

로지스틱 회귀분석을 이용한 임도붕괴 위험도 평가

백승안^{1,2} · 조구현¹ · 황진성¹ · 정도현¹ · 박진우² · 최병구² · 차두송^{2*}

¹국립산림과학원 산림생산기술연구소, ²강원대학교 산림과학부

Assessment of Slope Failures Potential in Forest Roads using a Logistic Regression Model

Seung-An Baek^{1,2}, Koo-Hyun Cho¹, Jin-Sung Hwang¹, Do-Hyun Jung¹, Jin-Woo Park²,
Byoungkoo Choi² and Du-Song Cha^{2*}

¹Forest Practice Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11186, Korea

²Division of Forest Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

요약: 임도 사면의 붕괴는 환경적 피해 뿐 만 아니라 사회·경제적 손실을 발생시킨다. 본 연구는 2013년 집중호우로 임도 붕괴가 발생한 강원도 홍천군 화촌면 지역을 대상으로 GIS의 속성정보와 로지스틱 회귀분석을 이용하여 임도 붕괴지 위험도 평가를 실시하였다. 로지스틱 회귀분석결과, 토성이 사토인 지역의 회귀계수는 6.616으로 임도붕괴에 가장 위험성이 높았으며, 경급이 중경목인 지역의 경우 회귀계수가 -3.282로 임도사면의 안정성이 높았다. 임도붕괴지의 정오분류결과는 74.6%의 분류정확도를 보였다. 로지스틱 회귀모델식을 이용하여 전 구간을 대상으로 적용해 본 결과, 임도붕괴지의 경우 0.5의 기준점 보다 높은 0.7이상의 구간에서 가장 많이 분포하여 붕괴가능성이 높은 것으로 나타났다. 임도 위험도 평가의 판별적중률로 볼 때 임도의 산림환경 및 입지인자의 분석을 통해서도 충분한 붕괴위험 평가가 가능할 것으로 사료된다.

Abstract: Slope failures in forest roads often result in social and economic loss as well as environmental damage. This study was carried out to assess susceptibility of slope failures of forest roads in Hongcheon-gun, Gangwon-do where many slope failures occurred after heavy rainfall in 2013 using GIS and logistic regression analysis. The results showed that sandy soil (6.616) in soil texture type had the highest susceptibility to slope failures while medium class (-3.282) in tree diameter showed the lowest susceptibility. A error matrix for both slope failure and non-slope failure area was made and a model was developed showing a classification accuracy of 74.6%. Non-slope failures area in the forest roads were classified mostly in the range of >0.7 which was higher values than the classification criteria (0.5) used by the logistic regression model. It is suggested that considering forest environment and site factors related to forest road failures would improve the accuracy in predicting susceptibility of slope failures.

Key words: forest road, logistic regression model, GIS, slope failure

서론

우리나라의 산림면적은 전 국토 면적의 64%이며, 1970년대부터 수행된 치산녹화사업의 성과로 인하여 현재 산림구조는 대부분 III~IV영급의 중경목으로 구성되어 있다. 또한, 산림청은 2040년까지 국내 생산을 약 10,000,000 m³를 목표로 삼고 있어 국내 목재 생산량 달성을 위한 자원 관리 및 이를 위한 생산기반 시설의 확대가 시급한 실정이다.

현재 효율적인 목재수확을 위해서는 임업노동력 확보,

적정 작업시스템 구축 등을 포함한 임업기계화가 절실히 요구된다. 이와 같은 임업기계화를 위하여 임도는 산림생산의 필수적인 기반시설이며, 목재수확, 임산물 운반, 임업기계화의 활성화, 인력 및 장비 운송 등의 집약적인 관리에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 또한 산촌의 교통로, 레크레이션 및 휴양, 산불진화대응 등의 다목적의 역할도 담당하고 있다. 이러한 임도의 다목적 효과를 극대화하기 위하여 산림청은 1980년대부터 지속적으로 임도 시설을 확충하여, 2014년 말 현재 임도의 총 시설량은 19,077 km, 임도밀도 2.99 m/ha로 확충되었지만, 임업선진국인 캐나다(12.8 m/ha), 오스트리아(45.0 m/ha), 독일(46.2 m/ha) 등과 비교해 보면 우리나라의 임도밀도는 여전히 매우 낮

*Corresponding author
E-mail: dscha@kangwon.ac.kr

은 실정이다(Korea Forest service, 2015).

