해설

열역학 지표를 활용한 광물자원 평가 기술 동향

조진동^{1)*} · 김종헌²⁾

Mineral Resource Assessment Tool Trends Using Thermo Dynamic Approach

Jin-Dong Cho* and Jong-Heon Kim

Abstract : The natural resources is consists of water, air, biomass and mineral resources, and their characteristics are different. In particular, the mineral resources are classified as non-fuel and fuels resources, and their physical parameters are expressed as mass and energy. Since the valuation of mineral resources using a single attribute is very difficulty, the currency is generally used at present. But all the natural resources can be integrated into a single indicator as energy, so the evaluation of mineral resources have been using a thermodynamic approach (exergy and emergy) at recently.

Key words : Mineral resources, Exergy, Emergy, Assessment tool, Exergeocology

요약 : 자연자원은 물, 공기, 바이오매스 및 광물 자원으로 구성되며, 그들의 특성은 다르다. 특히 광물 자원은 비 연료 및 연료 자원으로 분류되며, 그들의 물리적 특성은 질량과 에너지로 표현된다. 단일 속성을 이용한 광물자원의 가치 평가는 매우 어렵기 때문에 일반적으로 현재 통화가치를 이용한다. 그러나 모든 자연자원은 에너지와 같은 단일 지표로 통합 수 있으므로, 최근에 광물자원 평가에 있어서 열역학적 접근법(exergy, emergy)이 통화가치평가보다 효율적인 것으로 확인되어 이를 사용하고 있다.

주요어 : 광물자원, 엑서지, 에머지, 평가기술, 생태학적 엑서지

서론

오늘날 우리가 살고 있는 지구는 자연자원 고갈 심화, 자연환경 파괴 및 오염증가로 인하여 자원전환 네트워크는 매우 복잡하며, 특히 지구환경 문제는 정치이념을 떠나서 범세계적인 문제로 대두되고 있다. 광물(연료 및 비연료)자원의 수요는 인구 및 경제 성장과 관련을 갖고 있는데, 최근 거대 개발도상국들의 비약적인 경제성장은 광물자원의 고갈 문제를 더욱 심화시키는 원인으로 지적되고 있다. 광물자원 가치평가는 지질학적 측면, 개발 타당성 및 시장 경제적 측면 등 세 가지 주요 지표에 따라 종합적으로 고려된다(Ko et al., 2008). 광물자원은 물리적 특성이 서로 다른 연료자원과 비 연료자원으로 분류

됨으로 단일화 평가도구를 이용한 광물자원 평가에는 어려움이 따른다. 또한 화폐가치(monetary cost)를 이용한 평가는 화폐가치의 상대적 변동성으로 인해 객관성이 부족하다(Valero, 2008). 반면에 열역학적인 자원가치는 환경물질의 특정한 구조 및 농도를 조성하는데 소요되는 일(작업)의 량으로 정의가 되므로, 최근에 열역학적인 방법인 단일평가 방법을 이용하여 산업, 환경, 생물자원에 대한 평가가 다수 이루어지고 있을 뿐 아니라 광물 자원에 대한 평가 수행이 점차적으로 시도하고 있다. 엑서지 이용에 대한 국외 연구에서 사회분야는 Ivar(2001), Chen et al.(2006), Zhang et al.(2010), 산업분야는 Zafer et al.(2008), 환경분야는 Zornitza(2010), 광물자원 분야는 Valero et al.(2008), Valero et al.(2010), 순환평가는 Göran et al.(1997) 등등이 있으며, 국내에서는 Park et al.(1999)이 산업분야 평가를 수행하였다. 에머지를 이용한 연구는 경제적인 사고와 생태적인 사고 사이에 존재하는 '신뢰성 격차(credibility gap)'를 줄이기 위한 기법개발의 필요성과 실질 분석 연구는 Odum(1971, 1973, 1982), Westman(1977) 등이, 자원평가기술은 Bastianoni et al.(2005) 및 Wesley(2011) 등등이 했었으며, 국내는 환경

2012년 8월 22일 접수, 2012년 11월 12일 심사완료

2012년 12월 13일 게재확정

1) KISTI ReSEAT Program(KISTI 사업팀)

2) KISTI Information Analysis Center(KISTI 정보분석 센터)

*Corresponding Author(조진동)

E-mail: jdcho@reseat.re.kr

Address: 245 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-806, Korea

관리 면에서 Jang(2007) 등 다수가 있다. 이 글의 목적은 국외의 열역학 방법을 이용한 자원 평가에 관련된 논문을 분석·해설을 함으로서 국내의 광물자원 평가기술 향상 및 효율적인 정책개발을 위한 기초자료 제공에 있다.

