

태풍 매미가 부산시에 미치는 영향에 대한 에머지 평가

박경민 · 김동명 · 이석모[†]
국립부경대학교 생태공학과

Emergy Evaluation of Typhoon Maemi in Busan

KyungMin Park, Dong-Myung Kim and Suk Mo Lee[†]

Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

기후변화의 영향으로 자연재해에 의한 인명 및 재산의 피해가 증가함에 따라 자연재해 취약성에 관한 연구들이 근래에 폭넓게 수행되고 있으며, 기후변화의 영향평가와 적응·방재대책 마련이 활발히 진행되고 있다. 종래의 재해영향을 평가한 연구에서는 대리변수를 이용하여 취약성 평가를 수행하였으나, 이는 정성적이고 상대적인 결과를 도출하여 절대적인 비교나 방재 또는 적응능력의 기준을 제시하기 어려운 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 시스템 생태학적 접근법으로 재해를 Order와 Disorder의 관계로 인식하고 에머지평가법을 이용하여 정량적인 평가를 하고자 하였다. 먼저, 2003년 부산시를 대상으로 유입 에너지와 내부 자산을 파악하였고, 태풍 매미로 인해 발생된 태풍 에너지, 태풍 영향 그리고 복구 에너지를 분석하였다. 그 결과, 유입 에너지는 $4.66E+22$ sej/yr, 내부 자산은 $1.98E+22$ sej, 태풍 에너지는 $7.80E+18$ sej, 태풍 영향은 $4.55E+20$ sej, 복구 에너지는 $3.87E+20$ sej로 나타났다. 이를 통해 재해 에너지에 대한 재해 영향을 허리케인 앤드류와 비교·고찰해봤을 때, 부산시의 방재능력을 증가시킬 경우, 매미보다 큰 태풍의 에너지에 대한 영향 정도를 줄일 수 있음을 알 수 있었고 피해에 대한 실질적인 복구를 통하여 추가피해에 대한 예방이 필요함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구는 재해에 대한 영향을 동일한 척도로 나타내어 자연환경과 인간의 경제 시스템별로 정량적으로 파악할 수 있었으며 이러한 정량적인 취약성 평가가 이루어지고 추후 태풍 크기에 따라 방재능력을 어느 정도까지 증가시키는 것이 효율적인 방재인지에 대한 추가적인 연구를 통해 도시의 방재정책마련에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract – Damage of both life and property has been increased by natural disaster under the influence of climate change, thus many natural disaster vulnerability researches have been carried out to make adaptation policy and impact assessment of climate change recently. Their method for assessing vulnerability usually have used proxy variables for making vulnerability indices. However, because their results were too qualitative and relative it tends to be hard to make absolute comparison and establish standard of prevention or adaptation ability. Accordingly, this study aimed at quantifying natural disaster vulnerability using emergy through recognizing disaster as the relations between order and disorder by system approach. As a result, ordering energy ($4.66E+22$ sej/yr) and ordered structure ($1.98E+22$ sej) of Busan in 2003 and disordering energy ($7.80E+18$ sej), disordered parts ($4.55E+20$ sej) and rebuilding energy ($3.87E+20$ sej) by typhoon Maemi were analysed. And then, this was compared with Hurricane Andrew in Dade County. Through this comparison, if the prevention ability of Busan increases, disordered parts can be reduced against the more powerful disordering energy. Also, prevention for additional damages by disaster is needed to practical rebuilding action. In conclusion, it was able to figure out the impact of disaster quantitatively by natural systems and urban systems showing as common measure. Based on this study and further research to make effective prevention for how much prevention ability should be increased will contribute to producing the scientific data for disaster management policy in future.

Keywords: Typhoon Maemi(태풍매미), Natural disaster(자연재해), System approach(시스템접근법), Emergy evaluation(에머지 평가)

[†]Corresponding author: leesm@pknu.ac.kr

1. 서 론

산업의 발달과 지구온도의 지속적인 상승으로 인해 폭염, 집중호우 증가, 해수면 상승과 같은 그동안 경험하지 못한 극한기후 현상에 직면하면서 사회·경제적 고통을 겪고 있다. 특히, 연안에서 발생하는 취약성이 증대되고 있으며 해안 인근에 인구밀집지역이 분포하고 있으므로 폭풍해일, 태풍, 허리케인등과 같은 연안재해에 매우 취약함이 지적되고 있다(Park *et al.*[2011]; Kang[2014]). 이러한 기후변화의 영향에 따른 인명 및 재산 피해를 저감하기 위해서 자연재해에 대한 국지적 취약성 평가 및 재해 리스크 평가 등 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 최근 들어 안전한 도시를 구축하기 위한 방재의 개념은 위험관리 측면에서 위해(Hazard), 노출(Exposure), 취약성(Vulnerability)을 종합적으로 고려하는 추세이고 이 때 취약성을 과학적인 방법으로 정량적이며 평가하여 그 지역의 방재역량과 연계해 방재능력의 효율성을 높일 필요가 있다(Lee and Chang[2009]; IPCC[2014]).

자연재해에 대응하기 위해 수행되고 있는 취약성 평가 방법의 경우, 일반적으로 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 4차 보고서[2007]의 취약성 개념 틀에 의거하고 있는데, 일반적으로 노출인자, 민감도인자, 적응능력인자 각각에 해당하는 대리변수들을 선정한 뒤, 표준화 방법을 통해 취약성을 지수화하고 있다(Yoo and Kim[2008]; Sandra[2014]). 그러나 이러한 방법은 지표를 산정할 때의 대리변수 선정과 통계적 처리방법에 있어 연구자 주관에 따른 정성적인 취약성 평가결과를 도출하게 되며 방법론의 일관성이 떨어지고 지역별로 상대적인 비교에 그치는 문제점이 있다. 따라서 재해 발생 시, 시스템이 받는 재해에 대한 예방능력, 적응능력의 기준 등을 정량적으로 제시할 수가 없다.

