

工學博士 學位論文

海水 內 汚染物의 除去를 爲한
泡沫分離 工程

指導教授 徐 根 學

이 論文



提出함

2002年 2月

釜慶大學校 大學院

化 學 工 學 科

金 炳 辰

金 炳 辰의 工學博士 學位論文을 認准함

2001年 12月 日

主 審 工學博士 金 星 九



副 審 工學博士 金 容 河



委 員 工學博士 安 甲 煥



委 員 工學博士 李 慶 範



委 員 工學博士 徐 根 學



목 차

목차	i
표 목차(List of table)	v
제목 목차(List of figure)	vi
영문요약(Abstract)	xiii
1. 서 론	1
2. 문헌연구	7
2.1. 포말 분리법	7
2.2. 포말 분리법의 분류	14
2.3. 포말분리장치	16
3. 실 험	18
3.1. 포말분리 장치의 비교	18
3.1.1. 향류 공기구동식 포말분리기	18
3.1.2. 고속폭기식 포말분리기	18
3.1.3. 벤츄리식 포말분리기	21
3.1.4. 실험재료 및 방법	21
3.1.5. 분석방법	21

3.2. 해수 내 생물학적 오염물 제거 실험	24
3.2.1. 실험장치	24
3.2.2. 실험재료 및 방법	24
3.2.3. 분석방법	29
3.3. 자료 계산방법	29
3.3.1. 제거속도 계산	29
3.3.2. 제거율 계산	30
3.3.3. 용존산소 전달 효율	31
4. 결과 및 고찰	32
4.1. 포말분리 장치의 비교	32
4.1.1. 포말 분리장치의 운전 특성	32
4.1.2. 단백질 제거 특성	36
4.1.3. 총 부유 고형물 제거 특성	41
4.1.4. 탁도 제거 특성	45
4.1.5. 최적 포말분리 장치의 선정	48
4.2. 초기 단백질 농도영향	49
4.2.1. 단백질 제거속도 변화	49

4.2.2. 단백질 제거속도식	51
4.2.3. 총 부유 고형물 제거속도 변화	57
4.2.4. 탁도 제거속도 변화	60
4.2.5. 입도 분포 변화	63
4.2.6. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화	66
4.2.7. 암모니아성 질소 제거속도 변화	69
4.2.8. 용존산소 공급 효율 변화	73
4.3. 수력학적 체류시간 영향	75
4.3.1. 정상상태 도달시간	75
4.3.2. 단백질 제거속도 변화	78
4.3.3. 총 부유 고형물 제거속도 변화	82
4.3.4. 탁도 제거속도 변화	85
4.3.5. 입도 분포 변화	88
4.3.6. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화	88
4.3.7. 암모니아성 질소 제거속도 변화	92
4.3.8. 용존산소 공급 효율 변화	96
4.4. 공탐공기속도 영향	98
4.4.1. 단백질 제거속도 변화	98

4.4.2. 총 부유 고형물 제거속도 변화	102
4.4.3. 탁도 제거속도 변화	105
4.4.4. 입도 분포 변화	108
4.4.5. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화	111
4.4.6. 암모니아성 질소 제거속도 변화	114
4.4.7. 용존산소 공급 효율 변화	114
 4.5. 공기 분산기 영향	 118
4.5.1. 단백질 제거속도 변화	118
4.5.2. 총 부유 고형물 제거속도 변화	122
4.5.3. 탁도 제거속도 변화	125
4.5.4. 입도 분포 변화	128
4.5.5. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화	128
4.5.6. 암모니아성 질소 제거속도 변화	132
4.5.7. 용존산소 공급 효율 변화	135
 5. 결 론	 138
 참고문헌	 143
 연구목록	 148

List of table

Table 1. Water quality of feeding sea water in hydraulic residence time change experiment	27
Table 2. Water quality of feeding sea water in superficial air velocity and air distributor pore size change experiments	28
Table 3. Comparison of three types of foam separator	35
Table 4. The regression result for the determination of kinetic parameter	56

List of figure

Fig. 1. Flowchart of this research.	5
Fig. 2. Surface and bulk phase equilibrium[11].	8
Fig. 3. Cross section of a liquid capillary in foam[11].	11
Fig. 4. Photograph of wet foam and dry foam.	12
Fig. 5. Bubble, particle and surfactant interactions during bubble separation[13].	13
Fig. 6. Schematic classification of the foam separation technique[11].	15
Fig. 7. Schematic diagram of counter current type foam separator.	19
Fig. 8. Schematic diagram of high speed aeration type foam separator.	20
Fig. 9. Schematic diagram of venturi type foam separator.	22
Fig. 10. Schematic diagram of experimental unit.	23
Fig. 11. Schematic diagram for the biological contaminant removal from sea water by using foam separator.	25
Fig. 12. Flowrate of three types of foam separator.	34
Fig. 13. Protein removal rate with respect to hydraulic residence time.	37
Fig. 14. Protein removal efficiency with respect to hydraulic residence time.	38

Fig. 16. TSS removal efficiency with respect to hydraulic residence time.	43
Fig. 17. Turbidity removal rate with respect to hydraulic residence time.	46
Fig. 18. Turbidity removal efficiency with respect to hydraulic residence time.	47
Fig. 19. The effect of initial protein concentration on protein removal rate.	50
Fig. 20. The effect of initial protein concentration on foam generation rate.	52
Fig. 21. The Lineweaver–Burk plot (a), Eadie–Hofstee plot (b) and Hanse–Woelf plot (c) for the determination of kinetic parameter and the comparison between the experimental data and the regression results (d).	55
Fig. 22. TSS removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.	58
Fig. 23. The concentration ratio of TSS over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TSS over protein.	59
Fig. 24. Turbidity removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.	61
Fig. 25. The concentration ratio of turbidity over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of turbidity over protein.	62

Fig. 26. Differential particle distributions of feed (a) and effluent (b) and the particle removal efficiency (c) with respect to particle size.	64
Fig. 27. Particle removal efficiency with respect to initial protein concentration.	65
Fig. 28. SCOD removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.	67
Fig. 29. The concentration ratio of SCOD to protein of influent (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of SCOD to protein.	68
Fig. 30. TAN removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.	71
Fig. 31. The concentration ratio of TAN over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TAN over protein.	72
Fig. 32. Overall mass transfer coefficient of oxygen and saturation with respect to initial protein concentration.	74
Fig. 33. Time profiles of the concentration ratio of effluent concentration over influent concentration of protein, TSS, turbidity, SCOD and TAN and DO saturation.	76
Fig. 34. Protein removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.	79

Fig. 35. Foam generation rate and the ratio of foam generation rate to liquid flowrate with respect to hydraulic residence time.	81
Fig. 36. TSS removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.	83
Fig. 37. The concentration ratio of TSS over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TSS over protein.	84
Fig. 38. Turbidity removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.	86
Fig. 39. The concentration ratio of turbidity to protein of influent (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of turbidity to protein.	87
Fig. 40. Differential particle distributions (a), the cumulative particle distributions (b) and the particle removal efficiency (c) with respect to particle size.	89
Fig. 41. Particle removal efficiency with respect to hydraulic residence time.	90
Fig. 42. SCOD removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.	91
Fig. 43. The concentration ratio of SCOD over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of SCOD over protein.	93

Fig. 44. TAN removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.	94
Fig. 45. The concentration ratio of TAN over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TAN over protein.	95
Fig. 46. Overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency with respect to hydraulic residence time.	97
Fig. 47. Protein removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.	99
Fig. 48. Foam generation rate and enrichment ratio with respect to superficial air velocity.	101
Fig. 49. TSS removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.	103
Fig. 50. The concentration ratio of TSS over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TSS over protein.	104
Fig. 51. Turbidity removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.	106
Fig. 52. The concentration ratio of turbidity over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of turbidity over protein.	107
Fig. 53. Differential particle distributions (a), the cumulative particle distributions (b) and the particle removal efficiency (c) with respect to superficial air velocity.	109

Fig. 54. Particle removal efficiency with respect to superficial air velocity.	110
Fig. 55. SCOD removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.	112
Fig. 56. The concentration ratio of SCOD over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of SCOD over protein.	113
Fig. 57. TAN removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.	115
Fig. 58. The concentration ratio of TAN over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TAN over protein.	116
Fig. 59. Overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency with respect to superficial air velocity.	117
Fig. 60. Protein removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.	119
Fig. 61. Foam generation rate with respect to initial protein concentration.	121
Fig. 62. TSS removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.	123
Fig. 63. The concentration ratio of TSS over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TSS over protein.	124

Fig. 64. Turbidity removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.	126
Fig. 65. The concentration ratio of turbidity over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of turbidity over protein.	127
Fig. 66. Differential particle distributions (a), the cumulative particle distributions (b) and the particle removal efficiency (c) with respect to air distributor pore size.	129
Fig. 67. Particle removal efficiency with respect to air distributor pore size.	130
Fig. 68. SCOD removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.	131
Fig. 69. The concentration ratio of SCOD over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of SCOD over protein.	133
Fig. 70. TAN removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.	134
Fig. 71. The concentration ratio of TAN over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TAN over protein.	136
Fig. 72. Overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency with respect to air distributor pore size.	137

The Foam Separation Process for the Removal of Contaminant in Seawater

Byong—Jin, Kim

*Department of Chemical Engineering, Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

Experimental investigations on the removal of contaminant, such as protein, total suspended solids (TSS), soluble chemical oxygen demand (SCOD), turbidity and total ammonia nitrogen (TAN) from sea water were carried out by using foam separator.

To select the suitable foam separator type, the comparison of the three types of foam separator: counter current air driven type foam separator (CCADFS), high speed aeration type foam separator (HSAFS) and venturi type foam separator (VFS) has been carried out.

The removal rate and the removal efficiency of the foam separator have been studied according to the change of the initial concentrations of protein, hydraulic residence time (HRT), superficial air velocity (SAV) and air distributor hole size. In addition, the aeration capability of the foam separator was also investigated by increasing dissolved oxygen concentration.

1. Comparison of foam separator type

Experimental investigations on the removal of protein, total suspended solids and turbidity from aquacultural water were carried out by using three types of foam separator: counter current air driven type foam separator, high speed aeration type foam separator and venturi type foam separator. The decrease of flowrate for CCADFS, HSAFS and VFS were 0.4, 66.1, 77.2%, respectively. the Protein removal rates of three types of foam separator were decreased with the increased hydraulic residence time. Below the 0.32 minute and 0.21 minute of hydraulic residence times, the protein removal rate of HSAFS and VFS was higher than CCADFS, respectively. the Protein removal rate of VFS was lower than HSAFS at any HRT. As the increase of the HRT, the protein removal efficiency of CCADFS was increased, but those of HSAFS and VFS were decreased on the contrary. The changes of removal rates and efficiencies of total suspended solid and turbidity were similar to proteins.

2. Effect of initial protein concentration

The level of initial protein concentrations tested were selected 12.1, 23.7, 38.0, 49.3 and 62.4 g/m³. The experimental results of foam separator using sea water indicated that the removal efficiency of protein decreased according to the increase of the initial protein

concentration. The protein removal rate followed the Langmuir isotherm. The increase of the initial protein concentration resulted in the increase of the removal rate of TSS, SCOD, turbidity and TAN. The removal efficiencies of TSS, turbidity and SCOD were decreased with increase of the initial protein concentration, but TAN showed opposite trend.

3. Effect of hydraulic residence time

The level of hydraulic residence time tested were selected as 0.3, 0.5, 0.8, 1.4, 3.5 and 8.8 min. The increase of the in hydraulic residence time resulted in increase of the removal efficiencies of aquacultural waste. Optimum hydraulic residence time was found to be 0.48 min and the highest protein removal rate was $10.25 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$. The changes of removal rates and efficiencies of TSS, SCOD and turbidity exhibited similar trends to those of proteins.

4. Effect of superficial air velocity

The level of the superficial air velocity tested were selected as 0.4, 0.9, 1.3, 1.7 and 2.1 cm/sec. The increase of SAV, resulted in the increase of protein removal rate and removal efficiency, but resulted in the decrease of protein enrichment ratio. The changes of removal rates and efficiencies of TSS, SCOD and turbidity exhibited similar trends to those of proteins.

5. Effect of air distributor hole size

Four air distributor: one of commercial air stone and three of sintered glass disc (G1, G2 and G4) were used to test the effect of air distribute hole size. The range of pore size of G1, G2 and G3 were from 90 to 150 μm , from 40 to 90 and from 3 to 15 μm , but pore size of commercial air stone was unknown. As increasing the pore size of air distributor, the removal rates and removal efficiency of protein was decreased. The removal rate with commercial air stone was in the range between the removal rate with G2 and G4 sintered glass disc. Within the range of pore size distributor from G1 to G4, the removal efficiencies of protein covered the range from 21 to 42%. The changes of removal rates and efficiencies of TSS, SCOD and turbidity showed similar trends to those of proteins.

6. Oxygen transfer efficiency

Dissolved oxygen transfer effect of foam separator was investigated in the sea water. Dissolved oxygen were measured under various range of initial protein concentration, HRT, SAV and with different air distributor pore size. The overall oxygen mass transfer coefficient and the saturation efficiency of dissolved oxygen were calculated from the experiment at data. Dissolved oxygen saturation level of the effluent from the foam separator was higher than 96.0%. These facts indicates that the foam separator can be a supplementary equipment of aeration.

1. 서 론

인구의 증가와 생활수준의 향상 등으로 신선하고 건강에 보다 유익한 고단백질 식품의 생산과 소비량이 크게 증가하고, 특히 횡감용 활어의 소비량이 급증하고 있다. 3면이 바다로 둘러싸인 우리나라는 수산 자원이 풍부한 조건이 조성되어 있으나 최근 수산자원의 남획과 폐수의 유입 등으로 해수가 오염되어 부영양화에 의한 적조 현상이 발생하여 수산자원이 점차 고갈되어 가고 있다[1]. 국내 수요에 필요한 수산 자원은 양식과 원양어업에 의해 보충할 수 있으나 원양어업의 경우 각국의 수자원 보호정책에 의해 타국의 자국 영해내의 조업을 금지하거나 할당량을 감소시키고 있는 상황으로 부족한 어류 자원은 양식에 의해서 보충해야만 한다.

어류 양식은 어류를 고밀도로 사육함에 따라 사육조에서 발생하는 오염물질의 양도 많아 연근해의 수질을 악화시키는 원인이 된다. 오염된 해수는 양식장에서 사육되는 어류에 악영향을 미쳐 어류의 생산성을 저하시키거나 어류의 대량 폐사를 유발하기도 한다. 활어의 유통에 있어서도 신선한 해수가 필요하며 특히 해수의 수급이 용이하지 않은 내륙지방의 경우 활어수조 내 해수의 오염도가 높아 어류의 폐사가 발생하게 된다.

사료 찌꺼기나 어류의 배설물 등에 의하여 해수 내에 유기성 고형 성분이 급격하게 증가하게 된다. 해수 내에서 어류에 의해 발생하는 생물학적 오염물로는 부유 고형물, 단백질, 용존 유기물, 암모니아 등이 있다. 어류의 대사 작용과 미섭취 사료 등에 의해서 발생하는 이들 생물학적 오염물은 사육중인 어류에 나쁜 영향을 야기하고[2-4], 부영양화를 촉진하여 적조를 유발할 가능성이 매우 높아 가능한 신속하게 제거되어야 한다.

생물학적 오염물을 제거하는 방법으로는 고형물의 경우 침전법이나 여과법, 용존 유기물이나 암모니아성 질소는 생물학적 여과조에 의해 제거되고 있으나 장치의 구조가 복잡하고 운전 경비가 많이 소요되는 단점이 있다. 특히 각 성분별로 별도의 장치를 이용하여 제거해야 하므로 많은 시설이 요구된다. 이에 따라 최근 양어장 순환수 중 어류에 유해한 성분을 동시에 처리할 수 있는 방법으로써 포말분리법이 연구되어지고 있다[5-8].

포말 분리법은 용액 내에 존재하는 입자상 물질이나 용존 물질을 용액 내에서 상승하는 기포에 부착시켜 분리시키는 방법으로 공정이 고압 또는 고온 등의 운전조건을 필요로 하지 않아 매우 경제적인 공정이다[9-10]. 포말분리 공정에서 제거되는 물질들은 대개가 계면 활성 물질들로 계면 활성 물질의 친수기가 액측으로 소수기가 기체측으로 배열되어 기-액 계면에 액본체보다 높은 농도로 농축되는 성향을 가지고 있어, 목적성분을 고농도로 회수하는데 매우 효과적인 방법으로 최근에는 수용액 중의 염료 제거[11]나 유류 오염물 분리[12]등에 응용되고 있다.

포말분리법은 환경공학 분야에서는 공기 부상법(air flotation)이라고도 하며 폐수 내에 존재하는 물보다 가벼운 부유물질을 가라앉히는 대신 부상시켜 제거하는 방법으로 이용된다[11]. 공기 부상법의 효율을 높이기 위한 장치로 폐수와 공기를 가압하여 공기를 용존상태로 공급하는 용존공기 부상법(dissolved air flotation)이 많이 이용되고 있다.

포말 분리시 계면 활성 성분만이 액본체와 분리되는 것이 아니라 계면 활성이 없는 이온 성분이나 고형물의 제거도 가능하여 포말분리를 생물학적 오염물의 제거에 적용시킬 경우 포말분리에 의해 부유 고형물과 용존 유기물, 암모니아 이온 등의 성분을 동시에 제거할 수 있다[13].

타공정의 포말분리법이 목적성분의 효율적 분리를 위해 별도의 계면활성제를 첨가하는 것과 달리 양어장 순환수의 경우 미섭취 사료나 어분에 포함된 단백질 성분은 소수기와 친수기를 함께 가지는 구조적 특성으로 인해 계면활성제 역할을 하므로 포말분리를 더 용이하게 수행할 수 있다 [14-15].

포말분리법을 이용하여 수중의 생물학적 오염물을 제거하는 공정에 대한 연구는 외국의 경우 순환여과식 양식장 등에 적용시키는 연구가 진행되어 왔다. Lomax[16]는 생물 여과기에 침강 탱크, 포말 분리 장치 또는 기계식 여과기를 각각 조합하여 사용한 어류 양식 시스템을 비교한 결과, 비용이나 효율성의 측면에서 볼 때 포말 분리법을 함께 사용한 생물 여과기가 최적의 설계 조합이었다고 하였으며, Dwivedy[17]는 포말 선별법에 의해 굴양식장 폐수에서 부유성 유기물과 용존성 유기물을 제거할 수 있었다고 하였다. 또한 포말 분리법에 의해 유기산이 제거되게 됨에 따라 양식장수의 pH를 일정하게 유지하는 데 도움이 되었으며, 물 속의 박테리아도 제거할 수 있음을 확인하였다.

우리나라의 경우에는 외국에 비해 이에 대한 연구가 늦어 90년대 중반부터 포말분리법에 의한 양어장 순환수 처리에 관한 연구가 진행되었다 [6-8, 15]. 이들 연구에 따르면 포말 분리법에 의한 담수 중의 고형물 제거 특성을 조사한 결과, 장치의 효율에 영향을 미치는 주요 인자들은 공탑 공기유속, 체류시간, 그리고 포말층의 높이였으며 측정된 양어장수 시료 내에는 총 단백질량의 약 50%정도가 계면 활성 성분으로 포말분리의 적용 가능성이 매우 높다고 하였다.

공탑 공기유속, 체류시간이 증가함에 따라 단백질, 총질소, 암모니아

및 고형물 성분들의 제거율은 증가하였으며, 총휘발성 고형물의 제거율은 공탑 공기유속 및 체류시간(HRT)이 증가함에 따라 증가하였으나 포말층 높이가 높아짐에 따라서는 감소한다고 하였다.

또한, 포말분리기의 공탑 공기 유속 및 포말층 높이가 증가할수록 순환 수내의 용존산소도 증가하여 포말분리기는 양어장 순환수의 산소 공급 장치로도 활용될 수 있으며 어류 성장에 유해한 부유 고형물, 암모니아, 아질산성 질소를 단기간에 제거할 수 있고 어류 성장에 필요한 산소를 공급할 수 있는 매우 효과적인 방법이라고 하였다.

현재까지 진행되어온 연구들을 종합해 보면 대부분의 연구가 담수에 국한되어 있다. 담수에 대한 연구가 많은 이유는 외국의 경우 해산어보다 담수어에 대한 선호도가 높아 양식산업이 대부분 담수어 양식에 치중되어 있기 때문이다. 그러나 우리나라의 경우에는 해산어에 대한 선호도가 더 높으며 이에 따라 해수에 대한 연구가 필요하다.

한편 현재까지 연구되어 온 포말분리장치는 공기 구동식 포말분리 장치가 대부분이다. 그러나 생물학적 오염물의 제거에 응용될수 있는 포말분리 장치는 공기의 공급방식과 유체과 공기의 접촉방향에 따라 향류 공기구동식(counter current air driven type), 고속 폭기식(high speed aeration type), 벤투리식(venturi type) 포말분리 장치 등이 있으며 이들 장치들의 운전 특성에 대한 연구도 필요하다.

본 연구에서는 포말 분리법을 해수 속의 생물학적 오염물을 제거하는데 응용하고 공정에 가장 적합한 형태의 장치를 개발, 이에 대한 이론적 고찰을 통해 장치의 설계인자와 운전인자를 도출하고자 Fig. 1과 같이 연구를 수행하였다.

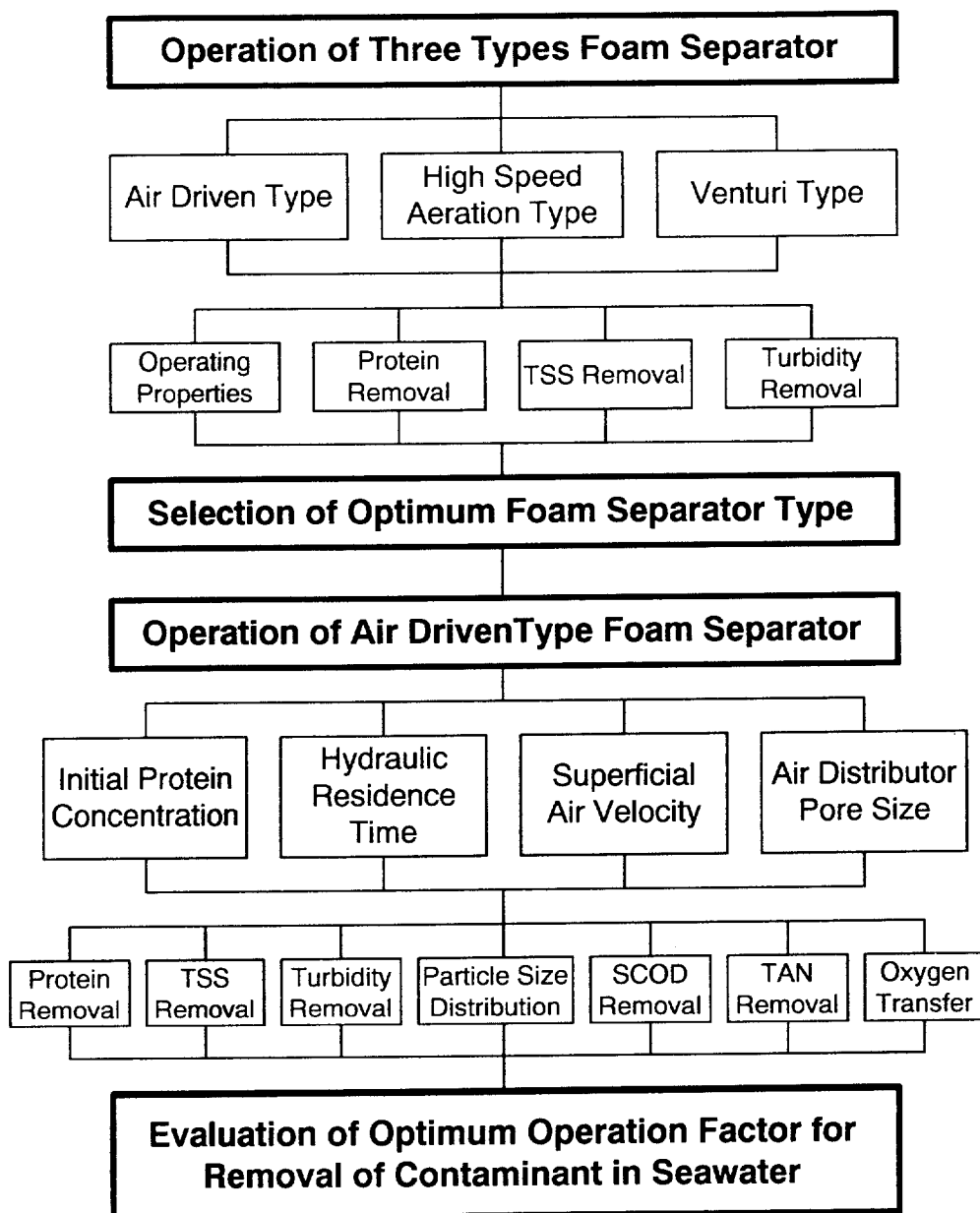


Fig. 1. Flowchart of this research.

해수 포말분리에 적합한 포말분리 장치를 선정하기 위하여 고속 폭기식 및 벤틀리식 포말분리 장치와 기존에 연구되어온 향류 공기구동식의 포말분리를 동일한 용량으로 제작, 운전하였다. 이를 통해, 각 장치의 운전 특성을 알아보았으며 수력학적 체류시간의 변화에 따른 단백질, 총 부유 고형물, 탁도와 같은 오염물의 제거속도와 제거율의 변화를 고찰하여 해수 내 오염물의 제거에 가장 적합한 포말분리기의 형태를 선정하였다.

해수 내 오염물의 제거에 가장 적합하다고 선정된 공기구동식 포말분리기의 최적 운전인자를 도출하기 위하여 실제 해수를 이용하여 초기 단백질 농도, 수력학적 체류시간, 공탑공기속도와 공기분산기 기공크기 등의 운전인자의 변화에 따른 연속 운전을 수행하였다.

각 운전인자의 변화에 따른 포말분리기의 해수 내 오염물 제거 특성의 고찰을 위해 계면활성제 역할을 하는 단백질의 제거속도와 제거율의 변화를 조사하고 단백질 제거속도식을 도출하였다.

총 부유고형물, 탁도와 같은 입자상 물질의 제거속도와 제거율에 대해서 고찰하였으며 입도 분포의 변화도 고찰하였다. 또한 용존 유기물의 지표로 용존 화학적 산소요구량에 대해서 조사하였으며 총 암모니아성 질소의 제거속도와 제거율의 변화를 조사하였다.

유입수와 유출수의 용존산소 농도와 포화도를 측정하여 총괄산소 전달계수를 구하여 포말분리기의 운전을 통해 부가적으로 얻을 수 있는 용존산소 공급 능력을 검토하였다.

2. 문헌연구

2.1. 포말 분리법

포말 분리법(foam separation method)은 용액중의 희박한 농도의 용존 물질이나 고형물질을 용액과 분리하는 기술 중의 하나이다. 포말 분리법을 미생물 산업이나 폐수처리 등 용존 물질이나 고형물질을 제거하는 공정에 적용할 경우, 조업시간이 짧고 소요부지가 적으며 다양한 규모의 여러 가지 폐수에 적용가능하며 조업 비용이 비교적 저렴한 장점을 가진다[18].

포말 분리법은 기-액 계면에 계면 활성 분자가 흡착되어 농축되는 성향을 이용한다. 포말 분리가 일어나도록 하는데 필요한 주요 성분은 계면활성제로서, 이들 분자는 적어도 1개 이상의 극성 말단부와 1개의 비극성 말단부를 가지고 있다. 물분자는 극성구조를 가지므로 소수성인 계면활성의 비극성 말단부는 물의 바깥부분 즉, 기포에 흡착됨으로써 계면활성제는 기-액 계면상에 농축되게 된다[11].

계면 활성 물질이 기-액 계면(gas-liquid interface)에 흡착되는 것은 친수기(hydrophilic side chain)와 소수기(hydrophobic side chain)를 동시에 가진 계면 활성 물질이 포함되어 있는 용액 내에 기포를 발생시킬 경우, Fig. 2-(a)와 같이 초기에는 소수기가 기체 쪽을 향하여 이동하다가 시간이 지나감에 따라 기-액 계면에 나란히 배열되고, 액본체(bulk)의 농도가 증가함에 따라 기-액 계면에 흡착되는 용질의 분자수가 점점 더 증가하여, 평형 상태에서는 Fig. 2-(b)와 같이 그 계면이 완전 포화되어 표면과잉농도에 이르는 현상에 의한 것이다[11, 19].

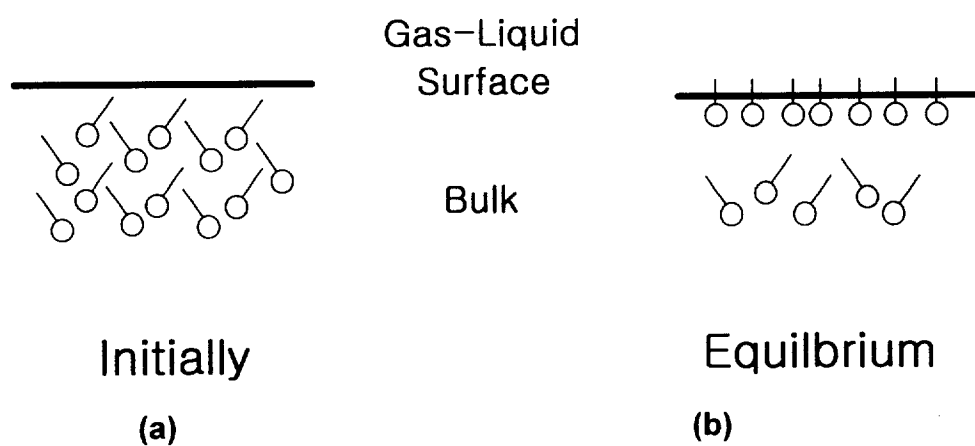


Fig. 2. Surface and bulk phase equilibrium[11].

기-액 계면에서의 평형 흡착 현상은 다음의 Gibbs 식으로 표현된다.

$$\Gamma = -\frac{a}{RT} \cdot \frac{d\gamma}{da} \quad (1)$$

여기서 Γ 는 표면 과잉(surface excess) : gmol/cm^2

a 는 용질의 활동도(activity) : gmol/cm^3

R 은 기체상수 : $8.48 \times 10^6 \text{ g/s}^2 \cdot \text{gmol} \cdot \text{K}$

T 는 절대온도 : K

γ 는 표면장력(surface tension) : g/s^2 이다.

(1)식은 사용된 가정이나 조건들에 따라 여러 가지 형태의 식들이 주어지며[10] 포말 분리의 경우 대체 용액 속의 용질의 농도가 낮기 때문에 활동도를 구하기 쉬운 변수인 농도로 표현할 수 있으므로 (1)식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma = -\frac{c}{RT} \cdot \frac{d\gamma}{dc} \quad (2)$$

여기서 c 는 용액 속의 용질의 농도 : gmol/cm^3 이다.

Γ 를 구하기 위해 (2)식을 변형하면 다음과 같다.

$$\Gamma = -\frac{1}{RT} \cdot \frac{d\gamma}{d(\ln c)} \quad (3)$$

(3)에서 표면장력 γ 를 $\ln c$ 에 대해 작도하면 기울기는 $1/(RT\Gamma)$ 가 되

므로 이미 알고 있는 값 R 과 T 를 대입하여 I 를 구할 수 있다. 작도된 선도에서 기울기가 급격히 증가하는 지점의 농도를 임계 미셀 농도(critical micelle concentration, CMC)이라 하며 이 지점이 포말 분리가 가장 성공적인 농도로 알려져 있다[11].

용존 물질이나 고형 물질을 포말 분리를 이용하여 분리할 경우 용액 속에서 목적물질을 제거한 후 정제할 때 제거해야 할 용액의 양이 매우 적은 장점을 가진다. 포말 분리공정에서 포말에 흡착되어 유출되는 목적 물질에 동반되는 액체량은 Fig. 3에서 보는바와 같이 포말을 형성하는 미세량과 포말사이의 모세관에 들어있는 양 뿐 이므로 고농도의 농축물을 얻을 수 있다[11].

포말 분리공정에서 목적성분이 농축되는 과정은 액체층에서 상승하는 기포에 의해 목적성분이 기-액 계면에 포화농도까지 흡착되는 과정과 액층 상부에 포말이 모여 농축되는 과정으로 이루어진다. 포말이 농축되는 과정은 액층 상부에 모인 Fig. 4-(a)와 같은 형태의 습윤한 구형의 포말을 형성하는 용액성분이 중력에 의해 액층으로 하강하게 되면, 포말은 Fig. 4-(b)와 같이 12면체의 건조 포말로 변하게 되는데 완전한 건조포말이 되면 포말은 계면활성을 가진 목적 물질만으로 구성되어 매우 높은 농축 효과를 얻을 수 있다.

포말 분리시 계면 활성 성분만이 액본체와 분리되는 것이 아니라 계면활성이 없는 이온 성분이나 고형물의 제거도 가능하다. 이는 Fig. 5와 같이 계면 활성 물질과 반대의 전하를 가진 이온성분이나 고형물이 기-액 계면에 흡착된 계면 활성 물질과 전기적 결합을 하여 포말에 동반되어 흡착되므로, 이와 같은 현상을 이용하여 계면 활성이 없는 용존 이온성분이나 고형물을 액본체와 분리할 수 있다[15].

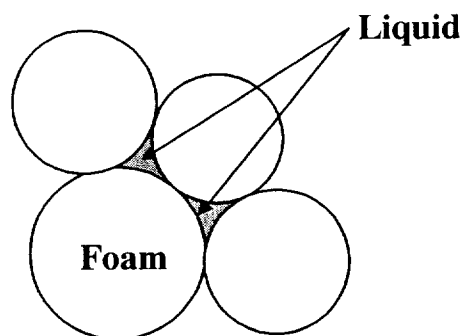
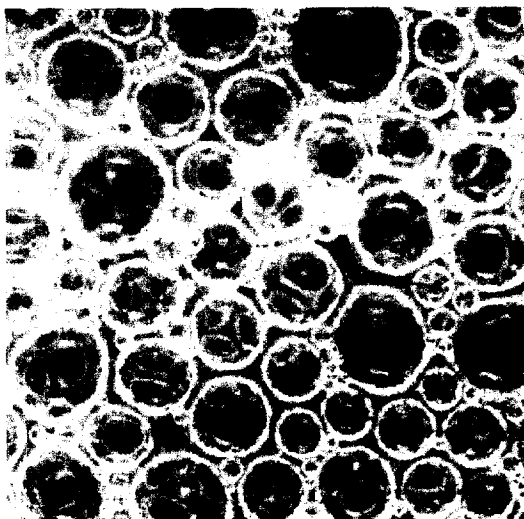
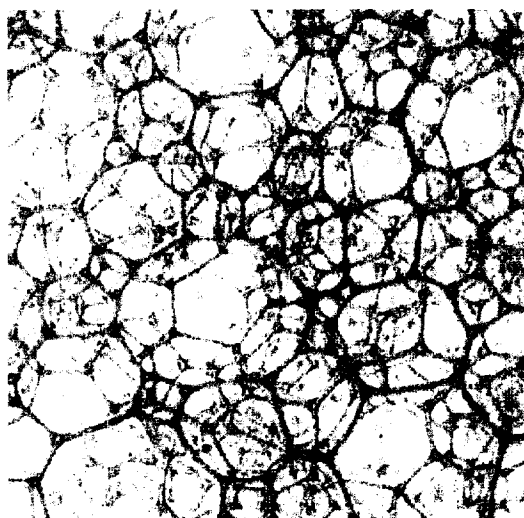


Fig. 3. Cross section of a liquid capillary in foam[11].



(a) Wet foam



(b) Dry foam

Fig. 4. Photograph of wet foam and dry foam.

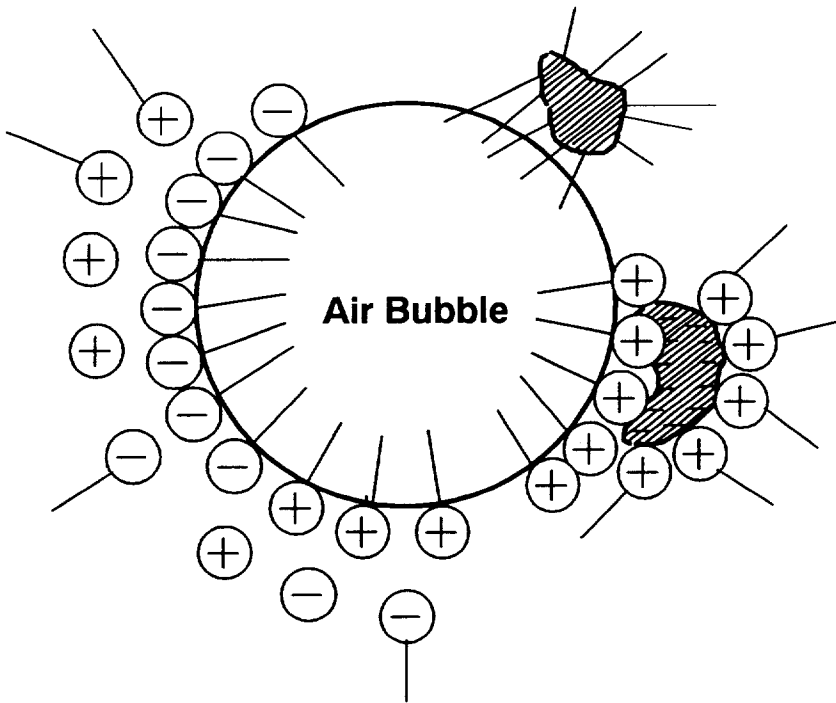


Fig. 5. Bubble, particle and surfactant interactions during bubble separation[13].

2.2. 포말 분리법의 분류

포말 분리법은 크게 포말 분별법(foam fractionation)과 포말 부상법(foam flotation)으로 나뉘며 포말 부상법은 다시금 여러 가지로 분류된다. Fig. 6에 이러한 분류를 도시하였다.

포말 분별법은 용액 속의 용존물질을 기포(bubble) 표면에 흡착시킨 후 포말(foam)에 동반시켜 분리시키는 것으로 용존 유기물이나 수용성 물질을 분리 및 농축하는 방법이다.

포말 부상법은 입자상 물질을 포말에 동반시켜 분리하는 것으로 광석 부상법(ore flotation), 거대 부상법(macroflotation), 극소 부상법(microflotation), 침전 부상법(precipitate flotation), 이온 부상법(ion flotation), 분자 부상법(molecular flotation), 흡착콜로이드 부상법(adsorbing colloid flotation)으로 나누어진다.

