2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU-9 독물질주입 정지계통 수격현상 해석

An Analysis on Water Hammer in Liquid Injection Shutdown System of CANDU-9

김태한, 허진, 한상구, 최해윤, 노태선

한국전력기술주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

CANDU-9 독물질주입 정지계통 (Liquid Injection Shutdown System) 배관계에 대하여 수격현상에 의해 야기된 압력 부하가 LEVEL C의 설계허용압력에 부합된다는 것을 확인하기 위하여 수격현상 해석 코드인 PTRAN을 사용하여 천이압력 및 차압 등을 계산하였다. CANDU-9 독물질주입 정지계통의 배관계는 수격현상을 고려하여 헬륨헤더 수평배관부위를 경사지게 하고 또한 전체 계통의 위치를 높이는 등의 설계개선이 적용되었다. 해석결과 계통내 최고압력은 배기배관내 닫힌 밸브에서 7.92 MPa(a)로 허용압력과 LEVEL C조건의 밸브 설계 허용압력 미만임을 확인할 수 있었다. 또한 이 최고압력은 CANDU-6의 해석결과에 비해 상당히 작은 값임을 확인하였다.

Abstract

The water hammer analysis code, PTRAN, is used for computation of transient pressures and pressure differentials in the Liquid Injection Shutdown System(LISS) piping network of CANDU-9 to ensure that the design allowables for LEVEL C Service Limit are met for the water hammer loads resulting from the water hammer. The LISS piping network of CANDU-9 has incorporated design improvement in considering the water hammer, such as declining the horizontal part of helium header, and raising the elevation of the overall system piping configuration, etc. The maximum pressure in the LISS piping network is found to be 7.92 MPa(a) at the closed valve in the vent line, which is below the allowable working pressure and the valve design pressure under Level C service conditions. And it is also shown that the maximum pressure in CANDU-9 is much lower than that in CANDU-6.

1. 서론

배관계 내에서의 급격한 가압에 의한 유동 변화는 높은 압력 변화를 야기할 수 있으며, 이러한 압력은 배관계 내에 공기(air pocket)와 같은 형태의 비응축 가스가 존재할 경우 더 높아질 수도 있다. 수격현상(water hammer)이라 불리는 이러한 배관내의 비정상유동(unsteady flow)은 정상유동(steady flow)에 비하여 계통 내에 과도한 압력이나 소음, cavitation 및 진동 등을 유발시키며 이로 인하여 결과적으로 계통의 배관, 기기 및 배관지지대 등의 파손이나 기기의 성능저하를 초래하게 된다. 이러한 현상들은 원자력 발전소에서는 keep-full systems, vacuum breaker, void detection system, venting system 의 개선 및 운전원의 교육 등에 의하여 완화시킬 수 있으나, 예측하지 못하였던 현상이 일어날 수도 있으므로 배관과 지지대 등의 설계 단계에서 첨두 압력 또는 차압 등의 압력천이를 예측하여 이를 완화시키는 것은 매우 중요하다.

CANDU-9 의 제 2 정지계통인 독물질주입 정지계통(Liquid Injection Shutdown System; LISS)은 기존 호기들의 설계경험을 토대로 계통내의 수격현상이 최소화될 수 있도록 배관내 헬륨 헤더부분을 어느 정도 경사지게 배치하여 비응축 가스의 포집 확률을 낮추고, 또한 계통의 전체 높이를 감속재에 비하여 상대적으로 높이 배치하여 침수시 수위를 낮추는 등의 설계개선을 시도하였다.

본 해석에서는 CANDU-9 독물질주입 정지계통의 수격현상을 전용 해석코드인 PTRAN 을 사용하여 해석하여 이러한 설계개선 등이 수격현상 감소에 미치는 실질적인 효과 여부를 확인하고 또한 전체 계통 내에서의 압력천이를 예측하였다.

