

제5장 재하시험

5.1 개 요

5.2 재하시험 계획 및 실행

5.3 정적재하시험

5.4 동적주행시험

5.5 재하시험 결과분석

제5장 재하시험

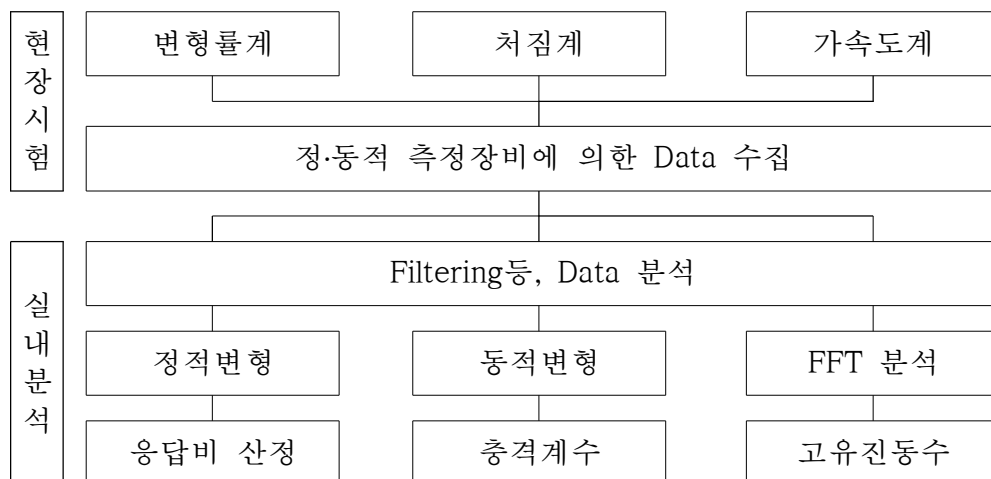
5.1 개 요

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 대별된다.

정적재하시험은 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

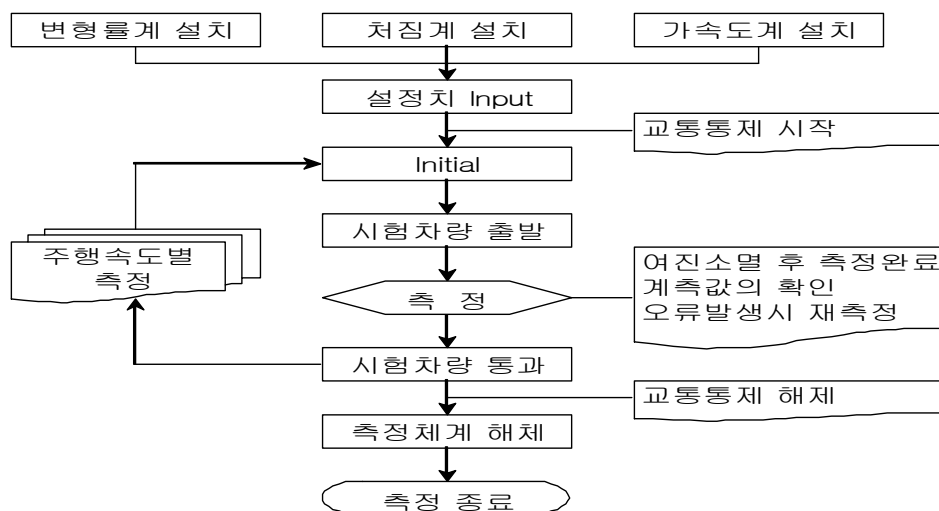
5.1.1 정적 재하시험

정적재하시험은 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 정적시험을 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 20km/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 및 실행

5.2.1 재하시험 장비

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

기 기 명	모 델 명	용 도	비 고
Digital Strain Meter	TC 31k	센서의 이상유무 확인	일본, TML사
Data Logger	SDL-600R	정·동적 변형률, 처짐 및 가속도 측정기	한국, RADIANT
Software	MULTILOAD	데이터 분석, 저장, 디스플레이	한국, RADIANT

<표 5.1> 재하시험 측정기기

센 서 명	모 델 명	용 도	비 고
Strain Gauge	FLA-2-11-1L	강재 변형률 측정	일본, TML사
Displacement Meter	OU-30	정·동적 처짐 측정	일본, TML사
Accelerometer	AS-1GB	가속도 측정 (1축)	일본, KYOWA사

<표 5.2> 센서의 종류

5.2.2 시험차량 제원 및 축중

재하차량은 덤프트럭에 모래를 적재한 총중량 약 27톤의 덤프트럭 1대를 사용하였고, 시험에 이용된 시험트럭의 총중량은 설계하중의 약 62% 수준이다. <그림 5.3>, <표 5.3>에 재하차량의 제원 및 축중을 나타내었다.

<그림 5.3> 재하차량 제원

구 분	총중량 (tonf)	전륜 (tonf)	중륜 (tonf)	후륜 (tonf)	비 고
15ton 덤프트럭	26.970	6.540	10.215	10.215	

<표 5.3> 재하차량 제원

5.2.3 시험경간의 선정

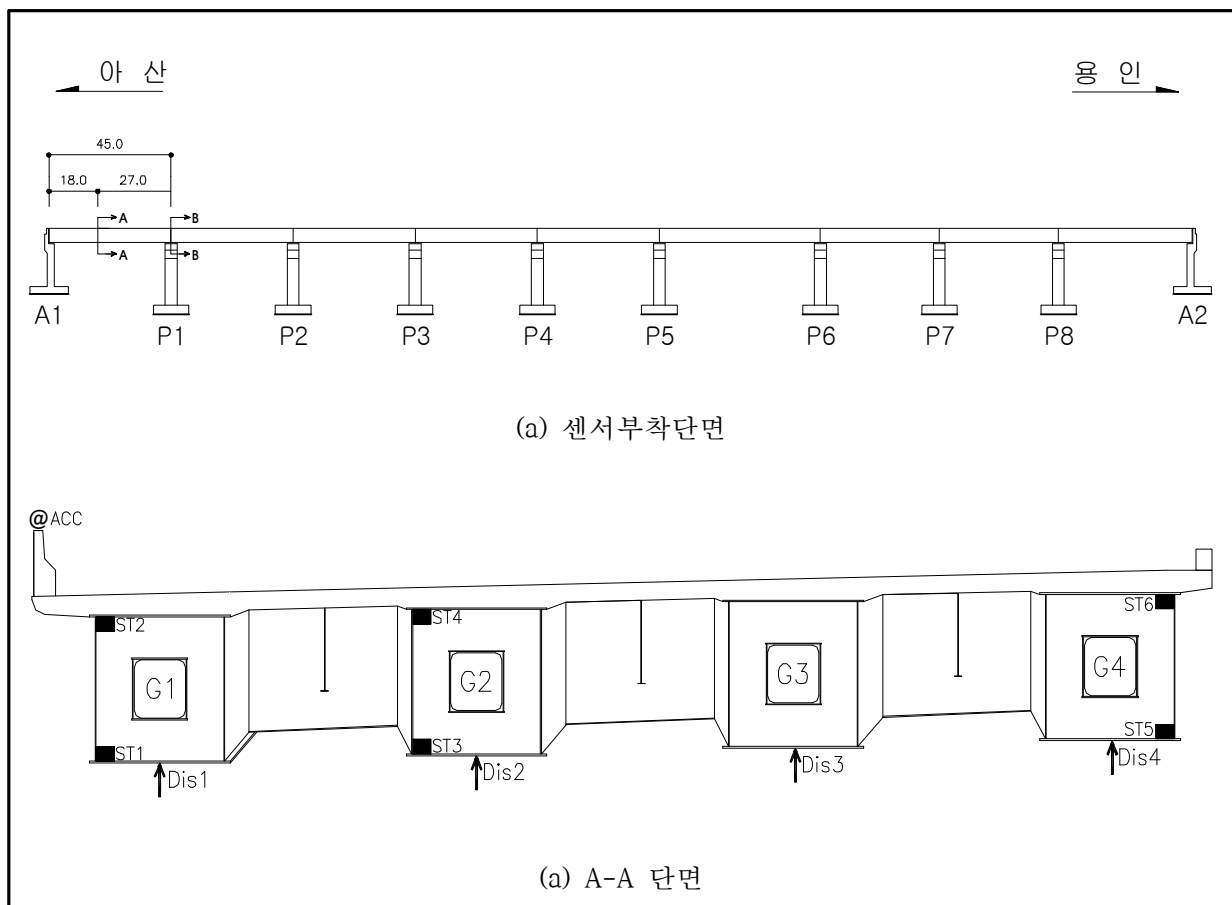
본 교량은 Steel Box Girder교 형식으로 이루어진 교량으로서 금회 정밀안전진단 재하시험 구간은 현장 조사 시 내하력 저하 등이 발생할 수 있는 손상은 발견되지 않아 최대 단면력의 발생 위치를 고려하여 <표 5.4>, <그림 5.4>와 같이 A₁~P₁(S₁경간, 용인→아산방향)구간을 선정하였다.

