

강우자료의 비정상성을 고려한 재현기간 변화에 관한 연구 A Study on the Changes of Return Period Considering Nonstationarity of Rainfall Data

신 흥 준* / 안 현 준** / 허 준 행***

Shin, Hongjoon / Ahn, Hyunjun / Heo, Jun-Haeng

Abstract

This research focuses on the changes of return period for nonstationary rainfall data in which exceedance or nonexceedance probability varies depending on time. We examined two definitions of return period under nonstationarity and also performed nonstationary frequency analysis using the nonstationary Gumbel model to investigate variations of return period in Korea. Seogwipo, Inje, Jecheon, Gumi, Mungyeong, and Geochang were selected as subject sites of application. These sites have a trend in rainfall data as well as having more than 30 years data. As the results of application, the return periods considering nonstationarity are different with those considering stationarity. The differences of return periods between nonstationarity and stationarity increase as growing return period increases. In addition, the return period using the expected waiting time method shows lower value than that using the expected number of event method.

Keywords : return period, nonstationarity, nonstationary Gumbel model, expected waiting time, expected number of exceedance event

요 지

본 연구에서는 초과확률 또는 비초과확률이 시간에 따라 변화한다는 비정상성을 가정하여 재현기간 산정에 대한 연구를 수행하였다. 비정상성을 고려한 2가지 재현기간 산정 방법에 대해 검토하고 비정상성 Gumbel 모형을 이용한 빈도해석을 수행하여 초과확률 및 비초과확률을 구한 뒤 비정상성을 고려한 재현기간 정의에 따른 우리나라 재현기간의 변화에 대해서 살펴보았다. 적용 대상으로는 자료기간 30년 이상을 보유하면서 일 강우 자료의 경향성이 나타나는 서귀포, 인제, 제천, 구미, 문경, 거창 등 6개 지점을 선정하였다. 적용결과 비정상성을 고려한 재현기간 산정 시 기존의 재현기간 산정 방법과는 재현기간이 다르게 산정됨을 알 수 있었고, 재현기간이 커질수록 정상성 가정하의 재현기간과 비정상성 가정하의 재현기간 값의 차이가 더 커지는 것으로 나타났다. 또한 비정상성을 고려한 재현기간의 2가지 정의 중 기대 대기시간(expected waiting time) 정의에 의한 방법이 기대 초과사상 수(expected number of exceedance event) 정의에 의한 방법보다 작은 재현기간이 산정 되었다.

핵심용어 : 재현기간, 비정상성, 비정상성 Gumbel 모형, 기대 대기시간 정의, 기대 초과사상 수 정의

* 연세대학교 대학원 토목환경공학과 박사후과정, 공학박사 (e-mail: sinong@yonsei.ac.kr)
Post-Doctoral Fellow, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea.

** 연세대학교 대학원 토목환경공학과 통합과정 (e-mail: kamjakang@yonsei.ac.kr)
Graduate Student, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea.

*** 교신저자, 연세대학교 사회환경공학부 토목환경공학과 교수, 공학박사 (e-mail: jhheo@yonsei.ac.kr, Tel: 82-2-2123-2805)
Corresponding Author, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea.

1. 서 론

자연현상을 해석하는 분야에서 확률론적 기법은 매우 유용한 방법 중 하나이며, 수공학에서도 확률론적 기법을 기반으로 만들어진 모형을 이용하여 수공구조물의 설계나 이수·치수와 같은 수자원 관리의 측면에서 효율적인 의사결정을 내리고 있다. 기존의 확률론적 기법을 바탕으로 만들어진 많은 모형들은 정상성(stationarity)이라는 가정을 바탕으로 하고 있다. 정상성 가정이란 확률론적 기법을 수행하는데 있어서 시간의 변화에 따라 자료의 통계적 특성이 변화하지 않는다는 가정을 의미한다. 하지만 최근 전 세계적으로 나타나고 있는 기후변화와 불특정하지만 빈번히 발생하고 있는 이상 기후 현상으로 인하여 이러한 정상성 가정이 점차 유효하지 않다고 여겨지고 있다(Milly et al., 2008). 국내에서도 강우와 기온 등의 기상 수문자료를 활용하여 극한 사상의 발생빈도나 경향성과 같은 특성을 분석하여 이상 기후 현상에 따른 우리나라 수문사상의 변화나 기후 특성에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다(Lee et al., 2004; Kwon, 2005; Kwon et al., 2007; Kim et al. 2008). 따라서 많은 학자들은 이와 같은 현상을 배경으로 하여 자료의 특성이 시간의 흐름에 따라 변화가 없는 것으로 보는 정상성 가정이 아닌 시간의 흐름에 따라 변화한다고 보는 비정상성(nonstationarity) 가정에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이러한 비정상성을 고려한 빈도해석에 대한 연구는 1990년대 말부터 논의가 서서히 진행되었으며 주로 특정 분포형의 매개변수에 경향성을 반영한 빈도해석이 주를 이루고 있다(Olsen et al., 1999; Coles, 2001; Katz et al., 2002; Cunderlik and Burn, 2003; Nadarajah, 2005; He et al., 2006; El Adlouni et al., 2007). 국내의 경우에도 연최대강우량과 해수면온도와 같은 수문 및 기상 인자들의 추세와 통계적 특성 등을 분석하고 자료의 경향성이 나타나는 지점의 분포모형과 분석된 자료와의 상관관계를 바탕으로 비정상성 빈도해석을 수행하는 연구가 진행 중이다(Kwon et al., 2009; Lee et al., 2010; Lee et al., 2010; Kwon and Lee, 2011; Jang et al., 2011; Kim et al., 2011; Seo et al., 2012).

