

경량전철 2주형 판형교 복부판의 탄성좌굴 특성

Elastic Buckling Characteristics of Plate Girder Web Panel

황민오* 성택룡* 윤태양** 이안호***
Hwang, Min-Oh Seong, Taek Ryong Yoon, Tae Yang Lee, An-Ho

ABSTRACT

In the design of plate girder web panels, it is required to evaluate accurately the elastic buckling strength under pure shear, pure bending and combined bending and shear. Currently, elastic buckling coefficients of web panels stiffened by transverse intermediate stiffeners are determined by assuming conservatively that web panels are simply supported at the juncture between the flange and web. However, depending upon the geometry and the properties of the plate girder bridge, upper juncture between the flange and web can be assumed as fixed because concrete deck prevents the rotational displacement of upper flange. In the present study, a series of numerical analyses based on finite element modeling is carried out to investigate the effects of the concrete deck, and the resulting data are quantified in simple equations.

1. 서론

합리화 2주형 판형교는 일반적인 판형교를 대신하여 주형의 수를 줄이고 보강재, 가로보, 브레이싱 등의 구조부재를 단순화 또는 생략함으로써 합리화한 구조이다. 이러한 2주형 판형교에서의 복부판 설계의 경우, 복부판을 되도록 얇게 하여 단면적을 작게 하느냐, 복부판을 두껍게 하여 수직, 수평보강재를 최소한의 필요량만 붙여서 제작공비를 줄이느냐에 따라 경제성이 좌우된다고 할 수 있다. 그러나 여기에는 좌굴에 대한 안정성의 확보, 작용하중 하에서 잔류변형이나 국부적 초과응력의 억제 등에 대한 고려가 뒤따라야 한다.

본 연구에서는 판형교 복부판의 설계 개념 및 설계기준에 대하여 알아보고 2주형 판형교의 복부판 및 보강재의 합리적인 설계를 위한 복부판 좌굴해석과 그 결과에 대하여 고찰하였다.

2. 판형교 복부판 설계 개념 및 설계기준

일반적인 판형교 복부판의 경우 휨모멘트, 전단력이 작용하게 되며, 합성형의 경우에는 약간의 인장력(-압축력)이 추가로 작용한다고 할 수 있다. 이러한 휨모멘트, 전단력, 인장력(-압축력)의 영향을 고려한 직사각형 판형의 좌굴내력을 고려하여 복부판 설계식을 제안하게 되는 것이다. 이러한 설계규정은 판형 전체의 극한내하력을 기준으로 하게 되나, 계산 취급의 편의상 복부판의 탄성

* 포항산업과학연구원 토목구조연구팀 선임연구원

** 포항산업과학연구원 토목구조연구팀장 책임연구원

*** 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 선임연구원, 정회원

좌굴응력과 극한내하력과 관계를 합리적인 안전율의 값으로 처리하게 되어있으며, 이러한 안전율은 도표 1에 나타내었다⁽⁶⁾. 또한 여기에 사용되는 탄성좌굴응력은 복부판과 플랜지의 접합부, 그리고 복부판과 보강재의 접합부 모두를 단순지지된 상태로 가정한 탄성좌굴 응력으로⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾, 앞에서 언급한 안전율과는 별도로 상당한 안전율을 더 가지고 있다고 할 수 있다.

도표 1. 판형 복부판 설계 좌굴 안전율

	압축력만 받는 경우	휨모멘트만 받는 경우	전단력만 받는 경우	압축, 휨, 전단이 각각 조합되어 작용할 경우의 안전율
안전율	1.70	1.40	1.25	$\gamma_B = 1.25 + (0.30 + 0.15\phi)e^{-4.3\eta} \geq 1.25$

여기서, γ_B : 압축, 휨, 전단이 각각 조합되어 작용할 경우의 안전율

ϕ : 복부판 상하연의 응력비

η : 복부판에 작용하는 전단응력과 큰쪽의 연압축응력과의 비

이러한 복부판의 응력상태, 안전율 및 지지조건의 가정하에 직사각형 판형의 탄성좌굴 거동을 분석하여 안전율이 적용된 탄성좌굴응력이 강판의 항복응력을 넘지 못하도록 규정하여 강판의 효율적인 사용을 유도한 것이 복부판의 최소두께 규정이다⁽³⁾⁽⁵⁾. 도로교 표준시방서에서는 이러한 복부판의 최소두께를 수평보강재의 사용 상태 및 강중에 따라 제시하였으며, 이는 복부판의 높이에 대한 길이의 비(형상비)를 1.5 이내에서 사용한다는 가정을 기반으로하고 있다⁽⁶⁾.

