

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-Il

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 been 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 일반철도와와는 다른 양상의 환경 및 사용조건이 나타날 수 있기 때문에 앞으로 운행되는 고속전철에서는 과거 일반철도에서 경험하지 못하였던 어려움이 일어날 수 있다. 즉, 사소한 부품고장이라 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 [1][6].

본 논문은 고속전철의 안전성 평가를 실시할 때, 연구자간의 의사결정을 지원하기 위한 방법론을 제공하는데 목적을 두고 있다. 안전성 향상을 위한 평가기법에 대해서는, 시스템의 신뢰성과 안전성 향상을 위한 FMEA 시행에 의한 사례 [5] 등이 보고되고 있다.

* 한국철도기술연구원 고속철도사업단

** 한국철도기술연구원 고속철도사업단

*** 한국철도기술연구원 고속철도사업단

표 1 Saaty에 의한 쌍대비교값과 그의 정의

쌍대비교 값	정의 (이전의 항목과 이후의 항목을 비교했을 경우)
1	같은 정도로 중요 (equal importance)
3	약간 중요 (weal importance)
5	상당히 중요 (strong importance)
7	대단히 중요 (very strong importance)
9	극히 중요 (absolute importance)
2,4,6,8	보간적으로 이용
위의 수치들의 역수	위의 수치들의 역수&이후의 항목에서 이전의 항목을 비교했을 경우

고속전철에 대한 안전성을 평가하는 항목 (평가항목, criterion)은 다수 존재하고, 게다가 이들 항목 간의 관계는 상당히 복잡하기 때문에 이것을 이해하기 쉽게 하거나, 간편한 의사결정 시스템을 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 \cite{takahagi}. 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

막대한 데이터로부터 객관적으로 상황을 평가하거나 목표값을 관리하기 위한 실천적인 평가척도로서 다수의 지표가 존재한다. 고속전철 분야에서도 마찬가지로 본격적으로 운행되는 시점으로부터 사고에 이르기까지의 인명사고를 유발할 수 있는 탈선이나 충돌 등과 같은 지표가 작성되게 될 것이다. 그러나 신뢰성 목표에 도달하기 위해서는 평가지수를 일률적인 건수로서 평가하기

보다는 사고의 내용도 적극적으로 고려하여 평가할 필요가 있다.

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 손실율, 사회성은 사회에 대한 이미지다운을 의미한다.

3. 문제의 수식화

Saaty의 AHP는 각 계층에서 각 평가항목의 기본중요도를 쌍대비교로 구하고, 각 사고내용에 대한 각 평가항목의 평가값 (쌍대비교로 구하거나 하단계층에서 계산된 것)의 가중합 (weighted summation)을 구하는 것이다 [4].

Saaty의 AHP에서 합계평가값은 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$W^j = \sum_{i=1}^m \omega_i \times \pi_i^j \tag{1}$$

여기에서,

W^j : j 번째 대체안의 합계평가값

π_i^j : j 번째 대체안에 대한 i 번째 평가항목의 평가값. $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$

m : 대체안의 수. 여기에서는 사고내용의 수

n : 평가항목 수

ω_i : i 번째 평가항목의 기본중요도. $\sum_i \omega_i = 1$

이다.

F-AHP에서 기본중요도는 ω_i 대신에 퍼지측도 M 을 사용하기로 한다. 즉,

M_j : i 번째 평가항목의 상호작용이나 기본중요도를 나타내는 퍼지측도

이다. 여기에서, 측도란 공집합에 대해서 0의 값을 취하고, 가법성을 만족하는 집합을 말하며, 가법성 대신에 단조성을 만족하는 집합함수를 퍼지측도 (Fuzzy Measure)라 한다. 한편, AHP를 이용하여 평가를 실시할 때 쌍대비교에 대한 정합성을 충분히 유지하도록 전제로 하고 있다. Saaty는 쌍대비교에 있어서 정합성 지표로서 C.I (Consistency Index)를 정의하고 있다. 단, 쌍

대비교의 크기를 행렬 $n \times n$, 그 최대고유값을 λ_{\max} 로 한다.

