

파형강판 복부의 전단좌굴거동 연구

Shear Buckling Behavior for Trapezoidal Corrugated Webs for Bridges

이필구* 윤태양** 이학은*** 이승록****
Lee, Pil-Goo Yoon, Tae-Yang Lee, Hak-Eun Lee, Seung-Rock

ABSTRACT

As a trapezoidal corrugated steel plate has the sufficient stiffness out of plane direction without shear stiffener or thick plate, a use in the web of bridge structure is on the increase. However, there are no domestic design guides for shear buckling strength of corrugated plates. Therefore, foreign design specifications are analyzed about application methods and a numerical parametric study is used to get the relationship of the shear strength and geometric boundary conditions for corrugated plates. Elastic buckling finite element analysis is executed through eigenvalue analysis using the eight nodes five freedoms thin shell element. Parameters such as the width and height of panel and the thickness and height of web, are determined considering the factors to influence on the buckling of corrugated plate. Accuracy of shear buckling analysis is evaluated with theory of foreign buckling equations.

1. 서 론

파형 강판은 오래 전부터 빌딩 구조물을 건설하는 재료로서 보편적으로 사용되어 왔으며 사용되어지는 형상도 다양하다. 지붕이나 벽체를 시공하는 데에 파형 강판이 널리 사용되어졌고, 암거나 관거에도 그 쓰임이 보편화 되어있다. 현재 평판을 조합한 제형 파형강판 구조물은 전단 보강재와 두꺼운 강재를 사용하지 않아도 면외 방향으로 충분한 강성을 발휘할 수 있기 때문에 교량 구조물의 복부판으로도 많이 사용되고 있다.

1960년대에 미국에서는 Easley와 McFarland[2]에 의해 파형 강판이 연구되었는데, 그들은 직교 이방성 이론을 이용하여 전체좌굴을 설명할 수 있는 적합한 해를 제시하고 실험을 통해 그 정확성을 증명하였다. 그 이후 1980~90년대에 미국의 Mohamed Elgaaly와 Robert W. Hamilton[3] 등에 의해 파형강판의 전단강도에 대한 연구가 활발히 진행되었고, 프랑스와 스웨덴 등지에서도 많은 연구가 수행되었다. 특히 1996년 Luo R 등은 유한요소해석을 통해 복부판의 길이와 높이, 파고, 경사각, 패널폭등 제형파형강판의 기하학적 인자들이 전단 거동에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 한편, 일본에서는 Yoda등에 의해 파형강판에 대한 연구가 활발히 수행되어 현재 일본 도로교 설계지침에 파형 복부판에 대한 설계기준이 마련되어 있고, 현재 파형 강판을 이용한 교량들이 다수 건설되어있다. 국내에서는 2001년부터 파형강판을 복부판으로 한 거더교량이 가설되고 있고 제형 또는 Sine형 파형강판의 탄성전단좌굴에 대한 기초적인 연구가 수행되었으나 아직 초기단계에 머물러 있고 명확한 설계기준 또한 제시되지 않은 실정이다.

* 정희원 · 포항산업과학연구원(RIST) 토목구조연구팀 선임연구원
** 정희원 · 포항산업과학연구원(RIST) 토목구조연구팀 수석연구원
*** 정희원 · 고려대학교 토목환경공학과 교수
****정희원 · 포스코e&c 토목기술팀 차장

현재 각국에서 많은 연구가 수행되었고 각 나라별로 채택한 설계 기준들이 있지만, 국가별로 상이한 기준들이 발견되기도 한다. 국내에서는 파형강판에 대한 설계기준이 마련되어있지 않으므로 외국의 설계 기준에서 국부좌굴·전체좌굴·연성좌굴에 대한 적용 방법과 차이점에 대해 비교해 보고, 파형 강판에 존재하는 여러가지 변수들이 미치는 물리적인 영향들에 대하여 해석을 통해 알아보려 한다. 해외의 연구자료들은 크게 북미·유럽·일본의 세 그룹으로 분류될 수 있으며, 같은 그룹내의 여러 나라들의 설계 개념은 대부분 비슷한 경향성을 가지고 있다. 유럽에서 파형강판을 이용한 교량설계에 대표되는 나라로는 프랑스를 들 수 있고, 북미에서는 미국과 캐나다에서 연구가 진행되어 왔다. 일본에서도 일찍이 파형 복부판을 이용한 교량설계가 이루어져 왔는데, 일본에서는 북미 유럽과는 달리 이론적인 접근 방법이라든지 설계에서 좌굴을 이해하는 관점 등에서 차이를 보인다. 따라서 이와 같은 국가별 차별성이 존재함을 확인하고 유한 요소 해석을 통해 그러한 차별성의 원인이 어디에 있는지, 좌굴의 경향성을 어떠한 변수로 표현하였는지 등에 대해 검증과 분석을 수행하고자 한다.

