

KR C-08030

Rev.0, 5. December 2012

피로

2012. 12. 5



한국철도시설공단

경 과 조 치

이 “철도설계지침 및 편람” 이전에 이미 시행 중에 있는 설계용역이나 건설공사에 대하여는 발주기관의 장이 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 우리공단 “철도설계지침 및 편람”을 그대로 사용할 수 있습니다.

일 러 두 기

- 사용자의 이용 편의를 위하여 책 단위로 구성된 “철도설계지침” 및 “편람”을 국제적인 방식에 맞게 체계를 코드별로 변경하였습니다.
또한, 코드에 대한 해설 및 목차역할을 하는 KR CODE 2012, 각 코드별로 기준 변경사항을 파악할 수 있도록 Review Chart 및 Record History를 제정하였습니다.
- 이번 개정된 “철도설계지침 및 편람”은 개정 소요가 발생할 때마다 각 항목별로 수정되어 공단 EPMS, CPMS에 게시될 것이니 설계적용 시 최신판을 확인 바랍니다.
- “철도설계지침 및 편람”에서 지침에 해당하는 본문은 설계 시 준수해야 하는 부분이고, 해설(이전 편람) 부분은 설계용역 업무수행의 편의를 제공하기 위해 작성한 참고용 기술도서입니다. 여기서, 제목 부분의 편람은 각 코드에서의 해설을 총칭한 것입니다.




목 차

1. 용어의 정의	1
2. 일반사항	2
3. 피로응력한계	2
4. 강교 및 강합성교의 허용피로응력	3
해설 1. 강교 및 강합성교 피로	12
1. 기본 피로이론	12
1.1 개요	12
1.2 피로 해석 이론	13
2. 피로 설계 기준	21
2.1 개요	21
2.2 철도교 피로설계기준	21
2.3 외국의 피로설계기준	32
RECORD HISTORY	50

1. 용어의 정의

- (1) 가도교 : 도로위에 가설된 교량
- (2) 강도감소계수(Strength Reduction Factor) : 재료의 공칭강도와 실제강도 간의 불가피한 차이, 제작 또는 시공, 저항의 추정 및 해석 모형 등에 관련된 불확실성 등을 고려하기 위한 안전계수
- (3) 공칭강도(Nominal Strength) : 강도설계법의 규정과 가정에 따라 계산된 부재 또는 단면의 강도를 말하며 강도감소계수를 적용하기 이전의 강도
- (4) 과선교 : 철도선로 위에 가설된 교량
- (5) 경간(Span) : 교량에서 교대와 교각, 또는 교각과 교각사이 공간을 말함. 연속교인 경우 그 위치에 따라 측경간, 중앙경간 등으로 부르고, 경간 수에 따라 3경간, 5경간 연속교 등으로 부름
- (6) 계수하중(Factored Load) : 강도설계법으로 부재를 설계할 때 사용하는 하중으로서, 사용하중에 하중계수를 곱한 하중
- (7) 구조물 안전성 설계 : 일반적인 구조물 안전조건과 변형조건을 포함하는 의미로 구조물에 작용하는 외력이나 주변 조건에 대하여 구조부재가 안전한 내력을 보유토록 설계를 하는 것
- (8) 동륜하중 : 동력차의 구동차륜 하중
- (9) 붕괴유발부재(Fracture Critical Member) : 그 부재의 파괴가 교량의 붕괴를 초래하거나 교량의 설계기능을 발휘할 수 없도록 하는 부재
- (10) 사용하중(Service Load) : 고정하중 및 표준열차하중으로서 하중계수를 곱하지 않은 것이며, 작용하중이라고도 함
- (11) 상로 플레이트거더교 : 통로가 주거더의 상면위치에 배치되는 교량
- (12) 설계강도(Design Strength) : 공칭강도에 강도감소계수(ϕ)를 곱한 강도
- (13) 설계기준강도(Specific Compressive Strength) : 콘크리트부재의 설계에 있어 기준으로 한 압축강도. 일반적으로 재령 28일의 압축강도를 기준으로 함
- (14) 설계사용기간 : 구조물 또는 부재가 그 사용에 있어서 목적하는 기능을 완수하도록 설계상에 고려하는 기간
- (15) 설계하중 : 부재를 설계할 때 사용되는 적용 가능한 모든 하중으로서, 강도설계법에 의한 설계에서는 하중계수를 곱한 하중(계수하중)이고 허용응력설계법에 의한 설계에서는 하중계수를 곱하지 않은 하중(사용하중)이 설계하중이 됨
- (16) 소요강도(Required Strength) : 하중조합에 따른 계수하중을 저항하는데 필요한 부재나 단면의 강도, 또는 이와 관련된 휨모멘트, 전단력, 축방향력 및 비틀림모멘트 등으로 나타낸 설계 단면력
- (17) 실제 열차하중 : 동적해석에 사용되는 실제 열차의 차축하중을 모델로 만든 하중

- 
- (18) 2차부재 : 주요부재 이외의 2차적인 기능을 갖는 부재로 그 일부가 파괴되어도 열차 운행에는 직접 지장이 없는 부재
 - (19) 주하중 : 교량의 주요 구조부를 설계하는 경우에 항상 또는 자주 작용하여 내하력에 결정적인 영향을 미치는 하중의 총칭
 - (20) 차축하중 : 차량의 좌우측 바퀴의 하중을 합한 하중
 - (21) 충격계수 : 정적설계시 동적 충격효과를 고려할 수 있도록 표준열차하중에 곱해지는 계수. 열차 또는 차량의 주행에 의해 구조물에 발생하는 정적응답에 대한 동적응답의 증가비율을 나타냄
 - (22) 특수하중 : 교량의 주요 구조부를 설계하는 경우에 교량의 종류, 구조형, 가설지점의 상황 등의 조건에 따라 특별히 고려해야 하는 하중의 총칭
 - (23) 하로 플레이트거더교 : 통로가 주거더의 하면위치에 배치되는 교량
 - (24) 하중계수(Load Factor) : 하중의 공칭값과 실제 하중 간의 불가피한 차이, 하중을 작용외력으로 변환시키는 해석상의 불확실성, 예기치 않은 초과하중, 환경작용 등의 변동을 고려하기 위하여 사용하중에 곱해주는 안전계수
 - (25) 허용응력(Allowable Stress) : 탄성설계에서 재료의 기준강도를 안전율로 나눈 것
 - (26) 합성거더교 : 주거더와 현장치기 바닥판이 전단연결재에 의해 결합되어 주거더와 바닥판이 일체로 된 합성단면으로 하중에 저항하는 교량
 - (27) 단경간교(Single Span Bridge) : 경간이 하나인 교량
 - (28) 모멘트-곡률 해석 : 철근콘크리트 구조물의 재료비선형 단면해석의 하나로서, 횡방향 철근에 의한 횡구속효과와 축력의 영향 등을 고려하고 철근과 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 이용하여 모멘트와 곡률의 관계를 구하는 해석
 - (29) 읍셋변위 : 크리프, 건조수축 그리고 온도변위의 50%에 해당하는 지진격리받침의 수평변위.

2. 일반사항

- (1) 이 규정은 하중 중에서 변동하중이 차지하는 비율이 높거나 작용빈도가 크기 때문에 피로에 대한 안전성 검토를 필요로 하는 경우를 위한 것이다.
- (2) 강교량의 피로검토를 적용해야 한다.
- (3) 콘크리트교량의 피로검토는 다음과 같이 해야 한다.
 - ① 보 및 슬래브는 휨 및 전단에 대하여 검토해야 한다.
 - ② 기둥은 검토하지 않는다. 다만 휨모멘트나 축방향 인장력의 영향이 큰 경우에는 보에 준하여 검토해야 한다.

3. 피로응력한계

- (1) 사용하중하에서 표준열차하중과 충격에 의해 야기되는 직선철근의 최대 인장응력과 최소응력 사이의 범위는 <식 (1)>의 값을 초과할 수 없다.

$$f_f = 165 - 0.33f_{\min} \quad (1)$$

여기서, f_f : 응력범위(MPa)

f_{\min} : 최소응력 수준으로 인장은 정(+), 압축은 부(-)의 값(MPa)

- (2) 높은 응력범위의 구역에서는 주철근을 구부리는 일은 피해야 한다.
 (3) 근사방법에 따라 설계되는 주철근의 방향이 차량 진행방향에 직각인 콘크리트 바닥판에 대해서는 피로응력한계를 고려할 필요가 없다.

4. 강교 및 강합성교의 허용피로응력

(1) 일반내용

- ① 반복적인 응력을 받는 부재 및 연결부는 이 장에 규정된 일반허용응력조건과 함께 피로조건을 만족시켜야 한다. 다만, 압축응력만을 받는 부재는 피로 검토를 하지 않는다.
- ② 피로강도를 지배하는 주된 요소는 사용기간 중 예상되는 응력반복횟수, 응력범위의 크기 및 피로상세범주의 형태와 위치이다.
- ③ 응력반복횟수(N)는 예상통행량을 이용한 적절한 분석을 통해 결정해야 하지만, 교통량조사나 다른 고려사항이 없는 경우에는 <표 3>으로부터 구한다. N은 종방향 부재에 대하여는 경간의 길이에 의해 결정되며 가로보와 행어 그리고 일부 트러스 부재에 있어서는 궤도 수에 따라 결정된다.
- ④ 피로설계에 적용하는 충격하중은 KR C-08020 하중 4.4 및 4.5항에 규정된 충격하중을 <표 1>의 비율로 조정하여 구한다.

표 1. 적용 비율

부재지간 L(m)	적용비율
$L \leq 9m$	100%
$L > 9m$	65%

- (4) 피로설계를 위한 활하중은 「KR C-08020 하중」의 규정을 따른다.
 (5) 응력범위(f_R)은 활하중, 충격하중 그리고 원심하중에 의해서 계산된 최대응력값과 최소응력값의 차이로 규정한다.
 (6) 다양한 상세구조의 형식이나 위치는 <그림 1>과 <표 6>에 설명되어 있다.
 (7) 붕괴유발부재의 응력범위는 <표 4>에 기재된 허용응력범위를 넘어서는 안 된다.
 (8) 붕괴유발부재가 아닌 부재의 응력범위는 <표 5>에 기재된 허용응력범위를 넘어서는 안 된다.



- (9) 90m가 넘는 경간에 대하여는 반복횟수에 대한 적절한 분석이 필요하다.
- ① 인장피로하중을 받는 고장력볼트 - 고장력볼트는 인장력을 받지 않도록 하는 것을 원칙으로 하나, 불가피한 경우 <표 2>에 따라 설계한다.

표 2. 인장볼트의 허용피로응력범위(MPa)

반복횟수	F8T	F10T(S10T)	F13T(S13T)
10만회	200	210	160
50만회	110	120	90
50만회 이상	100	110	80

표 3. 응력반복횟수(N)

부재설명	휨부재 및 트러스부재의 지간(L) 및 하중조건	일정응력범위의 반복횟수(N)
분류 1 - 종방향 휨부재와 그 연결부, 단주를 포함하는 트러스 현재와 그 연결부	$L > 30m$	2,000,000회 미만
	$L \leq 30m$	2,000,000회 이상
분류 2 - 가로보와 연결부, 가로보의 반력만을 전달하는 트러스 행어, 부사재와 그 연결부, 트러스 복부부재와 그 연결부	양케도 하중	2,000,000회 미만
	단일케도 하중	2,000,000회 이상

주) <표 3>은 「KR C-08020 하중」에 규정된 활하중에 의하여 설계된 교량에 적용한다.

표 4. 허용피로응력범위(f_{Rfat}) - 붕괴유발부재인 경우(단위: MPa)

상세범주	응력반복횟수(N)	
	2,000,000회 미만	2,000,000회 이상
A	168	168
B	112	112
B'	77	77
C	70	63
	84 ¹⁾	77 ¹⁾
D	56	35
E	42	16
E' ²⁾	28	9
F	49	42

주) 1) 복부판과 플랜지의 수직보강재 용접부

2) 두께가 20mm 이상인 플랜지를 갖는 붕괴유발부재에는 국부보강용 용접덮개판을 사용해서는 안 된다.

표 5. 허용피로응력범위(f_{fat}) - 붕괴유발부재가 아닌 경우(단위: MPa)

상세범주	응력반복횟수(N)	
	2,000,000회 미만	2,000,000회 이상
A	168	168
B	126	112
B'	101	84
C	91	70 또는 84 ¹⁾
D	70	49
E	56	31
E'	40	18
F	63	56

주) 1) 복부판과 플랜지의 수직보강재 용접부

표 6. 피로상세범주

일반조건	상황	응력의 종류 ¹⁾	상세범주 (<표 4,5> 참조)	적용 예 (<그림 1> 참조)
단순부재	압연면 또는 매끈한 면을 가진 모재	인장 또는 교변	A	1,2
아이바와 핀판	아이바와 핀판	인장	E	
코프	반경이 19mm보다 크거나 같은 표준코프	인장 또는 교변	C	23
조립부재	응력방향과 평행하게 연속 완전용입 그루브용접(뒷담판 제거)이나 연속필릿용접으로 접합되었으며 부착물이 없는 부재의 모재와 용접부	인장 또는 교변	B	3, 4, 5, 7
	응력방향과 평행하게 연속 완전용입 그루브용접(뒷담판 미제거)이나 연속 부분용입 그루브용접으로 접합되었으며 부착물이 없는 부재의 모재와 용접부	인장 또는 교변	B'	3, 4, 5, 7
	거더 복부판이나 플랜지에 설치된 수직보강재의 용접단부	인장 또는 교변	C	6
	부분보강용 덮개판 끝의 모재(끝부분의 용접처리 유무와 관계없이 끝이 직각이나 테이퍼 처리된 플랜지보다 좁은 덮개판, 또는 플랜지보다 넓고 끝부분이 용접처리 되어 있는 덮개판) (a) 플랜지 두께 ≤ 20mm (b) 플랜지 두께 > 20mm	인장 또는 교변	E E'	7
	끝부분이 용접처리 되어 있지 않은 플랜지보다 넓은 부분용접된 덮개판 끝에서의 모재	인장 또는 교변	E'	7



표 6. 피로상세범주(계속)

