

빈도해석을 통한 확률저유량 산정에 관한 연구

Estimation of Low-Flow in Korea Based on Frequency Analysis

김 경 덕* · 허 준 행** · 조 원 철***

1. 서 론

근간에 세계적 이상기상으로 가뭄과 한발 등이 빈번히 발생하고 있는 추세이며, 1993년부터 해를 넘기며 계속된 가뭄으로 可用水原이 줄어든 데다 용수의 수요량이 기하급수적으로 급증하여 가뭄에 대한 피해는 매우 심각하였다. 따라서 가뭄에 대한 자료를 수집·정비하고 이에 대한 다각적인 해석을 통하여 가뭄에 대해 철저히 대비하여 용수공급에 만전을 기하여 할 것이다.

가뭄을 올바르게 해석하기 위해서는 크기와 지속기간이라는 차원에서 고려해야 한다. 본 연구에서는 한국 주요 하천의 저유량 자료에 대하여 크기차원의 빈도해석을 실시하였다. 전국 5대강 14개 지점의 3일, 5일, 7일, 15일 저유량 자료를 대상으로 빈도해석을 실시하였다.

수문자료에 적합하다고 알려진 13가지 확률분포형(γ -2, γ -3, General extreme value, Gumbel, lognormal-2, lognormal-3, log-Gumbel-2, log-Gumbel-3, log-Pearson type III, Weibull-2, Weibull-3, Wakeby-4, Wakeby-5)을 저유량 자료에 적용하였으며, 매개변수의 추정은 모멘트법, 확률가중 모멘트법, 최우도법 등을 사용하였다. χ^2 -검정, Kolmogorov-Smirnov 검정, Cramer von Mises 검정 등으로 적합도 검정과 도시적인 해석을 실시하였다. 뿐만 아니라 최저값 자료와 하한계 값(location parameter)의 비교, 모멘트비 일람도(moment ratio diagram)와 L-모멘트비 일람도(L-moment ratio diagram)를 조사하여 최적 분포형을 선정하였다. 최종적으로 대상 지점의 확률 저유량을 산정하였다.

2. 본 론

본 연구에서는 관측기록이 비교적 길고 저수위시에도 관측정도가 양호한 14개 지점을 선정하여, 일수위자료로부터 3일, 5일, 7일, 15일 저유량 자료를 획득하였다. 결측된 자료는 자기회귀 모형(autoregressive model)을 이용하여 보완하였다. 표 1은 대상지점과 자료의 기록년수 및 결측년도와 15일 저유량 자료의 기본적인 통계치를 나타내고 있다.

-
- * 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정
 - ** 연세대학교 공과대학 토목공학과 조교수
 - *** 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

표 1 대상지점의 자료년수 및 결측년도와 15일 저유량 자료의 기본적인 통계치

유역명	지점명	기록년수	결측년도	평균	표준편차	변동계수	왜곡도 계수
한 강	고 안	41		3722.7	3546.9	0.953	0.842
	청 평	38		2611.3	2187.8	0.838	0.662
	여 주	40		1012.8	863.6	0.853	2.088
낙동강	진 동	42	1957	936.5	430.3	0.460	0.401
	현 풍	42		480.1	345.0	0.719	0.938
	동 천	42		353.1	401.3	1.136	1.255
	왜 관	41	1954, 1958	828.1	434.7	0.525	0.598
금 강	규 암	40		798.5	724.5	0.907	2.176
	공 주	41	1965	685.3	972.8	1.420	5.089
	회 덕	39		171.6	167.8	0.978	1.507
영산강	마 립	39		149.5	298.2	1.994	3.880
섬진강	송 정	38	1958	673.0	578.2	0.859	1.472
	압 록	38		133.2	99.0	0.743	1.009
	적 성	22		258.2	296.2	1.147	3.386

2.1 매개변수 추정

본 연구에서는 13가지 확률분포형을 적용하였으며, 각 매개변수 추정방법에 따라 매개변수를 추정하고 적합성을 조사하였다. 표 2에서 15일 저유량의 GEV 분포형에 대한 모멘트법, 최우도법, 확률가중 모멘트법에 의한 매개변수 추정결과를 나타내었으며, 추정된 매개변수의 적합성을 나타내었다. Gamma-3, lognormal-3, log-Gumbel-3, Weibull-3 분포형의 경우 매개변수 적합성 조건을 만족하지 못하는 지점이 발생하였다. 또한 최우도법에 의한 매개변수 추정시 수렴이 되지 않아 매개변수 추정을 할 수 없는 지점도 나타났다.

