

수리·수문기술을 적용한 도로 배수시설 설계 기법

Road Drainage Facility Design Methods apply on the Hydraulic and Hydrologic Analysis

이 만 석*

Lee, Man Seok

Abstract

Due to the calculation difficulty on the hydraulic and hydrologic analysis for road drainage facilities design, these analysis techniques are not applicable. This study's result are development of minutely rainfall-intensity equation suitable for road drainage area, verification of rainfall-runoff model joining kinematic wave theory for road drainage area, computational model based GUI for road surface drainage facilities spacing and culvert's size decision and various road drainage channel design. Applicable test on the developed model is proceed, result that in case of road surface drainage facilities spacing is narrower 6~65% than present spacing calculation method, in other case of road cross drainage facilities size is bigger 6~140% than present size decision method.

Keywords : kinematic wave model, minutely rainfall intensity equation, varied flow analysis, road surface drainage facility, road cross drainage facility

요 지

도로 배수시설 설계시 수리 및 수문요소 분석이 적절하게 적용되어야 하지만, 현재는 계산의 복잡함 때문에 충분히 고려되지 못하고 있다. 본 연구에서는 강우지속시간이 10분 이하인 도로배수유역에 적합한 분단위 강우강도식의 개발, 국내 도로배수유역의 지형 특성을 사실적으로 반영할 수 있는 운동파 모형 이론을 접목한 표면 박류 강우-유출 모형의 개발 및 검증, 노면 배수시설 설계, 암거 단면규격 산정 및 각종 수로 설계 등의 모형 개발, 개발된 모형들을 도로 설계자가 쉽게 익혀서 신속 정확하게 활용할 수 있도록 사용자 편의를 고려한 도로배수설계 전산프로그램을 개발하였다. 개발된 모형을 이용하여 적용성 검토를 수행하였으며, 현행 설계 방법과 개발된 설계 방법을 비교한 결과 노면 배수시설의 설치 간격은 6~65% 짧게 계산되었으며, 횡단 배수시설의 단면 크기는 6~140% 크게 계산되었다.

핵심용어 : 운동파 모형, 분단위 강우강도식, 부등류 해석, 노면 배수시설, 횡단 배수시설

1. 서 론

현재 도로 실무자들은 도로의 배수시설 설계 시 실제 도로 배수유역에 적합하지 않은 수문학 개념에서의 유역 구분, 강우량 산정 및 강우강도 산정 방법, 설계홍수량 산

정 방법과 같은 일련의 흐름을 통하여 설계를 수행하여 왔다. 따라서 이와 같은 설계 방법은 실제 도로 배수유역과 상이한 유역 산정, 강우량 및 강우강도 산정의 오류 등과 같은 상당히 많은 잠재적인 문제점들을 내포하고 있다. 또한 국내의 도로 배수설계 지침은 그 내용 중 상당

* 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: msasa@korea.com)

Graduate Student, Dept. of Civil and Env. Eng., Dankook Univ., Yongin 448-701, Korea

부분이 명확한 수리·수문학적 이해가 부족한 상태에서 외국 지침서의 일부를 그대로 기술함으로써 단편적인 서술에 그치는 경우가 많다. 따라서 발전된 수리·수문 해석 기술을 반영하는 동시에 설계 실무에 실질적인 도움이 될 수 있도록 도로배수 설계지침을 개선하고, 설계 지침에 의한 설계가 가능하도록 전산프로그램 등의 설계도구를 개발할 필요가 있다. 본 연구의 최종 목적은 향상된 수리·수문해석 방법을 이용하여 새로운 도로 배수설계 프로그램의 개발과 이를 통한 현행 도로 배수설계 지침의 개선에 있으며, 이를 위하여 Fig. 1과 같은 계획을 수립하여 연구를 수행하였다.

2. 개선 방향 설정

현재 도로 배수설계에 사용되고 있는 설계 기술은 크게 2가지 측면에서 문제점을 가지고 있다. 첫째는 도로 배수 시설 설계의 주요 인자인 유출량 계산에 있어, 하천 유역과는 규모면에서 상이한 소규모 도로 배수유역에 적합하게 개발된 계산 방법이 없다는 것이며, 둘째는 도로 노면의 우수 거동에 대한 해석 기술의 부재를 꼽을 수 있는데, 하천 유역과 거동 양상이 다른 도로 노면에 적합한 이론적 근거 없이 설계를 수행하고 있다는 것이다(이만석 등, 2007). 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 Table 1과 같은 개선 방향을 설정하였다.

3. 분단위 강우강도식 개발

도로 배수유역의 배수구조물 설계시 설계홍수량 산정의 주요 인자인 강우지속시간은 대부분 10분 이내에 존재하고 있으나, 현재는 강우지속시간 10분 이상인 경우에만 적용 가능한 시단위 강우강도식을 사용하고 있으며(건설교통부, 2000), 이러한 10분 이하의 강우지속시간을 입력 변수로 하여 설계홍수량을 산정할 수 있는 기법이 부재하기 때문에 본 연구에서는 국내에 관측된 1분 단위 강우자료가 시·공간적으로 부족한 현실에서, 가능한 높은 정확도를 가진 분단위 I-D-F 관계식의 개발을 목표로 하였으며, 이용할 수 있는 방안으로는 i) 가용한 1분 단위 강우자료를 직접 해석하여 강우강도식을 개발하는 방법, ii) 시단위 강우자료를 분단위 자료로 변환하여 이용하는 방법(random cascade 모형, fractal 모형 등), iii) 시단위 자료와 분단위 자료 사이의 관계를 통계적으로 정량화하여 주어진 시단위 자료에 대한 분단위 자료의 특성을 추정하여 이용하는 방법(모포마 분포) 등이 있으며(유철상 등, 2007), 본 연구에서는 상기한 방법 중 시단위 강우자료를 분단위 자료로 변환하여 이용하는 Random Cascade 모형 방법을 이용하였다. 분단위 강우강도식 개발 과정 및 절차는 아래와 같은데, 우선 대상유역 내 1분 단위 강우자료와 시단위 강우자료를 수집하여 대상 지점을 설정하고, 설정된 지점에 대해 Random Cascade 모형의 매개변수를 산정하였으며, 매개변수의 공간적 분포 특성을 파악하였

