

# 자동열차제어장치 AF케도회로 S-BOND의 사용신뢰도 분석

論 文  
58-2-14

## Field Reliability Analysis of S-Bond of AF Track Circuit for Automatic Train Control System

崔圭亨<sup>†</sup> · 高永煥<sup>\*</sup>  
(Kyu-Hyoung Choi · Young-Whan Kho)

**Abstract** - This paper presents a reliability analysis of S-bonds for AF track circuits, which detect train movement and transmit a speed control signal to the train. Field survey shows that S-bonds are exposed to very large vibrations transferred from rail, and suffer from frequent failures when they were installed on ballasted track. We collected the time-to-failure data of S-bonds from the maintenance field of Seoul metro line 2, and made a parametric approach to estimate the statistical distribution that fits the time-to-failure data. The analysis shows that S-bonds have time-to-failure characteristics described by Weibull distribution. The estimated shape parameter of Weibull distribution is 1.1, which means the distribution has constant failure rate characteristics like exponential distribution. The reliability function, hazard function, percentiles and mean lifetime are derived for maintenance support.

**Key Words** : S-Bond, AF Track Circuit, Reliability Analysis, Weibull Distribution, Mean Lifetime

### 1. 서 론

철도신호에서는 열차 안전운행을 확보하기 위하여, 선로를 일정 구간별로 구분하고, 각 구간에는 1편성의 열차만 진입을 허용하게 함으로써 열차간의 충돌을 방지하는 폐색방식이 사용된다. 이때 각 구간별로 레일을 이용하여 폐회로를 구성하는 케도회로가 설치되는데, 케도회로는 Fig. 1에 보이는 것과 같이 구간 내에 열차가 진입할 경우 열차의 차축에 의한 회로 단락으로부터 열차 점유를 검지함과 동시에, 열차제어에 필요한 정보를 열차와 지상간 송수신하는 열차제어의 핵심기능을 수행한다[1].

최근 열차제어방식이 지상신호의 수동방식에서 차상신호의 자동열차제어방식으로 발전함에 따라, 이에 적합한 AF케도회로방식이 도입되고 있다. AF케도회로는 16~20,000[Hz] 대의 가청주파수대를 신호원으로 사용하는 방식으로서, 케도회로 구간에서의 열차검지 기능뿐 아니라, 선행열차와의 운행간격, 해당 열차의 지시속도, 차량운행정보 등을 열차에 전송함과 동시에 제동장치에도 직접 연결함으로써 선행 열차와의 간격에 따라 열차속도를 자동제어할 수 있게 한다. 또한, 타 케도회로와의 경계 구간에서 레일을 기계적으로 단절시키지 않고, 전기적으로 회로를 구분하는 무절연 방식을 채택할 수 있기 때문에, 레일 절연으로부터 야기되는 고장 발생 및 유지보수 부담을 경감할 수 있다. 이상과 같은 장점

이 있기 때문에, 도시철도의 자동열차제어시스템에는 AF케도회로가 주로 도입되고 있으며, 설치한 지 오래되어 사용연수를 경과한 케도회로를 대체하여 신설하는 경우에도 적용되고 있다[2].

국내 일부 도시철도에는 S-bond를 사용하는 AF 케도회로장치가 도입되고 있는데, S-bond는 레일에 접속되어 케도회로 신호를 송수신하는 연결 역할을 수행한다. 이와 같은 구조적 특성에 따라, S-bond는 레일로부터 전해지는 충격에 노출되어 있고, 열차가 통과할 때마다 전해지는 진동충격을 반복적으로 받게 되어 고장 발생 확률이 높게 나타나고 있다.

