

레일용접부 피로수명 예측 Prediction of bending fatigue lifes of rail welded parts

양 신 추* 이 진 옥** 나 성 훈**
Yang, sin-chu Lee, Jin-Wook Na, Sung-Hoon

Abstract

This paper investigates about the prediction of rail bending fatigue lifes for the purpose of the effective maintenance of surface irregularities of rail welded parts. The rail bending stresses are calculated using a track dynamic analysis program. The rail surface irregularities measured in situ are given as inputs in the analyses. On the other hand, the S-N curves are derived based on the results of bending fatigue tests. Using data found so far, rail fatigue lifes are estimated adopting a modified Miner's rule. The useful guides for maintenance of rail welded part are proposed in terms of grinding period and grinding depth of rail surface irregularities.

1. 개요

차량으로부터의 비정상적인 충격력과 용접부의 물리적 취약성으로 인하여 차륜이 용접부를 계속적으로 통과하는 경우 용접부를 중심으로 요철의 크기가 급속하게 증가하게 된다. 이러한 경우 레일용접부는 과도한 충격력에 의하여 파손될 수 있고 피로수명도 크게 단축된다. 따라서 레일용접부의 파손을 방지하고 충분한 피로수명을 유지하기 위해서는 용접부의 발생응력을 어느 한도 이하로 제한하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 용접부의 표면을 계속적으로 최상의 조건으로 유지하여야하나 그럴 경우 레일표면 삭정을 위한 많은 시간 및 비용을 요하게 된다. 따라서 현실적으로는 레일용접부가 주어진 피로수명을 갖도록 하는 최소의 레일 삭정주기 및 삭정량을 결정하여 그에 따라 용접부를 유지관리하는 것이 필요하게 된다.

본 고에서는 레일피로수명 예측을 통한 레일용접부의 효율적관리 및 피로수명 향상 방안에 대하여 연구하였다. 현장에서 측정된 레일용접부의 요철을 토대로 레일저부에서의 발생응력을 계산하였고, 테르밋용접과 가스압접용접 시편에 대한 피로시험 결과들을 회귀분석하여 S-N 곡선을 유도하였다. 레일저부응력과 S-N 곡선에 대하여 수정 마이나 축을 적용하여 레일용접부의 피로수명을 추정하였다. 또한 요철깊이에 따른 피로수명에 대한 관계식을 도출한 후 이들을 토대로 요철의 초기깊이, 현장 요철진행율, 용접부 삭정주기 및 삭정량 등의 변화에 따른 레일 피로잔존수명을 예측하였다. 예측된 피로수명을 토대로 효율적인 레일용접부 관리방안을 제시하였다.

* 한국철도기술연구원 책임연구원

** 한국철도기술연구원 주임연구원

2. 레일용접부 휨응력 산정

본 연구에서는 차량주행시 궤도에 가장 큰 영향을 주는 수직방향 상호작용력을 보다 정확히 해석할 수 있도록 개발된 GTDAP[1]을 사용하여 용접레일의 저부휨응력을 계산하였다.

2.1 계산제원

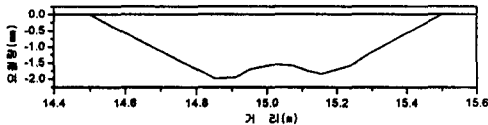
경부선 평택~천안간의 궤도조건을 감안하여 50kg레일과 PC침목로 구성된 토노반상의 자갈 궤도를 가정하였다. 열차 주행속도는 새마을 열차를 기준으로 120km/h로 설정하였다. 표1은 계산에 사용된 차량과 궤도의 제원 및 물성치를 나타낸다.

