탄성 및 수동 댐퍼에 대한 연구	80%
	서주원	현대건설	수동형 및 비선형 댐퍼 설계 연구	80%
케이블 제진 설계기준	장승필	서울대학교	케이블 강교량 설계지침 참여집필위원	80%
	조충영	유신코퍼레이션	케이블 강교량 설계지침 참여집필위원	80%
	이만섭	코비코리아	케이블 강교량 설계지침 참여집필위원	80%
	김종수	롯데건설	케이블 강교량 설계지침 참여집필위원	80%
케이블 동특성 추정	이해성	서울대학교	시스템확인기법에 의한 탄성체 물성 추정	90%
	윤정방	한국과학기술원	시스템확인기법에 의한 탄성체 물성 추정	90%

4. 국내연구 인프라 수준

국내의 케이블 댐퍼에 대한 연구는 5년 안팎의 짧은 기간의 이력을 가지고 있다. 최근 케이블을 이용한 장대교량이 급증하면서 케이블 댐퍼에 대한 관심이 증가하면서 이에 대한 연구가 점점 활발해지고 있는 실정이다. 그러나, 아직 외국의 케이블 댐퍼에 대한 연구 및 인프라 구축에 비하면 많이 뒤떨어져 있는게 현실이다. 현재 국내에는 도로공사의 실외 진동실험장과 현대건설의 실내 실험장이 있으며 기초적인 성능평가실험을 수행할 수 있다. 또한, 관련분야 전문가도 소수에 불과하나 점점 케이블 댐퍼에 대한 관심이 증가하면서 앞으로는 케이블 댐퍼 전문가 수도 점점 증가할 것으로 예상하고 있다.

국내의 케이블 댐퍼에 대한 연구는 아직 걸음마 수준이나 이 분야에 대한 시간과 노력을 앞으로 계속 투자하여 연구를 계속 진행한다면 10년 후에는 국내 케이블 댐퍼 시장은 한층 더 발전할 것이다. 그러기 위해서는 지속적인 연구진행을

위하여 앞으로 이 분야의 꾸준한 관심이 필요하다

표 2.1.7 국내의 케이블 댐퍼 연구에 대한 인프라 수준

기술분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소 부족	동등	우월	보다 우월
케이블 댐퍼 개발	전문 인력 연구 실험 시설	○				

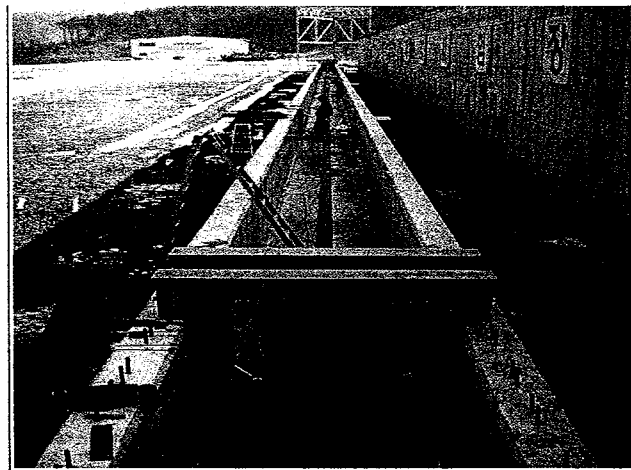


그림 2.1.4 한국도로공사 실외 실험장



그림 2.1.5 현대건설 기술연구소 실내실험장

5. 국내 기술개발 수준

현재 국내의 케이블 댐퍼는 국외 제품에 거의 의존하고 있으며, 이에 따라 감쇠 장치에 관련된 연구 및 설계지침 등은 거의 국외의 사례 및 설계를 바탕으로 하고 있다. 국내 개발 케이블 댐퍼는 국외 제품을 수입하여 이를 연구, 개발하고 있으나 아직은 국외에 비하면 약 60%정도 수준에 불과하다.

표 2.1.8 국내 케이블 댐퍼 기술개발 수준

세부기술 내용	국외 현황 (주요선진국명)	국내 개발 현황	수준 (국외대비)
케이블 제진 댐퍼	정성, 탄소성 댐퍼 등 (후레시네)	수입제품 연구, 모방	60%
감쇠관련 연구	정성, 탄소성 댐퍼 등 (후레시네)	진동, 감쇠특성의 기초연구 (한국도로공사, 안상섭)	80%

2절. 국외 기술 및 산업 동향

최근 국외의 댐퍼에 관련된 연구는 기존의 연구와는 달리 케이블 댐퍼의 기본적인 연구보다는 새로운 개념의 댐퍼가 개발 및 소개되고 있다. 또한, 국내여건과 달리 전문업체에서 개발하여 자체 성능평가 후 품질보증을 하는 형태로 그간의 실적과 함께 경쟁력을 갖는 방법을 취하고 있으며, 하나의 전문분야로서 케이블 댐퍼의 연구개발을 진행하고 있다.

1. 주요국가의 시장규모

근래에 케이블 교량이 많이 건설되거나 예상되는 국가는 중국, 중동 및 동남아시아의 개발진행중인 몇몇 주요국가들이며, 현재에도 케이블 교량의 수요는 꾸준히 증가 추세에 있다. 현재의 근거 자료로는 해외시장 규모를 정확히 예측하기 힘들지만, 사장교의 경우 전세계적으로 500m 이상급이 약 9개소, 430m 이상급이 약 23개소로 알려져 있으며 신규교량으로는 중국시장을 중심으로 600m 이상급이 약 7개소가 계획중에 있다.

표 2.2.1 500m 이상 및 430m 이상급 케이블 교량

중양경간	교량명	중양 경간장	위치	개통	케이블 공급사
500m 이상	Tatara	890	Japan	1999	NSC
	Normandie	856	France	1995	Freyssinet
	2 nd Nanjiang Yangtze River	628	중국	2001	Shanghai Pujiang
	Qingzhou Minjiang	605	중국	1996	VSL
	Yangpu	602	중국(상해)	1993	Shanghai Pujiang Cable Co.
	Meiko Central	590	Japan	1998	NSC
	Xupu	590	중국(상해)	1996	Shanghai Pujiang Cable Co.
	Skarnsundet	530	Norway	1991	
	Tsurumi Tsubasa	510	Japan	1994	NSC
430m 이상	Øresund	490	Denmark/Sweden	2000	Freyssinet
	Ikuchi	490	Japan	1991	NSC

	Higashi Kobe	485	Japan	1994	(BBR License)
	Ehuang Yangtze River	480	중국 (HKSAR)	2001	Shanghai Pujiang
	Ting Kau	475	중국(홍콩) (HKSAR)	1998	Freyssinet
	SeoHae	470	Korea	2000	Freyssinet
	Alex Fraser	465	Canada	1986	British Rope
	Yokohama Bay	460	Japan	1989	NSC
	Junshan Yangtze River	460	중국 (HKSAR)	2001	Shanghai Pujiang
	2 nd Hooghly	457	India	1989	
	2 nd Severn	456	UK	1996	Freyssinet
	Dartford	450	UK	1991	Bridon
	Rama IX	450	Thailand	1987	Tyssen
	Lijiatuo Yangtze River	444	중국 (HKSAR)	2000	Shanghai Pujiang
	Tonglin Yangtze River	432	중국 (HKSAR)	1994	Shanghai Pujiang
	Kap Shui Mun	430	중국(상해)	1997	Dywidag

2. 세계시장을 선도하는 주요 업체

현재 국내에서 케이블 댐퍼에 대한 시공을 하는 업체는 후레시네, VSL, Sumitomo 등이 있으며 이중에서 후레시네(프랑스)가 국내 뿐만아니라 세계 많은 나라에서 전문적으로 케이블 댐퍼의 시공을 맡고 있다.

표 2.2.2 케이블 댐퍼시공 주요업체

업체명(국적)	업체별 능력	중점 분야
후레시네 (프랑스)	케이블 및 댐퍼 시공에 있어 세계적으로 유명, 댐퍼의 경우 자체적인 성능 규정으로 품질보증을 내세우는게 특징	케이블 시공, 유지관리

3. 해외 시장예측 및 발전전망

케이블텍(주)는 그동안 대륙별로 국제적인 협력업체들과 유기적인 관계를 지속해 오고 있다. 따라서, BBR사(스위스)를 통해 유럽의 교체 및 유지관리 시장 진출, SPCC사(중국)를 통해 중국 신규교량 시장 진출, Sumitomo사(일본)를 통한 일본 교체 및 유지관리 시장 진출을 꾀할 계획에 있다. 케이블텍(주)는 이들 협력업체와

공조를 통해 해외 케이블 댐퍼 시장에 진출할 경우, 이들 협력업체의 영향력을 고려하여 다음과 같은 해외진출 성과를 기대하고 있다.

표 2.2.3 케이블 댐퍼시장의 예상규모

교체 및 유지관리 시장	신규 설치 시장	연간 수출액
11 억원	14 억원	25 억원

4. 개발된 기술의 해외 시장 진출 방안

국내 업체의 진출이 활발해지고 있으며 케이블 교량의 설계 및 시공에 있어 약 10여년간의 실적을 갖춘 상태이므로 충분히 경쟁력이 있다. 케이블 댐퍼의 경우 교량의 부속품으로서 자체의 성능규정과 잘 정립된 설계지침을 준비하여 진출할 때 고부가가치 분야가 될 것으로 판단된다.

5. 특허 동향

국내의 특허출원을 검색한 결과 일반적인 댐퍼장치에 대한 특허건수는 다수 존재하나 케이블 전용 댐퍼의 특허등록 건수는 확인되지 않고 있다. 다만, 당사를 포함해 케이블 전용 댐퍼에 대한 특허출원중에 있는 업체 또는 개인은 약 5건 이하 존재하는 것으로 추정된다. 케이블 댐퍼의 개발 및 시공으로 유명한 후레시네(프랑스)의 경우는 국가의 특성상 특허가 아닌 자사의 특수 상품으로서 자체 성능평가를 통해 납품 중이다.

6. 소 결

가. SWOT분석

본 연구를 통하여 국산 케이블 댐퍼 개발로 인한 장·단점은 다음과 같다.

표 2.2.4 케이블 댐퍼 국내 개발의 장·단점

강점	국내 케이블 전문설계시공 업체와 케이블교량 설계 및 시공업체가 협력하여 개발하고 관련 대학이 참여하여 기술개발 과정의 효율성을 극대화	약점	국내 케이블 제진 관련 설계기준 및 관련지침이 매우 부족한 실정임. 따라서, 본 연구에서 이러한 관련 규정을 개발하고자 하나 기준 제정기관과의 긴밀한 협조 및 지원이 필요
기회요인	향후 발주될 다수의 케이블교량에 필요한 제진댐퍼를 국산화함으로써 기술자립화 뿐만 아니라 수입대체효과 기대	위험요인	제품개발후 적극적인 홍보와 관련기관의 충분한 지원이 이루어지지 않을 경우, 국산화 제진 댐퍼의 폭넓은 활용이 어려울 수 있음

나. 시사점 및 결론

본 연구과제는 케이블 제진댐퍼 개발 국산화 및 관련 제지침을 개발하기 위하여 국내 케이블 관련 전문 업체들이 컨소시움을 구성하여 기술개발 과정의 효율성이 극대화 되도록 하였다. 향후 발주될 다수의 케이블교량에 필요한 제진댐퍼를 국산화함으로써 기술자립화 뿐만 아니라 경제성 측면에서 유리하다. 한편 국내 케이블 제진 관련 설계기준 및 관련지침이 매우 부족한 실정으로 본 연구에서 이러한 관련 지침을 개발하고자 하나 기준제정기관과의 긴밀한 협조 및 지원이 필요할 것이다. 또한 제품 개발후 보다 적극적인 홍보와 관련기관의 충분한 지원으로 국산 제진 댐퍼의 폭넓은 활용이 이루어질 수 있도록 해야 할 것이다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절. 연차별 연구목표 및 내용

1. 연구목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	- 케이블 댐퍼 개발을 위한 기초 연구 - 케이블 댐퍼 설계지침 관련 기초 연구	국, 내외 케이블 댐퍼 관련 조사 및 분석
		기존 국산 댐퍼 성능 평가
		기존 케이블 제진댐퍼 유효성 평가
		케이블 동특성 분석 및 평가
		케이블 고유감쇠비 추정을 위한 알고리즘 개발
		케이블 댐퍼 관련 설계기준 조사 및 분석
2차년도	- 케이블 댐퍼 시제품 제작 - 케이블 댐퍼 개발을 위한 실험 및 해석적 연구 - 케이블 댐퍼 설계 기준관련 상세연구	시제품 고안 및 제작
		케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램 개발 및 실험
		새그를 고려한 케이블 고유진동수의 해석적 산정기법 개발
		케이블 댐퍼 성능별 설치 위치 분석
		케이블 댐퍼 설계법 도출
3차년도	- 케이블 댐퍼 검증 및 실용화 - 케이블 댐퍼 설계지침 개발	시제품에 대한 실내 검증실험
		개발 케이블 댐퍼의 상용화 검증을 위한 현장 실험
		케이블 댐퍼 제작기준 개발
		케이블 댐퍼 시공/품질관리 지침 개발
		케이블 댐퍼 유지관리 지침 개발
		케이블 댐퍼 적용 설계 예제 작성

2. 1차년도

가. 연구목표 및 성과지표(성과지표 내용확인-추가)

연구목표	성과지표	성과물
케이블 댐퍼 개발을 위한 기초 연구	특허출원(국내외)	기존형식을 응용한 케이블 댐퍼 특허출원 (고감쇠 고무댐퍼 : 1건)
	시제품 출시	고감쇠 고무댐퍼 시제품 제작
	번 역	케이블 댐퍼 관련 번역(3건)
	연구시설 고도화	연구시설 업그레이드(PWS케이블 설치)
	주요 연구시설 이용	PWS 케이블 이용
	연구시설 운영여건 구축	운영전반에 관한 전문관리요원 확보 (현대건설 : 2명)
	산학연 강좌	기술 세미나 개최 (AT Center) - 2007. 5. 16
	학술회의 발표논문	한국 소음진동 공학회 춘계학술대회 (5. 10 ~ 5.11) : 1건
케이블 댐퍼 설계지침관련 기초연구	공공 서비스 제공	웹기반 자료 공유 시스템구축
	학술지 게재 논문	총 2건 - 대한토목학회 접수완료 : 2007. 5. 22 심사중 - 한국소음진동 공학회 논문집 : 게재 준비중

나. 연구내용 및 범위

연구 내용	세부 내용 및 범위
국내외 케이블댐퍼 관련 조사 및 분석	• 국내외 개발된 케이블댐퍼 현황조사 • 국내 일반 댐퍼 현황 조사 • 현장조사를 통한 국외 케이블댐퍼의 장단점 연구 • 수동댐퍼의 거동에 관한 문헌조사
케이블 댐퍼관련 설계기준 조사 및 분석	• 케이블 댐퍼관련 해외설계기준 조사 및 분석 • 케이블 댐퍼설계 관련 국내외 연구성과 조사 및 분석
케이블 댐퍼개발 기초연구	• 케이블 댐퍼 개발을 위한 기존 일반 국산 댐퍼의 성능 분석 • 기존 케이블 댐퍼의 성능 평가를 통해 각각의 제진 성능을 비교 분석
설계관련 기초연구	• 케이블의 동특성인 고유감쇠비와 고유진동수를 분석하고 평가하기 위해 실험수행 • 케이블 감쇠비 추정용 프로그램 개발을 효과적으로 하기 위하여 알고리즘을 개발

다. 성과지표 설정근거 및 측정방법

연구 내용	설정근거 및 측정방법
국내외 케이블 댐퍼 관련 조사 및 분석	• 케이블 댐퍼 종류별 장단점 및 개선점 평가 여부 및 분석 충실도
케이블 댐퍼관련 설계기준 조사 및 분석	• 케이블 댐퍼관련 제설계기준의 조사 여부 및 분석 충실도
케이블 댐퍼개발 기초연구	• 기존 일반 국산 댐퍼의 성능 실험수행 여부 및 분석 충실도 • 기존 케이블 댐퍼의 성능평가 실험수행 여부 및 분석 충실도 • 기존 케이블 댐퍼의 문제점을 고려한 합리적인 케이블 댐퍼 모델 고안
케이블 감쇠비 추정용 알고리즘을 개발	• 케이블 감쇠비 추정용 알고리즘을 개발 여부

3. 2차년도

가. 연구목표 및 성과지표

연구목표	성과지표	성과물 명칭
케이블 댐퍼 시제품 개발	시제품 출시 건수	· 고감쇠고무댐퍼(완성품)-현장에 적용하여 부분적으로 설치완료 · 가스오일댐퍼(시제품)-고안품은 이미 출시 하였으나, 제작사 선정에 어려움이 있어 시제품 출시는 완료하지 못하였음
	특허출원 건수 (국내/국외)	· 기존 고감쇠고무 댐퍼의 성능을 보완한 수정제품의 특허출원완료
케이블 댐퍼 설계관련 해석 및 실험적 연구	실험을 통한 검증	· 케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램-케이블의 가속도를 변위로 재구성하여 고유 감쇠비를 추정(서울대위탁연구)
	학술지 게재 논문 건수(국내/국외)	· 학술지 논문게재를 통한 전문가 타당성 검증 - 에너지방정식에 기초한 사장케이블 기본진 동수 추출(대한토목학회)
케이블 댐퍼 설계지침 관련 상세연구	전문가 타당성 확보	· 설계기준관련 논문게재 - 댐퍼도입에 의한 사장케이블의 제진설계(대한토목학회)
실규모 케이블 가진을 위한 가진기 개발	가 진 기	· 현대기술연구원에서 개발한 기존 가진기의 성능을 증대시킨 대형 가진기를 완성하여 실험을 실시하였으며, 추후에 성능을 업그레이드하여 새로운 형태의 가진기 개발 예정.

