



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

고형연료제품의 성분특성과 CO₂배출계수 개발

Development of CO₂ Emission Factor and
Component Characteristics of Solid Refuse Fuel

2020년 2월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
이 정 용

고형연료제품의 성분특성과 CO₂배출계수 개발

Development of CO₂ Emission Factor and Component Characteristics of Solid Refuse Fuel

지도교수 전 의 찬

이 논문을 공학 석사학위논문으로 제출함

2020년 2월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
이 정 용

이정용의 석사학위논문을 인준함

2020년 2월

심사위원장 차재형 (인)

심사위원 김하나 (인)

심사위원 전의찬 (인)

국 문 초 록

우리나라는 폐기물의 재이용을 처리방법에 따라 '재사용', '재이용', '폐자원 에너지'로 구분하고 있다. '폐자원에너지'란 폐기물의 형태를 변화시켜 연료화한 것을 뜻하는데 대표적인 폐자원에너지가 고형연료제품(SRF: Solid Refuse Fuel)이다.

SRF는 시멘트, 제지, 발전 업종 등 다양한 사업체에서 사용하고 있다. 배출권거래제에 포함되는 업체는 SRF 사용에 따른 온실가스 배출량을 산정하고 있으나, SRF에 대한 국가 고유 배출계수가 없어 IPCC G/L에서 제공하는 도시폐기물(비-바이오매스)의 배출계수를 적용하고 있다.

본 연구의 목적은 국내에서 제조되는 SRF 비성형제품과 성형제품의 성분특성을 분석하고 SRF 종류별 CO₂ 배출계수를 개발하는 것이다.

이를 위하여 2018년도에 실시한 SRF 제조시설의 분기별 품질확인검사료 수집된 405개의 비성형제품과 성형제품을 대상으로 성분과 발열량분석 등을 실시하였다.

SRF 비성형제품과 성형제품의 계절별, 권역별 저위발열량의 통계적 검정 결과, '계절별 평균분포는 같다'는 특성과 '권역별 평균분포는 같지 않다'는 특성 결과가 도출되었다. 즉, SRF의 저위발열량은 통계적으로 SRF를 생산하는 시기적으로는 성분의 차이가 없으나 SRF를 생산하는 권역별로 성분특성 차이가 발생한다는 것을 의미한다.

SRF의 중금속 성분을 분석한 결과, 납(Pb)의 경우 성형제품은 30.51 mg/kg, 비성형제품은 51.47 mg/kg로 나타났고, 카드뮴(Cd)은 성형제품 1.75 mg/kg, 비성형제품 4.02 mg/kg로 성형제품이 낮게 나타났다.

수은(Hg)의 경우 성형제품 0.11 mg/kg, 비성형제품 0.05 mg/kg로 나타났고, 비소(As)의 경우는 성형제품 1.41 mg/kg, 비성형제품 1.00 mg/kg로

비성형제품이 낮게 나타났으나, 농도는 모두 매우 낮은 결과가 나왔다.

SRF의 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC G/L에서 제시하고 있는 배출계수 산정방법을 적용하였다. SRF 비성형제품과 성형제품의 CO₂ 배출계수 산정 결과, SRF 비성형제품은 95,266 kgCO₂/TJ, SRF 성형제품의 배출계수는 85,670 kgCO₂/TJ로 SRF 성형제품의 배출계수가 비성형제품 대비 0.9배로 낮은 것을 확인 할 수 있었다.

2006 IPCC G/L의 도시폐기물(비-바이오매스) 배출계수 91,700 kgCO₂/TJ과 비교하면 SRF 비성형제품의 배출계수는 1.04배, SRF 성형제품의 배출계수는 0.93배로 나타났다. 연료용 유연탄의 국가 배출계수 95,300 kgCO₂/TJ과 비교하면 SRF 비성형제품은 연료용 유연탄의 배출계수와 거의 유사하고 SRF 성형제품은 0.9배로 낮게 나타났다.

SRF 사용하는 시설에 본 연구에서 도출된 배출계수를 적용 시 온실가스 인벤토리의 정확성과 신뢰성이 향상될 것으로 판단된다.

주요어 : 폐자원에너지, 고탄연료제품(SRF), 배출계수, 배출권거래제, 2006 IPCC G/L

목 차

제1장 서 론

제1절 연구의 배경 및 목적	1
제2절 연구의 내용 및 범위	3

제2장 이론적 고찰

제1절 국·내외 고품연료제품 현황	5
제2절 국내 고품연료제품 제조·사용시설 현황과 품질기준	7
제3절 선행연구 분석	14

제3장 연구방법

제1절 고품연료제품 현장 시료 채취방법	17
제2절 고품연료제품 성분특성 분석방법	19
제3절 고품연료제품 CO ₂ 배출계수 산정방법	28

제4장 고품연료제품의 발열량 및 성분특성 분석

제1절 연구대상 고품연료제품	29
제2절 고품연료제품의 계절별, 권역별 저위발열량 특성	30
제3절 고품연료제품의 계절별, 권역별 중금속 농도 특성	41
제4절 고품연료제품의 권역별 원소함량 특성	45

제5장 고품연료제품의 CO₂ 배출계수 개발

제1절 고품연료제품의 CO₂ 배출계수 개발 47
제2절 고품연료제품의 CO₂ 배출계수 비교 49

제6장 결 론

제1절 연구 요약 51
제2절 연구의 시사점 및 한계 53

참고문헌 54

Abstract 56

표 목 차

<표 2-1> 국내 SRF 제조시설 현황	7
<표 2-2> 2018년 권역별 SRF 제조시설 현황 및 제조량	9
<표 2-3> 2018년 권역별 SRF 사용시설 현황 및 사용량	11
<표 2-4> 고품연료제품 종류별 사용시설 현황	12
<표 2-5> SRF 성형 제품과 비성형 제품 품질기준	13
<표 2-6> 고품연료제품 국내·외 연구 및 지침	16
<표 4-1> 분기별 제조시설의 고품연료제품 품질검사 대상	29
<표 4-2> SRF 성형제품의 계절별 저위발열량 특성	30
<표 4-3> SRF 비성형제품의 계절별 저위발열량 특성	31
<표 4-4> SRF 성형제품의 계절별 저위발열량 정규성 검정 결과	32
<표 4-5> SRF 비성형제품의 계절별 저위발열량 정규성 검정 결과	32
<표 4-6> SRF의 계절별 저위발열량 Kruskal-Wallis검정 결과	33
<표 4-7> SRF 성형제품의 권역별 저위발열량 특성	35
<표 4-8> SRF 비성형제품의 권역별 저위발열량 특성	36
<표 4-9> SRF 성형제품의 권역별 저위발열량 정규성 검정 결과	37
<표 4-10> SRF 비성형제품의 권역별 저위발열량 정규성 검정 결과	38
<표 4-11> SRF의 권역별 저위발열량 Kruskal-Wallis검정 결과	38
<표 4-12> SRF 성형, 비성형제품의 권역별 저위발열량 대응비교 결과	40
<표 4-13> SRF 성형제품의 계절별 중금속 특성	41
<표 4-14> SRF 비성형제품의 계절별 중금속 특성	42

<표 4-15> SRF 성형제품의 권역별 중금속 특성	43
<표 4-16> SRF 비성형제품의 권역별 중금속 특성	44
<표 4-17> SRF 성형제품의 권역별 원소함량 특성	45
<표 4-18> SRF 비성형제품의 권역별 원소함량 특성	46
<표 5-1> SRF 종류별 탄소함량	47
<표 5-2> SRF 종류별 CO ₂ 배출계수	48
<표 5-3> 본 연구 결과와 국내·외 폐기물 및 연료 CO ₂ 배출계수 비교 ..	50

그림 목 차

<그림 1-1> 연구 흐름도	4
<그림 3-1> 시료채취 위치(고형연료제품 품질 시험 · 분석방법)	17
<그림 3-2> 건조기 (WOF-155, Germany)	19
<그림 3-3> 열량계((AC600, USA)	20
<그림 3-4> 자동원소분석기(Flash EA1112 CHNS-O Analyzer)	21
<그림 3-5> 이온 크로마토그래피 모식도	22
<그림 3-6> ICP-OES (5300DV, USA)	23

제1장 서론

제1절 연구의 배경 및 목적

환경부는 국내 폐기물 발생을 줄이고 재활용을 확대하는 등 자원의 순환적 이용을 위해 자원 재활용 기본계획에 대한 내용을 정의하여 폐기물의 발생을 최대한 억제하고 재활용, 재사용, 에너지 회수 등에 대한 방법으로 폐기물을 처리할 것을 권장하는 자원순환에 관한 기본원칙을 정하였다.

폐기물의 재이용은 처리방법에 따라 재사용·재이용, 폐기물의 폐자원 에너지로 구분한다. 「자원재활용법 및 동법 시행규칙」상의 “폐자원에너지는 폐자원 중 에너지화(회수된 에너지 또는 에너지를 회수할 수 있도록 전환하는 것)된 물질”로 정의할 수 있으며(환경부, 2015), 대표적인 폐자원에너지가 고품연료제품이다.

우리나라는 자원 및 에너지 다소비 국가로서 광물자원의 90%, 에너지의 94% 이상을 수입에 의존하고 있으며 국가 정책의 방향이 고효율, 친환경에 기초한 사회구조로의 전환으로 나아가고 있다.

이에 따라 환경부는 폐자원에너지에 대한 이용을 확대하기 위해 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」을 개정하여 기존의 4가지 종류의 고품연료(RDF/RPF/TDF/WCF) 형태를 통합하여 고품연료제품(SRF ; Solid Refuse Fuel)과 바이오 고품연료제품(Bio-SRF)로 분류하고 형태에 따라 성형제품과 비성형제품으로 분류하여 관리하고 있다.

2018년 기준으로 국내 SRF 제조시설은 244개소(공공 25, 민간 219), SRF 사용시설은 145개소(공공 5, 민간 140)가 운영되고 있다.

SRF는 발열량이 높고 온실가스 및 오염물질 발생이 적은 재생 에너지

로서 전력생산시설이나 열을 생산하는 집단에너지 시설에서 사용량이 점차 증가하고 있다. 한국에너지공단에 따르면 SRF를 이용하여 생산하는 신·재생에너지는 국내 전체 신·재생에너지 생산량의 1.6%(2015년)에서 5.8%(2016년)로 점유율이 증가하고 있다.

국내 배출권거래제도내에서 시멘트, 발전, 제지 업종 등의 30여개 할당업체가 SRF를 연료로 사용하는 배출시설을 보고하고 있으나, SRF의 온실가스 배출계수가 없어 가장 유사한 IPCC G/L에서 제시하는 도시폐기물(비-바이오매스) 배출계수를 적용하고 있다. 이에 SRF 사용에 대한 정확한 온실가스 배출량 산정을 위한 국가배출계수 수준의 CO₂ 배출계수 개발이 필요하다.

본 연구의 목적은 국내에서 제조되는 SRF 비성형제품과 성형제품을 대상으로 저위발열량, 원소분석, 중금속 분석 등의 성분특성을 계절별, 권역별로 분석하고 SRF의 종류별 CO₂ 배출계수를 개발하는 것이다.

이를 통해 개발된 배출계수를 SRF를 사용하는 시설에 적용 시 온실가스 인벤토리의 정확성과 신뢰성이 향상될 것으로 기대한다.