<표 1> 차량 및 궤도의 제원 및 물성치

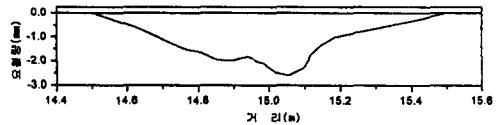
차량/궤도모델	물성치	차량/궤도모델	물성치
주행속도(km/h)	120	레일표면반경(mm)	300
차체반질량(kg)	12750	레일질량(kg/m)	50.47
2차 현가장치 스프링(kN/m)	940	레일 휨강성	4.04×10^5
2차 현가장치 댐핑(kN·s/m)	40	궤도패드강성(kN/m)	3.0×10^5
대차질량(kg)	1750	궤도패드 댐핑계수(kN·s/m)	90.0
1차 현가장치 스프링계수(kN·s/m)	758	침목간격(m)	0.6
1차 현가장치 댐핑계수(kN·s/m)	30	침목질량(kg)	130.0
축간거리(m)	2.5	침목지지 도상강성(kN/m)	8.33×10^9
축의 질량(kg)	827.0	침목지지 도상댐핑계수(kN·s/m)	1000.0
차륜반경(mm)	457	최하층 도상강성(kN/m)	5.11×10^9
레일	ks50	최하층 도상댐핑계수(kN·s/m)	1000.0

2.2 해석결과

그림 1은 측정한 개소들 중 테르밋 및 가스압접 용접부 각각 1개소에서의 요철형상을 나타낸 것이며, 에 대한 레일저부의 휨응력의 해석결과를 나타낸 것이다

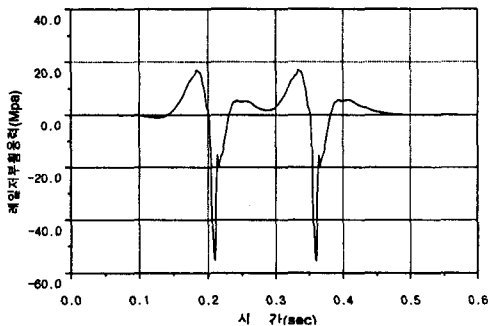


(a) 테르밋 용접부

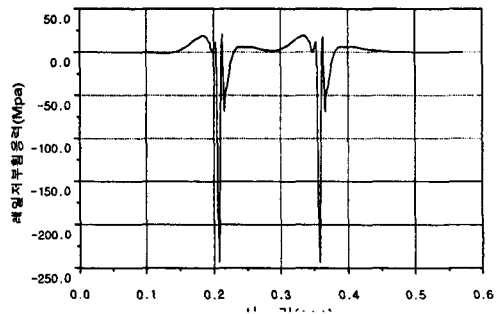


(b) 가스압접 용접부

그림 1 요철형상



(a) 테르밋용접



(b) 가스압접

그림 2. 레일용접부의 휨응력

표 2, 3은 10개소의 테르밋 용접부 및 8개소의 가스압접 용접부에서 측정된 요철에 대하여 각각의 최대레일저부응력 해석결과를 부설경과년도 및 요철깊이와 함께 나타낸 것이다.

표 2. 테르밋 용접의 레일저부응력

번호	부설후 경과년도 (년)	요철 깊이 (mm)	레일저부응력(Mpa)	
			최대	최소
1	1.2	1.99	23.1	-251.1
2	10.4	0.98	19.2	-102.2
3	10.4	0.62	19.2	-93.2
4	1.0	2.35	19.3	-66.1
5	11.6	1.99	19.3	-217.7
6	11.6	1.46	19.3	-131.9
7	16.0	3.64	19.8	-392.5
8	6.5	2.95	19.3	-294.1
9	1.2	1.35	19.5	-172.7
10	1.0	2.15	19.2	-135.4

표 3. 가스압접 용접의 레일저부응력

번호	부설후 경과년도 (년)	요철 깊이 (mm)	레일저부응력(Mpa)	
			최대	최소
1			19.3	-62.8
2	10.4	2.5	75.6	-141.1
3	1.2	1.82	19.3	-160.1
4	6.5	2.61	19.2	-234.9
5	6.5	2.62	20.5	-243.3
6	11.6	0.50	19.3	-42.3
7	6.5	2.00	31.3	-230.0
8	14.0	2.30	19.2	-223.4

3. 레일용접부의 피로시험

3.1 시험결과

테르밋 용접시편 8개 및 가스압접 용접 6개 시편에 대하여 최소응력을 15Mpa로 하고 가진력을 5.5Hz으로 유지하면서 응력진폭을 변화시키며 피로시험(그림 3)을 수행하였다. 피로시험결과를 회귀분석하여 얻은 S-N 곡선과 관련 파라메타를 테르밋용접에 대하여 그림 4와 표4에 가스압접에 대하여서는 그림 5와 표5에 각각 나타내었다.

