# 선로의 기울기와 열차운전성능에 관한 연구
# The research between the vertical slope and the trainset performance

정병률* 우성원** 박성익***
Jeong, Byeng-Ryul Woo, Sung-won Park, Seong-Ik

---

ABSTRACT

The vertical slope of railway track is the differences of attitude for the horizontal distances between two positions of railway. It is better to be small vertical slope for the comfortable of passengers and the operation of railway system. However, the variable vertical slope is required that the simple vertical slope causes the huge quantities of embankment and cutting, the continuous welded rail tunnels, the continuous welded rail bridges, etc,. This research is for the relation between the vertical slopes and the trainset performances. This research shows that the effective vertical slopes for the operation of railway. The velocity of car and operation time and the consumed energy was considered for each vertical slope and type of car power system. The result of suitable vertical slope from this research is to be used for the design of railway plan.

keywords : vertical slope, trainset performances

---

## 1. 서 론

철도선로의 종단기울기는 수평거리에 대한 고저차를 비율로 나타낸 것으로서 승차감과 열차의 운행을 고려하여 수평에 가깝도록 하는 것이 좋으나, 종단기울기를 level로 계획하면 토공량이 많아지고 장대터널이나 장대교량의 개소가 증가하여 건설비에 영향을 미치므로, 우리나라와 같이 산악지대가 많은 조건에서는 지형을 고려하여 기울기를 선택적으로 사용하게 된다. 이러한 철도선로 기울기를 계획함에 있어 선로기울기 조건과 열차운전성능과는 어떠한 상관관계가 있는지 연구하였다. 철도차량의 열차저항은 열차주행에 의한 주행저항과 계획된 종단선형에 의해 발생하는 기울기 저항이 있다. 이 기울기 저항값은 차량중량의 기울기에 대한 수평분력으로 나타내며 기울기 1‰일때 1㎏/t 의 저항값을 받는다. 이 때문에 차량의 성능은 기울기 상에서 요구되는 운전성능에 따라 결정되어진다. 본 연구에서는 선로기울기별, 동력차종별로 여객·화물열차에 대한 운전속도, 운전소요시간, 소모에너지량 등의 열차운전성능을 비교검토하여 종단선형기울기 조건과 열차운전성능과의 상관관계를 분석하였다.

---

*책임저자 : (주)태조엔지니어링 부사장, 정회원
**(주)태조엔지니어링 철도사업부 이사, 정회원
***(주)태조엔지니어링 철도사업부 사원, 정회원

## 2. 본 론

### 2.1 관련규정 및 지침

전기차는 기울기 등판력이 강하지만 특히 기관차 견인열차는 기울기의 영향이 크므로 철도 건설규칙에서는 선로등급별로 기울기를 정하고 있으며, 기관차 견인열차는 점착 견인력 범위내로 견인력을 증가하면 견인중량 및 견인연결량 수를 증가시킬 수 있으나, 견인중량을 증가시키면 시킬수록 열차속도는 저하된다. 철도건설규칙에서 정하고 있는 선로등급별 기울기는 다음과 같다.

도표 1. 선로의 기울기

| 선로의 등급 | 기 울 기 | 정거장 전후 부득이한 경우 | 전동차 전용선 |
|---|---|---|---|
| 고 속 선 | 25‰ | 30‰ | 35‰ |
| 1 급 선 | 10‰ | 15‰ | |
| 2 급 선 | 12.5‰ | 15‰ | |
| 3 급 선 | 15‰ | 20‰ | |
| 4 급 선 | 25‰ | 30‰ | |

또한, 열차운전시행절차에 의하면 하기울기에서는 기관차의 제동력을 고려하여 다음과 같이 하기울기 속도제한을 두고 있으며, 경부선 및 호남선(강경～임성리)과 수도권 전기동차 열차는 하기울기 연장거리 1,000m 미만인 경우는 하기울기 속도제한을 받지 않는다.

