

런던 히드로 제5 터미널, 주 터미널 건물 소개

Terminal 5, London Hearhrow The main terminal building envelope



김종수
CS구조 엔지니어링 대표이사

소개 / Introduction

1946년 여러개의 텐트와 전화부스로 출발한 히드로 공항은 항공에 필요한 건물을 지속적으로 증설해 왔고, 1980년대 말 제5터미널에 대한 계획을 시작 하였다.

복잡하고 길었던 건물계획에 대한 결정과 승인과정 때문에 2000년 초에서야 프로젝트팀이 새 터미널을 설계하는 일을 착수 할 수 있었다.

T5는 연간 3천만 명의 여객을 처리해야 했다. “세계에서 가장 신선하고 좋은 여객시설”을 요구하는 BAA의 의지에 부응하여 구조엔지니어는 주터미널빌딩이 한 공간안에서 이질적인 모든 활동을 담아

낼 수 있도록 등근천장을 가진 단일 경간의 지붕을 제안했고 건축가와 BAA는 이 제안을 흔쾌히 받아들였다.

BAA는 지상부 모든건물에 대한 구조설계 책임을 가진 프로젝트팀은 Arup에게 맡겼다. 성공적인 프로젝트의 완성을 위해 건축가, 시공자, 엔지니어 그리고 건축주까지 하나의 목표를 위해 함께 일할 수 있는 파트너쉽을 형성하게 하였고 이 모든팀이 현장인 히드로에서 같이 일할 수 있게 했다.

T5에 대해서는 설명할 것이 많이 있으며, 진보된 컴퓨터 응용설계는 지난번에 다루었었다. 이번 기사는 주 터미널 빌딩의 파사드와 지붕의 설계와 시공을 다루도록 한다.



〈그림1〉 The main terminal building, summer 2005. / 주 터미널 빌딩, 2005 여름



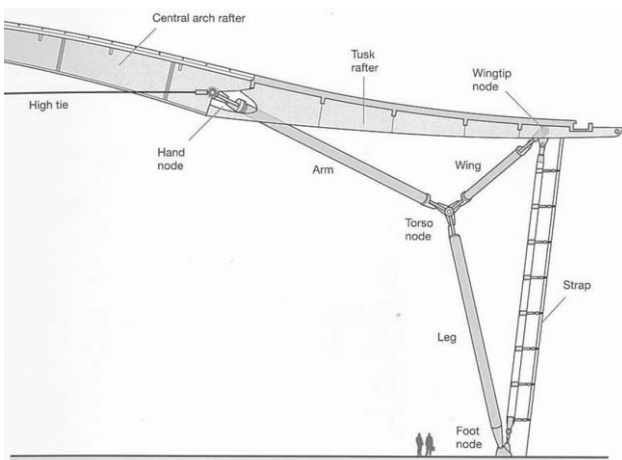
〈그림 2〉 Dramatic full-height circulation space.
드라마틱한 높이의 여객실 공간

주 터미널 지붕 / Main Terminal Building Roof

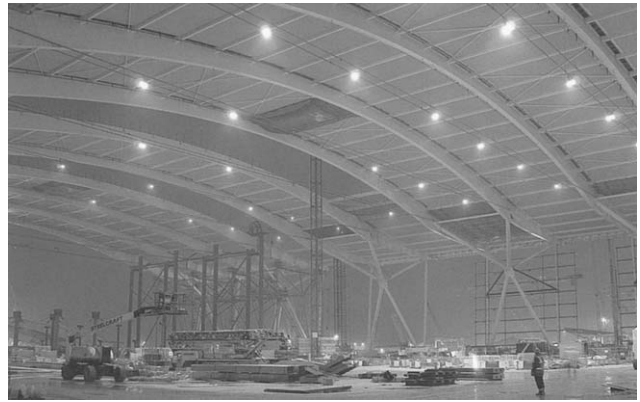
지붕은 가로 396m, 세로 156m 의 규모로 형성된다.

이 지붕은 22쌍의 지름 914mm 강재다리(steel legs)로 지지되며, 그림 2에서와 같이 드라마틱한 여객실 공간을 구성한다. 이 공간은 또한 정문에서 정문까지 수직 여객 운송의 주된 동선도 포함한다.

경간의 18m 중앙부는 800mm 폭과 3.8m 촘의 강재 각형거더로 형성되고, 이 거더는 상층부(High level)에서 쌍으로 된 $\phi 115\text{mm}$ 긴장케이블로 묶이게 된다.



〈그림 3〉 Main structural elements of the roof. / 지붕의 주 구조요소



〈그림 4〉 Structural separation of envelope and content.
지붕과 파사드의 분리

그림 3과 같이 914mm 지름의 강재 팔이 다리 상부와 서까래(rafter)를 지지하며, 서까래 끝에서 강재 묶음 끈(solid steel tie-down strap)으로 3D복합골조로 완성하고 있다.

