

호남고속철도 동적 안정성 요구 조건을 고려한 강합성 거더교의 변수 연구 Parametric Study on Steel composite Girder bridges for HONAM High-Speed Railway Considering Criteria Requirement of Dynamic Response

조선규*
Cho, Sun-Kyu

정한옥**
Jung, Han-Ouk

김성일***
Kim, Sung-Il

ABSTRACT

High speed railway bridge is affected on safety of bridge by dynamic amplification effect, when dynamic response of bridge is equal to effect cycle load for rolling stock axle according to high speed operation train. And excessive deformation of structure has negative effect on operation safety of train and comfort of passenger due to fluctuation of wheel load by torsion of track etc. and decrease of contact force on vehicle wheel-rail. To ensure the safety of track and train operation safety, it is have to perform the study on resonance and deformation of structure. That criteria and requirement of railway bridge is limitation of vertical acceleration on deck for dynamic behavior of structure, contact of vehicle wheel and rail, limitation of face distortion and rotation angle of end deck, and limitation of vertical displacement by train. Unlike KYEONGBU High Speed Railway, New constructed HONAM High Speed Railway have to applied the new requirement for dynamic behavior safety according to change of condition which is type of ballast (slab ballast), interval of track, and actual rolling stock load. Therefore, in this paper, it was conformed the dynamic characteristic due to parameter, which related with above mentioned criteria, for steel composite bridges.

국문요약

고속철도 교량은 고속주행 열차의 차축 주기하중 효과와 교량 고유의 동적특성에 의한 동적 증폭 효과로 인하여 구조물의 안전성에 영향을 받는다. 그리고 교량의 과도한 변형으로 인하여 차륜과 레일의 접촉력 감소, 궤도틀림 등의 운중 변동이 일어나 열차의 주행안전성 및 승차감을 저해할 수 있다. 이러한 궤도 안전성을 확보하기 위하여 동적거동에 대한 교량상관수준의 수직가속도 제한, 차륜-레일간의 접촉과 열차주행 안전성 확보를 위한 상판 면틀림 제한, 단부 회전각 변위 제한, 차량하중에 의한 교량의 수직 처짐 제한을 반드시 만족시켜야 하며, 필수적으로 공진에 대한 검토도 이루어져야 한다. 신설되는 호남고속철도에서는 기존의 경부고속철도와 다른 콘크리트 도상을 적용하고, 궤도간격, 설계 열차하중 등이 변경되어 적용되므로 새로운 동적안정성 요구조건을 적용하게 된다. 본 연구에서는 콘크리트교량에 비해 진동특성이 취약한 것으로 알려진 강합성 거더 고속철도 교량의 동적거동 분석을 수행하였다.

* 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 교수 E-mail : skcho@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6512

** 정희원, 한국철도시설공단 KR기술연구소 E-mail : cbambo@hanmail.net
TEL : (042)607-3423 FAX : (042)607-3399

*** 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 E-mail : sikim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5354 FAX : (031)460-5359

1. 서론

고속철도 운행 중 교량진동은 운행안정성에 매우 중요한 문제이다. 고속철도 교량은 고속주행 열차의 차축 주기하중 효과와 교량 고유의 동적특성에 의한 동적 증폭 효과로 인하여 구조물의 안전성에 영향을 받는다. 그리고 교량의 과도한 변형으로 인하여 차륜과 레일의 접촉력 감소, 궤도틀림 등의 운중 변동이 일어나 열차의 주행안전성 및 승차감을 저해할 수 있다. 이러한 궤도 안전성을 확보하기 위하여 동적거동에 대한 교량상판수준의 수직가속도 제한, 차륜-레일간의 접촉과 열차주행 안전성 확보를 위한 상판 면틀림 제한, 단부 회전각 변위 제한, 차량하중에 의한 교량의 수직 처짐 제한을 반드시 만족시켜야 하며, 필수적으로 공진에 대한 검토도 이루어져야 한다. 신설되는 호남고속철도에서는 기존의 경부고속철도와 다른 콘크리트 도상을 적용하고, 궤도간격, 설계열차하중 등이 변경되어 적용되므로 새로운 동적안정성 요구조건을 적용하게 된다. 본 연구에서는 콘크리트교량에 비해 진동특성이 취약한 것으로 알려진 강합성 거더 고속철도 교량을 대상으로 동적거동 분석을 수행하였다. 동적거동에서 구조물의 감쇠특성은 구조물의 공진과 매우 밀접한 관계가 있으므로 감쇠특성값을 매개변수로 하여 호남고속철도에서 요구되어지는 동적 안정성 요구 조건 별로 거동특성을 분석하였다.

