

## 서론

하지만나 운하 등 수로를 횡단하는 교량의 경우, 선박운항을 위하여 일시적으로 횡단교량의 일부를 들어 올리거나 이동할 수 있도록 가설된 교량들이 있다. 이러한 교량을 기동교라고 하며, 기동되는 형식에 따라 도개교, 선개교, 승개교 등의 여러 종류로 분류한다.

기동교들은 그 최소성과 상징성을 인정받아 100년이 넘도록 유지관리되는 국외 교량의 사례도 있으나, 국내 영도대교의 경우 1696년에 노후조사를 실시한 기록 외에는 당시까지 특별한 유지관리가 이루어지지 않았다.

“시설물의 안전관리에 관한 특별법”이 1995년 제정된 이후 주기적으로 해당 교량에 대한 정밀안전진단 등 유지관리 활동이 수행되었으나, 정·동적 재하시험에 의한 교량거동의 계측은 Plate Girder로 이루어진 Gerber 구간 중 Suspended Span의 경간에서만 수행되었을 뿐, 도개교 구간에 대해서는 별도의 계측자료가 확인되지 않았다. 이와 같이 국내에서 도개교는 영도대교가 유일한 교량일 뿐더러 도개교 구간에 대한 거동특성이나 분석은 그 사례가 거의 없다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 도개교의 영도대교가 재가설 된지 약 1년이 경과한 시점에서 도개교의 도개과정 및 상시 거동을 계측하고, 구조해석을 실시하여 이론적인 거동과 비교 분석하며, 도개교의 실제거동을 파악하고자 하였다.



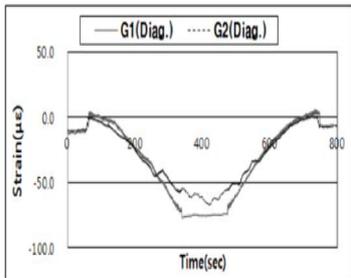
<사진 1. 영도대교 개설 당시 모습>



<사진 2. 2002년 도개교 보강 후 당시의 모습>

## 본문

측정대상 교량은 왕복 6차선의 도로교량이지만 도개과정은 모든 차량을 통제 후 진행되므로 도개시에는 일체의 활하중 없이 고정하중만 작용하는 상태이다. 거동 측정은 차량이 완전히 통제된 이후 또는 일체의 차량하중 없이 고정하중만 작용하는 상태를 초기치로 설정하여 변형을 및 가속도 응답변화를 측정하였다. 도개시 변형을 측정 결과 도개시 좌, 우 거리의 균형상태와 응력상태를 상호 비교하기 위하여 도개과정의 시작 단계인 도개 직후 약 2초간의 변형을 평균값을 각 부재의 초기치로 설정하여 변형을 그래프시프트(Shift)하고, 좌측거더 G1과 우측거더 G2 부재의 변형률변화이력 그래프의 일례를 아래의 그래프와 같이 나타내었다

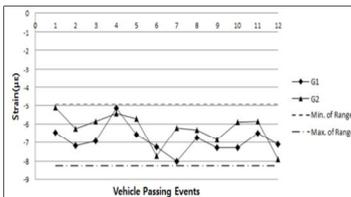


<표 1. 변형을 변화이력 그래프>

Date	Girder Num.	Step			Range of strain (0°~55°) [μ]
		Step 1 (App. 0°) [μ]	Step 2 [μ]	Step 3 (App. 0°) [μ]	
6 Oct.	G1	-44.002	86.083	-33.354	130.085
	G2	-65.616	58.909	-61.934	124.525
7 Oct.	G1	-24.630	104.109	-20.404	128.739
	G2	-50.925	73.826	-48.392	124.751
8 Oct.	G1	-30.084	97.731	-26.567	127.815
	G2	-53.716	69.542	-50.916	123.258
9 Oct.	G1	-32.381	93.155	-32.847	125.536
	G2	-59.692	64.838	-59.507	124.530

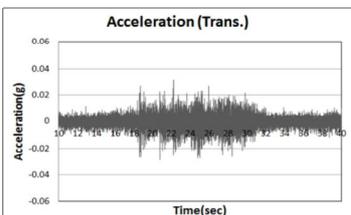
<표 2. 각 측일별 하현재의 응력>

도개 직전 도개교의 선단이 교각 P1에 지지되고 고정하중만 작용하는 상태에서 측정 초기치를 설정한 후 전체 도개과정을 측정하였다. 그러므로, <표 1>의 도개 초기 변화량을 고려하면, 도개 전에 거더가 교각에 거치된 상태에서 좌측거더 G1과 우측거더 G2의 초기 응력상태에 다소 차이가 있을것으로 판단된다. 또한 <표 2>의 각 측정일별 하현재의 응력에서도 최종 응력상태가 상이하므로 P1에서의 변력도 매도개시마다 오차가 있을 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 도개 직후 캔틸레버 구조가 된 이후로는 도개과정에서 좌, 우 거리의 상승 및 하강 거동이 균형을 잘 이루고 있으며, 응력 변화량 및 변화이력도 좌, 우 거더가 거의 동일하게 변화하는 것으로 판단할 수 있다.



