

양중작업 자동화를 위한 부재진동에 따른 타워크레인의 작업가능 기준 연구

A study of Operation Criteria of Tower-crane for Automatic Transportation Considering Swung Member

신 윤 석* 진 일 권** 안 성 훈*** 조 훈 희**** 강 경 인*****
 Shin, Yoonseok Jin, Il-Guan An, Sung-Hoon Cho, Hun-Hee Kang, Kyung-In

요 약

현재 건설현장에서는 인력수급의 어려움과 숙련공의 노령화의 해법으로 건설 자동화가 추진되고 있다. 특히, 건축물의 대형화 및 고층화에 따라 양중작업의 중요성이 높아지면서 작업의 효율성을 향상시킬 수 있도록 타워크레인을 대상으로 한 많은 자동화연구가 진행 중이다. 타워크레인을 이용한 양중작업의 자동화를 위해서는 부재의 관성과 풍하중에 의한 진동을 제어해야 하는데, 제어하기에 앞서 진동을 예측하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 타워크레인과 부재를 대상으로 동적 모델링을 실시하고 시뮬레이션을 통해 부재의 동적 진동을 분석하였다. 그 결과, 작업조건에 따른 발생하는 부재의 최대진동폭과 특징을 분석하였다. 그리고 분석자료를 바탕으로 부재의 특성에 따라 양중작업 자동화가 가능한 풍속기준을 판단할 수 있는 방안을 제시하였다.

키워드 : 양중작업 자동화, 진동, 동적 해석, 시뮬레이션

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

현재 건설현장에서는 기능인력 수급의 어려움과 숙련공 노령화로 인건비 상승, 시공품질의 저하, 공사기간의 지연, 안전사고 발생 위험 증가와 같은 문제가 제기되고 있다. '건설자동화'는 이 문제해결을 위한 하나의 명백한 해법으로 제시되었다(김영석

외 2001). 국내 건설자동화 연구수준은 이미 커튼월공사용 로봇, 콘크리트 바닥 연마로봇 등을 작업에 투입하여 건설작업에서 생산성 향상 및 안전성 확보에 기여하고 있다(이승열 외 2006). 이제는 이 단계를 넘어 일본의 SMART 시스템(Shimizu, 1993)처럼 건물을 현장에서 자동으로 건설할 수 있는 시스템 개발의 단계에 접어들어 있다.

산업의 발전과 인구의 도시집중으로 인한 공간의 효율적인 이용요구가 증가됨에 따라 도심지 건축물은 점차 대형화, 고층화되면서 공사에 소요되는 자재의 운반이 많아지고 있다(이종렬 외 2004). 이에 따라 건설작업 효율성 증진을 위해서 양중작업의 중요성이 높아지고 있고, 특히 양중장비 중 타워크레인에 의한 작업비중이 높아지고 있어(이용균 외 2004, 고광일 외 2006), 타워크레인을 이용한 양중작업 효율성 향상을 위한 자동화 연구가 진행되고 있다.

양중작업 중 인양 과정에서 타워크레인은 부재의 관성과 풍하중에 의해 진동을 하게 된다. 특히, 타워크레인 케이블로 연결되는 부재의 경우, 끊임없는 진자운동 형태의 흔들림이나 비틀림과 같은 진동이 발생한다. 이런 진동은 건축물의 고층화로 타워크레인의 높이가 높아지면서 바람에 의한 횡하중을 더 크게

* 일반회원, 고려대학교 건축공학과 박사수료, yoonseok@korea.ac.kr
 ** 일반회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, wis0616@korea.ac.kr
 *** 일반회원, 대구대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사, shan7208@hanmail.net
 **** 종신회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 조교수, 공학박사, (교신저자), hhcho@korea.ac.kr
 ***** 종신회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사, kikang@korea.ac.kr
 본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설기술평가원에서 위탁 시행한 2006년도 첨단융합건설기술개발사업(과제번호 : 06 첨단융합 D01)의 지원으로 이루어졌습니다.

받아 심화되고 있다(이종렬 외 2004, 최운교 2005, 이환 외 2005). 양중작업의 자동화의 측면에서, 이런 진동은 양중작업시 부재와 인근의 구조물간의 충돌을 일으키거나 부재를 원하는 위치로 이동시키기 어렵게 하는 등 정밀하고 안정적인 제어를 방해하는 요인이 된다. 따라서 이런 진동을 제어하는 것은 타워크레인을 이용한 양중작업의 자동화 연구진행을 위해서 반드시 해결해야할 문제이다.

그러나 타워크레인 진동발생에 결정적인 원인인 바람에 의한 풍하중은 공사가 진행되는 지역, 작업이 진행되는 현장의 높이, 부재의 크기와 형태, 무게 등 현장의 작업조건에 따라 복잡하게 작용하고, 양중되는 부재도 타워크레인의 거동에 영향을 받기 때문에 제어하기가 매우 어렵다. 그러므로 이러한 제어를 위해서는 동적인 진동을 예측하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 타워크레인 부재를 대상으로 동적 모델링을 실시하고 시뮬레이션을 통해 부재의 동적 진동을 분석하여 그 특성을 규명하였다. 이를 통해 타워크레인 부재의 진동에 대한 제어연구에 필요한 자료를 제공함으로써 양중작업 자동화에 기여하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 국내에서 가장 보편적으로 많이 사용되고 있는 타워크레인들 중에서 (주)한양공영의 'HY708' 모델을 대상으로 부재의 인양 및 파지작업까지의 자동화 추진을 위해 이 과정에서 풍속에 따라 발생하는 부재의 흔들림의 변위를 모델링하여 분석하는 것으로 한다.

