

컴퓨터를 이용한 강교 조립시뮬레이션 공법

Computer-Aided Assembly System for Steel Bridge



이 창근*



이 원 태**



강 윤 모***

*한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원
 **한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
 ***두산메카텍주식회사 강교설계팀장

1. 서 론

국내 강교량의 제작기술은 80년대부터 지속적인 투자와 이후 국내 강교제작사와 중공업사의 교량제작을 위한 자동화 설비의 구축이 활발해 졌으며, 90년대초 대형 강교량의 붕괴사고 이후 제작 정밀도와 용접기술의 향상으로 강교 제작기술은 빠른 속도로 성장해 왔다. 그러나 강거더교의 제작은 콘크리트 교 보다 품질을 확보하기 위한 많은 노력과 기술이 결집되어야 하고, 각 공정 별로 품질에 대한 철저한 관리가 필요하다. 이에 도로교표준시방서(건설교통부)와 고속도로공사표준시방서(한국도로공사)에 강거더 교량을 가설하기 전 제작된 단품에 대해 공장가조립을 수행하여 조립성 및 완성도를 사전에 검수하도록 하고 있다.

그러나 공장가조립 공정은 공사기간의 증가 및 인건비 상승 요인이 되며, 강교 제작사에는 넓은 가조립장의 사용에 따른 생산량의 감소와 강교 제작 후 장시간 가조립을 위해 야적장에 적치하여야 하며 조립, 해체하면서 발생하는 표면손상 및 부식발생과 안전사고 등의 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점들을 해소하고 공장가조립을 효과적으로 대체하기 위하여 제작장에서 만들어진 높은 품질의 교량을 계측을 통해 컴퓨터상에서 조립상태를 시뮬레이션하고, 이에 따른 교량의 상태를 확인한 뒤 공장가조립 없이 현장에 교량을 설치하는 디지털조립 시스템의 개발이 필요하다.

이미 해외의 많은 교량제작 업체들은 플레이트거더교 및 강박스 거더교에 대해 컴퓨터를 통한 조립을 실시하고 있으며, 이러한 추세는 지속적으로 증가 할 전망이다. 또한 국내에서도 이러한 세계적 추세에 발맞추어 2005년도에 개정된 도로교표준시방서에 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 디지털가조립(수치가조립)이 공장가조립을 대신할 수 있도록 법적 근거도 마련되어 있으며, 발주처와 강교 제작사에서도 디지털가조립의 필요성을 인식하고 있다.

지금까지의 강교량 제작에 관한 많은 경험을 바탕으로 우리나라 실정에 맞는 강교 조립시뮬레이션 시스템을 개발할 때이며, 향후 본 시스템이 공장가조립을 대체함으로써 공기단축과 적기 공급체계를 구축하고 공사비 절감과 공기단축을 실현과 나아가 국내교량의 품질을 한 단계 더 높일 수 있는 계기가 될 것이다. 또한, 정밀한 계측을 통해 품질의 완성도를 확인하고 수정여부에 대해 판단한 뒤 최종적으로 컴퓨터상에서 실제 현장에서의 가설조건을 기준으로 조립하여 각 제품별 허용오차와 가설 시 발생할 수 있는 여러 가지 상황을 미리 추적, 보완함으로써 가설 시 발생할 수 있는 문제를 사전에 방지하고 무리한 가설로 발생하는 품질의 저하를 예방할 수 있다.

따라서, 이를 충분히 수행할 수 있는 시스템의 필요성이 절실히 요구되고 현실적으로 충분히 구축할 수 있는 시기가 도래하였다고 판단하여 디지털 측정시스템을 이용하여

계측한 데이터로부터 각 단품별 완성도를 확인하고 각 부재 계측정보를 통해 컴퓨터상에서 가조립 시뮬레이션을 수행할 수 있는 '강교 디지털 조립시스템(Digital Assembly System for Steel Bridge)'을 개발하였다.

본 디지털 조립시스템은 크게 1) 설계정보를 바탕으로 한 3차원 교량모델링 모듈, 2) 실물형상을 정확히 측정할 수 있는 측정시스템, 3) 측정된 정보와 설계정보 분석 모듈, 4) 조립시뮬레이션 모듈, 그리고 5) 각종 검사보고서 출력 모듈로 구성된다.

