

## 영향면을 이용한 현수교 설계기법 개발

### Development of Design Technique for Suspension Bridges Using Influence Surface

조준상\*\*                      정운용\*                      서영국\*\*  
Cho, Jun-sang                Jeong, Un-Yong            Seo, Young-Guk

---

#### ABSTRACT

In this paper, The program of design technique of Influence surface is presented for analysis of moving(live) load of long-span bridges such as suspension bridges. This program is verified by comparing with various numerical examples. The proposed program is calculated the design conditions for the initial equilibrium state of suspension bridges, hence it can be used to analysis of various 3-dimensional frame structure with cable system.

---

#### 1. 서    론

교량에 있어서 차량 및 열차하중과 같은 이동하중의 영향은 구조계에 미치는 영향이 매우 복잡한 양상을 나타낸다. 특히 차량의 형태가 다양해지고, 영종대교나 청담대교와 같은 도로, 철도병용교량과 같이 교량의 용도가 다양해지면서 더욱 이동하중의 영향이 복잡해지고 있다. 따라서 교량의 설계에 있어서 이동하중의 영향을 적절히 고려하는 것이 설계의 전반적인 효율성을 좌우하는 중요한 요인이 되고 있다. 현재 이동하중에 대한 해석이 가능한 몇 가지 상업용 프로그램들이 사용되고 있으나, 이러한 프로그램들은 현수교나 사장교와 같은 케이블지지교량에 사용되기가 어려우며, 또한 이동하중 해석에 의하여 설계자가 얻고자하는 최종적인 결과인 설계 부재력을 구하는 과정이 완전히 자동화 되어있지 않으므로 설계의 효율성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 케이블지지교량의 영향면 해석이 가능하며, 설계자가 원하는 설계부재력들을 자동적으로 계산할수 있는 영향면 자동계산 및 활하중 자동재하 방법을 개발하였으며, 이를 일반 뼈대구조뿐만아니라 현수교와 같은 케이블 지지교량에도 적용하였으며, 그 결과에 대한 타당성 검증을 수행하였다.

교량에 대한 이동하중해석을 수행할 때, 특정부재 및 단면에서의 최대값 및 최소값은 설계자의 큰 관심사이다. 이러한 최대값을 구하려고 할 때, 첫째로 고려할 것은 최대값을 주는 이동하중의 위치를 결정하는 것이다. 최대부재력을 일으키는 활하중의 위치는 직관에 의해서 곧 알 수 있는 경우도 있지만, 이러한 방법에 의하여 장경간 교량이나 현수교와 같이 복잡한 구조계에 있어서 모든 부재에 최대부재력을 유발하는 이동

---

\* 한국도로공사 도로연구소 강구조연구실 책임연구원

\*\* 한국도로공사 도로연구소 강구조연구실 연구원

하중 위치를 구한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 대부분의 경우에 있어서 영향선이나 영향면을 이용하여 구하게 된다. 영향선의 개념은 1867년 독일의 Winkler교수가 처음 사용한 것이며, 현수교나 사장교와 같은 고차 부정정구조물에서는 이런 영향선 및 영향면을 구하기 어려우므로 Muller-Breslau의 원리를 부분적으로 사용하여왔다(최외호, 1997). 그러나 이 방법은 하나의 부재력에 대한 영향면을 계산하고자하는 경우에는 유용하게 사용될 수 있으나, 설계에 있어서 모든 부재력을 구하고자 하는 경우에는 결국 설계 부재력만큼의 계산과정을 필요로 하므로, 설계에 효율적으로 사용하기에는 부적절하다. 따라서 본연구에서는 영향면 계산 및 설계부재의 모든 최대, 최소부재력을 한번의 해석으로 가능하도록 함으로써 실제 설계에 있어서 효율적으로 적용될 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 상술한 영향면 해석 후 각 부재에 대한 최대 하중 재하위치를 자동적으로 결정하고, 또한 이동하중을 자동적으로 재하하도록 함으로써 설계의 효율성을 극대화하였다. 또한 이러한 부재력 결과들을 기타 다른 하중적용 결과와 조합하기 편리하도록 저장하여 최종적인 설계 부재력을 결정하는데 이용될 수 있도록 하였다.