<표 3. 도개 전, 후 측정된 변형을 그래프>

<상시 변형을 측정 결과>  
도개과정에서 발생할 수 있는 구조역계의 변화 또는 1일 1회 도개 후 P1 거치상태의 변화 등 도개 전, 후의 변화발생 여부를 확인하기 위하여 도개 전 상시 측정과 도개 후 상시 측정을 실시하였다. 각 측정일마다 도개 전, 후의 상시측정에서 측정된 변형률값이 표 3의 일례와 같이 차량의 중량차이에 의한 예상 변화범위 이내로 측정되었으며, 도개 전과 후의 경향이 거의 유사하게 나타났다. 또한 각 측정일별의 결과에서도 특별한 변화가 없으므로 도개에 따른 구조물의 역학적 거동의 변화 및 거치상태의 변화 등 역계의 변화는 없거나 무시할 만한 수준인 것으로 판단된다.



<표 4. 도개교의 고유진동수 분석>

<가속도 측정에 의한 진동수 분석>  
Girder 2의 중간지점에서 연직방향과 교축직각방향인 횡방향 진동가속도를 측정하여 도개교의 고유진동수를 분석해보고자 하였다. 그 결과는 <표 4>에 나타내었다. 샘플링한 진동가속도와 FFT 분석 결과의 일례를 나타낸 것이며, 차량의 주행에 의한 진동성분을 계속하여 연직방향의 가속도 신호를 분석한 1차 모드 고유진동수는 3.906 Hz로 모션센 플러터 데이터에서 동일한 값을 나타내었다. 연직방향 진동에 기인한 수평방향의 진동성분은 신호가 약하여 동일한 진동수를 확보하지는 못했지만 평균 약 2.343 Hz의 진동수를 나타내는 것으로 분석되었다.

### <응력 검토>

교량의 실제 거동을 분석하기 위해 본 연구에서 계측한 실측 응력값과 구조해석에 의한 이론적 응력값을 비교하고자 하였다. <표 5>에서 정리한 각 부재의 도개단계별 평균 응력값을 이용하여 상시 거치상태(Step 0)에서 도개 개 시작되는 Step 1 사이의 변화량과 도개 개 시작된 직후(Step 1)부터 55°의 완전도개(Step 2) 사이의 변화량을 산정하고, <표 5>에 나타낸 동일한 과정의 이론적 응력 변화량과 상호 비교하면 <표 6>과 같다. 이 비교결과에서 실측값과 이론값의 다소 차이는 있지만 가장 큰 응답을 나타내는 하현재를 기준으로 보면 다음과 같다. 도개 개 시작되는 과정, 즉 Step 0에서 Step 1로 진행되는 과정에서 발생하는 실측 응력 변화량은 설계 시 예상한 약 217.7 kN의 반력이 좌, 우 대칭으로 작용하는 상태인 Step 0(a)보다 이 연구에서 가정된 비대칭 반력이 작용하는 상태인 Step 0(b)에서 Step 1로 진행할 때의 결과와 유사한 거동을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

또한 Step 1에서 Step 2로 진행되는 도개과정에서는 좌, 우측 거더 하현재의 응력변화량이 약 26 MPa의 유사하며 <표 1>(a)에 나타낸 바와 같이 응력변화 과정도 거의 동일한 것으로 나타나 도개과정에서의 균형상태는 안정된 것으로 분석할 수 있다. 또한, 실측 변화량은 이론적 변화량인 약 28 MPa의 93%수준으로 이론적 도개과정과 거의 일치한다고 볼 수 있다.

Div.	Girder Num.	Step 0(a) → Step 1		Step 0(b) → Step 1		Step 1 → Step 2	
		Stress [MPa]	Strain [μ]	Stress [MPa]	Strain [μ]	Stress [MPa]	Strain [μ]
Lower chord	G1	-14.6	-71.3	-6.8	-33.0	28.3	138.3
	G2	-14.6	-71.3	-11.7	-57.1	28.3	138.3
Ver.	G1	-3.2	-15.8	-1.6	-7.8	18.9	92.0
	G2	-3.2	-15.8	-2.5	-12.2	18.9	92.0
Diag.	G1	3.3	16.2	1.7	8.1	-24.3	-118.6
	G2	3.3	16.2	2.5	12.3	-24.3	-118.6

<표 5. 이론적 응력변화량>

Div.	Girder num.	Variation of strains [MPa]					
		Measurement		Analysis		Reaction at P1 [kN]	
		Step 0 → Step 1	Step 1 → Step 2	Step 0(a) → Step 1	Step 1 → Step 2	Step 1 → Step 1	Step 1 → Step 2
Lower chord	G1	-6.7	26.2	-14.6	-6.8	28.3	
	G2	-11.8	25.5	-14.6	-11.7	28.3	
Ver.	G1	0.5	9.4	-3.2	-1.6	18.9	
	G2	-0.5	10.5	-3.2	-2.5	18.9	
Diag.	G1	1.5	-15.5	3.3	1.7	-24.3	
	G2	1.6	-11.3	3.3	2.5	-24.3	

