

제 5장 재하시험

5.1 개요

5.2 재하시험 계획

5.3 정적재하시험

5.4 동적재하시험

5.5 재하시험 결과

5.6 진동 영향 평가

제 5장 재하시험

5.1 개요

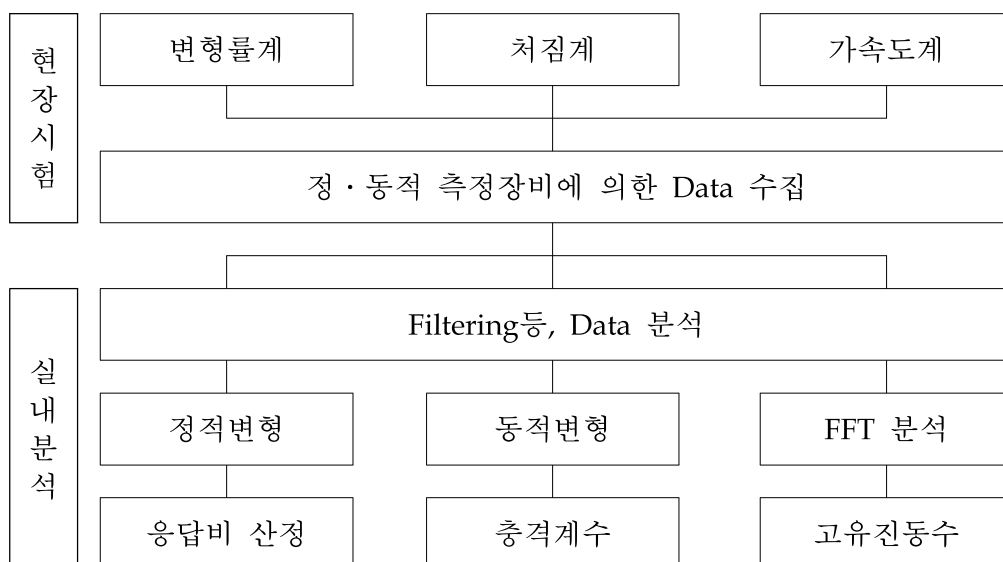
재하시험은 축중을 정한 시험차량의 재하에 따른 대상구조물의 실거동을 측정함으로써 정·동적 거동특성을 파악하고 공용 내하력을 평가하기 위하여 실시한다.

본 과업에서는 청도천1교의 진동영향과 관련하여 그에 대한 평가절차의 수행을 주요 목적으로 하였다.

일반적으로 재하시험은 하중의 재하방법에 따라 정적재하시험 및 동적주행시험으로 대별된다. 정적재하시험은 작용외력에 대한 대상교량의 정적거동특성을 파악하고 정적변형률 및 응력의 응답비 등 내하력평가를 위한 제반계수를 산정하기 위하여 실시한다.

동적주행시험은 기본적으로는 구조물의 동적거동을 조사·측정하기 위한 것으로 대상교량의 실충격계수와 실고유진동수 등을 측정·분석하여 교량의 동적거동특성을 파악하기 위하여 실시한다.

정·동적 재하시험의 측정체계는 【그림 5.1.1】과 같다.



【그림 5.1.1】 정·동적 재하시험 측정체계

5.1.1 안전성 검토

본 교량 재하시험의 주요 목적은 다음과 같다.

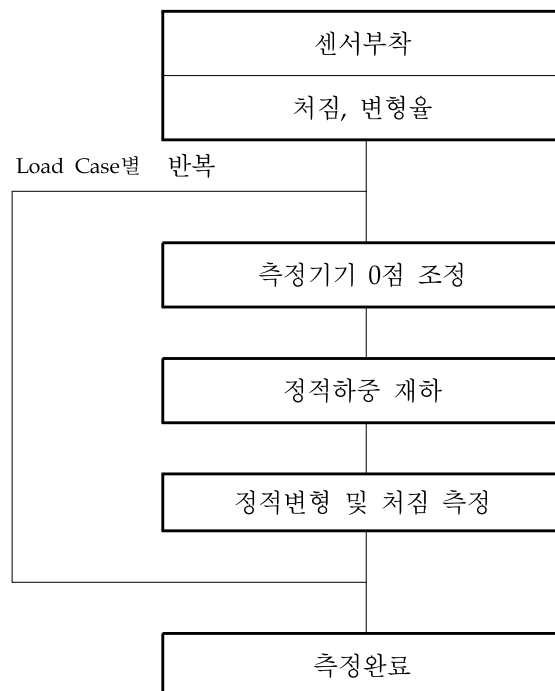
1. 진동영향평가(처짐, 진동 등에 대한 사용성 검토)
2. 교량의 정적 및 동적 실거동 분석
3. 해석값과 실측값을 통한 응답비 비교 및 분석
4. 교량의 동적특성 파악
5. 내하력 평가를 위한 응력보정계수 도출

5.1.2 정적재하시험

정적재하시험은 교량의 정적거동을 계측하기 위한 시험방법으로서, 미리 선정된 지점에 측정하고자 하는 목적에 맞는 센서를 설치한 후, 축중을 알고 있는 시험차량을 각 Load Case 별로 이동시키면서 하중의 횡분배를 측정할 수 있는 재하경우로 측정한다.

시험차량을 소정의 Load Case에 재하 완료 후 정적응답은 구조체의 응답시간을 고려한 최소 1분간 대기하여 측정한다.

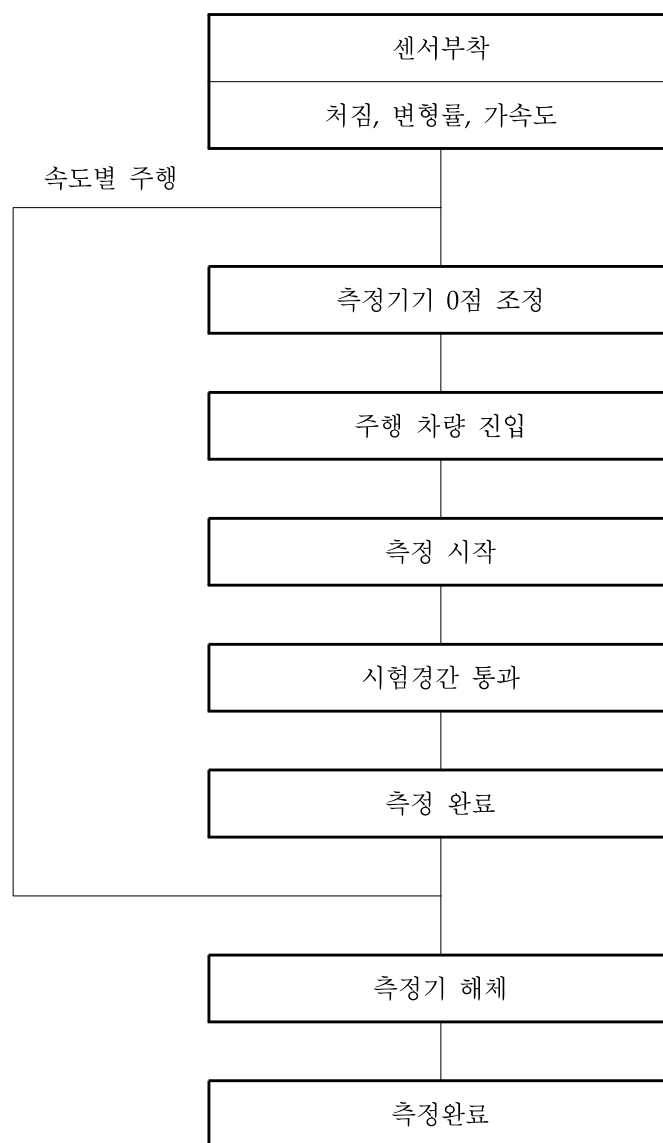
이때 각종 센서의 부착위치 및 시험차량의 재하위치는 전문기술자의 지식 및 경험에 의해 결정되며, 일반적으로 최대 응답 발생 부위가 된다.



【그림 5.1.2】 정적 재하시험 절차

5.1.3 동적재하시험

주행차량에 의한 교량의 동적거동을 파악하는 것은 실제 교량이 가지고 있는 저항능력, 강성 및 사용성의 한계를 평가하는데 매우 중요하다. 이와 같은 목적을 위해 실시되는 동적주행시험은 시험차량의 주행에 의해 유발되는 동적효과 및 제반 동특성을 추정하여 대상교량의 안전성 및 사용성 평가를 위한 기초자료를 도출하고자 실시한다. 동적재하시험은 동적거동특성을 파악하고자 하는 대상부재에 측정항목에 따른 센서를 부착하고 시험차량의 주행속도를 단계적으로 증가하면서 주행하며, 이 때 측정 지점에 발생하는 처짐 및 가속도 등을 측정하여 교량의 동적거동상태를 파악하고자 한다.



【그림 5.1.3】 동적 재하시험의 절차

5.2 재하시험 계획

5.2.1 재하시험 장비

본 교량 재하시험에 사용된 측정기기 및 센서의 종류는 아래의 【표 5.2.1】 과 【표 5.2.2】와 같다.

【표 5.2.1】 재하시험 측정기기

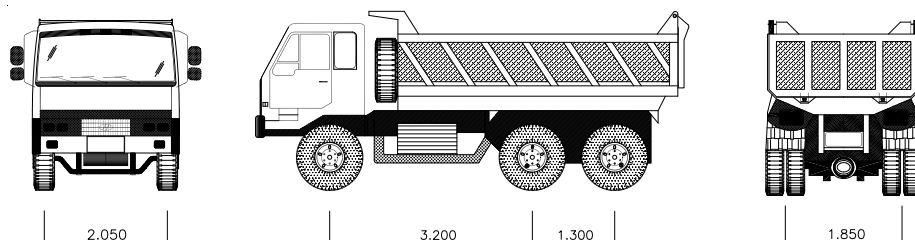
기 기 명	모 델 명	용 도	비 고
Digital Strain Meter	Ganthner	정 · 동적 측정기	독일, G.I사
Software	DIADEM	데이터 분석, 저장, 디스플레이	미국, NI사

【표 5.2.2】 센서의 종류

센 서 명	모 델 명	용 도	비 고
Strain Gauge	FLA-5-11-1L	정 · 동적 강재 변형률 측정	일본, TML사
Accelerometer	ARF-10A	가속도 측정 (1축)	일본, TML사
Displacement Meter	OU-30	정 · 동적 변위 측정	일본, TML사

5.2.2 재하시험 차량

재하차량은 15t 덤프트럭 1대에 모래를 적재하여 사용하였고, 【표 5.2.3】 및 【그림 5.2.1】에 재하차량의 제원 및 축중을 나타내었다.



