

시간이력해석을 이용한 철도 주행속도에 따른 교량의 거동분석

The bridge behavior analysis by means of time history analysis according to the railway velocity

이종선¹ 이재열² 황낙연³ 김경남⁴ 정경섭⁴

Jong-seon Lee, Jae-Yeol Lee, Nag-yeon Hwang, Kyoung-Nam Kim, Kyoung-Sup Jung

Abstract

Now a days, the fabrication and election skills have improved in Korea. Due to taking the vertical clearance and a point of beauty, the election of the suspension and the cable-stayed bridges whose span length can be lengthened have been increased.

Accordingly, there are link areas between the bridges by cables and other bridges. These dynamic behaviors are different from others. When the vehicles and trains run on the link area, the member force and the fatigue behavior which are occurred to the structure have different values depend on the velocity.

On this paper, we analyze the bridge behavior by means of the time history analysis depend on to velocity, the number of vehicles, single and double way.

1. 서론

철도산업이 미래의 경쟁력 있는 교통수단으로 그 중요성에 대한 인식이 높아짐에 따라 국내에서도 내륙뿐만 아니라 해상을 연결하는 철도교량의 신설이 증가되고 있다.

또한, 국내 강교량의 제작, 시공 능력이 향상되어 형하공간의 확보 및 미적 관점에서 시간의 길이를 크게 할 수 있는 현수교 및 사장교의 시공이 증가함에 따라 기존의 다른 형식의 교량과 케이블에 의해 지지되는 교량이 연속되게 되었고, 케이블에 의한 교량은 그 동적 거동이 기존의 단순교 및 연속교와는 다른 양상을 띄게 되기 때문에 철도 및 차량 등의 활하중이 다른 형식의 교량이 연속되는 부위를 통과 시, 주행 속도의 결정에 따라 구조물에 발생하는 부재력 및 피로거동에 차이가 발생하게 된다.

오늘날의 철도는 시대의 흐름에 맞춰 고속화, 대형화하는 추세이고 이에 따라 내륙뿐만 아니라 해상을 연결하는 철도교량 산업에 있어 많은 발전을 거듭해왔다.

기존 철도교량의 설계시, 철도교량에 대해 각 교량의 속도를 계획하여 구조적 문제가 발생하지 않도록 설계하고 있는 실정으로 종류가 다른 교량이 연결된 복합교량의 경우 각 구조물의 거동이 서로 상이하기 때문에 이에 대한 구조적 검토가 필요하다고 판단된다.

따라서, 본 논문에서는 국내의 Y교량을 대상으로 교량의 시공 후, 단·복선 여부, 통과량 수 및 철도의 주행속도를 변수로 설정하여 시간이력해석을 이용한 대상 교량의 구조적 거동을 분석하였다.

또한, 해석결과를 분석하여 본 구조물의 피로에 대한 영향을 최소로 하는 주행속도를 산정하고, 나아가 구조물의 피로 수명을 증가시켜 미래 철도교량의 안전성과 경제성에 기여할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

*1 비회원, 충북대학교 구조시스템공학과 석사과정

*2 비회원, 충북대학교 구조시스템공학과 석사과정

*3 비회원, 충북대학교 구조시스템공학과 석사과정

*4 비회원, 충북대학교 구조시스템공학과 박사과정

*5 정회원, 충북대학교 구조시스템공학과, 교수

2. 본 문

1) 개요

본 대상교량은 도로, 철도병용의 2층 WARREN TRUSS 형식으로 중앙현수교 구간과 6개의 3경간 연속 TRUSS교로 이루어진 복합교량이다.

또한, Truss교 구간의 경간길이는 125m이고, 상층부의 6차선 도로, 하층부의 4차선 도로와 철도 복선으로 이루어져 있으며, 현수교는 3차원 자정식 케이블로 설계되어있다.

다음 Fig. 1과 표. 1은 대상교량의 구간별 배치현황과 교량의 재원 및 위치별 연장을 나타내고 있다.

