

# 광섬유센서 레일패드를 이용한 레일누적통과톤수 실측장치의 효용성 분석

## An effect of rail accumulated passing tonnage measurement device which uses a optical fiber sensor rail pad

신호정\*      박은용\*\*      공선용\*\*\*      김박진\*\*\*\*  
Shin, Hyo-Jeong      Park, Eun-Yong      Kong, Sun-Yong      Kim, Bag-jin

---

### ABSTRACT

For maintaining railroad, accumulated passing tonnage is a determinant factor of appropriate rail replacement time. Recently, Seoul Metro's rail maintaining system and technology is being improved from previous years, which increasing a standard of rail replacement. Thus, this brings importance of estimating and managing for accumulated passing tonnage. In case of light weighted train such as subway, current method of calculating accumulated passing tonnage has defaults of misrepresenting accumulated passing tonnage data. Because current method is based on the weight of passengers and train, and operation data. In addition, currently there is no mechanical and electronic system that could represent and support the accurate data between heavy and non-heavy traffic area, and accumulated passing tonnage is calculated inaccurately by estimating average value each line. The current method of calculating accumulated passing tonnage misleads to unpredictable data that represent inappropriate rail replacement period, which leads to under or over analyzed replacement period. If accumulated passing tonnage is over estimated, rail replacement leads to waste of budget. Hence, it is necessary to construct reliable actual measurement system to manage rail's life safely and efficiently, and in this study the accumulated passing tonnage measurement device is installed with using rail pad of optical fiber sensors and its effect is analyzed.

---

### 1. 서 론

궤도시설 유지관리에 있어서 레일누적통과톤수는 레일의 적절한 교체시기를 결정하는 중요한 기준이다. 최근 서울메트로는 궤도의 안전도 향상 및 레일 유지관리 기술의 발전으로 레일수명연장이 가능해짐에 따라 누적통과톤수에 의한 레일교체기준을 상향 조정하였으며 이에 따라 정확한 레일통과톤수 산정 및 관리의 중요성이 더욱 커지게 되었다.

특히 지하철과 같이 시간대에 따라 승객에 의한 중량이 크게 변동되는 경우에는 열차의 무게 및 운행 실적을 기초로 레일통과톤수를 산정할 경우 실제 레일통과톤수와 많은 차이를 보일 수 있다. 또한 기계화 및 전자화 된 시스템이 구성되지 않은 상태에서 혼잡구간과 비 혼잡구간을 구별하여 구간별로 열차통과톤수를 정확히 산정해 내는데 한계가 있으며, 현재 각 호선별로 평균적인 값을 추정하여 누적통과톤수를 산정하여 관리하고 있으나 구간별 특성이 제대로 고려되지 않아 부정확한 실정이다.

이러한 레일누적통과톤수 산정의 부정확은 레일 교체시기를 정확히 예측하지 못하게 되어 적기에 레

---

\* 책임저자 : 정희원, 서울메트로, 철도토목팀, 선임  
E-mail : s19813056@seoulmetro.co.kr  
TEL : (02)6110-5627 FAX : (02)6110-5629

\*\* 비회원, 한국유지관리(주) 전략기획실, 대리

\*\*\* 정희원, 서울메트로 철도토목팀, 팀장

\*\*\*\* 정희원, 서울메트로 철도토목팀, 차장

일을 교체하는 것이 어렵게 되고, 실제보다 과다하게 통과톤수가 산정 될 경우 불필요하게 레일을 교체하게 되어 예산 및 자원의 낭비를 초래하게 된다. 따라서 안전하고 경제적으로 레일의 수명을 관리하기 위해서는 신뢰성 있는 누적통과톤수 실측방법이 필요하며 본 연구에서는 광섬유센서 레일패드를 이용한 레일누적통과톤수 실측장치를 설치하고 그 효용성을 분석해 보았다.

## 2. 기존 누적통과톤수 산정방법의 한계성

기존 누적통과톤수는 열차운행실적 및 영업실적을 기초로 하여 계산되며, 기계화되고 전자화된 시스템이 없는 상태에서 다양한 전동차 제원 및 구간별 혼잡도를 구별관리 할 수 없고 대략적인 값을 추정 산정하여 호선별로 일률적으로 관리 할 수밖에 없다는 한계가 있었다. 기존 누적통과톤수 산정방법은 표 1과 같다.

