

'00 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로형 원전의 대수형 중성자속 고변화율 응답시간 분석

The Response Time Analysis of High Log Neutron Flux Rate for Heavy Water Reactors

이광대, 이용관, 신창훈
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

이연기, 최종삼
한국전력공사 월성원자력본부
경북 경주시 양남면 나아리 260

요 약

중수로형 원전인 월성1호기는 원자로 보호 및 안전 계통으로 특별 안전 계통이 있다. 여기에는 제어봉 삽입으로 원자로를 정지시키는 원자로 제1 정지계통(SDS#1:Shutdown System #1), 가돌리늄 투입에 의한 화학 반응으로 원자로를 정지시키는 원자로 제2 정지계통(SDS#2:Shutdown System #2), LOCA시 비상 노심 냉각을 위한 비상 노심 냉각 계통(ECCS:Emergency Core Cooling System), 원자로 격리 및 살수 기능의 원자로 건물 계통(CS:Containment System)이 있다. 본 논문에서는 원자로 제1,2 정지 계통의 원자로 정지 신호 중 하나인 대수형 중성자속 고변화율에 의한 원자로 정지 응답시간에 대하여 고찰하였다. 먼저, 최종안전성 분석보고서에 기술된 응답시간 기준과 전달 함수를 분석하였다. 그리고 발전소에서 사용중인 증폭기 회로를 해석하여 전달 시간을 계산하였으며 실제 시험을 통하여 확인하였다. 결과로부터, 고변화율 루프의 응답시간 기준과 전달 함수에 의해 계산 된 값과 시험 결과를 비교, 검토하였다.

Abstract

The heavy water reactor such as Wolssung #1 has a protection/safety system named special safety system. The system has four safety systems ; Shutdown #1, Shutdown #2, Emergency Core Cooling System and Containment System. In this paper, the response time of high log neutron flux rate, one of the reactor trip loops of Shutdown #1/#2, was analysed based on the description of final safety analysis report and compared to the plant measutrement.

1. 서론

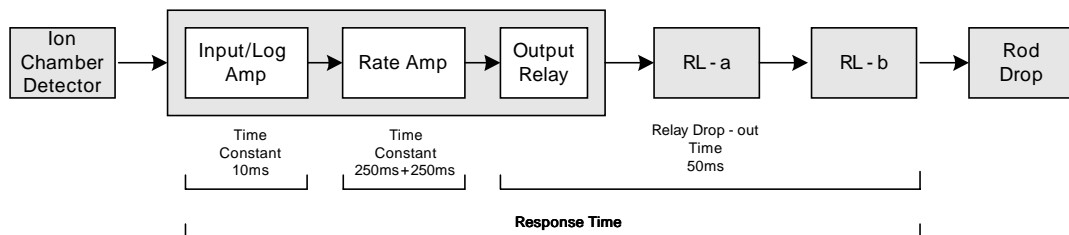
중수로형 원전인 월성1호기는 원자로 보호 및 안전 계통으로 특별 안전 계통이 있다. 여기에는 제어봉 삽입으로 원자로를 정지시키는 원자로 제1 정지계통(SDS#1:Shutdown System #1), 가돌리늄 투입에 의한 화학 반응으로 원자로를 정지시키는 원자로 제2 정지계통(SDS#2:Shutdown System #2), LOCA시 비상 노심 냉각을 위한 비상 노심 냉각 계통(ECCS:Emergency Core Cooling System), 원자로 격리 및 살수 기능의 원자로 건물 계통(CS:Containment System)이 있다.

본 논문에서는 원자로 제1,2 정지 계통의 원자로 정지 신호중 하나인 대수형 중성자속 고변화율에 의한 원자로 정지 응답시간 기준에 대해서 실제 사용중인 모듈의 회로를 분석하고 시험을 통하여 확인한 내용을 기술하고 있다.

