

# RMQC의 피로설계

## - BS5400 Part10의 적용을 중심으로 -

### Fatigue Design of Rail Mounted Quayside Crane(RMQC)

허철원 · 문덕홍 · 강화중

C. W. Hur, D. H. Moon and H. W. Kang

#### 1. 서 언

부두 또는 선박의 하역장비로서 크레인의 역할은 매우 중요하고, 이러한 크레인은 컨테이너 크레인(Container crane), 갠트리 크레인(Gantry crane), 집 크레인(Jib crane) 등 여러 가지가 사용되고 있다.

이들 크레인의 용도는 주로 화물을 선박에서 부두의 야적장 또는 이송용 트럭으로, 그리고 그 역으로 운반하는데 쓰인다. 크레인이 작업 중에는 화물의 종류에 따라 다양한 이동하중이 크레인의 주요 구성부재에 반복적으로 작용한다. 이렇게 반복적인 부하를 받는 부재는 피로의 누적에 의한 손상, 균열의 발생 또는 피로균열의 성장으로 갑작스런 붕괴를 초래할 수도 있다. 피로균열은 통상 수년간 사용에 따른 피로누적손상으로 발생하고 정기검사에서도 발견되지 않을 수 있다.

컨테이너 크레인은 설계 제작시 ASTM(미국재료시험협회), AWS(미국용접협회), DIN(독일산업표준규격), BS(영국공업표준규격), JIS(일본산업표준규격), KS(한국산업표준규격) 등 각국의 많은 규격을 참고로 적용하고 있다.

이중 피로설계의 피로응력을 계산함에 있어서 BS2573과 JISB8821은 최대 최소의 응력 비(Stress ratio)를 사용하고 있는데 비하여, 도로교 및 철도교에 대한 영국 표준규격인 BS5400 Part10<sup>1)</sup>은 다양한 하중 스펙트럼에 대한 응력 이력(Stress history)을 사용하여, 구조물의 피로를 마이너의 가법(Miner's summation)<sup>2)</sup>을 사용하여 평가하는 방법으로 최근 설계 제작되는 크레인은 피로설계에 관한 이 규격을 많이 적용하고 있다.

따라서, 컨테이너 크레인인 RMQC의 피로설계에 관련하여 영국 표준규격인 BS5400 Part10을 중심으로 크레인에 적용되는 주요내용과 실제 적용에 관하여 간략하게 기술하고자한다.

그러나 BS5400 Part10은 도로교 및 철도교에 대

한 영국 표준 피로설계 규격이므로, 교량에만 적용되는 규격은 제외하고, 크레인에 적용하는 설계하중 스펙트럼들(Design load spectra)을 이용하며, 표준 용접상세에 관(tube)의 연결부 상세를 추가하고, 누적손상은 과부하상태나 휴지상태 등은 고려하지 않고 정상 운전 상태에서 만 검토하였다.

#### 2. 피로설계의 용어 및 손상계산

##### 2-1. 관련용어의 정의

###### (1) 피로(Fatigue)

한 번의 하중작용에 의하여 파손시키기에 불충분한(허용강도 이하의)응력들이 반복적으로 작용한다. 이로 인하여 발생하는 구조부의 점진적인 균열(Crack)에 의한 손상(Damage)

###### (2) 하중 발생>Loading event

크레인의 구조상에 설치된 레일위로 트롤리(Trolley, 컨테이너 박스의 운반 대차)의 이동

###### (3) 하중 스펙트럼(Load spectrum)

구조물에 작용하는 서로 다른 크기의 하중 발생(Loading event)의 상대적 빈도를 나타내는 도표작성

###### (4) 표준 하중 스펙트럼(Standard load spectrum)

BS의 이 부분에 적용한 하중 스펙트럼은 레일 위에서 트롤리에 의한 컨테이너의 실제 이동의 해석으로부터 유도

###### (5) 응력 이력(Stress history)

하나의 하중 발생 동안 한 위치에서 응력이 어떻게 변화하는가를 보여주는 기록

###### (6) 응력 주기(Stress cycle or cycle of stress)

트롤리의 이동 즉 하중 발생 동안, 구조물의 한 위치에서 발생하는 응력 변화의 주기

###### (7) 응력 변화량(Stress range)

한 용접점에서, 임의의 한 응력 주기 내에 응력의 최대 값과 최소 값의 대수적 차이

###### (8) 응력 스펙트럼(Stress spectrum)

하중 발생 동안에 서로 다른 크기를 갖는 모든 응력 변화량들의 발생 총수를 도표로 작성한 것.

(9) 설계스펙트럼(Design spectrum)

구조부의 피로평가에 사용되어지는 하중 스펙트럼에서 각종 하중 발생으로 인한 응력변화량의 총수를 도표화한 것.

(10) 상세 분류(Detail class)

피로저항의 정도를 나타내는 상세(Detail)에 대하여 주어진 등급으로 A, B, C, D, E, F, F2, G, S 또는 W로 분류된다.

(11) S-N 관계 또는 S-N curve

각 상세에 대하여 시험데이터에서 확률근거로 도출된 S-N(응력-주기)사이의 양적 관계

(12) 설계 S-N curve

파손될 개연성(확률)을 근거로 설계에 채용되는 영국표준의 S-N 관계

① 붕괴유발부재 (FCM): 파손확률 2.3% - 인장부재

② 비붕괴유발부재(NFCM): 파손확률 16% - 압축부재

(13)설계수명(Design life)

허용된 파손 확률을 가지고 안전하게 유지될 수 있는 기간

(14) 누적손상은 손상의 합계로

$$L = \sum \{(f r_i)^m \cdot n_i\}$$

여기서,  $L$ : 작용된 누적손상

$f r_i$ : 시방서에서 규정한 응력스펙트럼에 대하여 저수장법(부록 1) 또는 비흐름법(부록 2)을 이용하여 계산한  $i$ 번째 응력변화량

$n_i$ : 규정된 구조물 수명내에서  $f r_i$ 의 발생 횟수

$m$ : 상세등급(Detail class)에 관련된 승수

허용누적손상 ( $K_j$ )는 상세등급 및 최대파손 개연성에 관련된 값으로 실험에 의해서 상세별로 구한 S-N 커브에 의해서 산정함.

$K_1$ : 비붕괴유발부재(NFCM)에 대한 허용누적손상

$K_2$ : 붕괴유발부재(FCM)에 대한 허용누적손상

여기서, 붕괴유발부재(Fracture critical members)란 파손으로 인하여 구조물 전체의 붕괴가 예상되는 인장부재 또는 인장구성 부재이고 여기서 인장부재들은 인장응력을 받는 강성부재들도 포함된다.

2-2. Pamgren -Miner 법칙

영국규격인 BS5400 Part10(1980)은 피로현상에 의한 누적손상법으로 Pamgren-Miner 법칙을 사용

하고 있고, 이 법칙은 다음과 같다.

피로에 의한 손상의 누적은 피로균열의 성장이전까지 고려하고, 일정 진폭의 피로하중시험에서  $N$ 회의 피로수명을 갖는 응력수준에서 1회의 반복하중에 의한 손상  $D$ 는

$$D = 1/N$$

$n$ 회의 하중이 가해진 경우 손상은

$$nD = n/N$$

여기서  $n/N$ 은 사이클 비이고, 임의의 응력 수준에서 작용 사이클 수와 파손에 이르는 총 사이클 수의 비의 합이 다음과 같으면, 파손이 예상된다.

$$\sum_i (n_i/N)_i \geq 1.0 ; i = \text{일정 진폭의 하중 수}$$

2-3. 마이너의 가법(Miner's summation)

Pamgren-Miner법칙에 근거한 누적손상가법(Cumulative damage summation)으로 누적손상(Cumulative damage,  $L$ )과 허용누적손상(Allowable Cumulative damage,  $K_j$ )를 구하여 그 비( $L/K_j$ )가 1.0과 같은 경우 파손(Failure) 된다.