자연자원 및 자원 특성

인류가 살아가는 데 필요한 물질자원의 대부분은 지각으로부터 얻어진다. 지구는 오랜 동안의 진화과정을 거치면서 각종 원소들이 지각 내에 분포됐으며, 지각 내 평균함량보다 훨씬 높은 비율로 농집 된 부분을 우리는 ‘광상’이라고 하며, 추출되는 유용물질을 ‘자원’이라 한다(KESS, 2004). 지구행성에 존재하고 있는 자원은 Fig. 1과 같으며, 물질의 특성(nature)과 사회(society)에서 사용된다. 따라서 자연자원은 부분적으로 자연 플로우(Natural Flow)자원과 저장자원(Stocks, 광상과 편드)로 분리된다(Fig. 2). 자연 플로우 자원은 제한적이지만 크

Fig. 1. A classification of resources (Göran, 1990).

Fig. 2. Resource use by nature and society (Göran et al., 2001).

기를 가지며 장기간 지속되어서 햇빛, 물, 이산화탄소 및 광물질의 자연적인 흐름을 형성한다. 그러나 광상은 서서히 고갈되어 분산되면 흐름(flow)을 야기할 수 있다. 따라서 자연흐름은 재생이 되는 반면에 광상은 비재생자원이다.

지하자원은 부피나 중량과 같은 적절한 단위로 측측이 가능하며 유한성, 고갈성 및 재생불능성이라는 자원특성을 가진다. 즉 자원의 물리적 지표는 보통 질량과 에너지를 근거로 한다. 일반적으로 모든 연료 자원은 그들 사이에 직접비교를 허락하는 함량(joule)으로 평가되는 반면에 비 연료광물은 개별적 물리적인 특성인 톤과 품위(%)로 평가된다. 따라서 연료와 비 연료 광물자원은 쉽게 상호 비교될 수 없으므로 지구상의 광물자원을 포괄적인 단일도구로 평가가 어려워져 각 자원에 대한 많은 정보량을 같은 시스템으로 동화시킬 수 있는 의사 결정은 쉽지 않다.

광물자원 평가기술

우리가 원하는 것을 마음껏 소비할 수 있다면 경제문제가 존재하지 않는다. 우리에게 활용자원은 제약되므로 이것을 ‘희소성’이라 부른다. 희소성이라는 제약조건을 갖는 인간사회는 모든 욕구를 충족시킬 수 없으므로 지구상에 존재하고 있는 자원에 대한 평가가 필요하다. 광물자원 평가란 자원공급 측면에서는 가까운 미래 경제, 즉 자원발견의 유무에 관계없이 채굴되는 자원에 대한 측정 및 평가를 의미하는 반면에 활용측면에서는 국가 및 지역 내의 자원부존량의 범위와 자원수출 역량을 결정하는 것이다. 광물가치는 물리적인 형태로 결정되며, 지구의 특성성분과 구조에서 제공되는 광물의 투자성질은 최소 경제평가로 된다. 우리는 물리적인 관점에서 인간을 위한 많은 비용은 이론적인 한계를 무시하기 때문에 단독으로 자연자원을 평가할 수 없지만, 자원이 갖는 모든 특성을 단일 지표인 에너지(공통화폐)로 통합할 수 있다. 따라서 열역학적 방법을 사용은 모든 자원을 통합된 단일 평가를 할 수 있으며, 열역학 평가 기술의 주요 차이점은 Table 1과 같다.

에너지 방법(Energy method)

에너지는 운동이나 운동 능력으로서 필수적인 작업(일)은 아니며, 이는 열로 변화될 수 있거나 열 단위(Btus, calories, or joules)로 측정되는 모든 물체 특성이다. 시장시스템에서 교환 매개수단으로 활용되는 화폐들이 가지고 있는 한계극복을 위해 자연환경의 가치평가에서 에너지를 공통화폐(common currency)로 채택하였다.

Table 1. The Comparative analysis of Energy, Exergy and Emergy method

	Energy	Exergy	Emergy
Originated from		1956	1969
Originated by	Economist	Engineering Scientist	System ecologist
key words	Physical indicators	Thermodynamics potentials	Transformity
Academic basis	The first law of thermodynamics	The second law of thermodynamics	All energy and material on earth are originated from solar energy
	Energy is motion or ability to produce motion. $\Delta Q = \Delta U + \Delta W$ (1) where: ΔQ is added energy as heat to the system, ΔU is the change of the internal energy U of the system, ΔW is extracted energy as work from the system.	Exergy is work, i.e. ordered motion, or ability to produce work. $E = T_0 \Delta S^{tot}$ (2) where: E is the exergy, T_0 is the temperature of the environment, ΔS^{tot} is the change of the entropy of the total system S^{tot} , i.e., the system and the environment.	Emergy is the availability of energy. $M = \tau \cdot B$ or $Em = \sum_i \tau_i Ex_i$ (3) where: $M(Em)$ is the emergy, B is available energy, Ex is the exergy, τ is the transformity and i the i -th input.
Measures	Energy is a measure of quality.	Exergy is a measure of quantity and quality	Emergy is a measure of quantity and quality
Unit of measures	Joule or TOE	Joule or TOE	Emjoule(emergy joule(sej))

*Göran (2001), Juan et al.(2008) and Bastianoni et al. (2007).

