

슬래브궤도상의 레일 용접부 피로수명 예측

Prediction of Bending Fatigue Life to Welding Parts of Rail on Slab Track

김만철¹ 김진성² 한상철³
Man-Cheol Kim Jin-Sung Kim Sang-Chul Han

keywords : Track dynamic analysis(궤도동적해석), Modified Miner's rule(수정마이너스), Rail welded part(레일용접부, Fatigue life(피로수명)

Abstract

For the purpose of the effective maintenance of surface irregularities of rail, this paper investigates the rail service life to a bending fatigue failure of welding parts of rail on the slab track by the structures laboratory testing to derive S-N curves, a GTDAP(General Track Dynamic Analysis Program) to calculate the stresses and a modified Miner's rule to predict a fatigue life. The useful guides for maintenance of rail welded parts on the slab track are proposed in terms of a grinding period and the depth of rail surface irregularities. This study also proposed the guides for maintenance of rail welded part on the ballast track. The effects of fatigue service lives are compared one another.

1. 서론

현재 철도에서는 속도 및 승차감, 차량의 주행안전성 등을 향상시킴으로써 승객들에 대한 고품질의 서비스 제공을 위한 일환으로 레일의 장대화를 추진하고 있다. 그러나 열차가 장대레일의 용접부를 통과할 때 차량과 용접부 요철과의 상호작용에 의해 발생하는 윤중변동, 즉 충격력에 의해 용접부를 중심으로 요철이 증가하게 되고 휨피로가 발생하여 레일의 수명을 단축시키게 된다.

양신추 등[1]은 자갈도상 궤도의 장대레일 용접부의 휨에 대한 피로수명을 예측하고, 효율적인 레일 용접부 관리방안을 제시하였다. 이를 위해서 자갈도상 궤도의 장대레일 현장용접에서 많이 사용되고 있는 테르 및 용접과 가스압접 시편에 대한 휨피로시험을 통하여

S-N 곡선을 구하였다. 이를 기초로 차량과 자갈도상 궤도의 상호작용에 의해 발생하는 레일 용접부에서의 레일 저부 휨응력을 차량/궤도 상호작용 해석프로그램인 GTDAP[2]를 이용하여 구하고, 이를 수정 마이너스에 적용하였다.

최근 점차적으로 전통적인 자갈도상 궤도 형식에서 슬라브 궤도의 부설이 늘어나고 있다. 슬라브 궤도의 장점은 궤도강도의 향상으로 레일 장대화시 좌굴 저항력 증대로 내구성을 향상시키고 축중에 의한 선형변화를 최소화시킨다는 것이다. 이로 인하여 궤도의 보수 작업 주기가 길어지며 유지·보수비용을 절감시킬 수 있다.

본 논문에서는 점진적으로 그 사용이 증가하고 있는 슬라브 궤도상에 부설된 장대레일 용접부에 대해 테르 및 용접과 가스 압접에 대해 피로시험을 통해서 구한 S-N 곡선[1]을 기초로 자갈도상 궤도와 슬라브 궤도의 장대레일 용접부에 대한 레일에서 발생하는 응력 및 피로수명을 등을 유지관리 측면에서 비교·검토하였으며, 레일 용접부 관리방안을 제시하였다.

¹ 정회원, 한국철도기술연구원 궤도팀 선임연구원

² 정회원, 인덕대학교 토목공학과 교수

³ 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수

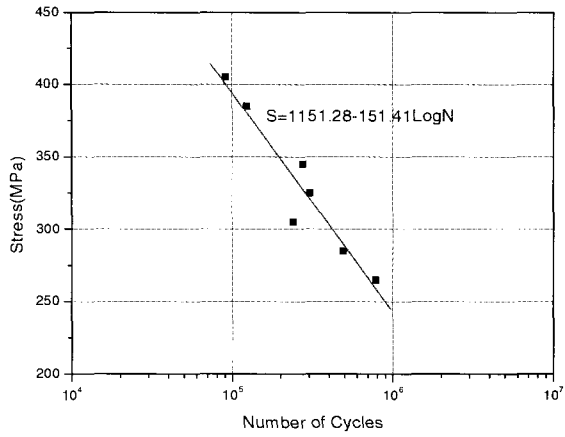


그림 1. 테르밋 용접의 S-N 곡선
(파괴확률 50%)

