



파형강판 구조물의 볼트 연결부 거동에 관한 해석적 연구

Analytical Study on Structural Behavior of Bolted Connections in Corrugated Steel Plate Structures

김상현* · 전세진** · 김인규*** · 이병주****

Kim, Sang-Hyun*, Jeon, Se-Jin**, Kim, In-Gyu***, and Lee, Byeong-Ju****

Abstract

Although corrugated steel plate structures have largely been applied in Korea as well as globally due to their structural efficiency, the causes of damage occurring at bolted connections should be examined. In this study, detailed finite element models for a bolted connection were formed, and the stress distribution around the connection was evaluated for various parameters, such as the number and arrangement of bolts, loads, edge length, and the spacing of bolts, by considering the cross-sectional forces of actual structures. As a consequence of the analyses, the cracks observed at the plate near a bolt hole can be attributed to very high local stresses that occur at the contact surface between the bolt head or nut and the curved plate when fastening the bolt. When the cross-sectional forces induced by external loads are applied to these local stresses, stresses in excess of the yield strength can occur. Furthermore, larger stresses occurred in an incorrect joint lap than those occurring in a correct joint lap, regardless of the number of bolts, when subjected to a bending moment. In regard to the edge length and spacing of bolts, the current specifications are appropriate in terms of the stress level. Several countermeasures to reduce the local stress around a bolt hole during fastening were also discussed, such as the use of the washers with a curved surface. It is expected that this study can contribute to the extended use of corrugated steel plate structures by clarifying the causes of damage and proposing possible improvements.

Key words : Corrugated Steel Plate, Bolt, Connection, Finite Element Analysis

요 지

파형강판 구조물은 구조적인 효율성으로 인하여 국내외에서 활발히 적용되어 왔으나, 볼트 이음부의 손상 사례에 대한 원인 규명이 필요한 실정이다. 이 연구에서는 볼트 이음부의 상세한 유한요소 모델을 구성하고 실구조물의 단면력을 고려하여 볼트 개수, 볼트 배열, 하중, 연단거리, 볼트 간격과 같은 다양한 변수에 대하여 이음부에서 발생하는 응력 상태를 예측해 보았다. 그 결과 볼트 구멍 주변 강판의 균열은 이미 볼트 체결 단계에서 볼트 머리 또는 너트와 곡면 형상의 강판이 접촉하는 부위에서 발생한 큰 국부 응력 때문으로 판단된다. 이러한 국부 응력에 외부하중에 의한 단면력이 더해질 경우 강판 항복강도 이상의 응력도 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 휨모멘트가 작용할 때에는 볼트 개수에 관계 없이 정배열보다 부배열된 볼트에서 더 큰 응력이 발생하였다. 볼트 이음부 연단거리 및 볼트 간격의 경우 응력 수준으로 판단할 때 현행 규정은 적절한 것으로 나타났다. 한편 곡면 와셔 사용 등 볼트 체결 시의 국부 응력을 저감할 수 있는 방안에 대해서도 논의하였다. 이 연구는 파형강판 구조물의 손상 원인을 규명하고 개선방안을 제안함으로써 그 적용이 확대되는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 파형강판, 볼트, 이음, 유한요소해석

*정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 박사과정(E-mail: sanghyunii@ajou.ac.kr)

Member, Ph.D Candidate, Department of Civil Systems Engineering, Ajou University

**교신저자, 정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-31-219-2406, Fax: +82-31-219-1613, E-mail: conc@ajou.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Systems Engineering, Ajou University

***대우건설 기술연구원 토목연구팀 수석연구원

Chief Researcher, Civil Engineering Research Team, Daewoo Institute of Construction Technology

****도로교통연구원 구조물연구실 수석연구원

Research Director, Structure Research Division, Korea Expressway Corporation Research Institute

1. 서론

파형강판(corrugated steel plate)은 강판을 정해진 규격의 주름을 갖도록 성형하여 강성을 증가시킨 것으로서, 지중구조물로 사용될 경우 세그먼트 단위로 제작되어 현장에서 이음부를 볼트로 체결한 후 양질의 흙으로 뒤채움하게 된다. 이때 외부하중에 대하여 파형강판은 연성구조물로 거동하며, 뒤채움 지반과 파형강판 구조물 간의 상호작용을 통해 강판 내에는 주로 원환방향의 압축력이 발생하여 구조적인 효율성을 도모할 수 있다. 이러한 파형강판 구조물은 경제성과 시공성이 우수하여 도로 및 철도의 터널, 암거, 수로, 생태 교량과 같은 소규모 교량 등 다양한 방면에서 활용되고 있다. Fig. 1은 도로교에서 파형강판이 터널로 사용된 사례를 보여주고 있다.



Fig. 1. Corrugated Steel Plate Tunnel

한국도로공사 지침(KEC, 2001)과 같은 파형강판 구조물 설계기준에는 이음부 상세 규정 및 이음부 안전도 검토 절차가 제시되어 있다. 하지만 파형강판 볼트 이음부에서 Fig. 2와 같이 강판의 균열, 찢김, 누수 및 녹이 발생하는 사례가 간간히 보고되고 있다.



Fig. 2. Tearing and Water Leak at Bolted Connection

기존 연구에서는 실험이나 해석을 통해 이러한 파형강판 볼트 이음부의 손상 원인을 규명하고 개선안을 제안해 보고자 노력한 바 있다. 하지만 실험적 연구에 있어서는 실험 비용이나 장비 등의 제약으로 인해 볼트 이음부의 다양한 배열 및 상세를 실험 변수로 충분히 반영하지 못한 한계가 있다(Mikhailovsky et al., 1992; Choi, 2005; Lee et al., 2007; Oh and Nam, 2012). 한편 주로 유한요소법을 이용한 해석적 연구에서 있어서도 볼트 이음부의 구조 거동을 합리적으로 모사할 수 있는 유한요소 모델을 도출하려는 연구가 미흡했다고 판단된다(Kang, 2004; Lee, 2012).

이 연구에서는 기존 연구보다 좀 더 다양한 변수를 반영하고 상세한 모델을 구성하여 파형강판 볼트 이음부의 유한요소 해석을 실시하고, 그 결과를 분석하여 현재 사용되고 있는 볼트 이음부의 타당성을 평가하고 개선안을 제안해 보았다.

2. 관련 규정 및 기존 연구

2.1 관련 규정

파형강판은 규격에 따라 표준형 및 대골형이 사용되고 있으며, 국내에서 파형강판 구조물 설계를 위해 가장 범용적으로 참조하는 규정은 한국도로공사 지침(KEC, 2001)이다. 이에 따르면 표준형의 강판 두께는 2.7~7 mm, 골의 피치 및 깊이는 각각 150 mm 및 50 mm이며, 파형의 굽힘반지름은 28 mm이다. 한편 파형강판 볼트 이음부에서 볼트 조임 토크 범위는 200~400 N·m로 규정하고 있다. 또한 볼트 이음부의 강도를 직경 20 mm 볼트를 기준으로 강판 두께 및 볼트 개수에 따라 제공하고 있다.

볼트 이음부에서 강판들의 겹침과 관련된 규정은 Fig. 3을 참조할 때 표준형의 경우 축방향 연단거리 $l = 50$ mm, 원환방향 연단거리 $g_1 = 35$ mm, 원환방향 볼트 간격 $g_2 = 50$ mm이다. 이는 KS D 3590 (2017) 기준과 동일하다. 한편 캐나다의 CHBDC (CSA, 2006) 및 미국의 AISI (2002) 규정에서는 $l = 50$ mm 이상, $g_1 = 32$ mm 이상, $g_2 = 50.8$ mm 이상으로 규정하고 있으므로 국내 규정과 유사하다. Fig. 3은 표준형에서 피치당 2볼트가 사용된 경우이며, 3볼트 및 4볼트의 경우에도 2볼트 배열 사이에 볼트만 추가될 뿐 관련 규정은 동일하다.

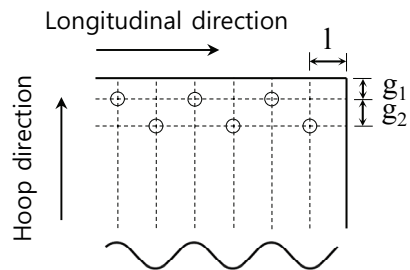


Fig. 3. Specifications for Joint Lap of Corrugated Steel Plates

2.2 기존 연구

Bakht and Agarwal (1988)은 Fig. 4(a)와 같이 볼트 이음부에 휨모멘트가 작용할 경우 B-B열보다는 C-C열에 위치한 볼트가 더 큰 힘을 받게 되므로 C-C열 볼트 구멍 주변의 강판이 손상될 가능성이 더 크다고 지적하였다. 한편 Mikhailovsky et al. (1992)은 Fig. 4(b)와 같이 휨모멘트가 작용할 때 볼트의 정비열(correct joint lap)과 부배열(incorrect joint lap) 중에서 부배열 볼트 주변 강판에 균열이 발생할 확률이 더 크다고 지적하였다. 결국 Bakht and Agarwal은 Mikhailovsky et al.과 동일한 현상을 언급하고 있다. 이 논문에서 정부배열이라는 용어는 볼트 배열의 옳고 그름보다는 휨모멘트 저항성의 유효리의 의미로 사용되었다.