표 2 . 연간 호선별 누적통과톤수

선별	1일열차 통과횟수	편성량수	1량당 하중(ton)				1일누적 통과톤수 (ton)	연간 누적통과톤수 (ton)	08~09시 평균혼잡율 (%)	
			계 (ton)	전동차 (ton)	승객 (ton)	승객수 (명)				
1호선	308	10	49.2	41	8.2	149	151,536	55,310,640	133	
2호선	순환선	271	10	55.3	41	14.3	260	149,863	54,699,995	232
	성수지선	114	4	44.5	41	3.5	63	20,292	7,406,580	56
	신정지선	109	6	48.3	41	7.3	132	31,588	11,529,693	118
3호선	216	10	51	41	10.0	181	110,160	40,208,400	162	
4호선	249	10	54.3	41	13.3	242	135,207	49,350,555	216	

\* 1일누적통과톤수 = 1량열차중량×편성량수×1일열차횟수

\* 연간누적통과톤수 =1일누적통과톤수×365일

\* 1량열차무게 = 전동차중량 + 승객중량 (승객수(정원160명× '08~09시 평균혼잡율' ×0.7)×승객무게(55kg))

## 3. 레일누적통과톤수 실측시스템 구축

### 3.1 광섬유 센서 레일패드

Microbending 센서는 다중모드 광섬유를 이용하여 광섬유의 감쇠계수를 측정하는데 기초하고 있으며, 광섬유가 변형됨에 따라 발생하는 빛의 손실(Scatter Loss)을 측정하는 원리이다. 중심 기둥줄에 두 가닥의 유리섬유를 센서의 최소 곡률반경에 가깝게 교차시켜 나선형 구조를 만든 후 계측대상물의 인장 또는 축소 변형효과에 의한 단면적 변화로 인한 투과광량의 차이를 감지하여 변형률의 크기와 방향을 계산해 낸다.

본 연구에 사용된 Microbending 센서는 광섬유 센서의 한 종류로서 기존의 전자소자 대신에 빛을 이용하여 측정하므로 전자기 잡음이 발생하지 않고, 우수한 민감도와 분해능을 가지고 있으며, 크기가 작고 유연해서 측정하고자 하는 대상물에 쉽게 부착하거나 삽입이 가능할 뿐 아니라, 변형을 측정할 때 전송되는 빛의 에너지양을 측정함으로써 온도나 스트레인의 영향을 받지 않는 장점이 있다. 또한 정밀도가 높고 환경요인의 영향이 거의 없으며 시공성과 경제성이 우수하다.

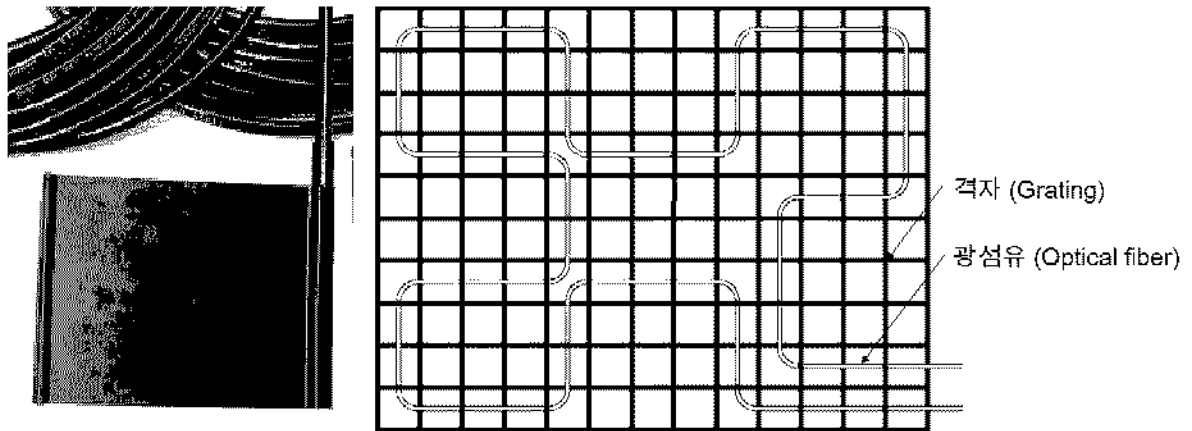


그림 1. 광섬유 센서 레일패드 및 내부구조도

### 3.2 측정시스템 시험설치

측정시스템의 효용성 분석을 위하여 서울메트로 3호선 하선 무악재역~독립문역 구간 14k630~14k640 지점을 설치 장소로 선정하고 1개월간 시험운영을 실시하였다. 본 구간은 “B2S” 궤도구조로서 60kgK 레일이 부설되어 있으며, 산업용 컴퓨터 및 Optical Transmittance Analyzer 합체를 설치 운영할 주변 선로여건이 우수하다.

