

이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인의 피로 해석, 신뢰도 및 수명 예측에 관한 연구

허철원[†] · 문덕홍^{*}

한국선급엔지니어링 · 부경대학교 기계공학부
(2001. 9. 7. 접수 / 2001. 10. 29. 채택)

A Study on Fatigue Analysis, Reliability and Life Expectancy of a Double Link Type Level Luffing Jib Crane

Chul-Won Hur[†] · Deok-Hong Moon^{*}

KR Engineering Co., LTD · School of Mechanical Engineering, Pukyong National University
(Received September 7, 2001 / Accepted October 29, 2001)

Abstract : This paper is a study on the fatigue analysis using BS5400 Part10(1980), code of practice for fatigue for a double link type level luffing jib crane which has been operated since the crane was built in 1985 at a domestic pier, South Korea. In addition, on the basis of the design life due to fatigue analysis and the number of cracks detected from the nondestructive test, the structural reliability and the residual life of the crane is predicted by evaluating the expected development of detectable fatigue cracks during the next five to ten years using Paris's Law for predicting fatigue crack growth and Gaussian probability density function to be reasonable for stress ranges below the mean values determined by laboratory tests. The statistical data used for the analysis of the structural reliability and life expectancy is given in the above referred code.

Key Words : fatigue, LLC, reliability, life expectancy

1. 서 론

국내 A항에 사용 중인 이중링크 형식 수평 인입 집 크레인은 광석, 소금, 원당 및 곡물 등을 하역하는 산물용 크레인이다. 이 크레인은 1985년에 가동된 이래 현재까지 약 17년간 약 1100만 톤의 하역 처리와 이에 따른 약 150만 사이클의 부하 시험을 수행해왔다.

이동 하중에 의해 반복적인 부하를 받는 크레인 구조물은 피로균열의 성장에 의한 갑작스러운 붕괴가 발생할 수 있다. 피로균열은 통상 수년간 사용에 따른 피로누적손상에 의해 발생하는데, 정기검사에서 발견되지 않고 균열의 크기가 임계 길이를 초과할 경우 취성파괴가 일어나 붕괴 사고로 이어진다.

국내의 경우 부산항에 설치된 후 10년에서 15년 사용한 컨테이너 크레인의 경우 구조물 안전도에 대한 신뢰도 평가가 선진사의 기술 용역으로 수행된 바가 있다. 반복 주기 하중을 받는 구조물의 잔존 수명 평가에 대한 연구가 근래에 많이 수행되고 있다.³⁾

이 크레인이 설계 및 제작되었을 때의 국내 피로 설계 기술은 현재의 수준에 비하면 매우 낮을 뿐만 아니라 피로 설계를 반영하지 못한 경우가 허다하여 피로에 대한 자료가 없다. 따라서, 본 논문에서는 크레인의 하중 사용이력과 설계된 자료를 바탕으로 근래 크레인의 피로 해석에 많이 적용하고 있는 규격인 BS5400 Part10 (1980)¹⁾을 이용하여 피로 해석을 수행하였다. 아울러, 크레인 구조물의 신뢰도 및 수명 예측 해석에 사용된 통계적 데이터는 이 규격에서 주어졌고, 피로 해석에 의한 설계 수명과 비파괴 검사에서 검출한 균열의 수를 바탕으로 피로 균열의 성장에 대한 Paris의 법칙과 연구실 시험에 의해

[†]To whom correspondence should be addressed.
humly@hanmail.net

결정된 평균값 이하의 응력 범위를 구하는데 적합한 Gaussian 확률 밀도 함수를 이용하여 향후 5년 내지 10년에 걸쳐 예상되는 피로 균열의 발생 빈도를 평가함으로써 이 크레인 구조물의 신뢰도 및 잔존 수명을 예측하였다.

2. 이론

2.1. Palmgren-Miner 법칙

영국의 강, 콘크리트 및 복합 교량의 피로에 적용하는 규격인 BS5400 Part10(1980)의 피로 누적 손상 계산은 선형 손상법인 Palmgren-Miner의 법칙을 사용하고 있다. 피로 현상에 따른 손상의 누적은 피로 균열의 성장 이전까지 고려하고, 일정 진폭의 피로 하중 시험에서 N 회의 피로수명을 가진 응력 수준에서 1회의 반복 하중에 의한 손상 D 는 다음과 같이 정의한다.

$$D = 1/N \quad (1)$$

n 회의 하중이 작용한 경우 손상은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n \times D = n/N \quad (2)$$

여기서, n/N 를 손상비(damage fraction)라고 한다. 다양한 응력 수준이 포함된 응력 스펙트럼이 작용할 경우, S-N곡선으로부터 여러 가지의 응력 수준 S_i 의 각각에 대한 손상비 D_i 로 나타낼 수 있고, 이 손상비의 합이 1 이상이 되면, 즉 다음의 조건이 만족될 때 파손이 예상된다.

$$D_1 + D_2 + \dots + D_{i-1} + D_i \geq 1 \quad (3)$$

Palmgren-Miner의 법칙에 손상비 D_i 는 임의의 응력 수준에서의 작용 사이클 수와 그 응력 수준에서 파손에 이르는 총 사이클 수의 비에 선형적으로 비례한다고 가정한다. 즉,

$$D_i = n_i / N_i \quad (4)$$

식(4)를 이용하여 식(3)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (5)$$

식(5)가 Palmgren-Miner법칙 또는 선형 손상법을 전형적으로 나타낸 식이다.

