

사용후 소듐처리 물모의 실험

Experiment on the Water Mock-up
for a Sodium Waste Treatment Process

KAERI

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2010년도 “제4세대 소듐냉각 고속로 핵심기반기술 개발”
대과제의 한 분야인 “소듐 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험” 과제의
기술보고서로 제출합니다.

2010년 12월



KAERI

주저자: 남 호 윤

공저자 : 김 종 만

김 병 호

이 용 범

요 약 문

실험에 재사용이 불가능한 소듐을 처리하기 위한 한 방안으로 소듐을 가성소다 용액(NaOH)과 반응시켜 가성소다로 만들고 이를 중화시켜 처분하는 기술이 개발되고 있다. 이 방법에는 소듐을 가성소다로 채워진 반응기 내부로 분사시켜 반응시킬 때에 반응성을 균일하게 하기 위하여 분무노즐을 이용해 질소가스와 같이 분사시킴으로써 소듐을 미립화시켜 반응시킨다.

이와 같은 현상은 소듐을 사용하는 실험에서는 관찰, 측정할 수 없기 때문에 소듐을 사용하는 실험 전에 물로 모의하는 실험을 수행하여 결과를 소듐실험에 활용하고자 한다. 이 실험에서는 질소와 색소로 이루어지는 분사의 조건, 순환수의 유동조건 및 순환수가 반응용기로 주입되는 위치와 방향 등이 유체적 혼합에 미치는 영향을 사진을 촬영하여 분석하였고, 300 세트의 실험자료를 이용하여 최적의 유체적 조건을 도출하였다.

KAERI

SUMMARY

As a treatment method of the waste sodium which was produced from a sodium facility, an investigation for a reaction procedure of the waste sodium with the sodium hydroxide has been developed. The sodium was injected into a reaction vessel filled with a caustic soda through an atomizing nozzle to maintain the reaction uniformly. There were complex reacting phenomena in the system to observe with a naked eye. Therefore, a water mock-up was carried out for a practical use the data got in the waste sodium treatment test. The major experimental parameters are the flowrate of water through an atomizing nozzle and the recirculation rate. In addition, the positions and flow directions of the nozzles are important parameters, also. From this experiment, 300 sets of data were obtained by analyses of the phenomena of the photographic records, and the optimum flowing conditions.

목 차

요약문	-----	i	
Summary	-----	ii	
표목차	-----	iv	
그림목차	-----	v	
제 1 장	서 론	-----	1
제 2 장	실험장치	-----	3
2.1	실험장치의 구성	-----	3
2.2	실험부	-----	7
2.3	분무노즐 및 순환수노즐	-----	12
2.4	실험방법 및 매트릭스	-----	23
제 3 장	실험결과	-----	28
3.1	분무노즐의 영향	-----	24
3.2	순환수의 영향	-----	46
3.3	다공판의 영향	-----	59
제 4 장	결 론	-----	69
참고문헌	-----	70	

표 목 차

표 1	실험인자 및 범위 -----	24
표 2	실험 매트릭스-----	25
표 3	최적 주입조건 -----	67



그림 목 차

그림 1	실험장치의 개념도-----	4
그림 2	실험장치의 사진 -----	6
그림 3	반응용기의 형상과 규격 -----	8
그림 4	색소주입 탱크 -----	9
그림 5	실험부 지지대 -----	11
그림 6	분무노즐 개념도 -----	13
그림 7	분무노즐 각 부분의 구조 -----	14
그림 8	분무노즐 출구의 형상 -----	15
그림 9	분무노즐 분해형상과 조립형상 -----	16
그림 10	분무노즐에 설치한 가열기 및 열전대 -----	17
그림 11	순환수 노즐 type-1 의 형상과 규격 -----	19
그림 12	노즐 마개 -----	20
그림 13	순환수 노즐 type-2-----	21
그림 14	Sight panel 의 규격 -----	22
그림 15	순환수만을 순환시킬 때 생성된 와류 -----	29
그림 16	질소가스 분무에 의한 와류의 소멸 -----	31
그림 17	색소만 0.6 g/s 로 유입될 때 시간에 따른 분사현상 -----	32
그림 18	색소만 2.4 g/s 로 유입될 때 시간에 따른 분사현상 -----	33
그림 19	순환수가 없을 때 분무노즐(80°)에서의 분사현상 -----	35
그림 20	순환수가 없을 때 분무노즐(63°)에서의 분사현상 -----	36
그림 21	순환수가 없을 때 분무노즐(36°)에서의 분사현상 -----	37
그림 22	순환수가 없을 때 분무노즐(15°)에서의 분사현상 -----	38

그림 23	순환수가 없을 때 1.2 g/s 색소와 질소가스 주입시간에 따른 현상 -----	41
그림 24	순환수가 없을 때 3.0 g/s 색소와 질소가스 주입시간에 따른 현상 -----	42
그림 25	질소가스의 주입량에 따른 색소의 혼입상태 -----	43
그림 26	순환수 0.55 l/s 일 때, 질소가스 주입량에 따른 분무상태 -	45
그림 27	질소가스 분무상태(1.0l/s)에서 순환수노즐 type-1의 영향-	47
그림 28	순환수노즐 각도 30°일 경우 질소가스 유량에 따른 혼합상태 -----	49
그림 29	순환수노즐 각도 45°일 경우 질소가스 유량에 따른 혼합상태 -----	50
그림 30	순환수노즐 각도 60°일 경우 질소가스 유량에 따른 혼합상태 -----	51
그림 31	분무노즐과 순환수노즐 높이차이 100mm에서 분무상태 ---	53
그림 32	분무노즐과 순환수노즐 높이차이 200mm에서 분무상태 ---	54
그림 33	분무노즐 하부에서의 순환수 유입 -----	55
그림 34	질소가스 0.5 l/s에서 순환수의 유량에 따른 유동분포 ----	57
그림 35	순환수 0.3l/s, 질소가스 0.8l/s 일 때 색소주입량에 따른 분사상태 -----	58
그림 36	순환수 유량 0.35l/s 에서 다공판-2을 설치하였을 때 질소가스 분포 -----	60
그림 37	순환수 유량 0.35l/s 에서 다공판-1을 설치하였을 때 질소가스 분포 -----	61
그림 38	다공판을 설치한 경우 순환수 유량에 따른 기포의 분포 ---	63
그림 39	순환수노즐과 다공판 간의 간격에 따른 분무상태 -----	64
그림 40	수위에 따른 질소가스 자유액면 요동상태 -----	66
그림 41	선정한 유체적 최적조건에서 색소의 혼합 상태 -----	68

1 장 서 론

소듐을 냉각재로 사용하는 고속로가 GEN-IV의 차세대 노형의 하나로 채택되어 있다. 소듐은 고속로의 냉각재로서 핵적, 열유체적 특성은 매우 높으나 화학적 활성이 강하여 공기, 물 등과 반응함으로써 이 고속로의 개발에 문제점을 제기하고 있다. 다양한 실험시설과 원자로에서 나오는 사용한 소듐을 안전하게 처리하는 것은 매우 중요하여 원자로 설계단계에서부터 고려하고 있으며, 오염된 소듐을 안전하게 처리할 수 있도록 계통을 단순화하고, 효율화하는 연구들이 수행되고 있다.

국내에서는 1990년대부터 소듐을 사용하여 다양한 기초실험과 전산코드 검증에 관한 연구가 수행되고 있으며, 앞으로 대형 검증실험을 준비하고 있어 그 과정에서 발생한 오염된 소듐을 처리하는 문제가 심각하게 대두되고 있다. 지금까지 외국에서 제안한 방법으로는 활성이 강한 소듐을 보다 안전한 물질로 전환한 후 저장하는 방법들을 제안하고 있다. 소듐을 처리하는 기술현황을 분석하여 지금의 시점에 적합한 기술을 선정한 바 있다[1].

이 기술은 프랑스에서 개발하여 Rhapsodie 고속로와 PFR 고속로의 폐 소듐을 처리한 바 있는 NOAH 공정과 같은 방법으로 이를 개량한 것이다. NOAH 공정[2]은 대량으로 채워진 50% 정도의 NaOH 용액에 소량의 소듐을 연속적으로 주입하면서 NaOH 용액과 반응시켜 소듐을 NaOH 으로 변환시키는 공정이다. 이 반응은 서서히 일어나므로 급격한 폭발성을 배제할 수 있다. 그러나 반응 시에 수소와 열이 발생하므로 밀폐된 용기에서 처리하며, 온도의 상승을 방지하기 위하여 용액을 순환시키면서 냉각시켜 60°C 정도로 유지시킨다. 이 때에 물을 공급하고, 산성용액으로 중화시켜 용액의 농도를 10 mole/liter 로 유지시킨다.

이 공정은 원리가 간편하고, 안전성, 작업의 단순성, 시설의 조밀성에 있어서 좋은 장점을 갖고 있지만 용액의 상부에서 소듐을 주입하는데, 소듐이

용액보다 비중이 적은 관계로 소듐이 용액의 상부에 적체되어 균일한 반응이 일어나지 않거나 적체된 다량의 소듐이 순간적으로 용액과 반응하는 문제가 있었다. 일본에서는 이 문제를 개선하기 위하여 용기의 측면, 용액의 자유액면보다 하위에서 노즐을 사용하여 NaOH 용액으로 소듐을 직접 주입하는 방법을 개발하고 하였다[3]. 이 공정은 소듐과 NaOH 의 혼합이 용이한 반면에 소듐이 응고하여 주입노즐이 폐쇄할 가능성이 높은 단점을 가지고 있다. 따라서 소듐의 고착을 방지할 목적으로 고온의 질소가스를 소듐과 동시에 주입하는 방법을 개발하여 주입하는 소듐의 온도, 주입량, 분무가스의 양 및 NaOH 용액의 농도를 실험인자로 실험을 수행하였다.

이 방법은 여러 면에서 폐소듐을 처리하는 좋은 방법으로 간주되지만, 이 실험에서 여러 실험인자들의 영향이 복잡하고 아직 개발 중이다. 본 연구에서는 기본적으로 이 방법을 채택하여 문제점을 개선하고, 최적조건을 찾을 예정이다. 최적조건으로는 소듐이 반응용기의 중심부에서 균일하게 반응하는 것으로, 분무노즐의 영향이 크다. 본 연구에서는 와류를 일으키게 나선형으로 주입되는 분무노즐과 혼합이 잘 되는 방법들을 고안하였다.

소듐을 사용하는 본 실험에 앞서 유체적으로 이 방법의 타당성과 유체적 최적조건을 찾기 위하여 물로 모의하는 실험을 수행하였다. 최적조건은 소듐과 용액이 균일하게 반응하면서도, 반응하지 않은 소듐이 용기하부의 순환수 노즐로 유입되지 않는 조건, 반응이 용기의 벽면에서 일어나지 않는 조건 및 주입하는 질소가스에 혼입하여 반응하기 전에 용액의 자유액면 위로 부상하여 적체되지 않는 조건이다. 가장 중요한 조건인 분무노즐에서 소듐이 응고하지 않는 조건은 소듐 실험에서 측정이 가능하다. 이 연구에서는 유체적 최적조건을 도출하기 위한 실험을 수행하였다.

제 2 장 실험장치

2.1 실험장치의 구성

실험에 재사용이 불가능한 소듐을 처리하기 위한 한 방안으로 소듐을 가성소다 용액(NaOH)과 반응시켜 가성소다로 만들고 이를 중화시켜 처분하는 기술이 개발되고 있다. 이 방법에는 소듐을 가성소다로 채워진 반응기 내부로 분사시켜 반응시킬 때에 반응성을 균일하게 하기 위하여 분무노즐을 이용해 질소가스와 같이 분사시킴으로써 소듐을 미립화시켜 반응시킨다.

반응이 안정되고 효율적으로 일어나기 위해서는 유체적으로 다음의 3 가지 조건이 형성되어야 한다. 첫째로는, 가성소다는 부식성이 강한 물질이기 때문에 분사형태로 이루어지는 반응이 용기의 벽면에서 일어나지 않게 분사가 맞은 편 벽면에 닿지 않아야 한다. 둘째로는, 가성소다 용액을 냉각시키고 중화시키기 위하여 순환시키는 순환수 배관으로 반응하지 않은 소듐이 빨리 들어가 배관 내에서 반응이 일어나지 않아야 한다. 셋째로는, 질소가스의 부력에 의해 반응하지 않은 소듐이 가성소다 용액의 표면위로 분출되어 적체되지 않아야 한다.

이와 같은 현상은 소듐을 사용하는 실험에서는 관찰, 측정할 수 없기 때문에 소듐을 사용하는 실험 전에 물로 모의하는 실험을 수행하여 결과를 소듐실험에 활용하고자 한다. 그러므로 이 실험의 목적은 질소와 소듐으로 이루어지는 분사의 조건, 순환수의 유동조건 및 순환수가 반응용기로 주입되는 위치와 방향 등 최적의 유체적 조건을 도출하는 것이다.

실험에서는 소듐 대신 식용 붉은 색소를 물에 용해하여 사용하였다. 실험장치는 크게 실험부(반응기), 색소 공급계통, 물 순환계통, 가스 공급계통 등으로 구성된다. 그림 1 은 실험장치의 개념도이다. 분무노즐은 색소공급과 질소가스 공급이 동시에 이루지는 노즐이다. 실험에서 주요인자는 질소가스 공급량, 분무노즐 위치, 순환수노즐 위치, 순환수량 등이다.

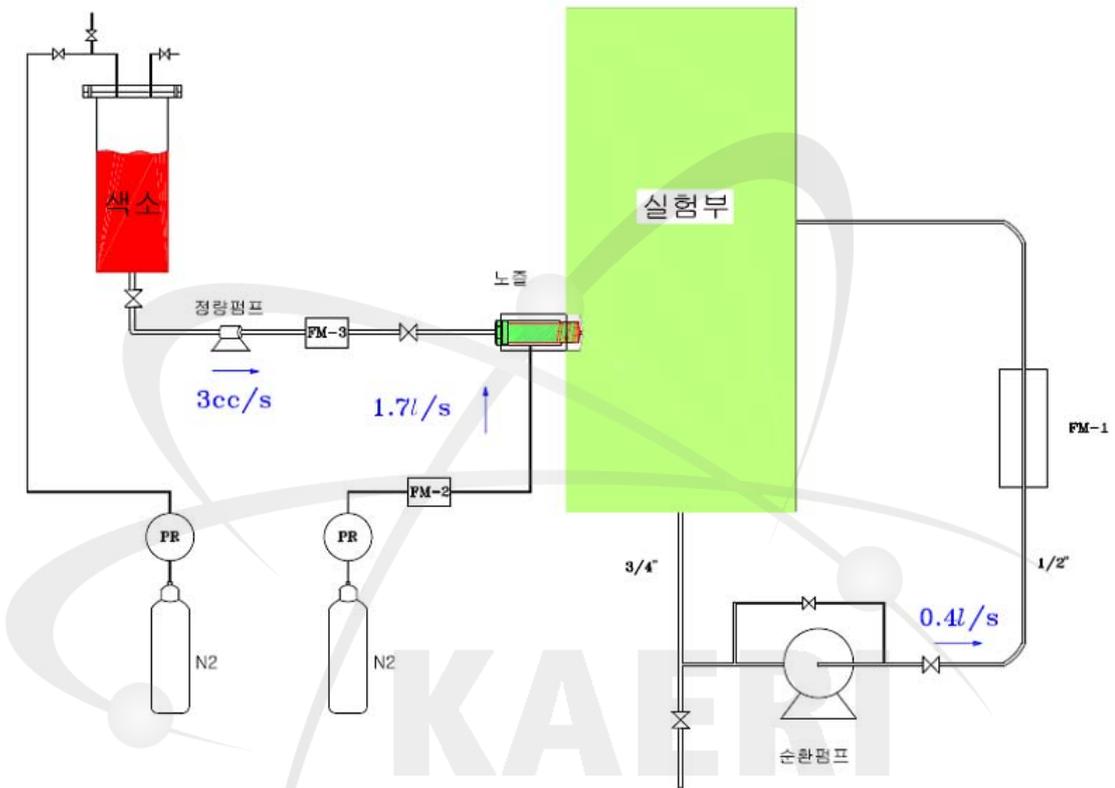


그림 1 실험장치의 개념도

질소탱크, 색소주입탱크, 정량펌프와 분무노즐로 구성되는 색소공급 계통은 1/4 인치 튜브로 구성되며, 분무노즐의 위치를 용이하게 변경시킬 수 있도록 노즐과 밸브 사이는 호스로 연결하였다.

질소탱크와 유량계(FM-2)로 연결되는 가스공급 계통은 1/4 인치 튜브로 배관하고, 유량계와 노즐 사이는 고압 호스로 연결하였다. 순환펌프와 유량계 FM-1 으로 구성되는 물순환 계통에는 펌프의 양단에 바이패스 관을 설치하여 순환하는 유량을 조절하였다. 주배관에는 ON/OFF 밸브를 설치하였고, 바이패스 배관에는 1/2 인치로 그로브 밸브를 설치였다. 펌프 유입구 부분의 배관은 1/2 인치 스테인레스 스틸 관을 사용하였다. 유량계(FM-1)와 실험부 사이에는 순환수 유입구의 위치를 용이하게 바꿀 수 있도록 호스를 사용하여 배관하고, quick connector 로 순환수 주입노즐과 연결하였다.

순환수계통에서 유량계 FM-1 은 낮은 유량에서는 HJ-HITECH 모델 KTM-800 마그네틱 유량계를 사용하였고, 높은 유량에서는 프로팅 유량계를 사용하였다. 질소를 공급하는 배관에 설치한 FM-2 유량계는 HJ-HITECH 모델 TSM-120 질량유량계를 사용하였다. 소량의 색소를 주입시키는 정량펌프는 3cc/sec 로 정밀하게 용액을 주입할 수 있는 인재상사 모델 QVRH1CKC 이고, 이 배관에 설치된 FM-3 유량계는 BRONCHOST 모델 L30-AAD-22-O 질량유량계이다. 그림 2 는 설치한 실험장치의 사진이다.



그림 2 실험장치의 사진

2.2 실험부

실험부는 투명한 아크릴 원통으로 그림 3 과 같은 규격으로 제작하였다. 외경 400mm, 두께 8mm, 높이 1200mm 이고, 직경의 오차는 1mm 이내이었다. 분무노즐의 타당한 위치를 선정하기 위하여 반응기의 하부에서 200mm 위치에서부터 중심간의 거리 200mm 간격으로 분무노즐을 세 곳에 설치하였다. 분무노즐은 그림 6-10 에 도시하였고, 상세한 규격에 대해서는 2.3 항에서 기술하였다. 분무노즐의 직경은 46mm 이며 소켓에 나사로 삽입하여 실험부에 부착하였다.

순환수 주입노즐(순환수노즐)의 적절한 모양과 위치를 선정하기 위하여 2 종의 순환수노즐 type-1 과 type-2 을 설치하는데, type-1 순환수노즐 2 개는 분무노즐과 정반대되는 위치에서 높이 400mm, 600mm 곳에 설치하였다. Type-2 순환수노즐 3 개를 실험부의 후면에, 분무노즐과 90° 각도로, 각각 높이 300mm, 600mm, 800mm 위치에 설치하였다. 순환수노즐에 대해서도 2.3 항에서 상세히 기술하였다.

실험부의 전방에는 사진촬영을 위하여 투명 아크릴로 Sight Panel 을 만들어 물을 채웠다. Sight Panel 은 상부는 열려있는 상태로 제작하였으며, 하부에는 배수가 가능하게 배관하고, 밸브를 설치하였다. 실험부의 하부에는 순환수 순환과 배수에 사용하기 위하여 1.25"×1/2" reducer 를 설치하였다. 실험부의 상부와 하부에는 원통을 보호하고, 지지대에 고정하기 위하여 두께 2mm, 폭 50mm 스테인레스 강판으로 띠를 설치하였다.

그림 4 는 색소주입탱크를 도시하고 있다. 색소주입탱크는 실제 소듬을 사용하는 실험에서는 폐기할 소듬을 저장하고, 반응용기로 보내기 위한 탱크로 소듬이 주입되는 형상을 모의하기 위하여 빨간 식용색소를 물에 용해하여 사용하였다. 색소를 주입한 물을 정량펌프나 또는 질소가스로 가압하여 실험부에 주입하기 위하여 5 기압으로 설계하였다. 내경 200mm, 높이 500mm 인 투명 아크릴로 제작하였고, 상부에는 플렌지를 부착하였다.