복부판의 최소두께 규정은 전술한 바와 같이 복부판-플랜지, 및 복부판-보강재 연결부의 조건을 단순지지로 가정한 직사각형 판의 좌굴계수를 사용하였으며 그 좌굴계수는 순수 압축에 대하여 4.0, 순수 휨에 대하여 23.9, 순수 전단에 대하여는 형상비 1.5에 대하여 7.12의 값을 사용하고 있다. 참고로 단순지지 및 고정지지에 대한 좌굴계수의 값을 정리하면 도표 2와 같다.

도표 2. 직사각형 판형의 좌굴계수

	순수 압축	순수 휨	순수 전단 (a/b=1.5)
단순지지	4.0	23.9	7.12
고정지지	6.97	39.6	10.88
고정지지/단순지지	174%	166%	153%

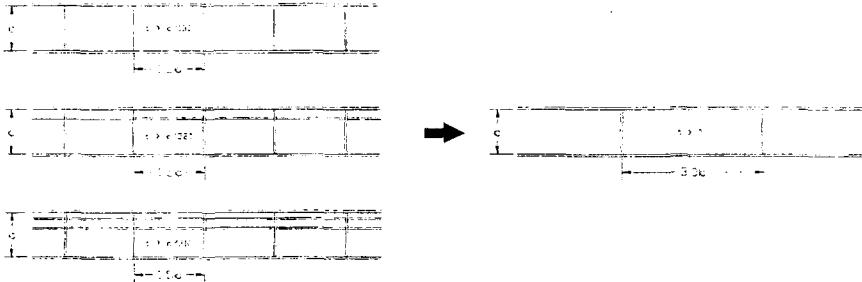
도표 2에 의하면 지지조건을 고정지지로 볼 경우 좌굴계수가 50~80%정도 증가하게 되며 지지조건의 차이가 가져오는 강재의 사용량의 차이는 전체 주형을 고려할 경우 상당한 양이 됨을 알 수 있다. 또한 플랜지의 두께가 복부판 두께의 2배 이상이 될 경우 복부판-플랜지 이음부는 고정지지에 가깝게 거동한다는 보고⁽²⁾가 있으며, 이를 고려할 경우 현재의 설계규정은 상당량의 과다설계를 유발하는 것임을 알 수 있다.

3. 2주형 판형교 복부판 설계 합리화 방안

현재 일반적으로 판형교의 경우 복부판의 높이가 2m 이상일 경우 수평보강재를 1단 이상 사용하도록 설계하고 있다. 하지만 본 연구에서는 구조물 제작의 합리화를 도모하는 측면에서 다소 복부판의 두께가 증가하더라도 수평보강재를 전혀 사용하지 않는 방안을 제안하고자 하며, 복부판의 정확한 좌굴거동을 파악하여 복부판 두께의 증가량을 최소화 하는 방안을 마련하고자 한다.

그리고, 현행 시방서의 경우 형상비를 1.5 이내로 사용하도록 규정하고 형상비가 1.5의 경우에 대한 전단좌굴계수를 사용하고 있으나, 이러한 제한은 판형의 전단좌굴계수가 형상비가 커짐에 따라 현저히 작아지는 현상에 따른 것으로 휨응력에 비해 전단응력이 상대적으로 작은 지간 중앙부 같은 경우에는 별 효과가 없다고 할 수 있다. 하지만 시방서 규정은 지간 중앙부와 지점부에 차이를 두지 않고 일률적으로 형상비 1.5를 초과할 수 없도록 규정하여 지간중앙부에 필요이상의 과다

한 수직보강재를 사용하도록 유도하고 있다. 이러한 불합리한 사항을 개선하기 위하여는 형상비 1.5 이상의 경우에 대한 검토가 필요하며, 정확한 좌굴계수값을 얻을 필요가 있다. 본 연구에서는 형상비를 3.0까지 사용할 수 있도록 3.0의 경우에 대한 직사각형 판형의 정확한 좌굴계수를 구하여 사용하도록 한다.



기존 설계 방법(SWS 490)
합리화 방안

그림 1. 주형 합리화 방안 (보강재 최소 사용)

또한, 판형교의 경우 바닥판이 상부 플랜지를 구속하게 되고 구속된 플랜지는 복부판의 상부를 거의 고정에 가깝게 구속하게 된다. 하지만, 전술한 바와 같이 현 시방규정은 이러한 고정된 지지조건을 단순지지조건으로 보아 안전측의 설계를 유도하고 있는 바, 이러한 바닥판의 구속효과를 고려하게 되면 다소 합리적인 설계가 가능하다고 판단된다.

