

해양심층수를 이용한 미네랄소금 제염장치 개발

김현주 · 신필권 · 문덕수 · 정동호

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부/해양심층수연구센터

Development of for Mineral Salt Manufacturing System using Deep Sea Water

H. J. Kim, P. K. Shin, D. H. Moon, D. H. Jung,

*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Deep Ocean Water 해양심층수, Spray Drying 분무건조, CFD/Computational Fluid dynamics 전산유체역학

ABSTRACT:

Deep ocean water is located in the sea deeper than 200m. At such depth the solar light does not reach, photosynthesis is not performed and nutrition salt is not consumed. Therefore, compared with surface water, Deep Sea Water contains more nutrition salt, such as nitrogen and phosphor. Moreover, it has the good balance of minerals. This Research is primary attempt for apply deep sea water to food industry. New type of mineral salt manufacturing system was developed and high levels of Ca, K, Mg detected from the salt analysis.

1. 서 론

해양심층수는 태양광이 도달하지 않는 수심 200m 이상의 깊은 곳에 존재하여 연중 안정된 저온을 유지하고 있으며, 유기물이나 병원균 등이 거의 없다. 또한 해양식물의 생장에 필수적인 영양염류가 풍부하고 미네랄 조성이 양호한 무한정의 해수자원이다. 이러한 심층수의 특성을 이용해서 일본, 미국 등에서는 에너지, 식품, 담수화, 수산업, 의료, 농업 등 다양한 산업분야에 활용하고 있다. 국내에서는 최근에 동해 고성해역을 중심으로 심층수 개발이 진행 중이며, 동시에 산업분야에 활용하기 위한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 심층수의 식품분야 활용을 위한 시도로서 심층수의 부영양성을 이용한 미네랄 소금 제염장치를 설계하고 그 성능을 분석하였다. 제염장치는 미네랄성분의 함량을 효과적으로 향상시킬 뿐 아니라 대량생산에 적합하도록 설계하는데 중점을 두었다.

2. 본 론

2.1 제염방법

해수염은 대상 해수의 특성과 제조 방법에 따라 달라질 수 있다. 해수에는 40종류 이상의 용존물질이 있는데 제염과정에서 무엇을 얼마나 남길 것인가 하는 것이 제염기술의 핵심이 될 수 있다. 또 더 나아가 무엇을 어떻게 없앨 것인가 하는 것

이 제염기술의 고도화를 위한 과제이다.

소금의 제조법에는 천일염법, 기계염법, 재제염법 및 기공염법 등이 있다. 이러한 전통적인 소금제조법은 최근 연안역의 오염에 따른 품질문제나 기계염이 미네랄을 거의 함유하지 못하는 문제 등이 제기되고 있다. 이로부터 현대적인 건조기법을 이용한 고품질 소금제조가 모색되어 왔으며 본 연구에서는 상온순간결정 제염법인 분무건조법을 활용한 개선방안을 검토하였다.

분무건조법은 용액 또는 반죽 상태의 혼합물을 노즐이나 미립화장치를 통해 작은 액적으로 분무하여 뜨거운 건조매질과 접촉시켜 건조된 상태의 분말, 과립 등을 만드는 방법이다. 분무건조법은 접촉 면적이 넓고 건조시간이 짧아 열에 민감한 물질의 건조에 적합하며 건조된 물질의 크기, 밀도 등의 최종 상태를 조절하기 쉬운 이점이 있기 때문에 미네랄 염 생산에 적합하다고 판단된다.