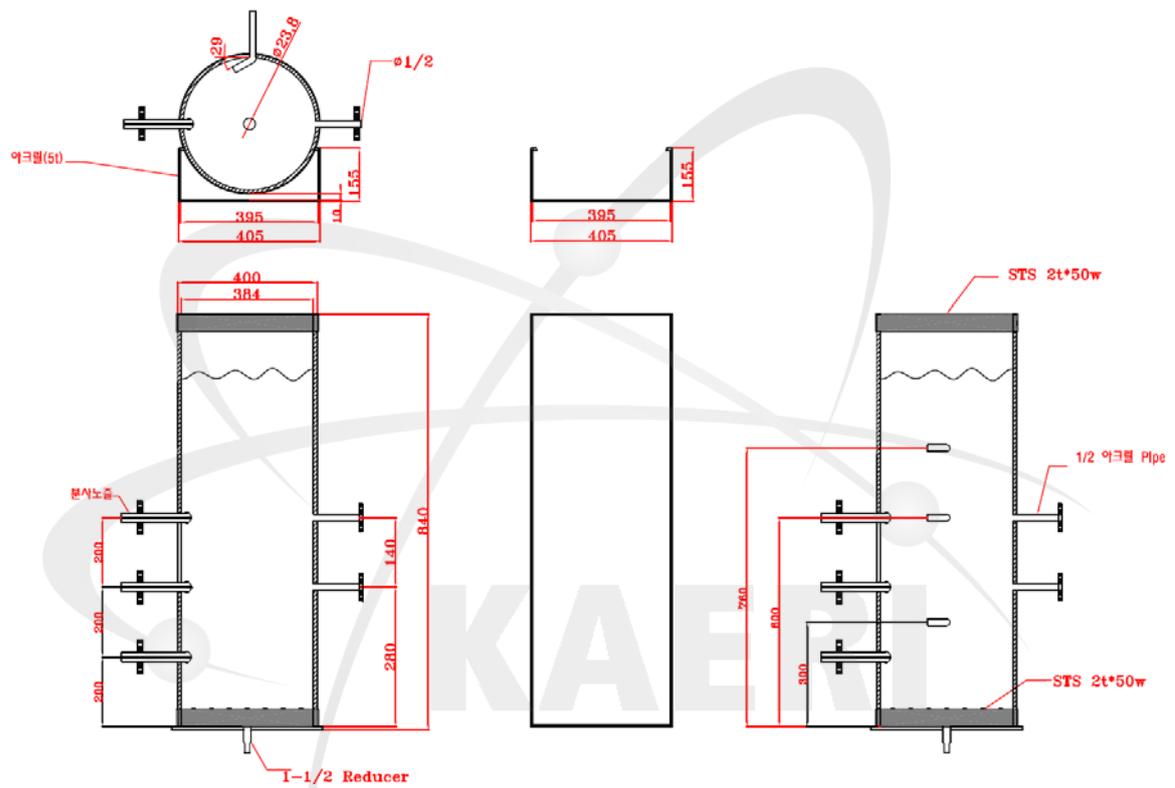


그림 3 반응용기의 형상과 규격

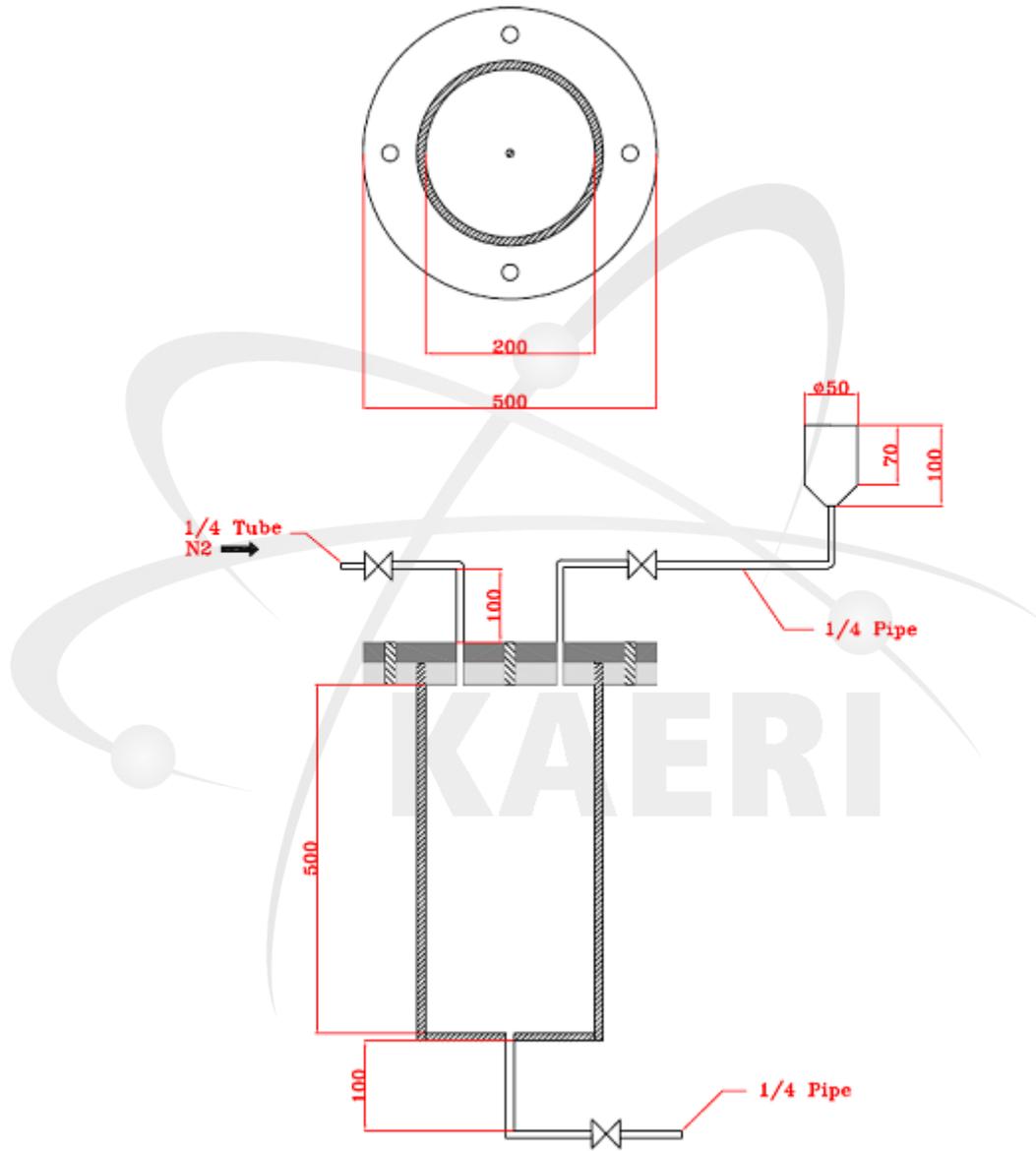


그림 4 색소주입 탱크

상부에는 질소 주입을 위한 1/4 인치 튜브 배관과 색소를 주입하기 위한 1/4 인치 파이프 배관을 설치하였고 색소주입을 용이하게 하기 위하여 주입구를 설치하였다. 색소 주입구는 직경 50mm 높이 100mm 로 아크릴로 만들었다.

그림 5 는 실험부 지지대를 도시하고 있다. 두께 5mm 인 60x60mm 인 스테인레스 스틸 앵글로 높이 700mm 되게 만들었고, 실험부를 그 위에 고정시켰다.



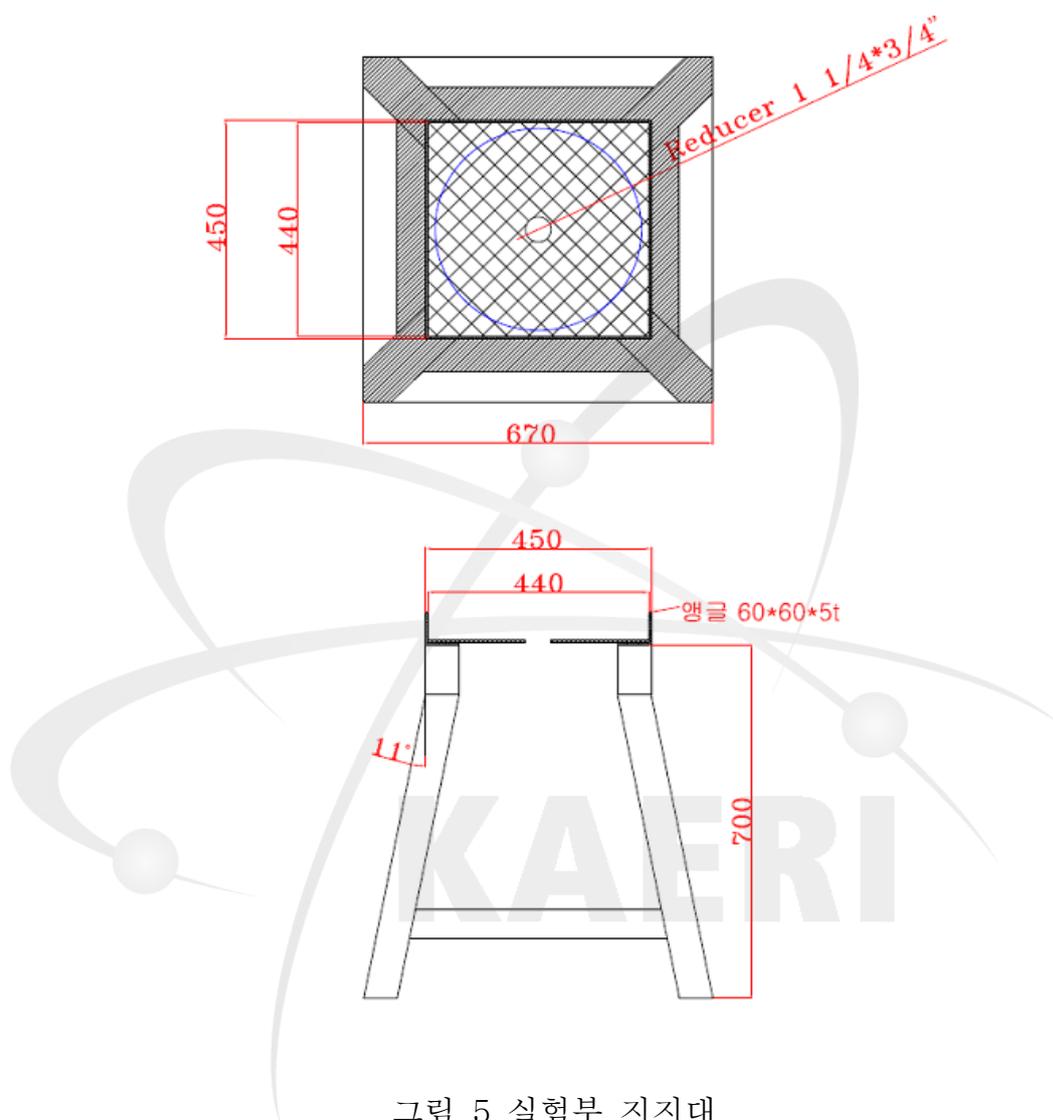


그림 5 실험부 지지대

2.3 분무노즐 및 순환수노즐

그림 6 은 분무노즐의 개념도이다. 이 노즐은 소뿔을 사용하는 실험에 활용할 목적으로 SS316 으로 제작하였으며, 물로 모의하는 실험에서도 동일한 분무노즐을 사용하였다. 분무노즐의 외경은 $\Phi 46\text{mm}$, 길이는 110mm 이고 실제로는 용접으로 부착하지만 이 실험에서는 소켓에 나사로 삽입하였다.

이 노즐의 형상과 각 부분의 구조는 그림 7 에 도시하였다. 형상은 외부 원통에 내부 원형봉을 삽입한 형태이다. 내부 원형봉의 중심에는 소뿔(색소)을 주입하는 1/4 인치 튜브를 삽입하여 부착하였고, 원형봉의 주위에는 노즐을 가열하는 봉형 가열기가 들어가는 3 개의 홀과 열전대가 들어가는 홀이 뚫려 있다. 봉형 가열기의 직경은 9mm 이며, 가열기당 30W 이다. 열전대가 들어가는 홀의 직경은 3mm 이다. 외부원통에는 측면에서 질소가스를 주입하는 1/4 인치 튜브가 설치되고, 이 튜브에서 주입된 질소는 외부원통과 내부 원형 봉 사이의 틈을 지나 내부 원형 봉의 외벽에 나선형으로 제작한 홈을 통과하여 노즐출구에서 분사된다. 이 나선형 홈은 실험부 주입시 분사각을 넓히기 위해 설치하였다.

200mm 간격으로 3 개의 소켓을 설치하였으며, 한 개는 분무노즐을 삽입하여 연결하고, 다른 두 개는 마개로 막는다. 소켓은 외경 76mm 이며 길이는 40mm 이다. 높이는 하부에서 200mm , 400mm , 600mm 에 소켓 세 개를 노즐의 끝 부분이 벽면에서 10mm 나오게 설치하였다. 분무노즐의 각도는 분사형태를 결정하는 중요 변수이므로 15° , 36° , 63° 및 80° 각도를 갖는 4 종의 분무노즐을 제작하였다.

그림 8 에서 그림 10 까지는 실제 제작한 분무노즐의 사진을 보여주고 있다. 그림 8 에서는 중심의 홀에서는 소뿔이 분사되고, 환형 홀에서는 질소가스가 분사된다. 그림 9 는 분무노즐을 분해한 형태와 조립한 형태이다. 가열기와 열전대가 설치되는 중심의 봉과 외부는 질소가스의 통로가 되는 파이프 형이다. 그림 10 은 분무노즐에 열전대와 가열기를 설치한 형태이다.

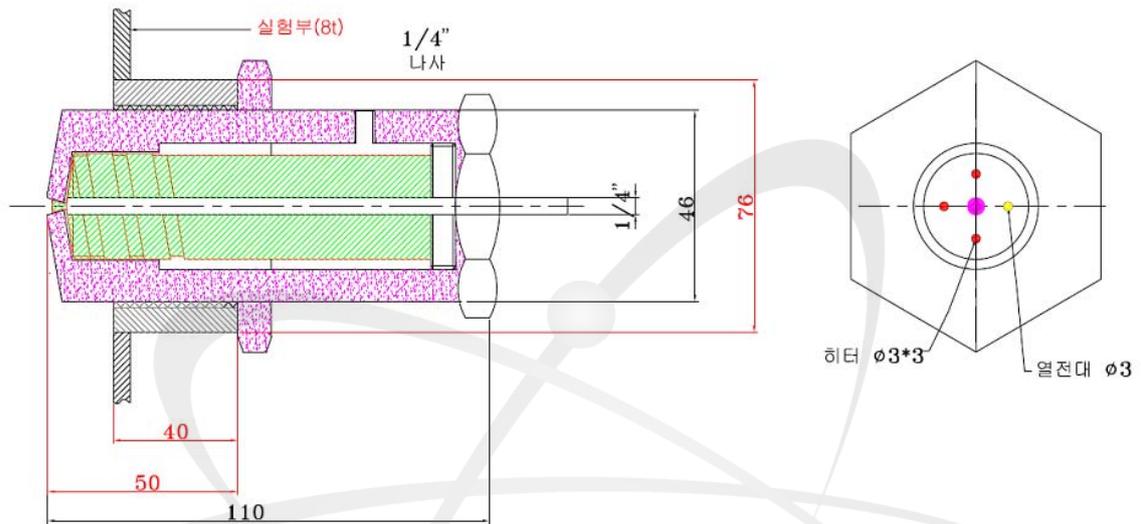


그림 6 분무노즐 개념도

KAERI

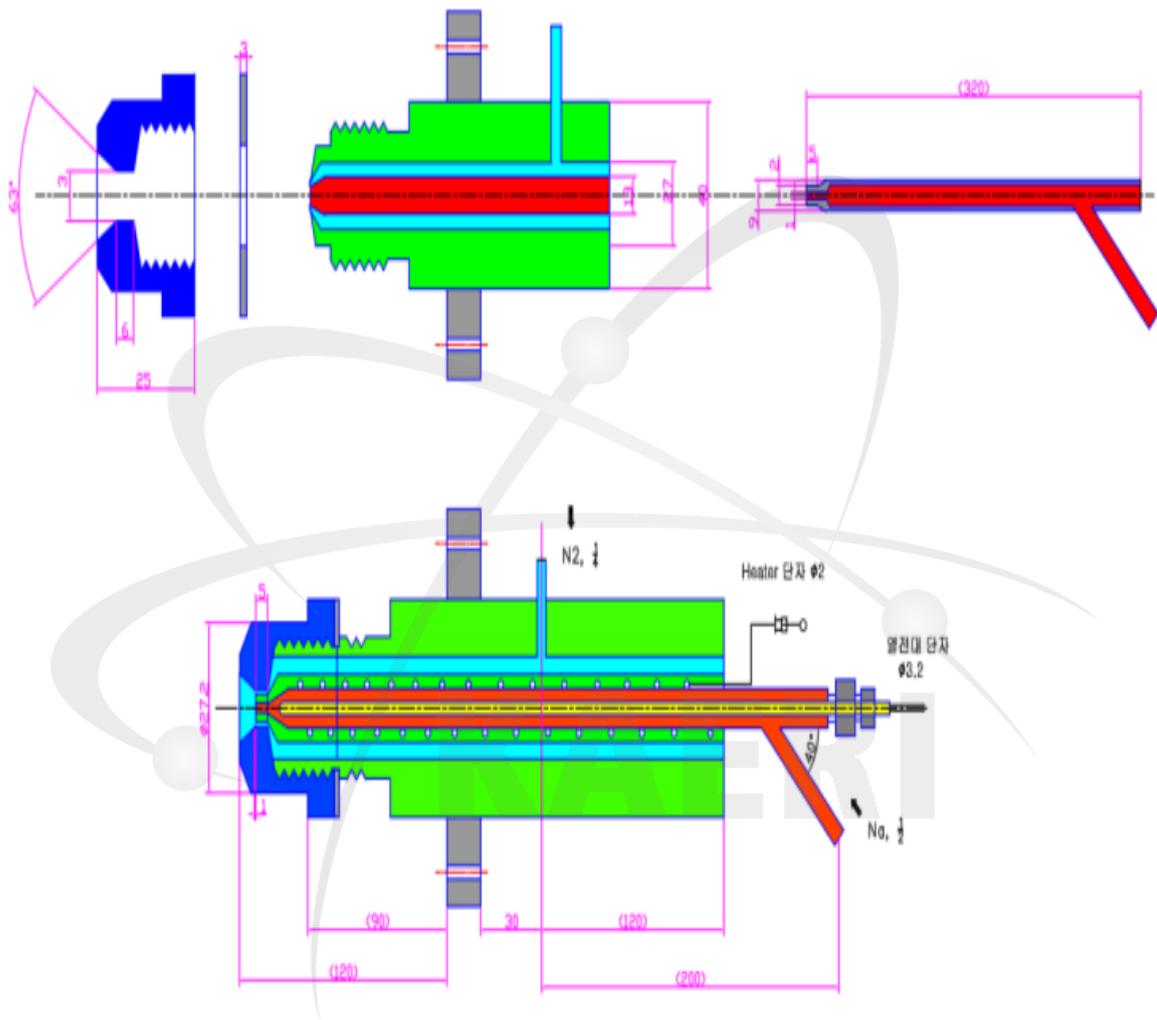


그림 7 분무노즐 각 부분의 구조

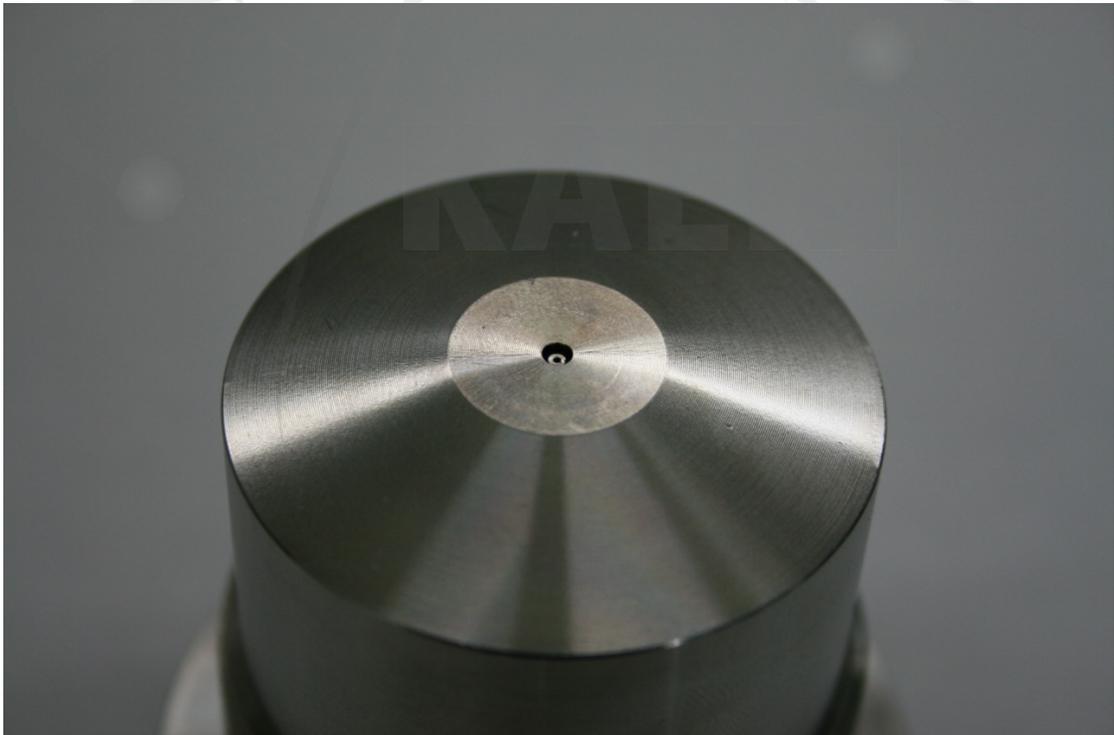


그림 8 분무노즐 출구의 형상

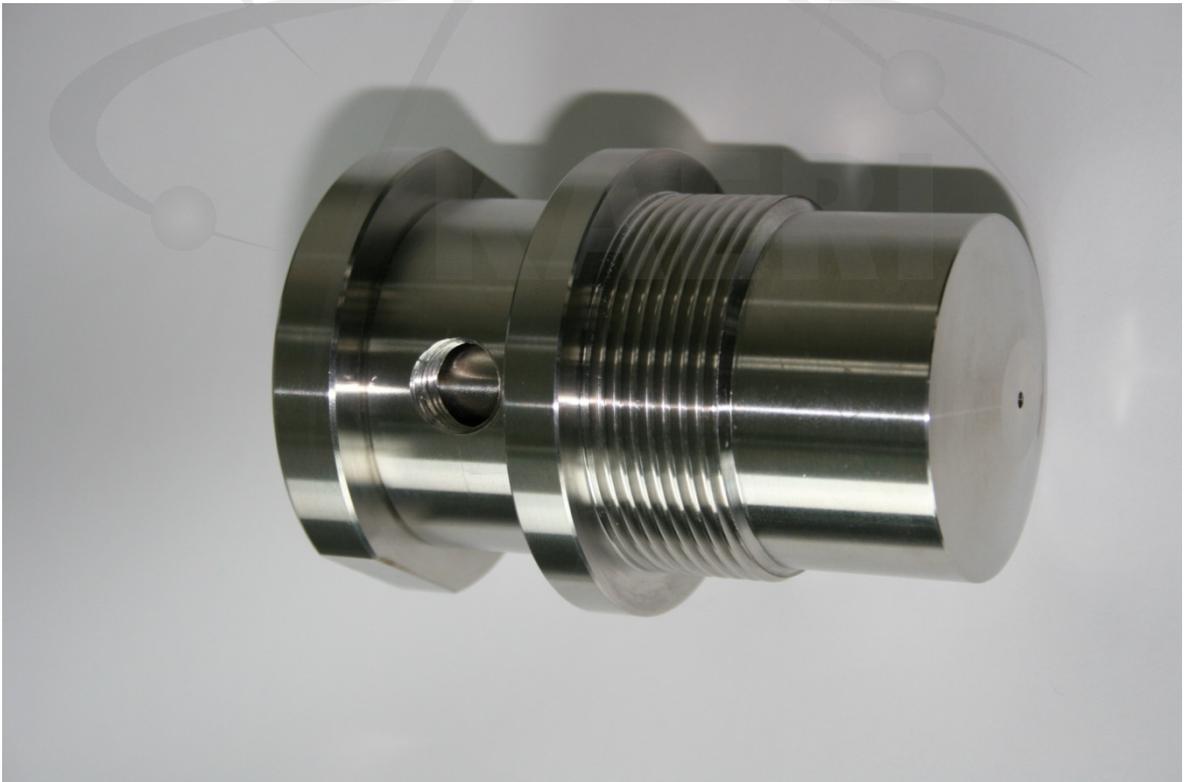


그림 9 분무노즐 분해형상과 조립형상



그림 10 분무노즐에 설치한 가열기 및 열전대

순환수노즐은 앞에서 기술한 바와 같이 두 종류(type-1 과 type-2)가 있는데, 모두 호스의 연결이 용이하고 사용하지 않을 시에 별도의 마개가 필요 없는 quick connector 구조로 만들었다. 분무노즐의 맞은 편에 설치하는 type-1 순환수노즐의 상세한 형상은 그림 11 에 도시하였다. 제트의 형상으로 분사되게 벤추리 형으로 제작하였으며, 이 각도는 대략 18.2°이다

이 노즐을 2 종 제작하였는데, 노즐의 분사면에 다공판을 설치한 형태와 다공판이 없는 형태이다. 분사면에 다공판(스크린)을 설치할 수 있도록 제작하였으므로 이 노즐은 1 개를 제작하였고, 필요 시에 다공판을 부착하였다. 또 다른 한 개의 소켓에는 그림 12 와 같은 마개를 제작하여 막았다. 다공판은 직경 40mm, 두께 3mm 스테인레스 판에 직경 3mm, 피치 4mm 홀들을 삼각배열로 뚫었다. 또한 다공판을 부착/탈착하기 위하여 4 곳에 $\Phi 4\text{mm}$ 나사홀을 깊이 10mm 로 뚫었다

Type-2 순환수노즐은 수위 300mm, 600mm, 800mm 세 곳에서, 분무노즐과 90° 각도의 위치에 설치하였다. 주입되는 방향이 중심선과 30°, 45° 및 60° 되게 3 종의 노즐을 제작하였다. 그림 13 에서는 이 각도가 30° 되는 노즐을 설치한 형상을 보여준다. 이 순환수노즐의 주입각도는 실험부 내의 물을 회전시키는 역할을 한다.

그림 14 는 Sight Panel 의 세부치수를 보여주고 있다. Sight Panel 은 사진촬영을 위하여 빛의 굴절을 방지하기 위한 것이다. 1200mm 높이로 채워지는 물의 하중에서도 휘어지는 것을 방지하기 위하여 두께 10mm 투명 아크릴을 사용하였다. 실험부의 외면과 Sight Panel 내부면은 10mm 정도의 간격을 두었으며, 앞면이 분무노즐 주입방향과 정확히 평행이 되게 만들었다.

