

## 파형강판 볼트 이음부의 피로성능에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on the Bolted Connection Fatigue Capacity of Corrugated Steel Plates

오 흥 섭<sup>1)\*</sup>  
Hong-Seob Oh

#### Abstract

Corrugated steel plate structure, which is built by assembling corrugated steel plate segments with bolts on site and filling the surroundings with quality soil, is widely used for buried structures as a eco-corridors, small bridges, and closed conduits. This experimental study is dealt with the static and fatigue performance of bolt connected corrugated steel plates under flexural loading. The experimental variables to verify the fatigue performance are bolt diameters and detailing of connection such as washer and the corrugation dimension of specimens has a 400×150 mm. The experimental ultimate strength of specimens under static loading was higher than the theoretical strength and all specimen failed by a bearing and tearing failure of bolt hole of upper plate. Therefore, a fatigue tests of specimens had 6.0mm and 7.0mm thickness was conducted in which the load range was up to 209kN and 516kN, respectively. From the fatigue test, failure patterns are changed from plate bearing and tearing which is a typical failure pattern of static failure to a bearing failure of plate and shear failure of bolt, and experimental fatigue limit at  $2 \times 10^6$  cycles is about 85MPa.

Keywords : Corrugated steel plate, Fatigue performance, Flexural test, Shear failure of bolt, Static performance, Tearing failure of plate

#### 1. 서론

일반적인 개착식 터널을 대신하여 시공되는 파형강판구조물은 경제성과 시공의 신속성 등으로 인하여 소규모 교량, 생태통로, 빗물저류조 및 방호구조물 등에 많이 활용되고 있다. 10m 이하의 단지간 지중 파형강판 구조물은 White and Layer (1960)이 제시한 압축링 모델과 같이 압축응력이 지배적으로 작용하게 된다. 그러나 지간이 15m 이상 되는 경우에는 Fig. 1과 같이 연성구조물의 특성상 압축응력대 휨응력비가 커지게 되고, Duncan (1979)은 낮은 토피고(지간의 12.5%에서 25%)로 시공할 경우 구조물 주변토압분포가 활하중의 재하량에 따라 달라지는 비정형적인 분포를 나타내며 이에 따른 휨모멘트가 발생하므로 장지간 구조물은 압축력과 함께 휨모멘트에 대한 저항력을 고려하여야 한다고 제시하였다.

특히 Fig. 2와 같이 구조체 상부에 동적하중이 반복적으로 작용하는 경우에는 시공상의 뒷채움재의 다짐 불량, 토피고의 부족 등에 의한 시공불량사례 등과 함께 동적 피로휨응력에 의한 연성구조체의 피로손상이 발생할 수 있다 (Mohammed and Kennedy, 2009; Amer, 2012).

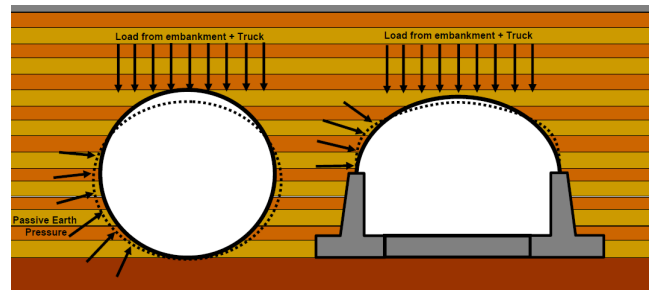


Fig. 1 Typical deformation shapes of buried corrugated steel shell structures

1) 정희원, 경남과학기술대학교 교수, 교신저자

\* Corresponding author : opera69@chol.com

· 본 논문에 대한 토의를 2014년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.



Fig. 2 Buried corrugated steel structures subjected to train

파형강판 구조체는 현장에서 조립, 일체화되는 연성구조체이기 때문에 사용상태에서도 볼트연결부 거동의 지배를 받게 된다 (Oh and Nam, 2012). 본 연구에서는 파형강판 볼트 연결부에 반복적인 휨하중이 작용하는 경우의 피로거동 특성을 실험적으로 규명하고자 하였다. 실제의 파형강판 구조체는 최대지간 20m 내외에서 일정정도의 곡률을 갖도록 시공되기 때문에 사용 상태에서 지점부 구속에 의한 압축응력과 휨응력이 동시에 작용하게 된다. 따라서 CNS/CSA-S6-06 (2006)에서는 정적설계시 압축과 휨거동을 평가한 후 Eq. 1을 적용하여 설계하도록 규정하고 있다.

$$\left[ \frac{T_f}{P_{pf}} \right]^2 + \left| \frac{M_f}{M_{pf}} \right| \leq 1.0 \quad (1)$$

여기서,  $M_f$ : 지중 파형구조물의 단위길이당 계수모멘트 ( $\text{kN} \cdot \text{m/m}$ ),  $M_{pf}$ : 파형강판구조물의 계수소성모멘트 ( $\text{kN} \cdot \text{m/m}$ ),  $P_{pf}$ : 좌굴을 고려하지 않은 파형강판구조물의 계수압축강도 ( $\text{kN/m}$ ),  $T_f$ : 단위길이당 계수하중에 의한 최대 인장력 ( $\text{kN/m}$ )

파형강판 구조물의 피로설계는 CNS/CSA-S6 (2006), CSA-S6 Commentary (2006)와 AASHTO LRFD Code (2002)에 명확히 규정되어 있지 않으며, 지간 8.0m 이상에 대해서만 피로검토를 수행하도록 하고 있다. 일반적인 강구조물의 피로설계는 Eq. (2)를 사용하여 활하중에 대한 인장 및 휨응력을 검토하도록 하고 있으며, 설계기준상에 상세별 피로등급이 제시되어 있다. 그러나 파형강판 구조물과 같이 면외 휨에 의해 인장과 압축응력이 동시에 발생하는 구조체의 볼트이음에 대한 피로등급은 제시되어 있지 않으며, 면외 휨에 의한 연결부의 피로파괴 메커니즘 역시 충분히 정립되어 있지

