

파형강판 이음부의 강도 및 응력분포특성에 관한 연구

Strength and Stress Distribution Behavior for the Connections of Corrugated Steel Plates

황 원 섭¹⁾ · 강 승 표²⁾ · 위 영 민³⁾
Hwang, Won Sup · Kang, Seung Pyo · Wi, Young Min

요 약 : 이 연구에서는 FEM 해석을 통하여 파형강판 이음부의 강도 및 응력분포 특성에 관한 축방향 겹침길이 및 볼트간격의 영향 등을 검토하였다. 파형강판의 항복강도비(P/P_y) 및 항복 후의 강도상승률은 축방향 겹침길이가 30mm일 때 가장 유리하게 되며, 현행의 제작기준에 의한 겹침길이는 매우 안전측의 값이 된다. 또한 파형강판 이음부의 강도특성은 볼트배치 방법에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 즉, 볼트가 지그재그로 배치되어있는 표준형의 경우에는 주로 원둘레방향의 연단거리만이 강도에 영향을 미치게 되며, 볼트가 일렬로 배치되어있는 대골형의 경우에는 원둘레방향 연단거리와 볼트중심간격 모두 강도특성에 영향을 미치게 된다. 이 연구에서는 이상의 해석결과로부터 구한 강도특성 및 응력분포특성을 기초로 하여 현행의 파형강판 이음부 제작기준에 대한 타당성을 검토하였다.

ABSTRACT : This paper presents the numerical results in strength and stress distribution behavior for the connections of corrugated steel plates (CSP). The results obtained using the finite element method indicate that the CSP with =30mm of longitudinal edge lap, by the current standard specification, has very conservative values. The results also indicate the difference of strength behavior from the bolt arrangement. The strength behavior of standardcorrugated type with staggered holes is only affected by circumferential edge lap, but the edge lap and bolthole spacing have an effect on the strength behavior for the deeply corrugated type with parallel holes. Based on these results, this paper examines the current specification of the connections for CSP.

핵심용어 : 파형강판, 이음부, 겹침길이, 볼트중심간격

KEYWORDS : corrugated steel plate, bolted connection, edge lap, bolt hole spacing

1. 서론

최근 횡단통로 구조물과 지중압거 등에 파형강판을 이용한 지중구조물의 적용이 점차로 증가하는 추세에 있다. 이러한 파형강판은 간단한 볼트체결 작업만으로 구조물을 완성시킬 수 있으므로 종래의 철근콘크리트 구조물에 비하여 공기단축 및 공사비 절감효과 등을 기대할 수 있으며, 지반의 부등침하 등에 유연하게 대처할 수 있는 장점을 가지고 있다. 파형강판에 대한 종래의 연구는 주로 지중구조물로의 적용을 위한 측면에서 이루어져 왔다.(박연수 등, 2000). 또한 최근에 들어서는 중지간의 교량구조물은 물론, 거푸집 및 군용구조물 등

으로 그 적용범위가 확대됨에 따라 파형강판의 인장특성에 대한 실험이 수행된 바 있다(황원섭 등, 2003). 그러나 파형강판의 원활한 적용을 위해서는 구조상세에 대한 좀더 면밀한 검토가 요구된다고 할 수 있으며, 특히 현장조립작업에 의한 파형강판 구조물에서는 합리적인 이음부 구조상세의 수립이 중요한 과제라고 할 수 있다.

현행의 제작기준에 의한 축방향 겹침길이를 파형강판에 적용하는 경우, 그림 1에 나타낸 바와 같이 볼트체결을 위한 전동공구(impact)의 외경(=45mm)으로 인하여 겹침길이의 제작기준(=50mm)을 유지하기 어렵다. 이는 국내생산 파형강판의 형상차이를 고려치 않고 외국의 제작기준(AISI,

1) 정회원, 인하대학교 토목공학과 부교수, 공학박사
(Tel. 032-860-7570, Fax. 032-873-7560, E-mail : hws@inha.ac.kr)
2) 학생회원, 인하대학교 토목공학과, 석사과정(runee@nate.com)
3) 정회원, 평산에스아이(주) 기술연구소 부장, 구조기술사(ymwi@pyungsan.co.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 동의 회답을 게재하겠습니다.

CSA)을 그대로 도입하였기 때문이며 이를 국내생산규격에 맞도록 하는 것이 필요하다고 하겠다. 따라서 이 연구에서는 FEM 해석을 통하여 파형강판의 강도특성 및 응력분포특성 등을 검토하고, 이를 기초로 하여 이상에서 서술한 축방향 겹침길이 및 원둘레방향 볼트간격 등에 관한 제작기준을 검토하고자 한다.

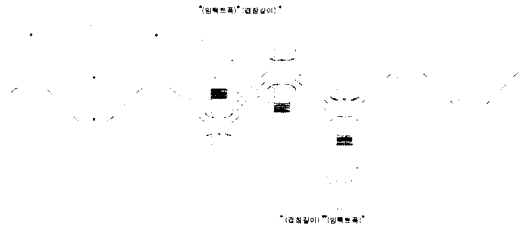


그림 1. 파형강판 볼트체결 상세도

2. 볼트이음부의 제작규정에 대한 검토

2.1 평판 이음부

그림 2는 볼트구멍이 있는 평판의 단부에 인장력이 작용할 때 구멍 주변에 발생하는 응력집중 현상을 나타낸 것으로서 이때의 발생응력 f_θ 는 다음과 같이 주어진다(김상식, 1999).

$$f_\theta = \frac{f_o}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{f_o}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (1)$$

여기서, f_o : 평판 양단에 작용하는 인장력

a : 평판내 볼트구멍의 반경

r, θ : 극좌표

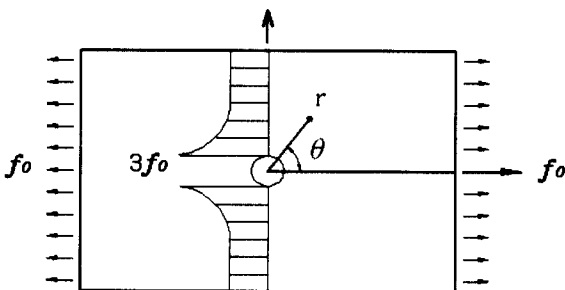


그림 2. 응력집중 현상

윗 식으로부터 구멍 주변에 발생하는 최대응력 $(f_\theta)_{max} = 3f_o$ 가 되며 구멍 중심으로부터의 거리 r 에 따른 응력의 크기는 그림 3과 같이 변화하게 된다. 이 그림으로부터 응력집중

현상은 (r/a) 의 비가 증가할수록 크게 감소하다가 $(r/a) = 3.0$ 이상이 되는 거리에서는 평균응력 f_o 에 거의 수렴하는 것을 알 수 있다. Nakai(中井, 1992) 등은 그림 4와 같은 볼트이음부 연단거리 및 중심간격에 대하여 볼트 공칭직경 d 를 이용하여 표 1과 같이 제안하고 있다. 즉, 작용응력 방향의 연단거리에 대해서는 응력집중 현상이 충분히 완화되는 $e_1 \geq 2d$ ($r/a=4$), 직각방향에 대해서는 이보다 약간 작은 $e_2 \geq 1.5d$ 로 하고, 볼트 중심간격에 대해서는 $1.5d$ 의 두배인 $e \geq 3d$ 를 채택하고 있다.