에너지 단위는 각각 다른 종류의 에너지자원들을 원유 1톤이 발열하는 칼로리를 기준으로 표준화 한 단위로 석유환산톤(toe: ton of oil equivalent)이란 국제에너지기구(IEA)에서 정한 단위를 사용한다. EA에서 사용되는 여러 형태 측정방법, 즉 직접에너지를 요구하는 방법(DED: direct energy demand), 누적에너지 방법(CED: cumulative energy demand) 등이 있다(Thomas Veach Long, II, 1978).

에머지 방법(Emergy method)

에머지는 1980년대 초 미국의 생태학자인 Odum(1983, 1996)에 의해 개발되었으며, 이는 ‘한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에 직간접으로 이미 소모된 한 종류의 이용 가능한 에너지’로 정의된다. 에머지는 한 가지 자원이 가지고 있는 에너지 관점의 가치는 이 자원이 형성되기까지 열역학 제2법칙에 따라 소모되었던 모든 에너지들까지 포함해야 한다는 개념이다. 즉 주어진 자원에 현재 남아 있는 에너지뿐 아니라 과거에 사용된 에너지까지 포함하는 개념이다. 현재 에머지 평가 법은 서로 다른 자원들을 비교하기 위하여 기준으로 삼은 에너지는 태양 에너지이며, 단위는 solar emergy로서 solar Joules(seJ) 불린다.

에머지는 제품이나 서비스를 만들기 위해 직·간접적 변환에 사용이 되는 사용 가능한 모든 종류의 에너지(exergy)이다. 에머지 계정은 에너지 형태간의 품질 차이를 측정한다. 에머지는 에너지의 한 종류의 단위 제품 또는 서비스를 생성하는 작업과정에 사용되는 모든 에너지의 표현식이다. 에머지의 단위는 emjoule로서, 변환에서 소비되는 한 종류의 가용 에너지를 말하는 단위이다. 에머지는 다양한 에너지와 자원(예로 햇빛, 물, 화석 연료, 광물 등)을 설명한다. 각 형태는 자연의 변화 과정에 의해 생성된 각각은 시스템을 지배하는 자연과 인간의 작업을 지원하는 다른 능력을 가진다. 품질에서 이러한 차이의 인식은 에머지 방법론의 핵심 개념이다(Wikipedia, 2012).

엑서지 방법(Exergy method)

엑서지는 가끔 에너지와 혼동된다. 엑서지는 열역학 2법칙으로 Carnot S.(1796~1832)과 Gibbs J.W.(1839~1903)의 논문과 관련되며, 용어는 Zoran Rant가 1953년에 그리스어 단어 ex(외부)와 ergos(일)의 합성으로 신 표현을 만들어 냈다(Göran, 1990). 엑서지는 물질의 질과 양이 고정된 표준 환경 하에서 평형을 이룰 때 에너지 혹은 물질 흐름에서 얻어지는 일의 최대량으로 정의된다. 에너지와 같은 단위, 즉 Joules를 가진다. 엑서지는

생산되어 지는 엔트로피에 비례하여 모든 현실과정에서 소비된다. 엑서지 분석(ExA)은 엑서지 손실과 엑서지 파괴를 측정할 수 있으며 산업 및 공학적 모델, 경제, 환경영향 평가, 생태 시스템 및 사회 시스템을 포함한 여러 분야에서 사용되어 질 수 있다. 엑서지는 포괄적인 단위(에너지 단위)로 측정되며, 자원회계 내에 추가 특성을 가진다. 엑서지는 이질적인 에너지와 유형 자산을 통합할 수 있는 기능을 가지며, 분석은 통화 정책에 지배를 받지 않기 때문에 객관적인 정보를 준다. 다행히도 엑서지는 다른 종류의 kJ 혹은 kcal 단위뿐만 아니라 등가기를 Ton-Toe(엑서지는 원유 1톤이 갖는 열량으로 10^7 Kcal 입)으로 하나의 단위로 측정되어 질수 있다. Valero (2008)은 지구상의 광물자본의 엑서지 전개를 연구했으며, Valero et al.(2010)은 광물자원을 기술하는 모든 특성(수량(톤), 화학성분과 농도(품위))를 엑서지 면에서 열역학 제2법칙으로 측정을 할 수 있으므로 에너지자원의 평가 단위 TOE의 단일지표로 통합할 수 있다고 언급했다.

