

# 지진하중을 받는 곡선교량의 동적거동

## Dynamic Behavior of Curved Bridges under Seismic Loading

박 남 회\* / 윤 기 용\*\* / 강 영 종\*\*\*

Park, Nam Hoi / Yoon, Ki Yong / Kang, Young Jong

### Abstract

This study is performed to understand complex behavior and to investigate the rational analysis methods for seismic design of the curved bridges. To analyze the curved bridges for the seismic loadings, it is used that the finite element analysis program has the 7-dof curved beam and straight beam element. The free vibration characteristics of the curved bridges are compared with the straight bridges that have span length same as the average arc length of inside and outside girder of those. For the same case, the dynamic behavior is compared under seismic loadings. It is found that regular bridges classified by AASHTO are analyzed as if those were straight. To investigate the dynamic behavior of general curved bridges under seismic loading, the seismic loading directions and the subtended angle of curved bridges are varied.

**key words** : Horizontally Curved Bridges, Seismic Design, Seismic Loading, Dynamic Behavior, 7-dof Curved Beam, Time history method

### 요 지

곡선교량의 복잡한 동적거동을 이해하고, 내진해석시 합리적인 해석방법을 선정할 수 있는 기초적인 연구를 수행하기 위하여 뒀자유도를 포함한 절점당 7자유도를 갖는 곡선보요소와 직선보요소를 갖는 동적유한요소해석 프로그램을 사용하여 곡선교량의 내진해석을 수행하였다. 자유진동해석결과로부터 곡선교량의 모드특성을 직선교량과 비교하여 분석하였다. 또한, 동일지간장을 갖는 직선교와 곡선교의 지진시 거동특성을 분석하고, AASHTO의 정규교량으로 분류된 곡선교량의 내진해석방법에 대해 비교하였다. 또한, 지진하중작용방향과 곡선교량의 내부중심각을 변화시켜 곡선교량의 동적거동을 파악하였다.

**핵심용어** : 곡선교, 내진설계, 지진하중, 동적거동, 7자유도 곡선보, 시간이력해석법

### 1. 서 론

고속도로의 인터체인지와 교량접속구간 등에서 교량량을 완만히 분산하고 교통흐름을 조절하기 위하여 곡선교량에 대한 필요성은 이미 오래전부터 제기되어 왔다. 세계적으로 1960년대까지만 하더라도 곡선교량은 거더를 직선거더로 사용하고 바닥판만을 곡선으로 제작하였다. 직선거더를 사용한 곡선교량은 설계에 필요한 구조해석이 용이한 반면, 곡률 때문에 바닥판 캔

틸레버 부분의 길이가 제한되므로 보의 지간이 상대적으로 짧은 단순보의 조합형태가 되어 상당히 많은 하부구조의 건설이 필요하고 신축이음부의 유지관리에 어려움이 따르게 된다. 사회의 발전과 더불어 대도시의 토지가격의 상승으로 교량의 하부공간의 효율적 이용의 필요성이 대두하고, 생활수준의 향상으로 교량의 미적인 측면이 부각되면서 1960년대 후반부터 곡선거더를 사용한 곡선교량이 제작되기 시작하였다. 최근 미국의 경우 신설교량의 25%정도가 곡선교로 시공되고 있

\* 정회원 · 고려대학교 공학기술연구소 연구교수 (e-mail : nhpark@korea.ac.kr)

\*\* 정회원 · 선문대학교 토목공학과 부교수

\*\*\* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

다.(Yoo, 1996) 곡선교는 연속교로 설계할 수 있어 효과적인 단면설계를 기할 수 있고, 긴 지간을 갖는 교량의 제작이 가능하여 하부구조의 사용을 감소시키므로 공사비의 절감과 공기단축 효과를 얻을 수 있을 뿐 아니라 하부공간의 효율적인 활용을 도모할 수 있다. 또한 긴 지간에서 나오는 선형미는 미적인 면에서도 아름다운 교량을 창출하여 도시미관을 증진시킨다. (Suros *et al.*, 1991) 우리나라에서도 공간의 효율적 활용과 교통문제의 해결 등을 위하여 경제적인 측면뿐 아니라 미적인 측면에서도 우수한 곡선교의 사회적 요구가 증가할 것이다. 특히 복잡한 대도시에서의 곡선교의 활용도는 매우 우수할 것으로 판단된다.

곡선교의 거동특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 현재까지의 대부분의 연구는 곡선보 요소의 개발이나(Kang *et al.*, 1994a) 곡선보 또는 곡선교량의 정적거동특성(Dabrowski, 1968; Nakai *et al.*, 1988; Yoo *et al.*, 1995; 강영중 외 1996), 특히 좌굴거동에 대한 연구와(Kang, 1994b; Yoo *et al.*, 1996), 곡선보 또는 곡선교량의 자유진동특성(윤기용 외 1998; Kim *et al.*, 2002; Yoon *et al.*, 2005), 이동질량 효과를 고려한 동적해석에 대한 연구(Huang *et al.*, 1995; 서영국, 1996)에 집중되어 있는 실정이다. 따라서, 곡선교량의 설계지침인 AASHTO의 "Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges"에서도 정적인 거동 및 국부좌굴에 관한 조항만을 규정하고 있다 (AASHTO, 1993).

1992년에 도로교 표준시방서의 개정과 더불어 내진 설계에 대한 사회적 관심이 고조되었다. 현재 도로교설계기준은 정규교량에 대한 내진설계기준을 제공하고 있을 뿐 곡선교량과 같은 비정규교량에 대하여서는 설계자의 판단에 따라 설계하도록 권하고 있다(건설교통부, 2005). 그러나 곡선교량의 복잡한 거동특성에 대한 이해부족과 관련된 해석방법이 정립되지 않아 해석에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 한편, AASHTO에서는 정규교량으로 정의할 수 있는 곡선교량을 내부중심각 90° 이하와 최대지간비를 2이하를 동시에 만족시키는 교량으로 규정하고, 이와 같은 곡선교량은 동일지간을 갖는 등가의 직선교량으로 변환하여 해석하도록 규정하고 있으며, 정규교량으로 정의되지 않는 곡선교량에 대하여서는 국내 설계기준과 동일한 수준이다 (AASHTO, 2004). 따라서, 안전성 및 사용성을 모두 만족시키면서 경제적인 곡선교량의 설계 및 시공을 위해서는 지진하중에 대한 동적거동특성이 밝혀져야 한다.

