

F-AHP평가수법을 적용한 고속전철 안전성의 평가 (Fuzzy-AHP Estimation Technique for Korea High Speed Railway Safety Management)

박태근*
Park, Tae-Keun

박춘수*
Park, Choon-Soo,

서승일*
Seo, Sung-II

ABSTRACT

Railway is huge traffic system which is operated organically combining all the elements; vehicle, track, electric power, signal/communication, operation, etc. Safety level has ben improved steadily by learning lessons from past accident. But with rapid progress in high-speed, massive, high-frequency transit fresh idea of accident prevention is now in order. In quest of effective and efficient countermeasure, we aim to establish an adequate safety evaluation/management method. Our proposals are basic concept relating to safety analysis of fatal accidents, AHP of Saaty, Fuzzy AHP.

1. 도입

고속전철은 기계, 전기, 제어 등 다양한 시스템이 유기적으로 결합하여 전체가 운영되는 대규모 복합 교통시스템이며, 고속으로 주행하여 승객을 운송하는 장비이다. 고속으로 주행하는 경우에는 기존의 일반철도와는 다른 양상의 환경 및 사용조건이 나타날 수 있기 때문에 앞으로 운행되는 고속전철에서는 과거 일반철도에서 경험하지 못하였던 어려움이 일어날 수 있다. 즉, 사소한 부품 고장이라 하더라도 안전상에 심각한 문제를 야기할 수 있기 때문에 개발, 설계단계 및 운용과정에서 철저한 분석과 시험을 거쳐 문제가 발생하지 않도록 해야 하며, 따라서 안전에 대한 요소를 최우선 과제로 취급하여야 한다. 또한, 이전에 발생한 철도사고를 귀중한 교훈으로 삼아 안전성에 대한 대책이 우선적으로 구축되어야 한다고 생각한다. 일본의 JR 東日本에서는 회사 설립 당시부터 안전을 경영의 최우선 과제로서 설정하여, 2년에 걸친 5개년 계획에 총액 약 1조 3000억엔을 투자함으로써 1987년 회사설립 당시에는 연간 376건의 사고가 발생하였으나 2001년에는 121건 발생하여 약 40%이하 정도의 감소 결과를 낳았다. 따라서 고속전철에 대한 특수성으로 인해 종래의 "사후보전적인 투자"에서 "사전보전적인 투자"에의 새로운 대안이 모색되어야 할 것이다 .

고속전철에 대한 안전성을 평가하는 항목 (평가항목, criterion)은 다수 존재하고, 게다가 이들 항목간의 관계는 상당히 복잡하기 때문에 이것을 이해하기 쉽게 하거나 , 간편한 의사결정 시스템

* 한국철도기술연구원 고속철도사업단

을 구축하는 것이 중요한 과제로 떠오르고 있다. 이런 이유에서 복수의 애매한 평가항목을 근거로 몇 개의 대체안 (alternatives)중에서 가장 좋은 안을 선택하는 의사결정의 문제인 **계층화 의사결정법** (AHP; Analytic Hierarchy Process)의 수법을 이용하기로 했다.

