HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용한 농촌 저지대 침수해석

Flood Inundation Analysis in a Low-lying Rural Area using HEC-HMS and HEC-RAS

김학관* · 강문성**† · 송인홍*** · 황순호**** · 박지훈**** · 송정현**** · 김지혜****

Kim, Hak Kwan · Kang, Moon Seong · Song, Inhong · Hwang, Soon Ho · Park, Ji Hoon · Song, Jung Hun · Kim, Ji Hye

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the flood inundation in a low-lying rural area. The study watershed selected for this study includes the Il-Pae and Ahn-Gok watersheds. It is located in the Namyangju, Korea and encompasses 3.64 km². A major flood event that occurred in July 2011 was chosen as the case for the flood inundation analysis. The Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) and River Analysis System (HEC-RAS) were used to simulate flood runoff and water surface elevation at each cross-section, respectively. The watershed topographic, soil, and land use data were processed using the GIS (Geographic Information System) tool for the models. The contribution to the total flood volume was estimated based on the results simulated by HEC-HMS and HEC-RAS. The results showed that the overflow discharge from the Il-Pae stream constituted 80% of the total flood volume. The contributions of rainfall falling directly on the inundation area and overflow discharge from the Ahn-Gok stream were 15 % and 5 %, respectively. The simulation results in different levee scenarios for the Ahn-Gok stream were also compared. The results indicated that the levee could reduce the flood volume a little bit.

Keywords: Flood inundation; low-lying; rural area; HEC-HMS; HEC-RAS

1. 서 론

최근 이상기후의 영향으로 게릴라성 호우 및 태풍과 같은 자연 재해의 발생 요인이 증가하고 있다 (Jun & Lee, 2007). 특히 여름철 집중호우는 농경지의 범람, 도심지역 저지대의 침수피해 유발, 하천 주변 저지대 및 수공구조물의 안전을 위협하고 있다.

농촌지역의 도로 신설 등으로 인해 하천변 저지대에 위치하고 있는 농촌마을은 폭우시 배수의 불균형으로 인해 빈번한 침수 피해를 입고 있다. 따라서 집중호우로 인해 발생한 하천변 저지대 농촌마을의 홍수피해 원인을 정확히 파악하고, 이에 따른 침수피해 지역의 영향 및 방재 방안을 수립하여야 할 것이다.

홍수에 의한 범람 또는 피해와 관련하여 많은 연구가 이루어지고 있으며, 주로 GIS (Geographic Information System) 기

반의 수문 및 수리 모형인 Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) (USACE, 2010) 과 Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) (USACE, 2010)을 연계하여 홍수 영향을 분석하는 연구가 수행되고 있다.

Tate (1999)는 HEC-RAS와 GIS를 이용하여 홍수범람도를 작성한 바 있으며, 최근에는 사용자 편의시스템이 급속히 발전하고 있다. Baumann and Halaseh (2011)은 홍수해석을 위하여 GIS를 기반으로 하여 HEC-GeoHMS, HEC-GeoRAS 및 ArcHydro를 연계한 인터페이스 툴을 제안한 바 있다. Gibson et al. (2011)은 최근 HEC-HMS와 HEC-RAS에 추가된 토양유실과 이송 기작을 이용하여 유역단위에서의 토양유실량을 산정하여 평가한 바 있다.

Jun and Lee (2007)은 HEC-GeoHMS와 HEC-RAS를 이용하여 저지대 농경지의 홍수범람을 분석하였으며, Park (2003)은 HEC-GeoHMS와 HEC-GeoRAS을 연계 운용하여 농경지 침수 피해 모의시스템을 개발하고 적용성을 평가하였으며, 이를 바탕으로 침수에 의한 벼 감수피해량을 추정한 바 있다. Lee et al. (2004)는 HEC-HMS와 HEC-RAS을 연계 운용하여 성주댐 유역의 홍수영향을 분석시스템을 개발하여 그 적용성을 평가하였으며, Ahn et al. (2003)은 HEC-HMS와 HEC-RAS을 이용하여

