

원형 파형 강판의 전단좌굴강도 산정

The Shear Strength Evaluation of Circularly Corrugated Steel Plates

한 택 회¹⁾ 임 남 형²⁾ 김 중 헌³⁾ 강 영 중⁴⁾
Han, Taek-Hee Lim, Nam-Hyoung Kim, Jong-Heun Kang, Young-Jong

ABSTRACT

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

1. 서 론

고강도재료의 박판구조물은 작아진 단면적에 의해 압축력을 받을 경우 필연적으로 좌굴현상을 동반하게 되므로, 이러한 좌굴에 대한 검토를 반드시 행해야만 한다. 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. Flat Plate의 경우, 탄성순수전단좌굴에 대한 연구 외에도 후좌굴강도에 대한 많은 연구가 수행되어 외국 시방서(AISC-LRFD 등)에서는 극한좌굴강도식을 채택하여 사용하고 있다. 그러나, 이 경우, 국부전단좌굴의 방지를 위하여 수직보강재의 사용이 필연적이며, 이로 인한 사용재료의 증가와 시공상의 추가 작업이 필요하게 된다. 하지만, 복부판을 단순한 Flat Plate가 아닌, 波形 Plate를 사용한다면, 전단좌굴강도의 증가를 기대할 수 있으며, 그 결과로서, 수직보강재를 사용하지 않거나 그 사용량을 현저하게 줄일 수 있을 것이다. 이러한 장점에 따른 재료비의 절감과 시공의 편의를 위하여, 현재 수직보강재가 필요 없는 파형 Plate를 복부판으로 갖는 보가 일부 사용되고 있으나, 파형 Plate에 대한 전단좌굴강도 산정에 대한 시방기준은 아직 확립되지 않은 상태이다. 그러므로, 본 연구에서는 파형 Plate의 순수전단좌굴 특성을 파악하고, 이의 전단좌굴강도를 결정할 수 있는 식을 제안하여, 파형 Plate(Corrugated Plate)를 복부판으로 갖는 보의 설계의 합리적인 지침 개발에 도움을 주고자 한다.

2. 연구방법

직선 판형의 경우 형상계수의 결정은 판형의 가로-세로 비와 판의 두께로 충분히 정의할 수 있으나, 波形 Plate의 경우 각 파형의 곡률효과(h/w), 각 파형의 크기(h/a 또는 w/a), 판형의 두께(t/a), 판형의 가로-세로 비(b/a)에 따라 형상계수가 결정된다.

1) 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, 학생회원
2) 고려대학교 토목환경공학과, 공학박사, 정회원
3) 고려대학교 토목환경공학과, 공학박사, 정회원
4) 고려대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사, 정회원