한편, 시간의 흐름에 따른 변화를 고려하기 위해 개발된 빈도해석 모형을 이용하여 비정상성 빈도해석을 수행해 보면 초과확률과 비초과확률이 시간에 흐름에 따라 변하게 되는데 이에 따른 재현기간의 변화에 대한 연구 또한 최근 활발히 진행 중에 있다. Olsen et al. (1998)은 비정상성을 고려한 비초과확률 또는 재현기간의 정의 및 개념에 대한 연구를 수행하였고 이를 기대 대기시간(expected

waiting time)의 개념으로 제시하였으며, 이 연구를 통해 기후변화의 영향에 따른 재현기간 및 위험도의 개념이 변화되어야 한다고 주장하였다. Parey et al. (2007)은 기후변화의 영향으로 인한 비정상성을 고려한 재현기간의 정의를 기대 초과사상 수(expected number of exceedance event)라는 개념으로 제시하였다. Walter (2007)는 기후변화의 영향을 고려하여 기존 재현기간의 개념을 앞서 제시된 기대 대기시간과 기대 초과사상 수 라는 개념으로 확장하여 새로 정의해야 한다고 주장한바 있으며, Cooley (2013)는 Olsen et al. (1998)과 Parey et al. (2007)이 각각 제시한 기대 대기 시간 개념과 기대 초과사상 수의 개념을 비교 정리하였다. Salas and Obeysekera (2013)는 비정상성이 나타나는 실제 간단한 수문사상을 예로 들어 비정상성 가정하에서 재현기간과 위험도를 산정한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 최근 연구가 시작되고 있는 비정상성을 고려한 재현기간의 개념에 대해 알아보고, 비정상성 빈도해석모형을 통해서 얻어진 우리나라 강우자료의 재현기간 별 초과확률과 비초과확률을 비정상성을 고려한 재현기간의 2가지 개념에 적용하여 각각의 방법 별로 재현기간을 산정한 뒤 이를 비교 분석하였다.

2. 방법론

2.1 비정상성 Gumbel 모형

비정상성을 고려한 빈도해석을 수행하기 위하여 비정상성 Gumbel 모형(NS-GUM; nonstationary Gumbel)을 사용하였다. NS-GUM 모형의 기반이 되는 Gumbel 분포형은 GEV 분포형의 제 1분포(EV1)로도 널리 알려져 있으며, 위치 매개변수(location parameter)와 규모 매개변수(scale parameter)의 2가지 매개변수를 갖는 확률분포형이다(Lettenmaier and Burges, 1982). Eqs. (1) and (2)는 각각 Gumbel 분포의 확률밀도함수와 누적분포함수이다(Gumbel, 1958).

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\epsilon}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\epsilon}{\alpha}\right)\right] \quad (1)$$

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\epsilon}{\alpha}\right)\right] \quad (2)$$

여기서, ϵ 는 위치 매개변수, α 는 규모 매개변수를 의미한다.

이러한 Gumbel 분포형에서 비정상성을 고려해 주기 위하여 Coles (2001)가 제시한 바와 같이 위치 매개변수와

규모 매개변수에 각각 Eqs. (3) and (4)와 같은 형태의 시간항 t 를 고려하였다.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 t \quad (3)$$

$$\alpha_t = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 t) \quad (4)$$

이때 비정상성을 고려하기 위하여 시간항 t 를 위치 매개변수에 적용한 모형은 NS-GUM (1,0), 규모 매개변수에 적용한 모형은 NS-GUM (0,1), 위치 및 규모 매개변수 모두에 적용한 모형은 NS-GUM (1,1)으로 나타내었다. 각 모형의 매개변수와 누가분포함수를 정리하면 Table 1과 같으며, 본 연구에서는 가장 간단한 방법으로 비정상성을 고려할 수 있는 NS-GUM (1,0) 모형만을 이용하여 연구를 수행하였다.

2.2 정상성을 고려한 재현기간의 정의

수공구조물의 설계나 수자원 관리 실무에서 사용되는 개념인 재현기간(T)은 연초과확률(p)의 역수로써 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{1}{p} \quad (5)$$

예를 들어 100년 빈도($T=100$)라는 것은 확률로 보았을 때 0.01의 초과확률($p=0.01$)로 나타낼 수 있다. 일반적으로 수공학에서는 빈도해석을 수행할 때 연 최대치 자료(annual maximum data)를 이용한다. 그러므로 1년에 한 개씩 발생이 되는 연 최대치 자료에서 0.01의 초과확률은 곧 100년 중에 한번은 발생할 만한 확률을 가진 사상이라고 볼 수 있다. 이러한 재현기간에 대한 접근 방법에는 기대 대기시간 개념(Olsen et al., 1998)과 기대 초과사상 수 개념(Parey et al., 2007)이 있다. 기대 대기시간 개념은 임의 기간 동안 처음으로 초과사상이 발생할 때의 시간에 대한 기댓값으로 나타낼 수 있다. 기대 초과사상 수의 개념은 초과사상이 발생하는 횟수의 기댓값이 1이 되는 기간을 의미한다. 두 가지 정의에 따른 방법 모두 Fig. 1과 같이 정상성 가정 상태에서는 시간의 흐름에 상관없이 일

정한 초과확률(p), 비초과확률(q)을 갖게 되므로 확률강우량(z_q)에 대하여 동일한 재현기간을 가지게 된다.

2.2.1 정상성 가정의 기대 대기시간 정의

Fig. 1과 같이 정상성 가정 하에서 임의 기간(t)에 처음으로 초과사상이 발생할 확률은 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P(T=t) &= P(x_1 \leq z_q, x_2 \leq z_q, x_3 \leq z_q, \dots, \\ &\quad x_{t-1} \leq z_q, x_t > z_q) \\ &= P(x_1 \leq z_q)P(x_2 \leq z_q)P(x_3 \leq z_q) \dots \\ &\quad P(x_{t-1} \leq z_q)P(x_t > z_q) \\ &= P(x_1 \leq z_q)^{t-1}P(x_1 > z_q) \\ &= (1-p)^{t-1}p \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 각각의 발생 확률은 독립이므로 T 는 이산 확률 분포 중 하나인 기하 분포(geometric distribution)를 따르고 여기에 기댓값을 취하면 Eq. (7)로써 표현된다.

$$E(T) = \sum_{t=1}^{\infty} tf(t) = \sum_{t=1}^{\infty} tq^{t-1}p = \frac{1}{1-q} = \frac{1}{p} \quad (7)$$

