

부족캔트량과 레일마모의 상관관계 고찰
A Study on a Mutual Relation of Cant Deficiency/Rail Wear
in Metro Lines

홍철기*
Hong, Chull-Kee

양신추**
Yang, Shin-Chu

김연태***
Kim, Yeun-Tae

ABSTRACT

In this study, the relation between cant deficiency(C') and rail wear in Seoul Metro Line 5 with STEDEF track structure(concrete bed) is studied. As a result, it is found that cant deficiency have a direct influence on rail wear, and under the condition that other negative effects are neglected, the cant deficiency in Metro Lines is demanded to set as little as possible.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 도시철도 건설과 도시 내 경량철도 건설이 활발히 추진되고 있다. 도시철도 건설시 우리나라 실정 및 적용기술에 맞도록 충분한 기술검토가 이루어지지 않을 경우 시설물 유지관리시 많은 문제점이 발생하게 되고, 또한 유지관리비용을 증대시키는 요인이 된다. 그러므로 유지관리시 나타난 문제점을 보완, 개선하여 향후 도시철도 건설 시 반영토록 함이 필요하다.

본 연구에서는 서울시 도시철도 5호선 콘크리트도상 STEDEF 궤도에서의 개통후의 운행실적을 토대로 Cant량 부족과 Rail마모와의 상관관계를 분석하여, 도출된 결과를 향후 도시철도 및 경량철도 건설 시 반영하고자 한다.

* 한국철도기술대학원 석사과정, 서울도시철도공사 보선팀장, 정회원

** 서울산업대학교 철도기술대학원 교수, 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 서울산업대학교 구조공학과, 철도기술대학원 교수, 정회원

1.2 연구범위 및 방법

레일에는 운중, 역행 또는 제동에 따른 접선력, 곡선통과시 발생하는 측압력, 좌우 차륜의 주행로 차에 의한 윤축틀림에 따른 접속력 등의 외력은 물론, 기상, 레일의 운할상태 등 다양한 요인에 의거 두부 및 궤간 내측면에 마모가 발생하게 된다. 그런데, 앞에서 기술된 외력은 설정된 캔트량에 따라 그 크기가 변하기 때문에 결국 캔트부족량은 레일의 마모에 직접적인 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이와 관련, 서울 지하철 5호선 STEDEF 궤도구조구간에서 최근 몇 년간의 실적을 토대로 캔트 부족량이 레일마모에 미치는 영향을 조사하여 캔트설정과 관련된 유지관리 방향을 제시하고자 한다.

(1) 대상노선 및 구간

대상 노선은 도시철도 시스템 중에서 ATC/ATO 운전시스템과 STEDEF 궤도구조를 가지고 있는 서울 도시철도 5호선으로 하였다. 서울 도시철도 6,7,8호선은 5호선과 동일한 시스템이긴 하나 개통 후 운영기간이 짧아 레일마모와 관련된 자료가 충분히 축적되지 않았기 때문에 개통 후 운영기간이 가장 오래된 서울 도시철도 5호선만을 대상 노선으로 선정하였다.

대상구간은 서울 도시철도 5호선은 열차가 2가지 방식(방화~강동~상일 구간과 방화~강동~마천 구간 교호운행)으로 상이하게 운행되고 있기 때문에 이 중에서 운행방식이 동일하고, 통과톤수가 동일한 방화~광나루 역간에서 레일마모가 심하게 발생하는 반경 600m 이하의 곡선구간으로 하였다. 구체적으로 경두레일인 급곡선 $R \leq 300\text{m}$ 구간 6개소(상·하 12개소), 보통레일로서 최급곡선이며, 캔트 부족량이 큰 $R=400\text{m}$ 구간 6개소(상·하 12개소), 비교적 레일마모가 심한 $400\text{m} < R \leq 600\text{m}$ 구간 6개소(상·하 12개소), 그리고 거의 마모가 없는 $R=600\text{m}$ 구간 6개소(상·하 12개소)로 선정하였으며, 따라서 총 4 개의 곡선에 상·하선 총 48개소를 조사위치로 설정하였다.

