

단순 스파저에 의한 증기 응축 영역도 실험

Experimental Study of Steam Condensation Regime Map for Simplified Spargers

김연식, 윤영중, 송철화, 박춘경, 강형석, 전형길

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

GIRLS 장치를 이용하여 단일-구멍 및 4-구멍 증기 스파저에 대한 증기 응축 영역도 생산을 위한 실험이 수행되었다. 단일-구멍 스파저에 대해서는 동압계의 측정 결과를 바탕으로 주파수와 압력 크기 등을 바탕으로 응축 영역도가 작성되었다. 4-구멍 스파저에 대해서는 응축 소리와 동압력계의 변화를 바탕으로 응축 영역도를 작성하였다. 단일-구멍과 4-구멍 스파저의 응축 영역도를 바탕으로 단순 스파저에 대한 증기 응축 영역도를 수조 온도와 증기 유속에 대하여 제시하였다.

Abstract

An experimental study was conducted to produce a condensation regime map for single-hole and 4-hole steam spargers using GIRLS facility. The regime map for a single-hole sparger was derived using parameters such as the frequency and magnitude of the dynamic pressure. For 4-hole sparger, the regime map was derived using the trends of sound and dynamic pressure. Using the single-hole and 4-hole data, a steam jet condensation regime map was suggested with respect to pool temperature and steam mass flux.

1. 서 론

수조내의 증기제트 응축현상에 대하여는 그사이 많은 연구와 실험이 수행되었다. 연구와 실험의 대상은 응축현상에 대한 이해와 규명을 목적으로 한 것이 주류를 이루고 있다. 이를 구분하여 보면 응축제트 형상 및 길이, 증기제트 유동특성, 응축 열전달계수, 응축 진동(또는 안정성), 응축제트에 의한 제트유동, 그리고 수조내 열혼합 등으로 나타낼 수 있다. 이러한 연구 결과들에도 불구하고 증기제트 응축현상의 복잡성과 측정(장치)능력의 한계 등으로 인하여 증기제트 응축현상에 연구는 미세 영역에 대한 현상이해 보다는 전체 영역에 대한 현상 이해에 초점이 맞춰져 있어 증기제트 응축현상에 이해에는 측정기술 개발, 미세 영역 현상에 대한 심층 연구, 그리고 응축현상을 적절히 모형화하는 노력이 필요한 실정이라 하겠다.

증기제트 응축에 대하여는 한국원자력연구소에서 소규모와 실규모 실험[1-5]이 수행된 바 있다. 소규모 실험에는 작은 수조내의 단일노즐에 의한 실험, 축소 RDT내 단일노즐 및 간이 Sparger에 의한 실험, 그리고 GIRLS 장치를 활용한 단일구멍 및 다중구멍 실험 등이 있으며, 그리고 실규모 실험에

는 B&C 장치를 활용한 원형 I-Sparger 실험과 단순 I-Sparger 실험 등이 있다. 소규모 실험의 결과는 실규모 실험을 위한 실험장치 설계의 입력자료, 관련 현상이해, 실험 Matrix 설정, 그리고 실험 결과 분석을 위한 기초 자료 등으로 활용될 수 있도록 서로 유기적인 관계를 유지하도록 하고 있다.

본 논문에서는 실규모 실험인 B&C 응축진동 실험을 위한 실험 Matrix 설정과 결과 분석을 위한 기본 자료로서 GIRLS 장치를 이용하여 단일구멍 및 4-구멍에서의 증기응축 영역도 작성 실험 수행 결과를 기술하였다.

2. GIRLS 실험 장치

당 연구분야에서는 소규모 증기제트 응축에 대한 범용 실험을 위하여 GIRLS (General Investigation Rig for Liquid/Steam jet direct contact condensation)를 구성한 바 있다. 본 장에서는 GIRLS에 대한 주요 재원, 주요 측정 설비, 실험 데이터 취득, 그리고 실험절차에 관한 내용을 정리하였다.

2.1 GIRLS 주요 재원

GIRLS는 크게 증기발생기와 간이 Sparger, 그리고 수조로 이루어져 있다. 증기발생기에서는 Demi. Water를 사용하여 필요한 압력(최대 10기압)에서 최대 360kg/hr의 증기를 공급하고, 공급된 증기는 배관과 유량계를 거쳐서 간이 Sparger를 통하여 수조내 물속으로 분사되어 그곳에서 응축된다. 그림 1에는 GIRLS 장치에 대한 개념도를 나타내었다.

보일러(증기발생기)는 전기 히터를 사용하여 증기를 발생하며 주요 재원은 표 1에 정리하였다. 보일러에서 발생된 증기는 1"(Sch 40) 배관을 따라 Vortex 유량계를 통과하여 유량제어 밸브를 지나 간이 Sparger로 흐르게 된다. 유량제어 밸브는 게이트 밸브로서 Sparger로 흐르는 증기유량 제어 및 격리기능을 동시에 갖는다. 간이 Sparger를 통하여 분사된 증기는 수조내에서 응축이 일어난다. 수조는 직경 1.8m, 높이가 1.5인 Stainless Steel 탱크이며 내부 벽면에는 음파 반사를 최소화하기 위하여 2cm 정도의 Acoustic Sponge가 입혀져 있다. 정상적인 경우 수조의 물 깊이는 약 1.3m이다. 간이 Sparger는 1"배관에 14"배관을 밖에 짜서 두 배관사이에 공기층이 존재하도록 하여 물 속에서의 열 손실을 최소화하였다. 간이 Sparger 증기 구멍의 크기는 차세대 원전인 APR1400의 I-Sparger의 구멍의 크기인 직경 1cm로 하여 원형의 물리적 특성을 유지하도록 하였다. 그림 2에는 Test Section인 단일구멍 및 4-구멍의 간이 Sparger 형태를 나타내었다.

2.2 주요 측정설비

GIRLS 장치에서 측정하는 주요 변수는 증기 유량, 온도 및 압력과 수조내에서의 물 온도와 동압, 그리고 유속이다. 표 2에는 GIRLS 실험 장치에서 사용되는 측정장치들에 대한 주요 재원을 나타내었다. 동압력은 증기제트 응축 진동에 의하여 발생하는 동압력의 크기를 측정하는 것으로서 응축 영역도 작성에서 기준 인자로 사용된다. 유속 측정을 위한 Pitot 튜브는 증기제트에 의하여 형성되는 제트유동의 속도를 측정하기 위한 것으로서 동압-정압 사이의 압력차를 이용한 속도 측정개념을 사용한다.

