

문헌고찰에 의한 도시 지역 도로퇴적물의 중금속 특성 및 적정 관리방안*

Heavy Metals in Road Deposited Sediments and Control of Them in Urban Areas: A Review

김도균**

Do Gun Kim**

Abstract

Road Deposited Sediment (RDS) is the solids formed from the wear of road, wear of vehicles, exhausts, and the input of the emissions from various sources out of the roads. RDS is seriously polluted by organic matter, nutrients, and metals. RDS plays an important role as the sink and the transport medium of the associated pollutants because RDS can be carried to the adjacent water system via stormwater runoff. In this regard, the heavy metals in RDS were investigated based on the publications. The contents of the metals in RDS were highly variable. The concentration of Cr, Ni, Cu, Fe, Zn, As, Cd, and Pb in urban RDS in various regions was in a range of 3.16-3,410, 1.15-1,382, 20.2-9,069, 2,980-124,853, 81-2,550, 2.3-214, 0.19-21.3, and 15.21-1,125 mg/kg, respectively. The anthropogenic enrichment of the metals in RDS was confirmed by the high concentration of Cu, Zn, Cd, and Pb. The contents of the metals were higher in industrial and traffic areas than in residential areas, while they were generally increased with decreasing particle size. It is believed that this study's results would contribute to quantifying the metals' load via RDS and establishing control strategies.

Keywords : Road Deposited Sediments, Heavy Metal, Urban Area, Non-Point Source Pollution

1. 서론

도로퇴적물(Road Deposited Sediments, RDS)은 (1) 도로와 도로에 설치된 시설물 마모, (2) 타이어, 브레이크 패드 등의 자동차 부품의 마모, (3) 자동차 배가스, 그리고 (4) 도로 외부의 산업시설 또는 타 배출원에서의 유입, 등에 의해 형성되어 도로 위에 축적되는 입자 물질들로 정의할 수 있다(Charlesworth and Lees, 1999; Seattle Public Utilities and Herrera

Environmental Consultants, 2009; Yuen et al., 2012).

RDS는 도시 지역의 다양한 오염물, 특히 비점오염물질의 축적과 이동에 중요한 역할을 한다. RDS는 다양한 오염물들을 포함하는 입자들이거나 이들에 오염물이 흡착되어, 오염물의 축적되는 요소(sink)로 작용하며, 주로 강우유출수와 함께 주변 수계로 유입되어, 오염물들을 이송하는 매개(transport medium)의 역할을 한다(Fig. 1; Charlesworth and Lees, 1999; Kim and Ko, 2021). 특히, RDS의 중금

*순천대학교 교연비 사업에 의하여 연구되었음.

**국립순천대학교 환경공학과 조교수(dgkim@scnu.ac.kr)

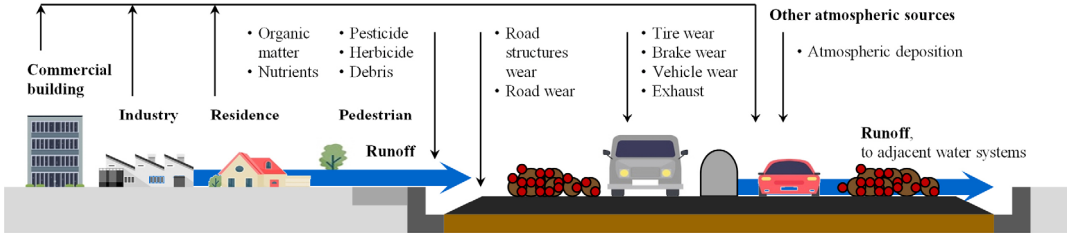


Fig. 1. Sources and Transport of RDS

속 농도는 대륙지각에 비해 상당히 높으며(Rudnick and Gao, 2003), 산업지역 및 상업지역의 RDS가 교외 또는 농촌 지역의 RDS에 비해 높아(Shabbaj et al., 2018; Shabanda et al., 2019), 인위적 요인에 의한 중금속 축적 및 이에 의한 위해 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.

도시 지역에서 RDS에 의한 수계 중금속 오염은 강우유출수의 높은 금속류 농도로 확인되고 있다. 도시 지역 강우유출수의 Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Ni, 그리고 Zn 농도는 각각 0.15-4.9, 0.1-400, 0.056-1,900, 1-9,650, 0.0334-162,000, 0.5-13,100, 5.5-19,100, 그리고 1-21,060 $\mu\text{g/L}$ 에 달한다(Baum et al., 2021; Wijeyawardana et al., 2022; Hwang and Weng, 2015; Kayhanian et al., 2003; Kayhanian et al., 2012; USDOT and FHWA, 2017).

그러므로, 도로에서 RDS의 제거는 다양한 비점오염물질을 제어하는 중요한 대책이 될 수 있다. 침투, 여과, 저류시설 등의 비점오염저감시설들은 변화가 심한 강우유출수 유량 및 수질에 의해 계획이 어렵고 유지관리의 어려움이 있으나(Siriwardene et al. 2007), 도로청소는 비구조적(non-constructive) 대책으로, 예방적 차원의 비점오염 저감이 가능하다는 장점이 있다. 도로에서의 RDS 제거는 주로 청소차에 의한 도로청소(road sweeping)에 의해 이루어져 왔으며, 이에 의한 강우유출수 오염부하 저감이 확인되고 있다(Martinelli et al., 2002; Kim et al., 2014; Kim et al., 2019).

RDS 제거에 의한 오염 부하 저감의 정량적 판단을 위해서는, RDS의 오염물 농도의 파악이 선행되어야 한다. 일반적으로 RDS는 유기물, 휘발성 고형물, 질소와 인 등 영양염류, 각종 금속류에 심각하게 오염되어 있으며, 지역에 따라 매우 큰 편차를 나타내고 있다(Seattle Public Utilities and Herrera Environmental Consultants, 2009; Wei and Yang, 2010; Shabbaj et al., 2018; Shabanda et al., 2019; Kim et al., 2019). 그러므로, RDS의 오염물에 대한 조사연구가 최근까지 이루어지고 있다(Gao et al., 2021).

특히, 중금속류는 자연계에 축적되고 일정 농도 이상에서 높은 악영향을 미치므로(Ma et al., 2017; Shi et al., 2011), RDS의 중금속 농도와 이송, 그리고 수계에 미치는 영향의 파악은 도시 지역의 중요한 중금속 오염원, 즉 RDS와 이에 관련된 중금속에 대한 이해를 크게 높일 수 있을 것으로 생각된다.

그러므로, 본 연구에서는 RDS의 중금속 농도를 문헌을 바탕으로 검토하여, RDS에 의한 수계의 중금속 부하의 산정과 저감 대책의 수립에 도움이 되고자 한다.

2. 도시지역 RDS의 중금속 농도

도시 지역 RDS의 중금속 농도에 대한 분석 연구는 주로 2000년대 초반에 여러 나라의 여러 도시에서 이루어졌다(Table 1). 그러나, RDS의 중금속 농도에

Table 1. The Concentration of Heavy Metals in Urban RDS (mg/kg)