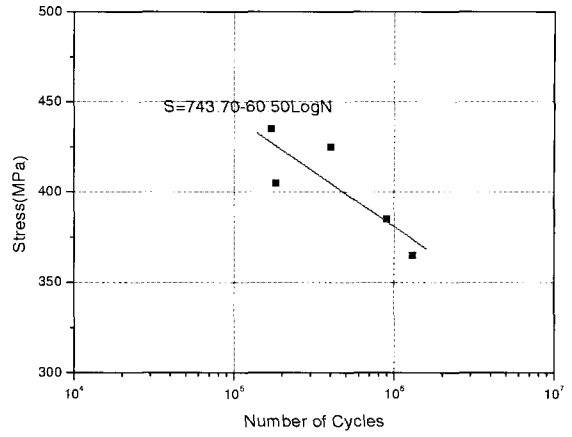
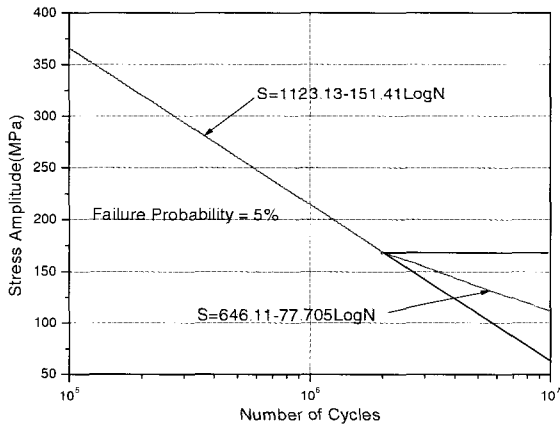
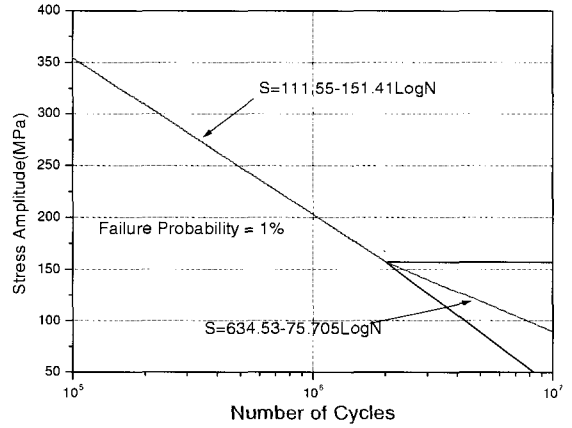


그림 2. 가스 압접 용접의 S-N 곡선
(파괴확률 50%)

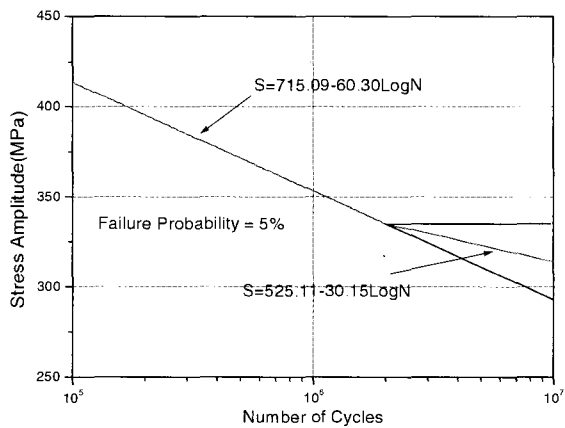


(a) 5% 파괴확률

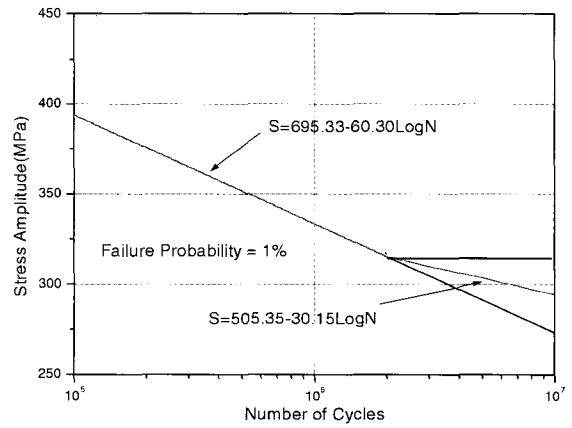


(b) 1% 파괴확률

그림 3. 테르밋 용접의 수명추정을 이용한 S-N곡선



(a) 5% 파괴확률



(b) 1% 파괴확률

그림 4. 가스압접 용접의 수명추정을 이용한 S-N곡선

2. 레일용접부 S-N 곡선[1]

2.1 시험재료성질 및 시험방법

영국 ESH 500KN 피로시험장비를 이용하여 테르밋 용접 시편 7개 및 가스 압접 용접 시편 5개에 대해 피로시험을 실시하였다. 지점간 거리를 1m, 3점지지 하중재하방식을 이용하여 최소응력을 15MPa로 하고 가진력을 5.5Hz로 하여 응력의 폭을 변화시켰다.

