

원형강관 분기이음에 대한 고찰

- Study for Connection of Steel Pipe -

김종수*, 신창훈**

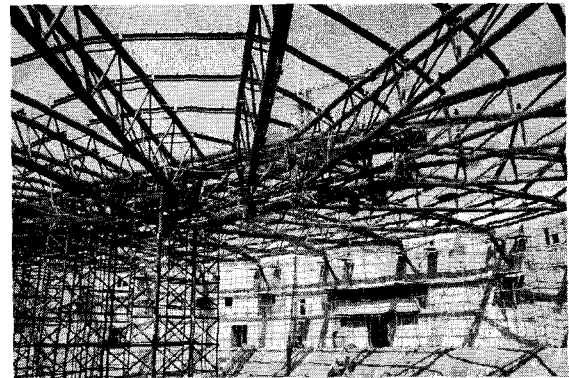
Kim, Jong-Soo, Shin, Chang-Hoon

1. 서론

대형공간 구조물을 구성하는 구조 시스템은 구조해석 툴, 시공기술력 등의 발전과 더불어 많은 진보를 이루어왔다. 중력 하중계에서 발생하는 면외력을 면내력으로 치환하여 저항하는 구조물의 형상을 형태 저항형 구조물이라고 분류할 수 있는데, 이 형태 저항형 구조물을 구성하는 구조부재의 종류중에 가장 빈번하고 효율적으로 쓰는 것이 공간 트러스라고 할 수 있다. 대부분의 대공간 구조물은 실내에서 볼 때 별도의 천정 마감없이 상부 구조 부재의 골조체가 드러나는 시스템으로 계획된다. 그런 이유로 많이 쓰이는 부재가 원형 강관이라고 할 수 있다.

강관은 폐쇄형 단면으로 개단면 형태의 다른 형강보다 구조적으로 유리한 강재이다. 그러나 강관으로 구성된 트러스를 구조부재로 사용할 경우 이음부에 대한 적합한 고려가 필히 이루어져야 하는데, 국부변형, 국부좌굴, 뿔림전단 등에 대한 검토가 필수적이다.

본 고에서는 1998년 제정된 강관구조 설계규준 상에 나타난 접합부에 관한 내용을 살펴보고, 특히 복잡하게 이루어질 수밖에 없는 강관 접합부에 대해 상세해석을 통하여 검증하는 방법을 고찰해 본다.



<그림 1> 원형강관을 이용한 지붕 트러스 형성

2. 규준

2.1 개요

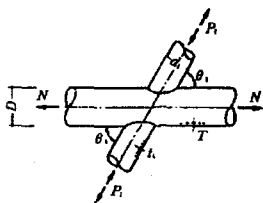
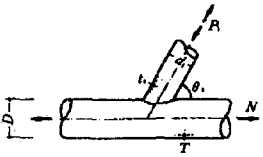
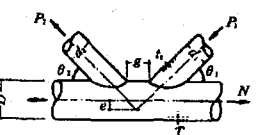
1998년 이전 강관설계에 대한 국내 규준이 없을 때는 IIW (International Institute of Welding, 국제용접학회)나 일본의 강관구조설계 시공지침을 참고로 하였으나, 1998년 '강관구조 설계기준 및 해설' (대한건축학회)이 제정되면서 비로소 국내 규준을 통한 구조설계가 진행될 수 있었다.

규준의 접합부 설계에 대한 내용을 살펴보면 강관 트러스를 형성할 때 빈번하게 사용되는 접합형태인 T이음, Y이음, X이음, K이음을 기본으로 하여 각각에 대한 주강관의 국부변형, 지강관의 국부좌굴, 뿔림 전단에 대해서 검토하도록 규정하고 있다. 그림 2는 강관구조 접합부에 대해 규준에서 제시하는 검토 내용이다.