City	Cr	Ni	Cu	Fe	Mn	Zn	Cd	Pb	Reference
Oslo, Norway	-	41	123	-	833	412	1.4	180	De Miguel et al., 1997
Madrid, Spain	61	44	188	-	362	476	-	1927	
Sydney, Australia	42	14	263	19645	567	6.5	0.2	165	Nguyen et al., 2015
Sydney, Australia	49-486	20-208	314-730	22,036-103,000	489-3,966	557-2,117	0.2-1.7	36-379	Mohammed et al., 2012
Sydney, Australia	34	27	160	-	-	850	-	880	Birch and Scollen, 2003
Birmingham, UK	-	41	467	-	-	534	1.6	48	Charlesworth et al., 2003
Coventry, UK	-	130	226	-	-	680	0.9	47	
Inner city, Manchester, UK	-	-	39-113	7664-17214	160-433	402-1,016	-	120-645	Robertson et al., 2003
Outer city, Manchester, UK	-	-	32-283	2492-15,000	49-411	172-2,183	-	25-260	
Avilés, Spain	42	28	183	42	1661	200	22.3	514	Ordenez et al., 2003
Amman, Jordan	-	88	177	7,132	-	358	1.7	236	Jiries, 2003
Istanbul, Turkey	-	32	208	-	398	521	1.9	212	Sezgin et al., 2004
Tokat, Turkey	41	128	38	-	415	98	5.4	266	Tüzen, 2003
Aqaba, Jordan	-	57	67	-	274	-	10.1	165.5	Al-Khashman, 2007
Tehran, Iran	33	35	225	47	1,215	935	10.7	257	Saeedi et al., 2012
Luanda, Angola	26	10	42	-	258	317	1.1	351	Ferreira-Baptista and De Miguel, 2005
Ottawa, Canada	43	15	66	-	431	113	0.4	39	Rasmussen et al., 2001
Hawaii, USA	273	177	167	-	-	434	-	106	Sutherland and Tolosa, 2000
Urumqui, China	54	43	95	-	926.6	294	1.2	54	Wei et al., 2010
Baoji, China	-	33.3-219.3	77.9-259.9	-	544.5-2,335.8	384.9-1,778.3	-	140.6-1,846.6	Lu et al., 2009
Hangzhou, China	60	28	212	-	-	709	3.6	194	Zhang and Wang, 2009
HongKong	-	-	173	-	-	1,450	3.8	181	Li et al., 2001
Taiwan	-	17	51	25	338	467	-	102	Kuo et al., 2009
Singapore	1245	186	9,069	-	-	1696	2.4	338	Joshi et al., 2009
Jilin, China (Highways)	19.6-96.8	11.1-48.1	9.4-53.1	-	-	167-272	0.04-0.11	35.6-68.7	Gao et al., 2021
USA	95	-	105	-	-	240	-	38	Apeyeyi et al., 2011
China	132	41	91	-	-	496	1.86	155	Cai and Li, 2019
Malaysia	28	-	98	-	-	230	-	70	Shabanda et al., 2019
Thailand	-	-	90	-	-	519	21.3	129	Srithawirat and Latif, 2015
India	149	36.4	192	-	-	284	2.65	121	Surayawanshi et al., 2016

영향을 미치는 인자들이 다양하므로(Yuen et al., 2012), 특이한 경향을 나타내지 않았으며, 매우 넓은 범위에서 불균일한 특성을 가진다.

De Miguel et al.(1997)은 RDS의 중금속 연구에서 주목할 만한 초기 연구들을 수행하였다. 이들은 1990년과 1992년 여름에 Spain의 Madrid에서, 그리고 1994년 여름에 Norway의 Oslo에서 RDS를 분석하여, 매우 높은 수준의 Ni, Cu, Zn, 그리고 Pb가 RDS에 함유되어 있음을 밝혔다. Australia의 Sydney에서는 2003년에서 2015년에 걸쳐, 조사가 진행되었으며, Cr, Ni, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, 그리고 Pb의 농도는 각각 34-486, 14-208, 160-730, 22,036-103,000, 489-3,966, 6.5-2,117, 0.2-1.7, 그리고 36-880mg/kg으로, 지역과 조사의 시점에 따라 큰 편차를 나타내었다(Birch and Scollen, 2003; Mohammed et al., 2012; Nguyen et al., 2015). 특히, 인구집중지역에서 채취한 RDS(Nguyen et al., 2015)의 중금속 농도가 다른 지역에 비해(Birch and Scollen, 2003; Mohammed et al., 2012) 낮은 것으로 나타나, 인간의 일상적 활동이 RDS 중금속 농도에 미치는 영향이 불균일하거나 제한적임을 나타내었다.

Charlesworth et al.(2003)은 United Kingdom(UK)의 West Midlands에 속해 있는 Birmingham과 Coventry에서 채취한 각각 100 개와 49 개의 시료를 분석하였다. 조사 당시, Birmingham의 인구는 약 23,000,000 명으로, UK에서 London 다음으로 큰 규모이었으며, 산업, 주거, 녹지 지역 등으로 복합적으로 이루어져 있다. 반면, Coventry는 Birmingham 인구의 약 1/7 수준의 소도시이며, 대부분의 산업시설은 도시 외곽에 위치하고 있었다. 그러나, RDS의 Cu와 Cd는 Birmingham에서, 그리고 Zn와 Ni는 Coventry에서 더 높아, 도시의 규모와 토지 용도와 상관관계는 나타나지 않았다.

Robertson et al.(2003)은 UK North West England의 Manchester 시내와 외곽의 RDS를 분석하였는

데, 시내의 RDS가 외곽에 비해 중금속 농도가 높아, 도시에서 이루어지는 다양한 활동이 중금속 축적에 영향을 미칠 수 있음을 나타내었다.

Ordenez et al.(2003)은 Spain 북부에 위치한 Avilés의 7km² 구역에서 채취한 112개의 RDS를 분석하였다. Avilés는 인구 약 80,000 명의 중규모 도시로, 산업 및 교통이 집중되어 중금속 농도가 높을 가능성이 있다. 분석 결과, 산업지역에 접근한 곳의 RDS에서, Zn, Cd, 그리고 Hg가 각각 4,892, 22.3, 그리고 2.56mg/kg으로, 평균(Table 1)에 비해 높게 나타났다.

도시 지역과 고속도로 RDS의 높은 Ni, Cu, Zn, 그리고 Pb 함량이 Jordan의 수도 Amman과(Jiries, 2003) Turkey(Türkiye)의 Istanbul에 위치한 E-5 highway의 18km 구간에서 확인되었다. E-5 highway는 교통량이 많고, 주변 100-1,000m 내에 거주하는 인구가 많으며, 자동차 수리소 등의 중소규모 사업장이 많다. 한편, Tüzzen(2003)에 의하면, RDS의 중금속 농도가 교통량에 따라 변화하였다.

Al-Khashman(2007)은 Jordan의 Aqaba 만에 위치한 인구 약 120,000 명(2004년 현재)의 Aqaba 시의 RDS를 조사하였다. Aqaba시는 정유, 비료 등이 주요 산업이며 Red Sea 지역에서 중요한 상업용 항구의 역할을 하고 있다. RDS의 중금속 농도는 다른 연구에 비해 높지 않으나, Pb는 유사한 수준을 나타내었다.

Iran의 Tehran에서 채취된 RDS는 Cr, Ni, Cu, Mn, Zn, Cd, 그리고 Pb의 농도가 다른 연구의 RDS와 유사하였으나, Fe 농도는 낮았다(Saeedi et al., 2012). Tehran은 Iran에서 가장 오래된 도시 중 하나로, 당시 중동에서 가장 인구밀도가 높았다.

총 92개의 RDS 시료를 2002년 8월과 9월에 Angola의 수도 Luanda의 중심지와 일부 주거지역에서 채취하였다(Ferreira-Baptista and De Miguel, 2005). 대상지역을 0.25km² 단위로 구분하였고, 도로 등의

불투수 지역 중에서 반지름 5m의 원형 채취지점을 무작위로 선정하였다. RDS의 Cd와 Mn 농도는 다른 지역에 비해 낮았으나, 다른 금속류는 유사한 수준을 나타내었다.

Rasmussen et al.(2001)는 Canada의 Ottawa의 주거지역에서, 무작위로 선정된 10개 지역에서 각각 50 개의 RDS를 채취하였다. 금속류의 농도는 다른 연구에 비해 낮았는데, 이는 산업 및 교통에 의한 금속류 유입이 적은 때문으로 생각된다.

Hawaii의 Manoa basin의 13개 지역의 RDS의 금속류의 농도(Sutherland and Tolosa, 2000)는 다른 산업지역 및 교통밀집지역의 RDS와 유사하였다(Nguyen et al., 2015; Mohammed et al., 2012; Birch and Scollen, 2003; Charlesworth et al., 2003; Robertson et al., 2003; De Miguel et al., 1997). 이는 대상지역의 교통량이 <3200-45,200 대/일로 높은 때문으로 생각된다.