본 연구에서는 진동을 검토하고자 하는 대상이 타워크레인뿐만 아니라 양중되는 부재까지 포함하기 때문에 타워크레인에 케이블로 연결되어 있는 부재를 해석하기에는 정적 해석방법은 많은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 '다물체 동역학 해석(multi-body dynamic analysis)'을 위한 상용 프로그램인 리커다인(Recurdyn)(강종진 2007)을 이용하여 모델을 구축하고 시뮬레이션을 통해 타워크레인과 양중부재의 진동특성을 파악해 보았다.

리커다인은 다양한 부속이나 부재로 구성되는 기계장비를 시뮬레이션하는 툴(tool)로서, 고속전철(박찬경 외 2002), 건설장비인 굴삭기(이윤식 2006), 반도체 제작장비(유건모 외 2004), 로봇용 제어기설계(홍창우 2007) 등 다양한 분야의 연구에서 이미 많이 적용되고 있다.

본 연구에서는 먼저 타워크레인을 이용한 양중작업의 자동화와 타워크레인의 모델링에 관한 선행연구들을 고찰하였다. 이어

서 크레인 제조사에서 제공하고 있는 매뉴얼((주)한양공영, 1994)을 바탕으로 주요제원 및 구성, 권상위치에 따른 양중가능한 최대용량, 자체 중량 등 타워크레인을 모델링하는데 필요한 요소들을 산출하였다. 구축된 모델을 가지고 좀 더 사실적인 조건에서 부재의 동적(dynamic) 진동변위를 해석해보기 위하여 타워크레인 양중되는 부재를 모두 동적인 모델로 모델링하였다. 끝으로 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 분석하였다.

2. 선행연구의 고찰

타워크레인을 이용한 양중작업의 자동화와 관련된 연구는 타워크레인에 연결하는 자동장치 개발에서부터 GPS(Geographical Positioning System), 머신비전(Machine Vision), RFID(Radio Frequency Identification)와 같은 IT기술을 적용한 작업 효율성 향상을 위한 연구, 타워크레인의 운전을 자동으로 제어해주는 시스템 연구까지 여러 범위에서 진행이 되고 있다(표 1참조).

타워크레인의 모델링과 관련된 선행 연구에서는 타워크레인 모델링하는 연구들과 양중되는 부재를 동적으로 모델링하여 그 진동을 검토하고 더 나아가 진동을 제어하는 방법을 제안하는 연구까지 이미 진행되었다(표 1참조).

표 1. 선행연구 분석

연구자	연구내용
이진우와 김상봉 (1993)	타워크레인 자동화를 위한 기초적 연구로 동적모델 방정식을 추론
이정호 외 (2002)	GPS기술과 머신비전기술을 타워크레인에 적용하고 이를 활용한 양중 프로세스의 개선안을 제안
한용우 외 (2004)	기존의 타워크레인에 CCTV, RFID기술을 적용하여 현장작업자와 타워운전자간 정보를 공유할 수 있는 지능형 양중관리 시스템의 프로토타입을 제시
유승남 외 (2005)	목적지까지 추크를 자동으로 이동시키는 지능형 타워크레인 제어 시스템을 제안
이승열 외 (2006)	철골조립작업시 부재를 구속하는 와이어를 자동으로 해제하는 로봇핸드 개발
이명규(2006)	비례미분 제어기 설계를 위해 타워크레인 시스템의 수학적 모델링을 수
서종원 외 (2006)	크레인의 추진동 운동해석을 포함한 물리적 모델을 제시하고 그래픽 모델과 연계하여 개선된 건설 그래픽 시뮬레이션 방법을 제안
Chin et al.(1998)	크레인 케이블의 동적거동을 복합 좌표계를 사용한 수치해석방법을 제안
Abdel-Rahman et al. (2003)	크레인 케이블의 물리적 모델링에 관한 연구들을 정리하고 콘트롤 방법들에 관해 언급
Jerman et al.(2004)	타워크레인의 물리적 특성인 동적 거동을 고려하여 동적 운동모델링을 수행

그러나 자동화와 관련된 선행연구들은 모두 타워크레인에 초점이 맞춰져 있고, 아직까지 앞서 언급한 풍하중이 작용하는 조건하에서 발생하는 부재의 진동에 대해서는 연구가 진행되지 못했다. 그리고 타워크레인의 모델링에 관한 선행연구들은 케이블과 이에 연결된 부재부분에 대해 타워크레인 운동에 의한 동적 모델링을 수행하였지만, 이 모델들에서도 풍하중에 의한 영향은 무시되었고, 타워크레인이 외력에 변형을 일으키지 않는 것으로 단순하게 가정하여 타워크레인의 사실적인 진동은 제외되었다.

따라서, 본 연구에서는 사실적인 부재거동 검토를 위하여, 풍

하중에 의해 타워크레인과 양중되는 부재 모두에서 진동이 발생한다는 사실적인 조건을 적용하여 연구를 진행하고자 한다.

3. 타워크레인 및 양중부재 진동에 관한 고찰

3.1. 관성에 의한 진동

모든 물체는 자신의 운동상태를 그대로 유지하려는 관성이 있다. 관성에 따라 정지한 물체는 계속 정지해 있으려 하고, 운동하는 물체는 원래의 속력과 방향을 그대로 유지하려 한다. 따라서 타워크레인의 지브가 회전하거나 지브 아래의 트롤리가 이동하는 경우 타워크레인 및 양중되는 부재는 관성에 의해 진동이 발생하게 된다. 진동의 크기는 관성이 질량에 비례하기 때문에 질량이 큰 부재일수록 진동의 폭도 커진다. 하지만 이런 진동은 '최적 제어 방법', '트롤리와 모터의 구동 힘을 제어하는 방법', '감속 구간에서 모터를 정회전이나 역회전 시키는 방법', '속도를 제어하는 방법'을 통해 억제하는게 가능하다(유승남 외 2005).