측정 경간		시험 항목	선정 사유
Steel Box Girder	S ₁ (A ₁ ~P ₁)	- 정적 재하시험 - 동적 주행시험	- 초기점검과 동일위치 - 게이지 설치 및 교통

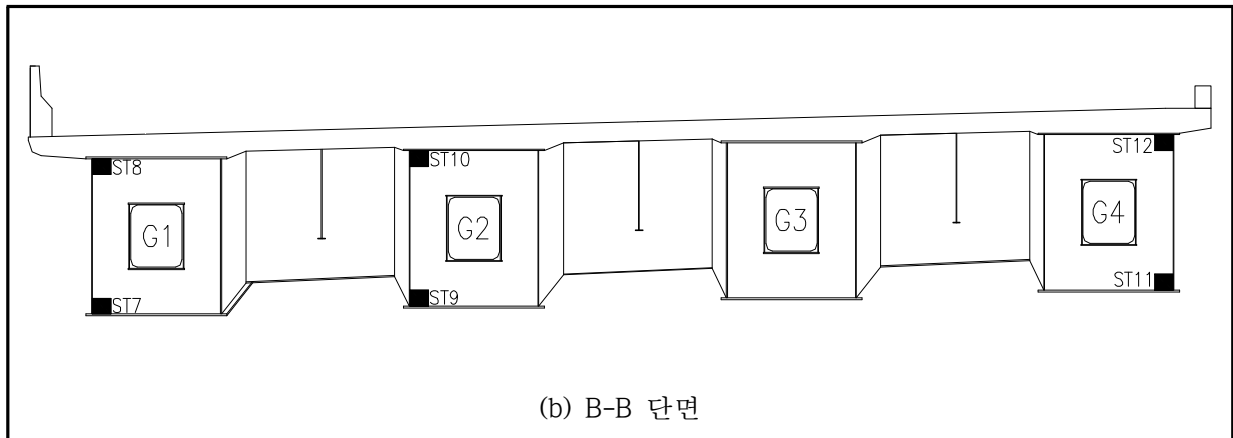
<표 5.4> 재하시험 대상경간

5.2.4 측정 센서의 부착위치

본 교량에서는 재하하중에 따른 단면력이 최대로 발생하는 측 경간(S₁) 정모멘트부(단면 A-A)와 지점부(P₁) 부모멘트부(단면 B-B)를 측정단면으로 선정하여 휨변형, 처짐 및 고유진동수를 얻을 수 있도록 하였다.



<그림 5.4> 게이지 부착위치



〈그림 5.4〉 게이지 부착위치(계속)

대상경간	Gauge No.	부착위치	측정목적
S ₁ 정모멘트부 (단면 A-A)	S1	G ₁ 좌측하연	교축방향 변형률
	S2	G ₁ 좌측상연	교축방향 변형률
	S3	G ₂ 좌측하연	교축방향 변형률
	S4	G ₂ 좌측상연	교축방향 변형률
	S5	G ₄ 우측하연	교축방향 변형률
	S6	G ₄ 우측상연	교축방향 변형률
	D1	G ₁ 중앙하연	처짐
	D2	G ₂ 중앙하연	처짐
	D3	G ₃ 중앙하연	처짐
	D4	G ₄ 중앙하연	처짐
	ACC1	G ₁ 방호벽상단	진동가속도
P ₁ 부모멘트부 (단면 B-B)	S7	G ₁ 좌측하연	교축방향 변형률
	S8	G ₁ 좌측상연	교축방향 변형률
	S9	G ₂ 좌측하연	교축방향 변형률
	S10	G ₂ 좌측상연	교축방향 변형률
	S11	G ₄ 우측하연	교축방향 변형률
	S12	G ₄ 우측상연	교축방향 변형률

〈표 5.5〉 재하시험 구간 Gauge 번호, 부착위치 및 목적

5.3 정적재하시험

5.3.1 시험방법 및 결과

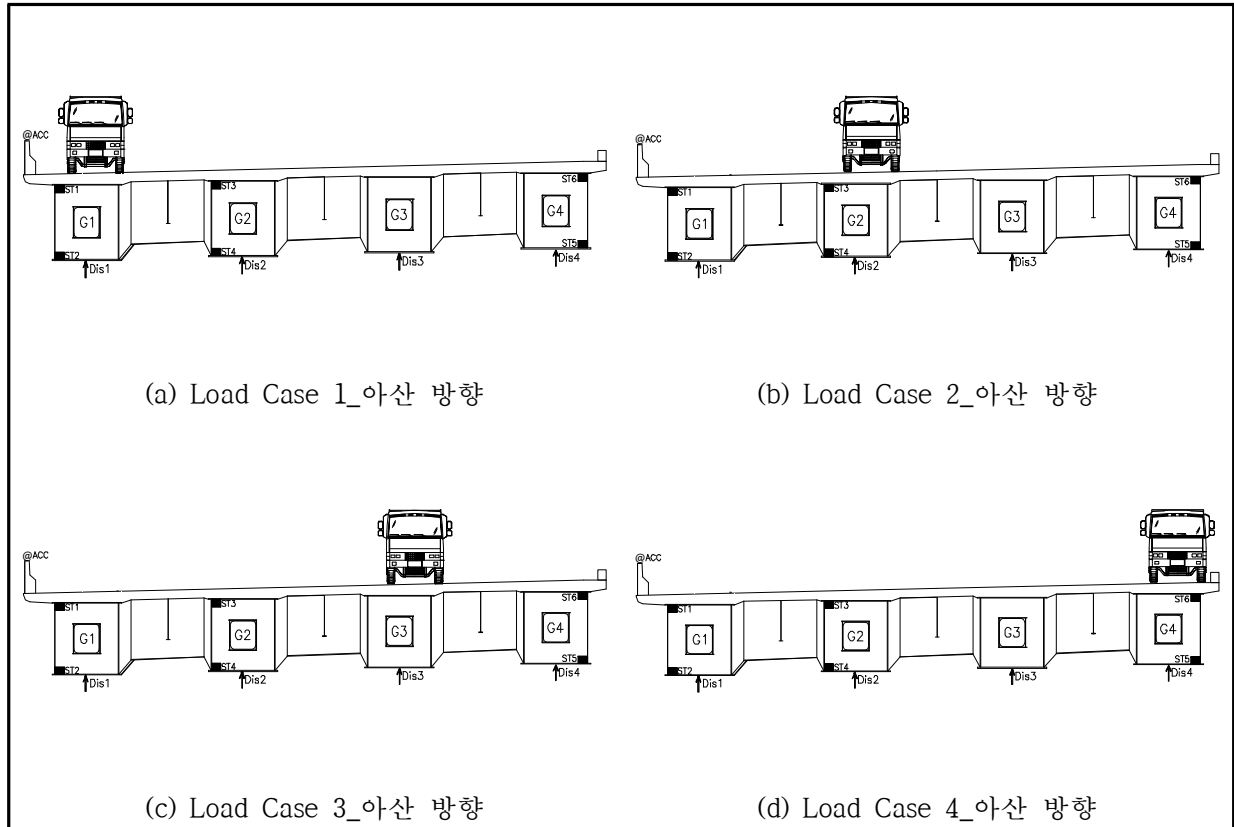
가. 시험방법

정적재하시험의 경우 1대의 재하차량을 이용하여 용인(A₂)에서 아산(A₁)방향으로 진행하며 LC1 ~ LC4 까지 총 4개의 하중조합으로 실시하였다.

정적재하시험의 재하경우는 다음 <표 5.6>과 같으며 <그림 5.5>은 차량 재하 방향 및 Load Case별 시험차량 위치를 나타내었다.

재하경우	주행방향	재하위치	비 고
LC1	용인(A ₂) → 아산(A ₁)	G1	1대
LC2	용인(A ₂) → 아산(A ₁)	G2	1대
LC3	용인(A ₂) → 아산(A ₁)	G3	1대
LC4	용인(A ₂) → 아산(A ₁)	G4	1대

<표 5.6> 정적재하시험 하중 재하 경우



<그림 5.5> Load Case별 재하위치

나. 정적재하시험 결과

본 교량에 대한 정적재하시험의 측정결과는 아래 <표 5.7>~<표 5.9>과 같으며 변형률의 경우 인장은 음(-), 변위의 경우 음(-)의 값은 하향의 처짐을 나타낸다.