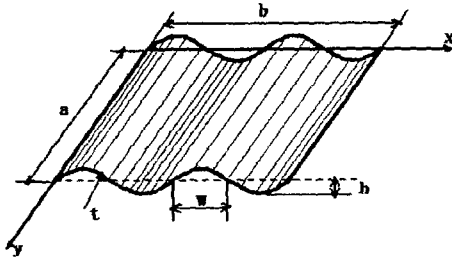


그림 1. 波形 Plate의 형상

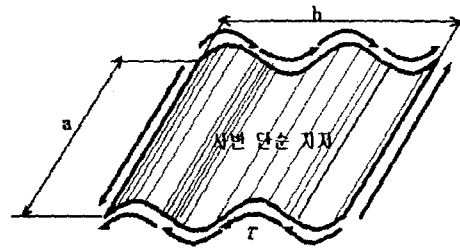


그림 2. 波形 Plate의 전단응력 분포

[그림 1]과 같은 파형 Plate의 형상은 각 인자의 영향에 따라 Flat Plate, Curved Plate로 표시될 수 있다. 만약 형상 변수가 $h/b=0$ 이라면 이 판형은 Rectangular Flat Plate를 나타내며, $h/b>0$ 이고 $l/b=1$ 이라면 이 판형은 Curved Plate를 나타내게 된다. Corrugated Plate는 $h/b>0$, $0<l/b<1$ 인 경우에 해당되며, 본 연구에서는 파형의 형상으로 원호(circular)를 사용하였다. 일반적으로 Flat Plate의 경우, 수직보강재의 강성은 상당히 크므로 복부판과 수직보강재의 접합면에서 면의변형이 생기지 않고 면의각변형만이 생긴다. 또한 대부분의 시방서에서도 단순지지의 거동 조건을 만족하도록 수직보강재의 강성을 제시하고 있으므로, 복부판과 수직보강재의 접합면을 단순지지로 가정하는 것은 타당한 것으로 생각된다. 따라서 본 연구인 파형 Plate의 해석 또한 수직보강재는 없으나, 타 부재와 접합되는 최종 경계부는 단순지지로 가정하였다. 또한, 대부분의 시방서에서 안전측으로 I형 보에서 플랜지에 접하는 복부판(Plate)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, 波形 Plate의 해석 시에도 사변이 단순 지지된 경계조건을 적용하였다. 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 2]과 같이 균일하게 분포한다고 가정하였다.

2.1 해석 프로그램의 검증

표 1. 검증 모델 제원

판형의 폭 (b)	판형의 높이 (a)	판의 두께 (t)	하중
200 cm	100 cm	0.25~1.0 cm	1kg/cm ²

본 연구를 수행함에 있어 해석 프로그램은 범용 유한요소 해석 프로그램인 LUSAS(Version 13.2)를 사용하였다. 해석 시 8절점 요소(Quadratic Quadrilateral Thin Shell Element, QSL8)를 사용하였으며, 검증 시 사용한 모델의 제원은 [표 1]과 같으며, 검증 모델의 해석 결과는 [그림 3] 및 [표 2]과 같다.

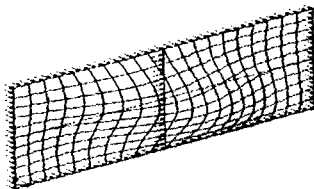


그림 3. Flat Plate의 순수전단좌굴 형상

표 2. 검증 모델의 유한요소해석 결과와 정해의 전단좌굴강도 비교

	t=1	t=0.5	t=0.25
정해값	1231.956	307.901	76.975
FEM해석값	1263.530	315.883	78.971
오차	2.56 %	2.59 %	2.59 %

검증 결과 유한요소해석 결과 값이 약 2.6% 정도 크게 나오나, FEM해석 결과가 정해보다 크게 나온다는 사실을 감안한다면, 충분히 신뢰할 수 있는 수준이라 할 수 있다.

2.2 수렴도 분석

유한요소해석의 결과치는 해석모델의 요소의 개수에 따라 상당한 차이를 보이므로, 정해를 알고있는 모델에 대하여 유한요소의 개수별 해석치의 비교를 통하여 적당한 유한요소의 개수를 결정하는 것이 타당하다. 波形 Plate의 경우 곡선으로 이루어져 있기 때문에 직선요소(QSL8)로 곡선의 거동을 충분히 표현하기 위해서는 충분한 자유도를 갖도록 많은 요소를 사용하여야 한다. 따라서, 본 절에서는 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=200으로 하였으며, 곡률효과가 가장 큰 w/h=2인 경우로 하였다. 해석 결과는 다음과 같으며, 이상의 결과로, 곡률효과를 표현하는데 있어서, 한 곡선 당 16개 이상의 요소를 사용한다면 충분히 그 곡률효과를 표현할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 충분한 곡률효과를 표현하기 위해 하나의 波形을 표현하는데 있어, 16개 이상의 요소를 사용하였다.

표 3. 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%

Mesh 수에 따른 수렴도

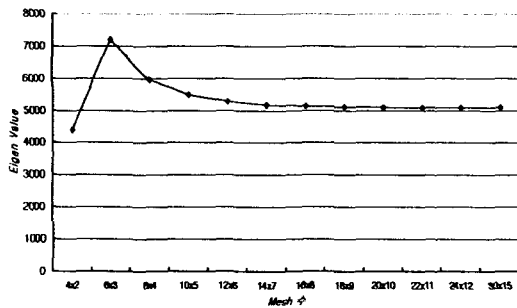


그림 4. Mesh 수에 따른 해석결과의 수렴도

2.3 매개 변수의 결정

표 4. b의 변화에 따른 전단좌굴강도의 변화율 (a=100cm, t=1cm h/a=0.1, w/h=2)