3.2. 풍하중에 의한 진동

태풍 및 계절풍과 같은 기후변화는 강풍을 동반하기도 하는데 이런 강풍은 양중작업에 부정적인 영향을 끼치게 된다. 국내에는 안전을 고려하여 '산업안전기준에 관한 규칙(노동부 2006)'에서 초당 순간풍속이 10미터를 초과하는 경우에는 타워크레인의 설치·수리·점검 또는 해체작업을 금지시키고 있고, 초당 20미터를 초과하는 강풍이 발생하는 경우에는 타워크레인의 작업자체를 중지하도록 규정하고 있다. 또한, 현장에서 현장관리자에 따라 약간의 차이는 있지만 초당 14미터에서 초당 16미터 사이에서 기준을 정하고 풍속이 초과하게 되면 양중작업을 중단하고 있다.

외기에 노출된 곳에서 진행되는 양중작업의 특성상 바람을 통제하는 것은 불가능하여 풍하중에 의한 진동을 제어하는 것은 매우 어렵기 때문에 이러한 일괄적인 기준이 적용되는 것이다. 그러나 풍하중은 공사가 진행되는 지역과 위치, 구조물의 크기, 높이, 형태 등 다양한 요인에 따라 다르게 작용하기 때문에 작용하는 풍속에 따라 적절히 대처하기 힘들다. 또한 이러한 일괄적인 기준은 현실적으로 적용상의 문제가 있다. 예를 들어 초당 10

미터의 풍속에서 철골부재의 양중작업이 안전하게 수행된다고 하더라도 상대적으로 풍압을 더 받을 수 있는 면의 면적이 넓은 커튼월과 테이블폼과 같은 부재는 같은 조건에서 큰 진동을 일으킬 수 있는 것이다.

따라서 제어가 어렵고 거의 매순간 작용하는 풍하중에 의한 타워크레인 및 양중되는 부재들의 조건에 따른 진동의 특성과 변위를 검토하는 것은 향후 진동제어로 양중작업의 자동화추진을 위해 선행되어야 하는 양중작업의 안정성 확보를 위해 반드시 필요하다.

4. 타워크레인 동적 시뮬레이션 모델 구축

4.1 타워크레인의 동적 모델링

본 연구의 대상 타워크레인인 'HY708' 모델의 작업반경은 최대 70m이고 자립고를 기준으로 한 마스터 높이는 46.11m로, 조립된 형상은 그림 1과 같고 각 부분의 명칭은 표 2와 같다.

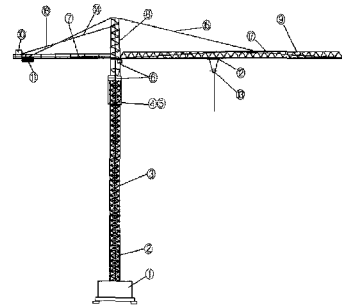


그림 1. 타워크레인 HY708의 조립도

표 2. 타워크레인의 각 부분의 명칭

번호	명칭
1	기초 콘크리트
2	베이스 마스트 (베이스 타워 섹션)
3	마스트 (타워 섹션)
4	가이드 섹션
5	유입장치
6	슬루잉 플랫폼
7	카운터 지브 섹션
8	타워 헤드
9	지브 섹션
10	호이스트 기어 프레임
11	카운터 지브 빌라스트
12	트롤리
13	후크
14	카운터 지브 서스펜션
15	지브 서스펜션
16	호이스트 로프
17	트롤리 로프

타워크레인의 모델링을 위해 타워크레인의 구성을 크게 마스트, 지브, 타워헤드 3가지 부분으로 단순화하여 그림 2와 같이 모델링하였다. 트리스를 구성하는 부재들은 각 부분에 따라 동일한 부재들을 적용하였고 접합부는 강접합으로 적용하였다.

1) 산업안전기준에 관한 규칙(2006) 제117조의3 (강풍시 타워크레인의 작업제한) : 사업주는 순간풍속이 매초당 10미터를 초과하는 경우에는 타워크레인의 설치·수리·점검 또는 해체작업을 중지하여야 하며, 순간풍속이 매초당 20미터를 초과하는 경우에는 타워크레인의 운전작업을 중지하여야 한다.

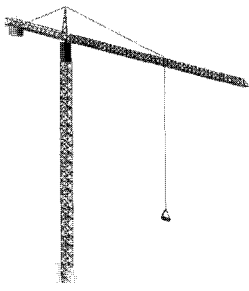


그림 2. 타워크레인 모델링

합한 구성을 갖는 실제 타워크레인의 구성과 동일하도록 모든 부재와 형태를 각각 적용하여 트리스를 구성하는 것은 지나치게 시간이 소모되는 비현실적인 작업으로 판단되었다. 따라서 효율적인 동적 모델링을 위해 부재와 형태를 단순화하여 모델을 구축하였다. 이어서, 모델의 동적 거동을 검토하는 연구의 목적에 부합할 수 있도록 단순화된 모델이 실제 대상 타워크레인과의 근사하게 변형을 나타내도록 제조사에서 제공하는 매뉴얼(주)한양공업, 1994)에서 그림3, 표3의 자료를 바탕으로 하중(load case #1²⁾)에 따른 타워크레인 각부의 변위량이 근사치를 갖도록 설정하였다.

