

좌굴해석에 의한 Steel Tube 아치교의 면내 및 면외좌굴 안정성 검토

1. 해석목적

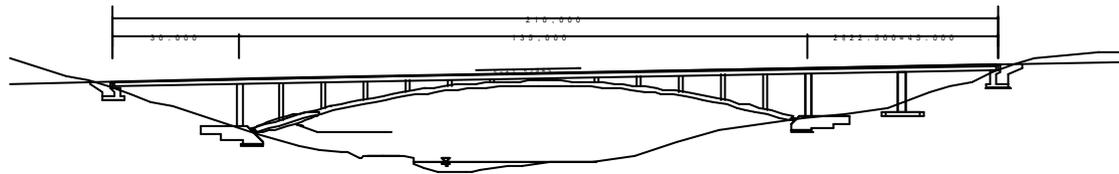
아치계 교량은 축력지배구조이므로 외력에 대한 구조적인 안전성 및 사용성 확보와 더불어 좌굴에 대해서도 충분히 안정한 구조가 되도록 계획하는 것이 중요하다. 아치계 교량의 좌굴은 면내좌굴 및 면외좌굴로 구분되며, 이에 대한 검토식이 아치 관련문헌 및 설계기준에 제시되어 있다. 그러나, 문헌상의 좌굴안정성 검토식은 개략적인 검토단계에서는 적은 노력에 의해 안전축의 결과가 도출되므로 유용하게 활용될 수 있지만, 구조계의 전체거동 및 구조특성, 즉, 횡지지 부재의 영향, 부재의 강성변화 및 부재상호간의 강성차이 등을 정확히 반영할 수 없으므로 엄밀한 해석결과가 요구되는 경우에는 적용성의 한계가 있다. 따라서, 본 과업에서는 영국교가 St. Tube로 제작되는 특수형식의 아치교인 점을 감안하여 면내 및 면외 좌굴에 대한 안정성과 최대 축력을 받는 아치리브의 국부좌굴에 대한 안정성을 좌굴해석을 통해 검토하고자 한다.

2. 해석개요

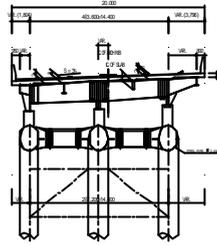
전체 구조계의 면내 및 면외좌굴 안정성 검토를 위한 좌굴해석은 St. Tube 아치교인 영국교를 대상으로 하였다. 표 1에 나타낸 바와 같이 역로제거더 형식인 영국교의 총연장 및 폭원은 각각 210m와 20m이며, 주요제원 및 단면형상은 그림 1과 같다.

표 1. 영국교의 구조형식 및 주요제원

구조 형식	경 간 구 성	폭 원
역로제거더교	30+135+22.5+22.5 = 210.0	20.0m



(a) 종단면도



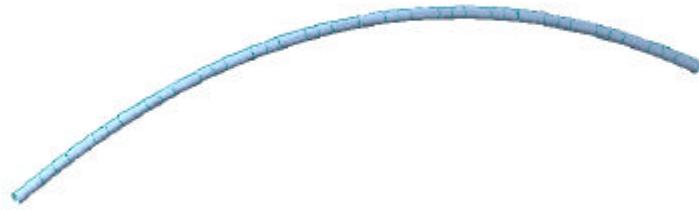
(b) 횡단면도

그림 1. 명국교의 제원 및 형상

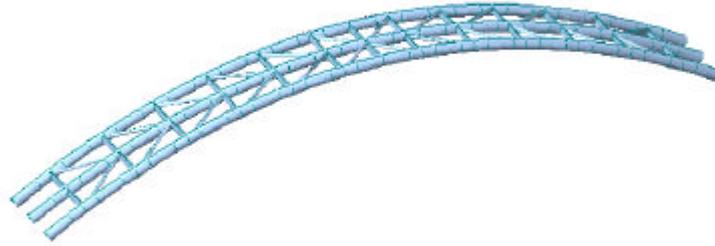
가설 단계에 따라 구조특성 및 하중조건이 변화하는 점을 감안하여 표2와 같이 가설 단계를 총 4가지로 구분하였고, 단계 4(완성계)에 대해서는 고정하중, 활하중, 그리고 풍하중의 하중 조합에 따라 총 4가지 경우를 선정하였다. 각 해석경우에 대한 해석모형을 프레임 요소를 사용하여 그림 2와 같이 모델하였으며, 각 해석모형에 대한 좌굴해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS/Civil을 이용하여 수행하였다.