2.3 실험 데이터 취득계통

GIRLS 장치의 측정 변수들에 대한 데이터 취득계통(DAS)은 Window NT 환경에서 HP사의 DAC Express 프로그램을 사용하였다. 각 계측기의 위치 및 DAS에서의 표시(ID)는 표 3에 정리하였다. GIRLS 장치에는 원통형 수조와 사각형 수조가 있으나 본 보고서에서는 원통형 수조에서만 실험

을 수행하였으므로 사각형 수조의 계측 계통은 사용하지 않았다.

실험에 앞서 각 계측기에서부터 DAS사이의 Data Processing에 대한 Calibration을 수행하였다. 표 4에는 DAS에서 취득하는 주요 계측기들에 대한 Calibration에서 사용된 Calibrator와 DAS의 출력 변수 형태, 그리고 Calibration 결과를 정리하였다.

3. 증기응축 진동 영역도 실험

이미 기술된 바와 같이 GIRLS 실험 장치에서의 증기응축 진동 실험은 실규모 장치인 B&C 응축 진동 실험 Matrix 설정 및 실험 결과 분석을 위한 기초 자료로서 활용하기 위하여 수행되었다. Test Section인 단일구멍 및 4-구멍을 가진 간이 Sparger를 제작하였으며 실험을 수행하여 증기응축 영역도를 작성하고 또한 4-구멍 Sparger에서의 국부온도 특성 실험을 수행하였다.

3.1 단일구멍 응축진동 실험

단일구멍 증기응축 진동 영역도에 관해서는 선행된 연구결과를 활용할 수도 있겠으나 관심있는 대상 발전소가 APR1400이므로 APR1400의 I-Sparger의 설계 특성을 반영한 Test Section에 대하여 실험을 수행함이 타당하다는 인식 하에 단일구멍과 4-구멍 간이 Sparger를 제작하였다. 앞장의 그림 2에 각각의 형상을 나타낸 바 있다.

응축진동 영역도 작성을 위한 실험 수행 방법은 크게 두 가지 즉, 측정된 자료들만을 활용하는 방법과 음향 및 측정 자료의 변화를 동시에 활용하는 방법으로 대별할 수 있다. 측정된 자료만을 활용하는 방법은 실험자가 영역도 주요 변수들의 값을 변화시키면서 자료를 취득한 후 실험 결과 분석을 통하여 영역도를 작성하는 방법으로서 영역도를 작성함에 있어서 결과 분석의 자료가 많아지고 영역도의 경계 결정에 불확실성이 커지는 단점이 있으나 전반적인 물리적 현상을 반영하는 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 음향 및 측정 자료의 변화를 동시에 활용하는 방법은 증기응축 영역도의 경계에서 발생하는 음향 및 측정된 자료의 변화를 실험자가 판단하여 자료 취득에 활용하는 방법으로서 대부분의 자료는 응축 영역도의 경계 자료가 되어 결과 분석의 자료가 비교적 적고 영역도의 경계 결정이 확실해지는 장점이 있는 반면 실험자의 자의적 요소가 영역도에 반영되는 불확실성이 존재한다는 것이 단점이라 하겠다.

단일구멍 응축진동 실험은 전반적인 물리적 현상을 반영한 결과를 얻는 것을 목표로하여 측정된 자료들만 활용하는 방법을 선택하였다. 실험 경우의 수가 많아져 자연 결과 정리에 시간이 많이 소요되었다. 부록 A에는 단일구멍 Sparger의 실험결과를 일정 범위의 수조온도에 대해서 동압센서(DPT03)의 출력(V)을 Pa단위로 환산하여 FFT(Fast Fourier Transform)한 후 압력 침두가 일어나는 주파수(f_1, f_2)와 해당 주파수의 압력크기(amp_1, amp_2)와 동압력 진동의 Peak-to-Peak에 의한 최대 압력차 값과 RMS (Root Mean Square) 값을 증기유량에 따라 나타내었다.

부록 A에 보듯이 실험 데이터는 저유량에서는 영역도 식별을 위한 충분한 데이터가 존재하지 않아서 Chugging(C)과 Condensation Oscillation(CO)사이의 경계인 C-CO 자료를 추출하기가 어려웠다. 대부분의 데이터는 CO와 Stable Condensation(SC)사이의 경계인 CO-SC 자료를 나타내고 있었다. 그림 3은 부록 A의 그림 A-1중의 하나로서 수조 온도가 30-32°C에서 증기 유속의 변화에 따른 f_1 주파수 및 amp_1 압력 변화를 자세히 나타낸 것이다. 그림 3에서 보듯이 증기 유속이 증가함에 따라 침두 압력이 존재하는 주파수의 값 및 압력의 크기가 변화하는 것을 알 수 있다. 증기 유량에 따라 주파수 및 압력 크기가 변화함에 있어서 그 경향이 반전되는 부근이 응축 형태의 변화 즉, 응축 영역

의 경계에 해당한다고 볼 수 있으며 CO-SC 경계의 한점에 해당한다.

수조 온도에 따라 동압력 데이터를 정리한 결과인 부록 A와 같은 실험 결과를 기준으로 응축 영역의 경계를 찾아내는 작업을 수행하여 그림 4와 같은 단일구멍 Sparger의 증기응축 영역도를 도출하였다.

3.2 4-구멍 응축진동 실험

APR1400의 I-Sparger의 특성을 이해와 실규모 실험 Matrix 설정, 그리고 실험 결과 분석에 활용할 수 있도록 GIRLS 보일러의 용량에 맞는 4-구멍 간이 Sparger를 제작하여 증기응축 실험을 수행하였다. 4-구멍 Sparger의 Test Section은 앞장 그림 2에 나타나 있다. 그림에서 보는바와 같이 증기구멍이 있는 전면은 I-Sparger와 같은 6"Sch.40S의 배관을 사용하였으며, 그 이외 면들은 직육면체와 같게 하였다. 전면에 배치된 4개의 구멍은 I-Sparger의 구멍 배치와 동일하다.

단일구멍 응축진동 실험에서는 전반적인 물리적 현상을 반영한 결과를 얻는 것을 목표로 하여 측정된 자료들만 활용하는 방법을 선택했었는데 저유속 증기유량에서의 데이터를 생산하는데 어려움이 있어서 4-구멍 실험에서는 음향(소리) 및 측정 자료의 변화를 동시에 활용하는 방법을 택하였다. 즉, 주어진 수조 온도에서 증기 유량의 변화에 따라 음향과 동압력계의 신호 변화를 동시에 확인하여 C-CO와 CO-SC 경계에서의 데이터를 측정하는 방법이다. 부록 C는 측정된 C-CO와 CO-SC 경계에서의 데이터를 정리한 것이다. 이를 바탕으로 그림 5와 같은 증기 응축 영역도를 도출하였다. 그리고, 부록 B에는 몇가지 수조 온도에 대한 C-CO와 CO-SC 경계에서의 동압력 측정 결과를 나타내었다.

