

2차산불피해저감기술개발을 위한 강원도 산불지토양 중 Fe-Mn원소의 분포특성

양동윤¹ · 김주용¹ · 오근창^{1*} · 남옥현¹ · 윤정환²

¹한국지질자원연구원 지질연구부, ²전남대학교 자원공학과

Properties of the Variation of Fe and Mn in the Vicinity of Soil Affected by Forest Fire for the Development of Technics that Reduces Forest Fire-induced 2nd Damage from Gangwon Provinces, Korea

Dong-Yoon Yang¹, Ju-Yong Kim¹, Keun-Chang Oh^{1*}, Wook-Hyun Nam¹ and Chung-Han Yoon²

¹Dept. of Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Taejon 305-350, Korea

²Dept. of Mineral and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

This study was carried out to prove the factor properties of the soil affected by a forest fire through the physical and chemical analysis and the data from the conclusion of those analysis are applied to the development of technics that reduces a forest fire-induced 2nd damage. The forest fire was in December 2000 at Gangreung city and Donghae city, Gangwon provinces, Korea. Soil samples were collected at upper layers (0-5 cm) and bottom layers (5-40 cm) in November 2001 from the burned and control sites. Values of pH in burned soils of the upper layers affected by forest fire are higher than those in control soils. Both the fragments of fire-burned plant and differences of geological properties are resulted in a class of soil. Contents of organic matters in burned soils are higher than those in control soils, exceptionally the contents of organic matters in burned soils that contain coaly shale are lower than those in control soils. Weathering indices in burned soils are higher than those in control soils and it concerned with loss of soil. Iron ions (Fe^{2+} or Fe^{3+}) are easily extracted from the burned soils by rainfall, but Mn ions are straightly exist in the burned soils by physiochemical adsorption of colloid. Through the sequential extraction in the burned soils and control soils, we are certificate the extraction of Fe ions and the disturbance of Mn ions from the burned soils. As a consequence of factor analysis in burned soil and control soil, we are certificate that the influence of forest fire results in a disturbance of positive correlation factors.

Key words : weathering indices, Iron ions, Mn ions, sequential extraction, factor analysis

본 연구는 물리화학적 분석을 토대로 산불지 토양에 영향을 미치는 중요한 인자의 특성을 파악하려 하였으며, 산불지 2차피해저감기법의 개발에 획득한 결과를 활용하는데 그 목적이 있다. 연구대상지는 강원도 강릉시와 동해시에 소재한 임야이며, 산불발생시기는 2000년 12월경이다. 토양시료는 산불발생후 약 1년이 지난 2001년 11월에 산불지와 비산불지, 표토와 심토를 대상으로 구분하여 채취하였다. 산불지 표토 (0-5 cm) 중의 pH는 비교지에 비하여 높은 특성을 보였으며, 심토 (5-40 cm) 중의 pH는 비교지에 비하여 낮은 특성을 보였다. 토성분류 결과, 산불로 소실된 초목류의 잔류물이 산불지 토성에 영향을 주었으며, 지질적 특성에 따라서도 토성의 차이가 있음을 확인하였다. 유기물함량은 산불지에서 높게 나타났지만 예외적으로 탄질세일이 많이 분포하는 산불지에서는 비교지에 비하여 유기물함량이 낮은 것으로 나타났다. 풍화지수는 산불지에서 낮게 나타났으며 이는 산불지 표토의 유실과 관련이 있다. $Fe(Fe^{2+}$ or $Fe^{3+})$ 이온은 강수량에 의하여 산불지 표토로부터 쉽게 용탈되는 반면에 Mn 이온은 콜로이드의 물리화학적 흡착작용에 의하여 산불지 토양 중에 그대로 잔류하는 특성을 확인하였다. 연속추출법을 통하여 산불지에서 Fe 이온의 용탈이 있음을 확인하였으며, Mn 이온의 용출특성이 교란되었음을 확인하였다. 요인분석결과에서도 산불로 인하여 인자들간의 수반특성이 교란되었음을 확인하였다.

주요어 : 풍화지수, Fe 이온, Mn 이온, 연속추출법, 요인분석

*Corresponding author: okc1027@hanmail.net

1. 서 론

2000년 12월경에 발생한 산불피해지역인 강원도의 강릉, 동해지역의 2000년도 강우량은 각각 1109.2 mm와 1175.4 mm로 6월과 9월사이에 70%이상 집중강우하는 특징을 보이고 있다. 이러한 집중강우는 연구지역의 경사가 심한 산불피해지에 대하여 심각한 토양침식을 야기하여 산림복구를 저해하는 요인으로 작용하며, 산사태와 같은 2차적인 재해를 초래하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 산불피해를 입은 이후 생태복원이 현저하게 더딘 주문진읍 향호리 향호농장, 강릉시 강동면 임곡리 61번지, 그리고 동해시 망양동 동해휴게소 부근의 산불지를 대상으로 몇 가지의 지화학

분석을 실시하여 2차산불피해의 인자를 찾아내는 작업을 시도하였다(Fig. 1). 이를 위하여 산불피해를 입은 산불지와 산불피해를 입지 않은 주변의 비교지에 대하여 적절한 방법으로 시료를 채취한 후, 토양의 물리적 특성과 더불어 $Al_2O_3(\%)$, $K_2O(\%)$, $Na_2O(\%)$, total Fe(%), 그리고 Mn성분분석을 통하여 토사유출로 인한 토양의 성분변화를 파악하려 하였다. 또한 이들 자료에 대하여 통계적기법을 활용함으로써 획득한 결과를 토대로 GIS를 이용한 산불지 2차피해저감기법의 개발에 주요한 인자로 활용하고자 하였다.

2. 지질환경

연구지역의 산불지를 중심으로 한 세부지질을 살펴보기 위하여 연구지역일대의 북분리도폭과 강릉-산성우, 석병산, 묵호(옥계)지역의 지질도를 참조하였다. 이 중에서 강릉시 주문진읍 향호리일대(도폭구분명 : 주문리)와 강릉-산성우 도폭(대한지질학회, 1962a)의 일부는 아직까지 지질도폭이 미발간된 지역으로 현장에서 확인한 지질상황과 인접한 북분리도폭(국립지질광물연구소, 1975a)을 참조하였다. 주문진읍 향호리 향호목장 부근의 산불지는 북분리 도폭의 삼형제봉으로부터 동쪽으로 약 6 km의 거리에 위치한다. 북분리도폭에 의하면 삼형제봉을 중심으로 남북방향으로 큰 규모의 암체로 복운모 화강암이 분포하며, 골짜기와 분지에는 충적층이 협재한다. 향호리 산불지 주변에 대한 현장지

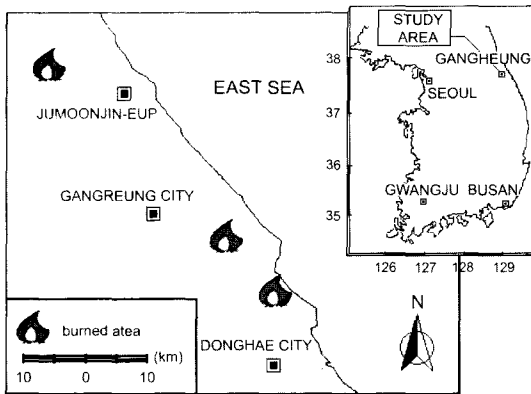


Fig. 1. Location map of the studied area, Gangwon province.

