

액체 이산화탄소의 전과정목록(LCI) DB 구축에 관한 연구

이수선, 김영실[†], 안중우^{‡*}

한국교통대학교 신소재공학과/친환경 에너지 변환 저장소재 및 부품개발 연구센터
380-702 충북 충주시 대소원면 대학로 50
[†]성신여자대학교 대학원 미래융용과학과
142-732 서울특별시 강북구 도봉로76가길 55
[‡]성신여자대학교 청정융합과학과
142-732 서울특별시 강북구 도봉로76가길 55

(2014년 12월 2일 접수; 2015년 1월 12일 수정본 접수; 2015년 2월 2일 채택)

Development of Life Cycle Inventory (LCI) Database for Production of Liquid CO₂

Soo-Sun Lee, Young Sil Kim[†], and Joong Woo Ahn^{‡*}

Department of Materials Science and Engineering/Research Center for Sustainable Eco-Devices and Materials (ReSEM)
50 Daehak-ro, Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungbuk 380-702, Korea
[†]Department of Next Generation Applied Science, Sungshin Women's University
55 Dobong-ro 76ga-gil, Gangbuk-gu, Seoul 142-732, Korea
[‡]Department of Interdisciplinary Eco Science, Sungshin Women's University
55 Dobong-ro 76ga-gil, Gangbuk-gu, Seoul 142-732, Korea

(Received for review December 2, 2015; Revision received January 12, 2015; Accepted February 2, 2015)

요 약

본 연구에서는 전과정평가 방법론을 활용하여 액체 이산화탄소 제조 공정에 대한 전과정목록 DB를 구축하였다. 특성화와 정규화 결과, 액체 이산화탄소의 제조는 자원소모, 지구온난화 범주가 주로 영향을 미치며, 다음으로 산성화, 부영양화, 광화학적산화물생성 순이었다. 투입물의 기여도에서는 대부분의 영향범주에서 전력이 가장 높았으며 산성화와 부영양화에는 대기배출이 높은 기여도를 나타내었다. 오존층 파괴 범주의 경우 암모니아가 주된 원인이었다. 본 액체 이산화탄소 LCI DB를 통하여 탄소성적표지 등의 국가적 차원의 환경 전략 활용이 활성화되기를 기대한다.

주제어 : 액체 이산화탄소, 전과정 목록 데이터베이스, 전과정 평가

Abstract : In this research, life cycle inventory database (LCI DB) was developed for liquid CO₂ employing life cycle assessment (LCA) methodology. As are result of characterization and normalization process, production of liquid CO₂ puts on environmental impact in the order of resource depletion, global warming, acidification, eutrophication and photochemical oxidation, and among a wide variety of input, electricity contributes in most of the impact categories. Air emission plays a key role in the acidification and eutrophication while ammonia affects most on the ozone depletion. It is anticipated that development of liquid CO₂ LCI DB makes it possible for national environmental strategies to be more activated including environmental labeling scheme.

Keywords : Liquid CO₂, Life cycle inventory database, Life cycle assessment

1. 서 론

지구온난화, 기후변화 등을 야기하는 대표적 온실가스인

이산화탄소는 탄소배출권거래제로 인해 환경 문제와 경제 문제로 부각되고 있다[1]. 탄소배출권거래제를 시행하고 있는 나라는 전 세계 약 32개이며 우리나라 또한 2015년부터 본격

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jwahn@sungshin.ac.kr http://cleantech.or.kr/ct/

doi: 10.7464/kset.2015.21.1.033 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적으로 시행할 예정이다[2,3].

이러한 상황에서 환경평가 기법 중 하나인 전과정평가(life cycle assessment, LCA)를 위해 이산화탄소에 관한 전과정 목록(life cycle inventory, LCI) DB 구축에 대한 연구가 필요한 상황이다. 기업의 환경적 전략 수립에 있어 대표적인 환경성 평가인 LCA는 제품 및 서비스의 전과정에서 유발되는 잠재적 환경영향을 정량화하여 객관적인 비교를 가능하게 한다[4]. 그러나 신뢰성 있는 결과를 위해서 전과정 목록(life cycle inventory, LCI) DB를 구축해야 한다[5]. 전과정 목록 DB가 구축되면 현장데이터에 도입하여 분류화, 특성화, 정규화 등의 환경영향 평가 단계를 진행시킬 수 있다.