Wei et al. (2010)은 China 북서부 Xinjiang Uygur 자치구의 수도인 Urumqi에서, 2007년 8월에 총 169 개의 시료를 채취하였다. 이들 중, 24 개는 고속도로, 64 개는 간선도로, 65 개는 지선도로, 10 개는 주거지역 도로, 그리고 6 개는 주차장 도로에서 채취하였다. RDS의 평균 금속류 농도는 산업, 상업, 및 교통밀집 지역과 유사하였다.

Lu et al.(2009)은 China 북서부 Shaanxi 주에서 2 위 규모 도시인 Baoji에서 RDS를 채취하였다. 산업 지역, 교통밀집지역, 상업지역 및 주거지역에서 고루 시료를 채취하였는데, 이에 의해 RDS의 금속류 농도의 편차가 매우 컸다. 지역별 금속류 농도는 문헌에 별도로 제시되지 않았으나, Cu와 Zn의 최고 농도는 교통밀집지역의 RDS에서, 최소 농도는 산업 지역, 낮은 교통량 지역, 상업 및 주거지역에서 나타났다.

Zhang and Wang(2009)은 China의 Zhejiang 북부의 Hangzhou에서, 산업, 상업, 공원, 주거 및 교외

지역에서 25 개 시료를 채취하여 분석하였고, Li et al.(2001)은 Hong Kong의 도시 공원에서 45 개의 RDS 시료를 채취하였다. 이들 지역의 RDS는 유사한 금속류 함량을 나타내었다. 한편, Hong Kong의 도시 지역의 공원 토양의 평균 Cd, Cu, Pb, 그리고 Zn 농도는 각각 2.18, 24.8, 93.4, 그리고 168mg/kg, 그리고 외곽 지역 공원에서는 각각 0.15, 5.17, 8.66, 그리고 76.6mg/kg으로, RDS에 비해 매우 낮아(Li et al., 2001), 도시지역 RDS의 심각한 중금속 오염을 반증하였다.

한편, Kuo et al.(2009)은 산업시설 또는 대규모 식당이 없는 Nantou County의 Jiji, Shuili, 그리고 Shinyi에서 RDS를 채취하였다. RDS의 Fe, Al, Mn, As 등의 농도는 하천 토양과 유사하였으나, 교통과 관련된 Pb, Zn, Cu, Ni, 그리고 Mo의 농도는 하천 토양에 비해 높았다.

Gao et al.(2021)은 China의 Jilin 주의 4 개 고속도로(Ring expressway of Changchun city, Changchun-Siping, Jilin-Yanji, Changchun-Jilin, Ring Road of Changbai Mountain)의 RDS를 분석하였으며, 상당 수준의 Cr 및 Zn를 확인하였다.

그 외에도, United States of America(USA)의 주거지역(Apeayei et al., 2011), China의 교통지역(Cai and Li, 2019), Malaysia의 상업지역(Shabanda et al., 2019), 그리고 Thailand와 India의 주거지역(Srithawirat and Latif, 2015; Surayawanshi et al., 2016)의 RDS에 대한 조사가 이루어졌으며, 특히, Cr, C, Zn, 그리고 Pb 농도가 높았다.

Table 1에 정리된 대부분의 연구에서, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, 그리고 Pb의 농도가 높게 나타났다. Fe와 Mn은 대륙 지각(Continental crust)의 주요 성분으로, RDS 뿐만 아니라, 일반 토양에서도 그 농도가 높다(Rudnick and Gao, 2003). 그러나, 높은 Cu, Pb, Zn 농도는 타이어와 도로의 마모, 금속류(Fe, Mg, Ca, Al, Zn 등) 함량이 높은 배가스의 연소 입자, 그리고

윤활유 등에 의한 것으로, 인위적 활동에 의해 RDS의 금속류 농도가 높아졌음을 의미한다(Kreider et al., 2010; Crosby et al., 2014; Agarwal et al., 2015; Kim et al., 2019).

3. 도시지역 용도에 따른 RDS의 중금속 농도

도시 지역은 일반적으로, 주거(residential), 상업(commercial), 산업(industrial), 교통(traffic, 주차장, 터미널 등), 녹지(park, 공원) 지역으로 구성되어 있으며, 이들은 해당 지역의 RDS에 서로 다른 중금속 배출원을 제공할 수 있다. 그러므로, 지역의 용도에 따라 RDS의 금속류 함량이 달라질 수 있으며, 이는 중금속의 원인 규명에 유용한 정보를 제공할 수 있다. 그러므로, 지역에 따른 RDS의 금속류 농도 특성을 검토하였다.

Ahmed et al.(2007)은 Bangladesh의 Dhaka 시에 축적된 RDS를 분석하였다. 채취 지역은 산업지역으로 Dhaka 북부와 중부, Tejgaon, 그리고 Old Dhaka, 상업지역으로 Motijheel과 교통량이 많은 간선도로(>1,500 대/시간), 그리고 주거지역으로는 그 외의 지역으로 교통량은 100-700 대/시간 이었다. 분석 결과, Cr, Ni, 그리고 Pb는 지역별로 유의미한 차이가 없었으나, Cu와 Zn는 산업 > 상업 > 주거 지역의 순이었다.

Gunawardana et al.(2012)은 Australia의 Southeast Queensland의 4개 지역에서 총 16 개의 RDS를 분석하였다. 대상지역 중, Clearview Estate는 주거지역을, Nerang은 산업지역을, Benowa는 주거/산업/상업 복합지역을, 그리고 Surfers Paradise는 주로 상업지역으로 이루어져 있다. 이 지역들에서 채취한 RDS의 중금속 농도는 특별한 차이가 없었으나, Cr, Ni, Cu, 그리고 Cd는 주변 토양에 비해 높았다. 주변 토양의 Cr, Ni, Cu, 그리고 Cd 농도는 각각 0.00, 0.00, 8.09±2.10, 그리고 0.11±0.08mg/kg 이었다. 단, Fe

와 Zn는 주거지역과 주거/산업/상업 복합지역이 산업지역과 상업지역에 비해 높았는데, 이는 Fe와 Zn가 산업활동과 자동차 등에 의함(Crosby et al., 2014; Agarwal et al., 2015; Kim et al., 2019) 배치되는 결과이다. 또한, 전 지역에서 Fe, Zn, 그리고 Pb의 농도가 주변 토양에 비해 높았다. 주변 토양의 Fe, Zn, 그리고 Pb 농도는 각각 61,200±20,000, 352.9±101, 그리고 272.1±98mg/kg 이었다. 이는 RDS의 Fe, Zn, 그리고 Pb가 주변 토양에 의함을 의미할 수 있다.

Jiries(2003)는 Jordan의 수도 Amman의 RDS를 연구하였다. 최소 4개월의 무강우 후, 2001년 8월에, 주거, 주차장, 상업 용도의 36 개 지역에서 RDS를 채취하여 분석하였다. Amman의 퇴적물의 주요 성분이 중금속 농도가 낮은 carbonate rock임을 고려할 때, 분석한 RDS는 심각한 중금속 오염을 나타내었다. Fe 농도는 세 지역이 유사하였으며, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, 그리고 Pb 농도는 주차장과 상업지역의 RDS가 주거지역에 비해 높았다.

Singapore에서는 명확하게 구분되는 주거, 상업, 산업 지역에서, 2007년 5월에서 10월까지 6 개월 간, 매주 RDS를 채취하여 분석하였다(Joshi et al., 2009). 분석된 Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, 그리고 Pb의 전 항목에서 산업지역의 농도가 다른 지역에 비해 월등히 높았다. 주거지역은 상업지역에 비해 Cr, Ni, 그리고 Cu 농도는 높고, Zn 농도는 낮았다. 이는 상업지역의 교통 밀집도가 더 높아, Zn의 원인이 되는 타이어 마모와 윤활유의 사용이 더 많기 때문으로 생각된다. Sri Lanka에서도 상업지역 RDS의 금속류 농도가 주거지역에 비해 높은 것으로 나타났다(Herath et al., 2016).