(2) 조사 기간

조사기간은 지하철 5호선이 최초 개통일(1995.11.15)을 기준으로 할 경우 2001년 현재까지 약 5년 이상의 기간이 경과하였지만, 구간별로는 왕십리~상일역간이 '95.11.15, 방화~까치산역간이 '96.3.20, 마천~강동역간이 '96.3.30, 여의도~까치산역간이 '96.8.12, 여의도~왕십리역간이 '96.12.30 등 5 단계로 구분 개통하였기 때문에 최종개통해인 '96년말 부터를 기준으로 하여 약 4 년간을 조사기간으로 하였다.

(3) 레일마모 측정방법

본 연구에서는 Cant부족에 따른 레일마모량 조사에 초점을 두고 있고, 캔트부족은 레일의 편마모와 직접적인 연관성이 있기 때문에 레일의 측마모를 측정하여 원래의 단면과 비교, 마모된 깊이를 측정하는 방식으로 진행하였다. 측정은 $R \leq 300\text{m}$ 경두레일구간은 분기 1회, $300\text{m} < R \leq 600\text{m}$ 을 포함한 보통레일구간은 월 1회의 주기로 실시하였으며, 측정간격은 5m 로 하였다.

2. 부족켄트량 기준 및 현황

2.1 켄트설정

켄트부족은 설정Cant량이 균형Cant보다 작을 경우에 생기는 것으로서, 일반적으로 차량이 곡선을 통과할 때 초과원심력에 의한 승차감의 저하, 차량의 진동이나 곡선 내측으로부터의 횡력의 작용에 따른 곡선의측으로의 전도 등을 고려하여 정하고 있다. Cant부족량 한도 산출식을 유도하면 다음과 같다.

그림 1에서 H = 차량 중심높이, G = 궤간, C = 설정켄트, C_d = 부족켄트량이라고 할 때 부족켄트량 C_d 는 다음 식으로 표시된다.

$$C_d = \frac{V^2}{127R} - C \quad (1)$$

그림 1에서 Cant C 에 대한 균형속도를 V_0 라고 하면

$$C = \frac{G V_0^2}{127R} \quad (2)$$

이 되고, 이 속도보다 큰 임의의 속도 V ($V > V_0$)로 통과할 경우 아래 식이 얻어진다.

$$C + C_d = \frac{G V^2}{127R} \quad (3)$$

식 (2.2)에서 식(2.1)를 빼면

$$C_d = \frac{G V^2}{127R} - \frac{G V_0^2}{127R} = \frac{G}{127R} (V^2 - V_0^2) \quad (4)$$

된다. 여기서, 원심력과 중량과의 합력 방향이 궤도중심으로부터 편기된 량을 x 라 하면, 그림으로부터

$$\frac{C_d}{G} = \frac{x}{H} \quad (5)$$

가 성립된다. 따라서 식 (4), (5)에서 아래 식이 얻어진다.

$$x = C_d \times \frac{H}{G} = \frac{G}{127R} (V^2 - V_0^2) \times \frac{H}{G} = \frac{1}{127R} (V^2 - V_0^2) \times H \quad (6)$$

우리나라 국유철도 및 도시철도의 경우 차량의 외방 전도에 대하여 안전율 4 를 적용하여, 즉 x 는 $(\frac{1}{8} G)$ 이내에 있도록 할 경우 $H = 2,000\text{mm}$, $G = 1,500\text{mm}$ 를 적용하면 $\frac{1}{8} G \geq \frac{C_d}{G} \times H$, $C_d \leq \frac{G^2}{8H}$ 으로부터 $C_d \leq 140\text{mm}$ 이 되어야 한다. 이 값은 순수하게 전도에 대한 안전을 확보면에서 정하고 있는 것으로서, 규정에서는 여기에 풍하중, 차량의 Spring 작용, 승차감의 영향 등을 고려하여 부족켄트량의 한도를 100mm로 정하고 있다.

