

## 3경간 연속 중로식 강Arch 교량의 내풍안정성을 고려한 Rise 비 Rise Ratio of the 3 Continuous Spans Half Through Steel Arch Bridges Considering Wind Resistant Dynamic Stability

강 성 후\*                  박 선 준\*\*                  최 명 기\*\*\*  
Kang, Sung-Hoo      Park, Sun-Joon      Choi, Myeong- Ki

### ABSTRACT

The most important element is a rise ratio when regarding beauty and economics of arch bridges. Only the effect of dead load has been considered to decide the rise ratio. In this study, when going over the rise ratio of arch bridges, examined the problems, that the determination of the rise ratio by the dead load has, by adding the factor of a determination of optimum rise ratio, which is not only the effect of the dead load that has been currently considered but also the problem with respect to wind resistant dynamic stability that is now taken seriously. Synthetically, when deciding rise ratio that is investigated in basic step of design, it is not necessary to consider the evaluation wind resistant dynamic stability.

### 1. 서 론

1960년대 이후 교량은 기능으로서의 문제뿐만 아니라 미관으로서의 역할도 중요시되어 왔다. 하지만, 미관을 고려한 설계에서 필수적으로 고려되어야 하는 문제가 안정성과 경제성이며, 안정성 측면에서 볼 때 아치 타입의 교량은 가장 안정한 구조 형식중의 하나이다.<sup>(1)</sup> 아치교는 구조물의 독특한 곡선의 아름다움과 하중에 의한 수평반력을 효과적으로 분배할 수 있어 최근 중앙경간이 70~200m이상 요구되는 장대교량에서 주변 지역환경과의 조화측면에서 많이 설계·시공되고 있는 추세이다. 아치교량의 미관과 경제성을 고려할 때 가장 중요한 요소가 라이즈 비이다.<sup>(1)</sup> 이러한 라이즈 비를 결정하는데 있어 현재는 자중에 의한 영향만을 고려하고 있고, 아직까지 아치교량의 라이즈 비 선정에 있어 그 결정인자에 대한 명확한 기준과 영향검토가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 3경간 연속 중로식 강아치 교량의 라이즈 비 검토시 현재 고려하고 있는 자중에 의한 영향뿐만 아니라 최근 중요시되고 있는 풍하중에 대한 동적안정성 문제를 라이즈 비 결정인자로 추가하여, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.275, 0.3, 0.35, 0.4의 8가지 Type의 라이즈 비와 각각의 라이즈 비에 대한 상·하 분배비율을 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0의 5가지 Type으로 변화시켜 연직 발산진동·연직 와려진진동에 대한 내풍안정성 검토와 수직개인 Hanger에 대한 진동과 단면응력등을 비교·분석하여, 3경간 연속 중로식 강아치 교량의 라이즈 비와 Tie Girder에 의한 상·하 분배비율을 선정하는데 목적이 있다.

\* 정희원 · 동신대학교 토목공학과 교수 · 공학박사

\*\* 동신대학교 토목공학과 전임강사 · 공학박사

\*\*\* 성화대학 토목환경과 조교수 · 박사과정수료

## 2. 해석모델링

### 2.1. 일반제원

본 연구 대상교량은 총 연장길이 240m(60m+120m+60m)인 3경간 연속 중로식 강아치 교량으로서, 구조형식은 그림 1과 같다. 라이즈 비와 상·하 분배비율 변화에 따른 40가지 Type의 교량제원은 표 1과 같다. 아치 교량의 라이즈 비( $f/L$ )란 그림 1에서 지간( $L_2$ )에 대한 아치 높이(라이즈,  $f=h_1+h_2$ )의 비를 의미하며, Tie Girder에 의한 상·하 분배비율은 하부 라이즈에 대한 상부 라이즈의 비, 즉  $h_1/h_2$ 를 의미한다. 3경간 연속 중로식 강아치 교량의 라이즈 비와 Tie Girder에 의한 상·하 분배비율 등에 대한 설계기준은 현재까지 전무한 실정이며, 설계시 라이즈 비는 각 형식에 관계없이 보통 0.1에서 0.2까지가 일반적으로 많이 사용되고 있으며, Tie Girder에 의한 상·하 분배비율은 보통 1.5를 많이 사용하고 있다.<sup>(1)</sup>