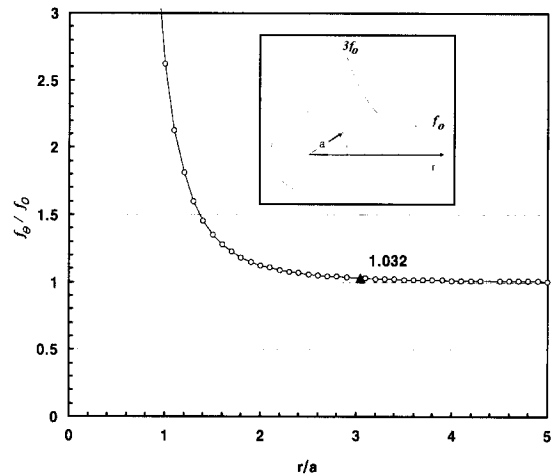


그림 3. 응력집중의 완화

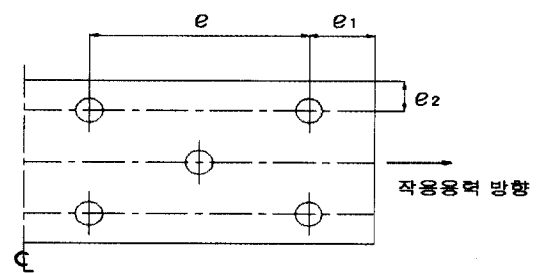


그림 4. 고장력볼트의 배치(평판)

표 1. 볼트 중심간격 및 연단거리의 제안값

볼트 중심으로부터의 연단거리(mm)		볼트 중심간격(mm) e
작용응력방향 e_1	응력직각방향 e_2	
$e_1 \geq 2d$	$e_2 \geq 1.5d$	$3d \leq e \leq 6d$

2.2 파형강판 이음부

그림 5는 파형강판 이음부의 겹침길이 및 볼트간격을 나타

낸 것이다. 파형강판 구조물은 주로 지중구조물에 적용되므로 작용응력의 방향은 원둘레방향이 된다. 표 2는 표준형 및 대골형 파형강판의 축방향 겹침길이 및 원둘레방향 볼트간격에 대한 각국의 제작기준을 정리한 것이다.(AISI, 1984; CSA, 1992; 한국도로공사, 2001; 한국공업규격(KS), 1981). 축방향겹침길이 l 은 원둘레방향(작용응력방향)과 직각방향이 되는 연단거리를 나타내며 주로 빗물침투 등을 방지하기 위하여 확보하는 것이 된다. 한국공업규격에서는 각국의 제작기준을 참고로 하여 표준형 파형강판의 경우 $l=50\text{mm}$ 이상, 대골형의 경우에는 $l=38\text{mm}$ 이상으로 규정하고 있다. 한편 표준형과 대골형 파형강판의 원둘레방향 연단거리 g_1 은 각각 35mm와 38mm 이상을 채택하고 있으며, 볼트중심간격 g_2 는 각국의 설계규정과 동일하게 표준형과 대골형 각각 50mm와 76mm 이상으로 하고 있다. 현재 국내에서는 파형강판 구조물의 이음부에 M20 볼트를 사용토록 하고 있다. 따라서 볼트의 공칭직경 $d=20\text{mm}$ 를 적용해보면 원둘레방향의 연단거리 g_1 은 Nakai(中井, 1992) 등이 제안한 평판이음부의 연단거리 $e_1=40\text{mm}$ 에 비하여 약간 작은 값이 된다. 또한 작용응력의 직각방향 연단거리 e_2 는 e_1 보다 약간 작은 30mm 이상이 되는데 비하여, 표준형 파형강판의 겹침길이 $l=50\text{mm}$ 로서 상당히 안전측으로 제작하도록 규정하고 있다. 한편 파형강판의 볼트간격 g_2 는 표준형과 대골형에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

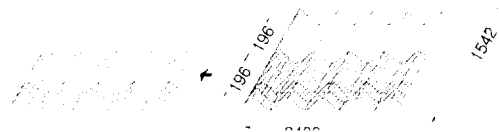
표 2. 각국의 파형강판 설계기준

구분	축방향 겹침길이 $l(mm)$	원둘레방향 간격	
		$g_1(mm)$	$g_2(mm)$
표준형	KSD3590	≥ 50	≥ 50
	한국도로공사	≥ 50	≥ 50
	CSA	≥ 50	≥ 50.8
	AISI	≥ 50	≥ 50.8
대골형	KSD3590	.	.
	한국도로공사	≥ 38	≥ 76
	CSA	≥ 38	≥ 76
	AISI	≥ 38	≥ 76

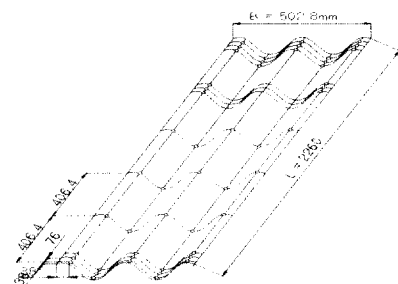
3. FEM 해석방법

3.1 해석모델의 선정

표준형 파형강판의 해석 대상으로서는 국내 생산 파형강판의 최대규격인 7-3번(2400×1542mm) 파형강판으로 하였으며, 해석의 효율성을 위하여 그림 6(a)와 같이 대상구조물의 일부에 대한 해석을 수행하였다. 대골형 파형강판의 경우 그림 6(b)와 같은 국내생산 파형강판(502×2260mm)으로 하였으며, 골의 수가 적으므로 강판 전체에 대한 해석을 수행하였다.



(a) 표준형



(b) 대골형

그림 6. 파형강판 해석모델

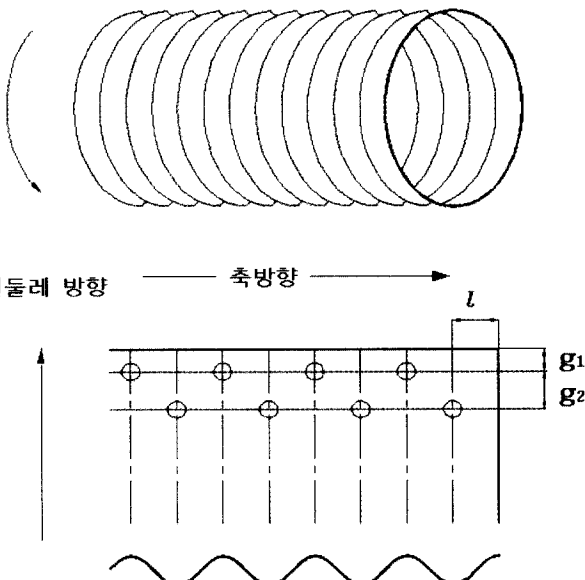


그림 5. 파형강판의 방향 및 기호 구분

3.2 요소분할 및 경계조건

본 해석에서는 상용 프로그램인 ABAQUS의 3차원 쉘요소 (S4R)를 사용하였으며, 볼트구멍 주변에는 일반부의 1/4 크

기의 요소를 사용하여 해석의 정확도를 증가시켰다. 그림 7은 요소 크기의 변화에 따른 영향을 나타낸 것이다. 여기서 각 모델명의 숫자는 요소의 크기(mm)를 나타내며, 요소의 크기가 점차 작아짐에 따라 요소 수의 증가에 의하여 강도가 실험값에 수렴하여, 요소의 크기가 4.17mm 이하인 경우 실험값과 거의 일치하게 된다.