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

표 2 μ 와 그의 정의

μ	정의
\uparrow	극히 소극적으로 평가 (absolute negative estimation)
0.1	상당히 소극적으로 평가 (strong negative estimation)
0.3	약간 소극적으로 평가 (weal negative estimation)
0.5	밸런스 유지 (keep one's balance)
0.7	약간 적극적으로 평가 (weal positive estimation)
0.9	상당히 적극적으로 평가 (strong positive estimation)
\downarrow	극히 적극적으로 평가 (absolute positive estimation)
0.2, 0.4, 0.6, 0.8	이전의 항목과 이후의 항목과의 보간적으로 이용

쌍대비교의 일관성이 존재하는 지를 측정하기 위한 측도로서 정합성이 있다. 이 정합성이 완전히 취해져 있을 경우에는 C.I의 값은 0이고, C.I의 값이 크면 정합성이 없는 경우라고 가정해도 좋다. 실제로 작성하는 쌍대비교에 있어서 완전히 정합성이 취해져 있는 경우는 드물고, 경험적으로 Saaty는 \$0.1Wsim 0.15\$에 있으면 그 쌍대비교에는 정합성이 있다고 주장하고 있다 [2] 다음으로 위에서 논한 Saaty AHP를 이용하여 인간에 대한 감성값을 부가하여 확장된 AHP를 생각할 수 있다는 점이다. 여기에서의 인간에 대한 감성값의 모수 (parameter) \$Wmu\$를 결정하기 위해서는 표 2와 같이 평가하기로 한다.

퍼지측도의 할당방법은 ϕ_s 변환을 사용한다 [3].

$$\phi_s: [0, 1] \rightarrow s \in [0, +\infty]$$

$$\phi_s(\xi) = \begin{cases} [\xi], & s=0 \\ \xi, & s=1 \\ \frac{s^{\xi}-1}{s-1}, & \text{기타} \end{cases} \quad (3)$$

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.

$$M_i = \phi_s\left(\sum_{i \in \xi} \omega_i\right) \quad (4)$$

4. 앙케트 실시와 F-AHP의 알고리즘

한국철도연구원 소속 27명에 대해 앙케트를 실시했다. 앙케트 형식은 그림 1과 같다. 회답형식은 2절에서 열거한 기존 AHP 근간이 되는 문제에 대한 평가항목, 평가항목 간의 대체안에 대한

쌍대비교를 행했다. 카테고리 수는 표 1과 같이 18단계로 행했다. 그 결과에 대해 다음에 표시하는 알고리즘을 근거로 하여 합계평가값 (total estimation value)을 구했다.

합계평가값을 구하는 방법은 다음과 같다.

Step 1: 평가항목과 대체안을 계층구조로서 정리한다. 여기에서 말하는 대체안은 사고내용을 가리킨다.

Step 2: 대체안에 대한 직접 상위의 수준인 평가항목간의 쌍대비교를 행한다. 각 평가항목마다 기하평균을 취해 총합을 구하고, 이 값으로 각 기하평균값을 나눈다. 이 결과로서 각 평가항목에 대한 기본중요도를 계산할 수 있다. 결과는 표 3과 같다.

표 3 기본중요도

평가항목	기본중요도
중대성	0.44
반복성	0.22
안정성	0.19
경제성	0.09
사회성	0.06

그림 1 양케트 형식의 예

Step 3: 각 평가항목마다 대체안에 대한 쌍대비교를 행한다.

Step 4: 식 (2)를 이용하여 정합도를 계산한다. 0.1~0.15에 존재하지 않으면 Step 2로, 존재하면 Step 5로 전진한다.

Step 5: 인간에 대한 감성값의 모수 (parameter) μ ($0 \leq \mu \leq 1$)를 결정한다.

Step 6: Step 2에서 구한 결과로부터 각 평가항목마다 쌍대비교 값을 내림차 순으로 배열하고, 이에 대응하여 기본중요도를 대응시킨다.

