

대형 천정 크레인 주행보의 피로설계법

Fatigue Design Method of Large Sige Crane Runway Girder



임 영 도*
Lim, Young-Do

최근 조선과 제철산업의 활황에 따라 대형 플랜트 공장건축이 많이 건립되어 대공간 내 천정 크레인은 대형화, 고속화되면서 구조안전성과 경제성에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 대형공장건물에서 천정크레인이 차지하는 기능적 역할의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다.

대형 천정크레인 주행보는 보통 용접구조물로서 정적인 하중을 받는 일반보의 설계와는 달리 크레인의 운행에 따른 진동을 수반한 반복적인 하중을 받게 된다. 이로 인해 피로 손상이 재료의 항복강도에 우선하여 발생하는 것이 특징이다.

그동안 외국에서는 크레인 주행보의 피로에 의한 손상 및 파괴 사례가 많이 발생되어 그에 따른 구조물의 피로거동에 대한 이론적인 연구와 더불어 다양한 형태의 용접부재에 대한 피로실험을 통해 일찍부터 강구조물의 설계에 피로개념을 도입하여 계속적인 수정. 보완을 통해 현재는 피로설계기준이 정착되고 있지만 우리나라는 대형산업 건물이 건립되어 운영된 기간이 비교적 짧아 피로손상 및 파괴 사례가 아직 많이 발생되지 않았지만 이제부터는

서서히 발생가능성의 증가가 예상된다.

따라서 피로손상의 위험이 예상되는 구조물에 대해 체계적으로 조사·점검이 요구되며 향후 설계되는 크레인 주행보에 대해서는 합리적인 피로설계법을 반드시 적용하여야 할 것이다.

우리나라는 아직까지 건축구조물에 피로설계개념을 실질적으로 도입하고 있지 않으며 피로실험자료 또한 거의 없는 실정이다.

그러나 외국의 피로실험자료와 설계기준을 검토하여 연구하면 합리적이고 실용적인 피로설계 기준을 마련할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 대형공간을 가진 산업건물에 설치되는 천정 크레인 주행보가 반복하중에 의해 피로손상이 재료의 항복강도에 우선하여 발생된다는 특징에 유념하여 외국의 피로실험자료와 피로설계 기준을 적용하여 우선적으로 설계방법을 정립할 필요가 있다.

1. 강재의 피로에 관한 일반사항

1.1 피로수명

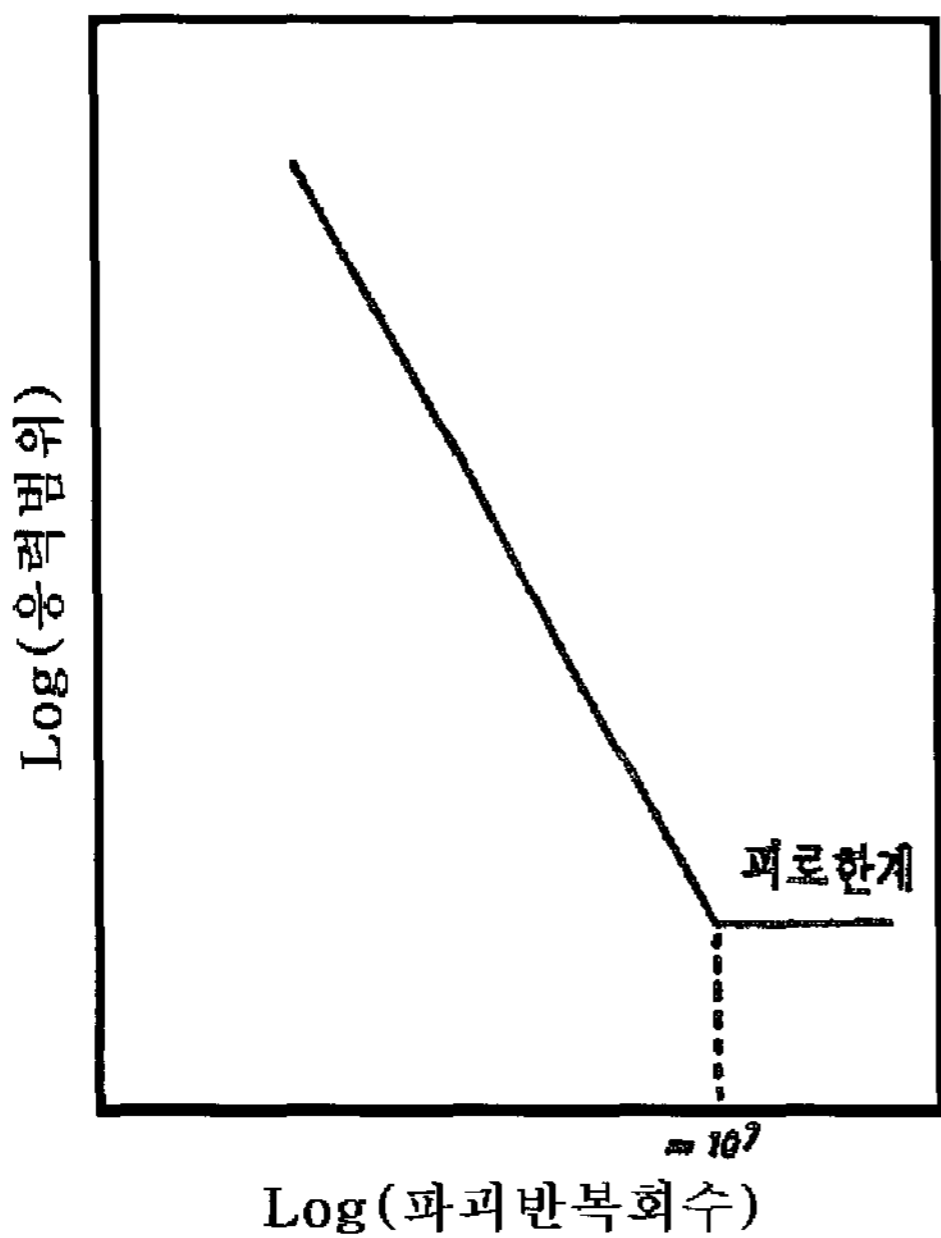
하중·변위 또는 열응력을 반복시켜서 재료가 손상하는 현상을 피로라 하며 이때 까지의 하중·변

