

불포화토이론을 이용한 강우시 열차운전규제기준 개발

The Development of Rail-Transport Operation Control based on Unsaturated Soil Mechanics Concept

김 현 기* / 신 민 호** / 김 수 삼***
Kim, Hyun Ki / Shin, Min Ho / Kim, Soo Sam

Abstract

Infiltration of rainfall causes railway embankment to be unstable and may result in failure. Basic relationship between the rainfall and stability of railway embankment is defined to analyze the stability of embankment by rainfall. An experimental study for defining of infiltration rate of rainfall into slope is conducted in the lab. The results of Rainfall infiltration show that rainfall infiltration is not equal to infiltration as like reservoir because rate of rainfall infiltration is controlled by slope angle. Based on these results, boundary condition of rainfall is altered and various numerical analysis are performed. The variation of shear strength, the degree of saturation and pore-water pressure for railway slope during rainfall can be predicted and the safety factor of railway slope can be expressed as the function of rainfall amount, namely rainfall index. Therefore, it is judged that this rainfall index can be a good tool for the rail-transport operation control.

Key words : rail-transport operation control, rainfall index, rainfall infiltration, stability of railway slope, train speed

요 지

강우침투는 철도성토사면의 불안정성을 유발하는 요인으로 작용하여 때때로 파괴의 결과로 나타나게 된다. 강우량과 철도성토사면 안정성과의 기본적인 상관성이 강우에 의한 성토사면의 불안정성을 분석하여 제안되었다. 사면내부로의 강우침투속도를 규명하기 위하여 실내시험을 수행하였으며, 강우침투실험결과에서 강우침투량은 강우침투속도가 사면경사에 의해 지배되기 때문에 저수지 등의 경우에 있어서의 침투와는 상당히 다르다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과에 근거하여 강우의 경계조건을 변화시켜 적용한 후, 다양한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 강우시 철도 성토사면의 전단강도, 포화도 그리고 간극수압의 변화를 예측할 수 있었으며, 철도사면의 안전율이 강우량-강우지수의 함수로서 표현될 수 있었다. 따라서 이 강우지수가 강우시 열차운전규제기준을 설정하기 위해 유용함을 밝혔다.

핵심용어 : 강우시 열차운전규제기준, 강우지수, 강우침투, 철도사면, 안정성, 열차속도

1. 서 론

철도는 공공운송기관으로서 안전하고, 안정된 운송의 확보를 책임지고 있다. 하지만, 우리나라의 열악한 국토조건 및 자연조건에 의해 태풍과 장마 등의 호우로 인한 철도연변의 성토·절취사면 등의 붕괴가 자주

발생하여 철도의 운송을 저해하고 있다. 이와 같은 강우에 기인한 재해로부터 안전한 운송을 확보하기 위해서 위험개소를 추출하여 검사하고, 대책공의 실시와 동시에 강우에 의한 재해사고의 방지를 위해 강우량에 의한 운전규제와 붕괴검지 등이 적절히 시행되어야 한다. 강우시 사면재해는 방재분야의 연구개발에 의해

* 정회원 한국철도기술연구원 주임연구원
** 정회원 한국철도기술연구원 수석연구원
*** 정회원 한양대학교 토목환경공학과 정교수

그 건수가 감소하고 있지만, 열차의 고속화, 고밀도화가 요구되어지는 현실을 감안하면 보다 고도의 안전대책이 필요로 된다.

현재 국내외에서 적용되고 있는 강우시 열차운전규제는 강우량과 재해의 상관성분석에 의한 기준, 사면제해와 한계우량과 실효우량 등의 통계해석모델과 같은 경험적인 방법에 주로 근거하고 있다. 이와 같은 통계해석모델은 정확한 정보를 갖는 다수의 자료가 확보되어야만 유효하므로 제한된 정보를 갖는 지역에서는 적용하기 어려움이 있으며, 공학적인 안정해석이 뒷받침되지 않아 예기치 않은 재해발생의 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 열차의 고속화, 고밀도화에 부응하며, 예기치 않은 재해발생을 최소화하기 위해 불포화토질역학 이론에 근거한 강우재현 침투실험을 통해 사면경사변화에 따른 강우침투속도를 예측하고, 수치해석을 이용한 철도사면의 안정성 해석으로 공학적 기반을 갖는 강우시 열차운전규제기준의 설정을 위한 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 강우재현 사면침투실험