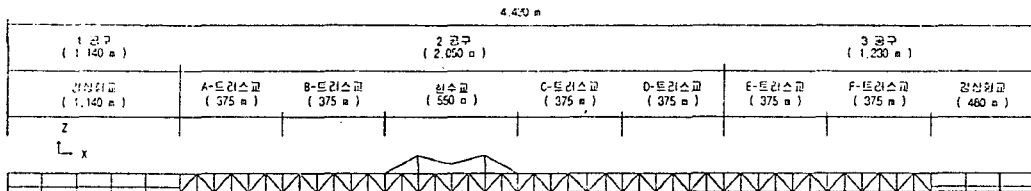


Fig. 1 Y교량의 구간별 배치도

표. 1 Y교량의 구조규격 및 재원

구 분	철 도
구조규격	2 급선(수도권전철설계기준)
설계속도	110 km/h
궤도 수	복선
설계하중	Q-25
통과높이	6.0m 이상
궤간	1,435m
궤도중심간격	4.0m

2) 구조해석

(1) 모델링

구조해석은 MIDAS/CIVIL 5.4.0을 사용하였으며, beam 요소 및 트러스 요소를 이용한 3D 모델링 실시하였다.

하중에 대해서는 중형의 경우 사하중으로 대처하여 재하하였고, 철도 1량의 중량을 100tonf(철도 1량의 지중 47.6tonf × 제작오차 1.05 + 160인/차 × 62kgf/인 × 혼잡률 3.3) × 할증계수 1.18 = 97.6tonf ≈ 100tonf)로 가정한 고속철도 설계하중 기준에 해당하는 Q-25하중을 재하하였으며, 본 교량의 시간이력해석에 앞서 구조물의 안전을 판단하기 위해 설계하중인 차량하중(상부 6차선, 하부 4차선)과 철도하중을 최대한 불리하게 적용하여 정적이동하중해석 (Envelop Analysis)을 수행하였고, 전체구조물에 별다른 문제점이 발생하지는 않는 것으로 확인되었다.

따라서, 추후 운행계획을 참고하여 단·복선과 차량수(6량, 8량)를 변수로 하여 구조해석을 수행하였으며, 각 경우마다 속도를 90Km/hr, 100Km/hr, 110Km/hr으로 달리 하여 주행속도에 따라 트러스교와 현수교에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

i) 트러스교

각 부재의 재원에 대한 단면 Property 값들을 이용하여 Beam 요소로 모델링하였다.

본 교량의 트러스교는 길이 375m인 3경간 연속교로, Y교량 전구간에 대해 동일한 형식이 적용되어있다. 따라서 다음의 구조해석에서는 이들 중 1구간을 선정하여 각 하중에 대한 구조적 거동 및 부재력에 대해 검토하였다.

다음 Fig. 2 와 Fig. 3은 철도중형에 대한 하중을 사하중으로 대처하여 재하한 형상과 시간이력해석시 트러스교의 차선

지정 형상을 나타내고 있다.



Fig. 2 트러스교의 철도 증형 하중재하 형상

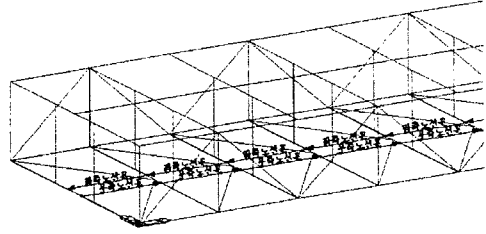


Fig. 3 트러스교의 시간이력해석시 철도 차선위치

ii) 현수교

본 교량 내의 현수교는 중앙 경간 300m, 양측 경간 125m로 이루어진 연장 550m의 자정식 현수교이다.

현수교의 경우, 각 부재에 단면형상과 물성치를 부여한 beam 요소를 이용하였고, 케이블은 등가 트러스 요소를 사용하였다. 또한, 재하 하중에 대해서는 트러스교와 동일하게 적용되었다.

다음 Fig. 4와 Fig. 5는 현수교의 구성부재에 대한 상세와 전체 모델링 형상을 나타내고 있다.