USA에서 2 개 주거지역(West Seattle, Southeast Seattle)과 1 개의 산업지역(Duwamish Diagonal)의 RDS 분석 결과, Cr, Cu, Zn, Cd, 그리고 Pb 농도는 산업지역이 주거지역에 비해 높아, 산업 배출이

RDS의 중금속의 원인이 될 수 있음을 나타내었다 (Seattle Public Utilities and Herrera Environmental Consultants, 2009). 단, 전 지역에서, Hg 농도는 매우 낮았다.

Malaysia의 Petaling Jaya의 7개 지역의 RDS를 분석한 결과에서도, 주거 또는 상업 지역에서보다, 산업 및 교통 지역을 포함하는 지역에서 채취된 RDS의 중금속 함량이 전반적으로 더 높았다(Shabanda et al., 2019). 이는 도로, 도로시설물, 자동차 등과 산업시설에서의 배출이 RDS 중금속의 원인이 됨을 의미한다.

이는 Saudi Arabia의 Jeddah(Shabbaj et al., 2018)와 China의 Panzhuhua(Yang et al., 2016)에서 수행된 연구에서도 확인되었다. Jeddah는 Red Sea 해안에 위치하며, 교통량이 >1,400,000 대/일로, Saudi Arabia의 최대 도시이다. Jeddah의 주거, 교외, 상업/주거, 주차장, 교통, 그리고 농촌의 7개 지역의 RDS 분석 결과, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, 그리고 Pb 농도는 교통 지역에서 가장 높고, 농촌 지역에서 가장 낮았다(Shabbaj et al., 2018). 특히, 농촌 지역 RDS의 중금속 농도는 다른 지역에 비해 크게 낮았다. Panzhuhua의 교통 지역 RDS의 Cr과 Cu 농도는 주거 지역에 비해 약간 높았으나, Zn와 Pb는 월등하게 높았다(Yang et al., 2016).

Singapore에서도 각각 15개의 시료를 산업지역과 주거지역에서 채취하였으며, Cr, Ni, Cu, Fe, 그리고 Pb 농도가 산업지역에서 더 높았다(Yuen et al., 2012). Zhang and Wang(2009)은 China의 Hangzhou의 여러 지역에서 채취한 25개의 RDS 시료를 분석하였다. Cr과 Ni는 산업지역이, Cu, Fe, Cd, 그리고 Zn는 상업과 산업지역이, Pb는 상업지역이 상대적으로 높았다.

Jeong et al.(2020a)은 우리나라 안산시와 시흥시의 22개 지점에서 RDS를 채취하여 분석하였다. 지점은 주거지역 5개, 교통지역 6개, 주차장 4개, 상업지역 3개, 산업/상업지역 4개이었다. 분석 결과, 산업/상업지역의 RDS의 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, 그

리고 Hg 농도는 각각 3410, 1382, 2109, 2550, 214, 3.16, 551, 그리고 0.09mg/kg으로, 타 지역에 비해 월등하게 높았다. 상업지역의 RDS가 다음으로 높은 중금속 농도를 나타내었다. 교통지역은 종합버스터미널, 물류터미널, 버스 차고지 등으로 선정하였는데, 주거지역에 비해서는 중금속 농도가 높았으나, 주차장에 비해서는 낮았다.

4. 입자 크기에 따른 RDS의 중금속 농도

일반적으로, RDS의 제거에는 청소차에 의한 도로 청소를 이용하는데, 입자 크기가 작아짐에 따라 청소효율이 낮아진 반면, 오염물의 농도는 증가한다(Kim et al., 2014; Kim et al., 2019). 그러므로, 입도에 따른 중금속 농도의 파악은 청소에 의한 RDS 및 중금속 제거율 및 강우유출수 부하량 산정에 유용한 자료이다.

Jeong et al.(2020b)이 광양만의 RDS를 조사한 바에 의하면, Ni, Zn, As, Cd, Pb, 그리고 Hg는 입자 크기가 감소할수록 농도가 증가하였다. 입자의 크기가 감소함에 따라, 그 입자의 비표면적이 증가하므로, 이는 이들 중금속이 입자를 구성하는 성분으로 존재하는 양에 비해, 형성된 입자의 표면에 흡착되어 존재하는 양이 더 많음을 의미한다(Lau and Stenstrom, 2005; Kim et al., 2019). 그러나, Cr와 Cu의 농도는 >1,000 μ m와 <125 μ m에서, 다른 입자들에 비해 높았으며, 이는 Cr와 Cu를 포함하는 입자들이 RDS를 구성할 가능성이 있음을 의미한다.

Lee et al.(2020)은 우리나라 시화공단 RDS의 입도별 중금속 농도를 분석하였다. 조사된 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, 그리고 Hg는 입도가 감소함에 따라, 그 농도가 증가하여, 이들이 RDS의 표면에 흡착되어 존재할 가능성이 높음을 나타내었다(Lau and Stenstrom, 2005; Kim et al., 2019).

Zafra et al.(2011)은 북부 Spain의 Torrelavega

에 위치한 주거지역인 Rufino Peon Boulevard의 RDS를 입도별로 분류하여 중금속 농도를 측정하였다. RDS의 중금속 농도는 입도가 감소함에 따라 감소하였다. 그러나, 그 농도는 산업지역(Jeong et al., 2022b; Lee et al., 2020)에 비해 낮았으며, 이는 중금속 배출원이 적은 때문으로 생각된다.

그러나, 우리나라 고속도로에서 채취한 RDS는 Jeong et al.(2022b) 와 Lee et al.(2020)에서와 같이 높은 중금속 농도를 나타내었다(Kim et al., 2019). 또한, 그 농도는 작은 입자(<63 μ m)에서 큰 입자(2,000-63 μ m)에 비해 더 높았다. Cr, Ni, Zn, 그리고 Pb는 산업지역에 비해 낮았으나, Cu 농도는 산업지역 RDS에 비해 높았다. 고속도로의 밀집된 교통량을 고려할 때, Cu는 자동차와 도로, 그리고 Cr, Ni, Zn, 그리고 Pb는 산업 배출에 의함을 추정할 수 있다.

5. 도로 퇴적물 중금속 오염의 심각성과 적정 관리방안 제언

5.1 도로 퇴적물 중금속 오염의 심각성

대륙지각의 Cr, Ni, Cu, Fe, Mn, Zn, 그리고 Pb 농도가 각각 92, 47, 28, 39176, 774.5, 67, 그리고 17mg/kg임을 고려한다면(Rudnick and Gao, 2003), 본고에서 조사된 대부분의 사례에서, RDS가 중금속에 심각하게 오염된 것으로 판단된다. Sydney (Mohammed et al., 2012), Manchester(Robertson et al., 2003), Hawaii(Sutherland and Tolosa, 2000), Baoji(Lu et al., 2009), 그리고 Singapore(Joshi et al., 2009)의 RDS는 Cu, Fe, Mn, Zn, As, Cd, 그리고 Pb 농도가지각에 비해 높았다(Table 1). 또한, 우리나라의 산업지역(Jeong et al., 2022a; Lee et al., 2020)과 고속도로(Kim et al., 2019)의 RDS는 대부

Table 2. The Concentration of Heavy Metals in RDS in Various Land Uses in Urban Area (mg/kg)

