

## 축하중을 받는 콘크리트 충전 원형 강관 N형 이음부의 핫스팟 응력 특성

### Hot Spot Stress of Concrete-filled Circular Hollow Section N-joints Subjected to Axial Loads

김인규\* · 정철현\*\* · 김영진\*\*\*

Kim, In-Gyu · Chung, Chul-Hun · Kim, Young-Jin

#### Abstract

The use of Concrete filled circular hollow steel section (CFCHS) members in bridge design is a relatively new concept. The most important part of the design and durability of such structures is the design and the construction of the joints. In the design of recently constructed steel-concrete composite bridges using CFCHS truss girders for the main load carrying structure, the fatigue verification of the tubular spatial truss joints was a main issue. Welded CFCHS joints are very sensitive to fatigue because the geometric discontinuities of the welds lead to a high stress concentration. New research done on the fatigue behaviour of such joints has focused on CFCHS N-joints, directly welded, with finite element analysis method. A commercial software, ABAQUS, is adopted to perform the finite element analysis on the N-joints. This paper is main focused on these topics, including hot spot stress.

**Keywords** : CFT(concrete filled steel tube), CHS(circular hollow section), tubular section joints, Hot spot stress, SCF(stress concentration factors)

#### 요 지

콘크리트 충전강관을 이용한 교량은 새로운 형식의 교량 형태이다. 강관을 이용한 교량을 적용하는데 있어서 가장 중요한 것은 이음부의 설계이다. 이 논문에서는 축하중을 받는 충전강관 N형 이음부에서 현재는 충전강관으로 브레이스는 강관으로 구성된 이음부의 특성을 범용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 유한요소해석을 통해 고찰하였다. 충전강관 이음부의 핫스팟 응력을 결정하는 기하학적 인자 중, 용접 각장길이, 현재의 직경, 브레이스의 두께에 따른 핫스팟 응력의 차이점을 비교하였다. 또한 충전강관 N형 이음부에서 사재의 각도와 수직재와 사재사이의 거리를 변수로 하여 유한요소해석을 수행하였으며, 현재에 충전된 콘크리트의 강도의 변화에 따른 이음부의 핫스팟 응력 특성을 살펴보았다.

**핵심용어** : 콘크리트 충전강관, N형 이음부, 핫스팟 응력, 응력집중계수

#### 1. 서 론

강관 구조물의 이음부는 N형, T형 및 K형 등 다양한 외형적 형상을 가진다. 또한 현재(chord)와 브레이스(brace)가 만나는 용접 이음부서 수직재의 경우 크라운(crown), 새들(saddle), 사재의 경우 토우(toe), 새들, 힐(heel) 등이 존재하는 기하학적 형상을 가지게 된다. 이러한 강관 이음부의 기하학적 형상은 현재 및 브레이스의 직경 및 두께, 사재의 각도 등에 의하여 결정된다. 강관 이음부에서는 기하학적 형상에 의하여 공칭응력 보다 훨씬 더 큰 응력이 발생하는 핫스팟(hot spot)응력 구역이 나타난다. 핫스팟 응력은 이음부의 기하학적 형상과 관련된 특성으로 원형강관 및 각형강관

구조물의 피로설계에 매우 중요한 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Lewei, 2006). 강관 이음부의 핫스팟 응력을 직접적인 해로 구하기는 매우 어려워 지금까지 이음부의 핫스팟 응력을 실험과 유한요소 해석을 통해 구하고 있다. 그러나 강관 이음부의 기하학적 형상을 구성하는 인자는 매우 많기 때문에 실험을 통해 직접 구하는 것은 매우 어렵고 시간이 많이 소요되기 때문에 최근에는 핫스팟 응력을 유한요소해석을 통하여 구하며 이를 통해 구조물의 피로설계에 이용하고 있다(Nazari, 2007; Jaurrieta, 2003).

CIDECT No 8(2000), OTH 354(2000) 및 IIW(2000) 등에서는 강관 이음부의 피로 설계를 위하여 필요한 핫스팟 응력을 구하기 위하여 이음부의 기하학적 특성에 따른 응력

\*정회원 · 교신저자 · (주)대우건설 기술연구원 책임연구원 (E-mail : gyu@dwconst.co.kr)

\*\*정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : chchung5@dankook.ac.kr)

\*\*\*정회원 · (주)대우건설 기술연구원 전문위원 (E-mail : kimyj@dwconst.co.kr)

집중계수(stress concentration factors, SCF)를 제시하고 있다. 국내의 경우도 강관 K형 이음부의 응력집중계수에 대한 실험적 연구 등이 수행되고 있으나 아직까지 기준화된 강관 이음부 피로설계 기준이 없어 교량과 같은 피로하중을 받는 구조물에 있어서 강관 부재의 사용이 제한되고 있다. 해외 각 설계기준 또한 각 설계기준에서 제시한 기준의 범위를 벗어나는 다양한 형태의 강관 이음부에 대하여는 응력집중계수를 실험이나 유한요소해석을 통하여 구하여야 한다. 더욱이 충전강관 이음부에 대한 응력집중계수는 해외 기준에서도 제안되고 있지 않아 충전강관 부재를 피로를 받는 구조물에 적용하기 위해서는 이음부 형상별로 실험 또는 유한요소해석을 수행하여 각각의 이음부에 대한 응력집중계수를 구하여야 한다.

충전강관 이음부에 대한 연구는 최근에 활발히 수행되고 있으며 충전강관 T형 이음부에 대한 실험적 연구 결과에서 강관 이음부보다 응력집중계수가 면내 휨에 대하여 20~70% 정도로 감소되고, 축력에 대하여는 10~80% 정도로 감소하는 것으로 밝혀졌다(Lewei, 2007). 축하중을 받는 충전강관 N형 이음부에 대한 실험에서는 강관 이음부에 비하여 충전강관 이음부의 내력이 두 배 이상 증가하는 것으로 밝혀졌다(Yin, 2009). 그러나 아직까지 충전강관 부재를 이용한 다양한 형태의 이음부 피로거동에 대한 연구는 미비하여 충전강관 부재의 적용에 많은 어려움이 따르고 있다.