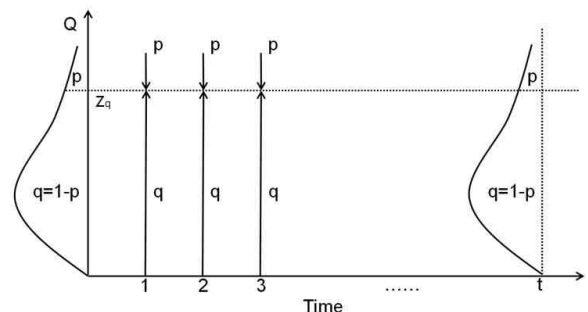


Fig. 1. Schematic Plot of Exceedance and Non-exceedance Probabilities under Stationary Condition (Salas and Obeysekera, 2013)

Table 1. Parameter and Cumulative Distribution Function of Nonstationary Gumbel Model

Model	Parameters	Cumulative Distribution Function
NS-GUM (1,0)	ϵ_0, ϵ_1 α	$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x - (\epsilon_0 + \epsilon_1 t)}{\alpha}\right)\right]$
NS-GUM (0,1)	ϵ α_0, α_1	$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x - \epsilon}{\exp(\alpha_0 + \alpha_1 t)}\right)\right]$
NS-GUM (1,1)	ϵ_0, ϵ_1 α_0, α_1	$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x - (\epsilon_0 + \epsilon_1 t)}{\exp(\alpha_0 + \alpha_1 t)}\right)\right]$

따라서 처음으로 확률강우량(z_q)을 넘는 초과 사상이 일어날 평균 기대 시간은 초과확률의 역수로써 나타낼 수 있으며, 이 값이 바로 일반적으로 알고 있는 재현기간(T)이 된다.

2.2.2 정상성 가정의 기대 초과사상 수 정의

초과 사상의 발생 횟수를 나타내는 변수를 N 이라고 하면, 임의의 기간(t) 동안에 초과 사상의 발생 횟수는 Eq. (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$N = \sum_{t=1}^T I(x_t > z_q) \quad (8)$$

여기서, I 는 임의의 기간 t 에서 대해서 초과 사상의 발생 여부를 나타내는 지수(indicator)이다. 만약, $x_t > z_q$ 이면 $I=1$ 이고 $x_t < z_q$ 이면 $I=0$ 이므로, N 은 이항 분포(binomial distribution)를 따르고 Eq. (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$P(N=k) = \binom{T}{k} p^k (1-p)^{T-k} \quad (9)$$

여기에, 기댓값을 취하면 Eq. (10)으로 나타 낼 수 있으며 기댓값이 1일 경우 재현기간(T)는 초과확률(p)의 역수로 나타낼 수 있다. 다시 말해서 발생 기댓값이 1이 될 때의 임의의 기간이 곧 재현기간(T)이 되는 것이다.

$$\begin{aligned} E(N) &= \sum_{k=0}^T k \binom{T}{k} p^k (1-p)^{T-k} \\ &= Tp(p+1-p)^{T-1} = Tp \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 비정상성을 고려한 재현기간의 정의

하지만 비정상성을 고려하면 시간에 흐름에 따라 분포형의 매개변수의 변화로 인해 초과확률과 비초과확률의 값이 변하게 된다. 따라서 정상성 가정하의 Fig. 1과는 다르게 Fig. 2와 같은 양상이 나타나게 된다.

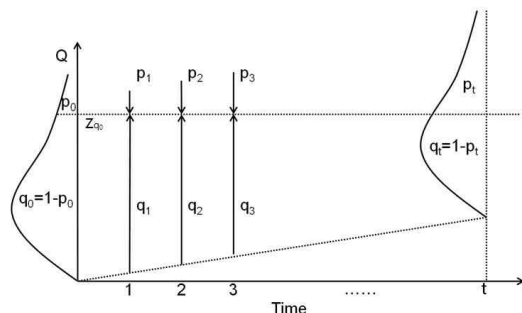


Fig. 2. Schematic Plot of Exceedance and Non-exceedance Probabilities under Nonstationary Condition (Salas and Obeysekera, 2013)

2.3.1 비정상성 가정의 기대 대기시간 정의

Fig. 2와 같이 비정상성 가정 하에서 임의의 기간(t)에 처음으로 초과사상이 발생할 확률은 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있다(Olsen et al., 1998).

$$\begin{aligned} P(T=t) &= P(x_1 \leq z_{q_0}, x_2 \leq z_{q_0}, x_3 \leq z_{q_0}, \\ &\quad \dots, x_{t-1} \leq z_{q_0}, x_t > z_{q_0},) \\ &= P(x_1 \leq z_{q_0})P(x_2 \leq z_{q_0})P(x_3 \leq z_{q_0}) \\ &\quad \dots P(x_{t-1} \leq z_{q_0})P(x_t > z_{q_0}) \\ &= q_1 q_2 q_3 \dots q_{t-1} p_t = (1-p_1)(1-p_2)(1-p_3) \\ &\quad \dots (1-p_{t-1})p_t \end{aligned} \quad (11)$$

이를 확률밀도함수와 누가분포함수로 나타내면 각각 Eqs. (12) and (13)과 같고, T 에 기댓값을 취하면 Eq. (14)와 같다.

$$f(t) = p_t \prod_{i=1}^{t-1} (1-p_i) \quad (12)$$

$$F(t) = \sum_{i=1}^t f(i) = \sum_{i=1}^t p_i \prod_{j=1}^{i-1} (1-p_j) \quad (13)$$

$$E(T) = \sum_{i=1}^{t_{\max}} t f(t) = \sum_{i=1}^{t_{\max}} t p_i \prod_{j=1}^{i-1} (1-p_j) \quad (14)$$

이때 시간에 따라 초과확률, 비초과확률이 변화하므로 재현기간은 Eq. (13)이 1이 될 때까지 반복 수치 계산(numerical method)을 통해 얻을 수 있다.