광석 부상법은 수중의 광물질(mineral) 성분을 분리하는 것이며 거대 부상법과 극소 부상법은 분리하고자 하는 입자의 크기에 따라 육안으로 식별이 가능한 물질을 분리하는 것은 거대 부상법, 육안으로 인식이 불가능한 콜로이드나 미생물을 분리하는 것은 극소 부상법이다[11].

침전 부상법은 용액 중의 이온을 침전물 형태로 만들어 그 침전물의 표면을 계면 활성제를 이용하여 소수성이 되게 한 후 포말에 흡착시켜 침전물이 흡착된 포말을 회수하는 것이다.

이온 부상법은 용액 중의 이온을 계면 활성제로 활성화된 기-액 계면에 흡착되도록 하거나 이온을 계면 활성제와 결합시켜 소수성을 가지게 하여 포말에 흡착시켜 포말을 회수하는 기술이며 분자 부상법은 불용성 물질을 포집체(collector)가 포함된 포말에 의해 분리하는 기술이다.

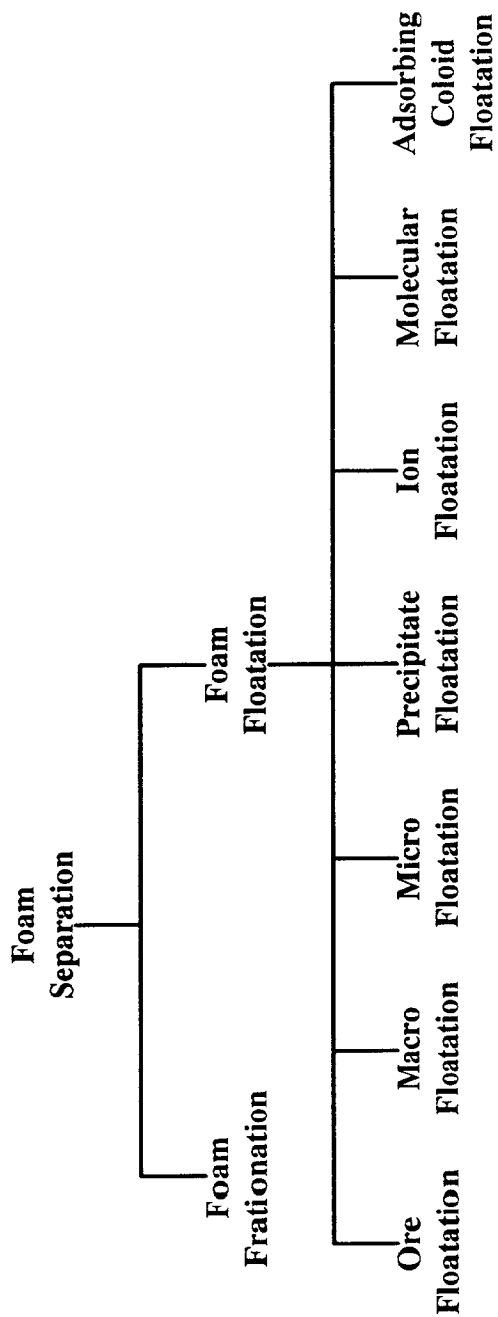


Fig. 6. Schematic classification of the foam separation technique[11].

마지막으로 흡착 콜로이드 부상법은 용액 내에 Fe(III)나 Alum 등을 첨가하여 흡착 콜로이드를 만든 후, 이 흡착 콜로이드의 표면 위에 용액 중의 이온성분이나 부유물질을 흡착 또는 공침시켜 생성된 침전물을 소수성으로 전환시켜 상승하는 기포의 계면에 흡착시켜 제거시키는 방법이다[9].

2.3. 포말분리장치

포말분리 장치는 foam separator, foam fractionator 또는 protein skimmer라고 불리우고 있으며 기포에 수중의 용존 유기물(DOCs : Dissolved Organic Compounds)과 부유 고형물을 흡착시켜 이를 농축시켜 제거하는 장치이다.

포말분리 장치는 크게 separation column, foam separation neck, collection cup으로 구성된다. Separation column은 폐수와 용존 유기물이 접촉하는 부분으로 유체가 차지하는 부분이다. Foam separation neck은 foam riser tube라고도 하며 단백질을 동반한 포말(protein laden foam)이 폐수와 분리되고 젖은 거품(wet foam)에서 건조한 거품(dried foam)으로 건조되는 부분으로 액위부터 foam collection cup 까지의 부분이다. 마지막으로 collection cup은 riser tube로부터 유출된 포말을 수집하여 일부는 폐수 속으로 재순환시키고 일부는 밖으로 배출시키는 부분이다.

현재 사용되고 있는 포말분리장치는 공기의 공급방식과 유체와 공기의 접촉방향에 따라 향류 공기구동식(counter current air driven type, CCAD), 고속 폭기식(high speed aeration type, HSA), 벤츄리식(venturi type), down-draft type 등이 있으며 공기구동 방식이 가장 일반적인 형태이다.

공기펌프에 의해 발생된 공기를 공기분산기를 통해 액체 속으로 공급하는 공기구동식 포말분리 장치의 경우 공기와 액체의 접촉 방향에 따라 병류 접촉식(parallel current type)과 향류 접촉식(counter current type)이 있다.

병류 접촉식은 포말분리 장치를 수중에 설치하여 상승하는 공기에 의해 액체를 동반 상승시키는 방식으로 별도의 액송 펌프는 필요하지 않으나 제거 효율이 낮은 단점이 있다. 반면 향류접촉식은 액체는 상부에서 하부로 공기는 하부에서 상부로 흘러 접촉시키는 방식으로 가장 광범위하게 사용되고 있는 형태이다.

고속폭기식 포말분리기는 순환수를 ejector에 유입시켜 공기를 흡입, 삼입관을 통해 포말분리기의 하부로 분사시켜 생성되는 기포를 이용하는 방식으로 별도의 공기 펌프가 필요 없으며 순환수의 유량이 많은 경우 더 많은 기포가 생성되어 높은 단백질 제거 효율과 용존산소 공급 효율을 기대할 수 있다.

벤츄리식 포말분리기는 액체 유입구에 모세관 노즐이 설치된 venturi를 설치하여 순환수 유입시 발생하는 제트기류에 의해 공기를 흡입, 포말분리관 내에 기포를 생성시켜 단백질을 제거하는 방식으로 별도의 공기 펌프를 필요로 하지 않으면서도 높은 단백질 제거효율과 용존산소 폭기 효율을 기대할 수 있다.

Down-draft type 포말분리기 순환수를 강한 압력으로 수면에 분사시켜 생성되는 기포를 이용하는 방식으로 별도의 공기 펌프가 필요 없으며 순환수의 유량이 많은 경우 더 많은 기포가 생성되어 높은 단백질 제거 효율과 용존산소 공급 효율을 기대할 수 있다.

3. 실 험

3.1. 포말분리 장치의 비교

3.1.1. 향류 공기구동식 포말분리기

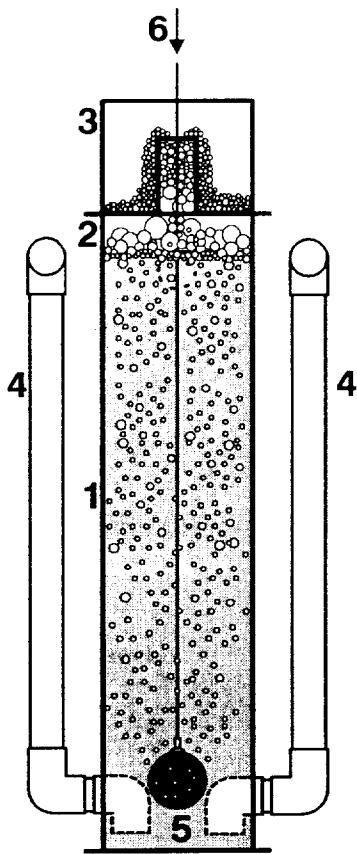
본 연구에서 사용한 향류 공기구동식 포말분리 장치는 Fig. 7에서 보는 바와 같은 형태로 separation column과 foam riser tube는 일체형으로 내경 10 cm 높이 50 cm의 아크릴 파이프를 사용하여 제작하였으며 액체 용적은 3 L 였다.

Collection cup은 내경 10 cm, 높이 10 cm의 아크릴 파이프에 내경 2 cm의 삽입관을 통해 포말이 유입되도록 제작하였고 유입관과 유출관은 1 inch PVC pipe를 사용하였다. 기포를 발생시키는 공기분산기는 직경이 3 cm인 air stone을 사용하였으며 공기는 air pump를 이용하여 5 L/min의 유량으로 주입하였다.

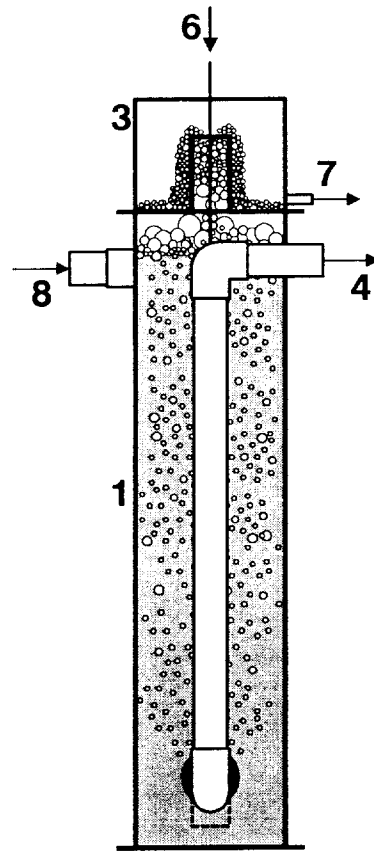
3.1.2. 고속폭기식 포말분리기

본 연구에서 사용한 고속폭기식 포말분리기는 Fig. 8과 같은 형태로 공기구동식 포말분리기와 동일한 규격으로 제작하였다. 액체의 유입과 동시에 공기를 흡입할 수 있도록 포말분리기 상부에 ejector를 설치하였으며 흡입된 공기와 양어장수가 포말 분리기 하부까지 내려 갈 수 있도록 내경 2 cm의 삽입관을 설치하였다.

포말분리기 하부에는 삽입관에서 분출된 기포가 장치 외부로 유출되지 않도록 하기 위하여 방해판을 설치하였다.



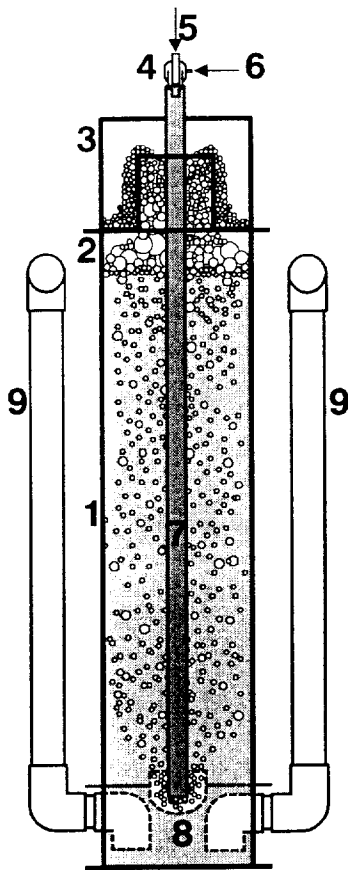
Front View



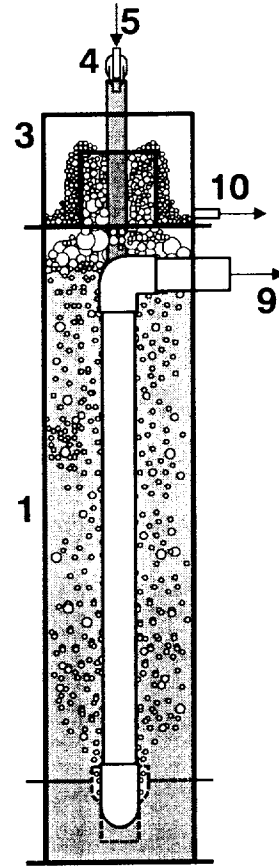
Side View

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Separation Column | 2. Foam Riser Tube |
| 3. Collection Cup | 4. Water Outlet |
| 5. Air Distributor | 6. Air Inlet |
| 7. Foam Outlet | 8. Water Inlet |

Fig. 7. Schematic diagram of counter current type foam separator.



Front View



Side View

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Separation Column | 2. Foam Riser Tube |
| 3. Collection Cup | 4. Ejector |
| 5. Water Inlet | 6. Air Inlet |
| 7. Draft Tube | 8. Baffle |
| 9. Water Outlet | 10. Foam Outlet |

Fig. 8. Schematic diagram of high speed aeration type foam separator.

3.1.3. 벤튜리식 포말분리기

본 연구에서 사용한 벤튜리식 포말분리기는 Fig. 9와 같은 형태로 규격은 공기구동식 포말분리기와 동일하게 제작하였으며 포말분리기 측면에 공기 유입 노즐이 설치된 벤튜리를 2개 설치하여 양어장수가 유입됨과 동시에 공기를 흡입할 수 있도록 하였다. 벤튜리는 직경 2.5 cm, 길이 10 cm의 아크릴 봉을 가공하여 사용하였다. 상·하부 벤튜리를 통과하는 폐수의 유량은 동일하게 조절하였다.

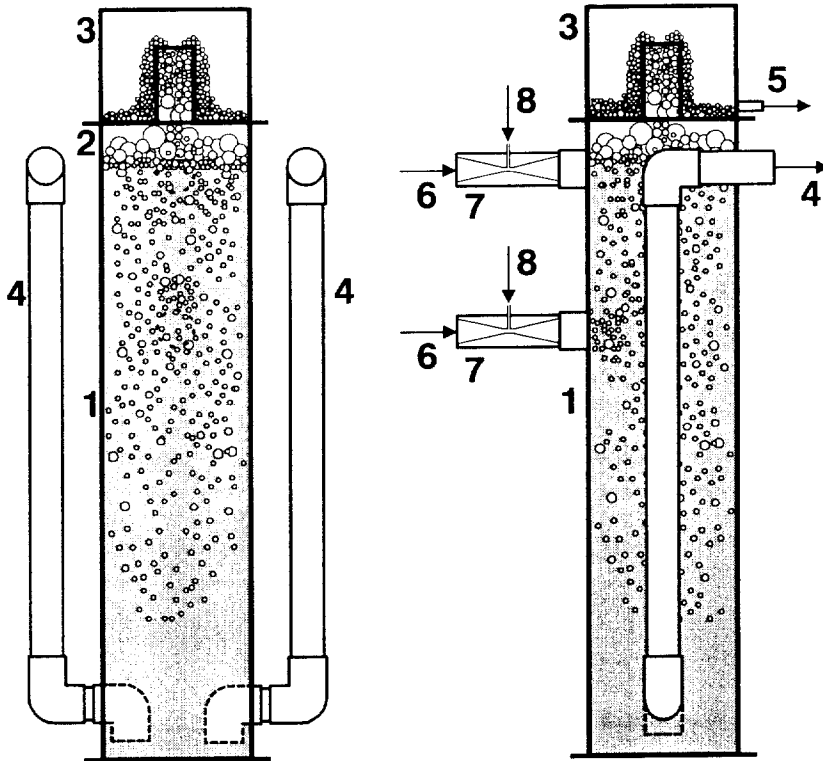
3.1.4. 실험재료 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 모식도는 Fig. 10과 같다. 폐수의 공급은 원심펌프를 이용하였으며 동일한 유량으로 공급하기 위하여 공급 탱크의 수두를 일정하게 조절하였다. 수력학적 체류시간(hydraulic residence time)의 조절은 밸브를 이용하였으며 유량의 측정은 rotameter를 이용하였다.

실험에 사용한 폐수는 부경대학교 부속 양어장의 순환수를 이용하였으며 초기 단백질 농도는 양어장에서 발생한 포말 농축물을 양어장 순환수에 첨가하여 35 g/m³으로 조절하여 사용하였다.

3.1.5. 분석방법

단백질의 농도 분석은 Lowry method[19]에 의해 수행하였으며 총 부유고형물의 농도는 standard method[20]에 따라 vacuum filtration method로 분석하였다. 탁도는 탁도계(Model 2100N, HACH Co. LTD)를 이용하여 측정하였다.

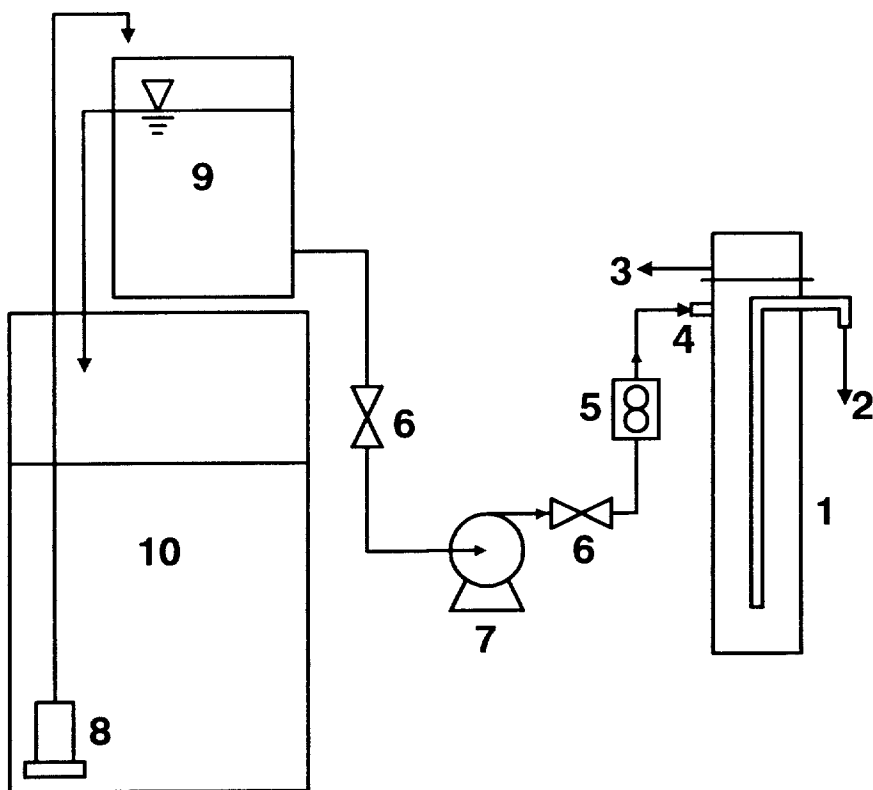


Front View

Side View

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Separation Column | 2. Foam Riser Tube |
| 3. Collection Cup | 4. Water Outlet |
| 5. Foam Outlet | 6. Water Inlet |
| 7. Venturi | 8. Air Inlet |

Fig. 9. Schematic diagram of venturi type foam separator.



- | | |
|---------------------|-------------------|
| 1. Foam Separator | 2. Water Outlet |
| 3. Foam Outlet | 4. Water Inlet |
| 5. Rotameter | 6. Valve |
| 7. Centrifugal Pump | 8. Submerged Pump |
| 9. Feeding Tank | 10. Storage Tank |

Fig. 10. Schematic diagram of experimental unit.

3.2. 해수 내 생물학적 오염물 제거 실험

3.2.1. 실험장치

본 연구에서 제작하여 사용한 포말분리 장치는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 separation column과 foam riser가 일체형인 형태로 내경 5 cm 높이 50 cm의 acrylic pipe를 사용하여 제작하였으며 액본체의 용적은 1 L였다. Foam collector는 내경 5 cm, 높이 10 cm의 acryl pipe에 내경 2 cm의 삽입관을 통해 포말이 유입되도록 제작하였다. 유입관과 유출관은 2 cm acrylic pipe를 사용하였다.

포말분리기 하부에는 유리 여과기를 이용한 공기분산기를 접합시켜 기포가 작고 균일하게 발생하여 포말에 의한 분리효율이 최대가 될 수 있게 하였다. 공기의 공급은 공기펌프를 이용하였으며, 공기 유량은 공기펌프의 needle valve와 유량계의 조절밸브를 이용하여 조절하였다. 실험수는 정량 펌프를 이용하여 액층 상부에서 일정한 유량으로 공급하고, 처리수는 하부에서 유출 되도록 하였으며 공기는 탑의 하부에서 공급함으로써 향류식 접촉을 유도하였다.

3.2.2. 실험재료 및 방법

실험에 사용한 해수는 부산지역 횃집에 공급되는 것으로서 염분도는 30‰이었으며 단백질 성분은 검출되지 않았다. 실험수는 실제 양어장 등에서 발생하는 폐수와 유사하도록 하기 위하여 상기 해수에 부경대학교 부속 순환여과식 양어장에서 발생한 양식 폐기물을 희석시켜 단백질 농도를 조절하여 실험에 사용하였다.

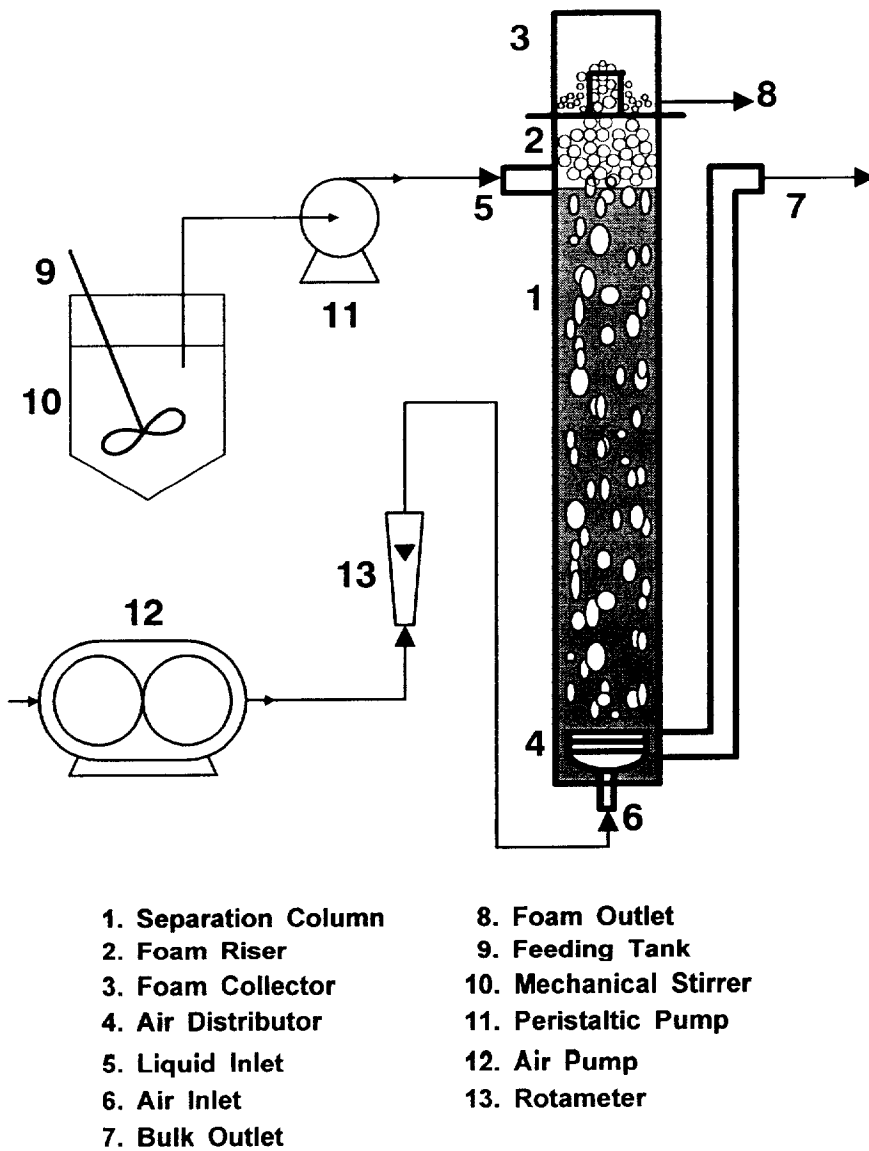


Fig. 11. Schematic diagram for the biological contaminant removal from sea water by using foam separator.

초기 농도 영향에 대한 실험은 수력학적 체류시간을 2.34 min, 공탑 공기유속은 0.85 cm/sec으로 고정하여 단백질 농도가 12.06, 23.68, 37.97, 49.28, 62.36 g/m³ 인 실험수를 연속적으로 공급하여 실험하였다. 이때 공기분산기로 사용한 유리여과기의 규격은 G3였다.

수력학적 체류시간 변화 실험은 G3규격의 유리여과기를 사용하여 공탑 공기유속은 0.85 cm/sec으로 고정하고 Table 1과 같은 조성을 가지는 폐수를 공급하여 수행하였다. 수력학적 체류시간의 변화는 8.76, 3.48, 1.40, 0.77, 0.48, 0.28 min으로 조절하였다.

공탑공기 유속 변화 실험은 수력학적 체류시간을 2.05 min으로 고정하여 Table 2와 같은 조성을 가지는 폐수를 공급하여 수행하였다. 유리여과기의 규격은 G3이었으며 공급공기의 유량을 500, 1000, 1500, 2000, 2500 mL/min으로 변화시켜 공급하였으며 각각의 공탑 공기유속은 0.424, 0.85, 1.27, 1.70, 2.12 cm/sec이었다.

공기분산기 기공크기 변화 실험은 90 - 150 μ m의 기공크기를 가지는 G1 size, 40 - 90 μ m의 기공크기를 가지는 G2 size, 3 - 15 μ m의 기공크기를 가지는 G4 size 등 세 가지 규격의 유리 여과기와 기공크기를 알 수 없는 시판용 직경 3cm의 산기석을 공기 분산기로 사용하여 수행하였다. 이때 수력학적 체류시간 2.05 min, 공탑 공기유속 0.85 cm/sec의 조건으로 행하였으며 공급폐수의 조성은 Table 2와 같았다.

각 실험에서 사용한 폐수의 pH는 7.9 ± 0.1 이었으며 온도는 26 ± 1 °C로 조절하여 실험하였다. 시료의 채취는 정상상태에 도달한 운전 개시 후 수력학적 체류시간의 5배가 경과한 후부터 1회에 2개의 시료를 수력학적 체류시간의 2배 간격으로 3회 채취하여 평균 분석값을 실험자료로 이용하였다.

Table 1. Water quality of feeding sea water in hydraulic residence time change experiment

Component	Concentration
Salinity	30.00 ‰
Protein	16.18 g/m ³
Total Suspended Solid	35.00 g/m ³
Turbidity	17.86 NTU
Soluble Chemical Oxygen Demand	15.35 g/m ³
Total Ammonia Nitrogen	0.41 g/m ³

Table 2. Water quality of feeding sea water in superficial air velocity and air distributor pore size change experiments

Component	Concentration
Salinity	30.00 ‰
Protein	27.61 g/m ³
Total Suspended Solid	57.33 g/m ³
Turbidity	26.87 NTU
Soluble Chemical Oxygen Demand	18.08 g/m ³
Total Ammonia Nitrogen	0.72 g/m ³

3.2.3. 분석방법

담수 중의 단백질 농도 분석은 Lowry's method[19]를 이용하였으며 해수 중의 단백질 농도 분석은 UV₂₈₀ method[21]를 이용하여 수행하였다. 총 부유고형물은 standard method[20]에 따라 GF/C여지로 여과한 후 염소이온이 검출되지 않을 때까지 증류수로 세척하여 분석하였다.

용존 화학적 산소 요구량은 GF/C 여지로 여과한 시료를 알칼리성 KMnO₄ method[22]에 따라 시료 채취 즉시 분석하였으며 탁도의 분석은 turbidimeter (HACH, 2100AN)를 이용하였다.

총 암모니아성 질소의 분석은 NH₃ ion selective electrode (ORION Research Inc., 9512BN)가 부착된 Ion meter (ORION Research Inc., Model 720A)를 이용하여 이온선택성 전극법[20]에 의해 분석하였다. 용존 산소는 DO meter (YSI Inc. Model 52)를 이용하여 유입수의 농도를 측정한 후 유출수의 농도는 30초 간격으로 연속 측정하여 정상상태에서의 평균값을 취하였다.

각 시료의 입도 분포는 100 μ m의 aperture를 이용한 입도 분석기 (COULTER Electronics, COULTER MULTISIZER II)를 사용하여 측정하였다.

3.3. 자료 계산방법

3.3.1. 제거속도 계산

단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소 등의 제거속도는 유입수와 유출수의 각 성분의 농도와 포말 발생량을 측정하여 계산하였다.

각 성분의 제거속도는 포말에 의해 제거되는 양과 동일하므로 다음과 같다.

$$-r_a = \frac{Q_f \cdot C_{f,a}}{V} \quad (5)$$

여기서 $-r_a$ 는 각 성분의 제거속도($\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$ 또는 NTU/min), Q_f 는 발생한 포말의 유량(m^3/min), $C_{f,a}$ 는 각 성분의 포말층 농도(g/m^3 또는 NTU)이며 V 는 포말분리기의 액본체 용적(m^3)이다.

포말에 의해 제거된 각 성분의 양은 물질 수지식에 의해 유입수와 유출수에 포함된 양의 차와 동일하므로 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-r_a = \frac{C_{i,a} \cdot Q_i - C_{o,a} \cdot Q_o}{V} \quad (6)$$

여기서 $C_{i,a}$ 와 $C_{o,a}$ 는 각 성분의 유입수 및 유출수의 농도(g/m^3 또는 NTU)이며 Q_i 와 Q_o 는 실험수의 유입수 및 유출수의 유량(m^3/min)이다.

유출수의 유량은 유입수 유량과 포말 유량의 차와 같으므로 식 (6)은 식 (7)로 정리된다.

$$-r_a = \frac{C_{i,a} \cdot Q_i - C_{o,a} \cdot (Q_i - Q_f)}{V} \quad (7)$$

3.3.2. 제거율 계산

각 성분의 제거율은 유입수와 유출수의 각 성분의 농도와 유량을 측정

하여 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$R\%_a = \frac{C_{i,a} - C_{o,a}}{C_{i,a}} \times 100 \quad (8)$$

3.3.3. 용존산소 전달 효율

포말분리기 내에서 용존산소의 흡수속도는 다음과 같다[23].

$$r_{DO} = K_L a (C_{s,DO} - C_{o,DO}) \quad (9)$$

여기서 r_{DO} 는 용존산소 흡수속도($\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$), $K_L a$ 는 총괄 용존산소 전달 계수(min^{-1}), $C_{s,DO}$ 는 용존산소의 포화농도(g/m^3)이며 $C_{o,DO}$ 는 유출수의 용존산소 농도(g/m^3)이다.

포말분리기의 용존산소 흡수속도는 액체 체적당 증가되는 용존산소의 양과 동일하므로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{DO} = \frac{(C_{o,DO} - C_{i,DO}) \cdot Qi}{V} \quad (10)$$

식(2)와 (3)을 등식으로 두고 총괄 용존산소 전달 계수로 정리하면 다음과 같다.

$$K_L a = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{(C_{o,DO} - C_{i,DO})}{(C_{s,DO} - C_{o,DO})} \quad (11)$$

여기서 τ 는 V/Q_i 로서 수력학적 체류시간(min)이다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 포말분리 장치의 비교

본 연구에서는 해수 내 오염물 제거에 가장 적합한 장치를 선정하고자 고속 폭기식 및 벤츄리식 포말분리 장치와 기존에 연구되어온 향류 공기구동식 등 세 가지 형태의 포말분리 장치를 동일한 용량으로 제작하여 운전 특성을 비교하였다.

또한 순환여과식 양어장 순환수에 함유된 단백질, 부유 고형물과 탁도의 제거실험을 통해 각 포말분리 장치의 종류에 따른 각 성분의 제거 특성을 알아보려고 하였다.

4.1.1. 포말 분리장치의 운전 특성

공기구동식 포말분리기는 기포를 외부의 공기펌프에서 주입된 공기에 의해 발생시키므로 유입 유량과는 거의 무관하게 기포를 발생시킬 수 있다. 그러나 고속 폭기식과 벤츄리식 포말분리장치는 양어장 수가 장치로 유입될 때 대기중의 공기를 동반 흡입하여 기포를 발생시키므로 유입 유량에 따라 발생하는 기포의 유량이 변화하게 된다. 포말분리가 수행될 수 있는 수력학적 체류시간을 측정해 본 결과, 공기구동식 포말분리기는 거의 모든 유량에 대해서도 장치를 운전할 수 있었으나 고속 폭기식 포말분리기는 0.38 min, 벤츄리식 포말분리기는 0.23 min 이하의 수력학적 체류시간에서 포말분리가 수행될 수 있었다. 이후의 실험은 공기 구동식 포말분리기는 0.13 - 4.0 min, 고속 폭기식 포말분리기는 0.19 - 0.38 min, 벤츄리식 포말분리기는 0.13 - 0.23 min의 수력학적 체류시간의 범위에서 수행하였다.

포말분리 장치를 현장에 적용함에 있어 제거효율도 중요하지만 운전비용은 더 중요하다고 할 수 있다. 포말분리 장치의 운전에서 경비에 소요되는 부분은 장치에 양어장 수를 공급하는 액송펌프의 운전과 공기 주입시 소요되는 공기 공급장치의 운전에서 소요되는 동력이 있다.

공기 구동방식 외의 두 가지 장치는 공기 공급을 별도의 장치 없이 양어장 수의 공급과 동시에 수행되므로 액송펌프에 의한 운전 경비의 차이를 측정하기 위해 양어장 순환수가 각 포말분리장치를 통과함에 따라 발생하는 압력손실을 측정하고 하였다.

Fig. 12는 동일한 원심 펌프를 이용하여, 동일 유량을 각 포말분리장치를 통과 시켰을 때 발생하는 유량의 변화를 도시한 것이다. 이 때 나타나는 유량의 변화는 장치에서 발생하는 압력손실에 의한 것으로서 손실된 압력은 운전 경비를 증가시킨다[24].

그림에서 보는 바와 같이 공기 구동식 포말분리기의 경우 아무런 장치도 없는 빈 원통관과 거의 동일한 유량을 보여 압력손실이 거의 없음을 알 수 있었으나 벤츄리식 포말분리기는 유입된 유량의 33.9%만이 통과되는 것으로 나타나 66.1%정도의 압력 손실이 발생하는 것으로 생각되었다.

고속 폭기식 포말분리기는 벤츄리식 포말분리기보다 더 낮은 23.3% 만의 압력이 회복되는 것으로 나타나 이 둘 포말 분리 장치를 운전하기 위해서는 높은 압력 손실을 보전할 수 있는 고압의 펌프를 사용해야 할 것으로 생각되었다.

각 포말분리 장치의 장치 특성과 운전 특성은 Table 3에 비교, 요약하여 나타내었다.

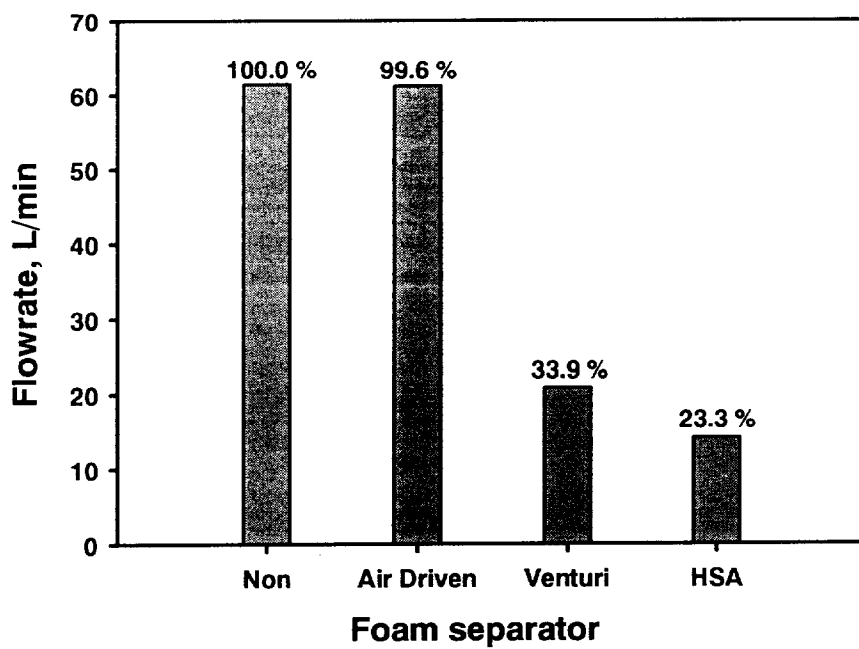


Fig. 12. Flowrate of three types of foam separator.

Table 3. Comparison of three types of foam separator

Type Characters	Counter current air driven type	High speed aeration type	Venturi type
Liquid pump	needed (low pressure)	needed (high pressure)	needed (high pressure)
Air pump	needed	no needed	no needed
Head loss	-	77 %	66 %
Operating HRT	any flowrate available	< 0.38 min (9.17 L/min)	< 0.23 min (15.2 L/min)

4.1.2. 단백질 제거 특성

양어장에서 단백질 성분은 미접취 사료나 어류의 배설물에 포함되어 있는 단백질이 순환수에 용출되어 발생하며 단백질의 질소 성분은 미생물에 의해 암모니아로 분해되기 때문에 신속한 제거가 필요하다[25]. 단백질은 소수기와 친수기를 모두 가지고 있어[26] 별도의 계면활성제를 첨가하지 않고도 포말분리를 가능하게 해준다[15].

포말분리장치의 단백질 제거 효율을 알아보기 위하여 세 가지 포말분리장치를 이용하여 양어장 순환수를 연속적으로 공급하면서 수력학적 체류시간(hydraulic residence time)을 변화시킴에 따른 제거속도 및 제거율의 변화를 측정하여 그 결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 각각 나타내었다.

제거속도란 일정체적의 포말분리 장치가 일정시간동안 제거할 수 있는 물질의 양을 나타내는 것이고 제거율은 유입수 농도와 순환수가 포말분리장치를 통과할 때 감소된 농도의 비를 나타내는 것이다. 제거속도와 제거율은 모두 포말분리장치의 성능을 판단하는 기준이 되나 제거율은 유입수와 유출수의 농도비에 의해서만 결정되므로 장치를 통과하는 유량의 변화에 대한 고려사항이 없어 얼마나 많은 양의 오염물질을 제거하는가 하는 정량적 평가는 제거속도를 통해서 판단할 수 있다.