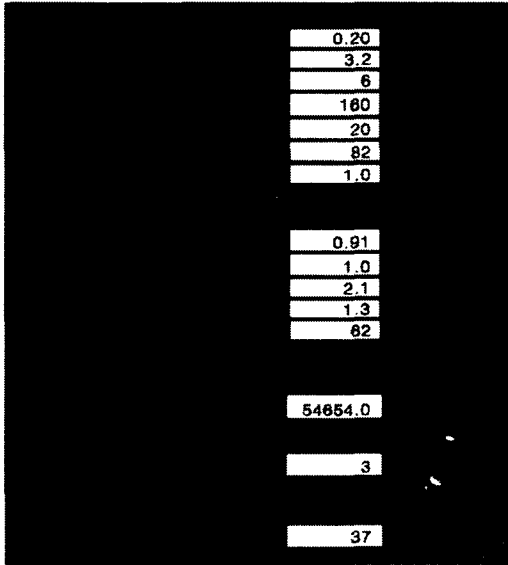
2.2 분무건조기 제원 및 성능해석

분무건조는 원액의 성상, 건조조작 조건에 의해 입도, 수분, 부피밀도 등 제품형상을 어느 정도 조절할 수 있지만 정해진 장치내에서는 한도가 있기 때문에 장치선정이 중요하다. 본 연구는 김 등의 연구(2003)를 바탕으로 수평형 분무방식을 설계하였으며, 열풍과 액적이 동일 방향으로 분사되는 병류형(co-current flow) 방식을 선정하였다.

Table 1은 3kg/h 증발용량의 수평식 병류식 분무장치에 대

한 설계제원을 나타낸 것이다. 열풍주입 온도가 160℃ 일 때 건조과정 후 출구로 나가는 온도는 82℃이며 건조는 1초 이내에 이루어지는 것으로 예측되었다. 이런 조건에서 요구되는 건조실 크기는 원통형의 경우 직경 2.1m, 높이 1.3m 이다. 본 연구에서는 건조입자의 회수율을 고려해 폭 1m, 길이 2.3m의 직사각형 형태로 건조실을 설계했다.

Table 1 Values of spray dryer design properties



2.3 설계조건의 검토

실 장치 제작에 앞서 3차원 CFD해석을 통해 위의 상세설계 조건이 적절한지 검증하였다. 전산해석은 상용코드인 Fluent 6.01을 이용해 수행했으며, 계산영역 및 조건 등을 Fig.1 및 Table 2, 3 에 각각 나타냈다.

액적의 미립화 방식에 따라 회전원반 및 노즐로 분무될 때의 건조 특성과 내부 유동패턴의 변화를 비교했으며 회전원반형의 경우에는 열풍의 선회각도의 영향이 건조에 어떤 영향을 미치는지 조사하였다.

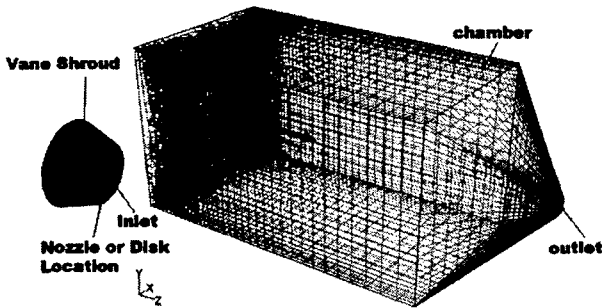


Fig.1 Computational Domain

Table 2 Drying Chamber Specification

크기	폭	1 m
	길이	2.3 m
입출구면적	입구	0.0387 m ²
	출구	0.0028 m ²
회전원반	직경	60 mm
	회전수	10000 rpm
노즐	3L/h	
배인각도변화	0°, 20°	
입구온도	160℃	

Table 3 CFD Conditions

CFD Software	Fluent 6.01
Grid generation	Quad + Tri
Grid cell number	200,000
Solver	Segregate, Steady state
Turbulent mode	k- ω SST

2.4 노즐형 분무의 경우

분무된 액적은 건조과정 중 중량이 변화하게 된다. Fig. 2는 액적의 중량변화와 궤적을 나타낸 것이다. 건조는 대부분 온도가 가장 높은 열풍입구 60~80cm 부근에서 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 본 해석에서는 입자의 충돌이나 벽면교착 및 입자 궤도에 대한 확률론적인 모델을 적용하지 않았기 때문에 액적의 궤적이 부드러운 곡선으로 나타난다. 축방향속도가 크고 배인각이 커질수록 건조챔버 내에서 활발한 유동이 일어나며 이로 인해 입자의 최종 함수율에 차이가 날것으로 예상된다.

Fig. 3은 시간의 경과에 따른 액적의 직경변화를 나타낸 것이다. 대부분의 입자가 0.3초 이내에 건조되는 것으로 나타났으며(간류 수분함량 조건: 4%), 이로부터 노즐형 분무의 경우 열풍입구조건 160℃는 건조에 충분한 열량이며 이보다 더 낮추어도 건조가 가능하다고 판단된다.