3. 피로거동에 영향을 미치는 요소들

(1) 연결부에서 구조물 구성요소들의 국부적 구속에 의한 2차 변형 및 응력 발생

(2) 모재와 용접두께를 증가시켜 작용응력을 낮출수록 피로수명은 증가

(3) 최상의 연결부 구성

① 편심이 없는 연결부

② 자유 끝단 가까이에 용접을 피함

(4) 구멍, 개구 및 오목한 구석(Corner)에서의 응력집중은 성능저하의 원인

(5) 크랙의 전파를 일으키고 따라서 파손에 도달하는 응력반복수를 감소시킬 수 있는 응력들의 크기와 성질에 관련된 요소

① 용접 및 굽힘(Bending) 등에 의한 잔류응력의 존재

② 용접부와 인접한 모재에 있어 고유결점(Lamellar tear 등), 표면결점

③ 응력의 흐름을 방해함으로 인한 또 다른 응력 상승

④ 상기의 사항들은 부록 3(BS5400의 part10 Table17)에서 주어진 상세등급 분류에서 고려

## 4. 상세의 등급분류

### 4-1. 일반

(1) 변동 응력을 받는 구조상세의 각 부분은 가능한 한 부록 3에서 주어진 기준과 일치하는 특별한 등급을 가져야한다.

(2) 상세의 각부의 등급분류는 다음 사항들에 달려있다.

- ① 상세에 관련한 변동 응력의 방향
  - 균열의 전파는 응력작용 방향의 직각방향으로 발생함
- ② 상세에서 균열시작이 발생 가능성이 있는 위치
- ③ 상세의 기하학적 배치 및 크기
- ④ 제작과 검사의 방법들

(3) 용접된 상세에 있어 잠재적 피로균열이 발생할 수 있는 위치가 존재하고 다음과 같다.

- ① 아래에 인접하여 결합된 부분의 모재(Parent metal)
  - 용접의 끝단
  - 용접의 토(Toe)
  - 용접방향이 바뀌는 부분
- ② 용접 목부
  - 부재의 끝단에 필렛용접(Fillet welds)
  - 부분 개선 받 용접(Partial penetration butt weld)에 의해 취부된 부재
  - 전단연결재(교량의 stud bolt 등)들을 갖는 플랜지(Flange)
  - 상기의 각 경우에 균열의 시작은 모재에서 발생할 수도 있고, 용접목에서 발생할 수도 있는데, 두개의 가능성 모두 적당한 상세 등급 분류와 응력 변화량을 고려해서 검토해야한다.(부록 3 참조)

### 4-2. 상세들에 대한 등급분류

(1) 부록 3의 상세 등급은 상세들이 3개의 기본 형태로 분류되어있다.

- ① 용접이 없는 상세
  - ② 부재의 표면위에 용접된 상세
  - ③ 부재의 끝에서 용접된 상세
- (2) 부록 3에서 각각 등급분류된 상세는
- ① 형태(Type)번호가 매겨져 있고, 설명되어져있다.
  - ② 여러 가지 관련된 기준들이 주어졌고
  - ③ 그림들은 기하학적인 특징과 각 상세의 등급을 결정하는 잠재적 균열의 위치를 나타내고

④ 적당한 상세등급을 초기 선택하는데 도움을 준다.

(3) 만약 하나의 상세가 Table 17의 형태(Type) 번호에 적합한 도표화된 기준을 따른다면 하나의 개별등급으로 지정되어진다.

(4) 용접 후처리

① 기계가공(machining) 및 그라인딩(grinding) 등과 같은 용접 후처리에 의해서 용접상세의 성능이 개선될 수 있다.

② 용접부를 그라인딩하였을 때 허용응력 변화량은 30%정도 증가한다.

미국용접협회 실험에 근거하면 계수 → 1.3

③ 마이너의 가법에서 허용누적손상은 응력변화량의  $m$ 승( $m=3$ )에 비례한다. 즉, 허용누적손상의 증가효과는  $1.3^3 = 2.2$ 배가 된다.

$$L = \sum_i ((Fr_i)^m \cdot n_i)$$

### 4-3. 제작기량과 검사(Workmanship and inspection)

(1) 일반사항

① 상세의 분류등급이 특별한 제작 또는 검사 요구조건에 의존되는 경우, 제작과 검사에 대한 필수적인 기준들은 도면상에 지시되어야 한다.

② 더 나아가  $D$  또는 더 좋은 등급으로 분류된 어떠한 임계상세(Critical detail)에 대한 등급과 설명이 도면상에 지적되어야 한다.

(2) 유해한 영향들

아래의 존재들로 인하여 본래의 등급보다 낮은 성능의 상세로 될 수 있다.

① 튀겨진 용접(Weld spatter)

② 뜻밖의 아크 스트라이크(Accidental arc strikes)

③ 인증되지 않는 부속물들(Unauthorized attachments)

④ 부식 막공(Corrosion pitting)

## 5. BS5400 Part10에 의한 크레인의 피로설계

### 5-1. 일반사항

(1) BS5400 part10은 도로교 및 철도교에 대한 영국표준 피로설계 규정

(2) 교량에만 적용되는 규정은 제외하고 크레인에 적용되는 설계하중 스펙트럼(Design load spectra)들을 이용

(3) BS5400 part10의 표준용접상세에 관(tube)의 연결부 상세를 추가

(4) 누적손상은 정상 운전 상태에서만 검토되고, 과부하상태(Snag하중, 충돌 하중 등), 휴지상태(폭풍시 풍하중) 등은 고려하지 않음.

5-2. 피로하중 및 하중조합

(1) 피로하중

① TL: 트롤리하중(Trolley load)

② LS: 권상장치 하중(Lifting system load)

= 헤드블록 + 스프레더 (Head block+Spreader)

③ LL: 권상하중(Lifted load)

④ LLF: 피로권상하중(Fatigue lifted load)

⑤ IMP: 충격하중(Impact load)

= 0.1\*TL+0.25\*LS+0.25\*LLF

⑥ LATT: 트롤리 주행 관성력(Trolley inertia force)

트롤리 주행방향: 0.1(TL+LS+LL)

트롤리 주행 직각방향: 0.025(TL+LS+LL)

(2) 피로하중 조합= TL+LS+LLF+IMP+LATT

사하중(Dead load), 풍하중(Wind load), 갠트리 주행관성력(Gantry traveling inertia force)등은 고려하지 않는다. 하중 스펙트럼 다음과 같다.

① TL+LS+1.00LL → 15%

② TL+LS+0.66LL → 15%

③ TL+LS+0.33LL → 20%

④ TL+LS → 50%

상기 네 가지 경우를 조합한 하중은 다음과 같으며 충격하중과 피로권상하중은 피로 권상하중에 고려되었다.

TL+LS+LATT+0.75LL

(3) 설계주기 스펙트럼(Design cycle spectrum)

Table 1과 Fig. 1에 설계주기 스펙트럼을 나타내었다.

① 1회 이동(one move)

부두에서 컨테이너를 들고 트롤리로 주행한 다음 배위에 배치시킨다. 또는 그 역의 과정;

\* 컨테이너 장착(부두) → 트롤리 주행 → 배에 배치

② 단일 주기(single cycle)

부두에서 컨테이너를 들고 트롤리로 주행한 다음 배에 컨테이너를 배치시키고, 권상장치만 부두로 돌아와서 다른 컨테이너를 들기 위해서 권상시스템을 컨테이너에 장착시키는 과정 또는 그 역의 과정;

\* 컨테이너 장착(부두) → 트롤리 주행 → 배에 배치 → 권상장치 부두로 복귀 → 컨테이너 장착 준비

여기서, 단일 주기는 1회 이동이 존재함.

