

南向傾斜面の月平均全日射量

金 斗 千*

Monthly Average Insolation Data on South-Facing Inclined Surfaces

Doo Chun Kim*

Abstract

Radiation data on south-facing surfaces required for the simplified design procedures for solar energy systems, have been computed using the method by Liu and Jordan⁽⁴⁾. For the five localities of South Korea selected from reference 6, the factor R for the conversion of the monthly average daily total radiation on a horizontal surface to that on an inclined surface is presented in Table 5.

For the other localities, the conversion factor R can be computed using Table 2 through Table 4.

Nomenclature

\bar{I} ; Monthly average daily total radiation on a horizontal surface
 \bar{I}_d ; Monthly average daily diffuse radiation on a horizontal surface
 \bar{I}_T ; Monthly average daily total radiation on an inclined surface
 \bar{I}_o ; Extraterrestrial daily insolation on a horizontal surface
 \bar{I}_{ω} ; Hourly solar radiation on a horizontal surface outside the atmosphere of the earth
 $(I_o)_n$; Extraterrestrial daily insolation on a horizontal surface for the n th day of the month
 I_{sc} ; Solar constant
 \bar{K}_T ; Ratio of the monthly average daily total radiation on a horizontal surface

to that of extraterrestrial one
 n ; Day of the year, given for each month in Table 1
 \bar{R} ; Ratio of the daily radiation on an inclined surface to that on a horizontal surface for the month
 \bar{R}_b ; Daily ratio of the extraterrestrial radiation on an inclined surface to that on a horizontal surface for the month
 S ; Angle of inclination from the ground, deg.
 δ ; Solar declination, deg.
 ϕ ; Latitude, deg.
 ω ; Hour angle, deg.
 ω_b ; Sunset hour angle for a horizontal surface, deg.
 ω'_s ; Sunset hour angle for an inclined surface, deg.
 ρ ; Albedo

* 正會員, 陸軍士官學校

1. 序 論

太陽熱에 너지 利用裝置를 設計하는 데에는 任意의 傾斜角으로 設置된 集熱板에 對한 月平均 全日射量 資料가 必要하다.

그러나 大體로 우리가 利用할 수 있는 資料는 水平面日射量이며 傾斜面에 對한 日射量 資料는 거의 없기 때문에 水平面日射量 資料로부터 任意의 傾斜面에 對한 日射量 資料를 評價하는 方法이 要求된다.

傾斜面에 對한 一日全日射量을 計算하기 위해서는 먼저 水平面全日射量을 直達成分과 擴散成分으로 分離하여야 하는데, 여기에 대해서는 이미 많은 研究結果가 發表되어 있다.[1,2,3]

Liu and Jordan [3]은 水平面全日射量에 對한 擴散日射成分의 相關關係를 一日全日射量을 基準한 것과 月平均 一日全日射量을 基準한 것의 두가지로 發表하였으며, 또 다른 論文[4]에서는 南向 傾斜面에 對한 每月의 平均 一日全日射量을 推定하는 方法을 提示하였는데, Klein[5]은 이 技法을 연장하여 任意 方向의 傾斜面에 對한 月平均 一日全日射量의 計算方法을 提示하였다.

여기서는 參考文獻[4]의 計算方法을 제시하고 韓國의 水平面 日射量 資料[6]로부터 "f-Chart method"[7]에 依한 太陽熱이용 시스템의 設計에 적용할 수 있는 南向面에 對한 月平均 水平面全日射量에 對한 月平均 傾斜面全日射量의 比를 나타내는 R 表를 作成하였다.

2. 理論解析

月平均 一日 水平面全日射量을 大氣圈外에서 一日 水平面全日射量에 對한 比로 表示하면

$$R = \bar{I} / \bar{I}_0 \dots\dots\dots(1)$$

그런데 大氣圈外 水平面全日射量 \bar{I}_0 는 地球와 太陽間의 거리에 따라서 달라지므로, 地球와 太陽間의 平均거리에서의 大氣圈外 法線面日射量인 太陽常數 I_{sc} 를 날자에 따라 수정하고, 이에 다시 水平面에 對한 入射角을 곱하여 구한다.

$$I_{oh} = I_{sc} [1 + 0.033 \cos(\frac{360n}{365})] \cdot \cos \theta_h \quad (2)$$