먼저, 대수형 중성자속 고변화율 응답시간 기준에 대해 월성1호기 최종안전성분석 보고서 자료를 정리하였다. 다음으로 월성1호기에서 실제 사용하는 전자 모듈 회로와 Log 및 Rate 식을 분석하여 실제 구현되는 응답 특성을 구하고 시간을 계산하였다. 마지막으로 월성1호기의 응답시간 기준과 수식에 의해 계산된 값, 실제 발전소 시험 결과를 비교, 검토하였다.

2. 대수형 중성자속 고변화율 루프 개요 및 응답시간 기준

대수형 중성자속 고변화율 루프는 3개의 비보상 전리함(Uncompensated Ion Chamber)으로 발생하는 중성자속에 대해 설정된 변화율에 따라 원자로를 정지시키는 역할을 수행한다. 고변화율 루프는 [그림 1]과 같이 중성자속 입력 신호를 Log 출력으로 변환하는 Input Amp/Log Amp와 Log 출력을 Log Rate 신호로 변환하는 Rate Amp의 2개 기능 블록으로 구성되며 각각 10ms, 250ms+250ms의 시간 상수 (최종안전성분석보고서 11.C.1.2절) 를 가진다.



[그림 1] 대수형 중성자속 고변화율 루프

여기에서는 월성1호기 최종안전성 분석보고서에서 기술하고 있는 기능 블록 전달 함수를 분석하고 실제 발전소의 Ion-Chamber Amp 시험 결과를 비교, 검토하므로써 고변화율 루프 전달함수와 설정치에 따른 원자로 정지 시간 변화를 분석해보았다.

월성1호기 최종안전성 분석보고서에는 각 Amp 전달 함수와 응답시간 기준을 다음과 같이

기술하고 있다.

○ Input Amp/Log Amp : $\text{Log Output} = \left[\frac{1}{1+T_1S} \right] \times \text{Input}$

○ Log Rate Amp : $\text{Log Rate Output} = \left[\frac{S}{(1+T_2S)(1+T_3S)} \right] \times \text{Input}$

여기서, $T_1 = 10\text{ms}$, $T_2 = T_3 = 250\text{ms}$ 이다.

3. 대수형 중성자속 고변화율 회로 해석

대수형 중성자 고변화율 증폭기인 KEITHLEY Amp는 Input Amp/Log Amp와 Rate Amp로 구성되어있으며 각각 분석한 내용은 아래와 같다.

(1) Input Amp/Log Amp

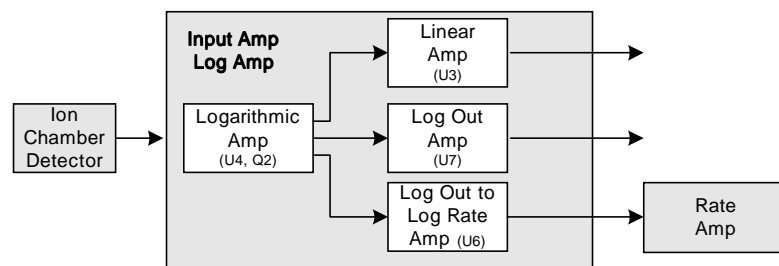
Input Amp/Log Amp는 Ion-Chamber 검출기로부터 측정된 중성자 속에 대해 Volt/Decade로 변환하는 Logarithmic Amp와 이 출력을 다양한 형식으로 변환하여 출력하는 Linear Amp, Log Out Amp, Log Out Amp to Log Rate Amp의 3가지 출력을 가진다 [그림 2].

Log Amp는 대수형 중성자 고변화율 루프중 Log 연산을 수행하는 부분이며 Rate 연산 즉 미분(Differentiator)은 Log Amp 와 연결되어있는 Rate Amp에서 수행하게된다.