일반 조건	상황	응력의 종류 ¹⁾	상세범주 (<표 4,5> 참조)	적용예 (<그림 1> 참조)
그루브 용접 연결부	비슷한 단면을 갖는 압연단면 또는 용접단면의 완전용입 그루브용접된 이음부나 인접부의 모재와 용접부(작용응력방향으로 용접부를 연마처리하고 용접부의 건전성을 비파괴검사를 통하여 검사한 경우)	인장 또는 교번	B	8, 10
	부재의 폭방향으로 600mm의 변화부 반경을 갖는 완전용입 그루브용접된 이음부나 인접부의 모재와 용접부(작용응력방향으로 용접부를 연마처리하고 용접부의 건전성을 비파괴검사를 통하여 검사한 경우)	인장 또는 교번	B	13
	부재의 폭방향 또는 두께방향 변화부(용접부경사가 1:2.5 이하인 경우)에서의 완전용입 그루브용접된 이음부나 인접부의 모재와 용접부(작용응력의 방향으로 용접부를 연마처리하고 용접부의 건전성을 비파괴검사를 통하여 검사한 경우)	인장 또는 교번	B'	11, 12
	부재의 폭방향 또는 두께방향 변화부가 없거나 용접부경사가 1:2.5 이하인 변화부가 있는 완전용입 그루브용접된 이음부나 그 인접부의 모재 또는 용접부(용접덧살을 제거하지 않고 용접부의 건전성을 비파괴검사를 통하여 검사한 경우)	인장 또는 교번	C	8, 10, 11, 12
종방향으로 응력을 받는 그루브 용접부착 ²⁾	응력방향으로의 이음부 길이 L이 50mm 이하인 경우, 완전 또는 부분용입 그루브 용접된 부착물의 이음부에 인접한 모재	인장 또는 교번	C	6, 15
	응력방향으로의 이음부의 길이 L이 50mm 이상이며 판두께의 12배 이하인 경우(단, 100mm 이하), 완전 또는 부분용입 그루브 용접된 부착물의 이음부에 인접한 모재	인장 또는 교번	D	15

표 6. 피로상세범주(계속)

일반 조건	상황	응력의 종류 ¹⁾	상세범주 (<표 4,5> 참조)	적용예 (<그림 1> 참조)
중방향으 로 응력을 받는 그루브용 접부착물 ²⁾ (계속)	응력방향으로의 이음부의 길이 L이 판 두께의 12배 이상이거나 100mm 이상인 경우, 완전 또는 부분용입 그루브용접으 로 부착된 이음부에 인접한 모재 (a) 이음부 두께 < 25mm (b) 이음부 두께 ≥ 25mm	인장 또는 교번	E E'	15
	이음부의 길이와 상관없이 반경 R의 변 화부를 갖는 완전 또는 부분용입 그루브 용접으로 부착된 이음부에 인접한 모재. 아래의 원형반경을 갖고 용접단부를 연 마처리한 경우: (a) $R \geq 600\text{mm}$ (b) $600\text{mm} > R \geq 150\text{mm}$ (c) $150\text{mm} > R \geq 50\text{mm}$ (d) $50\text{mm} > R \geq 0\text{mm}$	인장 또는 교번	B C D E	16
	변화부의 용접단부를 연마처리하지 않 은 경우	인장 또는 교번	E	16
횡방향 으로 응력을 받는 그루 브용접부 착물 ^{2) 3)}	이음부의 길이와 무관하고 비파괴검사 를 통해 응력의 수직방향에 대한 용접 의 건전성이 확인된 반경 R의 변화부를 갖는 완전용입 그루브용접으로 모재에 불인 부착물	인장 또는 교번		16
	- 판두께가 동일하며 용접덧살이 제거 된 경우: (a) $R \geq 600\text{mm}$ (b) $600\text{mm} > R \geq 150\text{mm}$ (c) $150\text{mm} > R \geq 50\text{mm}$ (d) $50\text{mm} > R \geq 0\text{mm}$ - 판두께가 동일하나 용접덧살이 제거 되지 않은 경우: (a) $R \geq 150\text{mm}$ (b) $150\text{mm} > R \geq 50\text{mm}$ (c) $50\text{mm} > R \geq 0\text{mm}$	인장 또는 교번	B C D E C D E	16



표 6. 피로상세범주(계속)

일반 조건	상황	응력의 종류 ¹⁾	상세범주 (<표 4.5> 참조)	적용예 (<그림1> 참조)
횡방향으로 응력을 받는 그루브용접부착물 ^{2) 3)} (계속)	- 판두께가 다르고 용접덧살이 제거된 경우: (a) $R \geq 50\text{mm}$ (b) $50\text{mm} > R \geq 0\text{mm}$	인장 또는 교변	D E	16
	- 판두께가 다르고 용접덧살이 제거되지 않은 변화부 반경	인장 또는 교변	E	16
필릿용접 연결부	횡방향의 하중을 받고 응력방향에 수직하게 용접된 연결부의 모재			
	(a) 이음부의 두께 $\leq 12.5\text{mm}$	인장 또는 교변	C	14
	(b) 이음부의 두께 $> 12.5\text{mm}$	인장 또는 교변	그림 참조	22
	불연속 필릿용접부의 모재	인장 또는 교변	E	
	필릿용접의 목부의 전단력	전단력	F(그림 참조)	9
종방향으로 응력을 받는 필릿용접부착물 ^{2) 3) 4)}	응력방향으로 용접길이 L이 50mm보다 길지 않은 필릿용접으로 부착된 이음부에 인접한 모재: 스티드형태의 전단연결재	인장 또는 교변	C	15, 17, 18, 19, 20
	응력방향으로 용접길이 L이 50mm 이상 그리고 판두께의 12배 이하(단, 100mm 이하)인 필릿용접으로 부착된 이음부에 인접한 모재	인장 또는 교변	D	15, 17
	응력방향으로 용접길이 L이 판두께의 12배 이상 또는 100mm 이상인 필릿용접으로 부착된 이음부에 인접한 모재			
	(a) 이음부두께 $< 25\text{mm}$	인장 또는 교변	E	7, 9, 15, 17
	(b) 이음부두께 $\geq 25\text{mm}$	인장 또는 교변	E'	7, 9, 15
	이음부의 길이와 관계없이 반경 R의 변화부를 갖는 필릿용접으로 부착된 이음부에 인접한 모재: - 용접단부를 연마처리한 경우 (a) $R \geq 50\text{mm}$ (b) $50\text{mm} > R \geq 0\text{mm}$ - 용접단부를 연마처리하지 않은 경우	인장 또는 교변	D E E	16 16

표 6. 피로상세범주(계속)

일반 조건	상황	응력의 종류 ¹⁾	상세범주 (<표 4,5> 참조)	적용예 (<그림 1> 참조)
주응력방 향으로 용접된 횡방 향으로 응력을 받는 필용접 부착물 ^{2) 4)}	이음부의 길이와 관계없이 반경 R의 변 화부를 갖는 필릿용접으로 모재에 부착된 이음부(상세범주 F에 의해 결정되는 필릿 용접 목부에 작용하는 전단응력): - 용접단부를 연마처리한 경우 (a) $R \geq 50\text{mm}$ (b) $50\text{mm} > R \geq 0\text{mm}$	인장 또는 교변	D E	16
	- 용접단부를 연마처리하지 않은 경우	인장 또는 교변	E	16
볼트 및 리벳 연결부	연결재에 면외 힘을 갖지 않는 고장력볼 트 마찰이음부의 전단면에서의 모재	인장 또는 교변	B	21
	고장력볼트 지압이음의 순단면에서의 모재	인장 또는 교변	B	21
	리벳연결부의 순단면에서의 모재	인장 또는 교변	D	21

주) 1) 인장은 인장응력범위를 나타내고 교변은 반복응력 시 인장 및 압축이 모두 일어나는 응력범위를 나타낸다.

2) “종방향으로 응력”은 용접선에 평행한 응력의 방향을 나타내고, “횡방향으로 응력”은 용접선에 수직인 응력의 방향을 나타낸다.

3) 하중이 용접선에 수직으로 재하된 경우에는 부분용입 그루브용접을 피해야 한다.

4) 거더플랜지의 바깥 면에 연결된 연결판은 횡방향 필릿용접만으로 부착해서는 안 된다.

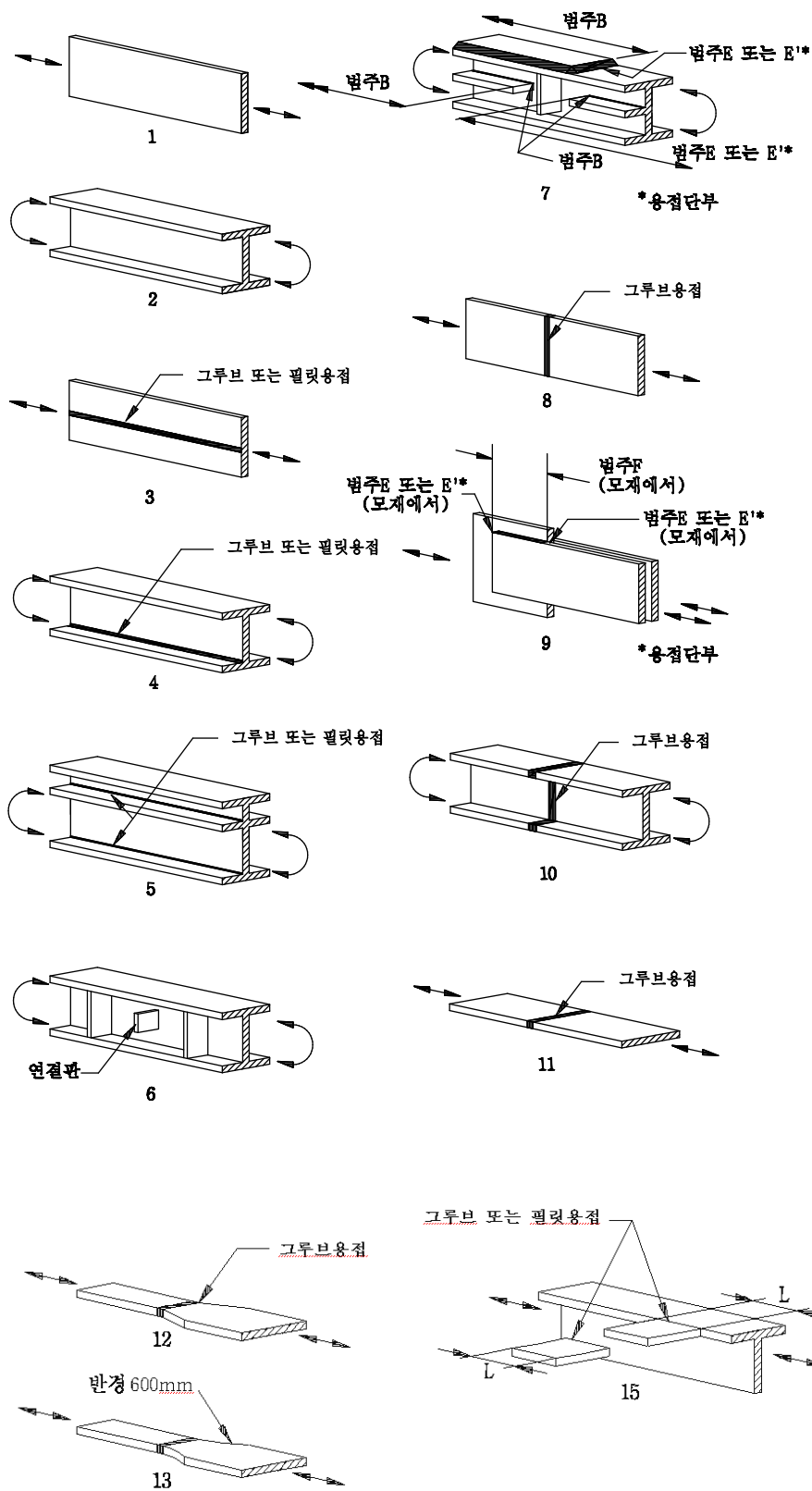


그림 1. 피로상세범주



해설 1. 강교 및 강합성교 피로

1. 강교 및 강합성교 기본피로이론

1.1 개요

강재료에서 발생하는 피로라는 것은 반복하중으로 인해 균열이 발생되고 그 균열이 진전하는 것을 말한다. 만약 균열이 계속 진전하여 더 이상 발생하는 하중을 지탱할 수 없게 되었을 때 부재는 파단하게 된다. 이러한 피로로 인한 파괴의 과정은 정적인 하중 상태에서의 부재 파단에서보다 크기가 작은 응력상태에서 발생하게 된다. 일반적으로 큰 횟수의 하중 반복으로 인해 이러한 피로 균열이 발생한다.

구조물의 설계와 시공 전후에 있어 피로에 취약한 상세에 대한 점검과 구조물의 균열 조사가 이루어져야 한다. 구조물에 사용되는 구조용 강재에는 미세한 균열 또는 일련의 재료 불연속성이 존재하기 때문에 설계자들은 반드시 구조물의 피로와 파괴에 대해 설계시 충분히 고려하여야 한다.

일반적인 토목 분야 구조물에서는 강을 재료로 사용한 교량 구조물은 반드시 피로에 대한 검토가 이루어져야 할 것이다. 일찍이 강교 구조물은 처음엔 리벳 그리고 후에는 고강도볼트를 사용하여 기계적인 연결방법으로 제조되었고 이러한 경우엔 상대적으로 작은 초기 결함을 보였었다. 또한 추가적으로 현재 시점보다 하중의 크기와 빈도에 있어서도 미약하였다. 따라서 균열발생의 빈도도 간헐적으로 발생하였다. 하지만 강을 접합하는데 있어 용접의 방법이 일반적으로 사용됨에 따라 피로에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다. 용접은 피로에 관계된 중요한 2가지의 결점을 가지고 있는데 첫 번째로는 용접은 볼팅이나 리벳팅보다 심각한 초기 균열을 발생시키고 두 번째로는 용접 구조물에 내재된 불연속성은 근접한 다른 부재로 균열이 진전할 수 있는 가능성을 가지고 있다는 것이다.

이론과 실험을 통한 피로 설계의 기준은 그 동안 꾸준한 발전을 보여 왔지만 기존 외국의 사례를 그대로 사용하고 있는 실정이며 피로균열진전에 대한 메카니즘은 설계자들에게 충분히 인식되어 오지 않았다. 게다가 이러한 실험적인 결과도 축소된 시편을 가지고 도출되어 피로강도 평가를 하는데 있어 신뢰성의 한계를 느끼고 있는 실정이다.