구 분 하중경우	S ₁ 정모멘트부 [단위: $\mu \varepsilon$]						비 고
	G ₁		G ₂		G ₄		
	S1(하연)	S2(상연)	S3(하연)	S4(상연)	S5(하연)	S6(상연)	
LC1	-22.345	2.122	-6.778	4.475	-1.099	-0.204	
LC2	-11.377	0.260	-13.820	2.172	-4.703	0.739	
LC3	-6.421	0.479	-7.256	1.349	-11.785	1.560	
LC4	-1.884	0.380	-4.066	1.057	-21.780	0.588	

<표 5.7> 측 경간(S₁)의 정모멘트부 측정 결과 - 변형률

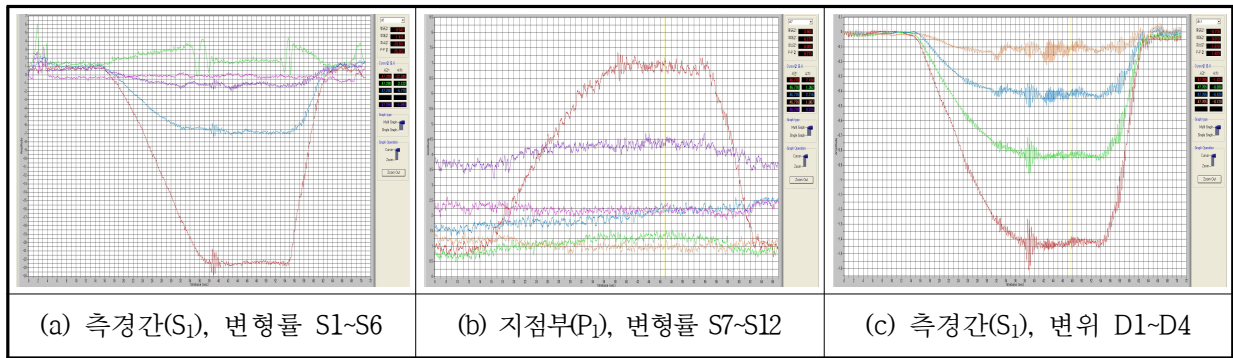
구 분 하중경우	P ₁ 부모멘트부 [단위: $\mu \varepsilon$]						비 고
	G ₁		G ₂		G ₄		
	S7(하연)	S8(상연)	S9(하연)	S10(상연)	S11(하연)	S12(상연)	
LC1	7.104	1.362	2.216	1.007	4.315	2.344	
LC2	4.175	0.123	1.018	0.066	1.782	-0.670	
LC3	1.919	-0.402	0.590	-0.130	2.088	-1.038	
LC4	1.117	0.563	1.218	0.491	5.376	0.043	

<표 5.8> P₁의 부모멘트부 측정 결과 - 변형률

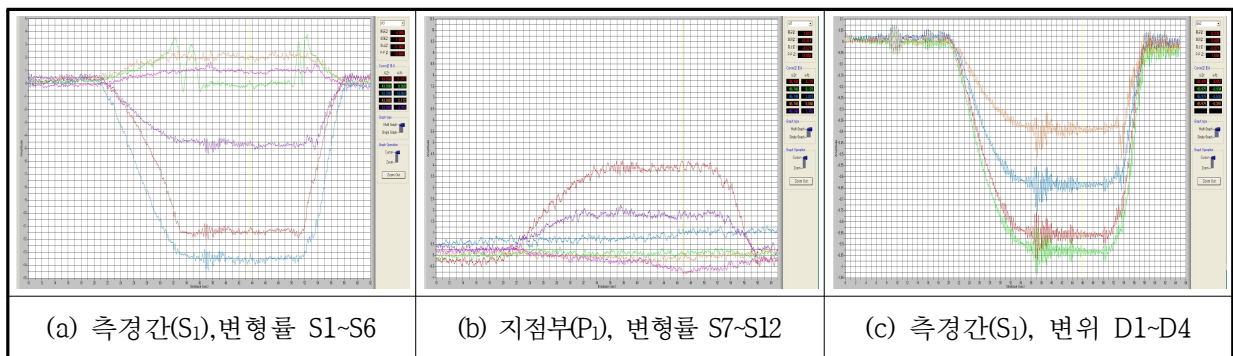
구 분 하중경우	S ₁ 정모멘트부 [단위:mm]				비 고
	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	
	D1	D2	D3	D4	
LC1	-1.424	-0.838	-0.428	-0.120	
LC2	-0.857	-0.934	-0.635	-0.391	
LC3	-0.307	-0.621	-0.871	-0.740	
LC4	-0.095	-0.381	-0.852	-1.412	

<표 5.9> 측 경간(S₁)의 정모멘트부 측정 결과 - 변위

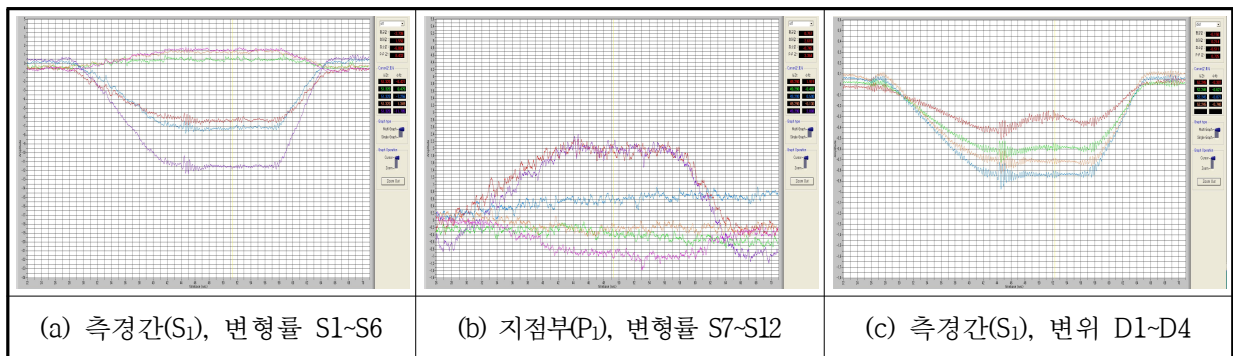
정적재하시험을 실시한 결과, 측 경간(S₁) 정모멘트부의 최대 변형률 및 최대 처짐은 $-22.345 \mu \varepsilon$ (인장), -1.424mm 로 나타났으며 지점부(P₁)에서의 최대변형률은 $7.104 \mu \varepsilon$ (압축)로 측정되었다. 다음 <그림 5.6>~<그림 5.9>에는 재하 경우 시 시간에 따른 변형률 및 변위의 응답곡선을 나타냈다.



