

원형 파형 판의 탄성전단좌굴 특성

Elastic Shear Buckling Characteristics of Circularly Corrugated Plates

한택희¹⁾ · 임남형²⁾ · 박남희¹⁾ · 강영종³⁾

Han, Taek Hee · Lim, Nam Hyung · Park, Nam Hoi · Kang, Young Jong

요약 : 최근, 경제적 이점과 전단강도의 증가효과로 인하여, 파형판의 사용이 증가하고 있다. 하지만, 일반적인 평판에 대해서는 현재 거의 모든 시방서에 설계기준이 제시되어 있으나, 파형판의 전단강도에 대한 규정은 제시되지 않은 실정이다. 따라서 설계자가 파형판을 설계할 수 있도록 참고할 수 있는 규정이 필요하다 할 수 있다. 본 연구에서는 수치해석 방법에 의해 파형판의 여러 기하 조건에 따른 전단강도의 관계를 알아보았으며, 수치해석에는 8절점 박판 쉘요소를 사용했다. 수치해석을 통하여 파형판에 있어서 파형의 크기, 곡률, 파형판의 두께에 따라 전단강도를 결정할 수 있는 식을 제안하였으며, 제안식은 파형판이 일반적인 평판에 비해 상당히 큰 전단강도를 갖는다는 것을 보여준다.

ABSTRACT : Applications of corrugated plates (or folded plates) have been recently increasing due to certain economic and structural advantages. Likewise, applications of corrugated plates has been increasing because they are stronger compared to flat plates. Therefore, specifications of corrugated plates should be determined. There are many design details in almost every specification for flat plates. However, except the bending strength and the normal strength, there are no detailed design guides such as shear strength. Thus, it is difficult for engineers to design structures consisting of corrugated plates. As such, engineers need a guide in designing corrugated plates. Extensive numerical study was conducted in order to identify the relationship between the shear strength and geometric conditions for corrugated plates. An eight-node thin shell element (QSL8) of the commercial program LUSAS (version 13.2) was used. The study was able to come up with a formula that helps 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. Likewise, corrugated plates were found to have a higher shear buckling strength than flat plates.

핵심용어 : 전단강도, 파형 판, 전단좌굴, 판

KEYWORDS : shear strength, corrugated plate, shear buckling, plate

1. 서론

산업혁명 이후 지금까지 모든 구조물은 그 규모가 거대화, 장대화하는 경향을 보이고 있으며, 앞으로도 계속 그러할 것으로 추측된다. 이러한 경향에 먼저 대두되는 것은 구조물의 경량화 및 건설비의 절감이다. 이러한 경량화, 건설비의 절감은 고강도 재료의 개발과 역학이론의 발전으로 가능하게 되었으며, 그 대표적인 경우가 강구조를 비롯한 박판구조물이라고 할 수 있다. 교량의 상판이나 선박의 갑판, 항공기, 철도 및 차량 등 각종 구조물에서는 부하능력 및 경제성을 극대화시키

기 위하여, 보강평판 구조물이 널리 사용된다. 각종 판구조물의 보강방법에는 판에 보강재를 부착하여 주는 방법과, 판 자체에 변형을 주어 주름을 잡아줌으로써 강성을 극대화시켜 구조물의 부하능력을 향상시키는 방법이 있다.

판에 주름을 잡아 강성을 극대화 시키는 연구는 20세기 초 이후에 적극적으로 이루어지기 시작하였는데, 1924년 독일의 Ehler에 의해 대형 석탄창고에 처음으로 도입되었으며, 1930년 구조해석에 대한 그의 첫 논문이 발표된 이후, Gruber (1931), Seydel(1931), Craemer, Ohlig, Girkmann 등에 의해, 연구되었으며, 미국에서는 응력분포절차(Stress

1) 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정
2) 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 연구조교수
3) 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 부교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