그림 8은 각각 표준형 및 대골형 해석모델의 요소분할을 나타낸 것이며, 파형강판 2매가 이음되어있는 상태를 대상으로 한 것이다. 아울러 두 개의 판이 서로 겹쳐지게 되는 부분에서는 각 면 사이에 접촉요소를 부여하였다. 본 모델은 원둘레방향 경계(boundary)에 강제변위를 주어 변위제어로 해석하였다. 그림 9는 표준형 해석모델의 경계조건을 나타낸 것이다. 파형강판의 4변은 모두 1,2 방향이 고정인 단순지지를 기본으로 하고 있으며, ①은 3방향(하중 방향)을 고정시킨 고정단이고, ②부분에 3방향으로 강제변위를 도입하였다. 대골형 해석모델 역시 같은 방법으로 경계조건을 사용하였다.

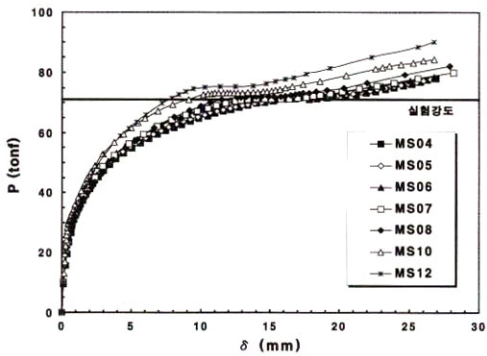
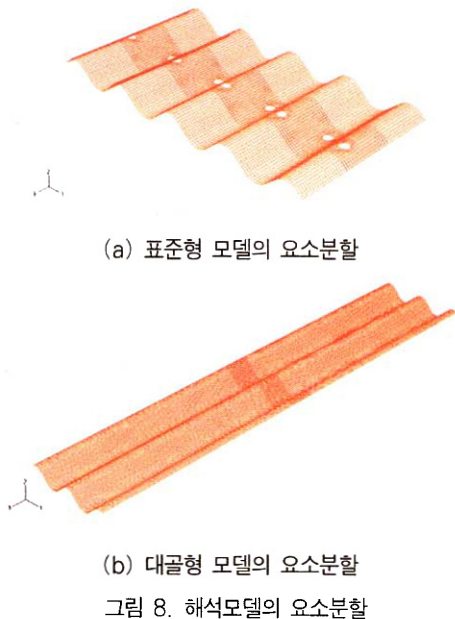


그림 7. 요소크기에 따른 영향



(a) 표준형 모델의 요소분할
(b) 대골형 모델의 요소분할
그림 8. 해석모델의 요소분할

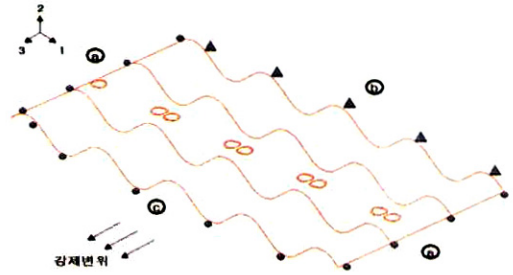


그림 9. 해석모델의 경계조건

3.3 이음부의 해석방법

파형강판의 이음부에는 일정량의 설계토크력(200 MPa)을 가하도록 규정하고 있다((주)평산SI, 2003). 이는 평판이음부에 비하여 상당히 작은 값이 되며 판면간의 마찰효과 보다는 미끄러짐 방지를 위한 체결효과만을 기대하는 것으로 판단된다. 이 연구에서는 선압축력의 도입에 따른 영향을 검토하기 위하여 인장력만을 도입한 경우와 인장력과 볼트의 선압축력을 도입한 경우에 대하여 FEM 해석에 의한 응력분포특성을 검토하였다. 그 결과 연단응력에 관한 선압축력의 영향은 2.7% 이내로서 무시할 수 있는 것으로 판명되었으며 따라서 이하의 해석에서는 선압축력을 무시하고 볼트와 판 사이를 지압상태로 설정하였다. 그림 10은 지압이음 형태의 볼트이음부의 해석방법을 나타낸 것이다. 이상에서 언급한 바와 같이 설계토크력은 무시하였으며, 볼트의 변형량은 판의 변형량에 비하여 매우 미소하므로 이를 무시하는 것으로 가정하였다. 또한 판의 변형으로 인하여 볼트와 판이 서로 접촉하게 되는 압축영역에는 공유절점을 설치하였다.

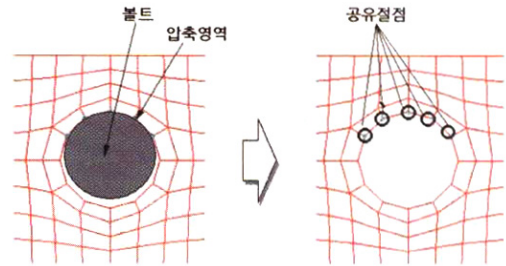


그림 10. kinematic coupling (공유절점)

3.4 해석결과의 검증

이 해석에서는 Nishimura(西村, 1993) 등이 제안한 강제구성식을 식 (2)와 같이 SS400(표준형)과 SS490(대골형) 강종((주)평산SI, 2003)에 대하여 정식화하여 사용하였다.

강종에 따른 구성식의 계수를 표 3에 나타내었다.

$$\sigma = a \ln \left(\frac{\epsilon_{mn}^P}{b} + 1 \right) + \left(E_{st}^P - \frac{a}{b} \right) \epsilon_{mn}^P + \sigma_y \quad (2)$$

여기서, ϵ_{mn}^P : 변형률 경화시점을 원점으로 한 변형률
 E_{st}^P : 변형률 경화 기울기
 σ_y : 하향복점의 응력
 a, b : 강종에 따라 결정되는 정수

표 3. 강재구성식 계수

강종	E (kgf/cm ²)	E_{st}^P	ϵ_{st}^P	a	b
SS400	2.11×10^6	53000	0.0125	2730	0.0426
SS490	2.13×10^6	54300	0.0185	3440	0.0484

그림 11은 두께 $t=5.6\text{mm}$ 인 표준형 파형강판 이음부의 재하실험결과(포항 산업과학연구원, 1999)와 이 연구에서의 해석결과를 비교한 것이다. 이 그림으로부터 해석에 의한 파형강판 이음부의 하중 P 와 변위 δ 와의 관계는 소성영역이 어느 정도 진행된 영역에서 실험결과와 약간의 거동차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 해석모델의 경우 각 볼트구멍이 동시에 소성영역으로 진입하는 반면, 실험의 경우에는 볼트구멍의 제작 및 체결상의 오차로 인하여 각 볼트구멍마다 제작 각 소성영역으로 진입하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 일부영역을 제외하고 이상에서 서술한 해석방법은 실험결과와 거의 일치하게 되며, 따라서 파형강판 이음부의 거동을 파악하는데 타당한 것으로 판단된다.