Step 7: 식 (4)를 이용하여 퍼지변환을 행한다.

Step 8: Step 6에서 구한 쌍대비교 값을 가지고 최하단으로부터 상위의 값과의 차를 구하여 간다.

Step 9: 퍼지변환과 쌍대비교값과의 차의 곱을 구하고, 최종적으로 각 평가항목간의 합계, 즉 합계평가값을 구한다.

5. F-AHP를 이용한 안전성의 평가 결과

제 4절에 열거한 알고리즘에 근거하여 계산된 결과를 그래프로 그려보면 그림 2와 같다.

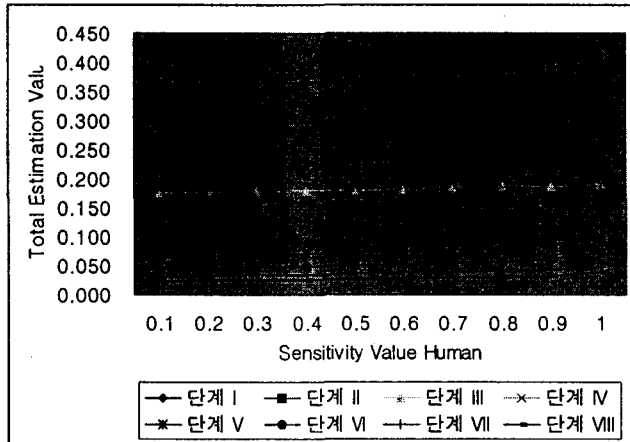


그림 2 인간의 감성값을 변화시킬 때 합계평가값의 변화

그림 2에서 알 수 있듯이 각각의 사고 내용에 대한 선은 오른쪽으로 갈수록 선형적으로 증가하여 가고 있다. 이것은 μ 가 증가하면 증가할수록 합계평가값도 증가한다는 즉, 단조성을 가지고 있다고 말할 수 있다. 이것은 당연히 $\mu=0.1$ 일 때의 합계평가값과 $\mu=0.9$ 일 때의 합계평가값과 비교하여 작다는 의미이다.

한편, 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 0.1에서 0.9이상까지 변화시켜 보면, 단계 I이 계속 우위를 지키고 있음을 알 수 있다. 이것은 고속철도 연구자가 시간적 또는 경제적으로 모든 주위 상황을 판단하여 소극적으로 판단하는 적극적으로 판단하든 어느 경우에도 앞으로 운행하게 될 고속전철에 사망사고나, 다수의 부상자의 발생은 불가피하며, 이를 방지할 수 있는 시스템이 우선적으로 구축해야 할 것이라고 예측했다.

또한 $\mu < 0.6$ 에 고속철도 연구자가 사고내용에 대해 전반적으로 소극적으로 대처했을 경우 즉, 사망자 또는 다수의 부상자 발생 가능성은 부상자 발생보다 다소 희박하다는 결론을 내렸으나, μ 의 값을 증가시킴으로써 단계 III에 역전되고 있다. 이것은 사고내용에 대해 보다 적극적으로 대처했을 경우 사망자 또는 다수의 부상자의 발생가능성은 증가할 것이라고 판단한 것이다.

마지막으로 단계 IV ~ VIII에서는 기본중요도 순으로 순차적으로 변화하여 가는 모습을 보여주고

있으며, $\mu=1$ 을 제외한 나머지 감성값들은 거의 일정한 값으로 유지하고 있기 때문에 소극적으로 판단하여도 문제가 되지 않는다는 경우로서 판단하였다고 말할 수 있다. 이것으로 보아 F-AHP는 위와 같은 상황판단을 합리적으로 설명할 수가 있음을 알 수 있었다.

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 때의 합계평가값이 거의 일치) 의사결정자의 결정판단에 다소 어려움이 존재하였으나, 제 3절의 표 2와 같이 F-AHP를 이용한 평가에서는 인간의 감성값을 변화시킴으로써 시간적 경제적 그리고 다수의 외부요인을 상정한 상황하에서 최적결정을 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] Satty, 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).