Distribution Procedure, Winter & Pei, 1947), Whitney 법(Gaafar, 1954) 등이 주름판(folded plate)의 해석 방법으로 연구되었으며, Yitzhaki와 Vlasov에 의해 폭넓은 연구가 수행되었다. 또한 사용상의 제약조건에 따라 요구되는 주름판과 주름판을 조합한 패널구조 및 파형 판(corrugated plate)과 평판(flat plate)이 부착된 구성요소에 대한 연구도 수행되었다(Fung, Kinloch, Max L. Potter). 그러나 지금까지의 연구는 주로 파형판의 강성산정에 관한 연구에 치우쳐 있으며^{(1),(2)}, 전단좌굴강도에 관한 연구는 최근 수행되고 있으나(Mohamed Elgaaly & Robert W. Hamilton, 1996), 평판을 조합한 제형의 파형에 관한 연구만이 수행되었다. 직선의 조합으로 이루어진 파형판과 곡선으로 이루어진 파형판은 그 거동이 확연히 다르게 나타난다. 평판의 조합으로 만들어진 제형의 파형판의 경우 판의 형상비에 따라, 파형판 전체에서 좌굴이 발생하지 않고 파형판의 일부인 평판 내에서만 좌굴이 발생하는 현상이 나타나나, 곡선의 파형을 갖는 파형판의 경우 이러한 현상은 발생하지 않고, 항상 전체 파형판에 대해서만 좌굴이 발생하게 된다. 따라서 원형파형판은 제형의 파형판보다 좌굴에 더 안전하다고 할 수 있다.

고강도재료의 박판구조물은 작아진 단면적에 의해 압축력을 받을 경우 필연적으로 "좌굴현상"을 동반하게 되므로 이러한 좌굴에 대한 검토를 반드시 행해야만 한다. 판형교의 경우, 구조물의 경량화와 건설비의 절감을 위해 박판을 조합한 거더(girder)를 사용하게 된다. 박판은 인장에 비해 압축력에 취약한데, 이는 좌굴현상에 기인한다. 그러나 복부판은 주로 전단응력에 저항하는 역할을 하므로, 임계하중을 초과하게 되면, 국부전단좌굴이 발생하게 된다. 이러한 국부전단좌굴을 방지하기 위해, 수직보강재를 설치하게 되는데, 국부전단좌굴이 발생하는 임계전단좌굴응력은 수직보강재의 간격과 복부판의 높이, 복부판의 두께, 경계조건에 따라 변하게 된다. 판(plate)의 경우, 탄성순수전단좌굴에 대한 연구 외에도 후좌굴강도에 대한 많은 연구가 수행되어 외국 시방서(AISC, LRFD 등)에서는 극한좌굴강도식을 채택하여 사용하고 있다^{(3),(4)}. 그러나 판의 경우, 국부전단좌굴의 방지를 위하여 수직보강재의 사용이 필연적이며, 이로 인한 사용재료의 증가와 시공 상의 추가 작업이 필요하게 된다. 하지만, 복부판을 단순한 판이 아닌, 파형판을 사용한다면, 전단좌굴강도의 증가를 기대할 수 있으므로, 수직보강재를 사용하지 않거나 그 사용량을 현저하게 줄일 수 있을 것이다. 이러한 장점에 따른 재료비의 절감과 시공의 편의를 위하여, 현재 수직보강재가 필요 없는 파형판을 복부판으로 갖는 보가 일부 사용되고 있으나, 파형판에 대한 전단좌굴강도 산정에 대한 시방기준은 아직 확립되지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 파형판

의 순수전단좌굴 특성을 파악하고, 파형판의 전단좌굴강도를 결정할 수 있는 식을 제안하여, 파형판을 복부판으로 갖는 보의 설계의 합리적인 지침 개발에 도움을 주고자 한다.

2. 유한요소 해석 및 변수 결정

현재 시방서에서 제안되어 있는 전단좌굴계수는 판의 탄성 전단좌굴을 이론적으로 유도하고 간략화 시킨 것이다. 파형판에서는 각 파형이 갖는 초기 곡률의 영향으로 인하여, 전단좌굴 특성이 편평한 판과는 다르다. 판의 전단좌굴 편미분 방정식은 두 개의 위치 독립변수(x, y)를 갖고 있으나, 파형의 경우에는 곡률에 관계된 항이 추가되며, 곡률에 관계된 항도 계속 변화하기 때문에 그 해석이 대단히 복잡하게 된다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법을 사용하여, 파형판의 전단좌굴강도 산정 영향인자인 각 파형의 곡률효과, 각 파형의 크기, 강판의 두께, 강판의 형상비에 따른 해석을 수행하였으며, 해석에는 범용구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하였다.