도면으로 제시하지 않는 펌프 받침대, 유량계 지지대, 색소탱크 지지대 및 가스탱크 지지대는 장치를 설치하면서 별도 제작하였다. 수위 아래에 설치하는 다공판 2 종은 각각 직경 10mm, 피치 20mm 와 직경 5mm, 피치 10mm 이고, 홀은 삼각배열이다.

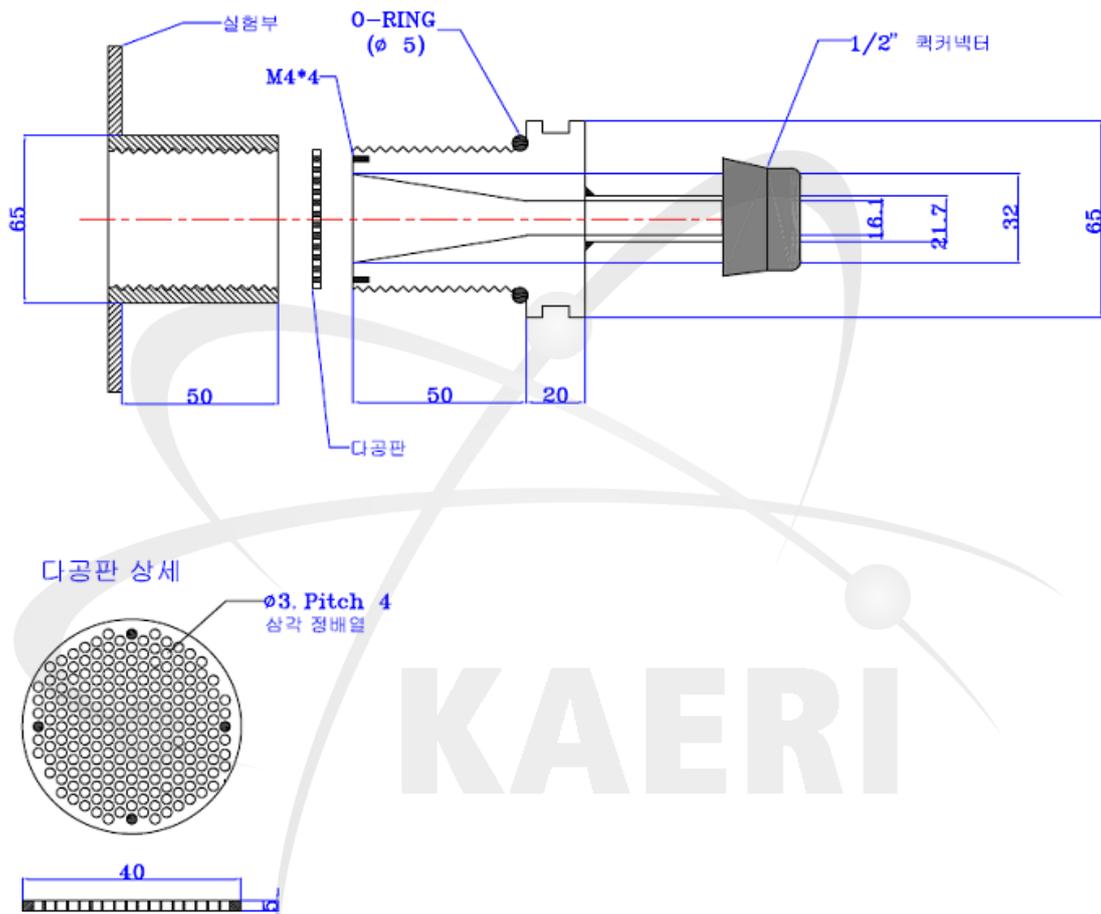


그림 11 순환수 노즐 type-1의 형상과 규격

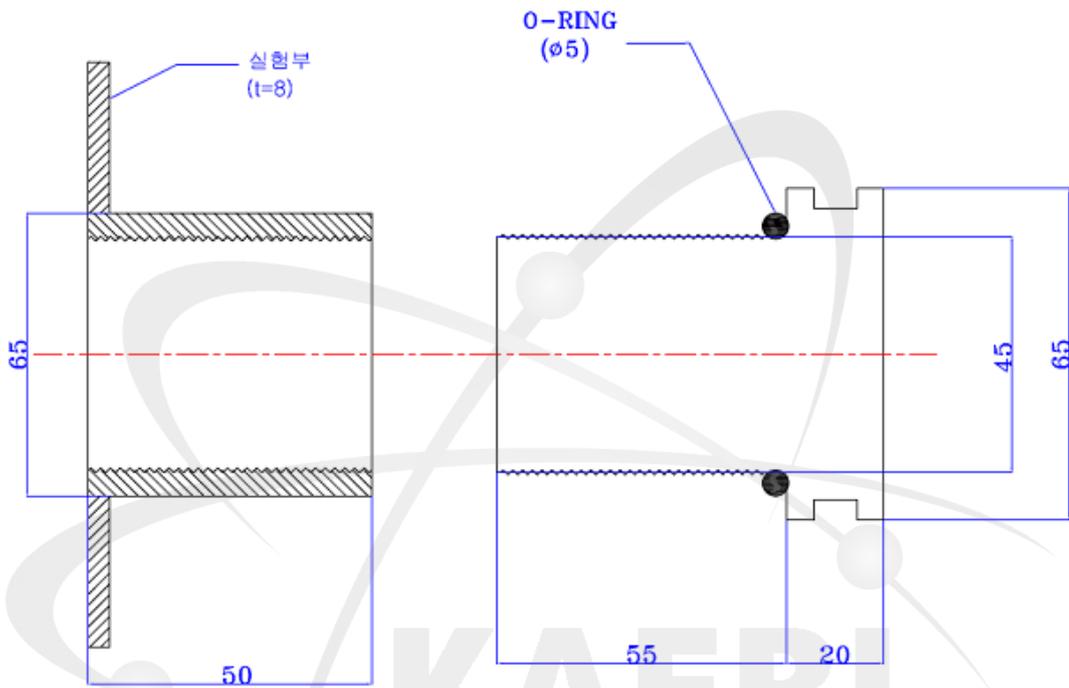


그림 12 노즐 마개

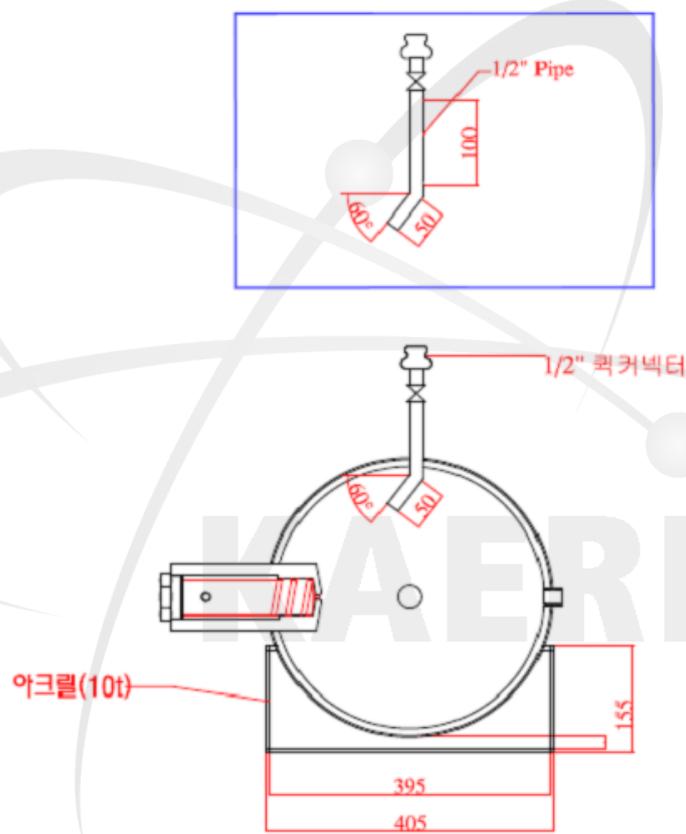


그림 13 순환수 노즐 type-2

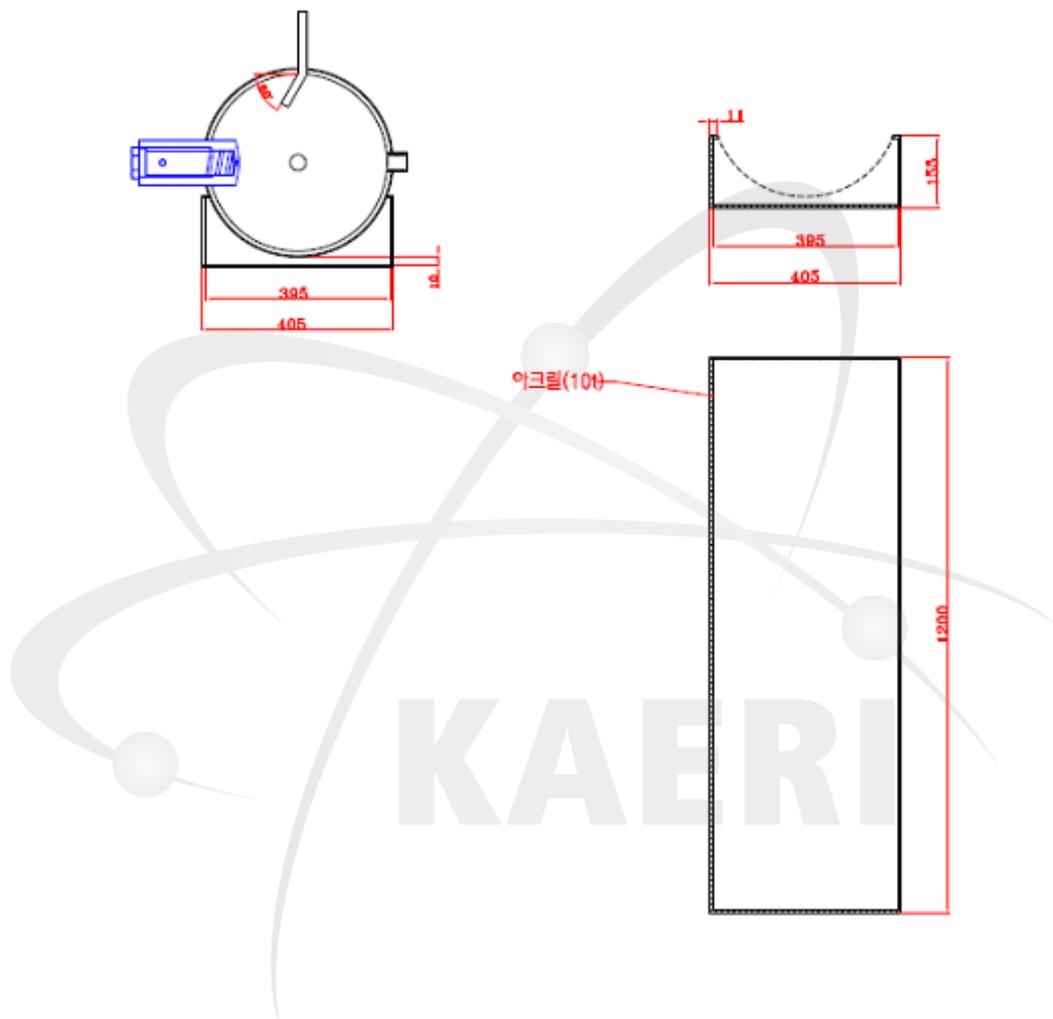


그림 14 Sight panel의 규격

2.4 실험방법 및 실험 매트릭스

반응용기에 분무노즐과 순환수노즐에 의해 주입되는 유체적 현상을 초당 3 장의 촬영속도를 갖는 카메라로 자동 촬영하여 분석하였다. 표 1 에서와 같이 많은 실험변수와 측정코자 하는 범위가 넓어 한 변수의 변화시키면서 측정할 때마다 적정 값의 범위를 좁혀가는 방법으로 실험을 수행하였고, 최종 단계에서는 예상되는 최적 값의 상하에서 다시 범위를 좁혀가면서 측정하였다. 실험을 수행한 매트릭스는 표 2 와 같다.

분무노즐의 위치를 초기에는 두 곳으로 설정하였으나 실험 도중에 한 곳을 더 추가하였고, 순환수노즐의 위치도 초기 설정한 것보다 한 곳을 더 추가하였으며, Type-2 순환수노즐의 각도도 한 개를 더 추가하였다. 순환수의 유량범위도 초기에는 0.4 liter/sec 로 설정하였으나 0.7 liter/sec 까지 확장하였다. 초기에는 분무노즐이 주입되는 상부에 다공판을 설치할 계획이 없었으나 추가로 다공판 2 종을 제작하여 시험하였다.

총 300 세트의 실험을 수행하였으며, 각 세트마다 5-10 장의 사진을 촬영하여 분석하였다.

표 1 실험인자 및 범위

실험인자	단위	측정범위	측정회수
질소 주입량	cc/s	0~1600	5
물(색소) 주입량	g/s	0~3	5
물 순환량	ℓ/s	0~0.7	5
분무노즐 위치	mm	200, 400, 600	-
분무노즐 각도	도	15, 36, 63, 80	-
Type-1 순환수노즐 위치	mm	400, 600	-
Type-2 순환수노즐 위치	mm	300, 400, 600, 800	-
Type-2 순환수노즐 각도	도	30, 45, 60	-
수위	mm	600, 700, 800, 900	-
스크린 위치	mm	600, 700, 800	-
스크린 규격 (t5)	mm	Φ5×p10, Φ10×p20	-

표 2 실험 매트릭스

(1/3)

Test No.	분무노즐 각도/위치 (°/mm)	순환노즐 각도/위치 (°/mm)	수위 (mm)	스크린 타입/위치 (T/mm)	색소 주입량 (g/s)	순환량 (ℓ/s)	질소 주입량 (ℓ/s)
Test-01-1~5	80 / 400	0 / 400	1000	-	0	0	0.2~1.6
Test-02-1~5	80 / 400	0 / 400	1000	-	0	0~0.4	1.0
Test-03-1~5	80 / 400	0 / 400	1000	-	0	0.2	0.2~1.6
Test-04-1~5	80 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.05~0.4	0
Test-05-1~5	80 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.1	0.2~1.6
Test-06-1~5	80 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.4	0.2~1.6
Test-07-1~5	80 / 400	60 / 600	1000	-	0.6~2.4	0	0.2~0.8
Test-08-1~5	63 / 400	60 / 600	1000	-	0	0	0.2~1.6
Test-09-1~5	63 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.1	0.2~1.6
Test-10-1~5	63 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.4	0.2~1.6
Test-11-1~5	63 / 400	60 / 600	1000	-	0.6~3.0	0	0.2~1.6
Test-12-1~5	63 / 400	60 / 600	1000	-	1.2	0	0.2~1.6
Test-13-1~5	36 / 400	60 / 600	1000	-	0	0	0.2~1.6
Test-14-1~5	36 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.1	0.2~1.6
Test-15-1~5	36 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.2	0.2~1.6
Test-16-1~5	36 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.3	0.2~1.6
Test-17-1~5	36 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.25	0.2~1.6
Test-18-1~5	36 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.35	0.2~1.6
Test-19-1~5	36 / 400	60 / 600	1000	-	1.2	0	0.2~1.6
Test-20-1~5	36 / 400	60 / 600	1000	-	1.2	0.25	0.2~1.6
Test-21-1~5	36 / 400	60 / 600	1000	-	0.6~3.0	0.3	0.8
Test-22-1~5	15 / 400	60 / 600	1000	-	0	0	0.3~0.8
Test-23-1~5	15 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.2~0.4	0
Test-24-1~5	15 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.2	0.3~0.8
Test-25-1~5	15 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.25	0.3~0.8

(2/3)

Test No.	분무노즐 각도/위치 (°/mm)	순환노즐 각도/위치 (°/mm)	수위 (mm)	스크린 타임/위치 (T/mm)	색소 주입량 (g/s)	순환량 (ℓ/s)	질소 주입량 (ℓ/s)
Test-26-1~5	15 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.30	0.3~0.8
Test-27-1~5	15 / 400	60 / 600	1000	-	0	0.35	0.3~0.8
Test-28-1~5	-	-	-	-	-	-	-
Test-29-1~5	-	-	-	-	-	-	-
Test-30-1~5	-	-	-	-	-	-	-
Test-31-1~5	15 / 200	45 / 300	1000	-	0	0.2	0.3~0.8
Test-32-1~5	15 / 200	45 / 300	1000	-	0	0.25	0.3~0.8
Test-33-1~5	15 / 200	45 / 300	1000	-	0	0.30	0.3~0.8
Test-34-1~5	15 / 200	45 / 300	1000	-	0	0.35	0.3~0.8
Test-35-1~5	15 / 200	60 / 300	1000	-	0	0.3	0.3~0.8
Test-36-1~5	15 / 200	60 / 300	900	-	0	0.3	0.3~0.8
Test-37-1~5	15 / 200	60 / 300	800	-	0	0.3	0.3~0.8
Test-38-1~5	15 / 200	60 / 300	700	-	0	0.3	0.3~0.8
Test-39-1~5	-	-	-	-	-	-	-
Test-40-1~5	15 / 200	60 / 300	800	-	0.6~2.4	0	0
Test-41-1~5	15 / 200	60 / 300	800	-	1.2	0.25~0.35	0
Test-42-1~5	15 / 200	60 / 300	800	-	1.2	0.35	0.3~0.8
Test-43-1~5	-	-	-	-	-	-	-
Test-44-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#2/500	0		0.3~0.8
Test-45-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#2/500	0	0.2~0.4	0
Test-46-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#2/500	0	0.2~0.4	0.5
Test-47-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#2/500	0	0.35	0.3~0.8
Test-48-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#2/600	0	0.35	0.3~0.8
Test-49-1~5	-	-	-	-	-	-	-
Test-50-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#1/500	0	0	0.3~0.8

(3/3)

Test No.	분무노즐 각도/위치 (°/mm)	순환노즐 각도/위치 (°/mm)	수위 (mm)	스크린 타입/위치 (T/mm)	색소 주입량 (g/s)	순환량 (ℓ/s)	질소 주입량 (ℓ/s)
Test-51-1~5	-	-	-	-	-	-	-
Test-52-1~5	-	-	-	-	-	-	-
Test-53-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#1/600	0	0.2~0.4	0.5
Test-54-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#1/700	0	0.4	0.3~0.8
Test-55-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#1/600	0	0.35	0.3~0.8
Test-56-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#1/500	0	0.5~0.7	0.5
Test-57-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#1/550	0	0.5~0.7	0.5
Test-58-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#1/600	0	0.5~0.7	0.5
Test-59-1~5	15 / 200	60 / 300	700	#1/600	0	0.6	0.3~0.8
Test-60-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#1/600	0	0.6	0.3~0.8
Test-61-1~5	15 / 200	60 / 300	900	#1/600	0	0.6	0.3~0.8
Test-62-1~5	15 / 200	60 / 300	800	#1/600	0	0.6	0.3~0.8
Test-63-1~5	15 / 200	45 / 300	800	#1/600	0	0.6	0.3~0.8
Test-64-1~5	15 / 200	30 / 300	800	#1/600	0	0.6	0.3~0.8
Test-65-1~5	15 / 200	30 / 300	800	#1/600	0.6	0.55	0.3~0.6
Test-66-1~5	15 / 400	30 / 300	1000	#1/800	1.0	0.55	0.3~0.6
Test-67-1~5	15 / 400	30 / 600	1000	#1/800	1.0	0.55	0.3~0.6
Test-68-1~5	-	-	-	-	-	-	-
Test-69-1~5	15 / 200	30 / 300	800	#1/600	0	0.45~0.6	0.45
Test-70-1~5	15 / 200	30 / 300	800	#1/600	0	0.50~0.6	0.~0.6

제 3 장 실험결과

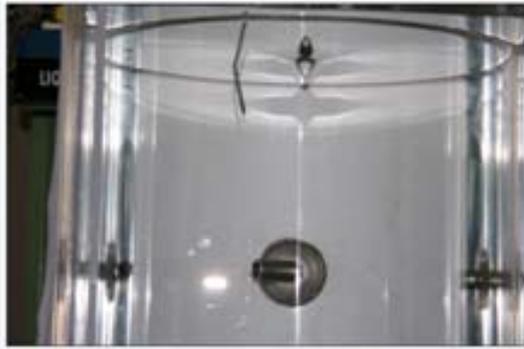
3.1 분무노즐의 영향

분무노즐은 이 실험에서 중요한 부분에 해당한다. 이 과제에서 설계, 제작한 분무노즐의 특성을 물모의 실험으로 검증하여야 할 부분은 분무노즐의 각도이다. 15°, 36°, 63° 및 80° 각도를 갖는 4 종의 분무노즐을 제작하여 실험을 수행하였다 (그림 7 참조). 반응용기에서 분무노즐의 위치는 소뿔과 질소가스가 혼입하여 주입할 때에 반응하지 않은 소뿔이 순환수 유입구로 빨려 들어가는 문제와 질소가스에 편승하여 액면 위로 올라가 적체될 가능성을 예방하는 차원에서 중요하다.

이 항에서는 분무노즐에 대해 기술하고자 하지만 순환수노즐, 다공판 및 각각의 위치 등 모든 실험인자들이 서로 연관을 갖고 영향을 미치므로 한 인자의 영향을 독립적으로 설명하는데 어려움이 있다. 그러므로 여기서는 각 실험인자들의 주요 특징을 주로 기술하였고, 다른 인자의 영향을 기술하는 사진도 동시에 나타내었다. 또한 3 차원인 혼합현상을 2 차원적으로 표현되는 사진으로 설명하는 데는 무리한 점이 있어, 육안으로 관찰한 현상을 기준으로 설명하였고, 최적조건을 찾는데 관찰한 내용을 최대한 활용하였다.

3.1.1 순환수에 의한 와류의 생성

분무노즐로 주입된 소뿔이 순환수 유입구로 순환수에 혼입되는 것은 순환수의 영향이 매우 큰데, 그림 15 는 순환수 만을 순환시켰을 때에 순환수의 양에 따른 Vortex(와류) line 의 형성 및 길이를 보여 준다. 순환수가 0.05 l/s 로 순환할 경우에 자유액면에 와류가 생성되었고, 유량이 증가할수록 증가하여 0.3 l/s 에서는 수위 1000mm 를 관통하여 와류가 연결되었다. 이 때 공기가 다량으로 유입되면서 순환수의 유량이 감소하였다.



0.1 ℓ/s



0.2 ℓ/s



0.3 ℓ/s



0.4 ℓ/s

그림 15 순환수만을 순환시킬 때 생성된 와류

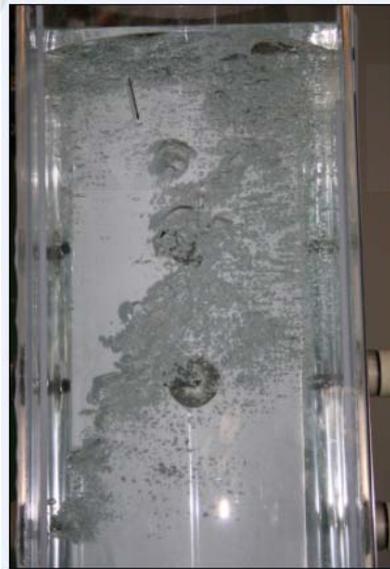
이 때 그림 16 에서와 같이 질소가스를 0.2 l/s 만을 주입하여도 와류가 소멸되었다. 다공판을 설치하였을 때에도 와류는 발생하지 않았으나, 색소를 주입하였을 때의 영향은 관찰하지 못하였다. 색소 주입량은 미량이라 와류에 영향을 주지 않을 것으로 예상된다. 질소가스를 주입하지 않거나 다공판을 설치하지 않고 순환수 만이 있는 상태에서 소뿔을 주입하면 소뿔은 강력한 와류에 혼입하여 순환수 유입구로 들어갈 것으로 예상된다.