도표 2. 하기울기 속도제한

| 구 분 \ 하기울기(‰) | | 5~9 미만 | 9~13 미만 | 13~16 미만 | 16~19 미만 | 19~23 미만 | 23~28 미만 | 28~33 미만 | 33~36 미만 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 새마을호 | 속도 (km/h) | 125 | 120 | - | - | - | - | - | - |
| 여객열차 | | 110 | 105 | 90 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 |
| 수도권 전기동차 | | 110 | 110 | 110 | 105 | 100 | 95 | 90 | 80 |
| 기타열차 | | 70 | 70 | 65 | 60 | 60 | 55 | 50 | 45 |

### 2.2 Simulation 조건

철도의 종단 기울기 계획시에는 열차의 수송능력, 선로조건, 지형형태, 배수 등을 고려하여야하나 해석결과의 비교를 위하여 다음과 같은 전제하에 Simulation을 시행한다.

(1) 선로등급은 철도건설규칙에서 정하는 2급선을 기준으로 한다. (v=150km/h)

(2) 적용차량 및 열차편성은 현재 간선철도를 운행하고 있는 동력기종인 디젤기관차와 전기기관차로 분류하고 여객과 화물열차로 구분하여 설정하였다.

도표 3. 적용차량 및 편성

| 구 분 | 디젤기관차 | | 전기기관차 | |
|---|---|---|---|---|
| | 여객열차(DL7100) | 화물열차(DL7500) | 여객열차(EL8100) | 화물열차(EL8000) |
| 편 성 | 8량 1편성 | 26량 1편성 | 8량 1편성 | 26량 1편성 |
| | 동력1+ 객차6 + 발전차1 | 동력1+ 화차25 | 동력1+ 객차6 + 발전차1 | 동력1+ 화차25 |
| 최고속도 | 150 km/h | 105 km/h | 150 km/h | 85 km/h |

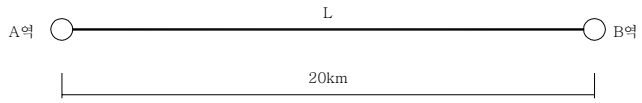
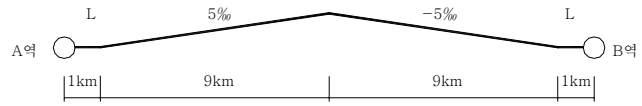
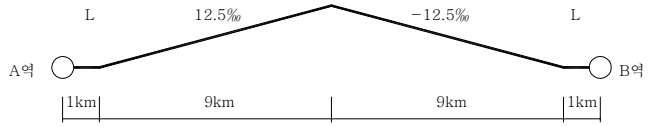
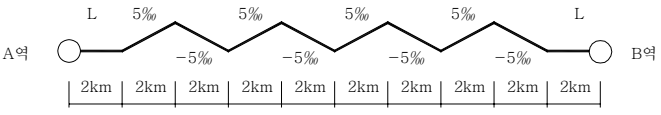
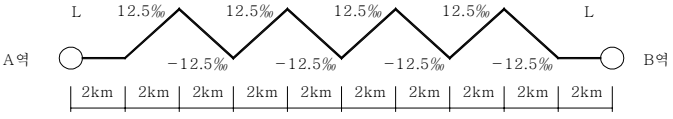
(3) 차량상태는 공차로서 승객과 화물하중이 없는 것으로 한다.
(4) 전기기관차의 경우는 회생제동으로 인해 생긴 회생에너지를 고려하여 소요에너지와 회생에너지 두 가지에 의한 실 소모에너지를 산정한다.
(5) 선로의 형상은 다음과 같이 조건화 한다.

도표 4. 선로형상

| 역간거리 | 20km | 평면곡선 | 없 음 |
|---|---|---|---|
| 기 울 기 | Level ~ 12.5‰ | 터널 / 교량 | 없 음 |
| 기울기 변경점 | 3개소, 9개소 | 정거장 | 없 음 |
| 기울기당 최소주행거리 | 2km 이상 | 전력사구간 | 없 음 |
| | | 열차운행방법 | All-out |

(6) 종단기울기는 국내 간선철도에서 건설기준으로 적용하고 있는 2급선의 최급기울기인 12.5‰를 적용하고 역간거리는 20km로 가정하며 A역과 B역을 연결하는 종단선형의 모델은 다음과 같다.