본 연구에서는 곡선교량의 복잡한 동적거동을 이해하고, 내진해석시 합리적인 해석방법을 선정할 수 있는

기초적인 연구를 수행하고자 한다. 즉, 본 연구에서는 윤기용 등(2002)이 발표한 뒀자유도를 포함한 절점당 7자유도를 갖는 곡선보요소와 직선보요소를 갖는 동적유한요소해석 프로그램을 사용하여 곡선교량의 내진해석을 수행하고 동일지간장을 갖는 직선교와 곡선교의 지진시 거동특성을 분석하고, 지진하중의 작용하중 방향과 곡선교량의 내부중심각을 변화시켜 곡선교량의 동적거동을 파악하고자 한다.

## 2. 유한요소해석 프로그램

### 2.1 곡선보 요소

곡선보 요소는 박판곡선보 이론(Kang *et al.*, 1994a, b)에 근거한 요소로서 그림 1과 같이 절점당 7개의 자유도가 정의된 개단면 2축 대칭 단면을 갖는 요소이다. 곡선보요소의 요소강도행렬과 요소질량행렬은 박판곡선보 이론을 Hamilton의 원리에 적용하여 구성한 곡선보의 선형 운동방정식으로부터 구성된다(윤기용 외 2002).

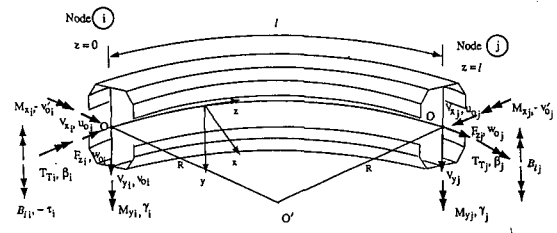


그림 1. 곡선보 요소

### 2.2 직선보 요소

직선보 요소의 절점력과 절점변위는 그림 2와 같으며, 뒀자유도를 포함하여 절점당 7개의 자유도를 갖는다. 또한 곡선보 요소와 마찬가지로 2축 대칭단면에 대하여 요소강도행렬과 요소질량행렬을 구성하였다 (Sekulovic, 1986).

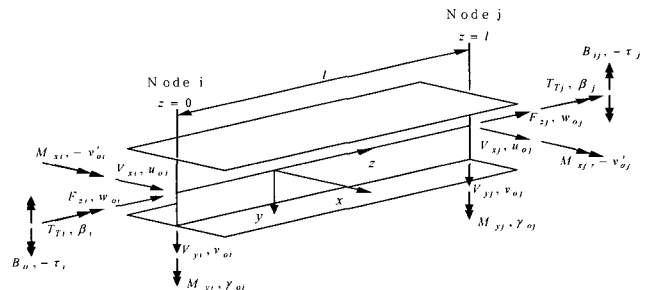


그림 2. 직선보 요소

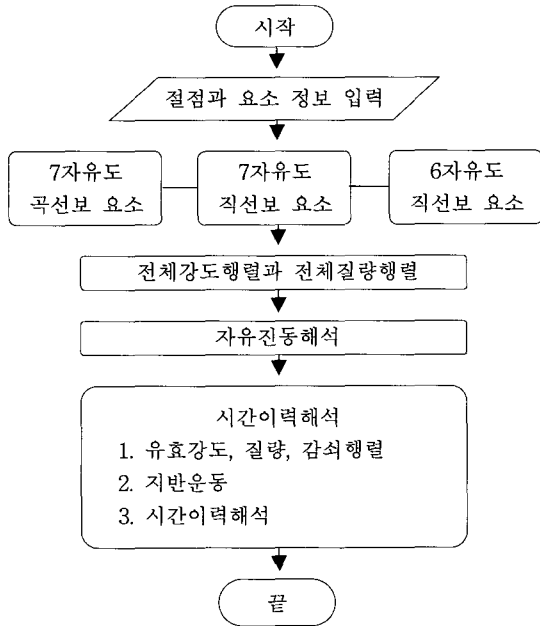


그림 3. 프로그램 흐름도

### 2.3 유한요소해석 프로그램

곡선교를 동적해석을 수행하기 위한 유한요소해석 프로그램의 흐름도는 그림 3과 같다(윤기용 외 2002).

### 3. 해석모델

해석대상교량은 그림 4와 같이 3경간 연속 곡선교량이며, 각 경간에서는 두개의 곡선주형과 11개의 가로보가 등간격으로 배치되어 있다. 두개의 곡선주형간의 간격은 2.69m이다. 모델의 편의를 위하여 곡선주형과 가로보의 단면제원이 같도록 가정하였다. 상부구조의 단면의 성질과 재료의 성질은 표 1과 같다. 한 경간에서 내측주형과 외측주형의 평균길이, 즉 주형 중심선의 길이는 30.48m이며, 총지간은 91.44m이다. 각 경간의 내부중심각은 일정하게 가정하였는데, 한 경간의 내부중심각은 10도인 경우와 30도인 경우로 가정하여 3경간 곡선교량의 내부중심각이 30도인 경우와 90도인 경우에 대해 해석하였다. 해석에 사용한 모델의 경계조건은 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 고정단(교각 P1)을 중심으로 각 지점부에서 직선으로 연결하는 방향으로 이동단을 설치한 활선경계조건을 사용하였다.

한편, 교각은 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 지름이 1.27m, 높이가 7.62m인 원형단면으로 가정하였고, 하부구조의 단면의 성질과 재료의 성질은 표 1과 같다.

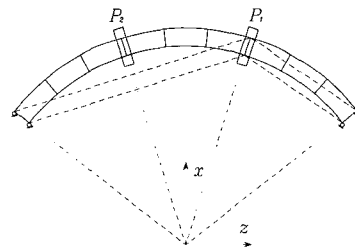
해석모델의 곡선주형은 7자유도 곡선보요소로 모델링하였으며, 가로보는 7자유도 직선보요소, 교각을 포함한 하부구조는 6자유도 직선보요소를 사용하여 해석하였다.

표 1. 단면성질과 재료성질

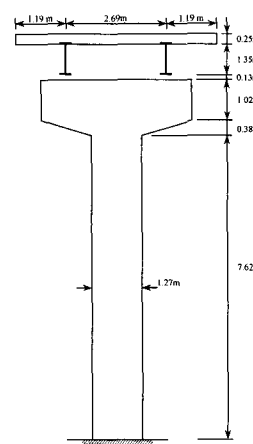
구분	상부구조	하부구조
단면 성질	$A=4.28 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ , $I_x=1.42 \times 10^{-2} \text{ m}^4$ , $I_y=2.98 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ , $L_0=1.28 \times 10^{-4} \text{ m}^6$ , $K_T=1.54 \times 10^{-5} \text{ m}^4$	$A=1.267 \text{ m}^2$ , $I_x=I_y=0.128 \text{ m}^4$ , $K_T=0.255 \text{ m}^4$
재료 성질	$E=200 \text{ GPa}$ , $G=76.9 \text{ GPa}$ , $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$	$E=22.8 \text{ GPa}$ , $G=9.7 \text{ GPa}$ , $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$

입력지진하중으로는 한반도의 지반특성과 지진자료를 분석하여 진앙지와 관측치가 비교적 먼 압반 또는 경질의 토질층에서의 한반도 인공지진파형을 선택하여 최대지반가속도를 0.14g로 하여 그림 9와 같은 지진파형을 사용하였다(김원배 1988).