평가사례 결과 및 토의

Table 1에서 보는 바와 같이 열역학적인 평가방법 중에서 에너지는 운동이나 운동 능력으로서 필수적인 작업은 아니며, 공동화폐 역할과 에너지 자원에 대해 평가를 할 수 있으나 비 연료광물에 대해서 평가를 할 수 없다. 에머지 평가는 가용에너지를 이용한 변환도(transformity)를 사용하여 주로 재생 에너지 자원을 평가를 수행하지만 광물자원 평가를 위해서는 태양 에너지를 근본으로 하는 변환도를 사용하여 자원평가를 수행한다. Fig. 3은 엑서지 생태학적인 방법(exergoecological method)과 열환경방법(thermo-ecological method)에서 유도된 다른 엑서지 접근방식과의 차이를 보여주는 것이다. Eco-exergy는 ‘생태계의 엑서지’로서 동일한 온도와 압력에 있지만 비 활동성 비유기질 물질로 이루어진 동일한 시스템으로 정의된다(Valero, 2008). 엑서지 평가 법은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 가용에너지를 이용하여 물질들을 평가하는 방법이다. 세 가지 열역학적 방법의 기본원리를 상호 비교(Table 1)하면 광물자원평가를 위한 방법 중에서 엑서지 방법이 효율적인 것으로 판단된다. 화폐단위로 가치를 환산하여 평가에 있어서 문제가 있으며 정확한 가치판단이 곤란하다. 지금까지는 자연적인 자본은 자유로운 상품으로 취급을 받았으나 최근에는 발달의 제한 요인이 되고 있다. 또한 Champan et al.(1983)은 자원 대체는 단기간에는 유효할지 모르지만 모든 대체에 관한 자원 부족과 동등하게 될 때 장기간에는 실패할 것이라고 언급을 했다. 물리적인 관점에서 인간을 위한 많은 비용

Fig. 3. Conceptual diagram of the terms exergoecology and thermo-ecology(Valero et al., 2008).

을 이론적인 한계를 무시하기 때문에 단독으로 천연자원을 평가할 수 없다. 따라서 우리는 자원을 얻는 데 실제적인 과정에서 투자된 에너지와 과정 순환을 최소 열역학적인 관계로 정의할 수 있다. 사례 결과와 같이 우리는 생태학적 열역학 접근(엑서지와 에머지)을 기반을 통해서 광물자원 평가 결과를 얻었다. 최종 결과로서 우리는 지구상의 매장량 관리를 위한 새로운 책임도구(accountability tool)를 제시했으며, 이 도구를 통하여 ‘물리적인 경제 지리학’라고 부를 것을 제시해왔다. 기술에 의한 학습을 통하여 더 발전되어 야 할 근거를 둔 회계 원칙이 될 것이다. Valero et al.(2008)은 지구상의 광물자본의 엑서지 전개를 연구했다. Valero et al.(2010)은 엑서지 면에서 열역학 제2법칙으로 측정을 할 수 있다면 광물자원을 기술하는 모든 특성을 단일 지표로 통합할 수 있다고 했다. 엑서지는 포괄적인 단위(에너지 단위)로 측정되며, 자원회계 내에 추가 특성이다.

Fig. 4(a)는 흑암지구 속에 존재하는 광물질을 추출하여 인간이 활용에 따른 엑서지/엑서지 비용관계를 나타낸 것으로서 흑암상태에 있는 물질의 환경을 표준 환경제로 엑서지라고 한다. 엑서지는 기준환경 조건에서 주어진 자료 구성에 필요한 작업의 최소량을 측정하는 것으로서 Valero et al.(2010)은 Exergoecology(생태학적 엑서지)에 대하여 지구광물자본 회계를 위한 열역학 접근법, 즉 방법은 엑서지와 엑서지 비용 개념을 근거로 산업용 체인의 생산과정(Fig. 4(b))을 나타냈다.

Bauxite → alumina → aluminium과 limestone → calcite → lime 등의 엑서지와 엑서지 비용을 산출하였다. 보크사이트, 알루미늄 및 알루미늄과 석회석 방해석 및 석회의 공정은 각각 (1)과 (2)이며 이에 관련비용은 다음과 같다. 에너지 소비는 알루미늄의 228GJ/ton이며,

Table 2. Available exergy, potential exergy use and current exergy consumption of natural resources on earth. letter e denotes electrical consumption, while the thermal consumption (Valero et al., 2010)

Renewable resources	Available, Gtoe	Potential, Gtoe	Current, Gtoe/yr
Geothermal	13.5	0.04~0.09 e	0.007 e/0.02 th
Tidal power	2	0.13	2.0E-04
Solar PV	32,521	38.7	2.0E-4
Solar thermal power	32,521	0.47~3.5	2.6E-04
Water power	8.2	1.3	0.7
Ocean waves	2.3	0.4	5.60E-06
Biomass	70	14~42	1.1
Non renewable resources	Available, Gtoe	Potential, Gtoe	Current, Gtoe/yr
Uranium-fission	27,100	52,000	0.6
Coal	1,615	523	3.1
Natural gas	365~666	163.4	2.6
Oil	200~300	164.8	3.9
Unconventional fuels	>3,800	-	0.19

