하천방재

재해위험지구의 홍수위험도 저감을 위한 최적 수위관측망 구성 방안 A Strategy on Optimizing a Stream Gauging Network to Mitigate the Flood Risk in a Disaster Risk Area

김수전* · 주홍준** · 김형수*** · 전환돈****

Kim, Soojun*, Joo, Hong Jun**, Kim, Hung Soo***, Jun, Hwandon****

Abstract

The data of stream gauging stations connected to the upper and lower stream have similar hydrological characteristics. It is also very important data for disaster management. In this study, we suggest a methodology which is used to build an optimal stream gauge network for mitigating the flood risk of a disaster risk area by adding new stream gauges at disaster risk areas to the existing stream gauge network. The upper stream basin of Geum river was selected as a study area. Representative unit hydrograph was estimated by Clark method in each station. And the information transmission by entropy analysis were evaluated based on the log-normal distribution. The optimized stream gauging networks about three scenarios of the gauging stations were determined using the entropy theory. Finally the most important gauging station was selected using the received information transmission in each disaster risk area and the whole basin.

Key words : Disaster risk area, Stream gauging station, Entropy, Optimization

요 지

상·하류로 연결되어 있는 수위관측소의 자료는 수문학적으로 유사하다. 또한 이는 재해관리를 위하여 상당히 중요한 수문자료이다. 본 연구에서는 재해위험지구의 홍수위험도 저감을 위하여 기존 수위관측망에 더하여 수위관측소를 추가로 설치할 경우 이를 위한 최적 수위관측망을 구성하고자 하였으며 금강상류 유역을 대상으로 평가하였다. Clark 방법에 의한 수위관측소별 대표 단위도를 산정하고 대수정규분포를 기반으로 엔트로피 이론에 의한 정보전달량을 추정하였다. 그리고 관측망에 대한 3개의 시나리오에 대하여 유역내 최대 정보전달량을 나타내는 최적의 수위관측망을 도출하였다. 또한 상호정보이론에 의한 수역 정보량을 산정하여 각 재해위험지구 및 대상유역에서 재해관리를 위하여 가장 중요하게 고려될 수 있는 수위관측소를 선정하였다.

핵심용어 : 재해위험지구, 수위관측소, 엔트로피, 정보전달량, 최적화

1. 서 론

최근 전세계적으로 이상기후 현상에 의한 대규모 재해의 발생이 빈발하고 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012)에 의하면 기후변화에 의하여 극한기상 현상의 발생이 더욱 강력하고 빈번하게 발생할 것으로 보고되고 있다. 즉, 미래에 재해의 위험성은 더욱 크게 증가할 것이다. 이러한 사실에 기반할 때 재해에 취약한 구조를 가지고 있는 재

해위험지구의 중점적인 관리가 요구된다. 재해관리에 있어 무엇보다 중요한 것은 정확한 데이터를 기반으로 위험요소를 추정하는 것이다. 이에 따라 수문관측의 정확도가 더욱 중요하게 되었으며 전국적으로 우량관측소와 수위관측소를 포함하는 상당히 많은 관측소가 신설되고 있다. 여기에서 각 수문관측소는 유역의 수문특성을 가장 잘 대표할 수 있는 위치에 경제적으로 설치되어야 한다. 따라서 유역내에서 최적화된 수문관측망과 함께 정보이론 측면에서 각 수문관측망이 얼마나

*정회원. Columbia University(E-mail: soojun78@gmail.com)
Member. Columbia University, Columbia Water Center, Post-Doctoral Researcher

**정회원. 평화엔지니어링, 사원 Member. Professor, Pyunghwa E&G

***정회원. 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수 Member. Professor, Inha University, Dept. of Civil Engineering

****교신저자. 정회원. 서울과학기술대학교 공과대학 건설환경공학부 조교수(Tel: +82-2-970-6570, Fax: +82-2-948-0043, E-mail: hwjun@seoultech.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Seoul National University of Science and Technology, Dept. of Civil Engineering

많은 정보를 제공할 수 있는지에 대한 평가는 재해위험지구 관리를 위하여 선행되어야 한다.