않은 상태이다.

$$(\nabla F)_n = \left( \frac{A}{N} \right)^{1/3} \geq \frac{1}{2} (\nabla F)_{TH} \quad (2)$$

여기서,  $N$ :  $(365)(75\text{years})n(ADTT)_{SL}$ ,  $A$ : 피로수명상수,  $(ADTT)_{SL}$ : 1차선의 1일 평균 트럭 통행량,  $(\nabla F)_n$ : 피로저항응력 (MPa), and  $(\nabla F)_{TH}$ : 피로인장응력

파형강판 구조체의 볼트 연결부의 피로성능은 골의 간격과 깊이가 각각 150mm와 50mm내외인 중골의 경우 Amer (2012)와 Mohammed and Kennedy (2009) 등에 의하여 수행되었으며, 볼트의 배열 위치, 간격 등에 의해 피로수명이 변화하는 것을 실험적으로 증명하였다. 그러나 장지간 구조체에 많이 사용되는 골깊이 350mm이상의 대골형 파형강판 이음부의 피로수명 연구는 연구가 많이 진행되지 않았으며, 본 연구에서는 강판 두께, 휨응력 수준 등을 변수로 하여 동일진폭 휨하중에 의한 대골형 파형강판 연결부의 피로 수명 및 파괴 형태를 실험적으로 평가하고자 하였다.

## 2. 파형강판 이음부 정적거동

### 2.1 실험체 형상 및 제원

본 연구에서 고려한 파형강판의 제원 및 실험체의 연결 조건은 Fig. 3에 나타내었다. 실험체는 골간격과 깊이가  $400 \times 150\text{mm}$ 인 파형을 갖고 있으며, 길이 1,012mm, 폭 1200mm 제원의 두 개의 파형강판을 ASTM A761 (2003)과 AISI (2002)에 따라 3열로 볼트이음하였다. 하중재하시의 변위 및 이음부의 변형을 측정하기 위하여 실험체 중앙부에 변위계를 설치하였으며, 볼트구멍 주위에서의 강판 국부변형을 측정하기 위하여 Fig. 3에 도시한 것과 같이 강판의 인장부 (Valley)와 압축부 (Crest) 파형 볼트구멍 주위에 주응력 방향으로 변형을 게이지를 설치하였다. 강판의 재질 및 실험체 단면 특성은 Table 1에 나타내었으며, 볼트의 역학적 성질은 AISI (2002)에 제시되어 있으며, Table 2에 정리하였다.

파형강판 이음부의 연결상세에 따른 정적거동 특성을 평가하기 위하여 Table 3의 변수에 대하여 정적 휨실험을 수행하였다. 강판 두께는 6mm와 7mm에 대하여 19mm 볼트 체결시 강판사이의 국부압력 분산과 시공시 효율성 등을 위하여 와서, 개스킷 및 슬롯홀을 사용한 경우의 거동을 같이 분

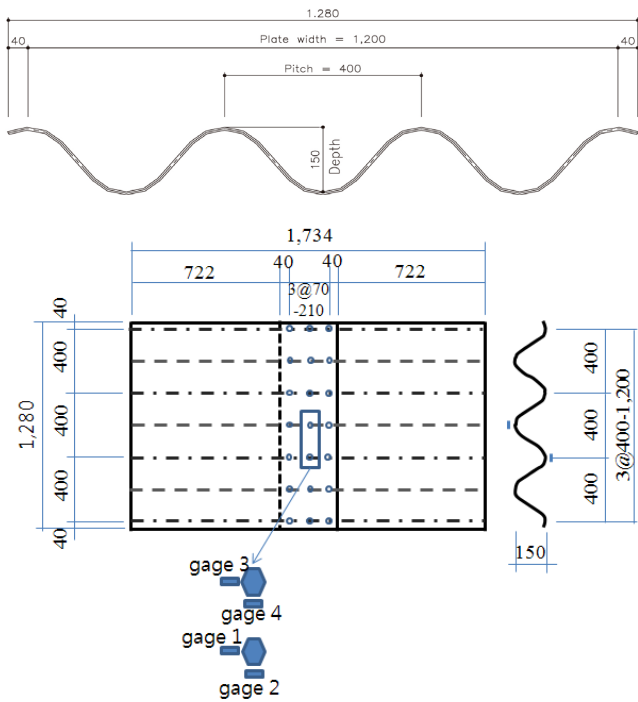


Fig. 3 Configuration and detailing of connected corrugated steel plates

Table 1 Material and sectional properties of corrugated steel plate specimens

material	Material properties			
	Yield Strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	elongation (%)	
			t ≤ 5	5 < t ≤ 16
ASTM A1018 Grade40	≥285	≥380	≥19	≥15

Thickness	(mm)	6.00	7.00
Area	(mm <sup>2</sup> /mm)	8.260	9.640
Modulus of section	(mm <sup>3</sup> /mm)	283.71	329.69
Plastic modulus of section	(mm <sup>3</sup> /mm)	390.57	456.35
Moment of inertia	(mm <sup>4</sup> /mm)	23.15 × 10 <sup>3</sup>	27.07 × 10 <sup>3</sup>
Radius of Gyration	(mm)	52.95	52.99

Table 2 Mechanical properties of bearing bolt

	Nominal strength	Minimum strength	Proof strength	Fracture Elongation
bearing bolt	1000MPa	1040MPa	830MPa	9%

석하였으며, 22m 볼트 체결시의 휨 성능도 같이 평가하였다. 하중재하는 1,000kN 용량의 액츄에이터 (Actuator)를 사용하여 Fig. 4에 나타난 것과 같이 변위제어방식의 4점 휨재하를 실시하였으며, 하중가력점 사이의 거리는 515mm로 고

