

연구노트

## 수질 영향평가 신뢰수준 향상을 위한 낙동강 유역 미관측 지점에서의 일사량 추정: 수정형 Angstrom모형과 투과율모형의 비교

이 길 하

대구대학교 토목공학과

(2011년 7월 20일 접수, 2011년 12월 5일 승인)

### Estimation of Daily Solar Radiation at the Missing Point for Water Quality Impact Assessment in Nakdong River Watershed: Comparison of Modified Angstrom Model and Transmittance interpolation Model

Lee, Khil-Ha

Civil Engineering, Daegu University(DU)

(Manuscript received 20 July 2011; accepted 5 December 2011)

#### Abstract

Daily solar radiation is essential for water resources planning and environmental impact assessment. However, radiation data is not commonly available in Korea other than in big cities, and there has been no direct measurement for rural areas where water resources planning and environmental impact assessment is usually most needed. In general, missing radiation data is estimated from nearby regional stations within a certain distance, and this study compared two dominant methods (modified Angstrom equation and transmittance interpolation method) at six stations in Nakdong River watershed area. Two methods shows a similar level of accuracy but the transmittance interpolation method is likely to be superior in that there is no need for any measurement element since the modified Angstrom equation require the sunshine hour measurement. This study will contribute to improve water resource and water quality management in Nakdong River watershed.

Keywords : Modified Angstrom model, Transmittance interpolation Model, Nakdong River watershed

## 1. 서론

환경영향평가는 주로 대기, 수질, 생활(소음·진동) 환경에서의 예측모델링 기법 등을 이용하여 다양한 사업에서 수행되고 있다. 우리나라의 환경변화는 계절 변동이 뚜렷하기 때문에 보다 정확하고 신뢰할만한 환경영향 평가를 수행하기 위해서는 개발사업에 의한 환경부하의 영향과 더불어 계절변화도 고려하여야 한다. 계절변화를 고려한 환경영향평가를 수행하기 위해서는 모델링 기법과 입력자료의 관점에서 기상자료의 활용이 필수적이다. 또한 신뢰할만한 모델링 결과를 도출하기 위해서는 관측 자료를 이용한 모형의 보정 및 검증 과정과 더불어 신뢰할만한 모형 입력자료 확보가 매우 중요하다(Martin and McCutcheon, 1999). 본 연구는 개발사업에 의한 수질환경영향평가를 보다 정확하게 수행하기 위한 1차 단계에 해당하는 일사량 입력자료의 추정에 중점을 두고 수행되었다. 기상인자는 직접적·간접적으로 수질인자의 변동에 영향을 미치는데 특히 일사량은 온도에 직접적으로 영향을 미친다. 기본적인 기상자료(풍속, 온도, 습도, 일사량)를 이용하여 추정되는 기준 증발산량 자료는 어떤 구역에서의 수량에 영향을 미치고, 수량은 수질에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 기온은 수온에 영향을 미치고, 수온은 대부분의 수질항목의 반응계수에 영향을 미친다(Snoeyink & Jenkins, 1980). 또한 수온예측을 위한 열수지(heat budget) 분석과 부영양화, 적조 및 녹조와 관련되어 있는 식물플랑크톤 밀도 예측을 위해서는 일사량이 직접적으로 영향을 미친다(Taylor, 2005; Thomann and Mueller, 1987). 따라서 일사량이 수질예측모형의 입력자료로 사용하는 경우에는 자료의 품질이 의심되는 특정시기 및 특정지점에서는 예측결과에 큰 오차가 포함될 수 있다.

일사량은 일정 시간 동안 지구의 표면에 다다른 태양에너지의 양으로 표현된다. 수자원과 관개용수 추정의 바탕이 되는 증발산량의 산정, 수질환경분석과 예측, 광합성을 통한 생태환경 분석의 정확도는 입력자료의 신뢰성에 좌우되며 일사량이 그 중심에

있다. 일사량은 생태학적 기능과 작용(physiological), 증발산량의 기상학적 역학(meteorological)에 영향을 미치므로 생태, 환경, 수문모형의 정확성에 중요한 역할을 한다. 그러나 일사량은 관측이 쉽지 않으며 우리나라의 경우 대도시에 집중되어 있는 실정이라 막상 수환경분석이나 관개용수산정이 필요한 농어촌 지역은 자료가 미비한 상태이다.