순환여과식 양어장이나 활어 수조의 순환수를 처리하는 목적은 사육조내 오염물질의 농도를 낮게 유지하는 것이다. 순환여과식 양어장의 수처리공정은 일반적인 폐수처리 공정과는 달리 수처리 공정에서 배출된 유출수가 사육조를 거쳐 다시 수처리 장치로 유입되는 재순환 공정이다[27]. 재순환공정의 경우 반응기를 한번 통과할 때의 제거율도 중요하지만 1회의 흐름을 통해 제거된 암모니아성 질소의 제거율이 작다고 하더라도 유출수를

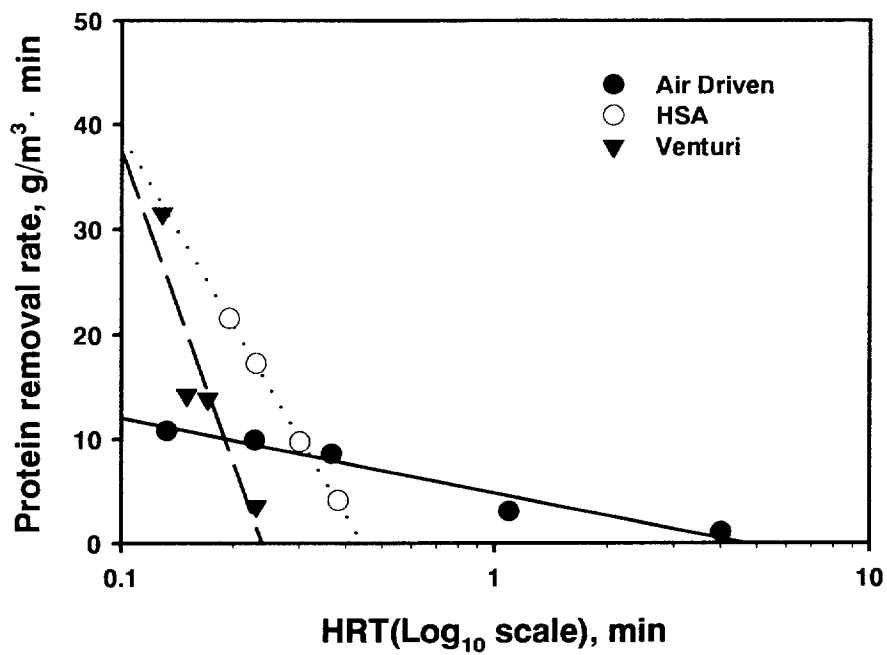


Fig. 13. Protein removal rate with respect to hydraulic residence time.

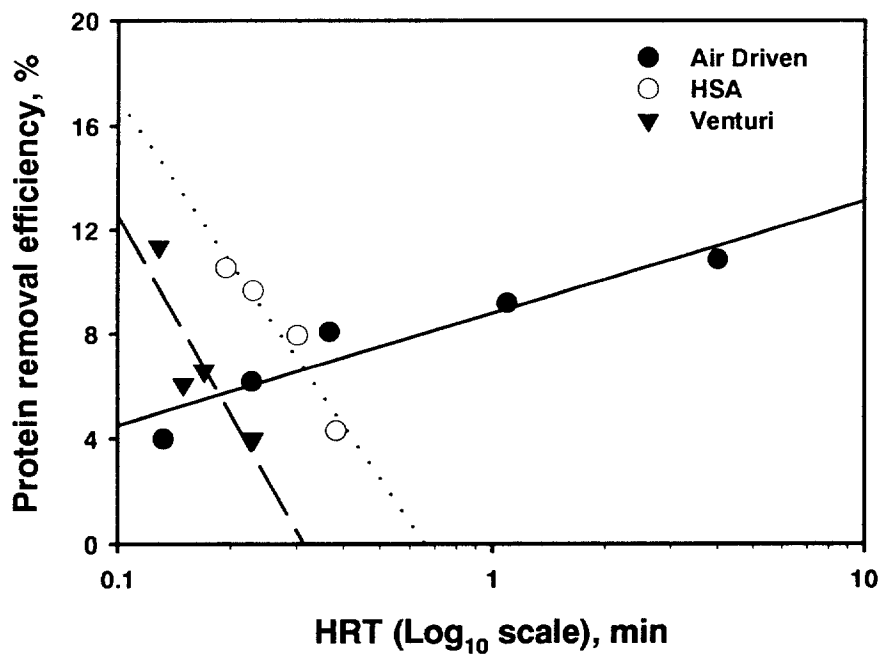


Fig. 14. Protein removal efficiency with respect to hydraulic residence time.

재순환 시키면 원하는 제거율을 얻을 수 있으므로 반응기 1회 통과 시 높은 제거율을 유지하는 것보다는 제거속도를 높게 유지하는 것이 더 중요하다[28]. 그러므로 제거 속도가 최대일 때 반응기의 성능이 최대라고 볼 수 있다.

그림에서 나타난 바와 같이 단백질 제거속도는 유량이 감소하여 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 단백질 제거속도는 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. 공기 구동식 포말분리기의 경우 수력학적 체류시간이 0.13 min에서 4.01 min으로 증가함에 따라 단백질 제거속도는 $10.8 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 에서 $1.1 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 로 감소하였으나 제거율은 4.0%에서 10.9%로 증가하는 것으로 나타났다. 고속 폭기식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기는 수력학적 체류시간이 각각 0.19 min에서 0.38 min, 0.13 min에서 0.23 min으로 증가함에 따라 단백질 제거속도가 $21.6 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 에서 $4.2 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, $31.5 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 에서 $3.6 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 로 감소하여 공기 구동식 포말분리기와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 단백질 제거율은 각각의 수력학적 체류시간의 증가에 대해 고속 폭기식 포말분리기는 10.6%에서 4.3%, 벤츄리식 포말분리기는 11.4%에서 2.3%로 감소하여 공기 구동식 포말분리기와는 반대의 현상을 나타내었다.

0.32 min 이하의 수력학적 체류시간에서는 고속 폭기식 포말분리기가 공기 구동식보다 더 높은 제거 속도를 보였으며 벤츄리식 포말분리기는 0.21 min 이하의 수력학적 체류시간에서 공기 구동식보다 높은 제거속도를 나타내었다. 그러나 벤츄리식 포말분리기는 고속 폭기식 포말분리기에 비해 전반적으로 낮은 제거속도를 나타내었다.

공기 구동식 포말분리기의 단백질 제거율이 체류시간이 길어짐에 따라 단백질 제거율이 증가하는 현상은 체류시간이 길수록 기포와 단백질이 접촉하는 시간이 길어져서 흡착기회가 증가하는 현상[7]에 의한 것으로 생각된다. 고속 폭기식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기의 경우 공기 구동식 포말분리기와 달리 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 제거율이 감소하는 것은 공기 구동식 포말분리기의 경우 공기를 외부에서 강제적으로 유입시키므로 수력학적 체류시간에 무관하게 공기의 유입량이 일정하나 고속 폭기식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기는 유입 액량이 감소함에 따라 유입되는 공기량도 감소하게 되므로 발생하는 기포의 수가 감소하여 제거율이 낮아지는 것으로 생각된다.

단백질 제거속도가 수력학적 체류시간이 감소할수록 증가되는 것은 유량이 증가함에 따라 유입되는 단백질의 양이 많아짐에 따른 현상에 의한 것으로 생각된다. 유입되는 단백질의 양이 증가하면 기·액 계면과 접촉할 수 있는 단백질 양이 많아져서 계면에 흡착되는 단백질의 양도 증가하여 단백질 제거속도가 증가되는 것으로 사료된다.

공기 구동식 포말분리기의 경우 유량의 증가에 따른 단백질 농도의 증가에 의한 효과도 제거속도를 증가시키는 요인으로 생각된다. 수력학적 체류시간이 감소하여 유량이 증가할 경우 앞서 설명한 바와 같이 제거율이 감소하므로 포말분리기 내의 단백질 농도가 상승하게 되어 나타나는 현상으로 기·액 계면의 단백질 흡착속도는 Langmuir 등은 흡착식을 따르므로 [10] 단백질 농도가 증가할 경우 기·액 계면으로의 흡착속도가 증가하게 되는 것이다. 고속 폭기식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기의 경우 수력학적 체류시간의 감소에 따라 단백질 제거율이 감소하여 포말분리 장치내

의 단백질 농도가 더 낮아지므로 단백질 농도의 증가에 의한 제거속도의 증가는 없다고 생각된다. 그러나 이 두 형태의 포말분리기는 수력학적 체류시간의 감소에 따라 유입 공기량이 증가하여 발생하는 기·액 계면의 증가에 의한 영향이 더 크게 작용하여 제거속도가 크게 증가되는 것으로 사료된다.

4.1.3. 총 부유 고형물 제거 특성

총 부유성 고형물은 입경이 1 μm 이상인 고형물로서[20] 어류 양식에서는 어종이나 어류의 성장정도에 따라 차이는 있으나 25 - 80 g/m^3 이하의 농도가 권장되고 있다[29]. 해수에서 어류에 의해 발생하는 고형물 중 미섭취 사료나 어분에 의해 발생하는 총 부유성 고형물은 어체의 아가미에 직접적인 충격을 주거나 용존산소의 전달을 방해하여 질병에 대한 저항력을 약화시킬 수 있기 때문에 어류의 생산력에 직접적인 영향을 끼칠 수 있다[13]. 고형물의 농도가 높을 경우 생물학적 질산화 장치에 **biofouling**을 유발하여 암모니아 제거 속도를 감소시킬 수도 있고[25], 고형물의 대부분은 유기성 고형물로 단백질 성분을 함유하고 있어 즉시 제거하지 않고 방치할 경우 미생물에 의해 어류에 유해한 암모니아를 발생시키므로[13] 양식장 순환수 중의 고형물의 제거는 매우 중요하다.

Fig. 15와 Fig. 16은 수력학적 체류시간의 변화에 따른 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수력학적 체류시간의 변화에 따른 각 포말분리 장치의 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율의 변화는 단백질 제거속도와 제거율의 변화와 유사하게 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 단백질 제거속도는 지수적으로 감소하는 경향을 보였다.

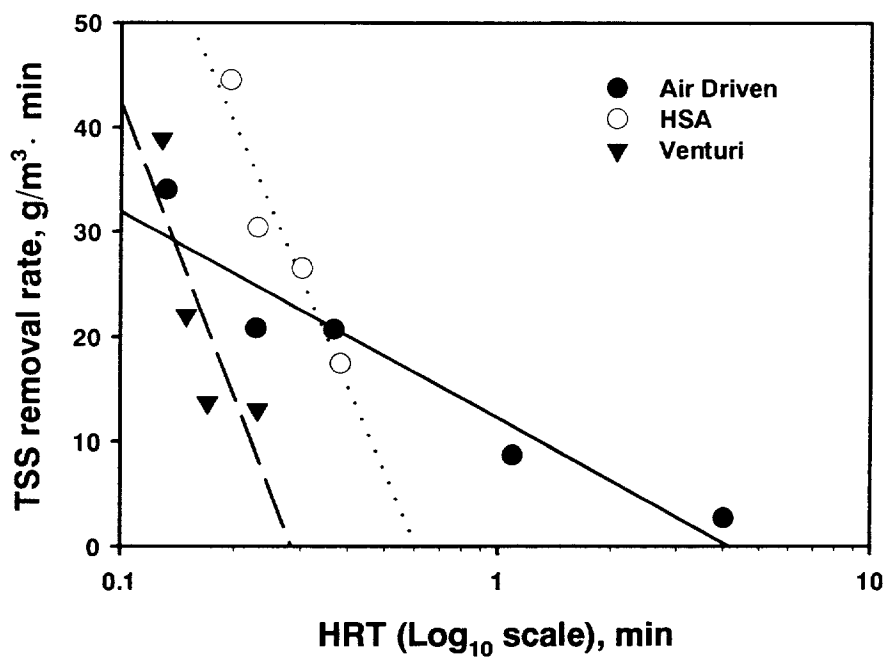


Fig. 15. TSS removal rate with respect to hydraulic residence time.

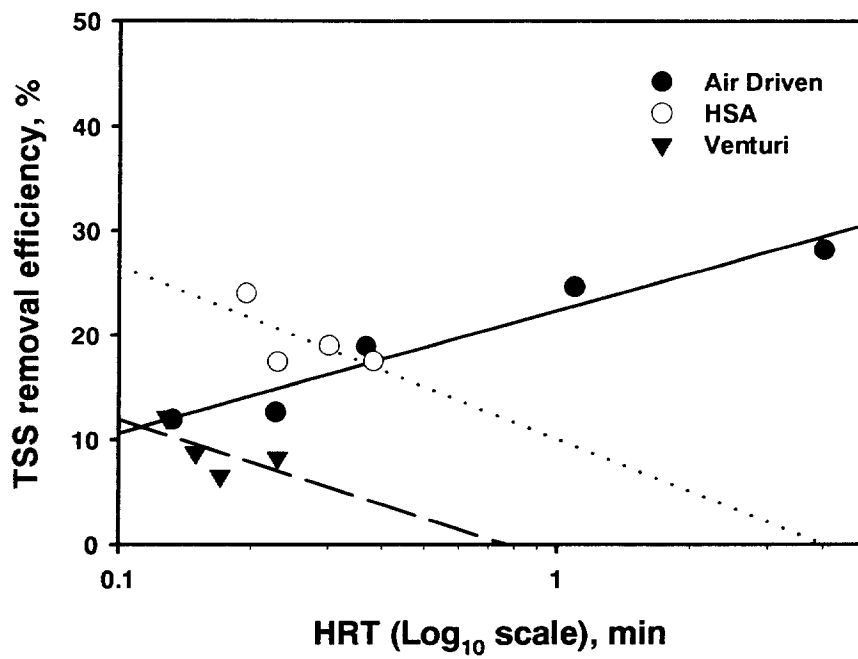


Fig. 16. TSS removal efficiency with respect to hydraulic residence time.

공기 구동식 포말분리기의 경우 수력학적 체류시간이 0.13 min에서 4.01 min으로 증가함에 따라 총 부유 고형물의 제거속도는 $34.0 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 에서 $2.7 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 로 감소하였으며 고속 폭기식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기는 0.19 - 0.38 min, 0.13 - 0.23 min의 수력학적 체류시간의 증가에 대해 $44.6 - 17.5 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, $38.9 - 13.0 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 로 감소하였다.

고속 폭기식 포말분리기가 공기 구동식보다 더 높은 제거 속도를 나타낸 수력학적 체류시간은 0.33 min 정도로서 단백질에서 나타난 것과 거의 동일하였으나 벤츄리식 포말분리기가 공기 구동식보다 높은 제거속도를 나타내는 수력학적 체류시간은 0.11 min으로 나타났다.

이와 같이 총 부유 고형물의 제거율과 제거속도의 변화가 단백질의 경우와 유사하게 나타나는 것은 총 부유 고형물이 제거되는 것이 단백질이 기·액 계면에 흡착될 때 동반 흡착되어 제거되는 제거기작[5]에 의한 현상이라고 생각된다.

총 부유 고형물의 제거율은 공기 구동식 포말분리기의 경우 단백질 제거율이 4.0 - 10.9%의 범위에서 총 부유 고형물은 12.0 - 28.2%의 제거율을 나타내어 약 3배 정도 높은 비율을 보였으며 고속 폭기식은 4.3 - 10.6%의 단백질 제거율에 대해 총 부유 고형물은 2 - 4배 정도 높은 17.5 - 24.1%의 제거율을 나타낸 반면 벤츄리식 포말분리기는 2.3 - 11.4%의 단백질 제거율에 대해 6.6 - 12.2%의 총 부유 고형물 제거율을 나타내어 저유속인 경우에는 총 부유고형물/단백질 비율이 다른 두 포말분리기와 유사하였으나 고유속으로 갈수록 단백질제거에 대한 총 부유 고형물의 제거효율은 떨어지는 것으로 나타났다.

4.1.4. 탁도 제거 특성

탁도는 물을 흐리게 하는 성분을 총칭하는 것으로 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 부유 고형물과 색소성 용존 물질도 모두 포함하는 것으로 물의 투명도를 측정하는 척도이며[30] 양어장에서는 60 NTU 이하의 농도를 권장하고 있다[31].

Fig. 17과 Fig. 18에 각 포말분리 장치의 수력학적 체류시간의 변화에 따른 탁도 제거속도와 제거율의 변화를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 수력학적 체류시간의 변화에 따른 제거속도와 제거율의 전체적인 변화는 단백질 및 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율의 변화와 유사하게 나타났다. 이는 탁도를 유발하는 물질 중 상당부분을 총 부유 고형물이 차지하므로[30] 총 부유 고형물이 단백질에 동반하여 제거됨으로 인한 현상으로 생각된다.

Fig. 17에서 나타난 바와 같이 공기 구동식 포말분리기의 경우 수력학적 체류시간이 0.13 min에서 4.01 min으로 증가함에 따른 탁도의 제거속도는 13.8 NTU/min에서 0.8 NTU/min로 감소하였으며 고속 폭기식 포말분리기와 수력학적 체류시간이 0.19 min에서 0.38 min으로 증가함에 따라 12.7 NTU/min에서 3.2 NTU/min로 감소하였다. 벤츄리식 포말분리기의 탁도 제거속도는 0.13 min에서 0.23 min으로 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 12.3 NTU/min에서 1.7 NTU/min로 감소하였다.

고속 폭기식 포말분리기가 공기 구동식보다 더 높은 제거 속도를 나타낸 수력학적 체류시간은 0.21 min 이하의 범위였으며 벤츄리식 포말분리기가 공기 구동식보다 높은 제거속도를 나타내는 수력학적 체류시간은 0.11 min 이하로 나타났다. 또한 0.21 min 이하의 짧은 수력학적 체류시간에서 나타난 공기 구동식 포말분리기의 탁도 제거속도는 고속 폭기식과 벤츄리식 포말분리기와 비교하여 거의 유사한 값을 나타내었다.

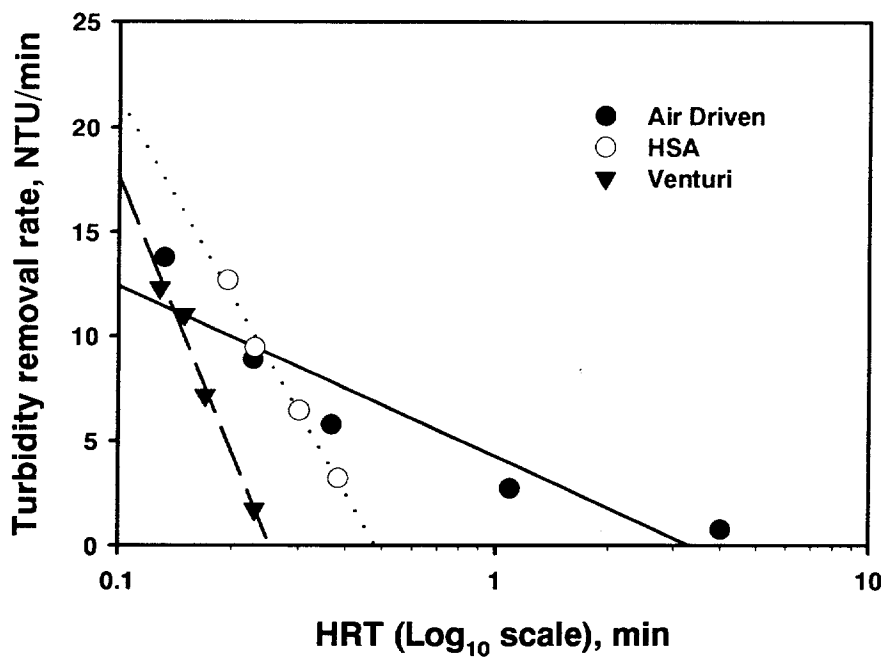


Fig. 17. Turbidity removal rate with respect to hydraulic residence time.

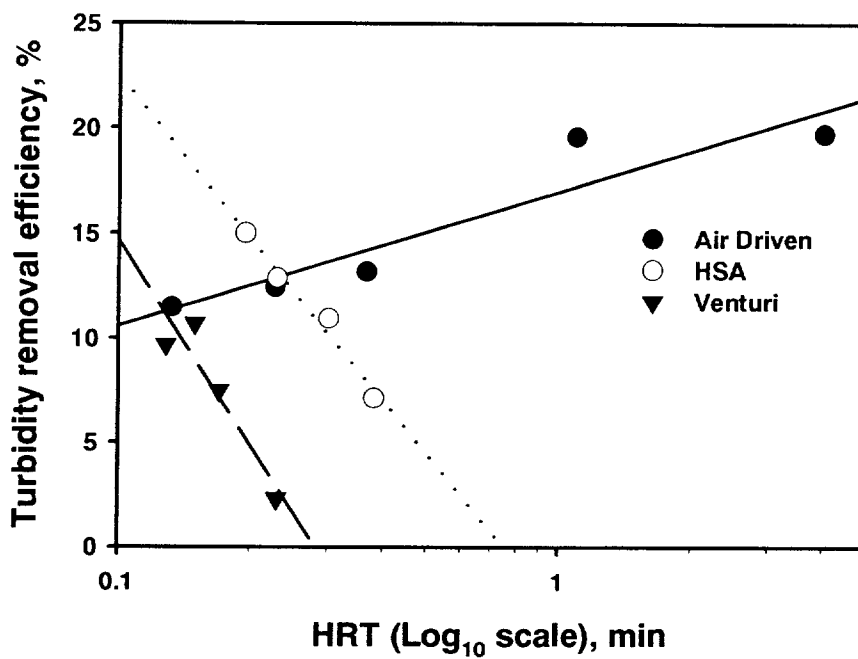


Fig. 18. Turbidity removal efficiency with respect to hydraulic residence time.

공기 구동식 포말분리기의 경우 0.13 - 1.09 min의 수력학적 체류시간의 범위에서 탁도의 제거율이 11.5 - 19.6%의 범위를 나타내어 총 부유 고형물의 제거율이 12.0 - 24.7%의 범위를 나타낸 것에 비해 0.5 - 5.1% 정도의 낮은 제거율을 보였다. 고속 폭기식 포말분리기는 7.1 - 15.0%의 탁도 제거율을 나타내어 총 부유 고형물의 제거율에 비해 각각 10%정도 낮은 것으로 나타났다으며 벤츄리식 포말분리기의 탁도 제거율은 2.3 - 10.7%의 범위로서 총 부유 고형물의 제거율에 비해 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것으로 보아 공기 구동식 포말분리기와 벤츄리식 포말분리기는 1 μm 이상의 총 부유 고형물 뿐 아니라 그 이하의 입자나 용존 물질도 잘 제거하나 고속 폭기식 포말분리기는 총 부유 고형물보다 작은 입자는 포말에 충분히 흡착시키지 못하는 것으로 사료된다.

4.1.5. 최적 포말분리 장치의 선정

해수 내 오염물의 제거에 가장 적합한 형태를 선정하고자 공기 구동식, 고속 폭기식 및 벤츄리식 포말분리장치의 운전특성 및 폐수의 처리 효율변화를 비교하였다.

본 연구의 결과 고속 폭기식 및 벤츄리식 포말분리장치는 짧은 수력학적 체류시간의 범위에서 높은 제거속도를 얻을 수 있으나 운전 가능한 수력학적 체류시간의 범위가 한정되어 있고 장치에 의한 압력손실이 큰 것으로 나타나 운전 경비가 증가되는 단점을 나타내었다. 반면, 공기 구동식 포말 분리기는 압력 손실이 거의 없으며 수력학적 체류시간의 변화에 따른 제거속도 및 제거율의 변화가 적어 조업 환경의 변화에 대해 능동적으로 대처할 수 있는 범위에서 운전 가능하므로 해수 내 오염물의 제거에 가장 적합한 포말 분리 장치로 선정하였다.

4.2. 초기 단백질 농도영향

양어장에서 사료나 어류에 의해 생성되는 여러 물질들 중에서 단백질은 구조적·특성적으로 계면활성제와 같은 역할을 하는 물질로써, 기-액 계면에 농축되게 된다. 따라서 단백질 농도의 영향이 포말분리 공정에 미치는 영향은 매우 크다.

본 연구에서는 해수 속의 단백질, 부유 고형물, 화학적 산소 요구량, 탁도, 암모니아성 질소와 같은 양식 폐기물의 연속 제거운전을 수행하여 유입 단백질 농도에 따른 해수 내 생물학적 오염물의 제거 특성을 검토하였으며 포말분리기의 용존산소 전달 효율의 변화를 검토하였다.

4.2.1. 단백질 제거속도 변화

Fig. 19는 유입 단백질 농도가 단백질 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 유입수의 단백질의 농도가 49.28 g/m^3 까지 증가할 경우 제거속도도 거의 선형적으로 증가하였으며 그 이상의 농도에 대해서는 거의 동일한 값을 나타내었다. 반면 단백질의 제거율은 Fig. 19에서 보여지는 바와 같이 유입수의 단백질 농도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.

유입 단백질 농도가 증가함에 따라 단백질 제거속도가 증가하다가 거의 일정한 수준으로 유지되는 현상은 포말분리기로 공급되는 공기량이 일정하므로 separation column 내에 체류되는 기포의 표면적이 일정하여 기·액 계면에 흡착되어 제거될 수 있는 단백질의 양이 한정되기 때문에 발생하는 것으로 유입 단백질의 농도가 높을 경우 기체 공급량을 늘려 기·액 계면을 증가시킬 경우 보다 높은 제거 속도를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

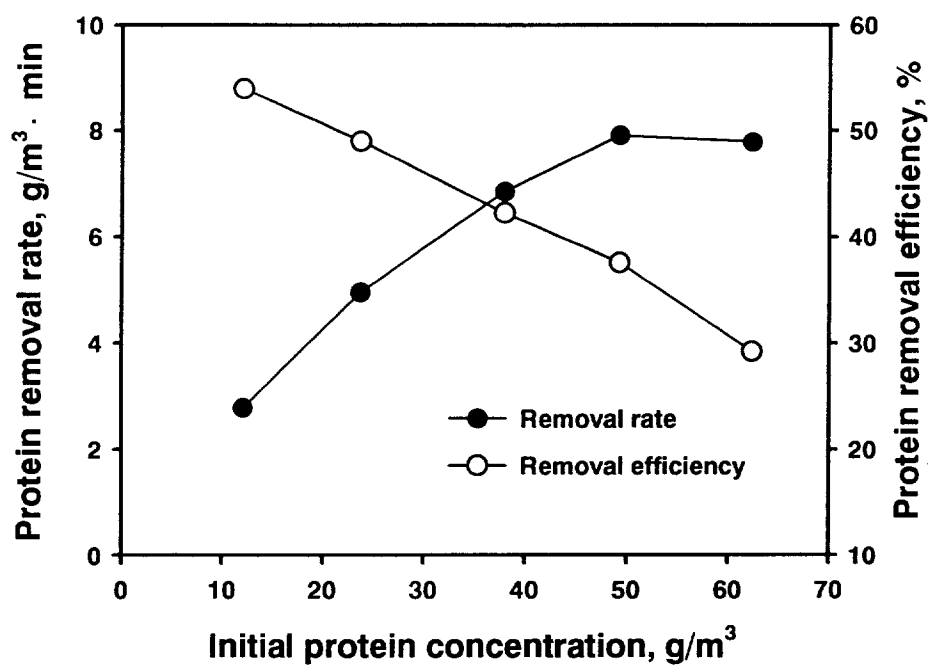


Fig. 19. The effect of initial protein concentration on protein removal rate.

유입 단백질 농도의 증가에 따라 단백질의 제거율이 감소하는 것은 유입 단백질 농도가 증가하여도 기·액 계면에 흡착되어 제거되는 단백질의 양은 포화 농도이상 증가하지 않으므로[32] 유입되는 단백질 양의 증가에 대해 제거되는 단백질 양의 비가 감소하는 것으로 사료된다. 또한 이것은 포말분리 공정을 이용한 단백질 회수공정에 대한 연구에서 나타나는 전형적인 현상인 유입 단백질 농도의 증가에 따라 포말의 단백질 농축비 및 회수율이 감소하는 현상[33]과 동일한 결과이다.

Fig. 20은 유입 단백질 농도의 변화에 따른 포말 생성속도의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 단백질 제거속도의 변화와 유사한 형태로 나타났다. 포말은 기·액 계면에 흡착된 계면활성 물질에 의해 대기 중에서도 그 형태가 깨어지지 않고 유지되는 것으로[34] 유입 단백질의 농도가 높아질수록 기·액 계면에 흡착되는 단백질의 양이 증가하여 포말이 파쇄되지 않고 많이 발생하는 것으로 사료된다. 이러한 현상은 Brown et al.[35]의 연구에서도 나타난 결과로서 유입 단백질의 농도가 증가함에 따라 포말 내의 단백질 체류시간이 증가함에 따른 현상이라고 하였다.

4.2.2. 단백질 제거속도식

포말분리에서 계면 활성 물질이 기포 표면에 흡착하는 현상은 친수기(hydrophilic side chain)가 액측으로 소수기(hydrophobic side chain)가 기체측으로 배열되어 액본체(bulk liquid)농도가 증가함에 따라 기체 표면에 흡착되는 용질의 분자수가 점차 증가하여 그 표면이 완전 포화되어 표면과잉 농도에 이르는 것으로 다음의 Langmuir 등은 흡착식으로 나타낼 수 있다[36].

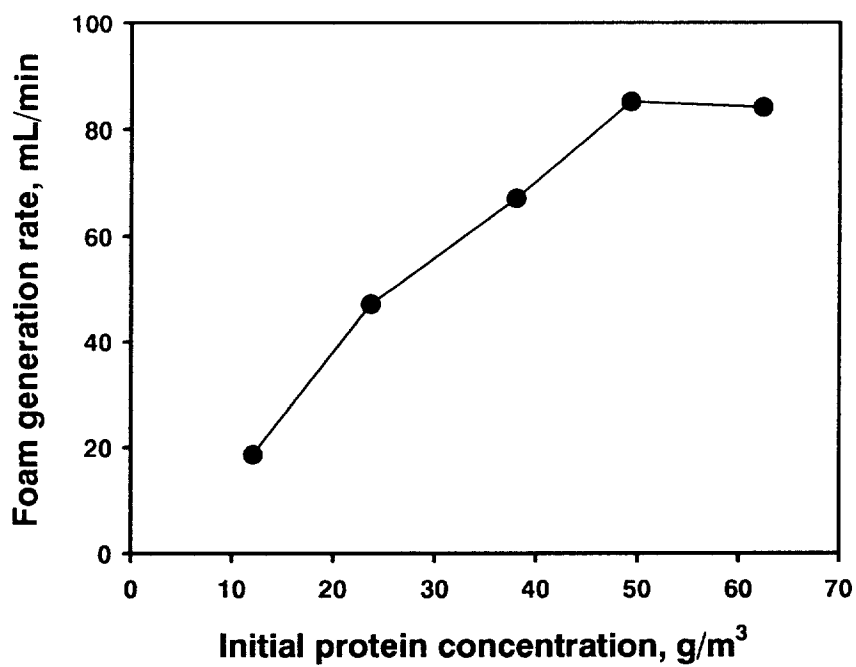


Fig. 20. The effect of initial protein concentration on foam generation rate.

$$\Gamma(C_b) = \frac{\Gamma_m \cdot C_b}{C_b + C_{1/2}} \quad (12)$$

여기서 Γ 는 표면의 단백질 농도(g/m^2), Γ_m 는 표면의 최대 단백질 농도(g/m^2), C_b 는 액본체의 단백질 농도(g/m^3), $C_{1/2}$ 는 Γ 가 Γ_m 의 1/2일 때의 단백질 농도로서 반 포화 상수(half saturation constant, g/m^3)이다.

만일 separation column 내의 기·액 계면의 면적이 일정하다면 단백질 제거속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} -r_P &= \Gamma(C_b) \cdot \frac{Na}{V} \\ &= \frac{\Gamma_m \cdot C_b}{C_b + C_{1/2}} \cdot \frac{Na}{V} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $-r_P$ 는 단백질 제거속도($\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$), Na 는 기·액 계면의 생성 속도($\text{m}^2 \text{ area}/\text{min}$)이다.

Na 와 V 는 일정하므로 식 (13)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$-r_P = \frac{-r_{P,m} \cdot C_b}{C_b + C_{1/2}} \quad (14)$$

여기서 $-r_{P,m}$ 은 최대 단백질 제거속도($\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$)이다

식 (14)의 $-r_{P,m}$ 과 $C_{1/2}$ 는 다음의 Lineweaver-Burk plot, Eadie-Hofstee plot, Hanse-Woolf plot에 의해 구할 수 있다[37].

Lineweaver-Burk plot은 식(14)에 이중 역수를 취한 형태로 가장 보편적으로 사용하는 형태이다.

$$\frac{1}{-r_P} = \frac{1}{-r_{P,m}} + \frac{C_{1/2}}{-r_{P,m}} \cdot \frac{1}{C_b} \quad (15)$$

Eadie-Hofstee plot은 식(16)와 같은 형태로 낮은 농도에 대해 작은 오차를 나타낸다.

$$-r_P = -r_{P,m} - C_{1/2} \frac{-r_P}{C_b} \quad (16)$$

Hanse-Woolf plot은 $-r_{P,m}$ 을 비교적 정확히 결정할 수 있으며 그 형태는 다음과 같다.

$$\frac{C_b}{-r_P} = \frac{C_{1/2}}{-r_{P,m}} + \frac{1}{-r_{P,m}} C_b \quad (17)$$

포말분리에서 장치 내의 촉상 혼합이 매우 빠르게 이루어지므로 separation column은 하나의 완전한 혼합 pool로 가정할 수 있다[6]. 그러므로 식의 적용에 있어 C_b 는 C_o 를 사용할 수 있다.

Fig. 21은 상기 세 가지 형태의 plot을 이용하여 선형회귀 분석을 행한 결과와 선형회귀 분석하여 구한 계수를 사용하여 얻어진 액본체 농도 변화에 따른 제거속도의 변화와 실험에서 얻어진 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그리고, Table 4는 선형 회귀분석의 결과에 의해 계산된 최대 단백질 제거속도와 $C_{1/2}$ 를 나타낸 것이다.

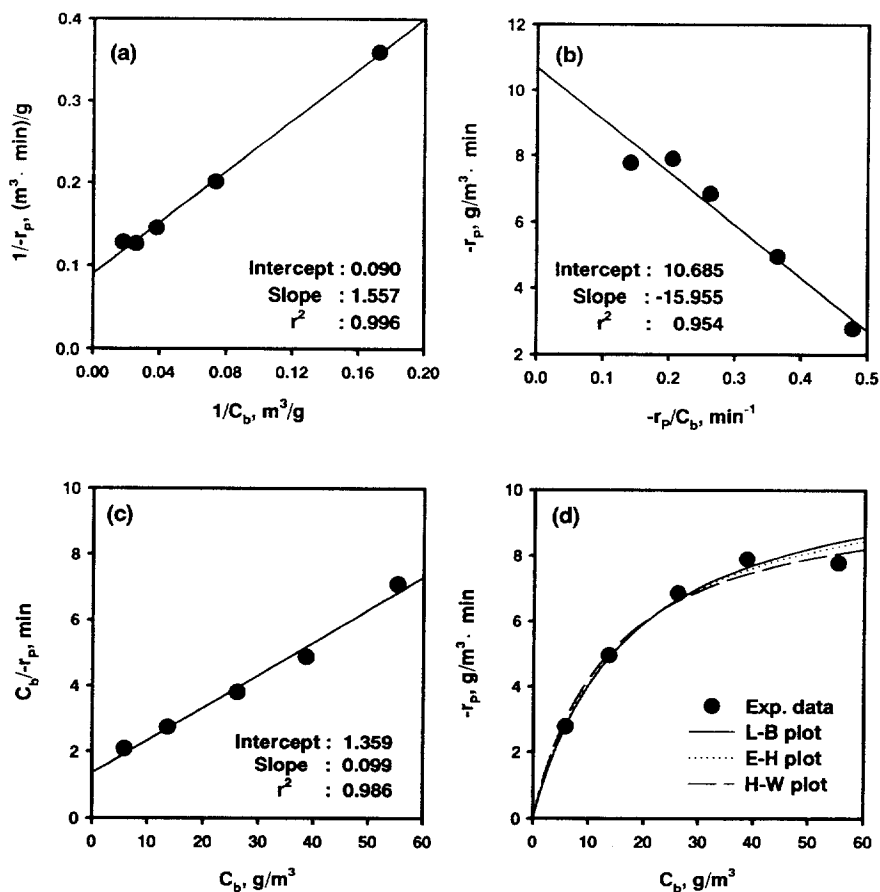


Fig. 21. The Lineweaver-Burk plot (a), Eadie-Hofstee plot (b) and Hanse-Woolf plot (c) for the determination of kinetic parameter and the comparison between the experimental data and the regression results (d).

Table 4. The regression result for the determination of kinetic parameter

Type	Parameter	Half constant, g/m^3		Maximum removal rate, $\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$	
Lineweaver-Burk plot		17.154		11.039	
Eadie-Hofstee plot		15.955		10.685	
Hanse-Woolf plot		13.700		10.078	

세 가지 plot의 상관계수 r^2 이 0.954 ~ 0.9996의 범위로 나타나 포말분리관 내의 단백질 흡착은 Langmuir 등온흡착식과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 최대 단백질 제거속도와 $C_{1/2}$ 는 plot의 형태에 따라 조금 차이가 있으나 각각 $10.0 \sim 11.0 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, $13.7 \sim 17.2 \text{ g/m}^3$ 의 범위로 나타났다. 본 연구에서 얻어진 최대 단백질 제거속도는 유입 단백질 농도를 150 g/m^3 로 한 Suh and Lee[6]의 담수 양어장수로부터 단백질제거에 관한 연구 결과에서 공탑 공기속도가 0.85cm/sec 일 때 얻어진 결과와 유사한 것으로 나타났다.

4.2.3. 총 부유 고형물 제거속도 변화

Fig. 22는 유입 단백질 농도가 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 유입수의 단백질의 농도가 증가함에 따라 총 부유 고형물의 제거속도는 거의 선형적으로 증가하였으며 제거율은 단백질 농도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으나 전반적으로 70% 이상의 높은 제거율을 나타내었다.

Fig. 23은 유입 단백질 농도의 변화에 따른 유입수와 유출수의 농도와 제거속도의 총 부유 고형물/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수와 유출수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 거의 일정하게 나타났으며 제거속도의 비는 단백질 농도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

유입수의 총 부유 고형물/단백질 비가 약 2.5로 거의 동일한 것은 실험수를 제조함에 있어 양어장 폐기물을 분취, 농축하여 혼합하였으므로 단백질과 고형물이 거의 동일한 조성비로 농축된 결과로서 양어장수 속의 총 부유 고형물 농도는 단백질 농도의 2.5배 정도임을 알 수 있다.

