

자료번호
112001A00Z-210-003

철도교량 동적재하실험 매뉴얼

2023. 09.

■ 목 차 ■

1. 일반사항	1
1.1 적용범위	1
1.2 용어의 정의	1
1.3 동적재하실험 계획	2
1.4 동적재하실험 계측장비 요건	3
2. 동적재하실험 관련 기준 해설	5
2.1 개요	5
2.2 철도교량의 성능검증 항목	7
3. 동적재하실험 Data 분석	29
3.1 열차의 속도 계산	29
3.2 가속도 데이터 처리 방법	30
4. 동적재하실험 항목별 측정 및 분석 예시	33
4.1 연직처짐	33
4.2 단부회전각	35
4.4 연직가속도	38

해당 매뉴얼은 한국철도기술연구원이 수행한 국가철도공단 용역과제 ‘고속철도교량 공진영향 분석 및 유지보수기준 제정 연구용역(21.09.~23.09.)’성과의 일환으로 작성되었음

1. 일반사항

1.1 적용 범위

「철도교량 동적재하실험 매뉴얼」은 철도교량 관련 실험을 실시함에 있어 기존 교량 관련 실험 지침에서 정의하지 않은 동적재하실험 세부 내용에 한정하여 기술하며 본 매뉴얼에서 제시하지 않은 사항은 일반 지침을 따른다. 본 매뉴얼을 적용하는 실험은 다음과 같다.

- 「철도의 건설 및 철도시설 유지관리에 관한 법률」 제31조, 제33조, 제45조에 근거하여 시행하는 철도시설 중 교량의 성능평가실험
- 「철도안전법」 제38조, 제79조에 근거하여 시행하는 철도종합시험운행 시설물 검증시험 중 교량시설물 검증시험
- 기타 철도교량의 주행안전성, 승차감 평가를 위한 연구목적의 실험

한편, 본 매뉴얼에서 기술된 내용과 다르더라도 널리 알려진 이론이나 시험에 의해 기술적으로 증명된 사항에 대해서는 관리주체와 사전협의하여 적용할 수 있다.

1.2 용어의 정의

- 연직가속도 : 상판의 수직방향 진동 가속도
- 단부회전각 : 교량 바닥판 단부와 교대 사이의 상대각 변위
- 횡방향 비틀림(면틀림) : 상판의 단위길이(3m)당 최대횡방향비틀림
- 연직처짐 : 보(beam)가 하중을 받아 탄성 변형을 한 때, 하중을 받기 전의 보(beam)의 축선과 직각 방향의 변위량
- 측정빈도(Sampling Rate) : 1초당 데이터 측정 회수

1.3 동적재하실험 계획

① 동적재하실험의 구분

교량의 동적재하실험은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 열차의 주행에 따른 동적응답으로부터 실제 교량의 응답을 평가하기 위한 주행실험과 교량의 동적 특성을 구하기 위한 실험이 있다.

- 열차 주행시험

특수한 목적을 제외하고 동적재하시험은 실제 열차를 활용하여 시행한다. 정적재하시험용 계측기와 동적재하시험용 계측기가 상이한 경우 계측기의 측정오차를 검정하기 위하여 동적재하시험용 계측기를 사용한다. 시험차량의 상하행 주행선로 구분, 주행속도가 계산가능하도록 실험전 주행하중 식별계획을 수립한다. 측정결과를 이용하여 교량의 응답에 따라 주행안전성 및 승차감 관련 기준 충족여부를 판별한다.

- 동적특성 시험

교량의 동적특성 즉 고유진동수, 감쇠율을 구하는 실험으로써 주행차량에 의한 진동, 가진기에 의한 처짐 또는 진동의 여진신호를 분석하여 산출한다.

② 실험경간 선정

실험대상 경간은 차량에 의해 방해받지 않는 곳으로 선정하며 지상으로부터 교량의 하면 높이까지 5m를 넘지 않는 곳에서 시행한다. 불가피한 경우 처짐계의 오차가 최소화되도록 지지대를 보강하고 방풍설비를 갖춘다.

③ 계측기 및 센서의 부착

센서는 습기, 이물질의 제거하여 부착하고 방습 및 보호 처리한다. 연결선은 최대한 중첩되지 않도록 배선하며 노이즈를 최소화하기 위해 반드시 그라운드 접지한다.

④ 재하하중의 판별

일반적으로 전용선으로 운행되는 고속철도는 실험 후 데이터 처리를 통해 열차의 판별이 가능하여 주행속도 계산에 용이하나 기존선의 경우 다양한 열차편성으로 속도계산에 혼선을 초래할 수 있다. 따라서 필요한 경우 주행열차의 종류를 유관 또는 영상으로 판별한다.

⑤ 재하시험 계획

재하시험 시기는 교량의 주변여건, 교통량, 보행자의 안전 등 경제적, 사회적 손실을 고려하여 교통통제의 영향이 적은 시간대를 선정한다. 우천 시나 대기온도가 계

측기의 작동범위를 벗어날 때는 적절한 대책을 마련하지 않는 한 재하시험을 실시하지 않는다.

⑥ 안전계획

재하시험원 및 교통통제원은 주·야간 모두 육안으로 식별이 가능한 복장을 착용한다. 차량의 안전운행을 위하여 각종 교통통제용 안전간판, 비상조명등, 보조장비를 설치하여 운영한다. 재하시험 종료 후 부분적으로 훼손된 교량표면을 원상 복구한다.

1.4 동적재하실험 계측장비 요건

교량거동의 최대응답값, 반응 속도등을 고려하여 적합한 계측장비와 센서를 채택한다. 또한 실험자는 계측장비와 센서의 종류, 일련번호, 기본 사양을 포함한 목록을 작성하여 관리한다. 실험에 투입되는 계측장비와 센서는 실험일 개시 전 기준 1년 이내에 검교정이 완료되어 있어야 한다. 실험결과 제출시 계측장비와 센서의 목록표와 검교정 증빙서류를 반드시 첨부한다.

2. 국내외 동적성능검증 관련 기준 해설

2.1 개요

철도교의 동적성능과 관계되는 시방기준의 경우, 국내의 관련 기준으로는 철도설계기준 (노반편) (2017)[3], KDS 24 10 10[4]과, 고속철도와 관련된 BRDM(Bridge Design Manual)[13]이 있으며, 2007년 호남고속철도 설계지침에 관련 분야가 제정된 바 있다.

국외의 관련 기준으로는 UIC Code[14~18] 및 Eurocode[12], 프랑스 기준인 CTRL Technical Standard[23], 스페인의 IAPF[31] 등이 있다. 또한, ERRI(European Rail Research Institute) 보고서[10, 11]에 관련 기준 및 설정 근거 등이 제시되어 있다. 또한, 일본의 철도구조물 등 설계표준/동해설의 콘크리트교편 및 2006년도 발간된 변위제한[30]을 참조하였다.

교량 상 열차주행시 안정성은 주행안전성(traffic safety)와 승차감(passenger comfort)으로 나뉜다. 먼저 차량의 주행안전성은, 차륜에 작용하는 횡압 Q 를 동적인 연직윤중 P 로 나눈 탈선계수로 평가되는 것이 일반적이다. 일반적으로 이 탈선계수가 0.8~1.2를 넘지 않도록, 구조물의 변위를 제한해 왔다. 열차의 윤중은 교량 위를 주행하면서 열차와 교량의 상호작용에 의해 지속적으로 변동되며, 이와 같은 윤중변동율은 동적인 윤중의 변화량을 정적 윤중으로 나눈 것으로, 윤중의 변화를 표시하는 지표로서 이용되고 있다. 이 중 특히 윤중감소율은 주행안전성을 평가하는 지표가 되고 있다. 실제의 열차 주행에서는 궤도틀림 혹은 풍압 등에 의해서도 횡압이나 윤중감소가 발생하며, 이러한 것들을 고려하여 일본의 경우에는 교량 상 주행안전성 검토를 위해 횡압 48kN, 윤중감소율 28.1%의 한계값이 탈선계수 0.8에 근거하여 정해져왔다. 최근 발간된 “변위제한”편에서는 횡압 40kN, 윤중감소율 37.0%에 근거하여 연직변위 제한 기준을 설정하였다.

주행안전은 탈선 가능성을 예측함으로써 평가할 수 있다. 탈선 가능성을 평가하는 가장 일반적인 지표는 탈선계수로 아래 식으로 주어진다.

$$K_{Q/P} = Q/P \quad (2.1)$$

여기서 Q 는 횡압이고, P 는 동적 윤중이다. 일반적으로 윤중과 횡압은 각각 차체의 수직 및 수평가속도와 상관관계가 매우 높다는 사실로부터 탈선계수(KQ/P)및 윤중감소율

(KdP)은 다음과 같이 수직 및 수평차체가속도로 나타낼 수 있다.

$$K_{Q/P} = \frac{Q}{P} = \frac{Q}{P_0 - \Delta P} = \frac{2P_0 \frac{\beta}{\lambda_H} a_H}{P_0 - P_0 \frac{\beta}{\lambda_V} a_V} = \frac{2 \frac{\beta}{\lambda_H} a_H}{1 - \frac{\beta}{\lambda_V} a_V} \quad (2.2)$$

$$K_{dP} = a_V$$

여기서, P_0 : 정적 윤중, ΔP : 윤중 변동분, β : 축중에서 차체 중량이 차지하는 비율(차체 중량비), λ_V : 차체 중량에 의한 윤중변동이 전체 윤중변동에서 차지하는 비율(차체 윤중 변동율), λ_H : 차체 중량에 의한 횡압이 전체 횡압에서 차지하는 비율(차체 횡압비), a_V : 차체 상하 가속도(편진폭) [g], a_H : 차체 좌우 가속도(편진폭) [g]이다.

Sato의 연구결과에 따르면 $\beta=2/3$, $\lambda_V=2/3$, $\lambda_H=1/2$ 가 가정될 수 있으므로 위 식의 탈선계수는 다음 식과 같이 단순화될 수 있다.

$$K_{Q/P} = \frac{8}{3} \left(\frac{a_H}{1 - a_V} \right) \quad (2.3)$$

국내 철도차량안전기준에 관한 규칙에 의하면 탈선계수는 $K_{Q/P}=0.8$ 의 값을 적용하므로 횡축을 a_V , 종축을 a_H 로 하는 좌표 상에 그림 1.1과 같이 나타낼 수 있다.