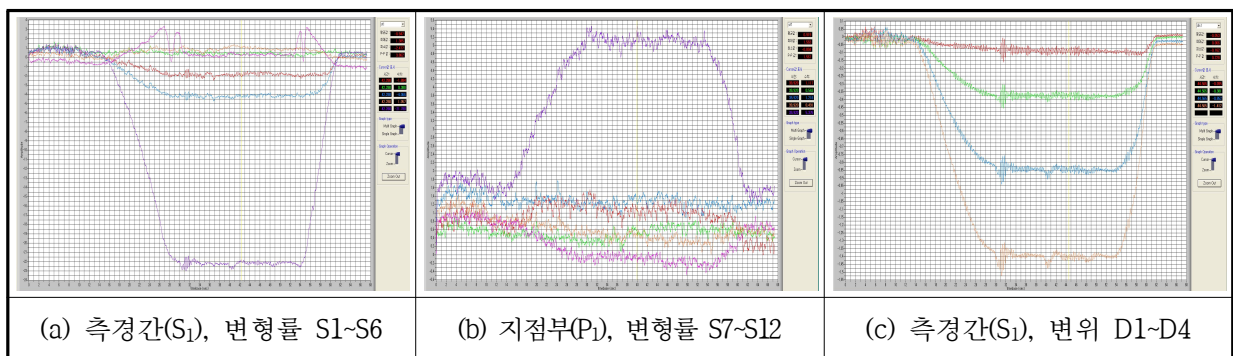
<그림 5.6> 정적 응답곡선(변형률, 변위) - LC1



<그림 5.7> 정적 응답곡선(변형률, 변위) - LC2



<그림 5.8> 정적 응답곡선(변형률, 변위) - LC3

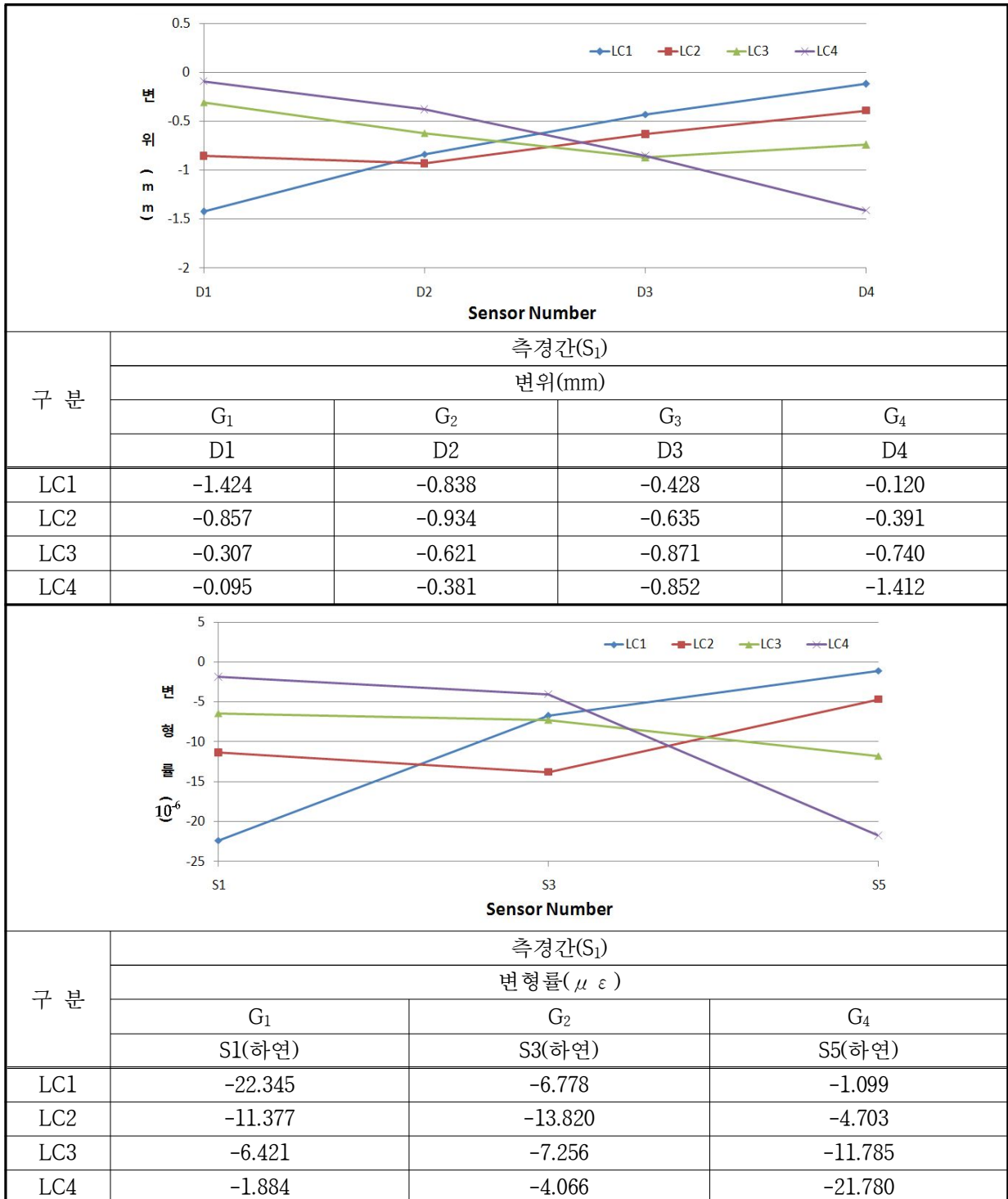


<그림 5.9> 정적 응답곡선(변형률, 변위) - LC4

다. 계측결과의 분석

1) 횡방향 거동 특성

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

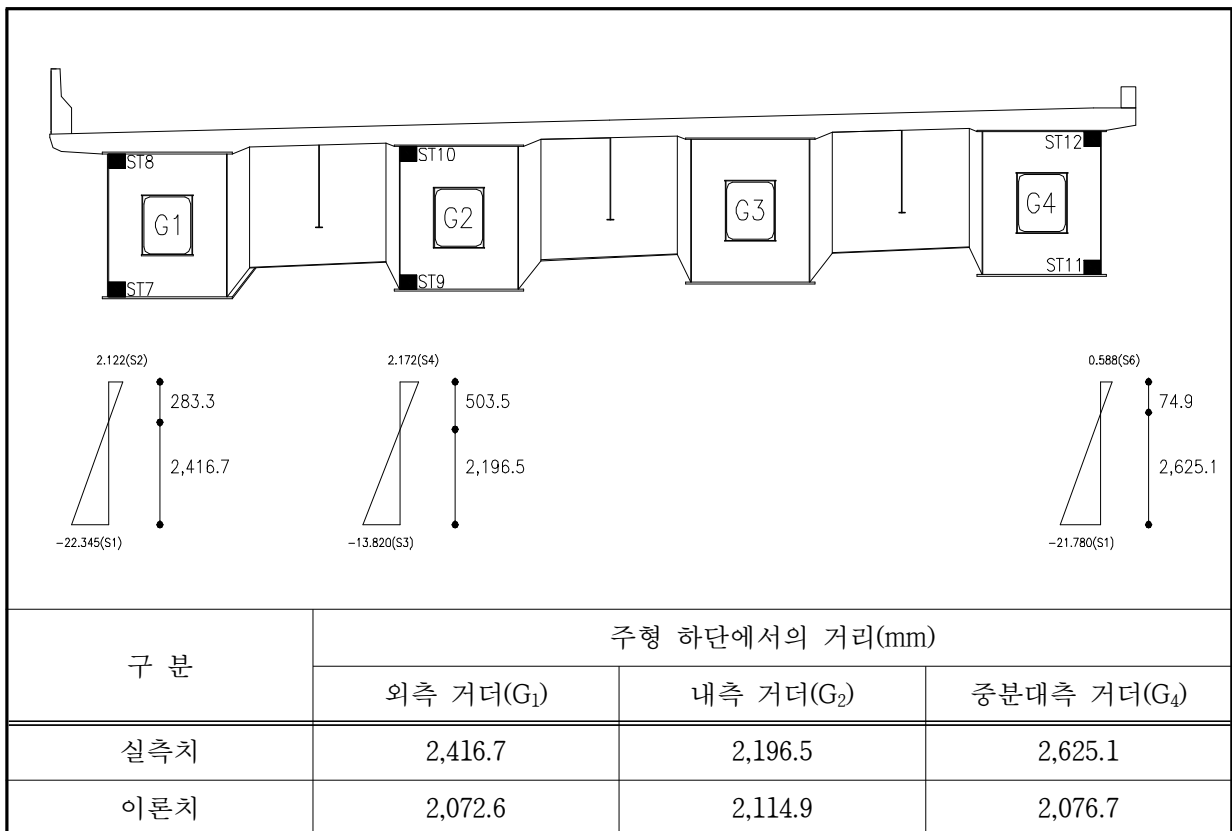


<표 5.10> 횡방향 거동분포

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 각 거더별 해당 LC를 이용하였다.