(가) Logarithmic Amp

Logarithmic Amp는 연산증폭기 U_4 와 트랜지스터 Q_2 로 구성되며 U_4 의 출력 전압은 150 nA당 1Volt/Decade로 출력된다.

$$V_{\text{out}}(U_4) = -\text{Log}(I_{\text{in}} \div 150 \times 10^{-9})$$



[그림 2] Input Amp/Log Amp 블록도

이것을 표로 정리하면 [표 1]과 같다.

I_{in}	$V_{out}(U_4)$
150×10^{-12} A	+3.0 Vdc
150×10^{-11}	2.0
150×10^{-10}	1.0
150×10^{-9}	0.0
150×10^{-8}	-1.0
150×10^{-7}	-2.0
150×10^{-6}	-3.0

[표 1] Input Amp/Log Amp 입출력 값

(나) Log Out Amp

Log Out Amp는 연산증폭기 U_7 으로 구성되며 출력 전압은 10pA당 0.5 Volt/Decade로 출력된다.

$$V_{out}(U_7) = 0.5 \times \text{Log}(I_{in} \div 10 \times 10^{-12})$$

이것을 표로 정리하면 [표 2]와 같다.

I_{in}	$V_{out}(U_7)$
1×10^{-12} A	+0.5 Vdc
1×10^{-11}	1.0
1×10^{-10}	1.5
1×10^{-9}	2.0
1×10^{-8}	2.5
1×10^{-7}	3.0
1×10^{-6}	3.5
1.5×10^{-4}	4.088

[표 2] Log Out Amp 출력 값

(다) Logarithmic Amp

Log Out Amp는 연산증폭기 U_6 로 구성되며 출력 전압은 150nA당 2Volt/Decade로 출력된다.

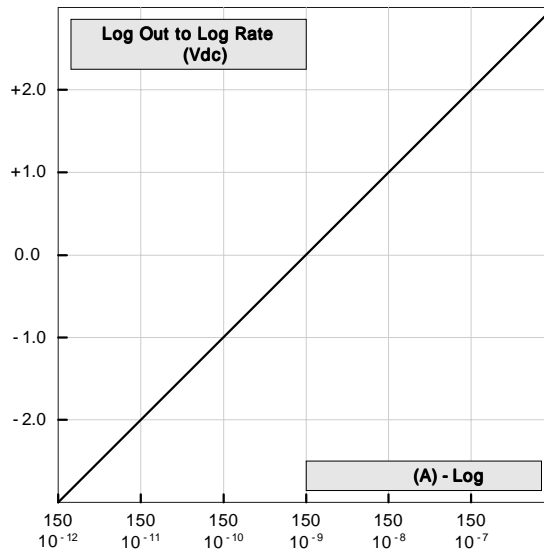
$$V_{out}(U_6) = -2.0 \times \text{Log}(I_{in} \div 150 \times 10^{-9}) \text{ ----- ①}$$

이것을 표로 정리하면 [표 3]과 같다.

I_{in}	$V_{out}(U_4)$
$150 \times 10^{-12} \text{ A}$	+6.0 Vdc
150×10^{-11}	4.0
150×10^{-10}	2.0
150×10^{-9}	0.0
150×10^{-8}	-2.0
150×10^{-7}	-4.0
150×10^{-6}	-6.0

[표 3] Logarithmic Amp 출력 값

따라서, Log Out 신호는 [그림 3]과 같이, 검출기 전류가 지수 함수(Exponential) 형태이며 직선 전압출력이 얻어진다.



[그림 3] 지수형 검출기 전류에 대한 Log Out 출력신호

(라) Linear Amp

Linear Amp는 연산증폭기 U_3 로 구성되며 검출기 전류를 Log가 아닌 비례 선형 증폭하여 출력하며 관계식은 다음과 같다.

$$V_{out}(U_3) = 26.667 \times 10^3 \times I_{in} + 0.5$$

검출기 입력 $0.0 \sim 1.5 \times 10^{-4} \text{ A}$ 에 대하여 $0.5 \sim 4.5\text{Vdc}$ 가 출력된다.

