

철도방재시스템과 강우에 인한 철도기상사고

Railroad Disaster Prevention System and Railroad Weather-Related Accidents and incidents according to Precipitation

박종길† 정우식* 김희만** 김은별*** 이재수****
Jong-Kil Park Woo-Sik Jung Hi-Man Kim Eun-Byul Kim Jae-Su Lee

ABSTRACT

This paper aims to find out characteristics of railroad weather-related accidents and incidents and to proposes the plan of railroad disaster prevention according to the precipitation. For this, we make the database about the railroad weather-related accidents and incidents and analysis the relationship between the hourly and cumulative precipitation and railroad accidents.

The results are as follows; The weather events that have the most occurrence frequency of railroad weather-related accidents and incidents is a rainfall of the precipitation and then the cause of that was the falling rocks and the collapsed roadbed. The rainfall patterns of collapsed roadbed were classified into 4 groups. When the variation of hourly rainfall is 10/15 mm/hr over, we need to consider the caution/stop of train operation and a speed limit, respectively.

1. 서론

IPCC(2007)에서는 기후변화로 태풍, 집중호우, 폭염과 같은 극한 기상현상이 빈발할 것으로 예상하고 있다. 최근 우리나라에서도 기후변화로 것으기상이변으로 국지성 집중호우가 증가하고 있으며, 그발할따름으로 예상하고 피해도 기상상황 악화와 동반하여 증가 추세발할있다(정우식 등, 2009; 박종길 등, 2008; 신민호 등, 2003).

철도는 공공의 수송기관으로 승객과 화물의 안전 수송 확보에 책임을 갖고 있으나, 해방이후 경제성을 고려한 철도건설과 동서횡단철도건설에 열악한 국토조건 및 고속철 도입 과정에서 국내의 선로, 기후, 지형·지질학적 특성을 반영한 국내 열차안전운행감시시스템 규정으로 정립되지 않은 것이 현실이다(신민호 등, 2003).

고속으로 주행하는 열차에 직접적인 위험요소가 되는 선로 주변의 급격한 기상변화는 기후변화로 인해 향후에도 계속 증가할 것으로 예상되고 있으므로(박종길 등, 2006; 신민호 등, 2003) 철도기상사고의 DB 구축은 물론 기상현상과의 관련성을 조사 분석하고, 실시간으로 기상현상을 감시하고 재해를 줄일 수 있는 경보시스템이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기상 현상에 의해 직·간접으로 발생한 철도사고 및 운행 장애 현상을 철도기상사고(railroad weather-related accidents and incidents)로 분류하고 이들 철도기상사고 중에서 발생빈도가 가장 높은 기상현상 가운데 강우에 대해서 자세히 검토하여 철도기상사고를 저감할 수 있는 기초

† 책임저자 : 정희원, 인제대학교 환경공학부/대기환경정보연구센터, 교수
E-mail : envpjk@inje.ac.kr
TEL : (055)320-3250 FAX : (055)321-3252

* 비회원, 인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터, 조교수

** 정희원, 철도공사 부산경남본부 안전환경팀장

*** 비회원, 인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터, 박사수료

**** 정희원, 철도공사 마산기관차승무사업소 지도운용과장

자료를 제공하고자 한다. 이를 위해 먼저 철도공사가 운영하고 있는 철도방재시스템을 살펴보고, 강우로 인한 철도기상사고 종류별 시간 및 누적강수량을 비교 분석하여, 철도기상사고를 사전에 방지할 수 있는 방안을 마련하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용한 철도사고 관련 자료는 철도통계연보, KROIS (Korea Railroad Operation Information System) 통계자료와 철도사고사례집 및 철도사고분석보고서로 1996년부터 2008년까지 자료를 사용하였다. 철도통계연보에는 여객사고 발생 및 배상현황, 연도별 화물사고 발생현황, 연도별 운전사고 발생현황이 기록되어 있으며, KROIS에는 1996년부터 14,323건의 철도사고와 운행 장애의 기록 및 통계를 관리하고 있고, 철도사고사례집과 철도사고분석보고서는 철도사고 및 운행 장애 발생현황을 제공하고 있다.