표 2. 좌굴해석 경우

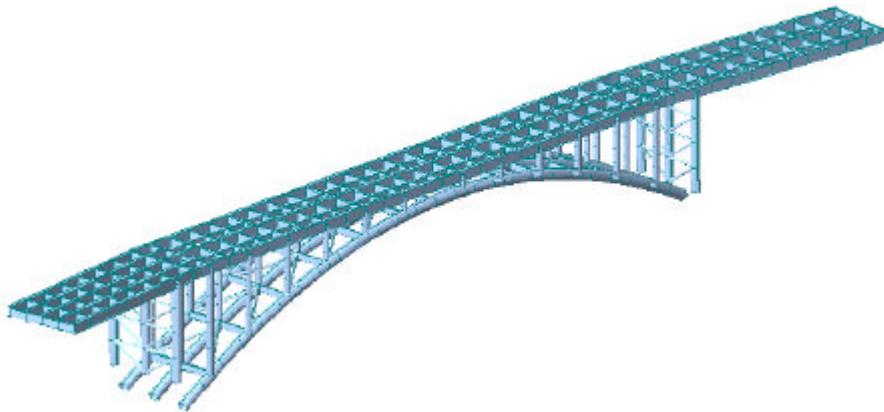
구 분		구조계 상태	하중 조건
단계1	해석경우1	1개의 아치리브가 단독으로 가설되어 있는 경우	고정하중
단계2	해석경우2	3개의 아치리브가 가로보 및 브레이싱으로 연결되어 있는 경우	고정하중
단계3	해석경우3	프레임구조 완성후 바닥판과의 합성전 단계	고정하중
단계4	해석경우4	구조물 완공단계	고정하중
	해석경우5		고정하중+활하중
	해석경우6		고정하중+풍하중
	해석경우7		고정하중+활하중+0.5풍하중
국부 좌굴	해석경우8	수직재 사이 아치리브	최대축력
	해석경우9	수직재 접합부 아치리브	최대축력+수직재반력