나. 연구내용 및 범위

연구 내용	세부 내용 및 범위
케이블 댐퍼 시제품 개발	• 기존 국내 기술을 활용한 케이블 댐퍼를 고안하여 시제품 제작 • 다학제적 연구진에 의한 케이블 댐퍼 고급 기술 개발 및 이에 대한 시제품 제작
케이블 댐퍼 설계관련 해석 및 실험적 연구	• 케이블 감쇠비 추정을 위해 개발된 알고리즘을 이용하여 프로그램 개발 • 프로그램 검증에 위한 비교실험 • 해석적 방법을 이용하여 새그를 고려한 케이블 고유진동수 산정기법 도출
케이블 댐퍼 설계법 도출	• 케이블 댐퍼의 최적 설치위치를 결정하기 위한 합리적인 방안 도출 • 과거 자료를 분석하고, 실험 및 해석적 연구를 수행하여 케이블 댐퍼 설계법 정립

다. 성과지표 설정근거 및 측정방법

연구 내용	설정근거 및 측정방법
케이블 댐퍼 시제품 개발	• 시제품 제작 여부 • 고안된 제품에 대한 성능 분석과 이론적 기술적 우월성 평가
케이블 댐퍼 설계관련 해석 및 실험적 연구	• 케이블 감쇠비 추정을 위한 프로그램 개발 여부 • 프로그램 검증을 위한 실험 수행여부 • 새그를 고려한 케이블 고유진동수 산정기법 개발 여부
케이블 댐퍼 설계법 도출	• 케이블 댐퍼의 최적 설치위치 방안 도출여부 • 케이블 댐퍼 설계법 도출 여부

4. 3차년도

가. 연구목표 및 성과지표

연구목표	성과지표	목표치	성과물 명칭
케이블 댐퍼의 실용화	사업화/제품화 건수	분야별 1건	
	연구시설 구축	실험실 건립	케이블 진동 실험동
	장비 구축건수	1.5억원	
	연구개발 관련 홍보 건수	1건	세미나 개최
	주요 연구시설 활용도	개발제품당 사용실적	
케이블 댐퍼 관련지침 개발	안전 및 성능기준 확보	1건	케이블 댐퍼 설계지침 제작기준, 시공/품질 지침, 유지관리 지침

나. 연구내용 및 범위

연구 내용	세부 내용 및 범위
케이블 댐퍼의 실용화	• 시제품 실내외 검증 실험 • 개발 케이블 댐퍼의 상용화를 위한 현장적용 • 개발 케이블 댐퍼의 현장 적용성 검토 및 보완
케이블 댐퍼 관련기준 및 지침 개발	• 케이블 댐퍼 적용 설계기준 개발 • 케이블댐퍼의 제작 기준, 시공/품질관리 지침개발 • 케이블댐퍼의 유지관리 지침 개발
설계참고도서 작성	• 실용화 및 설계실무 참고를 위한 설계예제 작성

다. 성과지표 설정근거 및 측정방법

연구 내용	설정근거 및 측정방법
케이블 댐퍼의 실용화	• 시제품 실내외 검증실험 여부 • 개발 케이블 댐퍼의 상용화 검증을 위한 시험시공 여부 • 현장검증 및 시험시공 후 추가보완에 따른 성능개선 여부
케이블 댐퍼 관련기준 및 지침 개발	• 케이블 댐퍼 적용 설계기준 개발 여부 • 케이블댐퍼의 제작 기준, 시공/품질관리 지침개발 여부 • 케이블댐퍼의 유지관리 지침 개발 여부
설계참고도서 작성	• 실용화 및 설계실무 참고를 위한 설계예제 작성 여부

5. 연도별 주요 추진 일정

일련 번호	연구내용	추진 일정 (연도별)												비중 (%)	
		1차년도		2차년도				3차년도							
		1/2	2/2	1/4	2/4	3/4	4/4	1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6		
1	기초조사	■													6
2	케이블 댐퍼개발 기초연구	■	■												9
3	설계관련 기초연구	■	■												9
4	케이블 댐퍼 시제품 개발		■	■	■	■									14
5	케이블 댐퍼 설계관련 해석 및 실험적 연구			■	■	■									13
6	케이블 댐퍼 설계법 도출				■	■	■								13
7	케이블 댐퍼의 실용화							■	■	■	■				16
9	케이블 댐퍼 관련기준 및 지침개발												■	■	14
10	설계참고도서 작성													■	6

2절. 협동과제의 연구개발 목표 및 내용

1. 협동연구기관 1 : (주)유신코퍼레이션

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	케이블 진동현상에 관한 설계기준조사 및 분석	- 댐퍼에 의한 제진방안이 지배적인 진동현상 및 개선효과 초기 분석 - 효과적인 댐퍼성능 목표값 초기 분석 - 정량적인 댐퍼 성능평가를 위한 기존 연구 조사
2차년도	동적매개변수 개선기법 개발 (고유진동수, 댐퍼설치위치 이론 분야)	- 댐퍼에 의한 제진방안에 주요 영향을 미치는 동적매개변수 초기 분석 - 케이블 Sag를 고려한 고유진동수 추정에 관한 해석적인 기법 개발 - 댐퍼설치위치 최적화를 위한 해석적인 기법 개발
3차년도	댐퍼의 구조물 적용에 관한 설계기준제시 및 이에 관한 설계예제 작성	- 케이블 진동현상 평가모델 정립 - 댐퍼를 이용한 제진성능 평가모델 정립 - 관련된 설계예제 작성

2. 협동연구기관 2 : 현대건설(주)

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	동적매개변수 분석을 위한 예비시험 및 역해석기법 개발 초기 연구	- 케이블 정·동적매개변수 분석실험 - 케이블 고유감쇠비 추정을 위한 역해석 알고리즘 연구
2차년도	동적매개변수 개선기법 검증시험 및 역해석기법 일반화 (고유감쇠비 이론분야 및 검증실험)	- 케이블 고유감쇠비 추정을 위한 전산프로그램 개발 및 실험적 검증 - 협동연구기관 1에서 개발한 해석적인 기법에 관한 실험적 검증
3차년도	댐퍼의 구조물 적용에 관한 검증시험 및 시공/품질관리 지침 검토	- 주관연구기관에서 개발한 댐퍼에 관한 상용화를 위한 현장실험 - 주관연구기관에서 개발한 댐퍼에 관한 시공지침 및 유의사항 정립 - 관련된 품질관리 지침서 개발

3절. 연구대상기술의 개발 가능성

- 1장의 지금까지의 연구개발 실적'에 서술된 바와 같이 당해 연구기관은 케이블 댐퍼 개발을 위한 연구와 노력을 지속해 왔으며, 이 과정에서 소기의 성과는 물론 개발 노하우를 습득해 왔다.
- 또한, 본 연구기관은 케이블 설계 및 시공관련 전문업체로서 케이블 진동과 진동 제어에 대한 체계적인 이해와 전문인력을 확보하고 있으며, 국내외 우수한 전문가 및 전문업체들과 상호 교류가 활발하므로 가시적인 연구성과물을 확보할 가능성이 높다.
- 국내 댐퍼 제조기술은 그 자체로 교량용 케이블 댐퍼에 적용하기에 무리가 없는 수준이며, 국내 전문가 집단의 케이블 진동에 대한 이론적 연구 및 이해 수준도 높으므로 이 둘을 조화롭게 연계한다면 목표로 하는 케이블 댐퍼 제조가 가능할 것으로 판단된다.

1. 제품 종류별 개발 가능성 고찰

재료에 의한 제품 분류	개발 방향	개발 난이도	현재 개발수준
고강쇠 고무 재료	• 재료 개발	중	중
	• 최적거동을 위한 조합 및 배치 개발	중	하
점성유체	• 재료 개발	상	하
	• 최적거동을 위한 조합 및 배치 개발	상	중
납-고무	• 재료 개발	상	하
	• 최적거동을 위한 조합 및 배치 개발	상	하
마찰재료	• 재료 개발	중	하
	• 최적거동을 위한 조합 및 배치 개발	상	하
복합재료 또는 기타 비선형 댐퍼류	• 재료 개발	중	중
	• 최적거동을 위한 조합 및 배치 개발	상	하

※ 개발 난이도 및 현재 개발수준: (상 · 중 · 하)

제 4장. 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

1절. 연구목표 및 연구성과

연 차	연구목표	주요연구성과
1차년도	케이블 댐퍼 개발을 위한 기초 연구	- 구조물 진동제어용(케이블 이외) 기성댐퍼(수동형)에 대한 조사·분석완료 - 케이블댐퍼로 응용가능한 타산업분야의 감쇠장치에 대한 조사(→shock absorber) - 국내외 개발된 케이블댐퍼 조사·분류, 연구자료 입수·분석 및 해외주요업체(VSL,FIC)의 제품을 조사하고 그 기술수준과 특징을 분석 - 그밖에 차년도 계획중인 일부 시제품(실험용)을 제작하여 기초물성실험(동특성실험) 추진중이며 현재 가설중인 사장교에 대한 현장 모의실험 실시
	케이블 댐퍼 설계기준 관련 기초 연구	- 케이블 진동제어에 관한 국내외 설계지침을 입수하였으며 국내지침에 대해서는 개선사항 모색중 - 해석알고리즘 검증에 위한 실내실험시설 (길이 45m, 경사 8.4°)을 정비하여 자유감쇠진동실험 수행중
2차년도	케이블 댐퍼 시제품 제작	기존 국내 기술을 활용한 케이블 댐퍼를 고안하여 시제품제작
	케이블 댐퍼 개발을 위한 실험 및 해석적 연구	새그를 고려한 케이블 고유진동수의 해석적 산정 기법 개발 (대한토목학회논문집 제28권 제1A호, pp.125~133)
	케이블 댐퍼 설계 기준 관련 상세연구	댐퍼도입에 의한 사장 케이블의 제진방안 (Drift Version) 참고문헌: 댐퍼도입에 의한 사장 케이블의 제진설계(대한토목학회논문집 제28권 제1A호, pp.51~58)
	케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램 검증에 위한 실험	실내외 검증실험을 통한 역해석 프로그램 개발
	실규모 케이블 가진을 위한 가진기 개발	케이블 댐퍼 시제품 제작 후 성능평가를 위한 가진기 개발 연구를 차년도로 이월
3차년도		-
		-

2절. 연구개발의 목표치 대비 실적치

1. 1차년도

연구목표	성과지표	목표치	실적치	성과물 명칭
케이블 댐퍼 개발을 위한 기초 연구	특허출원 건수(국내/국외)	1건	1건	기존형식을 응용한 케이블 댐퍼 특허출원
	시제품 출시 건수	1건	1건	고감쇠 고무댐퍼 시험용 시제품 제작
	산학연 강좌건수	1건	1건	케이블 진동 기술강좌
	공공 서비스 제공	1건	1건	웹기반 자료 공유 시스템 마련
	번역	1건	3건	케이블 댐퍼 관련 번역
	학술회의 발표 논문건수(국내/국외)	1건	1건	케이블 댐퍼 관련 연구(한국소음진동공학회)
	연구시설고도화	1건	1건	연구시설 업그레이드(PWS 케이블 설치)
	주요연구시설이용도	2건	2건	PWS 케이블 이용건
	연구시설 운영여건 구축	2명	2명	운영전반에 관한 전문관리요원 확보
케이블 댐퍼 설계 기준관련 기초연구	학술지 게재 논문 건수(국내/국외)	1건	2회	대한소음진동공학회, 대한토목학회(심사중)
	기술확산을 위한 상호 교류 정도	1회	1회	케이블 진동 기술강좌 대체

2. 2차년도

연구목표	성과지표	목표치	실적치	성과물 명칭
케이블 댐퍼 시제품 고안 및 제작	댐퍼 시제품 출시건수	1건	1건	고강쇠 고무댐퍼시제품
	특허출원건수	1건	1건	특허 출원중
케이블 댐퍼 개발을 위한 실험 및 해석적 연구	실험을 통한 검증	전문가 타당성 확보	-	전문가 타당성 확보 (자문위원의 확보에 어려움이 따라 전문가 확보를 완료하지 못하였음)
	학술지 게재 논문건수	1건	1건	에너지방정식에 기초한 사장 케이블 기본진동수 추출 (대한토목학회논문집 제28권 제1A호, pp.125~133)
케이블 댐퍼 설계 기준관련 상세연구	전문가 타당성 확보	1건	1건	댐퍼도입에 의한 사장 케이블의 제진설계 (대한토목학회논문집 제28권 제1A호, pp.51~58)
케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램 개발	프로그램	1건	1건	케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램 - 서울대 위탁연구를 통하여 역해석 프로그램 검증 실시, 추가적인 검증필요
실규모 케이블 가진을 위한 가진기 개발	가진기	1건	0.5건	고강쇠고무 댐퍼의 실험에 성능을 증대시킨 가진기를 사용하였으며 추가로 새로운 형태의 고성능 가진기 개발이 필요함(진행중)

다. 산학연 강좌전수

- 2007년 5월 16일 양재 AT center에서 케이블 진동 및 댐퍼에 관한 기술강좌

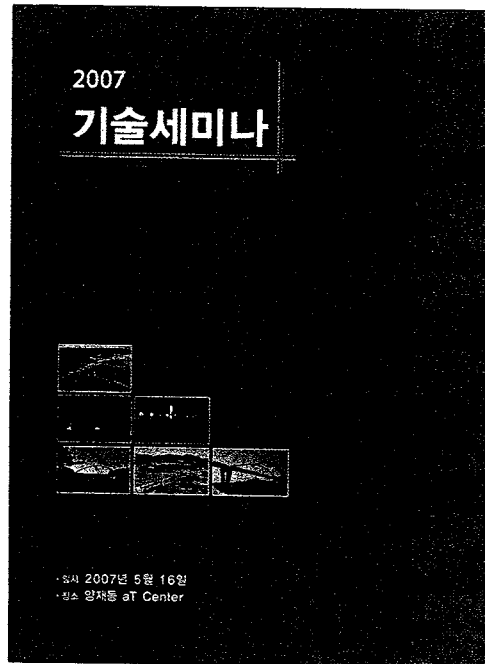


그림 4.2.3 기술세미나 발표자료서

라 .공공 서비스 제공

- 웹기반 자료공유 시스템을 마련하여 기존의 관련 연구자료 및 본 연구 진행 사항등을 공유할 수 있는 기반을 구축하여 케이블 댐퍼 및 케이블 지지교량에 대한 기술적인 자료의 공유를 통한 국내 기술발전에 기여