Table 3 Connection detailing for flexural test

Size	Connection detail	Specimen	
1,280mm × 1,734mm	19mm	2	ASTM A1018
	19mm-washer	2	
	19mm-gasket	2	
	19mm-slot hole	2	
	22mm	2	



Fig. 4 Test setup and loading apparatus

Table 4 Theoretical strength of bolt connected corrugated steel plates

properties	Yield Strength (kN/m)	Ultimate Strength (kN/m)	Bolts at bottom fiber		
			Shear Strength (kN/m)	Bearing Strength (kN/m)	
thickness	19mm	314.0	576.4	598.1	515.9
	22mm			819.4	566.8
6t	19mm	364.9	673.4	598.1	601.9
	22mm			819.4	661.2

정하였다. 하중재하시 지점과 가력점은 강판에 응력이 충분히 분배될 수 있도록 강판과 동일한 형태를 갖도록 제작하였다.

## 2.2 실험결과 및 고찰

파형강판 이음부의 기준강도를 평가하기 위하여 Table 1 과 2의 재료성질을 적용하여 국부좌굴 등을 고려하지 않고  $M = f \cdot Z$ 를 적용하여 실험체의 이론적인 항복강도와 극한 강도를 평가하였으며, 단위폭 (m)당 하중으로 환산하여 Table 4에 정리하였다. Table 4의 극한 강도는 인장강도와 단면소성계수를 적용하여 전단면이 소성상태일때의 이론적인 최대강도를 평가한 것이다. 여기서,  $f$ 는 항복강도 및 인장강도이며,  $Z$ 는 단면계수 또는 소성단면계수를 적용하였다. 볼트연결부의 파괴강도는 AASHTO-LRFD (2002) 기준에 따라 다음의 식으로 평가하였다. 볼트 파괴 해석시 인장력과 압축력에 대한 연결볼트는 각각 9개와 12개로 가정하여 위험단면인 인장력에 대한 이론하중을 산정하였다.



Fig. 5 Typical failure pattern under static loading

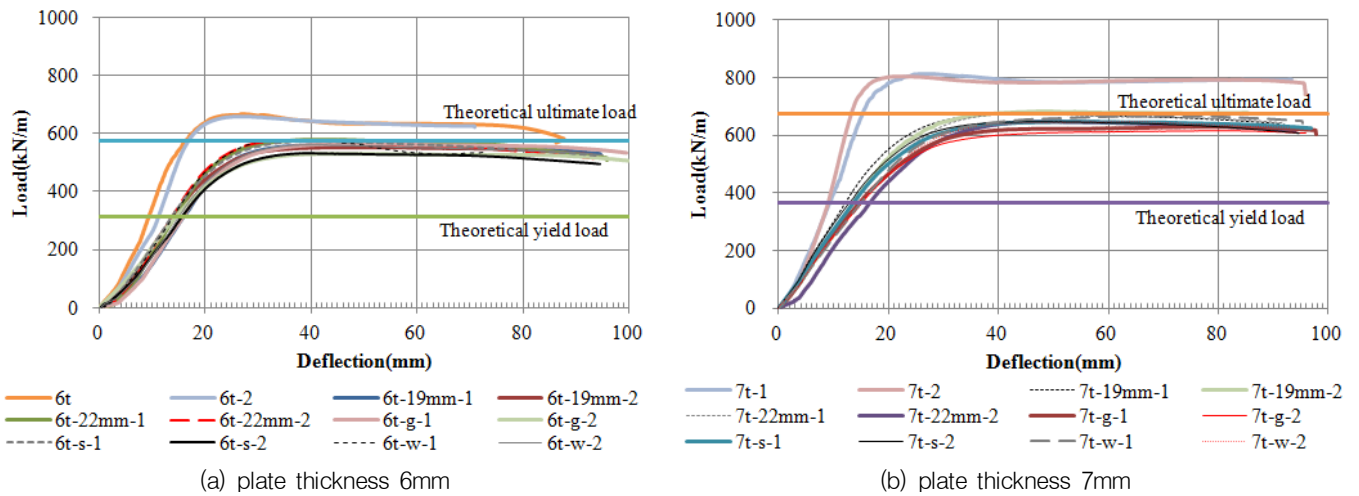


Fig. 6 Load-deflection relationships of 6 and 7mm plate specimens

$$\text{전단파괴} : R_n = 0.38N_s f_{vub} A_b \quad (3)$$

$$\text{지압파괴} : R_n = \begin{cases} 1.2L_c t f_u & L_c \leq 2.0d \quad \text{or} \quad s \leq 2.0d \\ 2.4d t f_u & L_c \geq 2.0d \quad \text{and} \quad s \geq 2.0d \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $N_s$ : 전단면의 수,  $f_{vub}$ : 볼트의 최소인장강도,  $A_b$ : 볼트 공칭단면적,  $f_u$ : 강판의 인장강도,  $d$ : 볼트의 공칭 직경,  $t$ : 강판의 두께,  $L_c$ : 지압력이 작용하는 방향의 부재 단부와 볼트구멍 사이의 순간격,  $s$ : 볼트구멍사이의 순간격

실험결과 이론적 파괴형태는 강판의 두께와 볼트의 직경에 관계없이 강판의 휨파괴가 먼저 발생하였다. 최종적인 파괴형태의 경우에는 두께 6mm 강판의 경우에는 휨파괴강도 이후 볼트의 지압에 의하여 부재가 파괴되는 것으로 나타났으나, 7mm 강판의 경우에는 19mm 볼트 사용시 극한강도 이후에 볼트 전단과 지압이 거의 동시에 발생하는 것으로 계산되었다. 실험후 파괴형태는 Fig. 5에 도시하였으며, Fig. 6과

Table 5에는 하중-변위관계와 결과를 정리하였다. 인장부 볼트의 지압파괴후 압축부의 국부좌굴에 의하여 최종적인 파괴에 도달하였으며, 최대강도 이후 연성적인 파괴거동을 나타내었다.

