

강우시 성토사면의 열차운전규제기준

Rail Transport Operation Control for Railway Embankment under rainfall

김현기¹⁾, Hyun-Ki Kim, 신민호²⁾, Min-Ho Shin, 최찬용¹⁾, Chan-Yong Choi

¹⁾ 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원, Senior Researcher, Railroad structure, Korea Railroad Research Institute

²⁾ 한국철도기술연구원 철도구조연구실 수석연구원, Head Researcher, Railroad structure, Korea Railroad Research Institute

SYNOPSIS : Infiltration of rainfall causes railway slopes to be unstable and may result in failure. Basic relationship between the rainfall and stability of railway embankment is defined to analyze its stability 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. And suggested rainfall index is compared with the rail transport operation control which is used in KORAIL. 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

1. 서 론

지구온난화에 의해 국내 기후는 점진적으로 아열대 기후로 변화하고 있으며, 이상기온에 따른 국지성 호우, 태풍 등이 자주 발생하여 피해를 유발하고 있다. 비탈면의 파괴는 상기 요인에 의한 피해사례 중에서 가장 높은 빈도로 발생하게 되어 도로·철도의 영업손실과 함께 국민의 인적·물적 손실을 유발하게 된다. 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 시행되어져야 한다.

강우에 의한 사면피해는 강우 개시 이후 우수의 지반 침투에 따라 함수율이 증가함에 따른 지반의 자중증가, 부의 간극수압 감소 및 겉보기 점착력 감소에 따른 지반강도 저하 등에 의해 발생하게 된다. 이 결과로 사면의 안정성을 대표하는 안전율의 감소와 파괴확률의 증가가 나타나게 되며, 최종적으로 활동파괴로 정의되는 과정을 거치게 된다. 따라서 각 단계마다의 메커니즘을 적절히 구성하여 모델화하고, 시시각각으로 변화하는 강우량에 대응한 사면안정성의 변화를 파악할 수 있어야 그 시각의 붕괴위험성이 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 일반적으로 강우시의 사면안정성은 포화·불포화 침투류 해석과

원호활동해석 등의 사면안정해석을 결합한 연계해석에 의해 평가된다.

현재 국내외에서 적용되고 있는 강우시 열차운전규제는 강우량과 재해의 상관성분석에 의한 기준, 사면재해와 한계우량과 실효우량 등의 통계해석모델과 같은 경험적인 방법에 근거하고 있다. 이와 같은 모델은 정확한 정보를 갖는 다수의 자료가 확보되어야만 유효하며, 공학적인 안정해석이 뒷받침되지 않아 예기치 않은 재해발생의 가능성성이 있다. 따라서 본 연구에서는 열차의 고속화, 고밀도화에 부응하며, 예기치 않은 재해발생을 최소화하기 위해 불포화토질역학 이론에 근거한 강우재현 침투실내시험을 통해 사면경사변화에 따른 강우침투속도를 예측하고, 수치해석을 이용한 철도사면의 안정성 해석으로 공학적 기반을 갖는 강우시 열차운전규제기준의 설정을 위한 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 지반내 흐름

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 나타난다.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = g\rho m_2^w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 m_2^w : 토질함수특성곡선의 기울기

2.2 강우경계조건

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 사면안정해석의 오차를 발생시킬 수 있으므로, 이를 보완할 수 있는 강우침투경계조건의 재설정이 필요하다(Fig. 1).

3. 강우경계조건 평가를 위한 실내시험

강우재현 사면침투모델시험을 일차원 침투실험장치를 이용해서 수행하여, 강우 침투시 간극수압 및 체적함수비 변화를 직접 측정하여 사면경사변화 및 강우강도 변화에 따라 사면내부 특성변화를 파악코자 하였다.