* 정회원·(주)아림구조엔지니어링, 공학박사/
구조기술사/건축사

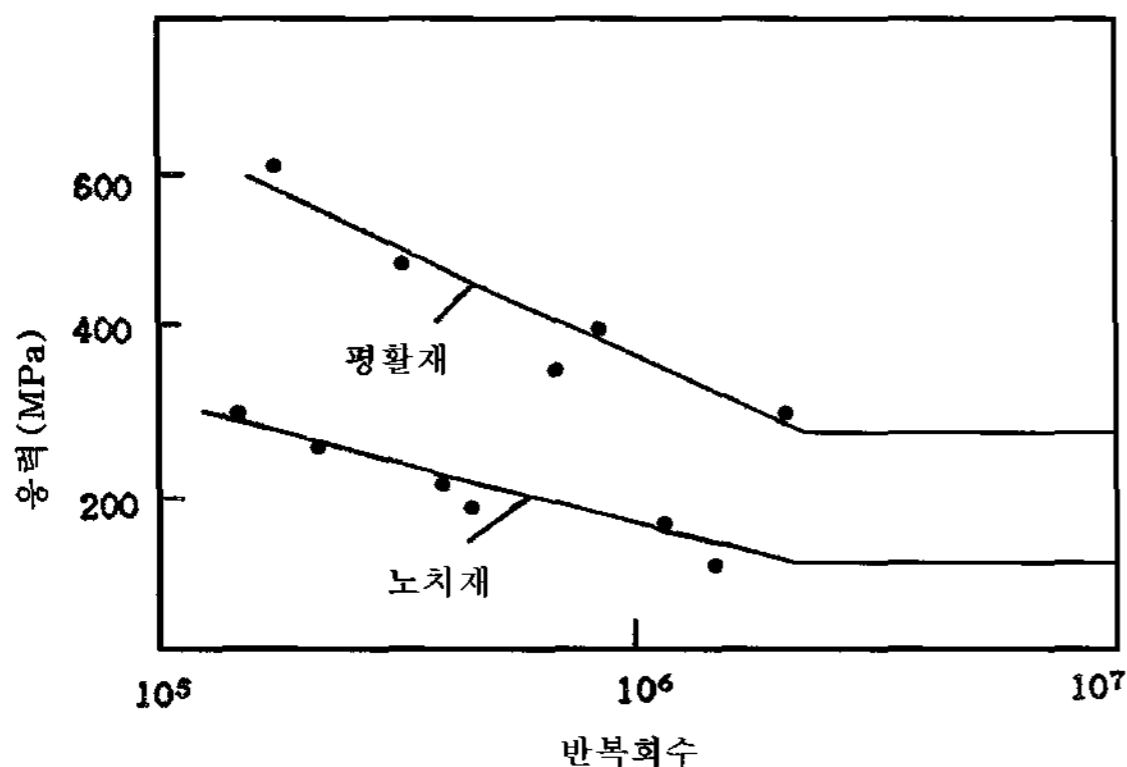
위 또는 열응력의 반복된 회수를 피로수명이라 한다.

1.2 S-N선도

피로실험은 보통 주어진 응력(S)하에서 파괴가 일어날 때까지의 응력 반복회수(N)의 관계를 도표화하여 S-N선도로 제공된다. S-N선도를 작성하기 위해 각 연결상태에서 여러 응력을 작용시켜 그 결과를 logS와 logN값의 관계로 나타낸 것으로 다음 그림과 같다.