본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하기 위한 취약성 평가방법의 일환으로 시스템 생태학적 관점에서 재해가 일어나는 과정을 정의하고 에너지와 물질의 흐름으로 정량 가능한 에머지 분석을 통해 정량적인 평가 방법을 제시하고자 하였다.

2. 선행연구검토

극한 강우사상의 발생정도가 증가하고 있으며 태풍 및 집중호우가 자주 발생하여 막대한 재산피해 및 인명피해가 발생하고 있다(국립기상연구소, 2009). 예측하기 힘든 자연재해의 피해에 대한 적응대책과 방재정책을 마련하기 위해 최근 재해 영향을 평가하기 위해 취약성 평가와 위험도 평가 등이 이루어지고 있다. 그 중에서도 주로 활발히 연구되고 있는 취약성 평가란 발생하는 재해에 대한 노출, 민감도를 통해 재해 영향정을 산정하고 재해에 대한 적응능력을 감하여 취약정도를 평가하는 것을 말한다(Adger[2006]; IPCC[2007]; Füssel[2007]; Yoo and Kim[2008]). 우리나라에서는 2000년대 후반부터 본격적으로 주로 기후변화에 대한 관심이 높아지면서 기후변화 취약성 평가지표 개발, 취약성 평가 기법개발 등 다양한 측면의 연구들이 진행되고 있다.

기존에 수행된 국내·외의 취약성 평가 연구를 살펴보면, 국내의 경우 먼저 Yoo and Kim[2008]은 해외자료를 기반으로 IPCC 개념 틀에 따라 기후노출, 민감도, 적응능력에 해당하는 33개 변수를 선정 취약성-탄력성 지표(VRI)를 도출하였고 주성분 분석을 통해 국내 실정에 맞는 변수 18개를 제시하였다. 하지만 단위가 각각 다른 대리변수들을 표준화하여 단순히 합산하여 취약성을 나타내는 것은 무리가 있었으며, 표준화 방법론과 지표선정 개수에 따라 지표 계산의 결과가 달라질 수 있다는 한계점이 있었다. Oh *et al.*[2014]은 연안도시의 취약성 평가인자와 요소를 선정하여 연안도시의 특성에 적합한 기후변화 취약성 평가지표를 선정하였지만, 평가요소의 선정이 주관적이며 가중치 부여의 문제가 발생하므로 표준화된 방법의 개발이 요구된다고 지적하고 있다. 또한, Kim *et al.*[2015]은 취약성-탄력성 지표(VRI)에 태풍 피해액과의 상관계수를 통해 노출 변수에 가중치를 적용하여 태풍 취약성 지수 정량화를 시도하였으나 여전히 상대적인 취약성 크기를 보여주며 얼마만큼 투자를 하여야 태풍에 대한 취약성을 저감시킬 수 있는지와 같은 예방 또는 적응능력에 대해서는 고려하지 못하였다는 점이 한계로 남는다.

국외의 경우, Chang and Huang[2011]은 에머지 개념을 취약성 평가에 처음으로 적용하여 노출, 민감도, 잠재영향, 적응능력을 지수화 하였다. 공통의 척도로써 에머지를 이용하여 자연시스템과 경제시스템을 포괄한 취약성을 평가하는 에머지 평가방법의 적용 가능성은 보여주었지만 각 지수의 크기로는 취약성을 파악하기 힘든 한계점이 있었다. 이후 Chang and Huang[2015]은 동일한 태풍 사례를 이용하여 취약성을 에너지 다이어그램으로 표현하고 물질과 에너지의 흐름으로 나타내어 취약성의 구성요소(노출, 민감도, 적응능력)들 간의 상호작용관계를 보여주고 GIS를 통해 취약성을 공간적으로 나타내었다. 그러나 여전히 IPCC 취약성 틀에 머물며 지역별로 상대적인 취약성 크기를 보여주었다.

기존의 방법이 정성적이며 상대적 평가라는 문제점을 탈피하기 위해서는 기존의 연구와 차별성을 가지는 정량적, 절대적 평가가 필요하므로 이를 위해서 시스템 생태학 관점에서 재해를 바라보고 공통의 척도인 에머지를 이용하여 평가하는 방법이 요구된다.

3. 연구방법

3.1 시스템 생태학적 관점에서의 재해

에너지 시스템 이론(Energy system theory)을 바탕으로 창시된 시스템 생태학(Systems ecology)이란 자연시스템과 경제시스템을 하나의 통합된 시스템으로 인식하여 시스템 내의 유기적인 관계와 상호작용을 열역학 법칙을 기반으로 체계적이고 정량적으로 파악하는 학문이다. 이에 재해가 일어나는 과정을 시스템 관점에서 Order(질서)와 Disorder(무질서)의 유기적관계로 인식할 수 있다. 생물권은 열역학 제 2법칙(엔트로피 법칙)에 따라 질서정연한 구조나 형태가 무질서한 형태로 서서히 변화되며 흐트러진 형태로부터 다시 정돈되는 형태로 질서를 구축하며 이를 반복한다(Odum and Odum[1976]; (Brown and Woithe[1995]). Fig. 1에서 나타나는듯이