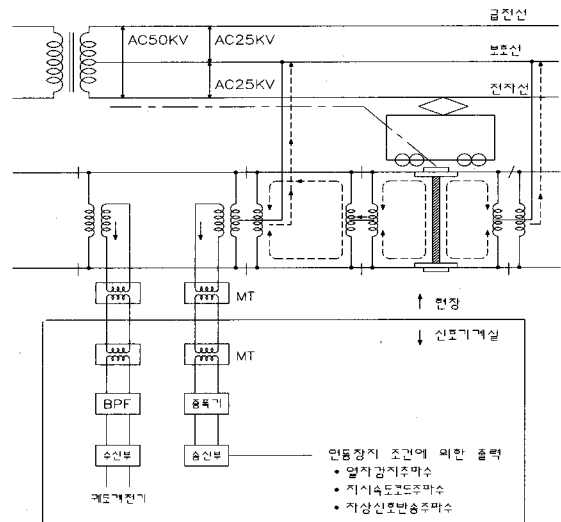


그림 1 케도회로 구성도  
Fig. 1 Configuration of track circuit.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 서울産業大 鐵道電氣信號工學科  
助教授 · 工博

E-mail : khchoi@snut.ac.kr

<sup>\*</sup> 準會員 : 서울産業大 鐵道電氣信號工學科 碩士課程  
接受日字 : 2008年 11月 20日  
最終完了 : 2008年 12月 29日

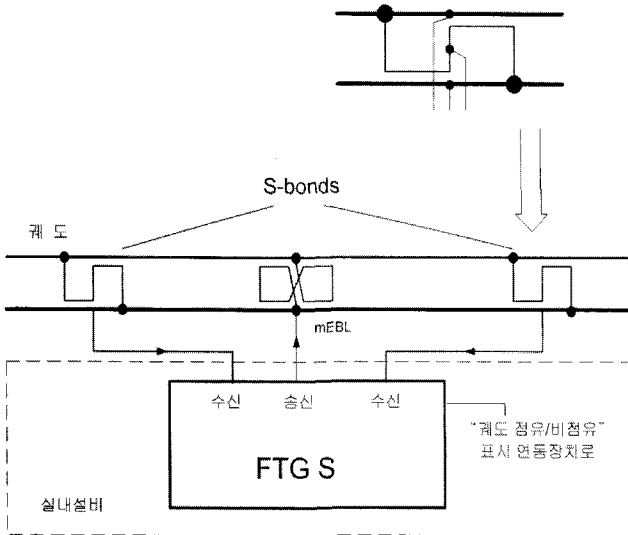


그림 2 FTG S 궤도회로 및 S-bond  
 Fig. 2 FTG S track circuit and S-bond

특히, 자갈도상의 궤도인 경우에는 콘크리트 슬라브 궤도에 비해 진동 충격이 크게 발생하기 때문에 고장 발생 빈도가 더욱 높게 나타나고 있다. S-bond의 고장발생시 궤도회로의 기능이 마비되어 정상적인 열차제어정보의 송수신이 불가능해지기 때문에, 열차 운행 지연 및 안전사고에 직결될 수 있어 이에 대한 대책을 강구할 필요가 있다[3].

본 논문에서는 자갈도상 궤도에 설치되어 있는 S-bond의 운영 환경을 조사하고 고장데이터를 분석하여 신뢰도를 평가함으로써 S-bond의 유지보수에 활용할 수 있도록 하였다. 이를 위해, 열차 운행 현장에서 열차로부터 레일에 전해지는 진동의 크기를 측정하여 주변 환경을 조사하였고, 현장에서의 유지보수 기록을 분석하여 고장데이터를 수집하였다. 또한, 이 데이터를 이용하여 신뢰도 분석을 수행함으로써, 고장 확률분포함수를 추정하고 신뢰도함수, 고장률함수 및 평균수명을 산출하였다.

## 2. S-bond 고장데이터

### 2.1 S-bond 운영 환경

S-bond는 독일 SIEMENS사의 자동열차제어시스템(LZB 700)에서 사용하는 AF 궤도회로 FTG S에 설치되어 있다. FTG S는 원격 공급 부호화된 무절연 가청 주파수 궤도회로(The Remote-fed and Coded Jointless Audio-Frequency Track Circuit)의 독일식 약자이다[4]. 우리나라에서는 인천 지하철과 서울지하철2호선 등에 도입되어 있다.