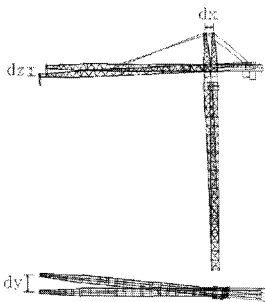


그림 3. 하중에 따른 타워크레인의 변위량

표 3. 부위별 압력을 받는 면적 및 작용 풍하중

부위	입력을 받는 면적(m ²)	16m/sec시 풍하중(kg)	수직 거리(m)
베이지 마스트	10.85	223	6.20
마스트	27.30	778	31.03
솔루잉 플랫폼	9.19	262	50.50
카운터 지브	9.20	262	53.31
지브 섹션	30.80	878	53.31
타워 헤드	2.30	68	57.06
계	89.64	2,471	-

4.2. 케이블 및 양중부재의 동적 모델링

케이블과 양중부재의 모델링은 크게 양중부재, 부재를 연결하는 2개의 하부케이블과 하부케이블을 지브에 연결해 상부케이

2) 풍속은 16m/s, 풍향은 지브의 수평방향, 지브에서의 권상위치는 70m, 양중물의 무게는 3,000kg, 부위별 작용풍하중은 표 5와 동일, 타워크레인의 변위량(dx, dy, dz)값은 각각 124mm, 56mm, 27mm.

블, 3부분으로 구성된다. 케이블은 거의 부피를 갖지 않는 강체로 가정하였다. 케이블과 지브, 케이블과 케이블, 케이블과 부재의 접합부는 구형결속(spherical joint)에 의해 연결하여 그림 4와 같이 모델링하였다. 구형결속은 하나의 중심점에 대해서 3개의 회전 자유도(Degrees of Freedom)를 갖는 결속방식(그림 5 참조(Mathworks (2005)))이며 조건에 따라 그림 4와 같이 접합부를 중심으로 거동하는 것이 가능하다(정태은과 백성호, 2002).

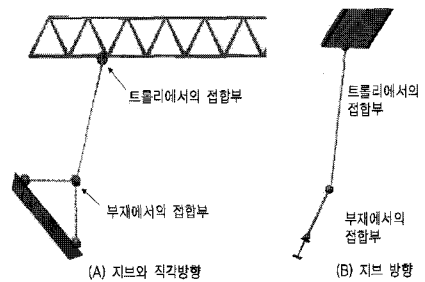


그림 4. 타워크레인 케이블 및 부재 모델링

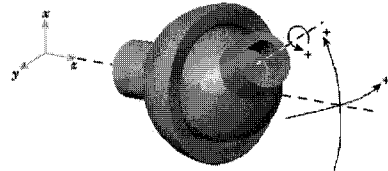


그림 5. 구형결속의 개념

양중부재는 철골 보부재와 유사하도록 600×300×8,000 (높이×폭×길이)의 크기에 단위중량이 175kg/m인 부재를 선택하였다.

시뮬레이션 결과를 양중작업 자동화에서 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 세부형태는 그림 6과 같이 모델링하였다. 기존의 철골조립작업은 인력에 의해서 부재를 가조립할 수 있는 위치까지 이동시키고 가조립을 실시한다. 그러나 양중작업 자동화에서는 부재를 일정한 오차범위까지 운반하면 조립로봇(end-effector)이나 연결된 부재에 설치된 빗각(bevel) 또는 가이드(guide)와 같은 장치에 의해서 정확하게 위치가 보정된다(Scott Howe 2000). 해당부재는 부재의 철골기둥 브라켓에 설치된 가

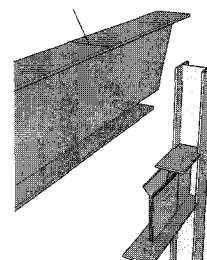


그림 6. 가이드가 있는 보-브라켓 접합부의 예

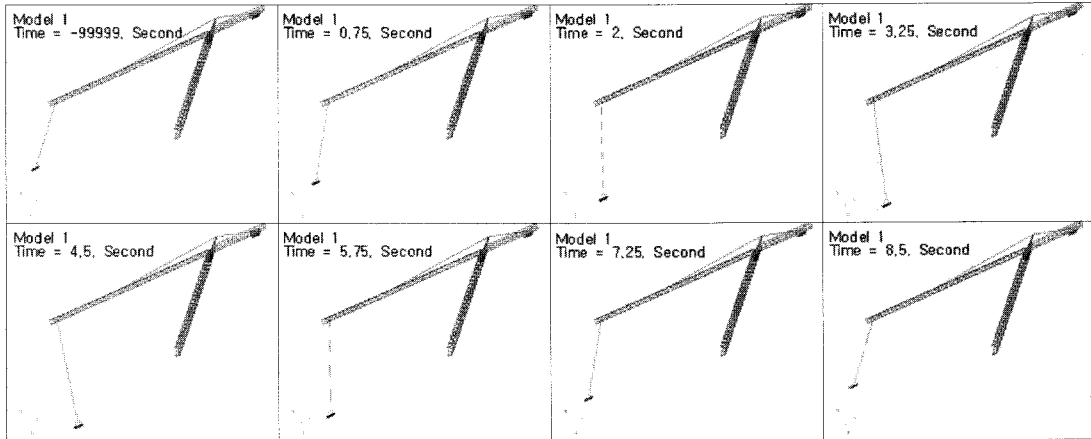


그림 7. 풍하중에 의해 거동하는 타워크레인 동영상 스틸컷

이드를 통해 보부재의 위치가 보정되고 보의 회전은 없다고 가정한다. 설치가능한 오차범위는 보의 폭인 300mm로 설정하였다.