2. 해석 모델

본 연구에 사용된 범용 프로그램은 ABAQUS V6.2-1이며, 요소는 각 요소 당 8절점 5자유도를 갖는 Shell 요소인 S8R5를 사용하였다. 하중을 재하할 때 파형강판 상부 플랜지의 절점에 집중하중을 재하하는 방식을 채택하여 하중점에 수직 보강재가 필요하며 이러한 보강재는 보강재의 좌굴을 방지하기 위하여 R2D2(Rigid Body Beam)요소를 패널과 패널 사이에 교축 직각방향으로 삽입하여 모델을 구성하였다. 본 해석에서 사용한 FEM Scheme은 고유치해석을 이용한 좌굴해석만 수행하였다.

2.1 복부판 모델의 경계조건

복부판에 동일한 전단 응력이 분포하는 상태인 순수전단하중 상태를 모사하기 위하여 경계조건을 이용하여 복부판만을 모델링 하는데는 한계가 있음을 다음과 같은 분석을 통해 알 수 있다.

모델링 진행은 그림1에서 보는 바와 같이 웹만 모델링한 것과 웹의 상하부에 플랜지를 모델링 하였을 경우 어떤 모델이 접합면의 경계조건을 제대로 인식할 수 있는지에 초점을 맞추어 수행되었다.

	Web	Web+Frame	Full
범위	Web만 모델링	Web, Frame(직교 이방성 유지)	Web, Flange, Stiffner
경계 조건	A-C : 1(x)방향, D : 3(z)방향 구속 4면 면외방향 구속		2점 집중하중을 받는 Beam의 경계조건
하중	전단하중을 분포하중으로 재하		2점 집중하중 재하

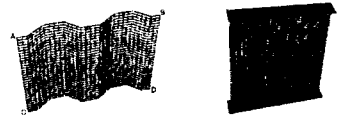


그림 1. Web 모델링(Web+Frame) 과 Full 모델링 및 경계조건

탄성 좌굴 하중 산정식의 적합성을 검토하기 위하여 웹만을 모델링한 경우와 Elgaaly[3]의 좌굴 실험과 같은 상태를 모사하기 위하여 각 변에 빔요소를 이용하여 만든 Frame을 이용하여 플랜지와 스티프너의 강성을 모사한 경우 좌굴 응력을 검토하였으나 정확한 좌굴 응력을 산정하지 못했고 이와 같은 경계조건으로는 실제의 플랜지와 스티프너의 강성을 모사할 수 없었다. 플랜지와 스티프너를 고려한 전체 모델을 사용한 경우에는 파형강판의 기하형상에 따라 국부좌굴 또는 전체좌굴의 성향이 강한 경우에 좌굴강도식과 일치하는

값을 나타냈다.

2.2. Eigen-value Analysis

고유치(Eigen-value)해석을 통해 모드별로 연산되는 고유치를 이용하여 좌굴 하중을 산정하였으며, 고유치를 국부좌굴 계수에 대한 항으로 환산하여 다음 그림2와 같이 표시하였다. 본 해석에서는 탄성적인 거동 규명 위주로 해석을 수행하였다. 모델의 재원은 패널폭 300mm, 웹 두께 6mm, 파고 150mm, 웹의 높이가 1500mm인 단면을 사용하였다. 이 모델에서 초기 모드에 의해 산정되는 좌굴은 패널간에 단순지지 경계조건을 가진 국부좌굴의 형태라는 사실에서 이론적인 정확성도 동시에 확보할 수 있었다. 또한 파형강판의 좌굴 계수가 단순지지 된 평판의 좌굴계수 5.34와 고정지지시의 계수 8.98의 사이에서 발생한다는 것을 알 수 있었다. 단, 이 연구에서 사용한 단면은 전형적인 국부좌굴에 속하는 형상이기 때문에 전체좌굴이 나타날 수 있는 모델을 통해 이 해석기법의 신뢰성을 갖추어야 하겠다.