궤도회로 장치에서, 폐색구간 설정에 따라 궤도는 전기적으로 구분되어야 하는데, 무절연 방식의 FTG S 궤도회로에서는, Fig. 2에 보이는 것처럼, S 자 모양의 S-bond를 이용하여 궤도구간의 완전한 전기적 분할을 실현하고 있다. 궤도 구간의 시작부분에서 송신기는 AF 교류전류를 선로에 공급하고, 구간의 끝부분에서 S-bond를 통하여 수신한다. 또한, S-bond는 두 주행선로간의 전차선 전류를 보상하는 역할도 수행하고 있다.

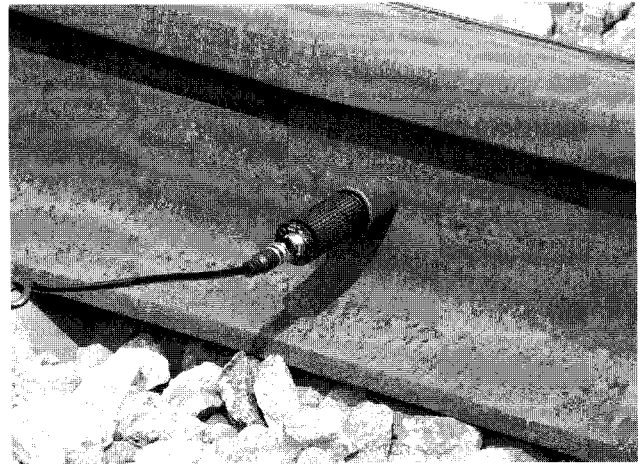


그림 3 레일 진동 측정 센서  
 Fig. 3 Test probe for vibration transmitted to rail

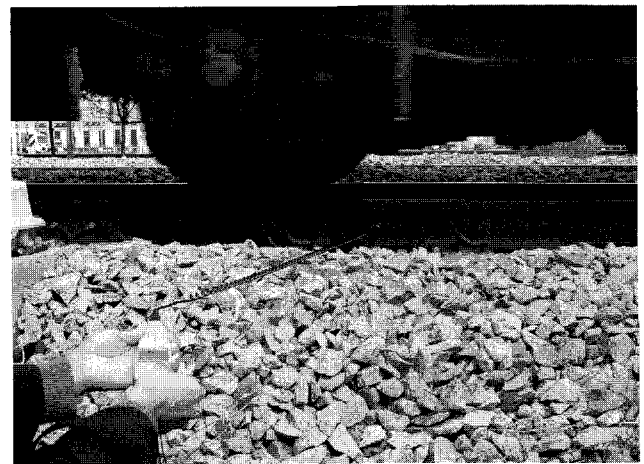


그림 4 진동 측정 현장  
 Fig. 4 Test site of vibration

레일로부터 S-bond에 전해지는 충격 크기를 조사하기 위하여, 자갈도상궤도에서, 열차 통과 시 레일에 전해지는 진동을 측정하였다. 또한, 비교를 위하여 슬라브 궤도에서도 동일한 방법으로 측정을 시행하였다. 측정방법은, Fig. 3 및 Fig. 4에 보이는 것 처럼 휴대형 진동측정기(TYPE 3116)를 레일에 취부하고, 열차가 측정 대상 레일에 접근할 때부터 그 레일을 완전히 빠져나가는 시점까지 각 순간 진동의 최대치를 초 단위로 측정하였다.

Fig.5는 자갈도상궤도 및 슬라브 궤도를 대상으로, 열차가 레일에 접근해서 빠져 나갈 때까지, 레일에 가해지는 진동의 시간적 변화를 측정한 결과를 나타낸다. 그림에서 자갈도상 궤도는 서울지하철 2호선을 대상으로 측정한 결과이고, 슬라브 궤도(1)은 서울지하철 4호선 그리고 슬라브 궤도(2)는 인천지하철 1호선에서 측정한 결과를 나타낸다.