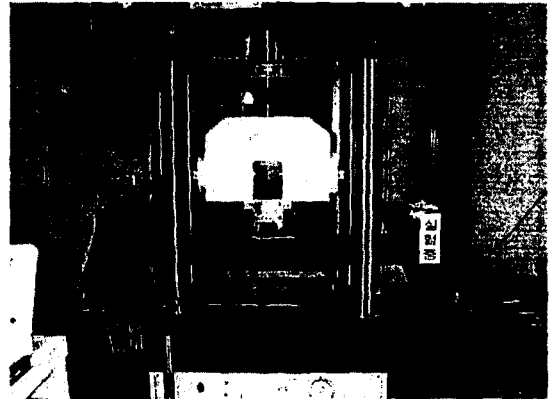


그림 3. 레일용접부의 피로시험 장면

표 4. 테르밋 용접의 회귀분석 파라메타

파라메타	결 과
곡선식 (50%위험율)	$y = -151.41 \log N + 1151.28$
상관계수	0.95244
추정식의 표준편차	17.11
위험율	9.234E-4
자료수	7

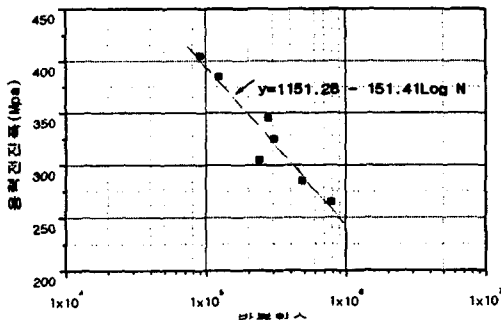


그림 4. 테르밋용접의 S-N곡선(파괴확률 50%)

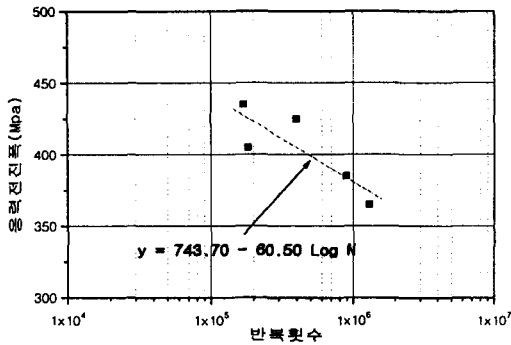
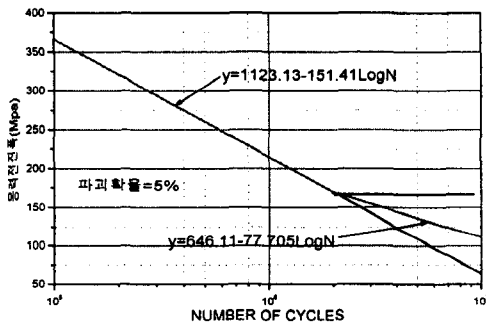


표 5 가스압접의 회귀분석 파라메타

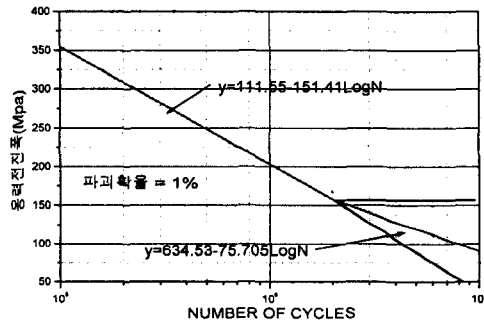
파라메타	결과
곡선식 (50%위험율)	$y = -60.50 \text{Log} N + 743.70$
상관계수	0.8407
추정식의 표준편차	17.91
위험율	$7.448E-2$
자료수	5

그림 5. 가스압접 용접의 S-N곡선(파괴확률 50%)

상기 회귀분석결과를 이용하여 테르밋트 용접 및 가스압접 용접에 대하여 각각 5% 및 1% 피로 파괴 추정치에 대한 S-N곡선을 구하면 다음과 같다.