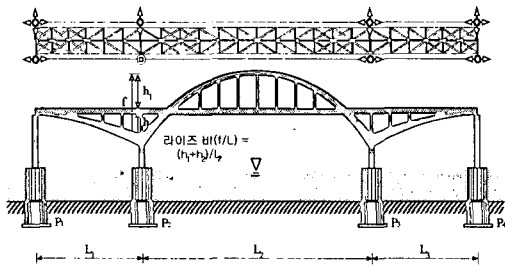


그림 1. 3경간 연속 중로식 강아치교 종단면도

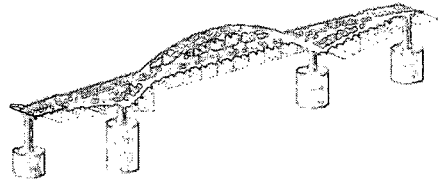


그림 2. 대상 교량의 정적 풍하중 제하

표 1. 라이즈 비와 상·하 분배비율에 따른 해석 교량 제원

$f/L$	$d$	$f$ (m)	$h_1$ (m)	$h_2$ (m)	$f/L$	$d$	$f$ (m)	$h_1$ (m)	$h_2$ (m)
0.1	1.0	12	6.0	6.0	0.275	1.0	33	16.5	16.5
	1.5		7.2	4.8		1.5		19.8	13.2
	2.0		8.0	4.0		2.0		22.0	11.0
	2.5		8.6	3.4		2.5		23.6	9.4
	3.0		9.0	3.0		3.0		24.8	8.3
0.15	1.0	18	9.0	9.0	0.3	1.0	36	18.0	18.0
	1.5		10.8	7.2		1.5		21.6	14.4
	2.0		12.0	6.0		2.0		24.0	12.0
	2.5		12.9	5.1		2.5		25.7	10.3
	3.0		13.5	4.5		3.0		27.0	9.0
0.2	1.0	24	12.0	12.0	0.35	1.0	42	21.0	21.0
	1.5		14.4	9.6		1.5		25.2	16.8
	2.0		16.0	8.0		2.0		28.0	14.0
	2.5		17.1	6.9		2.5		30.0	12.0
	3.0		18.0	6.0		3.0		31.5	10.5
0.25	1.0	30	15.0	15.0	0.4	1.0	48	24.0	24.0
	1.5		18.0	12.0		1.5		28.8	19.2
	2.0		20.0	10.0		2.0		32.0	16.0
	2.5		21.4	8.6		2.5		34.3	13.7
	3.0		22.5	7.5		3.0		36.0	12.0

여기서,  $f/L$  : 라이즈 비

$f$  : 라이즈( $h_1+h_2$ )

$h_2$  : 하부 라이즈(m)

$d$  : Tie Girder에 의한 상·하 분배비율

$h_1$  : 상부 라이즈(m)

$L$  : 지간길이( $L_1$  : 60m,  $L_2$  : 120m,  $L_3$  : 60m)

## 2.2. 해석 모델링

모델링 해석은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL(ver 5.8.0)을 이용하여 수행하였다. 상부구조의 Arch Rib, Tie Girder, Floor Beam, Stringer, Hanger, Bracing은 각각 Frame 요소로, 하부구조는 강체로 거동하는 것으로 간주하여 우물통 기초하단을 지점으로 모델링하였으며, 상부구조물의 자중은 강체연결(Rigid Link)을 통하여 하부구조에 전달되도록 모델링을 실시하였다. 동일한 단면일 경우에도 설계하중에 대한 부재의 안전 여유 변화는 미비하므로 일정한 강성비와 형고비를 맞춘 기준단면을 40가지 Type에 대하여 동일하게 적용하였다. 식 (1)에서 항력계수  $C_d$ 는 「도로교설계기준」에서 제안된 기타형식의 교량으로 분류하여 풍상측과 풍하측에 각각 1.6 및 0.8을 적용하였고, 풍하측 부재에 작용하는 풍하중은 항력계수  $C_d$ 가 0.8이므로 식 (1)에 의해 산정된 풍하중강도  $P_{\text{값}}$ 의 1/2을 적용하였다. 또한 설계기준풍속  $V_d$ 는 식 (2)에 의하여 산정하였다.