본 연구에서는 현재는 충전강관으로 브레이스는 강관으로 이루어진 이음부(이하, 충전강관 이음부라 함)에 대한 유한요소해석을 통하여 응력집중계수를 구하기 위한 핫스팟 응력을 구함으로써 이음부 특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 핫스팟 응력과 응력집중계수

활하중을 받는 용접구조물은 이음부에 대하여 피로설계를 수행하여야 한다. 특히 강관 구조물 연결부에서는 응력의 상태가 균일하지 않고 응력집중현상이 발생하여 정적설계보다는 피로설계가 단면을 지배하게 된다. 서론에 언급하였듯이 원형 강관 이음부의 기하학적 형상에 의하여 공칭응력 보다 훨씬 더 큰 응력이 집중되는 핫스팟 응력 구역이 나타난다. 핫스팟 응력은 초기균열이 일반적으로 시작되는 위치에서 발생하는 최대 기하학적 응력을 의미하며 이음부의 기하학적 형상과 관련된 특성으로 원형강관 및 각형강관 구조물의 피

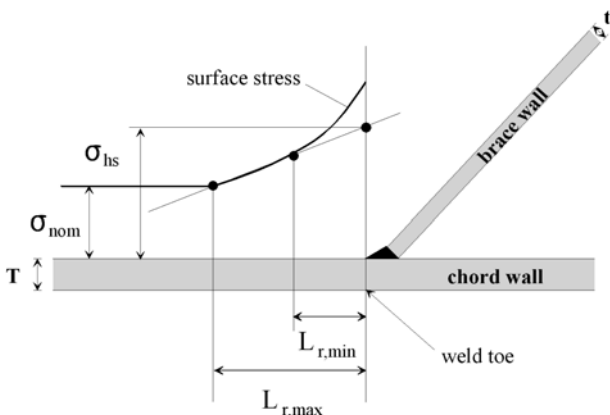


그림 1. 핫스팟 응력을 구하기 위한 외삽법 모식도

로설계에 매우 중요하다. 강재의 피로설계는 S-N 곡선법, 공칭 응력법 및 핫스팟 응력법 등이 수행되지만 원형강관의 경우 이음부의 기하학적 특성으로 인하여 핫스팟 응력을 이용하여 강관 이음부의 피로설계에 이용하고 있다. 핫스팟 응력은 해석적 접근이 어려워 일정한 관계식을 찾기가 쉽지 않은 이음부에 대하여 일반적으로 실험을 통해 측정할 수 있는데, 핫스팟 구역에서는 직접적으로 응력을 측정할 수 없어 간접적으로 그림 1과 같이 용접 토우(weld toe)에서 제안된 2점의 측정값을 통해 외삽법으로 측정할 수 있다(OTH 354, 2000).

여기서,

$$L_{r,min} = 0.2\sqrt{r \cdot t} \quad (1)$$

$$L_{r,max} = 0.4(R \cdot T \cdot r \cdot t)^{0.25} : \text{현재} \quad (2)$$

$$L_{r,max} = 0.65\sqrt{r \cdot t} : \text{브레이스} \quad (3)$$

R : 현재의 반지름

r : 브레이스 반지름

$\sigma_{hs}$  : 핫스팟 응력

$\sigma_{nom}$  : 공칭응력

핫스팟 응력은 공칭 응력에 응력집중계수를 곱하여 식 (4)에 의해서 산정될 수 있다면, 반대로 식 (4)을 이용하여 핫스팟 응력을 측정한다면 응력집중계수를 구할 수 있다(OTH 354, 2000).

$$\sigma_{hs} = SCF \cdot \sigma_{nom} \quad (4)$$

응력집중계수란 이음부의 기하학적 형상으로 인한 핫스팟 응력과 공칭응력의 비이며, 국외의 경우 빈 원형 강관부재에 대한 다양한 형태의 이음부에 대한 응력집중계수를 구하는 연구가 진행되었으며 피로설계에 필요한 설계식 및 설계방법을 통해 응력집중계수가 제공되고 있다. 그러나 국외의 경우도 충전강관 이음부에 대한 연구는 최근에 수행되고 있으나 충전강관 부재에 대한 다양한 형태의 이음부 피로거동에 대한 연구는 아직 미비하여 중공 강관과 같이 이음부에 대한 다양한 정보가 제공되고 있지 않아 충전강관 부재의 현장 적용에 많은 어려움이 있다.

그림 2에 강관 이음부의 기하학적 형상을 결정하는 다양한 인자를 나타내었다. 이음부의 형상은 알파벳 형상으로 표현 되는데 그림 2에서와 같이 “B” 브레이스만 존재하는 경우 T형 이음부, “A” 브레이스 또는 “C” 브레이스만이 존재하는 경우 Y형 이음부, “B” 브레이스와 “C” 브레이스가 있으면 N형 이음부, “A” 브레이스와 “C” 브레이스가 있으면 K형 이음부 등으로 불리우는 다양한 형상을 가진다. 또한 그림 2에 현재와 브레이스를 연결하는 용접이음인 필렛용접의 형상을 나타내었다.

강관 용접이음부의 핫스팟 응력 지역의 피로특성은 여러 인자에 의해 영향을 받는데, 특히 충전강관의 경우 충전 콘크리트의 영향으로 강관 이음부의 피로 특성과는 차이가 있을 것으로 예상된다. 이 논문에서는 이음부의 브레이스와 현재가 강관으로 구성된 N형 이음부와 브레이스는 강관, 현재는 충전강관으로 구성된 N형 이음부의 핫스팟 응력 특성을