Fig. 4는 건조실 장축 중심선에서의 수분의 질량분율을 나타낸 것이다. 초기 분사위치에서 약 20cm 지점까지는 유사한 경향을 나타냈으나 이 이후부터는 큰 차이가 나타난다. 즉 3m/s-20° 조건은 0.004 정도로 다른 두 조건 (1.5m/s-0°, 1.5m/s-20°)에 비해 약 1/3 수준으로 감소한다. 건조열량이 일정할 때 열풍 선회보다는 축방향 속도가 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 1.5m/s 조건을 비교해 보면 배인각이 20°일 때 출구로 갈수록 수분분율이 작아짐을 볼 수 있다. 전체적으로는 배인각 커질수록 챔버 내부 전체에 걸쳐 액적과의 열교환이 활발히 일어나므로 건조에 유리하다고 판단된다.

2.5 회전 원반형 분무의 경우

회전원반에서 액적은 원주(지름60mm)상의 8개 지점에서 분무된다(액적크기분포: 40 μ m~70 μ m). Fig.5는 1.5m/s-0°인 경우 회전원반 주위의 액적의 초기궤적을 나타낸 것이다. 액유량 3L/h, 회전원반직경 60mm, 회전속도 10000rpm에서 액적의 초기속도는 38m/s 이다. 해석결과에서 초기액적이 챔버 벽에 닿거나 역류하는 입자가 없으며 부드럽게 전방으로 분무되고 있어 분

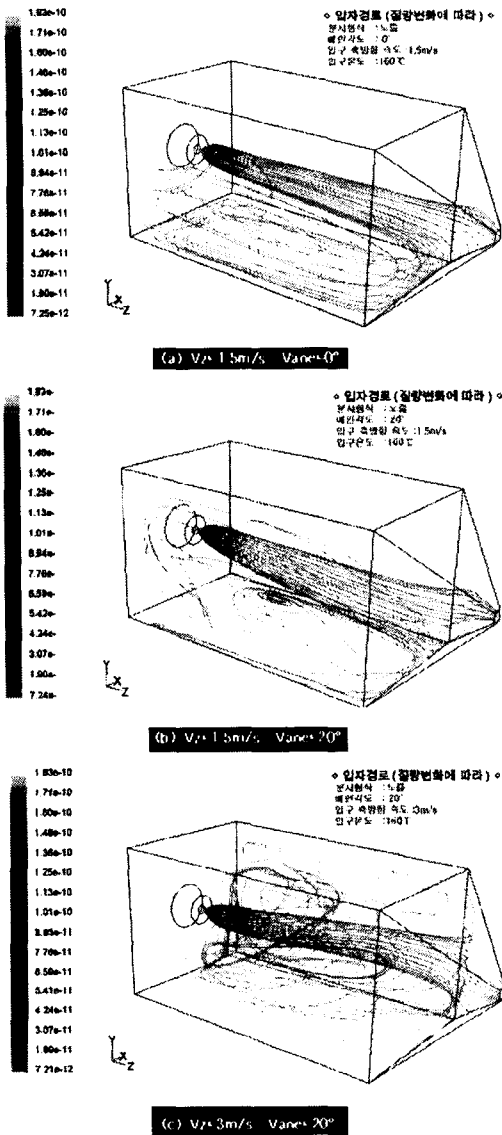


Fig.2 Particle trajectory for varying axial velocity and vane angle (Nozzle type)

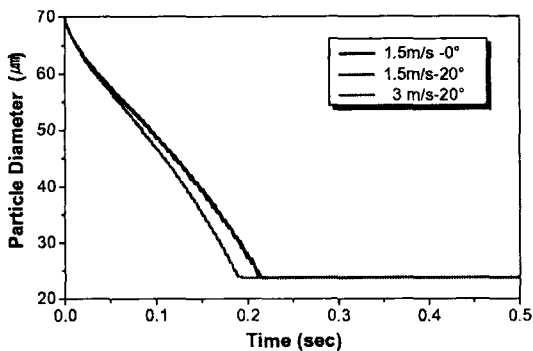


Fig.3 Variation of particle diameter with time for varying axial velocity & vane angle (Nozzle type)

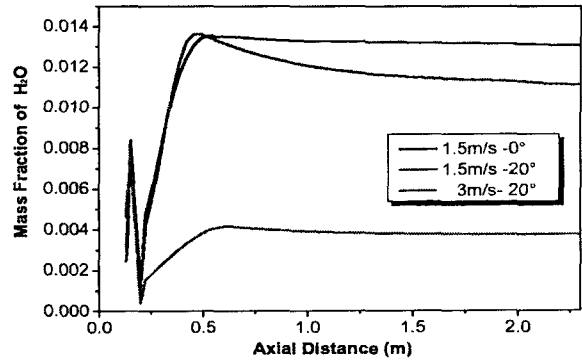


Fig.4 Variation of H₂O mass fraction with axial distance for varying axial velocity & vane angle (Nozzle type)

무조건은 적절하다고 판단된다.