단일구멍의 경우와 비교했을 때 CO-SC의 경계의 경향이 두 경우 비슷한 경향을 가지고 있음을 그림 4와 5에서 알 수 있으며, 이로부터 소리와 동압센서에 의해 작성된 응축 영역도의 타당성을 간접적으로 입증하고 있음을 알 수 있다. 두 경우의 유사한 결과에서 4-구멍 증기응축 현상도 단일구멍 증기응축과 유사한 현상이라는 것을 짐작케 한다. 4-구멍 증기응축이 단일구멍 증기응축과 유사하다는 것은 본 실험에서의 4-구멍 증기응축은 증기 Plume간의 간섭 영향이 작다는 것으로 해석할 수 있는데, 이는 I-Sparger 구멍의 수직.수평 간격이 충분히 커서 증기응축이 일어나는 Plume간의 간섭이 작아서 각각의 Plume의 경향인 단일구멍 증기응축의 경향을 나타내고 있다고 보는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3.3 이전 응축진동 실험과의 비교

당 부에서 전에 수행되었던 실험에서는 그림 6과 같은 응축 영역도를 제시한 바 있다. 그림 6 응축 영역도[2]는 증기 분사를 위한 장치가 노즐과 같이 직경에 비하여 비교적 길이가 긴 튜브형의 Test Section을 사용한 실험결과를 정리한 것이다.

비교적 긴 튜브형의 Test Section은 앞절에서 언급한 단일구멍이나 4-구멍 Test Section과는 분사되는 기구(Mechanism)가 다르다고 볼 수 있다. 단일구멍이나 4-구멍 Test Section은 분사 구멍을 사이에 두고 하류측 영역 즉, 응축 진동이 발생하는 영향을 상류측인 증기 공간의 거동에도 영향을 주게 되고, 그 결과 분사구멍 상류측 및 하류측 사이의 압력차 거동 양상이 분사되는 증기량에 영향을 주게 된다. 이에 비하여 긴 튜브형의 Test Section에서는 증기 분사 통로가 비교적 긴 튜브로 되어 있으므로 상대적으로 튜브에 의한 압력강하나 교축(Throttle) 영향이 크게 작용하게 되는 개념이 된다. 즉, 증기 노즐의 상류측인 증기공간과 하류측인 응축진동 발생 영역사이에 노즐에 의한 압력강하의 영향이 비교적 크게 나타나고 경우에 따라서는 교축의 경향까지 보일 수 있는 형태인 것이다. 증기 분사 경향이나 과도적 특성이 노즐 분사와 같이 계통의 영향을 덜 받는 경우를 Hard Steam Supply

System으로 정의하고, 단일구멍 혹은 4-구멍 Test Section과 같이 계통에 의한 영향이 큰 경우를 Soft Steam Supply System으로 정의할 수 있다.

그림 5와 6을 비교해 보면 증기 유량이 큰 영역인 CO-SC 경계에서 낮은 수조 온도에서의 경향이 다르게 나타남을 알 수 있다. 이는 증기 유량이 상대적으로 적을 때 즉, 대기압에서의 임계 유속인 $275\text{kg/m}^2\text{-sec}$ 이하에서는 Soft와 Hard의 차이가 잘 나타나고 있음을 의미한다고 판단된다. 반면, 임계 유속이상인 높은 증기 유량에서는 Soft와 Hard의 차이가 안 보이는 것은 두 경우의 계통 거동이 유사해지는 경향 때문이 아닌가 판단된다. 여기서, 한가지 지적하는 것은 그림 5,6에서 C-CO 경계선 중 높은 수조 온도에서 Soft 경우에 반대적인 기울기를 갖게 되는 것은 외부 Chugging이 발생하는 높은 수조 온도에서 Condensation Oscillation으로 넘어가는 경향을 나타내는 것으로 이해할 수 있을 것이며, 이러한 경향은 Hard에서는 잘 구분되지 않는 것으로 보아야 될 것으로 판단된다.

4. 결 론

GIRLS 장치를 이용하여 단일-구멍 및 4-구멍 증기 스파저에 대한 증기 응축 영역도 생산을 위한 실험이 수행되었다. 단일-구멍 스파저에 대해서는 동압계의 측정 결과를 바탕으로 주파수와 압력 크기 등을 바탕으로 응축 영역도가 작성되었다. 4-구멍 스파저에 대해서는 응축 소리와 동압력계의 변화를 바탕으로 응축 영역도를 작성하였다. 단일-구멍과 4-구멍 스파저의 응축 영역도를 바탕으로 단순 스파저에 대한 증기 응축 영역도를 수조 온도와 증기 유속에 대하여 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

1. Y.S. Kim et al., An Experimental Investigation of Direct Condensation of Steam Jet in Subcooled Water, J. of the Korean Nuclear Society, 29(1), pp. 45-57, 1997
2. S. Cho et al., Experimental Study on Dynamic Pressure Pulse in Direct Contact Condensation of Steam Jets Discharging into Subcooled Water, NTHAS08: First Korea-Japan Symposium on Thermal Hydraulics and Safety, Pusan, Korea, pp. 291-298, 1998
3. C.K. Park et al., A Study on the Characteristics of the Jet Type Condensation, '99 KNS Spring Conference (in Korean)
4. S.J. Hong, Dynamic Characteristics of Steam Jet Condensation in Sparger, Seoul National University Ph.D Thesis, 2001
5. S. Cho et al., Multiple-Hole Effect on the Performance on a Sparger during Direct Contact Condensation of Steam, KSME Int. Journal, 15(4), pp. 482-491, 2001.

표 1 GIRLS 보일러 재원

제조사 및 모델명	Reimers Electra Steam Inc.; RHPH-375
Type	Electrical Heater Type
Heater Capacity	315 kW
Steam Flow Rate	Maximum ~360kg/hr
Operating Pressure	Maximum 9.3 bar _g
Water Supply	500 l /hr (Demi. Water)
Power Supply	440V,3-Phase, 60Hz
Material	Carbon Steel
Dimension	W2.24×D1.73×H1.83m

표 2 GIRLS 주요 측정설비 재원

측정변수	계측장치	재원
온도	K-Type	정확성: 0.6℃
압력	Rosemount 3051P	정확성: 0.5kPa (0.05% for full span)
유량	Rosemount 8800A (Vortex Meter)	1.35% for reading value
동압력	Kistler 7061B (Piezoelectric Type)	Negligible delay of response (natural frequency: 15kHz)
유속	Pitot Tube	

