

철도노선 선형의 실용적 노후도 평가기법 개발

Practical Evaluation Technique for Deterioration of Railroad Lines using Track Geometry

김현기* · 김성진 · 최찬용 · 황수범

Hyun Ki Kim · Sung Jin Kim · Chan Yong Choi · Soo Beom Hwang

Abstract In this study, a practical evaluation technique to detect the deterioration of railroad lines by means of train performance and track geometry measures is suggested. A train that has a specific performance and is running the straight line can make minimum travel time (ideal time). But the actual travel time will be increased by the track geometry and various speed limitations. By comparing these travel times, we can easily define the degree of line deterioration. This method does not require complex vehicle performance measures and/or specifications that exceed those of typical Train Performance Simulations (TPS). For this reason, ease of use is ensured and the results are similar to those obtained by running a TPS for practical evaluations.

Keywords : Track Geometry, Train Performance, Evaluation of Deterioration of Railroad Lines

초 록 본 연구에서는 철도노선을 주행하는 열차의 성능과 노선의 선형정보를 이용하여 실용적인 철도노선의 선형 노후도 평가기법을 제안하였다. 일정한 성능의 열차가 직선 선로를 주행하는 시간을 기준으로 노선의 종단 및 평면 선형에 의하여 속도제한이 이루어지는 현황을 반영하여 늘어나는 주행시간을 비교하여, 시간의 함수로 정규화하여 노선의 선형에 따른 노후도 평가기법을 개발하였다. 본 기법은 통상적으로 차량운전성능시물레이션(Train Performance Simulation; TPS)을 이용하는 기법에 비하여 복잡한 차량성능 및 사양이 요구되지 않아 사용의 용이성이 확보되면서도 TPS 결과와 유사한 결과를 얻어 실용성 있는 평가가 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 철도노선, 열차성능, 선로 노후도 평가

1. 서 론

철도시설은 건설 이후 약 100여년의 공용기간과 각종 외부환경으로의 노출, 열차하중 등으로 지속적인 노후화가 진행된다. 철도 노선의 종합적인 노후화는 궤도, 노반, 분기기, 교량, 터널 등 선로구간을 구성하는 시설의 노후도로 결정되며, 궤도의 선형 또한 선로구간 노후도에 영향을 준다. 궤도는 도상에 일정간격으로 설치한 침목 위에 두 줄의 레일을 평행하게 체결한 것으로 노반과 함께 차량하중을 직접 지지하는 역할을 하는 도상 윗부분의 설비이다. 지속적인 차량운행은 레일의 피로상태, 마모상태, 침목상태, 도상상태 등에 영향을 준다. 노반은 도상과 궤도를 지지하는 시공기면¹⁾ 이하를 의미한다. 노반은 반복하중에 의한 소성변형²⁾으로 침하 및 지지력저하 등의 연약화가 발생할 수 있으며 여기에는 배수상태의 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 분기기는 차량을 한 궤도에서 다른 궤도로 전환시키기 위하여 궤도에 설치한 설비를 의미하며 노후도 관점에서 중요한 요소로는 분기기의 재료, 구조, 마모상태 등을 들 수 있다. 터널과 교량

의 경우에는 각각 노후도를 평가하기 위한 많은 방법들이 연구되어 있으며 이를 활용할 수 있다. 또한, 궤도의 선형은 선로구간의 노후화에 영향을 줄 수 있다. 예를 들어 궤도의 곡선이 심한 선로구간은 그렇지 않은 선로구간보다 노후화 관점에서 불리하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 철도노선을 주행하는 열차의 성능과 노선의 선형정보를 이용하여 실용적인 철도노선의 선형 노후도 평가기법을 제안하고자 하였다. 일정 성능의 열차가 직선 선로를 주행하는 시간을 기준으로 노선의 종단 및 평면 선형에 의하여 속도제한이 이루어지는 현황을 반영하여 늘어나는 주행시간을 비교하여, 시간의 함수로 정규화하여 노선의 선형에 따른 노후도 평가기법을 개발하였다.

지금까지 사용되어온 차량운전성능시물레이션(Train Performance Simulation; TPS) 프로그램은 차량의 성능과 사양을 요구함과 동시에 프로그램 난이도로 인하여 노선의 선형을 계획하거나 현재 노선의 선형 평가를 진행하는 토목기술자가 원활하게 활용하기에는 어려운 것이 현실이었다. 본 연

*Corresponding author.
Tel.: +82-2-460-5307, E-mail : hkkim@krri.re.kr
©The Korean Society for Railway 2014
<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.2.106>

1)시공기면(施工基面, formation level)은 토목공사의 끝 손질면으로 노반의 높이를 보여주는 기준면
2)소성변형(塑性變形, plastic deformation)은 하중이 한도를 넘어 하중을 제거해도 원형으로 돌아가지 않게 되는 재료의 성질