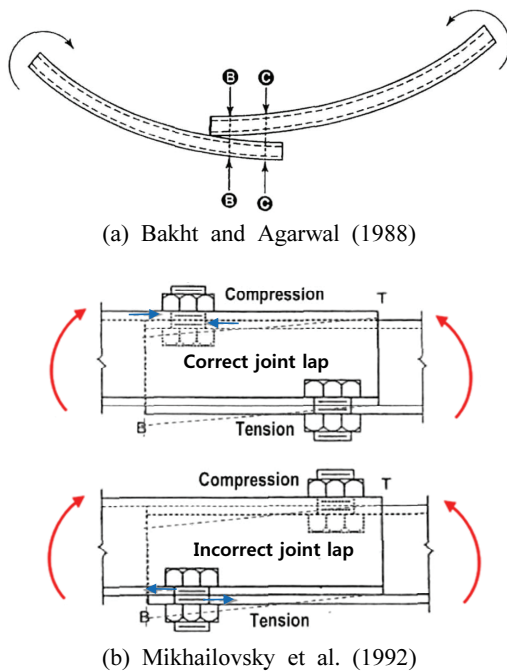


Fig. 4. Effect of Bolt Location on Behavior of Joint Lap

Kang (2004)은 국내외 설계기준에 제시된 파형강판의 접침길이나 연단거리 규정은 경험에 의존하고 있으며 이에 대한 이론적, 해석적 연구가 부족하다고 지적하였다. 이에 ABAQUS의 쉘요소를 사용한 해석을 실시하였으며, 변수는 강판 형태(표준형, 대골형), 축방향 연단거리 l (25~50 mm), 강판 두께(3.2~7 mm), 원환방향 연단거리 g_1 (15~50 mm), 원환방향 볼트 간격 g_2 (48~90 mm)였다. 해석 결과에 근거하여 표준형의 경우 적절한 이음부 형상으로 $l \geq 35$ mm, $g_1 \geq 35$ mm, $g_2 \geq 50$ mm를 제안하였으며, 따라서 현재 사용되는 한국도로공사 지침이 타당하다고 주장하였다. 하지만 이는 압축력에 대해서만 검토한 결과로서 휨모멘트가 작용하는 경우까지 유효한 결론으로 보기는 어렵다.

Lee et al. (2007)은 2볼트 배열에 대하여 이음부 사이의 개스킷 유무, 볼트 접합 시 와셔 유무, 볼트 구멍 천공 시 돌출부 유무, 정비열 및 부배열, 강판 두께(3.2~6 mm)를 변수로 압축시험 및 휨시험을 별도로 실시하였다. 그 결과 개스킷이 이음부 거동에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 와셔의 경우 압축 또는 휨 거동 여부 및 강판 두께에 따라 차이가 있었지만 극한하중 측면에서 명확한 효과는 없었다. 또한 볼트 구멍 돌출부 유무도 극한하중에 거의 영향을 미치지 않았다. 주목할만한 점으로 휨 거동 시 볼트의 정비열과 부배열이 극한하중에 미치는 영향은 크지 않았으나, 부배열에서는 극한하중 이후 볼트부 주변 강판에 균열이 발생하여 하중이 급격히 감소하는 경향이 관찰되었으며, 이러한 현상은 특히 두께가 6 mm로 두꺼울 때 두드러진 것으로 나타났다.

Lee (2012)는 대골형 파형강판의 두께 및 볼트 직경을 변수로 한 실험 결과와 LS-DYNA의 솔리드요소를 이용한 해석 결과를 비교하여 수치해석 모델의 타당성을 검증하였으며, 수치해석을 통하여 실제 거동을 매우 유사하게 예측할 수 있음을 주장하였다. 하지만 이 연구 또한 압축력에 대해서만 검토하였다는 제한점이 있다.

그 외 기존의 실험적 연구를 살펴보면 파형강판 구조물 설계 시 주요 가정인 압축력에 대해서만 실험을 실시한 경우들이 있었다(Oh and Nam, 2012). 하지만 파형강판 구조물 볼트 이음부에서 발생하는 손상의 주요 원인이 압축 거동보다는 휨 거동과 관련된다는 점이 파악됨에 따라 볼트 이음부 검토를 위해서 압축 실험과 더불어 휨 실험을 실시하는 경우가 증가하였다(Choi, 2005; Lee et al., 2007). 하지만, 실제 파형강판 구조물의 거동은 압축력과 휨모멘트를 동시에 받고 있지만 실험에서는 대부분 압축 실험과 휨 실험을 별도로 실시하여 실구조물의 거동을 충분히 모사하고 있지 못한 단점이 있다고 생각된다. 이처럼 실험체에 압축력과 휨모멘트를 동시에 가하지 못한 것은 실험 장치의 제약이나 실험 시 하중 또는 변위 제어의 어려움에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 실험 시의 애로 점들은 합리적인 수치해석 모델이 구성되었다는 전제하에 유한요소법 등 전산구조해석을 통한 접근을 통해 해결 가능할 것으로 판단된다.

3. 파형강판 볼트 이음부의 수치해석

3.1 해석 개요

국내 파형강판 구조물의 이음부 설계에 사용되는 한국도로공사 지침(KEC, 2001)의 이음부 강도 규정은 가장 이상적인 상황을 가정하여 파형강판에 휨모멘트는 발생하지 않고 압축력만 작용할 때의 강도이며, 실험에 근거하여 도출된 것으로 알려져 있다. 하지만 실제로는 시공중 또는 공용중에 압축력과 더불어 불가피한 휨모멘트도 발생하는 경우가

대부분이므로 이러한 이음부 강도 규정이 충분한 안전성을 담보하고 있지는 못하다고 생각된다. 특히 휨모멘트 작용 시 기존에 문제가 제기되었던 볼트의 정배열이나 부배열 (Bakht and Agarwal, 1988; Mikhailovsky et al., 1992) 여부가 볼트 이음부 거동의 주요 영향인자라면 통상적으로 사용하던 연단거리 규정이나 볼트 간격 규정에 대한 재고의 여지가 있다. 따라서 볼트 이음부의 손상 메커니즘을 올바르게 밝히기 위해서는 실험적 또는 해석적인 추가 검증이 필요하다.

이 연구에서는 실제 발생할 가능성이 큰 수준의 압축력과 휨모멘트가 작용할 때 볼트 이음부 주변의 강판에서 발생하는 응력의 크기를 검토함으로써 파형강판 구조물에서 관찰되는 볼트 이음부의 균열이나 손상의 원인에 대해 고찰해 보았다. 또한, 볼트 개수, 볼트의 정배열 및 부배열, 연단거리, 볼트 간격을 변수로 하여 해석을 수행함으로써 이러한 볼트 이음부 강판 손상을 완화할 수 있는 방안을 파악해 보았다. 해석에는 전세계적으로 통용되는 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS (Dassault Systèmes Simulia, 2015)를 사용하였다.

수치해석을 통한 분석 대상은 그간 볼트 이음부 손상 사례가 더 많이 보고되었던 표준형 파형강판이며, 강판 두께는 그간 사용되었던 2.7~7 mm 범위 중 비교적 빈번히 사용되고 두께가 얇은 편에 속하여 손상에 취약할 것으로 예상되는 4 mm를 고려하였다. 원환방향 곡률반경(R)은 구조물 규모에 따라 변동하지만 실제 빈번히 사용되는 R = 3.25 m를 대상으로 하였다. 표준형 파형강판의 경우 토피가 매우 깊은 경우를 제외하고는 거의 대부분 피치당 2개의 볼트를 배치하는 2볼트 시스템이 사용되고 있으므로 이를 기본안으로 하였다. 해석 기본안에는 한국도로공사 지침의 연단거리 및 볼트 간격 규정을 적용했으며, 33절에서 언급할 변수 해석에서는 이러한 볼트 개수나 관련 규정들을 변동시켜 보았다.

볼트, 너트 및 강판 사이에는 접촉면이 존재하고 접촉면에서는 볼트의 토크, 휨 거동 및 인장압축 거동 등에 의하여 마찰이 존재하고 있으므로 수치해석 시 접촉면의 정의 및 성질 부여 등 접촉 해석(contact analysis) 기법이 필요하다. 하지만 기존의 해석적 연구를 살펴보면 유한요소 모델에서 개선이 필요한 점들이 발견된다. 예를 들어, Fig. 5와 같은 기존 연구(Lee, 2012)에서는 강판을 솔리드요소로 모델링하였는데, 강판 두께 방향으로 1층으로만 분할함으로써 솔리드요소의 특성을 고려할 때 휨모멘트 작용 시 강판의 휨 거동을 올바르게 모사할 수 없다는 단점이 있다. 또한 볼트의 자유로운 회전을 볼트 상하면 경계조건을 통해 구속하여 실제 거동과의 차이가 예상된다. 이 연구에서는 이러한 파형강판 볼트 이음부의 기존 수치해석 모델의 단점들을 개선하여 신뢰성 있고 합리적인 모델을 구성하고자 노력하였다.