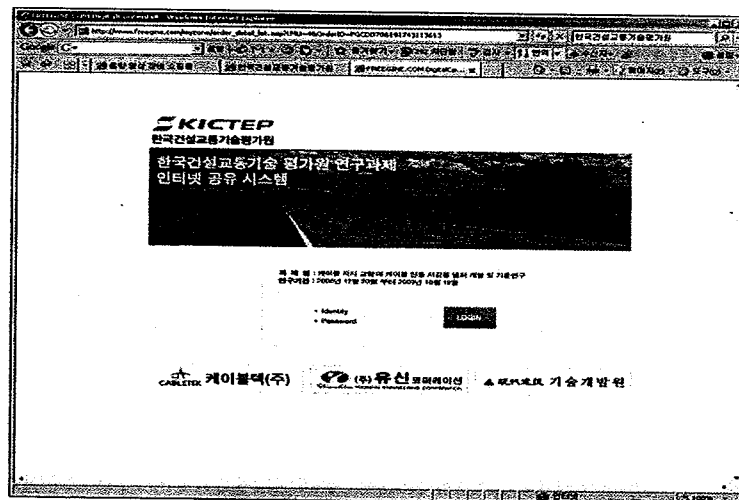


그림 4.2.4 웹기반 자료공유 시스템

마. 전문 학술 서적번역

- 장대 사장교의 케이블의 내풍 안전성에 대한 조사연구
 - : 태풍에 의한 강풍 시 동 고베대교 케이블에서 관측된 케이블 진동의 발생 기구 원인 분석 및 장대 사장교 케이블의 내풍 안전화 대책
- 사장교 케이블 및 거더부의 내풍 안정성에 관한 조사연구
 - : 타원판(회전마찰판) 부착 케이블의 제진 메커니즘
 - : 장대 사장교 거더 단면의 소용돌이 여진 특성
 - : 동 고베대교의 실기 관측 데이터 해석
- 장대 교량의 케이블 및 거더의 내풍성에 관한 연구
 - : 난기류 속에서의 케이블의 Galloping Instability의 메커니즘 분석

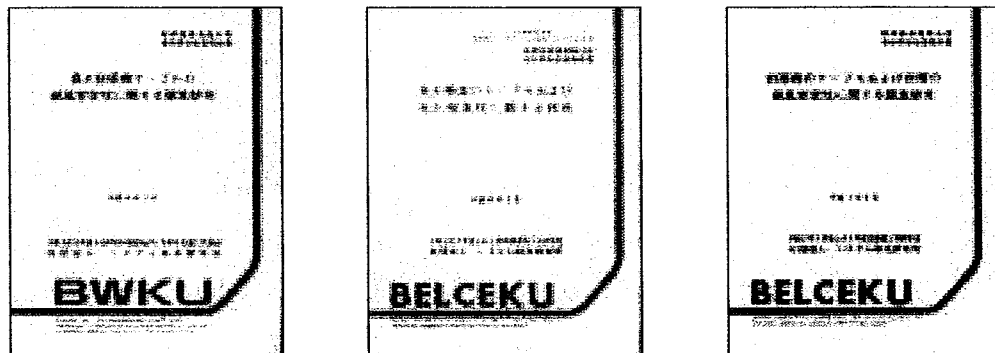
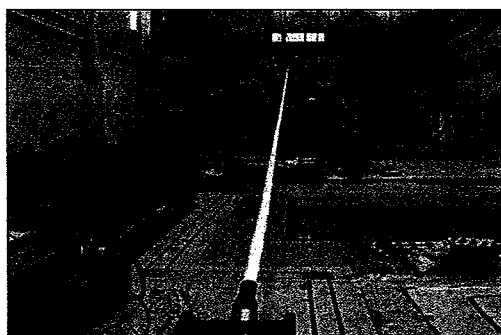


그림 4.2.5 전문학술 서적

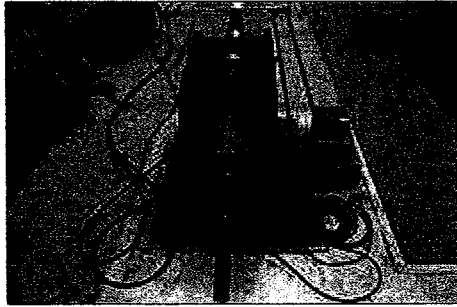
바. 학술회의의 논문 발표 : 소음진동 공학회 춘계학술대회 발표. ‘사장교 케이블의 감쇠성능 향상을 위한 댐퍼의 비선형성 연구’

사. 연구시설 구축 및 운영 (PWS 케이블설치)

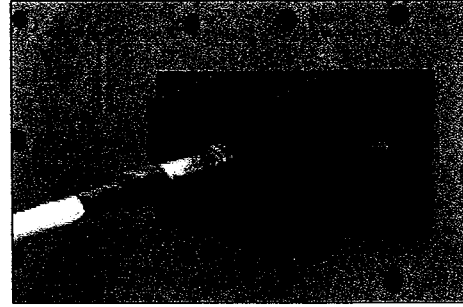


구 성	직경 7mm 스트랜드 @ 61EA
길 이	44.679 m
직 경	80 mm
경 사	8.38 °
단위중량	20.3 kg/m
탄성계수	200 GPa

그림 4.2.6 케이블이 설치된 실험실



상부 정착단



하부 정착단

그림 4.2.7 설치된 케이블의 정착단

아. 주요 연구시설 이용도

- PWS 케이블 시스템 : 이용인원 5명, 이용건수 2건(현대, 서울대), 이용시간 약 30일

자. 연구시설 운영여건 구축

- PWS 케이블 시스템 운영 요원 확보 : 현재 인원 2명(이성형, 김신영)

차. 케이블 동특성 파악을 실험

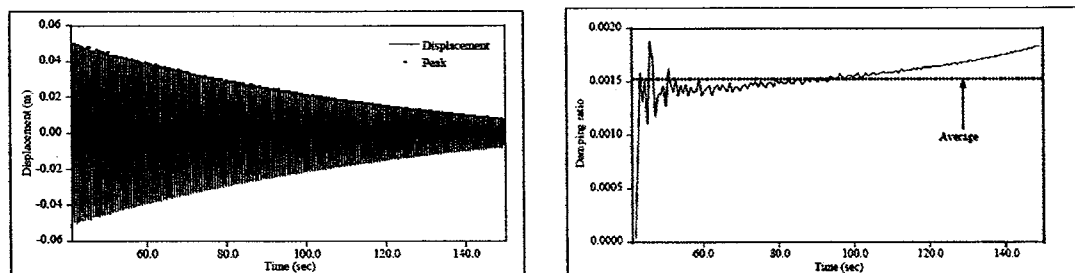


그림 4.2.8 PWS 케이블 동특성 실험결과

- 소음진동공학회 논문집에 연구성과 제출(심사통과후 게재 준비중)

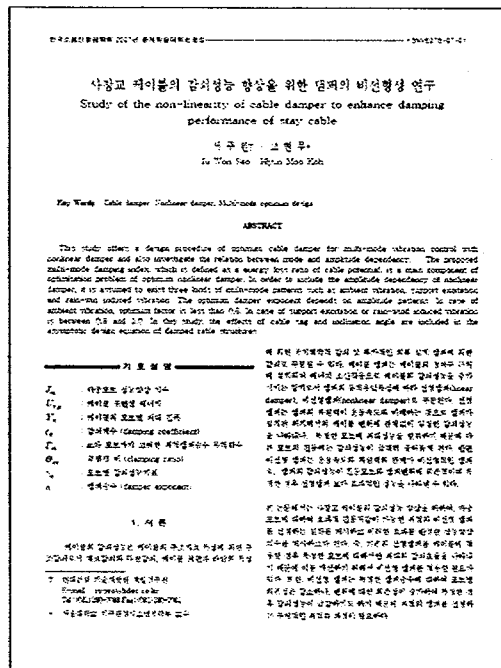


그림 4.2.11 학술지에 게재된 연구성과 논문

나. 기술확산을 위한 상호교류

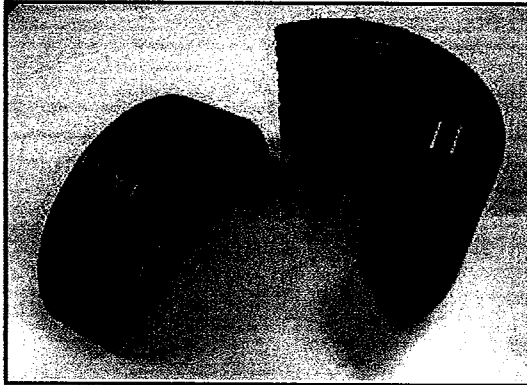
- 케이블텍(주)의 주관으로 산학연 기술강좌 실시(2007. 5. 16/양재 AT center)

4. 2차년도 연구성과

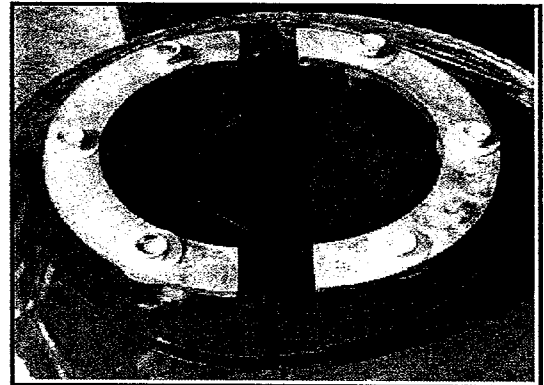
(1) 케이블 댐퍼 시제품 고안 및 제작

가. 특허 출원 건수(국내외)

- 기존 등록특허(등록번호:10-0816059 - 케이블텍(주)) 제품인 고감쇠 고무댐퍼를 보완한 새로운 고무댐퍼 출원중



기존 등록제품



출원 준비중인 보완제품

그림 4.2.12 케이블 댐퍼 보완 전·후 제품

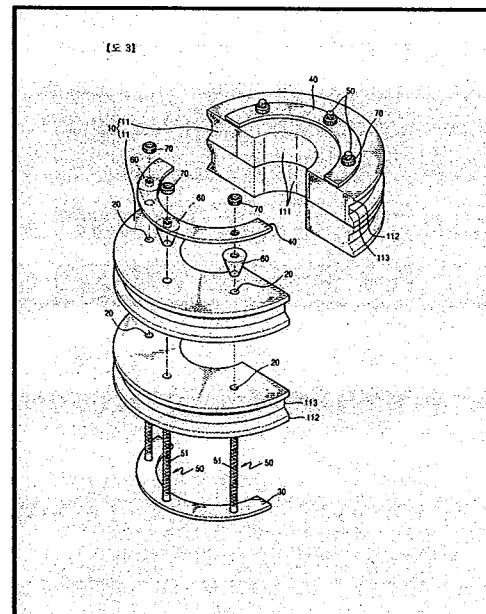
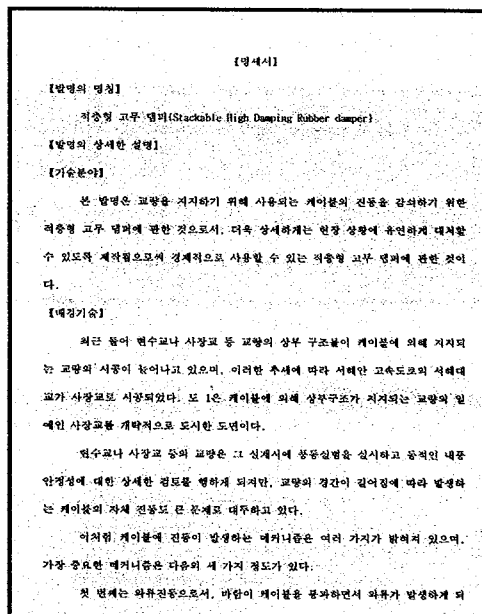


그림 4.2.13 보완된 케이블 댐퍼 출원 명세서

나. 시제품 출시

- 고감쇠 고무댐퍼 시험용 시제품 제작

(한국기계연구원에서 성능실험 진행중이며, 현장적용 실험을 실시하였음)



그림 4.2.14 고감쇠 고무 케이블 댐퍼의 시제품

(2) 케이블 댐퍼 개발을 위한 해석적 연구

가. 학술지 게재 논문 건수

- 대한토목학회 논문집에 연구성과 논문 제출(제28권 제1A호, pp 125~133)

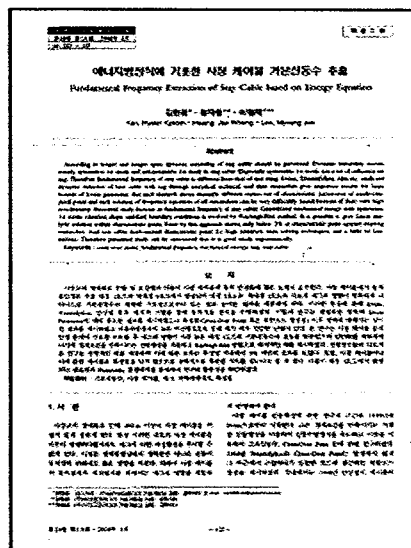


그림 4.2.15 학술지에 게재된 연구성과 논문

(3) 케이블 댐퍼 설계기준관련 상세연구

가. 학술지 논문 게재를 통한 전문가 타당성 검토

- 대한토목학회 논문집 연구성과 논문 제출 (제28권 제1A호, pp 51~58)

: 타 연구과제와 공동 작업한 연구성과물로서 다수의 내용이 본 수행연구
과제내용으로 포함되어 있으나, 성과물은 타 연구과제로 등록되었음.

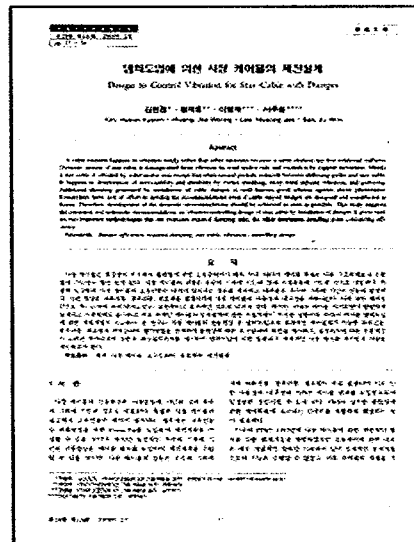


그림 4.2.16 학술지에 게재된 과제수행 논문

(4) 케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램

- 케이블의 가속도를 변위로 재구성하여 이를 바탕으로 무응력길이와 고유감쇠비를 추정하는 역해석 방법 - 서울대 위탁연구 수행

(5) 실규모 케이블 가진을 위한 가진기 개발

- 케이블 가진을 위하여 가진기 개발을 계획하였으며, 2-3차년도에 걸쳐 연구를 수행함

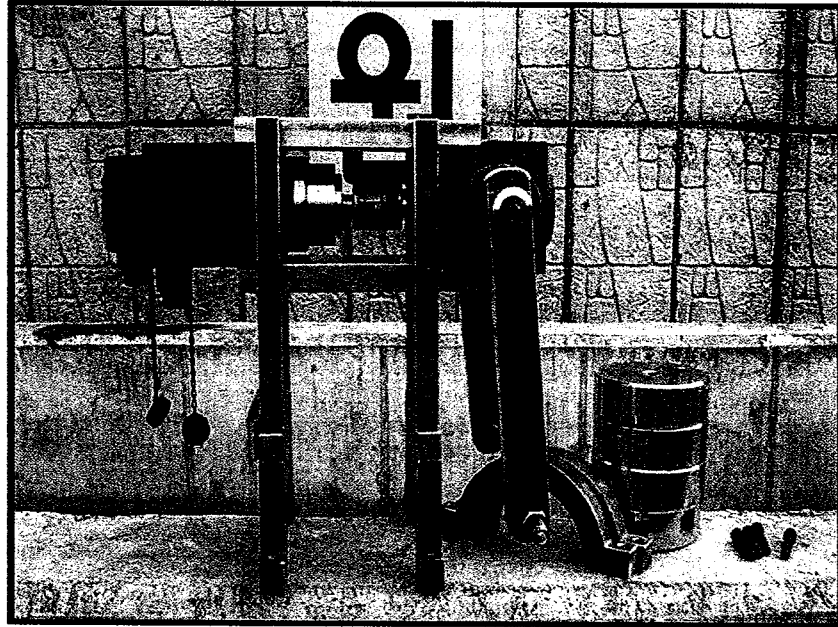


그림 4.2.17 용량을 증가시킨 케이블 가진기(2차년도 연구성과)

3절. 연구개발의 주요내용

1. 구조물용 수동댐퍼에 관한 문헌조사

우리나라는 30년전 남해대교 건설을 시점으로 진도대교, 골산대교가 거의 동시에 완공된 이후, 올림픽대교, 서해대교, 영흥대교, 삼천포대교 등이 사장교 형식으로 건설되어 공용중에 있으며 현재에도 인천대교, 마창대교 등 다수의 교량이 사장교 형식으로 설계되거나 시공 중에 있다. 사장교 케이블은 외부 하중으로 인하여 발생된 변형을 억제 할 수 없으며, 매우 낮은 감쇠비를 갖기 때문에 진동에너지를 소산시키지 못한다. 따라서, 사장 케이블은 시공뿐만 아니라 건설 후 유지관리가 매우 중요한 사장교의 주요 부재이다. 사장교의 진동을 제어하기 위하여 다양한 제어방법에 대한 연구가 진행 중이며 케이블의 표면에 Helical fillet, Dimple등의 공기역학적인 처리를 하는 방법, 케이블과 케이블을 서로 연결하는 Cross-tie를 사용하여 진동을 제어하는 방법, 케이블의 정착부 부근에 수동형 감쇠기를 설치하는 방법 또는 능동 및 반능동형 감쇠기를 설치하여 케이블에 발생한 진동에너지를 소산시키는 방법등이 있다.