단일경간 / Single span

터미널의 3층의 상부구조는 지붕과 파사드를 완전히 분리했다. (그림4) BAA는 몇 가지의 중요한 이점 때문에 이 과감한 구조계획을 선택했다.

지붕은 빌딩을 시각적으로 여러 요소들을 통합하도록 하는 역할도 하며, 여행자들이 터미널 안에 있다는 직관적인 느낌과 함께 세계속의 한 장소에 속해 있다는 느낌을 제공한다.

이런 구조의 선들과 지붕은 공간의 목적에 충실하면서도 정숙성과 단순명료함을 제공한다.

BAA는 터미널에서 제공되는 여객 서비스와 상점을 일정수준으로 미세하게 조정하여 터미널의 수익성을 추구한다. 이러한 일들은 자칫 잘못하면 터미널 운영에 많은 불편과 일들을 야기 시킬 수 있다.

그러나 T5의 주 건물은 이러한 일들을 내부와 지상층, 그리고 비구조부에서 일어나게 함으로서 혼란을 최소화시키도록 했다.

본공사의 critical path(주공정선)는 최단 기간 내에 지붕과 파사드가 방수효과를 낼 수 있도록 지하층 공사를 완료하는데 있었다. 더욱이 실내 환경에 준하여 내부공사를 하는 것은 나쁜 기후로 인한 지연을 방지하고 공사의 품질도 높일 수 있다.

실내공간의 계획과 기능에 방해 없이 지붕공사와 파사드 공사를 할 수 있도록 설계를 수행한 것이 이공사의 가장 큰 이점이라고 할 수 있다.

예를 들어 2003년에 BAA는 건물의 내부계획을 크게 변경했으나 지붕 공사에는 아무런 영향을 주지 않았다. 그래서 현장공사는 중단 없이 잘 진행되었다.



〈그림 5〉 minimal intrusion of facade vertical structure. / 파사드 수직부재의 최소화

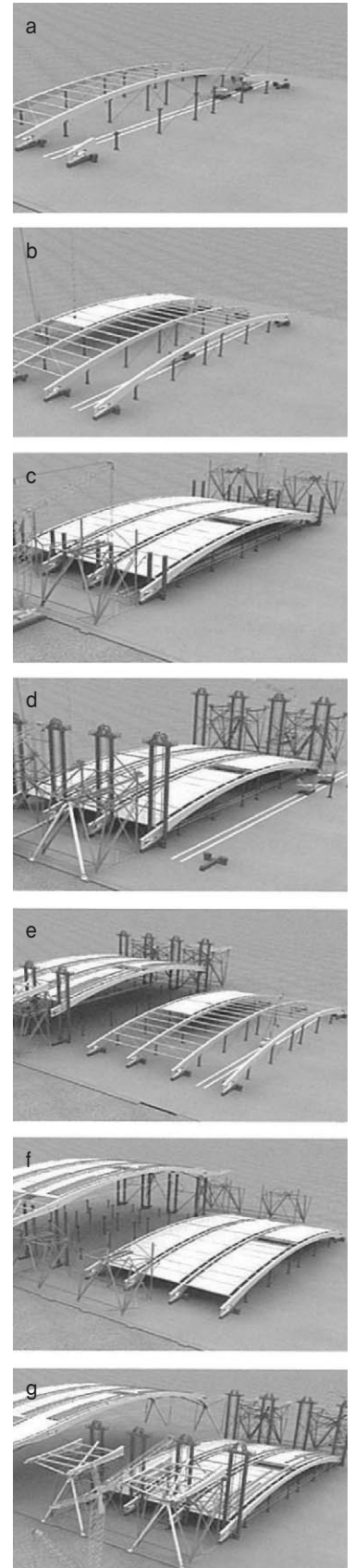
파사드 / FaC*ades

이 건물에서 여행객의 느낌 중 핵심은 항공여행의 멋을 충분히 느낄 수 있는 비행장과, 여객기를 시원스럽게 볼 수 있다는 점이다. 파사드는 통유리로 되어 전망을 방해하지 않게 하고, 이를 위해 설계팀은 수직부재의 돌출을 최소화했다.(그림5)

설계팀은 파사드에 작용하는 바람하중에 저항하기 위해 띠줄(straps)을 지붕에서 잡아매기로 했다. 이 띠줄은 지붕구조의 한 부분이며 지붕으로부터 9000kN의 인장력으로 지지된다. 따라서 바람이 불 때 이 인장력으로 인해 팽팽하게 지지된다.

이 인장력은 휨모멘트와 변형을 줄여주기 때문에 띠 줄은 가늘어지며 따라서 기존의 파사드 지지구조보다 전망을 적게 방해한다.