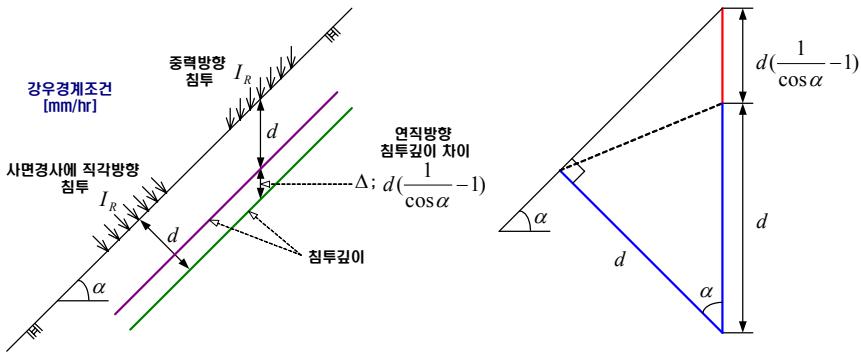


Fig. 1. Boundary condition for rainfall infiltration

3.1 실험장치 및 종류

습윤과정과 배수과정에서의 흡수력과 함수비를 측정할 수 있는 계측장치를 갖춘 강우재현 아크릴 원주형 시험기를 제작하여 본 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 1과 같이 설정하여 진행하였다.

Table 1. Testing condition

대상시료	강우강도	사면경사	기타
가평지역 화강풍화토	20mm/hr	0°	하부 배수조건
	30mm/hr	15°	
	40mm/hr	30°	
		45°	

3.2 실험결과 및 분석

사면경사 및 강우강도를 변화시켜 진행한 실험결과에서 강우강도의 증가는 체적함수비의 포화상태 도달시간을 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(Fig. 2). 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. Fig. 3은 강우강도에 따른 침투속도를 추세식과 함께 제시하였으며, 실험결과를 이용한 경험식으로 다음과 같은 식을 제안할 수 있었다.

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

여기에서 Y : 강우침투깊이(cm)

x : 강우강도(mm/hr)

t : 강우지속시간(sec)

a b : 계수

계수 a b 는 다시 사면경사각의 함수로 상관성이 높도록 추세가 가능하며,

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

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

여기에서 x' : 사면경사각(degree)

와 같이 나타낼 수 있다.

일반적인 강우상황에서 Fig. 1과 같은 중력방향으로 침투가 발생할 것이다. 동일 강우강도 I_R 을 사면에 적용하면, 침투깊이가 동일하더라도 사면에 직각방향 침투인 경우와 중력방향 침투인 경우는 침투방

향에 따른 차이가 발생한다.

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

여기에서, d : 경사면에 직각으로 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.

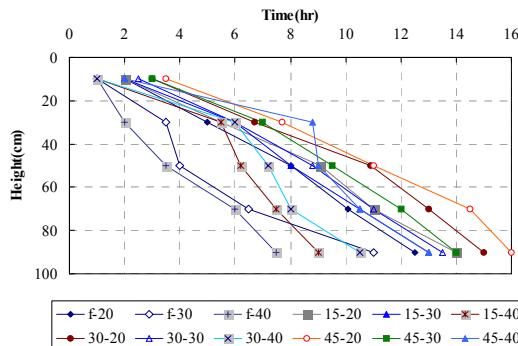


Fig. 2. Saturation time for depth with rainfall intensity and slope angle

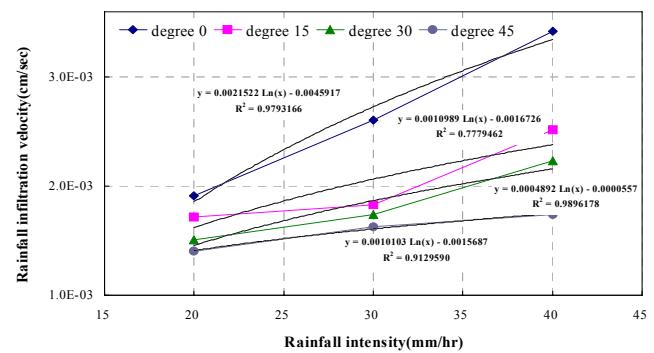


Fig. 3. Rainfall infiltration velocity with rainfall intensity

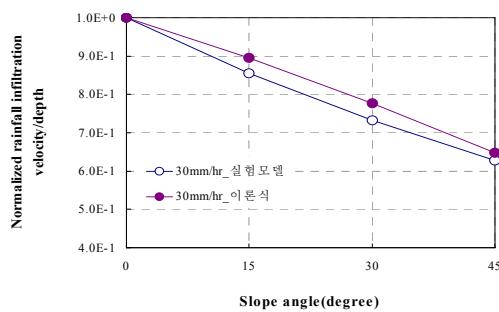


Fig. 4. Infiltration depth with slope angle(rainfall intensity 30mm/hr)