최근 지구온난화에 따른 기후변화로 인하여 게릴라성 집중호우가 6~9월에 집중적으로 발생하여 임도의 피해가 증가하고 있는 실정이다. 그 원인을 살펴보면, 임도 자체의 구조요인과 산림환경 및 입지요인 등이 결합하여 임도 붕괴의 원인을 제공하고 있다(Jung, 1995; Bang et al., 2014). 또한 우리나라의 산림지역은 경사가 급하고 토질의 형태가 다양하며, 지형적·지질적·인위적 원인으로 해마다 임도 붕괴에 의한 토사유출 등의 재해가 발생하여 산림훼손이 심각한 실정이다(Yang et al., 2007; Cha et al., 2009). 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 지속적으로 임도의 사전 및 사후 관리를 수행하여야 하며, 임도 붕괴에 대한 발생원인의 파악 및 붕괴가능성이 높은 지역에 대한 위험도 평가의 실시를 통한 적극적인 대책방안의 수립이 필요하다(Jung, 1995; Ji et al., 2000). 현재까지 임도 붕괴 및 산사태 위험도 예측모델 개발을 위하여 수량화 II 류, Fuzzy이론 및 AHP법, 로지스틱 회귀분석 등이 이용되고 있다(Cha and Ji, 1998; Cha et al., 2000; Choi et al., 2004; Lee, 2005; Kim et al., 2012; Bang et al., 2014).

본 연구의 목적은 2013년 집중호우에 의하여 임도 붕괴가 발생한 강원 홍천군 화촌면을 대상으로 GIS를 이용하여 임상, 입지토양, 지형인자의 DB를 구축하고 확률적으로 예측 가능한 로지스틱 회귀모형을 개발하여 임도 붕괴 위험도 평가를 실시하기 위함이다.

자료 및 방법

1. 조사대상지

조사대상지는 Figure 1과 같이 2013년 7월 13~15일 동

안 집중호우로 인하여 임도 붕괴가 발생한 강원도 홍천군 화촌면(풍천리, 구성포리, 성산리) 지역이다. 조사대상 총 임도 노선 길이는 약 48.6 km로 임도 붕괴 발생지는 총 87개소이며, 이 중 절토사면 붕괴지역 53개소(60.9%), 성토사면 붕괴지역은 34개소(39.1%)로 조사되었다. 조사대상지의 연평균기온은 10.1°C, 30년 평균강수량은 1291.3 mm이다. 또한 지질은 화강 편마암계에 속하는 화강암 또는 변성암으로 구성되어 있으며, 토양은 대부분 양토 또는 사양토로 구성되어 있다.

2. 조사자료

임도 붕괴지는 임도망도와 중첩하여 임도 중심선으로부터 양방향 폭 20 m의 버퍼와 임도길이 100 m를 1개의 구간으로 설정하였으며, 구간내의 속성정보는 GIS자료를 이용하여 수치임상도(1:5,000), 임도망도(1:5,000), 수치지형도(1:5,000), 산림입지토양도(1:25,000)를 이용하였다. 임상인자는 임상, 영급, 경급, 수관밀도 정보를 이용하였으며, 토양인자는 토심, 토성, 모암 등 토양입지 정보를 이용하였다. 지형인자는 수치지형도에서 DEM(cell size: 30 m × 30 m)정보를 구축하여 산지경사와 사면방위 정보를 추출하여 이용하였다.

