

강우시 사면안전성 변화를 고려한 열차운전규제 개발

Development of Rail-transport Operation Control in Consideration of the Stability Variation of Railway Embankment under Rainfall

신민호¹⁾, Min-Ho Shin, 김현기²⁾, Hyun-Ki Kim, 김정기³⁾, Jung-Ki Kim

- 1) 한국철도기술연구원 수석연구원, Chief Researcher, Korea Railroad Research Institute
- 2) 한국철도기술연구원 주임연구원, Researcher, Korea Railroad Research Institute
- 3) 한국철도기술연구원 연구원, Researcher, Korea Railroad Research Institute

개요(Synopsis) : Train speed and infiltration of rainfall causes railway embankment to be unstable and may result in failure. Therefore, the variation in the safety factor of railway embankment should be analyzed as the function of rainfall intensity, rainfall duration, and train speed and the study is accomplished using numerical analysis program. Based on unsaturated soil engineering, the variables in the shear strength function and permeability function are also defined and used for the numerical model for evaluation of railway embankments under rainfall. As a result of the study, in order to secure the safety of train under rainfall, the variation in the safety factor of railway embankment is predicted as the function of rainfall intensity, duration time and the train load as a function of train speed. It is possible to ensure the safety of train under rainfall. Thereafter, the feasibility of the rail-transport operation control with engineering basis was established.

주요어(Key word) : train speed, rainfall, stability of embankment, rail-transport operation control

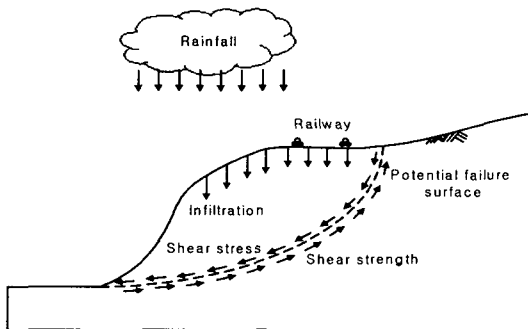
1. 서론

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 위해서는 위험개소를 추출하여 검사하고, 대책공의 실시함과 동시에 강우에 의한 재해사고의 방지를 위한 강우량에 의한 운전규제와 붕괴검지 등이 적절히 시행되어야 한다. 강우시 사면재해는 방재분야의 연구개발에 의해 확실하게 건수가 감소하고 있지만, 열차의 고속화, 고밀도화가 요구되어지는 현실을 감안하면 보다 고도의 안전대책이 필요로 되어지고 있다.

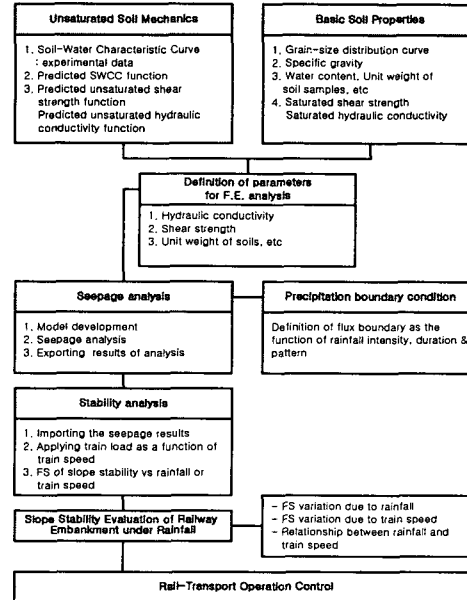
현재 국내외에서 적용되고 있는 강우시 열차운전규제는 강우량과 재해의 상관성분석에 의한 기준, 사면재해와 한계우량(critical rainfall)과 실효우량(effective rainfall) 등의 통계해석모델과 같은 경험적인 방법에 주로 근거하고 있다. 이와 같은 통계해석모델은 정확한 정보를 갖는 다수의 자료가 확보되어야만 유효하므로 제한된 정보를 갖는 지역에서는 적용하기 어려움이 있으며, 공학적인 안정해석이 뒷받침

되지 않아 예기치 않은 재해발생의 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 열차의 고속화, 고밀도화에 부응하며, 예기치 않은 재해발생을 최소화하기 위해 불포화토질역학 이론에 근거하여 토질의 함수특성과 강우침투의 상관관계를 규명하고, 수치해석을 이용한 철도성토사면의 안정성 해석으로 공학적 기반을 갖는 강우시 열차운전규제기준의 설정을 위한 타당성을 검증하고자 하였다(<그림 1>, <그림 2> 참조).