현재 활용하고 있는 흐름/침투방정식은 강우침투가 사면의 경사각에 따라 변화됨을 고려할 수 없어 사면경사각 0인 경우에 적용이 가능하다. 또한 수치해석 프로그램의 강우침투조건은 단위유량으로 경사면에 부여해 경사면에 직각인 방향으로 침투가 발생토록 하여 이에 따라 강우침투깊이의 과대평가가 발생할 여지가 있다. 이는 사면안정해석에 중대한 오차를 발생시킬 수 있으므로 이를 보완할 강우침투경계조건 재설정 필요하다(그림 1). 이를 위해 강우재현 사면침투모델시험을 일차원 침투실험장치를 이용해서 수행하여, 강우침투시 간극수압 및 체적함수비 변화를 직접 측정하여

사면경사변화 및 강우강도 변화에 따라 사면내부 특성변화를 파악코자 하였다.

2.1 이론적 배경

포화흐름과 불포화흐름을 모두 고려할 수 있으며, Darcy의 법칙을 기본으로 한 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = \frac{\partial (V_w/V)}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 h : 전수두

k_x, k_y : x, y 방향 투수계수

q : 외부에서 공급되는 수량

V_w/V : 체적함수비

t : 시간

식 (1)은 정상상태 조건일 때, 시간에 대하여 유입되는 물의 체적과 유출되는 체적이 같으므로 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = 0 \quad (2)$$

한편, 식 (1)을 비정상 상태의 흐름에 관한 지배방정식으로 변환시키면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = g \rho m_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

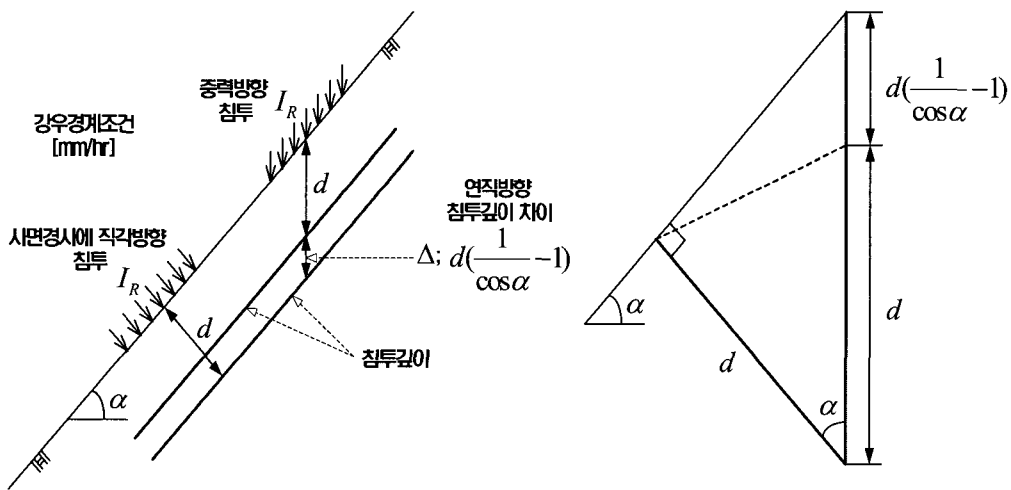


그림 1. 강우침투현상 개념도

여기서 m_2^w : 토질함수특성곡선의 기울기

$$Y = [a \times \ln(x) + b] \times t \quad (4)$$

2.2 실험장치 및 종류

습윤과정과 배수과정에서 흡수력과 함수비를 측정할 수 있는 계측시스템을 포함한 Perspex Column을 제작하여 실험을 수행하였다. 전체적인 구성도는 다음의 그림 2에 보였으며, 실험조건은 표 1과 같이 설정하였다.

