

제형파형 Plate의 탄성전단좌굴 특성

Elastic Shear Buckling Characteristic of Trapezoidally Corrugated Plates

윤상열¹⁾, 김성남²⁾, 한택희³⁾, 강영종⁴⁾

Yoon, Sang Yul, Kim, Sung Nam, Han Taek Hee, Kang, Young Jong

abstract

Recently, the applications of corrugated plates(or folded plates) are increasing due to economic and structural advantages in certain situations. And, because of the higher strength of corrugated plates than flat plates, the usage of the corrugated plates is increasing. So there are many necessities for specifications of corrugated plates. For flat plates, there are many design details in almost specifications. However, there are no detail design guides such as shear strength except the bending strength and the normal strength. So, it is difficult for engineers to design structures consist of corrugated plates. Therefore, a provision is necessary for engineers to refer for designing corrugated plates.

The conclusion of this study shows a formula that helps to determine the shear strength of corrugated plates under various geometric conditions ; the size of corrugation ; the curvature of corrugation and ; the thickness of the corrugated plate. Also, it shows that corrugated plates have higher shear buckling strength than flat plates.

1. 서론

고강도재료의 박판구조물은 작아진 단면적에 의해 압축력을 받을 경우 필연적으로 “좌굴(buckling)현상”을 동반하게 되므로 이러한 좌굴에 대한 검토를 반드시 행해야만 한다. 판형교의 경우, 구조물의 경량화와 구조물의 경량화와 건설비의 절감을 위해 박판을 조합한 거더를 사용하게 된다. 박판은 인장에 비해 압축력에 취약한데, 이는 좌굴현상에 기인한다. 그러나 복부판은 주로 전단 응력에 저항하는 역할을 하므로, 임계하중을 초과하게 되면, 국부전단좌굴이 발생하게 된다. 이러한 국부전단좌굴을 방지하기 위해, 수직보강재를 설치하게 되는데, 국부전단좌굴이 발생하는 임계전단

1) 다산이엔씨, 구조부, 공학석사,

2) 고려대학교, 토목환경공학과, 공학석사,

3) 고려대학교, 토목환경공학과, 공학석사,

4) 고려대학교, 토목환경공학과, 교수, 공학박사

좌굴응력은 수직보강재의 간격과 복부판의 높이, 복부판의 두께, 경계조건에 따라 변하게 된다.

판형(Flat Plate)의 경우, 탄성순수전단좌굴에 대한 연구 외에도 후좌굴강도에 대한 많은 연구가 수행되어 외국 시방서(AISC-LRFD등)에서는 극한좌굴강도식을 채택하여 사용하고 있다. 그러나, 판형(Flat Plate)의 경우, 국부전단좌굴의 방지를 위하여 수직보강재의 사용이 필연적이며, 이로 인한 사용재료의 증가와 시공상의 추가 작업이 필요하게 된다. 하지만, 복부판을 단순한 판형(Flat Plate)이 아닌, 파형판형(Corrugated Plate)을 사용한다면, 전단좌굴강도의 증가를 기대할 수 있다. 따라서, 수직보강재를 사용하지 않거나 그 사용량을 현저하게 줄일 수 있을 것이다. 이러한 장점에 따른 재료비의 절감과 시공의 편의를 위하여, 현재 수직보강재가 필요 없는 파형 판형(Corrugated Plate)을 복부판으로 갖는 보가 일부 사용되고 있으나, 파형 판형에 대한 전단좌굴강도 산정에 대한 시방기준은 아직 확립되지 않은 상태이다.

그러므로, 본 연구에서는 재형인 파형판형(Corrugated Plate)의 순수전단좌굴 특성을 파악하고, 파형판형(Corrugated Plate)의 전단좌굴강도를 결정할 수 있는 식을 제안하여, 파형판형(Corrugated Plate)을 복부판으로 갖는 보의 설계의 합리적인 지침 개발에 도움을 주고자 한다.