## 2. 영향면 해석 방법

### 2.1 영향면의 개념 및 프로그램화

영향선은 1867년 독일의 Winkler교수가 처음 사용한 것인데, 단위하중이 구조물 위를 지나갈 때에 구조물의 특정한 기능에 주는 영향을 도표로 나타낸 것이다. 여기서 구조물의 어느 특정기능이라는 것은 반력, 전단력, 휨모멘트, 그리고 처짐 등을 의미한다. 영향선이란 “임의의 점에서의 중거가 그 점에 작용하는 단위 하중에 의해서 생기는 어떤 특정한 기능의 값과 같게 되는 곡선이다”라고 정의 될 수가 있다. 또한 영향면이란 이런 여러 영향선의 조합된 것을 말한다.

영향선 및 영향면의 용도는 크게 다음 두가지라고 볼 수 있다.

- ① 특정한 기능(전단력, 모멘트, 축력등)에 대한 영향선을 그렸을 때 그 기능의 최대값을 주는 활하중의 위치를 결정하여 주며,
- ② 위치가 결정된 활하중으로 인한 특정한 기능의 최대 및 최소값을 산정할 수 있다.

이상과 같은 영향선 및 영향면을 이용하여 설계시 필요한 최대 및 최소값을 사용하기 위하여 프로그램화 하였다. 프로그램방법은 이론적으로 이해하기 쉽고 유지관리가 쉽게 차로별로 각 재하점에 단위하중을 가하여 이것을 부재별로 데이터베이스화 하여 영향면을 구하는 방법을 사용하였다. 이때 모든부재의 영향계수 값을 저장하면서 최대, 최소부재력을 구하면 프로그램기법적으로 너무 많은 저장용량과 시간이 걸리므로, 각 차로별 계산후 특정부재의 영향계수 값만을 저장하구, 이어 다음 차로의 계산을 수행하는 방법을 사용함으로써, 저장용량 및 속도를 개선하였다. 이 방법을 사용함으로써 본 영향면 프로그램은 국내 설계회사에서 많이 사용하고 있는 상용프로그램인 SAP90 Bridge프로그램보다 빠른 실행속도를 가진다.

### 2.2. 집중하중군(DB하중, 열차하중) 및 차선(DL)하중을 받는 요소의 최대부재력

이동하중(Moving Loads)을 지지하는 보, 주형, 또는 트러스나 케이블등의 구조물을 설계하기 위해서는 구조물의 여러 단면에서 최대전단력, 또는 최대휨모멘트를 일으키는 이동하중의 위치를 알아야만 하다. 구조물이 등분포활하중이나 1-2개의 집중활하중을 받을 때, 어떤 특정 단면에서의 최대전단력이나 최대휨모멘트를 일으키는 활하중의 위치는 영향선으로부터 쉽게 알아 낼 수 있다. 그러나 구조물이 연속된 트럭이나 기차바퀴 같은 一連의 집중하중, 즉 하중군을 받는다면 문제는 그리 단순한 것이 아니다. 영향선을 이용한다면 최대전단력, 최대모멘트의 값을 주는 활하중군의 개략적인 위치는 알수 있게 된다. 왜냐하면 가장 무거운 하중이 어떤 특정한 기능의 영향선의 최대종거 부근에 몰려 있어야만 그 기능의 최대값을 얻을수 있게 되기 때문이다. 그러나 설계자의 입장에서는 모든설계부재에 대한 집중하중군(a series of concentrated loads)의 정확한 위치는 역시 컴퓨터에 의한 계산에 의존할 수 밖에 없다.

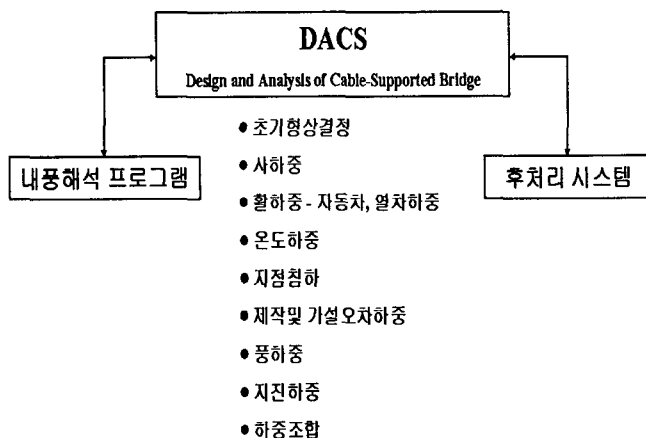
따라서 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 사용하여 집중하중군에 의한 각 부재의 최대, 최소값을 산출하였다.