<그림 1> 강우로 인한 철도 성토의 불안정



<그림 2> 열차운전규제 설립 절차

2. 실내실험

국내 토질에 대한 함수특성곡선의 작도를 위해 가평지역에서 채취한 화강풍화토와 주문진 표준사를 사용하여 실험을 실시하였다. 화강풍화토는 No. 10체 통과시료를 사용하였으며, 토질함수특성곡선의 실험에 사용된 모든 시료는 $0.95 \times \gamma_{dmax}$ 가 되도록 시료를 성형하였다. 본 연구에서는 모든 불포화 영역에 대해 대표적인 토질함수특성곡선을 가장 잘 표현할 수 있는 Fredlund and Xing(1994)가 제안한 예측식 (1)을 사용하였다.

$$S = \frac{\theta_w}{\theta_s} = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \left[\left\{ \frac{1}{\ln\left\{\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right\}} \right\}^m \right] \quad (1)$$

여기서, S : 포화도

θ_w : 체적함수비

θ_s : 포화 체적함수비

ψ : 모관흡수력

h_r : 체적 잔류함수비 θ_r 에 대한 모관흡수력

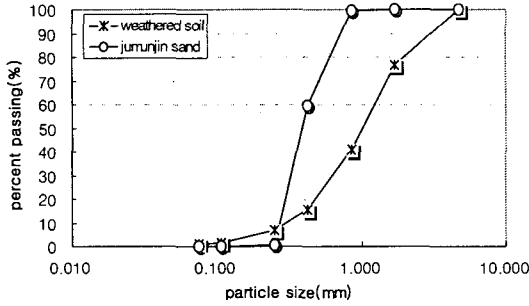
a : 곡선의 변곡점에서의 모관흡수력

n : 변곡점의 경사에 대한 토질 파라미터

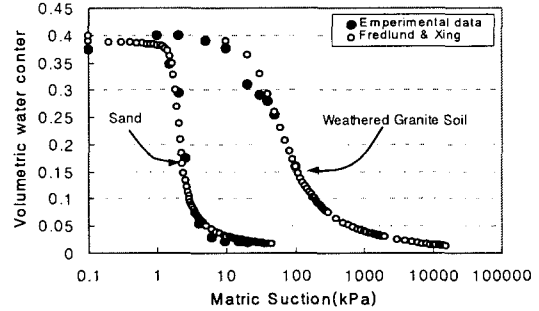
m : 잔류 함수비에 대한 토질 파라미터

3.1 기본물성시험

KS규정에 준하여 입도분포시험, 비중시험, 투수시험, 다짐시험 등의 기본물성시험을 실시하여 <표 1>에 보였으며, <그림 3>에 입도분포곡선을 제시하였다. 토질함수특성의 측정은 재하 공기압 0~15bar, 압력셀(Pressure Plate)내 압력조절이 1/100 kPa까지 가능한 실험기를 제작하여 대상 시료에 대한 토질함수특성을 측정하였다. <그림 4>는 화강풍화토와 주문진 표준사의 실험 데이터를 나타내고 있으며, Fredlund and Xing(1994)이 제시한 식 (1)을 이용한 예측결과와도 잘 일치하고 있다. 토질함수특성곡선 예측을 위한 제안식의 관련 계수를 <표 2>에 보였다.