이러한 측면에서 수위관측망을 최적화하기 위한 연구가 다수 있었으며 이를 위하여 Moss and Karlinger(1974)는 몬테카를로 시뮬레이션, 회귀분석, 베이시안 분석을 이용하는 방안을 제시하였으며 Caselton and Husain(1980)은 수위관측망 설계에 정보전달의 개념을 적용한 예가 있고, Chapman(1986)은 엔트로피를 이용하여 수문학적 자료들이 가지고 있는 불확실성을 추정하고 모형에 적용시켜 불확실성의 감소정도를 평가한 바 있다. Tasker and Stedinger(1989)는 GLS(Generalized least square) 기법을 적용하였는데 Markus *et al.*(2003) 등은 GSL과 함께 침투홍수량에 대한 엔트로피를 적용하는 방법을 확장하였으며 Yoo *et al.*(2011)은 엔트로피에 단위유량도를 적용하여 신규관측망을 고려한 수위관측소의 최적화를 시도한 바 있다. 국내에서는 Yoo and Jung(2002)이 혼합분포를 엔트로피 이론에 적용하여 강우관측망을 평가한 바 있으며, Yoo *et al.*(2003)은 강우의 공간상관구조를 이용하여 남한강 유역의 강우관측망을 평가하였다. Kim *et al.*(2007)은 소양강댐 유역의 강우관측망을 대상으로 공간상관분석 및 엔트로피 방법을 적용하여 관측망 밀도, 공간분포의 적정성을 검토하였고 Lee *et al.*(2013)은 강우관측소가 가지는 정보량과 중요도를 동시에 고려하여 다목적 유전자 알고리즘에 의해 최적화하는 방안을 제시한 바 있다. 엔트로피 이론은 상수관망에도 적용되었는데 Chung *et al.*(2009)이 엔트로피를 이용하여 압력계측 위치를 제안한 바 있으며, Chang *et al.*(2012)은 엔트로피와 유전자 알고리즘을 결합하여 상수관망의 최적 압력계측 위치를 결정하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 우리나라에서 가장 큰 피해를 발생시키고 있는 홍수에 초점을 맞추어 재해관리를 위하여 중요한 기준자료가 되고 있는 수위관측소를 대상으로 하였다. 각 수위관측소별로 측정되는 수위자료는 그 수위관측소의 수문학적 유출 특성을 반영하고 있다. 수위관측소들은 하천으로 연결되어 있기 때문에 상·하류간의 수문학적 유출특성이 어느 정도 유사한 특성을 보일 수 있다. 따라서 이러한 수위관측소 간의 수문학적 유출특성의 유사성을 평가가 최적수위관측망 구성을 위하여 필요하다. 또한 이러한 결과를 활용하여 재해위험지구의 재해관리와 연계할 수 있는 방안을 검토하고자 한다. 이를 위하여 엔트로피 이론에 의하여 대상유역내 수위관측소의 정보전달량을 산정하고 최적화된 수위관측망을 구성함으로써 재해위험지구의 재해관리를 위하여 어떠한 수위관측소가 중요하게 활용될 수 있는지에 대한 정보 및 방법론을 제공하고 자 한다. 따라서 엔트로피 이론에 의한 기존의 방법론이 관측망의 최적화에 초점이 맞추어져 있었다면, 본 연구의 경우 재해위험지구의 관리에 있어서도 중요하게 적용될 수 있을 뿐만 아니라 상호정보이론을 바탕으로 재해관리를 위하여 기존의 수위관측망에 추가로 수위관측소의 설치를 고려할 경우

본 연구에서 제안된 방법을 적용하여 효율적인 수위관측망 구성에 활용될 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 최적 수위관측망 구성을 위한 방법론

2.1 엔트로피 이론

엔트로피는 일반적으로 무질서도 또는 불확실성의 척도로 알려져 있으나, 정보이론에서는 신호가 가지고 있는 정보용량으로 정의되고 있다(Shannon and Weaver, 1949). 즉, 정보교환의 과정으로 신호가 보내질 때, 이 신호의 불확실성은 신호에 대한 정보가 불확실성을 제거할 정도로 많아지면 감소하게 되고, 따라서 불확실성의 감소정도로 신호에 대한 정보를 간접적으로 측정할 수 있는 것이다. 이러한 의미에서 정보와 불확실성은 이원적인 용어이며 서로 바뀌어서 사용되기도 한다(Ozkul *et al.*, 2000).

엔트로피 이론은 Shannon and Weaver(1949)에 의하면 이산무작위변량(discrete random variable) X 에 대한 한계 엔트로피는 다음과 같이 정의된다.

$$H(X) = - \sum_{n=1}^N P(x_n) \ln P(x_n), \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

여기에서 $P(x_n)$ 은 x_n 의 발생확률이며, 한계엔트로피 $H(X)$ 은 X 가 가지고 있는 정보량 또는 불확실성을 의미한다.

연속무작위변량(continuous random variable) X 가 확률밀도함수 $f(x)$ 를 따른다고 가정하면, X 의 범위를 Δx 의 간격으로 분할할 수 있으며, 이때 X 의 한계엔트로피는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(X; \Delta x) \cong - \int_0^{\infty} f(x) \ln(f(x) \Delta x) \quad (2)$$

현재까지 엔트로피방법에서 적용이 가능한 확률밀도 함수는 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포 등으로 그 외의 분포형은 적용이 제한되어 있다. 위 세 분포형에 대해서만 엔트로피 값이 이론적으로 유도되어 있어 그 적용이 쉬우나 그 외의 분포형에 대해서는 복잡한 다차원 수치적분을 필요로 하기 때문이다(Yang and Burn, 1994).