이들 각 모듈에 관한 개발 내용은 다음과 같다.

- 설계정보를 통한 3차원 수치조립 모델 생성시스템
 - 설계정보 입력
 - 설계상의 조립 모델 생성
- 측정시스템
 - 측정 데이터에 의한 3차원 모델 생성
- 부재측정 정보와 설계정보 분석시스템
 - 설계상의 모델과 계측 모델과의 비교
 - 부재별 품질보고서 생성
- 강교 조립 시뮬레이션 및 분석시스템
 - 경계조건 및 조립 허용오차에 대한 분석
 - 임의의 조립순서에 대한 전체형상 시뮬레이션
- 검사보고서 출력시스템
 - 연결 부재의 설계 수정보고서 출력
 - 승인 판단을 위한 조립 성적보고서 출력

2. 조립시뮬레이션

2.1 조립시뮬레이션 과정

2.1.1 조립시뮬레이션 개요

그림 1에 기존의 강교 제작과정과 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 디지털 조립시스템의 개요를 나타내었다.

컴퓨터를 이용한 조립시뮬레이션을 실시함으로써 전체 조립상태를 예측할 수 있고 제작된 단품의 제작오차, 스프라이스 변경을 통한 조립가능성 여부 등을 검토할 수 있다. 아래에 각 항목별로 얻을 수 있는 정보에 대해서 기술하였다.

◆ 조립 상태 예측 및 문제 해결

기 제작된 단품들의 수정하지 않은 상태에서 공장가조립을 수행하였을 경우 나타날 수 있는 문제점들을 예측해 볼 수 있다. 또한, 발생한 문제점을 파악하고 이를 토대로 특정 단품을 수정하는 등의 문제점 해결방안을 마련할 수 있다.

◆ 스프라이스 수정을 통한 조립 가능성 확보

조립 가능성을 검토하고 조립에 문제가 있는 경우, 단품의 수정만으로 문제점을 해결할 수 있는지의 여부와 단품 수정작업 없이 스프라이스만을 수정하여도 조립이 가능한지를 판단할 수 있다.

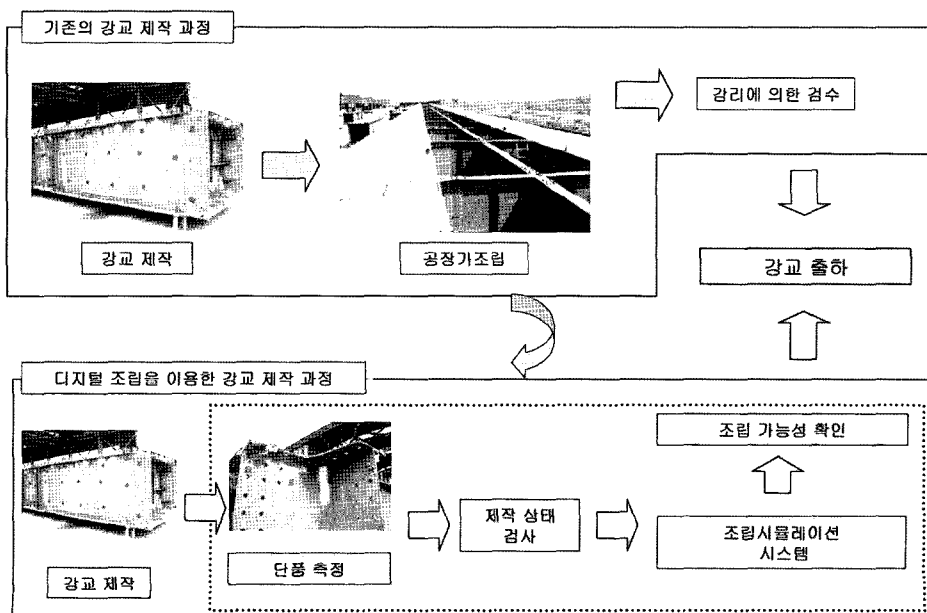


그림 1 시뮬레이션 시스템 개요

◆ 조립 가능성 판단

최종적으로 강교 조립이 가능한지의 여부를 판단한다. 본 시스템은 조립 가능성을 수시로 판단할 수 있는 피드백 과정이 포함되어 있으므로 이러한 반복 수행과정을 통하여 조립가능성을 판단한다.