표 3 GIRLS 계측기 표시 및 위치

ID	위치	측정변수
TC201	유량계 하류	유량계 하류 증기 온도
TC202	Sparger 내부	Sparger 증기 온도
TC601	Cylinder Tank, (90,180,11) ¹⁾	수조 온도
TC602	Cylinder Tank, (90,180,10)	수조 온도
TC603	Square Tank, (40,0,110) ²⁾	수조 온도
TC604	Square Tank, (40,0,10)	수조 온도
TC605	Cylinder Tank, (90,45,110)	수조 온도
TC606	Cylinder Tank, (90,45,10)	수조 온도
TC607	Cylinder Tank, (90,-45,110)	수조 온도
TC608	Cylinder Tank, (90,-45,10)	수조 온도
TC701	Cooling System Inlet 1	냉각수 입구 온도
TC702	Cooling System Inlet 2	냉각수 입구 온도
TC703	Cooling System Outlet	냉각수 출구 온도
TC1	Tank 내부, 이동식	국부 온도
TC2	Tank 내부, 이동식	국부 온도
TC3	Tank 내부, 이동식	국부 온도
TC4	Tank 내부, 이동식	국부 온도
PT201	유량계 하류	증기압력
PT202	Sparger 내부	Sparger 증기 압력
FT201	증기 배관	증기유량
DP202	Pitot 튜브	제트유동 속도
DPT ³⁾ 01	밑바닥→DPT04와 대칭으로서 Sparger와 앞편 벽(-방향) 중간	수조 내부 동압
DPT02	Sparger 뒤편 벽(-방향)	수조 내부 동압
DPT03	Sparger 바로 뒤	수조 내부 동압
DPT04	Sparger와 뒤편 벽(+방향) 중간	수조 내부 동압

- 주. 1) Cylinder Pool의 (r, θ, z) 는 수조 바닥 중심을 원점으로 하고 반경(r)과 높이(z)를 cm로 표시하고 θ 는 원점과 사각 Pool 중심과의 연결선을 기준으로한 각도를 의미함.
- 2) Square Pool의 (r, θ, z) 는 Sparger의 투영이 바닥과 만나는 점을 원점으로 하고 반경(r)과 높이(z)를 cm로 표시하고 θ 는 원점과 Cylinder Pool 중심과의 연결선을 기준으로한 각도를 의미함.
- 3) DPT의 출력은 V이며 1V=50kPa을 의미함. DPT01 데이터는 국부온도 실험때만 취득했음

표 4 GIRLS 계측기 Data Processing Calibration

ID	Calibrator(y)	Reading(x)	Calibration Equation
TC201	Fluke744(℃)	℃	y=0.9998x-0.8418
TC202	Fluke744(℃)	℃	y=1.0004x+0.8403
TC601	Fluke744(℃)	℃	y=0.9996x+0.7270
TC602	Fluke744(℃)	℃	y=0.9998x+0.7928
TC605	Fluke744(℃)	℃	y=0.9997x-0.2341
TC606	Fluke744(℃)	℃	y=0.9996x+0.5003
TC607	Fluke744(℃)	℃	y=0.9997x-0.3236
TC608	Fluke744(℃)	℃	y=1.0001x-0.6345
TC1	Fluke744(℃)	℃	y=0.9996x+3.460
TC2	Fluke744(℃)	℃	y=0.9999x-1.7236
TC3	Fluke744(℃)	℃	y=0.9993x+2.2978
TC4	Fluke744(℃)	℃	y=0.9999x+1.0934
PT201 ¹⁾	DPI515(bar _g)	V	y=2.4996x-2.5207
PT202	DPI515(bar _g)	V	y=2.5027x-2.5181
FT201	Fluke744(mA) (URV ²⁾ =2.22873ACMM ³⁾)	V	y=0.5577x-0.5621
DP202	DPI510(bar _g)	V	y=0.6218x-0.6238

주. 1) 압력 보정에 있어서 대기압을 상대압으로 취급하기 때문에 문제는 없지만 실험을 수행함에 있어서 Steam Table 등에서 사용될 절대압력을 계산하기 위해서는 기준 대기압을 아는 것이 필요하다. 실험실의 온도 T[℃]인 경우의 기준 대기압 p_a는 다음과 같다.

$$p_a = 1.013 * p_c \text{ [bar]}$$

$$\text{where, } p_c = \frac{g}{g_{world}} \left[1 + (20 - T) \frac{0.002}{100} \right]$$