이러한 방향을 가지고 유한요소해석을 실시하였으며, 그 내용과 결과는 다음 절에서 다루기로 한다.

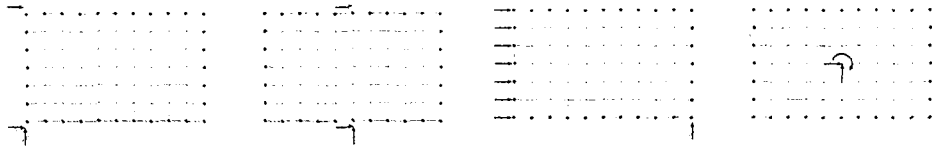
4. 판형교 복부판 유한요소해석

본 연구에서 수행한 유한요소해석을 크게 두가지로 나누어 보면, 복부판의 전단좌굴 해석과 전단력과 휨모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대한 해석으로 나눌 수 있다.

직사각형 판형에 대한 좌굴해석은 형상비 3.0에 대한 정확한 좌굴계수를 구하고, 바닥판 인접 연단의 지지조건을 고정조건으로 하였을 경우에 대한 좌굴계수를 알아보기 위하여 수행되었다. 앞서 언급한 바와 같이 복부판 양단이 단순지지되어 있거나, 고정지지되어 있을 경우에 대한 좌굴계수값은 이미 알려져 있지만 한쪽은 고정지지, 한쪽은 단순지지되어있는 판형의 좌굴계수값은 보고된 바 없다. 이에 본 연구에서는 이미 알려진 고정지지, 단순지지에 대한 해석결과를 이론치와 비교하고, 단순-고정지지에 대한 좌굴계수값을 구하였다. 해석 내용으로는 먼저 형상비에 따른 전단좌굴해석을 수행하였으며, 다음으로는 형상비를 3.0으로 고정시킨 상태에서 지지조건과, 휨응력/전단응력의 비를 변화시켜 지지조건 변화와 응력상태의 변화에 따른 좌굴거동도 살펴보았다. 합성형의 경우 약간의 인장응력이 추가로 발생되기는 하지만, 그 값이 무시할 수 있을 정도이며, 고려하지 않은 해석결과를 적용하는 것이 안전측의 결과를 주게 되므로 인장응력은 고려하지 않았다.

4.1 지지조건 및 수렴도

이러한 좌굴해석은 범용프로그램을 이용하여 수행되었으며, 해석요소로는 4-node shell 요소를 사용하였다. 먼저 본 해석에 들어가기에 앞서 해석모델의 지지조건 및 해석요소의 개수를 결정하는 것이 필요하다. 유한요소 해석의 경우 지지조건 차이에 따라서 결과가 상당한 차이를 보일 수 있으며, 해석요소의 개수의 차이도 결과의 차이를 보여주게 된다. 그림 2는 전단응력이 작용할 경우의 해석시 적용할 수 있는 지지조건 중 4가지를 나타내었다. 이러한 4가지 Case 모두 전단좌굴해석에 사용될 수 있는 조건이지만, 본 연구에서는 이후 전단응력과 휨응력을 동시에 작용시킨 해석을 수행할 계획이므로 이 중 Case 2의 조건을 사용하기로 하였다.



Case 1 Case 2 Case 3 Case 4
 그림 2. 복부판 전단좌굴해석에 사용가능한 지지조건(양단 단순지지 예)

그림 2의 지지조건은 양단 단순지지의 경우를 나타내었으며, 고정지지의 경우 플랜지와 만나는 절점들의 면외방향 변위를 구속하면 된다.

이러한 지지조건을 적용하여 모델의 수렴도 확인 해석을 수행하였다. 형상비는 1.0, 2.0, 3.0의 3가지를 사용하였으며, 복부판 높이방향으로 2개, 4개, 8개, 16개, 32개의 요소를 가지는 모델에 대하여 해석하여 수렴도를 알아보았다. 그림 3은 수렴도 해석결과를 그래프로 나타낸 것이다. 해석 결과에 의하면 복부판 높이방향으로 8개 이상의 요소를 사용하면 정해에 1% 이내의 오차를 보여주고 있으나, 이후 본해석에서는 복부판 높이방향으로 20개의 요소를 사용하여 정밀도를 확보하였다.