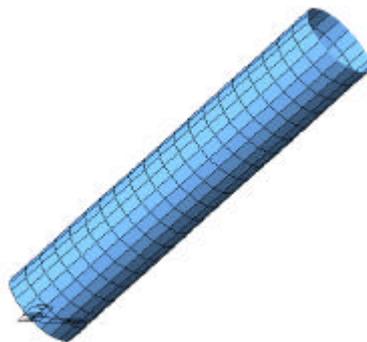
(a) 해석 경우 1



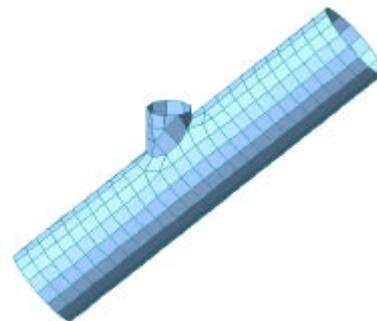
(b) 해석 경우 2



(c) 해석 경우 3~7



(d) 해석 경우 8



(e) 해석 경우 9

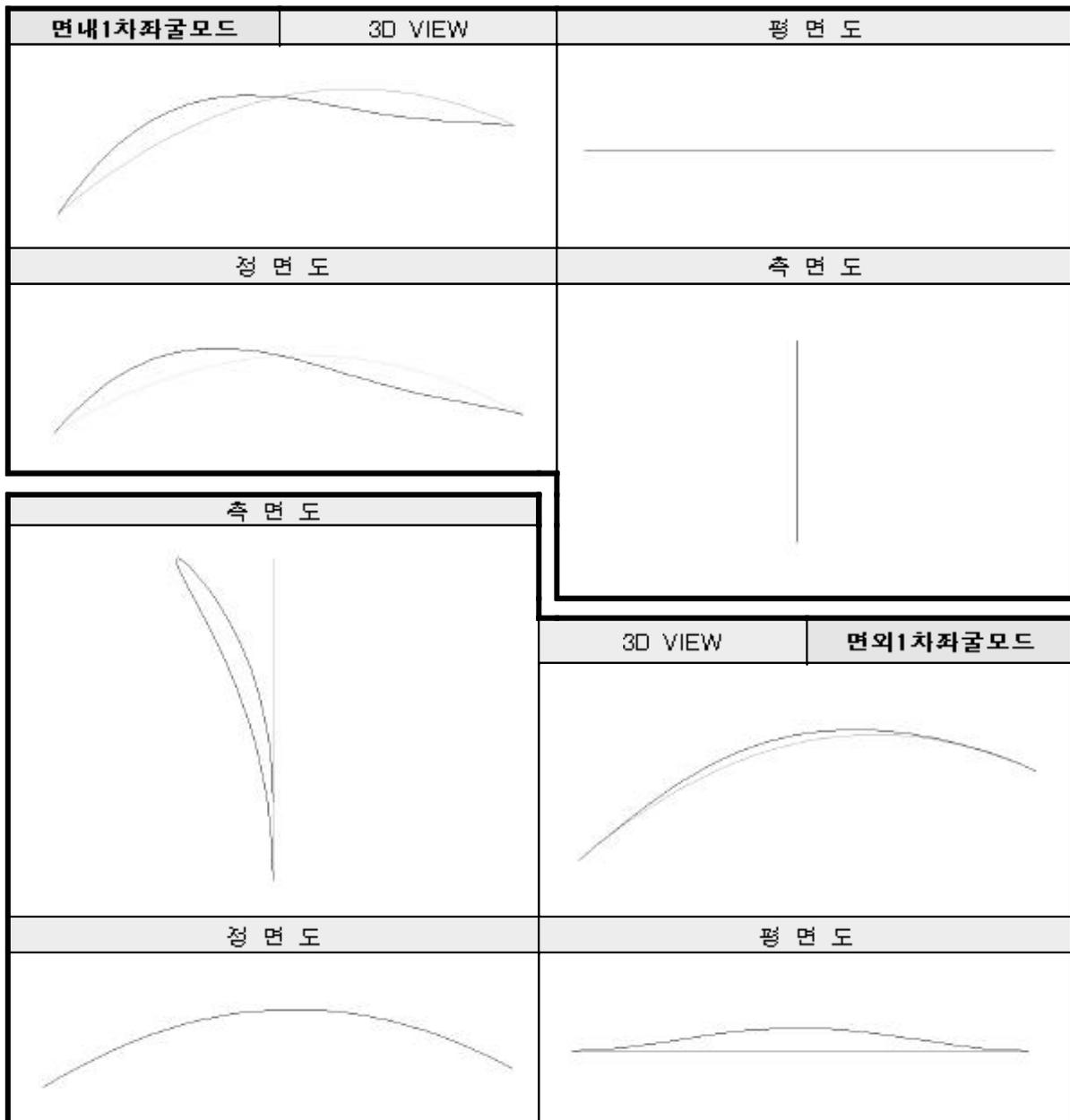
그림 2. 해석경우별 해석모형

3. 해석결과 및 분석

3.1 전체계 및 국부 좌굴 해석 결과

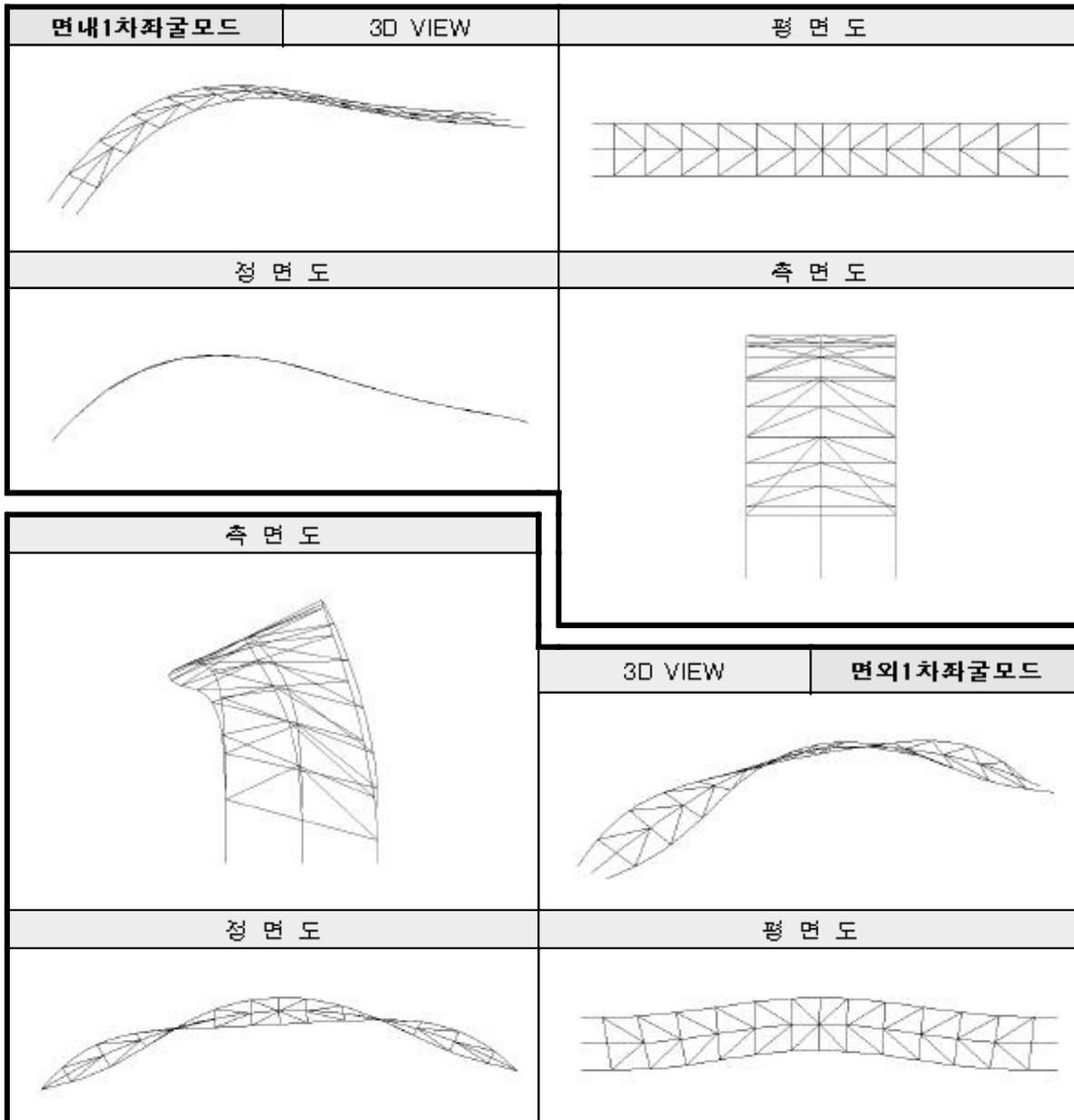
가. 해석 경우 1

MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고	MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고
1	15.888275	7.7144e-015	면외1차모드	11	198.517200	8.5902e-016	
2	17.278332	2.0562e-016	면내1차모드	12	202.704526	8.9638e-013	
3	34.490554	8.2404e-016		13	258.921692	6.5862e-016	
4	39.073323	7.2739e-016		14	259.923234	1.0979e-006	
5	67.521388	1.6837e-015		15	318.759127	7.1331e-016	
6	68.925819	1.0309e-015		16	389.406208	7.2987e-016	
7	102.140700	4.1739e-016		17	457.718835	0.0000e+000	
8	106.518188	1.0673e-015		18	535.297886	4.2476e-016	
9	150.005019	1.7052e-015		19	589.355774	2.0544e-002	
10	151.315258	9.3916e-016		20	601.463391	1.3619e-001	



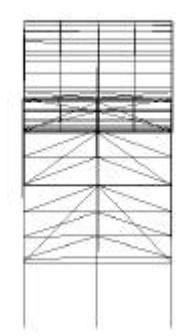
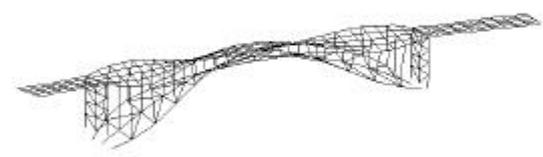
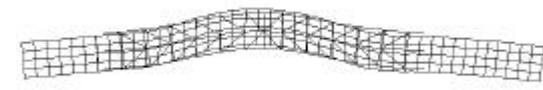
나. 해석 경우 2

MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고	MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고
1	15.488820	2.7525e-015	면내1차모드	11	179.802862	1.3392e-011	