그러나 철도통계연보는 재해관련 자료가 미약하여 KROIS 자료를 주로 사용하였고, 사고내역에 대한 검토를 위해 철도사고사례집과 철도사고분석보고서를 참고하였다. 그리고 피해액에 관련된 자료는 국가재난정보센터에 있는 1985~2008년까지 자료를 사용하였으며, 철도사고와 기상과의 관련성을 알아보기 위하여 사용한 기상자료는 동기간에 걸쳐 기상청 자료 가운데 시간강수량 자료를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 한국철도공사 철도방재시스템 현황

한국철도공사가 운용하고 있는 철도강우자동경보시스템의 운용율과 효율성이 그리 높지 않은 편이다. 이는 철도공사 내 방재기상관련 전문가가 없어 이들 장비 관리와 기록된 자료에 대한 유효성과 신뢰성 검증이 이루어지지 못하기 때문으로 생각된다. 그러나 국가재난정보센터에서 제공하고 있는 기상현상에 의한 철도피해규모는 철도사고의 피해액을 훨씬 상회하고 있으므로, 이 문제에 대해 적극적인 해결책과 더불어 철도강우자동경보시스템의 전달체계 및 수시 관리 및 점검 체계를 정비하여 항상 가동상태를 점검할 수 있는 체계가 이루어져야 할 것이다.

3.2 철도기상사고에 따른 강수량 DB

철도강우자동경보시스템의 효율적인 운용과 철도기상사고로 인한 인명과 재산상의 피해를 저감하고자 철도기상사고의 주요 원인이 되는 강수와 철도기상사고와의 상관성을 분석하여 강수에 의한 철도기상사고를 저감할 수 있는 방안을 마련하여야 할 것이다. 이를 위해 철도기상사고와 강수량에 관한 Database를 구축하고, 철도기상사고의 종류에 따른 특성을 분석하였다.

3.2.1 철도기상사고와 강수

강수현상에 의한 철도기상사고는 연구기간동안 전체 철도기상사고 가운데 총 268회로 61.0% 발생하였으며, 강우, 강설, 안개, 이슬로 구분되어진다. 강수 중에서도 강우현상이 200회로 전체 74.6%로 가장 많은 비율을 나타내고 있으며 강설현상은 61회로 22.8%를 차지하여 두 번째를 나타내고 있다. 그 다음은 이슬, 안개 순으로 나타나 철도기상사고와 관련된 강수현상은 강우가 주를 이루고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 철도기상사고에 관련한 강수량 DB

강수현상에 의한 철도기상사고는 비탈면의 붕괴나 침수 등에 의해 발생하는 경우로 노반상태나 침식·풍화정도에 따라서도 달라질 수 있다. 그러나 이는 중·장기적으로 고려해야 할 요소가 되며, 당해 지역에 내린 누적강수량과 강수강도에 해당하는 시간강수량이 단기간에 나타나는 주요 변화 요소로 작용한다(신민호 등, 2003). 따라서 철도연변에 설치 운영하고 있는 강우량계의 자료를 수집하여 인근의 기

상청 관측망 자료와 비교 분석하여 유효한 자료를 선정하고 이를 토대로 철도기상사고에 대한 검토를 시도하였다.

두 관측 자료를 비교하기 위해 철도공사의 관측망과 기상청 관측망은 지역성을 고려해 비교적 동일지역이라고 판단되는 지점을 선정하였는데, 207개 관측소 가운데 강수로 인한 여러 철도기상사고 가운데 노반유실, 선로침수, 궤도매몰에 해당하는 지점을 선정하였다. 따라서 최종으로 선정된 지점은 지점명과 위치, 사고가 발생한 구간과 일시를 함께 고려하였다.