2.3.2 비정상성 가정의 기대 초과사상 수 정의

정상성 가정 하에서 기대 초과사상 수 정의와 같이 초과 사상의 발생 횟수를 나타내는 변수 N 을 Eq. (8)처럼 나타낼 수 있다. 하지만 비정상성 가정 하에서 변수 N 은 더 이상 이항 분포를 따르지 않기 때문에 N 에 대해서 기대 값을 취하면 Eq. (15)와 같다(Parey et al., 2007; Cooley, 2013).

$$E(N) = \sum_{t=1}^T E[I(x_t > z_{q_0})] = \sum_{t=1}^T P(x_t > z_{q_0}) = \sum_{t=1}^T p_t \quad (15)$$

정상성 가정에서와 마찬가지로 N 의 기댓값이 1이 될 때까지의 임의의 기간(t)이 재현기간(T)이 되고 이는 수치 계산을 반복함으로 얻을 수 있다.

3. 적 용

앞서 소개한 방법론을 바탕으로 국내 61개 지점에 대해서 비정상성을 고려한 NS-GUM(1,0) 모형을 이용하여 빈도해석을 수행하였으며 비정상성 가정에 따른 2가지 재현기간의 개념을 적용하여 각각의 방법으로 재현기간을 산정해 보았다.

3.1 경향성 검정

먼저 비정상성 빈도해석을 수행하기 위하여 우리나라

기상청 산하 관측 지점 중 관측기간이 30년 이상 되는 속초, 대관령, 춘천 등 총 61개 지점을 선정하였다. 자료 관측기간이 30년 이상이 되는 지점을 선정한 이유는 자료개수에 따른 빈도해석의 안정적인 결과를 확보하기 위함이다. 비정상성 빈도해석을 수행하기 위해 61개 지점 중 자료의 경향성 존재 여부를 판별하기 위하여 지속기간 1440분 자료에 대해서 경향성 검정(trend test)을 실시하였다. 경향성 검정 방법으로는 Mann-Kendall test를 이용하였고 유의수준 5%에 대하여 수행하였다. 경향성 검정 결과 Table 2와 같이 서귀포, 인제, 제천, 문경, 구미, 거창의 6

Table 2. Trend Test Results for Rainfall Data in Korea

Site	Sample size	Table.	Com.	Trend	Site	Sample size	Table.	Com.	Trend
Sokcho	43	1.960	0.042	X	Yangpyeong	38	1.960	1.748	X
Daegwallyeong	39	1.960	0.726	X	Icheon	38	1.960	1.433	X
Chuncheon	45	1.960	1.242	X	Inje	38	1.960	2.263	O
Gangneung	50	1.960	1.163	X	Hongcheon	38	1.960	1.811	X
Seoul	50	1.960	1.422	X	Jecheon	38	1.960	2.301	O
Incheon	50	1.960	1.690	X	Boeun	38	1.960	0.377	X
Wonju	39	1.960	1.077	X	Cheonan	38	1.960	0.176	X
Suwon	47	1.960	0.835	X	Boryeong	38	1.960	0.339	X
Chungju	38	1.960	1.169	X	Buyeo	38	1.960	0.402	X
Seosan	43	1.960	0.827	X	Geumsan	38	1.960	0.239	X
Ulsan	40	1.960	0.851	X	Buan	38	1.960	0.905	X
Cheongju	44	1.960	1.578	X	Imsil	38	1.960	1.370	X
Daejeon	42	1.960	0.856	X	Jeongeup	38	1.960	0.239	X
Chupungnyeong	50	1.960	1.230	X	Namwon	38	1.960	0.654	X
Andong	33	1.960	1.395	X	Suncheon	38	1.960	1.270	X
Pohang	50	1.960	0.142	X	Jangheung	38	1.960	0.113	X
Gunsan	43	1.960	1.057	X	Haenam	38	1.960	0.314	X
Daegu	50	1.960	0.803	X	Goheung	38	1.960	0.000	X
Jeonju	50	1.960	0.460	X	Yeongju	38	1.960	1.182	X
Ulsan	50	1.960	0.251	X	Mungyeong	38	1.960	2.075	O
Gwangju	50	1.960	1.246	X	Yeongdeok	38	1.960	0.327	X
Busan	50	1.960	0.184	X	Uiseong	38	1.960	0.201	X
Tongyeong	43	1.960	0.335	X	Gumi	38	1.960	2.653	O
Mokpo	50	1.960	0.418	X	Yeongcheon	38	1.960	0.453	X
Yoesu	50	1.960	0.059	X	Geochang	38	1.960	1.974	O
Wando	39	1.960	0.302	X	Hapcheon	38	1.960	1.031	X
Jeju	50	1.960	1.029	X	Miryang	38	1.960	1.081	X
Seongsan	38	1.960	0.981	X	Sancheong	38	1.960	0.842	X
Seogwipo	50	1.960	2.267	O	Geoje	38	1.960	0.302	X
Jinju	42	1.960	0.347	X	Namhae	38	1.960	0.968	X
Ganghwa	38	1.960	0.779	X					

개 지역에서 자료의 경향성이 존재하는 것으로 나타났다.

3.2 국내 적용 결과

우리나라 기상청 산하 관측 지점 중 자료기간이 30년 이상이면서 지속기간 1,440분의 연최대치 강우자료에 대하여 경향성이 나타나는 것으로 판단된 6개 지점에 대해서 NS-GUM(1,0) 모형을 이용하여 비정상성 빈도해석을 수행하였다. 빈도해석 수행 결과 적용 지점별 NS-GUM(1,0)의 매개변수 추정 결과값은 Table 3과 같다.

적용 대상으로 선정된 각 지점에 대해서 NS-GUM(1,0)을 통해 초과확률과 비초과확률을 산정한 후, 이에 대하여 비정상성을 고려한 재현기간 산정방법을 적용해 보았다. Table 4는 6개의 적용 지점 중 거창 지점에 대해서 기대 대기시간과 기대 초과사상 수의 개념으로 5년 빈도의 재현기간을 산정하기 위한 시간의 변화에 따른 초과확률과 발생확률의 기댓값을 정리해 놓은 결과이다.