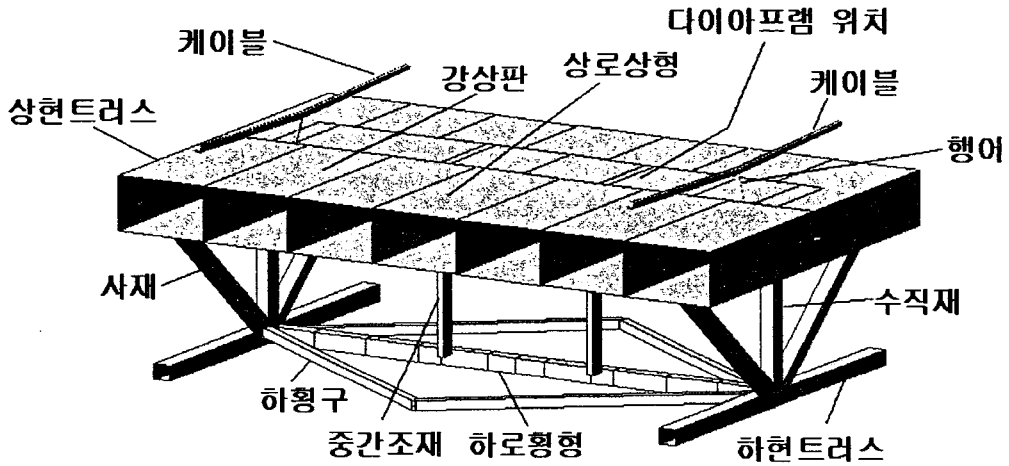


Fig. 4 현수교의 각 구성부재 상세

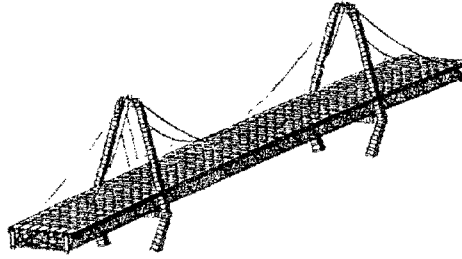


Fig. 5 현수교의 전체 모델링 형상

(2) 해석결과

본 교량의 구조해석 결과에 대해서 부재 그룹별 응력 범위의 최대 값을 산출하여 각 주행속도에 따른 부재력을 표3~표6에 정리하였다. 이는 각 경우의 하중이 주행속도에 따라 발생하는 부재별 응력들 중에서 그룹내 최대 응력값을 유발하는 부재에 대한 결과 값들만을 나타낸 것이다.

다음 결과에서 보이듯이 철도하중의 속도의 변화와 단·복선에 따라서 각 부재는 상이한 거동을 나타내고 있다.

본 교량의 실제시 철도에 대해서 복선 주행을 계획하였지만, 교량내의 통과 시간이 주행속도 90km/hr일 경우 최대 25초를 초과하지 않기 때문에, 출발시간에 따라 단·복선의 경우로 나누어질 수 있을 것이다.

구조해석을 통해 차량의 수에 따른 결과는 각 주행속도와는 별도로 구조물에 대해 증가된 응력 값들을 나타내었으나, 단·복선과 주행속도의 변화는 구조물 전체 부재력에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 더욱이 주행속도의 증가에 따라 부재력은 비례적으로 증가하지 않고 있음을 나타내었고, 주행속도가 본 교량의 고유진동수 및 진동형상과 관련하여 영향을 미치고 있음을 나타내고 있다.

i) 트러스교

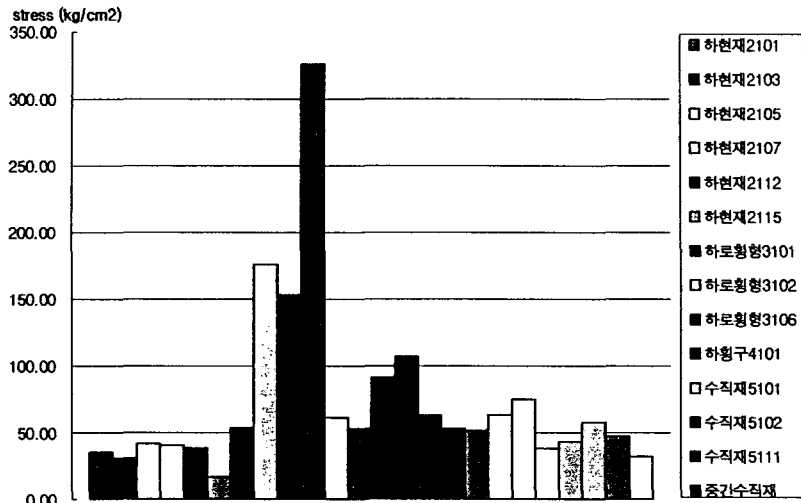


Fig. 6 정적이동하중해석결과 - 응력 범위값

Fig. 6에서 보여지듯이 트러스교의 정적이동하중해석에 의한 결과 최대 응력값은 하횡구에서 발생하였으며, 구조적 거동에 문제를 발생하지는 않고 있다.