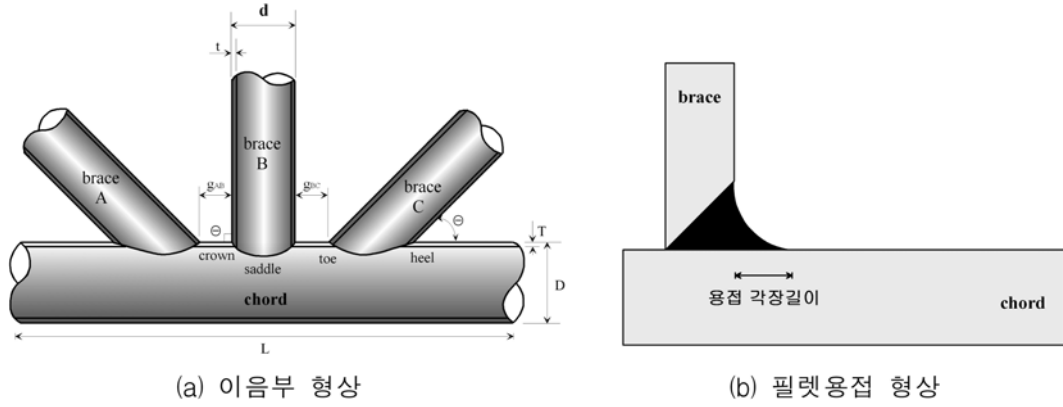


그림 2 대표적 강관 이음부 형상 및 필릿용접 형상

평가하였다. 해석변수는 용접 각장길이, 수직재와 사재간의 거리, 브레이스의 두께변화, 현재의 직경변화, 사재의 각도 및 콘크리트의 강도 변화에 따른 충전강관 N형 이음부의 핫스팟 응력 특성을 고찰하였다.

### 3. 충전강관 N형 이음부의 유한요소 해석

본 연구에서는 축하중을 받는 충전강관 N형 이음부의 핫스팟 응력을 유한요소해석을 통하여 구하기 위하여 범용해석 프로그램인 ABAQUS(Ver 6.7)를 사용하였다. 충전강관 N형 이음부의 거동 평가를 위한 해석 모델은 N형 이음부의 기하학적 형상이 매우 복잡하기 때문에 이음부의 형상을 효율적으로 모사하기 위하여 4절점 사면체 고체요소(first-order tetrahedron)를 사용하였다. 충전강관 내부에 충전된 콘크리트는 완전합성으로 가정하여 모델링 하였다.

해석 모델은 하중 및 구조물의 대칭성을 이용하여 1/2만을

모사하였으며 기하학적 특성을 상세하게 모사하기 위하여 이음부 주변은 매우 세밀하게 분할하여 모델링하였으며 대표적인 해석대상 모델의 형상은 그림 3과 같다. 현재의 길이는 강관 이음부의 거동 특성에 실 교량 구조물에서 가장 많이 적용 될 수 있는 2m로 고정하였으며 양단은 고정단으로 모델링하였다.

축하중을 받는 강관 N형 이음부의 하중조건은 수직재와 사재의 축력에 대한 하중조합에 따라 3가지 경우를 고려하였다. 하중의 크기는 응력집중계수를 쉽게 구하기 위하여 단위응력 형태인  $1 \text{ kN/m}^2$ 를 단면에 등분포하중으로 재하 하였으며 형상은 그림 4와 같다. 재하 된 하중의 크기는 브레이스의 공칭응력과 같으며 경계조건은 현재의 양단은 완전 고정된 것으로 가정하여 모델링하였다.

본 해석에 앞서 이음부의 기하학적 특성이 매우 복잡하고 민감하기 때문에 유한요소해석의 정확성을 높이기 위하여 강관 부재 두께의 분할 개수에 따른 해석의 수렴성을 검증하