이산화탄소는 일반적으로 대기압 및 상온에서 기체로 존재하는 기체 이산화탄소, 고압 하에서 기체 이산화탄소를 냉각, 압축시켜 생산하는 액체 이산화탄소 그리고 드라이 아이스로 사용되는 고체 이산화탄소로 분류할 수 있다[6].

이 중 액체 이산화탄소는 식음료용의 탄산가스 및 산업에서 냉매로 주로 사용되는 가스로 석유화학 플랜트, 비료 플랜트, 주정 공장 등에서 부산물로 생산된 원료가스를 파이프라인을 통해 공급 받아 압축, 냉각, 건조, 정제 공정을 거쳐 생산되는 제품이다[7]. 식품공업에서는 탄산음료(콜라 및 사이다, 맥주 등) 및 탄산수 제조 시 식품첨가물, 공업용으로는 용접, 급속냉각, 주물공업의 이형제, 산화방지제, 가연성 위험물 저장탱크의 밀봉용 등으로 사용되며, 그 외 의료용으로는 소화제, 살충제, 국소마취제, 소독가스 등으로 다양한 산업 분야에서 사용된다. 특히 대기로 배출되어 환경오염을 일으키는 기체 이산화탄소를 회수하여 생산하므로 경제적이다.

이에 본 연구에서는 다양한 용도로 사용되는 액체 이산화탄소의 LCI 데이터베이스 구축을 통해, 액체 이산화탄소가 사용된 공정이나 제품을 생산하는 기업의 정확한 환경영향평가 및 제품환경전략 수립을 위한 의사결정과 탄소성적표지 및 환경성적표지에서 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있도록 방향성을 제시하고자 한다.

2. 목적 및 범위 설정

2.1. 목적정의(Goal Definition)

이 연구의 목적은 식음료용의 탄산가스 및 산업에서 냉매로 사용되는 액체 이산화탄소에 대하여 LCI DB를 구축하는 것이며, 이는 기업에서 생산하는 제품과 연관된 환경 평가에서 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위한 기반을 제공할 수 있도록 한다.

2.2. 범위정의(Scope Definition)

2.2.1. 기능, 기능단위 및 기준흐름

액체 이산화탄소의 기능은 식음료, 의약품 및 산업 공정 등에서 원료 및 보조물질로, 기능단위와 기준흐름은 도출된 전과정 목록분석 결과의 이용을 쉽게 하기 위해 동일하게 정의하였다(Table 1).

Table 1. Scope definition

Function	For food and beverage, Industrial, Raw material and of medical supplies
Functional unit	Liquid CO ₂ 1 kg Production
Reference flow	Liquid CO ₂ 1 kg

Table 2. Data category and input and output of the system

Group		Material
Input	Raw material	Gas CO ₂
	Energy	Electricity
	water	-
	Utility	Water, NH ₃ , Lubricating oil
Output	Product	Liquid CO ₂
	Co-product	Solid CO ₂
	Air emission	H ₂ O, O ₂ , Total hydro carbon, NH ₃
	Water emission	Waste water
	Waste	Waste oil, Solid waste (impurities in raw material gas)

Table 3. Data quality requirements

Group	Up/Down stream	Transport stage	Production stage
Temporal scope	Most recent data	2012 Annual data	2012 Annual data
Regional scope	Local data	Inland transportation	Local data
Technological scope	-	-	Technologies of the target company

2.2.2. 시스템 경계

본 연구의 시스템 경계는 인근 화학업체에서 부산물로 생산된 기체 이산화탄소를 파이프라인을 통해 운송받아, 압축, 냉각, 건조, 정제, 액화시켜 충전시키는 단계까지로 선정하여 Gate to Gate로 정의하였다.

2.2.3. 데이터 범주

데이터 범주는 원료물질, 보조물질, 용수, 에너지, 제품, 대기 및 수계배출물, 폐기물로 분류하였다(Table 2).