도표 5. 종단기울기 개요

| 구 분 | 선 형 | 개 요 도 |
|---|---|---|
| CASE 1 | Level |  |
| CASE 2 | ・완기울기 연결<br>・기울기당 연장<br>: 9km |  |
| CASE 3 | ・최급기울기 연결<br>・기울기당 연장<br>: 9km |  |
| CASE 4 | ・완기울기 연결<br>・기울기당 연장<br>: 2km |  |
| CASE 5 | ・완기울기 연결<br>・기울기당 연장<br>: 2km |  |

## 2.3 열차운전성능 시험결과 분석(TPS : Trainset Perfomance Simulation)

설정된 simulation 조건하에서 정거장 전・후 구간은 level로 계획하고 그 외 본선구간의 종단선형 기울기를 Level, 5‰, 12.5‰ 로 계획하여, 여객과 화물 각각에 대해 시행한 simulation 결과는 다음과 같다.

도표 6. TPS 결과

| 구 분 | | | 여객열차 | | | | 화물열차 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 디젤기관차 새마을호 DL7100 | | 전기기관차 새마을호 EL8100 | | 디젤기관차 무개화차 DL7500 | | 전기기관차 무개화차 EL8000 | |
| CASE1 | 소요 시간(min) | | 10.68 | | 10.80 | | 13.32 | | 16.13 | |
| | 평균속도(km/h) | | 112.32 | | 111.16 | | 90.75 | | 74.39 | |
| | 소모에너지 (kwh) | 소요에너지(kwh) | 315.96 | | 222.22 | 299.63 | 324.97 | | 203.89 | 244.37 |
| | | Regen.에너지(kwh) | | | | 77.41 | | | | 40.48 |
| CASE2 | 소요 시간(min) | | 11.81 | | 11.50 | | 16.47 | | 17.61 | |
| | 평균속도(km/h) | | 101.65 | | 104.34 | | 72.86 | | 68.15 | |
| | 소모에너지 (kwh) | 소요에너지(kwh) | 253.52 | | 195.19 | 271.55 | 279.05 | | 183.84 | 230.46 |
| | | Regen.에너지(kwh) | | | | 76.36 | | | | 46.62 |
| CASE3 | 소요 시간(min) | | 12.87 | | 11.69 | | 17.98 | | 17.64 | |
| | 평균속도(km/h) | | 93.26 | | 102.64 | | 66.75 | | 68.04 | |
| | 소모에너지 (kwh) | 소요에너지(kwh) | 269.22 | | 194.39 | 305.56 | 343.54 | | 199.64 | 353.38 |
| | | Regen.에너지(kwh) | | | | 111.13 | | | | 153.74 |
| CASE4 | 소요 시간(min) | | 11.68 | | 11.71 | | 17.21 | | 17.92 | |
| | 평균속도(km/h) | | 102.78 | | 102.46 | | 69.71 | | 66.95 | |
| | 소모에너지 (kwh) | 소요에너지(kwh) | 270.64 | | 193.49 | 309.73 | 313.73 | | 182.65 | 264.79 |
| | | Regen.에너지(kwh) | | | | 116.24 | | | | 82.14 |
| CASE5 | 소요 시간(min) | | 12.23 | | 11.98 | | 17.70 | | 17.95 | |
| | 평균속도(km/h) | | 98.11 | | 100.13 | | 67.80 | | 66.84 | |
| | 소모에너지 (kwh) | 소요에너지(kwh) | 276.89 | | 187.74 | 331.45 | 359.11 | | 194.20 | 365.11 |
| | | Regen.에너지(kwh) | | | | 143.71 | | | | 170.72 |

(1) 기울기를 level로 계획한 경우 (CASE1)

여객열차의 평균속도는 19.89km까지 전기기관차가 약 평균 15초정도 빠른 속도를 보이나 회생제동에 의해 제동 소요시간이 커 총 평균속도는 디젤기관차가 빠른 것으로 나타났다. 화물열차는 디젤기관차가 평균속도 측면에서 우수하나 소모에너지 측면에서는 회생에너지를 고려하면 전기기관차가 효율적인 것으로 나타났다.

