

기존자료를 이용한 현수교의 예비설계에 관한 연구

A Study on the preliminary Design of Suspension Bridge with Existing Data

하성문* 신기용* 계만수** 정진환*** 김성도****
Ha, Sung-Moon Shin, Ki-Yong Gye, Man-Soo Cheung, Jin-Hwan Kim, Seong-Do

ABSTRACT

A suspension bridge with long span is distinguished by aesthetic point of view, but it is difficult to analyze the structural behaviors due to its geometric nonlinear characteristics. Futhermore, because the chance of design such special bridges is very rare, the assumption of initial dimensions of geometrical shapes and structural sections may be much difficult also.

In this paper, the brief data base on the important structural dimensions of suspension bridges is constructed after the informations on existing suspension bridges are collected and classified from various texts and internet web sites. Therefore this data base may be utilized very easily by the designers who tries to design such bridges in the preliminary design step. Also the static *geometric nonlinear* analysis program is added to assist the designer in simple decision of safety check for assumed dimensions.

1. 서 론

삼면이 바다로 둘러 싸여 있는 우리나라는 도서 지역을 연결하는 장경간의 해상교량들의 건설이 많이 요구되고 있는데, 이들 장경간의 해상교량들은 주로 케이블 지지 형식을 취하는 경우가 보편적이다. 그러나 이러한 케이블 지지 구조물은 특유의 비선형성으로 인하여 해석과 설계에 상당한 어려움이 따르고, 깊은 수심과 높은 파도 등 여러 가지 자연 조건 때문에 시공상의 곤란함으로 건설 단가가 비싸지게 된다. 따라서 얼마 전까지 우리나라에는 현수교인 남해대교를 제외하면 장경간의 교량이 거의 없는 형편이었으나, 근래에 들어서 소득 수준의 향상으로 경제적인 교량 가설의 문제로부터 약간 자유로워지면서 서해대교와 광안대교 등과 같은 장경간의 케이블 지지 교량이 건설되기 시작하였다. 그런데 이러한 특수 형식의 교량에 대한 경험이 거의 없는 설계자들의 경우에는 예비설계 단계에서 교량의 기하학적인 기본 형상의 결정에도 상당한 어려움을 겪게될 것이

* 부산대학교 토목공학과 석사과정
** 부산대학교 토목공학과 박사과정
*** 부산대학교 토목공학과 교수
**** 경성대학교 토목공학과 교수

다. 최근 들어서 건설재료와 공법이 발달되고, 인장재로서 탁월한 성능을 지닌 케이블의 장점을 심분 활용할 수 있으며 미관이 수려한 현수교 및 사장교는 지간길이가 수백 m에서 수천 m까지 가능하므로 이와 같은 케이블지지 교량의 건설이 활발해질 전망이다.

지금까지는 정적 비선형해석, 자유진동, 차량하중, 풍하중 및 지진하중 등과 같은 동하중에 대한 동적해석을 포함하여 시공과정을 묘사하고 완공 후 뿐만 아니라 시공중의 구조물의 안정성여부를 검토하기 위해 시공상태를 고려한 해석을 수행할 수 있는 전문적이 현수교 해석 시스템 개발에 주력하였다. 하지만 그 이전에 수행되어야하는 예비설계단계에 대한 연구는 미약한 현실이다. 이에 대부분의 설계자들의 경우, 경험이 많지 않은 현수교의 설계에 있어서 처음 시작을 어디서 할 지 몰라 많은 시간과 노력을 허비하고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 위에서 언급한 어려움을 해결하기 위하여 현재 공용 중에 있는 현수교에 관한 자료들을 수집하고 정리하여 중요한 사항들을 데이터 베이스화하였고, 현수교의 예비설계 단계에서 교량의 기하학적인 형상과 대략적인 단면을 결정하는데 참고가 되도록 하였으며, 이렇게 선정된 단면에 대한 기하학적인 정적 비선형 해석을 통하여 가정된 단면의 안전성을 간단하게 검토할 수 있도록 해석 프로그램을 추가하여 예비설계 단계에서 설계자들의 수고와 시간을 절약할 수 있도록 하는 것이다.