<그림 3> 주문진 표준사와 화강풍화토의 입도분포곡선



<그림 4> 토질함수특성곡선

3.2 전단강도함수 및 투수함수 예측결과

직접전단시험을 실시하여 전단강도 파라미터(c' , ϕ')를 구하고 Fredlund et al.(1994)가 제시한식 (2)를 이용하여 ϕ^b 를 구하였다(<표 3> 참조). <그림 5>과 <그림 6>은 식 (2)를 이용하여 구한 불포화 전단강도 예측결과를 보여주고 있다.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + \tan \phi' \int_0^\psi \left(\frac{S - S_r}{1 - S_r} \right) d(u_a - u_w) \quad (2)$$

- 여기서, τ : 불포화토의 전단강도
- c' : 유효 점착력
- $(\sigma_n - u_a)$: 순연직응력
- ψ : 모관흡수력
- ϕ' : 유효 내부마찰각
- S : 포화도
- S_r : 잔류포화도
- $(u_a - u_w)$: 모관흡수력

<표 1> 대상시료의 물성

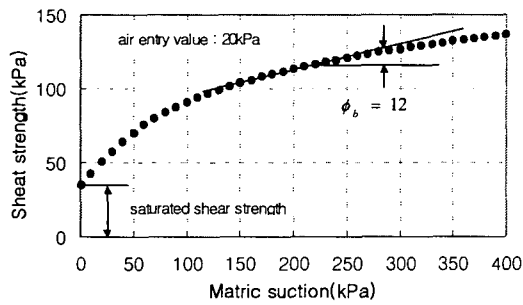
	$\gamma_{dmax} (t/m^3)$	$w_{opt}(\%)$	$k_s (cm/sec)$	G_s	$S(\%)$	w_{sat}
주문진 표준사	1.63	-	8.1×10^{-2}	2.63	100	23.2
화강풍화토	1.82	11%	4.41×10^{-4}	2.64	100	20.1

<표 2> 토질함수특성곡선의 예측을 위한 파라미터

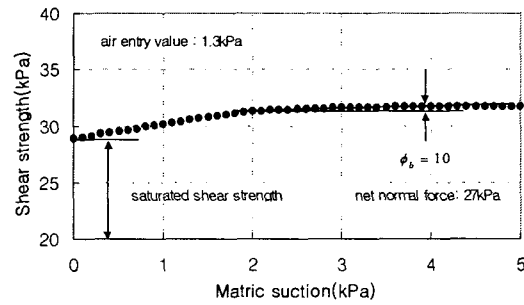
	주문진 표준사	화강풍화토
a	1.8	40
m	10.05	2.14
n	0.84	1.06
ϕ_r	4	200
AEV	1.3	20
θ_r	0.03	0.03
θ_s	0.39	0.4

<표 3> 전단강도 파라미터

	c (kPa)	ϕ'	ϕ_b	$(\sigma_n - u_a)$ (kPa)
주문진 표준사	0	43	10	27
화강풍화토	2.45	37.5	12	34



<그림 5> 화강풍화토의 모관흡수력에 따른 전단강도의 변화



<그림 6> 주문진 표준사의 모관흡수력에 따른 전단강도의 변화

<그림 7>은 식 (3)을 이용하여 구한 흡수력에 대한 불포화 투수계수의 변화를 보여주는 것이다. 본 식은 Fredlund et al.(1994)가 제시한 식을 사용하여 불포화 영역내에서 체적함수비 변화에 따른 불포화 투수계수의 변화를 예측하였다.

$$k_r(\psi) = k_s(\psi) \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta(\psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i}) dy}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta(\psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i}) dy} \quad (3)$$