$$g = 979.832 \text{ cm/sec}^2; \quad g_{world} = 980.665 \text{ cm/sec}^2$$

2) URV= upper range value

3) ACMM= actual m³/min

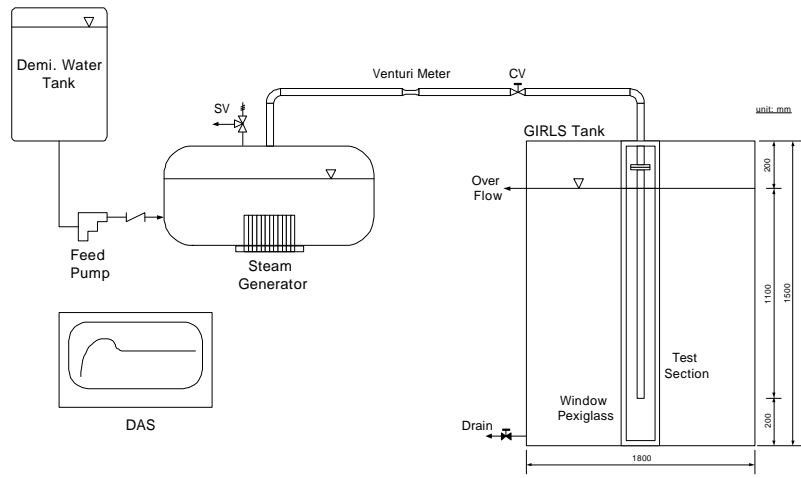


그림 1 GIRLS 장치 개념도

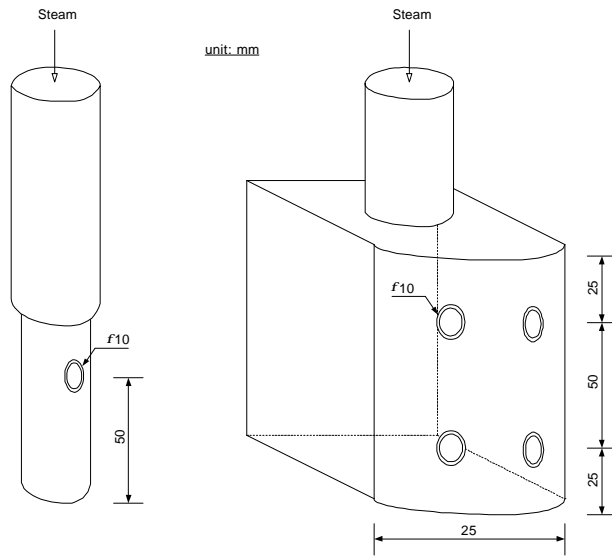


그림 2 단일구멍 및 4-구멍 간이 Sparger

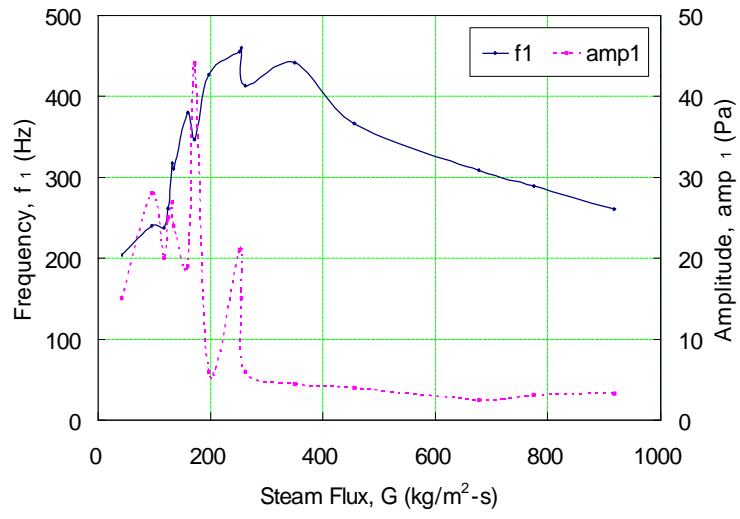


그림 3 증기유량에 따른 f_1 주파수 및 amp_1 압력 변화

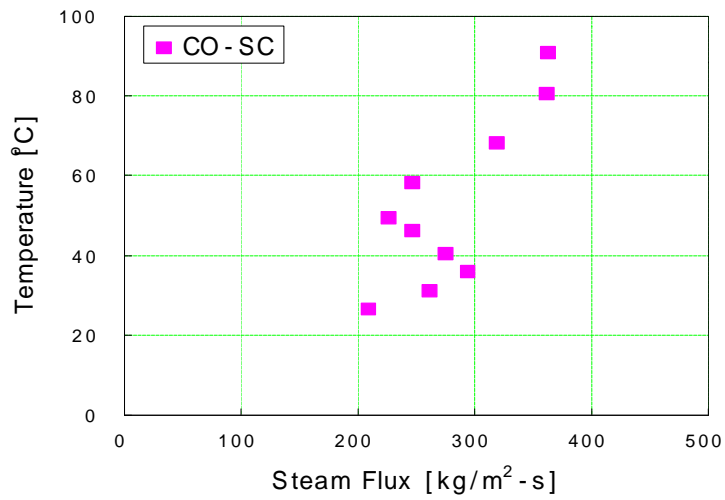


그림 4 단일구멍 Sparger의 증기응축 영역도

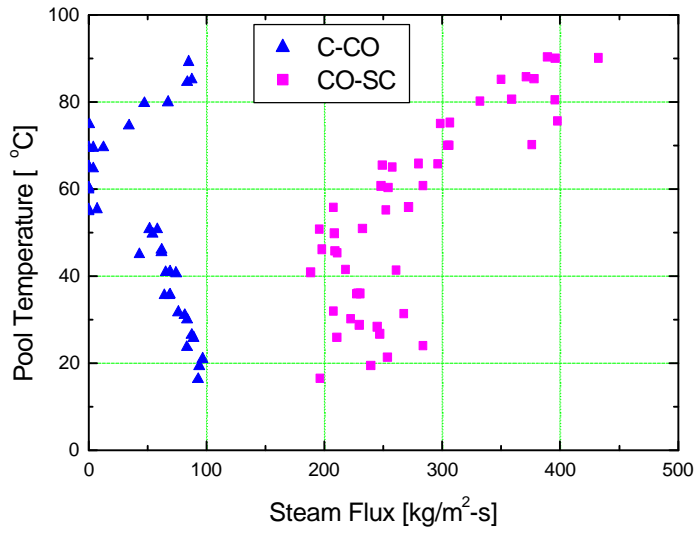


그림 5 4-구멍 Sparger의 증기응축 영역도

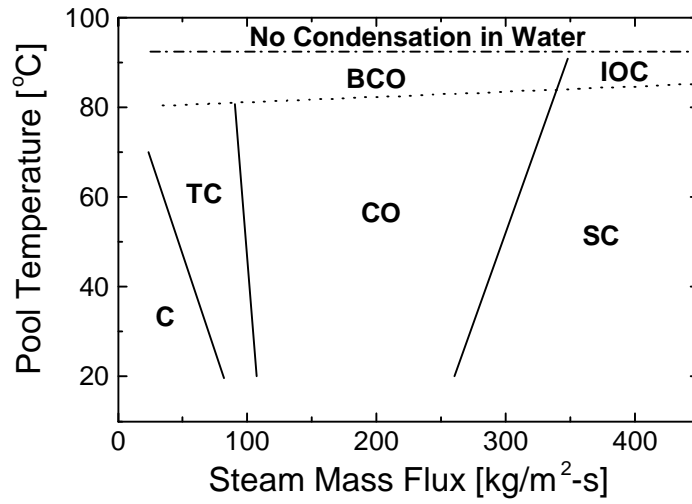


그림 6 단일증기 Nozzle의 증기응축 영역도

부록 A Single Hole Sparger Test Result

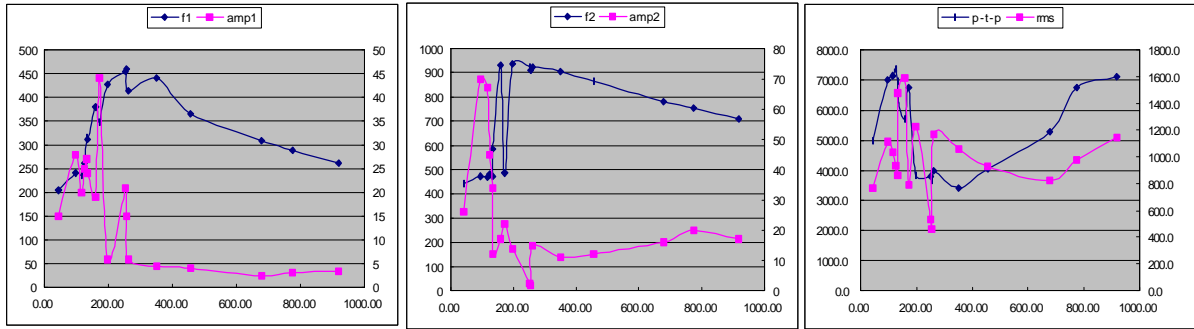


그림 A-1 단일구멍 Sparger 동압력 변화 (수조온도: 30-32°C)