해석모델은 지진하중작용방향과 곡선교량의 내부중심각의 크기에 따라 구별하였다. 예를 들어 모델 S\_X는 직선교량으로 지진하중이 x축 방향으로 작용한 경우이며, 90\_Z는 내부중심각인 90도인 곡선교량으로 지진하중이 z축 방향을 작용한 경우를 의미한다. 또한 해석결과를 비교하기 위해 상부구조와 하부구조의 절점 및 요소번호는 그림 5와 같다.



(a) 상부구조와 경계조건



(b) 하부구조

그림 4. 해석대상교량

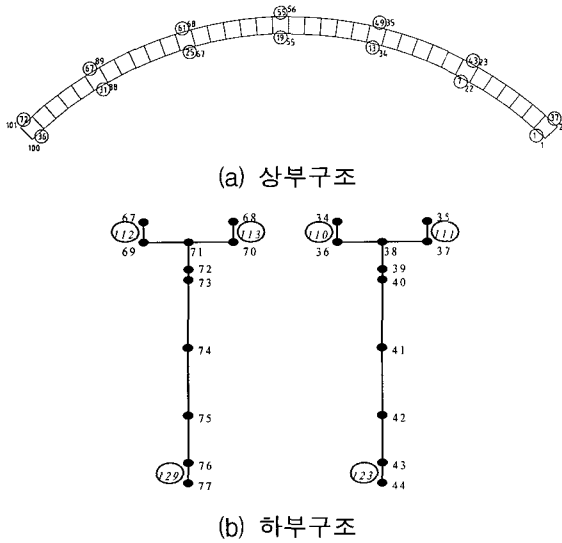


그림 5. 해석대상교량의 절점과 요소번호

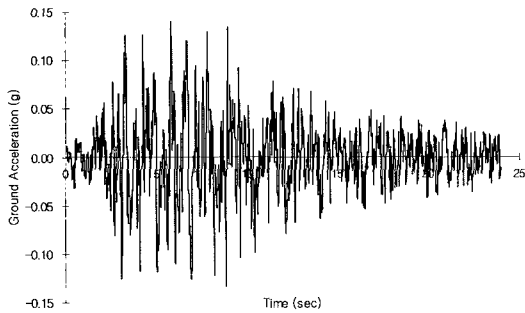


그림 6. 인공지진파형

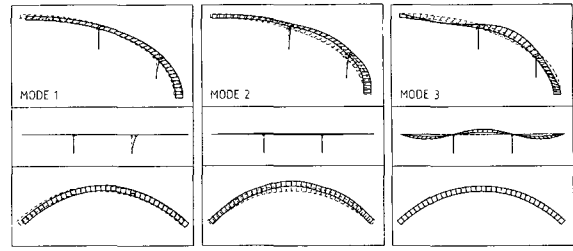
#### 4. 해석결과

##### 4.1 자유진동해석

곡선교량과 직선교량의 자유진동특성을 비교하기 위하여 곡선교량과 동일지간장을 갖는 직선교와 내부중심각이 30도인 곡선교, 내부중심각이 90도인 곡선교에 대해 자유진동해석을 수행하여 각 모드별 제1진동수를 정리한 결과는 표 2와 같다. 여기서 모드분류는 그림 7과 같이 대표적인 3가지 형상으로 분류하였다.

교각을 포함하지 않는 직선교량의 경우 각 모드가 서로 독립적이고, 곡선교량에서도 곡률면내모드와 곡률면외모드가 서로 독립적으로 발생한다. 그러나 교각을 포함하면 직선교량이나 곡선교량 모두 교각의 진동으로 인하여 그림 7에서 보는 바와 같이 횡방향 모드에서도 수직변위가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 각 모드에 지배적인 거동을 보이는 형상에 따라 교각모드, 횡모드, 연직모드로 분류하였다.

표 2에서 차이는 직선교와 곡선교의 진동수의 차이를 의미한다. 표 2를 살펴보면, 교각모드와 횡모드처럼 교각의 거동이 지배적인 영향을 미치는 경우에는 직선



(a) 교각모드 (b) 횡모드 (c) 연직모드

그림 7. 자유진동 모드형상

표 2. 모드별 진동수 (단위 : Hz)

구분	교각모드	횡모드	연직모드
직선교	0.775	1.236	2.002
내부중심각 30도	0.776	1.253	1.872
차이(%)	0.13	1.38	6.5
내부중심각 90도	0.791	1.256	1.394
차이(%)	2.06	1.62	30.4

교와 곡선교의 진동수의 차이가 3%미만정도로 미미함을 알 수 있다. 그러나, 연직모드의 경우에는 상부구조의 거동이 지배적이므로, 곡률효과로 인하여 내부중심각이 90도인 곡선교의 진동수는 직선교의 경우보다 약 30%정도 감소하고 있다. 이는 곡률의 영향으로 상부구조의 횡방성이 크게 감소함을 의미한다.

따라서 지진하중과 같이 수평방향 하중이 곡선교량에 작용하는 경우 교각과 상부구조의 구속조건에 영향을 받음을 예상할 수 있으며, AASHTO 2004에서 제안하는 바와 같이 곡선교량이 정규교량으로 분류될 수 있다면 곡선교량을 동일지간장을 갖는 직선교량으로 이상화하여 해석할 수 있음을 알 수 있다. 반면, 수직하중이 작용한다면 직선교와 곡선교의 거동은 상당한 차이가 발생할 것임을 예상할 수 있다.

##### 4.2 곡선교와 동일지간장을 갖는 직선교

본 연구에서 선택한 해석모델은 모두 AASHTO 2004에 의하면 정규교량으로 분류되어 동일지간장을 갖는 직선교량으로 이상화하여 내진설계를 수행할 수 있는 모델이다. 본 연구에서는 동일지간장을 갖는 직선교와 곡선교에 지진하중이 작용시 발생하는 응답을 분석하기 위하여 내부중심각이 90도인 곡선교와 동일지간장을 갖는 직선교에 대해 지진하중을 직선교의 교축방향(하중방향 0°)과 교축직각방향(하중방향 90°)으로 작용시켜 동적해석을 수행하여 표 3에 정리하였다. 또한, 곡선교량에서는 교축방향과 교축직각방향의 구분이 애매하기 때문에 내부중심각이 90도인 곡선교량에 대해서는 지진하중을 5°씩 변화하며 작용시켜 최대와

최소의 응답이 발생하는 지진하중작용방향에 대하여서도 정리하였다. 이 경우 하중조합은 지진하중작용방향을 직각으로 작용시켜 주방향응답에 직각방향응답의 0.3배를 더한 응답에 해당한다. 예를 들어 Fx에 대해 하중조합 최대는 지진하중작용방향이 70°인 경우의 응답 396.5kN에 이에 직각인 지진하중작용방향이 160°인 경우의 응답 174.0kN의 0.3배인 52.2kN을 더하여 448.7kN으로 계산하였다.