2. 기존 현수교에 대한 DATA BASE 구축과 활용

2-1. 기존 자료의 수집

기존 자료의 수집은 인터넷상의 토목, 교량관련 사이트들과 케이블 교량에 관한 많은 참고자료들을 이용해 산재되어있는 자료들로부터 이루어 졌다. 104개의 교량에 대한 정보가 수집되었는데 대부분의 자료들은 어느 한 부분만을 집중적으로 다룬 것이고, 또한 중복되는 자료들이 많아 각각의 항목에 대한 완벽한 수집은 힘들었지만 얻어진 모든 데이터들을 본 프로그램의 Database에 추가하였다.⁽¹⁾ (건설도서 “강교 -설계편 II”참조)

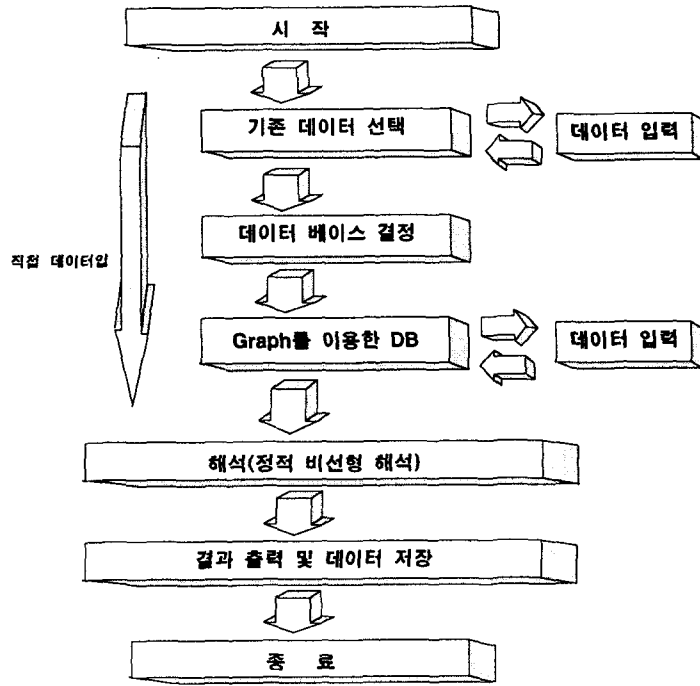
분 류	주경간길이	측경간길이	주탑높이	케이블 직경	세그	형하고	주경간 행어수	측경간 행어수
개	104	41	22	45	24	22	21	21

<표 2-1> 주요한 데이터 베이스의 데이터 개수

<표 2-1>은 현수교를 모델링하기 위해 주요한 몇 가지의 데이터 베이스의 데이터 개수를 나타내었다. 이외에도 세그비, 보강형식, 주케이블 수, 케이블 구성, 와이어 지름 등 약 30개정도의 항목들을 조사하였다.

2-2. DATA BASE의 구축

본 프로그램에서는 Visual Basic Language를 사용하여 편리한 사용자 Interface와 자료 선택의 용이성을 도모하였다. 각각의 데이터들은 대략 ±10%정도의 범위에서 선택할 수 있도록 하였으며 각 창에는 데이터들에 대한 정의나 데이터 베이스한 결과위주로 설명되어있다. 이를 통하여 사용자가 올바른 판단을 하도록 유도하였고 데이터 베이스와 정적 비선형 해석부분의 전체적인 프로그램의 구성은 <그림 2-1>과 같다.



