

진공열전달기술에 의한 해수의 종합자원화에 관한 연구

소예덕¹ · 문수범[†] · 김경근² · 최부홍³ · 이서연⁴

(Received May 19, 2015 ; Revised June 12, 2015 ; Accepted July 22, 2015)

A study on the comprehensive resources utilization of seawater by the vacuum heat transfer technology

Yude Shao¹ · Soo-Beom Mun[†] · Kyung-geun Kim² · Bu-Hong Choi³ · Seo-Yeon Lee⁴

요약: 바닷물을 농축하면 농도가 높아짐에 따라서 뿔과 산화철, 석고, 소금, 미네랄, 용존광물이 순차적으로 석출된다. 이 논문에서는 이러한 해수의 물리적 특성을 이용하여, 해수 중의 용존성분들을 순차적으로 석출하여 회수할 수 있는 경제성 있는 새로운 진공열전달기술을 제안하였다. 진공상태하의 열전달특성에 관한 실험적 결과를 토대로 해수 종합자원화를 위한 공정을 다음과 같이 4-공정으로 구분하였다. 즉, (1)소금이 석출되기 시작하는 포화농도까지의 농축하는 단계, (2)소금의 결정화가 이루어지는 단계, (3)미네랄이 석출되는 단계, (4)잔류 용존금속 액체의 4-공정이다.

주제어: 해수, 담수, 진공열전달, 식용소금, 용존광물

Abstract: Mud, iron oxide, plaster, salt, minerals, and dissolved metals are sequentially deposited in accordance with the increasing concentration of seawater. In this paper, by using the physical characteristics of the seawater, we propose a new vacuum heat-transfer technology to subsequently obtain the proportion of the dissolved components in a cost-effective manner. Based on the vacuum heat-transfer characteristics of seawater, we comprehensively divide the seawater resource processes into the following four processes: (1) the salt concentration process to the saturation concentration, (2) crystallization process for salt formation, (3) mineral precipitation, and (4) remaining of dissolved metals.

Keywords: Seawater, Fresh water, Vacuum heat-transfer technology, Table salt, Dissolved metals

1. 서론

해수에는, Table 1과 같이, 지구상의 거의 모든 성분들이 이온상태로 존재하는 무한자원의 보고로서, 담수, 소금, 리튬, 우라늄 등 특정물질만을 얻는 방법으로 활용되고 있다 [1]. 해수를 이용하는 가장 보편화 된 담수생산의 경우, 폐열을 이용하여 해수를 진공 증발시키거나[2], 역삼투막식 담수설비를 이용하여[3] 담수를 생산하지만, 에너지비용과 해수의 강한 부식성에 따른 재료비 상승으로 경제성을 확보하기가 쉽지 않다.

해수를 원료로 소금을 생산하는 경우도 천일염과 호수염을 제외하면 경제성을 확보하기가 쉽지 않다.

해수에는 첨단산업에 필요한 우라늄, 리튬, 붕소, 희토류와 같은 용존 금속 성분들이 존재하는데, 이들을 채취하기 위해서는 수분을 거의 제거하여 농도를 충분히 높인 후에

특정 용재로 특정 금속성분을 녹여 추출하는 방법이 일반적으로 사용된다[4]. 희토류는 첨단전자산업에 필요한 희귀물질로 세계적으로 생산지가 편중되기 때문에, 한국은 전량 수입에 의존하는데 해수에는, Table 2에서 보는 바와 같이, 대부분의 희토류 성분이 용존 되어 있다[5].

수입 천일염 가격은 0.1원/그램, 국산 식용 천일염은 2원/그램, 5년 숙성하여 간수를 제거한 고품질 천일염은 10원/그램, 세계적인 최고품질 식탁염은 2,000원/그램으로 소금은 품질에 따라 가격의 변동폭이 매우 크므로 고품질의 식탁염 생산은 산업적으로 매우 중요하다[6]. 소금의 품질은 색과 맛은 물론 수은, 납, 카드뮴 등 인체에 매우 해로운 물질의 함유 정도 등에 따라서 결정된다[7].

해수 중에서 평균적으로 96.5%의 무게를 차지하는 담수는 톤당 판매가격이 1,200원 정도인데, 강물을 이용하여 수돗물을

[†]Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4519-7305>): Training ship of Kunsan National University, 588 Daehak-ro, Gunsan, Jeonbuk 573-701, Korea, E-mail: sbmoon72@kunsan.ac.kr, Tel: 063-469-1727

1 Graduate School of Korea Maritime and Ocean University, E-mail: shaoyude@naver.com, Tel: 051-410-4261

2 Department of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: kimkg@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4261

3 Department of Maritime Safety Administrations, Mokpo National Maritime University, E-mail: bhchoi@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7227

4 San-Ya co., E-mail: chwa5@naver.com, Tel: 051-324- 1385

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.

Table 1: Dissolved element concentration in sea water

원소명	원소기호	농도 (mg/L)	원소명	원소기호	농도 (mg/L)	원소명	원소기호	농도 (mg/L)	원소명	원소기호	농도 (mg/L)
칼슘	Ca	400	우라늄	U	0.003	크롬	Cr	5.0x10 ⁻⁵	가돌리륨	Gd	24.0x10 ⁻⁷
칼륨	K	380	구리	Cu	0.003	스칸듐	Sc	4.0x10 ⁻⁵	어븀	Er	24.0x10 ⁻⁷
브롬	Br	65.0	비소	As	0.003	은	Ag	4.0x10 ⁻⁵	이터븀	Yb	20.0x10 ⁻⁷
나트륨	Na	10.5	크립톤	Kr	0.003	납	Pb	3.0x10 ⁻⁵	사마륨	Sm	17.0x10 ⁻⁷
스트론튬	Sr	8.00	바나듐	V	0.002	수은	Hg	3.0x10 ⁻⁵	홀름	Ho	9.0x10 ⁻⁷
붕소	B	4.60	니켈	Ni	0.002	갈륨	Ga	3.0x10 ⁻⁵	베릴륨	Be	6.0x10 ⁻⁷
규소	Si	3.00	망간	Mn	0.002	지르코늄	Zr	2.2x10 ⁻⁵	튴륨	Tm	5.0x10 ⁻⁷
탄소	C	2.80	티타늄	Ti	0.001	비스무스	Bi	1.5x10 ⁻⁵	루테튬	Lu	5.0x10 ⁻⁷
마그네슘	Mg	1.35	주석	Sn	8x10 ⁻⁴	란타넘	La	1.2x10 ⁻⁵	유로퓸	Eu	5.0x10 ⁻⁷
불소	F	1.30	안티몬	Sb	5.0x10 ⁻⁴	탈륨	Tl	1.0x10 ⁻⁵	터븀	Tb	1.0x10 ⁻⁷
리튬	Li	0.17	세슘	Cs	5.0x10 ⁻⁴	니오븀	Nb	1.0x10 ⁻⁵	팔라듐	Pd	0.5x10 ⁻⁷
루비듐	Rb	0.12	셀레늄	Se	4.0x10 ⁻⁴	네오디미움	Nd	0.92x10 ⁻⁵	텔루르	Te	0.1x10 ⁻⁷
인	P	0.07	이트륨	Y	3.0x10 ⁻⁴	하프늄	Hf	0.80x10 ⁻⁵	프로악티늄	Pa	0.02x10 ⁻⁷
요오드	I	0.06	네온	Ne	1.4x10 ⁻⁴	헬륨	He	0.69x10 ⁻⁵	라튬/라돈	Ra	-
바륨	Ba	0.03	카드뮴	Cd	1.1x10 ⁻⁴	세륨	Ce	0.52x10 ⁻⁵	유황(기체)	S	885
인듐	In	0.02	텅스텐	W	1.0x10 ⁻⁴	레늄	Re	0.40x10 ⁻⁵	산소(기체)	O	857
아연	Zn	0.01	코발트	Co	1.0x10 ⁻⁴	금	Au	0.40x10 ⁻⁵	수소(기체)	H	108.
몰리브덴	Mo	0.01	게르마늄	Ge	0.6x10 ⁻⁴	디스프로슘	Dy	0.29x10 ⁻⁵	염소(기체)	Cl	19.0
철	Fe	0.01	크세논	Xe	0.52x10 ⁻⁴	프라시오디뮴	Pr	0.26x10 ⁻⁵	아르곤(기체)	Ar	0.60
알루미늄	Al	0.01	토륨	Th	0.50x10 ⁻⁴	탄탈	Ta	0.25x10 ⁻⁵	질소(기체)	N	0.50