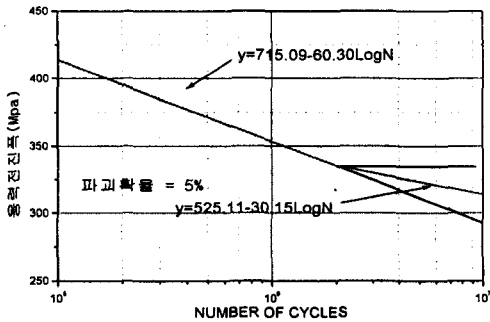


(a) 5% 파괴확률

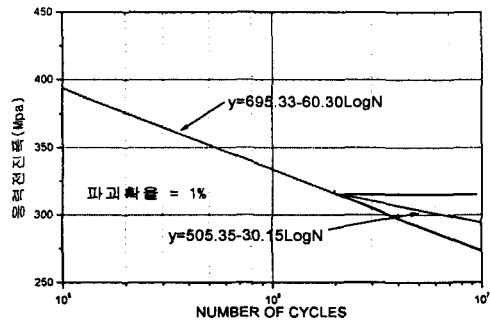


(b) 1% 파괴확률

그림 6. 테르밋트 용접의 수명추정을 이용한 S-N곡선



(a) 5% 파괴확률



(b) 1% 파괴확률

그림 7. 가스압접 용접의 수명추정을 이용한 S-N곡선

4. 레일용접부의 피로수명 예측

4.1 예측방법

열차통과에 따른 레일저부에서의 발생하는 휨응력에 대한 확률밀도함수를 $f(s)$, 주어진 휨응력 s 에 대하여 S-N 곡선상에 대응하는 반복횟수를 N , 총피로수명(횟수)을 N_{total} 일 때 수정마이나츠크 [2,3,4] 적용하면 다음과 같은 관계식이 성립된다.

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

그림 8과 같이 확률밀도함수를 $f(s)$ 를 평균 m 과 표준편차 σ 인 s 에 대한 정규분포로 가정하고, 피로시험으로부터 얻은 S-N곡선($s=a\text{Log}N+b$)으로부터 $n(s)$ 를 구하면, 식(1)은 다음 식으로 나타내진다.

$$N_{total} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{e^{-\frac{1}{2}(\frac{s-m}{\sigma})^2}}{(s-b/a)} ds = 1 \quad (2)$$

식(2)는 레일용접부에 작용하는 하중이 항상 변하지 않을 경우에 적용할 수 있는 방법이다. 그러나 앞서 언급한바와 같이 레일용접부에 충격하중이 작용할 경우 요철의 크기는 증가하게 되고 다시 그에 따라 충격하중도 증가하게 되어 이러한 경우에 식(1)을 사용하여 레일 피로수명을 예측하는 것은 큰 오차를 유발할 수 있다. 하중조건이 년 단위로 변화한다고 가정할 경우 i 년차에 레일용접부의 피로수명손실 d_i 는 다음과 같이 구해진다.

$$d_i = N_i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_i(s)}{N_i(s)} ds \quad (3)$$

여기서 $f_i(s)$ 및 $N_i(s)$ 는 각각 i 년차에 대응하는 하중의 확률밀도함수 및 S-N 곡선상의 힘응력에 대응하는 반복횟수이다. 레일용접부의 피로수명이 X 년이라고 가정하면 다음식이 성립한다.

$$1 = \sum_{i=1}^X d_i = \sum_{i=1}^X N_i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_i(s)}{N_i(s)} ds \quad (4)$$

여기서 i 년차에 해당선로를 통과하는 축중의 종류가 m 일 경우, 각 축중을 P_{ij} , $j=1, \dots, m$, 각 축중의 연간통과 횟수를 L_{ij} , 레일저부에 발생하는 힘응력의 분포를 $f_{ij}(s)$, $j=1, \dots, m$ 라 하면 식(4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$1 = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^m L_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_{ij}(s)}{N_{ij}(s)} ds \quad (5)$$

레일용접부 P 년이 경과한 경우는 P 년간의 하중이력은 알 수 있으므로 다시 식(5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

