

제5장 재하시험

5.1 개 요

5.2 재하시험 계획

5.3 의사정적재하시험

5.4 동적주행시험

제5장 재하시험

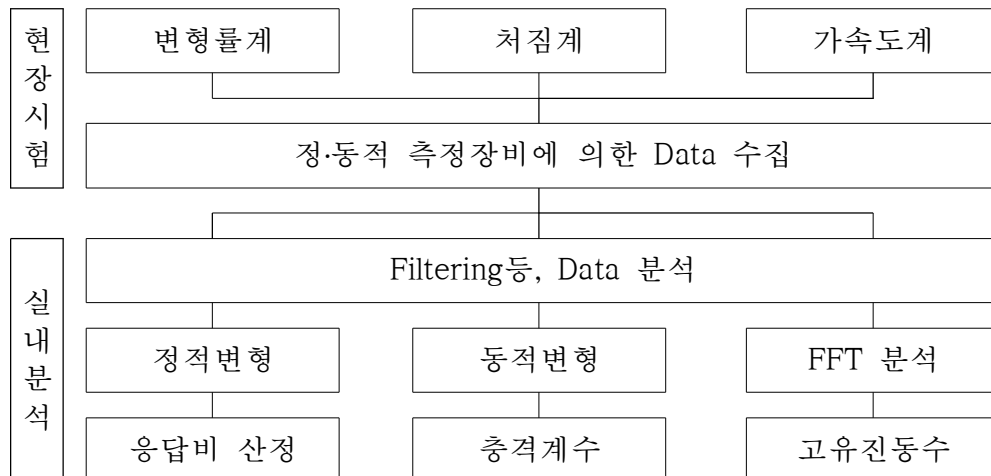
5.1 개 요

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

일반적으로 재하시험은 하중의 재하방법에 따라 정적재하시험 및 동적주행시험으로 대별되며, 최근에는 장비의 발달로 인해 정지하중에 의한 정적재하시험 대신에 종방향 이동 재하에 따른 교량의 정적거동을 연속적으로 측정하는 의사정적재하시험을 실시한다.

의사정적재하시험은 정적재하시험과 동일하게 작용외력에 대한 대상교량의 정적거동특성을 파악하고 정적변형률 및 응력의 응답비 등 내하력평가를 위한 제반계수를 산정하기 위하여 실시하며 동적주행시험은 기본적인 구조물의 동적거동을 조사·측정하기 위한 것으로 대상교량의 실충격계수와 실고유진동수 등을 측정·분석하여 교량의 동적거동특성을 파악하기 위하여 실시한다.

정·동적 재하시험의 측정체계는 <그림 5.1>과 같다.



<그림 5.1> 정·동적 재하시험 측정체계

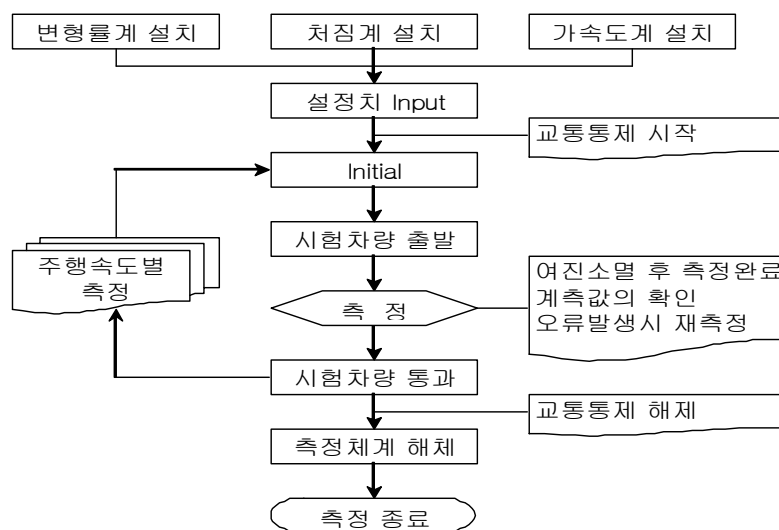
5.1.1 의사정적 재하시험

의사정적재하시험은 동적시험과 연계하여 수행할 수 있으며, 축중을 알고 있는 시험차량을 시험대상 경간에 저속으로 주행시키면서 계측한 후 응력파형상의 동적효과를 제거함으로써 정적효과를 얻을 수 있는 재하시험의 한 방법이다.

본 과업에서는 대상교량의 정적거동을 계측하기 위해 의사정적시험을 수행하여, 계측결과를 분석하여 대상교량의 정적거동특성 분석 및 내하력 평가시 응력보정을 위한 응답비를 구하기로 한다. 재하시험은 미리 선정된 지점에 측정하고자 하는 목적에 맞는 센서를 부착한 후, 시험차량을 임의의 위치를 기준으로 주행하여 교량의 처짐, 부재의 변형률 등을 측정하여, 교량의 중·횡방향 정적거동을 파악한다. 이 때 각종 센서의 부착위치 및 시험차량의 재하위치는 전문기술자의 지식 및 경험에 의해 결정되며, 대개는 최대 응답 발생 부위가 된다.

5.1.2 동적 재하시험

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 10km/hr부터 최고주행속도까지 단계적으로 증가하면서 주행하며, 이 때 측정 지점에 발생하는 처짐, 변형률 및 가속도 등을 측정하여 교량의 동적거동상태를 파악하고자 한다.



〈그림 5.2〉 재하시험의 절차

5.2 재하시험 계획

5.2.1 재하시험 장비

본 교량의 재하시험에 사용될 측정기기 및 센서의 종류는 아래의 <표 5.1> 및 <표 5.2>와 같다.

<표 5.1> 재하시험 측정기기

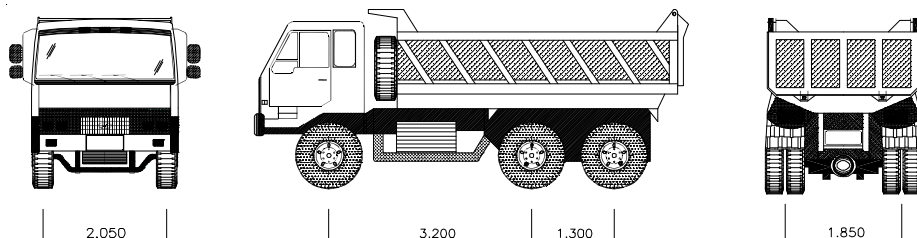
기 기 명	모 델 명	용 도	비 고
Digital Strain Meter	TC 31k	센서의 이상유무 확인	일본, TML사
Data Logger	DRA-30A	정·동적 변형률, 처짐 및 가속도 측정기	일본, TML사
	EDX-100A		일본, KYOWA사
Software	DIADEM	데이터 분석, 저장, 디스플레이	미국, NI사

<표 5.2> 센서의 종류

센 서 명	모 델 명	용 도	비 고
Strain Gauge	FLA-5-11-1L	강재 변형률 측정	일본, TML사
Displacement Meter	CDP-50	정·동적 처짐 측정	일본, TML사
Accelerometer	AS-1GB	가속도 측정 (1축)	일본, KYOWA사

5.2.2 시험차량

재하차량은 덤프트럭에 모래를 적재한 총중량 약 26.3톤의 덤프트럭 1대를 사용하였고, <그림 5.3>, <표 5.3>에 재하차량의 제원 및 축중을 나타내었다.



<그림 5.3> 시험차량의 제원

<표 5.3> 시험차량의 제원 및 축중하중

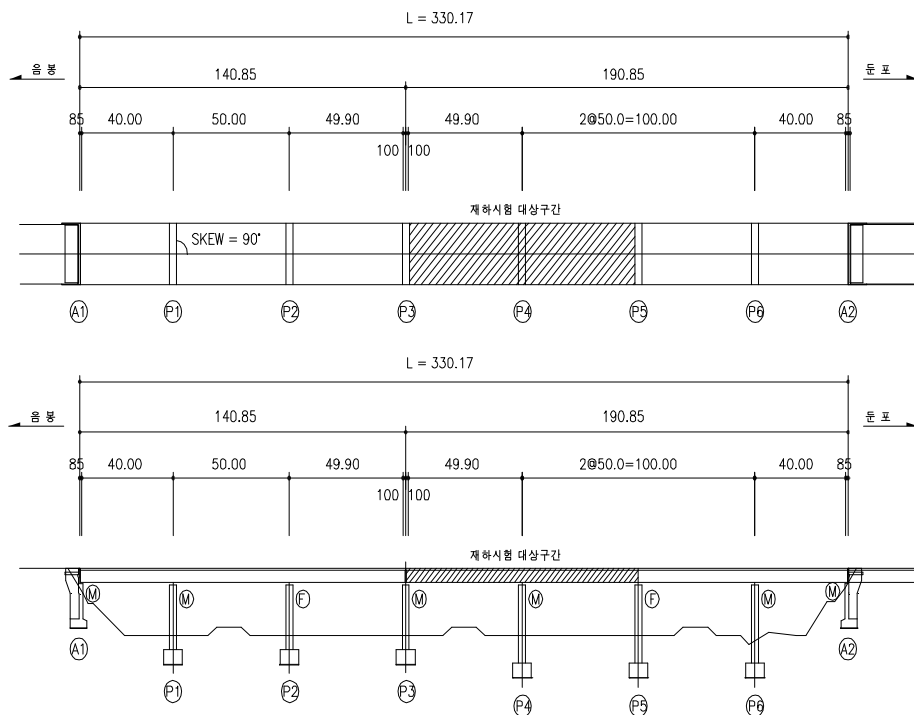
구 분	총중량 (tonf)	전륜 (tonf)	중, 후륜 (tonf)	비 고
A 차량	26.310	6.100	20.210	

5.2.3 시험경간 선정

본 교량은 Steel Box Girder교 형식으로 이루어진 교량으로서 금회 정밀안전진단 재하시험구간은 현장조사시 내하력 저하 등이 발생할 수 있는 손상은 발견되지 않아 최대단면력이 발생 위치를 고려하여 <표 5.4>, <그림 5.4>와 같이 P₃~P₅(S₄~S₅경간, 음봉→둔포방향) 구간을 선정하였다.