		Cr	Ni	Cu	Fe	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Reference
Dhaka City,	Residential	100.4	22.9	22.2	-	95.9	-	-	34.3	-	Ahmed et al., 2007
Bangladesh	Commercial	107	25.4	47	-	151.7	-	-	75.2	-	
	Industrial	136.1	35.2	104.9	-	168.7	-	-	53.3	-	
Brisbane,	Residential	14.8± 8.70	7.92± 5.00	131.4± 26.0	7,220± 4,000	296.6± 78.0	-	0.51± 0.10	32.5± 12.2	-	Gunawardana et al., 2012
Austalia	Industrial	3.96± 0.40	6.11± 1.80	65.5± 20.0	4,230± 1,200	176.4± 100	-	0.19± 0.10	25.7± 11.0	-	
	Residential/ Industrial/ Commercial	9.37± 2.30	7.01± 1.60	98.4± 24.0	5,730± 1,900	236.5± 42.0	-	0.35± 0.10	29.1± 4.70	-	
	Commercial	3.16± 0.40	4.53± 0.70	70.8± 20.0	2,980± 100	90.4± 23.0	-	0.54± 0.10	38.4± 9.50	-	
	Soil	0.00	0.00	08.09± 2.10	61,200± 20,000	352.9± 101	-	0.11± 0.08	272.1± 98	-	
Sri Lanka	Residential	72	-	57	-	253	-	-	-	-	Herath et al., 2016
	Commercial	67	-	107	-	349	-	-	20	-	
Jordan	Residential	1.73- 5.43	0.96- 1.15	50- 110	5,075- 6,525	200- 285	-	0.15- 0.19	175- 305	-	Jiries, 2003
	Parking	19.13- 46.80	17.5- 42.5	150- 300	5,150- 6,650	550- 675	-	1.43- 1.73	1,000- 1,125	-	
	Commercial	3.73- 19.03	12.5- 25.0	175- 325	4,275- 9,125	250- 525	-	0.16- 1.66	950- 1,125	-	

Table 2. The Concentration of Heavy Metals in RDS in Various Land Uses in Urban Area (mg/kg) (Continued)

		Cr	Ni	Cu	Fe	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Reference
Singapore	Residential	85.7± 11.4	53.1± 18.5	246.9± 53.5	-	274.7± 55.1	-	0.71± 0.3	68.6± 25.9	-	Joshi et al., 2009
	Commercial	73.2± 40.9	10.3± 7.7	97.7± 76.4	-	619.7± 185.9	-	0.3± 0.1	111.3± 15.0	-	
	Industrial	1245± 664	185.6± 118.7	9,069± 3742	-	1,696± 446.4	-	2.41± 1.0	338± 55.6	-	
West Seattle, USA	Residential	77	-	39.7	-	165	-	0.5	62.5	0.1	Seattle Public Utilities and Herrera Environmental Consultants, 2009
Southeast Seattle, USA	Residential	25.1	-	49.1	-	231	-	0.7	54.5	0.1	
Duwamish Diagonal, USA	Industrial	69.5	-	76.5	-	304	-	1.1	193	0.1	
Malaysia	Traffic/ Industrial	56.97± 1.36	-	201.52± 4.49	-	403.94± 9.37	-	-	144.53 ±10.20	-	Shabanda et al., 2019
	Traffic/ Commercial	31.88± 0.7	-	135.86± 3.22	-	315.56± 7.22	-	-	74.69 ±7.99	-	
	Traffic/ Industrial/ Commercial	43.34± 0.87	-	139.19± 3.18	-	403.42± 7.28	-	-	183.31 ±10.30	-	
	Congested traffic	59.36± 1.35	-	179.82± 1.36	-	596.60± 3.44	-	-	130.10 ±15.75	-	
	Residential by roadside	21.58± 0.36	-	39.62± 0.73	-	148.95± 4.90	-	-	52.22 ±7.91	-	
	Residential	18.11± 0.22	-	40.41± 1.90	-	169± 5.67	-	-	49.61 ±4.18	-	
	Commercial	25.05± 0.48	-	60.39± 2.30	-	145.09± 4.15	-	-	65.28 ±4.64	-	
Saudi Arabia	Residential	48.22± 4.5	38.2± 4.06	100.69± 12.32	13,543.06± 996.92	346.4± 31.6	15.7± 1.8	5.31± 0.53	100.0± 10.1	-	Shabbaj et al., 2018
	Suburban	59.9± 7.1	47.91± 5.65	127.7± 14.23	13,119± 11341	448.9± 42.0	20.1± 2.8	6.9± 0.87	129.7± 14.3	-	
	Residential/ Commercial	63.0± 7.6	50.04± 6.54	134.39± 15.14	11,900± 1123	472.5± 52.7	21± 2.5	7.2± 0.91	136.0± 15.7	-	
	Parking	71.3± 8.5	55± 7.07	152.11± 19.49	11,2004± 1091	534.6± 59.1	23.3± 2.9	8.2± 1.04	154.4± 20.6	-	
	Traffic	84.7± 10.6	65.3± 8.61	180.67± 23.1	12,4853± 1211	635.1± 72.5	27.7± 2.4	9.71± 1.22	183.5± 23.9	-	
	Rural	41.0± 3.8	22±1.9	20.2± 1.97	18,500± 965	81±7	2.3± 0.2	0.4± 0.04	15.21± 1.42	-	
China	Residential	196	46.6	98	-	289	-	0.98	73	-	Yang et al., 2016
	Traffic	232	46.5	101	-	345	-	0.87	111	-	
Singapore	Industrial	402± 115	204± 116	729± 265	73,020± 20,890	1,649± 807	-	-	280± 91.3	-	Yuen et al., 2012
	Residential	312± 103	75.5± 16.8	498± 129	51,700± 15,300	1,543± 425	-	-	201± 28.7	-	

Table 2. The Concentration of Heavy Metals in RDS in Various Land Uses in Urban Area (mg/kg) (Continued)

		Cr	Ni	Cu	Fe	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Reference
Hangzhou, China	Residential	37.7± 5.5	19.3± 6.4	49.2± 17.5	25,200± 1,600	220.0± 76.6	-	1.02± 0.45	127.6± 48.8	-	Zhang and Wang, 2009
	Commercial	34.2± 6.7	16.6± 2.6	206.6± 75.1	19,000± 7,200	344.0± 154.8	-	2.12± 0.80	521.6± 244.8	-	
	Industrial	60.2± 18.6	28.4± 11.0	211.6± 47.2	35,800± 15,100	709.0± 309.4	-	3.62± 1.59	194.0± 33.1	-	
Korea	Residential	119	29.5	101	-	549	11.7	0.85	126	0.03	Jeong et al., 2020a
	Traffic	179	61.1	190	-	653	13.2	0.74	181	0.03	
	Commercial	302	115	404	-	866	10.2	1.09	182	0.08	
	Parking	161	44.5	93	-	530	13.3	0.69	140	0.04	
	Commercial/Industrial	3,410	1,382	2,109	-	2,550	214	3.16	551	0.09	
USA	Residential	95	-	105	-	240	-	-	38	-	Apeayei et al., 2011
China	Traffic	132	41	91	-	496	-	1.86	155	0.29	Cai and Li, 2019
Malaysia	Commercial	28	-	98	-	230	-	-	70	-	Shabanda et al., 2019
Thailand	Residential	-	-	90	-	519	-	21.3	129	-	Srithawirat and Latif, 2015
India	Residential	149	36.4	192	-	284	-	2.65	121	-	Surayawanshi et al., 2016

분의 중금속이 지각 농도에 비해 월등하게 높았다 (Table 2). 더욱 심각하게는, 주거지역과 상업지역에서 주로 Cu, Fe, 그리고 Mn의 농도가 높았으며 (Ahmed et al., 2007; Gunawardana et al., 2012; Herath et al., 2016; Joshi et al., 2009; Jiries, 2003), Cr가 Ni도 지각 농도를 초과하였다 (Joshi et al., 2009) (Table 3). USA (Apeayei et al., 2011), Malaysia (Shabanda et al., 2019), 그리고 India (Surayawanshi et al., 2016)에서의 조사에서도 주거지역과 상업지역에서 Cr, Cu, Mn, 그리고 Pb의 농도가 농도가 높았다. 우리나라에서는 도시 전 지역에서 Cr, Cu, Mn, 그리고 Pb의 농도가 높아 (Jeong et al., 2020a; Table 3), 더욱 심각한 상황으로 생각된다.