2.2. Miner의 가법

Palmgren-Miner가 고안한 선형 손상법을 근거로 한 누적 손상 가법으로서 작용된 피로 누적 손상 L 은 다음과 같다.

$$L = \sum_i (F_n)^{m_i} \times n_i \quad (6)$$

여기서, F_n 는 응력 스펙트럼에서 저수장법(reservoir method)¹⁾ 또는 비 흐름법(rain flow method)⁶⁾에 따라 주기 계산한 i 번째 응력 범위이고, m_i 은 logN-logS 곡선 기울기의 역수이고, n_i 는 규정한 구조물의 수명 내에서 F_n 의 발생 횟수이다. 따라서, 설계 스펙트럼에 의해 계산된 피로 누적 손상 L 과 BS5400 Part10에서 제공하는 상세 등급에 따른 허용 누적 손상과 비교하여 설계 수명을 계산할 수 있다. 붕괴 유발 부재 및 비붕괴 유발 부재의 허용 누적 손상의 값은 S-N 평균 곡선 아래의 표준편차의 수 d 를 각각 2.0 및 1.0을 적용^{1,2)}하여 평균 허용 누적 손상 K_0 ¹⁾로부터 각각 K_2 , K_1 의 허용 누적 손상을 설정하였다.

2.3. 피로 균열 성장에 대한 Paris의 법칙

피로 균열 성장을 예측하기 위해서 Paris의 방정식³⁾을 이용한다.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m, \quad \Delta K > \Delta K_{th} \quad (7)$$

여기서, a 는 균열 길이이고, N 는 사이클 수이고, ΔK 는 응력 확대 계수 범위(stress range intensity factor)이고, C 와 m 은 재료 상수이고, ΔK_{th} 는 응력 확대 계수 한도 범위(stress range threshold intensity factor)이다.

응력 확대 계수 범위는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta K = \Delta \sigma Y(a) \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

여기서, $\Delta \sigma$ 는 응력 범위이고, $Y(a)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y(a) = F_e F_s F_w F_g \quad (9)$$

여기서, F_e, F_s, F_w 및 F_g 는 균열 형상(crack shape), 자유 면(free surface), 유한 폭(finite width) 및 응력 구배 수정(stress gradient correction) 계수이다. $Y(a) = Y$ 가 일정하다면, 식(8)을 식(7)에 대입하면,

$$\frac{da}{dN} = CY^m \Delta \sigma^m \pi^{m/2} a^{m/2} = Ea^{m/2} \quad (10)$$

여기서, $E = CY^m \Delta \sigma^m \pi^{m/2}$ 이다.

식(10)을 적분하면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta N = \frac{1}{(1-\frac{m}{2})E} \times \left(\frac{1}{a_2^{\frac{m}{2}-1}} - \frac{1}{a_1^{\frac{m}{2}-1}} \right) \quad (11)$$

여기서, a_1 는 초기 균열 크기이고, a_2 는 ΔN 사이클 작용 후에 성장한 균열의 크기이다. 따라서, 식(11)을 이용하여 붕괴 유발 부재에 초기 균열 길이 a_1 이 임계 균열 길이 a_c 까지 성장하는데 소요되는 작용 사이클 수를 계산할 수 있다.

2.4. BS5400 Part10 규격의 통계 데이터와 Gaussian 확률밀도 함수를 이용한 신뢰도 계산

응력 대 수명의 대수-대수 도표로 나타낸 S-N 곡선의 기본 피로 데이터는 주기 하중을 받는 구조물의 설계에 기초적인 정보를 제공한다. 임의의 주어진 응력 수준의 피로 시험 결과에서 나온 피로 수명 데이터들은 산포(scatter)되기 때문에 주어진 재질에 대하여 하나의 S-N 곡선뿐만 아니라 매개 변수로써 파손 확률을 내포한 S-N-P 곡선 군이 피로설계에 필요하다. 수명 분포가 대수 정규 분포이면, 시험의 평균, 표준 편차 및 표준 편차의 수 등을 이용하여 희망하는 파손 확률을 규정할 수 있다. Fig. 2.1에 나타낸 바와 같이 임의의 시험 평균, 표준 편차 및 표준 편차의 수를 포함한 하나의 S-N-P 곡선의 함수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Log}N = \text{Log}K_0 - d\sigma - m_1 \text{Log}S \quad (12)$$

여기서, N 는 응력 범위 S 에 의해 파손 예상되는 사이클 수이고, K_0 은 시험 평균이고, σ 는 $\text{Log}N$ 선의 표준 편차이고, d 는 평균 이하의 표준 편차의 수이다. 사이클 수가 N_0 이고, 응력 범위가 S_0 이고, $d=2$ 의 설계 조건을 식(12)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

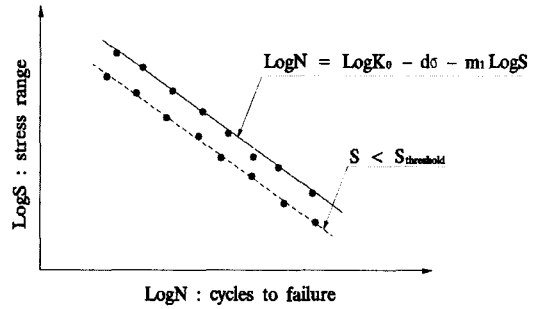


Fig. 2.1. S-N-P curve with test mean, standard deviation of LogN line, number of standard deviations below the mean

$$\text{Log}N_0 = \text{Log}K_0 - 2\sigma - m_1 \text{Log}S_0 \quad (13)$$

식(12)에서 식(13)을 뺀 후 d 를 구하면, 실제 작용한 사이클 수와 설계 수명 사이클 수의 비 및 실제 작용된 응력범위와 설계시 고려된 응력 범위의 비에 따른 평균 이하의 표준 편차의 수 d 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d = \frac{-\text{Log}(N/N_0) - m_1 \text{Log}(S/S_0)}{\sigma} + 2 \quad (14)$$