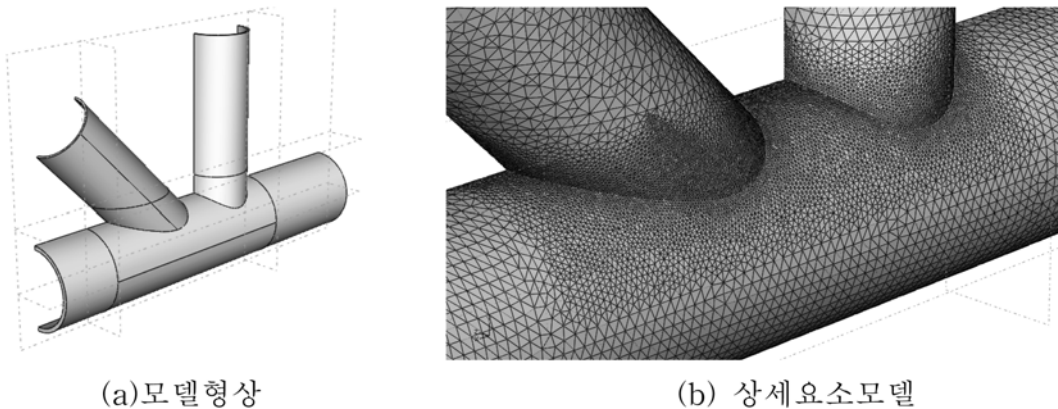


그림 3. 원형강관 N형 이음부 모델 형상 및 상세 요소 모델

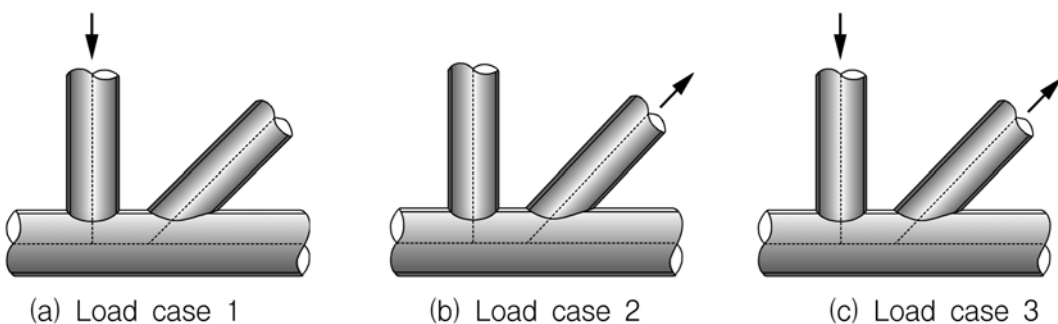


그림 4. 강관 N형 이음부 하중 조건

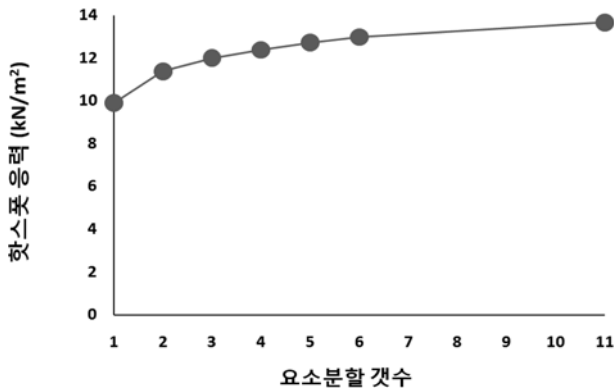


그림 5. 강관 부재 해석모델 두께 분할 개수에 따른 핫스팟 응력

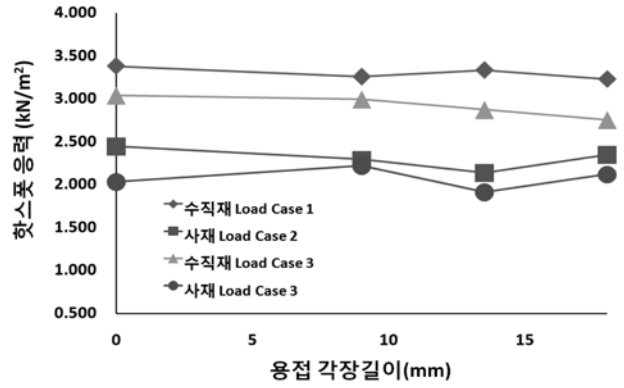


그림 7. 용접 각장길이에 따른 강관 N형 이음부의 최대 핫스팟 응력(현재 : D=406.4 mm, T=19 mm, 브레이스 : d=318 mm, t=9 mm)

였다. 유한요소해석 결과의 수렴성을 검증하기 위하여 강관으로 된 휨을 받는 모델을 사용하였으며, 부재의 두께별 분할 개수를 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11개로 나누었으며 분할에 따른 각 부재에서의 응력 변화를 그림 5에 나타내었다.

해석결과에서 보면, 강관 부재 두께에 대한 분할 개수가 증가하면서 최대 응력이 증가하다가 수렴하는 경향을 보였다. 이 논문에서는 강관 N형 이음부의 핫스팟 응력을 평가하기 위한 유한요소해석을 위하여 강관 부재 두께별 분할 개수는 그림 5의 결과를 토대로 해석의 효율성을 고려하여 3~4층으로 분할하였으며 탄성해석을 수행하였다. 강재와 용접단면의 재료적 성질은 동일하게 적용하였으며 단위중량은 78 kN/m³, 탄성계수는 200,000 MPa 및 포와송비는 0.3을 콘크리트의 단위중량 23 kN/m³, 강도는 35 MPa, 탄성계수는 27,223 MPa 및 포와송비는 0.16을 적용하였다.

#### 4. 충전강관 N형 이음부의 변수별 핫스팟 응력 특성

##### 4.1 원형 강관 N형 이음부 용접 각장길이 따른 핫스팟 응력

축하중을 받는 충전강관 N형 이음부의 거동에 있어서 용접 각장길이를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우 차이를 보일 수 있기 때문에 용접 각장길이의 영향에 대하여 평가하였다. 용접방식은 필렛용접이며 OTH 354(2000)에는 필렛 용접 각장길이에 따른 응력집중계수를 구하는 식을 제안하고 있다. Lloyd's는 용접 각장길이가 현재 두께의 0.5~1.0배인 경우 핫스팟 응력이 5% 감소하는 것으로 제안하고 있다. 또한 Jaurrieta(2003)은 응력집중계수가 용접 각장길이를 고려하는 경우가 그렇지 않은 경우보다 다소 감소하는 결과를 보이며, 용접 각장길이에 상관없이 응력집중계수가 10~15% 정도 감소되는 것으로 나타낸바 있다.

이 논문에서는 용접 각장길이에 따른 영향을 검토하기 위하여 필렛용접 각장길이에 따른 핫스팟 응력의 변화를 유한요소 해석을 통하여 분석하였다. 해석모델은 용접 각장길이를 브레이스의 두께 대비 100%, 150% 200%의 변수로 하여 모델링하였으며 ABAQUS 프로그램에서 필렛이음부 형상을 선택하여 모델링을 하였다. 해석 대상 모델에서 현재의 직경은 406.4 mm, 두께는 19 mm 이며 브레이스의 직경은 318.5 mm, 두께는 9 mm인 경우를 적용하였다. 유한요소해석 결과는 그림 6 및 그림 7에 나타내었다.

강관 N형 이음부의 경우 용접 각장길이를 고려하는 경우 핫스팟 응력이 용접 각장길이가 없는 모델 보다 작은 수준으로 나타났으며 해석결과 Load case와 수직재 및 사재에 따라 다소 차이는 있지만 일반적으로 평균 5%정도 응력이 감소하는 것으로 나타났다. 해석에서 사용된 강관의 현재의 두께는 19 mm로써 Lloyd's가 제안하는 용접 각장길이 조건을 만족하고 있어 해석 결과 값을 비교할 수 있었다. 그림 7에서 보면 용접 각장길이에 따른 응력집중계수의 감소는 Lloyd's의 연구결과와 비슷하게 핫스팟 응력이 5% 감소하는 것으로 나타났다.

##### 4.2 충전강관 N형 이음부 갭 길이에 따른 특성

강관 및 충전강관 이음부에서 갭(gap)이란 그림 2에서 나타났듯이 N형 이음부의 경우 수직재와 사재 사이의 길이이다. IIW(1985)에서는 갭의 길이가 응력집중계수에 영향을 주는 것으로 하여 응력집중계수에 갭 길이에 대한 인자가 포함되어 있었다. 그러나 IIW(2000)에서는 새롭게 갭의 길이에 대한 인자가 포함되지 않는 응력집중계수식을 제안하고 있다. 이 논문에서는 갭이 충전강관 N형 이음부의 거동에 미치는 영향을 파악하고자 갭의 길이를 변수로 하여 유