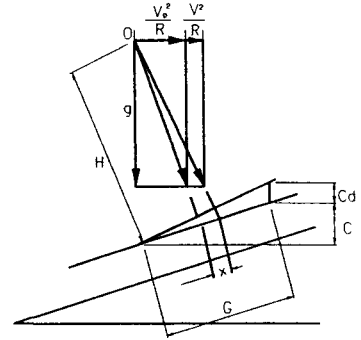


그림 1. 부족켄트량 설정

2.2 지차채별 설정 및 부족캔트량 기준

도시철도 건설규칙(1979.5.9. 교통부령 제1025호) 제11조, 제1항에서는 캔트량에 대하여 “곡선부의 바깥측 레일에는 열차의 운행안전을 위하여 캔트(열차의 원심력에 의한 탈선이나 전복을 막기 위하여 바깥쪽 레일을 안쪽 레일보다 높게 부설하는 것을 말한다)를 두어야 한다. 다만, 분기부에 부대되는 곡선의 경우에는 그러하지 아니하다”라고 정의하고 있으며, “캔트의 크기는 곡선의 반경, 열차의 운행 속도 등을 고려하여 시·도지사가 정하되, 그 최대크기는 160mm를 초과할 수 없다”라고 하므로써 캔트량의 적용을 시·도지사에 위임하고 있다. 지방자치단체별 도시철도의 Cant량 산정공식 및 부족 Cant량(C') 적용현황은 표 1과 같다.

표에 의하면 서울시에서는 부족캔트량을 0~40mm, 부산시 1호선에서는 0~20mm, 부산시 2, 3호선과 대구, 대전, 광주시 지하철에서는 0mm 로 정하고 있다. 부족캔트량은 구조물 설계속도와 운전속도와의 차이, 역간거리와 가·감속에 의한 운전속도 하향조정, 규정속도와 수동운전에 따른 실제 운전속도와의 차이, 이용승객의 승차감 등을 고려하여 정하고 있다.

표 1. 지방자치단체별 설정 및 부족캔트량 적용현황

구 분	서울시			부산시		인천시	대구, 대전, 광주시
	1 호선	2,3,4 호선	5,6,7,8 호선	1 호선	2,3 호선	1 호선	1 호선
토 목 구조물	$C = 10 \times \frac{V^2}{R}$ 단, $C \leq 160\text{mm}$	$C = 11.3 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단, $C \leq 160\text{mm}$ $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 40\text{mm}$ 적용	$C = 11.8 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단, $C \leq 160\text{mm}$ $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 40\text{mm}$ 적용	$C = 11.3 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단, $C \leq 160\text{mm}$ $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 20\text{mm}$ 적용	$C = 11.3 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단, $C \leq 160\text{mm}$ $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 0\text{mm}$ 적용	$C = 11.8 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단, $C \leq 160\text{mm}$ $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 0\text{mm}$ 적용	$C = 11.8 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단, $C \leq 160\text{mm}$ $C' = 0-100\text{mm}$ $C' = 0\text{mm}$ 적용
개 도 구조물	$C = 11.3 \times \frac{V^2}{R} - C'$ $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 40\text{mm}$ 적용	$C = 11.3 \times \frac{V^2}{R} - C'$ $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 0-40\text{mm}$ 적용	$C = 11.8 \times \frac{V^2}{R} - C'$ $C' = 0-100\text{mm}$ $C' = 0-40\text{mm}$ 적용	$C = 11.3 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단 $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 0-20\text{mm}$ 적용	$C = 11.3 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단 $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 0\text{mm}$ 적용	$C = 11.8 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단 $C' = 0-75\text{mm}$ $C' = 0\text{mm}$ 적용	$C = 11.8 \times \frac{V^2}{R} - C'$ 단 $C' = 0-100\text{mm}$ $C' = 0\text{mm}$ 적용