P 년이 경과한 후의 레일용접부의 잔존수명은 $(X-P)$ 가 되고 잔존누적통과횟수는 다음식으로 구할 수 있다.

$$LT_i = \sum_{i=P+1}^X L_{ij} P_{ij} \quad (7)$$

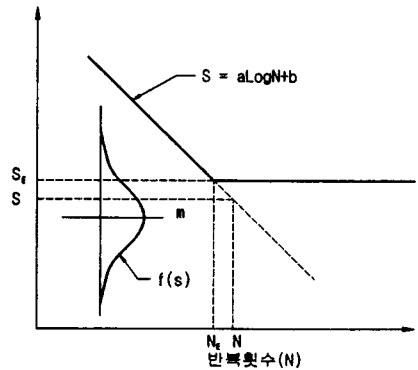


그림 8. 피로수명 예측방법

4.2 피로수명 예측결과

마아나측과 수정마아나측의 중간측을 적용하여 레일용접부의 5% 및 1% 피로파괴확률에 대하여 피로수명을 예측하였다.

4.3 요철깊이에 따른 레일용접부 피로수명

10개의 테르밋트 용접부의 요철 측정결과를 형상별로 분류해본 결과 테르밋트 용접은 대부분 V형 요철을 갖는 것을 알 수 있었다. 레일두부의 표면으로부터 하부로 파인 최대깊이를 요철깊이로 정의할 때 요철 깊이에 따라 레일저부에 발생하는 휨응력을 알아보기 위하여 같은 요철형상을 갖는 V형 요철에 대하여 요철 깊이에 따른 휨응력은 표 6 같고 휨응력에 대한 회귀분석 결과는 그림 9 및 표 7과 같다.

측정번호	요철깊이 (mm)	레일저부의 휨응력 (Mpa)
No. 2	0.98	102.2
No. 5	1.99	217.7
No. 6	1.46	131.9
No. 7	3.64	392.5
No. 8	2.95	233.4
No. 10	2.15	135.4

표 6. 요철깊이에 따른 휨응력

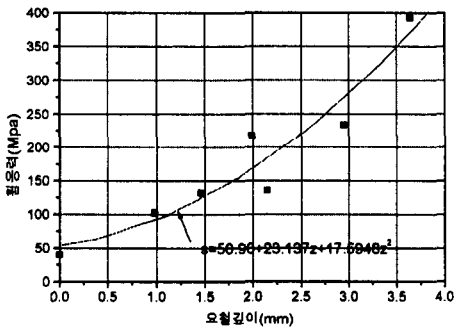


그림 9. 요철깊이에 따른 레일저부 휨응력의 회귀분석결과

표 7 회귀분석 파라메타

파라메타	결 과
곡선식 (50%위험율)	$y=50.96+23.137z+17.5948z^2$
상관계수	0.909
추정식의 표준편차	42.51
위험율	0.00829
자료수	7

이상의 회귀분석 결과로부터 자료수는 적으나 상관계수가 1에 가깝고, 위험율도 0에 근접하므로 요철깊이에 따른 휨응력은 유리함수식으로 나타낼 수가 있다.

요철깊이에 따른 테르밋트 용접부의 피로수명을 상기의 추정식을 사용하여 계산하면 그림 9와 같다.

그림 10의 결과로부터 레일용접부의 피로수명은 요철깊이에 따라 다음식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

$$F_{life} (\times 10^6 \text{ton}) = 10^{0.874742z + 3.2915} \quad (8)$$

경부선 병점~평택간의 통과톤수는 1996년도를 기준으로 상행선에 대하여 $3.0 \times 10^7 \text{ton}$ 이고, 하행선에 대해서는 $2.8 \times 10^7 \text{ton}$ 이므로, 본 연구에서는 경과년도에 따른 잔존수명을 예측하기 위해서 연간 통과톤수를 $3.0 \times 10^7 \text{ton}$ 로 가정하였다. 식 (8)