본 연구에서는 양쪽 레일에 4개씩 총 8개의 광섬유 센서 레일패드를 설치하였으며, 6개는 SL MA-110 Optical Transmittance Analyzer, 2개는 SL MA-220 Optical Transmittance Analyzer에 연결하여 레일패드 센서의 응답을 측정하였다.

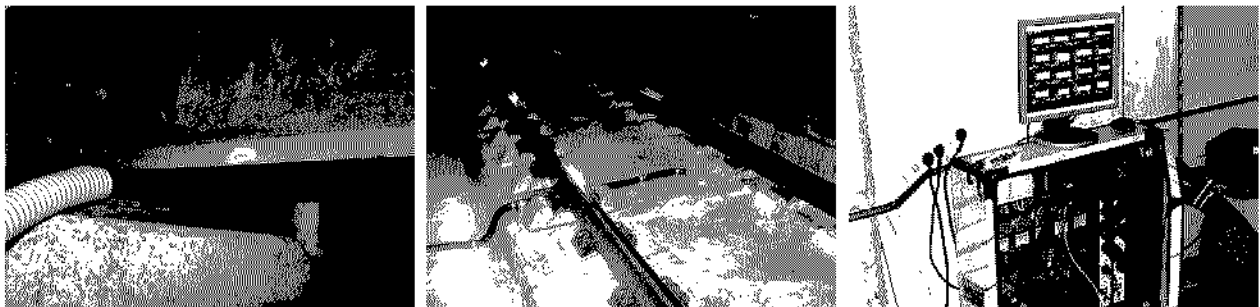


그림 2. 레일누적통과톤수 실측장치 설치 광경

### 3.3 측정시스템 데이터 검증

광섬유 센서 레일패드의 설치 완료 후, 속도 및 하중 변수에 대하여 센서 응답을 검증하기 위하여 차량제원을 미리 알고 있는 궤도모터카, 레일연마차, 임시열차를 속도별로 5회씩 운행시켜 각 채널별 응답 데이터를 확인하였다. 그림 3은 검증에 사용된 철도장비 및 열차의 응답특성을 나타내고 있다.