2. 파형형상과 경계조건

직선 판형의 경우 형상계수의 결정은 판형의 가로-세로 비와 판의 두께로 충분히 정의 할 수 있으나, Corrugated Plate의 경우 각 파형의 형상(h/l), 각 패널의 크기(l/a), 판형의 두께(t/a), 판형의 가로-세로 비(b/a)에 따라 형상계수가 결정된다.

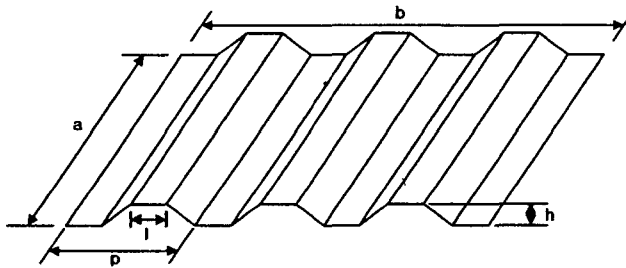


그림 1. 파형Plate의 형상

그림 1과 같은 파형판형의 형상은 각 인자의 영향에 따라 직선 판형(Flat Plate), 재형 판형(Trapezoidally Plate)으로 표시될 수 있다. 만약 형상 변수가 $\frac{h}{l} = 0$ 이라면 이 판형은 직선 판형(Rectangular Flat Plate)을 나타내며, $0 < \frac{h}{l} < 1$ 이라면 이 판형은 재형 판형(Trapezoidally Shell)을 나타내게 된다. 파형판형(Corrugated Plate)은 $0 < \frac{h}{l} < 1$ 인 경우에 해당된다. 본 연구에서는 사방향 패널의 길이와 종방향 내널의 길이가 같은 파형을 사용하였다.

일반적으로 직선 판형의 경우, 수직보강재의 강성은 상당히 크므로 복부판과 수직보강재의 접합

면에서 면외변형이 생기지 않고 면외각변형만이 생긴다. 또한 대부분의 시방서에서도 단순지지의 거동 조건을 만족하도록 수직보강재의 강성을 제시하고 있으므로, 복부판과 수직보강재의 접합면을 단순지지로 가정하는 것은 타당한 것으로 생각된다. 따라서 본 연구인 파형판형의 해석 또한 수직보강재는 없으나, 타 부재와 접합되는 최종 경계부는 단순지지로 가정하였다.

또한, 대부분의 시방서에서 안전측으로 I형 보에서 플랜지에 접하는 판형(복부판)의 경계부는 단순지지되었다고 보고 있으며, 복잡한 하중 하에서 플랜지와 복부판이 어떠한 지지조건을 갖는지에 대한 간편하고 정확한 결정 방법이 제시되지 않고 있으므로, 안전측인 단순지지로 가정하는 것은 타당하다고 생각된다. 따라서, 파형판형(Corrugated Plate)의 해석 시에도 사변이 단순지지된 경계조건을 적용하였다.

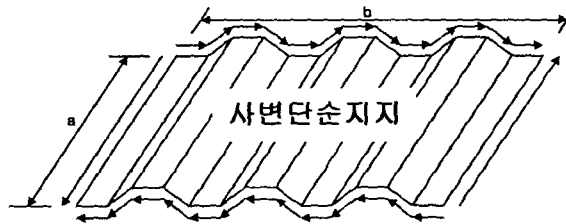


그림 2. 波形 판형(Corrugated Plate)의 전단응력 분포

순수전단 하에서는 직선 복부판의 경계면을 따라 전단응력이 균일하게 분포한다는 가정을 전단좌굴에 대한 대부분의 연구에서 사용하였다. 그러한 가정은 정적 재하 실험 연구에 의해서 사실로 검증되었으므로, 본 연구에서도 곡률을 가진 상부와 하부 경계부분의 응력은 곡률의 접선 방향으로 그림 2과 같이 균일하게 분포한다고 가정하였다.