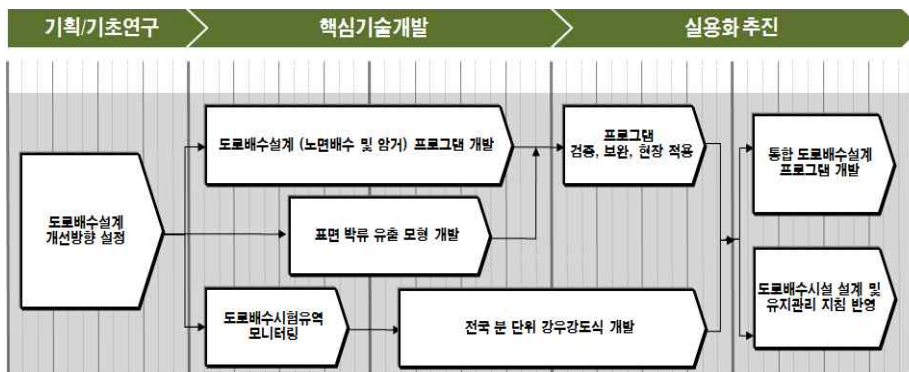


Fig. 1. Road Drainage Facility Design Research RoadMap

Table 1. Road Drainage Facility Design Improvement Direction

개선 방향	개선 내용
운동과 모형	지역 의존성이 약한 물리적 모형으로 배수유역에 적절한 설계홍수량 산정
분단위 강우강도식	강우지속시간이 10분 이하인 배수유역에 적합한 강우강도식 개발
부등류 흐름 해석	강우패턴 변화와 집중호우 증가에 따른 노면배수시설의 정확한 배수능력 산정

다. 매개변수의 공간적 분포 특성을 고려하여 Random Cascade 모형을 1분 단위 강우자료가 없는 지점의 시단위 강우자료에 적용하여 1분 단위 강우자료를 재생산하고, 이를 직접 빈도해석하여 분단위 강우강도식을 유도한 뒤, 결과로 도출된 분단위 강우강도식을 이용하여 전국에 대한 공간적 확장을 수행하였다.

분단위 강우강도식의 형태는 수자원 계획 및 설계에서 일반적으로 사용하는 강우강도 공식인 Talbot, Sherman,

Japanese, Semi-Log 형태를 활용하였으며(건설교통부, 2000), 서울지점에 대한 시단위 강우강도식과 분단위 강우강도식의 매개변수를 비교한 내용은 Table 2와 같다.

분단위 강우강도식 매개변수 산정을 위하여 전국 강우 관측소(Table 3) 지점의 강우지속시간 10분 이하의 I-D-F 관계식을 유도하였고, 대표적으로 서울 지점의 분단위 I-D-F 관계 곡선식은 Fig. 2와 같다(국토해양부, 2010).

Table 2. Rainfall-Intensity Equation for Seoul Observatory

Type	Minutely Rainfall-Intensity Equation	Hourly Rainfall-Intensity Equation
Talbot	$I = \frac{601.141}{t+0.067}$	$I = \frac{153.0746}{t+144.5254}$
Sherman	$I = \frac{563.447}{t^{0.957}}$	$I = \frac{153.0746}{t^{144.5254}}$
Japanese	$I = \frac{228.123}{\sqrt{t}-0.596}$	$I = \frac{153.0746}{\sqrt{t+144.5254}}$
Semi-Log	$I = 540.755 + (-685.149) \times \text{Log}(t)$	$I = 153.0746 + 144.5254 \times \text{Log}(t)$

Table 3. Minutely Rainfall-Intensity Observatory in South Korea

No.	관측소명	관할기관	코드	TM좌표 (X)	TM좌표 (Y)	해발표고 (m)	No.	관측소명	관할기관	코드	TM좌표 (X)	TM좌표 (Y)	해발표고 (m)
1	속초	기상청	90	336894	528699	18.0	95	장선	국토해양부	31700	225066	287883	80.0
2	대관령	기상청	100	355067	466400	843.0	96	홍산	국토해양부	32380	178562	301905	30.0
3	춘천1	기상청	101	264626	489145	77.0	97	공주	국토해양부	33510	211367	329929	17.5
4	강릉	기상청	105	366592	473793	26.0	98	정안	국토해양부	33580	210666	345260	80.0
5	서울	기상청	108	196904	452122	86.0	99	반포	국토해양부	33750	221737	322526	80.0
6	인천	기상청	112	166708	441784	68.9	100	병천	국토해양부	34350	226768	362724	60.0
7	원주	기상청	114	283826	426582	240.0	101	가덕	국토해양부	34550	251608	342051	130.0
8	수원	기상청	119	198616	418918	36.9	102	증평	국토해양부	34650	252436	364822	70.0
9	서산	기상청	129	154751	364035	19.7	103	진천	국토해양부	34850	240595	374308	80.0
10	청주	기상청	131	239342	348768	57.0	104	부강	국토해양부	35050	233169	336523	40.0
11	대전	기상청	133	233325	319080	68.0	105	안내	국토해양부	36450	259165	321803	80.0
12	추풍령	기상청	135	289334	302609	245.9	106	청산	국토해양부	36650	271217	316441	120.0
13	강화	기상청	201	151134	467381	46.4	107	모서	국토해양부	37550	286123	316178	248.0
14	양평	기상청	202	243656	443048	49.0	108	양감	국토해양부	63900	195051	397657	20.0
15	이천	기상청	203	242882	418130	75.0	109	성환	국토해양부	68500	213126	383140	20.0
16	인제	기상청	211	302354	506996	199.0	110	안성	국토해양부	69000	224746	389637	40.0
17	홍천	기상청	212	277590	464941	141.0	111	원삼	국토해양부	69500	227457	407436	140.0
18	보은	기상청	226	265711	332110	170.0	112	예산	국토해양부	73500	181830	354212	50.0
19	보령	기상청	235	160187	314136	33.0	113	홍성	국토해양부	79700	169252	344350	30.0
20	부여	기상청	236	192821	307963	16.0	114	반월1	국토해양부	133000	187932	423382	22.0