2.1.2 조립시물레이션에 필요한 정보

조립시물레이션을 수행하기 위해서는 설계정보, 검사정보 및 측정정보 등이 필요하다.

◆ 설계 정보

조립시물레이션을 수행하기 전의 초기 상태 즉, 설계값에 의한 조립 상태를 판단하기 위하여 다음과 같은 설계 정보를 입력 받는다.

- 각 단품의 설계 수치 정보
- 선형 정보(중·횡 구배 및 캠버 정보)

◆ 측정 정보

조립시물레이션을 수행하기 위해서는 기 제작된 단품의 실측정보가 필요하다.

- 각 단품을 측정된 형상 정보

◆ 검사 정보

조립시물레이션의 검사를 위하여 필요한 정보는 다음과 같다.

- 검사 시 요구되는 허용오차 범위

2.1.3 조립시물레이션 결과

조립시물레이션을 통해 전체 교량의 조립 가능성 여부를 판단할 수 있으며, 각 검사 항목별로 Post-Processor를 통하여 확인할 수 있다.

◆ 스플라이스 수정 정보

스플라이스를 수정하여 강교의 조립 가능성을 확보하도록 하였으므로 수정된 스플라이스가 발생할 경우 이에 대한 정보를 출력함으로써, 수정 스플라이스 제작에 도움을 주도록 한다.

◆ 가조립 보고서

공장가조립 시에 작성되는 가조립 보고서와 같은 시물레이션 조립 보고서를 출력한다.

◆ 단품 및 연결부 세부 정보

단품이 허용오차 범위내로 제작되었다 하더라도 단품과 단품을 조립하는 연결부분에서 허용범위를 초과하는 오차가 발생할 수 있다. 따라서 단품에서의 오차 분포를 자세하게 표현하여, 연결부의 오차를 줄이기 위한 조치방안을 마련하는데 도움을 줄 수 있는 단품 및 연결부의 세부정보를 제시한다.

2.2. 조립시물레이션

2.2.1 좌표계 정의

그림 2에서는 강교의 기준좌표계 [W], 경계조건의 좌표계 [E_n], 그리고 각 박스 좌표계[B_n] 등을 보여주고 있다. 각 박스의 위치 및 방향은 절대좌표계에 대하여 아래와 같이 표현한다.

$${}^W T_{B_i} = Trans({}^W \vec{p}_{B_i}) \cdot Rot({}^W \vec{\delta}_{B_i}) \\ = {}^W T_{B_i}^I \cdot Trans({}^{B_i} \vec{p}_{B_i}) \cdot Rot({}^{B_i} \vec{\delta}_{B_i})$$

여기서, ${}^W \vec{p}_{B_i} = ({}^W p_{B_{ix}}, {}^W p_{B_{iy}}, {}^W p_{B_{iz}})^T$,

${}^W \vec{\delta}_{B_i} = ({}^W \theta_{B_{ix}}, {}^W \theta_{B_{iy}}, {}^W \theta_{B_{iz}})^T$

