

## 퍼지-랜덤 변수를 이용한 실시간 전력 시스템의 성능 및 신뢰도 평가

민 병 조, 김 학 배

연세대학교 전기·컴퓨터공학과

### Evaluation of the Performance and Reliability of a Real-time Power System

#### Described by a DES Model Using Fuzzy-Random Variables.

Byungjo Min and Hagbae Kim

Dep. of Electrical & Computer Engineering, Yonsei University

**Abstract** - 엄격한 시간 제약성에 의해 특성화되는 실시간 전력 시스템의 성능 및 신뢰도를 평가하기 위해서 퍼지-랜덤 변수가 포함된 이산 사건 모델 및 확장된 path-space 기법을 제시한다. 실시간 시스템의 정확성은 출력의 논리적 결과 뿐 아니라 반응시간에도 의존하므로, 본 논문에서는 실시간 전력 시스템의 성능 및 신뢰도를 유연하게 평가하기 위해서 퍼지-랜덤 변수에 의해 적절하게 변형된 상태 오토마타를 제시하고 몇가지 수치 예제를 제시함으로써 제안한 기법의 효용성을 검증한다.

### 1. 서 론

전력시스템은 열에너지 또는 운동에너지 등의 1차 에너지를 전기 에너지로 변환하여 수송, 배분, 소비하는 하나의 유기적인 시스템으로 특성화되며, 전력의 생산(발전), 수송(송전), 배분(배전), 그리고 이들의 관리 제어 및 운용(급전)을 위한 설비, 장치로 구성된 합성체이다. 이러한 전력시스템에서는 전력의 생산과 소비가 동시에 이루어지고, 소비량의 변화에 따라서 실시간으로 생산량의 조절은 가장 중요한 운용목적중의 하나이다[1]. 이처럼 복잡해지고 거대해진 전력시스템의 적절한 제어를 위해 날로 그 응용분야가 확장되어 가는 마이크로 프로세서나 컴퓨터를 이용하는 디지털 제어시스템의 도입이 활성화되고 있는 추세이다. 이러한 디지털 제어 시스템에서 마이크로 프로세서의 기술과 네트워크 기술의 발달을 근간으로 발전되어 온 분산제어시스템(DCS: Distributed Control System)은 마이크로 프로세서의 고속 데이터 처리 능력을 활용하여 하나의 제어기가 다수의 기기를 제어할 수 있는 다중 루프 제어 기능을 보유하고 있으며 고기능, 고신뢰성, 자동화 단계의 고도화, 비용 절감, 시스템 규모 축소 효과를 통한 경제성 향상 및 유지 보수의 편의성의 장점을 가지고 있다. 이러한 DCS는 발전소, 송변전 계통 제어, 전기 설비 등의 전력시스템의 주된 응용분야에 적용되어 자동화, 신뢰성과 가용성 향상, 운용, 보수 점검의 편의성을 도모하고 외부와의 통신, 자기 진단 및 고장 기록 등의 다기능화를 통한 상태 추적 기능과 주기적 자기 진단 기능의 추가로 높은 안전도와 신뢰도를 확보 유지할 수 있는 감시, 제어 시스템이 추구하고 있다[2]. 하지만 이러한 전력시스템의 경우, 제어기들의 요소 고장 발생 및 회복기법이 실시간적으로 이루어져야 하고, 또한 이러한 시스템을 모델링하는 경우 이러한 실시간성이 잘 표현되어야 한다. 유동적인(dynamic) 시스템의 특성을 표현하는 형태는 크게 세가지로 분류된다. 시연속 시스템을 표현하는데 있어서는 미분 및 차분 방정식이 오랜 기간의 발전을 이루어 왔다. 하지만 컴퓨터의 출현으로 이산 사건 모델링은 급속한 속도로 발전하는 컴퓨터의 성능과 더불어 복잡한 생산시스템, 통신 및 컴퓨터 시스템의 설계 등의 다양한 분야에서 응용범위를 넓혀왔다.