2.2 피로시험 결과

테르밋 용접시편 및 가스압접 용접시편에 대한 피로시험을 수행한 결과를 회기분석을 통하여 50% 파괴확률에 대한 S-N 곡선을 도출하였다(그림 1~2). 그리고 상기 회기분석결과를 이용하여 테르밋 용접 및 가스압접 용접에 대하여 각각 5% 및 1% 피로파괴 추정치에 대한 S-N곡선을 가우스 정규분포로 가정하여 구하였다(그림 3~4).

3. 레일용접부 휨응력

레일의 피로수명을 예측하기 위해서는 차량주행시 차량과 궤도의 상호작용에 의해 레일 저부에 발생하는 휨응력을 측정 또는 수치해석을 통하여 계산하여야 한다. 본 연구에서는 "G7 선로구축물 시스템엔지니어링

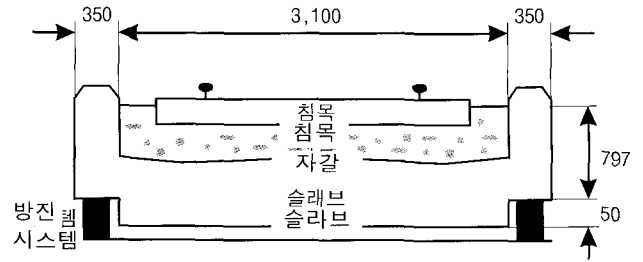


그림 5. 방진슬라브 궤도 단면

기술개발[2]" 과제를 통하여 개발되고 그 성능이 입증된 차량/궤도 상호작용 해석프로그램인 GTDAP (General Track Dynamic Analysis Program)를 사용하여 레일 저부에서 발생하는 응력을 계산하였다. GTDAP는 반차량 모델을 이용한 프로그램으로써 차량주행시 궤도에 가장 큰 영향을 주는 수직방향 상호작용력을 산정하므로써 정확한 레일 용접부의 휨응력을 계산할 수 있다.

슬라브 궤도상의 레일 용접부의 응력을 계산하기 위해 GTDAP에 사용한 차량 및 슬라브 궤도의 물성치는 표 1과 같다. 본 연구에서는 50kg 레일과 방진 슬라브 궤도를 대상 구조물로 하였다(그림 5). 주행차량은 현재 기존선에서 최고속도로 주행중인 새마을 열차를 기준으로 하였으며 평균 주행속도인 120km/h에 대해 분석하였다.

현재 기존선 구간에는 아직까지 슬라브 궤도가 부설되지 않은 상황이다. 따라서 차량주행시 충격을 유발

표 1. 레일 및 궤도의 제원

차량모델		물성치	방진 슬라브 궤도모델	물성치	
주행속도(km/h)		120	레일표면반경(mm)	300	
차체반질량(kg)		12.75×10^3	레일질량(kg/m)	50.4	
2차현가장치	스프링(kN/m)	940	레일 휨강성(kNm ⁴)	4.04×10^3	
	감쇠(kNs/m)	40		강성(kN/m)	30.0×10^3
대차질량(kg)		1.75×10^3	레일패드	감쇠(kNs/m)	98.0
1차현가장치	스프링(kN/m)	758	침목간격(m)		0.6
	감쇠(kNs/m)	30	침목질량(kg)		130.0
축간거리(m)		2.5	침목지지 슬라브	휨강성(kNm ⁴)	1.89×10^6
축의 질량(kg)		1.32×10^3		질량(kg/m)	2.2×10^3
차륜반경(mm)		457	방진패드	강성(kN/m)	5.6×10^3
레일		ks50		감쇠(kNs/m)	98×10^3

시키는 레일 용접부의 요철 형상은 자갈도상에서 발생하는 요철형상과 슬라브 케도의 요철형상이 유사하다는 가정하에 기존선 자갈도상 케도인 평택-천안 구간에서 테르밋 용접부 10개 구간 및 가스 압접 용접부 7개 구간에 대해 용접 전·후부 30m 구간을 실측하여 해석의 입력값으로 사용하였다. 향후 슬라브 케도에 대한 잔존수명을 좀 더 정확히 평가하기 위해서는 슬라브 케도의 특성이 반영된 요철형상을 측정하여 추가적인 연구를 수행하여야 할 것이다.