(2) Rate Amp

Rate Amp는 전단의 Log Amp로부터 변환된 Log 전압 신호를 기울기(Rate) 신호로 변환하는 2차 미분기(Differentiator)와 출력 Buffer Amp로 구성된다.

(가) Log Amp 출력

검출기 전류를 다음과 같은 지수(Exponential) 신호로 가정하면, (참고로, 대수형 증성자 고변화율 응답시간 시험에 사용되는 393T Test Set 신호 형태가 지수 형태임)

$$i(t) = I_0 \times e^{\frac{r}{100} \times t} \text{ ----- ②}$$

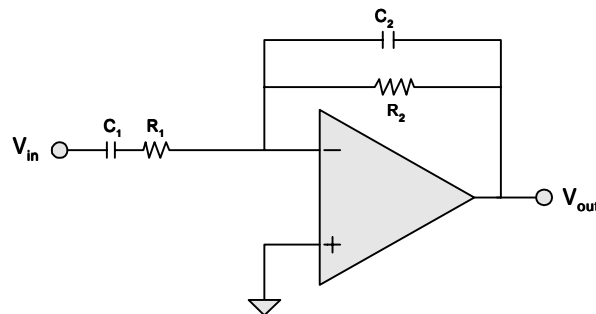
여기서, r = input current rate of change in percent

Log Out 출력은 식②를 식①에 대입하여 풀면

$$\begin{aligned} V_{out}(U_6) &= -2 \times \text{Log}(i(t)) \\ &= -2 \times [(\log_{10}e)(\log_e I_0) + (\log_{10}e)(r/100) \times t] \text{ --- ③} \end{aligned}$$

(나) Rate Amp

Rate Amp는 전단의 Log Amp에서 연산된 검출기 전류의 Log 연산 결과를 Rate 즉, 미분(Differentiator)하는 2차 미분기로 구성되어있으며, 블록도는 [그림 4]와 같다.



[그림 4] Rate Amp의 미분 회로

위의 2차 미분 회로를 해석하면 다음과 같다.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{Z_2}{Z_1} = - \left[\frac{R_2 \times \frac{1}{SC_2}}{R_2 + \frac{1}{SC_2}} \right] \frac{1}{R_1 + \frac{1}{SC_1}} = \frac{R_2 C_1 S}{(1 + R_1 C_1 S)(1 + R_2 C_2 S)} \text{ ----- ④}$$

여기서, $R_1 C_1 = R_2 C_2 = T_2 = 250\text{ms}$, $R_2 C_1 = T_1 = 7.5$

미분기에 식④이 인가되므로 식④의 첫 번째 항인 상수항은 미분기에 의해 제거되고 두 번째 항만 미분기의 V_{in} 으로 인가된다. 따라서,

$$V_{in}(t) = -2 \times [(\log_{10}e)(r/100) \times t] = k \times t \quad \text{----- ⑤}$$

미분기 출력을 구하기 위하여 식⑤를 식④에 대입하여 풀면

$$V_{out}(s) = - \frac{\frac{T_1}{T_2} \times k}{s \times \left[s + \frac{1}{T_2} \right]^2}$$

이를 부분 분수 전개하면

$$V_{out}(s) = (k \times T_1) \times \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{\left(s + \frac{1}{T_2}\right)} - \left(\frac{1}{T_2}\right) \times \frac{1}{\left(s + \frac{1}{T_2}\right)^2} \right] \quad \text{---- ⑥}$$

식⑥을 역 Laplace 변환하고 식⑤의 k 값을 대입하면

$$V_{out}(t) = (-2) \times (\log_{10}e) \times \left(\frac{r}{100}\right) \times T_1 \times \left[1 - e^{-\frac{t}{T_2}} - \left(\frac{t}{T_2}\right) e^{-\frac{t}{T_2}} \right] \quad \text{----- ⑦}$$

이것이 Rate Amp 미분기 연산증폭기 U₂ 출력이다.