3.1.2 질소가스의 분무현상

순환수와 질소가스가 주입되지 않는 상태에서 색소 만을 주입하였을 경우에는 그림 17 과 그림 18 에서와 같이 수초 내에 맞은 편 벽면에 닿고, 벽면을 따라 상하로 퍼져나갔다. 그러므로 용액에 소뿔 만을 주입하여 반응시키면 맞은 편 벽면 근방에서 반응이 많이 일어날 것으로 예상된다. 여기에서 시간 간격은 정확하지 않으며, 대략적인 추이이다. 색소의 주입량이 많을 때에는 더 빠른 속도로 진행하였지만 제트의 형상은 육안으로는 아주 유사하였다. 그러나 다음에서 기술하지만 질소의 주입량과 색소의 주입량에 따라서는 혼입현상에 차이가 있음을 알 수 있었다.



순환수량 0.4 l/s, 질소주입량 0.2 l/s



순환수량 0.4 l/s, 질소주입량 1.6 l/s

그림 16 질소가스 분무에 의한 와류의 소멸

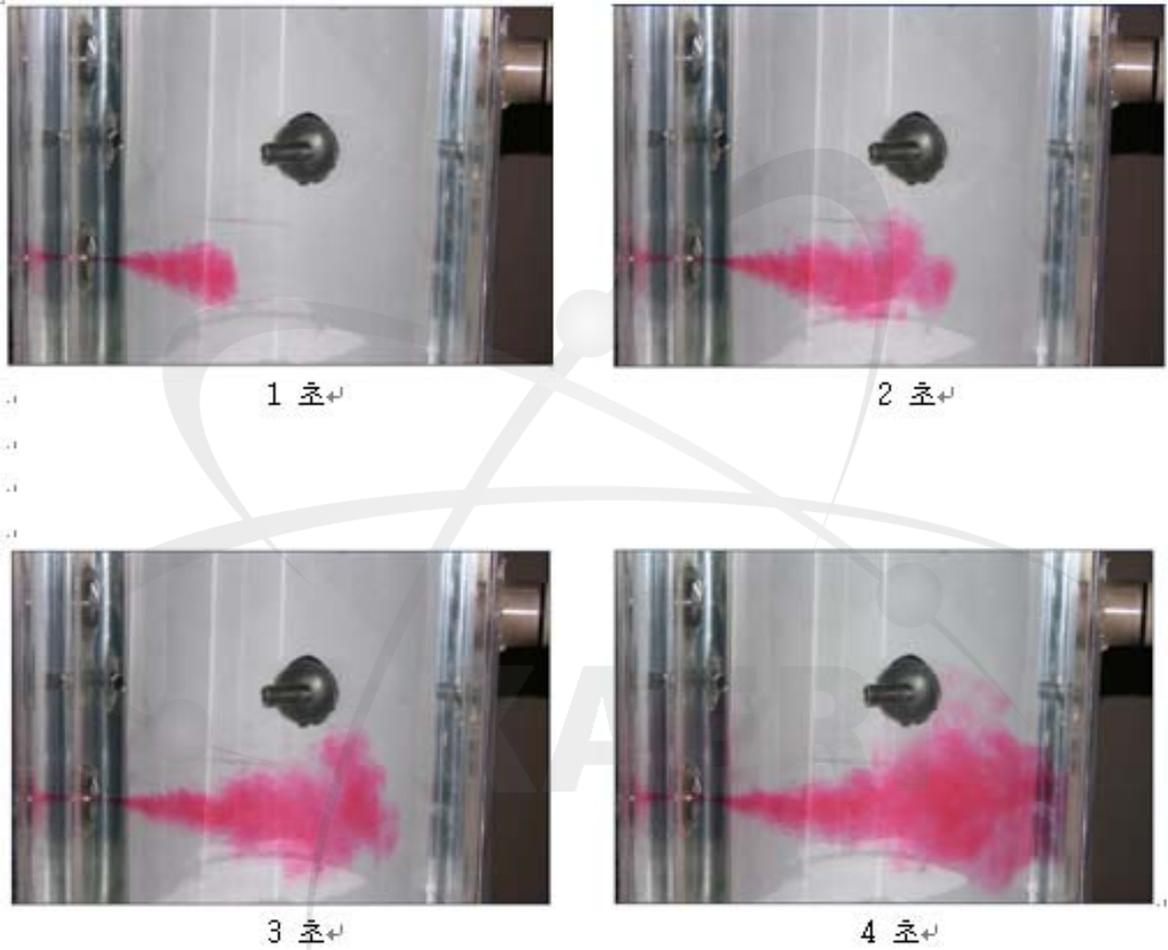


그림 17 색소만 0.6 g/s로 유입될 때 시간에 따른 분사현상

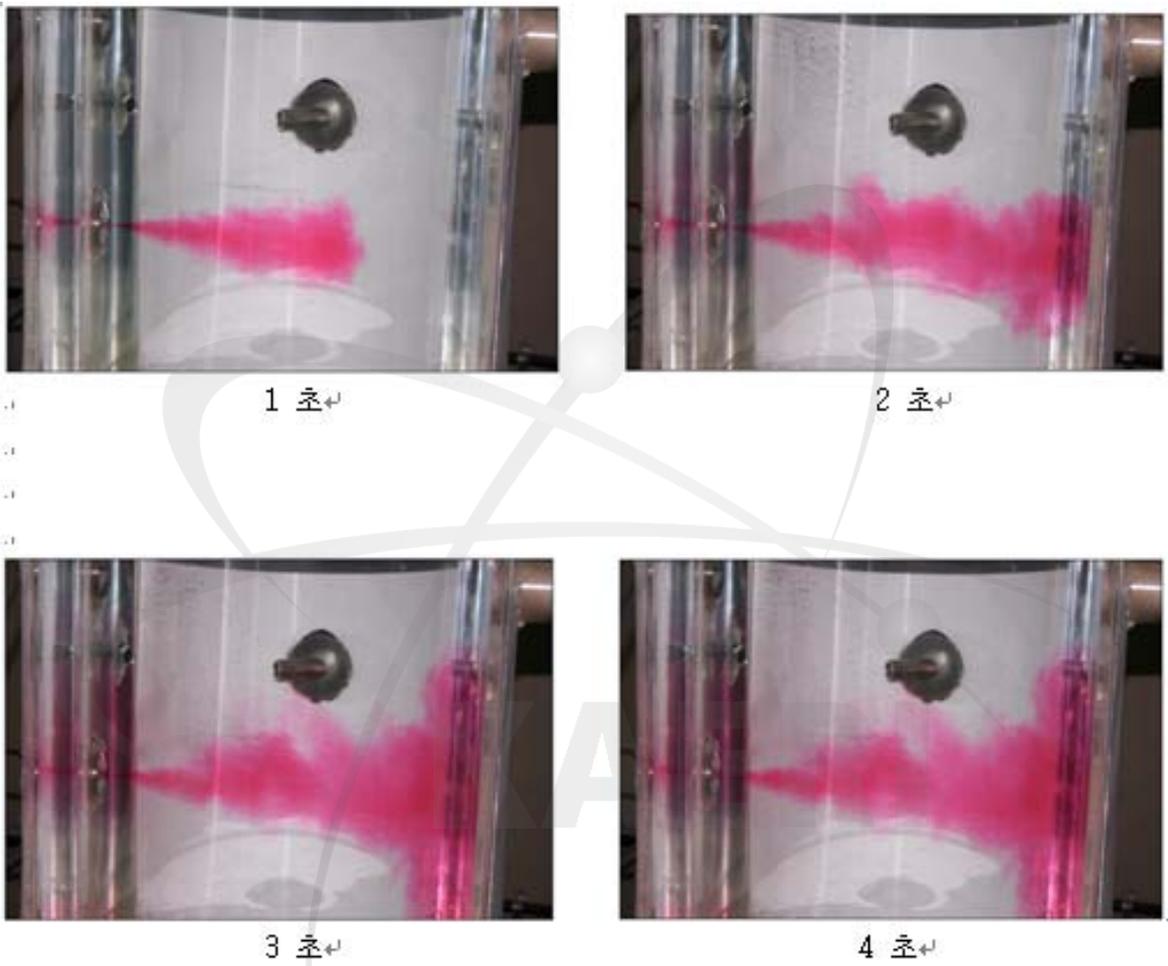


그림 18 색소만 2.4 g/s로 유입될 때 시간에 따른 분사현상

3.1.3 분무노즐 각도의 영향

살수기에서와 같이 일반적으로 공기 중에서 분사할 때에는 분무노즐의 각도가 클수록 분무가 광범위하게 흩어지고 공기와 혼합이 잘되는 것으로 나타난다. 그러나 기체를 물속으로 분사할 때에는 질소의 분사력이 적은 반면, 물의 저항력이 커서 공기의 분사가 얼마 진행하지 못하고 부력에 의해 위로 올라가는 것을 관찰할 수 있었다. 본 실험에서는 15°, 36°, 63° 및 80° 각도를 갖는 분무노즐을 제작하여 실험을 수행하였다.

초기에는 각도가 클수록 유리할 것으로 예상하였지만 결론적으로는 질소가스의 양을 적게 주입하는 경우에는 각도가 적을수록 질소가스의 분사가 더 중심까지 진행되었다. 그림 19-23 이 4 종의 분사각을 가지는 분무노즐에서 실험한 현상을 비교한 것이다. 질소가스가 물 속으로 분사하면 제트의 중심 부분은 작은 기포로 이루어지지만 제트의 외곽에는 큰 기포가 형성되어 물속으로 얼마 진입하지 못하고 부력에 의해 위로 상승하였다. 또한 기포는 자유액면에 닿을 때까지 큰 크기를 거의 유지하고 있었다. 즉, 분사각이 클수록 기포의 크기가 증가하였고, 물속으로 진입하는 길이가 짧아졌다.

분사각이 80°인 큰 각도에서는 질소가스의 양이 적을 때 거의 벽면에 붙는 현상을 보였으며, 질소가스 분사량이 많아도 질소가스만을 분사하면 상부에서는 거의 벽면에 닿는 것을 볼 수 있고, 분사각이 적을수록, 주입하는 질소가스의 양이 많을수록 벽면 근방에 분포하는 양은 적어졌으나, 가스의 부력이 너무 커 제트의 형성에는 색소만 주입하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 없었다.

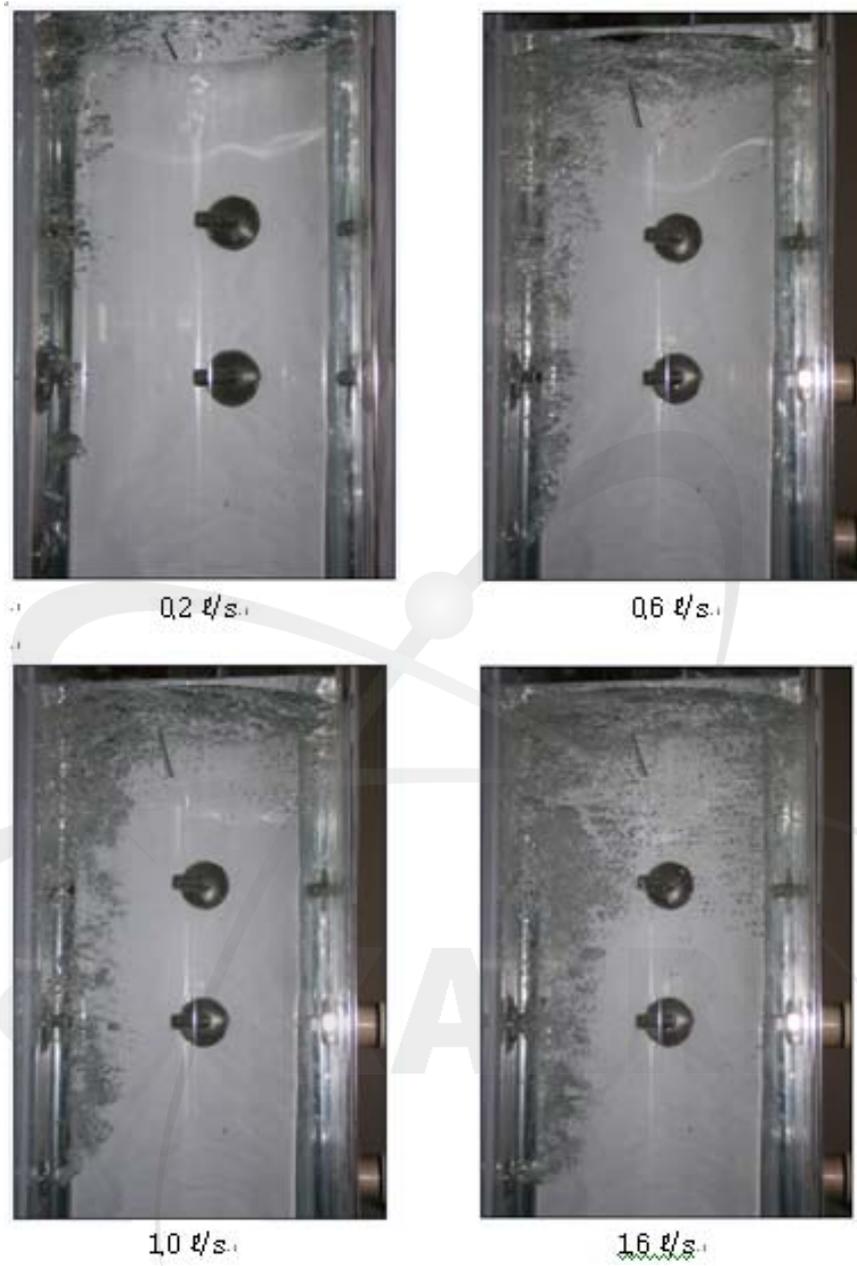


그림 19 순환수가 없을 때 분무노즐(80°)에서의 분사현상

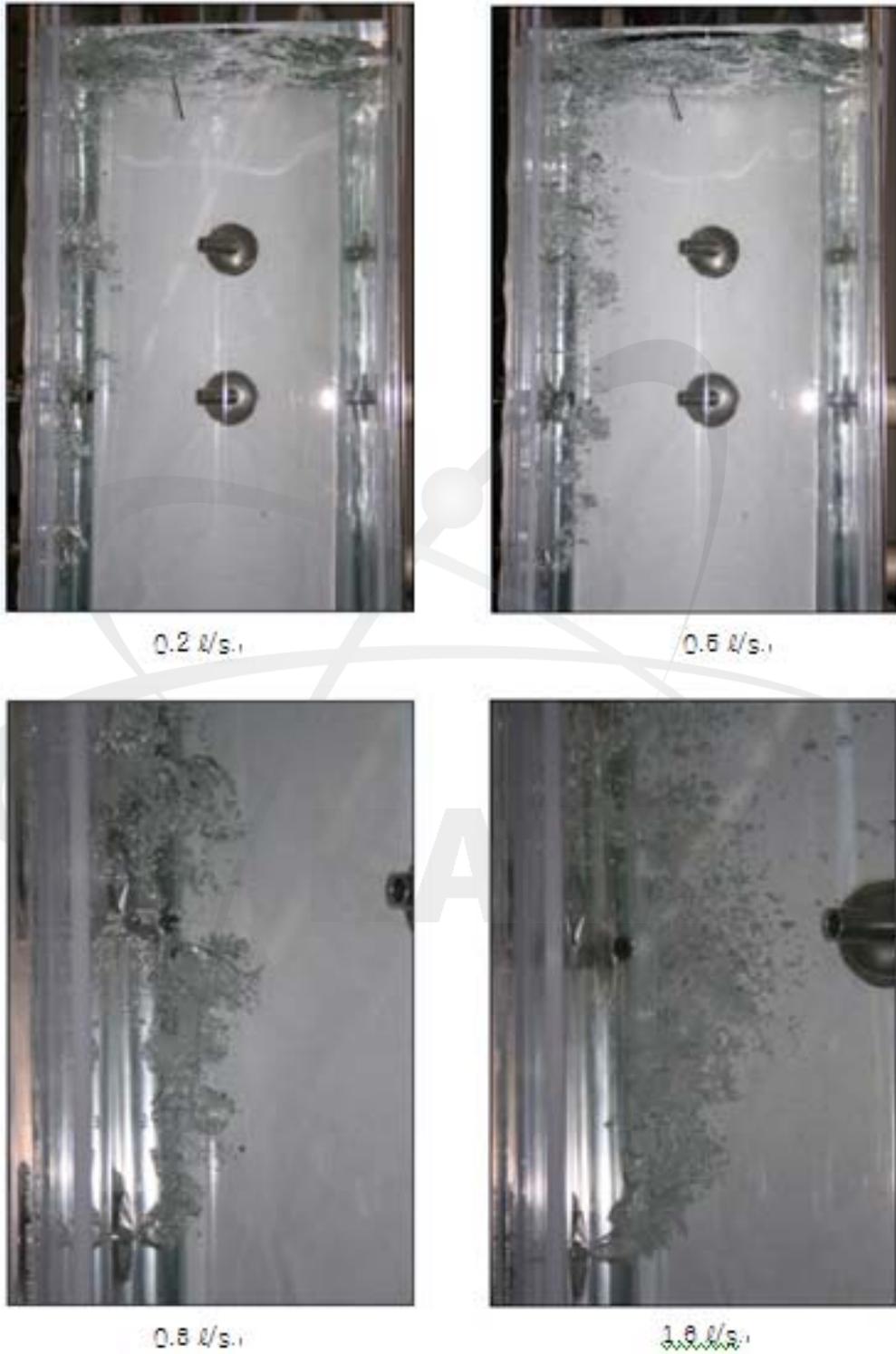


그림 20 순환수가 없을 때 분무노즐(63°)에서의 분사현상

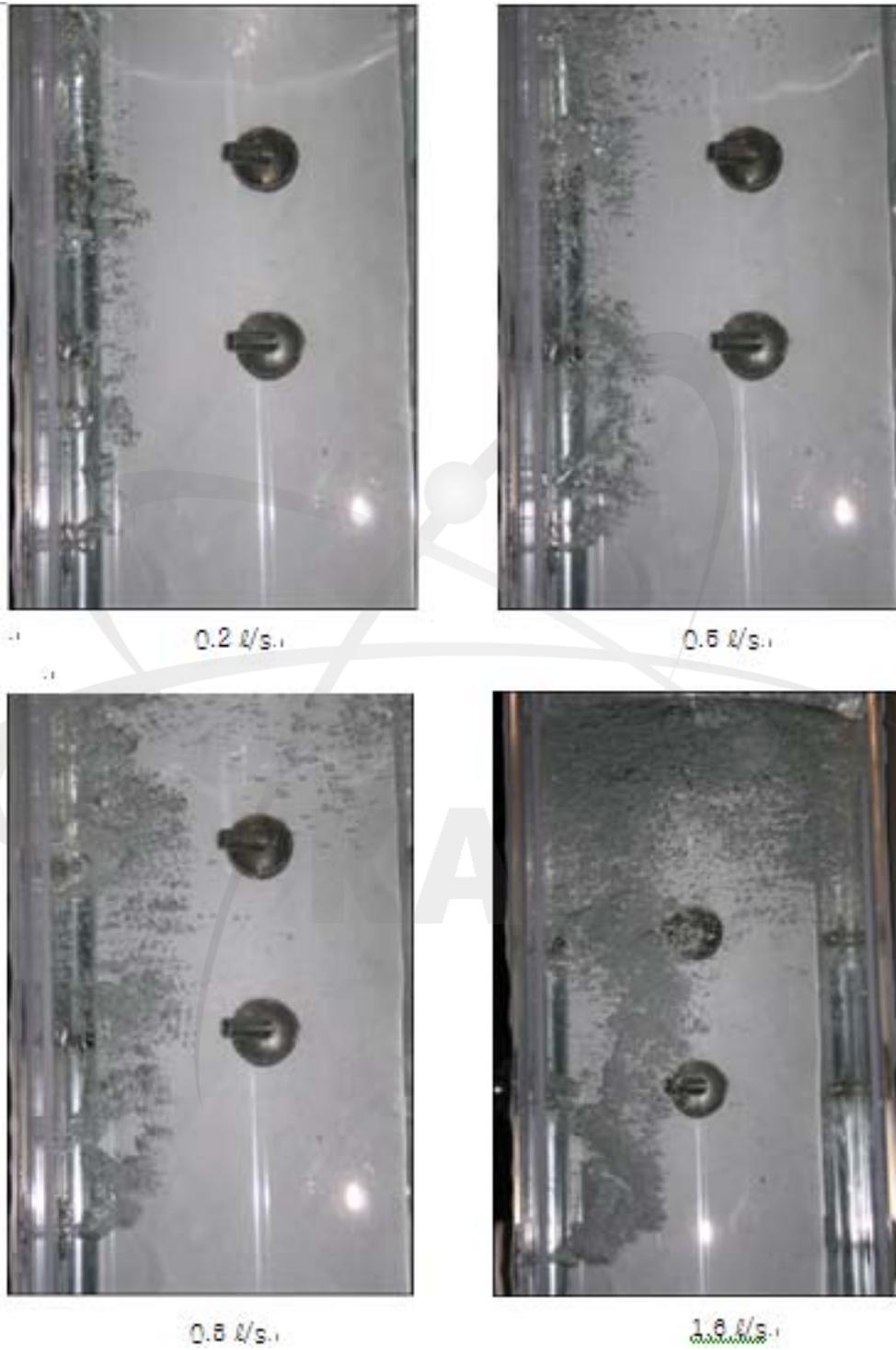


그림 21 순환수가 없을 때 분무노즐(36°)에서의 분사현상

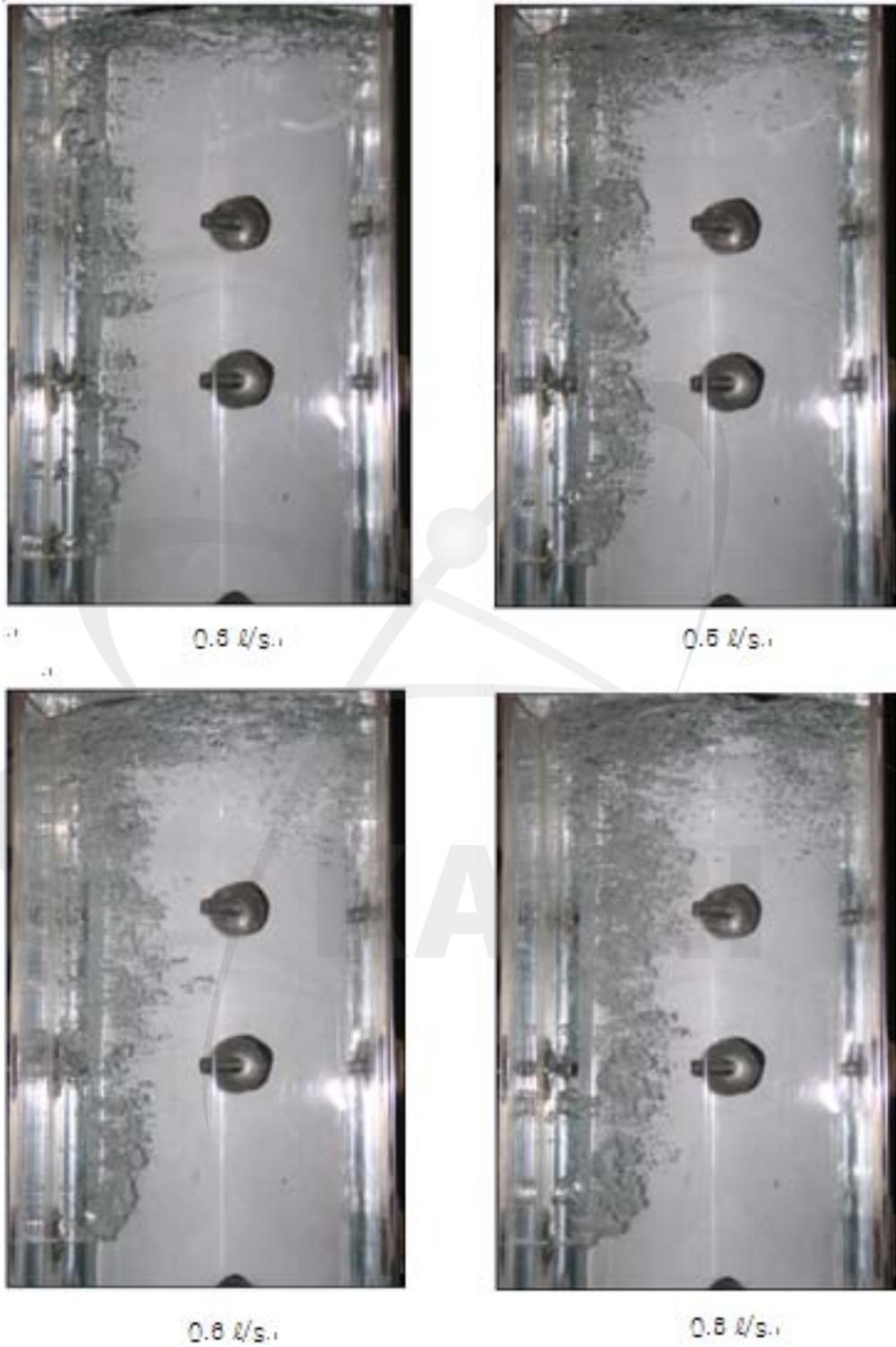


그림 22 순환수가 없을 때 분무노즐(15°)에서의 분사현상

3.1.4 질소가스 유량의 영향

이 그림들(그림 19-22)에서 보는 바와 같이 질소가스의 주입량이 많을수록 반응기의 중심부로 더 들어가고, 큰 기포의 양도 상대적으로 줄었다. 그림 19 는 질소가스 만을 주입할 때에 질소가스 유량에 따른 질소가스의 분포를 보여주고 있다. 질소가스 유량이 0.2 l/s 로 주입 할 때에는 가스가 물속으로 거의 주입되지 못하고 벽면을 따라 상승하는 것을 볼 수 있다. 0.6 l/s 정도만 되면 벽면에서 분리되고, 질소가스 유량이 많을수록 중심 쪽으로 더 많이 들어옴을 알 수 있다.