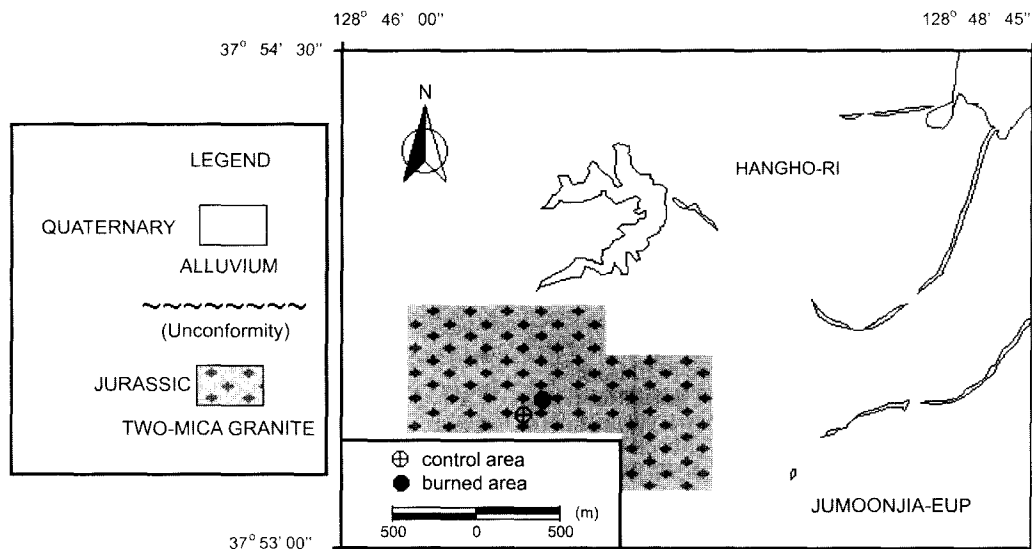


Fig. 2. Geological map in the vicinity of Hyangho-ri, Gangreung city.

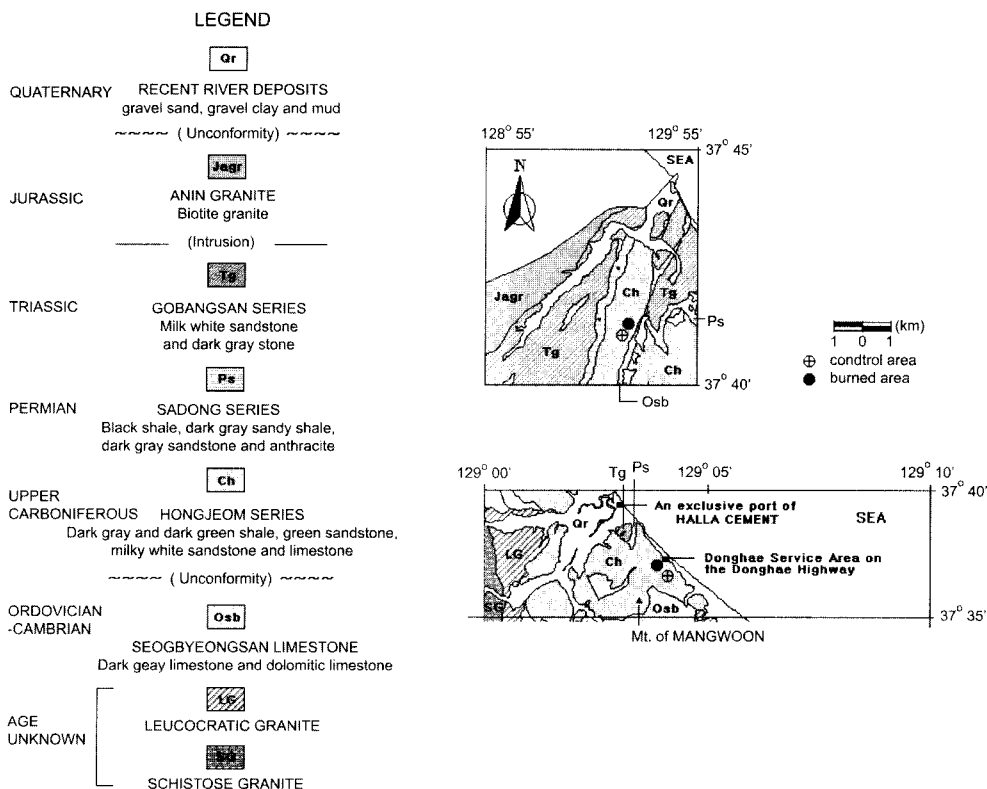


Fig. 3. Geological map in the vicinity of Yimgok-ri of Gangneung city and Donghae Service Area of Donghae city.

질조사결과, 중생대 북운모화강암과 제4기의 충적층이 널리 분포하고 있음을 확인하였으며, 골짜기에 인접한 지면에서는 풍화대의 깊이가 최고 2 m에 도달하는 곳도 있다(Fig. 2). 강릉시 강동면 임곡리 대수원 61번지 인가로부터 북동방향으로 분포하는 산불지는 상부석탄기의 홍점통이 큰 암체로 발달하고 있다. 이 암체는 주로 암회색 또는 암녹색의 셰일, 녹색 사암, 그리고 유백색의 사암과 석회암으로 구성되어 있다(대한지질학회, 1962b; 국립지질광물연구소, 1975b). 현장조사결과, 산불지와 그 주변 암체는 암회색의 탄질 셰일이 전적으로 우세하게 분포하는 특징을 보이고 있으며, 반경 3 km 이내로 크고 작은 광업소가 다수 분포하고 있다(Fig. 3). 동해시 망상동 동해휴게소와 서쪽의 망운산사이에 위치하는 산불지는 임곡리의 산불지와 같은 상부석탄기의 홍점통이 큰 암체로 발달하고 있다(대한지질학회, 1962c; 국립지질광물연구소, 1975b). 그러나 임곡리의 산불지주변에 분포하는 탄질셰일보다는 훨씬 밝은 회색의 셰일층이 전적으로 분포하고 있으며, 유백색의 사암과 석회암이 전석 또는 노두로 관찰되었다. 토양층의 발달은 임곡리와 비교하면 양호한 차별성을

보이고 있다(Fig. 3).

3. 시료의 채취 및 실험방법

산불피해를 입은 후 약 1년정도 경과한 산불지를 대상으로 침식작용이 활발한 능선과 사면에 대하여 2001년 11월 1일부터 11월 4일까지 burned soil 10 개 site, control soil 5개 site를 선정하여 각각 표토를 채취하였으며, 동해휴게소 산불지에서는 상부토양(0~5 cm)과 하부토양(5~40 cm)을 채취하여 10 mesh로 체질한 다음 실험실에서 풍건하였다(Fig. 4). 입자의 크기 -10 mesh는 보통 토양으로 규정되는 입도로서 토양의 pH측정과 유기물함량(Organic matters)의 측정에 이용되었으며, -80 mesh는 화학분석용으로 사용하였다. 각 피해지의 지형지질분석, 시료지점별 경사도, pH, 유기물함량(%), 입도분석 및 total Fe(%)와 Mn(%)분석을 통하여 2차산불피해의 정도와 유형을 파악하려 하였으며, 대상지 시료의 풍화정도를 확인하기 위하여 Al₂O₃(%), K₂O(%), Na₂O(%)를 분석대상원소로 추가하였다.