Table 2: Rare-earth metals dissolved in sea water

원소명	원소기호	평균농도 (mg/L)	무게 (gr/10만톤)	용도
이트륨	Y	0.0030	300	형광체, 초전도체
스칸듐	Sc	0.000040	4.00	크리스탈, 세라믹
란타넘	La	0.000012	1.20	광화유리, 섬유, 배터리 촉매제
네오디미움	Nd	0.0000092	0.92	영구자석, 레이저, 콘덴서
세륨	Ce	0.0000052	0.52	자동차 배기가스 촉매제, 영구자석
디스프로슘	Dy	0.0000029	0.29	영구자석
프라시오디뮴	Pr	0.0000026	0.26	영구자석, 레이저, 페인트
가돌리륨	Gd	0.0000024	0.24	형광체, 핵반응제, 영구자석
어븀	Er	0.0000024	0.24	크리스탈 제조, 광화유리, 섬유
이터븀	Yb	0.0000020	0.20	형광물질, 활성화제, 세라믹, 레이저
사마륨	Sm	0.0000017	0.17	영구자석
홀름	Ho	0.0000009	0.09	크리스탈, 레이저
튴륨	Tm	0.0000005	0.05	크리스탈, 레이저
루테튬	Lu	0.0000005	0.05	크리스탈, 레이저
유로퓸	Eu	0.0000005	0.05	형광체, 원자로 제어제
터븀	Tb	0.0000001	0.01	형광램프

생산할 경우 톤당 생산원가는 500원 전후, 역삼 투막식에 의하여 담수를 생산할 경우 생산원가는 1,000-1,500원으

로 충분한 경제성을 확보하는 것이 매우어렵다[8]. Figure 1은 해수 중에 포함된 모든 용존 자원을 종합적으로 활용하는 경우를 상정하여, 농도 3.5%의 일반해수가 갖는 경제적 가치를 그림으로 정리한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 해수 1,000톤이 갖는 경제적 가치는 물을 1,000원/톤, 소금을 2원/그램, 주요광물 가격을 한국 광물자원공사의 수입가격에 따를 경우 약 1.3억원 이상이 된다. 1,000톤의 해수 증발에 필요한 에너지비용은 G.O.R이 5.0인 다단 농축시스템을 적용할 경우 1,300만원 전후로 추산되므로, 해수가 갖는 모든 성분을 활용하는 종합 자원화를 한다면 충분한 경제성을 확보한 고부가가치산업이 될 수 있음을 알 수 있다[8].

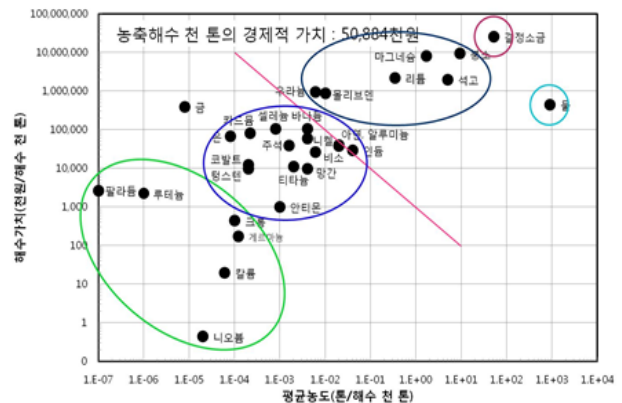


Figure 1: Economic value estimation of the dissolved resources in sea water

해수의 종합자원화를 위해서는 대량의 수분을 짧은 시간에 증발시켜 액화시킬 수 있는 에너지절약형 농축장치와 석출된 물질들을 고효율로 건조할 수 있는 건조장치의 개발이 선행되어야 한다[1]. 이러한 시스템은 선박, 화력발전소 등에서 발생하는 85℃ 이하의 폐열을 이용하는 경우를 상정하면, 수분을 85℃ 이하에서 증발시킬 수 있는 진공농축장치, 진공건조장치, 전체 시스템을 진공압력으로 유지하기 위한 진공장치 및 결정소금 생산을 위한 결정화장치의 개발이 핵심요소기술이 된다[1].

먼저 진공농축장치는 에너지효율을 극대화하기 위하여 통상 3~4단으로 구성되는데, 증기 이젝터(Steam ejector)에 의하여 발생된 저온저압 증기를 흡입 열압축(Thermo-compressing)하여 담수를 생산하면서 발생하는 상대적 고온증기를 다음단의 증발열원으로 재사용하는 시스템이다. 이에 관하여는 김경근, 최두열 등에 의한 일련의 산업화 연구 성과[9]-[12]가 있으며, 이 기술들은 다단 증발식 담수화설비에 관하여 세계 최고수준의 시공능력을 보유한 D중공업의 열병합 발전소 발생 폐열에 의한 대량 담수생산설비에 적용되고 있다.

산업용 건조기술에는 열풍건조, 냉풍건조, 동결건조, 적외선건조, 진공건조기술 등이 있는데, 에너지효율, 건조품질, 운전의 수월성 등을 고려하면 진공건조기술이 가장 기술적으로 우월하다는 것이 학술적으로 알려져 있다. 1회에 수백 그램을 건조할 수 있는 실험실용의 소형 진공건조기는 개발되어 있으나, 대량을 안정적으로 산업화 생산이 가능한 증대용량 진공건조장치는 세계적으로 개발되어 있지 않았는데, 그 이유는 진공이므로 건조기 내부에 공기가 거의 없어 수분의 증발에 필요한 막대한 열을 전달하기 위한 메커니즘이 불확실 하여 열전달효율이 낮아져 결국 건조시간이 길어지기 쉽기 때문이다. 이에 대하여 최순열, 문수범 등[13][14]은 진공건조기 내부를 -700mmHg 전후로 유지하여 수분이 15~20℃에 증발할 수 있는 소위 저온진공건조기(Low temperature vacuum dryer)의 실용화 개발에 성공하였으며, 김경근, 김경석 등[15]-[17]은 고단백질 최고가의 수산물인 해삼을 종래와 같이 염장(소금 사용)을 하지 않고 건조하는 “순수 무염 건해삼”의 건조생산 공정기술을 개발하였다.

본 연구의 목적은 가장 고가인 식용 결정소금의 생산에 중점을 두되, 해수 중에 포함된 모든 성분들을 활용할 수 있는 해수의 종합자원화가 연구의 목표로, 해수자원화 공정을 (1)소금이 석출되기 시작하는 포화농도까지의 농축하는 단계, (2)소금의 결정화가 이루어지는 단계, (3)미네랄이 석출되는 단계, (4)잔류 용존 금속 회수단계의 4-공정으로 나누어 각 공정에서의 진공열전달특성(Vacuum Heat transfer characteristics)에 관하여 연구하였으며, 실험은 기보유종인 실험실용 소형 저온진공건조장치(STVD-50)를 이용하여 수행하였다.