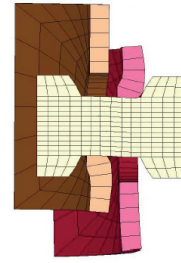


Fig. 5. Example of Previous Analytical Study of Bolted Connection (Lee, 2012)

3.2 유한요소 모델링

충분히 세분화한 유한요소망을 이용하여 정밀한 해석을 수행하고자 파형강판 구조물의 부분 모델을 구성하였다. 엄밀한 형상 모델링을 위하여 한국도로공사 지침(KEC, 2001)에 제시된 파형 형상을 참조하되, 이에 추가하여 Fig. 6과 같이 실제 파형강판 및 구성품을 참조하여 형상이나 치수를 검증하였다.

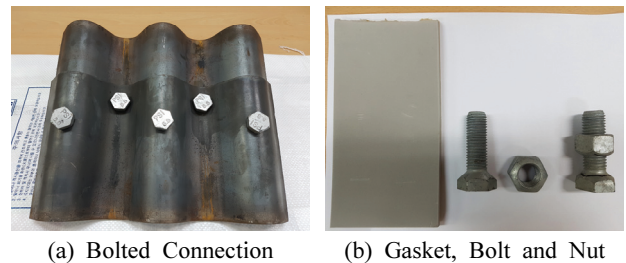


Fig. 6. Sample of Corrugated Steel Plate Structure

부분 모델은 Fig. 7(a)의 파형강판이 2장 겹친 형태이다. 이때 파형은 굽힘반지름 규정까지 고려하여 엄밀한 형상으로 모델링하였다. 부분 모델은 연속된 전체 구조물 중 일부를 잘라 낸 것이므로 잘린 단면에 작용하는 응력이나 단면력을 올바르게 모사해야 실제 거동과 유사하게 된다. 또한 잘린 단면을 구속하는 경계조건에 따라 실제 거동과 차이가 발생할 수 있으므로 가급적 부분 모델의 변형이 자유롭게 발생할 수 있도록 경계의 구속조건은 최소화하는 것이 바람직하다. 파형강판 구조물은 종방향(통로방향)으로 길이가 긴 구조물로서 종방향으로는 토압 등 외부하중에 대해 유사한 구조 거동을 보이므로 종방향 길이가 중요한 것은 아니지만, 앞서 언급했듯 부분 모델의 경계조건 영향을 고려하여 종방향 길이는 3개 피치에 해당하는 450 mm로 하였다. 1개 강판의 횡방향(원환방향) 길이는 300 mm로 두었으며, 강판 2장이 겹쳐져 있으므로 연단거리나 볼트 간격 규정을 고려하면 기본안의 경우 2볼트, 3볼트 및 4볼트 부배열은 480 mm, 4볼트 정배열의 경우 430 mm가 된다. 횡방향 경계에는 압축력이나 휨모멘트를 가하게 되는데, 횡방향 길이가 너무 길 경우 쉘 이론(Calladine, 1983)에 따르면 파형 곡률의 영향으로 인해 경계로부터 멀어질수록 휨모멘트가 감소하

여 부분 모델의 중심부에서는 의도한 휨모멘트가 작용하지 않을 우려가 있다. 따라서 이 연구에서는 이러한 영향을 고려하여 최소로 필요한 횡방향 길이를 취하였다. 또한 실제로는 횡방향 곡률이 있더라도 이처럼 짧은 횡방향 길이를 가진 부분 모델에서는 영향이 미미하므로 그러한 횡방향 곡률을 고려하지 않았다.

볼트는 Fig. 7(b)와 같이 통상적으로 사용되는 20 mm 직경의 볼트 줄기를 가진 볼트를 모델링하였다. 실제로는 Fig. 6(b)와 같이 볼트 머리 및 줄기, 너트로 구성되지만 볼트 머리와 너트는 유사한 형상을 가지므로 동일한 형태로 일체로 모델링하였다. 볼트 구멍의 직경은 시공 오차 및 볼트와 너트 체결 시의 작업성을 고려하여 볼트 줄기 직경보다 약간 크게 여유를 두는데, 이 해석에서는 21 mm로 설정하였다.

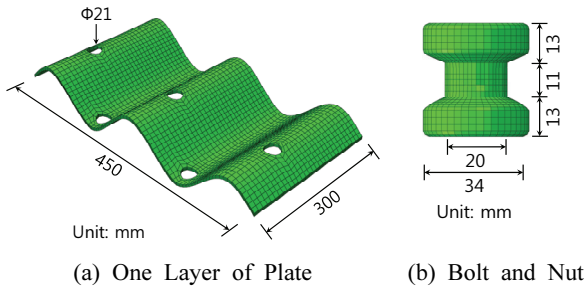


Fig. 7. Finite Element Modeling of Corrugated Steel Plate Structure

유한요소는 강판, 볼트 및 너트 모두 ABAQUS에서 제공하는 다양한 종류의 솔리드요소 중 C3D8R을 사용하였다. 이는 8개의 절점을 갖는 육면체 모양이고, 감차적분(reduced integration)을 적용한 요소이다. 감차적분은 전단 잠김(shear locking) 현상과 같은 유한요소해석 시의 부작용을 방지할 수 있고 해석시간이 단축되는 장점도 있다. 요소의 평면상 한 변 길이는 최대 10 mm 이하로 비교적 조밀하게 구성하여 해의 정확성을 유지하였다. 한편 회전 자유도가 없는 솔리드 요소의 단점을 보완하여 휨 거동을 올바르게 모사할 수 있도록 강판 두께 방향으로 4개 층으로 분할하였다.

상하 파형강판 사이의 접촉면, 그리고 강판과 볼트 및 너트가 서로 접촉하는 거동을 구현하기 위해 ABAQUS의 다양한 접촉 해석 모델링 방법 중에서 general contact 기능을 적용하였다. 접촉 해석에서는 접촉면 간의 접선 방향 마찰 거동에 대한 모델링도 가능한데, 이 연구에서는 Fig. 6(b)와 같이 상하 파형강판 사이에 끼워 넣어 압착되는 유연한 재질의 개스킷의 영향을 고려하여 마찰이 없는 조건으로 보았다. 즉, 개스킷을 직접 모델링하지 않고 그 영향을 간접적으로 고려하였다.

Fig. 8과 같이 하중으로는 33절에서 언급할 축력과 휨모멘트를 작용시켰으며, 경계조건으로 하중이 작용하는 측면은 자유로운 변위를 허용하였고, 하중이 작용하는 않는 측면은

변형 시 구속을 최소화하여 실제 구조물과 유사하게 거동할 수 있도록 하였다. 즉, Fig. 8에서 음영 표시된 측면의 경우 x 방향으로 구속하되, y 및 z 방향으로 최소한의 위치만 구속하였다. 한편 역시 실제 거동을 모사하기 위해 볼트에는 어떠한 구속조건도 부여하지 않았다. Fig. 8은 상판 및 하판이 볼트 접합을 통해 결합된 해석모델을 보여주고 있으며, 연단 거리 및 볼트 간격의 정의도 함께 나타내었다.

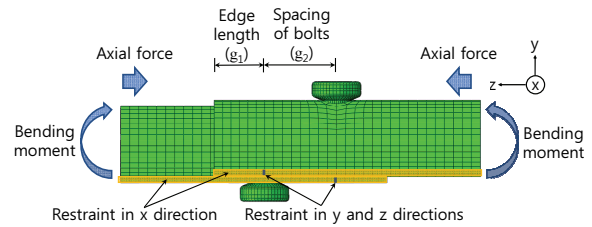


Fig. 8. Loads and Boundary Conditions

파형강판의 재료물성은 Fig. 9와 같이 재료의 비선형성을 반영한 엄밀한 응력-변형률 곡선을 고려하였다. 표준형 파형강판에는 SS400의 강재 규격이 사용되며, 항복강도는 235 MPa, 인장강도는 400 MPa, 탄성계수는 2.05×10^5 MPa, 포아송비는 0.3이다. 강판은 가장 보편적으로 사용되는 폰 미세스(von Mises)의 항복기준을 따르는 것으로 하였다. 한편 볼트의 경우 인장강도 800 MPa의 고장력 볼트이므로 볼트에서 파단이 발생하지는 않는다고 보고, 탄성계수 2.05×10^5 MPa의 선형탄성으로 모델링하였다.

