

AHP와 DEA를 활용한 철도선로구간 노후도 평가

Evaluation of Railway Line Segment Deterioration Using AHP and DEA

김성호* · 최찬용 · 나희승

Seongho Kim · Chan-Yong Choi · Hee-Seung Na

Abstract Railway line segment deterioration can be affected by rail tracks, subgrades, bridges, tunnels, and line shapes. In this paper, an evaluation method is presented for the railway line segment deterioration using the analytic hierarchy process (AHP) and data envelopment analysis (DEA). The importance weights can be assessed systematically for component facilities from numerous experts using AHP. The importance weights provided by experts may differ according to each expert; however, the DEA enables the evaluation of railway line segment deterioration that reflects the variety of expert opinions using these importance weights.

Keywords : Railway Line Segment, Deterioration, Analytic Hierarchy Process, Data Envelopment Analysis

초 록 철도선로구간의 노후도는 궤도, 노반, 교량, 터널 등 요소시설의 노후도로 결정되며 궤도의 선형 또한 선로구간 노후도에 영향을 준다. 본 논문에서는 계층구조분석(analytic hierarchy process: AHP)과 자료포락분석(data envelopment analysis: DEA)을 활용하여 선로구간의 노후도를 평가하는 방법을 제시한다. AHP는 다수의 전문가들이 평가하는 각 요소시설의 중요도를 체계적으로 파악할 수 있도록 해준다. 요소시설에 대한 중요도는 전문가에 따라 달라질 수 있다. DEA는 선로구간 요소시설의 중요도 가중치 범위를 체계적으로 반영하여 선로구간의 노후도를 평가할 수 있도록 해준다.

주요어 : 철도선로구간, 노후도, 계층구조분석, 자료포락분석

1. 서 론

철도선로구간의 노후도는 철도선로시설을 개선하고자 할 때 한정된 예산을 배분하는 기준으로 사용될 수 있다. 노후도 평가에 관한 기존 연구는 터널[1], 레일[2,3], 교량[4] 등 선로구간을 구성하는 개별 요소의 유지보수 관점에서 수행되었다. Sato[1]는 터널의 노후도평가방안을 제시하였고 Park 등[2,3]은 누적통과톤수 또는 현장측정을 통한 레일의 노후도평가방안을 제시하였다. Sasnal 등[4]은 AHP로 교량의 상태를 평가하는 방법 및 적용사례를 제시하였다. 현장에서 시행하고 있는 선로구간의 노후도 평가 역시 안전점검 또는 유지보수 관점에서 시트법(시설물의 안전관리에 관한 특별법) 또는 선로정비지침에 의거하여 궤도, 노반, 교량, 터널 등을 개별적으로 평가하는 방식이라고 할 수 있다.

철도선로구간의 노후도는 궤도, 노반, 교량, 터널 등 요소시설의 노후도가 종합적으로 반영되어 결정되며 궤도의 선형 또한 선로구간의 노후도에 영향을 준다. 따라서 노후도 평가 역시 요소시설의 노후도를 종합적으로 반영한 총괄 노후도점수로 평가할 필요가 있다. 요소시설의 노후도점수를 총괄하기 위해서는 각 요소시설에 대한 중요도 가중치가 있

어야 한다. 최근 Kim[5]은 AHP(analytic hierarchy process)를 활용하여 다수의 전문가들로부터 각 요소시설의 중요도를 체계적으로 파악하고 이를 요소시설의 노후도점수에 적용하여 철도선로구간의 총괄 노후도점수를 평가하는 방법을 제시하였다.