타원의 중공단면이 지붕 띠줄 사이 18m 경간을 지나간다. 유리과 강재의 자중은 139mm지름의 강재기둥에 의해 지지된다. 건물의 박공면에 있는 파사드는 수직방향으로 바람하중과 중력하중에 저항하며 단순격자 형태를 구성하고 있다. 파사드와 지붕사이의 수직과 면내수평방향의 변위를 허용하도록 파사드의 윗부분은 절점을 설치했다. (그림7) 모든 파사드 패널은 2m*3m의 이중유리이며 알루미늄 뼈대로 짜여져있다. 건물의 지면 쪽에는 테리에 대비하여 유리, 뼈대, 접합부 등이 보강되어 있다.



〈그림 6〉 Roof assembly sequence. 지붕조립과정



〈그림 7〉 Joint at head of south facade. / 남측 파사드 머리부분 절점



〈그림 8〉 Rafter section arriving on site.

Transport factors

The dimensions of this structure are such that almost every design decision included some reference to how the steel would be transported to site. There was no space for storage and so every load had to be planned so that it could arrive on site and be unloaded directly onto the work face.

The largest sections of rafter weighed around 50 tonnes and were up to 3.8m high. Other rafter sections were 27m long. They were fabricated in Finland and brought to the UK by ship, where they took to the road (Fig 8). The torso nodes were slightly lighter at 38 tonnes, but they did require purpose-made transport frames so that they were in the correct orientation for assembly as soon as they arrived on site.

설치방법 / Erection method

Arup은 각 항목별로 최고의 설계를 추구하는 것을 넘어서서 보다 넓은 감각으로 건물의 품질향상을 추구한다. 이것은 물론 시스템,



〈그림 9〉 Roofing material in place prior to erection.
설치를 위해 준비된 지붕재



〈그림 10〉 Central section clad and prestressed, May 2004.
중앙단면의 마감재와 긴장, 2004년 5월

건축미, 유용성, 지속성뿐만 아니라 시공성까지 고려하는 것을 포함한다.

본 공사에서는 시공성 문제가 주요 고려항목으로 선정되었고, Arup은 강재업체 Watson, 건축가 Richard Rogers, 중량물 인양 전문업체 Rolton등과 함께 안전하고 효율적인 시공방법을 설계에 적용하게 된 것을 아주 기쁘게 생각한다.

그들은 최선을 다해 설계에 맞춰 시공법을 제안했고, 따라서 어디까지가 설계의 끝이고 시공의 출발점인지 구분하기가 어려울 정도였다. 이것은 BAA가 Heathrow에 사무실을 제공함으로써 T5 프로젝트를 위해 함께 일함과 동시에, 파트너 계약에 의하여 더욱 쉽게 이루어졌다.

한 경간이 18m인 지붕은 세경간(54m)을 한번에 구성하였고, 모두 5번으로 나뉘어 조립된다. 각 단계별로 중앙아치 단면이 조립된 후 지상에서 마감과 긴장작업을 실시한 후 가설구대를 이용하여 다리 받침 구조체의 정확한 위치에 설치 시공된다.(그림6a-b)

중앙단면은 수직으로 30m인양된 후 다리받침 구조체에 볼트로 조립된다.(그림6c-e) 한 단계가 끝난 후 가설구대는 다음 단계를 위하여 54m 북쪽으로 이동된다.(그림6f-g) 이러한 지붕아치단면의 지층



〈그림 11〉 Jacking of roof elements. / 지붕구조재의 인양

에서의 조립은 크게 3가지 이점이 있다.

- 강재 조립공과 지붕재 설치공 모두 높은 장소에서 작업을 피할

수 있어 위험이 줄어든다.

- 아치의 조립에 필요 가설재의 높이를 최소화 할 수 있다.

Modal buckling analysis

The T5A roof is a massive arch and carries huge compression forces. It is essential to prevent buckling both of its individual parts, and of the structure as a whole. In the past, engineers typically used rules of thumb, simple calculations, and educated guesswork to design against buckling, but here, the team carried out a modal buckling analysis (Fig 12) to predict the most critical possible buckling modes, and then processed the mode shape data to give sets of design forces. Designing for these forces ensured that there is a consistent reserve of strength against buckling, without wasting money on providing strength where it is not needed.

This method gives safer and more realistic results than the use of traditional notional restraint forces for the rafters in their minor axis, and enabled slimmer leg and arm sections because of the partial fixity provided at main nodes. Moreover, it allowed Arup to quantify the effective length of the major axis buckling mode of the main rafters rather than just taking an educated guess.

12. Modal Buckling analysis.

a) Buckling analysis model in GSA.

b) Simple buckling model predicted by the analysis.

c) Complex buckling mode predicted by the analysis.