$$P = \frac{1}{2} \rho V_d^2 C_d G \quad (1)$$

$$V_d = 1.925 \left( \frac{Z}{Z_c} \right)^a \times V_{10}, \quad Z \geq Z_b \quad (2)$$

## 3. 해석결과

### 3.1. 동적 내풍설계 필요성 판정과 제랑산정

동적 내풍설계 필요성을 판정하기 위하여 교량의 최대 지간장( $L$ )은 120m, 교폭( $B$ )은 11.9m, 주형의 평균유효높이( $d$ )는 3.8m, 설계기준풍속( $V_d$ )은 60.752m/s, 기류의 난류강도( $I_w$ )는 0.13을 적용하여 강상형교 조건식에 적용하여 표 2와 같이 동적 내풍설계 필요성을 판정하였다.<sup>(4)</sup> 내풍안정성에 대한 검토는 현 「도로교설계기준」에서 동적 내풍설계기준이 마련되어 있지 않아 일본도로협회 「일본도로교 내풍설계편람」을 기준으로 내풍안정성을 평가하였다. 동적 내풍설계의 필요성 판정 결과 연직 발산진동과 연직 와려진진동에 대해서 내풍안정성 검토가 필요한 것으로 판정되었다.

표 2. 동적 내풍설계 필요성 판정[일본도로교내풍설계편람]

구 분	동적 내풍설계 필요성 판정		판정결과
연직 발산진동 (Galloping)	판정기준	$L \times V_d / B > 330, B/d < 5$ 이며 $I_w < 0.15$ 인 강교일 경우 연직 발산진동 발현 가능성 있음.	검 토 필 요
	검 토	$L \times V_d / B = 612.6 > 330$ $B/d = 3.13 < 5, I_w = 0.13 < 0.15$	
연직 와려진진동 (Vortex Shedding)	판정기준	$L \times V_d / B > 200$ 이며 $I_w < 0.20$ 일 경우 연직 와려진 발현 가능성 있음.	검 토 필 요
	검 토	$L \times V_d / B = 612.6 > 200, I_w = 0.13 < 0.20$	

라이즈 비에 따른 연직 발산진동(Galloping)과 연직 와려진(Vortex Shedding) 진동발현속도 추정을 위한 최저차 연직진동수( $f_n$ )는 고유주기 해석결과로부터 산정하였으며, 연직 발산진동 검토풍속( $V_{rg}$ ), 연직 와려진진동 검토풍속( $V_{rh}$ ), 구조감쇠량( $\delta$ ), 단위길이상 거더질량  $m(\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2)$ 은 식 (3), (4), (5), (6)에 의하여 산정하였다.

$$V_{rg} = 1.2 V_d \quad (3)$$

$$V_{rh} = V_d \quad (4)$$

$$\delta = \frac{0.75}{\sqrt{L}}, \quad \text{단 } \delta \geq 0.04 \quad (5)$$

$$m = \frac{W/L_t}{g} \times 1000 \text{ (kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2\text{)} \quad (6)$$

### 3.2. 연직 발산진동

연직 발산진동 발현속도( $V_{cg}$ )의 값이 연직 발산진동 검토풍속( $V_{rg}$ )의 값보다 커야 연직 발산진동 발생에 대하여 안정하다. 본 연구에서 대상 교량은 해상지역에 가설되므로 연직 발산진동 발현속도( $V_{cg}$ )은 식 (8)에 의하여 산정하였다.

