

# 컨테이너 크레인 붐 구조물의 잔존수명 예측을 위한 컴퓨터 시뮬레이션

김상열#, 배형섭\*, 이육형\*\*, 박명관\*\*\*

## Computer Simulation for Residual Life Expectancy of a Container Crane Boom Structure

Sang Yeol Kim#, Hyung Sub Bae\*, Yuk Hyung Lee\*\* and Myeong Kwan Park\*\*\*

### ABSTRACT

The residual life expectancy of the container crane which has been operated more or less 39 years is examined carefully, especially on the boom structure. The basic load and load combination need to be considered for to analyse the boom structure. Various parts of container crane are modeled for to analyse stress, the deflection and the fatigue. Analysis results show that the boom is stable in the stress and deflection but the boom vertical member is over the fatigue life.

The rail support beam and boom bottom chord are approximately near the fatigue life. Analysis results show that the residual life of rail support beam and the boom bottom chord would be 2.2 years and 6.8 years, respectively.

**Key Words :** Container Crane (컨테이너 크레인), Computer Modeling (컴퓨터 모델링), Fatigue Analysis (피로 해석), Cumulative Fatigue Damage (피로 누적 손상), Residual Life (잔존수명)

### 기호설명

$n_1, n_2 \dots n_n$  : 여러 가지 응력범위의 반복횟수  
 $N_1, N_2 \dots N_n$  : 동일한 응력범위에 대하여 파손이 되는 반복횟수  
 $D_i$  : 손상률  
 $\sigma_r$  : 응력범위  
 $N$  : 응력범위  $\sigma_r$  에서 파손에 이르는 사이클 수

$m$  : 피로파괴 곡선인 S-N 곡선에서 해당 지점의 곡선 기울기의 역수  
 $K_0$  : 평균 허용 누적 손상  
 $\Delta$  :  $\log N$  의 표준편차의 anti-log 의 역수  
 $d$  : 표준편차의 수  
 $K_1$  : 비붕괴 유발부재(NFCM : Non-Fracture Critical Member)의 허용 누적 손상  
 $K_2$  : 붕괴 유발부재(FCM : Fracture Critical Member)의 허용 누적 손상

접수일: 2007 년 4 월 4 일; 게재승인일: 2007 년 7 월 25 일

# 교신저자: 한국선급엔지니어링

E-mail: kws2214@kornet.net Tel. (055) 329-6106

\* 부산대학교 대학원 지능기계공학과

\*\* 부산정보대학

\*\*\* 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

- $L$  : 피로 누적 손상
- $f_{ri}$  : 저수장법(reservoir method)을 이용한 임의의 번째 응력변화량(최대-최소)
- $n_i$  : 주어진 해당 주기횟수에서  $f_{ri}$  가 발생하는 횟수

### 1. 서론

산업 발전의 가속화와 국경이 없는 무역 시장이 전개됨에 따라 원자재뿐만 아니라 중간재와 완성된 공산품의 교역량이 급증하는 추세이다. 이에 따라 주요 운반 하역 장비인 크레인의 수요가 나날이 증가하고 있다. 크레인은 운송 품목과 기능에 따라 다양한 종류가 있다. 규격화된 컨테이너를 배에 선적하거나 하역하는 컨테이너 크레인(container crane), 부두의 야적장에서 컨테이너를 취급하는 야드(yard)용 갠트리 크레인(gantry crane), 다용도로 사용할 수 있는 브리지 트래블링 크레인(bridge traveling crane)과 수평 인입 크레인 (level luffing crane), 컨베이어 벨트에 운송된 석탄, 철광석이나 곡물 등의 산적화물을 야적장에 적재 하거나 야적장에 적재된 산적화물을 컨베이어 벨트에 탑재하는 스택커-리크레이머(stacker-reclaimer), 건축용 및 일반 조립용으로 사용되는 타워 크레인(tower crane)과 공장 내의 생산품을 취급하는 천정 크레인(overhead crane)등 많은 종류가 있다.<sup>1</sup>

본 연구는 이 중에서 컨테이너 크레인 붐(boom)의 잔존수명 예측에 관한 연구를 시행하였다. 컨테이너 크레인 붐의 잔존수명은 보수시점을 예측하고 원활한 물류의 흐름을 지속하고자 필수적인 고려 사항이다. 크레인의 붐 구조는 구조물 전체에 걸쳐서 피로결합이 지속적으로 검출되고 있다. 그러나 피로 결합이 생기는 부위에 대해서는 신속하고 적절한 보수가 이루어지면 구조물의 수명은 연장될 수 있으나, 붕괴 유발부재의 결합이 보수 되지 않고 방치될 경우는 크레인 붕괴로 이어질 수 있다. 그러나 현재까지의 대부분의 크레인에 관한 연구는 크레인의 움직임을 제어하는 제어기 설계<sup>2</sup> 및 안정성에 목적을 둔 기구학 설계<sup>3,4</sup>가 주를 이루는 실정으로 크레인 붐의 잔존 수명에 대한 체계적인 연구가 없었다. 따라서 본 연구에서는 컨테이너 크레인 붐의 잔존수명을 해석적으로 구하여 더욱 정확한 설계의 기초 자료를 마련하고

시스템의 안정성을 확보하고자 한다.