이들 지점에 대한 시간강수량과 누적강수량을 철도기상사고가 발생한 시점을 기준으로 전후 자료를 비교하기 위해 수치와 그래프를 함께 나타내었으며, 철도사고가 발생한 노선의 구간과 일시도 비교 분석하였다. 그 결과, 철도공사의 자료는 결측된 경우가 많았으며, 강수강도를 나타내는 시간강수량의 경우도 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서 결측이 없고, 관측 전문가에 의해 정기적으로 관측되고 있는 기상청 관측망 자료를 이용하여 철도기상사고 발생 시 자료를 수집하고, database를 구축하였다. DB 구성은 철도기상사고 발생 일시와 노선 및 구간, 사고 종류 및 원인, 강수량 관측소, 사고 시점의 시간강수량(mm), 강수기간(일수), 누적강수량(mm), 일강수량(mm), 평균 시간강수(mm)의 순으로 도표 1에서와 같이 이루어졌다.

도표 1. 강우에 의한 사고 발생현황(일부)

년도	월	일	시각	선명	구간	종류	원인	관측지점	사고 발생시 강수량 (mm)	강우일수	누적 강수량 (mm)	당일 강수량 (mm)	당일 시간당 강수량 (mm)
96	3	17	08:32	영동선	석포-승부	선로장애	낙석	태백관측소	0.0	3.16(1)	31.5	5.0	0.2
96	3	18	16:28	영동선	현동-분천	선로장애	낙석	태백관측소	0.0	3.16~18(3)	31.9	0.4	0.0
96	4	17	17:00	태백선	민동산-자미원	선로장애	낙석	태백관측소	5.5	4.17(1)	23.0	23.0	1.0
96	5	14	20:21	영동선	승부-석포	선로장애	낙석	태백관측소	0.0	5.13~14(2)	4	0.5	0.0
96	6	17	03:09	중앙선	아신-국수	선로장애	궤도매몰	양평관측소	0.0	6.16~18(3)	109.5	101.5	4.2
96	6	24	17:43	영동선	마차리-신기	선로장애	낙석	동해관측소	2.1	6/23~25(3)	57.5	40.7	1.7
96	6	25	11:49	영동선	동백산-통리	선로장애	낙석	태백관측소	0.5	6/24~26(3)	77	26.0	1.1

3.3 강우에 의한 철도기상사고의 제 특성

3.3.1 강우량과 강우지속일수

본 연구에서 구축되어진 강우에 의한 철도기상사고 database를 이용하여 우리나라에서 발생한 철도기상사고의 발생 시점과 강우 지속일수와의 관계를 나타내 보았다. 그 결과 강우일수가 2일 지속되는 경우가 78(39.0%)건으로 가장 많이 발생하였고, 3일 지속될 경우가 57건으로 28.5%를 차지하여 두 번째로 많았으며, 4일 지속되는 경우가 23(11.5%)건으로 나타나 강우에 의한 철도기상사고는 강우 첫날부터 4일 동안 지속되는 사이에 발생하는 경우가 전체의 대부분인 89.0%를 차지하고 있음을 알 수 있다.

위의 분석내용을 바탕으로 한반도 철도기상사고는 강우 예보 또는 발생 2~4일째에 철도기상사고가 가장 빈번히 발생함을 알 수 있으며, 장시간 강우가 지속되는 경우에도 지속적인 감시가 필요하다. 더욱이 2일째 가장 많은 철도기상사고가 발생하므로, 기후가 변화하여 집중호우가 빈번해지고 있으므로 단 시간에 내리는 호우에도 특히 주의를 기울여야 할 것이다.

강우에 의해 발생한 철도기상사고가 주로 어떠한 강우강도와 누적강우량에 의해 사고가 발생하였는지 알아보기 위하여 사고 당시의 시간강우량과 그 시간까지의 누적강우량을 산포도 형식으로 나타내었다(그림 1). 그 결과 본 연구기간동안 누적강우량이 100mm 이하로 나타난 경우가 전체 사고의 45.5%를 차지하였으며, 시간강우량은 대부분 10mm/hr 이하로 나타났다. 이처럼 시간강우량은 사고발생 시점에 따라 뚜렷한 차이는 알 수 없었으나, 누적강우량이 300mm까지 증가하는 경우 시간강우량도 증가하였고 그 이후 감소함을 알 수 있다.