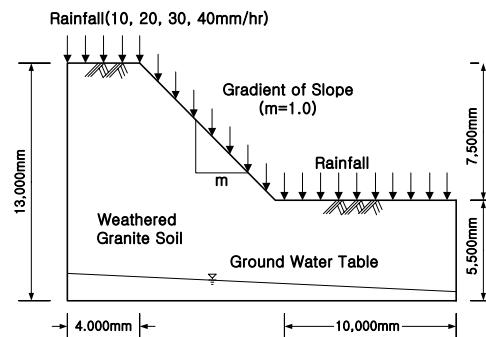


Fig. 5. Cross section of railway embankment

4. 수치해석

4.1 해석단면 및 조건

강우침투에 의한 철도사면의 안정성을 검토하기 위해 대표 단면을 설정하여 수치해석을 실시하였다. 해석의 용이성을 위해 지반은 화강풍화토로 균질하게 구성되었고 지반의 투수계수는 수평방향 및 연직 방향이 동일하다는 것을 가정하였으며, 지하수위는 불투수층으로부터 좌측 1.5m, 우측 0.5m 상부에 존재한다(Fig. 5). 강우침투해석에 있어 강우경계조건은 실험결과에 의해 부여하였으며, 이로 인해 평지 및 경사면의 강우조건이 다르게 설정되었다. 한편 사면안정해석에 있어서 열차하중의 경계조건은 성토사면의 안정해석을 위한 열차하중은 국내 1·2급 선로조건을 적용하고, 표준하중에 근거하여 속도충격률에 의한 변동분을 고려함에 의해 동적하중을 계산하여 적용하였다. 강우침투해석과 사면안정해석은 상용프로그램인 GEO-SLOPE사의 SEEP/W와 SLOPE/W를 사용하였다.

4.2 해석결과

강우지속시간 및 누적강우량에 따른 철도사면의 안전율은 최대 0.5정도의 감소를 보이고 있으며, 강우강도 및 누적강우량의 증가는 안전율의 감소를 유발하고 있음을 알 수 있다(Fig. 6, 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(Fig. 9). 한편, 강우강도 증가에 따라 안전율을 감소하고 있으며, 지속시간이 증가함에 따라 강우강도에 따른 안전율 감소율이 커지는 것을 확인할 수 있다(Fig. 10). Fig. 11은 임의의 강우강도로 임의 지속시간동안 내린 강우에 대하여 열차속도에 따른 안전율 확보 영역을 보인 것으로 각각의 선 아래 영역에 존재하는 강우에 대해서는 열차의 안전이 확보되는 것을 알 수 있다.

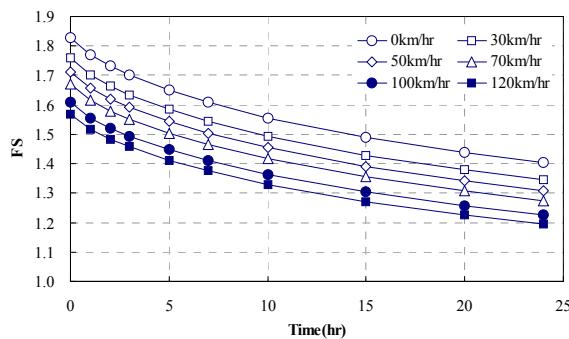


Fig. 6. Safety factor with rainfall duration time(rainfall intensity 20mm/hr)