Fig. 6에서 액적의 궤적을 살펴보면 액적군이 분무초기 열풍구를 가로지르며 하류방향으로 진행하기 때문에 대부분 열풍구 주변에서 건조가 이루어지는 것을 볼 수 있다. 직경이 작은 입자는

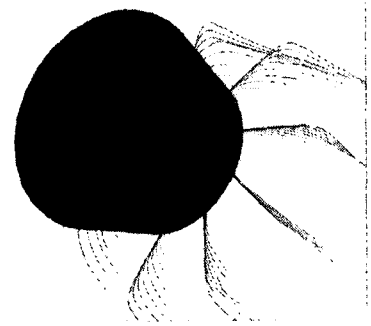


Fig.5 Drops trajectories (Disk Atomizer)

건조실내 재순환영역에 들어가 순환하다가 바닥에 떨어지며 전체적으로 노즐일 경우보다 복잡한 양상을 나타낸다. Fig.7에서 시간경과에 따른 입자직경변화를 보면 축방향 속도가 크고, 베인각이 있는 경우 건조 속도가 빠른 것으로 나타났다. 그러나 전반적으로 노즐식보다 건조속도가 느린걸 알 수 있다. Fig. 8의 수분분율 곡선에서도 이러한 경향이 잘 나타난다.

이외에도 건조실 전체에 대한 온도, 수분, 속도분포 등을 분석했으며 이로 부터 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다. 첫째, 액적의 최종수분함량과 관련된 재순환 영역은 축방향 속도가 클수록 챔버내에서 크게 형성되며 베인각이 있는 경우 전면부로 이동한다. 액적의 체류시간이 길면 건조 효율이 증가할 수 있으나 너무 커지면 건조되지 못한 액적이 벽에 부딪힐 우려가 있으므로 적절한 베인각도 및 축방향 속도를 정해야 한다.

둘째, 베인각도가 일정할 때(20°) 길이방향(Z축) 속도가 클수록 건조효율이 우수하다. 이러한 경향은 노즐식 및 회전원반식 모두에 적용되므로 실장치 제작시 송풍기 용량 및 베인각도는 중요하게 고려해야할 사항이다.

셋째, 베인각도의 적절한 조절, 즉 최적의 선회풍은 건조성능을 향상시키며 특히, 회전 원반형에서 선회풍의 영향이 크게 나타난다.

이와 같은 수치해석 결과 및 초기의 상세 설계를 바탕으로 수평형 분무건조기를 제작하여 성능시험을 수행하였다.

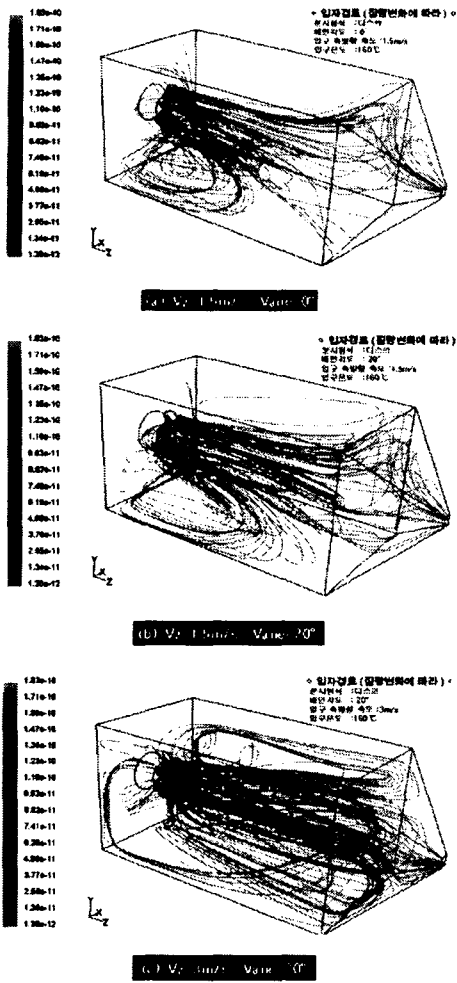


Fig.6 Particle trajectory for varying axial velocity and vane angle (Disk type)