〈그림 1〉 용접 연결에 대한 전형적인 S-N선도

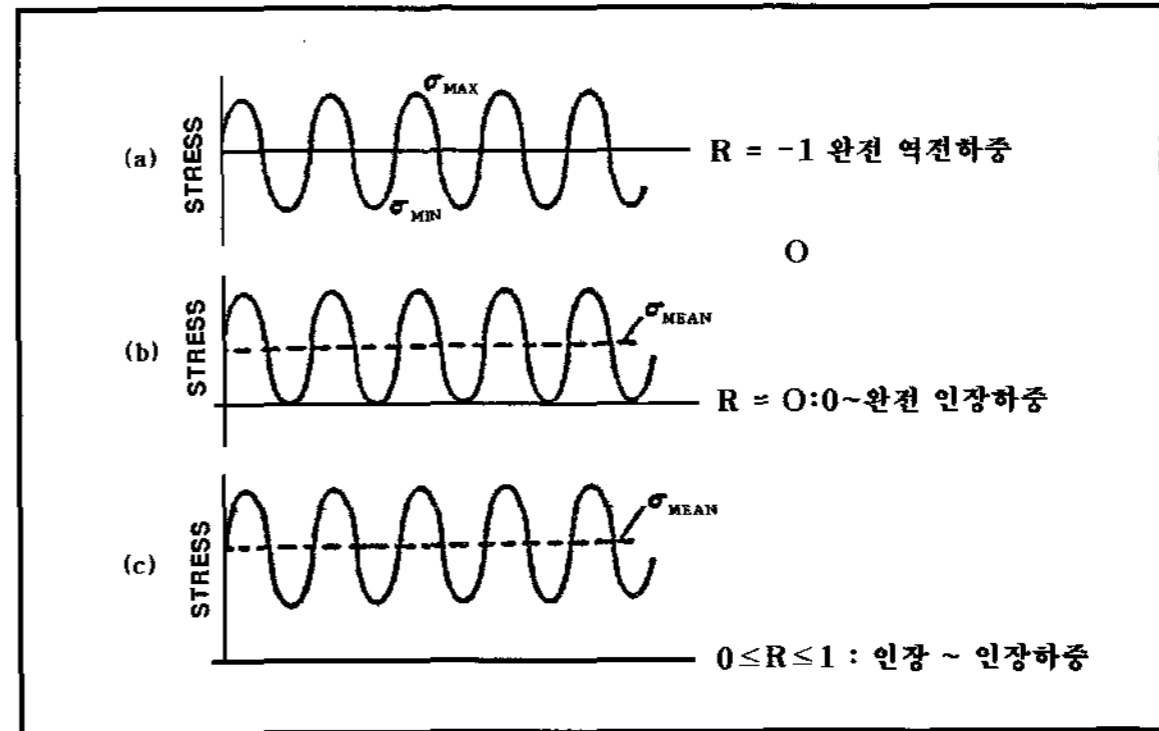


〈그림 2〉 노치재와 평활재의 S-N선도

1.3 피로하중과 응력파

피로현상은 시간의존적인 동적응력 작용으로 일

어나며 하중의 종류에 따라 그 영향이 크다. 실제로 많은 구조물에 작용하는 동적 응력은 진폭이 임의로 변하는 변동진폭응력이지만 피로실험에서는 응력이 일정하게 최대치와 최소치사이를 단순하게 또는 주기적으로 변화하는 변동응력으로서 다음 그림과 같이 3가지 응력 사이클형식을 이용하여 응력범위 $\Delta\sigma(\sigma_{max} - \sigma_{min})$ 와 평균응력 $(\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2})$, 응력비 $(R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}})$ 을 사용하고 있다.



〈그림 3〉 일정진폭 응력

1.4 피로강도

S-N선도에서 어느 특정한 반복회수 N에 대한 응력수준 또는 범위의 값들을 피로강도라 하는데 미

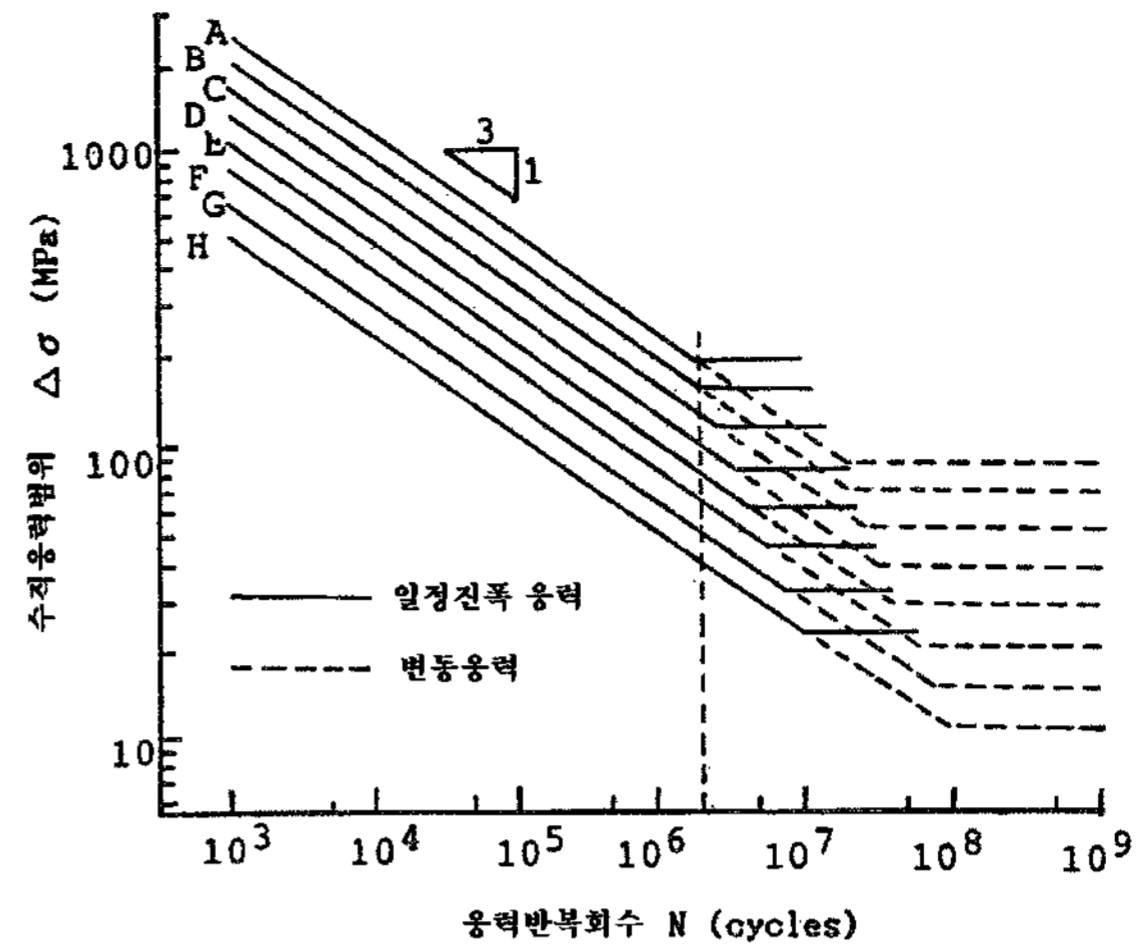
〈표 1〉 고강재의 각종 연결부의 피로강도(단위 : kg/mm²)