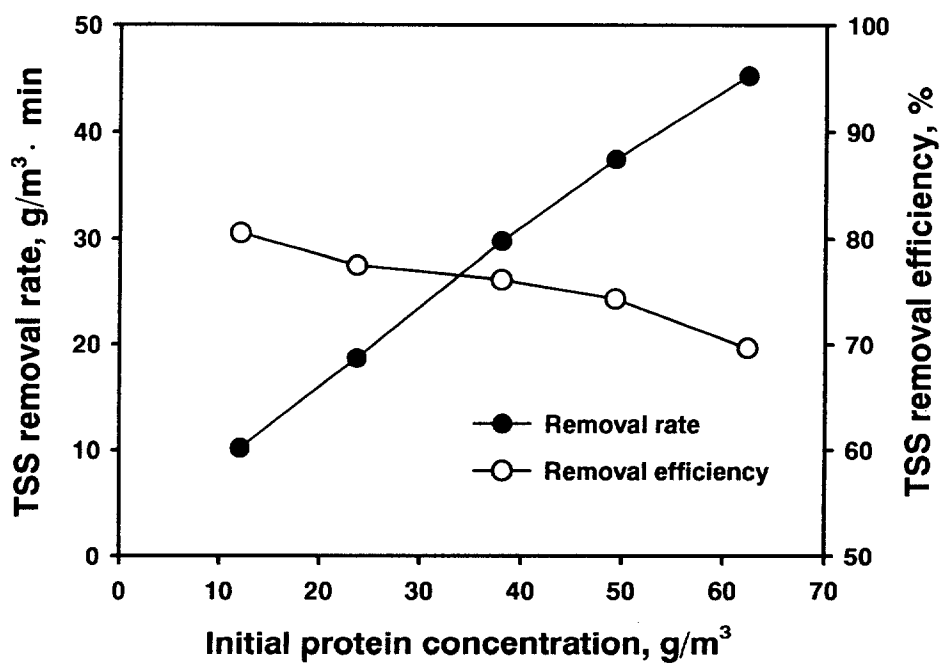


Fig. 22. TSS removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.

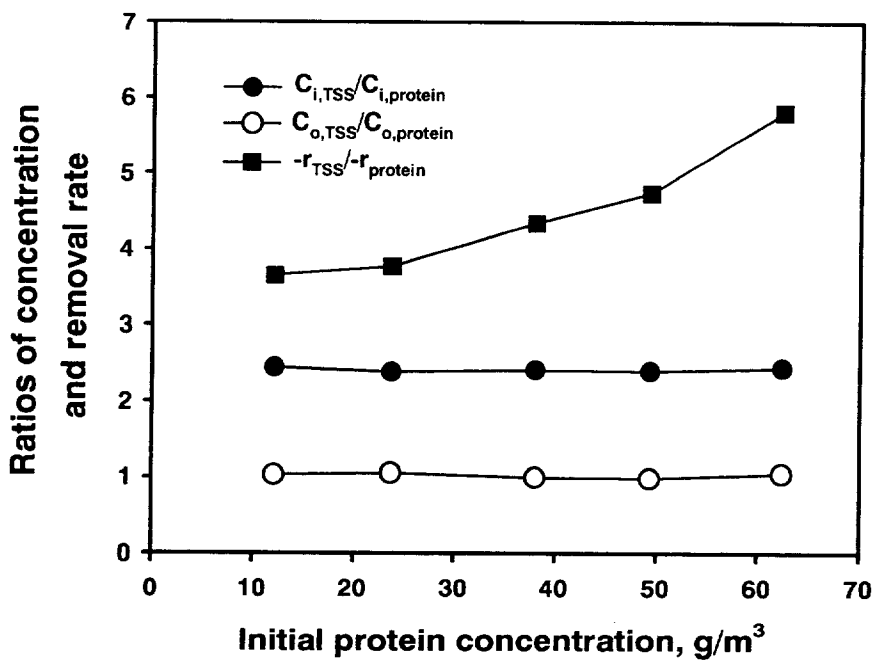


Fig. 23. The concentration ratio of TSS over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TSS over protein.

유입 단백질 농도의 변화와 무관하게 유출수의 총 부유 고형물/단백질 비가 1.0 정도로 유지되고 총 부유 고형물의 제거율의 변화가 단백질의 경우와 유사하게 나타나는 것은 총 부유 고형물이 제거되는 것이 단백질이 기·액 계면에 흡착될 때 동반 흡착되어 제거되는 제거기작[38]에 의한 현상이라고 생각된다. 그러나 유입 단백질 농도의 증가에 따라 제거속도에 대한 총 부유 고형물/단백질 비가 증가하는 것은 유입 단백질 농도의 증가에 따라 단백질 제거량이 증가하는 비율 보다 더 높은 비율로 부유 고형물의 제거량이 증가하며 기·액 계면에 단백질성분이 포화되어도 부유 고형물은 그 이상 흡착된다는 것을 보여준다.

4.2.4. 탁도 제거속도 변화

Fig. 24와 Fig. 25는 각각 유입 단백질 농도의 증가에 따른 탁도 제거속도 및 제거율의 변화와 유입수와 유출수의 농도, 제거속도에 대한 탁도/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 25에서 보여지는 바와 같이 유입수의 단백질의 농도가 증가함에 따른 탁도의 제거율 및 제거속도의 변화는 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율의 변화와 거의 유사한 형태로 변화하였다. 이러한 현상은 탁도를 유발하는 물질 중 상당부분을 총 부유 고형물이 차지하므로[30] 많은 분율을 차지하는 총 부유 고형물이 제거되는 것과 유사한 양상으로 탁도의 제거가 이루어지는 것으로 생각된다.

유입수와 유출수의 탁도/단백질 농도비와 제거속도 비는 Fig. 25에서 보는 바와 같이 유입 단백질의 농도 변화와 무관하게 거의 일정하게 나타났다.

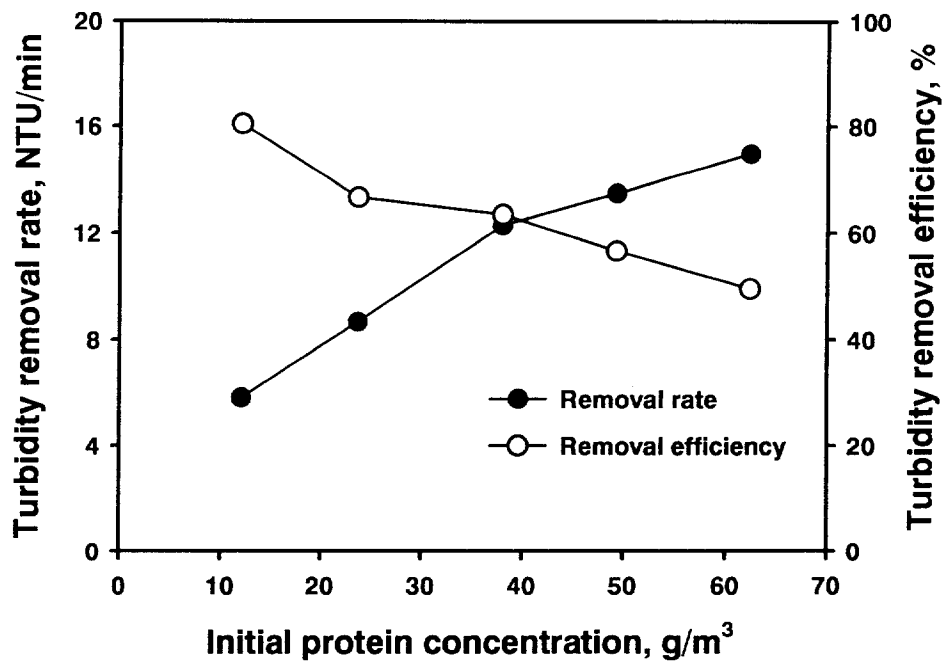


Fig. 24. Turbidity removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.

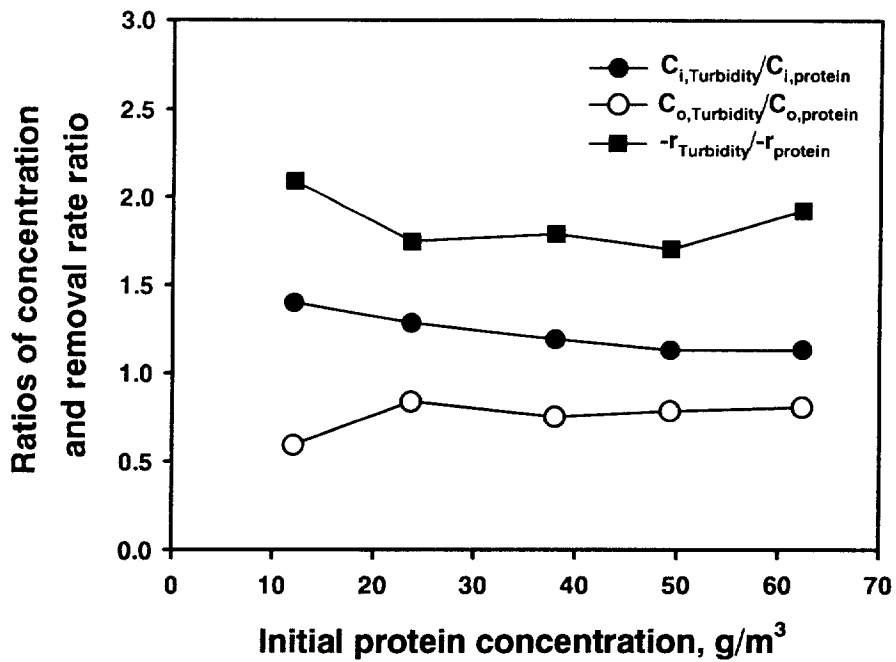


Fig. 25. The concentration ratio of turbidity over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of turbidity over protein.

유입수와 유출수의 탁도/단백질 농도비는 총 부유 고형물의 경우와 유사한 결과였으나 제거속도 비는 단백질 농도의 증가에 따라 제거속도비가 증가하는 부유 고형물과는 달리 일정하게 나타났다. 이것으로 보아 탁도를 구성하는 입자 중 부유 고형물보다 작은 미소입자가 잘 제거되지 않기 때문으로 생각된다.

4.2.5. 입도 분포 변화

Fig. 26은 각각의 유입 단백질 농도에 대한 유입수(a)와 유출수(b)의 입도 분포 변화와 입자 직경별 제거율의 변화(c)를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수와 유출수의 입도 분포는 입자 농도의 절대값은 차이가 있으나 그 형태는 거의 동일하게 나타났으며 입자는 0 ~ 15 μm 의 범위에서 분포하였으며 2.632 μm 인 입자가 차지하는 비율이 가장 큰 것으로 나타났다.

입자 직경의 변화에 따른 입자의 제거율의 변화는 전체적으로 입경이 클수록 제거율이 높은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 양어장수 내 입자의 밀도가 1190 kg/m^3 [13]으로 물과의 밀도차가 크지 않으므로 중력에 의한 침강력보다 상승하는 기포에 의해 발생하는 부력에 대한 영향에 더 민감하여 발생하는 현상으로 입경이 커질수록 단면적이 커져 부력의 작용을 더 크게 받기 때문으로 사료된다.

Fig. 27은 유입 단백질 농도의 변화에 따른 입자의 총 제거율과 Fig. 26의 입도 분포 중 가장 큰 비율을 차지하는 2.632 μm 입자와 제거율을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 12.06 ~ 49.28 g/m^3 의 유입 단백질 농도 범위에서는 입자 제거율의 변화는 크지 않았으나 49.28 ~ 62.36 g/m^3 의 범위에서는 급격히 하락하는 것으로 나타났다.

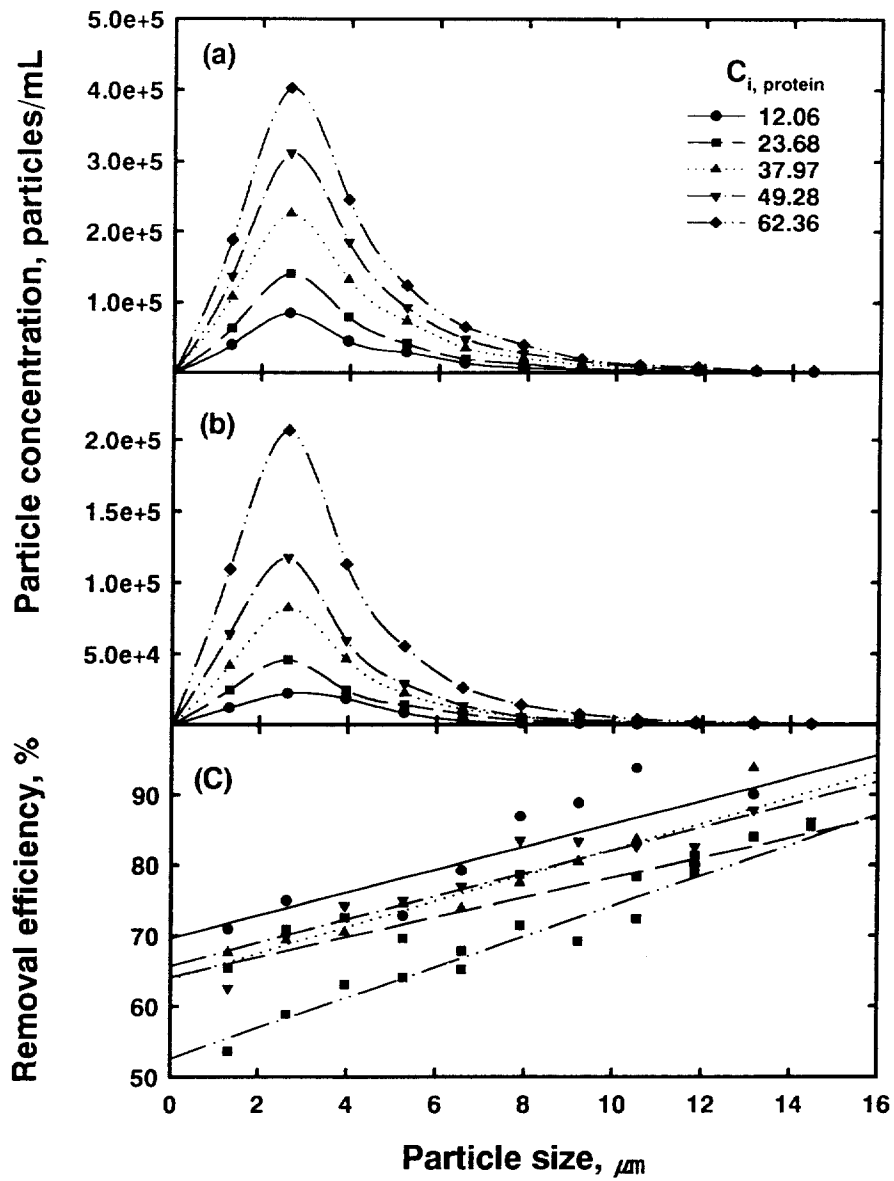


Fig. 26. Differential particle distributions of feed (a) and effluent (b) and the particle removal efficiency (c) with respect to particle size.

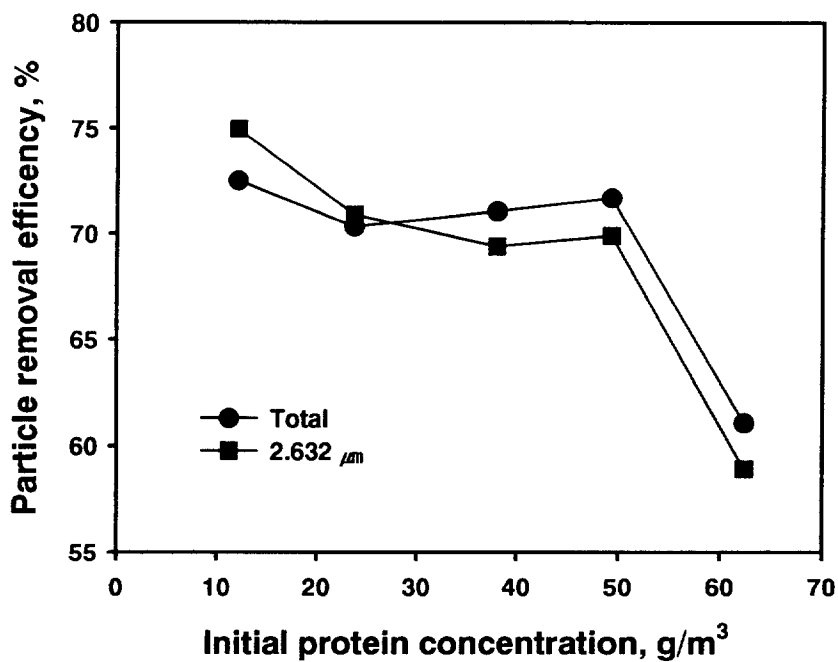


Fig. 27. Particle removal efficiency with respect to initial protein concentration.

전체 범위에 있어 총 입자의 제거율과 2.632 μm 입자와 제거율은 큰 차이를 보이지 않아 2.632 μm 입자를 입자의 제거특성에 있어 전체입자에 대한 대표직경으로 사용할 수 있을 것으로 사료되었다.

4.2.6. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화

순환여과식 양어장에서 용존 유기물은 미섭취 사료에서 용출되거나 어체 내에서 완전히 분해되지 않아 발생한다. 용존 유기물의 농도가 높을 경우 타가영양체 미생물의 생장을 촉진시키게 되어 생물학적 처리장치에 우점종화 되어 질산화 효율을 저하시키거나 산소요구량을 증가시키는 원인이 된다. 일부 타가영양체 미생물은 병원균으로 어류에게 질병을 유발시키기도 한다[31].

용존 유기물 농도의 지표로서 화학적 산소 요구량을 측정하여 유입 단백질의 농도 변화에 따른 포말 분리기의 제거 속도 및 제거율을 측정하여 Fig. 28에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 화학적 산소 요구량의 제거속도는 앞서 나타난 단백질 또는 부유 고형물의 제거 속도와 같이 유입 단백질 농도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 화학적 산소 요구량의 제거율은 유입 단백질의 농도가 12.16 g/m^3 에서 23.68 g/m^3 으로 증가할 경우 36.9%에서 27.9%로 급격히 감소하였으나 그 이상의 단백질 농도 증가에 대해서는 작은 감소 폭을 나타내었다.

유입 단백질 농도의 변화에 따른 유입수와 유출수의 농도와 제거속도의 화학적 산소 요구량/단백질 비의 변화를 Fig. 29에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수와 유출수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비는 유입 단백질의 농도가 증가함에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다.

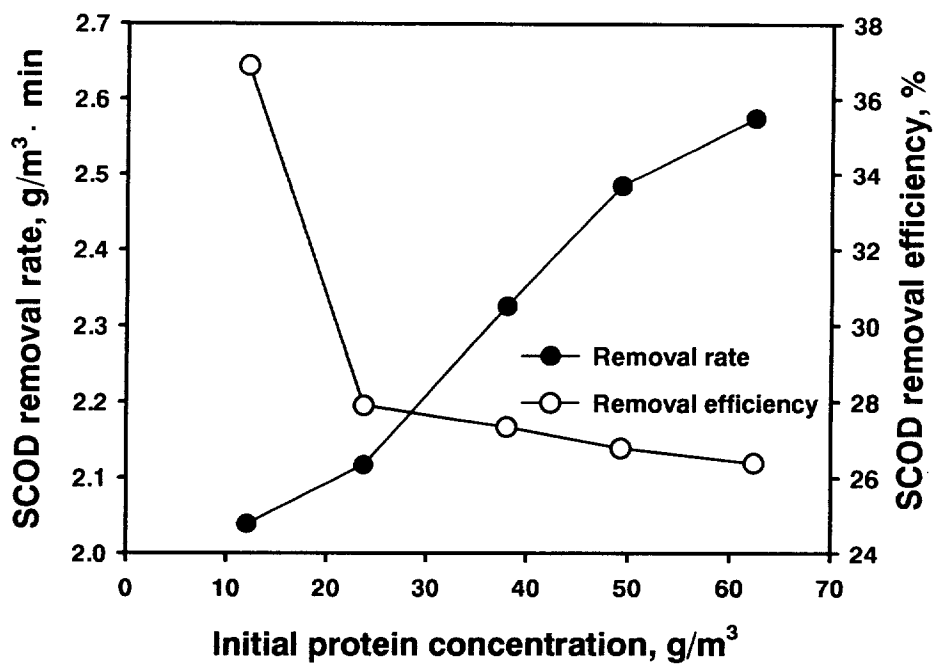


Fig. 28. SCOD removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.

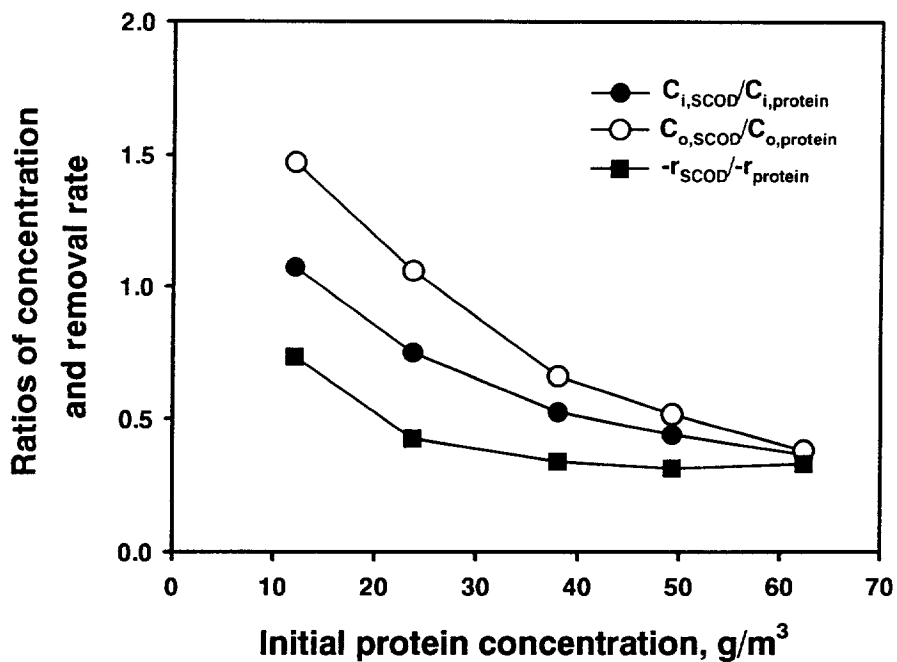


Fig. 29. The concentration ratio of SCOD to protein of influent (C_i) and effluent (C_o) and the removal rate ratio of SCOD to protein.

화학적 산소 요구량과 단백질 제거속도의 비는 유입 단백질의 농도가 12.16 g/m^3 일 경우 0.73이었으나 유입 단백질 농도가 증가함에 따라 감소하여 37.94 g/m^3 이상의 유입 단백질 농도에 대해서는 0.33정도의 일정한 값을 나타내었다.

이러한 현상은 단백질 농도가 낮을 경우 전체 기·액 계면 중 단백질이 흡착되지 않은 부분이 많아 유기물 중 계면활성을 가지는 물질이 상당부분 흡착되나 단백질농도가 높아짐에 따라 계면 활성이 더 큰 단백질이 기·액 계면의 대부분을 차지하게 되기 때문으로 생각된다.

4.2.7. 암모니아성 질소 제거속도 변화

암모니아는 수중에서 비이온성 암모니아(NH_3)와 이온성 암모니아(NH_4^+) 두 가지 형태로 존재한다. 중성의 pH에서 암모니아의 99%는 이온성 암모니아로 존재하며 pH 9이상에서는 비이온성 암모니아의 농도가 증가한다. 1 g/m^3 이상의 암모니아는 구리 파이프를 부식시키며 암모니아가 수계로 방출되면 생물학적 산화에 의해 질산성 질소나 아질산성 질소로 산화되면서 수중의 용존산소를 고갈시키게 된다[39].

특히 비이온성 암모니아는 동물의 세포벽을 통과하여 저농도에서도 어류에게 치명적인 피해를 주게된다[4]. EPA[40]에서는 어류를 사육하는 수계의 비이온성 암모니아 농도를 0.02 g/m^3 이하로 유지하도록 권장하고 있다. 비이온성 암모니아가 수중에 존재하는 비율은 pH 7 ~ 7.8인 경우 0.6 ~ 2.45%이므로 수중의 비이온성 암모니아를 0.02 g/m^3 이하로 유지하기 위해서는 총 암모니아성 질소(TAN, total ammonia nitrogen)를 2 ~ 5 g/m^3 이하로 유지하여야 한다.

유입 단백질의 농도 변화에 따른 포말 분리기의 암모니아성 질소의 제거 속도 및 제거율을 Fig. 30, 유입수와 유출수의 농도와 제거속도의 암모니아성 질소/단백질 비의 변화를 Fig. 31에 각각 나타내었다.

Fig. 30에서 보여지는 바와 같이 유입 단백질 농도가 증가함에 따라 암모니아성 질소의 제거속도는 동반하여 증가하다가 50 g/m^3 이상의 고농도에서는 포화상태에 도달하는 형태를 나타내어 앞서 나타난 다른 성분들의 변화 형태와 거의 유사하였다. 그러나 암모니아성 질소의 제거율의 경우 다른 성분들이 유입 단백질 농도의 증가에 따라 제거율이 감소하는 것과 달리 암모니아성 질소의 제거율은 증가하는 것으로 나타나 반대의 경향을 나타내었다.

이와 같이 포말 분리기에 의해 암모니아성 질소가 제거되는 것은 비이온성 암모니아의 경우 stripping 효과에 의해 제거되고 이온성 암모니아의 경우 기·액 계면에 흡착된 계면활성 물질 중 음이온성 물질에 정전기적으로 부착되는 기작[5]에 의해 제거되는 것으로 사료된다.

또한 다른 성분들과 달리 유입 단백질의 농도가 증가할수록 암모니아의 제거율이 증가하는 것은 다른 성분은 기·액 계면에 흡착되어 제거되므로 포화상태에 도달할수록 기·액 계면에 흡착되는 성분의 비율이 줄어들지만 stripping에 의해 제거되는 암모니아는 기·액 계면에 접촉하는 암모니아의 양이 증가할수록 제거될 수 있는 암모니아의 비율이 증가되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 31에서 보여지는 바와 같이 유입 단백질의 농도가 증가함에 따라 유입수의 암모니아성 질소/단백질 농도비는 약간 감소하나 큰 차이는 없었으나 유출수의 농도비는 제거량이 증가함에 따라 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 이에 따라 제거속도의 비는 증가하는 것으로 나타났다.

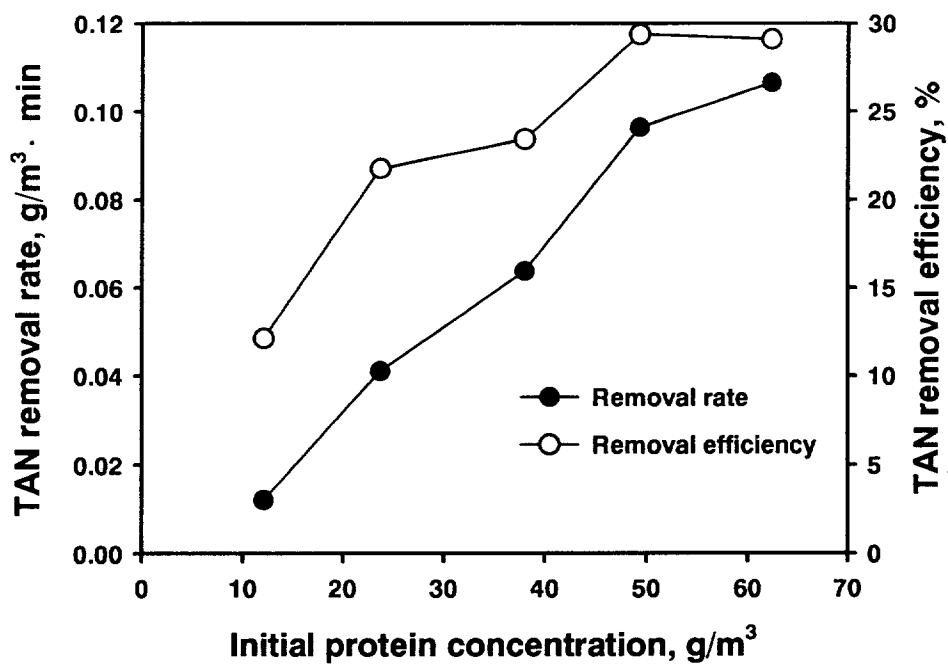


Fig. 30. TAN removal rate and removal efficiency with respect to initial protein concentration.

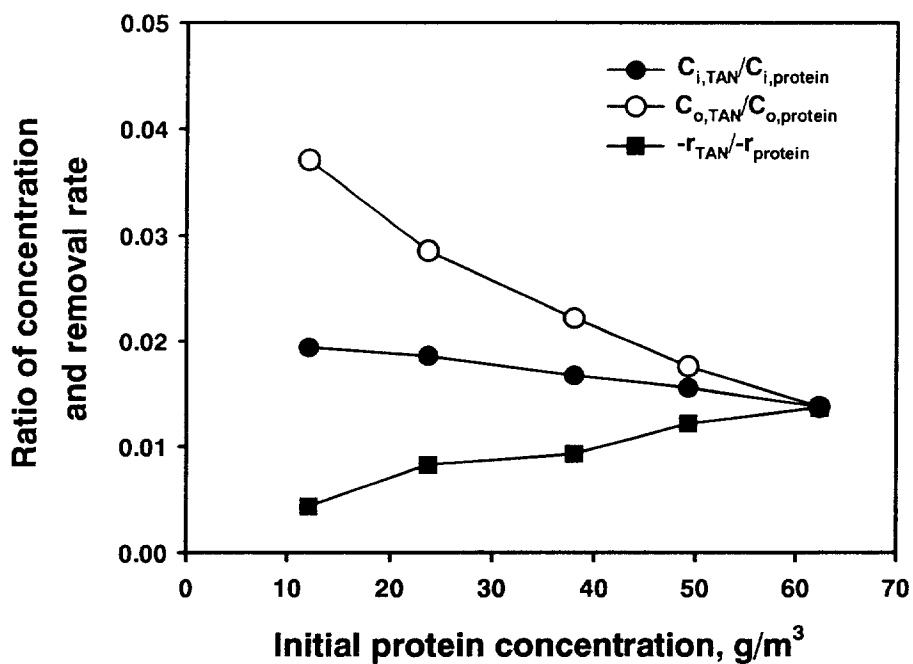


Fig. 31. The concentration ratio of TAN over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TAN over protein.

담수 양어장수의 포말분리에 대한 Suh and Lee[15]의 연구 결과에 따르면 수력학적 체류시간, 공탑 공기유속, 포말층 높이를 증가시킴에 따라 암모니아성 질소의 제거율이 증가한다고 하였다. 본 연구에서 나타난 해수로부터의 암모니아성 질소의 제거율은 12.1 ~ 29.4%의 범위로서 매우 높지는 않으나 다른 운전 조건의 변화에 대한 연구를 통해 보다 높은 제거율을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4.2.8. 용존산소 공급 효율 변화

어류에 쾌적한 환경을 조성하기 위해서는 기본적으로 호흡에 필요한 충분한 용존산소가 수중에 녹아있어야 한다. 일반적으로 어류의 사육에 권장되는 용존산소 농도는 어종에 따라 다르나 담수성 어종의 경우 온수성 어류에 대해서 최소 5.0 g/m^3 정도이며, 냉수성 어류인 경우에는 최소 6.0 g/m^3 정도의 산소가 필요한 것으로 권장되고 있다[31].

Fig. 32는 포말분리기의 용존산소 공급 효율을 알아보기 위하여 단백질 농도의 변화에 대한 총괄 물질 전달계수, K_{La} 와 유출수의 용존산소 포화도의 변화를 도시한 것이다. 이때 유입수의 용존산소 농도는 $6.5 \sim 6.6 \text{ g/m}^3$ 로서 용존산소 포화도는 41.7 ~ 44.7% 였다.

그림에서 보는 바와 같이 K_{La} 는 유입 단백질의 농도가 49.28 g/m^3 까지 상승함에 있어서는 완만하게 상승하였으나 그 후 급격히 상승하는 것으로 나타났다. 용존산소의 유출수의 용존산소 포화도도 동일한 경향을 나타내었다. 본 연구의 결과 유출수의 용존산소 포화도가 전체적으로 96.6 ~ 98.5%의 비교적 높은 값을 나타내어 포말분리 장치는 각종 양식 폐기물을 제거함과 동시에 용존산소의 공급도 효율적으로 수행할 수 있는 것으로 판단되었다.

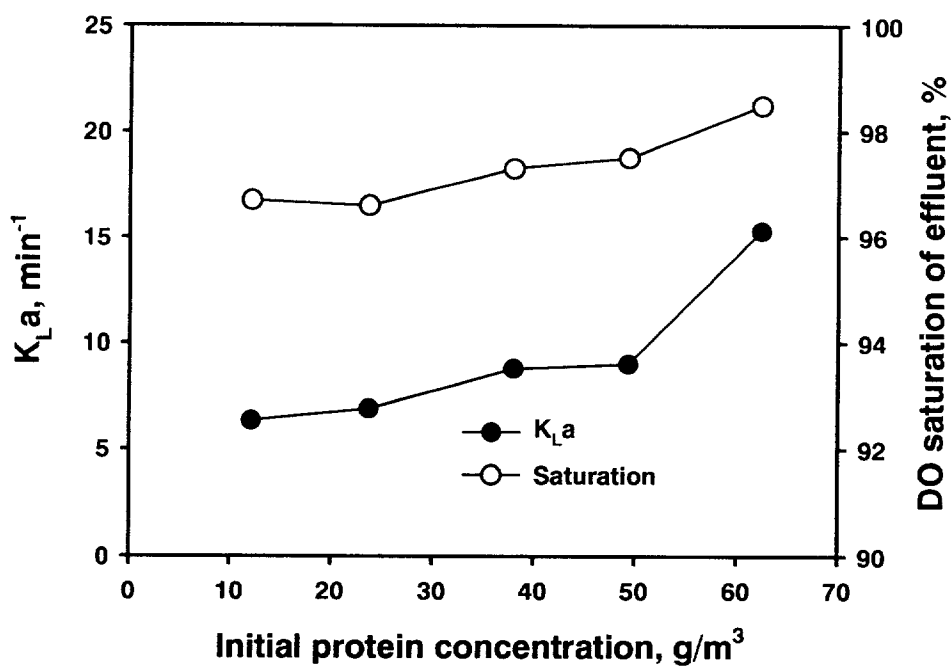


Fig. 32. Overall mass transfer coefficient of oxygen and saturation with respect to initial protein concentration.

4.3. 수력학적 체류시간 영향

수력학적 체류시간은 유체내의 오염물질과 기포의 접촉시간을 결정하여 오염물의 제거속도와 제거율의 변화를 유발한다. 일반적으로 수력학적 체류시간이 증가하면 제거율은 증가하나 제거속도는 감소하며 장치가 처리할 수 있는 전체 공정의 부하를 결정하게 된다.

따라서 본 연구에서는 연속 포말분리 공정에 가장 큰 영향을 미치는 운전 인자인 수력학적 체류시간의 변화에 따른 양식 폐기물의 제거 특성을 검토하였으며 포말분리기의 용존산소 공급 능력을 검토하였다.

4.3.1. 정상상태 도달시간

포말분리 장치의 연속 운전시 정상상태에 도달하는 시간을 검토하기 위하여 실험수를 공탑 공기유속 0.85 cm/sec , 수력학적 체류시간을 0.77 min 으로 하여 연속공급하면서 단백질, 총 부유 고형물, 탁도, 화학적 산소 요구량, 총 암모니아성 질소의 유입수 농도에 대한 유출수의 농도비와 용존산소의 포화도를 측정하여 유출 시간과 운전시간(t)과 수력학적 체류시간(τ)의 비인 무차원 시간 단위의 변화에 따라 Fig. 33에 나타내었다.

그림에서 보여지는 바와 같이 계면활성제 역할을 하는 단백질의 경우 운전을 시작한 후 1 min 이 경과하면서부터 정상상태 값의 84%에 도달하였고 수력학적 체류시간의 2.6배에 상당하는 시간인 2 min 후부터는 거의 정상상태에 도달한 결과를 나타내었다.

Suh et al.[7]은 포말분리법을 이용한 담수 양어장수의 단백질제거 실험을 통해 2.1 min 의 수력학적 체류시간에서 수력학적 체류시간의 약 9.5배인 20분의 시간이 경과한 후 유출수의 단백질 농도가 정상상태에 도달하

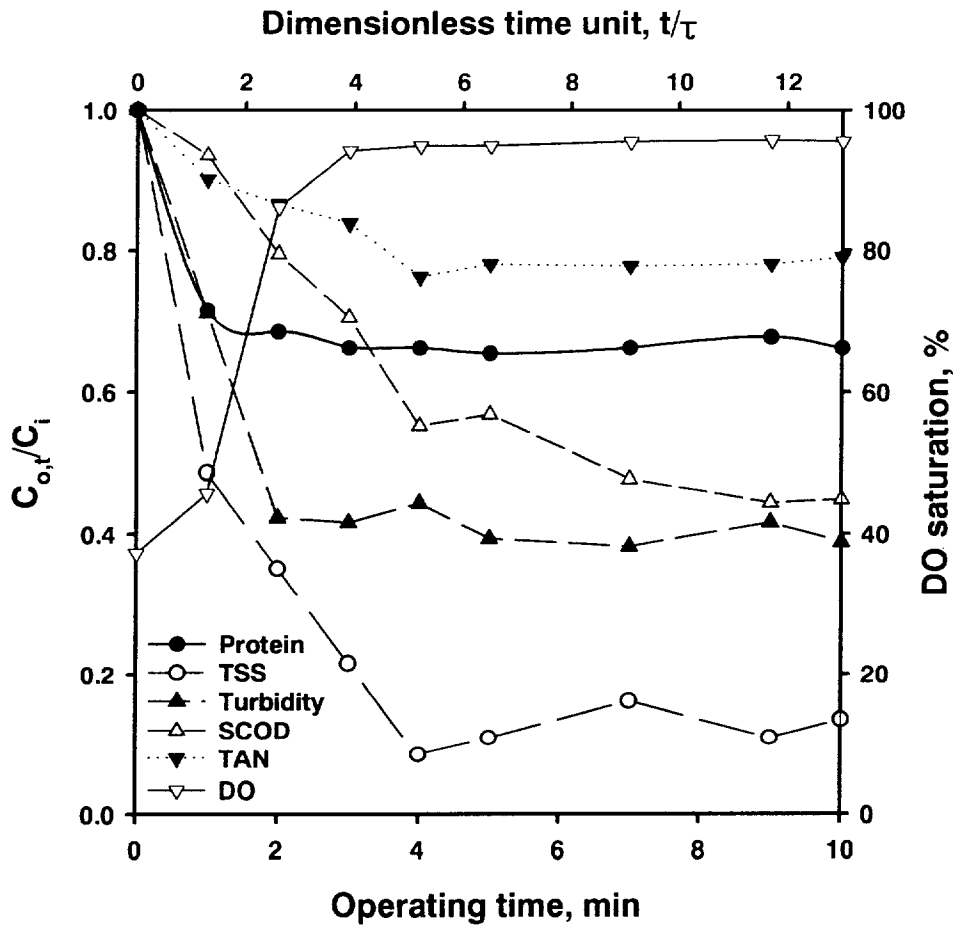


Fig. 33. Time profiles of the concentration ratio of effluent concentration over influent concentration of protein, TSS, turbidity, SCOD and TAN and DO saturation.

였다고 하였다. 이를 본 연구의 결과와 비교하여 볼 때 기·액 계면에서의 단백질의 흡착은 담수보다는 해수에서 더 빠르게 진행된다고 사료된다.