2.2.4. 데이터 품질 요건

데이터는 액체 이산화탄소의 제조단계는 현장데이터를 사용했으며, 그 상위 및 하위공정의 기술계 흐름은 공개된 일반 데이터(국가 및 해외 LCI 데이터베이스)를 사용하였다(Table 3).

2.2.5. 가정 및 제한사항

1) 액체 이산화탄소와 드라이아이스는 생산량 데이터의 부재로 업계 전문가의 자문을 통해 판매 비율을 기준으로 생산량을 도출하였다.

2) 제조 공정 내에서 냉각수 용도로 사용되는 공업용수의

경우 배출 시 처리되는 시설 및 장비가 없으므로, 자연 증발로 가정하였다.

3) 원료물질인 기체 이산화탄소는 타 제품의 생산 공정에서 부산물로 생산되므로 환경부하는 없는 것으로 가정하였다.

4) 실측치 수집이 어려운 연료 연소에 의한 대기배출물은 IPCC (1996) 배출계수를 적용하여 산출하였다.

2.2.6. 할당

액체 이산화탄소와 드라이아이스는 생산 공정이 하나의 공정으로 이루어져 있어, 질량정보를 기준으로 하였다. 질량비에 따른 할당은 액체 이산화탄소 85%, 드라이아이스 15% 질량비로 하였다.

3. 전과정 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis)

3.1. 공정 흐름도

액체 이산화탄소의 생산 공정은 업체별 기술적 특성에 있어

차이가 없었으며, 업체별 공정흐름도(process flow diagram)를 근거로 현장데이터 수집단위인 단위공정을 결정하였다. 작성된 공정흐름도는 Figure 1과 같다. 공정은 총 6단계로 나뉘며 인근 화학업체로부터 인수한 이산화탄소 가스를 압축시키는 압축공정, 압축된 이산화탄소 가스를 냉각수 및 냉동기로 냉각하여 응축수와 불순물을 제거하는 냉각공정, 냉각공정을 거친 이산화탄소 가스를 건조기에 통과시켜 잔류 수분을 제거하는 건조공정, 건조공정 후 2차로 불순물을 제거하는 정제공정, 정제된 이산화탄소 가스를 액화시키는 액화공정을 거쳐 제품의 출하를 위해 저장하는 충전공정으로 나뉜다.

3.2. 데이터 수집 및 계산

데이터 수집은 업체의 현장데이터를 우선 적용했으며, 국가 데이터베이스의 사용은 원료물질, 보조물질, 에너지 등의 상위흐름 및 하위흐름 연결을 위한 데이터베이스를 활용하는 것으로 환경부와 산업통산자원부에서 개발한 LCI 데이터베이스와 Ecoinvent 등 해외 데이터베이스를 활용하였다(Table 4).

액체 이산화탄소를 생산하는 공정에서 발생하는 대기배출

Table 4. Data sources for LCI

Group	Material	Data source			LCI Data Base		
		Survey	Calculation	Estimation	Database	Source	Year
Transport			V		3.51-5 ton Truck	Ministry of environment	2003
Raw material	CO ₂	V			-	-	-
Sub-material	NH ₃	V			NH ₃	Ministry of environment	2003
	Lubricating oil	V			Lubricating oil	Ministry of environment	2003
water	Industrial water	V			Industrial water	Ministry of environment	2003
Energy	Electricity	V			Electricity	Ministry of trade, Industry and energy	2000
Waste	Waste oil	V			-	-	-
	Solid waste	V			Incineration	Ministry of environment	2003
Water emission	Waste water	V			Wastewater treatment	Ministry of environment	2012