연결의 종류	σ_B N	50 ~ 60		60 ~ 70		70 ~ 80		80 ~ 90	
		10^5	2×10^6	10^5	2×10^6	10^5	2×10^6	10^5	2×10^6
평활한재	34	25	42	28	42	28	46	30	
다듬질 횡 맞대기 연결	30	22	38	25	-	-	46	30	
구멍있는 모재	24	13	-	-	-	-	-	-	
고장력 볼트 연결	30	20	40	23	-	-	-	-	
리벳 연결	22	12	26	15	-	-	-	-	
다듬질 안한 종방향 연속용접	30	17	53	17	-	-	10	22	
다듬질 안한 맞대기용접	24	13	24	13	26	14	25	13	
리이프 + 자용접 토우	26	14	21	10	-	-	-	-	
+자 필렛 용접	15	65	15	65	13	5	-	-	
측면 필렛 용접끝 모재	10	45	-	-	-	-	-	-	

국 등 여러 선진국의 강구조 피로설계에 있어서 기준으로 하는 피로강도는 $N=2 \times 10^6$ 에 대한 것이며 N 이 무한대의 반복회수에 견디는 응력수준 또는 범위의 상한치를 피로한계라 한다.

피로강도는 그 부재의 노치(Notch)의 응력집중계수에 반비례하는 경향이 있으며 이것은 용접부에서의 용접결합은 피로강도에 큰 영향을 준다는 것을 의미한다.

다음 표는 일본용접학회의 피로강도위원회가 구조용 고강재의 용접연결부의 종류에 따른 탄성피로강도를 수집한 자료이다.



〈그림 4〉 피로설계곡선(수직응력을 받는 연결)

2. 각국별 피로설계 기준

2.1 한국기준 (일본의 강구조설계 기준)

2.1.1 피로계수와 허용응력도

동일한 단면내에서 응력의 크기가 빈번하게 변화할 때는 반복응력에 의한 피로의 영향을 고려하여 응력도를 증가 시켜야 한다.

$$\gamma \cdot \sigma \leq fr$$

γ : 피로계수, fr : 허용응력도

〈표 2〉 피로계수와 허용응력도

응력반복 회수	γ	$f_t(t/cm^2)$
10^5 이하	$1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	강종, 응력종별, 결합재 종별에 따라 주어진 허용응력도
10^5 을 초과- 2×10^6 이하	$1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	강종, 용접부에 대해서는 SS41에 대하여 주어진 허용응력도
2×10^6 초과	$\frac{3}{2} (1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma_1})$	강종, 용접부에 대해서는 SS41에 대하여 주어진 허용응력도

2.2 일본피로설계지침

2.2.1 피로설계곡선 (피로설계 $\Delta\sigma - N$ 선도)

연결부의 종류별, 강도등급에 따라 8개(A~H)의 피로곡선 설정하며 각각의 강도등급에 대해 2×10^6 회 응력반복회수에서의 기본 허용응력범위를 표시한다.

〈표 3〉 기본허용응력범위(수직응력을 받는 연결) $m=3$

명칭	강도 등급	응력범위의 컷오프 한계 (MPa)	
		일정진폭응력 $\sigma_{ce}(N)$	변동응력 $\sigma_{ve}(N)$
A	2×10^6 기본허용응력 $\Delta\sigma f(MPa)$ 190	$190(2.0 \times 10^6)$	$88(2.0 \times 10^7)$
B	155	$155(2.0 \times 10^6)$	$72(2.0 \times 10^7)$
C	125	$115(2.6 \times 10^6)$	$53(2.6 \times 10^7)$
D	100	$84(3.4 \times 10^6)$	$39(3.4 \times 10^7)$
E	80	$62(4.4 \times 10^6)$	$29(4.4 \times 10^7)$
F	65	$46(5.6 \times 10^6)$	$21(5.6 \times 10^7)$
G	50	$32(7.7 \times 10^6)$	$15(5.5 \times 10^7)$
H	40	$23(1.0 \times 10^7)$	$11(1.0 \times 10^8)$

2.3 미국기준 (AISC)

2.3.1 하중조건과 허용응력범위

크레인 종류별로 조업상태에 따른 하중조건을 분류하여 용접부의 형태에 따라 허용응력범위를 작성하여 적용한다.

〈표 4〉 하중조건

하중조건	하중반복회수
1	$20000^a - 100000$
2	$100000^b - 500000$
3	$500000^c - 2000000$
4	2000000^d 이상

^a 대략 매일 2회, 25년동안 작용한 회수

^b 대략 매일 10회, 25년동안 작용한 회수

^c 대략 매일 50회, 25년동안 작용한 회수

^d 대략 매일 200회, 25년동안 작용한 회수

〈표 5〉 허용응력범위 (단위:ksi)