* Dept. of Agricultural and Biological Engineering, Mississippi State University

** 서울대학교 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸임연구원

*** 서울대학교 농업생명과학연구원

**** 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

2011년 10월 27일 투고

2011년 11월 14일 심사완료

2012년 2월 2일 게재확정

충북 청원군 저지대 농경지에 대상으로 홍수피해로 인한 침수면적에 관한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구의 목적은 경기도 남양주시에 위치한 일패천과 안곡천을 대상으로 HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용하여 집중호우시 하천 범람에 따른 농촌마을의 침수량을 정량적으로 산정하고, 이를 바탕으로 침수지역의 침수에 대한 피해 기여도를 분석하여 홍수피해 경로 및 침수 원인을 구명하고 방재 방안을 제안하는데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지구 및 자료구축

가. 대상지구

대상지구는 경기도 남양주에 위치한 일패천과 그 지류인 안곡천 유역 및 그 하류에 인접한 침수지역 (약 3 ha)이다. 일패천은 홍릉천의 제1지류인 지방2급 하천으로 동경 127° 10' 00" ~ 127° 12' 25", 북위 37° 36' 20" ~ 37° 38' 35" 사이에 위치하고 있으며, 유역 내의 행정구역은 경기도 남양주시 일패동, 남양주시 진건읍 배양리 등을 포함하고 있다. 대상지구의 유역면적과 유로연장은 각각 3.64 km² 및 4 km이며, 산림과 농경지가 87 %에 해당되는 전형적인 농촌유역이다. Fig. 1은 대상지구의 위치와 하천도를 보여주고 있다.

대상지구의 지질은 시대미상의 반상화강암 제4기에 속하는 충적층이며, 일패천 전체의 하상을 따라 발달해있다. 유역의 토양

특성은 강우로 인한 유출량을 산정할 때 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다. 대상유역의 토양은 SCS 토양형의 분류에 따르면 전체적으로 C, D형으로 이루어져있다. 이는 침투율이 대체로 작고 배수가 불량하며 유출률이 높은 특성을 보인다.

나. 홍수피해 사례

남양주시 통계연보 (2010)에 따르면 남양주시는 1995~2009년도 기간동안에 1997년을 제외하고 매해 홍수피해가 발생하고 있다. 1998년에 기록된 홍수피해는 사망 및 실종이 29명에 이르고 침수면적은 231 ha, 피해액은 366 억원에 이르는 것으로 보고되고 있다.

최근 대상지구에서는 2011년 7월 26일~29일 동안 647 mm의 폭우가 발생하였으며, 이로 인해 하천변 저지대 인근마을에서 침수피해가 발생하였다.

다. 기상 및 입력자료 구축

강우빈도 해석을 위해 국가수자원관리종합정보시스템 (Water Management Information System; WAMIS) (<http://www.wamis.go.kr>)을 통해 국토해양부 관할 금곡관측소의 1980-1991년과 2003-2010년의 20개년 시강우량 자료를 수집하였다.

도형자료는 ArcView와 영상자료에 의하여 추출된 결과를 바탕으로 수문/수리모형의 입력자료 형태로 변환시키도록 구성하였다. 시험유역의 기본도는 NGIS (National Geographic Information System) 및 RGIS (Rural Geographic Information System)

Fig. 1 Location and stream map of the study watershed

Fig. 2 Stream profile and inundation area

수치지도를 이용하였다. 토양특성은 농촌진흥청의 1/25,000 정밀토양도 및 국립농업과학원의 토양정보시스템 (Korean Soil Information System) (<http://soil.rda.go.kr>)에서 제공하는 자료를 이용하여 구축하였으며, 토지피복도는 WAMIS에서 제공하는 Landsat-TM 영상 분석 결과로부터 추출하였다. 주제도는 기본도로부터 소유역 경계도, 수계망도, 경사도 등을 구축하였고, 토지이용도와 정밀토양도로부터 수문학적토양군도를 구축하였다.