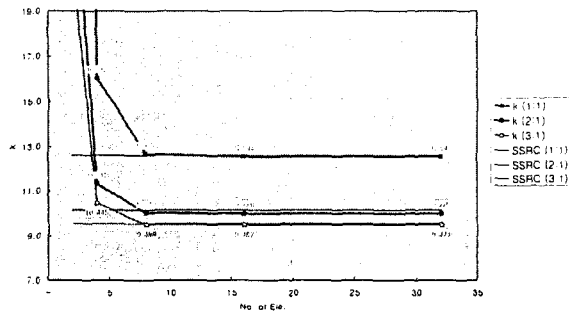


그림 3. 수렴도 해석 결과

4.2 순수 전단좌굴 해석

먼저, 상기 언급한 Case 2의 지지조건을 적용하고, 복부판 높이방향으로 20개의 요소를 사용하여 형상비에 따른 전단좌굴거동을 알아보았다. 지지조건은 양단 단순지지, 양단 고정지지, 단순지지+고정지지의 3가지 Type에 대하여 수행하였으며, 형상비는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0의 8가지에 대하여 수행하였다. 그림 4는 해석을 수행한 모델의 요소망을 보여준다.

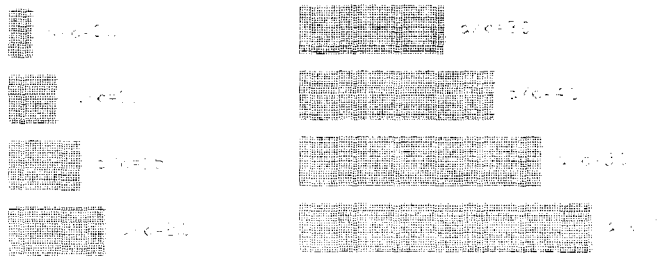


그림 4. 전단좌굴 해석 요소망

이렇게 총 24종류의 좌굴해석을 수행하였으며, 도표 3과 그림 5는 그 결과를 정리한 것이다. 형상비 0.5와 2.0의 결과가 이론치와 다소 차이는 있지만, 이론이라고 표기한 값 역시 기본이론을 회귀분석한 결과⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾이므로 이 차이는 무시하기로 한다.

도표 3. 직사각형 판형의 전단좌굴계수

구 분	a/b	지지조건	k (해석)	k (이론)	오차 (%)	구 분	a/b	지지조건	k (해석)	k (이론)	오차 (%)	구 분	a/b	지지조건	k (해석)	k (이론)	오차 (%)
ASS05	0.5	단순-단순	26.329	25.360	3.823	AFS05	0.5	고정-단순	26.663	-	-	AFF05	0.5	고정-고정	27.171	26.733	1.633
ASS10	1.0	단순-단순	9.317	9.340	-0.251	AFS10	1.0	고정-단순	10.704	-	-	AFF10	1.0	고정-고정	12.574	12.600	-0.208
ASS15	1.5	단순-단순	7.063	7.118	-0.765	AFS15	1.5	고정-단순	8.943	-	-	AFF15	1.5	고정-고정	10.779	10.884	-0.962
ASS20	2.0	단순-단순	6.541	6.340	3.164	AFS20	2.0	고정-단순	8.077	-	-	AFF20	2.0	고정-고정	9.997	10.134	-1.354
ASS30	3.0	단순-단순	5.836	5.784	0.885	AFS30	3.0	고정-단순	7.543	-	-	AFF30	3.0	고정-고정	9.470	9.530	-0.623
ASS40	4.0	단순-단순	5.620	5.590	0.541	AFS40	4.0	고정-단순	7.343	-	-	AFF40	4.0	고정-고정	9.251	9.300	-0.519
ASS50	5.0	단순-단순	5.526	5.500	0.469	AFS50	5.0	고정-단순	7.246	-	-	AFF50	5.0	고정-고정	9.147	9.188	-0.452
ASS60	6.0	단순-단순	5.474	5.451	0.428	AFS60	6.0	고정-단순	7.192	-	-	AFF60	6.0	고정-고정	9.093	9.127	-0.370