* (주) C-S구조엔지니어링 대표이사 건축구조 기술사

** (주) C-S구조엔지니어링 실장

(a) 주강관 국부변형의 검토

이음형상 · 하중조건	허용력 (tf)		최대 강도 (tf)	
	P_1 이 압축일 때	P_1 이 인장일 때	P_1 이 압축일 때	P_1 이 인장일 때
X 이음 	$P_{1a} = f_{\beta} \cdot f_{\gamma} \cdot f_n \cdot \frac{T^2 \cdot F_y'}{\sin \theta_1} \quad (1)$ <p>여기서,</p> $f_{\beta} = \frac{3.5}{1 - 0.81\beta}$ $f_{\gamma} = \gamma^{-0.1}$ $f_n = 1 + 0.3n - 0.3n^2$	$0.80\gamma^{0.2} P_{1a}$ <p>여기서, P_{1a}는 식 (1)에 의한 다.</p>	$2.14 P_{1a}$ <p>여기서, P_{1a}는 식 (1)에 의한 다.</p>	$1.53\gamma^{0.3} P_{1a}$ <p>여기서, P_{1a}는 식 (1)에 의한 다.</p>
T, Y 이음 	$P_{1a} = f_{\beta} \cdot f_{\gamma} \cdot f_n \cdot \frac{T^2 \cdot F_y'}{\sin \theta_1} \quad (2)$ <p>여기서,</p> $f_{\beta} = 0.96 + 4.7\beta^2$ $f_{\gamma} = \gamma^{0.2}$ $f_n = 1 + 0.3n - 0.3n^2$	$0.26\gamma^{0.6} P_{1a}$ <p>여기서, P_{1a}는 식 (2)에 의한 다.</p>	$2.14 P_{1a}$ <p>여기서, P_{1a}는 식 (2)에 의한 다.</p>	$1.1\gamma^{0.5} P_{1a}$ <p>여기서, P_{1a}는 식 (2)에 의한 다.</p>
K 이음 	$P_{1a} = f_{\beta} \cdot f_{\gamma} \cdot f_{\theta} \cdot f_n \cdot T^2 \cdot F_y' \quad (3)$ <p>여기서,</p> $f_{\beta} = 1.17 + 6.6\beta$ $f_{\gamma} = \left\{ 1 + \frac{0.021\gamma^{-1.2}}{\exp(0.5\gamma^{-1}) + 1} \right\} \gamma^{0.2}$ $f_{\theta} = \frac{1 - 0.4\cos^2 \theta_1}{\sin \theta_1}$ $f_n = 1 + 0.3n - 0.3n^2$	$2.14 P_{1a}$ <p>여기서, P_{1a}는 식 (3)에 의한 다.</p>		

(b) 지강관 국부좌굴의 검토

이음형상	허용력 (tf)	최대 강도 (tf)
X, T, Y 이음	검토 불필요	검토 불필요
K 이음	$P_{1a} = 0.64(F_y')^{-0.25} \left(\frac{d_1}{t_1} \right)^{-0.25} (F_y' A_1 + P_{1a}) \quad (4)$ <p>여기서,</p> $P_{1a} = 2.14 \times (\text{표 해 52.5 (a)의 식 (3)에 의한 } P_{1a})$	$2.14 P_{1a}$ <p>여기서, P_{1a}는 식 (4)에 의한 다.</p>

(c) 돌림전단의 검토

이음형상	허용력 (tf)	최대 강도 (tf)
X, T, Y 및 지강관끼리 관통하지 않는 K 이음 (꺾 K 이음)	$P_{1a} = \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i} T f_i \quad (5)$ <p>여기서,</p> $i = 1 \text{ 또는 } 2$	$2.14 P_{1a}$ <p>여기서, P_{1a}는 식 (5)에 의한 다.</p>
지강관끼리 관통하는 K 이음 (꺾 K 이음)	검토 불필요	검토 불필요

<그림2> 접합부설계에 대한 기준내용

2.2 주강관 국부변형 검토 (T, Y, X, K이음)

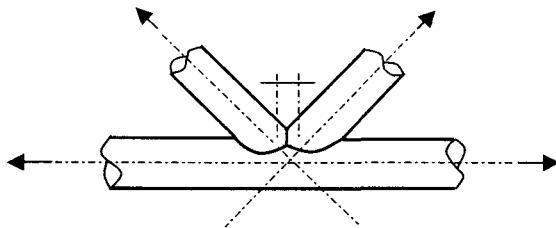
주강관의 국부변형이란 지강관의 축력이 주강관 관벽의 소성 휨내력 이상으로 작용하여 주강관 접합부가 국부적인 변형을 일으키는 것을 말한다. 규준에서 국부변형에 대한 모든 식에 T^2F_y' (T: 주강관의 두께, F_y' : 허용응력도 기준값)항이 적용되어 있는 것은 국부변형 내력은 주강관 관벽의 소성휨내력에 의해 좌우된다는 점을 분명하게 나타낸다.