Table 5에 나타난 것과 같이 무이음된 강판의 실험 극한강도는 각각 평균 663.9kN/m와 806.5kN/m로 평가되었으며, 소성단면에 대한 이론적 극한강도를 약 10% 정도 상회하는 것으로 분석되었다.

볼트이음실험체에서 7-22mm와 7t-22mm를 제외한 실험체는 모두 19mm 볼트로 이음하였으며, 상세에 따라 볼트만을 연결한 경우 (6t-19mm, 7t-19mm)와 gasket, slot hole 또는 washer를 적용한 경우로 구분하였다.

볼트 이음된 실험체의 평균 극한강도의 경우에는 무이음판의 76.8~85.8%의 휨강도를 나타내었으나, 이음방법에 관계없이 휨항복강도의 123%이상을 확보한 것으로 나타나 이음부 휨강도는 충분한 것으로 판단된다. Table 5의 실험체 평균 최대응력은 소성단면계수로부터 산정된 것으로 이음실

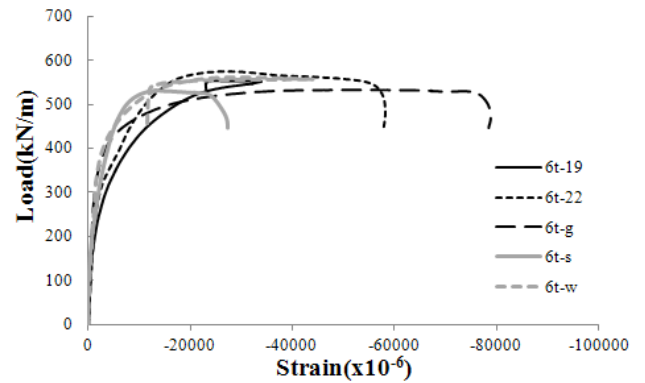
Table 5 Static flexural test results of 6 and 7mm plate specimens

Plate Thickness	Max. Load (kN/m)	Ave. Max. Stress (MPa)	Displ. at Max. Load (mm)	Ave. Initial Stiffness (0.5 P <sub>u</sub> /δ)
6t	668.1	437.7	26.9	31.5
	659.6		26.6	
6t-19mm	562.7	367.7	57.9	20.6
	552.6		49.5	
6t-22mm	578.6	380.3	41.0	22.0
	575.2		36.0	
6t-gasket	566.7	362.5	49.2	20.6
	533.1		45.0	
6t-slot hole	573.3	364.5	39	21.1
	532.5		39.5	
6t-washer	578.2	375.6	36.3	21.2
	561.2		39.5	
7t	811.4	455.0	26.1	40.8
	801.5		21.7	
7t-19mm	672.9	382.5	43.6	28.5
	683.0		47.5	
7t-22mm	673.0	372.6	43.3	24.2
	647.6		50.2	
7t-gasket	627.9	351.0	77.9	24.9
	616.2		80.10	
7t-slot hole	648.2	366.0	57.3	28.0
	649.2		46.1	
7t-washer	668.5	370.6	69.3	24.3
	645.0		65.1	

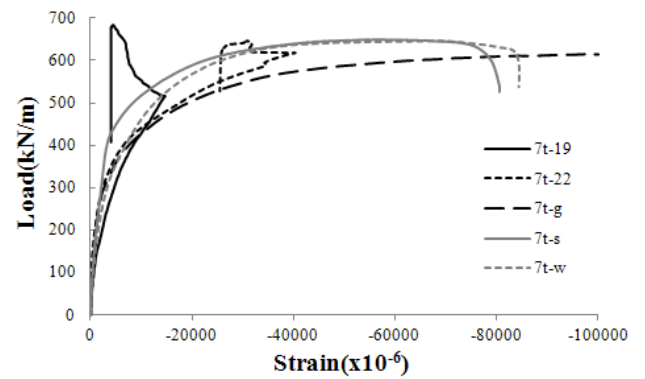
험체의 경우 강판 극한강도의 90%이상 응력이 발생하는 것으로 관찰되어 강도측면에서 연결부의 적정성은 충분한 것으로 판단된다.

극한강도의 50%하중에서의 변위비 (deflection ratio)를 초기 강성 ( $\frac{P_u}{2\delta}$ )으로 정의하여 볼트 연결부의 미끄러짐 등에 의한 강성의 저하 정도를 평가하였다. 전체적으로 이음방법에 따른 강성저하의 차이는 크지 않았으나, 무이음판에 비하여 30.2~40.7% 정도의 초기강성저하 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 볼트구멍의 여유분과 볼트 및 강판의 지압응력에 의한 국부변형에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 무이음판과 볼트이음 실험체의 하중-변위 관계를 도시하였으며, 모든 실험체가 극한강도 이후에도 충분히 연성적인 거동을 하는 것으로 관찰되었다. 변위의 경우 무이음된 6mm와 7mm 파형강판의 이론 항복강도에서의 탄성변위는 약 16mm내외로 계산되었으나, 이음부 실험체의 변위



(a) plate thickness 6mm



(b) plate thickness 7mm

Fig. 7 Load-strain relationships of 6 and 7mm plate specimens at the gage 1

는 약 30mm로 볼트 이음부의 변형에 기인한 것으로 판단되며, 하중-변위곡선에서 초기 변위를 제외하면 이론값의 거의 유사하게 나타난 것을 알 수 있다.