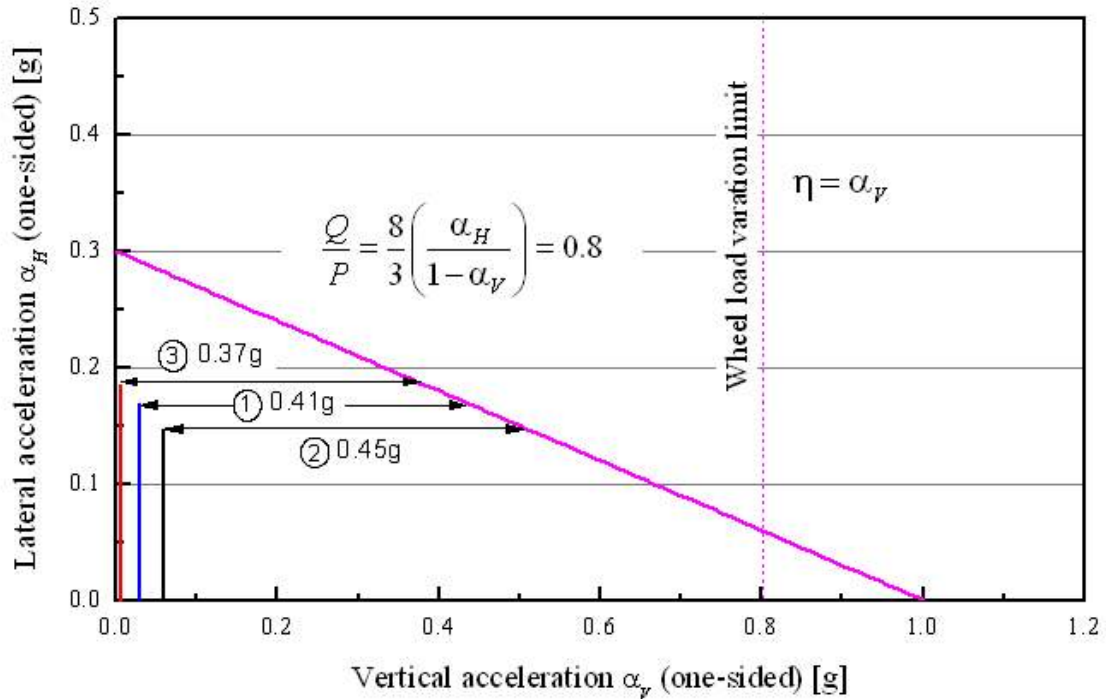


그림 2.1 주행 안전을 위한 차량 가속도 관계

승차감에 대하여는 1단계 연구에서 자세히 분석한 바와 같이 열차 내부에서 발생하는 가속도로 평가하는 것이 직접적인 방법이며, 이에 대한 국제적 지표가 다양하게 소개되어 있다. Eurocode의 경우 0.1g 이하에 대해 “매우 좋은”, 0.13g 이하에 대해 “좋은”, 0.2g 이하에 대해 “보통”의 승차감으로 평가하고 있다.

2.2 철도교량의 성능검증 항목

교량설계 시, 동적거동에 대한 검토는 단순히 충격계수를 적용하여 안전을 개념에서 정적검토를 수행함으로써 포함시키고 있다. 그러나, 이러한 충격계수는 단순히 지간장 등에 대한 함수일 뿐이며, 다양한 하중조건, 불규칙성 및 교량 구조물과 주행차량의 동적특성 등이 포함되지 않은 항목이다.

표 1. 철도교량의 일반적 성능검증 항목

시 험 종 류	측 정 항 목	비 고
정적 구조안전성	주부재 응력 (충격계수)	
설계변수 관련	고유진동수, 감쇠비	
주행 안전성 및 구조적 안정성	연직처짐	
	상판의 연직가속도	
	단부회전각	철도설계기준 노반편(2011 이후), 최근의 EUROCODE에선 제외됨
	상판의 면틀림	
승차감 (진동사용성)	연직처짐	
	객차 연직가속도	

철도교량의 경우 도로교와는 달리 특정한 축간격을 가진 열차가 주행함으로써 인해, 공진의 발생가능성이 크며, 중량의 하중이 고속으로 주행함에 따라 충격계수 외에 다양한 동적성능항목에 대한 검토가 필연적이다. 일반적으로 철도교량의 동적성능과 관련된 항목은 다음과 같이 정리할 수 있다.

2.2.1 충격계수

철도설계기준 (노반편) (2011)에 따르면 충격계수는 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트교의 경우, 다음과 같은 값을 사용하도록 규정되어 있다.

$$L \leq 4m : i (\%) = 60$$

$$4m < L \leq 39m : i (\%) = 125 \sqrt{L}$$

$$L > 39m : i (\%) = 20$$

또한, 강교 및 강합성의 경우, 다음과 같이 규정되어 있다.

$$L \leq 24m : i = 50 - L^2 / 48$$

$$L > 24m : i = 180 / (L - 9) + 26$$

Eurocode(EN1991-2)에서는 다음과 같이 충격계수를 정의하고 있다.

$$\Phi_2 = \frac{1.44}{\sqrt{L_\Phi} - 0.2} + 0.82 \quad (\text{For carefully maintained track, } 1.0 \leq \Phi_2 \leq 1.67)$$

$$\Phi_3 = \frac{2.16}{\sqrt{L_\Phi} - 0.2} + 0.73 \quad (\text{For track with standard maintenance, } 1.0 \leq \Phi_3 \leq 2.0)$$

위의 식에서 일반철도의 충격계수는 미국의 설계기준인 AREMA를 근간으로 하고 있으며, 국내 고속철도인 호남고속철도 설계지침은 Eurocode의 Φ_2 와 같은 값을 사용하고 있다.

한편, 철도설계기준(노반편) (2013)에서부터는 Eurocode와 동일하게 일반철도, 고속철도 모두 다음 식과 같이 통일되었다.

$$I_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_c} - 0.2} - 0.18 \quad \text{여기서, } 0 < I_m \leq 0.67$$

한편, 이와 같은 충격계수 산정은 단순히 지간장에 의해서만 결정된 값으로서 공진의 발생가능성에 대한 영향이 포함되어 있지 않으며, 열차의 특성, 주행면 불규칙성 등 다양한 조건에 대한 영향 역시 포함되어 있지 않다. Cantieni 등의 연구자에 의해 실험적으

로 교량에서 충격계수는 설계기준을 훨씬 상회하는 결과가 예측될 수 있음이 입증된 바 있다.

실제 철도교량의 경우 다양한 종류의 열차 및 각 열차의 축간격에 의해 설계속도 내에서 공진의 발생가능성이 크며, 이와 같은 공진 발생 시 시방기준 상의 충격계수를 충분히 상회할 수 있으며, 값은 그림 2.2와 같이 감쇠비에 따라서 매우 커질 수 있다. 그림 2.2의 세로축은 동적응답을 나타내며 가로축은 가진주파수와 구조물의 고유주파수의 비율을 나타낸다. 즉, 가진주파수와 고유주파수가 일치하게 되면 감쇠비가 작아짐에 따라 동적응답은 무한대로 크게 발생할 수 있음을 나타낸다.

반면, 이러한 공진에 의한 매우 큰 값의 충격계수를 설계에 반영하게 되면 교량은 매우 비현실적이고 비경제적인 단면의 과다설계로 귀결될 수 있으므로 주의하여야 한다.

이와 같은 경우에는 단순히 충격계수 검토가 아닌, 발생 응력, 처짐, 가속도 등 다양한 정량적인 값에 대하여 구조적으로 충분한 안정성을 확보하고 있는지 검토하여 전체 교량 구조물의 안전성을 평가하여 합리적인 설계를 도출하여야 한다. 결과적으로 충격계수를 고려한 설계하중 정적해석에 의한 응답($i \times \text{Design Load}$)과 실 열차하중(Real Train Simulation) 동적해석에 의한 응답 중 불리한 것을 설계에 적용하는 것이다.

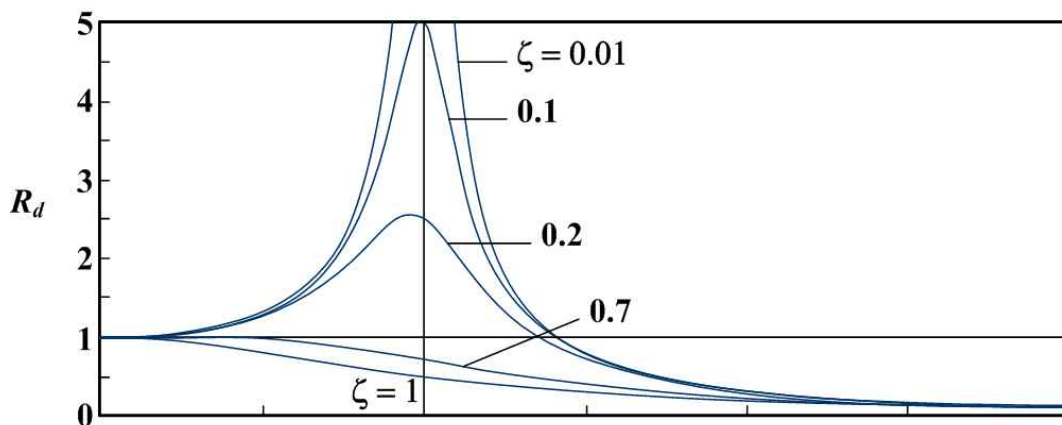


그림 2.2 공진발생 시 감쇠특성에 따른 동적증대효과

일본의 경우 1992년 철도교설계기준에서 이미 속도의 영향 및 타격간격을 고려한 충격계수 식을 제안하였으며, 2004년 기준개정[26]에서도 이에 대한 다양한 이론적 연구 및 실험을 통하여 합리적인 충격계수 산정을 위한 노력을 기울이고 있다. 일본 철도구조물 - 콘크리트교편(2004)의 충격계수는 다음과 같이 규정되며, 열차의 특성 및 속도가 반영되는 특이점을 찾을 수 있다.

- (1) 열차 주행에 의한 응답의 동적 증가분은 정적 하중의 증가로 치환해서 충격 하중으로서 산정해도 된다. 이 경우 충격 하중의 특성치는 열차 하중의 특성치에 설계 충격계수를 곱한 값으로 한다.
- (2) 설계 충격 계수는 동적 해석 등의 적절한 방법을 이용하고, 열차 또는 차량의 최고 속도, 축배치, 편성량수와 부재의 스패, 비선형성, 기본 고유 진동수 및 감쇠 정수 외에 구하려는 응답치의 종류, 궤도와 정비 상황 등을 감안하여 산정하는 것을 원칙으로 한다.
- (3) 단선을 지지하는 부재의 피로 파괴를 제외한 안전성 및 복구성 조사에 이용하는 설계 충격계수는 일반적으로 다음 식에 의해서 산정하기로 한다.

$$i = (1 + i_a)(1 + i_c) - 1$$

여기에서 i : 설계 충격계수

i_a : 속도 효과의 충격계수

i_c : 차량 동요의 충격계수

$$i_c = \frac{10}{65 + L_b}$$

여기에서 L_b : 부재의 스패(m)

- (4) 피로 파괴에 관한 안전성 및 사용성 조사에 이용하는 설계 충격 계수는 (3)에서 정한 설계 충격 계수의 3/4으로 하면 된다.
- (5) 복선을 지지하는 구조물 또는 부재의 조사에 이용하는 설계 충격 계수는 (3), (4)에서 정하는 성능 항목별 설계 충격 계수에 식(4.4.3)에 의해서 산정되는 저감 계수 β_i 를 곱한 값으로 충분하다.

$$L_b \leq 80 \text{인 경우 } \beta_i = 1 - L_b/200$$

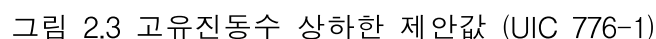
$$L_b > 80 \text{인 경우 } \beta_i = 0.6$$

- (6) 구조물의 상면에 흙덮이가 있는 경우나 단면이 큰 교각과 기둥인 경우에는 (3)~(5)에서 정하는 설계 충격 계수를 줄일 수 있다.

UIC 776-1에서는 첫 번째 힘 고유진동수가 다음과 같은 허용범위를 벗어날 경우에는 종합적인 동적검토를 수행하도록 되어 있다.

첫 번째 힘 고유진동수 하한치 : $n_0 = 80/L$ $L = 4.0 \sim 20.0\text{m}$
 $23.58 \times L - 0.592$ $L = 20.0 \sim 100.0\text{m}$

이와 같은 내용은 국내에도 철도설계기준(철도교편)이 2004년에 개정되면서 동일하게 수록된 바 있으나, 이는 호남고속철도 설계지침, 철도설계기준(2011)에서부터는 삭제되었다. 일본의 경우에는 과거 과도한 동적응답을 피하기 위해 강성을 규제하는 방법으로 $55L_b^{-0.8}$ 으로 고유진동수의 하한치를 규정한 경우가 있었으나, 최근 장경간/경량화 된 신형식 교량들이 지속적으로 개발되면서 이 기준의 하한치를 만족시키지 못하는 경우가 발생하는 것에 대하여 이와 같은 규정에 반드시 제한받지 않고 구조물 전체의 안전성 및 사용성 등을 다각도에서 검토하여 경제적, 구조적으로 효율적인 구조를 적용하고 있는 추세이다.