2.1 매개변수 및 하중조건

평판의 경우 형상계수의 결정은 판의 가로-세로 비와 판의 두께로 충분히 정의 할 수 있으나, 파형판의 경우 각 파형의 곡률효과(h/w), 각 파형의 크기(h/a 또는 w/a), 판의 두께(t/a), 판의 가로-세로 비(b/a)에 따라 형상계수가 결정되며, 본 연구에서는 파형의 형상으로 호(circular)를 사용하였다.

일반적인 판의 경우, 수직보강재의 강성은 상당히 크므로 복부판과 수직보강재의 접합면에서 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 파형판의 해석 또한 수직보강재는 없으나, 타 부재와 접합되는 최종 경계부는 단순지지로 가정하였다. 또한, 대부분의 시방서에서

그림 1. 파형판의 형상

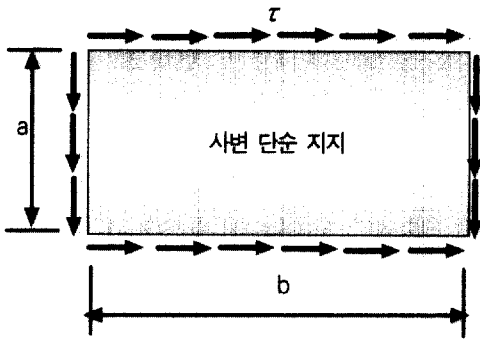


그림 2. 평판의 전단응력 분포

안전측으로 I형 보에서 플랜지에 접하는 판(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 파형판의 해석 시에도 사변이 단순지지된 경계조건을 적용하였다. 순수전단 하에서는 판의 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 3과 같이 균일하게 분포한다고 가정하였다.

2.2 해석 프로그램의 검증

본 연구를 수행함에 있어 해석 프로그램은 범용 유한요소 해석 프로그램인 LUSAS를 사용하였다. 해석 시 8절점 요소 (Quadratic Quadrilateral Thin Shell Element, QSL8)를 사용하였으며⁽⁶⁾, 검증 시 사용한 모델의 제원은 표 1과 같으며, 경계 조건은 표 2와 같다.

검증 모델의 해석 결과는 그림 5 및 표 3과 같으며, 유한요소해석 결과 값이 약 2.6% 정도 크게 나오나, 신뢰할 수 있는 수준이라 할 수 있다.

표 1. 검증 모델의 경계 조건

		4 Edges	Center Line	Center Point
Translation	X	Free	Fix	Fix
	Y	Free	Free	Fix
	Z	Fix	Free	Free
Rotation	X	Free	Free	Free
	Y	Free	Free	Free
	Z	Free	Free	Free

표 2. 검증 모델 제원

판의 폭	판의 높이	판의 두께	하중
200 cm	100 cm	0.25~1.0 cm	1 kgf/cm ²

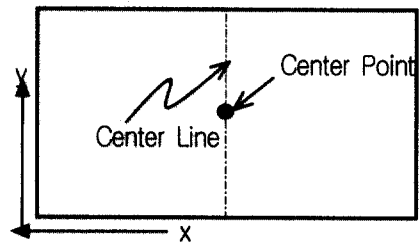


그림 4. 검증 모델의 좌표계

그림 3. 파형판의 전단응력 분포

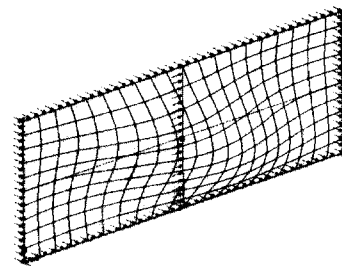


그림 5. 판의 순수전단좌굴 형상

표 3. 검증 모델의 결과와 전단좌굴강도 비교

	t=1cm	t=0.5cm	t=0.25cm
이론해 (kgf/cm ²)	1231.956	307.901	76.975
FEM해석 (kgf/cm ²)	1263.530	315.883	78.971
오차율	2.56 %	2.59 %	2.59 %

2.3 수렴도 분석

유한요소해석의 결과치는 해석모델의 유한요소 개수에 따라 상당한 차이를 보인다. 따라서 정해를 알고 있는 모델에 대하여 유한요소의 개수별 해석 치의 비교를 통하여 적당한 유한요소의 개수를 결정하는 것이 타당하다. 직선 복부판의