<표 5.4> 재하시험 대상경간

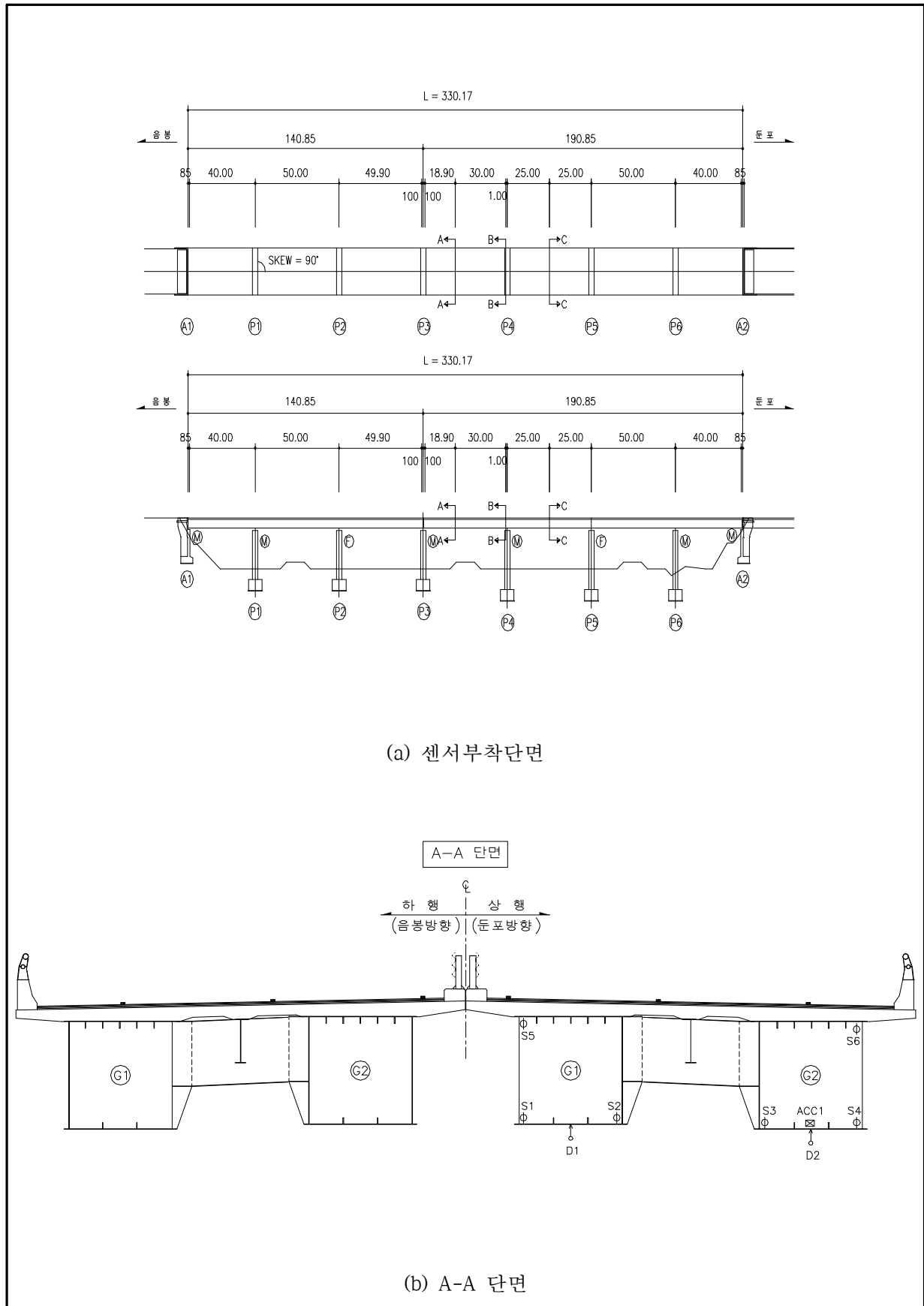
측정 경간		시험 일자	시험 항목
Steel Box Girder	S ₄ , S ₅ (P ₃ ~P ₅)	2015. 11. 11. (10:00~18:00)	- 의사정적 재하시험 - 동적 주행시험



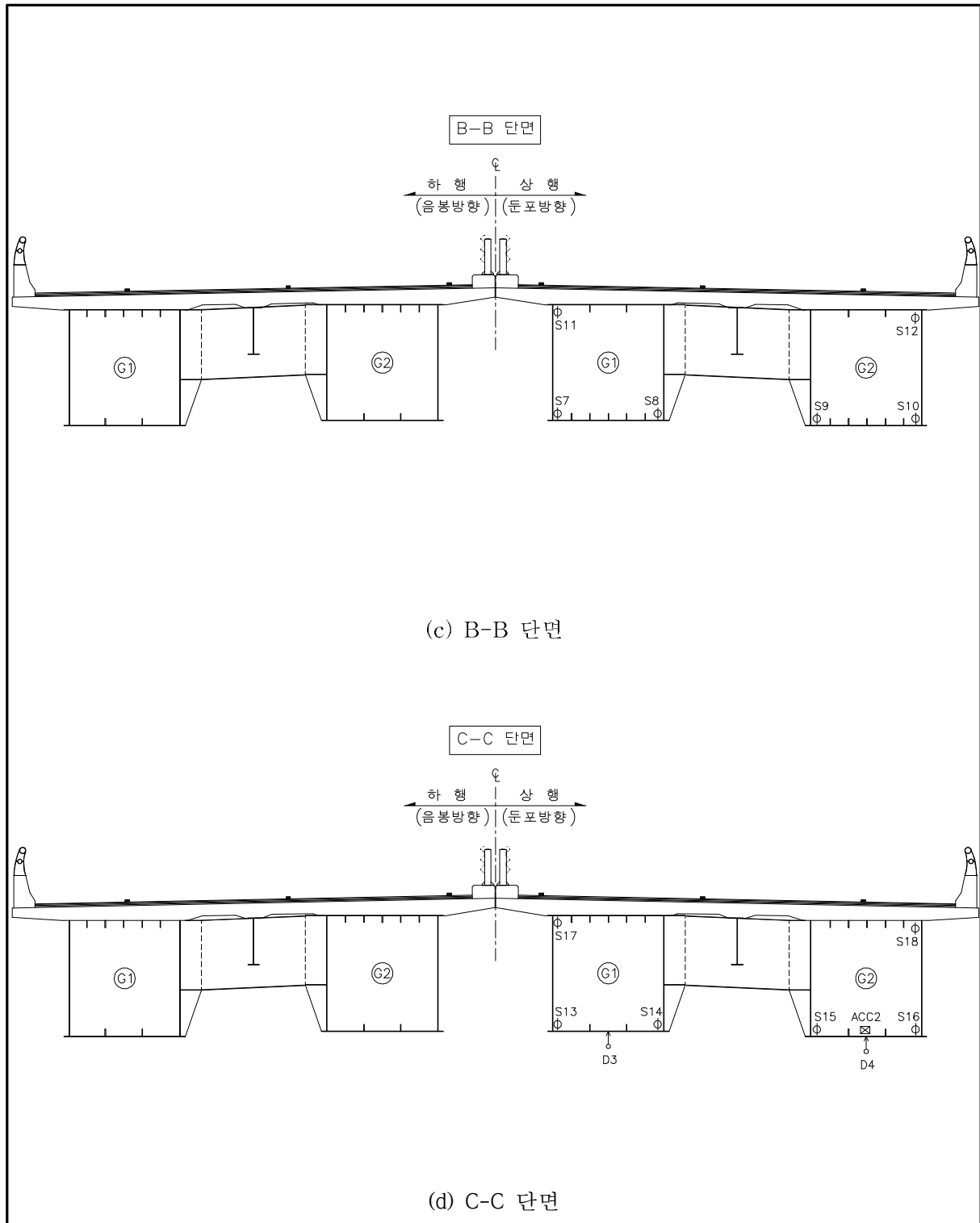
<그림 5.4> 재하시험 대상경간

5.2.4 센서설치 위치 및 수량

본 교량에서는 재하하중에 따른 단면력이 최대로 발생하는 측경간 및 내측경간 정모멘트 부(단면 A-A, 단면 C-C)와 부모멘트부(단면 B-B)를 측정단면으로 선정하여 휨변형, 처짐 및 고유진동수를 얻을 수 있도록 하였다.



〈그림 5.5〉 게이지 부착 위치



〈그림 5.5〉 게이지 부착 위치(계속)

〈표 5.5〉 재하시험 구간 Gauge 번호, 부착위치 및 목적

대상경간	Gauge No.	부착위치	측정목적
S ₄ 정모멘트부 (단면 A-A)	S1	G ₁ 좌측하연	교축방향 변형률
	S2	G ₁ 우측하연	교축방향 변형률
	S3	G ₂ 좌측하연	교축방향 변형률
	S4	G ₂ 우측하연	교축방향 변형률
	S5	G ₁ 좌측상연	교축방향 변형률
	S6	G ₂ 우측상연	교축방향 변형률
	D1	G ₁ 중앙하연	처짐
	D2	G ₂ 중앙하연	처짐
	ACC1	G ₂ 중앙하연	진동가속도
P ₄ 부모멘트부 (단면 B-B)	S7	G ₁ 좌측하연	교축방향 변형률
	S8	G ₁ 우측하연	교축방향 변형률
	S9	G ₂ 좌측하연	교축방향 변형률
	S10	G ₂ 우측하연	교축방향 변형률
	S11	G ₁ 좌측상연	교축방향 변형률
	S12	G ₂ 우측상연	교축방향 변형률
S ₅ 정모멘트부 (단면 C-C)	S13	G ₁ 좌측하연	교축방향 변형률
	S14	G ₁ 우측하연	교축방향 변형률
	S15	G ₂ 좌측하연	교축방향 변형률
	S16	G ₂ 우측하연	교축방향 변형률
	S17	G ₁ 좌측상연	교축방향 변형률
	S18	G ₂ 우측상연	교축방향 변형률
	D3	G ₁ 중앙하연	처짐
	D4	G ₂ 중앙하연	처짐
	ACC2	G ₂ 중앙하연	진동가속도