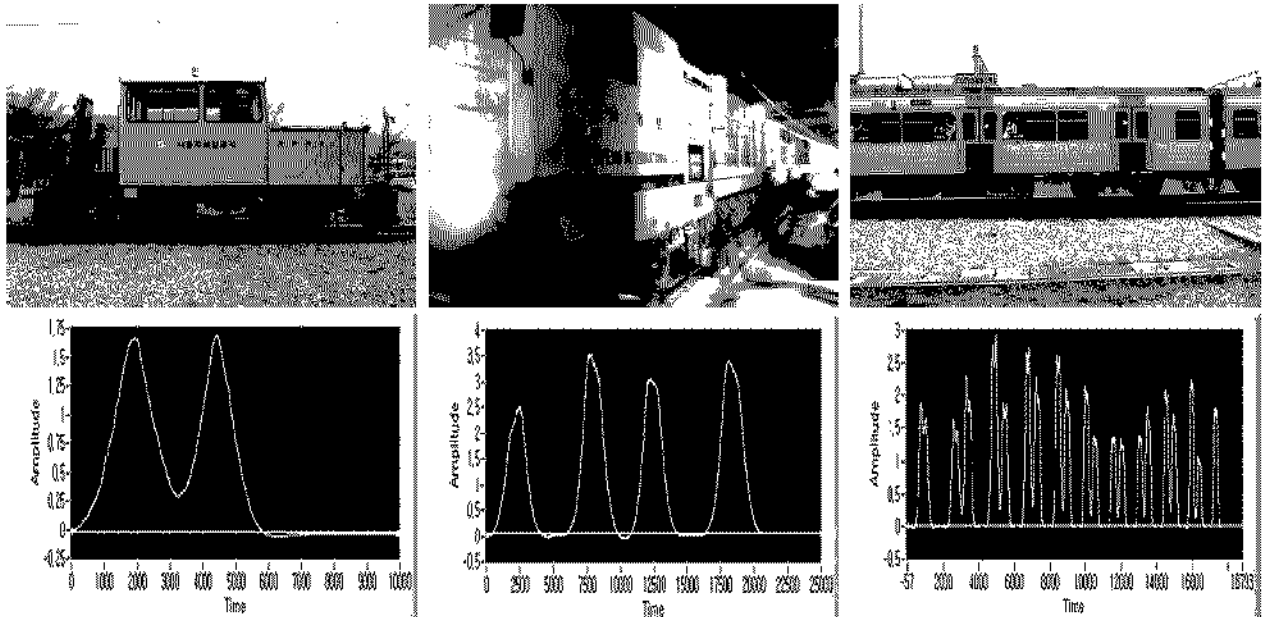


그림 3. 검증에 사용된 궤도모터카, 레일연마차, 임시열차 및 각 응답 특성 예

#### 4. 계측결과 분석

##### 4.1 일일 누적통과톤수 비교

기존 방법에서는 열차 운행실적과 평균 열차중량 및 승객중량 추정치를 이용하여 호선별 누적통과톤수를 산정하였다. 기존 방법을 이용하여 구한 3호선 일일 누적통과톤수 값은 106,590 ton이며 산정방법은 표 2와 같다.

표 2. 기존방법에 의한 3호선 일일 누적통과톤수

선별	일일열차 통과횟수	편성 량수	1량당 하중 (ton)				일일누적 통과톤수 (ton)	08~09시 평균혼잡율 (%)
			계 (ton)	전동차 (ton)	승객 (ton)	승객수 (명)		
3호선	209	10	51	41	10.0	181	106,590	162

\* 1일 통과 톤수 = 1일열차횟수(연간열차횟수(상하선) ÷ 365 ÷ 2) × 편성량수 × 1량 톤수(승객포함)  
 → 1일열차횟수(209) × 편성량수(10) × 1량 톤수(51ton) = 106,590 ton  
 \* 실측장치에 의한 값과 비교를 위해 209회 기준으로 산출

반면, 누적통과톤수 실측장치에 의해 계측된 평일 임의의 1일 데이터는 87,488 ton 으로서 기존 방법에 비해 19,102 ton 정도 작게 계측되었다. 이는 본 시험설치 구간이 비혼잡 구간일 뿐만 아니라, 기존 방법의 경우 전동차 1량의 중량을 41ton 안전치로 적용하고 승객무게는 '08~09시 평균혼잡율 × 0.7' 을 이용하여 추정함에 따른 것으로 판단된다.