구에서는 기존에 사용된 TPS기법과 비교하여 복잡한 차량 성능 및 사양을 요구하지 않아 사용의 용이성을 확보할 수 있으면서도 결과의 유사성을 가질 수 있는 실용적인 기법을 개발하고자 하였다. 여기서 TPS는 열차가 주행할 때 거리에 대한 운행시간, 속도 등의 결과를 얻을 수 있는 열차주행시물레이션이다. 설계단계에서는 TPS의 결과를 활용하여 설계시 목표했던 노선의 성능에 부합여부를 검증하며, 운영 단계에서는 열차 배차시간, 역간 운행시간, 대피시간, 운행 속도 등을 고려한 열차운영계획의 기초자료로 활용이 된다. 이와 같이 열차주행시물레이션(TPS)은 철도선형의 선형성능의 검증 및 활용을 위한 척도로 사용된다. 따라서 열차의 주행시간, 속도와 관계된 선형의 성능의 정확한 평가를 위하여는 TPS를 시행하여야 하므로 본 연구에서는 통해 선형 성능의 평가의 정확성을 향상하기 위하여 TPS 결과와의 비교를 통한 보정계수를 적용하였다.

또한, 제안기법의 검증을 위하여 영동선, 중앙선, 태백선 및 경북선의 노선에 대하여 적용성 검토를 통하여 적용 가능성을 검토하였다.

2. 기본 가정 및 전제조건

실용적인 철도노선의 선형 노후도 평가를 위하여 기본 가정과 전제조건을 결정하였다. 먼저, 선형평가를 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- ① 선형조건을 단순화하여 변수를 최소화하기 위해 운전선도 모양을 Linear하게 변환
- ② 계산식의 단순화를 위해 결과 값에 영향을 크게 주지 않는 범위에서 변수 조건을 이상화

한편, 선형평가를 위한 전제 조건을 아래와 같이 정의하였다.

- ① 차량성능: 모든 차량성능은 동일하다고 가정
- ② 차량 가·감속 성능에 의한 최대운행 속도 도달까지의 시간 배제를 위하여, 모든 정거장은 무정차 통과하며 시점에서 종점까지 운행속도 및 시간만을 고려

또한, 노선별 곡선반경 개수에 따라 발생할 수 있는 계산 값 오차의 최소화를 위하여 현재 운영중인 노선을 대상으로 적용성을 분석하여 보정계수를 산출하였으며, 이를 통하여 실용적인 선형 노후도 평가를 진행할 수 있도록 하였다.

2.1 선형분석 대상 항목 결정 및 선형 기준 정의

노선의 선형 정보를 이용한 실용적 선형 노후도 평가를 위하여 선형 성능에 대한 정량화를 진행하였다. 먼저, 열차 속도에 영향을 미치는 설계기준과 속도향상에 영향을 미치는 인자는 다음 Table 1과 같고, 선형기준은 Table 2와 같이 “철도의 건설기준에 관한 규정(2013.5, 국토교통부)”을 적용하였다.

2.2 운전선도 분석

열차의 운전상태 즉, 운전속도, 운전시분, 주행거리, 전력 소비량 등의 상호관계가 열차의 주행에 따라 변화하는 상태를 도시한 것을 운전선도 또는 운전곡선(Run Curve)이라 한다. 운전선도는 차량의 종류, 편성, 성능 등 열차 성능인자와 선로조건 즉 곡선반경, 기울기의 선로조건 인자들의 상호 연계된 계산 및 해석으로 작도되므로 운전선도를 이해하고 이를 단순화하여 선형분석 결과의 정량적 해석으로서 선로노후화 평가에 연계하였다. 또한 노선성능의 정량적 평가를 위해 열차운전시물레이션(TPS)을 활용하여 운행시간, 소비에너지, 표정속도 등의 결과를 상대적으로 비교하여 평가하였다.

3. 실용적인 철도노선의 선형 노후도 평가기법 개발

선형의 성능을 평가하기 위해서는 열차주행 시물레이션을 시행하여 설계시 목표했던 성능에 부합하는지 검토하여야 한다. 하지만 열차주행 시물레이션은 열차의 성능과 선로의 선형 등 다양한 변수들이 존재하며, 시물레이션을 실행하기 위해서는 전문 기술자의 해석에 의한 입력자료를 구성하여 입력하여야 하며, 결과의 검토와 분석에서도 전문적인 지식이 필요로 된다. 본 연구에서는 선로의 노후화 평가시 운전선도를 단순화하여 선형의 성능을 간단히 평가할 수 있는 실용적인 방법을 제안하였다. 본 방법은 사용의 용이성을 위하여 운행시간을 기준으로 접근하여 평가하였다.