2. 소금산업 현황과 해수의 물성

한국의 소금 연간 총소비량은 330만톤 정도로 이중 약 80%에 해당하는 270만톤(약 2억불)을 수입하고 있으며, 80%에 해당하는 270만톤은 공업용으로, 나머지 20%가 식용으로 사용되고 있는데 식용소금 조차도 약 절반만이 국내산이고, 나머지는 중국, 호주 등에서 수입되고 있다[6]. 공업용 소금은 주로 겨울철 제설제와 화학공업에서 촉매제 등으로 사용된다.

Table 3에는 전 세계 상위 20개국의 연간 소금 생산량을 나타내는데 미국과 중국이 연간 4,000여만톤, 한국이 30만톤 정도를 생산하며, 이 표에서 보는 바와 같이 소금의 대량 생산국은 미국, 독일, 영국, 프랑스, 네델란드, 이태리와 같은 공업선진국임을 알 수 있다. 현재 전 세계적으로는 연간 2억3천만톤 정도의 소금이 생산 소비되며 인구증가와 공업화로 소금의 소비량은 꾸준히 증가하고 있는 실정이다[1].

Table 3: Ranking of salt production nations in the world

단위 : 천톤, %

순위	Nation	Annual Production (2002~2006)	Worldwide Market Share(%)
1	USA	44,305	18.8
2	China	40,816	17.4
3	German	17,726	7.5
4	India	16,589	7.1
5	Canada	13,525	5.8
6	Australia	11,284	4.8
7	Mexico	8,508	3.6
8	France	7,685	3.3
9	Brazil	6,784	2.9
10	Netherlands	5,941	2.5
11	UK	5,800	2.5
12	Chile	5,345	2.3
13	Spain	3,905	1.7
14	Poland	3,872	1.6
15	Ukraine	3,842	1.6
16	Italy	3,588	1.5
17	Russia	2,800	1.2
18	Rumania	2,383	1.0
19	Turkey	2,015	0.9
20	Bulgaria	1,876	0.8
Sub-total		208,589	88.8
28	Japan	1,239	0.5
46	KOREA	292	0.1
기타 국가		25,052	10.7
Worldwide Total		235,172	100

Figure 2는 한국의 소금의 수출입동향을 나타내는데, 과거의 소금 수출국에서 만성적인 소금 수입국이 되어있음을 알 수 있으며, 향후 소금산업의 활성화는 고용창출과 농어촌경제의 활성화 측면에서 매우 중요하기도 하다. 소금은 인체 내에서 소화된 영양분과 결합하여 삼투압현상으로 혈

액속으로 침투하여 영양분을 이송하는 역할을 하므로, 소금 품질의 양부는 인체의 건강에 매우 중요하다. 더욱이 한국의 식문화를 대표하는 식품인 김치, 젓갈, 고추장, 된장, 간장은 발효식품으로 부패 방지를 위한 소금의 역할과 발효 속도에 맞추어 소금이 서서히 녹아야 하므로 결정소금은 식품의 발효공정에 매우 중요하다.

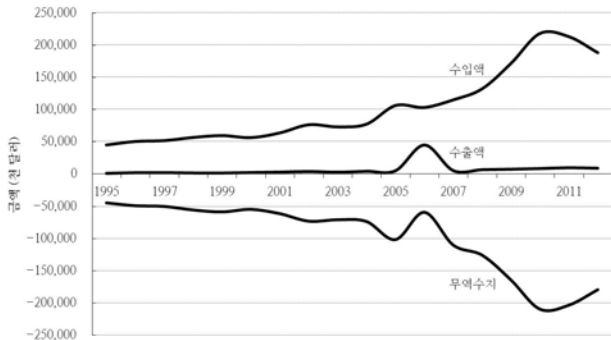


Figure 2: Export and import of the salt in Korea

‘H소금(주)’에서는 이온교환막을 통하여 중금속이 완벽히 제거된 염수를 만들어 진공증발로 소금입자가 생기면 원심분리 후, 열풍건조로 소금을 제조하는데, 소금결정의 입자크기가 작은 가루소금 형태의 정제염을 생산한다. 한식문화에 필요한 적정 입자크기의 결정소금이 바로 천일염인데, 과거 한국의 천일염은 함경도, 서해안과 신안에서 생산되었으며, 현재는 주로 신안에서 대부분 생산된다. 최근 천일염전은 자동차 매연과 농약 등에 의한 오염과 인건비의 상승

에 의한 경제성 확보 어려움에 봉착해 있다. 또 한가지의 기술적 문제는 결정소금에 다량의 간수가 포함되므로, 공기 중의 수분과 간수가 결합하여 흘러내리도록 3년 정도 장기간 숙성을 하여야 하므로 자금의 유동성이 좋지 못하고, Table 4에 보이는 바와 같이 인체에 치명적인 비소, 납, 카드뮴, 수은과 같은 유해성분이 불가불 포함되어, 법적으로도 이 표와 같이 유해성분의 함유가 허용한다는 점이다.

Table 4: Quality basis of the Korean table salts

	항목	천일염	재제염	용융염	정제염	기타염	가공염
일반성분	염화나트륨 (%)	70.0 이상	88.0 이상	88.0 이상	95.0 이상	88.0 이상	35.0 이상
	총 염소 (%)	40.0 이상	54.0 이상	50.0 이상	58.0 이상	54.0 이상	20.0 이상
	수분 (%)	15.0 이하	9.0 이하	4.0 이하	4.0 이하	9.0 이하	5.5 이하
	불용분 (%)	0.15 이하	0.02 이하	3.0 이하	0.02 이하	0.15 이하	—
	사분 (%)	0.2 이하	—	0.1 이하	—	—	—
유해성분	황산이온 (%)	5.0 이하	5.0 이하	5.0 이하	0.4 이하	5.0 이하	5.0 이하
	비소 (mg/kg)	0.5 이하	0.5 이하	0.5 이하	0.5 이하	0.5 이하	0.5 이하
	납 (mg/kg)	2.0 이하	2.0 이하	2.0 이하	2.0 이하	2.0 이하	2.0 이하
	카드뮴 (mg/kg)	0.5 이하	0.5 이하	0.5 이하	0.5 이하	0.5 이하	0.5 이하
	수은 (mg/kg)	0.1 이하	0.1 이하	0.1 이하	0.1 이하	0.1 이하	0.1 이하
	페로시인화 이온 (g/kg)	불검출	0.01 이하	0.01 이하	0.01 이하	0.01 이하	0.01 이하