2. 호남고속철도 동적 안정성 요구 조건

2.1 개요

동적해석 관점으로 볼 때 호남고속철도의 큰 특징은 여객화물 혼용으로 사용 할 수 있는 경부고속철도와는 달리 여객전용선으로 계획되어지므로 궤도중심간 거리 축소, 활하중 축소 그리고 도상형식을 자갈도상에서 유지관리가 용이한 콘크리트 도상을 적용한 것이다. 그러나 현재 국내 고속철도의 설계기준에서 호남고속철도의 특징을 고려하는 설계기준이 없으므로 새로운 설계기준이 요구되어 호남고속철도 설계지침(안)을 별도로 작성하게 되었다. 호남고속철도에 적용되는 교량에 대하여 운행을 위한 한계조건 중 동적해석을 통하여 검토하여야 하는 기준은 주행 안정성 검토의 상판 수직가속도 제한, 면틀림 제한과 승차감 검토의 승차감 기준제한이다.

2.2 주행안정성 검토

(1) 상판 수직가속도 제한

- 가) 상판의 수직가속도의 과도한 발생은 궤도의 불안정성과 차륜/레일 접촉력의 감소 및 교좌장치의 들림 등을 유발할 수 있고 이것은 운중변동의 증가와 도상의 교란, 교좌장치 부반력 발생 등을 철도교량의 안정성과 밀접한 관계가 있으므로 제한한다.
- 나) 실제 열차하중에 의해 발생하는 고속철도 교량 상판의 최대 수직가속도는 콘크리트 도상 궤도에서 5.0m/s^2 을 초과해서는 안된다.
- 다) 수직가속도 검토를 위한 재하 궤도수는 궤도수에 관계없이 단선 재하로 규정한다.

(2) 면틀림 제한

- 가) 면틀림은 차륜과 레일의 접촉에 대한 안전을 확보하여 탈선 위험을 최소화하기 위한 것으로 교량의 교축직각방향 회전에 의한 캔트 변화 (비틀림 각변화) 제한규정이다.
- 나) 면틀림은 3m떨어진 두 지점에서의 양쪽레일에 대한 캔트의 변화량(mm/궤도1m)을 의미한다.
- 다) 상판 면틀림의 3m 기준 면틀림 변화량 값은 1.5mm/3m 이내로 제한한다.

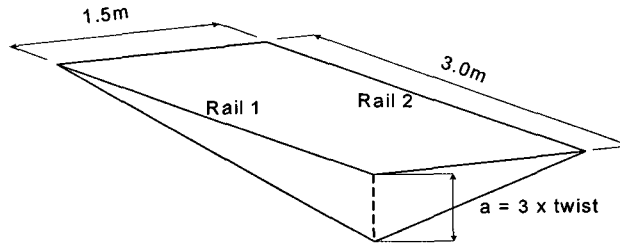


그림 1. 면틀림의 정의

- 라) 충격계수를 고려한 표준활하중에 의한 것과 실제 열차하중에 의한 동적해석 결과 중 불리한 값을 적용한다.
- 마) 궤도 선형상 존재(예:완화곡선 구간)하는 교량상의 면틀림값과 열차 하중에 의해 발생하는 교량상의 모든 면틀림값을 더한 총 면틀림값은 7.5mm/3m를 초과해서는 안된다.
- 바) 면틀림 검토를 위한 하중재하 궤도수는 표 1. 을 따른다.

표 1. 면틀림 검토를 위한 하중재하 궤도 수

궤도 수		
1	2	3 이상
1	1 or 2 (가장 불리한 경우를 재하)	1 or 2 or 3 or more (가장 불리한 경우를 재하)

2.3 승차감 검토

(1) 승차감 기준 제한

가) 승차감을 고려한 연직 처짐 ($L/8$) 규정

승차감을 고려한 연직처짐 ($L/8$) 규정은 그림 2. 와 같이 경간 길이별, 열차 속도별로 제한한다. 하중재하는 충격계수를 고려한 표준 활하중으로 재하하며, 단 이 경우는 반드시 단선재하로 규정한다.

나) 설계속도 $V=350\text{km/h}$ 의 경우 승차감을 고려한 연직처짐 규정값의 산정은 표2. 에 따라 평가할 수 있다.