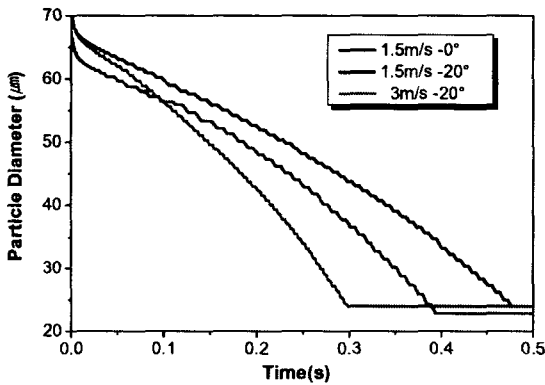


Fig.7 Variation of particle diameter with time for varying axial velocity & vane angle(Disk type)

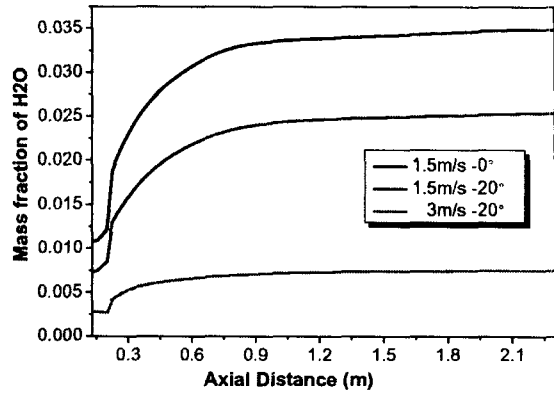


Fig.8 Variation of H₂O mass fraction with axial distance for varying axial velocity & vane angle (Nozzle type)

2. 6 수평식 분무건조기 성능실험

2.6.1 건조기 제작

분무건조기 상세설계 및 해설결과를 바탕으로 3kg/h 수분 증발 용량의 수평형 분무건조기를 제작하였다.

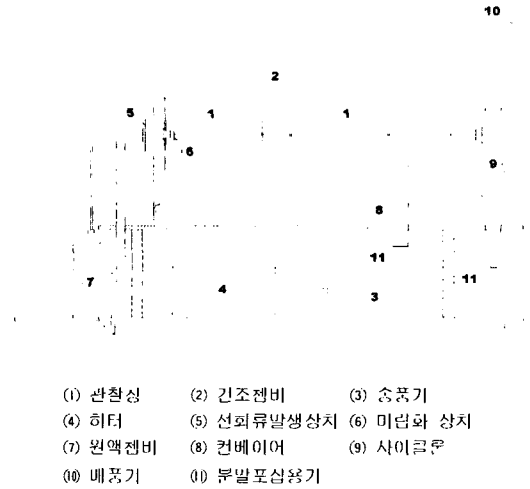


Fig.9 Schematic diagram of spray dryer system



Fig. 10 System setup Photograph

Fig.9는 건조기의 개략도이며, Fig.10은 제작된 건조기 사진이다. 건조실은 수평으로 놓인 직사각형 형상으로 폭 1m, 길이 2.3m 이며 열풍은 원형의 공기분산기를 통해 건조실로 유입되어 출구(60mm)로 빠져 나간다. 분무장치는 필요에 따라 회전 원반 및 압력노즐을 교환하여 사용할 수 있다. 건조분말은 1차적으로 건조실 바닥의 컨베이어를 통해 회수되고 출구에 연결된 사이클론을 통해 2차 포집된다. 또한 전면 하단부에 공압피스톤을 장착해 건조실 수평각도를 조절하여 분말포집을 용이하게 조절할 수 있도록 했다. 송풍기에 의해 유입된 공기는 히터(15kW)를 통과하면서 가열되어 선회풍 발생장치를 통해 건조실로 유입된다. 수치해석결과에서 나타났듯이 유입공기의 초기 유동은 건조성능에 크게 영향을 준다. 그러므로 풍량에 따라 최적의 선회풍을 공급하도록 가변 안내베인을 장착하였다. (Fig. 11)