Table 4를 살펴보면 처음으로 초과사상이 발생할 때 ($\Sigma f(x)$)까지의 시간에 대한 기댓값($\Sigma x f(x)$)이 4.7341이 되므로 기대 대기시간 정의에 의한 비정상성을 고려한 재현기간은 약 4.73년이 되고, 발생확률의 합(Σp_i)이 1이 될 때 까지 걸리는 반복 횟수가 5회이므로 기대 초과사상 수 정의에 의한 비정상성을 고려한 재현기간은 5년으로 산정된다. 이때 기대 대기시간 정의의 경우 초과사상이 처음으로 발생할 확률의 확률밀도함수 값을 누적하면서 누가분포함수 값이 1이 될 때까지 연산을 반복 수행하게 되므로 연산시간이 길어지는 반면, 기대 초과사상 수 정의의 경우 초과사상의 발생 확률 값을 더해 발생 횟수의 기댓값이 1이 될 때까지 연산을 반복 수행하므로 상대적으로 연산시간이 짧다. 하지만 기대 대기시간 정의의 개념에서는 처음으로 초과사상이 발생할 확률의 확률밀도함수가 반복횟수가 증가함에 따라 매우 작은 값으로 수렴하기 때문에 충분한 반복 연산 횟수만 확보된다면 정의에서 가정된 누가분포함수 값이 1로 수렴할 때의 시간의 기댓값(재현기간)을 구할 수 있는 반면, 기대 초과사상 수 정의에서는 초과사상 발생 확률 값이 반복횟수가 증가함에 따라 커지게 되므로 발생 횟수의 기댓값이 정의에서 가정된 것처럼 1로 수렴하는 반복횟수를 얻기는 어렵고 1을 초과할

때의 반복횟수가 재현기간이 된다.

Table 4에서 보인 것처럼 동일한 방법으로 선정된 6개 지점별로 100년 빈도까지 두 가지 개념을 적용한 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 기대 초과사상 수 정의를 이용하여 산정한 재현기간은 사각형 기호로, 기대 대기시간 정의를 이용하여 산정한 재현기간은 원형 기호로 표시하였고, x 축에는 정상성 가정하의 재현기간, y 축에는 비정상성 가정하의 재현기간을 표시하여 비정상성을 고려한 재현기간이 정상성 가정하의 재현기간으로는 어떠한 값을 갖는지 비교해 볼 수 있도록 하였다. 예를 들어 서귀포 지점의 경우 정상성 가정에서의 50년 빈도는 비정상성을 고려했을 때 기대 초과사상 수 개념에서는 약 39년, 기대 대기시간 개념에서는 약 33년에 해당함을 알 수 있다. 따라서 비정상성을 고려하여 50년 빈도에 해당하는 설계량을 산정하기 위해서는 기대 초과사상 수 개념으로는 약 76년, 기대 대기시간 개념으로는 약 90년에 해당하는 설계량을 찾아야 하는 것을 의미한다.

또한 예상되는 바와 같이 6개 지점 모두 비정상성을 고려한 재현기간 산정방법이 기존의 재현기간 산정 방법 보다 작은 재현기간을 나타내었고, 두 가지 방법 중에서는 기대 대기시간 정의에 의한 방법이 기대 초과사상 수 정의에 의한 방법 보다 작은 재현기간을 나타내는 일관성을 보였다. 특히 지점별로 살펴보면 인제와 제천에서 두 가지 정의를 이용한 재현기간의 값이 서귀포를 비롯한 다른 4개의 지점들보다 작은 것을 확인할 수 있다. Table 3을 살펴보면 인제와 제천은 위치 매개변수의 기울기의 값이 각각 1.838과 1.642로 문경의 0.574나 구미의 0.450 등 다른 4개의 지역의 기울기보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 따라서 비정상성을 고려하여 재현기간을 산정하는 방법인 기대 대기시간 정의와 기대 초과사상 수 정의들은 NS-GUM(1,0) 모형의 위치 매개변수의 기울기에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다. 이를 보다 객관적인 평가를 통해 알아보기 위하여 각 지역의 매개변수들과 두 가지 정의에 의한 재현기간과의 상관분석을 실시하였다. Table 5를 보면 각각의 정의를 이용하여 산정한 재현기간과 NS-GUM(1,0) 모형의 규모 매개변수 사이에서 -0.4128에서 -0.6529까지의 음의 상관계수가 나타났고, 위치 매개

Table 3. Parameters of NS-GUM(1,0) Model for Selected 6 Sites

Parameters	Seogwipo	Inje	Jecheon	Mungyeong	Gumi	Geochang
ϵ_0	127.786	90.519	95.112	97.474	93.269	107.067
ϵ_1	0.650	1.838	1.642	0.574	0.450	0.607
α	45.539	45.485	44.516	26.958	27.597	36.540