(1) 피로파괴 영향인자

피로파괴 영향인자를 다음과 같이 세가지로 크게 구분할 수 있다

- ① 응력범위의 크기 (magnitude of stress range)
- ② 응력반복회수 (number of stress cycles)
- ③ 구조상세 (structural details)

여기서 응력 범위란 구조 부재의 1차적 거동에 의한 것뿐만 아니라, 부재의 면외 변형등에 의해 발생하는 2차적 응력도 포함되며, 때때로 이러한 2차 응력이 교량의 구조상세에 결정적인 피로손상을 일으킬 수 있는 큰 응력범위를 발생시키기도 한다. 강구조 부재는 반복응력의 작용에 의해 발생하며 또 응력범위가 어떤 레벨보다 작으면 피로손상이 발생하지 않는 피로한계가 존재한다. 일반적으로 부재간 이음부나 용접 이음부 또는 노치부의 응력집중부에서 발생하며 피로손상에 의해 균열이 발생하며 성장, 확대된다.

(2) Miner의 피로손상 누적법칙

등가응력 범위는 일반적으로 다음 식과 같이 피로 손상을 선형 축적 개념으로 나타내는 Miner's Rule에 의해 결정된다.

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

여기서, n_i = 응력범위 S_{ri} 의 발생 회수

N_i = S_{ri} 에 대한 피로수명 (Fatigue Life)

또한, 응력범위 S_{ri} 와 피로수명 N_i 과의 관계는 다음 식과 같이 표현되며, 일반적으로 기울기 m 값은 3을 나타낸다.

$$N_i = AS_{ri}^{-m} \quad \text{또는} \quad \log N_i = B - \log S_{ri} \quad (3)$$

위의 식들로부터 R.M.C(Root Mean Cube) 법이라 부르는 등가응력 산정식을 유도할 수 있다.

$$S_{re} = \left(\sum \gamma_i S_{ri}^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad \left(\gamma_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \right) \quad (4)$$

1.2 피로 해석 이론

(1) 피로 해석 개념

부재의 피로수명은 균열초기영역과 균열전파영역으로 구성되며 아래 <그림 2>에 나타나 있다. 초기영역에서 전파영역으로 변화하는 균열의 크기는 알려지지 않고 보통 분석자의 관점이나 해석되는 부재의 크기에 의존한다. 낮은 변형률진폭에서는 초기영역이 전체수명의 90%를 차지하는 반면, 높은 진폭에서는 균열전파영역이 피로수명의 대부분을 차지한다. 파괴 역학적 방법은 전파수명 평가에 사용된다.

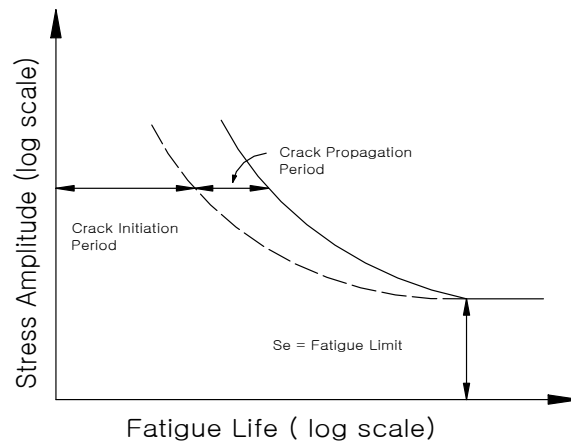


그림 2. 피로수명의 초기수명과 전파수명

파괴역학적 방법에서는 초기균열크기를 알거나 가정하는 것이 필요하다. 결함, 즉 용접에 의한 가공, 혼입 주조 결함 등이 있는 부재의 초기균열크기는 알 수 있다. 대신에, 균열이 없는 재료의 피로수명 평가를 위해서는 전파수명을 결정하는데 사용하고 변형률-수명을 초기수명을 결정하는데 사용하여 평가된 두 수명의 합으로 전체수명을 평가할 수 있다.

(2) 선형탄성파괴역학

① 개요

선형-탄성 파괴역학(LEFM; Linear-Elastic Fractures Mechanics)은 균열 또는 균열 같은 불연속성의 방향, 모양, 크기 그리고 재료특성, 구조적 부재에 적용된 공칭 응력에 따라 균열 첨단부 근처의 응력장의 크기와 분배에 관한 분석법에 기초한다.

② 하중형상

파괴역학의 기본적인 원리는 구조물의 균열부분의 응력장이 응력집중계수(K)에 의해 특정 지어 질 수 있다. (단위: $K_{SI} \sqrt{in}$ ($MPa \cdot \sqrt{m}$)) K는 요소의 공칭 응력과 균열 크기와 관련이 있다. 탄성체에 있어 균열의 응력 분석 방법을 세우는 것은 두 개의 균열 표면의 상대적인 움직임에 따라 3가지 종류로 정의하는 것이 편리하다. <그림 3> 상의 변위 형태는 균열에 있어 미소요소상의 국부적인 변형을 나타낸다.

Mode I 은 x-y 와 x-z 평면에 대칭인 국부 변형의 형태이다. 2개의 파괴표면은 반대 방향으로 각각 수직적으로 위치하고 있다. 슬라이딩이나 전단의 형태로 국부변형이 발생하는 Mode II 는 x-y평면으로 대칭이고 x-z평면으로 기울어진 대칭의 형태이다. 두개의 파괴면은 균열 끝 선상에 각각 수직적으로 미끄러진다. 찢어진 형태인 Mode III는 x-y, x-z 평면상에서 각각 기울어진 대칭인 형태로 국부 변형이 나타난 경우이다. 두 파괴면은 균열선상에서 평행으로 각각 다른 방향으로 미끄러져 있다. 이 변형의 형태는 균열 첨단에서 미소하게 응력장의 기본적인 형태로 나타난다. 어떤 경우라

도, 균열침단에서 변형은 국부 변위 형태에서 한가지 또는 조합의 형태로 다뤄진다.
더욱이 균열 선단에서의 응력은 응력장의 3가지 형태 중 한가지 또는 조합의 형태로 다뤄질 수 있다.

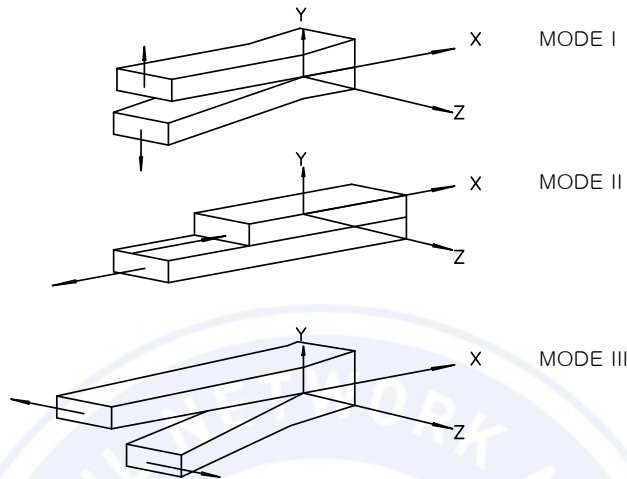


그림 3. 균열 형상

균열선단 주변의 탄성응력장과 변형의 분배는 주어진 변형 형태에 관련하여 모든 요소에 있어 불변하며 탄성 응력의 크기는 Mode I, II, III에 각각 관련된 K_I, K_{II}, K_{III} 에 의해 설명될 수 있다.

(3) 파괴역학 개념

① 균열진전

<그림 4>와 같이 하중이 재하되어 있고 균열을 포함하고 있는 5가지의 판이 있다. 경우 1에서 5까지 균열정도에 따라 놓여진 판을 이해하기 위해서는 파괴역학적인 지식을 필요로 하진 않는다. 단지 비교 대상의 기준으로 경우 1을 취한다면 다음과 같은 파괴역학적인 변수들을 알 수 있게 된다.

- i) 균열 길이(경우2)
- ii) 균열의 위치(경우3 : 판의 가장자리에 균열 발생)
- iii) 휨의 영향(경우4)
- iv) 응력집중의 발생(경우5)

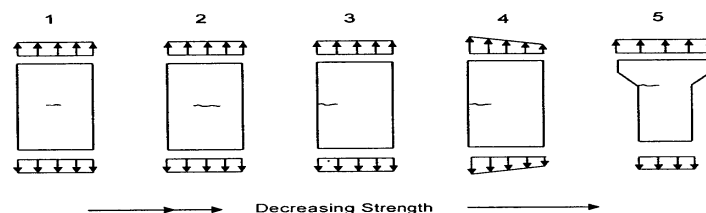


그림 4. 균열을 포함하고 있는 5가지 경우의 판



물론 이러한 변수들은 실제적인 판의 상태에 따라서 변화할 것이다. 하지만 각 변수에 따른 영향은 판에 중대한 결과를 초래한다. 예를 들어 균열이 발생한 판에 응력집중의 현상(경우5)이 발생한다면 균열이 발생하기전의 판의 강도보다 1/2 보다 작은 강도를 나타낼 수 있다.

<그림 5>는 무한판에 발생한 균열 주변을 나타낸 것이다. 이런 경우는 판의 폭에 비해 균열의 길이가 미세할 때 경우1의 조건과 흡사하다. 응력(σ)이 가해졌을 때 균열은 거리(d)만큼 열릴 것이고 단면에 가해진 응력은 판의 균열이 발생하지 않은 부분으로 전이될 것이다. 이러한 응력의 전이는 균열선단 부근에 높은 응력집중 현상을 초래할 것이다. 이론적으로 탄성체내에서는 균열선단의 응력상태는 무한대일 것이다. 하지만 실제 재료에서는 변형이 재료가 탄성적으로 거동하는 한계를 초과하므로 소성영역이 형성된다. 다음과 같은 단계가 균열 또는 균열일련의 불연속성을 포함하고 있는 구조물을 약화시키는 기본적인 메카니즘이다.

- i) 가해진 하중으로 인해 균열이 열린다.
- ii) 열린 균열은 응력의 균열 표면을 경감시킨다.
- iii) 균열선단의 소성경화가 증가한다.

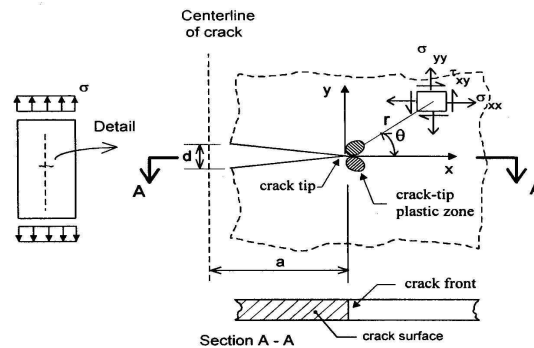


Figure 2 A Crack in an Infinitely Wide Plate

그림 5. 무한판 내에서의 균열

r 과 θ 의 좌표를 사용한 함수를 사용한 응력함수를 전개하였다. 특수한 경우로 $\theta=0$ 인 경우에 대해 y 방향의 응력을 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (5)$$

<식 (5)>에서 r 이 0으로 가까이 갈 때 분자의 크기는 무한대로 증가하기 때문에 분자는 응력의 상태를 결정하는 변수가 된다. 이 분자를 응력확대계수(K)라 한다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

이러한 형태의 식은 단일 변수인 K 로 응력과 균열길이의 조합을 표현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 다른 특수한 기하학적인 특성과 하중상태에 대해 해석적인 결과

를 도출할 수 있다. 하지만 실제적인 경우에 있어 해석적으로 해결되지 않아 다음과 같은 대략적인 K를 표현하고 있다.

$$K = WY_{0V}\sqrt{\pi a} \quad (7)$$

식에서, Y는 판과 균열형상에 따른 보정계수이며 W는 잔류응력, 응력집중 또는 응력경사와 같은 요인으로 인해 발생하는 균일하지 않은 국부 응력면에 대한 보정계수이다. 대개 이러한 보정계수들은 수리학적 방법을 통해 결정된다.

<식 (5)>는 재료의 선형-탄성 거동에 바탕을 두고 있으며 균열선단에서 발생하는 항복에 대해선 설명할 수 없다. 게다가 소성으로 발생하는 응력의 재분배 현상으로 인해 균열선단의 소성구역 밖의 응력면은 변화된다. 하지만 이러한 응력면의 자기 때문에 판두께, 균열길이 그리고 균열이 발생하지 않은 지역의 결속력에 있어 2%도 차지하지 않기 때문에 그 영향이 미미하여 응력확대계수(K)를 사용한 접근방법은 만족스런 결과를 제시하고 있다.

하지만 위에서 말한 제한사항들은 실제의 경우에 있어 맞지 않는 경우가 있는데 예를 들면 응력집중으로 인해 국부 소성상태가 발생했을 때 탄성-소성 해석이 요구된다. 가장 일반적인 해석에서는 균열길이와 관계된 위치에너지에서의 변화를 표현하기 위해 J 또는 균열선단개구변위(CTOD)라는 변수를 사용한다. 그리고 이러한 변수를 실험적으로 결정할 수 있는 기준을 미국의 실험과 재료 협회에서 제정하였는데 다음과 같다. 따라서 경우에 따라 K를 등가적으로 계산할 수 있다.

$$\frac{K^2}{E} = J = \sigma_y CTOD \quad (8)$$

식에서, E는 탄성계수이고 σ_y 는 유효항목강도를 말한다. 만약 판의 크기가 평면응력(plain strain)상태로 제안되는 거동을 할 정도로 충분히 크다면 재료상수인 E는 $E/(1-\nu^2)$ 로 대체될 수 있다. 위에서 설명한 K는 소규모의 균열길이에 대해 제한적이지만 일반적인 경우에 있어 재료가 등방성이라면 위에서 설명한 K와 J는 충분히 정확한 결과를 보여준다.

② 파괴 한계상태

현재 사용되는 해석적인 방법들은 일반적으로 파괴인성이라고 일컬어지는 한계값을 균열변수(예로 K 또는 J)의 값이 초과할 때 파괴가 발생한다고 말하고 있다. 설계자들은 일반적으로 적용되는 값보다 높은 파괴인성을 가지고 있는 강재를 선택하여야 한다. 파괴인성은 습도, 재료의 조직, 온도, 하중 비율, 판두께, 그리고 제조공정과 같은 인자들에 의해 변화한다.

대부분의 구조적인 설계에서 정확히 파괴인성을 계산하는 것은 상당히 복잡하다. 따라서 실제적으로는 간소화된 방법을 사용하고 있다. 가장 일반적으로 강의 인성을 결정하는 방법은 샤르피 충격 시험으로 80년 전에 개발되었다. 간략히 말하면 이 방법은



기계적으로 가한 노치를 포함하고 있는 재료를 충격으로 갑작스러운 파괴를 인위적으로 일으켜 그때 발생하는 흡수에너지를 측정하는 것이다. 인성시험의 시편은 추를 사용하여 파단시키며 그 전후의 회전높이의 차이에 따라 발생하는 흡수에너지를 측정한다. 온도에 따른 영향은 다른 온도에서 냉각된 물리적으로는 동일한 시편을 반복적으로 시험하여 결과를 도출한다. 각각의 시험을 통하여 흡수에너지와 온도의 관계를 알 수 있다.