한편 선로구간의 노후도 관점에서 개별 요소시설이 얼마나 중요한가에 대한 평가는 전문가에 따라 달라질 수 있다. 다수의 전문가로부터 파악한 다양한 가중치를 노후도점수에 적용하는 기존의 방법은 한 사람의 대표전문가가 있다고 가정하고 이 사람의 가중치로 기하평균을 사용하는 것이다. 본 논문의 목적은 한 사람의 대표전문가가 존재한다는 가정을 하지 않고 AHP로 파악한 다수 전문가들의 다양한 의견을 명시적으로 반영하여 총괄 노후도점수를 산정하는 방안과 그 적용사례를 제시하는 것이다. 다양한 가중치를 명시적으로 반영하기 위해 본 논문에서는 1978년 Charnes 등[6]이 개발하여 제시한 자료포락분석(data envelopment analysis: DEA)을 활용한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 1절의 서론에 이어 2절에서는 선로구간 요소시설의 노후도점수를 산정하는 과정을 제시한다. 3절에서는 다수의 전문가들로부터 AHP로 파악한 요소시설의 중요도 가중치를 제시한다. 4절에서는 DEA모형을 설명하고 5절에서 결론을 제시한다.

*Corresponding author.

Tel.: +82-32-860-7768, E-mail : shk7768@inha.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.2.117>

2. 철도선로구간 요소시설의 노후도점수

철도선로구간의 노후도는 궤도, 노반, 교량, 터널 등 요소 시설의 노후도로 결정되며 궤도의 선형 또한 선로구간 노후도에 영향을 준다. 요소시설의 노후도를 반영한 총괄점수로 선로구간의 노후도를 평가하는 문제의 계층구조는 Fig. 1로 나타낼 수 있다.

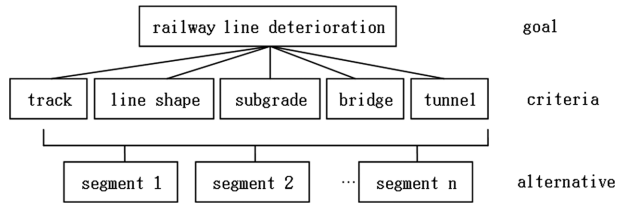


Fig. 1 Hierarchy for evaluating railway line deterioration

궤도는 도상에 일정한 간격으로 설치한 침목위에 두 줄의 레일을 평행하게 체결한 것으로 노반과 함께 차량 하중을 직접 지지하는 역할을 하는 도상 윗 부분의 설비를 말한다. 궤도의 선형은 철도선로구간의 노후화에 영향을 줄 수 있다. 곡선이 심한 구간은 그렇지 않은 구간보다 노후화가 빠르게

진행될 수 있다. 본 논문에서는 선로구간의 곡선화정도를 계수화하고 이를 선로구간의 선형 노후도점수로 사용하였다. 곡선계수는 궤도연장에 대한 곡선연장가중합계의 비율로 산정하였다. 곡선연장가중합계는 곡선연장에 식 (1)로 구한 곡선가중치를 적용한 가중합계이다.

$$\text{곡선가중치} = \frac{1}{\text{곡선반경} \times 1000} \quad (1)$$

궤도의 노후도점수는 궤도검측차로 측정한 불량연장에 대한 검측연장의 비율로 산정하였다. 불량연장은 궤도의 입체 불량수준을 나타내는 비틀림불량의 길이와 평면불량수준을 나타내는 줄맞춤불량의 길이의 합으로 정의하였다. 교량 및 터널의 노후도점수는 시트법(시설물의 안전관리에 관한 특별법)에 의해 매년 실시되는 안전점검에서 평가된 A(최상), B(양호), C(보통), D(미흡), E(불량) 등의 등급을 각각 1, 2, 3, 4, 5점으로 점수화하여 산정하였다. 선로구간에 여러 개의 교량 및 터널이 있는 경우에는 산술평균¹을 취하였다. 노반의 노후도점수는 보선관리사무소의 관리담당자가 평가한 등급자료를 교량 및 터널의 경우처럼 점수화하여 산정하였다. Table 1은 경북본부에 소속된 22개 선로구간의 요소시설의 노후도점수를 정규화하여 나타낸 것이다.