3. Trapezoidally Corrugated Plate의 좌굴 특성

Flat Plate의 경우 전단좌굴의 형상은 그림 3-5처럼 면외방향으로 튀어 나가는 형상이다. 판의 형상이(b/a)에 따라 이런 것이 몇개가 나타나는데 정도가 차이점이다. 하지만 제형파형강판(Trapezoidally Corrugated Plate)은 Flat Plate와는 다른 좌굴형상을 보인다. Trapezoidally Corrugated Plate의 좌굴형상은 다음의 세가지로 나눌 수 있다.

- (1) Local Mode
- (2) Zonal Mode
- (3) Global Mode

먼저 Local Mode는 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼, Flat Plate처럼 판 하나에서 좌굴이 일어나는 것이다. 좌굴 형상은 Flat Plate와 거의 동일하다. Zonal Mode는 그림 4 처럼 판 하나에서의 좌굴이 옆의 판으로 전이되는 것이다. 마지막으로 Global Mode는 그림 5과 같이 좌굴이 Flat Plate와 같은

형상으로 발생하는 것이다.

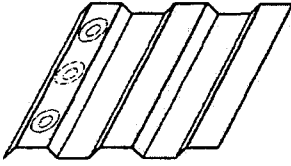


그림 3. Local Mode

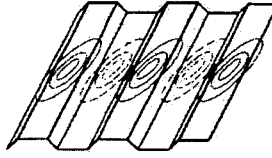


그림 4. Zonal Mode

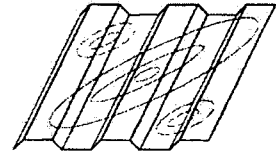


그림 5. Global Mode

각각의 좌굴형상을 보면 확연하게 그 특성이 차이가 난다. 따라서 이것들을 분리해낼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 Local Mode와 Zonal & Global Mode로 해석치들을 분리하여 각각을 분석하였다.

해석 범위는 좌형의 두께, 좌형의 크기, 그리고 패널의 크기들을 변화시켜서 다음과 같은 범위로 해석을 수행하였다.

$$100 \leq \frac{a}{t} \leq 1000, \quad 0.2 \leq \frac{h}{l} \leq 0.8, \quad 0.2 \leq \frac{l}{a} \leq 1$$

4. 해석결과

Local Mode에서는 그림 3에서 보는 것처럼 하나의 판에 좌굴이 발생하며 그 양상은 Flat Plate와 거의 동일하다. 하지만 Flat Plate의 전단좌굴강도식은 단순지지일 때 강도이지만, Corrugated Plate의 경우 양쪽의 격인 부분이 Stiffener의 역할을 할 것이다. 그래서 더 높은 Flat Plate의 전단좌굴강도식의 좌굴강도 값보다 높은 강도를 낼 것으로 보인다. 그래서 해석치중 Local Mode를 나타내는 것들을 Flat Plate의 전단좌굴강도식으로 나누어 주었다. 그 결과들을 분석하여 본 결과 양쪽 격인 부분의 Stiffener효과에 의해 Flat Plate의 좌굴강도값 보다 큰 값이 나왔고, 그 값은 두께나 좌형의 크기보다는 판 하나의 형상비에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 그것들을 회귀분석한 결과 기존 전단좌굴강도식에 판의 형상비(l/a)에 대한 1차식을 곱함으로써 정의 할 수 있었다. 그래서 그 식은 다음과 같다.

$$\tau_{cri} = \left(1.15 + 0.25 \frac{l}{a} \right) \tau_f \quad \text{식 1}$$

여기서 τ_f 는 Flat Plate의 전단좌굴강도식이다. 하지만 τ_f 는 순수전단좌굴계수 k_v 가 있는데 이것 역시 판의 형상비(l/a)에 대한 식이다. 따라서 두 값을 곱하여 Local Mode일 때의 탄성전단좌굴강도식을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tau_{cri} = k_L \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{l}{t}\right)^2}$$