### 2. 크레인과 하중 조건

#### 2.1 크레인 조건

본 연구에 사용된 크레인은 1966 년 미국의 PACECO 사가 설계 제작하여 베트남에 설치되어 사용 후 H 사 부산항 부두에 인도하여 크레인의 스패ن(span)을 8.5m 에서 16m 로 개조 후 사용되고 있는 크레인이다. 용량은 27.5 톤으로 크레인 사용 연수가 30 여 년을 경과하던 1999. 8 월에 정밀안전 진단이 수행되었다. 그 이후 현재 계속하여 상업 정상 운전을 가동 중이나 현재까지 컨테이너 시스템의 구조적 안정성에 많은 영향을 미치는 붐의 잔존수명 예측에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 또한, 해석을 수행하기 위한 규격은 BS2573 Part 1<sup>5</sup> 을 적용하였고 STAAD.Pro 2004 구조해석 전용 소프트웨어<sup>6</sup> 를 사용하여 작업계수 0.95 와 충격계수 1.25 등을 입력하였다. 컨테이너 크레인 전체 모습과 붐은 Fig. 1 에 보인다.

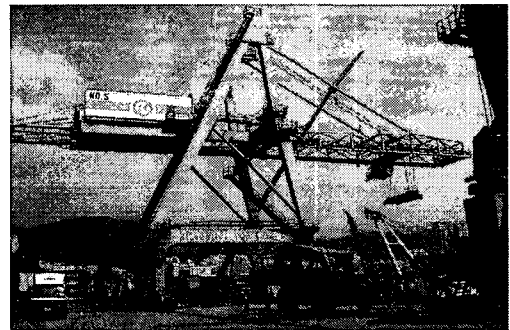


Fig. 1 A complete view of container crane

기구학적 구조상 크레인은 컨테이너를 들어 올리고 내리는 권상/권하 속도, 트롤리(trolley)가 크레인 상부에서 움직이는 속도, 크레인 자체가 움직이는 속도 등이 붐의 구조 해석을 위하여 우선 고려 돼야 한다. 따라서 권상/권하 속도 130/60m/min., 횡행속도 180m/min., 주행속도 45m/min., 붐 기복 5min.를 적용하였고 붐 구조물은 모든 종류의 형강(H-beam, pipe, SQ. tube 등)을 사용하여 설계되었다. 본 연구에서는 구조 강재 중 최저 항복 강도의 재질인 SS400 또는 ASTM A36 을 기준으로 계산하여 최악 조건에서 강도계

산을 수행하였다.

### 2.2 하중 조건

기본하중<sup>7,8</sup>이란 실제 크레인의 운전상황과 최대한 같게 만들기 위한 기본 입력자료로서 BS2573 Part 1에 준거하고 Table 1과 같다.

Table 1 Basic loads

Symbol	하중내용	하중값 (ton)
DL1	사하중(봄 자중)	36.92
DL2	사하중(봄 자중 중 선단장치류)	2.0
TL	트롤리 중량	9.0
LS	스프레다 중량	4.5
LL	정격하중	27.5
LLF	피로해석을 위한 하중(0.63×LL)	17.325
IMP	운전시 발생하는 수직 충격하중 (1.25×(LS+LL))	40.0
M	작업계수	0.95
OWL	풍속 16m/s 시의 풍 하중	-
SWL	풍속 49m/s 시의 풍 하중	-
SWS	풍속 65m/s 의 계류장치검토 풍 하중	-
LATG	주행운전시의 수평관성력 주행방향(0.05×(DL+TL+LS)) 주행직각방향(0.0125×(DL+TL+LS))	- -
LATT	횡행운전시의 수평관성력 횡행방향(0.1×(DL+TL+LS)) 횡행직각방향(0.025×(DL+TL+LS))	- -
SKW	주행운전시 차륜측방 수평력	-
COLL	주행운전시 충돌하중	-
EQ	지진하중	-
RP	로프에 의해 발생하는 각부의 하중	-
SNC	스내그(snag) 하중	-

하중 조합이란 크레인이 운전 또는 계류 중 풍 하중<sup>9-12</sup>을 포함한 발생하는 모든 하중들의 실제 조합을 나타낸다. 하중조합은 강도계산이나 강성 계산 사양에서 요구하는 조건들에 맞도록 각 하중을 조합 하였으며 하중조합 기준은 BS2573 Part 1에 준거 하며 Table 2와 같다. Fig. 2는 본 연구 대상인 봄 구조물의 전경을 나타내고 있으며 Fig. 3은 봄 구조물의 명칭과 단면에 대한 모멘트 선도

를 나타내며, 이와 같은 봄의 굽힘 모우먼트(bending moment)는 구조물의 강도와 피로수명에 지대한 영향을 미치는 요인이다.

Table 2 Load combination

Symbol	Load combination	Remark
OP1	DL+TL+LS+LLE+IMP+LATT+S KW	풍 하중 미 고려시 운전 조건
OP2	DL+TL+LS+LLE+LATT+SKW+ LATG	
OW1	DL+TL+LS+LLE+IMP+LATT+ SKW+OWL	풍 하중 고 려시 운전 조건
OW2	DL+TL+LS+LLE+LATT+SKW+ LATG+OWL	
OL1	DL+TL+LS+SNC+OWL	충돌하중이 나 지하하중 등의 비상사 조건
OL2	DL+TL+LS+LL+COLL+OWL	
OL3	DL+TL+LS+LL+EQ	
S1	DL+TL+LS+SWL	태풍시 계류 조건

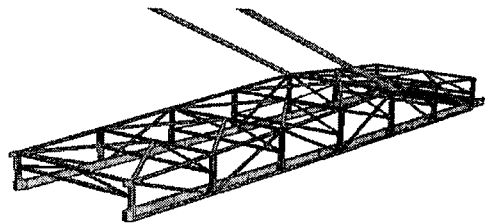


Fig. 2 A complete view of boom structure

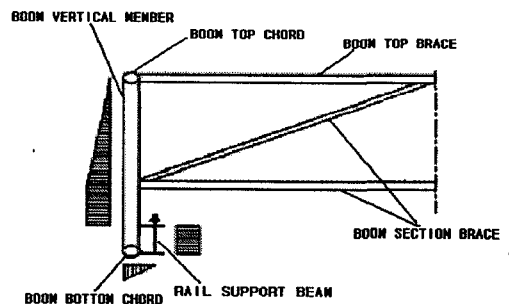


Fig. 3 Boom local bending moment diagram

### 3. Computer analysis modeling

크레인의 운전 중 발생하는 모든 하중들을 경우의 수에 맞도록 설정하여 봄의 모델링(model-

ing)을 수행하였으며 구조물의 정확한 모델링을 통해 해석 결과의 신뢰성과 크레인의 피로수명 및 잔존수명 예측에 적용하기 위한 모든 경우에 따른 조건들을 검토하였다. 봄은 트롤리의 위치에 따라 구조적 하중 형태가 변하기 때문에 트롤리의 위치에 따른 봄의 해석이 중요하다.