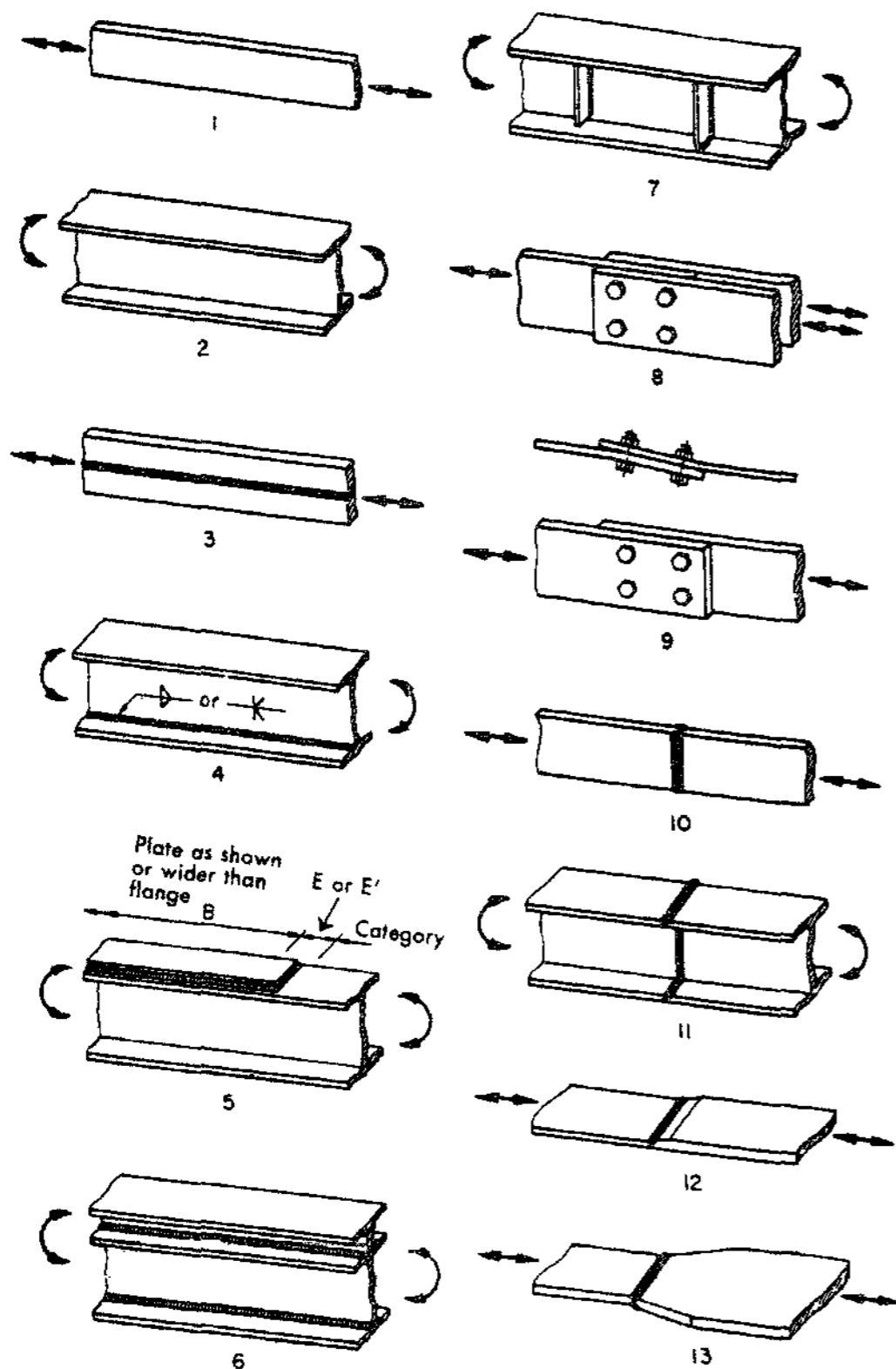
종 류	하중조건1	하중조건2	하중조건3	하중조건4
A'	63	37	24	24
B'	49	29	18	16
B'	39	23	15	2
C'	35	21	13	10 ^a
D'	28	16	10	7
E'	22	13	8	5
E'	16	9	6	3
F'	15	12	9	8

^a 플랜지의 보강재 용접토우에서 휨응력 12ksi 허용

〈표 6〉 피로응력 규정

일반 조건	상태	연결 분류	그림 예	응력의 종류
조립재	부착재(Attachments)가 없으며 응력의 작용방향과 평행한 연속 의 완전 또는 부분관통 그루부용 접이나 연속 필렛용접에 의해 조 립된 플레이트 모재와 용접재 거더 웨브나 플랜지의 수직보강 재 용접 단부에서 휨응력 산정 정방향 또는 사변형의 부분용 접 커버 플레이트 단부의 모재	B	3, 4, 5, 7	T 또는 REV.
		C	6	T 또는 REV.
		E	7	T 또는 REV.