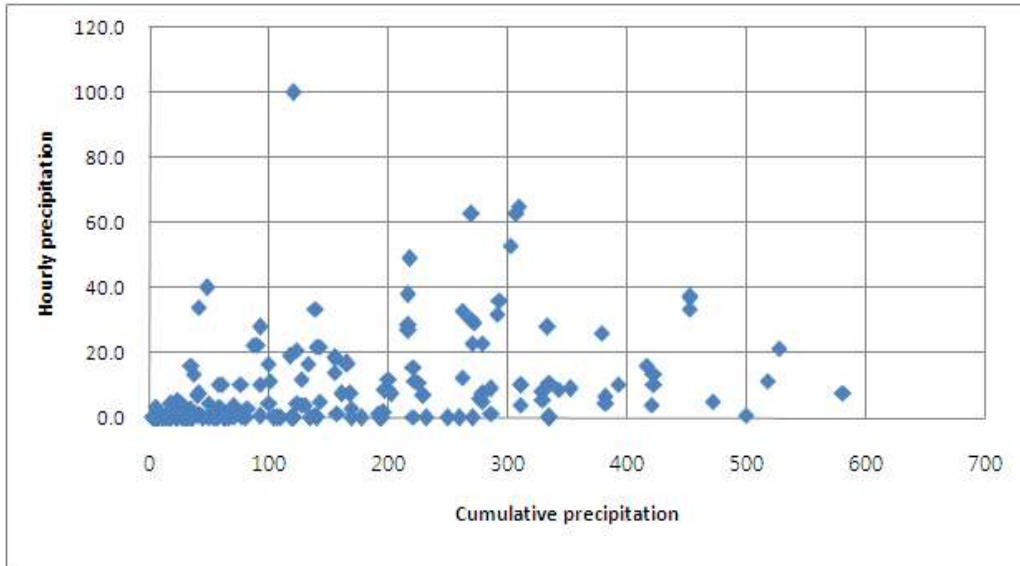


그림 1. 강우에 의한 철도사고에 대한 사고당시 강우량과 누적강수량에 관한 분포도

따라서 철도기상사고와 강우량사이의 관계를 살펴본 결과 강우지속일이 2~4일사이인 경우 대부분의 사고가 발생하였으며, 특히 2일째 가장 많은 철도기상사고가 발생하였다. 누적강수량이 100mm 이하이며, 사고 당시 시간강우량이 10mm/hr 이하인 사고의 경우가 45.5%를 차지하였고 누적강수량이 300mm 까지 증가함에 따라 시간강우량도 증가하였고, 그 이후 감소하는 경향을 나타내었다.

3.3.2 철도기상사고의 종류와 원인

선행조사 분석결과, 강우에 의해 발생한 철도기상사고가 가장 많았는데, 그 종류를 살펴보면, 열차탈선, 직무부상, 급전장애, 선로장애, 차량탈선, 신호장애, 열차지연이 주로 발생하였고, 그 중 가장 높은 빈도를 나타내는 사고는 선로장애로 146회 발생하였다. 선로장애를 일으킨 2차적인 원인이 교각붕괴 1회, 교각유실 1회, 궤도매몰 17회, 기초세굴 1회, 낙석 38회, 낙석우려대기 1회, 노반유실 38회, 노반침하 3회, 담전도 2회, 도상유실 1회 산사태 11회, 선로침수 22회, 수목전도 8회, 장비전도 1회 전주전도 1회를 나타내었다. 두 번째로 높은 빈도를 나타낸 것은 열차지연으로 29회이었으며, 2차 원인은 공전이 28회, 신호장애 1회로 나타났다.

이러한 사고를 일으키는 2차적인 원인을 분류해보면, 낙석이 가장 많은 40회(20.0%)이었으며, 노반유실은 39회(19.5%)로 두 번째로 높은 빈도를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 높은 발생 빈도를 나타내는 낙석과 노반유실에 대한 시간강우량과 누적강수량 사이의 관계를 분석하였다.

3.3.2.1 낙석(falling rocks)

낙석의 발생 조건을 알아보기 위하여, 시간강우량과 누적강수량, 누적강수량과 강우지속일수사이의 관계를 분석해보았다. 그 결과, 낙석은 누적강수량이 10mm/hr 이하로 나타나 강우강도나 누적강수량에 크게 의존하고 있지 않음을 알 수 있었다. 이는 우리나라의 지형의 대부분이 산지지형으로 계곡사이에 철도가 부설되고 있기 때문에 적은 강우량에 의해서도 낙석이 발생하고 있음을 알 수 있다.