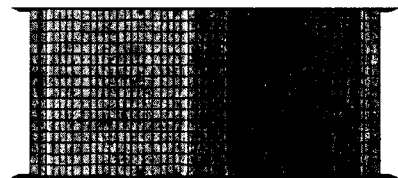
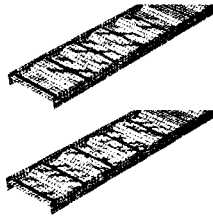
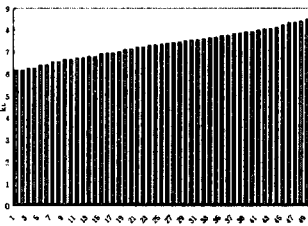


그림 2. Elastic shear buckling coefficients와 좌굴형상

그림 3. static 해석에 의한 전단응력 분포

2.3. Pure Shear

순수전단이라 함은 판형의 면내에 발생되는 응력이 균등한 분포를 갖는 것인데, 본 해석에서 사용한 모델은 그림3에서 보는 바와 같이 중앙에서 2점재하를 통해 순수전단 형태가 나타남을 볼 수 있다. 순수전단면 주위에 작용하는 전단 흐름이 평판의 조합으로 이루어진 파형 강판에서도 잘 적용된다는 것을 해석을 통해서도 분명히 확인할 수 있었다.

2.4. Half Model의 도입

Parametric Study를 수행하기 위해서는 모델링이 간소화되어야 하며, 해석시간을 단축시킬 수 있는 모델이 필요하다. 전 단계에서 사용하던 전체 모델은 Mesh를 구성하는 방법에 있어서 ABAQUS 전처리 기능만으로는 불가능하므로 수백개의 기하학적 특성이 다른 모델을 만들기 어렵다. 따라서 다음과 같은 Half 모델을 도입하였다. Stiffener는 실제와 같이 모사하여 작업이 용이하도록 하였고, 하중 재하 방법은 오른쪽 상단부에 플랜지의 너비 방향으로 등분포 하중을 주는 방식을 택하였다. 등분포 재하시 모서리에 9개의 절점을 만들어 각각의 절점에 일정한 크기의 집중하중을 재하 하였다.

해석의 정도를 검증하기 위해서 Full Model과 Half Model의 좌굴강도를 비교하여 보았다. 이론적으로는 Full Model과 Half Model의 파형에 대한 고유치는 같게 나와야 하지만 최대 5%정도의 오차가 생기는 이유는 플랜지와 스티프너의 결합에서 오는 강성 차이에 있다고 판단된다.

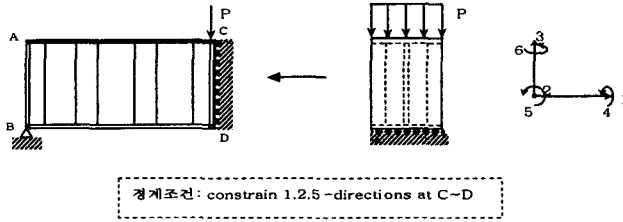


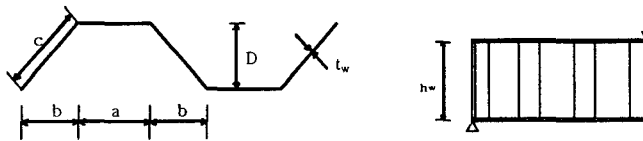
그림 4. Half 모델의 개념도

2.5. 패널 수의 영향

복부판의 높이와 패널폭에 의해 해석 모델의 전체 길이가 결정되므로 패널의 수에 따른 해석값의 오차를 확인해야 한다. 패널의 수를 2개에서 8개까지 변화시켜가며 해석을 수행한 결과로부터 패널 수에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단되었다. 단, 전체좌굴이 발생하는 모델은 교축 방향 길이가 좌굴 주기보다 작을 때 해석값이 이론값보다 높게 나오는 경향이 있다. 따라서, 웹의 높이에 비해 단면 형상이 조밀한 모델에 대해서는 교축 길이가 충분히 길도록 패널수를 늘리는 것이 필요하다. 또한, 플랜지나 스티프너가 충분히 큰 강성을 갖아서 좌굴이 일어나지 않도록 두께를 체크하여 P-Δ 해석이나 고유치 해석을 수행하여야 한다.