케이블의 표면에 공기역학적인 처리를 하여 진동을 제어하는 방법은 일정영역의 진동수의 진동만을 제어한다는 한계가 있으며, Cross-tie를 사용하여 케이블을 서로 연결하는 방법은 교량의 미관을 해친다. 또한, 능동 및 반능동형 제어장치를 사용하여 사장 케이블의 진동을 제어하는 방법에 대한 연구는 현재 국내외의 많은 연구진에 의하여 진행중에 있다. 하지만, 능동형 감쇠기는 제어장치 및 전원에 대한 의존성 때문에 실 교량에 적용성이 떨어진다.

따라서, 본 연구에서는 실 교량에 적용함에 있어서 성능 및 내구성, 유지관리, 시공성 등이 우수한 수동형 감쇠기를 개발하고자 한다. 따라서, 케이블 진동제어용 감쇠기를 개발함에 앞서 케이블의 진동원인 및 그에 따른 감소방법과 보편적으로 사용되고 있는 교량 진동 제어용으로 수동 댐퍼에 대한 포괄적인 문헌조사를 실시하였다

2. 케이블의 진동 원인

사장교의 케이블은 단면적에 비해 비지지 길이가 길어서 휨강성이 낮을뿐만 아니라 초기장력에 비해 동적 거동시 나타나는 축방향 장력의 크기가 작으므로 케이블 자체의 감쇠비는 대단히 낮다. 따라서, 이러한 부재들에 상시진동 및 유해진동이 발생할 가능성은 다른 구조 부재들보다 훨씬 높다. 또한, 사장교 구조계를 볼 때 사장교 케이블은 교량의 데크 지지력을 직접 주탑에 전달하는 역할을 하며 케이블 정착부의 특수한 형태 및 중요도로 인해 상시진동 및 과도한 진동에 대해 적극적인 대응이 필요한 부재이다.

여기선, 케이블에서 발생하는 대표적인 진동 현상과 그 원인에 대해 언급하며 간단한 수식으로 진동현상의 특징에 대해 조사하였다. 또한 이러한 여러 가지 진동을 감소시키는 기존의 방법들을 공기역학적인 방법과 구조적인 방법으로 분류하여 간단히 조사하였다.

가. 케이블 진동 원인

케이블의 진동은 2, 3개의 케이블만이 진동하는 국부 진동(Local vibration)과 케이블, 보강형, 주탑이 일체로 진동을 일으키는 전체 진동(Global vibration)이 있다. 국부 진동에는 와류진동, 깰로핑, 웨이크 깰로핑, 풍우진동 등이 있으며 전체 진동에는 지점가진에 의한 진동등이 있다.

(1) 와류진동(Vortex Shedding)

와류에 의한 진동은 와류의 생성주기가 근사적으로 케이블의 고유주기와 일치하는 풍속이 될 때 발생한다.

일반적인 와류진동(Karman vortex shedding)이 발생하는 조건은 다음과 같이 무차원 풍속(Reduced velocity)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{S} = \frac{U}{fD} = 5 \sim 10$$

여기서, f 는 와류생성 진동수(shedding frequency), D 는 케이블 직경 그리고 U 는 풍속, S 는 스트로할(Strouhal)수이다. 케이블과 같은 원형 단면은 스트로할 수가 0.18정도이다.

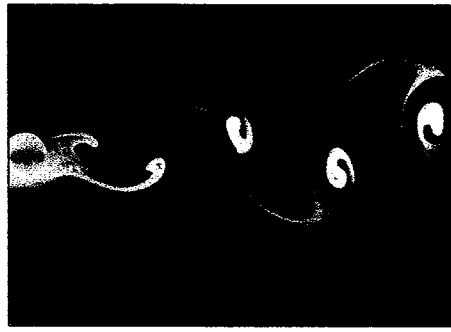


그림4.3.1 원형단면 뒤에 발생한 와류

와류의 생성주기가 구조물의 고유 주기와 비슷한 풍속대에서는 풍속이 약간 변하더라도 와류 생성주기는 변하지 않아서 약간의 풍속변화에 대해서 진동이 없어지게 되며 이를 Lock-in현상이라고 한다. 이러한 현상으로 인해 진동의 진폭은 케이블 직경의 절반을 초과하지 않는다.

(2) 갤로핑(Galloping)

갤로핑은 공기역학적 리프트 혹은 바람의 각도에 따라 변하는 바람 직각방향 힘에 의해 발생하는 불안정 현상이다. 즉, 자발공기력(self-excited force)의 작용에 의한 발산 진동으로 진동 발생 자체가 케이블 정착구에 파손을 야기할 수 있다. 바람에 의해 잘리는 케이블 단면 형상이 원형일 때는 리프트 힘과 같은 바람 직각 방향 힘이 단면 상, 하부에서 거의 평형을 이루므로 발생 가능성이 적으나 경사진 케이블에서와 같이 바람이 통과하는 단면 형상이 원형이 아니거나 비 혹은 얼음에 의해 단면 형상이 일정하지 않으면 리프트 힘이 생기고 갤로핑 현상이 발생할 수 있다.

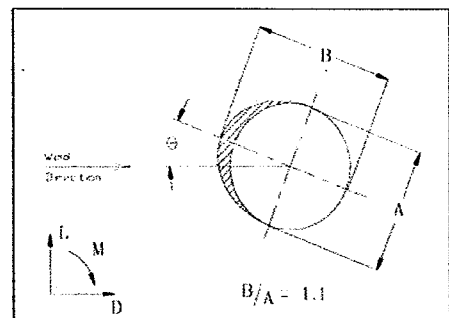
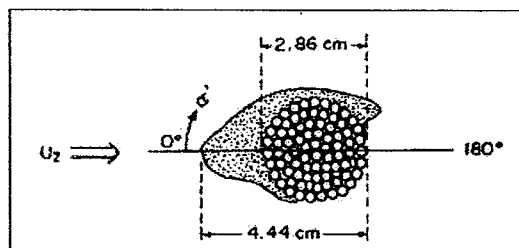


그림 4.3.2. 갤로핑 발생 매커니즘

갤로핑이 발생하지 않을 조건을 스크루톤 수 S_c 에 따른 무차원 임계풍속 $\frac{U_{crit}}{fD}$ 으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{U_{crit}}{fD\sqrt{S_c}} < 35 \sim 40$$

여기서, S_c 는 $m\xi/(\rho D^2)$, m 은 케이블의 단위길이당 질량, ξ 는 케이블의 감쇠비, ρ 는 상온에서 공기밀도로서 $1.23kg/m^3$ 이다.

(3) 웨이크 갤로핑(Wake Galloping)

웨이크 갤로핑은 다른 구조요소들에서 발생된 와류속에 케이블이 존재하여 발생하는 공기역학적 불안정현상으로 여러 다발로 이루어진 케이블 시스템이나 바람의 영향이 사장교 교축방향인 경우에 발생할 수 있다. 현장측정이나 풍동 실험 결과에 의하면 다음과 같은 경우에 하류측 케이블이 불안정해진다.

$$\frac{W}{D} = 1.5 \sim 6$$

여기서, W 는 케이블 중심간 거리이다.



그림 4.3.3. 공기역학적 불안정으로 인한 웨이크 갤로핑

(4) 풍우진동(Rain-Wind vibration)

풍우진동은 다음 그림과 같이 케이블 표면의 상부 혹은/그리고 하부에 생기는 물줄기(rivulet)에 의한 단면 현상변화에 따라 발생하는 리프트 힘으로 가진 되는 갤로핑 현상으로 볼 수 있다. 하지만 케이블 표면에 형성된 물줄기는 표

면에서 움직이며 케이블의 진동변위 및 풍속 증가에 따라서 물줄기의 일부는 표면에서 떨어져 나가거나 바람에 날려 가는 등의 거동을 하여서 갯로핑과는 달리 발산 진동은 아니다. 또한, 케이블에 유해한 진동을 발생시키는 가장 중요한 원인이며 케이블의 진동 감소를 위한 설계시 감쇠비의 임계치는 대부분 풍우진동의 기준을 따르게 된다.

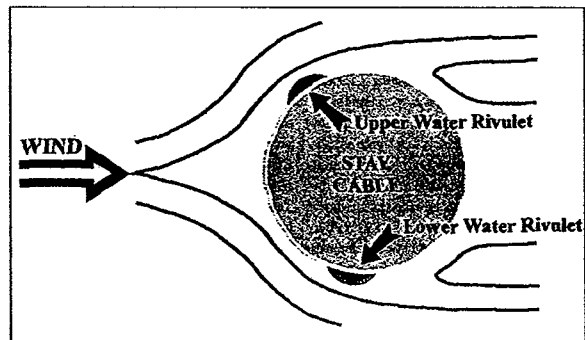


그림 4.3.4. 풍우진동 발생 매커니즘

표4.3.1 풍우진동 방지를 위한 소요 감쇠비

케이블 표면상태	기준		비고
매끄러움	PTI(Irwin)	$S_c \geq 10$	Draft
표면처리	Fuzier	$S_c \geq 4$	표면은 나선형 돌기, Dimple등
매끄러움	Yoshimura	$S_c \geq 8 \sim 16$	경험적인 소요감쇠비로부터 도출

풍우진동의 방지 대책으로는 주로 케이블 단면 형상을 변화시키는 공기 역학적 방법을 사용하지만 풍우진동에 대한 단정적인 연구결과가 없으므로 케이블에 감쇠비를 증가시키는 구조적인 방법을 함께 사용한다. 케이블에 감쇠비를 증가시킬 때 소요 감쇠비에 대해서도 여러 가지 기준이 제시되어 있다. 현재까지 제안된 풍우진동 방지를 위한 소요 감쇠비에 대한 제안식은 표 1에 정리되어 있으며 이는 공기역학적 진동 문제에서 중요한 무차원 수 인 스크루톤 수 S_c 에 기초하여 제시되어 있다.

(5) 지점가진에 의한 진동

케이블은 지점 가진에 의해 주형이나 주탑의 동적 변위가 발생하여 케이블의 고유진동수와 동일한 진동하게 되면 케이블은 공진하게 되며 동적 불안정 상태가 된다.

3. 케이블의 진동 감소 대책

케이블의 상시진동 및 유해한 진동을 줄이기 위한 방법으로는 크게 공기역학적 방법과 구조적인 방법이 있다. 공기역학적인 방법은 케이블 표면의 형상을 특별하게 변화시켜 공기역학적으로 안정하게 만드는 목적이 있으며 케이블에 나타나는 여러 가지 진동현상에 대해 모두 대처할 수는 없다. 반면에 구조적인 방법은 보다 넓은 범위에 다양한 기능으로 활용되고 있다. 일반적으로 케이블의 제진대책 중 공기역학적 방법 보다는 직접적인 구조적 방법을 주로 사용한다.

가. 공기역학적 방법

공기역학적 방법은 케이블의 표면에 돌기나 요철 등을 설치하여 단면 형상을 바꾸는 방법이다. 나선형 돌기(Helical strakes), Cable fins 등은 주로 와류진동을 방지하기 위해, Axial grooves, Dimple 등은 풍우진동을 방지하기 위해서 많이 사용된다. 하지만 나선형 돌기 또한 풍우진동 방지용으로 사용되기도 한다. 그림 4에 풍우진동 방지를 위해 케이블에 시공되어 있는 공기역학적 예가 나타나 있다. 이것은 케이블 표면의 물줄기의 흐름을 차단하여 바람에 의한 불안정한 상태를 만들지 않기 위해 설치된다. 또한, 이러한 종류의 표면돌기가 목적하는 진동에 대한 제진 효과를 확보하기 위해서는 돌기의 배치 형상, 간격 그리고 크기 등을 풍동실험을 통하여 최적치로 산정하여야 한다.

나. 구조적 방법

케이블의 고유 진동수를 변화시켜서 풍우진동 등 유해한 진동이 발생하는 진동수에서 케이블 진동을 분리시키며, 케이블 시스템 전체가 한꺼번에 거동함으로써 감쇠 및 강성을 증가시키는 역할을 하는 케이블 구속장치(restrainer), 스페이스(spacer) 등이나 케이블의 감쇠를 높여서 응답의 크기는 줄이기 위해 케이블의 그라우팅 재료 및 방법의 개선, 케이블 튜브의 재질 변경 등의 간접적 방법과 케이블에 댐퍼를 설치하여 부가 감쇠를 제공하는 직접적인 방법이 있다.

다. 케이블의 감쇠

구조물의 동적 응답은 감쇠에 크게 의존한다. 케이블의 경우 구조감쇠, 공기역학적 감쇠 그리고 더 큰 양의 감쇠가 필요할 경우에 사용하는 댐퍼에 의한 감쇠를 생각할 수 있다. 또한, 강성이나 고유진동수를 증가시키기 위해 사용되는 보조 케이블에 의해서도 부가 감쇠효과를 얻을 수 있다.

라. 구조 감쇠

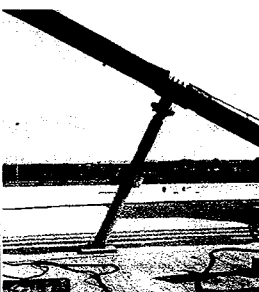
케이블의 구조 감쇠는 재료 감쇠와 마찰 감쇠(Coulomb damping)로 구성되며 이 두 가지는 서로 독립적으로 발생되지 않고 축방향 변형 및 휨 변형이

동시에 발생하므로 장력과 진폭에 따라서 기여도가 달라지게 된다. 즉, 케이블의 장력이 작으면(케이블의 변형 곡률이 커지면) 마찰감쇠가 지배적이고 장력이 커지면(변형곡률이 작아지면) 재료 감쇠가 지배적이 된다. 다음 표 2에 나타난 구조 감쇠비는 케이블의 형태에 따라 구분된 것으로 특히 Fressynet 스트랜드에 HDPE 관을 사용한 케이블의 경우 구조 감쇠 비가 케이블 길이의 함수로 나타나 있다. 케이블 길이가 길수록 구조 감쇠 비는 감소함을 알 수 있다.

4. 기존 케이블 댐퍼 현황조사

케이블 댐퍼는 국내업체의 경우 개발 실적이 미미하며 상용화된 사례는 극히 드물어 해외에서 개발된 케이블 댐퍼가 주가 되는 것으로 파악되었다. 사용재료와 거동 메카니즘에 따라 고감쇠고무 댐퍼(압축거동과 전단거동형), 오일댐퍼, 마찰댐퍼, 고정성유체 댐퍼, 납-고무댐퍼, MR 댐퍼, 회전 마찰식 댐퍼 등이 시공사례가 있는 대표적인 케이블 댐퍼의 종류인 것으로 조사되었다. 이중 MR 댐퍼는 반능동형 댐퍼로 분류된다. 이밖에 케이블 진동을 전자신호 또는 기계적 반응으로써 실시간 감지하여 상황에 따라 최적의 거동을 발현하게끔 능동제어형 케이블 댐퍼도 이론적으로 연구되고 있음. 다음은 대표적인 케이블 댐퍼의 특징과 시공사례를 정리하였음.