대부분의 경우 입력자료로 필요한 미관측 지점에서 일사량은 간접적인 방법으로 산정하게 되는데 지금까지의 연구로는 주변의 관측자료로부터 투과율( $R_s/R_0$  여기서  $R_s$ 는 incoming solar radiation,  $R_0$ 는 clear sky radiation)을 산정한 후 관측목표지점의 를 곱하여 구하는 투과율 모형(Transmittance interpolation Model)이 권장되어오고 있다(Allen, 1995; Lee, 2009). Lee(2009)는 우리나라 기상청의 전국 20여 개 관측소의 일사량 자료를 이용하여 투과율 모형이 정확도나 실용성에 있어 공학적 타당성이 있음을 보여주었다. 나아가 투과율 모형으로 산정된 일사량을 기준 증발산량 산정에 적용하여 활용도가 우수함을 확인하였다.

또 다른 하나의 지배적인 일사량 추정방법은 일조시간(bright sunshine duration, hour) 관측자료로부터 일사량을 간접 환산하는 방법이다. Angstrom 모형(1924, Prescott, 1940)이 개발된 이래 오랫동안 많은 과학자들에 의하여 사용되어 온 이 방법은 모형계수의 조정, 기상인자와의 결합을 통한 다각도의 진화를 시도해 왔다. 최근에는 기존의 선형 Angstrom 모형을 향상시킬 목적으로 Lee(2010)가 비선형 수정형 Angstrom 모형을 제시하여 우수함을 입증하였다.

이 논문에서는 낙동강 유역에 해당하는 대구, 부산, 안동, 포항, 진주, 추풍령 지점의 일사량을 수정형 Angstrom 모형과 투과율 모형으로 산정하여 비교 검토해 보았다. 이 연구의 결과는 향후 낙동강 유역의 수질환경영향평가와 수자원 분석 개선에 이바지할 것이다.

## II. 관측자료

기상인자가 수질영향분석에 미치는 영향경로는 다양하고 매우 중요하다. 본 논문에서는 우리나라 기상관측소에서 제공되는 기상인자인 일사량을 중심으로 자연적인 수질환경변화의 영향 분석에 앞서 하나의 기초자료 사전 점검을 수행·제시하였다.

일사량과 일조시간은 기온, 강수량 등의 정보에 비하여 상대적으로 덜 익숙한 기상인자이지만 수질 환경영향평가에서는 매우 중요하고 민감한 영향인자이다. 앞서 설명하였듯이 일사량은 에너지원으로서 기온과 수온변화를 주도하기도 하지만, 광합성을 하는 식물플랑크톤의 성장에 영향을 미치는 기상인자이다. 특히 식물플랑크톤의 성장은 최근 중요한 문제로 부각되는 적조, 녹조 등의 환경문제와 직결되어 있기 때문에 적절한 수질환경영향평가를 수행하기 위해서는 일사량 및 일조시간 자료의 품질검정이 선행되어야 한다. 자료 검증을 위한 기본 개념은 청정한 하늘(clear sky)에서 가능한 최대량 개념으로, 태양의 고도(위도의 함수) 및 연중 시기 정보를 이용하여 계산할 수 있다. 실질적으로는 구름 등의 영향으로 일조시간 또는 일사량이 계산된 시간보다는 항상 적게 나타나고 있으나 구름이 없

는 맑은 날도 발생하는 경우가 있기 때문에 연간 변화 양상에서 보여지는 포락선(envelop)은 이론적으로 최대량에 도달하여야 한다. 전체적인 포락선의 시간적 변화양상이 이론적인 가능 최대량과 차이를 보이는 경우에는 관측기기의 관측 또는 검정문제라고 판단하는 것이 합리적이다.