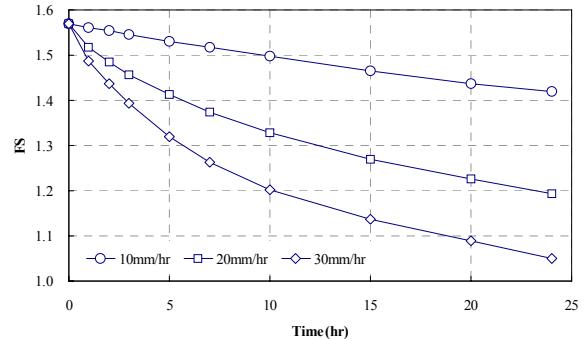


Fig. 7. Safety factor with rainfall duration time

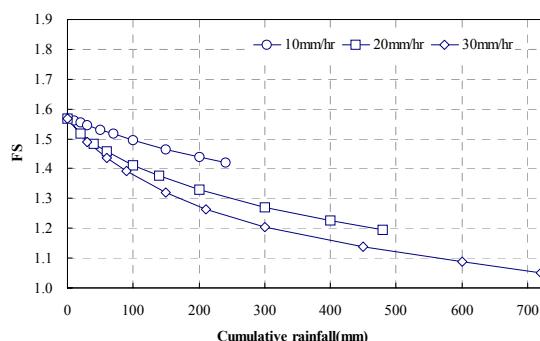


Fig. 8. Safety factor with cumulative rainfall

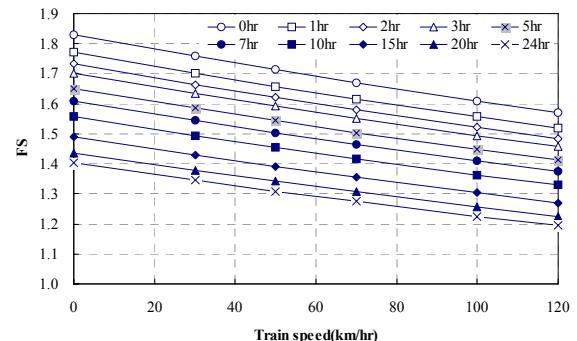


Fig. 9. Safety factor with train speed (rainfall intensity 20mm/hr)

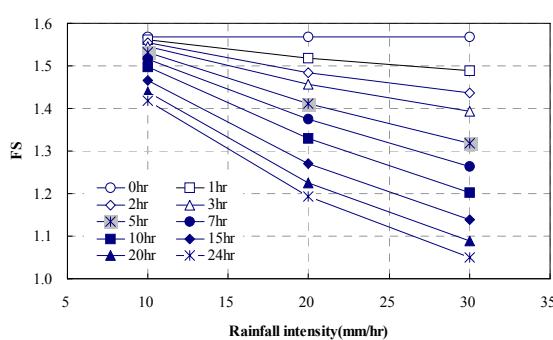


Fig. 10. Safety factor with rainfall intensity

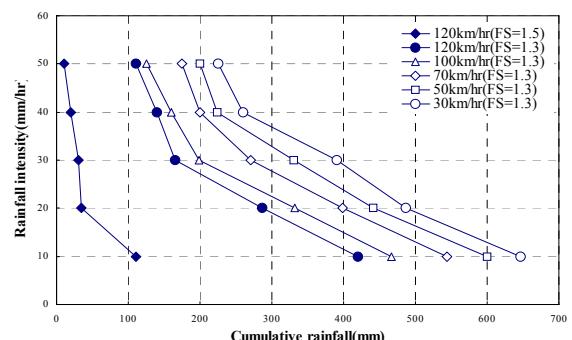


Fig. 11. Safety factor with train speed (rainfall intensity, cumulative rainfall)

5. 성토사면의 강우시 열차운전규제기준 제안

철도사면으로의 강우침투는 사면의 안전을 저하를 동반하게 되며, 열차의 운행속도 감소는 충격률의 감소로 이어져 결과적으로 사면에 재하되는 하중 감소로 나타나 안전율 증가를 유발한다. 이에 본 연구에서는 강우조건항과 열차속도(하중)항의 두가지 조건을 조합하여 강우시 열차운행기준을 설정하고자 하였다. 강우침투시 철도사면의 안전율 변화를 강우강도와 지속시간, 그리고 열차속도의 함수로 분석하여 열차운전규제의 가능성은 확증하기 위해 모식도를 작성하였다. Fig. 10에서 $FS = \beta$ 를 기준안전율로 정할 때, FS 가 β 이상이면 열차는 정상운행하며, $\beta < FS \leq \beta_1$ 로 기준안전율 이하로 되면 열차운행상 위험이 발생할 수 있으므로 경보를 발령하는 단계로 하며, FS 가 β_1 값 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(Fig. 12).

