

Crane Runway Girder의 피로파손과 안정성평가

정희돈 · 이용상 · 조일현

Fatigue Cracking and Assessment of Structural Integrity of Crane Runway Girders

Hee-Don Jeong, Yong-Sang Lee and Il-Hyun Cho



- 정희돈(산업과학기술연구소 철강계 풀연구부문)
- 1956년생
- 파괴역학을 전공하였으며, 구조물의 현상태 및 수명예측을 위한 각종 비파괴검사의 개발과 적용에 관심을 가지고 있다.



- 이용상(포항제철(주) 포항제철소 설비 기술부 기계기술팀)
- 1955년생
- 기술사, 비파괴검사를 이용한 설비 안정성 평가와 설비의 방식기술 및 수명연장에 관심을 가지고 있다.



- 조일현(포항제철(주) 포항제철소 설비 기술부 기계기술팀)
- 1961년생
- 피로파괴를 전공하였으며, 제철설비의 안정성평가와 피로수명예측에 관심을 지고 있다.

1. 배경

설계시에 최대의 부하조건을 감안하고, 충분한 설계상의 안전율을 고려했음에도 불구하고 구조물이 내구수명 이전에 파손되는 원인으로서는, 다음과 같은 몇 가지의 사항을 대표적으로 들 수 있을 것이다.

- ① 설계시에 고려했던 것보다 사용조건이 더욱 가혹해 졌다는 점.
 - ② 설계상의 실수나 제작상의 부주의에 의한 부분적인 과대부하의 작용
 - ③ 관리 및 보수대책의 미흡
- 역으로 말하면, 그림 1의 평형관계에서도 알 수 있듯이 상기의 세 가지 항목중 한 가

지만이라도 관여하게 되면 파손사고의 가능성은 피할 수 없을 것이다. 여기서 ①과 ②의 사항에 대한 대책은 당연히 구조물의 제작 이전에 충분한 검토가 이루어져야 할 것이며, ③에 관해서는 구조물의 사용이 개시된 시점에서부터 구조물의 폐기때까지 지속적으로 이루어져야만 파손사고를 예방할 수 있을 것이다. 또한, 파손사고는 파손의 원인을 내포하고 있는 특정 부분에서 집중적으로 발생하기 때문에, 구조물의 설계와 제작 그리고 관리/보수가 서로 다른 각도에서 실시되어야만 대형사고를 방지할 수 있다. 다시 말해서 설계자의 관점은 안전율을 고려한 부하조건을 기반으로 하는, 구조물의 전반적인 설계자체에 한정되기 쉽다. 한편으로는 설계

시에 고려할 수 없었던 사용환경(조건)이 실제로는 구조물의 안정성에 큰 영향을 미칠 수도 있기 때문에 설계 제작과 관리는 서로 동등한 입장에서 그리고 별도의 관점에서 이루어져야 할 것이다. 여기서 정량적인 설비의 관리 및 보수를 행할때 선행되어야 할 사항은 구조물의 현상태를 정확하게 예측하는 것이 필요하게 된다. 현상태를 정확하게 평가한다는 것은 향후상태의 예상을 가능하게 하며, 결국 설비의 안정성 평가 및 설비의 수명평가가 이루어지기 때문이다. 또한 부분적인 보수대책의 수립에 관한 정량적인 정보를 제공하게 되어 구조물의 전반적인 수명연장과도 상통하게 될 것이다. 구조물파손의 직접적인 원인을 살펴 보면 다양각색이지만, 경험상으로 보아 구조물 부재의 피로현상에 의한 균열의 발생 진전이 가장 일반적이라 할 수 있다.

현재 국내의 수많은 공장에서 움직이고 있는 대표적인 운반기계인 크레인의 구조 부재들은 피로하중을 받는 대표적인 설비로서, 제작 당시에 피로설계 개념이 적용되지 않았던 것들이 상당수를 차지하고 있다. 최근에 작성된 설계기준에 대입시켜 보면 피로파손의 가능성이 증가하고 있는 추세이며, 실제로 균열이 자주 발견되고 있는 관계로, 이에 대한 대책 수립이 시급한 실정이다. 이와 같은 배경하에서 이 글에서는 크레인 런웨이 거더의 일반적 사항과 지금까지의 손상에 그리고 향후 거더의 안정성평가가 어떠한 방향

으로 진행되어야 할 것인가에 대해서 문헌조사 및 필자들의 경험을 토대로 생각해 보기로 한다.

2. 크레인 런웨이 거더의 구조와 손상

2.1 거더의 대표적 구조

크레인에는 수많은 종류가 있으나, 이 글에서는 그림 2에 보이는 바와 같은 다리형 크레인(bridge type crane)에 한정하기로 한다. 일반적으로, 그림에 나타난 바와 같이 수평방향의 운반운동을 담당하는 트롤리(trolley)를 지지하는 거더를 크레인 거더