3.1 선형성능의 선로 노후도 평가 연계 방법

차량성능 즉 에너지효율, 가감속 능력 등과 선로의 조건, 즉 곡선반경, 기울기 등에 따라 열차주행 운전선도는 다양

Table 1 Design criteria and the main factors affecting the speed

Examination item	Velocity effect factors	An essential particular
Design criteria	Railway construction rules in accordance with the reference analysis(based on speed) - compare with railway construction rule items	Affect train scheduled speed of design criteria: depending on the minimum curve radius, transition curve length, straight and curve line of minimum length, vertical curve radius, vertical curve length, station form, etc. difference in speed occurs.
The main factors affecting the speed	The factors affecting the speed(aspect of the railway linear)	Linear aspect - Plane curve radius - Vertical slope - Cant and transition curve - Track center spacing

Table 2 Railway construction standard for the track geometry rules

Division		Railway construction standards	Division		Railway construction standards
Speed		70~350km/h	Gradient	Main track	Below 10~25/1,000
Range		Railway construction detailed standards necessary for the enforcement of standards		Station	Below 2/1,000 (unable car liberation 8/1,000)
Track structure		Ballasted track Concrete track	Vertical curve	radius	R = 1,800m~25,000m (If unavoidable 1,300~10,000m)
Track gage		1,435mm			
Slack		Below curve radius 300m $S = \frac{2400}{R} - S$ (Below 30mm)		Between vertical curve length	-
Cant		$C = 11.8 \frac{V^2}{R} - C_a$		Vertical Curve length	-
Maximum cant		Concrete bed track : 180mm Ballast bed track : 160mm			Equation
Curve	Minimum curve radius	Concrete bed track : 400m~5,000m Ballast bed track : 400~6,100m	Straight and curve line of minimum length		40~180m(L=0.5V)
		$R \geq \frac{11.8V^2}{C_{max} + C_{d,min}}$	Transition curve	Shape	Cubic parabola
	At station	250m~600m (Electric vehicle dedicated lane: 250m)		Length	2,500C~600C(1,700C) $L_{T1} = C_1 = \frac{7.31V}{1000}$

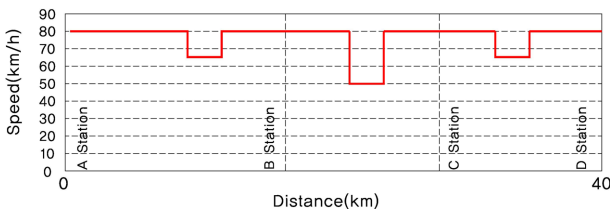


Fig. 1 A schematic diagram of the running curve for the evaluation of the degree of line deterioration

한 결과로 나타난다. 본 연구에서는 철도노선의 선형 노후화를 평가하는 것이 목적이므로 차량의 성능에 따른 여러 변수를 배제하였다. 차량의 기계저항, 마찰저항, 공기저항, 차량동요 저항 및 선로의 곡선저항, 기울기저항, 터널저항 등은 속도의 가감속 및 최고속도에 무관하며, 열차의 편성, 종류 등 모든 차량은 기 시공된 선로를 제약 없이 운행한다고 가정하였다. 정거장은 무정차 통과하며 정거장 진입·진출 및 통과 속도는 선로의 최대속도 값으로 적용하였다. 상기의 조건을 적용하여 일반적인 노선의 운전선도를 그래프로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

3.2 철도노선의 선형 노후도 평가

철도노선의 선형 노후도는 선형적으로 이상화된 평탄한 직선 선로 주행시간을 기준으로 하며, 곡선과 기울기가 혼합된 실제 운행선을 주행한 시간과 대비하여 평가하고 각 열

차주행시간 계산시 열차운전선도 단순화 결과를 이용하면 비교적 간단한 방법으로 선형의 성능에 대한 노후화를 평가할 수 있다. 선형성능에 따른 선로 노후화 정도의 정량적 계산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = a \frac{\sum^n (T_{hi} + T_{vi})}{2T_s} \tag{1}$$

여기서, α = 철도노선의 선형 노후도, a = 보정계수(속도제한요소 보정계수), T_s = 이상화된 선형의 주행시간(기준 주행시간), T_{hi} = 평면선형의 제한속도로 주행한 시간(운전선도 단순화 결과의 운행시간), T_{vi} = 종단선형의 제한속도로 주행한 시간(운전선도 단순화 결과의 운행시간)

3.2.1 이상화된 선형의 주행시간(T_s : 기준주행시간) 산정

이상화된 선형이란 열차의 성능만으로 노선을 주행할 수 있는 선형을 뜻한다. 즉, 열차의주행시 곡선저항, 기울기 저항 등 선형요소에 의한 영향이 없는 선형으로 “평탄화된 직선 노선”이다. 따라서 이상화된 선형의 주행시간은 다음의 설명과 같이 산정 된다.

이상화된 노선의 A정거장을 출발하여 D정거장에 도착하는 열차의 주행을 그래프화한 운전선도는 가속구간과 감속구간이 포물선 형태로 나타나지만, A정거장과 D정거장을 무정차 통과하는 운전선도는 직선형태로 나타나며, 이 때 주행시간을 기준운행시간으로 산정할 수 있다.

