

## 점성 및 점탄성 액체를 이용한 기포탑에서의 기체 체류량에 관한 연구

서 일 순

건국대학교 화학공학과  
(1994년 4월 7일 접수, 1994년 8월 4일 채택)

## Gas Holdup in the Bubble Columns with Viscous and Viscoelastic Liquids

Il-Soon Suh

Department of Chemical Engineering, Kon-Kuk University  
(Received 7 April 1994; accepted 4 August 1994)

### 요 약

액체의 점성 및 점탄성이 기포탑에서의 기체 체류량에 미치는 영향을 연구하였다. 넓은 범위의 액체 물성을 고려하기 위하여 뉴턴 유동특성을 나타내는 수크로오스 수용액, 강한 가소성을 나타내면서 약한 점탄성을 지니는 xanthan 수용액, 강한 점탄성을 나타내는 polyacrylamide(PAA) 수용액, 그리고 중간 정도의 점탄성을 나타내는 xanthan-PAA 혼합물의 수용액을 액체상으로 각각 사용하였다. 액체의 점도가 증가함에 따라 기체 체류량은 불균일 흐름영역에서는 감소하여 최소치를 보인 후에 슬러그 흐름영역에서는 증가함을 보였다. 강한 점탄성을 나타내는 PAA 수용액에서의 기체 체류량은 약한 점탄성의 xanthan 수용액에서 보다 낮은 값을 보였다.

**Abstract**—The effects of liquid viscosity and viscoelasticity on gas holdups were studied in a bubble column. For the sake of covering a wide range of the liquid properties, the newtonian sucrose, strongly pseudoplastic and weakly viscoelastic xanthan, strongly viscoelastic polyacrylamide(PAA) and moderately viscoelastic xanthan-PAA mixture aqueous solutions were used as the liquid phase. As increasing the liquid viscosity, the gas holdups decreased in the heterogeneous flow regime. On the other hand, the gas holdups in the slug flow regime increased with the effective viscosity. The gas holdups in the strongly viscoelastic solutions of PAA exhibited lower values than those in the weakly viscoelastic xanthan solutions.

### 1. 서 론

기포탑은 화학공업 및 폐수처리 등의 생물공정 분야에서 폭 넓게 이용되고 있다[1, 2]. 최근에 Suh 등[3]은 기-액 산소전달의 효율이 나쁜 것으로 알려진 높은 점도를 나타내는 호기성 xanthan 발효공정에도 기포탑을 성공적으로 이용한 바 있다.

산소의 낮은 용해도로 인하여 호기성 회분식 발효공

정에서도 공기를 발효조 내로 계속 주입하여 균에 산소를 공급한다. 이 때 생성물의 생성속도는 주로 반응기의 기-액 산소 전달속도에 의해 결정되어, 단위체적당 기-액 물질전달계수로부터 계산되는 기-액 산소 전달속도는 가장 중요한 공학적 변수 중 하나이다. 기-액 물질전달계수는 액상 물질전달계수와 단위체적당 기-액 접촉면적의 곱으로 표시되며, 단위체적당 기-액 접촉면적  $a$ 는 다음과 같이 기체 체류량  $\epsilon_G$ 과 기포의 직경  $d_B$ 에

연관된다.

$$a = 6\varepsilon_G/d_B \quad (1)$$

기체 체류량은 기체 공탐속도  $u_G$ 와 기포 상승속도  $u_B$ 에 대해 다음과 같은 상관관계를 갖는다.

$$\varepsilon_G = u_G/u_B \quad (2)$$

여기서 기포 상승속도는 기체 공탐속도 및 기포의 크기에 영향을 받는다. 따라서 기포의 크기는 반응기의 수력학적 특성을 나타내는 가장 기본적인 변수 중의 하나이다. 그러나 측정에, 특히 높은 점도 하에서, 많은 문제점이 있다. 반면에 기체 체류량의 측정은 간편하고 정확하며 그 측정치로부터 중요한 공학적 변수인 기-액 물질전달계수를 비롯한 다른 설계변수들을 간접적으로 쉽게 예측할 수 있다.

일반적으로 기-액 접촉면적, 기체 체류량 및 기포의 크기는 기포탐의 기하학적 특성, 기체분산기, 기체유속과 점도 및 표면장력 등의 액체물성의 변화에 영향을 받는다. 특히 액체의 점도가 증가함에 따라 기포의 합체가 증대되어 기포의 크기가 증가하며 기체 체류량 및 단위부피당 기-액 접촉면적이 감소한다. 이러한 반응기의 수력학적 특성으로 인해 액체점도가 증가함에 따라 단위부피당 기-액 산소전달 등의 반응기의 성능은 저하된다. 따라서, Table 1에 정리한 바와 같이, 쉽게 측정이 가능한 기체 체류량에 미치는 액체점도의 영향에 관해서 많은 연구가 보고되었다.

Haque 등[4]은 기포탐에서 carboxymethyl cellulose (CMC) 수용액을 사용하여 크기가 작은 기포와 큰 기포가 함께 존재하는 불균일 흐름영역에서의 액체의 점도가 기체 체류량에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 기포탐 직경의 영향을 조사하고자 직경을 0.1 m에서 1.0 m까지 변화시켜 다음의 실험식을 제시하였다.

$$\varepsilon_G = 0.171 u_G^{0.60} \mu_{eff}^{-0.22} D_C^{-0.15} \quad (3)$$

가소성 CMC 수용액의 유효점도  $\mu_{eff}$ 는 Ostwald-de Waele의 상관식 식 (4)로부터 산출하였다.

$$\mu_{eff} = k \dot{\gamma}_{eff}^{n-1} \quad (4)$$

기포탐에서의 유효 전단속도  $\dot{\gamma}_{eff}$ 는 뉴턴 및 가소성 액체에서 측정된 열전달계수의 비교를 근거로 Nishikawa 등[5]이 제안한 식 (5)에 의해 계산하였다.

$$\dot{\gamma}_{eff} = 5000 u_G \quad (5)$$

Godbole 등[6]은 직경 0.305 m의 기포탐에서 glycerine과 CMC 수용액을 사용한 결과 높은 점도하에서 기포가 기포탐의 단면적을 거의 채우는 슬러그 흐름영

역을 관찰하였으며 이 영역에서의 기체 체류량을 측정하였다. 그들은 Schumpe와 Deckwer[7]에 의해 직경 0.102 m와 0.14 m의 기포탐에서 측정 보고된 실험치와 자신들의 실험치를 비교한 결과 큰 직경의 기포탐(0.305 m)에서 기체 체류량은 낮은 값을 나타낸다는 것을 발견하였고 다음의 실험식을 제시하였다.

$$\varepsilon_G = 0.239 u_G^{0.634} D_C^{-0.50} \quad (6)$$

식 (6)은 슬러그 흐름영역에서 기체 체류량은 액체의 점도에 영향을 받지 않고 불균일 흐름영역에서 보다 강하게 기포탐 직경의 영향을 받는다는 것을 나타낸다. Kawase와 Moo-Young[8]은 기포탐의 액상 순환모델과 난류 운동점도의 개념을 근간으로 불균일 흐름영역에서의 기체 체류량에 관한 다음의 이론식을 제안하였다.

$$\varepsilon_G = 1.07 g^{-1/3} n^{2/3} u_G^{2/3} D_C^{-1/3} \quad (7)$$

식 (7)은 뉴턴 액체에서는 기체 체류량은 액체의 점도에 영향을 받지 않는다는 것을 의미하고 이는 문헌에 발표된 여러 실험결과와 상반된다[9].