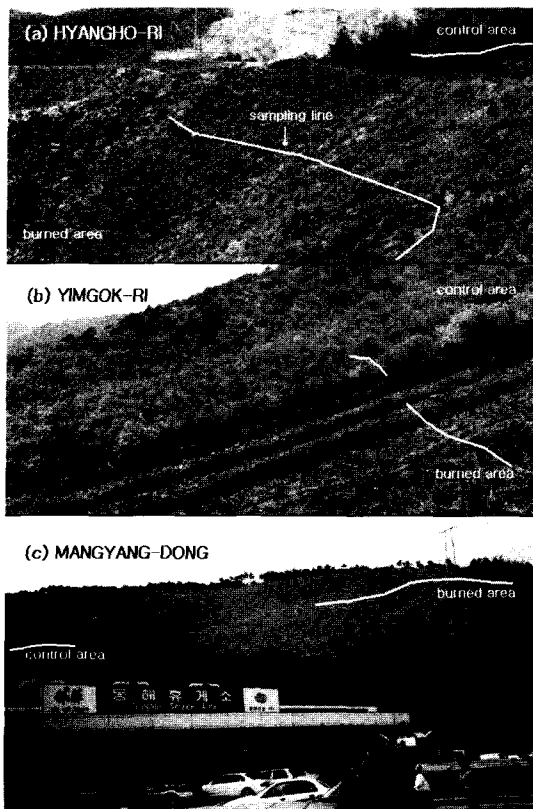


Fig. 4. Photographs of the studied area. (a) Site of Hyangho-ri (b) Site of Yimgok-ri (c) Site of Mangyang-dong

3.1. 경사도(slope)

산불지와 비교지의 경사를 측정하기 위하여 측정자의 눈높이에 맞추어 깃발을 부착한 풀을 시료채취지점의 경사를 대표하는 지점에 세우고 이를 클리노미터에 부착된 고각계를 이용하여 읽는 방법으로 경사를 측정하였다.

3.2. 수소이온농도(pH)

산불지와 비교지 토양시료의 pH는 Hoffman(1987)이 제안한 현장 측정 방법과 Rump and Krist(1988), 전효택과 최완주(1992) 등이 실시한 실험실 측정방법을 참고하여 실내에서 건조시킨 시료를 대상으로 측정하였다. 실험방법은 -10 mesh의 건조시료 10g에 증류수 25ml를 가하여 교반기에서 1시간 혼탕한 후 10분간 방치한 뒤 pH 4, 7, 10의 완충용액으로 보정한 Corning의 pH meter로 상등액의 pH와 Eh를 측정하였다. 시료의 측정이 완료된 시점에서 다시 pH 보정용액(7.0)으로 pH meter의 감도와 오차를 확인한 후,

시료의 pH측정값에서 오차를 보정하였다.

3.3. 입도분석

시료의 입경분포를 확인하기 위하여 이물질을 제거한 원래의 시료를 5~7g정도 vial에 취하여 MALVERN instruments의 MASTER SIZER-20으로 입도를 분석(Particle Size analysis : PSA)하였다.

3.4. 유기물 함량

유기물함량은 이상한(1989)에 의한 방법과 공정시험방법(동화기술편집부, 1998)을 참고로 하였다. 시료를 105~110°C에서 약 3시간 건조해서 desiccator(건조기) 중에서 방냉한 시료를 중량기(W)의 백금도가니에 정확히 평취(W₁)하여 이것을 처음에는 저온에서부터 10°C/min으로 승온하여 550°C로 1시간 강열한 후 -10°C/min으로 온도를 강하시켰다. 이 시료를 desiccator(건조기) 중에서 방냉하고 전자저울을 이용하여 정확히 칭량하여 재차 30분간 강열해서 칭량하는데 이 조작을 일정한 값(W₂)이 정량될 때까지 반복하였다. 유기물함량은 다음의 식에 의한다.

$$\text{Organic matters(\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W} \times 100$$

W : 도가니 무게

W₁ : (도가니+시료) 무게

W₂ : 회화후의 (도가니+시료) 무게

3.5. 화학분석

산불지 토양과 비교지 토양 중 Fe-Mn함량분석을 위하여 -80 mesh로 체질한 시료에 혼합산(HF/HClO₄/HNO₃)을 가하는 완전분해방식에 의하여 시료 중 Fe와 Mn의 총함량을 구하였으며, 5단계의 연속추출공정(정명채, 1994)을 통하여 시료의 각 단계별 Fe와 Mn의 용출특성을 확인하고자 하였다. 분해후의 여액을 증류수로 적당량 희석하여 Fe와 Mn을 포함한 몇가지 성분 원소를 varian의 AAS(Atomic Absorption Spectrometry)로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 경사도

연구지역의 산불지와 비교지는 연구의 목적상 경사가 가파른 지점을 선택하였기 때문에 비교적 높은 경사도를 나타내고 있다. 강릉시 향호리의 산불지와 비교지의 경사도는 각각 평균 26.4, 25.0, 임곡리의 산불

Table 1. Range and average value of the characteristics in burned soils and control soils from the studied area.

Characteristics		Samples							
		A	B	C	D	E	F	G	H
slope	range	18.0~35.0	18.0~32.0	24.0~36.0	25.0~30.0	22.0~35.0	24.0~31.0	-	-
	average	26.4	25.0	27.2	27.8	27.5	27.6	-	-
pH	range	5.24~6.34	5.25~5.46	5.35~5.82	4.90~5.31	5.87~7.30	5.67~6.09	5.18~6.04	5.54~5.91
	average	5.70	5.36	5.54	5.13	6.41	5.83	5.62	5.71
Organic matters (%)	range	5.41~10.5	5.00~7.55	5.92~15.6	7.80~14.6	4.65~17.6	6.45~8.72	4.64~7.39	4.29~6.94
	average	7.14	6.16	9.34	12.3	8.42	7.62	5.80	5.86
Al ₂ O ₃ (%)	range	7.78~16.0	13.3~14.6	9.80~12.4	9.49~11.9	9.49~14.8	14.6~18.8	10.9~16.0	11.9~23.8
	average	11.8	14.2	11.2	10.4	12.4	15.8	13.4	15.3
K ₂ O(%)	range	3.99~8.64	5.39~10.1	1.66~2.78	1.69~2.14	1.79~3.00	1.90~2.45	1.99~3.64	2.16~3.32
	average	6.31	8.07	1.97	1.85	2.26	2.13	2.55	2.67
Na ₂ O(%)	range	1.23~3.19	1.04~1.50	0.52~1.24	0.64~0.82	0.54~1.08	0.39~0.67	0.41~1.01	0.66~0.85
	average	1.84	1.25	0.75	0.74	0.72	0.51	0.66	0.76
total Fe(%)	range	1.14~2.18	1.44~1.72	1.68~2.80	1.78~1.90	2.05~4.73	2.89~3.98	2.39~5.32	3.25~5.14
	average	1.51	1.55	2.16	1.85	3.04	3.36	4.08	4.12
total Mn (ppm)	range	186~666	180~294	198~1254	276~342	426~1572	312~744	144~1224	336~426
	average	364	246	437	310	817	479	393	389
WI	range	1.11~1.78	1.25~1.96	3.00~5.24	3.20~4.82	3.23~4.94	5.32~7.84	3.25~4.99	3.62~5.97
	average	1.46	1.58	4.20	4.06	4.21	6.03	4.25	4.42

*Abbreviations are A: burned soil of hyangho-ri, B: control soil of hyangho-ri, C: burned soil of Yimgok-ri, D: control soil of Yimgok-ri, E: burned soil of the upper layer from the site of Mangyang-dong, F: control soil of the upper layer from the site of Mangyang-dong, G: burned soil of the bottom layer from the site of Mangyang-dong, H: control soil of the bottom layer from the site of Mangyang-dong, and WI: Weathering Index.