여기에서 Y : 강우침투깊이(cm)

x : 강우강도(mm/hr)

t : 강우지속시간(sec)

a, b : 계수

2.3 실험결과 및 분석

사면경사 및 강우강도를 변화시켜 진행한 실험결과에서 강우강도의 증가는 체적함수비의 포화상태 도달 시간을 감소시켜 모든 실험의 경우에 있어 강우침투속도가 증가되는 경향을 확인할 수 있었으며, 시간에 따른 토주내부로의 강우침투깊이를 분석해 본 결과, 경사각이 증가함에 따라 포화상태 도달시간이 감소함과 동시에 동일한 경사각일지라도 강우강도가 큰 경우의 도달시간이 빠르게 감소하는 경향을 파악할 수 있다(그림 3). 또한 실험결과를 시간에 대한 침투깊이로 산정하면, 강우침투속도를 계산할 수 있다. 본 강우침투속도는 불포화영역이 포화영역으로 전이되는 순간의 토질 매체내부의 변화는 무시하고, 전체적으로 침투되는 속도를 의미한다. 따라서 강우침투속도의 계산을 위해 토주 높이를 이동시간으로 나눠 값을 얻었다. 그림 4은 강우강도에 따른 침투속도를 추세식과 함께 제시하였으며, 실험결과를 이용한 경험식으로 다음과 같은 식을 제안할 수 있다.

계수 a, b 는 사면의 경사각과 밀접한 관계를 가지며,

$$a = -0.0000339 \times x' + 0.0019493 \quad (5)$$

$$b = 0.0000914 \times x' - 0.0040290 \quad (6)$$

여기에서 x' : 사면경사각(도.))

와 같이 나타낼 수 있다.

일반적인 강우상황에서 그림 1과 같은 중력방향으로 침투가 발생할 것이다. 동일 강우강도 I_R 을 사면에 적용하면, 침투깊이가 동일하더라도 사면에 직각방향 침투인 경우와 중력방향 침투인 경우는 침투방향에 따른 차이가 발생한다. 이를 고려해서 침투깊이를 산정하여 경험식과 비교 분석하였다(그림 5).

$$\Delta = d \times \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad (7)$$

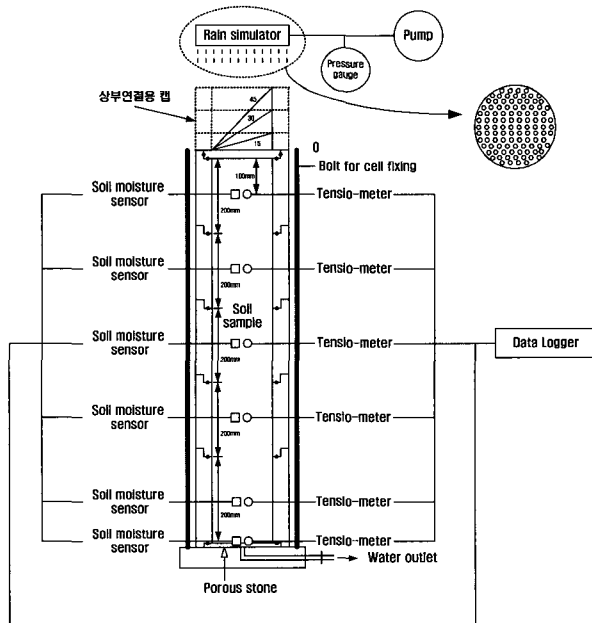


그림 2. 강우재현 실험기 구성도

표 1. 실험조건

| 대상시료 | 강우강도 | 사면경사 | 기타 | |
|---------------|---------|------|-------------|-----|
| 가평지역 화강풍화토 | 20mm/hr | 0° | 하부 배수 조건 | |
| | | 15° | | |
| | | 30° | | |
| | 30mm/hr | 45° | | |
| | | 0° | | |
| | | 15° | | |
| | 40mm/hr | 30° | | |
| | | 45° | | |
| | | 0° | | |
| | | | | 15° |
| | | | | 30° |
| | | | | 45° |