(2) 노선중앙부 본선에 기울기 변곡점을 1개소만 두었을 경우 (CASE2, CASE3)

여객열차는 전기기관차가 평균속도와 에너지소모 측면에서 우수하고, 화물열차의 평균속도는 5‰의 완기울기에서는 디젤기관차가, 12.5‰의 최급기울기에서는 전기기관차가 유리한 것으로 나타났다.

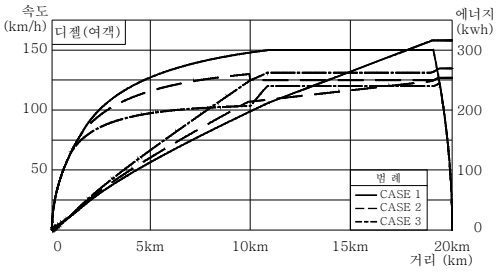



그림 1. CASE1,2,3 거리-속도-에너지:디젤(여객)

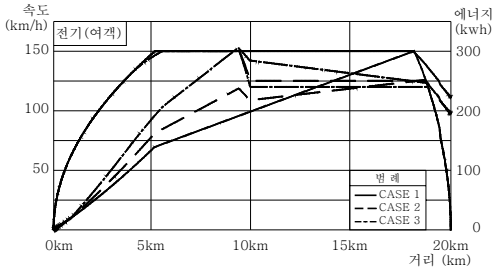



그림 2. CASE1,2,3 거리-속도-에너지:전기(여객)

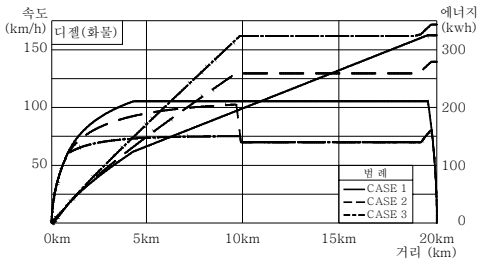



그림 3. CASE1,2,3 거리-속도-에너지:디젤(화물)

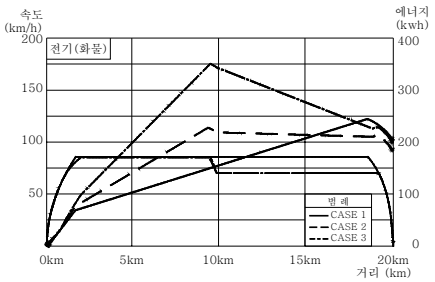



그림 4. CASE1,2,3 거리-속도-에너지:전기(화물)

또한, 종단기울기를 1‰~12.5‰까지 1‰ 간격으로 증가시키며 해석해본 결과, 일률적으로 5‰에서 평균속도의 큰 저하를 나타냈다. 이는 하기울기 속도제한에 의한 것으로 판단되며 기울기 증가에 의한 평균속도의 변화는 미미한 것으로 나타났다. 소모에너지는 전기차의 경우는 변화가 미미했으나 디젤기관차는 4‰ 이하에서는 기울기 증가와 반비례하는 것으로 나타났다.