Table 5: Comparisons of the table salt quality with the world-best salt

	소금 종류	수분 H ₂ O (%)	석고 Fe (mg/kg)	석고 Ca (mg/kg)	소금 NaCl (%)	간수 Mg (mg/kg)	간수 K (mg/kg)	유해성분			
								비소, As (mg/kg)	납, Pb (mg/kg)	카드뮴, Cd (mg/kg)	수은, Hg (mg/kg)
분석치	본질염 부산항 해수	4.52	-	-	94.21	-	-	불검출	불검출	불검출	불검출
범규	KOREA, 천일염 기준	8.00	-	-	80.00	-	-	0.500	2.000	0.500	0.100
범규	CHINA, 천일염 기준	5.88	58.34	990.0	88.74	4,240	936.0	0.000	0.057	0.008	0.000
분석치	신안 천일염	9.04	24.48	1,296	81.75	9,645	3,465	0.000	0.142	0.005	0.000
World Best-10 Table Salt	이태리, 코마치오 천일염	4.43	80.57	1,406	90.00	1,576	613.0	0.001	0.002	불검출	불검출
	이태리, 사보이아 일염	1.90	25.19	1,518	92.00	190.0	139.0	불검출	0.018	0.001	불검출
	이태리, 사보이아 가공염	0.18	19.64	928.0	99.00	485.0	334.0	불검출	0.017	0.001	불검출
	이태리, CIS 가공염	0.25	23.05	655.0	97.00	519.0	288.0	불검출	0.029	0.010	0.001
	이태리, 이탈리아 일염	0.03	17.26	152.0	100.0	17.00	44.00	불검출	0.029	0.014	불검출
	사이프러스, 피치오 천일염	0.21	18.03	2,311	92.00	454.0	252.0	불검출	0.016	불검출	불검출
	슬로베니아, 세코벨즈스케	0.89	35.49	1,967	94.57	1,507	579.0	0.001	0.030	불검출	불검출
	프랑스, 카마르그	0.30	19.28	1,072	96.83	539.0	549.0	0.001	0.010	0.001	불검출
	프랑스, 게랑드 소금	3.99	35.22	1,578	92.49	4,447	1,322	불검출	0.250	불검출	불검출
	프랑스, 게랑드 천일염	4.92	94.09	3,481	89.57	3,533	936.0	불검출	0.253	불검출	불검출
위 평균		1.71	36.78	1,507	94.40	1,327	505.6	0.000	0.065	0.003	0.000

Table 6: Extraction components from seawater according to concentration

Volume (CC)	Density	Weight (gr)	Salinity (%)	Extraction Components (mg/kg)								
				Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	CaSO ₄	NaCl	MgSO ₄	MgCl ₂	NaBr	KCl	Metals
100	1.0245	1,025.0	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54.3	1.0531	571.5	6.4	0.0008	0.0619	-	-	-	-	-	-	-
37.1	1.0748	399.2	7.5	0.0004	0.0210	-	-	-	-	-	-	-
24.3	1.0958	265.9	13.2	-	0.0018	-	-	-	-	-	-	-
19.8	1.1238	217.0	13.8	-	0.0082	0.3353	-	-	-	-	-	-
15.1	1.1150	174.0	17.2	-	0.0087	0.4308	-	0.0078	0.0168	-	-	-
11.9	1.1864	140.6	21.3	-	0.0127	0.2486	-	0.0053	0.0141	-	-	-
10.0	1.2176	121.8	19.8	-	-	0.0751	0.0839	0.0050	0.0181	-	-	-
8.4	1.2219	102.2	22.2	-	-	0.0753	4.8465	0.0710	0.1189	-	0.0034	-
6.6	1.2253	81.0	27.0	-	-	0.0550	5.1887	0.0379	0.0836	-	0.0173	-
4.4	1.2358	54.9	35.3	-	-	0.0483	6.2577	0.0712	0.1227	0.0089	0.0221	-
2.6	1.2512	32.5	48.0	-	-	0.0396	5.6609	0.1251	0.2254	0.0058	0.0513	-
1.6	1.2924	20.6	59.3	-	-	0.0116	2.6256	0.0837	0.1975	0.0068	0.0406	-
0.8	1.3056	10.4	74.3	-	-	-	1.0966	1.1784	0.4221	0.0268	0.2417	-
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4800

Table 5에 태국에서 개최된 제1회 세계 소금품질대회에서 선발된 'World best-10' 소금의 유해성분의 함유정도, 한국과 중국의 천일염 품질기준을 나타내었다. 이 표에서 보는 바와 같이 대부분의 좋은 식탁염은 이태리와 프랑스에서 생산되는 천일염으로 유해성분이 거의 검출되지 않고 있음을 알 수 있다. 그러므로 유해성분이 거의 전혀 포함되지 않는 결성소금을 생산하는 것은 국민의 건강과 한식 문화를 위하여 매우 중요하며, 해수 자체가 무한자원이므로 고품질 식탁염의 수출산업화를 위한 신기술 개발은 산업적으로도 매우 가치가 있다고 사료된다.

Table 6에는 일반해수 100CC에 열을 가하여 수분을 증발시키면 모액(액체)의 체적이 감소할 경우, 밀도, 염도 및 이에 따른 석출물량의 변화를 나타낸다. 이 표에서 보는 바와 해수의 농도를 높여가면 체적이 약 54%로 줄어들면 해수로부터 석출이 개시되어 처음에는 뽕, 산화철, 석고성분(CaCO₃, CaSO₄)이 석출된다. 다음으로 포화농도상태에 도달하면 소금이 석출되기 시작한다. 포화상태를 지나면 결정소금이 본격적으로 생성되는데 소금(NaCl)과 일부의 석고성분(CaSO₄)과 미네랄성분(MgSO₄, MgCl₂, NaBr, KCl)이 동시에 석출된다.

소금 석출이 거의 끝나면 모액량은 1% 정도가 되어 간수성분을 추출할 수 있으며, 0.8%까지 농축하면 미네랄성분의 석출도 끝나고, 용존금속액만이 잔류하게 된다. 참고로 동양권에서 간수는 두부의 응고제로 사용되어 자연스럽게 섭취하게 되는데, 천연미네랄은 항암과 항균성이 좋은 인체에 필수 불가결한 성분이다. 그러나 과거의 전통적인 천일염 제조기술에 의존할 경우 간수에는 다량의 유해금속을 포함할 가능성이 크므로 주의를 요한다.

Table 6로부터 구한 모액의 염도와 체적율(VR)의 관계를 Figure 3에, 염도와 비중 체적율의 관계를 Figure 4에 각각 나타낸다.

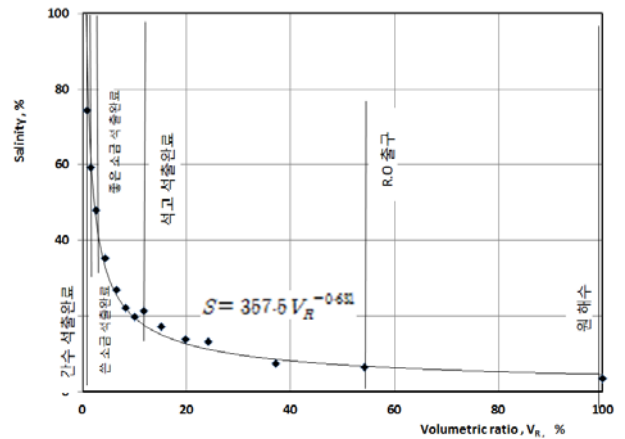


Figure 3: Relationship between salinity and volumetric ratio

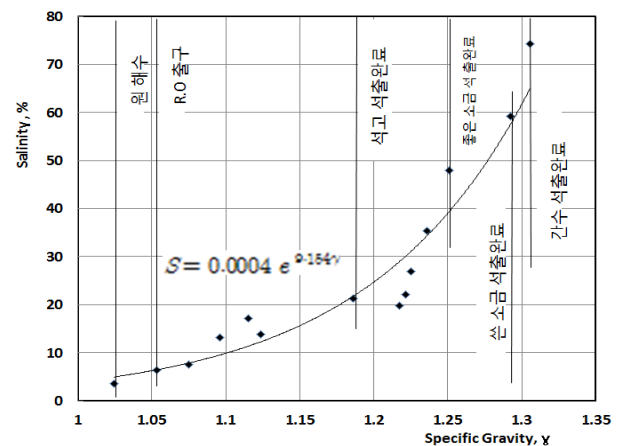


Figure 4: Relationship between salinity and specific gravity

이들 그림에서 보는 과와 같이 해수의 농축과정에서는 석출현상이 발생하므로 모액의 염도와 비중은 불규칙하게 변함을 알 수 있다. 최소자승법을 이용하여 평균적인 값에