3.3.2.2 노반유실(collapsed roadbed)

노반유실이 2차적 원인이 되어 발생하는 철도기상사고는 본 연구기간동안 총 39회 발생하였으며, 누적강수량이 10mm이하에서 발생한 경우가 2회 있었다. 이는 자료의 오류에 의한 것으로 판단하여 제외시키고, 사고당시의 시간강우량과 누적강수량 사이의 관계를 분석해보았다. 그 결과 시간강우량에 관계없이 누적강수량이 70mm이상에서 노반유실이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 그 이상에서는 시간강우

량이 많아질수록 누적강우량도 많아져 사고 발생 시점이 달라지고 있음을 알 수 있다.

또한 노반유실의 74%가 강우지속일수가 2~4일 인 경우에 발생하며, 강우지속일수가 늘어남에 따라 누적강수량도 증가하여 노반유실의 가능성이 커지고 있음을 알 수 있다. 특히 누적강수량이 300mm 이상이 될 경우 강우지속일수와 관계없이 노반유실이 발생하였음을 알 수 있다.

3.4. 노반유실 발생과 강우량의 변화

앞서 살펴본 바와 같이, 노반유실은 시간강우량과 누적강우량에 따라 발생 가능성이 달라지므로, 노반유실에 대해 사고시점을 기준으로 매시간 강우량의 변화를 살펴 철도기상사고의 발생시점의 강우패턴과 종관기상상태를 비교해 보고자 한다.

이를 위해서 강수로 인한 노반유실 사례를 세밀히 조사하였는데, 총 39회 사례 가운데 1998년 8월 6일(3사례), 1998년 8월 16일(2사례), 2001년 7월 14일(4사례)은 인접한 지역에서 비슷한 시간대에 사고가 발생하였다. 이 경우 주변기상관측 자료는 동일한 지점의 자료를 사용하기 때문에, 하나는 사례로 간주한다. 또한 2003년 7월 9일은 앞 절에서도 언급하였지만, 측정된 강우자료의 이상으로 분석에서 제외하였다. 2006년 11월 2일은 강수에 의한 노반유실이 기록되어 있으나, 실제 사고 당일과 이전 시간에서 강수가 발생하지 않았고, 이날의 기상상태가 맑음으로 나타나기 때문에 이를 비로 인한 노반유실이라고 판단할 수 없어 추가 분석에서는 제외하였다. 따라서 노반유실이 강수에 의해 발생하는 사례는 총 31회로 이들을 대상으로 분석을 실시하였다.

3.4.1 노반유실에 따른 강우패턴

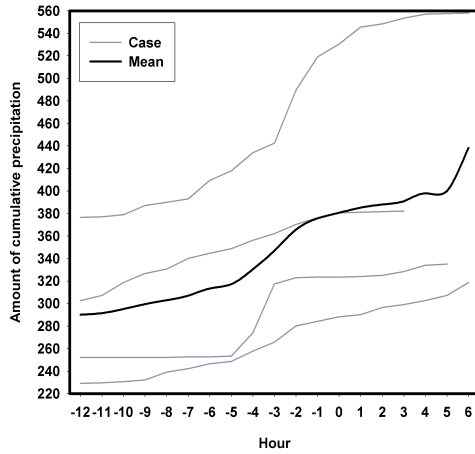
강수에 의한 노반유실이 일어난 31개 사례를 대상으로 사고가 발생하는 시점을 0으로 두고 사고가 발생하기 전 12시간, 사고가 발생한 이후 6시간에 대한 누적 강수량을 살펴보았다. 그 결과 본 연구에서는 누적강수량의 시간별 변화 패턴에 따라서 총 4개의 group으로 분류하였고, 그 결과는 그림 2와 같다. Group I, II, III, IV는 각 4개, 7개, 5개, 15개의 사례가 포함되었다.