폐소뿔을 처리하는 이 공정에서는 질소가스는 소뿔을 혼입하여 분무하는 역할을 할뿐만 아니라 질소를 고온으로 가열하여 주입하므로 소뿔이 분무노즐에서 응고하는 것을 방지하는 역할도 한다. 질소가스 유량이 많아지면 가스의 비용이 증가할 뿐만 아니라 가열하는 가열기의 용량이 커지게 되며, 가열한 질소가스를 주입하므로 주입량이 많을수록 순환수에 설치되는 냉각기의 용량이 또한 커지게 된다. 그러므로 다른 인자를 적절하게 활용하여 질소가스 유량을 최소화할 필요가 있다.

3.1.5 질소가스와 색소의 편승현상

그림 23 과 그림 24 는 0.8 l/s 로 질소가스가 분사되는 상태에서 색소를 주입할 때 일어나는 분사상태를 보여주고 있다. 이 그림들에서 시간은 대략의 진행상태를 보여주지만 정확한 시간이 아니다. 그림 23 에서 색소의 분사량이 1.2g/s 으로 비교적 적을 때에는 색소가 질소가스에 혼입되어 상승하였다가 질소가스의 상승으로 생긴 용액의 자연순환에 따라 다시 아래 쪽으로 확산되는

것을 볼 수 있다. 그러나 그림 24 에서와 같이 색소 주입량이 3 g/s 로 증가하면 즉, 색소의 분사하는 힘이 증가하면 일부분은 질소가스의 제트에서 이탈하여 스스로 확산되는 것을 볼 수 있다.

주입하는 질소가스의 양의 영향은 그림 25 에 보이고 있다. 이 실험에서 순환수가 없는 상태에서 분무노즐의 분사각도는 63° 이고 색소는 1.2 g/s 로 주입하였다. 질소가스가 0.2 l/s 일 때에는 색소의 주입량이 많을 경우에서와 같은 현상으로 가스와 색소가 분리되는 것을 보이고 있고, 질소가스의 주입량이 0.5 l/s 이상에서는 잘 혼입하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 색소는 1.2 g/s 일 때에는 질소가스의 주입량이 0.5 l/s 이상으로 주입하여야 함을 알 수 있다.

큰 기포 속에는 색소가 미소량 들어가는 것을 볼 때에, 색소가 질소가스에 잘 편승하려면 질소가스가 더 작은 기포로 쪼개지고, 분산되어야 함을 알 수 있다. 큰 기포는 제트의 외각에서 발생하므로 노즐의 구조와 깊은 연관이 있으며, 노즐에서 층류의 분리가 일어나지 않게 노즐을 설계하는 것이 필요하고, 노즐의 내부가 넓고, 출구가 좁은 벤추리 타입 노즐을 설계하는 것이 바람직한 것으로 보인다.

이와 같은 이유로 분무노즐에서 나선형 가스 유입로는 유입하는 제트를 회전시켜 확산시키므로 더 질소가스를 좋지 않는 영향을 미칠 수 있다

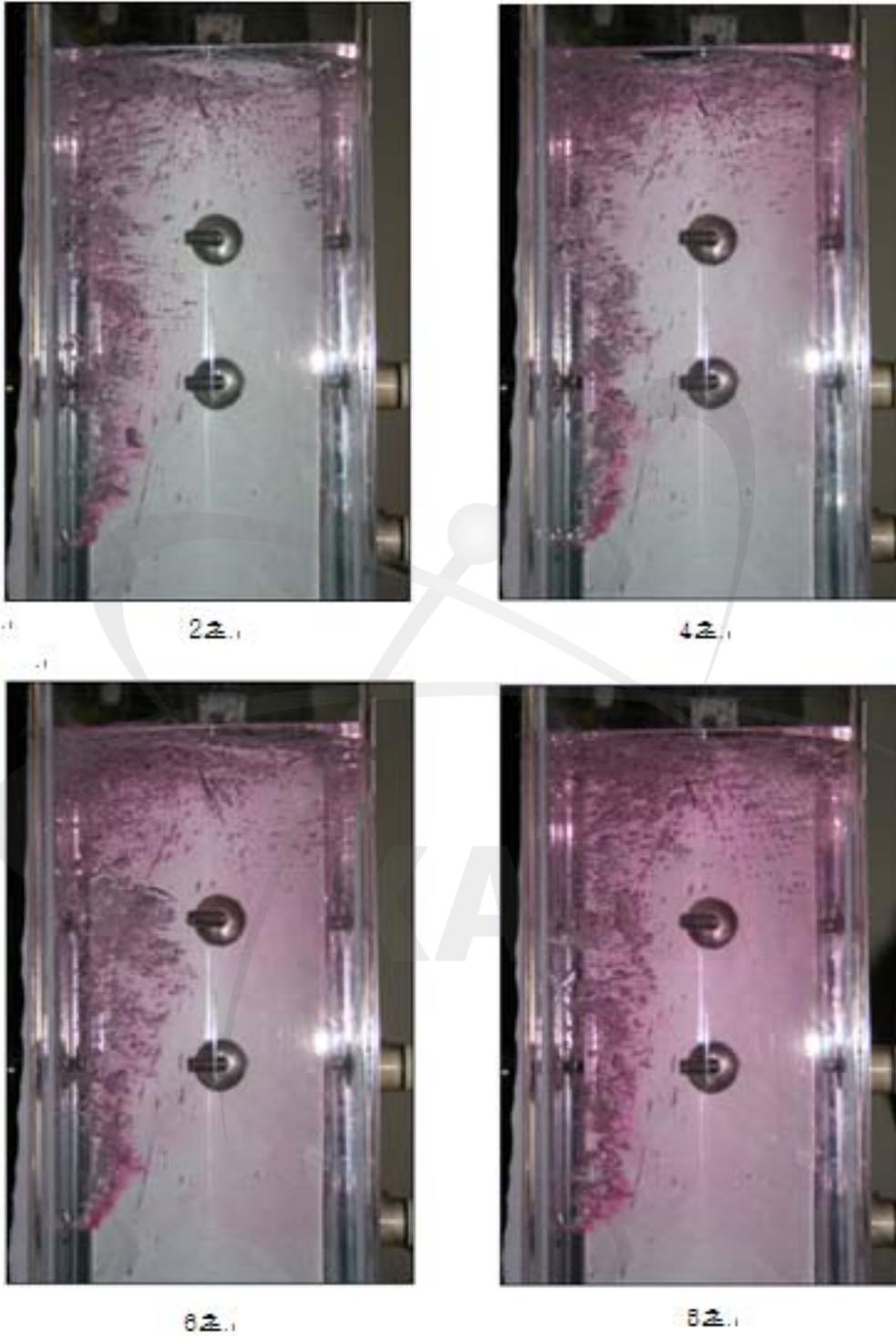


그림 23 순환수가 없을 때 1.2 g/s 색소와 질소가스 주입시간에 따른 현상

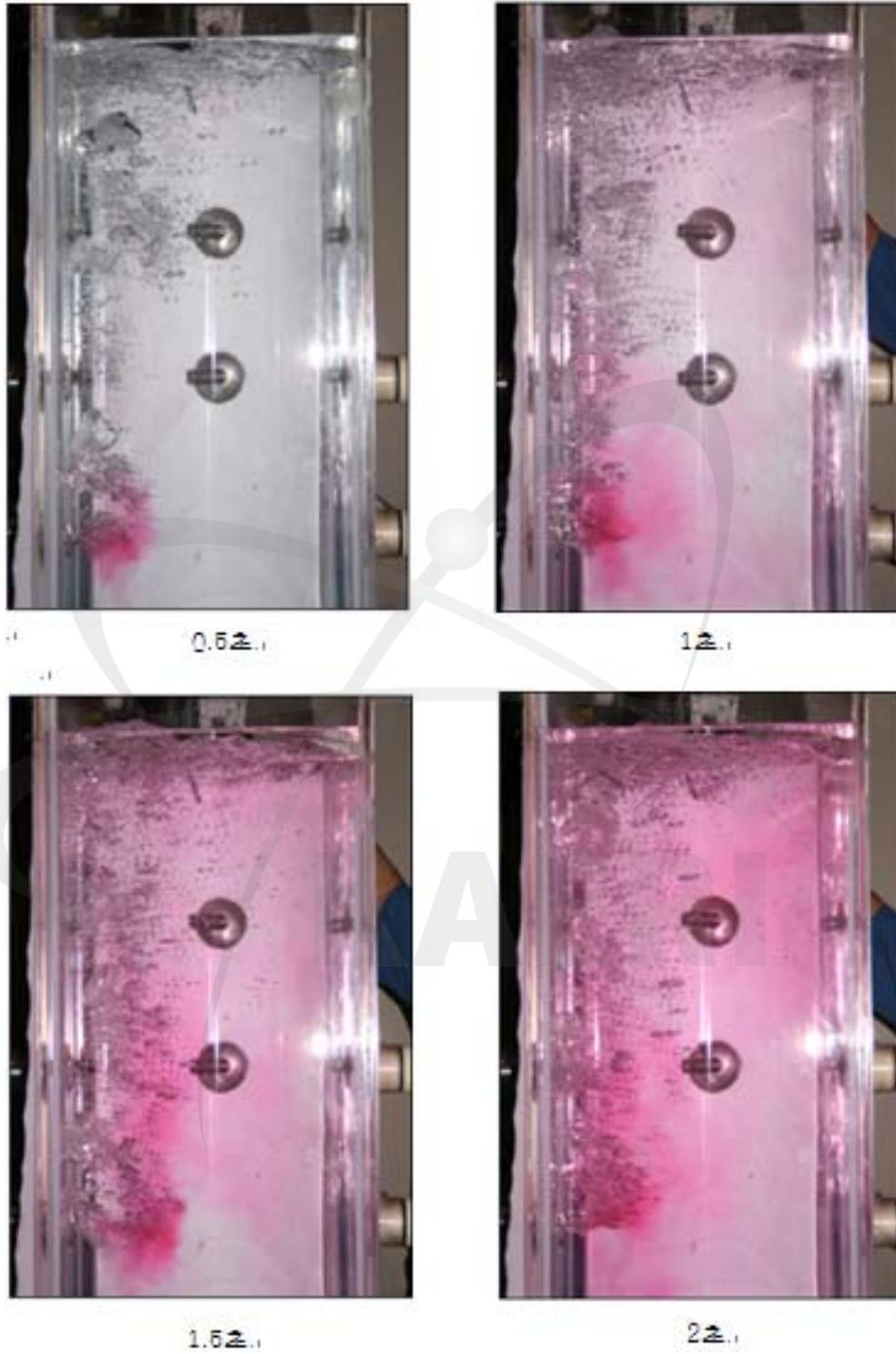


그림 24 순환수가 없을 때 3.0 g/s 색소와 질소가스 주입시간에 따른 현상

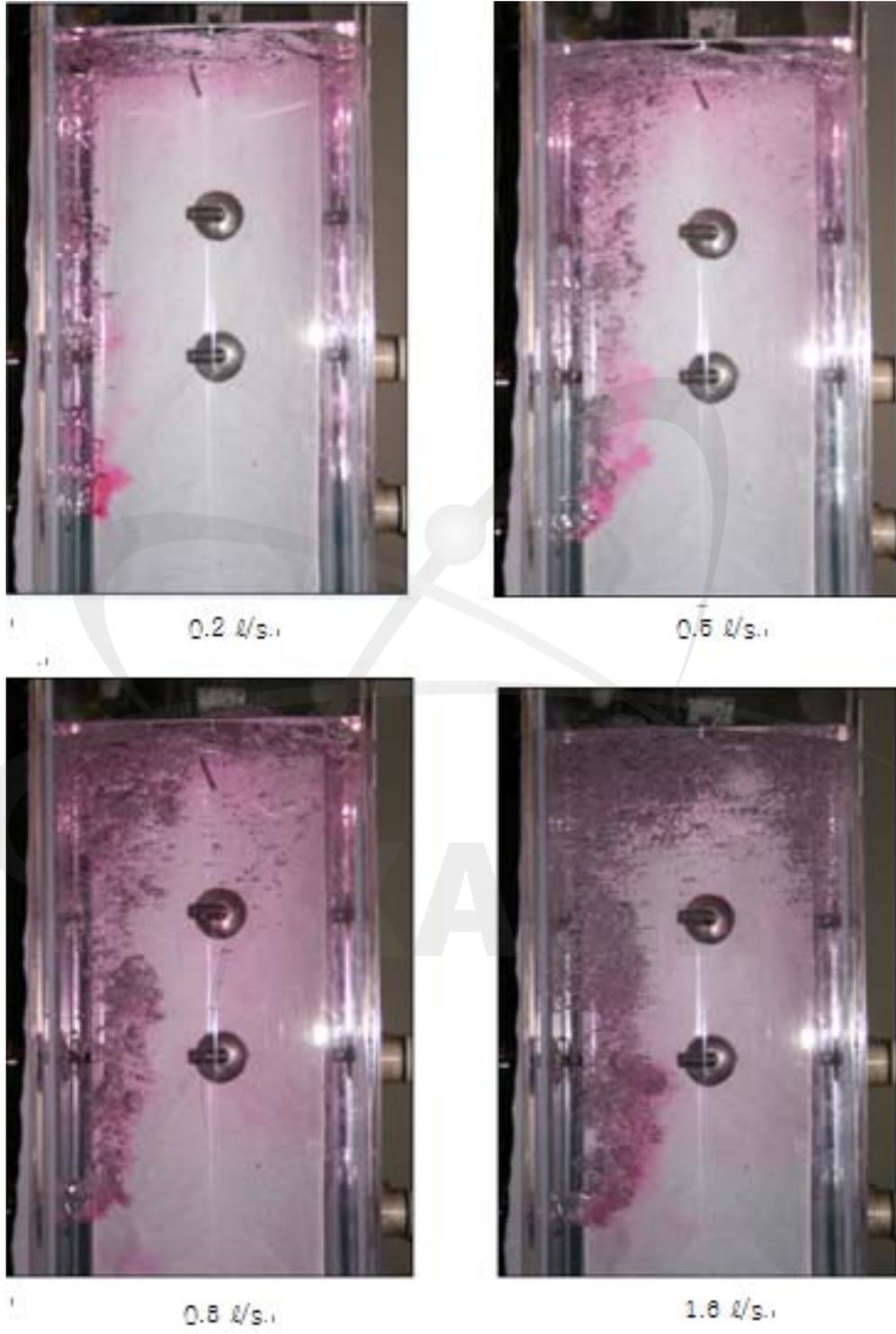


그림 25 질소가스의 주입량에 따른 색소의 혼입상태

3.1.6 분무노즐의 위치

그림 26 에서는 순환수가 0.55 l/s 로 흐를 경우 질소가스의 주입량에 따라 변하는 색소의 분포상태를 보여주고 있다. 이 그림은 다공판을 설치하여 순환수의 유량을 높인 실험에서 촬영한 것으로 실험결과로 볼 때에 이 순환수 유량은 최적의 조건이었다.

여기서도 질소유량이 0.5 l/s 이상이면 색소가 질소가스에 편승하여 상승함을 볼 수 있다. 또한 순환수가 0.55 l/s 가 되어도 색소가 대부분 질소가스에 편승하여 위로 상승하고 순환수의 유입구로 직접 빨려 들어가지 않음을 볼 수 있었다. 그러므로 분무노즐의 위치는 낮아도 소듬이 반응하지 않은 상태에서 순환수 유입구로 흡입되지 않으므로 분무노즐의 위치는 반응용기의 하부에서부터 200mm 정도이면 충분한 것으로 판단된다.

하향하는 색소는 충분한 시간을 경과한 후 하강하므로 소듬 경우로 보면 충분한 반응이 일어난 것으로 예상되어 고려의 대상이 되지 않는다.

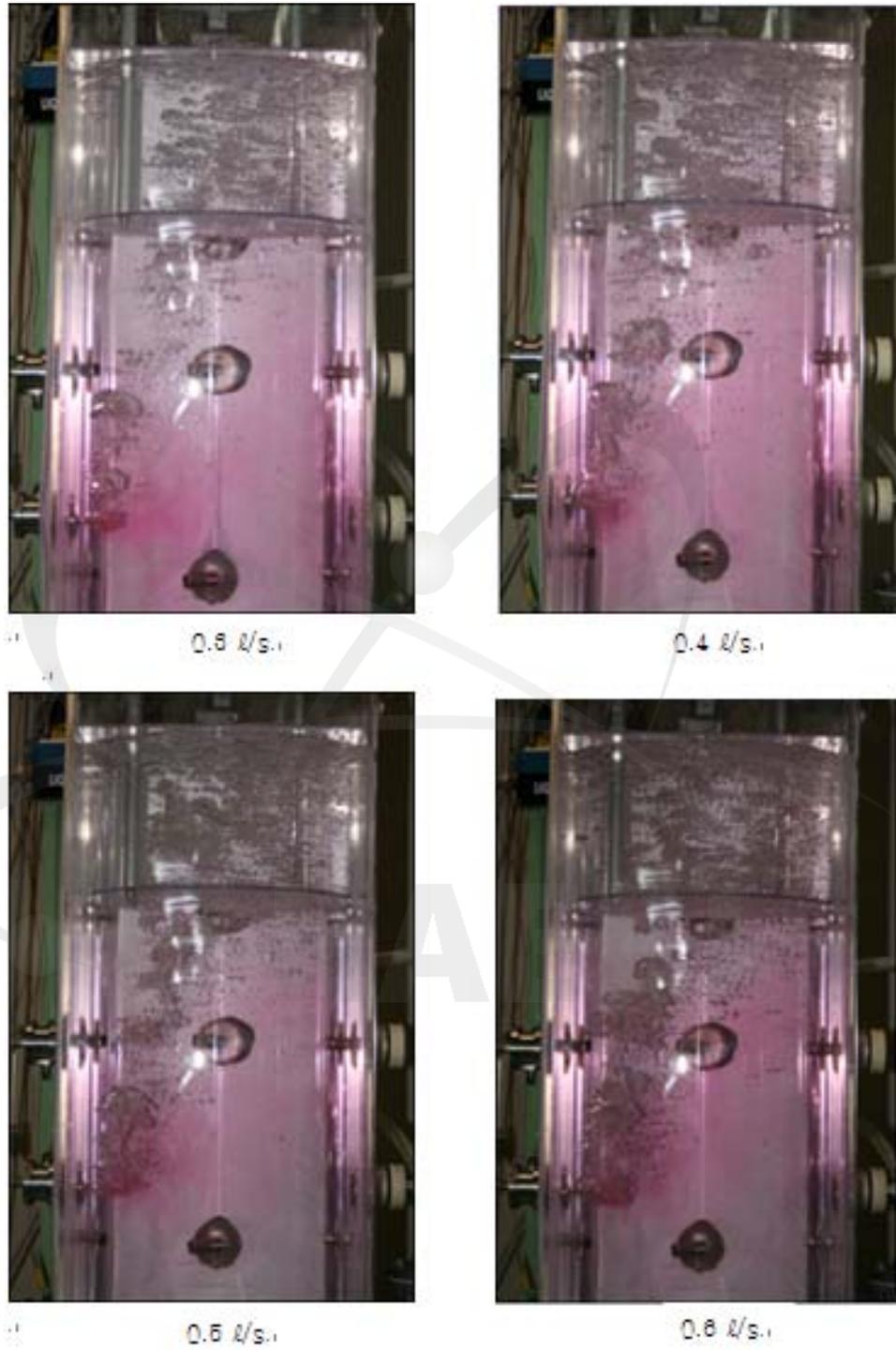


그림 26 순환수 0.55 l/s 일 때, 질소가스 주입량에 따른 분무상태

3.2 순환수의 영향

3.2.1 순환수노즐 type-1

순환수가 작동하지 않고 질소가스 만이 1.0 l/s 로 주입되는 상태 (그림 19)에서 분무노즐의 맞은 편에 설치한 순환수 노즐 type-1 로 순환수를 유입하였을 때의 현상을 보이는 것이 그림 27 이다. 순환수의 유입량이 많을수록 질소가스는 벽면에 접근하여 상승하는 것을 볼 수 있다. 질소가스가 반응용기의 중심에서 균일하게 분포되어야 함을 고려할 때 순환수노즐 type-1 은 적합하지 않는 것으로 판명되었다. 이 후부터는 순환노즐 type-2 를 사용하여 실험을 수행하였다.

이와 같은 이유로 type-1 의 다공관을 교체하는 실험과 이 순환수노즐을 600mm 위치에서 측정하는 실험은 수행하지 않았지만 순환수노즐 type-1 의 위치를 분무노즐의 바로 위인 200mm 상부에 설치하고 실험을 수행한 바 있다. 이 실험에서는 순환수가 질소가스가 상승하는 형태 및 질소가스 기포의 분포에 별 영향을 미치지 못하였다.