2	35.008063	1.4207e-015		12	202.126637	5.4839e-015	
3	61.741703	4.6033e-016		13	212.470706	5.0832e-015	
4	85.881419	1.8202e-015	면외1차모드	14	222.041588	3.6711e-007	
5	95.274201	0.0000e+000		15	237.260177	2.2589e-006	
6	108.953484	1.8260e-015		16	251.073135	6.8585e-005	
7	130.185952	0.0000e+000		17	256.449523	1.0623e-010	
8	135.057443	1.0522e-015		18	257.986999	1.5608e-011	
9	136.313578	1.8765e-015		19	265.283603	1.6587e-004	
10	167.801205	0.0000e+000		20	275.948514	5.4100e-012	



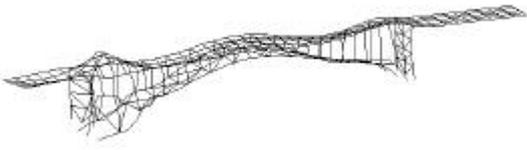
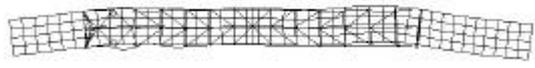
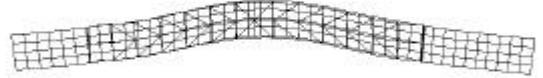
다. 해석 경우 3

MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고	MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고
1	10.080349	2.4671e-015	면내1차모드	11	64.176165	6.8645e-015	
2	17.880156	1.3909e-015		12	66.521827	3.4180e-015	
3	26.512142	4.0201e-016		13	74.061127	7.2320e-013	
4	36.181331	1.7675e-015	면외1차모드	14	76.891744	2.5490e-012	
5	38.206789	1.8597e-016		15	77.135202	2.1224e-011	
6	43.658706	8.1375e-016		16	83.887197	3.5416e-009	
7	48.890931	8.7199e-016		17	86.818110	6.1122e-006	
8	50.429801	5.6359e-016		18	88.478297	3.6205e-006	
9	55.790387	3.1840e-015		19	92.927555	3.5257e-007	
10	64.089559	3.5477e-015		20	93.893521	1.6242e-006	