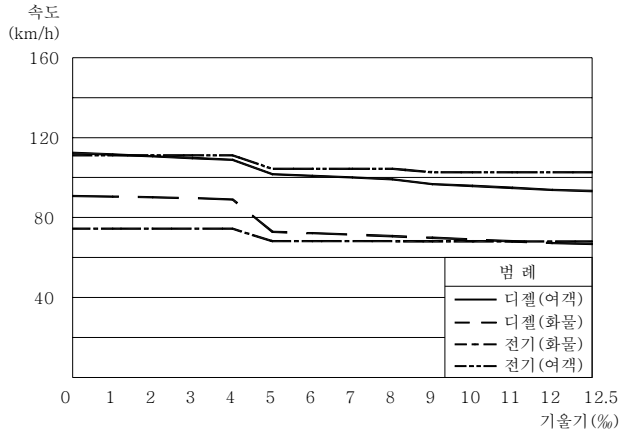



그림 5. CASE1,2,3 차량별 평균속도

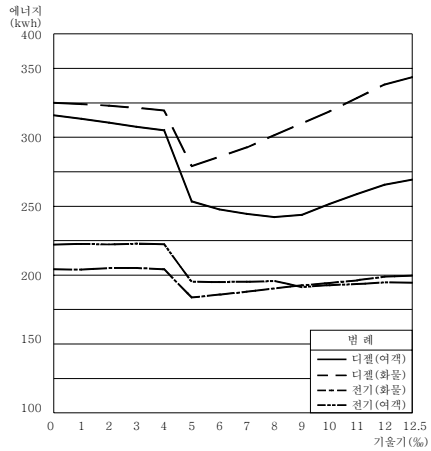



그림 6. CASE1,2,3 차량별 소모에너지

(3) 노선중앙부 본선에 기울기 변곡점을 다수 두었을 경우 (CASE4, CASE5)

CASE4의 여객열차는 전기기관차가 19.98km까지는 평균 약 14초 정도 빠른 속도를 보이나, 기울기 Level인 경우와 마찬가지로 회생제동에 의한 제동 소요시간이 커 총 평균속도는 디젤기관차가 빠른 것으로 나타났다. 화물열차의 평균속도는 제동시를 제외한 전구간에서 전기기관차와 디젤기관차가 동일하거나 전기기관차가 우수하였으나, 회생제동 소요시간에 의해 디젤기관차가 빠른 것으로 나타났다. 소모에너지 곡선이 기울기변곡점부에서 변화를 보이는 것은 종단선형의 hump 효과에 의해 타력주행이 표현된 것으로 판단된다.

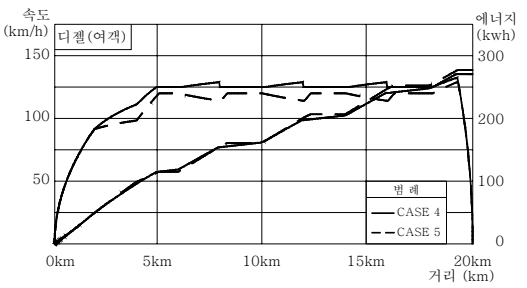



그림 7. CASE4,5 거리-속도-에너지:디젤(여객)

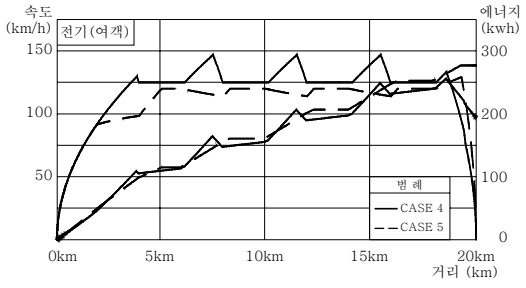



그림 8. CASE4,5 거리-속도-에너지:전기(여객)

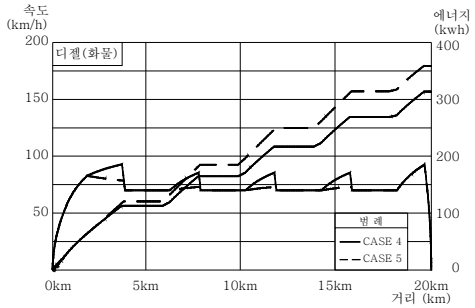



그림 9 .CASE4,5 거리-속도-에너지:디젤(화물)

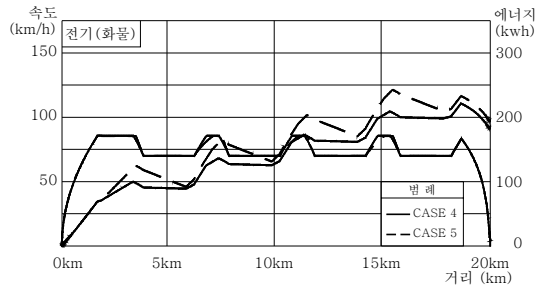



그림 10. CASE4,5 거리-속도-에너지:전기(화물)

이 경우에도 종단기울기를 1‰~12.5‰까지 1‰간격으로 증가시키며 해석해 본 결과, 기울기 변곡점은 1개소만 두었을 경우와 마찬가지로 기울기 5‰에서 큰 속도저하를 나타냈다.