지와 비교지의 경사도는 각각, 평균 27.2, 27.8, 그리고 동해시 망양동 동해휴게소인근 산불지와 비교지의 경사도는 각각 평균 27.5, 27.6정도인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 강릉시 향호리에 위치한 연구지의 경사도가 서로 비슷한 경사도를 갖는 다른 두 지점에 비하여 상대적으로 완만한 경사지인 것을 나타낸다 (Table 1).

4.2. 수소이온농도

토양의 pH는 보통 3~11정도이며 7등급으로 분류된다(임연풍, 1996). 연구지역 산불지와 비교지의 pH범위는 각각 5.18~7.30, 4.90~6.09로 산불지 토양은 약 산성토(pH=5~6.5), 중성토(pH=6.5~7), 그리고 약알카리토(pH=7~8)의 영역에 분포하며, 비교지 토양은 산성토(pH=4~5)와 약산성토(pH=5~6.5)의 범위에 해당하는 차이를 나타내고 있다. 일반적으로 중금속 양이온들은 산성조건에서 이동성이 가장 활발하고, 보통 4.0~8.5의 pH값을 가지며, 일반토양(mineral soil)에서는 6.5, 이탄질 토양(peaty soil)에서는 5.5정도가 식물의 생장에 최적의 pH로 보고된 바 있다(Alloway,

1995). 산불지의 pH에 관한 국외의 연구로는 산불발생 후 pH가 낮아졌다는 연구(Beaton, 1959; Tarrant, 1956)와 pH의 변화가 없었다는 연구(Burns, 1952) 등이 있으며, 국내에서는 산불지와 비산불지, 그리고 심도별 pH차이가 없었다는 연구(박관수, 1999) 등이 보고된 바 있다. 그러나 비교지, 산불발생직후, 2주후, 그리고 1년후를 대상으로 한 연구(Kutieli *et al.*, 1995)에서는 산불직후에는 pH값의 차이가 없었지만 지점별로 2주부터 1년 후까지 증가하기도 하며, 1년정도 지나서 비교지와 비슷하게 pH값이 떨어지는 경향이 있음을 보고하고 있다. 즉 파괴된 식생의 회복정도에 따라 pH의 변화가 나타나는 것이다.

본 연구지역내 표토(0-5 cm)의 pH도 3지점 모두 비교지 토양에 비하여 산불지 토양에서 높게 나타났으며(Table 1, Fig. 5), 이는 산불로 인하여 소실된 수목과 유기층의 산화로 인하여 양이온들이 표토로 유입된 결과로 pH가 상승하였기 때문이다. 그리고 동해휴게소 부근의 산불지와 비교지의 심토(5-40 cm)에서는 산불지보다는 비교지에서 오히려 높은 pH를 나타냈는데, 이는 초목류의 생장활동이 pH를 상승시키는 작용을 한

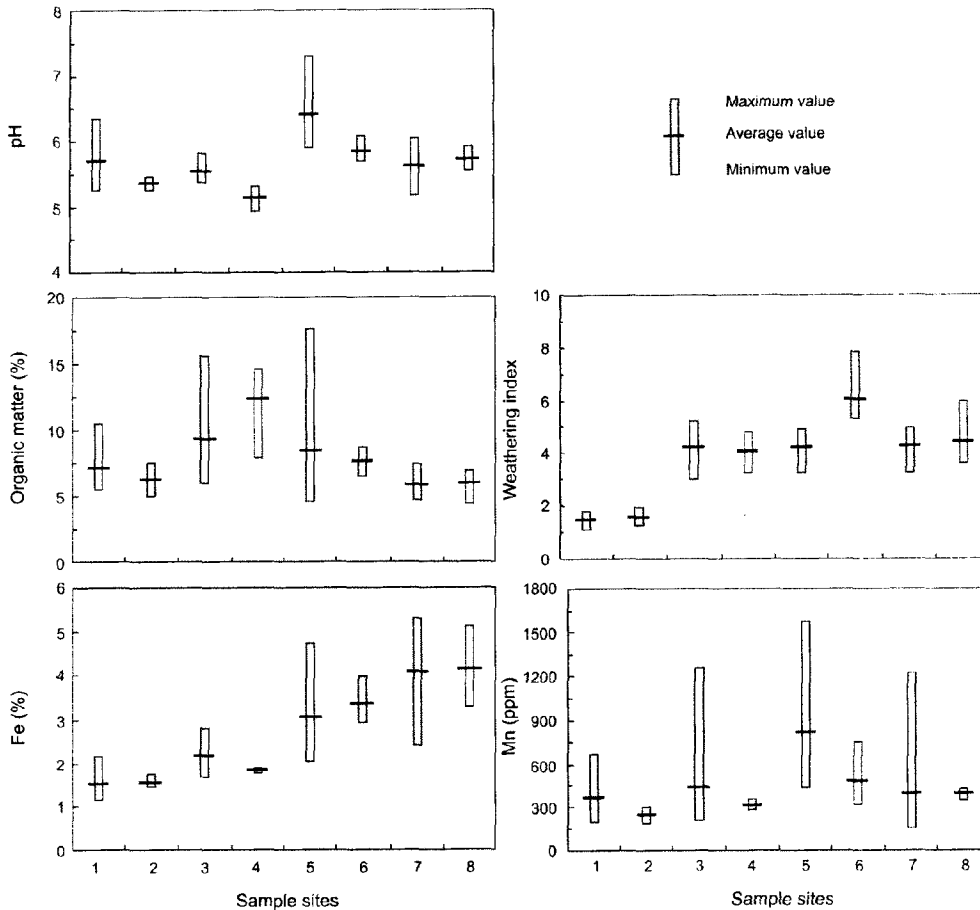


Fig. 5. Physical and chemical properties of soil from the studied area. Abbreviations are 1: burned soil of hyangho-ri, 2: control soil of hyangho-ri, 3: burned soil of Yimgok-ri, 4: control soil of Yimgok-ri, 5: burned soil of the upper layer from the site of Mangyang-dong, 6: control soil of the upper layer from the site of Mangyang-dong, 7: burned soil of the bottom layer from the site of Mangyang-dong, 8: control soil of the bottom layer from the site of Mangyang-dong.

것으로 사료된다.

4.3. 토성분류

토양 무기질입자의 입경조성(기계적 조성)에 의한 토양의 분류를 토성(soil texture, soil class)이라고 하며, 이는 모래, 실트, 점토 등의 함유비율에 의하여 결정된다. 토양의 기계적 분석으로 조립질과 세립질을 포함한 모래(Φ 2~0.02 mm), 실트(Φ 0.02~0.002 mm) 및 점토(Φ <0.02 mm)의 백분율을 산출하여 삼각도표법을 이용하면 토성을 쉽게 결정하여 구분할 수 있다. 토양의 입경은 토양내의 중금속원소함량에 대한 변수 중에서 가장 많은 영향을 주는 요인이라고 할 수 있다. 토양의 입경이 적을수록 비표면적이 커지게 되고 토양내의 공극수에 이온상태의 중금속원소들이 흡착하

게 되어 토양내 중금속원소함량이 높아지는 것으로 알려져 있다.