규준을 통해서 접합부 내력을 산정해 보면 대부분 국부적인 휨변형에 대한 내력이 가장 작은 것으로 나타난다. 실제로 규준에서도 X, T, Y K이음의 공통적인 파괴형태가 주강관 관벽의 국부적인 휨변형이라고 언급하고 있다. 따라서 분기이음 설계시 이음부의 국부변형에 대한 검토가 가장 우선시 되어야 할 것으로 판단할 수 있다.

K이음을 제외한 분기이음에서는 주강관과 지강관의 축력방향에 따라서 주강관 관벽의 국부변형에 대한 내력이 달라진다. 규준 식에서도 이에 대해 구분되어 있다.

2.3 지강관의 국부좌굴(K이음)

K이음의 대해서는 특별히 지강관의 국부좌굴로 인한 파괴도 검토하게 되어 있다. 이는 K이음의 경우에는 압축 지강관의 단부가 국부좌굴로 인하여 파괴될 우려가 있기 때문이다. 특히 지강관끼리 상관하는 K이음(랩 K이음)의 경우에는 국부변형과 국부좌굴의 파괴형태가 동시에 나타나는 경우가 많다고 한다.



<그림3> 지강관끼리 상관하는 K이음(랩 K이음)

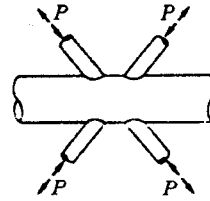
2.4 뚫림 전단의 검토 (T, Y, X, K이음)

지강관과 주강관의 접합 용접부에서 전단파괴가 일어나는 파괴형태를 뚫림 전단(punching shear)이라 부른다.

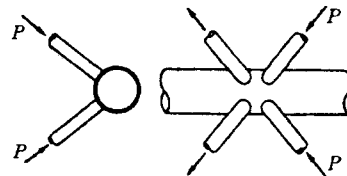
충분한 국부변형이 생기기 전에 내부에 균열이 발생하여 이음내력을 약화시키는 경우로서 그 원인에 대해서는 실험데이터의 부족으로 확실하게 규명되지 않았으며, 규준에서는 이에 대한 대책으로 지강관의 축력에 제한을 두고 있다.

2.5 기본이음(T, Y, X, K이음) 이외의 형태

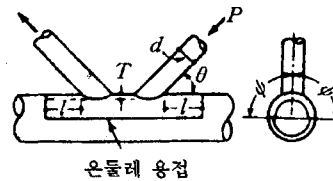
규준에서는 앞에서 말한 기본이음 형태 외에 이음형상에 대해서도 언급하고 있다. 그러나 이들 형상은 기본이음 형태의 범주에서 크게 벗어나지 않는 형상에 대한 것으로 허용력도 상관된 기본이음과 동일하거나, 일정한 계수를 곱하여 나타내고 있다.



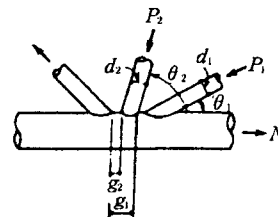
- 허용력 :
X형이음의 1/2



- 허용력 :
K이음의 0.9배



- 허용력 :
증가된 부분의 두께로 산정



- 허용력 :
K이음을 기본으로 산정

<그림4> 기본이음 이외의 이음형태

3.FEM 상세 해석

3.1 개요

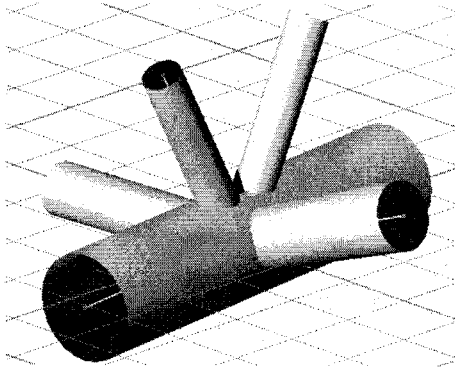
기준의 내용에서 기본 이음 이외의 내용에 대해서도 일부는 허용력을 제안하고 있으나 실제의 형상을 보면 이보다 더욱 복잡하고 간단한 수식으로 응력의 흐름을 명확하게 파악하지 못할 경우가 많이 있다. 이들에 대해서는 상세해석을 통한 응력검증을 실시하여 허용응력을 초과하는 지를 판단하여 보아야 한다. 본 내용은 3D FEM 범용 프로그램인 MIDAS Family Program을 이용하여 접합부에 대한 상세 해석을 실시하는 과정과 그 응력을 검토하는 내용에 대해 살펴본다.