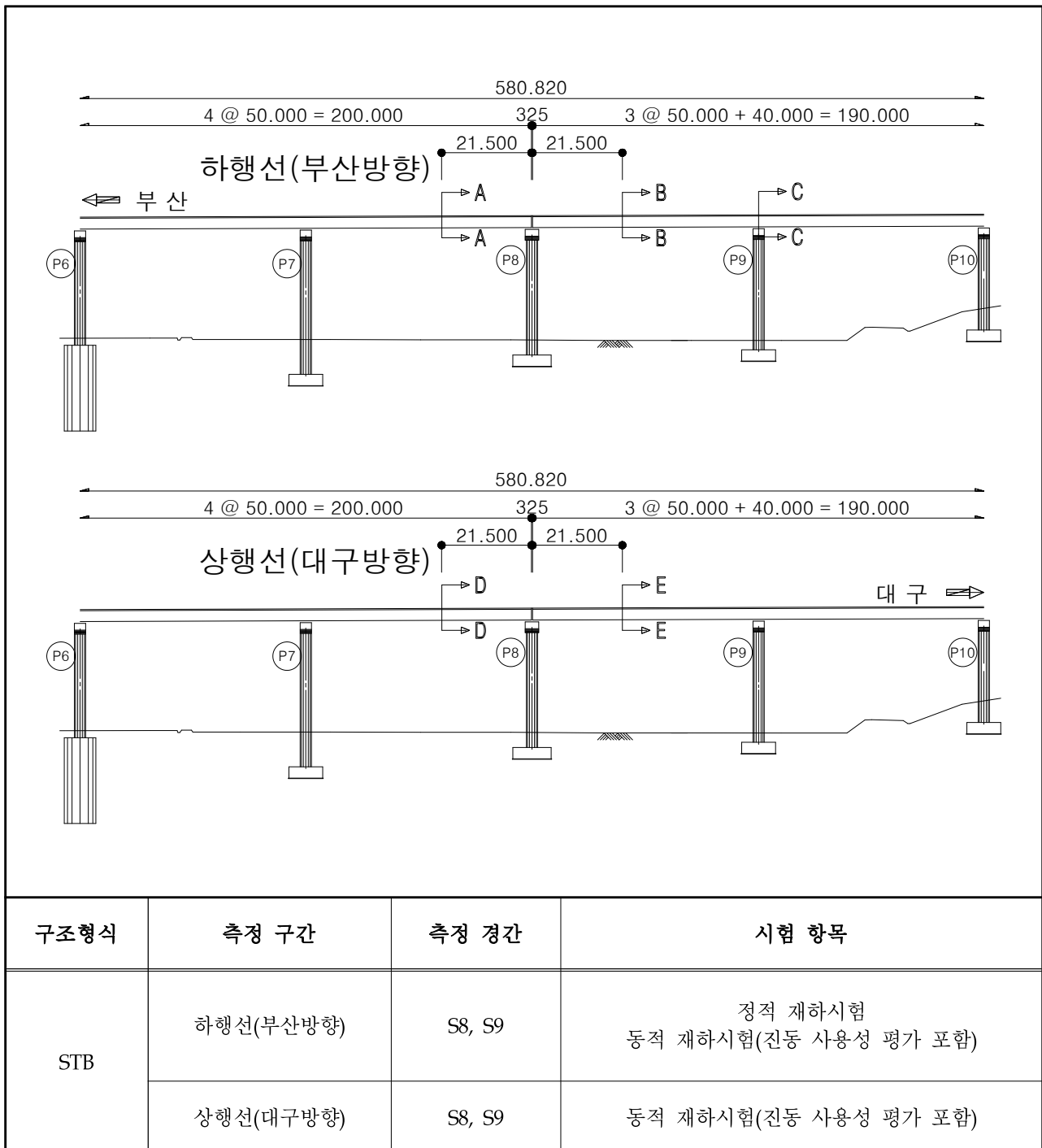
【그림 5.2.1】 시험차량의 제원

【표 5.2.3】 시험차량의 제원 및 축중하중

구 분	총중량 (tonf)	전륜 (tonf)	중륜 (tonf)	후륜 (tonf)	비 고
축별 중량	24.80	6.18	9.51	9.11	

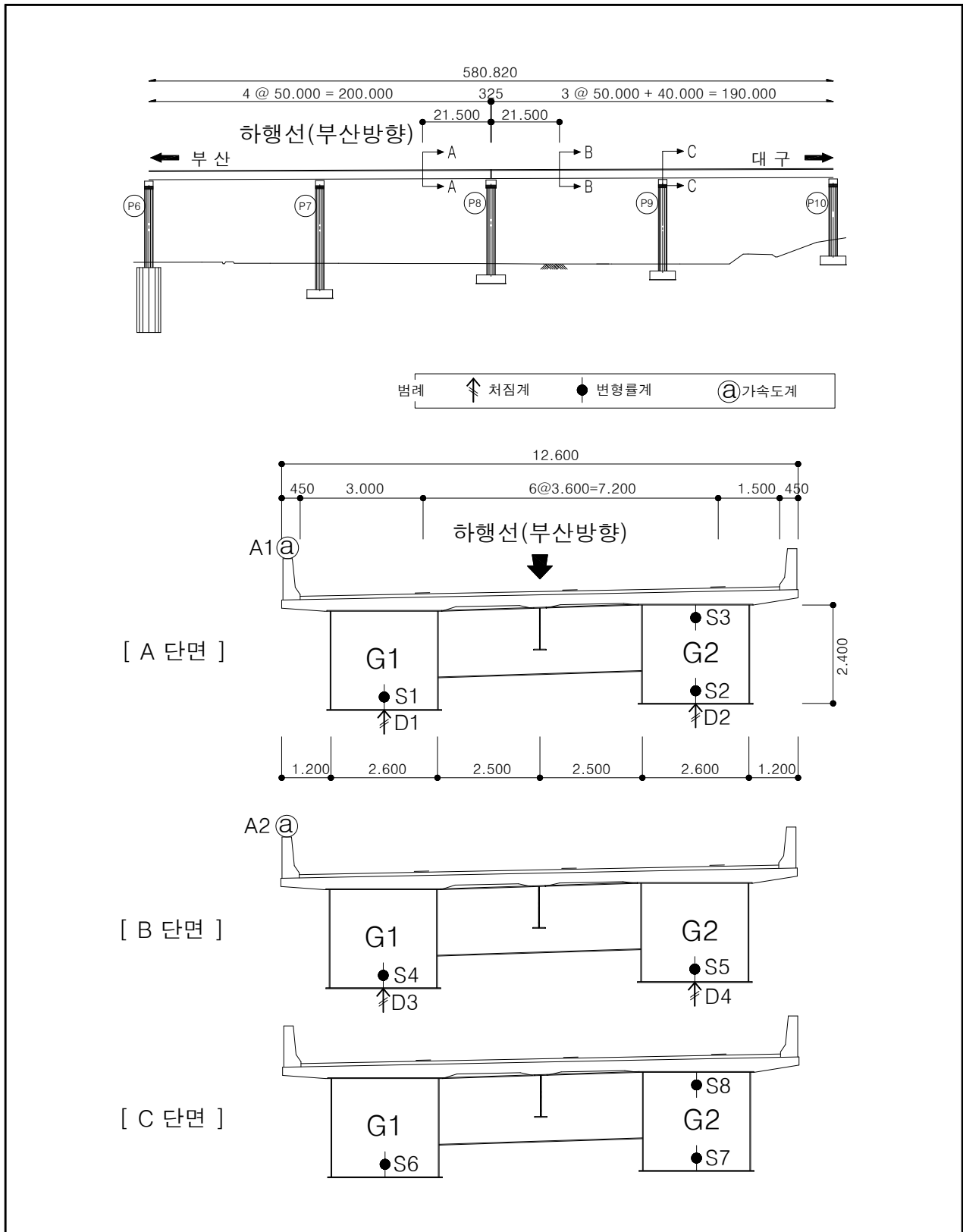
5.2.3 시험경간 선정

재하시험 대상 경간은 진동에 대한 민원발생 구간인 하행선(부산방향)을 주요 시험 대상으로 하였으며, 세부 단면은 외관조사 시 진동이 가장 크게 느껴지는 2개 경간(S8, S9)을 선정하고, 사전 구조해석을 통하여 최대 모멘트 발생단면을 산정하여 시험단면을 결정하였다. 또한 상행선의 동일 단면에 대하여 추가 시험을 실시하였다.

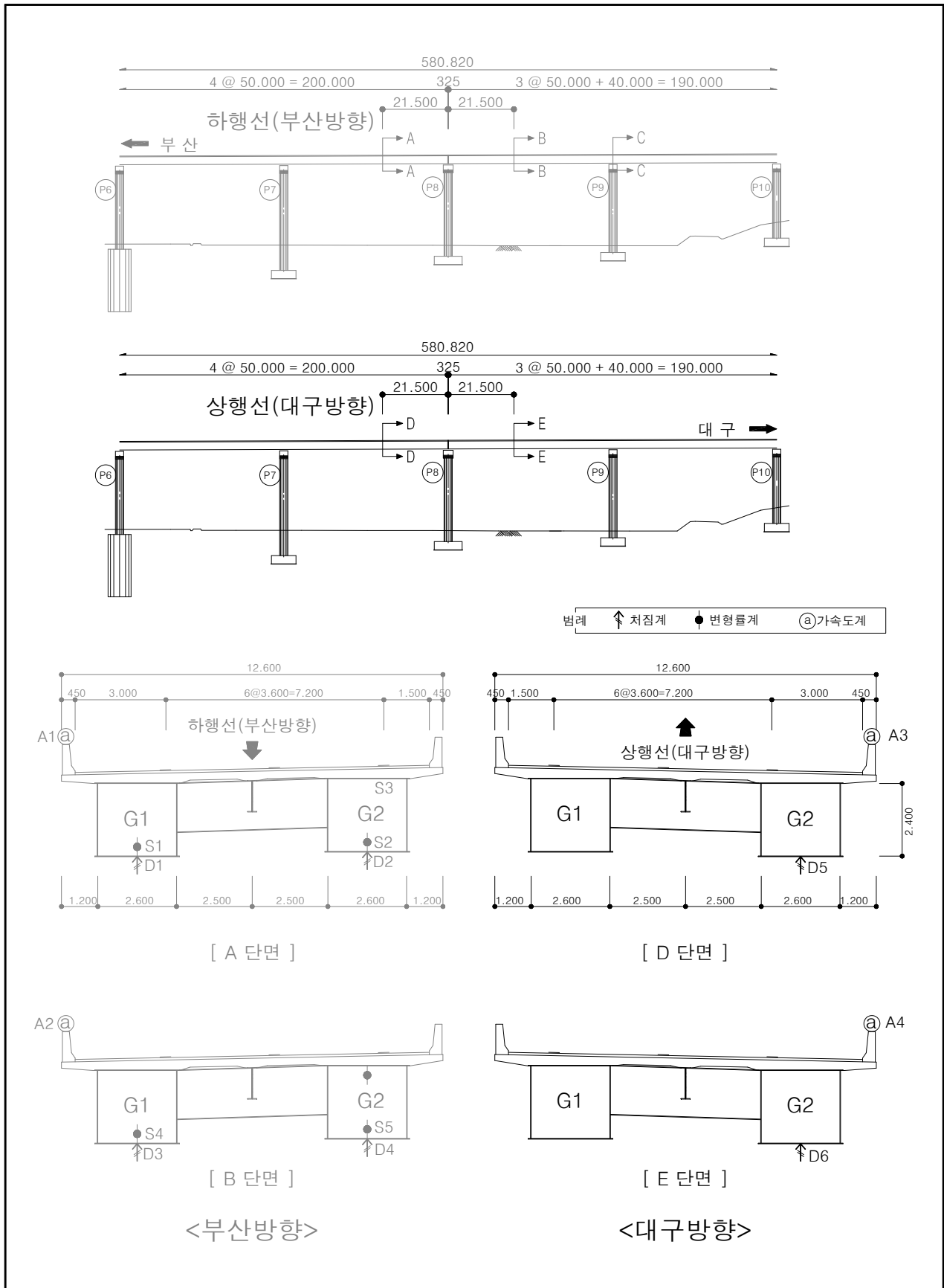


【그림 5.2.2】 재하시험 시험경간 선정

5.2.4 센서설치 위치 및 수량



【그림 5.2.3】 센서설치 위치(부산)



【그림 5.2.4】 센서설치 위치(대구)

【표 5.2.4】 센서 종류 및 수량

기 호	센서종류	수 량
●	강재 변형률계	8
↑	처짐계	6
@	가속도계	4

【표 5.2.5】 재하시험 구간 Gauge 번호, 부착위치 및 목적

구분	위치				Gauge No.	측정목적
처짐계	부산방향	8경간	G1	하연	D1	정적변위, 동적변위(충격계수, 진동영향평가)
			G2	하연	D2	정적변위
		9경간	G1	하연	D3	정적변위, 동적변위(충격계수, 진동영향평가)
			G2	하연	D4	정적변위
	대구방향	8경간	G2	하연	D5	동적변위(충격계수, 진동영향평가)
		9경간	G2	하연	D6	동적변위(충격계수, 진동영향평가)
변형률계	부산방향	8경간	G1	하연	S1	정모멘트부 정적변형률
			G2	하연	S2	정모멘트부 정적변형률
				상연	S3	중립축 산정
		9경간	G1	하연	S4	정모멘트부 정적변형률
			G2	하연	S5	정모멘트부 정적변형률
		P9	G1	하연	S6	부모멘트부 정적변형률
			G2	하연	S7	부모멘트부 정적변형률
				상연	S8	중립축 산정
가속도계	부산방향	8경간	G1측 방호벽		A1	동적 진동가속도(고유진동수, 진동영향평가)
		9경간	G1측 방호벽		A2	동적 진동가속도(고유진동수, 진동영향평가)
	대구방향	8경간	G2측 방호벽		A3	동적 진동가속도(고유진동수, 진동영향평가)
		9경간	G2측 방호벽		A4	동적 진동가속도(고유진동수, 진동영향평가)

5.2.5 재하시험 전경



처짐계



변형률계



가속도계

【사진 5.2.1】 재하시험 현황 사진



데이터 수집



시험차량 전경



정적 Load Case 위치 선정



동적 주행시험



정적 재하시험

【사진 5.2.1】 재하시험 현황 사진(계속)

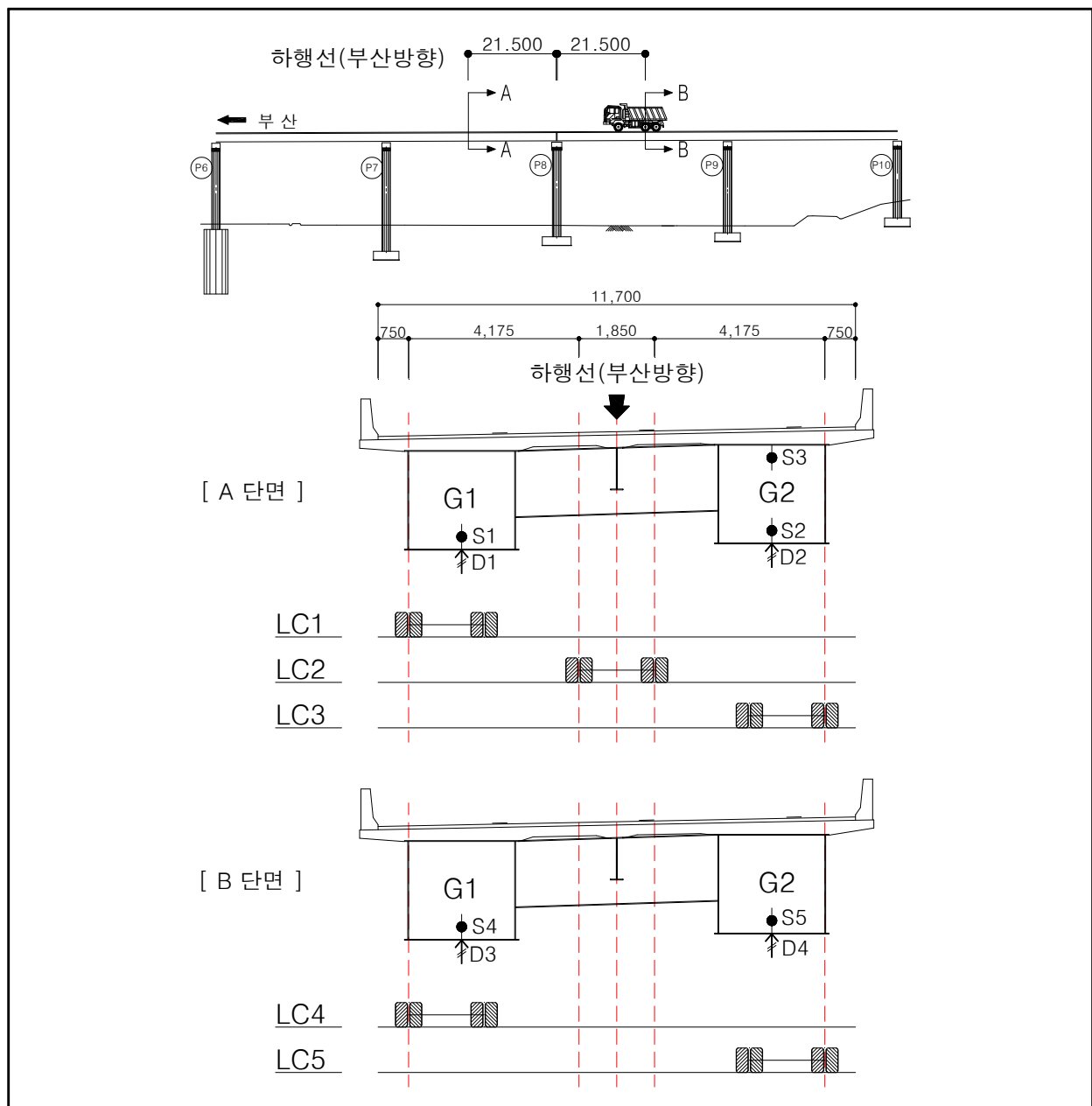
5.3 정적재하시험

5.3.1 시험방법 및 결과

가. 시험방법

정적재하시험의 경우 1대의 재하차량을 이용하여 차량 진행방향으로 총 5개의 하중조합으로 시험차량을 재하 하였다.

각 정적재하시험의 재하경우는 【그림 5.3.1】에 차량 재하 방향 및 Load Case별 시험차량 위치를 나타내었다.



【그림 5.3.1】 정적재하시험 하중재하 경우

나. 정적재하시험 결과

본 교량의 정적재하시험의 측정결과는 아래 【표 5.3.1】 과 같으며 변형률의 경우 인장은 양(+), 변위의 경우 하향처짐이 양(+)의 값을 나타낸다.