고유진동수 하한규정에서 주의할 점은 하한규정은 설계되는 철도교량이 하한치를 반드시 만족하여야 한다는 규제사항이 아니고 이를 통해 동적거동 검토를 수행하여야 할 필요성에 대한 판단을 할 수 있도록 검토하는 항목이란 것이다. Eurocode에서도 고유진동수에 대한 우선적인 검토에서 하한규정을 만족하지 못한다고 해서 바로 재설계를 수행해야 하는 것이 아니고 하한규정을 만족하지 못할 경우 동적거동에 대한 면밀한 분석을 하도록 유도하고 있다.

2.2.3 상판 연직가속도

경부고속철도의 규정인 BRDM(Systra, 1995)에 따르면, 220km/h 이상의 속도에서는 deck 연직가속도를 필수적으로 검토하여야 하고, 이때에 0.35g 이내가 되어야 한다고 규정하고 있다. 또한, 프랑스 규정에 따르면 다음과 같이 deck 연직가속도를 제한하고 있으며 이에 대한 검토는 220km/h 이상으로 주행하는 선로에 대하여 실열차하중의 단선재하에 의한 동적해석으로 수행하도록 명시되어있다. 이는 Eurocode의 규정과도 같으며, 호남고속철도 설계지침에도 다음과 같은 제한을 두도록 규정하고 있다.

- . 유도상 궤도 : 0.35g
- . 무도상 궤도 : 0.5g

Eurocode의 규정은 각 궤도 선로를 따라 계산한 연직가속도의 값이 위의 값을 넘지 않도록 규정하고 있으며, 30Hz, 1차 고유진동수의 1.5배, 구조물의 3차 고유진동수의 세 가지 값 중 큰 값까지의 주파수 대역을 고려하도록 하고 있다.

ERRI D214 RP9(1999) 보고서는 동적성능과 관련된 항목에 대한 ERRI의 지속적인 연구에 대한 결과를 수록하고 있으며, 다음과 같은 이유로 상판의 과도한 가속도 발생을 완화하여야 한다고 기술하고 있다.

- ㉠ 상향 또는 하향의 과도한 deck 가속도와 같은 공진효과를 유발하는 구조물의 고유진동수와 일정 간격의 축간거리 사이의 동적 상호작용
- ㉡ 하향의 과도한 가속도는 다음과 같은 사항에 영향을 준다.
 - . wheel/rail contact force의 감소
 - . 도상(ballast) interlock 손실, ballast와 교량 상판 그리고 침목과 도상의 접촉 마

찰력(contact friction)의 손실, 궤도(track)의 연직방향 강성과 횡방향 저항력의 손실, 궤도 이동(track movement)의 잠재적 위험, 더운 날씨에서의 궤도 좌굴의 위험성, 수평방향 alignment의 손실

- 도상(ballast) interlock 손실, 궤도(track)의 연직방향 강성과 종방향 저항력의 손실, 도상과 상판사이의 종방향 이동(movement/slippage) 위험성, 노후구조물 및 단경간 교량에서 하중분배효과를 높여주는 상판/도상/궤도사이의 복합거동특성의 손실

㉔ 상향의 과도한 가속도는 다음과 같은 사항에 영향을 준다.

- 교좌장치(bearing)에 들림/충격을 주어서 교좌장치의 열화를 가속시키게 되며, 교대 상단에서 높은 충격효과를 주게 된다.
- 교좌장치/교각/교대에 수평력에 영향을 주는 연직방향의 반력의 감소, 지점에서 연직하중 최소화 및 수평하중 최대가 되는 최악의 하중조합 발생의 가능성

㉕ 축하중 아래의 충격에 의해 수반되는 접촉 및 도상 interlock 감소를 일으키는 하향의 과도한 가속도는 도상의 열화와 마모를 촉진함

㉖ 교량에 설치된 다른 구조물에 과도한 가속도를 전달하게 됨

㉗ 공진속도 대역이 허용속도 바로 위에 있는 경우, 공진 또는 공진근처에서의 높은 응답 때문에 과속에 의한 위험성 증대됨

㉘ 공진속도 대역이 허용속도 바로 위에 있는 경우, 강성의 큰 편차(variation)와 이에 상응하는 고유진동수의 편차에 의하여, 심지어 동일한 형식일지라도, 콘크리트 교량의 동적거동의 설계상의 예측 및 평가에 있어서 오차가 커질 수 있다.

㉙ 감쇠특성의 큰 편차(variation)에 의하여, 심지어 동일한 형식일지라도, 가속도의 공진 시 최고값의 설계상의 예측 및 평가에 있어서 오차가 커질 수 있다.

㉚ 주거지의 공진특성과 비교하여 가로보 및 국부부재의 다른 공진특성을 모델링하는 방안이 요구됨

가속도 제한 규정의 배경인 ERRI D214 보고서에 의하면 궤도 모형에 대한 실내 실험 결과 자갈도상이 불안정해지는 값은 0.7~0.8g 이상일 경우였으며 이에 대해 안전율을 둔 0.35g를 설정하였다. 임계속도 운행에 의해 공진이 발생하는 교량 상에서 다수의 현장실험을 수행하였으며, 그 결과 0.7~0.9g 이상에서 궤도의 안정성에 저해가 되는 현상들이 관찰되었으며, 실내 실험에서도 0.7g 이상에서 불안정한 동적거동이 관찰되었다.

도상구조의 교란의 우려는 없으나, 콘크리트 궤도에서 0.50g의 규정을 적용한 것은 교

좌장치의 부상을 방지하기 위한 것으로 판단된다. ERRI D214 보고서에 따르면 지점에서의 들림 현상 과 충격손상으로 인한 위험을 막기 위해 바닥판의 가속도를 제한할 필요가 있으며, 바닥판이 상향가속 할 때 지점 반력은 줄어든다. 상향가속의 최대값은 경간이 열차의 가장 긴 차축 거리보다 짧기 때문에 재하 된 하중이 없을 때나 마지막 차축이 바닥판에서 벗어난 직후 교량이 자유진동 할 때에 나타난다. 바닥판 가속도가 전 경간에 걸쳐 평균적으로 1.0g를 초과할 경우에는 들림이 발생할 수 있다. 들림이 발생하지 않게 하기 위해서는 경간 중앙의 바닥판 가속도가 허용된 값 이에 대한 안전율을 고려하여 0.50g로 제한하여야 한다고 설명하고 있다.

반면, 일본에서는 교량 상판의 연직가속도에 대해 특별한 규정이 없으며, 주행안전성에 관해서는 연직처짐에 의한 검토로 충분하다는 입장이다.

유럽에서도 최근에는 동적성능 검토 기준 중 가속도에 대한 규정이 동적설계에 있어서 가장 결정적이며, 안전율 2를 고려한 현 규정은 비경제적 설계로 귀결된다는 지적이 있다. 독일의 최근 연구에서는 SNCF의 실험과 유사한 실험을 통해 0.7g 이상에서 침묵의 변위나 침하 등 불안정한 동적거동이 나타났으나, 안전율 2.0은 엔지니어링 측면에서 과도한 설계로 판단해 안전율 1.3을 고려해 자갈궤도 0.55g, 콘크리트궤도 0.75g의 규정이 적합하다는 연구가 보고된 바 있다.

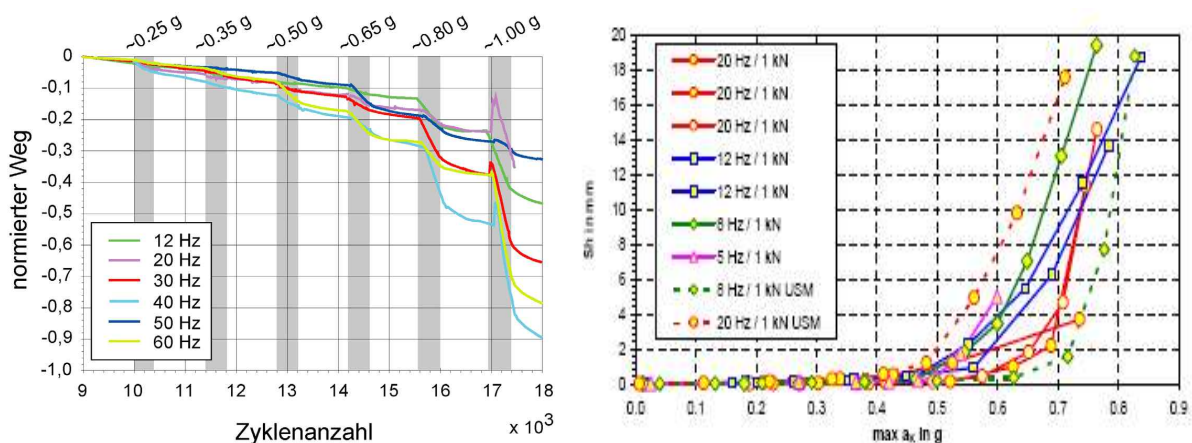


그림 2.4 상판연직가속도 제한에 대한 독일의 실험적 연구

한편, 철도설계기준(노반편) (2013)에서는 다음과 같이 Low Pass 필터링 규정을 두어 완화시키고자 한 측면이 있으며, 검토 위치를 보다 상세화하였다.

- 최대 연직가속도는 설계를 위한 해석 및 현장계측을 통한 안정성 검토에 모두 적용하며, 이때 고려하여야 할 진동수의 상한치는 다음 중 최대값으로 한다.

- i) 30Hz
- ii) 고유진동수의 1.5배
- iii) 3번째 진동모드

- 그림 2.5와 같이 자갈도상의 경우에는 도상이 설치된 부분에 해당되는 교량상판 범위에, 콘크리트 도상의 경우에는 레일이 위치한 교량의 상판지점에서 검토했어야 한다.

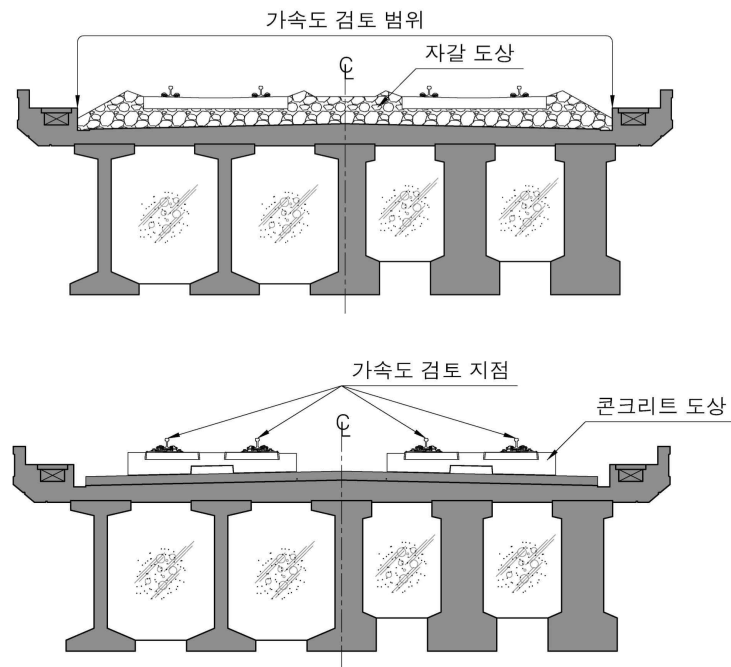


그림 2.5 가속도의 검토 범위 및 위치

2.2.4 단부회전각(End Rotation)

UIC 774-3에 의하면, 연직하중에 의한 단부회전각은 궤도/교량 상호작용 거동을 만족시키기 위한 중요한 인자로 deck 상부 끝단에서의 변위를 제한함으로써 도상의 안전성을 유지하도록 규정하고 있다. 장대레일상에서 온도변화, 시동/제동하중, 및 연직하중에 의한 deck 상부 끝단과 성토부 그리고 연속하는 두 deck 상부사이의 거리의 합이 단부회전각의 최대허용치가 된다.