b/w	b/a	전단좌굴강도(kg/cm ²)	강도 감소율
5.0	1.0	24681.30	
6.0	1.2	23654.80	4.16%
8.0	1.6	22283.50	5.80%
10.0	2.0	21851.30	1.94%
12.0	2.4	21717.40	0.61%
14.0	2.8	21673.30	0.20%
16.0	3.2	21657.40	0.07%
18.0	3.6	21651.20	0.03%
20.0	4.0	21648.50	0.01%
22.0	4.4	21647.20	0.01%
24.0	4.8	21646.50	0.00%

표 5. b의 변화에 따른 전단좌굴강도의 변화율 (a=100cm, t=1cm, h/a=0.5, w/h=8)

b/w	b/a	전단좌굴강도 (kg/cm ²)	강도 감소율
2.0	1.6	1905.62	
4.0	3.2	1732.42	9.09%
6.0	4.8	1731.60	0.05%
8.0	6.4	1731.25	0.02%
10.0	8.0	1731.10	0.01%
12.0	9.6	1731.00	0.01%
14.0	11.2	1730.95	0.00%

Flat Plate의 경우 수직보강재 설치의 간격에 따라 좌굴강도가 달라진다. 그러나, 판의 길이가 길어진다면 판의 전단좌굴강도는 최소전단좌굴강도로 수렴하게 된다. 본 연구에서는 각 파형의 크기 및 곡률을 변화 시켰을 때, 최소전단좌굴강도로 수렴하는 b의 범위를 알아보기 위하여, 파형의 크기($0.1 \leq \frac{b}{a} \leq 0.5$)와 파형의 곡률변화($2 \leq \frac{w}{h} \leq 6$)에 따라 b/a의 값을 증가 시켜 수렴도를 알아보았으며, 이 결과에서, b의 영향을 고려하지 않아도 되는 b의 길이는 파형의 크기가 작은 경우에는 b/a에 더 큰 영향을 받으며, 파형의 크기가 큰 경우에는 b/w에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. h/a=0.1, w/h=2인 경우와 같이 파형의 크기가 작은 경우, b의 값이 a의 2.4배 이상인 경우 전단좌굴강도의 변화는 1% 미만으로 거의 일정하다고 할 수 있으며, h/a=0.5인 경우, b/w가 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. 해석 결과

3.1 판의 두께 변화에 따른 전단좌굴강도의 변화 (a/t-Shear Strength Relationship)

波形 Plate의 두께 변화에 따른 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. 해석결과 두 가지 방법의 차이는 없으므로, 첫 번째 방법에 의한 해석결과만을 밝히기로 한다. 본 연구에서는 波形주름의 형태를 Sine Curve를 사용하지 않고, 호(Circular)의 형상을 사용하여 해석하였으며, 재료의 물성치는 $E=1.5\sim 3.0\times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $\mu=1.0\sim 4.0$ 의 범위에서 해석을 실시하였다. Flat Plate의 경우, 판형의 순수전단좌굴강도식은 다음과 같은 형태로 표현된다.

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

여기서, $k_s = 5.34 + 4.00 \left(\frac{\text{Short Dimension}}{\text{Long Dimension}} \right)^2$ 이며, (식 1)로부터, Flat Plate의 전단좌굴강도는 a/t의 제곱에 반비례함을 알 수 있으며, 波形 Plate의 경우에도 비슷한 결과를 예측할 수 있다. 해석결과, a/t와 전단좌굴강도간의 관계는 (식 2)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 A는 w/h, h/a에 따라 변화하는 상수이다.