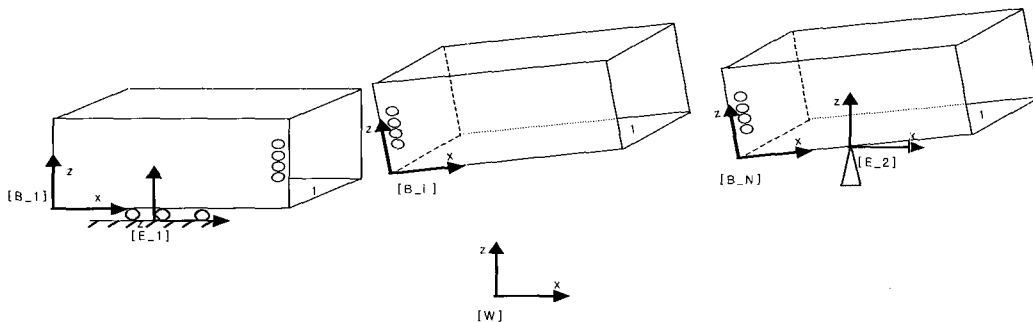


그림 2 강교의 좌표계 정의

2.2 허용오차와 조립가능성 의사결정

박스 [A]와 박스 [B] 상의 Hole들과 스플라이스의 Hole들의 중심위치들과의 오차를 최소화 시키는 박스 [A]와 박스 [B]의 위치, 방향 및 스플라이스들의 체결 관계를 구할 수 있다. 그러나 각 박스의 Hole과 스플라이스의 Hole 간의 오차가 최소화 되도록 시뮬레이션 한다 해도 실제 조립되었을 때의 상태를 그대로 반영하는 조립시뮬레이션은 아니다. 따라서, 본 시스템에서는 주어진 경계조건(고정단, 이동단)을 만족시키면서 Hole들 사이에 최소한의 오차가 될 때(가장 잘 조립될 수 있는 경우)의 조립상황(조립오차 및 간섭 등)을 확인하면서 조립 가능성을 판단할 수 있도록 사용자 의사결정 시스템을 채택하였다.

시뮬레이션 결과 일부 Hole의 최소오차가 조립허용오차 보다 크더라도 다른 부위의 스플라이스와 박스의 Hole 위치를 허용오차 범위 내에서 변화시켜서 체결에 문제가 되는 Hole들의 최소오차를 허용오차 범위내로 들어오도록 만들 수도 있을 것이다. 이와 같이, 박스의 Hole들과 스플라이스의 Hole의 위치와 오차가 비록 전체적으로 최소화된 상태는 아니지만, 주어진 경계조건을 만족하면서 모든 Hole 오차들이 허용오차 범위내로 들어올 수 있도록 박스와 스플라이스의 위치조정이 가능한지 불가능한지에 대한 시뮬레이션은 매우 유용하다.

2.3 시뮬레이션 시나리오

조립시뮬레이션은 그림 3과 같은 과정을 통해서 이루어진다.

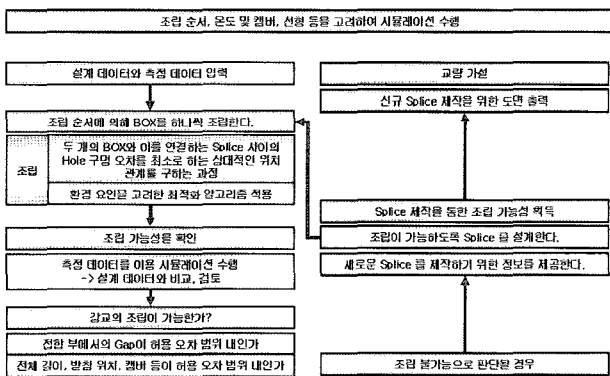


그림 3 시뮬레이션 시나리오

2.4 조립시뮬레이션 프로세스

Hole 오차를 최소화하여 스플라이스를 체결하면서 각 박스와 가로보 등을 배치하는 것을 조립시뮬레이션이라

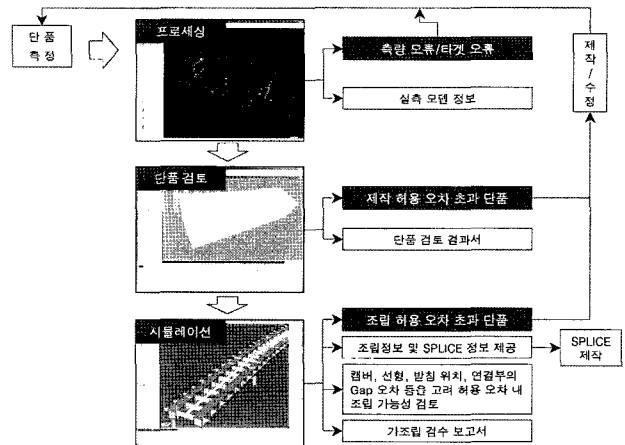


그림 4 조립시뮬레이션 흐름도

정의한다. 전체 단품 박스를 조립함으로써 공장가조립 상태를 시뮬레이션 해 볼 수 있으므로 이를 통하여 현장 조립을 예측할 수 있다.

조립이 이루어진 상황에서 단품 박스 사이의 연결부 상태(박스 사이의 간격, 단차, 비틀림 등)와 스플라이스 부착 위치, 캠버, 선형, 연장 등을 검토하여 허용오차 범위 안에 들어오는지 확인한다. 또한 크로스빔, 스트링거들과의 연결부위를 검토하여 오차상태를 검토한다.