<표 6. 이론, 실측 응력변화량 비교>

Div.	Measurement		Analysis		Reaction at P1 [kN]
	Frequency [Hz]		Frequency [Hz]		
	Ver.	Trans.	Ver.	Trans.	
Model 1	3.906	2.343	2.871	2.482	G1 : 137.8 G2 : 137.8
	(Average)	(Average)			G1 : 99.7 G2 : 175.6
Model 2			3.903	2.447	

<표 7. 각 모델의 구조해석 형상>

본 연구에서는 도개교량을 상승, 하강 시키는 도개과정과일반 차량이 통행하는 상시 사용상태에 대하여 실거동을 측정하였으며, 구조해석에서는 가능한 실제와 유사하게 Model을 구현하고 비교하여 다음과 같은 사항을 유추하였다.

- 1) 대상 교량은 도개과정의 아닌 상시 거치 상태에서 도개를 용이하게 하기 위한 카운터 웨이트의 하중 균형으로 도개간 거더의 하현재는 고정하중 작용상태에 압축응력을 받고 있으며, 캔틸레버에 가까운 거치 상태이다.
- 2) 1일 1회 반복하는 도개구간의 도개전과 도개후의 상태에서 구조역계의 특별한 변화는 발생하지 않는 것으로 측정되었다. 단, 기계적 장치에 의해 자동으로 도개과정을 수행하더라도 교각 P1에 도개교의 캔틸레버 선단을 거치 시 좌, 우측거더에서 약 30 kN 정도의 반력오차는 매회 발생될 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 도개 시작시 초기 응력상태와 도개 종료시 최종 응력상태를 분석하면 자중을 포함한 고정하중에 의한 P1에서의 반력이 상시 거치 상태에서 좌, 우 비대칭으로 판단된다.
- 4) 도개교 구간의 중량과 기계설 내 카운터 웨이트의 중량의균형을 맞추어 P1의 반력을 최소화 시켰고, 상부구조의 횡방향 강성과 제작 및 시공시 내포될 수 있는 여러 가지 오차로 P1에서 비대칭 반력이 작용하는 경우가 있더라도 측정기간 내 고정하중에 의한 부분변위가 발생하는 경우는 없으므로 불안정한 상태는 아닌것으로 판단된다.
- 5) 도개 진행되는 과정에서는 좌, 우측 거더가 균형을 이루며 동일한 응력상태로 상승, 하강과정이 진행되며, 좌, 우의 불균형 진동은 측정되지 않았고, 도개 중 발생하는 응력의 변화량은 해석에 의한 예상치의 93%수준으로 유사하며 안전성도 만족하는 것으로 분석되었다.
- 6) 설계시 적용한 구조해석 Model에서 본 연구의 변형을 측정결과에 의하여 카운터 웨이트의 중량을 보정하고 P1에서의 반력상태를 고려하여 경계조건을 수정함으로써 가능한 실제 교량과 유사한 Model을 구현하고 구조해석을 수행한 결과, 실측치와 거의 동일한 반력 및 고유진동수를 산정할 수 있었다.
- 7) 당초 설계시의 예상보다는 다소 작은 P1의 반력상태로 분석되었지만 발생 응력과 고유진동수를 고려하면 현재 도개교는 설계시 목표와 거의 유사한 거동상태 및 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

## 결론

본 연구에서는 국내 유일의 도개교량에 대하여 도개시 및 상시의 실제 거동을 측정하고 이에 근거하여 구조해석에 의한 비교 분석 등 도개교량의 거동을 분석해 보고자 하였으며, 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 철거 전 기존의 도개교량에 대하여 정밀안전진단 등이 수행되었으나, 도개구간의 실제 거동분석을 위한 재하시험 및 측정 시 행된 사례가 없었으며, 재가설 후의 초기안전점검에서도 도개과정에 대한 거동 측정 및 분석이 수행된 사례가 없으므로, 본 연구의 결과는 추후 해당교량의 도개시 거동분석과 더불어 도개구간 전체의 거동분석 시에도 비교 기준치가 되는 초기자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 재가설된 도개교는 설계에서 계획한 바와 거의 유사하게 복원되었고, 그 거동도 설계의 목표치를 만족할 수 있을 것으로 판단된다. 1일 1회의 도개과정의 반복에서도 구조역계의 특별한 변화 없이 양호한 도개과정을 보여 주고 있는 것으로 나타났다.
- 3) 도개구간의 경량화를 위해 적용된 강바닥판의 상부구조 형식과 중량 콘크리트로 충전된 카운터 웨이트, 그 외 해상구조에서의 조립, 거치 등의 시공과정을 감안하면 정확한 대칭성 및 균형상태를 유지하기 어려울 수 있으므로, 추후에도 공용연수 증가 및 도개횟수의 증가에 따른 교량거동의변동 추세를 분석하기 위해 본 연구결과를 토대로 지속적 관리 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.