Table 3. The exergy and exergy cost of the 2006 mineral production, reserve base and world resources Values are expressed in ktOE (Valero et al., 2010)

	2006 mineral production		reserve base		world resources	
	B _t	B _t [*]	B _t	B _t [*]	B _t	B _t [*]
Aluminium	2.39E+04	5.81E+05	4.13E+06	8.94E+07	9.67E+06	2.10E+08
Antimony	1.22E+01	1.36E+02	3.93E+02	4.37E+03	N.A.	N.A.
Arsenic	9.78E+00	1.23E+02	2.91E+02	3.66E+03	1.80E+03	2.26E+04
Barite	4.09E+01	N.A.	4.53E+03	N.A.	1.03E+04	N.A.
Beryllium	5.50E-03	2.88E-01	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Bismuth	1.94E-01	3.16E+00	2.32E+01	3.77E+02	N.A.	N.A.
Boron oxide	1.57E+02	N.A.	1.51E+04	N.A.	N.A.	N.A.
Bromine	2.39E+04	8.24E+00	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Cadmium	1.27E+00	6.93E+01	7.92E+01	4.31E+03	3.96E+04	2.16E+04
Cesium	0.00E+00	N.A.	8.53E+00	8.00E+00	N.A.	N.A.
Chromium	1.77E+03	4.03E+03	N.A.	N.A.	1.06E+06	2.40E+06
Cobalt	8.73E+00	4.38E+02	1.68E+03	8.44E+04	1.94E+03	9.74E+04
Copper	9.01E+02	9.35E+04	5.61E+04	5.82E+06	1.79E+05	1.86E+07
Feldspar	5.06E+01	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fluorspar	2.33E+02	N.A.	2.10E+04	N.A.	2.19E+04	N.A.
Gallium	1.22E-02	1.22E-02	N.A.	N.A.	1.77E+02	176
Germanium	1.67E-02	1.65E-02	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Gold	1.91E-02	1.56E+03	6.97E+01	5.71E+04	N.A.	N.A.
Graphite	8.70E+02	N.A.	1.77E+05	N.A.	6.76E+05	N.A.
Gypsum	4.02E+02	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Table 3. The exergy and exergy cost of the 2006 mineral production, reserve base and world resources Values are expressed in ktoe (Valero et al., 2010) (Countined)

	2006 mineral production		reserve base		world resources	
	B _t	B _t [*]	B _t	B _t [*]	B _t	B _t [*]
Hafnium	N.A	N.A	1.57E+02	N.A	N.A	N.A
Helium	5.09E+00	5.09E+00	1.20E+03	1.20E+03	1.19E+03	1.186
Indium	5.51E-02	5.28E-01	1.52E+00	1.46E+01	N.A	N.A
Iodine	4.67E-01	N.A	5.04E+02	N.A	6.35E+02	N.A
Iron	1.42E+05	9.96E+05	2.63E+07	1.84E+08	3.78E+07	2.65E+08
Lead	9.99E+01	3.90E+03	4.90E+03	1.91E+05	4.32E+04	1.69E+06
Lithium	N.A	N.A	1.51E+04	5.66E+04	1.79E+04	6.69E+04
Magnesium	4.33E+02	4.33E+02	N.A	N.A	N.A	N.A
Manganese	2.59E+03	2.50E+04	1.13E+06	1.09E+07	N.A	N.A
Mercury	2.51E-02	8.59E+00	4.08E+00	1.39E+03	1.02E+01	3.48E+03
Molybdenum	3.41E+01	6.40E+02	3.52E+03	6.61E+04	2.41E+03	4.52E+04
Nickel	1.58E+02	1.26E+04	1.50E+04	1.19E+06	N.A	N.A
Niobium	1.05E+01	1.03E+01	7.06E+02	6.94E+02	N.A	N.A
Phosphate rock	1.22E+03	1.58E+03	4.30E+05	5.56E+05	N.A	N.A
PGM	9.10E-03	N.A	1.61E+00	N.A	2.02E+00	N.A
Potash (K ₂ O)	2.39E+04	5.81E+05	4.13E+06	8.94E+07	9.67E+06	2.10E+08
REE(as Ce ₂ O ₃)	3.72E+00	N.A	4.53E+03	N.A	N.A	N.A
Rhenium	3.61E-03	4.40E-01	7.65E-01	9.31E+01	8.41E-01	1.02E+02
Selenium	1.76E-01	1.62E-01	1.94E+01	1.78E+01	N.A	N.A
Silver	3.61E-01	3.46E+02	1.02E+01	9.78E+03	N.A	N.A
Strontium	1.24E+02	N.A	2.54E+03	N.A	2.12E+05	N.A
Tantalum	3.06E-01	8.49E+01	3.93E+01	1.09E+04	N.A	N.A
Tellurium	8.30E-03	8.07E-03	2.99E+00	2.87E+00	N.A	N.A
Thorium	N.A	N.A	1.34E+02	N.A	N.A	N.A
Tin	3.45E+01	1.77E+03	1.25E+03	6.46E+04	N.A	N.A
Titanium (TiO ₂)	3.52E+01	9.13E+02	9.10E+03	2.36E+05	1.21E+04	3.15E+05
Vanadium	1.92E+01	2.16E+02	1.31E+04	1.48E+05	2.17E+04	2.45E+05
Wolfram	1.00E+01	7.58E+02	6.94E+02	5.26E+04	N.A	N.A
Zinc	1.30E+03	2.37E+04	6.23E+04	1.14E+06	2.46E+05	4.50E+06
Zircon (ZrO ₂)	1.21E+01	1.16E+04	7.36E+02	7.07E+02	N.A	N.A
Sum	1.80E+05	1.70E+06	3.43E+07	2.98E+08	7.67E+07	5.44E+08