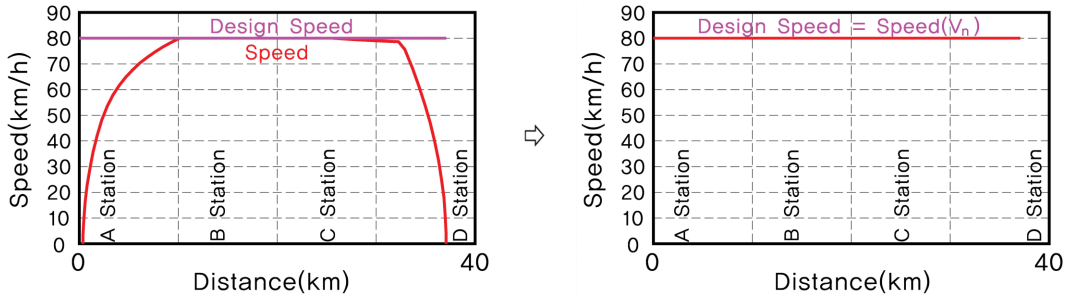


Fig. 2 Idealization of the running curve between stations

Fig. 2의 우측의 운전선도에서의 이상화된 선형의 주행시간(기준 주행시간)은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_s = \frac{D-A}{V_D} \quad (2)$$

여기서, A : A정거장의 위치(km), D : D정거장의 위치(km), V_D : 선로의 운행최고속도(km/h)

3.2.2 평가노선의 주행시간($T_i = T_{hi} + T_{vi}$) 산정

열차의 주행시 운전선도는 가속구간과 감속구간이 포물선 형태로 나타나며 작은 곡선 또는 급기울기 구간 주행시에는 열차의 안전성 확보를 위한 제한속도로 주행하기 위해 감속을 한다. 또한 Fig. 3의 좌측과 같이 제한속도 구간을 벗어나면 다시 운행최고속도로 주행하기 위해 가속을 하는 운행 패턴으로 나타난다. 열차의 가·감속 성능을 배제하면 Fig. 3의 우측과 같은 형태로 나타나며 이때 주행시간을 산정할 수 있다.

Fig. 3 우측의 선로 운행시간은 다음 식 (3)과 같이 산정된다.

$$T_i = T_{hi} + T_{vi} = \left(\sum_i \frac{L_{Si}}{V_D} + \sum_i \frac{L_{Rhi}}{V_{Rhi}} \right) + \left(\sum_i \frac{L_{Li}}{V_D} + \sum_i \frac{L_{Rvi}}{V_{Rvi}} \right) \quad (3)$$

여기서, T_i : 평가노선의 주행시간(hour), V_D : 선로의 운행최고속도(km/h), V_{Rhi} : 곡선구간 제한속도(km/h), V_{Rvi} : 선로기울기 제한속도(km/h), L_{Si} , L_{Li} : 운행최고속도구간 연장(km), L_{Rhi} : 평면선형 제한속도구간(곡선구간) 연장(km)-곡선구간 연장은 완화곡선포함 연장, L_{Rvi} : 종단선형 제한속도구간(급기울기 구간) 연장(km)

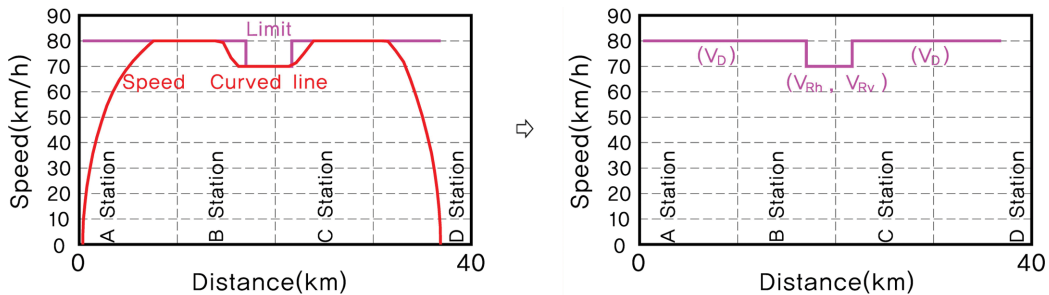


Fig. 3 Idealization of the running curve under speed limitation

3.2.3 평면선형에서의 제한속도 결정(V_{Rh})

철도선형 설계시 선로의 곡선반경은 열차의 속도와 균형 캔트에 따라 다음의 관계식에 의하여 정의된다.

$$R = 11.8 \frac{V^2}{C_{eq}} \quad (4)$$

여기서, C_{eq} : 균형캔트(mm), V : 열차속도(km/h), R : 곡선반경(m)

선형 노후도 평가에서는 주행열차들의 속도차이에 따라 캔트가 설정되므로 열차혼용운용을 배제(부족캔트 및 초과캔트를 배제)함이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 최고 속도로 주행하는 열차를 기준으로 최대설정캔트에 의한 통과 속도로 주행시간을 계산하였다. 따라서, 철도의 건설기준에 관한 규정에서 제시하는 최대설정캔트의 곡선반경에 따른 최대 주행속도를 다음 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$V_{Rh} = \sqrt{\frac{C_{max} \times R}{11.8}} \quad (5)$$

여기서, C_{max} : 최대설정캔트(mm)

상기의 제한속도는 선로의 운행최고속도보다 작을 경우에 적용하며, 선로의 운행최고속도가 클 경우에는 선로 운행최고속도를 적용한다. 최대설정캔트(C_{max})는 기존 선로의 도상형식인 자갈도상 궤도를 적용한다.