③ 2역 주기(Double cycle)

부두에서 컨테이너를 들고 트롤리로 주행하여 배에 컨테이너를 배치한 다음, 옆의 컨테이너를 들고 부두로 주행하여 사시 위에 놓고 부두에서 다른 컨테이너를 장착할 준비하는 과정 또는 그 역의 과정;

Table 1 Design cycle spectrum

CYCLE SYMBOL	CYCLES	MOVES	RANGE(m)	
			OUTBOARD OF W / S RAIL	INBOARD OF W / S RAIL
A	1.1×10 <sup>5</sup>	1.1×10 <sup>5</sup>	10.0	14.0
B	3.0×10 <sup>5</sup>	3.0×10 <sup>5</sup>	27.0	14.0
C	3.0×10 <sup>5</sup>	3.0×10 <sup>5</sup>	44.0	FULL BACKREACH
D	3.1×10 <sup>5</sup>	3.1×10 <sup>5</sup>	FULL OUTREACH	FULL BACKREACH
E	4.5×10 <sup>5</sup>	9.0×10 <sup>5</sup>	10.0	14.0
F	3.7×10 <sup>5</sup>	7.4×10 <sup>5</sup>	27.0	14.0
G	3.7×10 <sup>5</sup>	7.4×10 <sup>5</sup>	44.0	14.0
H	3.0×10 <sup>5</sup>	6.0×10 <sup>5</sup>	FULL OUTREACH	14.0
TOTAL MOVES		40.0×10 <sup>5</sup>		

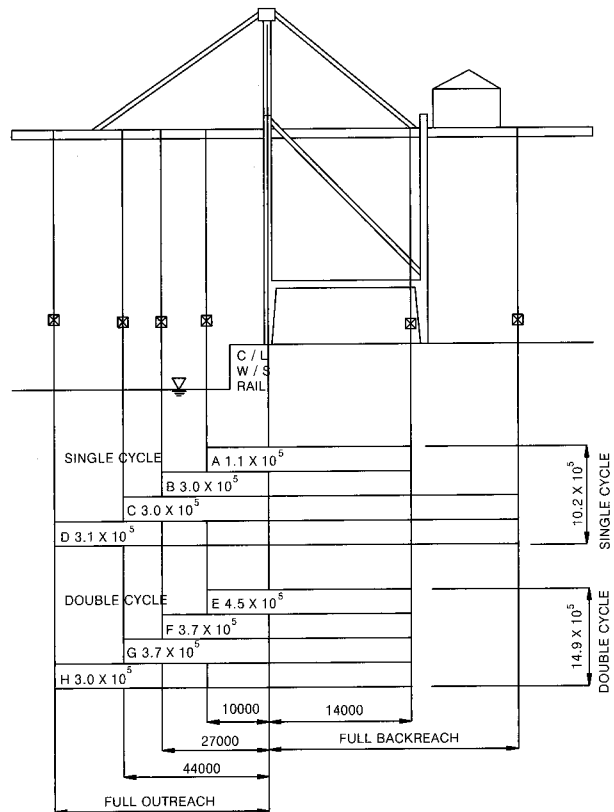


Fig. 1 Design of cycle spectrum

\* 컨테이너 장착(부두) → 트롤리 주행 → 배에 배치 → 컨테이너장착(배) → 트롤리 부두로 복귀 → 야시에 컨테이너 착탈 → 컨테이너 장착 준비 여기서 2역 주기는 2회 이동이 존재함.

(4) 전형적인 응력주기 스펙트럼

Fig. 2는 단일 주기의 응력스펙트럼을 나타내고, Table 2는 작업과정과 작용응력들을 나타낸 것이다. Fig. 3과 Table 3는 2역주기에 대한 것이다.

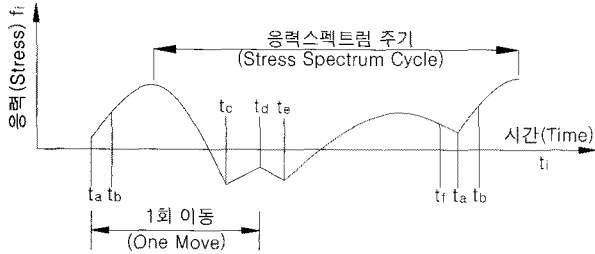


Fig. 2 Stress spectrum of single cycle

Table 2 Working stresses of single cycle

시간	작업과정 및 작용하중
ta	권상장치가 컨테이너를 장착;
	트롤리 하중에 의한 응력만이 작용
tb에서 tc까지	권상장치와 컨테이너를 권상;
	(트롤리 + 권상장치 + 컨테이너 + 충격) 하중에 의한 응력이 작용
tc에서 td까지	트롤리 주행;
	(트롤리 + 권상장치 + 컨테이너 + 주행관성) 하중에 의한 응력이 작용
td에서 te까지	권상장치와 컨테이너가 권하 및 야시에 장착;
	트롤리 하중에 의한 응력만이 작용
te에서 ti까지	권상장치 권상;
	(트롤리 + 권상장치 + 충격) 하중에 의한 응력이 작용
ti에서 ta까지	트롤리가 되돌아옴;
	(트롤리 + 권상장치 + 주행관성) 하중에 의한 응력이 작용
ta에서 tb까지	권상장치가 컨테이너를 장착;
	트롤리 하중에 의한 응력만이 작용

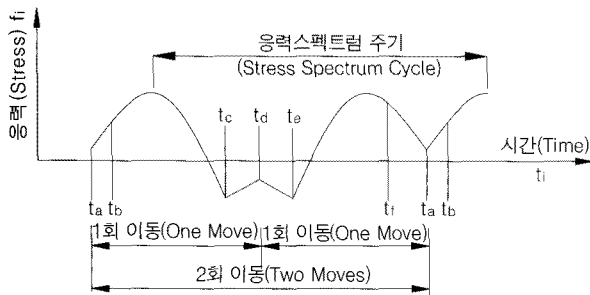


Fig. 3 Stress spectrum of double cycle

Table 3 Working stresses of double cycle

시간	작업과정 및 작용하중
ta	권상장치가 컨테이너를 장착;
	트롤리 하중에 의한 응력만이 작용
tb에서 tc까지	권상장치와 컨테이너를 권상;
	(트롤리 + 권상장치 + 컨테이너 + 충격) 하중에 의한 응력이 작용
tc에서 td까지	트롤리 주행;
	(트롤리 + 권상장치 + 컨테이너 + 주행관성) 하중에 의한 응력이 작용
td에서 te까지	권상장치와 컨테이너가 권하 및 야시에 장착;
	트롤리 하중에 의한 응력만이 작용
te에서 ti까지	권상장치 및 컨테이너를 권상;
	(트롤리 + 권상장치 + 컨테이너 + 충격) 하중에 의한 응력이 작용
ti에서 ta까지	트롤리가 되돌아옴;
	(트롤리 + 권상장치 + 컨테이너 + 주행관성) 하중에 의한 응력이 작용
ta에서 tb까지	권상장치가 컨테이너를 권하 및 야시에 장착;
	트롤리 하중에 의한 응력만이 작용

(5) 피로상세들의 신뢰도

Table 4 Reliability of fatigue details

상세 분류	L / K2의 비			
	1.0	0.8	0.6	0.4
W	0.977	0.994	0.999	1.000
G	0.977	0.994	0.999	1.000
F2	0.977	0.992	0.999	1.000
F	0.977	0.993	0.999	1.000
E	0.977	0.991	0.998	1.000
D	0.977	0.993	0.999	1.000
C	0.977	0.993	0.999	1.000
B	0.977	0.994	0.999	1.000
T-X	0.977	0.993	0.999	1.000

(6) 두꺼운 판의 허용누적손상

판의 두께가 25mm 이상이고, 누적 손상 량의 계산에 있어 승수m이 4이하인 상세들의 경우, 붕괴유발부재(FCM) 및 비붕괴유발부재(NFCM)의 허용누적손상은 아래의 식에 의하여 결정된다.

$$K_{1R} = K_1 \times (25/t)^{m/4}$$

$$K_{2R} = K_2 \times (25/t)^{m/4}$$

여기서, K1=비붕괴유발 부재의 허용누적손상

K2=붕괴유발부재의 허용누적손상

t=판의 두께(mm)

① 예제1: 분류 F2상세인 50mm판의 허용누적손상( $K_{2R}$ )은

$$K_{2R} = K_2 \times (25/50)^{3/4} = 0.59K_2$$

② 예제2: 분류 F2 상세인 50mm 판의 허용응력 변화량( $FrR$ )은

$$FrR = (0.59)^{1/3} \cdot Fr = 0.84Fr$$

(7) 피로 누적손상 계산

① 일반사항

· 붕괴유발부재(FCMS)의 피로상세등급(Fatigue detail class)은 통상 G등급 이하의 사용하지 않아야 하고 F2이상의 등급을 사용하여야 한다.