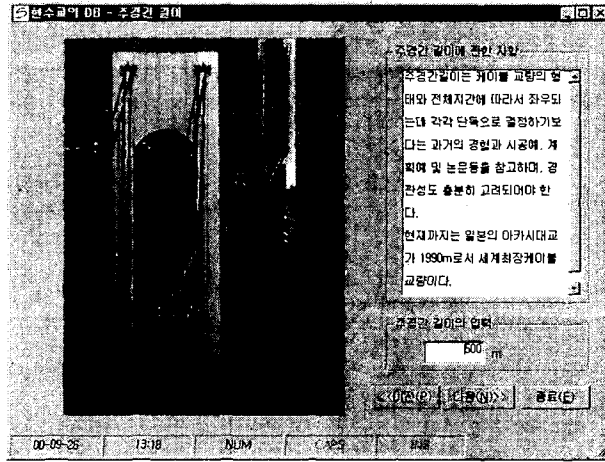
<그림 2-1> 프로그램의 구성도

<그림 2-2>은 시작 부분으로 기존 데이터 선택을 참조하는 방법으로 할 것인지, 혹은 직접 데이터를 입력 할 것인지를 판단하는 부분이다. 본 프로그램의 첫 화면이며, 기존 데이터 선택에 의한 방법과 사용자 직접 데이터 입력에 의한 방법의 차이점은 데이터 베이스의 사용 여부에 따라 나누어진다.



<그림 2-2> 편리한 Interface

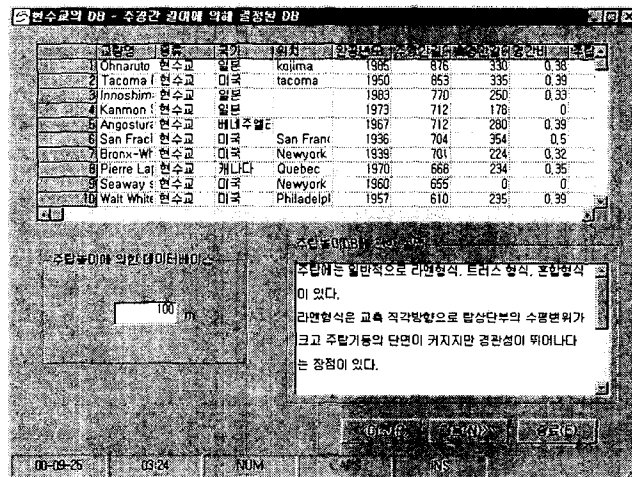
<그림 2-3>은 기존 데이터 선택에 의한 방법의 첫 화면이다. 이 창은 데이터 베이스를 시작하기 전 첫 화면이며 Text에 들어갈 데이터에 대한 설명을 간략히 소개하고 있다. 이 때 설명 창에는 대부분 데이터 베이스에 의한 통계와 데이터의 정의 등이 포함되어 있다.



<그림 2-3> 사용자 입력창의 시작 창

Data Base의 구축은 사용자가 보기 쉽도록 Flexgrid를 이용하였으며 각각의 창에는 그 데이터 베이스에 관한 상세한 설명이 첨부되어있다. Text창에 데이터를 입력하면 아래의 <그림 2-4>와 같은 Grid가 나타나게 된다. 여기서의 기존 데이터는 전세계각지에 있는 100여 개 현수교들의 제원들을 주경간길이의 크기 순서로 나열되었으며, 사용자는 목적으로 하는 데이터 혹은 그와 유사한 데이터를 선택하게 된다.

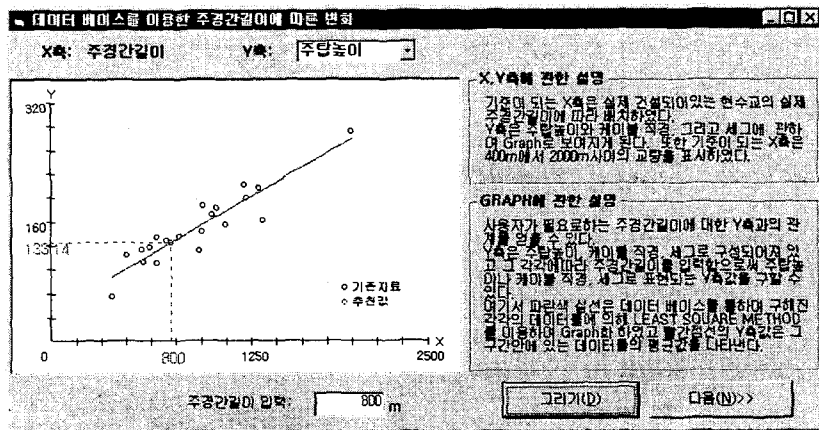
우선 주경간길이, 주탑높이, 측경간길이, 세그, 형하고의 순서로 데이터를 얻는다. 이 때 text box안의 값을 기준으로 약 $\pm 10\%$ 정도의 데이터들을 추출하여 다음 창의 데이터 베이스로 나타내어진다.