$$V_{cg} > V_{rg} \quad (7)$$

$$V_{cg} = 8 \cdot f_v \cdot B \quad (8)$$

해석결과 라이즈 비가 0.1에서 0.4까지 증가할 때 연직 발산진동 발현속도는 감소하는 경향을 보였고, 동일한 라이즈 비에서 상·하 분배비율이 1.0에서 3.0까지 증가할 때 연직 발산진동 발현속도는 증가하는 경향을 보였다. 이러한 원인은 최저차 연직진동수( $f_v$ ) 때문인 것으로 사료되며, 연직 발산진동 발현속도 최대값은 라이즈 비 0.1, 상·하 분배비율 3.0일때 103.142m/s로 해석되었다. 40가지 Type에서 연직 발산진동 조건식을 모두 만족하여, 연직 발산진동에 대하여 안정하다고 판단된다. 또한 동일한 라이즈 비에서 상·하 분배비율의 증가는 최대 1.9% 증가하여 연직 발산진동 발현속도에 크게 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

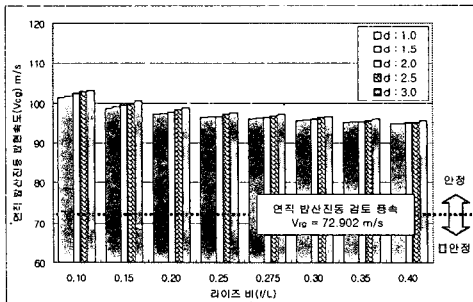


그림 3. 연직 발산진동

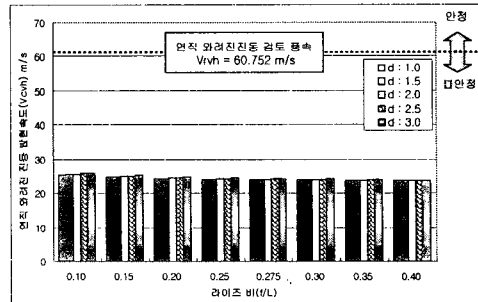


그림 4. 연직 외러진진동

### 3.2. 연직 외러진진동

연직 외러진진동 발현속도( $V_{cvh}$ )의 값이 연직 외러진진동 검토풍속( $V_{rvh}$ )의 값보다 커야 연직 외러진진동 발생에 대하여 안정하다. 연직 외러진진동은 발현속도와 함께 진폭이 문제되기 때문에 진폭에 대한 고려가 필요하며, 최대진폭( $h_c$ )이 허용진폭( $h_a$ )보다 작아 허용진폭 범위에 들어오면 연직 외러진진동에 대하여 안정하다.

$$V_{cvh} > V_{rvh} \quad (9)$$

$$h_c < h_a \quad (10)$$

$$f = 0.150 l + 2.2 \quad (11)$$

해석결과 연직 외러진진동 발현속도의 값이 연직 외러진진동 검토풍속 값보다 작아 불안정하므로, 연직

와려진진폭에 대한 검토를 수행하였다. 진폭에 대한 해석결과 40가지 Type에서 식 (10)의 조건을 모두 만족하므로, 최종적으로 연직 와려진진동에 대하여 안정하다고 판단된다.

연직 발산진동과 연직 와려진 진동에 해석결과 라이즈 비와 상·하 분배비율은 내풍안정성에 영향을 미치지 않으므로, 기본설계 단계에서 3경간 연속 중로식 강 아치교량의 라이즈 비와 상·하 분배비율을 선정시 자중에 의한 영향만을 고려하여도 무방할 것으로 판단된다. 또한 일본교량건설협회에서 제시한 식 (11)의 아치지간 길이와 라이즈의 실적조사식<sup>(2)</sup>은 내풍안정성을 확보하고 있으므로 타당하다고 사료된다.