Schumpe와 Deckwer[9]는 불균일 흐름영역과 슬러그 흐름영역에서의 기체 체류량에 관한 식을 제시하기 위하여 그들 자신의 실험치와 문헌[4, 6, 7, 10-16]에 발표된 실험치들을 이용하였다. 뉴턴 유체인 glycerol 수용액, 약한 가소성을 나타내는 CMC 수용액과 강한 가소성 액체인 xanthan 수용액의 불균일 흐름영역에서의 기체 체류량으로부터 다음의 실험식을 제시하였다.

$$\varepsilon_G = 0.20 g^{-0.27} \rho_L^{0.09} \sigma^{0.13} \mu_{eff}^{-0.22} u_G^{0.54} D_C^{-0.20} \quad (8)$$

가소성 액체의 유효점도를 산출하기 위해서 열전달계수 ( $h \propto \mu_{eff}^{-0.33}$ )에 비해 점도의 영향을 크게 받는 기-액 물질전달계수 ( $k_L a \propto \mu_{eff}^{-0.70}$ )의 실험치로부터 얻은 유효 전단속도에 관한 다음의 식을 사용하였다.

$$\dot{\gamma}_{eff} = 2800 u_G \quad (9)$$

슬러그 흐름영역에서의 기체 체류량은 식 (2)를 이용하여 해석하였으며 이 때 기포 상승속도는 Nicklin 등[17]이 제시한 이론식을 다음과 같이 수정하였다.

$$u_B = C(u_G + u_L) + 0.35(g D_C)^{1/2} \quad (10)$$

여기서 상수 C는 기포상단의 액체 속도분포가 기포 상승속도에 영향을 미친다는 점과 기포의 합체가 기체분산기 부근에서 주로 일어난다는 점을 고려하여 다음의 식으로 나타냈다.

$$C = (3n + 1)/(n + 1) + 3.4 e^{-2.0n/D_C} \quad (11)$$

이 식에 의하면 기포합체에 영향을 미치는 기포후류의

Table 1. Experimental studies on the gas holdup in bubble columns with viscous liquids

Investigators	Liquids	Operating conditions
Akita and Yoshida[18]	glycol-solns k: $1.21 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 1	D <sub>C</sub> : 0.152 m H <sub>GL</sub> : 2-3 m u <sub>G</sub> : 0.001-0.25 m/s heterogeneous flow
Buchholz et al.[14]	glycerol-, CMC-solns k: $3.450 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 1-0.75	D <sub>C</sub> : 0.14 m H <sub>GL</sub> : 3.9 m u <sub>G</sub> : 0.01-0.06 m/s u <sub>L</sub> : 0.006-0.015 m/s heterogeneous flow
Nakanoh and Yoshida[19]	sucrose-, CMC-, PA-solns k: $1.246 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 1-0.51	D <sub>C</sub> : 0.145 m H <sub>GL</sub> : 1.1 m u <sub>G</sub> : 0.02-0.09 m/s heterogeneous flow
Schumpe and Deckwer[7]	CMC-solns k: $1.500 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 1-0.75	D <sub>C</sub> : 0.102, 0.14 m H <sub>GL</sub> : 2.4, 2.7 m u <sub>G</sub> : 0.003-0.20 m/s u <sub>L</sub> : 0.006 m/s homogeneous, slug flow
Godbole et al.[6]	glycerol-solns k: $1.246 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 1 CMC-solns k: $1.2, 570 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 1-0.5	D <sub>C</sub> : 0.305 m H <sub>GL</sub> : <2.4 m u <sub>G</sub> : 0.04-0.28 m/s heterogeneous, slug flow
Godbole et al.[10]	CMC-solns k: $95.7, 683 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 0.85-0.44	D <sub>C</sub> : 0.305 m H <sub>GL</sub> : 2.5 m u <sub>G</sub> : 0.03-0.24 m/s u <sub>L</sub> : 0-0.006 m/s heterogeneous flow
Schumpe et al.[12]	xanthan-solns k: $23.9, 780 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 0.70-0.18	D <sub>C</sub> : 0.14, 0.30 m H <sub>GL</sub> : 2.0 m u <sub>G</sub> : 0.02-0.20 m/s heterogeneous, slug flow
Haque et al.[4]	CMC-solns k: $12.1, 320 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 0.80-0.50	D <sub>C</sub> : 0.10, 0.20, 0.38, 1.0 m H <sub>GL</sub> : 0.3-2.0 m u <sub>G</sub> : 0.03-0.24 m/s heterogeneous flow
Kawase and Moo-Young[8]	glycerine-, dextrose-, CMC-, carboxypolymethylene-, PAA-solns k: $0.9-1,650 \cdot 10^{-3}$ Pa s <sup>n</sup> n: 1.0-0.504	D <sub>C</sub> : 0.23, 0.76 m H <sub>GL</sub> : 1.22, 3.21 m u <sub>G</sub> : ? heterogeneous flow

속도는 점도를 비롯한 액체의 물성들에 영향을 받지 않고 오직 기포탑의 기하학적 특성에 의존한다는 것이다.