대부분의 상용시스템에서 상태 방정식 분석에 기인한 여러가지 성능측정법 및 성능지수들이 제시되었고 사용

되어왔다. 그러나 실시간 시스템은 요소(component) 에러/고장의 결과가 전체 시스템의 재난으로 직접적으로 이어질 수 있기 때문에 이러한 고장에 영향을 미치는 동작 환경과 작업부하에 대한 정보가 일반적인 시스템에 비해 더욱 중요하게 부각된다. 그러므로, 시스템의 성능은 다른 보통의 시스템과는 달리 시계약성과 계산 시간 지연(Computational Time Delay,CTD)을 동시에 고려해야되는 차별성을 지닌다[3]. 시연속 유동 시스템에서 시계수 제한성을 유도하기 위해 상태 방정식을 이용한 연구가 제안되었다[4]. 실시간 시스템에서 시제한성 또는 계산 시간 지연은 기본적으로 시스템의 상태를 운영하는 시스템 유동성에 의존하게 된다. 그러나 실시간 시스템에서 랜덤하게(stochastically) 변화하는 상태들을 표현하거나 기존의 모델들로 분석하기에 어려운 면이 있다. 또한, 시제한성을 시스템 상태 또는 시지연으로 인해 초래된 시스템 비용으로 정확하게 대응시키는 것도 쉽지 않기 때문에, 시스템 상태들의 출현은 확률적으로 모델링하면서 각 시스템 상태들은 비용이나 시지연 자체에 관련된 퍼지 로직을 사용하여 표현된다. 결과적으로, 퍼지-랜덤 변수로 정의된 변수를 실시간 시스템의 시정보에 연관된 사건(event)들의 퍼지성과 랜덤성을 분석하는데 사용되었다. 실제로 이전에 이와 연관된 논문으로 [5]에서는 퍼지-랜덤 변수의 개념을  $F, \Omega \rightarrow F(R)$ 과 같이 소개하였고, 이 때,  $(\Omega, A, P)$ 는 확률 공간이며,  $F(R^n)$ 은 함수,  $\{x \in R^n; u(x) \geq \alpha \text{ for each } \alpha \in (0, 1)\}$ 의 조건을 만족시키는  $u: R^n \rightarrow [0, 1]$ 여야 한다. 그러나, 이전 연구들에서는 실제 적용가능한 퍼지-랜덤 변수들의 기본적인 원리에 관련된 성과는 전무하다고 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 퍼지-랜덤 변수들의 새로운 정의를 제시하고, 퍼지-랜덤 사건의 확률을 구하기 위해 기본적인 원리를 유도하며, 각각의 사건에 적절한 보상값(reward)을 줌으로써 실시간 시스템의 성능을 보다 정확하게 측정할 것이다. 또한 path-space 기법에 퍼지-랜덤 변수를 적용함으로써 확장된 신뢰도를 유도할 것이다.

### 2. 본 론

#### 2.1 퍼지-랜덤 변수가 포함된 상태 오토마타

퍼지 stochastic 현상[6]과 랜덤 변수들의 일반화를 수학적으로 표현하기 위해서 본 논문에서는 퍼지성과 랜덤성이 같이 통합된 불확실한 정보를 퍼지-랜덤 변수를 사용하여 표현하였고 이를 통해 실시간 시스템의 포괄적이고 유동적인 상태를 표현할 수 있고, 사건들의 퍼지성과 랜덤성을 통합하여 표현함으로써, 복잡한 시스템특성을 간략화할 수 있다. 퍼지-랜덤 변수는 다음과 같다.

정의:  $(\Omega, A, P)$ 를 확률 공간이라 하자.  $X: \Omega \rightarrow F_0(R)$ 의 대응을 확률 공간에서의 퍼지 랜덤 변수라고 한다. 임의의 어떤  $\alpha \in (0, 1]$ 와  $\omega \in \Omega$ 에 대해서,

$$\tilde{X}_\alpha(\omega) = \{x \in R, \tilde{X}(\omega)(x) \geq \alpha\} = [X_\alpha^-, X_\alpha^+], \quad (1)$$

여기서  $\tilde{X}_\alpha$ 는 랜덤 구간이며,  $X_\alpha^-$ 와  $X_\alpha^+$ 는 두 개의 랜덤 변수이다. 본 논문에서는 우선적으로 시스템 상태에