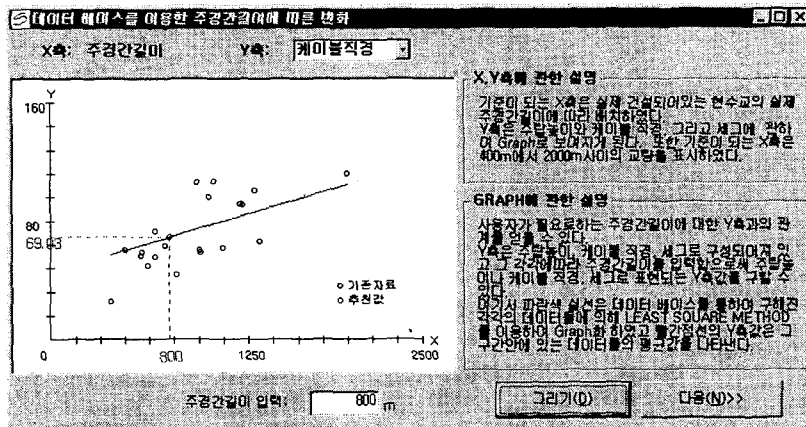
<그림 2-4> 데이터의 선택

사용자가 설계에 대한 충분한 자료를 가지고 있거나 설계에 능숙하다면 <그림 2-2>에서 사용자 직접 입력에 의한 방법으로 정확한 데이터를 입력하여 현수교의 정적 비선형해석을 간단하게 수행할 수 있도록 구성하였으며, 이는 Visual Basic과 Fortran Program을 접목시켜서 그 결과를 Visual Basic에서 한 눈에 쉽게 볼 수 있도록 구성하였다.

데이터 베이스가 끝난 다음 창에서는 주경간길이에 따른 주탑높이와 케이블직경, 그리고 세그에 대한 사항들을 Graph화하였고, <그림 2-5>와 <그림 2-6>에서 보여지는 파란색 실선은 이러한 좌표들을 Least Square Method를 이용하여 나타낸 것이며, 주경간길이를 입력하면 거기에 대한 Y좌표축의 각각의 평균값이 빨간색 점선으로 표시되도록 하였다. 여기서 사용자의 편의를 위해서 선택된 데이터들의 X좌표와 Y좌표값을 Graph내에 표시하여 사용자가 원하는 대략적인 값들을 취할 수 있도록 하였다. 여기서는 주경간길이 300m에서 2000m까지의 정확한 데이터 20개를 추출하여 Graph에 표시하였다.



<그림 2-5> Graph화한 데이터 베이스의 예 I



<그림 2-6> Graph화한 데이터 베이스의 예 II

위의 <그림 2-5>와 <그림 2-6>는 앞으로 건설될 현수교의 예비설계단계에서 설계자가 직접 데이터를 찾

아야하는 시간과 수고를 덜어줄 수 있을 것이라고 생각된다.