여기서, $k_r(\psi)$ = 불포화투수계수

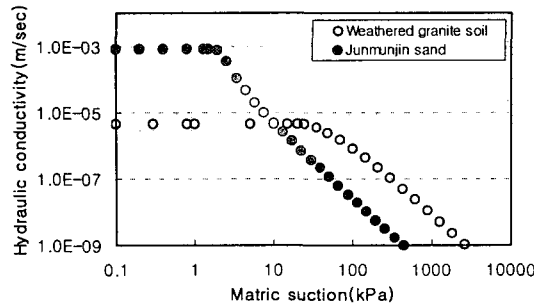
$k_s(\psi)$: 포화투수계수

θ : 체적함수비

y_i : 적분더미변수

e : 2.718

N : $\ln(1,000,000) \approx 13.81551$

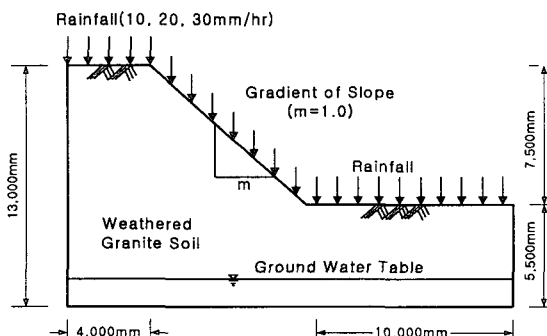


<그림 7> 모관흡수력에 따른 투수계수의 변화

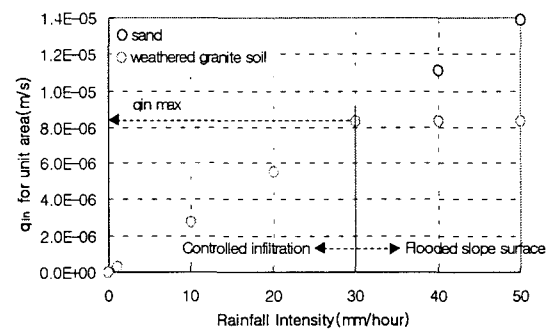
4. 철도성토사면 적용성 검토

4.1 해석단면 및 경계조건

강우침투에 의한 성토사면의 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 1.5m 상부에 존재한다. 강우침투 및 사면안정성 분석에 사용된 해석단면을 <그림 8>에 보였다. 수치해석에 사용된 토질정수 등의 입력 물성치는 기본실험 및 예측식에 의해 얻어진 값을 적용하였다.



<그림 8> 강우침투 및 사면안정해석을 위한 단면도



<그림 9> 강우강도(I_R)와 유입수량(q_{in})의 관계

한편 사면 표면으로 침투하는 강우는 다음과 같은 두 가지 경계조건으로 주어질 수 있다.

- 사면상부 흐름유출

이때의 조건은 강우강도가 지반으로 침투할 수 있는 물의 양보다 월등하게 크다는 것을 정의한다. 따라서 강우의 일부분은 침투할 것이고, 나머지는 사면표면을 따라 유출될 것이다. 이 경우 경계조건은 모관흡수력을 0로 둔다.

$$u_a - u_w = 0 \quad (4)$$

- 조정된 침투

이때의 조건은 강우강도가 지반으로 침투할 수 있는 물의 양보다 월등하게 작다는 것을 정의한다. 이 경우 물의 유입은 강우강도에 의해 통제되며, 경계조건은 유입수량 q_{in} 과 강우강도 I_R 가 동일하다.

$$q_{in} = I_R \quad (5)$$

- 강우강도 입력치

침투해석을 위해 상기의 경계조건에 의한 강우강도 입력치를 정의하였다. 최대 사면유입량($q_{in\ max}$)은 김 등(1991)에 의하면 포화투수계수의 약 4~5배 정도로 정의되며, 조 등(2000)에 의하면 강우강도와 투수계수의 차수(order)가 같아질 때로 정의한다. 이를 도식적으로 표현하면 <그림 9>와 같고, 수치해석에 사용된 강우강도 경계조건을 <표 4>에 보였다.

<표 4> 강우강도 경계조건

강우강도 $I_R(\text{mm/hr})$	강우강도 $I_R(\text{m/s})$	단위면적당 침투속도 $q_{in}(\text{m/s})$	강우지속시간 (hour)	강우형태
0	0	0	0	-
10	2.78×10^{-6}	2.78×10^{-6}	1, 2, 5, 10	constant rate
20	5.56×10^{-6}	5.56×10^{-6}	"	"
30	8.33×10^{-6}	8.33×10^{-6}	"	"

성토사면의 안정해석을 위한 열차하중은 국내 1·2급 선로조건을 적용하고, 표준적인 하중에 근거하여 속도충격률 i 에 의한 변동분을 고려함에 의해 동적하중을 계산하였다. 해석의 용이성을 위해 윤증을 레일면에 직하하지 않고, 노반압력으로 변환하여 재하하는 것으로 하였다.