다음 <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 5.10> 측정간 중립축 위치분석

5.4 동적주행시험

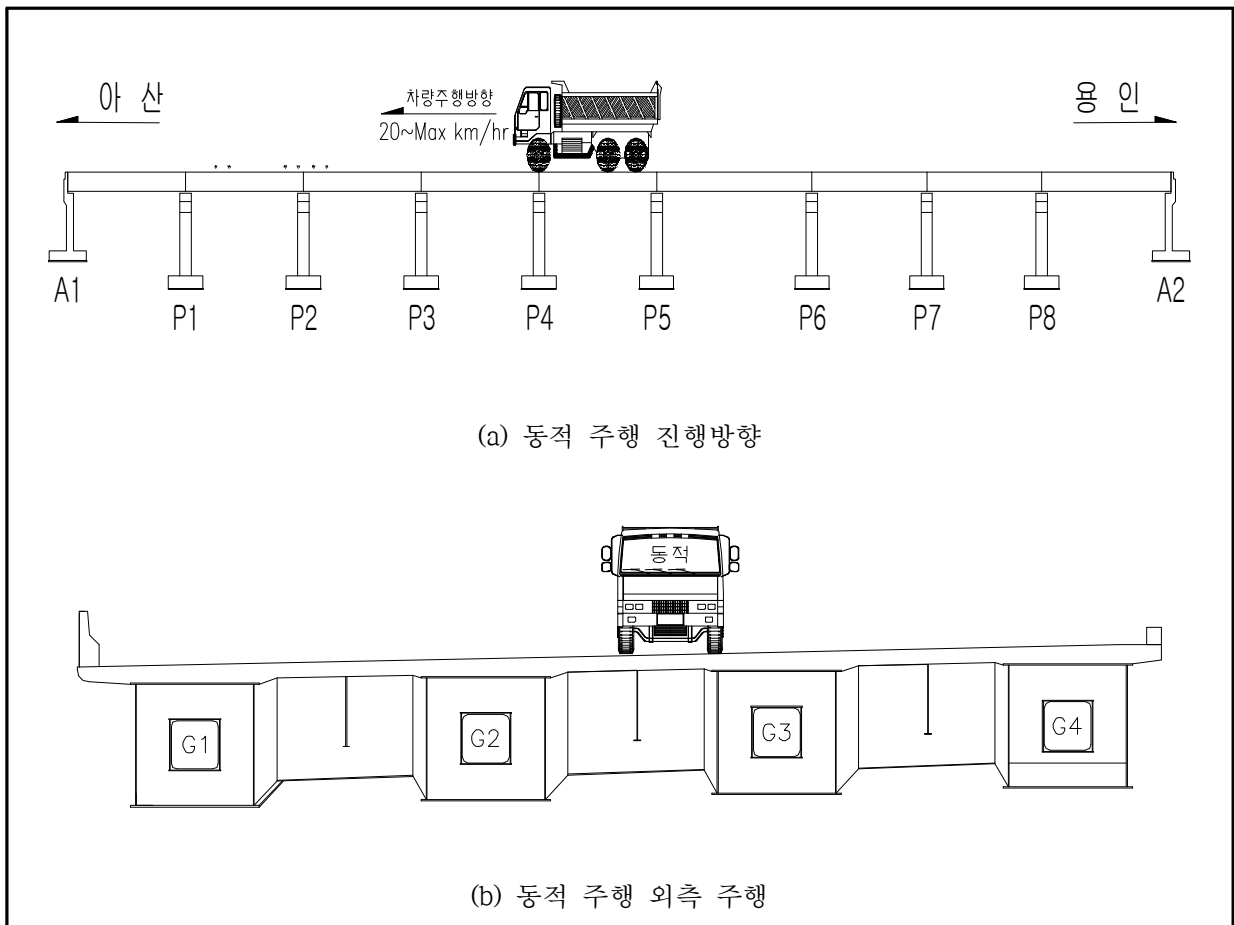
5.4.1 시험방법 및 결과

가. 주행시험 및 재하 경우

동적재하시험은 충격계수와 고유진동수 측정을 위하여 실시하였으며, 재하차량을 이용하여 20km/h에서 주행 가능한 최대속도 80km/h까지 속도를 증가하여 측정하였으며, 주행속도 및 주행방법은 <표 5.11> 및 <그림 5.11>에 나타내었다.

재하경우	주행방향	주행차선	주행속도(km/h)	비 고
LC1	용인(A ₂) → 아산(A ₁)	3차선	20	
LC2	용인(A ₂) → 아산(A ₁)	3차선	40	
LC3	용인(A ₂) → 아산(A ₁)	3차선	60	
LC4	용인(A ₂) → 아산(A ₁)	3차선	80	최고속도

<표 5.11> 동적 재하시험 주행속도별 차량 진행 방향



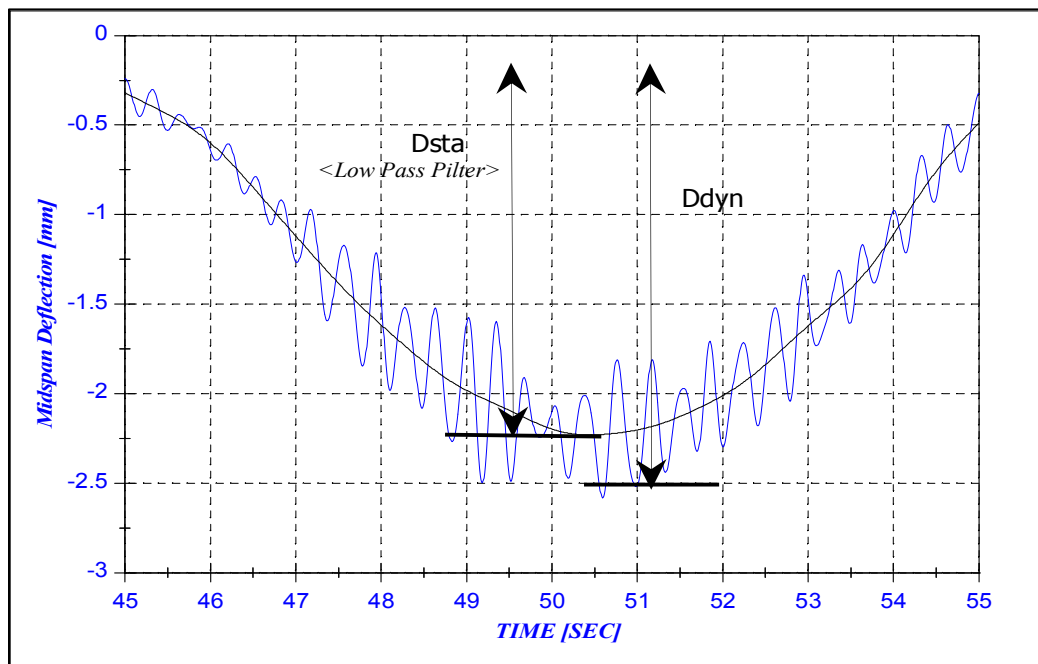
<그림 5.11> 동적 주행 방향 및 위치

나. 실측충격계수 분석

충격계수 산정시 5~10km 정도의 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 1.0Hz이하의 Low Pass Filter로 필터링하여 정적응답곡선을 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 최대 동적응답치<Ddyn(max)> 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 5.12> 응답 이력곡선

다. 동적재하시험 결과

1) 측 경간(S₁) 주행속도별 처짐 측정결과

동적재하시험 결과 시험차량에 의해 발생된 최대 처짐은 D3에서 40km/h 일 때 -0.978mm를 나타내었다.

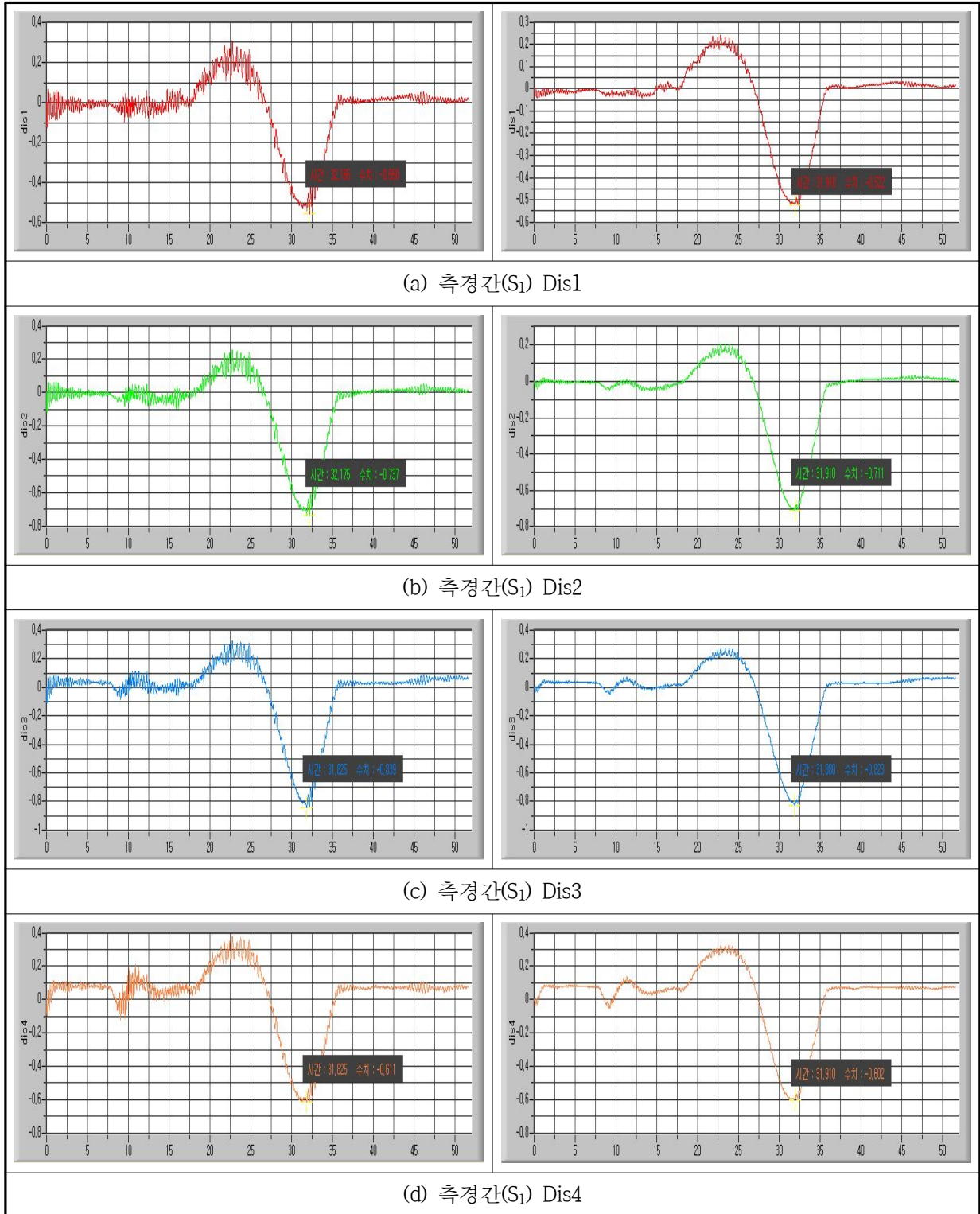
구 분 하중경우	S ₁ 정모멘트부 [단위:mm]				비 고
	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	
	D1	D2	D3	D4	
LC 1(20km/h)	-0.558	-0.737	-0.839	-0.611	
LC 2(40km/h)	-0.725	-0.884	-0.978	-0.764	
LC 3(60km/h)	-0.601	-0.788	-0.915	-0.747	
LC 4(80km/h)	-0.517	-0.689	-0.878	-0.686	