의해 주어지는 특정한 이산 시간 영역 함수나 이산 비용 함수를 다루기 때문에  $\alpha$ -레벨의 개념을 적용하지 않았고,  $X$ 의 영역을 단순히 비용 영역으로 간주하였다. 퍼지-랜덤 변수는  $\omega$ 가 대응되는 실수가 구간으로 존재한다는 측면에서 랜덤 변수와 특징적으로 다르기 때문에 퍼지-랜덤 변수와  $\omega$ 의 관계가 일대일로 대응되는 것이 아니고, 여러 가지의  $\omega$ 값들이 같은 실수 구간을 공유하게 되고, 그들의 관계는 소속도로써 특징지워질 수 있게 된다. 이제, 퍼지-랜덤 변수들의 확률을 (i)  $w$ 가 이산이고  $X$ 가 이산일 경우와 (ii)  $w$ 가 이산이고  $X$ 가 연속인 경우에 대해서 정의한다. 그리고,  $\omega$ 와  $X$ 가 이산적인 값을 갖는 경우, 표기는  $\omega_i$ 와  $X_i$ 로 하며, 이들은  $\omega$ 의  $i$ 번째 요소와 실수축 위에  $X$ 의  $i$ 번째 요소를 각각 의미한다. 대부분의 상용 컴퓨터 제어 시스템들의 경우, 시스템의 대부분 동작들은 이산 샘플링 시간을 기반으로 하는 디지털 컴퓨터의 성능에 의존한다. 그러므로, 실시간 시스템을 모델링하면서,  $X$ 의 영역을 이산 시간 영역  $t$ 로 간주할 수 있으며, 이 때,  $X_i$ 는 시스템의  $i$ 번째 샘플링 시간을 의미하고, 또한 실제 시스템의 경우, 유한한 시간 구간만을 다루게 된다. 유사한 이유로,  $X$ 의 영역을 시스템의 사건에 포함되는 비용값이라고 간주할 수 있다. 그러므로 매우 큰 수  $N$ 까지  $X$ 의 영역을 제한한다는 적절한 가정을 세울 수 있으며,  $X_i$ 는  $i=1, \dots, N$ 에서 존재한다고 할 수 있다. 이제 위의 경우들에 대하여 퍼지-랜덤 변수들의 확률 함수  $P(X)$ 를 다음과 같은 식(2)로 정의한다.

$$P(X) = \sum_{j=1}^N P_j \beta_j^i \text{ for } j=1, \dots, N \quad (2)$$

여기서  $P(X_i)$ 는 퍼지-랜덤 변수  $X$ 가 실수값  $X_i$ 에 속할 확률이고,  $P_j$ 는  $\omega$ 가  $\omega_j$ 에 속할 확률이다. 또한 모든  $i$ 에 대하여  $\sum_{j=1}^N \beta_j^i = 1$ 과  $\sum_{i=1}^N P_i = 1$ 이 성립한다. 식(2)를 행렬형태로 표현하기 위해, 퍼지-랜덤 변수 벡터, 표본요소 벡터를 각각  $P_x = [P(X_1), \dots, P(X_N)]$ 와  $P_w = [P_1, \dots, P_N]$ 로 정의한다. 그러면 식(2)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_x = P_w M \quad (3)$$

여기서  $P_x \in R^{1 \times N}$ ,  $P_w \in R^{1 \times N}$ 이고  $M$ 은 다음과 같은 소속도 행렬로 구성되어 있다.

$$\begin{bmatrix} \beta_1^1 & \beta_2^1 & \dots & \beta_N^1 \\ \beta_1^2 & \beta_2^2 & \dots & \beta_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_1^n & \beta_2^n & \dots & \beta_N^n \end{bmatrix}$$

그러므로,  $X \leq X_k$ 를 의미하는 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$P(X \leq X_k) = P(X_1) + P(X_2) + \dots + P(X_k) \quad (4)$$

$$= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N P_i \beta_j^i$$

이제  $X$ 가 연속적인 값을 가지는 경우도 위와 유사하게 확률 분포함수를 구할 수 있다.  $X=x$ 인 확률은 다음과 같다.

$$P(X=x) = \sum_{i=1}^N P_i m_i(x) \text{ for } x \in [0, \infty), \quad (5)$$

여기서  $m_i(x)$ 는  $x$ 가  $i$ 번째 표본요소소 소속되는 소속도의 값을 의미하며,  $\sum_{i=1}^N P_i = 1$ ,  $\int_0^\infty m_i(x) dx = 1$ 을 만족한다.