다) 승객 승차감은 객차내의 연직방향 가속도로 평가하며, 표 3. 에 나타난 값에 의해 평가할 수 있다.

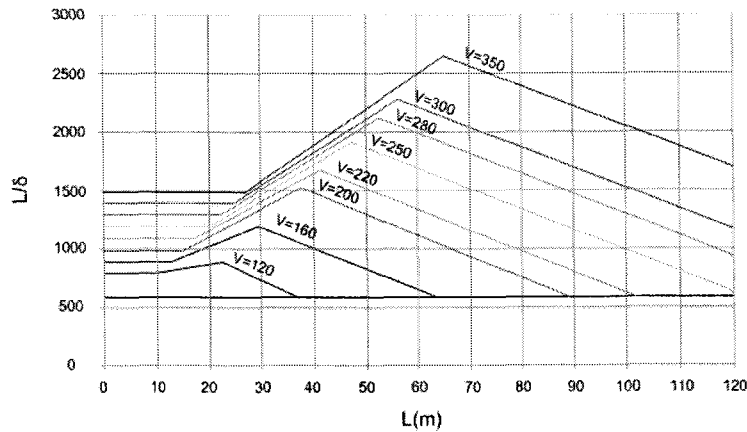


그림 2. 3련이상의 단순교에 대한 최대연직처짐 제한 (승차감= '매우양호')

표 2. 최대연직처짐 제한 (승차감= '매우양호')

구 분	거더 또는 부재의 스패ん 길이 L(m)						
	10	20	30	40	50	60	65
3련이상의 단순교	L/1500		L/1600	L/1900	L/2200	L/2500	L/2700
	70	80	90	100	110	120	
	L/2600	L/2400	L/2300	L/2100	L/1900	L/1700	
3경간 연속이상 의 연속교	10	20	30	40	50	60	65
	L/1400		L/1500	L/1800	L/2000	L/2300	L/2500
	70	80	90	100	110	120	
1,2련의 단순교 2경간 연속교	10	20	30	40	50	60	65
	L/1100		L/1200	L/1400	L/1600	L/1800	L/1900
	70	80	90	100	110	120	
	L/1800	L/1700	L/1600	L/1500	L/1400	L/1200	

표 3. 승차감 기준 (차체 연직가속도)

승 차 감	차체 연직가속도(b_v) (m/s^2)
매우 양호	1.0
양 호	1.3
보 통	2.0

라) 위의 기준은 교량-열차 상호작용을 수행해야만 얻을 수 있으므로, 이를 대체할 수 있도록 교량 경간길이, 열차속도, 경간 수, 지지형식의 함수로 구성하여 그림 2. 에 의해 교량의 연직 처짐으로 평가할 수 있도록 하였다.

마) 위의 그림 2. 는 '매우양호' 한 상태의 승차감 기준이며, 승차감 상태가 '양호' 혹은 보통 '의 경우에는 L/δ 를 다른 승차감 상태의 차체 연직가속도로 나누어서 사용할 수 있다.

바) 그림 2. 는 3련 이상의 단순교에 대한 것이다. 1련의 단순교나 2련의 단순교, 2경간 연속교의 경우에는 그림 2. 의 L/δ 에 계수 0.7을 곱해서 사용한다. 3경간 연속이상의 연속교에는 계수 0.9를 곱하여 사용한다.

사) 바)항에서 나열된 계수는 $L/\delta=600$ 미만의 경우에는 적용되지 않는다.

아) 그림 2. 는 경간 120m까지 유효하며, 이 이상의 장대교량은 탈선에 대한 주행안전성 및 승객 승차감에 대한 세밀한 평가를 수행한다.

자) 위 모든 경우에 대하여 실제 열차하중에 의한 동적해석결과와 비교하여 불리한 값으로 적용한다.

3. 동적해석

3.1 개요

동적해석 대상 교량은 강합성 거더 고속철도 교량으로 호남고속철도의 설계요구조건에 부합되는 1050m 교량으로 하였다. 동적거동에서 구조물의 감쇠특성은 구조물의 공진과 매우 밀접한 관계가 있으므로 감쇠특성값을 매개변수로 하여 호남고속철도에서 요구되어지는 동적 안정성 요구 조건 별로 거동 특성을 분석하고자 하였다.