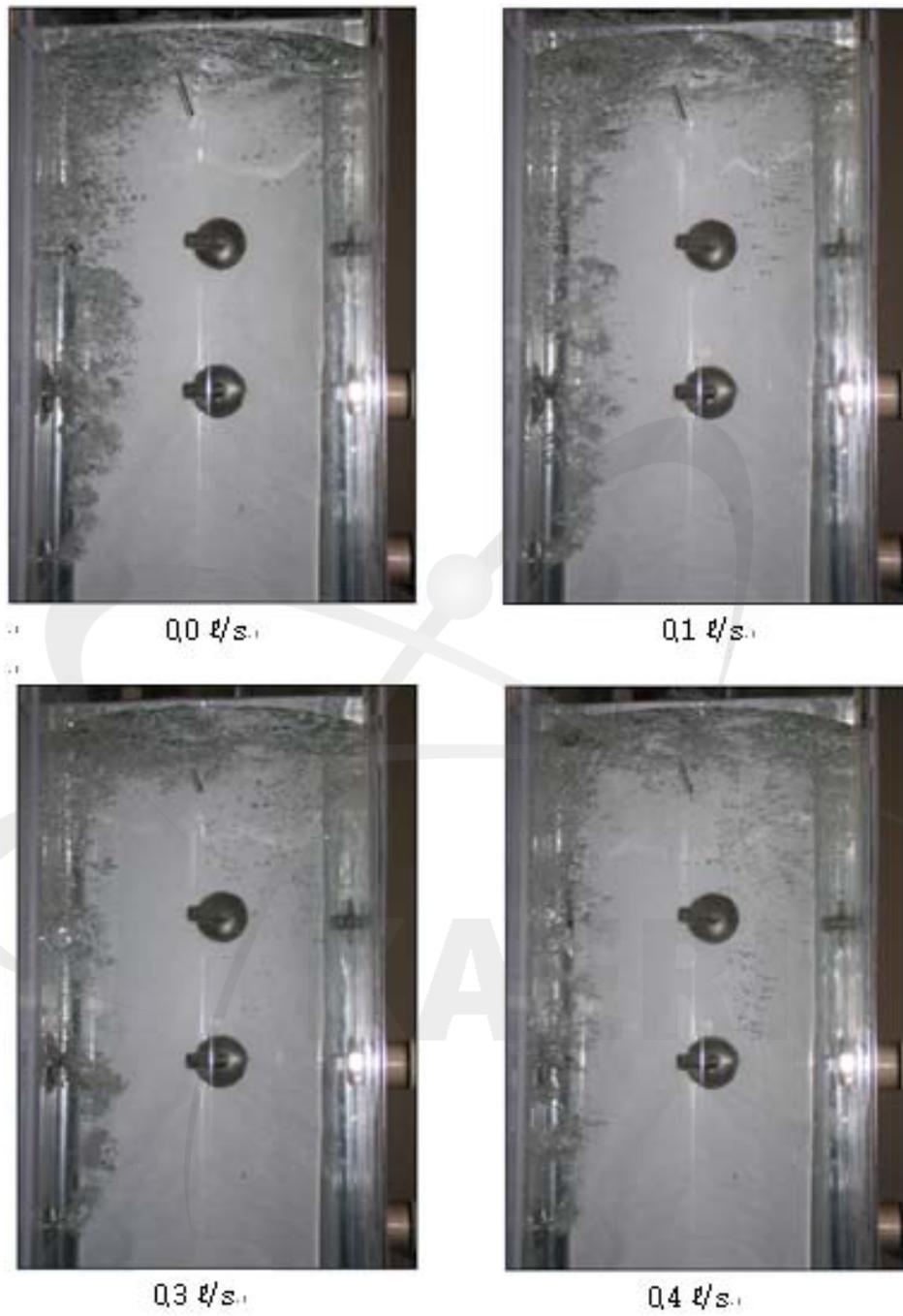


그림 27 질소가스 분무상태(1.0l/s)에서 순환수노즐 type-1의 영향

3.2.2 순환수노즐 주입각도

순환수노즐 type-2 의 각도는 반응용기 내의 용액을 혼합하는 역할을 하였다. 용기의 중심선과의 각도를 3 종 30°, 45°, 60°을 설정하여 type-2 순환수노즐을 제작하였다. 노즐의 방향은 분무노즐 방향이며 자유액면과는 평행 즉, 수평으로 주입하였다. 그러므로 순환수노즐에서 주입되는 순환수는 용액을 회전시키는 역할을 하게 된다.

그림 28-30 은 다공판을 설치한 상태에서 순환수량 0.6 l/로 순환시킬 때에 각 순환수노즐의 각도에 따른 반응용기 내에서의 질소가스의 분포도 이다. 이 실험에서 순환수노즐의 위치는 분무노즐의 90° 방향, 수위상으로는 분무노즐보다 100mm 위에 설치하였다. 순환수가 주입되는 각도에 따라 용액의 회전하는 특성이 조금씩 다르지만 순환수가 어떤 각도를 갖고 주입되더라도 그림 28-30 에서와 같이 분사되는 질소가스는 순환수에 따라 회전하면서 벽면 쪽에서 중심방향으로 이동하였다.

노즐의 각도가 30° 일 경우에는 순환수가 직접 상승하는 질소가스에 부딪쳐 질소가스를 벽면 쪽으로 이동시키는 경향이 있었지만 그 각도가 커지면 순환수의 방향이 벽면 쪽으로 더욱 근접하여 분사되어 질소가스를 더 많이 분산시키는 것으로 나타났었다. 분사각 45° 각도와 60° 각도에서의 결과들은 사진상으로는 분간하기 어려우니 육안으로는 60° 각도일 경우가 약간 유리한 것으로 나타났다.

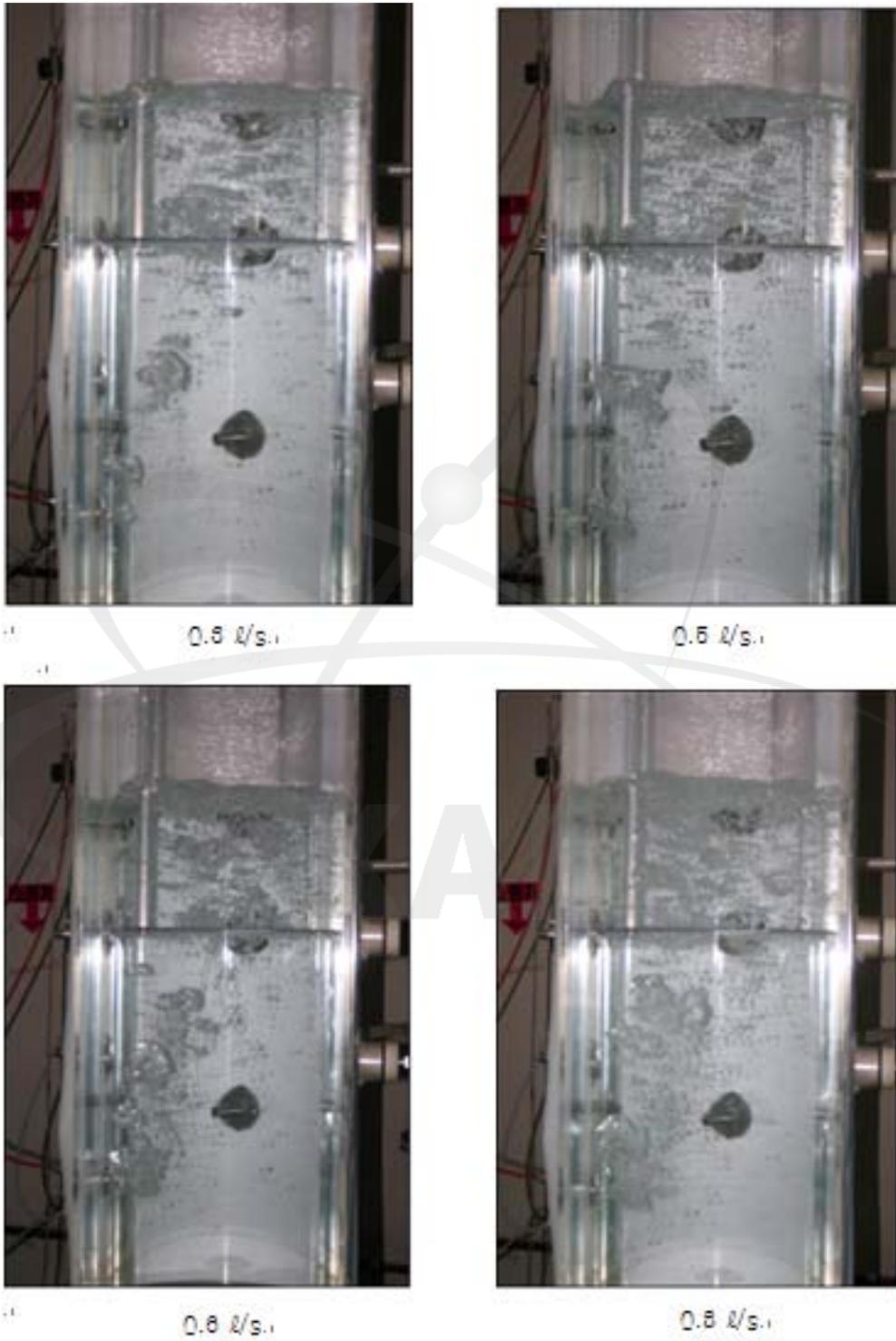


그림 28 순환수노즐 각도 30°일 경우 질소가스 유량에 따른 혼합상태

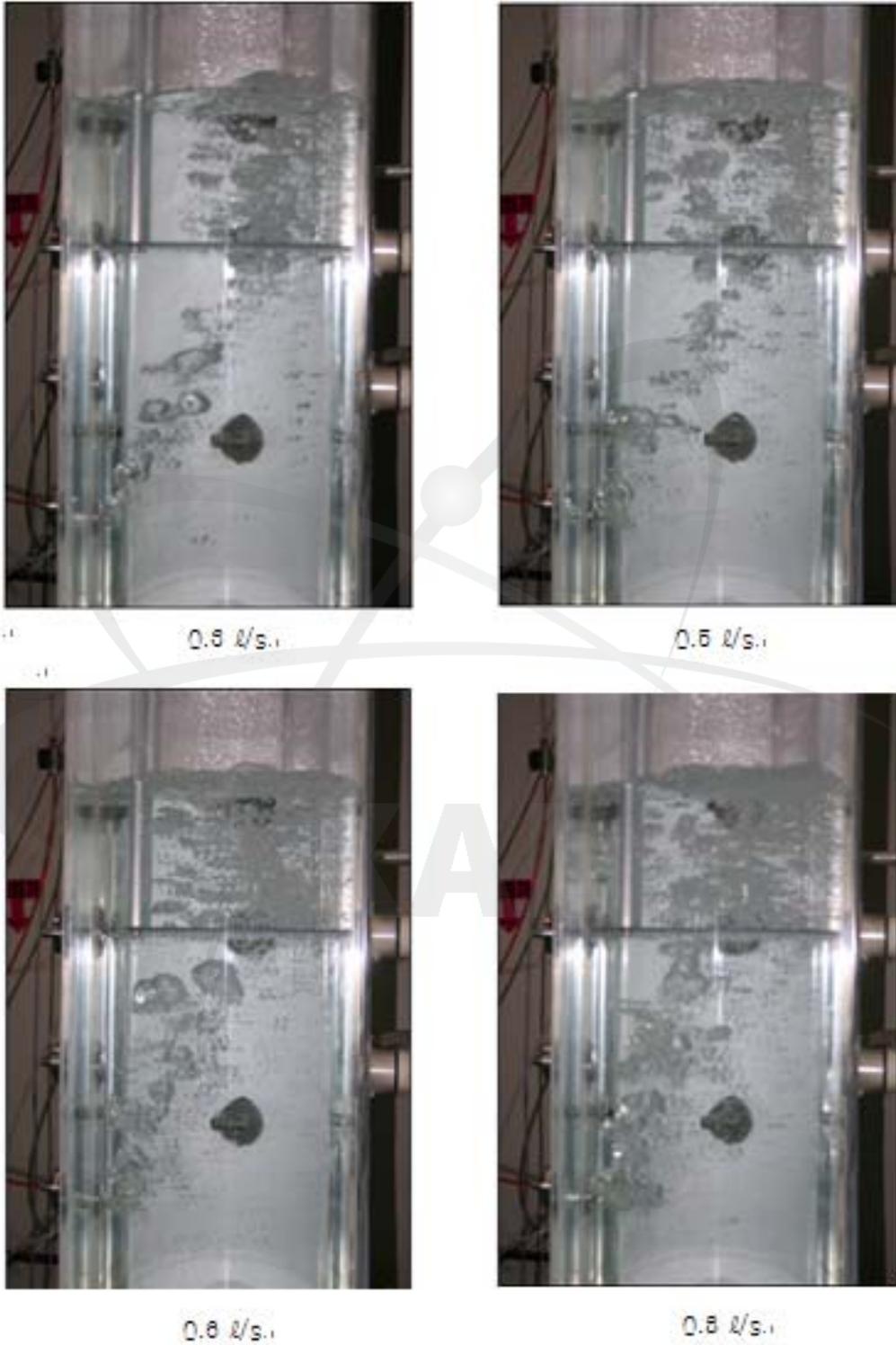


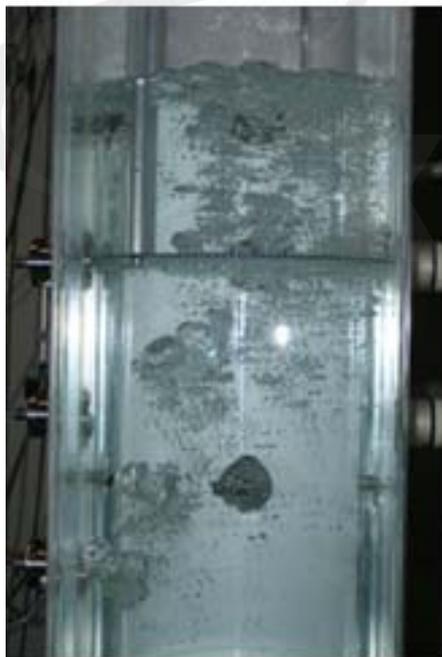
그림 29 순환수노즐 각도 45°일 경우 질소가스 유량에 따른 혼합상태



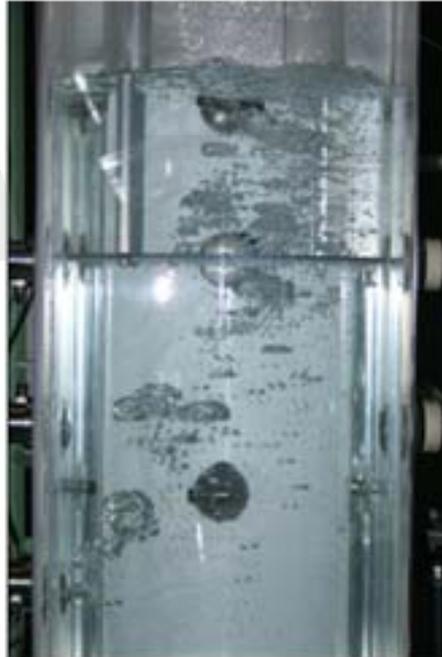
0.8 L/s.



0.5 L/s.



0.8 L/s.



0.8 L/s.

그림 30 순환수노즐 각도 60°일 경우 질소가스 유량에 따른 혼합상태

3.2.3 순환수노즐의 위치

분무노즐과 순환수노즐 사이의 수위상 높이의 차이가 100mm, 200mm, 400mm 일 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 분무노즐보다 400mm 위쪽에 있을 때는 별 영향을 미치지 못하여 제외하였고, 그 높이차이가 100mm, 200mm 일 때를 비교한 것이 각각 그림 31 과 그림 32 이다. 이 실험에서 순환수의 양은 0.55 l/s, 색소는 각 0.6 g/s, 1.0 g/s 로 수행하였고, 질소주입량의 범위는 0.3 에서 0.6 g/s 이었다.

두 경우의 결과 중에서 좋고, 나쁨을 선별하기가 어려웠다. 분사형태를 육안으로 관찰한 바에 의하면 두 노즐 간의 거리가 200mm 일 때가 더 좋은 상태를 유지한다는 결론을 내었다. 높이차이가 100mm 일 때는 낮은 위치에서 순환수의 영향으로 질소가스가 벽면으로 가끔 더 가까이 이동하는 경향을 보였고, 또한 다공판의 위치가 분무노즐에서 400mm 위에 있는 경우에는 분무노즐과 다공판의 중간 지점에서 순환수가 유입되는 것이 더 타당한 것으로 판단하였다.

분무노즐과 90°되는 방향에서 분무노즐보다 100mm 하부에 순환수노즐을 설치하여 같은 조건으로 실험을 수행하였다. 그림 33 은 이 실험에서 측정한 사진인데, 그림에서 보는 바와 같이 순환수가 용액을 회전시키는 역할은 상기의 경우와 유사하였으나 질소가스 분사에는 직접적인 영향을 미치지 못하여 큰 기포가 그대로 스크린 쪽으로 상승함을 볼 수 있다.

순환수노즐의 각도의 영향을 시험한 실험에서도 순환수노즐의 위치가 분무노즐 보다 수위상으로 200mm 위에 설치하는 것이 100mm 위에 설치할 때보다 약간 더 좋은 분포상태를 보였다.

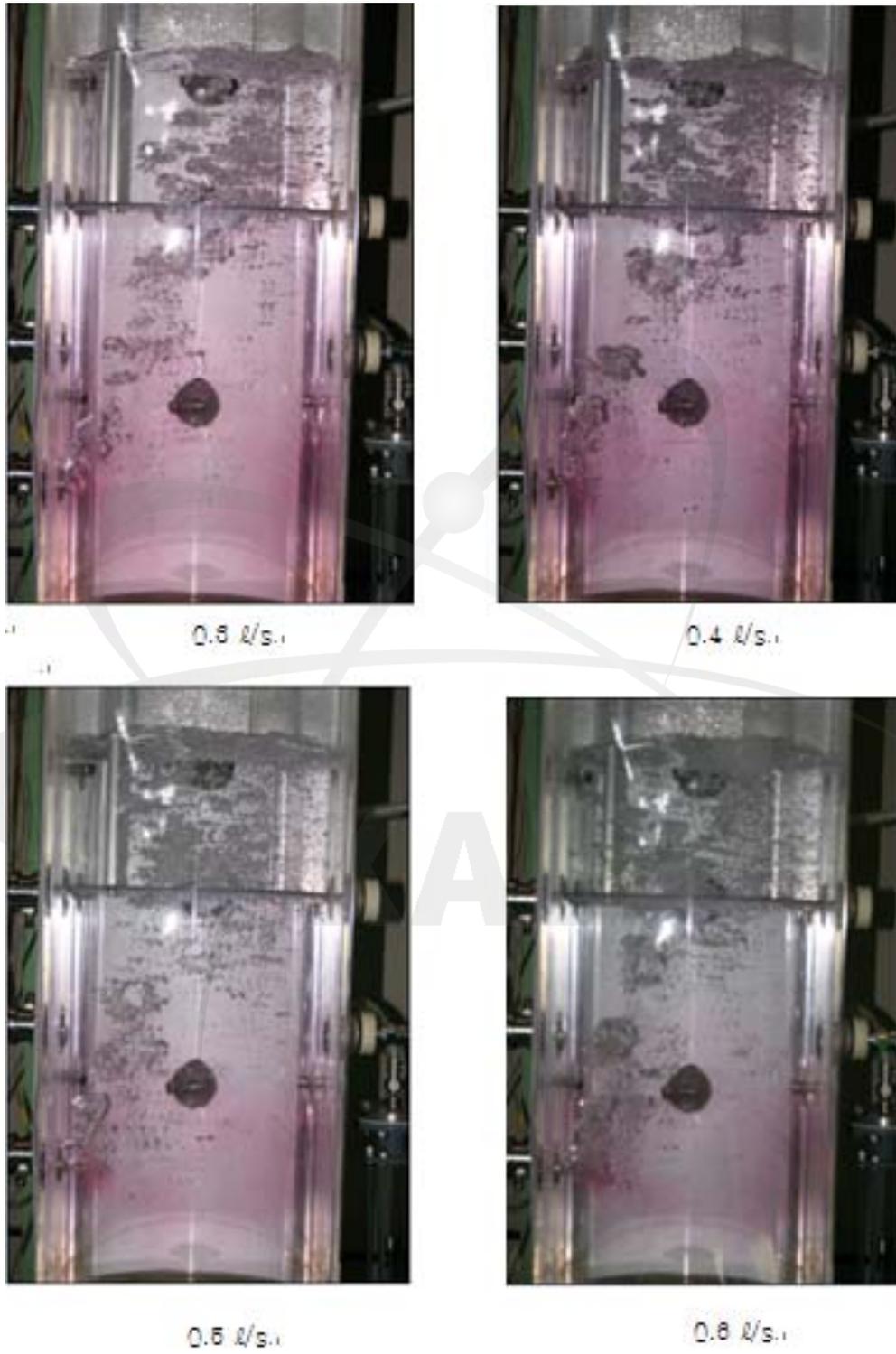
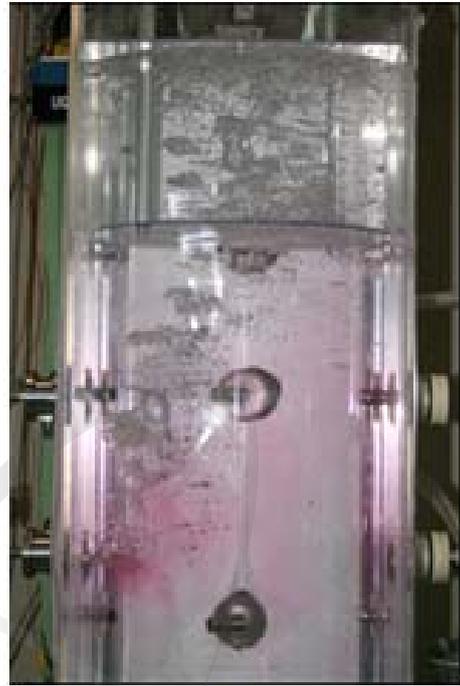


그림 31 분무노즐과 순환수노즐 높이차이 100mm에서 분무상태



0.3 l/s.



0.4 l/s.



0.5 l/s.



0.8 l/s.