대하여 염도(S)와 체적율(VR)의 관계를 식 (1)로, 염도(S)와 비중(γ) 관계를 식 (2)와 같이 구하였다.

$$S = 357.5 V_R^{-0.631} \quad (1)$$

$$S = 0.0004 e^{9.154\gamma} \quad (2)$$

이상의 해수의 염도증가에 따른 물성변화 특성과 실험적 결과를 토대로 해수의 종합자원화 공정을 Table 7과 같이 5-단계로 나눌 수 있었다. ‘Process=0’은 염도 3.5%의 일반 해수중의 수분 45.7%를 증발시키면 석고성분의 석출 직전까지로 역삼투막식 담수화 설비에서 담수 45%가 생산되는 한계이다. ‘Process-1’은 소금결정이 생성되기 시작하기 직전까지로 모액이 포화상태(농도 27%)가 되며, 이 과정에서 42.3%의 수분이 추가로 증발한다. 그러므로 ‘Process=0’와 ‘Process-1’에서 도합 88%의 수분이 증발하는 것으로 이 과정에서 대부분의 담수가 얻어지며, 소금 등의 잔류물은 12%밖에 안된다. 본 실험에서는 ‘Process=0’와 ‘Process-1’이 구분 없이 연속적으로 수행되었다.

‘Process-2’는 결정소금의 본격적으로 석출되는 단계로, 모액이 정지 상태로 있어야 소금결정이 잘 성장할 수 있으며, 결정의 입자크기는 기본적으로 모액의 높이에 의하여 결정된다. ‘Process-2’에서는 추가로 7.6%의 담수가 얻어지며, 결정소금의 하부에 약간의 모액만이 잔류하여 ‘Process-3’에 진입한다.

‘Process-3’의 미네랄 석출과정은 비교적 서서히 진행되는 데, 미네랄의 석출이 완료되면, 용존 금속 모액만이 남게

되며, ‘Process-4’에서는 잔류하는 용존 금속과 수분으로 계속 농축하면 젖은 상태의 용존 금속에서 건조상태의 금속 분말을 얻게 된다.

‘Process-1’에서 얻어진 젖은 상태의 석고, ‘Process-2’에서 추출된 결정소금, ‘Process-3’에서 얻어진 젖은 상태의 미네랄과 ‘Process-4’에서 얻어진 젖은 상태의 추출물에는 약 30%의 수분이 함유되어 있는데 이를 저온진공건조하면 고품질의 석고, 식용 결정소금, 미네랄, 용존 금속을 얻을 수 있다. 이상과 같은 해수의 농도에 따른 물성치 변화특성에 착안한 새로운 해수의 종합자원화 공정을 Figure 5에 나타내었다.

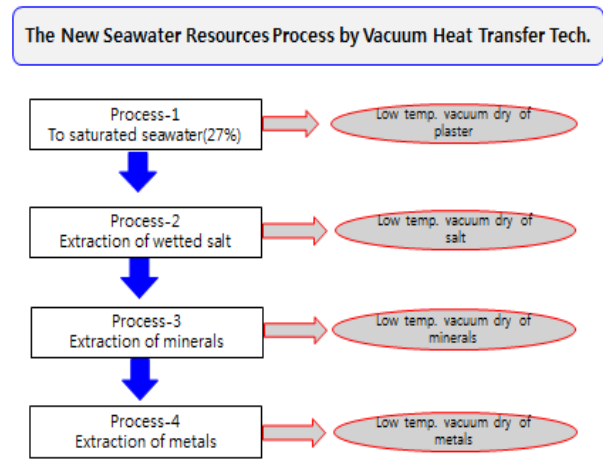


Figure 5: New thermal modes for the comprehensive resources of seawater

Table 7: New resource recovery process for the s.w resource extraction

Component Step	Salinity	H ₂ O (cc)	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	CaSO ₄	NaCl	MgSO ₄	MgCl ₂	NaBr	KCl
Process-0 Vaporization	W (gr)	(45.73)	-	-	-	-	-	-	-	-
	W% (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Process-1 Concentration	6.4	0.00	0.00008	0.00619	-	-	-	-	-	-
	7.5	17.12	0.00004	0.00210	-	-	-	-	-	-
	13.2	12.87	-	0.00018	-	-	-	-	-	-
	13.8	4.43	-	0.00082	0.03353	-	-	-	-	-
	17.2	4.63	-	0.00087	0.04308	-	0.00078	0.00168	-	-
	21.3	3.25	-	0.00127	0.02486	-	0.00053	0.00141	-	-
	Total(gr)	(42.30)	0.00012	0.01143	0.10147	0	0.00131	0.00309	0	0
W% (%)	-	0.1	9.7	86.4	0	1.1	2.63	0	0	
Process-2 Crystallization	19.8	1.83	-	-	0.00751	0.00839	0.00050	0.00181	-	-
	22.2	1.14	-	-	0.00753	0.48465	0.00710	0.01189	-	0.00034
	27.0	1.20	-	-	0.00550	0.51887	0.00379	0.00836	-	0.00173
	35.3	1.52	-	-	0.00483	0.62577	0.00712	0.01227	0.00089	0.00221
	48.0	1.23	-	-	0.00396	0.56609	0.01251	0.02254	0.00058	0.00513
	59.3	0.71	-	-	0.00116	0.26256	0.00837	0.01975	0.00068	0.00406
	Total(gr)	(7.63)	0	0	0.03049	2.46633	0.03939	0.07662	0.00215	0.01347
W% (%)	-	0	0	1.2	93.8	1.5	2.9	0.1	0.5	
Process-3 Mineral Extraction	74.3	-	-	-	-	0.10966	0.11784	0.04221	0.00268	0.02417
	Total(gr)	(0.52)	0	0	0	0.10966	0.11784	0.04221	0.00268	0.02417
	W% (%)	-	0	0	0	29.7	39.7	14.2	0.9	8.2
Process-4 Dissolved Metal	remained	-	(Gas)	(Metal)	-	-	-	-	-	-
	W (gr)	-	0.19	0.48	-	-	-	-	-	-

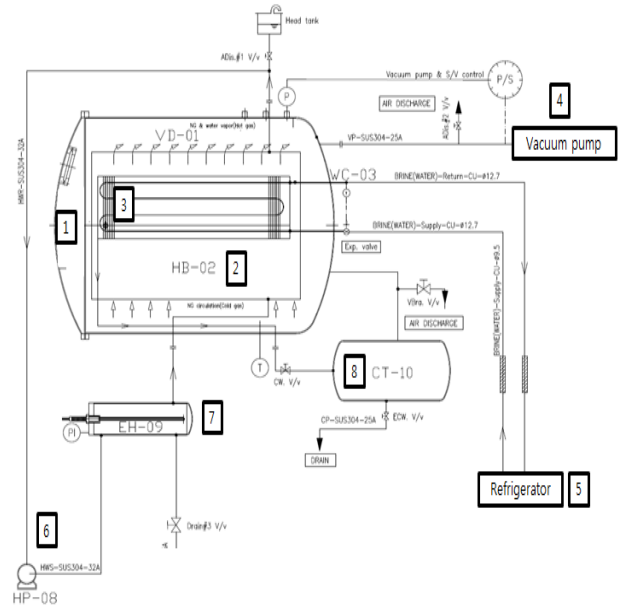
3. 실험결과

3.1 실험방법

해수의 종합자원화를 위한 실제 플랜트에서는 수분의 약 87.0%가 증발하는 포화상태까지의 포화농축과정은 처리속도의 증대 및 에너지효율 때문에 통상 3-4단의 다단 농축장치를 채용해야 한다[2]. 그러나 본 실험에서는 정밀실험이 목적이므로 저온진공건조장치(STVD-50)만에 의하여 해수의 농축, 건조실험을 수행하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 실험장치는 해수를 농축 또는 건조하기 위한 진공용기 본체(Vacuum chamber), 건조판을 올려놓는 가열수가 흐르는 4각형 Water channel의 가열상자(Heating transfer box), 증발된 수증기를 재응축시키기 위한 응축기(Vapor condenser), 본체의 내부를 소정의 진공압력으로 유지하기 위한 진공펌프(Vacuum pump), 응축기 구동용 냉동장치(Refrigerator), 가열상자 내에 가열수를 순환시키기 위한 순환펌프(Water circulation pump), 가열수 가열을 위한 전기히터(Electric heater), 피건조물의 건조중 얻어지는 수분(담수)을 재응축하기 위한 응축수탱크(Phytoncide water tank)로 구성된다.