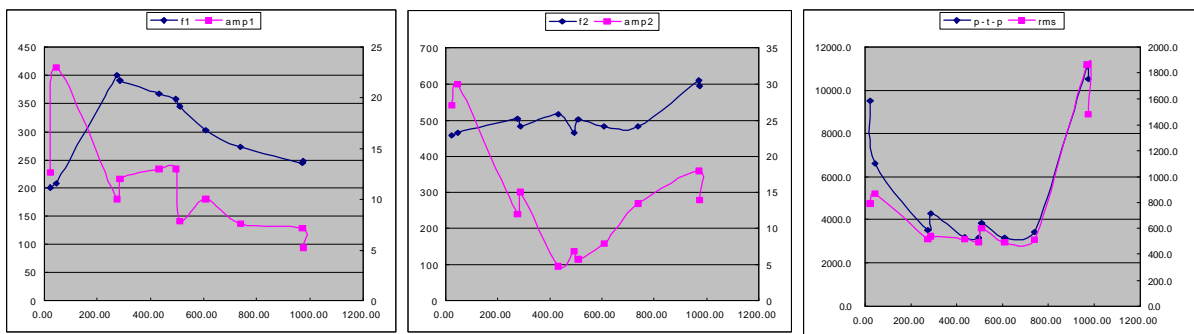


그림 A-2 단일구멍 Sparger 동압력 변화 (수조온도: 40-42°C)

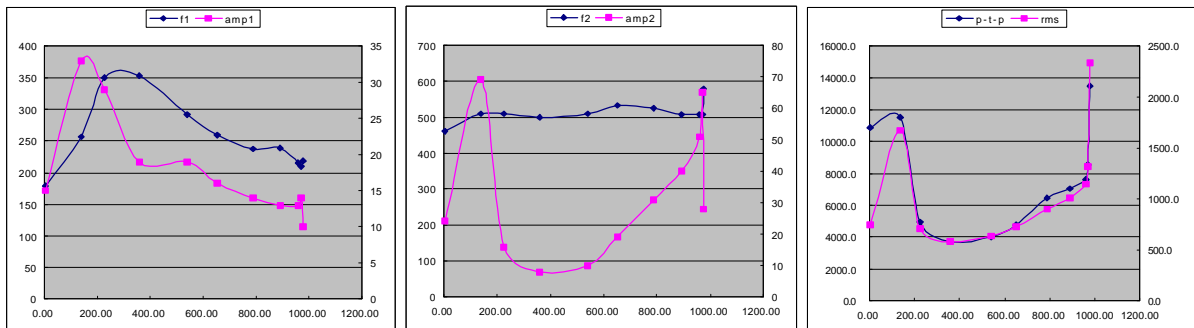


그림 A-3 단일구멍 Sparger 동압력 변화 (수조온도: 49-52°C)

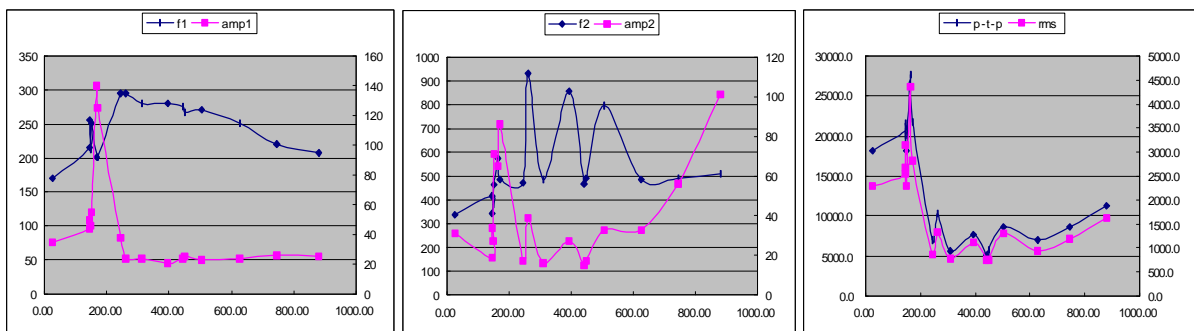


그림 A-4 단일구멍 Sparger 동압력 변화 (수조온도: 58-61°C)

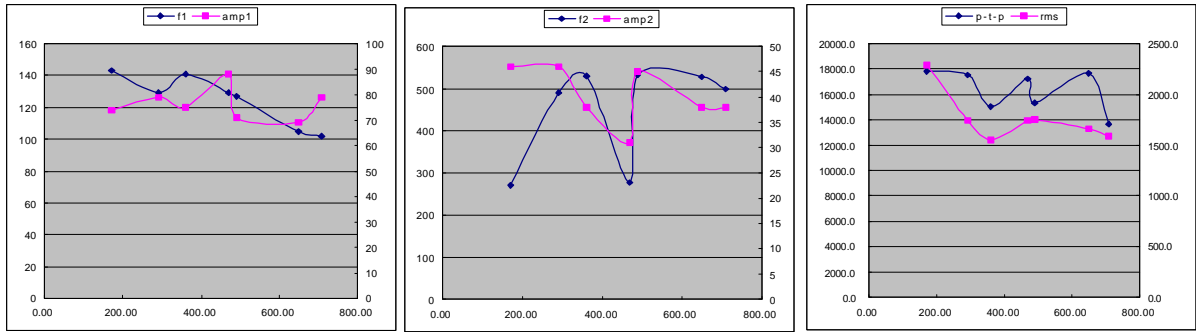


그림 A-5 단일구멍 Sparger 동압력 변화 (수조온도: 80-82°C)

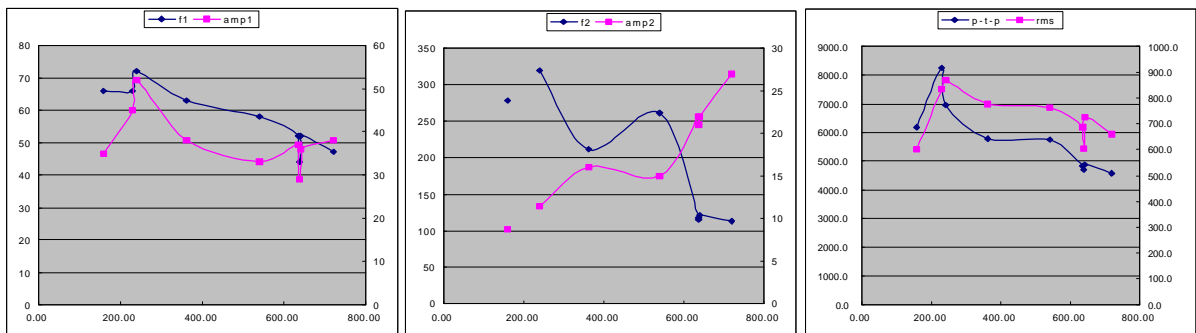
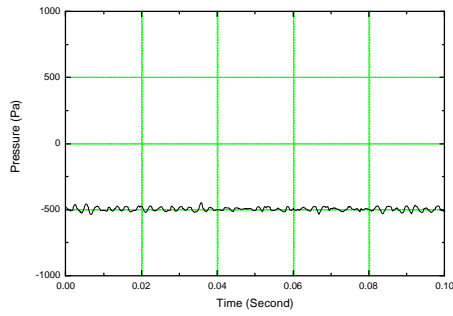
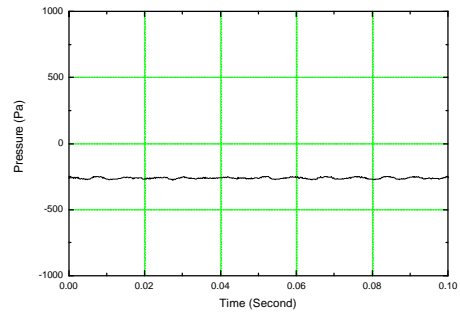