식 2

여기서,

$k_L = 6.15 + 1.54(l/a) + 4.6(l/a)^2 + 1.15(l/a)^3$, Local mode일 때의 순수전단좌굴계수

E = Young's Modulus of Elasticity

ν = Poisson's ratio

l = 패널의 길이, a = Trapezoidally Corrugated Plate의 폭

t = 두께

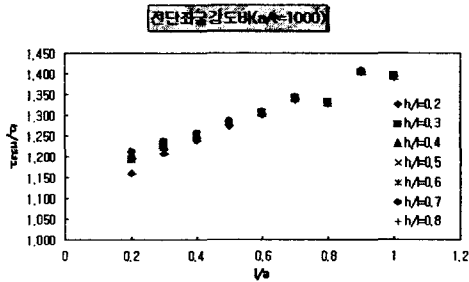


그림 6 Local Mode의 전단강도 특성(at=1000)

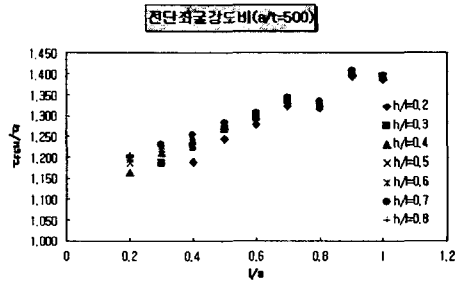


그림 7 Local Mode의 전단강도 특성(at=500)

5. 결론

Trapezoidally Corrugated Plate을 복부판으로 갖는 경우, 이의 특성은 Flat Plate에서 고려하지 못한 여러 가지 인자들의 영향을 받게 되므로, Flat Plate에서 유도된 식을 사용하는 것은 적합하지 못하다. 따라서, 본 연구는 Trapezoidally Corrugated Plate의 각 영향 인자에 따른 매개변수 연구를 통하여, Trapezoidally Corrugated Plate의 전단좌굴 특성을 파악하여, 합리적 설계에 도움을 주고자 하는 목적으로 수행하였다.

수행된 결과중 Local Mode를 나타내는 것만을 분석한 결과 Flat Plate의 좌굴형상과 비슷한 것을 알 수 있었고, 그 값의 경향 또한 비슷했다. 하지만 양쪽 꺾인 부분의 효과에 때문에 사변단순지지의 Flat Plate의 이론식과는 다른 결과를 보였다. 그래서 Flat Plate의 좌굴식의 값과 해석결과들의 값을 비교하여본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

$$\tau_{cri} = k_L \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{l}{t}\right)^2}$$

$k_L = 6.15 + 1.54(l/a) + 4.6(l/a)^2 + 1.15(l/a)^3$, Local mode일 때의 순수전단좌굴계수

E = Young's Modulus of Elasticity

ν = Poisson's ratio

l = 패널의 길이, a = Trapezoidally Corrugated Plate의 폭

t = 두께

Zonal Mode과 Global Mode에 대한 것은 두 Mode의 경계를 명확화하기 위해서는 더 많은 해석과 실험이 뒤따라야 할것으로 보인다.

참고문헌

1. S. P. Timoshenko and Woinowsky-Krieger , "Theory of Plates and Shells", 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., 1959
2. S. P. Timoshenko and James M. Gere , "Theory of Elastic Stability", 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., 1961
3. M. I. Hussain & C. Libove, "Trapezoidally corrugated plates in shear", Journal of the structural division, ASCE, Vol. 102, ST5, 1976, 1109-1131
4. J. T. Easley, "Strength and Stiffness of Corrugated Metal Shear Diaphragms", Journal of the structural division, ASCE, Vol. 103, No. ST1, 1977, 169-180
5. M. I. Hussain & C. Libove, "Striffness tests of trapezoidally corrugated shear webs", Journal of the structural division, ASCE, Vol. 103, ST5, 1977, 971-987
5. M. Elgaaly, R. W. Hamilton & A. Seshadri, "Shear strength of beam with corrugated webs", Journal of structural engineering, ASEC, Vol. 122, No. 4, 1996, 390-398