3.2 해석 방법

요소망 형성을 위한 모델링 과정으로 자동 Mesh 생성 Program인 MIDAS MESH를 사용하고 그에 대한 해석은 MIDAS GEN을 이용하였다.

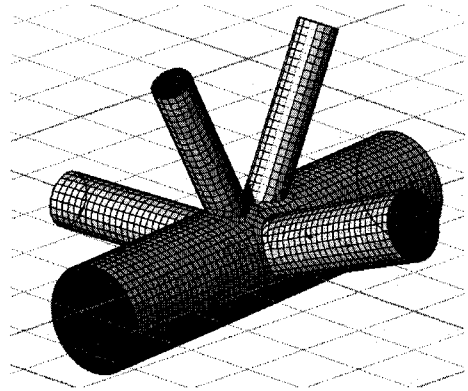
1단계 : 기본 형상 생성

절점 좌표와 각도 등을 이용하여 각 형상들을 조립해 가는 방식으로 모델링을 진행한다. 원형 강관이 교차되는 부분은 교차계산을 통하여 불필요한 부분을 제거해 가도록 한다.



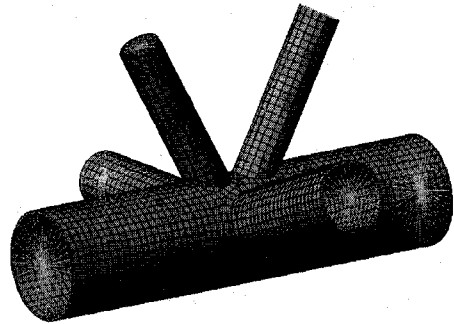
2단계 : 요소망 생성

요소망의 크기가 작을수록 해석에 대한 신뢰도가 좋으나 그에 따라 해석시간도 길어지고, 해석 결과에 대한 시간 대비 효율이 떨어진다. 그러므로 엔지니어의 판단과 강관의 두께에 따른 Mesh의 크기를 해석 툴의 제안에 따른 적합한 크기를 결정해야 한다.



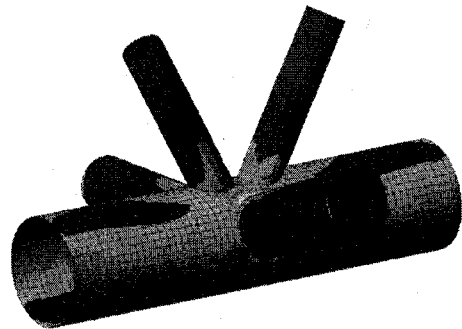
3단계 : 구조해석 실시

해석의 방법에는 하중법과 변위법이 있을 수 있다. 변위법을 사용하면 보다 정밀한 해석 결과를 얻을 수 있지만, 각 절점에 발생하는 변위를 모두 고려해야만 하는데, 이는 시간이 많이 소요되는 일이다. 여기서는 응력의 형상을 보려는 접합부에서 이격된 Pipe 부분을 강절점으로 치환하여 발생하는 부재력을 입력하는 방법을 채택하였다. 또한 이는 실제 원구조물 해석에서 발생하는 부재력을 구현하도록 하였다.



4단계 : 해석 결과의 확인

해석은 판 요소의 요소내력 및 응력을 출력하여 평가한다.

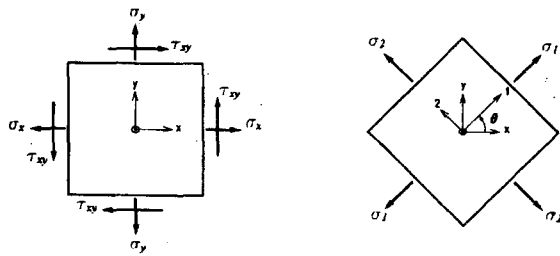
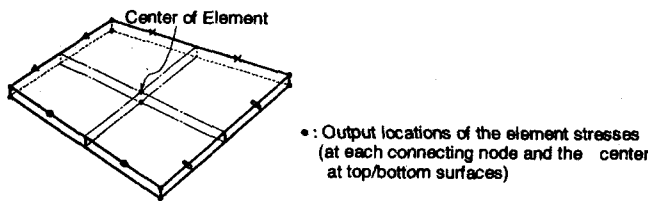


3.3 응력검토

구조해석을 통해 출력된 결과물은 판 요소에 발생하는 응력으로 검토가 된다. 이 응력은 두 방향 응력에 대한 조합응력으로 검토하게 해 놓은 σ_{eff} 로 검토한다.

von-Mises Stresses (σ_{eff})는 최대 전단 응력설에 의한 응력으로 일반적으로 연성재료에 대한 실험과 잘 일치하므로 철골의 항복 기준으로 가장 널리 사용되는 이론이다.