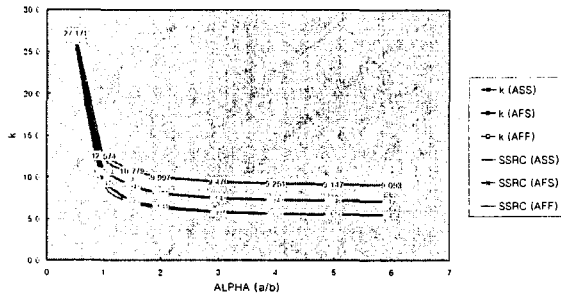


그림 5. 직사각형 판형의 전단좌굴계수

위의 해석결과에 의하면 고정-단순 지지의 경우 양단 단순지지와 양단 고정지지 조건의 좌굴계수값의 중간정도의 값을 보이고 있으며, 고정-단순 지지된 형상비 3.0의 좌굴계수가 7.543으로 양단 단순지지된 형상비 1.5의 좌굴계수 7.063보다 큼을 알 수 있다. 이는 현재 사용하고 있는 판형 복부판의 최소두께 규정을 만족시켜주기만 하면 형상비를 3.0까지 사용해도 문제가 없음을 보여준다고 할 수 있다. 물론 이는 순수전단응력만이 작용할 경우에 관한 것으로 휨응력과 동시에 고려하여 면밀히 검토해 봐야 하지만 복부판의 합리화 가능성을 충분히 보여준다고 판단할 수 있다. 그림 6은 단순지지조건의 다양한 형상비에 대한 좌굴 Mode Shape을 보여주고 있으며, 전단좌굴형상의 전형적인 모습을 보여준다.

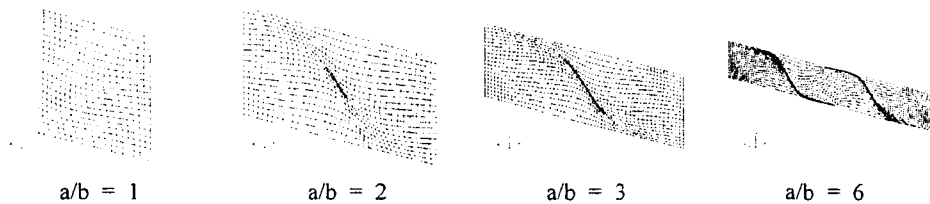


그림 6. 전단해석 결과 Mode Shape 예

4.3 휨 응력과 전단력이 동시에 작용하는 경우에 대한 좌굴해석

휨 응력에 의한 좌굴은 패널의 길이에 상관없이 최소값을 사용하므로 형상비의 영향을 전혀 받지 않는다. 다만 전단응력에 의한 좌굴응력이 패널의 길이에 관계하지만 위의 해석결과에 의해 전단응력에 대하여 합리화의 가능성을 볼 수 있었다.

이러한 전단좌굴 해석결과를 바탕으로 형상비 3.0에 대하여 순수 전단, 순수 휨, 전단+휨 응력이 작용하는 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 플랜지 접합부에 대하여는 양단 단순지지, 양단 고정지지, 상단 고정-하단 단순, 상단 단순-하단 고정의 4가지 경우에 대하여 수행하였다. 상하단의 차이는 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에서의 바닥판의 영향이 서로 반대가 되기 때문에 구분하여

수행하였다. 하중조건은 순수 휨에서 순수전단까지 14단계로 나누어 두 응력이 함께 작용할 경우를 모사하였다.

상기와 같이 4가지 지지조건에 대하여 14가지 하중조건을 적용하여 총 56가지 해석을 수행하였으며 도표 4와 그림 7, 8은 그 결과를 정리한 것이다. 해석 결과에 의하면 양단 단순지지조건과 양단 고정지지조건인 경우 그 절대치의 차이는 있으나, 순수전단이나 순수휨의 좌굴계수와는 비는 일정하며 그 추이는 1/4원형의 곡선과 거의 일치함을 볼 수 있다. 하지만 단순-고정지지의 경우 정모멘트, 부모멘트 구간의 값의 차이가 상당히 있음을 볼 수 있으며, 부모멘트 구간의 경우에는 1/4원형 곡선의 안쪽으로 곡선이 지나가게 되어 상하단의 지지조건의 차이가 전반적인 좌굴거동에 다소 안좋은 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 반대로 정모멘트 구간의 경우에는 1/4원형 곡선의 바깥쪽으로 곡선이 지나가며 이는 상하단 지지조건의 차이가 좌굴계수의 상승효과를 줄 수 있음을 볼 수 있다.