〈그림12〉 Modal Buckling analysis. / 좌굴해석



〈그림13〉 Bracing in roof plane and abutments. 다리받침

· 필요한 모든 크레인 작업이 공항의 레이더 레벨보다 낮은 곳에서 가능하다.

시공팀은 처음부터 전 공정을 꼼꼼하게 계획했으며 작업을 진행하면서 더욱 정밀도를 높였다. Arup 설계팀은 인양작업과정을 관찰했으며 현장에서 생기는 문제점과 시공과정에 적극적으로 참여했다.

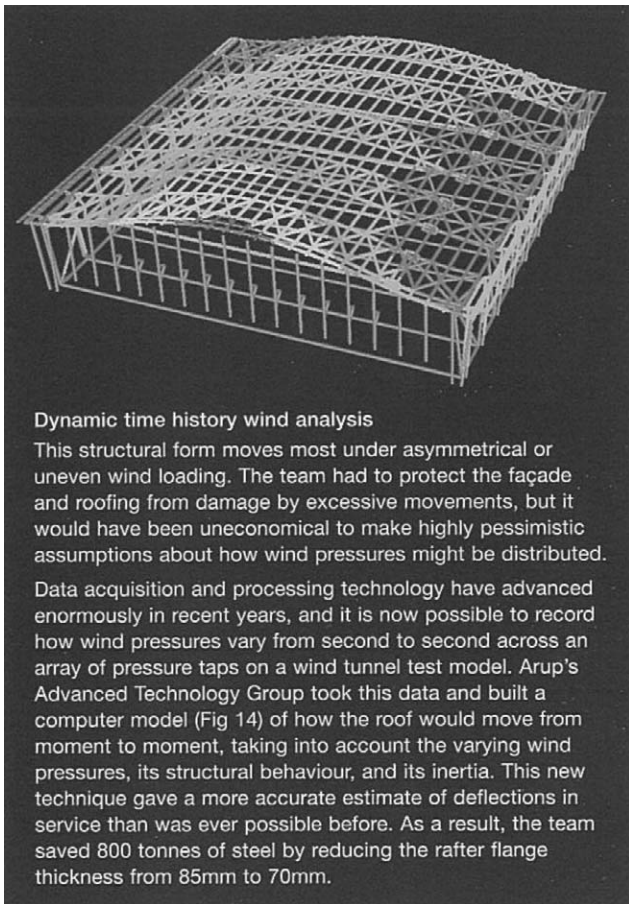
전체적으로 시공과정은 무리없이 잘 진행됐으며 그러한 직접적인 과정에 대한 참여가 설계팀의 자랑이다. (그림9-11)

구조거동 / Structural action

지붕에 대한 구조적인 거동은 성당에서의 스톤볼트(Stone Vaults)와 상점창고를 형성하는 포털프레임(Portal Frame)에 의해 이루어 진다.

성당의 지붕볼트와 마찬가지로 지붕과 구조체의 자중은 거더와 다리받침에 압축력을 발생시키며, 받침부분에서는 지층슬래브에 밖으로 미는 힘과 아랫방향의 힘을 일으킨다. 거더에서 아치거동은 휨모멘트를 크게 감소시킨다. 바람하중과 동서방향으로 작용되는 힘은 포털프레임(Portal Frame) 휨거동으로 저항된다.

남북으로 긴방향의 바람하중은 거더사이에 설치되어 있는 가새에



Dynamic time history wind analysis
 This structural form moves most under asymmetrical or uneven wind loading. The team had to protect the façade and roofing from damage by excessive movements, but it would have been uneconomical to make highly pessimistic assumptions about how wind pressures might be distributed. Data acquisition and processing technology have advanced enormously in recent years, and it is now possible to record how wind pressures vary from second to second across an array of pressure taps on a wind tunnel test model. Arup's Advanced Technology Group took this data and built a computer model (Fig 14) of how the roof would move from moment to moment, taking into account the varying wind pressures, its structural behaviour, and its inertia. This new technique gave a more accurate estimate of deflections in service than was ever possible before. As a result, the team saved 800 tonnes of steel by reducing the rafter flange thickness from 85mm to 70mm.

〈그림 14〉 Single frame from time history dynamic wind analysis.
 풍하중 해석

의해 다리받침으로 전달된다. 다리받침에서 바람하중은 "X" 가새 거동에 의해 지층으로 전달된다.(그림13). 지붕면에 설치된 가새는 거더의 약축방향 좌굴을 방지하는 역할도 한다.

지붕거더에 설치된 강선은 지층에 설치된 묶음재와 같은 작용을 한다. 강선의 인장력은 거더에 상부방향의 휨모멘트를 일으키며 이것은 거더의 자중과 지붕재의 자중에 의해 발생하는 하부방향의 모멘트를 상쇄시키게 된다. 거더의 중앙부는 긴장작업을 통하여 107m 경간을 이루며 완전한 형태를 갖춘다.