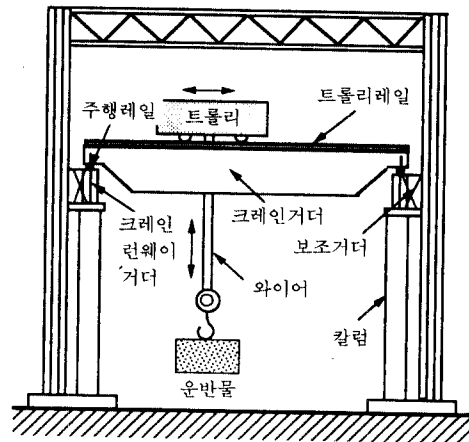


그림 2 다리형 크레인의 개략도

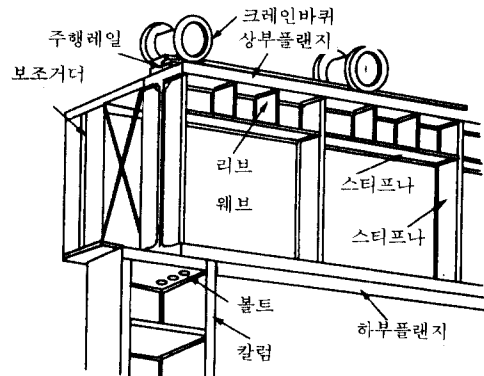


그림 3 크레인 런웨이 거더의 구성

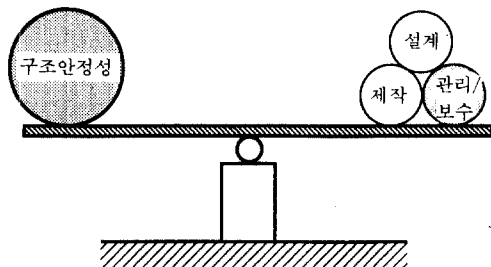


그림 1 구조물의 안전성에 미치는 영향인자들

(crane girder)라고 하며, 크레인의 주행을 위한 거더를 크레인 런웨이 거더(crane runway girder)라고 말한다. 크레인 런웨이 거더의 일반적인 형태를 그림 3에 나타낸다. 크레인 런웨이 거더는 크게 나누어, ① 크레인 레일을 받치고 있는 상부 플랜지(upper flange), ② 수직 및 압축응력에 대응하여 결정되는 웨브(web), ③ 웨브의 굽힘 및 비틀림 변형을 방지하기 위한 스티프너(stiffener) 그리고 ④ 하부플랜지(lower flange) 등으로 구성되어 있다. 한편 이와 같은 거더를 지면으로부터 지지하기 위한 컬럼(column)이 있으며, 거더의 수평방향 지지력을 위한 보조거더(back girder)가 연결되어 있다.

2.2 거더의 주요 손상 부위

종래는 크레인의 가동률이 그다지 높지 않았고, 또한 크레인의 속도도 저속이었으며, 공장의 내구 수명중에는 반복하중을 받아도 피로에 의한 파손은 일어나지 않을 것으로 판단하고 있었다. 이것은 일본의 경우만 생각하더라도 강구조물의 설계에 있어서 피로 문제를 정량적으로 도입한 기준이 70년대 말에야 완성되었던 점에서도 알 수 있으며, 현

재 운행중인 수많은 노후 크레인 구조물들이 그 이전의 설계기준에 맞추어져 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 그러나 근래에 들어 크레인의 대형화 내지는 고속화와 더불어 가동률도 증가하게 되어 피로에 의한 균열의 발생 가능성이 높아지고 있는 실정이다. 실제로 이와 같은 피로균열의 문제에 대한 수많은 보고가 나오고 있다. 아직 국내에서는 체계적인 통계가 없으나 미국과 일본에서 발행된 보고서에 의하면, 크레인 거더 및 런웨이 거더에서 발견되는 손상은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 즉, 중간 스티프너와 웨브에서의 손상과 스티프너 사이의 웨브와 플랜지의 필렛용접부 등을 들고 있다. 이러한 보고서에서는 손상의 발생 경위 등에 대해서도 설명하고 있는데, 특히 웨브에서의 균열은 웨브와 스티프너의 연결부위 즉 필렛용접부의 끝단에서 발생되고 있음을 보이고 있다.^(1~5) 또한 이러한 균열들은 처음에는 용접부와 평행하게 진전되다가 웨브쪽으로 진전되는 경향을 나타내고 있다고 보고했는데 이와 같은 균열은 국내의 수많은 거더에서도 자주 관찰되는 유형이라 할 수 있다. 유럽의 경우에는 2차 세계대전 이후 용접시공이 급속하게 증가됨에 따라 크레인 거더의 손상은 미