표 4.3.2 주요 케이블 댐퍼의 특징

	적용사진	특징	적용사례
오일 댐퍼		- 오일댐퍼를 케이블의 주진동 방향인 케이블 축의 수직방향으로 브레이스 형태로 설치하여 케이블 진동을 저감하는 방식. - 오일댐퍼는 기계장비에 제진장치로 오랜기간 적용되어온 장치이므로, 내구성과 피로성능이 입증된 장치임.	- 현존 사장교 케이블의 진동저감을 위해 가장 널리 사용된 방법. - Tokachi 대교(일본), Usui Bridge (일본), Fred Hartman Bridge(미국)외 다수
고감쇠 고무		- 고감쇠고무의 전단변형발생시 발생하는 감쇠력을 이용하여 케이블의 진동을 저감하는 방식. - 케이블 진동에 따른 고감쇠고무 자체 뿐만 아니라, 고감쇠고무와 철판 간 접촉부의 피로에 대한 검증이 요구됨.	- 진도대교 적용.
고정성 유체		- 케이블 주변에 고정성 유체를 설치하여 케이블의 진동을 저감하는 방식. - 최근에 사용된 형식이므로 내구성과 피로성능에 대한 검증이 요구됨.	- 댐퍼설치에 따른 진동저감효과가 검증되지 않아서 적용사례 미미. - 서해대교 외 적용.

납과 고무		- 납과 고무의 변단변형 발생시 생기는 감쇠력을 이용하여 케이블의 진동을 저감하는 방식. - 케이블 진동에 따른 고무와 납, 그리고 고무와 철판간 접촉부의 피로에 대한 검증이 요구됨.	- 제2진도대교 반영. - 추가적인 검증 필요.
-------	---	---	---

5. 타산업분야 댐퍼의 응용

국내 일반 댐퍼란 케이블 댐퍼용으로 개발되지는 않았으나 타산업분야, 특히 자동차와 기계설비분야에서 개발되어 케이블 댐퍼용으로 활용이 가능한 댐퍼를 대상으로 하였음. 오일댐퍼도 케이블 댐퍼 이전에 여러 산업분야에 걸쳐 이미 보편화된 댐퍼인 점을 착안한다면 타산업분야에서 사용되는 보다 발전된 댐퍼형식을 응용하여 케이블 댐퍼로 충분히 활용가능하리라고 판단.

6. Shock Absorber

타 산업에서 사용되고 있는 댐퍼의 하나인 Shock Absorber는 표 4.3.3과 같이 구분기준에 따라 여러 가지 종류가 있으며, 이들 shock absorber 중의 하나를 응용하여 새로운 케이블 댐퍼를 개발할 계획을 가지고 있음.

표 4.3.3 타 산업에서 사용되는 댐퍼(Shock Absorber)의 종류

구분기준	종 류
내용물	오일쇼바, 가스쇼바
겉모습	순정형태, 코일오버
실린더 구조	단통형(모노튜브), 복통형(트윈튜브), 탱크형
감쇠력 작용 방향	단동식, 복동식
감쇠력 가변 가능 여부	고정식, 조절식
모 양	스트럿, 카트리지, 텔레스코픽
실린더와 피스톤 로드 위치	순치식, 도치식

7. 고감쇠 고무 댐퍼

본 연구에서의 고감쇠 고무댐퍼는 기존의 전단변형에 의한 에너지소산방식의 댐퍼와는 달리 케이블을 감싸는 링 형식의 링댐퍼로써 고감쇠고무의 압축변형에 의한 감쇠력을 이용하여 케이블의 진동을 저감시키는 댐퍼형식이다. 링 타입의 형태이므로 전방향에 대하여 진동제어가 가능하며 그림 4.3.5(a)와 같이 고감쇠고무 사이에 썬기형태의 클립을 삽입하여 고무의 압축력을 증진시켰다. 그러나, 일체형의 고무댐퍼는 현장배치시 현장에 맞게 적용을 시키는데 어려움이 따르기 때문에 그림 4.3.5(b)와 같이 적층형태로 구성하여 시공성을 보완한 새로운 고감쇠고무댐퍼를 추가 개발하였다. 새로 보완된 고감쇠고무댐퍼는 케이블에 적합한 고무량을 산출하여 설치할 수 있도록 댐퍼의 두께를 조절할 수 있을 뿐만아니라 현장에서 케이블의 위치에 맞게 Hole을 뚫을수가 있어서 작업오차도 줄일 수 있는 장점이 있다. 따라서 기존의 댐퍼의 성능에 시공성을 보완하여 현장에 쉽게 적용할 수 있는 국산 케이블 댐퍼가 첫 연구결과로 출시된 것이다. 본 연구결과와 제품은 현장에서의 적용성 및 성능 실험을 1차적으로 마쳐 실제 교량에도 배치되었으며 현재 특허출원 중이다.

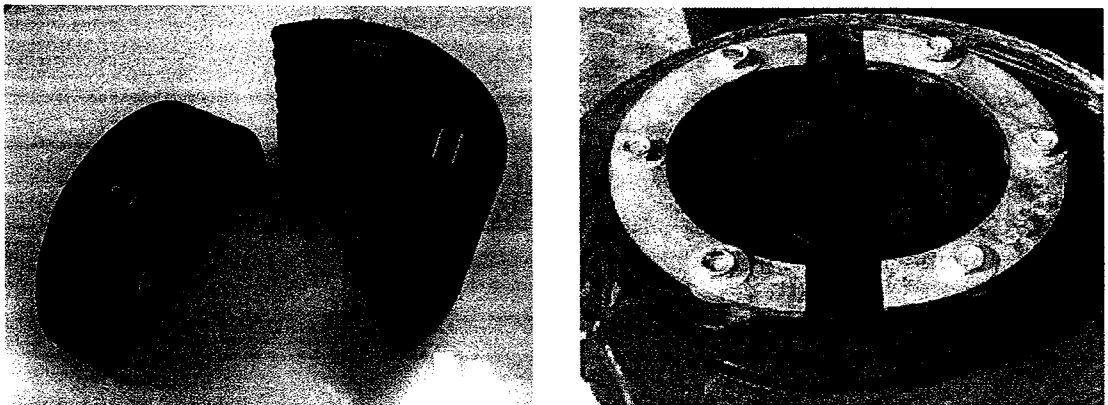


그림 4.3.5 고감쇠 고무댐퍼 시제품

※ 고감쇠 고무댐퍼 시제품에 대한 현장실험

1) 실험개요

실험 대상케이블의 진동을 제어하기 위하여 설계 및 설치된 HRD(High Damping Rubber Damper)는 케이블의 편심량에 따라 현장에서 제작을 할 수 있도록 고안되어졌으며, 효과적인 진동제어를 위하여 대상케이블에 최적의 성능을 발휘할 수 있는 고무량을 설계한 후 제작 및 실험하였다.

HRD의 평가기준은 케이블의 요구 감쇠비이며 이를 위하여 케이블 자체 감쇠비와 댐퍼가 설치된 케이블의 감쇠비를 측정 및 분석하였다.

2) 고감쇠 고무댐퍼 설계

① 개요

고무댐퍼의 경우 낮은 온도의존성 및 내구성이 확보되면서도 감쇠효과가 좋은 고감쇠 고무댐퍼가 개발됨으로써 케이블 댐퍼로서 재조명 받고 있다.

고무 댐퍼는 크게 두 가지 형태로 에너지 소산을 한다. 첫째는 고무의 압축에 의한 에너지 소산으로 그림 3.2.2와 같이 앵커 파이프의 끝단에 현장에서 고무를 녹여 부어서 시공을 하게 된다. 이러한 고무댐퍼는 도너츠 형태의 형상을 가지므로 케이블의 기하 형상에 관계없이 시공할 수 있는 장점이 있다. 또한 케이블 소선에서 발생하는 힘에 의한 2차 응력을 감소시키는 완충장치 역할도 겸할 수 있다. 둘째는 고무의 전단변형에 의한 에너지 소산 메커니즘으로 그림 3.2.1과 그림 3.2.3이 대표적인 예라고 할 수 있다. 고무의 전단변형을 이용하는 댐퍼의 경우 기본 댐퍼는 대부분 공장제작이며 케이블의 제원에 맞게 기본댐퍼 여러 개를 조합하여 원하는 감쇠효과를 낸다.

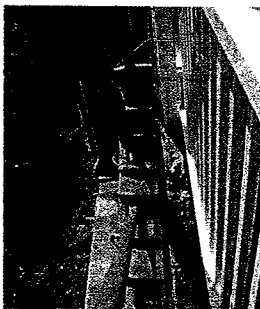


그림 4.3.6 고무댐퍼(진도대교)

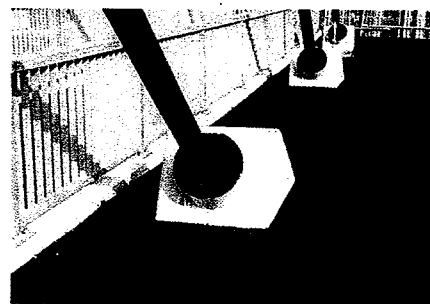


그림 4.3.7 고감쇠 고무댐퍼(타다라교)



그림 4.3.8 고감쇠 고무댐퍼 (타다라교)

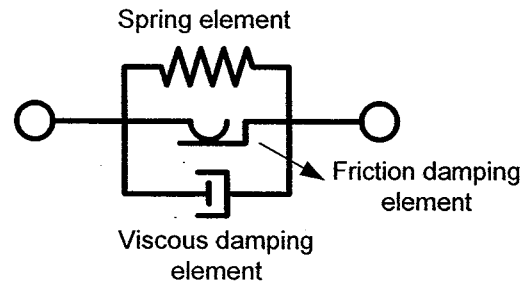


그림 4.3.9 고무댐퍼의 수학적 모델

실험 대상케이블의 경우 발생 가능한 유해진동을 제어하기 위하여 위에서 언급한 두가지 형태의 댐퍼 중 첫 번째의 고무의 압축변형에 의해 에너지를 소산시키며 현장에서 고무를 녹여 부어서 시공하는 형태보다 댐퍼의 품질면에서 더욱 신뢰할 수 있는 공장 제작된 링타입의 고감쇠 고무댐퍼를 사용한다.

② 설계식

고무댐퍼의 에너지 소산 메커니즘은 압축 변형형태나 전단 변형형태에 관계없이 분자간의 점성, 마찰 그리고 탄성의 작용으로 풀이될 수 있으며 그림 4.3.9에서와 같이 켈빈(Kelvin)모델에 마찰 감쇠요소가 병렬 연결된 것으로 모델링할 수 있으며 다음과 같은 구성방정식을 사용할 수 있다.

$$F_d(t) = k_d v_d(t) + c_d \dot{v}_d(t) + \mu N \quad (식 4.3.1)$$

여기서, $v_d(t)$ 는 댐퍼의 변위, N 은 댐퍼가 받는 압축력이다. μ 는 분자 사이의 마찰계수로 고무의 경우 그 크기가 매우 작으므로 때로는 무시하기도 한다.

이와 같이 고무 댐퍼는 변형 형태에 상관없이 강성과 감쇠계수로 그 거동을 설명할 수 있다. 따라서 고무 댐퍼의 강성과 감쇠계수를 실험으로 구하면 위의 식과 다음에서 언급하는 설계식을 이용하여 간단히 설계할 수 있다.

일반적으로 압축 변형 형식 고무의 탄성계수는 단면형상에 따라 달라지는데 실험에 의하면 형상에 따라 다음과 같다.(일본 철도차량공업회, 개정 방진고무)

$$S = \frac{L_1}{r_2 + r_1} \frac{1}{\ln(r_2/r_1)} \quad (\text{식 4.3.2})$$

$$E_{ap}/G = 4 + 3.209S^2 \quad (\text{식 4.3.3})$$

$$B = E_{ap} \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4} \right)_{\theta_1}^{\theta_2} + G \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} \right)_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (\text{식 4.3.4})$$

$$k_d = \frac{BL_1}{\ln(r_2/r_1)} \quad (\text{식 4.3.5})$$

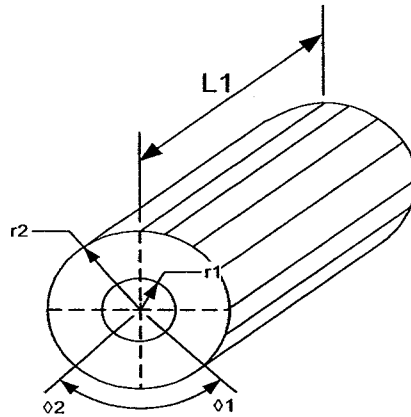


그림 4.3.10 관형 고무댐퍼의 모델

또한, 손실계수(loss factor)를 γ 라 하면 식 (1)에 나타난 감쇠계수와 관계는 다음과 같다.

$$c_d = \frac{\gamma k_d}{\omega} \quad (\text{식 4.3.6})$$

만일 관형 고무댐퍼의 기본형을 적층으로 조립하여 사용하는 경우, 손실계수의 변화는 없고 단지 댐퍼의 강성은 기본형의 개수에 비례하여 증가하게 된다.

한편 안상섭(2003)에 따르면, 새그가 없는 케이블에 지점으로부터 a 위치에 댐퍼가 설치되어 있는 경우, 댐퍼에 의한 부가 감쇠비는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\xi_n \approx \frac{\Delta\beta_n^\infty}{\Delta\beta_n^0} \frac{d}{(1+c)^2 + d^2} \quad (\text{식 4.3.7})$$

여기서, $c = \text{Re}[a \widetilde{F}_d / (T_0 \widetilde{v}_d)]$, $d = \text{Im}[a \widetilde{F}_d / (T_0 \widetilde{v}_d)]$ 이며 $\sim$ 는 댐퍼의 구성방정식을 Fourier변화하여 구해지는 복소량이다. 또한, $c = \frac{ak_d}{T_0}$,

$$d = \frac{a}{T_0} c_d m \omega_0 \quad \text{또는} \quad d = \gamma c \text{로 간단하게 표현할 수 있다.}$$

$\Delta\beta_n^\infty$ 은 댐퍼의 강성이 무한대이어서 댐퍼설치점이 고정점이 되는 경우 케이블-댐퍼 시스템의 무차원 고유진동수, $\Delta\beta_n^0$ 은 댐퍼가 설치되지 않은 케이블의 무차원 고유진동수이다.

새그가 없는 케이블의 경우, $\Delta\beta_n^\infty/\beta_n^0 = a/L$ 이 되지만, 새그 효과로 인해 이 값은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta\beta_n^\infty}{\beta_n^0} \approx \frac{a}{L} \alpha_s, \quad n=1,3,\dots \quad (\text{식 4.3.8})$$

여기서, $\alpha_s = (\tan \frac{\beta_n^0 L}{2} - \frac{\beta_n^0 a}{2})^2 / \left\{ \tan^2 \frac{\beta_n^0 L}{2} + \frac{12}{\lambda^2} (\frac{\beta_n^0 L}{2})^2 \right\}$ 이며, 일반적으로 $\alpha_s \leq 1$ 로 새그효과에 의해 케이블의 대칭모드에 대해 α_s 만큼 부가 감쇠비가 저하된다. 이러한 α_s 는 선형, 비선형 댐퍼에 관계없이 적용할 수 있다. 위의 식에서의 β_n^0 은 새그가 있는 케이블의 비감쇠 무차원 고유진동수가 되며 다음 식을 사용하여 근사화할 수 있다.

$$\beta_n^0 \approx \frac{n\pi}{L} \sqrt{1 + \frac{2\lambda^2}{\pi^4} \frac{[1 - (-1)^n]^2}{n^4}} \quad (\text{식 4.3.9})$$

케이블의 새그 효과를 고려하는 경우, 첫 번째 모드 고유진동수 ω_0 는 새그효과를 고려한 고유진동수이므로 식 4.3.9로부터 다음과 같다.

$$\omega_0 = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{T_0}{m}} \sqrt{1 + \frac{8\lambda^2}{\pi^4}} \quad (\text{식 4.3.10})$$

λ^2 은 Irvine의 파라미터로 케이블의 새그정도를 나타내는 무차원량이다. λ^2 은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\lambda^2 = \frac{EA}{T_0} \left(\frac{mgL}{T_0} \right)^2 \quad (\text{식 4.3.11})$$

여기서, θ 는 케이블 설치각이다.