표 3. 직선교와의 P1에서의 최대반력 비교

	하중방향	Fx (kN)	Fz (kN)	Mx (kN·m)	Mz (kN·m)
직선교량	Z축(0°)	0.0	658.3	6412	0
	X축(90°)	375.5	0.0	0	3696
	하중조합 1	112.6	658.3	6412	1109
	하중조합 2	375.5	197.5	1924	3696
곡선교량	Z축(0°)	81.7	557.8	5403	796
	X축(90°)	413.7	46.1	488	3855
	하중조합 1	205.8	571.6	5549	1952
	하중조합 2	438.2	213.4	2109	4094
곡선교량	최대응답	413.7	557.8	5403	3858
	방향(°)	90	0	0	85
곡선교량	최소응답	81.7	46.1	488	743
	방향(°)	0	90	90	175
하중작용방향변화	하중조합 최대	448.7	584.1	5663	4169
	방향(°)	70	15	15	75
	하중조합 최소	205.8	213.4	2109	1901
	방향(°)	0	90	90	175

직선교와 곡선교에 동일하게 교축방향과 교축직각방향으로 지진하중을 작용시켜 하중조합을 한 경우에 대해 살펴보면 하중조합 1에 대해 Mx는 직선교가 약 15% 크고, Mz는 75%정도 곡선교가 크게 발생하고 있다. 하중조합 2의 경우에는 곡선교가 Mx와 Mz 모두 약 10%정도 크게 발생하였다. 이를 다시 원형교각의 설계모멘트( $\sqrt{M_x^2 + M_z^2}$ )로 비교하면 표 4와 같다. 표 4를 보면 하중조합 1이 지배적인 하중조합임을 알 수 있다. 하중조합 1에 대하여 교각의 설계모멘트는 직선교로 이상화한 경우가 교축과 교축직각방향으로 곡선교에 지진하중을 재하한 경우에 비해서는 10%정도 크고, 지진하중을 변화시켜가며 작용시킨 경우에 대해해서도 8%정도 크다. 따라서 정규교량에 해당하는 곡선

교량은 AASHTO 2004에서 제안하는 바와 같이 동일시간을 갖는 직선교로 이상화하여 내진해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

표 4. 교각의 설계모멘트 비교(단위 : kN·m)

구분	직선교	곡선교	곡선교 (지진작용방향 변화)
하중조합 1	6507	5882	5974 (최대Mx, 최소Mz)
하중조합 2	4167	4605	4672 (최소Mx, 최대Mz)

그러나, 표 3에서 보는 바와 같이 지진하중작용방향을 5°씩 변화시켜가며 작용시킨 경우 최대응답은 일정한 패턴을 갖고 발생하지는 않는다. 따라서 정규교량에 해당하지 않는 곡선교량의 내진해석에 있어서는 지진하중작용방향에 교축방향과 교축직각방향의 구분이 어렵고 따라서 다양한 입력하중방향을 가정하고 반복적인 해석이 수행되어야 할 것이다. 또한, 이 경우 하중조합에 대해서는 보다 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

### 4.3 지진하중작용방향에 따른 곡선교량의 거동 특성

본 연구에서는 지진하중 작용방향에 따른 곡선교량의 동적거동특성을 면밀히 검토하기 위하여 동일조건(시간장, 교각, 경계조건 등)을 갖는 직선교량과 내부중심각이 30도인 곡선교량, 내부중심각이 90도인 곡선교량에 대해 지진하중을 두개의 수평방향(z축, x축)과 수직방향(y축)으로 작용시켜 해석하였고, 교각과 교량받침, 상부구조로 나누어 시간이력응답 중 최대변위와 최대반력, 최대단면력을 비교하여 분석하였다.

#### 4.3.1 교각의 거동특성

그림 5에서 보는 교각 상단의 절점 38번과 절점 71번에서의 변위와 요소 123번과 129번에서의 부재력을 통하여 교각의 거동특성을 파악하고자 하였다. 여기서 변위는 전체좌표계에 대한 값이고, 단면력은 요소좌표계에서의 결과이다.

교각상단에서의 최대변위는 그림 8과 같다. 먼저 z축 방향으로 지진하중이 작용한 경우(즉 직선교에서는 교축방향)에 교각에서의 변위를 살펴보면 직선교에서는 z축 방향 변위와 x축에 관한 회전변위만이 발생하고 있다. 그러나 곡선교에서는 z축 방향 변위와 x축에 관한 회전변위가 물론 지배적으로 크지만 내부중심각이 클수록 그 크기가 감소하며, 하중작용방향의 직각인 x

축 방향 변위와 z축에 관한 회전변위가 증가하는 현상이 발생하고 있다. 이는 초기 곡률과 경계조건에 의한 영향인 것으로 판단된다. 또한 특기 할 것은 그림 8(e)를 보면 교각의 비틀림 모멘트를 유발하는 y축에 대한

회전변위가 직선교에서는 발생하지 않으나, 곡선교에서는 내부중심각이 커짐에 따라 급격히 증가하고 있다는 점이다.