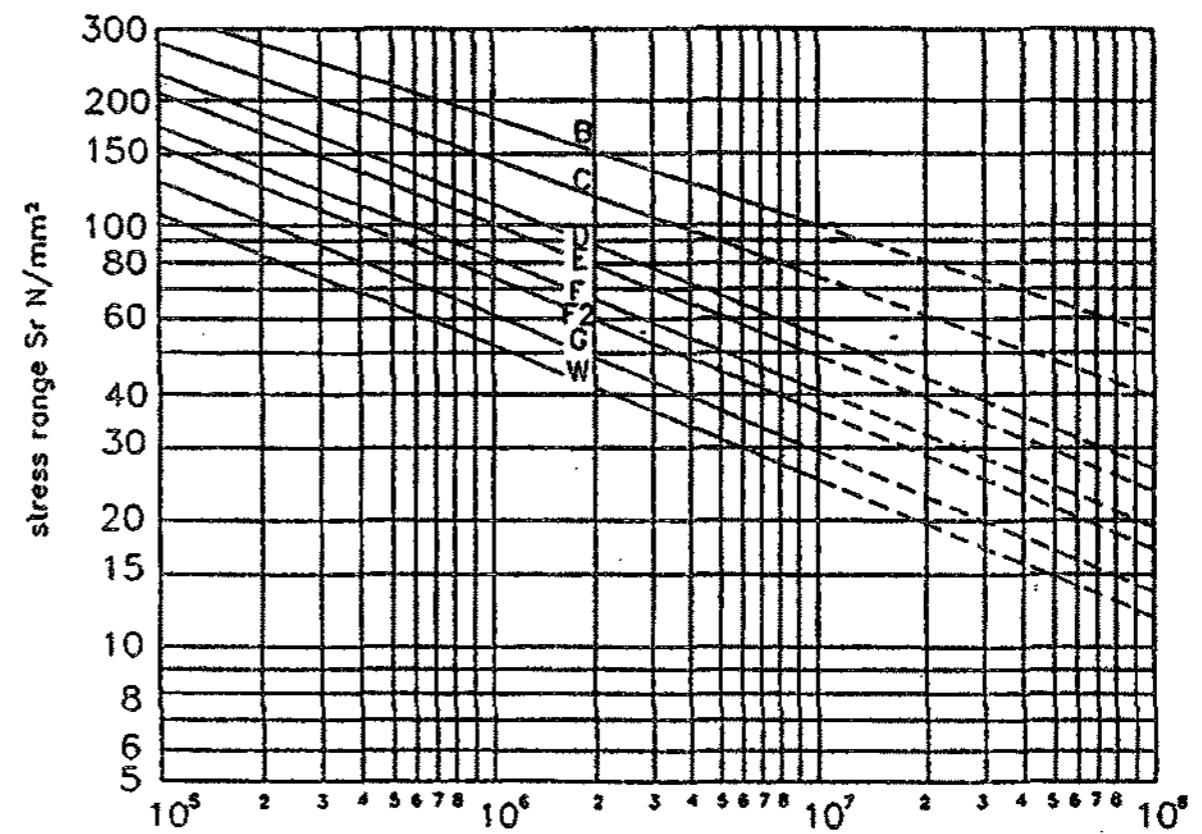
T : 인장응력범위
REV. : 역전응력 범위



〈그림 5〉 강재의 부재 및 용접부 형태

2.4 영국규준 (BS 5400)

2.4.1 강재별 S-N 선도



〈그림 6〉 강재에 대한 S-N선도

2.4.2 설계 $\sigma_r(\Delta\sigma)$ -N 관계

$$N \times \sigma_r^m = K_2, \quad \log N = \log_{10} K_2 - m \log_{10} \sigma_r$$

〈표 7〉 $\delta_r(\Delta\sigma)$ -N관계와 일정진폭응력에 대한 컷오프 한계

상세 분류	m	K ₂	$\sigma_0 N / \text{mm}^2$	2.0×10 ⁶ 회 허용응력범위	
				파괴확률 2.3%	파괴확률 0.14%
W	3.0	0.16×10 ¹²	25	43.1 MP _a	37.3 MP _a
G(H)	3.0	0.25×10 ¹²	29	50.0 MP _a (40)	43.6 MP _a
F2(H)	3.0	0.43×10 ¹²	35	60.0 MP _a (40)	50.3 MP _a
F(F)	3.0	0.63×10 ¹²	40	68.0 MP _a (65)	57.6 MP _a
E(E)	3.0	1.04×10 ¹²	47	80.4 MP _a (80)	66.2 MP _a
D(D)	3.0	1.52×10 ¹²	53	91.3 MP _a (100)	77.7 MP _a
C(C)	3.5(3.0)	4.23×10 ¹³	78	123.9 MP _a (125)	108.2 MP _a
B(B)	4.0(3.0)	1.01×10 ¹⁵	100	150.0 MP _a (125)	135.0 MP _a
S	8.0	2.08×10 ²²	82	100.5 MP _a	86.9 MP _a

2.5 각국 피로설계 기준에 따른 허용 피로강도 산정결과 비교

- 1) 응력반복회수 $N=2 \times 10^6$ 을 기준으로 한동일한 조건의 강종과 용접부를 대상으로한 부재를 각국 기준을 적용하여 허용피로강도(응력범위)를 산정한 결과 다음 표와 같은 결과를 나타냈다.

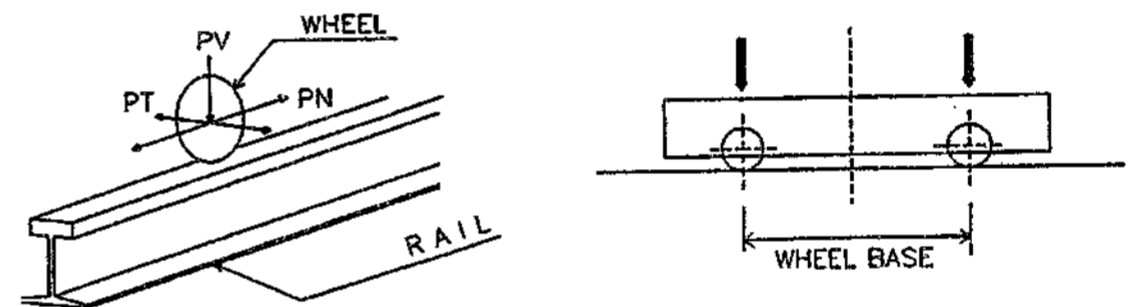
〈표 8〉 각국의 수직 충격계수와 피로허용응력 비교

규 준 명	수직충격계수	피로허용응력		비 고
		2×10 ⁶ 이하	2×10 ⁶ 초과	
한 국	1.25	1.6	1.15	응력비 R=0.1에 대한 허용응력
독 일	호이스트 등급 H4 1.4+0.0088 · v _H	1.6	1.5	ST37강에 대한 허용응력 응력비 R=0.1
일본피로지침	1.25	0.99		2×10 ⁶ 에 대한 허용응력범위
영국	1.25	1.09		2×10 ⁶ 에 대한 허용응력범위
CMAA	1.15 ≤ 1+0.0164 · v _H ≤ 1.5	1.60 (하중등급L3)	1.19 (하중등급L4)	허용응력범위
AISC	1.25	1.26	1.12	허용응력범위

〈표 9〉 각국의 크레인 주행보 수직방향 허용처짐 기준

규준명	수직방향 허용처짐기준	
	CRANE 등급	기준
한국(KS)규준	1) 수동식 크레인	L/500
	2) 수동식 크레인	L/800-L/1200
일본(JIS)	1) 수동식 크레인	L/500
	2) 수동식 크레인	L/800-L/1200
미국(CMAA)	1) 경량 크레인	L/600
	2) 공장 크레인	L/1000
	3) 고속형 중량 크레인	L/1200
독일(DIN)	1) 경량 크레인	L/600
	2) 공장 크레인	L/1000

현재 우리나라에서 설계·시공되어 있는 50여개의 대형천정크레인(스팬 10m이상, 용량 30톤 이상)의 주행보에 대한 응력해석을 수행하여 크레인 용량별(30, 45, 100, 150, 275, 450톤), 주행보스팬별(ℓ=10.0, 15.0, 20.0, 30.0m)로 분석하고 크레인 주행보의 합리적인 스패대 보 춤의 비를 산정하였다.