Fig. 6에 나타난 것과 같이 모든 실험체가 구조적 항복이후 볼트연결부 주위에서 강판의 지압과파괴와 파형 상부에 국부 좌굴이 발생하였으며, 볼트 전단에 의한 취성 파괴는 발생하지 않았다. 정적 실험을 통하여 강판 이음부의 휨강도는 볼트 직경의 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났으며, 개스킷, 슬롯홀 또는 와셔를 적용할 경우에는 응력집중 등에 의한 강도저하가 발생할 수 있는 것으로 관찰되었다.

Fig. 7에는 파형강판 인장부의 볼트구멍 외측에 설치한 gage1의 변형을 나타낸 것이며, 하중-변형율의 변화는 거의 유사한 것으로 나타났으나, 볼트로만 연결된 실험체 (6t-19, 6t-22, 7t-19와 7t-22)의 경우에는 일정하중 이후 지압변형이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 볼트의 풀림 등에 의하여 국부적인 지압변형이 감소되었기 때문인 것으로 판단되며, 와셔, 개스킷 및 슬롯홀의 경우에는 최종 파단시까지 변형율이 지속적으로 증가함으로서 파괴시까지 충분한 체결력을

유지하는 것으로 판단된다.

### 3. 이음부의 피로거동

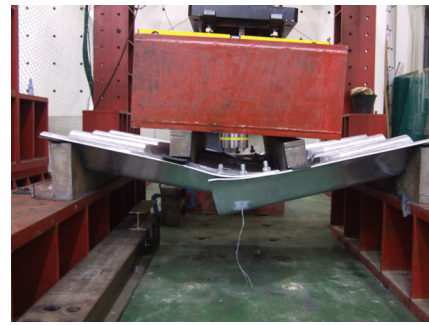
#### 3.1 반복하중 수준

정적 실험결과로부터 피로실험 변수와 반복하중의 수준을 Table 6과 같으며, 하중은 조화하중의 형태로 1Hz의 속도로 가력하였다. 두께 6mm 강판의 경우에는 연결부 상세에 따른 영향을 보기 위하여 볼트만 연결한 경우와 와셔와 슬롯홀을 적용한 경우를 대상으로 하였고, 가스킷의 경우에는 정적 실험의 결과 강도가 낮게 나타났기 때문에 제외하였다. 두께 7mm 강판의 경우에는 이음부 상세에 대한 하중 수준을 변화시켜 실험을 수행하였으며, 직경 22mm 볼트의 경우에는 19mm 볼트의 최저하중 수준시의 피로거동과 비교, 검토하고자 하였다.

#### 3.2 피로파괴형태

Fig. 8에는 최종피로파괴형태를 나타내었으며, 각 실험체의 하중반복횟수와 파괴형상의 변화는 Table 7에 정리하였다. 실험체의 대표적인 파괴 형태는 볼트구멍에서의 지압과 피후 볼트 파단과 강판의 인장피로파단에 의하여 최종적으로 파괴되었다.

Fig. 8에 나타낸 것과 같이 이음부 하면의 강판은 인장파괴가 발생하지 않은 반면 상부 강판 이음부의 내측 볼트구멍에서 발생한 피로인장균열에 의해 파괴되었다. 와셔를 적용



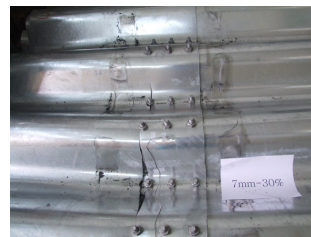
(a) 7-19-202



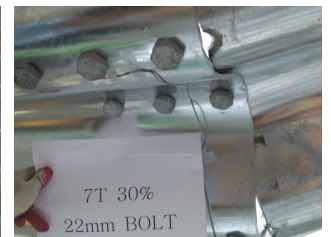
(b) 6-19-109



(c) 6-19W-109



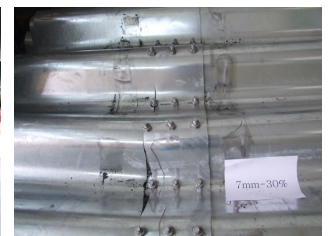
(d) 7-19-139



(e) 7-22-139



(f) 7-19-336



(g) 7-19-381

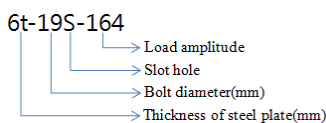
Fig. 8 Typical fatigue failure patterns of bolt connected corrugated steel plates

Table 6 Pulsating load amplitude for fatigue test

specimens	Max. load (kN/m)	Min. Load (kN)	$\Delta P$
6-19-164	218.0	54.7	163.6
6-19-109	163.3	54.7	108.6
6-19W-109	163.3	54.7	108.6
6-19S-109	163.3	54.7	108.6
7-19-381	448.4	67.2	381.2
7-19-336	403.1	67.2	335.9
7-19-202	268.8	67.2	201.6
7-19-139	206.4	67.2	139.2
7-22-139	206.4	67.2	139.2

Table 7 Number of cyclic loads and fatigue failure pattern

specimens	Fatigue Life (Cycles)	Failure Pattern
6-19-164	151,021	bearing → bolt and plate rupture
6-19-109	826,625	bearing → plate rupture
6-19W-109	546,000	bearing → bolt and plate rupture
6-19S-109	590,883	bearing → bolt and plate rupture
7-19-381	14,670	bearing → bolt and plate rupture
7-19-336	26,135	bearing → bolt and plate rupture
7-19-202	126,920	bearing → bolt and plate rupture
7-19-139	730,000	bearing → bolt and plate rupture
7-22-139	915,100	bearing → plate rupture



한 9-19W-109의 경우, 하면 강판 외측부 볼트구멍의 지압과 피후 강판 찢김에 의한 국부 파괴가 발생한 것으로 관찰되었다.