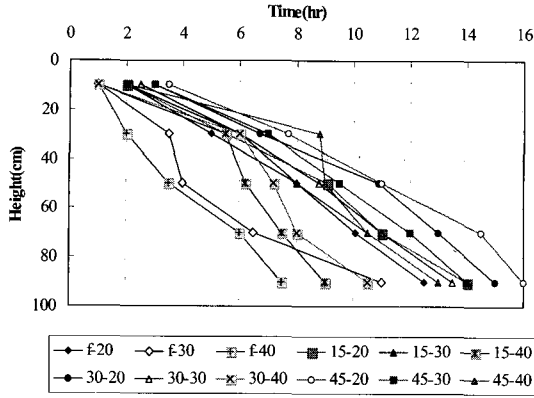


그림 3. 강우강도 및 경사변화에 따른 깊이별 포화상태 도달시간

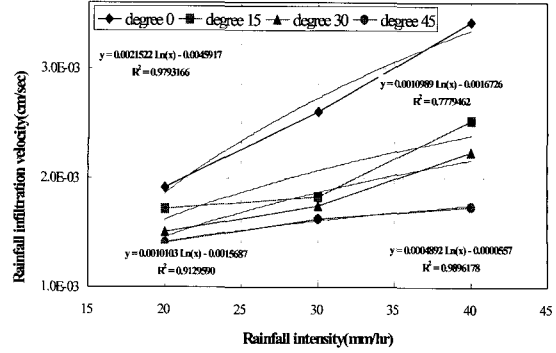


그림 4. 강우강도에 따른 강우침투속도

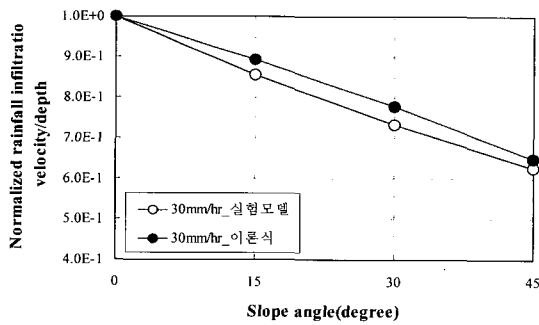


그림 5. 사면 경사각 변화에 따른 강우침투깊이(강우강도 30mm/hr)

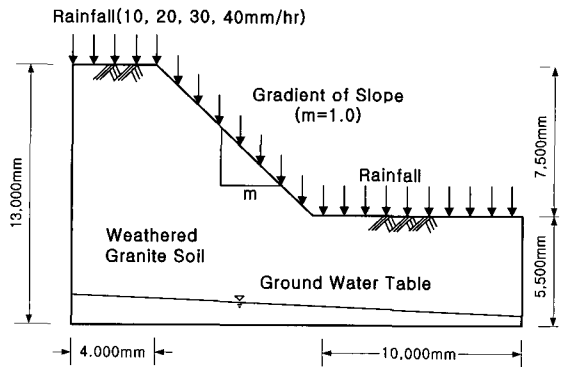


그림 6. 강우침투 및 철도사면안정해석 단면

여기에서,

Δ : 연직방향 침투깊이와 중력방향 침투깊이 차이 (cm)

d : 경사면에 직각으로 침투할 때의 침투깊이(cm)

d' : 사면에서 중력방향으로 침투할 때의 침투깊이 (cm)

α : 사면경사각(degree)

즉, 강우에 의해 실제로 발생하는 침투깊이는

$$d' = d - \Delta = d - \left[d \times \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

로 된다.

3. 수치해석

3.1 해석단면 및 조건

강우침투에 의한 철도사면의 안정성을 검토하기 위해 대표 단면을 설정하여 수치해석을 수행하였다. 해석의 용이성을 위해 지반은 화강풍화토로 균질하고, 지반의 투수계수는 수평방향 및 연직방향이 동일한 것으로

가정하였으며, 지하수위는 불투수층으로부터 좌측 1.5m, 우측 0.5m 상부에 존재한다(그림 6).

강우침투해석에 있어 강우경계조건은 실험결과에 의해 부여하였으며, 이로 인해 평지 및 경사면의 강우조건이 다르게 설정되었다. 한편 사면안정해석에 있어서 열차하중의 경계조건은 성토사면의 안정해석을 위한 국내 1·2급 선로조건을 적용하고, 표준하중에 근거하여 속도충격률에 의한 변동분을 고려함에 의해 동적하중을 계산하여 적용하였다.