Fig. 2.2는 표준 정규 분포에 대한 Gaussian 확률 밀도 함수 $f(x)$ 를 나타내고 있다. 즉, $f(x)$ 는

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2}t^2}}{\sqrt{2\pi}} \quad (15)$$

여기서, x 의 범위는 $-\infty < x < \infty$ 이다. 또한, 표준 정규 분포에 대한 누적 분포 함수 $F(X)$ 는

$$F(X) = \int_{-\infty}^x f(x) dt = \int_{-\infty}^x \frac{e^{-\frac{1}{2}t^2}}{\sqrt{2\pi}} dt \quad (16)$$

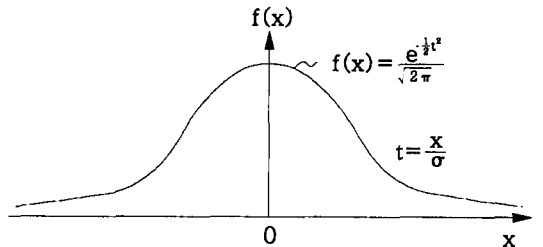


Fig. 2.2. Gaussian probability density function

식(16)의 X 에 식(14)에서 구한 d 를 대입하여 적분하면 평균 이하의 표준 편차의 수 d 에 대한 신뢰도 R (reliability)를 얻을 수 있다. 따라서, 파손 확률 P 는 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$P = 1 - R \tag{17}$$

3. 설계 조건 및 수치 해석 결과

3.1. 이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인의 각부 명칭

Fig. 3.1은 이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인의 전체 조립도를 나타낸다.

3.2. 하중 약어의 정의, 운송 품목별 하중과 하중 스펙트럼 및 피로 권상 하중 조합

1) 하중 약어의 정의

LS 권상 시스템(lifting system)의 약어로서, 그랩(grab) 및 권상 로프 일부분의 중량이다.

LL 권상 하중(lifted load)의 약어로서, 그랩에 담길 하역물의 중량이다.

IMP 충격 하중(impact load)의 약어로서, 권상 하중의 수직 가속도에 의해 발생하는 하중이다.

LLF 피로 권상 하중(fatigue lifted load)의 약어로서, 이 하중은 정격 권상 하중에 공칭 하중 스펙트럼 계수 K_f ⁴⁾를 곱한 하중이다.

2) 운송 품목별 하중 및 하중 스펙트럼

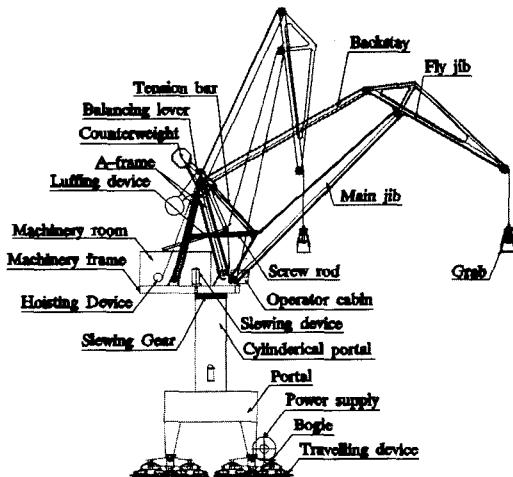


Fig. 3.1. General assembly of the crane

Table 3.1. Loads and load spectrum

Trans. item	V^* (m ³)	LS	LL	Total	Applied No. of cycles($\times 10^4$)			Percentage (%)
					20만	40만	60만	
Ore	3.6	9.0	9.0	18.0	■			17.0
Salt	7.5	9.0	9.0	18.0	■	■	■	53.3
Sugar	7.5	9.0	5.5	14.5	■	■	■	23.1
Grain	10.0	9.0	6.0	15.0	■			6.6

V^* : effective volume of grab

3) 피로 하중 조합

Table 3.1은 그랩 및 운송 품목의 하중과 사용이력에 의한 하중 스펙트럼을 나타내고 있다. 하중 스펙트럼은 1985년 가동 이후 17년간 크레인의 사용이력 기록에 따른 것이다. 이 도표를 근거로 공칭 하중 스펙트럼 계수 K_f 를 0.89로 설정하였다. 따라서, 피로 권상 하중 LLF는 16.0 ton이 된다. 충격 하중은 피로 권상 하중의 0.5배⁴⁾를 적용하였다. 피로 하중 조합은 피로 권상 하중과 충격 하중의 합이고, 그 값은 24.0ton이 된다.