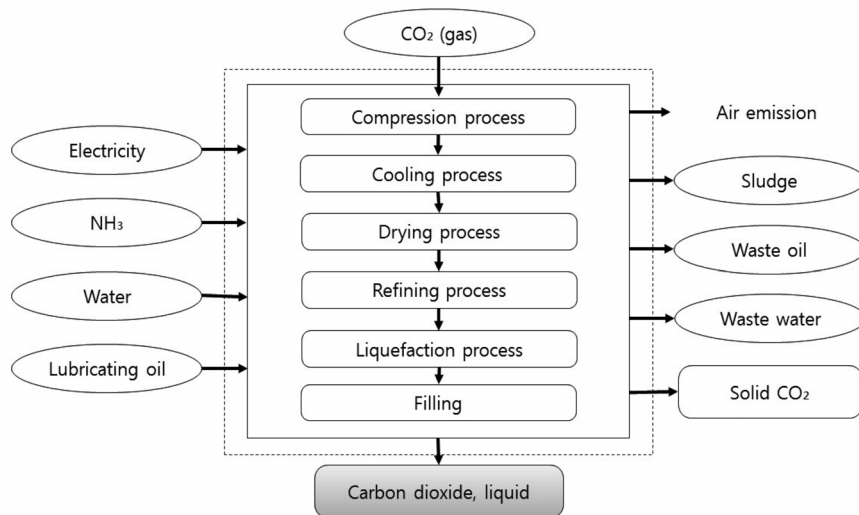


Figure 1. Liquid CO₂ production process.

물은 원료가스 내 각 물질의 비율과 손실량을 고려하여 산정하였다. 원료가스 1 kg 당 대기오염물질 발생량 비율은 아래 산출식을 이용하여 산소를 20%, 탄화수소를 80%로 산출하였다.

$$E = [R_g - W_w - W_s] * Ra_{i,j} \quad (1)$$

여기서 E는 대기배출물의 발생량(kg), R_g는 원료가스 손실량, W_w는 폐수 발생량, W_s는 고형폐기물 발생량, Ra_{i,j}는 원료가스 내 각 물질의 비율이다.

3.3. 전과정목록 분석 결과

각각의 단위공정별 데이터를 기능단위인 액체 이산화탄소

Table 5. Significant LCI parameters for impact categories

Parameter	Result value (kg)	Main cause	Level of contribution
Coal	4.21E-02	Raw material acquisition	Electricity (99.6%)
Oil, crude	5.47E-03	Raw material acquisition	Electricity (95.0%)
Gas, natural	5.4E-03	Raw material acquisition	Electricity (99.7%)
Sox	3.91E-04	Raw material acquisition	Electricity (99.6%)
NOx	2.87E-04	Raw material acquisition	Electricity (99.4%)
VOC	4.19E-06	Raw material acquisition	Electricity (99.7%)
Dust	2.61E-05	Raw material acquisition	Electricity (99.2%)
BOD	1.03E-04	Raw material acquisition	NH ₃ (95.2%)
CO ₂	1.17E-01	Raw material acquisition	Electricity (99.6%)

1 kg 기준으로 계산하였으며 전과정평가 소프트웨어인 TOTAL을 사용하여 전과정 목록분석을 수행하였다. 액체 이산화탄소 생산의 LCI DB 구축 결과에서 주요 목록항목을 Table 5에 나타내었다.

4. 전과정 영향평가 (Life Cycle Inventory Analysis)

액체 이산화탄소 1 kg 생산 시 시스템경계에서 어느 물질이 환경에 영향을 미치는지 주요 기여도를 규명하기 위해 구축한 LCI DB를 이용하여 전과정 영향평가를 수행하였다. TOTAL 소프트웨어와 EDP 2013방법론을 사용하였으며, 광화학적산화물생성, 자원소모, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 오존층파괴로 총 6개의 영향범주를 고려하였다[8]. 특성화(characterization), 정규화(normalization) 순서로 수행하였으며 정규화 인자는 Table 6에 제시하였다. 정규화 기준값을 도출하기 위한 인자는 모두 국내에서 산정된 값이며[9] Ni/Ti는 감소계수(reduction factor), Fi는 상대적 중요도 계수(relative significance factor)이다.

액체 이산화탄소 1 kg 생산 시 LCIA 특성화 결과 값을 Figure 2와 Table 7에 나타냈다. 영향범주 별 주요 환경인자를 살펴보면, 오존층파괴를 제외한 나머지 영향범주의 주요 기여도는 전력으로 나타났으며, 산성화와 부영양화는 전력 외에 대

Table 6. Normalization references for impact categories

Impact categories	Ni	Ni/Ti	Fi
POCP	1.19E+04	1.09	0.06
ADP	2.94E+04	1.06	0.218
AP	3.98E+04	1.05	0.034
EP	1.31E+04	1.46	0.026
GWP	5.53E+06	1.05	0.274
ODP	4.06E+01	1.71	0.171