B_t : absolute exergy of the substance(ktoe); B_t^{*} : absolute exergy cost of the substance(ktoe)

였다. Valero et al.(2010)은 엑서지 면에서 열역학 제2법칙으로 측정을 할 수 있다면 광물자원을 기술하는 모든 특성(수량(톤), 화학성분과 농도(품위))을 단일 지표로 통합할 수 있다. 엑서지는 포괄적인 단위(에너지 단위)로 측

정되며, 자원회계 내에 추가 특성이다. Valero et al. (2010)은 미국 지질조사소에 의해서 기록된 2006년도 광물 생산, 매장량 및 세계 주요 50개 광물자원과 재생 및 비 재생자원으로부터 엑서지와 엑서지 비용을 계산하

Table 4. Unit energy value models for parameter uncertainty calculations (Wesley, 2011)

Category	Model	Source
Minerals	$UEV_{\text{mineral}} = \text{Enrichment Ratio} \times \text{Land Cycle UEV}(\text{sej/g})$	Cohen M. et al. (2008)
	$\text{Enrichment Ratio} = (\text{ore grade cutoff, \%}) / (\text{crustal concentration, ppm}) / (1E6)$	
	$\text{land Cycle UEV}(\text{sej/g}) = (\text{energy base line, } 15.83E + 24\text{sej/yr} / \text{turnover, cm/yr}) (\text{density of crust, g/cm}^3) (\text{crust area, cm}^2)$	Odum H. T. (1996)
Petroleum	$\text{Petroleum UEV petro}(\text{sej/J}) = (1.68^b \times \text{energy of kerogen, sej/J}) (\text{C content, \%}) / ((\text{conversion of kerogen to petroleum, fraction}) (\text{enthalpy of petroleum, } 4.19E4 \text{ J/g}))$	Bastianoni S. et al. (2005)
	$UEV_{\text{carbon in kerogen}}(\text{sej/g}) = (\text{energy of C in phytoplankton, sej/g}) / (\text{conversion to kerogen, fraction})$	
	$UEV_{\text{carbon in phytoplankton, sej/g}} = (\text{phytoplankton UEV, sej/J}) \times (\text{phytoplankton Gibbs Energy, } 1.78E4 \text{ J/g}) / (\text{phytoplankton fraction C})$	

Table 5. Summary of emergy in mine products based on two allocation rules (Wesley, 2011)

Product	Geologic energy(sej/g)	Mining energy(sej/g)	Mining allocation %	Total energy(sej/g)	95% confidence interval
Emergy based on co-product allocation					
Doré	1.7E+11	6.6E+12	100	6.8E+12	4.4E+12 - 1.3E+13
Gold in doré	3.7E+11	1.5E+13	100	1.6E+13	1.0E+13 - 2.7E+13
Silver in doré	2.5E+10	1.2E+13	100	1.2E+13	7.5E+12 - 2.2E+13
Mercury	1.7E+11	2.4E+13	100	2.4E+13	1.6E+13 - 4.5E+13
Emergy based on economic allocation					
Doré	1.7E+11	6.6E+12	99.92	6.8E+12	4.4E+12 - 1.3E+13
Gold in doré	3.7E+11	1.5E+13	97.31	1.5E+13	9.9E+12 - 2.5E+13
Silver in doré	2.5E+10	3.0E+11	2.61	3.3E+11	2.2E+11 - 5.4E+11
Mercury	1.7E+11	2.0E+10	0.08	1.9E+11	1.8E+11 - 2.1E+11

여, Table 2 and 3을 작성하였다.