향호리 산불지와 비교지의 토성을 분류한 결과, 비교지의 토성은 loam영역에서 silt loam영역에 분포하는 반면에 산불지의 토성은 비교지에 비하여 입자의 크기가 다소 적은 silt loam영역에 분포하는 특성을 나타냈으며(Fig. 6), 이러한 결과는 초목류의 소실로 인하여 재로 변한 유기물 등이 아직 산불지에 그대로 존재하기 때문에 나타난 결과로 해석된다. 임곡리의 토성분석결과에서는 모든 시료가 silt loam영역에 분포하였으며, 산불지의 토성에 비하여 비교지의 토성이 loam영역쪽에 치우치는 결과를 나타냈다(Fig. 6). 망양동 동해휴게소 표토시료도 임곡리시료의 토성과 동일한 결과를 나타냈으며(Fig. 7), 세지역의 표토에 대한 토성분석

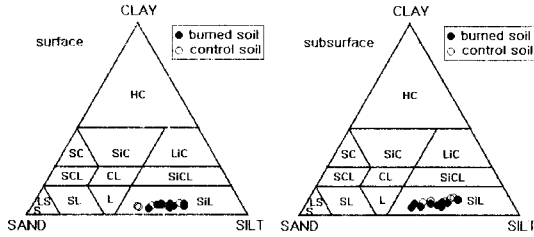


Fig. 6. Soil properties of the burned soil and control soil from Hyangho-ri and Yimgok-ri sites. Abbreviations are S: sand, LS: loamy sand, SL: sandy loam, L: loam, SiL: silt loam, SCL: sandy clay loam, CL: clay loam, SiCL: silt clay loam, SC: sandy clay, SiC: silty clay, LiC: light clay, HC: heavy clay

결과는 산불지에 비하여 비교지에서 입경이 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 향호리의 경우에서 기술한 것처럼 초목류의 소실로 인하여 재로 변환 유기물 등이 아직 산불지에 그대로 잔존하여 나타난 결과이다.

망양동 동해휴게소 심토(5-40 cm)의 토성도 연구지역 표토의 토성처럼 모든 시료가 silt loam 영역에 분포하지만 비교지시료의 입경이 다소 굵은 표토의 경우와는 달리 비교지와 산불지의 시료가 서로 혼재하는 특징을 보이고 있다(Fig. 7).

토성분류결과, 지역간 기반암의 차이에 따른 토성의 차이가 있음을 확인하였다. 향호리 산불지부근의 기반암은 복운모화강암으로 오랜 풍화의 영향으로 풍화대가 깊고 석영과 장석이 주성분인 굵은모래가 잘 발달한 반면에 임곡리와 망양동 산불지부근의 기반암은 각각 탄질셰일과 암회색 셰일(dark gray shale)이 우세하게 분포한다. 이들 셰일이 풍화를 받게 되면 미분의 loam을 형성하게 되며, 이러한 지질적 차이가 지역간의 토성차이로 나타나 다른 두 지역에 비하여 향호리의 토성이 다소 입경이 굵은 loam 영역에 가깝게 분포한 것으로 사료된다.

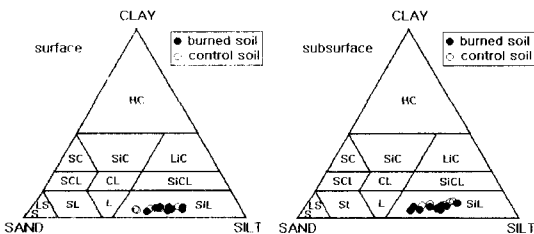


Fig. 7. Soil properties from the burned soil and control soil of upper layer (0-5 cm) and bottom layer (5-40 cm) in the vicinity of Donghae Service Area, Mangyang-dong, Donghae city. Abbreviations are same as Fig. 6.

4.4. 유기물 함량

토양내의 유기물함량은 경작지에서 10%이내, 일반 토양(mineral soil)에서는 5%이내이다. 주로 표토층에 많이 존재하며, 심부로 내려갈수록 감소한다(Alloway, 1995).

본 연구지역내에서 기반암이 풍화되어 토양화가 비교적 잘 진행된 주문진읍 향호리와 동해휴게소 부근 연구지 표토(0-5 cm)에서는 비교지에서 각각 6.16%, 7.62%, 산불지에서 각각 7.14%, 8.42%로 산불지토양에서 높게 나타났지만 임곡리 산불지의 경우에는 토양대의 발달이 미진한 반면에 탄질셰일이 전석의 형태로 산불지와 비교지의 표토층에 우세하게 분포하므로 유기물함량이 다른 지역에 비하여 높게 나타났으며, 비교지의 유기물함량이 12.3%인 것에 비하여 산불지의 유기물함량은 9.34%로 낮은 특징을 보이고 있다. 이는 탄질셰일성분 중의 유기물이 산불로 인하여 소실된 결과인 것으로 판단된다. 산불지후, 표토에서의 유기물함량은 일시적으로 늘어나지만 일정 시간이 경과하면 강우나 강설등의 영향에 의하여 비교지에 비하여 오히려 낮아지는 경향을 갖는다. 이러한 결과는 산불발생 후, 3년 5개월이 지난 시점의 유기물함량을 대상으로 한 연구(박관수, 1999)에서 비산불지의 유기물함량이 높게 나타난 결과로도 확인할 수 있다.

깊이에 따른 유기물함량을 알아보기 위하여 표토(0-5 cm)와 심토(5-40 cm)를 비교한 동해휴게소 부근의 산불지에서는 산불지와 비교지 모두 심토보다는 표토에서 유기물함량이 높은 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 5). 이는 일반적으로 토양내 유기물함량은 심도가 깊어질수록 지수함수적으로 감소한다는 연구결과(Eswaran et al., 1995)와 더불어 초목의 식생작용 등에 의하여 지표에 가까울수록 유기물함량이 높게 나타나는 자연현상과도 일치하는 내용이다.

4.5. 풍화지수

암석의 풍화는 암석에서 흙으로의 일방적인 물리·화학적 변화이다. 따라서 풍화정도의 판정은 물리적, 역학적, 광물적, 화학적인 것 등 다양한 방법이 가능하다. 그러나 각각의 판정법은 이용 목적에 따라 그 방법이 달라질 수 있다. 특히 화학조성의 변화에 따라 풍화도를 측정하는 방법으로 지질학, 광물학, 토양학에서 가장 널리 쓰이는 방법으로서 비교적 용탈하기 어려운 Al₂O₃를 기준으로 하여 성분 변화가 큰 K₂O + Na₂O에 대한 비로 표현하는 방법이다(박춘식, 1996).

본 연구에서는 이 방법을 이용하여 풍화지수를 산정하였다.

$$\text{Weathering index} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}$$

풍화지수의 값은 기반암의 Al_2O_3 , Na_2O , K_2O 의 함량에 따라 초기 값의 크기가 결정되어지나 공통적인 성향은 풍화가 진행됨에 따라 그 값이 증가한다는 것이다. 그러므로 기반암에 가까울수록 풍화도의 값은 0에 가까우며, 풍화가 진행됨에 따라 풍화도 값은 커지게 된다.

본 연구지역에 대한 풍화지수 범위는 주문진읍 향호리의 산불지가 1.11~1.78(평균 1.46), 비교지가 1.25~1.96(평균 1.58)으로 비교지의 풍화지수가 높게 나타나며, 임곡리의 경우에는 산불지는 3.00~5.24(평균 4.20), 비교지는 3.20~4.82(평균 4.06)로 서로 비슷하지만 산불지의 풍화지수가 약간 높게 나타나고 있다. 또한, 동해휴게소부근 산불지 표토(0~5 cm)의 풍화지수는 3.23~4.94(평균 4.21), 비교지 표토에서는 5.32~7.84(평균 6.03)로 비교지의 풍화지수가 더 높은 것으로 나타났으며, 심토(5~40 cm)에 대한 풍화지수도 산불지에서 3.25~4.99(평균 4.25), 비교지에서 3.62~5.97(평균 4.42)로 비교지의 풍화지수가 더 높게 나타났다(Table 1, Fig. 5). 풍화도값이 낮을수록 기반암에 가까운 상태를 의미하므로 연구지역 산불지의 풍화도값이 낮게 나타난 것은 산불로 인한 초목 식생의 파괴가 산불지 표토의 삭박을 초래한 결과로 사료된다. 그러나 임곡리의 경우에는 전술한 것처럼 탄질 세일이 전석으로 표토층에 산재하여 있으며, 토양의 발달이 미약한 상태에서 강우나 강설, 그리고 바람 등에 인한 2차적인 토양유실의 영향이 크지 않았을 것으로 사료되며, 망양동 동해휴게소 심토의 경우에는 산불로 인하여 표토부근은 삭박의 영향을 받았지만 심토(5-40 cm)까지의 영향은 크지 않은 것으로 해석할 수 있다.