3.2 해석결과

강우지속시간 및 누적강우량에 따른 철도사면의 안전율은 최대 0.5정도의 감소를 보이고 있으며, 강우강도 및 누적강우량의 증가는 안전율의 감소를 유발하고 있음을 알 수 있다(그림 7, 8). 사면에 재하되는 하중의 변화를 유발하는 열차속도변화에 의한 해석결과에서도 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량이 증가함에 따라 안전율이 감소되는 경향을 보이고 있으며 속도 감속에 의해 동일한 강우조건하에서 안전율이 커지는 것을 확인할 수 있다(그림 9). 그림 10은 임의의 강우강도로

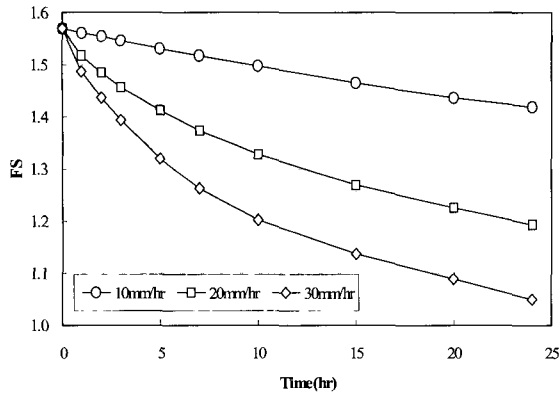


그림 7. 강우지속시간 변화에 따른 철도사면안전율

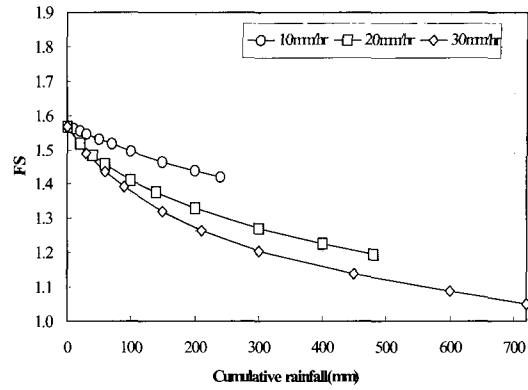


그림 8. 누적강우량 변화에 따른 철도사면안전율 변화

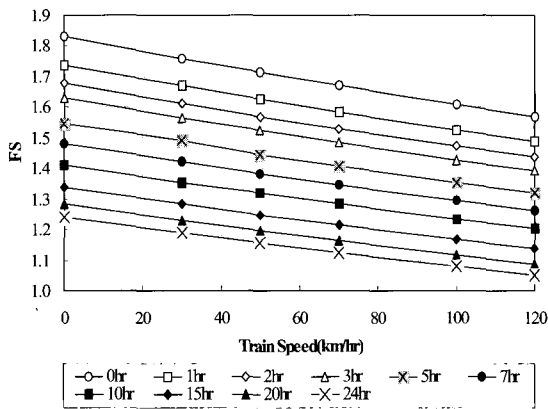


그림 9. 열차속도변화에 따른 철도사면안전율 변화 (강우강도 30mm/hr)

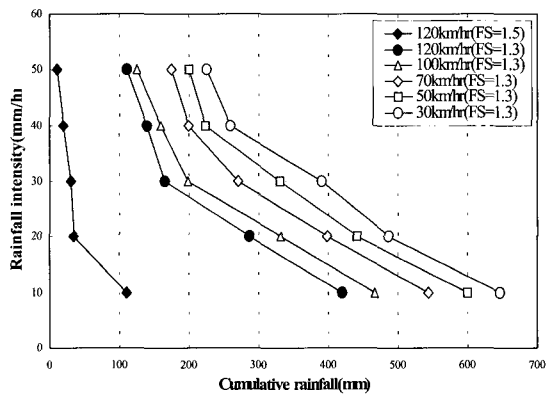


그림 10. 열차속도변화에 의한 철도사면 안전율 확보(강우강도, 누적강우량)

임의 지속시간동안 내린 강우에 대하여 열차속도에 따른 안전율 확보 영역을 보인 것으로 각각의 선 아래 영역에 존재하는 강우에 대해서는 열차의 안전이 확보 되는 것을 알 수 있다.