에머지 평가 기술은 희소성지표로 사용되는 2가지 기본적인 기능을 소유하므로, 1) 자원의 물리적 특성에 기반을 둔 것과 2) 모든 자원이 단일 단위를 가지고 측정되어야 하는 것이다. 일반적으로 에머지 분석은 성공적으로 재생자원을 위하여 적용되어 질 수 있다. 그러나 Valero et al.(2008)는 태양이 자원 형성에 중추적인 역할을 하지 않은 광물자원에 대하여 이 접근법의 적용은 매우 의문시 된다. 아무리 많은 태양 에너지가 태양으로부터 받는다고 하더라도 예로서 지구상의 금 혹은 철의 양은 변화하지 않을 것이기 때문이다. 따라서 광물자원 평가를 위한 변환도의 철저함은 의심스럽다고 언급하였다. 반면에 Bastianoni et al.(2005), Wesley (2011) 등은 Cohen et al.(2008) 및 Bastianoni et al.(2005)이 각각 개발한 모델(Table 4)을 사용하여 태양 에너지를 기준으로

하는 변환도를 산출하여 광물가치평가를 수행하였다.

Wesley (2011)은 채굴할 수 있는 광상의 위치의 작업 환경을 나타내는 금, 은 및 수은의 지질학상의 에머지는 다음 형태로 기술될 수 있는 원소의 부광비 근거로 땅의 원소광물의 추정 에머지를 위한 새로운 일반적인 모델(universal model)로 추정했다(Table 5). Bastianoni et al.(2005)은 퇴행적 진화를 거친 광합성에서 그들 형성에 기여한 생물화학적 과정을 근거로 오일과 석유 천연가스의 변환도 계산을 제시하여, 석유 형성 에머지 평가는 광합성, 박테리아 감소와 속성작용 및 퇴행성 진화와 오일 형성을 통해서 행하였다. 열역학 및 지질학적 관점에서 석유형성의 생물화학과정의 에머지 분석은 오일과 천연가스 변환도는 개략적으로 각각 55,400sej/J와 40,000sej/J임을 확인하였다(Bastianoni et al., 2005).

결 론

자원평가 대상인 광물자원은 연료자원과 비 연료자원으로 분류되므로 이들은 물리적인 특성이 서로 다르기 때문에 보편적인 단일 평가도구를 이용한 평가는 어려움이 따르며, 화폐가치(monetary cost) 평가는 화폐가 갖고 있는 가치의 상대성으로 객관성이 좀 떨어진다. 더 나아가서는 각 자원에 대한 정보량을 동일 시스템으로 동화시킬 수 있는 의사 결정이 쉽지 않다.

열역학적인 자원가치는 자원, 환경 물질의 특정한 구조 및 농도를 구성하는데 필요한 ‘일’로 정의되기 때문에 열역학 방법은 물리적 특성이 다른 광물자원을 “공동 화폐”인 에너지 단위(joule)로 통일할 수 있는 기능을 가진다. 따라서 열역학적인 평가방법은 광물자원을 포괄적으로 통합된 단일평가를 행하는 수단이 될 수 있으므로 최근에 산업, 환경, 생물자원 및 광물자원을 평가에 있어서 보편적이고 투명한 열역학 방법을 사용될 수 있다.

열역학적인 방법 중에서 엑서지는 이질적인 에너지와 유형 자산을 모으는 기능을 가지며, 분석은 통화 정책에 지배를 받지 않으므로 객관적인 정보를 제공할 수 있다. 따라서 열역학적인 방법에 따른 개념분석에 있어서 좀 더 객관성을 유지할 수 있고 자원 정보량을 동일 시스템으로 동화시킬 수 있는 엑서지 방법을 자원평가 및 정책개발을 위하여 국내에서도 활용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

사 사

이 글은 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 수행하고 있는 교육과학기술부의 과학기술진흥기금 출연사업인 고정력 과학기술인을 활용한 “지원사업(ReSEAT Program)”의 일부이다. 심사과정에서 미비한 점을 꼼꼼하게 지적하고 조언을 하여 준 심사위원님들에게 깊이 감사사를 드린다.