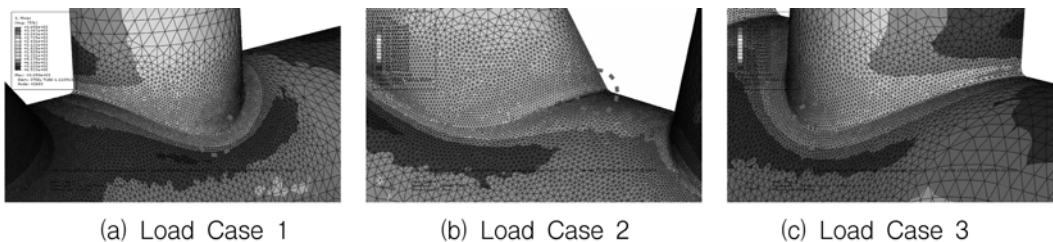
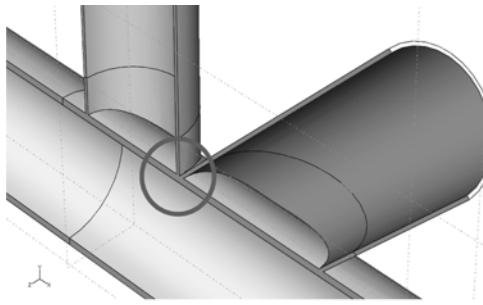
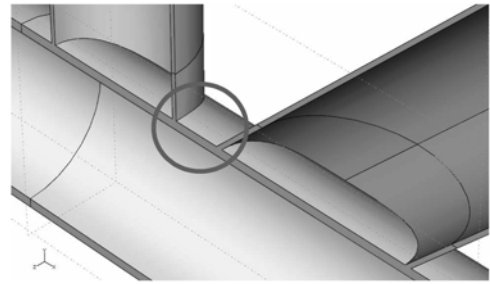


그림 6. 강관(D406-19T-d318-9t) N형 이음부(용접 각장길이=9 mm)의 핫스팟 응력



(a) 겹 길이=0 mm



(b) 겹 길이=100 mm

그림 8. 충전강관(D=406.4 mm, T=19 mm, d=318.5 mm, t=9 mm) N형 이음부의 겹 길이 변화에 따른 유한요소해석 모델

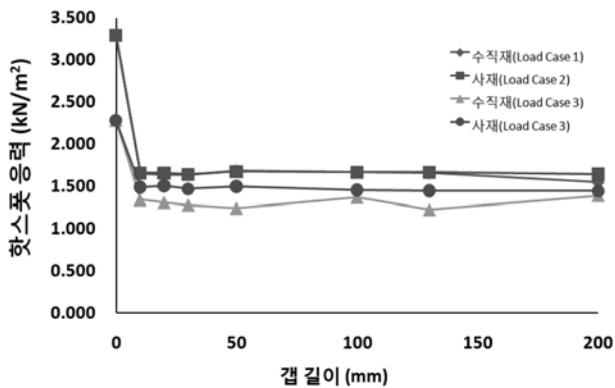


그림 9. 충전강관(D=406.4 mm, T=19 mm, d=318.5 mm, t=9 mm)의 겹 길이에 따른 핫스팟 응력

한요소해석을 수행하였다. 현재는 직경 406.4 mm, 두께는 19 mm 강관을 사용하였으며 브레이스의 직경은 318.5 mm, 두께는 9 mm인 강관을 적용하였다. 겹 길이의 변화는 수직재와 사재가 떨어져 있지 않은 0 mm부터 10 mm, 20 mm에서 최종 300 mm까지 8단계로 선택하여 유한요소해석을 수행하였다. 그림 8은 강관 N형 이음부의 겹 길이 변화에 따른 모델이다.

본 해석을 통해 브레이스 사이의 겹 길이 변화에 따른 상호 간섭효과를 확인할 수 있었으며 그림 9에 겹의 길이 변화에 따른 각각의 핫스팟 응력을 나타내었다.

겹의 길이 변화에 따른 핫스팟 발생응력을 검토한 결과 겹의 유, 무에 따라 핫스팟 응력의 크기가 큰 차이를 보였다. Load case 1, 2의 경우 약 2배 정도의 차이를 보였으며 Load case 3의 경우 겹의 유무에 따라 응력이 약 1.6 배 정도의 차이를 보였다. 그러나 겹이 존재하는 경우 겹 길이의 크기에 따른 핫스팟 응력의 변화는 수직재와 사재 모두 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 겹 길이가 존재하는 N형 이음부의 경우는 수직 브레이스는 T형 이음부로, 사재는 Y형 이음부로 각각 별도의 형상으로 해석할

수 있기 때문에 N형 이음부의 거동 평가를 별도로 고려하지 않고 T형 이음부 및 Y형 이음부 거동 특성, 또는 브레이스 각도 변화의 고려가 가능한 T형 이음부 하나의 거동 특성으로 겹 길이가 존재하는 N형 이음부를 평가하는 것이 가능함을 알 수 있다.

#### 4.3 충전강관 N형 이음부 브레이스 두께 및 현재의 직경 변화에 따른 특성

충전강관 N형 이음부의 브레이스 두께변화에 따른 핫스팟 응력을 평가하기 위하여 현재의 직경은 406.4 mm, 두께는 19 mm, 브레이스의 직경은 318 mm, 두께는 각각 6, 7, 8, 9 mm에 대하여 핫스팟 응력을 구하였다. 그림 10에 브레이스 두께 7 mm인 충전강관 N형 이음부의 브레이스 두께변화에 따른 유한요소해석 결과를 대표적으로 나타내었다.

충전강관 N형 이음부에서 브레이스 두께증가에 따른 수직재 및 사재의 응력 변화를 종합하여 그림 11에 나타내었다.

해석결과 전반적으로 브레이스 두께가 증가함에 따라 핫스팟 응력이 증가하는 경향을 보였다. 최대 핫스팟 응력 발생 위치는 수직재의 경우 크라운부 근처에서 발생하였으며 사재

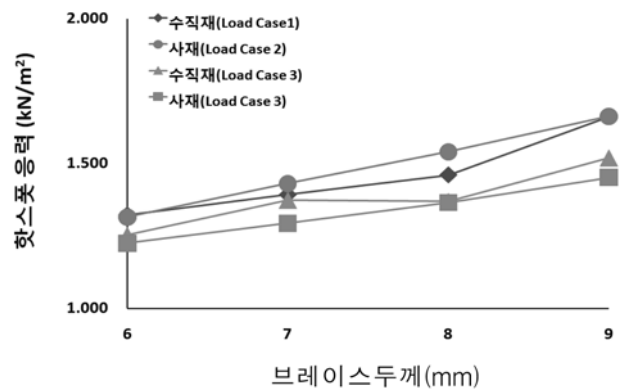
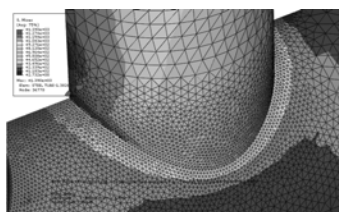
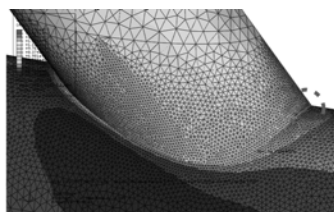