(다) Buffer Amp

Buffer Amp는 Rate 미분기 출력 연산 증폭기인 U₂ 출력 전압을 증폭하고 Bias를 더해준다. 즉, 검출기 신호가 +15%/s로 변화시에는 Rate 미분기 출력을 4.5Vdc로, 0%/s시에는 2.5Vdc, -15%/s시에는 0.5Vdc로 출력하도록해준다.

정확한 이득을 계산하여보자.

입력 전류가 +15%/s 변화시 식⑦의 Steady State(즉, t=∞)에서 미분기 출력은

$$V_{out}(t) = (-2) \times (\log_{10}e) \times \left(\frac{15}{100}\right) \times T_1 = 0.97716 \text{ Vdc}$$

이 값이 Buffer Amp를 통하여 (+) Span인 +2Vdc가 되어야하므로

$$\text{Buffer Amp 이득} = 2.0/0.97716 = 2.047$$

각 변화율에 대한 Rate Amp 즉, Buffer Amp 출력 Steady State 값을 계산하면 다음과 같다.

○ +10%/s 변화시

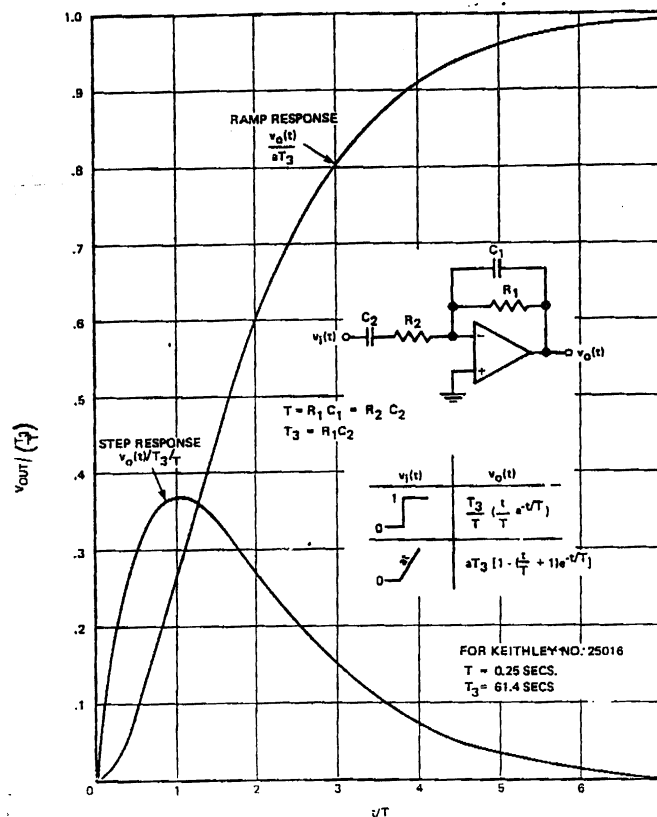
$$V_{out}(t) = [(-2) \times (\log_{10}e) \times \left(\frac{10}{100}\right) \times T_1] \times 2.047 + 2.5 = 3.833 \text{ Vdc}$$

○ -10%/s 변화시

$$V_{out}(t) = [(-2) \times (\log_{10} e) \times \left(-\frac{10}{100}\right) \times T_1] \times 2.047 + 2.5 = 1.666 \text{ Vdc}$$

(3) Log Rate 응답 곡선의 의미

Log Rate Amp 의 응답 특성을 나타낼 때 자주 사용되는 응답 특성 곡선은 SDS#1에 사용되는 KEITHLEY Log Rate Amp의 경우, [그림 5]와 같다.