표 2. 3변수 GEV 분포의 매개변수와 적합성

지점명	자료 크기	모멘트법 (MOM)			최우도법 (ML)			확률가중 모멘트법 (PWM)		
		위 치 매개변수	규 모 매개변수	형 상 매개변수	위 치 매개변수	규 모 매개변수	형 상 매개변수	위 치 매개변수	규 모 매개변수	형 상 매개변수
고 안	41	2170.00	2957.54	.055	1600.16	1794.74	-503	1958.56	2369.02	-.146
청 평	38	1677.28	1899.79	.094	1253.25	1183.75	-501	1528.47	1604.84	-.090
여 주	40	615.79	562.02	-.116	620.92	416.50	-.261	593.74	371.73	-.362
진 동	42	762.13	396.22	.158	760.25	381.31	.141	754.80	399.52	-.139
현 풍	42	327.49	281.50	.037	309.04	240.70	-.126	313.00	258.58	-.066
동 천	42	171.27	305.44	-.018	*	-24.82	351.697	145.14	190.96	-.345
왜 관	41	644.53	382.95	.109	644.17	373.12	.098	642.55	389.82	.113
규 암	40	465.56	464.93	-.124	427.29	227.95	-.654	445.68	267.47	-.434
공 주	41	260.52	479.13	-.241	352.23	314.73	-.289	340.12	297.32	-.376
회 덕	39	94.76	121.31	-.054	73.18	79.33	-.559	87.62	100.99	-.207
마 립	39	16.53	158.56	-.212	*	-11.46	6.019	47.77	33.78	-.715
송 정	38	408.65	420.85	-.049	352.10	301.01	-.421	385.50	362.41	-.181
압 록	38	89.13	79.51	.023	89.95	80.42	.039	91.85	84.15	.094
적 성	22	124.82	164.15	-.194	128.87	104.60	-.453	130.56	110.37	-.374

표 2에서 GEV 분포형의 경우 최우도법에 의한 매개변수 추정시 일부 지점을 제외하고 거의 모든 지점에서 매개변수 추정이 가능하였으며, 매개변수 적합성 조건을 만족하고 있다. 그밖에 2변수 확률분포형의 경우 매개변수 추정은 문제가 없었으며, 적합성 조건 역시 모두 만족하였다.

2.2 적합도 검정 및 도시적인 해석

각 확률분포형별로 추정된 매개변수중 적합성 조건을 만족하는 경우에 대하여 적합도 검정을

실시하였다. 확률밀도함수에 대하여는 χ^2 검정, 누적분포함수에 대하여는 Kolmogorov-Smirnov 검정, Cramer von Mises 검정을 실시하였다. 표 3은 확률가중 모멘트법에 의한 15일 저유량의 각 확률분포형에 대한 적합도 검정 결과를 나타내고 있다.

표 3. 각 확률분포형별 적합도 검정결과 (확률가중 모멘트법)