2.3 부족 캔트량 현황

전술한 조사대상에 대하여 곡선반경별 부족Cant량 현황을 집계하면 표 2와 같다. 표에 따르면 $R \leq 300\text{m}$ 구간에서는 부족Cant량이 0~24mm, $R = 400\text{m}$ 구간에서는 0~77mm, $400\text{m} < R < 600\text{m}$ 구간에서는 0~55mm, $R = 600\text{m}$ 구간에서는 0~24mm 범위로 분포되어 있다. 즉 곡선중별에 관계없이 부족캔트량이 특별히 돌출적인 몇 개소를 제외하고는 대체로 0~30mm 정도의 값으로 설정되어 있으나 $C' = 0-40\text{mm}$ 관리기준을 벗어나는 경우도 발견되고 있다. 또한 각 곡선별로 어떤 규칙성이 발견되지 않는 점으로 미루어 부족 캔트량이 정해진 관리기준에 의거 설정되기보다는 임의적으로 설정되고 있는 실정이다. 또한 캔트부족량의 발생요인은 토목구조물 설계시 부족Cant량 $C' = 40\text{mm}$ 적용과 정거장내 최대 Cant $C \leq 30\text{mm}$ 제한에 따라 발생되고 있는 것으로 나타나고 있다.

표 2. 서울도시철도 5호선 곡선별 부족캔트량 현황

단위 : mm

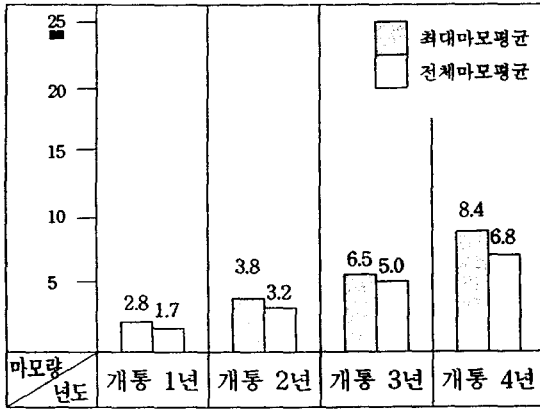
R≤300m				R=400m				400m<R<600m				R=600m			
역구간	상하	부족 캔트	비고	역구간	상하	부족 캔트	비고	역구간	상하	부족 캔트	비고	역구간	상하	부족 캔트	비고
방 화 ~ 개화산	하	0		개화산 ~ 개화산	하	(-) 22	정거장 구간	발 산 ~ 우장산	하	(-) 23		여의나루 ~ 마 포	하	(-) 8	
	상	(-) 13			상	(-) 77			상	(-) 11			상	(-) 23	
김포공항 ~ 송 정	하	(-) 21		김포공항 ~ 김포공항	하	(-) 22	정거장 구간	목 동 ~ 목 동	하	(-) 14	정거장 구간	마 포 ~ 공 덕	하	(-) 5	
	상	(-) 24			상	(-) 77			상	(-) 55			상	(-) 9	
까치산 ~ 신 정	하	(-) 10		발 산 ~ 발 산	하	(-) 22	정거장 구간	오목교 ~ 양 평	하	(-) 5		서대문 ~ 광화문	하	(-) 24	
	상	(-) 24			상	(-) 22			상	(-) 22			상	(-) 24	
종로3가 ~ 을지4가	하	0		서대문 ~ 광화문	하	(-) 19		신 길 ~ 신 길	하	(-) 16	정거장 구간	장한평 ~ 군 자	하	(-) 10	
	상	(-) 15			상	(-) 19			상	(-) 17			상	(-) 10	
을지4가 ~ 동대문(운)	하	(-) 15		청 구 ~ 금 호	하	(-) 20		애오개 ~ 충정호	하	(-) 21		장한평 ~ 군 자	하	(-) 10	
	상	(-) 15			상	0			상	0			상	(-) 10	
답십리 ~ 장한평	하	(-) 15		아차산 ~ 광나루	하	0		동대문(운) ~ 청 구	하	(-) 4		장한평 ~ 군 자	하	(-) 10	
	상	0			상	0			상	(-) 4			상	0	

3. 부족캔트량과 레일마모의 상관관계

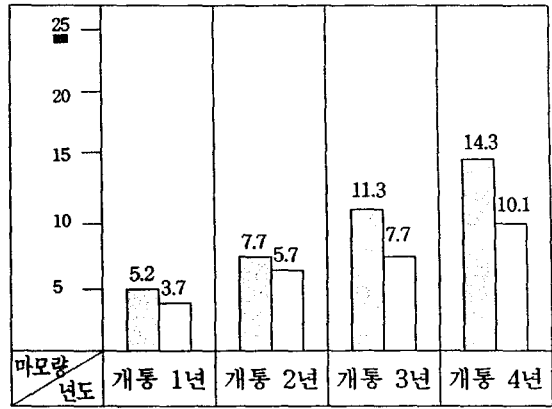
3.1 곡선별 Rail 마모현황

전술한 조사대상 및 분석방법에 의거 서울시 도시철도 5호선 곡선반경별 년차별 Rail 마모현황을 정리하면 그림 2와 같다.