컨테이너 크레인 작업 시 봄 위에서 팔주하는 트롤리가 우측으로부터 이동하는 각각의 위치에 대한 모델링을 통하여 트롤리가 봄의 각 위치에서의 구조해석을 수행하였다. 그뿐만 아니라 컨테이너 시스템이 지리적으로 바다 근처에서 많이 사용되기 때문에 자연적 조건에 대해서도 많은 영향을 받는다. 그 중에서도 바람에 대한 영향을 고려하는 것이 무엇보다도 중요하다. Fig. 4 는 풍 하중이 봄의 구조강도에 미치는 영향을 계산하기 위한 모델링이다. 풍 하중 계산방식은 풍속 16m/s, 49m/s 시와 계류장치 검토를 위한 65m/s 의 풍속으로 JIS B8821 의 규격(code)에 따라 풍압을 산정하고 여기에 크레인의 표면의 면적을 고려한 풍 하중을 적용하였다. 이 풍 하중을 조합하여 입력하고 크레인의 강도해석과 강성해석을 수행하였으며 강도해석에서 추출한 응력(stress)으로 피로해석을 수행하였다.

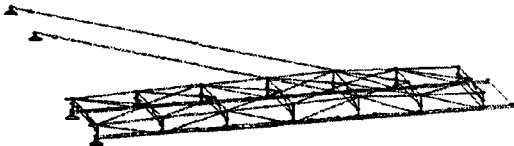


Fig. 4 Wind load modeling

또한, 크레인은 작업을 중단하고 있는 상태 즉, 휴지 상태의 경우가 빈번히 발생한다. Fig. 5 는 컨테이너 크레인이 휴지 시 풍압에 의한 안정도를 올리도록 봄을 상부로 올린 상태에서의 모델링을 나타내고 있다. 휴지 상태는 작업을 하지 않는 상태로 봄을 수평선에 대해서 80°이상으로 올려서 봄이 선박과 충돌을 방지하고 또한 풍속이 올라갈 때 크레인 전체가 전복되지 않도록 안정도를 올려주기 위한 작동 방식이다. 이러한 요인 역시 피로잔존수명예측에 많은 영향을 미치기 때문에 필수적 해석 요소이다.

해석 모델링에 적용된 기계적인 성질 값으로 재질은 JIS SS400 이나 ASTM A36 이고, 항복응력 (Fy: Yield stress)은 2.4ton/cm<sup>2</sup>, 종탄성계수(modulus

of longitudinal elasticity)는 2038.9ton/cm<sup>2</sup> 그리고 포아송 비(poisson ratio)는 0.3 을 적용하였다. 또한, 하중조합(load combination)에 따라 적용된 허용응력은 Table 3 과 같으며 하중조합에 대한 각 부재의 허용응력을 나타낸다.

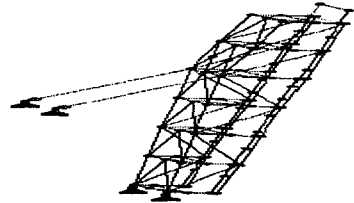


Fig. 5 Boom up position modeling

Table 3 Allowable stress

Load comb.	Stress type	Calculation basis	Allow. stress (t/cm <sup>2</sup> )
OP	Tension/compression	$0.95 \times 0.6 \times F_y$	1.368
OW	Tension/compression	$1.13 \times 0.95 \times 0.6 \times F_y$	1.545
OL	Tension/compression	$1.5 \times 0.6 \times F_y$	2.160
S	Tension/compression	$1.36 \times 0.6 \times F_y$	1.958

그리고 구속조건(Boundary condition)은 Fig. 6 에 지지부(support)로 표시된 곳과 H 부재 (H250 x250x9)를 사용한 포스테이(forestay)와 봄에 연결된 부분은 힌지 핀(hinge pin) 형식으로, 절점(node) 3, 39 에 Table 4 와 같이 구속하였다. 여기서 F 는 Fixed, R 은 Release 를 나타내며 Fig. 7 은 절점 3 의 연결부를 상부에서 확대하여 본 그림이고 절점 39 는 대칭으로 위치하여 있다.