3. 변수 해석

변수의 기호를 다음과 같이 정의한다. 패널폭은 a, 파고를 D, 사폭을 b, 웹의 높이를 h_w , 웹의 두께를 t_w 로 하여 그림5와 같이 모델링을 실시하였다.



변수	①	②	③	④	⑤	비고
a	200	300	350	400	500	5EA
D	50	100	150	200	250	5EA
h_w	1000	1500	2000	2500	3000	5EA
t_w	5	10	15	-	-	3EA
c	$= \sqrt{D^2 + b^2}$					1EA
b	150	290	340	390	490	1EA (a보다 작은 값)
Total	(5×5×5×3×1×1)-30=345개 *a=200,D=200,250인 모델 30개 제외					

그림 5. 파형 강판의 변수 및 위치

위의 변수 외에도 경사 패널의 각도(a)라든지, 경사 패널의 길이(c) 등이 변수가 될 수 있지만, 각도는 파고에 종속되며 경사 패널의 길이는 사폭에 종속되므로 고려하지 않기로 했다. 변수를 조합할 때 도표3.8에 나온 내용과 같이 각 변수에 대하여 ①에서 ⑤의 순서로 조합하였으며, 사폭(b)는 수평 패널의 길이보다 약간 작은 경사 패널의 코사인 값으로 하여 산정하였으므로 종속적인 변수로 보아 모델의 개수에 포함시키지

않았다. 변수해석에 사용된 좌굴이론은 국부좌굴의 경우 Timoshenko & Gere 공식을 따르고, 전체좌굴의 경우에는 Easley 좌굴공식을 따른다. 연성좌굴강도식은 국부좌굴과 전체좌굴이 특정 단면에서 지배적으로 발생하는 파괴모드를 1차와 2차 항을 사용하여 다음과 같이 표현하였다. 탄성 해석이므로 항복 항이 제외되었으며, 위와 같이 국부좌굴과 전체좌굴이 단순히 수학적으로 표현된다.

- Timoshenko & Gere : $\tau_{cr,L} = k_L \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{a}\right)^2$, $k_L = 5.34 + 4(a/h_w)^2$

- Easley Buckling formula : $\tau_{cr,C} = 36\beta \frac{(EI_y)^{1/4}(EI_x)^{3/4}}{t_w h_w^2}$, $I_x = \frac{t^3}{6}[a(3\delta^2+1) + c(\delta^2+3)]$, $I_y = t^3/[12(1-\nu^2)]$

δ : 파괴에 대한 두께비 (= D/t), $\beta = 1.0 \sim 1.9$

- 연성좌굴식 : $\frac{1}{(\tau_{in})^n} = \frac{1}{(\tau_{le})^n} + \frac{1}{(\tau_{ge})^n} + \frac{1}{(\tau_y)^n}$

4. 해석 결과

4.1. 국부좌굴 및 전체좌굴의 경계조건

G/L을 매개 변수로 하여 결과를 나타내면 그림6과 같이 연성 이론에 근거하여 좌굴을 설명할 수 있다. 이 그래프에서 축은 전체좌굴 이론값(G)을 국부좌굴 이론값(L)으로 나누어 로그(Log) 스케일로 표시하였다. 축은 G/L > 1 일때 FEM 해석값을 국부좌굴 이론값으로 나누고, G/L < 1 일때 FEM 해석값을 전체좌굴 이론값으로 나누어 표현하였다. 연성좌굴 이론식에 의하면 전체좌굴 이론식에 의한 값이 국부좌굴 이론식에 의한 값보다 낮을 경우 전체좌굴에 의한 파괴가 지배적으로 작용하며, 국부좌굴이 전체좌굴 이론값보다 작을 경우 국부좌굴이 지배적으로 작용하게 된다.