입자상 물질인 총 부유 고형물과 탁도는 공기가 공급되어 기포가 발생되기 시작한 후 시간의 경과에 따라 거의 직선적으로 감소하여 총 부유 고형물은 수력학적 체류시간의 5.2배인 4 min, 탁도는 수력학적 체류시간의 2.6배인 2 min 후에 각각 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다. 화학적 산소 요구량 및 총 암모니아성 질소는 단백질이나 탁도가 정상상태에 도달하는 시간의 2배 가량인 4 min이 경과하면서 거의 일정한 값을 나타내었다. 이는 수력학적 체류시간의 5.2배였다.

입자상 물질이나 화학적 산소 요구량, 총 암모니아성 질소의 제거가 단백질에 비해 정상상태에 늦게 도달되는 것으로 보아 이들 성분의 흡착속도가 단백질의 흡착속도에 비해 느리기 때문이다. 이러한 현상은 단백질 성분은 기·액 계면에 직접적으로 흡착되지만 다른 성분은 기·액 계면에 직접적으로 흡착되기보다는 단백질 성분과 결합되어 제거되는 기작[38]에 의한 것이라고 생각된다.

용존 산소 포화도는 운전시간이 경과함에 따라 증가하여 3 min의 운전 시간 이후부터는 거의 일정한 값을 나타내어 포말 분리기 내 기·액 계면의 용존산소 전달속도는 수력학적 체류시간의 3.9배에 해당하는 시간이 경과한 후 평형에 도달함을 알 수 있었다.

전체적으로 수력학적 체류시간의 5배 이상의 시간이 경과한 후부터는 정상상태에 도달하였으므로 이후 실험에서는 운전 시작 후 수력학적 체류시간의 5배가 경과한 후부터 1회에 2개의 시료를 수력학적 체류시간의 2배 간격으로 3회 채취하여 평균 분석값을 실험자료로 이용하였다.

4.3.2. 단백질 제거속도 변화

단백질 성분은 어류에 대한 독성이 높은 암모니아를 발생시키고 산소 요구량을 증가시켜 신속한 제거가 요구되는 성분으로[25] 소수기와 친수기를 모두 가지고 있는 구조적 특징[26]으로 인해 계면활성제 역할을 수행하므로 별도의 계면활성제를 첨가하지 않는 본 연구에서 가장 중요한 성분이다.

Fig. 34는 수력학적 체류시간이 단백질 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 체류시간의 증가에 따라 단백질의 제거율이 증가하는 것으로 나타났으며 그 증가율이 서서히 감소하는 형태를 나타내었다. 단백질 제거속도는 수력학적 체류시간이 0.28 min에서 0.48 min으로 증가함에 따라 $7.17 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 에서 $10.25 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 으로 증가하였으나 그 이상의 수력학적 체류시간부터는 제거속도가 감소하여 단백질 제거율이 증가하는 것과는 반대의 현상을 나타내었다.

수력학적 체류시간의 증가에 따라 단백질의 제거율이 증가하는 현상은 체류시간이 증가하면 유입된 단백질이 포말분리 장치 내에서 머무는 시간이 증가하므로 포말분리기 내에서 기포와의 접촉시간이 증가하여 나타난 현상으로 사료된다. 체류시간의 증가에 따라 제거율이 증가하는 변화폭이 감소하는 것은 기·액 계면의 면적은 한정되어 있어 발생하는 현상으로 짧은 체류시간의 범위에서는 단백질이 흡착되어있지 않은 기·액 계면의 면적이 충분하여 체류시간이 증가함에 따라 미흡착 단백질의 흡착이 용이하게 진행되나 체류시간이 길어질수록 단백질이 흡착될 수 있는 기·액 계면의 면적이 감소하게 되므로 미흡착 단백질이 경쟁적으로 활성 계면에 흡착되기 때문으로 사료된다.

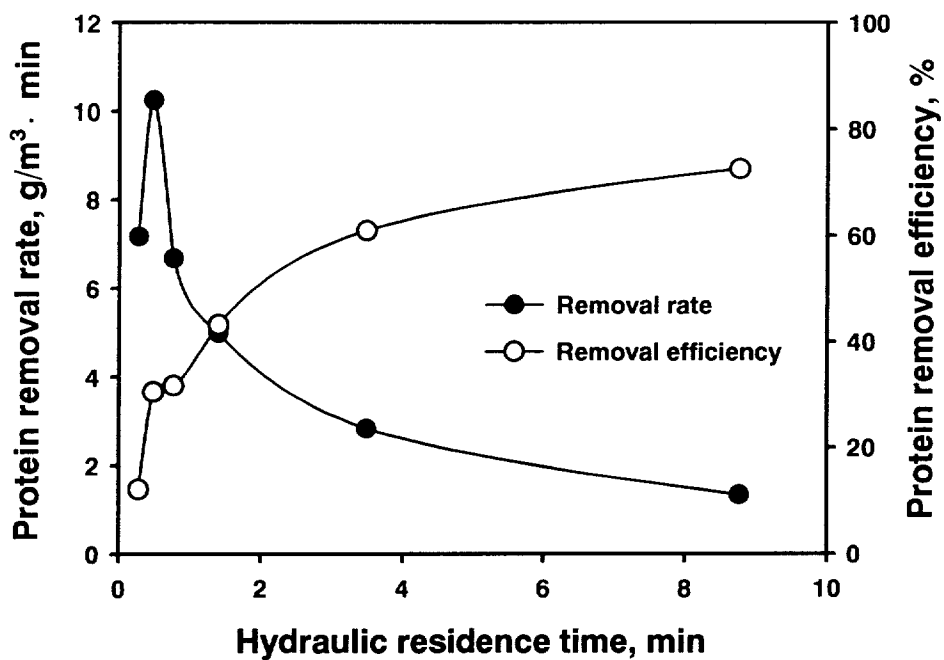


Fig. 34. Protein removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.

단백질 제거속도가 수력학적 체류시간이 감소할수록 증가되는 것은 두 가지 현상에 의한 것으로 생각된다. 첫 번째는 접촉기회의 증가에 의한 것으로서 유량의 증가에 따라 유입되는 단백질의 양이 증가하므로 기·액 계면과 접촉할 수 있는 단백질의 양이 증가하므로 흡착되는 단백질의 양도 증가하여 단백질 제거속도가 증가되는 현상이다. 다른 하나는 유량의 증가에 따른 단백질 농도의 증가에 의한 효과로서 수력학적 체류시간이 감소하여 유량이 증가할 경우 앞서 설명한 바와 같이 제거율이 감소하므로 포말 분리기 내의 단백질 농도가 상승하게 되어 나타나는 현상이다. 전보에서 나타난 바와 같이 포말분리기의 단백질 제거속도는 Langmuir 등온 흡착식을 따르므로 단백질 농도가 증가할 경우 기·액 계면으로의 흡착속도가 증가하게 되는 것이다.

0.48 min 이하의 체류시간에서는 제거속도가 감소하는 것은 수력학적 체류시간이 매우 짧아질 경우 단백질이 기·액 계면으로의 물질 전달 속도보다 액체흐름 속도가 더 커져 단백질이 기·액 계면에 흡착될 수 있는 접촉 시간을 유지하지 못하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 35는 수력학적 체류시간의 변화에 따른 포말 생성속도와 유입 유량에 대한 포말 생성 속도의 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 포말 생성속도는 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며 0.48 min 이상의 수력학적 체류시간에서는 포말 생성 속도의 변화폭이 감소하여 거의 일정한 값을 나타내었다. 반면 유입 유량에 대한 포말 생성 속도의 비는 1.4 min의 수력학적 체류시간에서 가장 큰 값을 나타내었다.

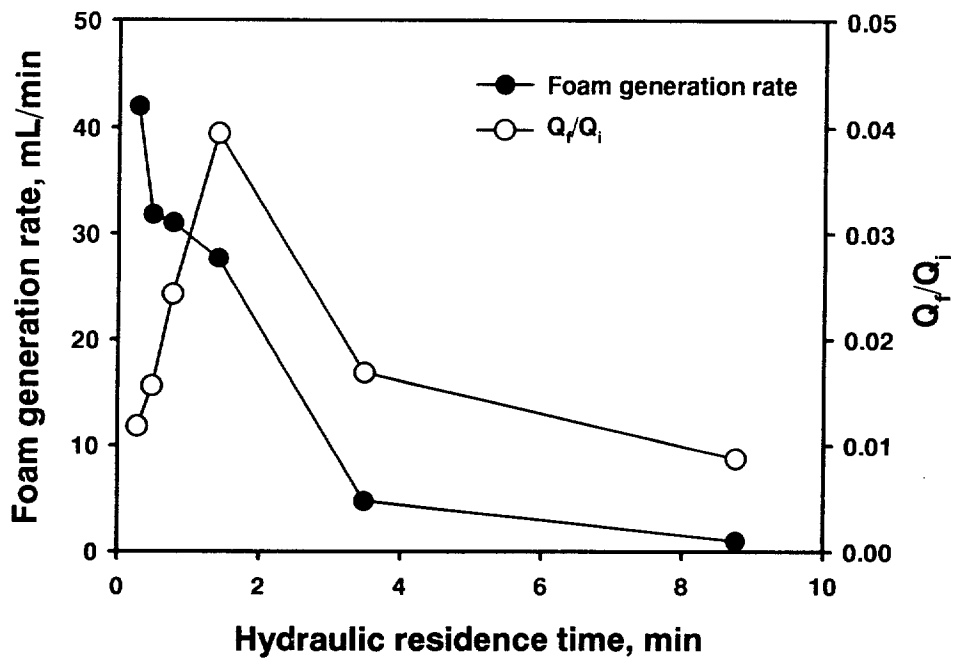


Fig. 35. Foam generation rate and the ratio of foam generation rate to liquid flowrate with respect to hydraulic residence time.

수력학적 체류시간의 감소에 의해 포말 생성 속도가 증가하는 것은 수력학적 체류시간이 감소함에 따라 단백질 농도가 증가하여 포말의 발생량이 증가하는 현상과 포말 내 액체 체류량의 증가에 의한 현상[35]에 기인한 것으로 생각된다.

4.3.3. 총 부유 고형물 제거속도 변화

Fig. 36은 수력학적 체류시간이 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 체류시간의 변화에 따른 제거속도의 변화는 단백질 제거속도의 변화와 거의 동일한 경향을 나타내었으며 최대 제거속도는 0.48 min에서 나타난 $51.8 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 이었다

총 부유 고형물의 제거율은 수력학적 체류시간이 0.77 min으로 증가함에 따라 33%에서 80%로 급격히 증가하였으나 그 이상의 수력학적 체류시간에서는 80 - 92%의 범위로 크게 증가하지는 않았다. 총 부유 고형물의 제거속도가 단백질 제거속도와 유사하게 수력학적 체류시간의 영향을 받는 것은 포말분리를 유발하는 성분이 단백질이고 부유 고형물은 기·액 계면에 흡착된 단백질에 이온적으로 흡착되어 제거되는 기작[5]에 연유한 현상으로 사료된다.

Fig. 37은 수력학적 체류시간의 변화에 따른 총 부유 고형물과 단백질의 유출수 내의 농도와 제거속도의 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유출수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 거의 일정하게 나타났으며 제거속도의 비는 0.48 min이상의 수력학적 체류시간에서는 0.6 - 0.9의 범위에서 거의 일정한 것으로 나타났으며 제거속도의 비는 수력학적 체류시간의 증가에 따라 5.9 - 2.8의 범위에서 감소하는 것으로 나타났다.

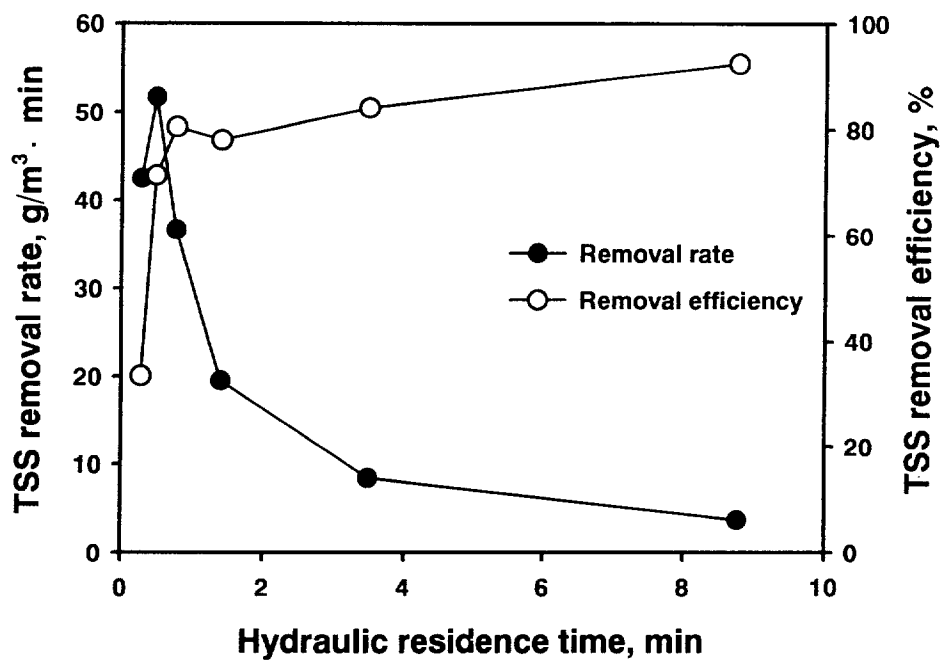


Fig. 36. TSS removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.

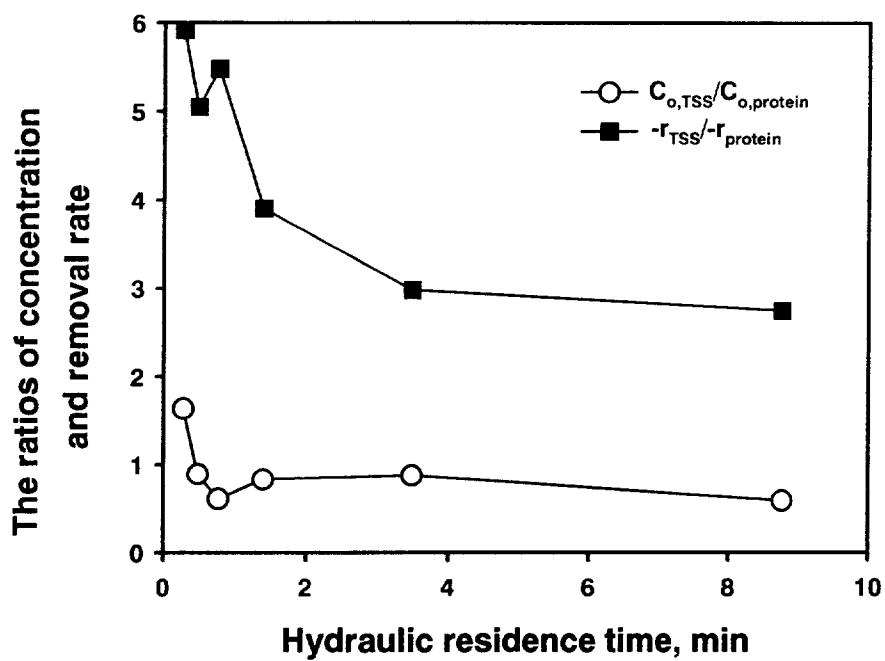


Fig. 37. The concentration ratio of TSS over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TSS over protein.

유입수의 총 부유 고형물/단백질 농도비가 약 2.2인 것에 비해 유출수의 농도비가 더 낮게 나타나는 것으로 보아 기·액 계면에 흡착 제거되는 단백질의 단위 질량당 총 부유 고형물의 양이 더 크다는 것을 알 수 있었으며 0.28 min의 짧은 수력학적 체류시간에서 농도비가 증가하는 것은 액체 흐름속도의 증가가 단백질과 고형물의 간의 결합력보다 커서 나타난 현상으로 사료된다.

4.3.4. 탁도 제거속도 변화

Fig. 38과 Fig. 39는 각각 수력학적 체류시간의 변화에 따른 탁도 제거속도 및 제거율의 변화와 유출수의 농도와 제거속도에 대한 탁도/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 수력학적 체류시간의 증가에 따른 탁도의 제거율 및 제거속도의 변화는 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율의 변화와 거의 유사한 형태로 나타났다. 이러한 현상은 탁도를 유발하는 물질 중 상당부분을 총 부유 고형물이 차지하므로[5] 많은 분율을 차지하는 총 부유 고형물이 제거되는 것과 유사한 양상으로 탁도의 제거가 이루어지는 것으로 생각된다.

Fig. 39에서 보는 바와 같이 유출수의 탁도/단백질 농도비는 0.57 정도로 나타났으며 유입수의 농도비가 1.1인 것과 비교할 때 단백질에 비해 50%정도 더 많은 양이 제거되는 것으로 생각된다. 제거속도 비는 총 부유 고형물의 단백질 제거속도에 대한 비와 비교할 때 50% 정도의 수치를 나타내었다. 총 부유 고형물의 경우 1 μm 이상의 입경을 가지는 고형물인 것과 달리 탁도는 1 μm 이하의 부유 고형물과 색소성 용존 물질도 모두 포함하는 것을 생각 할 때 총 부유 고형물보다 작은 미소입자가 잘 제거되지 않는 것으로 생각된다.

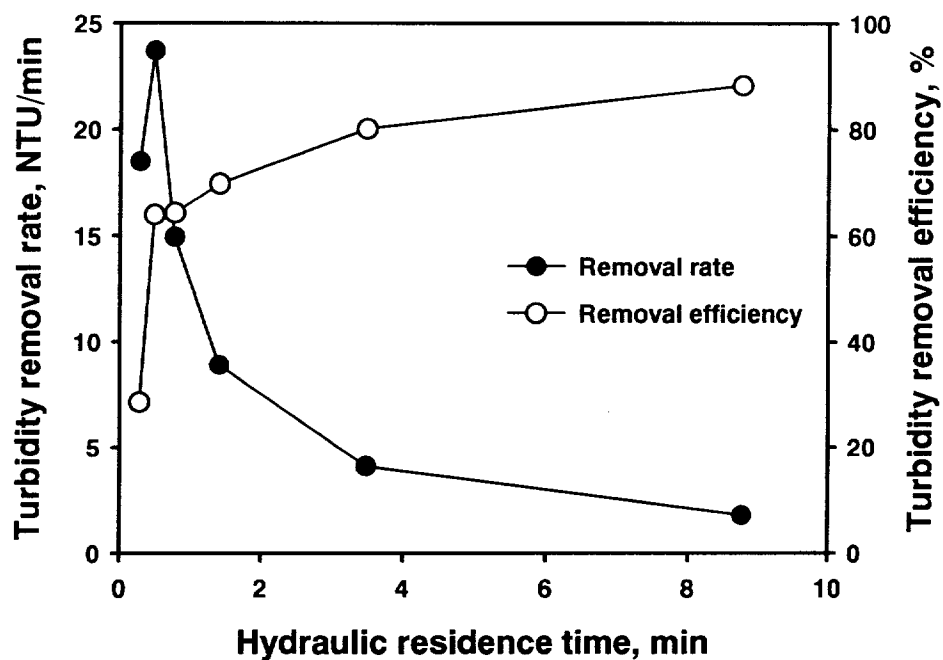


Fig. 38. Turbidity removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.

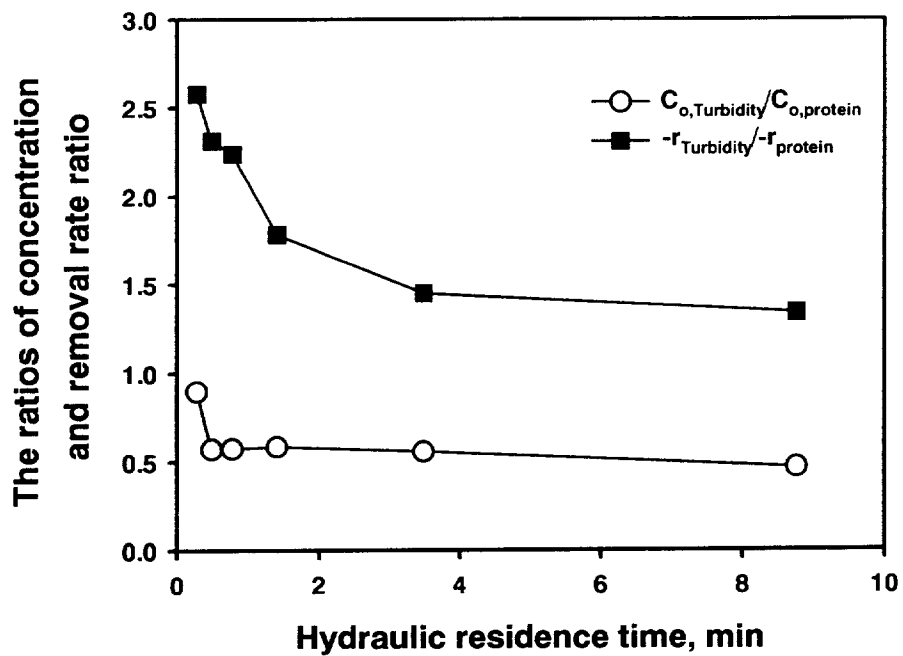


Fig. 39. The concentration ratio of turbidity to protein of influent (C_i) and effluent (C_o) and the removal rate ratio of turbidity to protein.

4.3.5. 입도 분포 변화

Fig. 40은 유입수와 각 수력학적 체류시간에서 얻어진 유출수의 입자 직경별 입도 분포(a) 및 누적 입도 분포(b)와 입자 직경별 제거율의 변화(c)를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수와 유출수의 입도 분포는 입자 농도의 절대값은 차이가 있으나 그 형태는 거의 동일하게 나타났다으며 입자는 0 ~ 15 μm 의 범위에서 분포하였으며 2.632 μm 인 입자가 차지하는 분율이 가장 큰 것으로 나타났다.

입자 직경의 변화에 따른 입자 제거율의 변화는 전체적으로 입경이 클수록 제거율이 높은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 중력에 의한 침강력보다 상승하는 기포에 의해 발생하는 부력에 의한 영향에 더 크게 작용하여 큰 입자가 작은 입자보다 separation column에 더 오래 체류하게 되어 기·액 계면에 더 많이 흡착될 수 있어 나타나는 현상으로 사료된다.

Fig. 41은 수력학적 체류시간의 변화에 따른 입자의 총 제거율과 Fig. 10의 입도 분포 중 가장 큰 분율을 차지하는 2.632 μm 입자의 제거율을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 0.48 - 8.77 min의 수력학적 체류시간의 범위에서는 체류시간의 증가에 따라 입자의 제거율이 서서히 증가하고 2.632 μm 입자의 제거율은 총 입자의 제거율에 비해 3%정도 작게 나타났다으나 그 절대값은 큰 차이를 보이지 않았다. 0.28 min의 수력학적 체류시간에서는 입자의 제거율이 매우 낮은 것으로 나타났으며 2.632 μm 입자의 제거율은 전체 입자의 제거율에 비해 18%정도 더 낮은 것으로 나타났다.

4.3.6. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화

수력학적 체류시간의 변화에 따른 포말 분리기에 의한 화학적 산소 요구량의 제거 속도 및 제거율을 Fig. 42에 도시하였다.

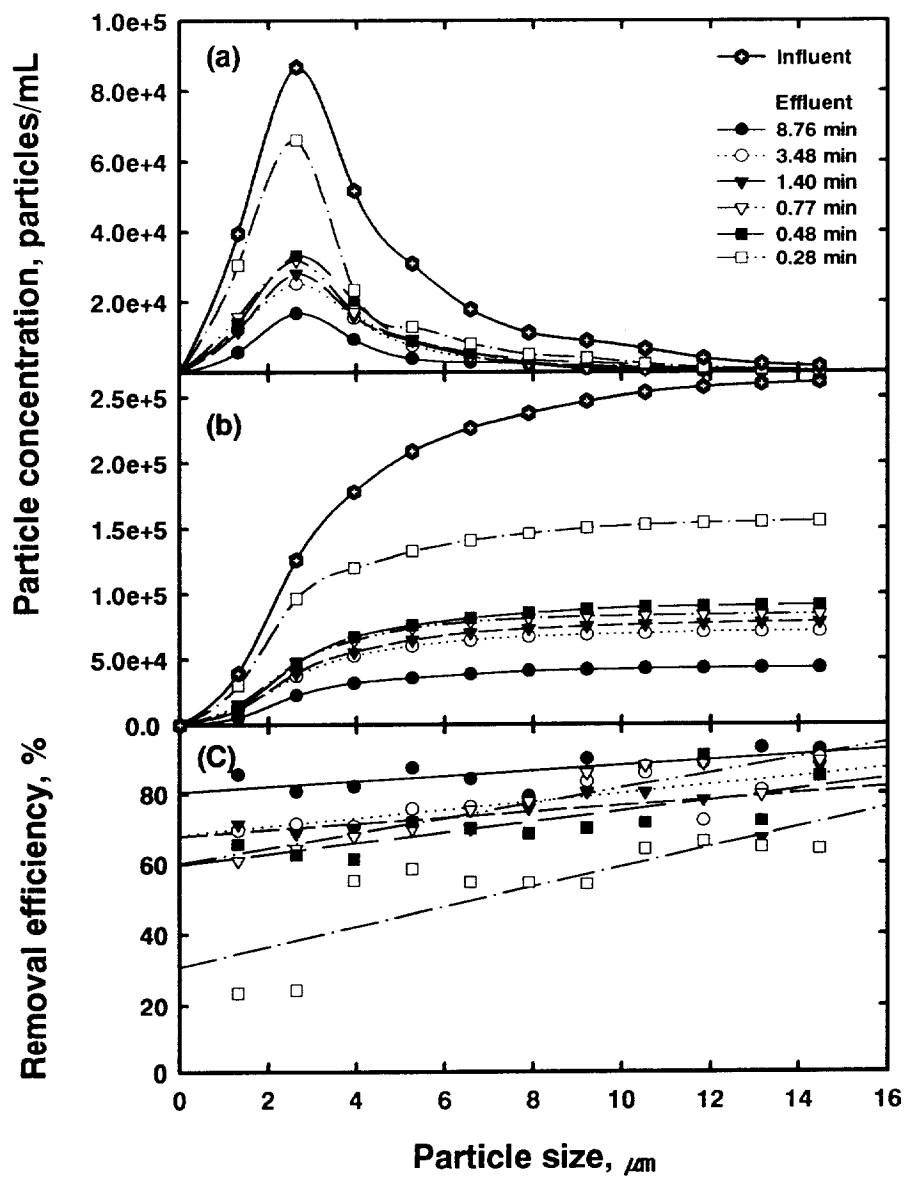


Fig. 40. Differential particle distributions (a), the cumulative particle distributions (b) and the particle removal efficiency (c) with respect to particle size.

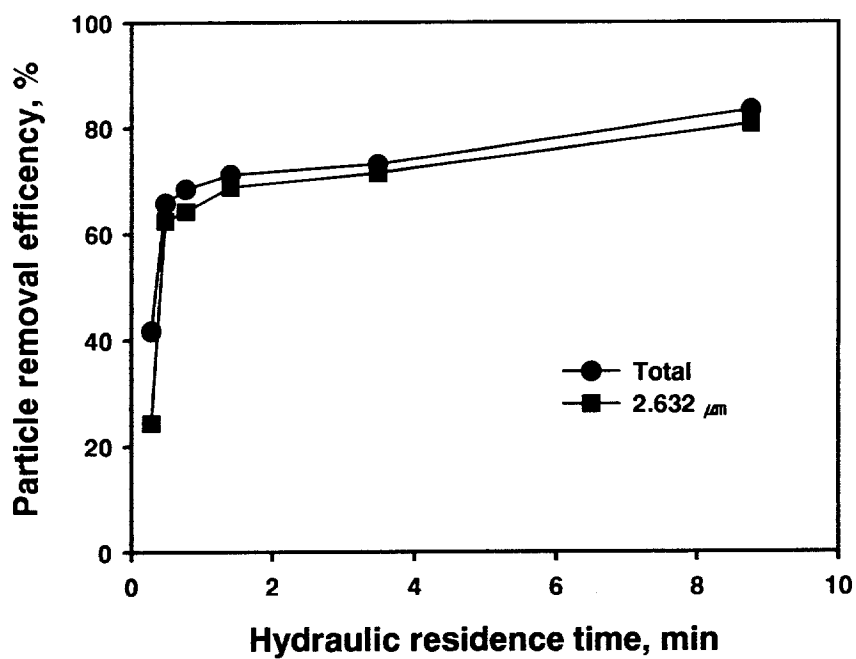


Fig. 41. Particle removal efficiency with respect to hydraulic residence time.

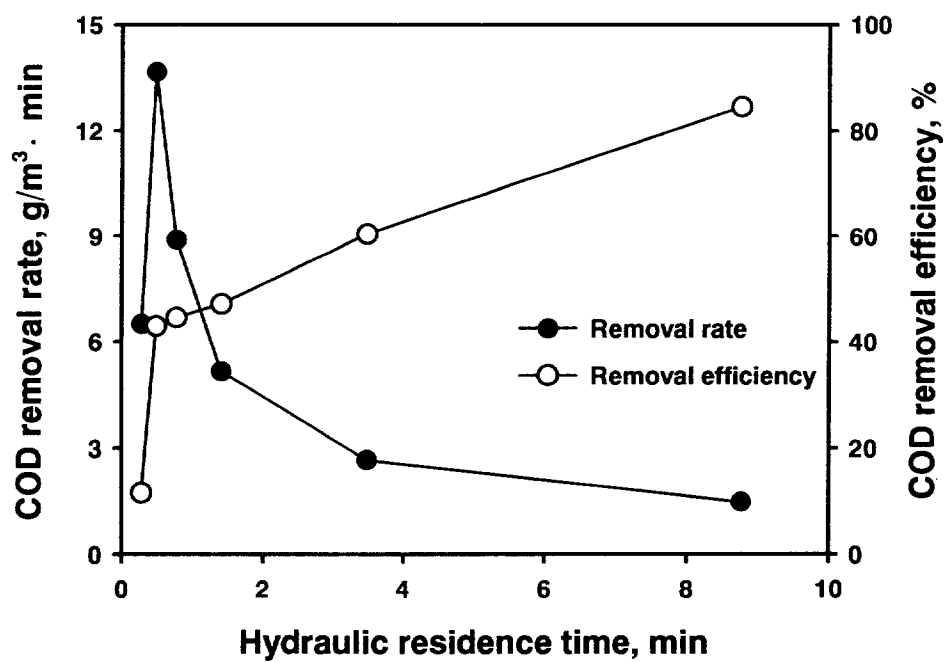


Fig. 42. SCOD removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.

그림에서 보여지는 바와 같이 화학적 산소 요구량의 제거속도는 앞서 나타난 단백질 또는 부유 고형물의 제거 속도와 같이 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며 화학적 산소 요구량의 최대 제거속도는 $13.7 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 이었다. 화학적 산소 요구량의 제거율은 수력학적 체류시간이 0.28 min에서 0.48 min으로 증가함에 따라 11.7%에서 43.0%로 급격히 증가한 후 0.48 min이상의 수력학적 체류시간에 대해서는 선형적으로 증가하여 8.77 min의 체류시간에서 84.6%의 제거율을 나타내었다.

Fig. 43은 수력학적 체류시간의 변화에 따른 유출수의 농도와 제거속도의 화학적 산소 요구량/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비와 제거속도비는 수력학적 체류시간의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

4.3.7. 암모니아성 질소 제거속도 변화

수력학적 체류시간의 변화에 따른 포말 분리기의 암모니아성 질소의 제거 속도 및 제거율을 Fig. 44에 나타내었다. Fig. 44에서 보는 바와 같이 암모니아성 질소의 제거속도는 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타나 유량이 많을수록 제거속도가 큰 것으로 나타났으며 제거율은 0.48 min의 수력학적 체류시간에서 가장 높은 것으로 나타났다.

암모니아성 질소의 경우 다른 성분들과는 달리 0.28 min의 짧은 수력학적 체류시간에서도 제거속도가 감소하지 않고 오히려 더 증가하는 것은 stripping 효과에 의해 암모니아가 제거되는 기작에 의한 것으로 기·액 접촉기회의 증가에 의해 제거되는 암모니아의 양이 증가되는 것으로 생각된다.

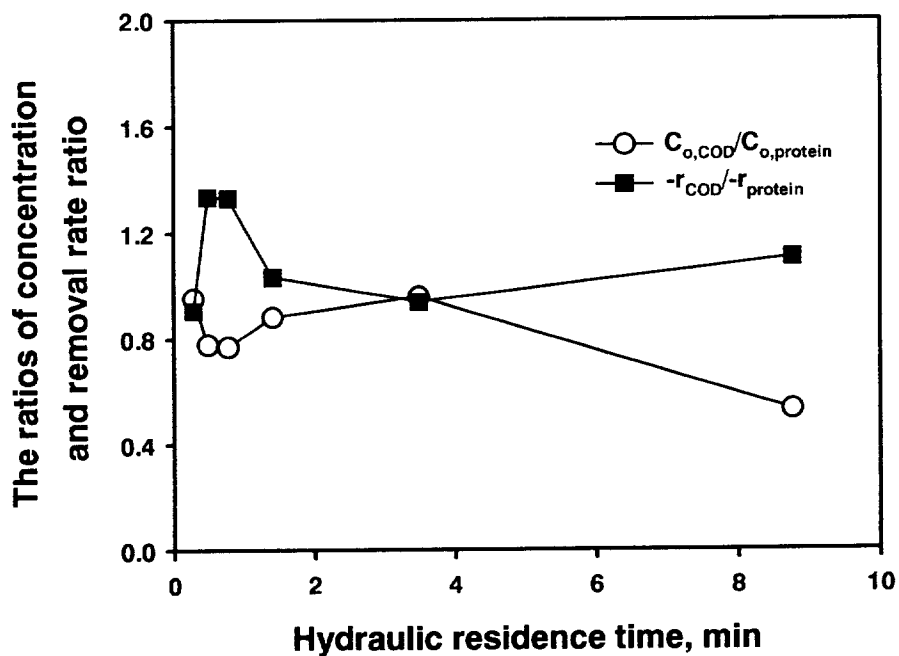


Fig. 43. The concentration ratio of SCOD over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of SCOD over protein.

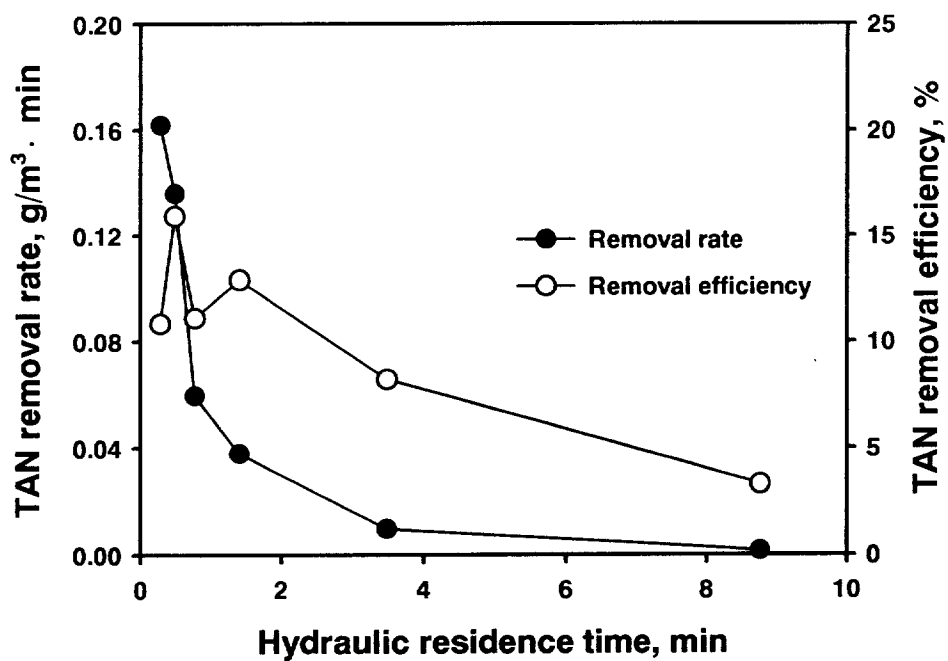


Fig. 44. TAN removal rate and removal efficiency with respect to hydraulic residence time.

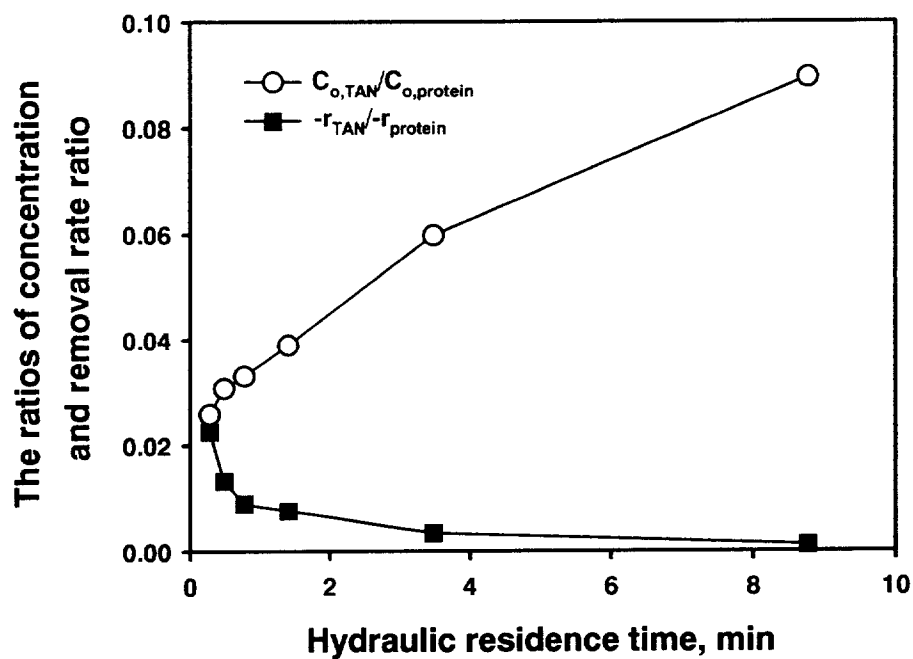


Fig. 45. The concentration ratio of TAN over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TAN over protein.

Fig. 45는 유출수 농도와 제거속도의 암모니아성 질소/단백질 비의 변화를 나타낸 것으로서 수력학적 체류시간의 증가에 따라 유출수의 암모니아성 질소/단백질의 농도비는 증가하였으나 제거속도의 비는 감소하는 것으로 나타났다.