모든 검토 대상이 허용오차 범위 안에 들어왔을 때 스플라이스를 재설계한다. 특정 부위의 스플라이스 정보를 수정하고 조립 가능성을 검토한다.

그림 4와 같은 과정을 통해서 시스템이 제공하는 시뮬레이션결과와 사용자가 정의하는 조립시뮬레이션을 통하여 최적의 조립 가능한 상태를 찾아낼 수 있다.

3. 측정시스템

강박스교 조립시뮬레이션을 위해서는 제작된 단품박스 와 가로보, 스트링거 등에 대한 실물 제원이 필요한데, 이러한 제원들을 측정하기 위해서는 전문적이고 정밀한 측정시스템이 요구된다. 따라서 몇 가지 측정시스템에 대해 현장실측검사 및 정도검증을 통해 본 시스템에 적합한 측정시스템을 선정하였다.

정도검증을 실시한 장비로는 가장 많이 사용되고 있는 광파측정기, 레이저트랙커, 레이저스캐너와 사진측정시스템 등으로 이들 장비에 대해 정도뿐만 아니라, 사용성 등에 대해서도 2차례에 걸쳐 장비성능 검증을 수행하였다. 강박스교의 공장가조립을 대체할 디지털 가조립의 성공여부는 그 구성시스템의 상호연계도 중요하지만 측정하고자 하는 강박스의 모든 치수를 있는 그대로 나타내 주는 측정

정밀도가 최우선적이고 계측자의 기량에 상관없이 측정값이 일정해야 하며 측정 소요시간, 측정 장소 및 별도의 설비보완 여부와 측정정보의 활용성, 경제성 등 많은 요소를 고려해서 결정해야 한다.

1차 장비성능 검토 결과 레이저스캐너와 레이저트랙커는 경제성과 실용성 등에 있어 적용이 힘든 것으로 판단되어 범용으로 가장 많이 사용되고 있는 광과측정을 이용하는 Total Station 장비와 사진측정기술과 이미지프로세싱 기술을 이용한 새로운 기법의 Photogrammetric System (사진계측시스템)을 선정했으며, 이 두 시스템에 대한 성능시험과 활용성 등을 최종 검토한 결과 사진계측시스템이 적합한 것으로 판단되었고, 향후 박스를 구성하는 소부재의 측정에도 활용도가 높은 것으로 나타났다.

사진계측시스템(Photogrammetric System)이란 고해상도의 디지털카메라를 이용하여 특정 타겟이 부착된 대상을 촬영한 후 획득한 이미지를 소프트웨어로 처리하여 3D 좌표 및 형상을 만들어내는 시스템이다. 본 시스템은 현재 다양한 산업용 측정에 사용되고 있으며, 주로 항공산업, 자동차, 선박, 중공업, 원자력산업 분야에서 단품검사, 조립검사, 역 설계, 면의 형상분석 등 여러 분야에서 사용되고 있다. 또한, 본 장비는 휴대가 가능하여 이동이 쉽고 어느 곳에서도 사용이 가능한 장점을 갖고 있다.

사진계측의 기본 원리는 삼각측량의 원리를 이용한 것인데 사진 찍는 각도를 달리한 사진 2장 이상을 이용하여 카메라 위치와 피사체의 위치를 계산한다. 이러한 삼각측량의 원리는 광학측량기에 의한 측정에 적용되는 원리이다.

또한, 광과측정기는 강교제작 공장 내 여건상 중량물 운송 및 제작에 따른 진동에 대해 별도의 방진시설이 필요하며 사용자의 측정 환경(측정오차, 타겟 부착 오차)에 따른 측정오차가 발생할 수 있으며 Photogrammetry의 경우

표 1 측정장비 비교표

구 분	사진계측시스템	광과측정기
측정 유형	사진 계측+이미지프로세싱	광과기와 좌표변환 소프트웨어
정밀도	0.025mm/4m	각 정밀도: 0.5"/Hz, V 거리정밀도: ±0.2mm/120m
측정 방식	사진 계측	근적외선을 이용한 Polar Method
타겟 형태(유형)	Coded Target, 광반사 원형타겟	반사 Tape target, Reflector
측정정보 내용	좌표, 거리, 모서리, 면생성, 형상 Data	좌표 및 형상 Data
측정데이터 활용성	형상모델링 일부 자동화지원 → 결과를 설계에 Feedback	부품및 조립정도검사 및 수정 → 결과를 설계에 Feedback

상대적으로 정밀도가 높고 타겟 부착이 용이하여 사용자에게 따른 오차 및 타겟의 부착 위치에 대한 오차 감소 등으로 광과측정의 한계를 극복 할 수 있다는 장점이 있다. 표 1에 각 장비별 특성을 간략히 나타내었다.