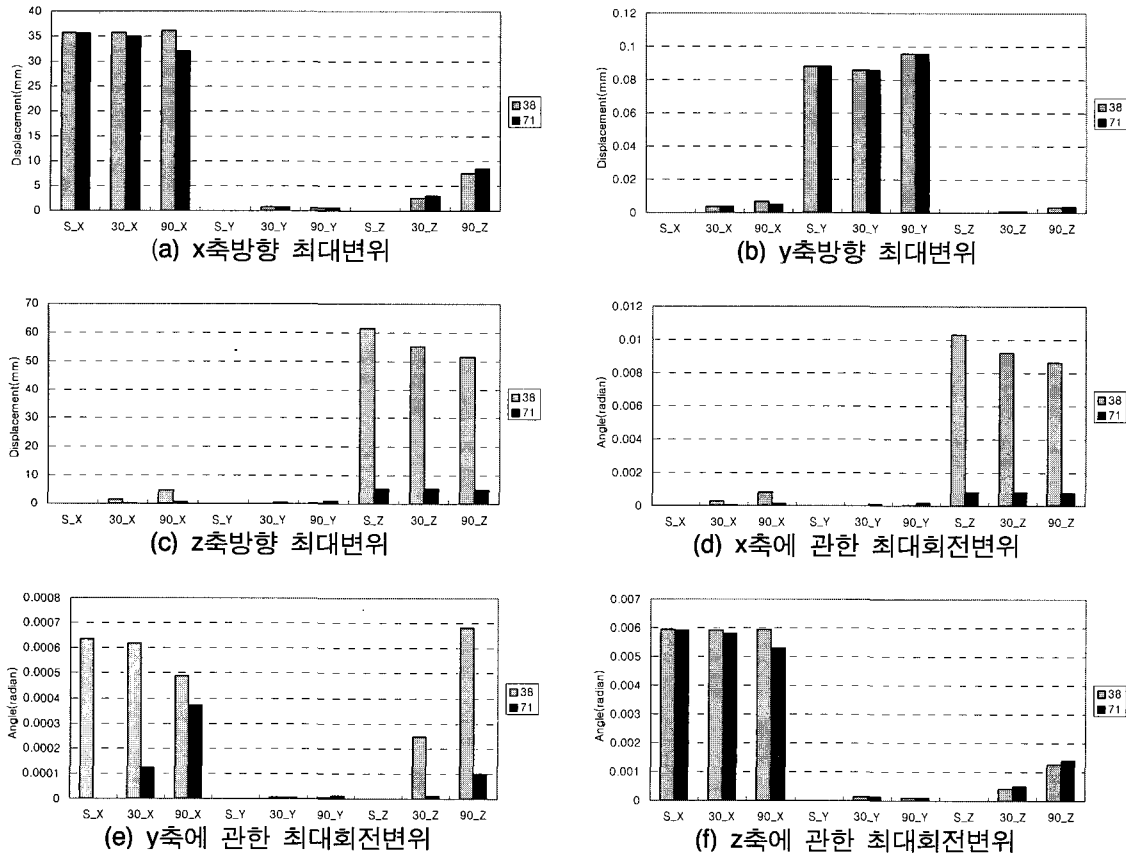


그림 8. 교각상단에서의 최대변위

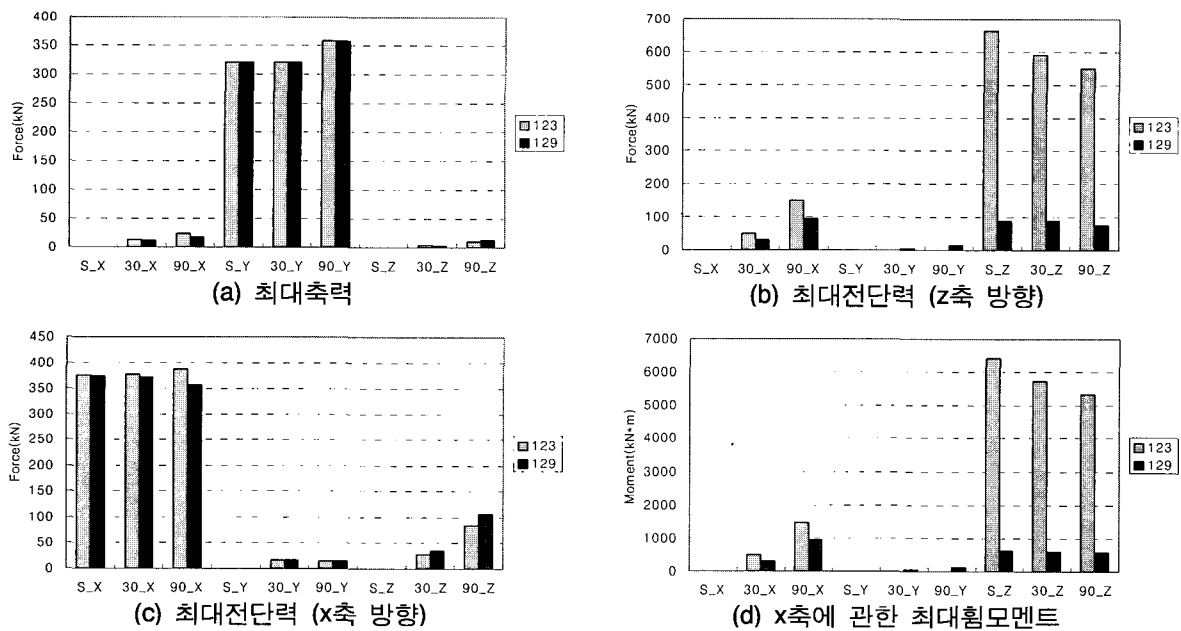


그림 9. 교각하단에서의 최대단면력(계속)

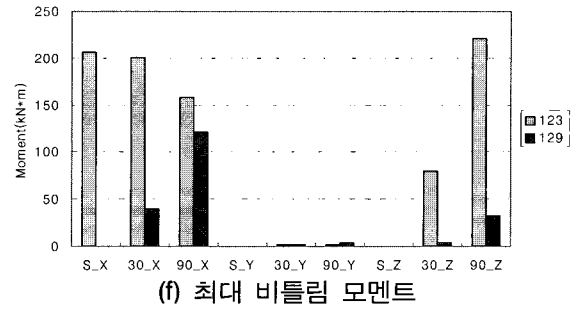
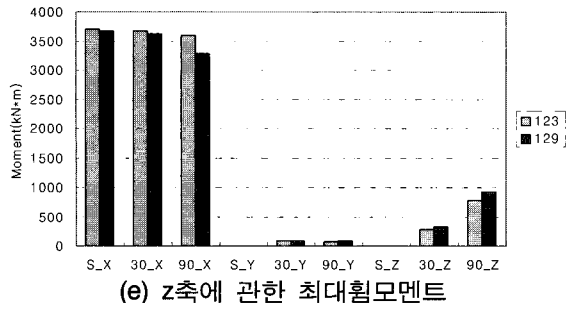


그림 9. 교각하단에서의 최대단면력

x축 방향으로 지진하중이 작용한 경우(즉 직선교에서는 교각직각방향)에 교각에서의 변위 중 특기 할 것은 경계조건(상부구조와 교각의 연결조건)의 영향으로 그림 8(e)에서 보는 바와 같이 교각 2번에서 y축에 대한 회전변위가 내부중심각이 커짐에 따라 급격히 증가하고 있다.