HEC-RAS의 하천 단면 자료는 GIS 자료를 기반으로 현장조사 자료를 이용하여 보완하였다. 홍수추적은 하천단면 9개 (일패천 6개, 안곡천 3개)를 대상으로 하여 홍수위를 모의하였으며, 홍수 흔적을 바탕으로 최대 월류 수심을 적용하였다. Fig. 2는 대상지구의 하천단면도와 침수지구의 모식도를 보여주고 있다.

한편, 대상지구의 안곡천 하류는 하천정비를 위하여 홍수 발생시 석축 일부가 제거된 상태였다. 따라서, 하천 홍수 추적은 석축 유무에 대하여 모의하였으며, 현재 단면에서 석축을 없애기 이전의 하상단면은 제거된 단면의 제방 높이와 하천 설계 단면을 바탕으로 가상제방을 설정하였다.

2. 수문 및 수리 해석 모형

유역 유출량 산정은 HEC-HMS 모형을 사용하였으며, 유역세분화에 따른 각각의 출구점에서의 유출량을 추정하였다. 본 연구의 대상유역인 3개의 소유역에 대하여 토지이용 및 토양도를 기

반으로 CN값을 산정하였고, 이를 바탕으로 SCS Curve Number 방법을 적용하여 유효유량을 산정하였다. 유역 유출량 산정은 Clark 및 SCS 단위도법을 적용하였다. Clark 단위도법의 집중시간과 저류상수는 각각 Kirpich식과 Clark 공식을 사용하여 산정하였고, SCS 단위도법의 지체시간은 SCS에서 제안한 관계식을 사용하였다.

대상지구의 하천에서의 월류량과 월류수심 등의 모의는 HEC-RAS를 사용하였다. HEC-RAS는 미공병단에서 개발되어 인공하천 또는 자연하천에서의 정상류 (steady flow) 상태의 점변류에 대한 수문곡선을 분석하는 모형이다. HEC-RAS는 현재 각종 하천수리시설물 (교량, 제방, 보 암거 등)의 설계 검토나 하천 흐름의 모의를 위해 현장에서 많이 이용되고 있는 모형이다. HEC-RAS의 유입량은 HEC-HMS모형에서 추정된 시간별 유량을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우빈도 해석

가. 기왕 최대강우량

대상관측소의 20년간의 자료기간에 대한 기왕 일최대강우량은 2006년의 250 mm인 것으로 나타났다. 지속시간 1시간 및 2시간의 기왕 최대강우량은 2003년의 77 mm와 81 mm인 것으로 나타났으며, 지속시간 24시간의 경우에는 1990년의 273 mm인 것으로 산정되었다.

한편, 침수피해 시기인 2011년 7월 26일부터 29일까지의 총강우량은 647 mm이었으며, 지속시간별 최대강우량은 지속시간 1시간이 92 mm, 2시간이 126 mm, 그리고 24시간이 464 mm인 것으로 나타났다. 따라서 2011년에 발생한 폭우사상이 기왕의 지속시간별 최대강우량보다 상당히 큰 값을 보였다.

나. 강우빈도 해석

강우빈도 분석은 국립방재연구소에서 제공하는 강우분석 프로그램인 FARD2006을 이용하였으며, 확률가중모멘트법에 의해 Gumbel 분포로 추정하여 분석하였다.

강우빈도 분석 결과, 지속시간 1시간 강우량인 92 mm는 70년 빈도, 지속시간 2시간 강우량인 126 mm는 200년 빈도, 그리고 지속시간 24시간 강우량인 464 mm는 500년 빈도 이상에 해당하는 것으로 분석되었다.

2. 유역 유출량 산정

유역 유출량은 HEC-HMS를 이용하여 Clark 단위도법과 SCS

Table 1 The results from the hydrological models

Model	Sub-watershed	Rainfall (mm)	Loss (mm)	Effective rainfall (mm)	Runoff (mm) (10^3 m^3)	
Clark	A-1	647.00	153.72	493.28	546.81	1987.6
	A-2	647.00	129.32	517.68	522.71	341.3
	A-3	647.00	39.85	607.15	612.31	19.8
SCS	A-1	647.00	153.72	493.28	576.71	2096.4
	A-2	647.00	129.32	517.68	531.74	347.2
	A-3	647.00	39.85	607.15	624.22	20.2