4. 디지털 조립시스템 적용 사례

4.1 개요

실험적용은 본 시스템의 적용성과 시스템에서 제공하는 여러 가지 시나리오의 적정성과 측정시스템과의 연계성, 또한 실무적용 시 조립가능성 판단 및 수정부분 결정 등 사용자가 의사결정 할 수 있도록 도와주는 여러 가지 필요한 정보들의 출력 기능 등 본 시스템의 적용 시 문제점과 보완해야 할 점 등을 파악할 수 있었으며, 실험적용 결과 본 시스템의 적용성과 기능을 확인할 수 있었다.

4.2 강교 제원

실험대상교량은 익산-장수고속도로 건설 구간 내에 가설된 강박스거더교로 교량제원과 전체적인 조립 형태는 다음과 같다.

표 2 교량제원

중단 선형	중단 선형	길이	폭	거더 열 수	경간수	박스 수
완화 곡선	-0.5%	150m	12.6m	2열, CB/STR	3경간	15개/열

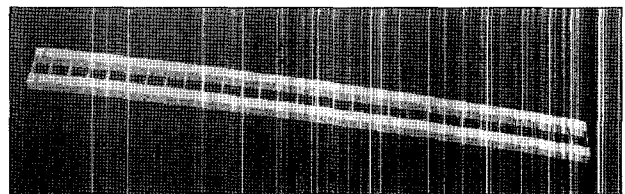


그림 5 강교의 전체 형상

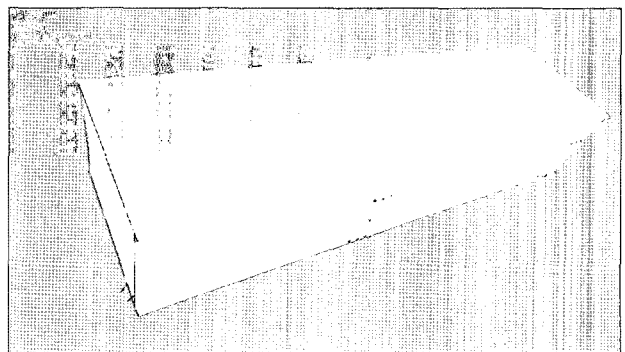


그림 6 단품 박스의 형상 확인

설계정보와 입력된 측정정보가 측정정보를 읽어 들이는 과정에서 측정정보 입력상태를 확인함과 동시에 허용오차를 벗어나는지 여부를 그림 6와 같은 화면을 통하여 쉽게 확인할 수 있다.

4.3. 디지털 조립시뮬레이션 수행 결과

설계정보와 측정정보를 이용한 단품 검토가 끝나고 시뮬레이션을 통하여 디지털조립을 수행하였다. 시뮬레이션

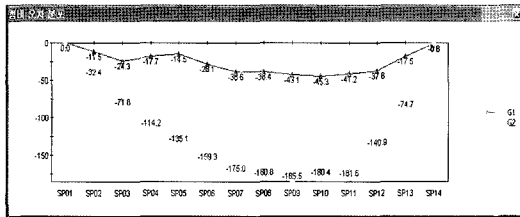
표 3 시뮬레이션 결과(요약)

구 분	시뮬레이션 결과	허용오차
총 길이	+11.0	$\pm 25 \pm (10+L/10)$
캠버 오차	-2.2/+13.5	-5 ~ +15
최대 박스간 간격	7.2	5±3
스플라이스 변경	설계 대비 60%	-

수행 과정에서 비교 대상이 되고 오차 분석을 위한 기준 값으로 사용되는 설계 캠버와 선형 등 설계 정보를 기준으로 초기 조립시뮬레이션을 수행하였으며 조립 배열된 상태를 설계값과 근접하도록하기 위해 박스 배열 조정과 스플라이스 수정을 통해 최적의 조립상태를 모사하였다. 표 3에 시뮬레이션 결과를 요약하였다. 그림 7은 스플라이스 수정 전, 후의 캠버상태를 보여준다.