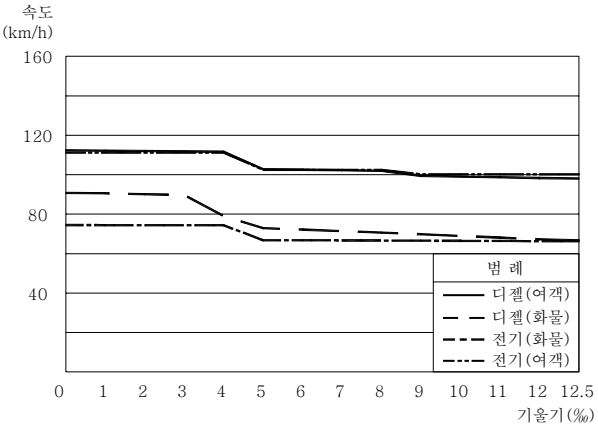



그림 11. CASE4,5 차량별 평균속도

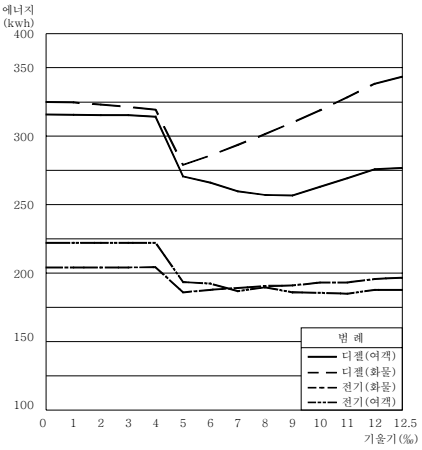



그림 12. CASE4,5 차량별 소모에너지

## 3. 결론 및 추후연구

본 연구에서는 종단선형 기울기조건과 열차운전성능과의 상관관계를 분석하기 위하여 범용프로그램인 TPS를 활용하여 Simulation 한 결과 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

(1) 디젤기관차와 전기기관차의 평균속도는 여객일 경우와 화물일 경우 모두 기울기가 Level~12.5‰까지는 중간본선의 형상과 관계없이 기울기의 영향을 받지 않는다. 다만 5‰에서 적용되는 하기울기 속도제한에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

(2) 여객의 경우는 본선의 형상에 관계없이 전기기관차가 평균속도도 빠르고 에너지 소모 측면에서도 우수하였으나, 제동시 회생에너지 생성을 위한 회생제동에 의해 총소요시간에서는 과도하게 산정되어 불리하게 나타났다.

(3) 화물의 경우는 하기울기 속도제한이 70km/h 규정되므로 디젤기관차가 우수하였으나 12.5‰의 최급기울기에서는 전기기관차가 우수한 것으로 나타났다.

(4) 디젤기관차의 경우 CASE2, 3의 차량소모에너지가 4‰ 이하 구간에서 감소하는 것은 기울기증가에 의한 기울기저항의 증가보다 hump에 의한 에너지절감 효과가 더 큰 것으로 판단되며, 전기차에서는 동일 구간에서 그 영향이 나타나지 않았다.

(5) 에너지 측면에서는 5‰ 이하의 기울기에서 타력운행 효과가 가장 커 소요에너지가 적게 소요되었고, 회생에너지의 증가는 없는 것으로 나타났다. 전기기관차(여객)의 경우는 최급기울기로 변곡점을 다수 두었을 경우가 에너지 효율이 큰 것으로 나타났는데, 이는 급기울기 주행에 따른 회생에너지량이 증가된 것으로 판단된다.

(6) 지형에 따라 기울기는 서로 다른 값을 선택적으로 다수 사용하는 경우가 대다수이므로 향후 최적의 기울기의 조합에 의한 열차운전성능의 최적화에 대한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. 열차운전시행절차(2004), 철도청
2. 철도건설규칙(2005), 철도청
3. TPS-ONC Ver.2.0 (User manual), 정설시스템