4.2 시뮬레이션 수행을 위한 설정

4.2.1 시뮬레이션 조건 설정

본 연구에서는 풍하중에 대한 부재의 진동변위를 산출하여 그 결과를 분석하기 위해서 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 마스트는 지면과 강접합을 한다.
- (2) 로프와 후크, 서스펜션, 유압장치, 가이드 섹션 등 모델의 단순화 과정에서 생략된 부재의 질량은 고려하지 않는다.
- (3) 지브의 회전과 트롤리의 이동은 고려하지 않고 정지된 상태에 대해서만 적용한다.
- (4) 양중 부재는 타워크레인의 변형에 영향을 받는다.
- (5) 본 연구에서는 실제 양중가능한 상황만을 대상으로 하기 때문에 시뮬레이션에 적용되는 변수들 중 풍속변화의 범위는 1~10m/s, 단면변화 범위는 1~9m²으로 정하였다.
- (6) 풍하중은 타워의 변위를 가장 크게 일으킬 수 있도록 지면과 평행하고 지브의 수직인 방향에 대해서만 작용한다
- (7) 타워크레인 양중되는 부재는 관성에 의한 내력과, 풍하중에 의한 외력을 모두 고려한다.

4.2.2 풍하중의 설정

풍하중은 풍속과 수압면적³⁾에 따라 부재별로 다른 값을 갖게 된다. 리카다인에서는 풍하중과 같은 외력을 지원하는 옵션이 없기 때문에 부재별로 수압면에 작용하는 전체 풍하중을 산출하고 부재의 무게중심 점에 작용하는 집중하중으로 변환해 적용하

였다. 풍속과 수압면적이 바뀌게 되는 경우 해당 부재에 작용되는 풍하중의 크기는 아래의 과정을 통해 산출해서 이용한다.

풍하중의 값은 ‘크레인 제작기준 안전기준 및 검사기준’⁴⁾에 근거하여 다음과 같이 계산하여 얻은 값을 적용하였다.

$$W = q \times C \times A \dots\dots\dots\text{식(1)}$$

식(1)에서 W, q, C와 A는 각각 다음 값을 나타내는 것이다.

- W : 풍하중(kgf)
- q : 속도압(kgf/m²)
- C : 풍력계수⁵⁾
- A : 수압 면적(m²) (표 3 참조)

속도압은 다음의 크레인의 상태에 따라 산출하여 위의 계산식에 적용한다. 본 연구의 모델링에서는 크레인 정지된 상태에서 풍하중만을 고려하기 때문에 식(3)을 적용한다.

$$q = 8.5 \times \sqrt[4]{h} \text{ (kgf/m}^2\text{)} : \text{크레인 작동시} \dots\dots\dots\text{식(2)}$$

$$q = M \times \sqrt[4]{h} \text{ (kgf/m}^2\text{)} : \text{크레인 정지시} \dots\dots\dots\text{식(3)}$$

$$\text{여기에서, } M = V^2 / 30 \dots\dots\dots\text{식(4)}$$

위의 식(4)에서 V와 h는 각각 다음과 같은 값을 나타낸다.

- 3) 바람을 받는 면적을 말함.
- 4) “크레인 제작기준 안전기준 및 검사기준” 제10조(풍하중 및 지진하중)
- 5) “크레인 제작기준 안전기준 및 검사기준” 제10조 제1항의 풍력계수는 크레인의 바람을 받는 면에 관하여 풍동시험을 하여 얻은 값으로 하거나 또는 제10조 제3항의 표3에 정하는 값으로 한다. 여기서 풍력계수(C)는 총실용 W₃에 해당되고 본 모델에서는 제조사 자료에서 제시된 1.2를 적용함.

V : 설계기본풍속(m/sec)⁶⁾

h : 크레인의 바람을 받는 면의 지상으로부터의 높이(m). 다만, 그 높이가 16m 미만일 때는 16으로 한다.

4.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 수행을 통해 그림 7과 같이 타워크레인인 양중부재가 동적거동을 하는 것을 동영상상을 통해 확인할 수 있었다. 세부적인 기준에 따른 결과는 다음과 같다.

4.3.1. 타워크레인의 동적거동과 풍속변화에 따른 부재의 동적거동

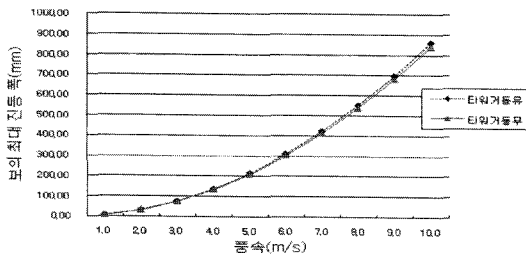


그림 8. 풍속에 따른 보부재의 최대 진동폭의 비교 (케이블 길이 15m, 풍속 10m/s)

우선 타워크레인이 풍하중에 동적거동을 하는 것이 보의 흔들림에 어떤 영향을 끼치는 지 알아보기 위해서 타워크레인이 동적거동을 하는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교해 보았다(그림 8 참조).

두 경우에서의 부재의 최대 진동값을 비교해 본 결과, 타워크레인이 함께 거동하는 것을 모델링된 본 연구의 최대진동폭이 평균 5%정도 더 크게 나타났다. 이는 타워크레인에서 발생하는 진동이 부재의 진동을 더욱 크게 만드는 효과가 있음을 나타낸다.