5.3 의사정적재하시험

5.3.1 시험방법 결과

가. 시험방법

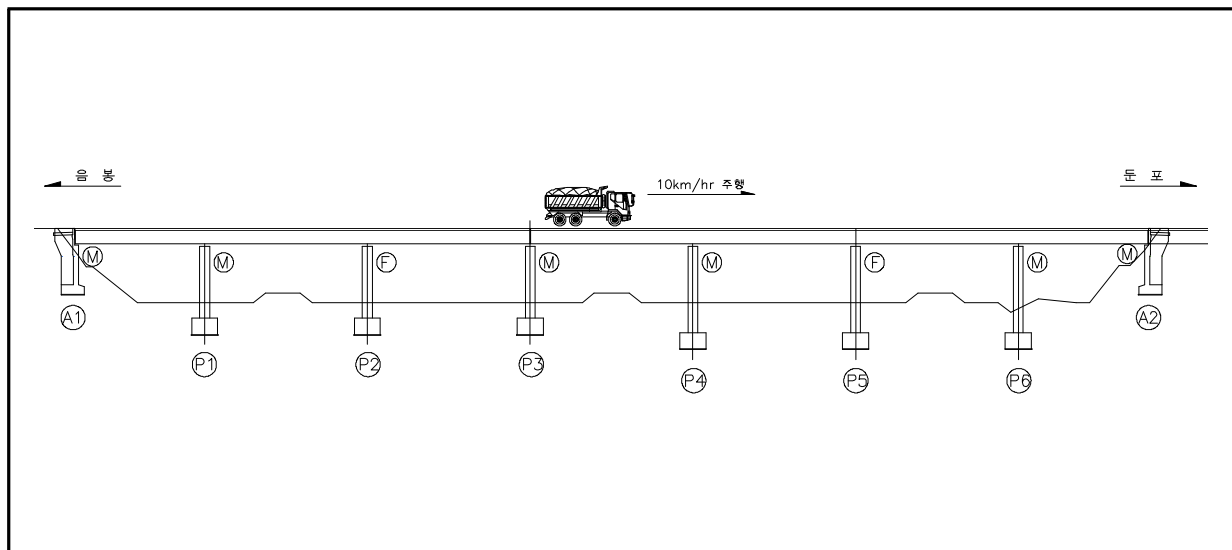
의사정적 재하시험의 경우 1대의 재하차량을 이용하여 음봉(A1)에서 둔포(A2)방향으로 진행하며 LC1 ~ LC3까지 총 3개의 하중조합으로 실시하였다.

본 교량의 경우 주행속도 10km/h를 기준으로 의사정적재하시험을 시행하였다.

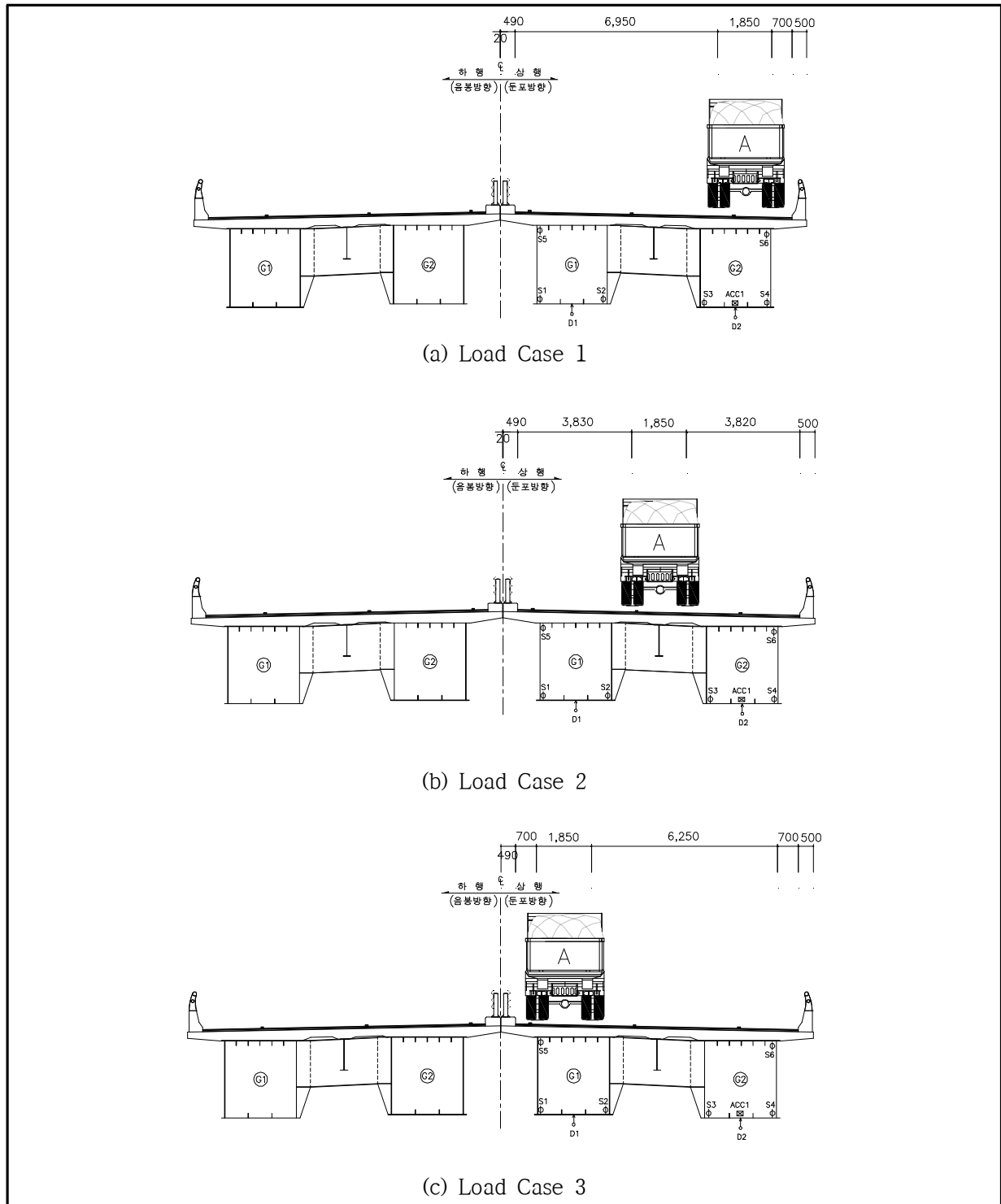
의사정적재하시험의 재하경우는 다음 <표 5.6>과 같으며 <그림 5.6>, <그림 5.7>은 차량 재하 방향 및 Load Case별 시험차량 위치를 나타내었다.

<표 5.6> 의사정적재하시험 하중 재하 경우

재하경우	주행방향	주행속도	주행차선	비 고
LC1	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	10km/h	2차선 외측주행	
LC2	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	10km/h	중앙차선 주행	
LC3	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	10km/h	1차선 내측주행	



<그림 5.6> 의사정적 주행방향



〈그림 5.7〉 Load Case별 재하위치

나. 의사정적 재하시험 결과

본 교량에 대한 의사정적재하시험의 측정결과는 아래 <표 5.7>~<표 5.8>과 같으며 변형률의 경우 인장은 양(+), 변위의 경우 음(-)의 값은 하향의 처짐을 나타낸다.

〈표 5.7〉 의사정적재하시험 결과 - 변형률

[단위: $\mu \varepsilon$]

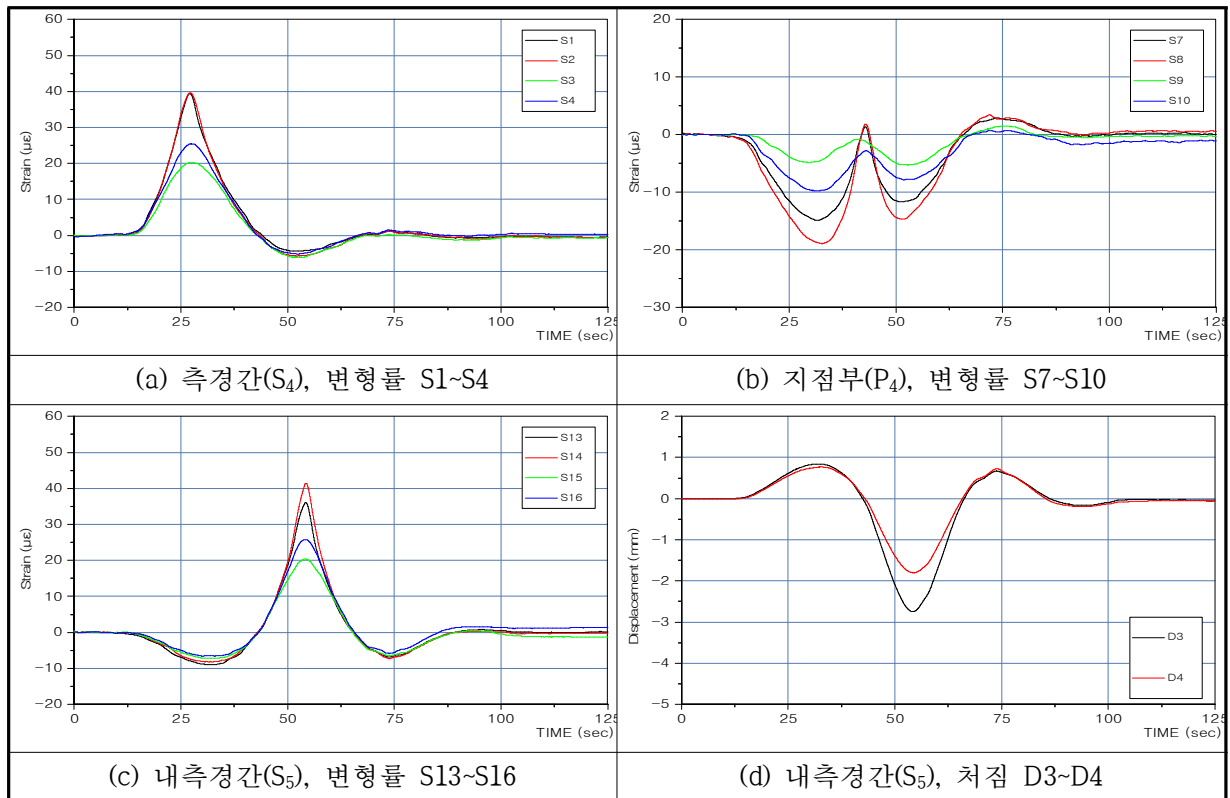
구 분 하중경우	S ₄ 정모멘트부						비 고
	G ₁			G ₂			
	S1	S2	S5	S3	S4	S6	
LC1	24.69	20.68	-4.65	41.57	38.59	-7.42	
LC2	30.67	30.32	-5.46	31.11	29.53	-5.73	
LC3	39.46	39.57	-7.43	20.29	25.47	-4.16	
구 분 하중경우	P ₄ 부모멘트부						비 고
	G ₁			G ₂			
	S7	S8	S11	S9	S10	S12	
LC1	-12.77	-9.19	0.94	-14.62	-11.17	4.12	
LC2	-12.77	-14.45	1.89	-10.85	-9.96	3.01	
LC3	-14.91	-18.92	2.62	-5.25	-9.73	1.47	
구 분 하중경우	S ₅ 정모멘트부						비 고
	G ₁			G ₂			
	S13	S14	S17	S15	S16	S18	
LC1	24.02	19.94	-4.18	43.13	40.75	-4.80	
LC2	33.55	30.36	-5.00	30.65	33.58	-5.47	
LC3	36.03	41.44	-5.60	20.38	25.79	-3.82	