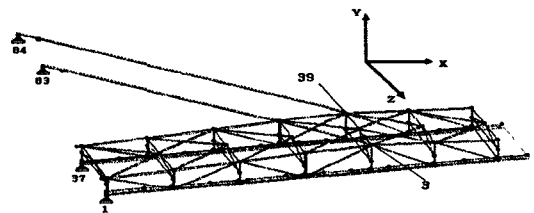


Fig. 6 Wind load modeling

Table 4 Boundary condition

Node	X	Y	Z	rX	rY	rZ
1	F	F	F	R	R	R
37	F	F	R	R	R	R
83	F	F	F	R	R	R
84	F	F	F	R	R	R
3	F	F	F	F	R	R
39	F	F	F	F	R	R

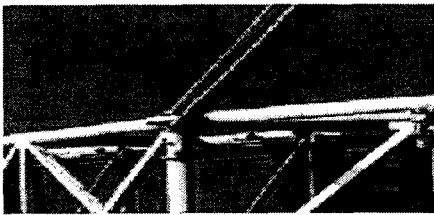


Fig. 7 Connection part of forestay and boom

#### 4. 강도와 강성해석

해석 대상 크레인의 강도와 강성해석은 구조해석 범용 프로그램인 STAAD.Pro 2004 를 사용하여 해석하였다. 해석 시 사용된 하드웨어 사양은 Intel 코어 2 듀오 1.8GHz CPU, 1GB RAM 및 2GB 용량의 가상메모리로 구성되어 있다. 유한요소 해석 모델은 STAAD.Pro 2004 의 3 차원 보요소로 모델링되었으며, 104 개의 절점과 190 개의 보요소로 구성되어 있다. 해석에 소요된 시간은 해석 모델링 작성에 10 일, 해석에 20 일이 소요되었다.

##### 4.1 강도해석

STAAD.Pro 2004 의 구조해석 전용 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터 모델링을 작성하고 기본하중과 하중조합을 입력하여 부위별 최대응력을 계산하였다. 계산된 응력 값은 허용응력과 비교하여 계산결과를 검토하였다. 크레인의 구조부재가 모두 대칭 단면으로 형성되어 있으므로 인장 부(-)와 압축 부(+)의 응력이 같을 경우 허용응력 값이 더 낮은 압축 부를 기준으로 하였다. 구조 강 중 최소 항복 응력 값을 기준으로 허용응력 기준을 마련하였다. 아래의 Fig. 8 은 트롤리가 붐의 끝 부분인 최대 도달거리(outreach)인 지점(22.7m)에서 Z 방향에 대한 굽힘 모우먼트와 강도해석을 위한 트롤리의 각 위치(position)를 나타내고 있다. 트롤리가 위치

한 붐에서 최대 굽힘 모우먼트가 나타나는 것을 알 수 있다.

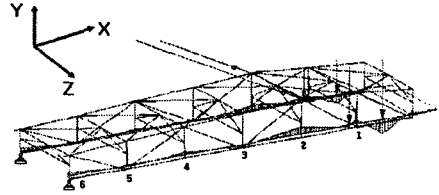


Fig. 8 Typical BMD(MZ) at trolley max. outreach

Fig. 9 는 트롤리가 붐의 최대 도달거리인 지점에서 인장과 압축 응력을 나타내며 Fig. 10 은 붐 파이프의 단면에서 각 부분 별로 받고 있는 응력의 크기를 표시하고 있다. Fig. 11 은 붐에서 최대 응력을 구하기 위한 부재의 번호를 나타내고 있다.

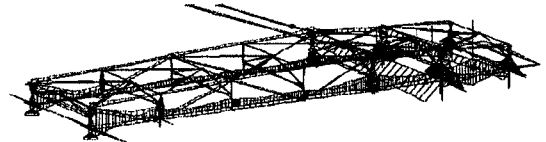


Fig. 9 Typical stress diagram at trolley max. outreach

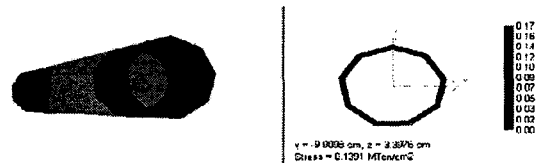


Fig. 10 Typical pipe stress

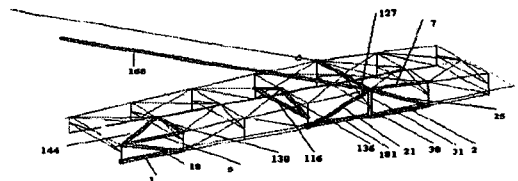


Fig. 11 Boom member number

Table 5 는 재질이 SS400, ASTM A36 또는 동등재질을 사용한 각 부재에 대한 최대 응력을 나타내고 여기서 단위는  $\text{ton}/\text{cm}^2$  이고 (-)는 인장 응력, (+)는 압축 응력을 나타내고 있다. 또한, 붐의

각 부재에서 하중조합이 된 경우에 받는 트롤리의 각 위치에서 계산된 최대 응력이 허용된 범위에 있는지를 나타내고 있다. 여기서 'Calc'는 강도해석에 의하여 계산된 응력이고 'Allow'는 부재의 허용 응력이며 'Ratio'는 허용응력 대비 계산 응력이다. 최대응력이 발생 하는 부재는 하중조합 'OL1', 트롤리의 위치가 2 인 경우 38 번 부재로서 붐의 구조물은 크레인의 모든 조건에서 강도 상 안전함을 알 수 있다.

Table 5 Maximum stress summary

Load comb.	Position	Memb. no.	Type	Calc.	Allow	Ratio
OL1	1	168	H-beam	-1.002	2.160	0.46
OL1	1	1	Pipe	1.495	2.160	0.69
OL1	1	2	Pipe	0.680	2.160	0.31
OW1	5	5	Pipe	0.838	1.545	0.54
OW1	1	7	Pipe	-0.514	1.545	0.33
OP1	3	181	H-beam	0.723	1.368	0.53
OP1	5	18	Pipe	-1.051	1.368	0.77
OL1	3	21	Pipe	-0.796	2.160	0.37
OL1	1	25	Pipe	-1.313	2.160	0.61
OL1	2	127	SQ. tube	0.110	2.160	0.05
OL3	2	130	SQ. tube	0.579	2.160	0.27
OL3	1	144	SQ. tube	-0.768	2.160	0.36
OL3	3	116	SQ. tube	-0.444	2.160	0.21
OL3	3	136	SQ. tube	0.687	2.160	0.32
OL1	2	31	H-beam	-1.274	2.160	0.59
OL1	2	38	H-beam	-1.507	2.160	0.70

4.2 강성해석

강성해석은 크레인 붐 구조부의 변위량을 계산하여 규격에서 규정하고 있는 범위 이내로 설계하고자 행하여 진다. 강성해석 절차는 응력해석과 같은 방식으로 이루어지며 강성해석에 의하여 변위량의 결과치를 검토하여 부재 크기를 선정하게 된다.