21	금산	기상청	238	243301	289569	171.0	115	반월2	국토해양부	136000	189359	427678	58.0
22	내리	국토해양부	10680	220044	476003	170.0	116	포항	기상청	138	129°24'	36°02'	2.5
23	김포	국토해양부	12100	174885	457050	20.0	117	군산	기상청	140	126°42'	35°59'	26.3
24	구로	국토해양부	12250	189932	443705	35.0	118	대구	기상청	143	128°37'	35°53'	57.8
25	안양	국토해양부	12350	191376	433628	27.0	119	전주	기상청	146	127°09'	35°49'	51.2
26	남면	국토해양부	12450	194805	427287	40.0	120	울산	기상청	152	129°19'	35°33'	31.5
27	의정부	국토해양부	12650	204092	471265	42.0	121	광주	기상청	156	126°53'	35°10'	70.3
28	낙생	국토해양부	12900	204401	432345	40.0	122	부산	기상청	159	129°02'	35°06'	69.2
29	퇴계원	국토해양부	13300	213334	460845	31.0	123	통영(충무)	기상청	162	128°26'	34°51'	25.0
30	내촌(경)	국토해양부	13350	218531	476539	110.0	124	목포	기상청	165	126°23'	34°47'	53.4
31	금곡	국토해양부	13400	218513	459193	60.0	125	여수	기상청	168	127°44'	34°44'	67
32	팔당댐	국토해양부	13650	224889	447297	20.0	126	진주	기상청	192	128°06'	35°12'	21.5
33	남한산성	국토해양부	13750	216303	441886	20.0	127	부안	기상청	243	126°42'	35°43'	7.0
34	경안	국토해양부	13800	223227	433847	60.0	128	임실	기상청	244	127°17'	35°37'	244.0
35	모현	국토해양부	13830	222052	426013	20.0	129	정읍	기상청	245	126°53'	35°34'	40.5
36	포곡	국토해양부	13870	256853	517444	20.0	130	남원	기상청	247	127°25'	35°25'	115.0
37	용인1	국토해양부	13910	216516	414680	87.0	131	순천	기상청	256	127°29'	34°56'	74.0
38	운학	국토해양부	13950	221755	411303	150.0	132	장흥	기상청	260	126°55'	34°41'	40.0
39	청평	국토해양부	14150	234885	467851	36.0	133	해남	기상청	261	126°34'	34°33'	22.1
40	하면	국토해양부	14200	231064	479543	117.0	134	고흥	기상청	262	127°18'	34°36'	32.4
41	서면	국토해양부	14400	259082	465901	130.0	135	밀양	기상청	288	128°45'	35°29'	12.5
42	홍천	국토해양부	14500	280192	467485	204.0	136	산청	기상청	289	127°53'	35°25'	141.8
43	서석	국토해양부	14650	304524	468577	320.0	137	남해	기상청	295	127°52'	34°47'	49.8
44	두촌2	국토해양부	14680	289570	485586	206.0	138	상북	국토해양부	20350	127°04'	35°24'	180.0
45	가평(경)	국토해양부	14800	245538	481111	60.0	139	산내	국토해양부	20600	128°53'	35°35'	200.0
46	춘천	국토해양부	15010	258924	480481	73.0	140	영산	국토해양부	20900	128°32'	35°27'	45.0
47	추양	수자원공사	15100	277383	502808	210.0	141	지리산	국토해양부	21630	127°48'	35°21'	340.0
48	부평	국토해양부	15150	294757	496839	250.0	142	서상	국토해양부	22400	127°41'	35°41'	450.0
49	인제	수자원공사	15280	300421	504375	220.0	143	창녕	국토해양부	22650	128°27'	35°31'	40.0
50	현리	수자원공사	15350	317375	494519	320.0	144	신반	국토해양부	22700	128°19'	35°28'	100.0
51	창촌	수자원공사	15380	321504	474909	620.0	145	고령	국토해양부	23650	128°16'	35°43'	60.0
52	용대1	국토해양부	15460	316333	522206	380.0	146	야로	국토해양부	23700	128°10'	35°49'	100.0
53	용대2	수자원공사	15470	316418	522251	340.0	147	신천	국토해양부	24130	128°37'	35°47'	110.0
54	서화	수자원공사	15490	306259	526594	330.0	148	자인	국토해양부	24270	128°49'	35°49'	70.0
55	사내	국토해양부	15550	245511	507511	260.0	149	신령	국토해양부	24350	128°47'	36°02'	120.0
56	화천	국토해양부	15600	261949	511619	154.0	150	죽장	국토해양부	24460	129°06'	36°09'	214.0
57	상서	국토해양부	15650	288691	372225	420.0	151	왜관	국토해양부	24700	128°23'	35°59'	20.0
58	화천댐	국토해양부	15700	268548	512911	180.0	152	장천	국토해양부	24900	128°30'	36°07'	40.0
59	방산	국토해양부	15800	282516	523439	350.0	153	김천	국토해양부	25200	128°06'	36°06'	160.0
60	양평	국토해양부	16080	243269	442790	31.0	154	지례	국토해양부	25250	128°01'	36°58'	58.0
61	청운	국토해양부	16150	262747	450638	110.0	155	부항1	국토해양부	25300	127°57'	35°59'	200.0
62	이천	국토해양부	16350	239228	419552	63.0	156	안계	국토해양부	25550	128°26'	36°23'	50.0
63	여주	국토해양부	16450	257383	421676	45.0	157	군위	국토해양부	25650	128°34'	36°14'	100.0

64	생극	국토해양부	16530	253925	392685	100.0	158	외서	국토해양부	26180	128°04'	36°29'	140.0
65	설성	국토해양부	16550	246806	405027	100.0	159	상주	국토해양부	26350	128°09'	36°25'	60.0
66	간현	국토해양부	16660	274325	429224	70.0	160	농암1	국토해양부	26760	128°00'	36°35'	60.0
67	횡성	국토해양부	16830	287050	443792	130.0	161	동로1	국토해양부	27080	128°19'	36°46'	340.0
68	청일	국토해양부	16880	301521	454095	85.0	162	지보	국토해양부	27650	128°22'	36°31'	50.0
69	법천	국토해양부	16910	266551	411992	80.0	163	일직1	국토해양부	27900	128°39'	36°28'	190.0
70	상모	국토해양부	17110	288691	372225	180.0	164	안동	국토해양부	27950	128°48'	36°31'	92.0
71	연풍	국토해양부	17150	289005	362797	223.0	165	길안	국토해양부	28200	128°55'	36°26'	120.0
72	속리산	국토해양부	17330	272122	334680	330.0	166	현서	국토해양부	28250	128°55'	36°15'	555.0
73	백운	수자원공사	17650	290071	404301	200.0	167	석포	국토해양부	29850	129°04'	37°02'	600.0
74	청풍	수자원공사	17700	310631	390701	180.0	168	함열	국토해양부	30700	126°58'	36°04'	300.0
75	단양	수자원공사	17750	320238	385807	265.0	169	장선	국토해양부	31700	127°16'	36°05'	80.0
76	영춘1	국토해양부	17890	332195	398479	170.0	170	모서	국토해양부	37550	127°57'	36°20'	220.0
77	영춘2	수자원공사	17900	334229	400762	170.0	171	무주	국토해양부	38730	127°39'	36°00'	230.0
78	상동	수자원공사	17950	359630	401640	540.0	172	적상	국토해양부	38800	127°39'	35°55'	280.0
79	영월1	수자원공사	18050	329968	410372	200.0	173	대불	국토해양부	39290	127°22'	35°57'	380.0
80	수주	수자원공사	18250	312213	421435	270.0	174	진안	국토해양부	39690	127°25'	35°46'	308.0
81	평창	수자원공사	18450	321906	435895	295.0	175	안성장	국토해양부	39880	127°39'	35°51'	430.0
82	고길	국토해양부	18460	315384	439782	500.0	176	장수	국토해양부	39990	127°31'	35°38'	430.0
83	방림	국토해양부	18570	323334	436972	480.0	177	삼서	국토해양부	45400	126°38'	35°13'	20.0
84	대화	국토해양부	18650	328847	445324	400.0	178	북이	국토해양부	45900	126°46'	35°26'	240.0
85	신리	국토해양부	18680	328911	449313	500.0	179	하동	국토해양부	50590	127°44'	35°04'	20.0
86	유천	국토해양부	18750	321659	447933	490.0	180	북내	국토해양부	53100	127°08'	34°53'	210.0
87	등매	국토해양부	18760	323033	450864	500.0	181	보성	국토해양부	53500	127°05'	34°45'	50.0
88	봉평	수자원공사	18810	321865	458353	300.0	182	금구	국토해양부	81800	127°00'	35°46'	80.0
89	홍정	국토해양부	18870	316843	461692	640.0	183	고부	국토해양부	83000	126°46'	35°37'	40.0
90	계방	국토해양부	18950	328998	464559	700.0	184	고산	국토해양부	98000	127°12'	35°58'	40.0
91	정선1	국토해양부	19300	347015	432230	300.0	185	기계1	국토해양부	103000	129°12'	36°04'	10.0
92	정선2	수자원공사	19310	350677	432943	300.0	186	경주1	국토해양부	105900	129°18'	36°46'	35.0
93	임계	수자원공사	19800	360704	445437	498.0	187	호계	국토해양부	113000	129°21'	35°37'	20.0
94	황지	국토해양부	29960	376367	408780	660.0							