프랑스 기준(Channel Tunnel Rail Link Technical Design Standards)에 의하면, 복선교의 경우 단부회전각의 한계치는 다음과 같다.

- 기준 [a] (설계하중(LM71)을 적용한 경우)

- ○ 단부의 회전각이 인접 성토구간에 접해있는 경우
- $\theta_{\max}(\text{rad}) \leq 3.5 \times 10^{-3}$
- ○ 회전각이 연속된 2개의 상판사이에 있는 경우
- $(\theta_1 + \theta_2)_{\max}(\text{rad}) \leq 5.0 \times 10^{-3}$ 1)

220km/h의 속도를 초과하는 경우에 대해서는 기준 [a]에 다음과 같은 기준 [b]를 추가 적용하여 실 열차하중에 의하여 단부회전각을 검토하여야 한다.

- 기준 [b] (실제 운행열차를 적용한 경우)

교대부 : $\theta_{\max}(\text{rad}) = (2.0 \times 10^{-3}) / h \text{ rad}$

교각부 : $(\theta_1 + \theta_2)_{\max}(\text{rad}) = 4.0 \times 10^{-3} / h \text{ rad}$

○

여기서, h(m)는 레일면과 교좌장치 중심(교량 베어링 종류에 따라 다름)까지의 거리이다. 경부고속철도의 기준과 비교하면, h를 4m로 간주하면 다음과 같은 단부회전각 기준이 된다.

- 경부고속철도기준 : $\theta_{\max}(\text{rad}) \leq 5.0 \times 10^{-4}$

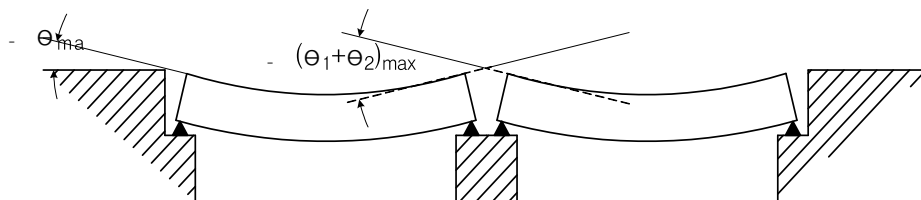


그림 2.6 단부회전각

콘크리트 슬래브궤도 교량의 단부회전각 등 단부변위의 제한은 도상자갈 이완 및 부가적 레일응력 증가를 억제하기 위함이다. 콘크리트 슬래브 궤도에서는 도상 이완의 가능성이 없으므로 단부변위를 제한하지 않고 직접적으로 레일응력과 체결장치의 부상력을 규정하고 있다. 따라서, 궤도-레일 상호작용과 관련된 규정인 교량 단부에서의 부상력 (uplift force), 압축력, 들림 등의 직접적인 검토로 대체한다.

주) θ_1 와 θ_2 는 연속한 2개의 단순경간 상판의 양쪽 단부에서의 회전이다.

단부회전각은 사실 상 교량 연직변위에 의해 결정되는 물리값이며, 교량-궤도 종방향 상호작용력 검토 등에서 상세히 검토되므로, 현재 Eurocode 및 일본의 신간선 기준에서는 모두 존재하지 않는 항목이다.

2.2.5 상판의 면틀림

면틀림의 정의는 다음과 같다. “동적계수(Dynamic Factor)를 고려한 UIC 71 하중(및 기타 협의 결정한 하중 모델)아래에서 유도된 3m 기준에서의 캔트 변화량(mm/궤도 1m)”. 이 의미는 한 평면 상에서 대차를 구성하고 있는 4개의 바퀴 중 한개가 특정 제한값을 벗어나 주행안전성에 위험이 생겨서는 안된다는 의미라고 볼 수 있다.

면틀림은 주행안전성 관련 기준이며, 열차속도에 따라 기준값이 다르다. 기존에 적용하는 3.0mm/m(횡방향)/3m(종방향)의 표현 방식은 약간 혼란스러워서 오해나 실수를 초래할 수 있다. SNCF-I 전문가에 의하면 위 표현 방식이 다음을 의미한다고 판단된다. “3미터 기준에서 측정한 캔트의 변화가 3.0mm(즉, 1m당 1mm)를 초과해서는 안 된다.” 그러나 이 기준은 속도에 따라 다음과 같이 보완해야 할 것이다.

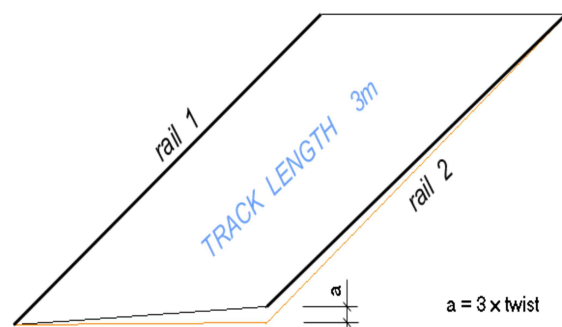


그림 2.7 면틀림 기준

철도설계기준 노반편(2011, 2013) 및 EUROCODE에서는 고속열차의 경우에는 실 열차 하중에 의해 0.4mm/m가 검토되어야 한다고 규정되어 있다.

표 2.2 면틀림(twist) 기준

속도(km/h)	면틀림(mm/m)	3m 기준 면틀림 변화량
$V \leq 200$	1.0	3.0mm/3m
$200 < V$	0.5	1.5mm/3m
실 운행열차 동적해석	0.4	1.2mm/3m

또한, 총 캔트 변화량(즉, 하중으로 인한 캔트 변화+완화곡선 등으로 인해 이미 존재하는 캔트 변화)은 2.5mm/m(궤도 3m에서 7.5mm/m의 캔트 변화)를 초과해서는 안 된다.

일본에는 면틀림 및 단부회전각과 관련된 별도의 기준이 없으며, 주행안전성 및 승차감에 대한 연직변위 검토로 대체하고 있다.

2.2.6 경간 중앙부 연직처짐

이 항목은 구조물의 구조적 안전성과 더불어 주행안전성 및 진동 사용성, 즉 승객의 승차감과도 연결된다.

(1) 철도설계기준 :

국내의 철도교설계기준(2004)에는 수직처짐의 제한 규정을 속도별로 제시하고 있다. 이는 설계하중을 단선재하에 의해 검토하도록 하고 있으며, 이에 대한 수립배경은 불명확한 것으로 판단된다.

표 2.3 주거더의 허용처짐값 (철도교설계기준(2004))

지간길이 L(m) 열차속도 V(km/h)	0 < L < 50	L ≥ 50
$V \leq 120$	L/800	L/700
$120 < V \leq 150$	L/1100	L/900
$150 < \text{속도} \leq 200$	L/1600	

반면, 2011년에 개정된 고속/일반 통합 철도설계기준에서는 Eurocode에 근간을 두고 속도대역별로 다음 표 2.4와 같이 승차감 확보를 위한 기준이 제시되었다. (2013 이후 동일) 하중재하 방법 등은 Eurocode와 동일하게 단선재하를 원칙으로 하고 있다.

표 2.4 승차감 확보를 위한 연직변위 기준 (철도설계기준 (노반편) (2013))

설계속도 (V)(km/h)	거더 또는 부재의 경간(m)										
	0~20	25	30	35	40	45	50	55	60~75	80~95	100~120
$270 < V \leq 350$	L /1500	L /1500	L /1600	L /1750	L /1900	L /2100	L /2200	L /2350	L /2500	L /2200	L /1900
$200 < V \leq 270$	L /1300	L /1400	L /1500	L /1600	L /1700	L /1900	L /2000	L /2100	L /2000	L /1700	L /1400
$V \leq 200$	L /1100	L /1200	L /1300	L /1500	L /1500	L /1400	L /1300	L /1200	L /1100	L /800	L /600

(2) Eurocode (EN1990)

Eurocode EN1990은 교량 연직처짐 규정을 주행안전성(traffic safety) 확보를 위한 규정과 승차감(passenger comfort)을 위한 사용성 확보 규정으로 구분하고 있으며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

주행안전성에 대한 연직처짐 규정은 LM71(혹은 SW/0, SW/2)이 가장 불리하도록 재하된(복선재하 포함) 상태에서 L/600으로 제한(EN1990 A2.4.4.2.3)

승차감을 고려한 제한은 속도별 그래프로 제한함(350km/h 설계속도, 40m 경간 교량의 경우 약 L/1700), 단 이 경우는 하중증가계수(α)를 고려할 수 없으며, 반드시 단선재하로 규정함)

위 모든 경우에 대하여 실 운행열차하중에 대한 동적해석결과와 충격계수를 고려한 LM71에 의한 응답을 비교하여 불리한 값으로 사용 (EN1991-2, 6.4.6.5)

Eurocode의 주행안전성 및 승차감에 대한 처짐기준 및 재하방법을 비교하면 표 2.5와 같다.

표 2.5 Eurocode의 주행안전성 및 승차감 연직변위 제한 비교

구분	주행 안전성(Traffic Safety) 처짐	승차감(진동사용성, Passenger Comfort) 처짐
목적	열차의 탈선방지	승객의 승차감(진동사용성) 확보
변위기준 근거	탈선계수, 윤중감소율로 부터	객차 내 연직가속도로 부터
재하하중	표준열차하중 (HL25, LS22, KRL 등의 정적해석)	표준열차하중(정적해석) 혹은 실열차하중(동적해석)
재하방법	교량 상 선로 수에 따라 복선재하, 3선재하 등 가장 불리하게	교량 상 선로 수에 관계없이 단선재하
제한기준	L/600	속도 및 경간에 따라 변동 (350km/h 설계속도 60m 경간의 경우 L/2500)
비고	일반적으로는 주행안전성 기준인 L/600은 L/1500 이상인 승차감기준에 비해 덜 엄격해 보여 승차감기준 한가지로 통일하자는 의견도 있으나, 하중재하가 복선재하 등 훨씬 무겁기 때문에 경우에 따라 이 기준이 더 엄격할 수도 있음. 따라서 유럽이나 일본이 이 기준을 유지하고 있는 것으로 판단됨.	

(a) 주행안전성 확보를 위한 연직처짐 검토

EN1991-2의 수직하중(계수를 고려한 LM71, SW/0, SW/2)에 따라 재하되는 구조물의 연직방향 최대처짐은 어떤 궤도에서도 L/600을 넘지 않아야 한다. (주 : 자갈도상궤도 및 콘크리트궤도의 추가적인 연직처짐 제한은 국가별 규정을 따를 수 있다.)

표 2.6 EN1991-2 Table 6.10 처짐 검토를 위한 궤도재하 수

한계상태 및 관련기준	단/복선 궤도		
	1	2	3 이상
주행안전성 Check: 교량 상판 연직처짐 (EN1990 A2.4.4.2.3)	1	1 or 2 (불리한 경우를 재하)	1 or 2 or 3 or more
SLS Check : 승객 승차감 기준 (EN 1990 A2.4.4.3)	1	1	1

하중재하규정은 EN1991-2의 표2.5에 따라 복선 이상 궤도 교량의 경우 단선, 복선,

혹은 3선 등 가장 불리한 경우가 나올 수 있도록 재하한다. 따라서, L/600의 규정은 재하하중이 다르므로 승차감에 대한 규정보다 엄격할 수도 있다.

(b) 승차감을 위한 연직처짐 검토

승객 승차감은 객차내의 연직방향 가속도로 판명한다.