· 단면이 변화하는 곳에서는 완만한 기울기(1/2.5~1/4.0)를 유지하여야 한다.

· 전형적인 몇 가지 허용할 수 없는 상세들과 그들의 개선안을 부록 4에 표시 하였다.

② 링크(link) 등으로 구성된 일련(series)의 붕괴 유발부재들

· 합성 설계신뢰도가 최소 0.977이상이어야 한다.

· 두개 이상의 링크로 구성된 부재들의 합성 신뢰도의 계산은 각 링크 신뢰도의 곱으로 한다.

· 예를 들면 세 개의 링크 신뢰도가 각각 0.977, 0.994, 0.999라면 이 링크들의 합성 신뢰도는  $0.977 \times 0.994 \times 0.999 = 0.970$

· 시리즈로 구성된 부재의 예는 Fig. 4와 같다. 구멍에서의 등급 F는 평균응력으로 설정될 수도 있고 또한 응력 집중계수를 이용하여 등급이 해석 될 수도 있다.

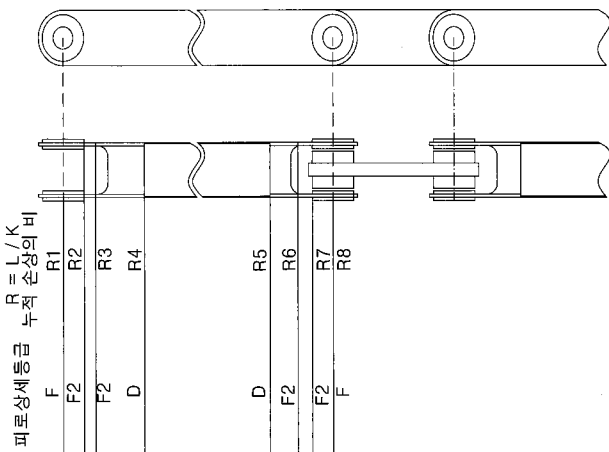


Fig. 4 Member to be composed of series

(8) 피로누적손상의 계산 흐름

① 지정된 트롤리의 모든 위치에 따라 피로의 영향을 받는 각 위치에 작용하는 응력을 알아낸다.

② 변동응력(Fluctuating stress)과 변동의 주기는 응력스펙트럼으로부터 결정한다.

③ 응력주기(Stress cycle)값과 계산은 저수장법(Reservoir method)(부록 1) 또는 비 흐름법(Rain flow method)(부록 2)에 의하여 결정된다.

④ 각 피로위험점(Fatigue critical point)에 작용된 누적손상(Applied cumulative damage)은 마이너의 법칙(Miner's rule)을 이용하여 계산한다.

⑤ 각 피로위험위치의 상세등급을 결정한다.

⑥ 계산된 누적손상  $L$ 값과 허용누적손상  $K$ 값의 비  $R$ 를 계산하여 작용된 피로손상의 정도를 계산한다.(부록 5)

⑦  $R$ 이 1.0보다 클 경우 설계수명내에 피로파손이 발생함을 의미한다.

⑧ 여러 부재로 연결된 링크요소의 피로평가는 존재하는 각 상세들에 대한  $R$ 값과 각 신뢰도를 구한 후 합성신뢰도를 계산한다. 이 합성 신뢰도가 0.977이상인가를 평가한다.( $R$ 값에 따른 각 상세들의 신뢰도는 “피로상세 신뢰도” 도표를 이용하고 표시되지 않은 계산된  $R$ 값에 해당하는 신뢰도는 선형보간법으로 계산할 것)

## 6. 결 언

RMQC의 피로설계에 있어, BS5400 Part 10의 적용에 중점을 두어 피로하중 및 설계주기스펙트럼의 계산, 피로누적손상에 의한 설계수명평가, 용접상세 등에 대하여 소개하였다.

실제 RMQC의 작업상태를 보면, 선박에 배치된 컨테이너 박스의 위치가 다르고, 컨테이너의 내용물의 다양성에 따라 하중의 크기가 각각 다르다. 이것과 같이 다양한 이동거리, 하중의 크기 및 주기들이 존재하는 특성을 가진 RMQC의 피로설계는 이런 특성을 감안하지 못하는 응력비법을 적용한 BS2573 및 JISB8821보다 피로누적손상법을 적용한 BS5400 Part 10이 보다 합리적인 것으로 판단된다.

### 부록 1: 저수장법에 의한 주기계산(Cycle counting)

1. 일반사항

(1) 주기계산의 목적은 불규칙한 일련의 변동응력들을 단순화된 응력변화량으로 도표 작성하는데 있다.

(2) 개개의 하중발생(Individual loading events)에서 나타나는 짧은 응력이력(Short stress history)들을 취급하는 데 적합하다.

(3) 개개의 응력이력들의 그래프출력을 저수지(Reservoir)의 단면으로 생각한다.

(4) 각 저점(Each low point)으로부터 연속적으로 배수시키고, 각 배수과정에 대한 1주기(One cycle)를 결정한다.

## 2. 방법

(1) 설계주기스펙트럼에 따라 하나의 하중발생(One loading event)에 의한 응력이력(Stress history)에서 정점과 하점의 값을 얻는다.

(2) 이 하중발생에 의한 두개의 연속적인 응력이력을 스케치한다.

(3) 정점과 하점응력의 계산 값들을 직선으로 연결한다.

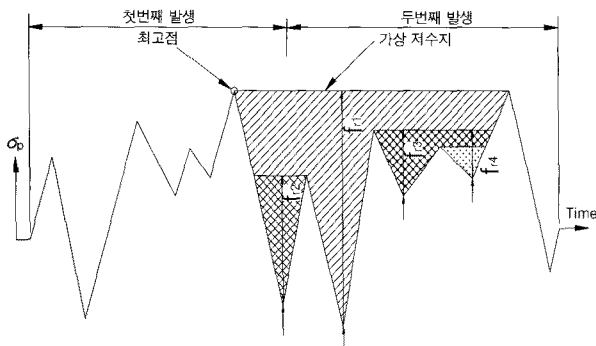


Fig. 5 Cycle counting by Reservoir method

(4) 각 하중발생에서 최대정점을 표시한다.

(5) 하나의 응력이력에서 두개 이상의 똑같은 최대정점이 존재하면 각 하중발생에서 첫 번째 최대정점만 표시한다.

(6) 두개의 표시된 최대정점을 연결하고 이 선 아래로 그려지는 그래프 부분만 고려한다. 이것은 저수지 전체의 단면으로 볼 수 있다.

(7) Fig. 5의 가장 낮은 점부터 저수지의 물을 빼고, 빠지지 않는 물은 그대로 둔다. 만약 2개 이상의 같은 최저점이 존재하면 그중 하나를 통하여 먼저 배수시킨다.