제2절 연구의 내용 및 범위

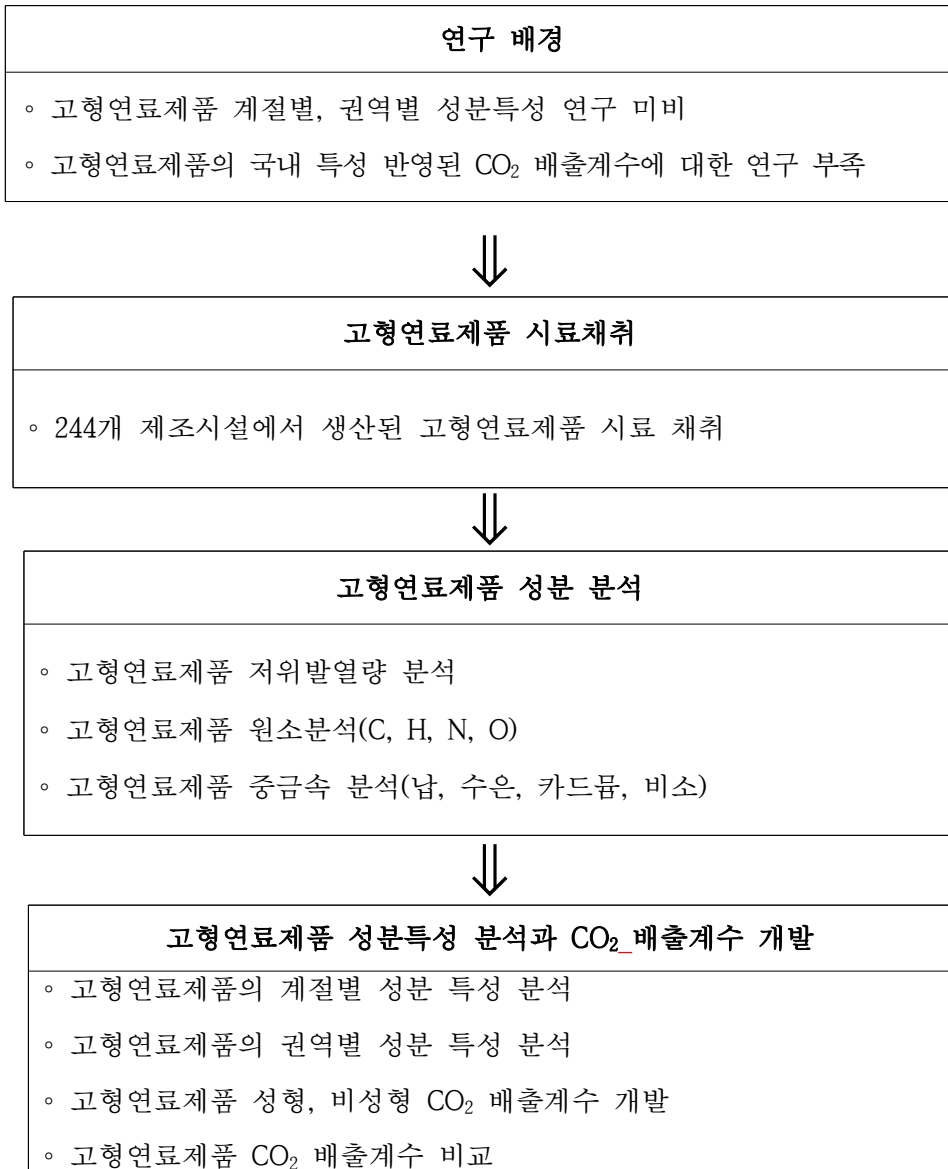
고형연료제품(Solid Refuse Fuel, SRF)은 폐합성수지, 폐합성섬유류, 폐고무 등을 원재료로 선별 및 가공하여 저위발열량, 수분 및 염소, 중금속 등 품질기준을 만족하도록 하는 가연성 폐기물을 에너지화한 재생에너지이다.

일반 폐기물보다 저위발열량이 높고 대기오염물질 발생량이 낮아 국내에서는 제지업체, 시멘트업체, 집단에너지 등의 배출권거래제 할당업체에서 사용하고 있다.

본 연구는 SRF 비성형제품 및 성형제품의 계절별, 권역별 특성을 분석하기 위해 2018년 전국에서 운영 중인 240여개 제조시설을 대상으로 선정하였다. SRF 성분특성은 고형연료제품 품질시험·분석방법(환경부고시 제2014-135호)을 준용하여 발열량 분석, 원소 분석, 공업분석을 통해 저위발열량, 수분, 황, 염소 등 총 10개 항목에 대하여 특성 분석을 하였다.

SRF의 CO₂ 배출계수는 원소분석 및 저위발열량 성분 분석 결과를 바탕으로 2006 IPCC G/L에서 제시하고 있는 배출계수 산정방법을 적용하였다.

본 연구는 <그림 1-1>과 같은 순서에 따라 진행하였다. 2장에서는 SRF 이용 현황과 선행연구 사례를 살펴보고, 3장과 4장에서는 본 연구 결과를 도출하기 위한 SRF의 성분 분석을 실시하였다. 마지막으로 5장과 6장은 SRF의 계절별, 권역별 성분특성과 CO₂ 배출계수를 개발하고 본 연구의 결론을 정리하였다.



〈그림 1-1〉 연구흐름도

제2장 이론적 고찰

제1절 국내·외 고형연료제품의 현황

1. 해외 고형연료제품 현황

유럽의 고형연료제품은 1999년 발효된 「Directive on the Landfill of waste 99/31/EC」에 따라 폐기물 매립량을 최소화하고 신재생에너지를 생산하기 위해 제조되었다.¹⁾ 유럽은 폐기물의 연료적 가치와 사용처 확보를 위한 기준을 설정하여 제품으로 인정받도록 하였으며 “제품의 명칭은 SRF(Solid Recovered Fuel)로 정의하고, SRF 사용시설은 대기오염 기준을 만족한 폐기물 소각로로 한정하였다” (Renewable Energy Sources Directive (2009/28/EC)).

미국의 고형연료제품 명칭은 RDF(Refuse Derived Fuel)이며, 1970년대 1차 오일쇼크로 연료비가 증가함에 따라 가연성 폐기물을 석탄화력 발전소에 사용하면서 ‘폐기물을 연료로 사용’ 한다는 폐기물의 연료적 측면을 중시하였다. RDF의 가공처리 정도에 따라 RDF-1~RDF-7의 7가지 등급을 나누어 관리하고 있다.

일본은 1997년, 환경성이 「쓰레기처리의 광역화 계획」을 추진하면서 고형연료화 시설과 RDF 발전소가 증가하게 되었다. 이에 따라 고형연료제품이 생산되었으며 RDF(Refuse Derived Fuel)와 RPF(Refuse Paper&Plastic Fuel)로 구분한다. 일본의 고형연료제품 정책의 목적은 생활폐기물의 광역처리이며 이를 위해 운송 및 저장에 용이한 성형제품에 한정하여 관리하고 있다.

1)한국환경공단, 고형연료제품 원료·품질기준 재설정 및 품질표시제에 관한연구, 2011

2. 국내 고품연료제품 현황

환경부에 따르면 국내에서 고품연료제품이 도입된 것은 2003년 ‘생산자책임 재활용제도’가 시행됨에 따라 필름류 포장재(과자봉지 등)를 재활용하기 위해 플라스틱 고품연료(RPF)가 허용이 되었고, 고품연료제품의 종류는 성형제품만 원료는 폐합성수지만 가능하였다.

2006년에 종량제 봉투를 선별하여 고품연료제품으로 제조하는 것이 허용되어 고품연료제품 품질등급이 마련되었으며, 이후 현재까지 9차례 걸쳐 고품연료제품 관련 개정이 이루어졌다.

2006년 9월 고품연료를 RDF, RPF로 분류하고, 저위발열량 등급 기준, 황분 및 중금속 함유량에 대한 품질기준이 마련되었다. 2007년 12월에는 폐타이어 고품연료제품(TDF, Tier Derived Fuel), 2008년에는 폐목재 고품연료제품(WCF, Wood Chip Fuel)이 허용되었다.

2013년 1월에는 기존의 RDF, RPF, TDF는 SRF로, WCF는 Bio-SRF로 변경되었다. 2013년 개정의 가장 큰 특징은 기존에 성형제품만 인정되던 폐합성수지 고품연료제품에 대해서 비성형제품도 허용하여 SRF 대상이 되는 가연성 폐자원이 확대되어 SRF를 연료로 사용 가능한 사업장 범위가 확대된 것이다.

제2절 국내 고품연료제품 제조·사용시설 현황과 품질기준

1. 고품연료제품 제조시설 현황

한국환경공단의 폐자원에너지종합정보관리시스템(srf-Info.) 자료에 따르면, 2018년 기준 국내 SRF 제조시설은 2017년 233개 대비 11개소가 증가한 244개소가 운영되고 있다. 국내 SRF 제조시설은 <표 2-1>에서 보는 바와 같이 공공부문의 제조시설은 큰 변화를 보이지 않았으나, 민간부문의 제조시설은 12개소가 증가 되었다.

<표 2-1> 국내 SRF 제조시설 현황

(단위: 개소)

구분	제조시설		
	합계	공공	민간
2017년	233	26	207
2018년	244	25	219

2018년 SRF 제조시설의 권역별 현황을 살펴보면, 수도권이 전국 제조시설의 39%, 제조량의 약 47%를 차지하고 있다. SRF 제조시설은 서울특별시에는 시설이 없으며, 대규모 폐기물 재활용사업장이 많은 경기도가 89개소로 전체 36%를 차지하고 충청북도(22개소, 9%), 경상남도(21개소, 9%), 전라남도 및 전라북도(각 17개소, 7%), 경상북도(15개소, 6%)의 순으로 나타났다.

‘2018년 고품연료제품 제조·사용·수입 실적현황’²⁾ 자료에 따르면

2018년 국내에서 생산한 SRF 제조량은 약 307만톤으로 이중 공공 부문에서 41만톤을 생산하였고, 민간부문에서 약 266만톤을 생산하였고 1개 제조 시설별 평균 SRF 제조량은 12,574톤이다.

2018년 SRF 제조시설의 지역별 시설 및 제조량 현황은 아래 <표 2-2>에 나타내었다. SRF 제조량을 지역별로 살펴보면 가연성폐기물 및 폐목재가 많이 발생하는 대도시 권역 주변인 경기도에서 생산량이 약 127만톤으로 전체 제조량의 40% 이상을 차지하고 있으며, 그 다음으로 충북지역 27만 6천톤(9.0%), 전남과 대구가 각 22만 4천톤 정도를 생산하고 있다.

충북지역은 수도권의 생활폐기물을 주원료로 하여 고품연료제품을 생산하고 있다. 대구광역시도 자체적으로 발생하는 생활폐기물을 이용하여 SRF를 제조하는 대규모의 대구광역시 폐기물에너지화시설이 운영되고 고품연료제품을 사용하는 시설을 동시에 가지고 있어 생산된 고품연료제품을 바로 그 지역에서 사용하고 있다.