이어서, 시뮬레이션에서 풍속을 1m/s 단위로 지속적으로 증가시키면서 부재의 최대진동폭을 비교해 본 결과 최대진동폭이 지속적으로 증가하는 것을 확인하였다. 이것은 앞서 적용된 풍하중 산정식에서 풍하중이 풍속의 제곱에 비례하기 때문일 것으로 판단된다.

철골보부재와 유사한 부재는 최대 진동폭은 현장에서 작업이 중지하는 풍속 10m/s에서 863mm로 나타났다.

4.3.2. 트롤리 위치에 따른 부재의 동적거동

지브의 가장 먼 쪽을 기준점으로 마스트방향으로 부재를 이동

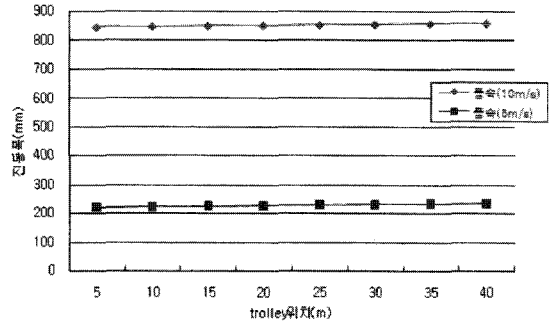


그림 9. 트롤리 위치 변동에 따른 최대진동폭 (케이블 길이 15m)

시키면서 시뮬레이션을 해본 결과, 그림 9와 같이 양 끝점에서 최대 진동폭의 차이가 약 20mm 정도 발생하였다. 따라서 트롤리 위치는 본 시뮬레이션에서 동적거동에 크게 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

4.3.3. 케이블의 길이변화에 따른 부재의 동적거동 범위의 변화

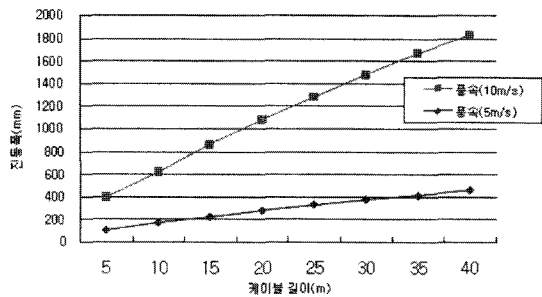


그림 10. 케이블 길이에 따른 최대진동폭 (트롤리 위치 40m)

연결된 지브의 조인트 지점을 기준으로 지면방향으로 부재를 움직이면서 케이블의 길이를 늘려보았다(그림 10 참조). 그 결과 정비례에 가까운 최대 진동폭의 증가가 나타났다. 이는 케이블의 길이는 늘어났지만, 부재가 받는 힘은 동일하기 때문에 부재가 동일한 각을 유지해서 진동폭도 늘어난 것으로 판단된다.

4.3.4. 면적증가에 따른 부재의 동적거동

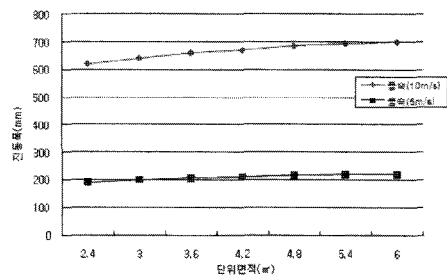


그림 11. 단위 면적에 따른 최대진동폭 (케이블 길이 15m, 트롤리 위치 40m)

시뮬레이션에서 175kg/m²의 단위중량을 갖는 부재의 길이를 1m씩 증가시켜 수압면적을 0.6m²단위로 지속적으로 증가시키

6) 설계기본풍속은 건축법 제38조 및 동법 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙 제13조제4항의 규정에 따른다. 본 연구에서는 풍속의 영향을 검토하기 위해 2m/s에서 20m/s 사이의 설계풍속을 적용함.

면서 부재의 최대진동폭을 조사해 본 결과 그림 11과 같이 선형으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것 앞서 적용된 풍하중 산정식에서 풍하중이 풍속과 비례하기 때문일 것으로 판단된다.

4.3.5. 풍속변화에 따른 서로 다른 수압면적을 가진 두 부재의 동적거동 비교

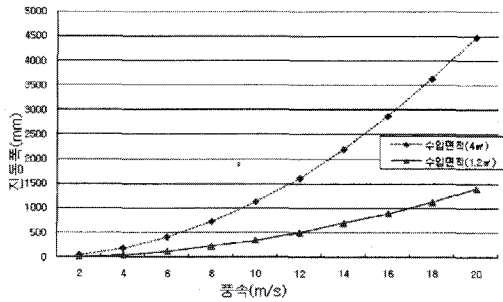


그림 12. 동일한 무게에서 서로 다른 수압면적을 가진 부재 비교 (케이블 길이 15m, 부재중량 1,500kg)

동일한 자중과 서로 다른 수압면적을 가진 두 부재의 풍속에 대한 최대 진동폭을 비교해 본 결과, 그림 12와 같이 두 부재 모두 지수적인 증가곡선을 나타내었다. 이는 풍하중이 풍속에 제곱에 비례하기 때문에 이런 결과가 나타난 것으로 판단된다. 또한 수압면적이 큰 부재의 진동폭이 두드러지게 크게 증가하는 것으로 나타났다.