〈표 5.8〉 의사정적재하시험 결과 - 변위

[단위: mm]

구 분 하중경우	S ₄ 정모멘트부		비 고
	G ₁	G ₂	
	D1	D2	
LC1	-2.219	-3.144	
LC2	-2.630	-2.668	
LC3	-3.175	-2.166	
구 분 하중경우	S ₅ 정모멘트부		비 고
	G ₁	G ₂	
	D3	D4	
LC1	-1.897	-2.795	
LC2	-2.368	-2.268	
LC3	-2.748	-1.802	

의사정적재하시험을 실시한 결과, 측경간(S_4) 정모멘트부의 최대 변형률 및 최대 처짐은 $41.57 \mu\epsilon$ (인장), -3.175 mm 로 나타났으며, 내측경간(S_5) 정모멘트부의 최대 변형률 및 최대 처짐은 $43.13 \mu\epsilon$ (인장), -2.795 mm 로 측정되었다. 또한 지점부(P_4)에서의 최대 변형률은 $-18.92 \mu\epsilon$ (압축)으로 측정되었다. 다음 <그림 5.8>에는 재하 경우 시 시간에 따른 변형률 및 변위의 응답곡선을 일례로 나타냈다.



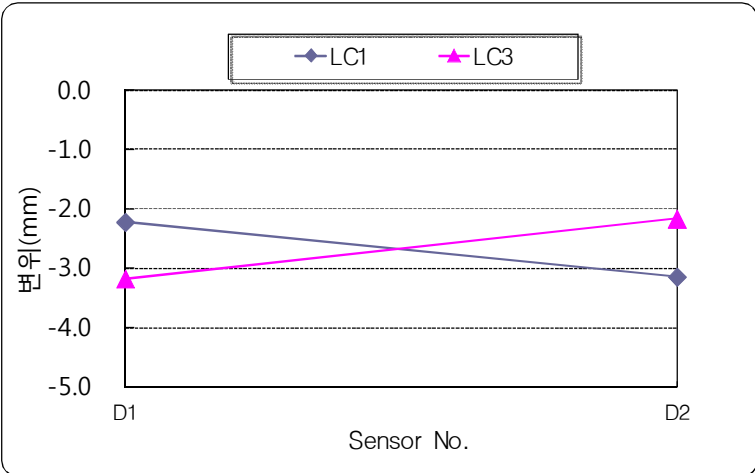
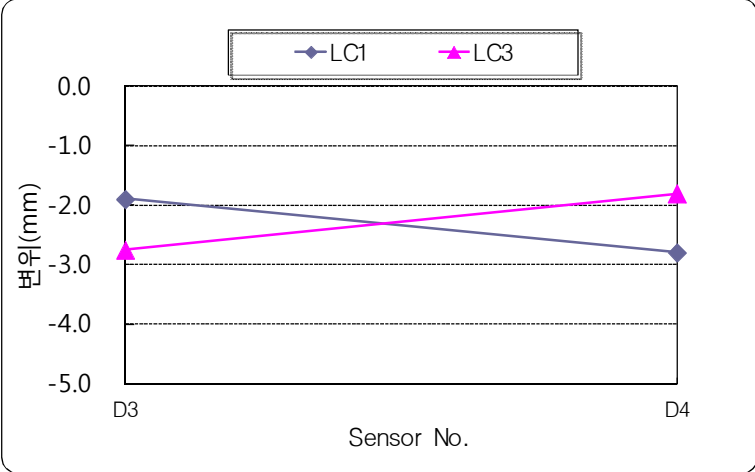
<그림 5.8> 의사정적 응답곡선 일례 - LC3

다. 계측결과의 분석

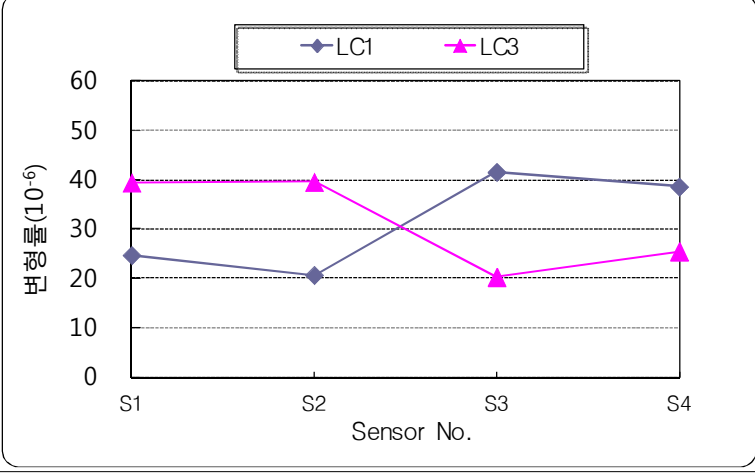
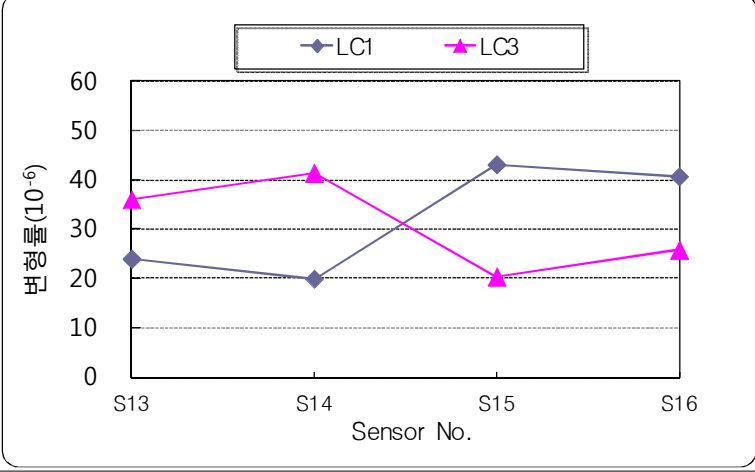
1) 횡방향 거동 특성

의사정적재하시험결과를 바탕으로 본 교량의 횡방향 거동 특성을 파악하기 위해 변형률 및 변위의 분포를 분석한 결과, 각 재하하중위치에 따른 변형률 및 변위의 횡방향 거동은 양호하게 나타나 특이한 구조거동은 없는 것으로 판단된다.

<표 5.9> 횡방향 거동분포

		
구 분	단면 A-A(S ₄)	
	변위(mm)	
	G ₁	G ₂
	D1	D2
LC1	-2.219	-3.144
LC3	-3.175	-2.166
		
구 분	단면 C-C(S ₅)	
	변위(mm)	
	G ₁	G ₂
	D3	D4
LC1	-1.897	-2.795
LC3	-2.748	-1.802

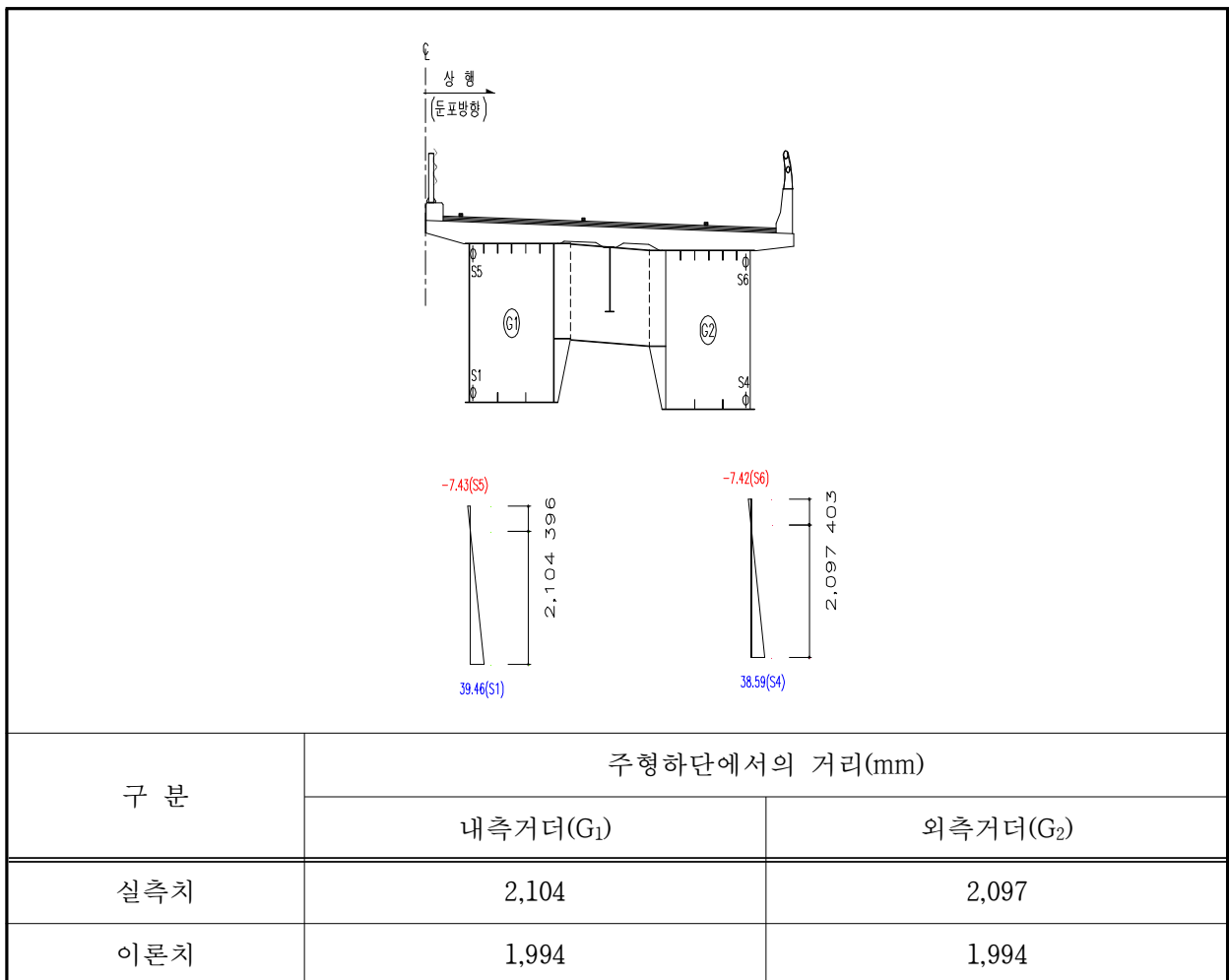
<표 5.9> 횡방향 기동분포(계속)