2) 한국환경공단, 2018년 고품연료제품 제조·사용·수입 실적현황

<표 2-2> 2018년 권역별 SRF 제조시설 현황 및 제조량

구 분		제조시설 (개소)	제조량 (톤)	제조시설 비율(%)	제조량 비율(%)
수도권	서울	0	0	0.0%	0.0%
	경기	89	1,273,819	36.5%	41.5%
	인천	6	169,864	2.5%	5.5%
	소계	95	1,443,683	38.9%	47.1%
강원권	강원	7	30,008	2.9%	1.0%
충청권	충북	22	275,699	9.0%	9.0%
	충남	12	128,629	4.9%	4.2%
	대전	3	58,599	1.2%	1.9%
	세종	3	5,446	1.2%	0.2%
	소계	40	468,373	16.4%	15.3%
전라권	전북	17	92,107	7.0%	3.0%
	전남	17	224,378	7.0%	7.3%
	광주	5	27,751	2.0%	0.9%
	제주	0	0	0.4%	0.0%
	소계	40	344,236	16.4%	11.2%
경상권	부산	5	201,320	2.0%	6.6%
	대구	13	224,468	5.3%	7.3%
	울산	8	82,761	3.3%	2.7%
	경북	15	79,245	6.1%	2.6%
	경남	21	193,947	8.6%	6.3%
	소계	62	781,741	25.4%	25.5%
합 계		244	3,068,041	100.0%	100.0%

2. 고품연료제품 사용시설 현황

환경부의 폐자원에너지종합정보관리시스템에 따르면 2018년 국내 SRF 사용시설은 145개가 운영되고 있는데 2017년 140개 대비 5개소가 증가한 것이다. 권역별로는 중규모의 산업단지와 열병합시설이 밀집된 충청권과 전라권에서 가장 많고 지역별로는 소규모 산업 보일러가 가장 많은 경기도가 28개소로 전체 시설의 약 20%를 차지하고 있다.

‘2018년 고품연료제품 제조·사용·수입 실적 현황’ 자료에 따르면 2018년 기준 국내 SRF 연간 사용량은 약 373만톤으로 나타나 SRF 사용시설 1개 시설의 연간 평균 사용량은 약 25,698톤으로 나타났다.

2018년 SRF 사용시설의 권역별 시설현황 및 사용량은 아래 <표 2-3>에 나타내었다. 지역별로 보면 서울, 광주, 제주 지역에는 SRF 사용시설이 없으며 전북지역의 사용량이 약 75만톤, 충남지역의 사용량이 약 72만톤으로 2개 시도의 사용량이 전체 사용량의 약 40%를 차지하고 있다.

경기도는 SRF 사용량이 약 49만톤으로 제조량 대비 사용량 비율이 약 45% 정도이다. 이는 경기도는 수도권에서 발생하는 폐기물을 재활용하기 위한 대규모 SRF 제조시설이 다수 운영되고 있으나, 이를 사용할 발전과 산업보일러 시설의 설치 제약이 많아 경기도 내 생산된 SRF를 경기도와 가까운 충청권과 전라권으로 반출하기 때문인 것으로 파악된다.

<표 2-3> 2018년 권역별 SRF 사용시설 현황 및 사용량

지역		사용시설 (개소)	사용량 (톤)	사용시설 비율(%)	사용량 비율(%)
수도권	서울	0	0	0.0%	0.0%
	경기	28	496,303	19.3%	13.3%
	인천	6	163,447	4.1%	4.4%
	소계	34	659,750	23.4%	17.7%
강원권	강원	7	251,907	4.8%	6.8%
충청권	충북	14	211,093	9.7%	5.7%
	충남	19	725,222	13.1%	19.5%
	대전	1	46,204	0.7%	1.2%
	세종	4	114,627	2.8%	3.1%
	소계	38	1,097,146	26.2%	29.4%
전라권	전북	21	749,484	14.5%	20.1%
	전남	8	221,123	5.5%	5.9%
	광주	0	0	0.0%	0.0%
	제주	0	0	0.0%	0.0%
	소계	29	970,607	20.0%	26.0%
경상권	부산	4	239,773	2.8%	6.4%
	대구	6	126,373	4.1%	3.4%
	울산	13	208,031	9.0%	5.6%
	경북	1	4,869	0.7%	0.1%
	경남	13	167,887	9.0%	4.5%
	소계	37	746,933	25.5%	20.0%
합 계		145	3,726,343	100.0%	100.0%

SRF 종류별 사용시설 현황을 분류하면 아래 <표 2-4>와 같이 5개 종류의 업종에서 사용하며 업체는 산업용 보일러가 72개소로 가장 많고, 사용량은 발전시설(열병합포함)이 210만톤과 산업용 보일러 시설 125만톤, 제지업의 보일러 시설이 33만톤으로 SRF가 대부분 산업단지와 발전시설에서 스팀과 전력생산의 원료로 이용되는 것을 확인 할 수 있다.

<표 2-4> 고품연료제품 종류별 사용시설 현황

구 분	시멘트 소성로	발전시설 (열병합포함)	지역 난방	산업용 보일러	제지업 보일러	합계
업체수 (개소)	8	50	1	72	14	145
사용량 (톤)	10,108	2,113,613	10,859	1,256,203	335,560	3,726,343
비율 (%)	0.3	56.7	0.3	33.7	9.0	100

3. 고품연료제품 품질기준

폐기물관리법 제2조 4항에서 SRF로 가능한 가연성 폐기물의 원료는 생활폐기물, 폐합성수지류, 폐합성섬유류, 폐고무류, 폐타이어 등이다.

한국환경공단의 「'16년도 고품연료제품 원료 성상 조사」 연구 결과에 따르면 국내 고품연료제품의 주요 원료 성상은 폐합성 섬유 재질이 34.7%로 가장 높고 그 뒤를 이어 폐고무류 27.0%, 폐합성수지류 23.3% 순이다.

SRF 비성형제품과 성형제품의 품질기준은 다음 <표 2-5>와 같다.

환경부는 SRF 품질의 적정 관리를 위해 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 시행규칙」에 SRF의 품질기준을 제정하여 모든 고품연료제품

제조·사용시설이 이러한 품질기준을 준수하도록 하였다.

<표 2-5> SRF 성형제품과 비성형제품 품질기준

구 분		단 위	성 형		비 성 형	
모양 및 크기		mm	직경	50 이하	가로	50 이하
			길이	100 이하	세로	50 이하
수분		wt. %	10 이하		25 이하	
저위발열량		kcal/kg	제조 고품연료제품: 3,500 이상			
회분		wt. %	20 이하			
염소		wt. %	2.0 이하			
황분		wt. %	0.6 이하			
금속 성분	수은(Hg)	mg/kg	1.0 이하			
	카드뮴(Cd)		5.0 이하			
	납(Pb)		150 이하			
	비소(As)		13.0 이하			

출처 : 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 시행규칙(환경부 2015)

제3절 선행연구 분석

SRF 활용에 대하여 국내·외로 다양한 선행연구들이 진행되었다.

국립환경과학원(2016)은 「기타연료 사용에 따른 대기오염물질 배출계수 개발연구」에서 고행연료제품 사용시설의 성분특성 연구를 위해 15개 고행연료제품 사용시설을 대상으로 분석하였으며, 모든 시설에서 고행연료 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

한국환경공단은 고행연료제품 관련 다수의 연구를 진행하였다.

2017년도에는 「2016년도 고행연료제품 원료 성상 조사 연구」를 통해 24개의 고행연료제품 원료 성상 분석을 진행하여 국내 고행연료의 성분 특성을 연구하였는데 황과 회분의 평균 함량은 품질기준을 통과하지만 염소의 경우 기준치를 초과하는 것으로 나타나, 고행연료제품의 원료에 합성수지에 사용되는 안정제, 안료 등의 첨가제에 대한 철저한 선별 작업이 필요한 것으로 확인되었다.

2018년도의 「고행연료제품 품질등급 기준설정 연구」에서는 과거 3개년 시설별 품질검사 데이터의 통계분석을 통하여 국내 SRF의 품질등급을 EU등급과 비교하였는데, 국내 SRF의 품질이 더 우수한 것으로 나타났다.

또한 양질의 SRF의 안정적 제조 및 사용 확대를 위해서는 성분특성별 분석의 고도화를 통한 고행연료 등급제가 필요할 것으로 연구되었다.

같은해 「고행연료제품 관리제도 성과평가 및 발전방안 마련 연구」에서는 고행연료제품이 원유 사용을 대체한다는 가정하에 온실가스 감축효과를 분석하였는데, 온실가스 감축량은 2014년 132만tCO₂eq., 2015년 178만 tCO₂eq. 2016년 227만 tCO₂eq.로 추정되어, 온실가스 감축 효과가 큰 것으로 연구되었다.

최상현(2019)의 연구에 따르면, 일반 SRF와 Bio-SRF를 50:50으로 사용하는 SRF 사용시설에서 연료의 6가지 원소의 성분 분석과 굴뚝으로

배출되는 N₂O 가스의 농도를 3차례 측정하여 개발한 N₂O의 배출계수는 평균 2,345.74 g-N₂O/ton-waste로 상당히 높게 나타나 온실가스 배출량의 정확한 산정을 위하여는 이러한 SRF의 배출계수 연구가 더 필요한 것으로 확인되었다.

나경호(2012)는 5개의 화력자 RDF 사용시설에 대하여 농도실측과 성분 조성 분석을 통하여 CO₂의 배출계수를 산정하였다. 실측을 통한 CO₂ 배출계수는 2.3576 tCO₂/tRDF, 성분조성 분석을 통한 배출계수는 2.7057tCO₂/tRDF로 나타나 성분조성 분석 배출계수가 2006 IPCC G/L의 폐플라스틱의 기본 배출계수인 2.750tCO₂/t과 유사한 것으로 분석되었다.

<표 2-6> 고품연료제품 국내·외 연구 및 지침

관련연구 및 지침	연구 내용
나경호 (2012)	<ul style="list-style-type: none"> · 화격자 RDF 사용시설의 농도실측과 성분조성 분석을 통한 CO₂의 배출계수를 산정함. · 성분 조성 분석을 통한 배출계수가 더 크고 2006 IPCC G/L의 폐플라스틱의 기본배출계수와 유사한 값이 나타남.
국립환경과학원 (2016)	<ul style="list-style-type: none"> · 15개 SRF 사용시설을 대상으로 성분특성 분석 하였으며, 모든 시설에서 품질기준을 만족하고 있음.
IPCC G/L (2006)	<ul style="list-style-type: none"> · IPCC G/L에서는 도시폐기물로 정의 · 도시폐기물의 바이오매스 부문과 비바이오매스에 대한 배출계수 적용
한국환경공단 (2017)	<ul style="list-style-type: none"> · SRF의 품질등급 기준 설정을 위해 과거 3개년에 대한 품질의 통계 분석을 실시하였는데, 국내 SRF 제품이 EU의 제품보다 품질이 우수한 것으로 나타남. · SRF의 안정적 제조 및 사용확대를 위해 고품연료 등급제 도입 필요
한국환경공단 (2018)	<ul style="list-style-type: none"> · SRF관리의 발전방안 연구에서 SRF가 원유를 대체한다는 가정하에 온실가스 감축에 대하여 연구 · 2014년 132만 tCO₂, 2015년 178만 tCO₂, 2016년 227만 tCO₂의 온실가스 감축효과가 나타남
최상현 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> · 일반 SRF와 바이오 SRF 5:5로 혼소하는 사용시설을 대상으로 N₂O 배출계수 개발함. · 연구결과 N₂O의 배출계수가 2,345 g-N₂O/ton-waste로 높게 나타나 Tier 2 수준의 SRF 배출계수 개발 필요

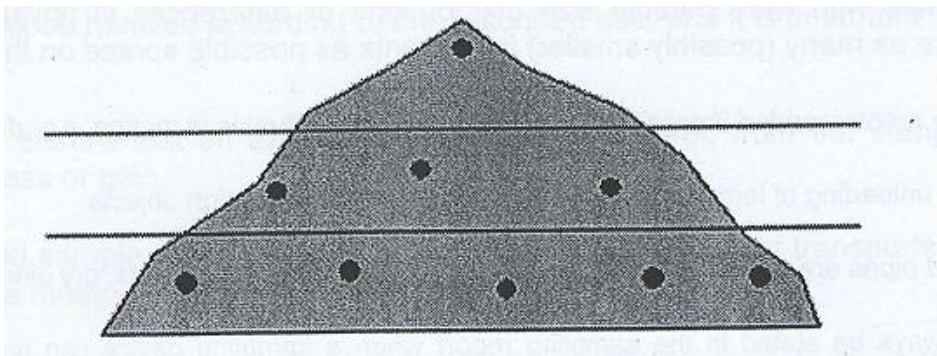
제3장 연구방법

본 연구에서는 2018년도에 가동 중인 144개 SRF 제조시설에서 생산되는 SRF 성형 및 비성형제품을 분기별로 채취한 405개의 시료에 대하여 「자원의 절약과 재활용에 관한 법률」 시행규칙 별표 7의 품질기준 등에 따라 저위발열량, 회분, 수은(Hg), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 비소(As), 염소(Cl), 황(S), 수분(W%) 등에 대하여 성분 분석을 실시하였다.