표 2~3은 방진 슬라브 케도상의 테르밋 용접부 10개소와 가스압접 용접부 7개소에 대해 측정된 요철부 중앙점의 레일 저부 응력을 산정한 결과를 나타낸 것이다.

4. 레일 용접부의 피로수명 예측

4.1 예측방법[3,4]

시편이 동일한 응력진폭 S_i 에 대해 피로파괴가 발생하는 횟수를 N_i 라고 할 때 실제로 시편이 응력진폭 S_i 를 경험하는 횟수를 n_i 라고 하면 전체 누적 피로의 영향은 식 (1)과 같다.

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

수정 마이너 가정에 따라 D 가 1의 값을 가지게 될 때 피로에 의해 파괴가 발생하게 된다.

식 (1)에서 동일한 응력진폭 S_i 에 대해 피로파괴가 발생하는 횟수 N_i 는 피로시험을 통하여 구한 S-N 곡선의 상관관계를 통하여 구할 수 있다. 또한 시편이 실제로 응력진폭 S_i 를 경험하는 횟수 n_i 는 레일 용접부의 저부에서 발생하는 휨응력을 평균 m 과 표준편차 σ 를 가진 가우스 정규분포 $f(S)$ 로 가정하고 총 피로수명을 N_{total} 이라 하면 $N_{total}f(S)dS$ 로 표현할 수 있으므로 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{N_{total}f(S)}{N(S)} ds = 1 \quad (2)$$

피로시험으로부터 얻은 S-N곡선을 $N(s)$ 에 적용하면,

식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{total} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{e^{-\frac{1}{2}(\frac{S-m}{\sigma})^2}}{10^{\frac{(S-b)}{a}}} dS = 1 \quad (3)$$

열차하중이 작용함에 따라 충격에 의해 요철도 증가하게 된다. 따라서 하중조건에 따른 요철 증가량을 정확히 고려하기 위하여 하중조건이 년 단위로 변화한다고 가정할 경우 i 년차에 레일 용접부의 피로수명손실 d_i 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_i = N_i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_i(S)}{N_i(S)} dS \quad (4)$$

여기서 $f_i(S)$ 및 $N_i(S)$ 는 각각 i 년차에 대응하는 하중의 확률밀도함수 및 S-N 곡선상의 휨응력에 대응하는 반복횟수이다.

레일 용접부의 피로수명을 X 년이라고 가정하면 식 (3)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$1 = \sum_{i=1}^X d_i = \sum_{i=1}^X N_i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_i(S)}{N_i(S)} dS \quad (5)$$

여기서 i 년차에 해당선로를 통과하는 축중의 종류가 m 일 경우, 각 축중을 P_{ij} , $j=1, \dots, m$, 각 축중의 년간통과 횟수를 L_{ij} 레일저부에 발생하는 휨응력의 분포를 $f_{ij}(S)$ 라 하면 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$1 = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^m L_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_{ij}(S)}{N_{ij}(S)} dS \quad (6)$$

레일용접부 P 년이 경과한 경우 P 년간의 하중이력을 알 수 있으므로 위 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

표 2. 테르밋 용접의 피로수명 예측결과

번호	부설후 경과년도 (년)	요철 깊이 (mm)	레일저부응력(MPa)		피로수명(×106 ton)	
			최대	최소	파괴확률(5%)	파괴확률 (1%)
1	1.2	1.99	18.2	-232.0	0.12E+02	0.10E+02
2	10.4	0.98	11.3	-101.0	0.22E+03	0.16E+03
3	10.4	0.62	20.1	-82.3.0	0.39E+03	0.28E+03
4	1.0	2.35	25.7	-49.0	0.11E+04	0.76E+03
5	11.6	1.99	14.5	-226.0	0.14E+02	0.11E+02
6	11.6	1.46	14.9	-128.0	0.98E+02	0.71E+01
7	16.0	3.64	30.1	-355.0	0.19E+01	0.16E+01
8	6.5	2.95	20.4	-243.0	0.10E+02	0.87E+01
9	1.2	1.35	15.6	-160.0	0.42E+02	0.33E+02
10	1.0	2.15	22.3	-138.0	0.74E+02	0.54E+02