3. 구조해석 및 실행예제

3.1 구조해석

현수교는 다른 교량형식과 비교할 때 강성이 경간 길이에 비해 비교적 작은 유연한(flexible) 구조적 특성을 갖고 있다. 현수교의 해석이론은 1823년 Navier가 무보강 현수교 이론을 발표한 이래 현재의 탄성현수선(elastic catenary cable)요소를 이용한 유한요소해석까지 발전되어 왔다. 본 연구에서는 현수교의 기하학적 비선형성을 고려하여 축력에 의한 영향을 안정함수(S)와 강도계수(R)를 사용한 수정된 강성도 행렬(K)을 도입하였다.⁽¹¹⁾ 즉, 1차 탄성해석으로 절점변위와 부재력을 얻고, 불평형력을 산정하여 2차 탄성해석을 수행하게 된다. 이러한 해석은 반복회수와 수렴한계로 제어하게 된다. 케이블은 비압축부재이긴 하지만 축력에만 저항하므로 해석시 축력요소(회전강성이 매우 작은 bar element)로 모델링하였고, 주탑과 보강형은 뼈대요소로 모델링하였다. 본 연구에서 구조해석부분은 Fortran으로 짜여져있으며 본 연구에서는 간단한 2차원 정적 비선형해석만을 수행하도록 하였다. 현수교의 해석 프로그램의 입력과 출력을 보다 더 사용하기 편리하게 하기 위하여 Visual Basic Language를 사용하여 입력창과 출력창을 개발하였다.

3.2 실행예제

본 연구에 사용된 프로그램의 검증을 위하여 우리 나라 최초의 현수교인 남해대교를 모델로 간단한 2차원 정적 비선형 해석을 수행하였다. 남해대교의 제원은 <표 3-1>과 같고 하중은 중앙 경간의 가운데 절점에

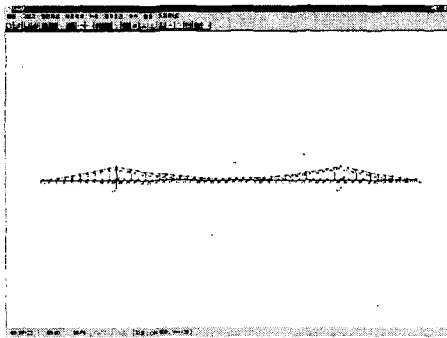
구조형식		3경간 2한지 보강 현수교
지간장		128m+404m+128m
sag(sag비)		33.3m(1/12)
보강형 (유선형상형)	환산단면적	0.12029m ²
	단면이차모멘트	연직방향 : 0.1316m ⁴ 수평방향 : 3.2667m ⁴
	비틀상수	0.4399m ⁴
	탄성계수	2.1×10 ⁶ kg/cm ²
케이블	탄성계수	2.0×10 ⁶ kg/cm ²
	단면적	417.8cm ² (편측)
행 어	단면적	10.428cm ² (분당)
주탑	환산단면적	0.16906m ²
	단면이차모멘트	0.11143m ⁴

<표 3-1>남해대교 제원

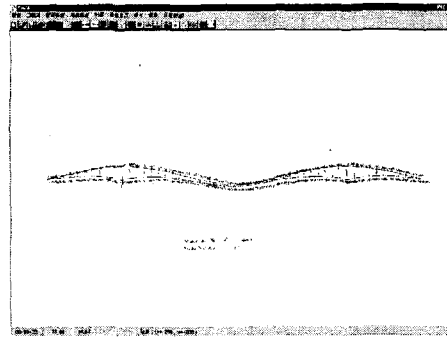
남해대교의 실제설계하중(23ton)을 재하하였다. 본 연구의 결과를 범용 프로그램인 LUSAS의 결과와 비교, 검토하였고(<표 3-2> 참조), 그 결과에 대한 항목들을 Visual Basic Language를 사용하여 가시화 하였다.(<그림 3-1>, <그림 3-2>, <그림 3-3>, <그림 3-4> 참조)

	최대변위(m)	최대모멘트(t-m)	케이블축력(ton)	행어축력(ton)
본연구	-0.686	491.6	51.4	1.3
LUSAS	-0.683	485.6	53.3	1.3
비교(%)	0.4	1.2	3.5	0