제1절 고품연료제품 현장 시료 채취방법

SRF의 시료 채취방법과 분석방법은 「고형연료제품의 품질 시험·분석 방법」³⁾을 준용한다.

SRF의 성분 분석을 위한 시료 채취는 제품 더미에서 원추 4분법을 적용하여 채취하게 되며, 제조시설의 경우는 원료가 투입되어 마지막에 제품이 생산되는 곳에서 실시한다.



<그림 3-1> 시료채취 위치(고형연료제품 품질 시험·분석방법)

3) 환경부 고시 제 2014-135호, 2014년

「고형연료제품의 품질 시험·분석 방법」에 의해 SRF 제조시설 공정에서 시료 채취를 하는 경우 당일 제조된 제품에 대하여 해당되는 인크리먼트 수를 최소 6시간 동안 균등 분배하여 시료 채취를 해야한다. 다만, 당일 가동시간이 6시간 미만일 경우 허가받은 가동시간 동안 균등 분배하여 시료 채취 할 수 있다.

SRF 제품의 낙하구에서도 시료 채취를 할 수 있으며 컨베이어 이동상 위에서 시료 채취는 시료의 양이 부족할 경우는 구분된 하나의 인크리먼트를 균등한 시간 간격으로 2회 채취할 수 있으며, 시료의 양은 1회에 1.5 kg 이상으로 한다.

제2절 고품연료제품 성분특성 분석방법

1. 고품연료제품 성분특성

가. 수분 함유율 측정

SRF는 다양한 성분들로 구성되어 있으므로 SRF의 수분 함유율 측정을 위한 시료의 대표성을 확보하기 위해서는 최소 500g 이상을 시료를 준비하여야 한다. SRF의 수분함량 측정은 환경부 고시에 따라 시료를 $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에서 항량에 도달할 때까지 건조기(WOF-155, Germany)에서 건조하고 무게를 달아 무게 차로부터 수분의 양(%)을 구한다.

수분 함유율 측정을 위한 공식은 식 (1)과 같다.

$$\text{수분 (\%)} = \frac{(W_2 - W_3)}{(W_2 - W_1)} \times 100 \quad (1)$$

여기서, W_1 = 증발접시의 무게 (g)

W_2 = 건조 전의 증발접시와 시료의 무게 (g)

W_3 = 건조 후의 증발접시와 시료의 무게 (g)



<그림 3-2> 건조기 (WOF-155, Germany)

나. 발열량 분석

발열량은 열량계를 이용하는 방법과 원소분석에 의한 방식 등 2가지 분석방법이 있다.

본 연구에서는 자동열량분석기(AC600, USA)를 사용하여 발열량을 구하며 분석용 시료의 입자크기는 1mm 미만으로 분쇄하고, 정밀분석용 전자저울(XPE204V, SWISS)을 이용하여 0.1 mg까지 정량하였다.

자동열량분석방법은 시료를 연소시켜 연소열에 의한 물의 수온 변화를 측정하여 건조 고위발열량을 산출하고 수분 및 원소함량을 이용하여 식 (2)와 같이 저위발열량 (kcal/kg)을 산출한다.

$$Hl = Hg - 600 \times (9h + W) \quad (2)$$

여기서, Hh = 열량계로 측정한 건조고위발열량 (kcal/kg)

Hg = 습량기준고위발열량 (kcal/kg)

Hl = 저위발열량 (kcal/kg)

h = 습윤기준의 수소함량 (%)



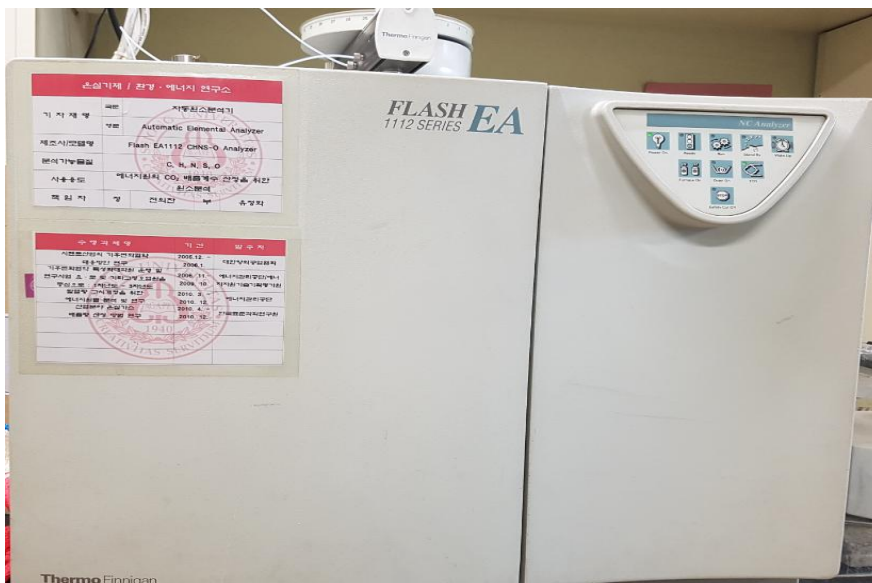
<그림 3-3> 열량계((AC600, USA)

다. 원소분석(탄소, 수소, 질소, 산소)

원소분석은 SRF 중 탄소(C), 수소(H), 질소(N), 산소(O) 등의 함량을 측정하는 방법으로, 본 연구에는 자동원소분석기(Automatic Elemental Analyzer)를 사용하였다.

원소분석을 위해 사용된 자동원소분석기는 Dynamic flash combustion method이며, 분석방식은 유기물질을 산화시켜 연소된 가스들을 컬럼으로 분리시키고, 열전도성 검출기(TCD, Thermal Conductivity Detector)를 통하게 하여 각각의 함량을 측정하는 방식이다

5개 권역별로 SRF 성형제품 5개, 비성형제품 5개 등 총 10개의 시료에 대하여 탄소함량을 측정하였고, 자동원소분석기(Thermo Finnigan-Flash EA 1112, USA)를 이용하였다.



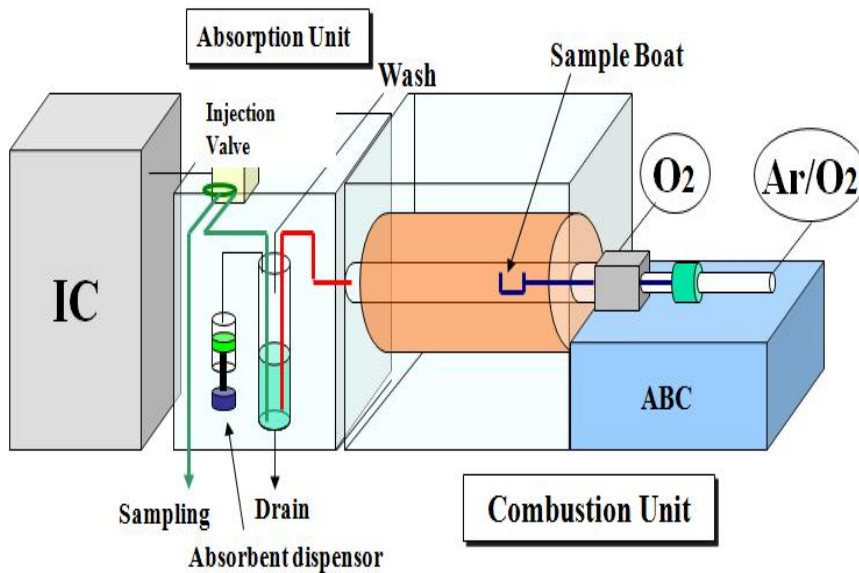
<그림 3-4> 자동원소분석기(Flash EA1112 CHNS-O Analyzer)

라. 원소분석(염소, 황분)

염소(Cl)와 황분(S)은 연소관(AQF-100, Mitsubishi)을 이용하여 회화하여 흡수액에 흡수한 후 이온 크로마토그래피(ICS-1000, Dionex)로 함량(%)을 산출한다<그림 3-5 참조>.

석영제 연소관 중에 수분을 제거한 시료 20~30 mg을 0.1 mg까지 정확히 무게를 측정하고 샘플 보트에 넣어 연소로의 석영관 중앙부분에 위치한 샘플 주입장치에 시료를 주입한다.

이후 아르곤, 산소를 도입해서 고온(900~1,100) °C에서 연소시켜 생성된 가스를 흡수용액에 통과시켜 흡수시킨 후 이온 크로마토그래피로 황의 함유량을 구하고, 염소는 시료를 연소시켜 생성된 가스를 물에 흡수시켜 함량을 측정한다.



<그림 3-5> 이온 크로마토그래피 모식도

마. 중금속성분(Pb, As, Cd, Hg)

SRF의 중금속 성분 중 납(Pb), 비소(As), 카드뮴(Cd)은 유도결합플라즈마 방출분광법(ICP-OES)에 따라 각 중금속별 파장에서 샘플 용액의 발광도를 측정하고 미리 작성한 검량선으로 각 중금속 원소의 양을 구하여 농도를 산출한다.

시료에서 각 금속의 측정값으로부터 계산된 농도를 이용하여 식 (3)에 따라 시료 중에 농도를 계산한다.

$$\text{SRF 금속의 농도 (mg/kg)} = \frac{(C_1 - C_0)}{W_d} \times f \times V \quad (3)$$

여기서, C_1 = 검정곡선에서 얻어진 분석시료의 금속 농도 (mg/L)

C_0 = 검정곡선에서 얻어진 바탕시험용액의 금속 농도 (mg/L)

f = 희석배수

V = 시료용기의 부피 (L)

W_d : 시료의 건조중량 (kg)



<그림 3-6> ICP-OES (5300DV, USA)

2. 성분 특성의 통계적 분석방법

가. 비모수적 통계분석

통계적 방법은 크게 모수적 통계분석(parametric method)과 비모수적 통계분석(nonparametric method)으로 나눌 수 있다.

'모수적 통계분석'은 모집단이 특정 분포를 따른다는 가정하에 모르는 모수에 대하여 추정이나 검정하는 방법으로 엄격한 수준의 기준을 적용하여 가정한다. 모수적 통계분석은 모집단이 특정 분포를 따른다는 가정하에서 유도된 방법으로 검정력이 비모수적 방법보다 높다.

반면, '비모수적 통계분석'은 모집단에 대하여 특정한 분포형태를 가정할 수 없는 경우에 전개하는 통계적 방법으로 모집단의 분포형태가 정규 분포에서 멀어질수록 비모수적 방법의 검정력이 높아지게 된다.