- ① 먼저 앞에서 언급한 영향선 및 영향면 계산방법에 따라 각 부재의 영향선 및 영향면을 구한후 최대, 최소종거값의 위치를 찾아낸다.
- ② 최대, 최소종거값의 위치에 집중하중군의 각 집중하중을 차량진행방향으로 하나씩 이동하여 계산후, 가장 큰 값을 선택하여 최대, 최소부재력을 산출하였다.

이상과 같은 방법을 사용하면 응력변화가 적은 토목구조물에서는 빠른 계산시간으로 얻고자하는 정확한 해를 구할 수 있으며, 그 해의 정확성은 다음절에서 자세히 설명하였다. 또한 차선(DL)하중에 대한 프로그램은 우리나라 도로교시방서기준에 따라 작성하였다. 차선하중에 대한 검증은 수 계산과 SAP2000 Nonlinear 프로그램을 사용하여 검증하였다.

### 2.3. 맥스(DACS) 프로그램

#### (1) DACS프로그램 개요



본 논문에서는 해석프로그램인 DACS (a program for Design and Analysis for Cable-Supported bridge)와 후처리 프로그램인 DACS POST을 사용하였으며, 이 프로그램은 현수교와 같은 케이블 시스템 설계에 적합한 구조해석 프로그램이며, 현수교를 비롯한 장대교량의 3차원 뼈대 구조물에 매우 적절히 활용될수 있다. <그림 2.1>은 DACS프로그램의 구성도 및 해석가능한 모듈에 대하여 나타내었다.

그림 2.1 DACS프로그램 구성도

(2) 프로그램의 정확성

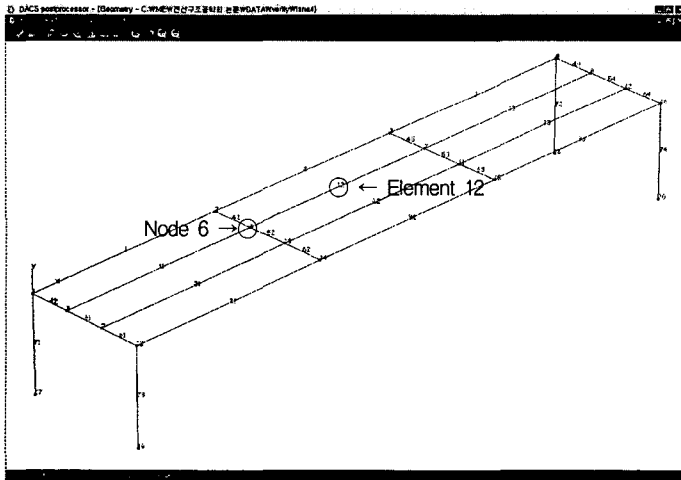
본 프로그램의 정확성은 이미 발표된 참고문헌(도로연구소, 1998)에 잘 기술되어 있으며, 본 논문에서는 영향면 해석부분에 대하여만 기술하겠다.

본 영향면해석프로그램과 기존의 영향선해석프로그램과의 다른 특징은 크게 4가지로 설명할 수 있다.

- ① 다중재하된 차량의 최대, 최소부재력을 일으키는 차량재하위치를 보여주고,
- ② 장대교량과 같은 상판에서 주로 사용하는 트러스부재에서 차량경로에 요소가 없어도, 절점만 구성되어 있으면 선형보간법을 사용하여 영향면을 계산할 수 있다.
- ③ 다중재하시의 횡방향효과등을 잘 볼 수 있는 영향면을 보여줄 수 있으며,
- ④ 활하중의 여러 하중조합을 단 한번의 계산으로 최대, 최소부재력 및 그때의 하중조건을 구할 수 있다.