水平面에 對한 入射角은

$$\cos \theta_h = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \dots\dots\dots(3)$$

太陽赤緯 δ 는 Cooper의 近似式에 의하면

$$\delta = 23.45 \sin[360(284 + n)/365] \dots\dots\dots(4)$$

하루중에 大氣圈外의 水平面이 받게 되는 一日全日射量은 式(3)을 積分하여 구한다. 매 시간 은 $2\pi/24$ radian 이므로

$$\begin{aligned} (I_o)_n &= I_{sc} [1 + 0.033 \cos(360n/365)] \int_{-\omega_s}^{\omega_s} (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta) d(\frac{2\pi}{24} \cdot \omega) \\ &= \frac{24}{\pi} I_{sc} [1 + 0.033 \cos(360n/365)] (\cos \varphi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta) \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

여기서 ω_s 는 日沒時間의 時間角이며, 式(3)의 $\theta_h = 90^\circ$ 로 하면

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta \dots\dots\dots(6)$$

式(5)에서 구한 $(I_o)_n$ 은 n 일의 값이므로 每月의 平均値는

$$\bar{I}_o = \frac{1}{(m_2 - m_1)} \sum_{n=m_1}^{m_2} (I_o)_n \dots\dots\dots(7)$$

여기서 m_1 과 m_2 는 每月의 첫날과 마지막날이며, \bar{I}_o 는 一日 大氣圈外 水平面全日射量을 式(5)로 구하고 式(7)로부터 1個月間의 平均値를 구하여 比較하면 每月의 平均値가 되는 날자가 決定되므로 그 날을 基準하여 式(5)로부터 直接 計算할 수 있다.

每月의 16日을 基準하면 \bar{I}_o 의 값에 弱干의 誤差가 생기는데 특히 6月과 12月에 그 程度가 심하다. 每月의 平均値가 되는 計算日을 Table 1과 같다.

傾斜面에 對한 月平均 一日全日射量은 Liu and Jordan[4]에 의하면 다음 식으로 구한다.

$$\bar{I}_r = \bar{R} \bar{I} \dots\dots\dots(8)$$

여기서 \bar{R} 는 경사면전일사량을 直達成分과 擴散成分 그리고 反射成分으로 分離하고 이들 각각의 水平面全日射量에 對한 比를 개별적으로 구하여 계산한 것인데, 擴散日射와 反射日射는 모든 方向에서 同一하다고 假定하면 다음과 같이 표시된다.

Table 1. Recommended average day for each month

Month	Day of the year, n	Date
Jan.	17	17 Jan.
Feb.	47	16 Feb.
Mar.	75	16 Mar.
Apr.	105	15 Apr.
Mar.	135	15 May.
June	162	11 June.
July	198	17 July
Aug.	228	16 Aug.
Sept.	258	15 Sept.
Oct.	288	15 Oct.
Nov.	318	14 Nov.
Dec.	344	10 Dec.

$$\bar{R} = (1 - \bar{I}_d / \bar{I}) \bar{R}_b + \bar{I}_d / \bar{I} (1 + \cos S) / 2 + \rho (1 - \cos S) / 2 \dots\dots\dots(9)$$

여기서 \bar{R}_b 는 직달日射成分에 對한 變換係數인데, 同一한 期間中의 水平面 直達日射成分에 對한 傾斜面 直達日射成分의 比를 나타내므로 이의 計算基準은 반드시 地表面이어야 하므로 雲量指數와 大氣中의 水蒸氣等에 의해 決定되는 大氣透透率의 函數이다.

地表面의 日射量에 基礎를 둔 正解法^[8]도 있지만, 大氣의 影向이 전혀 없는 大氣圈外日射量을 基準한 近似解法^[4]이 提示되었다.