- 열차이동속도에 따른 동적하중

$$P_{dy} = P_{st} \times i \quad (6)$$

- 속도충격률(impact ratio)

$$i = 1.0 + 0.513 \left(\frac{V}{100} \right) \quad (7)$$

- 열차제원 : LS22(축중 22tf, 윤중 11tf)

여기서, P_{dy} : 동적하중, P_{st} : 열차정지하중, i : 속도충격률, V : 열차속도(km/hr)

수치해석용 노반압력(침목)에 의한 하중분담율(차륜직하 침목 : $0.4 P_{dy}$)은 평균압력분포 계산에서 도상두께 15cm 까지는 하중분산이 없으며, 도상두께 15cm 이하 깊이에 대해서는 45°로 하중이 분산된다는 가정(RTRI, 1994)하에 사면안정해석시 열차속도에 따른 하중경계조건을 다음의 <표 5>와 같이 적용하였다.

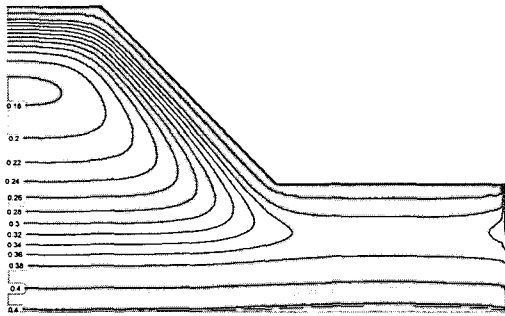
< 표 5> 열차의 동적하중 경계조건

열차속도(km/h)	동적하중(P_{dy})		노반압력(kPa)
	축중(tf)	윤중(tf)	
30	25.39	12.69	100.3
50	27.64	13.82	109.3
80	31.03	15.51	122.6
100	33.29	16.64	131.6
150	38.3	19.46	153.9
200	44.57	22.29	176.2

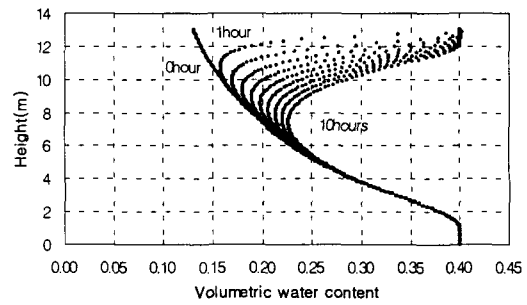
4.3 강우침투해석

사면내부로 침투하는 강우침투해석을 위하여 SEEP/W를 사용하였으며, 본 프로그램을 이용하여 지하수의 흐름이나 간극수압의 소산 예측이 가능하고, 단순한 포화-정상류부터 복잡한 포화/불포화-시간변화흐름까지 계산이 가능하다. 또한 불포화흐름에 있어서 실내시험결과인 토질함수특성곡선·불포화투수계수함수, 강우지속시간도 고려할 수 있다.

본 연구에서는 해석대상사면에 지하수위를 주고, 정상상태에서 1차 해석하여 불포화침투해석의 초기조건을 구현하였으며, 2차 해석에 있어 비정상상태로 화강풍화토의 토질함수특성과 투수함수 등을 적용하여 강우상황을 재현하여 해석하였다. 다음의 <그림 10>은 강우강도 10mm/hr로 5시간 지속된 강우에 대한 사면의 침투결과 나타난 체적함수비 등고선도이며, 10mm/hr 강우강도에 대한 성토높이에 따른 지속시간별 체적함수비 변화를 <그림 11>에 보여주고 있다.