표 3. 연직 발산진동·연직 와려진 진동, 진폭 안정성해석

d	안정성검토	라이즈 비( $f/L$ )							
		0.1	0.15	0.2	0.25	0.275	0.3	0.35	0.4
1.0	$f_v$ (Hz)	1.065	1.036	1.020	1.011	1.007	1.003	0.998	0.996
	$m$ (kgf·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	2265.29	2282.65	2303.28	2326.65	2339.23	2352.33	2379.92	2409.12
	$V_{cr}$ (m/s)	101.384	98.653	97.143	96.259	95.871	95.486	95.010	94.821
	$h_a$ (m)	0.038	0.039	0.039	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
	$h_c$ (m)	0.034	0.034	0.034	0.034	0.033	0.033	0.033	0.033
	안정성검토	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$
1.5	$f_v$ (Hz)	1.071	1.041	1.022	1.013	1.009	1.006	1.000	0.997
	$m$ (kgf·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	2263.40	2280.14	2299.91	2322.20	2334.16	2346.6	2372.76	2400.39
	$V_{cr}$ (m/s)	101.927	99.063	97.342	96.454	96.065	95.775	95.200	94.915
	$h_a$ (m)	0.037	0.038	0.039	0.039	0.040	0.040	0.040	0.040
	$h_c$ (m)	0.034	0.034	0.034	0.034	0.033	0.033	0.033	0.033
	안정성검토	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$
2.0	$f_v$ (Hz)	1.075	1.045	1.028	1.015	1.011	1.008	1.001	0.998
	$m$ (kgf·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	2261.95	2278.35	2297.61	2319.27	2330.87	2342.92	2368.22	2394.89
	$V_{cr}$ (m/s)	102.366	99.478	97.842	96.650	96.259	95.968	95.295	95.010
	$h_a$ (m)	0.037	0.038	0.039	0.039	0.040	0.040	0.040	0.040
	$h_c$ (m)	0.035	0.034	0.034	0.034	0.033	0.033	0.033	0.033
	안정성검토	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$
2.5	$f_v$ (Hz)	1.080	1.050	1.033	1.020	1.016	1.012	1.004	0.999
	$m$ (kgf·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	2261.47	2277.57	2296.42	2317.56	2328.88	2340.63	2365.28	2391.25
	$V_{cr}$ (m/s)	102.808	100.000	98.347	97.143	96.748	96.356	95.582	95.105
	$h_a$ (m)	0.037	0.038	0.039	0.039	0.039	0.040	0.040	0.040
	$h_c$ (m)	0.035	0.034	0.034	0.034	0.034	0.033	0.033	0.033
	안정성검토	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$
3.0	$f_v$ (Hz)	1.083	1.056	1.038	1.026	1.021	1.015	1.008	1.002
	$m$ (kgf·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	2261.42	2277.19	2295.63	2316.30	2327.35	2338.82	2362.87	2388.18
	$V_{cr}$ (m/s)	103.142	100.528	98.858	97.641	97.242	96.650	95.968	95.391
	$h_a$ (m)	0.037	0.038	0.039	0.039	0.039	0.039	0.040	0.040
	$h_c$ (m)	0.035	0.034	0.034	0.034	0.034	0.033	0.033	0.033
	안정성검토	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$	$h_c < h_a$ $V_{cr} > V_{tr}$

주<sup>1</sup>) 연직 발산진동 검토풍속  $V_{tr} = 72.902$  m/s

주<sup>2</sup>)  $V_{cr} > V_{tr}$  이면 연직 발산진동(Galloping) 발생에 대하여 안정

주<sup>3</sup>) 최대진폭( $h_c$ ) < 허용진폭( $h_a$ ) : 연직 와려진 진동에 안정

### 3.3. Hanger의 내풍안정성

#### 3.3.1. Hanger의 공진발생 풍속과 횡진동에 의한 수평변위

아치교량의 수직재인 Hanger와 같이 비교적 세장비가 큰 교량의 부재는 그 단면형상과 세장비에 따른 바람에 의한 진동을 고려하지 않으면 피로응력이 반복되어 구조물의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. Hanger 32번 요소에 대한 공진 발생풍속은 「일본도로교 내풍설계편람」, 「일본한신공단의 동적조사법」, 영국의 「Bridge Aerodynamics 경험식」 중 「Bridge Aerodynamics 경험식」이 가장 보수적임을 그림 7에서 알 수 있다.