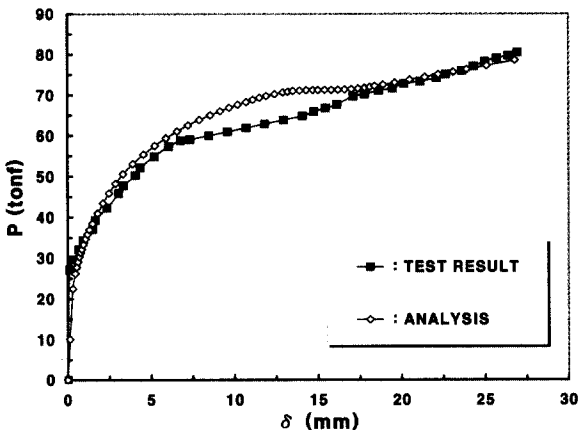


그림 11. 실험결과와의 비교

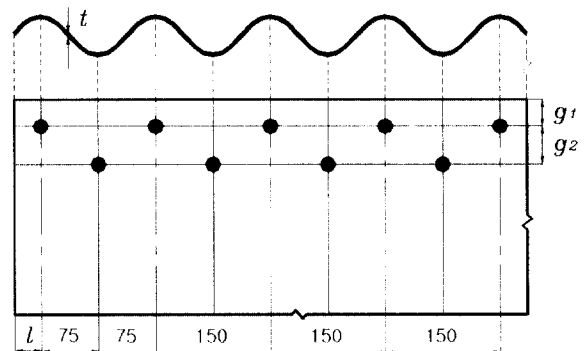
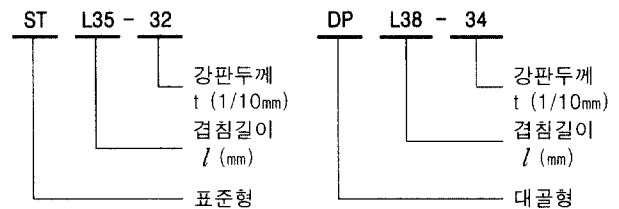
4. 설계변수의 영향

이하에서는 위에서 서술한 FEM 해석방법을 이용하여 파형강판 이음부의 겹침길이와 볼트간격에 관한 검토를 수행하였다. 여기서는 해석결과로부터 얻은 강도특성을 기초로 유리한 범위를 검토하고, 응력분포 특성에 관한 검토를 통하여 겹침길이와 볼트간격의 최소값을 설정하였다.

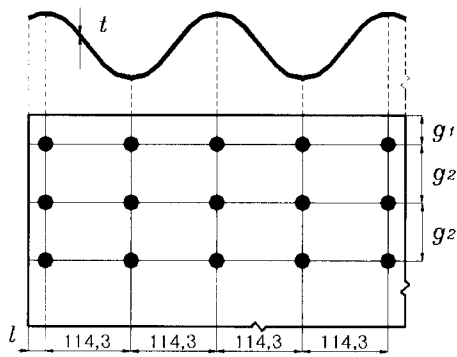
4.1 축방향 겹침길이의 영향

4.1.1 해석모델의 제원

그림 12는 겹침길이의 영향을 검토하기 위한 표준형과 대골형 해석모델의 제원을 나타낸 것이다. 표준형 모델의 경우에는 볼트배치를 지그재그 형태로 하였으며 이때의 볼트간격 g_1 과 g_2 는 현재의 제작기준에 따라 각각 35mm와 50mm로 하였다. 또한 대골형의 경우에는 그림 12(b)에 나타낸 바와 같이 각 열마다 볼트 3개씩을 배치하였으며 이때의 간격 g_1 과 g_2 는 각각 38mm와 76mm로 하였다. 해석에서는 축방향 겹침길이를 25mm에서 50mm까지 변화시키면서 각 두께별 거동특성을 파악하였다. 해석모델은 겹침길이 l 과 강판 두께에 따라 모델을 구분하였으며 표기 예는 다음과 같다.



(a) 표준형

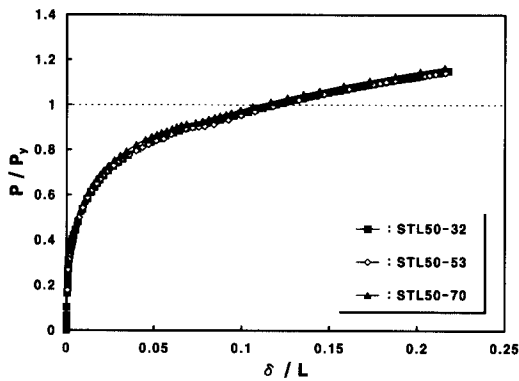


(b) 대골형

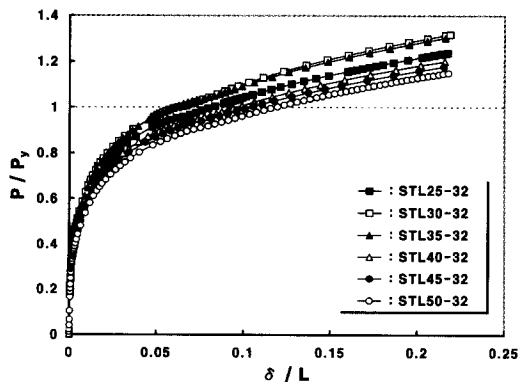
그림 12. 파형강판 해석모델

4.1.2 강도특성에 관한 축방향 겹침길이의 영향

그림 13은 표준형 파형강판의 강도특성에 관한 두께 t 와 겹침길이 l 의 영향을 나타낸 것이다. 이 그림에서 세로축은 하중 P 를 파형강판의 항복하중 P_y 로 나눈 값을 나타내며, 이때의 항복하중 P_y 는 파형강판의 두께별 단면적에 항복응력 $f_y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ 을 곱하여 구한 값이 된다. 또한 가로축은 발생 변위 δ 를 해석모델의 전체길이 L 로 무차원화한 것이다.



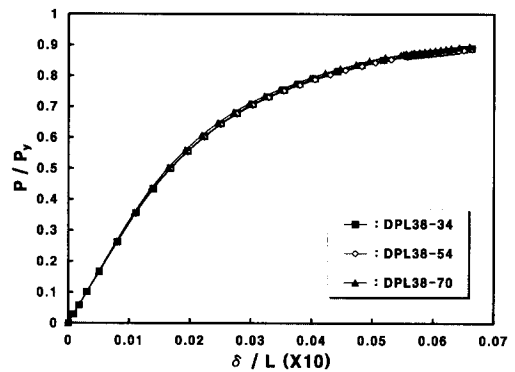
(a) 두께 t 의 영향



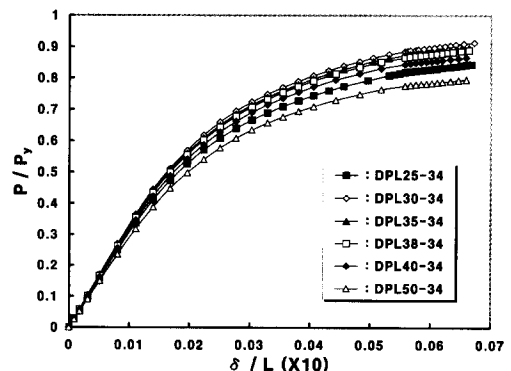
(b) 겹침길이 l 의 영향

그림 13. 표준형 파형강판의 강도특성

그림 13(a)는 축방향 겹침길이 l 을 현행의 제작기준이 되는 50mm로 고정하고 두께 t 를 3.2mm에서 7.0mm까지 변화시킨 경우 표준형 파형강판의 하중 P 와 변위 δ 와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에 나타낸 바와 같이 표준형 파형강판의 하중과 변위관계는 두께 t 의 변화에 따라 거의 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 그림 13(b)는 각각 두께 $t=3.2\text{mm}$ 인 표준형 파형강판의 하중-변위관계를 나타낸 것이다. 여기서는 축방향 겹침길이 l 을 현행의 제작기준인 50mm에서 점차로 감소시키면서 항복강도비 (P/P_y)와 강도특성을 비교하였다. 이 그림으로부터 겹침길이 $l=50\sim40\text{mm}$ 의 범위에서는 $P/P_y=0.58$ 정도로 거의 일정하게 되고, 항복후의 강도상승효과 역시 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이에 대하여 $l=35\text{mm}$ 와 30mm 의 경우에는 P/P_y 비가 각각 0.68 정도로 증가하는 경향을 나타내게 되며, 특히 $l=30\text{mm}$ 인 경우에는 강도측면에서 가장 효율적이라고 할 수 있다. 그러나 겹침길이 l 을 25mm까지 감소시켰을 경우에는 $l=30\text{mm}$ 의 경우에 비하여 P/P_y 의 값과 강도상승 효과가 크게 저하하게 된다. 이상의 결과로부터 파형강판의 강도 측면에서 효율적인 겹침길이 $l=30\sim35\text{mm}$ 정도가 되며, $l=40\text{mm}$ 인 경우에도 현행의 겹침길이 $l=50\text{mm}$ 와 비교하여 거의 거동차이가 없다고 할 수 있다.