그림 32 분무노즐과 순환수노즐 높이차이 200mm에서 분무상태

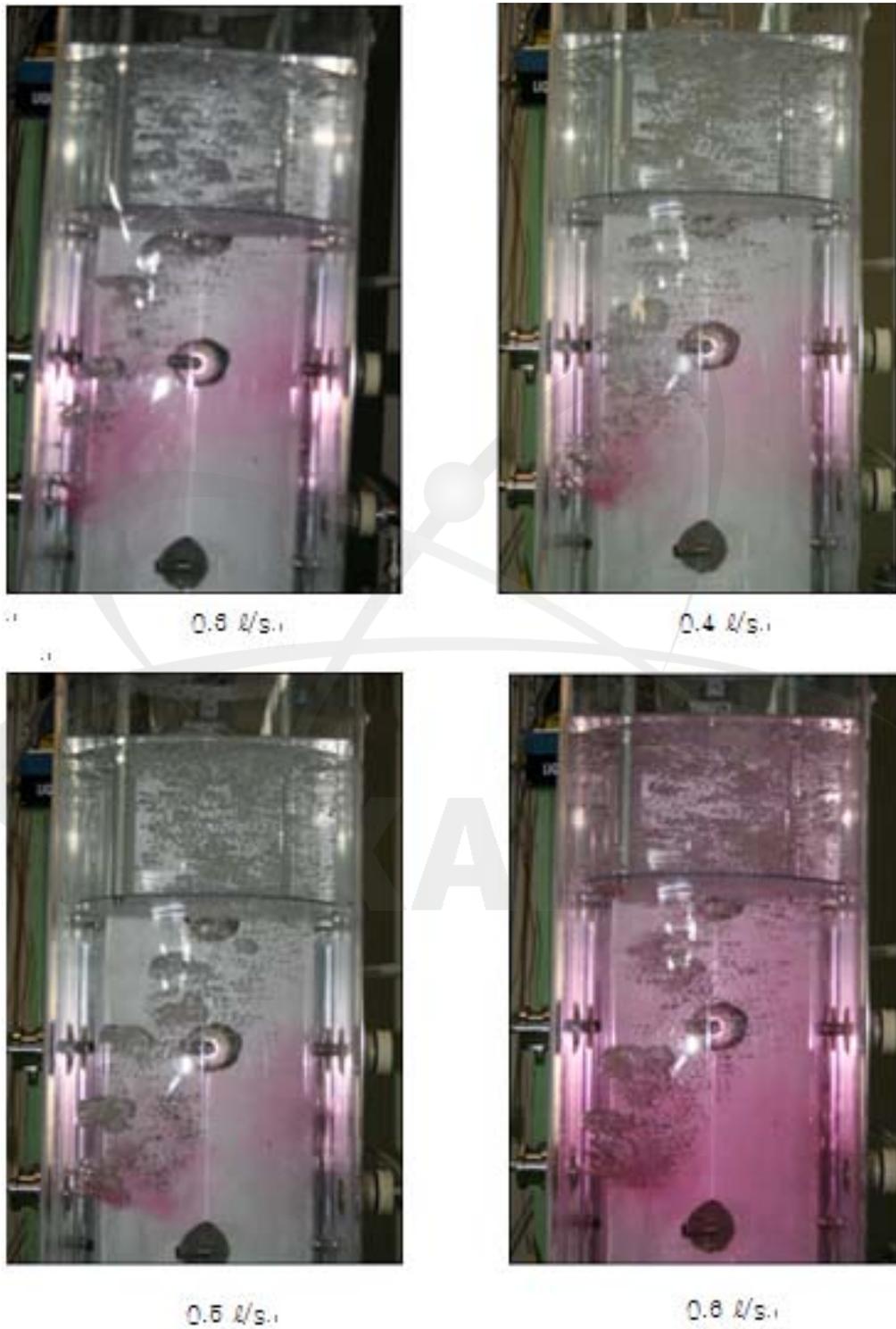


그림 33 분무노즐 하부에서의 순환수 유입

3.2.4 순환수의 유량

순환수의 주요 역할은 소듐과 가성소다(NaOH) 용액이 반응하여 생성되는 열과 고온으로 유입되는 질소가스의 열을 제거하여 가성소다 용액의 온도를 일정하게 유지시키는 것과 생성된 가성소다 용액의 농도를 조절하는 기능이다. 소듐과 물이 반응하면 소듐 24 g 당 139.6 kJ 의 열이 발생하고, 질소가스의 온도를 300°C 상승되게 가열한다면 질소 1 l 당 대략 0.36 kJ 의 열이 발생한다. 소듐 1 g/s 와 질소 1 l/s 를 주입한다고 가정하면 대략 6.2 kW 의 열을 제거하여야 한다. 순환수의 유량이 많으면 열교환기의 효율을 향상시킬 수 있고, 반응용기 내에서 혼합을 효율적으로 할 수 있다.

순환수를 반응용기 내에서 강하게 회전시키면 소듐을 벽면 쪽에서 반응이 일어나게 만들고, 적으면 혼합이 잘 이루어지지 않는다. 그림 34 는 다공판이 설치되지 않은 상태에서 순환수 양을 0.1 l/s 에서 0.35 l/s 까지 변화시키면서 혼합상태를 관찰한 것이다. 이 때 질소가스 주입량은 0.5 l/s, 분무노즐의 각도는 36° 이었다. 순환수가 0.2 l/s 보다 적을 경우에는 벽면 근방에서 질소가스가 상승하지만 질소가스의 양이 증가하면 용기 내에 비교적 균일하게 분포하는 것을 볼 수 있다. 순환수의 유량이 0.1 l/s 일 때에는 질소가스의 유량과 무관하게 벽면 근방에서 질소가스가 상승하였다.

순환수 유량과 질소가스 유량의 상호관계에 대해서는 상당히 많은 실험을 수행하였다. 대표적으로 순환수 0.3 l/s 조건에서 색소주입량을 변화시키면서 측정된 것이 그림 35 이다. 색소주입량에 따라 질소가스 분사현상은 거의 유사하였으나 색소주입량이 많아 질수록 색소는 질소가스 분무의 밖으로 더 많이 확산하는 것을 볼 수 있었다.

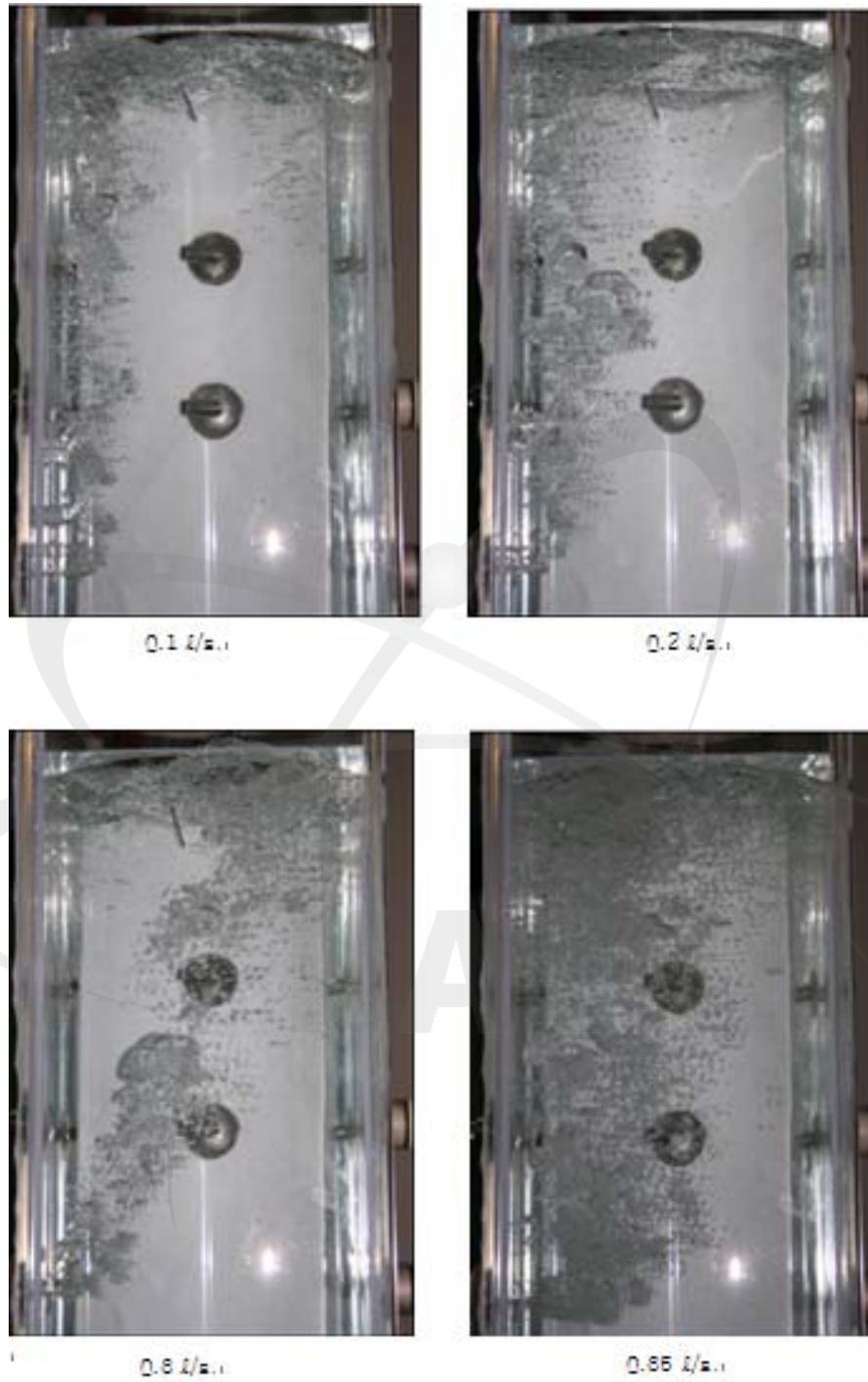


그림 34 질소가스 0.5 l/s에서 순환수의 유량에 따른 유동분포

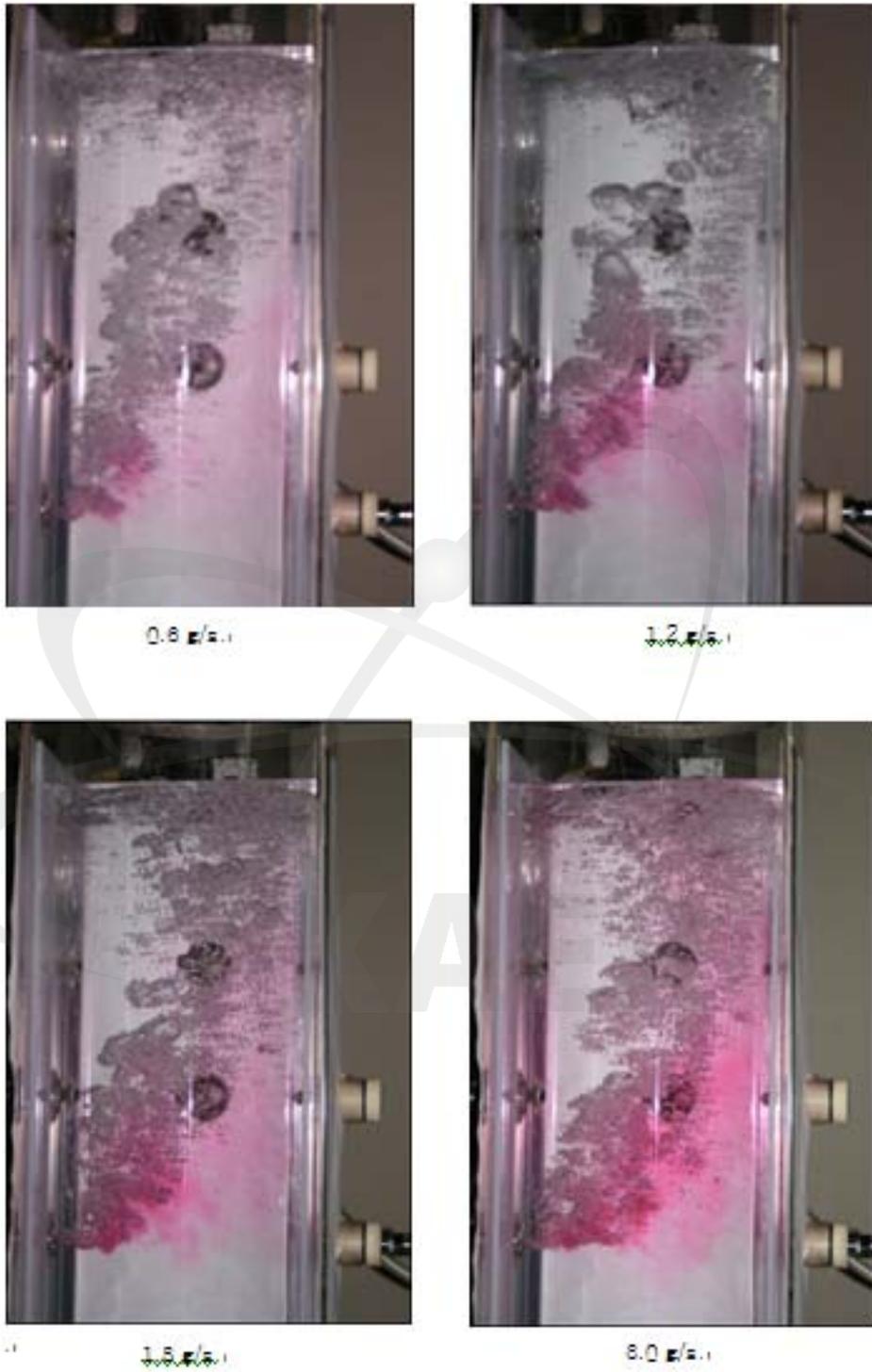


그림 35 순환수 0.3l/s, 질소가스 0.8l/s 일 때 색소주입량에 따른 분사상태

3.3 다공판의 영향

3.3.1 다공판의 규격

다공판이 없을 경우, 질소가스 유량은 0.5 l/s, 순환수 유량은 0.35 l/s 가 최적의 상태로 고려되었다. 앞의 그림에서와 같이 다공판이 없을 경우에는 큰 규모의 기포가 부상하였으므로 실제 반응용기에서는 큰 덩어리의 질소가스가 깨지지 않는 상태에서 자유액면으로 부상하고, 소뜸도 이에 편성하여 자유액면으로 부상하여 적체될 가능성이 높다.

이와 같은 가능성을 없애기 위하여, 분무노즐과 자유액면 사이에 다공판을 설치하여 분사상태를 관찰하였다. 본 실험에서는 2종의 다공판을 제작하여 시험하였다. 다공판-1은 홀의 직경이 5mm, 피치가 10mm 이고, 다공판-2는 홀의 직경이 10mm, 피치가 20mm 이었고, 두께와 배열은 2종 모두 같게 두께 5mm, 삼각배열이었다.

순환수 유량은 0.35 l/s, 다공판과 순환수노즐 간의 간격은 200mm 인 조건으로 실험하였는데 그림 36에서와 같이 다공판-2 경우에는 질소가스의 유량에 관계없이 어느 정도 기포의 크기는 줄었으나 다공판을 통과 한 후에도 상당히 큰 기포가 상승하는 것을 볼 수 있었다. 그림37에서는 질소가스 유량이 0.5 l/s인 조건에서 순환수의 유량을 변화시키면서 질소가스의 분포를 측정 한 것이다. 이 다공판에서는 질소가스가 상당히 적은 크기로 깨어져 상부로 상승하는 것을 볼 수 있었다. 다공판-2에서도 다공판 하부에 어느 정도 질소가스가 정체되는 것을 볼 수 있었는데, 홀의 직경이 적은 다공판-1에서는 다공판-2 보다 더 많은 질소가스가 정체되었다. 그러나 이 정체된 현상으로 인해 유동에 방해가 될 정도는 아니었다.

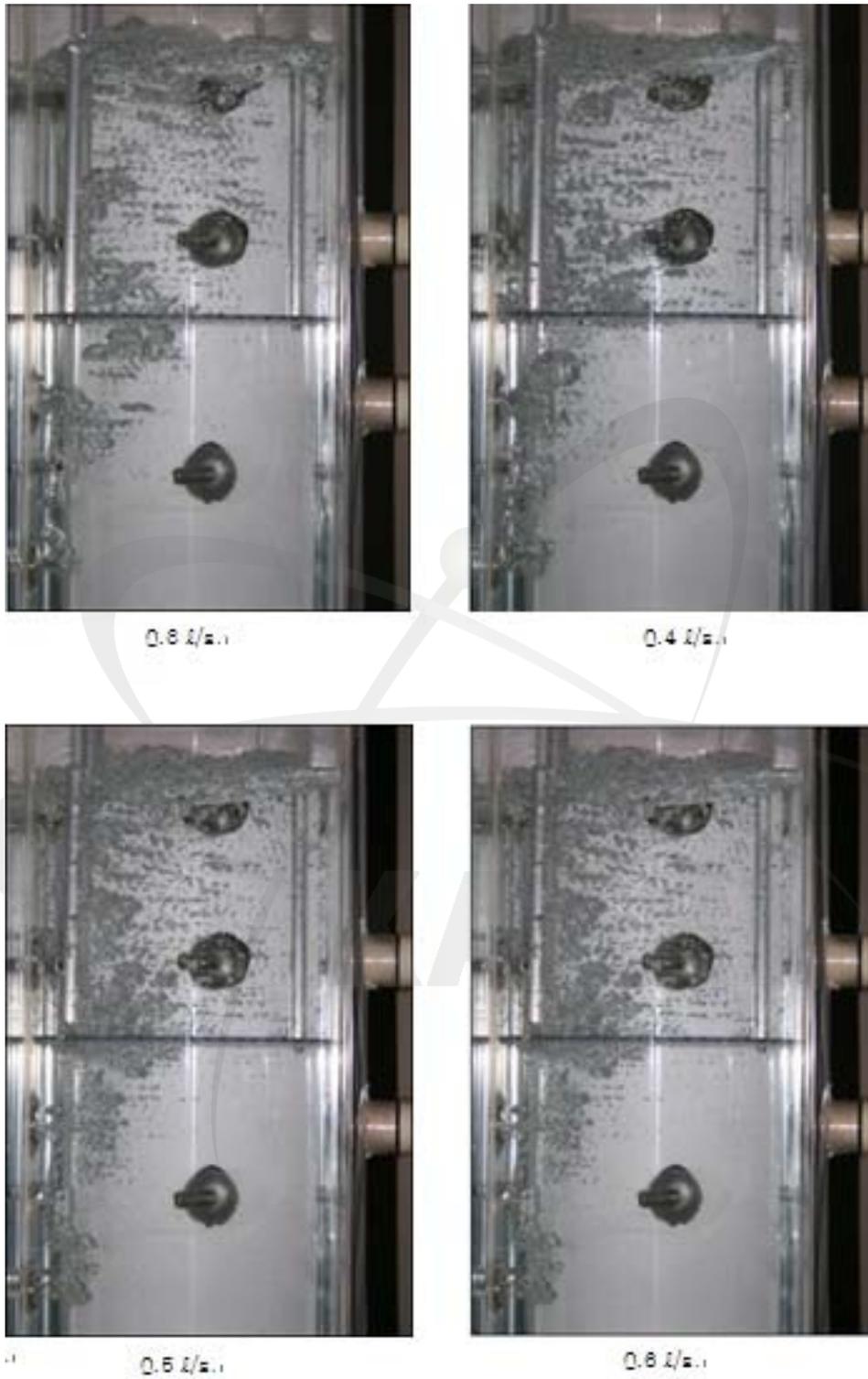


그림 36 순환수 유량 0.35l/s 에서 다공판-2을 설치하였을 때 질소가스 분포

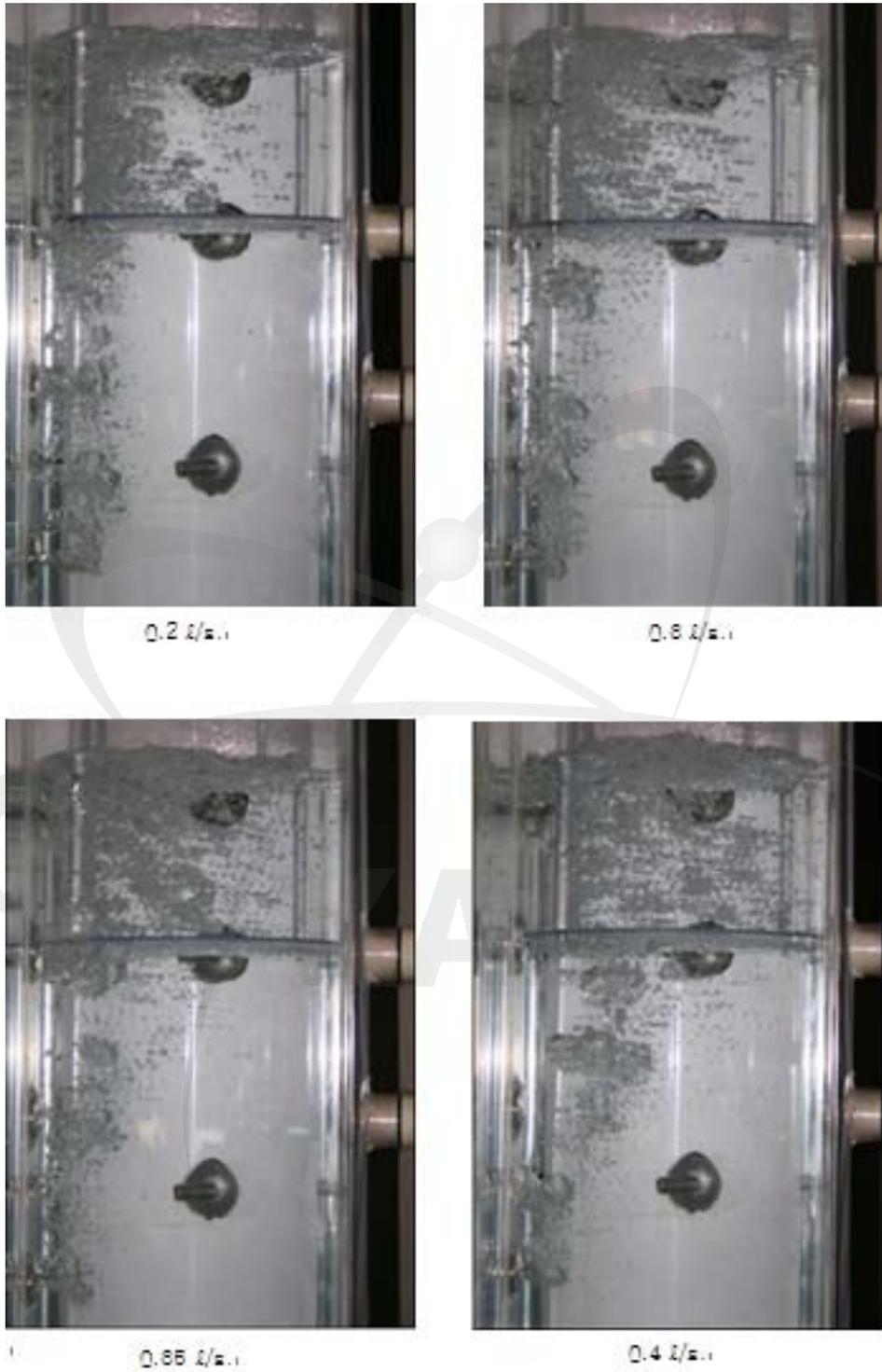


그림 37 순환수 유량 0.35l/s 에서 다공판-1 을 설치하였을 때 질소가스 분포

다공판을 설치하지 않은 실험에서 측정된 그림 34 와 35 에서 보면 순환수의 유량이 0.35 l/s 일지라도 질소가스가 용기에 광범위하게 분포하는 것을 볼 수 있으나 다공판을 설치한 그림 36 과 37 에서는 다공판이 없는 반응용기에서의 실험에서 순환수의 유량이 적을 경우에서와 같이 기포가 벽면으로 편중되는 것을 볼 수 있었다. 이는 다공판에 의한 유동마찰력이 상승하여 용액의 회전량이 감소하기 때문이다. 그러므로 다공판을 설치하는 경우에는 순환수 유량을 증가시킬 필요가 이었다.

그림 38에서는 다공판-1을 순환수노즐의 200mm 상부에 설치하고, 순환수 유량을 0.5l/s에서부터 0.7l/s까지 상승시키면서 질소가스의 분포를 측정하였다. 순환수 유량이 0.5l/s에서는 아직 벽면에 치우쳐 있으며, 0.7l/s 인 경우에는 맞은 편 벽면으로 치우치는 것을 볼 수 있다. 그러므로 다공판-1을 설치한 경우에는 순환수의 유량은 0.55~0.6 l/s 범위가 타당한 것으로 판단된다.

3.3.2 다공판의 위치

다공판의 위치는 순환수노즐과 다공판 간의 간격을 200mm, 250mm, 300mm 및 400mm 를 설정하여 시험하였다. 질소주입량과 순환수 유량을 여러 단계로 나누어 시험하였으나 여기서는 질소가스 주입량 0.5l/s, 순환수 유량 0.55 l/s 인 경우에 대해 순환수노즐과 다공판 사이의 간격에 따라 그림 39 에 도시하였다. 다공판의 위치가 높으면 반응용기의 용량이 커지므로 가능한 낮은 것이 바람직하다. 400mm 이상에서는 특별한 영향이 없어 생략하였고, 이 그림의 첫 번째 그림은 분무노즐과 순환수노즐 사이의 간격이 100mm 인 경우이고 2 번째 그림은 이 거리가 200mm 인 경우이다. 여러 경우에 대해 관찰한 바에 의하면 다공판의 위치는 600mm 가 타당하였다.