표. 2 트러스교 단선재하시 응력범위 최대값

	속도90	속도100	속도110
하현제2101	1.37E+01	1.79E+01	1.48E+01
하현제2103	1.11E+01	1.43E+01	1.18E+01
하현제2105	1.10E+01	1.45E+01	1.19E+01
하현제2107	1.01E+01	1.64E+01	1.32E+01
하현제2112	4.36E+00	1.24E+01	7.97E+00
하현제2115	9.42E+00	1.27E+01	1.08E+01
하로횡형3101	3.64E-01	4.37E-01	3.99E-01
하로횡형3102	2.27E+00	3.59E+00	3.71E+00
하로횡형3106	1.21E+00	2.56E+00	2.21E+00
하횡구4101	6.27E+00	1.12E+01	1.06E+01
수직제5101	5.38E+01	7.56E+01	6.18E+01
수직제5102	6.14E+00	1.00E+01	8.04E+00
수직제5111	7.52E+01	1.41E+02	1.08E+02
중간조제6101	7.22E+01	1.40E+02	1.07E+02
사제7101	3.15E+01	6.97E+01	5.32E+01
사제7102	9.76E+00	1.74E+01	1.31E+01
사제7103	8.75E+00	1.58E+01	1.22E+01
사제7104	8.16E+00	1.16E+01	8.60E+00
사제7108	3.26E+01	6.07E+01	4.63E+01
사제7109	8.86E+00	1.67E+01	1.33E+01
사제7113	1.86E+00	7.54E+00	5.11E+00
사제7114	8.93E+00	1.22E+01	9.97E+00
사제7115	3.64E+00	5.07E+00	4.03E+00
상로상형	4.78E+00	9.58E+00	8.11E+00

표. 3 트러스교 복선재하시 응력범위 최대값

	속도90	속도100	속도110
하현제2101	1.70E+01	2.33E+01	2.03E+01
하현제2103	1.25E+01	1.58E+01	1.43E+01
하현제2105	1.30E+01	1.59E+01	1.95E+01
하현제2107	1.29E+01	1.56E+01	2.20E+01
하현제2112	5.04E+00	1.39E+01	1.19E+01
하현제2115	1.68E+01	2.33E+01	1.99E+01
하로횡형3101	3.51E-01	4.76E-01	4.71E-01
하로횡형3102	2.86E+00	4.66E+00	5.04E+00
하로횡형3106	1.60E+00	2.37E+00	3.55E+00
하횡구4101	7.86E+00	1.37E+01	1.36E+01
수직제5101	5.83E+01	7.96E+01	7.14E+01
수직제5102	7.53E+00	1.26E+01	8.63E+00
수직제5111	1.13E+02	2.23E+02	1.48E+02
중간조제6101	1.16E+02	2.28E+02	1.51E+02
사제7101	3.79E+01	7.91E+01	6.28E+01
사제7102	9.79E+00	1.76E+01	1.45E+01
사제7103	1.37E+01	2.50E+01	2.00E+01
사제7104	9.75E+00	1.23E+01	1.07E+01
사제7108	5.09E+01	1.02E+02	7.05E+01
사제7109	8.82E+00	1.51E+01	1.66E+01
사제7113	2.62E+00	7.43E+00	9.12E+00
사제7114	1.34E+01	2.11E+01	1.61E+01
사제7115	4.26E+00	7.89E+00	5.86E+00
상로상형	7.10E+00	1.49E+01	1.11E+01

ii) 현수교

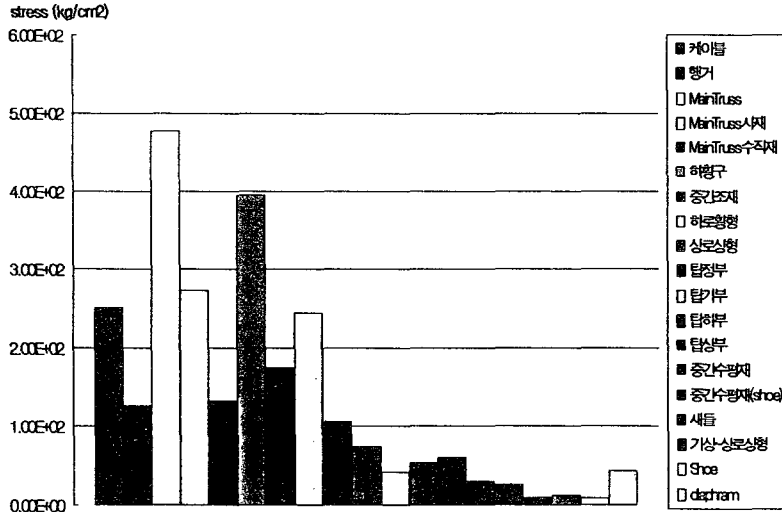


Fig. 7 정적이동하중해석결과 - 응력 범위값

Fig. 7은 현수교의 정적이동하중해석 결과로서 철도 6량의 하중에 의한 최대, 최소 응력값들의 응력범위를 나타낸 것으로 하현재에서 비교적 큰 값이 발생하지만 구조적 거동에는 문제를 야기하지 않고 있음을 알 수 있다.