3.2 모델링 및 해석방법

(1) 교량의 제원

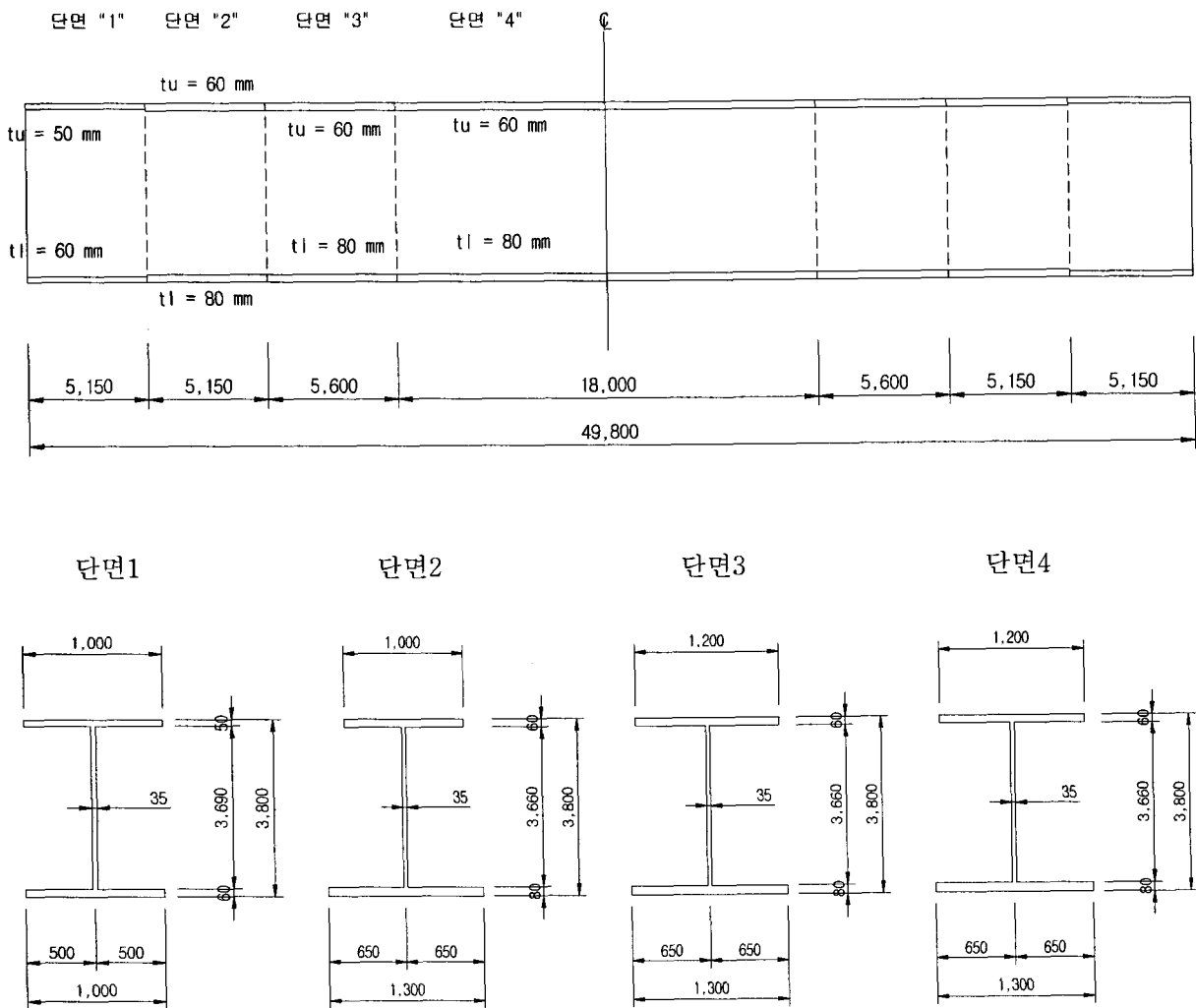


그림 3. 주형의 종단면도 및 횡단면도

(2) 모델링

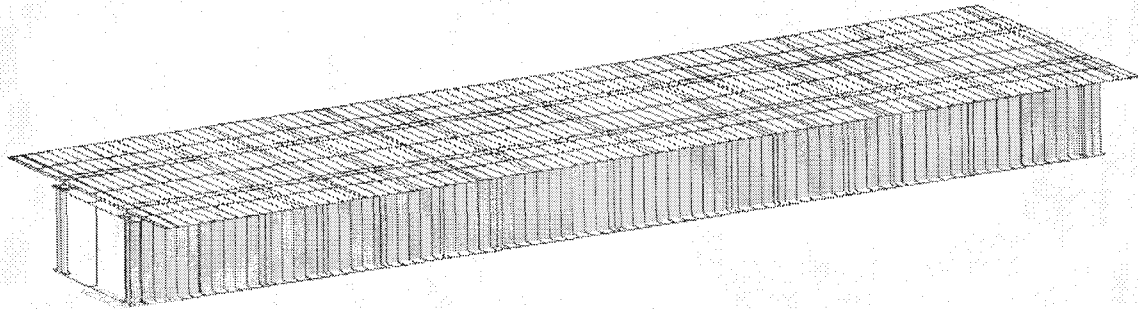


그림 4. 해석 모델링

사용해석 프로그램은 MIDAS Civil 7.01 을 사용하였다. 사용부재는 주형과 크로스빔, 브레이싱은 Frame요소를 사용하였으며, 상부 슬래브는 Shell요소를 사용하였다. 주형과 슬래브의 연결은 Rigid Link기능을 사용하여 합성단면 효과를 나타내도록 하였다. 사용한 절점은 1158 개이며, 부재수는 Frame 요소 300개와 Shell 요소 792개를 적용하였다.

(3) 동적해석은 설계속도의 1.2배인 420km/h까지 20km/h 간격으로 수행하였다. 주행열차하중에 대한 동적해석 전에 자유진동해석을 수행하여 공진을 일으킬 수 있는 임계속도를 미리 산정하고 이 속도를 해석범위에 포함하였다. 임계속도 산정식은 다음과 같다.

$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{eff}$$

여기서, ω_1 은 교량의 첫번째 휨 고유진동수이며, S_{eff} 는 열차의 지배적 타격간격이며 KTX와 G7의 경우 15.7m, 18.7m 에 대하여 V_{cr} 을 도출하였다.

(4) 주행열차하중의 하중크기 및 축간격은 그림 5. 와 같다.

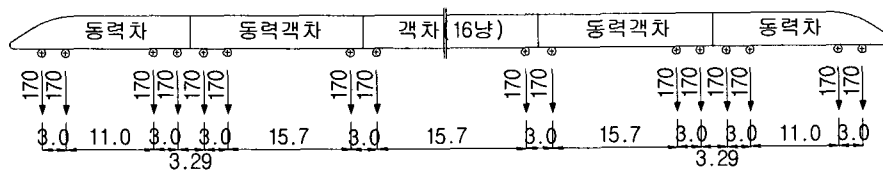