경우의 비교치는 앞 절에서 이미 밝힌바 있다. 파형판의 경우 곡선으로 이루어져 있기 때문에 직선요소로 곡선의 거동을 충분히 표현하기 위해서는 충분한 자유도를 갖도록 많은 요소를 사용하여야 한다. 따라서 요소의 수에 따른 해석결과의 수렴도를 검토하였다. 유한요소망의 종류는 4×2부터 30×15까지 12가지의 경우를 선정하였으며, 해석모델은 $h/a=0.3$, $b/a=1.2$, $a/t=200$ 으로 하였으며, 곡률효과가 가장 큰 $w/h=2$ 인 경우로 하였다. 해석 결과, 곡률효과를 표현하는데 있어서, 한 곡선 주기를 16개 이상의 요소로 구성한다면 충분히 그 곡률효과를 표현할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 충분한 곡률효과를 표현하기 위해 하나의 파형을 표현하는데 있어, 16개 이상의 요소를 사용하였다.

표 4. Mesh 수에 따른 해석결과의 수렴도

Mesh 수	Eigen Value	변화율
4x2	4405.03	
6x3	7194.96	-63.34%
8x4	5957.66	17.20%
10x5	5485.93	7.92%
12x6	5275.35	3.84%
14x7	5176.88	1.87%
16x8	5129.04	0.92%
18x9	5105.86	0.45%
20x10	5095.16	0.21%
22x11	5090.89	0.08%
24x12	5089.96	0.02%
30x15	5094.19	-0.08%

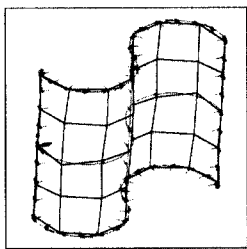


그림 6. Deformed Shape (4×2 Mesh)

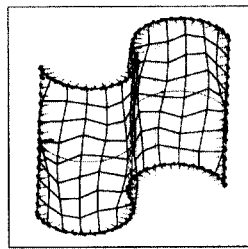


그림 7. Deformed Shape (8×4 Mesh)

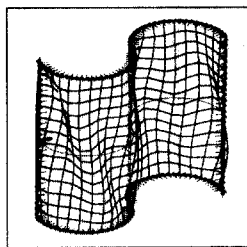


그림 8. Deformed Shape (14×7 Mesh)



그림 9. Deformed Shape (30×15 Mesh)

2.4 매개 변수의 결정

등방성 재질로 된 파형 판, 즉 한 방향으로 주름잡아준 판에서 주름의 수가 충분히 많다면, 혹은 주름의 길이가 판의 측면 길이에 비해 매우 작다면 근사적으로 직교 이방성 판형으로 고려될 수 있다(Seydel, 1931; Fung, 1962)⁽⁵⁾. 평판 (flat plate)의 경우 수직보강재 설치의 간격에 따라 좌굴강도가 달라진다. 그러나 판의 길이가 길어진다면 판의 전단좌굴강도는 최소전단좌굴강도로 수렴하게 된다⁽⁴⁾. 따라서 본 연구에서는 파형판의 최소전단좌굴강도를 산정하였다. 이에 따라, 파형판의 경우 최소전단좌굴강도로 수렴하는 b 의 범위를 알아보았다. 본 연구에서는 각 파형의 크기 및 곡률을 변화시켰을 때, 최소전단좌굴강도로 수렴하는 b 의 범위를 알아보기 위하여, 파형의 크기($0.1 \leq h/a \leq 0.4$)와 곡률변화($2 \leq w/h \leq 6$)에 따라 b/a 의 값을 증가 시켜 수렴도를 알아보았다.

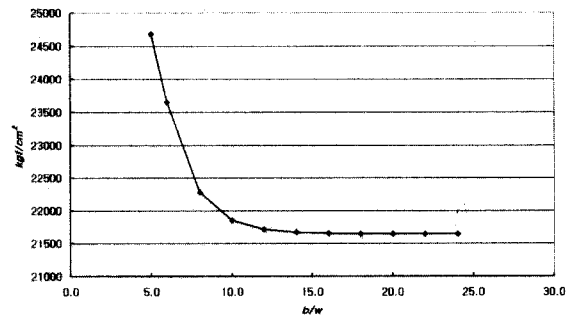


그림 10. b/w 에 따른 전단 강도의 변화 ($a=100\text{cm}$, $t=1\text{cm}$, $h/a=0.1$, $w/h=2$)