본 연구에서는 수위자료의 특성을 고려하여 2변수 대수정규분포형(2-parameter log-normal distribution)을 고려하였으며, 대수정규분포를 따르는 X 에 대한 한계엔트로피 $H(X; \Delta x)$ 는 식 (3)과 같으며, Y 에 대한 X 의 조건엔트로피로 X 와 Y 간 정보전달 사이에서 손실되는 정보량 $H(X|Y; \Delta x)$ 은 식 (4)와 같다. 그리고 X 로부터 Y 에게 전달되는 정보전달량 $T(X, Y)$ 는 식 (5)와 같이 계산한다(Chapman, 1986).

$$H(X; \Delta x) = \mu_z + 0.5 \ln(2\pi e \sigma_z^2) - \ln \Delta x \quad (3)$$

$$H(X|Y; \Delta x) = \mu + 0.5 \ln[(2\pi e \sigma_z^2)(1 - \rho_{zw}^2)] - \ln \Delta x \quad (4)$$

$$T(X, Y) = -0.5 \ln(1 - \rho_{zw}^2) \quad (5)$$

여기에서 μ_z 와 σ_z 는 $z(=\ln x)$ 의 평균과 표준편차이며, ρ_{zw} 은 z 와 $w(=\ln y)$ 의 상관계수를 의미한다. 또한 Chapman(1986)은 일정하게 고정된 간격 Δx 대신 변수의 범위에 비례하는 간격 $\Delta x/x$ 를 적용시켜 한계엔트로피와 조건엔트로피를 다음과 같이 정의하였다.

$$H(X; \Delta x/x) = 0.5 \ln(2\pi e \sigma_z^2) - \ln(\Delta x/x) \quad (6)$$

$$H(X|Y; \Delta x/x) = 0.5 \ln[(2\pi e \sigma_z^2)(1 - \rho_{zw}^2)] - \ln(\Delta x/x) \quad (7)$$

Markus *et al.*(2003)는 X 와 Y 사이에서 발생하는 엔트로피의 변화, 즉 정보전달량의 변화에 대하여 다음과 같이 수여 정보량(Received Information, $R(X, Y)$)과 제공 정보량(Sent Information, $S(X, Y)$)을 정의하고 그 차로서 순 정보량(Net Information, $N(X, Y)$)을 정의하였다.

$$R(X, Y) = \frac{T(X, Y)}{H(X)} \quad (8)$$

$$S(X, Y) = \frac{T(X, Y)}{H(Y)} \quad (9)$$

$$N(X, Y) = S(X, Y) - R(X, Y) \quad (10)$$

3. 정보전달량 산정 및 최적 수위관측망 구성

본 연구에서는 대상유역내 재해위험지구의 관리를 위하여 엔트로피 정보전달 이론을 고려함으로써 수위관측소의 최적 위치를 결정하고자 하였다. 이를 위하여 재해위험지구 주변에 임의로 관측소를 설치하고 기존 관측망을 포함하여 Clark 방법(Clark, 1945)에 의한 대표단위도를 유도하고 2변수 대수정 규분포형의 최적 매개변수를 도출하였다. 엔트로피 이론에 의하여 정보전달량을 산정하고 최적의 수위관측망을 구성하였으며 재해위험지구의 관리를 위하여 어떠한 관측소의 정보가 가장 효과적으로 활용될 수 있는지 검토하였다.

3.1 대상유역

본 연구의 대상 유역은 금강 상류 유역(중권역 유역코드 3001-3006)으로 유역면적 3,012.8 km², 하천연장 199 km이다. 최고고도 1,582 m, 최저고도 59 m, 평균고도 802 m로 비교적 높은 고도에 위치한 산악지역이라고 할 수 있다. 대상 유역내에는 기존 10개(천천, 동향, 용담, 안천, 무주, 수통, 호탄, 양강교, 송천, 심천)의 수위관측소가 위치하고 있다. 그리고 소방방재청에서 2010년 특별 재고시한 재해위험지구 지정현황을 바탕으로 대상지역내 재해위험지구를 조사한 결과 대상지역내에는 4개의 재해위험지구(정천면, 무주읍, 양산면, 영동읍)가 위치하고 있다(Fig. 1 참고). 따라서 재해저감을 위한 최적화된 수위관측망의 구성을 위하여 기존 관측소 외에 재

Fig. 1. Study Area.