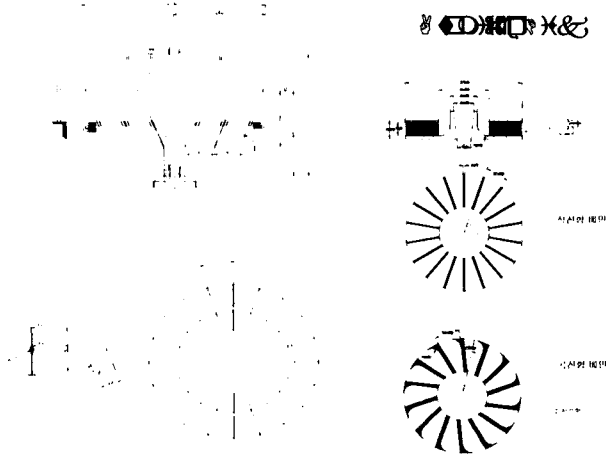


Fig.11 Swirl Vain Driving Systems & Atomizer Disk

2.6.2 건조실 내부의 열유동

건조실 내부의 열유동은 건조효율과 밀접한 관계가 있으므로 열전대 및 열선유속계를 사용하여 건조실 축방향 중심면의 유동상태를 측정하였다. 열풍작용을 위한 히터의 가온은 300℃ 이고, 입구에서의 온도는 160℃로 공급된다.

Fig.12는 베인각도가 0°이고 액적분무가 없을 때 종방향 중심선의 속도분포를 수치해석결과와 비교한 것이다. 초기 속도는 약 1.5~1.6m/s 이며 열풍입구로부터 0.76m 지점부터 속도가 감소되어 1.66m 지점에서는 0.3m/s 로 측정되었다. 그래프에서 수치해와 실험데이터가 미소하게 차이가 나는데 이것은 열풍하우징 부에서 구조적(열풍챔버 및 다공판)손실 때문인 것으로 판단된다.

회전원반형 분무장치를 사용하여 베인각도 20도, 회전수 13000rpm, 액공급을 3kg/h 조건에서 분무전후의 온도변화를 측정하였다. 측정지점은 종방향 수직 중심면이다. 총 42개 지점에서 온도를 측정했으며, 실험결과는 측정데이터를 기준으로 영역 전체에 걸쳐 보간하여 나타났다.

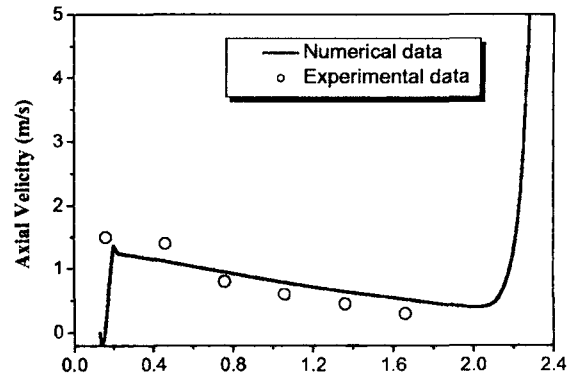


Fig.12 Comparison in Axial center-line velocity profile in experiment & CFD result

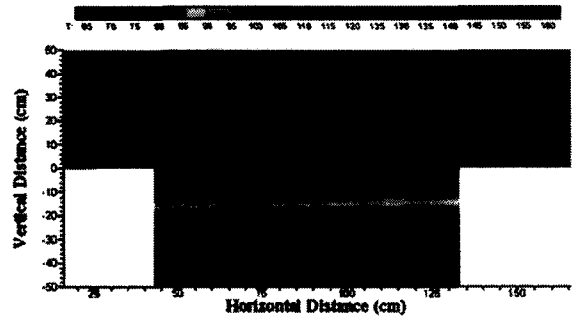


Fig.13 Temperature distribution (without drop)

- 분무 전 온도분포 (Fig.13)