지점명		PWM																													
		GAM2			GAM3			GEV			GUM			LN2			LN3			LP3			WBU2			WBU3					
		C	T	R	C	T	R	C	T	R	C	T	R	C	T	R	C	T	R	C	T	R	C	T	R	C	T	R			
고안	χ^2	4.73	7.81	0	6.89	5.99	x	4.12	11.07	0	8.26	11.07	0	4.12	7.81	0	5.29	5.99	0							10.65	7.81	x	4.41	5.99	0
	K-S	0.13	0.19	0	0.13	0.19	0	0.14	0.19	0	0.16	0.19	0	0.13	0.19	0	0.14	0.19	0							0.13	0.19	0	0.13	0.19	0
	CVM	0.12	0.46	0	0.17	0.46	0	0.21	0.46	0	0.33	0.46	0	0.23	0.46	0	0.19	0.46	0							0.12	0.46	0	0.16	0.46	0
창평	χ^2	9.11	7.81	x	11.21	5.99	x	13.79	11.07	x	18.84	11.07	x	5.99	7.81	0	11.26	5.99	x	15.74	11.07	x	13.16	7.81	x	13.47	5.99	x			
	K-S	0.12	0.19	0	0.14	0.19	0	0.16	0.19	0	0.17	0.19	0	0.19	0.19	0	0.15	0.19	0	0.11	0.19	0	0.11	0.19	0	0.12	0.19	0	0.14	0.19	0
	CVM	0.13	0.46	0	0.18	0.46	0	0.23	0.46	0	0.25	0.46	0	0.27	0.46	0	0.21	0.46	0	0.11	0.46	0	0.11	0.46	0	0.13	0.46	0	0.17	0.46	0
여주	χ^2	11.75	7.81	x				3.20	11.07	0	13.40	11.07	x	3.80	7.81	0							8.25	11.07	0	12.50	7.81	x			
	K-S	0.12	0.19	0				0.07	0.19	0	0.13	0.19	0	0.10	0.19	0							0.11	0.19	0	0.13	0.19	0			
	CVM	0.17	0.46	0				0.03	0.46	0	0.25	0.46	0	0.07	0.46	0							0.11	0.46	0	0.20	0.46	0			
진동	χ^2	0.39	7.81	0	0.39	5.99	0	2.86	11.07	0	2.57	11.07	0	0.29	7.81	0	2.86	5.99	0	0.62	11.07	0	0.26	7.81	0	0.26	5.99	0	0.26	5.99	0
	K-S	0.05	0.18	0	0.05	0.18	0	0.05	0.18	0	0.06	0.18	0	0.08	0.18	0	0.05	0.18	0	0.05	0.18	0	0.05	0.18	0	0.05	0.18	0	0.05	0.18	0
	CVM	0.03	0.46	0	0.02	0.46	0	0.02	0.46	0	0.04	0.46	0	0.05	0.46	0	0.02	0.46	0	0.01	0.46	0	0.01	0.46	0	0.01	0.46	0	0.01	0.46	0
현풍	χ^2	7.59	7.81	0	5.14	5.99	0	6.86	11.07	0	4.46	11.07	0	5.71	7.81	0	6.86	5.99	x	3.48	11.07	0	5.71	7.81	0	5.71	7.81	0	5.71	5.99	0
	K-S	0.07	0.18	0	0.08	0.18	0	0.09	0.18	0	0.10	0.18	0	0.09	0.18	0	0.09	0.18	0	0.10	0.18	0	0.08	0.18	0	0.08	0.18	0	0.08	0.18	0
	CVM	0.05	0.46	0	0.05	0.46	0	0.05	0.46	0	0.07	0.46	0	0.07	0.46	0	0.05	0.46	0	0.05	0.46	0	0.05	0.46	0	0.05	0.46	0	0.05	0.46	0
동천	χ^2	3.24	7.81	0	3.24	5.99	0	8.29	11.07	0	36.43	11.07	x	6.00	7.81	0	8.29	5.99	x	6.10	11.07	0	3.43	7.81	0	5.43	5.99	0			
	K-S	0.12	0.18	0	0.12	0.18	0	0.18	0.18	0	0.22	0.18	x	0.17	0.18	0	0.16	0.18	0	0.10	0.18	0	0.12	0.18	0	0.12	0.18	0	0.13	0.18	0
	CVM	0.16	0.46	0	0.15	0.46	0	0.28	0.46	0	0.50	0.46	x	0.22	0.46	0	0.22	0.46	0	0.09	0.46	0	0.14	0.46	0	0.16	0.46	0	0.16	0.46	0
왜관	χ^2	0.34	7.81	0	0.34	5.99	0	1.59	11.07	0	3.34	11.07	0	4.51	7.81	0	1.59	5.99	0	0.15	11.07	0	1.59	7.81	0	1.59	5.99	0	1.59	5.99	0