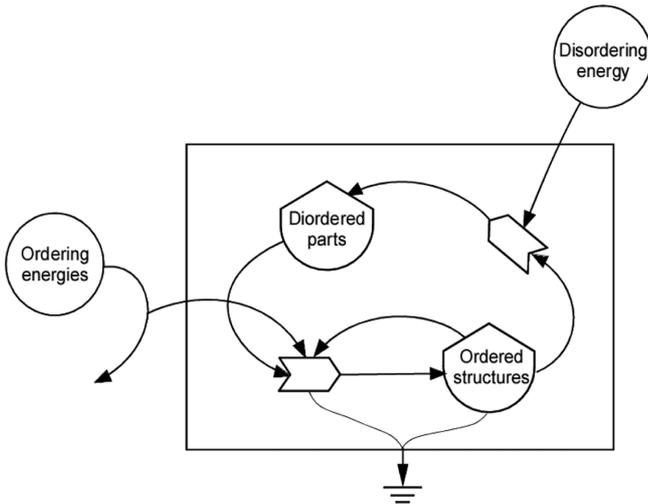


Fig. 1. System diagram of Order and Disorder (Brown and Woithe [1995]).

Ordering energy(일상적 에너지)가 시스템 내부로 들어와 Ordered structure(일상적 스트럭처)를 축적시키며 시스템 외부의 Disordering energy(재해 에너지)가 유입되어 Disordered parts(재해 영향)를 형성하고 이를 복구하기 위해 Rebuilding energy(복구 에너지)가 들어와 질서를 재건한다(Brown and Woithe[1995]). 즉, 시스템생태학적 관점의 재해란 것은 재해 에너지가 들어와서 일상적 스트럭처를 파괴하는 현상으로 볼 수 있다. 이렇게 발생하는 재해에너지로 인한 재해 영향 정도는 일상적 에너지를 통하여 구축되어 있는 일상적 스트럭처에 재해 에너지가 얼마만큼 들어와서 어떻게 작용하고 피해를 입히는지의 에너지 흐름을 통해서 파악될 수 있다. 이들 에너지는 각기 종류가 다르기 때문에 이런 종류가 다른 에너지를 서로 비교하기 동일한 척도로서 정량화 시킬 수 있는 에머지 평가법이 적용될 수 있다.

3.2 에머지 평가법

에머지(Emergy)란 “현재 가지고 있는 에너지뿐만 아니라 생산 과정에서 과거에 사용된 모든 에너지(Used energy)”를 의미하는 것으로 에머지량은 측정된 에너지, 질량, 화폐 등의 흐름량이나 보유량에 적합한 UEV를 곱하여 나타낸다(Odum[1996]).

에머지 평가는 크게 3단계로 1) 에너지 시스템 다이어그램 작성, 2) 에머지 분석표 작성, 3) 에머지 지수 계산 및 분석으로 나누어진다. 에너지 시스템 다이어그램은 Odum[1996]이 제안한 에너지시스템언어(energy system language)를 이용하여 작성하며, 평가 대상 시스템의 경계를 설정하고 시스템 내부의 주요 구성성분들과 이들 사이의 유기적인 연결 관계를 파악하여 에너지 시스템 언어의 규칙에 따라 그린다. 그리고 이렇게 그려진 시스템 구성 성분들을 정량화하기 위해 에머지 평가표를 작성하게 되는데, 평가표는 Table 1과 같이 항목의 주석번호, 평가항목의 명칭, 에머지량 계산에 필요한 에너지량, 물질량, 화폐량 등의 기초자료(주요 유입, 유출, 내부 구성성분을 나누어 기재), UEV, 태양 에머지 값의 순으로 작성

한다. 마지막 단계로 앞서 작성된 에머지 분석표를 기초하여 지수를 계산하거나 산정된 값을 분석한다(Odum[1996]; Lee *et al.*[2000]; Kang[2013]).

본 연구는 2003년 발생한 태풍매미로 인해 피해를 크게 입었던 부산광역시를 대상으로 연구범위를 선정하였으며, 일상적 에너지 분석은 대상시스템의 자연환경과 경제활동을 유지 및 구축할 때 유입되는 주요 에너지원으로, 재해 에너지는 태풍 매미로 발생한 에너지를 이용해 나타내었다. 그리고 토지 이용형태에 따라 대상지를 자연시스템, 농경지시스템, 도시시스템으로 구분하여 각 시스템 내에 있는 바이오매스, 콘크리트 등과 같은 내부의 보유량으로 일상적 스트럭처를 분석하고, 태풍으로 인해 일어난 피해와 손실인 재해영향과 복구에너지를 공통의 척도인 에머지로 평가하여 재해발생으로 인한 영향정도를 정량적으로 도출하고자 하였다.

에머지 평가에 사용된 기초 자료들은 2003년의 부산통계연보(BHC[2003]), 재해연보(MPSS[2003]), 기상연보(KMA[2003]), 산림통계연보(KFS[2003]), 상수도통계(ME[2003]) 등의 신뢰할 수 있는 기관의 자료를 이용하였다. UEV의 경우, 문헌 자료를 참고하였으며 UEV 계산의 기준이 되는 지구 전체 재생가능에머지 유입량(Emergy baseline)은 $12.00E+24$ sej/yr(Brown *et al.*[2016])를 이용하였다.