(8) 가장 큰 수직 배수고로써  $fr_1$ 의 응력변화량을 가지는 하나의 주기(cycle)를 기록한다.

(9) 각 남은 물에 대하여 전체 저수지의 물을 비울 때까지 (7)과 (8)의 과정을 계속 반복한다.

(10) 응력변화량의 크기  $fr_1$ ,  $fr_2$  등의 내림차순으

로 개개의 모든 응력변화량을 내포하는 최종기록을 열거한다. 여기서, 두개이상의 똑같은 응력변화량이 기록되면 각각 그것을 분리하여 기록한다.

## 부록 2: 비흐름법(Rain flow method)에 의한 주기계산(cycle counting)

(1) 가장 큰 하중의 산에서 출발할 수 있도록 응력이력을 정리한다.

(2) 가장 큰 응력의 산에서 시작하여 반환점까지 아래로 내려간다.

(3) 반환점에서 아래로 내려가는 다음 범위까지 수평으로 이동한다.

(4) 아래로 내려가는 범위가 없으면 다음 반환점까지 위로 올라간다.

(5) 아래로 내려오는 과정과 똑같이 위로 가면서 반복하고 이 단계를 끝까지 계속한다.

(6) 이미 앞의 과정들에서 사용하지 않은 모든 범위들이나 범위의 일부분에 대하여 앞의 과정을 반복한다.

① 최대의 산이 가장 낮은 골보다 절대값이 크다는 가정하에 설명하였으며, 그렇지 않다면 가장 낮은 골에서 시작하여 위로 가야한다.

② Fig. 6 (a)에 수평으로 잇는 점선이 보이며 나머지 부분이 Fig. 6 (b)이다. 이와 같은 방법으로 계산한 결과가 아래의 주기들이다.

25/-14, 14/5, 16/-12, 7/2

③ 비흐름법은 마쭈이시와 엔도가 처음 사용하였는데 그들은 반환점에서 그 다음 범위로 가는 선을 90도 회전시켜 보면 응력이력의 산과 골이 지붕으로 된 층층탑으로 비가 흘러내리는 것처럼 보였기 때문에 “비흐름법”이라고 명명함.

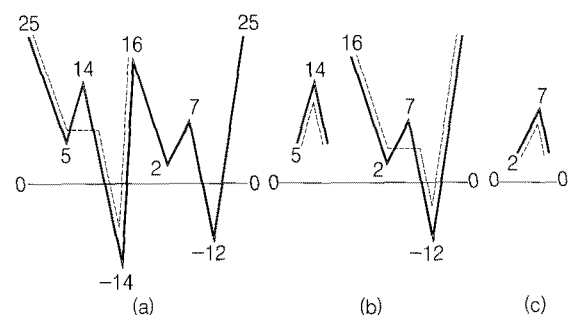


Fig. 6 Cycle counting by rain flow method

부록 3: 상세 등급

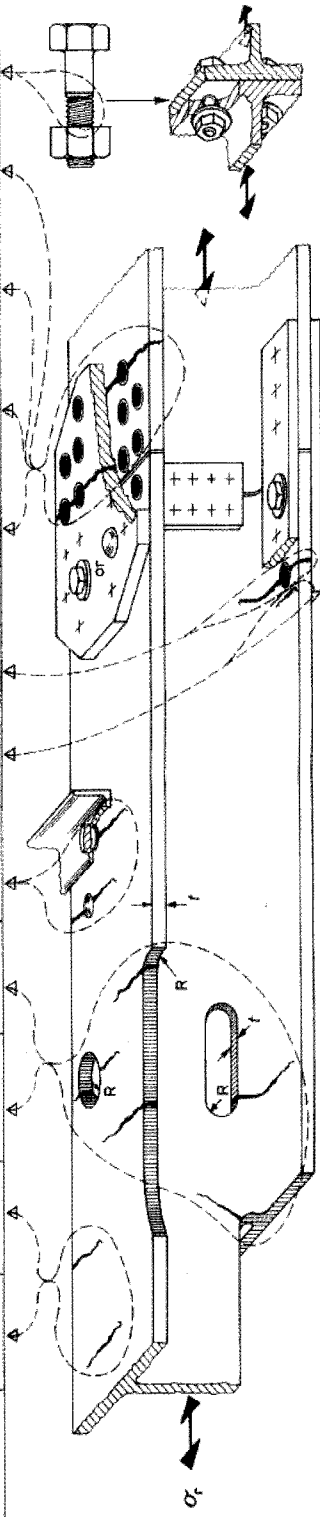
① 용접이 없는 상세

BS 5400 : Part 10 : 1980

Table 17. Classification of details

(a) Non-welded details

Product form	Rolled steel structural plates and sections		Threaded fasteners									
Location of potential crack initiation	Away from all welding											
	Away from all structural connections											
Dimensional requirements	On a member of constant or smoothly varying cross section	At any external or internal edge	At a small hole (may contain bolt for minor fixtures)	At a lapped or spliced connection fastened with: high strength friction grip bolts Away from At a hole rivets precision bolts black bolts								
	No holes	Any aperture or re-entrant corner radius $\geq r$	Hole diameter $\leq 3t$	In a butt joint, fastener axis parallel to or in threaded root								
Manufacturing requirements (see also Part 6)	No re-entrant corners	Any frame cut edges subsequently machined or ground smooth	Hole drilled or reamed									
	All surfaces fully machined and polished	Any frame cut edges subsequently machined or ground smooth	Tighten to BS 4604 : Parts 1, 2 and 3	Bolts to BS 3692 or BS 4388 or BS 3643 : Part 2								
Special inspection requirements	No flame cutting	Any cutting of edges by planing or machine flame cutting with controlled procedure										
Design stress area		Net cross section	Gross	Core area (minor diameter)								
		Use stress concentration factor for apertures or re-entrant corners	Designed for no slip at ultimate load (see Part 3)	See 7.5								
Type number	1.1	1.2	1.3*	1.4*	1.5*	1.6*	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12*
Class	A <sup>†</sup>	B <sup>†</sup>	B <sup>†</sup>	C <sup>†</sup>	D <sup>†</sup>	C <sup>†</sup>	C <sup>†</sup>	D <sup>†</sup>	D <sup>†</sup>	E <sup>†</sup>	G <sup>†</sup>	B <sup>†</sup>



Key. Typical crack location — Cut edge — Fastener • Direction of stress fluctuation ↔

\*See H.2.3.  
†Important features that change significantly from one type to another.  
‡Classifications that should be used with caution.

NOTE: Tables 17(a), (b) and (c) are also available separately as a set of wall charts (BS 5400 : Part 10C). Price Gr 6 plus VAT.