시뮬레이션 결과로부터 필요한 부분의 스플라이스 재설계하여 새로 수정된 스플라이스를 이용해 공장가조립을 수행하였으며, 가조립 중 문제없이 조립되어 시뮬레이션의 적용성과 정확도를 확인하였다. 그림 8와 9는 수정된 스플라이스를 이용한 공장가조립 후 몇몇 스플라이스의 체결상태를 보여준다. 또한, 시뮬레이션과 공장가조립을 통한 확인과정에서 다음과 같은 사항을 검토할 수 있었다.

스플라이스 수정 전



스플라이스 수정 후

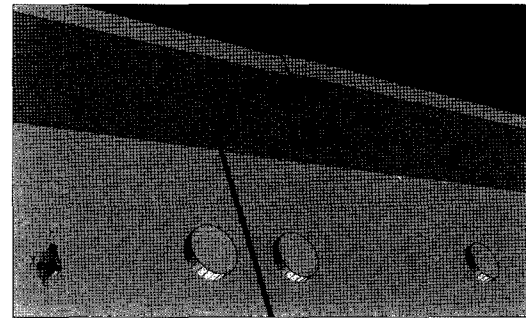
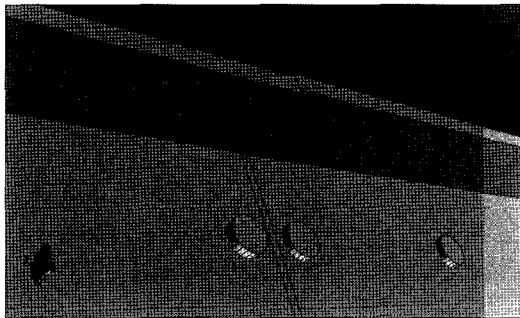
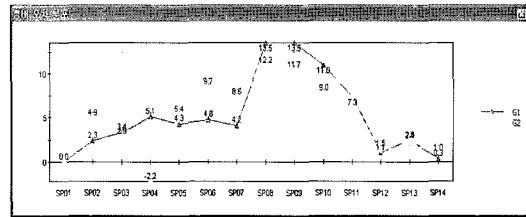


그림 7 스플라이스 조정을 통한 시뮬레이션 결과

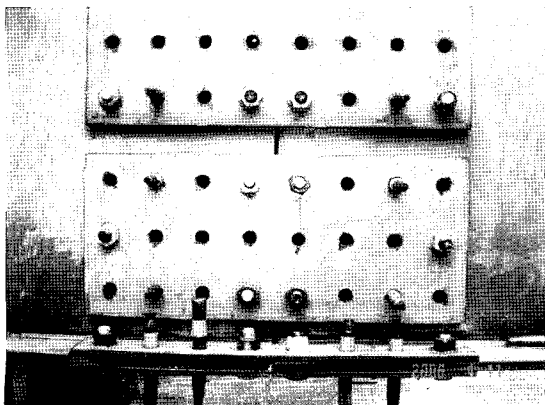


그림 8 박스 스플라이스 체결 상태

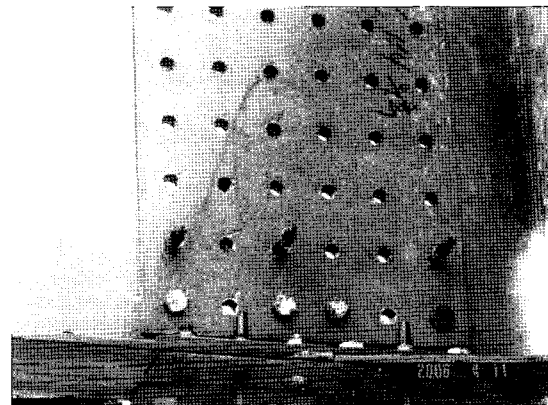


그림 9 가로보 스플라이스 체결 상태

1) 측정정보를 이용하여 실제형상을 시뮬레이션을 통해 배치상태를 확인하게 되므로 실제 강교의 조립 상황을 예측할 수 있음을 확인하였다. 이러한 배치 상태는 박스와 박스 사이의 허용간격, 캠버, 횡 선형 등을 고려한 배치 상태이므로, 실제 강교의 조립에서 발생할 수 있는 문제를 사전에 제거한 상태로, 실제 강교 조립의 지침으로서 활용될 수 있다.