도표 4. 지지조건별, 하중조건별 좌굴계수

구분	a/b	지지조건 (상단-하단)	τ/σ	σ_{cr}	τ_{cr}	k (Bending)	k (Shear)	구분	a/b	지지조건 (상단-하단)	τ/σ	σ_{cr}	τ_{cr}	k (Bending)	k (Shear)
SS300000	3	단순-단순	0.000	20.286	0.00	24.048	-	SF300000	3	단순-단순	0.000	33.141	0.00	39.287	-
SS300050	3	단순-단순	0.017	20.193	0.34	23.938	0.40	SF300050	3	고정-단순	0.017	33.045	0.55	39.173	0.65
SS300100	3	단순-단순	0.033	20.028	0.67	23.742	0.79	SF300100	3	고정-단순	0.033	32.805	1.09	38.889	1.30
SS300250	3	단순-단순	0.083	19.198	1.60	22.758	1.90	SF300250	3	고정-단순	0.083	31.492	2.62	37.332	3.11
SS300500	3	단순-단순	0.167	17.074	2.85	20.241	3.37	SF300500	3	고정-단순	0.167	27.941	4.66	33.123	5.52
SS300750	3	단순-단순	0.250	14.613	3.65	17.323	4.33	SF300750	3	고정-단순	0.250	23.548	5.89	27.915	6.98
SS301000	3	단순-단순	0.333	12.335	4.11	14.623	4.87	SF301000	3	고정-단순	0.333	19.332	6.44	22.917	7.64
SS301500	3	단순-단순	0.500	9.064	4.53	10.745	5.37	SF301500	3	고정-단순	0.500	13.561	6.75	16.005	8.00
SS302000	3	단순-단순	0.667	7.058	4.71	8.367	5.58	SF302000	3	고정-단순	0.667	10.180	6.79	12.068	8.05
SS302500	3	단순-단순	0.833	5.750	4.79	6.817	5.68	SF302500	3	고정-단순	0.833	8.121	6.77	9.628	8.02
SS303000	3	단순-단순	1.000	4.841	4.84	5.738	5.74	SF303000	3	고정-단순	1.000	6.739	6.74	7.989	7.99
SS304000	3	단순-단순	1.333	3.668	4.89	4.348	5.80	SF304000	3	고정-단순	1.333	5.014	6.69	5.944	7.93
SS305000	3	단순-단순	1.667	2.948	4.91	3.495	5.83	SF305000	3	고정-단순	1.667	3.986	6.64	4.726	7.88
SS30infini	3	단순-단순	무한대	0.000	4.96	-	5.88	SF30infini	3	고정-단순	무한대	0.000	6.41	-	7.60
FS300000	3	단순-고정	0.000	20.307	0.00	24.073	-	FF300000	3	고정-고정	0.000	34.641	0.00	41.065	-
FS300050	3	단순-고정	0.017	20.250	0.34	24.006	0.40	FF300050	3	고정-고정	0.017	34.578	0.58	40.991	0.68
FS300100	3	단순-고정	0.033	20.114	0.67	23.844	0.79	FF300100	3	고정-고정	0.033	34.382	1.15	40.758	1.36
FS300250	3	단순-고정	0.083	19.399	1.62	22.997	1.92	FF300250	3	고정-고정	0.083	33.992	2.83	40.296	3.36
FS300500	3	단순-고정	0.167	17.554	2.93	20.810	3.47	FF300500	3	고정-고정	0.167	28.167	4.69	33.391	5.57
FS300750	3	단순-고정	0.250	15.429	3.86	18.290	4.57	FF300750	3	고정-고정	0.250	24.103	6.03	28.573	7.14
FS301000	3	단순-고정	0.333	13.437	4.48	15.929	5.31	FF301000	3	고정-고정	0.333	20.323	6.77	24.092	8.03
FS301500	3	단순-고정	0.500	10.344	5.17	12.262	6.13	FF301500	3	고정-고정	0.500	14.864	7.43	17.621	8.81
FS302000	3	단순-고정	0.667	8.278	5.52	9.814	6.54	FF302000	3	고정-고정	0.667	11.534	7.69	13.673	9.12
FS302500	3	단순-고정	0.833	6.865	5.72	8.138	6.78	FF302500	3	고정-고정	0.833	9.378	7.82	11.117	9.26
FS303000	3	단순-고정	1.000	5.851	5.85	6.936	6.94	FF303000	3	고정-고정	1.000	7.886	7.89	9.348	9.35
FS304000	3	단순-고정	1.333	4.505	6.01	5.341	7.12	FF304000	3	고정-고정	1.333	5.969	7.96	7.076	9.43
FS305000	3	단순-고정	1.667	3.658	6.10	4.337	7.23	FF305000	3	고정-고정	1.667	4.796	7.99	5.686	9.48
FS30infini	3	단순-고정	무한대	0.000	6.41	-	7.60	FF30infini	3	고정-고정	무한대	0.000	8.06	-	9.56