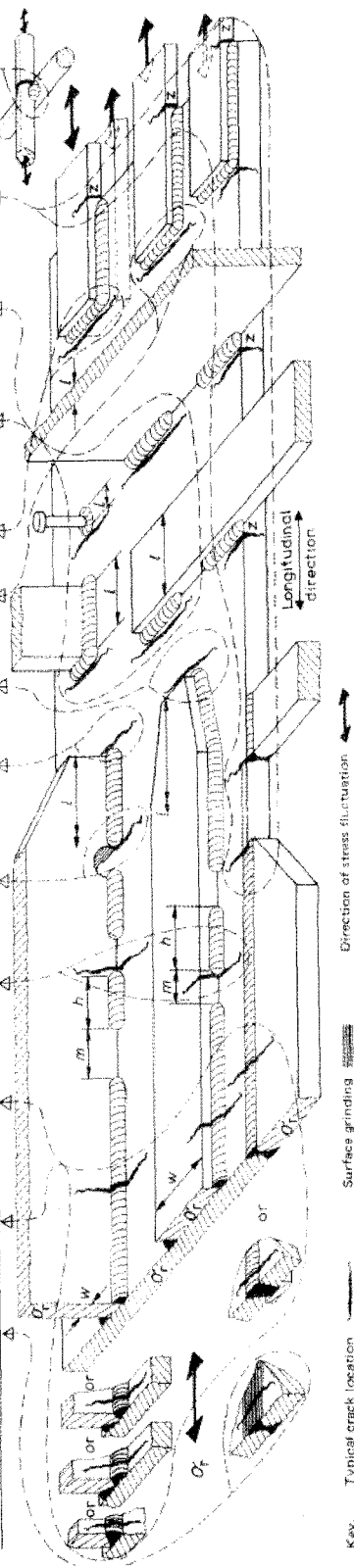


② 부재의 표면의 용접된 상세

BS 5400 : Part 10 : 1980

(b) Welded details on surface of member

Product form		Rolled steel structural plates, sections and built-up members				Reinforcing steel in concrete						
Location of potential crack initiation	At a long welded attachment (in direction of $\sigma_x$ )		At a short welded attachment		At any attachment							
	Away from weld end	At an intermediate gap in a longitudinal weld	At a scope hole	At a weld end	At a short welded attachment	At any attachment						
Dimensional requirements	Weld toe within 10 mm of member edge	Weld toe not less than 10 mm from member edge	Wide attachment On one side only	Wide attachment On both sides symmetrically	Close to edge of member	Close to edge of member						
	Butt weld full penetration	Fillet weld Intermittent $\frac{w}{h} \leq 2.5$	Weld length (parallel to $\sigma_x$ ) $l > 150$ mm	Weld length (parallel to $\sigma_x$ ) $l > 150$ mm	Weld toe within 10 mm of member edge	Weld toe within 10 mm of member edge						
Manufacturing requirements (see also Part 8)	Grind smooth any undercut on member edges	Grind smooth any undercut on member edges	Attachment width $w \leq 50$ mm	Attachment width $w \leq 50$ mm	Grind any undercut	Grind any undercut						
	Drill flush reinforcement	Automatic reinforcement no stop-starts			Avoid weld returns round laps (see 2f)	Resistances or make plus grind smooth undercut						
Special inspection requirements	Proved free of all significant defects	Proved free of all significant defects										
Design stress area	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation										
Special design stress parameter					$r < 0.5 \sigma$	$r > 0.5 \sigma$						
Type number	2.1*	2.2*	2.3	2.4*	2.5	2.6	2.7*	2.8*	2.9	2.10*	2.11*	2.12
Class	B†	C†	D†	E†	F†	F2†	G†	F2†	F†	E†	G†	D†



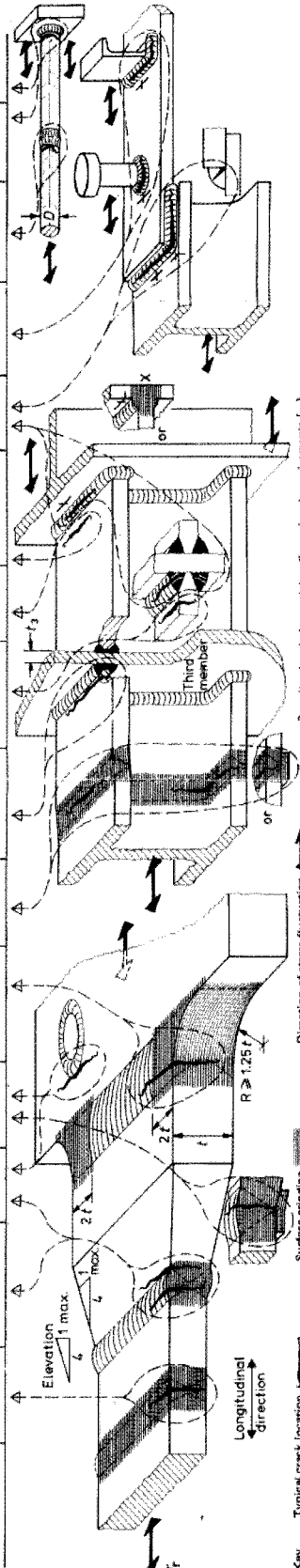
NOTE: Weld throat cracks are Type 3 (see table 17(c)).  
 \*See H.3.3.  
 †Important features that change significantly from one type to another.  
 ‡Classifications that should be used with caution.

③ 부재의 끝에서 용접된 상세

BS 5400 : Part 10 : 1980

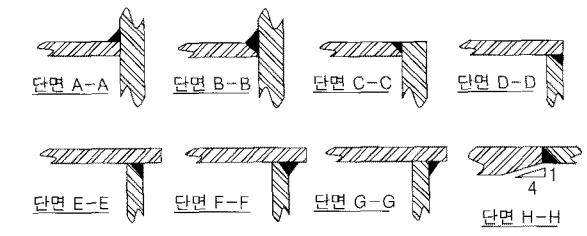
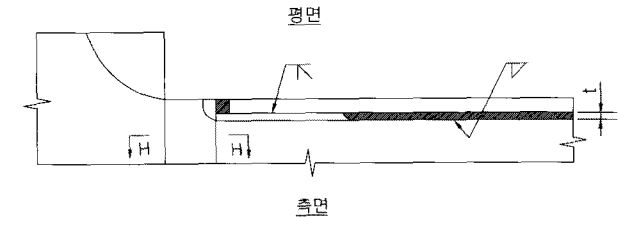
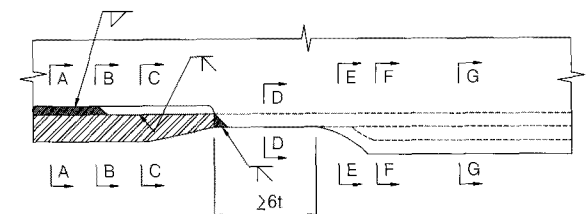
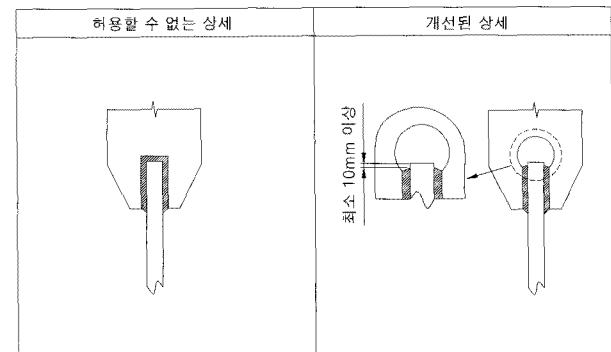
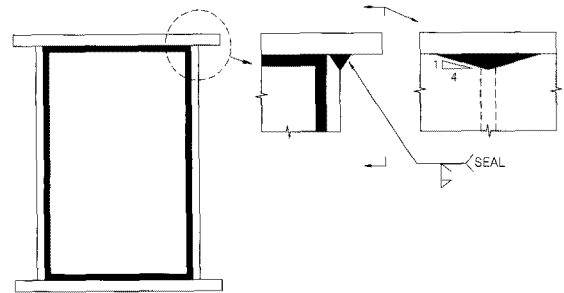
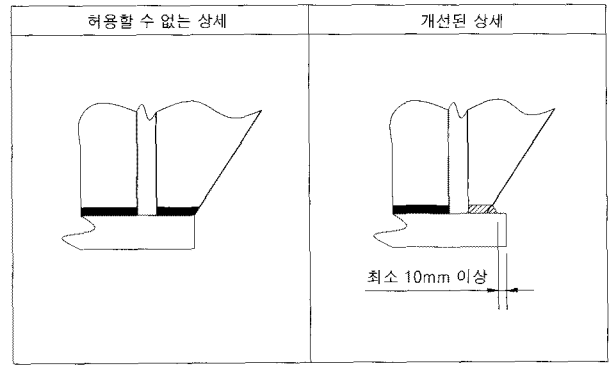
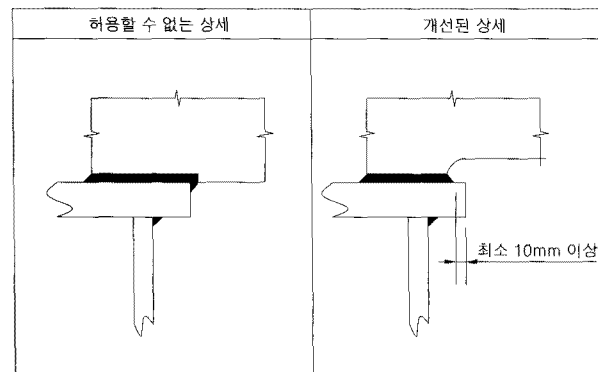
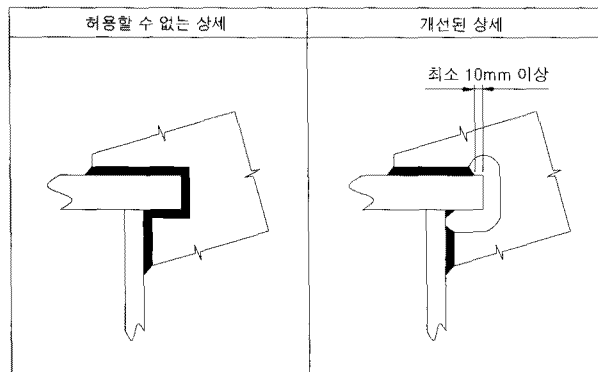
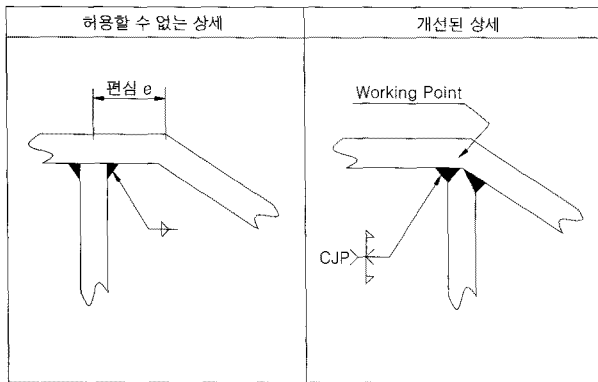
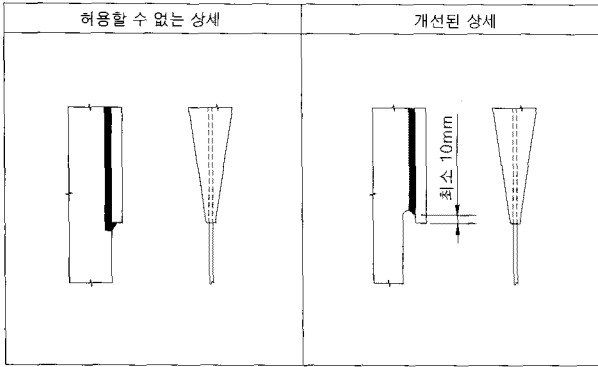
(c) Welded details at end connections of member