4.4. 시뮬레이션 결과의 해석 및 적용방안

4.4.1. 시뮬레이션 결과의 해석

시뮬레이션을 통해 얻은 결과값들을 정리해 본 결과, 부재의 수압면적, 풍속 및 케이블 길이가 부재의 최대 진동폭과 밀접한 영향이 있는 것으로 나타났고, 트롤리의 위치는 영향이 매우 작았다. 이 중에서 풍속은 통제가 어려운 자연적 요인인데 비해, 수압면적과 케이블 길이는 통제가 가능한 인위적인 요인이기 때문에 이를 통해 풍하중에 의한 부재의 거동을 부분적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

부재 진동을 완화시키기 위해서는 케이블 길이를 줄여서 부재를 최대한 지브에 가까이 양중하여 진동을 완화시킨 후 수직방향으로 양중시키는 방법과 수압면적을 최소화, 또는 질량을 증가시키는 방안이 적용가능하다. 또한, 일본의 스마트 시스템에서 볼 수 있듯이 작업현장의 외부에 바람을 차단할 수 있는 벽, 지붕 및 바닥을 설치하면 외부 풍속의 영향을 효과적으로 완화시킬 수 있다.

4.4.2. 양중작업 자동화를 위한 적용방안 제시

시뮬레이션 결과를 바탕으로 양중작업 자동화에 적용할 수 있는 방안을 철골조립작업을 대상으로 제시해 보았다. 앞서 제안된 철골 보부재는 부재의 폭인 300mm 이내의 오차범위까지 부재가 위치하면 가이드를 따라 부재설치가 가능한 것으로 가정되었다.

풍속변화에 따른 부재 길이별 최대 진동폭을 정리하면 다음 표 4와 같다.

표 4. 풍속과 길이에 따른 부재의 최대진동폭 (단위 : mm, 폭×높이=300×600, 단위중량 175kg/m², 케이블 길이 15m)

길이(m) 풍속(m/s)	4	5	6	7	8	9	10
1	7.69	7.69	8.08	8.28	8.44	8.55	8.64
2	30.78	31.7	32.61	33.24	33.74	34.18	34.51
3	68.87	71.83	73.59	75.05	76.07	76.90	77.65
4	122.35	127.48	130.74	133.23	135.15	136.65	137.69
5	191.23	198.97	204.32	208.28	211.15	213.61	215.7
6	275.48	286.64	294.35	299.89	303.87	307.65	310.46
7	375.11	390.14	403.34	407.95	413.55	418.53	422.56
8	489.71	509.47	523.39	532.8	540.17	547.6	551.97
9	619.66	644.91	662.08	674.21	683.7	692.41	698.47

정리된 결과에 따르면 길이 4~7m인 보부재는 초당 6m/s 이하의 풍속에서, 8~10m인 부재는 초당 5m/s 이하의 풍속에서 양중작업의 자동화 수행이 가능한 것으로 것으로 판단된다. 또한, 길이 4m 이하의 부재는 양중작업 자동화 수행이 어려울 것으로 보여, 양중작업 자동화 수행을 위해서는 진동을 제어해 줄 수 있는 별도의 장치나 방법이 필요한 것으로 판단된다. 이와 같은 방법으로 다른 부재에 대해서도 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 양중작업 자동화 수행을 위한 풍속의 범위를 판단할 수 있을 것이다.

5. 결론

건설현장에서의 기능 인력 수급의 어려움, 숙련공의 노령화로 인해 여러 작업 분야에 자동화가 도입되었고, 도심지 건축물이 점차 고층화됨에 따라 양중작업의 중요성이 높아지면서, 타워크레인을 이용한 양중작업의 효율성 향상을 위한 자동화연구가 진행되고 있다.

타워크레인과 케이블로 연결되는 양중부재는 양중작업 과정에서 타워크레인의 운동과 풍하중에 의해 끊임없는 진자운동 형태의 흔들림이나 비틀림과 같은 진동이 발생한다. 이러한 진동은 양중작업시 부재와 인근의 구조물간의 충돌을 일으키거나 부재를 원하는 위치로 이동시키기 어렵게 하는 등 정밀하고 안정적인 제어를 방해하는 요인이 된다. 따라서, 양중작업의 자동화를 위

해서는 진동을 제어하는 것이 기본적으로 해결되어야 한다.

그러나 진동발생에 결정적인 원인인 풍하중은 현장의 작업조건에 따라 복잡하게 작용하고 양증되는 부재도 타워크레인의 거동에 영향을 받기 때문에 부재의 동적인 진동을 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 타워크레인과 부재를 대상으로 동적 모델링을 실시하고 시뮬레이션을 통해 부재의 동적 진동을 분석하여 그 특성을 규명하였다.

시뮬레이션 결과, 시뮬레이션 조건에 따른 부재의 최대진동폭의 값들이 변화하는 특성을 파악할 수 있었다. 또한 분석된 자료를 바탕으로 부재의 길이에 따라 보부재 설치작업 자동화가 가능한 풍속기준을 판단할 수 있는 방안을 제시하였다.

그러나 본 연구에서 양중작업의 자동화를 위하여 진동을 제어할 수 있는 구체적인 방안에 대해서는 검토하지 못하였다. 따라서 향후 이번 연구의 자료를 바탕으로 부재의 진동을 제어할 수 있는 방법에 대해 지속적인 연구를 추진해 나가도록 하겠다.