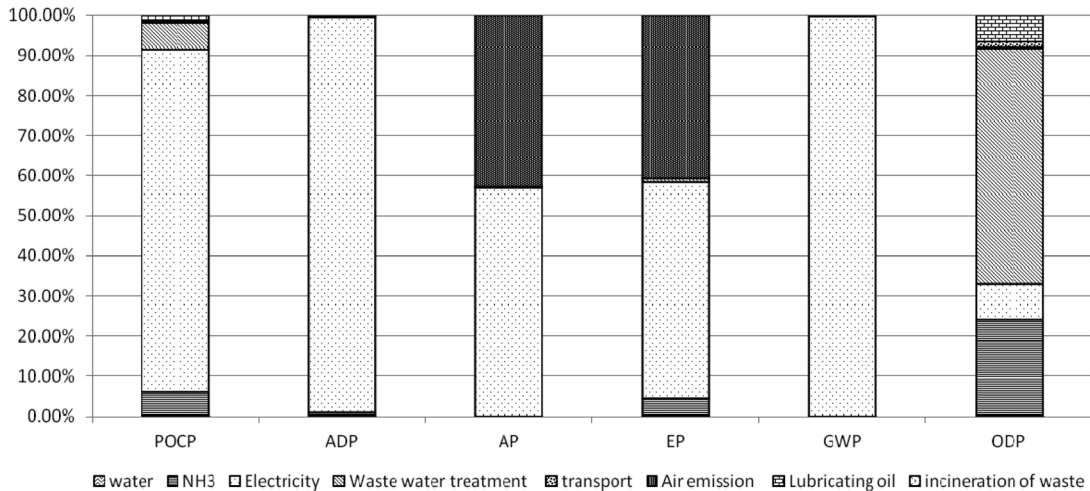


Figure 2. Results of characterization for liquid CO₂ production process.

Table 7. Results of characterization

Impact categories	Result value	Level of contribution	Unit
POCP	9.87E-07 kg	Electricity (85.4%)	C ₂ H ₄ eq.
		Waste water treatment (6.7%)	
ADP	7.56E-04 kg	Electricity (98.9%)	Antimony
AP	3.53E-04 kg	Electricity (56.7%)	SO ₂ eq.
		Air emission (42.8%)	
EP	6.90E-05 kg	Electricity (54%)	PO ₄ ³⁻ eq.
		Air emission (40.7%)	
GWP	1.19E-01 kg	Electricity (99.6%)	CO ₂ eq.
ODP	3.58E-11 kg	Waste water treatment (58.8%)	CFC11 eq.
		NH ₃ (23.9%)	

Table 8. Normalization results and key inventory parameters for each impact categories

Impact categories	Result value	Level of contribution
POCP	8.29E-11	Electricity (85.4%)
		Waste water treatment (6.7%)
ADP	2.57E-08	Electricity (98.9%)
AP	8.87E-09	Electricity (56.7%)
		Air emission(42.8)
EP	5.27E-09	Electricity (54%)
		Air emission (40.7%)
GWP	2.15E-08	Electricity (99.6%)
ODP	8.82E-13	Waste water treatment (58.8%)
		NH ₃ (23.9%)

기배출이 40% 이상의 기여도를 보여줬다. 나머지 오존층 파괴는 폐수처리가 58.8%, 암모니아가 23.9%의 기여도를 나타내었다.

정규화 단계는 기능단위가 하나의 영향범주에 미치는 영향을 일정지역, 기간 영향범주에 기여하는 총 환경영향으로 나누는 과정이며 영향범주 간 상대적인 비교가 가능하게 된다. 정규화 결과, 자원소모(41.84%), 지구온난화(35.02%)가 주로 영향을 미치며, 다음으로 산성화(14.43%), 부영양화(8.57%), 광화학적산화물생성(0.13%)이 낮은 기여도를 보였다. 자원소모와 지구온난화 범주 모두 특성화 결과에서 전력이 90% 이상 기인했다(Table 8).