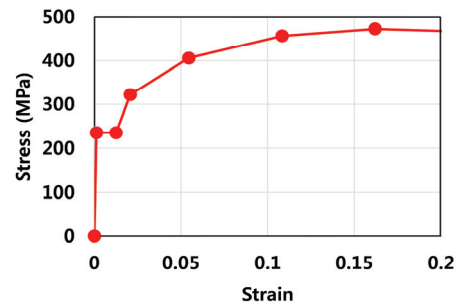


Fig. 9. Stress-Strain Relationship of Corrugated Steel Plate

이러한 파형강판 볼트 이음부 해석의 경우 볼트의 체결에 대한 모델링이 해석 결과에 중요한 영향을 미친다. 기존 연구를 살펴보면 볼트 체결력의 영향이 크지 않다고 보고 이를 무시하고 해석한 경우가 있다(Kang, 2004; Lee, 2012). 하지만 이때에는 볼트의 체결에 의해 강판 두께 방향으로 작용하는 압축응력이 고려되지 않아 올바른 응력 상태를 모사할 수 없는 큰 단점이 있으므로 볼트 체결력은 고려되어야 한다. 또한 볼트의 체결을 모델링하지 않으면, 상판, 하판, 볼트 및 너트가 서로 결합되지 않은 구조적으로 불안정한

상태가 되므로 실제와는 다른 추가적인 구속조건이 필요하다. 한편 볼트에 체결력이 작용할 때 안정적인 해석을 위해 볼트의 특정 위치에 실제와 다른 구속조건을 부여해도 안 된다. 이 연구에서는 실제와 가장 유사한 상황이 모사될 수 있도록 초기응력(initial stress)을 볼트에 가하여 볼트 축력, 즉, 볼트 체결력을 구현하였다. 해석은 1차적으로 볼트 체결을 통해 볼트 이음부의 2개 파형강판이 결합되고, 이렇게 결합된 파형강판에 추가적으로 압축력이나 휨모멘트가 가해지는 단계별 해석을 수행하였다. 이때 볼트 체결력은 후속 하중이 가해질 때에도 올바르게 유지되고 있음을 확인하였다.

실제 시공 시 참조되는 한국도로공사 지침의 볼트 조임 토크 범위인 200~400 N·m를 볼트 축력으로 변환하기 위해서 통상적으로 사용하는 Eq. (1)(Han et al., 2008) 및 Eq. (2)(Sindo ILS, 2018)를 적용하였다. 이러한 수식으로 검토해보면 파형강판 볼트의 체결력은 60~120 kN 범위이며, 이 해석에 사용된 20 mm 직경 볼트의 단면적으로 나누어 응력으로 환산해 보면 191~382 MPa이 산출된다. 이 연구에서는 이러한 범위의 평균값보다 약간 작은 240 MPa의 초기응력을 볼트에 도입하였다.

$$T = KdN \quad (1)$$

여기서, T: 토크, K: 토크 계수값(Type A: 0.11~0.15, Type B: 0.15~0.19, 이 해석에서는 Type B 사용), d: 볼트 외경, N: 볼트 조임 축력.

$$T = K_i A_s S_p \quad (2)$$

여기서, T: 토크, K_i: 0.75~0.9(반복체결: 0.75, 영구체결: 0.9), A_s: 볼트 유효단면적, S_p: 볼트 보증강도(항복강도 이하이며, 일반적으로 항복강도의 90%).

3.3 해석 변수

해석 변수는 Table 1과 같이 피치당 볼트 개수, 볼트 배열 하중, 연단거리, 볼트 간격이다. 볼트 개수는 통상적인 2볼트 이외에 3볼트 및 4볼트에 대해서도 검토하였고, 볼트 배열은 정배열 및 부배열을 고려하였다. Table 2는 2, 3, 4볼트 시스템 각각에 대하여 정배열 및 부배열로 볼트가 배치된 유한요소 모델을 보여주고 있으며, 구분을 위해 상판은 짙은 색으로, 하판은 옅은 색으로 표현하였다.

기존의 해석적 연구(Kang, 2004; Lee, 2012)에서는 압축력만을 검토하고, 휨모멘트는 고려하지 않았으므로 실제 볼트 이음부 열화의 주된 원인으로 알려진 휨모멘트의 영향이 분석되지 못하였다. 이 연구에서는 기존 연구의 단점을 개선하여 압축력 및 휨모멘트의 개별적인 영향 및 복합적인 영향을 동시에 분석해 보았으며, 실제 구조물의 응력 발생 수준을 예측하기 위해 기존 자료 분석을 통해 실제 파형강판

구조물에 발생했거나 발생한 것으로 예측되는 하중값을 적용하였다(Daewoo E&C and Ajou University, 2017). 압축력은 시공 사례 분석을 통해 비교적 두꺼운 토피를 가진 경우 발생할 수 있는 값을 고려하였다. 이때 상재토압을 파형강판 압축력으로 변환하기 위해서 거의 모든 관련 설계 기준(KEC, 2001; AISI, 2002; CSA, 2006)에서 채택하고 있는 Eq. (3)과 같은 압축력 이론을 적용하였다. 다만 설계기준에 따라 아칭 효과의 고려 여부 및 방법에 있어서는 차이가 있지만 여기에서는 한국도로공사 지침에 따라 아칭 효과를 고려하지 않았다. 이러한 압축력은 압축응력으로 변환하여 강판 측면에 가하였다. 또한 휨모멘트의 경우 한국도로공사에서 3D 진단 로봇 및 맵핑 기법을 적용하여 개발한 ARGOS 시스템(Lee et al., 2014)을 통하여 국내 파형강판 구조물들에서 실측한 내공변위에 근거하여 계산한 휨모멘트 데이터 중 안전측으로 큰 값을 취하였다. 이때 휨모멘트는 Eq. (4)를 통하여 산정하게 된다. 이러한 휨모멘트와 동등한 효과를 발생시키도록 강판 측면에 인장 및 압축의 집중하중을 적절히 가하였다.

$$T = \frac{1}{2} P_v = \frac{1}{2} S \gamma H \quad (3)$$

여기서, T: 압축력, P_v: 상재 하중, S: 강판 폭, γ: 상재토의 단위중량, H: 토피.

$$M = E_c I_c \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_N} \right) \quad (4)$$

여기서, M: 휨모멘트, E_c: 파형강판 탄성계수, I_c: 파형강판 단면2차모멘트, R: 곡률반경 설계값, R_N: 변형 후의 곡률반경.

한편 연단거리 및 볼트 간격에 대해서도 변수 해석을 실시하였으며, 연단거리는 한국도로공사 지침에 제시된 35 mm를 기준으로 20 mm, 50 mm 및 65 mm로 변화시켜 가면서 그 영향을 분석하였다. 또한 볼트 간격은 역시 동일한 기준의 50 mm를 기본으로 하여 20 mm, 35 mm 및 65 mm로 변화시켰다.

4. 해석 결과 및 분석

4.1 변형 형상 및 응력 분포

볼트 체결력, 압축력 및 휨모멘트를 단계별로 작용시켰을 때 볼트 개수 및 볼트 배열에 따른 변형 형상 및 응력 분포는 Fig 10과 같으며, 볼트보다는 강판의 응력이 주요 분석대상이므로 강판의 응력만을 나타내었다. 이는 Table 1에서 대표적으로 7, 8, 15, 16, 23, 24에 대한 해석 결과를 보여준 것이다.

Table 1. Variables in Analyses of Bolted Connection

#	Number of bolts	Joint lap	Axial compressive stress ^{a)} (MPa)	Bending moment ^{b)} (kN·m/m)	Edge length (mm)	Spacing of bolts (mm)		
1	2	Correct	50	10	35	50		
2		Incorrect		15				
3		Correct						
4		Incorrect						
5		Correct	100	10				
6		Incorrect		15				
7		Correct						
8		Incorrect						
9	3	Correct	50	10				
10		Incorrect		15				
11		Correct						
12		Incorrect						
13		Correct	100	10				
14		Incorrect		15				
15		Correct						
16		Incorrect						
17	4	Correct	50	10				
18		Incorrect		15				
19		Correct						
20		Incorrect						
21		Correct	100	10				
22		Incorrect		15				
23		Correct						
24		Incorrect						
25	2	Correct	100	15			20	50
26							35	50
27							50	50
28							65	50
29							35	20
30							35	35
31							35	65

^{a,b)}Applied separately or in a combined way

Table 2. Modeling of Bolted Connection

Joint lap	Number of bolts		
	2	3	4
Correct			
Incorrect			

Note: Upper plate is indicated by darker color

Fig. 10의 변형 형상은 구분을 위하여 실제의 변형을 10배 증폭하여 나타내었다. 볼트 개수가 증가할수록 상판 및 하판의 일체성이 증대된 상태로 외력에 저항할 수 있으므로 강판의 변형이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 부배열보다 정배열에서 강판의 변형이 작게 발생하였는데, 이는 기존에 제안된 Fig. 4와 같은 거동이 어느정도 유효함을 의미한다.

한편 응력의 경우 Eq. (5)와 같은 폰 미세스 등가응력(von Mises equivalent stress)으로 분석해 보았다. 이는 폰 미세스 항복기준에 근거하여 실제의 다축 응력상태를 일축의 응력-변형을 곡선과 유사하게 표현한 것이다. 예를 들어 이 값이 강판의 항복강도와 유사하면 3차원 폰 미세스 항복기준상의 항복 시점에 도달했음을 의미한다. 항복 이후에도 인장강도에 다다를 때까지는 변형을 경화 현상에 의해 폰 미세스 항복기준 또는 파괴포락선이 확장되고 폰 미세스 등가응력도 증가하게 된다.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{3}{2}\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}} \quad (5)$$

여기서, σ_v 는 폰 미세스 등가응력이고, σ'_{ij} 는 텐서 형태로 표현된 편차응력(deviatoric stress)이다.