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 부산시의 일상적 에너지 분석

부산의 자연활동과 경제활동을 가동시키는 근원이 되며 질서를 구축하는 에너지흐름과 보유량을 평가하기 위해 Fig. 2와 같은 다이어그램을 작성하여 유입 에너지를 전체적으로 파악하였다. Table 1은 Fig. 1의 에너지 시스템 다이어그램에서 파악된 부산시의 유입 에너지흐름을 재생 가능한 자연환경 자원(Renewable resources), 재생 불가능한 내부 보유 자원(Nonrenewable sources use from within system), 재생 가능한 에너지원에 기반한 내부의 생산(Indigenous renewable energies), 외부 구입 자원(Purchased input sources)으로 구분하여 에머지 평가표로 작성한 것이다. 2003년을 기준연도로 태양, 바람, 강우, 파도, 지질작용, 조석, 하천으로 구성된 자연환경활동에서 제공되는 재생 가능한 에너지는 태양에너지가 가장 높고, 강우의 화학적 에너지, 파도에너지, 하천의 화학적 에너지 등의 순으로 산출되었다. 하지만, 서로 다른 형태의 에너지를 비교하기 위하여 에너지 질을 고려한 에머지의 경우는 하천의 화학적 에머지가 가장 높고, 파도에머지, 비의 화학적 에너지, 조석에머지 등의 순으로 산출되었다. 이는 각각 에너지의 능력을 고려 해준 값으로서 실제 가치를 나타낸다. 부산시 내부의 재생 불가능한 보유 자원의 경우 지하수와 토양이 있으며, 주요한 재생 가능한 생산으로는 수산업 생산과 농업 생산이 있다. 외부로부터 구매하여 유입된 자원의 경우는 석유 제품류가 가장 컸으며 재화와 용역, 전기, 천연가스, 석탄 순으로 산출되었다.

부산광역시의 경제를 유지하기 위해 2003년에 사용한 총 유입 에머지의 양은 $4.66E+22$ sej/yr로 나타났으며, 이는 중복계산을 피

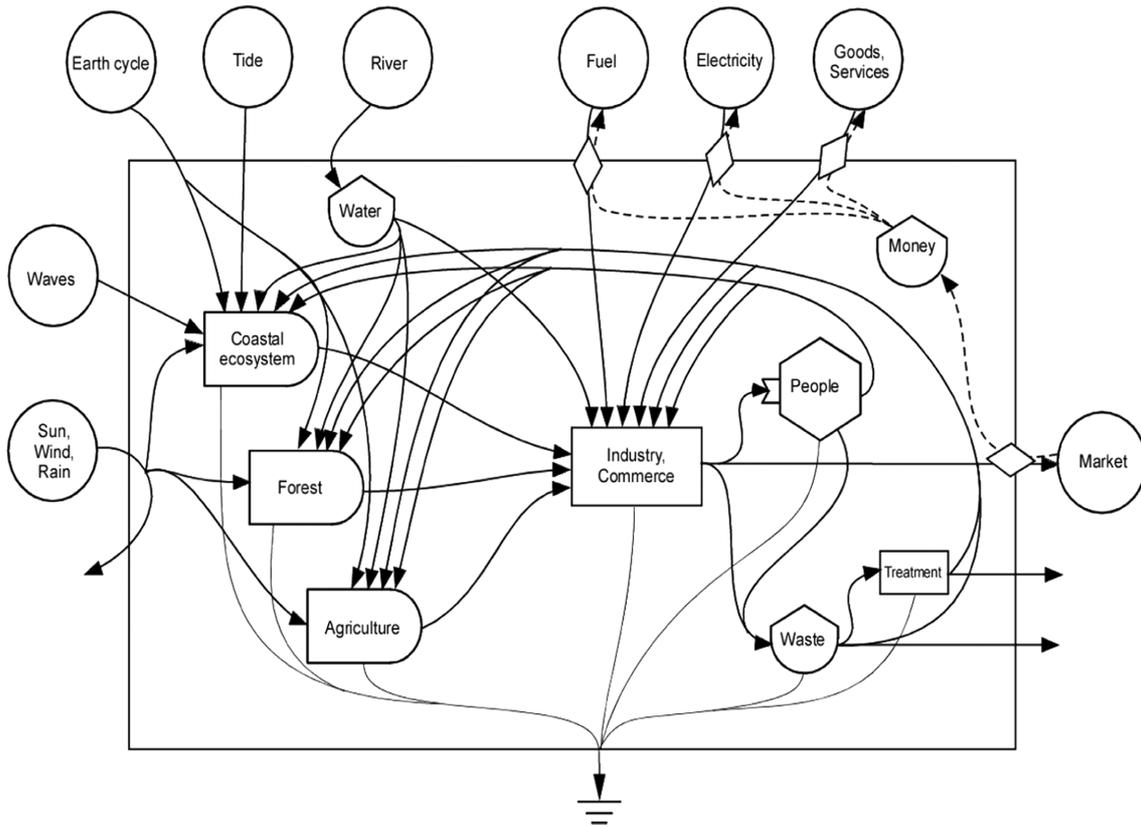


Fig. 2. Energy system diagram of Busan.

Table 1. Energy analysis for Busan in 2003

No	Item	Raw units	Unit Energy Value (UEV)	Solar Emery (sej/yr)
Renewable resources				
1	Sunlight	6.59E+18 J/yr	1 ¹⁾ sej/J	6.59E+18
2	Wind	4.93E+15 J/yr	1.86E+03 ¹⁾ sej/J	9.15E+18
3	Rain, chemical	8.78E+15 J/yr	2.31E+04 ¹⁾ sej/J	2.03E+20
4	Rain, geopotential	6.15E+14 J/yr	3.56E+04 ¹⁾ sej/J	2.19E+19
5	Waves	5.44E+15 J/yr	3.88E+04 ¹⁾ sej/J	2.11E+20
6	Earth cycle	7.63E+14 J/yr	4.37E+04 ²⁾ sej/J	3.33E+19
7	Tide	2.41E+15 J/yr	5.60E+04 ¹⁾ sej/J	1.35E+20
8	River, chemical	4.69E+15 J/yr	6.16E+04 ¹⁾ sej/J	2.89E+20
Nonrenewable sources use from within system				
9	Top Soil	1.35E+14 J/yr	9.40E+04 ³⁾ sej/J	1.27E+19
10	Groundwater	2.27E+14 J/yr	2.06E+05 ⁴⁾ sej/J	4.68E+19
Indigenous renewable energy				
11	Agricultural Production	7.22E+14 J/yr	2.55E+05 ⁵⁾ sej/J	1.84E+20
12	Fisheries Production	1.28E+15 J/yr	2.55E+06 ⁴⁾ sej/J	3.26E+21
Purchased input sources				
13	Coal	1.15E+15 J/yr	5.09E+04 ⁴⁾ sej/J	5.84E+19
14	Natural gas	3.67E+16 J/yr	6.10E+04 ⁴⁾ sej/J	2.24E+21
15	Electricity	5.32E+16 J/yr	2.21E+05 ⁴⁾ sej/J	1.17E+22
16	Petroleum products	2.14E+17 J/yr	8.41E+04 ⁴⁾ sej/J	1.80E+22
17	Import G&S	3.64E+13 ₩/yr	3.81E+08 ⁶⁾ sej/₩	1.39E+22