건조실내 최대온도는 167.8℃ 최저온도는 62℃로 나타났다. 출구온도는 평균 120℃이다. 실험결과 건조실 상부에서 고온영역이 형성되고 하부에는 55℃~75℃의 비교적 낮은 온도분포로 경계를 이루고 있었다. 초기에 열풍입구에서 나온 고온유속이 상부로 치우쳐 있으며 하부로는 전달되지 못하고 있다. 이것은 여러 가지 이유가 있으나 베인부에서의 열풍 선회가 적절히 이루어지지 않는 것이 가장 큰 이유라고 판단된다. 이를 확인하기 위해 열풍입구의 속도분포를 측정해본 결과 입구에서 불균적인 속도분포가 확인되었다. 건조실 하부 약 40% 영역에서는 선회가 전혀 이루어지지 않았다. 열풍유입관으로 유입된 열풍은 일단 열풍챔버에 모여져 다공판을 지나 베인을 통해 건조실 내부로 유입되는데 열풍챔버 체적 및 다공판의 홀 사이즈가 적절히 조합되지 않아 열풍이 균일하게 베인으로 유입되지 못한 것인 원인으로 밝혀졌다. 또한 관로 및 베인부를 지나며 속도속실이 크기 때문에 송풍기의 용량도 증가시켜 열풍속도를 높일 필요가 있다.

- 분무 후 온도분포 (Fig.14)

액적이 분사되어 건조가 이루어질 때 건조실내 온도분포를 측정된 결과 최고온도는 열풍구 주변에서 128.6℃로 측정됐고

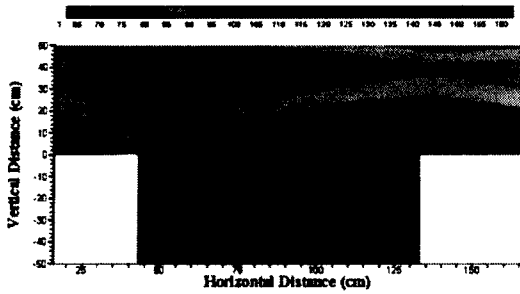


Fig.14 Temperature distribution (with drop)

최저온도는 하부 바닥에서 52℃로 측정되었다. 그리고 출구온도는 86℃로 나타났는데, 이 값은 설계시 경험식으로 계산한 온도(83.7℃)와 비교적 근사하게 일치한다.

건조실내 온도분포가 최적의 상태가 아님에도 불구하고 건조는 비교적 원활히 이루어 졌다. 그 이유는 액적의 크기가 충분히 작았으며(10~30 μ m), 이와 같은 작은 액적을 건조하는데 공급된 열풍온도(160℃)는 과잉열량이기 때문이다. 배인부의 설계를 수정하면 지금보다 낮은 입구온도(약 100~130℃)에서도 현재와 같은 건조성능을 낼 수 있을 것으로 예상된다.

2.6.3 회전원반 회전수 변화에 따른 건조입자 형태

유량이 일정할 때 (3kg/h) 디스크 회전속도 변화에 따른 소금입자의 형상 및 크기를 광학현미경($\times 40$)을 통해 조사했다. (Fig. 15) 사진판독결과 입자크기는 10~30 μ m 범위 내에 분포했다. 회전수 변화에 따라 입자들이 서로 충돌하여 합쳐진 형태가 많았으며 이러한 양상은 회전수가 증가할수록 많이 나타났다. 각각의 입자 크기는 회전수 변화에 따라 그다지 큰 차이가 없었다.

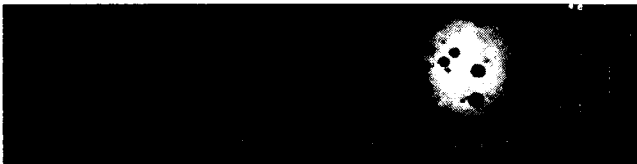


Fig. 15 Salt particle photographs (magnification 40)

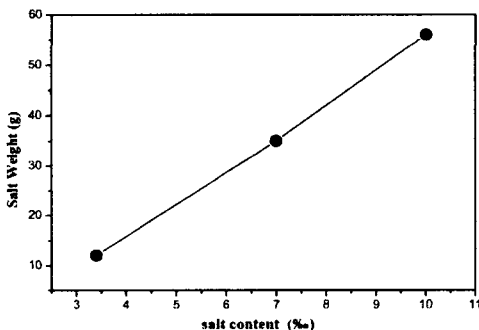


Fig. 16 Salt productivity variation with the change of sea water concentration

2.6.4 해수의 농도에 따른 제염성능 변화

해수의 농도가 원수인 3.4%부터 7%, 10%로 농축될 경우에 제염성능을 건조실 내부에서 수집할 수 있는 소금의 양으로써 비교하였다. Fig. 16에 나타낸 바와 같이 농축해수의 농도가 증가할수록 소금회수율도 선형적으로 증가했다. 실험에서 건조실 내부의 건조소금이 전량 회수된 것은 아니지만 농축 정도에 비례하여 제염이 가능함을 알 수 있다. 여기서 많은 양의 소금이 사이클론이 있는 2차 포집장치로 나갔으며, 이를 통해 사이클론은 집진 개념에서 포집개념으로 설계변화를 모색해야 한다고 판단된다.