AHP는 방법론도 이해하기 쉽고, 더군다나 복수개의 평가항목을 가진 복잡한 대상을 비교적 쉽게 취급할 수 있는 장점을 가지고 있다. AHP에서의 주요한 특징으로서 문제에 대한 평가항목과, 평가항목간에 대한 대체안에 있어 상대적인 기본중요도를 결정하기 위해 의사결정자가 주관적으로 생각한다는 점과, 이 때 쌍대비교 (雙對比較, Pairwise comparison)라는 행위가 중요한 역할을 담당한다는 점이다. 여기에서의 쌍대비교 행위에 대한 결과에는 우선 언어에 의한 표현이 사용되며, 그 기본중요도의 척도로서 Saaty는 1~9의 선형형 쌍대비교값을 표 1과 같이 제안하고 있다 [2]. 이렇게 하여 구성된 쌍대비교행렬에서 그 최대고유값에 대한 고유벡터를 구하면, 평가항목간의 기본중요도의 비를 알게 된다. 여기에서 각각의 기본중요도의 비가 1이 되도록 정규화한다. 모든 요소에 대해서 중요도를 구한 후, 가법성을 이용하여 각 대체안의 합계평가값을 구한다. 한편, 의사결정 시스템에 있어서 인간의 감성이 주입된 의사결정도 중요하다고 생각한다. 즉, 의사결정의 결과에 대해서 보완적으로 대처할 것인지 아니면 대체적으로 대처할 것인지, 또는 적극적으로 대처할 것인지 아니면 소극적으로 대처할 것인지의 판단 등을 제어할 수가 있어야 하는데 기존의 AHP에서는 이러한 결과에 잘 대처할 수 없었다. Saaty의 AHP [2]에서는 이런 현상에 대한 설명이 없기 때문에 최근 연구자들에 의해 인간의 감성이 주입된 연구가 활발히 행해지고 있다 [3]. 따라서 본 논문은 종래의 AHP 기반 위에서 인간의 감성이 주입된 **퍼지 AHP** (Fuzzy AHP, 여기에서는 F-AHP로 통칭하기로 한다)를 제안하기로 한다. 여기에서는 고속전철의 안전성을 평가하는 것에 목적을 두고 있기 때문에 “F-AHP평가수법을 적용한 고속전철에 대한 안전성의 평가”라는 논제로서 명명했다.

2. 고속전철에 있어 사고내용과 평가항목

여기에서 논하는 각각의 사고의 내용은 다음과 같다 [1].

- **단계 I:** 사망사고 또는 다수의 부상자 발생
- **단계 II:** 사망자 또는 다수의 부상자 발생 가능성 존재
- **단계 III:** 부상자의 발생
- **단계 IV:** 부상자의 발생 가능성 존재
- **단계 V:** 차량, 노선 등의 손상
- **단계 VI:** 운휴 또는 열차 지연 30분 이상
- **단계 VII:** 열차지연 30분 미만
- **단계 VIII:** 열차지연 10분 미만

한편, 평가항목으로서 중대성, 반복성, 안정성, 경제성, 사회성과 같이 5개의 축 (평가항목)에서 다면적으로 수량평가를 하기로 한다[1]. 이들 각각에 대한 의미는 다음과 같다. 중대성은 사고에 대한 중대도 또는 중대사고에의 발전도를, 반복성은 사고에 대한 동종사고의 반복도를, 안정성은 사고에 대한 회복도를, 경제성은 사고에 대한 경제적 손실을, 사회성은 사회에 대한 이미지다운을 의미한다.

3. 문제의 수식화

상위 계층의 요소를 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 이라 하고, 그 계층의 직접 하위 계층의 요소를 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_m\}$ 이라 할 때, 상위 계층의 어느 요소에서 하위 계층을 평가한다고 가정한다. 그리고 AHP로 구한 상위 계층의 요소에 대한 웨이트 w_1, w_2, \dots, w_n 을 구하는 경우, a_i 의 a_j 에 대한 쌍대비교 값을 a_{ij} 로 하면, 상위 계층의 요소 U_1, U_2, \dots, U_n 의 쌍대비교 행렬은 $\bar{U} = (a_{ij})$ 이 된다.

또, 상위 계층의 i 요소 하에서 AHP로 평가한 하위 계층의 요소에 대한 웨이트를 $\pi_i^1, \pi_i^2, \dots, \pi_i^m$ 으로 하면, 하위 계층의 j 요소에 대한 전합 웨이트 (overall weighting)는

$$W^j = \sum_{i=1}^n w_i \times \pi_i^j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다.

AHP를 이용하여 평가를 실시할 때 쌍대비교에 대한 정합성을 충분히 유지하도록 전제로 하고 있다. Saaty는 쌍대비교 행렬에 있어서 정합도 $C.I.$ (Consistency Index)를 식 (2)와 같이 정의하고 있다.

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

단, λ_{\max} 는 최대고유값을, 쌍대비교의 행렬을 $n \times n$ 로 한다.