응력과 균열길이의 값은 직접적으로 측정되지 않기 때문에 샤르피 시험과 다른 유사한 과정의 시험은 단지 방대한 정보만을 제공하게 된다. 하지만 특성 상태에서의 파괴 공학적인 모형과의 관계를 알 수 있다. 실험적인 공식을 사용하면 샤르피 충격 데이터는 동적인 평면-변형 파괴 인성인 K_{Id} 값으로 변환할 수 있으며 이 값을 정적 평면-변형 인성치인 K_{IC} 값으로 다시 변환할 수 있다.

일반적으로 이러한 관계는 중저 강도의 강에 있어서만 유효하다. 게다가 평면변형률 상태에서 평면응력 상태로 변화하는 인성치는 항복응력과 재료의 두께에 따라서 그 값이 변화한다. 이러한 변화의 각 경우를 샤르피 결과와 연관지어 생각할 순 없다.

한 온도에 있어 재료의 인성치는 탄소성 구역에서 평면변형률 상태에서 보다 평면응력의 상태에 있어서 더 큰 인성치를 나타내고 있다. 따라서 K_{Id} 와 K_{IC} 값은 안전측의 대략적인 파괴 인성치를 나타내고 있다.

임계 균열길이(a_{cr})은 사용 최소 온도와 <식 (3)>에서의 가능한 최대응력(σ)에 파괴 인성을 도입하여 계략적으로 계산할 수 있다. 만약 균열 또는 균열 일련의 불연속의 최대 크기인 a 가 a_{cr} 보다 작다면 파단은 발생하지 않을 것이다. 때에 따라서 검사방법에 따라 a_{cr} 와 최소 발생 균열길이인 a_0 를 비교하는 방법에 영향을 미치는데 설계자들은 반드시 설계와 조사장비 그리고 그에 따른 과정들이 a_{cr} 보다 작은 균열을 확실히 감지할 수 있는지에 대한 확인이 필요하다.

최근 강구조물에 있어서 시공된 지 얼마 되지 않아 파괴의 양상을 보이는 것은 드물다. 하지만 심각한 용접결함이 존재하거나 두꺼운 판이 사용되었을 경우 또는 아주 추운 지방에 구조물이 존재할 경우에는 심각한 문제가 발생할 수도 있지만 이러한 경우는 일반적이지는 않다. 최근에 기술의 발달로 인해 결함이 적은 강재료의 사용과 그 제조 기술의 발달로 인하여 이전의 a_{cr} 보다 큰 임계 균열길이를 보이고 있다. 동시에 비파괴검사의 향상으로 인해 최소 균열길이인 a_0 는 감소하고 있는 상태이다. 결과적으로 최근의 강구조물에 있어서는 피로나 부식과 같은 2차적으로 발생하는 균열에 의한 파괴의 위험성이 대두되고 있다. 파괴한계상태가 발생을 예상하는 것은 구조물 상세의 파괴인성을 정확히 측정하는 것 보다 2차적으로 발생하는 균열진전 모형을 합리적으로 선택하는데 따라 좌우된다고 볼 수 있다.

③ 피로한계상태

피로라는 것은 반복적인 응력상태에서 아주 미세한 균열이 발생하고 진전하여 그보다 큰 균열이 발생하는 것을 말한다. 토목공학 분야에서는 교량, 크레인, 타워와 같은 반복적인 하중을 받는 모든 구조물들에 있어 피로균열의 발생 가능성에 대한 검토가 이루어져야 한다. 과거에 비해 현재 사용하고 있는 강재는 인성에 있어 향상되었고 파괴에 대해 저항성이 높아졌다 하지만 많은 구조적인 부재는 아직도 피로균열진전에 취약하다. 결과적으로 만약 파괴한계상태에 도달한다면 아무런 문제가 발생하지 않았던 구조물에 피로균열진전으로 인한 결과라 할 수 있을 것이다. 이러한 현상을 피로한계상태를 정의함에 따라 설명할 수 있다.

구조용 강재로 사용되는 강재의 강도와 인성은 제조기술의 발달에 따라 그 값들도 또한 향상되었다. 그에 따라 더 큰 응력상태를 지탱할 수 있도록 구조물들은 설계, 시공되고 있다.

구조물의 부재를 접합하는데 있어 용접이 사용됨에 따라 리벳이나 볼트를 사용하였을 때보다 그 피로수명이 단축되고 있다. 그것은 일반적으로 얘기하면 과거 구조물들보다 현재의 강구조물들이 피로균열에 취약한 형태를 보이고 있다. 이러한 경향으로 인해 피로강도평가의 중요성이 대두되고 있다. 구조물의 모든 부재에는 비금속성 또는 재조과정에서 발생한 결함이 존재하고 있고 용접의 끝단과 같은 응력집중이 심각하게 발생하는 부분을 가지고 있다. 따라서 피로파괴라는 것은 응력집중이 되는 기존에 존재했던 균열에서 발생된다. 이러한 균열의 성장은 구조물이 실제로 사용되기 이전에 시작할 수도 있음을 시사한다. 이전에 설명한 파괴역학적 모델을 바탕으로 하여 피로균열이 성장하는 현상을 설명할 수 있을 것이다.

응력확대계수 K 는 반복하중에 대한 영향을 포함하기 위하여 <식 (7)>을 사용하여 피로균열성장을 표현할 수 있는 식으로 다음과 같이 수정할 수 있다. 일정한 응력범위 $\Delta\sigma(=\sigma_{\max}-\sigma_{\min})$ 에 대해 다음과 같이 식을 쓸 수 있다.

$$\Delta K = WY \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

<식 (9)>는 균열-성장을 측정하여 작성한 그래프의 기울기로부터 알 수 있는 균열-성장률인 da/dN 과 관련이 있다. 로그함수를 사용하여 ΔK 와의 관계를 나타낸 그림의 세로축의 값으로 이 기울기를 사용하여 나타낸 것이 <그림 6(b)>이다. ΔK 의 값은 균열길이 a 에 대해 <식 (9)>를 사용하여 계산할 수 있다. <그림 6(c)>에서 볼 수 있듯이 초반에는 기울기가 급하고 ΔK 의 값이 증가함에 따라 곡선의 기울기는 거의 상수에 가까운 일정한 값을 나타내고 있으며 최대응력에 가까이 갈수록 다시 수직에 가까운 기울기를 보이고 있다.

재료의 물성치, 응력의 크기 그리고 주변 환경은 그래프의 마지막 부분에 많은 영향을 미친다. 그래프에서 일정한 기울기를 보이고 있는 부분은 공학적인 분야에서 고려



하고 있는 영역이며 Paris의 식을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (10)$$

식에서, C는 실험데이터의 회기분석을 통해 결정되는 상수값이며 유사한 재료, 하중 상태와 환경에서 비교하여 신뢰할 수 있는 값을 얻을 수가 있다.

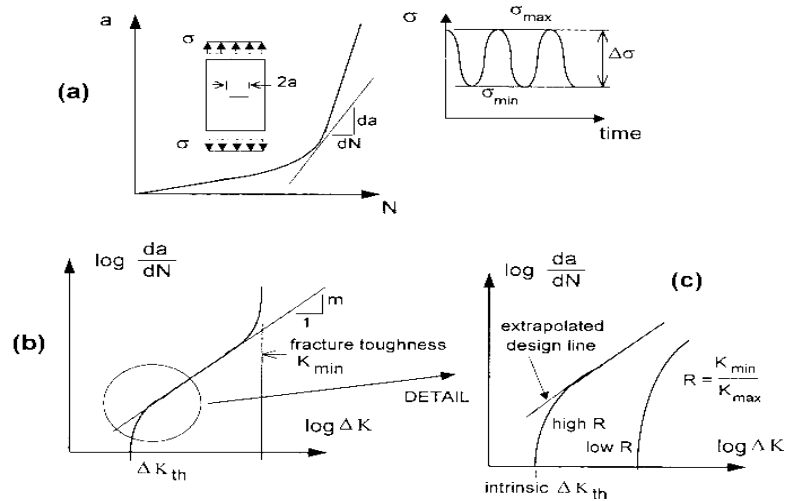
표 7. 강재특성별 상수값 (1ksi = 6.895MPa)

	Austenitic stainless	Ferrite-pearlite	Martensitic
항복응력 (f_{ys})ksi	$30 < f_{ys} < 50$	$30 < f_{ys} < 80$	$f_{ys} > 70$
인장응력 (f_T)ksi	$75 < f_T < 95$	$50 < f_T < 110$	$f_T > 95$
da/dN	$3.0 \times 10^{-10} (\Delta K_I)^{3.25}$	$3.6 \times 10^{-10} (\Delta K_I)^{3.0}$	$0.66 \times 10^{-8} (\Delta K_I)^{3.25}$

* Barsom & Rolfe, Fracture & Fatigue Control in Structure

표 8. JSSC에서 제시한 재료상수 (단위 MPa \sqrt{m})

JSSC	$C (\times 10^{-11})$	m	ΔK_{th}
최대안전설계곡선	2.69	2.75	2.0
평균설계곡선	1.54	2.75	2.9



- (a) 균열진전과 반복횟수의 관계
- (b) 균열진전율과 응력확대계수 범위의 관계
- (c) (b)곡선의 초기단계의 확대

그림 6. 응력확대계수와 피로균열진전

실제 구조물에 있어서는 백만회 이상의 반복하중 상태에 적용되고 있으며 ΔK_{th} 에 부근의 저속의 균열 진전에 대해 명확히 이해할 필요가 있다. 곡선의 추정에 따른 오차는 응력비의 크기인 R 에 따라 그 크기가 변화한다. 또한 R 은, 때로는 균열성장에서의 평균응력의 영향을 조사하는 데에도 사용된다.

ΔK 의 값이 ΔK_{th} 값보다 클 때 <식 (11)>은 균열진전 피로수명인 N 을 계산하기 위해 적분하게 되는데 그 식은 다음과 같다.

$$N = \frac{1}{A} \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{\Delta K^m da} \quad (11)$$

식에서 a_i 와 a_f 는 각각 초기와 마지막의 균열길이이다. 이 값들은 이전에 기술한 a_0 와 a_{cr} 로 각각 대치할 수 있다.

일반적으로 K 의 값이 유효한 상태에서는 결함의 크기가 크고 균열의 대부분이 발생하기 때문에 피로균열발생의 조건을 설명하는데 있어 응력확대계수는 아주 유용한 변수이다. 게다가 구조공학분야에 이를 적용하는 것은 불규칙적인 거동이 발생하는 것을 축소시키는 특징을 가지고 있다.

2. 피로설계기준

2.1 개 요

철도교는 열차하중에 의한 응력변동과 그 반복의 영향이 크기 때문에 부재의 피로파괴에 대한 안전이 중요하게 고려되어야 한다. 따라서 본 절에서는 강철도교 설계 시 반드시 고려하여야 할 피로설계기준을 수록하였으며, 참고로 일본 및 유럽의 피로설계기준과 AASHTO LRFD에 새로 추가된 강바닥판에 대한 상세분류를 수록하여 참고하도록 하였다. 설계자는 피로 검토 시 기본적으로 철도교 설계기준에 제시된 규정을 적용해야 하며, 적용상세가 불명확한 경우 외국의 피로설계기준도 참고하여 설계할 수 있을 것이다.

2.2 철도교 피로설계기준

다음은 철도교 설계를 수행함에 있어 그 지침이 되고 있는 철도교 설계기준 ‘제4장 강교 및 강합성교의 허용피로응력’ 부분으로서, 강철도교 설계 시 피로설계기준으로 적용하여야 한다.

피로 검토 시 활하중, 충격 및 원심하중만을 고려하며, 계산된 응력범위가 허용피로응력범위를 넘지 않도록 규정하고 있다.

(1) 인장피로하중을 받는 고장력볼트

- ① 고장력볼트는 인장력을 받지 않도록 하는 것을 원칙으로 하나, 불가피한 경우 <표 13>에 따라 설계한다.

(2) 피로 검토방법

강 철도교 설계시 피로검토는 다음의 순서를 따른다.

- ① 피로손상 위험 부위 선정
- ② 구조해석을 통한 부재응력
(단선을 지지하는 부재는 단선재하응력으로, 복선의 경우에도 단선재하 상태에서 응력범위 산정)
- ③ 하중조합에 의한 최대응력범위 계산
- ④ 열차 등급과 하중에 따른 피로설계 응력 반복횟수 결정
- ⑤ 상세범주, 부재의 중요성, 응력반복횟수에 따른 허용응력범위 결정
- ⑥ 최대응력범위와 허용응력범위를 비교하여 피로에 대한 안전성 판정
- ⑦ 최대응력범위와 허용응력범위를 초과할 경우에는 보완조치 후 다시 검토
- ⑧ 보완조치 방법
가. 단면을 증가시켜서 최대응력범위가 작아지도록 한다.
나. 허용응력범위가 큰 상세범주의 상세로 변경한다.

(3) 피로검토 대상부위 선정기준

일반적인 피로검토시 선정되어야 할 대상부위는 다음과 같다.

- ① 인장응력 또는 교변응력이 발생하는 부위에서 피로검토를 실시한다. 압축응력이 발생하는 부위는 실시할 필요가 없다.
- ② 주거더(I형, 박스거더형)과 같이 동종의 용접부가 연속되어 있는 경우, 또는 동일한 상세가 여러 곳에서 사용되는 경우에는 응력범위가 최대로 발생하는 위치에서 피로검토를 실시한다.
- ③ 피로손상이 발생할 경우, 교량의 전체의 안전성 및 기능성에 영향을 미칠 우려가 있는 부재 또는 이음부를 중심으로 피로검토를 실시한다.

2.3 외국의 피로설계 기준

(1) AREA(American Railway Engineering Association)

미국의 철도교 설계 시 적용하는 AREA의 피로설계기준을 국내 철도교 피로설계기준으로 그대로 적용하였으므로 앞 절에 기술한 피로상세 및 피로허용응력범위와 같은 내용이다. (이는 미국의 도로교설계기준인 AASHTO의 피로설계기준과 같다.)