하중 단계에 따른 응력의 분포는 Fig. 11과 같으며, 대표적으로 Table 1의 7 및 8에 해당되는 2볼트 정배열에서 상판의 상면 응력 분포를 볼트를 제외하고 나타내었다. 폰 미세스 등가응력으로 검토한 결과 이미 볼트 체결 시 볼트 구멍 주변 강판에서 볼트 머리 또는 너트와 맞닿는 국부적인 부분이 항복강도 가까이 도달됨을 확인할 수 있다. 이는 곡면 형상의 파형강판을 볼트로 체결하는 과정에서 볼트 머리 또는 너트와 강판이 국부적으로 접촉하는 부위에 응력이 집중되기 때문으로 판단된다. 또한 압축력과 휨모멘트가

추가로 작용되면 이러한 볼트 구멍 주변 강판의 국부 응력이 항복강도 이상으로 더욱 증가하게 된다. 다만 이 해석 결과는 실제로 작용할 가능성이 있는 압축력이나 휨모멘트 중 가장 높은 수준의 크기를 가정한 것으로서, 발생 가능한 가장 불리한 응력 상태로 볼 수 있으며 일반적으로는 이보다 작은 수준의 응력이 발생할 것으로 예측된다.

4.2 압축력 작용 시

볼트로 체결된 파형강판 구조물에 압축력만 작용하는 경우의 해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 여기에서는 폰 미세스 등가응력 외에도 Fig. 2와 같이 실제 파형강판 구조물에서 관찰되는 형태의 균열과 좀 더 직접적으로 관련된 축방향 최대 인장응력을 검토해 보았다. 최대 응력은 볼트 구멍 주변 강판에서 발생하였다.

축방향 응력의 경우 압축응력으로 가해진 압축력이 작은 경우에 비해 클 때에 강판 인장응력이 더 크게 발생하는 것으로 나타났으나, 볼트 개수나 배열에 따른 인장응력 차이는 크지 않았다. 볼트마다 축방향 하중을 분담하므로 볼트 개수가 증가할수록 볼트 주변 강판의 응력도 작아질 것으로 예상했으나 그러한 경향이 명확치 않았다. 이는 압축력이 작용할 때 국부적으로 크게 발생하는 응력은 볼트 개수에 큰 영향을 받지 않음을 의미하고 있다. 또한 원래 볼트 정배열과 부배열은 Fig. 4와 같이 휨모멘트가 작용할 때의 거동 차이와 관련되지만, 압축력 작용 시에도 다소의 응력 차이가 발생했으며 이때에는 오히려 부배열에 비해 정배열에서 응력이 약간 더 큰 경우가 많았다. 100 MPa의 압축응력이 작용할 때에는 항복강도인 235 MPa까지 도달하므로 볼트 구멍 주위 강판이 균열에 대해 취약해질 가능성이 있는 것으로 나타났다. 물론 Fig. 9의 강판 응력-변형을 곡선을 참조할 때 항복강도에 도달했다는 사실 자체가 강판의 균열을 의미하는 것은 아니지만, 적어도 균열 발생 가능성이

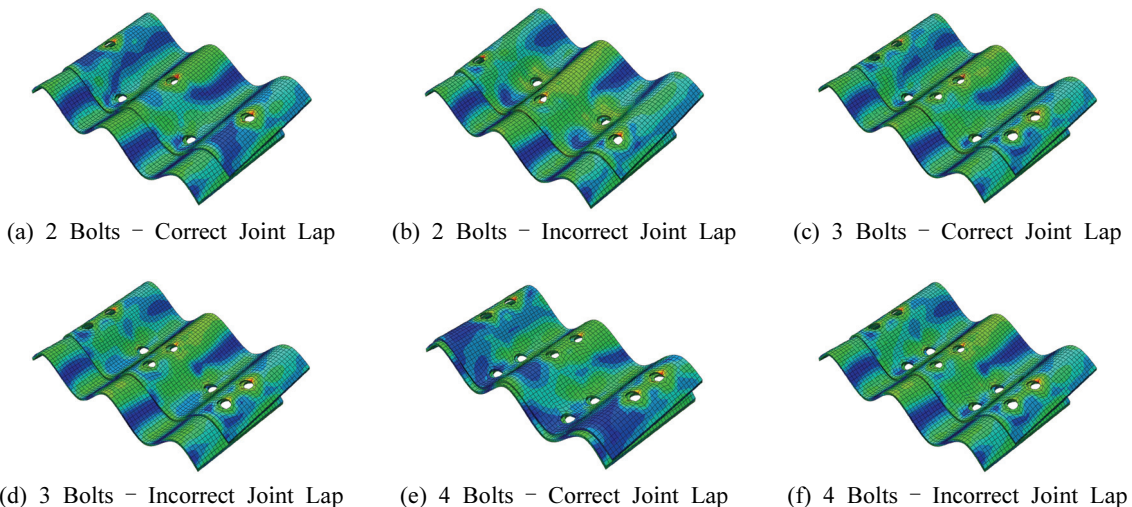


Fig. 10. Deformed Shape and Stress Distribution

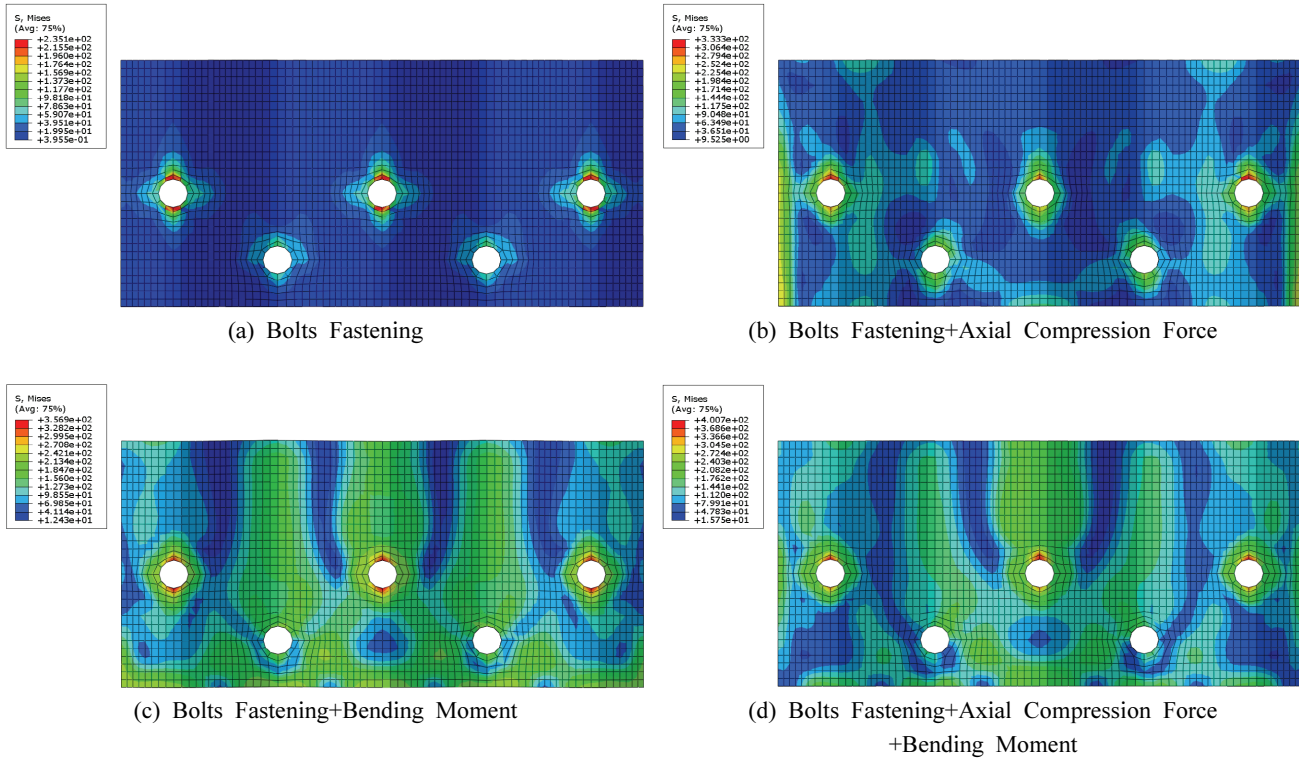


Fig. 11. Stress Distribution (2 Bolts, Correct Joint Lap, Upper Face of Upper Plate)