크레인과 같은 대형 구조물은 제작 시 제관 공차 와 기계가공 부위의 가공 공차, 그리고 현장에서 실측한 광파 측정 방법의 미세 측정 오차를 고려한 변위량이 발생한다. 이 실제 측정된 변위량과 컴퓨터 모델링에서 계산된 이론적인 변위량과 비교하여 정확한 수치적 판단을 내리기에는 비논리적인 점이 있다. 그러나 가장 이론적인 계산 값과 제작 오차를 감안한 현물의 측정값을 단순 상대

비교하는 이와 같은 방법은 구조물 전체의 변위 추이를 진단하고자 하는 데는 도움이 될 것이다. 또한, 과도한 비정상적인 이상변위 차이가 발생하는 부위를 발견하는데도 유의할 것이다. Fig. 12 는 하중조합 DL+TL+LS 가 화살표의 위치에서 작용할 때 수직 변형량의 형태를 나타낸다.

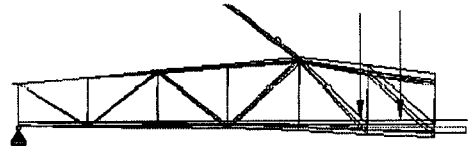


Fig. 12 Typical vertical deflection mode

Fig. 13 은 하중 LATG 가 작용할 때의 수평 변형량의 형태를 나타낸다.

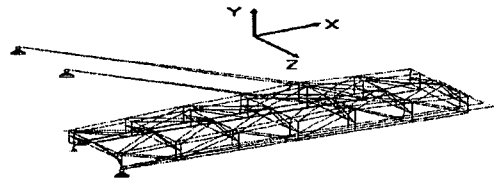
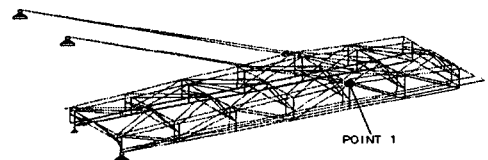
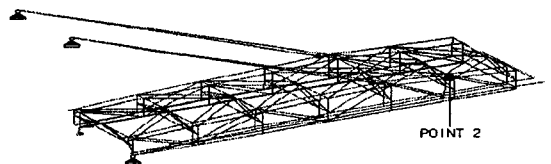


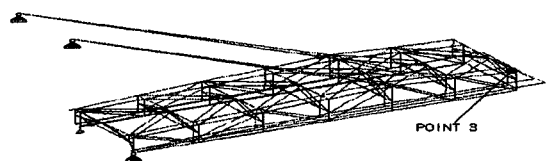
Fig. 13 Typical horizontal deflection mode



(a) Boom tip point 1 deflection



(b) Boom tip point 2 deflection



(c) Boom tip point 3 deflection

Fig. 14 Boom tip point 1, 2 and 3 deflection

Fig. 14 는 위에서부터 차례로 포스테이 연결부 분인 위치 1 에서와 붐의 최대 도달거리인 위치 2 에서와 붐의 최끝단부인 위치 3 에서의 변형량을 나타내고 있다. 강성해석 결과 이론적인 변형량은 붐 위치 3 에서 Y 방향으로 -46.9mm 이며, 광파 측정한 결과는 붐 위치 3 에서 Y 방향으로 +46.6mm 로 판단되며, 이러한 결과를 종합해 볼 때 붐 강성에 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

STAAD.Pro 2004 의 구조해석 전용 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터 모델링을 작성하고 기본하중과 하중조합을 입력하여 하중조합 DL+TL+LS 에 대한 붐 위치 1 에서 3 까지의 변형량을 계산하였다. 강성해석의 결과는 상기에서 수행한 각각의 위치에 대한 X, Y, Z 방향에 대한 변형량을 아래의 Table 6 에서 볼 수 있다.

Table 6 Summary of deflection

Point	Deflection				
	Load case	Horizon.	Vert.	Horizon.	Result
		X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	(mm)
1	DL+TL+LS	1.0	-23.0	-1.7	23.1
2	DL+TL+LS	0.4	-36.2	-1.8	36.3
3	DL+TL+LS	-0.5	-46.9	-1.7	47.0

### 5. 피로해석

#### 5.1 Palmgren-Miner 법칙

크레인이 설계, 제작이나 설치된 다음 설계 수명에 이르도록 장기간 가용한 시점에서, 크레인 구조물의 안전에 대한 수명 예측 평가는 크레인을 유지 보수 또는 폐기할 것인지에 대한 경제성 검토와 새로운 크레인의 발주시기 등을 결정하는 중요한 정보를 제공해준다. 본 피로해석에서는 약 39 년간 사용한 H 사 부산항 컨테이너 크레인의 붐 구조물을 대상으로 피로해석<sup>13-15</sup>의 기본이론인 Palmgren-Miner 법칙을 검토하고 사용 이력의 기록을 근거로 피로해석의 기준을 설정한다. 그리고 피로 사이클 스펙트럼을 작성하여 피로 누적 손상을 계산하여 피로해석에 의한 크레인의 잔존수명을 계산하고자 한다.