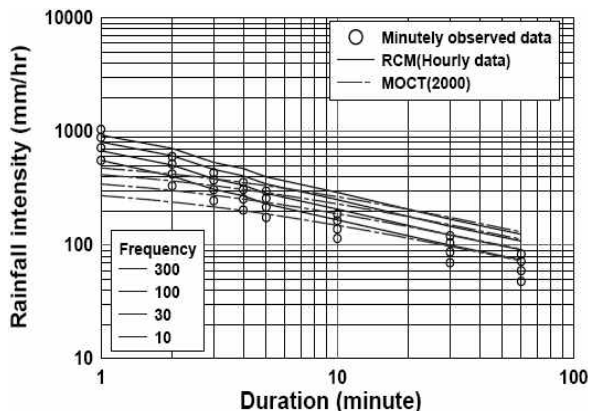


Fig. 2. Minutely I-D-F Curve at Seoul Observatory

4. 도로 배수시설 설계 모형 개발

4.1 표면 박류 강우-유출 모형

본 연구에서는 지표요소 1개와 주수로요소 1개를 포함하는 유역의 유출을 모의하는 모형과 지표요소 2개와 주수로요소 1개를 포함하는 유역의 유출을 모의하는 모형을 각각 수립하였다(Fig. 3).

4.1.1 지배 방정식

도로의 비탈사면과 도로 인접부 유역에서 발생하는 표면 박류 흐름(surface sheet-flow) 등에 대한 강우-유출 응답을 수리학적으로 해석하기 위하여 운동과 모형(Eq.

(1)을 기반으로 Eq. (4)와 같이 표면 박류 강우-유출 모형을 수립하였다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

여기서, x 는 흐름방향으로 거리, t 는 시간, A 는 흐름 단면적, Q 는 상류단에서 유입되는 유량, q 는 수로의 측벽에 분포되어 있는 측벽유입량(lateral inflow)을 나타낸다. 한편 관성, 압력, 중력 및 마찰력을 포함하는 운동량 방정식에 국부, 이송 가속항과 압력항이 제외되어 얻어지는 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$S_o = S_f \quad (2)$$

Eq. (2)에서 중력과 마찰력이 평형을 이루므로 흐름은 등류이고, 등류는 Manning 공식이나 Chezy 공식으로 기술되며, 본 연구에서는 Eq. (3)과 같은 Manning 공식을 사용하였다.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} = \frac{1}{n} \frac{S_f^{1/2}}{P^{2/3}} A^{5/3} \quad (3)$$

여기서, n 은 Manning의 조도계수, R 은 동수반경이고, S_f 는 에너지 경사이다. Eq. (3)에서 유량을 단면적의 함수로

나타내면 Eq. (4)와 같이 표현할 수 있으며, 유량과 단면적의 관계를 나타내는 계수 α 와 m 은 Eq. (5)와 같다.

$$Q = \alpha A^m \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{n} \frac{S_f^{1/2}}{P^{2/3}}, \quad m = \frac{5}{3} \quad (5)$$

4.1.2 표면 박류 강우-유출 모형의 검증

전술한 Eqs. (4) and (5)와 같이 수립된 표면 박류 강우-유출 모형을 검증하기 위해, 지표요소와 수로요소의 조합에 따라 Fig. 3과 같은 두 가지 형태의 가상 유역을 만들어, 각 유역에서 지표요소의 경사, 조도계수, 폭, 수로요소의 경사, 수로단면형상, 강우강도와 지속시간이 주어진 경우 수로유량(Q)을 모의하였다(Table 4).

Fig. 3에서 수립된 유역에 대한 표면박류 강우-유출 모형의 검증을 수행하였으며, Fig. 4와 같이 대표적 강우-유출 모형인 HEC-1 모형(Hydraulic Engineering Center, 1990)의 운동과 이론에 의한 강우-유출 모의 기능을 사용하여 도출된 유출수문곡선 결과와 비교하였으며, 적용 결과가 거의 유사함을 알 수 있다.