4.3.8. 용존산소 공급 효율 변화

Fig. 46은 수력학적 체류시간의 변화에 따른 유입수와 유출수의 용존산소 농도 변화와 총괄 산소 전달 계수 K_{La} 를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 또한 수력학적 체류시간의 변화에 따른 총괄 산소 전달계수의 변화는 단백질 제거속도와 거의 유사한 형태로 변화하는 것으로 나타났다. 단백질 제거는 단백질 성분이 액층으로부터 기·액 계면에 흡착되는 현상에 의해 이루어지고[10] 용존산소의 전달은 기포 내층에서 액층으로의 흡수에 의해 이루어지므로[23] 이 두 현상은 모두 기·액 계면의 면적의 증가에 의해 촉진될 수 있다. 따라서 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 기·액 계면이 증가하고 접촉이 효율적으로 수행되어 단백질 제거속도가 증가함과 동시에 기포 속의 용존산소가 액층으로 더 많이 전달될 수 있는 것으로 생각된다. 이것으로 보아 높은 K_{La} 를 유지할 수 있는 운전 조건에서 기·액의 접촉이 효율적으로 수행되므로 단백질 및 부유 고형물의 제거 속도도 높게 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

유입수의 용존산소 포화도가 37.2 – 40.8% 정도로 매우 낮게 공급됨에도 유출수의 용존산소 포화도는 체류시간의 변화에 큰 영향을 받지 않고 94.5 – 97.9%의 범위를 나타내는 것으로 보아 포말분리 장치는 단백질, 부유고형물과 같은 양식 폐기물을 제거함과 동시에 어류에 꼭 필요한 용존산소를 효율적으로 공급할 수 있는 폭기장치로도 병용될 수 있음을 알 수 있었다.

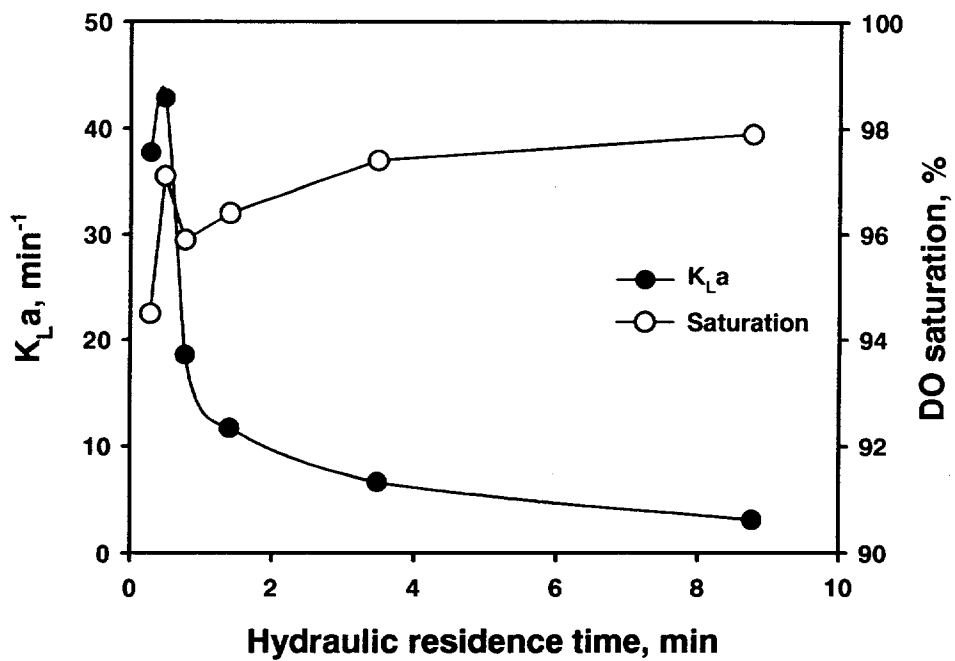


Fig. 46. Overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency with respect to hydraulic residence time.

4.4. 공탑공기속도 영향

공탑공기속도는 분리관을 통하여 흐르는 공기 흐름 속도로서 포말 분리관을 통하여 흐르는 공기의 체적유속과 분리관의 단면적의 비로써 나타내어진다[8]. 공탑공기속도는 포말 분리법에서 가장 중요한 운전 인자 중의 하나로 포말분리에 의한 단백질 회수[35], 미생물 회수[42] 등의 연구에서도 주요 운전인자로 연구되어왔다.

본 연구에서는 공기 구동식 포말분리기의 해수 내 오염물의 연속 제거운전을 수행하여 공탑공기속도에 따른 양식 폐기물의 제거 및 용존산소 전달특성을 검토하였다.

4.4.1. 단백질 제거속도 변화

Fig. 47은 공탑공기속도가 단백질 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 비례하여 단백질의 제거속도와 제거율은 4.04 g/m³·min, 30.0%에서 10.43 g/m³·min, 77.3%로 각각 증가하였다. 공탑공기속도가 5배 증가함에 비해 단백질 제거속도는 2.5배로 증가하는 것으로 보아 공탑공기속도의 증가폭보다 제거속도의 증가폭이 작은 것으로 나타났다.

공탑공기속도가 증가함에 따라 제거속도와 제거율이 동반하여 증가하는 것은 공탑공기속도가 증가함에 따라 기·액 계면 면적이 증가하고 이로 인해 흡착되는 단백질의 양이 증가하는 현상[35, 32-33]에 의한 것으로 생각된다.

공탑공기속도의 증가폭에 비해 단백질 제거속도의 증가폭이 작은 것은 복합적인 원인에 의한 것으로 공탑공기속도의 증가에 따른 기·액 계면의

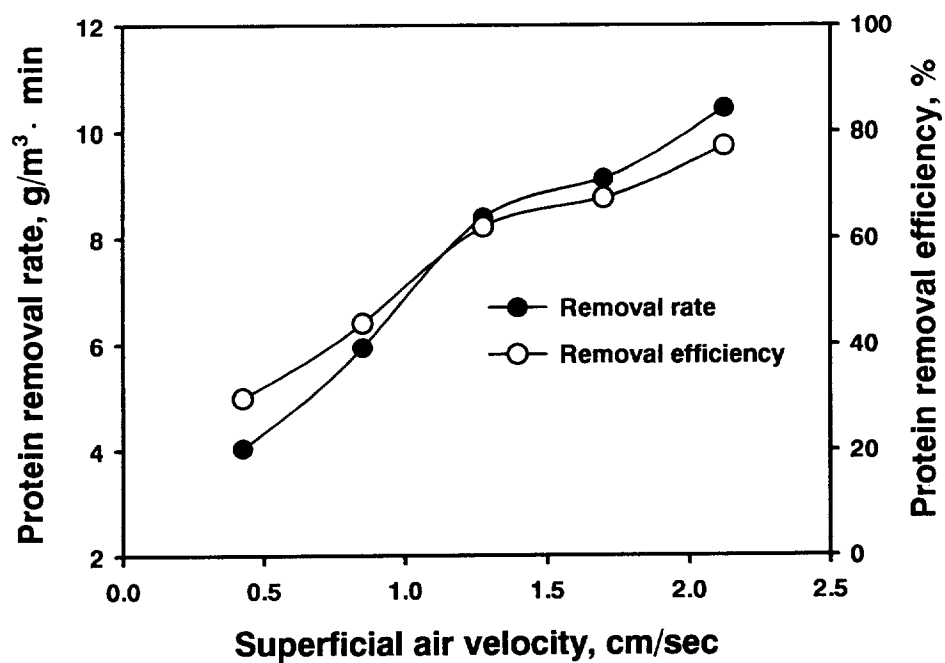


Fig. 47. Protein removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.

증가에 따라 흡착될 수 있는 단백질의 양이 증가되어 용액 속의 단백질 농도가 감소되므로 이에 따라 포말 기·액 면적 당 흡착되는 단백질의 양이 감소되는 현상[32]에 의한 것으로 생각된다. 또 공탐공기속도가 증가하면 포말간의 거리가 좁아져 여러 포말이 서로 합쳐되어 포말의 크기가 커지게 되므로 기체량의 증가에 비해 기·액 계면의 면적이 비례하여 증가하지 않는 현상[33]에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 48은 공탐공기속도의 변화에 따른 포말 생성속도와 유입수의 단백질 농도와 포말의 단백질 농도의 비인 농축비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 포말 생성속도는 공탐공기속도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며 포말 생성속도의 증가폭은 공탐공기속도가 클수록 더 커지는 것으로 나타났다. 그러나 농축비는 공탐공기속도가 증가함에 따라 오히려 감소되는 것으로 나타났다.

공탐공기속도의 증가에 따라 포말의 생성량이 증가하고 농축비가 감소하는 것은 공급되는 공기량의 증가에 따라 포말의 유출 속도가 빨라져서 포말이 농축부에서 동반 액체와 충분히 분리되지 못하여 포말 속의 액체 동반량이 증가하는 현상으로 이로 인해 포말의 농도도 감소하는 것으로 사료된다.

포말분리 공정에서 높은 제거속도도 중요하나 공탐공기속도의 증가에 의한 제거속도의 증가는 배출되는 포말량의 증가에 의한 것으로 오염물을 고농도로 제거할 수 없으므로 높은 농축비를 얻는 것도 중요하다. 그러므로 높은 제거속도를 얻고자하여 공탐공기속도를 증가시킬 경우 포말을 충분히 농축할 수 있도록 foam collector의 공간을 증가시켜야 할 것으로 생각된다.

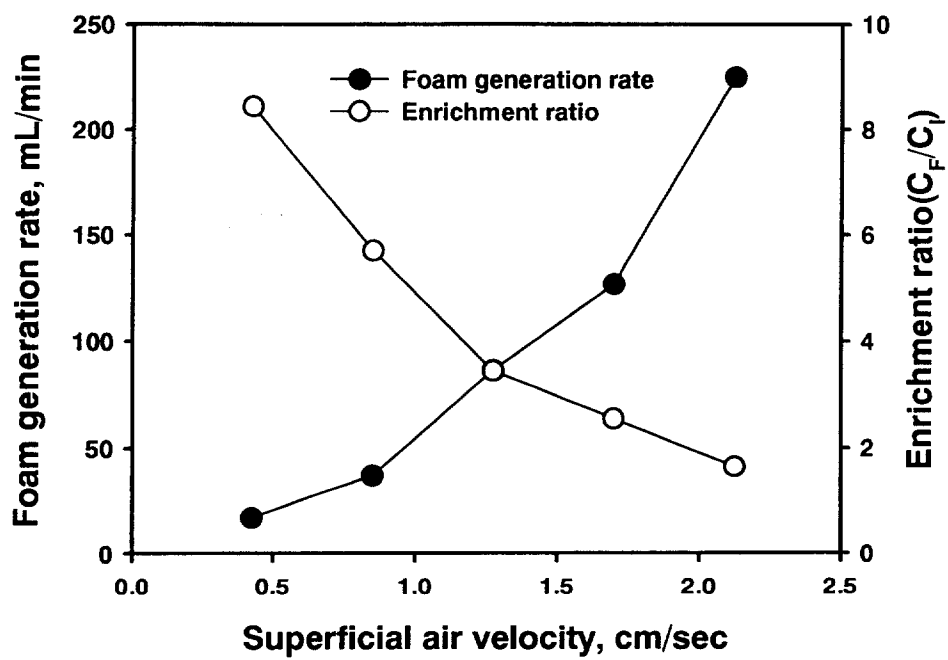


Fig. 48. Foam generation rate and enrichment ratio with respect to superficial air velocity.

4.4.2. 총 부유 고형물 제거속도 변화

Fig. 49는 공탐공기속도가 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 공탐공기속도의 증가에 따른 제거속도의 변화는 단백질 제거속도의 변화와 거의 동일한 경향을 나타내었다. 공탐공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율은 $16.63 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, 59.4%에서 $24.39 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, 87.0%로 증가하였다. 총 부유 고형물의 제거속도가 단백질 제거속도와 유사하게 공탐공기속도의 영향을 받는 것은 포말분리를 유발하는 성분이 단백질이고 부유 고형물은 기·액 계면에 흡착된 단백질에 이온적으로 흡착되어 제거되는 기작[6]에 연유한 현상에 의해 기·액 계면에 흡착되는 단백질의 증가에 비례하여 제거되는 고형물이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 50은 공탐공기속도의 변화에 따른 유출수 농도와 제거속도의 총 부유 고형물/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유출수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 1.16 - 1.47의 범위로 거의 일정하게 나타났으며 제거속도의 비는 공탐공기속도가 0.42 cm/sec에서 1.27 cm/sec로 증가함에 따라 4.44에서 2.44로 감소하였으나 그 이상의 공탐공기속도에 대해서는 2.34 - 2.51의 범위에서 거의 일정한 것으로 나타났다.

유입수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 2.08이었으며 이에 비해 유출수의 농도비가 더 낮게 나타나는 것으로 보아 기·액 계면에 흡착 제거되는 단백질의 단위 질량당 총 부유 고형물의 양이 더 크다는 것을 알 수 있었다.

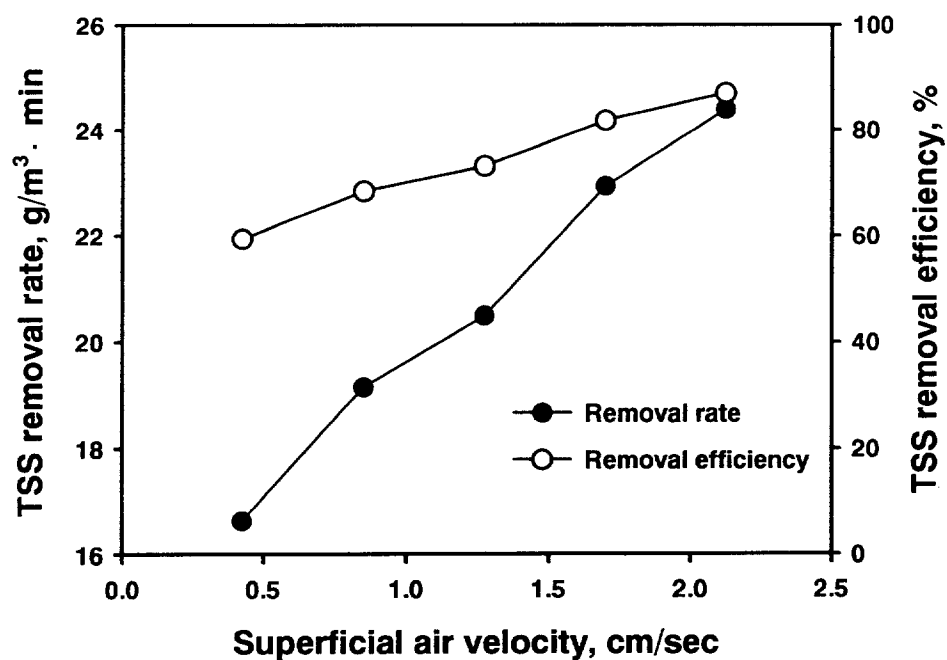


Fig. 49. TSS removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.

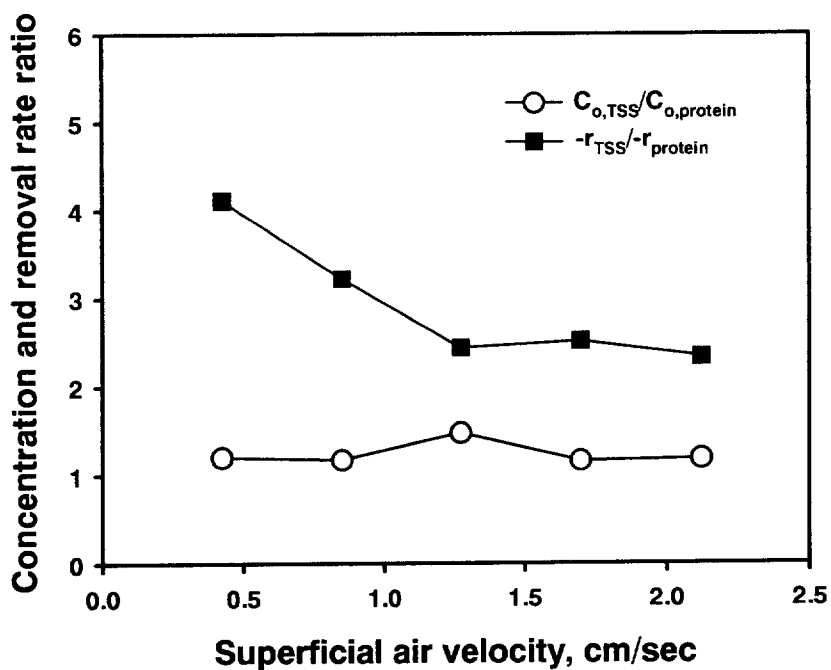


Fig. 50. The concentration ratio of TSS over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TSS over protein.

공탑공기속도가 증가함에 따라 총 부유 고형물/단백질 제거속도의 비가 감소하는 것은 유입수 속에 존재하는 고형물이 단백질과 결합하여 제거될 수 있는 양 보다 작아서 나타나는 현상으로 단백질 제거속도가 증가할수록 이에 동반하여 제거될 수 있는 고형물의 양이 부족해지기 때문으로 생각되며 보다 많은 고형물이 유입되더라도 충분한 제거가 이루어질 것으로 사료된다.

4.4.3. 탁도 제거속도 변화

Fig. 51은 각각 공탑공기속도의 변화에 따른 탁도 제거속도 및 제거율의 변화를 나타낸 것이며 Fig. 52는 유출수의 탁도/단백질 농도비와 제거속도의 탁도/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공탑공기속도의 증가에 따른 탁도의 제거율 및 제거속도의 변화는 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율의 변화와 거의 유사한 형태로 나타났다. 특히 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 총 부유 고형물의 제거율이 59.4%에서 87.0%로 증가한 것과 거의 유사하게 탁도의 제거율도 60.2%에서 90.3%로 증가하여 거의 동일한 제거율을 나타내는 것으로 나타났다. 이것으로 보아 탁도를 유발하는 물질 중 상당부분을 총 부유 고형물이 차지하는 것으로 생각된다.

Fig. 52에서 보는 바와 같이 유출수의 탁도/단백질 농도비는 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 0.55에서 0.41로 감소하는 것으로 나타났으며 제거속도비는 총 부유 고형물의 단백질 제거속도에 대한 비와 비교할 때 50% 정도의 수치를 나타내었다.

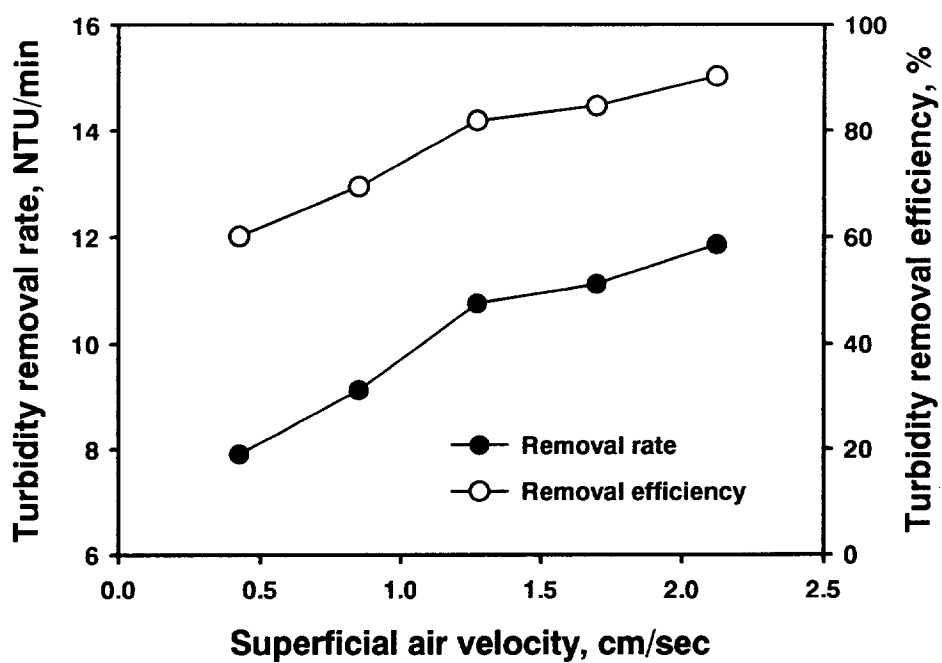


Fig. 51. Turbidity removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.

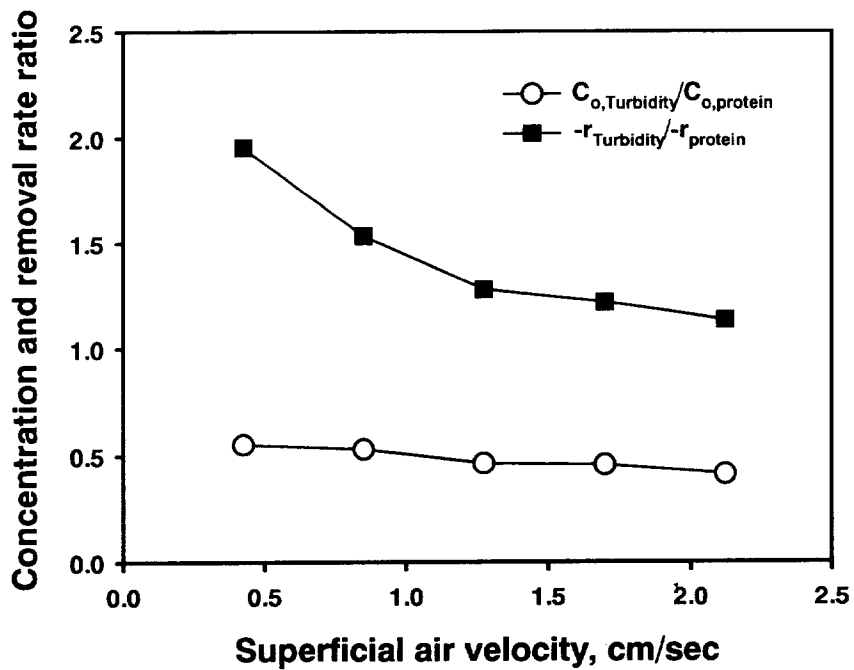


Fig. 52. The concentration ratio of turbidity over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of turbidity over protein.

4.4.4. 입도 분포 변화

Fig. 53은 유입수와 각 공탐공기속도의 변화 실험에서 얻어진 유출수의 입경 직경별 입도 분포(a) 및 누적 입도 분포(b)와 입자 직경별 제거율의 변화(c)를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수와 유출수의 입도 분포는 입자 농도의 절대값은 차이가 있으나 그 형태는 거의 동일하게 나타났으며 입자는 0 ~ 15 μm 의 범위에서 분포하였으며 2.632 μm 인 입자가 차지하는 분율이 가장 큰 것으로 나타났다.

입자 직경의 변화에 따른 입자의 제거율의 변화는 전체적으로 큰 차이는 없었으나 0.84 cm/sec이상의 공탐공기속도에 대해서는 입경이 클수록, 0.42 cm/sec의 공탐공기속도에 대해서는 입경이 작을수록 제거율이 높은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 공탐공기속도가 0.42 cm/sec일 경우 상승하는 기포에 의해 발생하는 부력이 중력에 의한 침강력보다 작아 무거운 입자의 제거율이 떨어지나 0.84 cm/sec이상의 공탐공기속도에 대해서는 부력에 의한 영향이 더 크게 작용하여 직경이 큰 입자의 제거율이 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 54는 공탐공기속도의 변화에 따른 모든 입자의 제거율과 Fig. 53에서 나타난 입도 분포 중 가장 큰 분율을 차지하는 2.632 μm 의 직경을 가지는 입자의 제거율을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공탐공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 입자의 제거율도 73.1%에서 93.8%로 증가하였으며 2.632 μm 입자의 제거율은 총 입자의 제거율과 유의적인 차이를 보이지는 않았다. 이것으로 보아 앞에서 나타난 바와 같이 2.632 μm 의 직경을 가지는 입자를 입자의 제거특성에 있어 전체 입자에 대한 대표직경으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

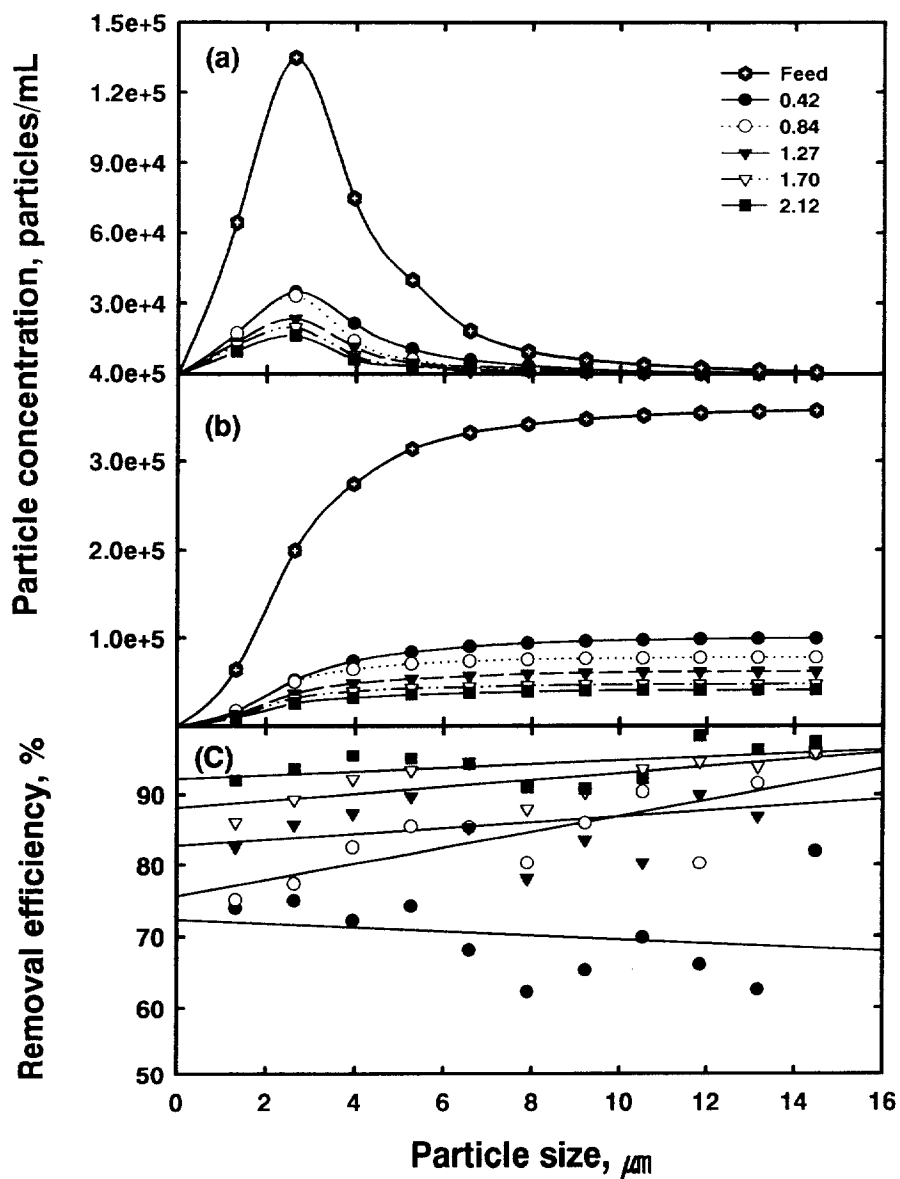


Fig. 53. Differential particle distributions (a), the cumulative particle distributions (b) and the particle removal efficiency (c) with respect to superficial air velocity.

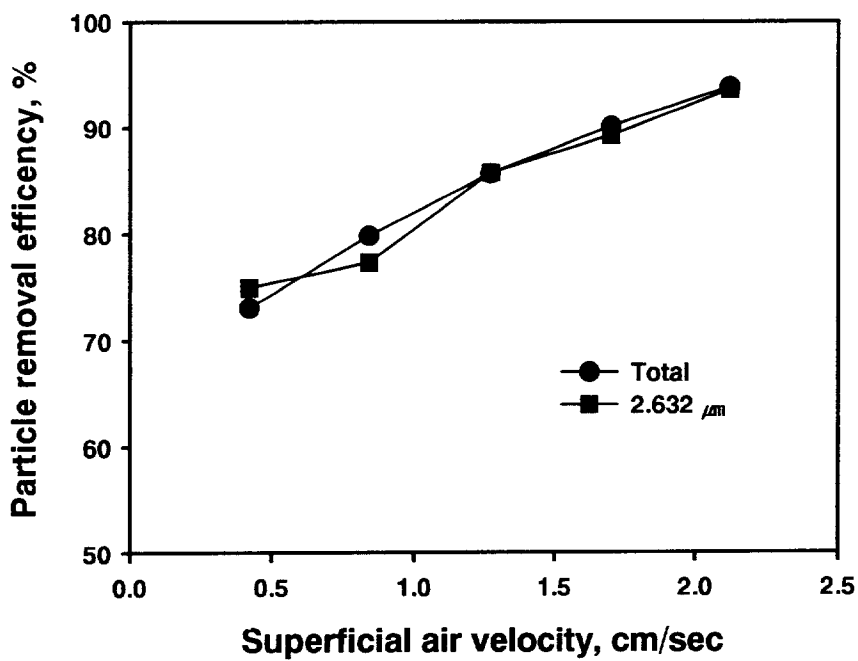


Fig. 54. Particle removal efficiency with respect to superficial air velocity.

4.4.5. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화

용존 유기물 농도의 지표로서 화학적 산소 요구량을 측정하여 공탑공기 속도의 변화에 따른 포말 분리기의 제거 속도 및 제거율의 변화를 Fig. 55에 도시하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공탑공기속도가 증가함에 따른 화학적 산소 요구량의 제거속도와 제거율의 변화는 앞서 나타난 단백질을 부유 고형물의 제거 속도와 같이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 단백질이 화학적 산소요구량을 증가시키는 유기물이고 어류에 의해 발생하는 부유 고형물의 상당 부분이 유기성 고형물인 것[13]에 의한 현상으로 생각된다.

Fig. 56은 공탑공기속도의 변화에 따른 유출수의 농도와 제거속도의 화학적 산소 요구량/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유출수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비는 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 0.79에서 0.95로 증가되었으며 제거속도의 비는 고형물의 경우와는 반대로 0.35에서 0.57로 증가되었다.

유입수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비가 0.66인 것과 비교할 때 유출수의 농도비가 더 높은 것으로 보아 포말분리에 의해 제거되는 유기물의 분율은 단백질에 비해 작으며, 이는 단백질과 고형물 이외의 용존 유기물은 단백질에 비해 흡착력이 약하여 기·액 계면에 많이 흡착되지 못하기 때문으로 생각된다.

화학적 산소 요구량/단백질의 제거속도비가 공탑공기속도가 증가할수록 커지는 것은 단백질에 비해 흡착력이 약하여 흡착되지 못한 용존 유기물이 기·액 계면의 증가에 따라 단백질에 점유되지 않은 계면의 증가로 보다 많이 흡착되었기 때문으로 사료된다.

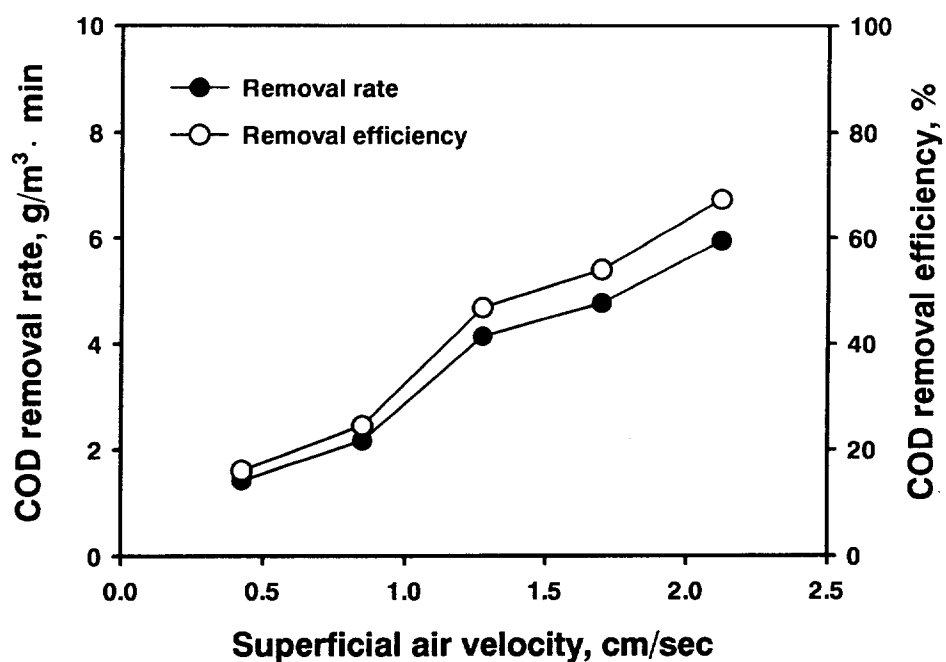


Fig. 55. SCOD removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.

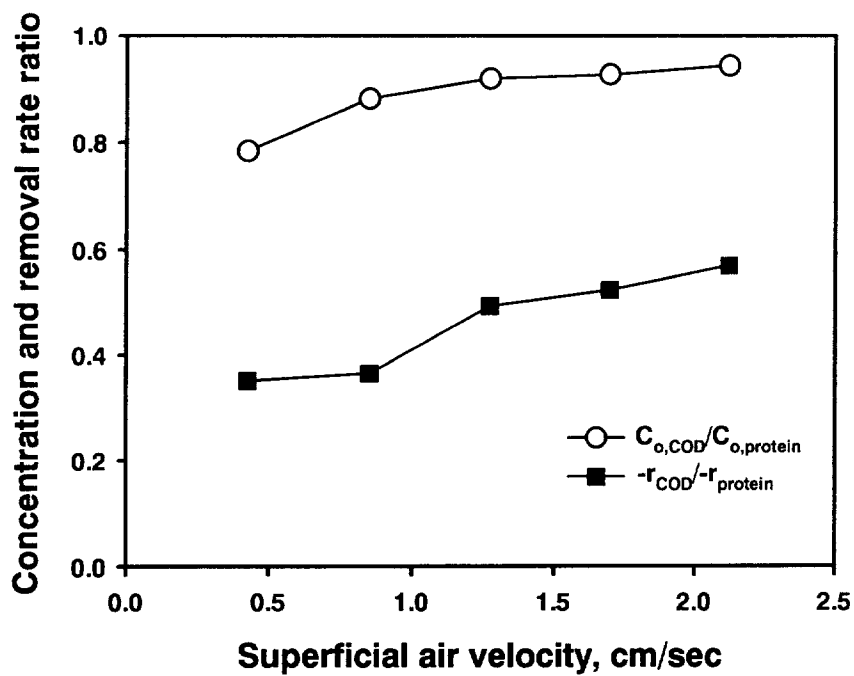


Fig. 56. The concentration ratio of SCOD over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of SCOD over protein.

4.4.6. 암모니아성 질소 제거속도 변화

공탐공기속도의 변화에 따른 포말 분리기의 암모니아성 질소의 제거 속도 및 제거율을 Fig. 57에 나타내었다. Fig. 57에서 보여지는 바와 같이 암모니아성 질소의 제거속도와 제거율은 공탐공기속도가 증가함에 따라 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 58은 유출수 농도와 제거속도의 암모니아성 질소/단백질 비의 변화를 나타낸 것으로서 유출수의 암모니아성 질소/단백질 농도비는 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 공탐공기속도가 5배 증가함에 따라 0.036에서 0.056으로 1.5배 정도 증가되었으며 제거속도의 비는 0.004에서 0.017로 3.5배의 큰 폭으로 증가하였다.

제거속도의 암모니아성 질소/단백질 비가 다른 성분들과는 달리 큰 폭으로 증가되는 것은 암모니아의 제거가 단백질의 흡착보다는 stripping에 의해 독립적으로 제거되는 것이 더 많다는 것을 나타내는 증거라고 볼 수 있다.

4.4.7. 용존산소 공급 효율 변화

Fig. 59는 공탐공기속도의 변화에 따른 유입수와 유출수의 용존산소 농도 변화와 총괄 산소 전달 계수 K_{La} 를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유출수의 용존산소 포화도는 96.6 - 99.1%로 높게 나타났으며 공탐공기속도의 증가에 따른 총괄 산소 전달계수와 용존산소 포화도의 변화는 단백질 제거속도, 암모니아 제거속도 등과 거의 유사한 형태로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 공탐공기속도가 증가함에 따라 공급되는 공기와 기·액 계면의 면적이 증가하여 기포 속의 용존산소가 액층으로 더 많이 전달되어 나타나는 현상[23]으로 생각된다.

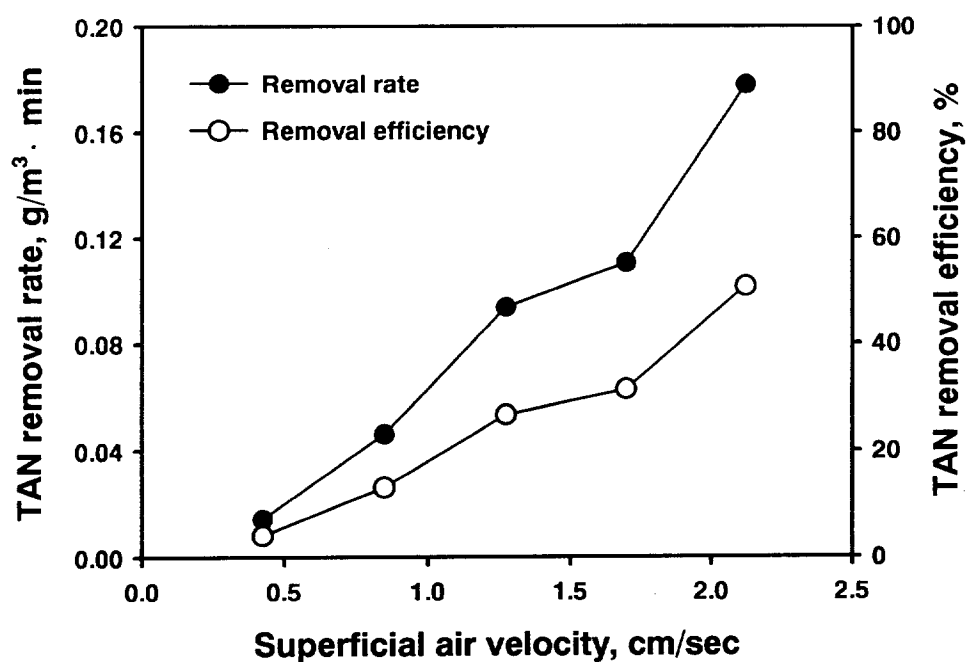


Fig. 57. TAN removal rate and removal efficiency with respect to superficial air velocity.