단위도법을 적용하여 산정하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 유역 유출량은 SCS 단위도법이 Clark 단위도법으로 산정한 결과 값보다 전체적으로 높은 것으로 나타났다. 홍수피해에 영향을 미치는 침투유량은 소유역 A-1에서 Clark 단위도법에 의한 값이 $33.4 \text{ m}^3/\text{s}$, SCS 단위도법에 의한 값이 $44.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 SCS 단위도법에 의한 침투유량이 약 34 % 정도 높게 산정되었다. 또한 유출량은 소유역 A-1에서 Clark 단위도법에 의한 값이 546.81 mm, SCS 단위도법에 의한 값이 576.71 mm로 SCS 단위도법에 의한 유출량이 약 5 % 정도 높게 산정되었다. 전체적인 유출률은 81.0~96.5 %로 단기간의 호우사상으로 인해 높게 나온 것으로 사료된다.

침수지구 배후 유역을 포함하는 유입량 (A3)은 강우초기에 일 패천의 수위가 침수지구 하류 배수관까지 상승하여 배수불량이 발생하는 시간까지의 강우에 의한 배제량으로 산정하였으며, 차단, 침투 등의 손실량을 고려하였다.

3. 하천 홍수 추적

하천 홍수량 추정은 HEC-RAS를 이용하였으며, 유입량은 HEC-HMS모형에서 추정된 시간별 유량 자료를 사용하였다. 하천조도계수는 홍릉천수계 하천정비기본계획 (Minstry of Land, 2004)에서 제시된 일패천 수계 구간별 조도계수 중 현재 대상지역으로 하고 있는 SW#1 & 2지역의 조도계수를 사용하였다.

대상지구의 침수량 및 기여율 산정을 위하여, 하천 홍수 월류량 추정은 석축 유무에 따른 월류량 (하천단면 ⑦)과 안곡천 및 일패천 합류지점에서의 월류량 (하천단면 ④), 그리고 암거 영향을 고려한 일패천 하류지점 (하천단면 ⑧) 월류량 등에 대하여 수행하였다.

가. 석축 유무에 따른 월류량 (하천단면 ⑦)

Fig. 3은 HEC-RAS를 이용하여 일패천과 안곡천에서의 석축 유무에 따른 월류량 추정 결과를 보여주고 있다. 모의기간은 7월 26일 18:00에서 7월 27일 8:00이다. 최대 유량이 모의된 27

Fig. 3 Comparison of flood water level with/without levee at the cross section ⑦ (July 27, 4:00 am)

Table 2 Predicted overflow time and potential overflow discharge

Item	Ahn-Gok stream		Il-Pae stream	
	with levee	without levee	Upstream	Downstream
Overflow time (hr)	2	2	2	1
Potential overflow discharge (m^3)	4,579	8,676	73,067	71,608

일 4:00에 제방이 있는 경우와 없는 경우를 비교한 것으로 석축이 있는 경우와 없는 경우 모두 월류하는 것으로 나타났다.

Table 2는 석축 유무에 따른 월류시간과 잠재월류량 추정 결과를 비교하여 나타내고 있다. 안곡천 ⑦ 단면에서의 총 잠재월류량은 석축 제거시 $8,676 \text{ m}^3$ 이었으며, 가상 석축 고려시 $4,579 \text{ m}^3$ 인 것으로 나타났다.

나. 안곡천 및 일패천 합류지점 잠재월류량 (하천단면 ④)

안곡천 하류 단면에서의 잠재월류량과 안곡천과 일패천의 합류지점에서의 월류량을 산정한 결과는 Fig. 4와 같다. 잠재월류량은 $73,067 \text{ m}^3$ 으로 산정되었으며, 7월 27일 오전 3:00~4:00에 월류하는 것으로 추정되었다.

다. 일패천 하류 월류량 (하천단면 ⑧)

일패천 하류 암거를 통한 유입경로(⑧번 단면)을 통해 유입된

Fig. 4 Flood water level at the cross section ④ (July 27, 4:00 am)

Fig. 5 Flood water level at the cross section ⑧ (July 27, 4:00 am)

하천수의 영향에 대해 분석한 결과 범람 수위는 EL.24.15로 나타났으며, 잠재월류량은 $71,608 \text{ m}^3$ 인 것으로 추정되었다 (Fig. 5). 이는 일패천 전체 잠재월류량의 약 40 %에 해당된다.