Table 1 Deterioration score of component facilities of 22 railway line segments

Segment	Line	Initial point	Terminal point	Length	Line shape	Track	Bridge	Tunnel	Subgrade
Mureung-Unsan	Jungang	257.5	264.3	6.8	5.6	3.2	9.7	20.9	3.9
Unsan-Danchon	Jungang	264.3	269.8	5.5	1.0	7.5	10.1	11.6	3.9
Danchon-Eopdong	Jungang	269.8	274.5	4.7	3.6	1.3	6.8	7.0	3.9
Eopdong-Uiseong	Jungang	274.5	278.8	4.3	2.5	0.7	4.8	0.0	3.9
Uiseong-Bibong	Jungang	278.8	285.1	6.3	4.0	9.0	15.5	0.0	3.9
Bibong-Tapri	Jungang	285.1	290.5	5.4	6.1	8.5	1.9	4.7	3.9
Tapri-Ubo	Jungang	290.5	299.1	8.6	3.2	3.6	2.9	0.0	0.0
Ubo-Hwabon	Jungang	299.1	307.1	8	4.2	5.9	0.0	0.0	0.0
Bonghwa-Geochon	Yeongdong	14.7	20.2	5.5	6.7	5.1	5.3	4.7	5.9
Geochon-Bongseong	Yeongdong	20.2	25.7	5.5	8.0	9.2	0.0	18.6	5.9
Bongseong-Beopjeon	Yeongdong	25.7	32.7	7	5.6	5.4	2.9	7.0	5.9
Beopjeon-Chunyang	Yeongdong	32.7	37.9	5.2	7.6	9.5	5.8	25.6	5.9
Chunyang-Nokdong	Yeongdong	37.9	42.7	4.8	5.8	6.7	6.3	0.0	5.9
Nokdong-Imgi	Yeongdong	42.7	47.6	4.9	8.1	5.5	0.0	0.0	0.0
Duwon-Oksan	Gyeongbuk	12.8	20	7.2	3.6	0.9	0.0	0.0	0.0
Oksan-Cheongni	Gyeongbuk	20	27.1	7.1	3.1	1.7	4.8	0.0	7.8
Cheongni-Sangju	Gyeongbuk	27.1	36	8.9	2.6	4.5	5.3	0.0	7.8
Sangju-Baegwon	Gyeongbuk	36	44.4	8.4	2.3	2.4	4.8	0.0	7.8
Baegwon-Hamchang	Gyeongbuk	44.4	55.8	11.4	3.9	3.3	6.8	0.0	7.8
Hamchang-Jeomchon	Gyeongbuk	55.8	60	4.2	3.4	3.7	2.9	0.0	7.8
Jeomchon-Gaepo	Gyeongbuk	60	73.3	13.3	4.5	1.6	3.4	0.0	7.8
Gaepo-Yecheon	Gyeongbuk	73.3	85	11.7	4.9	0.5	0.0	0.0	0.0

¹교량 및 터널의 연장이 반영된 가중평균이 산술평균보다 더 타당한 방법으로 판단됨. 본 논문에서는 자료의 한계로 산술평균을 사용함.

3. AHP로 평가한 요소시설의 중요도 가중치

철도선로구간 요소시설의 중요도 가중치는 철도시설공단, 연구단체, 건설 및 설계업체 등에 근무하는 39명의 철도전문가들로부터 Saaty의 9점척도를 사용하여 수집하였다. 설문문항은 「선로구간 노후도 평가에 있어서 A가 B(와)보다 (1=동일하게 중요하다, 3=약간 중요하다, 5=중요하다, 7=꽤 중요하다, 9=매우 중요하다)」이다. Table 2는 결측치가 포함되어 있거나 일관성비율이 낮은 응답자를 제외한 17명의 쌍체비교행렬로 평가한 각 요소시설의 중요도 가중치이다. 기하평균으로 총괄한 대표전문가의 의견은 노후도 관점에서 궤도(0.229), 노반(0.170), 교량(0.168), 터널(0.141), 선형(0.118) 등의 순서로 중요한 것으로 나타났다. 17명의 전문가는 노후도 관점에서 요소시설 중요도에 대하여 다양한 의견을 가지고 있다.