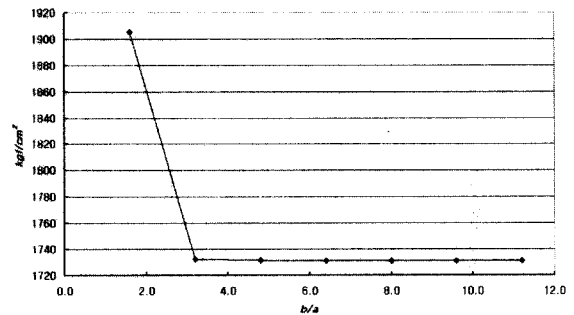


그림 11. b/a 에 따른 전단 강도의 변화 ($a=100\text{cm}$, $t=1\text{cm}$, $h/a=0.5$, $w/h=8$)

위의 결과에서, b 의 영향을 고려하지 않아도 되는 b 의 길이는 파형의 크기가 작은 경우에는 b/a 에 더 큰 영향을 받으며, 파형의 크기가 큰 경우에는 b/w 에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. $h/a=0.1$, $w/h=2$ 인 경우와 같이 파형의 크기가 작은 경우, b 의 값이 a 의 2.4배 이상인 경우 전단좌굴강도의 변화는 1% 미만으로 거의 일정하다고 할 수 있으며, $h/a=0.5$ 인 경우, b/w 가 6이상이면 전단좌굴강도는 거의

일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 따라서 본 매개변수 연구에서는 위의 결과를 토대로 하여, b의 값이 영향을 미치지 않도록 b의 값을 충분히 크게 고려하여 h/a가 0.2이하일 경우 b/a를 3이상으로, h/a가 0.3 이상일 경우, b/w를 6이상으로 모델링하여 해석하였다.

3. 해석결과

파형판의 전단좌굴강도의 변화를 알아보기 위하여 유한요소 해석을 실시하였다. 판의 높이 a=100cm로 고정하였으며, a/t는 200~1000의 범위에서 해석하였다. 파형의 크기와 곡률의 변화에 있어서는 파형의 크기를 h값을 고정하고 w값을 변화시키는 방법과, w값을 고정하고 h값을 고정하는 방법 두 가지를 사용하였다. 첫 번째 방법에서는 h/a는 0.1~0.5, w/h는 2~6의 범위로 설정하였으며, 두 번째 방법에서는 w/a를 0.1~1, w/h는 2~10의 범위에서 해석하였다. 또한 재료의 물성치는 탄성계수 E=2.1×10⁶ kgf/cm², 포아송비 μ=0.3을 기본으로 사용하였으며, 모든 해석 후, 탄성계수 값과 포아송비의 값을 변화시켜 다시 해석하여 제안식의 결과를 검증하였으며, 각 영향인자의 변화에 따른 해석 결과는 표 5와 같다.

표 5. 영향인자에 따른 파형판의 전단좌굴강도

h/a	a/t	Shear Strength (kgf/cm ²)				
		w/h=2	w/h=3	w/h=4	w/h=5	w/h=6
0.1	1000	1646.48	1106.33	804.58	618.492	479.454
	500	3689.92	2622.49	1891.32	1410.24	1098.75
	333	5750.97	4283.92	3180.38	2367.33	1841.7
	250	8002.83	6079.43	4509.08	3438.59	2649.21
	200	10405.3	8042.96	5953.88	4564.31	3537.22
0.2	1000	984.046	670.274	479.63	361.485	281.054
	500	2207.72	1532.61	1097.05	825.188	648.517
	333	3612.79	2497.59	1804.12	1367.15	1071.49
	250	5159.69	3572.23	2583.76	1959.18	1538.98
	200	6673.3	4769.48	3424.48	2595.9	2047.34
0.3	1000	768.7	499.816	359.447	290.365	219.534
	500	1670.43	1119.62	810.857	619.216	483.587
	333	2665.64	1842.54	1327.14	1002.84	787.139
	250	3795.7	2614.26	1902.07	1420.96	1122.81
	200	4984.62	3464.89	2508.65	1866.75	1472.8
0.4	1000	608.524	423.094	298.308	211.269	163.671
	500	1320.19	919.329	655.478	481.377	377.973
	333	2136.73	1483.04	1069.02	797.356	626.839
	250	3020.29	2103.28	1523.38	1141.91	898.429
	200	3986.6	2773.03	2016.04	1513.19	1186.37
0.5	1000	506.495	339.038	243.099	180.03	140.841
	500	1107.26	749.735	543.916	409.191	322.255
	333	1787.72	1224.04	894.696	675.347	531.459
	250	2530.86	1752.86	1278.05	967.494	759.516
	200	3342.04	2318.51	1689.95	1277.91	1004.13