그림 5. 주행열차하중

(5) 주행열차하중의 모델링은 연행이동집중하중으로 적용하였다.

(6) 동적해석시 자중 및 궤도구조의 질량 등 2차고정하중을 포함한 모든 부재의 질량이 고려되었으며, 차량의 하중을 질량으로 고려하여 적용하였다.

(7) 동적해석시 주행열차의 하중재하는 궤도 중심에 따른 단선재하 위치인 교량중심에서 2.4m 편심된 위치에 작용하였다.

3.3 감쇠비 적용

설계속도 내에서 공진발생시 감쇠 특성값을 대표하는 감쇠비에 따라 동적해석 결과 값이 매우 달라질 수 있다. 일반적으로 강교량의 경우 감쇠비를 1% 미만을 사용하였고 경부고속철도의 경우 0.5% 를 적용하였다. 참고문헌 3. 에 따르면 실물실험을 통한 결과로 경부고속철도 1@50m 강합성 거더교의 경우 1.68% 의 결과로 나타났으므로 해석 적용값과 실제 감쇠비 차이가 남을 볼 수 있었다. 본 연구에서는 설계 감쇠비를 매개변수로 하여 호남고속철도에 적용되는 강합성 거더교의 동적해석을 통하여 호남

고속철도에서 요구되어지는 동적 안정성 요구 조건 별로 교량의 거동특성을 분석하고자 하였다. 호남고속철도 설계지침(안)을 따르면 표 4. 와 같이 감쇠비 하한값을 제안하였다.

표 4. 감쇠비 하한값


교량형식	감쇠비 하한값 (%)	
	경간 < 20m	경간 ≥ 20m
강구조, 합성구조	0.5+0.125(20-L)	0.5

본 연구에서는 감쇠비를 0.5% 와 1.0%, 2.0% 에 대하여 각각 420km/h 까지 동적해석을 수행하여 동적 안정성 요구 조건 별로 거동특성을 분석하였다.