3. 연구방법

임도붕괴 인자 DB구축은 임상(임상, 영급, 경급, 수관밀도), 토양(토심, 토성, 모암) 및 지형(산지경사, 사면방위) 인자로 구분하였으며, 구축된 Raster 데이터는 임도구간에 공간결합(Spatial Join)방법을 이용하여 구간별 인자의 GIS DB를 구축하였다. 임상 및 토양 인자는 값의 형태가 정성적으로 분포하고 있어 구간 내 가장 많은 면적을 차

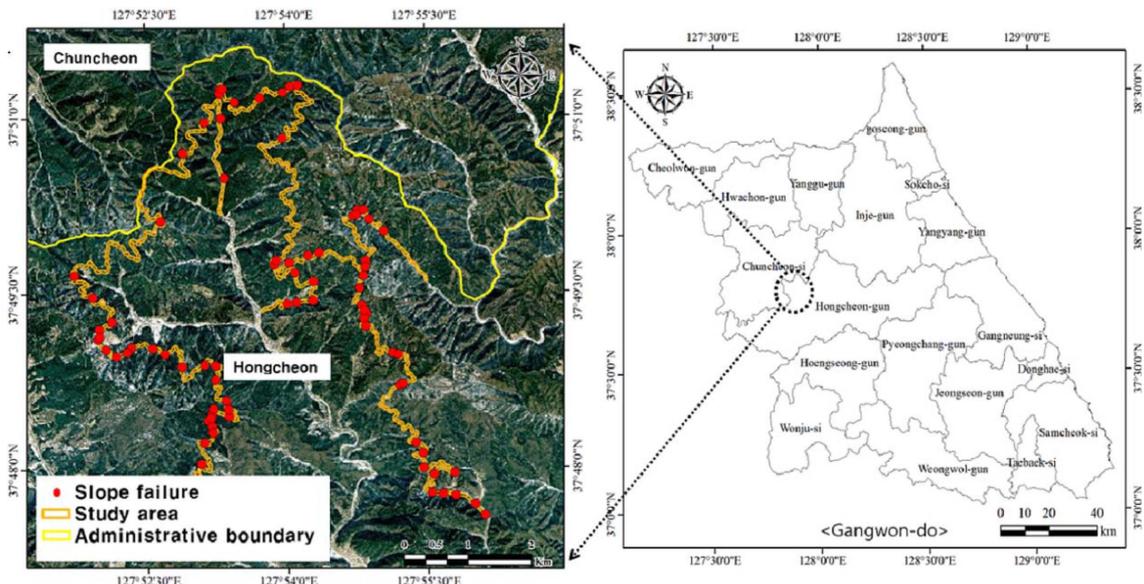


Figure 1. Study area.

Table 1. Database construction.

Classification	Factor	Factor value	Category
Forest condition	Forest type		non-forest, coniferous, deciduous, mixed forest
	Age class		I to IX
	Diameter class	Category values having highest distribution in each category	non-forest, small (6 to 18 cm), medium (18 to 30 cm), large (>30 cm)
	Crown closure		non-forest, small (<50%), middle (51 to 70%), tight (>71%)
Soil	Soil depth		shallow (<30 cm), middle (30 to 60 cm), deep (>60 cm)
	Soil texture		sand, sandy loam
	Parent rock		igneous, metamorphic, sedimentary
Topography	Slope	Mean	-
	Aspect	Mean	east (45 to 135°), west (225 to 315°), south (135 to 225°), north (315 to 45°)

지하고 있는 인자값을 적용하였다. 또한, 지형인자인 사면 방위와 산지경사는 구간 내 평균값을 적용하였다(Table 1). 또한, 임도 붕괴 발생위험도를 분석하기 위하여 임도 붕괴지 87개소에 대하여 임도 구간을 설정하였다. 임도의 구간을 100 m단위로 구분하여 설정한 결과, 87개소 중 두 개 이상이 한 구간에 설정될 경우는 한 개의 구간으로 설정하였다. 조사 대상 임도노선은 총 433개소의 구간으로 설정 되었으며, 이 중 임도 붕괴지는 80개소, 미붕괴지는 353개소로 구분되었다. 로지스틱 회귀모델 개발을 위하여 사용된 인자는 사면방위, 산지경사, 임상, 영급, 경급, 수 관밀도, 모암, 토심, 토성으로 총 9개 인자를 적용하였다. 총 조사 개소 중 임도 붕괴지 80개소와 임도 미붕괴지 중 약 46%인 160개소 자료를 임의적으로 추출하여 총 240개 소를 대상으로 실시하였다(Lee et al., 2012).