4. 침수량 및 기여율

침수지역에 대한 침수면적과 홍수 흔적을 바탕으로 침수량을 산정하였고, 산정된 침수용량을 기준으로 유입량과 유출량을 산정하여 물수지 분석에 바탕을 둔 각각의 소하천에서의 월류 기여율을 산정하였다.

침수량은 저지대 침수구역의 경계를 따라 면적을 계산하고 여기에 침수깊이를 고려하여 산정하였다. 현장 조사를 통해 침수지역은 크게 2개 구역으로 구분하였으며, 침수지역의 평균 침수깊이는 A1 구역이 1.5 m, A2 구역이 0.7 m로 나타났다. 총 침수면적은 $21,862 \text{ m}^2$ 로 계산되었고, 이에 따른 총 침수량은 $26,137 \text{ m}^3$ 로 산정되었다.

침수지역의 소하천 월류량 유입경로는 침수지역에서의 강우량 (침수경로1), 침수지역 배후도로 및 주변 지역의 유출수 유입 (침수경로2), 안곡천 및 일패천으로부터의 월류에 의한 침수 (침수경로3), 그리고 일패천 하류 암거를 통한 월류 (침수경로4) 등으로 설정하였다.

침수지구의 물수지 분석은 강우에 의한 유입량에 초기 손실량, 저류량 (침수기여량), 유출량을 고려하여 수행하였다 (침수경로

Table 3 Degree of contribution to total flood volume

Item	Degree of contribution		Remarks
	(m^3)	(%)	
Rainfall & back sub-watershed (inlet paths 1 & 2)	3,960	15.2 %	Ahn-Gok w/ levee 662 m^3 (2.5 %)
Overflow discharge (inlet paths 3 & 4)	Ahn-Gok w/o levee 1,255	4.8 %	
	Il-Pae upstream 10,567	40.4 %	
	Il-Pae downstream 10,356	39.6 %	
Flood volume	26,137	100 %	

1). 침수지역의 배후유역을 포함하는 유입량 (침수경로 2), 안곡천 및 일패천 월류에 의한 침수 기여량 (침수경로 3)은 수문모의를 통한 하천 잠재 월류량 산정결과를 이용하여 추정하였다.

일패천 하류암거를 통한 배수불량에 따른 저류 효과는 침수지역 배수 가능 여부를 고려하여 침수지구 하류 암거 배수로와 합류하는 일패천 지점의 수위를 HEC-RAS를 이용하여 시간별로 모의하여 산정하였다 (침수경로 4). 침수지구의 암거배수 관저고가 EL.22.00으로서 일패천 하류 수위가 이를 초과하면 침수지구로부터 배수가 발생하지 않은 것으로 가정하였다. 이는 마을 배수로 설계도면 자료에 기초하고 있으며, 배수구의 마을측 관저고는 EL.22.00이며, 일패천측 관저고는 EL.21.19이다. 또한 배수로의 일패천 최고 수위자료는 EL.23.21이다. 따라서 침수피해가 발생했을 개연성이 가장 높은 하천 침투유량 발생기인 27일 새벽 3~5시를 전후해서 발생한 일패천의 수위 상승 영향으로 침수지역에서 하천으로 배수가 원활하게 이루어지지 않을 것으로 예상된다. 따라서 27일 새벽 3~5시의 침수지구 유역 유출량은 일패천으로 배제되지 않고 침수 기여량으로 추정하였다.