교각하단에서 발생하는 최대단면력은 그림 9와 같다. z축 방향으로 지진하중이 작용한 경우에 교각에서의 단면력은 앞서 교각 상단에서 발생하는 변위에서와 같이 초기 곡률과 경계조건에 의한 영향으로 내부중심각이 증가 할수록 하중작용방향의 직각인 x축 방향으로의 전단력과 z축에 관한 휨모멘트가 증가하는 현상이 발생하고 있다. 또한 그림 9(f)를 보면 교각의 비틀림 모멘트는 직선교에서는 발생하지 않으나, 곡선 교에서는 내부중심각이 커짐에 따라 급격히 증가하고 있으며 내부중심각이 90도인 경우에 교각의 비틀림 모멘트가 휨모멘트의 약 4%정도 크기로 발생하고 있다. 이

비틀림 모멘트는 초기곡률, 경계조건, 상부구조 형식 및 하부구조의 형식 등의 요인에 의하여 영향을 받을 것으로 판단된다.

x축 방향으로 지진하중이 작용한 경우에 직선교에서는 교각 1번과 교각 2번에서의 단면력의 크기가 대칭적으로 발생하나 곡선교에서는 교각 1번에서의 단면력이 약간 크게 발생하고 있다. 즉 곡선교에서는 x축 방향으로 지진하중에 의하여 대칭적으로 거동하지 않는 것을 알 수 있다. 또한 특기 할 것은 경계조건의 영향으로 그림 9(f)에서 보는 바와 같이 교각 2번에서의 비틀림 모멘트가 내부중심각이 커짐에 따라 급격히 증가하고 있다.

#### 4.3.2 교량받침의 거동특성

교각위에 교량받침에서 발생하는 반력의 크기는 그림 10과 같다. 여기서 요소번호는 그림 5에서 나타난 바와 같다.

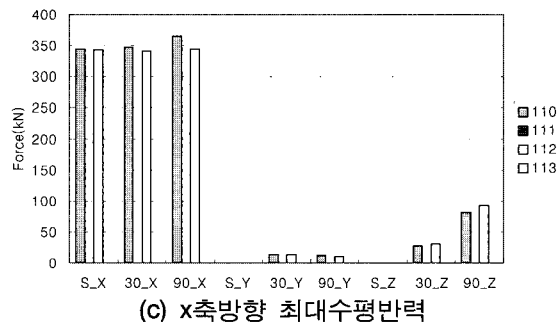
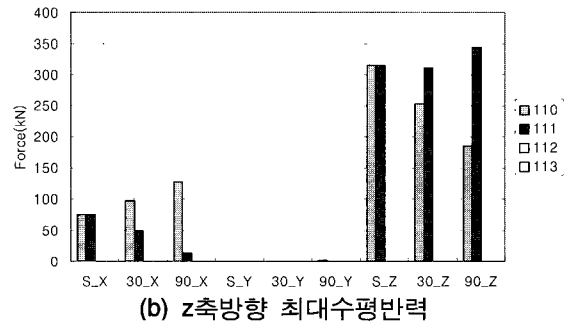
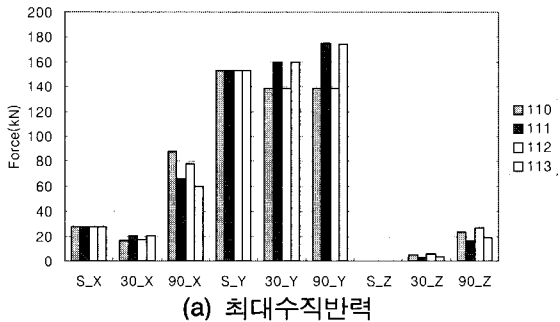


그림 10. 교량받침에서 최대반력

z축 방향으로 지진하중이 작용한 경우에 직선교에서는 그림 10에서 보는 바와 같이 고정단에서만 교축방향으로의 수평력이 발생하며, 그 크기는 내측주형과 외측주형에서 동일하다. 곡선교에서는 모든 교량받침에서 구속된 방향으로의 수평력이 발생하고 있다. 그림 10(b)를 보면 교축방향으로의 수평력이 내부중심각이 증가함에 따라 내측주형에서는 크기가 감소하고, 외측주형에서는 증가하는 현상이 발생하여 내부중심각이 90도인 경우에 외측주형의 교량받침인 111번 요소에서 수평력이 내측주형의 110번 요소에서의 수평력보다 약 2배정도 크게 발생하고 있다.

x축 방향으로 지진하중이 작용한 경우에는 그림 10(c)에서 보는 바와 같이 110번 요소와 112번 요소에서의 교축직각 방향의 수평력은 서로 비슷한 크기를 보이고 있으나 내부중심각이 증가함에 따라 고정단인 110번 요소에서의 교축직각 방향의 수평력이 약간 증가하는 현상이 나타났다. 그림 10(b)를 보면 고정단에서는 교축방향의 수평력이 발생하는데 내측주형의 교량받침인 110번 요소에서의 수평력이 크게 증가하고 있다.

수직지진하중을 작용시킨 경우에는 그림 10(a)를 보아 알 수 있듯이 내측주형과 외측주형에서의 수직력(교량받침의 축력)의 크기가 큰 차이를 보이고 있다. 특히 외측주형에서의 수직력의 크기가 크다.

이상에서 살펴본바와 같이 지진하중이 작용할 때 곡선교에서의 교량받침의 거동은 직선교에서와는 달리

내측주형에서의 교량받침과 외측주형에서의 수평력 또는 수직력의 크기가 차이를 보이고 있다.

### 4.3.3 상부구조의 거동특성

상부구조의 각 경간중앙에서 발생한 최대변위는 그림 11과 같다. 수평지진하중이 작용한 경우에 상부구조의 변위는 교각의 거동에 의하여 절대적으로 영향을 받는다. 특히 z축 방향으로 지진하중이 작용한 경우 직선교에서는 상부구조는 단지 강체운동만을 하게 된다. 그러나 곡선교에서는 그림 11(b)에서 보는 바와 같이 상부구조의 수직변위가 발생한다. 즉 직선교에서는 z축 방향으로의 지진하중에 의해 주형에 축력만 발생하게 되나, 곡선교에서는 축력 이외의 부재력도 발생하게 된다. z축 방향으로 지진하중이 작용한 경우에는 교각상단에서 횡방향 변위뿐만 아니라 수직변위와 z축에 대한 회전변위가 발생하여 상부구조의 곡률면내 거동은 물론 곡률면외 거동을 크게 유발하게 된다. 또한 직선교에서는 모든 변위성분이 대칭적으로 발생하고 있으나, 곡선교에서는 비대칭 거동을 하고 있다. 따라서 직선교에서는 일반적으로 교축직각방향으로 지진하중이 작용할 때 교축방향의 변위를 구속하고 양단을 횡방향 힌지로 이상화시켜 해석하고 있는데 곡선교에서는 그림 11(c)에서 보듯이 교축방향의 변위성분 즉 양단에서 가동방향으로 변위가 발생하므로 경계조건에 대한 세심한 고려가 필요하다.