$$V_{cr} = 6.5 \cdot f_b \cdot d \quad b/d < 5.0 \text{의 경우} \quad (12)$$

$$\eta_{\max} = (\rho \cdot b^{\frac{1}{2}} \cdot d^{\frac{5}{2}}) / (4m\delta) \quad (13)$$

여기에서,  $V_{cr}$  : 「Bridge Aerodynamics 경험식」에 의한 공진 발생풍속(m/s)

$f_b$  : 횡 고유진동수(Hz)

$b = 0.74\text{m}, d = 0.4\text{m}$  : Hanger 단면의 폭, 높이

$\eta_{\max}$  : Hanger의 횡진동에 의한 수평변위(m)

$\rho = 0.125 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$  : 공기밀도

$\delta = \frac{0.75}{\sqrt{120}} = 0.068$  : 구조감쇠율

$h_a = \frac{0.04}{f_b}$  : 허용진폭(m)

라이즈 비가 0.1에서 0.4까지 증가할 때와 동일한 라이즈 비에서 상·하 분배비율이 1.0에서 3.0까지 증가할 때 Hanger의 공진 발생풍속( $V_{cr}$ )은 감소하는 경향을 보였다. 이는 횡고유진동수와 공진 발생풍속이 상호 비례적인 관계가 있음을 의미한다. 표 5와 같은 해석결과 라이즈 비가 0.1이고, 상·하 분배비율 1.0, 1.5, 2.0, 2.5일때만 공진 발생풍속에 대하여 안정하고 그외의 경우에는 불안정하므로, Hanger의 횡진동에 의한 수평변위 해석을 수행하였다. 라이즈 비가 0.1에서 0.4까지 증가할 때와 동일한 라이즈 비에서 상·하 분배비율이 1.0에서 3.0까지 증가할 때 Hanger의 횡진동에 의한 수평변위( $\eta_{\max}$ )은 감소하는 결과를 보였다.

표 4. Hanger의 제원

부재	사용강재	단면적(cm <sup>2</sup> )	단면2차모멘트(cm <sup>4</sup> )		풍하중(ton/m <sup>2</sup> )
			I <sub>33</sub>	I <sub>22</sub>	
Hanger	SM 490	328.0	276,013	21,414	0.701

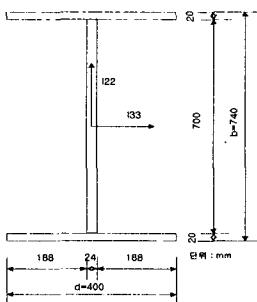


그림 5. Hanger 단면

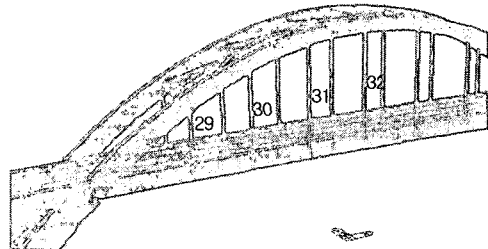


그림 6. Hanger 요소

이는 단위길이당 질량( $m$ )과 Hanger의 휨진동에 의한 수평변위가 서로 반비례적인 관계가 있음을 의미한다. Hanger의 휨진동에 의한 수평변위에 대한 해석결과 40가지 Type에서 와류진동 발현속도와 휨진동에 의한 수평변위에 대한 조건식을 모두 만족하므로, 라이즈 비와 상·하 분배비율은 Hanger의 내풍안정성에 영향을 미치지 않으며, 기본설계 단계에서 3경간 연속 중로식 강 아치교량의 라이즈 비와 상·하 분배비율을 선정시 자중에 의한 영향만을 고려하여도 무방할 것으로 판단된다.