4. 강우시 열차운전규제기준 개발

철도사면으로의 강우침투는 사면의 안전율 저하를 동반하게 되며, 열차의 운행속도 감소는 충격력의 감소로 이어져 결과적으로 사면에 재하되는 하중 감소로 나타나 안전율 증가를 유발한다. 이에 본 연구에서는 강우조건항과 열차속도(하중)항의 두가지 조건을 조합하여 강우시 열차운행기준을 설정코자 하였다.

강우침투시 철도사면의 안전율 변화를 강우강도와 지속시간, 그리고 열차속도의 함수로 분석하여 열차운전규제의 가능성을 검증하기 위해 모식도를 작성하였다. 그림 11에서 $FS = \beta$ 를 기준안전율로 정할 때, $FS > \beta$ 이면 열차는 정상운행하며, $\beta < FS \leq \beta_1$ 로 기준안전율 이하로 되면 열차운행상 위험이 발생할 수

있으므로 경보를 발령하는 단계로 하며, $FS < \beta_1$ 이하로 되면 열차속도를 감속시켜 $FS = \beta$ 의 안전율을 확보할 수 있도록 한다. 하지만 열차최소속도에 의해서도 즉 최소동적하중 재하상태에서도 $FS = \beta$ 의 확보가 불가능하면 열차의 운행을 중지한다.

이상과 같은 개념에 의거하여 본 연구에서는 철도사면안전율인 1.5를 기준으로 다음의 표 2에 해당하는 경우의 강우시 열차운전규제를 작성하였다. 기본가정으로 열차의 정상운행 속도 120km/hr에서 강우에 대한 성토사면의 안전율이 1.5이상인 확보되면 열차는 정상운행되며, $1.5 > FS \geq 1.3$ 의 구간에서는 열차에 경보를 발령하여 주의를 기할 수 있도록 하고, $1.3 > FS$ 면 열차의 운행속도를 감속시켜 사면에 작용하는 하중을 작게 함에 의해 $FS = 1.3$ 이 확보될 수 있도록 감속운행을 실시하도록 하였다. 강우강도와 강우지속시간이 계속 증가하여 최소열차운행속도 30km/hr의 재하하중에서도 안전율 $FS = 1.3$ 를 만족시키지 못하면 열차는 운행정지를 시행하는 것을 가정하였다. 이와 같은 가정을 해석

표 2. 강우시 철도사면안전율과 열차운전규제기준(열차속도 120km/hr)

| 철도연변 사면의 안전율 | 강우시 열차운전규제기준 |
|---------------------------|---|
| $FS \geq 1.5$ | 정상운행 |
| $1.5 > FS \geq 1.3$ | 경보발령 |
| $FS < 1.3$ | 열차속도규제 : 안전율이 본 구간에 들어오면, $FS=1.4$ 가 확보되도록 열차 감속운행 |
| 열차속도 30km/hr에서 $FS < 1.3$ | 열차운행중지 |

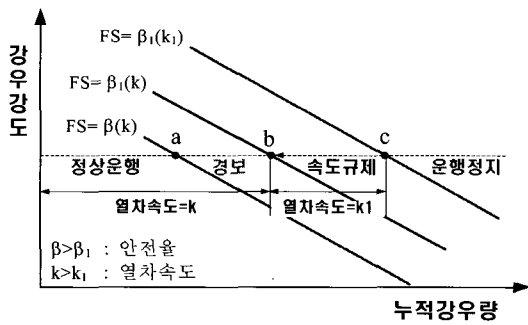


그림 11. 열차운전규제기준에 대한 모식도

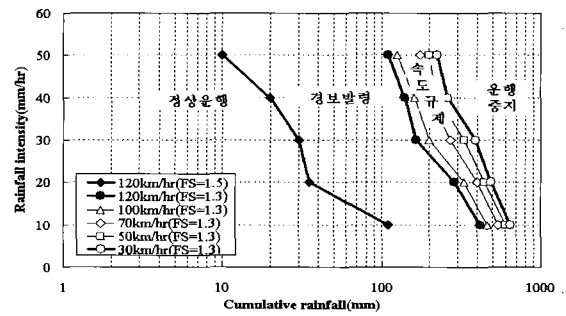


그림 12. 강우시 열차운전규제기준 (강우강도, 누적강우량)