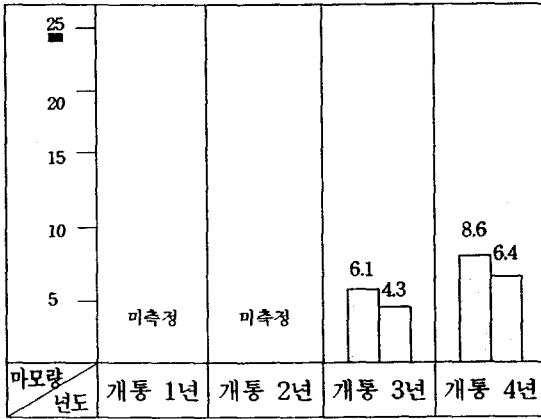
그림에 의하면 대상구간의 마모율이 전체를 평균한 평균마모율보다 예외없이 크게 나와 역시 예상 대로 레일의 마모는 곡선부에서 심하게 발생하며, 이는 곡선부의 캔트부족이 마모발생에 적지 않게 기여했을 것으로 유추된다. 곡선반경이 400m 인 곡선구간에서 마모가 가장 심하게 발생하고 있는 것으로 나타나 마모는 곡선반경과 캔트부족량과 직접적인 관련이 있는 것으로 판단된다. 하지만 반경 300m 곡선의 경우 마모율이 현저하게 적은 것은 이 구간에 사용된 레일이 경두레일이기 때문으로 보인다.



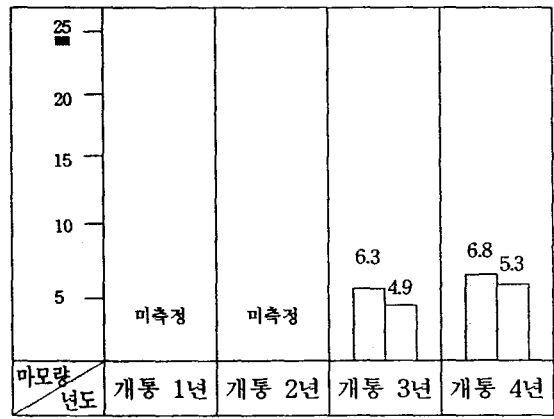
(a) $R \leq 300m$ 구간(경주Rail)



(b) $R=400m$ 구간(보통Rail)



(c) $400m < R < 600m$ 구간(보통Rail)



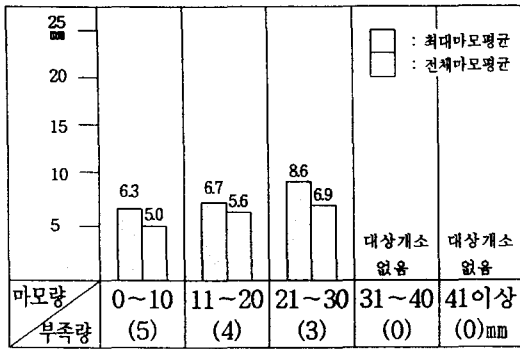
(d) $R=600m$ 구간(보통Rail)

그림 2 곡선반경별 년차별 Rail마모 현황

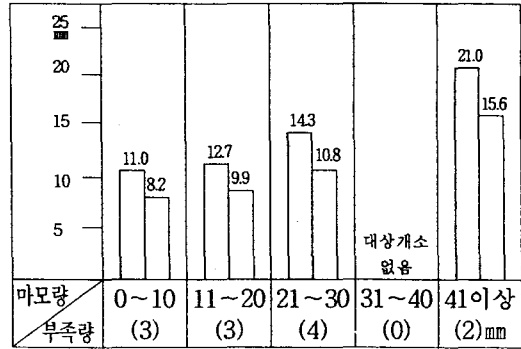
3.2 부족캔트량과 레일마모의 상관관계 분석

대상구간에서 조사된 결과를 토대로 곡선반경별 부족캔트량과 마모량간의 관계를 그림으로 나타내면 그림 3과 같다.