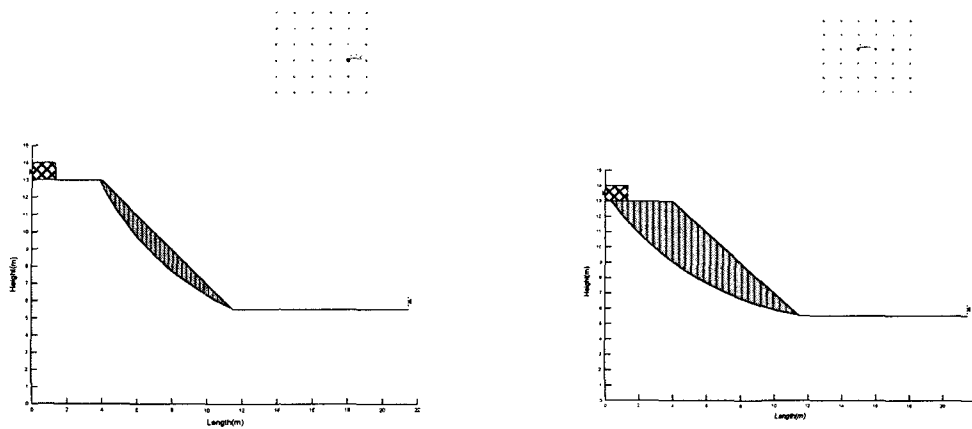
<그림 10> 체적함수비에 대한 침투해석 결과



<그림 11> 체적함수비의 변화(10mm/hr)

4.4 사면안정해석

강우침투에 의한 철도성토사면의 안정성해석을 위해 SLOPE/W를 사용하였다. SLOPE/W는 다양한 사면안정이론으로 토사/암반사면의 안전율을 계산하는 한계평형해석 프로그램으로 사면의 형상, 지층구조, 외부하중이 복잡한 경우에도 해석이 가능하다. 또한 강우침투해석결과를 직접 받아들여 해석이 가능하며, 불포화전단강도함수인 ϕ^b 의 고려로 불포화 전단강도 함수의 구현도 가능하므로 본 프로그램을 사용하였다. 다음의 <그림 12>는 강우강도 30mm/hr에 대하여 지속시간 1hr, 10hr일때의 안전율 변화로 사면안정성을 평가한 것이다.



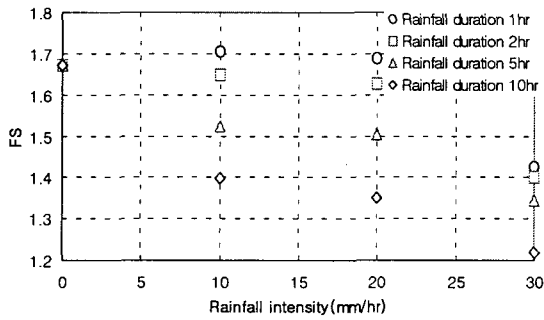
(a) 30mm/hr, 10hr, $F_s=1.218$

(b) 30mm/hr, 1hr, $F_s=1.474$

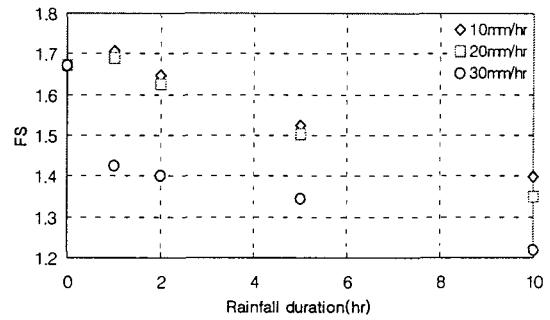
<그림 12> 사면안정해석결과

4.5 수치해석 결과 및 분석

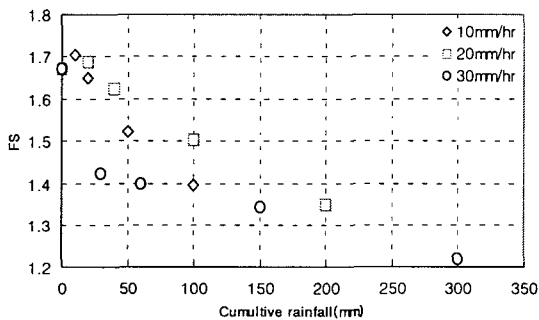
수치해석에 의해 강우시 철도성토사면의 안전율 변화는 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량의 변화에 대해 다음 <그림 13>, <그림 14> 및 <그림 15>와 같이 그 안정성이 변화된다. 모든 해석결과는 일정 속도에 대해 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량이 증가함에 따라 안전율이 감소되는 것을 보여주고 있다. 또한 열차속도 증가는 충격률의 증가를 동반하며, 결과적으로 성토사면에 재하 되는 하중의 증가를 발생시키기 때문에 성토사면의 안전율(FS)을 열차속도의 함수로 보면, 열차속도의 증가에 따라 안전율이 저하하고 있으며, 강우강도·강우지속시간의 증가에 따라서도 안전율이 감소하고 있다(<그림 16>, <그림 17> 및 <그림 18> 참조). 수치해석결과에 의하면 강우강도 및 강우지속시간의 증가가 열차속도 증가에 비해 성토사면의 안전율에 보다 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.