(2) AASHTO LRFD

허용응력설계에서 하중저항계수설계(LRFD : Load & Resistance Factored Design)로 이행되면서 기존의 상세범주를 거의 그대로 유지하고 있다. 단, 검토대상 구조상세가 구조물 공용기간 내에 받는 응력반복횟수를 추정하고 이에 해당하는 공칭피로강도를 구한 후 대상 구조상세에 실제 발생하는 응력범위가 공칭피로강도보다 작도

록 구조물을 설계하며, 다음과 같이 규정하고 있다.

$$\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F)_n$$

여기서, γ : 피로한계상태 조합에 대한 하중계수

(Δf) : 대상구조상세에 발생하는 활하중 응력범위

$$(\Delta f)_n : \left(\frac{A}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \text{ (공칭피로강도)}$$

여기서, A : <표 9>의 구조상세범주 상수

N : 대상 구조상세가 설계수명동안 받는 응력반복횟수

표 9. 구조상세범주 상수, A

상세범주	상수, $A \times 10^{11} (\text{MPa}^3)$
A	21.0
B	39.3
B'	20.0
C	14.4
C'	14.4
D	7.21
E	3.61
E'	1.28
축방향 인장을 받는 F8T 볼트	8.44
축방향 인장을 받는 F10T 볼트	10.2
축방향 인장을 받는 F13T 볼트	4.32

참고로 <표 10>에 일정진폭 피로한계값을 나타내었다.

표 10. 일정 진폭 피로 한계값

상세범주	한계값(MPa)
A	165.0
B	110.0
B'	87.7
C	69.0
C'	82.7
D	48.3
E	31.0
E'	17.9
축방향 인장을 받는 F8T 볼트	100
축방향 인장을 받는 F10T 볼트	110
축방향 인장을 받는 F13T 볼트	80



2007년 AASHTO LRFD에는 강바닥판의 피로설계를 위한 구조상세범주가 새로이 제시되었으며 <표 11>에 이를 나타내었다

표 11. 강바닥판의 구조 상세범주

그 립 예	상 세	조 건 설 명	상세범주
	<p>종방향 또는 횡방향의 바닥판 또는 리브 이음 맞대기 일면 그루브용접</p>	(1) 세라믹 반침봉을 제거하고 응력과 평행한 방향으로 용접부를 연마한 경우	B
		(2) 세라믹 반침봉을 제거하고 용접부를 연마하지 않은 경우	C
		(3) 반침봉을 제거하지 않은 경우	D
	<p>볼트가 적용된 바닥판 또는 리브 이음부</p>	(4) 비대칭 이음부는, 응력 계산 시 편심의 영향을 고려해야 한다.	B
	<p>바닥판 또는 종리브 이음부 양면 그루브용접</p>	(5) 용접 연결부를 모재와 같은 단면이 되도록 편평하게 연마 하고, 단부도 응력방향으로 연마한 경우	B
		(6) 용접덧살의 높이가 용접폭의 20%를 넘지 않는 경우	C
	<p>현장용접을 위한 구멍이 있는 리브 용접이음부 맞대기 일면 그루브용접</p>	(7) 리브 이음을 위한 영구 반침봉을 적용한 경우 용접 갭 > 리브 두께 f =리브 바닥에서의 축응력 범위	D

표 11. 강바닥판의 구조 상세범주(계속)

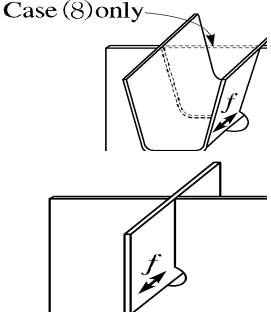
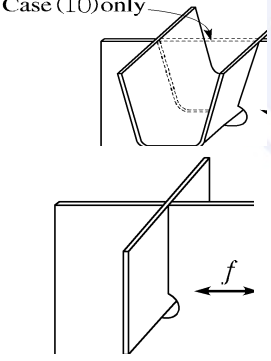
그 립 예	상 세	조 건 설 명	상세범주
	종리브와 가로보 교차부에서의 종리브판	(8) 개단면 종리브 또는 내부 다이아프램이 있는 폐단면 리브 f = 횡리브와 종리브 용접 하단부의 종리브판에 작용하는 축응력범위	C
	종리브와 가로보웹 사이의 필릿용접	(9) 내부 다이아프램이 없는 폐단면 리브 $f = f_1 + f_2$ f_1 = 종리브판에 작용하는 축응력범위	C
	종리브와 가로보 교차부의 가로보 웹	f_2 = 합리적 해석을 통해 얻는 종리브와 가로보 교차부의 상호작용에 기인한 면외 방향 휨에 의한 종리브판의 국부적인 휨응력범위	
	종리브와 가로보 웹 사이, 내부 다이아프램과 종리브 사이의 필릿용접	(10) 개단면 종리브 또는 내부 다이아프램이 있는 폐단면 리브 f = 가로보 웹에서 발생하는 용접과 수직한 방향의 축응력범위 $= f_1 + f_2$ f_1 = 웹에서의 축응력범위 f_2 = 지지점에서 종리브의 회전 에 기인한 면외 방향 휨에 의해 웹에 발생하는 휨응 력범위 (응력 f_1, f_2 모두 합리적 해 석을 통해 구함)	C
		(11) 내부 다이아프램이 없는 폐단면 종리브 $f = f_1 + f_2$ f_1 = 합리적 해석으로부터 구한 횡리브 또는 가로보 웹과 종리브 사이의 상호작용에 의한 응력범위 f_2 는 (10)과 동일	C



표 11. 강바닥판의 구조 상세범주(계속)

그림 예	상세	조건 설명	상세범주
	<p>횡리브 또는 가로보 웨브와 접합된 바닥판</p>	<p>(12) f = 가로보와 바닥판 용접부의 바닥판에 발생하는 축응력범위</p>	E

(3) 일본 JSSC 피로 지침

일본 강구조 협의회(JSSC)의 피로지침에서는 AASHTO와 동일하게 $\Delta\sigma_{caf}$ 보다 위 영역의 $m=3$ 인 설계 S-N 곡선이 $\Delta\sigma_{caf}$ 의 아래에 외삽하게 되는데 도중에 변동 하중에 대한 피로 한계를 나타내는 $\Delta\sigma_{val}$ 의 기호를 가지는 수평선이 존재한다. 즉, JSSC 피로 설계 지침서에서는 $\Delta\sigma_{val}$ 이하의 변동 응력 범위 성분은 피로 손상에 기여하지 않는 것으로 가정하고 있어 AASHTO 기준에 따른 피로 수명 평가보다 큰 피로수명이 평가될 것이다.

- ① 피로 설계 곡선을 그린 <그림 7~9>와 같이 수직응력을 받는 이음, 수직응력을 받는 케이블 및 고력 볼트, 전단응력을 받는 이음의 3계통으로 된다. 또 이에 대해 강도 등급에 따라 제각기 8개(등급 A~H), 5개(등급 K1~K5), 1개(등급 S)의 피로 설계 곡선이 설정되어 있다.

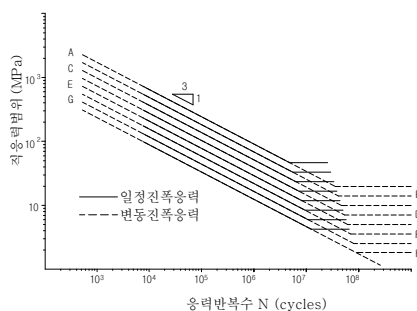


그림 7. 피로설계곡선
(수직응력을 받는 이음)

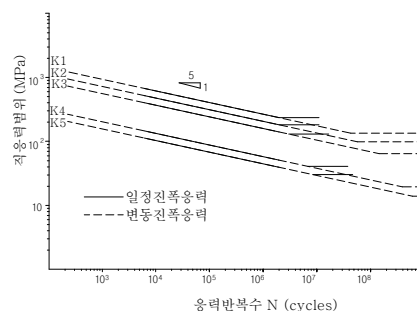


그림 8. 피로설계곡선
(수직응력을 받는 케이블 및 고력 볼트)

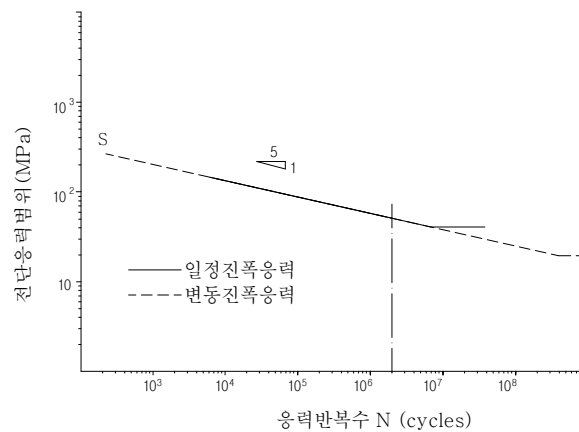


그림 9. 피로설계곡선 (전단응력을 받는 이음)

<표 12> 수직응력을 받는 이음, <표 13> 수직응력을 받는 케이블 및 고력 볼트, <표 14> 전단력을 받는 이음에 제각기 강도등급에 대해 2×10^6 회 응력 반복회수에서의 기본 허용응력 범위, 일정 진폭 응력 및 변동 진폭 응력에 대한 응력 범위의 소거 한계와 같이 표시한다. 일정 진폭 응력에 대한 응력 범위의 소거 한계는 변동 진폭 응력의 응력 범위 성분에 대한 모든 것이 그 이상이면 피로 검토가 필요 없는 한계치를 나타낸다. 변동 진폭 응력의 응력 범위 성분의 하나라도 일정 진폭 응력에 대한 응력 범위 소거 한계를 초과하는 경우 피로 손상에 기여하지 않는 응력 범위의 한계치로 변동 진폭 응력에 대한 응력 범위의 소거 한계를 사용한다.

- ② <그림 7, 8>과 같은 8개의 피로설계 곡선 $\Delta\sigma$ -N 곡선은 제각기 log 지상에 평행이다. 또 <그림 10>의 피로 설계 곡선은 거의 등 간격이며 이음 등급의 기본 허용 응력 범위의 차이는 25% 이다.

표 12. 기본 허용 응력 범위(수직응력을 받는 이음) $m=3$

강도 등급		응력 범위의 소거 한계	
명칭	2×10^6 회 기본허용응력범위 $\Delta\sigma_f$ (Mpa)	일정진폭응력 $\Delta\sigma_{ce}$ (N)*	변동진폭응력 $\Delta\sigma_{ve}$ (N)*
A	190	190 (2.0×10^6)	88 (2.0×10^7)
B	155	155 (2.0×10^6)	72 (2.0×10^7)
C	125	115 (2.6×10^6)	53 (2.6×10^7)
D	100	84 (3.4×10^6)	39 (3.4×10^7)
E	80	62 (4.4×10^6)	29 (4.4×10^7)
F	65	46 (5.6×10^6)	21 (5.6×10^7)
G	50	32 (7.7×10^6)	15 (7.7×10^7)
H	40	23 (1.0×10^7)	11 (1.0×10^8)



표 13. 기본 허용 응력 범위(수직응력을 받는 케이블 및 고력 볼트) m=5

강도 등급		응력 범위의 소거 한계	
명칭	2×10^6 회 기본허용응력범위 $\Delta \sigma_f$ (Mpa)	일정진폭응력 $\Delta \sigma_{ce}$ (N)*	변동진폭응력 $\Delta \sigma_{ve}$ (N)*
K 1	270	270 (2.0×10^6)	170 (2.0×10^7)
K 2	200	200 (2.0×10^6)	126 (2.0×10^7)
K 3	150	148 (2.1×10^6)	68 (1.0×10^7)
K 4	65	46 (1.1×10^7)	21 (5.7×10^8)
K 5	50	32 (1.9×10^7)	15 (8.2×10^8)

표 14. 기본 허용 응력 범위(전단 응력을 받는 이음) m=5

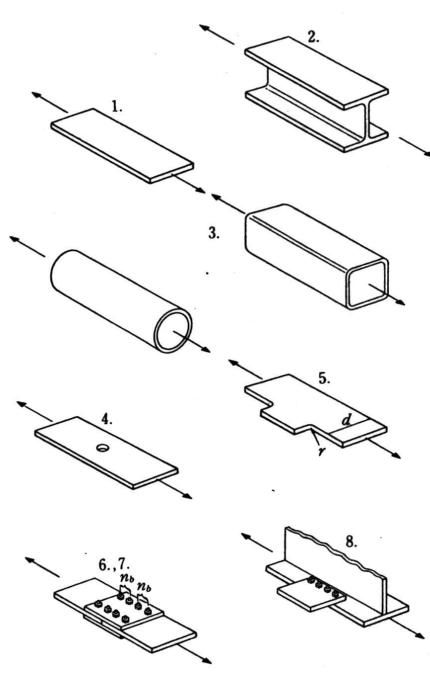
강도 등급		응력 범위의 소거 한계	
명칭	2×10^6 회 기본허용응력범위 $\Delta \sigma_f$ (Mpa)	일정진폭응력 $\Delta \sigma_{ce}$ (N)*	변동진폭응력 $\Delta \sigma_{ve}$ (N)*
S	80	67 (5.0×10^6)	43 (5.0×10^7)

* ()안의 N 수치는 동란과 같은 응력 범위 수치에 대한 응력 반복수의 개요치이며 참고치에 불과하다.

<JSSC 피로상세 범주>

표 15. 비용접 이음

강도등급 단위: MPa

이음 종류		강도등급	비고
1. 겹착판	(1) 표면 및 단면, 기계 마무리(조도 50s 이하).	A (190)	
	(2) 흑피 부착, 가스 절단, 절연(조도 100s 이하)	B (155)	
	(3) 흑피 부착, 가스 절단, 절연(현저한 조향은 제거)	C (125)	
2. 형 강	(1) 흑피 부착	B (155)	
	(2) 흑피 부착, 가스 절단, 절연(조도 100s 이하)	B (155)	
	(3) 흑피 부착, 가스 절단, 절연(현저한 조향 제거)	C (125)	
3. 심 레스 파이프		B (155)	
4. 원 공이 있는 모재 (순단면 응력, 실단면 응력)		C (125)	
5. 필릿 용접이 있는 모재	(1) $1/5 \leq r/d$ 절단면의 조도 50s 이하	B (155)	
	(2) $1/10 \leq r/d \leq 1/5$ 절단면의 조도 50s 이하	C (125)	
	(3) $1/5 \leq r/d$ 절단면의 조도 100s 이하	C (125)	
	(4) $1/10 \leq r/d \leq 1/5$ 절단면의 조도 100s 이하	D (100)	
6. 고력 볼트 마찰 접합 이음의 모재 (총단면응력)	(1) $1 \leq n_b \leq 4$	B (155)	
	(2) $5 \leq n_b \leq 15$	C (125)	
	(3) $16 \leq n_b$	D (100)	
7. 고력볼트 지압 접합 이음의 모재 ($n_b \leq 4$, 순단면 응력)		B (155)	
8. 검산 대상 방향의 응력을 전달하지 않는 고력 볼트 조임 구멍이 있는 모재 (순단면응력)		B (155)	

n_b : 응력방향의 볼트 개수

※(4,6,7,8) 구멍을 펀칭 전단으로 가공한 경우는 강도 등급을 1랭크로 내린다.