(a) 두께 t 의 영향



(b) 겹침길이 l 의 영향

그림 14. 대골형 파형강판의 강도특성

그림 14(a)는 대골형 파형강판에 관한 하중과 변위 관계를 나타낸 것이다. 대골형 파형강판의 제작기준에 따라 겹침길이 $l=38\text{mm}$ 로 하고 두께 t 의 영향을 검토하였다. 이 그림으로부터 대골형 파형강판의 강도특성은 표준형과 마찬가지로 두께 t 의 변화에 따른 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 그림 14(b)는 겹침길이에 따른 대골형 파형강판의 강도특성을 나타낸 것이다. 여기서 두께 $t=3.4\text{mm}$ 로 일정하게 하고 겹침길이 l 을 50mm에서 25mm까지 감소시키면서 강도특성을 비교하였다. 이 그림으로부터 파형강판의 겹침길이 $l=50\text{mm}$ 인 경우 항복강도비 P/P_y 는 약 0.55 정도가 되고, $l=40\text{mm}$ 로 감소시킨 경우에는 P/P_y 의 비가 0.62가 되며 항복후 강도상승률도 $l=50\text{mm}$ 에 비하여 현저히 증가하게 된다. 이후 겹침길이 $l=30\text{mm}$ 까지 감소시킨 경우에는 겹침길이가 작아짐에 따라 강도특성 면에서 점차로 유리한 경향을 보이게 되며 $l=40\sim 30\text{mm}$ 의 범위에서는 강도특성상 유리한 것으로 판단할 수 있다. 한편 그림 13(b)와 그림 14(b)를 비교해보면 표준형 파형강판의 항복강도비(P/P_y)는 대골형에 비하여 증가하는 것을 알 수 있다.

4.1.3 응력분포특성에 관한 축방향 겹침길이의 영향

그림 15는 표준형 파형강판의 겹침길이 l 에 따른 축방향 연단 최대응력을 나타낸 것이다. 이상에서 서술한 바와 같이 해석모델의 두께 $t=3.2\text{mm}$ 로 일정하며 파형강판 축방향 및 원둘레방향의 1/2 부분인 강판 일반부의 응력이 $1/2 f_y$ 에 도달하였을 때의 연단부에서의 최대응력을 택하여 나타내었다. 겹침길이 $l=30\text{mm}$ 인 경우에는 겹침부 연단에서 발생하는 최대응력 $f_{\text{max}}=1712\text{ kgf/cm}^2$ 로서 허용응력 $f_a=1400\text{ kgf/cm}^2$ (SS400)를 상회하게 된다. 그러나 $l=35\text{mm}$ 인 경우에는 겹침부 연단의 $f_{\text{max}}=1314\text{ kgf/cm}^2$ 로서 허용응력 이하로 완화되는 것을 알 수 있다. 또한 강도특성이 현행의 제작기준($l=50\text{mm}$)과 거의 동일하게 나타난 겹침길이 $l=40\text{mm}$ 인 경우에는 $f_{\text{max}}=942\text{ kgf/cm}^2$ 가 발생하게 되며, 충분한 안전성을 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 이상의 해석결과로부터 파형강판의 축방향 겹침길이 $l=35\text{mm}$ 이상 확보하는 경우에는 강도 및 응력분포 등에서 안전하다고 판단된다.

그림 16은 대골형 파형강판의 겹침길이 l 에 따른 연단 최대응력을 나타낸 것이다. 해석모델의 두께 $t=3.4\text{mm}$ 로서 모두 일정하며 볼트배치 방법은 그림 12(b)에 나타낸 바와 같다. 이 그림으로부터 $l=30\text{mm}$ 인 경우에는 겹침부의 연단에서 발생하는 최대응력 $f_{\text{max}}=1916\text{ kgf/cm}^2$ 로서 허용응력 $f_a=$

1900 kgf/cm^2 (SS490) 정도가 되며, 이를 $l=35\text{mm}$ 로 증가시킨 경우에는 $f_{\text{max}}=1649\text{ kgf/cm}^2$ 로서 허용응력 이하로 완화되는 경향을 나타내게 된다. 또한 겹침길이 l 이 현행기준 38mm인 경우에는 $f_{\text{max}}=1433\text{ kgf/cm}^2$ 로서 충분히 안전적인 것으로 판명되었다. 따라서 이상의 해석결과로부터 대골형 파형강판의 경우 축방향 겹침길이 l 을 35mm 이상 확보하게 되면 강도특성 면에서 현행의 $l=38\text{mm}$ 의 경우와 거의 차이가 없게 되며 또한 허용응력 이하의 응력이 분포하게 됨으로서 안전하다고 할 수 있다.

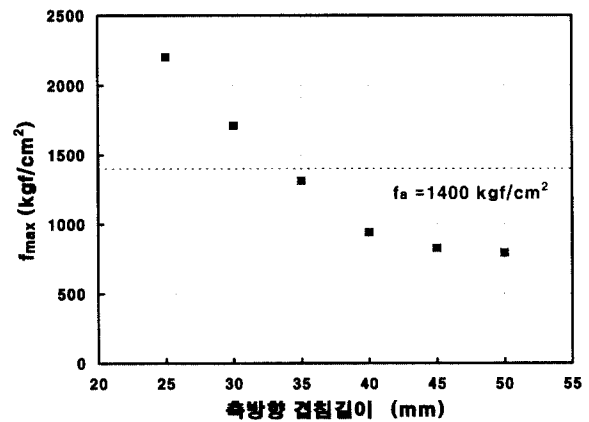


그림 15. 겹침길이 l 에 따른 연단 최대응력(표준형)