해수의 농축, 건조와 추출물의 진공건조열전달특성을 규명하는 과정에서 중요한 것은 가열온도와 모액의 유량 변화에 따른 진공열전달특성이 어떻게 변화할 것인가 하는 점이다. 따라서 본 실험에서의 파라미터는 가열온도와 건조판 위의 해수초기 무게로서 먼저, 가열온도는 75, 65, 55°C의 3가지 경우를 택하였고, 1판의 가열판에 탑재하는 해수의 초기무게는 5.0, 3.5, 2.0 kg을 택하였다. 건조판은 테프론 코팅 알루미늄 건조판으로 크기는 41.5x60.6cm로 면적은 약 0.251m²이다. 따라서 해수의 농축실험 직전 초기무게를 5.0 kg을 탑재하면, 모액의 초기높이는 약 1.95cm가 된다. 실험 중 저온진공건조기 내부의 압력의 작동범위는 -640~680mmHg 범위에서 on-off 작동하므로 본체 내부의 평균 진공압력은 -660mmHg으로 간주할 수 있으며, 이에 상당하는 수증기의 포화온도는 51.57°C, 수분의 증발잠열 $H_{fg} = 568.25 \text{ kca/kg}$ 이다[11][18].

측정은 3시간 간격으로 행해졌는데, 각부의 온도를 측정하여 각각의 열전대 검정식을 이용하여 수정하였으며, 건조판 위의 피 건조물의 무게를 측정하여 3시간 동안의 평균적인 무게 감소와 수분의 증발열량을 측정하여 필요한 열계산을 수행하였다.



- (1) Vacuum chamber
- (2) Heating transfer box
- (3) Vapor condenser
- (4) Vacuum pump
- (5) Refrigerator
- (6) Water circulation pump
- (7) Electric heater
- (8) Phytoncide water tank

Figure 6: Basic arrangement of experimental apparatus

3.2 측정결과

‘Process-1’을 통하여 얻어진 포화상태의 고염도 해수의 농축과정에서는 산화철이 거의 없는 품질 좋은 석고가 침전 석출됨을 확인하였다. 참고로 의료용 석고는 톤당 가격이 30~40만원으로 매우 고가이다. ‘Process-2’에서 얻어지는 소금은, Figure 7을 참조하면, 상부에는 맛이 좋은 소위 꽃소금(Flower salt)이 생성되고, 건조판의 하부에는 규칙적인 배열을 갖는 결정소금이 석출됨을 알 수 있다. ‘Process-3’의 미네랄에는 불가불 약간의 소금이 포함되어 있다.

Figure 8은 가열수 온도를 75°C로 유지하면서 각각의 공정마다 5kg의 모액을 넣고 진공 농축, 건조를 진행하면서 측정된 가열판 표면온도(T_w), 모액의 온도($T_{m,i}$)와, 건조실 내부의 공간온도(T_r)의 측정결과를 나타낸다. 이 실험의 경우 염도 3.5%의 일반 해수의 농축 개시부터 용존광물의 건조까지의 총 실험소요시간은 60시간 정도로서, 모액량이 많은 경우에는 모액의 온도가 상대적으로 낮게 유지

되다가, 소금 석출이 끝나가면 모액의 온도가 상승하여 건조실의 온도와 거의 같아짐을 알 수 있다.

Figure 9에는 일반해수 초기 무게를 5.0, 3.5, 2.0kg을 투입하여 소금 생성의 포화농도인 27%까지 농축하는 과정에서의 염도 증가변화 측정결과를 나타낸다.



Flower salt



Crystal salt

Figure 7: Photograph of wetted flower salt and crystal salt

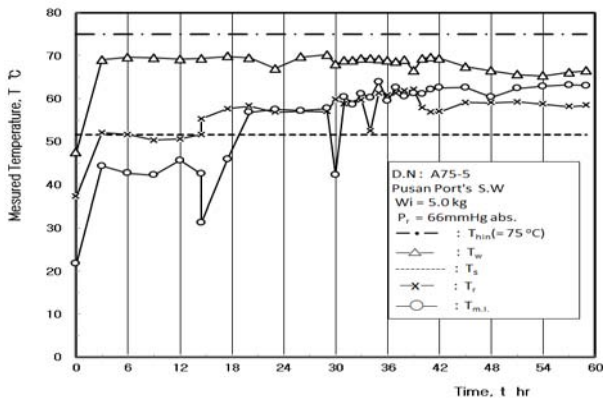


Figure 8: Temperature behaviors during the 4-processes

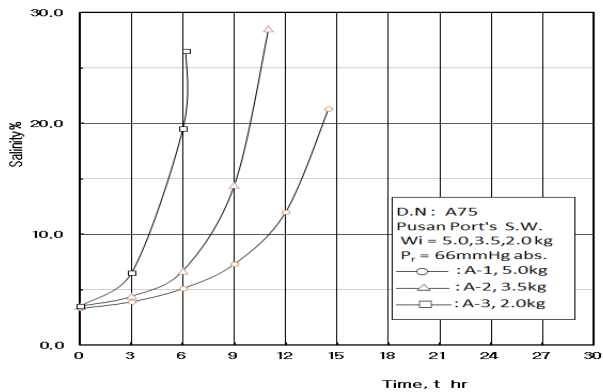


Figure 9: Salinity behavior during the concentration process

3.3 저온진공 농축과 건조의 열전달특성

Figure 10에는 가열수 온도를 75°C로 유지하면서, 일반해수 초기 무게를 5.0, 3.5, 2.0kg을 투입하여 소금 생성의 포화농도인 27%까지 농축하는 과정에서 초기무게를 기준으로 한 무게 감소율 계산결과를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 포화농도까지 농축하면 농도 3.5% 일반해수 체적의 12%까지 체적감소가 발생하며, 농축에 소요되는 시간은 5.0kg의 경우에는 약 15시간, 3.5kg의 경우에는 약 10.5시간, 2.0 kg의 경우에는 약 6시간이 걸리며, 포화농도까지의 농축 소요시간은 초기 투입 해수 중량에 거의 비례함을 알 수 있었다.