2. 해석방법

2.1 독물질주입 정지계통

독물질주입 정지계통은 원자로 트립 신호시 중성자 흡수제인 독물질(poison)을 원자로 감속재로 즉시 주입하여 원자로를 정지시키는 기능을 한다. 그림 1 은 독물질주입 정지계통의 개략도로서 중성자 흡수제, 즉 질산 가돌리늄 독물질을 가진 8 개의 독물질 탱크와 독물질을 감속재에 주입하기 위한 한 개의 고압 헬륨 탱크로 구성되어 있으며 각 독물질 탱크는 각각의 주입 노즐에 연결된다. 세부적인 계통 설명은 참고문서 1 및 참고문서 2 에 기술되어 있다. 캐나다 규제기관에서 제시한 독물질주입 정지계통이 작동 가능하여야 하는 사고 중 하나인 노내 냉각재상실사고(in core LOCA)는 압력관 및 관련된 칼란드리아관이 감속재 내에서 손상되어 독물질주입 정지계통의 헬륨헤더 부분까지 중수에 침수될 수 있다. 이러한 침수는 독물질주입 정지계통에서 정지신호의 발생시 계통 내에서 심각한 압력천이 현상(수격현상)을 야기할 수 있다. 이러한 압력천이 현상에 의한 영향을 평가하기 위하여 Method of

Characteristics (MOC)(참고문서 3)를 이용한 수격현상 전용 해석코드인 PTRAN을 사용하여 압력천이 현상을 해석하였다.

2.2 해석대상 및 가정

압력관 및 관련된 칼란드리아관의 노내 파손이 발생하면 감속재 수위는 급속히 증가하며 따라서 manometer형 배치로 인하여 독물질주입 정지계통의 수위도 감속재 수위와 동일한 높이까지 증가하고 또한 감속재 계통과의 정압 차이 만큼 더 높은 수위를 나타낸다. 이러한 침수과정에서 고압 헬륨탱크 하단 차단밸브 하류 및 8개의 주입노즐 배관계 상단 각각의 배기 밸브 주위에 비응축성 기체의 포집이 발생한다. 그때의 독물질주입 정지계통의 고압 헬륨탱크 하단 차단밸브 하류쪽의 압력은 감속재 상층기체 계통(moderator cover gas system)과 동일한 73 kPa(g)(10.6 psig)가 되며 고압 헬륨탱크의 압력은 8.27 MPa(g)(1200 psig)가 된다. 이 경우는 고압 헬륨탱크 하단 차단밸브 하류쪽의 포집된 헬륨체적이 가장 작게 되어 가장 강한 압축율을 나타내며 가장 보수적인 결과가 도출될 것으로 기대된다. 이때 제 2정지계통에 의한 노심 정지신호에 의하여 독물질을 주입하기 위하여 고압 헬륨탱크 하단 4개 차단밸브가 열리며 이때 계통내 급격한 압력천이를 동반한 수격현상을 야기시킬 수 있다.

PTRAN 해석을 위한 계통의 모델은 inlet reservoir, 밸브 및 orifice 등을 포함한 piping network 및 outlet reservoir로 구성되며 오직 독물질 주입과 직접 관련된 배관계만 모사하였다. Sampling, drain 등의 배관은 차단된 것으로 가정하고 제외하여 격리밸브까지의 배관을 dead end로 가정하였다. 모델링된 배관계의 일부를 그림 2에 나타냈으며 여기에 node, junction 및 section번호 등을 표시하였다. 또한 입력자료로서 고압 헬륨탱크 하단 차단밸브의 열림으로 인한 차단밸브 하단의 비응축 가스의 압축에 의한 압력천이 값을 사용하였다. 배관계 내에서의 헬륨 pocket이 각각의 노즐 주입구가 있는 8개 배관계의 상부에 존재하는 배기밸브 배관(vent valve line)에 포집된 것으로 가정하였고 포집된 체적은 배기밸브 배관 체적의 약 절반 정도에 해당하는 0.000101 ft^3 으로 가정하였다.

2.3 PTRAN 코드

PTRAN 프로그램은 일차원적(one dimensional), 단상 유체(single phase)의 수력학적 천이 현상 해석용 코드로서 계통 배관 네트워크에서의 수력학적 압력천이를 모사하는데 사용된다. 이러한 배관계통은 inlet/outlet reservoirs, valves, accumulators, pumps, air pockets 및 dead end 등으로 구성된다. PTRAN에서 사용된 계산 방법은 MOC 방법을 기초로 하였으며 사용된 수학적 모델은 참고문서 3에 기술되어 있다. 기본적으로 운동량 방정식과 연속방정식을 MOC 방법을 사용하여 계산하며, 증기압 이상의 압력에서 공기체적의 압축 및 팽창과 liquid column separation 및 vapor pocket collapse transient 등을 모사할 수 있다. PTRAN 코드는 Bruce B 발전

소의 비상냉각수 주입계통(Emergency Coolant Injection System)의 수격현상을 시험(참고문서 4)과 CANDU Owner's Group Program에 의한 실험(참고문서 5) 등으로 검증되었다. 세부적인 프로그램 내용은 참고문서 6에 기술되어 있다.