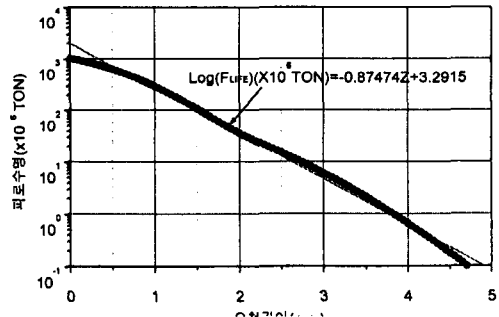


그림 10. 요철깊이에 따른 레일용접부의 피로수명(5%파괴확률)

로부터 통과톤수에 따라 요철깊이가 변화가 없고 요철부를 관리차원에서 삭정이 없다고 가정할 때 5%파괴확률의 피로수명이 20년을 유지하기 위해서는 요철깊이를 0.6mm이하로 유지할 필요가 있음을 알 수 있다.

부설경과년과 요철깊이를 나타낸 그림 10의 결과로부터 V형 요철형상에 대하여 용접부설 후 경과년수에 따른 요철깊이는 큰 상관관계가 없는 것으로 보인다. 그러나 이러한 결과는 자료수가 매우 적어 통계적 의미가 적기 때문이나 또 하나의 이유는 용접의 품질관리가 좋지 않아 차륜통과에 따른 마모발생 보다는 국부적 취성과파괴의 원인이 크기 때문으로 판단된다. 그러나 일본 등에서 수행된 연구결과[3,4]에 의하면 통과톤수와 용접부 요철깊이와는 상관관계가 있고 그 정도는 대략 0.2mm/억톤 입을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서도 이값을 기준으로 피로수명을 예측하였다.

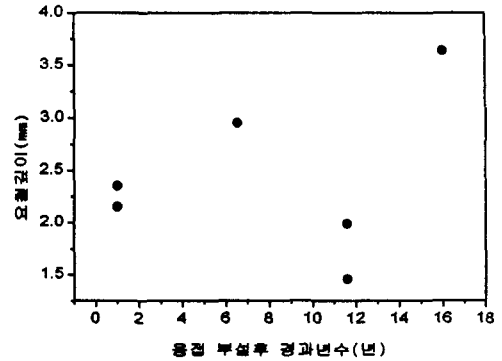


그림 11. 경과년수에 따른 용접깊이

그림 12는 5%파괴확률에 대하여 요철진행량을 0.2mm/억톤으로 할 때 초기 요철깊이 0.00mm, 0.25mm와 0.50mm에 따른 피로수명을 나타낸 결과이며, 그림 13은 초기요철깊이가 0인 경우 요철진행량이 0.15mm/억톤, 0.20mm/억톤, 0.25mm/억톤에 대하여 각각의 피로수명을 예측한 것이다. 또한 그림 14는 매회 요철부의 삭정량을 0.05mm로 할 때 삭정주기 1년, 2년과 5년별 피로수명을 예측한 결과이고, 그림 15는 삭정주기를 2년으로 할 때 삭정량 0.06mm, 0.03mm와 0.01mm에 따른 피로수명을 예측한 결과이다.

초기요철깊이에 따른 피로수명을 나타낸 그림 12의 결과로부터 초기요철량이 있을 경우는 피로수명을 매우 단축시키는 것을 알 수 있다. 따라서 용접 후 초기표면처리가 대단히 중요하다. 또한 요철진행량에 따른 피로수명 예측결과를 나타낸 그림 13으로부터 요철진행량이 0.15mm/억톤 이내인 경우는 요철 진행은 피로수명에 영향을 크게 주지 않는 것을 알 수 있다.

삭정주기에 따른 피로수명 예측결과인 그림 14로부터 래일 요철부를 자주 삭정한 경우는 피로수명을 크게 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 주어진 삭정주기(2년)에 대하여 피로수명을 예측한 결과를 나타낸 그림 15로부터 가급적 요철진행량과 비슷한 정도로 삭정한 경우 피로수명이 크게 향상됨을 알 수 있다.