Table 4. Return Period Estimation with Two Definitions in Geochang

Return Period (Stationary)	i	p_i	$f(x_i)$	$x_i f(x_i)$	$\sum p_i$	$\sum f(x_i)$	$\sum x_i f(x_i)$
5	1	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
	2	0.2030	0.1624	0.3248	0.4030	0.3624	0.5248
	3	0.2060	0.1314	0.3941	0.6090	0.4938	0.9189
	4	0.2091	0.1058	0.4234	0.8181	0.5996	1.3423
	5	0.2122	0.0850	0.4248	1.0303	0.6846	1.7671
	6	0.2153	0.0679	0.4075		0.7525	2.1746
	7	0.2185	0.0541	0.3786		0.8066	2.5532
	8	0.2217	0.0429	0.3431		0.8495	2.8963
	9	0.2250	0.0339	0.3049		0.8834	3.2012
	10	0.2283	0.0266	0.2664		0.9100	3.4676
	11	0.2316	0.0209	0.2294		0.9309	3.6970
	12	0.2350	0.0163	0.1951		0.9472	3.8921
	13	0.2384	0.0126	0.1641		0.9598	4.0562
	14	0.2419	0.0098	0.1365		0.9696	4.1927
	15	0.2454	0.0075	0.1125		0.9771	4.3052
	16	0.2490	0.0057	0.0919		0.9828	4.3971
	17	0.2525	0.0044	0.0744		0.9872	4.4715
	18	0.2562	0.0033	0.0597		0.9905	4.5312
	19	0.2599	0.0025	0.0475		0.9930	4.5787
	20	0.2636	0.0019	0.0376		0.9949	4.6163
	21	0.2673	0.0014	0.0295		0.9963	4.6458
	22	0.2712	0.0010	0.0229		0.9973	4.6687
	23	0.2750	0.0008	0.0177		0.9981	4.6864
	24	0.2789	0.0006	0.0136		0.9987	4.7000
	25	0.2828	0.0004	0.0104		0.9991	4.7104
	26	0.2868	0.0003	0.0078		0.9994	4.7182
	27	0.2908	0.0002	0.0059		0.9996	4.7241
	28	0.2949	0.0002	0.0044		0.9998	4.7285
	29	0.2990	0.0001	0.0032		0.9999	4.7317
	30	0.3032	0.0001	0.0024		1.0000	4.7341

변수의 절편과는 0.5045에서 0.6843까지의 양의 상관계수가 나타났다. 하지만 위치 매개변수의 기울기와는 -0.9340 이하의 강한 음의 상관계수가 나타났다. 이는 각각의 정의를 이용하여 얻은 비정상성을 고려한 재현기간이 NS-GUM (1,0) 모형의 위치 매개변수의 기울기와 깊은 상관관계가 있음을 의미한다.

Table 6은 Fig. 3을 통해 나타낸 결과를 정량적으로 나

타낸 것으로써 정상성 가정 상태에서의 재현기간에 대한 백분율을 함께 나타낸 결과 값이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 기대 초과사상 수 정의를 이용한 방법보다 기대 대기시간 정의를 이용하여 산정한 재현기간이 작게 나타났으며 재현기간 별로는 재현기간이 10년일 경우 정상성 가정하의 재현기간 대비 80% 이상의 값이 산정되었으나, 재현기간이 100년으로 증가할 경우 정상성 가정하의 재현기

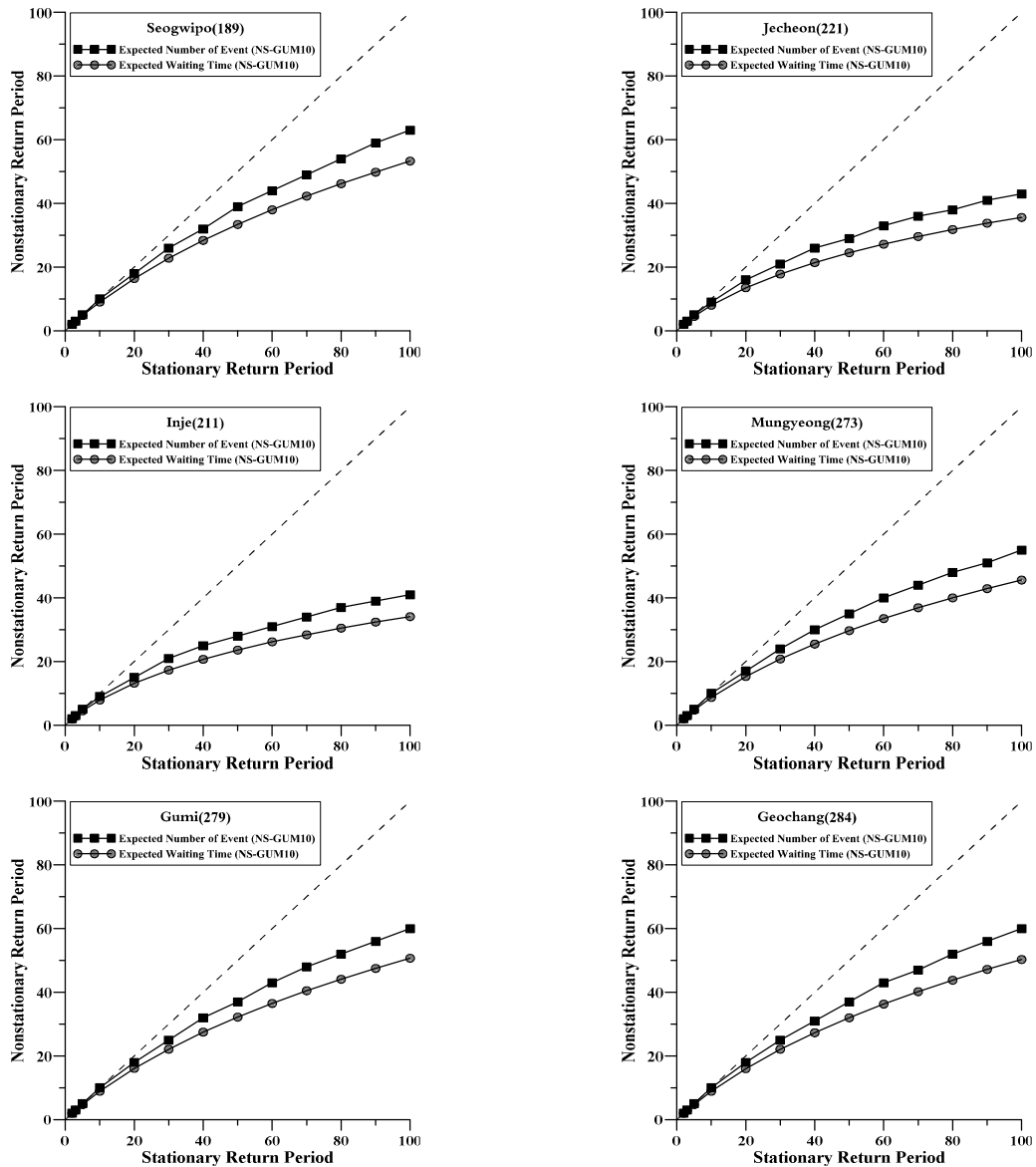


Fig. 3. Relationship between Stationary and Nonstationary Return Period

간 대비 65% 미만으로 작게 산정됨을 알 수 있었다. 특히 지점별로는 위치 매개변수의 기울기 값이 가장 큰 인제의 경우 100년 빈도에서 기존 정상성 가정하의 재현기간 대비 기대 초과사상 수 정의는 41%, 기대 대기시간 정의는 34.1%로 가장 낮은 비율이 나타났으며, 이어서 제천의 경우도 마찬가지로 43%와 35.6%로 다른 지역에 비해서 낮은 비율이 산정되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 비정상성을 고려한 2가지 재현기간 정