2.4 수학적 모델

수격현상의 지배방정식은 Mach number가 작을 때 운동량 보존 및 질량 보존에 의하여 다음과 같이 각각 단순화 시킬 수 있다.

Momentum Equation

$$gH_x + V_t + \frac{f}{2D}V|V| = 0 \quad \text{--} \quad (1)$$

Continuity Equation

$$H_t + \frac{a^2}{g}V_x = 0 \quad \text{--} \quad (2)$$

V는 유속, H는 수두, f는 Darcy-Weisbach friction factor이며, D는 배관의 직경, a는 압력파의 전달속도로 음속과 유사한 값이다. 위의 식은 MOC방법을 이용하면 다음과 같은 식으로 정리된다.

<u>At C+</u>

$$\frac{g}{a}\frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{--} \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = a \quad \text{--} \quad (4)$$

<u>At C-</u>

$$-\frac{g}{a}\frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{--} \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad \text{---} \quad (6)$$

위의 C^+와 C^-에 적용되는 식과 배관 양단의 경계조건을 적용하면 해석이 가능하게 된다.

3. 결과 및 고찰

첨두 차압(peak differential pressure) 및 첨두 압력(peak pressure)은 표 1 과 2 에 제시하였다. 압력천이를 나타낸 그래프는 그림 3 ~ 5에 제시하였고 그림 6 은 주입노즐에서 시간에 따른 유량의 변화를 표시하였다. 표 1 의 첨두 차압은 주요 기기에서의 결과로서 독물질 탱크로 향하는 수평부의 1″ 배관과 배수 배관부위의 3/8″ 배관 등 직경이 작은 부분에서 상대적으로 높은 차압이 발생함을 보여주고 있다. 표 2 에서의 첨두 압력 역시 상대적으로 직경이 작은 배관부위에서 높은 압력을 나타내고 있으며, 최대 첨두 압력은 비응축 가스가 존재하는 배기배관 부위에서 발생함을 알 수 있다.
이들 그림 및 표에서 알 수 있는 바와 같이 차단밸브 하단 기체의 체적은 독물질 주입신호에 의해 차단밸브가 열려 헬륨의 주입으로 51.89 ms 내에 초기 73 kPa(g)(10.6 psig)에서 7.91 MPa(a)(1147.2 psia)까지 가압되고 또한 배기밸브 배관에 포집된 가스의 체적도 가압된다. 해석결과 독물질주입 정지계통에서 최대 압력은 배기밸브 배관이 있는 부분 즉 비응축 가스가 포집된 배기밸브 배관 끝 부분의 닫힌 밸브(3471-V75)에서 7.92 MPa(a)(1149 psia)까지 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이러한 압력천이 현상은 고압 헬륨탱크 하단 차단밸브의 열림으로 차단밸브 하단 헬륨체적에서의 압력이 최대 압력에 도달하는 시간(약 0.05 초)과 거의 동시에 배관내 최대 압력이 발생하였으며, 이 최대 압력은 대략 0.05 초의 시간이 지나면 비록 작은 양의 압력천이는 있으나 상당히 안정적인 현상을 보여주고 있다. 따라서 예상한 바와 같이 배관 계통내 수격현상에 의한 압력천이는 상당히 짧은 시간 즉 1 초 이내의 시간내에 급격하게 발생되고 또한 안정화됨을 확인하였다. 그리고 최대 차압은 배수배관이 연결되는 부분과 배수차단 밸브 (3471-V80)사이 인 3/8″ tubing (3471-T3/8D-79)에서 3.68 MPa(534 psi)로 나타남을 알 수 있었다.

그리고 CANDU-9 의 이러한 해석결과는 비록 CANDU-6 독물질주입 정지계통과는 배관 배치 및 높이 등 여러 가지 차이가 있어 해석 결과값의 직접 비교는 불가능하지만, CANDU-6 독물질주입 정지계통에 대한 수격현상 해석 결과에서의 최대 첨두 압력인 29.9 Mpa(a)(4336 psia)과 최대 첨두 차압인 25.4 MPa(a)(3690 psia)를 고려하면 상당히 낮은 압력 천이결과를 확인할 수 있었다.