표 3. 가스압접의 피로수명 예측결과

번호	부설후 경과년도 (년)	요철 깊이 (mm)	레일저부응력(MPa)		피로수명(×106 ton)	
			최대	최소	파괴확률(5%)	파괴확률 (1%)
1	10.4	2.5	46.5	-142.0	0.266E+08	0.589E+07
2	1.2	1.82	17.4	-159.0	0.727E+07	0.160E+07
3	6.5	2.61	16.5	-218.0	0.804E+05	0.177E+05
4	6.5	2.62	24.0	-228.0	0.374E+05	0.828E+04
5	11.6	0.50	14.9	-39.4	0.674E+11	0.149E+11
6	6.5	2.00	31.8	-223.0	0.548E+05	0.122E+05
7	14.0	2.30	16.6	-226.0	0.436E+05	0.945E+04

표 4. 테르밋 용접부의 방진 슬라브 케도와 자갈도상 케도의 피로수명 비교

번호	요철 깊이 (mm)	파괴확률 5% 피로수명 ($\times 10^6$ ton)		비율(%)	파괴확률 1% 피로수명 ($\times 10^6$ ton)		비율(%)
		자갈도상	방진슬라브		자갈도상	방진슬라브	
1	1.99	0.92E+01	0.12E+02	33.71	0.77E+01	0.10E+02	33.50
2	0.98	0.21E+03	0.22E+03	3.71	0.15E+03	0.16E+03	3.69
3	0.62	0.28E+03	0.39E+03	39.30	0.19E+03	0.28E+03	39.26
4	2.35	0.64E+03	0.11E+04	68.22	0.45E+03	0.76E+03	68.22
5	1.99	0.15E+02	0.14E+02	-11.88	0.12E+02	0.11E+02	-11.86
6	1.46	0.87E+02	0.98E+02	12.07	0.63E+02	0.71E+01	11.31
7	3.64	0.10E+01	0.19E+01	76.88	0.90E+00	0.16E+01	76.88
8	2.95	0.48E+01	0.10E+02	117.52	0.40E+02	0.87E+01	117.52
9	1.35	0.32E+02	0.42E+02	30.65	0.25E+02	0.33E+02	26.16
10	2.15	0.79E+02	0.74E+02	-7.10	0.57E+02	0.54E+02	-6.53

표 5. 가스 압접 용접부의 방진 슬라브 케도와 자갈도상 케도의 피로수명 비교

번호	요철 깊이 (mm)	파괴확률 5% 피로수명 ($\times 10^6$ ton)		비율(%)	파괴확률 1% 피로수명 ($\times 10^6$ ton)		비율(%)
		자갈도상	방진슬라브		자갈도상	방진슬라브	
1	2.5	0.28E+08	0.27E+08	-7.35	0.63E+07	0.59E+07	-7.35
2	1.82	0.66E+07	0.73E+07	7.94	0.14E+07	0.16E+07	7.94
3	2.61	0.22E+05	0.80E+05	263.52	0.48E+04	0.18E+05	263.12
4	2.62	0.11E+05	0.37E+05	221.68	0.25E+04	0.83E+04	220.51
5	0.50	0.54E+11	0.67E+11	24.79	0.11E+11	0.15E+11	24.79
6	2.00	0.32E+05	0.55E+05	70.68	0.71E+04	0.12E+05	70.61
7	2.30	0.53E+05	0.44E+05	-18.01	0.11E+05	0.95E+04	-18.00

$$1 = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m L_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_{ij}(S)}{N_{ij}(S)} dS + \sum_{i=p+1}^X \sum_{j=1}^m L_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_{ij}(S)}{N_{ij}(S)} dS \quad (7)$$

$$LT_i = \sum_{i=p+1}^X L_{ij} P_{ij} \quad (8)$$

P년이 경과한 후의 레일용접부의 잔존수명은 (X-P)가 되고 잔존 누적 통과 톤수는 다음 식으로 구할 수 있다.

4.2 피로수명 예측결과

방진 슬라브 케도상의 장대레일 테르밋 및 가스 압접 용접부에 대해 마이나측과 수정마이나측의 중간측을 적용하여 레일 용접부의 5% 및 1% 파괴파괴확률에 대하여 피로수명을 예측하였다(표 2~3).

방진 슬라브 케도상의 레일 용접부의 피로수명과 자갈도상 케도상의 레일용접부의 피로수명을 요철형상에

관계없이 요철 깊이만을 고려하여 표 4~5에 비교하였다. 동일한 요철 깊이에 대해 방진 슬라브 궤도에서 레일 저부에 발생하는 응력이 테르밋 용접에서는 5와 10번과 가스 압접 용접에서는 1, 7번을 제외하고는 적게 발생하였고, 그 결과로 따라서 피로수명이 최소 3%에서 최대 264%까지 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 큰 강성을 가지고 있는 슬라브 궤도가 레일의 변형을 억제시키고 레일에 발생하는 응력을 저감시키기 때문이다. 즉 레일 용접부의 유지보수 측면에서 슬라브 궤도가 자갈 도상 궤도보다 유리하다는 것을 의미한다.