승차감 및 이와 관련된 연직가속도제한이 규정되어야 한다. (주: 이는 개별 프로젝트마다 정의할 수 있다. 추천값은 표 2.7과 같다.)

표 2.7 승차감 추천값

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

- 승차감 지표인 객차 내 수직가속도를 교량의 연직처짐으로 평가할 수 있도록 교량 경간길이, 열차속도, 경간 수, 지지형식의 함수로 구성되었다. 단, 교량-열차 상호 작용해석에 의해 직접적으로 객차내 수직가속도를 구할 수 있다.
- 승차감 검토를 위한 처짐은 충격계수를 고려한 LM71(하중계수 $\alpha=1$)을 단선 재하한 상태에서 구한다.
- 경간 길이나 강성이 크게 변하는 연속교 등 예외적인 구조물의 경우에는 동적해석으로 평가한다.
- 그림 2.8은 ‘매우양호’한 상태의 승차감 기준이며, 다른 레벨(‘양호’ 혹은 보통)의 경우에는 L/8를 다른 레벨인 b_v ’으로 나누어서 사용할 수 있다.
- 그림 2.8은 3련 이상의 단순교에 대한 것이다. 1련의 단순교나 2련의 단순교, 2경간 연속교의 경우에는 그림 2.6의 L/8에 계수 0.7을 곱해서 사용한다. 3경간연속 이상의 연속교에는 계수 0.9를 곱하여 사용한다.
- 그림 2.8은 경간 120m까지 유효하며, 이 이상의 장대교량은 특수해석을 수행한다.

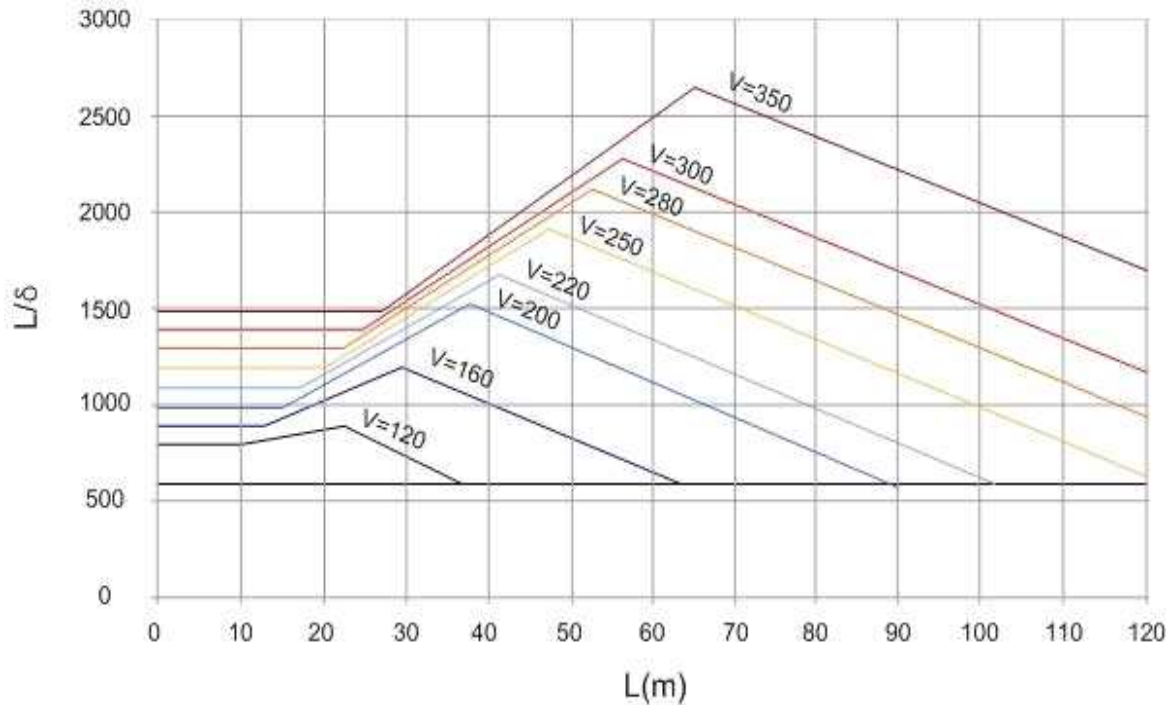


그림 2.8 객차 내 수직가속도 $b_V=1.0\text{m/s}^2$ 와 동일한 3련이상의 단순교에 대한 최대연직처짐 제한 (EN1990)

(3) 일본

일본은 2006년 ‘철도구조물 등 설계표준동해설 - 변위제한’편을 새롭게 제정하면서 세계 최초로 열차종류 및 속도별, 안전성 및 사용성 별도, 평상 주행시 및 지진발생 시 별도로 매우 세분화된 변위 기준을 제정하였다. 이는 안전성과 관련된 변위기준 뿐만 아니라 승객의 승차감을 고려한 매우 발달된 기준이라고 할 수 있다. 이와 같은 기준은 세밀한 교량/열차 상호작용 해석 및 다수의 현장실험 결과를 토대로 제정된 것이다.

상시 주행시 안전성 확보를 위한 처짐기준은 차륜플랜지각도와 한계탈선계수의 관계, 즉, 윤중감소율, 탈선계수, 차량 동요가속도 한계의 관계에서 유추하였으며 이를 연직처짐으로 환산한 기준값은 표 2.8과 같다.

사용성(승차감) 확보를 위한 연직처짐 기준은 그림 2.9와 같이 Janeway의 기준을 참조하여 차체 연직가속도의 한계를 통해 열차별, 교량 경간별 기준을 표 2.9와 같이 정하였다.

표 2.8 상시의 주행안전성에서 정해지는 처짐기준 (안전성 - 일본)

열차 종류	연 수	최고 속도 (km/h)	거더 또는 부재의 스패น 길이 L_b (m)									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100 이상
신간선	단 선	260	$L_b/700$									
		300	$L_b/900$									
		360	$L_b/1100$									
	복 선	260	$L_b/1200$					$L_b/1400$				
		300	$L_b/1500$					$L_b/1700$				
		360	$L_b/1900$					$L_b/2000$				
전차, 내연동차	단 선	130	$L_b/500$									
		160	$L_b/500$									
	복 선	130	$L_b/500$									
		160	$L_b/600$									
기관차	단 선	130	$L_b/400$									
	복 선	130	$L_b/600$				$L_b/700$					

표 2.9 승차감에서 정해지는 처짐기준 (사용성 - 일본)

열차 종류	연 수	최고 속도 (km/h)	거더 또는 부재의 스패น 길이 L_b (m)									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100 이상
신간 선	단 선	260	$L_b/2200$	$L_b/1700$	$L_b/1200$	$L_b/1000$						
		300	$L_b/2800$	$L_b/2000$	$L_b/1700$	$L_b/1300$	$L_b/1100$					
		360	$L_b/3500$	$L_b/3000$	$L_b/2200$	$L_b/1800$	$L_b/1500$					
	복 선	260	$L_b/2200$	$L_b/1700$								
		300	$L_b/2800$	$L_b/2000$								
		360	$L_b/3500$	$L_b/2800$	$L_b/2200$							
전차, 내연 동차	단 선	130	$L_b/500$									
		160	$L_b/500$									
	복 선	130	$L_b/900$						$L_b/700$			
		160	$L_b/1100$						$L_b/800$			
기관 차	단 선	130	$L_b/500$									
	복 선	130	$L_b/900$						$L_b/700$			

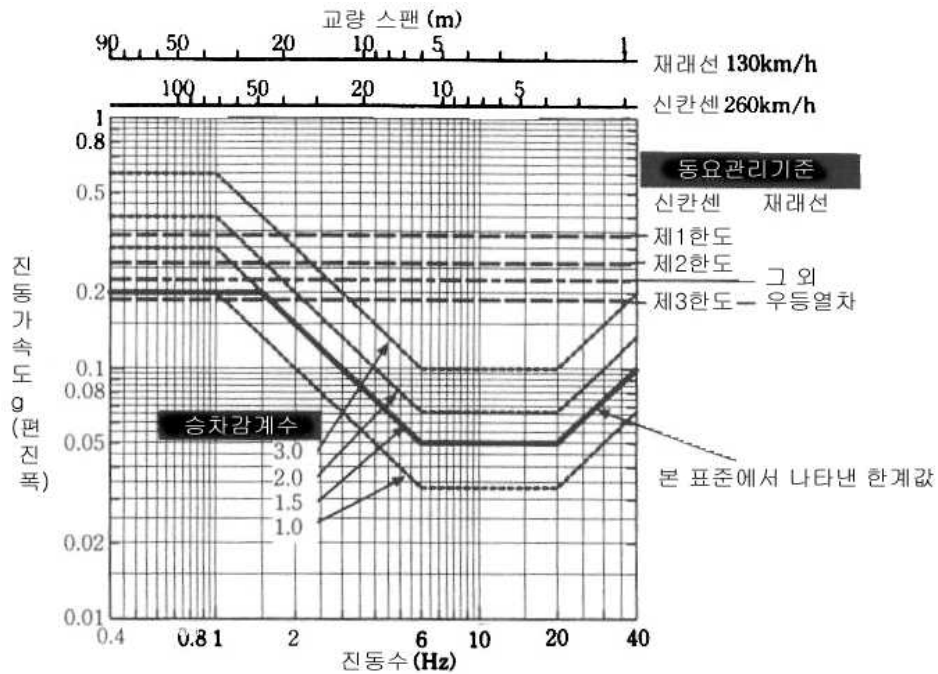


그림 2.9 도리의 힘에 의한 연직 방향의 승차감의 설계 한계값

2.2.7 감쇠비

교량의 감쇠비 가정은 동적해석시 매우 중요한 요소이다. 특히 공진속도 부근에서 구조물의 동적응답은 감쇠비에 의해 절대적으로 영향을 받으므로 고속철도 등 공진을 필연적으로 경험하는 구조물에서는 이에 대한 가정이 설계에 큰 영향을 줄 수 있다. 감쇠비의 영향은 그림 2.10과 같이 매우 큼을 알 수 있다.

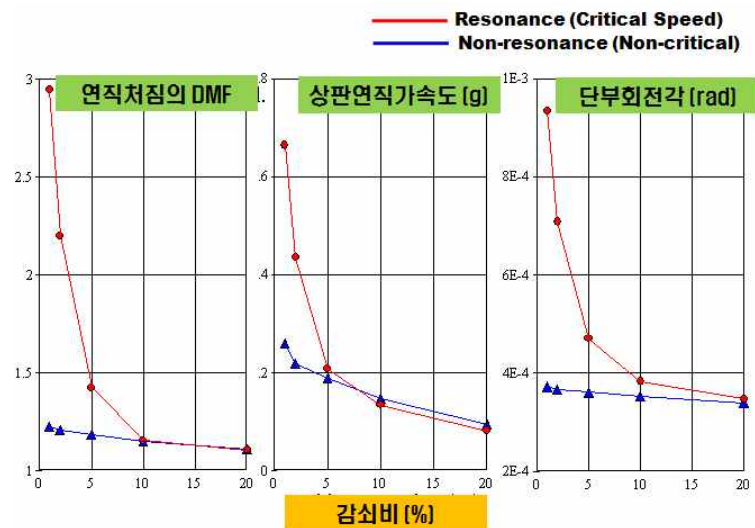


그림 2.10 임계속도 주행 시 구조물 응답에 대한 감쇠비 영향

그림 2.10은 KTX 실 열차를 대상 교량의 공진을 유발하는 임계속도에서 주행시켰을 때의 동적처짐의 증폭, 상판 연직가속도, 단부회전각을 나타낸 것으로 감쇠비가 작아짐에 따라 응답의 크기가 크게 증가함을 알 수 있다. 특히 감쇠비 5% 이하에서는 대단히 큰 응답이 발생하지만, 감쇠비가 5%를 초과하게 되면 공진 발생 시에도 매우 적은 응답이 나타남을 알 수 있다.