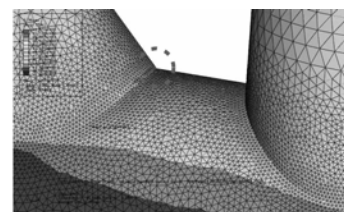
그림 11. 충전강관(D=406.4 mm, T=19 mm, d=318.5 mm)의 핫스팟 응력



(a) Load case 1



(b) Load case 2



(c) Load case 3

그림 10. 충전강관(D=406.4 mm, T=19 mm, d=318 mm, t=7 mm) N형 이음부의 핫스팟 응력

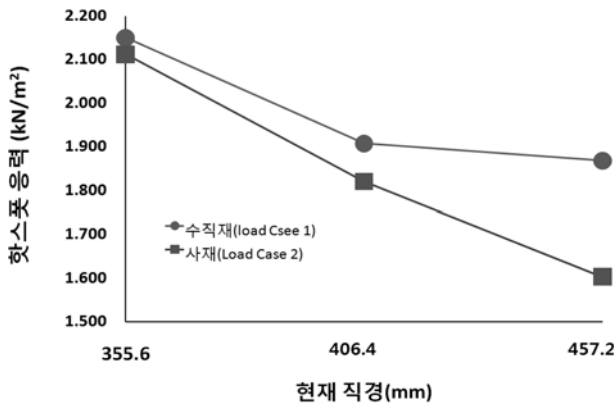


그림 12. 충전강관( $d=318.5$  mm,  $t=8$  mm,  $T=12$  mm)의 핫스팟 응력

의 경우 토우부근에서 발생하는 것으로 그림 10에 나타났다. 또한, 현재의 직경 변화에 따른 핫스팟 응력을 평가하기 위하여 브레이스의 직경을 318.5 mm, 두께를 8 mm, 현재의 두께를 12 mm로 고정 시킨 후 현재의 직경을 355.6 mm, 406.4 mm 및 457.2 mm로 하여 핫스팟 응력의 차이를 비교 분석하였으며 해석결과를 그림 12에 수록하였다.

현재의 직경이 증가할 수 록 충전강관 이음부의 핫스팟 응력은 수직재와 사재 모두 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4.4 충전강관 N형 이음부 사재 각도 변화에 따른 특성

강관 부재를 이용한 N형 또는 Y형 이음부의 응력집중계수는 브레이스 각도 변화에 따라 거동의 차이가 있을 것으로 예측되기 때문에 중공강관 이음부에 대해서 제안된 응력 집중계수식에 브레이스의 각도에 대한 인자가 포함된 식을 제공하고 있다. 각도 인자를 포함한 응력집중계수식을 제안한 OTH 354(2000)의 경우 강관 T형 이음부와 Y형 이음부를 같은 이음부로 간주하고 있으며, Y형 이음부 응력집중계수 제안식에 각도를 90°가 적용하면 T형 이음부가 된다. 중공강관 응력집중계수에 대한 Efthymiou식을 보면 축하중 하에서는 사재의 각도가 증가함에 따라 응력집중계수가 커지고 사재의 각도가 90°가 되면 T형 이음부와 같은 값을 갖도록 제안되어 있다(OTH 354, 2000). 그러나 면내 휨을 받는 경우에는 사재의 각도가 있는 경우 T형 이음부에 비하여 응력집중계수가 커지고 사재의 각도가 작아질 수 록 응력집중계수가 커진다.

이 논문에서 충전강관의 경우 사재 각도 변화에 따른 응력집중계수의 변화가 강관과는 다를 것으로 예측되기 때문에 충전강관 N형 이음부 사재의 각도 변화에 따른 영향을 파악하기 위하여 사재의 각도를 변수로 하여 유한요소해석을 수행하였다. 현재는 직경 216.3 mm, 두께는 8 mm인 충

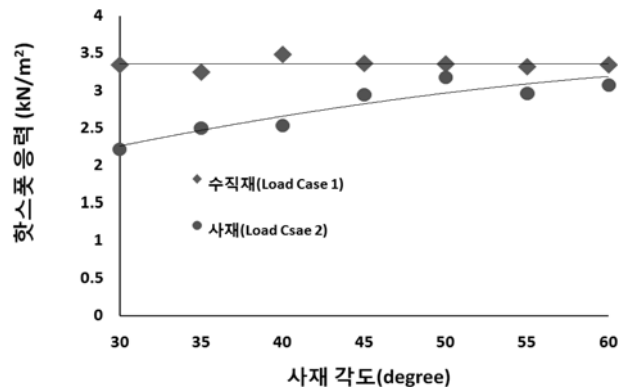


그림 14. 충전강관( $D=216.3$  mm,  $T=8$  mm,  $d=165.2$  mm,  $t=7$  mm) N형 이음부의 사재 각도 변화에 따른 핫스팟 응력

전강관을 사용하였으며 브레이스는 직경 165.2 mm, 두께는 7 mm인 강관을 적용하였다. 각도의 변화는 사재와 현재의 각도가 30°~60° 까지 5° 씩 변화 시켰다. 그림 13은 강관 N형 이음부 사재의 각도 변화에 따른 대표적 모델이다.

해석결과 충전강관 N형 이음부 사재 각도 변화에 따른 거동 특성을 확인 할 수 있었으며 그림 14에 각도 변화에 따른 핫스팟 응력을 나타내었다.

사재의 각도 변화에 따라 수직재에 발생하는 핫스팟 응력은 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 그러나 사재의 경우 각도가 증가함에 따라 사재에서의 핫스팟 응력이 증가하는 것으로 나타났으며, 최종적으로 수직재와 동일한 핫스팟 응력을 갖는 것으로 나타났다.