3.3. 설계 주기 스펙트럼

Fig. 3.2는 피로 설계에 적용한 이동 거리별 사이클 수를 나타내는 설계 주기 스펙트럼을 나타내고

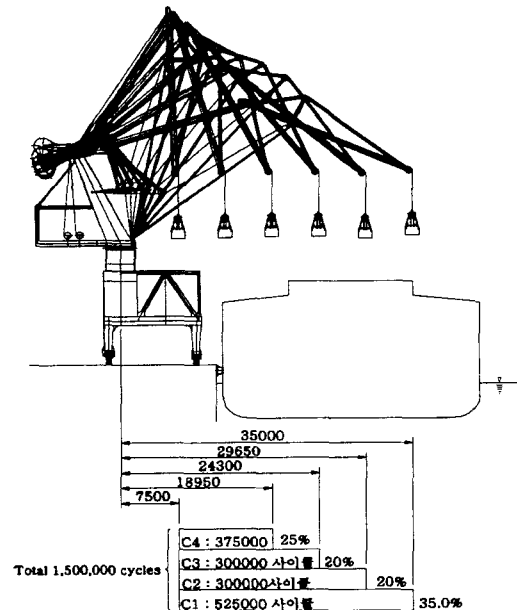


Fig. 3.2. Design cycle spectrum

있다 최대 작업 거리는 35.0m이고, 최소 작업 거리는 7.5m이다. Fig. 3.2에서 보는 바와 같이 최대 및 최소 작업 거리 사이를 4개의 구간으로, 즉 C1, C2, C3 및 C4로 나누고, 이동 사이클 수는 각각 52.5만, 30만, 30만 및 37.5만 사이클이다. 즉, 현재까지 총 사용한 150만 사이클을 적용시켜 피로 누적 손상을 계산하였다.

3.4. 허용 누적 손상^{1,2)}

Table 3.2는 BS5400 Part10에서 제공하는 통계해석 결과의 평균 허용 누적 손상 K_0 와 식(12)의 S-N-P관계식을 이용하여 비붕괴 유발 부재(NFCM)와 붕괴 유발 부재(FCM)의 허용 누적 손상 K_1 과 K_2 를 각각 계산한 도표이다. 여기서, Δ 는 $\text{Log}N$ 의 표준편차의 Anti-log의 역수이다. K_0 , K_1 및 K_2 에 적용한 표준 편차의 수 d 는 각각 0, 1, 2이고, 각각의 파손 확률은 50%, 16% 및 2.3%이다.^{1,2)}

Table 3.2. Allowable cumulative damage

Detail class	m_1	Δ	$K_d\{(\text{t/cm}^2)^{m_1} \text{ cycle}\}$		
			K_0	K_1	K_2
W	3	0.654	3.93×10^5	2.57×10^7	1.68×10^9
G	3	0.662	6.05×10^5	4.00×10^7	2.65×10^9
F2	3	0.592	13.06×10^5	7.73×10^7	4.57×10^9
F	3	0.605	18.38×10^5	11.11×10^7	6.72×10^9
E	3	0.561	34.95×10^5	19.60×10^7	11.00×10^9
D	3	0.617	42.39×10^5	42.39×10^7	16.13×10^9
C	3.5	0.625	115.91×10^5	72.44×10^7	45.27×10^9
B	4.0	0.657	253.69×10^5	116.67×10^7	109.50×10^9

3.5. 누적 손상 및 설계 수명 계산

Table 3.3. Fatigue design life for each block of crane

Block	detail class	Mem. class	Fatigue cumulative damage (L) $\times 10^5$	Allowable cumulative damage (K) $\times 10^5$	$R_e = L/K$	Design Life $\times 10^6$
Main jib	G	K_1	2.37	4.00	0.59	2.53
Fly jib	G	K_2	4.18	2.65	1.58	0.95
A-Frame	F2	K_2	5.33	4.57	1.17	1.28
Backstay	F2	K_2	0.73	4.57	0.16	9.38
Balancing lever	W	K_1	2.09	2.57	0.81	1.84
Tension bar	F2	K_2	3.66	4.57	0.80	1.87
Portal frame	G	K_2	4.10	2.65	1.55	0.97

*unit of damage is $(\text{t/cm}^2)^3$ cycles.
**unit of design life is cycle.

Table 3.4. Reliability due to the number of standard deviation for N/N_0 and S/S_0

	d, R						
	S/S_0						
	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	
N/N_0	0.25	6.48	4.76	3.43	2.34	1.42	0.62
	R	1.0000	0.9999	0.9997	0.9904	0.9222	0.7324
	0.50	5.10	3.38	2.05	0.96	0.04	-0.76
	R	1.0000	0.9996	0.9798	0.8315	0.5160	0.2236
	0.75	4.29	2.57	1.24	0.15	-0.77	-1.57
	R	0.9999	0.9949	0.8925	0.5596	0.2206	0.0582
	1.00	3.72	2.00	0.67	-0.42	-1.34	-2.14
	R	0.9999	0.9772	0.7486	0.3372	0.0901	0.0162
	1.25	3.27	1.56	0.22	-0.86	-1.78	-2.58
	R	0.9995	0.9406	0.5871	0.1949	0.0375	0.0049
	1.50	2.91	1.19	-0.14	-1.23	-2.15	-2.94
	R	0.9982	0.8830	0.4443	0.1093	0.0158	0.0016
1.75	2.60	0.89	-0.45	-1.53	-2.45	-3.25	
R	0.9953	0.8133	0.3264	0.0630	0.0071	0.0006	
2.00	2.34	0.62	-0.71	-1.80	-2.72	-3.52	
R	0.9904	0.7324	0.2389	0.0359	0.0033	0.0002	

Fig. 3.2의 설계 주기 스펙트럼의 C1, C2, C3 및 C4 주기 영역 각각에 대하여 피로 하중 조합에 의한 구조 블록별 응력 스펙트럼들을 먼저 구한다. 저수장법 또는 비 흐름 주기 계산법을 이용하여 응력 스펙트럼으로부터 응력 범위들을 계산한다. 따라서, 식(6)을 이용하여 피로 누적 손상을 계산할 수 있다. Table 3.3은 크레인의 각 블록에 존재하는 가장 취약한 피로 상수에 대한 허용 누적 손상과 피로 누적 손상을 비교하여 설계 수명을 계산한 도표이다.