특히 ②번의 경우는 기존의 프로그램에서는 편심등을 고려하여 계산하였는데, 이것은 구조물의 강성등을 적절히 표현할 수 없어 정확한 해를 얻기가 어려웠으나, 본 프로그램에서는 절점만 있으면 선형보간법을 사용하여 정확한 영향면등을 계산할수 있는 장점이 있다.

이상과 같이 설명한 DACS프로그램 영향면 부분의 정확성을 검증하기 위하여 상용프로그램인 SAP90프로그램과 비교하여 프로그램의 정확성을 검증하였다. 검증은 수계산 및 여러모델(4경간 연속교등)을 비교하여 완전히 일치하는 결과를 얻었으며, 여기서는 가장 대표적인 3차원 뼈대구조물만을 나타내었다.



항 목	적 용 치	
단면적(m <sup>2</sup> )	1.81	
단면2차 모멘트(m <sup>4</sup> )	수직	0.1
	수평	1.1
탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )	2.04 × 10 <sup>8</sup>	
활하중	DB24	

그림 2.2 3차원뼈대구조물의 절점, 요소번호 및 물성치

영향선해석 및 부재의 최대, 최소값을 얻기 위하여 상판의 4개 차로에 DB24하중을 다중 재하 하였다.

이 해석을 통하여 모든 부재의 최대, 최소값을 산출하였으며, 영향면 및 차량의 재하위치등을 계산하였으나, SAP90에서는 영향선 및 최대, 최소부재력 산출만 가능하기 때문에 본 논문에서는 영향선 및 부재의 최대, 최소부재력만을 비교하였다.

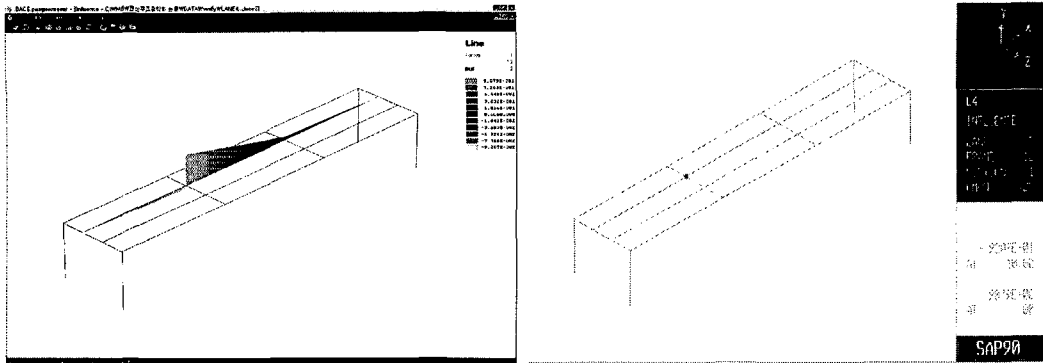


그림 2.3 요소12번의 노드6번에서의 전단력(V22)에 대한 영향선도(좌:DACS 우:SAP90)

<그림 2.3> 및 <표 2.1>에서 보는바와 같이 본 프로그램과 SAP90프로그램과 완전히 일치하는 결과를 볼 수 있다.

표 2.1 DACS와 SAP90의 영향선결과값 비교

Node	V22			M33		
	DACS	SAP90	상대오차	DACS	SAP90	상대오차
5	2.875514E-02	2.875514E-02	0%	-2.797023E-02	-2.797023E-02	0%
6	-9.207499E-02	-9.207499E-02	0%	1.102785E-00	1.102785E-00	0%
	9.079250E-01	9.079250E-01	0%	-	-	0%
7	9.207499E-02	9.207499E-02	0%	1.820353E-01	1.820353E-01	0%
8	-2.875514E-02	-2.875514E-02	0%	7.849077E-04	7.849077E-04	0%

표 2.2 DACS와 SAP90의 Envelope값 결과 비교

Element 12 Node 6	MAX			MIN		
	DACS	SAP90	상대오차	DACS	SAP90	상대오차
V22	25.330	25.330	0%	-5.867	-5.867	0%
M33	6.162	6.162	0%	-24.939	-24.939	0%

또한 4개차로에 DB-24하중에 대한 요소12번에서의 전단력 및 휨모멘트의 최대, 최소값도 <표 2.2>에서 보는 바와 같이 완전 일치하는 것을 볼 수 있다. 이상에서 보는바와 같이 본 프로그램의 영향선 해석방법은 해석속도와 정확도가 뛰어난 것을 볼 수 있으며, 기존의 범용프로그램에서 구현하지 못한 여러 가지장점을 구현함으로써 실무에서 실용적으로 사용할 수 있다.