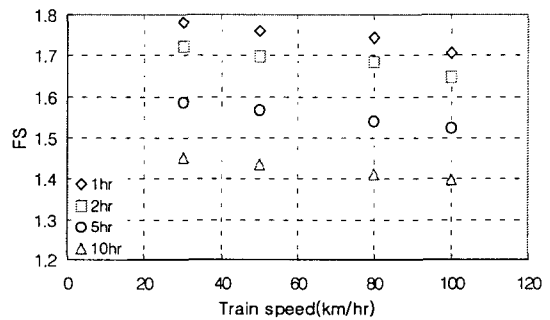
<그림 13> 강우강도에 따른 사면안정률 변화 (열차속도 100km/hr)



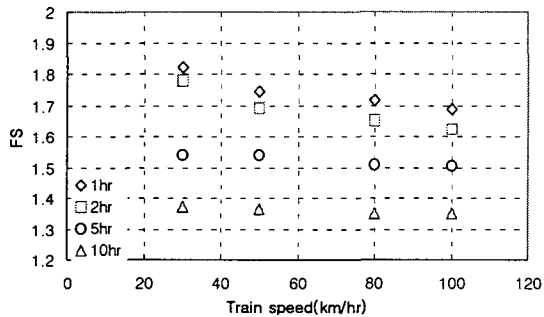
<그림 14> 강우지속시간에 따른 사면안정률 변화 (열차속도 100km/hr)



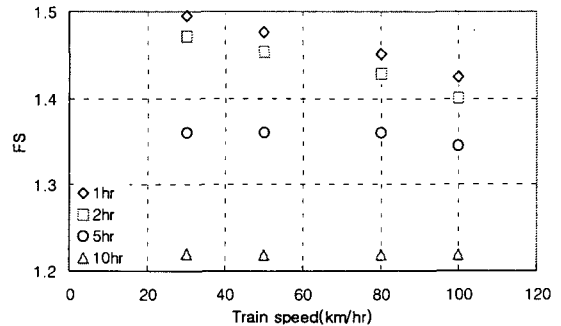
<그림 15> 누적강우량에 따른 사면안정률 변화 (열차속도 100km/hr)



<그림 16> 열차속도에 따른 사면안정률 변화 (강우강도 10mm/hr)

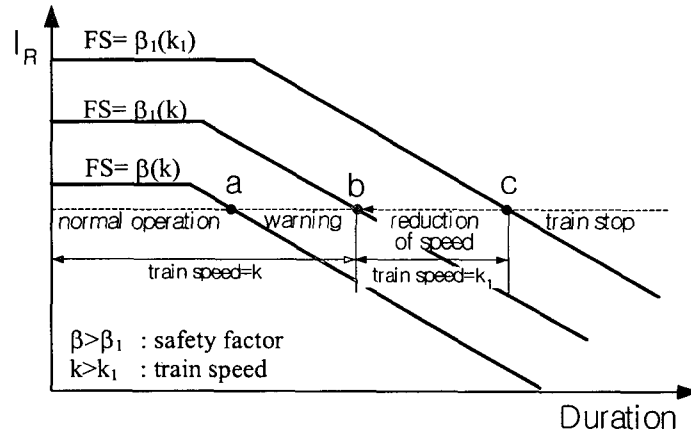


<그림 17> 열차속도에 따른 사면안정률 변화 (강우강도 20mm/hr)



<그림 18> 열차속도에 따른 사면안정률 변화 (강우강도 30mm/hr)

강우침투시 철도성토사면의 안전을 변화를 강우강도와 지속시간, 그리고 열차속도의 함수로 분석하여 열차운전규제의 가능성을 검증하기 위해 모식도를 작성하였다. <그림 19>에서 $FS = \beta$ 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.