그림 1(a)를 보면 연중 일사량 관측치가 이론적 가능 최대량에 전반적으로 미치지 못한다. 그러나 전체적인 일사량의 연중 거동은 합리적이며 이상치도 눈에 띄지 않는다. 이는 관측기기의 보정과 검정(calibration) 문제를 우선 의심해 볼 수 있어 관측치에 합리적인 비를 일률적으로 적용하여 보정하였다.

본 연구에서 사용한 일사량과 일조시간 자료는 기상청의 21개 기상대에서 관측한 1997년부터 2006년까지 10년 동안의 일 평균 기상자료이다. 관측 자료의 개수(n)는 10년 동안의 일 자료이기 때문에 총 3,652개로 구성되어 있으며, 본 연구는 기상 자료의 장기 변동 분석이 아니라 모형 검정에 있기 때문에 분석 자료의 기간은 중요하지 않지만 최소한 1년 이상의 자료를 이용하여야 이상자료와 더불어 전체적인 변화양상의 이상 유무 파악이 가능하다.

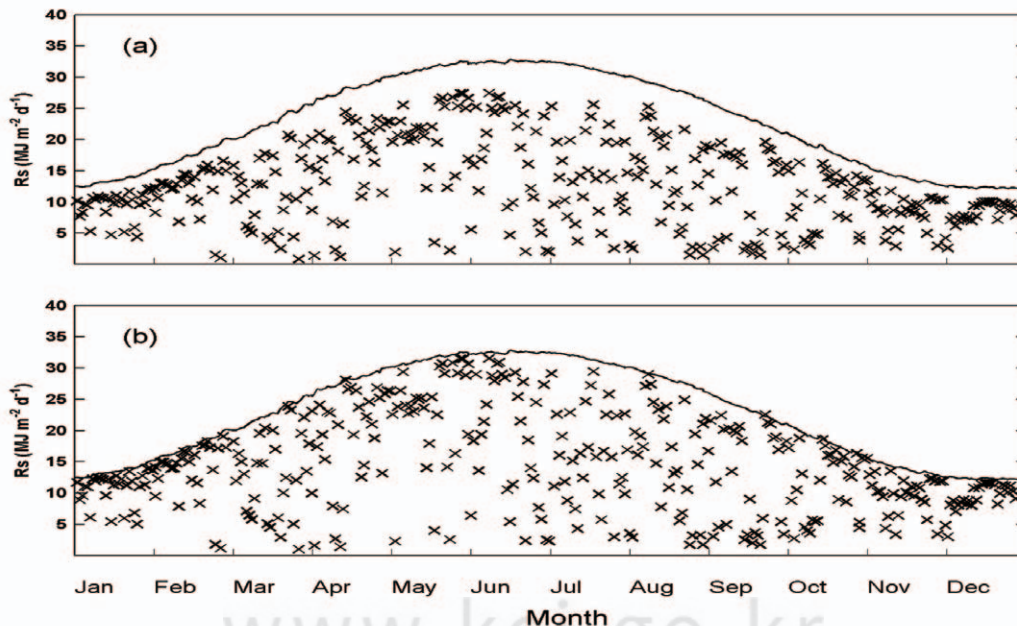


그림 1. 포항관측소에서 관측된 일사량이 맑은 날 포락선의 최대량에 맞도록 조절한 예: 그림 (a)는 조정 전, 그림 (b)는 조정 후.