일반적으로 액체의 점도를 변화시키기 위하여 첨가하는 CMC와 xanthan과 같은 고분자 물질의 수용액들은

약한 점탄성을 나타낸다. 본 연구와 같은 실험조건 아래서 수행된 Fig. 1의 연구결과가 나타내는 바와 같이, 기-액 물질전달계수는 액체의 점탄성이 증가함에 따라 감소하고 이러한 영향은 CMC 수용액이나 xanthan 수용액의 낮은 점탄성의 범위 내에서 이미 무시 못할 정

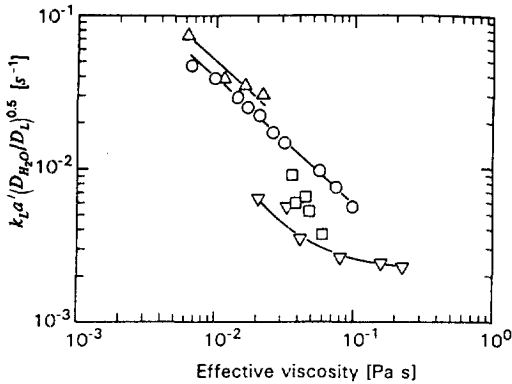


Fig. 1. Lower gas-liquid mass transfer coefficients in viscoelastic solutions of (▽) PAA and (□) mixed xanthan-PAA as compared to (○) pseudoplastic but slightly viscoelastic xanthan solutions and (△) inelastic sucrose solutions at the gas velocity of 0.14 m/s, after Suh et al.[20].

도라고 최근에 Suh 등[20]은 보고한 바 있다. 그러나 액체의 점탄성이 기체 체류량에 미치는 영향에 관해서는 아직 체계적인 연구보고가 없는 실정이다.

본 연구에서는 액체의 점탄성이 기포탑에서의 기-액 물질전달계수에 미치는 영향을 수력학적 관점에서 해석하고자 기체 체류량을 측정하여 기체 체류량에 미치는 액체 점탄성의 영향을 정성적으로 고찰하였다. 이 때 액체 점도의 영향을 분리 고려하기 위해서 뉴턴 및 비뉴턴 유체를 사용하여 액체의 점도와 가소성도 넓은 범위에서 동시에 변화시켰다.

## 2. 실험

본 연구에서 사용한 기포탑은 회분식 xanthan 발효에 실제 이용한 스테인레스틸관과 유리관으로 구성된 내경이 0.15 m이고 높이가 2.9 m인 수직관이다[3, 18]. 기체분산기로 sintered plate를 기체로는 압축공기를 사용하였으며 기체유량은 로타미터로 측정하였다. 기체 공급속도는 0.01-0.48 m/s의 범위 내에서 변화시켰다. 액체로는 수크로오스, xanthan, PAA 그리고 xanthan과 PAA의 혼합 수용액을 각각 사용하였다.

Xanthan 수용액에서의 기체 체류량은 기포탑의 관벽에 나타나는 종축방향의 압력구배로부터 다음식을 이용하여 산출하였다.

$$\Delta P/L = [\epsilon_{G,i}\rho_G + (1 - \epsilon_{G,i})\rho_L] g \quad (12)$$

종축거리 L 사이에서 나타나는 압력차  $\Delta P$ 는 차압계

(Fischer & Porter 50DPF110-3)로 측정하였다. 그러나 그외의 수용액들에서는, 특히 강한 점탄성을 나타내는 PAA 수용액에서는, 이 방법으로 압력차를 측정할 수 없었다. 이 경우에는 기포탑 내에 공기를 주입하기 전의 순수 액체높이  $H_{L0}$ 와 공기주입 후의 기-액 분산상의 높이  $H_{GL}$ 로부터 다음과 같이 산출하였다.

$$\epsilon_{G,i} = 1 - H_{L0}/H_{GL} \quad (13)$$

점도가 높은 액체에서는 직경이 대략 1 mm 미만인 아주 작은 기포가 발생하여 시간이 경과함에 따라 기포탑 내에 축적된다[21]. 따라서 일정한 운전조건 하에서 기체 체류량이 정상상태에 도달하는데는 수 시간 동안의 운전이 필요하며 아주 작은 기포는 공기주입 중단 후에도 계속 기포탑 내에 존재한다. 본 실험에서도 이러한 아주 작은 기포의 발생이 관찰되었다. 따라서 본 연구에서는 짧은 시간 내에 정상상태에 도달하는 직경 1 mm 이상의 기포의 체류량  $\epsilon_{G,i}$ 에 대해서만 논하고자 하며 기체의 전체 체류량  $\epsilon_{G,t}$ 로부터 다음 식과 같이 계산한다.

$$\epsilon_G = \epsilon_{G,i} - \epsilon_{G,rs} \quad (14)$$

1 mm 이하의 기포의 체류량  $\epsilon_{G,rs}$ 은 비중계로 측정되는 유체의 가밀도로부터 산출하였다.

### 2-1. 액체의 물성

액체의 물성을 변화시키기 위하여 수크로오스(technical grade), xanthan(Roth GmbH) 또는 PAA(Praestol 2540, Stockhausen GmbH)를 사용하였다. 액체의 밀도와 표면장력은 비중계와 링 제거방법(Kruess Interfacial-Tensiometer K8)을 각각 이용하여 측정하였다. 액체의 유변학적 특성과 점탄성은 동축 회전 원통점도계(Contraves 115)와 cone-and-plate 레오미터(Rheometrics RMS 800)를 사용하여 측정하였다.

액체의 유변학적 특성은 10-3000 s<sup>-1</sup>의 전단속도 범위 내에서 다음의 Ostwald-de Waele 상관식으로 잘 묘사할 수 있었다.

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (15)$$

Table 2에 나타난 바와 같이, 수크로오스 수용액은 뉴턴 유동특성( $n=1$ )을 나타내는 반면에 xanthan, PAA 그리고 xanthan-PAA 혼합물의 수용액은 가소성 유동특성을 나타내었다. Xanthan 수용액의 경우 xanthan 농도를 증가시키에 따라 액체의 가소성 정도를 나타내는 흐름저동지수  $n$ 은 감소하여 8.8 kg/m<sup>3</sup>의 농도에서 0.098의 최소치를 보인 후 증가하였다.