동일한 하중수준으로 슬롯홀 (6-19S-109)과 와셔 (6-19W-109)가 적용된 실험체의 파괴는 19mm 볼트만 체결된 6-19-109 실험체와 비교하여 정적강도는 유사하거나 약간 높았으나, 피로수명은 볼트만 체결한 경우의 약 67%로 감소하여 피로수명 측면에서는 슬롯홀과 와셔가 적절하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 9에는 각 실험체의 파괴 전 단계에서 측정된 실험체 종방향 피로변위형상을 나타내었다. 볼트 파괴가 발생하지 않는 이상적인 경우의 변위형상은 가력점 사이 중앙부의 변형이 완만하게 변화되는 것이 일반적이나, 최종적으로 볼트 파단이 발생한 실험체의 경우에는 1/3부분과 중앙부 변위가 직선이거나 기울기가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 7-19-202, 7-19-336과 7-19-381 실험체의 경우에는 Fig. 10(b)에 나타난 것과 같이 면외힘에 의한 볼트회전과 함께 볼트에 전단 및 인장력이 발생하여 볼트의 복합파괴에 이르게 되는 것으로 판단된다.

이와 같은 복합파괴를 제어하기 위해서는 Abdel-Sayed and Bakht (1993)이 제시한 것과 같이 인장응력이 발생하는 위치 (Valley)의 볼트를 강판내측으로 설치하는 것이 좋으나, AISI (2002), ASTM A761 (2003)과 A796 (2001)에서는 대골형 파형강판 이음부에 대하여 Fig. 10에 나타난 것과 같이 Crest와 Valley에 각 3개씩 설치하도록 규정하고 있기 때문에 구조물 시공시 볼트연결부를 활하중에 의한 휨응력이 작게 발생하는 위치에 설치하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 11에는 하중반복횟수별 실험체 중앙부의 최대누적변위와 변형율 변화를 도시하였다. 반복응력 수준이 높은 7-19-336과 7-19-381 실험체를 제외하고 초기 처짐과 변형

율이 일정 반복횟수까지 거의 변화하지 않는 것으로 나타났으며, 6-19W-109와 6-19-164의 경우와 같이 피로파괴단계에 도달하면서 처짐과 변위가 급격히 증가하는 것으로 관찰되었다. 변위 및 변형율이 증가하는 시점에서 강판의 지압과 볼트의 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 12에는 실험결과로부터 도출된 볼트이음과 파형강판 실험체의 S-N관계를 도시하였다. 두께 6mm 실험체의 경우에는 연결상세에 대한 결과를 고려하지 않았으며, 7mm 실험체는 22mm 볼트에 대한 영향을 고려하지 않았다. 실험결과에 의한 주부재에 대한 설계기준상의 설계응력 반복횟수 200만회에서 실험적인 피로한계는 85.5MPa와 88.5MPa로 예측되어 강판두께의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 현재의 CSA-S6 (2006) 및 AISI (2002) 등의 설계기준에서 제시하고 있는 볼트연결 갯수를 적용할 경우 강판의 두께 및 볼트의 직경 등에 관계없이 응력수준에 따른 피로등급

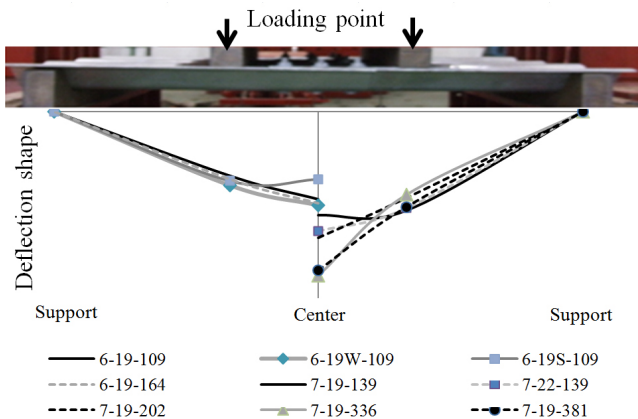


Fig. 9 Deflection shape of fatigue specimens at failure stage

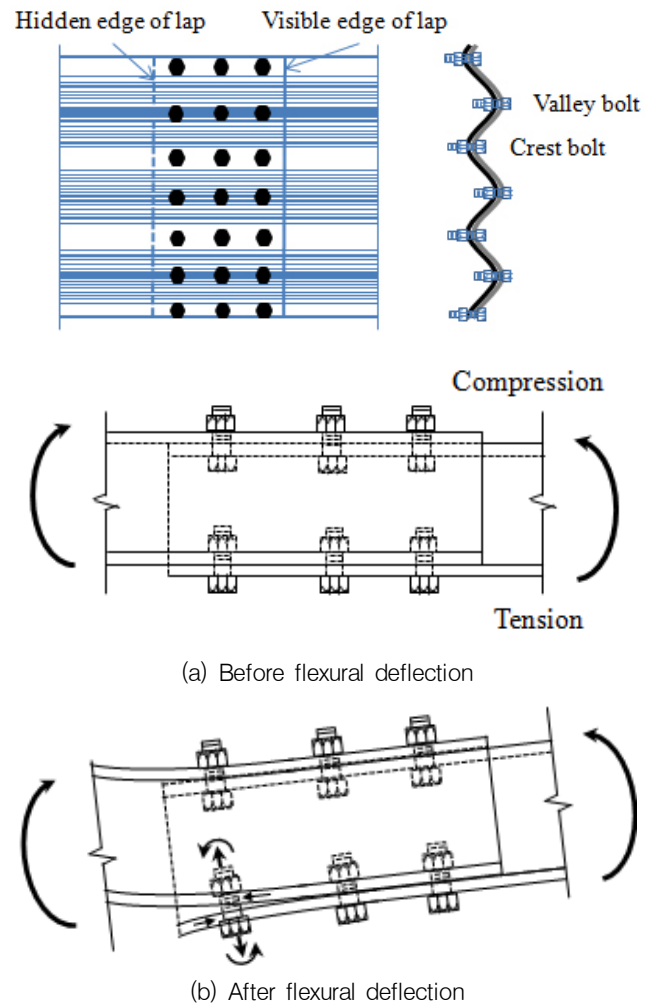
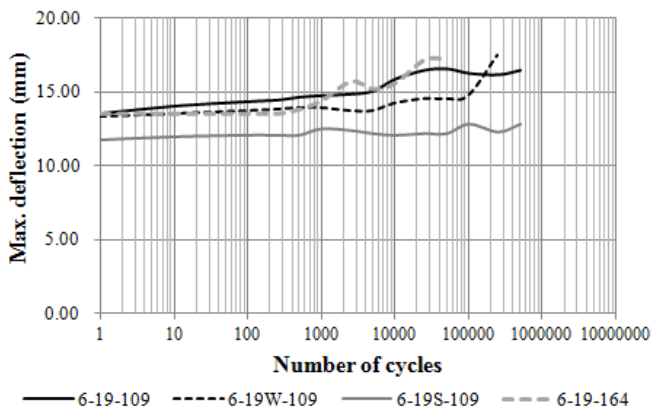
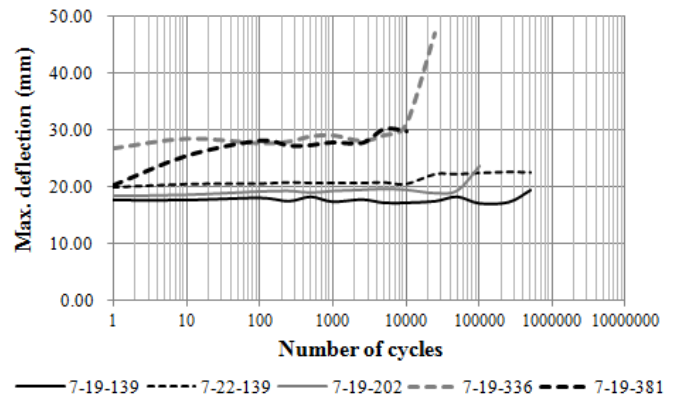