4. 해석결과

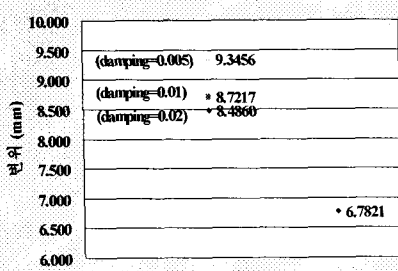
4.1 임계속도

표 5. Mode Shape 및 임계속도

구분 (Flexure)	Mode Shape	임계속도
1st Mode		<p>Frequency : 4.900Hz Vcr (Seff=15.7m) : 277km/h, Vcr (Seff=18.7m) : 330km/h</p> <p>: 임계속도 산정시 지배적 타격간격거리(Seff)를 실제 열차 하중의 반복축간거리인 15.7m 와 객차간 중심사이의 거리인 18.7m를 고려하여 임계속도를 산정 하였다.</p>

4.2 D.M.F

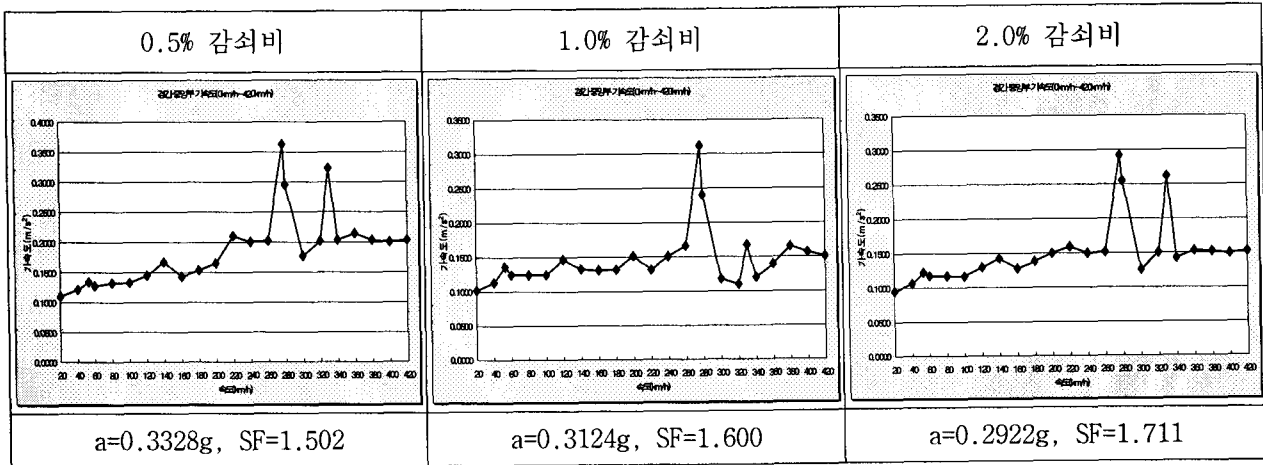
표 6. 감쇠비에 따른 D.F.M 결과 및 평가

해석 결과	평가
<p>정적 동적 변위 결과</p> 	<p>(1) 감쇠비 0.5% : D.M.F = 1.378 (2) 감쇠비 1.0% : D.M.F = 1.286 (3) 감쇠비 2.0% : D.M.F = 1.251 (4) 충격계수 적용성 검토 실열차하중 : 170 x 8 x 1.378 = 1874 kN/50m 설계열차하중: 1000+(50-6.4)x60x(1.0296)= 3723 kN/50m 설계열차하중/실열차하중 = 1.987이므로 충격계수는 안전 축의 값으로 판단됨.</p>

감쇠비에 따른 D.M.F의 특성은 감쇠비 0.5% 적용시 D.M.F 를 100으로 가정하였을 경우 감쇠비 1.0% 적용시 92.718, 감쇠비 2.0% 적용시 90.195 로 나타났다.