4.6. Fe함량 분포특성

지각내 Fe함량이 높기 때문에 토양 중 Fe함량도 3.8%로 비교적 높게 분포한다. 또한, 회화토, 부식토의 Fe함량은 0.35~0.59%로 비교적 낮은 반면에 흥토의 Fe함량은 9.3%로 비교적 높은 것으로 알려져 있다(임연풍, 1996).

실험의 신뢰성을 높이기 위하여 blank test, duplicate test, overall recovery rates test등을 실시하였으며,

이의 결과를 종합하여 결과값을 분석하고 보정하는데 참조하였다. 연구지역의 Fe함량은 풍화도분석결과와 마찬가지로 임곡리의 경우를 제외하고는 산불지보다는 비교지에서 높은 함량 분포를 나타냈으며, 표토와 심토를 비교한 결과는 비교지와 산불지 공통으로 심토에서 더 높은 Fe함량분포를 나타내고 있다(Table 1, Fig. 5). 산불로 소실된 초목류 중의 Fe원소는 Fe^{2+} 에서 Fe^{3+} 로 쉽게 왕복전환이 가능하므로 강우나 강설등에 의하여 산불지인 고지대에서 농선을 따라 골짜기로 쉽게 용탈되었을 것으로 사료된다. 따라서 Fe함량은 산불지보다는 비교지에서 오히려 높은 함량분포를 나타내는 것으로 해석되며, 심토층의 Fe함량이 높은 이유도 이러한 이유일 것으로 사료된다. 그러나, 임곡리의 경우는 예외적으로 비교지(평균 1.85%)보다는 오히려 산불지(평균 2.16%)에서 더 높은 Fe함량을 보이는데, 이는 표토의 발달이 현저히 미약한 임곡리의 산불지에서 산불로 인하여 산화철의 함량은 증가하였지만 강우나 강설등에 의하여 유실될만한 표토환경이 상대적으로 적박했던 관계로 비교적 유실의 영향이 적었던 것으로 해석할 수 있다. 그러나 연구지 표토에 산재한 탄질세일이 산불로 인하여 어떠한 영향을 받았는지 고려할 여지가 있다고 본다.

연속추출법에 의한 산불지와 비교지 표토(0-5 cm) 중 Fe의 단계별 용출특성은 5단계의 Residual > 4단계의 Organic and sulphides > 1단계의 Exchangeable > 3단계의 Fe and Mn oxides > 2단계의 Carbonate or specially absorbed fraction의 순서로 함량이 높은 특성을 보였다. 또한, 동해시 망양동 동해휴게소부근의 산불지와 비교지 심토(5-40 cm)의 연속추출실험결과 표토와는 조금 달리 5단계의 Residual > 1단계의 Exchangeable > 3단계의 Fe and Mn oxides > 4단계의 Organic and sulphides > 2단계의 Carbonate or specially absorbed fraction의 순서로 함량이 높은 용출특성을 나타냈다(Table 2, Fig. 8).

Fe의 용출특성에서 특이한 사항은 심토에서 4번째로 낮은 용출함량을 나타냈던 4단계의 Organic and sulphides fraction이 표토에서는 2번째로 높은 용출함량을 나타낸 점이다. 이는 바꾸어 말하면 토양중에 비교적 약한 결합력의 형태로 존재하는 1단계와 3단계 중의 Fe이온들이 산불후에 강우등에 의하여 Fe성분이 용탈되어 나타난 결과로 해석된다.

4.7. Mn함량 분포특성

토양 중 망간의 함량은 850 ppm으로 지각 중 망간

Table 2. Sequentially extracted Fe and Mn concentrations in burned soils and control soils of the upper layer from the studied area.

Fe (ppm)		1	2	3	4	5
A	range	14.2~308	20.1~33.8	45.2~151	72.2~194	8163~20887
	average	136	29.0	80.1	136	11582
B	range	8.60~151	36.6~41.7	50.1~69.4	82.4~111	7549~12974
	average	79.1	39.2	58.6	96.6	10790
C	range	67.4~271	10.8~49.6	85.0~264	755~935	13896~28548
	average	162	34.3	157	825	18204
D	range	14.0~122	17.5~29.4	56.4~270	726~937	12762~13522
	average	77.8	24.2	136	806	13262
E	range	45.9~266	1.92~12.3	78.6~177.9	145~244	18765~49869
	average	123	6.11	123.4	193	31535
F	range	18.0~179.7	0.56~17.4	81.5~124.8	152~195	17577~42444
	average	69.7	11.4	105.7	176	32108
G	range	51.4~223	2.16~18.6	60.2~106	11.1~59.4	21087~66600
	average	108.7	11.5	81.4	30.4	39780
H	range	86.3~161	0.88~9.60	67.7~127	19.0~78.4	25492~48060
	average	126.9	4.75	94.7	44.8	35002
Mn (ppm)		1	2	3	4	5
A	range	6.08~34.2	5.04~51.9	12.5~78.5	8.62~33.8	43.2~299
	average	20.7	16.4	44.4	21.6	152
B	range	8.76~19.3	4.32~8.08	6.88~20.0	4.60~8.88	84.6~169
	average	11.5	6.18	12.1	7.32	114
C	range	3.80~37.8	6.88~29.2	9.90~145	5.50~24.7	101~140
	average	15.6	13.1	41.6	10.9	123
D	range	7.88~52.3	8.08~16.6	16.5~26.4	7.36~15.7	108~122
	average	19.5	14.3	22.4	11.6	113
E	range	5.44~27.3	8.80~23.0	51.1~367	26.6~48.1	128~218
	average	10.0	13.5	161	35.1	155
F	range	0.92~3.48	6.32~13.4	30.8~104	17.4~40.1	110~268
	average	1.99	10.8	67.1	31.9	161
G	range	6.00~16.8	7.92~10.8	7.66~498	5.92~9.74	93.6~205
	average	8.97	9.37	83.5	7.61	143
H	range	4.52~8.08	7.84~10.1	18.4~89.3	5.76~8.40	95.4~234
	average	6.50	8.80	39.5	6.64	146

1: Exchangeable fraction, 2: Carbonate or specially absorbed fraction, 3: Fe and Mn oxides fraction, 4: Organic and sulphides fraction, 5: Residual fraction. AH are same as Table 1.

의 함량인 950 ppm과 비슷하다. 망간은 전이강도가 크지 않은 원소로 육수가 해양으로 흘러갈 때, 환경매질의 변화 때문에 곧 침적해서 MnO_2 , $Mn^{2+}Mn^{4+}O_2(OH)$, MnS , $MnCO_3$ 등의 함망간광물을 형성하기도 하며, 식물의 호흡작용과 광합성작용에 중요한 원소이며, 또한 식물체 내의 황과 인의 신진대사에 영향을 줄 수 있다(임연풍, 1996).