	K-S	0.05	0.19	0	0.05	0.19	0	0.05	0.19	0	0.05	0.19	0	0.10	0.19	0	0.05	0.19	0	0.07	0.19	0	0.05	0.19	0	0.05	0.19	0	0.05	0.19	0
	CVM	0.04	0.46	0	0.02	0.46	0	0.02	0.46	0	0.04	0.46	0	0.05	0.46	0	0.02	0.46	0	0.02	0.46	0	0.02	0.46	0	0.02	0.46	0	0.02	0.46	0
규암	χ^2	10.75	7.81	x				2.00	11.07	0	22.70	11.07	x	5.90	7.81	0	1.43	5.99	0	1.00	11.07	0	15.80	7.81	x						
	K-S	0.14	0.19	0				0.05	0.19	0	0.18	0.19	0	0.09	0.19	0	0.05	0.19	0	0.04	0.19	0	0.15	0.19	0						
	CVM	0.23	0.46	0				0.03	0.46	0	0.37	0.46	0	0.08	0.46	0	0.02	0.46	0	0.01	0.46	0	0.27	0.46	0						
문주	χ^2	5.22	7.81	0				5.10	11.07	0	5.99	11.07	0	7.15	7.81	0	7.15	5.99	x				10.07	7.81	x						
	K-S	0.13	0.19	0				0.19	0.19	0	0.17	0.19	0	0.11	0.19	0	0.11	0.19	0				0.13	0.19	0						
	CVM	0.17	0.46	0				0.13	0.46	0	0.24	0.46	0	0.18	0.46	0	0.18	0.46	0				0.17	0.46	0						
회덕	χ^2	3.44	7.81	0	1.38	5.99	0	4.23	11.07	0	3.00	11.07	0	11.31	7.81	x	4.23	5.99	0	2.15	11.07	0	3.00	7.81	0	3.00	5.99	0			
	K-S	0.08	0.19	0	0.08	0.19	0	0.11	0.19	0	0.10	0.19	0	0.17	0.19	0	0.10	0.19	0	0.08	0.19	0	0.09	0.19	0	0.08	0.19	0	0.08	0.19	0
	CVM	0.06	0.46	0	0.05	0.46	0	0.08	0.46	0	0.10	0.46	0	0.10	0.46	0	0.07	0.46	0	0.04	0.46	0	0.04	0.46	0	0.05	0.46	0	0.05	0.46	0
마북	χ^2	3.13	7.81	x				4.54	11.07	0	31.88	11.07	x	7.31	7.81	0							31.92	7.81	x						
	K-S	0.28	0.19	x				0.10	0.19	0	0.32	0.19	x	0.16	0.19	0							0.28	0.19	x						
	CVM	0.76	0.46	x				0.07	0.46	0	1.21	0.46	x	0.23	0.46	0							0.65	0.46	x						
승정	χ^2	0.89	7.81	0	0.89	5.99	0	2.74	11.07	0	6.84	11.07	0	3.37	7.81	0	1.79	5.99	0	0.42	11.07	0	2.11	7.81	0	2.11	5.99	0			
	K-S	0.07	0.19	0	0.07	0.19	0	0.08	0.19	0	0.10	0.19	0	0.09	0.19	0	0.07	0.19	0	0.07	0.19	0	0.07	0.19	0	0.07	0.19	0	0.07	0.19	0
	CVM	0.03	0.46	0	0.03	0.46	0	0.05	0.46	0	0.06	0.46	0	0.07	0.46	0	0.04	0.46	0	0.03	0.46	0	0.03	0.46	0	0.03	0.46	0	0.03	0.46	0
압록	χ^2	10.16	7.81	x	8.59	5.99	x	6.84	11.07	0	7.47	11.07	0	8.74	7.81	x	6.84	5.99	x				3.04	7.81	0	8.11	5.99	x			
	K-S	0.16	0.19	0	0.12	0.19	0	0.12	0.19	0	0.13	0.19	0	0.22	0.19	x	0.12	0.19	0				0.14	0.19	0	0.11	0.19	0			
	CVM	0.27	0.46	0	0.03	0.46	0	0.09	0.46	0	0.13	0.46	0	0.24	0.46	0	0.08	0.46	0				0.23	0.46	0	0.08	0.46	0			
적성	χ^2	3.82	5.99	0				6.84	9.49	0	2.55	9.49	0	5.73	5.99	0	5.73	3.84	x	2.36	9.49	0	3.46	5.99	0						
	K-S	0.13	0.25	0				0.13	0.25	0	0.16	0.25	0	0.13	0.25	0	0.13	0.25	0	0.10	0.25	0	0.13	0.25	0						
	CVM	0.08	0.46	0				0.08	0.46	0	0.13	0.46	0	0.08	0.46	0	0.08	0.46	0	0.06	0.46	0	0.08	0.46	0						