면내1차좌굴모드		3D VIEW	평면도
			
정면도		측면도	
			
측면도		3D VIEW	
		면외1차좌굴모드	
정면도			
		평면도	
			

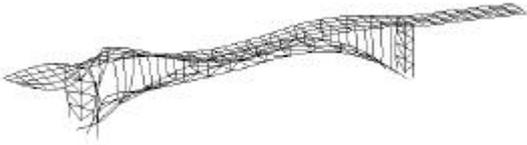
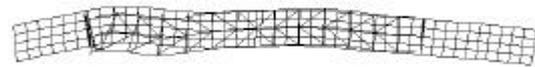
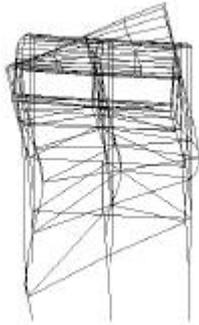
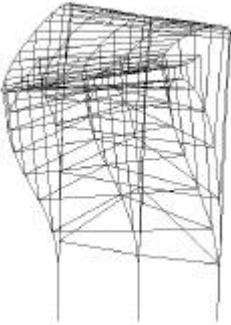
라. 해석 경우 4

MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고	MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고
1	54.606832	3.2530e-015	면외1차모드	11	125.319176	1.5301e-011	
2	55.338437	1.5408e-015		12	131.460011	7.7854e-011	
3	59.848921	1.6621e-015		13	142.143641	6.4429e-008	
4	76.611522	2.7824e-015		14	147.278487	4.4534e-007	
5	83.557146	2.2110e-015		15	154.352414	3.8749e-006	
6	86.723048	1.8025e-015		16	155.126245	6.1560e-006	
7	94.334611	4.5193e-015		17	161.696124	1.6859e-005	면내1차모드
8	98.748021	6.3321e-015		18	164.632196	5.8298e-005	
9	110.906354	1.0891e-014		19	166.690812	3.2895e-005	
10	121.977669	6.1893e-012		20	169.040698	3.0110e-004	

면내1차좌굴모드	3D VIEW	평 면 도
		
정 면 도		측 면 도
		
측 면 도		
		
정 면 도	3D VIEW	면외1차좌굴모드
		
		평 면 도
		

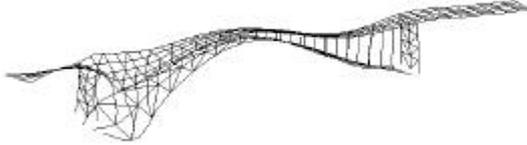
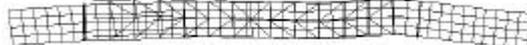
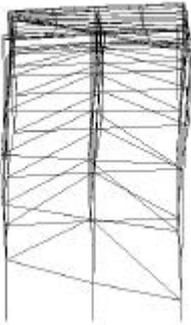
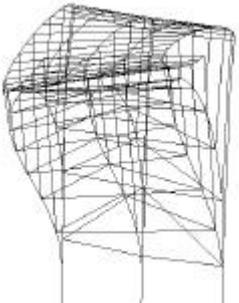
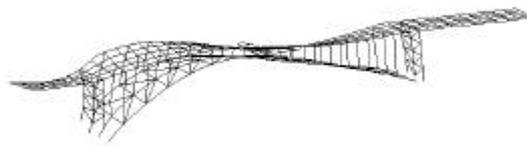
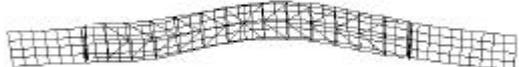
아. 해석 경우 5

MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고	MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고
1	45.170227	1.7303e-015	면외1차모드	11	104.484159	4.0115e-012	
2	46.712649	4.5633e-016		12	109.588285	5.0095e-011	
3	51.692285	4.1237e-016		13	118.052519	4.9602e-009	
4	64.219670	5.3108e-015		14	120.699648	2.8601e-008	
5	68.450615	3.9445e-015		15	128.925574	9.3760e-008	
6	73.201750	2.9120e-015		16	129.323196	9.1823e-007	
7	83.048437	2.9090e-015		17	136.369525	3.5071e-006	
8	84.302092	1.5171e-015	면내1차모드	18	137.645350	9.6739e-006	
9	92.708630	1.6861e-015		19	139.565712	3.7872e-006	
10	100.777842	2.6138e-012		20	141.112016	2.3070e-006	

면내1차좌굴모드	3D VIEW	평 면 도
		
정 면 도		측 면 도
		
측 면 도		
		
정 면 도	3D VIEW	면외1차좌굴모드
		
	평 면 도	
		

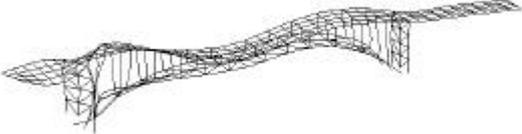
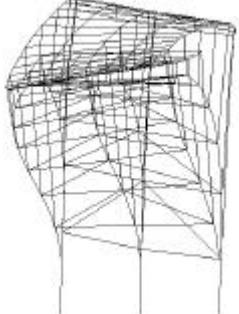
바. 해석 경우 6

MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고	MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고
1	52.801966	8.0740e-016	면외1차모드	11	122.930605	1.4925e-011	
2	55.068139	8.9031e-015		12	128.450653	8.3066e-011	
3	60.519050	0.0000e+000		13	137.762263	1.2108e-008	
4	75.056208	5.3014e-015		14	141.989691	3.7613e-008	
5	78.737757	5.4145e-015		15	149.378904	1.1991e-006	
6	86.380344	3.1258e-015		16	152.334847	5.5794e-008	
7	97.640100	2.4742e-015		17	160.445112	4.8696e-006	
8	101.389469	9.8113e-016	면내1차모드	18	161.893366	2.6948e-005	
9	108.875226	1.6316e-014		19	166.155552	1.7044e-004	
10	116.141371	3.7669e-012		20	167.392904	5.3837e-004	

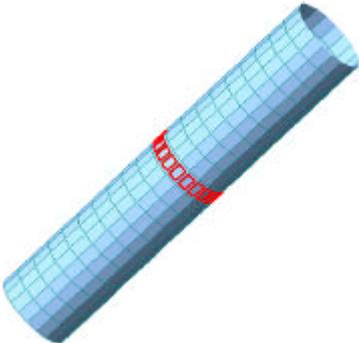
면내1차좌굴모드	3D VIEW	평 면 도
		
정 면 도		측 면 도
		
측 면 도		
		
정 면 도	3D VIEW	면외1차좌굴모드
		
평 면 도		
		

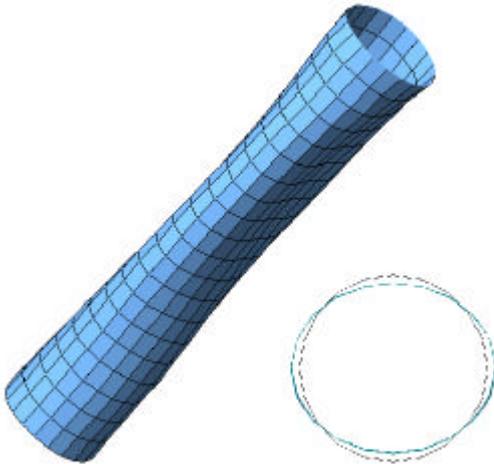
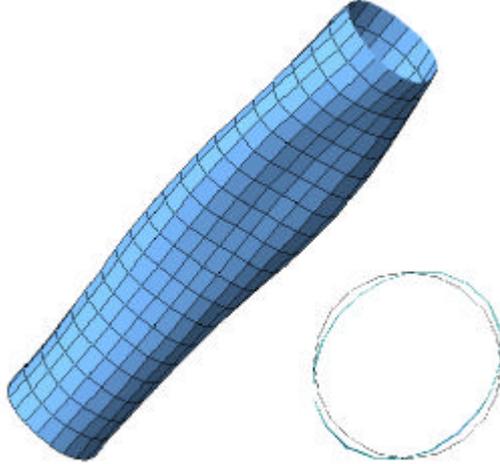
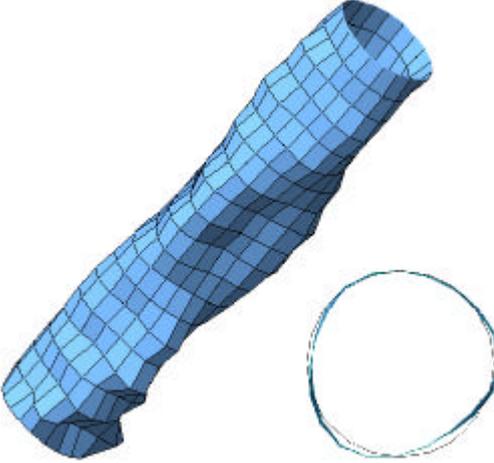
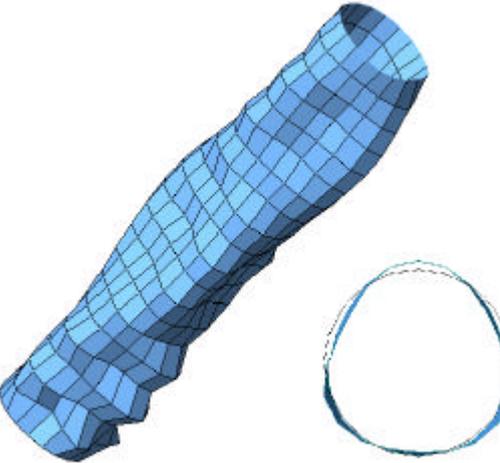
사. 해석 경우 7

MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고	MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비 고
1	44.430023	1.4393e-015	면외1차모드	11	103.264295	1.0625e-011	
2	46.647966	3.0464e-016		12	108.373888	1.9401e-010	
3	51.982156	2.7338e-016		13	116.063062	9.5912e-009	
4	63.411047	6.7232e-016		14	119.184172	3.0198e-008	
5	66.995562	4.2423e-016		15	124.945809	7.0673e-008	
6	73.036918	1.1674e-015		16	127.747079	5.8918e-008	
7	82.595798	1.3764e-015		17	135.812950	3.2232e-006	
8	86.875322	1.3086e-015	면내1차모드	18	137.010050	2.7830e-006	
9	91.639941	1.8764e-014		19	140.101658	4.6122e-005	
10	99.312252	8.5285e-012		20	141.559672	1.5176e-004	

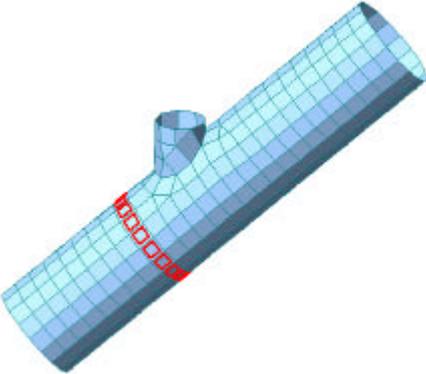
면내1차좌굴모드	3D VIEW	평 면 도
		
정 면 도		측 면 도
		
측 면 도		
		
정 면 도	3D VIEW	면외1차좌굴모드
		
	평 면 도	
		

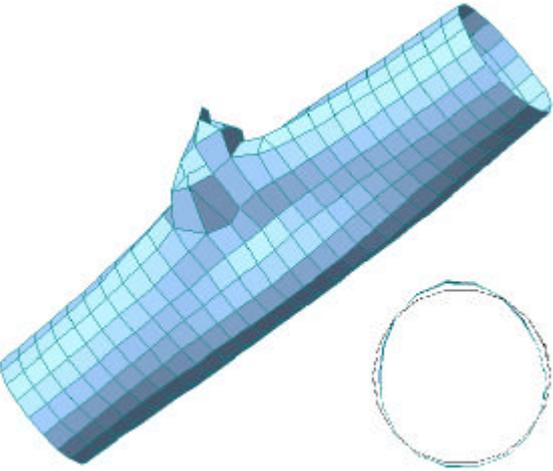
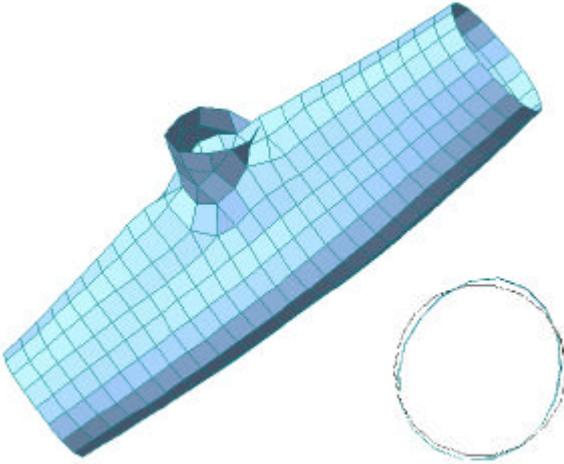
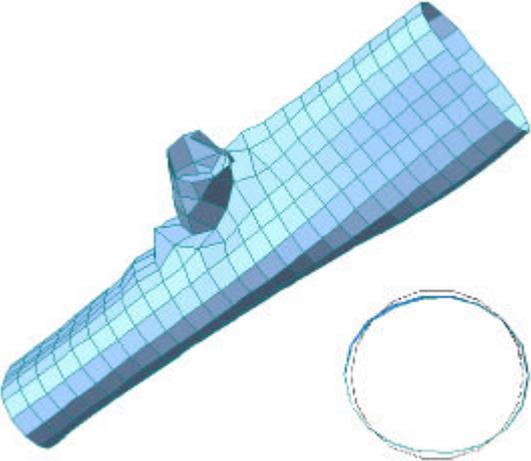
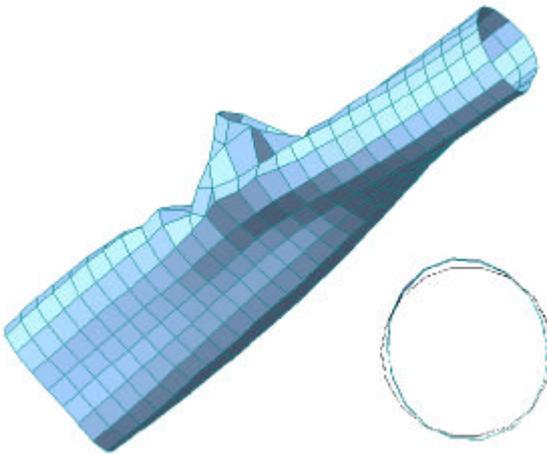
아. 해석 경우 8