본 연구지역 표토중의 Mn평균함량은 비교지에서 각각 246, 310, 479 ppm, 산불지에서 각각 364, 437, 817 ppm으로 분석되었으며, 심토중의 Mn평균함량은 비교지에서 389 ppm, 산불지에서 393 ppm으로 분석되었다. 연구지역의 표토와 심토를 비교한 결과는 산불지와 비교지 공통으로 표토중의 Mn평균함량이 월등히 높은 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 5). 이러한 결

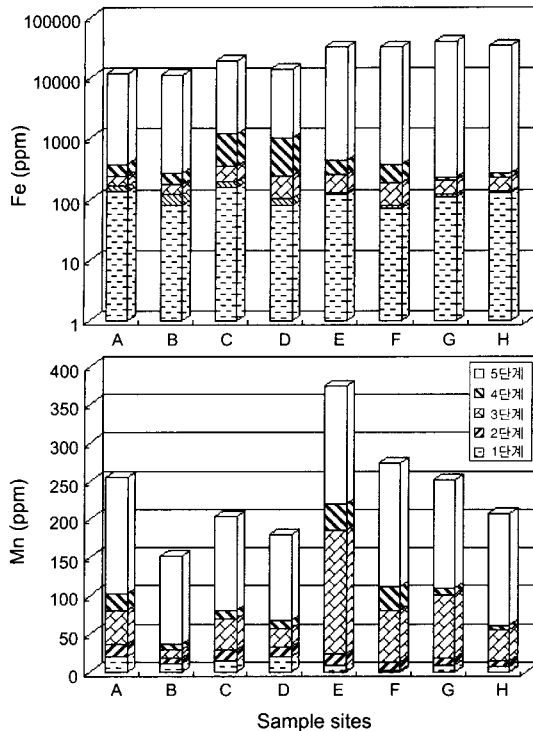


Fig. 8. A diagram of sequentially extracted average concentrations of Fe and Mn from the studied area. Abbreviations are A: burned soil of hyangho-ri, B: control soil of hyangho-ri, C: burned soil of Yimgok-ri, D: control soil of Yimgok-ri, E: burned soil of the upper layer from the site of Mangyang-dong, F: control soil of the upper layer from the site of Mangyang-dong, G: burned soil of the bottom layer from the site of Mangyang-dong, H: control soil of the bottom layer from the site of Mangyang-dong.

과는 산불로 소실된 초목류 중의 Mn이 강설등에 의하여 바다로 유실되지 않고 곧 함망간광물을 형성하여 산불지 토양 중에 그대로 잔류하여 산불지 토양 중 Mn함량이 높게 나타난 것으로 해석되며, 심토 중의 Mn함량에 비하여 표토중의 Mn함량이 높은 이유도 초목류의 생장활동에 의한 영향으로 설명이 가능하다. 본 연구조건과 비슷한 산불발생후 10개월이 지난 산불지를 대상으로 Mn함량을 분석한 연구(Gonzalez, P. J. etc, 1996)에서는 산불지와 비교지 표토 중의 Mn평균함량이 각각 916, 434 ppm, 산불지와 비교지 심토 중의 Mn평균함량은 각각 585, 241 ppm으로 나타났다. 이를 본 연구결과와 비교한 결과, 비교지와 산불지 표토 중의 Mn함량의 차이는 서로 비슷한 경향을 보였으며, 산불지 심토 중의 Mn함량의 차이는 Gonzalez 등(1995)에 의한 실험결과와 상이하였다. 이

러한 결과는 본 연구지역인 망양동 동해휴게소 산불지의 영향이 심토까지 미치지 않은 결과이다.

연속추출법에 의한 산불지와 비교지 표토(0-5 cm) 중의 Mn의 용출특성은 5단계의 Residual > 3단계의 Fe and Mn oxides > 2단계의 Carbonate or specially absorbed \geq 1단계의 Exchangeable \geq 4단계의 Organic and sulphides fraction의 순서로 함량이 높은 특성을 나타냈다. 또한, 동해시 망양동 동해휴게소부근의 산불지 심토(5-40 cm)의 연속추출실험결과는 5단계의 Residual fraction > 3단계의 Fe and Mn oxides > 2단계의 Carbonate or specially absorbed \geq 1단계의 Exchangeable \geq 4단계의 Organic and sulphides fraction의 순서로 함량이 높은 특성을 나타냈으며, 비교지 심토의 연속추출결과도 이와 비슷하지만 더욱 용출경향이 뚜렷하게 5단계의 Residual fraction > 3단계의 Fe and Mn oxides > 2단계의 Carbonate or specially absorbed > 1단계의 Exchangeable > 4단계의 Organic and sulphides fraction의 순서로 나타났다(Table 2, Fig. 8).

Mn이온은 이동성이 거의 없는 원소로서 산불후에도 우수등에 의한 Mn의 용탈은 거의 없었으며, 오히려 미량이나마 표토중에서 Mn함량이 증가한 사실을 확인한 바 있다. 위의 용출결과에서도 함량차이가 많은 1단계와 3단계에서는 표토와 심토중에서의 Mn의 용출특성이 뚜렷하지만 2단계, 1단계, 그리고 4단계에서는 표토중의 용출특성이 교란되는 현상을 확인할 수 있다. 이는 산불로 인하여 유입된 Mn이온들이 비교적 적은 함량으로 존재하는 결합단계에 영향을 주어 나타난 결과로 사료된다.

4.8. 요인분석

강원도내 연구지역의 산불지와 비교지에 대한 물리적 특성값과 Fe, Mn등의 화학분석값에 대하여 주성분분석(Principal Component Analysis)방법으로 요인을 추출하였으며, 적절한 요인을 추출하기 위해 eigenvalue 1이상인 값을 선택하였다. 요인과 변수간의 해석을 쉽게 하기 위하여 Verimax 회전법을 이용하여 eigenvalue를 계산하였으며, 요인별로 0.7이상의 양호(positive)한 요인적재값(회전전과 회전후)을 갖는 원소들을 분류하였다.

강릉시 주문진읍 향호리와 임곡리, 그리고 망양동 동해휴게소부근의 산불지 표토시료에 대한 요인분석 결과, Mn과 pH만이 약 39%의 설명력을 갖고 요인 1로 분류되고 있으며, Verimax 회전후에도 Fe와 pH가 요

Table 3. R-mode factor analysis for the burned soils and control soils in the surface (0-5) from the studied area.

	Principal Components	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
burned soils	Factor 1	Mn-pH	2.34	39.01
	Factor 2	-	1.45	24.11
	Varimax	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
	Factor 1	Fe-pH	2.16	39.01
	Factor 2	Organic matters-Mn	1.62	24.11
control soils	Principal Components	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
	Factor 1	Fe-pH-Mn-WI	3.13	52.15
	Factor 2	Organic matters-slope	1.54	25.75
	Varimax	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
	Factor 1	Fe-pH-Mn-WI	3.13	52.15
	Factor 2	Organic matters-slope	1.55	25.75

Table 4. R-mode factor analysis for the burned soils and control soils in the subsurface(5-40) from the vicinity of Donghae Service Area of Donghae city.