표 3에서 보면 확률가중 모멘트법인 경우 GEV 분포는 창평지점을 제외하고 모든 지점에서 채택되었고, lognormal-2 분포는 회덕지점과 압록지점을 제외하고 채택되었다. 참고적으로 모멘트법으로 매개변수를 추정하여 적합도 검정을 실시하였을 때는 log-Pearson type III 분포, GEV 분포, Weibull-2 분포순으로 많은 지점에서 채택되었다. 최우도법의 경우에는 GEV 분포가 현풍지점과 회덕지점을 제외하고 모든 지점에서 채택되었으며, gamma-2 분포와 Gumbel 분포가 많은 지점에서 채택되었다.

그림 1 ~ 그림 3은 매개변수 추정별로 송정지점(섬진강 유역)의 15일 저유량 자료에 대하여 경험 확률밀도함수를 각 확률분포형의 적합된 확률밀도함수와 비교하여 나타낸 것이다.

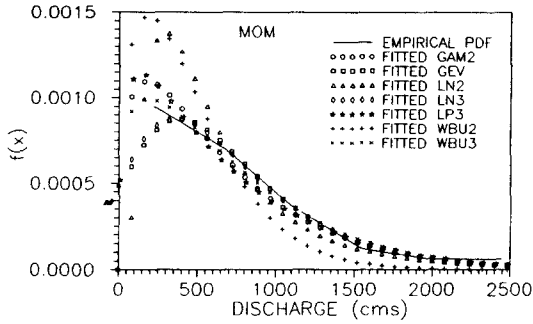


그림 1. 모멘트법에 의한 경험 확률밀도함수와 적합된 확률밀도함수(송정, 15일 저유량)

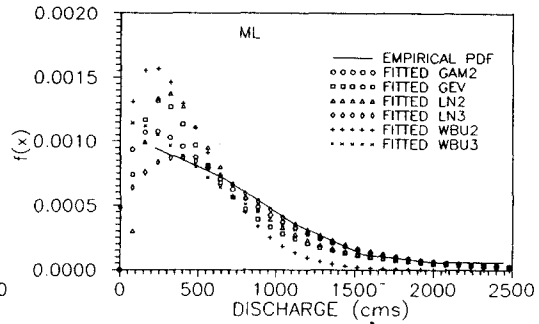


그림 2. 최우도법에 의한 경험 확률밀도함수와 적합된 확률밀도함수(송정, 15일 저유량)

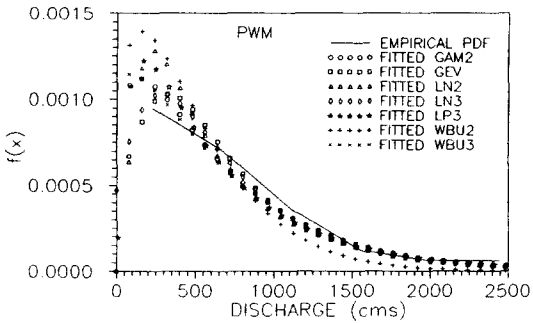


그림 3. 확률가중 모멘트법에 의한 경험 확률밀도함수와 적합된 확률밀도함수(송정, 15일 저유량)