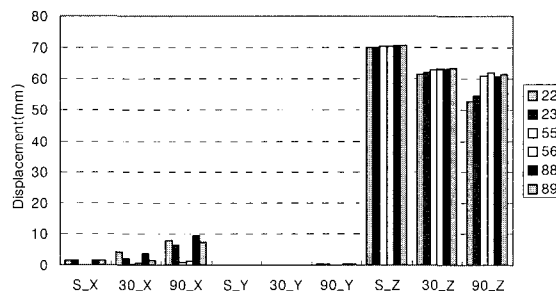
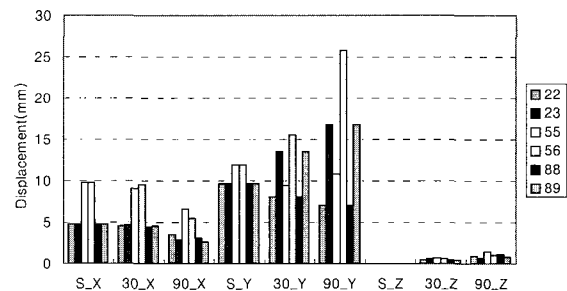
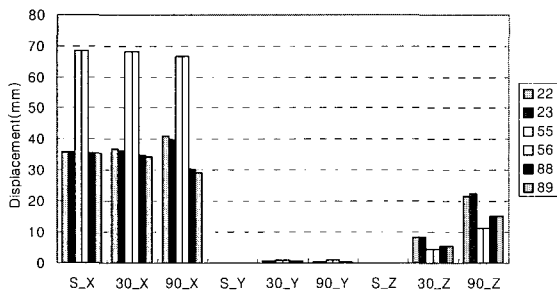


그림 11. 상부구조 지간 중앙부에서의 최대변위



수직지진하중 즉 y축 방향으로 지진하중이 작용한 경우에 직선교는 두개의 주형이 동일한 변위가 발생한다. 그러나 곡선교에서는 그림 11에서 보듯이 외측주형의 변위가 내측주형의 변위에 비하여 상당히 커지며, 내부중심각이 90도인 경우에는 내측주형의 변위에 2배 이상 크게 발생하고 있다.

상부구조의 각 경간중앙에서 발생하는 최대단면력은 그림 12와 같다. 수직지진하중(y축 방향 지진하중)이 작용한 경우에 외측주형과 내측주형에서 발생하는 수직축방향의 전단력, 곡률 중심축에 대한 휨모멘트, 비틀림 모멘트등의 부재력의 차이가 크게 발생하고 있는데 내부중심각이 큰 경우에 이 차이는 더욱 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

z축 방향으로 지진하중이 작용한 경우에 상부구조는 주로 강체운동을 하게 되므로 대체적으로 발생하는 축력이외의 다른 부재력 성분의 크기가 작지만 내부중심각이 90도인 경우에 그림 12(b)에서 보듯이 곡률중

심축방향으로의 전단력과 그림 12(e)의 수직축에 대한 휨모멘트의 크기가 상대적으로 크게 발생하고 있다.

x축 방향으로 지진하중이 작용한 경우에 위에서 설명한 바와 같이 교각의 영향으로 상부구조에는 곡률면의 변위성분이 발생하여 수직축 방향의 전단력(그림 12(c)), 곡률중심축에 대한 휨모멘트(그림 12(d)), 비틀림 모멘트(그림 12(f))가 유발되는데 수직지진하중이 작용한 경우에 발생한 부재력의 크기에 비하여 보면 상당히 큰 부재력임을 알 수 있다.

이상에서 살펴본바와 같이 곡선교의 상부구조의 거동은 수직지진하중에 의하여 외측주형에서 큰 변위와 부재력이 발생하며, 수평지진하중에 의해서도 곡률면의 변위 성분과 부재력 성분이 크게 발생하는 특징을 보이고 있다. 따라서 곡선교의 내진해석은 상부구조를 하나의 부재로 이상화하여 해석하는 것보다 본 논문에서와 같이 격자형으로 이상화하여 해석하는 것이 보다 정확한 거동 파악을 위하여 효과적임을 알 수 있다.

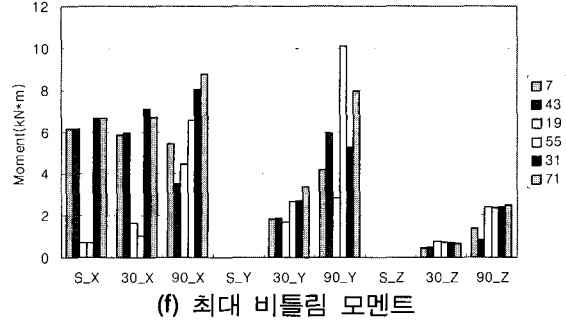
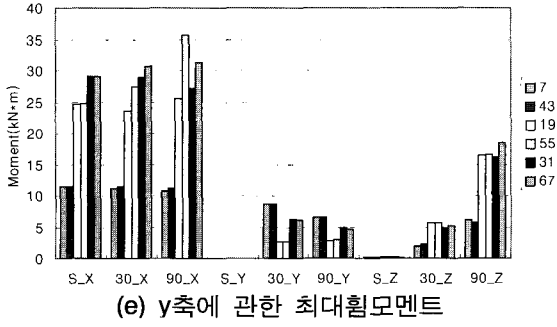
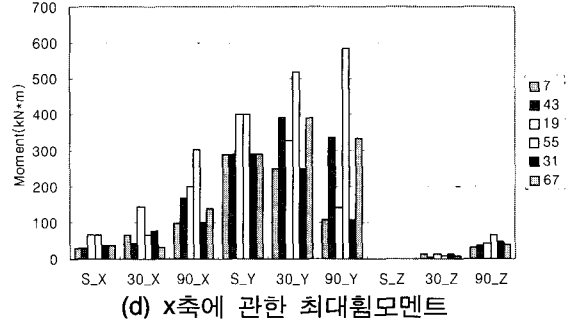
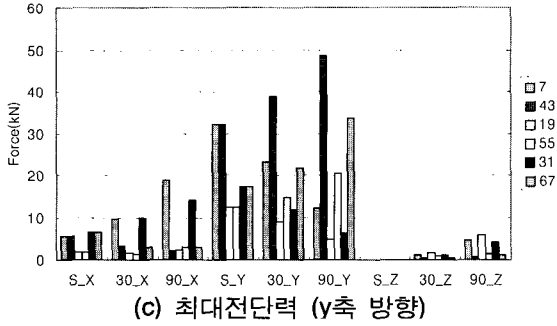
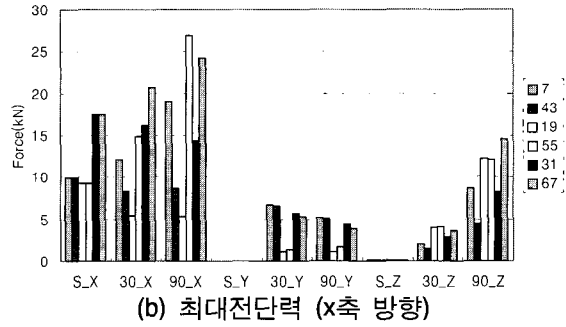
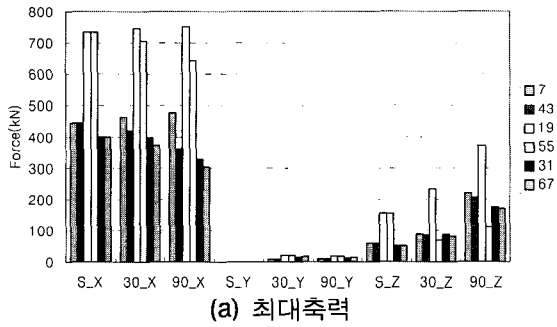