### 3. 수치해석

현수교해석에서 초기평형상태를 결정하는 것은 매우 중요한 것이다. 초기평형상태 결정방법에 대해서는

기 발표된 연구보고서에 상세히 서술되어 있다.(도로연구소, 1998)

### 3.1 영종대교 모델링

영종대교은 인천국제공항이 건설될 영종도와 인천을 연결하는 연육교의 주경간 교량으로써 중앙경간 300m, 측 경간 125m, 총경간 550m의 자정식현수교로 건설되고 있다. 이 교량의 자세한 제원 및 물성치는 참고문헌을 참고하기 바란다((주)조다이, 1996).

본 논문에서의 모델링 방법은 케이블 및 행어는 비선형 트러스요소를 사용하였으며, 상로 및 하로의 트러스부재는 3차원 프레임 요소를 사용하여 모델링 하였다. 모델링한 교량은 <그림 3.1>과 같다.

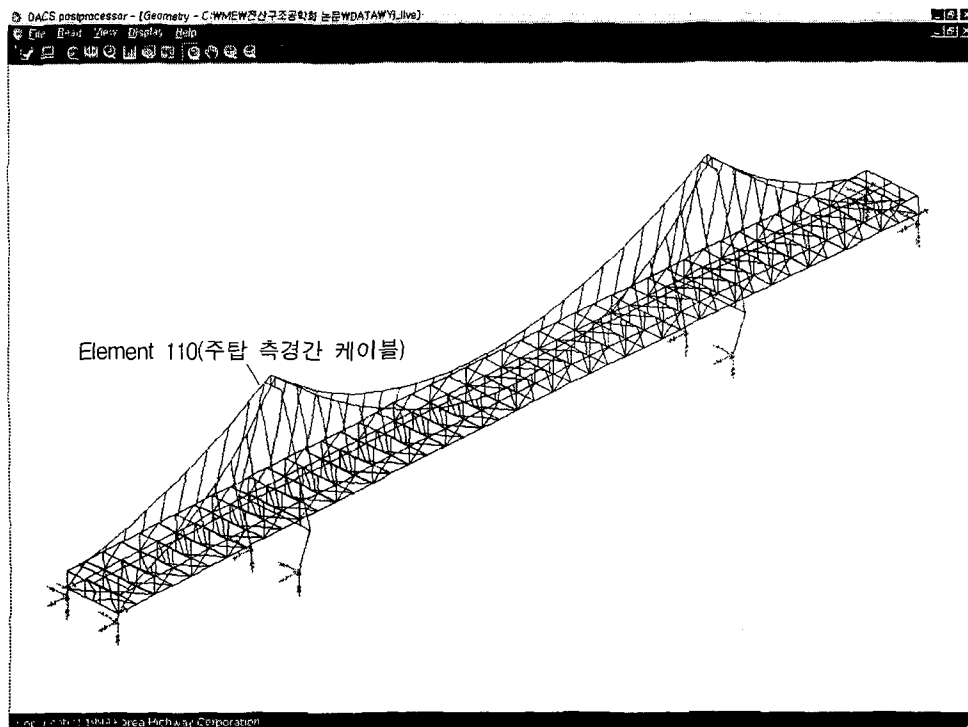


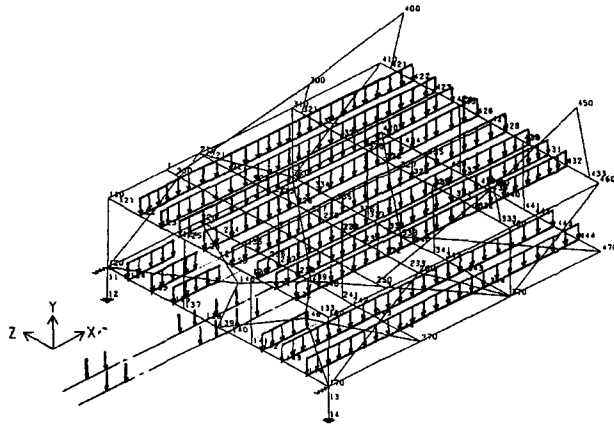
그림 3.1 영종대교 모델링

### 3.2 영종대교 영향면 해석

영종대교의 활하중해석은 상로 8차로 및 하로 6차로에 DL하중을 재하하고, 하로 중앙에는 열차를 복선으로 재하하여 설계하였으며, <그림 3.2>에 자세한 재하위치 및 하중을 나타내었다. 활하중 재하시 탑정부의 외측케이블에서 가장 큰 응력이 발생하게 된다.

<그림 3.3>은 상로 및 하로에서 나타나는 영향면을 각각 표시한 것이다. 영종대교와 같이 장대교량에서는 횡방향에 대한 효과가 거의 적은 것으로 나타났다. 이때 주부재인 케이블 중에서 최대장력이 작용하는 주탑부 측경간 케이블(요소 110)에서 활하중에 의한 축력이 1,992ton으로 계산되었으며, 이것은 영종대교 감

리회사인 일본의 조다이사의 Rittai프로그램에서 나온 값 1,876ton보다 큰 결과이다. 이때 최대, 최소 장력을 유발하는 차량재하위치는 <그림 3.4>와 같다.



	w(ton)	P(ton)	하중종류
상로(8차로)	0.953	11.7	DL하중
하로(6차로)	1.456	17.88	DL하중
편재하	0.741	9.10	DL하중
	0.661	8.12	DL하중
	0.794	9.75	DL하중
	0.874	10.73	DL하중
	1.191	14.63	DL하중
하 로	25×4륜		열 차
	4량에서 10량까지 복선재하		