그림 5는 적용 구조해석 프로그램인 MIDAS의 요소별 출력 가능 응력 형상을 보여주는 것으로 이 중에서 σ_{eff} 를 분석하여 사용 재질의 허용 응력을 초과하는 지를 판단한다.



σ_x : Axial stress in the ECS x - direction

σ_y : Axial stress in the ECS y - direction

τ_{xy} : Shear stress in the ECS x - y plane

$$\sigma_1 : \text{Maximum principal stress} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_2 : \text{Minimum principal stress} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{xy} : \text{Maximum shear stress} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

θ : Angle between the x - axis and the principal axis, 1

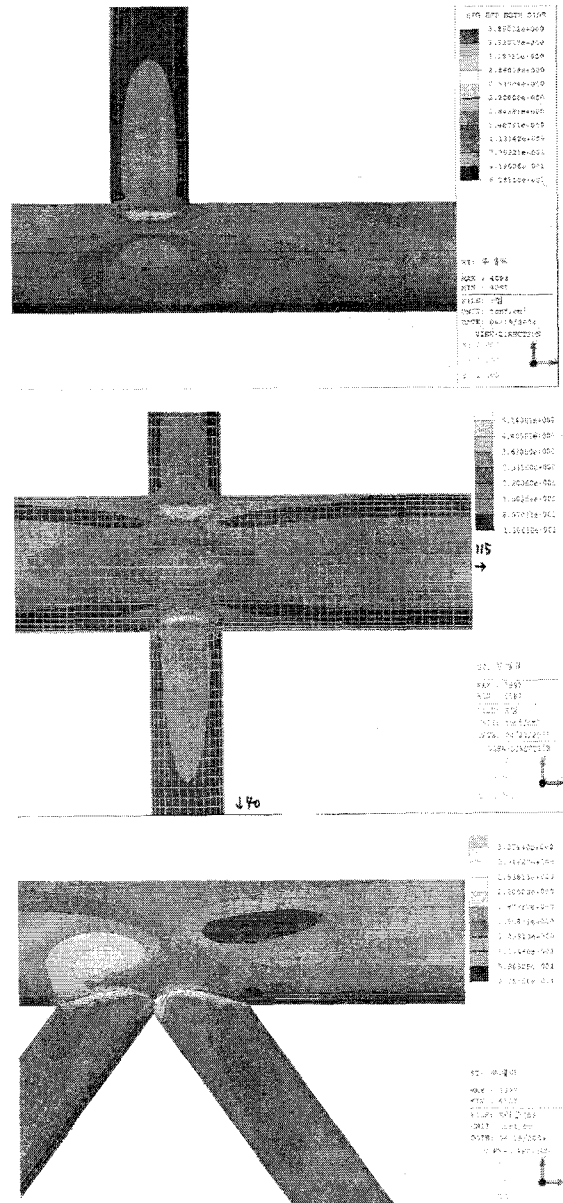
$$\sigma_{eff} : \text{von - Mises Stress} = \sqrt{(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)}$$

<그림5> 판요소의 응력출력

3.4 기본이음에 대한 상세해석 결과

상세 해석의 타당성 검증을 위하여 규준에서 제시한 기본 이음(T, Y, X, K)에 대하여 규준에 따라 부재 허용력을 산정하고, 이렇게 산정된 지강관의 허용력을 이용하여 전 절에서 설명한 상세해석 과정으로 구조해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

해석 결과를 분석할 때 해석 모델의 정교하지 못함으로 인하여 발생하는 국부적인 응력 집중은 배제하였다. <그림6>은 접합부에 발생하는 응력의 흐름을 보여준다.