4. 결론

상기의 결과로부터 독물질주입 정지계통에서 최대 첨두 압력 7.92 MPa(a) (1149 psia)는

배관계의 허용압력(allowable working pressure)인 33.40 MPa(g)(4845 psig)와 LEVEL C service condition 에서의 밸브 설계 허용 압력(valve design allowable pressure)인 30.61 MPa(g)(4440 psig)이하 임을 확인할 수 있었다. 그리고 3/8″ 보다 큰 배관 중에서 최대 압력을 나타내는 독물질 탱크로 향하는 수평부 1″ 배관에서의 7.6 MPa(a)(1103 psia)은 설계압력인 10.5 MPa(g)(1522.9psig) 미만임을 확인하였다. 따라서 상기 결과들에 의해 CANDU-9 독물질주입 정지계통 배관계는 수격현상에 의해 야기되는 첨두 압력 및 첨두 차압 등의 압력천이에 대하여 충분한 안전성을 확보하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 수격현상을 고려하여 새로 적용된, 경사지게 배치된 헬륨헤더 및 원자로와 비교하여 상대적으로 높게 배치된 전체 계통의 위치상승 등 설계개선 사항은 수격현상에 의해 야기되는 최대 압력 및 차압을 감소시키는 효과가 있음을 보여주었다.

추후 계속되어져야 할 연구과제는 계통에서 포집된 비응축 가스 체적 변화에 따른 수격현상에 의한 배관내 첨두 압력 변화에 대한 연구가 필요할 것으로 생각되며 또한 비응축 가스의 계통 내 위치에 대한 수격현상의 거동도 관찰하여 추후 설계의 기본자료로 활용하여야 할 것이다.

REFERENCES

1. Liquid Injection Shutdown System Design Description, 69–34700–DD–001, AECL

2. Liquid Injection Shutdown System Flowsheet, 69–34700–1–1–FS–0, AECL

3. E. B.Wylie, V.L. Streeter, L. Suo, “Fluid transient in systems”, Prentice hall, 1993

4. M.L. Goel and J.M. Francisco, “Transient Pressure (Waterhammer) Loads in CANDU Emergency Coolant Injection (ECI) System” paper presented at the International Symposium on Multi–Phase Fluid Transients, The Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Anaheim, CA, 1986 December 7–12, published in ASME FED - Vol. 41.

5. A. Lai, K.F. Hau, M.L. Goel, and E.J. Mistele, “Experimental and Analytical Studies of Waterhammer in a Piping Network”, paper presented at the 16th Annual Nuclear Simulation Symposium, Saint John, New Brunswick, 1991 August 26.

6. PTRAN Program Users Manual, Report No. 87–003, 1987 November, AECL.

Nomenclature

a	=	velocity of sound
A	=	pipe flow area
D	=	pipe diameter
f	=	Darcy-Weisbach friction factor
g	=	gravitational constant
H	=	head
P	=	pressure
Q	=	flow
t	=	time
V	=	fluid velocity
r	=	fluid density
x	=	distance along pipe axis

표 1. Summary of Peak Differential Pressures at Typical Locations in the LISS Piping Network

Locations	Peak Differential Pressure
6″ Header (Sections 27 to 344)	143 psi at 43 ms
1″ Line to Poison Tank (horizontal portion)	449 psi at 191 ms(Section 310 to 317)
3/8″ Tubing to Vent Valve	202 psi at 199 ms(Section 312 to 315)
1/2″ Return Line from Recirculation Sampling System	64 psi at 199 ms(Section 240 to 241)
Poison Tank	44 psi at 161 ms (Section 2 44 to 245)
3/8″ Tubing to Drain Valve	534 psi at 527 ms(Section 94 to 97)
Portion of 2–1/2″ Line + Injection Nozzle	195 psiat 65 ms(Section 102 to 107)

표 2. Summary of Peak Pressures at Typical Locations in the LISS Piping Network

Locations	Peak Pressure
1″ Line to Poison Tank	1103 psia at 67 ms (Section 309)
Vent Line	1149 psia at 49 ms at valve 75 (Section 37)
Return Line from Recirculation Sampling System	688 psia at 70 ms at valve 226 (Section 321)
Poison Tank	633 psia at 70 ms (Section 324)
Drain Line	1045 psia at 184 ms at valve 35 (Section 215)
Injection Nozzle	372 psia at 155 ms (Section 220)