#### 4.5 충전강관 N형 이음부의 콘크리트 압축강도 변화에 따른 특성

콘크리트 충전강관 구조는 콘크리트의 강도에 따라 휨 특성 및 압축 거동 특성이 달라진다. 일반적으로 콘크리트의 강도가 증가하면 콘크리트 충전강관 부재의 휨강도 및 압축강도는 증가한다. 콘크리트 충전강관 부재에서의 충전 콘크리트는 압축강도의 영향 보다는 시공 측면인 콘크리트의 유동성 및 충전성, 장기거동 특성인 건조수축 및 크리프에 대하여 매우 엄격한 조건이 요구되고 있으며 이에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있다.

충전 콘크리트의 압축강도에 따른 강관 이음부의 핫스팟 응력 특성에는 영향을 크게 주지 않는 것으로 알려졌으며 (Lewei, 2007), 본 연구에서도 콘크리트의 압축강도가 충전강관 N형 이음부의 거동 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 현재에 충전된 콘크리트 압축강도를 변수로 유한요소 해석을 수행하여 이음부의 거동 특성을 검토하였다.

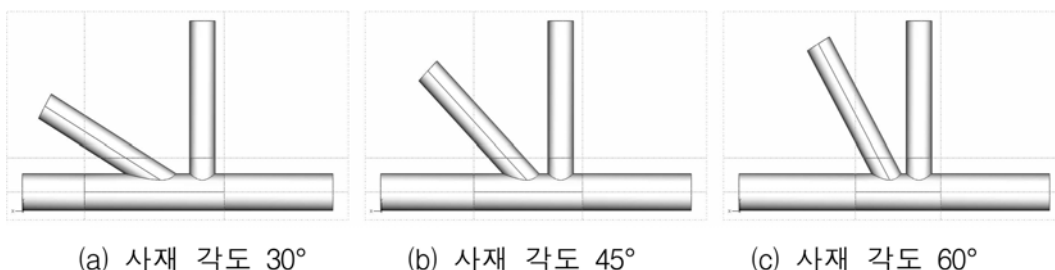


그림 13. 강관( $D=406.4$  mm,  $T=19$  mm,  $d=318.5$  mm,  $t=6$  mm) N형 이음부 사재각도 변화에 따른 대표 모델

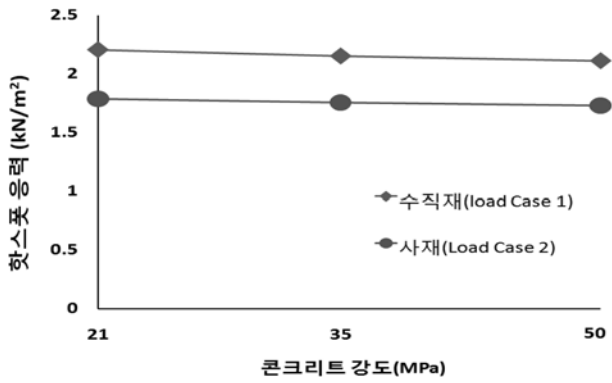


그림 15. 충전강관(D=406.4 mm, T=19 mm, d=318.5 mm, t=6 mm) N형 이음부 콘크리트 강도 변화에 따른 핫스팟 응력

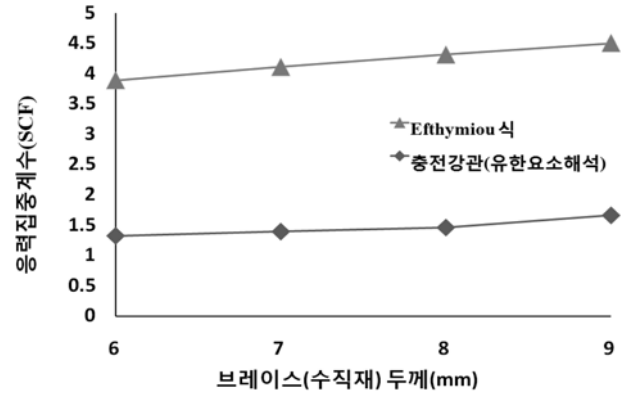


그림 16. 충전강관(D=406.4 mm, T=19 mm, d=318.5 mm) N형 이음부의 응력집중계수

콘크리트 충전강관 구조(대한건축학회, 2004)에서는 콘크리트 충전강관 기둥에 사용되는 콘크리트의 강도를 21 MPa ~50 MPa로 제한하고 있다. 이 논문에서도 현재에 충전된 콘크리트의 강도를 21 MPa, 35 MPa 및 50 MPa로 하여 이음부 모델을 해석하였다. 해석모델의 제원은 현재가 직경 406.4 mm, 두께 16 mm 이고, 사재는 직경 318.5 mm, 두께 9 mm이고 콘크리트의 단위중량은 23 kN/m<sup>3</sup>이다.

충전강관 N형 이음부의 충전 콘크리트 강도 변화에 따른 해석결과 충전강관 N형 이음부 현재에 충전된 콘크리트 강도 변화에 따른 거동 특성을 확인 할 수 있었으며 그림 15에 각도 변화에 따른 핫스팟 응력을 나타내었다.

유한요소 해석결과 충전된 콘크리트의 강도가 증가할 수록 핫스팟 응력은 다소 감소하는 경향을 보였다. 그러나 콘크리트 강도가 충전강관 N형 이음부의 핫스팟 응력의 크기의 변화에는 매우 미미한 영향을 주는 것으로 나타났다. 콘크리트 압축강도가 21 MPa인 경우와 50 MPa인 경우 콘크리트 강도는 약 2.4배 정도 크지만 충전강관 N형 이음부의 핫스팟 응력은 수직재의 경우 하중조합 1에서 2.205 MPa에서 2.112 MPa로 약 4.4% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

중공강관과 충전강관의 이음부의 특성은 많은 차이가 있을 것으로 예상되며 다양한 연구가 진행되고 있지만 아직까지 다양한 형태의 이음부의 거동 차이는 밝혀지지 않았다. 이 연구에서는 충전강관 유한요소해석 결과와 기존 중공강관 연구결과를 비교하기 위하여 OTH354(2000)에서 제시하고 있는 중공강관 이음부의 응력집중계수를 구하기 위한 Efthymiou식을 통해 구한 중공강관의 응력집중계수와 충전강관 N형 이음부의 핫스팟 응력을 식 (4)를 통해 변환한 응력집중계수와 비교 평가 하였다. 강관 N형 이음부의 제원은 현재의 직경은 406.4 mm, 두께는 19 mm, 브레이스의 직경은 318 mm, 두께는 각각 6, 7, 8, 9 mm 4가지의 경우에 대하여 비교하였으며 하중조건은 Load case 1을 적용하였다. 그림 16에 중공강관과 충전강관의 응력집중계수를 비교 결과를 나타내었다.