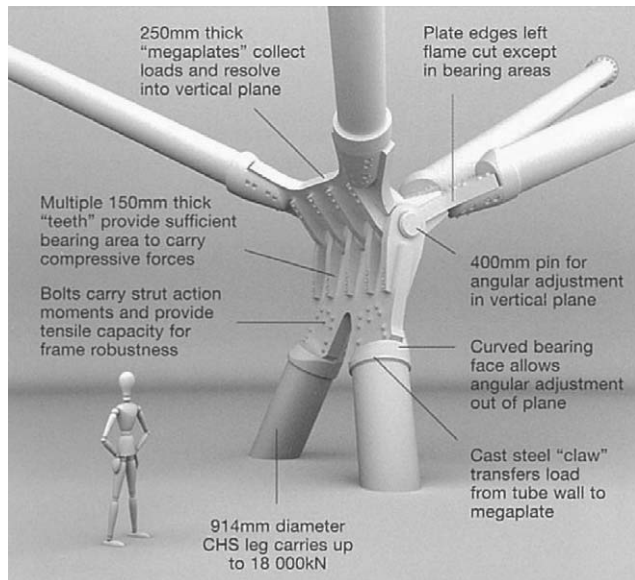
동서면의 파사드에는 알루미늄 구조체에 맞도록 중심간격 36m에 맞춰 수축, 팽창조절 조인트가 설치된다. 지붕에도 36m 간격으로 조절 조인트가 설치된다. 이 조인트는 지붕과 구조체에 온도차이로 발생하는 힘을 크게 감소시킨다. 이 조인트는 지붕면에 유연성을 주지만 구조체를 분할하지는 않으며, 전체 구조체는 남북방향의 힘에 잘 저항할 수 있도록 설계되었다.

제조와 조립을 위한 설계 / Design for manufacture and assembly

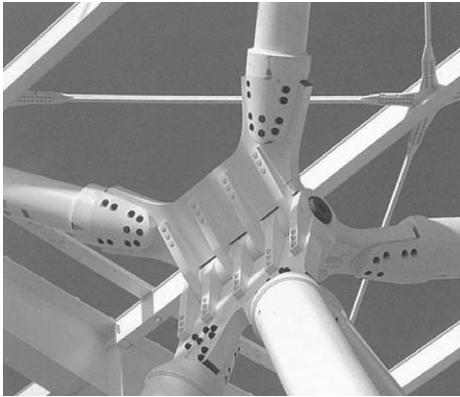
파트너계약의 기본은 전체 설계뿐만 아니라 마지막으로 볼트, 너트까지 잘 설계하는 것이다. 아래의 예들은 "제조와 조립을 위한 설계"가 얼마나 공기와 공사비 및 위험요소들을 줄일 수 있었는지를 잘 보여준다.

설계팀이 시공면에 초점을 맞췄기 때문에 육안으로 검토 가능한 품질과 사용성이 잘 조화를 이룰 수 있었다. 한편 건축가는 이 초점을 건물의 공학적인 아름다움을 표현하는 것으로 사용했다.

구조체와 접합부, 상세가 그들 스스로 조각품처럼 설계되었다. 노출



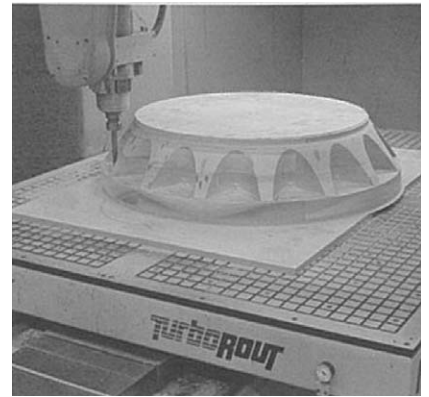
〈그림 15〉 The torso node. / 토르소 절점



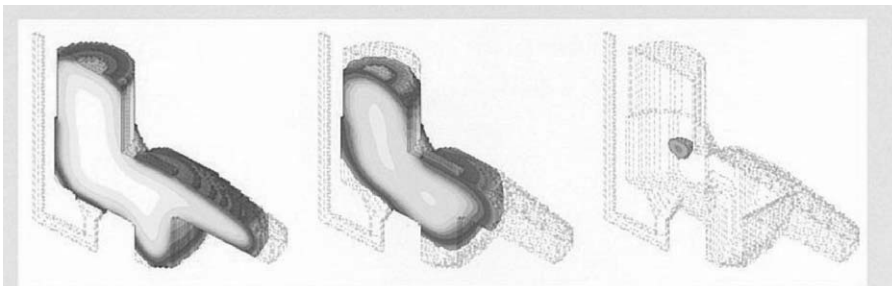
〈그림 16〉 Connection of arm to torso.
토르소와 팔의 접합부



〈그림 17〉 Casting removed from sand mould.