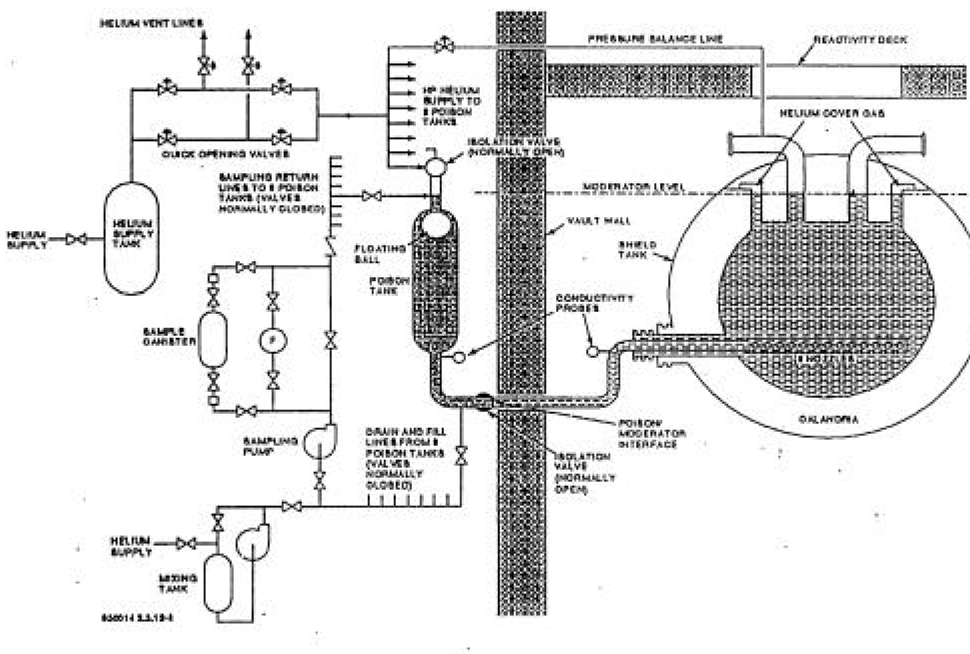

그림 1. Liquid Injection Shutdown System 개략도

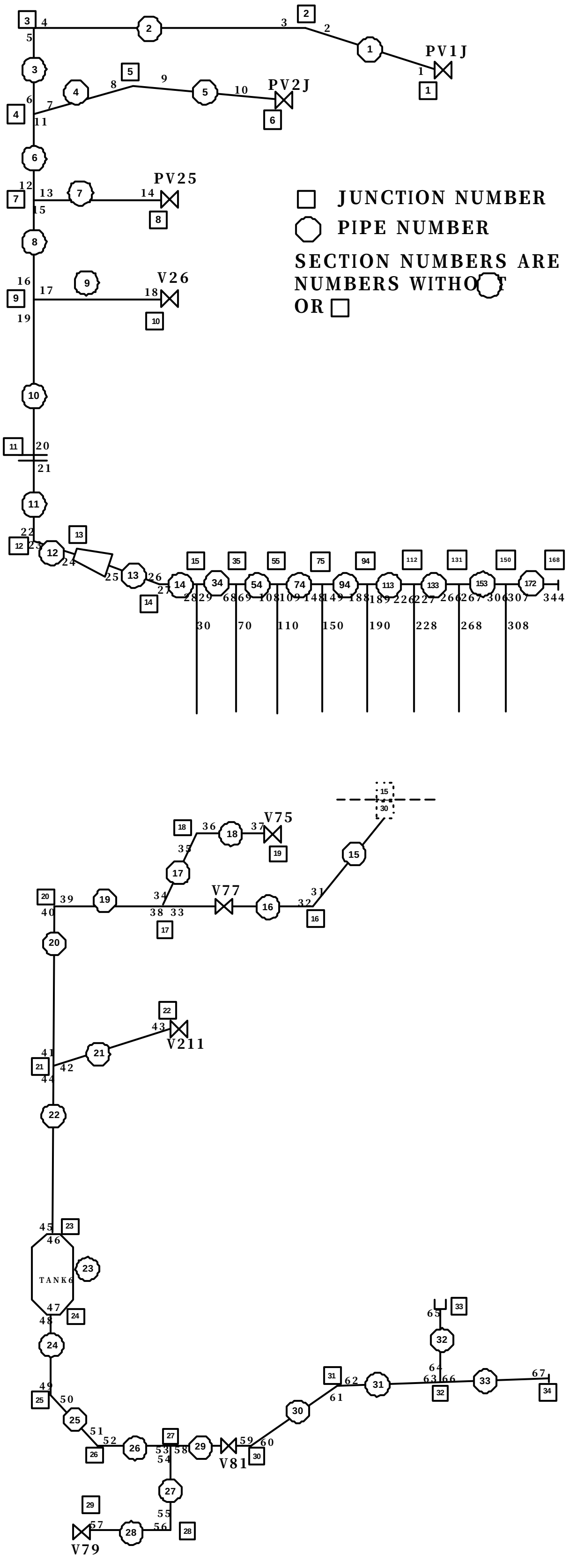

그림 2. Nodal Structure for LISS Piping Network

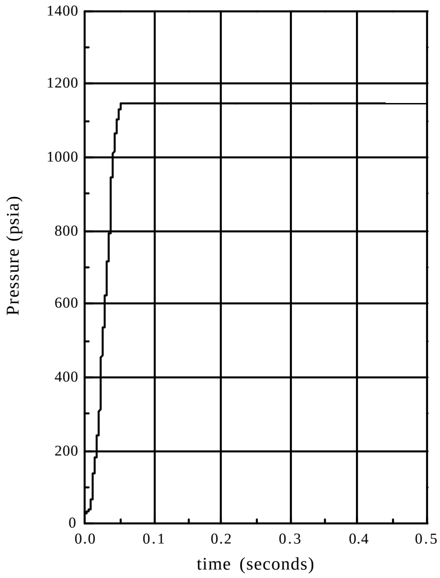

그림 3. Pressure versus Time at the Inlet Reservoir Junction