3.2.4 종단선형에서의 제한속도 결정(V_{Rv})

열차는 진행, 주의, 정지 등의 신호에 의하여 진행되고, 재래적 신호시스템은 고정 폐색식으로 운영되고 있다. 고정폐

Table 3 Railroad construction standards regulations (Section 7 cant)

Design speed V(kilometer/time)	Ballast bed track		Concrete bed track	
	Maximum cant (millimeter)	Maximum cant deficiency ⁽¹⁾ (millimeter)	Maximum correction of cant (millimeter)	Maximum cant deficiency ⁽¹⁾ (millimeter)
200 < V ≤ 350	160	80	180	130
V ≤ 200	160	100 ⁽²⁾	180	10 ⁽²⁾

색식이라 함은 선로를 일정간격으로 전기적인 방법에 의해 구분하고 각 구간을 1개 열차만이 들어올 수 있도록 하는 폐색구간을 형성한 후 각 폐색사이에 신호기를 설치하는 것이다. 또한 폐색구간의 길이는 신호시스템의 종류와 열차 속도에 의하여 결정되는데 가장 중요한 것은 열차의 제동능력이다. 신호기 사이의 거리는 어떤 속도에서 진행하는 열차가 다음 단계의 속도명령이 전달 될 경우 다음 속도로 감속하기 위하여 제동하기 시작하고 다음 신호기 이전에 목표한 속도까지 감속을 할 수 있는 거리를 확보해야 하기 때문이다. 감속거리를 검토할 때의 열차 감속능력은 평탄한 선로를 기준으로 하는데 실제 열차 운전시 내리막 선로에서는 위치에너지 감소로 감속도가 작아진다. 따라서 평탄한 선로에서의 감속거리 확보를 위해 내리막 선로, 즉 하구배에서는 열차 최고속도를 제한한다. 열차운전시행세칙에서 제시하고 있는 하구배 제한속도(V_{Rv})는 다음 Table 4와 같다.

부가적으로 북한 및 대륙철도 연계를 포함한 개발도상국 등으로 기술지원 및 보급을 위해서는 나라별로 상이한 데이터를 수용하여 선로 노후도를 평가할 수 있어야 하기 때문에 차내 신호시스템이 적용되지 않고 재래적 신호시스템인 고정폐색시스템과 비 전철 구간의 주요 운행하는 국내 여객 열차(새마을호, 무궁화호, 통근열차)를 기준으로 하였다. 따라서 하구배 제한속도(V_{Rv})는 Table 5와 같이 제안된다.

한편, 열차 주행시 기울기 제한속도는 하구배 구간에 적용하였다. 또한 상기울기 구간은 열차가 반대방향으로 주행시 하구배 구간이기 때문에 제한속도를 적용하여야 한다. 따

라서 중단선형의 노후화 평가시 기울기 제한속도는 하구배 및 상기울기 구간 전체의 급기울기 제한속도를 적용하였다.

3.2.5 속도제한요소 보정계수(a) 선정

보정계수는 상기에서 제시한 주행시간 계산방법과 열차시물레이전의 주행시간을 상대 비교하여, 속도제한요소와 상관관계를 아래와 같이 분석하여 산정하였다. 보정계수 산정시 대상노선은 영동선, 중앙선으로 하였으며, 열차운전시행세칙(한국철도공사)의 선로 최고속도를 다음 표와 같이 적용한다. 영동선 및 중앙선 선형을 분석하여 선로 최고속도보다 작은 속도제한요소(급곡선, 급기울기)를 분석하고 속도제한요소의 개수에 따른 계산식의 주행시간과 열차운전시물레이전의 주행시간 오차를 비교 분석하였다. 단, 기울기 제한속도는 열차운전시물레이전에서 적용하는 하구배 구간만 적용하여, 속도제한요소의 개수에 따른 주행시간 오차 분포군의 분석 보정계수를 산정하였다.