해위험지구 지점에 수위관측소의 추가적인 설치를 가정하여 총 14개의 수위관측소에 대한 평가를 수행하였다.

3.2 유역 특성 자료 추출 및 대표단위도 결정

대상유역인 금강 상류유역에 대하여 대표 단위도를 결정하기 위한 각 수위관측소 지점에 해당하는 유역면적, 하천연장, 하천경사와 같은 유역특성 자료를 GIS tools를 이용하여 추출하였다. 그리고 이러한 자료를 이용하여 Clark 단위도의 매개변수인 도달시간(T_c)과 저류상수(K)를 산정하였다. 각 매개변수를 산정하는 방법은 여러 방법이 있었으나 일관적인 값을 산정하기 위해 도달시간은 Kirpich(1940)식, 저류상수는 Sabol(1988)식을 이용하였다. 여기에서 금강 상류의 경우 용담댐이 위치하고 있지만 본 연구에서는 수위관측망 최적화에 대한 적용방법론에 초점을 맞추어 댐에 의한 유출의 조절은 없는 것으로 가정하고 각 매개변수를 산정하였다. 각 수위관측소 지점의 상류 지배면적, 상류 하천길이, 하천경사와 같은 유역 및 하천 특성정보를 이용하여 산정한 Clark 단위도의 도달시간(T_c)과 저류상수(K)에 대한 매개변수는 Table 1과 같다. Table 1에서 “Old”는 기존 수위관측소를 의미하며 “New”는 재해위험지구에 새롭게 추가된 관측소를 의미한다(위치 Fig. 2참고). 그리고 Table 1의 매개변수를 이용하여 각 수위관측소 지점을 대상으로 유도된 대표단위도는 Fig. 2와 같다.

3.3 엔트로피 이론을 이용한 수위관측소별 정보전달량 산정

각 수위관측소 지점에 대하여 추정된 대표단위도를 2 변수

Table 1. Parameters of Clark Unit Hydrograph on Stream Gauging Stations

ID	Name	Catchment Area (km ²)	Stream Length (km)	Stream Slop	T_c (hr)	K (hr)	Old/New
1	Songchun	140.31	7.01	0.3568	0.44	0.31	O
2	Shimchun	1923.81	84.80	0.1508	4.19	3.69	O
3	Yanggangkyo	1547.05	59.60	0.1842	2.96	2.35	O
4	Youngdongup	322.01	18.72	0.4861	0.83	0.61	N
5	Yangsanyun	1051.92	63.45	0.1567	3.30	2.93	N
6	Hotan	941.08	44.94	0.2566	2.10	1.64	O
7	Sootong	924.69	42.22	0.7810	1.30	1.01	O
8	Moojooup	916.50	41.70	0.4167	1.64	1.27	N
9	Anchun	916.48	41.22	1.1342	1.11	0.85	O
10	Youngdam	788.88	39.20	0.1577	2.27	1.76	O
11	Moojoo	164.53	4.87	0.6365	0.27	0.18	O
12	Donghyang	600.21	32.22	0.2912	1.54	1.18	O
13	Chunchun	288.38	11.96	0.6326	0.53	0.38	O
14	Jungchunmyun	112.72	4.06	0.3448	0.29	0.20	N

Fig. 2. Representative Unit Hydrograph in Each Station.

대수정규분포로 적용하여 매개변수를 추정하여 엔트로피 이론에 의한 정보전달량을 산정하였다. Table 2는 대상 유역인 금강 상류 유역의 수위관측소 지점의 정보전달행렬을 나타낸다. 여기에서 대각행렬을 통하여 각 수위관측소가 가질 수 있는 한계엔트로피를 확인할 수 있으며, 또한 각 행렬을 통하여 관측소들이 상호 공유하고 있는 정보량을 확인할 수 있다. 따라서 각 관측소의 최대정보량은 각 관측소의 한계엔트로피와 상호 공유하고 있는 엔트로피의 합으로 나타낼 수 있다. 따라서 엔트로피 이론에 의하여 각 관측소가 갖는 최대 정보량을 산정할 경우 심천 관측소가 33.87로 가장 큰 정보량을 가지고 있는 것으로 나타났다.