각 Group 별 강수의 지속시간을 살펴보면, Group I 과 II의 경우는 사고가 발생하기 전 20~40 시간 혹은 그 이상의 전 시간대부터 강우현상으로 누적강수량이 발생하였다. 반면에 Group III과 IV의 경우 사고발생 전 20시간 이하의 시간동안 누적강수량이 발생한 경우, 즉 단시간 내에 내린 강수에 의해서 노반유실이 일어난 사례이다.

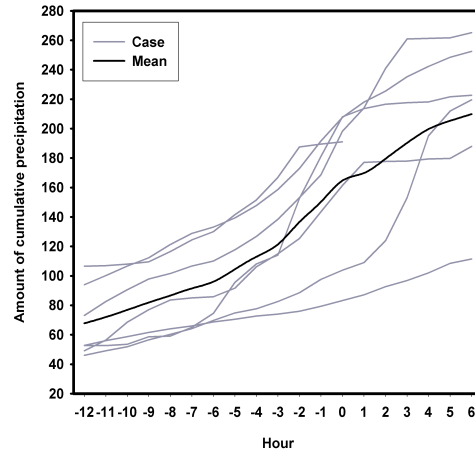
그룹별 강우가 발생할 경우 누적강수량 상태를 조사하여 1차 변곡점이 나타나고, 시간당 강우량의 변화를 살펴 10mm/hr 이상 차이가 날 경우 철도기상사고를 예측하고 운행 주의 및 속도제한을 시행하는 것이 바람직하다. 15mm/hr 이상 시간강우량이 전 시간에 비해 차이가 날 경우 3~4시간 이후 철도기상 사고 발생 가능성이 있으므로 운행정지를 심각하게 고려해야 한다.

3.4.2 노반유실에 따른 종관기상분석

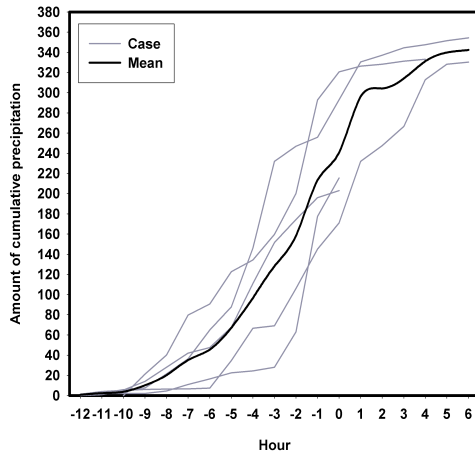
강수에 의한 철도기상사고는 종관일기도 상에서 사례 모두, 강우 패턴은 Group III에 속하는 것이었으며, 모두가 단시간 집중호우를 예측할 수 있는 종관기상 상태를 나타내었다. 기상청 일기예보를 참조하고 철도공사 내 기상관련 전문가가 수시로 일기도를 확인하고 실시간 측정되어지는 시일기도를 확인하고 실의 변화추이를 살펴 열차운행에 이용한다면, 일본의 조기지진경보시스템과 같이 사전에 철도 운행 정지 및 속도규제를 수행할 경우 철도기상사고로 인한 인명과 재산상의 피해를 최소화 할 수 있을 것이다.



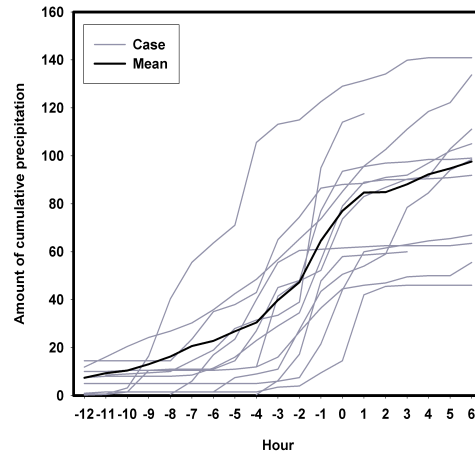
Group I



Group II



Group III



Group IV

그림 2. 1996년부터 2008년까지의 철도사고가 발생하기 전과 후의 누적 강수의 변동 분포 유형

4. 결론 및 제언

향후 기후변화에 따른 계절성 집중호우와 더 강한 태풍의 발생이 예상되는 만큼 기상에 대한 정확한 예보와 기상정보의 신속한 전달은 사전 방재활동을 강화하고 노선별로 발생할 수 있는 자연재해에 대한 방재계획이 수립되어야 한다.