그림 3.2 영종대교 활하중 해석을 위한 재하위치 및 하중

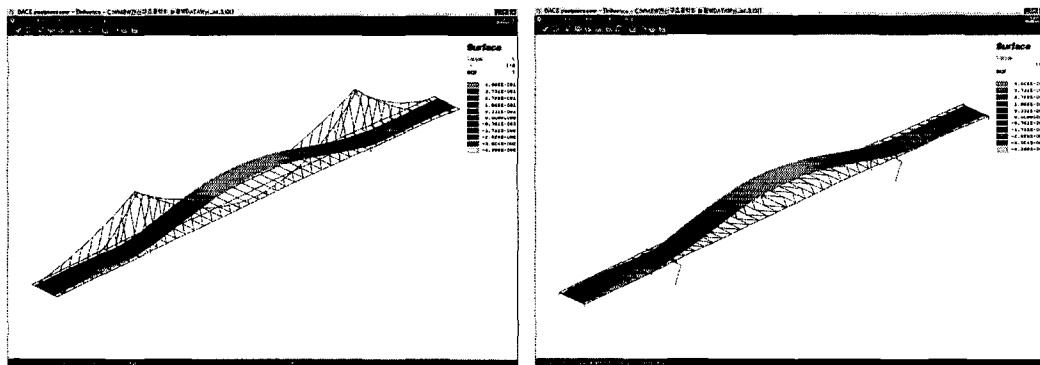


그림 3.3 탐정부 케이블(오소110번)의 상로 및 하로에서의 영향면

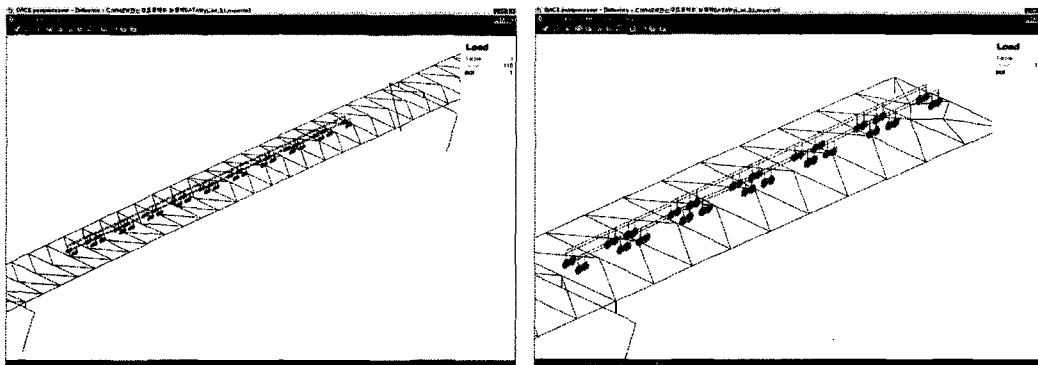


그림 3.4 탐정부 케이블(오소110)의 최대, 최소부재력을 일으키는 열차하중의 재하위치

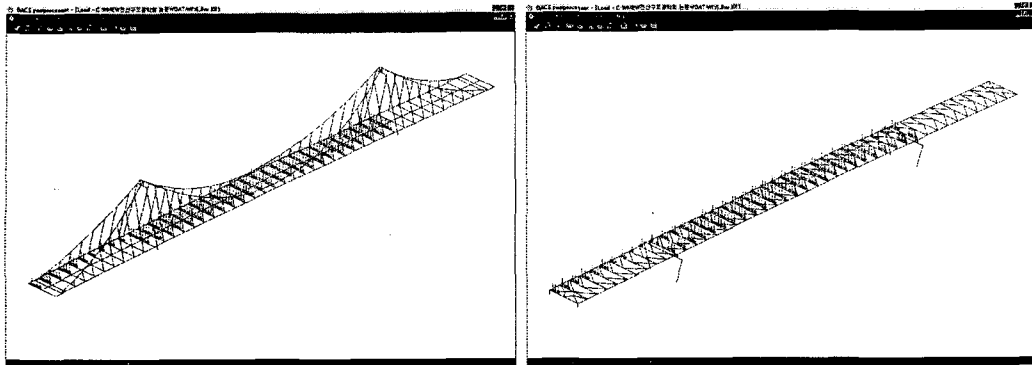


그림 3.5 최대부재력을 일으키는 DL하중 및 열차하중 재하

계산의 정확성을 검증하기 위하여 영향면의 (+)구간위에 DL하중 및 열차하중을 영종대교 상, 하로에 <그림 3.5>과 같이 재하시켜 구조해석을 수행한 결과, 같은 위치에서 케이블 장력이 1958ton으로 계산되었다. 이것은 영향선해석에 의한 값과 거의 일치하는 결과로서, 본 프로그램의 영향면에 의한 설계부재력 계산 결과가 타당함을 검증하는 결과이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 현수교 및 장대교량을 설계함에 있어서, 반드시 필요한 이동하중(활하중)에 대한 최대 및 최소 부재력을 얻기 위하여 필요한 영향면 설계기법을 실용적인 설계기법을 사용하여 개발하였으며, 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