Table 2 Importance weights for five component facilities assessed using AHP from 17 experts

Expert	Track	Line shape	Subgrade	Brdige	Tunnel
1	0.126	0.236	0.076	0.069	0.115
2	0.357	0.064	0.337	0.098	0.098
3	0.204	0.096	0.157	0.128	0.128
4	0.175	0.037	0.078	0.186	0.078
5	0.216	0.060	0.307	0.147	0.147
6	0.141	0.071	0.103	0.480	0.168
7	0.136	0.080	0.177	0.164	0.251
8	0.306	0.118	0.056	0.056	0.028
9	0.258	0.115	0.123	0.123	0.123
10	0.279	0.307	0.090	0.084	0.084
11	0.117	0.352	0.136	0.148	0.088
12	0.150	0.044	0.347	0.243	0.191
13	0.189	0.020	0.042	0.307	0.168
14	0.461	0.022	0.092	0.075	0.068
15	0.114	0.327	0.316	0.084	0.084
16	0.137	0.347	0.105	0.204	0.147
17	0.224	0.091	0.329	0.098	0.170
Maximum	0.114	0.020	0.042	0.056	0.028
Minimum	0.461	0.352	0.347	0.480	0.251
Geometric mean	0.229	0.118	0.170	0.168	0.141

4. 노후도평가를 위한 자료포락분석

Charnes 등[6]이 개발하여 제시한 자료포락분석(data envelopment analysis: DEA)은 선형, 궤도, 교량, 터널, 노반 등 다수의 노후도지표에 대한 가중치를 각 노후도 지표의 점수로부터 구하고 이를 적용하여 총괄 노후도 점수를 구할 수 있는 선형계획법모형(linear programming model)이라 할 수

있다. DEA는 미국의 소외계층을 위한 교육프로그램의 성과 분석[6], R&D프로젝트의 평가[7], 고에너지물리실험동 후보지 평가[8], 고속도로 유지보수반 평가[9] 등을 포함한 매우 다양한 분야에 활용된 바 있다.

노후도 지표의 수가 s 개이고 평가대상이 되는 선로구간의 수가 n 개일 때 p 번째 선로구간의 총괄노후도점수를 평가하기 위한 DEA 모형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{pp}^* = \text{maximize } D_{pp} \quad (2)$$

$$\text{subject to } D_{pq} \leq 100, \text{ for } q = 1, 2, \dots, n$$

여기서 $D_{pp} = \sum_{r=1}^s w_{pr} y_{pr}$ (자기평가점수)

$$D_{pq} = \sum_{r=1}^s w_{pr} y_{qr} \quad (\text{동료평가점수})$$

w_{pr} = 선로구간 p 의 r 번째 노후도지표에 대한 가중치

y_{pr} = 선로구간 p 의 r 번째 노후도지표의 점수

y_{qr} = 선로구간 q 의 r 번째 노후도지표의 점수

Thompson 등[10]이 식 (2)에 나타난 DEA모형의 추가적 제약조건으로 제안한 확신영역(assurance region)을 활용하면 다수의 전문가들이 판단한 각 노후도지표의 중요도 가중치를 DEA모형에 반영시킬 수 있다. 노후도지표에 대한 확신영역은

$$-w_{pr} + A_{rr'} W_{pr'} \leq 0, \text{ for } r < r', r, r' = 1, 2, \dots, s \quad (3)$$

$$w_{pr} - B_{rr'} W_{pr'} \leq 0, \text{ for } r < r', r, r' = 1, 2, \dots, s$$

으로 다시 나타낼 수 있다. 여기서

$A_{rr'}$ = r 번째 노후도지표 가중치의 최소값

÷ r' 번째 노후도지표 가중치의 최대값

$B_{rr'}$ = r 번째 노후도지표 가중치의 최대값

÷ r' 번째 노후도지표 가중치의 최소값이다.