비모수적 통계분석은 모집단의 표본의 크기가 소 표본(small sample scale)이고 모집단의 분포가 정확하게 알려지지 않은 경우와 데이터가 비율척도(ratio scale)나 구간척도(interval scale)로 주어지지 않고 순위척도로 주어질 경우 좀 더 유용한 방법이다.

비모수적 통계분석은 직관적으로 이해하기 쉽고 모수적 방법보다 적용하기 유용한 장점을 갖고 있으며 단일 모집단 비교, 두 모집단 비교, 일원 배치 분산 분석, 이원 배치 분산 분석, 상관분석, 단순 회귀 분석, 다수 회귀 분석 등 여러 분석상황에서 사용되고 있다.

SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)는 거의 모든 비모수 통계분석이 가능하므로 비모수 통계분석용으로 자주 사용되고 있는 통계 소프트웨어로 알려져 있다(조창상, 2016).

나. 비모수적 방법에 의한 평균 비교

1) 윌콕슨순위합 검정(Wilcoxon's signed-rank test)

비모수적 방법에 의한 평균 비교는 윌콕슨순위합 검정방법(Wilcoxon's signed-rank test)과 크루스칼-왈리스(kruskal-wallis) 검정방법이 있다.

윌콕슨순위합 검정은 두 모집단으로부터 독립된 확률표본을 이용하여 자료의 평균분포가 같이 있는지 각각 다르게 있는지 여부를 검정하기 위해 사용하는 방법이다.

윌콕슨순위합 검정은 두 개 확률표본의 관측치를 혼합한 후 작은 것부터 큰 것 순으로 나열하고 순위를 부여한다. 두 개의 확률표본이 같은 분포로부터 나온 것이라면, 표본들의 순위가 고르게 섞여 있어야 한다.

두 개의 표본 중 크기가 작은 표본 그룹의 확률표본에 대응되는 순위합을 검정 통계량으로 볼 때, 통계량이 너무 크거나 작으면 두 모집단이 같다는 귀무가설을 기각하는 것이 이 방법론의 기본적인 개념이다.

n 을 두 확률표본 중 크기가 작은 그룹(X표본 그룹)이라 정의하고 m (Y 표본 그룹)을 크기가 큰 그룹이라고 정의할 때, 윌콕슨순위합 통계량 W_X 는 식 (4)와 같다.

$$W_X = \sum_{i=1}^n R_i \quad (4)$$

윌콕슨순위합 통계량 W_Y 는 식 (5)와 같다.

$$W_Y = \frac{(n+m)(n+m+1)}{2} - W_X \quad (5)$$

2) 크루스칼-왈리스 검정(kruskal-wallis)

크루스칼-왈리스 검정은 비모수 표본을 대상으로 사용하며, 세 집단 이상의 평균을 비교할 때 사용한다.

이 방법은 k개의 독립표본에 대한 비모수 검정이므로 윌콕슨순위합 검정의 확장 개념으로도 정의 할 수 있다. 모수적 평균 비교 방법인 one-way ANOVA 검정과 같은 용도로 사용된다.

크루스칼-왈리스 검정에서 귀무가설(H_0)은 “K개 모집단의 평균분포는 동일하다” 고 가정하며, 대립가설(H_1)은 “K개 모집단 중 적어도 어느 하나의 집단의 평균분포는 같지 않다” 라고 가정한다.

크루스칼-왈리스 검정 통계량에서 전체 N개의 자료를 크기순으로 나열하며 순위를 부여할 때 가장 작은 것은 1, 가장 큰 것은 N, 동점이면 평균 순위를 이용한다. X_{ij} 에 해당하는 순위를 $R(X_{ij})$ 이라 정의할 때, j번째 표본의 순위합 순서 R_j 는 식 (6)과 같다.

$$R_j = \sum_i^{n_j} R(X_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

크루스칼-왈리스 검정통계량 K는 식 (7)과 같다.

$$K = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{1}{n_j} \left[R_j - \frac{n_j(N+1)}{2} \right]^2 = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1) \quad (7)$$

다. 정규성 검정

모든 통계적 분석방법들은 통계자료의 정규성 검정을 요구하기 때문에, 자료를 통계 분석하기 전에 자료의 정규성을 먼저 검사해야 한다.

정규성을 검정하는 방법으로는 카이제곱검정(Chi-square, χ^2), Q-Q plot(quantile-quantile plot), 콜로고로프-스미노프검정(Kolmogorov-Smirnov), 샤피로-윌크검정(Shapiro-Wilk) 등이 있다.

이 중 Shapiro-Wilk검정과 K-S검정은 모집단 수에 의해 방법이 결정된다. 정규성을 검정할 때, 일반적으로 모집단 수가 2,000개보다 클 때는 K-S검정을 이용하고 모집단 개수가 2,000개보다 적을 때는 Shapiro-Wilk 검정을 이용한다(Royston, J.P et al., 1982a, Royston, J.P et al., 1982b, Royston, J.P et al., 1982c). 이러한 검정 방법들은 모두 유의확률로 정규성과 비정규성을 검정한다.

정규성 검정은 표본이 정규분포를 따르는 모집단에서 추출되었다는 가설을 귀무가설로 가정하여 유의확률이 0.05보다 크면 정규분포 하는 것으로 판단하고, 유의확률이 0.05보다 작으면 귀무가설을 기각하여 비정규성으로 판단한다.

제3절 고형연료제품 CO₂ 배출계수 산정방법

고형연료제품 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC G/L에서 제시하고 있는 산정 방법을 적용하였다. 우선 식 (8)처럼 SRF의 탄소 배출계수를 구한 후, 식 (9)의 CO₂ 배출계수 개발 산정식에 따라 배출계수를 구하였다.

$$EmissionFactor_C = C_{ar} \times \frac{1}{EC} \times 10^3 \quad (8)$$

$$EmissionFactor_{CO_2} = EF_C \times 3.664 \times 10^3 \quad (9)$$

여기서, EF_{CO₂} : CO₂ 배출계수(kgCO₂/TJ-연료)

EF_C : 탄소 배출계수(kgC/GJ-연료)

3.664 : CO₂의 분자량(44.010)/C의 원자량(12.011)

Car: 탄소의 질량 분율(인수식, 0에서 1사이의 소수)

EC : 열량계수(연료 순발열량, MJ/kg-연료)

SRF의 CO₂ 배출계수 산정식의 매개변수 중 탄소함량(Car)은 건식 기준의 탄소 질량분율을 측정된 후 KS E 3709 방법에 따라 인수식 기준의 함량으로 환산해준다.

순 발열량은 건식 기준의 총 발열량을 측정된 후 인수식 기준의 총 발열량으로 환산하고 식 (10)의 방법으로 순 발열량을 구한다.

$$Hl = Hh - 600(9H + M) \quad (10)$$

제4장 고품연료제품의 발열량 및 성상특성 분석

제1절 연구대상 고품연료제품

본 연구의 대상은 2018년에 분기별로 실시한 고품연료제품 품질확인 검사로 수집된 데이터 중 제조시설의 SRF 비성형제품과 성형제품을 대상으로 하였으며, 연구대상 SRF는 <표 4-1>와 같다.

1분기(봄철) 품질검사 데이터는 105개, 2분기(여름철) 품질검사 데이터 99개, 3분기(가을철) 품질검사 데이터 97개, 4분기(겨울철) 품질검사 데이터 104개 등 총 405개의 품질검사 검사 결과 데이터가 대상이며, 저위발열량에 대해서는 통계적 분석을 통해 특성을 분석하였다.

<표 4-1> 분기별 제조시설의 고품연료제품 품질검사 대상

구 분	제조시설		합 계 (개소)
	비성형	성형	
1분기	47	58	105
2분기	41	58	99
3분기	43	54	97
4분기	48	56	104
합계	179	226	405

제2절 고품연료제품의 계절별, 권역별 저위발열량 특성

1. 고품연료제품의 계절별 저위발열량 특성

SRF의 계절별 저위발열량 특성을 알아보기 위해 배출특성을 분석하고, 정규성을 검정하였다. 계절별 저위발열량 자료의 표본수가 2,000개보다 적어 Shapiro-Wilk 검정방법으로 정규성을 검정하였다.

가. 성형제품의 계절별 저위발열량 특성

SRF 성형제품의 계절별 저위발열량을 <표 4-2>에 나타내었다.

SRF 성형제품의 계절별 평균 저위발열량은 봄철 평균 저위발열량은 7,060 kcal/kg, 여름철 평균 저위발열량 7,267 kcal/kg, 가을철 평균 저위발열량 7,184 kcal/kg, 겨울철 평균 저위발열량 7,171 kcal/kg로 분석되었다.

SRF 성형제품의 계절별 평균 저위발열량은 여름철이 가장 높고 봄철에 생산되는 제품이 가장 낮은 것으로 나타났다.

<표 4-2> SRF 성형제품의 계절별 저위발열량 특성

(단위: kcal/kg)

구 분	봄	여름	가을	겨울	평균
최소값	4,170	3,510	3,830	4,090	3,900
최대값	9,330	9,210	9,400	9,820	9,440
평균	7,060	7,267	7,184	7,171	7,171
표준편차	1,318	1,438	1,528	1,340	1,406
중위수	7,435	7,655	7,745	7,490	7,581

나. 비성형제품의 계절별 저위발열량 특성

SRF 비성형제품의 계절별 저위발열량 특성을 <표 4-3>에 나타내었다.

SRF 비성형제품의 봄철 평균 저위발열량은 6,246 kcal/kg, 여름철의 평균 저위발열량은 6,285 kcal/kg, 가을철의 평균 저위발열량은 6,148 kcal/kg, 겨울철의 평균 저위발열량은 6,371 kcal/kg로 분석되었다.

SRF 비성형제품의 계절별 평균 저위발열량은 겨울철이 가장 높고 가을철이 가장 낮게 나타났다.

<표 4-3> SRF 비성형제품의 계절별 저위발열량 특성

(단위: kcal/kg)

구 분	봄	여름	가을	겨울	평균
최소값	4,130	3,570	4,000	4,200	3,975
최대값	8,950	8,610	8,880	8,390	8,708
평균	6,246	6,285	6,148	6,371	6,263
표준편차	1,300	1,520	1,289	1,294	1,351
중위수	6,030	6,110	5,910	6,405	6,114

다. SRF 성형제품과 비성형제품의 계절별 저위발열량 검정 결과

SRF 성형제품의 계절별 저위발열량 Shapiro-Wilk 검정 결과를 <표 4-4>에 나타내었다. Shapiro-Wilk 검정결과 4계절 모두 유의확률(p-value)이 0.05 보다 작아 비정규분포임을 알 수 있었다.

이는 계절별 SRF 성형제품의 저위발열량을 통계적으로 분석하려면 비모수적 방법으로 분석해야 한다는 것을 의미한다.

<표 4-4> SRF 성형제품의 계절별 저위발열량 정규성 검정 결과

구 분	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	통계량	자유도	유의 확률	통계량	자유도	유의 확률
봄	0.179	58	0.000	0.943	58	0.009
여름	0.120	58	0.036	0.932	58	0.003
가을	0.158	54	0.002	0.920	54	0.001
겨울	0.133	56	0.015	0.954	56	0.031

SRF 비성형제품의 저위발열량 Shapiro-Wilk 검정 결과를 <표 4-5>에 나타내었다. Shapiro-Wilk 검정결과 4계절 중 여름철과 겨울철의 유의확률(p-value)이 0.05보다 작게 나타나 비정규분포임을 알 수 있었다.

이는 SRF 비성형제품의 저위발열량을 계절적으로 통계 분석하려면 비모수적 방법으로 분석해야 한다는 것을 의미한다.