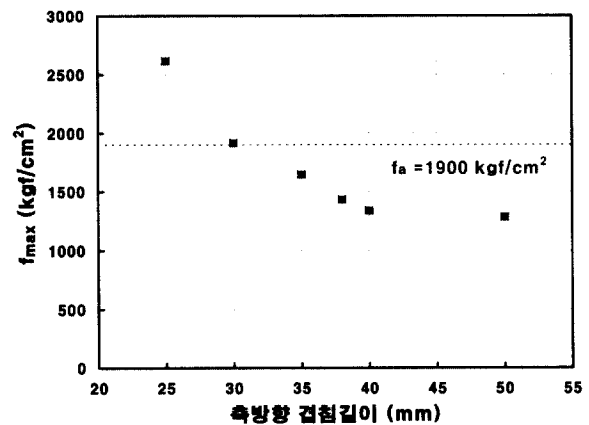


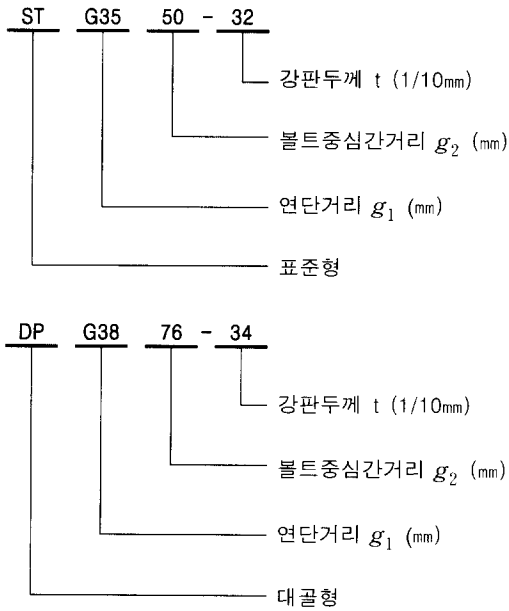
그림 16. 겹침길이 l 에 따른 연단 최대응력(대골형)

4.2 원둘레방향 연단거리 및 볼트간격의 영향

4.2.1 해석모델의 제원

이하에서는 그림 12에 나타낸 바 있는 원둘레방향 연단거리 g_1 과 볼트 중심간격 g_2 에 따른 파형강판의 거동특성을 검토하였다. 이 때 표준형 모델의 겹침길이 $l=35\text{mm}$, 대골형

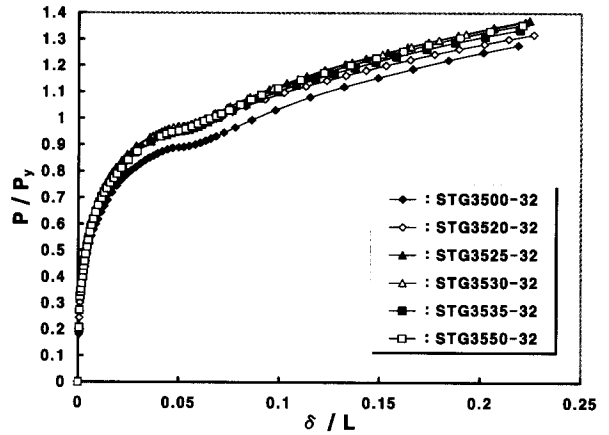
모델의 경우에는 $l=38\text{mm}$ 로 하였으며 해석모델의 표기 예는 다음과 같이 하였다.



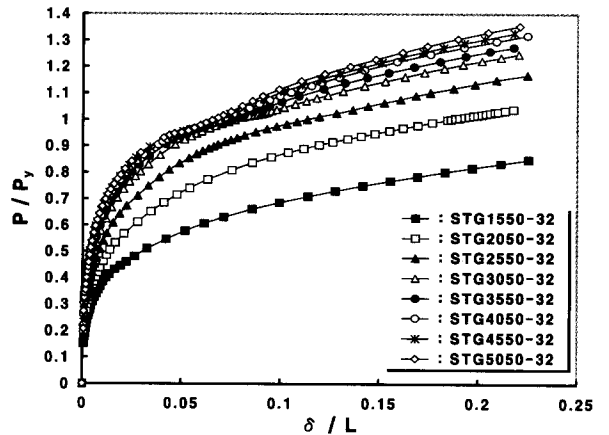
4.2.2 강도특성에 관한 연단거리 및 중심간격의 영향

그림 17(a)는 볼트중심으로부터의 원둘레방향 연단거리 g_1 을 현행의 제작기준인 35mm로 하고 볼트중심간격 g_2 의 영향을 검토한 것이다. 표준형 파형강판의 강도특성은 볼트 중심간격 g_2 를 현행의 제작기준인 50mm에서 20mm까지 감소시키는 경우에도 P/P_y 의 비와 항복 후의 강도상승효과 등은 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 또한 $g_2=0$ 이 되어서 볼트가 일렬배치로 되는 경우에는 강도특성이 약간 저하되는 경향을 나타내게 되나 그 영향은 미미하다고 할 수 있다. 따라서 볼트가 지그재그로 배치되는 표준형 파형강판의 경우에는 강도특성에 미치는 볼트 중심간격 g_2 의 영향은 작다고 할 수 있다. 그러나 볼트 중심간격이 너무 좁게 되면 시공이 곤란한 경우가 발생할 수도 있으며, 반대로 그 간격을 너무 넓게 하면 겹침부의 판 사이에 틈이 발생하여 부식이 생기거나 압축력에 의한 국부좌굴이 발생할 염려가 있으므로 볼트 중심간격 g_2 는 최소한 현행의 제작기준인 50mm를 확보하는 것이 타당하다고 판단된다. 그림 17(b)는 볼트 중심간격 $g_2=50\text{mm}$ 로 일정하였을 경우 연단거리 g_1 에 따른 표준형 파형강판의 강도특성을 비교한 것이다. 이 그림에 나타난 바와 같이 연단거리 $g_1=50\sim 30\text{mm}$ 범위의 표준형 파형강판의 강도특성은 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 g_1 이 25mm 이하인 경우에는 연단거리가 줄어들어 따라 항복강도비 P/P_y

가 현저히 감소하는 경향을 나타내며, g_1 에 따라 강도특성이 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 이상의 해석결과로부터 연단거리 g_1 을 30mm 이상 확보하는 경우에는 강도 측면에서 유리한 거동을 나타낸다고 할 수 있다.



(a) 볼트중심간격 g_2 의 영향 ($g_1=35\text{mm}$)



(b) 원둘레방향 연단거리 g_1 의 영향 ($g_2=50\text{mm}$)

그림 17. 강도특성에 관한 g_1 과 g_2 의 영향(표준형)

그림 18은 대골형 파형강판의 강도특성에 관한 연단거리 g_1 과 중심간격 g_2 의 영향을 비교한 것이다. 그림 18(a)에 나타난 바와 같이 연단거리 g_1 을 현행의 제작기준인 38mm로 하고 중심간격 g_2 를 변화시킨 경우에는 g_2 가 감소할수록 강도특성이 불리해지는 것을 알 수 있다. 또한 그림 18(b)로부터 중심간격 g_2 를 76mm로 일정하게 하고 연단거리 g_1 을 변화시킨 경우에도 g_1 이 감소할수록 강도특성이 불리하게 된다. 대골형의 경우에는 g_1 과 g_2 가 동시에 강도특성에 영향을 미치게 되며 볼트 중심간격 g_2 의 영향이 거의 없는 표준형

과는 차이를 나타내게 된다. 이는 표준형에서는 볼트를 지그재그로 배치하는데 비하여 대골형의 경우 일렬배치를 하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 19는 대골형 파형강판의 하중과 변위의 관계를 나타낸 것이며, 볼트 중심간격 g_2 는 연단거리 g_1 의 2배로 하는 현행 제작기준을 고려하여 해석모형을 작성하였다. 이 그림으로부터 연단거리 g_1 과 볼트 중심간격 g_2 가 감소함에 따라 항복강도비 P/P_y 는 점차로 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 또한 g_1 과 g_2 가 각각 35mm, 70mm 이상이 되는 경우에는 강도특성이 거의 일치하는 경향을 나타내고 있으나, g_1 과 g_2 가 그 이하인 범위에서는 P/P_y 와 항복후 강도 상승률의 감소폭이 점차로 증가하게 된다. 특히 현행의 제작기준이 되는 $g_1=38\text{mm}$, $g_2=76\text{mm}$ 인 경우에는 그 이상의 범위가 되는 강도특성과 거의 차이가 없으며 강도축면에서 비교적 효율적인 거동을 나타내는 것으로 판단된다.