참고문헌

1. 강중진, "Recurdyn을 이용한 2축 벨트-폴리계의 진동해석", 석사학위논문, 부산대학교, 2007.
2. 고광일, "건축용 타워크레인 마스트의 횡방향 지지요소인 월타이에 관한 부재 안전성", 석사학위논문, 중앙대학교, 2005.
3. 고광일, 오우훈, 이은택, "건축용 타워크레인 마스트의 횡방향 지지요소인 월타이 부재력 특성곡선", 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제 18권 제 6호, 2006, pp.697-706.
4. 김영석, 김현철, 서정희, 오세욱, "국내 건설산업의 건설 자동화 및 로봇틱스 도입방안에 관한 연구", 대한건축학회 논문집(구조계), 대한건축학회, 제 17권 제 2호, 2001, pp.111-120.
5. 노동부, "산업안전기준에 관한 규칙", 노동부령 제264호, 2006.
6. 서종원, 김영환, 정평기, "건설 그래픽 시뮬레이션 시스템의 기능 개선을 위한 물리적 모델링", 한국건설관리학회 논문집, 한국건설관리학회, 제 7권 제 1호, 2006, pp.80-88.
7. 유건모, 정종철, 정정주, 허건수, "차세대 리소그래피 시스템을 위한 2축 나노스테이지의 시뮬레이션 툴 구축", 대한기계학회논문집 A권, 대한기계학회, 제 28권 제 10호, 2004, pp.1541-1548.

8. 유승남, 김병화, 한창수, "위치 측정 장치와 운반제어 알고리즘을 이용한 타워크레인의 반자동화 시스템 개발", 대한건축학회논문집(구조계), 대한건축학회, 제 21권 제 12호, 2005, pp.157-166.
9. 이윤식, "Recurdyn을 이용한 굴삭기 트랙의 모델링 및 운동분석", 석사학위논문, 부산대학교, 2006.
10. 이명규, "타워 크레인 시스템의 충돌방지 및 흔들림 제어에 관한 연구", 석사학위논문, 울산대학교, 2006.
11. 이승열, 심형준, 최종호, 김진우, 김병화, 한창수, "철골조 공사의 자동화를 위한 로봇 핸드", 대한건축학회논문집(구조계), 대한건축학회, 제 17권 제 2호, 2006, pp.151-162.
12. 이용균, 김재엽, 서덕석, 강경인, "유전자 알고리즘 모델을 활용한 양중계획 합리화 방안", 대한건축학회논문집(구조계), 대한건축학회, 제 20권 제 2호, 2004, pp.127-134.
13. 이정호, 박성진, 오세욱, 김영석, "GPS 및 머신비전을 활용한 타워크레인 양중작업 효율화 방안", 대한건축학회 논문집(구조계), 대한건축학회, 제 18권 11호, 2002, pp.133-140.
14. 이종렬, 전용석, 박찬식, "고층건축공사 타워크레인 양중 시간 예측모델", 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, 한국건설관리학회, 제 5호, 2004, pp.472-475.
15. 이진우, 김상봉, "최적 제어법에 의한 타워크레인의 자동화에 관한 연구", 한국산업안전학회지, 한국산업안전학회, 제 8권 제 4호, 1993, pp.213-222.
16. 이환, 김민수, 이치형, 김주원, 윤성기, "풍하중을 받는 건물의 동조질량감쇠기를 이용한 진동 조절", 대한건축학회 논문집(구조계), 대한건축학회, 제 21권 제 12호, 2005, pp.35-43.
17. 정태은, 백성호, "리커다인을 이용한 Dynamic System 해석", 북스힐, 2002
18. 최운교, "건축용 타워크레인의 국내 풍하중기준을 적용한 작용하중 해석", 석사학위논문, 중앙대학교, 2005
19. 한국산업안전공단, "크레인 제작기준 안전기준 및 검사기준", 노동부 고시 제2001-57호, 2001.
20. 한용우, 조훈희, 이유섭, 강태경, 김종선, "멀티미디어와 RFID 등 IT를 활용한 지능형 타워크레인 개발 기초연구", 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, 제 5회, 2004, pp.625-628.
21. 홍창우, "Recurdyn과 SIMULINK를 이용한 제어기 설계용 통합 개발 플랫폼에 관한 연구", 석사학위논문, 부경대학교, 2007.

22. (주)한양공영, "MODEL : HY708 (고정식)", 매뉴얼, 1994.
23. Abdel-Rahman, E. Nayfeh, A. H., Masoud, Z., "Dynamics and Control of Crane: A Review, Journal of Vibration and Control, Vol. 9, 2003, pp.863-908.
24. Chin, C., Neyfeh, A. H., Abdel-Rahman, E., "Dynamics and Control of Ship-Mounted Cranes, Proceedings of the 39th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1998.
25. Jerman, B., Podrzaj, P., Kramar, J., "An Investigation of Slewing-Crane Dynamics During Slewing Motion-Development and Verification of A Mathematical Model, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, 2004, pp.729-750.
26. Mathworks (2005). "SimMechanics", <www.mathwork.com> (2007.08.31).
27. Scott Howe, A., Designing for automated construction, Automation in Construction, Vol 9, 2000, pp.259-276.
28. Shimizu, Shimizu Manufacturing system by Advanced Robotics Technology (SMART), in R&D product pamphlet, Shimizu Tokyo, 1993.

논문제출일: 2007.09.13

심사완료일: 2007.12.26

Abstract

At present, construction automation is a critical solution for the shortage of labor and the aging of skilled workers. Especially, researches for transportation automation are achieved to improve the efficiency as the construction of tall-building construction. Transportation automation needs to control the swung member by the inertia and/or the wind-force at the end of cable. However, previous to control, the presupposition of the swing is heavily difficult work because the inertia and the wind force are irregularly changable according to work condition. Therefore, in this study, dynamic modeling of crane and simulation was performed to find the characteristic of the swing. In the result, the maximum displacement of the swung material was analyzed. And, on the basis of analysis, the criteria to decide workability of automated transportation considering the material size and the wind force on-site was proposed.

Keywords : transportation automation, swing, dynamic analysis, simulation