<표 5.12> 측 경간(S₁)의 속도별 처짐 측정결과2) 측 경간(S₁) 주행속도별 충격계수 분석

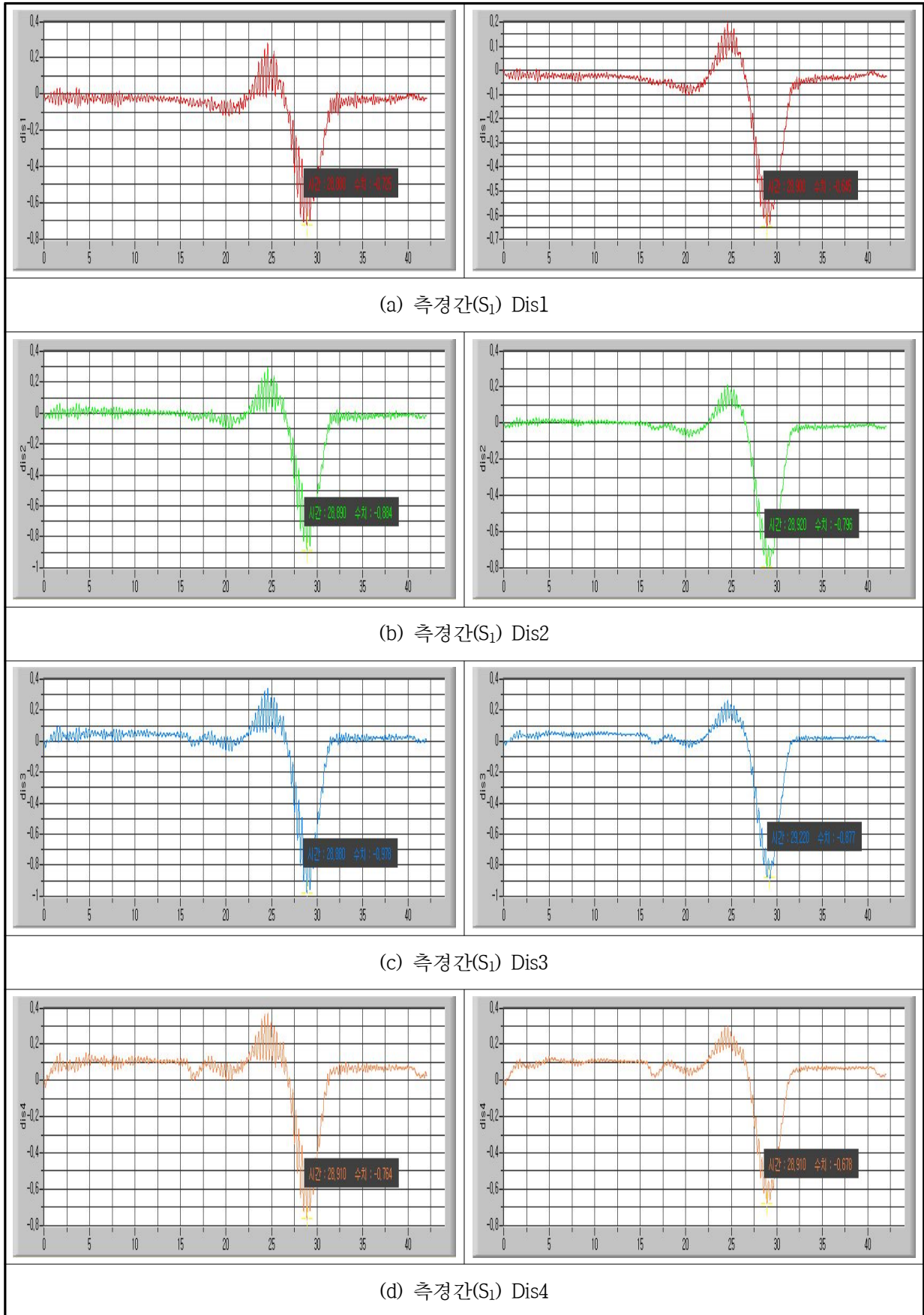
하중재하경우		측 경간(S ₁)			
		Dis1	Dis2	Dis3	Dis4
LC 1 (20km/h)	D _{dyn}	-0.558	-0.737	-0.839	-0.611
	D _{sta}	-0.522	-0.711	-0.823	-0.602
	D.L.F	1.069	1.037	1.019	1.015
	충격 계수(i)	0.069	0.037	0.019	0.015
LC 2 (40km/h)	D _{dyn}	-0.725	-0.884	-0.978	-0.764
	D _{sta}	-0.645	-0.796	-0.877	-0.678
	D.L.F	1.124	1.111	1.115	1.127
	충격 계수(i)	0.124	0.111	0.115	0.127
LC 3 (60km/h)	D _{dyn}	-0.601	-0.788	-0.915	-0.747
	D _{sta}	-0.529	-0.723	-0.852	-0.666
	D.L.F	1.136	1.090	1.074	1.122
	충격 계수(i)	0.136	0.090	0.074	0.122
LC 4 (80km/h)	D _{dyn}	-0.517	-0.689	-0.878	-0.686
	D _{sta}	-0.485	-0.672	-0.824	-0.635
	D.L.F	1.066	1.025	1.066	1.080
	충격 계수(i)	0.066	0.025	0.066	0.080
최대충격계수		0.136			
이론충격계수		0.176			