그러나 현재 한국철도공사의 철도강우자동경보시스템의 효율성은 그리 높지 않은 편이었으며, 자료의 신뢰성 및 타당성을 갖기 어려우므로 철도공사 내에 방재기상관련 전문가를 두어 장비 관리와 자료의 유효성과 신뢰성 검증이 이루어질 필요가 있다.

철도기상사고 가운데 강수(강우, 강설, 안개, 해빙, 이슬, 해일)에 의한 피해는 전체 439건 중 281건으로 64.0%를 차지하고 있다. 강수 중에서도 강우에 의한 피해가 전체 71%를 차지하고 있으며, 선로장애가 148건으로 73.5%로 가장 많이 발생하였다. 사고 발생에 가장 많은 영향을 준 강우 지속일은 2일에서 78회가 발생하여 높은 사고 발생빈도를 나타냈다. 다음으로 강우지속일이 3일인 경우 50회의 강우로 인한 사고가 발생하였다. 그러나 전체 누적 강수량이 300mm이상인 경우는 강우의 지속일과 관계없이 사

고가 발생함을 알 수 있었다.

강우에 의한 철도기상사고의 원인은 낙석이 가장 높은 빈도인 40회를 나타냈으며, 노반유실, 공전, 선로침수 순으로 나타났다. 이 중 노반유실은 누적강우량이 70mm이상에서 발생하고 있으며, 시간강우량과 강우지속일수가 늘어남에 따라 누적강우량도 많아져 사고 발생 시점이 달라지고 있다. 특히 누적강우량이 300mm 이상이 될 경우 강우지속일수와 관계없이 노반유실이 발생하였으며, 강수일수가 2~4일 지속될 경우 노반유실의 발생빈도가 증가한다.

노반유실을 일으키는 강우패턴은 크게 4가지 그룹으로 구분할 수 있으며, 그룹별 강우가 발생할 경우 누적강우량 상태를 조사하여 1차 변곡점이 나타나고, 시간당 강우량의 변화를 살펴 10mm/hr 이상 차이가 날 경우 철도기상사고를 예측하고 운행 주의 및 속도제한을 시행하는 것이 바람직하다. 15mm/hr 이상 시간강우량이 전 시간에 비해 차이가 날 경우 3~4시간 이후 철도기상사고 발생 가능성이 있으므로 운행정지를 심각하게 고려하여야 할 것이다.

또한 강우에 의한 철도기상사고는 종관일기도 상에서 사례 모두 강우 패턴은 Group III에 속하는 것이었으며, 모두가 단시간 집중호우의 예측을 할 수 있는 종관기상 상태를 나타내었다. 기상청 일기예보를 참조하고 철도공사 내 기상관련 전문가가 수시로 일기도를 확인하고 실시간 측정되어지는 시간강우량과 누적강우량의 변화추이를 살펴 열차운행에 이용한다면, 일본이 조기지진경보시스템과 같이 사전에 철도 운행정지 및 속도규제를 수행할 경우 철도기상사고로 인한 인명과 재산상의 피해를 최소화 할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0092800).

참고문헌

1. 기상청, 통계시스템
2. 박종길, 김병수, 정우식, 김은별, 이대근, “한반도에 영향을 주는 태풍의 통계적 특성 변화”, 한국기상학회 대기지, 16권 1호, pp.1-17, 2006.
3. 박종길, 정우식, 최효진, “자연재해저감을 위한 한반도 피해 취약성 분석 : 공공시설피해를 중심으로”, 한국환경과학회지, 17권 4호, pp.413-422, 2008.
4. 정우식, 박종길, 김은별, 송정희, “고온건강경보시스템 기준 설정에 관한 연구(II) - 설정 기준 개선-”, 한국환경과학회지, 18권 7호, pp.781-796.
5. 한국철도공사, 철도사고사례집, 한국철도공사, 제11집, 2007.
6. 한국철도공사, 철도운영정보시스템(KROIS), 2006.