영동선과 중앙선의 노후화 계산식의 주행시간과 열차운전시물레이전(TPS)의 주행시간의 오차비와 속도제한요소 개수에 대한 분포도는 Fig. 4와 같다. 몇 개의 구간을 제외하고는 오차비는 1.08~1.40 구간에서 분포되는 것을 볼 수 있다. 오차비 분포군에서 벗어나는 3개 구간 풍기-희방사, 봉성-거촌, 운산-무릉 구간의 오차비를 제외한 영동선, 중앙선의 오차비는 속도제한 요소의 개수에 관계없이 1.08~1.40까지 분포하므로 보정계수는 속도제한요소의 개수에 무관하다고 판단되었으며, 이를 근거로 각 정거장 구간의 오차비를 산정하여 산술평균으로 계산한 결과, 철도노선의 선형 노후도 평

Table 4 Train running enforcement regulations, Appendix 15: downward slope speed (Revision 2012.3.8, Korea railroad corporation)

Division		Downward gradient (%)	5~12.5	12.5~5	15~20	20~30	30~35
Speed (Km/h)	A passenger train (Saemaedul, Mugunghwa, A commuters'train)		150	125	100	75	65
	A passenger train (Intercity Train eXpress-Cheongchun, Nuriro, electric train)		150	130	110	95	85
	Goods train		90	85	65	55	50

Table 5 Train running enforcement regulations Appendix15 downward slope speed

Division		Downward slope (%)	5~12.5	12.5~15	15~20	20~30	30~35
Speed (Km/h)	A passenger train (Saemaedul, Mugunghwa, commuters'train)		150	125	100	75	65

Table 6 Train running enforcement regulations, Appendix 14: Railway maximum speed limit (Revision 2012.3.8, Korea railroad corporation)

Line	Section	Main line					Siding	
		High-speed vehicle	All sort of automobiles		All sort of locomotives	Crane	Allowed driving automobiles	Speed
			EMU-180	Etc				
Jungang line	Cheongyangni~Yongmun	150	-	150	150	60	Various	25
	Jecheon~Dodam							
	Yeongcheon~Gyeongju	130	-	130	120	60	Various	25
	Yongmun~Jecheon	120	-	120	110	60	Various	25
	Dodam~Yeongcheon							
Youngdong line	Donghae~Gangneung	110	-	110	100	60	Various	25
	Yeongju~Donghae	100	-	100	90	60	Various	25

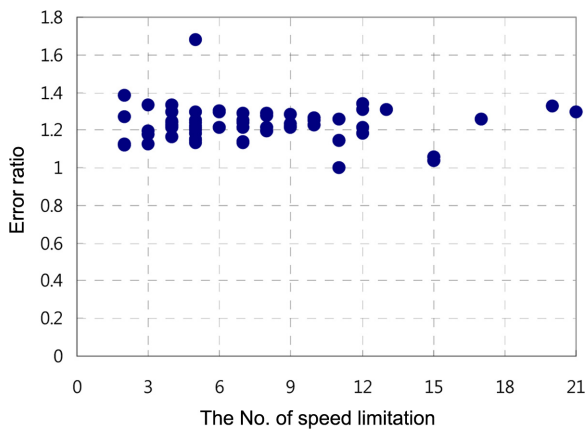


Fig. 4 Error distributions

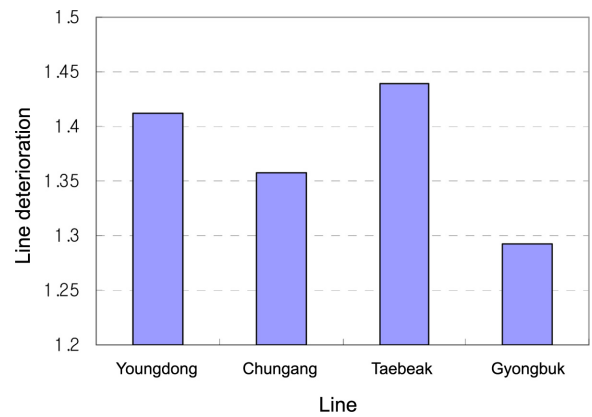


Fig. 5 Line deterioration assessment results

가의 속도제한요소 보정계수(a)는 1.234로 산정되었다.

4. 철도노선의 선형 노후도 평가기법의 적용성 분석

본 논문에서 제안한 철도노선의 선형 노후도 평가의 적용성 분석 대상은 영동선, 중앙선, 태백선, 경북선 총 4개 선로이며, 선로의 최고속도는 열차운전시행세칙의 선로 최고

속도 제한을 따랐다. 노후도 평가기법에 앞서 분석 대상 노선의 TPS결과는 Table 7과 같고, 노선에서 운행 중인 무궁화열차와 운행 시 제한속도 및 선로최고속도 등은 열차운전시행세칙(한국철도공사, 2012.3)을 준용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 선형의 선로 노후도 평가 결과표는 Table 8과 같다. 노선별로 경북선-중앙선-영동선-태백선 순으로 선형 노후도가 진행되고 있음을 알 수 있다.