<표 5.13> 측 경간(S₁) 실측 충격계수

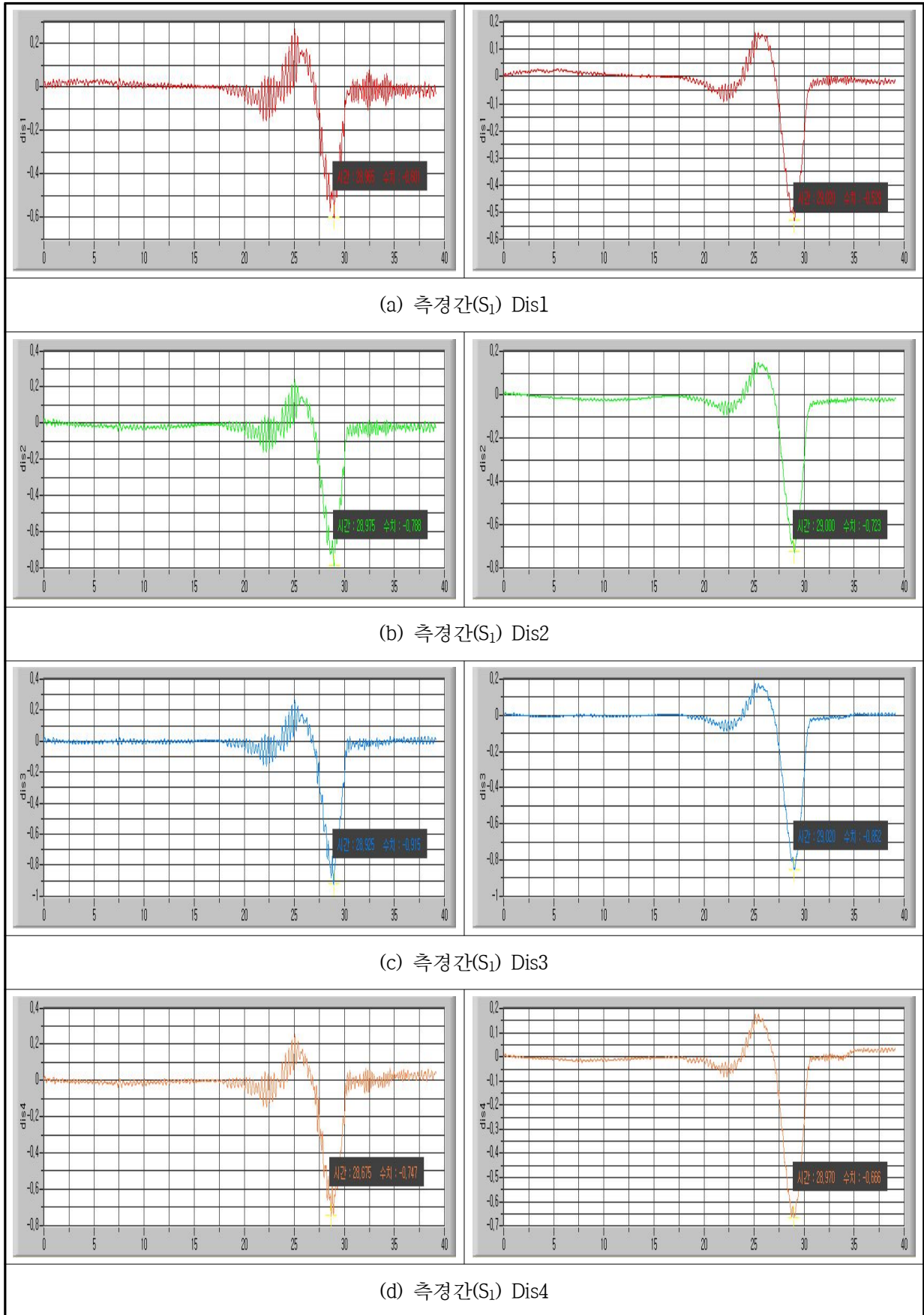
동적 주행시험결과 실측충격계수 최대값은 측 경간(S1)의 경우 60km/h 주행시 0.136로 나타나 도로교 설계기준에서 제시하는 이론충격계수 0.176보다 작게 분석되어 이동하중에 대한 영향은 양호한 것으로 판단된다. 각 속도별 충격계수를 <표 5.13>에 나타내었으며, 동적측정결과에 대한 필터링 전·후를 <그림 5.13>~<그림 5.16>에 도시하였다.



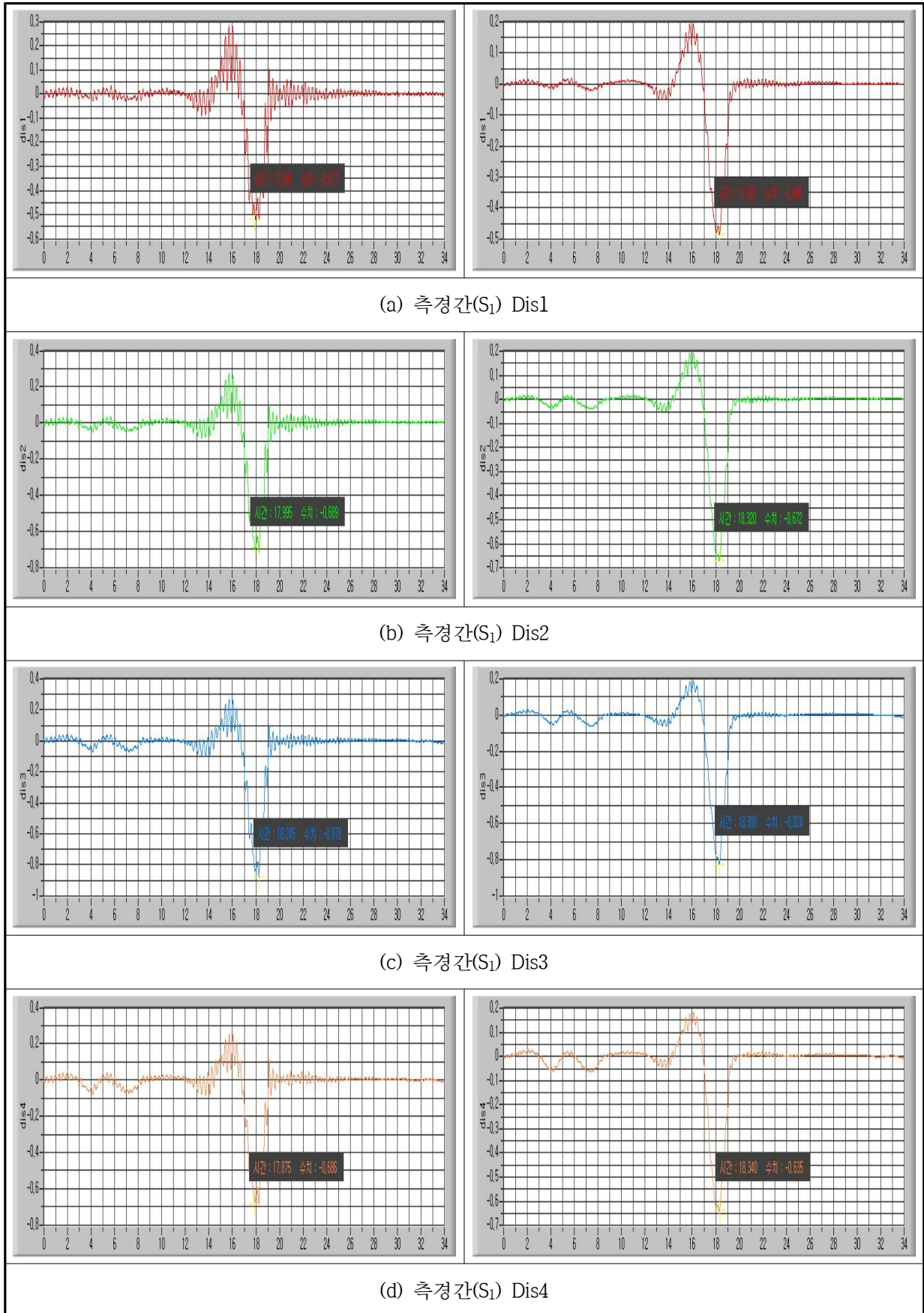
<그림 5.13> 필터링 전, 후 변위 응답 - 20km/h 주행



<그림 5.14> 필터링 전, 후 변위 응답 - 40km/h 주행



<그림 5.15> 필터링 전, 후 변위 응답 - 60km/h 주행



<그림 5.16> 필터링 전, 후 변위 응답 - 80km/h 주행

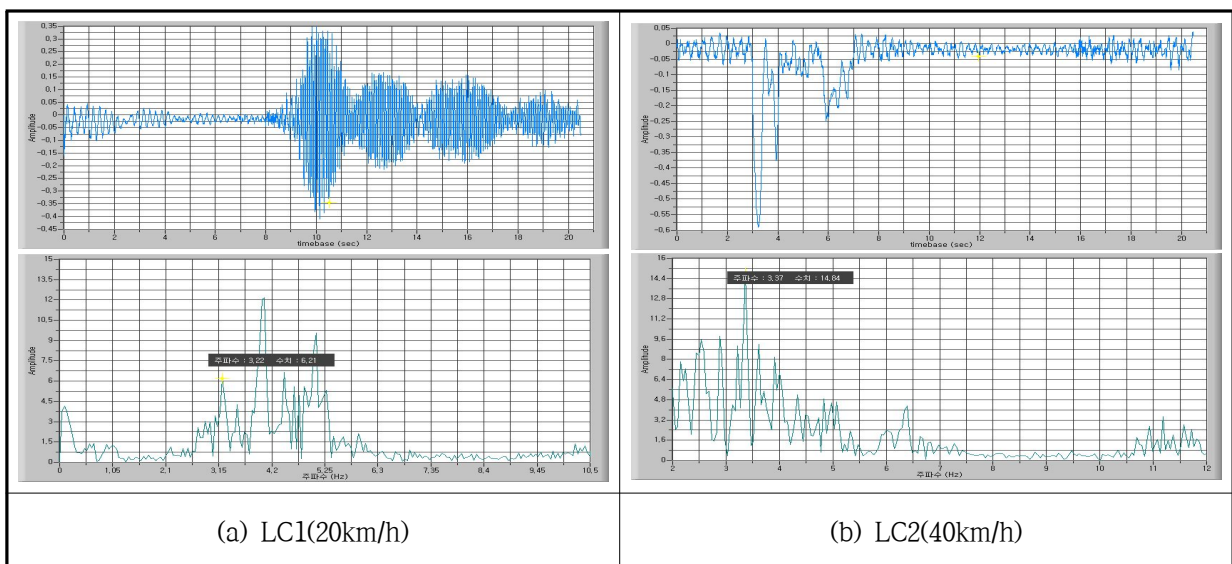
다. 고유진동수

대상교량의 고유진동수를 평가하기 위하여 측 구간(S_1) 정모멘트부에 가속도계를 1축 (연직방향)으로 부착하여 주행속도별로 진동가속도를 측정하였고 재하차량이 측정경간을 벗어나서 영향을 주지 않는 자유진동상태에서의 응답곡선으로 FFT 분석을 실시하였다. 분석결과 대상교량의 주행 속도에 따른 측정 고유진동수는 S_1 경간에서 2.93~3.37Hz로 나타나 해석고유진동수(3.196Hz)와 비슷하게 나타났다.