2) 단순히 박스 사이의 허용간격만을 고려한 배치가 아닌, 스플라이스를 체결하여 박스를 연결 하였을 때의 상황을 재현한 것이므로, 실제의 조립 상황을 반영한 시뮬레이션이다. 또한 조립 가능한 배치상태를 위하여 수정되어야 할 스플라이스에 대한 선정과 함께 수정을 위한 정보를 제공함으로써 실 강교 조립에 문제가 생기지 않도록 할 수 있다.

4.4. 시뮬레이션 시나리오 검증

상기와 같이 실교 적용사례를 통하여 조립시뮬레이션과 스플라이스의 재설계를 통한 강교의 조립 가능성 확보라는 기본 시나리오에 대한 타당성을 검토하였다.

스플라이스를 체결함으로써 강교를 조립해 나가는 현장에서의 조립을 그대로 반영하는 조립시뮬레이션을 통한 실제 강교 조립의 예측은 조립 가능성에 대한 판단 근거를 마련해 주었다. 이러한 예측기능은 조립가능성의 판단뿐만 아니라, 조립 시 발생할 수 있는 문제점을 미리 파악하여 대처할 수 있도록 하고 더 나아가 시뮬레이션결과를 제작공정에 피드백함으로써 근본적인 원인 파악과 제작상의 공정 개선을 위한 기본 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

조립시뮬레이션을 통한 예측결과와 스플라이스의 자유로운 조정으로 보다 안정적인 조립상태를 확보할 수 있었다.

5. 맺음말

지금까지 강교 제작 후 수행하는 공장가조립 공정을 대체할 수 있는 컴퓨터 조립시뮬레이션 시스템의 실교 적용

사례를 소개 하였다. 공장가조립은 공사기간의 증가와 제경비의 과다소요 그리고 가조립을 위한 넓은 공간의 확보가 필요하고, 가조립 시 일기변화에 따른 공기지연, 제작 후 장시간 가조립을 위해 야적장에서 방치 시키는 등 많은 불합리한 점을 내포하고 있다.

이미 언급한 바와 같이 10여년 전 부터 일본을 비롯해 유럽 여러 나라에서는 플레이트거더교와 강박스 거더교 등 강교량에 대해 컴퓨터를 통한 조립을 실시하고 있으며 지속적으로 증가추세에 있다. 국내에서도 발주처와 강교 제작사에서 디지털가조립의 필요성을 인식하고 90년대 후반부터 한국도로공사와 몇몇 강교제작사를 중심으로 시스템 개발에 대한 관심이 증가되고 있어 이러한 시스템의 적용이 사회적으로 요구되고 있는 실정이다. 한편, 2005년도에 개정된 도로교표준시방서상에 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 디지털가조립(수치가조립)을 허용하는 법적 근거도 마련하고 있어 향후 강교에 대한 디지털조립시스템의 적용이 활발해 질 것으로 예상된다.

이러한 사회적으로 요구와 공장가조립이 갖고 있는 여러 가지 어려움 등을 효과적으로 해소하기 위한 방안으로 각 부재의 정밀계측 정보와 설계정보를 바탕으로 컴퓨터 상에서 제작오차 검사와 조립상태를 점검하는 디지털 조립시뮬레이션 시스템을 개발하였으며 실교에 시험 적용하여 만족스러운 결과를 얻었다.

이상 소개한 디지털 조립시뮬레이션 시스템을 실무에 확대적용하고 공장가조립을 대체함으로써 강교제작사로서는 기술우위를 통한 경쟁력 확보와 가조립에 소요되는 용지 전용 등의 효과를 볼 수 있으며, 발주처로서는 공기 단축 및 공사비 절감을 기대할 수 있으며, 공장가조립 시 발생할 수 있는 손상들을 사전에 방지하여 국내 강교량의 품질을 한 단계 더 높일 수 있을 것으로 기대된다. **ㄹ**