의에 대하여 검토해보고, 이를 우리나라 강우자료에 대해 적용하여 재현기간의 변화에 대해 연구해 보았다. 이를 위하여 우리나라 기상청 산하 관측 지점 중 자료 기간이 30년이 넘는 61개 지점을 선정하였고 비정상성을 고려해야 하는 지역을 선정하기 위하여 자료의 경향성 검토를 실시하였다. 그 결과 서귀포, 인제 등 총 6개 지점에서 경향성이 나타나는 것으로 확인되었으며, 이 지점의 지속기간 1,440분에 대한 연최대 강우자료를 대상으로 위치매개변수가 시간의 흐름에 따라 선형으로 변하는 비정상성 빈도 해석 모형인 NS-GUM(1,0)을 이용하여 빈도해석을 수행하였다. 이를 통해 얻어진 초과확률과 비초과확률을 이용

Table 5. Correlation Coefficient between Parameter and Return Period

Method	Parameter	Return Period					
		10 yr	20 yr	30 yr	40 yr	50 yr	100 yr
NE	α	-0.6362	-0.4637	-0.4128	-0.5287	-0.4278	-0.4436
	ϵ_0	0.5045	0.5911	0.6843	0.5780	0.6813	0.6574
	ϵ_1	-0.9889	-0.9346	-0.9340	-0.9694	-0.9440	-0.9482
WT	α	-0.5043	-0.4696	-0.4465	-0.6529	-0.4418	-0.4263
	ϵ_0	0.6156	0.6325	0.6526	0.6503	0.6534	0.6628
	ϵ_1	-0.9686	-0.9556	-0.9487	-0.9468	-0.9461	-0.9397

Note : NE, Expected number of exceedance event; WT, Expected waiting time.

Table 6. Ratio of Nonstationary Return Period to Stationary Return Period According to Each Definition

Site	Method	Return Period					
		10 yr	20 yr	30 yr	40 yr	50 yr	100 yr
Seogwipo	NE	10.0 yr (100.0%)	18.0 yr (90.0%)	26.0 yr (86.7%)	32.0 yr (80.0%)	39.0 yr (78.0%)	63.0 yr (63.0%)
	WT	9.0 yr (90.0%)	16.4 yr (82.0%)	22.8 yr (76.0%)	28.4 yr (71.0%)	33.4 yr (66.8%)	53.3 yr (53.3%)
Inje	NE	9.0 yr (90.0%)	15.0 yr (75.0%)	21.0 yr (70.0%)	25.0 yr (62.5%)	28.0 yr (56.0%)	41.0 yr (41.0%)
	WT	7.9 yr (79.0%)	13.2 yr (66.0%)	17.3 yr (57.7%)	20.7 yr (51.8%)	23.6 yr (47.2%)	34.1 yr (34.1%)
Jecheon	NE	9.0 yr (90.0%)	16.0 yr (80.0%)	21.0 yr (70.0%)	26.0 yr (65.0%)	29.0 yr (58.0%)	43.0 yr (43.0%)
	WT	8.0 yr (80.0%)	13.5 yr (67.5%)	17.8 yr (59.3%)	21.4 yr (53.5%)	24.5 yr (49.0%)	35.6 yr (35.6%)
Mungyeong	NE	10.0 yr (100.0%)	17.0 yr (85.0%)	24.0 yr (80.0%)	30.0 yr (75.0%)	35.0 yr (70.0%)	55.0 yr (55.0%)
	WT	8.7 yr (87.0%)	15.3 yr (76.5%)	20.8 yr (69.3%)	25.5 yr (63.8%)	29.7 yr (59.4%)	45.6 yr (45.6%)
Gumi	NE	10.0 yr (100.0%)	18.0 yr (90.0%)	25.0 yr (83.3%)	32.0 yr (80.0%)	37.0 yr (74.0%)	60.0 yr (60.0%)
	WT	8.9 yr (89.0%)	16.1 yr (80.5%)	22.1 yr (73.7%)	27.5 yr (68.8%)	32.2 yr (64.4%)	50.7 yr (50.7%)
Geochang	NE	10.0 yr (100.0%)	18.0 yr (90.0%)	25.0 yr (83.3%)	31.0 yr (77.5%)	37.0 yr (74.0%)	60.0 yr (60.0%)
	WT	8.9 yr (89.0%)	16.0 yr (80.0%)	22.1 yr (73.7%)	27.3 yr (68.3%)	32.0 yr (64.0%)	50.3 yr (50.3%)

Note : NE, Expected number of exceedance event; WT, Expected waiting time.