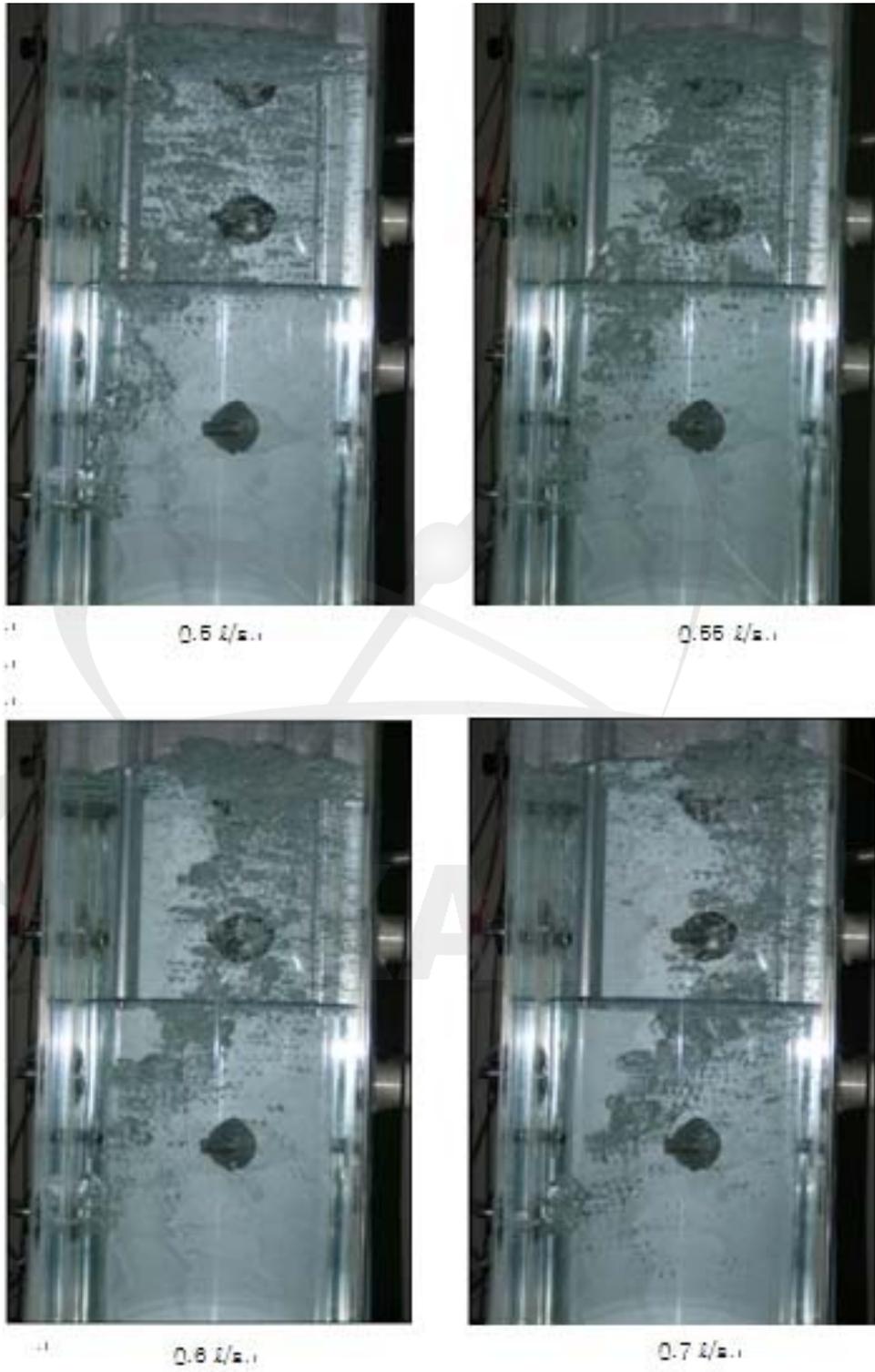
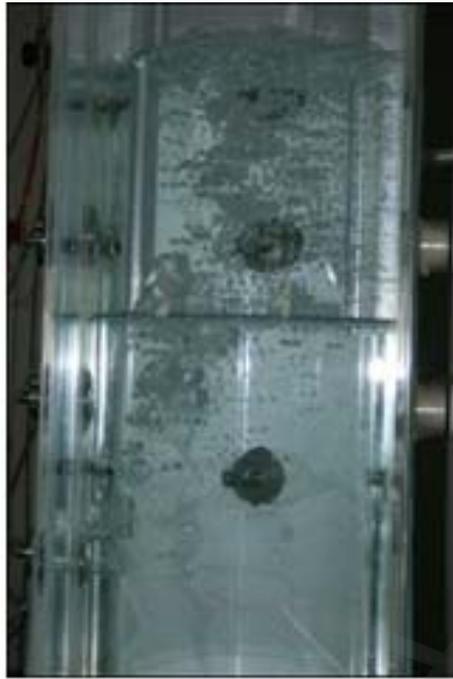


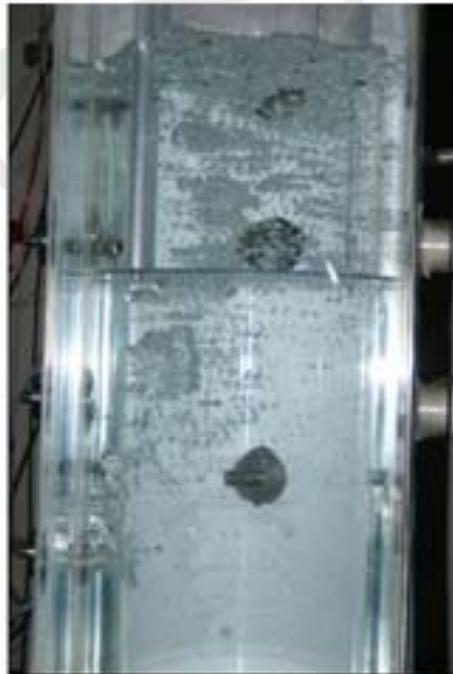
그림 38 다공관을 설치한 경우 순환수 유량에 따른 기포의 분포



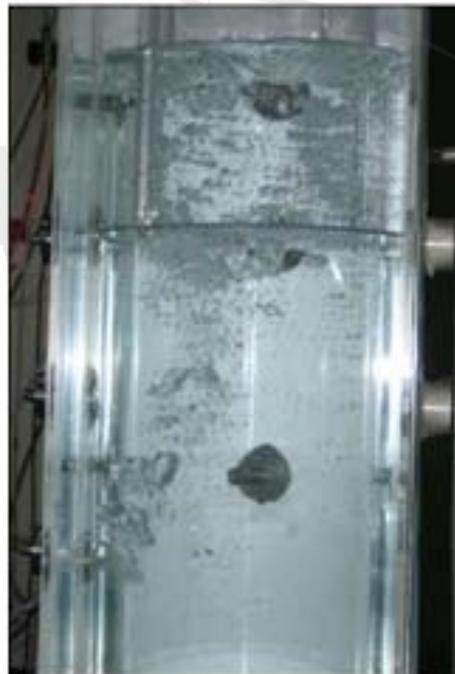
200 mm. ↓



200mm. ↓



250 mm. ↓



800 mm. ↓

그림 39 순환수노즐과 다공판 간의 간격에 따른 분무상태

3.3.3 수위

용액의 자유액면 위에는 대략 400mm 높이의 커버가스 공간이 필요하므로 용액의 수위는 반응용기의 부피를 줄이기 위해서는 낮을수록 좋다. 다공판을 하부에서부터 600mm 위치에 설치하고, 수위를 700mm, 800mm, 900mm 에 대해 비교한 것이 그림 40 이다. 이 그림에서 질소가스 주입량 0.5l/s, 순환수 유량 0.6 l/s 이다. 이 그림에서 첫 번째 그림인 수위가 700mm 에서는 자유액면이 심하게 출렁이는 것을 볼 수 있었고, 두 번째 그림은 수위는 800mm 인 경우이며, 세 번째 그림은 수위가 800mm 이면서 질소가스의 주입량이 0.6l/s 인 경우이다. 네 번째 그림은 수위가 900mm 인 경우로 자유액면에 요동은 적으나 이보다 조금 낮은 800mm 정도의 수위가 적합한 것으로 고려되었다.

최종적으로 최적 유체조건으로는 표 3 과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 질소가스 유입량은 0.5 l/s 가 최저 값으로 이보다 높은 것이 좋겠으나 질소가스 주입량을 낮추는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 분무노즐의 분사각은 작을수록 유체적 상태가 양호하였으나 실험한 가장 낮은 각도 15° 이하인 것이 바람직하다. 가장 문제점으로 지적할 수 있는 것은 질소가스가 분무상태로 작게 분리되지 못하고 큰 덩어리로 상승한다는 것과 색소주입량이 증가하면 질소가스에 혼입되지 못하는 양이 많아져 색소가 독립적으로 확산한다는 것이다.

그림 41 은 최적조건으로 선정된 조건에서의 혼합 현상이다.

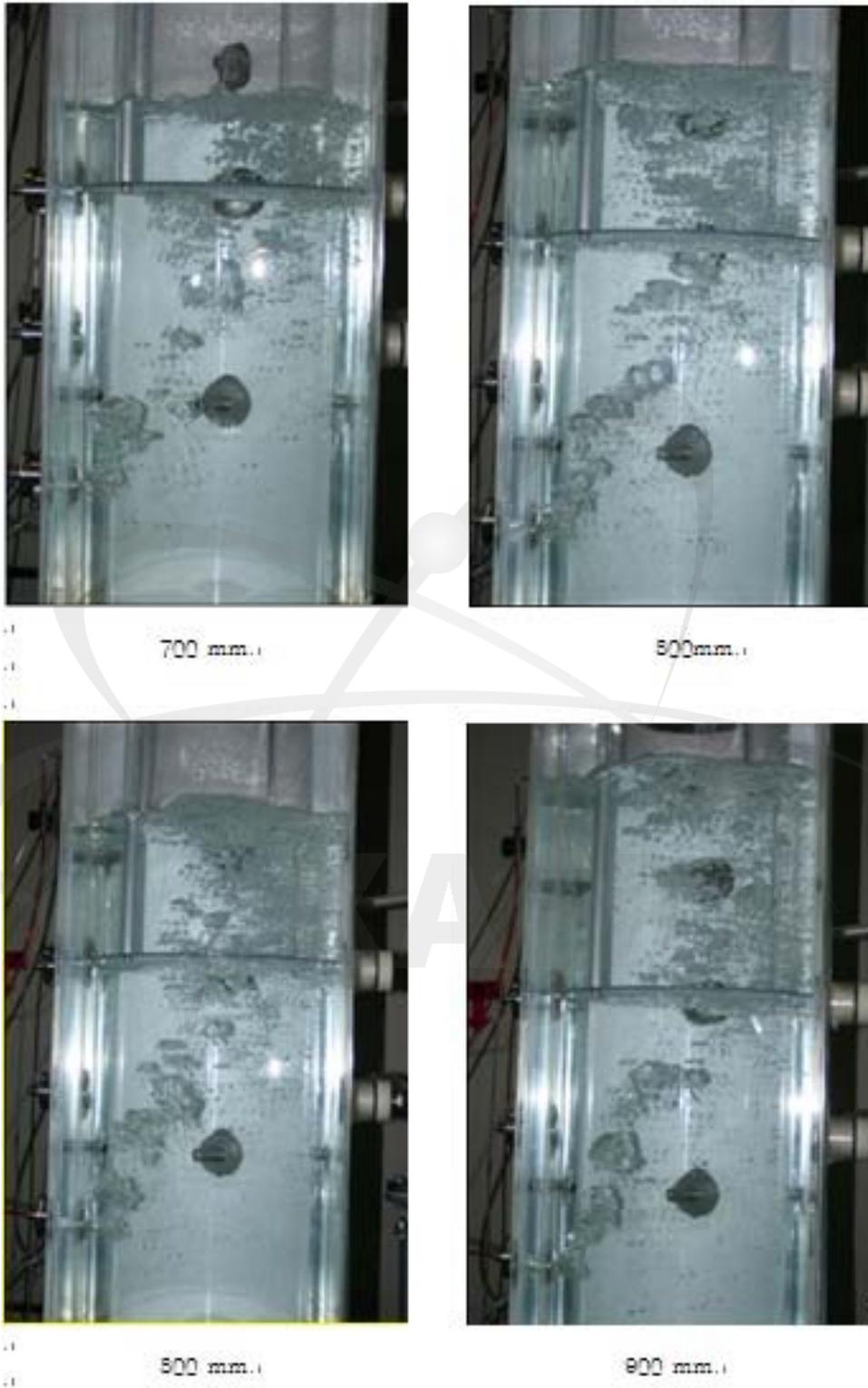


그림 40 수위에 따른 질소가스 자유액면 요동상태

표 3 최적 주입조건

실험인자	단위	최적조건
질소 주입량	cc/s	>550.
물(색소) 주입량	cc/s	1.
순환수 유량	ℓ/s	0.55
분무노즐 위치	mm	200
분무노즐 각도	도	< 15°
Type-1 순환수노즐 위치	mm	-
Type-2 순환수노즐 위치	mm	400
Type-2 순환수노즐 각도	도	60
수위	mm	800
다공판 위치	mm	600
다공판 규격 (t5)	mm	Φ5×p10

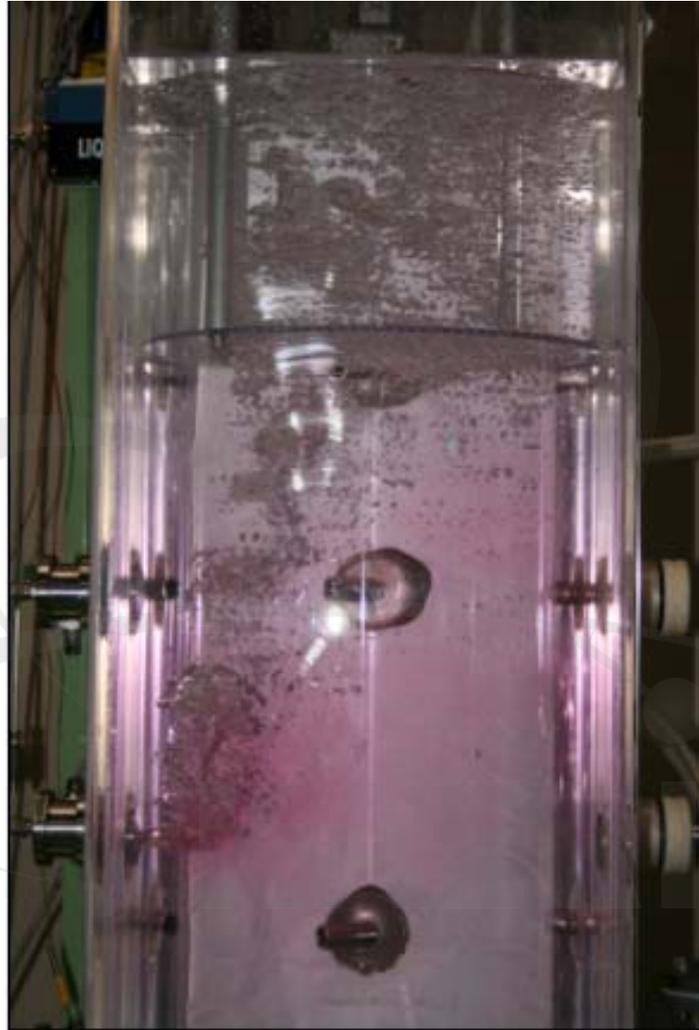


그림 41 선정된 유체적 최적조건에서 색소의 혼합상태

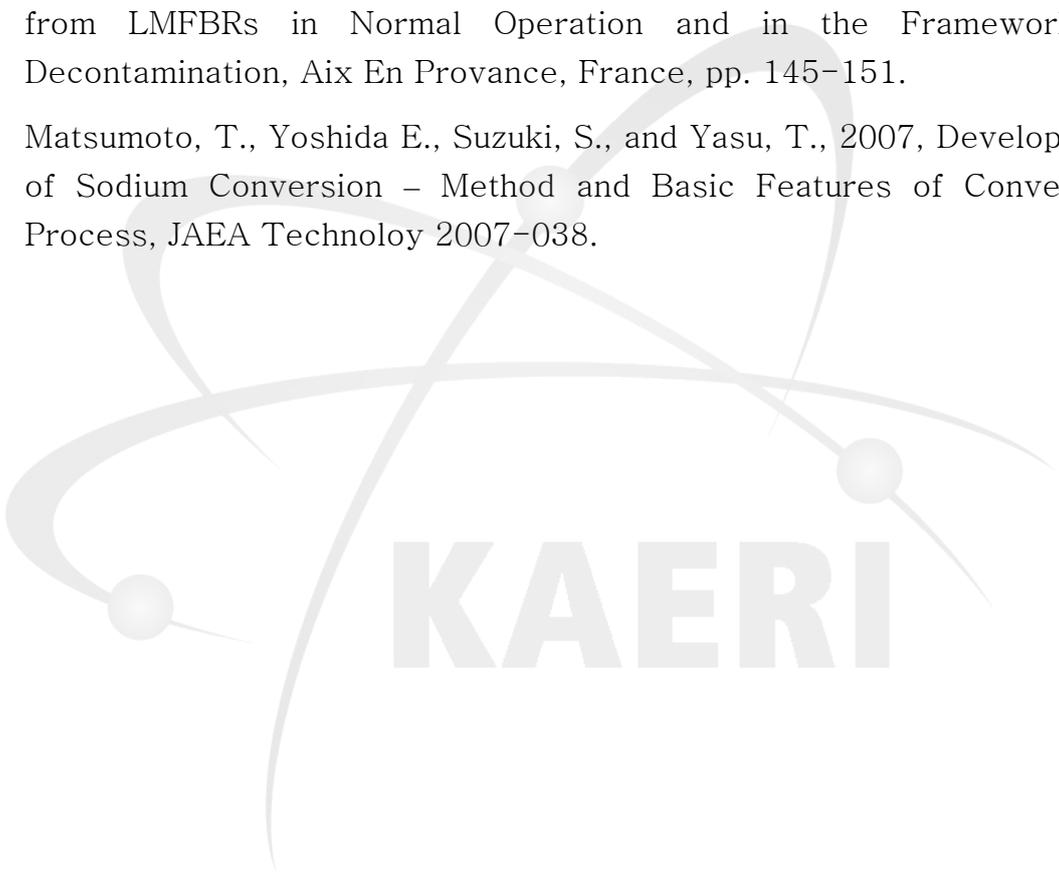
4 장 결 론

실험에 재사용이 불가능한 소듐을 처리하기 위한 한 방안으로 소듐을 가성소다 용액(NaOH)과 반응시켜 가성소다로 만들고 이를 중화시켜 처분하는 사용후 소듐 처리기술을 개발하고 있다. 이 방법에는 소듐을 가성소다로 채워진 반응기 내부로 분사시켜 반응시킬 때에 반응성을 균일하게 하기 위하여 분무노즐을 이용해 질소가스와 같이 분사시킴으로써 소듐을 미립화시켜 반응시킨다. 소듐을 사용하는 실험 전에 물로 모의하는 실험을 수행하여 결과를 소듐실험에 활용하고자 실험을 수행하였다. 실험에서는 질소와 색소로 이루어지는 분사의 조건, 순환수의 유동조건 및 순환수가 반응용기로 주입되는 위치와 방향 등이 유체적 혼합에 미치는 영향을 사진을 촬영하여 분석하였고, 300 세트의 실험자료를 이용하여 표 3 에서와 같이 최적의 유체적 조건을 도출하였다.

분무노즐에서 질소가스가 분사될 때에 질소가스가 분무상태로 작게 분리되지 못하고 큰 덩어리로 상승하였다. 큰 질소가스 기포는 노즐의 가장자리에서 생성되었는데 노즐에서 질소가스의 층류가 분리되면서 발생하는 것으로 판단되며, 노즐의 출구를 더 개선할 필요가 있다. 색소와 질소가스가 분무 상태로 잘 섞이지 못하여 색소주입량이 증가하면 질소가스에 혼입되지 못하는 양이 많아져 색소가 독립적으로 확산하였다.

참 고 문 헌

1. Kim, B., Kim, J., Kim, T, Nam, H, Jeong, B., Choi, B., Choi, J., and Lee, Y., 2010, Current Status on Development of Sodium Waste Treatment Process, *KAERI/AR-856/2010*, KAERI Report.
2. Magny, E., 1997, Fast Reactor Bulk Sodium Coolant Disposal NOAH Process Application, IAEA Secial Mtg. on Sodium Removal and Disposal from LMFBRs in Normal Operation and in the Framework of Decontamination, Aix En Provance, France, pp. 145-151.
3. Matsumoto, T., Yoshida E., Suzuki, S., and Yasu, T., 2007, Development of Sodium Conversion – Method and Basic Features of Conversion Process, JAEA Technoloy 2007-038.

A large, light gray watermark of the KAERI logo is centered on the page. The logo consists of the word "KAERI" in a bold, sans-serif font, with a stylized graphic of two curved lines and two spheres above it, resembling an atomic structure or a dynamic path.

KAERI

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-4249/2010					
제목 / 부제	사용후 소듐처리 물모의 실험				
연구책임자 및 부서명	남 호 윤, 소듐 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험				
연구자 및 부서명	김 종 만, 김 병 호, 이 용 범				
출판지		발행기관		발행년	
페이지	p. 76	도표	있음(○), 없음()	크기	Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비(), _ 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20 줄내외)	<p>실험에 재사용이 불가능한 소듐을 처리하기 위한 한 방안으로 소듐을 가성소다 용액 (NaOH)과 반응시켜 가성소다로 만들고 이를 중화시켜 처분하는 기술이 개발되고 있다. 이 방법에는 소듐을 가성소다로 채워진 반응기 내부로 분사시켜 반응시킬 때에 반응성을 균일하게 하기 위하여 분무노즐을 이용해 질소가스와 같이 분사시킴으로써 소듐을 미립화시켜 반응시킨다. 이와 같은 현상은 소듐을 사용하는 실험에서는 관찰, 측정할 수 없기 때문에 소듐을 사용하는 실험 전에 물로 모의하는 실험을 수행하여 결과를 소듐실험에 활용하고자 한다. 이 실험에서는 질소와 색소로 이루어지는 분사의 조건, 순환수의 유동조건 및 순환수가 반응용기로 주입되는 위치와 방향 등이 유체적 혼합에 미치는 영향을 사진을 촬영하여 분석하였고, 300 세트의 실험자료를 이용하여 최적의 유체적 조건을 도출하였다.</p>				
주제명키워드 (10 단어내외)	NOAH 공정, 분무노즐, 사용후 소듐처리				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-4249/2010					
Title / Subtitle	Experiment on the Water Mock-up for a Sodium Waste Treatment Process				
Project Manager and Department	Nam Ho-Yun, Constuction of Sodium Thermal-hydraulic Experimental Facility and Integral Effect Test				
Researcher and Department	Kim Jong-Man, Kim Byung-Ho, Lee Yong-Bum				
Publication Place		Publisher		Publication Date	
Page	p. 76	Ill. & Tab.	Yes(o), No ()	Size	Cm.
Note					
Classified	Open(o), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)	<p>As a treatment method of the waste sodium which was produced from a sodium facility, an investigation for a reaction procedure of the waste sodium with the sodium hydroxide has been developed. The sodium was injected into a reaction vessel filled with a caustic soda through an atomizing nozzle to maintain the reaction uniformly. There were complex reacting phenomena in the system to observe with a naked eye. Therefore, a water mock-up was carried out for a practical use the data got in the waste odium treatment test. The major experimental parameters are the flowrate of water through an atomizing nozzle and the recirculation rate. In addition, the positions and flow directions of the nozzles are important parameters, also. From this experiment, 300 sets of data were obtained by analyses of the phenomena of the photographic records, and the optimum flowing conditions.</p>				
Subject Keywords (About 10 words)	NOAH process, Atomizing nozzle, Sodium waste treatment				