[그림 5] KEITHLEY Log Rate Amp 응답 특성

Log Rate Amp의 응답 특성은 입력 신호가 지수함수일 때 식⑤와 식⑦로부터 출력 대 입력 신호 비는 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$\frac{V_{out}(t)}{V_{in}(t)} = \left[1 - e^{-\frac{t}{T_2}} - \left(\frac{t}{T_2}\right) e^{-\frac{t}{T_2}} \right] \text{----- ⑧}$$

Ion-Chamber 검출기의 지수형(Exponential) 신호는 Log Amp에서 식③과 같이 직선 식으로 나타난다. 이 직선 식은 식⑧의 Vin(t)으로 Ramp 신호 형태로 Rate Amp에 입력 신호로 인가되며, 식⑧의 (출력신호)/(입력신호)를 시간에 따라 그리면 [그림 6]으로 나타낼 수 있다.

Log Rate Amp 출력은 입력신호의 변화율 즉, Rate (%/s) 에 따라 KEITHLEY Amp에서는 약 2초 정도의 과도기를 지난후 일정한 출력 즉 Steady-State 출력을 나타낸다. 정상 운전중에는 검출기 출력 전류가 변화가 없을 것이므로 식⑥에서 Rate Amp 즉 미분기 출력은 0Vdc 가 되고, Bias 2.5Vdc를 고려한 Log Rate Amp 출력은 2.5Vdc가 된다.

대수형 중성자 고변화율에 의한 원자로 정지 설정치가 +10%/s 이므로 설정치 전압은 3.833 Vdc가 되며, 이 값이 Log Rate Amp 출력 값과 비교에 의하여 원자로 정지 상태를 결정하게된다. 만약, 원자로 출력이 갑작스럽게 증발하여 +10%/s가 되면, Log Rate Amp 출력 전압은 정상 운전 값인 2.5Vdc → 3.833Vdc 로 증가하게되고 설정치와 비교에 의하여 원자로 정지 상태가 발생된다. 그러나, 출력이 갑자기 증발하였다 하여 즉시 원자로 정지 상태가 되는 것이 아니고, 식⑧과 [그림 5]에서와 같이 Log Rate Amp 출력이 약 0.6초 정도의 지연후 설정치에 도달하므로 원자로 정지 상태는 +10%/s 발생후 약 0.6초 후에 도달하게된다.

트립 설정치를 계단 입력신호에 대한 변화분의 63.2%에 오도록 설정 (참조:ISA-S67.06-1984 Response Time Testing of Nuclear Safety- Related Instrument Channels in Nuclear Power Plants)하고 변화율 설정치를 +15%/s의 63.2%에 해당하는 +9.48%/s 로 하였을 때, 전달 함수 계산 값은 [그림 6]과 같다.

4. 대수형 중성자속 고변화율 응답시간 시험

Log Rate Amp의 응답시간을 측정하기 위하여 Ion Chamber 검출기 신호를 지수함수 (Exponential Function)로 발생 가능한 393T Test Set을 사용하였다. [그림 7]



[그림 7] 대수형 중성자 고변화율 시험 장면

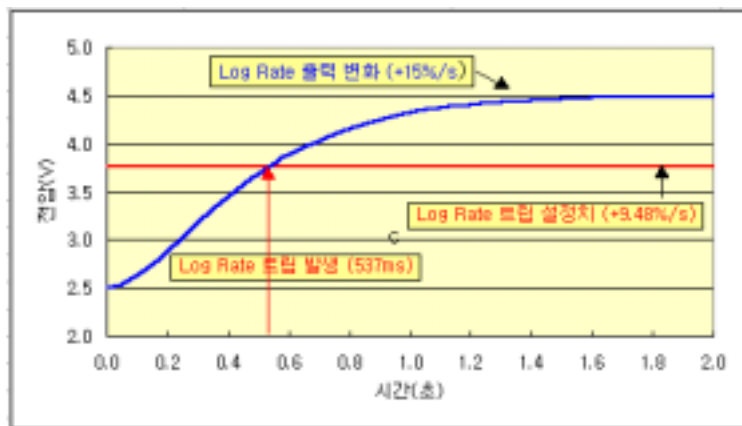
응답시간을 측정하기 위해서는 트립 설정치를 계단 입력신호에 대한 변화분의 63.2%에 오도록 설정하였다. (참조:ISA-S67.06-1984 Response Time Testing of Nuclear Safety- Related Instrument Channels in Nuclear Power Plants). 발전소 실제 트립 설정치가 +10%/s 이므로 이 값이 63.2%에 오도록 하기 위하여 393T에서는 +15.82%/s 의 변화율로 지수 신호를 계단 입력하여야한다. 그러나, 393T 신호원은 최대 +15%/s 의 변화율로만 신호 발생이 가능하므로