표 1. 기상관측소의 기본 정보

순번	지점	위도(°)	경도(°)	온도계 지상고도 (m)	풍속계 지상고도 (m)	일조시간 (hour)	풍속 (m/s)	상대습도 (%)	최저기온 (°C)	최고기온 (°C)	비고
1	안동	36.57	128.70	1.5	15.5	5.90	1.57	65.44	6.68	18.15	내륙
2	청주	36.63	127.43	1.5	10.0	5.86	1.81	64.71	8.18	18.31	
3	추풍령	36.22	127.98	1.5	20.7	5.85	2.53	66.06	6.73	17.80	
4	대구	35.88	128.62	1.5	18.2	6.10	2.37	59.14	10.05	19.60	
5	대전	36.37	127.37	1.6	22.8	5.86	1.92	67.22	8.41	18.52	
6	대관령	37.67	128.72	1.8	10.0	5.79	4.29	74.22	2.62	12.16	
7	광주	35.17	126.88	1.5	17.5	5.56	2.09	67.15	9.72	19.33	
8	전주	35.82	127.15	1.5	18.4	5.50	1.79	68.04	9.17	19.31	
9	진주	35.15	128.03	1.5	10.0	6.09	1.61	67.67	7.93	20.05	
10	서울	37.57	126.95	1.5	10.0	5.10	2.17	62.64	9.11	17.43	
11	수원	37.27	126.98	1.5	20.0	5.80	1.89	65.33	8.09	17.57	
12	원주	37.33	127.93	1.6	10.0	5.32	1.08	67.94	6.62	17.89	
13	부산	35.10	129.02	1.7	17.8	6.08	3.47	63.73	11.62	19.20	해안
14	강릉	37.75	128.88	1.7	13.8	5.82	2.81	59.11	9.58	17.84	
15	흑산도	34.68	125.45	1.5	25.0	5.33	5.70	77.82	11.22	16.18	
16	인천	37.47	126.62	1.4	11.0	6.15	2.47	67.65	9.11	17.38	
17	제주	33.50	126.52	1.8	12.3	5.06	3.23	68.16	13.37	19.36	
18	제주고산	33.28	126.15	1.8	10.0	5.40	7.42	74.39	13.07	18.67	
19	목포	34.82	122.37	1.5	15.5	5.92	3.82	71.20	10.55	18.35	
20	포항	36.02	129.37	1.6	13.2	6.12	2.72	61.85	10.88	19.02	
21	서산	36.77	126.48	1.4	20.2	5.81	2.60	72.71	7.23	17.55	

기상 자료는 바다와의 인접거리를 고려하여 내륙 지점과 해안(도서 포함) 지점을 포함하였으며, 관측 위치 및 관측기기의 기본 고도 정보, 분석기간 동안의 기상인자 평균자료를 표 1에 정리·제시하였다. 우리나라는 동계 건조시기와 하계 습윤 시기가 뚜렷하게 구분되는 온대기후이며, 강우의 70% 정도가 여름에 발생한다. 습도와 풍속은 해안 지역이 다소 높으나, 일교차(DTR, Daily Temperature Range)는 해안 지역이 약 7 °C로 내륙지역보다 약 3 °C 정도 낮다.

### III. 이론적 배경

#### 1. 수정형 Angstrom 모형 (Modified Angstrom Model)

Angstrom (1924)은 일사량을 일조시간과 일 가능 최대 일조시간과의 상관관계를 다음과 같은 선

형관계로 제시하였다.

$$\frac{R_s}{R_a} = 0.177 + 0.552 \left( \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

여기서  $R_s$ 는 단파하향일사량(total incoming shortwave solar radiation,  $MJ m^{-2} day^{-1}$ );  $R_a$ 는 우주복사열(extraterrestrial radiation,  $MJ m^{-2} day^{-1}$ );  $n$ 은 일조시간 (bright sunshine duration, hour); and  $N$ 은 일 가능 최대 일조시간 (total day length, hour). 이 식은 널리 사용되는 관계식으로  $n/N$ 은 일운량을 나타내는 척도로 다양한 대기 조건에 의해 영향을 받는다. 지구의 표면에 다다른 일사량은 직달 일사와 산란 일사로 구성되는데 운량과 일사량이 비선형 관계를 형성한다는데 착안하여 Lee (2010)는 하나의 수정형 Angstrom모형을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{R_s}{R_a} = a + b \left( \frac{n}{N} \right)^c \quad (2)$$

여기서 a, b, c는 모형 계수로 특히 c는 대기입자나 먼지에 의한 저항효과를 나타내는 비선형 계수로 Angstrom 원형의 수정 변형된 형태로 생각할 수 있다

**2. 투과율 모형 (Transmittance interpolation Model)**

일사량의 자료가 없을 지점에서는 주변의 관측지점의 정보를 이용하여 간접적으로 추정하는 것이 일반적이다. 여러 제안된 방법 중에서 Kriging, nearest neighbor, Thiessen polygons, inverse distance method, and inverse square weighted method 이 흔히 이용된다. Lee (2009)는 주변 관측 지점의 투과율과 추정 목표 지점의 일 가능 최대 일사량을 이용하여 다음과 같은 모형을 제시하였다.