〈그림 18〉 Cutting of timber patterns.



〈그림 19〉 Computer modelling of casting solidification.

Casting structural steel

The success of a structural steel casting depends on its shape because the steel shrinks as it solidifies, and it is essential to allow new molten steel to flow in to make up for the lost volume. The ideal would be a carrot shape with molten steel flowing in from a header at the thick end. The shapes of all the cast components were developed in consultation with the foundry (William Cook); the design team developed 3-D computer models and Cook then used its numerically controlled five-axis cutter to cut timber patterns directly from the computer files.

이에 따른 해결책이 필요하였다.

강재다리받침은 항상 압축력을 받고 있는 상태이므로 강재와 강재의 직접지압에 의한 힘의 전달이 가장 효율적이다. 지압 면에서 조그만 각도의 오차는 22m 높이에 위치한 긴 부재의 상부점에 큰 횡력을 유발시킬 수 있다. 설계팀은 현장에서 독립적으로 각 팔과 다리부재 각도를 조절할 수 있는 적정설계를 개발해야만 했다.

토르소 절점의 최종설계(그림15)는 성탄절에 볼 수 있는 전통 나무 조각에서 영감을 얻었다. 볼트는 보조로 힘을 전달하지만, 힘찬 느낌을 준다.(그림16)

형태와 부품의 조립은 가능한 한 공장

용접과 주조품, 눈에 보이는 볼트들이 건물에 아주 중요한 부품으로 다가오게 해주며, 이 거대한 구조체에서 사람의 숨결을 느끼게 해준다.

토르소 절점 / The Torso node

강재 다리받침의 형태는 그 자체가 스스로 공학적인 도전이다. 18000kN의 압축력에 저항하는 914mm지름의 원형강을 어떻게 필요한 형태에 맞춰 조립을 용이하게 처리할 수 있는냐의 문제인 것이다.

설계팀은 문제의 해결을 위해 과거의 예를 찾아보았다. 비슷한 형태로 강재크기와 여러 개의 복잡한 절점을 위해 큰 주조품과 용접이 된 구조물은 석유 시추 설비가 있었다. 현장용접은 오차에 대한 우려와 위험도 및 속도 때문에 고려하지 않았다. 팀은 가능한 50mm두께 이상은 용접을 피하고 전체용접을 공장에서 수행되도록 했다. 따라서

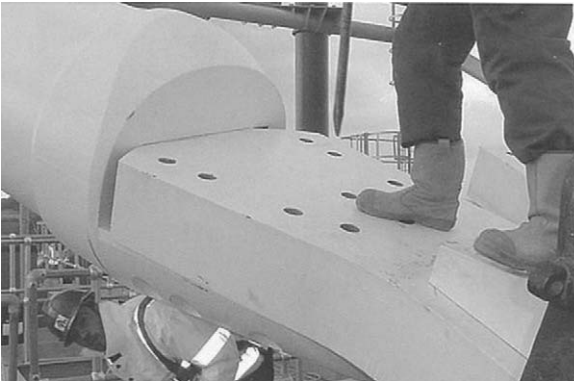
에서 쉽게 제작이 될 수 있도록 공급업체인 Corus 공정엔지니어링 업체와 함께 일을 했다. 예를 들어 조립판 두께는 150mm이나 설계팀은 4mm의 오차를 고려해서 중심간격 154mm로 설계를 했다.

이 작업은 정확한 크기를 맞추기 위한 가공작업시간을 줄여줌으로써 작업장에서의 돈과 시간을 절약할 수 있었다. 파트너 계약으로 인해 이와 같은 이점이 가능했으며 이것은 또한 건축주에게 이득으로 이어진다.

조립을 위한 설계 / Design for assembly

대개의 예에서 알려진 방법처럼 최종해석단계를 완료하는 동안 모든 단계에 걸쳐 각 시공단계별 해석과 설계가 이루어졌다.

덧붙여서 모든 현장 접합부(그림20-22)는 전체 구조재를 고려하면서 원 설계팀에 의해서 설계되었다.

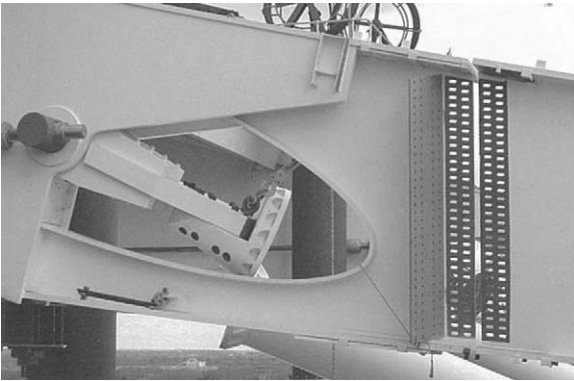


〈그림 20〉 Connection of arm to torso. / 토르소에 팔 접합

접합부는 세 가지 요건을 만족하도록 했다.