【표 5.3.1】 정적재하시험 결과

구분	위치				Gauge No.	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	단위
처짐		8경간	G1	하연	D1	2.569	1.983	1.501	-0.040	-0.018	mm
			G2	하연	D2	1.506	2.037	2.649	0.006	0.015	
		9경간	G1	하연	D3	-0.113	-0.018	0.005	2.607	1.445	
			G2	하연	D4	-0.057	-0.003	0.016	1.431	2.620	
변형률	부산 방향	8경간	G1	하연	S1	33.360	24.520	15.640	-0.290	-0.310	μm/m
			G2	하연	S2	16.410	25.310	34.190	-0.320	-0.600	
				상연	S3	-2.640	-2.380	-2.580	0.290	0.000	
		9경간	G1	하연	S4	-0.190	0.070	0.040	28.090	13.650	
			G2	하연	S5	-0.120	0.210	0.010	14.720	33.430	
		P9	G1	하연	S6	-0.020	-0.320	0.130	-8.540	-4.780	
			G2	하연	S7	-0.100	-0.400	0.050	-3.800	-9.730	
				상연	S8	0.230	0.000	0.020	0.740	1.600	

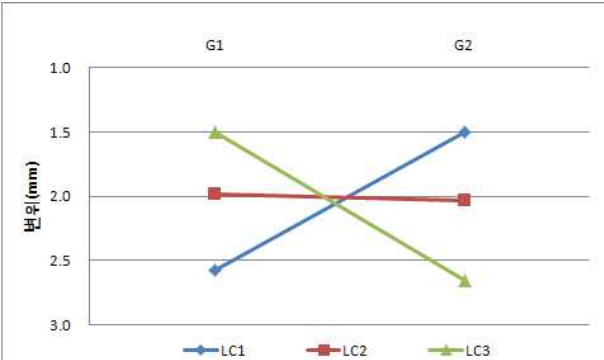
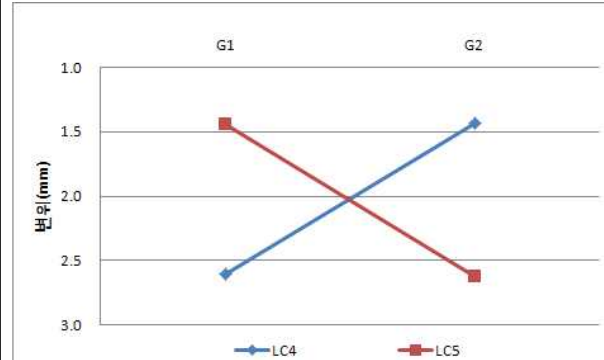
다. 계측결과와 분석

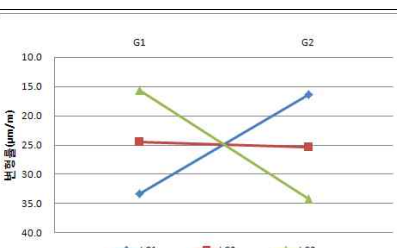
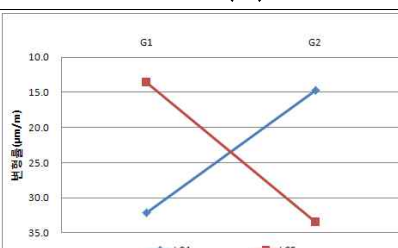
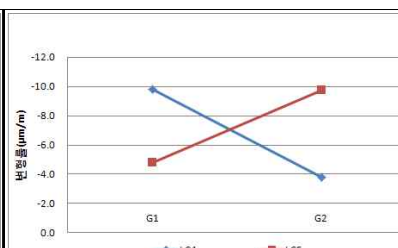
1) 횡방향 거동 특성

현장에서 측정된 데이터를 이용하여 현 상태의 거동특성은 횡분배 및 대칭성 분석을 통하여 판단할 수가 있다.

대칭구조의 교량부재에 하중을 대칭으로 재하하면 측정결과는 대칭성을 보여주게 되는데, 측정값이 합리적이고 충분한 신뢰성을 가지고 있다면 교량의 대칭거동은 교량이 선형탄성 범위에서 건전한 거동을 하는가를 판단하는 자료로 활용될 수 있다.

【표 5.3.2】 횡방향 거동분포

변위(mm)					
					
위치	부산방향 8경간		위치	부산방향 9경간	
	G1	G2		G1	G2
Gauge No.	D1	D2	Gauge No.	D3	D4
LC1	2.569	1.506	LC4	2.607	1.431
LC2	1.983	2.037	LC5	1.445	2.620
LC3	1.501	2.649	-	-	-

변형률(με)								
								
위치	부산방향 8경간		위치	부산방향 9경간		위치	부산방향 P9	
	G1	G2		G1	G2		G1	G2
Gauge No.	S1	S2	Gauge No.	S4	S5	Gauge No.	S6	S7
LC1	33.360	16.410	LC4	32.135	14.720	LC4	-9.770	-3.800
LC2	24.520	25.310	LC5	13.650	33.430	LC5	-4.780	-9.730
LC3	15.640	34.190						

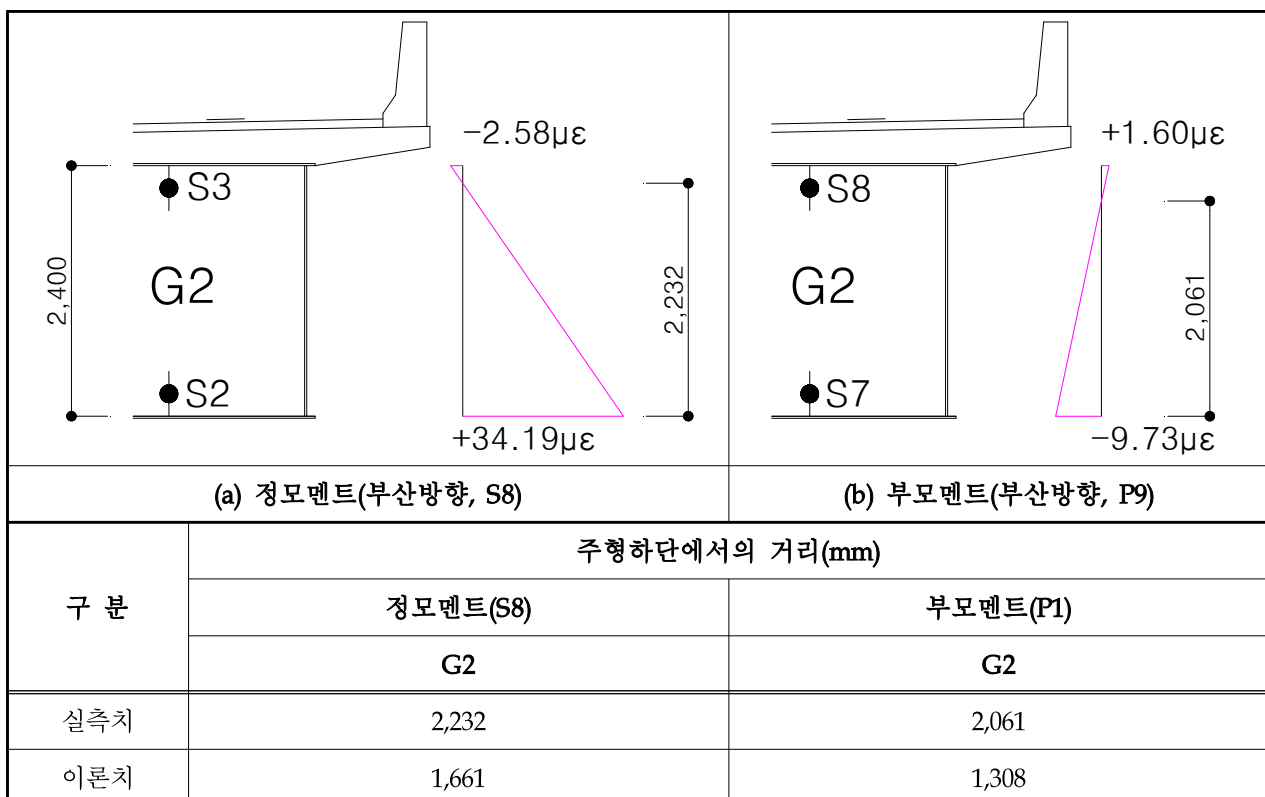
정적재하시험 결과 측정된 실측변형률 및 변위를 이용하여 주형의 횡분배 효과를 분석하였으며 【표 5.3.2】의 대칭성 그래프에서 제시된 바와 같이 각 재하하중에 따른 변형률 및 변위의 횡분배 및 대칭성 경향은 양호한 것으로 나타나 구조적 이상 거동은 없는 것으로 판단된다.

2) 중립축 위치분석

【그림 5.3.2】에는 박스거더 상하부에 부착한 변형률게이지 측정치를 직선 연결하여 구한 실측 중립축 위치를 도시하였다. 일반적으로 변형률의 측정값이 작을 경우 노이즈의 영향이 크므로 주형 상단에 설치된 변형률의 경우 응답값이 작아 중립축 위치 분석 시 오차를 많이 포함하고 있으므로 정확하게 일치하지 않는 경향이 있다.

구조해석 시 이론 중립축의 경우 방호벽 및 포장의 단면이 반영되지 않고, 하중값으로 작용시키기 때문에 실제 거동에서는 방호벽 및 포장의 강성이 반영되어 이론 중립축보다 실제 거동하는 중립축의 위치가 상단에 위치하게 된다.

금회 측정값의 경우, 이론중립축보다 상단에 위치하고 있어 거더와 바닥판의 합성거동이 이루어지고 있는 것으로 판단된다.



【그림 5.3.2】 중립축 위치 검토

3) 계산응력과 측정응력의 비교 (응답비)

응답비는 재하시험에서 시험차량하중을 재하하였을 경우에 측정된 실 구조물의 변형(또는 처짐)에 대한 구조해석에서 해석모델상에 동일한 시험차량 하중을 작용하였을 경우의 이론적인 값의 비(계산값/실측값)를 말하며, 이 변형(또는 처짐)의 응답비와 충격계수의 응답(계산충격계수/실측충격계수)를 곱한 값이 응답보정계수이다.

$$\cdot \text{응답보정계수}(K_s) = \frac{\varepsilon_{\text{계산}}}{\varepsilon_{\text{실측}}} \times \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}} \quad \text{또는} \quad \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \times \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}}$$

이러한 변형(또는 처짐)에 대한 응답비를 산정하였으며, 재하시험 시 측정된 값은 계측장비 및 센서의 정밀도, 측정시의 기후조건, 교량의 기하학적 특성 및 차량재하 시 하중집중으로 인한 국부적인 변형, 노이즈 등의 요인으로 인하여 많은 오차를 포함하게 되며, 변형 또는 처짐의 반응이 큰 재하경우가 오차값이 적은, 상대적으로 신뢰도가 높은 값이라 할 수 있다.

따라서, 응답비에 사용되는 실측값은 대상단면에서 측정된 값 중에서 비교적 큰 값을 나타내는 하중조건을 기준으로 하며, 응답비의 경우 안전측으로 가장 작은 값을 선택한다.

또한 변형률 측정값은 국소부위의 변형값으로 전기적 저항값을 증폭하여 산정된 값이므로 처짐계에 의한 측정값이 상대적으로 신뢰도가 높다고 할 수 있다.

금회 정적재하시험의 응답비 산정은 각 재하 경우(Load Case)별 가장 큰 값을 나타내는 처짐값에 대한 응답비를 계산값과 비교하였으며, 응답비 중 가장 작은 값이 안전측의 보정이 가능한 응답비의 대푯값이라 할 수 있다.

【표 5.3.3】 응답비

위치	부산방향		최대처짐 측정값	계산값	응답비
	8경간				
	G1	G2			
Gauge No.	D1	D2			
LC1	2.569	1.506	2.569	4.782	1.861
LC2	1.983	2.037	2.037	3.602	1.768
LC3	1.501	2.649	2.649	4.789	1.808

5.4 동적주행시험

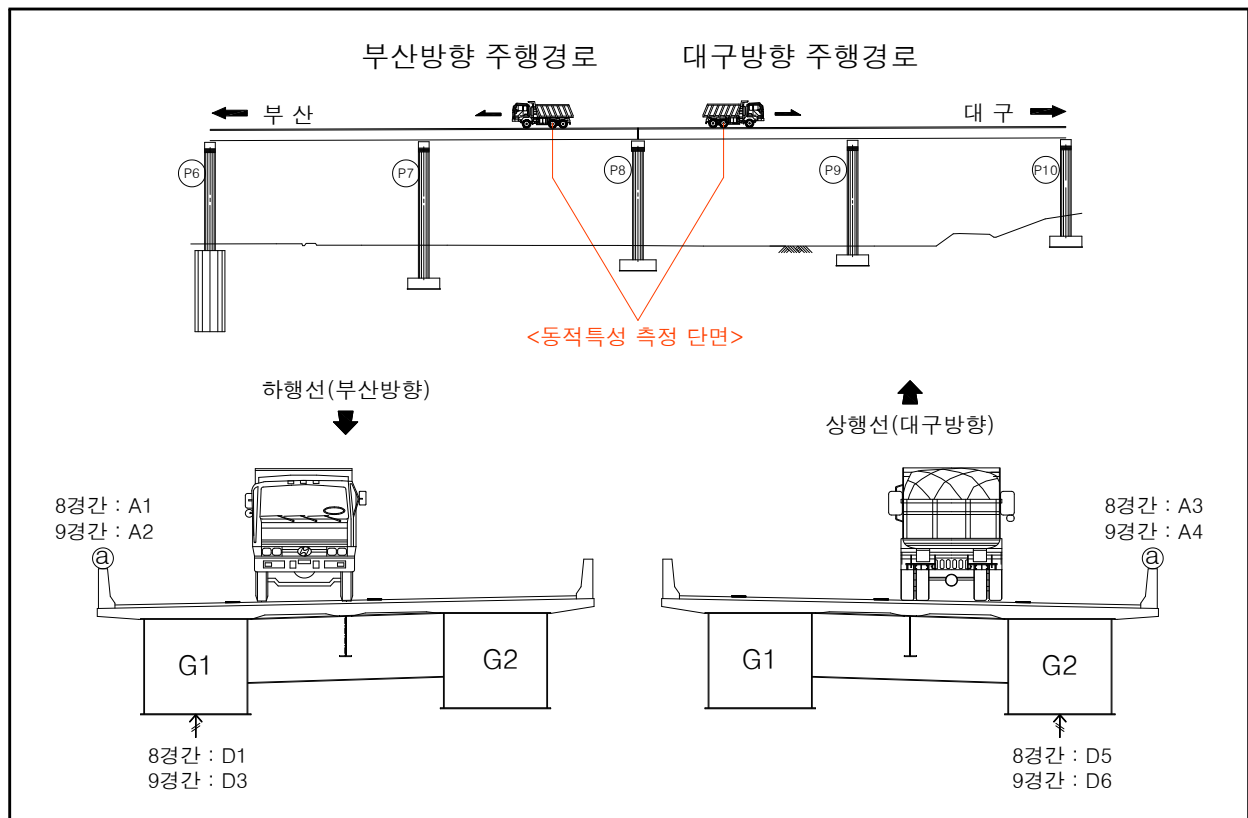
5.4.1 시험방법 및 결과

가. 주행시험 및 재하 경우

동적 재하시험은 충격계수와 고유진동수 측정을 위하여 실시하였으며, 진동영향평가는 별도의 절로 구분하여 수록하였다. 주요 시험구간인 부산방향은 20km/hr로 시작하여 20km/hr씩 속도를 증가하여 100km/hr까지 측정하였으며, 대구방향은 현장여건에 따라 80km/hr의 속도로 1회 측정하여 비교가 가능토록 하였다.