3.4 엔트로피 이론을 이용한 시나리오별 수위관측망 최적화

수위관측망의 최적화를 위하여 개별 수위관측소의 수문하

적 유출특성에 엔트로피 이론을 적용하여 최적의 수위관측망을 구성하고자 하였다. 여기에서 수위관측망의 구성에 대한 몇가지 시나리오를 우선적으로 가정하였다. 첫째로 ‘4개의 재해위험지구 위치에 대한 수위관측소의 추가 설치 없이 기존 수위관측망만을 이용하는 경우’, 둘째로 ‘4개의 재해위험지구 위치에 수위관측소를 추가 설치하여 수위관측망을 구성하는 경우’로 구분하였다. 그리고 최적 수위관측망을 구성하다 보면 추가로 설치한 재해위험지구의 수위관측소가 탈락되는 경우가 있기 때문에 대상유역에 대한 재해관리를 위하여 반드시 4개의 수위관측소가 추가 설치될 필요가 있다는 가정하에, 셋째로 ‘4개의 재해위험지구를 반드시 최적 수위관측망에 포함하여 관측망을 구성하는 경우’를 추가하였다. 이렇게 3개의 수위관측망의 구성안에 대하여 최적수위관측망을 구성하고자 수위관측소별 엔트로피 이론의 정보전달량을 산정한 후 관측망의 조합에 따라 총엔트로피를 계산하였다.

우선, 4 개의 재해위험지구 위치에 대한 수위관측소의 추가 설치 없이 기존 수위관측망(10개소)만을 이용하는 경우에 대한 결과는 Table 3에 요약되었다. Table 5에 의하면 수위관측소의 조합에 따라 관측소 개수를 늘리면 총정보량이 증가하다가 일정 개수 보다 많은 관측소를 선택할 경우 오히려 중복되는 정보량 때문에 총 정보전달량이 감소하는 특성을 보였다. 이의 결과를 통하여 최대 정보량(79.73)을 나타내는 최적 수위관측망의 개수는 7개이며 1번 송천, 2번 심천, 3번 양강교, 6번 호탄, 10번 용담, 12번 동향, 13번 천천 관측소로 구성된 관측망인 것으로 나타났다.

다음으로, 4개의 재해위험지구 위치에 수위관측소를 추가 설치하여 수위관측망을 구성하는 경우로 10개의 기존 관측소를 포함하여 14개의 관측소를 대상으로 평가하였으며 그 결

Table 2. Matrix Array of Entropy of Each Station

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Total Inform.
1	5.62	1.48	1.24	1.02	1.60	0.82	1.44	1.55	2.34	2.11	1.39	0.92	1.60	0.94	24.07
2	1.48	5.37	2.31	1.89	2.70	1.37	3.42	3.17	1.99	2.17	2.71	1.64	2.24	1.41	33.87
3	1.24	2.31	5.23	2.49	2.40	1.26	2.09	1.97	1.63	1.76	3.13	2.12	1.60	1.19	30.42
4	1.02	1.89	2.49	5.13	1.78	1.42	1.82	1.69	1.31	1.40	2.11	3.13	1.42	1.25	27.86
5	1.60	2.70	2.40	1.78	5.35	1.15	2.31	2.33	2.24	2.51	3.03	1.57	1.88	1.18	32.03
6	0.82	1.37	1.26	1.42	1.15	5.18	1.47	1.40	0.99	1.03	1.23	1.36	1.38	2.22	22.28
7	1.44	3.42	2.09	1.82	2.31	1.47	5.39	3.64	1.88	2.01	2.33	1.59	2.47	1.55	33.41
8	1.55	3.17	1.97	1.69	2.33	1.40	3.64	5.43	2.02	2.16	2.23	1.48	2.74	1.51	33.32
9	2.34	1.99	1.63	1.31	2.24	0.99	1.88	2.02	5.50	3.66	1.87	1.17	1.92	1.09	29.61
10	2.11	2.17	1.76	1.40	2.51	1.03	2.01	2.16	3.66	5.46	2.05	1.25	1.97	1.12	30.66
11	1.39	2.71	3.13	2.11	3.03	1.23	2.33	2.23	1.87	2.05	5.29	1.83	1.77	1.21	32.18
12	0.92	1.64	2.12	3.13	1.57	1.36	1.59	1.48	1.17	1.25	1.83	5.06	1.26	1.17	25.55
13	1.60	2.24	1.60	1.42	1.88	1.38	2.47	2.74	1.92	1.97	1.77	1.26	5.51	1.61	29.37
14	0.94	1.41	1.19	1.25	1.18	2.22	1.55	1.51	1.09	1.12	1.21	1.17	1.61	5.37	22.82

Table 3. Results of the Optimized Stream Gauging Network (First Case, 10 Stations)

Num. of stations	Optimized combination	Total information content	Relation of total number and information on the combined stations
1	2	24.7
2	2,10	43.83	
3	5,9,11	58.48	
4	2,3,9,13	68.36	
5	1,3,6,7,10	74.52	
6	1,6,7,10,11,12	78.75	
7	1,2,3,6,10,12,13	79.73	
8	1,3,6,7,9,11,12,13	75.78	
9	1,3,6,7,9,10,11,12,13	67.57	
10	1,2,3,6,7,9,10,11,12,13	53.61	