표 6. 슬라브궤도상에서 용접깊이에 따른 레일의 휨응력

측정 번호	요철깊이 (mm)	레일저부의 휨응력(Mpa)
2	0.98	-101.0
5	1.99	-226.0
6	1.46	-128.0
7	3.64	-355.0
8	2.95	-243.0
10	2.15	-138.0

4.3 V형 요철형상에 따른 용접 깊이별 용접부의 피로수명

테르밋 용접부에 대해 요철 측정결과를 형상별로 분류하여 V형상을 갖는 요철깊이에 따른 레일 저부에서 발생하는 휨응력 표 6에 정리하였다. 표 6을 기초로 회귀분석을 그림 6과 같이 실시하여 요철깊이와 레일 저부의 휨응력과의 상관관계를 유도하였다. 회귀분석 결과 자료수는 적으나 상관관계가 1에 가깝고, 위험율도 0에 근접하고 있기 때문에 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다. 요철깊이와 휨응력 S의 관계는 식 (9)와 같다.

$$S = 9.5316 + 73.72144z + 4.56087z^2 \tag{9}$$

요철의 변화에 따른 슬라브 궤도상의 레일 용접부 피로수명을 5% 파괴확률 S-N 곡선에 대해 식 (9)를 이용하여 그림 7, 식 (10)과 같이 예측하였다.

$$F_{life} (\times 10^6 \text{ ton}) = 10^{-0.81054z + 3.31036} \tag{10}$$

경부선 병점-평택간의 통과톤수는 1996년도에 상행선에서는 0.3억톤, 하행선에서는 0.28억톤이었다. 이중 극한조건인 0.3억톤을 기준으로 요철부의 삭정이 없다고 가정할 경우 파괴확률 5%에 대해 20년을 유지하기 위해 자갈 도상 궤도인 경우에는 0.6mm이하로 유지하여야 하는데 비해 슬라브 궤도상의 용접부 초기요철 깊이는 식 (10)으로부터 0.7mm이하로 나타났다.

양신추[1] 등에 의해 발표된 논문에서도 언급하였듯

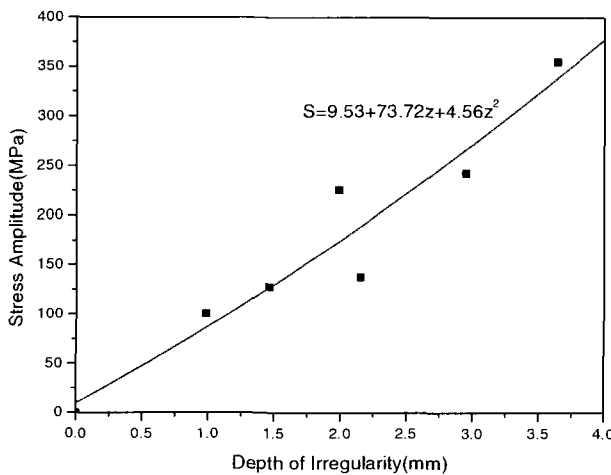


그림 6. 요철깊이에 따른 레일저부 휨응력의 회귀분석

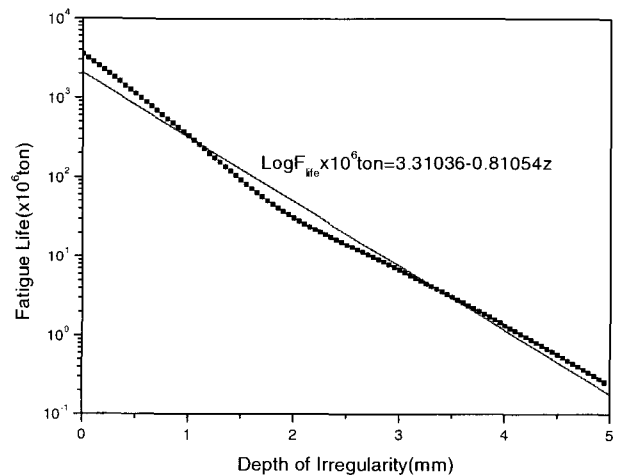


그림 7. 요철깊이에 따른 레일 용접부의 피로수명 (5% 파괴확률)