				
구 분	단면 A-A(S ₄)			
	변형률($\mu \varepsilon$)			
	G ₁		G ₂	
	S1	S2	S3	S4
LC1	24.69	20.68	41.57	38.59
LC3	39.46	39.57	20.29	25.47
				
구 분	단면 C-C(S ₅)			
	변형률($\mu \varepsilon$)			
	G ₁		G ₂	
	S13	S14	S15	S16
LC1	24.02	19.94	43.13	40.75
LC3	36.03	41.44	20.38	25.79

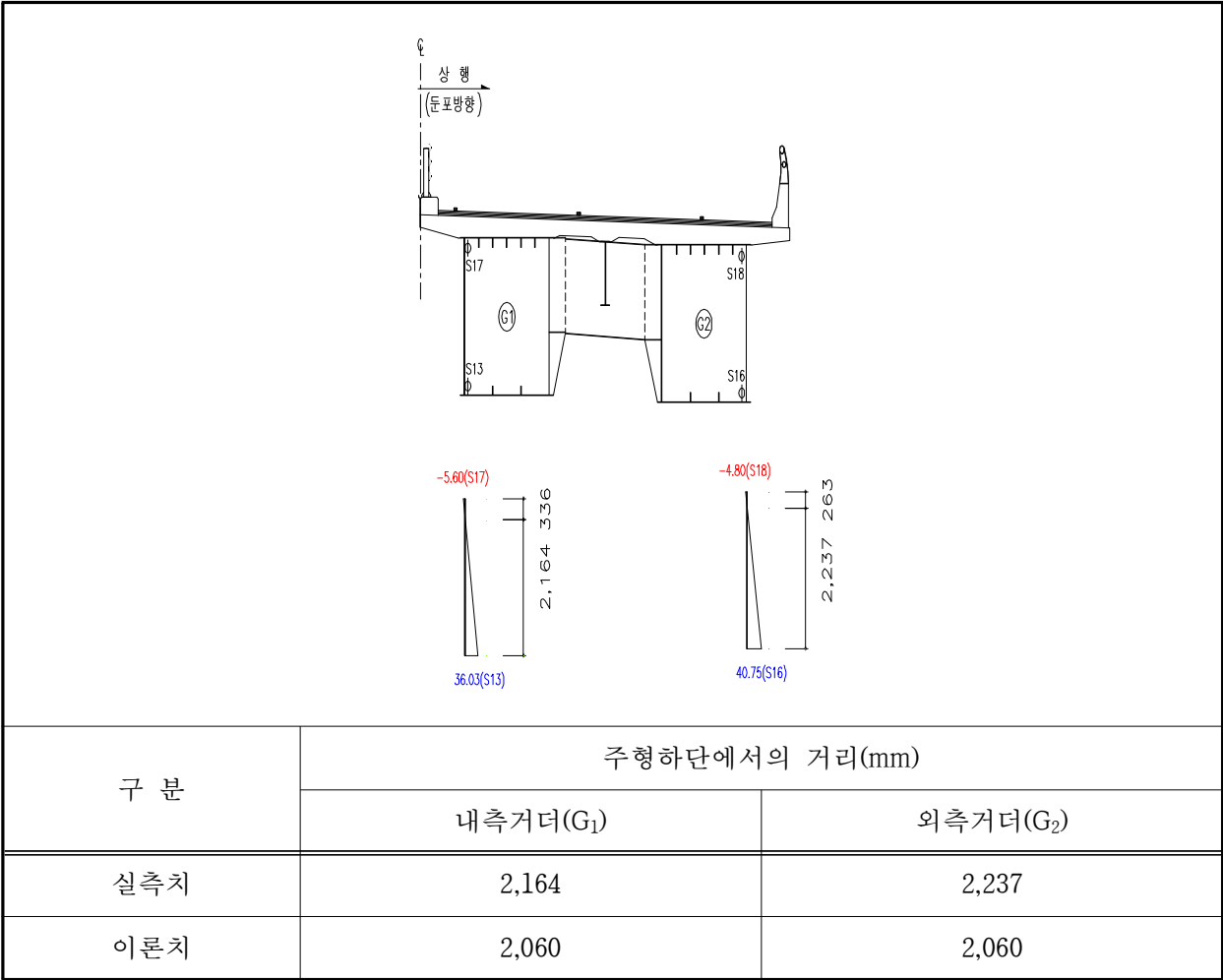
2) 중립축 위치분석

일반적으로 변형률의 측정값이 작을 경우 노이즈의 영향이 크므로 주형 상단에 설치된 변형률의 경우 응답값이 작아 중립축 위치 분석시 오차를 많이 포함하고 있으므로 정확하게 일치하지 않는 경향이 있다. 따라서, 본 측정구간에 대한 중립축 위치 분석은 주행위치에 있어 응답값이 큰 LC1, LC3을 이용하였다.

다음 <그림 5.9> ~ <그림 5.10>에는 주형 상하면에 부착한 변형률게이지 측정치를 직선 연결하여 구한 실측 중립축 위치(주형하단에서의 거리)를 도시하였고, 이론 중립축 위치와는 차이가 있으나 상대적으로 높게 나타나 재하차량에 대하여 단면이 양호한 거동을 하는 것으로 확인할 수 있다.



<그림 5.9> 측정간 중립축 위치분석



<그림 5.10> 내측경간 중립축 위치분석

5.4 동적주행시험

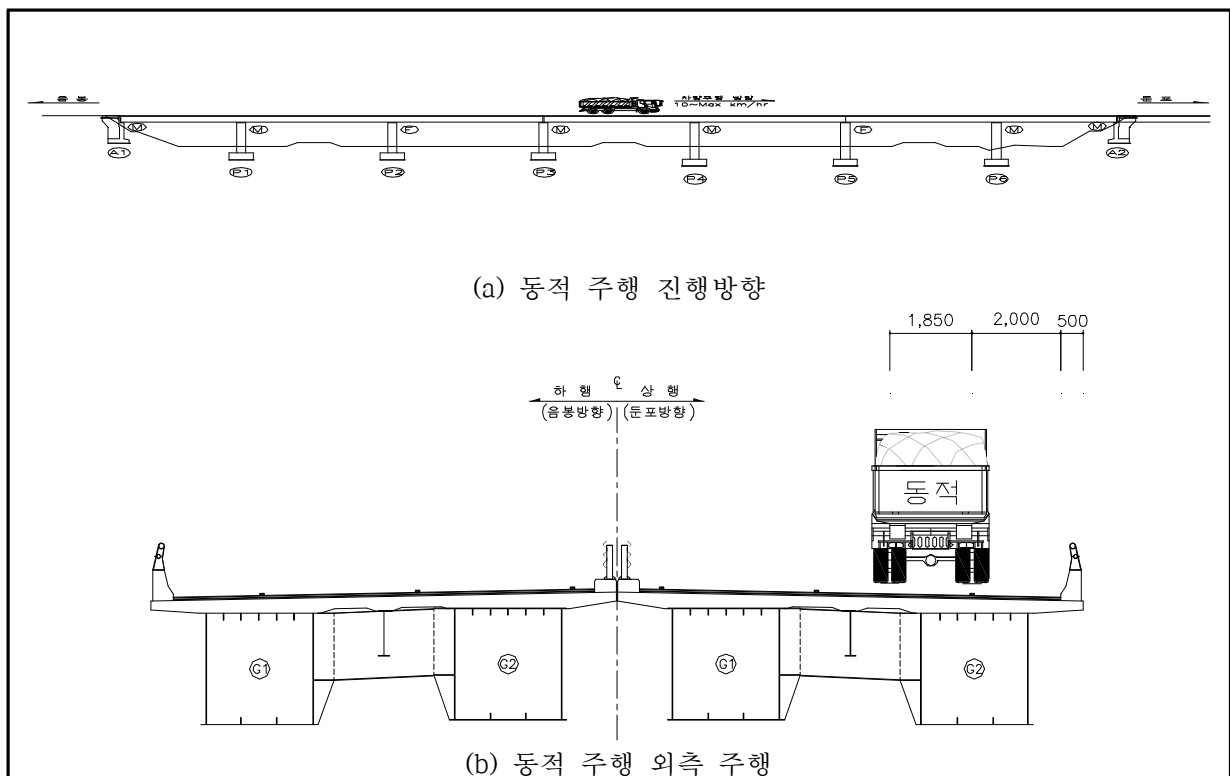
5.4.1 시험방법 및 결과

가. 주행시험 및 재하 경우

동적 재하시험은 충격계수와 고유진동수 측정을 위하여 실시하였으며 재하차량을 이용하여 10km/h에서 주행 가능한 최대속도 70km/h까지 속도를 증가하여 측정하였으며 주행 속도 및 주행방법은 <표 5.10> 및 <그림 5.11>에 나타내었다.