3.6. 신뢰도 계산

먼저 식(14)로부터 N/N_0 및 S/S_0 에 따라 평균이하의 표준 편차의 수를 계산한다. 이때 $\text{Log}N$ 의 표준 편차는 상세 등급 F의 것을 적용하였다. 표준 편차의 수 d 와 식(16)의 Gaussian 누적 분포 함수를 이용하여 신뢰도를 계산할 수 있고, 이 결과는 Table 3.4와 같다.

4. 고찰

4.1. 비파괴 검사 결과

본 크레인의 비파괴 정밀 검사는 자본 탐상 검사

약 650포인트, 육안 검사 약 350포인트씩 수행하였다. 검출한 총 균열 수는 50개이고, 이 중 38개는 붕괴 유발 부재(FCM)에, 12개는 비붕괴 유발 부재(NFCM)에 나타났다. 따라서, 비파괴 검사에서 검출된 균열 수에 의한 붕괴 유발 부재의 신뢰도 R은

$$R = 1 - 38 / 1000 = 0.962$$

이다. 이것은 붕괴 유발 부재의 설계 수명 내의 신뢰도 0.977보다 낮음을 알 수 있다. 즉, 검출한 균열의 수로 볼 때 설계 수명을 초과한 상태임을 의미한다.

4.2. 피로 해석 및 설계 수명

Table 3.3의 피로 해석 결과에 의하면, 주집은 약 250만 사이클, 플라이집은 약 95만 사이클, A-프레임은 약 130만 사이클, 백스테이는 약 940만 사이클, 평형 레버는 약 180만 사이클, 인장 바는 약 190만 사이클, 포탈 프레임은 약 100만 사이클의 설계 수명으로 설계된 것으로 평가된다. 약 17년간 150만 사이클이 작용된 이 크레인의 사용 이력으로 볼 때, 연평균 8만 8천 사이클의 부하 시험을 한 것으로 볼 수 있다. 따라서, 설계 수명을 연수로 환산해 보면 주집은 약 28년, 플라이집은 약 11년, A-프레임은 약 15년, 백스테이는 약 107년, 평형레버는 약 20년, 인장 바는 약 21년, 포탈 프레임은 약 11년 정도이다. 이때 각 블록에 존재하는 가장 취약한 피로 상

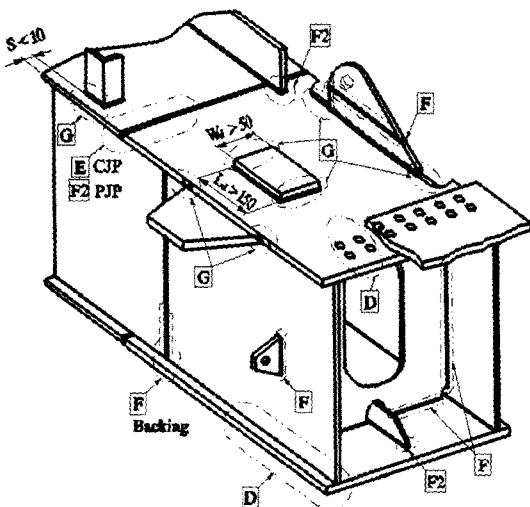


Fig. 4.1. Typical detail class according to BS5400 part10 for crane structure

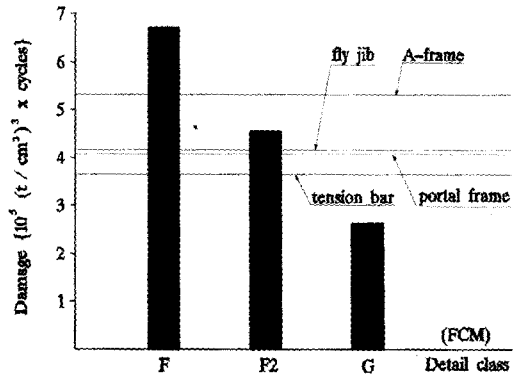


Fig. 4.2. A bar graph for allowable cumulative damage due to detail classes and each cumulative damage of blocks

세 등급을 적용하였다. 실제 크레인 구조물에는 다양한 피로 상세가 존재한다. Fig. 4.1은 BS5400 Part 10에 규정하고 있는 피로 상세 등급의 분류로써, 크레인 구조물에 존재하는 전형적인 피로 상세들이다.

플라이집, A-프레임, 인장 바 및 포탈 프레임 등의 블록에 존재하는 몇몇 피로 상세의 허용 누적손상과 피로 누적 손상을 막대 그래프로 나타내면 Fig. 4.2와 같다.

‘모든 붕괴 유발 부재에 피로 상세 등급 G는 사용하지는 안되고, F2 또는 더 좋은 상세를 사용해야 한다.’라는 규정이 근래에 발주되고 있는 크레인의 기술 사양서에 명시되어 있다.²⁾ 그 이유는 Table 3.2와 Fig. 4.2에서 보는 바와 같이 붕괴 유발 부재에 있어서 G등급의 사용은 설계 수명을 현격하게 저하시키기 때문이다. 본 크레인의 설계 및 제작 당시의 기술 표준들이 오늘날에 비해 초보적인 단계였지만 대체로 설계 및 제작이 잘 수행되어졌으나 불행하게도 붕괴 유발 부재에 몇몇의 G등급이 존재하고 있고, 결국 전체 크레인 구조물의 설계 수명을 저하시킨 주요 원인을 제공하고 있다.