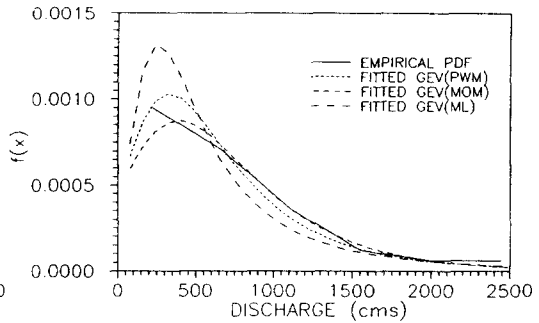


그림 4. GEV 분포형의 매개변수 추정별 도시적 비교(송정, 15일 저유량)

그림 1 ~ 그림 3을 살펴보면 송정지점에서 모멘트법의 경우 Weibull-3, GEV, lognormal-3 분포가 경험 확률밀도함수에 비교적 잘 적합되었다. 최우도법의 경우에는 lognormal-3 분포, gamma-2 분포, Weibull-3 분포가 잘 적합되었으며, 확률가중 모멘트법의 경우에는 Weibull-3 분포, GEV 분포, lognormal-3 분포가 잘 적합되었다. 그림 4는 GEV 분포에 대하여 매개변수 추정 방법간의 비교를 나타내었다. 그림 4에서 매개변수 추정별로 적합된 정도를 살펴보면 GEV 분포형의 경우 확률가중 모멘트법에 의한 적합이 가장 잘 적합되었으며, 모멘트법, 최우도법 순으로 잘 적합되었다. 그 밖의 지점의 저유량 자료에 대하여 적합도 검증결과와 도시적인 해석을 통하여 동시에 채택된 분포형에 대하여 최적 분포형을 선정하게 된다.

2.3 모멘트비 일람도와 L-모멘트비 일람도 검토

모멘트비 일람도와 L-모멘트비 일람도를 검토하였다(Cunnane, 1989; Hosking, 1986). 왜곡도 계수와 첨예도 계수의 관계를 그림으로 나타낸 것이 그림 5와 그림 6이다. 그림 5와 그림 6을 살

떠보면 특정 확률분포형과 경향을 가지지 않고 있다. 그림 6에서 5일 저유량의 경우는 범위 밖으로 벗어나서 제외하였다. 이와 같이 경향성을 가지 않는 것은 14개 지점의 저유량 자료는 동일한 확률분포형을 따르지 않는 것으로 판단된다.

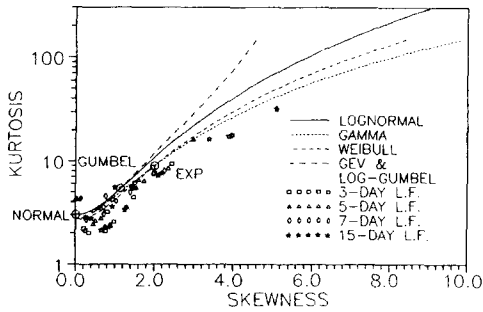


그림 5. 모멘트비 일람도
(왜곡도 계수 vs. 첨예도 계수)

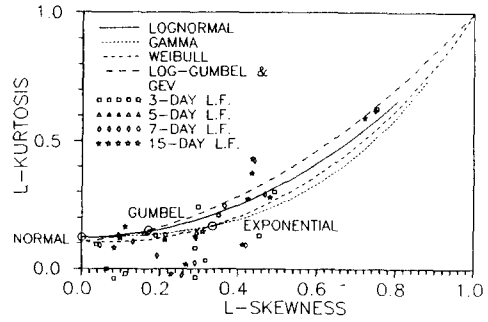


그림 6. L-모멘트비 일람도
(L-왜곡도 계수 vs. L-첨예도 계수)

2.4 확률저유량 산정

14개 지점, 4가지 저유량 자료(총 48개 자료)의 적정 분포형을 선정하여 확률저유량을 산정하였다. 선정된 분포형은 GEV(20개 자료), log-Pearson type III(18개 자료), Gumbel(7개 자료), Weibull-2(3개 자료), gamma-2(5개 자료), gamma-3(2개 자료), lognormal 분포형(1개 자료)이었다. 표 4는 송정지점의 확률저유량을 나타내고 있다.