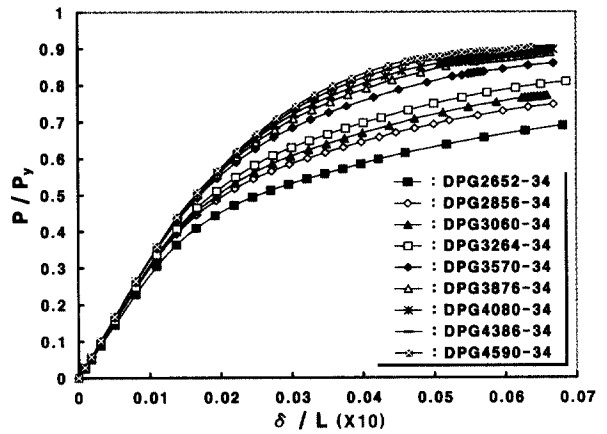
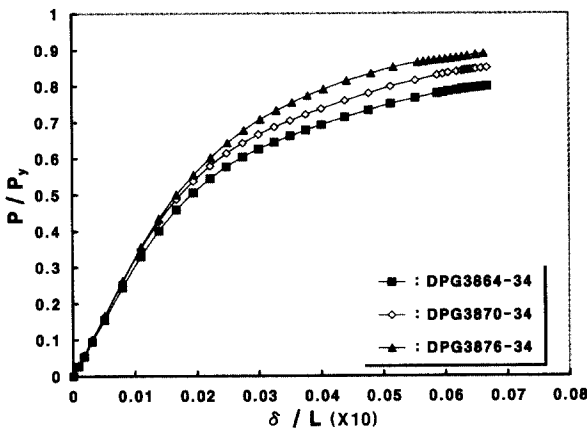


그림 19. 대골형 파형강판의 강도특성

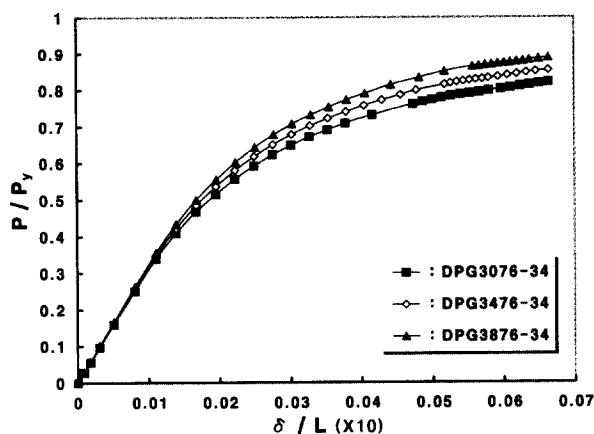
4.2.3 응력분포특성에 관한 연단거리및중심간격의 영향

그림 20은 $g_2=50\text{mm}$ 인 경우 표준형 파형강판의 원둘레방향 연단거리 g_1 에 따른 최대 연단응력의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에 나타난 바와 같이 $g_1=30\text{mm}$ 인 경우에는 볼트 구멍 주변의 소성영역을 따라 판의 연단에 이르는 부분에 응력이 집중하는 현상을 나타내며 이때 연단에서의 최대발생응력 $f_{\text{max}}=1856\text{ kgf/cm}^2$ 은 허용응력($f_u=1400\text{ kgf/cm}^2$)을 초과하게 된다. 그러나 연단거리 $g_1=35\text{mm}$ 로 증가하는 경우에는 응력집중 현상이 볼트구멍 주변으로 감소되는 경향을 나타내며 $f_{\text{max}}=1319\text{ kgf/cm}^2$ 로서 응력이 허용응력 이하로 완화되게 된다. 또한 $g_1=40\text{mm}$ 이상인 경우에는 볼트 구멍 주변의 소성영역이 점차로 감소하는 것을 볼 수 있으며 연단부의 응력은 크게 완화된다. 따라서 이상의 해석결과로부터 볼트중심으로부터의 연단거리 g_1 을 35mm 이상을 확보한 표준형 파형강판의 경우에는 허용응력을 만족하므로 g_1 의 최소거리로서는 35mm가 타당하다고 할 수 있다.

그림 21은 대골형 파형강판의 원둘레방향 연단거리 g_1 과 볼트 중심간격 g_2 에 따른 최대연단응력을 나타낸 것이다. 이 그림에서 가로축은 볼트중심간격 g_2 를 나타내며 이에 대응하는 연단거리 g_1 은 중심간격 g_2 의 1/2이 된다. 그림에 나타난 바와 같이 볼트 중심간격 $g_2=76\text{mm}$ ($g_1=38\text{mm}$)인 경우, 연단부에 발생하는 최대응력 $f_{\text{max}}=1588\text{ kgf/cm}^2$ ($f_u=1900\text{ kgf/cm}^2$) 정도가 되며, 그 이상의 볼트간격을 확보하는 경우에도 최대 발생응력의 완화효과는 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그러나 g_2 를 70mm($g_1=35\text{mm}$)로 감소시킨 경우에는 접침부의 연단에 발생하는 $f_{\text{max}}=1941$



(a) 볼트중심간격 g_2 의 영향($g_1=38\text{mm}$)



(b) 원둘레방향 연단거리 g_1 의 영향($g_2=76\text{mm}$)

그림 18. 강도특성에 관한 g_1 과 g_2 의 영향(대골형)

kgf/cm²로서 허용응력을 약간 초과하게 되며, $g_2 = 60\text{mm}$ ($g_1 = 30\text{mm}$)의 경우에는 볼트주변의 응력집중 현상이 현저히 증가하게 되며 발생응력 또한 $f_{\text{max}} = 2851 \text{ kgf/cm}^2$ 정도로 크게 증가하게 된다. 따라서 이상의 해석 결과로부터 대골형 파형강판의 연단거리 g_1 과 볼트 중심간격 g_2 는 현행의 제작기준인 38 mm 와 76 mm 를 그대로 하는 것이 타당하다고 판단된다.