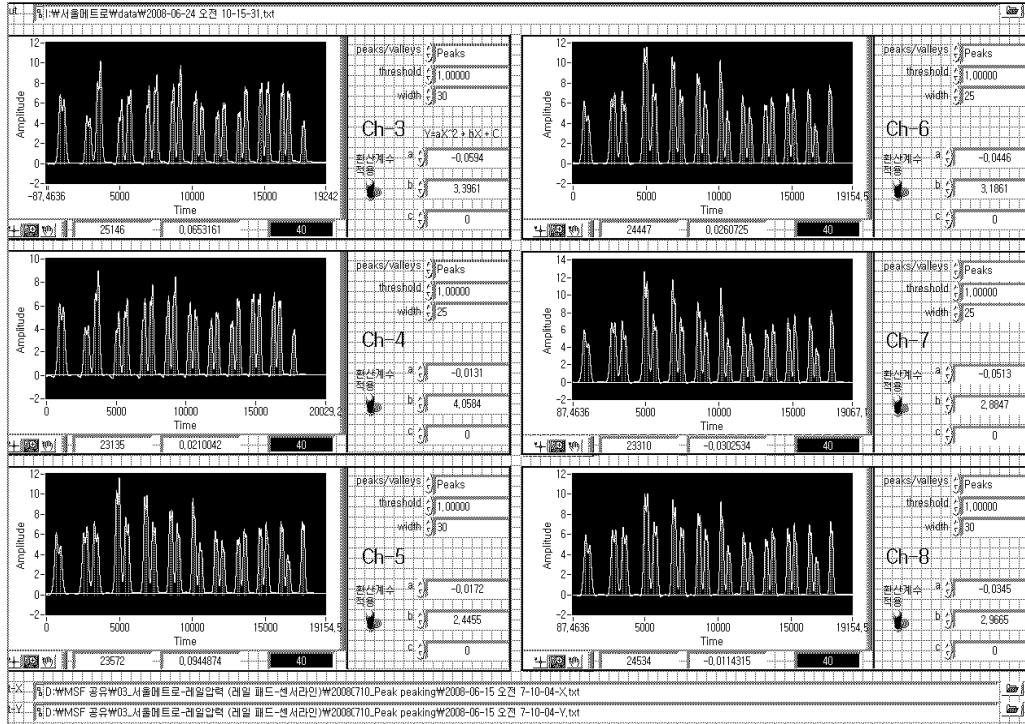


그림 4. 통과톤수 계측 프로그램

또한, 평일 임의의 1일 통과톤수 데이터를 시간대별로 합산해 본 결과, 오전 출근시간대에 계측값이 가장 높았으며 오전 출근시간대를 제외하고는 거의 비슷한 수준의 계측값을 나타내는 경향을 보였다.

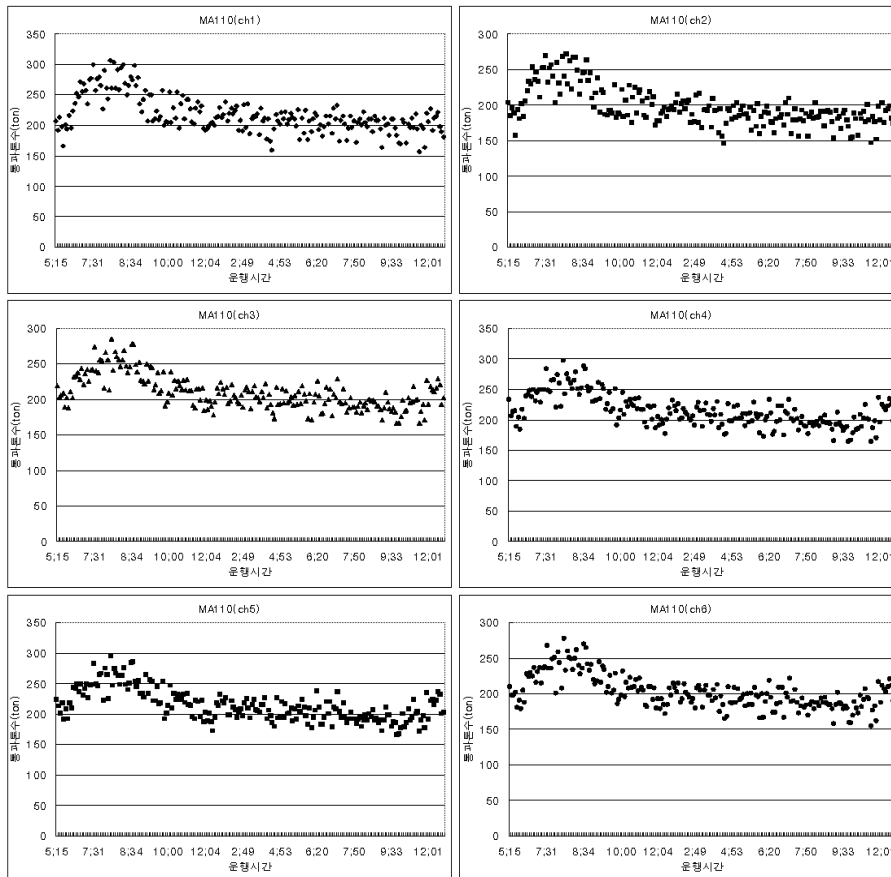


그림 5. 시간대별 통과톤수

#### 4.2 월간 및 연간 단위 누적통과톤수

비혼잡 구간인 3호선 무악재역~독립문역에서 1개월간 실측한 통과톤수 데이터를 기존 산정방법에 의해 계산한 값과 비교해 보았다. 비교결과는 아래 표 3과 같다.