우리나라 토양환경보전법에 따르면, 본고에서 조사된 82개의 RDS 조사 사례중, Cr, Cu, Zn, 그리고 Pb 농도는 각각 21, 50, 40, 그리고 34 사례가 토양오염

우려기준을 초과하고 있으며, 각각 2, 14, 15, 그리고 10 개의 사례에서 토양오염 대책기준을 초과하였다 (1지역)(토양환경보전법, 법률 제16613호, 2019. 11. 26., 일부개정). 특히, 우리나라의 광양만 (Jeong et al., 2020b), 시화공단 (Lee et al., 2020), 그리고 고속도로의 RDS (Kim et al., 2019)는 대부분 토양오염 우려기준을 초과하였으며, 상당수는 Cu와 Zn 농도가 토양오염대책 기준을 초과하였다.

우리나라 하천수 Cd, As, Hg, Pb, 그리고 Cr⁶⁺의 수질환경기준이 각각 0.005 이하, 0.05 이하, 검출되어서는 안 됨(검출한계 0.001), 0.05 이하, 그리고 0.05 이하임을 고려하면, RSD의 수계 유입에 의한 중금속 부하 증가의 가능성은 상당한 것으로 생각된다 (물환경보전법, 법률 제18469호, 2021. 9. 24., 타법 개정).

Table 3. The Concentration of Heavy Metals in RDS of Different Sizes in Urban Area (mg/kg)

	Size (μm)	Cr	Ni	Cu	Fe	Mn	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Reference
Industrial area												
Gwangyang,	>1,000	1,591	92.4	52.2	-	-	248	11.4	0.3	59.6	0.01	
Korea	500-1,000	405	82.1	126	-	-	455	13.7	0.7	87.5	0.03	
	250-500	368	63.3	227	-	-	782	13.7	0.5	76.4	0.06	Jeong et al., 2022b
	125-250	554	101	87.6	-	-	1,114	10.7	0.9	120	0.08	
	63-125	736	146	175	-	-	2,017	11.9	1.4	155	0.16	
	<63	841	246	193	-	-	2,982	16	2.1	221	0.21	
Shihwa,	>1,000	154	35	120	-	-	633	7.8	0.5	130	0.02	
Korea	500-1,000	287	96	251	-	-	1,797	20	0.8	283	0.02	
	250-500	539	145	484	-	-	1,167	16	0.8	147	0.03	Lee et al., 2020
	125-250	476	162	1,949	-	-	2,573	16	1.3	484	0.06	
	63-125	579	231	1,997	-	-	3,290	19	1.9	706	0.11	
	<63	769	312	1,810	-	-	3,605	24	3.5	1,438	0.24	
Urban area												
Spain	>1,000	-	-	36	-	-	83	-	8	154	-	
	500-1,000	-	-	47	-	-	139	-	11	210	-	
	250-500	-	-	141	-	-	268	-	22	297	-	Zafra et al., 2011
	125-250	-	-	104	-	-	309	-	19	273	-	
	63-125	-	-	91	-	-	399	-	23	280	-	
<63	-	-	124	-	-	630	-	38	350	-		
Traffic area (Expressway)												
Korea	63-2,000	96.8- 155.3	29.2- 212.4	250.6- 10,446.8	20,655.3- 37,674.4	264.6- 459.7	283.7- 694.1	-	-	22.8- 97.5	-	Kim et al., 2019
	<63	116.7- 215.8	46.7- 115	183- 6,286.1	29,163.5- 42,192.0	419.7- 640.5	714.1- 874.9	-	-	59.4- 93.4	-	

5.2 도로 청소에 의한 수계 중금속 부하 저감 방안 및 예상 효과

RDS의 강우유출수와 주변 수계의 중금속 부하에 영향을 미칠 수 있으므로, RDS의 중금속 오염 저감을 위해서는 중금속 발생원의 관리가 필요하다. 그러나, RDS의 중금속은 현대 생활에 필수적인 도로와 자동차 마모와 이들로부터의 배출이 그 원인임으로(Yuen et al., 2012; Nawrot et al., 2020), 교통량의 저감 등 발생원 관리는 매우 어려울 것으로 생각된다.

그러므로, 적절한 도로 청소의 수행이 RDS과 RDS에 의한 오염부하 저감을 위해, 현실적이고 적절한

방안으로 생각된다(Calvillo et al., 2015; Kim et al., 2019). 이를 위해서는 청소 주기의 최적화와 저감량 산정을 위한 조사 등이 선행되어야 할 것으로 생각된다. RDS 축적량은 청소 또는 강우 후 빠르게 증가하고, 이후 증가 속도가 감소하는데, 이는 RDS 발생량의 감소에 의한 것이 아니라, 비산에 의한 것임이 알려져 있으므로, 비산을 최소화하고 RDS 제거량을 최대화 할 수 있는 최적 시기의 선정이 필요하다(Kim et al., 2014). 또한, 도로청소에 의한 제거량 산정을 위해, 충분한 개수의 RDS 시료를 채취하여 오염물 함량을 분석하여야 한다. 특히, RDS의 축적량과 오염물 농도는 지역과 시간에 따라 큰 편차를 나

타내므로(Tables 1-3), 다양한 지역에서 조사가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

한편, RDS의 제거는 수계 오염부하 저감 외에도 다양한 장점이 있을 것으로 생각된다. RDS의 제거는 강우유출수의 고형물 농도를 감소시켜, 비점오염 저감시설, 특히, 많이 이용되는 여과형 시설의 폐색이 저감될 수 있다(Siriwardene et al., 2007; Calvillo et al., 2015; Kim et al., 2019). 또한, 도로청소에 의한 RDS의 저감은 RDS의 재비산양을 감소시킬 수 있다. 이와 관련하여, 서울특별시(2021)에서는 재비산 먼지 저감을 위해 도로청소를 강화하였다.

6. 결론

본 연구는 주변 수계의 중금속 부하에 큰 영향을 미칠 수 있는, 도로에 축적된 RDS의 중금속 농도를 문헌에 의해 검토하였다.

도시지역 RDS의 중금속 농도는 매우 넓은 범위로 불균일하였다. Norway, Spain, Australia, UK, Jordan, Turkey, Iran, Angola, Canada, USA, China, Taiwan, Malaysia, Thailand 그리고 India의 도시 지역 RDS의 Cr, Ni, Cu, Fe, Zn, As, Cd, 그리고 Pb 농도는 각각 3.16-3,410, 1.15-1,382, 20.2-9,069, 2980-124,853, 81-2,550, 2.3-214, 0.19-21.3, 그리고 15.21-1,125 mg/kg 이었다. 특히, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, 그리고 Pb의 농도가 높아, 자동차, 도로 및 도로 시설물, 그리고 산업 등 인위적 요인에 의해 RDS의 중금속 함량이 높아졌음을 나타내었다.

RDS의 중금속 농도는 지역의 용도에 따라서 차이가 있었으며, 주거지역이나 공원 등 녹지지역에 비해, 교통지역이나 산업지역에서 Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, 그리고 Pb의 농도가 높았다. 또한, 조사된 사례 중 대부분에서, RDS 입도가 감소함에 따라 중금속 농도가 높아졌으며, 이는 중금속들이 작은 입자로, 또는 입장 표면에 흡착되어 존재함을 나타내었다.