<표 5.10> 동적 재하시험 주행속도별 차량 진행 방향

재하경우	주행방향	주행차선	주행속도(km/h)	비 고
LC1	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	중앙차선	10	
LC2	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	중앙차선	20	
LC3	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	중앙차선	30	
LC4	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	중앙차선	40	
LC5	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	중앙차선	50	
LC6	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	중앙차선	60	
LC7	음봉(A ₁) → 둔포(A ₂)	중앙차선	Max 70	



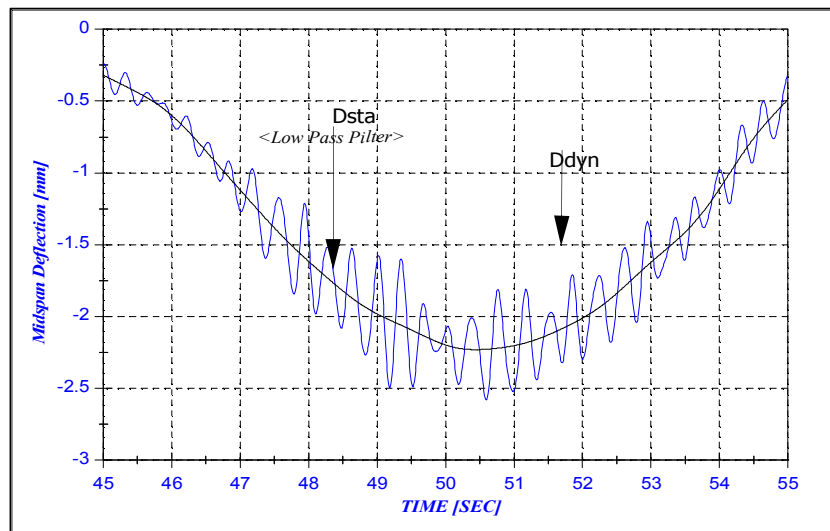
<그림 5.11> 동적 주행 방향 및 위치

나. 충격계수

충격계수 산정시 5~10km정도의 서행에 의한 응답을 정적응답치로 간주하고 이 값을 기준으로 속도별 응답치를 이용하여 충격계수를 산정하는 방법이 일반적으로 사용되나, 최초 서행시와 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 5.12>와 같이 동적주행 시험의 각 속도별의 동적응답 곡선을 Low Pass Filter에 의해서 필터링한 최대정적응답<Dsta(max)> 곡선을 기준으로 계측 최대동적응답치<Ddyn(max)>와 비교하여 실측충격계수를 산정한다.

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



<그림 5.12> 응답 이력곡선

동적주행시험결과 실측충격계수 최대값은 측정간(S4)의 경우 70km/h 주행시 0.156, 내측측간(S5)에서 70km/h 주행시 0.163로 나타나 도로교 설계기준에서 제시하는 이론충격계수 0.167보다 작게 분석되어 이동하중에 대한 영향은 양호한 것으로 판단된다.

또한 최대 충격계수의 선정은 각 주행별로 재하위치에 상대적으로 응답값이 큰 계측치만을 이용하였다.

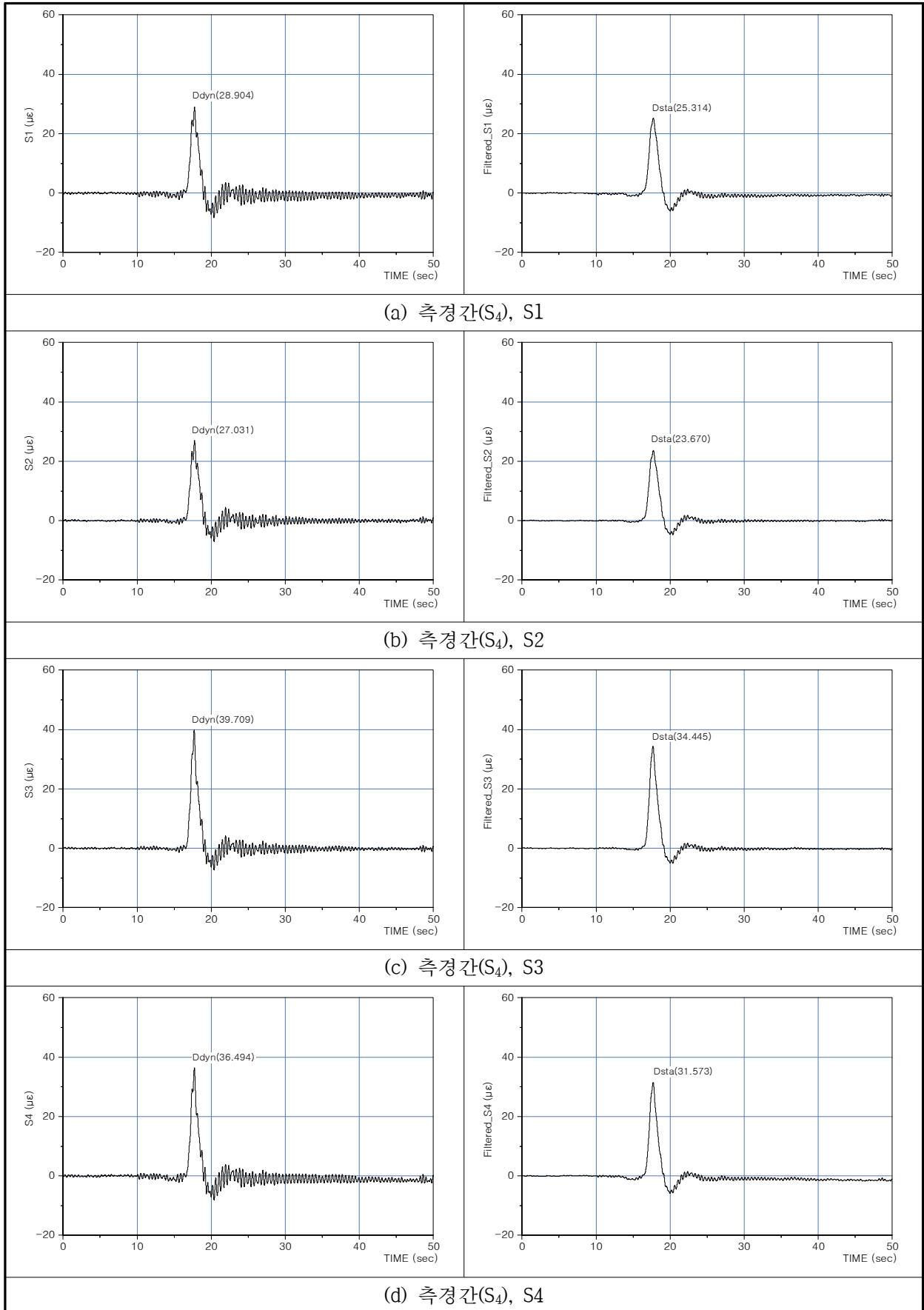
각 속도별 충격계수를 <표 5.11>에 나타내었으며, 동적측정결과에 대한 필터링 전·후의 일례를 <그림 5.13>에 도시하였다.

〈표 5.11〉 속도별 충격계수

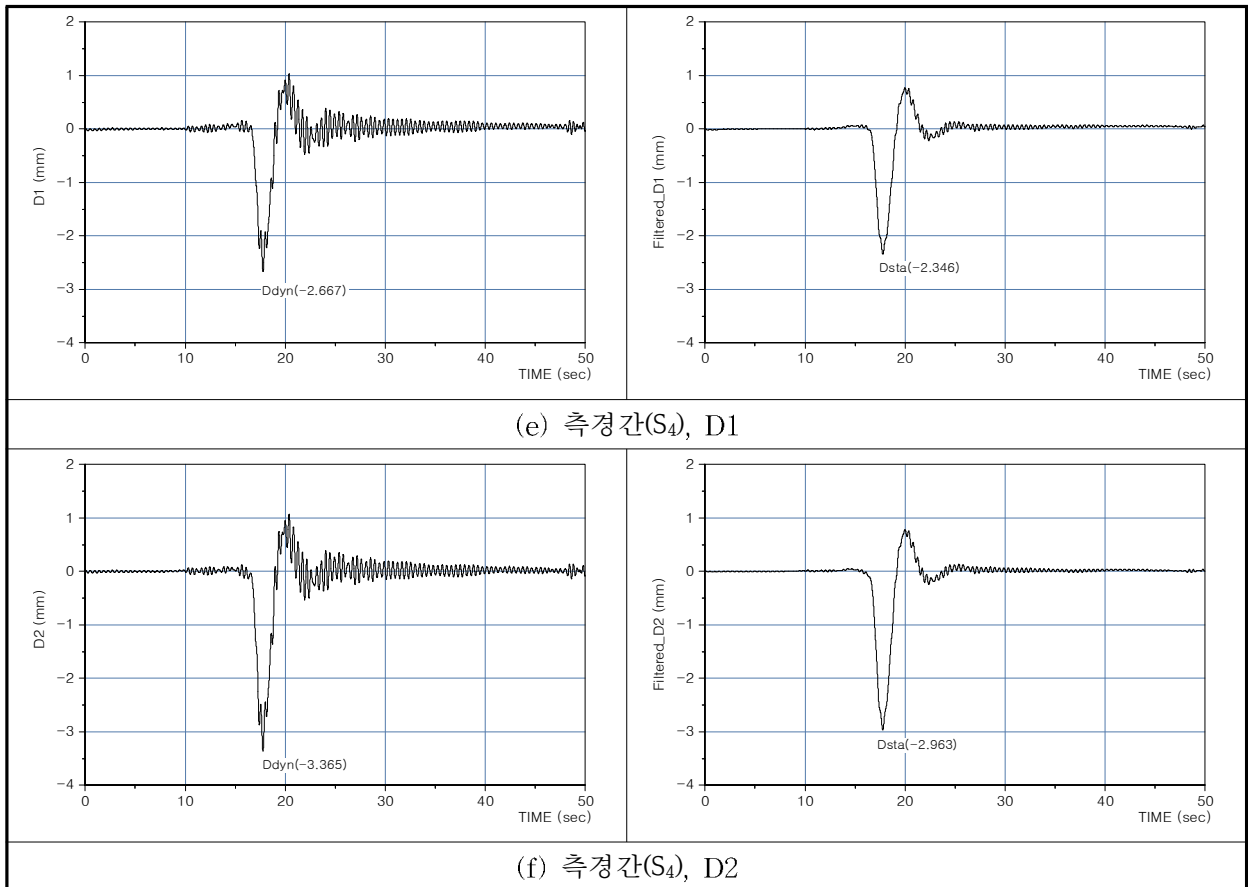
구 분		측경간(S ₄)					
		변형률(με)				변위(mm)	
		G ₁		G ₂		G ₁	G ₂
		S1	S2	S3	S4	D1	D2
LC 1 (10km/h)	Ddyn	28.491	24.538	39.739	37.420	-2.481	-3.127
	Dsta	27.574	23.491	38.317	35.991	-2.356	-3.001
	충격계수(i)	0.033	0.045	0.037	0.040	0.053	0.042
LC 2 (20km/h)	Ddyn	28.256	23.891	40.822	36.715	-2.359	-3.042
	Dsta	27.398	23.317	38.098	35.270	-2.338	-3.002
	충격계수(i)	0.031	0.025	0.071	0.041	0.009	0.013
LC 3 (30km/h)	Ddyn	28.968	24.904	41.685	36.574	-2.490	-3.217
	Dsta	27.388	23.525	38.397	34.314	-2.368	-3.056
	충격계수(i)	0.058	0.059	0.086	0.066	0.052	0.053
LC 4 (40km/h)	Ddyn	29.149	25.267	38.745	36.701	-2.611	-3.368
	Dsta	26.559	22.800	35.957	33.733	-2.366	-3.065
	충격계수(i)	0.098	0.108	0.078	0.088	0.104	0.099
LC 5 (50km/h)	Ddyn	30.080	26.369	41.266	37.040	-2.635	-3.305
	Dsta	26.864	23.436	36.579	33.856	-2.366	-2.971
	충격계수(i)	0.120	0.125	0.128	0.124	0.114	0.112
LC 6 (60km/h)	Ddyn	29.732	26.783	40.820	36.816	-2.582	-3.250
	Dsta	25.989	23.480	35.579	32.187	-2.290	-2.897
	충격계수(i)	0.144	0.141	0.147	0.144	0.128	0.122
LC 7 (70km/h)	Ddyn	28.904	27.031	39.709	36.494	-2.667	-3.365
	Dsta	25.314	23670	34.445	31.573	-2.346	-2.963
	충격계수(i)	0.142	0.142	0.153	0.156	0.137	0.136
최대충격계수		0.156				0.137	
설계충격계수		0.167					