한편, 신규열차의 도입 또는 운영계획의 변경으로 선로의

Table 7 TPS result

Section		Length (km)	Time (min)	Average speed (km/h)
Youngdong line	An up(Yeongju-Sokpo)	101	80.48	75.29
	A down(Sokpo-Yeongju)	101	79.71	76.03
Jungang line	An up(Jungnyeong-Hwasan)	143	95.48	89.87
	A down(Hwasan-Jungnyeong)	143	98.36	87.23
Taebaek line	An up(JeCheon-Sabuk)	101	85.49	70.88
	A down(Sabuk-JeCheon)	101	80.93	74.88
Gyeongbuk line	An up(Oksan-Gaepo)	65.60	50.92	77.29
	A down(Gaepo-Oksan)	65.60	51.36	76.64

Table 8 Line deterioration result

Section	Length (km)	Standard traveling time (hour)	Deterioration equation traveling time (hour)			TPS up and down traveling time _total (hour)	Measuring efficiency (%)	Linear of railway line deterioration
		$T_{S(A)}$	T_h	T_v	Total (B)	(C)	1.234(B)/(C)	$\alpha=1.234(B)/2(A)$
Youngdong line	76.845	0.768	0.958	0.801	1.759	2.153	0.80	1.412
Jungang line	140.144	1.168	1.372	1.198	2.570	3.137	1.09	1.358
Taebaek line	75.517	0.755	0.936	0.825	1.761	2.230	2.57	1.439
Gyeongbuk line	53.330	0.533	0.584	0.533	1.117	1.329	3.71	1.292

Table 9 Variation of line deterioration (%) for the each station in case of speed up in Young-Dong line

Section	Length (km)	Rail maximum speed 100km/h			Rail maximum speed 180km/h			Increased line deterioration (%)
		Standard traveling time (hour)	Deterioration traveling time (hour)	Linear deterioration	Standard traveling time (hour)	Deterioration traveling time (hour)	Linear deterioration	
		T_S	T_t	α	T_S	T_t	α	
Yeongju-Mundan	9.032	0.090	0.194	1.325	0.050	0.146	1.794	46.82
Mundan-Bonghwa	5.718	0.057	0.120	1.296	0.032	0.082	1.588	29.21
Bonghwa-Geochon	5.447	0.054	0.122	1.378	0.030	0.102	2.088	70.99
Geochon-Bongseong	5.544	0.055	0.139	1.551	0.031	0.129	2.577	102.54
Bongseong-Beopjeon	6.481	0.065	0.141	1.345	0.036	0.116	1.993	64.85
Beopjeon-Chunyan	5.660	0.057	0.127	1.382	0.031	0.103	2.018	63.60
Chunyang-Nokdong	4.840	0.048	0.105	1.343	0.027	0.083	1.894	55.11
Nokdong-Imgi	4.842	0.048	0.111	1.413	0.027	0.098	2.258	84.46
Imgi-Hyundong	5.119	0.051	0.112	1.348	0.028	0.089	1.941	59.26
Hyundong-Buncheon	6.642	0.066	0.155	1.440	0.037	0.123	2.063	62.34
Buncheon-Seungbu	9.850	0.098	0.238	1.488	0.055	0.197	2.217	72.85
Seungbu-Sokpo	7.670	0.077	0.195	1.566	0.043	0.167	2.413	84.76
Total	76.845	0.768	1.759	1.412	0.427	1.435	2.074	66.19

속도를 향상하여 운영할 경우, 선로 노후도 차이에 의하여 각 노선에서 요구되는 선로 개량 구간을 확인할 수 있다는 장점이 있다. Table 9는 현재 선로 최고속도 100km/h인 영동선에 EMU-180 열차를 투입하여 최고속도 180km/h로 운영할 경우에 예상되는 선형 노후도를 평가한 결과를 나타낸 것이다. EMU-180 열차의 투입시 열차운영계획, 전철화 여부, 신호, 통신 등 선로시스템, 선구의 구조물 상태 등 여러 조건들을 검토 하여야 하나 본 검토에서는 선형 조건에 대한 선형 노후도 증가량만을 대상으로 하였다.

현재 영동선의 선로노후화 점수는 1.412이며 EMU-180 열차 투입시 선로노후화 점수는 2.074로 현재의 선로노후화보다 66.19% 선형노후화 점수가 증가하였다. 이것은 신규열차 투입으로 운행속도 증가 등에 따른 노선의 노후화는 현재보다 66% 더 노후화가 진행 된다고 판단할 수 있다. 또한 영동선 선구중 거촌-봉성 구간이 102.54% 더 노후화 되어 선

형 개량시 거촌-봉성구간의 개량이 우선적으로 시행되어야 함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 숙련된 기술자가 아닌 기초 지식을 가진 일반인도 쉽게 접근할 수 있는 실용적인 선형 노후도의 정량적 평가를 위해 시간적 측면에 중점을 두고 실용적인 방법을 개발하였다. 또한 열차주행성능시물레이션에 의한 실제 열차주행 시간과의 오차를 최소화하기 위한 보정계수를 산정하여 적용하였으며, 이를 통하여 오차율을 약 4% 이내로 확보할 수 있었다.