중공강관과 충전강관 이음부의 응력집중계수를 비교한 결과 매우 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 브레이스 두께에 따라 다소 차이가 있지만 충전강관이 중공강관에 비하여 응력집중계수가 약 65% 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 OTH354(2000)에서 제시하고 있는 Efthymiou식에는 설계를

위한 안전율이 포함되어 있어 더욱 큰 차이를 보이고 있는 것으로 판단된다. 중공강관과 충전강관 N형 이음부에 대한 응력집중계수에 대한 최근의 실험 결과 충전강관 응력집중계수가 중공강관의 응력집중계수보다 약 54% 감소되는 것으로 나타났다(Yin 등, 2009).

## 5. 결 론

기존의 콘크리트 충전강관 부재를 새로운 형태의 교량 부재로써 개발하고 적용하는 데 있어서 교량의 피로설계에 필요한 이음부의 핫스팟 응력 특성을 평가하기 위하여, 충전강관 N형 이음부에서 현재는 충전 원형강관이고 브레이스는 강관으로 구성된 이음부의 특성을 유한요소해석을 통해 고찰하였다. 충전강관 N형 이음부의 기하학적 특성을 이루는 현재와 브레이스의 직경 및 두께, 사재의 각도 및 브레이스 간의 거리, 용접 각장길이 등에 따른 충전강관 N형 이음부의 핫스팟 응력의 특성을 파악하였다.

강관 이음부의 필렛용접 각장길이를 고려하면 핫스팟 응력이 용접 각장길이를 고려하지 않은 것보다 평균 5% 정도 작게 나타났으며, 용접 각장길이 증가에 따른 핫스팟 응력의 변화는 미미한 것으로 나타났다. 충전강관 N형 이음부에서 브레이스 두께가 커지면 수직재 및 사재의 핫스팟 응력이 증가하는 것으로 나타났으며 현재의 두께가 증가하면 핫스팟 응력은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 현재의 직경이 증가할수록 충전강관 이음부의 핫스팟 응력은 감소하는 것으로 나타났다.

충전강관 N형 이음부의 기하학적 형상의 변수에 따른 이음부의 피로거동에 브레이스의 갭의 존재 유무에 따라 핫스팟 응력이 큰 차이를 보였으며, 갭이 존재하는 경우 갭 길이에 따른 핫스팟 응력의 변화는 매우 적은 것으로 나타났다. 충전강관 N형 이음부에서 브레이스 두께가 커지면 수직재 및 사재의 핫스팟 응력이 증가하는 것으로 나타났다.

충전강관 N형 이음부 사재의 각도 변화에 따른 수직재의 미치는 영향도 매우 작은 것으로 나타났으나 사재의 경우 사재의 각도가 증가함에 따라 핫스팟 응력이 커지는 것으로 나타났다. 충전콘크리트의 압축강도는 충전강관 N형 이음부의 핫스팟 응력 변화에 매우 미미한 영향을 주는 것으로 나타났다.

향후 충전강관 이음부의 기하학적 형상에 따른 핫스팟 응력 및 응력집중계수에 대하여 다양한 변수에 따른 해석적 연구와 실험적 검증을 수행 할 예정이다. 또한 충전강관 이음부의 잔류응력 문제와 실제 하중에 따른 발생 핫스팟 응력과 조합응력에 대한 연구 등 다양한 형태의 연구가 진행되면 충전강관 부재를 이용한 다양한 형식의 구조물이 건설될 것으로 기대된다.

### 참고문헌

Ann Schumacher, Alain Nussbaumer, Senta Haldimann-Sturm and Scott Walbridge (2006) Fatigue of tubular bridge joints using welded or cast steel node solutions, *7th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Montreal, Canada.

CIDECT (2000) *Design Guide for Circular and Rectangular Hollow Section Welded Joints under Fatigue Loading*, Construction With Hollow Steel Sections, Serial No. 8. Verlag TÜV Rheinland, Cologne, Germany.

Jaurrieta, M.A., Alonso, A., and Chica, J.A. (2003) Welded circular hollow section (CHS) joints in bridges, *The 10th International Symposium In Tubular Structures*, pp. 18-20 September.

Eurocode 3 (2002) *Design of Steel Structures-Part 1.9: Fatigue*.

Draft, 7. European Committee for Standardisation.

IIW (1985) *Fatigue Analysis of Welded Components-Designer's Guide to the Structural Hot-Spot Stress Approach IIW-1430-00*.

IIW (2000) *Fatigue Analysis of Welded Components-Designer's Guide to the Structural Hot-Spot Stress Approach IIW-1430-00*.

Lewei, T. (2006) Fatigue behaviour of welded thin-walled T-joints between circular and square hollow section. *Journal of Steel Structure, ASCE*. Vol. 6, pp. 37-44.

Lewei, T, Wang, K.S., and Weizhou, C.Y. (2007) Experimental investigation on stress concentration factors of CHS-to-CFCHS T-joints subjected to in-plane bending, *Fifth Intl. Conf. On Advances In Steel Structures*, Iclass.

Nazari, A. and Guan, Z. (2007) Parametric study of hot spot stresses around tubular joints with doubler plates, *Practices Periodical On Structural And Construction, ASCE*, Vol. 12, No. 1, February 2007, pp. 38-47.

OTH 354 (2000) *Stress Concentration Factors for Simple Tubular Joints*.

Yin, Y., Han, Q.H., Bai, L.J., Yang, H.D., and Wang, S.P. (2009) Experimental study on hysteretic behaviour of tubular N-joints, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 65, Issue 2, February, pp. 326-334.

(접수일: 2009.8.24/심사일: 2009.10.28/심사완료일: 2010.1.7)