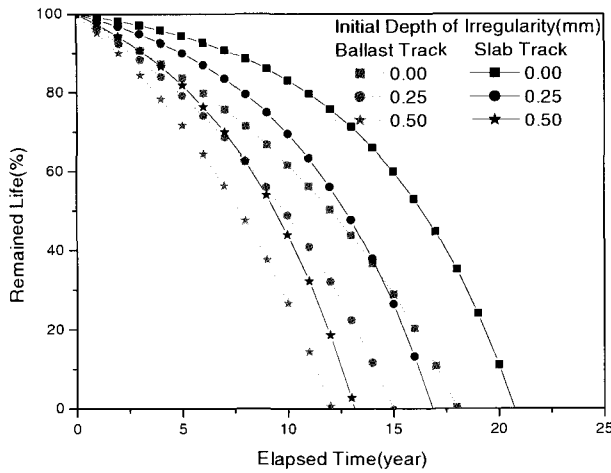


그림 8. 초기 요철 깊이에 따른 잔존수명

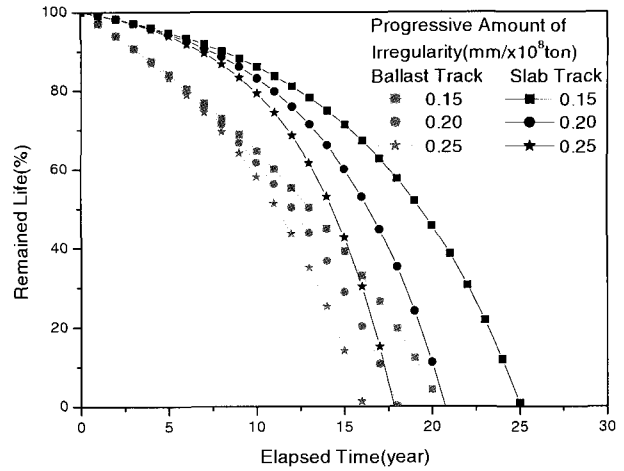


그림 9. 요철 진행량에 따른 잔존수명

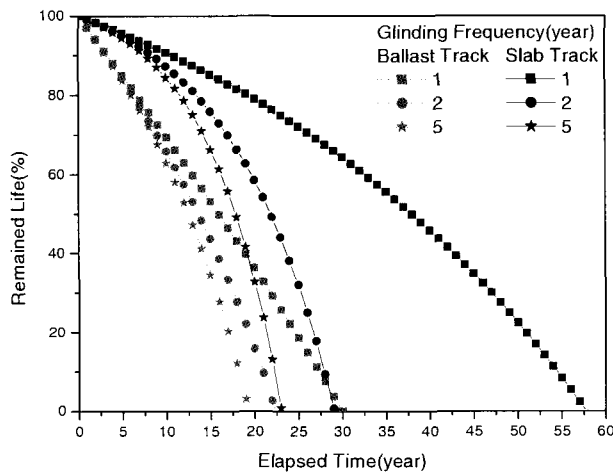


그림 10. 요철 삭정주기에 따른 잔존수명
(삭정량 0.05mm/회)

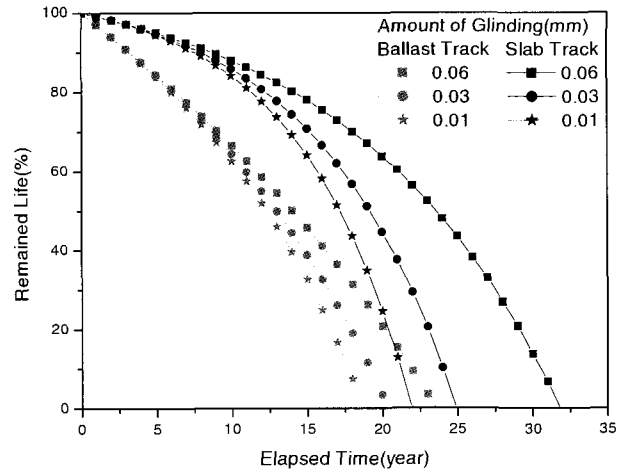


그림 11. 요철 삭정량에 따른 잔존수명
(삭정주기: 2년)

이 통과톤수와 용접부 요철깊이와의 상관관계는 대략 0.2mm/억톤이었다. 연간 통과톤수가 0.3억톤이므로 연간 요철 진행량은 0.06mm/년이라는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 연간 요철진행량인 0.06mm/년을 기초로 하여 다음과 같은 조건에 대한 피로수명을 예측하였고, 이들 결과를 자갈도상 궤도의 용접부 피로수명과 비교하였다.