표 3. 방법별 누적통과톤수 비교

기존 방법에 의한 누적통과톤수	실측장치에 의한 누적통과톤수
○ 1일 누적통과톤수 → 110,160 ton	○ 일평균 누적통과톤수 = 월간 누적통과톤수 ÷ 30 → 2,493,924 ÷ 30 = 83,131 ton
○ 월간 누적통과톤수 = 1일 누적통과톤수 × 30 → 110,160 × 30 = 3,304,800 ton	○ 월간 누적통과톤수 (실측값) → 2,493,924ton
○ 연간 누적통과톤수 = 1일 누적통과톤수 × 365 → 110,160 × 365 = 40,208,400 ton	○ 연간 누적통과톤수 = 1일 누적통과톤수 × 365 → 83,131 × 365 = 30,342,815 ton

기존 방법을 이용하여 계산한 월간 레일누적통과톤수 값은 3,304,800 ton 이며, 실측장치를 통해 계측된 월간 레일누적통과톤수 값은 2,493,924 ton 으로서 기존 방법에 비해 대략 24.5% 정도 작게 계측되었다. 또한 연간 레일누적통과톤수로 환산하여 비교한 결과 약 9,800,000 ton 정도 차이가 있음을 알 수 있었다. 이는 3호선 무악재역~독립문역이 비혼잡 구간이므로, 혼잡 구간을 고려하여 산출한 기존방식의 호선별 통과톤수와 차이가 발생한 것으로 판단되며, 혼잡도 단계에 따른 구간별로 실측 관리를 한다면 구간별 특성을 고려한 정확한 누적통과톤수를 도출할 수 있을 것이다. 객관적이고 정확한 계측을 통하여 3호선 무악재역~독립문역 구간과 같이 실측값이 기존 방법에 비해 작게 평가된 경우, 레일교체시기를 연장시킬 수 있으며 그에 따른 레일교체비용 또한 절감할 수 있다.

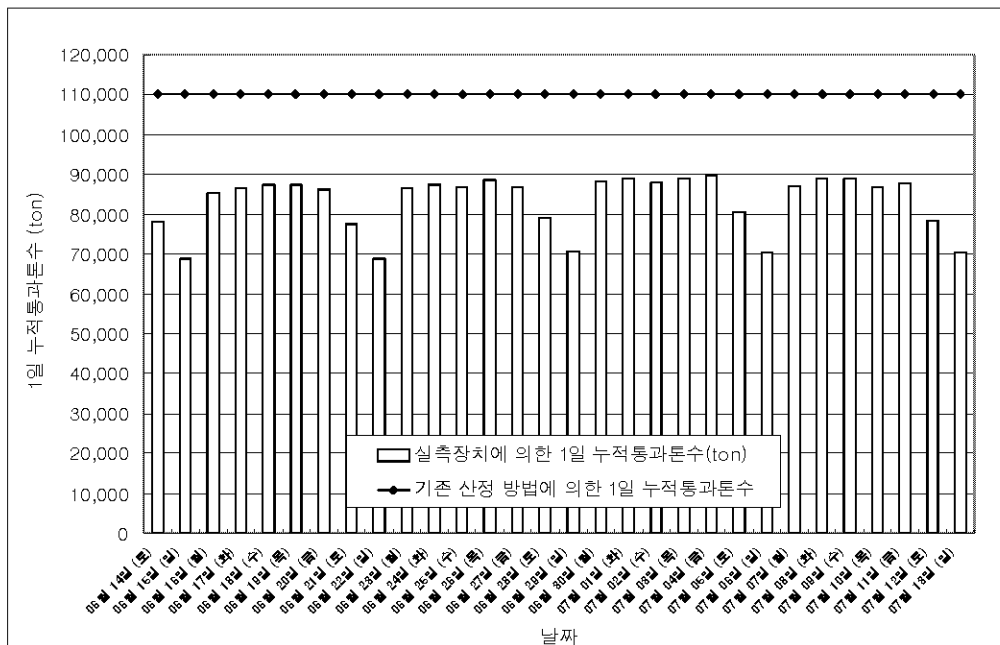


그림 6. 1개월 시험운영 기간 동안의 1일 누적통과톤수 값 변화 그래프

또한, 요일별로 누적통과톤수를 비교해 본 결과, 주말과 평일의 차이가 확연하였으며 가장 큰 요인은 열차 운행횟수 차이인 것으로 판단된다.