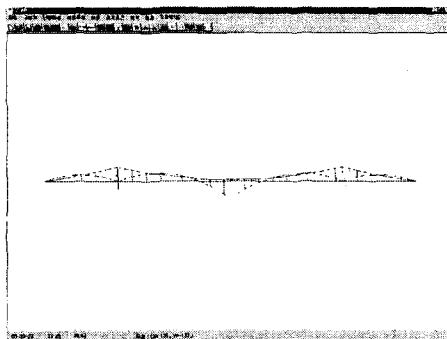
<표 3-2> 결과값의 비교



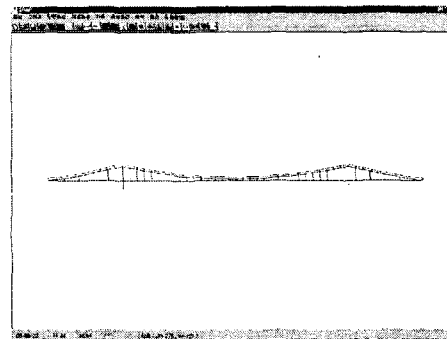
<그림 3-1> 해석 프로그램 창



<그림 3-2> 변위



<그림 3-3> 모멘트



<그림 3-4> 케이블과 행어의 축력

4. 결론

본 연구는 자연조건에 따라 많은 변수가 발생하는 토목 구조물인 현수교의 기존 데이터를 수집하고 이를 바탕으로 Data Base를 구축하여 예비설계를 하는 단계에서 경험이 부족한 현수교의 설계자들이 형상을 결정하는데 있어서 번거로운 과정을 줄이고, 그 과정에서 비롯되는 시간의 낭비를 줄이는데 도움을 주고자 하였다. 데이터 베이스는 많은 참고자료와 WEB상의 Site들을 참고로 구성되어졌지만 중복되는 부분이 많고 자료의 양도 많이 미비한 실정이다. 본 연구의 주된 목적은 현수교의 예비설계에 관한 것이므로 해석부분에서 기존의 해석 프로그램들과 같은 동적 해석부분이나 초기평형상태의 고려 등을 제외시켰다. 이 프로그램의 또 다른 장점으로 Visual Basic을 사용하여 user Interface를 편리하게 만들었기 때문에 비단 현수교의 설계자가 아니더라도 누구나 관심을 가지고 현수교에 대해 쉽게 접근할 수 있는 계기를 마련할 수 있다는 점이다. 특히, 해석 부분에서 Moment와 Axial force, 그리고 Displacement는 범용 Program에서와 같이 Visual 하게 나타내어지므로 결과를 한 눈에 알아볼 수 있도록 구성되어있다.

앞으로 더 다양하고 많은 데이터를 수집하고 정리하여 완벽한 데이터 베이스를 구축하고 구조해석부분에서 3차원 Dynamic Analysis를 수행할 수 있도록 한다면 현수교의 예비설계단계에서 설계자들에게 많은 도움이 되리라 고 생각한다.

5. 참고문헌

1. 건설도서 “강교 -설계편 II”, p.1027-1332
2. M. ITO, Y. FUJINO, T. MIYATA, N. NARITA “CABLE-STAYED BRIDGES”
3. IABSE “Structure Engineering International” p.30-31, p.45-53, p.66-69, February 2000, Volume 10, Number 1/ p.9-10, p.34-41, February 2000, Volume 9, Number 1 / p.168-1731, August 1998, Volume8, Number 3/ p.138-144, August 1998, Volume 5, Number 3/ p.218-220, p.235-238, p.244-246, p.252-255, November 1995, Volume 5, Number 4
4. The Hong Kong Institution of Engineers “Bridge into the 21st Century” p.1081-1096
5. 사단법인 대한토목학회 부산·경남지회 “장대교 설계에 있어서 최근의 기술 동향” p.25-72
6. 현대건설(주) 기술연구소 “남해대교 계측보고서 - 초기치 설정을 위한 재하실험” 1997.8
7. Fritz Leonhardt “ Bridge(교량의 미학)” 도서출판 圓技術
8. 圓技術 “瀬戸大橋 上部工工事寫眞集-Seto Ohashi Bridge”
9. Colin O'Connor “Design of Bridge Superstructure” p.371-454, 1971
10. 釜山直轄市 廣安大路建設事業所 “廣安大路建設實施設計 綜合報告書” 1994.8
11. 조남철 “사장교의 자동2차탄성해석”, 서울대학교, 1973
12. 건설도서 “케이블 교량의 계획과 설계” ,1988