로지스틱 회귀분석은 종속변수가 범주형이나 명목척도 로 나누어지는 경우에 사용 되는 분석 방법으로 독립변수 가 명목척도 또는 서열척도와 같이 정성적인 척도와 등간 척도를 함께 사용함으로써 다변량 정규분포를 한다는 가 정이 불분명할 때 사용하는 분석방법이다. 로지스틱 회귀 분석에서 가정하고 있는 모형은 다음 식 1과 같다(Chae et al., 2004; Hong, 2005; Quan et al., 2011).

$$\ln\left(\frac{P_Z}{1-P_Z}\right) = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p \quad (1)$$

여기서 α 와 β 값은 미지수이며, X 의 값은 변수이다.

따라서 로지스틱 회귀분석은 선형이 아닌 비선형 곡선 으로 나타난다. 즉, 독립변수와 발생확률과의 관계는 비선 형적이다. 확률추정은 변수값에 상관없이 항상 0과 1사이 에 존재하며 최대우도추정법(MLE: Maximum-Likelihood Method)을 이용하여 모형의 모수를 추정하며 선형적인 합 수로 변환시키기 위하여 로지스틱 함수로 변환시키게 된다.

회귀분석을 수행하고 신뢰성에 따라 변수를 제거, 혹은 다시 선택하여 최대한의 신뢰성을 확보할 수 있는 인자들 이 선택되도록 회귀식의 유의성 분석을 반복수행하는 방

법으로 이에 따라 최종적으로 유의확률이 유의수준 범위 에서 크게 벗어나, 발생 확률의 상관성이 낮은 것으로 판 정되어지는 인자들을 제외하고 최종 모델을 개발하였다.

결과 및 고찰

1. 임도붕괴 위험도 예측

1) 로지스틱 회귀모델 개발

단계적 선택법에 의하여 신뢰성 및 유의성 분석에 따라 변수를 제거하거나 다시 선택하여 최대한 신뢰성을 확보 할 수 있는 사면방위, 산지경사, 경급, 토심, 토성 등 총 5 개 인자를 선정하여 회귀분석을 실시한 결과는 Table 2와 같다. 단, 사면방위, 경급, 토성의 경우 유의 수준이 0.05 이상인 항목이 포함되어 있었지만 범주형 변수임을 고려 해 제거하지 않았다(Lee et al., 2005; Lee et al., 2012; Woo et al., 2014).

Table 2. Logistic regression results.

Variable	Category	Coefficients	Standard error	Significance probability
Aspect	North			.009
	East	-.275	.647	.671
	South	.981	.510	.054
	West	1.414	.479	.003
Slope(°)		.074	.031	.016
Diameter class	Non-forest			.000
	Small	-2.537	.990	.010
	Medium	-3.282	.865	.000
	Large	-.325	.787	.680
Soil depth (cm)		.117	.025	.000
Soil texture	Sand	6.616	1.701	.000
	Sandy Loam	.883	.518	.088
Constant term		-9.937	2.058	.000

따라서 5개 최종 인자를 적용한 로지스틱 회귀모델식은 다음 식 2와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Logit}(p) = & -9.937 - 0.275X_1 + 0.981X_2 + 1.414X_3 \\ & + 0.074X_4 - 2.537X_5 - 3.282X_6 - 0.325X_7 \\ & + 0.117X_8 + 6.616X_9 + 0.883X_{10} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 X_1 =동사면, X_2 =남사면, X_3 =서사면, X_4 =산지경사, X_5 =소경목, X_6 =중경목, X_7 =대경목, X_8 =토심, X_9 =사토, X_{10} =사양토

임도사면 붕괴 위험성은 토성이 사토인 지역에서 회귀 계수가 6.616으로 가장 높았으며, 사면방위의 서사면(1.414), 남사면(0.981), 양토(0.883) 토심(0.117), 산지경사(0.074) 순으로 분석되었다. 반면 임도사면 안정 측면에서는 경급이 중경목인 지역에서 회귀계수가 -3.282로 안정성이 가장 높았으며, 경급의 소경목(-2.537), 대경목(-0.325), 사면방위 동사면(-0.275) 순으로 분석되었다. 전체적으로 임도붕괴지에 대한 로지스틱 회귀모델식을 살펴보면, 토성의 인자들은 임도붕괴에 취약한 인자들로 구성되어져 임도붕괴가 발생할 우려가 높은 것으로 나타났으며, 경급의 인자들은 안정성이 높은 인자들로 구성되어져 임도붕괴 우려가 낮은 것으로 판단된다.