본 연구 결과, RDS의 높은 중금속 오염이 확인되었다. 이는 RDS의 위해성이 높음을 나타내지만, 또한, RDS의 효과적 제어에 의해 강우유출수 비점오염 부하를 저감할 가능성이 높음을 의미한다. 그러므로, 개선된 도로청소 등 효율적인 RDS 저감대책과 함께, 정량적 부하의 산정 방법 등이 수립되면, 수계 비점오염 저감에 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 서울특별시(2021), 「2021년 도로 청소 종합계획」, 서울.
2. Agarwal, A. K., T. Gupta, J. Lukose and A. P. Singh (2015), "Particulate Characterization and Size Distribution in the Exhaust of a Gasoline Homogeneous Charge Compression Ignition Engine", *Aerosol and Air Quality Research*, 15: 504~516.
3. Ahmed, F., M. H. Bibi and H. I. Ahmed (2007), "Environmental Assessment of Dhaka City (Bangladesh) based on Trace Metal Contents in Road Dusts", *Environmental Geology*, 51: 975~985.
4. Al-Khashman, O. A. (2007), "The Investigation of Metal Concentrations in Street Dust Samples in Aqaba City", *Jordan Environmental Geochemistry Health*, 29: 197~207.
5. Apeayei E., M. S. Bank and J. D. Spengler (2011), "Distribution of Heavy Metals in Road Dust along an Urban-Rural Gradient in Massachusetts", *Atmospheric Environment*, 45: 2310~2323.
6. Baum, P., B. Kuch and U. Dittmer (2021), "Adsorption of Metals to Particles in Urban Stormwater Runoff—Does Size Really Matter?", *Water (Basel)*, 13: 309.
7. Birch, G. F. and A. Scollen (2003), "Heavy Metals in Road Dust, Gully Pots and Parkland Soils in a Highly Urbanised Sub-Catchment of Port Jackson, Australia", *Australian Journal of Soil Research*, 41: 1329~1342.
8. Cai, K. and C. Li (2019), "Street Dust Heavy Metal Pollution Source Apportionment and Sustainable Management in a Typical City-Shijiazhuang, China",

- International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16: 2625~2639.
9. Charlesworth, S. M. and J. A. Lees (1999), "The Distribution of Heavy Metals in Deposited Urban Dusts and Sediments, Coventry, England", *Environmental Geochemistry and Health*, 21: 97~115.
 10. Charlesworth, S., M. Everett, R. McCarthy, A. Ordonez and E. De Miguel (2003), "A Comparative Study of Heavy Metal Concentration and Distribution in Deposited Street Dusts in a Large and a Small Urban Area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK", *Environment International*, 29: 563~573.
 11. Calvillo, S. J., E. S. Williams and B. W. Brooks, (2015), "Street Dust: Implications for Stormwater and Air Quality, and Environmental Management through Street Sweeping", In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, (ed.) Whitacre, D. M., 233 (71~128), Berlin: Springer.
 12. Crosby, C. J., M. A. Fullen, C. A. Booth and D. E. Searle (2014), "A Dynamic Approach to Urban Road Deposited Sediment Pollution Monitoring (Marylebone Road, London, UK)", *Journal of Applied Geophysics*, 105: 10~20.
 13. De Miguel, E., J. F. Llamas, E. Chacon, T. Berg, S. Larssen, O. Royset and M. Vadset (1997), "Origin and Patterns of Distribution of Trace Elements in Street Dust: Unleaded Petrol and Urban Lead", *Atmospheric Environment*, 31: 2733~2740.
 14. Ferreira-Baptista, L. F. and E. De Miguel (2005), "Geochemistry and Risk Assessment of Street Dust in Luanda, Angola: A Tropical Urban Environment", *Atmospheric Environment*, 39: 4501~4512.
 15. Gao, S., X. Wang, H. Li, Y. Kong, J. Chen and Z. Chen (2021), "Heavy Metals in Road-Deposited Sediment and Runoff in Urban and Intercity Expressways", *Transportation Safety and Environment*, 4: tdab030.
 16. Gunawardana, C., A. Goonetilleke, P. Egodawatta, L. Dawes and S. Kokot (2012), "Source Characterisation of Road Dust based on Chemical and Mineralogical Composition", *Chemosphere*, 87: 163~170.
 17. Herath, D., A. Pitawala and J. Gunatilake (2016), "Heavy Metals in Road Deposited Sediments and Road Dusts of Colombo Capital, Sri Lanka", *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 44: 193~202.
 18. Hwang, C.-C. and C.-H. Weng (2015), "Effects of Rainfall Patterns on Highway Runoff Pollution and Its Control", *Water and Environment Journal*, 29: 214~220.
 19. Jiries, A. (2003), "Vehicular Contamination of Dust in Amman, Jordan", *The Environmentalist*, 23: 205~210.
 20. Jeong, H., J. Y. Choi and K. Ra (2020a), "Characteristics of Heavy Metal Pollution in Road Dust from Urban Areas: Comparison by Land Use Types", *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 23: 101~111 (in Korean).
 21. Jeong, H., J. Y. Choi and K. Ra (2020b), "Assessment of Metal Pollution of Road-Deposited Sediments and Marine Sediments Around Gwangyang Bay, Korea", *Journal of Korean Society of Oceanography*, 25: 42~53 (in Korean).
 22. Joshi, U. M., K. Vijayaraghavan and R. Balasubramanian (2009), "Elemental Composition of Urban Street Dusts and their Dissolution Characteristics in Various Aqueous Media", *Chemosphere*, 77: 526~533.
 23. Kim, D-G., H-M. Kang and S-O Ko (2019), "Reduction of Non-Point Source Contaminants Associated with Road-Deposited Sediments by Sweeping", *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 1192~1207.
 24. Kim, D. G., K. Jeong and S. O. Ko (2014), "Removal of Road Deposited Sediments by Sweeping and its Contribution to Highway Runoff Quality in Korea", *Environmental Technology*, 35: 2546-55.
 25. Kim, D. G. and S. O. Ko (2021), "Road-Deposited Sediments Mediating the Transfer of Anthropogenic Organic Matter to Stormwater Runoff", *Environmental Geochemistry and Health*, 43: 3287~3301.
 26. Kayhanian, M., A. Singh, C. Suverkropp and S. Borroum (2003), "Impact of Annual Average Daily Traffic on Highway Runoff Pollutant Concentrations", *Journal of Environmental Engineering*, 129: 975~990.
 27. Kayhanian, M., B. D. Fruchtman, J. S. Gulliver, C., Montanaro, E. Ranieri and S. Wuertz (2012), "Review of Highway Runoff Characteristics: Comparative Analysis and Universal Implications", *Water Research*,

- 46: 6609~6624.
28. Kreider, M. L., J. M. Panko, B. L. McAtee, L. I. Sweet and B. L. Finley (2010), "Physical and Chemical Characterization of Tire-Related Particles: Comparison of Particles Generated Using Different Methodologies", *Science of the Total Environment*, 408: 652~659.
 29. Kuo, C. Y., J. Y. Wang, S. H. Chang and M. C. Chen (2009), "Study of Metal Concentrations in the Environment Near Diesel Transport Routes", *Atmospheric Environment*, 43: 3070~3076.
 30. Lau, S. L. and M. K. Stenstrom (2005), "Metals and PAHs Adsorbed to Street Particles", *Water Research*, 39: 4083~4092.
 31. Lee, J., H. Jeong, K. Ra and J. Y. Choi (2020), "Assessment of Particle Size Distribution and Pollution Impact of Heavy Metals in Road-deposited Sediments (RDS) from Shihwa Industrial Complex", *Journal of Environmental Impact Assessment*, 29: 8~25 (in Korean).
 32. Li, X. D., C. S. Poon and P. S. Liu (2001), "Heavy Metals Contamination of Urban Soils and Street Dusts in Hongkong", *Applied Geochemistry*, 16: 1361~1368.
 33. Lu, Xl, L. Wang, K. Lei, J. Huang and Y. Zhai (2009), "Contamination Assessment of Copper, Lead, Zinc, Manganese and Nickel in Street Dust of Baoji, NW China", *Journal of Hazardous Materials*, 161: 1058~1062.
 34. Martinelli, T. J., R. Waschbusch, R. Bannerman and A. Wisner (2002), *Pollutant Loadings to Stormwater Run-Off from Expressways: The Impact of a Freeway Sweeping Program*, Madison: WISCONSIN DOT.
 35. Ma, Y., McGree, A. Liu, K. Deilami, P. Egodawatta and A. Goonetilleke (2017), "Catchment Scale Assessment of Risk Posed by Traffic Generated Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144: 593~600.
 36. Mohammed, T., P. Loganathan, A. Kinsela, S. Vigneswaran and J. Kandasamy (2012), "Enrichment, Inter-Relationship, and Fractionation of Heavy Metals in Road-Deposited Sediments of Sydney, Australia", *Australian Journal of Soil Research*, 50: 229~238.
 37. Nawrot, N., E. Wojciechowska, S. Rezania, J. Walkusz-Miotk and K. Pazdro (2020), "The Effects of Urban Vehicle Traffic on Heavy Metal Contamination in Road Sweeping Waste and Bottom Sediments of Retention Tanks", *Science of The Total Environment*, 749: 141511.
 38. Nguyen, T. C., P. Loganathan, T. V. Nguyen, T. T. N. Pham, J. Kandasamy, M. Wu, R. Naidu and S. Vigneswaran (2015), "Trace Elements in Road-deposited and Waterbed Sediments in Kogarah Bay, Sydney: Enrichment, Sources and Fractionation", *Soil Research*, 53: 401-411.
 39. Ordonez, A., J. Loreda, E. De Miguel and S. Charlesworth (2003), "Distribution of Heavy Metals in the Street Dusts and Soils of an Industrial City in Northern Spain", *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 44: 160~170.
 40. Rasmussen, P. E., K. S. Subramanian and B. J. Jessiman (2001), "A Multi-Element Profile of Housedust in Relation to Exterior Dust and Soils in the City of Ottawa, Canada", *The Science of the Total Environment*, 267: 125~140.
 41. Robertson, D. J., K. G. Taylor and S. R. Hoon (2003), "Geochemical and Mineral Magnetic Characterization of Urban Sediment Particulates, Manchester, UK", *Applied Geochemistry*, 18: 269~282.
 42. Rudnick, R. L. and S. Gao (2003), "Composition of the Continental Crust", In *The crust. Treatise on Geochemistry*, vol 3, (ed) Rudnick R. L., Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 1~64.
 43. Saeedi, M., Y. L. Loretta and M. Salmanzadeh (2012), "Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Pollution and Ecological Risk Assessment in Street Dust of Tehran", *Journal of Hazardous Materials*, 227, 228: 9~17.
 44. Seattle Public Utilities and Herrera Environmental Consultants (2009), "Seattle Street Sweeping Pilot Study: Monitoring Report".
 45. Sezgin, N., H. K. Ozcan, G. Demir, S. Nemlioglu and C. Bayat (2004), "Determination of Heavy Metal Concentrations in Street Dusts in Istanbul E-5 Highway", *Environment International*, 29: 979~985.
 46. Shabanda, I. S., I. B. Koki, K. H. Low, S. M. Zain, S. M.