\bar{R}_b 를 大氣圈外 水平面 一日全日射量에 對한 傾斜面日射量의 比로 表示하면, 南向面에 對해서는

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi - S) \cos \delta \sin \omega'_s + \pi / 180 \omega'_s \sin(\phi - S) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \pi / 180 \omega_s \sin \phi \sin \delta} \dots\dots\dots(10)$$

여기서 ω'_s 는 傾斜面에 對한 日沒時間角이며, 다음 식으로부터 구한다.

$$\omega'_s = \min \{ \omega_s, \arccos [-\tan(\phi - S) \tan \delta] \} \dots\dots(11)$$

式(9)의 \bar{I}_d 는 完測值가 거의 없기 때문에 平均 一日全日射量의 測定值로부터 계산하여야 하는데, 이의 近似式으로 Liu and Jordan에 의한 다음식이 주로 사용되고 있다.

$$\bar{I}_d / \bar{I} = 1.390 - 4.027 \bar{K}_T + 5.531 \bar{K}_T^2 - 3.108 \bar{K}_T^3 \quad (12)$$

여기서,

$$\bar{K}_T = \bar{I} / \bar{I}_0 \dots\dots\dots(13)$$

이며 大氣의 晴明指數이다.

3. 結 果

Table 2는 式(5)에 Table 1의 추천 每月 平均日 n을 代入하여, 南韓을 緯度로 7等分하여 구한 月平均 大氣圈外 水平面一日全日射量이다.

直達日射成分의 水平面에 對한 傾斜面의 그것의 比 \bar{R}_b 는 傾斜角과 緯度의 函數로 Table 3에 表示하였는데, 이 表에 나타나 있지않는 中間 緯度에 對해서는 補間法으로 구하여도 된다.

Table 4는 參考文獻^[6]의 1960~1969年의 南韓의 12個 地方의 水平面一日全日射量 資料로부터 算出한 \bar{K}_T 의 값이다.

Table 5는 地表面의 反射率 $\rho=0.2$ 로 하여 計算한 南韓의 代表的인 5個 地方에 對한 傾斜面 一日全日射量을 구하는 \bar{R} 의 값을 4個의 傾斜角으로 表示한 것이다. 地表面 反射率을 0.2로 한 것은 式(9)와 $\rho=0.2$ 로 計算한 \bar{R} 의 값이 完測值와 比較的 一致한다는 많은 研究結果에 따른 것이다.

4. 結 論

太陽熱시스템의 設計에 必要 不可缺한 資料인 月平均 傾斜面一日全日射量을 求하는 \bar{R} 表를 南韓의 代表的인 5個 地方에 對하여 作成하여 그 結果를 Table 5에 表示하였다.

그 外의 地方에 대해서는 그 地方의 緯度와 集熱權의 傾斜角에 따라 Table 3으로부터 \bar{R}_b 를 구하고, Table 4에서 \bar{K}_T 를 구하여 式(12)로부터 \bar{I}_d / \bar{I} 를 구한 다음에 式(9)에 이 값들을 代入하여 \bar{R} 를 구할 수 있다.

南向傾斜面の月平均 全日射量

Table 2. Monthly average daily extraterrestrial radiation, kcal/m²

Lat	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
33	4.607	5.772	7.198	8.578	9.465	9.795	9.608	8.898	7.680	6.178	4.873	4.276
34	4.465	5.646	7.103	8.530	9.461	9.813	9.617	8.868	7.603	6.062	4.735	4.130
35	4.321	5.518	7.006	8.479	9.455	9.829	9.622	8.837	7.524	5.944	4.596	3.995
36	4.178	5.389	6.907	8.426	9.446	9.843	9.626	8.802	7.443	5.824	4.456	3.889
37	4.033	5.258	6.806	8.371	9.435	9.854	9.627	8.765	7.359	5.703	4.315	3.663
38	3.888	5.126	6.703	8.313	9.422	9.864	9.627	8.726	7.273	5.580	4.174	3.557
39	3.743	4.993	6.597	8.253	9.407	9.871	9.624	8.685	7.185	5.455	4.032	3.400