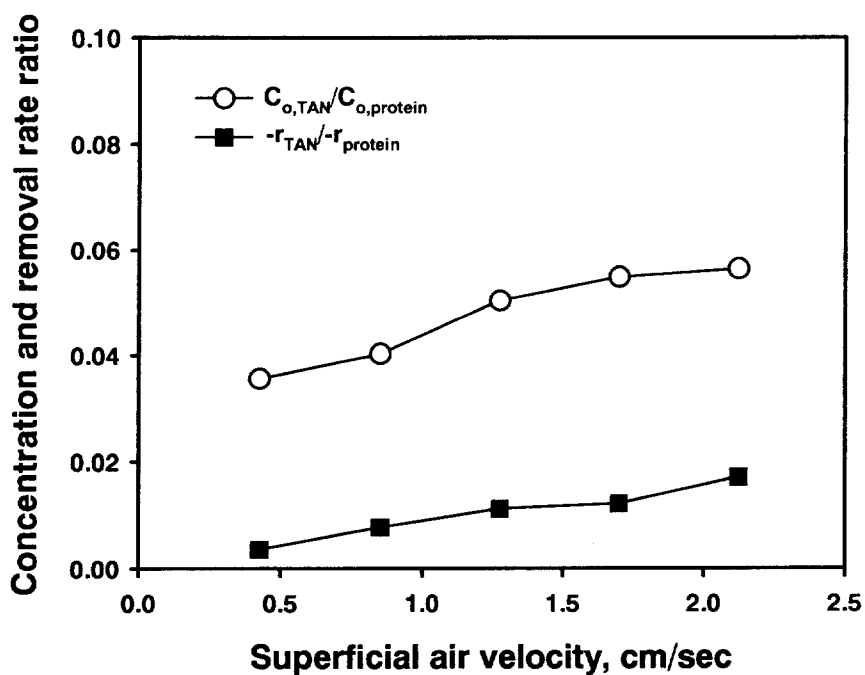


Fig. 58. The concentration ratio of TAN over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TAN over protein.

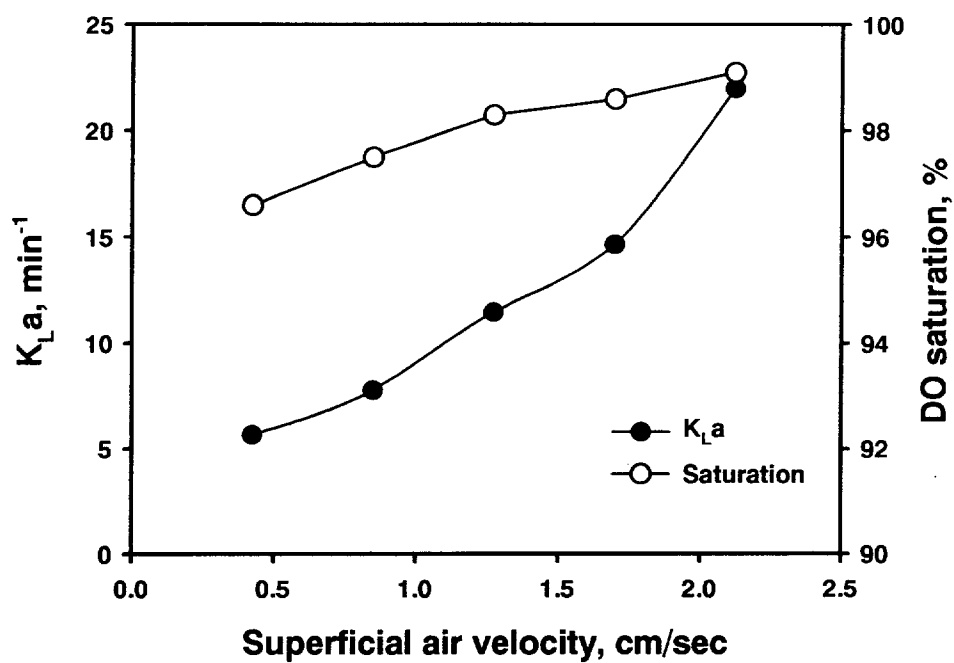


Fig. 59. Overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency with respect to superficial air velocity.

4.5. 공기 분산기 영향

포말분리장치에 공급되는 기포의 크기는 포말분리효율에 큰 영향을 미친다. 공급되는 기포의 크기는 포말분리 장치 하부에서 기포를 발생시키는 공기 분산기의 기공크기와 공기 유속에 의해 결정된다.

공기 분산기의 기공이 작을수록 발생하는 기포의 직경이 작아 동일한 공기 유속에 대해 보다 넓은 기·액 계면의 면적을 유도할 수 있다. 그러나 공기 분산기의 기공을 작게 만들기 위해서는 보다 많은 비용이 필요하게 되므로 장치의 제작비용이 증가된다. 따라서 공기 분산기의 기공 크기 변화에 따른 포말분리 효율을 고찰하여 적절한 기공크기의 범위를 선정해야 한다.

본 연구에서는 포말분리 공정을 해수에 적용할 경우 공기 분산기의 기공크기가 포말 분리의 효율에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

4.5.1. 단백질 제거속도 변화

Fig. 60은 공기 분산기로 G4, G2, G1 규격의 유리여과기를 사용한 것과 시중에서 시판되고 있는 직경 3cm의 산기석을 사용하여 나타난 단백질의 제거속도 및 제거율을 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기공의 크기가 가장 작은 G4의 경우 $5.62 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 의 단백질 제거속도와 41.6%의 단백질 제거율을 나타내어 가장 높은 값을 나타내었으며 공기 분산기의 기공크기가 증가함에 반비례하여 단백질의 제거속도와 제거율은 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 공기 분산기가 G4에서 G2로 변화할 경우에 비해 G2에서 G1로 변화할 경우의 단백질 제거속도와 제거율의 감소폭은 매우 적은 것으로 나타났다. 산기석의 경우 $4.1 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, 30.7%의 제거속도와 제거율로 G4보다는 떨어지나 G2보다는 높았다.

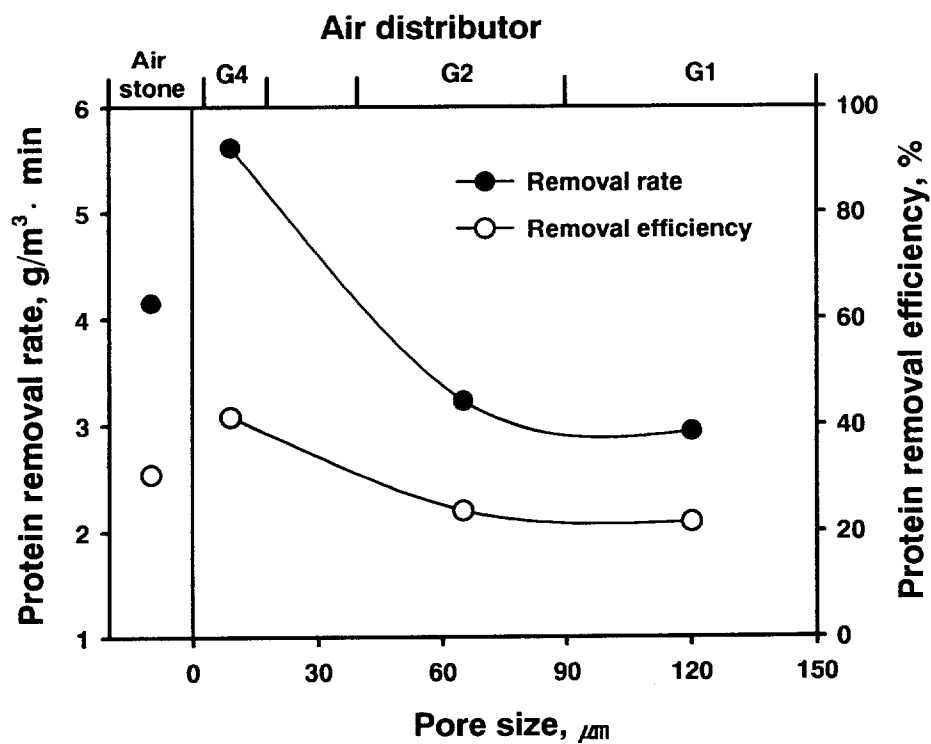


Fig. 60. Protein removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.

공기 분산기의 기공크기가 증가함에 따라 제거속도와 제거율이 동반하여 감소하는 것은 공기 분산기의 기공크기가 증가함에 따라 분산기에서 발생하는 기포의 직경이 커지게 되는 현상[23]에 의한 것으로 동일한 기체 유량에 대해 발생하는 기·액 계면 면적이 감소하여 흡착되는 단백질의 양이 감소하기 때문으로 생각된다.

공기 분산기가 G2에서 G1로 변화할 경우 단백질 제거속도와 제거율의 감소되는 비율이 작아지는 것은 공기 분산기의 기공크기가 일정 크기 이상으로 증가하면 공기 분산기에서 발생하는 기포의 크기가 크게 변화하지 않기 때문으로 사료된다.

Fig. 61은 공기 분산기 종류의 변화에 따른 포말 생성속도와 유입수의 단백질 농도와 포말의 단백질 농도의 비인 농축비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 포말 생성속도는 공기 분산기의 기공크기가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며 포말 생성속도의 감소폭은 공기 분산기의 기공크기가 클수록 더 커지는 것으로 나타났다. 그러나 농축비는 공기 분산기의 기공크기가 증가함에 따라 오히려 증가되는 것으로 나타났다.

공기 분산기의 기공크기가 작을 수록 포말 생성 속도가 증가하는 것은 이 경우 발생하는 기포의 크기가 작아 동일한 기체 유량에 대해 기·액 계면이 증가하는 현상에 기인한 것으로 생각된다. 기공크기의 증가에 따라 농축비가 증가되는 것은 포말분리기 내에 존재하는 단백질의 양이 일정함에도 발생하는 기·액 계면의 면적이 감소함에 따라 동일 기·액 면적에 더 많은 단백질이 흡착되기 때문[33]으로 생각된다.

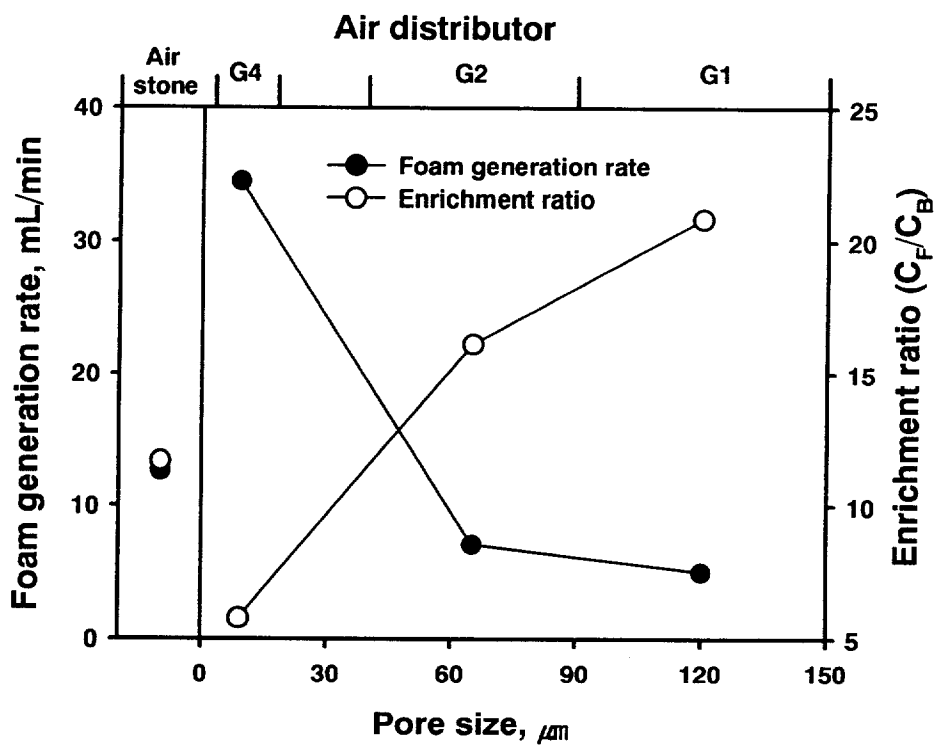


Fig. 61. Foam generation rate with respect to initial protein concentration.

4.5.2. 총 부유 고형물 제거속도 변화

Fig. 62는 공기 분산기의 기공크기가 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 공기 분산기의 기공크기의 변화에 따른 제거속도의 변화는 단백질 제거속도의 변화와 거의 동일한 경향을 나타내었다. 공기 분산기가 G4일 경우 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율은 $18.86 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, 67.3%로 가장 높은 것으로 나타났다. 총 부유 고형물의 제거속도가 단백질 제거속도와 유사하게 기공크기의 영향을 받는 것은 포말분리를 발생시켜 주는 계면활성제 역할을 하는 성분이 단백질이고 부유 고형물은 기·액 계면에 흡착된 단백질에 이온적으로 흡착되어 제거되는 기작[6]에 연유한 현상에 의해 기·액 계면에 흡착되는 단백질의 증가에 비례하여 제거되는 고형물이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 63은 공기 분산기의 기공크기의 변화에 따른 유출수 농도와 제거속도의 총 부유 고형물/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 유출수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 1.16 - 1.38의 범위에서 공기 분산기의 기공크기의 증가에 따라 약간 상승하는 것으로 나타났으며 제거속도의 비는 G4의 경우 3.36이었으나 그 외의 공기 분산기에서는 4.60 ~ 4.73으로 비교적 높게 나타났다.

유입수의 총 부유 고형물/단백질 농도비는 2.08이었으며 이에 비해 유출수의 농도비가 더 낮게 나타나는 것으로 보아 기·액 계면에 흡착 제거되는 단백질의 단위 질량당 총 부유 고형물의 양이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 공기 분산기의 기공크기가 작을 때 총 부유 고형물/단백질 제거속도의 비가 작게 나타나는 것은 유입수 속에 존재하는 고형물이 단백질과 결합하여 제거될 수 있는 양 보다 작아서 나타나는 현상으로 단백질 제거

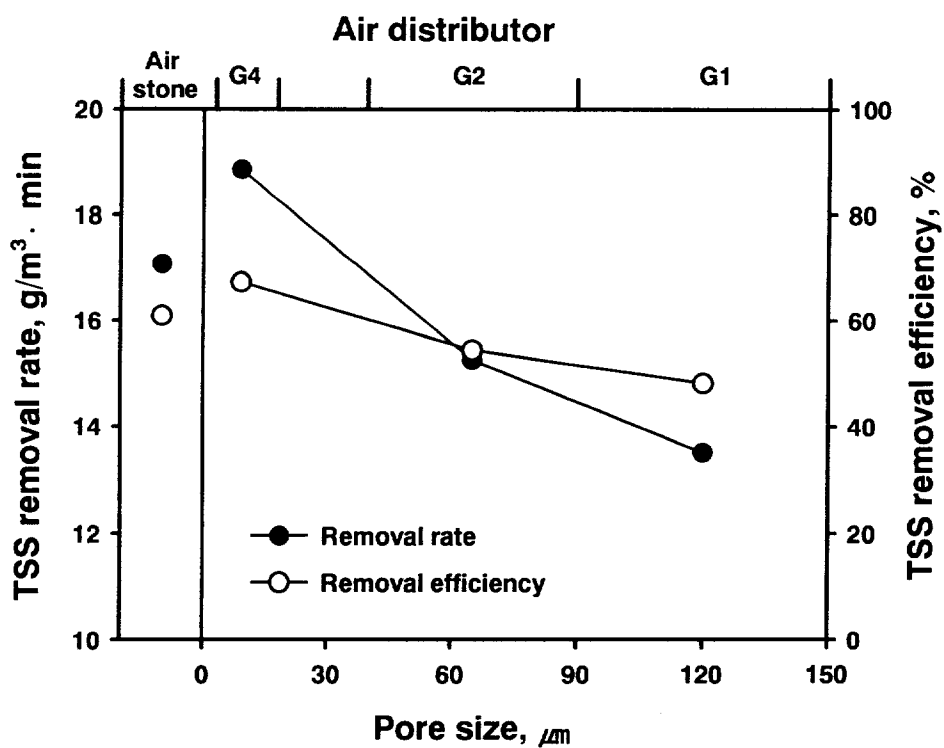


Fig. 62. TSS removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.

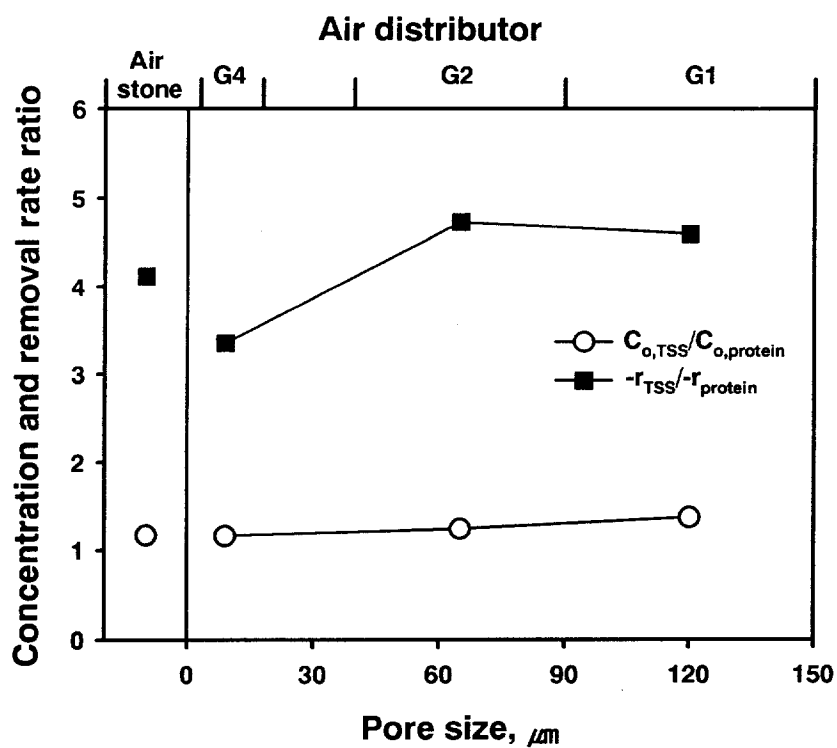


Fig. 63. The concentration ratio of TSS over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TSS over protein.

속도가 증가할수록 이에 동반하여 제거될 수 있는 고형물의 양이 부족해지기 때문으로 생각되며 보다 많은 고형물이 유입되더라도 충분한 제거가 이루어질 것으로 사료된다.

4.5.3. 탁도 제거속도 변화

Fig. 64와 Fig. 65는 각각 유입 단백질 농도의 증가에 따른 탁도 제거속도 및 제거율의 변화와 유입수와 유출수의 농도, 제거속도에 대한 탁도/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 64에서 보는 바와 같이 공기 분산기의 기공크기의 변화에 따른 탁도의 제거율 및 제거속도의 변화는 총 부유 고형물의 제거속도 및 제거율의 변화와 거의 유사한 형태로 변화하였으며 공기 분산기가 G4일 경우 총 부유 고형물의 제거속도와 제거율은 7.4 NTU/min, 66.4%로 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 포말분리기를 이용할 경우 2.05 분의 짧은 수력학적 체류시간에도 해수중의 탁도를 1 min에 7.4 NTU 감소시킬 수 있음을 의미한다.

유입수와 유출수의 탁도/단백질 농도비와 제거속도비는 Fig. 65에서 보는 바와 같이 총 부유 고형물에서 나타난 결과와 거의 유사한 형태로 나타났다. 이러한 현상은 탁도를 유발하는 물질 중 상당부분을 총 부유 고형물이 차지하므로[30] 탁도 유발 물질 중 많은 분율을 차지하는 총 부유 고형물의 제거와 유사한 양상으로 탁도의 제거가 이루어지는 것으로 생각된다. 또 이것으로 보아 해산어 양식장의 용수에 대해서 농도 분석에 많은 시간이 소요되는 총 부유 물질에 대해 분석시간이 짧고 방법이 간단한 탁도가 간접 지표로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

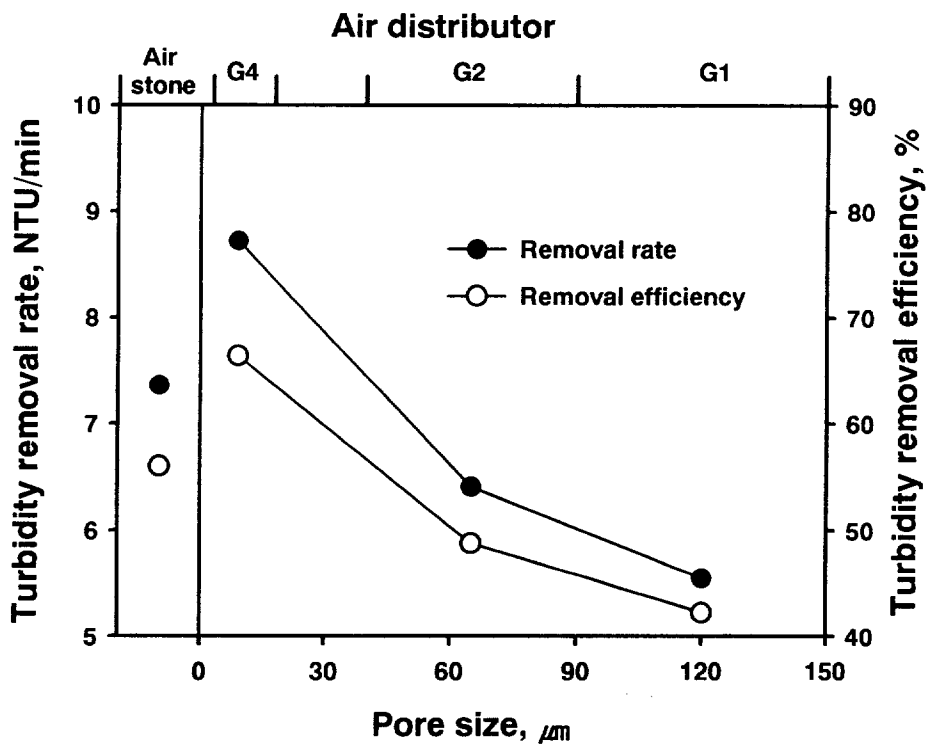


Fig. 64. Turbidity removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.

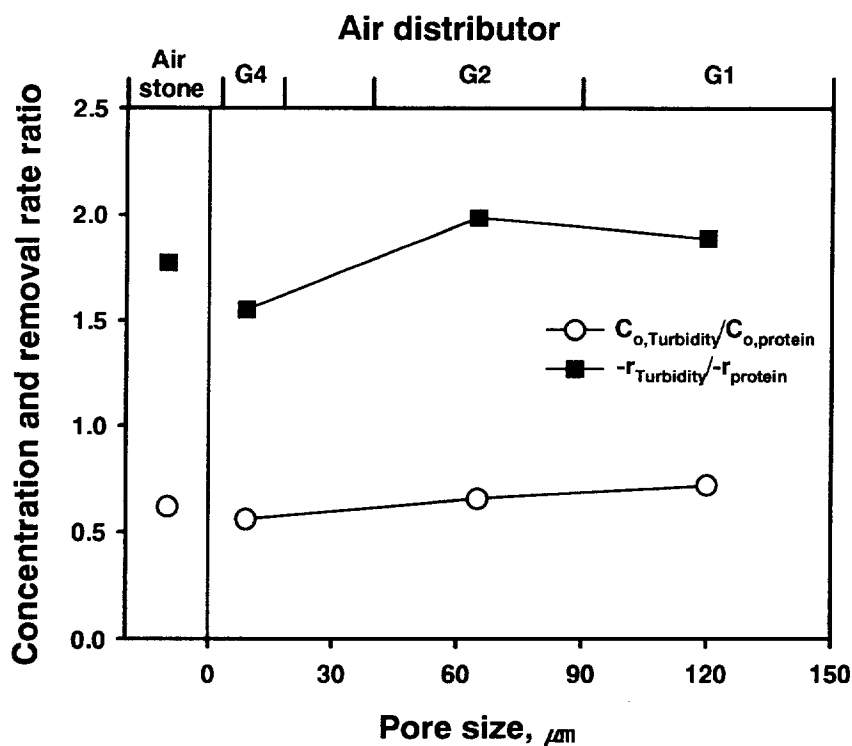


Fig. 65. The concentration ratio of turbidity over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of turbidity over protein.

4.5.4. 입도 분포 변화

Fig. 66은 유입수와 각 공기 분산기 종류의 변화에 따른 실험에서 얻어진 유출수의 입자 직경별 입도 분포(a) 및 누적 입도 분포(b)와 입자 직경별 제거율의 변화(c)를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입수와 유출수의 입도 분포는 입자 농도의 절대값은 차이가 있으나 그 형태는 거의 동일하게 나타났으며 입자는 0 ~ 15 μm 의 범위에서 분포하였으며 2.632 μm 인 입자가 차지하는 분율이 가장 큰 것으로 나타났다.

공기 분산기의 기공크기 변화에 따른 입자의 제거는 앞서의 총 부유 고형물이나 탁도의 제거에서 나타난 결과와 같이 기공크기가 작을수록 더 많은 입자를 제거함을 보였다.

Fig. 67은 공기 분산기의 기공크기의 변화에 따른 입자의 총 제거율과 Fig. 66의 입도 분포 중 가장 큰 분율을 차지하는 2.632 μm 입자와 제거율을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공기 분산기가 G4일 경우 75%이상의 입자 제거율을 보였으나 그 이상의 기공크기에 대해서는 10% 이상 급격히 하락하는 것으로 나타났다. 또 전체 범위에 있어 총 입자의 제거율과 2.632 μm 입자의 제거율은 2%이내의 적은 차이를 나타내어 2.632 μm 입자를 입자의 제거특성에 있어 전체입자에 대한 대표직경으로 사용할 수 있을 것으로 사료되었다.

4.5.5. 화학적 산소 요구량 제거속도 변화

화학적 산소 요구량을 측정하여 공기 분산기의 기공크기의 변화에 따른 포말 분리기의 제거 속도 및 제거율을 Fig. 68에 도시하였다.

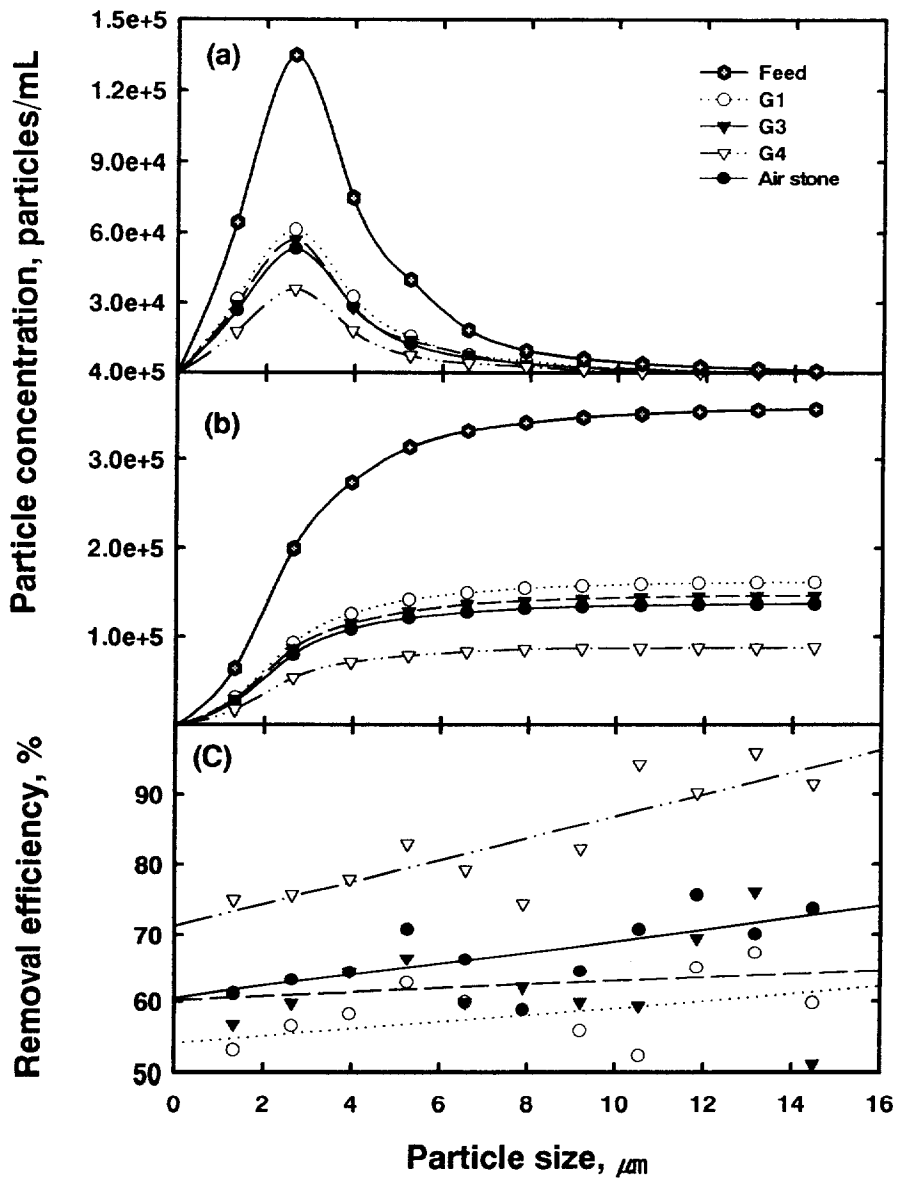


Fig. 66. Differential particle distributions (a), the cumulative particle distributions (b) and the particle removal efficiency (c) with respect to air distributor pore size.

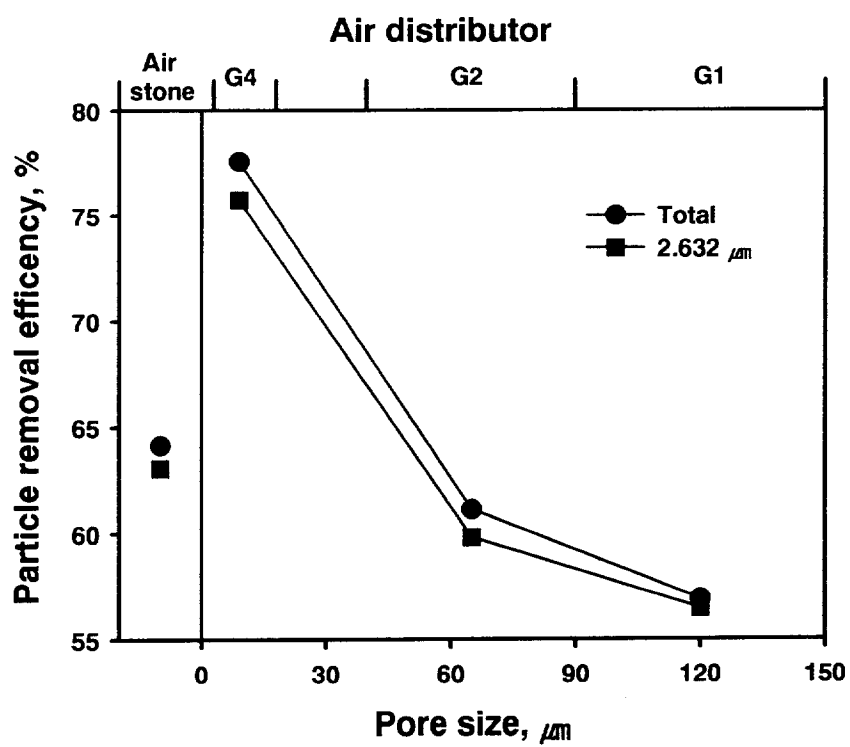


Fig. 67. Particle removal efficiency with respect to air distributor pore size.

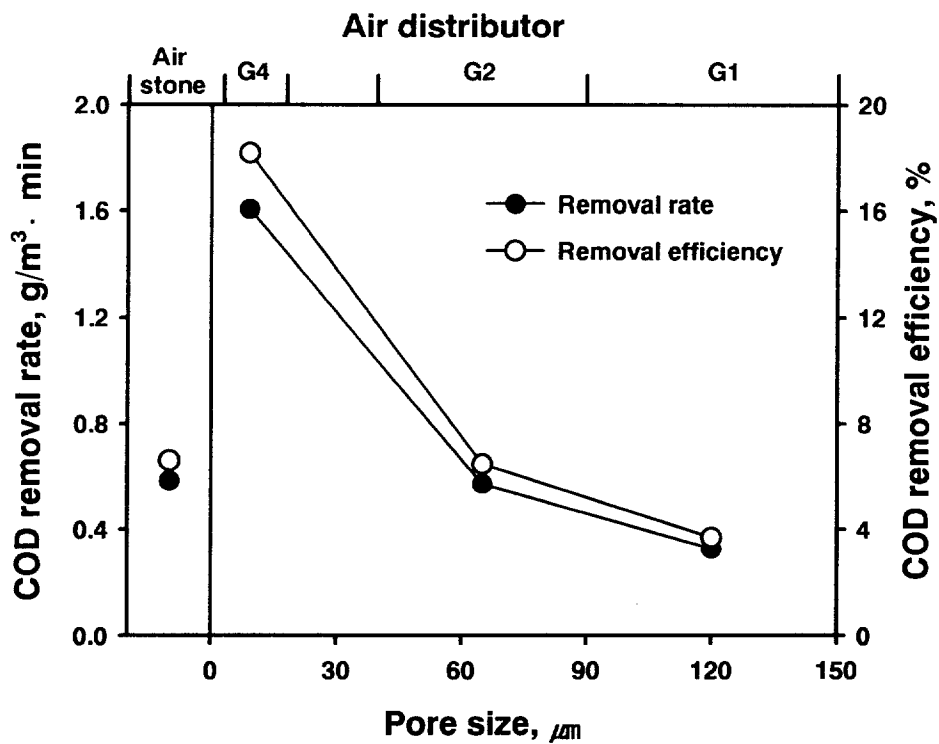


Fig. 68. SCOD removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.

Fig. 68에서 보여지는 바와 같이 기공크기 증가함에 따른 화학적 산소 요구량의 제거속도와 제거율의 변화는 앞서 나타난 단백질이나 부유 고형물의 제거 속도와 같이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 단백질이 화학적 산소요구량을 증가시키는 유기물이고 어류에 의해 발생하는 부유 고형물의 상당 부분이 유기성 고형물인 것[38]에 의한 현상으로 생각된다.

Fig. 69는 공기 분산기의 기공크기의 변화에 따른 유출수의 농도와 제거속도의 화학적 산소 요구량/단백질 비의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 유출수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비와 제거속도의 비는 공기 분산기의 기공크기가 증가할수록 감소되었다. 유입수의 화학적 산소 요구량/단백질 농도비가 0.66인 것과 비교할 때 유출수의 농도비는 0.81 ~ 0.92로 더 높아져 유기물의 제거도 효율적으로 수행됨을 알 수 있었다.

화학적 산소 요구량/단백질의 제거속도비가 공기 분산기의 기공크기가 작을수록 더 큰 것은 단백질에 비해 흡착력이 약하여 흡착되지 못한 용존 유기물이 기·액 계면의 증가에 따라 단백질에 점유되지 않은 계면의 증가로 보다 많이 흡착되었기 때문으로 사료된다.

4.5.6. 암모니아성 질소 제거속도 변화

공기 분산기의 기공크기의 변화에 따른 포말 분리기의 암모니아성 질소의 제거 속도 및 제거율의 변화를 Fig. 70에 나타내었다.

Fig. 70에서 보여지는 바와 같이 암모니아성 질소의 제거속도와 제거율도 공기 분산기의 기공크기가 작을수록 더 높은 것으로 나타났다. 이는 기공 크기가 작을수록 발생하는 기포의 직경이 작아 전체 기·액 면적이 증가하여 stripping효과가 증가하였기 때문으로 사료된다.

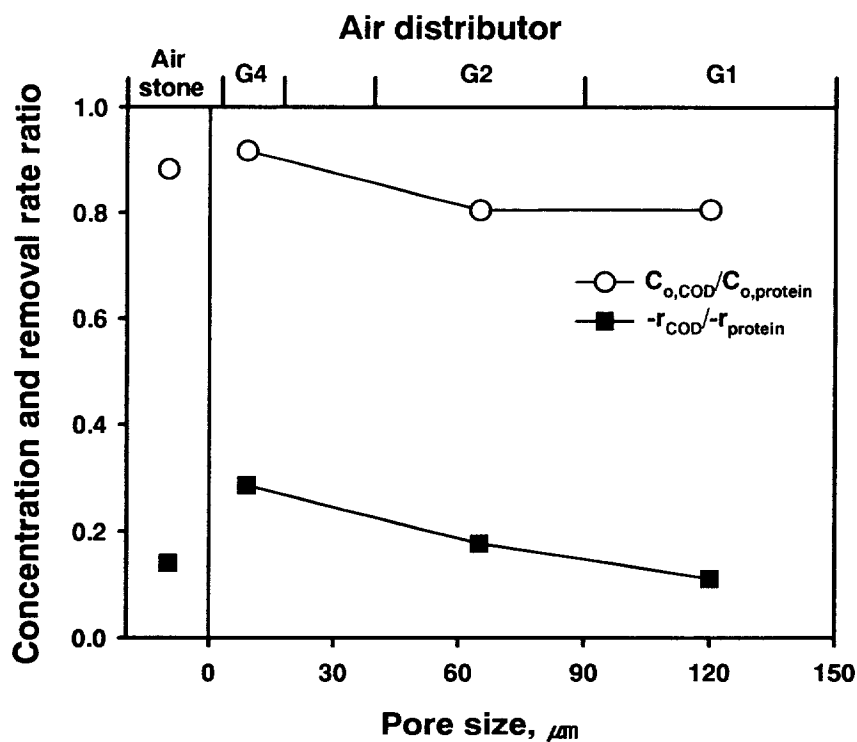


Fig. 69. The concentration ratio of SCOD over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of SCOD over protein.

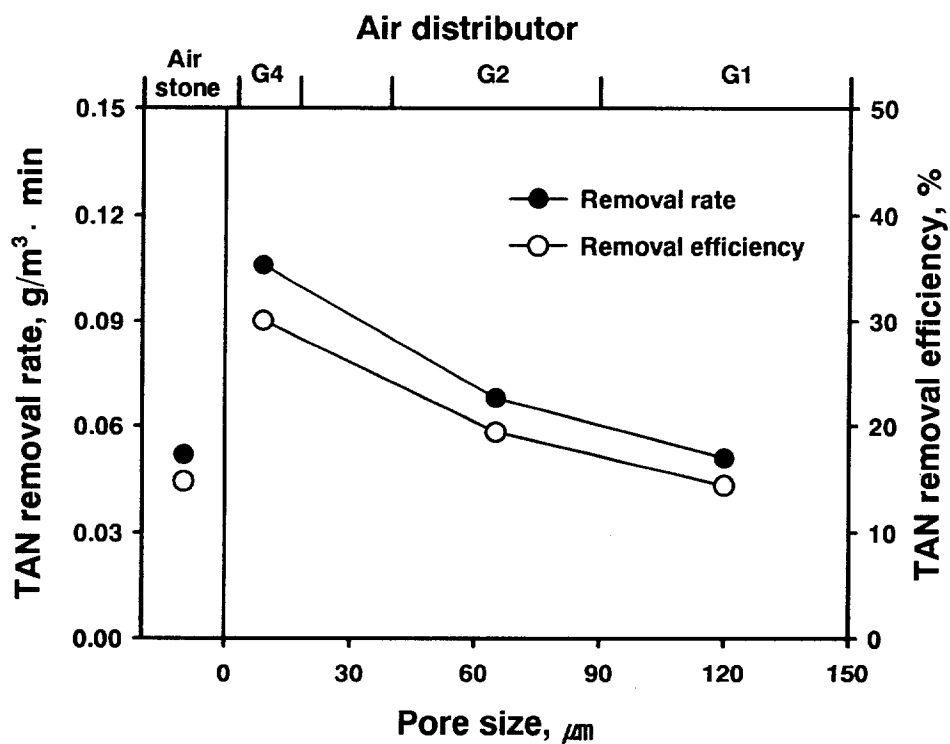


Fig. 70. TAN removal rate and removal efficiency with respect to air distributor pore size.