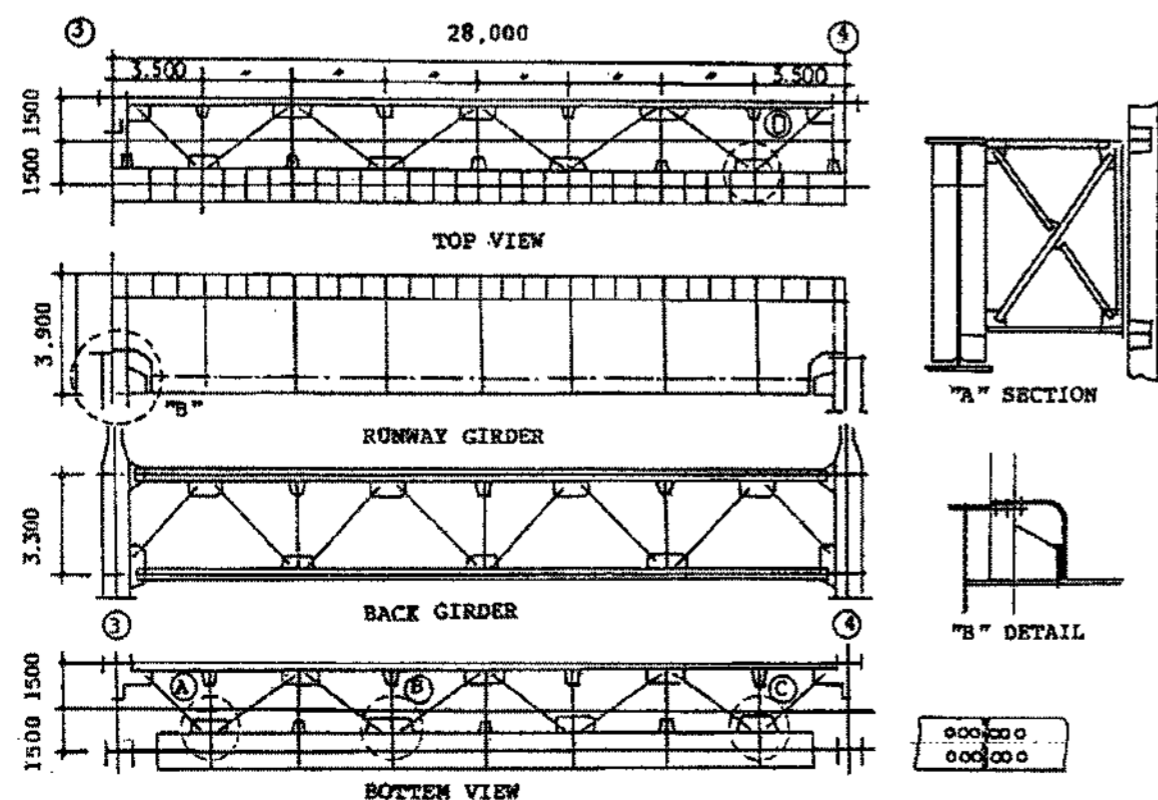


〈그림 8〉 크레인 주행보에 작용하는 주요하중

3. 크레인 주행보의 피로설계 적용 예

3.1 설계모델

각국별 피로설계 규준을 검토하여 우리나라에 적합한 설계기준을 산정하여 크레인주행보의 설계시 사용성한계상태인 처짐제한과 강도한계상태인 허용 피로응력 중 설계상의 지배요인을 분석하기 위하여



〈그림 7〉 크레인 주행보의 설계도

3.2 사용성한계상태(처짐제한)와 강도 한계상태(허용피로응력)의 설계상 지배요인 분석

3.2.1 개요

크레인 주행보의 설계란 결국 작용되는 외력에 대하여 용접연결된 부재 내력이 충분히 견딜 수 있으나 하는 강도한계상태와 크레인의 운행에 장애를 일으킬 수 있는 허용처짐한계 이내로 수직처짐값을 제한하는 사용성 한계상태를 유지, 검증하는 것이라 할 수 있다. 이 두가지 설계요인은 각각 별개의 방정식에 의해서 결정되고 크레인용량, 주행보의 스패 등이 다양하게 설계되므로 쉽게 판단 할 수 없는 요소이다.

3.2.2 해석 및 검토 방법

대형천정 크레인 주행보는 충격을 고려한 이동하는 변동하중을 받는 단순보로 설계되며 최대 휨모

메트와 최대 처짐값을 영향선이론에 의한 프로그램을 사용하면 쉽게 계산 할 수 있다.

해석결과 산정된 최대휨모멘트와 최대 수직처짐 값에 대하여 허용피로응력에 필요한 단면이차모멘트값과 허용처짐 값에 필요한 단면이차모멘트값을 산정한 후 각각의 값을 비교하여 큰 쪽의 단면이차모멘트값이 설계지배요인이 된다고 할 수 있다.