그림 A-6 단일구멍 Sparger 동압력 변화 (수조온도: 90-92°C)

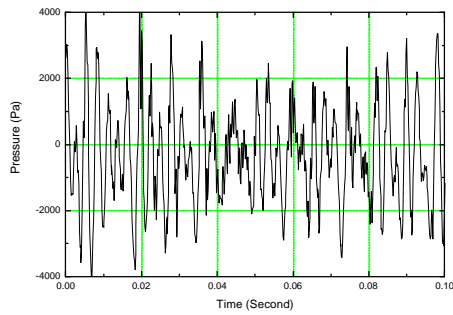
부록 B 4-Hole Sparger Test Result



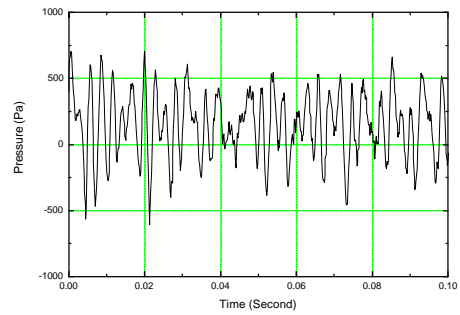
(a) DPT01



(b) DPT02

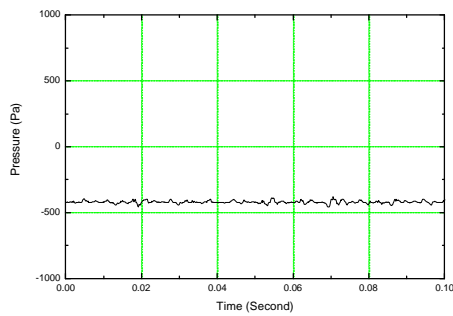


(c) DPT03

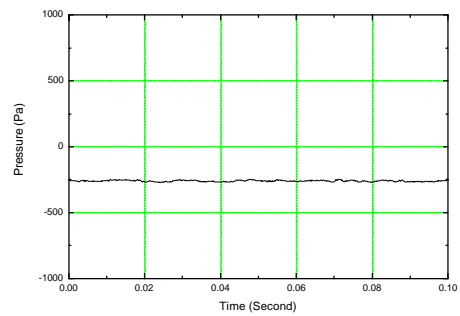


(d) DPT04

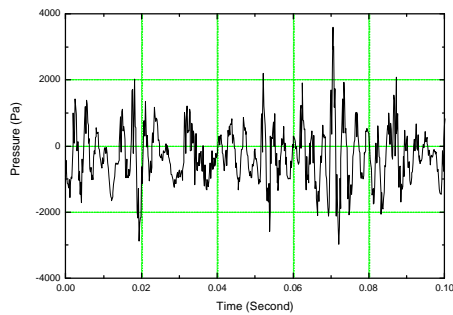
그림 B-1 4-구멍 C-CO 경계 동압력 변화(30.34℃;58.78kg/m²-sec)



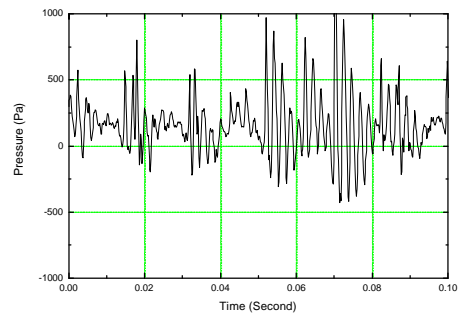
(a) DPT01



(b) DPT02

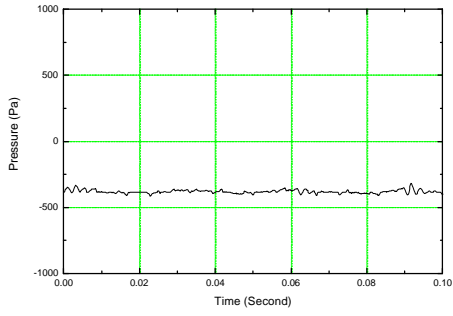


(c) DPT03

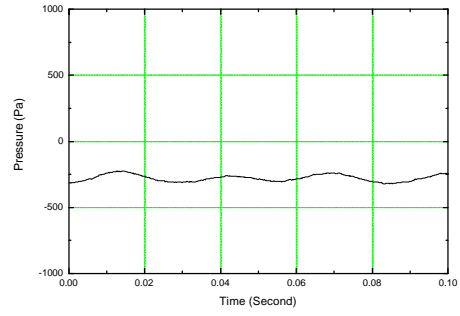


(d) DPT04

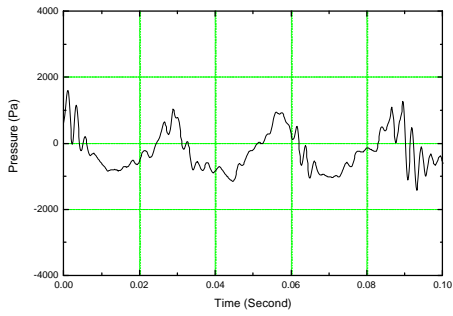
그림 B-2 4-구멍 C-CO 경계 동압력 변화(59.88℃;14.41kg/m²-sec)