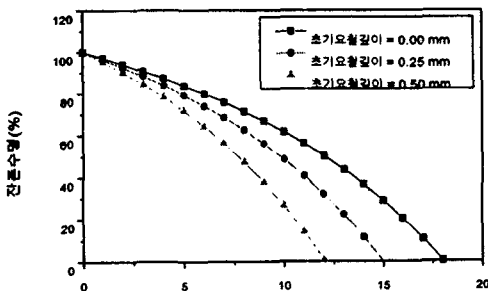


그림 12. 초기 요철깊이에 따른 피로수명

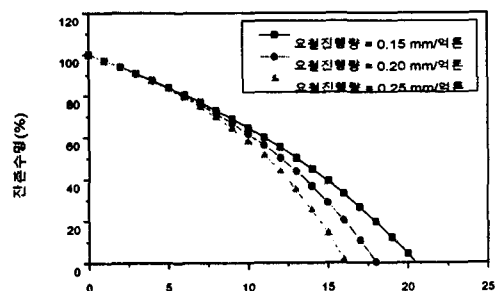


그림 13. 요철진행량에 따른 피로수명

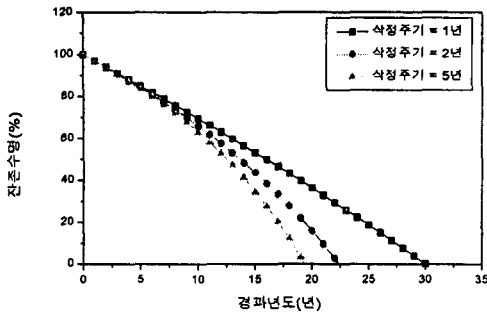


그림 14. 요철 삭정주기에 따른 피로수명
(삭정량 0.05mm/회)

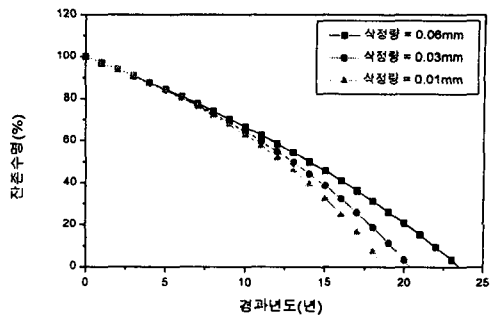


그림 15. 요철 삭정량에 따른 피로수명
(삭정주기 2년)

5. 결 론

본 연구에서는 현장에서 측정된 레일용접부의 요철을 토대로 레일저부에서의 발생응력을 산정한 후 수정 마이나 측 등을 적용하여 피로수명을 추정하였다. 파라메타 연구를 통하여 레일의 요철깊이, 요철진행량, 삭정주기, 매회 삭정량이 레일용접부의 피로수명에 미치는 영향을 검토였다.

이상의 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 레일용접부의 요철형상은 대부분 V형을 갖는다.
- 레일용접부의 요철깊이와 레일 저부에 발생하는 휨응력과는 일정한 상관관계가 있다.
- 통과톤수에 따라 요철깊이가 변화가 없고 요철부를 관리차원에서 삭정이 없다고 가정할 때 5% 파괴확률의 피로수명을 20년 이상 유지하기 위해서는 요철깊이를 0.60mm이하로 유지하여야 한다.
- 초기요철량이 있는 경우는 피로수명을 매우 단축시키는 것을 알 수 있으므로 피로수명을 향상시키기 위해서는 초기표면처리를 잘 하여야함을 알 수 있다.
- 레일 요철부를 자주 삭정한 경우는 피로수명을 크게 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.
- 주어진 삭정주기(2년)에 대하여 가급적 요철진행량과 비슷한 정도로 삭정한 경우 피로수명이 크게 향상됨을 알 수 있다.

5. 참고문헌

1. 양신추, 이진욱, 홍진완, "차량고속주행시 차량 및 궤도거동에 미치는 궤도틀림의 영향", 한국철도학회 춘계학술발표회, 1998, 5.29
2. 石田誠, 阿部則次, "レール頭頂面凹凸と溶接部曲げ疲労の關係", 日本鐵道總研報告書, Vol 4, No.7, 90.7
3. 阿部則次, 福井義弘, 長藤敬晴, 石田, 三浦重, "レール壽命延伸のための溶接部凹凸管理", 철도총련보고, Vol. 8, No. 11, '94. 11.
4. 石田誠, 河野昭子, 本卓也, "軌道支持剛性のレール溶接部曲げに与疲労影響", 철도총련보고, Vol. 12, No. 3, '98. 3.