자갈도상궤도에서 측정된 진동의 최대치는  $300[m/s^2]$ 로 매우 높게 나타났다. 2~3분의 운전시적으로 열차가 빈번하게 주행하고 있는 도시철도의 운영환경에서, 이와 같은 큰 진동이 반복적으로 레일에 가해짐으로써, 레일에 설치되어 있는 S-bond에 고장이 유발될 수 있다는 것을 알 수 있다.

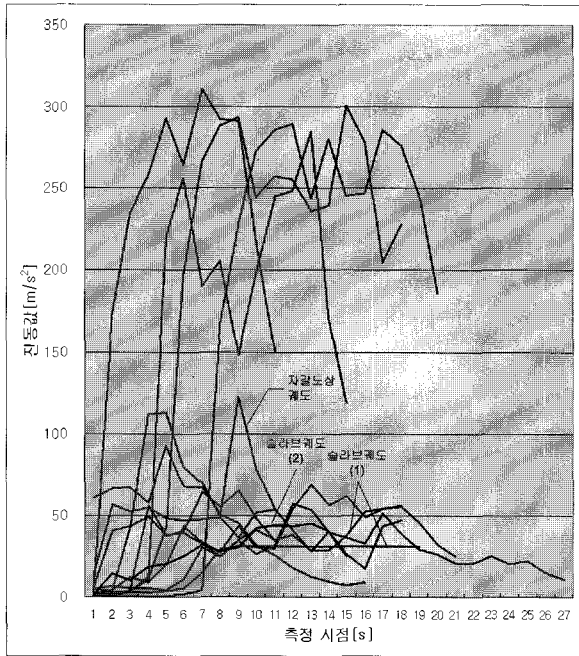


그림 5 진동 측정 결과  
Fig. 5 Results of vibration test

한편, 슬라브 궤도에서는 최대 진동치가 50[m/s<sup>2</sup>]로 측정되었으며, 자갈도상 궤도에 비해 진동이 상대적으로 작게 발생하였다.

2.2 고장 데이터 분석

서울지하철2호선의 자갈도상 궤도에 설치되어 있는 S-bond를 대상으로, S-bond의 고장 이력 데이터를 분석하였다. 이 구간에는 지하철 건설 초기에 직류 궤도회로가 설치되어 있었으나 사용연수가 오래 되었고, 최근 자동열차제어장치(ATC : Automatic Train Control) 및 자동운전장치(ATO : Automatic Train Operation)의 도입에 따라 신규로 AF궤도회로가 설치되어 있으며, 이에 따라 S-bond도 설치되고 있다. 2006년 2월부터 4월에 걸쳐 총 662기의 S-bond가 설치되었다. AF궤도회로의 무절연 궤도회로방식에서는, 폐색구간의 경계점에서 레일은 전기적으로는 구분되며 기계적으로는 접속되는데, 접속방식으로는 접착방식과 일반 이음방식이 적용된다. 현장에서의 유지보수기록 조사 결과, S-bond는 일반 이음방식으로 되어 있는 구간에서 고장 발생이 집중되었다. 이에 따라, 일반 이음 구간에 설치되어 있는 243개의 S-bond를 신뢰도 분석의 대상으로 하였다.

S-bond의 고장 데이터를 Table 1에 보인다. 설치된 시점으로부터 고장이 발생한 시점까지의 시간을 고장시간으로 하여, 고장시간이 짧은 순으로 정리하였으며, 관측 종료 시점에서 고장이 발생하지 않고 정상적으로 운영되고 있는 장치는 관측중단 데이터로 처리하였다. 이와 같은 고장데이터는, 신뢰성 데이터의 유형에서, 제1종 우측 관측중단형 데이터라고 분류할 수 있다[5]. 일반적으로 사용현장에서 획득한 고장데이터는 실제 사용 환경을 정확하게 반영하고 있다는 장점이 있는 반면[6], 완전 고장 데이터의 형태로 획득하기 어려운 경우가 대부분이다[7].