선형 손상법인 Palmgren-Miner 의 법칙은 영국의 규격인 BS5400 Part 10 에서 누적 피로 손상법으로 사용하고 있다. 이 규격은 강, 콘크리트나 복합

교량의 피로에 적용하고 있다. Palmgren-Miner 의 법칙은 식 (1)과 같으며 손상률은 임의의 응력 수준에서의 작용 사이클 수와 그 응력 수준에서 파손에 이르는 총 사이클 수의 비에 선형적으로 비례한다고 가정하며 식 (2)와 같다. 누적 손상 이론에서 파괴는 손상률의 합이 1 이상일 때 일어난다고 가정한다.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \left( \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} \right) \quad (1)$$

$$\sum D_i = \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (2)$$

식 (3)~(7) 에서  $K_1$  의 값은 설계 수명 내에서 16%의 실패 확률과 일치하고  $K_2$  는 2.3%의 실패 확률과 일치한다.

$$N \times \sigma_r^m = K_0 \times \Delta^d \quad (3)$$

$$N \times \sigma_r^m = K_2 \quad (4)$$

$$\text{Log}_{10} N = \text{Log}_{10} K_2 - m \text{Log}_{10} \sigma_r \quad (5)$$

$$K_2 = K_0 \times \Delta^d \quad (6)$$

$$K_1 = K_0 \times \Delta \quad (7)$$

Palmgren-Miner 가 고안한 선형 손상법을 근거로, 작용한 피로 누적 손상을 Miner's rule 인 식 (8)에 따라 구한다.

$$L = \sum_{i=1}^N (f_{ri})^m \times n_i \quad (8)$$

따라서, 상기에 의거 각각의 누적손상을 계산하여 BS5400 Part 10 에서 분류하는 각 부재의 상세 조인트 등급에 따라 허용 누적 손상 값과 비교하여 그 비율에 따른 파괴 정도의 신뢰성을 판정한다. 피로하중 조합은 BS5400 Part 10 에서 강교를 중심으로 명확히 규정되어 있으나 여기서는 컨테이너 크레인의 특성에 맞는 하중조합을 하도록 한다. 피로 해석을 위한 하중조합은 Table 7 과 같다.

Fig. 15 는 피로 사이클 스펙트럼을 나타내는 것으로서 크레인의 사용 이력을 기준으로 평균화물의 중량은 최대하중의 63%인 약 17.3ton 을 적용하였다. 사용 연수는 약 39 년이며 사용 이력에 따른 전체 하역 회수는 4,380,000 사이클(cycle)을 적

용하였다. 이것은 컨테이너 크레인의 사용 길이에 대한 사용 회수 즉, 트롤리가 컨테이너를 들고 왕복한 거리를 몇 사이클 반복했는지를 나타내고 있다.

Table 7 Load combination for fatigue

Symbol	Load combination
FT1	DL+TL+LS+LLF+IMP+LATT+SKW
FT2	DL+TL+LS+LLF
FT3	DL+TL+LS+IMP
FT4	DL+TL+LS+LLF+LATT+SKW
FT5	DL

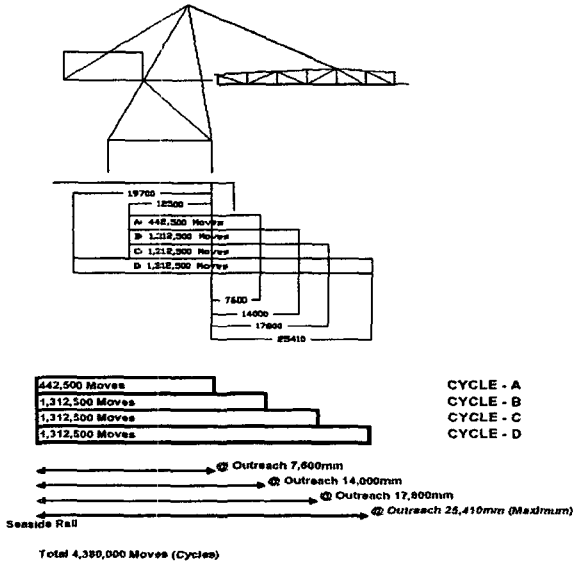


Fig. 15 Fatigue cycle spectrum

### 5.2 피로 누적 손상

허용 누적 손상 값은 붕괴 유발부재와 비붕괴 유발부재로 구분하여 마련되어 있으며 여기서 붕괴 유발부재는 만일 파괴가 발생할 시 크레인이 붕괴하거나 또는 취급하는 하중이 추락할 수 있는 구조물을 말한다. 그리고 비붕괴 유발부재는 붕괴 유발부재에 해당하지 않는 주요 구조물을 정의한다. BS5400 Part 10 에서 정의하는 허용 누적 손상은 Table 8 에 정리되어 있고 누적 손상 부위는 Fig. 16 에 표시되어 있으며 피로 누적 손상 값은 저수장 법이나 비흐름 주기 계산법(rain flow counting method)을 이용하여 응력 스펙트럼으로부터 계산한