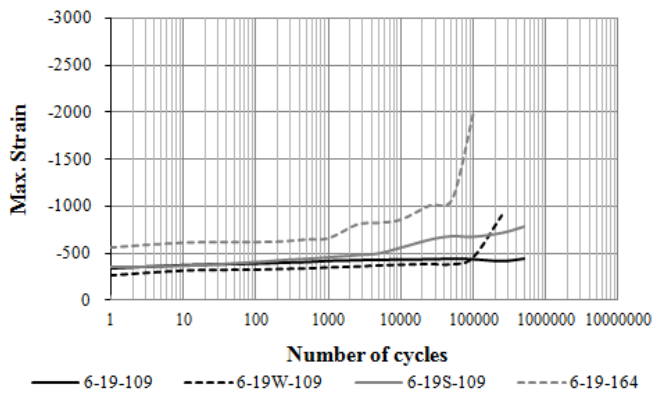
Fig. 10 Internal forces and deflection of bolts by external flexural loading



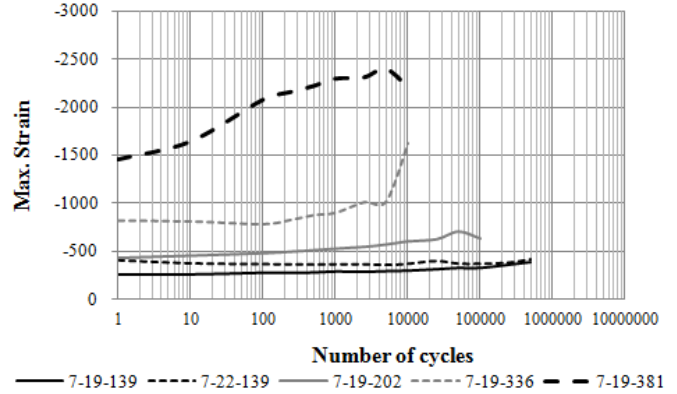
(a) deflection of thickness 6mm specimens



(b) deflection of thickness 7mm specimens

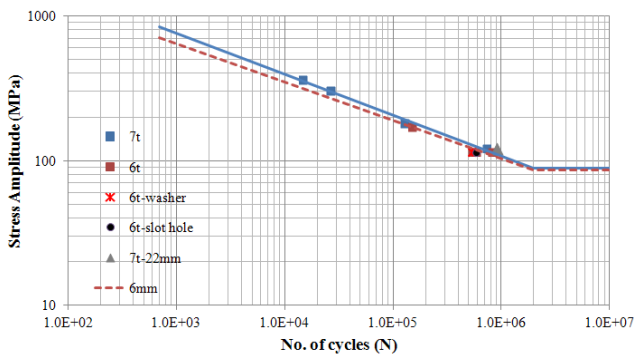


(c) strain of thickness 6mm specimens



(d) strain of thickness 7mm specimens

Fig. 11 Maximum cumulative deflection and strain variation according to the repeated cyclic loading at the mid point



$$\text{plate } 6\text{mm} : \log_{10}y = -0.265\log_{10}x + 3.602$$

$$\text{plate } 7\text{mm} : \log_{10}y = -0.284\log_{10}x + 3.733$$

Fig. 12 S-N relationship of bolt connected corrugated steel plate

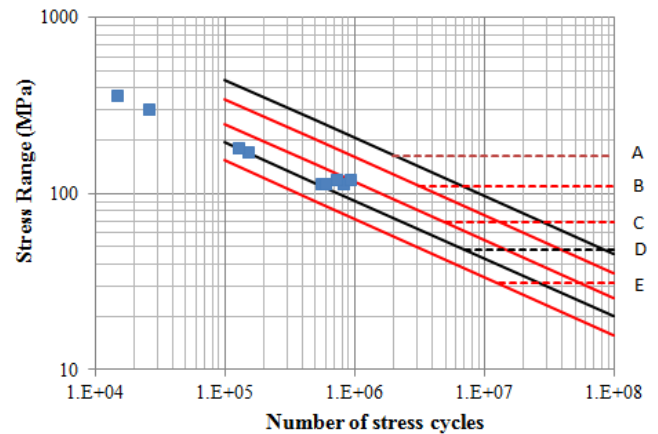


Fig. 13 Stress range versus number of cycles according to the detail categories and fatigue test results from bolt connected deep corrugated steel plate specimens

범주에 따라 단순화된 피로설계가 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 13에는 순수축응력을 받는 경우의 볼트 연결부에 대하여 AASHTO LRFD (2002)와 CSA-S6 (2006)에서 제시하고 있는 연결상세별 S-N관계에 실험결과를 도시하였다.