표 1 S-bond 고장 데이터  
Table 1 Time-to-failure data of S-bond

연번	궤도명	고장시간[일]
1	234-220T	15
2	211-470T	52
3	218-370T	84
4	218-390T	111
5	223-020T	113
6	218-200T	130
7	218-330T	150
8	218-470T	150
9	218-340T	166
10	218-280T	205
11	211-470T	329
12	218-330T	334
13	211-3-121BT	343
14	223-070T	357
15	218-420T	368
16	228-660T	370
17	223-120T	380
18	211-450T	450
19	228-550T	474
20	234-600T	524
21	228-560T	525
22	228-700T	551
23	218-310T	628
24	218-470T	631
25	218-350T	674
26	211-480T	696
27	211-500T	702
28	223-020T	708
29	228-700T	717
30	228-560T	722
31	211-510T	735

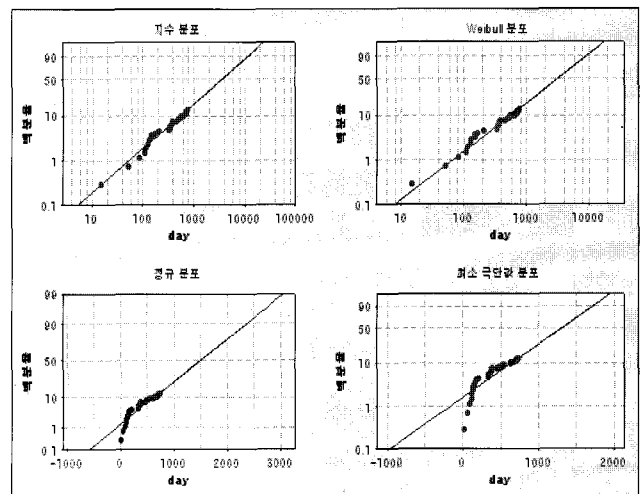


그림 6 각 분포별 확률도  
Fig. 6 Probability plots for distributions

### 3. S-bond 신뢰도 분석

#### 3.1 고장분포함수 추정

신뢰성 분석의 첫 단계로써, 획득된 고장데이터를 어떠한 확률통계분포에 적합시킬 수 있는지 분석하는 것이 필요하다. 신뢰도 분석을 위한 통계분석 소프트웨어는 다수 발표되어 상용화되어 있는데, 본 연구에서는 고장분포의 적합성 검토 alcc 분포 모수 추정을 위하여 Minitab을 이용하였다 [8][9].

신뢰도 분석에 주로 사용되는 확률분포를 대상으로 하여, 이들 각 분포에 대하여 확률도를 작성하고 이로부터 분포 적합도를 산출하여 최적합 분포를 도출하였다. 여기서, 모수 추정에는 최우추정법을 적용하였다. 최우추정법은 대수 우도함수(log-likelihood)를 최소화하는 모수를 수치해석을 이용하여 추정하는 방법으로써 신뢰도 추정에 널리 사용되고 있다[10]. 또한, 분포의 적합도 검정은 Anderson-Darling(A-D) 검정값으로 판정하였다. A-D 검정값은 확률지에 타점된 점과 이들을 적합한 직선의 대응점과의 차이를 측정한 값으로서, 후보 분포 중에서 더 작은 A-D 검정값을 갖는 분포가 더 적합하다는 것을 의미한다[11].

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln F(x_i) + \ln(1-F(x_{n-i+1}))] \quad (1)$$

- n : 표본 크기(Sample size)
- $x_i$  : 표본 값(Sample value) 단,  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$
- F : 적합하고자 하는 누적분포함수  
(Cumulative distribution function)

Table 1의 S-bond 고장데이터를 대상으로, 신뢰도 해석에 가장 널리 사용되고 있는 지수분포, Weibull분포, 정규분포, 극한치분포들에 대하여 확률도(probability plot)를 작도하여 분포 적합성을 나타낸 것을 Fig. 6에 보인다. 여기서 지수분포와 Weibull 분포의 적합도가 상대적으로 높게 나타난다는 것을 알 수 있으며, A-D 검정값 계산 결과, Weibull 분포의 A-D 검정값이 638.7로써 지수분포의 638.8 보다 미세하나마 작게 나타났으므로, Weibull 분포를 S-bond의 고장분포를 나타내는 확률분포로 선정하였다. 지수분포는 고장률이 일정한 고장분포를 나타내는 데 반하여, Weibull 분포는 고장률이 시간에 따라 변하는 다양한 수명분포를 나타낼 수 있으므로 수명분포로서의 활용도가 높다[12].