3.1 판의 두께 변화에 따른 전단좌굴강도

평판(flat plate)의 경우, 순수전단좌굴강도식은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\tau_c = k_s \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2) \left(\frac{a}{t}\right)^2} \quad (1)$$

$$k_s = 5.34 + 4.00 \left(\frac{a}{b}\right)^2 \quad (2)$$

위의 식에서 a는 장변의 길이, b는 단변의 길이이다. 식 (1)로 부터, 평판의 전단좌굴강도는 a/t의 제곱에 반비례함을 알 수 있으며, 파형판의 경우에도 판의 두께의 영향에 대해서는 유사한 결과를 예측할 수 있다. 해석결과는 그림 12~14와 같으며, 판의 두께가 얇아짐에 따라 전단좌굴강도가 감소함을 알 수 있다.

그림 12. a/t-Shear Strength Relationship (h/a=0.2)

그림 13. a/t-Shear Strength Relationship (h/a=0.5)

그림 14. a/t-Shear Strength Relationship (w/h=5)

파형판의 전단좌굴강도를 평판과 비교하기 위해, 파형판의 전단좌굴강도를 같은 형상비를 갖는 평판의 전단좌굴강도로 나눈 값으로 표현하면 다음과 같다.

그림 15. a/t에 따른 평판 대비 파형판의 전단좌굴강도 증진 효과 (h/a=0.3)

그림 16. a/t에 따른 평판 대비 파형판의 전단좌굴강도 증진 효과 ((w/h=6)

평판과 비교하였을 때, 파형판의 전단좌굴강도 증진효과는 상당히 크게 나타난다. 파형의 크기가 작을수록, 파형의 곡률이 클수록 전단좌굴강도 증진효과는 크게 나타나며, a/t에 선형 비례하여, 전단좌굴강도의 증진효과가 증대되는 것을 알 수 있다. 이것은 절대적인 전단좌굴강도는 a/t 값이 작을수록, 즉, 판의 두께가 두꺼울수록 전단좌굴강도가 커지나, 평판과 비교하였을 때, 波形주름의 효과는 판의 두께가 얇은 박판에서 그 주름의 효과가 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 판의 두께가 두꺼워질수록, 판의 두께증가로 인해 곡률효과가 반감되기 때문인 것으로 생각된다. 유한요소해석의 결과자료를 회귀 분석하여, a/t와 전단좌굴강도간의 관계를 나타내면, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{cr} = A \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^{-1.2} \quad (3)$$

여기서 A는 w/h, h/a에 따라 변화하는 상수이며, 파형판

그림 17. 변형 형상 (h/a=0.1, w/h=2, a/t=250)

그림 18. 변형 형상 (h/a=0.1, w/h=6, a/t=200)

의 전단좌굴강도는 $\left(\frac{a}{t}\right)^{-1.2}$ 에 비례함을 알 수 있다.

3.2 파형의 크기 변화에 따른 전단좌굴강도

파형판의 주름의 크기, 또는 파형의 크기를 나타내는 인자인 h/a에 따른 전단좌굴강도의 해석결과는 그림 19~22와 같으며, 판의 제원 및 해석범위는 앞 절에서와 같다. 평판과 비교한 파형판의 상대적인 전단좌굴강도의 증가율은 파형판의 전단좌굴강도 곡선과 거의 비슷한 형태를 보인다. 이는 a/t의 경우 평판에도 같은 영향인자가 존재하여, 상대적인 전단좌굴강도 증가율의 경향이 단순 전단좌굴강도 값의 경향과 차이를 보이지만, h/a의 경우 평판에서는 이에 상응하는 영향인자가 없기 때문에 전단좌굴강도의 증진효과에 있어 특별한 점은 없다. 다만, 파형판에서 파형의 크기가 작아질수록 전단좌굴강도의 값이 증가하는데, 일반적으로 파형의 크기가 매우 작아진다면, 주름의 효과가 상쇄되어, 평판과 같은 경향을 보일 것으로 예상되나, 본 연구에서는 h/a의 범위를 0.1이상으로 제한하였기 때문에 매우 작은 크기의 파형인 경우는 고려되지 않았으며, 이러한 경우는 실무에서 의미가 없는 범위이다.