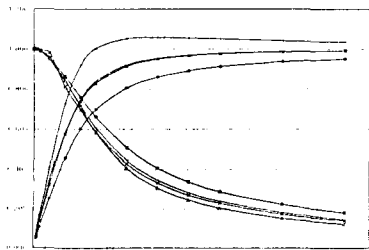


그림 7. 응력비의 변화에 따른 좌굴응력비

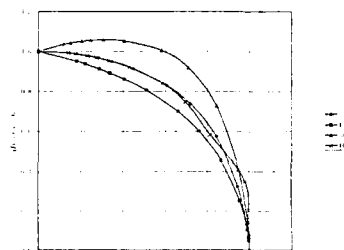


그림 8. 지지조건별 좌굴응력비

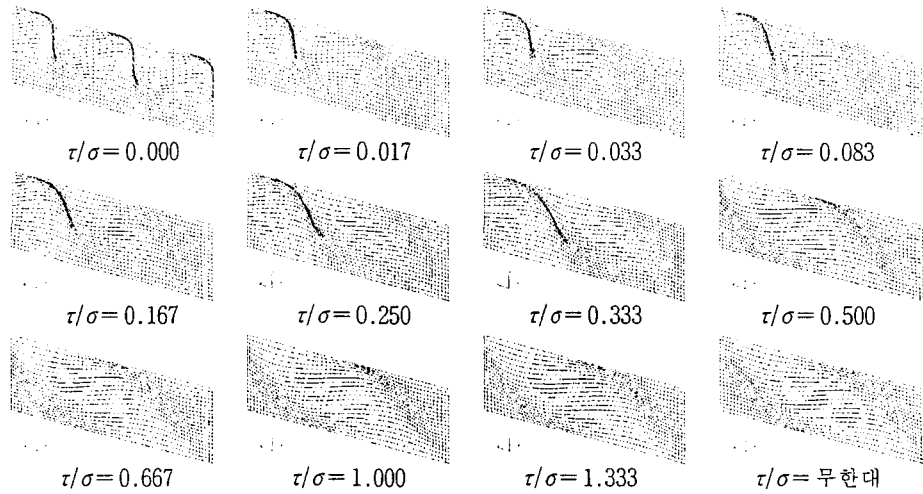


그림 9. 하중조건별 Mode Shape (양단 단순지지)

그림 9는 양단 단순지지조건에 대하여 전단응력과 휨응력의 비의 변화에 따른 좌굴모드이며, 이 그림에서는 순수휨 상태에서 순수 전단상태까지의 좌굴모드의 변화를 볼 수 있다.

이러한 해석결과가 복부판 설계의 합리화에 어떤 영향을 줄 수 있을 지를 알아보기 위하여 해석결과와 현재 시방서에서 적용하고 있는 단순지지의 결과의 비를 구하여 그림 10과 같이 그래프화 해 보았다. 그래프에서 보듯이 부모멘트 구간의 경우 순수 휨응력상태에서는 현재시방규정이 적절하다고 판단되나, 정모멘트구간의 경우 순수 휨응력상태에서 약 60% 이상 과다설계가 되고 있음을 볼 수 있다. 또한 순수전단응력상태의 경우 정모멘트와 부모멘트 구간 모두 30% 정도의 과다설계가 유도되고 있음을 알 수 있다. 결과를 종합하여 보면 부모멘트 구간의 경우 0~30%, 정모멘트 구간의 경우 30~60%의 과다설계가 되고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 정확한 좌굴거동이 시방에 적용될 경우 상당량의 복부판 두께의 절감을 가져올 수 있음을 보여준다.

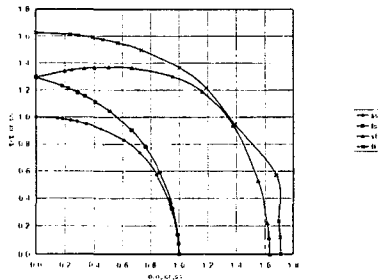
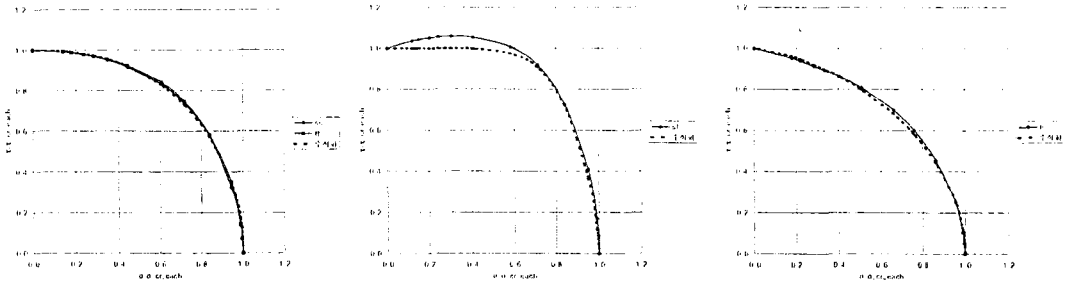


그림 10. 지지조건별 좌굴응력과 단순지지조건인 좌굴응력비

본 연구에서는 그림 10에 표현된 지지조건의 영향에 대하여 가장 근접하는 곡선의 수식을 구하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 해석결과와 본 연구에서 제안하는 수식을 함께 그래프화 하면 그림 11과 같으며, 그림 11에서 수식의 적절함을 확인할 수 있다.