#### 3.2 모수 및 평균수명 추정

Weibull 분포에서는 확률밀도함수와 신뢰도 함수 및 고장률 함수를 다음 식과 같이 나타낸다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} t^{\beta-1} \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] \quad (2)$$

표 2 Weibull 분포 모수 추정치

Table 2 Estimated value of Weibull distribution parameters

모수(parameter)	추정치	하한치 (95%)	상한치 (95%)
형상모수( $\alpha$ )	1.1	0.78	1.54
척도모수( $\beta$ )	4476	2235	8964

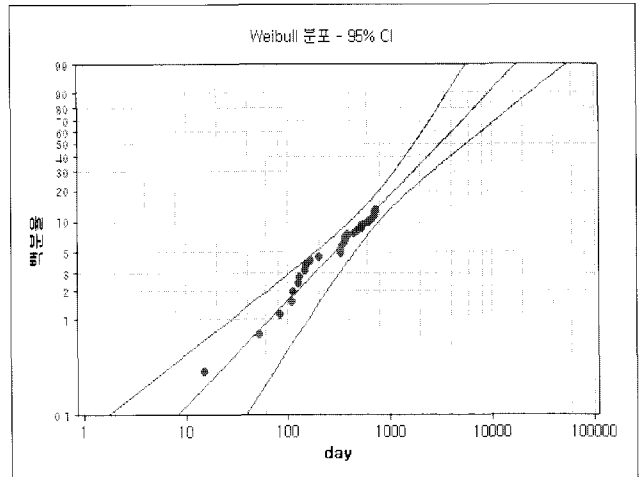


그림 7 95% 신뢰도에서의 확률도

Fig. 7 Probability plot with 95% confidence interval

$$R(t) = \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta] \quad (3)$$

$$h(t) = (\frac{\beta}{\alpha})(\frac{t}{\alpha})^{\beta-1} \quad (4)$$

- $\alpha$  : 척도모수(Scale parameter)
- $\beta$  : 형상 모수(Shape parameter)

전항에서 선정된 Weibull 분포에 대하여, 형상모수와 척도모수를 추정하였다. Fig. 7은 95% 신뢰도 구간에서 추정한 확률도를 나타낸 것으로, 전체 고장데이터가 95% 신뢰구간에 수용된다는 것을 알 수 있다. Table 2는 Weibull 분포 모수들의 추정치로써, 형상모수가 1.1로 추정되어 1.0에 근접하다는 것을 알 수 있다. Weibull 분포에서 형상모수가 1.0인 경우에는 지수분포와 동일한 분포로 되는데, 지수분포의 경우, 고장률이 시간의 경과에 따라 일정한 CFR(Constant Failure Rate) 특성을 갖는다. 앞서 도출된 Weibull 분포에서는 형상모수가 1보다 미소하게 큰 만큼, 고장률이 시간 경과에 따라 미세하게 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 추정된 Weibull 분포의 확률밀도함수, 신뢰도 함수(생존함수) 및 고장률 함수(위험 함수)를 나타낸다. 또한, 전체 장치 중에서 특정 비율(백분율)의 장치에 고장이 발생하기 까지 걸리는 시간을 나타내는 백분위수(Percentile)는 Table 3과 같이 도출되었다. 표에서 제1백분위수(B1)=67.6, 제10백분위수(B10)=575.1, 그리고 제50백분위수(중앙값)=32204.7 인 것을 알 수 있다.