유한요소해석의 결과자료를 회귀 분석하여, 파형의 크기 (h/a)와 전단좌굴강도간의 관계를 나타내면, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

그림 19. h/a-Shear Strength Relationship (a/t=200)

그림 20. h/a-Shear Strength Relationship (w/h=2)

그림 21. h/a에 따른 평판 대비 파형판의 전단좌굴강도 증진 효과 (a/t=333)

그림 22. h/a에 따른 평판 대비 파형판의 전단좌굴강도 증진 효과 (w/h=4)

그림 23. 변형 형상 (h/a=0.1, w/h=3, a/t=333)

그림 24. 변형 형상 (h/a=0.2, w/h=3, a/t=333)

$$\tau_{cr} = B \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^{-0.77} \quad (4)$$

여기서 B는 w/h, a/t에 따라 변화하는 상수이다.

3.3 파형의 곡률 변화에 따른 전단좌굴강도

파형판에서 파형의 곡률의 크기를 나타내는 인자인 w/h에 따른 전단좌굴강도의 해석결과는 다음과 같다. 판의 제원 및 해석범위는 앞의 경우와 같다. 해석결과, 파형판에서 파형의 곡률이 작아짐에 따라, 즉, w/h의 크기가 증가함에 따라, 전

단좌굴강도는 w/h의 누승에 반비례하여, 감소함을 알 수 있다. 만약, w/h의 크기가 무한대로 커져, 즉, 곡률효과가 거의 없어진다면 전단좌굴강도는 평판(flat plate)의 전단좌굴강도 값에 수렴할 것이다. 유한요소해석의 결과자료를 회귀 분석하여, 파형의 곡률)과 전단좌굴강도간의 관계를 나타내면, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{cr} = C \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^{-1.2} \quad (5)$$

여기서 B는 h/a, a/t에 따라 변화하는 상수이다.

그림 25. w/h-Shear Strength Relationship (h/a=0.5)

그림 26. w/h-Shear Strength Relationship (a/t=250)

그림 27. w/h에 따른 평판 대비 파형판의 전단좌굴강도 증진 효과 (h/a=0.2)

그림 28. w/h에 따른 평판 대비 파형판의 전단좌굴강도 증진 효과 (a/t=200)

그림 29. 변형 형상 (h/a=0.2, w/h=3, a/t=0.4)

그림 30. 변형 형상 (h/a=0.2, w/h=6, a/t=0.4)

3.4 좌굴강도 산정식 및 검증

유한요소해석 결과를 통하여, 각각의 영향인자 a/t, h/a, w/h에 관한 회귀분석식을 산출하였다. 회귀분석에는 SPSS를 사용하였으며, 이 회귀분석식을 종합하여, 모든 영향인자에 따른 식을 산출하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_c = k_{sc} \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2) \left(\frac{a}{t}\right)^{1.2} \left(\frac{h}{a}\right)^{0.77} \left(\frac{w}{h}\right)^{1.2}} \quad (6)$$

여기서 $k_{sc} = 1.3$ ($w/h \leq 2$ 또는 $w/h \geq 6$ 일 때)
 $k_{sc} = 1.5$ ($2 < w/h < 6$ 일 때) 이다.

제안식을 FEM해석값과 비교하여 T검증을 실시한 결과, Pearson 상관계수(r)는 0.997, 검정통계량(T)은 198.91이 산출되어, 유의수준 0.05%를 만족하며, 99% 이상의 신뢰도를 만족한다.

그림 32에서 직선은 기울기 1인 그래프를 의미하며, 각 점은 일반적인 강재에 대한 유한요소 해석값을 x좌표로, 제안식에 의한 값을 y좌표로 하여 나타낸 것으로, 항복강도 및 전단

항복강도 내에서는 거의 정확함을 알 수 있다. 또한, 본 제안 식을 산출하는데 이용된 모집단 값(FEM 해석값) 이외의 범위의 모델에 적용하여 검증된 결과는 표 6과 같다.