충격 및 스펙트럼 계수를 적용한 피로 권상 하중과 Fig. 3.2의 설계 주기 스펙트럼 및 현재 크레인의 피로 상세 등을 고려하여 설계 수명을 계산해 본 결과, 플라이집, A-프레임 및 포탈 프레임의 설계 수명은 현재까지 사용한 150만 사이클 보다 작게 나타났다. 비파괴 검사의 결과에서도 대부분의 균열이 이들 블록에서 검출되었다. 반면에 주집, 평형 레버, 백스테이 및 인장 바 등의 블록들은 설계 수명에 이르지 않은 상태이다. 특히, 주집, 백스테이 및 인장 바에는 실제 비파괴 검사에서도 피로 균열이 발견되지 않았다. 따라서, 피로 해석에 의한 설계 수명

과 비파괴 검사에서 검출한 피로 균열의 발생 경향이 부합되고 있음을 알 수 있다.

붕괴 유발 부재에 존재하는 피로 상세 등급 G부분은 균열이 발생되었다. 이 균열 부분을 적합한 수정 작업을 한다면 균열 수정 용접부의 급속은 처음 제작 시와 같은 상태로 회생되고 그 신뢰도가 제고된다. 현재 G등급이 많이 존재하지 않으므로 이 등급으로 크레인 전체 구조물의 설계 수명을 평가하는 것은 너무 가혹할 것이다. 그러나, 붕괴 유발 부재의 피로 균열에 의한 파손은 크레인 전체 안정도에 치명적이므로 반드시 적합한 방법으로 개선 또는 보수 작업이 필요하다.

개선 또는 보수 수정 작업을 한 G등급은 현재까지 피로 누적 손상을 받은 F2 등급보다 높은 내구성을 갖게 될 것이다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 조건 하에서 크레인 구조물에 존재하는 가장 취약한 피로 상세를 F2로 설정하고 설계 수명을 계산하기로 한다.

Fig. 4.2에서 현재까지의 피로 누적 손상이 허용 누적손상 F2를 초과하는 블록은 A-프레임밖에 없다. 따라서, 이 블록을 기준으로 크레인 구조물의 설계 수명을 결정하면 약 130만 사이클이다.

4.3. 균열 성장률

Fig. 4.3은 플라잉집 상단에 발견된 대표적인 하나의 균열 위치와 크기를 나타내고 있다. 균열은 용접부 끝단에서 발생하여 모재로 전파되고 있는 상태이다.

부재의 단면 형상은 H빔이고 프레임의 중앙 부분에 균열이 발생하였다. 프레임의 폭은 250mm이고, 검출된 균열의 크기는 약 32mm이다. 균열부의 재질은 SM400B이다. 국내 철강 제조 업체의 경우가 재질에 대한 파괴 인성 K_{Ic} 에 대한 시험값이 없는 관계로 기계적 성질이 유사한 ASTM A36의 0°C

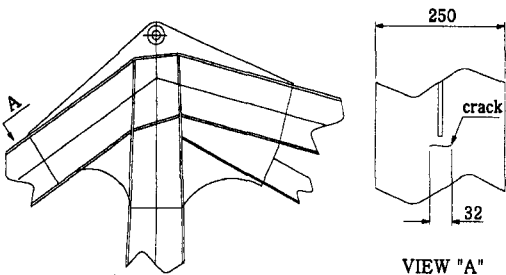


Fig. 4.3. Schematic showing a detected crack at fly jib

의 파괴 인성을 이용하였다. 식(10)의 Y값은 Del Research Corp.에서 시험한 중앙에 균열이 있는 시험편에 대한 결과값⁷⁾을 적용하였다.

균열의 임계 길이는 균열의 형상, 발생 위치, 재질의 파괴 인성 및 작용 최대 인장 응력 및 온도에 따라 결정된다. 균열부에 작용하는 최대 응력, 약 74.5MPa와 $Y=1.02$ 및 $K_{Ic}=1417.5MPa\sqrt{mm}$ 을 적용하여 균열의 임계 길이를 계산하면 약 110mm이다.

균열의 초기 길이 32mm에서 임계 길이 110mm까지 성장하는데 소요되는 사이클 수를 식(11)을 이용하여 계산하면 약 3.65×10^5 사이클이다. 이 결과는 1년에 10만 사이클 사용 기준으로 볼 때 약 3.6년 뒤에 이 부분은 균열의 임계 길이까지 성장함을 의미한다.

4.4. 신뢰도 평가 및 예상 잔존 수명

Table 3.4를 이용하여, 작용 사이클에 대한 1000 노치당 예상되는 누적 균열 발생 수 및 10^5 사이클 증가당 예상되는 균열의 증가 수에 대한 그래프를 각각 Fig. 4.4과 4.5와 같이 얻을 수 있다.

Fig. 4.4 및 4.5는 1000 노치당 파손의 누적 및 증분을 나타내는 그래프로써, 검출할 수 있는 피로 균열의 예상 발생 빈도를 나타내고 있는데 그 방법에 있어 서로 다르다.