Table 8 Allowable cumulative damage

Joint details			
Detail class BS5400 Part 10	m	NFCM $K_1(\text{ksi})^m$	FCM $K_2(\text{ksi})^m$
W	3.0	$7.46 \times 10^8$	$4.88 \times 10^8$
G	3.0	$1.15 \times 10^9$	$7.62 \times 10^8$
F2	3.0	$2.21 \times 10^9$	$1.31 \times 10^9$
F	3.0	$3.17 \times 10^9$	$1.92 \times 10^9$
E	3.0	$5.65 \times 10^9$	$3.17 \times 10^9$
D	3.0	$7.50 \times 10^9$	$4.63 \times 10^9$
C	3.5	$7.86 \times 10^{10}$	$4.91 \times 10^{10}$
B	4.0	$6.79 \times 10^{11}$	$4.46 \times 10^{11}$
Tubular Joints			
Detail class AWS D1.1	m	NFCM $K_1(\text{ksi})^m$	FCM $K_2(\text{ksi})^m$
T-A	5.8	$2.22 \times 10^{14}$	$7.40 \times 10^{13}$
T-B	4.4	$4.04 \times 10^{11}$	$1.35 \times 10^{11}$
T-C1	4.1	$1.07 \times 10^{11}$	$3.57 \times 10^{10}$
T-C2	3.6	$9.27 \times 10^9$	$3.00 \times 10^9$
T-D	3.3	$2.35 \times 10^9$	$7.83 \times 10^8$
T-E	3.2	$9.87 \times 10^8$	$3.29 \times 10^8$
T-F	4.6	$4.74 \times 10^{10}$	$1.58 \times 10^{10}$
T-DT	4.4	$4.39 \times 10^9$	$1.46 \times 10^9$
T-ET	3.4	$8.62 \times 10^7$	$2.87 \times 10^7$
T-FT	4.2	$1.09 \times 10^9$	$3.63 \times 10^8$
T-K1	4.5	$6.38 \times 10^7$	$2.13 \times 10^7$
T-K2	4.3	$2.35 \times 10^7$	$7.38 \times 10^6$

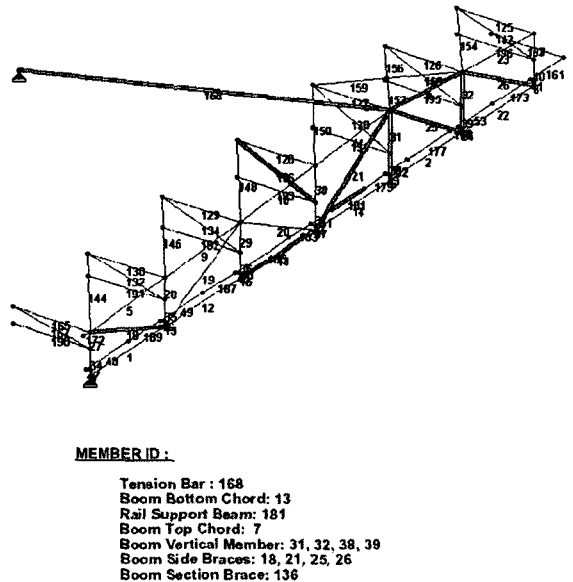


Fig. 16 Member location for checking of cumulative damage



후 식 (8)에 따라 계산할 수 있다. 붕괴 유발부재 31(detail class : G)에 대한 피로 누적 손상은 식 (8)을 이용하여 Table 9 와 같이 구하며 m 값은 3 을 적용하였다. Table 10 은 피로 누적 손상에 대한 신뢰도를 나타내고 있다.

피로해석에 대한 주요한 결과로서 요약을 하면, 31 번, 38 번과 39 번 부재들은 피로수명을 초과한 상태이며 붕괴 유발부재이므로 만일에 발생된 피로균열에 대해서는 신속한 보수를 해야 한다.

Table 9 Calculation of cumulative damage

Member no.	$f_{ri}(ksi)$	$f_{ri}^m(ksi)^m$	$n_i$	$f_{ri}^m \times n_i(ksi)^m$	$L(ksi)^m$
31	1.6358	4.3775	442500	$1.94 \times 10^6$	$1.0978 \times 10^9$
	1.8918	6.7715	1312500	$8.89 \times 10^6$	
	4.3954	84.9198	1312500	$1.11 \times 10^8$	
	9.061	743.9646	1312500	$9.76 \times 10^8$	

Table 10 Reliability ratio of cumulative damage

Item	Member no.	Detail class	Member	Reliability ratio(L/K)		Result
				Allow	Actual	
Tension bar(forestay)	168	F2	FCM	0.932	0.237	OK
Boom bottom chord(middle)	13	T-DT	FCM	0.977	0.855	OK
Rail support beam	181	G	FCM	0.977	0.926	OK
Boom top chord(far side)	7	T-DT	FCM	0.977	0.286	OK
Boom vertical upper(near forestay)	31	G	FCM	0.977	1.442	Fail
Boom vertical lower(near forestay)	38	F2	FCM	0.977	1.098	Fail
Boom vertical upper(far side)	32	G	FCM	0.977	0.540	OK
Boom vertical lower(far side)	39	F2	FCM	0.977	1.160	Fail
Boom side brace	18	T-B	FCM	0.977	0.299	OK
Boom side brace	21	T-B	FCM	0.977	0.046	OK
Boom side brace	25	T-B	FCM	0.977	0.229	OK
Boom side brace	26	T-B	FCM	0.977	0.004	OK
Boom section brace	136	T-ET	NFCM	1.000	0.226	OK

그리고 13 번과 181 번 부재들은 피로수명에 근접한 상태로써 지속적인 검사(VT+MT)를 필요로 하며 만일에 발생한 피로균열에 대해서는 신속한 보수가 수반되어야 한다. 168 번, 7 번, 32 번, 18 번, 21 번, 25 번, 26 번과 136 번 부재들은 피로파괴에 상대적으로 영향을 적게 받는 것으로 나타나고 있다.

### 5.3 잔존수명

본 연구에서 크레인의 붐 구조는 전반적으로 이미 피로강도의 한계범위를 초과한 상태이며 구조물 전체에 걸쳐서 피로결함이 지속적으로 검출되고 있다. 현재 31 번, 38 번과 39 번 부재들은 수명을 초과한 상태이며, 피로수명에 다다른 13 번과 181 번 부재에 대한 이론적 잔존수명은 Table 11 과 같이 각각 6.8 년과 2.2 년인 것으로 판단된다.