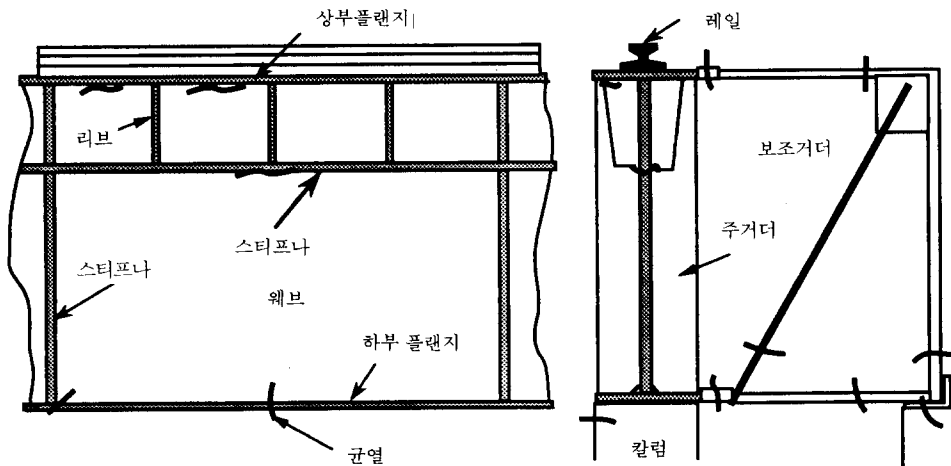


그림 4 플레이트형 거더에서 균열이 발생되기 쉬운 부위들

국보다 먼저 보고되어 왔다. 그들도 다른 외국과 마찬가지로 상부 플랜지와 웨브 사이의 균열을 주목하였으며, 균열의 발생방지를 위해서 플랜지와 웨브의 정밀한 접촉과 완전용입(pull penetration) 용접을 권장하게 되었다. 상부 플랜지와 웨브 사이의 용접부의 균열에 대해서는 수많은 보고가 발표되었고 본질적인 원인으로서, 편심이나 크레인의 수평하중 그리고 용접부 지단의 언더컷(under cut) 등에 의한 웨브의 굽힘 및 응력집중 등을 들고 있다. 이와 같은 균열의 대표적 발생부위는 그림 4와 같으며, 다음과 같이 정리된다.

- (1) 플레이트형 거더의 경우
 - (a) 상부 플랜지와 웨브 접합부에서의 균열
 - (b) 리브 단부의 웨브에 생기는 균열
 - (c) 스티프너 및 리브와 상부 플랜지 접합부의 균열
 - (d) 하부 스티프너로부터 웨브로의 균열
- (2) 트러스트 거더의 경우
 - (a) 트러스트 경사재의 파단 및 균열
 - (b) 카세트 플레이트의 균열
 - (c) 리벳 및 볼트의 완화 및 파단
- (3) 보조 거더의 경우
 - (a) 카세트 플레이트 및 리벳의 파단
 - (b) 상하면 수평 플레이트의 균열 및 파단
 - (c) 경사 플레이트의 파단 및 균열
 - (d) 백거더 부재의 균열 및 파단
 - (e) 기둥의 균열

2.3 대표적 손상원인

손상의 원인으로서, 서론에서도 언급하였듯이 설계상의 문제만을 예로 들면, 피로를 고려한 허용응력을 기준으로 하여 설계가 행하여지지 않았든지, 또는 크레인 하중의 설정에 문제가 있었다든지 생각할 수 있다. 또한 제작시의 부주의에 의한 응력집중부의 존재와 구조적인 편심도 주된 원인이 되고 있다. 이하에서는 앞서 분류했던 대표

적 손상에 대해서 검토한 것을 열거한다.

2.3.1 레일의 편심

아무리 정밀하게 제작을 한다 할지라도 거더 웨브의 중심에 대한 레일의 편심은 시공상 피할 수 없는 문제이다. 또한 크레인의 계속적인 주행에 의해서 서서히 레일의 이동이 나타날 수 있다. 이와 같은 레일의 편심에 의해서 나타나는 손상의 대표적인 위치로서는 그림 5에 보이는 바와 같이 상부 플랜지와 웨브의 접합부를 비롯하여, 리브의 끝단, 그리고 리브 및 스티프너와 상부플랜지와 접합부를 들 수 있다. 이러한 접합부에는 레일의 편심에 의해 반복 모멘트가 작용하고 상당히 높은 인장응력이 작용할 수 있다. 그리고 이러한 국부적인 모멘트는 크레인의 1개의 차륜에 의해 생기는 것으로 생각



그림 5 플랜지와 웨브의 접합부에서 발견된 균열의 일례

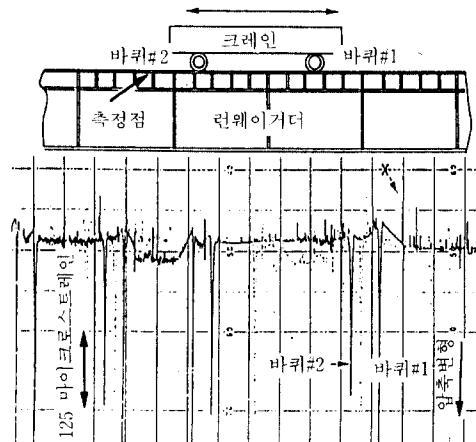


그림 6 크레인 바퀴에 의한 작용응력의 형태

하면, 그림 6과 같은 실측 데이터에서도 알 수 있듯이 그 반복수는 크레인이 통과 할 때마다 크레인 차륜수와 동일한 회수를 가지게 된다. 이러한 접합부는 단기간 내에 고응력 그리고 반복회수가 많아짐에 따라 매우 빠른 시기에 피로파괴가 일어난다.

2.3.2 주 거더의 휨에 의한 2차응력(보조 거더의 손상)

보조거더는 크레인의 주행이나 제동시에 생기는 수평방향의 하중을 칼럼까지 전달할 수 있도록 설계되어 있다. 통상 수평력은 크레인 차륜압의 10%로 가정되고, 부재의 산정에 있어서는 양단 핀(pin)절점 소위 트러스구조로 되어 있다. 상기의 가정에 있어서 그 응력도는 비교적 낮은 값이다. 그러나 실제의 보조거더에 있어서 부재 절점은 용접접합이 많으며, 이 때문에 주 거더의 휨이나 상술한 바와 같은 편심에 의한 휨 때문에 보조거더에는 2차적인 굽힘 모멘트가 생기게

된다. 특히 상하면 brace재의 응력이 매우 높으며 항복응력을 넘는 경우도 있다.

2.3.3 응력집중의 영향

통상의 구조물에서는 용접부부분이나 구멍부분 등 국부적인 불연속부가 존재하는 등, 소위 응력집중을 일으키는 부분이 포함되어 있고 피로 파괴도 이러한 응력집중부에서 일어나게 마련이다. 예를 들어 가세트플레이트 및 수평 brace 부재의 파단을 들 수 있으나, 리벳 구멍에 의한 응력집중부로부터 피로파괴가 일어나는 경우가 보고되고 있다.