액체의 점탄성은 일정한 전단속도하의 정상상태에서 레오미터의 cone과 plate 사이의 액체에 작용하는 토

Table 2. Liquid properties at 28°C

Solutes	Conc. kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> k Pa s <sup>n</sup>	n	$\rho_L$ kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> $\sigma$ N/m
Sucrose 1	517	6.2	1	1175	71.0
Sucrose 2	622	11.4	1	1225	71.2
Sucrose 3	668	16.3	1	1248	71.4
Sucrose 4	708	22.0	1	1264	74.6
Xanthan 1	n.a.	7.80	0.852	1000	n.a.
Xanthan 2	n.a.	30.3	0.684	1000	n.a.
Xanthan 3	0.9	143	0.483	1000	70.5
Xanthan 4	n.a.	193	0.487	1000	n.a.
Xanthan 5	1.6	469	0.350	1002	69.6
Xanthan 6	2.2	924	0.300	1002	70.7
Xanthan 7	2.9	1733	0.228	1002	71.5
Xanthan 8	3.6	2747	0.181	1002	n.a.
Xanthan 9	4.6	4632	0.131	1003	n.a.
Xanthan 10	8.8	6898	0.098	1003	n.a.
Xanthan 11	13.9	9873	0.136	1004	n.a.
Xanthan 12	15.5	10763	0.167	1006	n.a.
Xanthan 13	19.2	12670	0.187	1007	n.a.
PAA 1	2.0	139	0.762	1000	71.0
PAA 2	3.7	964	0.357	1002	70.7
PAA 3	9.3	7810	0.230	1002	67.0
PAA 4	n.a.	19450	0.194	1005	n.a.
PAA 5	20	29401	0.181	1005	n.a.
Xanthan/PAA 1	5.0/0.1 <sup>a</sup>	2036	0.327	1001	71.7
Xanthan/PAA 2	5.0/0.5 <sup>a</sup>	1989	0.375	1001	73.0
Xanthan/PAA 3	2.5/2.0 <sup>a</sup>	651	0.530	1001	65.6
Xanthan/PAA 4	5.0/2.0 <sup>a</sup>	1585	0.417	1002	69.0
Xanthan/PAA 5	7.5/2.0 <sup>a</sup>	2845	0.356	1003	73.0

n.a.: not available

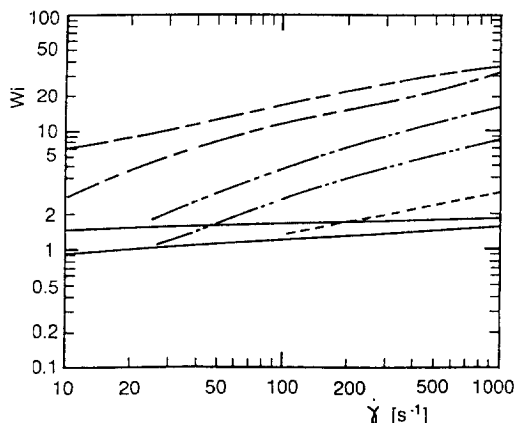
<sup>a</sup>Xanthan/PAA concentrations

Fig. 2. Weissenberg number as a function of shear rate (--- upper and lower limits of PAA, -.- of xanthan-PAA, — of xanthan, and ... of CMC solutions).

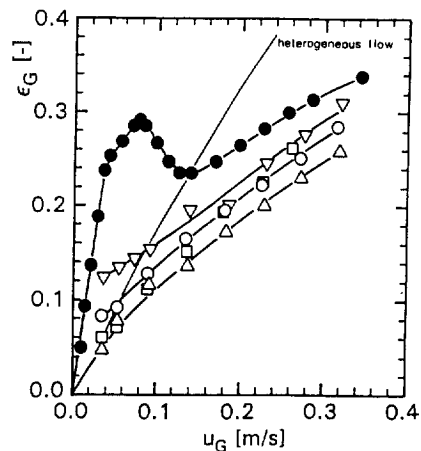


Fig. 3. Gas holdups in sucrose solutions 1 (▽), 2 (○), 3 (□), 4 (△) and water (●) in Table 2.

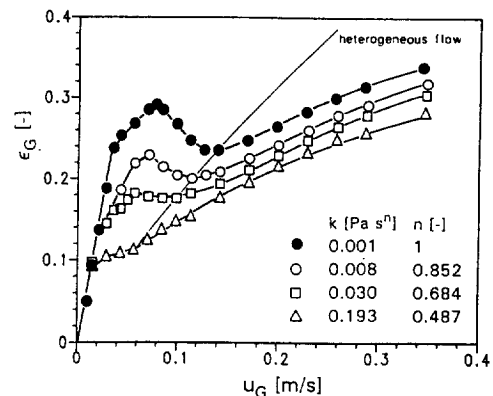


Fig. 4. Gas holdups in low concentrated xanthan solutions.

오크와 축방향 thrust로부터 전단응력  $\tau$ 와 일차 법선 응력차  $N_1$ 을 각각 측정하여 다음과 같이 정의되는 무차원 Weissenberg 수  $Wi$ 로 나타내었다.

$$Wi = N_1 / \tau \quad (16)$$

Fig. 2에 나타나듯이 xanthan, xanthan-PAA 혼합물, PAA 수용액의 Weissenberg 수는 전단속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. Xanthan 수용액은 문헌[22]에 발표된 CMC 수용액 정도의 약한 점탄성을 나타내나, PAA 수용액은 강한 점탄성을 보였다. Xanthan-PAA 혼합 수용액은 xanthan 수용액과 PAA 수용액 사이의 점탄성을 보임을 알 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 기체유속의 영향

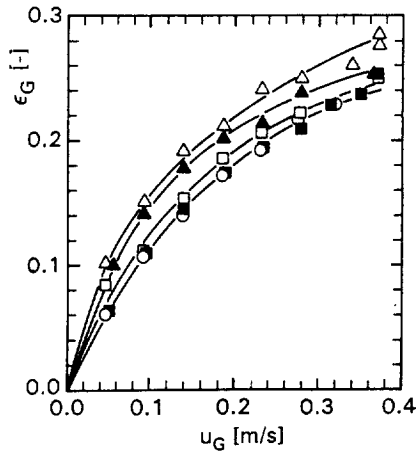


Fig. 5. Gas holdups in high concentrated xanthan 9 (○), 10 (■), 11 (□), 12 (▲) and 13 (△) solutions in Table 2.

기체 공압유속이 수크로오스와 낮은 농도의 xanthan 수용액에서의 기체 체류량에 미치는 영향을 Fig. 3과 4에 각각 나타내었다. 본 실험에서 사용한 다공판 기체분산기 때문에 기체유속이 증가함에 따라서 기체 체류량이 복잡한 양상으로 변화하였다. 낮은 기체유속에서는 크기가 균일한 작은 기포가 관의 단면에 고루 분포되어 낮은 속도로 상승하는 균일 흐름영역이 지배적으로 나타났다. 물과 낮은 농도의 xanthan 수용액을 사용한 경우, 기체유속을 균일 흐름영역에서 증가시키에 따라 기체 체류량은 기체유속에 정비례하여 증가한 후 최대치를 나타냈다. 반면에 수크로오스 수용액과 높은 농도의 xanthan 수용액의 경우 기체 체류량은 이러한 최대치를 보이지 않았다. 기체유속을 일정한 임계유속 이상으로 증가시키에 따라, 커다란 기포가 형성되기 시작하여 기포탑 내는 크기 큰 기포와 작은 기포가 서로 함께 존재하는 불균일 흐름영역이 형성되었고 기체 체류량은 계속 증가하였다. 빠른 상승속도를 나타내는 커다란 기포의 형성으로 인하여 기체유속의 증가에 따른 기체 체류량의 증가는 기체유속에 정비례하여 증가하는 초기 균일 흐름영역에 비해 낮게 나타났다. 또한 수크로오스 및 xanthan의 농도가 증가함에 따라 균일 흐름영역에서 불균일 흐름영역으로의 전이가 나타나는 기체유속은 감소하였고 기체 체류량은 낮은 값을 보였다.