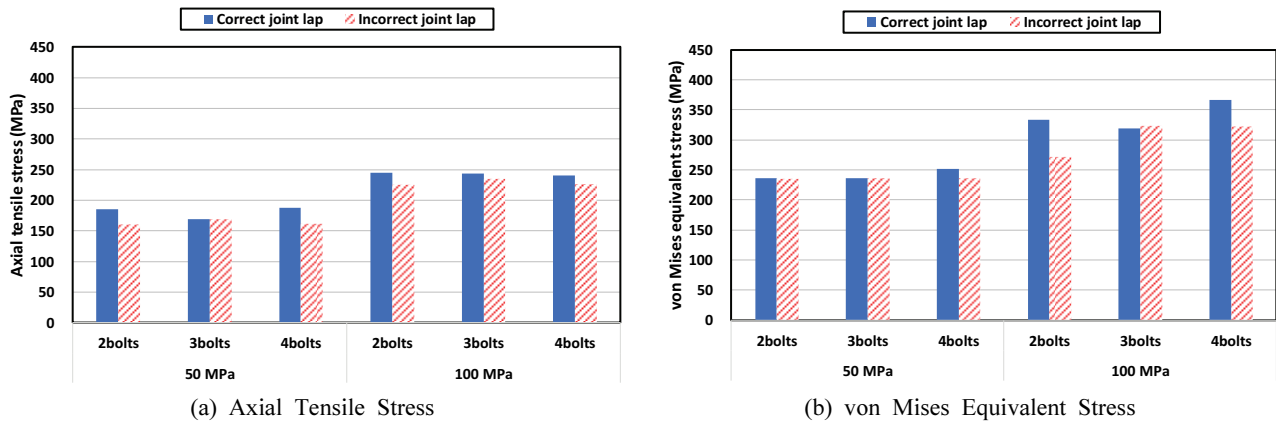


Fig. 12. Maximum Stress for Axial Compression Force

커진다고 볼 수 있다. 한국도로공사 지침(KEC, 2001)에 제시된 이음부 강도 중 이 연구의 대상인 두께 4 mm의 표준형 파형강판이 2볼트로 체결되었을 때의 이음부 강도를 응력으로 환산해보면 218 MPa의 압축응력에 해당되는데, 이 해석에 따르면 그보다 작은 압축응력하에서도 국부적으로 강판이 항복할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 따라서, 파형강판 종류에 따라 차이는 있겠지만 적어도 검토 대상의 경우 파형강판 설계 시 이음부 강도를 만족한다는 계산만으로는 볼트 이음부 균열을 완전히 방지하기 어려울 것으로 생각된다.

폰 미세스 등가응력은 축방향 응력보다 크게 나타났는데,

압축응력 50 MPa에서는 폰 미세스의 항복기준에 도달한 부분들이 있었고, 압축응력 100 MPa에서는 응력이 더욱 증가하였으나 강판의 인장강도까지 도달하지는 못하였다. 볼트 개수나 정부배열 여부에 따른 경향은 명확치 않았다.

4.3 휨모멘트 작용 시

볼트로 체결된 파형강판 구조물에 휨모멘트만 작용하는 경우의 해석 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 압축응력 작용 시와 마찬가지로 폰 미세스 등가응력 외에도 축방향 최대 인장응력을 검토해 보았다. 역시 최대 응력은 볼트 구멍 주변 강판에서 발생하였다.

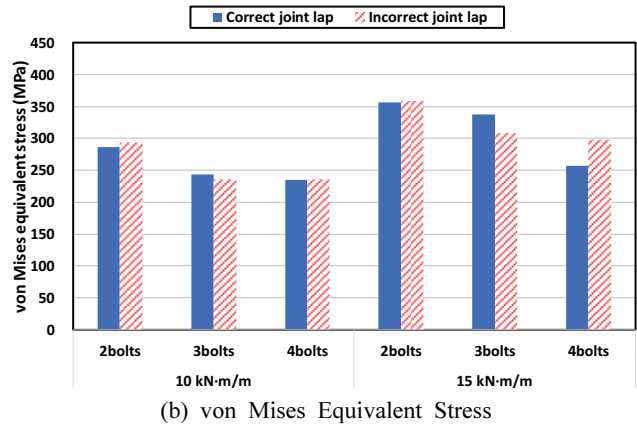
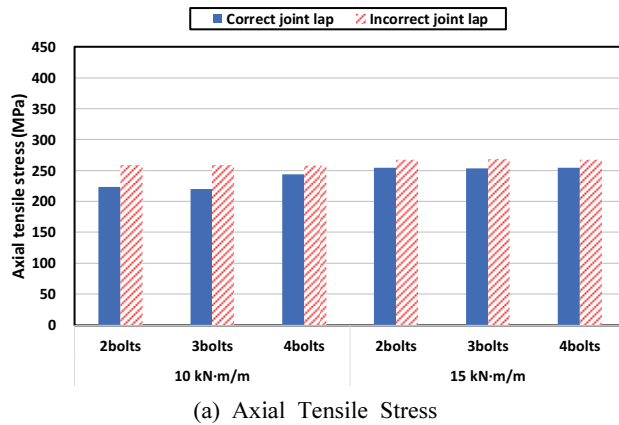


Fig. 13. Maximum Stress for Bending Moment

축방향 응력의 경우 가장 두드러진 특징은 부배열에서의 응력이 정배열에서의 응력보다 크게 발생하였다는 점이다. 또한 부배열에서는 휨모멘트의 크기에 관계없이 항복강도 이상의 큰 응력이 발생한 반면 정배열에서는 휨모멘트가 작은 경우 항복강도 정도의 응력이 발생하였고 휨모멘트가 큰 경우 항복강도 이상의 응력이 발생하였다. 볼트 개수에 따른 응력 차이는 크지 않았으며, 이는 휨모멘트가 작용할 때 국부적으로 크게 발생하는 응력은 볼트 개수에 큰 영향을 받지 않음을 의미한다.

폰 미세스 등가응력은 축방향 응력보다 대체로 크게 나타났는데, 특징적인 것은 볼트 개수가 늘어남에 따라 응력이 감소하는 경향이 비교적 명확히 나타났다는 점이다. 또한 폰 미세스 등가응력에서는 정배열 및 부배열에 따른 차이가 명확히 드러나지 않았다. 휨모멘트의 크기에 따른 경향은 비교적 뚜렷하였는데, 휨모멘트 10 kN-m/m의 경우 3볼트 및 4볼트에서는 폰 미세스의 항복기준 정도의 응력이 발생하였지만, 2볼트에서는 항복기준 이상의 큰 응력이 발생하였다. 반면 휨모멘트 15 kN-m/m의 경우 모든 볼트 개수에 대해 항복기준을 초과한 큰 크기의 응력이

발생하였다.

4.4 압축력과 휨모멘트 동시 작용 시

볼트로 체결된 파형강판 구조물에 압축력과 휨모멘트가 동시에 작용하는 경우의 해석 결과를 Fig. 14에 나타내었으며, 역시 최대 응력은 볼트 구멍 주변 강판에서 발생하였다.

축방향 응력의 경우 가장 두드러진 특징은 정배열보다 부배열에서 응력이 크게 발생하였다는 점이다. 즉, Fig. 13(a)와 같이 휨모멘트만 작용한 경우에도 이러한 경향이 나타났는데, 압축력까지 동시에 작용해도 이러한 경향이 유지되었다. 이는 실제 파형강판 구조물에서 Fig. 2와 같이 정배열보다는 주로 부배열 볼트의 경우에 주변 강판에서 종방향 균열 등 손상이 발생한 것으로 보고된 결과와 부합한다. 역시 볼트 구멍 주변 국부 응력이므로 볼트 개수에 따른 응력 크기의 경향 차이는 명확치 않았다. Fig. 2는 2볼트 부배열 시스템의 손상 사례를 보여주고 있지만, 다른 자료에 따르면 3볼트 및 4볼트 또한 Table 2에서 부배열로 배치된 경우 유사한 손상이 발생한 사례들이 보고되고 있으며, 이 해석 결과는 이러한 사실을 뒷받침하고 있다. 정배열에서는 항복

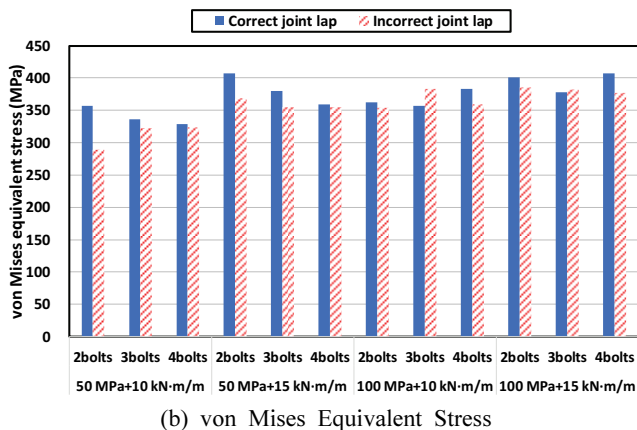
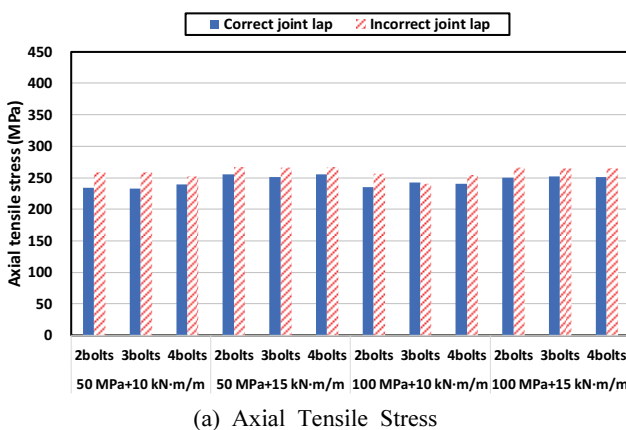


Fig. 14. Maximum Stress for Axial Compression Force and Bending Moment

강도인 235 MPa 이하가 발생한 경우도 적지 않았지만, 부배열에서는 압축력과 휨모멘트가 조합된 대부분의 경우 항복강도를 초과하는 응력이 발생하였다.