Eurocode에서는 기존에 콘크리트 구조물에 대해 2~5%에 감쇠비를 적용하였으나 2003년 발간된 EN1991-2 규정에서 표 2.10과 같이 변경하였다. 이 감쇠비 하한치는 매우 엄격한 값으로 볼 수 있다. 이와 같은 규정은 그림 2.11과 같은 현장실험을 통해 제정되었다.

표 2.10 구조형식별 감쇠비 하한값

교 량 형 식	감쇠비 하한값 (%)	
	경 간 < 20m	경 간 ≥ 20m
강구조, 합성구조	$0.5+0.125(20-L)$	0.5
프리스트레스트 콘크리트	$1.0+0.07(20-L)$	1.0
Filler Beam, 철근콘크리트	$1.5+0.07(20-L)$	1.5

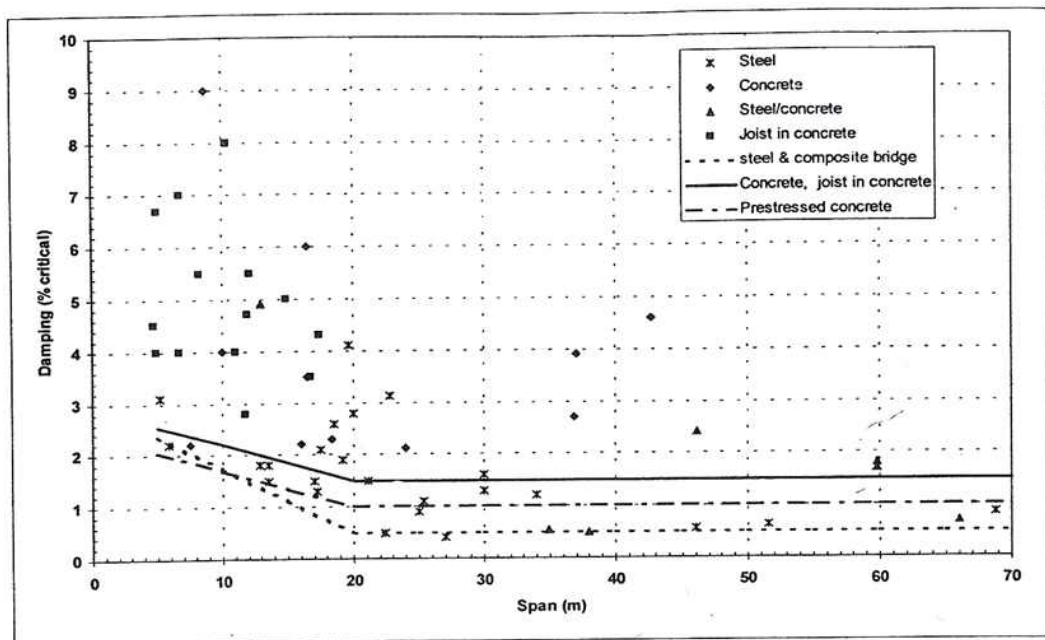


그림 2.11 Eurocode의 감쇠비 기준제정의 배경이된 실험결과

감쇠비의 경우 일반 주행속도에서는 동적응답에 큰 영향을 미치지 못하며 공진을 유발하는 임계속도 부근에서 매우 큰 영향을 미친다. 그러나, 실제 구조물의 감쇠는 점성감쇠와 더불어 구조적 감쇠특성이 있으며 처짐이력 등에 영향을 받아 큰 응답이 발생할 경우 감쇠비도 커질 수 있다. 또한 기존 연구들의 실험결과 Eurocode의 감쇠비 하한치는 과도한 적용으로 판단하여 스페인 등에서는 자율적으로 상향된 감쇠비를 적용하는 사례도 있으며, 일본 역시 PSC를 포함한 콘크리트 교량에 대해 2%의 감쇠비를 적용하고 있다.

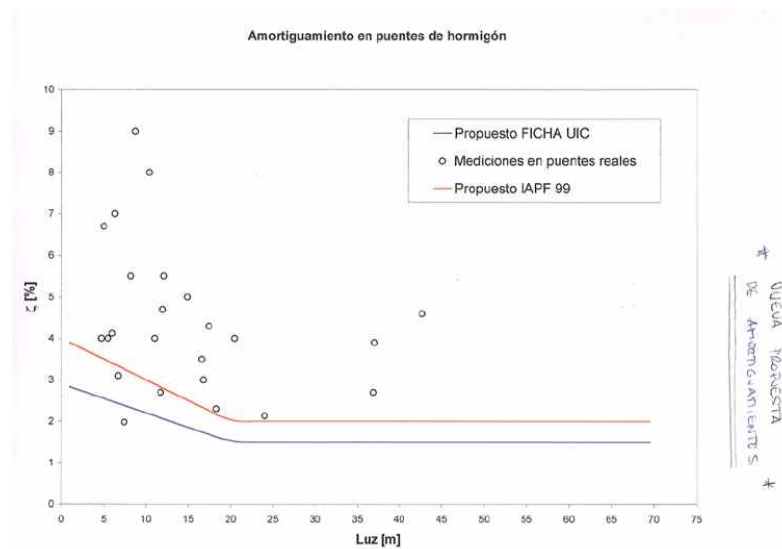


그림 2.12 스페인(IAPF)의 감쇠비 규정 (PSC = 2.0%)

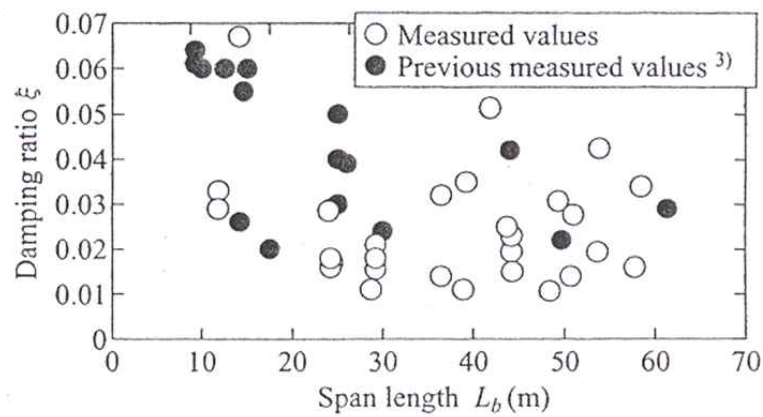


그림 2.13 일본의 감쇠비 규정 (PSC, 콘크리트 교량 = 2.0%)

국내 철도설계기준 (노반편)에서도 Eurocode를 기반으로 자체적인 실험을 통해 표 2.11과 같이 감쇠비 기준을 정하였다. Eurocode와 다른 점은 강합성 구조에 대해서는 보다 완화된 1.0% 적용이 가능하다는 점이다.

표 2.11 구조형식별 감쇠비 (철도설계기준 노반편 (2013))

교 량 형 식	감쇠비 하한값 (%)	
	경간 < 20m	경간 ≥ 20m
강구조	$0.5+0.125(20-L)$	0.5
강합성구조, PSC구조	$1.0+0.07(20-L)$	1.0
철근콘크리트	$1.5+0.07(20-L)$	1.5

3. 동적재하실험 Data 분석

3.1 열차의 속도계산

열차의 속도는 계측된 처짐의 파형을 통해 계산한다. 그림과 같이 열차 주행시 얻어진 동적응답처짐 파형중 선두 및 후두부의 동력차를 제외하고 객차부에 의해 발생하는 부분의 n 개의 Cycle을 이용하여 아래와같이 계산한다.

$$V_t = \frac{n \times D_t}{t_e - t_i} \times 3.6 (km/hr)$$

V_t : 주행열차의 속도

n : 처짐파형의 Cycle수

D_t : 열차의 대차중심간격

t_i : 첫 번째 Cycle의 정점에 해당하는 시간 (s)

t_e : n 번째 Cycle의 정점에 해당하는 시간 (s)

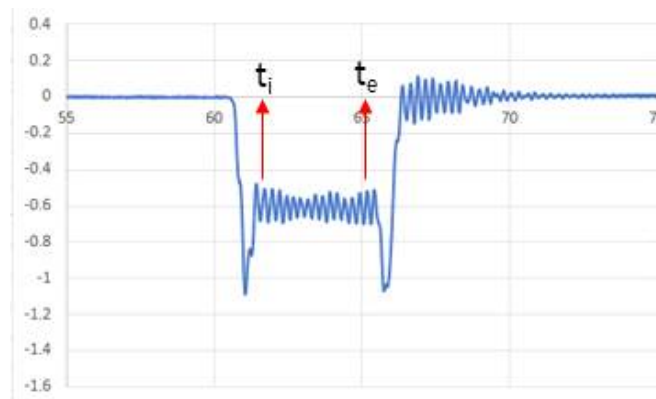


그림. 열차 주행시 처짐 파형

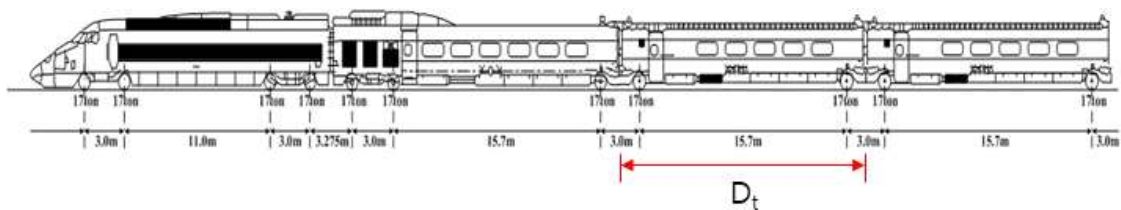


그림. KTX열차의 제원

주행열차하중에 대한 임계속도 산정은 아래 식과 같다.

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

여기서, ω_1 은 교량의 첫번째 휨 고유진동수이며, S_{eff} 는 열차의 지배적타격간격(객차 간 중심간격)으로 표 2.14와 같다.