표 5. Hanger의 공진 발생풍속과 휨진동에 의한 수평변위 해석 [Bridge Aerodynamics의 경험식]

d	Hanger의 내풍안정성		라이즈 비( $f/L$ )							
			0.1	0.15	0.2	0.25	0.275	0.3	0.35	0.4
1.0	공진발생 풍속검토	$f_b$ ( $H_a$ )	52.38	22.58	12.97	8.67	7.36	6.36	4.96	4.04
		$V_{cr}$ (m/s)	136.19	58.71	33.72	22.54	19.14	16.54	12.90	10.50
		안정성검토	$V_{cr}>V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$
	휨진동에 의한수평 변위검토	$m$ ( $kgf \cdot s^2/m$ )	141.45	220.06	298.67	377.28	416.59	455.89	534.50	613.12
		$\eta_{max}$ (m)	0.0028	0.0018	0.0013	0.0011	0.0010	0.0009	0.0007	0.0007
		$h_a$ (m)	0.0008	0.0018	0.0031	0.0046	0.0054	0.0063	0.0081	0.0099
	안정성검토	풍속안정	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	
1.5	공진발생 풍속검토	$f_b$ ( $H_a$ )	35.47	15.76	9.25	6.29	5.38	4.68	3.69	3.03
		$V_{cr}$ (m/s)	92.22	40.98	24.05	16.35	13.99	12.17	9.59	7.88
		안정성검토	$V_{cr}>V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$
	휨진동에 의한수평 변위검토	$m$ ( $kgf \cdot s^2/m$ )	172.89	267.23	361.56	455.89	503.06	550.23	644.56	738.89
		$\eta_{max}$ (m)	0.0023	0.0015	0.0011	0.0009	0.0008	0.0007	0.0006	0.0005
		$h_a$ (m)	0.0011	0.0025	0.0043	0.0064	0.0074	0.0085	0.0108	0.0132
	안정성검토	풍속안정	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	
2.0	공진발생 풍속검토	$f_b$ ( $H_a$ )	28.48	12.86	7.65	5.25	4.51	3.94	3.12	2.58
		$V_{cr}$ (m/s)	74.05	33.44	19.89	13.65	11.73	10.24	8.11	6.71
		안정성검토	$V_{cr}>V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$
	휨진동에 의한수평 변위검토	$m$ ( $kgf \cdot s^2/m$ )	193.86	298.67	403.49	508.30	560.71	613.12	717.93	822.75
		$\eta_{max}$ (m)	0.0021	0.0013	0.0010	0.0008	0.0007	0.0007	0.0006	0.0005
		$h_a$ (m)	0.0014	0.0031	0.0052	0.0076	0.0089	0.0102	0.0128	0.0155
	안정성검토	풍속안정	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	
2.5	공진발생 풍속검토	$f_b$ ( $H_a$ )	24.71	11.28	6.76	4.67	4.02	3.52	2.80	2.31
		$V_{cr}$ (m/s)	64.25	29.33	17.58	12.14	10.45	9.15	7.28	6.01
		안정성검토	$V_{cr}>V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$
	휨진동에 의한수평 변위검토	$m$ ( $kgf \cdot s^2/m$ )	208.82	321.13	433.36	545.77	601.90	658.06	770.34	882.60
		$\eta_{max}$ (m)	0.0019	0.0012	0.0009	0.0007	0.0007	0.0006	0.0005	0.0005
		$h_a$ (m)	0.0016	0.0035	0.0059	0.0086	0.0100	0.0114	0.0143	0.0173
	안정성검토	풍속안정	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	
3.0	공진발생 풍속검토	$f_b$ ( $H_a$ )	22.37	10.29	6.20	4.30	3.70	3.24	2.58	2.13
		$V_{cr}$ (m/s)	58.16	26.75	16.12	11.18	9.62	8.42	6.71	5.54
		안정성검토	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$	$V_{cr}<V_d$
	휨진동에 의한수평 변위검토	$m$ ( $kgf \cdot s^2/m$ )	220.06	337.98	455.89	573.81	632.77	691.73	809.64	927.56
		$\eta_{max}$ (m)	0.0018	0.0012	0.0009	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0004
		$h_a$ (m)	0.0018	0.0039	0.0065	0.0093	0.0108	0.0123	0.0155	0.0188
	안정성검토	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	$\eta_{max}<h_a$	