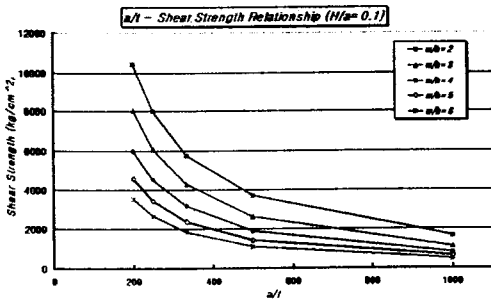


그림 5. a/t-Shear Strength Relationship (h/a=0.1)

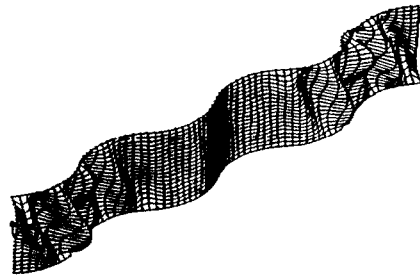


그림 6. Deformed Shape (h/a=0.1, w/h=6, a/t=1000)

$$\tau_{cr} = A \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^{-1.2} \quad (2)$$

3.2 파형의 크기 변화에 따른 전단좌굴강도의 변화 (h/a-Shear Strength Relationship)

波形 Plate의 주름의 크기, 또는 파형의 크기를 나타내는 인자인 h/a에 따른 전단좌굴강도의 해석결과는 다음과 같다. 해석결과, h/a에 따른 전단좌굴강도의 관계는 (식 3)과 같이 나타낼 수 있으며, B는 w/h, a/t에 따라 변화하는 상수이다.

$$\tau_{cr} = B \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^{-0.77} \quad (3)$$

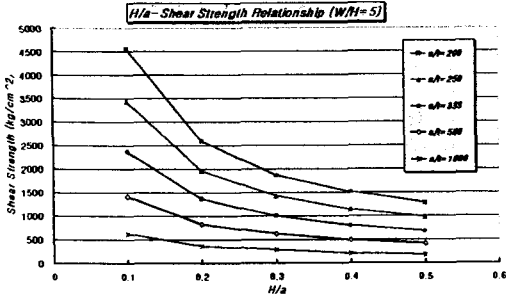


그림 7. h/a-Shear Strength Relationship (w/h=5)

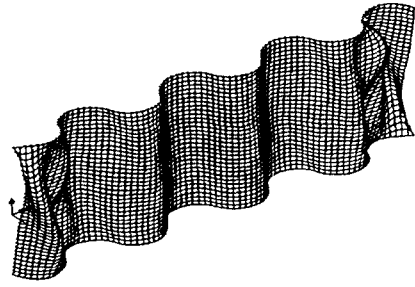


그림 8. Deformed Shape (h/a=0.1, /h=3,a/t=333)

3.3 파형의 곡률 변화에 따른 전단좌굴강도의 변화 (h/w-Shear Strength Relationship)

波形 Plate에서의 파형의 곡률(w/h)과 전단좌굴강도간의 관계를 나타내면, (식 4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 B는 h/a, a/t에 따라 변화하는 상수이다. 따라서, 波形 Plate의 전단좌굴강도는 w/h의 1.2제곱에 반비례함을 알 수 있다.

$$\tau_{cr} = C \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^{-1.2} \quad (4)$$

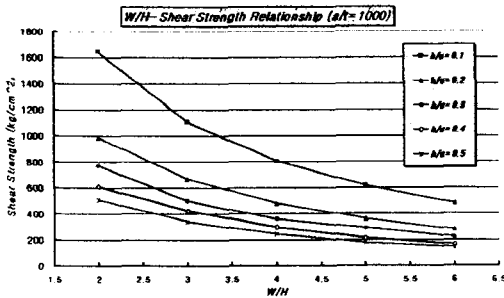


그림 9. w/h-Shear Strength Relationship (a/t=1000)

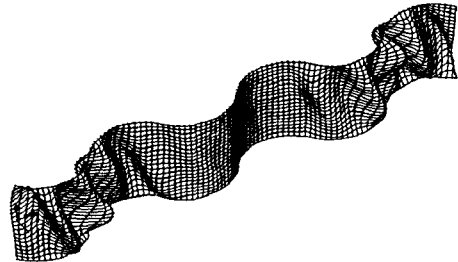


그림 10. Deformed Shape (h/a=0.2, w/h=4,a/t=0.4)

3.4 제안식의 신뢰도 분석

회귀분석을 통하여, 파형 Plate의 탄성전단좌굴강도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_c = \alpha \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2) \left(\frac{a}{t}\right)^{1.2} \left(\frac{h}{a}\right)^{0.77} \left(\frac{w}{h}\right)^{1.2}} \quad (5)$$