표. 4 현수교 단선재하시 응력범위 최대값

	속도90	속도100	속도110
케이블	311.22	357.77	322.85
행거	161.89	177.32	155.15
MainTruss	631.40	672.20	665.90
MainTruss사재	385.60	404.10	425.30
MainTruss수직재	162.49	154.52	154.05
하횡구	127.94	138.50	128.53
중간조재	25.97	25.28	27.51
하로횡형	81.40	68.85	67.57
상로상형	142.16	152.23	158.11
탑정부	90.40	103.70	94.27
탑기부	55.43	59.89	61.24
탑하부	72.51	78.38	80.15
탑상부	73.32	84.11	76.45
중간수평재	35.08	40.14	36.39
중간수평재(shoe)	30.54	34.94	31.68
새들	12.13	13.87	12.52
가상-상로상형	15.25	16.35	15.93
Shoe	10.73	10.27	9.97
diaphragm	18.71	20.50	21.53

표. 5 현수교 복선재하시 응력범위 최대값

	속도90	속도100	속도110
케이블	577.99	564.39	604.80
행거	277.23	267.16	287.37
MainTruss	882.90	869.40	938.50
MainTruss사재	461.60	462.40	498.40
MainTruss수직재	202.33	198.96	214.38
하횡구	154.91	191.89	163.54
중간조재	34.28	34.82	35.03
하로횡형	78.74	113.63	85.83
상로상형	232.72	228.69	240.57
탑정부	173.97	169.17	182.12
탑기부	85.45	84.20	87.59
탑하부	111.84	110.20	114.64
탑상부	141.08	137.20	147.75
중간수평재	68.12	66.37	70.87
중간수평재(shoe)	59.31	57.80	61.68
새들	23.36	22.74	24.38
가상-상로상형	21.48	20.88	22.66
Shoe	13.52	13.15	14.25
diaphragm	24.41	24.94	26.57

3) 분석 및 고찰

본 교량의 시간 이력 해석결과를 토대로 주행속도에 따른 구조적 거동과 단·복선에 따른 구조적 거동에 대해 검토한 결과를 트러스교와 현수교로 구분하여 아래 그래프에 나타내었다.