〈표 5.11〉 속도별 충격계수(계속)

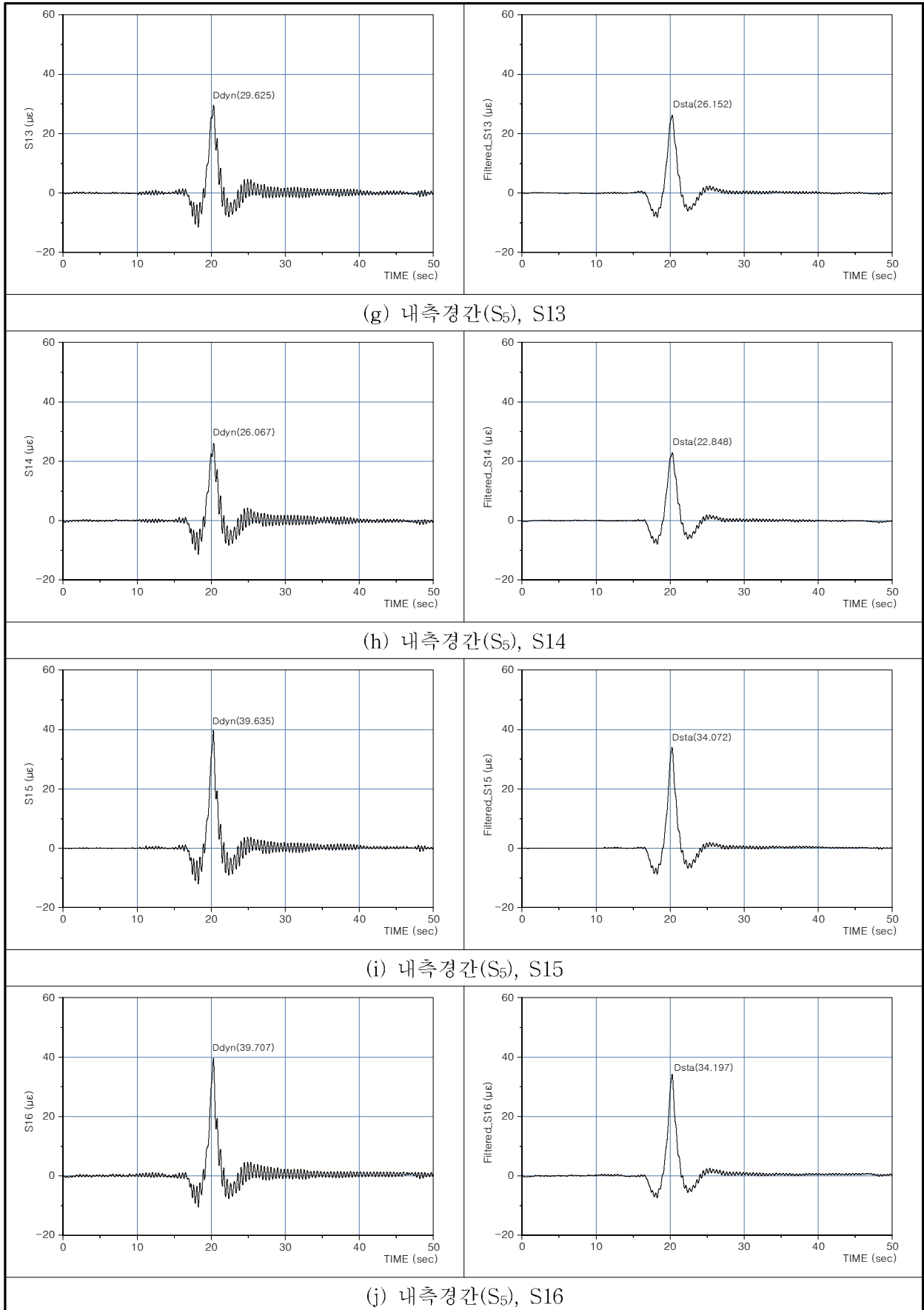
구 분		내측경간(S ₅)					
		변형률(με)				변위(mm)	
		G ₁		G ₂		G ₁	G ₂
		S13	S14	S15	S16	D3	D4
LC 1 (10km/h)	Ddyn	29.074	25.602	40.061	40.553	-2.195	-2.705
	Dsta	27.743	24.018	28.398	39.216	-2.067	2.591
	충격계수(i)	0.048	0.066	0.043	0.034	0.062	0.044
LC 2 (20km/h)	Ddyn	29.398	25.557	40.373	40.136	-2.122	-2.659
	Dsta	28.117	24.335	37.620	37.560	-2.036	-2.560
	충격계수(i)	0.046	0.050	0.073	0.069	0.042	0.039
LC 3 (30km/h)	Ddyn	28.512	23.477	40.616	39.131	-2.066	-2.650
	Dsta	27.381	22.907	37.936	36.792	-2.006	-2.577
	충격계수(i)	0.041	0.025	0.071	0.064	0.030	0.028
LC 4 (40km/h)	Ddyn	29.423	26.054	41.485	40.174	-2.240	-2.931
	Dsta	26.707	23.527	36.539	36.233	-2.037	-2.590
	충격계수(i)	0.102	0.107	0.108	0.109	0.100	0.093
LC 5 (50km/h)	Ddyn	28.985	25.431	40.171	40.300	-2.138	-2.933
	Dsta	26.299	23.098	35.684	35.899	-1.976	-2.532
	충격계수(i)	0.102	0.101	0.126	0.123	0.082	0.079
LC 6 (60km/h)	Ddyn	29.859	25.808	39.504	39.187	-2.266	-2.758
	Dsta	26.497	23.135	34.664	34.532	-2.013	-2.483
	충격계수(i)	0.127	0.116	0.140	0.135	0.126	0.111
LC 7 (70km/h)	Ddyn	29.652	26.067	39.635	39.707	-2.273	-2.819
	Dsta	26.152	22.848	34.072	34.197	-1.994	-2.504
	충격계수(i)	0.134	0.141	0.163	0.161	0.140	0.126
최대충격계수		0.163				0.140	
설계충격계수		0.167					