응답시간 측정을 위하여 변화율 설정치를 +15%/s의 63.2%에 해당하는 +9.48%/s 로 조정후 시험하였다.

[그림 8]에서는 설정치를 +9.48%/s로 두고, 393T로 +15%/s 변화율 신호를 계단 입력하였을 때의 Log Rate Amp 출력을 계산한 것이다. 이 결과로부터 +9.48%/s 로 설정시 Log Rate Amp의 응답시간은 537ms가 됨을 알수 있다.

Log Rate Trip Setpoint (%/sec)	9.48
Log Rate Test Signal (%/sec)	15.00
Time Contant (T1 - sec)	7.5
Time Contant (T2 - sec)	0.25

Time(sec)	Log Rate Trip Setpoint (+9.48%/s) Bias 2.5V	Log Rate Test Signal (+15%/s) Bias 2.5V
0.00	3.764	2.500
0.05	3.764	2.535
0.10	3.764	2.623
0.15	3.764	2.744
0.20	3.764	2.882
0.25	3.764	3.028
0.30	3.764	3.175
0.35	3.764	3.316
0.40	3.764	3.450
0.45	3.764	3.574
0.50	3.764	3.688
0.536	3.764	3.763
0.537	3.764	3.765
0.60	3.764	3.883
0.80	3.764	4.158
1.00	3.764	4.317
1.20	3.764	4.405
1.40	3.764	4.451
1.60	3.764	4.475
1.80	3.764	4.488
2.00	3.764	4.500



[그림 6] 설정치 9.48%/s에 대하여 변화율 15%/s일때 신호 응답 곡선

실제 시험한 결과는 [표 4]와 같다.

정지 변수	응답시간기준(ms) (Relay Drop 50ms포함)	채널		
		D-채널	E-채널	F-채널
대수형 중성자 고변화율	560	538	546	586

[표 4] 응답시간 시험 결과

시험한 결과로부터, SDS#1의 대수형 중성자 고변화율 루프 응답시간은 538, 546, 586ms로 측정되었으며 [그림 6]에서 전달 함수를 해석하여 얻은 결과 값인 537ms와 거의 일치함을 알 수 있다.

6. 결 론

중수로형 원전인 월성1호기 특별 안전 계통인 원자로 제1,2 정지계통 신호 루프중 대수형 중성자 고변화율 루프의 응답시간에 대하여 고찰하였다. 먼저, 최종안전성 분석보고서에 기술된 응답시간 기준과 전달 함수를 분석하였다. 그리고 발전소에서 사용중인 KEITHLEY Amp의 회로를 해석하여 전달 시간을 계산하였으며 실제 시험을 통하여 확인하였다.

7. 참고 문헌

- [1] KATSUHIKO OGATA, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall, pp 39-45, 1986.
- [2] ISA-S67.06-1984, "Response Time Testing of Nuclear Safety-Related Instrument Channels in Nuclear Power Plants", Instrument Society of America, 1984.
- [3] J. Jimeno, Nuclear Radiation Measurement and Reactor Safety Instrumentation, SCINTREX LIMITED, 1994
- [4] 월성1호기 최종안전성분석보고서, 86-03500-AR-007, 1993
- [5] 월성1호기 Design Manual 59-68200-DM-001 Rev.02, 1981