모드별 케이블 최대 진폭과 댐퍼 최대 진폭 관계 및 댐퍼력은 안상섭(2003a,b)에 의하면 다음과 같다.

$$|\widetilde{v}_d| \approx \frac{\sqrt{(1+c)^2 + d^2}}{\beta_n^0 a} |\widetilde{v}_d| \quad (\text{식 4.3.12})$$

$$|\widetilde{F}_d| = T_0 \sqrt{c^2 + d^2} \frac{|\widetilde{v}_d|}{a} \quad (\text{식 4.3.13})$$

③ 고무댐퍼의 설계

댐퍼는 모듈형태이며 모듈의 두께는 케이블-댐퍼 시스템의 거동시 모듈이 휘거나 찌그러지는 등의 거동이 발생하지 않기 위해 50mm로 한다. 따라서, 주탑측과 거더

측, 양쪽에 각각 모듈형 댐퍼를 설치하는 것으로 가정하여 댐퍼를 설계한다. 모듈이 50mm 두께 이므로 모듈의 개수를 바꿔가면서 최대의 감쇠비를 나타내는 모듈 개수를 구한다. 또한, 댐퍼는 케이블 가이드 파이프의 끝단에 설치된다고 가정하였다.

고무의 손실율과 전단탄성계수(G)는 실험결과(한국 생활환경시험연구원, 2007)에 따라 0.287, 1.87MPa를 사용하였다.

이러한 조건으로 설계된 결과가 표4.3.4~표4.3.7에 나타나있다. 표에서 v_c 는 케이블의 최대 변위이며 본 설계에서는 사용성 조건인 $L/1600$ 기준을 사용하였다. 그때의 댐퍼 변위가 v_d 이다. F_d 는 댐퍼가 받는 힘으로, 이것은 케이블의 가이드 파이프에 전달된다.

3) 실험 내용

① 대상케이블의 제원

실험 대상 케이블의 제원은 표 4.3.4와 같다

표.4.3.4 실험 대상 케이블 제원

Cable No.	직 경	질 량	길이		고무량	
			제작길이	유효길이	주탑측	거더측
	mm	kg/m	m	m	mm(개)	mm(개)
CLR04_L	120	52.9	88.2	81.3	100(2EA)	100(2EA)
CLL09_L	125	60.1	145.0	140.2	100(2EA)	100(2EA)
CLR15_L	140	77	216.1	209.2	100(2EA)	100(2EA)

② 댐퍼 설계값

본 실험 대상 케이블에 대한 설계값은 표 4.3.5와 같다

표.4.3.5 실험 대상 케이블의 댐퍼설계값 단위 : %

Cable No.	고유감쇠비	댐퍼설치 추가감쇠비	총감쇠비	요구감쇠비
CLR04_L	0.188	0.173	0.361	0.170
CLL09_L	0.155	0.126	0.281	0.163
CLR15_L	0.112	0.094	0.206	0.159

4) 실험 결과

① 감쇠비 산정방법

댐퍼의 감쇠비를 산정하기 위하여 Low pass filtering 기법을 이용하여 노이즈를 제거하였다.

케이블의 감쇠비는 아래의 식과 같이 logarithmic decrement method를 이용하여 추정하였으며 m (주기수) = 1~10으로 적용하였다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi m} \ln\left(\frac{a_{n+m}}{a_n}\right) \times 100(\%) \quad (\text{식 4.3.14})$$

여기서, a_n 은 n 번째 주기의 가속도, a_{n+m} 은 $n+m$ 번째 주기의 가속도

감쇠비를 추정하는데 적용되는 케이블의 가속도값은 측정데이터 전체시간에서의 최대값의 30%~70%의 값을 사용하였다.

케이블의 감쇠비는 가속도(변위)의 크기에 따라 비선형적으로 변화하므로 각각의 가속도(변위)에 따른 감쇠비를 추정한 후 이 값들의 평균값을 케이블의 감쇠비로 한다.

② 케이블별 실험결과

표.4.3.6 실험 대상 케이블별 평균감쇠비

① CLR04_L

단위: %

시험종류	모 드	최소값		최대값		평 균 감쇠비
		가속도	감쇠비	가속도	감쇠비	
Test 1 (cable)	1차	0.626	0.063	1.184	0.120	0.089
	2차	1.473	0.052	2.947	0.200	0.118
Test 2 (cable+damp.+devi.)	1차	1.409	0.362	0.639	0.506	0.453
	2차	1.248	0.412	1.945	0.535	0.463

② CLL09_L

단위 : %

시험종류	모 드	최소값		최대값		평 균 감쇠비
		가속도	감쇠비	가속도	감쇠비	
Test 1 (cable)	1차	0.584	0.035	0.761	0.092	0.067
	2차	0.793	0.064	1.387	0.146	0.103
Test 2 (cable+damp.+devi.)	1차	0.297	0.195	0.216	0.324	0.263
	2차	0.628	0.218	1.117	0.298	0.254

③ CLR15_L

단위 : %

시험종류	모 드	최소값		최대값		평 균 감쇠비
		가속도	감쇠비	가속도	감쇠비	
Test 1 (cable)	1차	0.045	0.005	0.036	0.392	0.125
Test 2 (cable+damp.+devi.)	1차	0.034	0.004	0.052	0.573	0.258

5) 결과정리

표.4.3.7 실험 대상 케이블의 모드별 감쇠비 비교

단위 : %

Cable No.	모드	요 구 감쇠비	설계값		실험값		실험값/설계값		실험값 /요구감쇠비
			bare	damped	bare	damped	bare	damped	
CLR04_L	1차	0.170	0.188	0.361	0.089	0.453	0.47	1.25	2.66
	2차				0.118	0.463	0.63	1.28	2.72
CLL09_L	1차	0.163	0.155	0.281	0.067	0.263	0.43	0.94	1.61
	2차				0.103	0.254	0.66	0.90	1.56
CLR15_L	1차	0.159	0.112	0.206	0.125	0.258	1.12	1.25	1.62

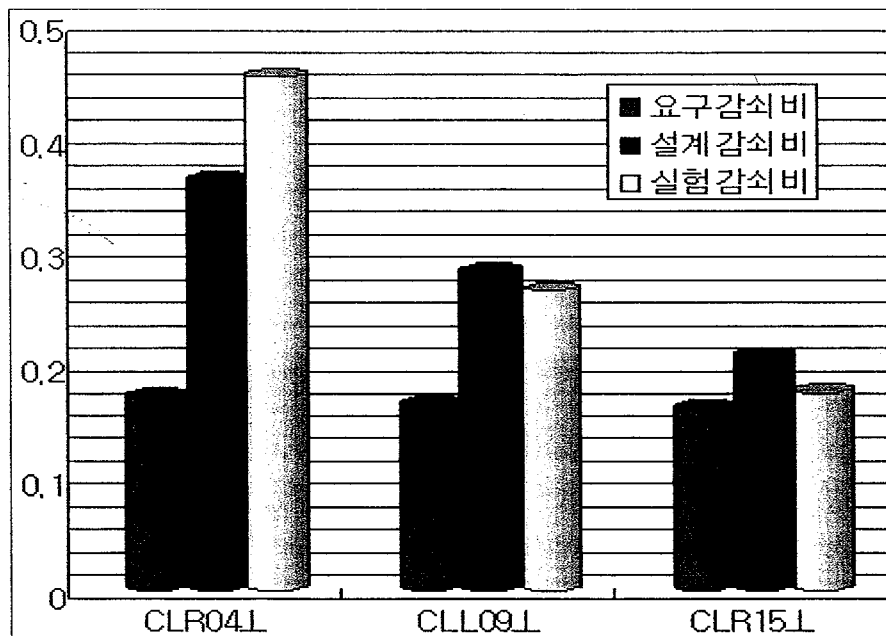


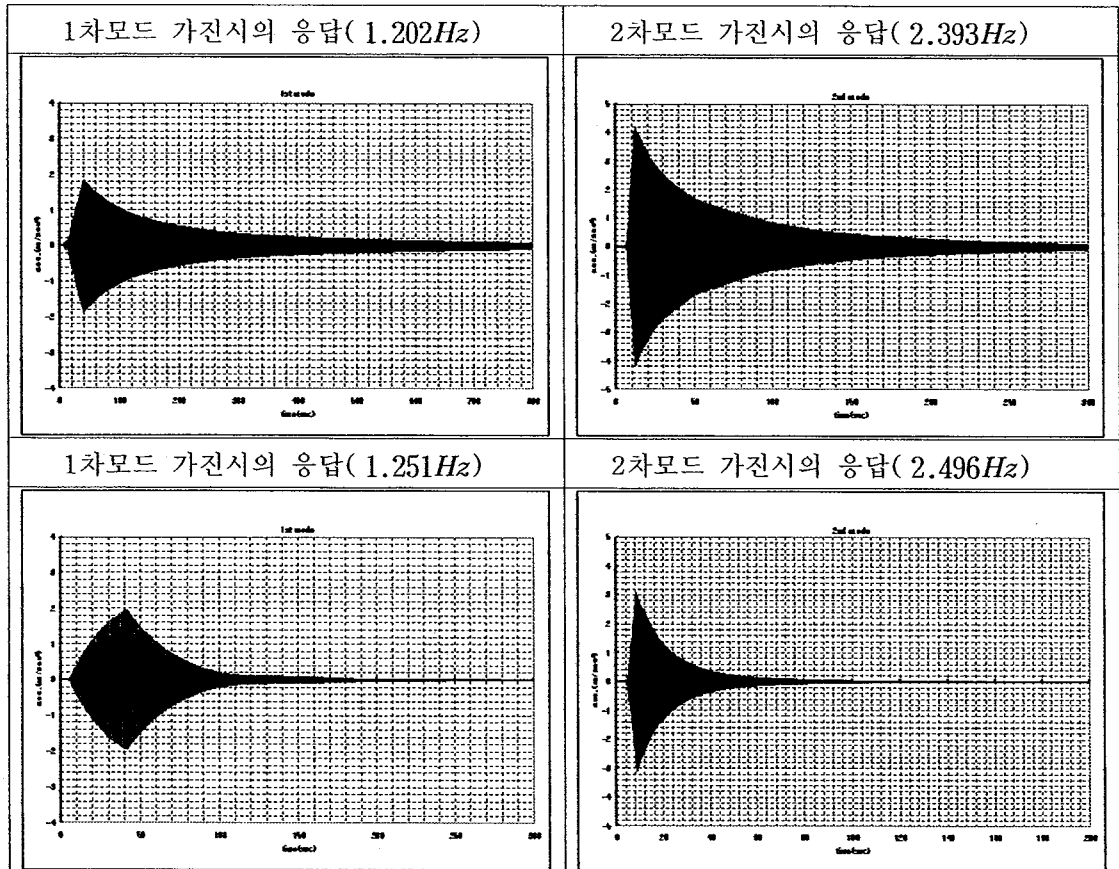
그림 4.3.11 1차모드 가진시의 케이블 감쇠비 비교

위의 그래프에 각각의 케이블에 대한 감쇠성능 및 요구 감쇠비와의 크기를 비교하였다. 실험결과 값이 설계값에 비하여 약 90%~128%정도의 성능을 보였으며 요구감쇠비 대비 156%~272%까지의 성능을 보였다. 따라서, 대상 케이블에 발생 가능한 유해진동을 제어하는데 HRD가 충분한 제진성능을 가지고 있다고 할 수 있다.

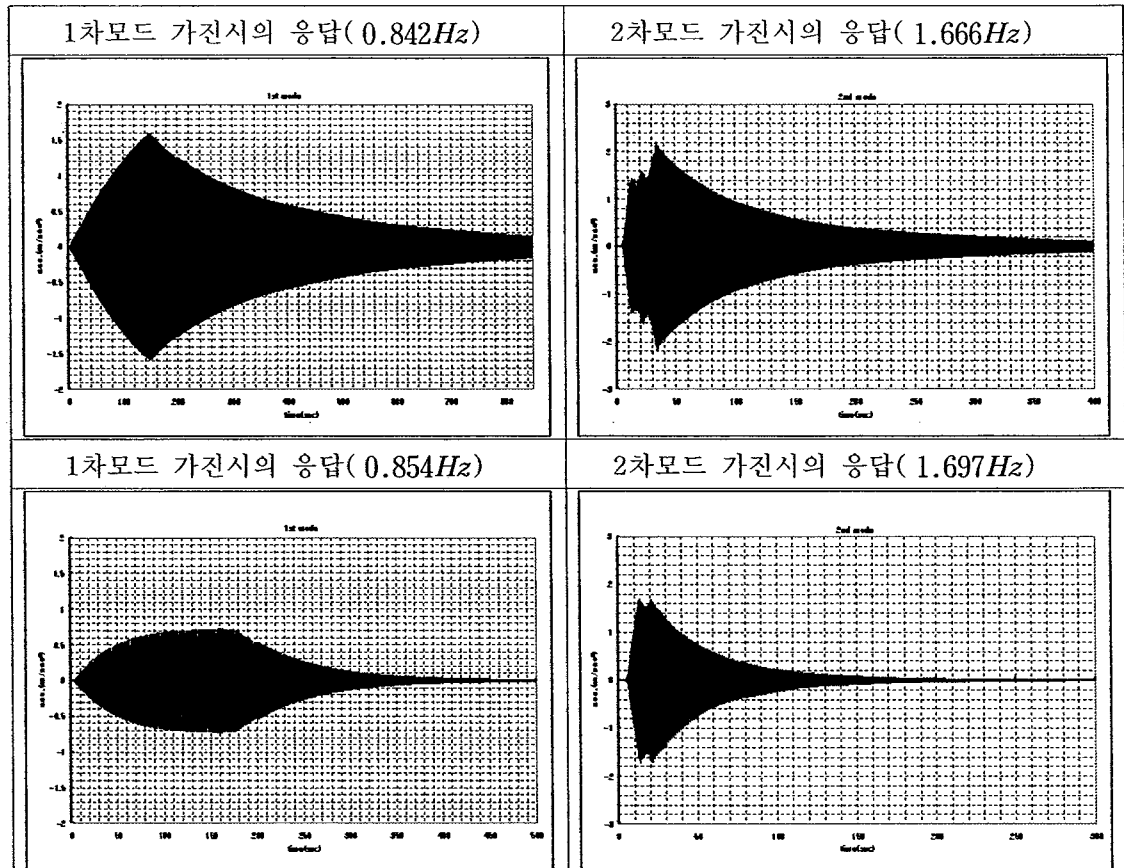
5) 실험 Data 및 감쇠비 분석 Data

① 실험 Data

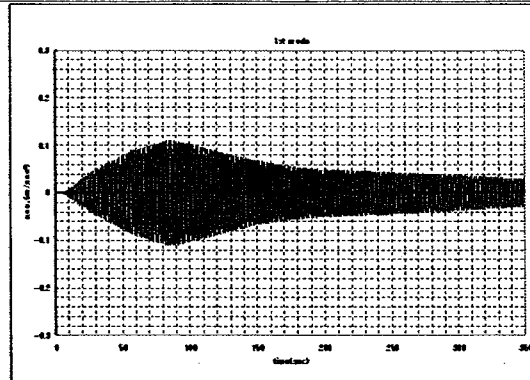
① CLR04_L



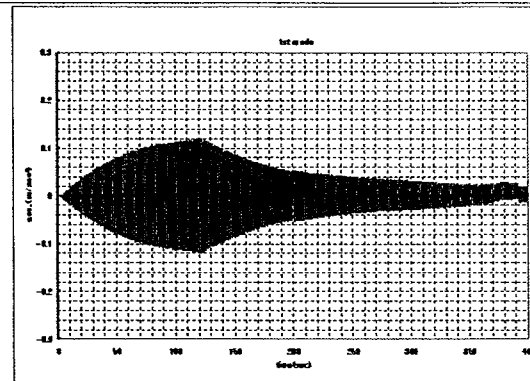
Ⓑ CLL09_L



1차모드 가진시의 응답 ($0.568Hz$)