【표 5.4.1】 동적 재하시험 주행속도별 차량 진행 방향

주행속도	주행 방향	차량 주행 위치
20km/hr	증평방향(A1) → 괴산방향(A2)	2차로 동일 경로 주행
40km/hr		
60km/hr		
80km/hr		
100km/hr		



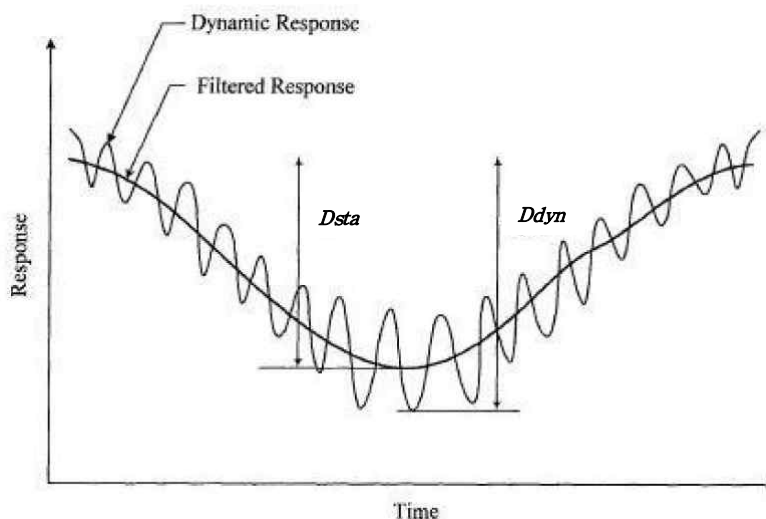
【그림 5.4.1】 동적 주행방법

나. 충격계수

기존의 충격계수 산정방법은 5~10km정도의 서행에 의한 응답을 정적응답치로 간주하고 이 값을 기준으로 속도별 응답치를 이용하여 충격계수를 산정하는 방법이 사용되었으나, 최초 서행 시와 매 속도마다의 응답은 운전자의 숙달, 습관, 주행위치 이격 등으로 달라질 수 있다. 따라서 각 속도별 동적응답을 1Hz이하의 Low Pass Filter로 필터링하여 의사정적 응답곡선을 구하고 필터링 전후의 값을 이용하여 각 속도별 충격계수를 구하는 방법을 사용하였다.

산정방법은 【그림 5.4.2】와 같이 동적주행 시험의 각 속도별의 동적응답 곡선을 Low Pass Filter에 의해서 필터링한 최대정적응답(D_{sta}) 곡선을 기준으로 계측 최대동적응답치(D_{dyn})와 비교하여 실측충격계수를 산정한다.

$$\cdot \text{동적증폭율(D.L.F)} = \frac{D_{dyn}}{D_{sta}(\max)}, \quad \cdot \text{실측충격계수 } i = D.L.F - 1$$



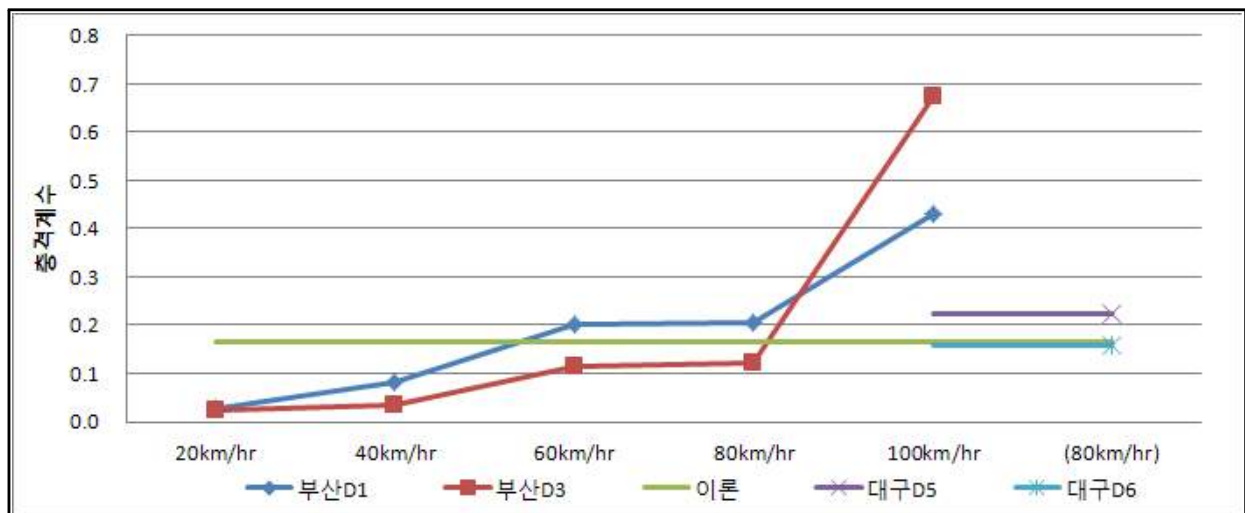
【그림 5.4.2】 처짐 이력곡선

동적주행시험 결과 실측충격계수 최대값은 부산방향 9경간에서 100km/hr의 경우 0.674로 나타났다. 이는 ‘도로교설계기준’상의 이론적 한계값인 $i=0.3$ 을 초과하는 값으로서 지점조건 및 상태, 노면상태 등에 대하여 면밀하게 검토한 결과, 충격계수에 영향을 미칠만한 특이 이상개소는 없는 것으로 검토되었다.

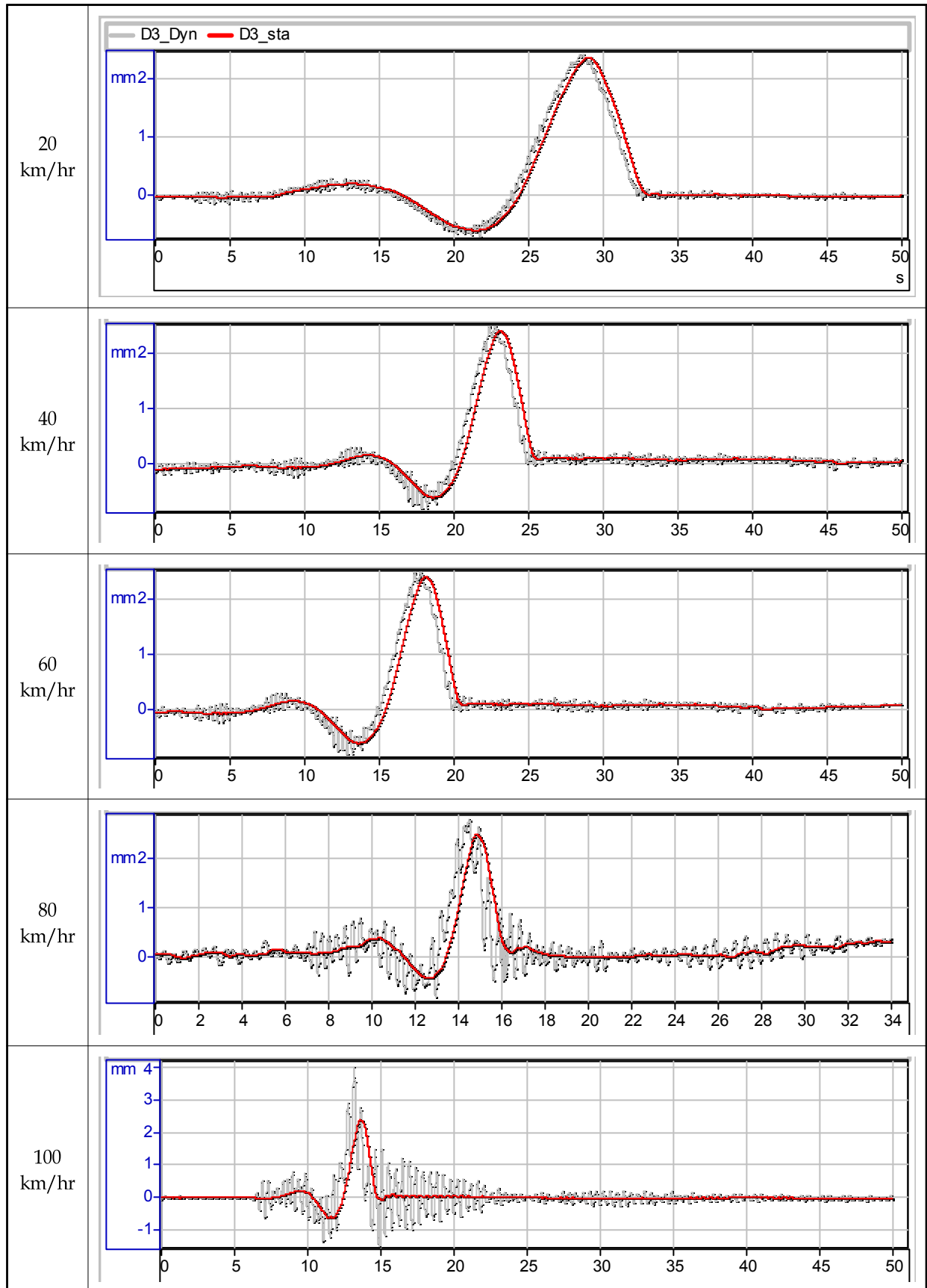
다만 진동 사용성(인체 감지 정도)에 대한 평가 시 진동가속도값이 크게 산정되었으며, 실측처짐과 이론처짐의 비율인 응답비의 최소값이 1.7이상이고, 실측 고유진동수가 계산값에 비하여 강성이 큰 상태로 분석되었다. 따라서 강성과 질량과의 관계 특성에 따라 교량의 질량에 비하여 상대적으로 큰 강성을 띠는 상태에서 동적하중에 대한 진동가속도 및 고유진동수가 민감하게 반응하여 발생하는 현상으로 판단된다.

【표 5.4.2】 속도별 충격계수

구 분		변위(mm)				비 고
		부산방향		대구방향		
		8경간	9경간	8경간	9경간	
속도 Gauge No.		D1	D3	D5	D6	
20km/hr	Ddyn	2.563	2.411	-	-	
	Dsta	2.494	2.357	-	-	
	충격계수(i)	0.028	0.023	-	-	
40km/hr	Ddyn	2.670	2.479	-	-	
	Dsta	2.468	2.395	-	-	
	충격계수(i)	0.082	0.035	-	-	
60km/hr	Ddyn	3.084	2.660	-	-	
	Dsta	2.564	2.386	-	-	
	충격계수(i)	0.203	0.115	-	-	
80km/hr	Ddyn	3.030	2.805	2.663	2.537	
	Dsta	2.515	2.500	2.179	2.192	
	충격계수(i)	0.205	0.122	0.222	0.157	
100km/hr	Ddyn	3.442	3.984	-	-	
	Dsta	2.406	2.380	-	-	
	충격계수(i)	0.431	0.674	-	-	
대표충격계수		0.431	0.674	0.222	0.157	
이론충격계수		0.167				



【그림 5.4.3】 충격계수 Graph



【그림 5.4.4】 충격계수 산정을 위한 필터링 전후 그래프 - 부산방향, 9경간

다. 고유진동수

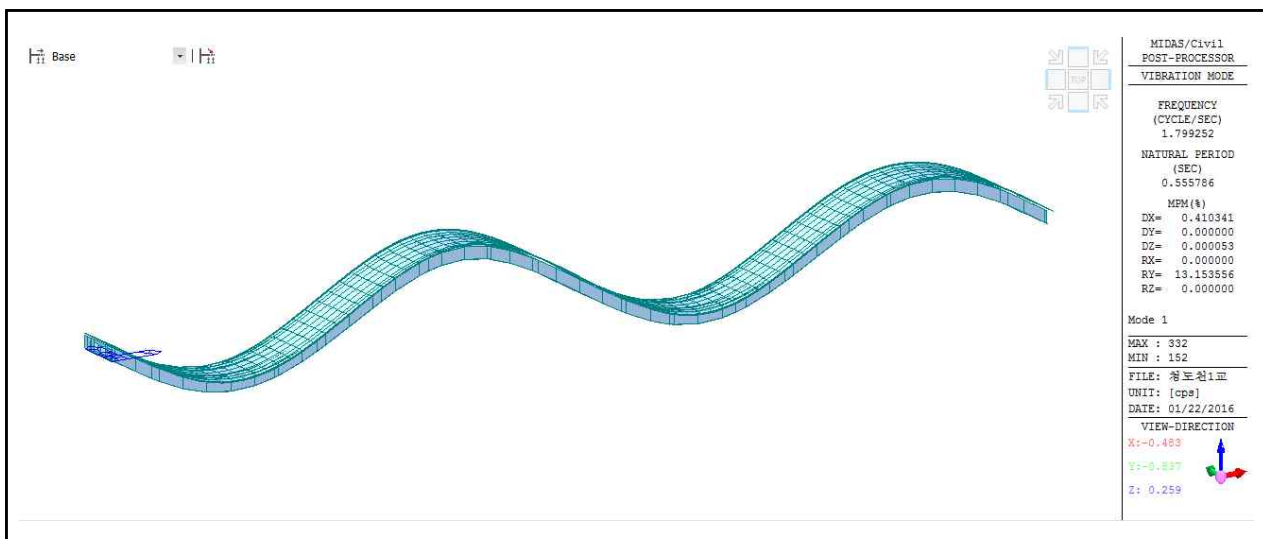
진동데이터의 스펙트럼 해석이란 불규칙한 진동파형을 Fourier 변환하여 시간영역의 데이터를 진동수 영역의 데이터로 바꾸고, 진동파형에 포함되어있는 진동수 성분(F.F.T)을 구하는 것을 말한다.

Window Function의 Hanning Type을 이용하여 교량에 설치한 가속도계로부터 재하차량이 측정경간을 벗어나 영향을 주지 않는 자유진동상태의 가속도 응답곡선을 F.F.T분석을 실시한 후 고유진동수를 구하였다.

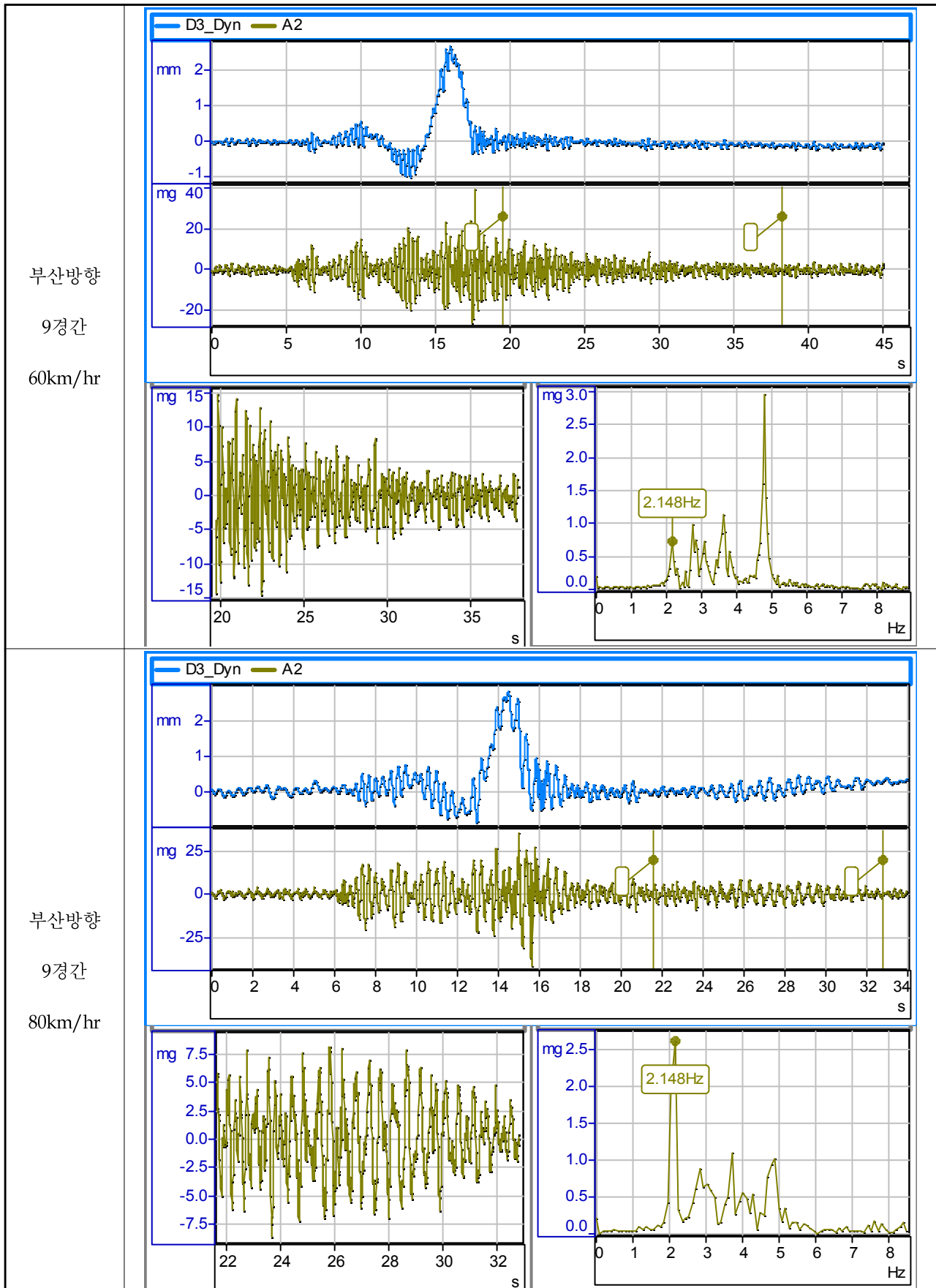
【표 5.4.3】에 속도별 교량의 실측 고유진동수를 나타냈으며, 실측 고유진동수는 2.148Hz로서 해석치(1.799Hz) 이상으로 크게 분석되어 해석모델링의 강성보다 실제 강성이 큰 것으로 판단된다. 내하력 평가에서 이론적 처짐값이 실측처짐보다 1.7배 이상으로 분석되어 고유진동수 분석결과와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