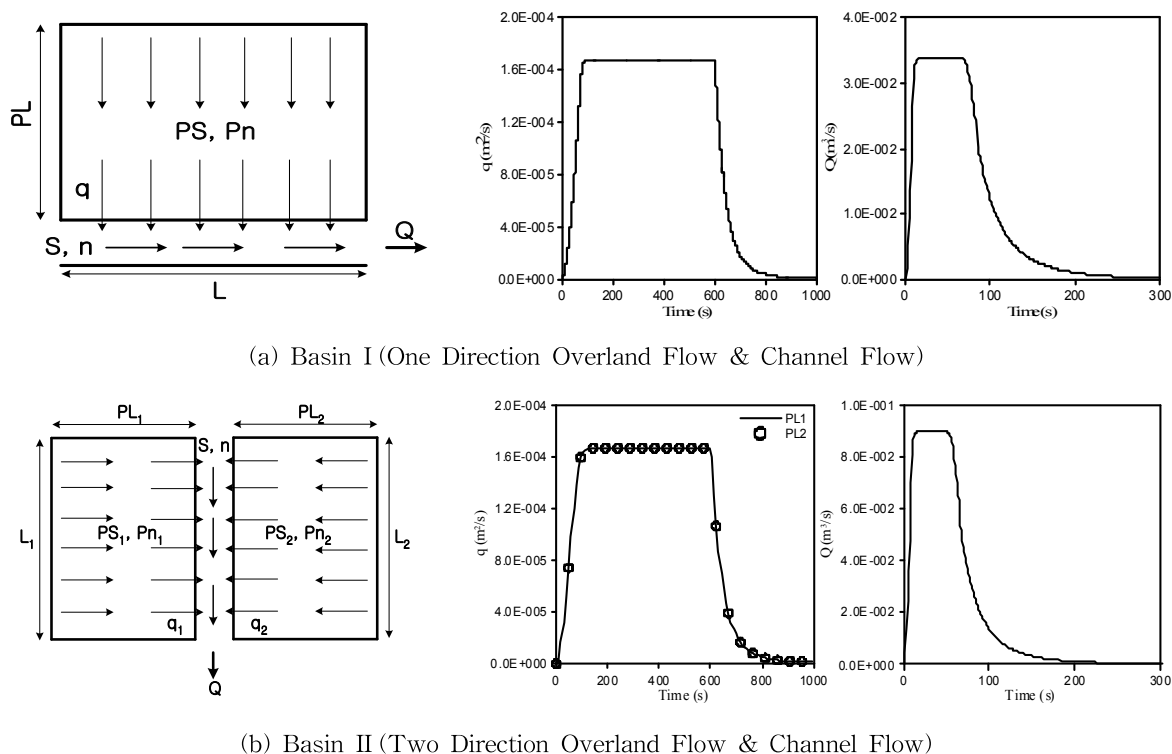


Fig. 3. Verification of the Sheet Flow Rainfall-Runoff Model

Table 4. Characteristics of Overland & Channel Flow

구분	유역 I		유역 I		
	지표	주수로	지표1	지표2	주수로
경사	0.02	0.003	0.02	0.02	0.003
조도계수	0.013	0.025	0.013	0.013	0.025
길이(m)	10	2000	10	10	2000
바닥폭(m)	-	2	-	-	2
수로단면 측면경사	-	2	-	-	2

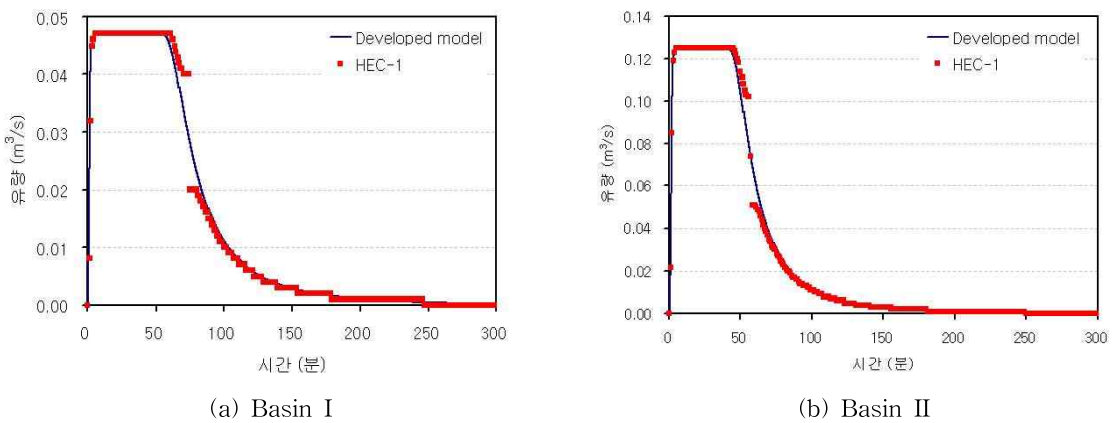


Fig. 4. Hydrograph Comparison for Runoff Model Verification

Table 5. Sheet Flow Rainfall-Runoff Model Application Results

대상유역	강우강도 (mm/hr)	침투유량 (m ³ /s)	지속시간 (min)	도달시간 (min)
I	41.84	0.2321	64.39	64.38
II	47.37	0.5256	51.22	51.22

4.1.3 설계홍수량 산정

유출 모의가 검증된 표면 박류 강우-유출 모형을 기반으로 최대 홍수량이 발생하는 도달시간을 산정하여 설계 홍수량을 결정할 수 있도록 임계지속시간의 개념을 반영하여 모형을 수정하였으며, 서울 지점의 분단위 강우강도 식(Japanese, 재현기간 10년)을 입력 자료로 이용하여 설계홍수량 검증에 사용된 대상유역(Fig. 4)에 대하여 설계한 결과를 Fig. 5에 제시하였으며, 이 때 임계지속시간이란 강우가 유역 내 최원점에서 배수로에 도달하는데 소요되는 유입시간과 배수로를 통하여 유역출구에 이르기까지의 유하시간의 합으로 취하게 되는 설계 강우강도 결정에 있어 중요한 인자이며, 강우지속시간이 도달시간과 유사해질 때의 지속시간으로 결정되므로, 유출 수문곡선은

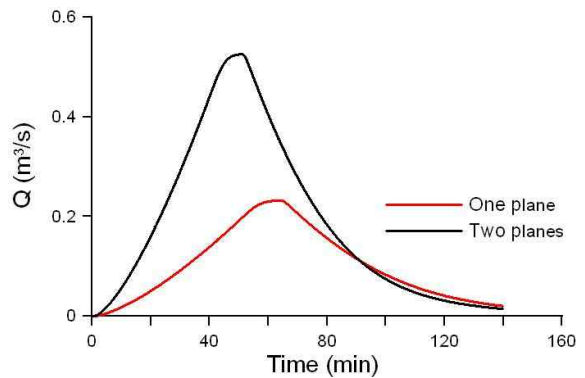


Fig. 5. Design Flood Calculation Results

침투유량이 발생한 후에 바로 감소하는 모형을 가지게 되었고, Table 5와 같이 지속시간과 도달시간이 동일하게

결정되었음을 알 수 있다.

4.2 횡단 배수시설 설계 모형

4.2.1 암거 흐름 해석 모형

암거 흐름해석은 Culvert Master 소프트웨어(Bentley)를 벤치마킹하여 개발하였으며(Bentley Systems, 2007), 암거 흐름해석을 위한 통제단면을 유입부 통제(inlet control)와 유출부 통제(outlet control)의 두 가지로 가정하여 흐름의 통제 단면별 유입부 상류수위를 계산하고, 더 큰 상류수위를 갖는 통제 방식이 암거의 흐름을 통제하는 것으로 한다. 유입부 통제를 가정하는 경우는 암거 내 마찰력과 미소 손실을 무시하고 유입부 상류 수위를 산정하며, 유출부 통제를 가정하는 경우는 유입 및 유출손실 뿐 아니라 마찰손실도 고려하여 전통적인 개수로 흐름 해석 방법으로 유입부 상류수위를 산정한다.