3. 피로설계기준곡선과 피로손상도 평가

3.1 피로설계기준곡선

피로설계곡선은 그림 7에 나타나는 바와

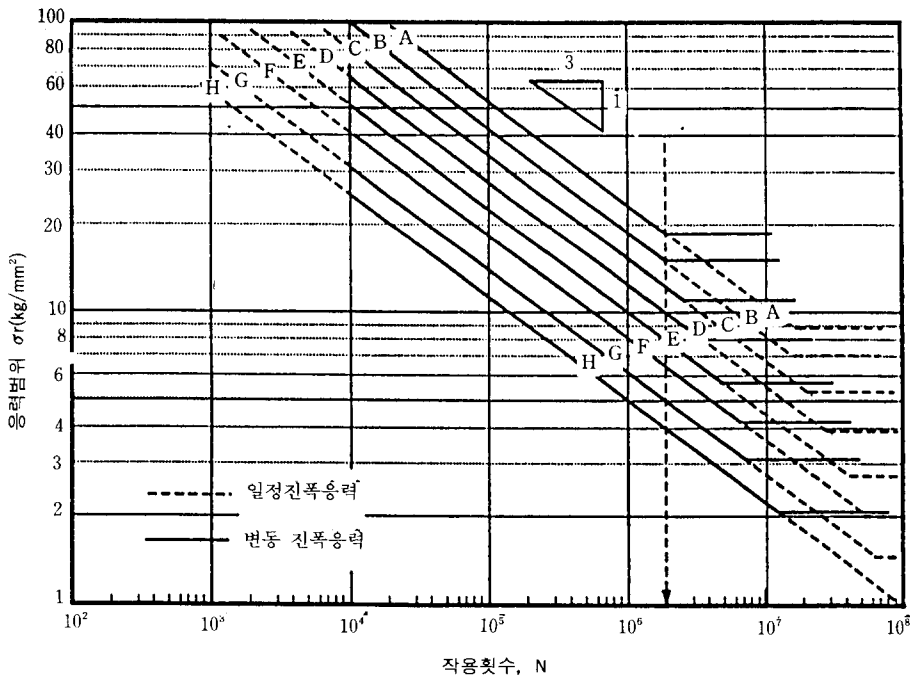


그림 7 수직응력을 받는 부위의 피로설계곡선의 일례⁽⁷⁾

이음부의 종류		강도등급 (MPa)	형상
1. 완전용입 용접	여성체거	B (155)	
	마무리작업 부	C (125)	
2. 부분 용입용접이음부		D (100)	
3. 필렛 용접이음부		D (100)	
4. 배면부착물 있는 경우		E (80)	
5. 단속적인 용접부		E (80)	
6. 스칼랩을 포함하는 용접부		G (50)	

이음부의 종류		강도등급 (MPa)	형상	
하중비전달형	1. 평탄한 지단의 필렛용접부	D (100)		
	2. 마무리작업한 필렛용접부	D (100)		
	3. 미 마무리작업한 필렛용접	E (80)		
	4. 용접의 끝단이 존재 하는 용접부	E (80)		
	5. 중공단면과의 필렛용접부	d < 100mm		F (65)
d > 100mm		G (50)		
하중전달형	6. 완전용입	(1) 평탄한 지단		D (100)
		(2) 마무리작업		D (100)
		(3) 미 마무리작업		E (80)
		(4) 중공단면부재		F (65)
	7. 지단파괴	(1) 평탄한 지단	E (80)	
		(2) 마무리작업	E (80)	
		(3) 미 마무리작업	F (65)	
		(4) 용접선 끝존재	F (65)	
8. 루트파괴		H (40)		

그림 8 대표적 용접부들의 강도등급 분류(7)

같이 수직응력을 받는 이음부와 전단응력을 받는 이음부 등에 대해서 확립되어 있으며, 이들 곡선의 거동은 국가마다 또는 관여하는 기관마다 약간씩 다를 수 있는데,^(6,7,8) 그림은 일본의 강구조협회의 피로설계 기준선도를 나타내고 있다. 그리고 이러한 것들에 대해서 강도등급에 따라, 수직응력과 전단응력이 작용하는 경우에는 각각 8등급 그리고 1개 등급의 피로설계곡선이 있다. 한편 그림 8에는 수직응력을 받는 대표적인 용접부를 대상으로 각각의 강도등급에 대한 2×10^6 회의 응력반복수에서의 기본허용응력범위($\Delta\sigma$)의 일례를 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이 수직응력을 고려한 피로설계 기준곡선은 강도등급 A-H에 대한 각각의 대응선들을 가지고 있다. 즉, 대상으로 되는 이음부의 기본허용 응력범위값(2×10^6 회 기본허용응력범위 190-40 MPa)을 고려하여 그 사이를 7등분하고 각각의 이음부가 설계선도의 어느 선과 일치하는가를 조사하는 것에 의해 각 이음부의 강도등급을 설정하고 있다. 이음부의 강도등급은 요구품질이나 시험체의 크기 등을 취사선택하여 실시된 피로시험결과를 기반으로 행하여지게 된다. 이하에서는 주요한 몇가지의 이음부들에 대한 강도등급에 대한 간단한 설명을 하기로 한다.^(7,9,10)

1) 종방향 용접이음부

완전 용입 용접이음부의 강도등급은 이음부 표면 마무리작업의 유무에 의해 B, C로 되어 있지만 서브머지드 아크용접 등의 자동 용접에서 용접비드의 표면이 평탄한 경우에는 용접부 그대로의 상태로도 B등급의 수준을 가지게 된다. 단, 부분용입 이음부 및 필렛이음부에 대해서는, 용접지단부에서부터 피로균열이 발생하는 것을 가정하고 있기 때문에 용접비드가 평활하거나 표면 마무리작업을 했다고 할지라도 강도등급을 B급으로 해서는 않된다. 그림에서 부분용입 용접이음부 그리고 종방향 필렛이음부의 강도등급은 C급 이하로 되어 있는데 이것은 용접지단부

에 꽤나 큰 결함의 존재를 가정한 것으로 등급은 D로 되어 있다.