- 조립부재의 크기는 현장 크레인의 조건과 수송한계를 고려함과 동시에 현장 작업장의 작업성도 고려한다.
- 강재는 현장에서는 사람에 의한 직접조립은 최소화 시켰다. 이것은 조립 공의 추락 또는 부상의 위험을 최소화시키면서 현장작업을 신속하게 만들어 준다.
- 조립부는 이 부분이 가장 잘 보이는 부분임을 고려하여 비례도 잘 맞으며 아름답게 한다.

중앙부 아치단면의 거더 접합부는 거의 눈에 띄지 않으며 아주 빠르고 쉽게 조립이 가능하였다. 아주 빠르게 조립이 진행되어 계획보다 두 대의 크롤러 크레인을 줄였으며, 공사기간 동안 총 6대를 줄일 수 있었다.



〈그림 21〉 Adjustable connections. / 조정가능한 접합부

허용오차 / Tolerance

부재가 제작될 때에는 완성된 부재의 치수가 도면상의 치수와 항상 차이가 난다. 설계팀은 모든 지붕 부재들을 조립할 때 이러한 차이가 누적되면 구조체가 제자리를 벗어날 수도 있다는 것을 알았다. 이 때까지의 계약에서는 이러한 사항이 맞고소와 수정작업으로 이어지고 또한 잔여공기를 지연시키는 경우가 많았다.

설계팀은 조립절차를 결정했고 이러한 문제점을 해결하기 위해 구조체에 조정 가능한 접합부를 설계했다.

Arup은 허용 가능한 형상에 맞출 수 있는 슬롯 홀에 필요한 접합판과 마찰볼트 등의 접합부 일체를 설계했으며, 각 부재의 허용오차 효과를 고려한 모든 해석을 수행하였다.