	Principal Components	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
burned soils	Factor 1	Fe-WI-Organic matters-(Mn)-(pH)	3.65	72.98
	-	-	-	-
	Varimax	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
	-	Rotation not possible with 1 factor.	-	-
control soils	Principal Components	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
	Factor 1	WI-Mn-Organic matters-(pH)	2.98	59.62
	Factor 2	-	1.28	25.53
	Varimax	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
	Factor 1	Organic matters-Mn-WI	2.25	59.62
	Factor 2	Fe-(pH)	2.01	25.53

인 1로, 유기물함량과 Mn만이 요인 2로 분류되는 빈약한 수반특성을 나타내고 있다(Table 3). 그러나, 비교지 표토시료에 대한 요인분석결과에서는 Varimax회전 전과 후에 공통적으로 Fe-pH-Mn-WI가 약 52%의 높은 설명력으로 요인 1로 분류되고 있으며, 요인 2로는 유기물함량과 경사도간에 양호한 분류특성을 나타내고 있다(Table 3). 또한, 동해시 망양동 동해휴게소부근의 산불지 심토에 대한 요인분류결과에서는 Fe-WI-Organic matters-(Mn)-(pH)간의 요인분류가 72.98%의 높은 설명력을 갖는 것으로 나타났으며, Varimax 회전

후의 결과는 존재하지 않았다(Table 4). 비교지 심토의 경우에는 회전 전에는 WI-Mn-Organic matters-(pH)간의 요인분류가 약 60%의 높은 설명력을 갖는 것으로 나타났으며, Varimax 회전 후에는 Organic matters-Mn-WI등이 요인 1로, Fe와 (pH)가 요인 2로 그 분류특성이 우세한 것으로 나타났다(Table 4).

이상의 분석을 통하여 본 결과, 산불지 표토의 경우에는 요인분류특성이 단순하고 분류결과에 대한 설명력도 비교지에 비하여 낮은 반면에 비교지 표토의 경우에는 6개의 인자들이 각각 양호한 수반특성을 나타

내는 동시에 높은 설명력을 갖는 것으로 나타났다. 또한, 산불지 심토의 경우에는 비교지 심토의 분류특성과는 약간의 차이를 보였지만 거의 비슷한 수반특성을 갖는 것으로 나타나고 있다. 이를 종합하면 산불로 인하여 교란을 받은 산불지 표토시료가 비교지 표토에 비하여 그 수반특성이 매우 빈약하였으며, 심토의 경우에는 산불지와 비교지의 수반특성이 약간의 차이를 보였지만 산불로 인한 영향은 거의 없는 것으로 해석된다.

5. 결 론

1. 산불지 표토(0-5 cm)의 pH가 비교지에 비하여 높은 특성을 보였으며, 심토(5-40 cm)의 경우에는 비교지의 pH가 더 높은 것으로 나타났다.

2. 토성을 분류한 결과, 산불지 표토에 비하여 비교지 표토의 토립자의 입경이 큰 것으로 나타났으며, 이는 산불로 소실된 초목류의 잔류물이 산불지 표토에 영향을 주었기 때문이다. 또한, 세일이 기반암인 임곡리와 동해휴게소 부근의 연구지에 비하여 복운모화강암이 기반암인 향호리의 토립자 입경이 다소 굵은 것으로 나타나 지질적 특성도 토성에 영향을 주는 것으로 사료된다.

3. 유기물함량은 산불지에서 높은 것으로 나타났으며, 예외적으로 탄질세일이 많이 분포하는 임곡리의 경우에는 비교지의 유기물함량이 산불지보다 높게 나타났다. 표토(0-5 cm)와 심토(5-40 cm)를 비교한 동해휴게소 부근의 산불지에서는 산불지와 비교지 모두 심토보다는 표토에서 유기물함량이 높은 것으로 나타났다.

4. 비교지에 비하여 산불지의 풍화지수가 더 낮게 나타난 것은 산불지 표토의 유실이 있음을 나타내는 증거이다.

5. 산불로 소실된 초목류 중의 Fe는 강우나 강설 등에 의하여 산불지 표토로부터 쉽게 용탈된 것으로 나타났다. Mn은 산불지 표토중에서 곧바로 함망간광물을 형성하여 산불지 토양 중에 그대로 잔류하는 것으로 분석되었다.

6. 연속추출법을 통하여 Fe와 Mn의 단계별 용출특성을 분석한 결과, 산불후 강우 등에 의한 Fe이온의 용탈현상을 확인하였으며, Mn의 용출특성이 교란을 받은 사실을 확인하였다.

7. 산불지와 비교지에 대한 요인분류결과를 종합하면 산불로 인하여 교란을 받은 산불지 표토시료가 비교지 표토에 비하여 그 수반특성이 매우 빈약하였으며, 심토의 경우에는 산불지와 비교지의 수반특성이 약간의 차

이를 보였지만 산불로 인한 영향은 거의 없는 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- 국립지질광물연구소 (1975a) 북분리지질도폭 설명서 (1:50,000). 17p.
- 국립지질광물연구소 (1975b) 강능탄전 정밀지질조사보고서. 54p.
- 대한지질학회 (1962a) 강능-산성우 지질도(1:50,000).
- 대한지질학회 (1962b) 석병산 지질도(1:50,000).
- 대한지질학회 (1962c) 옥계 지질도(1:50,000).
- 동화기술편집부 (1998) 수질오염·폐기물·토양오염 공정시험방법. 동화기술, 655p.
- 박관수 (1999) 산불이 토양의 물리·화학적 특성에 미치는 영향. 한국토양환경학회지, 4권, 1호, p. 119-126.
- 박춘식 (1996) 풍화토의 특성. 엔지니어즈, 232p.
- 이상한 (1989) 한강 상류 호수 퇴적물의 미량금속 분포특성에 관한 연구. 한양대학교 석사학위논문.
- 임영풍 (1996) 의학환경지구화학. 도서출판 준광, 434p.
- 전효택, 최완주 (1992) 도시 및 산업환경 분진 및 토양중의 중금속 원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구. 대한광산지질학회지, 25권, 3호, p. 317-336.
- 정명채 (1994) 토양중의 중금속 연속추출방법과 사례연구. 대한자연환경지질학회지, 27권, 5호, p. 469-477.
- Alloway, B.J. (1995) Heavy Metals in Soils. 2nd(ed.), Chapman & Hall, 368p.
- Baas-Becking, L.G.M., Kaplan, I.R. and Moore, O. (1960) Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation-reduction potentials. J. Geol., v. 68, p. 243-284.
- Beaton, J.D. (1959) The influence of burning on soil in the timber range area of Lac Le Jeune, British Columbia. Can. J. Soil Sci., v. 39, p. 1-11.
- Burns, P.Y. (1952) Effects of fire on forest soils in the pine barren regions of New Jersey. Yale Univ. School of Forestry Bull, n. 57.
- Eswaran, H., Van den Berg, E., Reich, P. and Kimble J. (1995) Global soil carbon resources. In Lal, R., Kimble, J., Levine E. and Stewart B.A.(eds.) Soils and Global Change.
- Gonzalez Parra, J., Cala Rivero V. and Iglesias Lopez, T. (1996) Forms of Mn in soils affected by a forest fire. The Science of the Total Environment, v. 181, p. 231-236.
- Hoffman, S.J. (1987) Geochemical exploration-The soil survey. In Exploration geochemistry : Design and interpretation of soil surveys. Reviews in Economic Geology, v. 3, p. 19-78.
- Kutiel, P., Lavee, H., Segev, M. and Benyamini, Y. (1995) The effect of fire-induced surface heterogeneity on

- rainfall-runoff-erosion relationships in an eastern Mediterranean ecosystem. Israel. Catena, v. 25, p. 77-87.
- Rump H.H. and Krist H. (1988) Laboratory Manual for the Examination of Water, Waste water and Soil. VCH Verlagsgesellschaft, 190p.
- Tarrant, R.F. (1956) Effects of slash burning on some soils of the Douglas-fir region. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., v. 20, p. 408-411.
-
- 2002년 2월 1일 원고접수, 2002년 6월 14일 게재승인.