참고문헌

- Bastianoni, S., Campbell, D., Susani, L. and Tiezzi, E., 2005, “The solar transformity of oil and petroleum natural gas,” *Ecological Modelling*, Vol. 186, Issue 2, pp. 212-220.
- Bastianoni, S., Facchini, A., Susani, L. and Tiezzi, E., 2007, “Emergy as a function of exergy,” *Energy*, Vol. 32, issue 7, pp. 1158-1162.
- Chapman, P.F. and Roberts, F., 1983, “Metal Resources and Energy,” Butterworth Scientific, Boring Green, p. 238.
- Chen, B. and Chen, G. Q., 2006, “Exergy analysis for resource conversion of the Chinese Society 1993 under the material product system,” *Energy*, Vol. 31, issues 8-9, pp. 1115-1150.
- Göran, W., 1977, “Exergy - a Useful Concept within Resource Accounting,” report no. 77-42, Institute of Theoretical Physics, Göteborg.
- Göran, W., 1990, “Exergy and sustainable Development (Preliminary Draft),” International Exergy Institute, Mölndal, Sweden, pp.1-36., <http://www.exergy.se>.
- Göran, F. and Per, Ö., 1997, “Exergies of Natural resources in Life-Cycle assessment and other Application,” *Energy*, Vol. 22, No.9, pp. 923-931.
- Göran, W. and Mei, G., 2001, “On exergy and sustainable development-Part 1: Conditions and concepts,” *Exergy Int. J.*, Vol. 1, No. 3, pp. 128-145.
- Ivar S. Ertesvåg., 2001, “Society exergy analysis: a comparison of different societies,” *Energy*, Vol. 26, issue 3, pp. 253-270.
- Jang, H.S., 2007, “Study on the Application of Emergy Analysis to Environmental Management Accounting,” Ph. D. Thesis, Keimyung University, Daegu.
- Juan, LIU., Toru, M. and Yonghai, XUE., 2008, *Comparison of Emergy Analysis Method with Ecological footprint, Exergy, and LCA methods*, Con_Account 2008, Urban metabolism: measuring the ecological city, pp. 1-12.
- Ko, E.M., Choi, S.G., Kim, C.S., 2008, “Evaluation system for overseas mineral resources development feasibility study,” *Minerals and Industry*, Vol. 21, No. 1, pp. 27-38.
- Odum, H.T., 1971, *Environment, Power and Society*, John Wiley, New York, p. 336.
- Odum, H.T., 1973, “Energy, ecology and economics,” *Royal Swedish Academy of Science, AMBIO*, Vol. 2, No. 2, pp. 220-227.
- Odum, H.T., 1982, “Pulsing, Power and Hierarchy,” in *Energetics and Systems*, ed. by W.J. Mitsch, R.K., pp. 33-59.
- Odum, H. T., 1983, “Maximum power and efficiency: a rebuttal,” *Ecological Modelling*, Vol. 20, pp. 71-82.
- Odum, H. T., 1996, *Environmental Accounting, Emergy and Decision Making*, John Wiley, New York, p. 370.
- Park, M.H., Kim, J.J., Yanzi, C. and Kim, C., 1999, “Exergy Analysis of a Coal Fired Power Plant by ASPEN PLUS,” *HWAHAK*, Vol. 37, No. 5, pp. 752-758.
- Thomas Veatch Long, II, 1978, “Energy analysis and economics,” *Resources and Energy*, IFIAS, Vol. 1, pp.151-204.
- Valero, A., Botero, E. and Valero, D.A., 2005, “Exergy accounting of natural resources. Exergy, Energy System Analysis, and Optimization,” from *Encyclopedia of Life Support Systems(EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO Eolss Publishers, Oxford, UK; Online encyclopedia., <http://www.eolss.net>.
- Valero, A., Valero, A. and Arauzo, I., 2008, “Evolution of the decrease in mineral exergy through the 20th century. The

- case of copper in the US,” *Energy*, Vol. 33, Issue 2, pp. 107-115.
- Valero, A., Valero, A. and Martinez, A., 2010, “Inventory of the exergy resources on earth including its mineral capital,” *Energy*, Vol. 35, issue 2, pp. 989-995.
- Valero, A. and Valero A., 2010, “Exergeocology: A thermodynamic approach for accounting the Earth's minweal capital. The case of bauxite-aluminium and limestone-lime chains,” *Energy*, Vol. 35, Issue 1, pp. 229-238.
- Valero, D. A., 2008, Exergy Evolution of the mineral capital on Earth, Ph.D. Thesis, University of Zaragoza, Spain.
- Wesley, W. I., 2011, “Uncertainty characterization for emergy values,” *Ecological Modelling*, Vol. 221, Issue 3, pp. 445-452.
- Westman, W.E., 1977, “How much are nature's services worth?,” *Science*, 197, pp. 960-964.
- Zafer, U. and Arif, H., 2008, “Energetic and exergetic assessment of the industrial Sector at varying dead (reference) state temperatures: A review with an illusive example,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, Issue 5, pp. 1277-1301
- Zhang, B. and Chen, G. Q., 2010, “Physical Sustainability assessment for the China Society: Exergy-based system account for resources use and Environmental emissions,” *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 14, Issue 6, pp. 1527-1545.
- Zornitza, K., 2010, “Application of the exergy method to environmental impact estimation: The ammonium nitrate production as a case study,” *Energy*, Vol. 35, Issue 8, pp. 3221-3229.
- Wikipedia, 2004. “Emergy,” “Introduction to Earthscience,” *The Korean Earth Science Society (KESS)*, p. 818, 2012. 06.11, <http://en.Wikipedia.org>.

조진동

1967 인하공과 대학교 광산공학과 졸업
1983 인하대학교대학원 공학박사(자원공학)
1971년~2004년 한국지질자원연구원 근무

현재 한국지질자원연구원 명예연구원 및 한국기술정보연구원
ReSEAT 프로그램 전문연구원
(E-mail: jdcho@reseat.re.kr)

김종현

2010년 ~ 현재 한국과학기술정보연구원
선임연구원

현재 한국과학기술정보연구원 선임연구원
(E-mail: heon93@kisti.re.kr)