표 4. 요일별 평균 누적통과톤수

(단위 : ton)

일	월	화	수	목	금	토
						06월14일
						78,176
06월15일	06월16일	06월17일	06월18일	06월19일	06월20일	06월21일
68,879	85,162	86,430	87,245	87,302	86,069	77,554
06월22일	06월23일	06월24일	06월25일	06월26일	06월27일	06월28일
68,693	86,616	87,351	86,899	88,456	86,910	78,992
06월29일	06월30일	07월01일	07월02일	07월03일	07월04일	07월05일
70,543	88,141	88,893	88,108	88,887	89,796	80,522
07월06일	07월07일	07월08일	07월09일	07월10일	07월11일	07월12일
70,224	87,212	88,836	88,807	86,754	87,804	78,361
07월13일						
70,302						

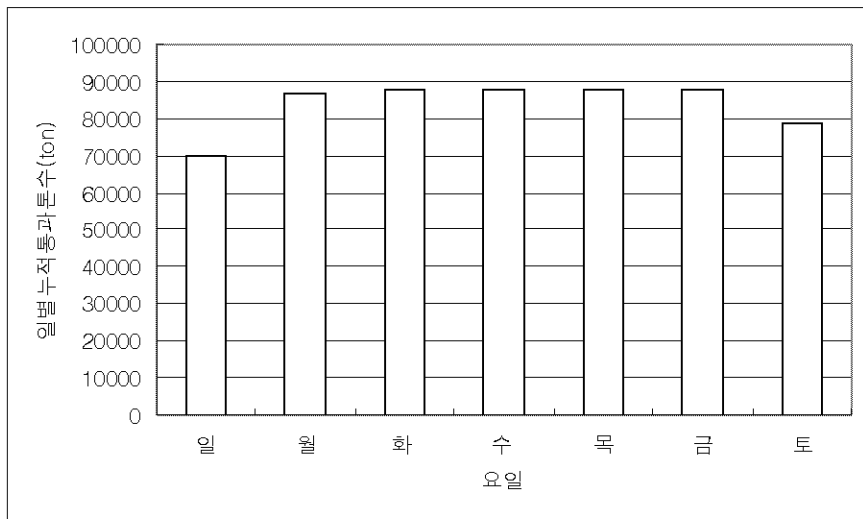


그림 7. 요일별 누적통과톤수

### 5. 결론

본 연구에서는 광섬유센서 레일패드를 이용하여 측정된 레일누적통과톤수 실측 데이터의 효용성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 광섬유 센서 레일패드를 이용한 레일 누적통과톤수 실측값은 중량 및 속도에 대한 보정을 통하여 합리적이고 신뢰도 높은 결과를 도출하였다.
2. 실측장치에 의한 결과와 기존 산정방법에 의한 결과를 비교 검토한 결과 본 시험운영 구간과 같이 비혼잡 구간에서는 실측장치에 의한 값이 기존 산정방법에 의한 값보다 작게 평가되었다.
3. 광섬유 센서 레일패드를 이용하여 객관적이고 정확하게 계측한 레일누적통과톤수는 레일을 보다 과학적으로 유지관리 할 수 있게 할 뿐만 아니라, 레일교체비용 또한 절감시킬 수 있을 것으로 판단된다.
4. 구간별 혼잡도에 따라 레일수명을 구별 관리함으로써 적재적소에 비용 및 인력을 투입할 수 있어 보다 합리적인 레일 수명관리를 가능케 한다.

본 연구에 의하여 검토된 레일누적통과톤수 실측장치는 현재 서울메트로 1~4호선 전구간에 USN 방

식으로 구축되고 있으며, 향후 타 철도운영기관으로의 횡단전개가 가능할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 이규완, 정성훈, 박은용 (2008), “첨단계측센서를 이용한 철도 구조물의 모니터링”, 한국소음진동 공학회 2008년도 춘계학술대회논문집, pp772 ~ 777
2. 최준성, 이규완, 조병완, 최광수, 오영국(2007) "마이크로 벤딩 광섬유센서를 이용한 축중량 측정센서 개발을 위한 기초연구", 한국구조물진단학회 2007년도 춘계학술발표회 논문집, pp. 135 ~ 138