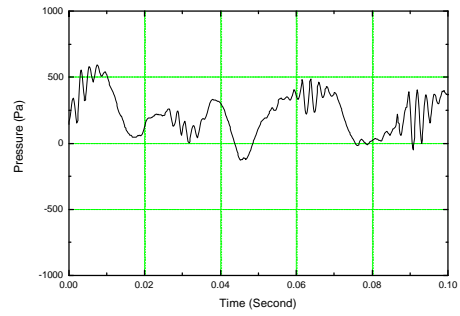
(a) DPT01



(b) DPT02

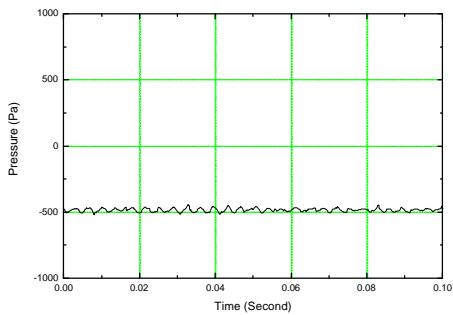


(c) DPT03

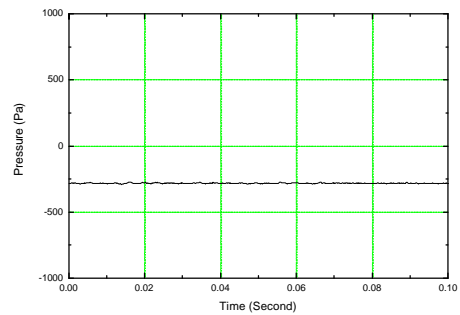


(d) DPT04

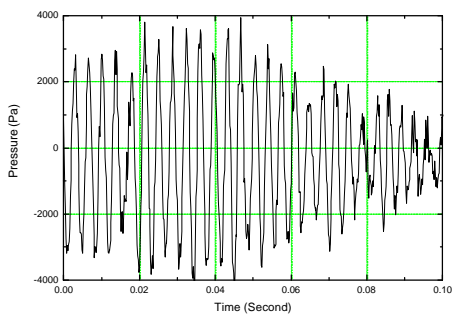
그림 B-3 4-구멍 C-CO 경계 동압력 변화(87.54℃;69.95kg/m²-sec)



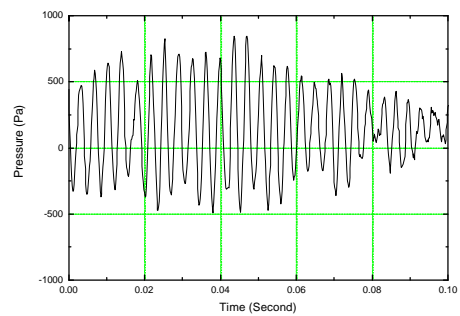
(a) DPT01



(b) DPT02

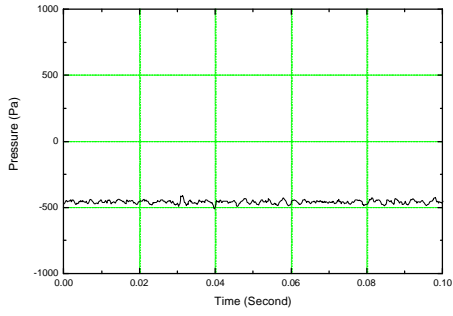


(c) DPT03

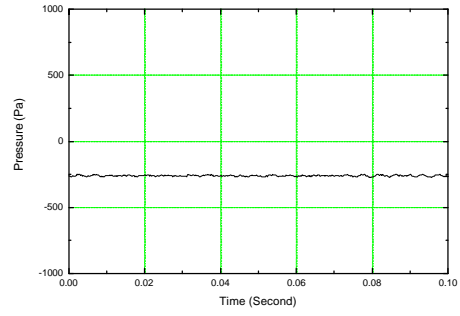


(d) DPT04

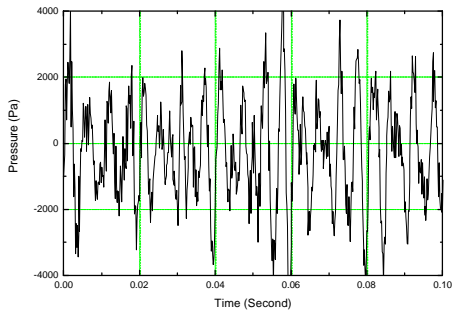
그림 B-4 4-구멍 CO-SC 경계 동압력 변화(30.61℃;209.1kg/m²-sec)



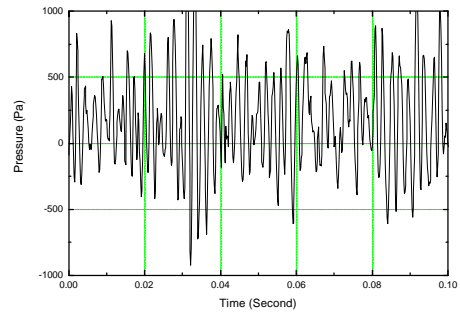
(a) DPT01



(b) DPT02

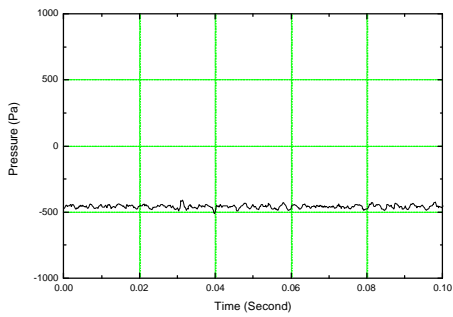


(c) DPT03

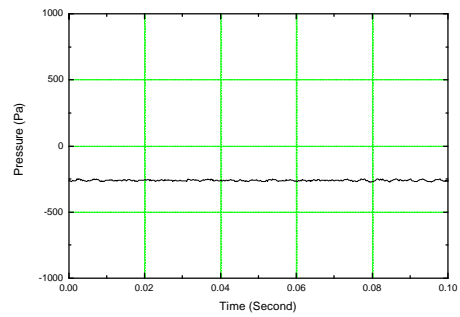


(d) DPT04

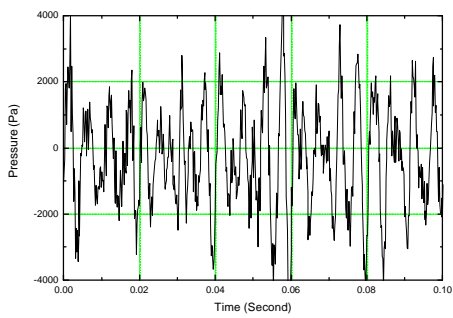
그림 B-5 4-구멍 CO-SC 경계 동압력 변화(60.25℃;221.19kg/m²-sec)



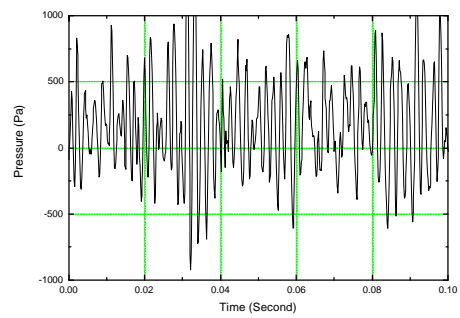
(a) DPT01



(b) DPT02



(c) DPT03



(d) DPT04

그림 B-6 4-구멍 CO-SC 경계 동압력 변화(88.49℃;392.09kg/m²-sec)