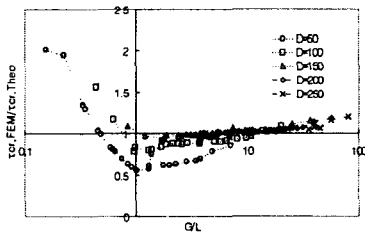


그림 6. Global&Local-Distribution ($t_w=5mm$)

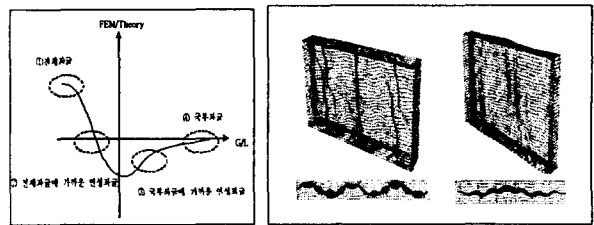


그림 7. 좌굴의 경향 및 형상

그림6을 보면 G/L이 1에 가까울수록, 파괴가 낮을수록, 이론과 해석의 차이가 더 많이 발생함을 알 수 있는데, 이는 국부좌굴과 전체좌굴의 연성효과에 의한 것으로 보인다. 하지만, 연성좌굴이 발생하는 구역이 일정한 경향성을 가지고 나타나는 반면 명확한 범위와 해당 변수를 선택하기 어렵다. 웹의 두께가 얇을수록 해석 강도가 이론에 근접하는 점들이 많아진다. 또한, 파괴에 따라서 좌굴 모드가 상당히 민감하게 작용한다는 것을 알 수 있다. 두께가 작아질수록 국부좌굴에 가깝게 근접함을 알 수 있으나, 파괴가 작은 경우에는 이론보다 낮은 값이 발견된다. 그래프의 왼편으로 갈수록 전체좌굴에 의한 경향성이 뚜렷하게 보이며, 전체좌굴이 플랜지와 웹의 접합부에 의해 고정지지에 근접함을 확실하게 알 수 있다. 전체좌굴 이론에 사용한 웹의 상하부 경계조건을 단순지지 조건을 사용하였으므로 위와 같이 해석값이 이론값보다 1.9배 가량 크게 된다. 그림7은 해석 데이터를 근거로, 좌굴의 경향성을 나타낸 그래프이며 ①번과 ④번 영역에서 나타나는 좌굴형

상은 그림7에서처럼 전형적인 전체좌굴과 국부좌굴을 갖는다.

이와 같이 좌굴형상으로 각 모델에서 일어난 좌굴의 종류를 구분할 수 있으며, R. Luo & B. Edlund[7]의 연구결과에서 국부좌굴(Local Buckling)과 연성좌굴(Zonal Buckling) 전체좌굴(Global Buckling)에 대한 Contour를 근거로 각 좌굴모드의 특성을 파악한 것보다 더욱 정교하게 세가지 좌굴 모드를 구분할 수 있었다. 이를 바탕으로 다음과 같은 기본적인 이론에 대한 분석을 수행하였고, 본 해석을 통해 국가별로 차이점을 보이는 각 좌굴의 경계조건을 보다 정확하게 규명할 수 있었다. 국부좌굴의 경계조건은 웹과 플랜지 그리고 패널과 인접 패널 사이의 접합조건을 나타내는 계수인데, 모든 나라가 공통적으로 인접 패널간의 경계조건을 단순지지로 가정하였으며, 캐나다를 제외한 나머지 국가들은 4변 단순지지 조건을 표현하는 국부좌굴계수를 채택하였다. 이처럼 국가 간의 차별성을 본 해석을 통해 검증한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