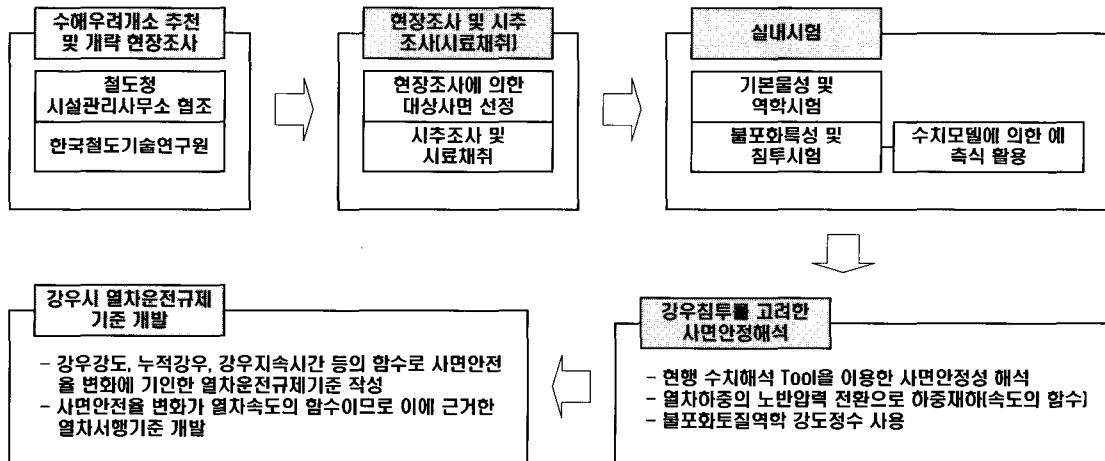


그림 13. 강우시 열차운전규제기준 작성을 위한 추진체계

결과와 연계하여 그림 12에 나타냈으며, 강우시 철도사면의 안전율 변화와 속도에 의한 하중을 비교하여 열차운전규제를 실시함을 알 수 있었다.

이상과 같이 제안된 강우시 열차운전규제는 국지적인 것으로 국내 철도 전반을 아우르는 기준으로 제시되기 위해서는 다음과 같은 기본적인 문제 해결이 선행되어야 한다.

- ① 전국 철도시설관리사무소 관내 위험사면 추출
 - ② 위험사면 현장조사
 - ③ 운전규제를 위한 분석 대상 사면 선정
 - ④ 대상사면 정밀조사 및 시추조사(시료채취)
 - ⑤ 실내시험 및 수치해석
 - ⑥ 지역별 열차운전규제 작성
- 이상의 절차를 그림 13에 나타내었다.

5. 결 론

철도의 안전운행을 위한 3가지 주체는 재해우려시설 물을 추출하고 건전도를 평가하는 검사와 방호/대책공 설치 및 재해검지장치 설치 등의 방호대책 그리고 자연재해에 대한 열차운전규제기준을 들 수 있다.

본 연구에서는 강우시 열차의 운행안전을 위해 불포화토이론을 도입하여 강우침투실험 결과를 이용해 강우시 사면내부로의 강우침투속도 및 깊이를 경험식으로 제안하고, 이를 수치해석시에 사면경사각을 고려한 경계조건으로 설정하였다. 또한 철도사면의 안전율 변화를 강우강도와 누적강우량의 함수로 예측함과 동시에 열차하중을 속도의 함수로 적용하여 강우시 안전확보를 위한 열차의 운전규제가 가능함을 확인할 수 있었으며, 이를 이용하여 지역·토질 특성을 반영한 공학적 기반을 갖는 열차운전규제를 설정할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술혁신 5개년 사업의 일환으로

건설교통부의 연구지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 신민호 외(2003) 철도시설물안정성강화기술개발, 건설교통부, 건설교통기술혁신사업 4차년도 보고서
2. Brook, R. H. and A.T. Corey(1964) Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
3. Childs, E. C. (1940) The use of soil moisture characteristics in soil studies. Journal of Soil Science, Vol. 50, pp. 239-252.
4. Fredlund, D. G. and A. Xing(1994) Equations for the Soil-Water Characteristics Curve. Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 521-532.
5. Fredlund, D. G., A. Xing, and S. Huang(1994) Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the SWCC. Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 533-546.