철도노선의 선형 노후도 평가를 위하여 운전선도의 단순화와 함께 운행시간 측면의 접근방법을 통하여 철도노선의 선형 노후도 평가기법을 제안하였으며, 4개 노선에 대한 적

용성 분석을 시행한 결과, 영동선의 선형 노후화 점수는 1.412, TPS 주행시간과 오차율은 0.80%, 중앙선의 선형노후화 점수는 1.358, TPS 주행시간과 오차율은 1.09%, 태백선의 선형노후화 점수는 1.439이며, TPS 주행시간과 오차율은 2.57%, 경북선의 선로노후화 점수는 1.292, TPS 주행시간과 오차율은 3.71%로 평가되었다. 특히, 선형 개량 및 고속열차의 투입을 검토하는 단계에서 선형 노후도가 가장 많이 진전된 개소를 쉽게 파악할 수 있으며, 우선적인 조치가 가능하게 되어 최적의 철도개량사업이 진행될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 선형 노후도 평가 기법을 기반으로 선형개량 정도의 정량적인 평가를 시행하여 노후화된 선형 구간의 개량비용 산정과 연계하는 연구를 추가적으로 진행해야 할 것으로 판단된다. 이는 국내 노후화된 기존 선로로의 적용성 및 확장성 뿐만 아니라 장기적으로 북한철도 개량 및 제3국의 선로 개량사업을 위한 주요 자료로 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

또한 시간적 측면에서의 선형노후도 평가 기법으로 에너지 효율적 측면은 미 고려 되었기 때문에 시간가치에 중점을 둔 여객운송이 주목적인 철도개량사업의 계획시에는 주요 자료로 활용이 가능할 것이나, 그 외 화물운송 등 시간가치보다는 에너지 활용성 등의 가치가 비중에 높은 철도개량사업에서는 조심스러운 접근이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] A. Charnes, W.W. Cooper, E.L. Rhodes (1978) Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 2(6), pp. 429-444.
- [2] Korea Railroad Corporation (2012) Train running enforcement regulations appendix15 Downward slope speed.
- [3] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2013) Regulations based on the construction of the railway.
- [4] M. Oral, O. Kettani, P. Lang (1991) A methodology for collective evaluation and selection of industrial R&D projects, *Management Science*, 37(7), pp. 871-883.
- [5] P. Andersen, N.C. Petersen (1993) A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis, *Management Science*, 39(10), pp. 1261-1264.
- [6] R. Allen, A. Athanassopoulos, R.G. Dyson, E. Thanassoulis (1997) Weights restrictions and value judgements in data envelopment analysis: Evolution, development and future directions, *Annals of Operations Research*, 73, pp. 13-34.
- [7] R.G. Thompson, F.D. Singleton, Jr., R.M. Thrall, B.A. Smith (1986) Comparative site evaluation for locating a high-energy physics lab in texas, *Interfaces*, 16(6), pp. 35-49.
- [8] R.G. Thompson, L.N. Langemeier, C.-T. Lee, E. Lee, R.M. Thrall (1990) The role of multiplier bounds in efficiency analysis with application to kansas farming, *Journal of Econometrics*, 46(1/2), pp. 93-108.
- [9] S. Sasmal, K. Ramanjaneyulu (2008) Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach, *Expert Systems with Applications*, 35(3), pp. 1430-1443.
- [10] S.H. Kim, C.-Y. Choi, H.-S. Na (2012) Evaluation of Railway Line Segment Deterioration Using AHP and DEA, *Journal of the Korean Society for Railway*, 16(2), pp.117-121.
- [11] S. Kim (2011) Deterioration evaluation of railway line segments using analytic hierarchy process, *Journal of the Korean Society for Railway*, 16(6), pp. 569-574.
- [12] T. Sato, A. Sutoh, H. Nishi, H. Arai (2011) Identification of correlation between demand performances to damage of lining concrete for tunnel management, *Procedia Engineering*, 14, pp. 529-534.
- [13] W.D. Cook, Y. Roll, A. Kazakov (1990) A dea model for measuring the relative efficiency of highway maintenance patrols, *INFOR*, 28(2), pp. 113-124.
- [14] Y.G. Park, S.K. Suh, J.Y. Choi (2008) Logicity estimate for domestic the periodic replacement criteria of CWR based on accumulated passing tonnage, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(3), pp. 326-333.
- [15] Y.G. Park, D.Y. Sung, H.K. Park, S.Y. Kong (2008) Bending fatigue life assessment of aged CWR using the field test, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(3), pp. 317-325.

접수일(2013년 10월 7일), 수정일(2013년 12월 4일),
게재확정일(2014년 2월 18일)

Hyun Ki Kim : hkkim@krri.re.kr

High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 360-1, Uiwang, Gyeonggi-do, Korea

Sung Jin Kim : sjk1004@rexenc.com

REX ENC, Garakbon-dong, Songpa-gu, Seoul, Korea

Chan Yong Choi : cychoi@krri.re.kr

High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 360-1, Uiwang, Gyeonggi-do, Korea

Soo Beom Hwang : remnant1982@krri.re.kr

High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 360-1, Uiwang, Gyeonggi-do, Korea