표 2.14 국내 운행열차의 유효타격간격

(1)	구 분	유효타격간격
	새마을호, 무궁화호, 틸팅열차	23.50m
	화물열차 (유조차)	13.95m
	KTX, KTX 산천	18.70m
	HEMU-430X	24.30m

3.2 가속도 데이터 처리 방법

가속도 신호는 200Hz 이상의 측정빈도로 신호를 수집하며, 계측된 데이터는 KDS 24 10 10 교량설계 일반사항기준 (일반설계법)의 4.2.3 주행안전성 및 승차감 검토 기준에 따라 다음의 값 중 최대값 이상으로 Low Pass 필터링한다. 일반적으로 고속철도교량은 30Hz Low Pass 필터링하며 일반선은 계측대상 교량의 동적물성값에 따라 기준을 적용한다. 단, Filtering 기준은 경우에 따라 상향될 수 있다. 가속도값 결과는 필터링 정보를 함께 기입하여 제출한다

가. 30Hz

나. 고유진동수의 1.5배

다. 3번째 진동모드

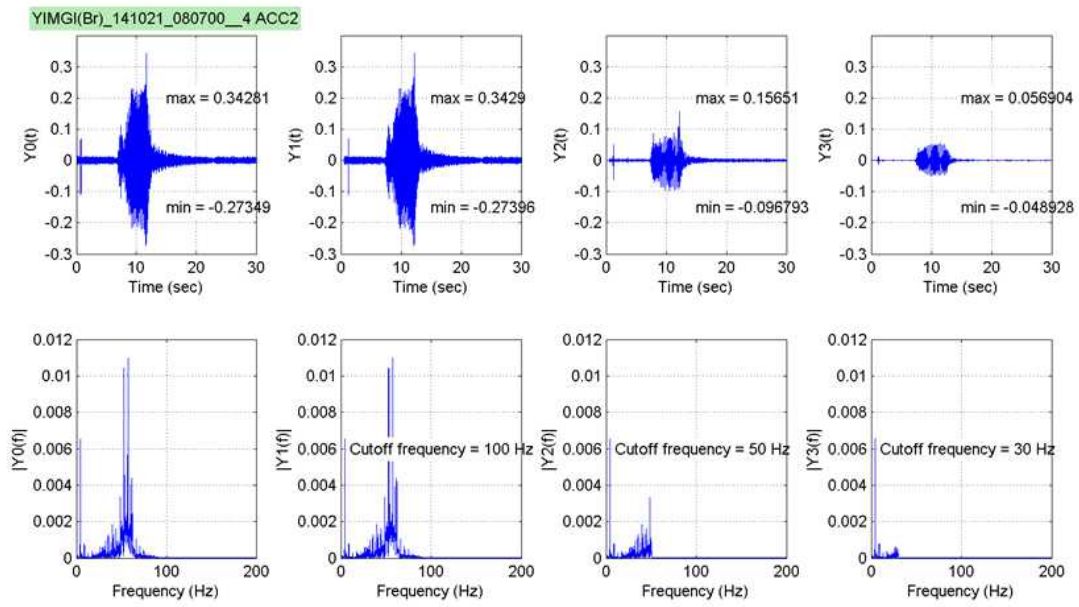


그림. 가속도 신호 Low Pass Filter의 예

4. 동적재하실험 항목별 측정 및 분석 예시

4.1 연직처짐

대상 교량에 설치한 변위계로부터 획득된 데이터를 이용하여 시험열차 통과시 교량 1/2 지점에서 발생한 측정회차별 최대 연직처짐 변위 측정예시를 표4-1-1, 표4-1-2 와 같이 정리하였다. 변위계의 방향성은 솟음(+), 처짐(-)이며 단위는 mm이다.

표 4-1-1 측정회차별 최대 연직처짐 변위

측 정 회 차	DT01 (mm)	DT02 (mm)	비고
#1	-0.850	-0.169	
#2	-0.128	-0.876	
#3	-0.817	-0.176	
#4	-0.128	-0.873	
#5	-0.841	-0.174	
#6	-0.108	-0.879	

표 3-2-2 측정 회차별 연직처짐 변위 그래프

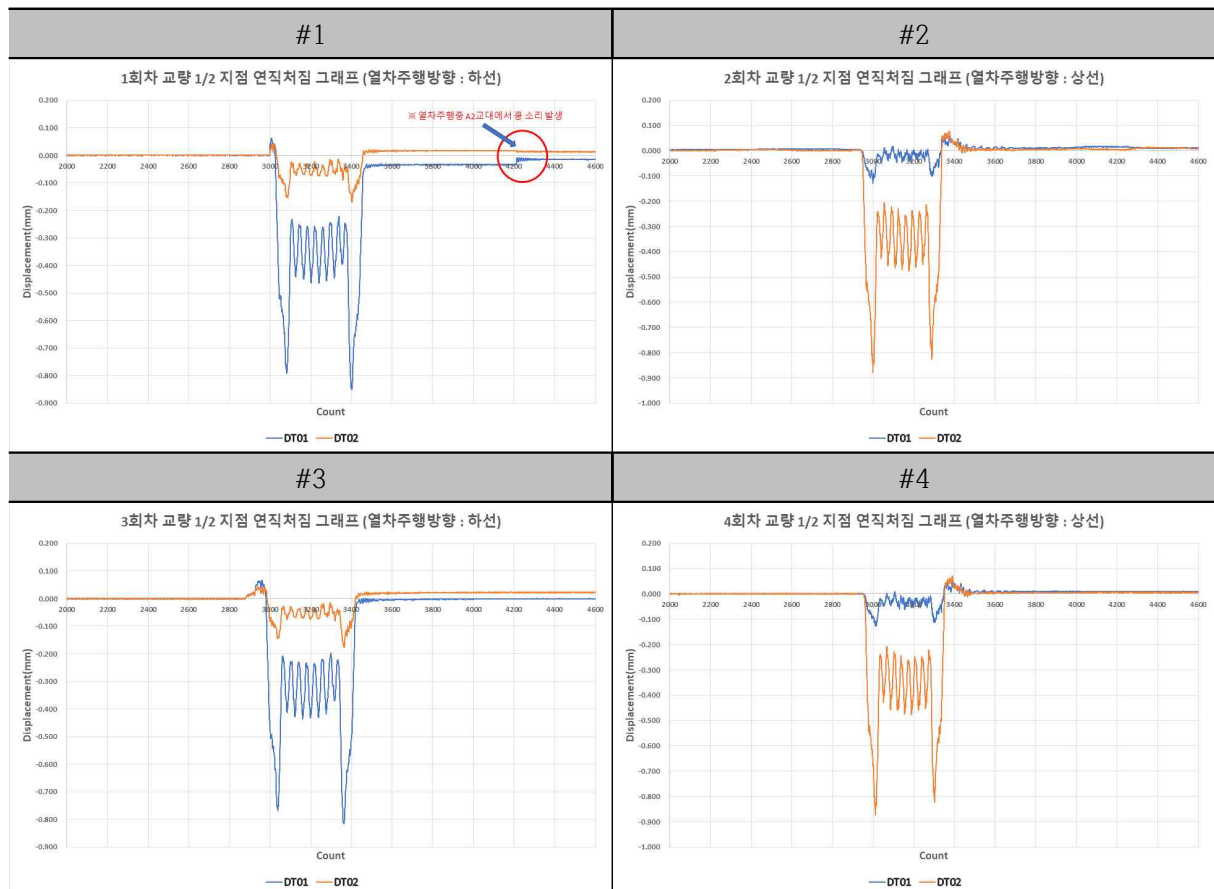


표 4-2-2 측정 회차별 연직처짐 변위 그래프 (계속)

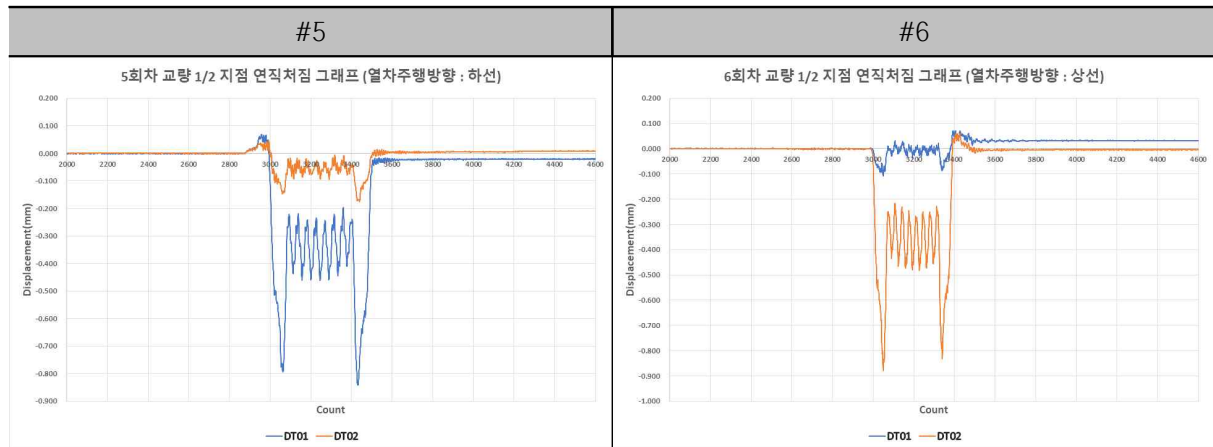


표4-2-3은 철도설계기준(노반편)에 따른 최대 연직처짐 판정기준이다. 시험대상교량은 경간 25m의 교량이고 열차주행속도 200km/h 의 조건하에 시험을 실시하였으므로 판정 기준은 20.83mm ($L/1200$, $L=25m$) 이다. 따라서, 본 시험대상교량은 모든 측정회차에 대하여 판정기준에 만족한다.

표 4-2-3 철도설계기준(노반편)에 따른 최대 연직처짐 판정기준

설계속도 (V)(km/h)	거더 또는 부재의 경간(m)										
	0~20	25	30	35	40	45	50	55	60~75	80~95	100~120
$270 < V \leq 350$	L /1500	L /1500	L /1600	L /1750	L /1900	L /2100	L /2200	L /2350	L /2500	L /2200	L /1900
$200 < V \leq 270$	L /1300	L /1400	L /1500	L /1600	L /1700	L /1900	L /2000	L /2100	L /2000	L /1700	L /1400
$V \leq 200$	L /1100	L /1200	L /1300	L /1500	L /1500	L /1400	L /1300	L /1200	L /1100	L /800	L /600

4.2 단부회전각

시험열차 통과시 교량의 단부에서 발생한 연직처짐 변위값을 이용하여 측정회차별 최대 단부회전각을 계산하였다. 계산식은 그림3-2-1 과 같으며, 그 결과를 표3-2-4와 같이 정리하였다. 변위계의 방향성은 솟음(+), 처짐(-)이며 단위는 mm이다. 단부회전각의 단위는 radian 이다.

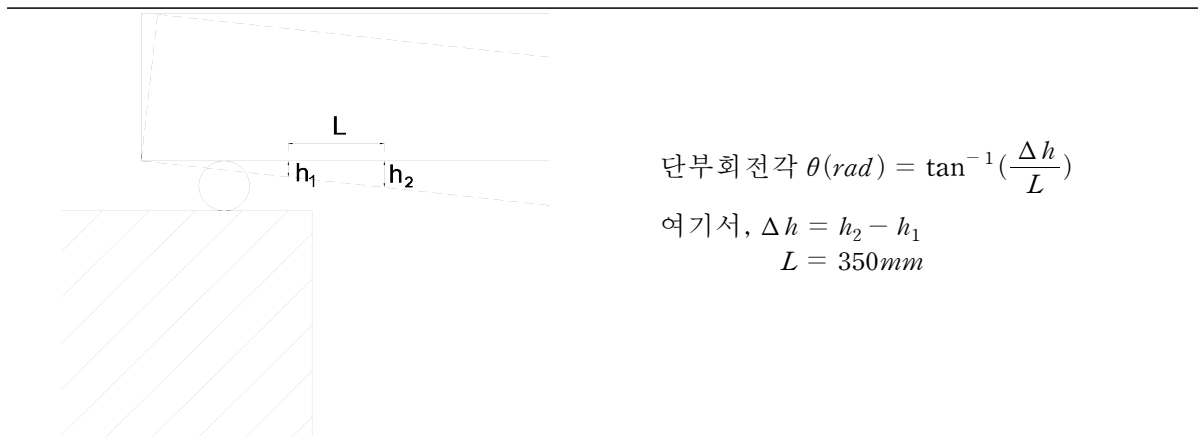


그림 4-2-1 단부회전각 계산식

표 44-2-4 측정회차별 최대 단부회전각

측 정 회 차	DT03	DT04	DT04-DT03	단부회전각(rad)	비고
#1	-0.104	-0.058	0.046	13.14×10^{-5}	
#3	-0.105	-0.057	0.047	13.52×10^{-5}	
#5	-0.105	-0.056	0.049	14.02×10^{-5}	
측 정 회 차	DT05	DT06	DT06-DT05	단부회전각(rad)	비고
#2	-0.116	-0.063	0.053	15.17×10^{-5}	
#4	-0.114	-0.064	0.051	14.51×10^{-5}	
#6	-0.110	-0.062	0.049	13.88×10^{-5}	

UIC 774-3에 따르면 최대 단부회전각 판정기준은 $\leq 50 \times 10^{-5}(\text{rad})$ 이다. 따라서, 본 시험대상교량은 모든 측정회차에 대하여 판정기준에 만족한다.