【표 5.4.3】 고유진동수 해석치와 실측치 비교

구분	부산방향, 8경간		부산방향, 9경간		대구방향, 8경간		대구방향, 9경간		비고
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
20km/hr	1.953	2.148	2.148	2.734					해석 고유진동수 1.799Hz
40km/hr	2.148	3.125	2.148	2.734					
60km/hr	2.148	2.539	2.148	2.295					
80km/hr	2.148	2.539	2.148	2.832	2.148	2.441	2.148	2.832	
100km/hr	1.953	2.148	2.148	2.734					
고유진동수	2.148		2.148		2.148		2.148		



【그림 5.4.5】 구조해석 모델링에 의한 진동모드 및 진동수



【그림 5.4.6】 가속도 응답곡선에 대한 F.F.T 분석

5.5 재하시험 결과

【표 5.5.1】 재하시험 결과

구 분	재하시험 결과																								
하중 횡분배	· Load Case별 처짐 및 변형률이 대칭성을 띠고 있는 것으로 나타나 횡방향 분배 상태는 양호한 것으로 판단됨																								
중립축 검토	· 대체로 실측중립축의 값이 해석중립축보다 상단에 위치하는 것으로 나타나 바닥 판과 거더의 합성거동이 이루어지고 있는 것으로 판단됨																								
응답비	· 최소 응답비가 1.768로서 양호한 실제 처짐강성을 보이고 있음 <table><tr><th>Gauge No.</th><th>D1</th><th>D2</th><th>최대처짐 측정값</th><th>계산값</th><th>응답비</th></tr><tr><td>LC1</td><td>2.569</td><td>1.506</td><td>2.569</td><td>4.782</td><td>1.861</td></tr><tr><td>LC2</td><td>1.983</td><td>2.037</td><td>2.037</td><td>3.602</td><td>1.768</td></tr><tr><td>LC3</td><td>1.501</td><td>2.649</td><td>2.649</td><td>4.789</td><td>1.808</td></tr></table>	Gauge No.	D1	D2	최대처짐 측정값	계산값	응답비	LC1	2.569	1.506	2.569	4.782	1.861	LC2	1.983	2.037	2.037	3.602	1.768	LC3	1.501	2.649	2.649	4.789	1.808
Gauge No.	D1	D2	최대처짐 측정값	계산값	응답비																				
LC1	2.569	1.506	2.569	4.782	1.861																				
LC2	1.983	2.037	2.037	3.602	1.768																				
LC3	1.501	2.649	2.649	4.789	1.808																				
충격계수	· 실측충격계수($i=0.674$) > 이론충격계수($i=0.167$) · 실측충격계수는 시험차량의 저속(40~50km/hr 이하) 시에는 이론충격계수보다 낮은상태이나, 60~80km/hr 범위에서는 이론충격계수 수준을 다소 상회하며, 고속주행(100km/hr) 시에는 ‘도로교설계기준’값($i=0.3$) 이상으로 분석됨 · 다만 지점조건 및 상태, 노면상태 등에 대하여 면밀하게 검토한 결과, 충격계수에 영향을 미칠만한 특이 이상개소는 없는 것으로 검토됨																								
고 유 진동수	· FFT 분석결과 : 2.148Hz · 구조해석 결과 : 1.799Hz · 해석모델링의 강성보다 실제 강성이 큰 것으로 판단됨																								
재하시험 평가결과	· 재하시험 결과 충격계수를 제외한 기타 항목에 대하여 우수한 상태로 나타남 · 충격계수값은 속도가 증가함에 따라 커지며, 양방향 교량 특성이 유사하게 분석된 점 및 현장조사 결과를 종합하여 볼 때, 특정 부재나 부위의 결함 및 손상으로 인하여 발생하는 현상은 아닌 것으로 판단됨 · 다만 진동 사용성(인체 감지 정도)에 대한 평가 시 진동가속도값이 크게 산정되었으며, 실측처짐과 이론처짐의 비율인 응답비의 최소값이 1.7이상으로 양호하고, 실측 고유진동수가 계산값에 비하여 강성이 큰 상태로 분석된 상태로서 강성과 질량과의 관계 특성에 따라 교량의 질량에 비하여 상대적으로 큰 강성을 띠는 교량의 상태가 동적하중에 대한 진동가속도 및 고유진동수에 대하여 민감하게 반응하여 발생하는 현상으로 판단됨																								

5.6 진동 영향 평가

5.6.1 개요

경제적 발전과 생활수준의 향상에 따라 도로를 통행하는 차량이 급속하게 증가되었으며, 차량의 중량화 및 고속화로 예전에는 중요하게 생각하지 않았던 진동 및 처짐이 문제가 되기 시작했다.

교량의 진동 및 처짐을 유발시키는 주원인은 통행차량이며, 승용차와 같은 비교적 경량의 자동차는 문제점 유발이 되지 않고, 비교적 중차량이 문제가 되고 있다. 또한 교면요철, 신축이음의 평탄성 및 교량받침의 노후화 등도 이러한 문제점을 증폭시키는 요인으로 알려져 있다.

이러한 원인으로 진동이 유발되어 교량을 통행하는 보행자나 차량에 탑승한 승객들은 불쾌감을 느끼고, 일부는 심리적인 불안감을 표출하게 된다.

진동에 의한 교량의 안전성을 평가하는 기준이 설정되지 않았고, 설계기준에 의한 처짐의 한도는 거의 모든 교량이 만족하므로, 사용자의 심리상태 및 진동이 인체에 미치는 요인들의 영향을 평가하여 제시하는 방향으로 오래 전부터 연구되고 있다.

본 과업에서는 '99년 건설교통부기술혁신사업의 일환으로 건설교통부와 한국건설기술연구원 에서 주관한 『교량의 진동·처짐에 대한 사용성 측면에서의 평가절차 수립』이란 연구보고서를 바탕으로 작성하였다.

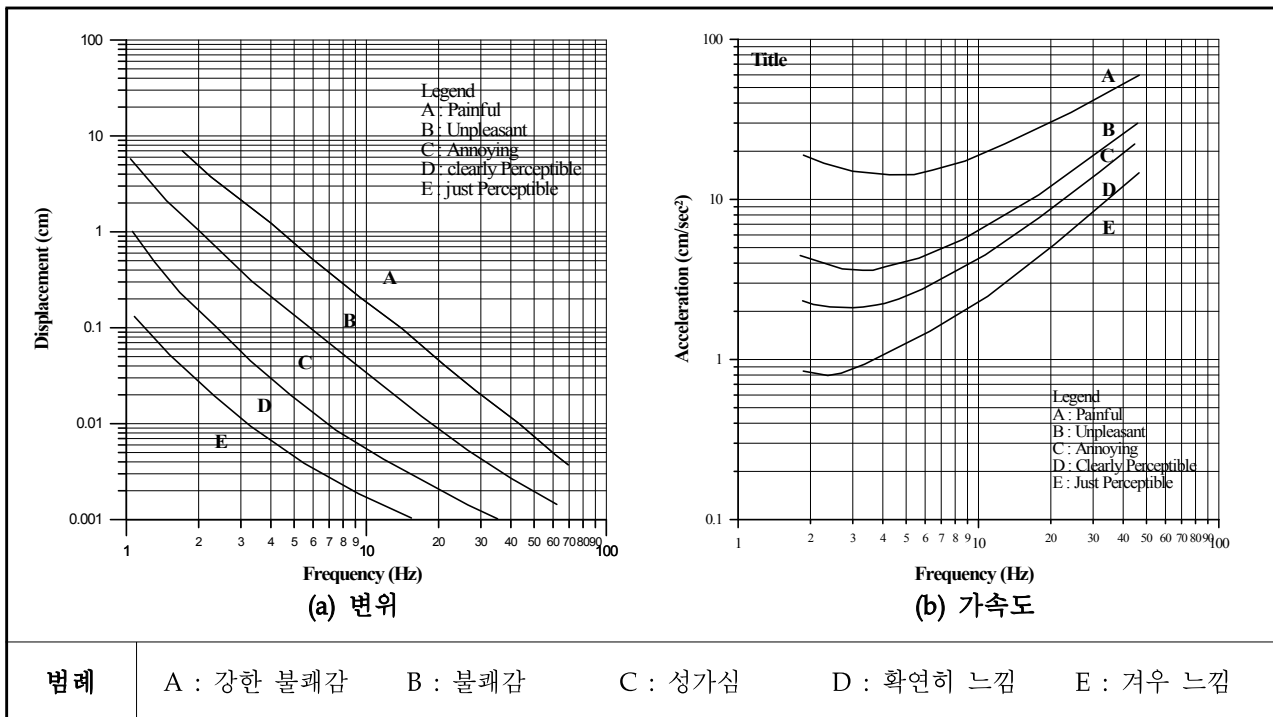
이 연구보고서에서는 진동을 평가할 수 있는 방법이 매우 많아 어떠한 방법이 가장 적절한지를 파악하기 위해 평가할 수 있는 각종 기준들을 비교 분석하였고, 그 중에서도 Meister의 진동등급기준이 교량진동 사용성 평가에 적용하기에 비교적 합리적이라고 평가하였다.

5.6.2 Meister의 진동감각특성

진동의 영향이 구조물에 직접적인 손상을 일으키지는 않는다 하더라도, 구조물에 발생하는 진동은 구조물을 이용하는 이용자들을 불쾌하게 만들거나 불안하게 만들 수도 있기 때문에, 많은 연구자들에 의해 진동에 의한 인간감각특성에 대한 연구가 이루어져 왔다.

인체도 일종의 진동체이기 때문에 고유한 진동수를 가지며 외부로부터 가진이 되어지면 공진하기 때문에, 진동에 관한 인체 감각에 대해서 인체를 기계 전달계(전신진동)로 취급하여 오래 전부터 연구되어 왔다. 이 가운데 Meister는 진동수에 따른 감각곡선을 정의하였으며 이 감각곡선은 인체감각의 기준으로 여러 분야에서 활용되어 왔다.

전신진동에 대한 인체의 진동감각 특성은 가진의 주파수 대역에 따라서 상이하게 반응하는데, 인체의 전신이 진동하는 것은 1~90 Hz의 범위이고, 이 이상 높은 주파수에서는 국부적으로 진동하는 것으로 알려져 있다. 전신진동과 인체의 진동감각과의 관계에 대한 대표적인 연구가 Meister의 진동감각곡선인데, 횡축을 주파수(Hz), 종축을 진동가속도로 놓고 대규모실험을 통해 서있는 상태와 누워있는 상태에서 수평, 수직방향의 진동을 가하여 아래 그림과 같이 ‘겨우 느낌’에서 ‘강한 불쾌감’까지 5단계의 향으로 분류하였으며, 최근까지 많은 분야에서 채용되고 있다. 그림(a)는 변위진폭에 대한 등감각곡선이며, 그림 (b)는 가속도진폭에 대한 진동 등감각곡선으로 일반적인 교량들의 고유진동주파수 영역인 주파수 2~8 Hz 범위의 진동에 인체가 가장 민감하게 느끼는 것으로 알려져 있다. 변위진폭에 대해서는 주파수가 높아지면 감각이 민감해지는 것에 반하여, 가속도진폭에 대해서는 주파수가 높아지면 감각이 둔화됨을 알 수 있다.



【그림 5.6.1】 Meister의 진동등감각곡선

5.6.3 진동평가 절차

가. 계획수립

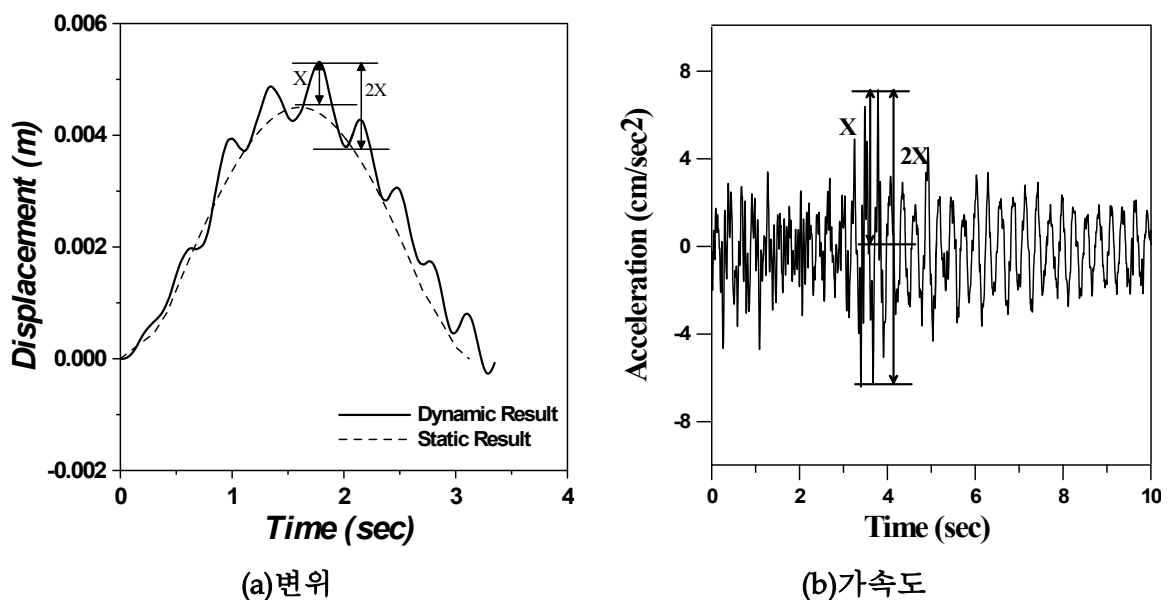
- 1) 정밀안전진단의 일환으로 동적재하시험과 연계하여 계획을 수립한다.
- 2) 대상교량의 외관조사, 도면 검토, 교통특성 등을 파악하여 처짐 및 가속도의 측정위치를 선정한다.