표 16. 맞대기 용접이음

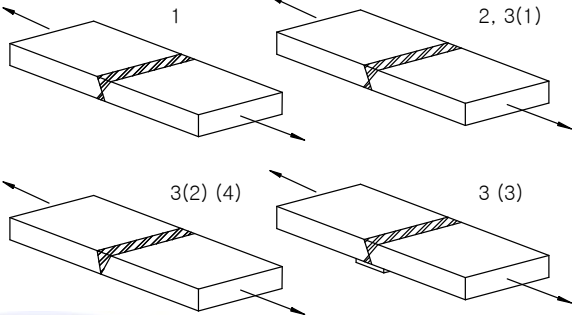
이음종류		강도등급	비 고
1. 잉여 상제한 이음		B (155)	
2. 지단 마무리한 이음		C (125)	
3.비마무리 이음	1) 양면용접	D (100)	
	2) 양호한 형상의 용융 용접이 있는 편면용접	D (100)	
	3) 보강 뒷댐 편면 용접	F (65)	※ 완전 용입 용접이며 용접부가 건전하다는 것을 전제로 한다. ※ 이음부가 테이퍼 식인 경우 그 구배를 1/5 이하로 한다. ※ 깊이 0.5mm 이상의 언더컷은 제거한다. ※ (1.2) 마무리는 언더컷이 남지 않게 해야 한다. 마무리 방향은 응력방향과 평행으로 한다.
	4) 뒷면 형상을 확일 할 수 없는 편면용접	F (65)	

표 17. 세로방향 용접이음

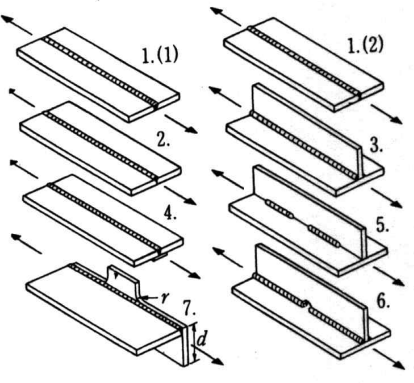
이음 종류		강도 등급	비고
1. 완전 용입 용접 이음 (용접부가 건전하다는 것을 전제)	(1)잉여상제	B (155)	
	(2)비무마리	C (125)	
2. 부분 용접 용접 이음		D (100)	
3. 필릿 용접 이음		E (80)	
4. 뒷댐 보강 용접 이음		E (80)	
5. 단속으로 하는 용접 이음		E (80)	
6. 스캘럽을 포함한 용접 이음		G (50)	
7. 펀칭 거싯의 필릿 부에 접하는 용접	(1) $1/5 \leq r/d$	D (100)	※ (1.(2), 2., 3.)용접봉 이음에 의해 생긴 비드 표면에 불규칙은 제거한다. ※ (2., 3.) 내재하는 결함(플로 홈 등의 원형으로 된 사향)의 폭이 1.5mm, 높이가 4mm를 초과하지 않는 것을 확인한 경우에 강도 등급을 C로 할 수 있다.
	(2) $1/10 \leq r/d \leq 1/5$	E (80)	

표 18. 크로스 용접 이음

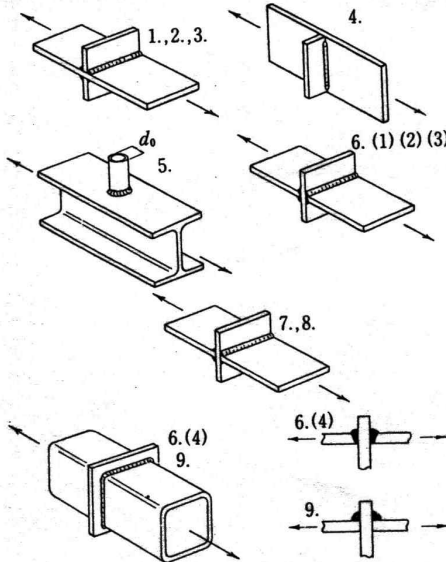
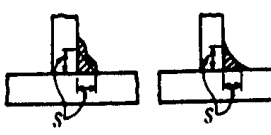
이음종류			강도 등급	비고
하중 비전 달형	1.미끄럼 지단이 있는 필릿 용접 이음		D (100)	 <p>※ (2., 6.(2), 7.(2))마무리는 언더컷이 남지 않게 해야 한다. 그라인더로 마무리하는 경우 마무리 방향을 응력방향과 평행으로 한다.</p> <p>※ (1., 6.(1), 7.(1)) 언더컷은 제거</p> <p>※ (3., 4., 5., 6.(3)(4), 7.(3)(4), 9.(1)) 깊이 0.5mm 이상의 언더컷은 제거한다.</p> <p>※ (8., 9.(2)) 네크 단면적은 (네크두께)×(용접 길이)에서 구한다.</p>  <p>네크 두께는 $s/\sqrt{2}$ 에서 구한다. 흠을 확보하고 부분 용입 필릿 용접으로 한 경우 네크 두께는 $(s + \text{흠 깊이})/\sqrt{2}$ 로 한다.</p> <p>※ (8., 9.(2))용접 다리 길이(또는 치수) s가 판두께의 0.4 미만의 이음에 대해서는 적용 범위 외로 한다.</p>
	2. 지단 마무리한 필릿 용접 이음		D (100)	
	3. 비 마무리의 필릿 용접 이음		E (80)	
	4. 용접의 시종점을 포함한 필릿 용접 이음		E (80)	
	5. 중공(속빈) 단면 부재를 필릿 용접한 이음	(1) $d_0 \leq 10\text{mm}$	F (65)	
		(2) $d_0 > 10\text{mm}$	G (50)	
하중 전 달 형	6. 완전 용입 용접		(1) 미끄럼이 지단이 있는 용접	D (100)
			(2) 지단 마무리 이음	D (100)
			(3) 비 마무리 이음	E (80)
			(4) 중공 단면 부재 (편면용접)	F (65)
	7.지단 파괴		(1) 미끄럼 지단이 있는 이음	E (80)
			(2) 지단 마무리 이음	E (80)
			(3) 비 마무리 이음	F (65)
			(4) 용접 시종점을 포함한 이음	F (65)
	필릿 및 부분 용입 용접	8. 루트면 파괴(네크 단면)		H (40)
			(1) 지단 파괴	H (40)
			(2) 루트 파괴 (네트단면)	H (40)
		9. 중공 단면 부재 (편면 용접)		



표 19. 거셋 용접 이음(부가판을 용접한 이음을 포함)

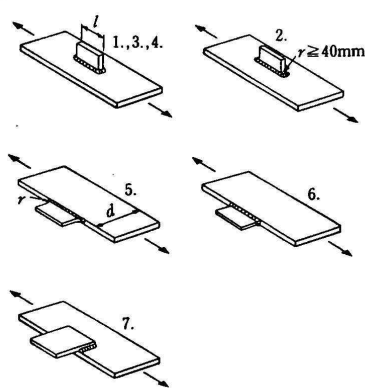
이음종류			강도 등급	비고
면 내 용 접	1. 거셋을 필릿 또는 그루브 용접한 이음($l \leq 100\text{mm}$)	(1) 지단 마무리	E (80)	
		(2) 비 마무리		
	2. 필릿이 있는 거셋을 그루브 용접한 이음(필릿 부 마무리)		F (65)	
	3. 거셋을 필릿 용접한 이음($l > 100\text{mm}$)		G (50)	
	4. 거셋을 그루브 용접한 이음($l > 100\text{mm}$)	(1) 지단 마무리	F (65)	
(2) 비 마무리		G (50)		
면 외 용 접	5. 필릿이 있는 거셋을 그루브 용접한 이음(필릿 부 마무리)	(1) $1/3 \leq r/d$	D (100)	※ (1.(1), 2., 4.(1), 5., 6.(1)) 마무리 는 언더컷이 남지 않게 해야 한다. 그라인더로 마무리하는 경우 마무리 방향을 응력방향과 평행으로 한다. ※ (1.(2), 3, 4.(2), 6.(2), 7.) 깊이 0.5mm 이상의 언더컷은 제거한다.
		(3) $1/5 \leq r/d < 1/3$	E (80)	
		(4) $1/10 \leq r/d < 1/5$	F (65)	
	6. 거셋을 필릿 용접한 이음	(1) 지단 마무리	G (50)	
		(2) 비 마무리	H (40)	
	7. 겹 거셋 이음의 모재			

표 20. 기타 용접 이음

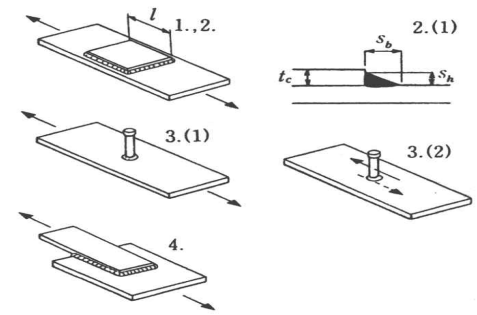
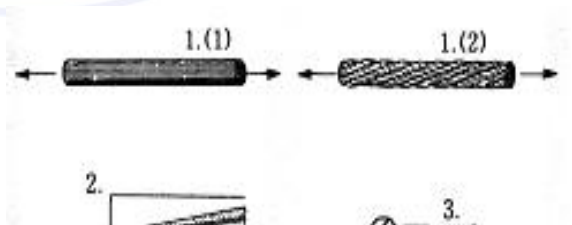
이음 종류		강도 등급	비고
1. 커버 플레이트를 필릿 용접으로 고정시킨 이음 ($l \leq 300\text{mm}$)	(1) 지단마무리	E (80)	
	(2) 비무마리	F (65)	
2. 커버 플레이트를 필릿 용접으로 고정시킨 이음	(1) 용접부 마무리	D (100)	
	(2) 비무마리	G (50)	
3. 커버 플레이트를 필릿 용접으로 고정시킨 이음	(1) 상판 단면	E (80)	<p>※ (1.(1), 2.(1)) 마무리는 언더 컷이 남지 않게 해야 한다. 그라인더로 연마하는 경우 마무리의 방향은 응력방향과 평행으로 한다.</p> <p>※ (1.(2), 2.(2)) 깊이 0.5mm 이상의 언더컷은 제거한다.</p> <p>※ (2.(1)) 다리 길이 s_h, s_b 는 $s_h \geq 0.8t_c, s_b \geq 2s$로 한다.</p>
	(2) 스테드 단면	S (80)	
4. 겹 이음	(1) 상판 단면	H (40)	
	(2) 첩접판 단면	H (40)	
	(3) 앞면 필릿 용접과 단면	H (40)	
	(4) 앞면 필릿 용접과 단면	S (80)	

표 21. 케이블 및 고력볼트

이음 종류		강도 등급	비고
1. 케이블 본체	(1) 평행선	K1 (270)	
	(2) 로 프	K2 (200)	
2. 케이블 정착부	(1) 평행선 새로운 정착부	K1 (270)	
	(2) 평행선 아연주입	K2 (200)	
	(3) 로 프 아연주입	K3 (150)	
3. 고력 볼트	(1) 전조	K4 (65)	<p>※ (2.(1)) 새로운 정착부와 케이블 체와 같은 정도의 피로 강도를 보유한 정착부 구조로 하는 공법이다.</p>
	(2) 절삭	K5 (50)	

(4) EUROCODE 3

- ① 유럽 통일 기준(EUROCODE 3)에서는 피로 강도 등급에 관계 없이 $N = 5 \times 10^6$ 에서 $\Delta \sigma_{caf}$ 가 나타나 $N < 5 \times 10^6$ 에서 $m=3$ 인 설계 S-N 곡선, $5 \times 10^6 < N < 10^8$ 에서 $m=5$ 인 설계 S-N 곡선, $N \geq 10^8$ 에서 피로 한계 $\Delta \sigma_{val}$ 를 채용하고 있다. $5 \times 10^6 < N < 10^8$ 인 설계 S-N 곡선의 기울기가 $N < 5 \times 10^6$ 인 설계 S-N 곡선의 기울기보다 작다. 따라서 EUROCODE 3에서는 $\Delta \sigma_{caf}$ 와 $\Delta \sigma_{val}$ 사이의 변동 응력 범위에 대해 그 일부 성분이 피로 손상에 기여하는 것으로 가정하고 있다. 또 EUROCODE 3에서는 $\Delta \sigma_{val}$ 이하의 변동 응력 범위 성분은 피로 손상에 기여하지 않는 것으로 가정하고 있다.

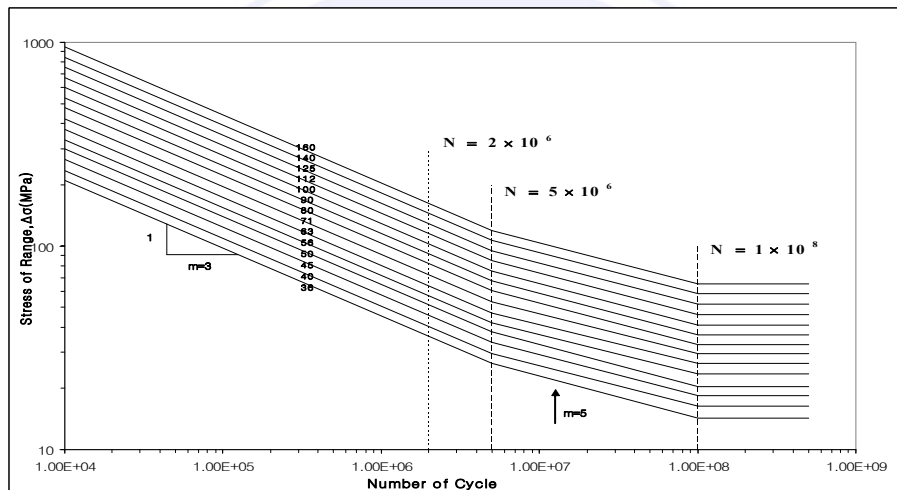


그림 10. Eurocode3 피로설계 곡선

- ② 따라서 $\Delta \sigma_{caf}$ 보다 아래 영역의 설계 S-N 곡선의 차이가 피로 수명에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 또한 현재 저응력이 발생하는 긴 수명 영역에 있어서 피로 시험의 결과가 매우 적기 때문에 $\Delta \sigma_{caf}$ 보다 아래 영역에 있어서 어느 규정이 타당한지는 아직 밝혀져 있지 않다. 하지만 강교의 피로설계는 긴 수명 영역에서 저응력이 발생하는 경우가 대부분이므로 좀더 많은 시험과 연구를 통해 변동 하중에 따른 S-N 곡선 확립이 강교의 피로 설계에 있어서 대단히 중요하다고 생각된다.