4.3 면틀림

대상 교량에 설치한 변위계로부터 획득된 데이터를 이용하여 측정회차별 최대 면틀림을 계산하였다. 계산식은 그림4-3-1 과 같으며, 그 결과를 표4-3-1와 같이 정리하였다.

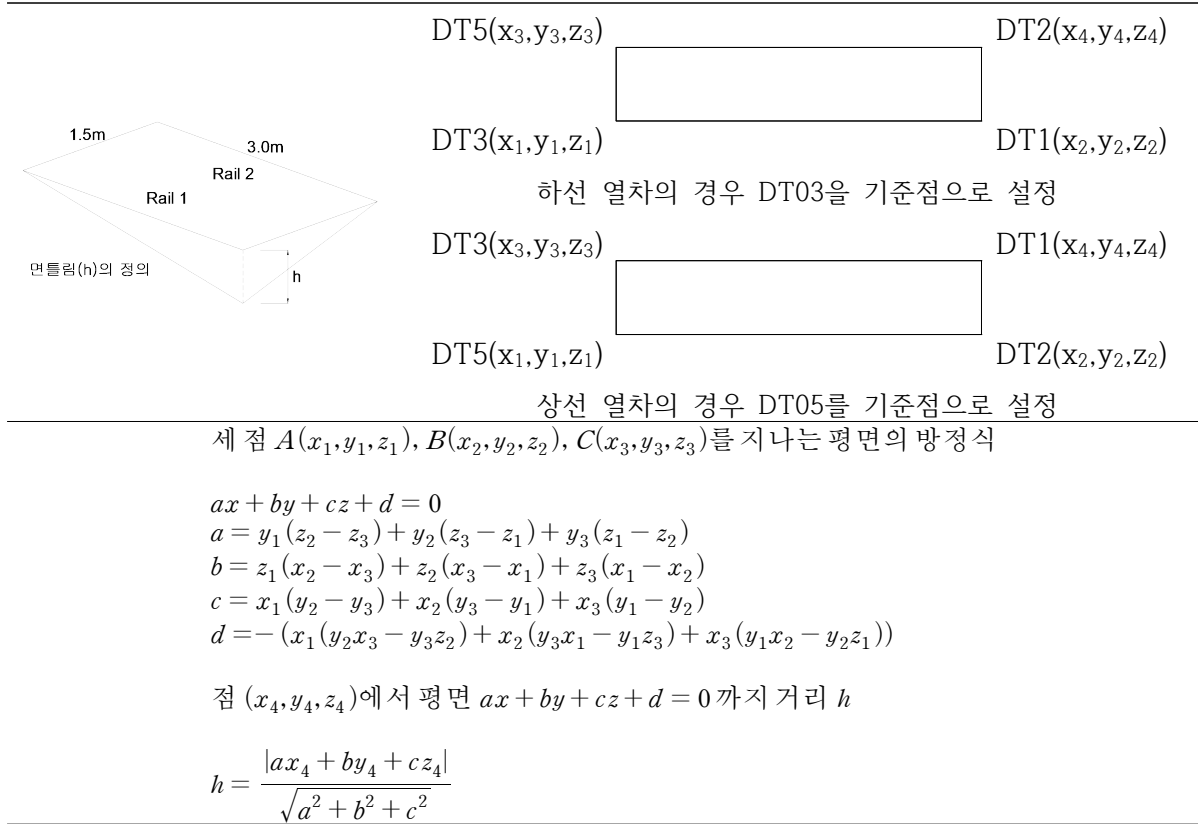


그림 4-3-1 면틀림 계산식

표 4-3-1 측정회차별 면틀림(상판의 단위길이(3m)당 최대횡방향비틀림)

측 정 회 차	DT01	DT02	DT03	DT05	면틀림(mm/3m)
#1	-0.844	-0.138	-0.102	-0.028	0.1517
#2	-0.128	-0.876	-0.019	-0.116	0.1565
#3	-0.812	-0.165	-0.103	-0.021	0.1358
#4	-0.127	-0.873	-0.020	-0.112	0.1572
#5	-0.840	-0.168	-0.102	-0.029	0.1442
#6	-0.108	-0.879	-0.019	-0.110	0.1634

※ 그림3-2-2의 면틀림의 정의와 같이 3m×1.5m 의 간격을 두고 변위계를 설치해야하지만 본 시험에서는 11.4m×8m의 간격을 두고 변위계를 설치하여 시험을 진행하였다. 따라서, 면틀림 기준거리와 실제 측정거리의 비를 이용하여 면틀림값을 보정하였다.

표 4-3-2는 철도설계기준(노반편)에 따른 면틀림 판정기준이다. 3m 기준 면틀림 변화량을 $\leq 1.2\text{mm}/3\text{m}$ 으로 보았을 때 본 시험대상교량은 모든 측정회차에 대하여 판정기준에 만족한다.

표 4-3-2 철도설계기준(노반편)에 따른 면틀림 판정기준

설계속도(V) (km/h)		면틀림(mm/m)	3m 기준 면틀림 변화량
표준열차하중재하	$V \leq 200$	1.0	3.0mm/3m
	$200 < V$	0.5	1.5mm/3m
실 운행열차 동적해석		0.4	1.2mm/3m

4.4 연직가속도

대상 교량에 설치한 가속도계로부터 획득된 데이터를 이용하여 시험열차 통과시 교량 1/2 지점에서 발생한 측정회차별 최대 연직가속도를 표4-4-1, 표4-4-2와 같이 정리하였다. 가속도계의 방향성은 상향(-), 하향(+)이며 단위는 g 이다.

표 4-4-1 측정회차별 최대 연직가속도 (절대최대값)

측 정 회 차	ACC01	ACC02	비고
#1	0.028	0.013	
#2	0.031	0.043	
#3	0.031	0.014	
#4	0.028	0.043	
#5	0.029	0.019	
#6	0.028	0.044	

표 4-4-2 측정 회차별 연직가속도 그래프

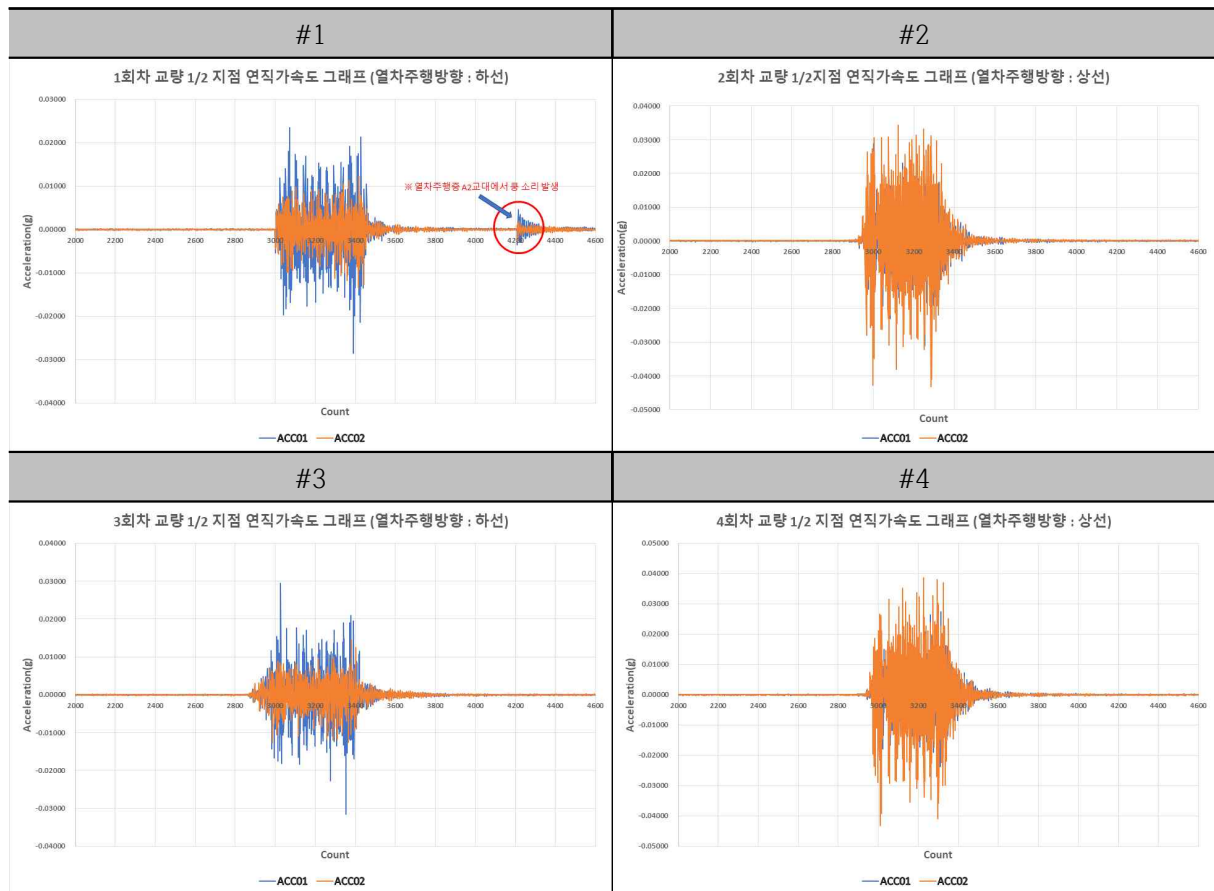


표 4-4-3 측정 회차별 연직가속도 그래프 (계속)

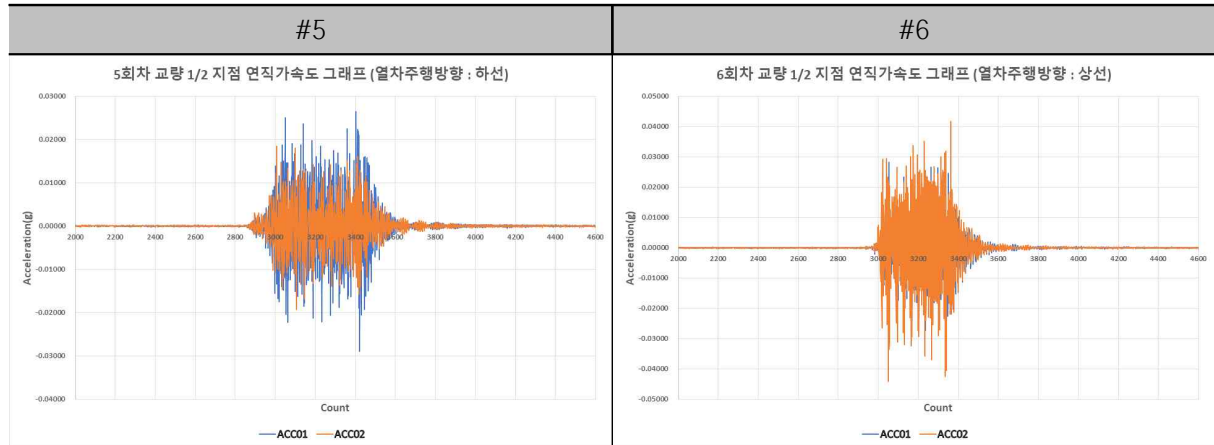


표4-4-4는 철도설계기준(노반편)에 따른 최대 연직가속도 판정기준이다. 자갈도상궤도의 연직가속도 판정 기준은 $\leq 0.35g$ 이다. 따라서, 본 시험대상교량은 모든 측정회차에 대하여 판정기준에 만족한다.

표 4-4-4 철도설계기준(노반편)에 따른 면틀림 판정기준

구 분	기 준	비 고
자갈도상궤도	$\leq 0.35g$	
콘크리트궤도	$\leq 0.5g$	