UEV has been adjusted for GEB of 12.00E+24 sej/yr

UEV Sources: ¹⁾Odum *et al.* [2000], ²⁾Odum [2000], ³⁾Brown and Ulgiati [2011], ⁴⁾Brown *et al.* [1993], ⁵⁾Brown and MaClanahan [1996], ⁶⁾Im [2011].

Table 2. Emergy analysis for structure in Busan

No	Item	Raw units	Unit Energy Value (UEV)	Solar Emergy (sej)
Natural system structure				
1	Inland wetlands	2.24E+12 J	4.45E+04 ¹⁾ sej/J	9.96E+16
2	Coastal wetlands	7.78E+12 J	4.45E+04 ¹⁾ sej/J	3.46E+17
3	Broad-leaved forests	4.63E+15 J	4.45E+04 ¹⁾ sej/J	2.06E+20
4	Coniferous forests	8.28E+15 J	4.45E+04 ¹⁾ sej/J	3.68E+20
5	Mixed stand forests	8.04E+15 J	4.45E+04 ¹⁾ sej/J	3.58E+20
Agriculture system structure				
6	Agriculture area	1.32E+14 J	4.45E+04 ¹⁾ sej/J	5.88E+19
Urban system structure				
7	Urban parks	5.80E+12 J	4.45E+04 ¹⁾ sej/J	2.58E+17
8	Transportation area (subbase rock)	1.91E+11 g	8.52E+06 ¹⁾ sej/g	1.63E+18
9	Transportation area (asphalt)	3.11E+15 J	6.74E+04 ¹⁾ sej/J	2.10E+20
10	Industrial & Commercial area (concrete)	9.48E+13 g	8.04E+07 ²⁾ sej/g	7.62E+21
11	Residential area (concrete)	1.37E+14 g	8.04E+07 ²⁾ sej/g	1.10E+22

UEV has been adjusted for GEB of 12.00E+24sej/yr

UEV Sources: ¹⁾Brown and Woithe [1995], ²⁾Brown and MaClanahan [1992].

하기 위해 강우의 화학적 에너지, 조석에너지, 하천의 화학적 에너지로부터의 공급된 에머지량을 더한 값이다. 외부 구입 자원의 에머지량이 전체의 98.53%로 가장 높은 기여도를 나타냈고 재생 가능한 자연환경 자원과 재생 불가능한 내부 보유 자원이 각각 1.35%, 0.13%로 낮은 수준을 보였다. 산출된 결과를 종합하면 부산의 경제구조는 외부 구입 자원에 크게 의존하고 있는 것을 알 수 있다.

부산의 토지 이용 형태(ME[2004])에 따라 자연 시스템, 농경지 시스템, 도시 시스템으로 구분하여 각 시스템 내에 있는 주요 보유량인 바이오매스, 아스팔트, 콘크리트량으로 내부 자산을 분석하였다(Table 2). 그 결과, 부산지역의 총 에머지 스트럭처는 1.98E+22 sej

로써 도시 스트럭처가 95.00%로 부산시 대부분의 스트럭처를 차지하였고, 자연 스트럭처(농경지 포함)가 5.00%로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 그러므로 재해가 발생했을 때, 대부분 재해영향이 도시 스트럭처에서 발생 할 것임을 예상해볼 수 있다. 도시 스트럭처 중에서도 주거지역의 스트럭처가 가장 컸으며 산업과 상업 지역, 교통지역 순으로 산출되었다. 이러한 시스템 관점에서 전체적으로 부산시의 주요한 유입 에너지와 스트럭처를 파악하고 평가를 통해 기존의 재해영향평가에서 발생했던 지표의 개수 선정이나 항목 설정의 문제가 해결되며 표준화방법론의 선택에 대한 고민 또한 해결된다.