폰 미세스 등가응력은 볼트 개수에 관계 없이 이 검토에서 가장 작은 압축력과 휨모멘트의 조합인 압축력 50 MPa, 휨모멘트 10 kNm/m에서만 300~350 MPa 정도의 응력값을 산출하였고, 그보다 큰 압축력과 휨모멘트의 조합에서는 350~400 MPa 정도의 응력값을 보였다. 이는 모두 폰 미세스의 항복기준을 초과하여 변형을 경화 현상에 의해 항복기준이 확장되는 과정에 있는 것으로서 축방향 응력보다는 매우 큰 수준이다. 하지만 이 검토에서 가장 작은 압축력과 휨모멘트의 크기조차도 실제로 발생할 수 있는 크기 중에서는 큰 편에 속함을 주의해야 한다. 정배열 및 부배열에 따른 응력 차이나 볼트 개수에 따른 응력 감소 경향은 경향이 혼재되어 뚜렷하지 않았다.

4.5 볼트 이음부 연단거리 및 볼트 간격의 영향

여기에서는 Table 1과 같이 국내 표준형 파형강판 구조물에서 가장 빈번히 사용되고 있는 2볼트 정배열 시스템을 대상으로 압축력 및 휨모멘트가 가장 큰 경우에 대하여 볼트 이음부 연단거리 및 볼트 간격을 변화시켜 가며 그 영향을 분석해 보았다. 응력은 상기의 분석과 같이 축방향 인장응력 및 폰 미세스 등가응력을 검토하였다.

먼저 현행 한국도로공사 지침(KEC, 2001)에 규정된 연단거리인 35 mm의 적절성을 판단하기 위해 현행 볼트 간격인 50 mm를 유지한 상태에서 연단거리 g_1 을 변경해 보았다. 그 결과 Fig. 15와 같이 연단거리와 응력 간에 뚜렷한 상관관계를 찾을 수 없었다. 즉, 이 연구에서 검토한 20~65 mm 수준의 연단거리에서는 볼트 구멍 주변의 응력이 크게 변동하지 않았다. 또한 현행 규정인 35 mm에서 축방향 인장응력은 최소에 가까웠고, 폰 미세스 등가응력은 최소값이었으므로 현행 규정보다 연단거리를 늘려야 할 필요성을 찾지는 못하였다.

한편 현행 한국도로공사 지침의 볼트 간격인 50 mm의 타당성을 판단하기 위해 현행 연단거리인 35 mm를 유지한 상태에서 볼트 간격 g_2 를 변경해 보았다. 그 결과 Fig. 16과 같이 현행 볼트 간격인 50 mm보다 간격이 좀 더 좁은 35 mm인 경우에 강판 볼트 구멍 주변 응력이 최소였으나, 그보다 더 좁은 20 mm 간격에서는 볼트 구멍 주위의 큰 국부 응력이 서로 간섭되면서 응력이 다시 증가하는 경향을 보였다. 한편 볼트 간격이 50 mm 이상인 경우 응력에 큰 변동이 없었다. 하지만 볼트 중심 간격이 너무 좁게 되면 토크 렌치(torque wrench)로 볼트를 조이는 작업이 어렵고, 볼트 간격이 너무 넓게 되면 파형강판 이음부 사이에 뒤채움흙으로부터 지하수가 침투하여 강판에 부식이 발생할 우려 등이 있을 것으로 예상된다. 따라서 이러한 측면에서도 현행 볼트 간격 기준을 유지하는 것이 적절하다고 판단된다.

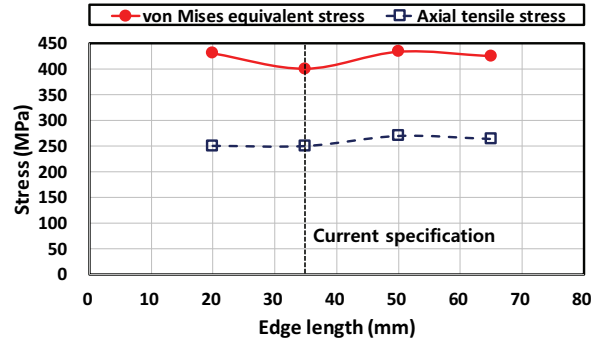


Fig. 15. Effect of Edge Length

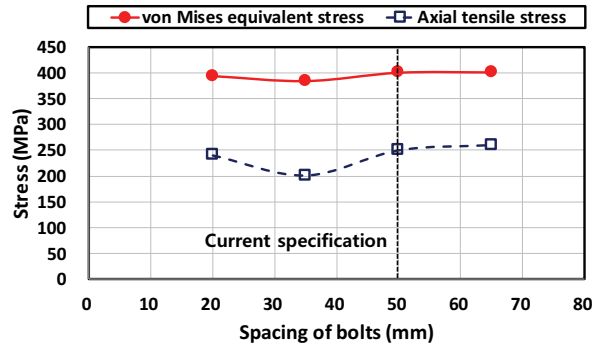


Fig. 16. Effect of Spacing of Bolts

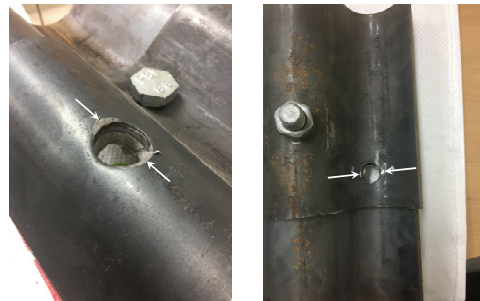


Fig. 17. Local Damage of Corrugated Steel Plate in Contact Surface during Fastening of Bolt and Nut

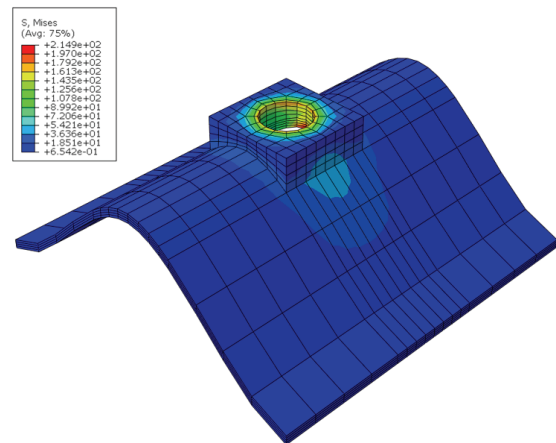


Fig. 18. Stress Distribution around a Curved Washer

5. 볼트 이음부 개선안

이상의 분석으로부터 판단할 때 파형강판 구조물의 볼트 이음부에서 발생하는 주요 손상인 Fig. 2와 같은 볼트 구멍 주변 강판의 균열은 이미 볼트 체결 단계에서 볼트 머리 또는 너트와 곡면 형상의 강판이 접촉하는 부위에서 발생한 큰 국부 응력 및 손상 때문으로 생각된다. 4.1절의 분석에 의하면 이러한 국부 응력은 이미 항복강도 가까이 발생하고 있다. 이처럼 파형강판 시공 단계에서 발생한 국부 응력에 부가하여 설계 시의 기본 가정인 압축력 외에도 불가피한 휨모멘트가 발생함에 따라 특히 휨 거동에 취약한 부배열 볼트 구멍 주변에서 그러한 국부 응력이 더욱 크게 증가하여 균열이 발생한 것으로 판단된다. 실제 볼트로 체결된 파형강판 구조물 샘플을 해체해보면 Fig. 17과 같이 강판의 곡면형상 때문에 볼트 구멍 주변 강판 전체가 볼트 머리나 너트와 접하는 것이 아니라 두 군데만 접하게 되며, 이는 볼트 체결 시 토크에 의해 생성된 강판 두께 방향의 압축력이 그러한 두 위치에 집중적인 국부 응력을 생성함을 의미한다. 하지만 이는 파형강판의 파형이 큰 곡률을 가진 이상 불가피한 상황이다. 상기의 분석과 같이 볼트 개수를 늘리거나 연단거리 또는 볼트 간격을 조절하는 것은 볼트 체결 시 발생하는 국부 응력과는 큰 관련성이 없으므로 최종 발생하는 응력을 저감시키는 데 효과가 크지 않은 것으로 파악되었다.