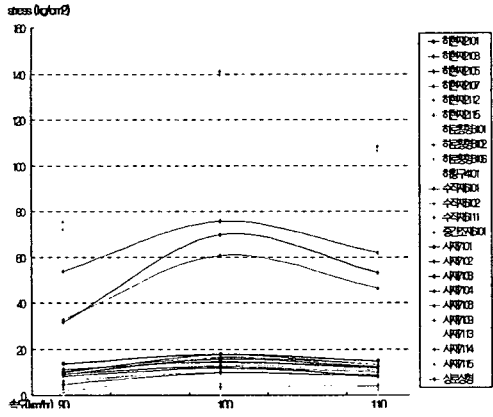


Fig. 8 트러스교 단선재하시 속도에 따른 응력범위

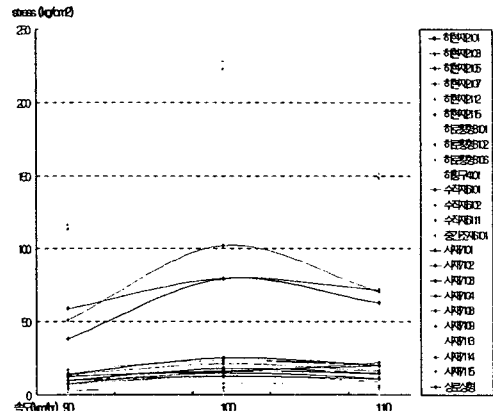


Fig. 9 트러스교 복선재하시 속도에 따른 응력범위

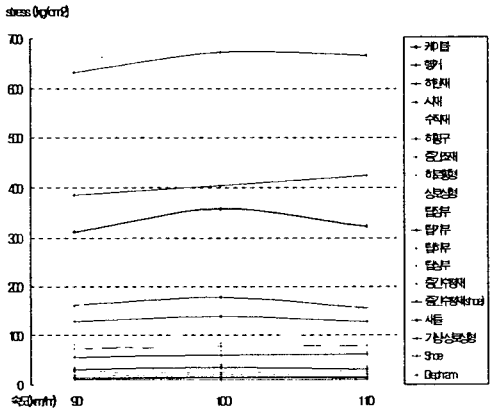


Fig. 10 현수교 단선재하시 속도에 따른 응력범위

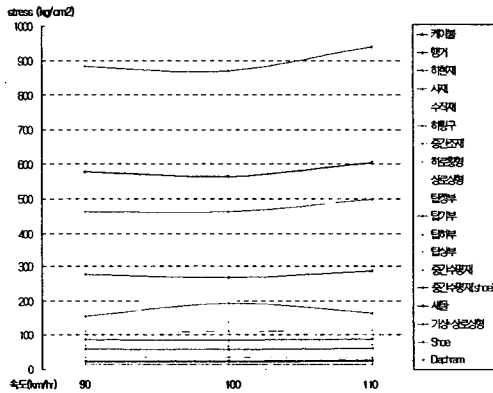


Fig. 11 현수교 복선재하시 속도에 따른 응력범위

본 교량은 철도에 대해 주행속도를 110km/h로 하여 설계되었지만, 위의 결과에서 보이듯이 본 교량의 트러스교와 현수교에 있어 각 주행속도와 단선으로 운행할 것인지 혹은 복선으로 운행할 것인지에 따라서 구조물의 거동이 상이하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

위의 그래프에 나타난 결과로서 트러스교의 경우 단·복선에 대해서는 변화의 차이가 없이 동일한 거동으로 주행속도 100km/hr일 때 각 부재에 가장 불리하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

그러나, 현수교의 경우 철도하중을 단선재하시 주행속도 100km/hr에서 부재에 불리하게 작용하며, 복선재하시 주행속도 110km/hr에서 불리하게 작용하는 경향을 보이고 있다. 위의 분석에 따르면 단선 운행시에는 기존의 주행속도 110km/hr가 적합하다고 판단되나 복선 운행시에는 기존의 주행속도는 현수교에 불리하다고 판단된다.

3. 결론

본 논문에서는 트리스교와 현수교로 연결된 복합교량에 대해 단,복선과 차량의 수에 대해 주행속도에 따른 구조적 거동을 검토하였다.

본 교량은 각 구조물에 대해 철도에 대한 설계속도를 110km/hr로 설계하였고 복선으로 운행할 계획이므로, 앞의 결과에 따르면 트리스교의 경우 주행속도 100km/h에서 가장 불리한 거동을 나타내고 있는 반면, 현수교는 주행속도 110km/h에서 가장 불리한 거동을 나타내는 것을 알 수 있다.

이는 트리스교와 현수교가 하중에 대해 각각의 거동을 달리하고 있음을 나타내고 있다.

또한, 단·복선 그리고 차량의 수에 따른 결과는 각 주행속도와는 별도로 구조물에 대해 증가된 응력 값들을 나타내었으나, 주행속도의 변화는 속도변화에 대해 부재의 응력들이 비례적으로 변화하지 않았다.

앞의 Fig. 8 ~ Fig. 11에서 보여지듯이 각 부재의 응력값들은 주행속도의 변화에 따라 큰 변화는 아니지만, 각각 다른 변화를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

이와 같이 일반형식의 교량과 케이블에 의해 지지되는 교량이 연결되어 복합교량이 성립할 때 각 교량의 구조적 거동은 서로 상이하게 나타나기 때문에 이런 복합교량에 대해서는 설계속도를 전체교량의 거동에 맞추어 새롭게 설정하거나, 구조물의 설계 이전에 이와 같은 문제점에 대해 검토 후 설계에 임해야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000- 00484-0 (2003)) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 영종대교 유지보수비 분담비율 (최종보고서), 2003.4
2. 철도설계기준 (철도교편), 1999
3. 철도속도향상을 위한 건설기준개선 (안) (A study on improvement of construction criteria of practice for speed - up - railway (Draft)), 1997
4. 경부선 철도의 근대화속 속도향상책 < 기1, 2 > (The Speed - up and Modernization Planning on Seoul - Pusan Rail Road Line (2)), 1969
5. 인천국제공항 고속도로 교량유지관리를 위한 초기점검 및 구조안정성 평가 보고서, 2001.4