확대 단면 위치	MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비고
	1	48.995818	1.1848e-008	
	2	49.298619	3.4940e-009	
	3	52.945207	2.8983e-006	
	4	52.965035	3.4201e-006	
	5	54.251603	1.7751e-005	
	6	54.291881	2.3875e-006	
	7	54.641057	2.3120e-005	
	8	54.656616	3.0159e-005	
	9	57.148164	2.3706e-006	
	10	57.166352	3.5493e-006	

1차 모드 (LF.=49.00)	2차 모드 (LF.=49.30)
	
3차 모드 (LF.=52.95)	4차 모드 (LF.=52.97)
	

자. 해석 경우 9

확대 단면 위치	MODE	EIGENVALUE	ERROR NORM	비교
	1	28.773636	2.9153e-009	
	2	32.487540	2.5086e-007	
	3	35.500131	4.2717e-004	
	4	35.567533	1.2540e-004	
	5	36.169658	2.2137e-005	
	6	36.630681	4.5026e-004	
	7	37.020950	2.8232e-004	
	8	38.636173	4.9218e-003	
	9	38.908901	7.1685e-004	
	10	39.558913	5.7641e-004	

1차 모드 (LF.=28.77)	2차 모드 (LF.=32.49)
	
3차 모드 (LF.=35.50)	4차 모드 (LF.=35.57)
	

3.2 결과 요약

이상의 검토에서 각 단계 좌굴 안전율을 정리하면 다음과 같다.

구분	아치 가설시		합성전	합성후(완성계)				국부좌굴	
	해석경우1	해석경우2	해석경우3	해석경우4	해석경우5	해석경우6	해석경우7	해석경우8	해석경우9
안전율	15.9	15.5	10.1	54.6	45.2	52.8	44.4	49.0	28.8
비고	면외좌굴	면내좌굴	면내좌굴	면외좌굴	면외좌굴	면외좌굴	면외좌굴	-	-

3.3 결과 분석

St. Tube 아치교의 가설단계에 따른 구조특성 및 하중조건 변화를 고려한 좌굴해석을 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1개의 아치리브가 단독으로 가설 되어가는 경우에는 횡방향(교축직각방향)의 지지가 없으므로 면외 좌굴이 우선적으로 나타났다. 하지만 나머지 아치리브를 모두 가설하고 횡방향으로 브레이싱한 경우에는 횡방향 강성의 증가로 인하여 연직방향으로의 좌굴(면내 좌굴)이 우선적으로 발생하였다.
- 골조구조의 가설 완료후 바닥판 타설시(합성전)의 경우를 보면 해석 경우 2와 거의 비슷한 결과를 준다. 즉, 합성전의 단면에서는 아치리브 강성의 강성이 좌굴에 지배적이라고 볼 수 있다.
- 합성후(바닥판과 거더가 밀체가 된 후)의 거동은 합성전과 뚜렷한 차이를 보인다. 안전율에 있어서도 상당한 증가를 보이며 기하학적 형상 및 하중조건에 있어서 비대칭 구조이므로 면외좌굴이 우선적으로 나타나며, 면내좌굴의 양상은 뚜렷하지 않다. 면내좌굴이 나타난다 하더라도 고차 모드에서 나타나며 안전율이 높아 발생 가능성이 희박한 형태이다.
- 본 교량의 완성계 구조물은 면외좌굴이 지배적이기는 하나 거더 및 아치리브가 적절히 횡방향으로 지지되어 면외좌굴에 대한 안전율이 상당히 높은 것으로 나타났다. 하중조합에 따라 변하기는 하지만(하중이 증가할수록 안전율인 감소하는 경향을 나타냄) 제일 불리한 경우(고정하중+활하중+0.5풍하중)에도 44.4의 안전율을 보임에 따라 면외좌굴에 대해 매우 안전한 것으로 나타났다.
- 가설단계에서 가장 불리한 경우는 합성전 바닥판 타설단계의 가설된 경우이지만, 이 경우에도 좌굴에 대한 안전율이 최소 10 이상을 확보하고 있으므로 좌굴에 대해 충분히 안전하다고 판단된다.
- 축력 및 수직재 반력이 가장 큰 지점부 아치리브에 대하여 좌굴검토를 수행하였다. 아치리브만의 국부좌굴검토가 주 목적이므로 수직재의 기하학적인 영향은 최대한 줄이고 반력만을 고려하고자 짧게 모델링 하였다.

검토 결과 축력만을 고려한 수직재 경간부 보다는 부재에 횡방향력이 추가된 수직재 연결부가 좌굴에 더 불리함을 알 수 있으나, 최소 안전율이 28.8으로 본 구조물의 아치리브는 국부 좌굴에 있어서도 매우 안전함을 보인다.