$$R_{s\ est} = \frac{\sum_{i=1}^m W_i R_{s,i} / R_{o,i}}{\sum_{i=1}^m W_i} \tag{3}$$

여기서  $i$ 는 주변 관측소 지표;  $m$ 은 추정 목표 지점 주위에 사용되는 관측 지점의 개수;  $W$ 는 관측소 간 거리  $r$ 에 의해 결정되는 가중치이다. Est 는 추정치; target은 추정목표지점을 나타낸다.

위하여 10년간의 관측 자료는 두 그룹으로 나누었다. 1997-2004년까지의 자료를 사용하여 위의 공식 (1)을 보정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\frac{R_s}{R_o} = 0.127 + 0.552 \left( \frac{n}{N} \right)^{0.658} \tag{4}$$

모형의 계수는 다변수 최적화 기법 (Duan, 1993; 1994; Nash and Sutcliffe, 1970; Nelder and Mead, 1965)을 사용하여 결정하였다. 모형 계수의 결정은 사용하는 자료의 기간과 관측지점의 개수에 의하여 영향을 받지만 관측 기간과 개수가 어느 한 계점을 지나면 물리적으로 큰 변화를 보이지 않는다. 그래서 이 연구에서 사용한 8년간 21개의 관측 자료가 식 (4)에서 보여준 모형 계수를 충분히 대표한다고 볼 수 있다(Duan, 1993; 1994).

투과율 모형의 추정치를 이끌어 내기 위해서는 전체 21개 관측소 자료로부터 목표 지점인 대구, 부산, 안동, 포항, 진주, 추풍령 지점을 차례로 하나씩 제외시켰다. 다음은 가중치를 구하기 위하여 나머지 20개 관측 자료를 반영하여 투과율 추정치를 계산하였다. 목표 지점의 우주 복사열 ( $R_o$ )을 계산한 후 식 (3)에서 주어진 대로 목표지점의 일사량 추정치를 계산하였다.

표 2는 두 비교 모형에 의하여 구해진 추정결과의 기본적인 통계치를 보여준다. 관측치에 대한 추정치의 상대 오차는 대구, 포항, 진주, 추풍령 지점

**IV. 분석결과**

우선 수정형 Angstrom 모형의 보정과 검정을

표 2. 표 2는 두 모형에 의하여 구해진 기본적인 통계치

		평균값 ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ )	상대오차 (%)	절대오차 ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ )	RMSE ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ )	결정계수
대 구	수정형	13.349	1.643	0.216	1.943	0.910
	투과율	13.654	3.966	0.521	2.356	0.873
	관측치	13.133	-	-	-	-
부 산	수정형	13.620	5.140	-0.738	1.767	0.961
	투과율	13.790	4.000	-0.568	3.213	0.827
	관측치	14.358	-	-	-	-
안 동	수정형	13.106	2.550	-0.034	1.524	0.944
	투과율	13.377	0.540	-0.727	1.823	0.916
	관측치	13.450	-	-	-	-
포 항	수정형	13.294	-0.976	-0.131	1.387	0.953
	투과율	13.563	1.027	0.138	2.631	0.831
	관측치	13.425	-	-	-	-

표 2. 표 2는 두 모형에 의하여 구해진 기본적인 통계치

		평균값 ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ )	상대오차 (%)	절대오차 ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ )	RMSE ( $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ )	결정계수
진 주	수정형	13.498	5.488	-0.784	1.760	0.950
	투과율	13.728	3.881	-0.554	2.861	0.832
	관측치	14.282	-	-	-	-
추풍령	수정형	13.084	0.946	0.123	1.381	0.962
	투과율	13.616	5.046	0.654	2.092	0.920
	관측치	12.962	-	-	-	-