유입부 통제 흐름 해석은 유입부가 잠겨있는지 여부에 따라 서로 다른 계산식을 사용하여야 하며, 유입부 잠수 여부는 $Q/AD^{0.5}$ 의 값으로 판별하며, 유입부가 잠수되어 있지 않은 경우 단면 형상과 재질에 따라 Eq. (6) 또는 Eq. (7)을 이용하여 상류수심을 구하며, 유입부가 잠수되어 있는 경우 상류수심은 Eq. (8)을 이용하여 구한다.

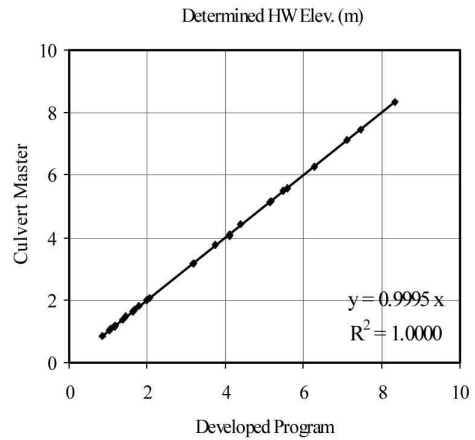
$$\frac{HW_i}{D} = \frac{H_c}{D} + K \left(\frac{Q}{AD^{0.5}} \right)^M - 0.5S \quad (6)$$

$$\frac{HW_i}{D} = K \left(\frac{Q}{AD^{0.5}} \right)^M \quad (7)$$

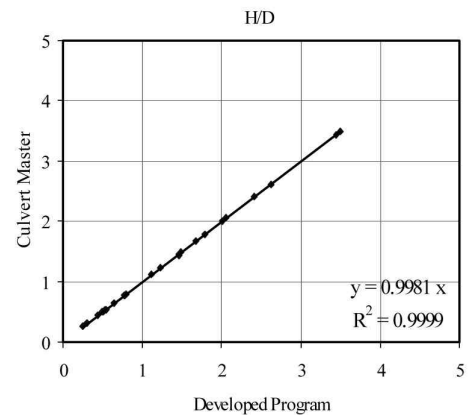
$$\frac{HW_i}{D} = c \left(\frac{Q}{AD^{0.5}} \right)^2 + Y - 0.5S \quad (8)$$

여기서, HW_i 는 유입부 상류수심, H_c 는 한계수두, Q 는 유량, A 는 만관일 때의 단면적, D 는 암거의 높이 또는 직경, S 는 암거가 설치된 경사(ft/ft), K , M , c 와 Y 는 단면 형상과 재료에 따른 상수이다. 유출부 통제 흐름으로 가정할 경우, Eq. (9)의 에너지 방정식을 이용하여 유입부 상류수심을 산정하는데 개수로의 정상 부등류로서 흐름특성이 점진적으로 변하는 점변류(gradually varied flow)에 대한 기본식이다. 부등류 해석에서 각 지점의 수심은 Newton-Raphson 방법에 의하여 구할 수 있다(Naqvi, 2003).

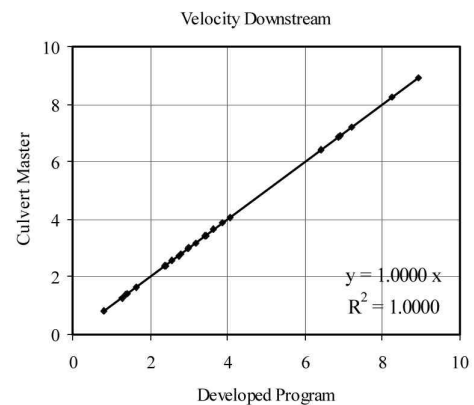
$$HW_o + \frac{V_u^2}{2g} + \Delta Z = TW + \frac{V_d^2}{2g} + H_L \quad (9)$$



(a) Inlet Water Level (HWE, m)



(b) Inlet Water Depth ratio to Culverts Diameter (H/D)



(c) Outlet Flow Velocity (V_{out} , m/s)

Fig. 6. Verification of Culverts Flow Model

여기서, HW_o 는 상류수심, TW 는 하류수심, V_u 는 유입유속, V_d 는 유출유속, H_L 은 마찰손실수두, 유입손실수두, 유출손실수두를 포함한 총 손실수두, g 는 중력가속도이다.

개발된 암거 흐름해석 모형의 검증을 위하여 암거의 형태별(BOX, PIPE) 흐름을 모의하고 Culvert Master의 결과(상류수위, H/D, 유출유속)와 비교하였다(Fig. 6).

4.2.2 암거 단면규격 산정 모형

암거 흐름 해석 모형을 기반으로 하여 단면규격 산정 모형을 개발하였고 암거의 최적 단면규격은 다음의 과정을 거쳐 설계한다.

- 1) 주어진 조건의 모든 수로암거와 횡단배수관 단면규격에 대한 흐름해석을 수행한다.
- 2) 흐름해석 결과 암거 내 흐름 통제단면의 위치(유입부 또는 유출부)를 판단한다.
- 3) 암거 내 흐름 통제단면 위치에 따라 적절한 공식을 사용하여 단면규격별 상류수위(HWE), 암거 직경에 대한 상류 수심의 비율(H/D), 유출유속(V_{out})을 결정한다.
- 4) 상기 ①에서 ③까지의 해석 결과로 구해지는 HWE와 H/D가 입력으로 주어지는 허용치를 초과하지 않도록 하는 최소 단면규격을 설계 단면규격으로 결정한다.

암거 단면규격 산정 모형에서는 도로암거표준도(건설교통부, 2003)의 26개 암거와 국도건설공사 설계실무 요령(건설교통부, 2006)의 18개 암거의 단면규격이 고려되었다.

4.3 노면 배수시설 설계 모형

4.3.1 선형 배수로에 대한 부등류 해석 모형

노면배수시설은 도로 부지 내(노면 및 비탈면)에 강우에 의해 발생한 우수를 원활히 배제하기 위해 설치하며, Fig. 7은 전형적인 노면배수 체계를 나타내고 있다. 횡단 경사를 두어 설치된 노면상의 물은 수로(다이크 측구)로 유도되고, 이 때 유량은 수로의 통수능을 초과하지 않도록 하는 간격으로 설치된 유출구(outlet)를 통하여 배수된다.