1. 절점하중, 균집하중, 분포하중 및 이들의 조합하중에 대한 영향면 해석방법을 개발하였고 또한 이러한 결과들을 다른 하중들과 편리하게 조합할 수 있는 활하중 자동해석 프로그램을 개발하였다.
2. 현수교 초기평형상태계산을 구현함으로써 케이블 구조계를 가지는 현수교 등 다양한 뼈대구조물에서 사용이 가능하다.
3. 장대교량의 상판으로 주로 사용하는 트러스 구조물에서 차량이나 기차의 경로에 요소가 없어도, 절점만 있으면 선형 보간법을 사용하여 영향선 및 영향면을 구할 수 있다.
4. 각부재의 최대, 최소부재력이 발생하는 균집하중군의 위치를 계산하여 준다.

#### 참고문헌

1. N. J. Gimsing, "Cable Supported Bridges", John Wiley & Sons, 1997
2. 영종대교 감리단, "영종대교 현수교 설계검토 감리보고서", (주)조다이·유신코퍼레이션, 1996
3. 최희호, 이승우 "현수교의 영향선 해석에 관한 연구" 대한토목학회 논문집 제 17권 제 1-2호, 1997
4. 한국도로공사 도로연구소, "현수교 설계와 시공을 위한 구조해석 및 제진대책에 관한연구(I)", 도로연 98-67-37, 1998