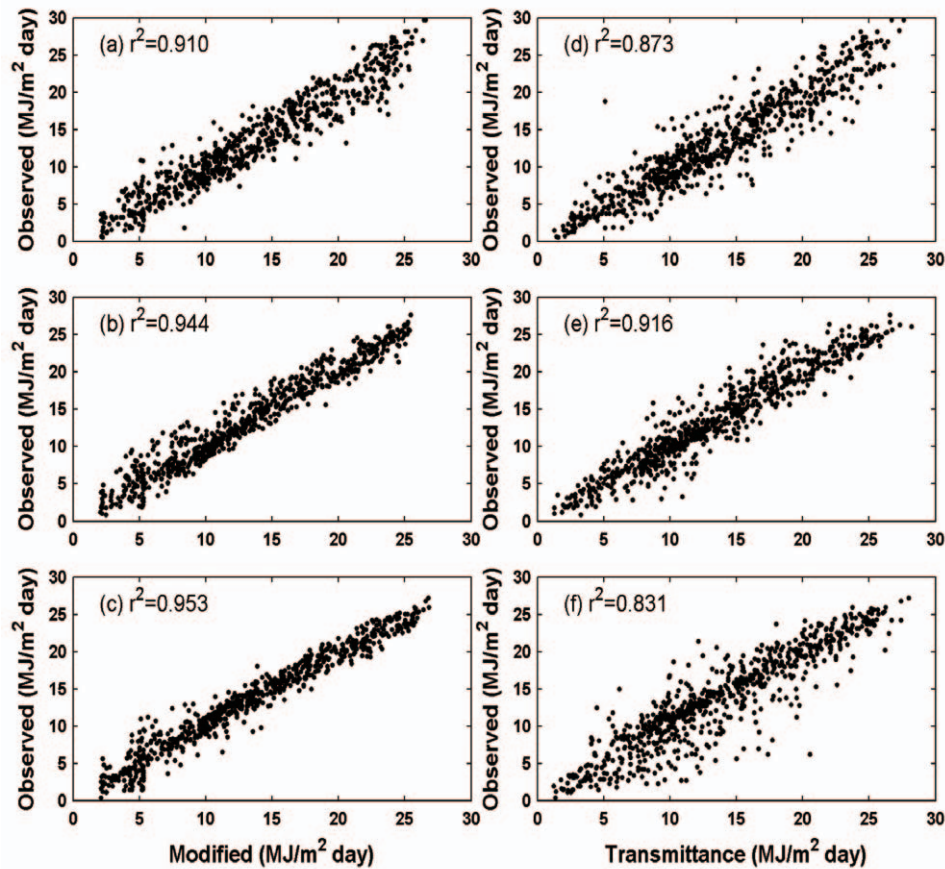


그림 2. 수정형 Angstrom 모형과 투과율 모형에 의한 추정치 대 관측치의 산포도. 그림 (a), (b), (c)는 수정형 대 관측치이며 (d), (e), (f)는 투과율 대 관측치.

에서 수정형 모형이 더 작은 값을 보여준다. 절대오차는 대구, 안동, 포항, 추풍령에서 수정형 모형이 더 작은 값을 보여준다. 그러나 RMSE는 대구, 부산, 안동, 포항, 진주, 추풍령 전 지역에서 수정형 모형이 더 작은 값을 보인다. 결정계수 또한 여섯 개 전 지역에서 수정형 모형이 더 높은 것으로 나타

났다. 특히 부산, 포항, 진주는 수정형 모형의 결정계수가 약 0.95인 반면 투과율 모형의 결정계수는 약 0.83으로 나타났다. 투과율 모형에서는 주변 관측치를 반영하여 내삽(interpolation)을 바탕으로 계산하는데 부산, 포항, 진주는 해안 쪽 관측 자료가 없어 내륙 관측치만 편향되게 반영한 효과로 사