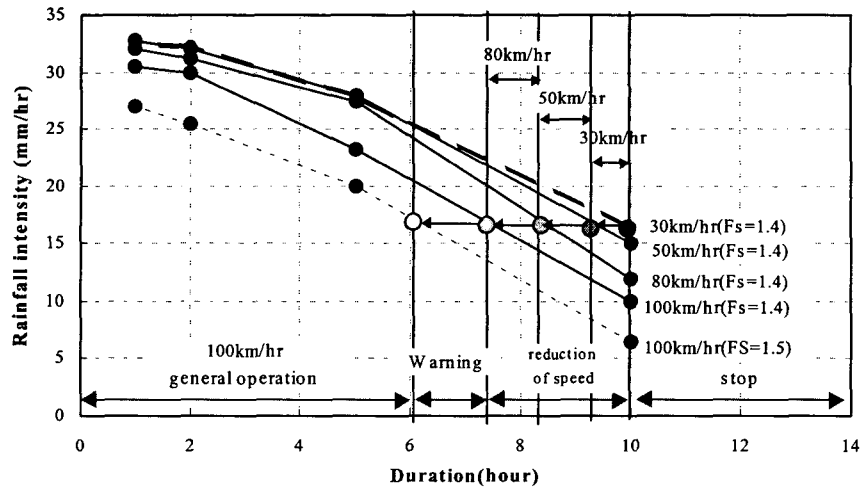


<그림 19> 열차운전규제 개략도

이상과 같은 개념에 의거하여 본 연구에서는 한국의 공용 성토사면안전율인 1.5를 기준으로 다음의 <표 6>과 같은 강우시 열차운전규제 예를 작성하였다. 기본가정으로 열차의 정상운행 속도 100km/hr에서 강우에 대한 성토사면의 안전율이 1.5 이상이 확보되면 열차는 정상운행되며, 1.5) $FS \geq 1.4$ 의 구간에서는 열차에 경보를 발령하여 주의를 기할 수 있도록 하고, 1.4) FS 면 열차의 운행속도를 감속시켜 사면에 작용하는 하중을 작게 함에 의해 $FS = 1.4$ 가 확보될 수 있도록 감속운행을 실시하도록 하였다. 강우강도와 강우지속시간이 계속 증가하여 최소열차운행속도 30km/hr의 재하하중에서도 안전율 $FS = 1.4$ 를 만족시키지 못하면 열차는 운행정지를 시행하는 것을 가정하였다. 이와 같은 가정을 해석결과와 연계하여 <그림 20>에 나타냈으며, 대상사면의 강우시 안전율변화를 이용하여 열차운전규제를 실시함을 알 수 있었다.

<표 6> 강우시 사면안전율과 열차운전규제의 상호관계(열차속도 100km/hr)

철도 성토 안전율	강우시 열차운전규제
$FS \geq 1.5$	정상운행
1.5) $FS \geq 1.4$	경보발령
$FS < 1.4$	열차속도규제 : 안전율이 본 구간에 들어오면, $FS = 1.4$ 가 확보 되도록 열차 감속운행
열차속도 30km/hr에서 $FS < 1.4$	열차운행중지



<그림 20> 강우시 열차운전규제안

5. 결론(Conclusion)

철도의 안전운행을 위한 3가지 주체는 재해우려시설물을 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 철도성토사면의 안전을 변화를 강우강도와 지속시간의 함수로 예측함과 동시에 열차하중을 속도의 함수로 적용하여 속도규제가 가능함을 확인하였으며, 이를 이용하여 공학적 기반을 갖는 열차운전규제를 설정할 수 있는 타당성이 검증되었다.

Acknowledgement

본 연구는 건설교통기술혁신 5개년사업의 일환으로 건설교통부의 연구지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

Reference

1. Fredlund, D. G. and A. Xing(1994), "Equations for the Soil-Water Characteristics Curve," Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 521-532.
2. Fredlund, D. G., A. Xing, and S. Huang(1994), "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristics Curve," Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 533-546.
3. 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
4. D. G. Fredlund, Anqing Xing, and Shagyan Huang, (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve". Canadian Geotech. J, 31, 533-546.