나. 동적재하시험

- 1) 시험차량의 선택은 교량 설계하중의 60% 범위에서 전륜/후륜의 축중비가 도로교설계 기준 규정을 벗어나지 않는 범위에서 토사를 적재한 성능이 양호한 덤프트럭을 사용한다.
- 2) 주행속도는 동적재하시험에서의 주행속도와 동일하게 수행한다.
- 3) 측정범위는 시험차량이 출발해서 진동특성 계측지점에 영향을 미치는 범위까지 특성을 계측한다.
- 4) 측정회수는 시험차량의 속도별 1회씩 측정하되 데이터의 훼손 등을 감안하여 다소의 추가계측을 실시한다.

다. 진동사용성 평가

- 1) 측정된 진동특성 데이터로부터 계측지점에서의 주요모드의 진동수를 구하기 위하여 FFT분석을 실시한다.
- 2) 가속도와 처짐의 측정데이터로부터 최대진폭값은 시험차량의 계측지점에 대한 영향구간으로의 진입에서부터 영향구간을 벗어나거나 진동이 없어질 때까지 계측한 데이터를 차량진입부, 주요영향부, 여진발생부의 3부분으로 나누어서 반진폭의 최대값을 구한 다음 이 값의 평균을 취한다.



【그림 5.6.2】 최대진폭을 구하는 법

- 3) 분석된 진동특성값은 Meister의 진동평가기준을 이용하여 진동등급을 평가한다.
- 4) 위와 같이 계측위치별, 진동특성(가속도, 변위)별, 주행속도별로 판정한 Meister의 진동 등급 중에서 제일 나쁜 등급을 대상교량의 진동등급으로 결정한다.

4.5.4 진동평가 분석

가. FFT 분석

Meister의 진동등급기준 그래프의 x축 값은 가속도계로부터 측정된 가속도 파형을 토대로 FFT분석을 실시하여 산정된 주요모드(교량의 고유진동수)의 주파수 값을 사용하며, 재하시험의 동적특성 분석 시 산정된 고유진동수 값을 활용하였다.

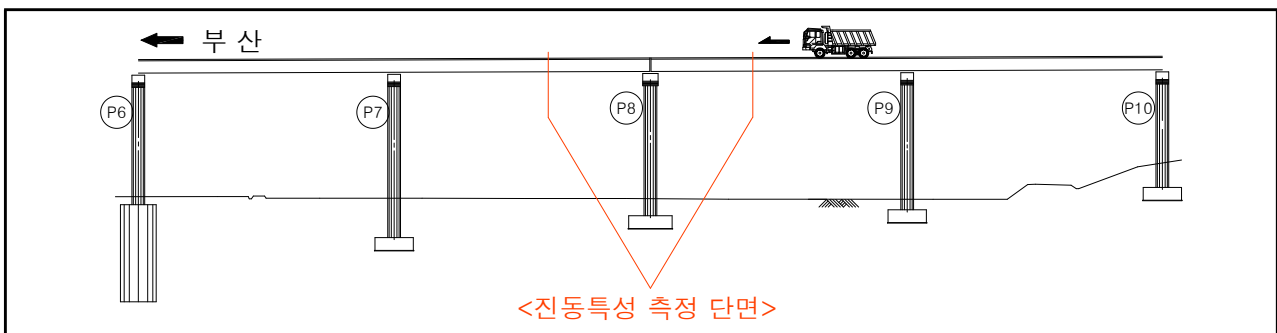
나. 진동진폭분석

측정자료는 동적 재하시험 시 실시되었던 속도별 측정 데이터가 동일하게 사용되며, 진동 진폭분석에 따른 별도의 분석 기법을 사용하였다.

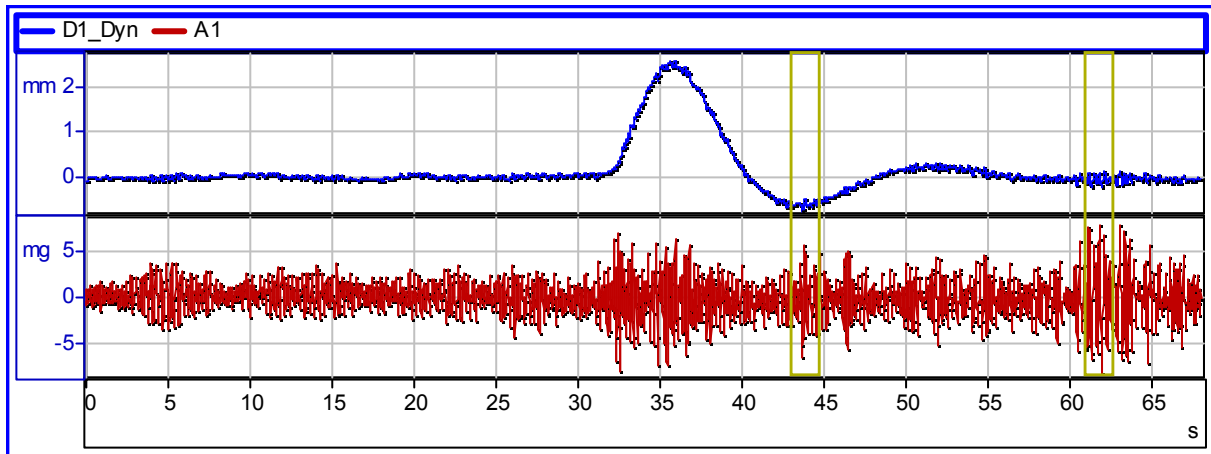
가속도와 처짐의 측정데이터로부터 최대진폭값은 시험차량의 계측지점에 대한 영향구간의로의 진입에서부터 영향구간을 벗어나거나 진동이 없어질 때까지 계측한 데이터를 차량진입부, 주요영향부, 여진발생부의 3부분으로 나누어서 반진폭의 최대값을 구한 다음 이 값의 평균을 취한다.

◆ 시험차량의 측정범위

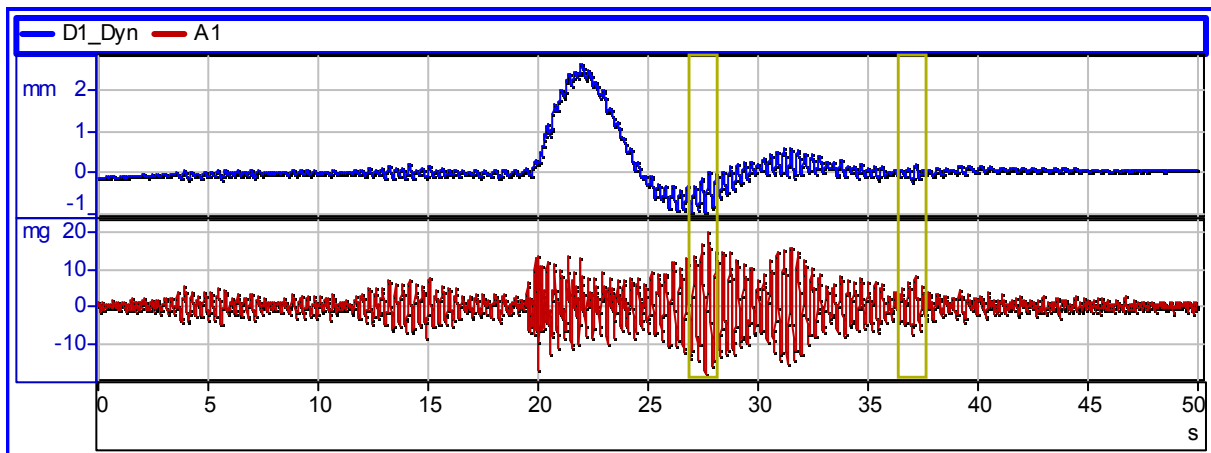
- 연속교 : 시험차량 진입부, 주요영향부, 여진발생부 3부분의 최대반진폭 평균값
- 단순교 : 시험차량통과부, 여진발생부 2부분의 최대반진폭 평균값



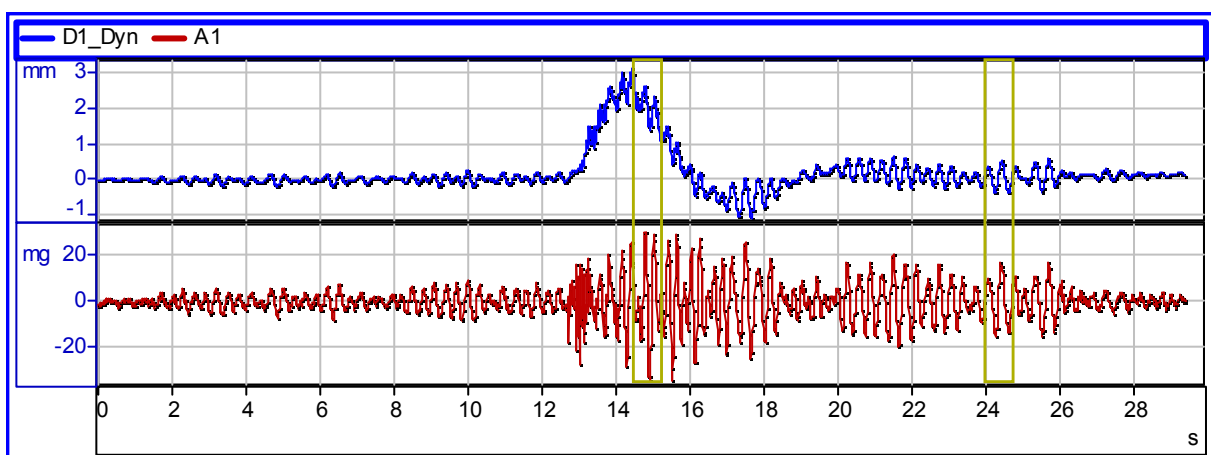
본 교량의 진동특성 측정 경간은 8경간·9경간이며, 교각8번측이 신축이음부로서 각각 4경간 연속부의 단부측 경간이다. 차량 진행방향이 부산방향인 경우, 9경간은 연속교 형태의 진동영향을 받지만, 8경간의 경우는 '차량 진입부' 부분의 진동영향이 없으므로 '단순교'형식의 2부분에 대한 진동 영향을 적용하였으며, 대구방향은 반대로 분석을 실시하였다.



8경간_20km/hr

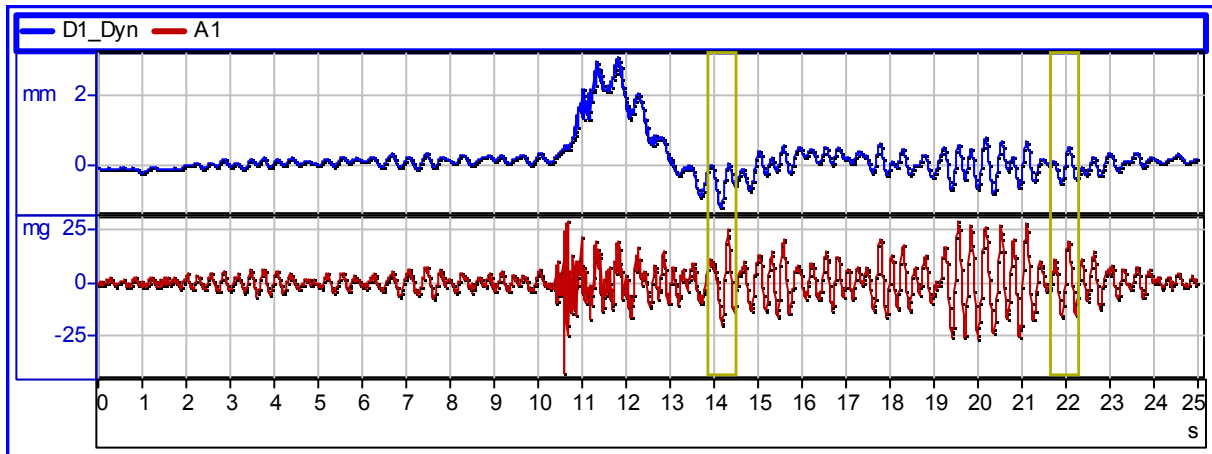


8경간_40km/hr

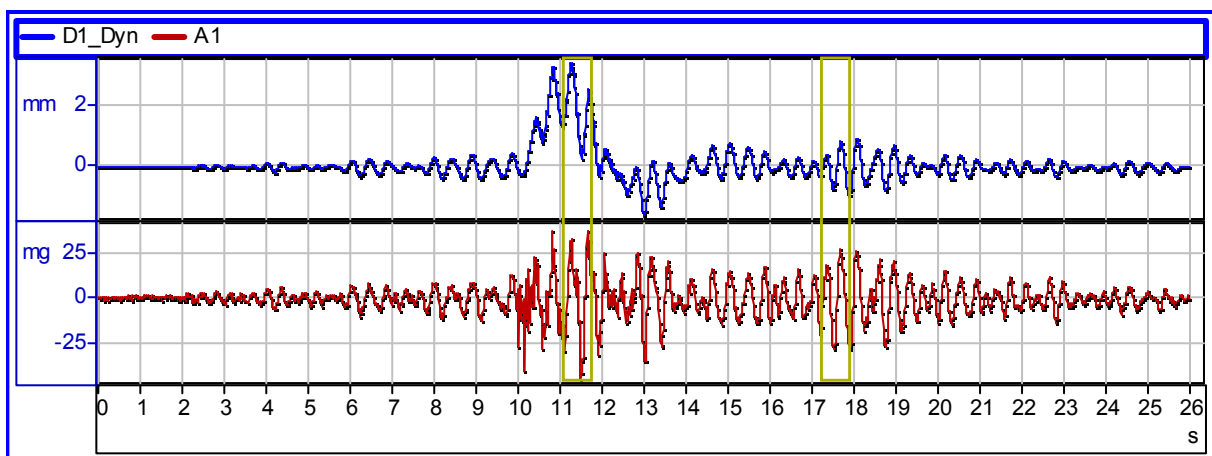


8경간_60km/hr

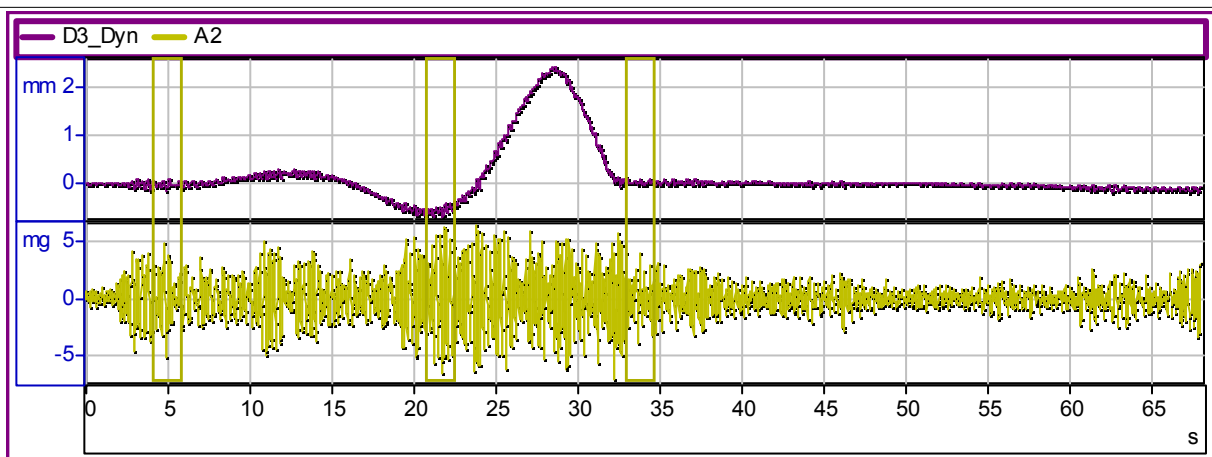
【그림 5.6.3】 진동변위 및 가속도 측정 데이터 추출(부산)