<표 4-5> SRF 비성형제품의 계절별 저위발열량 정규성 검정 결과

구 분	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	통계량	자유도	유의 확률	통계량	자유도	유의 확률
봄	0.118	47	0.103	0.960	47	0.106
여름	0.120	41	0.146	0.942	41	0.037
가을	0.108	43	0.200	0.969	43	0.289
겨울	0.127	48	0.049	0.932	48	0.008

표본별 평균분포 비교를 위한 귀무가설과 대립가설은 다음과 같다.

귀무가설(H_0) : 계절별 저위발열량의 평균분포는 같다.

대립가설(H_1) : 적어도 어느 하나의 계절별 저위발열량의 평균분포는 같지 않다.

<표 4-6>에서 보는 바와 같이, Kruskal-Wallis검정을 이용하여 봄, 여름, 가을, 겨울의 SRF 성형제품과 비성형제품의 저위발열량 자료의 평균분포 자료를 비교한 결과, 성형제품과 비성형제품 모두 유의수준이 0.05보다 큰 것으로 분석되었다.

이는 “계절별 저위발열량의 평균분포는 같다” 라는 귀무가설을 채택하는 결과를 보였다. 따라서 성형제품과 비성형제품 모두 계절적 요인이 저위발열량에는 영향이 없는 것으로 판단된다.

<표 4-6> SRF의 계절별 저위발열량 Kruskal-Wallis검정 결과

SRF 종류	귀무가설	가설 검정	유의 수준	결 과
성형제품	계절별 저위발열량의 평균분포는 같다.	Kruskal-Wallis검정	0.675	귀무가설 채택
비성형제품	계절별 저위발열량의 평균분포는 같다.	Kruskal-Wallis검정	0.888	귀무가설 채택

2. 고품연료제품의 권역별 저위발열량 특성

가. 성형제품의 권역별 저위발열량 특성

SRF 성형제품의 권역별 저위발열량 특성을 <표 4-7>에 나타내었다.

각 권역별 SRF 저위발열량 결과를 분석해보면, 수도권의 평균 저위발열량은 6,963 kcal/kg이며, 최소값 4,320 kcal/kg, 최대값 9,210 kcal/kg, 표준편차 1,358 kcal/kg로 나타났고, 강원권 평균 저위발열량은 6,133 kcal/kg, 최소값 3,830 kcal/kg, 최대값 9,380 kcal/kg, 표준편차 2,094 kcal/kg로 나타났다.

충청권의 평균 저위발열량은 7,212 kcal/kg, 최소값 4,620 kcal/kg, 최대값 9,380 kcal/kg, 표준편차 1,135 kcal/kg로, 전라권 평균 저위발열량은 6,963 kcal/kg, 최소값 4,540 kcal/kg, 최대값 9,650 kcal/kg, 표준편차 1,543 kcal/kg로 나타났고, 경상권 평균 저위발열량은 7,677 kcal/kg, 최소값 3,510 kcal/kg, 최대값 9,820 kcal/kg, 표준편차 1,132 kcal/kg로 나타났다.

권역별 SRF 성형제품의 평균 저위발열량은 경상권에서 제조된 제품이 7,677 kcal/kg로 가장 높게 나타났고 충청권에서 제조된 제품이 7,212 kcal/kg, 전라권과 수도권이 6,963 kcal/kg, 강원권이 6,133 kcal/kg로 가장 낮게 나타났다.

<표 4-7> SRF 성형제품의 권역별 저위발열량 특성

(단위: kcal/kg)

구 분	수도권	강원권	충청권	전라권	경상권	평균
최소값	4,320	3,830	4,620	4,540	3,510	4,164
최대값	9,210	9,380	9,380	9,650	9,820	9,488
평균	6,963	6,133	7,212	6,963	7,677	6,990
표준편차	1,358	2,094	1,135	1,543	1,132	1,452
중위수	7,340	5,005	7,310	7,550	7,920	7,025

나. 비성형제품의 권역별 저위발열량 특성

SRF 비성형제품의 수도권 평균 저위발열량은 5,858 kcal/kg이며, 최소값 3,640 kcal/kg, 최대값 8,880 kcal/kg, 표준편차 1,307 kcal/kg로 분석되었고, 충청권의 평균 저위발열량은 6,396 kcal/kg, 최소값 4,270 kcal/kg, 최대값 8,590 kcal/kg, 표준편차 1,211 kcal/kg로 분석되었다.

전라권 평균 저위발열량은 6,800 kcal/kg, 최소값 3,570 kcal/kg, 최대값 8,490 kcal/kg, 표준편차 1,480 kcal/kg로 경상권 평균 저위발열량은 6,707 kcal/kg, 최소값 4,380 kcal/kg, 최대값 8,950 kcal/kg, 표준편차 1,337 kcal/kg로 분석되었다.

SRF 비성형제품의 계절별 저위발열량 특성을 <표 4-8>에 나타내었다. 권역별 SRF 비성형제품의 평균 저위발열량은 전라권에서 제조된 제품이

6,800 kcal/kg로 가장 높게 나타났고 경상권에서 제조된 제품이 6,707 kcal/kg, 강원권 6,607 kcal/kg, 충청권 6,396 kcal/kg, 수도권이 5,858 kcal/kg로 분석되었다.

<표 4-8> SRF 비성형제품의 권역별 저위발열량 특성

(단위: kcal/kg)

구 분	수도권	강원권	충청권	전라권	경상권	평균
최소값	3,640	5,700	4,270	3,570	4,380	4,312
최대값	8,880	7,700	8,590	8,490	8,950	8,522
평균	5,858	6,607	6,396	6,800	6,707	6,474
표준편차	1,307	1,013	1,211	1,480	1,337	1,270
중위수	5,670	6,420	6,380	7,315	6,770	6,511

다. SRF 성형제품과 비성형제품의 권역별 저위발열량 특성

SRF 성형제품의 저위발열량에 대한 Shapiro-Wilk 검정 결과를 <표 4-9>에 나타내었다. Shapiro-Wilk검정 결과 수도권, 강원권, 전라권, 경상권의 유의 확률(p-value)이 0.05보다 작게 나타나 비정규분포임을 알 수 있었다.

이는 권역별 SRF 성형제품의 저위발열량을 통계적으로 분석하려면 비모수적 방법으로 분석해야 한다는 것을 의미한다.

<표 4-9> SRF 성형제품의 권역별 저위발열량 정규성 검정 결과

구 분	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	통계량	자유도	유의 확률	통계량	자유도	유의 확률
수도권	0.117	71	0.017	0.947	71	0.005
강원권	0.256	16	0.006	0.785	16	0.002
충청권	0.073	46	0.200	0.979	46	0.568
전라권	0.181	34	0.006	0.902	34	0.005
경상권	0.139	59	0.006	0.915	59	0.001

SRF 비성형제품의 저위발열량 Shapiro-Wilk 검정 결과를 <표 4-10>에 나타내었다. Shapiro-Wilk 검정 결과 수도권과 충청권은 유의확률이 0.05보다 작게 나타나 비정규분포임을 알 수 있다.

이는 SRF 비성형제품의 권역별 저위발열량을 통계적으로 분석하려면 비모수적 방법으로 해야 한다는 것을 의미한다.

<표 4-10> SRF 비성형제품의 권역별 저위발열량 정규성 검정 결과

구 분	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	통계량	자유도	유의 확률	통계량	자유도	유의 확률
수도권	0.085	77	0.200	0.956	77	0.010
강원권	0.240	3	-	0.975	3	0.694
충청권	0.099	48	0.200	0.951	48	0.046
전라권	0.219	16	0.038	0.891	16	0.058
경상권	0.087	35	0.200	0.958	35	0.198

Kruskal-Wallis검정 결과는 <표 4-11>에서 보는 바와 같이 유의수준이 0.05보다 작은 것으로 분석되었다. 유의확률이 0.05보다 작아 “권역별 SRF 성형제품과 비성형제품의 저위발열량의 평균분포는 같다.” 라는 귀무가설을 기각하게 되었다.

<표 4-11> SRF의 권역별 저위발열량 Kruskal-Wallis검정 결과

SRF 종류	귀무가설	가설 검정	유의 수준	결 과
성형제품	권역별 저위발열량의 평균분포는 같다.	Kruskal-Wallis검정	0.018	귀무가설 기각
비성형제품	권역별 저위발열량의 평균분포는 같다.	Kruskal-Wallis검정	0.018	귀무가설 기각

권역별 평균분포 비교결과를 자세히 검토하기 위해, 사후검정으로 권역별로 대응비교 자료를 검토해 보았다.

Kruskal-Wallis검정 결과가 귀무가설을 기각할 때, 사후검정으로 대응별 비교를 하여 어느 권역끼리 차이가 있는가를 살펴보아야 한다.

SPSS에서의 사후검정은 본페로니 교정에 따라 조정된 유의수준으로 평가하는데 본페로니 교정은 다중 비교에서 생길 수 있는 제 1종 오류가 커짐을 보정하기 위한 방법이다.

대응비교를 위한 귀무가설과 대립가설은 다음과 같다.

귀무가설(H_0) : 대응하는 권역별 저위발열량의 평균은 같다.

대립가설(H_1) : 대응하는 권역별 저위발열량의 평균은 같지 않다.

<표 4-12>에서 보는 바와 같이 성형제품의 저위발열량의 경우, 강원권과 경상권의 대응 비교결과가 유의수준이 0.04로 0.05보다 작게 나타났고, 비성형제품의 저위발열량의 경우는 수도권과 경상권의 대응 비교결과 유의수준이 0.03으로 0.05보다 작게 나타나 저위발열량의 평균농도가 다른 것으로 나타났다.

<표 4-12> SRF 성형, 비성형제품의 권역별 저위발열량 대응비교 결과

고형연료 종류	권역별 비교	조정된 유의수준	검정 통계량
성형제품	수도권-충청권	1.000	2.812
	수도권-강원권	1.000	-23.847
	수도권-경상권	0.112	29.230
	수도권-전라권	1.000	-1.783
	충청권-강원권	1.000	26.659
	충청권-경상권	0.400	-26.418
	충청권-전라권	1.000	4.595
	강원권-경상권	0.040	-53.077
	강원권-전라권	1.000	-22.064
	경상권-전라권	0.276	31.012
비성형제품	수도권-충청권	0.398	21.142
	수도권-강원권	1.000	31.673
	수도권-경상권	0.030	32.635
	수도권-전라권	0.107	38.319
	충청권-강원권	1.000	-10.531
	충청권-경상권	1.000	-11.493
	충청권-전라권	1.000	-17.177
	강원권-경상권	1.000	-0.962
	강원권-전라권	1.000	-6.646
	경상권-전라권	1.000	-5.684

제3절 고품연료제품의 계절별, 권역별 중금속 농도 특성

SRF 제품의 중금속 품질기준은 납(Pb)은 1.0 mg/kg 이하, 수은(Hg)은 150 mg/kg 이하, 카드뮴(Cd)은 5.0 mg/kg 이하, 비소(As)는 13.0 mg/kg 이하이다.

1. SRF 성형제품과 비성형제품의 계절별 중금속 함량 특성

SRF 성형제품의 계절별 납(Pb), 수은(Hg), 카드뮴(Cd), 비소(As) 등의 중금속 분석 결과는 <표 4-13>에서 보는 바와 같다.