2) 임도붕괴 위험도의 판별 적중률

로지스틱 회귀분석의 결과로 인한 임도붕괴 판별 적중률은 Table 3과 같다. 로지스틱 회귀식에 의한 예측결과와 실제 붕괴 발생 여부를 비교하여, 판단 기준값에 의한 붕괴지와 미붕괴지로 구분하였다. 분석결과의 값은 0에서 1 사이에 분포하기 때문에 분석된 값을 확률값으로 계산하여 임도붕괴 판정기준을 0.5로 기준하여 이 값보다 크면 붕괴 발생, 작으면 붕괴 미발생으로 분류하였다. 임도붕괴의 정오분류 결과, 임도 미붕괴지 160개소 중 125개소가 정분류 되어 78.1%의 분류 정확도를 보였으며, 임도붕괴지 80개소 중 54개소가 정분류 되어 67.5%의 분류 정확도를 보였다. 또한, 임도 미붕괴지와 붕괴지의 전체 분류 정확도는 74.6%로 높은 분류 정확도를 보였다. 이러한 결과는 Lee et al.(2006)의 산사태지역 위험도 평가의 분류 정확도 76.8%와 Lee and Kim(2012)의 로지스틱 회귀분석을 이용한 인제군 산사태지역의 위험도 평가에서의 분류 정

Table 3. Goodness of fit test to predict slope failures in forest road.

Classification	Correct	Error	Total	Accuracy (%)
Non-slope failure area	125	35	160	78.1
Slope failure area	54	26	80	67.5
Total	179	61	240	74.6

확도 74.8%와 유사한 판별 적중률을 나타낸다.

2. 임도붕괴 위험도 평가

임도붕괴 위험도 예측모형의 확률분포를 파악하기 위하여 개발된 로지스틱 회귀모델식을 연구대상지의 전 구간 433개소 지역에 적용한 임도붕괴 위험도 예측 결과는 Figure 2와 같다. 실제 임도붕괴지에서는 0.9~1.0의 값에서 23개소(28.8%)로 가장 많은 분포를 보였으며, 0.5~0.6의 값에서 4개소(5%)로 가장 낮은 분포율을 나타냈다. 또한 임도 미붕괴지의 경우, 0~0.1의 값에서 95개소(26.8%)로 가장 많은 분포를 보였고, 0.4~0.5의 값에서 31개소(8.7%)로 가장 낮은 분포율을 나타냈다.

임도붕괴 위험도 평가 시 실제 임도붕괴지에서는 확률값이 높을수록 임도 붕괴의 위험성이 높은 것을 나타내며, 임도 미붕괴지에서는 확률값이 낮을수록 임도 사면의 안

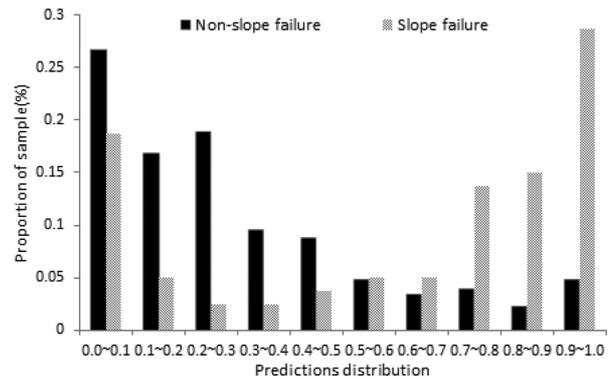


Figure 2. Prediction distribution of slope failures susceptibility in forest road.