그림8에 나타난 결과에서 나타난 것처럼 국부 패널간의 접합 조건을 가장 잘 설명해 줄 수 있는 이론은 패널 좌우 단순지지, 패널 상하 고정지지 조건(B)인 것으로 드러났다. 하지만, 이는 국부좌굴 강도가 낮은 영역(우측)에서의 경계조건을 잘 표현할 수 있는 반면, 국부좌굴 강도가 높은 영역(좌측)에서는 안전측에 도달하지 못하는 것으로 분석된다. 오히려 이 영역에서는 사변 단순지지 조건이 잘 맞는다. 또한, 국부좌굴 계수를 5.34로 사용한 프랑스와 미국의 조건은 국부좌굴 강도가 낮은 단면의 경계조건을 너무 보수적으로 예측하는 경향이 있으므로 안전측 설계를 고려하여, 일본이 사용한 4변 단순지지 조건(A)을 국부좌굴 계수로 사용하는 것이 바람직하다. (A)의 조건은 해석결과와 평균 4.03%의 오차가 있으며, (B) 조건의 4.49%와 프랑스, 미국의 조건(=5.34)의 8.28% 보다 우세한 정확도를 갖는 것으로 분석되었다. 또한, 그림8에서 드러난 파형강판의 경계조건은 국부좌굴 강도를 결정할 수 있는 단면 조건에 따라 웹의 상하부 접합면의 영향이 변할 수 있음을 의미하고 있으며, 전체좌굴 계수를 선정함에 있어서 반드시 단순지지 조건을 사용해야 한다는 의미로 해석하는 것은 부적합하다. 모든 단면이 일괄적으로 같은 경계조건을 갖는 것이 아니라 기하학적인 단면 조건에 의해 경계조건이 좌굴에 미치는 정도가 다르다고 할 수 있는 것이다.

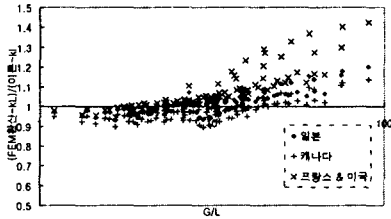


그림 8. 국부좌굴계수로 환산한 FEM/이론 비교

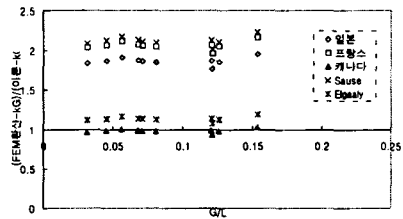


그림 9. 전체좌굴계수로 환산한 FEM/이론 비교

그림6의 해석 결과에서 나타난 전체좌굴 영역에서 좌굴 강도가 단순지지 경계조건인 전체좌굴계수 $\beta = 1.0$ 보다 1.9배에 수렴하는 것을 통해 알 수 있듯이 웹의 상하부 접합 조건이 좌굴에 미치는 영향은 특정한 단면에서 고정지지에 가깝다는 결론에 이르게 한다. 우선 각국이 설계에 반영한 전체좌굴 계수를 보면 일본과 프랑스, 미국의 Sause[4]는 단순지지 조건으로 보았으며, 캐나다와 미국의 Elgaaly[3]는 고정지지 조건으로 보았다. 처음에 전체좌굴 계수는 처음에 Easley에 의해 제안된 식과 함께 단순지지 조건으로 등장했다. 하지만, Leiva[6], Elgaaly, Raoul[5] 등에 의해 파형강판의 상하부 경계조건이 고정지지일 경우 강도가 증가된다는 것이 확인되었고, 위와 같이 각국이 사용하는 전체좌굴 계수도 저마다 그 특성을 반영하여 채택되었다. 해석 결과에 비교하면 그림9에서 처럼 해석 결과와 가장 유사한 것은 전체좌굴 계수가 68.4인 것이며, 평

균 2.60%의 정확도를 가진다. 이 외에 미국의 Elgaaly가 채택한 59.2 인 것이 본 해석결과와 근접한 것임을 알 수 있으며, 두 가지 모두 웹의 상하부 접합면을 고정지지로 해석한 기준이다. 이처럼 전체좌굴이 발생하는 모델을 잘 살펴보면 패널의 길이가 웹의 높이에 비해 작고, 파괴가 낮은 조밀한 단면에서 자주 발견되며, 거동시 국부적인 일그러짐이 없이 전체 패널이 일체로 좌굴을 일으키게 된다. 따라서, 이러한 단면조건에서 전체좌굴이 발생할 때 경계조건은 고정지지로 보아야 타당하지만, 단면 형상에 따라 접합조건이 달라질 수 있으므로 무조건 고정지지로 보는 것을 옳지 않다