8경간_80km/hr

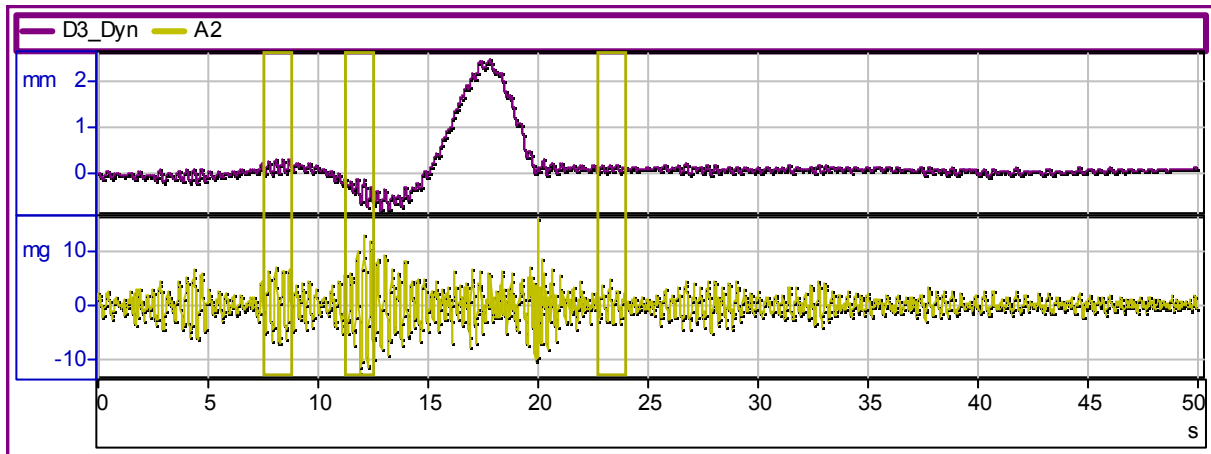


8경간_100km/hr

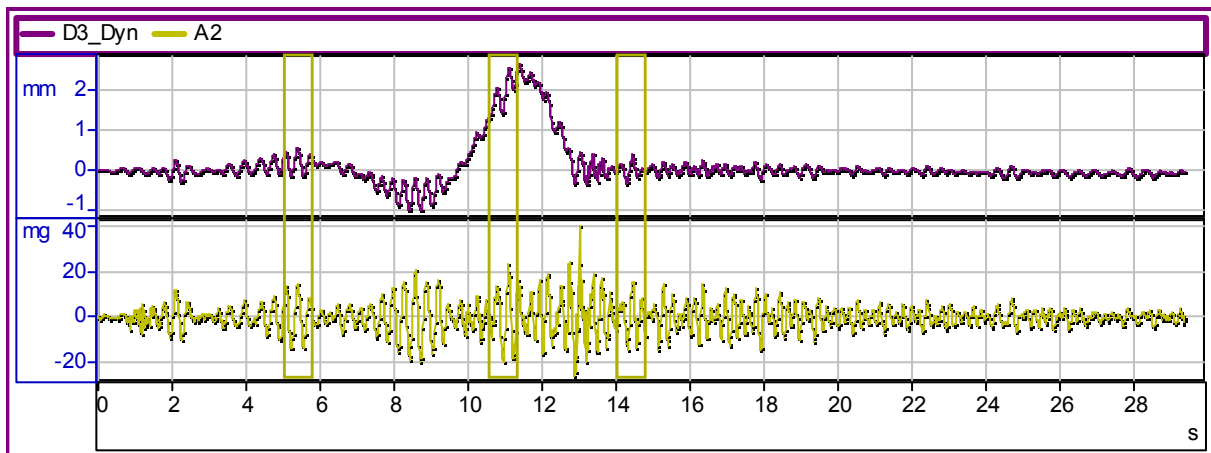


9경간_20km/hr

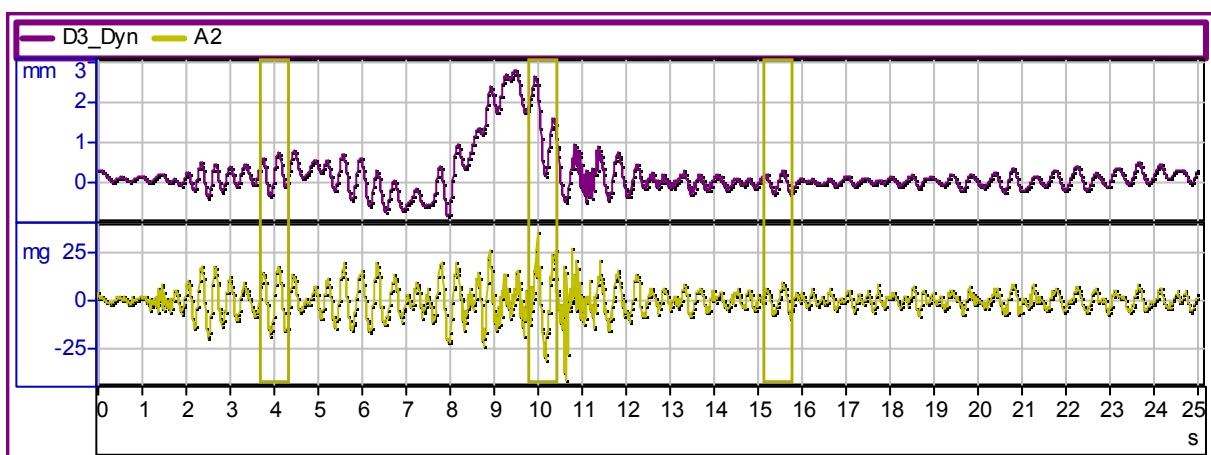
【그림 5.6.3】 진동변위 및 가속도 측정 데이터 추출(부산,계속)



9경간_40km/hr

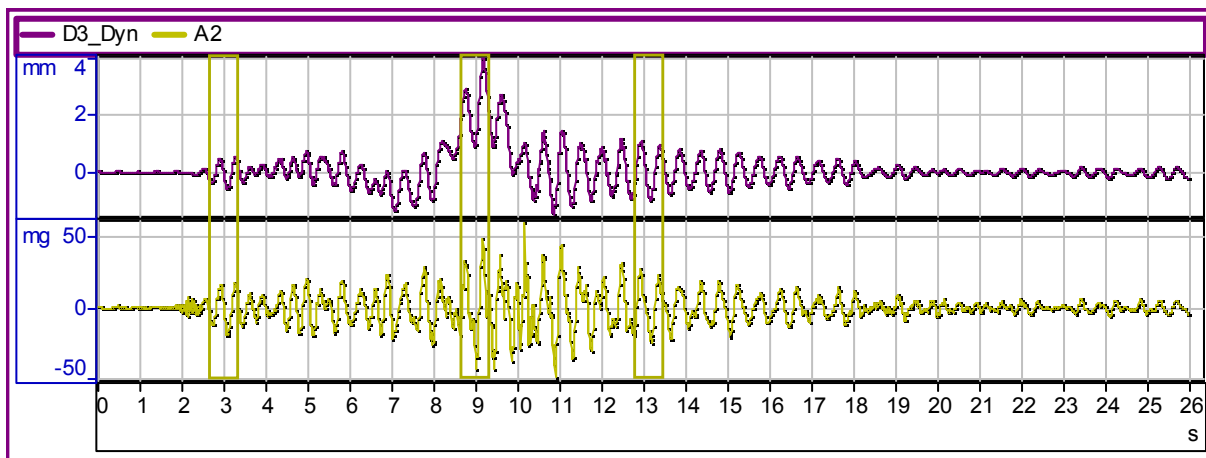


9경간_60km/hr



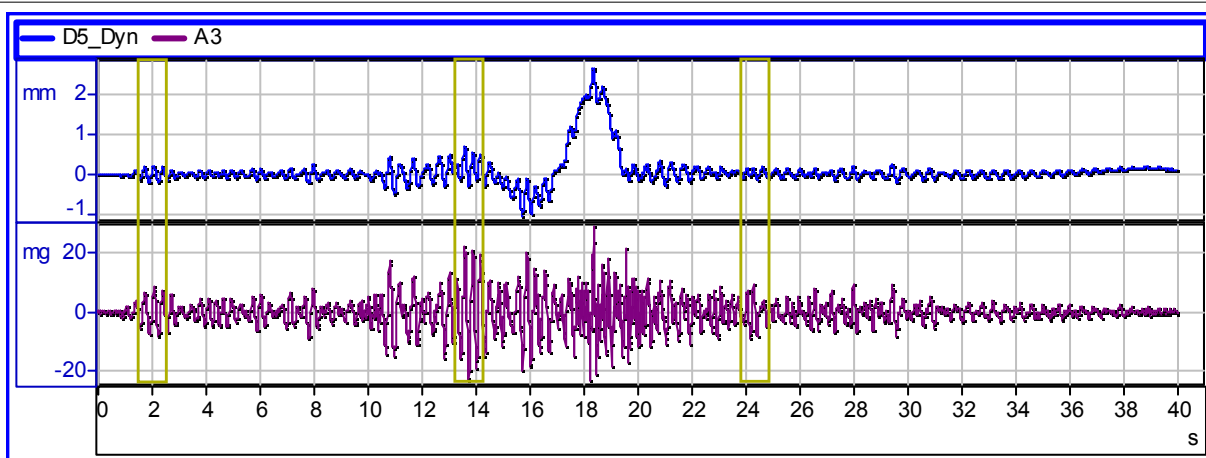
9경간_80km/hr

【그림 5.6.3】 진동변위 및 가속도 측정 데이터 추출(부산,계속)

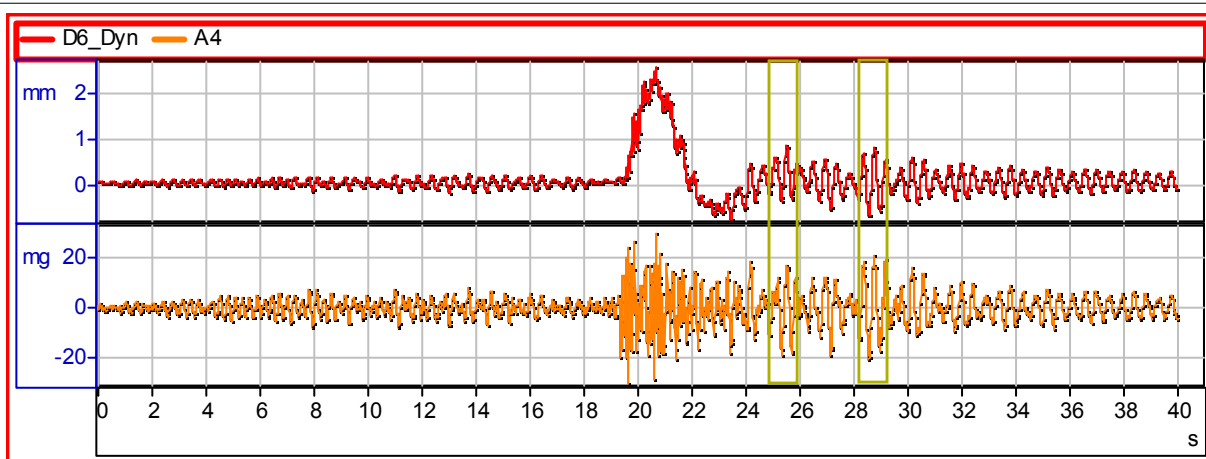


9경간_100km/hr

【그림 5.6.3】 진동변위 및 가속도 측정 데이터 추출(부산,계속)



8경간_80km/hr



9경간_80km/hr

【그림 5.6.4】 진동변위 및 가속도 측정 데이터 추출(대구)

【표 5.6.1】 진동변위 및 가속도 측정 데이터

구분		주행속도	단위	시험차량 통과부	여진발생부	평균
부산방향 8경간	변위 (D1)	20km/hr	cm	0.013	0.016	0.015
		40km/hr	cm	0.049	0.020	0.035
		60km/hr	cm	0.063	0.046	0.054
		80km/hr	cm	0.062	0.051	0.056
		100km/hr	cm	0.159	0.094	0.127
	가속도 (A1)	20km/hr	cm/sec ²	5.974	7.165	6.569
		40km/hr	cm/sec ²	18.780	7.585	13.183
		60km/hr	cm/sec ²	31.975	16.044	24.009
		80km/hr	cm/sec ²	22.305	17.672	19.988
		100km/hr	cm/sec ²	37.844	26.198	32.021

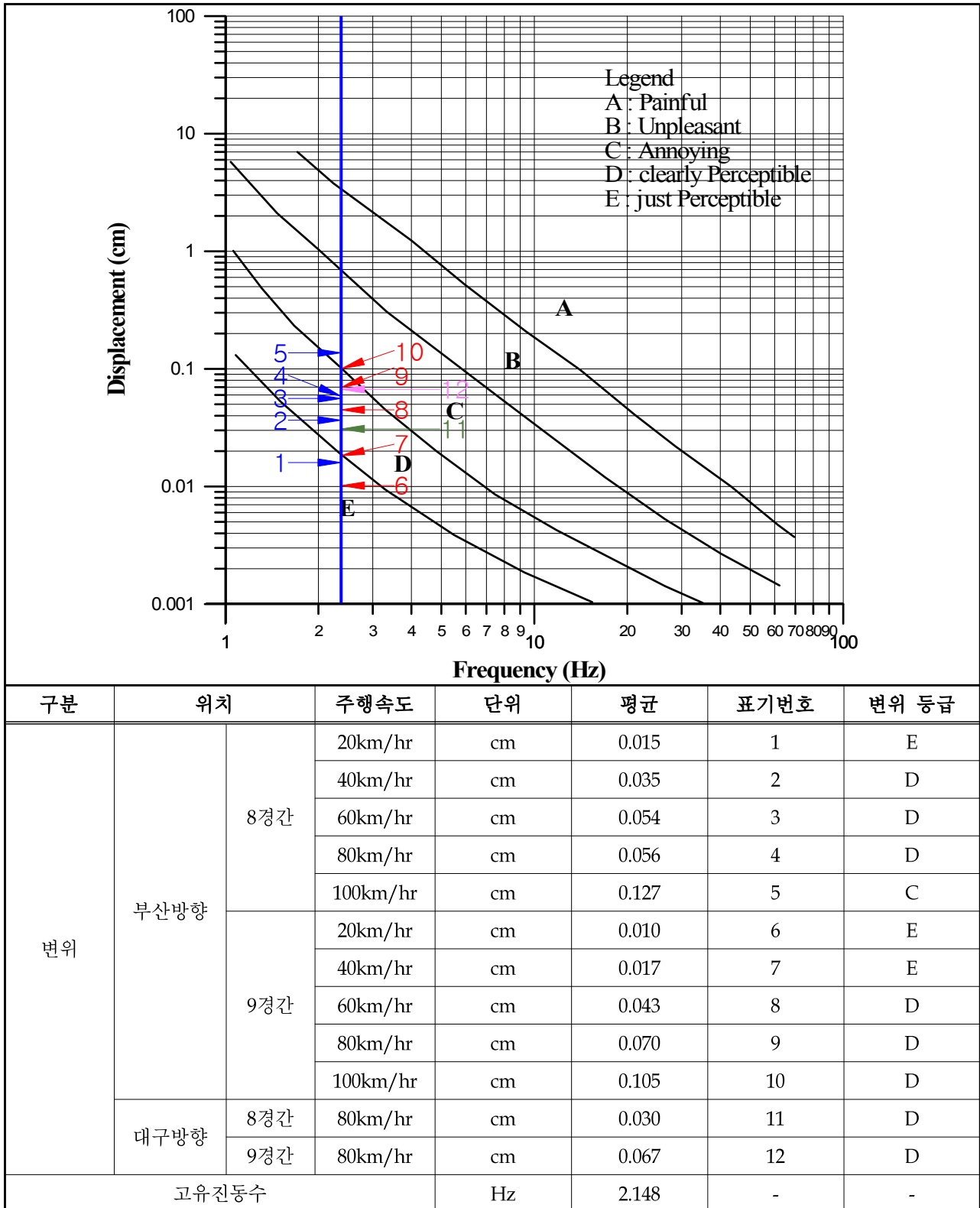
구분		주행속도	단위	시험차량 진입부	주요영향부	여진발생부	평균
부산방향 (9경간)	변위 (D3)	20km/hr	cm	0.011	0.013	0.006	0.010
		40km/hr	cm	0.016	0.027	0.009	0.017
		60km/hr	cm	0.036	0.059	0.035	0.043
		80km/hr	cm	0.055	0.125	0.030	0.070
		100km/hr	cm	0.057	0.154	0.104	0.105
	가속도 (A2)	20km/hr	cm/sec ²	4.437	6.267	3.809	4.838
		40km/hr	cm/sec ²	6.584	12.646	3.710	7.646
		60km/hr	cm/sec ²	14.077	20.898	15.024	16.666
		80km/hr	cm/sec ²	17.917	31.406	8.169	19.164
		100km/hr	cm/sec ²	18.368	44.900	24.816	29.361