그림 8은 5%파괴확률에 대하여 요철 진행량을 0.2mm/억톤으로 할 때 초기 요철깊이 0.00mm, 0.25mm와 0.50mm에 따른 피로수명을 나타낸 결과이다. 그림 9는 초기요철깊이가 0인 경우 요철진행량이 0.15mm/억톤, 0.20mm/억톤, 0.25mm/억톤에 대하여

각각의 피로수명을 예측한 것이다. 또한 그림 10은 매 회 요철부의 삭정량을 0.05mm로 할 때 삭정주기 1년, 2년과 5년별 피로수명을 예측한 결과이고, 그림 11은 삭정주기를 2년으로 할 때 삭정량 0.06mm, 0.03mm와 0.01mm에 따른 피로수명을 예측한 결과이다.

초기요철깊이에 따른 피로수명을 나타낸 그림 8의 결과로부터 자갈 도상 결과와 유사하게 초기 요철량이 클수록 피로수명이 단축됨을 알 수 있다. 요철 진행량에 따른 피로수명 예측결과를 나타낸 그림 9로부터 자갈 도상 궤도보다는 큰 값인 요철 진행량이 0.20mm/억톤 이내인 경우는 요철 진행은 피로수명에 영향을 크게 주지 않는 것을 알 수 있다.

삭정주기에 따른 피로수명 예측결과인 그림 10으로부터 레일 요철부를 자주 삭정할 경우 피로수명이 증가되며, 특히 매년 삭정할 경우 피로수명은 현저하게 증가된다는 것을 알 수 있다. 또한 주어진 삭정주기(2년)에 대하여 피로수명을 예측한 결과를 나타낸 그림 11로부터 가급적 삭정주기 2년마다 연간 요철 진행량 정도로 삭정할 경우 피로수명이 크게 향상됨을 알 수 있다.

위의 결과들은 자갈 도상 궤도상의 레일 용접부의 피로수명에 비해 슬라브 궤도상의 레일 용접부의 피로수명이 크게 증가한다는 것을 보여 주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 슬라브 궤도상의 레일 용접부에 대해 현장에서 측정된 레일용접부의 요철을 기초로 GTDAP 프로그램을 이용하여 레일 저부에서 발생응력을 산정하였다. 이들 값을 기초로하여 수정 마이나식 등을 적용하여 피로수명을 추정하였다. 파라메타 연구를 통하여 레일의 요철 깊이, 요철 진행량, 삭정 주기, 매회 삭정량이 레일 용접부의 피로수명에 미치는 영향을 검토하였으며, 유지보수 측면에서 자갈 도상 궤도의 경우 예측된 피로수명 값과 비교 검토하였다.

- ① 통과톤수에 따라 요철깊이가 변화가 없고 요철부를 관리차원에서 삭정이 없다고 가정하였을 경우 5% 파괴확률의 피로수명을 20년 이상 유지하기 위해서는 요철깊이를 0.70mm이하로 유지하여야 한다.
- ② 자갈 도상 궤도의 피로수명 예측 논문에서 논의하였듯이 슬라브 궤도상 용접부의 초기요철량이 피로수명에 매우 중요한 영향을 미치므로 피로수명을 향상시키기 위해서는 초기 표면처리가 대단히 중요하다.
- ③ 레일 요철부를 자주 삭정할 경우 피로수명을 크게 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.
- ④ 삭정주기 2년마다 삭정할 경우 연간 요철 진행량과 비슷한 정도로 삭정하면 피로수명이 크게 향상됨을 알 수 있다.
- ⑤ 자갈 도상 궤도와 슬라브 궤도상의 레일 용접부에 대한 피로수명을 여러 가지 파라메타 연구를 통해서 검토한바 슬라브 궤도가 레일 용접부 유지관리 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. 양신추, 김만철, 김진성. (2000). “레일 용접부 피로수명 예측.” 대한토목학회논문집, 제20권, 제1-D호, pp. 97-105.
2. 양신추. (1999). “선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발.” G7 1단계 2차년도 보고서, 한국철도기술연구원.
3. 石田誠, 阿部則次. (1990). “レール頭頂面凹凸と溶接部曲げ疲勞の關係.” 日本鐵道總研報告書, Vol. 4, No. 7.
4. 阿部則次, 福井義弘, 長藤敬晴, 石田, 三浦重. (1994). “レール壽命延伸のための溶接部凹凸管理.” 日本鐵道總研報告書, Vol. 8, No. 11.