여기서, $\alpha=1.3$ ($\frac{w}{h} \leq 2$, $\frac{w}{h} \geq 6$ 일 경우), $\alpha=1.5$ ($2 < \frac{w}{h} < 6$ 일 경우)

제안식에 의한 좌굴강도값을 FEM해석값을 모집단으로 하여, 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 11]에서 직선은 기울기 1인 그래프를 의미하며, 각 점은 일반적인 강재에 대한 유한요소 해석값을 X좌표로, 제안식에 의한 값을 Y좌표로 하여 나타낸 것으로, 항복강도 및 전단항복강도 내에서는 거의 정확함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 (식 5)를 波形판형(Corrugated Plate)의 탄성전단좌굴강도식으로 제안하고자 한다.

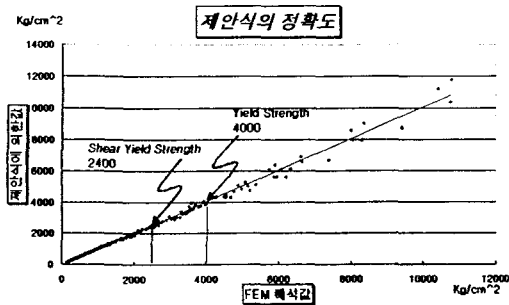


그림 11. 제안된 식의 정확도 (1)

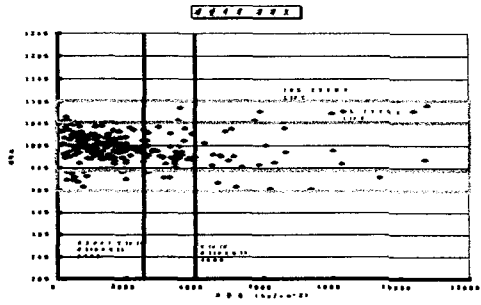


그림 12. 제안된 식의 정확도 (2)

4. 결 론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 波形 Plate의 극한전단좌굴강도 산정식은 다음과 같다.

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

여기서, $\alpha = 1.3$ ($\frac{w}{h} \leq 2$, $\frac{w}{h} \geq 6$ 일 경우), $\alpha = 1.5$ ($2 < \frac{w}{h} < 6$ 일 경우)

(2) 波形 Plate에서 주름의 효과는 판의 두께가 얇은 박판에서 그 효과가 더 크게 나타난다. 따라서, 박판일수록 波形 Plate로 설계하였을 때 더 큰 전단강도의 증진효과를 기대할 수 있다.

(3) 波形 Plate에서 a/t의 영향은 Flat Plate에서와 마찬가지로 발휘되며, 전단좌굴 강도는 a/t의 1.2제곱에 반비례한다.

(4) 波形 Plate에서는 주름의 크기가 작을수록 전단좌굴강도 값이 증가한다. 수치적으로, 전단좌굴 강도는 h/a의 0.77제곱에 반비례한다.

(5) 波形 Plate에서 전단좌굴강도는 波形주름의 곡률이 클수록 증가한다. 즉, w/h가 증가할수록 전단좌굴강도는 감소하며, 수치적으로 w/h의 1.2제곱에 반비례한다.

참 고 문 헌

1. S. P. Timoshenko and James M. Gere , "Theory of Elastic Stability", 2nd Ed, McGraw-Hill, Inc., 1961
2. Charles G. Salmon and John E. Johnson, "Steel Structures", 3rd Ed, Harper Collins Publishers Inc., 1990.
3. Choi, Jin-Yu , "Development of 4-Node Cylindrical Shell Element Including Curvature Effect in Displacement Field", Thesis for the Degree of Doctor Philosophy, Korea University, 1999
4. Klang, Eric C. & Owen, Vicki , "Shear Buckling of Specially Orthotropic Plates with Centrally Located Cutouts", NASA NAG-1-197, 1989
5. 韓秉基, 宋東浩, 張昌訓, "주름잡힌 板의 剛性에 대한 理論解析과 實驗的 研究(山形)"