Fig. 5는 높은 농도의 xanthan 수용액에서의 기체 체류량을 나타낸다. 일정한 기체유속하에서 xanthan의 농도가 증가함에 따라, 즉 액체의 점도가 증가함에 따라, 기체 체류량은 증가함을 알 수 있다. 이 때 기포가 관의 내경을 거의 채우는 슬러그 흐름이 관찰되었다. Weiss

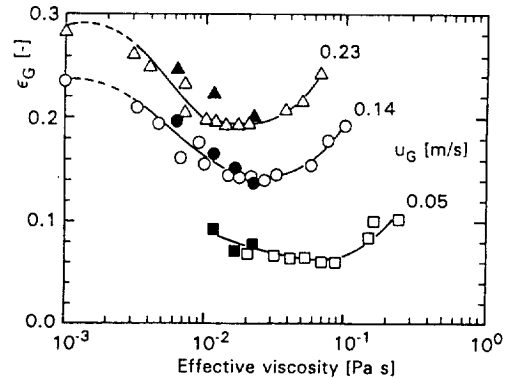


Fig. 6. Dependence of gas holdups upon liquid viscosity in xanthan(open symbols) and sucrose(close symbols) solutions at various gas velocities.

등[23]은 작은 직경의,  $D_c=0.00151$  m, 수직관에서 그리고 Philips 등[24]은 공기 리프트 반응기에서 이와 같은 슬러그 흐름영역에서의 점도증가에 따른 기체 체류량의 증가를 보고한 바 있다.

### 3-2. 액체점도의 영향

Xanthan 농도의 증가에 따른 점도증가는 유효점도로 나타낼 수 있다. 가소성 수용액의 유효점도 계산을 위해 반응기 내의 유효 전단속도를 산출해야 한다. 본 연구에서는 Schumpe와 Deckwer[9]에 의해 제안된 식 (9)로부터 기포탑에서의 유효 전단속도를 계산하여 Ostwald-de Waele의 상관식 식 (4)로부터 가소성 액체의 유효점도를 산출했다.

Fig. 6은 xanthan 수용액의 유효점도가 불균일 흐름영역과 슬러그 흐름영역에서의 기체 체류량에 미치는 영향을 나타낸다. 수크로오스 수용액에서의 기체 체류량도 비교하기 위하여 함께 나타냈다. 일정한 기체유속에서 유효점도의 증가에 따라 기체 체류량은 감소한 후 증가하는 경향을 보인다. 낮은 점도 하에서는 불균일 흐름영역이, 높은 점도에서는 슬러그 흐름영역이 각각 관찰되었다. 이 때 각 기체유속에서 불균일 흐름으로부터 슬러그 흐름으로 전이되는 최소치의 기체 체류량을 나타내는 액체의 유효점도는 기체유속이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

불균일 흐름영역에서의 점도 증가에 따른 기체 체류량의 감소는 기포합체의 증대에 따른 상승속도가 큰 커다란 기포 형성의 증가로 설명된다. 기포가 기포탑의 단면적을 거의 채우는 슬러그 흐름영역에서의 유효점도의 증가에 따른 기체 체류량의 증가는 앞서 올라가는 어느 한 기포의 뒷면에 형성되는 후류가 뒤 이어 올라

**Table 3. Comparisons of gas holdups observed in heterogeneous flow regime in xanthan solutions with the predictions by correlations previously reported in literature**

Authors	Correlations	Deviations(%)
Haque et al.[4]	Eq. (3)	26.6
Kawase and Moo-Young[8]	Eq. (7)	32.7
Schumpe and Deckwer[9]	Eq. (8)	17.7

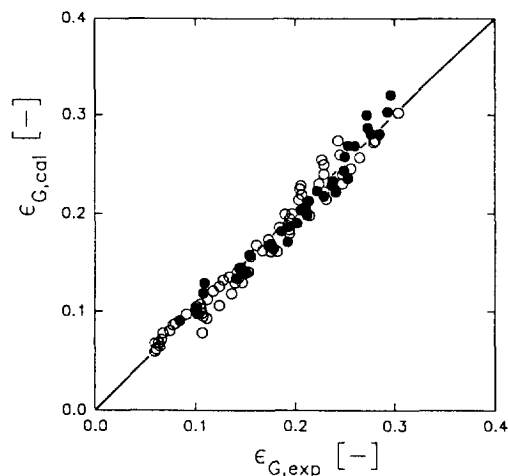
오는 기포의 상승속도를 가속시킨다는 일직선 상의 두 기포 사이의 상호작용으로 설명할 수 있다[25-27]. 즉 유효점도가 증가함에 따라 이러한 두 기포 사이의 상호작용이 감소하여 기체 체류량의 증가를 유발한다고 추측할 수 있다[27]. Schumpe와 Deckwer[9]는 기체 분산기 주위에서 기체합체가 왕성하게 일어나므로 식 (11)의 오른쪽 둘째 항의 기포탑의 높이와 직경의 비로서만 이러한 영향을 고려하였다. 그들의 식에 의하면 기포탑의 높이가 증가할수록 기체 체류량은 높은 값을 나타낸다.

불균일 흐름영역에서 측정된 실험치를 문헌에 발표된 실험식 또는 이론식들의 계산치와 비교하면, Table 3에 나타난 바와 같이 Schumpe와 Deckwer가 제시한 식 (8)이 Haque 등의 식 (3)과 Kawase와 Moo-Young의 식 (7)에 비해 본 연구의 실험치를 잘 예측함을 알 수 있다. 그러나 Schumpe와 Deckwer의 식과 Haque 등의 식은 실험치보다 전체적으로, 특히 높은 기체유속에서, 높은 값을 예측하였고 Kawase와 Moo-Young의 이론식은 뉴턴 유체인 수크로오스 수용액 및 약한 가소성을 나타내는 낮은 농도의 xanthan 수용액에 대해서는 실험치보다 높은 값을 나타낸 반면에 강한 가소성의 높은 농도의 xanthan 수용액에 대해서는 낮은 값을 예측하였다. 슬러그 흐름영역에서 측정된 기체 체류량은 Godbole 등의 식 (6)과 Schumpe와 Deckwer의 식 (2), (10) 및 (11)에 의해 각각 20%와 30%의 평균오차를 가지고 높게 묘사되었다. 특히 이들의 식들은 점도의 증가에 따라 기체 체류량이 증가하는 경향의 묘사에 문제가 있다.