<그림6> 기본이음에 대한 상세해석

규준상의 기본 이음에 대한 허용력에 대한 상세 해석의 결과를 보면, 대부분 20% 이상의 안전율을 가짐을 볼 수 있었다. 이는 좀 더 엄격한 규준의 내용을 확인할 수 있는 것으로 초기 설계에서 복잡한 형상의 접합부에 대해 규준의 내용으로 허용력을 산정하는 것이 상세 해석을 통하여 실시되는 응력에 대해서도 만족 수준을 가질 수 있다는 예측을 해 볼 수 있는 내용이다.

4. 구조설계 적용

대공간 구조물을 형성하는 트러스의 경우 부재의 개수가 상당히 많고, 형성되는 구조시스템에 따라서 상당히 큰 부재력이 발생할 수도 있다. 실제 설계에서 모든 부재에 대한 상세 해석을 실시하여 그 응력을 검증해보는 것이 정확한 설계가 될 수 있으나, 실제 설계를 진행하는 시간이 이를 허락하기는 어렵다.

그래서 우선 부재의 선정이 완료된 시점에서 규준 식을 이용한 부재의 허용력을 산정해 보기를 권장한다. 물론 현장에서 발생하는 접합부는 규준의 내용보다 훨씬 복잡하고 많은 부재들을 설치해야 할 경우가 대부분일 것이다. 하지만 앞서도 언급했듯이 시간상의 제약으로 인하여 이 모두를 정밀하게 파악하기는 불가능하므로 가장 유사한 형상의 접합형상으로 규준의 식을 이용하는 것이다.

그리고 규준 식의 허용력을 초과하는 부분에 대해서 상세 해석을 통한 검증을 실시하여야 한다. 이때 초과하는 부재에 대해 적합한 보강 등을 통하여 접합부를 설계한다면 구조설계의 경제성 확보와 시공성 확보를 가능하게 할 것이다.

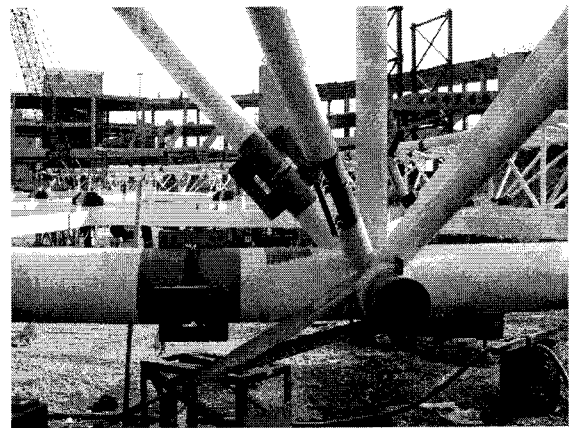
5. 결론

강관의 접합에서 기본이음 외의 상세해석이 필요한 분기이음의 경우 그 해석 과정이 복잡하고 시간이 오래 걸리는 것이 사실이다. 그래서 설계 초기단계에서 접합부에 대한 보강 방법을 미리 구현해두면 실제 설계에서 그에 대한 적용이 가능할 것이다. 실제로 어느 정도의 허용력을 초과

하는 부재력에 대해서는 주강관과 지강관의 관벽을 부분적으로 증가시키는 방법으로 해소할 수 있으며, 그 이상의 경우에는 스티프너 링의 설치, 힘의 전달 경로를 따르는 보강 플레이트의 설치, 다이아프램 플레이트의 설치 등 여러 가지 보강안으로 해결 가능하다.

그 외에 분기이음이 충분한 내력을 발휘하기 위해서는 무엇보다도 용접부에 취성파괴가 생기지 않도록 하는 것이 중요하다. 용접의 표면형상을 오목하게 하고, 또한 보강모살을 만들어 지강관의 응력이 원활하게 전달될 수 있게 하는 것이 중요하다.

강관으로 구성되는 구조물의 접합부는 어떤 방식이든 원활한 힘의 전달을 가질 수 있도록 설계되어야 한다. 부재의 응력을 만족시키기는 하였지만 부재의 접합부에서 응력 집중을 통한 파괴가 일어나게 해서는 안된다. 또한 설계의 적용에서 충분한 내력을 받는 접합부를 만들었으면 시공 품질의 확보를 통하여 그를 유지시키게 하는 것이 더욱 중요하다고 하겠다.



<그림 7> 강관 트러스 접합부

Reference

1. 강관구조 설계기준 및 해설, 대한건축학회, 1998
2. MIDAS GENw Analysis & Design, 포스마이다스, 2004