세로 축은 검출할 수 있는 피로 균열의 예상 발생 수를 나타낸다. 예상 균열 발생 수의 소수점 값은 한 개의 균열이 생성될 수 있는 확률을 의미한다. 가로 축은 응력 범위를 갖는 파동 응력의 작용 횟수를 나타낸다.

그래프를 작성한 기준은 첫째, Table 3.4의 통계적 신뢰도 계산을 근거로 하였고, 둘째, 피로 상세들은 설계시 고려한 응력 범위 수준의 부하를 매번 받는 조건이고, 마지막으로 크레인 구조물의 설계 수명은 130만 사이클로 설계된 것으로 하였다.

Fig. 4.4는 파동 응력의 작용 사이클 수에 따라 1000 노치당 발생할 수 있는 예상 총 누적 균열 수를 나타내고 있다. 여기서, 1000개의 노치를 기준으로 한 것은 크레인에 있어서 심각한 피로 손상을 입을 수 있는 상세, 즉 노치의 수는 1000개를 넘지 않을 것이므로 적당한 숫자로 볼 수 있다.

하역 작업량이 설계 수명의 50%, 즉 65만 사이클 정도일 때는 검출 가능한 균열은 생성되지 않았지만, 피로 상세들은 Fig. 4.6의 영역 I과 II 내에서 성장하고 있는 상태일 것이다. 약 75만 사이클 사용

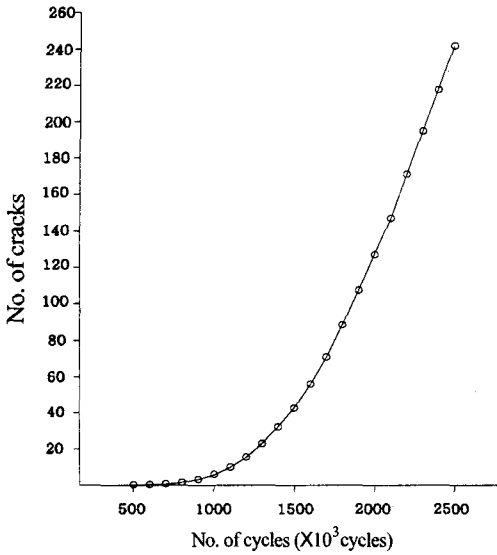


Fig. 4.4. Cumulative failures per 1000 notches

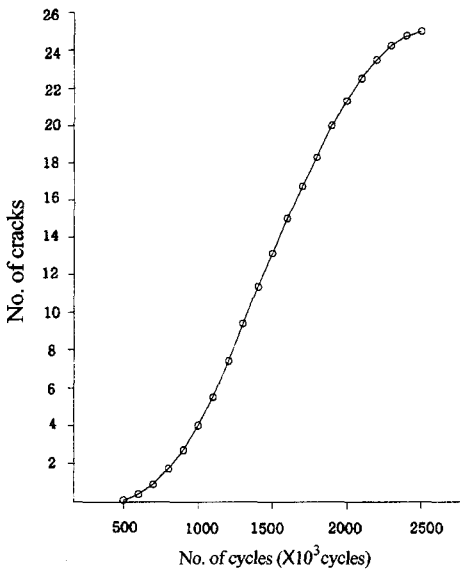
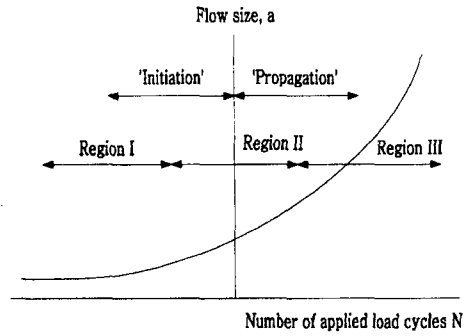


Fig. 4.5. Incremental failure per 1000 notches

했을 때 처음으로 1개의 검출 가능한 균열이 생성되며 크레인 가동 후부터 150만 사이클 사용한 현재까지 검출 가능한 예상 총 누적 균열 수는 약 43개이다. 실제 비파괴 검사 결과 붕괴 유발부재에 38개의 피로 균열이 검출되었는데 이에 상당하는 사용 사이클 수를 역으로 구해보면 약 145만 사이클이다. 이 결과로 볼 때 이론적인 피로 해석 및 통계적 신뢰도 평가에 의한 결과와 실험적인 비파괴 검



Region I : difficulty in defining flaw size (dislocation microcrack, porosity, etc)
 Region II : flaw can first be observed in an engineering sense
 Region III : crack growth can be observed

Fig. 4.6. Schematic showing relation between 'initiation' life and 'propagation' life⁵⁾

사 결과가 정확하지는 않지만 대체로 잘 부합하고 있는 것으로 판단된다.

향후 물동량이 현재까지의 연평균 물동량보다 약 10% 정도 증가할 것으로 예상하면 1년당 약 10만 사이클의 부하 시험이 예상된다.

Fig. 4.5는 가로 축의 각 사이클에서 매 10만 사이클이 더 작용할 경우 새로이 생성되는 균열의 예상 수량을 나타낸다. 150만 사이클에서 나타난 균열을 모두 수정 보수 작업을 한 뒤 10만 사이클, 즉 1년 후에 비파괴 검사를 한다면 약 13개, 2년 후에는 28개, 3년 후에는 45개, 4년 후에는 63개, 5년 후에는 83개, 10년 후에는 약 200개의 새로운 균열이 나타날 것이다.