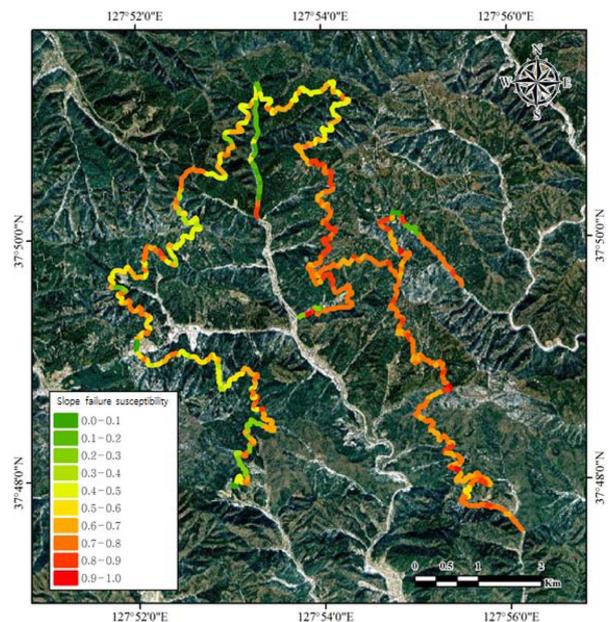


Figure 3. Evaluation map of slope failures potential in forest roads.

정성이 높은 확률을 의미한다. 예측된 임도 붕괴 위험도 분포를 살펴보면, 실제 임도 붕괴지의 경우 0.7~1.0에서 약 58%로 붕괴 위험이 높게 나타나는 것으로 볼 때 본 모델에서는 0.7이상은 붕괴 위험군으로 판정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 실제 임도붕괴가 발생하지 않은 구간의 경우 0~0.3의 값에서 62.5%가 분포하여 임도 붕괴 발생에 대한 분류정확도가 적합한 것으로 판단된다. 또한 Figure 3과 같이 개발된 로지스틱 회귀모델식을 이용하여 임도붕괴 위험도 평가 지도를 작성하였다. 붉은 색에 근접할수록 임도붕괴 발생 확률이 높은 것을 의미하며, 녹색에 가까울수록 낮은 확률을 나타낸다. 지역적으로 살펴보면, 임도붕괴 위험도 평가지도의 오른쪽 노선의 하부인 성산리 및 상부인 풍천리 일부지역은 토성 인자에 의해 임도붕괴 발생 확률이 높은 것으로 나타났으며, 왼쪽 노선의 상부인 구성포 및 풍천리 일부 지역은 임상인자 중 경급에 영향을 따라 임도붕괴 발생 확률이 낮은 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 2013년 7월에 집중호우로 인하여 임도붕괴가 발생한 노선을 대상으로 GIS의 속성정보와 로지스틱 회귀분석을 이용하여 임도 붕괴의 예측 및 위험도 평가를 실시하였다.

로지스틱 회귀분석에 의하면 토성이 사토인 지역은 회귀계수가 6.616으로 임도붕괴에 위험성이 가장 높으며, 경급이 중경목인 지역은 회귀계수가 -3.282로 임도사면의 안정성이 가장 높은 것으로 분석되었다. 임도붕괴 위험도 적중률은 판별 구간 240개소 중 179개소가 정분류되어 74.6%의 높은 적중률을 보였다. 또한, 예측모델식을 임도 전체노선에 적용한 결과, 임도 붕괴지에서는 0.7이상에서 가장 높은 분포를 보였으며, 임도 미붕괴지에서도 0.3이하에서 임도 붕괴가 발생할 확률이 낮은 것으로 예측되었다. 본 연구에서 임도붕괴 위험도 평가를 위하여 개발된 로지스틱 예측 모델식은 임도의 구조인자를 제외한 임도붕괴 예측 모델식으로서 본 연구대상지와 임황, 지황 및 지형이 유사한 지역에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 임업기술연구개발사업(No. S111216L040100)의 지원에 의해 수행되었음.