Figure 10의 실험결과로부터 포화농축과정(Process-1) 대하여 각각의 실험식을 구해보면 ;

$$G_i = 5.0 \text{ kg} ; \frac{G_t}{G_i} = -5.874 t + 98.60$$

$$G_i = 3.5 \text{ kg} ; \frac{G_t}{G_i} = -8.232 t + 98.58 \quad (3)$$

$$G_i = 2.0 \text{ kg} ; \frac{G_t}{G_i} = -14.20 t + 97.92$$

각 공정에서 건조판에 초기무게 (G_i, kg)로 건조를 시작하면 시간간격 (Δt) 동안의 평균 무게감소율 $\Delta W_t (\text{kg/hr})$ 는,

$$\Delta W_t = \frac{\Delta G_t}{\Delta t} \quad (4)$$

와 같이 표현되며, 따라서 건조판 ($A = 0.251 \text{ m}^2$) 단위면적당의 전열량 즉 열플럭스 ($\text{Heat flux}, q \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}$)는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$q = \frac{\Delta W \cdot H_{fg}}{A} \quad (5)$$

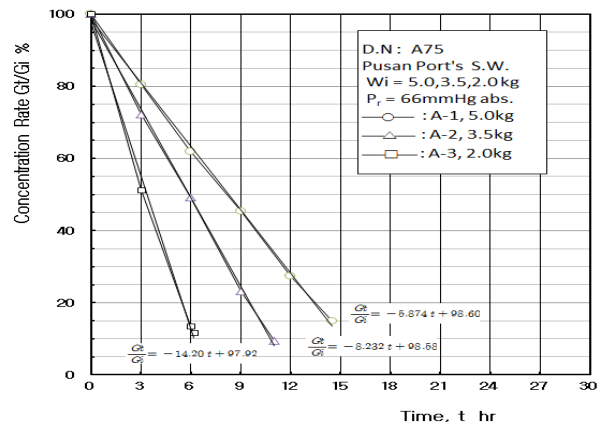


Figure 10: Weight reduction behavior during the concentration process

Figure 11에는 이와 같이 구한 포화농도까지의 진공농축 과정에서의 건조시간경과에 따른 열프럭스의 변화를 나타내었는데, 초기 모액의 투입 무게(G_i)에 관계없이 열프럭스가 거의 일정함을 알 수 있었다.

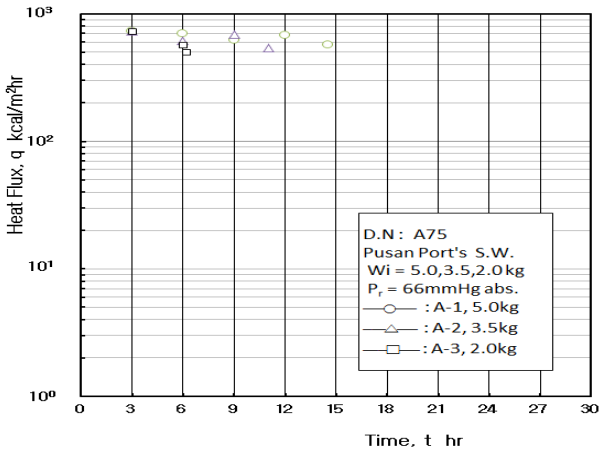


Figure 11: Heat flux behavior during the concentration process

Figure 12에는 가열수 온도를 75℃로 각 공정의 초기 무게를 5.0kg으로 유지하였을 경우, Process-1에서 Process-4까지의 열프럭스의 변화를 정리하여 나타내었는데, 석고, 소금, 미네랄의 석출 농축하는 기간에는 열프럭스 $q=500 \sim 800 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 로 유지되다가, 석출의 진행될수록 열프럭스 열프럭스 $q=200 \sim 400 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 급격히 내려가며, 이러한 현상은 “소금 석출→미네랄 석출→용존금속 석출”로 현상이 진행될수록 뚜렷해짐을 알 수 있었다.

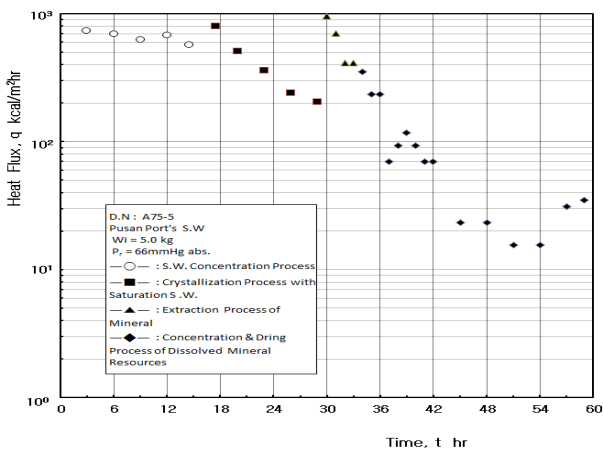


Figure 12: Heat flux behavior for the each moisture reduction process

Figure 13에는 각 공정에서 석출된 젖은 상태의 석고, 소금, 미네랄, 용존금속을 저온진공 건조할 동안의 열프럭스 변화를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 각 석출물의

건조 초기의 열프럭스는 $q=800 \sim 100 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 의 범위로 모액의 농축과정의 값 범위와 유사하지만, 건조 완료에 가까워질수록 열프럭스는 $100 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 까지 뚝 떨어지는 것을 알 수 있다.

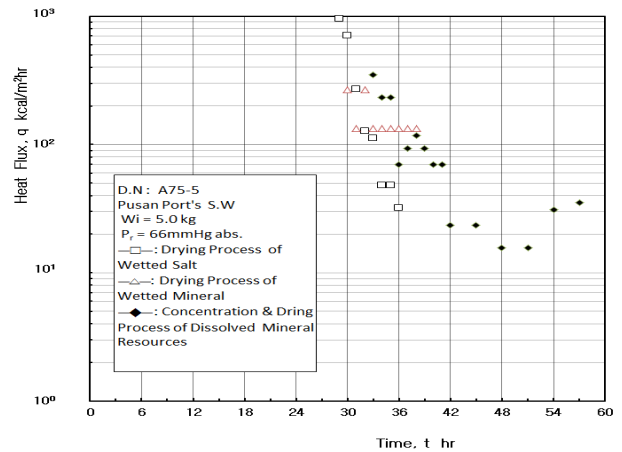


Figure 13: Vacuum dry heat flux behavior of salt, mineral and metals

‘순수 무염 건해삼’의 제조를 위한 해삼의 저온진공건조에 관한 문수범의 연구[15], ‘홍고추’의 저온진공건조에 관한 최순열의 연구[13]에 의하면 저온진공건조 초기의 건조가 활발한 소위 ‘항울건조기간’에는 열프럭스가 $q=500 \sim 800 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 으로 유지되다가 ‘감울건조기간’에 진입하면 열프럭스가 급격히 저하된다는 실험결과와도 정량적으로 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

Figure 14에는 “원해수 투입 ~ 포화농도 도달 ~ 소금 결정화 ~ 미네랄 석출 ~ 용존금속 석출 ~ 용존금속 건조”까지의 전체 과정에서 시간이 경과하면서 어떻게 무게비율이 감소가를 종합적으로 정리하여 나타내었다. 편의상 각 공정단계가 변하는 사이 시간을 제외함으로써 연속적으로 실험이 수행되었다고 가상하여 해수 종합자원화 전체 공정을 정리한 결과이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 각 공정 (Process)별로 석출성분이 다른 것은 물론이고, 각각의 무게 감소율의 패턴 즉, 열전달특성이 확연히 다르다는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 궁극적으로 추구하는 소금은 유해성분이 전혀 없는 고품질 최고부가가치의 식용 결정소금(식탁염) 제조기술의 개발이며, 이 과정에서 담수는 부수적으로 얻고자 하는 것이다. 부산항 해수는 대양 해수에 비하여 오염물질이 많이 유입한 혼탁한 해수임에도 불구하고, Table 5에서 보는 바와 같이, 성분분석결과 ‘World Best-10’ 소금보다도 유해물질의 혼입이 전혀 없는 소금제조가 가능함을 확인할 수 있었다.

해수의 종합자원화를 위한 농축과정에서는 농축이 진행되면서 석고, 소금(꽃소금과 결정소금), 미네랄, 용존금속이 순차적으로 석출되는데, 반복적인 실험결과 분석을 통하여

Table 8과 같이 4-단계별의 농도와 비중조건을 구하였다.