Table 4. Results of the Optimized Stream Gauging Network (Second Case, 14 Stations)

Num. of stations	Optimized combination	Total information content	Relation of total number and information on the combined stations
1	2	33.87
2	8,11	61.04	
3	7,10,11	83.47	
4	2,3,8,10	101.19	
5	2,4,8,9,11	114.86	
6	2,4,8,9,11,14	124.74	
7	1,2,4,8,10,11,14	131.64	
8	1,3,5,6,7,10,12,13	135.45	
9	1,2,6,7,9,10,11,12,13	136.31	
10	1,4,5,6,7,9,11,12,13,14	133.1	
11	1,2,3,4,5,6,8,9,12,13,14	126.08	
12	1,2,3,4,5,6,7,9,10,12,13,14	114.49	
13	1,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	98.02	
14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	74.89	

Table 5. Results of the Optimized Stream Gauging Network (Third Case, 14 Stations)

Num. of stations	Optimized combination	Total information content	Relation of total number and information on the combined stations
4	4,5,8,14	96.06	
5	4,5,8,14,9	112.02	
6	4,5,8,14,2,9	123.01	
7	4,5,8,14,3,9,13	129.07	
8	4,5,8,14,1,2,3,9	132.24	
9	4,5,8,14,1,2,3,6,9	132.56	
10	4,5,8,14,1,6,9,11,12,13	129.17	
11	4,5,8,14,1,2,3,6,9,12,13	121.45	
12	4,5,8,14,1,2,3,6,9,10,12,13	108.78	
13	4,5,8,14,1,3,6,7,9,10,11,12,13	91.13	
14	4,5,8,14,1,2,3,6,7,9,10,11,12,13	66.58

Fig. 3. Optimized Stream Gauging Network.

과는 Table 4와 같다. 이 경우에 최대정보량 136.31을 나타내는 9개의 관측소 2번 송천, 3번 양강교, 6번 호탄, 7번 수통, 9번 안천, 10번 용담, 11번 무주, 12번 동향, 13번 천천 수위관측소로 구성된 관측망이 최적의 수위관측망인 것으로 나타났다. 첫 번째 경우와 비교할 때 3개(7번 수통, 9번 안천, 11번 무주)의 관측소가 추가되었으며, 새롭게 추가된 타 관측소와의 상호관계에 의하여 1개(3번 심천) 관측소가 제외된 것으로 나타났다. 하지만 재해위험지구의 재해관리를 위하여 추가설치가 필요하다고 판단되는 수위관측소 지점(4번 영동읍, 5번 양산면, 8번 무주읍, 14번 정천면)은 포함되지 않은 것을 확인할 수 있다.

따라서 마지막으로 4개의 재해위험지구를 반드시 최적 수위관측망에 포함하여 관측망을 구성하는 경우에 대한 평가를 수행하였으며 그 결과는 Table 5와 같다. 총정보량 132.56으로 9개의 관측소 중 기존 재해위험지구 지점(4번 영동읍, 5번 양산면, 8번 무주읍, 14번 정천면)을 포함하여 1번 송천, 2번 심천, 3번 양강교, 6번 호탄, 9번 안천 관측소가 선택되었다. 이렇게 최적화된 수위관측망의 공간적 분포 특성은 Fig. 3과 같다. 이와 같이 재해위험지구 지점을 반드시 선택되도록 추가하였을 경우 두 번째 경우와는 달리 기존 관측망에서 7번 수통, 10번 용담, 11번 무주, 12번 동향, 13번 천천 수위관측소 대신에 재해위험지구 지점과 2번 심천 수위관측소가 선택되었다.

4. 상호정보이론에 의한 재해위험지구 연계 방법

금강 상류지역을 대상유역으로 엔트로피 이론에 의한 정보 전달량을 고려하여 3가지 시나리오를 구성하고 이에 대한 검토를 수행하였다. 이중 상호정보 이론을 통하여 본 방법을 재해위험지구와 연계할 수 있는 방법을 고려하였다. 우선 기존 관측소만(10개 관측소)을 이용할 경우 7개의 관측소를 이용하여 평균 11.39(79.73/7)의 정보량을 얻을 수 있었다. 다음으로 기존 관측소에 추가하여 4개의 재해위험지구 지점에 관측소를 가설하는 경우 9개의 관측소를 이용하여 평균 15.15(136.31/9)의 정보량을 얻을 수 있었다. 이 경우 재해위험지구 지점의 관측소가 제외되는 경향이 있었다. 따라서 재해관리를 위하여 재해위험지구 지점에 가설하는 4개의 관측소가 반드시 포함되도록 관측망을 구성할 경우 평균 14.73(132.56/9)의 정보량을 얻을 수 있었다. 여기에서는 재해위험지구의 재해관리를 위하여 대상지점에 수위관측소를 설치하는 것이 중요하다는 가정하에 앞의 세 번째 방법의 결과를 활용하여 재해위험지구지점에서 상호정보이론을 연계하는 방법을 고려해 보

고자 한다.