2) 십자형 용접이음부

하중전달형의 십자 필렛이음부의 피로해석은 주판파단(지단파괴를 상정) 및 루트부의 파단을 고려하여야만 한다. 하중전달형의 이음부가 지단파괴를 일으키는 경우에는 하중비전달형에 비해서 1등급 낮게 설정되어 있다. 이것은 응력의 전달기구에 의해 용접지단에서의 응력집중이 다르고, 하중전달형에 비해서 피로강도가 낮게 나타나기 때문이다. 일반적으로 십자형 용접이음부의 경우 용접부의 마무리 작업이 아무리 잘 되었다 해도 등급은 D급 이하로 간주하며, 루트파괴가 염려되는 구조에서는 가장 취약한 F급으로 계산하게 되어 있다.

3) 가세트이음부

면외가세트 이음부에서는, 가세트 부착길이에 따라 강도등급이 달라지게 된다. 이것은 피로균열의 기점으로 되는 부착부의 응력집중에 가세트길이의 영향을 받기 때문이다.

3.2 피로손상도 평가

피로에 의한 손상정도를 평가하는 데에 있어서는, 부재에 작용하는 모든 종류의 응력이 각각 피로기구에 영향을 미친다고 생각하고 다음과 같은 마이너법칙(miner's rule)을 이용하게 된다.⁽¹¹⁾ 응력진폭 S_1, S_2, \dots, S_n 이 각각 n_1, n_2, \dots, n_n 회 반복 작용하여 피로파단 되었다고 할 경우, S_1, S_2, \dots, S_n 이 단독으로 반복되었다 했을 때의 피로수명을 각각 N_1, N_2, \dots, N_n 이라고 하면 식(1)의 관계가 성립하는 것을 마이너법칙(또는 선형피해칙이라고도 함)이라고 한다.

$$\text{피로 손상도} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

상식의 값이 1에 도달했을 때에 피로균열에 의한 수명에 도달한 것으로 간주하게 된

다. 그리고 변동하중하에서는 피로한도보다 작은 응력진폭도 피로손상을 일으킨다고 알려져 있다. 이 때문에 S-N곡선의 경사부를 피로한도 이하까지 장수명측에 연장하여 상기식을 적용하는 방법이 채택되고 있다.

4. 거더의 피로손상도 평가의 일례

전절에서는 피로설계 기준선도와 용접강도의 등급분류에 의한 내피로 설계 개념을 설명했다. 본절에서는 이와 같은 개념을 역으로 현재 운용중인 크레인 런웨이 거더에 적용시켜 대상물의 현상태 즉, 피로손상도가 어느 정도 인지를 평가한 간단한 일례를 소개하기로 한다. 대상으로 한 크레인 런웨이 거더는 80년 초에 제작되어 지속적으로 사용되어 온 것으로서, 크레인의 자중 및 작업하중을 고려할 때 최대 약 930 톤의 하중이 작용되고 있는 구조물이다. 본거더는 높이 30미터의 컬럼 위에 설치되어 있으며, 한 개의 거더는 길이 25미터 높이 3.9미터의 제원을 가지고 있다. 그림 9는 가장 큰 응력이 작용되리라 예상되는 거더의 중앙하부 플랜지에 대해서 스트레인 게이지에 의한 장시간의 응력 측정 결과를 정리한 것이다. 그림을 보면 소정의 시간 동안 여러 종류의 작업내용에 대응하는 각각의 응력값들이 어느 정도의 횟수 만큼 작용하고 있는지를 알 수 있다. 한편, 그림과 같이 일정 시간 동안의 작용횟수와, 운전개시일부터 현재까지의 누적 작업시간을 알 수 있다면, 사용중에 어떤 크기의 응력이 몇 회씩 작용했는가를 산정할 수 있다. 일반적으로 응력반복수(피로회수)의 산정에 있어서는 크레인의 운반작업량을 기준으로 하는 경향이 있다. 그러나 실제에 있어서는 운반물의 이송과는 관계없는 별도의 크레인 이동회수가 무시할 수 없는 경우가 많다. 이와 같은 이유에서 실제 응력 작용회수의 정량적 계산을 위해서는 게이지에 의한 측정이 매우 중요한 의미를 가지게 된