만일  $G_i(x) = \int_0^x m_i(t) dt$ 라 정의한다면, 다음과 같은 식의 결과를 얻게 된다.

$$P(X \leq x) = \int_0^x P(X=t) dt = \int_0^x \sum_{i=1}^N P_i g_i(t) dt \quad (6)$$

$$= \sum_{i=1}^N P_i G_i(x).$$

## 2.2 실시간 시스템의 성능 분석

다른 여타의 상용 시스템들과 차별화될 수 있는 실시간 전력 시스템의 특성은 엄정한 시간제한성과 고장 발생시의 현저한 성능 저하 및 커다란 경제적 손실 등을 고려할 수 있다. 대다수 시스템의 정량적 성능은 정성적인 특성에 대부분 의존하는 것이 상식적인 사실이다. 다른 상용 시스템들과 달리 실시간 시스템의 특성은 엄격한 시간제한성과 고장 발생시의 현저한 성능 저하 등을 고려할 수 있다[7]. 대부분의 연구에서 고장과 회복을 무시한 순수한 성능 모델들은 단지 논리적인 정확성 차원에서 작업을 완수하는 능력만을 고려해왔다. 그러나, 본 논문에서는 앞 절에서 언급한 고장 발생과 시간 지연 효과를 반영하는 DES기법을 활용하여 시스템의 유용성을 모델링하였다. 또한, 시스템의 성능을 유연하게 측정하기 위하여, 비용 변수 확률을 보상값(reward) 구조로 간주하는 시스템의 보상값을 모델에 도입하였다. 보상값 구조 뿐만 아니라, 사건(event)의 구조를 변형할 수 있는 자유도를 고려하면, 보상값 모델을 통해 목표 시스템의 광역적인 시뮬레이션 상황을 표현할 수 있다. 결과적으로 보상값이 시스템 상태변화를 여러 가지 다른 보상비로 특성화하여 시스템 특성을 더 정확하게 표현할 수 있게 된다. 결과적으로 제시된 모델에서 시스템 구조의 유용성과 주변 환경의 영향을 반영하는 성능 지수는 비용 변수의 확률과 보상값의 곱을 더한 값으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$P_{sys} = \sum_{i=1}^N r_i P(X_i), \quad (7)$$

여기서  $P_{sys}$ ,  $r_i$ ,  $P(X_i)$ 는 각각 시스템의 성능지수,  $X_i$ 라는 비용 변수에 관련된 보상비(reward rate)와  $X_i$  비용 변수의 확률을 의미한다. 만일  $R$ 을 보상비 벡터로 정의하면, 식(2)와 (3)에서 정의된  $P_x$ ,  $P_w$ 와  $M$ 으로 다음과 같은 행렬로 표현된다.

$$P_{sys} = P_x R = P_w M R, \quad (8)$$

여기서  $P_x \in R^{1 \times N}$ ,  $P_w \in R^{1 \times N}$ 이고  $R = [r_1, \dots, r_N]^T$ 이다.

각각의 비용 변수  $X_i$ 는 시스템 특성에 의해 결정되며,  $[0, 1]$  사이의 값을 갖는다. 또한 비용 변수 확률  $P(X_i)$ 는 식(4)에 의해 유도할 수도 있다.

## 2.3 퍼지-랜덤 변수로 확장된 시스템 신뢰도 모델

퍼지-랜덤 변수에 의해 확장된 신뢰도 모델을 만들기 위해, 시스템 특성 중 데드라인 사건을 퍼지-랜덤 변수로 가정할 수 있다. 즉, 경성 데드라인  $\tau$ 가 상수가 아니라 소속도 함수  $\mu_{(\tau)}(y)$ 를 가진다고 가정하자. 이러한 가정 하에서 시스템 회복 성공과 회복 실패를 나타내는 퍼지-랜덤 백트  $G_\tau(y)$ 와  $\bar{G}_\tau(y)$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$G_\tau(y) = \mu_\tau(y) \int_0^y g(x) \bar{D}(x) dx$$

$$\bar{G}_\tau(y) = 1 - G_\tau(y) = \mu_\tau(y) \int_0^y d(x) \bar{G}(x) dx$$

예를 들어, 데드라인 사건  $\tau$ 가 정규화된 삼각함수를 그 소속함수로 가진다고 가정하자. 즉,

$$\mu_{(\tau)}(y) = \begin{cases} \frac{2}{c-a} \left( \frac{y-a}{b-a} \right) & \text{for } a \leq y \leq b \\ \frac{2}{c-a} \left( \frac{c-y}{c-b} \right) & \text{for } b \leq y \leq c \end{cases}$$