제한된 실험결과에 의한 것이나, 전체적으로 볼트 연결된 파형강판 이음부의 피로수명은 범주 D의 수명과 유사한 것으로 판단되며, 이를 그대로 적용할 경우 일정진폭에 대한 피



#### 4. 결 론

파형강관 볼트연결부의 휨하중에 대한 피로실험 결과 정적실험 결과와 달리 볼트 파괴 및 강관의 찢김 등에 의한 파괴가 발생하였으며, 이는 반복응력에 의한 반복적인 피로응력집중에 의한 것으로 판단된다.

볼트의 피로파괴는 면외휨응력에 의한 볼트의 회전과 전단 및 인장의 조합응력에 의하여 파단된 것으로 판단되며, 파형강관 이음부의 피로검토시 파형강관에 발생하는 휨인장응력과 함께 볼트에 발생하게 되는 조합응력에 대한 검토가 같이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

볼트연결시 체결력을 높이기 위해 적용되는 와셔 또는 슬롯홀의 경우 반복하중 작용시에는 피로수명이 미소하게 작아지는 현상을 나타내었기 때문에 휨인장부 등에서는 와셔를 가급적 사용하지 않는 것이 바람직한 것으로 관찰되었다.

6mm와 7mm 강관의 S-N관계는 거의 유사한 것으로 나타났으며, 볼트의 직경이 증가함에 따라 수명도 증가하나 증가 정도는 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 실험결과로부터 유추된 볼트연결부의 피로상세범주는 D등급에 근접하였으며, 제한된 실험결과이나 향후 파형강관 구조 이음부의 휨피로 설계시 D 등급의 응력수준에 따라 피로설계를 수행할 경우 피로수명을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원 (신재생에너지융합원천 기술개발사업)과 경남과학기술대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 저자는 이에 감사드립니다.

1. AASHTO (2002), Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. Abdel-Sayed, G., Bakht, B., and Leslie, G. J. (1993), Soil-Steel Bridge, McGraw-Hill, New York N.Y.
3. AMER, H. H. W. (2012), Soil Steel Composite Bridges A comparison between the Petterson-Sundquist design method and the Klöppel & Glock design method including finite element modelling, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology, 135.
4. American Iron and Steel Institute (2002), Handbook of steel drainage & Highway construction, AISI, 476.
5. ASTM A 761 (2003), Standard Specification for Corrugated Steel Structural Plate, Zinc-Coated, for Field-Bolted Pipe, Pipe-Arches, and Arches, ASTM, 8.
6. ASTM A 796 (2001), Standard Practice for Structural Design of Corrugated Steel Pipe, Pipe-Arches, and Arches for Storm and Sanitary Sewers and Other Buried Applications, ASTM, 15.
7. Duncan, J. M. (1979), Behaviour and Design of Long-Span Metal Culvert Structures, *ASCE Journal of Geotechnical Division*, 105(GT3), 399-417.
8. Mohammed, H., and Kennedy John, B. (2009), Fatigue Resistance of Corrugated Steel Sheets Bolted Lap Joints under Flexure, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, ASCE, 242-245.
9. National Standard of Canada (2006), CSA Special Publication Commentary on CNS/CSA-S6-06.
10. National Standard of Canada CNS/CSA-S6-06 (2006), Canadian Highway Bridge Design Code.
11. Oh, H., Nam, K. (2012), Verification on the Compressive Behavior of Corrugated Steel Plates due to Details of Bolted Lap Joint, *Journal of KSMI*, 16(1), 9-17.
12. White, H. L., and Layer, J. P. (1960), The Corrugated Metal Conduit as a Compression Ring, *Proceedings, Transportation Research Board*, USA, 39.

Received : 07/04/2013  
Revised : 10/22/2013  
Accepted : 11/05/2013

---

## 요 지

파형강판 구조물은 강판 세그먼트를 현장에서 볼트연결하고, 양질의 뒷채움 시공을 통해 시공성을 높일 수 있기 때문에 최근 생태통로, 소규모 교량 및 관로 등에 폭넓게 시공되고 있다. 본 연구는 휨하중을 받는 볼트연결된 파형강판 세스먼트의 정적 및 피로거동을 실험적으로 분석하였다. 피로거동을 분석하기 위하여 볼트 직경, 와셔와 같은 연결부 상세를 실험변수로 하였으며, 실험에 사용된 실험체의 파형의 제원은 400×150 mm이다. 정적실험 결과 모든 실험체의 실험 극한강도가 이론강도보다 높게 나타났으며, 강판의 지압 및 상부강판 볼트구멍의 찢김에 의해 파괴되었다. 6mm와 7mm 강판에 대하여 하중범위 209kN에서 517kN사이로 피로실험을 수행하였으며, 실험결과 정적 파괴시의 강판지압과 찢김파괴에서 피로실험시에는 강판지압과 볼트 전단의 형태로 변화하였으며, 2백만회 피로한계는 대략 85MPa로 분석되었다.

**핵심 용어** : 파형강판, 피로거동, 휨실험, 볼트전단파괴, 정적거동, 강판 찢김파괴

---