표 4. 송정지점의 확률저유량

재현기간	7일 저유량	15일 저유량
2	207.2	497.2
10	46.0	124.6
20	27.9	79.7
50	15.3	46.9
70	12.4	39.0
100	10.0	32.3
200	6.6	22.7
300	5.3	18.6
400	4.5	16.2
500	4.0	14.6

3. 결론

수위 관측정도가 비교적 양호하고 기록년수가 충분한 5대강 유역의 14개 지점을 선정하여 저유량자료를 구축하고 빈도해석을 실시하였다. 수문자료 해석에 주로 사용되는 13가지 확률분포형을 적용하여 모멘트법, 최우도법, 확률가중 모멘트법 등으로 매개변수를 추정하고 적합도 검정과 도시적인 해석을 통하여 적정분포형을 산정하였다. 최종적으로 확률저유량을 산정하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 모멘트법, 최우도법, 확률가중 모멘트법 등 3가지 매개변수 추정법을 사용한 결과, 최우도법은

이론적으로 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 해를 구할 때 근사해법을 사용하므로 해가 수렴하지 않는 경우가 많이 발생하여 매개변수 적합성 조건을 만족하지 못하는 경우가 많았다. 모멘트법에 의한 매개변수 추정은 가장 용이하였으나, GEV 분포의 경우 확률가중 모멘트법이 보다 안정적인 결과를 얻을 수 있었다.

2. 모멘트비 일람도와 L-모멘트비 일람도를 검토하였는데 전 지점에 대하여 일정한 확률분포형을 찾을 수 없었다.

3. 적합도 검정과 도시적인 해석을 통하여 적정 분포형을 선정하였으며, 이를 통하여 확률저유량을 산정하였다.

저수위 자료로부터 저유량 자료를 얻게 되는데 저수위시에는 수위관측을 정확하게 실시하지 않는 지점이 많으며, 수위-유량 관계곡선으로부터 유량을 획득할 때 저수위 부분은 관계곡선의 유효범위를 벗어나므로 어려움이 많다. 따라서 향후 저수위 관측을 정확히 하고 하천측량을 통한 수위-유량관계곡선을 잘 정비하여 할 것이다.

4. 참고문헌

건설부, "1994년도 수자원 관리기법개발 연구조사 보고서.", 1994.

김경덕, 허준행, 조원철, "지속기간별 강우자료의 분포형에 관한 연구.", '95 대한토목학회 학술발표회논문집, pp. 25~28, 1995.

윤용남, 김중훈, 김태균, 호정석, "빈도분석을 이용한 갈수량 및 '94 가뭄평가.", '95 대한토목학회 학술발표회논문집, pp. 228 ~ 231, 1995.

Cunnane, C., "Statistical distributions for flood frequency analysis.", WMO Operational Hydrology Report, No. 33, Geneva, Switzerland, 1989.

Frick, D., Bode, D., and Salas, J. D., "Effect of drought on urban water supplies. I : Drought Analysis.", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 6, pp. 733~753, 1990.

Greenwood, J.A., Landwehr, J.M., Matalas, N.C., and Wallis, J.R., Probability Weighted Moments : Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressible in Inverse Form, Water Resources Research, 15(5) : 1049~1054, 1979.

Guerrero, P., and Yevjevich, V., "Analysis of drought characteristics by the theory of runs.", Hydrology Paper, No. 80, 1975.

Hosking, J.R.M., The Theory of Probability Weighted Moments, IBM T.J. Watson Research Center, 1986.

Hosking, J. R., "L-moments Analysis and estimation of distribution using linear combinations of order statistics.", Journal of Royal Statistical Society, Vol. 52, No. 1, pp. 105~124, 1990.

Matalas, "Probability distribution of low flows", USGS Professional Paper, No. 434-A, 1963.

Sen, Z., "Regional drought and flood frequency analysis : Theoretical consideration.", Journal of Hydrology, Vol. 46, No. 3/4, pp. 265~279, 1980.

Yevjevich, "An objective approach to definition and investigation of continental hydrologic droughts.", Hydrology Paper, No. 23, 1967.