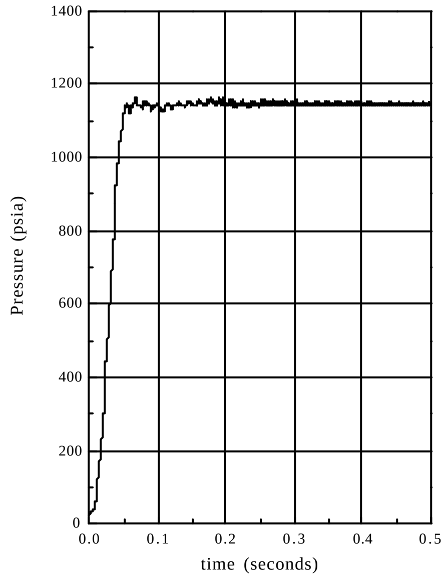

그림 4. Pressure versus Time at the Helium Header (section 28)

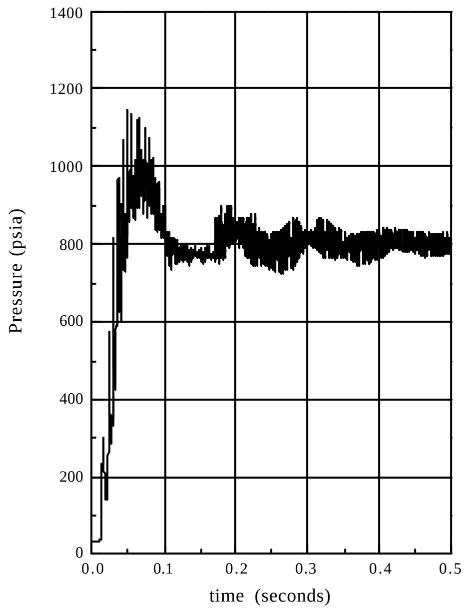

그림 5. Pressure versus Time at the Vent Valve V75

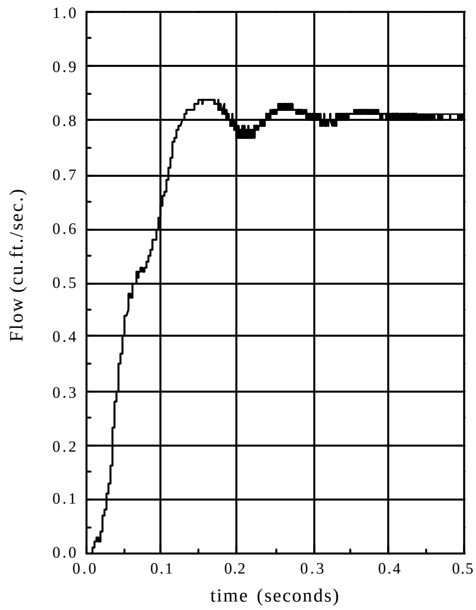

그림 6. Flow versus Time at the Injection Line (section 309)