쌍대비교 행렬이 완전한 정합성을 가지고 있는 경우의 $C.I.$ 의 값은 0이고, 만약 $C.I.$ 의 값이 0보다 일정한 값 이상이면 정합성이 없는 경우라고 가정해도 좋다. 실제로 작성하는 쌍대비교에 있어서 완전한 정합성을 가지고 있는 경우는 드물고, 경험적으로 Saaty는 0~0.15에 있으면 그 쌍대비교에는 정합성을 가지고 있다고 주장하고 있으나 [2], 본 논문에서는 0~0.10에서 정합성을 가지도록 했다. 만약 쌍대비교 행렬이 정합성이 취해지지 않은 경우에는 상위 계층의 요소 $U_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 에 대한 수정웨이트 w_i^* 식 (3)을 이용하기로 한다.

$$w_i^* = w_i \times \left| \log_{\rho} \left(\prod_{j=1}^m \pi_i^j \right)^{\frac{1}{m}} \right|^{10 \times C.I.} \quad (3)$$

여기에서 $\log_{\rho} \left(\prod_{j=1}^m \pi_i^j \right)^{1/m}$ 은 상위 계층의 i 요소 하에서 쌍대비교 평가한 모든 하위 계층의 웨이트를 곱하여 ρ 를 밑으로 한 대수를 계산한 것으로, 쌍대비교 행렬에 있어서 정합성의 지표인 $C.I.$ 의 값이 증가하면 이 값도 증가하는 경향을 가지고 있다. 그 이유는 의사결정자에 있어 쌍대비교의 판단에 애매한 부분이 다수 존재하기 때문이고, 하위 계층에 대한 선택 판단의 기준이라고 말할 수 있다. 또, ρ 는 두 요소간의 쌍대비교값이며, 본 논문에서는 상한값 9를 이용하기로 한다.

다음으로 위에서 논한 Saaty AHP를 이용하여 인간의 감성이 주입된 퍼지 감각이 존재하는 의사결정을 생각하기로 한다. 여기에서의 인간에 대한 감성값의 모수 (parameter) $\mu, (0 < \mu < 1)$ 를 이용하기로 한다 (표 1).

표 1: Definition of μ

μ	
0.0	가 (absolute negative estimation)
0.1	가 (strong negative estimation)
0.3	가 (weal negative estimation)
0.5	(keep one's balance)
0.7	가 (weal positive estimation)
0.9	가 (strong positive estimation)
1.0	가 (absolute positive estimation)
0.2,0.4,0.6,0.8	

상위 계층의 각 요소에 대해 다음과 같은 식 (4)을 이용하여 퍼지변환을 행한다 [1].

$$M = \begin{cases} [\xi], & s=0 \\ \xi, & s=1 \\ 1-[1-\xi], & s=\infty \\ \frac{s^{\xi}-1}{s-1}, & \end{cases} \quad (4)$$

단,

$$[\xi] = \begin{cases} 1, & 0 < \xi \leq 1 \\ 0, & \xi = 0 \end{cases}$$

$$s = (1/\mu - 1)^2$$

이다. 따라서 퍼지측도를 다음과 같은 식으로서 수식화할 수 있다.

$$F_i = \sum_{i \in U_i} \omega_i \quad (5)$$

여기에서 U 는 상위 계층의 요소의 집합이다.

4. 앙케트 실시와 F-AHP의 알고리즘

한국철도연구원 소속 20명에 대해 앙케트를 실시했다. 회답형식은 2절에서 논한 5개의 평가항목 하에서 8개의 대체안을 쌍대 평가하여, Saaty의 AHP 근간이 되는 문제에 대한 평가 항목간의 쌍대비교를 행한 후, 각각의 평가항목 하에서 대체안에 대한 쌍대비교를 실시했다.

■ 합계평가값을 구하는 방법은 다음과 같다.

Step 1: 평가항목과 대체안을 계층구조로서 정리한다.

Step 2: 안전성 평가에 대한 평가항목간의 쌍대비교를 행한다. 쌍대비교 행렬이 얻어지면 최대고 유값에 대한 고유벡터에서 평가항목간의 웨이트의 비를 계산하고, 그 웨이트의 비가 1이 되도록 정규화하여 이를 기본 중요도로 한다.

Step 3: 각각의 평가항목 하에서 대체안에 대한 쌍대비교를 행한다.