그림 12. 상부구조 지간 중앙부에서의 최대단면력

## 5. 결 론

본 연구에서는 지진하중을 받는 곡선교량의 거동특성을 파악하기 위하여 박판곡선보 이론에 근거한 곡선보요소를 갖는 동적유한요소해석 프로그램을 이용하여 곡선교량의 내진해석을 수행하였다. 이때 동일지간장을 갖는 직선교와 곡선교의 지진시 거동특성을 분석하였으며, 지진하중의 작용하중 방향을 변화시켜 곡선교량의 동적거동특성을 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. AASHTO 2004의 정규교량으로 분류되는 곡선교량과 동일지간을 갖는 직선교량에 대해 지진하중을 작용시켜 해석한 결과 직선교량으로 이상화한 경우 단면력이 약 10%정도 크게 평가되었다. 따라서 정규교량에 해당하는 곡선교량은 AASHTO 2004에서 제안하는 바와 같이 동일지간을 갖는 직선교로 이상화하여 내진해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.
2. 수평지진하중 작용시 하부구조의 거동특성을 분석하여 보면 곡선교는 직선교와 달리 하중작용방향에 각 방향의 변위성분이 모두 발생하며, 특히 교각에서의 회전변위가 크게 발생하여 고정단이 있는 교각뿐만 아니라 이동단이 있는 교각에서도 비틀림 모멘트가 크게 유발되는 현상이 나타나는 것으로 파악되었다.
3. 곡선교의 상부구조의 거동은 수직지진하중에 의하여 외측주형에서 큰 변위와 부재력이 발생하며, 수평지진하중에 의해서도 곡률면의 변위 성분과 부재력 성분이 크게 발생하는 특징을 보이고 있다. 따라서 곡선교의 내진해석은 상부구조를 하나의 부재로 이상화하여 해석하는 것보다 본 논문에서와 같이 격자형으로 이상화하여 해석하는 것이 보다 정확한 거동 파악을 위하여 효과적임을 알 수 있다.
4. 국내의 도로교설계기준과 AASHTO 2004 모두 비정규교량으로 분류되는 곡선교량에 대해서는 지진하중의 입력방향과 하중조합 등 내진설계를 위한 규정을 마련하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 곡선교량의 내진설계를 위해서는 보다 다양한 경우에 대한 해석을 수행하여 거동특성을 분석하여야 할 필요가 있다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

AASHTO (1993) Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges.

- AASHTO (2004) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.
- Dabrowski,R. (1968) "Curved thin-walled girders, theory and analysis." Cement and Concrete Association, London, England.
- Huang, D., Wang, T.L., Shahawy, M. (1995) "Dynamic Behavior of Horizontally Curved I-Girder Bridges." Computer & Structure , 57(4), pp.703-714.
- Kang, Y. J. and Yoo, C. H. (1994a) "Thin-Walled Curved Beams I : Formulation of Nonlinear Equations", J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.120(10), pp. 2072-2101.
- Kang,Y.J., Yoo,C.H. (1994b) "Thin-Walled Curved Beams. II : Analytical Solutions for Buckling of Arches." J. Engrg. Mech. ASCE, 120(10), Oct., pp.2102-2125.
- Kim, M.Y., Kim, N.I., Min, B.C. (2002) "Analytical and numerical study on spatial free vibration of non-symmetric thin-walled curved beams", Journal of Sound and Vibration 258, pp.595-618.
- Nakai,H., Yoo,C.H. (1988) "Analysis and design of curved steel bridges." McGraw Hill, New York, N.Y.
- Sekulovic, M. (1986) "Geometrically Nonlinear Analysis of Thin-Walled Members", Proceedings of the Invited Papers for the International Conference 'Steel Structures:Recent Research Advances and Their Applications to Design', Yugoslavia, Oct., pp. 219-243.
- Suros,O., Chu, H.Y. (1991) "Reducing Airport Congestion." Modern Steel Construction, June, pp. 21-25.
- Yoo,C.H., Hall,D.H., Sabol, Scott A. (1995) "Improved design specifications for horizontally curved steel-girder highway bridges." Proceedings of the 13th Structures Congress, Restructuring: America and Beyond Structures Congress, Part 2, pp.1699-1702.
- Yoo, C.H. (1996) Design and Construction of Horizontally Curved Steel Bridges, Lecture Note, Auburn University.
- Yoo, C.H., Kang, Y.J., and Davidson, J.S. (1996) "Buckling Analysis of Curved Beams by Finite Element Discretization," Journal of Engineering

Mechanics Division, ASCE, Vol. 122, No. EM8, pp.762-770.

Yoon, K.Y., Kang, Y.J., Choi, Y.J., Park, N.H. (2005) "Free vibration analysis of horizontally curved steel I-girder bridges", Thin-Walled Structures, Vol. 43, No. 4, pp.679-699.

강영종, 정주호, 윤기용 (1996) "수평곡선 격자형교의 유한요소해석." 대한토목학회논문집, 제16권 제I-3호, pp. 261-270.

건설교통부, 도로교설계기준, 2005.

김원배 (1988) "구조물의 동적해석을 위한 한반도의 인공 지진파 작성", 공학박사 학위논문, 고려대학교.

서영국 (1996) "3차원 차량 모델에 의한 곡선교의 동적

해석," 서울대학교 석사학위 논문.

윤기용, 강영종 (1998) "유한요소법을 이용한 수평곡선 I형교의 자유진동해석", 한국강구조학회논문집, 제10권, 제1호, pp.47-61.

윤기용, 성익현, 최진유, 강영종 (2002) "지진하중하에서의 수평곡선I형교의 거동특성", 한국강구조학회 논문집, 14권 6호, pp.793-802.

- ◎ 논문접수일 : 2005년 07월 28일
- ◎ 심사의뢰일 : 2005년 08월 02일
- ◎ 심사완료일 : 2005년 08월 18일