우선 각 관측소간 상호정보에 의하여 제공 정보량(S)과 수여 정보량(R)의 관계에 의한 순 정보량(N)을 산정하였다 (Table 6 참고). 여기에서 수여 정보량이 제공 정보량 보다 크면 순 정보량은 음수를 나타내고 최적 수위 관측망에서 탈락할 가능성이 크다(Markus *et al.* 2003). 하지만 Table 6의 결과에 의하면 순정보량(N)을 기준으로 판단할 때 상대적으로 순위가 높은 13번 천천, 10번 용담, 7번 수통 수위관측소가 선택되지 못하였다. 이러한 결과는 상대적으로 순위가 낮은 재해위험지구를 선택함으로써 인해서 유역내에서 최대의 정보량을 갖는 관측망을 재배열하는 과정에서 발생하였다고 판단된다. 특히 재해위험지구에서 새롭게 가설된 14번 정천면 지점은 13번 천천 관측소에 대한 정보를 제공할 수 있으며, 8번 무주읍 지점은 7번 수통 관측소에 대한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

위의 상호정보이론은 정보를 공유하고 있는 관측소간 특성을 이용하여 다양하게 적용될 수 있으며 본 연구에서는 재해

위험지구에 설치한 수위관측소가 고장 등의 이유로 정보제공이 원활하지 않을 경우 어떠한 수위관측소의 정보를 중요하게 활용할지에 대한 검토를 수행하고자 하였다. 따라서 최적화된 9개의 관측소 중에서 유역내에 위치하고 있는 4개 재해위험지구에 대한 수위 정보를 식 (8)의 수여 정보량(R) 산정을 통하여 검토하였다. 4개의 재해위험지구 지점에 각 수위관측소에서 수여받는 정보량의 순위를 나타내면 Table 7과 같다. 이 중에서 각 재해위험지구에 가장 많은 정보를 제공하는 관측소 순위 2위까지 음영으로 표시하였다. 일례로 재해위험지구 영동읍에 가설한 수위관측소에 문제가 발생하였을 경우 3번 양강교 및 2번 심천 수위관측소에 대한 정보를 중요한 정보로 고려할 수 있다. 이와 같이 이러한 상호정보이론에 의하여 각 재해위험지구에서 재해관리를 위하여 중요하게 고려하여야 할 수위관측소에 대한 정보를 확인 할 수 있다. 그리고 대상 유역내에서 재해위험지구의 관리를 위하여 가장 중요한 관측소는 순위평균(1.8)이 가장 우수한 심천(2번) 관측소 것으로 나타났다.

Table 6. Review Selections Due to the Rankings Based on the Information Transmission

Disaster Risk Area :

ID	Station	Information			Rank			Selection
		S	R	N	S	R	N	
1	Songchun	3.443	3.283	0.160	12	13	1	O
2	Shimchun	5.326	5.307	0.018	1	1	8	O
3	Yanggangkyo	4.720	4.816	-0.097	6	6	11	O
4	Youngdongup	4.268	4.431	-0.163	10	8	13	O
5	Yangsanyun	4.984	4.987	-0.003	5	5	9	O
6	Hotan	3.198	3.301	-0.103	14	12	12	O
7	Sootong	5.235	5.199	0.036	2	2	6	X
8	Moojooup	5.209	5.136	0.072	3	3	5	O
9	Anchun	4.491	4.384	0.107	8	9	3	O
10	Youngdam	4.694	4.615	0.078	7	7	4	X
11	Moojoo	5.032	5.083	-0.051	4	4	10	X
12	Donghyang	3.842	4.049	-0.207	11	11	14	X
13	Chunchun	4.459	4.330	0.128	9	10	2	X
14	Jungchunmyun	3.271	3.250	0.022	13	14	7	O

Table 7. Rankings Based on the Received Information in Each Disaster Risk Area and The Whole Basin

	Optimized stream gauging network									
	ID	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#8	#9	#14
Disaster risk area	Youngdongup	8	2	1	-	3	5	4	6	7
	Yangsanyun	6	1	2	5	-	8	3	4	7
	Moojooup	6	1	4	5	2	8	-	3	7
	Jungchunmyun	8	3	5	4	6	1	2	7	-
Ranking Average		7.0	1.8	3.0	4.7	3.7	5.5	3.0	5.0	7.0
Rangking		9	1	2	5	4	7	2	6	9