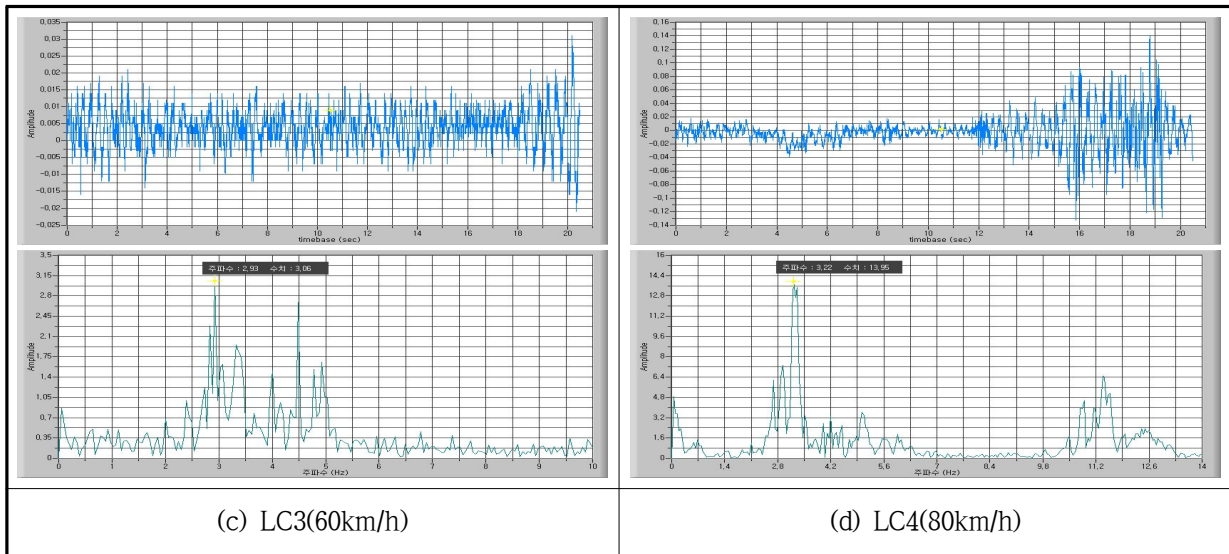
<표 5.14> 및 <그림 5.17>, <그림 5.18>에는 교량의 실측 및 계산 고유진동수를 비교한 것이며 합리적인 값으로 분석된다.

구분	ACCI(연직) 실측고유진동수(Hz)	해석고유진동수(Hz)	비 고
LC 1 (20km/h)	3.22	3.196	
LC 2 (40km/h)	3.37		
LC 3 (60km/h)	2.93		
LC 4 (80km/h)	3.22		

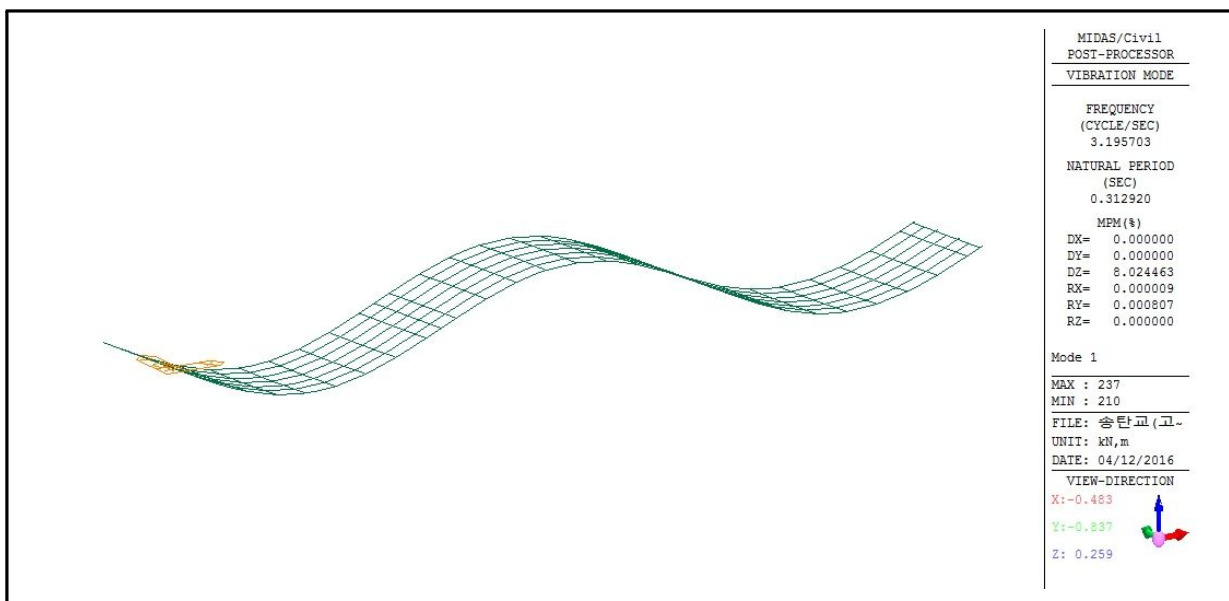
<표 5.14> 고유진동수 해석치 와 실측치 비교



<그림 5.17> 가속도 시간이력의 F.F.T 분석



〈그림 5.17〉 가속도 시간이력의 F.F.T 분석(계속)



〈그림 5.18〉 해석 고유진동수

5.5 재하시험 결과분석

5.5.1 재하시험 결과

송탄교(하행) 측 경간(S1)에 대한 금회 및 초기점검 재하시험 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

시험구분	측정항목	Gauge No.	금회 정밀안전진단		2005년 초기점검		비 고
			측정치	측정최대치	측정치	측정최대치	
정적 재하시험	변형률 ($\mu \varepsilon$)	S1(하연)	-22.345	-22.345	-29.990	-29.990	
		S3(하연)	-13.820		-20.930		
		S5(하연)	-21.780		-		
		S2(상연)	2.122	4.475	6.982	6.982	
		S4(상연)	4.475		5.240		
		S6(상연)	1.560		-		
	처짐 (mm)	D1	-1.424	-1.424	-1.123	-1.123	
		D2	-0.934		-0.779		
		D3	-0.871		-0.736		
		D4	-1.412		-0.947		
동적 재하시험	처짐 (mm)	D1	-0.645	-0.877	-0.588	-0.774	
		D2	-0.796		-0.735		
		D3	-0.877		-0.774		
		D4	-0.678		-0.459		
	충격계수	D1	0.136	0.136	-	0.171	
		D2	0.111		-		
		D3	0.115		0.171		
		D4	0.127		-		
	고유진동수	ACC	2.39~3.37	3.37	2.63~3.41	3.41	

<표 5.15> 재하시험 결과분석

5.5.2 결과 고찰

- 1) 정적재하시험 결과 최대 휨모멘트 발생 구간에 대하여 처짐을 측정한 결과 최대 처짐은 LC1의 D1에서 -1.424mm가 발생했으며, 최대변형률은 LC1의 S1(하연)에서 인장 $-22.345 \mu \varepsilon$, LC1의 S4(상연)에서 압축 $4.475 \mu \varepsilon$ 가 발생하였다.
- 2) 동적재하시험 결과 시험차량에 의해 발생된 최대 처짐은 40km/h 일 때 D3에서 -0.877mm로 측정되었으며, 실측 충격계수는 0.136로 측정되어 시방서에서 규정하고 있는 설계 충격계수에 대한 기준치인 0.176 이내로 조사되었다. 실측 고유진동수는 2.39Hz로 측정되었다.