4.3 상판 수직가속도 제한 검토

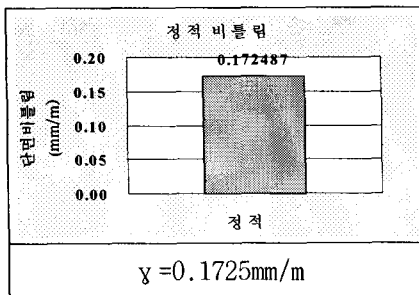
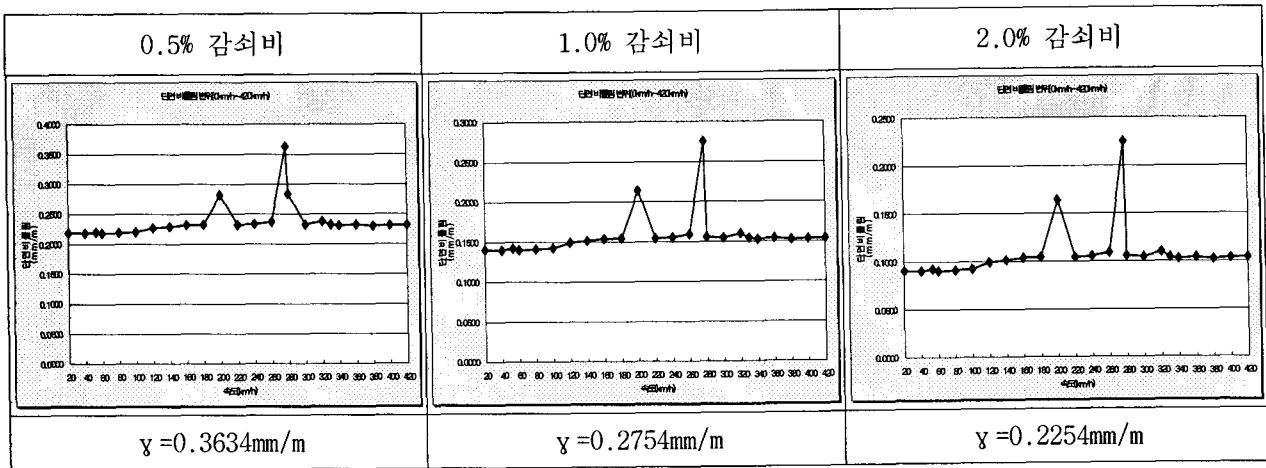
표 7. 감쇠비에 따른 상판수직 가속도 결과



감쇠비에 따른 상판 수직가속도 거동 특성은 감쇠비 0.5% 적용시 발생 수직가속도를 100으로 가정하였을 경우 감쇠비 1.0% 적용시 93.870, 감쇠비 2.0% 적용시 87.800 으로 나타났다. 발생 최대 수직가속도가 콘크리트 도상일 경우 수직가속도 제한치인 0.5g을 초과하지 않으므로 수직가속도 제한 검토 항목을 만족한다.