5. 결 론

본 연구는 유역의 수문학적 유출특성을 대표하는 수위관측소의 자료는 상·하류로 연결되어 있기 때문에 수문학적으로 유사한 특성을 보인다는 점에 착안하였다. 그리고 이러한 특성을 재해위험지구와 연계할 수 있는 방안을 검토하고자 하였다. 이를 위하여 금강상류 유역을 대상으로 각 수위관측소 지점과 임의로 관측소 설치를 가정한 재해위험지구 지점에 대하여 유역특성 자료를 추출하여 Clark 방법에 의한 대표단 위도를 산정하였다. 그리고 엔트로피 이론을 기반으로 한 수위관측소별 정보전달량을 산정하고 3개의 시나리오를 구성하였으며 그에 따라 대상 유역내 최적 수위관측망에 대한 정보를 제공하였다. 그리고 재해위험지구의 수역정보량을 산정함으로써 유역의 재해관리를 위하여 가장 중요한 관측소는 심천관측소임을 확인하였다.

이와 같이 본 연구의 방법론은 엔트로피 이론이 단지 정보이론으로만 국한되지 않고 유역의 재해관리를 위하여 활용될 수 있음을 확인하였다. 따라서 향후 본 연구결과를 재해관리에 있어 수문관측망의 구축 및 유지관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업[NEMA-자연-2011-45] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Caselton, W.F. and Husain, T. (1980) Hydrologic networks: Information transmission. *J. Water Resour. Plng. and Mgmt. Div.*, Vol. 106, No. 2, pp. 503-520.
- Chang, D.E., Ha, K.R., Jun, H.D., and Kang, K.H. (2012) Determination of Optimal Pressure Monitoring Locations of Water Distribution Systems Using Entropy Theory and Genetic Algorithm, *Journal of Korean Society of Water and wastewater*, Vol. 26, No. 1, pp. 1-12.
- Chapman, T.G. (1986) Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance. *J. Hydrol.(Amsterdam)*, 85(1-2), pp. 111-126.
- Chung, G., Chang, D.E., Yoo, D.G., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2009) Determination of Optimal Pressure Monitoring Locations for Water Distribution Systems using Entropy Theory, *Journal of KWRA*, KWRA, Vol. 42, No. 7, pp. 537-546.
- Clark, C.O. (1945) Storage and the unit hydrograph. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 110, pp. 1419-1446.

- IPCC (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX).
- Kim, J.B., Bae, Y.D., Park, B.J., and Kim, J.H. (2007) Evaluation of the soundness of the raingauge network in the Soyang-dam basin. *Korean Water Resources Association Annual Conference*, KWRA, pp. 178-182.
- Kirpich, Z.P. (1940) Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civ. Eng.*, Vol. 10, No. 6, pp. 362-365.
- Lee, J.H., Byun, H., Kim, H.S., and Jun, H.D. (2013) Evaluation of a Raingauge Network Considering the Spatial Distribution Characteristics and Entropy: A Case Study of Imha Dam Basin, *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 2, pp. 217-226.
- Markus, M., Knapp, H.V., and Tasker, G.D. (2003) Entropy and generalized least square methods in assessment of regional value of stream gages. *J. Hydrol.(Amsterdam)*, 283(1-4), pp. 107-121.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009) A Study on Establishment of National Hydrologic Network
- Moss, M.E. and Karlinger, M.R. (1974) Surface water network design by regression analysis simulation. *Water Resour. Res.*, Vol. 10, No. 3, pp. 427-433.
- Ozkul, S., Harmancioglu, N.B., and Singh, V.P. (2000) Entropy-based assessment of water quality monitoring networks, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 90-100.
- Sabol, G.V. (1988) Clark unit hydrograph and R-parameter estimation. *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 114, No. 1, pp. 103-111.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*, The University of Illinois Press, Urbana, Illinois, USA.
- Tasker, G.D. and Stedinger, J.R. (1989) An operational GLS model for hydrologic regression. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 111(1-4), pp. 361-375.
- Yang, Y. and Burn, D.H. (1994) An entropy approach to data collection network design, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 157, pp. 307-324.
- Yoo, C.S. and Jung, G.S. (2002) Evaluation of a raingauge network using Entropy Theory: Comparion between Mixed and Continuous Distributions. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 22, No. 4-B, pp. 447-457.
- Yoo, C.S., Kim, I.B., and Ryu, S. (2003) Evaluation of the raingauge density and spatial distribution : Case Study for the NamHanriver basin. *Journal of KWRA*, KWRA, Vol. 36, No. 2, pp. 173-181.
- Yoo, C.S., Jung, K., and Lee, J. (2008) Evaluation of rain gauge network using entropy theory: comparison of mixed and continuous distribution function applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 226-235.

Received ■ December 30, 2013

Revised ■ December 30, 2013

Accepted ■ January 17, 2014