구분		주행속도	단위	시험차량 진입부	주요영향부	여진발생부	평균
대구방향 (8경간)	변위(D5)	80km/hr	cm	0.021	0.051	0.016	0.030
	가속도(A3)	80km/hr	cm/sec ²	8.032	22.467	5.992	12.164

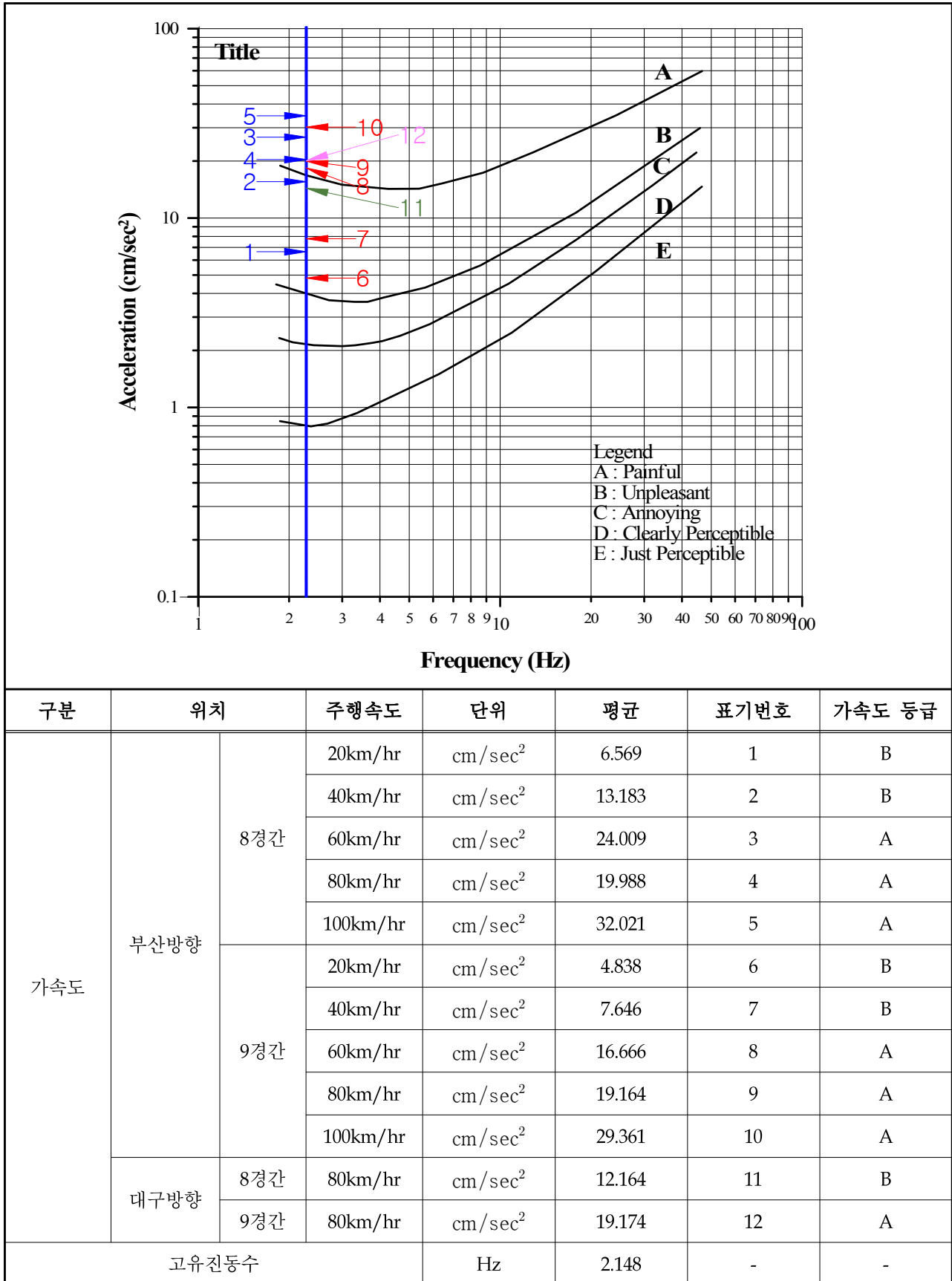
구분		주행속도	단위	시험차량 통과부	여진발생부	평균
대구방향 (9경간)	변위(D6)	80km/hr	cm	0.059	0.075	0.067
	가속도(A4)	80km/hr	cm/sec ²	17.647	20.702	19.174

다. 진동등급결정

측정된 진동변위 및 가속도 데이터를 Meister 진동평가기준에 대입하면 다음과 같다.



【그림 5.6.5】 Meister 등감각곡선(변위)



【그림 5.6.6】 Meister 등감각곡선(가속도)

라. 대상교량의 진동등급 결정

개별 진동특성(가속도, 변위)을 판정한 Meister의 진동등급 중에서 나쁜 등급을 대표 진동 등급으로 결정한다. 청도천1교의 진동등급은 진동가속도 등급이 지배적으로 작용하여 A급으로 평가되었다.

【표 5.6.2】 교량의 진동등급

구분		변위 등급		가속도 등급		구간별 최저등급	최종 등급
		시험 속도별 등급	최저등급	시험 속도별 등급	최저등급		
부산 방향	8경간	E, D, D, D, C	C	B, B, A, A, A	A	A	A
	9경간	E, E, D, D, D	D	B, B, A, A, A	A	A	
대구 방향	8경간	D	D	B	B	B	
	9경간	D	D	A	A	A	

마. 도로교의 사용성 판정

본 교량의 진동·처짐에 대한 사용성 평가는 진동으로 인해 사용자가 강한 불쾌감을 느끼는 수준인 A급으로 나타났다.

다만 본 평가결과는 교량의 안전성과는 별개의 개념이며, 연구자료에 근거하여 분석된 기법으로서 현재 공식적인 평가기준이 정립되어 있는 않은 점을 감안하여야 하며, 향후 관련 기준이 마련되어 정량적인 평가가 수행될 수 있을 때까지 유지관리에 참조할 수 있는 자료로 활용함이 적절할 것으로 판단된다.

바. 검토의견

진동 사용성(인체 감지 정도)에 대한 평가 시 진동가속도값이 수직변위값보다 크게 산정되었으며, 실측처짐과 이론처짐의 비율인 응답비의 최소값이 1.7이상으로 양호하고, 실측 고유진동수가 계산값에 비하여 강성이 큰 상태로 분석된 상태로서 강성과 질량과의 관계 특성에 따라 교량의 질량에 비하여 상대적으로 큰 강성을 띠는 교량의 상태가 동적하중에 대한 진동가속도 및 고유진동수에 대하여 민감하게 반응하여 발생하는 현상으로 판단된다.

또한 본 교량의 진동 민원에 대해서는 노선상의 타 교량이 상대적 질량 및 강성이 큰 P.S.C BOX형 교량으로서 강성 대비 질량이 작은 SEEL BOX 형식의 본 교량에서 상대적으로 더 큰 진동 영향을 감지하게되는 요인도 고려할 수 있다.

사. 사용성 판정에 따른 대책수립

교량의 진동·처짐에 대한 사용성평가는 교량의 안전성과는 별개로 교량을 통행하는 운전자나 보행자가 불쾌감을 느끼는 수준이나, 본 교량은 교량의 안전성과는 직접적인 연관이 없으므로 평가결과 불리한 등급으로 판정되었다 하더라도 즉각적인 보수·보강의 필요성은 없는 것으로 판단된다.

다만 상시 유지관리 시 참조하여야 할 사항은 다음과 같다.

1) 주행속도 및 노면조도에 의한 진동특성

포장의 노면조건이 나빠질수록 최대 진폭이 증가되며, 노면상태가 양호할 경우 주행차량의 속도에 따른 진폭변화가 크지 않으나, 노면조도가 나쁠수록 주행속도가 증가함에 따라 고유주기에서의 최대진폭이 크게 증가하게 된다. 따라서 노면 조건은 교량의 진동사용성에 대하여 영향을 많이 주는 인자이므로 양호한 노면상태를 유지시켜 진동사용성 저하 요소를 제어할 필요가 있다.

2) 받침의 노후화에 따른 교량의 진동특성

교량받침의 목적은 수직하중의 전달 외에도 교량의 온도나 크리프, 건조수축과 같은 형상변화에 의해 발생하는 수평력을 감소시키는 역할을 하며, 특히 포트받침은 상부구조의 연직방향 거동에 대하여 지점부에서 모멘트 반력이 발생되지 않도록 하여야 한다. 이러한 포트받침의 마찰력이 커져 교량 상부구조의 지점부에서 구속되면 모멘트 반력이 발생되게 되고 이로 인하여 교각 또한 휨거동을 하게 된다. 받침 노후화를 가정하여 진동특성을 연구한 자료에 따르면, 받침의 노후화가 진행될수록 최대진폭 및 고유진동수가 증가하는 것으로 나타났다. 최대진폭과 고유진동수의 증가는 인체감각에 불쾌감을 증가시킬 수 있는 요인이므로 받침의 거동상태 및 노후화에 대한 지속관찰을 실시하고 받침기능 저하 요소를 제거함으로써 진동사용성 저하 요소를 제어할 수 있다.

따라서 진동사용성이 불량하게 판정되는 사용중인 교량에서는 교량상부 및 하부구조의 형식적·구조적 보완이 어려운 점을 감안하면 교량의 포장 및 신축이음의 상태나 받침의 작동성능을 유지관리하여 1차적인 대책을 수립할 수도 있다.

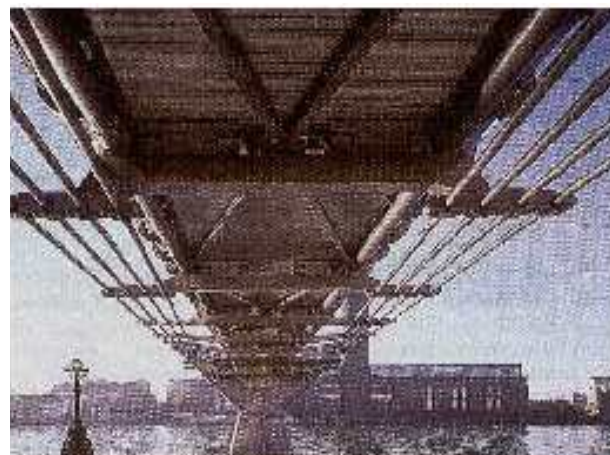
다음은 유지관리 시 참고가 될 수 있도록 보강방안에 대하여 정리하였다.

【표 5.6.3】 교량의 진동저감 공법 비교

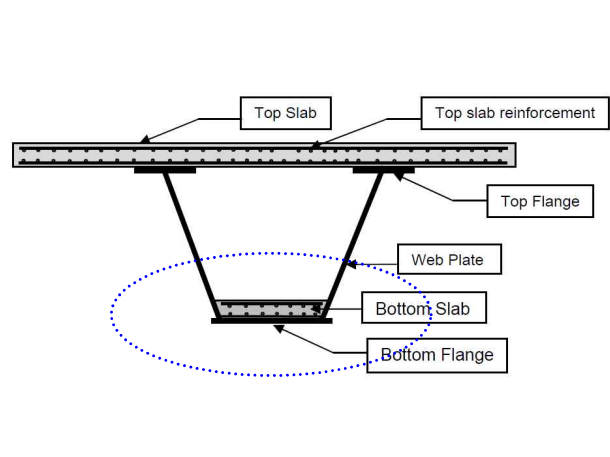
진동저감 공법	휨 제어장치 설치	TMD 설치	주형 강성 증대
공법 개요	주형내의 두 지점사이에서 발생하는 상대변위의 차를 이용하여 진동에너지를 흡수하여 수직진동을 감소시키는 방법	구조물의 고유진동수와 거의 같은 고유진동수를 가지고 진동에너지를 흡수, 소산하여 공진현상을 제거하는 방법	주형에 추가적인 부재를 설치 또는 콘크리트로 중량을 키워서 주형 전체의 강성을 키워 진동에 저항하는 방법
구조적 영향	거더 내부에 설치할수 있어 공간제약이 없음	거더 내부에의 설치가 곤란하므로 외부에 설치할 경우 공간제약이 큼	내부에서의 강성 증대효과보다 외부에서의 증대효과가 크나 외부에서의 설치가 곤란
저감 효과	온도에 의한 신축문제의 해결 및 미비한 진동에 대해서도 작동할수 있는 구조로 차량의 이동하중과 같은 강제진동에 대한 진동저감 효과 탁월	구조물의 자유진동 제어에는 효과가 크나 저감이 가능한 진동수 폭이 크지 않아 다양한 이동하중에 의한 강제진동에는 효과가 미비	강성을 증대하여 진동저감 효과는 기대할수 있으나 부가적으로 발생하는 중량증대 등으로 인하여 내진에 대해서는 불리
시공 사례	중리육교(마산)	건물이나 타워 등의 수평진동 제어, 밀레니엄 브리지(영국)	신간선 철도교량(일본), Ciervana Bridge(스페인)



시공사례1. 마산 중리육교 [휨제어장치]



시공사례2. 영국 밀레니엄 브리지 [TMD 장치]



시공사례3. Ciervana Bridge(스페인) [주형 강성 증대]

【사진 5.6.1】 교량의 진동저감 공법 시공사례