현재 이 크레인은 피로 해석 결과로 볼 때 설계 수명을 약 15% 초과한 상태이고, 또한 비파괴 검사를 통하여 검출된 균열의 수에 의한 신뢰도에 있어서도 설계 수명의 신뢰도 0.977보다 저하된 0.962이다. 따라서 현재의 크레인의 상태는 적합한 유지 보수 작업을 하지 않고 사용하는 것은 위험한 사고를 초래할 수 있을 것이다. 현시점에서 피로에 의한 파괴를 방지하기 위해서는 크레인 구조물에 대한 적절한 정밀 점검 계획을 수립하는 것이 최선의 방법일 것이다.

현재까지 검출한 균열을 적합한 방법으로 수정 작업을 한 후 6개월마다 육안 검사를 실시하고 15만 사이클 사용, 즉 1.5년 후에 자본 탐상 검사를 포함한 정밀 안전 진단을 실시하는 것이 균열의 성장률과 증가 발생 빈도로 볼 때 바람직할 것으로 사료된다. 사용 시간이 증가함에 따라 균열의 수가 점차

증가할 것이다. 크레인의 사용 여부는 안전성 및 보수 비용과 관련이 있을 것이다. 1.5년 뒤에 정밀 비파괴 검사에서 검출된 균열의 수와 성장률에 따라 크레인의 안전성을 판단하고 비파괴 검사의 주기를 재조정하는 것이 바람직할 것이다.

앞에서 예측한 균열의 누적 및 증가 수는 설정한 하중 및 설계 주기 스펙트럼에 의한 설계 수명과 통계적 신뢰도 평가에서 얻은 수치이다. 그러므로 실제의 하중 및 주기 스펙트럼에 따라 오차가 발생할 수 있다.

Table 3.4에서 실제 작용한 응력이 설계 시 고려한 응력과 같고, 설계 수명의 사이클 수만큼 피로 누적 손상을 받은 상세의 신뢰도는 0.9772이다. 반면에 실제 응력이 설계 응력의 125%, 150% 및 200%가 작용했을 때 그 신뢰도는 각각 0.7486, 0.3372 및 0.0162이다. 즉, 설계 응력이 작용되었을 때 2.3%의 파괴 확률을 가지나 설계 응력의 125%, 150% 및 200%인 경우 25.1%, 66.3% 및 98.4%의 파괴 확률을 각각 가지게 된다.

설계 응력의 125%로 설계수명의 75%만 가동하였다면 그 신뢰도는 0.8925이고 파괴확률은 10.8%가 된다. 또한, 설계 응력의 150%로 설계수명의 50%만 가동하였다면 그 신뢰도는 0.8315이고 파괴 확률은 16.9%가 된다.

피로 누적 손상은 응력의 작용 회수에 선형적으로 비례하고 응력 범위의 크기에 통상 3승에 비례한다. 따라서 과부하의 사용은 작업량의 초과보다 더 큰 손상을 가져옴을 알 수 있고, 결국 크레인 구조물의 수명을 더욱 단축시킬 것이다.

5. 결 론

약 17년간 사용한 이중 링크 형식 수평 인입 집 크레인 구조물의 피로해석, 신뢰도 및 잔존 수명 평가에 대한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 검출된 균열의 수에 의한 붕괴 유발 부재(FCM)의 신뢰도 R은 0.962이고, 설계 수명의 신뢰도 0.977를 초과한 상태이다.

2) 피로 해석 결과로 볼 때 이 크레인의 현재까지 작업량은 설계수명을 약 15% 초과한 상태이다.

3) 현재 검출된 균열을 적합한 방법으로 보수 수정 작업을 한 시기부터 1년(약 10만 사이클 사용) 후에 약 13개, 2년 후에 28개, 3년 후에 45개, 4년 후에 63개, 5년 후에 약 83개, 10년 후에 약 200개의 새로운 균열이 생성될 것으로 예측된다.

4) 현시점에서 피로에 의한 파괴를 방지하기 위해서는 크레인 구조물에 대한 적절한 정밀 점검 계획을 강구하는 것이 최선의 방법일 것이다.

5) 크레인 구조물의 안전을 유지하기 위해 현재까지 검출한 균열들을 적합한 방법으로 수정 작업을 한 후 6개월마다 육안 검사를 실시해야 하고, 1.5년 후에 자분 탐상 검사를 포함한 정밀 안전 진단을 실시하는 것이 균열의 성장률과 증가 발생 빈도로 볼 때 바람직할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) BS5400 : Part10 : 1980 Steel, concrete and composite bridges, code of practice for fatigue, British Standards Institution.
- 2) Specification No. HD-S2129 city of long beach, California harbor department for crane procurement at pier marine terminal long beach, California, pp. 59 ~61, 2000.
- 3) G. Marquis and J. Solin, "Fatigue Design and Reliability," ESIS publication, p. 16, 1999.
- 4) British Standard, rules for the design of cranes BS2573: Part1, pp. 4~7, 1983.
- 5) John M. Barson and Stanley T. Rolfe, "Fracture & Fatigue Control in Structures," 2nd Ed. Prentice Hall, pp. 25, 65~97, 136, 1987.
- 6) Eliahu Zahavi with Vladimir Torbilo, "Fatigue Design," Life Expectancy of Machine Parts, CRC press, Inc. pp. 95~98, 1966.
- 7) Tada, H. Paris, P. C. and Irwin, G. E., "The Stress Analysis of Cracks Handbook," Del Research Corporation, Hellertown, Pa., 1973.
- 8) 이창훈, 임태진, 전영호 공역, "공업통계학," 사이텍 미디어, 1999.