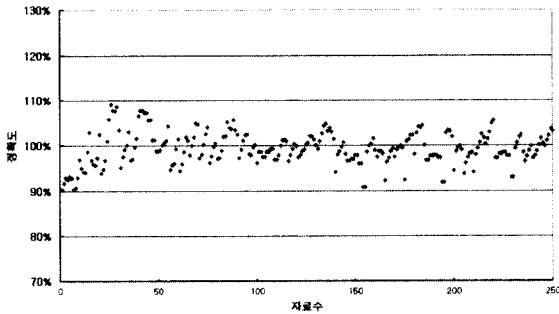


그림 31. 제안식의 정확도 (1)

그림 32. 제안식의 정확도 (2)

표 6. 제안식의 검증

FEM해석값 (kgf/cm ²)	제안식에 의한 값 (kgf/cm ²)	정확도
2456.14	2355.336	95.9%
258.203	261.69	101.4%
1502.34	1495.151	99.5%
1216.29	1217.412	100.1%
568.104	573.134	100.9%
1060.45	1060.636	100.0%
3210.14	2961.431	92.3%
340.326	329.031	96.7%
1974.59	1879.897	95.2%
1587.94	1530.687	96.4%
744.639	720.618	96.8%
1393.38	1333.569	95.7%
3273.56	3053.976	93.3%
346.102	339.313	98.0%
2009.9	1938.643	96.5%
1619.47	1578.521	97.5%
758.601	743.138	98.0%
1418.35	1375.243	97.0%
3566.16	3490.258	97.9%
373.556	387.786	103.8%
2176.38	2215.592	101.8%
1767.69	1804.024	102.1%
823.985	849.3	103.1%
1536.76	1571.706	102.3%

4. 결론

본 연구는 파형판의 각 영향 인자에 따른 매개변수 연구를 통하여, 파형판의 전단좌굴 특성을 파악하여, 합리적 설계에 도움을 주고자 하는 목적으로 수행되었으며, 이에 따라 파형판의 전단좌굴강도를 산정할 수 있는 식을 제시하였으며, 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 파형판의 전단좌굴강도 산정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_c = k_{sc} \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2) \left(\frac{a}{t}\right)^{1.2} \left(\frac{h}{a}\right)^{0.77} \left(\frac{w}{h}\right)^{1.2}} \quad (7)$$

여기서 $k_{sc} = 1.3$ ($w/h \leq 2$ 또는 $w/h \geq 6$ 일 때)

$k_{sc} = 1.5$ ($2 < w/h < 6$ 일 때) 이다.

- (2) 파형판에서 주름의 효과는 판의 두께가 얇은 박판에서 그 효과가 더 크게 나타난다. 따라서, 박판일수록 파형판으로 설계하였을 때 더 큰 전단강도의 증진효과를 기대할 수 있다.
- (3) 파형판에서 판의 두께(a/t)의 영향은 평판에서와 같이 두께가 두꺼워 질수록 전단좌굴강도가 증가하며, 전단좌굴 강도는 a/t 의 1.2제곱에 반비례한다.
- (4) 파형판에서는 주름의 크기가 작을수록 전단좌굴강도 값이 증가한다. 수치적으로, 전단좌굴 강도는 h/a 의 0.77제곱에 반비례한다.
- (5) 파형판에서 전단좌굴강도는 파형의 곡률이 클수록 증가한다. 즉, w/h 가 증가할수록 전단좌굴강도는 감소하며, 수치적으로 w/h 의 1.2제곱에 반비례한다.

감사의 글

본 연구는 환경부 「차세대 핵심 환경기술 개발사업」 지원 연구비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 정석주(1990) 주름판구조물의 강성계수 해석 및 최적형상 결정에 관한 연구. 서울산업대학교논문집, 제32권 pp. 31~39
2. 정석주(1995) 주름판구조물의 강성계수 및 진동 해석에 관한 연구. 서울산업대학교논문집, 제42 권 pp. 65~86

3. AISC(1989) Manual of Steel Construction, ASD 9th Ed
4. AISC, "Manual of Steel Construction, LRFD", 2nd Ed., 1994
5. S. P. Timoshenko and Woinowsky-Krieger, "Theory of Plates and Shells", 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., 1959
6. LUSAS Manual(1999) Version 13.2, FEA Ltd.,

(접수일자 : 2002년 4월 29일)