하여 비정상성을 고려한 재현기간 산정 개념인 기대 대기 시간 정의를 이용한 방법과 기대 초과사상 수 정의에 의한 방법을 적용하여 우리나라 재현기간의 변화를 살펴 보았다. 그 결과 두 가지 방법 모두 기존의 정상성 가정의 재현기간 산정 결과보다 작은 재현기간이 산정되었고, 재현기간이 커질수록 정상성 가정하의 재현기간 값과의 차이가 커짐을 확인하였다. 특히 인제와 제천의 경우 다른 지점들 보다 재현기간이 작게 산정되는 반면 다른 지점들에 비해 위치 매개변수의 기울기가 크게 추정되었는데, 이를 통해 위치 매개변수의 기울기와 재현기간 사이에 강한 음의 상관관계가 있음을 확인하였다. 두 방법 간의 차이로는 기대 대기시간 정의를 이용하여 재현기간을 산정할 경우 반복횟수가 늘어날수록 확률밀도함수가 작은 값

으로 수렴하기 때문에 누가분포함수 값이 1에 수렴할 때까지 많은 반복 연산을 수행하여야 하지만 기대 초과사상 수 정의를 이용하여 재현기간을 산정하는 경우 반복횟수가 증가함에 따라 초과확률 또한 증가하므로 상대적으로 연산 시간이 짧게 소요된다. 또한 기대 대기시간 정의를 이용한 방법이 기대 초과사상 수 정의를 이용한 방법보다 재현기간이 다소 작게 산정되는 것으로 나타났으며, 이를 통하여 비정상성 빈도해석방법을 이용하여 재현기간 산정 시 비정상성을 고려할 수 있는 재현기간 산정 방법을 이용해야 할 필요성을 확인하였고 앞으로 두 가지 방법론 중 어느 방법이 더 적절한지에 대한 추가 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업의 지원으로 수행한 '3차원 BIM 기술을 활용한 수방시설의 능동형 재난관리체계 구축' [NEMA-12-자연-57] 과제에 성과입니다.

References

- Coles S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer-Verlag, London.
- Cooley, D. (2013). "Return Periods and Return Levels Under Climate Change." *Extremes in a Changing Climate*, Edited by AghaKouchak et al., Springer, Netherlands, pp. 97-114.
- Cunderlik, J.M., and Burn, D.H. (2003). "Non-stationary pooled flood frequency analysis." *Journal of Hydrology*, Vol. 276, No. 1-4, pp. 210-223.
- El Adlouni, S., Ouarda, T.B.M.J., Zhang, X., Roy, R., and Bobee, B. (2007). "Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model." *Water Resources Research*, Vol. 43, No. 3, W03410.
- Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York.
- He, Y., Bardossy, A., and Brommundt, J. (2006). "Non-stationary flood frequency analysis in southern Germany." *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering*, Philadelphia, USA.
- Jang, S.W., Seo, L., Kim, T.W., and Ahn, J.H. (2011). "Non-stationary Rainfall Frequency Analysis Based on Residual Analysis." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 5B, pp. 449-457.
- Katz, R.W., Parlange, M.B., and Naveau, P. (2002). "Statistics of extremes in hydrology." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, No. 8-12, pp.1287-1304.
- Kim, B.K., Kim, B.S., and Kim, H.S. (2008). "On the Change of Extreme Weather Event using Extreme Indices." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 1B, pp. 41-53.
- Kim, B.S., Lee, J.K., Kim, H.S., and Lee, J.W. (2011). "Non-stationary Frequency Analysis with Climate Variability using Conditional Generalized Extreme Value Distribution." *Journal of Korean Wetlands Society, Korean Wetlands Society*, Vol 13, No. 3, pp. 499-514.
- Kwon, W.T. (2005). "Current Status and Perspectives of Climate Change Sciences." *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, Korea Meteorological Society*, Vol. 41, No. 2-1, pp. 325-336.
- Kwon, W.T., Boo, K.O., and Heo, I.H. (2007). "Climate Change during the recent 10 years in Korea." *2007 Korea Water Resource Society Annual Conference, KWRA*, pp. 278-280.
- Kwon, Y.M., Park, J.W., and Kim, T.W. (2009). "Estimation of Design Rainfalls Considering an Increasing Trend in Rainfall Data." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2B, pp. 131-139.
- Kwon, H.H., and Lee, J.J. (2011). "Seasonal Rainfall Outlook of Nakdong River Basin Using Nonstationary Frequency Analysis Model and Climate Information." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 339-350.
- Lee, C.H., Ahn, J.H., and Kim, T.W. (2010). "Evaluation of Probability Rainfalls Estimated from Non-Stationary Rainfall Frequency Analysis." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, pp. 187-199.
- Lee, J.J., Kwon, H.H., and Hwang, K.N. (2010). "Concept of Seasonality Analysis of Hydrologic Extreme Variables and Design Rainfall Estimation Using Nonstationary Frequency Analysis." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 8, pp. 733-745.
- Lee, S.B., Kim, K.D., and Heo, J.H. (2004). "Change and Trend Analyses of Rainfall Data." *2004 Korea Water Resource Society Annual Conference, KWRA*, pp. 696-700.
- Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., and Stouffer, R.J. (2008). "Stationarity is dead: whither water management?" *Science*, Vol. 319, No. 5863, pp. 573-574.
- Nadarajah, S. (2005). "Extremes of daily rainfall in West Central Florida." *Climate Change*, Vol. 69, No. 2-3, pp. 325-342.

Olsen, J.R., Stedinger, J.R., Matalas, N.C., and Stakhiv, F.Z. (1998). "Risk of extreme events under nonstationary conditions." *Risk Analysis*, Vol. 18, No. 4, pp. 497-510.

Olsen, J.R., Stedinger, J.R., Matalas, N.C., and Stakhiv, F.Z. (1999). "Climate variability and flood frequency estimation for the Upper Mississippi and Lower Missouri Rivers." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 1509-1524.

Parey, S., Malek, F., Laurent, C., and Dacunha-Castelle, D. (2007). "Trends and climate evolution: Statistical approach for very high temperatures in France." *Climatic Change*, Vol. 81, No. 3-4, pp. 331-352.

Salas, J.D., and Obeysekera, J. (2013). "Return period and

risk for nonstationary hydrologic extreme events." *World Environmental and Water Resources Congress 2013*, ASCE, Cincinnati, Ohio, pp. 1213-1223.

Seo, L., Jeon, M.H., Kim, T.W., and Kim, S.D. (2012). "Ensemble Prediction of Future Design Rainfalls Considering Climate Change." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 159-171.

Walter, M.D. (2007). *Interpretation of Return Levels under a Changing Climate*. B.S. dissertation, Pennsylvania State University.

논문번호: 14-027	접수: 2014.03.11
수정일자: 2014.04.10	심사완료: 2014.04.10