Product form	Rolled steel plates only		Rolled steel sections of built-up members (including plates)		Shear connectors in concrete	Rolled steel reinforcing bars in concrete
	At transverse weld joining two single plates end to end	Longitudinal axes in line	Two members end to end with third member transverse through joint	In weld throat		
Location of potential crack initiation	At transverse weld joining two single plates end to end	Longitudinal axes in line	Two members end to end with third member transverse through joint	In weld throat	Between encased connector and any member	Between ends of bars and surface of plate
	At transverse weld joining two single plates end to end	Longitudinal axes in line	Two members end to end with third member transverse through joint	In weld throat	Between encased connector and any member	Between ends of bars and surface of plate
Dimensional requirements	Full penetration butt weld	Full penetration butt weld	Partial penetration butt weld	Partial penetration butt or fillet weld	Full penetration butt weld	Full penetration butt weld
	Equal width	Equal thickness	Similar profile	Similar profile	Full penetration butt weld	Full penetration butt weld
Manufacturing requirements (see also Part 6)	Any width change $\leq 1$ in 4 slope	Any thickness change $\leq 1$ in 4 slope	Build-up corners to radius $\geq 1.25t$	Misalignment slope $\leq 1$ in 4	Partial penetration butt or fillet weld	Flillet weld leg size $\geq 0.4D$
	Downhand shop welds, not submerged arc	On permanent backing strip	Grind corners within $2t$	Grind corners within $2t$	Partial penetration butt or fillet weld	Plus reinforcing fillets with leg size $\geq 0.25D$
Special inspection requirements	Temporary run-on and run-off plates used, weld and ground smooth	Grind smooth any undercut particularly on external corner	Grind smooth any undercut particularly on external corner	Grind smooth any undercut	Check plate for lamellar defects and tears	Check plate for lamellar defects and tears
	Grind smooth any undercut particularly on external corner	Grind smooth any undercut particularly on external corner	Grind smooth any undercut particularly on external corner	Grind smooth any undercut	Check plate for lamellar defects and tears	Check plate for lamellar defects and tears
Design stress area	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	Minimum area of bar	Minimum area of bar
	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	Minimum transverse cross section of member at location of potential crack initiation	Minimum area of bar	Minimum area of bar
Type number	3.1*	3.2*	3.3*	3.4*	3.5*	3.6*
	3.1*	3.2*	3.3*	3.4*	3.5*	3.6*
Class	C†	D†	E†	F†	F†	F†
	C†	D†	E†	F†	F†	F†



Key. Typical crack location  
 NOTE. Potential crack locations marked 'x' are type 2 (see table 17(b)).  
 †See H.4.3.  
 ‡Important features that change significantly from one type to another.  
 †A classification that should be used with caution.

부록 4: 주의해야 할 상세들



부록 5: 비봉괴 및 봉괴유발부재에 대한 K<sub>1</sub>과 K<sub>2</sub>  
(K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> for NFCM and FCM)

DETAIL CLASS	K <sub>1</sub> VALUE		RELATIVE K <sub>1</sub> VALUES								RELATIVE (K <sub>1</sub> ) <sup>1/m</sup> VALUES					
			W	G	F2	F	E	D	C	B	W	G	F2	F	E	D
W	2.5957×10 <sup>3</sup>	3.0	1.000	0.648	0.337	0.236	0.132	0.099	0.036	0.016	1.000	0.865	0.696	0.618	0.509	0.463
G	4.0027×10 <sup>3</sup>	3.0	1.542	1.000	0.519	0.363	0.204	0.153	0.055	0.024	1.155	1.000	0.804	0.713	0.589	0.535
F2	7.7054×10 <sup>3</sup>	3.0	2.969	1.925	1.000	0.699	0.393	0.295	0.106	0.046	1.137	1.244	1.000	0.887	0.732	0.666
F	1.1022×10 <sup>6</sup>	3.0	4.246	2.754	1.430	1.000	0.562	0.422	0.152	0.066	1.619	1.402	1.127	1.000	0.825	0.750
E	1.9629×10 <sup>6</sup>	3.0	7.562	4.904	2.547	1.781	1.000	0.752	0.271	0.118	1.963	1.700	1.366	1.212	1.000	0.909
D	2.6109×10 <sup>6</sup>	3.0	10.06	6.523	3.388	2.369	1.330	1.000	0.360	0.157	2.159	1.868	1.502	1.333	1.100	1.000
C	7.2467×10 <sup>6</sup>	3.5	27.92	18.10	9.405	6.575	3.692	2.776	1.000	0.437	EXAMPLE : K <sub>1</sub> (W) = 0.648 K <sub>1</sub> (G) STRESS(W) = 0.865 STRESS(G)					
B	1.6599×10 <sup>7</sup>	4.0	63.95	41.47	21.54	15.06	8.456	6.358	2.291	1.000						