4.2. 연성전단좌굴 이론식에 대한 검증

연성 전단좌굴 이론은 국부 및 전체좌굴 중에 상대적으로 작은 강도에 의해 좌굴이 지배되는 것을 수학적 함수로 표현된 것이다. 연성공식은 1차항과 2차항을 주로 사용하는데, 프랑스와 일본을 제외한 나머지 국가들은 2차 연성공식을 이용하였다. 프랑스는 1차 연성항을 사용하였으며 일본은 연성 좌굴이 일어나지 않도록 하는 설계 개념을 갖고 있으므로 그에 대한 기준이 없는 상태이다. 연성 좌굴 공식에는 전체좌굴강도와 국부좌굴강도 그리고, 항복응력이 포함될 수 있는데 본 연구는 탄성전단좌굴에 대한 좌굴에 대해 해석을 수행하였기 때문에 항복응력은 고려하지 않았다.

캐나다는 연성공식의 기본 형태에서 n 값이 높을수록 연성곡선이 각 좌굴에 근접하게 표현될 수 있다고 하였지만, $n=2$ 로 하여 항복 강도에 가장 근접한 단면을 선택하는 설계개념으로 연성공식을 사용하였다. 반면에, Bergfelt, Leiva and Edlund[6, 7]는 실험을 통한 연구 결과에서 1차 승수를 사용하였고, 이에 대한 영향으로 프랑스에서는 1차 연성식을 연성좌굴 공식으로 사용하고 있다. 프랑스의 설계 개념은 캐나다와는 달리 연성좌굴 공식을 설계강도를 산정함에 있어 하나의 기준으로 사용하고 있지만, 탄성 및 비탄성 국부좌굴 이론식에 안전율을 적용하여 연성좌굴보다 안전측으로 하여 설계에 반영하므로 연성좌굴 공식이 파형강판의 설계에서 그다지 많은 비중을 차지하지 않는다.

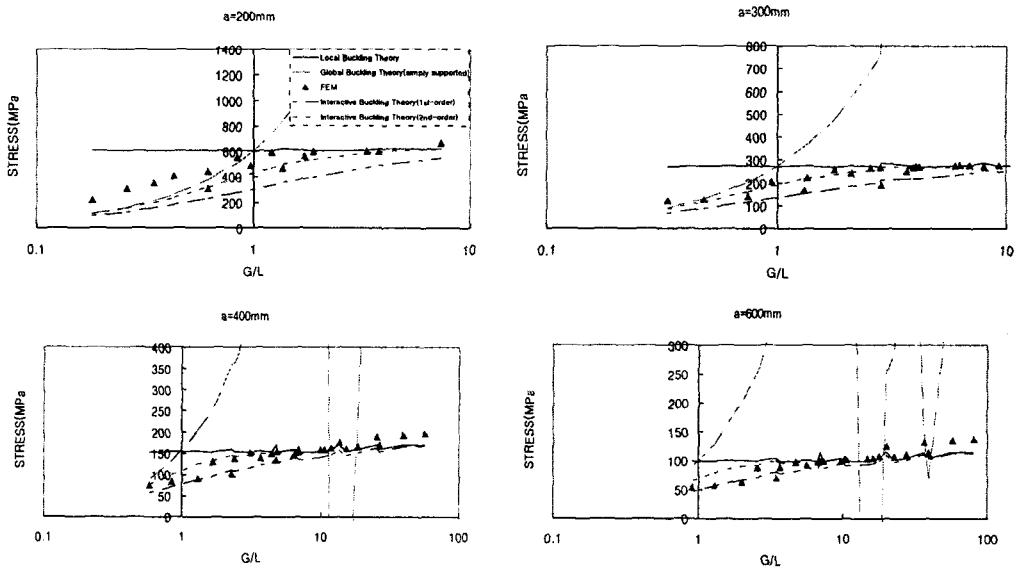


그림 10. 패널폭에 따른 전단좌굴 강도($t=5\text{mm}$)