Xanthan 수용액에서 측정된 기체 체류량은 불균일 흐름영역과 슬러그 흐름영역으로 구분하여 기체 공압 속도와 액체의 유효점도의 상관식으로 나타낼 수 있었다. 불균일 흐름영역에서 측정된 기체 체류량은 식 (17)로 6.0%의 평균오차를 가지고 나타낼 수 있었다.

$$\epsilon_G = 0.17 u_G^{0.50} \mu_{eff}^{-0.19} \quad (17)$$

여기서 기체 공압속도와 액체의 유효점도의 변화 범위는 다음과 같다.



**Fig. 7. Parity plot of Eqs. (17) and (18) for the gas holdups in heterogeneous(open symbols) and slug (close symbols) flow regimes in xanthan solutions.**

$$0.036 \leq u_G (\text{m/s}) \leq 0.347$$

$$0.004 \leq \mu_{eff} (\text{Pa s}) \leq 0.0866$$

슬러그 흐름영역에서의 기체 체류량은 식 (18)로 평균 오차 5.0%로 나타낼 수 있었다.

$$\epsilon_G = 0.81 u_G^{0.62} \mu_{eff}^{0.14} \quad (18)$$

$$0.046 \leq u_G (\text{m/s}) \leq 0.480$$

$$0.013 \leq \mu_{eff} (\text{Pa s}) \leq 0.244$$

식 (17)과 (18)로부터의 계산치와 본 연구의 xanthan 수용액에서의 실험치를 Fig. 7에서 비교하였다.

불균일 흐름영역에서 슬러그 흐름영역으로의 전이가 일어나는 유효점도  $\mu_{eff,ts}$ 는 식 (17)과 (18)에 의해 다음과 같이 기체유속이 증가함에 따라 감소한다.

$$\mu_{eff,ts} = 0.0088 u_G^{-0.36} \quad (19)$$

균일 흐름영역에서 불균일 흐름영역으로의 전이도 Fig. 3과 4에 보인 바와 같이 액체점도가 증가함에 따라 낮은 기체유속에서 일어난다. 또한 균일 흐름영역의 범위는 일반적으로 기체 분산기의 형태에 크게 의존하여 1 mm 이상 직경의 오리피스를 장착한 링 스파저 기체분산기를 사용할 경우 균일 흐름영역은 거의 나타나지 않는다[1].

기포탑에서의 회분식 xanthan 발효에서도 정성적으로는 본 연구에서와 같은 유효점도의 기체 체류량에 미치는 영향이 관찰되었다[3]. 발효가 진행됨에 따라 xanthan 농도가 증가하여 유효점도가 증가하였고 흐름영역은 균일 흐름영역에서 불균일 흐름영역을 통하여 슬러그 흐름영역으로의 전이가 관찰되었다. 균의 접종시

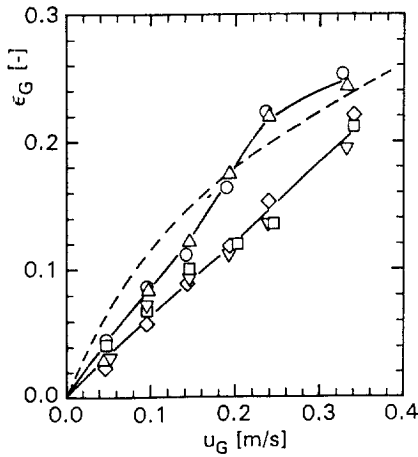


Fig. 8. Gas holdups in xanthan-PAA 1 (○), 2 (△), 3 (□), 4 (◇), 5 (▽) solutions in Table 2; xanthan 9 (---) included for comparison.

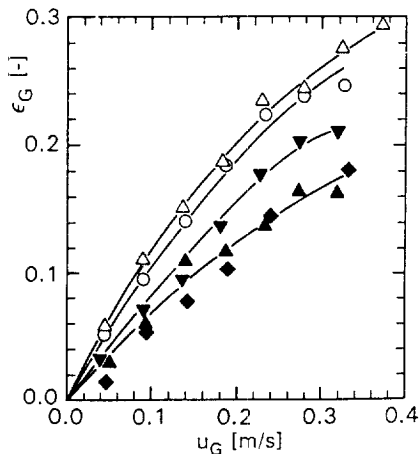


Fig. 9. Gas holdups in PAA 1 (◆), 2 (▲), 3 (▼), 4 (○), 5 (△) solutions in Table 2.

낮은 기체유속에서( $u_G < 0.17$  m/s) 나타나는 균일 흐름 영역에서는 기포탐 상단에서의 기-액 분리에 문제가 있어, 즉 거품이 발생하여, 거품 제거제를 첨가하면 기포포함체로 인한 불균일 흐름으로의 전이가 일어났다. 정량적으로는 xanthan 발효 중에 측정된 기체 체류량은 본 연구에서 측정된 기체 체류량보다 높은 값을 나타낸다. 그 원인 중 하나로 본 연구에서는 기체 체류량에 미치는 1 mm 이하의 아주 작은 기포의 영향을 식 (14)를 이용하여 제외할 것을 생각할 수 있다. 이러한 아주 작은 기포의 영향은 작은 기포의 상승속도가 특히 작게 나타나는 높은 점도에서 쉽게 알 수 있다. Xanthan 발효

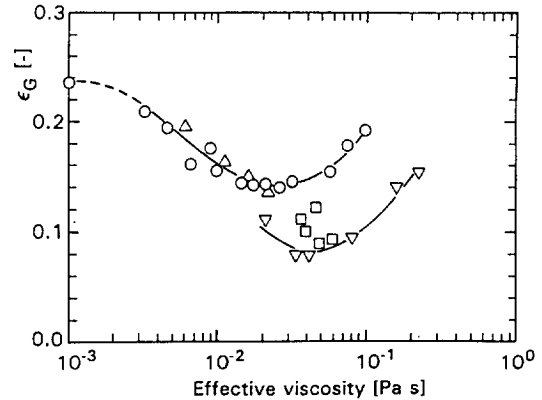


Fig. 10. Lower gas holdups in viscoelastic solutions of (▽) PAA and (□) mixed xanthan-PAA as compared to (○) pseudoplastic but only slightly viscoelastic xanthan solutions and (△) inelastic sucrose solutions at the gas velocity of 0.14 m/s.