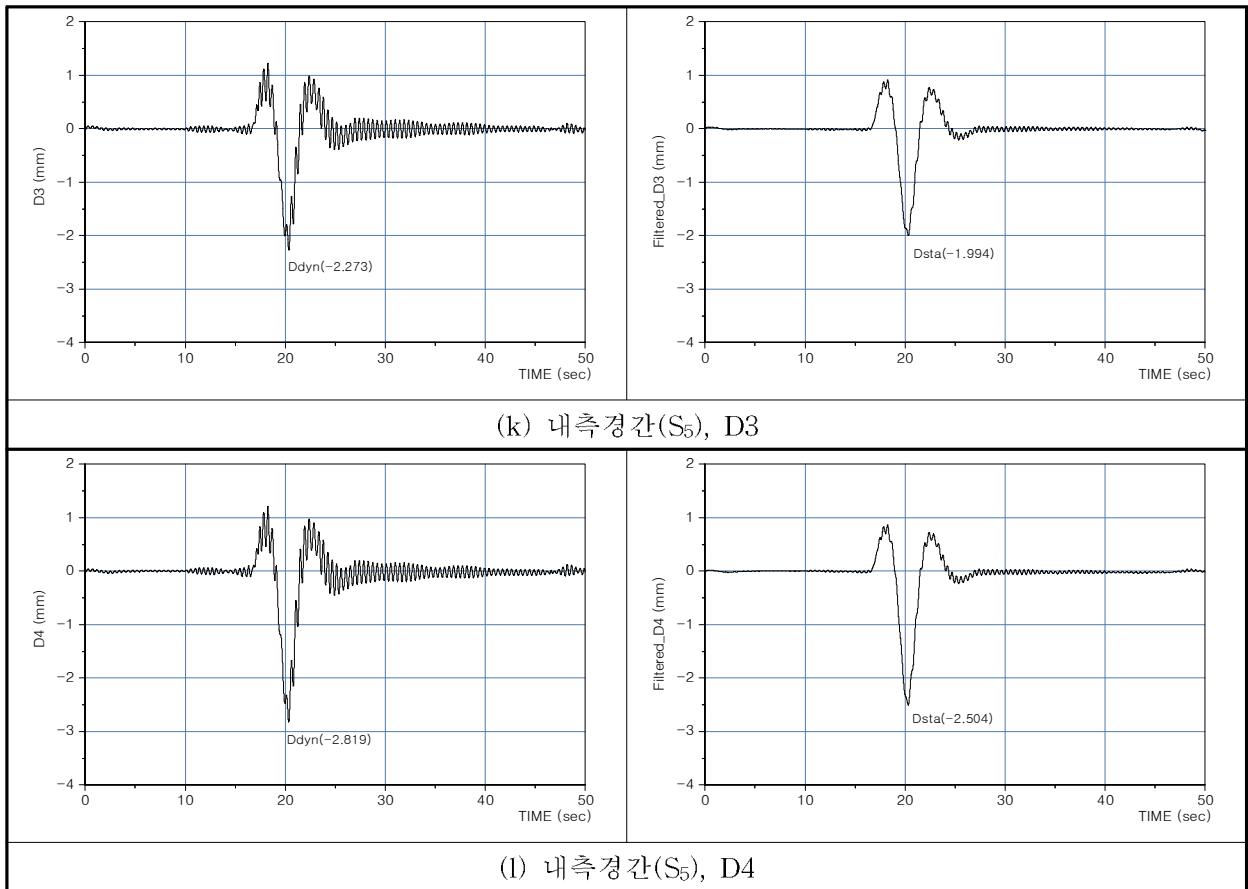
〈그림 5.13〉 필터링 전, 후 응답곡선 일례 - 70km/hr 주행



〈그림 5.13〉 필터링 전, 후 응답곡선 일례 - 70km/hr 주행(계속)



〈그림 5.13〉 필터링 전, 후 응답곡선 일례 - 70km/hr 주행(계속)



〈그림 5.13〉 필터링 전, 후 응답곡선 일례 - 70km/hr 주행(계속)

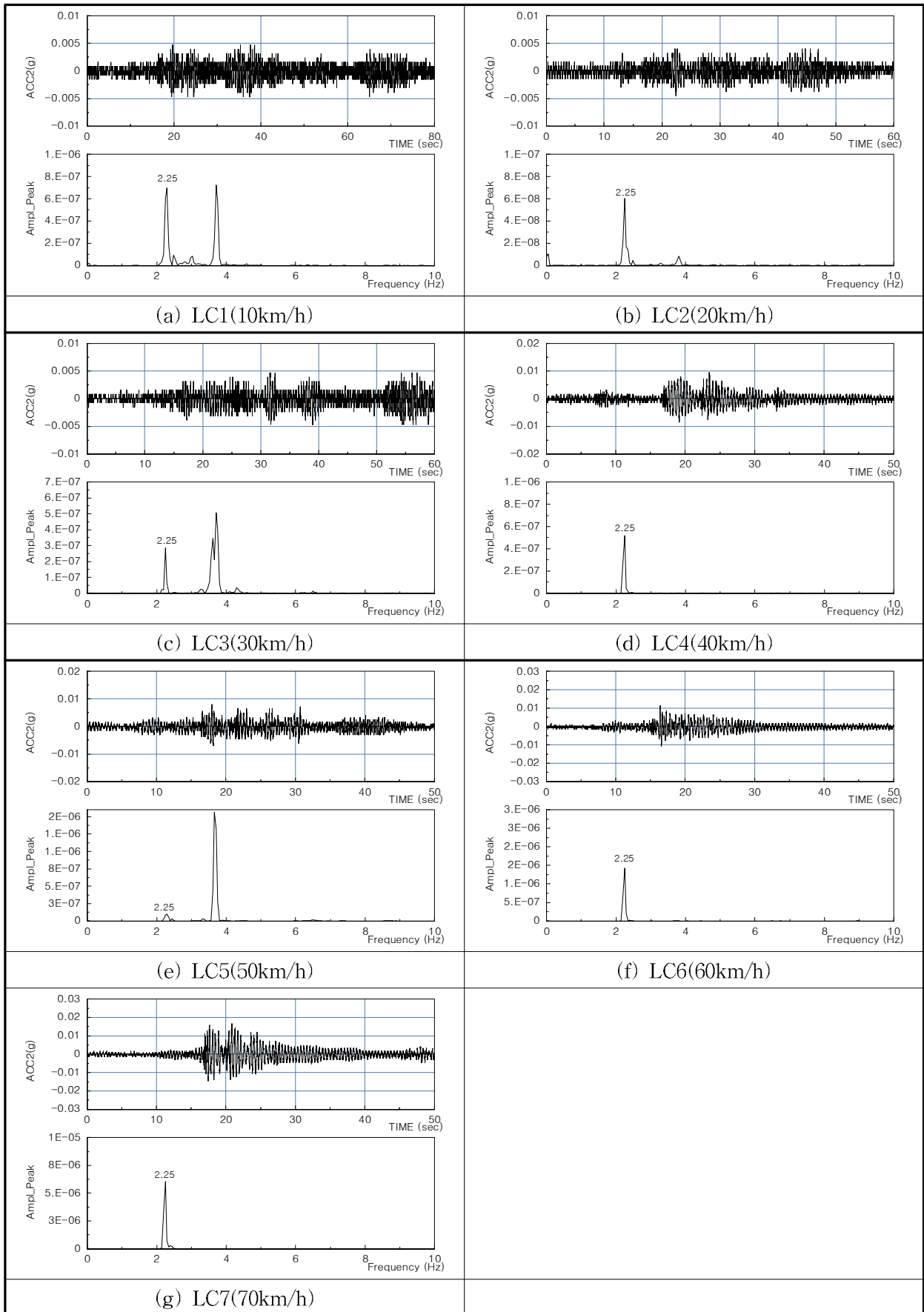
다. 고유진동수

대상교량의 고유진동수를 평가하기 위하여 S4, S5경간 정모멘트부에 가속도계를 1축(연직방향)으로 부착하여 주행속도별로 진동가속도를 측정하였고 재하차량이 측정경간을 벗어나서 영향을 주지 않는 자유진동상태에서의 응답곡선으로 FFT 분석을 실시하였다. 분석결과 대상교량의 실측고유진동수는 1차모드(연직방향)에서 2.25Hz로 나타나 해석고유진동수(2.135Hz)과 비슷하게 나타났다.

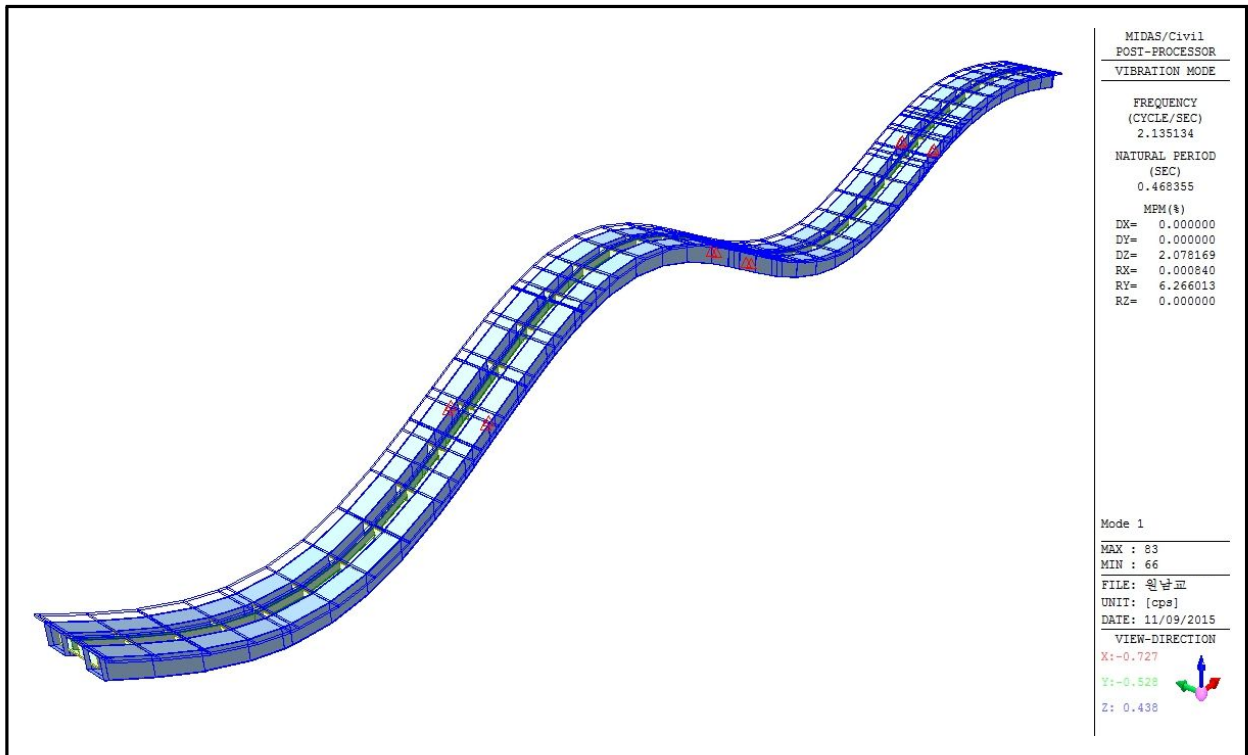
〈표 5.12〉 및 〈그림 5.14〉, 〈그림 5.15〉에는 교량의 실측 및 계산 고유진동수를 비교한 것이며 합리적인 값으로 분석된다.

〈표 5.12〉 고유진동수 해석치 와 실측치 비교

구분	실측고유진동수(Hz)		해석고유진동수(Hz)	비 고
	ACC1(연 직)	ACC2(연 직)		
1MODE	2.25	2.25	2.135	



〈그림 5.14〉 가속도 응답곡선에 대한 F.F.T 분석



〈그림 5.15〉 해석 고유진동수