- Khor and N. K. A. Bakar (2019), "Daily Exposure to Toxic Metals through Urban Road Dust from Industrial, Commercial, Heavy Traffic and Residential Areas in Petaling Jaya, Malaysia: A Health Risk Assessment", *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 37193~37211.
47. Shabbaj, I. I., M. A. Alghmdi, M. Shamy, S. K. Hassan, M. M. Alsharif and M. I. Khoder (2018), "Risk Assessment and Implication of Human Exposure to Road Dust Heavy Metals in Jeddah, Saudi Arabia", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15: 36~57.
 48. Shi, G., Z. Chen, C. Bi, L. Wang, J. Teng, Y. Li and S. Xu (2011), "A Comprehensive Study of Health Risk of Potentially Toxic Metals in Urban and Suburban Road Dust in the Most Populated City of China", *Atmospheric Environment*, 43: 764~771.
 49. Siriwardene, N. R., A. Deletic and T. D. Fletcher (2007), "Clogging of Stormwater Gravel Infiltration Systems and Filters: Insights from a Laboratory Study", *Water Research*, 41: 1433~1440.
 50. Srithawirat, T. and M. T. Latif (2015), "Concentration of Selected Heavy Metals in the Surface Dust of Residential Building in Phitsanulok, Thailand", *Environmental Earth Science*, 74: 2701~2706.
 51. Sutherland, R. A. and C. A. Tolosa (2000), "Multi-Element Analysis of Road-Deposited Sediment in an Urban Drainage Basin, Honolulu, Hawaii", *Environmental Pollution*, 110: 483~495.
 52. Surayawanshi, P. V., B. S. Rajaram, A. D. Bhanakar and C. V. Charapatirao (2016), "Determining Heavy Metal Contamination of Road Dust in Delhi, India", *Atmosfera*, 29: 221~234.
 53. Tüzen, M. (2003), "Investigation of Heavy Metal Levels in Street Dust Samples in Tokat, Turkey", *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 21: 513~521.
 54. United States Department of Transportation (USDOT) and Federal Highway Administration (FHWA), Eisenhower Interstate Highway System Website. Accessed June 20, 2017. <http://www.Fhwa.Dot.Gov/Interstate/Homepage.Cfm>.
 55. Wei, B. and L. Yang (2010), "A Review of Heavy Metal Contaminations in Urban Soils, Urban Road Dusts and Agricultural Soils from China", *Microchemical Journal*, 94: 99~107.
 56. Wei, B., F. Jiang, X. Li and S. Mu (2010), "Heavy Metal Induced Ecological Risk in the City of Urumqi, NW China", *Environmental Monitoring and Assessment*, 160: 33~45.
 57. Wijewardana, P., N. Nanayakkara, C. Gunasekara, A. Karunarathna, D. Law and B. K. Pramanik (2022), "Removal of Cu, Pb and Zn from Stormwater Using an Industrially Manufactured Sawdust and Paddy Husk Derived Biochar", *Environmental Technology and Innovation*, 28: 102640.
 58. Yang, J., Y. Teng, L. Song and R. Zuo (2016), "Tracing Sources and Contamination Assessments of Heavy Metals in Road and Foliar Dusts in a Typical Mining City, China", *PLOS One*, 11: e0168528.
 59. Yuen, J. Q., P. H. Olin, H. S. Lim, S. G. Benner, R. A. Sutherland and A. D. Ziegler (2012), "Accumulation of Potentially Toxic Elements in Road Deposited Sediments in Residential and Light Industrial Neighborhoods of Singapore", *Journal of Environmental Management*, 101: 151~163.
 60. Zafra, C. A., J. Temprano and I. Tejero (2011), "Distribution of the Concentration of Heavy Metals Associated with the Sediment Particles Accumulated on Road Surface", *Environmental Technology*, 32: 997~1008.
 61. Zhang, M. K. and H. Wang (2009), "Concentrations and Chemical Forms of Potentially Toxic Metals in Road-Deposited Sediments from Different Zones of Hangzhou, China", *Journal of Environmental Sciences*, 21: 625~631.

요 약

도로퇴적물(Road Deposited Sediments, RDS)은 도로, 도로 시설물, 자동차 마모와 배가스, 그리고 도로 외부에서 유입에 의해 형성되어 도로에 축적되는 입자 물질이다. RDS는 유기물, 휘발성 고형물, 영양염류, 각종 금속류 등 다양한 오염물에 고농도로 오염되어 있고, 강우유출수와 함께 주변 수계로 유출되므로, 도시 지역 비점오염물질의 축적과 이동에 중요한 역할을 한다. 이에, 본 연구는 RDS의 중금속 농도를 문헌에 의해 검토하여, 관련 부하저감 대책수립에 도움이 되고자 하였다. 도시지역 RDS의 중금속 농도는 매우 편차가 컸다. Norway, Spain, Australia, UK, Jordan, Turkey, Iran, Angola, Canada, USA, China, Taiwan, Malaysia, Thailand 그리고 India의 도시 지역 RDS의 Cr, Ni, Cu, Fe, Zn, As, Cd, 그리고 Pb 농도는 각각 3.16-3,410, 1.15-1,382, 20.2-9,069, 2980-124,853, 81-2,550, 2.3-214, 0.19-21.3, 그리고 15.21-1,125mg/kg 이었다. 특히, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, 그리고 Pb의 농도가 높아, 인위적 요인에 의한 RDS의 중금속 오염이 확인되었다. RDS의 Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, 그리고 Pb 농도는 주거지역이나 공원 등에 비해, 교통지역이나 산업지역에서 높았으며, 입도가 감소함에 따라 중금속 농도가 높아졌다. 본 연구결과는 RDS에 의한 수계의 중금속 부하의 산정과, RDS 제어에 의한 비점오염 저감대책의 수립에 도움이 될 것으로 생각된다.

주제어 : 도로퇴적물, 중금속, 도시 지역, 비점오염