중 높은 점도하의 슬러그 흐름영역에서 아주 작은 기포를 포함하는 전체 기체 체류량  $\epsilon_{G,t}$ 은 기체유속과 액체의 유효점도에 대해 다음 식으로 연관되었다[3].

$$\epsilon_{G,t} = 2.09 u_G^{0.67} \mu_{eff}^{0.39} \quad (20)$$

이 식의 유효점도의 지수 0.39는 식 (18)의 0.14에 비해 높은 값을 나타낸다. 따라서 아주 작은 기포의 체류량은 액체의 유효점도가 증가함에 따라 증가함을 추측할 수 있다.

### 3-3. 액체 점탄성의 영향

Fig. 8과 9는 중간 정도 및 강한 점탄성을 각각 나타내는 xanthan-PAA 혼합 및 PAA 수용액에서의 기체 체류량을 나타낸다. Xanthan-PAA 혼합 수용액과 낮은 농도의 PAA 수용액에서는 불균일 흐름이 지배적으로 나타났으며 이 때 관벽 쪽으로의 편류현상을 심하게 보였다. 반면에 높은 농도의 PAA 수용액에서는 높은 농도의 xanthan 수용액에서와 같이 PAA 농도가 증가함에 따라 높은 기체 체류량을 보였다. 슬러그 흐름영역에서의 점도의 증가에 따른 기체 체류량의 증가로 이러한 경향을 설명할 수 있다.

액체의 점탄성이 기체 체류량에 미치는 영향을 나타내고자 Fig. 10에 수크로오스, xanthan, xanthan-PAA 및 PAA 수용액에서 0.14 m/s의 기체유속에서 측정된 기체 체류량을 유효점도의 함수로서 나타내었다. 강한 점탄성을 나타내는 PAA 수용액의 경우도 액체점도가 증가함에 따라 기체 체류량이 불균일 흐름영역에서 감소한



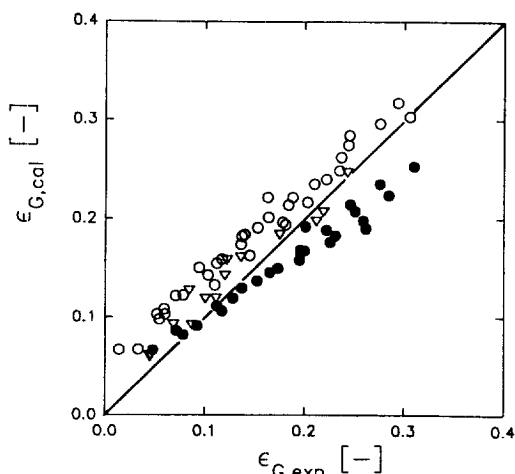


Fig. 11. Comparison of the gas holdups measured in (●) inelastic sucrose, (○) strongly viscoelastic PAA, and (▽) moderately viscoelastic xanthan-PAA solutions to the predictions by Eqs. (17) and (18) developed from gas holdups in weakly viscoelastic xanthan solutions.

후 슬러그 흐름영역에서는 증가하는 경향을 나타내었다. 흐름영역의 전이가 일어나는 유효점도는 강한 점탄성을 나타내는 PAA 수용액의 경우 약한 점탄성의 xanthan 수용액에 비해 높게 나타났음을 알 수 있다. 또한 임의의 유효점도에서 약한 점탄성의 xanthan, 중간 정도의 점탄성을 나타내는 xanthan-PAA 그리고 강한 점탄성의 PAA 수용액 순으로 낮은 기체 체류량을 나타낸다. 따라서 액체의 점탄성이 증가함에 따라 기체 체류량이 감소함을 알 수 있다. Fig. 1에 나타난 거의 같은 실험 조건하에서 측정된 기-액 물질전달계수와 비교하면, 기-액 물질전달계수도 액체의 점탄성이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내나 액체점도의 증가에 따라 불균일 흐름 및 슬러그 흐름의 두 영역 모두에서 감소하는 경향을 나타내었다.

점탄성 수용액에서의 낮은 기체 체류량은 단독기포의 상승속도에 미치는 액체의 점탄성의 영향에 기인한다고 생각할 수 있다. Astarita와 Apuzzo[28]는 점탄성 액체에 있어서 기포의 크기가 증가함에 따라 일정한 임계 부피(약 0.1 cc)에서 단독기포 상승속도가 최고 6배까지 급격히 증가하였다고 보고하였다. 기포의 모양은 작은 부피에서는 종축방향으로 편장된 모양을 나타내다 크기가 증가함에 따라 횡축방향으로 퍼진 spherical cap 모양으로 변하며, 크기에 무관하게 기포의 뒷면에 돌출부를 갖는다고 보고하였다. 본 연구에서는 직경이 기포탑의 직경(0.15 m)에 비교되는 커다란 기포도 강한

점탄성을 나타내는 높은 농도의 PAA 수용액에서는 종축방향으로 편장되고 뒷면이 볼록하며 돌출부를 갖는 모양을 나타내었다. 반면에 약한 점탄성을 나타내는 xanthan 수용액에서는 뒷면에 돌출부가 없는 spherical cap 모양의 기포 슬러그를 관찰할 수 있었다. 이러한 강한 점탄성 액체에서의 독특한 기포 모양을 근거로, Astarita와 Apuzzo의 작은 기포에서의 결과를 본 연구에 확장 적용하면 액체의 점탄성이 단독기포의 상승속도를 증가시켜 낮은 기체 체류량을 유발한다고 추측할 수 있다.

Fig. 11은 수크로오스, xanthan-PAA 그리고 PAA 수용액에서 측정된 기체 체류량의 실험치와 xanthan 수용액의 불균일 흐름영역과 슬러그 흐름영역에서의 기체 체류량으로부터 얻은 상관식 식 (17)과 (18)에 의한 계산치를 비교한 그림이다. 비탄성 액체인 수크로오스 수용액에서의 기체 체류량은 약한 점탄성을 나타내는 xanthan 수용액으로부터 얻은 식 (17)에 의해 평균 15%의 오차를 가지고 전체적으로, 특히 높은 기체 유속에서, 낮게 예측되었다. 따라서 보통 무시되는 CMC 수용액 정도의 점탄성을 나타내는 xanthan 수용액의 점탄성 범위 내에서 기체 체류량은 상당히 변화함을 알 수 있다. 이러한 점탄성의 영향이 앞에서 기술한 본 연구의 실험치와 문헌에 보고된 식들의 계산치와의 차이를 설명할 수 있는 이유 중 하나일 것이다. 강한 점탄성의 PAA 수용액에서 측정된 기체 체류량은 식 (17)과 (18)로부터 평균 43%의 오차를 가지고 전체적으로 높게 예측되었다.

#### 4. 결 론

점성 및 점탄성 액체를 이용한 기체 체류량에 관한 이상의 정성적인 결과로부터 다음과 같은 결론을 요약 정리할 수 있다.