5. 결론

본 연구에서는 액체 이산화탄소 제조의 전과정 목록 DB를 구축하여 제조 시 발생하는 환경부하량을 전과정평가를 적용하여 정량화했으며 6가지 영향범주에 대하여 분석하였다. 특성화와 정규화 결과, 액체 이산화탄소의 제조는 자원소모(41.84%), 지구온난화(35.02%) 범주가 주로 영향을 미치며, 다음으로 산성화(14.43%), 부영양화(8.57%), 광화학적산화물생성(0.13%)이 낮은 기여도를 보였다. 물질별 기여도로는 오존층 파괴를 제외한 나머지 영향범주의 주요 기여도에서 전력이 가장 높게 나타났으며 산성화와 부영양화는 전력 외에 대기배출이 40% 이상의 기여도를 보여줬다. 오존층 파괴 범주의 경우 폐수처리 58.8%, 암모니아 23.9%의 기여도를 나타내었다.

아직 국내 LCI DB 구축현황은 산업적 요구를 충족시킬 만큼 충분하지 못하며 기술의 미반영 문제로 신뢰성이 부족한 실정이다. 향후 액체 이산화탄소를 사용하는 제품의 친환경적 설계와 환경적합성 평가 등을 위해 신뢰성 있는 결과를 도출하는데 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사

본 연구는 환경부의 국가 LCI 데이터베이스 제·개정 사업에 포함되어 수행되었습니다.

References

1. Song, M. S., Kim, H. J., and Lee, S. H., "Analysis on the Carbon Emission Value of Chamaecyparis Obtusa Based on the Fertilization Methods," *J. Korean Forest Soc.*, **0**, 189 (2014).
2. Jeon, Y. S., Kim, Y. C., and Kim H. T., "A Study on Competitiveness and GHG Mitigation Effect of IGCC and Carbon Capture Technology According to Carbon Tax Change," *J. Energy Eng.*, **17**(2), 54-66 (2008).
3. Park, J. H., "Applying Proviso of Subsidy and Countervailing Agreement to Emission Trading Right," *Korean J. Int. Economic Law*, **5**, 99-126 (2011).
4. Lim, H. S., Chun, Y. Y., Lee, K. M., and Kim, Y. K., "Building of Life Cycle Inventory (LCI) Database for Aluminum (Al)

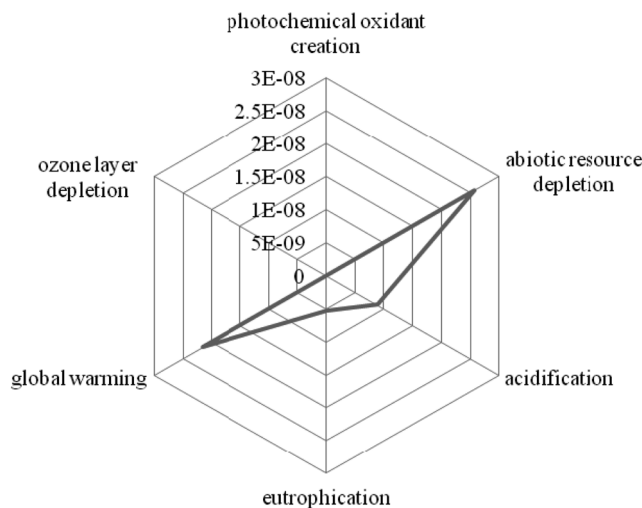


Figure 3. Results of normalization for liquid CO₂ production process.

- Car-Body of Electric Motor Unit (EMU),” *2006 Spring Confer. Korean Soc. Railway*, **5**, 33-40 (2006).
5. Kim, Y. D., and Park, P. J., “Development of National Life Cycle Inventory Database on Irrigation Water by Agricultural Dam,” *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **53**(3), 59-64 (2011).
 6. <http://www.sundochem.com/product/product01.htm>.
 7. <http://www.taekyungchem.co.kr/product/lco2.asp?title=pro&menu=lc>.
 8. Kim, H. J., Kwon, Y. S., Choi, Y. G., Chung, C. K., Baek, S. H., and Kim, Y. W., “Life Cycle Assessment on the Reuse of Glass Bottles,” *Clean Technol.*, **15**(3), 224-230 (2009).
 9. Jang, S. H., “Life Cycle Assessment of a Pressure Rice Cooker,” M.S dissertation, Ajou University, 2007.