Table 11 Residual life by calculation

Item	No	Operated life		Allowable life		Residual life	
		Cycle	L/K	Cycle	L/K	Cycle	Year
Tension -bar (forestay)	168	4380000	0.237	Non-fatigue failure member			
Boom bottom chord (middle)	13	4380000	0.855	5143020	0.977	763020	6.8
Rail support beam	181	4380000	0.926	4630000	0.977	250000	2.2
Boom top chord(far side)	7	4380000	0.286	Non-fatigue failure member			
Boom vertical upper (near forestay)	31	4380000	1.442	No allowance (NDT & repair work is required.)			
Boom vertical lower (near forestay)	38	4380000	1.098	No allowance (NDT & repair work is required.)			
Boom vertical upper (far side)	32	4380000	0.540	Non-fatigue failure member			
Boom vertical lower (far side)	39	4380000	1.160	No allowance (NDT & repair work is required.)			
Boom side brace	18	4380000	0.299	Non-fatigue failure member			
Boom side brace	21	4380000	0.046	Non-fatigue failure member			
Boom side brace	25	4380000	0.229	Non-fatigue failure member			
Boom side brace	26	4380000	0.004	Non-fatigue failure member			
Boom section brace	136	4380000	0.226	Non-fatigue failure member			

## 6. 결론

본 논문과 관련하여 H사 부산항 3 부두의 용량 27.5ton 컨테이너 크레인 붐 구조물의 잔존수명 예측에 관한 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

### (1) 크레인 강도/강성적 안전성

애초 설계된 크레인은 38 번 부재에 가장 많은 응력이 걸리나 허용응력의 범위에 있으므로 안전하고 또한 전반적으로 강도 상에는 허용응력을 초과하지 않는 안전한 상태이다. 강성적인 해석 결과 이론적인 처짐량은 붐 위치 3에서 Y 방향으로 -46.9mm 이며, 광과 측정된 결과는 붐 위치 3에서 Y 방향으로 +46.6mm로서 붐이 상부로 올라간 상태로 판단되나, 허용처짐의 범위에 있으므로 결과를 종합해 볼 때 붐 강성에는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

### (2) 피로해석과 누적 손상

BS5400 Part 10 규격에서 명기된 Miner's rule 을 사용하여 누적 손상 신뢰도를 계산한 결과 크레인의 붐 구조는 피로강도의 한계 범위를 초과한 상태이며 구조물 전체에 걸쳐서 피로 결합이 지속적으로 검출되고 있다 특히 31 번 붐 부재는 신뢰도를 훨씬 초과한 위험한 상태이다.

### (3) 잔존수명

현재 31 번, 38 번과 39 번 부재들은 수명을 초과한 상태이며, 피로수명에 다다르는 13 번과 181 번 부재들에 대한 이론적 잔존수명은 각각 6.8년과 2.2년인 것으로 판단된다.

앞으로 연구 과제로는 컨테이너 크레인에 대한 동적 해석의 수행과 전도를 일으키는 풍속의 거동 및 풍동 실험에 대하여 연구하고자 한다.

## 참고문헌

1. Verschoof, J., "Cranes-Design, Practice, and Maintenance," Professional Engineering Publishing Limited, pp. 4-17, 1999.
2. Son, J. K., Kwon, S. J. and Park, H. S., "A Design of Anti-sway Controller for Container Crane," Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 51-59, 2003.
3. Hur, C. W., "A Study on the Design and Life Expectancy of a Double Link Type Level Luffing Jib

- Crane," A Thesis for a Doctorate, pp. 15-59, 2002.
4. Choo, Y. W. and Yum, Y. J., "Optimal Design of Upper Structure of Level-Luffing Jib Crane," UOU Report, Vol. 21, (Natural Science and Engineering) No. 1, pp. 1-5, 1990.
5. BS(british Standard)2573 Part 1, "Rules for the design of crane," British Standards Institution, pp. 4-12, 1983.
6. Structural Analysis and Design software, "STADD. Pro 2004," Research Engineers International, 2004.
7. CMAA Specification No. 70-1988, "Specification for Electric Overhead Traveling Cranes," Crane Manufacturers Association of America Inc., pp. 10-16, 1988.
8. Federation Europeenne De La Manutention(FEM Code) "Rules for the Design of Hoisting Appliances," Technical Commission of FEM Section I, 1998.
9. Lee, S. W., Shim, J. J., Han, D. S., Han, G. J. and Kim, T. H., "The Comparison of Stability of a Container Crane according to Various Wind Load Design Codes," Journal of Korean Institute of Navigation and Port Research, Vol. 29, No. 6, pp. 561-566, 2005.
10. Lee, S. W., Shim, J. J., Han, D. S., Park, J. S., Han, G. J., Lee, K. S. and Kim, T. H., "The Effect of Wind Load on the Stability of a Container Crane," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 148-155, 2005.
11. Kang, J. H. and Lee, S. H., "Experimental Study of Wind Load on a Container Crane Model," Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 17, pp. 171-181, 2004.
12. Whang, K. S., Kim, H. S. and Kim, D. K., "Estimation of Wind Load at Container Crane's Wheel Wind Tunnel Test," Journal of The Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 8, pp. 176-181, 2005.
13. Im, S. W., Kim, J. H., Chang, I. H. and Shinga, A., "Experimental Study on Fatigue Crack in Welded crane Runway Girders(1)- Initiation and Propagation of Fatigue Crack," Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 9, No. 2, pp. 237-248, 1997.
14. Kim, J. H., Im, S. W., Chang, I. H. and Shinga, A., "Experimental Study on Fatigue Crack in Welded crane Runway Girders(2)-Repair Methods of Fatigue Crack," Journal of Korean Society of Steel

Construction, Vol. 10, No. 2, pp. 303-315, 1998.

15. Jeong, D. G. and Yoon, K. B., "A Study on Fatigue Life Assessment Procedure for a Container Crane," Journal of The Korean Institute for Industrial Safety, Vol. 14, No. 2, pp. 11-18, 1999.