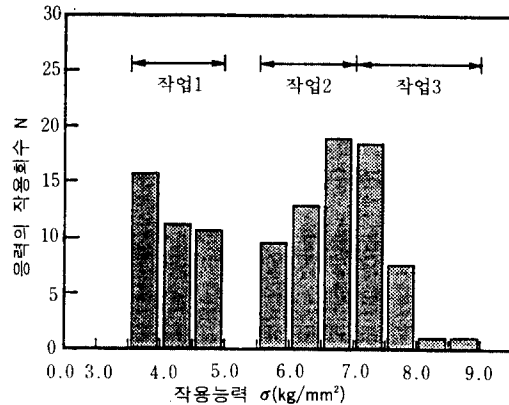


그림 9 실제 운전중의 크레인 런웨이 거더에 작용하는 응력의 종류의 일례

다. 또한 작용응력의 계산에 있어서 컴퓨터에 의한 해석도 중요하지만, 진동이나 충격 등과 같은 2차적인 응력값들을 정확하게 산출할 수 없다는 단점이 있다. 예를 들어, 설계시에는 충격에 의한 하중을 고려하여 통상 작업하중의 약 20% 정도의 설계여유를 두고 있지만, 필자들의 경험에 의하면, 그보다 훨씬 큰 충격하중이 작용하고 있는 경우도 종종 발견되었다. 이러한 연유로 거더의 평가에 있어서 실제 작용응력의 측정은 가장 중요한 위치를 차지한다고 할 수 있다. 일단, 작용응력의 크기 및 종류 그리고 작용회수를 알게 되면, 이 값들을 전절의 피로설계곡선에 대입시키고 마이너법칙에 의한 피로손상도를 계산하게 된다. 이때에 기준곡선중 어느 선을 선택할 것인가에 대해서는 앞으로도 더욱 정량적인 실험적 검토가 필요하지만, 우선적으로는 전절의 그림과 같은 강도 등급분류표를 참고로 하는 한편, 각종 비파괴적인 수법에 의해 용접부의 건전성 여부를 검토해야 할 것이다. 이 글에서 대상으로 하고 있는 중앙하부 플랜지의 경우, 구조상 2x10° 회 피로강도등급이 D급으로 되어 있고 초음파탐상 결과 용접부내부에는 특기할 만한 결함이 발견되지 않았다. 그러나 다중용접으로 이루어진 용접부의 층간 굴곡이 심하게 나타

표 1 크레인 런웨이거더의 중앙하부 플랜지에서의 피로손상도 계산 예

작용응력	실제작용회수(a)	수명회수(b)	피로손상도(a/b)
9 kg/mm ²	1.075 × 10 ⁴	1.3 × 10 ⁶	0.018
8 kg/mm ²	1.29 × 10 ⁵	2.0 × 10 ⁶	0.219
7 kg/mm ²	1.67 × 10 ⁵	2.9 × 10 ⁶	0.084
6 kg/mm ²	4.84 × 10 ⁴	4.0 × 10 ⁶	0.014
5 kg/mm ²	1.24 × 10 ⁵	7.3 × 10 ⁶	0.018
4 kg/mm ²	5.90 × 10 ⁴	1.0 × 10 ⁷	0.006
총 피로손상 누적도			0.36

나고 있고 언더컷 등에 의한 응력집중부의 존재가 인정되며, 안정적 평가의 측면에서 E 등급으로 분류했다. 이상과 같은 배경에서 그림 8과 같은 응력이 작용하고 있는 중앙하부 플랜지의 피로손상도 계산결과를 표 1에 나타낸다. 누적피로손상도는 약 0.36으로 계산되어 이 부분에서의 피로균열 발생의 가능성은 무시해도 되었다. 한편으로는 향후의 운전 계획 등을 고려하여 피로균열이 발생되는 시기를 산출해 낼 수 있었다.

5. 거더의 안정성 평가를 위한 고찰

5.1 기본방향

크레인 런웨이거더의 건전성을 평가하는 간단한 일례를 전절에서 설명하여 왔으나, 어디까지나 거시적인 측면에서의 평가이고, 보다 정량적인 평가를 위해서는 앞으로 기술적 그리고 해석적인 면에서 많은 연구와 노력이 필요하다고 여겨진다. 이하에 필자들의 경험과 문헌 등을 토대로 진단에 필요한 사항들에 대해서 언급하기로 한다. 우선 점점에 앞서 기본적으로 필요한 사항들은 다음과 같다.

(1) 공장의 이력에 관한 사항

- 공장명
- 작업종류(작업의 상세한 내용)

- 건설 및 운전개시일
- 휴지시기 및 한달 평균 작업일수
- (2) 크레인에 관한 사항
 - 크레인의 종류 및 사양
 - 크레인의 대수와 크레인 바퀴 수
 - 크레인의 용량 및 사용중 변경내용
 - 크레인의 이동 속도
- (3) 거더에 관한 사항
 - 균열발생의 경험이 있는 부위와 사후처리
 - 균열발생시까지의 운전일수
 - 향후 균열발생이 예상되는 곳
 - 레일및 충격흡수판의 설치 여부
- (4) 지지부재에 관한 사항
 - 백거더 부재의 균열
 - 연결볼트의 이완 및 파손여부
 - 컬럼의 건전 여부
- (5) 기타
 - 휴지사고에 의한 예상되는 영향
 - 설계도면의 유무

거더의 진단에 있어서 가장 핵심적인 사항이 실제로 거더 각 부위에 작용하고 있는 실제의 응력을 아는 일이다. 작용응력을 알기 위한 수단으로는 유한요소법에 의한 방법과 스트레인 게이지에 의한 실제 응력을 측정하는 방법을 들 수 있다. 여기서 계산에 의한 방법은 응력의 분포상황을 이해하는 데에 많은 정보를 제공하게 될 것이다. 그러나 경험을

통하여 알 수 있었듯이 정량적인 평가를 위해서는 운전중의 작용응력을 스트레인 게이지에 의해서 직접 측정하는 것이 무엇보다 중요하다. 측정개소의 선정에 있어서는 수계산에 의해서 얻어진 최대응력이 예상되는 곳은 필수적이며, 구조적으로 불연속된 부위 그리고 용접부 등이다. 이와 함께 문헌상에서 언급되고 있는 그리고 부위 그리고 필자들이 중점적으로 측정했던 대표적인 부위들을 정리하면 다음과 같다.