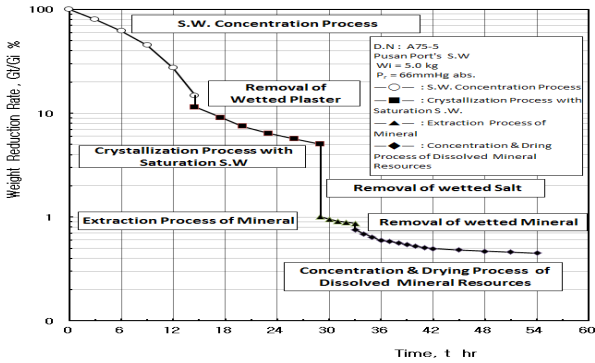


Figure 14: Weight reduction behavior during the 4-processes

Table 8: Classifying conditions for the 4-processes

	Mother liquor state	Brix concent.	Specific gravity	Volumetric ratio of mother liquid (%)
Sea water	(or High Saltwater)	3.5	1.025	100.0
Process-1	Saturated Sea Water	27.0	1.210	9.06
Process-2	End of Crystallization	50.0	1.268	3.19
Process-3	Mineral Extraction	50.0	1.302	0.68
Process-4	Remained Meantals	-	-	-

4. 결론

진공열전달기술(Vacuum heat transfer technology)을 기반으로, 충분한 경제성을 확보하면서 무한자원인 해수를 원료로 한 담수, 석고, 소금, 미네랄, 용존금속을 순차적으로 얻어 모두를 자원화 할 수 있는 해수의 종합자원화 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)해수의 농축과정은 해수물성의 변화 및 열전달특성의 변화에 순응하여 1)소금이 석출되기 시작하는 포화농도까지의 농축하는 단계, 2)소금의 결정화가 이루어지는 단계, 3)미네랄이 석출되는 단계, 4)잔류 용존금속 회수단계의 4-단계로 구분되는 것이 합리적인 공정임을 확인하였다.
- (2)젖은 상태의 석고, 소금, 미네랄, 용존금속은 각각 분리하여 저온진공 건조함으로써 성분별로 순도 높은 건조물을 얻을 수 있다.
- (3)한식문화에 필요한 결정소금에는 뽕, 석고, 유해금속이 함유되지 않으므로 고품질의 식용소금이 생산 가능하며, 즉시 건조하므로 천일염과 같이 간수를 제거하기 위한 3년간의 숙성기간도 필요없다.
- (4)해수의 종합자원화를 위한 대형 플랜트를 가동하면 첨단산업에 필요한 리튬, 우라늄과 희토류를 안정적으로

로 다량 획득할 수 있어 국가전략물자 확보의 새로운 기술적 대책이 될 수 있다.

- (5)소금을 중심으로 한 해수의 종합자원화 공정에서는 다량의 담수, 석고, 천연미네랄 및 용존금속이 부산물 형태로 얻어지므로, 해수의 담수화 과정에서 가장 문제점인 담수 생산원가증가 요인을 제거할 수 있다.
- (6)끝으로 본 연구결과를 역삼투막(R.O)식 담수설비에 의해 배출되는 약 55%로 농축된 ‘고염도 해수’ 즉 일종의 ‘바다 쓰레기’에 적용할 경우, 바다 환경보존과 해수종합 자원 측면에서 매우 유용한 기술적 방안이 될 수 있다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 산학연공동기술개발사업, 해수부 산하 한국해양과학기술진흥원(KIMST)의 기획연구 및 충북 괴산군 시골절임배추사업단의 연구비지원에 의하여 수행되었음을 밝히며, 이에 심심한 감사의 마음을 전합니다.

References

- [1] S. C. Shin, K. G. Kim, J. S. Park, D. K. Park, and C. H. Lee, A Planning Research for the High Technology Treatment of the High Salinity Seawater Resources, Planning report of Korea Institute of Marine Science and Technology Promotion, 2014.
- [2] C. B. Kim, Y. H. Song, K. G. Kim, K. T. Park, H. S. Jung, and D. Y. Choi, “A study for the operation characteristics of the multi-stage fresh water generator by the thermo-compressor,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 8, pp. 1185-1191, 2008.
- [3] C. H. Kim, “A development of application technology for the R.O type fresh water generator considering the the island seawater problem,” The Korea Water Research Development Corporation, KIWE-IWW-05-10, 2005.
- [4] K. S. Jung, B. K. Kim, K. G. Yu, J. C. Lee, J. K. Jung, Y. D. Seo, and D. S. Kil, A Planning Report for the Dissolved Resources in Seawater and the Growth Engined Policy Methode, Planning report of Korea Institute of Marine Science and Technology Promotion, 2010.
- [5] M. J. Kim, H. J. Baek, S. S. Shin, and M. S. Lee, “A planning report for the boron recovery technology in seawater by the AMF process,” Academic-Industrial Cooperation of Korea Maritime and Ocean University, Report, 2012-0099, 2013.
- [6] M. B. Joo, J. H. Kang, H. S. Jang, and H. D. Lee, “A study for the direction policy for the high-valued

- food industry of the sun-dried salt,” KMI Report, 2009.
- [7] I. C. Kim, “A Competition of the facility modernization and institutional improvement for the high-valued sun-dried salt production,” Korean Assembly, 2009.
- [8] J. H. Choi, K. W. Cho, N. G. Park, S. K. Kim, M. S. Jung, and K. G. Kim, “A preliminary report for the table salt production as a treatment technology of the high salinity seawater from the fresh water generating R.O plant,” Korea Maritime and Ocean University, Report, 2012.
- [9] K. G. Kim, Y. M. Kim, M. H. Kim, and S. D. Kang, “A Development for the CAD program for thw automatic design of the steam ejector,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 11, no. 3, pp. 219-226, 1987.
- [10] K. S. Kim, J. S. Lee, W. Y. Kim, and K. G. Kim, “A experimental study for the characteristics of the steam ejector,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 15, no. 5, pp. 358-365, 1991.
- [11] G. S. Kim and K. G. Kim, “A study the formulation for the properties of steam and water according to the ASME code on P.C,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 6, no. 4, pp. 88-101, 1992.
- [12] K. G. Kim, A Study on the Steam Ejector's Characteristics and Computer Aid Design, Ph.D. Dissertation, Korea Maritime and Ocean University, 1993.
- [13] S. Y. Choi, A Study on the Thermal Characteristics of Thw low Temperature Vacuum Dryer, Ph.D. Dissertation, Korea Maritime and Ocean University, 1999.
- [14] S. B. Moon, S. Y. Choi, K. G. Kim, “A study on the thermal characteristics of the big capacity vacuum dryer for the drying of food materials,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 24, no. 4, pp. 427-434, 2000 (in Korean).
- [15] S. B. Moon, A Study on the Drying Heat Transfer of the Sea Cucumber by the Low Temperature Vacuum Drying Technology, Ph.D. Dissertation, Korea Maritime and Ocean University, 2010.
- [16] K. G. Kim, C. H. Lee, and Y. D. Shao, “A development of the hugh quality vacuum dried abalone with the farming abalones,” Industry-Academic Cooperation Research Project of the Small and Medium Business Administration, 2012.
- [17] S. B. Moon, K. S. Kim, C. H. Lee, C. Oh, and C. W. Bae, “A study on the drying heat transfer of the high quality seafoods,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 4, pp. 460-469, 2010.
- [18] K. G. Kim and D. Y. Choi, “Detailed digital data book of the steam & water,” Thermal Engineering Lab. of Maritime College of Korea Maritime and Ocean University, 1998.