(1) 허용수직처짐 값에 필요한 단면이차모멘트 값

$$\delta v \text{ limit} > \frac{R.L^n}{dI_x}, dI_x > \frac{R.L^n}{\delta v \text{ limit}}$$

$\delta v \text{ limit}$: 허용수직처짐 제한 값

($\frac{L}{1000}$ 일 경우 값)

R : 크레인 주행보상의 이동하중

L : 크레인 주행보 스패

(2) 허용피로응력에 필요한 단면이차모멘트 값

$$f_r > \frac{M.y}{fI_x}, fI_x > \frac{M.y}{f_r}$$

f_r : 허용피로응력

fI_x : 허용피로응력에 필요한 단면이차 모멘트 값

M : 최대휨모멘트

y : 플랜지 최외단부까지의 거리

(3) (1), (2)에서 계산된 단면이차모멘트 값 중에서 큰쪽의 값이 설계지배요인이 된다.

$dI_x > fI_x$: 사용성한계상태인 허용처짐 값 의해서 설계가 지배되며 피로해석을 할 필요가 없음.

$fI_x > dI_x$: 강도한계상태인 허용피로용 역에 의해서 설계가 지배되며 피로해석을 하여야 함.

(3) 검토결과

① 초대형 크레인(275톤, 450톤) 주행보는 모든 스패(10, 15, 20, 30m)에서 강도한계 상태인 허용피로응력이 설계지배요인이 된다.

② 대형 크레인(100톤, 150톤) 주행보는 스패 20.0m 와 30.0m에서는 사용성 한계 상태인 허용수직 처짐 값이 설계지배 요인이고, 10.0m와 15.0m

스패에서는 강도한계 상태인 허용피로응력이 설계지배요인이 된다.

③ 중소형 크레인(30톤, 45톤) 주행보는 모든 스패(10, 15, 20, 30m)에서 사용성 한계상태인 허용수직처짐이 설계지배요인이 된다.

4. 결 론

1. 재료의 피로강도는 정적강도에 반드시 비례하지는 않는다. 강구조부재의 피로강도는 부재의 연결세목을 주로 하는 부재의 노치와 용접비드 등 용접집중거동에 큰 영향을 받는다. 고강도 강재를 사용한 구조부재는 용접성의 악화와 모재의 인성부족이 원인이 되어 피로강도는 향상되지 않으며 이 때문에 피로설계의 근본은 강종에 관계없이 설계피로강도를 결정하며 용접성과 연성이 좋은 강재를 크레인 주행보 부재로 사용하는 것이 바람직하다고 생각된다.
2. 크레인 주행보의 피로설계에서 허용응력범위의 피로설계방법은 실험에 의해서 나온 결과인 S-N선도를 이용하는 것으로 신뢰성이 있으므로 우리나라의 경우도 이를 고려하여 허용응력범위를 사용하는 피로설계 개념으로 전환하는 것이 바람직하다.
3. 크레인 주행보의 기준수명을 2×10^6 회로 하는 피로설계법에서 피로강도한계상태로 단면설계가 지배적일 때 사용강종을 고강재(SWS490)로 사용하여 상부압축측 플랜지에는 피로허용강도를 적용하지 않고 정적 허용강도를 적용하고 하부인장측 플랜지에만 피로허용강도를 적용하며, 처짐한계상태로 크레인 주행보의 단면설계가 지배적일때는 강종을 연강재(SWS400)로 사용하는 것이 경제적인 피로설계법이 될 수 있다.
4. 기존 크레인 주행보의 응력해석결과 사용성한계상태인 수직처짐 제한과 강도한계상태인 허용피로응력의 설계지배 요인 및 경제적이고 합리적인 스패대 보 춤의 비율을 분석한 결과는 다음과 같다.
 - 1) 크레인 용량이 150톤을 초과하는 초대형 크레인 주행보는 모든 스패에서 허용피로응력

이 설계지배 요인이 된다.

- 2) 크레인 용량이 50톤 초과 150톤 이하의 대형 크레인 주행보는 스패이 15.0m 이하일때는 허용피로응력이 스패이 15.0m를 초과 할 때는 허용수직처짐이 설계 지배 요인이 된다.
- 3) 크레인 용량이 50톤 이하의 중소형 크레인 주행보는 모든 스패이에서 허용수직처짐이 설계 지배 요인이 된다.
- 4) 크레인 주행보의 경제적이고 합리적인 스패이 대 보 춤의 비(span to depthratio)는 대략 다음과 같다.
 - ① 크레인 용량 150톤 초과 초대형크레인 : 6~8
 - ② 크레인 용량 100~150톤 대형크레인 : 7~9
 - ③ 크레인 용량 60~90톤 중형크레인 : 8~10
 - ④ 크레인 용량 50톤 이하 중소형크레인 : 10~12

참고문헌

1. Crane Runway Girder 안전조사보고서, 포항중

합제철 주식회사, 1991. 5

- 2. 임영도, 대형천정크레인 주행보의 피로 설계법에 관한 연구, 석사학위 논문, 한양대학교, 1996.
- 3. A.R.Ingraffee, W.H.Gerstle, K.I.Mettam, P. Wawrzynek and A. Heiller, Cracking of Welded crane runway girder: physical testing and computer simulation, Iron and Steel Engineer, Dec. 1985.
- 4. H.S.Reemsnyder and D.A.Demo, Fatigue cracking in welded crane runway girder : causes and repair procedures, Iron and Steel Engineer, April 1978.
- 5. 강구조 계산 기준 및 해설, 대한 건축 학회, 1983.
- 6. 강구조물의 피로설계지침·동해설, 일본 강구조협회, 1993.
- 7. AISC NINTH EDITION Allowable Stress Design Method For Steel Structure
- 8. 강구조물의 피로설계법, (주)제철엔지니어링, 1990.