Fig. 71은 유출수 농도와 제거속도의 암모니아성 질소/단백질 비의 변화를 나타낸 것으로서 유출수의 암모니아성 질소/단백질 농도비는 0.028 ~ 0.032로서 유입수가 0.026인 것에 비해 큰 차이가 없었으며 공기 분산기의 기공크기의 변화에 따른 변화도 거의 없는 것으로 나타났으며 제거속도의 비도 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것으로 보아 암모니아의 제거는 단백질 제거와 비례하여 이루어지는 것으로 생각된다.

4.5.7. 용존산소 공급 효율 변화

Fig. 72는 공기 분산기의 기공크기의 변화에 따른 유입수와 유출수의 용존산소 농도 변화와 총괄 산소 전달 계수, K_{La} 를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공기 분산기의 기공크기의 증가에 따른 총괄 산소 전달계수의 변화는 단백질 제거속도, 암모니아 제거속도 등과 거의 유사한 형태로 증가하는 것으로 나타났으며 31.2 - 33.5%의 유입수 용존산소 포화도에 대해 유출수의 용존산소 포화도는 88.2 - 97.1%로 나타났다.

공기 분산기의 기공크기가 작을수록 총괄 산소 전달계수와 포화도가 증가하는 것은 암모니아 제거시 **stripping** 효과가 증가하는 것과 마찬가지로 공기 분산기의 기공 크기가 감소함에 따라 발생하는 기포의 직경이 작아져서 동일 공기 공급량에 대해 발생하는 기·액 계면의 총 면적이 증가하기 때문으로 생각된다.

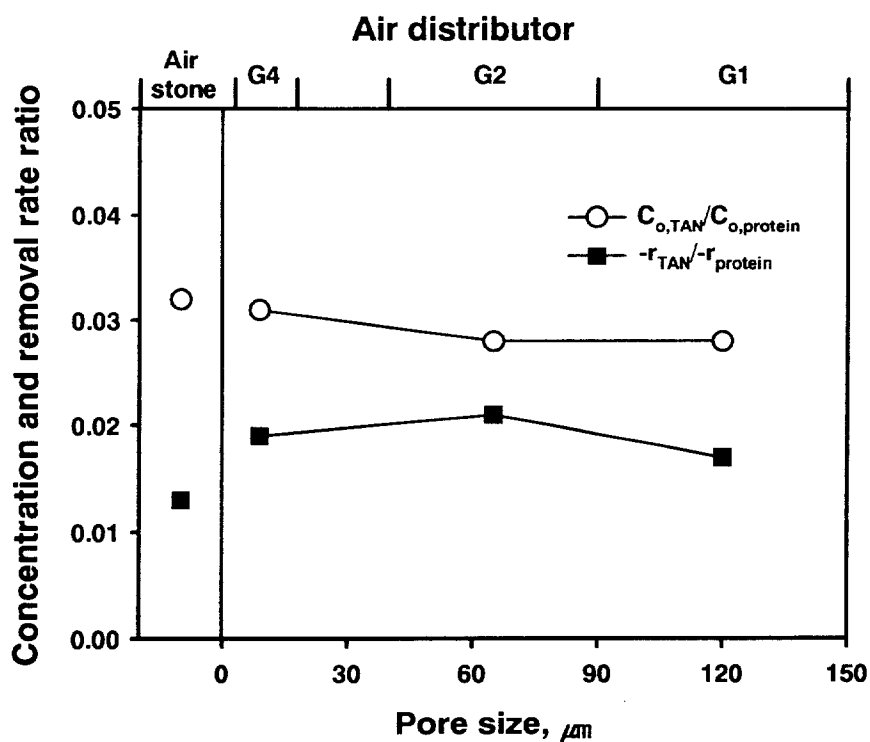


Fig. 71. The concentration ratio of TAN over influent protein (C_i) and effluent protein (C_o) and the removal rate ratio of TAN over protein.

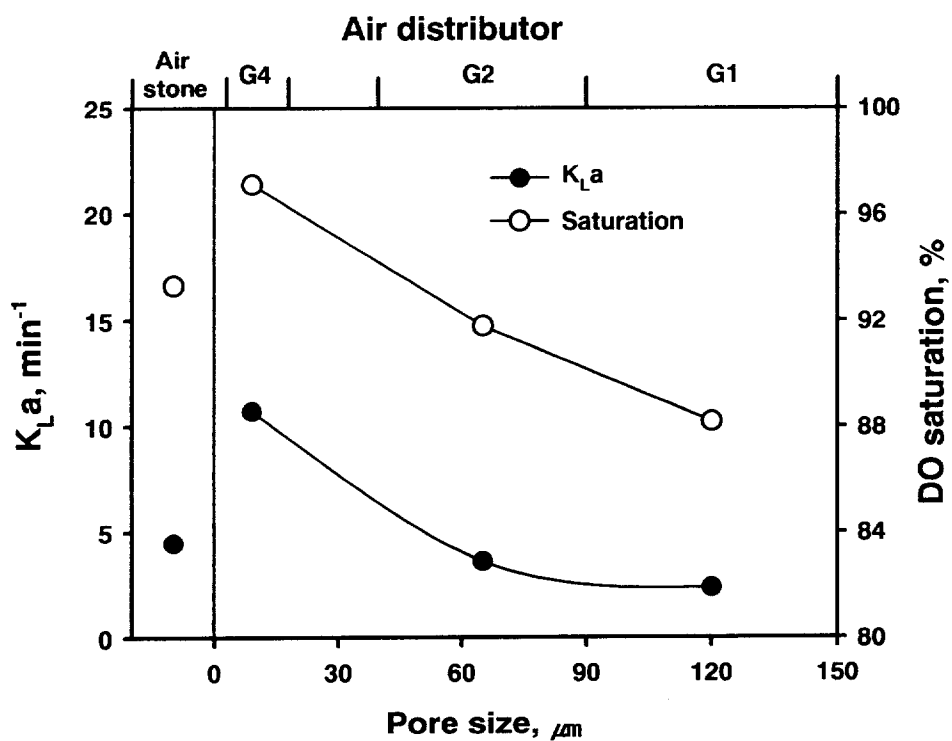


Fig. 72. Overall oxygen mass transfer coefficient and saturation efficiency with respect to air distributor pore size.

5. 결 론

본 연구에서는 해수 속의 생물학적 오염물을 제거하는 포말 분리 공정
에 가장 적합한 형태의 장치를 선정하고 이에 대한 실험을 통해 장치의 최
적 설계인자와 운전인자를 도출하고자 하였다.

1) 포말분리 장치의 비교

공기 구동식, 고속 폭기식 및 벤츄리식 포말분리 장치를 동일한 용량으
로 제작하여 양어장 순환수 중의 단백질, 총 부유 고형물 및 탁도를 제거
하는데 있어 각 포말 분리장치의 운전 특성을 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

공기 구동식 포말분리기의 유량감소가 거의 없었으나 벤츄리식 포말분
리기는 66.1%정도의 유량감소가 발생하였으며 고속 폭기식 포말분리기는
77.2%의 유량감소가 발생하였다.

공기 구동식, 고속 폭기식 및 벤츄리식 포말분리 장치의 단백질 제거속
도는 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 지수적으로 감소하였다. 0.32
min 이상의 수력학적 체류시간에서는 공기 구동식 포말분리장치의 제거속
도와 제거율이 가장 높게 나타났으며 그 이하의 수력학적 체류시간에 대해서
는 고속 폭기식 포말분리 장치의 제거속도와 제거율이 가장 높은 것으로 나타
났다.

수력학적 체류시간의 변화에 따른 총 부유 고형물과 탁도의 제거속도와
제거율의 변화는 단백질 제거속도 및 제거율의 변화와 거의 비슷하였으며
벤츄리식 포말분리기는 짧은 수력학적 체류시간에서는 총 부유고형물의 제
거 효율이 다른 두 포말분리기에 비해 떨어지는 것으로 나타났다. 탁도의
제거는 공기 구동식 포말 분리가 가장 우수한 것으로 나타났다.

본 연구의 결과 고속 폭기식 및 벤투리식 포말분리장치는 짧은 수력학적 체류시간의 범위에서 높은 제거속도를 얻을 수 있으나 운전 가능한 수력학적 체류시간의 범위가 한정되어 있고 장치에 의한 압력손실이 큰 것으로 나타나 운전 경비가 증가되는 단점을 나타내었다. 반면, 공기 구동식 포말 분리기는 압력 손실이 거의 없으며 수력학적 체류시간의 변화에 따른 제거속도 및 제거율의 변화가 적어 조업 환경의 변화에 대해 능동적으로 대처할 수 있는 범위에서 운전 가능하므로 해수 내 오염물의 제거에 가장 적합한 포말 분리 장치로 선정하였다.

2) 초기 단백질 농도 영향

유입 단백질 농도를 12.1, 23.7, 38.0, 49.3 62.4 g/m³으로 변화시켜 이에 따른 해수 중의 생물학적 오염물의 제거 특성의 변화를 고찰하였다.

유입수의 단백질의 농도가 49.28 g/m³까지 증가할 경우 제거속도도 거의 선형적으로 증가하였으며 그 이상의 농도에 대해서는 거의 동일한 값을 나타내었으며 단백질의 제거율은 유입수의 단백질 농도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 단백질 제거속도식은 Langmuir 등온 흡착식과 잘 일치하였으며 최대 단백질 제거속도와 반 포화 상수, $C_{1/2}$ 는 각각 10.0 ~ 11.0 g/m³ · min, 13.7 ~ 17.2 g/m³의 범위로 나타났다.

총 부유성 고형물, 탁도, 화학적 산소 요구량의 제거속도는 유입수의 단백질의 농도가 증가함에 따라 증가하였으며 제거율은 단백질 농도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 암모니아성 질소의 경우 유입 단백질 농도가 증가함에 따라 제거속도는 증가하였으나 제거율은 경우 다른 성분들과는 달리 유입 단백질 농도의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

유입수와 유출수의 입도 분포의 형태는 거의 동일하게 나타났고 입자는 0 ~ 15 μm 의 범위에서 분포하였으며 2.632 μm 인 입자가 차지하는 비율이 가장 큰 것으로 나타났다. 입자 직경의 변화에 따른 입자의 제거율의 변화는 전체적으로 입경이 클수록 제거율이 높은 것으로 나타났다.

3) 수력학적 체류시간 영향

수력학적 체류시간을 0.28, 0.48, 0.77, 1.40, 3.48, 8.76 min으로 변화시켰다. 단백질 제거속도는 수력학적 체류시간이 0.28 min에서 0.48 min으로 증가함에 따라 $7.17 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 에서 $10.25 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 으로 증가하였으나 그 이상의 수력학적 체류시간부터는 제거속도가 감소하였다.

총 부유 고형물, 화학적 산소 요구량의 제거속도 및 제거율의 변화는 단백질 성분과 유사한 경향으로 나타났으며 최대 제거속도는 각각 51.8, 13.7 $\text{g/m}^3 \cdot \text{min}$ 이었다. 단백질, 총 부유 고형물, 탁도, 화학적 산소 요구량의 제거율은 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 증가하였다. 암모니아성 질소의 제거속도는 수력학적 체류시간이 증가함에 따라 감소하였으며 제거율은 0.48 min의 수력학적 체류시간에서 가장 높은 것으로 나타났다.

4) 공탑공기유속 영향

공탑공기속도를 0.4, 0.9, 1.3, 1.7, 2.1 cm/sec로 조절하여 해수 속의 생물학적 오염물의 제거실험을 수행하였다. 공탑공기속도가 증가함과 비례하여 단백질 제거속도 및 제거율은 증가하였으며 공탑공기속도가 0.42 cm/sec에서 2.12 cm/sec로 증가함에 따라 단백질의 제거속도와 제거율은 $4.04 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, 30.0%에서 $10.43 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, 77.3%로 증가하였다.

포말 생성속도는 공탑공기속도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다으나 유입수의 단백질 농도와 포말의 단백질 농도의 비인 농축비는 감소되는 것으로 나타났다. 총 부유 고형물, 탁도, 화학적 산소 요구량의 제거 속도 및 제거율의 변화는 단백질 성분과 유사한 경향으로 나타났다.

입자 직경의 변화에 따른 입자의 제거율의 변화는 0.84 cm/sec이상의 공탑공기속도에 대해서는 입경이 클수록, 0.42 cm/sec의 공탑공기속도에 대해서는 입경이 작을수록 제거율이 높은 것으로 나타났다. 암모니아성 질소는 stripping에 의해 제거되었으며 높은 공탑공기속도에서 보다 많은 암모니아가 제거되었다.

5) 공기 분산기 기공크기 영향

공기 분산기 기공크기 변화 실험은 90 - 150 μm 의 기공크기를 가지는 G1 size, 40 - 90 μm 의 기공크기를 가지는 G2 size, 3 - 15 μm 의 기공크기를 가지는 G4 size 등 세 가지 규격의 유리 여과기와 기공크기를 알 수 없는 시판용 직경 3cm의 산기석을 공기 분산기로 사용하여 수행하였다.

공기 분산기의 기공크기가 증가함과 반비례하여 단백질 제거속도 및 제거율은 감소하였으며 기공의 크기가 가장 작은 G4의 경우 $5.62 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ 의 단백질 제거속도와 41.6%의 단백질 제거율을 나타내어 가장 높은 값을 나타내었다. 시중에서 유통되고 있는 직경 3 cm의 산기석의 경우 단백질 제거속도와 제거율이 $4.1 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$, 30.7%로 G4보다는 떨어지나 G2 보다는 높은 효율을 보였다. 총 부유 고형물, 탁도, 화학적 산소 요구량, 암모니아성 질소의 제거속도 및 제거율의 변화는 단백질 성분과 유사한 경향으로 나타났다.

6) 용존산소 전달효율의 변화

공탐공기속도의 증가, 공기 분산기 기공크기의 감소에 따라 총괄 산소 전달계수가 증가하였으며 전체적으로 유출수의 용존산소 포화율은 96%이상으로 나타나 포말분리공정은 단백질, 부유고형물과 같은 양식 폐기물을 제거함과 동시에 용존산소 공급장치로도 병용될 수 있음을 알 수 있었다. 수력학적 체류시간, 공탐공기속도, 공기 분산기 기공크기의 변화에 따라 단백질 제거속도가 클수록 용존산소 흡수 효율도 높은 것으로 나타나 용존산소 전달 효율이 포말분리 장치의 효율을 점검하는 인자로 이용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 조재윤: "양식공학", 부경대학교출판부, pp. 25(1996).
2. Jaffe, E.R.: in Binship, C. and Surgenor, D. (Eds.).
"Metabolic Processes Involved in the Formation and Reduction of
Methemoglobin in Human Erythrocytes : The Red Blood Cell",
Academic Press, New York, pp. 397(1964).
3. Wheaton, F., Hochheimer, J. and Kaiser, G.E.: "Biological
Filters for Agriculture, Scientific Article" #A-4904, Maryland
Agricultural Experiment Station(1989).
4. Miller, G. E. and Libey, G. S.: *Aquacultural Engineering*, 3,
39(1984).
5. Chen, S.: Ph. D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, New
York(1991).
6. Suh, K. H. and Lee, M. G.: *Journal of Korean Fisheries
Society*, **28**, 599(1995).
7. Suh, K. H., Lee, M. G., Kim, B. J., Cho, M. C., An, S.
H. and Cho, J. Y.: *J. Korean Environmental Science*, **7**,
41(1998).
8. Suh, K. H., Lee, M. G., Lee, M. S., Kim, B. J., Kim, E.
J. and Cho, M. C.: *Journal of Korean Fisheries Society*, **30**,
334(1997).

9. Clarke, A. N. and Wilson, D. J.: "Foam Flotation", Marcel Dekker, INC, New York, pp. 53(1972).
10. Rubin, E., 1981, Foam fractionation — some recent studies. In Theory, Practice, and Process Principles for Physical Separations, Proceedings of the Engineering Foundation Conference, M. P. Freeman and J. Fitz Patrick eds. Engineering Foundation, New York, USA.
11. Lemlich, R.: in R, Lemlich(Ed.) "Adsorptive Bubble Separation Techniques: Principles of Foam Fractionation and Drainage", Academic Press, New York, pp. 33(1972).
12. Choi, Y. H., Lee, J. D. and Choi S. J.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 63(1997).
13. Chen, S., Stechy D. and Malone R. F.: in M. B. Timmons and T. M. Losordo (Eds.) " Aquaculture water reuse system: Engineering design and management: Suspended Solids Control in Recirculating Aquaculture Systems", Elsevier, Amsterdam, pp. 61(1996).
14. Weeks, N. C., Timmons M. B. and Chen, S.: *Aquacultural Engineering*, **11**, 251(1992).
15. Suh, K. H. and Lee, M. G.: *Journal of Korean Fisheries Society*, **30**, 239(1995).
16. Lomax, K.M.: Ph. D. Dissertation, University of Maryland, College Park, MD. USA.(1976)

17. Dwivedy, R.C.: American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan pp. 561(1975).
18. Parthasarathy, S. and Kumar, R.: *Biotechnology and Bioengineering*, **32**, 174(1988).
19. Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L. and R.J. Randall, *Journal of Biotechnology*, **193**, 265(1951).
20. APHA, AWWA and WEF: "Standard methods for the examination of water and wastewater", 18th ed., EPS Group (1992).
21. Bollag, D. M. and Edelstein, S. J.: "Protein Methods", Wiley-Liss, New York, pp. 46(1991).
22. Korean Institute of Industry and Technology: " Standard Methods for the Examination of Environmental Pollution"(1990).
23. Bailey, J.E. and Ollis, D.F.: "Biochemical Engineering Fundamentals", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 464(1986).
24. McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P.: "Unit Operations of Chemical Engineering", Fifth ed., McGraw-Hill, Inc., New York, pp.190(1993).
25. Wheaton, F. W., Hochheimer, J. N., Kaiser, G. E., Klones, M. J., Libey, G. S. and Easter, C. C.: in M. B. Timmons and T. M. Losordo(Eds.), "Aquaculture Water Reuse System : Engineering Design and Management :Nitrification Filter Principle", Elsevier, Amsterdam, pp. 101(1996).

26. Cho, D. and Cornee, M.: *Korean Journal of Chemical Engineering*, **16**, 371(1999).
27. Losordo, T. M. and Westers, H.: "System Carrying Capacity and Flow Estimation, Aquaculture Water Reuse System : Engineering Design and Management", Timmons, M.B. and Losordo, T.M. eds., Elsevier, Amsterdam, pp.14(1994).
28. Levenspiel, O.: "Chemical reaction engineering", 2nd ed., John Wiley & Sons, New York(1972).
29. Roger, G. L. and Klementson, S. L.: *Aquaculture Engineering*, **4**, 135(1985).
30. Tchobanoglous, G. and Schroeder, E. D.: "Water Quality", Addison-Wesley Publishing Company, California, 56(1985).
31. Nigtingale, J. W., "Technical Report of Karmer", Chin and Mayo Inc., Washington(1976).
32. Urizee, F. and Narsimhan, G.: *Biotechnology and Bioengineering*, **51**, 384(1996).
33. Urizee, F. and Narsimhan, G.: *Separation Science and Technology*, **30**, 847(1995).
34. Cho, D. and Chang, H. N.: *Korean Journal of Chemical Engineering*, **15**, 445 (1998).
35. Brown, A. K., Kaul, A. and Varley, J.: *Biotechnology and Bioengineering*, **62**, 278(1999).

36. Valsaraj, K. T.: in K. A. Matis(Ed.) "Flotation Science and Engineering: Removal Organics from Water by Nonfoaming Flotation", Marcel Dekker Inc., New York, pp. 369(1995).
37. Shuler, M. L. and Kargi, F. ":Bioprocess Engineering – Basic Concepts", Prentice– Hall, New Jersey, pp. 84(1992).
38. Chen, S.: *Aquacultural Engineering*, **13**, 183(1994).
39. Liao, P. B. and Mayo, R. D.: *Aquaculture*, **3**, 61(1974).
40. Environmental Protection Agency: "Quality Criteria for Water, Office of Technology Transfer", Washington D. C. (1976).
41. Sedlak, R. I.: "Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater", Lewis publishers(1991).
42. Suh, K. H., H. K. Shim and Yun, J. W.: *Korean Journal of Biotechnology and Bioengineering*, **11**, 46(1996).

연구 목록

1. 석사 학위 논문

99. 2 김병진 석사논문(대학원), “질화세균 고정화된 충전층 생물반응기”

2. 정기 학술지 논문

1) 국제 정기 학술지 게재

1. Nitrification Performance of Nitrifiers Immobilized in PVA (polyvinyl alcohol) for a Marine Recirculating Aquarium System <J.K. Seo, I.H. Jung, M.R. Kim, B.J. Kim, S.W. Nam and S.K. Kim/ Aquacultural Engineering/ 2001.2/ 24/ 181-194>

2) 국내 정기 학술지 게재

1. 포말분리법을 이용한 양어장 순환수 처리(II. 고형물 제거 특성) <서근학, 이민규, 이민수, 김병진, 김은정, 조문철/ 한국수산학회지/ 97.5/ 30(3)/ 334-339>
2. 고정화된 Nitrifier consortium을 이용한 Total Ammonia-Nitrogen (TAN)의 제거 <김성구, 공인수, 서재관, 김병진, 이민규, 서근학/ 한국생물공학회지/ 97.12/ 12(5)/ 451-458>
3. 포말분리법에 의한 양어장의 단백질 제거 <서근학, 이회근, 김병진, 조문철, 안수현, 조재윤/ 한국환경과학회지/ 98.2/ 7(1)/ 41-45>
4. 고정화된 질화세균군에 의한 암모니아성 질소 제거 <서근학, 김병진, 조문철, 조진구, 김용하, 김성구/ 한국생물공학회지/ 98.6/ 13(3)/ 238-243>

5. 해조류를 이용한 Pb 및 Cu 의 흡착 <서근학, 안갑환, 조문철, 김병진, 진형주, 홍용기/ 한국생물공학회지/ 98.8/ 13(4)/ 444-448>
6. RBC를 이용한 양어장수 암모니아 제거 <김병진, 임성일, 서근학/ 한국수산학회지/ 98.9/ 31(5)/ 622-630>
7. 포말분리법에 의한 효모의 회수 <안수현, 김병진, 서근학/ 부경대 논문집/ 3(2)/ 251-260>
8. 모의 순환여과식 실험장치에서 회전원판반응기에 의한 순환수처리 <서근학, 김병진, 임성일, 조진구, 김용하, 오창섭/ 한국수산학회지/ 99.3/ 32(2)/ 180-185>
9. 고정화 생물반응기에 의한 암모니아 제거 <김병진, 이경범, 서근학/ 한국환경과학회지/ 98.4/ 8(2)/ 177-182>
10. 팽생이 모자반, *Sargassum honeri*를 이용한 Pb 흡착 및 탈착 <서근학, 안갑환, 김병진, 조진구, 진형주, 홍용기/ 한국수산학회지/ 99.5/ 32(3)/ 333-337>
11. 합성양어장수 속의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 제거 위한 질화세균 고정화된 생물반응기 <서근학, 김용하, 김병진/ 화학공학/ 99.6/ 37(3)/ 487-493>
12. PVA에 고정화된 질화세균에 의한 암모니아성 질소 제거 <서근학, 김용하, 조진구, 김병진, 박은주, 서재관, 김성구/ 한국환경과학회지/ 99.8/ 8(4)/ 479-483>
13. 향류 공기구동식, 고속폭기식 및 벤츄리식 포말분리기에 의한 양어장수의 단백질 및 부유고형물의 제거 특성 <서근학, 김병진, 김성구/ 한국수산학회지/ 2000.5/ 33(3)/ 205-212>

14. 포말분리기를 이용한 해수로부터 양식폐기물 제거-I.초기 단백질 농도 영향 <서근학, 김병진, 봉세환, 임준혁, 김용하, 김성구/ 화학공학/ 2000.10/ 38(5)/ 745-752>
15. 포말분리기를 이용한 해수로부터 양식폐기물 제거-III.공탑공기속도 영향 <김병진, 이정훈, 김성구, 김용하, 이경범, 서근학/ 화학공학/ 2001.2/ 39(1)/ 123-129>
16. 순환 여과식 양식 시스템의 설계 및 개발 <서근학, 김병진, 전임기/ 한국수산학회지/ 2001.2/ 34(1)/ 70-76>
17. 포말분리기를 이용한 해수로부터 양식폐기물 제거-II.수력학적 체류시간 영향 <서근학, 김병진, 김성구, 김용하, 이경범, 임준혁/ 화학공학/ 2001.4/ 39(2)/ 237-244>
18. PVA에 고정화된 질화세균균에 의한 암모니아성 질소 제거-I. 충진율 및 공기 유입량이 암모니아성 질소제거에 미치는 영향 <서근학, 김병진, 오창섭/ 한국생물공학회지/ 2001.6/ 16(3)/ 314-319>

3) 국내 정기 학술지 게재수락

1. 고정화 질화세균균에 의한 저농도 암모니아 제거속도식 <김병진, 서근학, 이정훈/ 2001. 12./ 화학공학>
2. 순환 여과식 양식 시스템의 개시 운전 <서근학, 김병진, 조재윤/ 2001. 12./ 한국수산학회지>
3. 순환 여과식 양식 시스템에서 나일 틸라피아(*Oreochromis niloticus*)의 사육 <서근학, 김병진, 조재윤/ 2001. 12./ 한국수산학회지>

3. 특허 출원

1. 저농도 암모니아가 함유된 오수의 비폭기 질산화 처리방법

〈출원인:부경대학교, 발명자:서근학, 김성구, 김병진/ 특허출원번호
10-2000-0061368(10.18)〉

4. 학술대회 논문

1) 국제 학술대회논문

1. The Removal of Protein and TSS by Foam Separation in Recirculating Aquaculture System 〈Byong-Jin Kim, Jin-Koo Cho and Kuen-Hack Suh/ YABEC '99, Pusan (8.21)/ 67-68〉
2. Effect of Aeration Rate for Removal of Ammonia Nitrogen in Airlift Bioreactor 〈Jin-Koo Cho, Byong-Jin Kim, Kuen-Hack Suh/ YABEC '99, Pusan (8.21)/ 65-66〉
3. The removal of protein and TSS from sea water by foam separation 〈K.H. Suh, B.J. Kim, J.H. Lee, S.K. Kim, J.Y. Jo/ Virginia Polytechnic Institute and State University/ The 3rd International Conference on Recirculating Aquaculture(7.20-23)/ 156-159〉

2) 국내 학술대회 논문

1. Treatment of Aquacultural Recirculating Water by Foam Separation -Characteristics of Solid Removal- 〈서근학, 이민수, 김병진, 이민규/ 96춘계 수산관련공동학회(5.17)/ 308-312〉

2. The Uptake of Lead in *Artherobacter* sp. <K.H Ahn, B.J Kim & K.H Suh/ 한국생물공학회 97춘계 학술대회(4.11)/ 171-172>
3. 포말분리법에 의한 순환여과식 양어장의 고형물 및 영양염류 제거 특성 <김병진, 조문철, 서근학, 이민규/ 한국공업화학회 97춘계 학술대회 (5.8)/ 응용화학 1(1)/ 187-190>
4. Biosorption of Pb and Cu by Marine Algae. <K.H Suh, K.H Ahn, B.J Kim & M.C.Cho/ 97춘계 수산관련 공동학회(5.23)/ 334-335>
5. 포말분리법의 순환여과식 양어장 적용 <서근학, 이민규, 김병진, 조문철/ 97춘계 수산관련 공동학회(5.23)/ 350-351>
6. 고정화 질화세균을 이용한 암모니아 제거 <김병진, 서재관, 김성구, 서근학/ 한국생물공학회 97추계 학술대회(10.10)/ 85-86>
7. 가시우무를 이용한 Pb 흡·탈착 특성에 관한 연구 <조문철, 김병진, 서근학, 안갑환/ 한국생물공학회 97추계 학술대회(10.10)/ 157-158>
8. 포말분리법에 의한 양어장의 단백질 제거 <김병진, 조문철, 이회근, 이민규, 서근학/ 한국화학공학회 97 추계 학술대회(10.24)/ 화학공학의 이론과 실제3(2)/ 2345-2348>
9. 고정화된 질화세균을 이용한 TAN 제거 <김병진, 조문철, 안갑환, 김용하, 서근학/ 한국화학공학회 97 추계 학술대회(10.24)/ 화학공학의 이론과 실제3(2)/ 2401-2404>
10. 가시우무를 이용한 Pb 및 Cu 제거 <조문철, 김병진, 서근학, 안갑환/ 한국화학공학회 97 추계 학술대회(10.24)/ 화학공학의 이론과 실제 3(2)/ 2409-2412>

11. 고정화된 질화세균을 이용한 Total Ammonia Nitrogen(TAN)의 제거
〈서재관, 김병진, 서근학, 김성구/ 97추계 수산관련 공동학회(10.31)/
146-147〉
12. 포말분리법에 의한 양어장의 단백질 제거 〈김병진, 안수현, 조진구,
서근학/ 한국화학공학회 97 부산·경남지회(12.19)/ p.79〉
13. *Hypnea charoides*의 Pb 및 Cu 생체흡착 특성 〈조문철, 김병진, 안수
현, 안갑환, 서근학/ 한국화학공학회 97 부산·경남지회(12.19)/ p.86〉
14. 모자반 종을 이용한 중금속 제거 〈조문철, 김병진, 안갑환, 서근학/
한국생명과학회 98춘계 학술대회(3.21)/ 76-77〉
15. 순환여과식 양어장의 단백질 제거 〈김병진, 안수현, 조문철, 조진구,
서근학/ 한국생물공학회 98 춘계 학술대회(4.15)/ 161-162〉
16. 고정화된 질화세균을 충전한 반응기에 의한 암모니아 제거 〈김병진,
조문철, 조진구, 안갑환, 서근학/ 한국생물공학회 98 춘계 학술대회
(4.15)/ 163-164〉
17. 고정화 질화세균 충전반응기에 의한 암모니아 제거 〈김병진, 조진구,
서근학/ 98춘계 수산관련 공동학회(5.22)/ 430-431〉
18. 포말분리법을 이용한 양어장순환수중의 단백질제거 〈김병진, 안수현,
이회근, 서근학/ 98춘계 수산관련 공동학회(5.22)/ 432-433〉
19. PVA에 고정화된 질화세균에 의한 TAN 제거 〈조진구, 김병진, 서근
학/ 한국화학공학회 98 추계 학술대회(10.23)/ 화학공학의 이론과 실제
4(2)/ 3185-3188〉
20. 순환여과식 양어장의 암모니아 제거 위한 생물반응기 개발 〈김병진,
서근학/ 해양식량자원개발 산업기술연구 발표회 / 98.12/ 21〉

21. *S.sagamianum*의 Pb흡착 특성 <김병진, 조진구, 정은수, 안갑환, 서근학/ 한국생물공학회 99춘계 학술대회(4.9)/ 380-383>
22. RBC를 이용한 양어장수 암모니아 제거시 수력학적 체류시간 영향 <김병진, 김용하, 서근학/ 한국생물공학회 99춘계 학술대회(4.9)/ 376-379>
23. 공기부상식 생물반응기에서 암모니아 제거시 공기량 영향 <조진구, 김병진, 서근학/ 한국화학공학회 99 춘계 학술대회(4.23)/ 화학공학의 이론과 실제5(1)/ 1077-1080>
24. Pilot-scale 순환여과식 양식시스템의 개발 <서근학, 조재윤, 김병진/ 99춘계 수산관련 공동학회(5.14)/ 277-278>
25. 모의 순환여과식 양어장에서 회전원판반응기의 최적 수력학적 체류시간 <김병진, 김용하, 서근학/ 99춘계 수산관련 공동학회(5.14)/ 297 -298>
26. 포말분리기에 의한 순환여과식 양식장의 단백질 및 부유고형물 제거 <김병진, 김용하, 서근학/ 99춘계 수산관련 공동학회(5.14)/ 299-300>
27. 포말분리법에 의한 해수중의 단백질 제거 <김병진, 조진구, 서근학/ 99추계 한국환경과학회 학술대회 (11.5-6)/ 67-68>
28. 공기부상식 생물반응기에서 암모니아제거시 암모니아 농도 및 체류시간 영향 <조진구, 김병진, 서근학/ 99추계 한국환경과학회 학술대회 (11.5-6)/ 125 -126>
29. 공기부상식 생물반응기에서 고정화된 질화세균군에 의한 암모니아성 질소 제거시 체류시간, pH, 온도 및 암모니아 농도 영향 <김병진, 조진구, 이정훈, 김용하, 서근학/ 한국화학공학회 2000 춘계 학술대회 (4.21-22)/ 화학공학의 이론과 실제6(1)/ 1585-1588>

30. 향류공기구동식, 고속 폭기식 및 벤츄리식 포말분리기에 의한 양어장수의 단백질 및 부유고형물 제거 특성 <김병진, 이정훈, 서근학/ 한국화학공학회 2000 춘계 학술대회(4.21-22)/ 화학공학의 이론과 실제 6(1)/ 1589-1592>
31. 포말분리법에 의한 해수중의 단백질 제거 <김병진, 이정훈, 서근학/ 한국화학공학회 2000 춘계 학술대회(4.21-22)/ 화학공학의 이론과 실제 6(1)/ 1593-1596>
32. 포말분리기에 의한 해수중의 단백질 및 부유고형물 제거 <김병진, 서근학, 김성구/ 2000춘계 수산관련 공동학회(5.19)/ 235-236>
33. 향류 공기구동식, 고속폭기식 및 벤츄리식 포말분리기에 의한 양어장수의 단백질 및 부유 고형물의 제거 특성 <김병진, 서근학, 조재윤, 김성구/ 2000춘계 수산관련 공동학회2000(5.19)/ 284-285>
34. 해수의 포말분리 특성 <김병진, 서근학, 김성구, 김용하/ 2000추계 수산관련 공동학회(10.20)/ 201-202>
35. 해수포말분리기에서 공기분산기 기공크기의 영향 <김병진, 서근학, 김용하, 김성구/ 2000추계 수산관련 공동학회(10.20)/ 211-212>
36. 고정화 미생물을 이용한 연속 생물반응기에 의한 암모니아의 질산화 <김병진, 서근학, 김용하/ 2000추계 수산관련 공동학회(10.20)/ 213-214>
37. 포말분리법에 의한 해수중의 단백질제거시 초기 단백질농도 영향 <김병진, 이정훈, 서근학/ 2001년 한국화학공학회 부산, 경남지회/ 화공기술논문집(12.21)/ 33-36>

38. 고정화 질화세균군에 의한 저농도 암모니아 제거속도식 <김병진, 이정훈, 서근학/ 한국화학공학회 2001 춘계 학술대회(4.27-28)/ 화학공학의 이론과 실제7(1)/ 1657-1660>
39. 포말분리기에 의한 해수중의 단백질 및 부유고형물 제거 <김병진, 이정훈, 서근학/ 한국화학공학회 2001 춘계 학술대회(4.27-28)/ 화학공학의 이론과 실제7(1)/ 1661-1664>
40. 양어장수의 암모니아 제거시 포괄고정화 미생물의 질산화 속도식 도출 <이정훈, 김병진, 서근학/ 2001춘계 수산관련 공동학회(5.11)/ 324-325>
41. 포말분리법에 의한 해수내 양어장 오염물 제거시 유입 단백질 농도 영향 <이정훈, 김병진, 서근학/ 수산학회2001춘계(5.11)/ 326-327>
42. 저농도 암모니아 처리시 공기 유입량과 수력학적 체류시간의 영향 <김병진, 이정훈, 서근학/ 한국화학공학회 2001 추계 학술대회(10.19-20)/ 화학공학의 이론과 실제7(2)/ 4367-4370>
43. 저농도 암모니아 처리시 초기 암모니아 농도, 온도 그리고 pH의 영향 <김병진, 이정훈, 서근학/ 한국화학공학회 2001 추계 학술대회(10.19-20)/ 화학공학의 이론과 실제7(2)/ 4371-4374>

감사의 글

실험실에 발을 들여 놓은지 6년, 이제 조그마한 결실을 맺으며 그간 제게 힘이 되어주신 여러분들께 감사의 글을 올립니다.

먼저 학부에 입학하면서부터 현재까지 항상 깊은 관심과 애정으로 저를 여기까지 끌어주시고 학자의 모범으로 함께 해주신 서근학 선생님께 부족하나마 글로써 감사를 드립니다.

학위기간 중 여러모로 많은 관심과 도움을 주시고 생물공학과 김성구 교수님과 학부 시절부터 이 논문이 완성될 때까지 제게 많은 도움을 주신 부산 가톨릭 대학교의 안갑환 교수님께도 감사드립니다. 깊은 관심으로 많은 충고와 격려를 주신 김용하 교수님과 바쁘신 중에도 시간을 내어 저의 부족한 논문을 다듬어 주신 이정범 교수님께도 머리 숙여 감사드리며 저를 이 자리까지 끌어주신 화학공학과와 모든 교수님께 감사를 드립니다.

저의 갖은 괴롭힘 속에서도 묵묵히 저를 도와준 생물반응공학 연구실의 모든 실험실 선·후배님 들께 새삼 고마움을 전하며 주위에서 제게 많은 용기와 위로를 보내준 모든 친구, 학형들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

묵묵히 6여 년을 저의 곁에 있어 주면서 저의 학위논문 실험까지도 함께 도와준 현정이에게 두고두고 고마움을 갚을 것을 전하며 서울에서 단란한 가정을 이루고 있는 큰누나 매형 부부와 조카들, 올해 세상을 처음 본 보언이의 부모가 된 작은 누나 매형 부부, 항상 집안을 위해 바쁘게 활동하시는 형님께 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 나이든 막내의 앞날을 걱정하시면서도 언제나 저를 믿어 주시는 어머님과 언제나 제 마음속에서 함께 하시는 아버님께 이 논문을 올립니다.

2001년 12월 마지막날 김 병 진 올림