와 같은 소속함수의 경우, (여기서  $a, b, c$ 는  $a \leq b \leq c$ 를 만족하는 음이 아닌 실수라고 가정함)  $G_\tau(y)$ 는 다음과 같이 유도되고,

$$G_\tau(y) = \begin{cases} \frac{2}{c-a} \left( \frac{y-a}{b-a} \right) \int_0^y g(x) \bar{D}(x) dx & \text{for } a \leq y \leq b \\ \frac{2}{c-a} \left( \frac{c-y}{c-b} \right) \int_0^y g(x) \bar{D}(x) dx & \text{for } b \leq y \leq c \end{cases} \quad (9)$$

이를 이용하여, 확장된 신뢰도의 상하위 경계치를 식(10)와 같이 계산할 수 있다.

$$UB = [1 - G_r] \sum_{k=1}^{\tau} \Pr[k \leq n | T] G_r^{k-1} \quad (10)$$

$$LB = [1 - G_r] \sum_{k=1}^{\tau} \Pr[k \leq n | T - nr] G_r^{k-1}$$

퍼지-랜덤 변수에 의해 확장된 신뢰도에 대해 고려해 본다면, 상하위 경계치 UB와 LB는 정규 소속도 함수에 의해 그 모호성이 표현되었기 때문에, y에 대한 함수 형태로 표현된다. 그러므로, UB와 LB 크기는 이전 상하위 경계치에 비해 작은 값으로 계산되는데, 이는 퍼지-랜덤 요소  $\mu_{(y)}$ 가 항상 1보다 작기 때문이다. 하지만 상대적 차이비율(Relative Ratio Difference, RRD)은 예상대로 큰 차이를 보이지 않음을 관찰할 수 있고, 따라서 이러한 구간 신뢰도 값은 유효함을 증명할 수 있다.

### 2.4 수치 예제

앞에서 언급된 바와 같이 전력 시스템에서, DCS는 빠른 처리속도와 높은 신뢰도 때문에 전력의 생산(발전), 수송(송전), 배분(배전), 그리고 이들의 관리 제어 및 운용(급전) 등의 공정에서 점점 더 많이 사용되고 있다. 이러한 DCS는 언급된 여러 과정들을 감시 및 제어하는 과정 중에서, DCS 부품의 노쇠 및 고장, 전자파에 의한 전도성 잡음 발생, 로직의 변화, 시스템 내 네트워크의 고장, I/O배선을 통한 잡음 발생, 프로세서의 전원의 요란, 잘못된 접지 등으로 인한 여러 고장들이 발생할 수 있다. 이러한 고장사건을 반영한 시스템 성능을 구하기 위해서 가장 대표적으로 사용되는 소속도함수를 적용하였으며, 보상값도 선형적으로 증가하는 경우(보상레벨 1)와 감소하는 경우(보상레벨2)와 지속적으로 감소하는 경우(보상레벨3)에 대하여 시스템의 성능을 계산하였고, 그 결과는 표1에 나타나 있다.

- Case 1: Uniform 소속함수인 경우,
- Case 2: Gaussian 소속함수인 경우,
- Case 3: Triangular 소속함수인 경우,
- Case 4: 비대칭 polynomial 소속함수인 경우,

계산된 성능크기의 순위가 보상레벨의 변화에 따라 다르다는 것을 쉽게 알 수 있다. 다시 말해, 전체 시스템의 성능이 비용 변수의 분포뿐만 아니라 그것의 보상값에도 의존한다는 것으로 결론지을 수 있다. 이제, 데드라인 사건을 퍼지-랜덤 변수화한 path-space 기법을 통해 확장된 시스템 신뢰도의 상하위 경계치를 계산하는 수치 예제를 고려해 보자. 자동화된 전력시스템에서 DCS에 의해 관측되고 운영되는 발전소를 가정하자. 이 전력계통안정제어기가 아주 긴 시간의 주기와 가지며 고신뢰도를 요구한다. 이런 시스템의 경우 아주 긴 작업수행 시간을 그 주기로 가지고 있고, 고장 발생시 그 복구가 어려우므로, 여분을 고려하여 설계된다. 제어기 고장의 평균 도착시간이  $10^5$ 이고 고장 발생시의 성공 확률  $G(\tau)$ 이 0.97이며,  $\tau$ 가 30분( $a=20, b=30, c=40$ )이며, 작업수행 시간이 100일이라고 가정하여, 그 결과를 표 2와 그림 1로 나타내었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 퍼지-랜덤 변수를 사용하여 DES 모델을 구축하였으며, 이를 통해, 실시간 시스템의 성능을 평가하는 기법을 제안하였다. 구체적으로 퍼지-랜덤 변수를 사용하여 시스템 사건의 퍼지성과 랜덤성을 통합할 수 있으며, 시스템 상태와 시간정보 사이의 모호성도 모델에 반영할 수 있다는 면을 보였다. 또한 지연 효과들을 분석함으로써, 성능 정보 분석을 통해 연성 시계수제 한성을 유도하는 방법에 대해 논의하였고, 이러한 결과는 간단한 예제를 통해 유용하게 활용될 수 있음을 검증하였다.