4.4 면틀림 제한 검토

표 8. 감쇠비에 따른 면틀림 결과

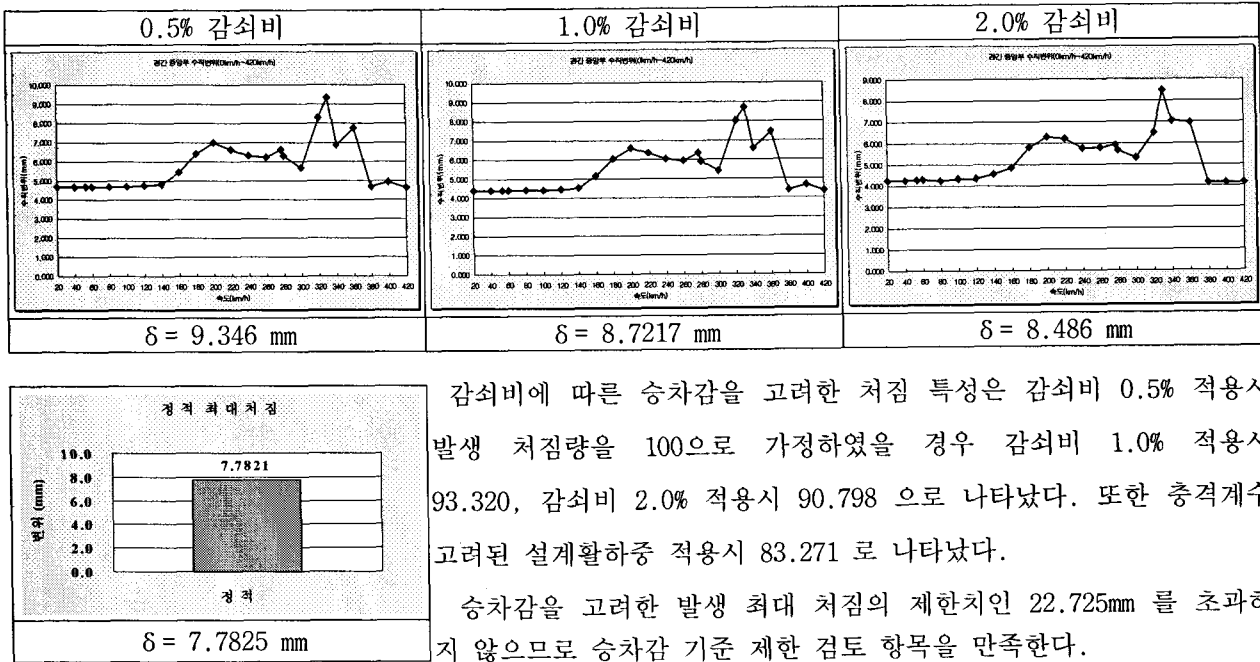


감쇠비에 따른 면틀림 거동 특성은 감쇠비 0.5% 적용시 발생 면틀림을 100으로 가정하였을 경우 감쇠비 1.0% 적용시 75.784, 감쇠비 2.0% 적용시 62.023 으로 나타났다. 또한 충격계수 고려된 설계활하중 적용시 47.468 로 나타났다.

발생 최대 면틀림은 제한치인 0.5mm/m 를 초과하지 않으므로 면틀림 제한 검토 항목을 만족한다.

4.5 승차감 기준 제한 검토

표 9. 감쇠비에 따른 승차감을 고려한 처짐 결과



감쇠비에 따른 승차감을 고려한 처짐 특성은 감쇠비 0.5% 적용시 발생 처짐량을 100으로 가정하였을 경우 감쇠비 1.0% 적용시 93.320, 감쇠비 2.0% 적용시 90.798 으로 나타났다. 또한 충격계수 고려된 설계활하중 적용시 83.271 로 나타났다.

승차감을 고려한 발생 최대 처짐의 제한치인 22.725mm 를 초과하지 않으므로 승차감 기준 제한 검토 항목을 만족한다.

5. 결론

호남고속철도에 적용되어지는 강합성 거더 고속철도 교량을 대상으로 동적거동 분석을 수행하였다. 감쇠 특성값을 매개변수로 하여 호남고속철도에서 요구되어지는 동적 안정성 요구 조건 별로 거동특성을 분석한 결과 요구되는 제한 조건을 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 감쇠비에 따른 각 검토항목 별 거동 특성은 감쇠비 0.5% 적용시 발생값을 100으로 하였을 경우 그림 6. 과 같다. 향후 실물실험을 통하여 실제 감쇠비를 도출한다면 해석대상교량의 안정성 검토 항목별 안전을 이력특성을 좀 더 쉽게 파악할 수 있다. 그리고 호남고속철도 특징을 고려한 강합성 거더 교량 설계 및 유지관리측면에서 좋은 자료로 활용가능하다고 사료된다.

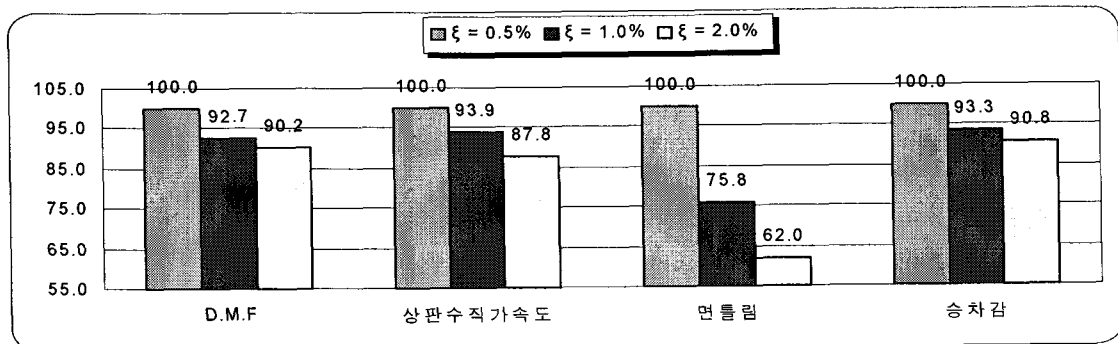


그림 6. 감쇠비에 따른 안정성 요구조건별 거동특성

참고문헌

1. 호남고속철도 설계지침(안) (2007), 한국철도시설공단
2. BS EN 1990-2:2002 pp.78-83, BSi
3. 최은석, 진원중, 박성룡, 곽종원, 김영진, 김병석, 황낙연(2002) “정부고속철도 교량의 감쇠실험연구”, 대한토목학회 2002년 학술발표회-한국건설비전2025, pp.196-199