이상과 같은 개념에 의거하여 본 연구에서는 건기시 기준안전율인 철도사면안전율 1.5를 기준으로 다음의 Table 2에 해당하는 경우의 강우시 열차운전규제를 작성하였다. 기본가정으로 열차의 정상운행 속도 120km/hr에서 강우에 대한 성토사면의 안전율이 1.5이상이 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 해석결과와 연계하여 Fig. 13에 나타냈으며, 강우시 철도사면의 안전율 변화와 속도에 의한 하중을 비교하여 열차운전규제를 실시할 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 2. Safety factor and rail transport operation control under rainfall(train speed 120km/hr)

철도연변 사면의 안전율	강우시 열차운전규제기준
$FS \geq 1.5$	정상운행
$1.5 > FS \geq 1.3$	경보발령
$FS < 1.3$	열차속도규제 : $FS = 1.3$ 이 확보되도록 열차 감속운행
열차속도 30km/hr에서 $FS < 1.3$	열차운행중지

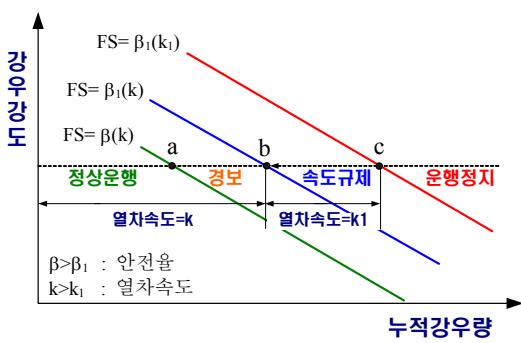


Fig. 12. Conceptual view of rail transport operation control

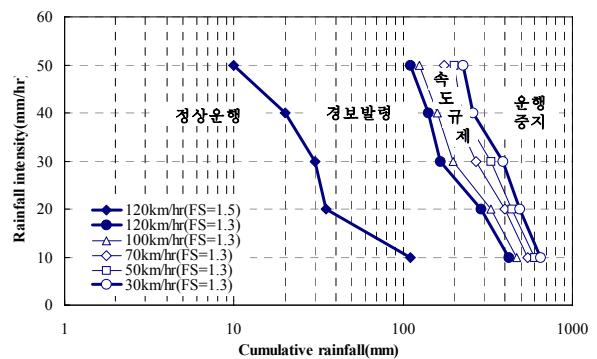


Fig. 13. Rail transport operation control(rainfall intensity, cumulative rainfall)

본 연구에서 제안된 강우시 열차운전규제기준과 현재 한국철도공사에서 ‘철도강우자동경보시스템’에서 적용하고 있는 재해이력에 근거한 기준과의 비교를 시행하였다. Fig. 14에서 재해발생이력은 한국철도공사의 강우정보시스템 구축 이후에 발생한 피해를 도시한 것이며, 굵은 실선은 각각 ‘정상운행’, ‘주의운

전’, ‘열차서행’, ‘열차정지’를 나타낸다. 현재기준과 본 연구에서 제안된 기준을 비교하면, ‘주의운전’에서 유사한 결과가 제시되고 있으며, ‘열차서행’과 ‘열차정지’의 기준도 상당히 유사한 결과를 보이고 있다. 다만, 시간우량을 본 연구에서는 50mm/hr를 최대값으로 설정하였기 때문에 시간우량 값은 다르게 나타나고 있다.