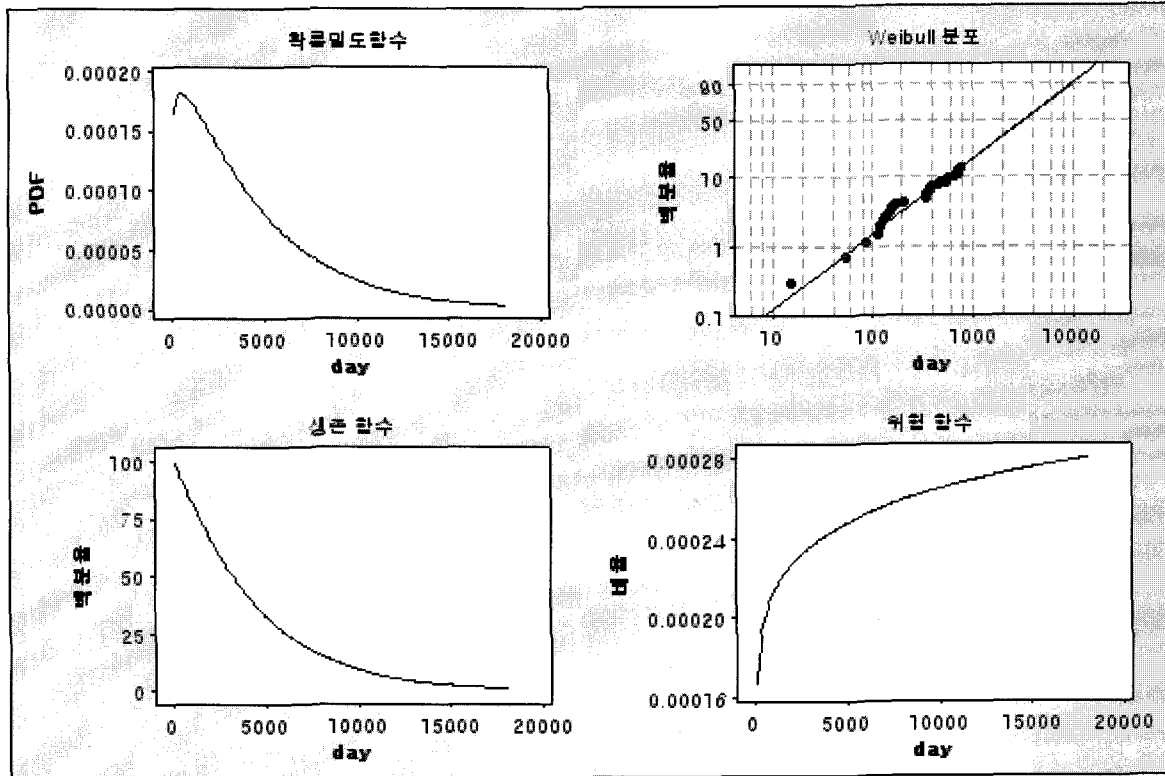


그림 8 S-bond 신뢰도 함수 곡선  
 Fig. 8 Reliability functions of S-bond life distribution

표 3 백분율 추정치  
 Table 3 Estimated value of percentiles

백분율[%]	시간[일]
0.1	8.2
1	67.5
6	354.0
10	575.1
50	3204.7
99	18017.1

Weibull 분포에서의 확률분포의 평균치, 즉 평균수명은 다음 식과 같이 정의된다[12].

$$E(T) = \alpha \Gamma\left[1 + \left(\frac{1}{\beta}\right)\right] \quad (5)$$

$\alpha$  : 척도모수  
 $\beta$  : 형상 모수

여기서, 감마함수  $\Gamma(t)$  는 다음 식과 같이 정의된다[13].

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} z^{t-1} \exp(-z) dz \quad (6)$$

앞서 산출한 Weibull 분포의 모수와 식(5)로부터, S-bond 의 평균수명은 4323[일]로 추정되었다.