(1) 액체의 점도가 증가함에 따라 균일 흐름영역에서 불균일 흐름영역으로 그리고 슬러그 흐름영역으로 전이가 일어났다. 불균일 흐름영역에서 슬러그 흐름영역으로의 전이가 일어나는 유효점도는 기체유속이 증가함에 따라 감소하였고 강한 점탄성 액체의 경우 약한 점탄성 액체에 비해 높게 나타났다.

(2) 기체 체류량은 액체점도가 증가함에 따라 불균일 흐름영역에서는 감소한 후 슬러그 흐름영역에서는 증가하였다.

(3) 액체의 점탄성은 기체 체류량을 감소시키는 영향을 나타냈다. 즉 일정한 기체유속과 액체점도에서 기체 체류량은 비탄성 액체인 수크로오스 수용액, 약한 점탄성의 xanthan 수용액, 중간 정도의 점탄성을 나타

내는 xanthan-PAA 혼합 수용액 그리고 강한 점탄성의 PAA 수용액의 순으로 낮은 값을 나타내었다. 특히 보통 무시되는 점탄성의 범위 내에서 기체 체류량은 상당한 변화를 보였다.

## 감 사

본 연구는 Braunschweig 소재의 Gesellschaft fuer Biotechnologische Forschung mbH에서 수행되었으며 W.-D. Deckwer 교수와 Braunschweig 공과대학교의 A. Schumpe 교수의 조언에 감사드립니다.

## 사용기호

a : specific gas-liquid interfacial area referred to gas-liquid dispersion volume [1/m]  
 $d_B$  : bubble diameter [m]  
 $D_C$  : column diameter [m]  
 $D_{H_2O}$  : molecular diffusivity of oxygen in water [m<sup>2</sup>/s]  
 $D_L$  : molecular diffusivity of oxygen [m<sup>2</sup>/s]  
 $h$  : height above gas distributor the gas holdup is characteristic for [m]  
 $H_{GL}$  : height of gas-liquid dispersion [m]  
 $H_{L0}$  : height of clear liquid [m]  
 $k$  : fluid consistency factor [Pa s<sup>n</sup>]  
 $k_{La'}$  : volumetric gas-liquid mass transfer coefficient referred to liquid volume [1/s]  
 $n$  : flow behavior index [-]  
 $N_1$  : first normal stress difference [Pa]  
 $P$  : pressure [Pa]  
 $u_B$  : bubble rising velocity in the bubble swarms [m/s]  
 $u_G$  : superficial gas velocity [m/s]

## 그리스 문자

$\dot{\gamma}$  : shear rate [1/s]  
 $\epsilon_G$  : holdup of bubbles larger than about 1 mm [-]  
 $\epsilon_{G,t}$  : total gas holdup [-]  
 $\epsilon_{G,vs}$  : holdup of very small bubble smaller than 1 mm [-]  
 $\mu$  : viscosity [Pa s]  
 $\rho$  : density [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\sigma$  : surface tension [N/m]  
 $\tau$  : shear stress [Pa]

## 하첨자

cal : values calculated by correlation

eff : effective

exp : values observed experimentally

G : gas

L : liquid

t-s : transition of heterogeneous(churn-turbulent) flow regime into slug flow regime

## 참고문헌

- Deckwer, W.-D.: "Reaktionstechnik in Blasensaulen", Salle + Sauerlaender, Frankfurt am Main (1985).
- Deckwer, W.-D.: "Bubble Column Reactors", John Wiley & Sons, New York(1992).
- Suh, I.-S., Schumpe, A. and Deckwer, W.-D.: *Biotechnol. Bioeng.*, **39**, 85(1992).
- Haque, M. W., Nigam K. D. P. and Josh, J. B.: *Chem. Eng. Sci.*, **41**, 2321(1986).
- Nishikawa, M., Kato, H. and Hashimoto, K.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **16**, 133(1977).
- Godbole, S. P., Honath, M. F. and Shah, Y. T.: *Chem. Eng. Commun.*, **16**, 119(1982).
- Schumpe, A. and Deckwer, W.-D.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **21**, 706(1982).
- Kawase, Y. and Moo-Young, M.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**, 933(1987).
- Schumpe, A. and Deckwer, W.-D.: *Bioprocess Eng.*, **2**, 79(1987).
- Godbole, S. P., Schumpe, A., Shah, Y. T. and Carr, N. L.: *AIChE J.*, **30**, 213(1984).
- Bach, H. F. and Pilhofer, T.: *Ger. Chem. Eng.*, **1**, 270(1978).
- Schumpe, A., Singh, C. and Deckwer, W.-D.: *Chem. Ing. Tech.*, **57**, 988(1985).
- Franz, K., Buchholz, R. and Schuegerl, K.: *Chem. Eng. Commun.*, **5**, 165(1980).
- Buchholz, H., Buchholz, J., Luecke, J. and Schuegerl, K.: *Chem. Eng. Sci.*, **33**, 1061(1978).
- Deckwer, W.-D., Nguyen-tien, K., Schumpe, A. and Serpemen, Y.: *Biotechnol. Bioeng.*, **24**, 461(1982).
- Schumpe, A. and Patwari, A.-N.: *Chem. Ing. Tech.*, **57**, 847(1985).
- Nicklin, D. J., Wilkes, J. O. and Davidson, J. F.: *Trans. Instn Chem. Engrs*, **40**, 61(1962).
- Akita, K. and Yoshida, F.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **12**, 76(1973).
- Nakanoh, M. and Yoshida, F.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **19**, 190(1980).
- Suh, I.-S., Schumpe, A., Deckwer, W.-D. and Kuli-

- cke, W.-M.: *Can. J. Chem. Eng.*, **69**, 506(1991).
21. Heijnen, J. J., Van't Riet, K. and Wolhuis, A. J.: *Biotechnol. Bioeng.*, **22**, 1945(1980).
22. Michele, H.: *Rheol. Acta*, **16**, 413(1977).
23. Weiss, R. G., Foster, N. R. and Clark, K. N.: *Can. J. Chem. Eng.*, **63**, 173(1985).
24. Philip, J., Proctor, J. M., Niranjani, K. and Davidson, J. F.: *Chem. Eng. Sci.*, **45**, 651(1990).
25. Bhaga, D. and Weber, M. E.: *Chem. Eng. Sci.*, **35**, 2467(1980).
26. Narayanan, S., Goossens, L. H. J. and Kossen, N. W. F.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 2071(1974).
27. Crabtree, J. R. and Bridgewater, J.: *Chem. Eng. Sci.*, **26**, 839(1971).
28. Astarita, G. and Apuzzo, G.: *AIChEJ.*, **11**, 815(1965).