SRF 성형제품의 계절별 중금속 농도 특성은 납은 평균 30.51mg/kg, 수은은 평균 0.11mg/kg, 카드뮴은 평균 1.75mg/kg, 비소 평균 1.41mg/kg로 분석되었다. SRF 성형제품의 중금속 농도를 계절별로 비교해보면 가을철의 납, 수은, 카드뮴의 평균농도가 각각 38.56mg/kg, 0.21mg/kg, 2.56mg/kg로 가장 높게 나타났고, 비소는 여름철의 평균농도가 1.56mg/kg로 가장 높게 나타났다.

<표 4-13> SRF 성형제품의 계절별 중금속 특성

(단위: mg/kg)

구 분	납(Pb)	수은(Hg)	카드뮴(Cd)	비소(As)
봄	25.61	0.08	1.22	미검출
여름	25.99	0.09	2.14	1.56
가을	38.56	0.21	2.56	미검출
겨울	31.79	0.07	0.85	0.93
평균	30.51	0.11	1.75	1.41

SRF 비성형제품의 계절별 납(Pb), 수은(Hg), 카드뮴(Cd), 비소(As) 등의 중금속 분석 결과는 <표 4-14>에서 보는 바와 같다.

SRF 비성형제품의 중금속 농도를 살펴보면, 납은 평균 51.47mg/kg, 수은은 평균 0.05mg/kg, 카드뮴은 평균 4.02mg/kg, 비소는 평균 1.00mg/kg로 분석 되었다.

SRF 비성형제품의 중금속 농도를 계절별로 비교해보면 납은 가을철 평균농도가 76.55mg/kg, 가장 높고 수은은 봄철 평균농도가 0.07mg/kg, 카드뮴과 비소의 평균농도는 여름철이 각각 각각 4.19mg/kg, 1.65mg/kg로 가장 높게 분석되었다.

<표 4-14> SRF 비성형제품의 계절별 중금속 특성

(단위: mg/kg)

구 분	납(Pb)	수은(Hg)	카드뮴(Cd)	비소(As)
봄	66.19	0.07	2.76	0.30
여름	43.73	0.05	4.19	1.65
가을	76.15	0.04	3.15	0.95
겨울	19.88	0.05	5.18	0.75
평균	51.47	0.05	4.02	1.00

2. SRF 성형, 비성형제품의 권역별 중금속 함량 특성

SRF 성형제품의 권역별 납(Pb), 수은(Hg), 카드뮴(Cd), 비소(As) 등의 중금속 분석 결과는 <표 4-15>에서 보는 바와 같다.

SRF 성형제품의 중금속 평균농도를 권역별로 비교해보면 납은 충청권에서 생산된 제품이 평균 41.58mg/kg, 수은은 전라권에서 생산된 제품이 평균 0.33mg/kg으로 가장 높다.

카드뮴은 수도권에서 생산된 제품이 평균 2.32mg/kg, 비소는 경상권에서 생산된 제품이 평균 1.56mg/kg로 가장 높게 분석되었다.

<표 4-15> SRF 성형제품의 권역별 중금속 특성

(단위: mg/kg)

구 분	납(Pb)	수은(Hg)	카드뮴(Cd)	비소(As)
수도권	23.97	0.07	2.32	미검출
강원권	34.58	0.05	2.06	0.93
충청권	41.58	0.05	1.10	미검출
전라권	32.72	0.33	1.88	미검출
경상권	27.16	0.05	1.40	1.56
평균	30.51	0.11	1.75	1.41

SRF 비성형제품의 권역별 납(Pb), 수은(Hg), 카드뮴(Cd), 비소(As) 등의 중금속 분석 결과는 <표 4-16>에서 보는 바와 같다.

SRF 비성형제품의 중금속 농도를 권역별로 비교해보면 납, 수은, 카드뮴은 전라권에서 생산된 제품이 각각 122.30mg/kg, 0.12mg/kg, 7.29mg/kg로 가장 높았으며, 비소는 경상권에서 생산된 제품이 1.65mg/kg로 가장 높게 나타났다.

<표 4-16> SRF 비성형제품의 권역별 중금속 특성

(단위: mg/kg)

구 분	납(Pb)	수은(Hg)	카드뮴(Cd)	비소(As)
수도권	19.39	0.05	5.05	0.86
강원권	31.74	0.05	미검출	미검출
충청권	84.61	0.08	2.63	0.30
전라권	122.30	0.12	7.29	0.83
경상권	30.33	0.03	3.15	1.65
평균	51.47	0.05	4.02	1.00

제4절 고품연료제품의 권역별 원소함량 특성

SRF의 권역별 탄소, 질소, 수소, 산소 함량을 특성 분석을 위하여 각 권역에 위치한 SRF 제조업체에서 생산된 제품을 성형제품과 비성형제품 각 5개씩 총 10개의 시료를 채취하여 분석하였다.

1. SRF 성형제품의 권역별 원소함량 특성

SRF 성형제품의 권역별 탄소, 질소, 수소, 산소 함량을 측정하기 위해 5개 권역에 위치한 성형 제조업체의 시료를 채취하여 각 3회 측정 분석하였고, 그 결과는 <표 4-17>에서 보는 바와 같다.

SRF 성형제품의 탄소 함량은 평균 70.19%, 질소 함량은 평균 0.62%, 수소 함량은 평균 10.02%, 산소 함량은 평균 19.18%로 분석되었다.

<표 4-17> SRF 성형제품의 권역별 원소함량 특성

(단위: %)

구 분	탄소(C)	질소(N)	수소(H)	산소(O)
수도권	75.62	0.18	7.84	24.57
강원권	65.36	0.41	9.66	16.36
충청권	74.32	0.41	11.96	11.77
전라권	61.33	0.26	8.50	29.90
경상권	74.30	1.83	12.10	13.31
평 균	70.19	0.62	10.02	19.18

2. SRF 비성형제품의 권역별 원소함량 특성

SRF 비성형제품의 권역별 탄소, 질소, 수소, 산소 함량을 측정하기 위해 성형제품과 동일하게 5개의 권역에 위치한 비성형제품 제조업체의 시료를 채취하여 각 3회 측정 분석하였고, 그 결과는 <표 4-18>에서 보는 바와 같다.

SRF 비성형제품의 탄소 함량은 평균 68.20%, 질소 함량은 평균 0.92%, 수소 함량은 평균 9.55%, 산소 함량은 평균 21.34%로 분석되었다.

<표 4-18> SRF 비성형제품의 권역별 원소함량 특성

(단위: %)

구 분	탄소(C)	질소(N)	수소(H)	산소(O)
수도권	66.04	2.37	9.80	9.90
강원권	78.65	1.03	10.41	21.79
충청권	68.46	0.13	10.00	11.67
전라권	51.34	0.17	6.58	41.90
경상권	76.49	0.91	10.94	21.41
평 균	68.20	0.92	9.55	21.34

제5장 고품연료제품의 CO₂ 배출계수 개발

제1절 고품연료제품의 CO₂ 배출계수 개발

SRF의 CO₂ 배출계수 개발은 2006 IPCC G/L의 배출계수 산정방법을 적용하여 구하였다.

1단계는 원소분석의 탄소함량 값을 인수식으로 전환하는 것이다. 건식의 원소분석방법으로 구해진 탄소함량을 공업분석을 통해 나온 총 수분값으로 보정하여 인수식의 탄소함량을 구한다.

인수식의 탄소함량 산출식은 식 (11)에 따라 결정된다.

$$\text{인수식 탄소 함량(\%)} = \text{건식 탄소 함량(\%)} \times (1 - \text{총수분}) \quad (11)$$

건식 탄소함량(%) 결과를 총 수분값으로 보정 하여 도출된 인수식 탄소함량 결과는 <표 5-1>과 같다. SRF 비성형제품 인수식 탄소함량은 63.22%, 성형제품의 탄소함량은 66.89%로 나타났다.

<표 5-1> SRF 종류별 탄소함량(%)

구 분	건 식 탄소함량(%)	총수분(%)	인수식 탄소함량(%)
SRF 비성형제품	68.2	7.3	63.22
SRF 성형제품	70.2	4.7	66.89

2단계는 발열량 분석을 통해 구해진 저위발열량 평균값을 IPCC G/L 기준의 단위인 TJ/kg로 단위변환을 해주고 1단계에서 구해진 인수식 탄소 함량(%)을 대입하여 SRF 종류별 열량 당 탄소의 배출계수를 구한다.

3단계는 SRF의 탄소 배출계수를 분자식 (CO₂/C) 무게비인 3.664를 곱한 후, IPCC G/L 기준인 kg CO₂/TJ 단위로 CO₂ 배출계수를 개발한다.

<표 5-2>는 단계별로 구해진 SRF 비성형제품, 성형제품의 종류별 저위발열량과 탄소 배출계수, CO₂ 배출계수이다.

<표 5-2> SRF 종류별 CO₂ 배출계수

구 분	저위발열량 (TJ/kg)	탄소 배출계수 (t C/TJ)	CO ₂ 배출계수 (kg CO ₂ /TJ)
SRF 비성형제품	26.23	26.00	95,266
SRF 성형제품	30.02	23.38	85,670

제2절 고행연료제품의 CO₂ 배출계수 비교

본 연구에서 개발된 SRF 성형제품과 비성형제품의 배출계수와 관련 연료의 CO₂ 배출계수를 비교하여 <표 5-3>에 나타내었다.

앞서 개발한 SRF 비성형제품의 CO₂ 배출계수는 95,266 kgCO₂/TJ, SRF 성형제품의 CO₂ 배출계수는 85,670 kgCO₂/TJ로 산정되었다.

SRF 성형제품의 CO₂ 배출계수가 비성형제품의 CO₂ 배출계수 보다 낮은 이유는 SRF 성형제품의 탄소함량과 저위발열량이 비성형제품보다 높기 때문이다. 성형제품은 생산된 비성형제품을 다시 한번 분쇄하고 이물질을 선별한 후 수분을 제거하는 건조과정을 통하게 되는데 이러한 과정을 통해 탄소함량과 저위발열량이 높다고 판단된다.

IPCC G/L에는 SRF 배출계수가 없으며 도시폐기물(비-바이오매스) CO₂ 배출계수가 가장 유사하다. 개발된 SRF 배출계수를 도시폐기물(비-바이오매스)의 CO₂ 배출계수 91,700 kgCO₂/TJ과 비교하면, SRF 비성형제품의 배출계수는 1.04배로 도시폐기물 배출계수보다 약간 높고 SRF 성형제품의 배출계수는 0.93배로 낮게 나타났다.

산업 보일러에서 주 연료로 많이 사용하는 연료용 유연탄의 국가 배출계수 95,300 kgCO₂/TJ과 비교하면, SRF 비성형제품은 연료용 유연탄의 배출계수와 거의 유사하고 SRF 성형제품은 0.9배로 낮게 나타났다.

본 연구에서 도출된 SRF 성형제품 배출계수와 비성형제품 배출계수를 업체에서 사용하는 SRF 종류에 따라 각각 개별 적용 시 온실가스 인벤토리의 정확성과 신뢰성이 향상될 것으로 판단된다.

<표 5-3> 본 연구 결과와 국내·외 폐기물 및 연료 CO₂ 배출계수 비교
 (단위: kg CO₂/TJ)

구 분	연료명	CO ₂ 배출계수
IPCC 2006 G/L (Tier 1)	도시폐기물 (비-바이오매스 부분)	91,700
국가 고유 배출계수 (Tier 2)	유연탄(연료용)	95,300
SRF 배출계수	SRF 비성형제품	95,266
	SRF 성형제품	85,670

제6장 결 론

제1절 연구 요약

우리나라는 폐기물의 재이용 방법을 폐기물의 재사용·재생이용, 폐자원에너지로 구분하고 있다. 폐자원에너지란 폐기물의 형태를 변화시켜 연료화한 것을 뜻하는데 대표적인 폐자원에너지가 고형연료제품(SRF ; Solid Refuse Fuel)이다.