- 양단 단순지지 : $\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^{2.3} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^{2.0} = 1, k_{\sigma} = 24.048, k_{\tau} = 5.876$
- 고정-단순지지 정모멘트 : $\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^{6.2} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^{1.3} = 1, k_{\sigma} = 39.287, k_{\tau} = 7.603$
- 고정-단순지지 부모멘트 : $\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^{1.5} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^{2.0} = 1, k_{\sigma} = 24.073, k_{\tau} = 7.603$
- 양단 고정지지 : $\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^{2.3} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^{2.0} = 1, k_{\sigma} = 41.065, k_{\tau} = 9.558$



양단 단순, 고정지지 고정-단순지지 정모멘트 고정-단순지지 부모멘트
 그림 11. 지지조건별 좌굴계수의 변화의 수식화

5. 결론

관형교 복부판의 설계는 복부판의 최소두께 제한과 수직보강재의 간격제한으로 이루어진다. 이러한 제한사항은 복부판의 항복이 일어난 이후에 좌굴현상이 발생할 수 있도록 유도하고 있지만, 복부판의 좌굴내력에 있어서 현재 사용하고 있는 시방은 상당히 안전측, 즉 좌굴내력을 상당히 작게 평가하고 있다. 이에 본 연구에서는 관형교 복부판의 정확한 탄성좌굴계수를 구해 합리적인 복부판 설계를 도모하고자 좌굴해석을 수행하였다. 좌굴해석의 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 1) 순수전단좌굴의 경우 상/하 플랜지의 구속조건이 고정/단순지지 조건의 경우 양단 단순지지와 양단 고정지지 조건의 사이에서 좌굴계수의 값이 40~50% 정도의 값을 보이고 있으며, 이는 실제 좌굴내력이 현재 시방서에서 사용하고 있는 값보다 상당히 큼을 알 수 있으며, 현재시방서에 규정하는 복부판의 최소두께를 형상비가 3인 경우에 사용하여도 문제가 없음을 보여준다.
- 2) 형상비가 3인 부모멘트 구간에 전단응력과 휨응력이 동시에 작용하는 경우에 대한 좌굴해석 결과 순수 전단에 대한 좌굴내력이 시방서에서 사용하는 값의 1.3배, 순수 휨응력에 대한 좌굴내력은 1배 정도로 순수 휨응력에 대하여는 적절히 평가되고 있지만 전단응력이 상대적으로 큰 구간의 경우 30% 정도 작게 평가되어 설계되고 있음을 알 수 있다.
- 3) 형상비가 3인 정모멘트 구간에 전단응력과 휨응력이 동시에 작용하는 경우에 대한 좌굴해석 결과 순수 전단에 대한 좌굴내력이 시방서에서 사용하는 값의 1.3배, 순수 휨응력에 대한 좌굴내력은 1.6배 정도로 순수 휨응력이 상대적으로 큰 경우에 대하여는 60% 정도, 전단응력이 상대적으로 큰 구간의 경우 30% 정도 작게 평가되어 설계되고 있음을 알 수 있다.
- 4) 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에 대하여 좌굴내력을 정확하게 계산할 수 있도록 각각에 대한 수식과 좌굴계수값을 제시하였으며, 본 결과가 설계에 반영된다면 주형의 설계가 보다 합리적으로 이루어질 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 川崎重工業株式會社(1999), "PC床版連続合成2主桁橋の設計/施工 Ver. 3.0"
2. S.C.Lee, J.S.Davidson, C.H.Yoo(1996), "Shear Buckling Coefficients of Plate Girder Web Panels", Computer & Structures
3. Salmon, Johnson(1990), "Steel Structures - Design and Behavior - 3rd edition", Harper & Row
4. Japan Society of Civil Engineers(1987), "Guidelines for Stability Design of Steel Structures"
5. Friedrich Bleich(1952), "Buckling Strength of Metal Structures", McGraw-Hill Book Company
6. 건교부(1996), "도로교 표준시방서"