본 연구에서는 해석 결과를 연성좌굴 이론에 비교할 수 있도록 차트를 여러 개로 구분하여 나타내었는데,

그림6처럼 x축을 G/L의 로그 좌표로 나타낸 것은 공통되나, y축을 응력 축으로 하여 표시한 점에서 다른 면이 있다. 그래프들은 각각 패널폭과 웹 두께를 구분하여 비교하였으며, 연성전단 좌굴식을 1차인 것과 2차인 것 두 가지를 동시에 비교하였다. 또한, 전체좌굴 강도는 단순지지 조건을 적용하였는데 웹과 플랜지의 경계조건이 파형강판의 모든 좌굴에 일정한 영향을 주는 것은 아니며, 특정한 단면 조건에서만 경계조건으로서의 성능을 발휘하기 때문이다.

그림10에서 패널폭에 따라 국부좌굴 강도가 다르고 두께에 따라 전체적인 양상이 반복됨을 알 수 있다. 여기서, 두드러지는 것은 국부좌굴과 전체좌굴이 비슷한 값을 갖는 부분에서 각 이론보다 낮은 강도가 나타난다는 점과 이 점들이 1차 연성식에 근접하게 나타난다는 것이다. 이 점에서, 프랑스의 연성좌굴에 대한 설계기준이 가장 적합하다는 결론에 이르게 되며, 탄성 전단 좌굴에 대해서만 고려한 점에서 본 연구의 결과와 매우 흡사하다는 것을 알 수 있다. 또한, G/L이 낮을수록 전체좌굴 이론값보다 1.9배 높은 점들을 확인할 수 있으며, 이러한 경향은 패널폭이 낮을수록 확연히 드러난다. 형상비와 강성비가 동시에 높은 조건에서 동시에 낮은 조건으로 진행할 경우, 좌굴 에너지의 전달 경로는 국부 패널에서 시작하여 수평 및 경사패널이 맞닿는 꺾임부로 이어지며, 마지막에는 플랜지에 의해 구속된 웹의 상하부 경계에 에너지가 집중된다. 따라서, 조밀한 파형 형상일수록 웹과 플랜지의 구속조건에 의해 강도가 높아질 수 있으며, 연성좌굴이나 국부좌굴이 발생할 때에는 웹의 상하부의 구속조건이 영향을 미치지 못하게 되는 것이다. 이러한 측면에서, 전체좌굴에 대한 경계조건은 안전율의 개념을 적용하여 단순지지 조건으로 보는 것이 타당하다.

모든 데이터들을 종합해 볼 때, 파형강판의 좌굴은 두께가 작고 파고가 높으며, 패널폭이 넓은 단면에서 국부좌굴 이론값과 잘 일치하며, 조밀한 단면에서는 고정지지 접합 조건을 가진 전체좌굴 이론값을 만족하였고, 그 중간 영역의 단면 형상에서는 1차 연성좌굴 이론에 적합한 좌굴이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 맥락에서 파형강판은 어떤 특정한 변수 조합에 의해서 좌굴의 종류와 물리적인 강도가 결정될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 KISTEP의 국가지정연구실(NRL)사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부, 도로교 설계기준, 2000
2. Easley, J. T. and McFland D. E., "Buckling of Light-gauge Corrugated Metal Shear Diaphragms", J. Struct. Div. Am. Soc. Civ. Engrs, 1969, 95, ST7, July, pp.1497-1516.
3. Elgaaly, M., Hamilton, R. W. Seshadri A., "Shear Strength of Beam with Corrugated Webs", Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 122, No.4, pp.390-398, 1996
4. Abbas H. H., Sause R., Driver R. G., "Shear Strength and Stability of High Performance Steel Corrugated Web Girders",
5. Raoul, J., "Some Remarks Concerning the use of Corrugated Webs for Bridges", Paper for TWG 8-3, European Convention for Constructional Steel Work, 1991, Oct.
6. Bergfelt A., Leiva L., "Shear Buckling of Trapezoidally Corrugated Girders Webs", Report Part 2, Publ.S84:2 Chalmers University of Technology, Sweden, 1984
7. Leiva L, Edlund B., Dergfelt A., " Trapezoidally Corrugated Girder Webs. Shear Buckling. Patch Loading.", Ing. Archit. Suisses, Vol. 111, No. 1-2, Jan. 1985, p22-27.