#### [참 고 문 헌]

[1] Z. Zhang, G. Hope, and O. Malik : "Expert

System in Electric Power Systems -- A Bibliographical Survey", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, pp. 1355-1362, Oct. 1989

[2] J. Keronen, "An Expert System Prototype for Event Diagnosis and Real-Time Operation Planning in Power System Control", IEEE/PES, pp.544-550, Apr.1988

[3] K. G. Shin and C. Krishna, "New performance measures for design and evaluation of real-time multiprocessors", Int'l J. Computer Science & Engineering, vol. 1, no.4, 179-192, 1986.

[4] K. G. Shin and H. Kim, "Derivation and Application of Hard Deadlines for Real-Time Control Systems", IEEE Trans. on Systems, Man, & Cybernetics, vol. 22, no. 6, pp. 1403-1413, 1992.

[5] M. Puri, D. Ralescu, "Fuzzy random variables", J. Math. Anal. Appl, vol. 114, pp. 409-422, 1986.

[6] W. Guanyuan, Z. Yue, "The theory of fuzzy stochastic processes", Fuzzy Sets and Systems, vol. 51, pp. 161-178, 1992.

[7] K. G. Shin, C. M. Krishna, Y.-H. Lee, "A unified method for evaluating real-time computer controllers and its application", IEEE Trans. Automatic Control, vol 30, no.4, pp. 357-366, 1985.

표 1. 시스템 성능

|                  | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| $P_{ox}$ (보상레벨1) | 0.5001 | 0.6283 | 0.6667 | 0.2845 |
| $P_{ox}$ (보상레벨2) | 0.5001 | 0.3718 | 0.3334 | 0.7156 |
| $P_{ox}$ (보상레벨3) | 0.6321 | 0.5457 | 0.5162 | 0.7637 |

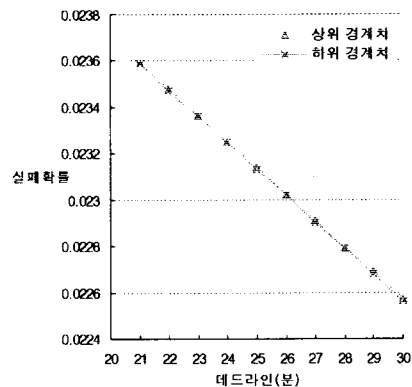


그림 1. 계통제어발전기 경우의 상하위 경계치

표 2. 상하위 경계치 및 RRD

|             | UB      | LB      | RRD                    |
|-------------|---------|---------|------------------------|
| $\tau=21$ 분 | 0.02359 | 0.02359 | $1.441 \times 10^{-4}$ |
| $\tau=22$ 분 | 0.02348 | 0.02347 | $1.510 \times 10^{-4}$ |
| $\tau=23$ 분 | 0.02336 | 0.02336 | $1.579 \times 10^{-4}$ |
| $\tau=24$ 분 | 0.02325 | 0.02325 | $1.648 \times 10^{-4}$ |
| $\tau=25$ 분 | 0.02314 | 0.02313 | $1.717 \times 10^{-4}$ |
| $\tau=26$ 분 | 0.02302 | 0.02302 | $1.786 \times 10^{-4}$ |
| $\tau=27$ 분 | 0.02291 | 0.02290 | $1.855 \times 10^{-4}$ |
| $\tau=28$ 분 | 0.02279 | 0.02279 | $1.924 \times 10^{-4}$ |
| $\tau=29$ 분 | 0.02269 | 0.02268 | $1.993 \times 10^{-4}$ |
| $\tau=30$ 분 | 0.02257 | 0.02256 | $2.062 \times 10^{-4}$ |