결론 / Conclusion

지붕공사는 2003년 12월 시작해서 2005년 11월에 예산에 맞춰 완료되



〈그림 22〉 Conjunction of rafter with top of abutment frame.
다리받침 구조의 윗 부분과 거더의 접합

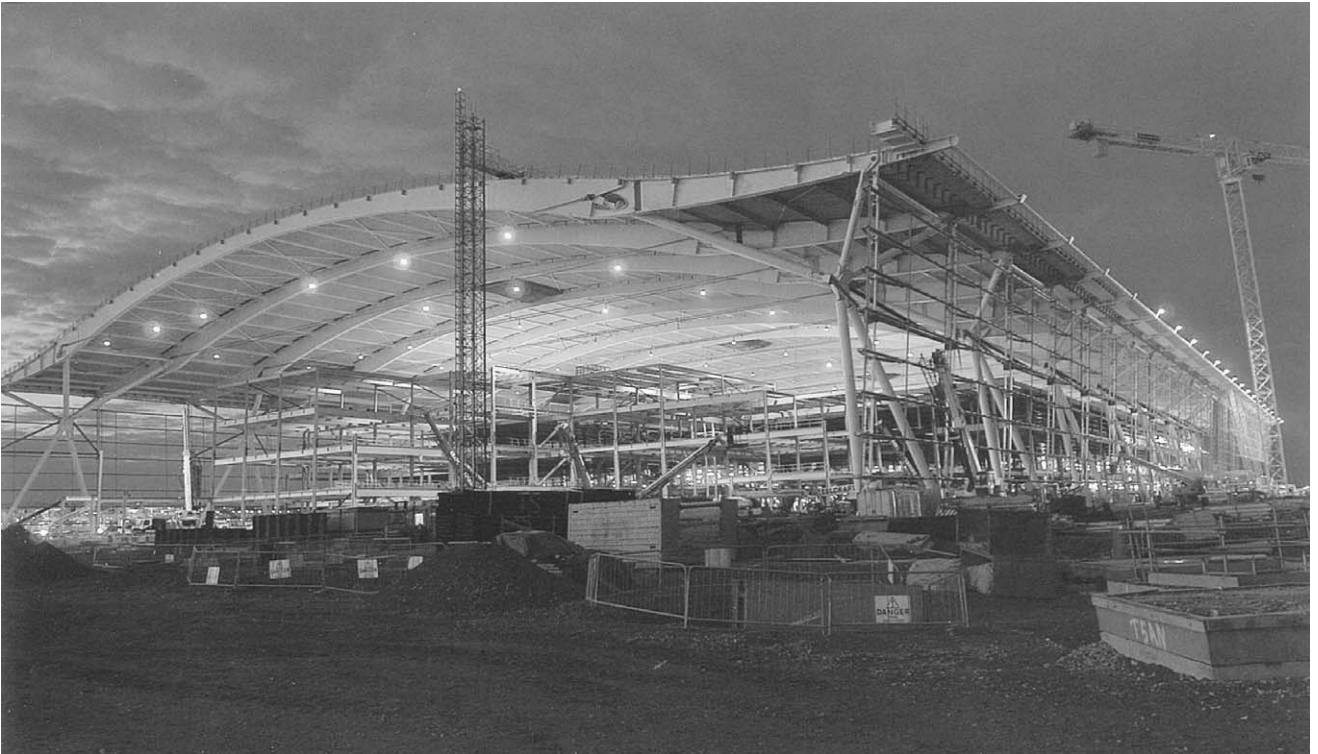


〈그림 23〉 Close-up of shear key.

〈그림 24〉 Rafter assembly.

Rafter splices

One of the more subtle advantages of the prestressed high ties is that the splices in the central arched section of the rafters always carry significant net compression. Therefore, they can transfer forces from section to section in bearing, rather like the joints between the stones of a gothic cathedral. No welding is required. 120mm diameter "male" and "female" shear connectors interconnect during erection so that the whole rafter fits together like giant Lego bricks (Figs 23, 24). Some bolts are required for extreme wind load cases but these can be accessed from inside the rafter section after assembly and off the critical path.



〈그림 25〉 The main terminal building in summer 2005. / 2005년 여름의 주 터미널 건물

었다. 이는 무엇보다도 열정과 전문성(professionalism), 그리고 혼신적인 팀웍으로 이루어낸 결과이다. 우리 팀은 훌륭한 건물을 건설하고 설계하는데 초점을 맞췄으며 가장 효과적인 방법으로 최선을 다하여 안전하게 수행해 내었다.

참고 / Reference

(1) BEARDWELL, G. et al, terminal 5, London Heathrow: 3-D and 4-D design in a single model environment. The Arup Journal, 41(1), pp3-8, 1/2006.

역사후기

번역을 하면서 과연 구조엔지니어가 설계를 수행할 때 어떠한 방법으로 프로젝트에 대하여 접근하고 고객, 건축가, 시공자, 사용자에게 최적의 효율적인 방법이 무엇인가를 고민할 수 있는 좋은 글이라 생각되었다. 국내에서도 구조엔지니어가 이러한 접근법으로 설계를 해나간다면 앞으로 우리 구조설계 분야의 미래는 밝아질 것으로 기대된다.

Steve Mckechnie / 김종수 譯

* 이 번역은 Arup Korea의 하승윤지사의 동의를 얻어 게재하게 되었습니다.

Credits

Client: BAA Architect: Richard Rogers Partnership
 Assistant architect: HOK Multidisciplinary engineer:
 Arup - Graham Aldwinkle, Andrew Allsop, Jolyon Antill,
 Trevor Baker, Mike Banfi, Kathy Beadle, Dan Birch,
 David Bloomfield, Isobel Byrne-Hill, Simon Cardwell,
 Mark Collier, Andrew Cunningham, Lee Cunningham,
 Pat Dallard, Tony Fitzpatrick, Brian Forster, Damien
 Friel, Ian Gale, Clare Gardiner, Florence Gautron, Kathy
 Gibbs, Chris Godson, Lee-Zane Greyling, Ray Ingles,
 Barney Jordan, Tarsem Kainth, Vince Keating, Richard
 Kent, Steven Luke, Steve McKechnie, Ian McRobbie,
 David McShane, Pablo Marsh, Astrid Meunzinger,
 Dervilla Mitchell, Phillip Money Penny, Gareth Mooney,
 Chris Murgatroyd, Paul Nuttall, Deirdre O'Neill, Gabriele
 Presot, Steve Roberts, Joe Spatola, David Storer,
 Martin Tarnowski, Gursharan Thind, John Thornton,
 David Trelease, Rebecca Wright Cost management:
 EC Harris/Turner and Townsend Steel supplier:
 Watson Structural Steelwork Ltd Heavy lift consultant:
 Rolton Team management and programming: Laing
 O'Rourke Steel foundry (castings): William Cook
 Machining and heavy assembly (nodes): Corus
 Process Engineering High tie supply and stressing:
 Bridon Wind tunnel testing: RWDI Checking
 engineer: Flint and Neill Roofing: Hathaway Strand
 jacking: PSC Fagiolet Building control: BAA Building
 Control Images: 1, 2, 4-7, 9-11, 13, 24, 25 BAA;
 3 Nigel Whale; 8, 17, 18, 20 Richard Rogers
 Partnership; 12, 14, 16, 21-23 Arup; 15 Arup/Richard
 Rogers Partnership; 19 William Cook.