#### 4. 결 론

도시철도의 무절연 AF 궤도회로에 설치되어 있는 S-bond에 대하여 운영환경을 조사하고 신뢰도 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

S-bond는 레일에 직접적으로 접촉되어 있다는 구조적 특성 때문에, 열차가 통과함에 따라 매우 큰 진동을 받는 것으로 나타났다. 자갈 도상 궤도의 경우 최대 300[m/sec<sup>2</sup>]에 달하는 진동이 발생하는 것으로 추정되었는데, 이 같이 큰 진동이 반복적으로 가해짐에 따라 고장이 발생하기 쉬운 취약한 환경에 놓여 있다. 콘크리트 슬라브 궤도의 경우에는, 상대적으로 진동이 작고 고장도 적게 발생하는 것으로 나타났다.

도시철도 현장에서의 유지보수기록으로부터 획득한 고장 데이터를 이용하여 신뢰도 분석을 수행한 결과, 고장 데이터를 나타내는 있는 확률분포로서 Weibull 분포가 추정되었다. 이때, 추정된 Weibull 분포의 형상 모수의 크기가 1.1로 추정됨으로써, 지수분포와 유사한 특성의 분포로 나타났다. 이상과 같이 추정된 확률분포로부터, 신뢰도 함수와 고장률 함수 및 백분율을 도출하였고, 평균 수명을 추정한 결과 4323일로 산출되었다.

궤도회로는 열차위치를 감지하여 열차 안전운행을 확보하기 위한 가장 기본적인 핵심장치로서, 그 신뢰성이 높게 요

구되는 장치이다. 궤도회로 중에서도 특히 선로현장에서 레일에 직접 접속되어 있는 S-bond는 고장 발생확률이 상대적으로 높게 나타나고 있는 점을 감안하여, 향후 시공 및 유지보수 측면에서 고장을 최소화하고 신뢰도를 향상시키기 위한 대책 및 연구가 필요하다.

**참 고 문 헌**

- [1] 김종기 외 7인, "신호보안체계 최적 구축 방안 개발", 한국철도기술연구원 연구보고서, 2002. 3.
- [2] 서울메트로 인재개발원, "신호제어시스템 I", 서울메트로, 2000.
- [3] Heummer, K. "Interference-free Track Vacancy Detection", International Conference on Mainline Railway Electrification, York. UK, pp. 47-52, 1999.
- [4] D'Addio, G, Ferrari, P. Masiscotti, A. Pozzobon, P., "Integrated Modelling of Audio Frequency Track Circuits", IEE Conference EMC New york 99, Publication no. 464, pp. 101-105, 1999.
- [5] Ushakov, I. G., "Handbook of Reliability Engineering", John Wiley and Sons, 1994.
- [6] Jauw, J. Vassiliou, P., "Field Data is Reliability Information : implementing an Automated Data Acquisition and Analysis System", IEEE Proceeding on Anual Reliability and Maintainability Symposium, L.A., USA, pp. 24-27, Jan. 2000.
- [7] Suzuki, K., "Estimation of Lifetime Parameters from Incomplete Field Data", Technometrics, vol. 27, no. 3, pp. 263-271, 1985.
- [8] Minitab, "MINITAB User's Guide #1 : Data, Graphics, and Macros", 2000.
- [9] Minitab, "MINITAB User's Guide #2 : Data Analysis and Quality Tools", 2000.
- [10] 서근순, "Minitab 신뢰성 분석", 이레테크, 2000.
- [11] Sinclair, C. D. Spurr, B. D., "Approximations to the Distribution Function of the Anderson-Darling Test Statistic", Journal of the American Statistical Association, vol. 83, no. 404, pp.1190-1191, 1988.
- [12] Nelson, W., "Applied Life Data Analysis", Wiley Series in Probability and Mathematics, 1982.
- [13] Lanczos, C., "A Precision Approximation of The Gamma Function", Journal of Society for Industrial and Applied Mathematics, Series.B, vol. 1. pp. 86-96, 1964.

**저 자 소 개**



**최규형 (崔圭亨)**

1959년 1월 31일생. 1981년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1982년 홋카이도(北海道)대학 전기공학 박사과정 졸업. 2005년~현재 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 조교수.



**고영환 (高永煥)**

1955년 2월 19일생. 2009년 2월 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 석사과정 졸업 예정. 1983년~현재 서울메트로 신호팀 팀장.