< Eurocode 3 피로 상세범주>

표 22. 비용접 상세

범주	구조상세	설명	요구조건
160		압연 및 압출제품 1) 평판 2) 압연 단면 3) 중공 단면	상세 1)~3) 날카로운 모서리, 표면은 그라인딩으로 가공
140			4) 가능한 보이는 모서리의 불연속면은 제거하며 절단면은 기계가공 또는 그라인딩으로 처리하며 거친면은 제거 5) 거친면은 모두 제거
125		절단 또는 가스 절단 플레이트 4) 기계가공 수준의 가스절단 5) ENV 1090-5의 절단능력을 지닌 가스 절단 $U \leq 0.4 + 1.00a$ $R_z \leq 70 + 1.20a$	상세 4)~5) -용접에 의한 수정이 없음 -요철부의 모서리(구배 1/4이하) 또는 그밖의 균열은 결함에 대해 그라인딩으로 처리 -설계 응력범위는 유효단면에 의해 설계
112		6) 고강도 볼트로 체결된 양면 볼트 연결 (preloading)	6) 전단면상에 계산된 응력
		6) 볼트 주입된 양면 볼트 연결 (preloading)	6) 전단면상에 계산된 응력
90		7) 꼭 맞는 양면 볼트 연결 (preloading)	7) 유효단면상에 계산된 응력
		7) 고강도볼트로 체결된 양면볼트 연결(preloading)	7) 유효단면상에 계산된 응력
		8) 고강도볼트로 체결된 편면 연결(preloading)	8) 전단면상에 계산된 응력
		8) 볼트 주입된 편면 볼트 연결 (preloading)	8) 전단면상에 계산된 응력
		9) 휨과 전단력을 받는 구멍이 있는 부재	9) 유효단면상에 계산된 응력

※ Weathering steel 은 다음의 낮은 범주를 사용한다.



표 22. 비용접 상세 (계속)

범주	구조상세	설명	요구조건
80	<p>⑩</p>	10) 꼭 맞는 볼트로 체결된 편면 연결	10) 유효단면상에 계산된 응력
		10) 볼트 주입된 편면 볼트 연결 (Non-preloading)	10) 유효단면상에 계산된 응력
50	<p>⑪</p>	11) 구멍이 있는 non-preloading 된 편면 연결	11) 유효단면상에 계산된 응력
50	<p>⑫</p>	12) 인장을 받는 볼트 및 가는 케이블 preloading 된 볼트에서, 볼트의 응력범위는 preloading 의 수준 및 연결의 상세를 따른다.	12) 볼트의 인장응력범위에 사용되어 계산된 인장 응력
100 m=5	<p>⑬</p>	일면 및 이면 전단을 받는 볼트 13) Fitted bolts (5.6, 8.8 또는 10.9 등급의 볼트)	13) -설계전단응력은 볼트의 목부분을 고려하여 계산 -지주 타입의 fitted 볼트는 이 상세를 고려하여 계산

표 23. 용접조립단면

범주	구조상세	설명	요구조건
125		<p>연속적인 종방향 용접</p> <p>1) 양쪽면에 자동으로 실시한 맞대기용접</p> <p>2) 자동 필릿 용접된 덮개판 단부는 <표 29>의 상세 5)를 따른다.</p>	<p>상세 1) ~2)</p> <p>- 기술자가 수정할때와 수정된 것이 적절한지 조사할 때까지 제외하고 시중점의 위치를 허용하지 않음</p>
112		<p>3) 자동 필릿 용접 및 맞대기용접은 측면 및 시중점위치에도 실시</p> <p>4) 자동 맞대기용접은 연속된 백킹바를 사용한 한쪽 측면만 실시</p>	<p>4) 이 상세에서 시중점 위치를 포함할때는 피로상세100을 따른다.</p>
100		<p>5) 수동 필릿 및 맞대기 용접시</p> <p>6) 수동 및 자동 용접은 특별하게 박스거더의 측면에 실시</p>	<p>6) 플렌지와 웹사이의 용접에 있어 제작시 오차를 줄이고 루트면을 적절히 만들기 위해 연속적인 수행이 되도록 갖추어야한다.</p>
100		<p>7) 수정을 위한 자동 또는 수동 필릿 및 맞대기 용접시</p>	<p>7) 충분하게 입증된 개선 방법은 원래 피로상세에 포함시킨다.</p>
80		<p>8) 횡방향 맞대기 용접과 교차하는 연속된 종방향 용접</p>	
		<p>간헐식 종방향 용접</p> <p>9) 스티치(Stitch) 또는 텍(Tack) 용접은 그 결과로서 연속적인 용접이 되지 않음</p>	<p>9) 간헐식 필릿용접 (Gap ratio $g/h \leq 2.5$)</p>
71		<p>10) 코프(Cope) 홀에서 연속된 용접 끝단</p>	<p>10) Cope 홀은 용접재료로 채우지 않음</p>



표 24. 맞대기 용접

범주	구조상세	설명	요구조건
112		백킹바(Backing bar) 없음 1) 플레이트 및 압연단면에서 횡방향 용접 2) 조립전에 플레이트 거더에서 플렌지와 웹 용접 3) 플레이트 및 테이퍼된 부재에서 폭 및 너비구배가 1/4 이하의 횡방향 용접	상세 1)~3) - 모든 용접은 지면과 동일한 높이에서 화살표방향과 평행
90		4) 플레이트 및 판의 횡방향 용접 5) 플레이트 및 테이퍼된 부재에서 폭 및 너비구배가 1/4 이하의 횡방향 용접	상세 4)~5) - 용접 덧살 두께는 용접폭의 10%를 넘지 않아야 하며 용접은 평평한 곳에서 실시
80		6) 압연단면 또는 용접한 플레이트 거더에서 연장하는 코프 홀(cope hole) 없이 횡방향으로 맞대기 용접한 경우 7) 플레이트 및 판의 횡방향 용접	상세 6), 7) - 용접 덧살 두께는 용접폭의 20%를 넘지 않아야 함 상세1)~7) - 양면 용접
36		8) 일방향 맞대기 용접	8) 백킹바(Backing bar) 없음
71		백킹 스트립(Backing strip) 있는 경우 9) 횡맞대기이음 10) 폭 및 너비의 구배가 1/4 이하인 테이퍼된 횡방향 맞대기 용접	상세 9), 10) - 응력을 받은 플레이트에서 모서리로부터 10mm이상은 제거하고 백킹 스트립(backing strip)을 붙여 필릿 용접 실시
50		11) 백킹바(Backing bar)를 사용한 횡방향 맞대기 용접	11) 백킹 스트립(Backing strip) 필릿 용접 끝단이 10mm 이하인 곳 또는 용접이 적절하지 않을 때

표 25. 하중 비전달 용접부착물


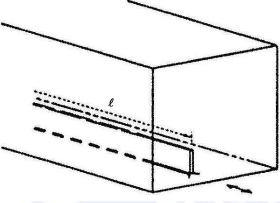

범주	구조상세	설명	요구조건
80	$l \leq 50\text{mm}$	 ① 	
71	$50 \leq l \leq 80\text{mm}$		
63	$80 \leq l \leq 100\text{mm}$		
56	$l > 100\text{mm}$		
90	$r/w \geq 1/3$ $r > 150\text{mm}$	 ②	2) 용접 전 기계가공이 나 가스절단된 거 셋 플레이트에 만 들어진 매끄러운 곡률 반경 r 이 형 성되며 그후에 횡 방향 용접 슬래그 를 완전히 제거하 여 화살표방향과 평행하게 그라인딩 실시
71	$1/6 \leq r/w \leq 1/3$		
45	$r/w < 1/6$		



표 25. 하중 비전달 용접부착물(계속)

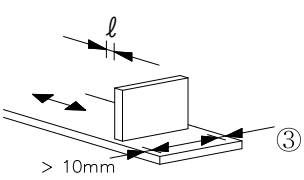
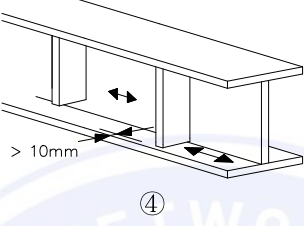
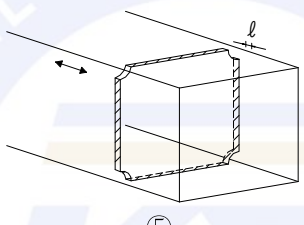
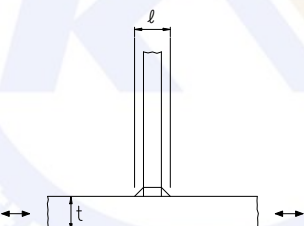
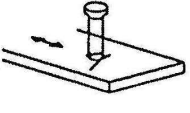
범주	구조상세			설명	요구조건
80	$l \leq 50$	all t		<p>횡방향 부착</p> <p>3) 플레이트의 모서리에서 10mm 이상 마무리된 용접</p> <p>4) 보와 플레이트 거더에 용접된 수직 스틱프너</p> <p>5) 플렌지와 웹에 용접된 박스 거더의 다이어프램</p>	4) 응력범위는 스틱프너가 웹에서 제거되었다면 주응력을 사용하여 계산한다.
71	$50 \leq l \leq 80$	all t			
63	$80 \leq l \leq 100$	all t			
56	$100 \leq l \leq 120$	all t			
56	$l > 120$	$0 \leq t \leq 20$			
50	$120 \leq l \leq 200$ > 200	$t > 20$ $20 < t \leq 30$			
45	$200 \leq l \leq 300$ > 300	$t > 30$ $30 \leq t \leq 50$			
40	> 300	$t > 50$			
단위: mm					
80				6) 본 부재에 전단 연결재로 용접된 효과	

표 26. 하중 전달 용접이음부

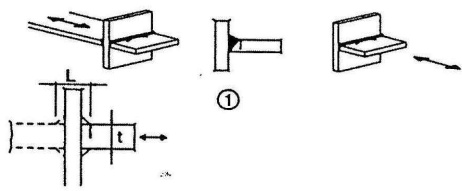
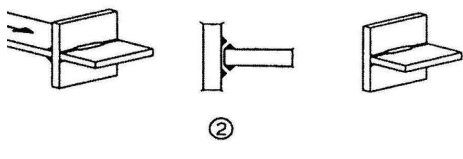
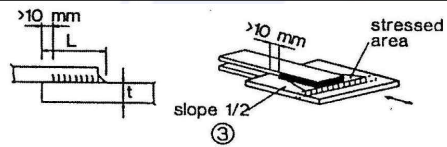
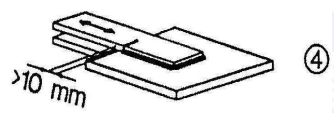
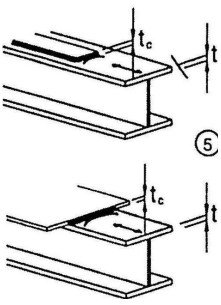
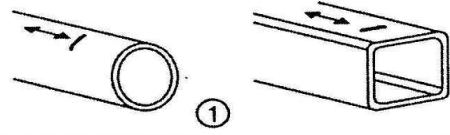
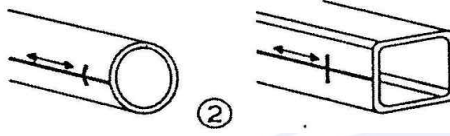
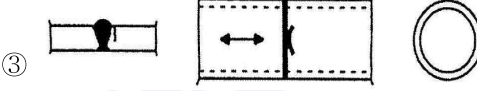
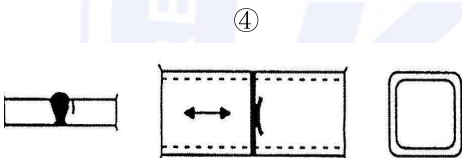
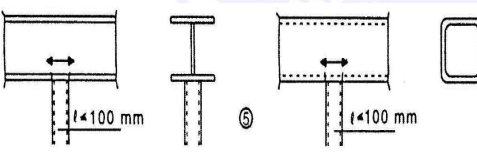
범주	구조상세		설명	요구조건	
71			십자 및 T 형 접합 1) 전체적으로 관통된 맞대기 용접과 부분적인 접합에 있어서의 선단 파괴	1) Reference Standard 9-Quality Level 3에서 제시한 허용오차를 넘는 불연속면을 세심하게 살핀다.	
36			2) 부분적인 T 형 맞대기이음이나 필릿 용접, ENV1993-1-1에 제시된 T 형 맞대기이음시 Root 파괴	2) 부분적인 용입용시 두가지의 피로 평가를 실시 ① 상세 36* σ_w 와 상세 80의 τ_w 를 사용하여 ENV 1993-1-1의 9.4.3으로 계산된 Root 상의 균열 ② 선단 균열은 하중재하시 응력범위에 의해 평가된다.	
63			Overlapped welded joint 3) 필릿 용접	3) 그림에서 보여진 것처럼 기본 영역에서 평가된 주요부재의 응력	
45			Overlapped 4) 필릿 용접	4) 응력은 오버랩된 플레이트에서 계산 상세 3), 4) - 플레이트끝단에서 용접부를 10mm 이상 제거 - 상세 7에서 사용한 것처럼 용접부의 선단 균열을 확인해야한다.	
	$t_c < t$	$t_c > t$		보와 플레이트 거더의 Cover plates 5) 정면 용접을 하거나 하지 용접된 하나 또는여러개의 Cover plate	5) 덮개판이 플랜지의 너비보다 크면 정면 용접 필요. 이 용접은 언더컷을 제거하기위해 평평한 곳에서 실시
56	$t \leq 20mm$	-			
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20mm$			
45	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$			
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$			
36	-	$t > 50$			



표 26. 하중 전달 용접이음부(계속)