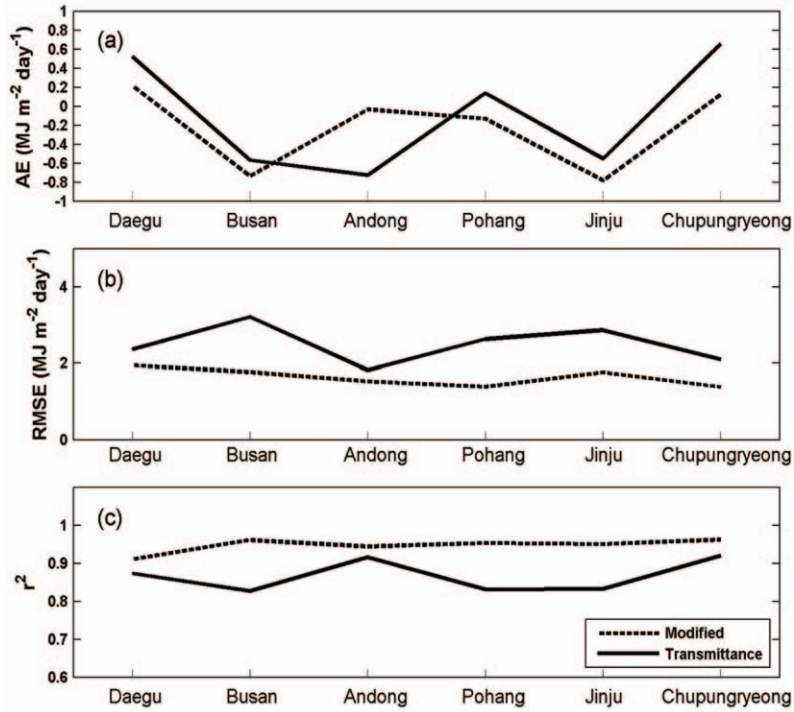


그림 3. 두 모형의 추정치에 대한 기본 통계: (a)대구, (b)안동, (c) 포항

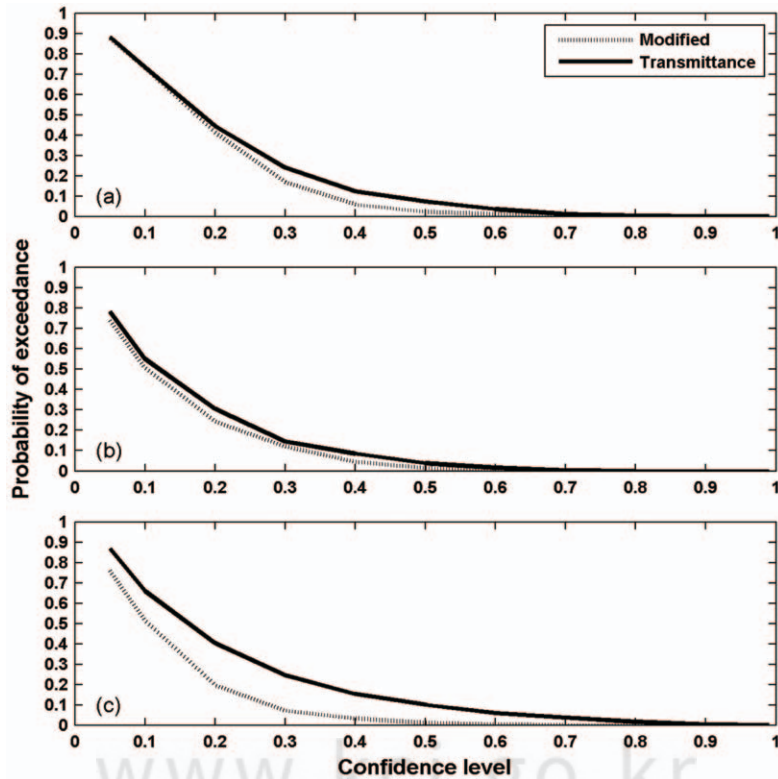


그림 4. 일정 범위 안에 있는 신뢰구간에 대한 일사량 추정치의 초과 확률: (a)대구, (b)안동, (c) 포항

료된다. 그림 2는 수정형 Angstrom 모형과 투과율 모형에 의한 추정치 대 관측치의 산포도를 시각적으로 보여준다. 그림에서 보여지듯 수정형 모형이 상대적으로 우수한 결과를 보여준다.