한편 식 (2)의 DEA모형으로 선로구간의 노후도를 평가할 경우 식 (3)의 확신영역이 제약조건으로 추가되더라도 총괄 노후도점수가 최대값인 100점으로 평가되는 선로구간이 복수개가 나타날 수 있다. Anderson 등[11]은 식 (2)의 DEA 모형에서 제약조건에 자기평가점수 D_{pp} 가 포함되지 않도록 하여 이러한 문제점을 해결할 수 있음을 제안하였다. Anderson 등[11]의 DEA모형은

$$D_{pp}^* = \text{maximize } D_{pp} \quad (4)$$

$$\text{subject to } D_{pq} \leq 100, \text{ for } q = 1, 2, \dots, n, p \neq q$$

로 나타낼 수 있다.

5. 철도선로구간의 총괄노후도점수

Table 3은 경북본부에 소속된 22개 선로구간의 총괄노후도점수 및 그 순위를 나타낸 것이다. Table 3에서 DEA1은 식 (2)의 DEA모형에 식 (3)의 확신영역을 제약조건에 추가

Table 3 Aggregate deterioration score evaluated using AHP and DEA

segment	Line	AHP		DEA1		DEA2	
		Rank	Score	Rank	Score	Rank	Score
Mureung-Unsan	Jungang	3	6.6	1	100.0	3	102.5
Unsan-Danchon	Jungang	4	5.8	5	90.3	5	90.3
Danchon-Eopdong	Jungang	12	3.5	17	60.2	17	60.2
Eopdong-Uiseong	Jungang	18	1.9	19	45.7	19	45.7
Uiseong-Bibong	Jungang	5	5.8	1	100.0	1	144.1
Bibong-Tapri	Jungang	8	4.3	11	77.5	11	77.5
Tapri-Ubo	Jungang	20	1.7	20	37.0	20	37.0
Ubo-Hwabon	Jungang	19	1.8	18	50.3	18	50.3
Bonghwa-Geochon	Yeongdong	6	4.5	9	81.1	9	81.1
Geochon-Bongseong	Yeongdong	2	6.7	4	94.9	4	94.9
Bongseong-Beopjeon	Yeongdong	7	4.4	15	73.0	15	73.0
Beopjeon-Chunyang	Yeongdong	1	8.7	1	100.0	2	135.5
Chunyang-Nokdong	Yeongdong	9	4.3	8	81.3	8	81.3
Nokdong-Imgi	Yeongdong	17	2.2	16	69.0	16	69.0
Duwon-Oksan	Gyeongbuk	22	0.6	22	27.2	22	27.2
Oksan-Cheongni	Gyeongbuk	15	2.9	13	75.8	13	75.8
Cheongni-Sangju	Gyeongbuk	11	3.6	7	83.7	7	83.7
Sangju-Baegwon	Gyeongbuk	14	3.0	12	77.1	12	77.1
Baegwon-Hamchang	Gyeongbuk	10	3.7	6	86.3	6	86.3
Hamchang-Jeomchon	Gyeongbuk	13	3.1	10	77.8	10	77.8
Jeomchon-Gaepo	Gyeongbuk	16	2.8	14	73.4	14	73.4
Gaepo-Yecheon	Gyeongbuk	21	0.7	21	35.4	21	35.4

한 모형의 적용결과이며 DEA2는 식 (4)의 DEA모형에 식 (3)의 확신영역을 제약조건에 추가한 모형의 적용결과이다. 그리고 AHP는 요소시설의 중요도 가중치에 대한 다수 전문가들의 의견을 기하평균으로 총괄하고 이를 적용하여 구한 총괄노후도점수와 그 순위이다.