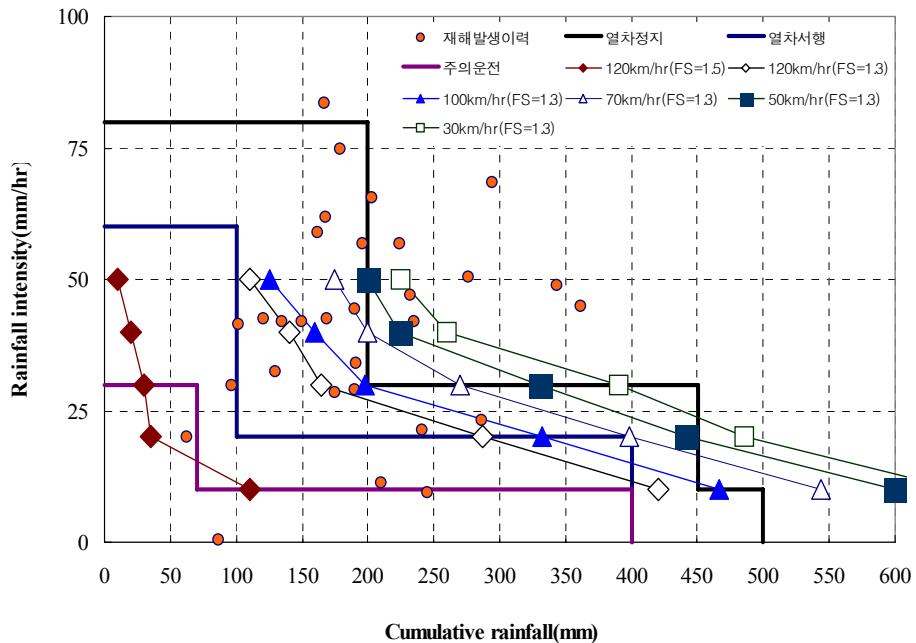


Fig. 14. Comparison of rail transport operation control

6. 결론

통제된 선로를 주행하는 열차에 대하여 강우침투에 의한 사면 또는 노반 성토체의 불안정은 즉각적으로 국민의 생명과 재산을 위협하는 요인으로 작용하게 된다. 열차의 안전확보를 위한 3가지 주체는 재해우려지구의 조사 및 선정, 건정성 평가 및 대책공법 적용으로 정의된다. 본 연구에서는 불포화토이론을 도입함에 의해 사면으로의 강우침투 경계조건을 재설정하였으며, 이를 근거로 침투해석과 사면안정해석을 시행하였다. 특히, 성토체 내부로 전달되는 하중의 크기가 열차속도의 충격률과 관련됨을 이용하여 강우침투시 안전확보를 위하여 열차속도를 제어할 수 있는 방안을 마련하였다.

즉, 철도사면의 안전을 변화를 강우강도와 누적강우량의 함수로 예측함과 동시에 열차하중을 속도의 함수로 적용하여 강우시 안전확보를 위한 열차의 운전규제가 가능함을 확인할 수 있었으며, 이를 이용하여 공학적 기반을 갖는 열차운전규제를 제안할 수 있었다. 또한, 본 기준은 현재 적용되고 있는 기준과 비교해도 만족할만한 결과를 보여주었다.

참고문헌

- 김상규, 김영묵 (1991) 강우로 인한 사면 불안정. 대한토질공학회지, 제7권 1호, pp.53-64
- 김현기, 김수삼 (2008) 파괴확률을 이용한 철도절개면의 위험도 평가. 한국철도학회논문집 제11권, 제2호, pp.158-164
- 김형배, 이승호 (2002) 실용적인 확률론적 사면안정해석기법 개발. 한국지반공학회논문집 제18권, 제5호, pp. 271-280
- 신민호 외 (2003) 철도시설물안정성강화기술개발, 건교부, 건설교통기술혁신사업 4차년도 보고서

- 조성은, 이승래 (2000) 강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석. 한국지반공학회논문집, 제16권, 제1호, pp.51-64.
- 한국철도기술연구원 (2009) 철도시설물 안전관리 네트워크 시범 구축. 연차별 연구보고서
- 한국철도기술연구원 (2004) 철도절개면 안정성 평가 및 대책방안 연구 보고서
- Brook, R. H. and A.T. Corey (1964) **Hydraulic Properties of Porous Media**. Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Childs, E. C. (1940) **The use of soil moisture characteristics in soil studies**. Journal of Soil Science, Vol. 50, pp. 239-252.
- Fredlund, D. G. and A. Xing (1994) Equations for the Soil-Water Characteristics Curve. Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 521-532.
- 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.
- D. G. Fredlund, S. K. Vanapalli, A. Xing & D. E. Pufahl, (1995) **Predicting the Shear Strength function for Unsaturated soils the Soil-water Characteristic Curve**. In: Unsaturated soils.