주<sup>1)</sup> Hanger 공진 검토풍속( $V_d$ ) = 60.752 m/s

주<sup>2)</sup>  $V_{cr}>V_d$  이면 공진 발생풍속에 대하여 안정

주<sup>3)</sup>  $\eta_{max}<h_a$  이면 휨진동에 의한 수평변위에 대하여 안정

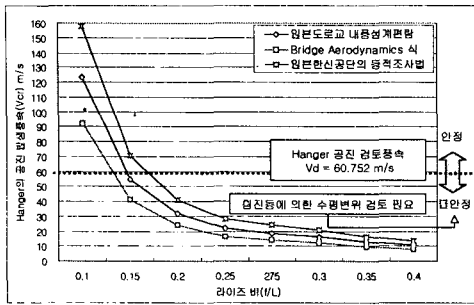


그림 7. Hanger의 공진 발생풍속( $\alpha=1.5$ )

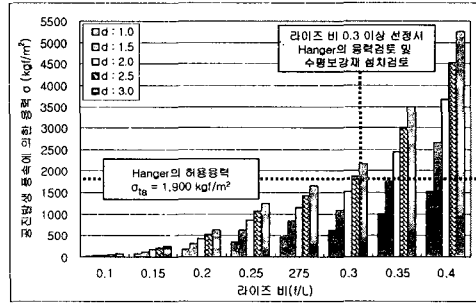


그림 8. 공진발생 풍속에 의한 Hanger 응력

### 3.3.2. 공진 발생풍속에 의한 Hanger의 응력

라이즈 비가 0.1에서 0.4까지 증가할 때와 동일한 라이즈 비에서 상·하 분배비율이 1.0에서 3.0까지 증가할 때 공진 발생풍속에 의한 Hanger의 응력은 증가하는 경향을 보여, 동적안정성에 불리하였다. 이의 원인은 수직재인 Hanger의 길이증가 때문으로 판단된다. 따라서, 라이즈 비를 0.3이상으로 선정하여 사용할 경우에는 Hanger(SM 490)의 허용응력  $1,900\text{kgf/m}^2$ 을 초과하므로 공진 발생풍속에 의한 Hanger의 응력검토와 수평보강재 설치등과 같은 별도의 단면보강이 필요할 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

내풍안정성을 고려한 3경간 연속 중로식 강아치 교량의 최적 라이즈 비와 Tie Girders에 의한 상·하 분배 비율을 선정하기 위한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 연직 발산진동과 연직 와려진동 해석결과 라이즈 비와 상·하 분배비율은 내풍안정성에 영향을 미치지 않으므로, 기본설계 단계에서 3경간 연속 중로식 강 아치교량의 라이즈 비와 상·하 분배비율 선정시 자중에 의한 영향만을 고려하여 선정하여도 무방할 것으로 사료된다. 또한 일본교량건설협회에서 제시한 아치지간 길이와 라이즈의 실적조사식은 내풍안정성을 확보하고 있으므로 타당하다고 사료된다.
- 2) 라이즈 비를 0.3이상으로 선정하여 사용할 경우에는 공진발생 풍속에 의한 Hanger의 응력검토와 수평보강재와 같은 별도의 단면보강이 필요할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. 김용희, 이윤영, 이영재, “아치타입 교량의 라이즈/경간 비의 적절성에 대한 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp 1-5, 2001
2. 일본 교량건설협회편, “강교의 계획과 설계·시공”, 과학기술, 1997.
3. 박성갑, “아치교량의 풍금진동 감소방안에 관한 사례연구”, 부경대학교 대학원 석사학위논문, 2001.
4. 한국전산구조공학회, “토목구조물의 내풍설계”, 한국전산구조공학회 기술강습회 교재 18-2, 1998.
5. Hambly, E. C., “Bridge Deck Behaviour”, E & FN SPON, 1991.
6. Melbourne, C., “Arch Bridges”, Thomas Telford, 1995.
7. MIDAS CIVIL “Program Manual”, MIDAS Home Page.