Table 3의 결과를 살펴보면 대표전문가의 존재를 가정하고 Table 2의 기하평균을 대표전문가의 가중치로 적용한 AHP에서는 「법전-춘양」, 「거촌-봉성」, 「무릉-운산」 등의 순서로 노후도가 평가되었다. 한편 확신영역을 사용하여 요소시설의 중요도에 대한 전문가들의 다양한 의견을 명시적으로 반영한 DEA2에서는 「의성-비봉」, 「법전-춘양」, 「무릉-운산」 등의 순서로 노후도가 평가되었다.

한정된 예산으로 선로구간의 노후도를 개선해야 하는 담당자는 다양한 우선순위정보를 검토할 필요가 있다. 대표전문가의 존재가 타당하다고 판단할 경우 Table 3의 AHP결과를 활용하여 「법전-춘양」, 「거촌-봉성」, 「무릉-운산」 등의 순서로 우선순위를 부여하여 예산을 배분할 수 있다. 한 사람의 대표전문가를 가정하는 것 보다는 다수 전문가들의 다양한 의견을 명시적으로 반영하는 것이 더 타당하다고 판단할 경우에는 Table 3의 DEA2의 결과를 활용하여 「의성-비봉」, 「법전-춘양」, 「무릉-운산」 등의 순서로 우선순위

를 부여하여 예산을 배분할 수 있다.

6. 결 론

한정된 예산으로 철도선로시설을 개선하고자 할 때 사용할 수 있는 효과적인 예산배분방법의 하나는 철도선로구간의 노후도점수를 산정하여 이를 예산배분의 기준으로 사용하는 것이다. 본 논문에서는 다수의 전문가들로부터 구한 선로구간 요소시설의 중요도에 대한 다양한 의견을 DEA모형을 사용하여 총괄노후도점수 산정에 명시적으로 반영하는 방안을 제시하였다. 이와 더불어 제시된 방안을 경북본부에 속한 22개 선로구간의 노후도 평가에 적용한 결과를 제시하였고 기존 방법을 적용한 결과와 비교하였다. 철도시설 정책담당자는 한정된 예산을 배분하기 위한 다양한 우선순위 정보가 필요하다. 본 논문에서 제시된 총괄 노후도점수 산정방법과 그 적용사례는 철도시설 정책담당자가 사용할 수 있는 효과적인 우선순위정보생산방법으로 사용될 수 있을 것으로 기대한다. 다수 전문가의 다양한 의견을 명시적으로 반영하기 위해 본 논문에서는 Thompson 등[10]이 제시한 확신영역을 활용하였다. 가중치에 관한 다양한 의견을 명시적으로 반영하기 위한 다른 방안들(Allen 등[12] 참조)도 후속

연구로 시도해볼 필요가 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원에서 수행하고 있는 「남북 및 대륙철도의 실용주의적 진출을 위한 상호 연계기술개발」 사업의 지원을 받아 이루어 졌음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Y.G. Park, S.K. Suh, J.Y. Choi (2008) Logicality 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] P. Andersen, N.C. Petersen (1993) A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis, *Management Science*, 39(10), pp. 1261-1264.
- [12] 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.

접수일(2012년 11월 23일), 수정일(2012년 12월 27일),
게재확정일(2013년 2월 13일)

Seongho Kim : shk7768@inha.ac.kr

Professor, Department of Business Administration, Inha University,
523 Yonghyun-Dong, Nam-Gu, Incheon 402-751, Korea

Chan-Yong Choi : cychoi@krri.re.kr

High speed Railway Research Division, Korea Railroad Research
Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757,
Korea

Hee-Seung Na : hsna@krri.re.kr

Principal Researcher, New Transportation System Research Center,
Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-si,
Gyeonggi-do 437-757, Korea