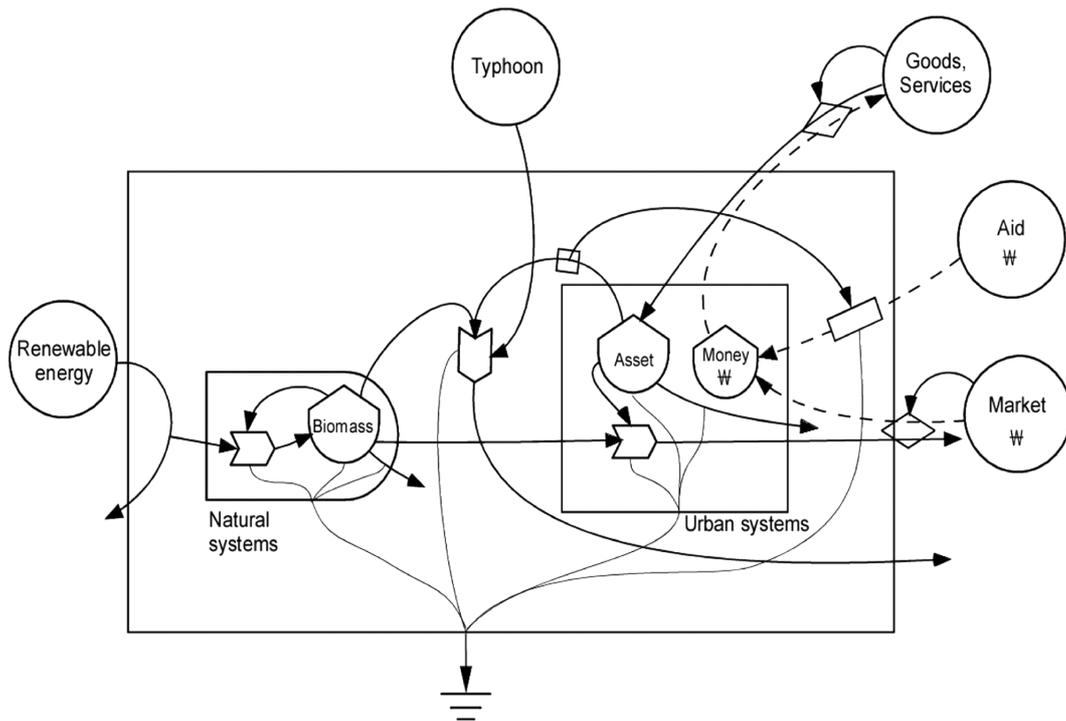


Fig. 3. Systems diagram of the inflows of disordering and ordering energies that resulted from Typhoon Maemi in Busan.

4.2 태풍 매미의 영향에 대한 에머지 평가

재해현상이 발생해 재해 에너지가 시스템 내에 유입되어 영향을 미치게 되는 유기적인 관계를 Fig. 3과 같이 에너지 시스템 다이어그램으로 나타내었다. 이 관계는 에너지와 물질의 흐름으로 동일한 척도로 정량화될 수 있으며, 재해연보(2003)에 제시된 피해내역을 기반으로 각 하위 시스템 별 재해 에너지의 영향을 산출하였다 (Table 3). 그 결과, 태풍 에너지는 $7.80E+18$ sej였으며, 이로 인해 총 $4.55E+20$ sej 만큼(태풍 에너지의 58.34배)의 태풍 영향이 발생했다. 태풍의 영향 중, 도시 시스템의 피해가 90.87%, 자연시스템의 피해가 9.13%로 대부분의 피해와 손실은 경제활동이 이루어지는 도시에서 일어났으며, 그 중에서도 산업과 상업지역의 기반시설 피해가 가장 컸고 도시의 생산성, 교통지역의 기반시설, 주거지역의 기반시설 순으로 피해가 산정되었다. 추후 투입되는 복구 에너지는 총 $3.79E+20$ sej로 그 중에서도 정부의 지원액이 가장 컸으며 단순히 복구액 뿐만 아니라 봉사자들의 인적에너지도 고려해서 산정하였지만 피해영향의 절대적 크기보다 다소 작게 투입되었음을 알 수 있었다(태풍 영향의 0.86배). 이상의 결과를 바탕으로 Table 4에서 1992년 미국 남부지역 Dade County를 강타했던 기록적인 자연재

해 중 하나인 허리케인 앤드류(Andrew)의 에머지 평가 사례(Brown and Woith, 1995), 2006년 대만 Hshi-Chih 지역에 큰 피해를 미친 태풍 상센(Xangsane)의 에머지 평가 사례(Chang and Huang, 2011)와 본 연구 결과를 비교해보았다.

허리케인 앤드류의 에너지는 $3.17E+20$ sej, 허리케인으로 인한 영향은 $1.59E+20$ sej로 태풍 매미보다 재해에너지와 재해영향 모두 매우 컸지만, 재해 에너지 1단위당 피해영향은 태풍 매미가 58.34배, 허리케인 앤드류가 50.39배로 부산 지역이 받은 피해 영향이 Dade County보다 크다는 것을 알 수 있었다. 피해를 복구하기 위한 복구 에너지의 경우, Dade county는 지역이 받은 영향보다 2.92배 큰 수준의 복구 에너지를 투입하였지만 이에 비해 부산의 경우, 재해 단위당 피해 영향이 컸음에도 불구하고 피해 영향의 0.86배로 복구하였다. 이를 통해 부산의 경우 태풍 매미보다 더 큰 태풍이 나타날 시에 대비해서는 방재능력과 복구능력을 강화시켜주어야 함을 판단할 수 있다. 태풍 상센의 경우, 태풍 에너지의 크기가 $1.63E+18$ sej, 재해 영향은 $1.11E+21$ sej, 복구에너지 $4.54E+19$ 로써 태풍 매미보다 재해 에너지의 크기는 작았지만 피해는 더욱 크게 나타났음을 통해 부산이 Hshi-Chih 지역보다는 방재능력이 높단 것을 알 수 있