Step 4: 평가항목하에서 쌍대비교 행렬에서 계산을 행한 정합도가 0 C.I. 0.10에서 존재하면 그 웨이트가 평가항목의 웨이트가 된다. Step 7로 전진한다. 그렇지 않으면 5로 전진한다.

- Step 5:** 평가항목의 웨이트가 변경이 되었을 경우에는 평가항목의 웨이트가 1이 되도록 정규화한다.
- Step 6:** Step 5에서 구한 수정웨이트를 근거로 식 (3)을 이용하여 쌍대비교 행렬을 변경한다.
- Step 7:** 인간에 대한 감성값의 모수 (parameter) μ ($0 < \mu < 1$)를 결정한다.
- Step 8:** Step 2에서 구한 각 대체안마다의 웨이트를 내림차 순으로 배열하고, 이에 대응하여 평가 항목의 웨이트를 대응시킨다.
- Step 9:** 평가항목의 웨이트 값을 최상단으로부터 직접하단의 웨이트 값과의 합을 구하여 간다.
- Step 10:** 식 (4)를 이용하여 퍼지변환을 행한다.
- Step 11:** Step 2에서 구한 대체안의 쌍대비교의 웨이트 값을 가지고 최하단으로부터 직접상단의 웨이트값과의 차를 구하여 간다.
- Step 12:** Step 9에서 구한 퍼지변환의 값과 Step 10에서 구한 값과의 곱을 구한다.
- Step 13:** 평가항목간의 전합 웨이트를 구한다.

5. F-AHP를 이용한 안전성의 평가 결과

제 4절에 열거한 알고리즘에 근거하여 전 Stage와 인간에 대한 감성값 μ 를 연속적으로 변화시킬 때 전합웨이트에 대한 변화데이터의 결과를 표 2에 정리했다. 더욱이 표 3에는 Saaty의 AHP를 이용하여 안전성을 평가한 결과를 표시했다.

표 2: Overall weighting change data when changing μ continuously

	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV	Stage V	Stage VI	Stage VII	Stage VIII
0.0	0.339	0.096	0.174	0.068	0.063	0.043	0.029	0.023
0.1	0.345	0.129	0.175	0.082	0.064	0.044	0.030	0.024
0.2	0.350	0.141	0.176	0.085	0.066	0.045	0.032	0.024
0.3	0.356	0.152	0.178	0.088	0.068	0.047	0.033	0.025
0.4	0.362	0.163	0.179	0.091	0.070	0.049	0.034	0.026
0.5	0.368	0.174	0.180	0.093	0.072	0.050	0.036	0.027
0.6	0.374	0.184	0.182	0.095	0.075	0.052	0.037	0.028
0.7	0.380	0.195	0.183	0.096	0.078	0.055	0.039	0.029
0.8	0.387	0.205	0.185	0.098	0.081	0.057	0.041	0.030
0.9	0.394	0.216	0.187	0.099	0.085	0.061	0.043	0.032
1.0	0.414	0.229	0.191	0.100	0.101	0.073	0.048	0.038

표 3: Saaty's Calculation

	Stage I	Stage II	Stage III	Stage VI	Stage V	Stage VI	Stage VII	Stage VIII
중대성	0.154	0.104	0.079	0.045	0.029	0.020	0.013	0.010
반복성	0.084	0.028	0.040	0.021	0.015	0.010	0.008	0.005
안정성	0.072	0.025	0.035	0.016	0.015	0.012	0.008	0.006
경제성	0.036	0.011	0.017	0.007	0.009	0.004	0.004	0.003
사회성	0.023	0.005	0.010	0.004	0.005	0.004	0.003	0.002
W^j	0.368	0.174	0.180	0.093	0.072	0.050	0.036	0.027
RTRI	0.350	0.200	0.180	0.120	0.080	0.040	0.020	0.010