범주	구조상세	설명	요구조건
56		6) 보와 플레이트 거더의 덮개판	
80		7) 플레이트 거더에서 플랜지에서 복부판까지 용접한 것처럼 전단류가 흐르는 연속적인 필릿 용접. 전단에 있어 연속적인 완전용입맞대기 용접은 상세 100을 기준으로 한다. 8) lap joint 가 있는 필릿용접	7) 용접 목두께를 사용하여 응력범위 산정 8) - 용접의 전체 길이를 고려한 목두께로부터 응력범위 산정 - 플레이트끝단에서 용접부를 10mm 이상 제거
80		전단을 받는 용접부 9) 합성으로 작용	9) 전단연결재의 공칭 단면으로 전단응력 산정
71		Deck plate 용접에서 사다리꼴 스틱프너 10) 완전 용입 용접	10) 완전용입 맞대기 용접에 있어서, 휨응력 범위는 스틱프너의 두께를 기준으로 하여 계산
50		11) 필릿 용접	11) 필릿 용접 및 부분 용입 용접에 있어서, 휨응력범위는 용접의 목두께 또는 그 보다 작으면 스틱프너의 두께를 기준으로하여 계산

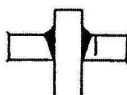
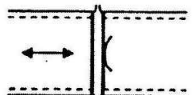

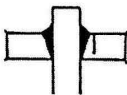
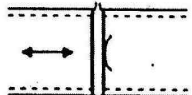
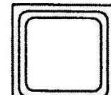
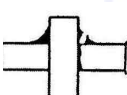
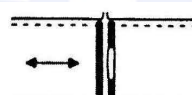

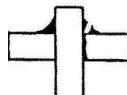
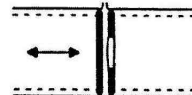

표 27. 중공단면

범주	구조상세	설명	요구조건
160		압연 및 압출 제품: 1) 비용접 요소.	1) 그라인딩으로 표 면 흐름과 각진 모서리 향상시킴.
140		연속적인 종방향 용접 2) 종방향 자동 seam 용접 (다른 경우에 대해서는 표 L.2 참 조)	2) 시중점 위치는 없으며 품질 등급 3의 내구성이상의 결합에 없어야 한 다.
71		종방향 맞대기 용접 3) 원형중공단면 간의 맞대기 용접	상세 3),4) - 용접 덧살두께 ≤ 용접폭의 10% - ENV 1090-5상에 정의된 품질 등급 3 의 내구성 이상 의 결합 발견이 없어야 하며 평평 한 위치에서 용접 되어야 한다.
56		4) 직사각형 중공 단 면간의 맞대기 용접	
71		용접 부착 5) 원형 또는 직사각 형 중공단면, 그 외 단면에 대해서 는 필릿 용접	5) - 하중비전달형 - 응력방향과 평행 위치상에서의 오 차폭 ≤ 100mm - 그 외 경우 표L.4 참조

*: $t \leq 12.5\text{mm}$



표 28. 중공단면(계속)

범주	구조상세	설명	요구조건
50	   <p>⑥</p>	<p>Welded splices:</p> <p>6) 임의의 판을 가지는 원형중공단면 간의 맞대기 용접</p>	<p>상세 6), 7)</p> <p>-용접 덧살두께 ≤용접폭의10%</p> <p>-ENV 1090-5상에 정의된 품질등급 3 의 내구성이상의 결함발견이 없어야 한다.</p>
45	   <p>⑦</p>	<p>7) 임의의 판을 가지는 직사각형중공단면 간의 맞대기 용접</p>	<p>-$t \leq 8\text{mm}$이면 상세 1등급이상으로 분류.</p>
40	   <p>⑧</p>	<p>8) 임의의 판을 가지는 원형중공단면 간의 필릿용접</p>	<p>상세 3),4)</p> <p>-하중 전달형</p> <p>-벽두께 $t \leq 8\text{mm}$</p>
36	   <p>⑨</p>	<p>7) 임의의 판을 가지는 직사각형중공단면 간의 필릿용접</p>	

*: $t \leq 12.5\text{mm}$

표 28. 격자 거더 연결부

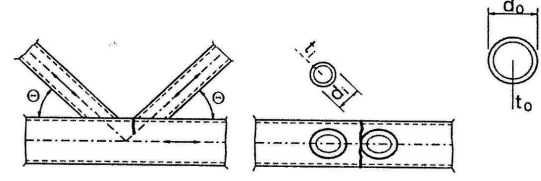
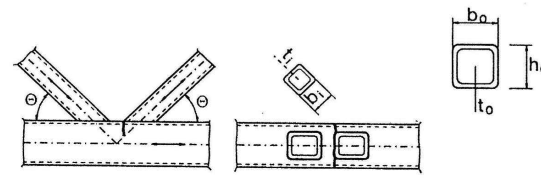
범주	구조상세 및 설명		요구조건
90 [m=5]	$\frac{t_o}{t_i} \geq 2,0$	Gap joints : [gap은 g : 평면의 편심 $e_{i/p}$ 은 +ve] 상세 1) : 원형 준공단면, 연결부 K와 N ①	상세 1)와 2) - chord와 brace에서 필요한 평가 분류 - 비율 t_o/t_i 의 중간수치는 상세 범주 사이에 선형적으로 삽입한다. - 필릿용접은 벽 두께 $t \leq 8\text{mm}$ 인 브레이싱에서 허용된다.
45 [m=5]	$\frac{t_o}{t_i} \geq 1,0$		- $t \leq 12.5\text{mm}$ (만약 $t > 12.5\text{mm}$ 일 경우 ENV 1993-1-1의 9.6.3을 참조하라) - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_o/t_o \leq 25$ - $d_o/t_o \leq 25$ - $0.4 \leq b_i/b_o \leq 1.0$ - $0.25 \leq d_i/d_o \leq 1.0$ - $b_o \leq 200\text{mm}$ - $d_o \leq 300\text{mm}$ - $-0.5h_o \leq e_{i/p} \leq 0.25h_o$ - $-0.5d_o \leq e_{i/p} \leq 0.25d_o$ - $e_{o/p} \leq 0.02b_o$ or $\leq 0.02d_o$ [$e_{o/p}$ 은 평면외 편심]
71 [m=5]	$\frac{t_o}{t_i} \geq 2,0$	Gap joints : [gap은 g : 평면의 편심 $e_{i/p}$ 은 +ve] 상세 2) : 직사각형 준공단면, 연결부 K와 N ②	
36 [m=5]	$\frac{t_o}{t_i} \geq 1,0$		상세 2) $0.5(b_o - b_i) \leq g \leq 1.1(b_o - b_i)$ 와 $g \geq 2t_o$



표 28. 격자 거더 연결부(계속)

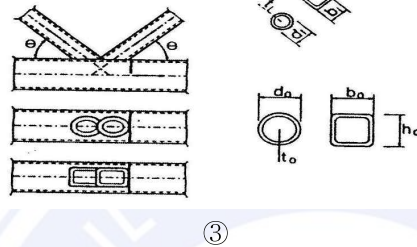
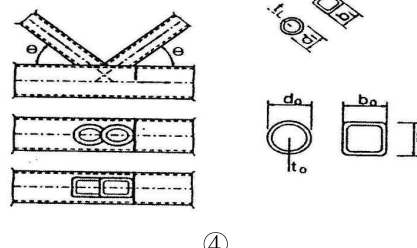
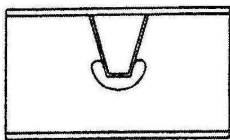
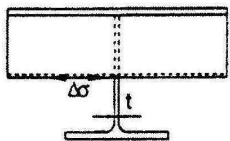
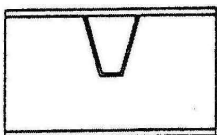
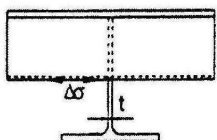
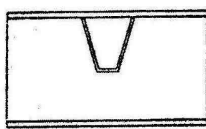
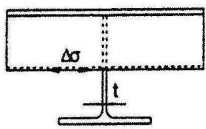
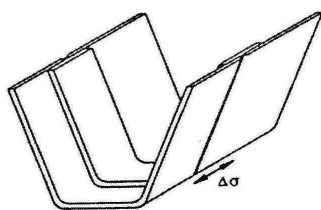
범주	구조상세 및 설명		요구조건
71 [m=5]	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1.4$	<p>Overlap joints : [overlap = (q/p) × 100% : 평면의 편심 $e_{i/p}$은 -ve] 상세 3) : 원형 또는 사각형 준공단면, 연결부 K</p>  <p style="text-align: center;">③</p>	<p>상세 3)와 4)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 30% ≤ overlap ≤ 100% - chord와 brace에서 필요한 평가 분류 - 비율 t_0/t_i의 중간수치는 상세 범주 사이에 선형적으로 삽입한다. - 필릿용접은 벽 두께 $t \leq 8\text{mm}$를 가진 브레이싱에서 허용된다. - $t \leq 12.5\text{mm}$(만약 $t > 12.5\text{mm}$일 경우 ENV 1993-1-1의 9.6.3을 참조하라) - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_0/t_o \leq 25$ - $d_0/t_o \leq 25$
56 [m=5]	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1.0$		<ul style="list-style-type: none"> - $0.4 \leq b_i/b_0 \leq 1.0$ - $0.25 \leq d_i/d_0 \leq 1.0$ - $b_0 \leq 200\text{mm}$ - $d_0 \leq 300\text{mm}$ - $-0.5h_0 \leq e_{i/p} \leq 0.25h_0$ - $-0.5d_0 \leq e_{i/p} \leq 0.25d_0$ - $e_{0/p} \leq 0.02b_0$ or $\leq 0.02d_0$ [$e_{0/p}$은 평면의 편심이다]
71 [m=5]	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1.4$	<p>Overlap joints : [overlap = (q/p) × 100% : 평면의 편심 $e_{i/p}$은 -ve] 상세 4) : 원형 또는 사각형 준공단면, 연결부 N</p>  <p style="text-align: center;">④</p>	<p>상세 2)</p> <p>$0.5(b_o - b_i) \leq g \leq 1.1(b_o - b_i)$ 와 $g \geq 2t_o$</p>
50 [m=5]	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1.0$		

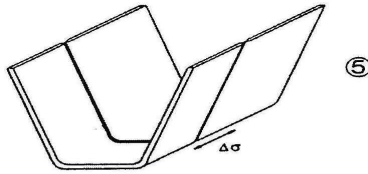
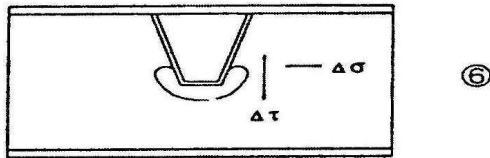
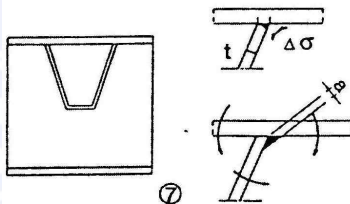
표 29. 철도교의 폐단면 리브적용 강바닥판

범주	구조상세		설명	요구조건
80	$t \leq 12\text{mm}$	  ①	1) 가로보 상에 추가적인 스켈럽을 가지는 연속적인 종방향 리브	1) 리브 상의 휨응력 범위 $\Delta\sigma$ 를 기초로 한 평가
71	$t > 12\text{mm}$			
80	$t \leq 12\text{mm}$	  ②	2) 가로보 상에 추가적인 스켈럽을 가지지 않는 연속적인 종방향 리브	2) 리브 상의 휨응력 범위 $\Delta\sigma$ 를 기초로 한 평가
71	$t > 12\text{mm}$			
36	  ③		3) 가로보 양면으로 리브가 각각 분리된 경우	3) 리브 상의 휨응력 범위 $\Delta\sigma$ 를 기초로 한 평가 (철도교에서는 사용하지 않는다)
71	 ④		9) steel backing plate를 가지는 완전 용입 용접을 가지는 리브 상 연결	2) 리브 상의 휨응력 범위 $\Delta\sigma$ 를 기초로 한 평가

※ 철도교에서는 일면 맞대기 용접은 사용하지 않는다.

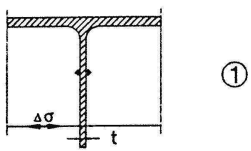
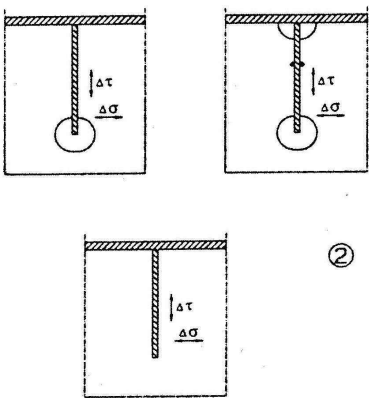


표 29. 철도교의 폐단면 리브적용 강바닥판(계속)

범주	구조상세		설명	요구조건
112	표 L.3 상세 1), 2), 3)		5) backing plate 가 없는 양면 완전 용입 용접	1) 리브 상의 휨응 력 범위 $\Delta\sigma$ 로 평가
90	표 L.3 상세 4), 5)			
80	표 L.3 상세 6), 7)			
36			6) 가로보 상에 연속적인 종방 향 리브의 연결	3) 복부에서의 전 단응력 범위 $\Delta\tau$ 와 휨응력 범 위 $\Delta\sigma$ 를 기초 로 한 평가 $\Delta\sigma_{eq} = [\Delta\sigma^2 + \Delta\tau^2]^{0.5}$
71	표 L.5 상세 10)		7) V-단면 리브 또는 사다리꼴 리브의 바닥판 과의 용접연결	7) 횡방향 휨에 의 한 용접목에서 의 휨응력 범위 $\Delta\sigma$ 를 기초로 한 평가
50	표 L.5 상세 11)			

※ 철도교에서는 일면 맞대기 용접은 사용하지 않는다.

표 30. 철도교의 개단면 리브적용 강바닥판

범주	구조상세		설명	요구조건
80	$t \leq 12\text{mm}$		1) 거더 단면에 연속 중 리브의 연결	1) 평가는 리브에서 휨응력 범위 $\Delta\sigma$ 에 기초를 둔다.
71	$t > 12\text{mm}$			
36			2) 거더 단면에 연속 중 리브의 연결	2) 평가는 복부에서, 아래 응력 공식에 따라, 전단응력 범위 $\Delta\tau$ 와 휨응력 범위 $\Delta\sigma$ 의 조합에 기초를 둔다. $\Delta\sigma_{eq} = [\Delta\sigma^2 + \Delta\tau^2]^{0.5}$



RECORD HISTORY

Rev.0('12.12.5) 철도설계기준 철도설계지침, 철도설계편람으로 나누어져 있는 기준 체계를 국제적인 방법인 항목별(코드별)체계로 개정하여 사용자가 손쉽게 이용하는데 목적을 둬.