2.6.5 미네랄 소금의 제조결과 및 품질 분석

본 실험을 통해 얻은 미네랄 소금이 현 식용 소금의 기준을 만족하고 있는지, 또한 미네랄 잔존량을 알아보기 위해 한국화학시험연구원에 성분분석을 의뢰하였으며, 그 결과를 종래의 소금과 비교하여 Fig.17에 나타냈다. 대표적인 제염법에 의한 소금의 주요성분 함량을 나트륨(Na)에 대한 비율로 비교한 것으로 본 장치에 의한 미네랄 소금이 다른 소금에 비해 유용한 성분이 많이 함유되어 있고, 황 성분은 적게 함유되어 있음을 알 수 있다.

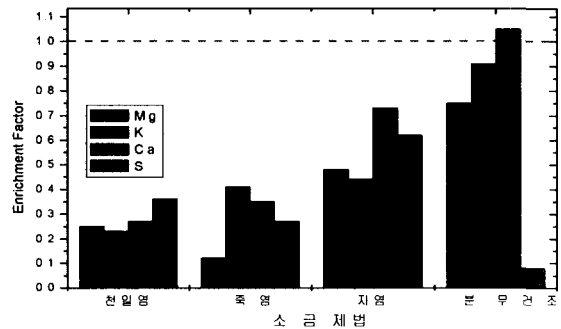


Fig. 17 Result of chemical analysis of drying salt

3. 결 론

해양심층수의 식품분야 활용을 위한 시도로서 심층수의 부영양성을 이용한 수평 분무건조형 미네랄 소금 제염장치를 설계하고 그 성능을 분석하였다.

CFD를 이용한 건조해석을 통해 설계비용 및 시간을 줄일 수 있었으며 향후 좀더 많은 실험데이터를 통해 보완이 이루어지면 보다 근사한 건조효율예측이 가능하다고 판단된다.

개발된 제염장치는 열풍선회부분 손실이 많았지만 액적의 미립화 효율이 우수하고 공급열량이 충분히 원활한 건조가 이루어졌으며 건조입자 회수에 있어서도 기존의 방법보다 편리성이 증대되었다. 또한, 본 장치에 의해 제조된 미네랄 소금은 식용소금 기준을 만족하며 미네랄 함량이 종래의 소금에 비해 우수함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 '해양심층수 다목적 개발' 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김현주 외 (2003). "해양심층수 기능성 소금 제조를 위한 분무건조기의 특성의 수치해석적 연구", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집 pp. 24-29
- 김현주 외 (2001). 해양심층수의 다목적 개발 (1), 한국해양연구원 보고서, UCM00210-2352.
- 김현주 외 (2003). 해양심층수의 다목적 개발 (2), 한국해양연구원 보고서, UCM00340-2431.
- 박준택 (1997). "분무건조기 기술현황", 화학기술과 공업, 제15권 제5호, 1997
- C.M.Van'Land(1991). " Industrial Drying Equipment",Marcel Dekker Inc.
- S.K.Aggarwal, A. T. Tong and W. A. Strignano, (1984). " Comparison of Vaporization Models in Spray Calculation", AIAA J., Vol.22. No 10, pp 1448-1457
- C.T. Crowe, (1980). " Modelling Spray- Air Contact in Spray Drying Systems", "Chapter 3 in Advances in Drying, vol.1" Hemishere, New York.
- P.J. O'Rourke, (1981). " Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays", Ph. D. Thesis, Princeton Univ.
- R. D. Reitz,(1987). " Modeling Atomization Process in High-Pressure Vaporization Sprays", Atomisation and Spray Tec, vol.3, pp. 309-337
- A.B.Liu,(1993). "Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup an fuel Sprays", SAE 930072.