침수지구의 월류에 의한 유입과 유출을 고려한 각각의 유입경로에 대한 물수지 분석 결과는 Table 3과 같다. 대상지구의 저지대 침수지역은 일패천 월류량이 가장 크게 기여한 것으로 나타났다. 침수 기여율은 유역 강우 영향이 약 15.2 %였고, 일패천과 안곡천의 월류에 의한 영향이 약 84.8 %인 것으로 추정되었다. 이중 일패천 월류가 침수에 기여한 비율이 약 80 %로 가장 높았고, 안곡천 월류 침수기여율은 석축이 없는 경우 4.8 %로 추정되었으며, 석축이 있는 경우에도 월류 기여율이 2.5 %로 추정되었다. 따라서, 석축 제거가 침수에 미친 영향은 2.3 %로 추정된다.

IV. 요약 및 결론

남양주시 도로건설 현장 인구 침수지구 피해 현황을 분석하기 위하여, 남양주시에 위치한 일패천과 안곡천, 그리고 저지대 침

수지구 유역을 대상으로 현장조사를 실시하였다. 강우빈도분석, 그리고 HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용하여 침수지구 면적 및 침수량을 정량적으로 분석하였고, 이를 바탕으로 침수지구의 침수량 기여율 및 안곡천 석축 유무에 따른 기여율을 분석/평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 분석대상 강우사상의 빈도분석 결과 24시간 지속시간 기준으로 500년 빈도를 초과하는 것으로 분석되었는데, 이는 50년 빈도로 설계된 지방 2급 하천인 일패천의 설계홍수량을 훨씬 초과하는 것으로 하천 범람 확률이 높은 것으로 분석되었다.
2. 유역 유출량 및 하천 수위분석 결과 주요 하천 범람지점은 안곡천 하류와 일패천 합류지점으로 나타났다. 배후 유역면적이 상대적으로 큰 일패천에서의 하천 범람이 침수지구의 주된 침수 원인으로 분석되었다.
3. 침수지구의 침수면적 및 침수량을 정량적으로 평가하였다. 총 침수량에 대한 각각의 월유 기여량은 강우가 15.2 %, 일패천 (하류 암거 포함)이 80 %, 안곡천 4.8 %인 것으로 분석되었다.
4. 안곡천 하류 부분의 석축 제거 공사가 침수에 미친 영향을 정량적으로 평가하였다. 총 침수량에 대한 석축 제거시 침수 기여율은 4.8 %이었으며, 석축 미제거시의 침수 기여율은 2.5 %인 것으로 나타났다. 따라서 안곡천 하류 석축 유무에 따른 기여율의 차이는 2.3 %인 것으로 분석되었다.

REFERENCES

1. Ahn, S. J. K. W. Jun, and H. G. Kwank.. 2003. A case study on the determination of inundated area by flood damage. *Korea Society of Civil Engineers* 23(3B): 183-189 (in Korean).
2. Baumann C. A., and A. A. Halaseh, 2011. Utilizing interfacing tools for GIS, HEC-GeoHMS, HEC-GeoRAS, and ArcHydro. In Proc. *World Environmental and Water Resources Congress 2011*. Palm Springs, CA: ASCE.
3. Gibson, S. A., J. H. Park, and M. J. Fleming, 2010. Modeling watershed and riverine sdeiment processes with HEC-HMS and HEC-RAS. In Proc. *2010 Watershed Management Conference*. Madison, WI: ASCE.
4. Jun, K. W., and H. J. Lee, 2007. Analyzing the flood inumdatation in low agricultural area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 49(2): 25-35 (in Korean).
5. Lee. W. H., S. J. Kim, and P. S. Kim, 2004. Flood effects analysis of reservoir basin through the linkage of HEC-HMS and HEC-RAS models. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(2): 15-25 (in Korean).
6. Ministsry of Land, 2004. Basic river maintenance plan for Hong-Reung River. Ministry of Land, Korea.
7. Namyangju City, 2010. Namyangju statistical year book. Namyangju, Korea.
8. Park, J. M., 2003. Development of GIS based farmland flooding damage simulation system. Ph. D. Diss., Seoul, Republic of Korea: Seoul National University (in Korean, with English abstract).
9. Tate E. C., 1999. Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcView GIS, Master thesis, Austin, TX: University of Texas.
10. U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2010. HEC-RAS River Analysis Systme user's Manual 4.1.
11. U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2010. Hydrologic Modelling System HEC-HMS user's manual version 3.5.