표 2에서 알 수 있듯이 각각의 사고 내용에 대한 수치는 오른쪽으로 갈수록 선형적으로 증가하여

가고 있다. 이것은 μ 가 증가하면 증가할수록 전합웨이트 증가한다는 즉, 단조성을 가지고 있다고 말할 수 있다. 이것은 당연히 $\mu = 0.0$ 일 때의 전합웨이트와 $\mu = 1.0$ 일 때의 전합웨이트와 비교하여 작다는 의미이다. 표 1과 표 2에서 F-AHP로 구한 $\mu = 0.5$ 의 전합웨이트와 식 (1)을 이용하여 구한 Saaty AHP로 구한 전합 웨이트가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다 [3]. 더욱이 RTRI 보고서 [1]에 게재된 전합웨이트를 적어 놓는다 (표 3). 이 두 데이터의 큰 차이는 Stage II와 Stage III의 중요도에 차이가 있다는 점이다. 즉, 한국철도연구원 소속의 연구자들은 사망자 또는 다수의 부상자 발생 가능성 존재보다 부상자 발생에 우선적으로 중요성을 두었고, 일본의 연구자들은 부상자 발생보다 사망자 또는 다수의 부상자 발생 가능성 존재에 우선적으로 중요성을 두었다. 한편, 표 1과 같이 인간에 대한 감성값 μ 를 변화시켜 봄으로서 전체적인 F-AHP 문제가 어떤 구조로 되어 있는지를 쉽게 파악할 수 있다. 우선 인간의 모든 감성을 이용했을 경우, 즉 μ 를 0.0 에서 1.0 이상까지 변화시켜 보면, Stage I이 계속 월등하게 우위를 지키고 있음을 알 수 있다. 이것은 고속철도 연구자가 시간적 또는 경제적으로 모든 주위 상황을 판단하여 소극적으로 판단하든 적극적으로 판단하든 어느 경우에도 앞으로 운행하게 될 고속전철에 사망사고나 다수의 부상자의 발생은 불가피하며, 이를 방지할 수 있는 시스템이 우선적으로 구축해야 할 것이라고 예측했다. 또한 $\mu < 0.6$ 의 경우에는 Stage I ~ Stage VIII은 표 3과 같이 웨이트 순으로 그 중요성을 가지고 있으나, μ 의 값을 증가시켜 보면 $\mu > 0.6$ 에서 Stage II와 Stage III의 웨이트가 역전되고 있다. 이것은 고속철도 연구자가 사고내용에 대해 전반적으로 적극적으로 대처했을 경우, Stage II가 Stage III보다 중요성이 크며, 부상자 발생에 대한 안전성의 확보보다는 사망자 또는 다수의 부상자 발생의 가능성에 대해 안전성을 우선적으로 확보해야 한다는 것을 의사결정자들은 예측하고 있다. 따라서 Saaty의 AHP는 표 3과 같이 단지 일면적인 상황 판단만이 가능하나, F-AHP는 인간의 감성값을 주입함으로써 보다 더 다면적인 상황판단이 가능하게 되었다.

4. 결론

F-AHP를 이용하여 고속전철의 안전성을 평가하는 수법에 대해서 검토를 행했다. 이 수법은 고속전철에 대한 안전성을 확보하는데 있어서 연구자의 의사결정을 지원하기 위한 것이다. 최근 AHP의 수법이 각광을 받는 이유는 그 수법에 다수의 항목이 존재하여도, 복잡한 대상을 간단하게 그리고 쉽게 취급할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문이다. 또, Saaty의 AHP의 경우 인간의 감성값 $\mu = 0.5$ 만을 이용했을 때 의사결정자의 결정판단에 다소 어려움이 존재하였으나, F-AHP를 이용한 평가에서는 인간의 감성값을 변화시킴으로써 시간적 경제적 그리고 다수의 외부요인을 상정한 상황하에서도 의사결정자가 최적 결정을 내리기가 다소 유리하다는 점을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Fukuda, H., Sato, Y. and Yabuhara, A., Study on Railway Safety Assessment Method and Safety Management Supporting System, *RTRI Report*, Vol. 11, No. 11, pp. 1-11 (1997).
2. Saaty, T. L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, (1980).
3. 高萩榮一郎, DEA의クロス効率値とファジィ測度--ショケ積分モデルによる最良評價, 平均評價および仲間の評價, *日本オペレーションズリサーチ學會*, (1996).
4. 박용성, 박태근, Fuzzy를 위한 의사결정론 *자유아카데미*, (2001).