References

Bang, H.S., Kweon, H.K., Lee, J.W., and Kim, M.J. 2014. A Study on Classification of Disaster Risk Rating for For-

- est Road Using AHP Methodology. *Journal of Korean Forest Society* 103(2): 258-263.
- Cha, D.S. and Ji, B.Y. 1998. The Prediction of Cutting Slope Failure of Forest Road. *Journal of Forest Science* 14: 145-156.
- Cha, D.S. and Ji, B.Y. 2002. The Evaluation of Failure Factors on Cutting Slopes of Forest Road by Quantification Theory(I). *Journal of Forest Science* 18: 7-14.
- Cha, D.S., Ji, B.Y., and Chun, K.W. 2009. Relation analysis of Landslide and forest road by severe rain storm. *Journal of Korean Forest Society* 2009: 343-344.
- Cha, D.S., Ji, B.Y., and Oh, J.H. 2000. Evaluation of Slope Failure Possibility on Forest Road Using Fuzzy Theory(II). *Journal of Korean Forest Society* 89(1): 33-40.
- Chae, B.G., Kim, W.Y., Cho, Y.C., Kim, K.S., Lee, C.O., and Choi, Y.S. 2004. Development of a Logistic Regression Model for Probabilistic Prediction of Debris Flow. *The Journal of Engineering Geology* 14(2): 211-222.
- Choi, J.W., Lee, S.R., Min, K.D., and Woo, I. 2004. Landslide Susceptibility Mapping and Verification Using the GIS and Bayesian Probability Model in Boun. *Economic and Environmental Geology* 37(2): 207-223.
- Hong, S.H. 2005. Binomial and multinomial logistic regression. *Kyoyookook*. pp. 141.
- Ji, B.Y., Oh, J.H., and Cha, D.S. 2000. Soil Mechanical Properties and Stability Analysis on Fill Slope of Forest Road. *Journal of Korean Forest Society* 89(2): 275-284.
- Jung, D.H. 1995. Studies on Erosion Amount of the Newly-Constructed Forest Road. *Journal of Korean Forest Society* 84(3): 319-332.
- Kim, H.J., Im, O.B., and Yoo, N.J. 2010. A Case Study on Occurrence of Landslide by Heavy Rainfall in Hongcheon Area in 2006. *Journal of Korean Geotechnical Society* 2010: 877-882.
- Korea Forest Service. 2015. Statistical yearbook of forestry. *Forest Road Density Status*. pp. 229-248.
- Lee, H.G., and Kim, G.H. 2012. Landslide Risk Assessment in Inje Using Logistic Regression Model. *The Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 30(3): 313-321.
- Lee, J.H. 2005. Management system for landslide hazard area using GIS. *Journal of Korean Society of Forest Engineering* 3(3): 245-255.
- Lee, S.R., Lee, M.J., and Won, J.S. 2005. Landslide Susceptibility Analysis and Verification using Artificial Neural Network in the Kangneung Area. *Economic and Environmental Geology* 38(1): 33-43.
- Lee, S.W., Kim, G.H., Yune, C.Y., Ryu, H.J., and Hong, S.J. 2012. Development of Landslide-Risk Prediction Model thorough Database Construction. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 28(4): 23-39.
- Lee, Y.J., Park, G.A., and Kim, S.J. 2006. Analysis of Landslide Hazard Area using Logistic Regression Analysis and AHP (Analytical Hierarchy Process) Approach. *Journal of*

- Korean Forest Society of Civil Engineers 26(5): 861-867.
- Quan, H.C., Lee, B.G., Lee, C.S., and Ko, J.W. 2011. The Landslide Probability Analysis using Logistic Regression Analysis and Artificial Neural Network Methods in Jeju. The Korea Society For Geospatial Information System 19(3): 33-40.
- Woo, C.S., Kwon, H.J., Lee, C.W., and Kim, K.H. 2014. Landslide Hazard Prediction Map Based on Logistic Regression Model for Applying in the Whole Country of South Korea. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 14(6): 117-123.
- Yang, I.T., Chun, K.S., Park, J.K., and Lee, S.Y. 2007. An estimation to landslide vulnerable area of rainfall condition using GIS. The Korean Society for Geo-Spatial Information System 15(1): 39-46.

(Received: May 4, 2016; Accepted: June 17, 2016)