SRF는 시멘트, 제지, 발전 업종 등 국내 다양한 사업체에서 사용하고 있다. 배출권거래제에 포함되는 업체는 SRF 사용에 따른 온실가스 배출량을 산정하고 있으나, SRF에 대한 국가 배출계수가 없어 IPCC G/L에서 제시하고 있는 SRF 배출계수와 가장 유사한 도시폐기물(비-바이오매스)의 배출계수를 적용하고 있다.

본 연구는 SRF 성형제품과 비성형제품의 계절적, 권역별 성분특성을 분석하고 SRF의 CO₂ 배출계수의 개발하는 것으로 이를 위해 2018년도에 분기별로 총 405개의 SRF 성형제품과 비성형제품을 분석하였다.

SRF의 저위발열량의 통계적 평균 분석 결과, SRF 성형제품과 비성형제품은 '계절별 평균분포는 같다'는 특성과 '권역별 평균분포는 같지 않다'는 특성 결과가 도출되었다. 이는 SRF의 저위발열량은 통계적으로 SRF를 생산하는 시기적으로는 성분의 차이가 없으나 SRF를 생산하는 권역별로 성분특성 차이가 발생한다는 것을 의미한다.

SRF의 중금속 성분을 분석한 결과, 납(Pb)의 경우 성형제품은 30.51 mg/kg, 비성형제품은 51.47 mg/kg로 나타났고, 카드뮴(Cd)은 성형제품 1.75 mg/kg, 비성형제품 4.02 mg/kg로 성형제품이 낮게 나타났다.

수은(Hg)의 경우 성형제품 0.11 mg/kg, 비성형제품 0.05 mg/kg로 나타

났고, 비소(As)의 경우는 성형제품 1.41 mg/kg, 비성형제품 1.00 mg/kg로 비성형제품이 낮게 나타났으나, 농도는 모두 매우 낮은 결과가 나왔다.

SRF의 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC G/L에서 제시하고 있는 배출계수 산정방법을 적용하였다. SRF 비성형제품과 성형제품의 CO₂ 배출계수 산정 결과, SRF 비성형제품은 95,266 kgCO₂/TJ, SRF 성형제품의 배출계수는 85,670 kgCO₂/TJ로 SRF 성형제품의 배출계수가 비성형제품 대비 0.9배로 낮은 것을 확인 할 수 있었다.

2006PCC G/L의 91,700 kgCO₂/TJ와 비교하면 SRF 비성형제품의 배출계수는 1.04배, SRF 성형제품의 배출계수는 0.93배로 나타났다. 연료용 유연탄의 국가 배출계수 95,300 kgCO₂/TJ와 비교하면 SRF 비성형제품은 연료용 유연탄의 배출계수와 거의 유사하고 SRF 성형제품은 0.9배로 낮게 나타났다.

본 연구에서 도출된 SRF 비성형제품 배출계수와 성형제품 배출계수를 IPCC G/L 배출계수 대신 SRF 사용하는 시설에 적용 시 온실가스 인벤토리의 정확성과 신뢰성이 향상될 것으로 기대된다.

제2절 연구의 시사점 및 한계

본 연구는 국내에서 제조되는 SRF의 성분 특성을 분석하고 CO₂ 배출 계수를 개발하고자 하였다.

국내에는 SRF 제조시설과 사용시설이 있는데 제조시설에서 수집된 1년간의 자료만을 이용하였고, SRF의 탄소함량 분석은 10개의 시료만을 분석하여 활용하였다.

따라서, 다년간의 자료를 확보하고 SRF 제조시설과 사용시설까지 대상으로 하여 조사한다면, 우리나라 SRF 제조 시와 사용 시의 특성에 대하여 다양한 연구가 진행될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 다음과 같은 두 가지 의미가 있다.

첫째, SRF 성형제품과 비성형제품을 구분하여 계절적, 권역별 성분특성을 분석하였으며, SRF의 저위발열량은 계절적 요인은 없고 SRF가 생산되는 권역에 따라 차이가 발생함을 제시하였다.

둘째, SRF 성형제품과 비성형제품의 종류별 CO₂ 배출계수를 개발하고 국내·외 적용하고 있는 배출계수와 비교함으로써 SRF를 사용에 따른 온실가스 배출량 산정의 정확성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립환경과학원, 2017, 『고형연료제품 사용시설의 유해대기오염물질 배출특성』, 인천
- 한국환경공단, 2017, 『2016년도 고형연료제품 원료 성상 조사』, 인천
- 한국환경공단, 2018, 『고형연료제품 품질등급 기준설정 연구』, 인천
- 한국환경공단, 2018, 『고형연료제품 관리제도 성과평가 및 발전방안 마련 연구』, 인천
- 나경호, 2012, “농도실측 및 연료 성분조성에 의한 중소형 RPF 소각시설의 온실가스 배출계수 개발”, 『한국대기환경학회지』, 28(4), pp.423~434
- 최상현, 2019, “고형연료 소각시설의 N₂O 배출특성 및 배출계수 조사,” , 『대한환경공학학회지』, 41(2), pp.82~88
- 조창상, 2016, “대기오염방지시설이 Non-CO₂ 배출농도에 미치는 영향 및 예측모형 연구,” 박사학위 논문, 세종대학교, 서울
- 조승현, 2019, “농업잔재물 소각의 CH₄ 배출계수 개발,” 석사학위 논문, 세종대학교, 서울
- 강성민, 2019, “생활폐기물소각시설의 온실가스 및 화석탄소함량 적정 측정주기 연구,” 박사학위 논문, 세종대학교, 서울

환경부, 2014, 『온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침. 환경부 고시 제 2014-186호』, 세종

환경부, 2015, 『고형연료제품의 품질검사 절차 및 방법 등에 관한 고시, 환경부 고시 제 2015-203호』, 세종

한광중, 2014, 『SPSS활용 미래예측과 시계열분석』, 백산출판사, pp.154~155

한국환경공단, 2019, 『사업장 고유배출계수 개발 가이드라인』, 세종: 환경부

한국환경공단, 2019, <http://www.srf-info.or.kr>

한국환경공단, 2018, 『고형연료제품 제조·사용·수입 실적현황』, 인천

한국에너지공단, 2016, <https://www.knrec.or.kr>

IPCC, 2006, 『2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories. Vol. 2: Energy』

IPCC, 2006, 『2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories. Vol. 5: Waste』

WRAP(Waste & Resources Action Programme), 2012, 『A Classification Scheme to Define the Quality of Waste Derived Fuels』

Abstract

Development of CO₂ Emission Factor and Component Characteristics of Solid Refuse Fuel

Lee Jung Yong
Cooperate Course for Climate Change
The Graduate School
Sejong University

Waste-to-Energy is the fuel used by changing the form of waste and the typical waste energy is Solid Refuse Fuel (SRF).

SRF is used by various industries. In the domestic emission trading scheme, such as cement, paper, and power generation sectors report emissions for SRF, but emission factor for SRF does not reflect the component characteristics of domestically produced SRF.

The purpose of this study is to analyze the component characteristics of SRF molded and non-molded products manufactured in Korea and to develop CO₂ emission factor of SRF based on them.

The results of this study, statistical average analysis of lower heating value of SRF-molded and non-molded products by season and region showed that the characteristics of 'seasonal average distribution is same' and 'average distribution by region' are not the same.

The lower heating value of SRF was found to be different in the characteristics of each region producing SRF and the difference was not significant at the season of production.

In the heavy metals of SRF, lead(Pb) showed 30.51 mg/kg molded product and 51.47 mg/kg non-molded product, and cadmium(Cd) 1.75 mg/kg molded product and 4.02 mg/kg non-molded product, and mercury (Hg) was 0.11 mg/kg molded products and 0.05 mg/kg non-molded products, and arsenic (As) was 1.41 mg/kg molded products and 1.00 mg/kg non-molded products.

The CO₂ emission factor of SRF molded and non-molded developed through lower-heating value and elemental analysis is 85,670 kgCO₂/TJ for SRF molded products, 95,266 kgCO₂/TJ for non-molded products.

Compared with the municipal waste (non-biomass) 91,700 kgCO₂/TJ based on 2006 IPCC G/L, the emission factor of SRF molded product was 0.93 times and that of SRF non-molded products 1.04 times.

As a result, the SRF emission factor developed in this study will contribute to the accuracy of the greenhouse gas inventory when applied separately to facilities using SRF molded products and those using non-molded products.

Keywords : Solid Refuse Fuel(SRF), Emission Factor, Emission Trading Scheme, IPCC G/L, Waste-to-Energy

감사의 글

대학원 입학 후 지금까지 2년 동안의 대학원 생활은 제 인생에서 새로운 동기부여가 된 정말 특별한 시간이었습니다.

2년 전 겨울에 처음 연구실을 방문하여 교수님과 대학원 입학 후 면접을 본 순간부터 논문을 작성하는 지금까지 정말 많은 분들의 도움을 받았습니다. 교수님과 가족, 대학원 선배님들, 그리고 친한 친구처럼 학교생활 하는데 도움을 준 대학원 입학 동기들 덕에 무사히 석사과정을 마칠 수 있었습니다.

먼저, 저에게 기후변화라는 학문에 더 깊게 다가갈 수 있는 기회와 배움의 중요성을 가르쳐주신 전의찬 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 교수님께서 부족한 저에게 항상 깊은 조언과 격려를 해주셨고 특히 이번 논문 주제에 대하여 바쁘신 와중에도 많은 상담과 지도를 해주셨습니다. 정말 감사드리고 앞으로도 제가 좀 더 발전하고 정진할 수 있도록 많은 조언을 부탁드립니다.

이번 학위논문 심사위원장으로 바쁘신 와중에도 통계작성 부문과 논문에서 상용하는 용어부문에 많은 지도를 해주신 차재형 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 좋은 강의와 더불어 논문 작성 시 상담 요청을 드렸는데 논문 작성 시에는 철저한 자료 분석을 해야 한다는 가르침과 더불어 친절히 지도를 해주신 김하나 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다.

대학원 생활을 즐겁게 생활할 수 있도록 학업 정보도 공유해주고 꼭 다 함께 졸업하자고 저를 다 잡아 주고 도와준 대학원 입학 동기 이한나 팀장, 유재호, 노준영, 우지윤 동기님들에게 깊은 감사와 축하를 드립니다.

또한 학업 관련 정보나 중요한 사항에 대해서 항상 공지해주는 조성흠 박사님과 연구실에 가면 항상 반갑게 맞이해주는 연구실 석·박사

선후배님들에게도 감사하다는 말을 전합니다.

사랑하는 제 가족들에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

맛별이로 저와 같이 평일에는 직장 생활하고 주말에는 어린 아들 독박 육아로 많이 힘들었을 제 아내 이현미에게 정말 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 주말에 쉬지도 못하고 좋아하는 여행도 제 스케줄 때문에 가지 못했는데도 2년 동안 싫은 내색이나 투정 안 부리고 저를 이해해 줘서 정말 감사합니다.

그리고, 항상 저에게 행복한 에너지와 열정을 제공해주는 제 아들 이은규에게도 사랑하고 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

제가 대학원에 지원한다고 했을 때 저를 응원해준 가족분들과 친지분들에게 진심으로 감사드리고, 행복하길 기원합니다.

도움을 주신 분들 다시 한번 감사드리고 앞으로도 제 자신이 성장할 수 있도록 노력을 게을리하지 않고 정진하도록 하겠습니다.