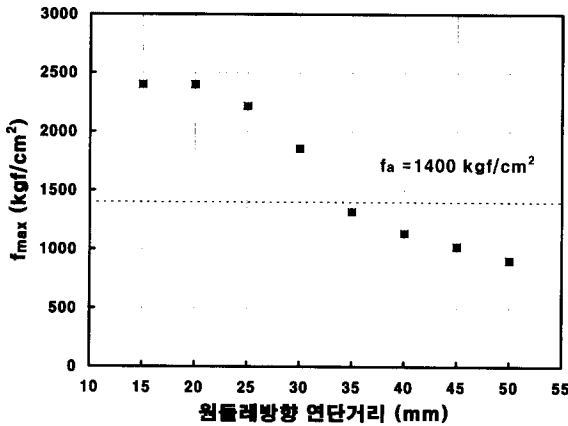


그림 20. 연단거리 g_1 에 따른 최대 연단응력 (표준형, $g_2 = 50\text{mm}$)

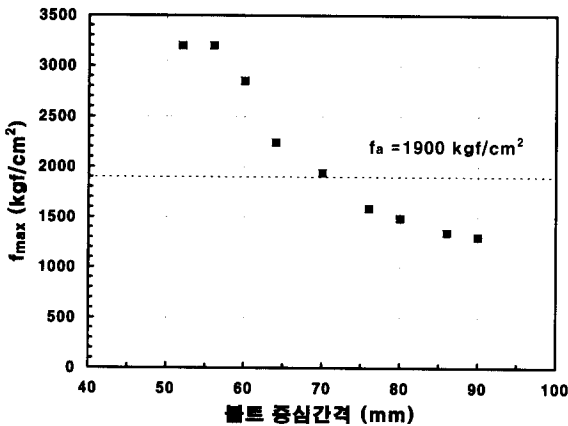


그림 21. 연단거리 g_1 과 볼트 중심간격 g_2 에 따른 최대 연단응력(대골형, $g_1 = g_2/2$)

4.3 파형강판의 겹침길이 및 볼트간격에 대한 검토

4.3.1 축방향 겹침길이

파형강판의 축방향 겹침길이 l 은 볼트중심으로부터 겹침부 연단까지의 수평거리인 l 을 나타낸다. 이러한 겹침길이 l 은 이상에서 검토한 바와 같이 강도 및 응력분포 특성에 관한 검

토로부터 표준형과 대골형 모두의 경우에서 35mm 이상 확보하게 되면 안전하다고 판단된다. 또한 이러한 값들은 표 1에 나타난 Nakai 등에 의한 평판 이음부에서의 응력 직각방향의 연단거리 $e_2 \geq 30\text{mm}$ ($d = 20\text{mm}$)와 비교하여 5mm 정도 증가하는 것이 되며, 이는 파형방향으로의 강성이 일반 평판에 비하여 감소하게 되는 파형강판의 특성을 고려한 것이라고 할 수 있다.

4.3.2 원둘레방향 연단거리 및 볼트중심간격

파형강판의 볼트중심으로부터의 연단거리 g_1 은 주로 연단에서의 파단을 방지하기 위하여 필요하게 된다. 이상의 4.2절에서 검토한 바와 같이 표준형의 경우 $g_1 \geq 35\text{mm}$, 대골형의 경우에는 $g_1 \geq 38\text{mm}$ 를 확보하게 되면 강도특성상 유리한 거동을 나타내게 되며 연단부에서의 작용응력 또한 허용응력 이하로 분포하게 되어 안전한 것으로 판단된다. 또한 이는 미국의 AISI 및 캐나다의 CSA 등에 의한 제안값들과 동일하거나(대골형) 약 3mm 정도 증가한 값이 되며(표준형), Nakai 등이 제안한 평판 이음부의 연단거리 $e_1 \geq 40\text{mm}$ 에 비하여 약간 감소하게 된다. 한편 볼트의 중심간격 g_2 는 시공성과 국부좌굴 등을 고려하여 규정할 필요가 있다. 볼트가 지그재그로 배치되어 있는 표준형 파형강판의 경우 강도특성에 관한 중심간격 g_2 의 영향은 거의 없다고 할 수 있다. 따라서 시공조건에 따라 g_2 의 간격을 조정할 수 있는 여유가 있다고 할 수 있으나 현행의 제작기준인 $g_2 \geq 50\text{mm}$ 로 하는 것이 볼트시공에 있어 타당한 것으로 판단된다. 또한 대골형의 경우에는 그림 22(b)에 나타난 바와 같이 일렬로 볼트를 배치하도록 규정되어 있으며, 이러한 경우 볼트 중심간격 g_2 는 볼트시공을 고려하여 연단거리 g_1 의 두 배 ($g_2 = 2 \times g_1$) 이상을 확보하도록 하여 $g_2 \geq 76\text{mm}$ 로 하는 것이 안전하다고 할 수 있다. 표 4는 이상에서 검토로부터 파형강판의 겹침길이 및 볼트간격을 정리한 것이다.

표 4. 파형강판의 겹침길이 및 볼트간격의 제안

구 분	축방향 겹침길이 l (mm)	원둘레방향 간격	
		g_1 (mm)	g_2 (mm)
표준형	제안값	≥ 35	≥ 50
	KSD3590	≥ 50	≥ 50
	CSA	≥ 50	≥ 50.8
대골형	제안값	≥ 35	≥ 76
	KSD3590	·	·
	CSA	≥ 38	≥ 76

5. 결 론

본 연구에서는 파형강판의 겹침길이 및 볼트중심간격에 관한 기존 규정의 타당성을 검토하였으며, 유한요소해석을 통하여 얻은 주요사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 표준형 파형강판의 강도특성은 축방향 겹침길이 $l=35\sim 30\text{mm}$ 인 경우 가장 유리하게 되며 겹침부 연단에서의 발생응력을 고려하면 $l=35\text{mm}$ 이상 확보하는 것이 필요하다.
- (2) 대골형인 경우에는 강도 측면에서 겹침길이 $l=40\sim 30\text{mm}$ 범위가 효율적이라고 할 수 있으며 $l=35\text{mm}$ 이상인 경우에는 안전하다고 할 수 있다.
- (3) 볼트가 지그재그로 배치되어있는 표준형 파형강판의 경우에는 주로 연단거리 g_1 만이 강도특성에 영향을 미치게 되며, 일렬로 볼트가 배치되어있는 대골형의 경우에는 연단거리 g_1 과 중심간격 g_2 가 모두 영향을 미치게 된다.
- (4) 표준형 파형강판의 원둘레방향 연단거리 g_1 은 최소 35mm 이상 확보하는 것이 필요하며, 중심간격 g_2 에 대해서는 시공성 등을 고려하여 현행의 제안값과 동일한 50mm 이상으로 하는 것이 타당하다고 판단된다.
- (5) 대골형 파형강판의 연단거리 g_1 및 볼트 중심간격 g_2 는 각각 현행의 제작기준인 $g_1=38\text{mm}$, $g_2=76\text{mm}$ 를

사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

- (6) 표준형 및 대골형 파형강판의 항복강도비(P/P_y)에 관한 두께 t 의 영향은 거의 없다고 할 수 있으며, 표준형의 P/P_y 비는 대골형에 비하여 증가하게 된다.

참 고 문 헌

- 한국도로공사(2001), 지중강판구조물 설계 및 시공지침
 한국표준협회(1981), KS 파형강판및파형섹션
 (주)평산SI(2003), 파형강판 Handbook
 포항 산업과학연구원(1999), 파형강판 이음부강도 시험성적서
 김상식(1999), 구조체의 탄성해석, 仁荷大學校 出版部
 박연수, 서병철, 김병하, 김응록(2000), 파형강 지중구조물의 안전성 평가기법 연구, 大韓土木學會 論文集, Vol.20 No.7
 황원섭, 위영민, 정대안(2003), 파형강판의 파형방향 인장 특성, 대한토목학회 논문집, 제23권 6A호, pp.1239-1245
 中井 博, 北田俊行(1992), 鋼橋設計の基礎, 共立出版株式會社
 西村 宜男(1998), 壓延變厚鋼板を用いた構造部材の強度評價と設計法に関する研究, 大阪大學研究成果報告集
 AISI(1984), Handboool of Steel Drainage & Highway Construction Products
 CSA(1992), CSA Standard G164-M92

(접수일자 : 2004. 1. 8 / 심사일 2004. 1. 30 /
 심사완료일 2004. 5. 25)