이 때 유출구 사이의 간격(outlet spacing)이 노면배수의

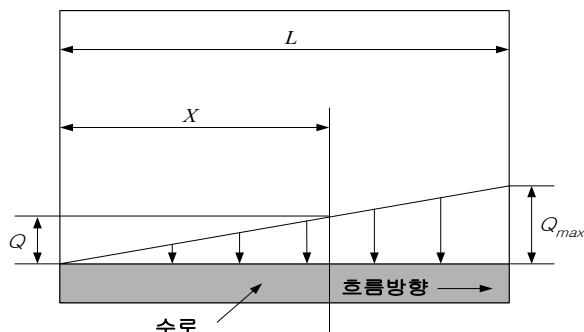


Fig. 7. Flowrate into the Linear Drainage System (Modified from Naqvi, 2003)

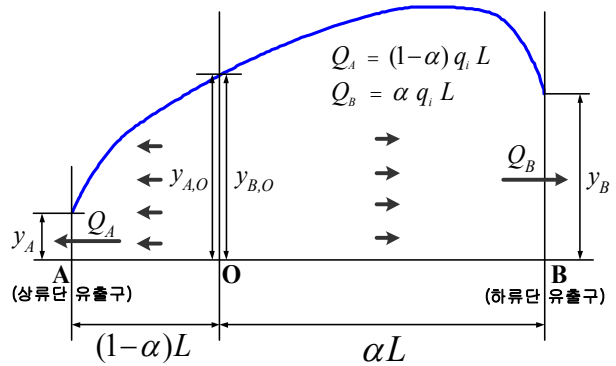


Fig. 8. General Flow Pattern of the Linear Drainage System (Modified from Naqvi, 2003)

설계변수가 되며, 수로는 상류단과 하류단에 각각 한 개씩의 유출구를 갖는 선형 배수로(linear drainage channel)로서, 연속적으로 유입되는 횡유입량에 의하여 유량이 선형적으로 증가한다.

Fig. 8은 수로의 양단에 유출구를 갖는 선형 배수로 내의 일반적인 흐름 형태를 나타낸다. 여기에서 O지점은 분수계(water dividend)를 의미하며, 이를 기준으로 상류측에서 유입된 유량(Q_A)은 상류단(A지점)을 통하여, 하류측에서 유입된 유량(Q_B)은 상류단(B지점)을 통하여 유출된다.

선형 배수로 흐름에 대한 지배 방정식으로는 Eq. (10)과 같은 유한 차분형태의 대수방정식을 이용하였다(Naqvi, 2003).

$$\frac{1}{g} (Q_2 V_2 - Q_1 V_1) - \frac{1}{2} S_0 (A_1 + A_2) dx + \frac{1}{2} (A_1 S_{f1} + A_2 S_{f2}) dx + \frac{1}{2} (A_1 + A_2) (y_2 - y_1) = 0 \quad (10)$$

여기서, dx 는 지점 1과 2사이의 거리이며, V 는 단면평균 유속이다. 아래첨자가 1인 변수들은 기지의 값을 의미하며, 아래첨자 2인 변수들은 모두 수심의 함수로서 표현이 가능하다. 따라서 Eq. (10)은 y_2 에 대한 비선형 방정식이 되며, Newton-Rapson 방법에 의하여 해를 구할 수 있다. 수로 내 각 지점에서의 수심은 지배단면의 수심을 기지의 값으로 하여 Eq. (10)을 축차적으로 풀어서 계산할 수 있다.

4.3.2 노면 배수시설 설계 전산 모형

개발된 노면배수시설의 설계 모형은 선형 배수로의 흐름을 등류로 해석한 경우와 부등류로 해석한 경우, 설계 도달시간을 변수로 사용하는 경우와 그렇지 않은 경우에 따라 Table 6과 같이 4가지 유형으로 구분할 수 있다(구혜진 등, 2008).

국내 노면배수시설의 설계실무에서 이용하는 설계방법은 Model I의 방법과 동일하므로 노면배수시설에 Model I을 적용하여 설계한 결과는 현행 수리계산서의 결과와 동일하게 된다. 도달시간을 설계변수로 고려하는 Model II와 Model VI를 적용하기 위해서는 분단위 강우강도식이 요구되며, 각 설계 모형을 적용하는 과정에서 일관성을 유지하기 위하여 Model I과 Model III를 적용하는 경우에도 서울 지점 강우강도식의 지속시간 10분의 값인 121 mm/hr를 이용하였다.

4.4 각종 수로의 설계 모형

본 연구에서 설계 대상으로 선정된 각종 수로 시설물은 V형 측구, 산마루 측구, 소단측구 시설이다. V형 측구와 산마루 측구의 설계는 배수유역으로부터 유입되는 홍수량을 통수할 수 있는 최소 단면규격을 결정하는 것으로서, 수로로 유입되는 유량은 선형적으로 증가하고 배수유역으로부터 유입되는 단위폭당 유량은 일정한 것으로 가정하여 단면규격 산정 프로그램을 개발하였다. 소단측구 시설물의 설계는 유출구 또는 도수로의 간격을 결정하는 것으로 앞에서 언급한 노면배수설계 모형을 기반으로 소단측구의 단면형상을 반영하여 도수로의 설치 간격을 결정하도록 만들어진 모형이다.

5. 모형의 적용성 검토

5.1 적용성 검토 대상

개발된 도로 배수설계 프로그램을 설계 실무 현장에 적용하기 위하여 국내 도로현장 중 산지부 도로의 특성을 가진 강원도 지역 국도 4개 현장과 도심지와 산지부가 포함된 경기도 지역 국도 2개 현장을 검토 대상으로 선정하였다(Table 7).

5.2 노면 배수시설 설치 간격

Table 7과 같이 선정된 대상 현장에 대하여 본 연구를 통하여 개발된 도로배수설계 프로그램을 적용하여 노면배수시설의 설치간격을 비교 검토하였으며, Fig. 9 및 Table 8과 같이 현행 설계방법과 개발된 설계 방법을 단순 비교하였을 때 성토부 도수로의 경우는 설치간격이 6~50%, 절토부 L형 측구 집수정의 경우는 설치간격이 15~65% 짧아지는 결과가 도출되었다.