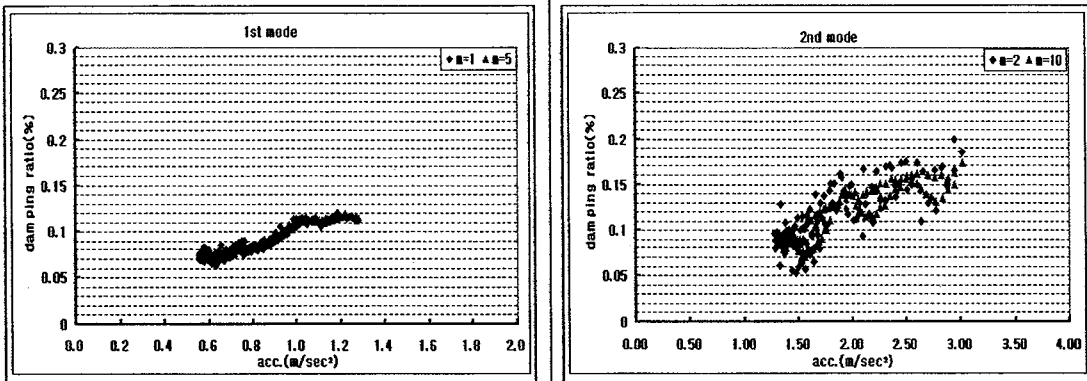
1차모드 가진시의 응답 ($0.574Hz$)



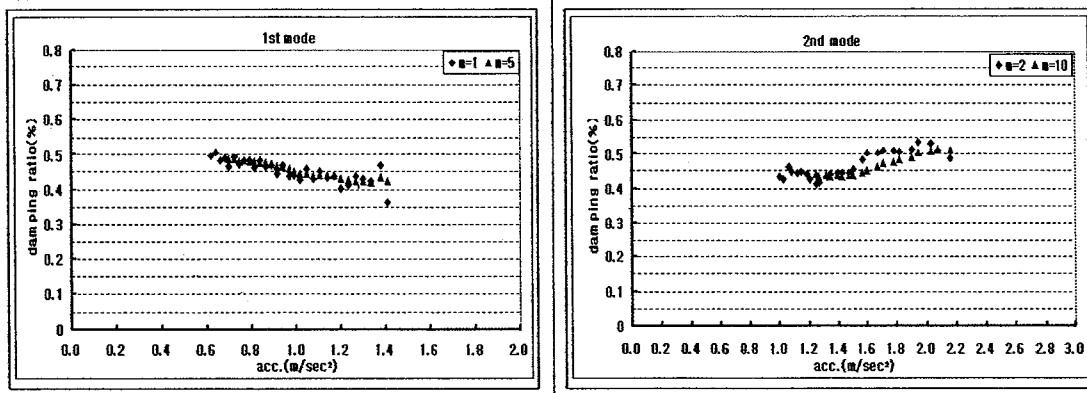
6) A-2.가속도별 감쇠비 분석 Data

① CLR04_L

Test 1 : 케이블 고유의 감쇠비

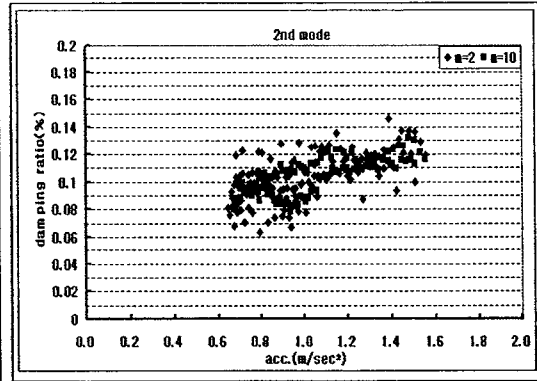
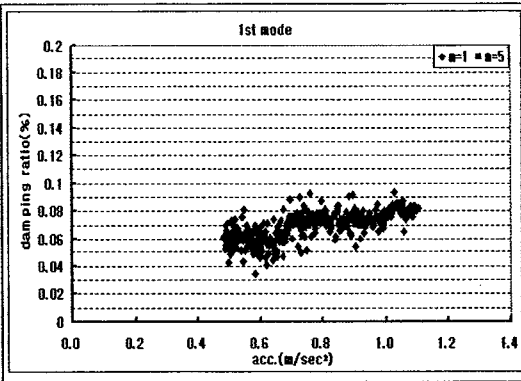


Test 2 : 댐퍼 설치후의 감쇠비

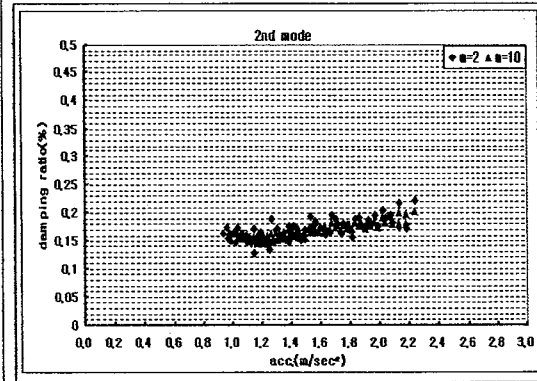
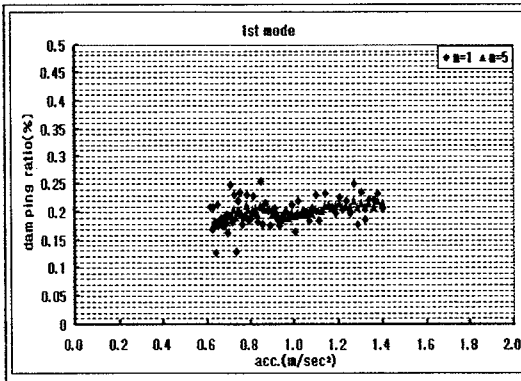


② CLL09_L

Test 1 : 케이블 고유의 감쇠비

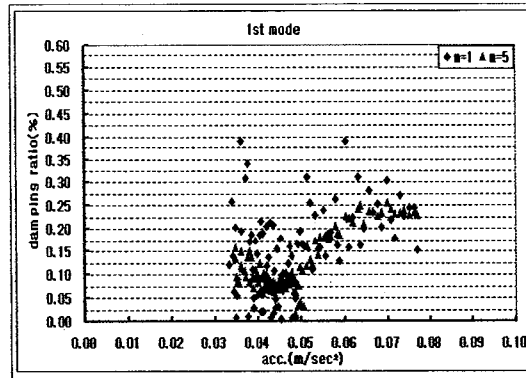


Test 2 : 댐퍼 설치후의 감쇠비

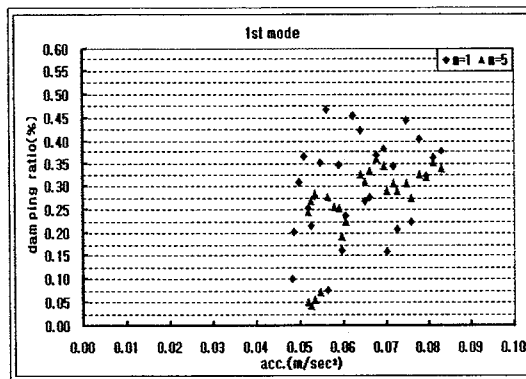


③ CLR15_L

Test 1 : 케이블 고유의 감쇠비



Test 2 : 댐퍼 설치후의 감쇠비



8. 외국의 케이블 진동제어용 댐퍼와의 성능비교

1) 개 요

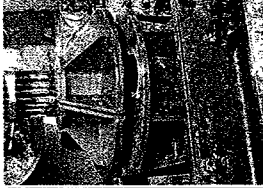
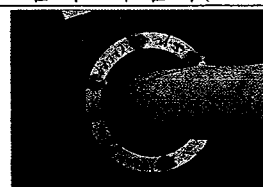
케이블 진동제어용 댐퍼는 그 설치위치가 감쇠성능에 상당한 영향을 미친다. 하지만 교량의 미관 및 설치를 위한 지지대를 설치등의 여건 상 일반적으로 케이블 댐퍼는 정착구 근처에 설치되며 그에 따른 성능의 한계를 지니고 있다. 보통 정착구의 외부에 설치되는 댐퍼의 경우(유압 댐퍼, MR댐퍼등)에는 성능이 상대적으로 우월한 반면 교량의 미관을 해치는 단점을 갖고 있다. 반면에 케이블 정착구 내에 설치되는 댐퍼의 경우(고감쇠 고무댐퍼, 마찰댐퍼등)에는 미관을 해치지 않는다는 장점을 갖고 있다. 본 보고서에서 비교대상으로 삼고 있는 타 제품에 대한 실험과 그 결과는 GS 건설(주) 기술 연구소(권오훈 기술연구소장의 5인)와 한국도로공사 도로교통 기술원(안상섭 책임연구원 및 4인)에서 연구한 “사장교 진동 및 내풍 안정성 연구 중 제 1 편 사장교 케이블 진동 검토 및 진동 제어 설계”에 수록되어 있는 내용이며 본 보고서에서는 실험의 결과에 대한 단순한 비교만을 포함하겠다.

표 4.3.8 실험대상 케이블 제원

$A(m^2)$	$w(kN/m)$	$T(kN)$	$L(m)$	λ^2	$f_1(Hz)$
0.00555	0.4283	1470	100	0.017	0.92

당해연도 연구 성과인 고감쇠 고무댐퍼의 성능을 실험하기 위한 대상 케이블과는 형식과 제원이 상이한 도로교통기술원내의 케이블을 대상으로 실험을 수행한 결과는 표 4.3.9와 같다.

표 4.3.9 타 형식의 댐퍼에 대한 기존의 실험결과

댐퍼 종류	모드	설치위치에 따른 감쇠비		
고감쇠고무댐퍼(HDR)		3.5%	4.5%	5.5%
	1	0.48	0.65	0.80
	2	0.55	0.75	0.93
	3	0.55	0.75	0.95
유체댐퍼(IHD)		2.5%	3.5%	4.5%
	1	0.56	0.78	0.72
	2	0.57	0.80	0.60
	3	0.50	0.71	0.60
오일댐퍼(IRD)		3%	4%	5%
	1	1.29	1.63	1.99
	2	1.24	1.40	1.55
	3	0.96	1.03	1.10
오일댐퍼(EHD)		3.5%	4.5%	-
	1	0.41	0.27	-
	2	0.42	0.29	-
	3	-	0.29	-
마찰댐퍼(FRD)		3.5%	4.5%	5.5%
	1	1.95	3.96	4.31
	2	1.80	2.52	2.78
	3	1.78	2.52	-
고감쇠고무댐퍼(HRD)	대상 케이블	설치위치	감쇠비	
	CLR04_L	2.75%	0.453	
	CLL09_L	1.90%	0.263	
	CLR15_L	1.37%	0.258	

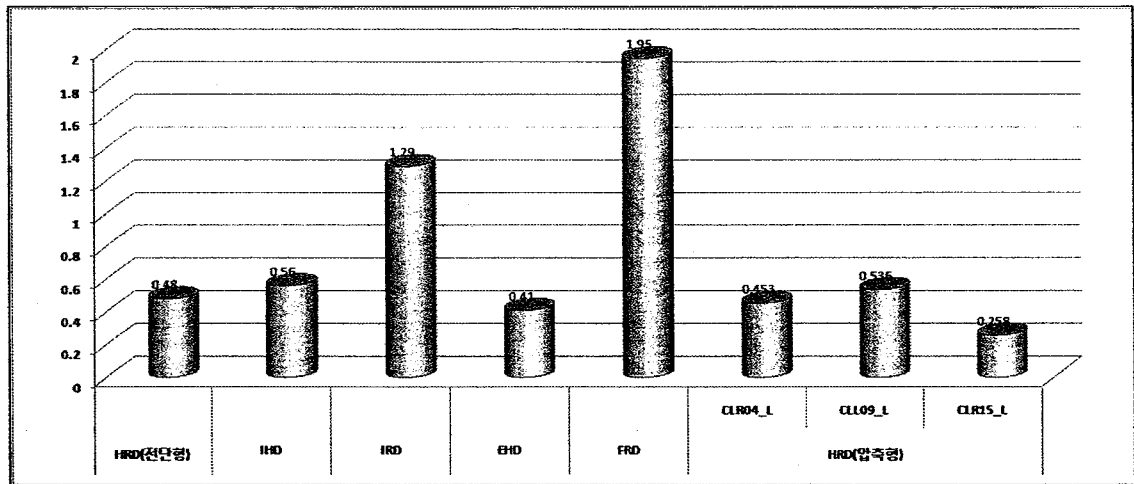


그림 4.3.12 타형식의 댐퍼와의 비교

타 형식의 댐퍼에 대한 실험을 수행하였을 시에는 댐퍼의 설치위치가 2.5%~5.5%이며, 시제품의 설치위치는 1.37%~2.75%로 시제품의 설치 위치가 정착구에 근접함을 알 수 있다. 위에서 언급한 것처럼 댐퍼의 설치위치는 그 성능에 상당한 영향을 미치며 비교적 설치위치가 유사한 형식의 댐퍼인 유체댐퍼(IHD)와 시제품을 비교하였을 시, 성능면에서 80.90%로 시공성과 경제적인 측면을 비교하였을 시 충분한 경쟁력이 있다고 판단된다. 일반적으로 케이블 댐퍼의 성능을 평가하기 위해서는 감쇠비 뿐만이 아니라 설계치 대비 성능에 대한 평가기준인 효율을 고려하는데 시제품의 경우 현장에서의 실험 결과 만을 비교하였을 시에는 90%~128%정도의 효율을 보였다. 이는 댐퍼의 변위에 따라 시스템의 감쇠비가 비선형적으로 변하는 특징을 보이는데 설계치는 완전한 점탄성 댐퍼로 가정하여 계산된 값이기 때문에 평균 감쇠비를 구한 현장실험의 결과가 크게 산정되었다.

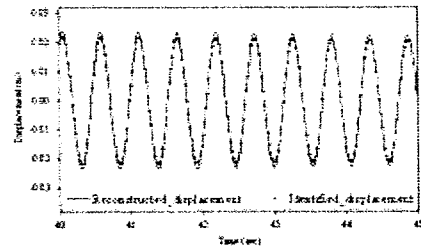
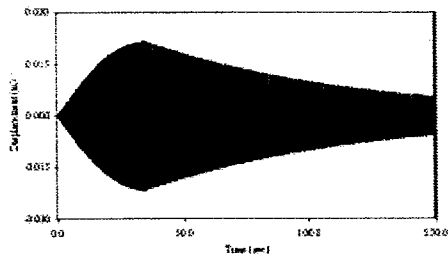
좀 더 신뢰성있는 결과를 얻기 위해서는 동일한 조건하에서의 실험이 진행되어야 할 것이며 이를 위한 추가적인 연구가 필요하다.

9. 케이블 댐퍼 설계 기준 관련 상세연구

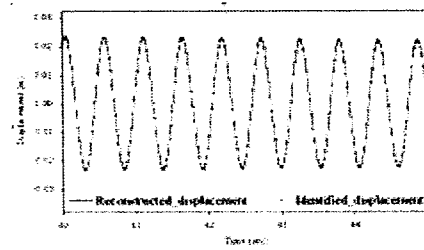
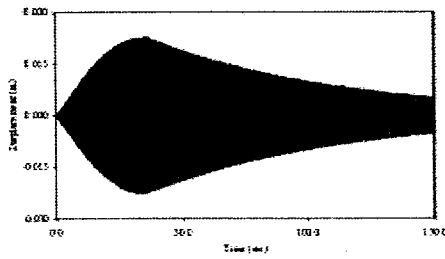
많은 연구진들에 의하여 케이블 - 댐퍼시스템에 관한 연구가 진행이 되었지만 연구의 주체가 대학이나 연구소로 편중되어 있어 실제적인 실용화와는 거리가 있던 기존의 한계에서 벗어나 실제 설계기준을 확립하고자 상세연구를 수행하고 있다. 당해 연도 연구의 결과물로 대한 토목학회논문집에 논문을 게재하였으며 설계 기준 확립에 기초자료로 사용될 것이다. 설계 기준 관련 상세연구로 기존의 연구자료를 바탕으로 현실에 적합한 또한 경제적이며 실용적인 설계기준을 제시하고자 한다. 그러나, 본 연구내용에 대한 논문은 타 연구개발과 공동작업을 하여 실제 성과물은 타 연구과제로 등록되었다.