그림 3은 수정형 모형과 투과율 모형을 사용하여 일사량을 추정한 후 관측치에 비교한 기본 통계값을 보여준다. 그림 4는 관측치에 대한 추정치의 거동을 볼 수 있는 통계 평가를 나타낸다. 대구, 안동, 포항에서 X-축의 각 신뢰구간 (Confidence Interval, CI) 에 대한 초과확률 (Exceedance Probability, EP)을 Y-축에서 보여준다. 세 지점에서 비슷한 거동을 보여주는데, CI가 0.1에서 약 90%의 초과를 보이거나 CI가 0.7에서 초과는 0으로 수렴하는 것으로 나타났다. 그러나 0으로 수렴하는 속도는 수정형 모형이 투과율 모형보다 더 빠른 것으로 나타났다.

## V. 결론 및 제언

관측자료가 없는 지점의 일사량 추정은 어려운 문제이며 간접적인 방법으로 일사량을 추정하는 것이 일반적이다. 낙동강 유역도 여타 지역과 마찬가지로 충분한 관측 지점이 존재하지 않으므로 간접적인 추정은 불가피하다. 이 연구에서는 최근에 새롭게 개발된 수정형 Angstrom 모형과 투과율 모형을 이용하여 6개의 관측 지점 (대구, 부산, 안동, 포항, 진주, 추풍령) 에서 일사량을 추정하여 실제 관측치와 비교해 보았다. 결정계수나 RMSE에서 수정형 Angstrom 모형이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 그러나 투과율 모형도 정확도면에 있어서 허용범위에서 크게 벗어나지 않아 선택사항에 포함시키는 것이 바람직해 보인다. 수정형 Angstrom 모형의 경우에는 일조시간 이라는 또 다른 기상인자가 입력자료로 필요하고 비록 상대적으로 일사량 관측 보다 쉽고 관측 지점이 훨씬 많다고는 하더라도 목표 지점에서 아무 관측 자료도 필요로 하지 않는 투과율 모형이 매력적인 면도 있다. 낙동강 유역에서는 향후 4대강 사업 이후 수자원과 수질관리의

재편성이 필수적이고 기후 변화에 따른 환경영향평가의 심화된 분석이 요구된다. 이를 위해서는 일사량이 중요한 입력 요소가 되며 이의 정확성이 곧 전체 결과의 정확도에 막대한 영향을 미친다. 이 연구는 향후 낙동강 유역에서 수자원 관리와 수질 환경 개선에 기여할 것이다. 이 연구에서는 분석이 낙동강 유역에 국한되었다 하더라도 접근 방법은 우리나라 여타 지역에도 적용 가능하리라 생각한다.

## 감사의 글

기상청의 기상자료 제공에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Angstrom, A. 1924. Solar and Terrestrial radiation. *Quarterly Journal of Royal Society*. 50, 121-125.
- Allen, R. G., 1995. Evaluation of procedure for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. Rep., United Nations Food and Agric. Org.(FAO), Rome, Italy.
- Duan, Q.Y. and Gupta, V.K., Sorooshian S. 1993, Shuffled Complex Evolution approach for effective and efficient global minimization. *J. Optimiz. Theor. Appl.* 76, 501-521.
- Duan, Q.Y., Sorooshian, S., Gupta, V.K., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158, 265-284.
- Lee, K., 2009. Predicting Incoming Solar Radiation and Its Application to Radiation-based Equation for Estimating Reference Evapotranspiration, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-*



- ASCE, 135(5), 609-619
- Lee, K., 2010, Constructing a Nonlinear Relationship Between Incoming Solar Radiation and Bright Sunshine Duration, International Journal of Climatology, 30, 1884-1892.
- Martin, J.L. and McCutcheon, S.C., 1999. Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling, Lewis Publishers.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, I-A Discussion of principles. Journal of Hydrology, 10, 282-290.
- Nelder, J.A. and Mead, R.A., 1965. A simplex method for function minimization. Comput. J., 7, 308-313.
- Prescott, J., 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Trans R. Sec. South Australia, 64, 114-118.
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D., 1980. Water Chemistry, John-Wiley & Sons.
- Taylor, F.W., 2005. Elementary Climate Physics, Oxford Univ. Press.
- Thomann, R.V. and Mueller, J.A., 1987. Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper Collins Publishers.

최종원고채택 11. 12. 10