DETAIL CLASS	K <sub>1</sub> VALUE	m	ALLOWABLE STRESS RANGE FOR GIVEN N MOES									
			5.0E5	1.0E6	1.5E6	2.0E6	2.5E6	3.0E6	3.5E6	4.0E6	4.5E6	5.0E6
W	2.5957×10 <sup>3</sup>	3.0	0.804	0.638	0.557	0.506	0.470	0.442	0.420	0.402	0.386	0.373
G	4.0027×10 <sup>3</sup>	3.0	0.928	0.737	0.644	0.585	0.534	0.511	0.485	0.464	0.446	0.431
F2	7.7054×10 <sup>3</sup>	3.0	1.155	0.917	0.801	0.728	0.675	0.636	0.606	0.578	0.555	0.536
F	1.1022×10 <sup>6</sup>	3.0	1.301	1.033	0.902	0.820	0.761	0.716	0.680	0.651	0.626	0.604
E	1.9629×10 <sup>6</sup>	3.0	1.578	1.252	1.094	0.994	0.922	0.868	0.825	0.789	0.758	0.732
D	2.6109×10 <sup>6</sup>	3.0	1.735	1.377	1.203	1.093	1.015	0.955	0.907	0.867	0.834	0.805
C	7.2467×10 <sup>6</sup>	3.5	2.147	1.761	1.563	1.445	1.355	1.287	1.231	1.185	1.146	1.112
B	1.6599×10 <sup>7</sup>	4.0	2.400	2.018	1.824	1.697	1.605	1.534	1.476	1.427	1.386	1.350

Joint Design:  
 $L = \sum (Fr_i^m \cdot Ni)$   
 $= Fre^m \cdot N$   
 $R = L/K$   
 $Fre = \sum (Fr_i^m \cdot N) / N^{1/m}$   
 $= (R \cdot K / N)^{1/m}$   
 Typically use  $N = 2.0 E6$   
 Note :  
 K<sub>1</sub> is 0.840 reliable for  
 NFCM

Unit : ct, cm  
 Unit converting factor = 9.4311F5

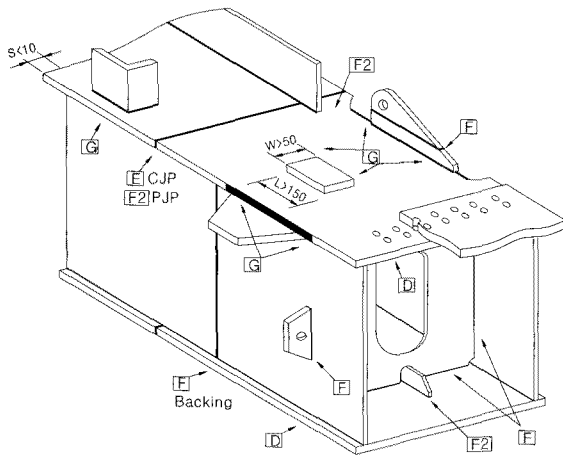
DETAIL CLASS	K <sub>2</sub> VALUE		RELATIVE K <sub>2</sub> VALUES								RELATIVE (K <sub>2</sub> ) <sup>1/m</sup> VALUES					
			W	G	F2	F	E	D	C	B	W	G	F2	F	E	D
W	1.6965×10 <sup>3</sup>	3.0	1.000	0.640	0.372	0.254	0.154	0.105	0.037	0.016	1.000	0.862	0.719	0.633	0.536	0.472
G	2.6508×10 <sup>3</sup>	3.0	1.563	1.000	0.581	0.397	0.240	0.164	0.058	0.024	1.161	1.000	0.834	0.735	0.621	0.547
F2	4.5594×10 <sup>3</sup>	3.0	2.688	1.720	1.000	0.683	0.413	0.283	0.101	0.042	1.390	1.198	1.000	0.881	0.745	0.657
F	6.6800×10 <sup>6</sup>	3.0	3.938	2.520	1.465	1.000	0.606	0.414	0.147	0.061	1.579	1.361	1.136	1.000	0.846	0.745
E	1.1027×10 <sup>6</sup>	3.0	6.500	4.160	2.419	1.651	1.000	0.684	0.243	0.101	1.866	1.608	1.342	1.182	1.000	0.881
D	1.6117×10 <sup>6</sup>	3.0	9.500	6.080	3.535	2.413	1.462	1.000	0.356	0.148	2.118	1.825	1.523	1.341	1.135	1.000
C	4.5292×10 <sup>6</sup>	3.5	26.70	17.09	9.934	6.780	4.107	2.810	1.000	0.415	EXAMPLE : K <sub>2</sub> (W) = 0.640 K <sub>2</sub> (G) STRESS(W) = 0.862 STRESS(G)					
B	1.0920×10 <sup>7</sup>	4.0	64.37	41.20	23.95	16.35	9.903	6.775	2.411	1.000						

DETAIL CLASS	K <sub>2</sub> VALUE	m	ALLOWABLE STRESS RANGE FOR GIVEN N MOES									
			5.0E5	1.0E6	1.5E6	2.0E6	2.5E6	3.0E6	3.5E6	4.0E6	4.5E6	5.0E6
W	1.6965×10 <sup>3</sup>	3.0	0.697	0.553	0.484	0.439	0.408	0.384	0.365	0.349	0.335	0.324
G	2.6508×10 <sup>3</sup>	3.0	0.809	0.462	0.561	0.510	0.473	0.445	0.423	0.405	0.389	0.376
F2	4.5594×10 <sup>3</sup>	3.0	0.970	0.770	0.672	0.611	0.567	0.534	0.507	0.485	0.466	0.450
F	6.6800×10 <sup>6</sup>	3.0	1.101	0.874	0.764	0.694	0.644	0.606	0.576	0.551	0.529	0.511
E	1.1027×10 <sup>6</sup>	3.0	1.302	1.033	0.903	0.820	0.761	0.716	0.680	0.651	0.626	0.604
D	1.6117×10 <sup>6</sup>	3.0	1.477	1.172	1.024	0.931	0.864	0.813	0.772	0.739	0.710	0.686
C	4.5292×10 <sup>6</sup>	3.5	1.877	1.540	1.371	1.263	1.185	1.125	1.076	1.036	1.002	0.972
B	1.0920×10 <sup>7</sup>	4.0	2.162	1.818	1.643	1.529	1.446	1.381	1.329	1.285	1.248	1.216

Joint Design:  
 $L = \sum (Fr_i^2 \cdot Ni)$   
 $= Fre^m \cdot N$   
 $R = L/K$   
 $Fre = \sum (Fr_i^m \cdot N) / N^{1/m}$   
 $= (R \cdot K / N)^{1/m}$   
 Typically use  $N = 2.0 E6$   
 Note :  
 K<sub>2</sub> is 0.840 reliable for  
 FCM

Unit : mt, cm  
 Unit converting factor = 9.4311F5

## 부록 6: 전형적인 피로상세의 분류



### [저자 소개]

허철원

E-mail : humly@hanmail.net

Tel : (051) 365-1808

금원엔지니어링(주) 대표이사

문덕홍

E-mail : dhmoon@pknu.ac.kr

Tel : (051) 629-6190

부경대학교 기계공학부 기계시스템전공

강화중

E-mail : senkang@hanmail.net

Tel : (051) 629-6190

부경대학교 기계공학부 대학원

### 참고문헌

1. BS5400(Part 10), 1980, "Steel concrete and composite bridges", Code of practice for fatigue, British Standards.
2. 허철원, 문덕홍, 2001, "이중링크 형식 수평 인입 집 크레인의 피로 해석, 신뢰도 및 수명예측에 관한 연구", 한국산업안전학회지, 16(4) pp. 65~73.