10. 케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램 개발

기존에 실험 및 수치해석기법을 이용하여 케이블의 고유감쇠비를 추정하였다. 이러한 방법은 케이블의 동특성을 정확히 파악하기 위하여 상당한 시간과 비용이 수반되었지만 이를 좀 더 효과적으로 산정하기 위하여 역해석 프로그램을 개발하였으며 이를 실내 및 현장실험을 통하여 검증하였다. 역해석 프로그램은 서울대에서 개발한 것으로 본 2차년도 연구개발의 위탁연구를 맡아 케이블 고유감쇠비 연구를 수행하였다. 역해석 프로그램을 검증하기 위하여 시제품을 적용한 현장에서 실험을 수행하였으며 수행결과 역해석 프로그램의 추정방법이 올바른 방법이라는 것을 다시 한번 확인할 수 있었으며, 역해석 프로그램을 완성하기 위하여 더 많은 검증작업이 필요하다고 판단하였다. 따라서 향후 추가적인 실험을 통하여 다양한 상황과 특성에 맞는 결과물을 얻기 위한 추가적인 연구를 진행하고 있다.



추정된 무응력길이(L0)로 해석한 변위와 재구성된 변위와의 비교



추정된 댐핑계수로 해석한 변위와 재구성된 변위와의 비교

그림 4.3.13 역해석 프로그램을 이용하여 추정한 결과와 실험결과의 비교

제 5 장 연구개발 결과의 활용방안 및 기대효과

1절. 연구결과의 활용방안

1. 시제품 고안 및 제작

: 1차년도 연구성과 중 하나인 기존의 제품에 대하여 분석한 자료를 바탕으로 고안된 시제품은 국내의 연구진에 의하여 개발된 수동형 제진장치의 시작이라고 볼 수 있으며 이로인해 향후 제품의 실용화 및 다양한 제품개발의 초석을 마련했다고 할 수 있겠다. 해상 장대교량의 건설이 증가하고 있고 따라서 교량의 진동에 관한 문제가 관심의 대상이 되고 있기에 국내 기술력에 의한 제품개발과 실용화를 통하여 세계시장에 발을 들이게 될 것이다. 또한 시제품에 대한 다양한 실험 및 해석을 통하여 케이블 - 댐퍼 시스템의 성능향상 및 재료 품질관리를 위한 규정을 확립하여 후속연구에 기여할 예정이다. 실 규모 케이블을 대상으로한 성능실험을 통하여 설계를 위한 기초 자료로 적용이 가능할 것이다.

2. 케이블 고유감쇠비 추정용 역해석 프로그램 개발 및 실험

: 사장 케이블의 동특성을 파악하기 위한 역해석 프로그램을 해석적인 방법으로 개발하고 이를 실내 및 현장실험을 통하여 검증하여 진동제어를 위한 장치개발 및 설계기준 제시의 하나의 툴로서 적용이 가능할 것이다. 해석적으로 실제 현장의 상황을 정확히 모사하고 이를 이용해서 케이블의 동특성을 정확히 파악한다며 기존에 수행했던 현장실험에 의한 방법을 대체할 수 있기 때문에 상당한 시간과 비용을 절약할 수 있다. 또한 이로인해 다양한 케이블 - 댐퍼 시스템을 개발하고 더욱 활발한 연구가 진행되는 원동력이 될 것이다.

3. 세그를 고려한 케이블 고유진동수의 해석적 산정기법

: 정확하게 케이블의 동특성을 파악함으로써 댐퍼의 최적설계를 통해 최상의 케이블 제진 시스템을 마련할 수 있다. 따라서, 정확한 동특성 파악을 위해서는 논문게재 등과 같은 전문가를 통한 검증을 여러번 실시하여야 하며, 이를 통한 정확한 산정기법은 현장실험을 통한 실제 실험결과를 뒷받침할 수 있을 것이다.

4. 케이블 댐퍼 성능별 설치 위치 분석

: 일반적인 케이블 - 댐퍼 시스템은 케이블 정착부의 2~5% 위치에 설치되며 이로인해 그 성능에 한계가 존재한다. 또한 수동형 댐퍼의 경우 댐퍼의 용량의 증가에 따른 추가적인 비용이 상당하며 설계에 따른 노력도 배가된다. 하지만 최적의 성능을 발휘하는 댐퍼의 설치위치를 사전에 파악하고 그에 따른 설계 및 시공이 이루어 진다면 경제적인 적용이 가능할 것이다. 댐퍼의 설치위치가 케이블 제진성능에 큰 영향을 미치고 있으므로 다양한 케이블 댐퍼에 따른 최적의 성능을 발현하면서 실제 현장에서의 적용이 가능한 최적의 설치위치를 분석하여 파악함으로써 개발중인 수동형 댐퍼를 좀 더 효과적이며 경제적으로 적용하는 것이 가능할 것이다. 다양한 종류의 댐퍼를 개발하고 이를 이용하여 현장에서의 성능실험 및 실용화까지 진행하는데 있어서 여러 가지 종류의 댐퍼가 가지는 특성을 파악하고 최적의 성능을 발현할 수 있는 설치위치를 인지 한다면 향후에 진행될 연구에 있어서도 많은 기여를 할 수 있을 것이다.

5. 케이블 댐퍼 설계법 도출

: 설계단계에서부터 교량 전체의 안정성을 확보할 수 있으며 효과적이고 경제적인 설계를 수행하기 위하여서는 설계법 및 설계식등이 필요하다. 케이블 - 댐퍼 시스템은 그 특성상 다양한 변수들이 존재하고 그에따라 설계 및 현장적용에 있어서의 어려움이 많이 존재한다. 하지만 설계 시방 및 설계법, 설계식등이 확립은 국내의 진동제어 기술을 발전을 위해 당면한 과제이다. 본 연구과제의 목적인 실용화란 관점에서 보면 제품을 개발하여 이에 대한

전반적인 솔루션을 제공하기 위하여서는 댐퍼의 설계에서부터 시공에 이르기까지의 일련의 과정에 대한 해를 제공해야 하며 당해연도 연구성과에서 설계법 도출이라는 큰 성과를 얻었음이 분명하다. 또한 이로 인해 후속연구에도 지대한 공헌을 할 것이다.

2절. 연구성과의 기대효과

1. 기술적 측면

가. 국내의 연구진에 의한 제진장치개발

국내에 많은 연구진들에 의해 사장 케이블의 진동제어와 관련한 연구가 진행되고 있지만 케이블 진동제어를 위한 제품을 제작하여 이를 실용화한 성과는 전무하다. 이에 국외의 제품 및 기술의 제진장치가 현장에 시공되고 있는 실정이다. 당해연도 연구성과중 하나인 수동형 댐퍼 시제품인 고감쇠 고무댐퍼를 제작함으로써 다음과 같은 효과를 기대할 수 있을 것이다.

- 외국의 제품과 기술력에 의존하던 기존의 상황에서의 탈피
- 시제품의 성능실험 및 동특성실험 등을 통하여 설계지침을 수립하는데 필요한 기초자료확보
- 향후 제품의 상용화시의 제품의 성능 및 품질관리를 위한 Know-how확보

나. 국내의 상황에 적합한 시방규정을 확립

사장교 케이블의 제진성능에 관한 연구결과는 댐퍼도입에 따른 사장교 케이블의 제진설계 지침개발의 원천적인 기술이 된다. 이로 인한 설계, 시공, 유지관리의 질적 향상 및 사장교 안정성 확보를 통해 다음과 같은 효과를 기대할 수 있을 것이다.

- 기존에 건설된 사장교의 케이블 진동제어에 대한 댐퍼교체시 목표값제시
- 신설되는 사장교의 케이블 진동제어에 관한 설계지침 제시
- 정량적인 검증을 통해 세부항목을 정립함으로써 제시한 설계지침의 적용한계, 증보 및 개정에 다른 원론적인 접근 등을 명확히 할 수 있음

다. 실 현장에 적합한 케이블 댐퍼 적용기준확립

기존에 다양한 연구가 진행되었음에도 불구하고 국내의 현실에 적합한 케이블 - 댐퍼 시스템의 적용기준을 확립하지는 못하였다. 따라서 해외의 관련기준에 준하여 국내의 제진장치를 설계하고 시공하는 현실이다. 본 연구의 최종목

표가 실용화인 만큼 국내의 실정에 맞는 댐퍼의 적용기준을 확립하는 것이 시급하며 이를 위한 기초연구를 수행하였다.

라. 국외의 기술에 대한 우위선점

본 연구 성과가 기술로서 완성도를 높여 국제적인 신뢰도까지 획득한다면 국외 케이블 댐퍼의 성능평가에 본 연구 성과를 적용하게 될 것이며 특히, 케이블 가진기를 이용해야 한다면 특허획득에 의한 기술적 우위선점으로 선진국의 기술이전 기피현상 극복이나 규제 회피에 높은 효과를 발휘할 것으로 기대된다.

2. 사회·경제적 측면

가. 불합리한 공사비 산출에 따른 예산낭비

근래에 설계 및 시공되는 케이블 교량에 있어, 교량 설계기준상 제진 대책을 강구하도록 명시되어 있으나 현재 뚜렷한 설계기준이 제시되고 있지 않으며 또한 케이블 댐퍼의 시공 시 산출근거 자료가 빈약해 케이블공 정체 공사비의 5~7% 수준을 명확한 근거기중 없이 할당하고 있어 예산 낭비의 원인이 되고 있다. 하지만 국내의 기술진에 의하여 설계기준이 확립되어 기준에 타당하게 시공이 이루어진다면 합리적인 시공이 이루어 질 것이다.

나. 국산 댐퍼 개발로 인한 수입대체효과

국내에 진출한 외국계 기업은 교량에 대한 체계적인 이해와 기계적 지식과 기술 그리고 자본력을 바탕으로 국내의 케이블 진동제어 장치시장을 잠식하고 있는 실정이라 국산 제품 개발을 통한 수입대체가 시급하다. 수입대체효과는 비단 신설교량에만 국한되진 않으며 장치 특성상 유지관리 및 교체가 주기적으로 반복되므로 기존교량의 적용까지 고려하여 판단하여야 한다. 현재까지 시공된 케이블 - 댐퍼 시스템의 모두 외국사의 제품을 사용하였으며 그로인해 시공비 및 유지관리 비용까지 고려한다면 상당한 비용이 발생하였음을 알 수 있을 것이다. 또한 제품을 개발로 인하여 국내의 기술력이 한층 더 높아질 것이며 이는 또다른 파급효과를 발생시킬 것임을 자명하다. 토목구조물은 랜드마크의 역

할을 하며 그 지역 및 국가의 이미지를 보여주는 상징물이다. 이러한 교량을 외국의 제품을 들여와 시공하는 현실에서 벗어나 국내의 기술력으로 국가의 이미지를 표출하는 상징물을 시공할 수 있을 것이다.

본 연구 성과로부터 국내건설업계가 대부분 국외 케이블 댐퍼를 수입 사용하고 있는 입장에서 그 성능의 정량화가 가능하므로 제품품질의 관리가 가능하여 케이블지지교량의 댐퍼설계에 국내기술자가 주도적으로 역할을 수행할 수 있으며 이로 인한 기술력우위, 더 나아가서는 기 개발된 국내제품으로의 수입 대체가 가능하리라 사료된다. 그러므로, 초장대 케이블 지지교량의 건설이 증가되는 추세로 본다면 본 연구 성과로부터 파생되는 국내외 시장성은 상당히 클 것으로 전망된다. 또한, 국내 기술자의 자긍심도 극대화 될 것이 자명하다.

다. 타 산업 파급효과

현상학적 문제를 지배미분방정식으로 변환하여 수학적 접근을 시도하고 있으므로 이에 관련된 분야의 확장성이 높은 장점을 언급할 수 있다.

- 토목에 관련된 설계세목 정립 이외에 댐퍼개발 산업의 목표성능 기준제시
- 원천적인 지배 미분방정식을 유도하고 있으므로 댐퍼설치위치 등을 자유 자재로 조정할 수 있기 때문에 Internal Damper 뿐만아니라 External Damper, 더 나아가 공진회피를 위한 Stabilizing Cable(속칭 Cross tie) 해석의 원천기술로 활용될 수 있음

제 7장 참고문헌

Bournand, Y. : Development of New Stay Cable Damper, Proceedings IABSE Conference, Malmo, Sweden 2-4 June, 1999.

Flamand, O. : Rain-wind induced vibration of cables, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 57, pp.353-362, 1995.

Fuzier, J. and Stubler, J. : Wind Vibrations and damping systems for stay cables, Long-span and high-rise structures, IABSE Symposium, Kobe, Japan, pp.205-210, 1998.

Hikami, Y. and Shiraishi, N. : Rain-wind induced vibration of cables in cable-stayed bridges, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 29, pp.409-418.

Krenk, S. : Vibrations of a taut cable with an external damper, Journal of Applied Mechanics, Vol. 67, pp.772-776, 2000.

Lecinq, B., Bouchon, E., Chaussin, R. and Chabert, A. : French recommendations for stay cables, Cable-Supported Bridges-Challenging Technical Limits, IABSE Conference, Seoul, Korea, 2001.

Macdonald, J.H.G. : Separation of the contributions of aerodynamic and structural damping in vibrations of inclined cables, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90, pp.19-39, 2002.

Main, J.A. and Jones, N.P. : Evaluation of viscous damper for stay-cable vibration mitigation, Journal of Bridge Engineering, Vol.6, No.6, pp.385-397, 2001.

Pacheco, B.M., Fujino, Y. and Sulekh, A. : Estimation Curve for Modal Damping in Stay Cables with Viscous Damper, Journal of Structural Engineering, Vol.119, No.6, pp.1961-1979, 1993.

PTI Committee on Cable-Stayed Bridges : Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation, Post-Tensioning Institute, 2000.

Tabatai, H. and Mehrabi, A. : Design of Mechanical viscous dampers for stay cable, Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol. 5, No. 2, pp.114-123, 2000.

Tokoro, S., Komatsu, H., Nakasu, M., Mizuguchi, K. and Kasuga, A. : A study on wake-galloping employing full aeroelastic twin cable model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.88, pp.247-261, 2000.

Verwiebe, C. and Ruscheweyh, H. : Recent research results concerning the exciting mechanism of rain wind-induced vibrations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74-76, pp.1005-1013.

Xu, Y.L. and Yu, Z. : Vibration of inclined sag cables with oil dampers in cable stayed bridge, Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol.3, No. 4, pp. 194-203, 1998.

Yamaguchi, H. and Adhikari, R. : Energy-Based Evaluation of Modal Damping in Structural Cables with and without Damping Treatment, Journal of Sound and Vibration, Vol. 181, No. 1, pp.71-83, 1995.

김남식, 정운, 서주원, 안상섭 : 사장교 케이블 동특성 평가를 위한 케이블 가진시스템 개발, 한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회논문집. pp.424-429, 2003.

안상섭 : 사장교 케이블의 진동검토, 대한토목학회논문집, 제22권, 제3호, pp.663-678, 2002.

김현겸, 황재웅, 이명재, 서주원 : 댐퍼도입에 의한 사장 케이블의 제진설계, 대한토목학회논문집, 제28권, 제1A호, pp.125-133, 2008.

김현겸, 황재웅, 이명재 : 에너지방정식에 기초한 사장케이블 기본진동수 추출, 제28권, 제1A호, pp.51-58, 2008.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업의 최종 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보완 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니 됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

- 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031) 381-6311
 케이블텍(주) TEL 031) 785-8248
 (주)유신코퍼레이션 TEL 02) 6202-0514
 케이블텍(주) TEL 031) 280-7211

R&D / 06건설핵심C13

케이블지지교량의 케이블진동 저감용 댐퍼개발 및 기준연구

■ 발행일 / 2008. 07. 30

■ 발행처 / 케이블텍(주)

경기도 성남시 분당구 수내동 16-2 동부루트빌딩 7층

TEL : 031-785-8200

■ 인쇄처 / 세종기획