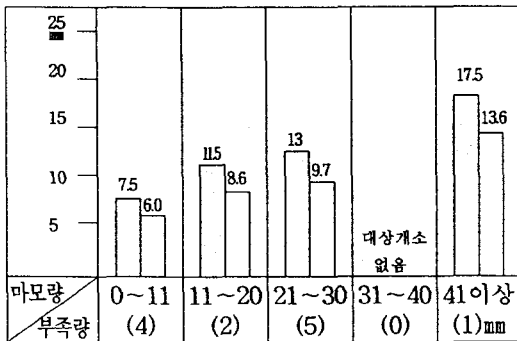
그림에서 보는 바와 같이 부족캔트량이 증가할수록 마모량이 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 편의상 부족캔트량이 0~10mm일 때의 레일마모량을 1이라고 하면, 부족Cant량이 11~20mm일 때의 마모량은 약 1.1배, 부족Cant량이 21~30mm일 때의 마모량은 약 1.6배, 40mm 이상일 경우는 약 2.7배이상 증가하는 것으로 확인되어 부족Cant량과 Rail마모량은 상호 밀접한 상관관계가 있는 것으로 나타나고 있다. 즉 부족캔트량이 증가할수록 레일 마모가 심해진다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 레일 마모측면에서만 볼 때, 부족캔트량은 가급적 적게 설정하는 것이 유지관리상 유리할 것으로 판단된다.



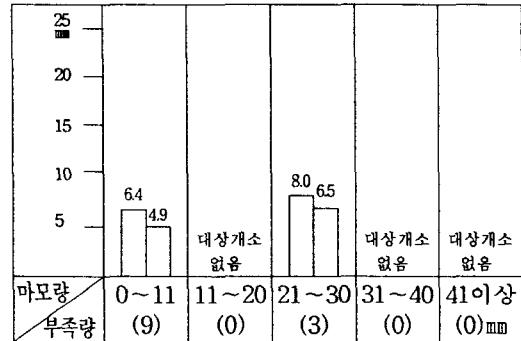
(a) R ≤ 300m 구간



(b) R = 400m 구간



(c) 400m < R < 600m 구간



(d) R = 600m 구간

그림 3. 부족Cant량별 Rail마모 현황

4. 결론

본 연구는 서울시 지하철 STEDEF 궤도구조 구간에 대한 지난 4년간의 운행실적을 토대로 부족캔트량과 레일마모량의 상관관계를 연구한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 도시철도 콘크리트도상 궤도구조에서 부족Cant량과 Rail마모량은 비례적인 상관관계가 있음을 확인하였다. 부족캔트량이 증가할수록 레일의 마모도 비례적으로 증가하는 것을 알았다.

(2) 따라서 도시철도 토목구조물이나 궤도구조물 설계시 부족Cant량 적용은 가능한 한 적게 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 하지만 이 것이 실효를 거두기 위하여는 열차운영모의시험을 통하여 도출된 구간별 적정속도에 따른 균형Cant가 설정되어야 할 것이다. 특히 현재 규정되어 있는 정거장 구조물설계시 최대Cant 설치제한 C=30mm 는 이로 인하여 마모가 촉진되고 있음을 감안하여 상향 또는 정거장 진입속도 하향 조정하는 것이 요망된다.

참고문헌

1. 宮本後光外, "線路-軌道の 設計と管理" 山海堂 PP300 昭和55年6月
2. 須田征男 外3 "新しい線路" 社團法人 日本鐵道施設協會 PP282 平成9年
3. 서울시지하철공사(1970~1982), 서울시 지하철 1,2,3,4호선 토목 및 궤도설계보고서
4. 서울시지하철건설본부(1989~1992), 서울시 도시철도 5,6,7,8호선 토목 및 궤도설계보고서
5. 부산,대구,인천,대전,광주 지하철건설본부(1976~1997) 도시철도 토목 및 궤도설계보고서