이러한 국부 응력을 완화하기 위하여 통상적으로 사용하는 것이 볼트 머리 또는 너트와 강판 사이에 끼워 넣는 와셔(washer)이다. 일반적인 파형강판 구조물에서는 와셔를 사용하지 않는 것이 보통이다. 하지만 와셔 유무를 변수로 파형강판 실험을 실시한 Lee et al. (2007)의 연구에 의하면 강판 두께에 따라 차이가 있기는 하지만 와셔를 사용해도 극한하중은 거의 유사하든가 약간의 증가에 그친 바 있다. 하지만 이는 평면 강판에 사용하는 평면 형상의 와셔를 사용했기 때문으로 판단된다. 평면 와셔의 경우 이를 적용해도 상기에서 언급한 강판 곡면과의 국부적인 접촉을 피할 수는 없기 때문이다. 따라서 파형강판 볼트 주변의 국부 응력을 완화하기 위해서는 일반적인 와셔보다는 강판 곡면과 밀착되는 특수한 형태의 와셔를 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각되며, 기존에 관련 특허(Fixon Inc., 2011)가 출원된 바도 있다. 이 연구에서는 추가적으로 이러한 곡면 형상 와셔의 영향을 해석적으로 검토해 보았으며, 그 결과 볼트 체결 시 와셔가 없을 때는 강판의 폰 미세스 등가응력이 235.1 MPa까지 발생했던데 반해 Fig. 18과 같이 곡면 와셔를 강판 양쪽면에 사용할 경우 그 값이 214.9 MPa로 약 8.6% 감소되는 효과를 나타내었다. 와셔의 두께나 강성 등을 추가적으로 조절하면 파형강판의 국부 응력을 추가로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

이외에도 이러한 국부 응력 감소를 위한 몇가지 대안들이 있을 수 있는데, 그 중 한가지는 도로용 철제 가드레일의

예와 같이 파형강판 부위 중에서 곡면 형상이 아닌 평면 형상인 위치에 볼트를 설치하는 것이다. 파형강판의 산과 골 부분이 아닌 경사면이 이에 해당한다. 하지만, 특히 휨 거동 시 경사면보다는 산과 골에서 큰 응력이 발생하게 되므로 산과 골에 볼트 이음이 없을 경우 외부하중에 대하여 강판의 일체성이 저하될 우려가 있다. 또한, 파형강판을 곡면이 아닌 평면들을 조합하여 절곡된 형태로 제작하면 그러한 평면에 설치된 볼트 주변의 국부 응력이 감소될 수 있겠지만, 곡면과 비교할 때 절곡 형태는 하중 작용 시 격인 부위에 응력이 집중되어 좀 더 크게 발생하므로 취약부가 될 우려가 있다.

6. 결론

파형강판 구조물의 볼트 이음부는 설계기준상의 규정 및 안전도 검토 절차에 따라 설계하고 있지만, 그럼에도 불구하고 이음부에서 강판의 균열 등 손상 사례가 보고되고 있다. 이 연구에서는 기존 해석 모델의 단점들을 파악하고 개선하여 볼트 이음부의 상세한 유한요소 모델을 구성함으로써 다양한 변수에 대한 해석적인 분석을 실시하였으며, 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 볼트 체결 시 각 볼트 구멍 주위의 강판에서 국부 응력이 크게 발생하였으며, 폰 미세스 등가응력은 항복기준에 가까웠다. 이는 곡면 형상의 파형강판을 볼트로 체결하는 과정에서 발생하는 볼트와 강판의 국부적인 접촉에 의한 응력 집중 때문으로 판단된다. 여기에 압축력 및 휨모멘트가 추가로 작용함에 따라 그러한 응력이 항복강도 이상 더욱 증가하는 현상을 보였다. 따라서 볼트 구멍 주변 강판의 균열은 이처럼 볼트 체결 시 발생하는 큰 국부 응력에 기인한 바가 크다고 판단된다.
- (2) 설계지침상 이음부 강도 이하의 압축력만 작용 시에도 볼트 구멍 주변에 국부적으로 항복강도에 도달하는 부분이 나타났다. 따라서, 설계 가정대로 압축력만 작용하더라도 현재 규정상으로는 볼트 이음부 균열을 완전히 방지하기 어려운 것으로 판단된다.
- (3) 휨모멘트가 단독 또는 실제 현상과 같이 압축력과 동시에 작용할 때 축방향 응력의 경우 부배열에서의 응력이 정배열에서의 응력보다 크게 발생하였다. 이는 기존에 정배열보다는 부배열 볼트에서 손상이 더 많이 관찰된 사실과 부합한다. 압축력과 휨모멘트의 동시 작용 시 부배열에서는 대부분 항복강도를 초과하는 응력이 발생하였다. 볼트 구멍 주변의 국부 응력이므로 볼트 개수에 따른 축방향 응력 크기의 경향은 명확치 않았다. 이는 2볼트 뿐 아니라 3볼트 및 4볼트도 부배열로 배치되면 손상에 취약할 수 있음을 의미

하며, 실제 사례와도 부합한다.

- (4) 연단거리의 경우 현행 35 mm를 포함하여 20~65 mm 수준의 연단거리에서는 볼트 구멍 주변의 응력이 크게 변동되지 않았으므로 현행 규정은 적절한 수준으로 파악된다. 한편 볼트 간격은 현행 50 mm를 포함하여 20~65 mm 범위를 검토하였으며, 전반적으로 유의미할 정도로 응력이 크게 변동하지는 않았으므로 시공성이나 내구성을 고려할 때 현행 볼트 간격은 적절하다고 판단된다.
- (5) 볼트 체결 단계에서 발생하는 큰 국부 응력을 저감시키는 것이 볼트 이음부 손상을 줄이는데 효과적인 것으로 파악되므로, 몇가지 대안을 제시해 보았다. 한 예로 강판 곡면에 밀착되는 특수한 형태의 와셔를 사용할 경우 해석을 통해 볼트 체결 시의 국부 응력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 한편 상기의 분석과 같이 볼트 개수를 늘리거나 연단거리 또는 볼트 간격을 조절하는 것은 볼트 체결 시 발생하는 국부 응력과는 큰 관련성이 없으므로 최종 발생하는 응력을 저감시키는 데 효과가 크지 않은 것으로 파악되었다.

감사의 글

본 연구는 2017년 한국도로공사 연구사업 “암거구조물의 안전성평가 및 보강방법 연구”의 공동연구비로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

- AISI (American Iron and Steel Institute). (2002). *Handbook of steel drainage & highway construction products* (2nd Canadian ed.).
- Bakht, B., and Agarwal, A.C. (1988). On distress in pipe-arches. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 589-595.
- Calladine, C.R. (1983). *Theory of shell structures*. Cambridge University Press.
- CSA (Canadian Standards Association). (2006). *Canadian highway bridge design code (CHBDC)*.
- Choi, M.S. (2005). *Evaluation of compressive seam strength and flexural strength of corrugated structural plates*. Master's thesis, Hanyang University.
- Daewoo E&C and Ajou University. (2017). *Safety assessment, repair and strengthening method of corrugated steel plate structures*.
- Dassault Systèmes Simulia. (2015). *Abaqus 6.15-Analysis user's manual*.
- Fixon Inc. (2011). *A bolt with the attached washer for corrugated steel plates*. Design patent, 30-05995740001.
- Han, J.H., Choi, J.K., Heo, I.S., and Kim, S.B. (2008). Slip behavior of high-tension bolted joints subjected to compression force. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 20, No. 2, pp. 279-288.
- Kang, S.P. (2004). *Evaluation of limitary edge lap and bolt hole spacing for the corrugated plate*. Master's thesis, Inha University.
- KEC (Korea Expressway Corporation). (2001). *Guidelines of design and construction of soil-steel structures*. KEC Expressway Research Institute.
- KS D 3590. (2017). *Corrugated steel pipes and sections*. Korean Agency for Technology and Standards.
- Lee, J.H. (2012). *Evaluation of deep corrugated steel plate seam strength using numerical analysis method*. Master's thesis, Dankook University.
- Lee, J.K., Cho, S.M., Lee, J.G., and Yoon, T.Y. (2007). Analysis of influence factors on the bolt hole tears in soil steel structures. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 2C, pp. 129-137.
- Lee, B.J., Yoon, J.Y., Nam, M.S., and Park, Y.H. (2014). Development of performance evaluation method for structures based on 3D geometric information and image processing. *Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 18, No. 2, pp. 17-25.
- Mikhailovsky, L., Kennedy, D.J.L., and Lee, R.W.S. (1992). Flexural behavior of bolted joints of corrugated steel plates. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 896-905.
- Oh, H.S., and Nam, K.W. (2012). Verification on the compressive behavior of corrugated steel plates due to details of bolted lap joint. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 16, No. 1, pp. 9-17.
- Sindo ILS. (2018). *Tightening torque*. Retrieved from www.sindoils.com.

Received October 15, 2018

Revised October 16, 2018

Accepted October 30, 2018