Table 3. Disorder by typhoon Maemi in Busan

No	Item	Raw units	Unit Emergy Value (sej/unit)	Solar Emergy (sej)
Disordering energy				
1	Typhoon Maemi	$1.85E+15$ J	$4.92E+03^1$ sej/J	$7.80E+18$
Disordered parts				
Natural system				
2	Forest(biomass)	$4.78E+10$ J	$4.45E+04^2$ sej/J	$2.12E+15$
Agriculture systems				
3	Rice paddy crops	$8.42E+14$ kg	$6.80E+11^3$ sej/kg	$1.76E+18$
4	Dry paddy crops	$2.92E+09$ kg	$6.80E+11^3$ sej/kg	$1.98E+19$
Urban systems				
5	Building(residential area)	$1.94E+10$ g	varies sej/g	$3.83E+19$
6	Infrastructure(transportation area)	$1.33E+10$ ₩	$1.09E+09^3$ sej/₩	$1.44E+19$
7	Infrastructure (industrial & commercial area)	$2.98E+11$ ₩	$1.09E+09^3$ sej/₩	$3.23E+20$
8	Productivity	$5.32E+10$ ₩	$1.09E+09^3$ sej/₩	$5.78E+19$
Sub total				$4.55E+20$
Rebuilding energy				
9	Volunteer workers	$9.38E+11$ J	$1.03E+05^4$ sej/J	$9.66E+16$
10	Local funds	$7.10E+09$ ₩	$1.09E+09^3$ sej/₩	$7.71E+18$
11	Government funds	$3.49E+11$ ₩	$1.09E+09^3$ sej/₩	$3.79E+20$
Sub total				$3.87E+20$

UEV has been adjusted for GEB of $12.00E+24$ sej/yr

UEV Sources: ¹Odum [2000], ²Brown and Woithe [1995], ³In this study, ⁴Huang and Kao [2002]

Table 4. Comparison of disorder energy with other study

Items	Typhoon Maemi ¹⁾	Hurricane Andrew ²⁾	Typhoon Xang-sane ³⁾
① Disordering energy	$7.80E+18$ sej	$3.17E+20$ sej	$1.63E+18$ sej
② Disordered parts	$4.55E+20$ sej	$1.59E+22$ sej	$1.11E+21$ sej
③ Rebuilding energy	$3.87E+20$ sej	$4.65E+22$ sej	$4.54E+19$ sej

UEV has been adjusted for GEB of $12.00E+24$ sej/yr

Source : ¹In this study, ²Brown and Woithe, 1995 ³Chang and Huang, 2011

었고, 재해 에너지 단위당 피해가 683.77배, 재해 영향에 대비한 복구 에너지는 0.04배 수준임을 통해 이 지역은 방재와 복구수준 모두 저조함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 기존의 재해영향평가 방법의 정성적·상대적 한계점을 극복하기 위해 재해라는 현상을 시스템 외부의 재해 에너지가 유입되어 재해 영향을 형성하는 것으로 보고 이를 복구하기 위해 복구 에너지가 들어와 질서를 재건하는 질서와 무질서의 상호적 관계로 인식하고자 하였다. 즉, 시스템 생태학적 관점의 재해란 것은 재해 에너지가 들어와서 일상적 스트러처를 파괴하는 것이며 이러한 유기적 관계를 자연시스템과 인간의 경제 시스템을 포괄하여 에머지라는 동일한 척도로 정량적·비교·평가하고자 하였다.

이를 위해 부산시를 대상으로 주요 유입 에너지와 내부 보유량을 통해 일상적 에너지와 일상적 스트러처를 분석하였고, 태풍 매미로 인한 재해 에너지, 재해 영향, 복구 에너지를 절대적인 수치로 분석하였다. 그 결과, 태풍으로 인한 피해는 도시 시스템의 피해가 90.87%, 자연시스템의 피해가 9.13%로 대부분의 피해와 손실은 경제활동이 이루어지는 도시에서 일어났으며 그 중에서도 산업과 상업지역의 기반시설피해가 가장 컸음을 확인하였다. 이러한 시스템 관점에서 전체적으로 부산시의 주요한 유입 에너지와 스트러처를 파악하고 재해영향을 평가함을 통해 기존의 재해영향평가에서 발생했던 지표의 개수 선정이나 항목 설정의 문제가 해결되며 표준화방법론의 선택에 대한 고민 또한 해결된다. 그리고 허리케인 앤드류, 태풍 상센과 비교 및 고찰해봤을 때, 부산의 경우, Hshi-Chih 지역보다는 방재가 잘 되고 있지만, 태풍 매미보다 더 큰 태풍이 나타날 시에 대비해서는 방재능력과 복구능력을 강화시켜주어야 함을 판단할 수 있었다.

에머지 평가법은 실질적인 가치를 평가해 줄 수 있는 시스템 생태학적 관점의 정량화 도구으로써 기존의 국내·외의 에머지 평가연구는 도시나 국가의 지속성을 평가하기 위해 많이 이용되어왔지만 본 연구와 같은 재해의 평가에 에머지 평가가 적용된 경우는 드물다. 이에, 이러한 연구의 시작은 앞으로 방재정책에서도 에머지가 적용가능하며 정량적인 기준을 제시해 줄 있을 것으로 판단된다. 추후에 재해영향에 대한 정량화 연구인 본 연구를 기반으로 태풍의 크기에 따라 방재능력을 어느 정도까지 증가시키는 것이 경제적인 방재수준인지에 대한 추가적인 연구가 이루어진다면 보다 실질적이며 효율적인 방재정책수립이 가능할 것이라 기대된다.