- ① 레일직하 상부플랜지의 용접부 (편심과 압축응력에 의한 손상)
- ② 중앙하부 플랜지의 모재와 용접부 부근
- ④ 백거더의 가세트 (응력집중부)
- ⑤ 웨브에 부착된 리브(rib)단 부근(응력집중부)
- ⑥ 일정한 각도를 가지고 꺾여 있는 부위(응력집중부) 등을 들 수 있다. 그리고 측정 시에는 가능한한 0도 방향과 90도 방향의 응력을 동시에 측정하는 것이 좋다.

5.2 피로하중의 반복횟수 산정

이 항목은 피로 손상도를 평가하는 데에 있어서 오류를 범하기 쉬운 것 중의 하나이다. 기본적으로는 크레인의 왕복횟수에 의존한다. 그러나 크레인의 작업종류별 응력의 차이가 뚜렷하지 않을 때, 충격에 의한 하중이 작업에 의한 응력과 비슷하게 나타나는 경우 그리고 크레인 바퀴의 간격이 크므로 해서 바퀴별 집중응력이 존재하는 경우에는 특별한 주의를 요한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 거더의 중앙하부에서 최소한 1일 이상의 장시간 측정을 실시하고 특징적인 응력값들이 몇 회 나타나고 있는가로부터 산출하는 것이 가장 정확한 방법이라고 할 수 있다. 한편 크레인의 작업내용에 따라서는 측정된 응력의 파형이 복잡하게 나타나는 수가 있는데 이 때에는 별도의 반복횟수 산정 방법이 필요하게 된다.

설계개념	파괴과정		
	미시균열생성	거시균열	파단
파괴 (nominal stress approach)			
균열발생 (local strain approach)			
균열전파 (fracture mechanics approach)		초기균열	
균열발생 및 전파 (local strain and fracture mechanics approach)			

그림 10 구조물의 수명평가 방법⁽¹²⁾

5.3 손상도평가를 위한 S-N 곡선의 선택

응력과 반복수가 결정되었다고 할 때, 한계피로선도(S-N 곡선)의 선정에 의해서 피로손상도의 평가가 가능해진다. 어느 기준선을 선택할 것인가에 대해서는 용접시공의 신뢰도와 비파괴검사에 의해 적절한 선을 선택해야 할 것이다. 거더와 같이 피로에 의한 파손이 염려되는 강구조물에서, 보다 정확하고 정량적인 전전성평가와 수명평가를 위해서는 비파괴 수법에 의한 용접부의 결함을 특징화시키는 일이 시급하다. 현단계에 있어

서는 미비한 점이 많으며, 향후 이에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다. 비파괴 검사 중에서도 가장 현실적인 것은 바로 초음파 탐상으로서, 향후 연구되어야 할 항목은 다음과 같다. 즉, 용접부내에서 어떠한 종류의 결함 또는 균열이 어느 방향으로 존재하는가, 탐상결과 나타난 지시파가 용접결함인지 피로균열인지를 구별, 결함(또는 균열)의 크기는 어느 정도인지 등이다.