5.3 횡단 배수시설 단면 규격

Table 7과 같이 선정된 대상 현장에 대하여 본 연구를 통하여 개발된 도로배수설계 프로그램을 적용하여 횡단배수시설의 단면규격을 비교 검토하였으며, Table 9와 같이 현행 설계방법과 개발된 설계방법을 단순 비교하였을

Table 6. Classification of Road Surface Drainage Facilities Design Methods

설계 모형	흐름 해석	설계 도달시간
Model I (기존방법)	등류	10분
Model II	등류	변수(variables)
Model III	부등류	10분
Model IV	부등류	변수(variables)

Table 7. Application Test Site

현장	연장(km)	수문관측소	설계빈도	강우강도(mm/hr)
신북~용산	7.6	춘천	노면: 10년 횡단: 25년	노면배수: 119.4 횡단배수: 141.2
성남~장호원	10.9	서울	노면: 5년 횡단: 25년	노면배수: 137.0 횡단배수: 185.0
철원~서면	6.9	철원	노면: 10년 횡단: 50년	노면배수: 100.0 횡단배수: 135.0
신동~가사	5.2	정선	노면: 5년 횡단: 25년	노면배수: 92.0 횡단배수: 118.0
가사~문곡	4.6	정선	노면: 5년 횡단: 25년	노면배수: 92.0 횡단배수: 118.0
장흥~송추	8.4	서울	노면: 5년 횡단: 25년	노면배수: 124.0 횡단배수: 186.0

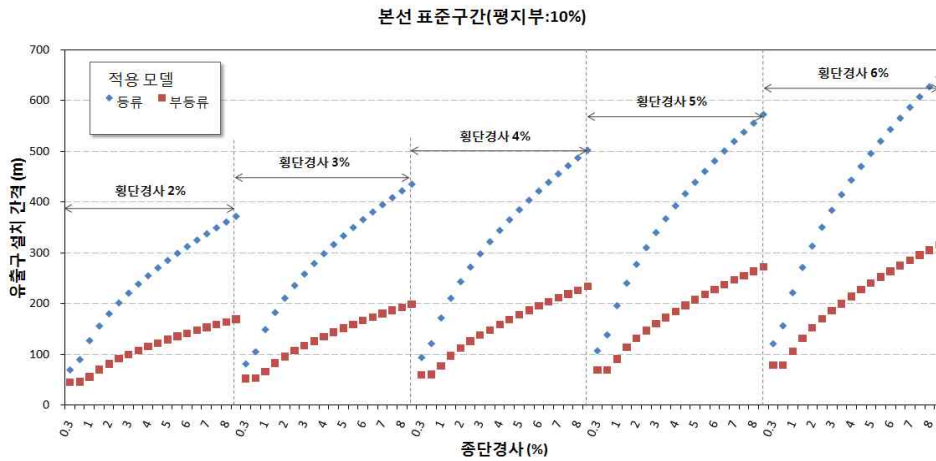


Fig. 9. Install Spacing Comparison of the Link Canal with Road Banking

Table 8. Road Surface Drainage Facility Application Test Results

현 장 별	구 분	성토부 도수로	절토부 집수정
신북 - 용산		설치간격 50% 짧아짐	설치간격 37% 짧아짐
성남 - 장호원		설치간격 12% 넓어짐	설치간격 15% 짧아짐
철원 - 서면		설치간격 18% 짧아짐	설치간격 27% 짧아짐
가사 - 문곡		설치간격 50% 짧아짐	설치간격 56% 짧아짐
방산 - 하중		설치간격 6% 짧아짐	설치간격 65% 짧아짐
장흥 - 송추		설치간격 48% 짧아짐	설치간격 40% 짧아짐

Table 9. Road Culverts Application Test Results

현 장 별	구 분	횡단 배수관	횡단 배수암거
신북 - 용산		73% 단면 상승	50% 단면 상승
성남 - 장호원		64% 단면 상승	50% 단면 상승
철원 - 서면		5% 단면 축소	30% 단면 축소
가사 - 문곡		10% 단면 상승	96% 단면 상승
신동 - 가사		14% 단면 상승	33% 단면 상승
장흥 - 송추		6% 단면 상승	140% 단면 상승

때 구형 암거의 경우 단면 규격이 33~140%, 원형 암거의 경우는 단면규격이 6~73% 커지는 결과가 도출되었다.

6. 연구결과

도로 배수시설 설계에서 수리, 수문학적 이해가 중요한 요소이지만 지금까지 도로 배수유역에 적합하지 않은 배수유역의 구분, 강우강도 산정 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 도로 배수시설 설계에서 수리, 수문학적 문제점

들을 파악하여 배수시설 설계 개선 방향을 제시하였다.

강우지속시간 10분 이하의 I-D-F 관계식을 유도하여 도로 배수시설 설계에 적합한 전국 분단위 강우강도식의 개발, 지역 의존성이 약한 물리적 모형인 운동파 모형과 운동량 방정식을 이용하여 도로 배수유역에 적합한 설계홍수량 산정 모형을 개발하였다. 도로의 횡단 배수시설 설계에 있어서, 암거 흐름해석 및 단면규격 설계를 위해 상용 Culvert Master 소프트웨어를 벤치마킹하여 모형을 개발하였으며, 도로 노면의 배수시설 설치간격 결정을 위

해 도로 노면과 같이 선형 배수로에 대한 등류·부등류 해석 모형 개발 및 배수시설 설치간격 전산 모형을 개발하였다. 개발된 도로 배수시설 설계 프로그램에 대해 국도 6개 현장을 선정하여 적용성 검토를 수행하였으며, 노면 배수시설 설치간격은 현행 설계 방법과 개발된 설계 방법을 비교한 결과 성토부 도수로는 6~50%, 절토부 L형 측구 집수정은 15~65% 짧아지는 결론이 도출되었으며, 횡단 배수시설인 암거의 단면규격은 배수관의 경우 33~140%, 배수암거의 경우 6~73% 커지는 결과가 도출되었다.

향후 추가 연구로는 도로 배수유역 실제 현장의 관측값과 수리모형 실험 결과로 도출되는 수리·수문 특성값에 대한 비교 검토가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 건설기술혁신사업 중 “친환경·지능형 도로설계 기술개발” 연구과제 내용 중 일부입니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

건설교통부 (2000). 한국 확률강우량도.
 건설교통부 (2003). 도로암거표준도.

건설교통부 (2006). 국도건설공사 설계실무요령.
 국토해양부 (2010). 친환경·지능형 도로설계 기술개발 최종보고서.
 이만석, 구혜진, 김홍래, 박태권, 유철상, 전경수 (2007). “기상변화에 대응하기 위한 새로운 개념의 도로 배수설계 방향.” **한국도로학회 학술발표회 논문집**, 한국도로학회, pp. 349-354.
 유철상, 박창열, 김경준, 전경수 (2007). “모포마 분포를 적용한 분단위 강우강도-지속시간-재현기간 관계의 유도.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제8호, pp. 643-654.
 구혜진, 김진수, 박형섭, 전경수 (2008). “부등류 해석을 기반으로 한 노면배수시설 설계.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제12호, pp. 1173-1185.
 Bentley Systems, Inc. (2007). CulvertMaster User’s Guide. Hydraulic Engineering Center. (1990). HEC-1-Flood Hydrograph Package-User’s Manual.
 Naqvi, M. (2003). Design of linear drainage systems. Thomas Telford.

논문번호: 11-112	접수: 2011.10.12
수정일자: 2011.11.14/2012.01.27	심사완료: 2012.01.27