References

- [1] Adger, W.N., 2006, "Vulnerability", *Global Environmental Change*, Vol. 16, 268-281.
- [2] Brown, M.T., Campbell, D.E., DeVilbiss, C., Ulgiati, S., 2016, "The geobiosphere energy baseline; A synthesis", *Ecol. Modell.*, Vol. 339, No. 10, 92-95.
- [3] Brown M.T. and McClanahan, T.R., 1992, "Emergy Analysis Perspectives of Thailand and Mekong River Dam Proposals", Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida, Phelps Lab, Museum Road, Gainesville, FL, 27.
- [4] Brown M.T., McClanahan, T.R., 1996, "Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals", *Ecol. Modell.*, Vol. 91, 105-130.
- [5] Brown, M.T. and Ulgiati, S., 2011, "Understanding the global economic crisis: a biophysical perspective", *Ecol. Modell.*, Vol. 223, 4-13.
- [6] Brown, M.T. and Woithe, R.D., 1995, Hurricane Andrew: Emergy Analysis of Dade County, the Hurricane Impact Area and Evaluation of Damages and Costs, Center for Environmental Policy, Department of Environmental Engineering Science, University of Florida, Gainesville, FL, 4(1-16).
- [7] Brown, M.T., Woithe, R.D., Odum, H.T., Montague, C.L. and Odum, E.C., 1993, Emergy analysis perspectives of the Exxon Valdez oil spill in Prince Williams Sound, Alaska, Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida, Gainesville, FL, 122.
- [8] Busan Meotropolitan City, 2003, 42th Busan Statistical Yearbook.
- [9] Chang L. and Huang S., 2011, Emergy Indices for Assessing Vulnerability, Emergy Synthesis 6: Theory and Applications of the Emergy Methodology, Center for Environmental Policy, Department of Environmental Engineering Science, University of Florida, Gainesville, FL, 531-538.
- [10] Chang L. and Huang S., 2015, "Assessing urban flooding vulnerability with an emergy approach", *Landscape and Urban Planning*, Vol. 143, 11-24.
- [11] Füssel, H., 2007, "Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research", *Global Environmental Change*, Vol. 17, 155-167.
- [12] Huang, S.L., and Kao, W.Y. 2002. Emergy evaluation of damages and costs of Xang-Sane typhoon in Hsih-Chih. *Journal of City and Planning*, Vol. 29, No. 1, 89-113.
- [13] Im, J.H., 2011, "An Ecological Economic Evaluation on the Carbon Reduction Plan of Urban by the Energy Modeling", Ph. D. dissertation, Department of Environmental Engineering, Graduate School, Pukyong National University, 123.
- [14] IPCC, 2007, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976.
- [15] IPCC, 2014, Summary for policy makers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D.

- Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1-32.
- [16] Kang, D., 2013, "Emergy-based value of the contributions of the Yongsan River estuary ecosystem to the Korean economy", *The Sea*, Vol. 18, No. 1, 13-20.
- [17] Kang, T., 2014, A Study on the Framework of Coastal Vulnerability Assessment, Department of Civil Engineering, Ph. D. dissertation, Department of Civil Engineering, Pukyong National University, 1-47.
- [18] Kim, C., Nam, K. and Lee, J., 2015, "Quantification of Climate Change Vulnerability Index for Extreme Weather -Focused on Typhoon case-", *J. Environ. Impact Assess.* Vol. 24, No. 2, 190-203.
- [19] Kim, Y., 2003, "Path and Surface Wind Speed of Typhoon Maemi", *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 7, No. 2, 132-137.
- [20] KMA(Korea Meteorological Administration), 2003, Annual Climatological Report, Seoul, Korea, 94.
- [21] Lee, S. and Chang, E.M., 2009, "Application of GIS to Typhoon Risk Assessment", *The Journal of GIS Association of Korea*, Vol. 17, No. 2, 243-249.
- [22] Lee, S.M., Son, J. and Kang, D., 2000, "Evaluation of Korea's Sustainable Development by the Systems Ecology (I) -EMERGY Analysis of Korea's Natural Environment and Economic Activity-, *J. of the Korean Environmental Sciences Society*, Vol. 9, No. 6, 449-454.
- [23] Ministry of Public Safety and Security, 2003, *Korea Disaster Yearbook*, 173-176.
- [24] Oh, S., Kang, Y. and Lee, H., 2014, "A Study on Evaluation of Coastal Cities' Vulnerability by Climate Change in Korea", *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 16, No. 4, 87-97.
- [25] Odum, H.T., 1996, *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*, John Wiley & Sons, New York, 1-317.
- [26] Odum, H.T. 2000, *Handbook of Emergy Evaluation, Folio#2 Emergy of Global Processes*, Center for Environmental Policy, University of Florida.
- [27] Odum, H.T. Brown, M.T. and S.B. Willams, 2000, *Handbook of Emergy Evaluation, Folio#1 Introduction and Global Budget*, Center for Environmental Policy, University of Florida.
- [28] Odum, H.T. and Odum, E. C., 1976, *Emergy Basis for Man and Nature*, 3-32.
- [29] Park, S., Lee, W., Kwon, T., Lee, B., Son, Y. and Cho, Y., 2011, "Vulnerability Assessment for Ocean to Climate Change Using Spatial Information Based on GIS", *Journal of Korea spatial information society*, Vol. 19, No. 3, 1-9.
- [30] Sanddra, R.B., 2014, Design and use of composite indices in assessments of climate change vulnerability and resilience, United States Agency for International Development, 4-5. Statistics of Groundwater, accessed June 1 2016 at National Groundwater Information Center, <http://www.gims.go.kr>.
- [31] Ministry of Environment, Statistics of land cover status by regional area, 2000~2004, accessed July 21 at <https://egis.me.go.kr/bd/listMetaDatasrch.do>.
- [32] Korea Forest Service, Statistics of Landslide, 2003, accessed October 10 2016 at <http://www.forest.go.kr>.
- [33] Ministry of Environment, Statistics of Watersupply, 2004, accessed August 7 at <http://library.me.go.kr>.
- [34] Yoo, G. and Kim, I., 2008, Development and application of a climate change vulnerability index, Korea Environment Institute, 41-43.

Received 24 October 2016

Revised 6 December 2016

Accepted 17 February 2017