5.4 향후의 진단 방향에 대해서

구조물의 안정성평가와 관련하여 수명을

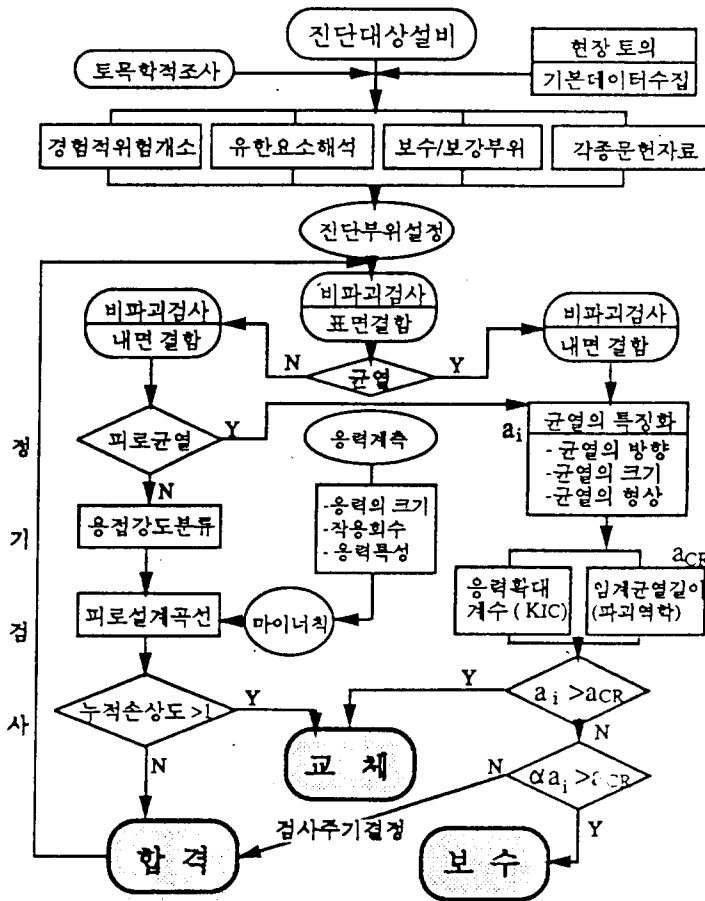


그림 11 크레인 런웨이 거더의 안정성 평가를 위한 흐름도

예측하는 방법은 그림 10에 나타내는 바와 같이 크게 네 가지로 나눌 수 있다⁽¹²⁾. 즉, ① 피로에 의한 균열 발생자체가 구조물의 수명을 좌우한다는 설로서 이 글에서 중점적으로 다루었던 방법, ② 작용응력보다는 응력에 의한 재료의 변형량에 중점을 둔 방법, ③ 균열이 발생된 후 실질적인 파손사고까지 시간적인 여유가 있다는 사실에 근거를 둔 방법, 그리고 마지막으로 ④ 상기의 ①과 ②의 방법을 함께 고려 한 방법 등이다. 여기서 현재 가장 많이 적용되고 있는 방법이 ①에 의한 것이지만 너무 보수적인 면이 있는 것이 사실이다. 이 때문에 구조물의 대형화에 따라 초기균열의 존재를 피할 수 없는 경우나 균열의 점진적 진행이 예상되는 구조물에는 ③의 방법이 적용되는 곳도 있다. 현재 수 많은 생산공장에서 가동되고 있는 거더들의 상당수가 시간적인 문제와 목표 생산량의 달성으로 인해 설비의 예방관리가 어려운 실정이다. 다시 말해, 대부분의 설비관리는 균열이 육안으로 발견된 후 이루어지는 것이 일반적이고, 균열이 있다 할지라고 가급적 정해진 휴지 예정 시간에 보수가 실시되는 것이 보다 현실적인 경우가 많다. 이러한 현장의 사정으로 인하여, 이제는 상기의 ①의 방법 이외에도 대상 구조물의 종류에 따라서는 ④에 관련된 방법을 도입해야 한다고 여겨진다. 즉, 발견된 균열이 향후 어떠한 속도로 진행해 나아갈 것인지 그리고 거시적 파단까지는 어느 정도의 시간적 여유를 가지고 있는지에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해서는 앞서 말한대로 비파괴적 수법의 정량적 해석의 개발이 우선되어야 할 것이며, 또한 파괴역학적 고찰이 필요하게 된다. 이와 같은 개념을 그림 11에 나타낸다. 그림은 구조물의 진단 결과로서, ① 지속운전가능, ② 폐기처분(교체) 그리고 ③ 보수후 사용이라는 세 가지의 판정을 내리는 과정을 나타내고 있다. 그림에서 왼쪽 부분은 피로에 의한 균열이 아직 발견되지 않은 상태에서, 피로

균열의 발생시기에 중점을 둔 것이다. 한편 오른쪽의 부분은 비파괴 탐상에 의해서 피로 균열(특기할 만한 크기의 결함도 포함)이 발견되었을 때에, 거시적 파괴를 일으키는 임계균열의 크기(a_{cr})을 설정하고 그 크기에 도달할 때까지의 시간적 여유를 조사하여 경제적인 설비관리를 목표로 하고 있다.

6. 맺음말

작년에 발생한 성수대교의 파손사고는 인적손실은 물론 경제적 그리고 사회적으로 심각한 영향을 미쳤다. 현재 수많은 공장에서 가동되고 있는 크레인 관련 시설들은 변동응력의 작용과 용접구조물이라는 점에서 성수대교와 유사한 조건을 가지고 있다. 또한 그 중에서 많은 부분은 설계시에는 고려치 못했던 부하조건, 가혹화와 노후화 때문에 손상 가능성이 항상 존재하고 있다. 이러한 점을 고려하여 필자들은 설비의 예방정비 차원에서 크레인 거더 및 런웨이 거더의 안정성 평가에 주목하게 되었고 나름대로 얻은 경험을 지면에 정리하여 보았다. 보다 정량적이고 현실적인 적용을 위해서는 앞으로도 실험적 그리고 해석적인 면에서 수많은 연구와 경험이 요구되고 있지만, 미약한 이 글이 관련 실무자들에게 조금이나마 보탬이 되었으면 한다.

참고문헌

- (1) John E. M., 1965, "Lessons from Crane Runways," *AISC Engineering Journal*, pp. 16~20.
- (2) 日本鋼構造協會, 1973, "クレーンガ-グ-の疲勞損傷に題する調査報告," *JSSC*, Vol. 12, No. 123, pp. 9~23.
- (3) Waiter, M. G. and Anthony, R. Ingraffer, 1985, "Cracking of Welded Crane Runway Girders," *AISE*, Dec. pp. 46~52.

- (4) Zurbier, G. W., 1980, "Lessons from Structural Failures," *AISE*, Jan. pp. 49~52.
- (5) John, C. R., 1989, "Crane Girder Tie-back Connections," *AISE*, Jan. pp. 58~62.
- (6) Crane Manufacturers Association of America Inc., 1983, *Specifications for Electric Travelling Crane*.
- (7) 日本鋼構造協會, 1980, "鋼構造物の疲勞設計指針/同解説," *JSSC*.
- (8) American Institute of Steel Construction, 1989, *Specification for Structural Steel Building*.
- (9) Dieter Radaj, 1990, *Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures*.
- (10) American Welding Society, 1994, "Structural Welding Code."
- (11) 日本機械學會, 1979, "疲勞強度の設計資料".
- (12) William, S. P., 1983, "Guideline for Fracture-safe and Fatigue-Reliable Design of Steel Structures." 