Table 3. \bar{R}_b for south facing svrfaces

$\phi-S$	Lat	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
15°	33	1.497	1.337	1.182	1.050	0.963	0.927	0.943	1.011	1.126	1.282	1.452	1.551
	34	1.543	1.366	1.197	1.056	0.964	0.925	0.942	1.014	1.137	1.306	1.492	1.602
	35	1.591	1.397	1.214	1.062	0.964	0.924	0.942	1.018	1.149	1.332	1.535	1.656
	36	1.642	1.429	1.231	1.068	0.965	0.923	0.941	1.022	1.162	1.359	1.581	1.714
	37	1.696	1.463	1.250	1.076	0.966	0.921	0.941	1.026	1.175	1.387	1.629	1.777
	38	1.755	1.500	1.269	1.083	0.968	0.921	0.941	1.031	1.189	1.417	1.681	1.844
	39	1.818	1.539	1.289	1.091	0.969	0.920	0.941	1.036	1.203	1.448	1.736	1.916
10°	33	1.611	1.408	1.212	1.046	0.938	0.893	0.913	0.998	1.141	1.339	1.554	1.679
	34	1.659	1.439	1.228	1.052	0.939	0.892	0.912	1.001	1.153	1.364	1.596	1.733
	35	1.710	1.471	1.245	1.058	0.939	0.890	0.912	1.005	1.165	1.391	1.642	1.792
	36	1.765	1.505	1.263	1.065	0.940	0.889	0.911	1.008	1.178	1.419	1.690	1.854
	37	1.823	1.541	1.282	1.072	0.941	0.888	0.911	1.013	1.191	1.448	1.742	1.921
	38	1.886	1.579	1.301	1.079	0.943	0.887	0.911	1.017	1.205	1.479	1.797	1.992
	39	1.953	1.620	1.322	1.087	0.944	0.886	0.912	1.022	1.220	1.512	1.855	2.070
0°	33	1.802	1.518	1.245	1.015	0.869	0.809	0.835	0.949	1.147	1.422	1.721	1.896
	34	1.854	1.551	1.262	1.021	0.870	0.808	0.835	0.952	1.158	1.448	1.768	1.956
	35	1.911	1.585	1.279	1.027	0.870	0.806	0.834	0.956	1.171	1.476	1.817	2.021
	36	1.970	1.622	1.297	1.033	0.871	0.805	0.834	0.960	1.183	1.506	1.870	2.090
	37	2.035	1.660	1.317	1.040	0.872	0.804	0.834	0.964	1.197	1.537	1.926	2.163
	38	2.103	1.701	1.337	1.047	0.873	0.804	0.834	0.968	1.211	1.570	1.986	2.243
	39	2.177	1.744	1.358	1.055	0.875	0.803	0.834	0.972	1.226	1.605	2.050	2.329
-10°	33	1.937	1.582	1.240	0.954	0.777	0.705	0.736	0.874	1.117	1.426	1.837	2.055
	34	1.993	1.616	1.257	0.959	0.777	0.704	0.736	0.877	1.129	1.489	1.886	2.120
	35	2.053	1.652	1.274	0.965	0.778	0.703	0.735	0.880	1.140	1.517	1.938	2.188
	36	2.116	1.689	1.292	0.971	0.779	0.702	0.735	0.883	1.153	1.548	1.993	2.262
	37	2.184	1.729	1.311	0.978	0.779	0.701	0.735	0.887	1.166	1.579	2.052	2.341
	38	2.257	1.771	1.332	0.984	0.781	0.700	0.735	0.891	1.180	1.613	2.116	2.425
	39	2.334	1.816	1.353	0.991	0.782	0.700	0.735	0.895	1.194	1.649	2.183	2.517
-15°	33	1.983	1.596	1.224	0.913	0.723	0.647	0.680	0.826	1.090	1.465	2.873	2.112
	34	2.040	1.630	1.240	0.918	0.723	0.645	0.679	0.829	1.101	1.492	1.923	2.177

ϕ -S	Lat	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
-15°	35	2.100	1.666	1.257	0.923	0.724	0.644	0.679	0.832	1.112	1.521	1.976	2.247
	36	2.165	1.704	1.275	0.929	0.724	0.643	0.678	0.835	1.124	1.551	2.032	2.322
	37	2.234	1.744	1.294	0.935	0.725	0.643	0.678	0.839	1.137	1.583	2.092	2.403
	38	2.308	1.786	1.314	0.942	0.726	0.642	0.678	0.843	1.151	1.616	2.156	2.489
	39	2.387	1.831	1.335	0.949	0.727	0.642	0.679	0.847	1.165	1.652	2.225	2.582
Vert.	33	1.768	1.248	0.746	0.349	0.150	0.085	0.112	0.253	0.567	1.071	1.620	1.941
	34	1.834	1.291	0.774	0.368	0.164	0.097	0.125	0.270	0.590	1.108	1.679	2.016
	35	1.903	1.336	0.802	0.386	0.178	0.109	0.138	0.286	0.614	1.146	1.740	2.095
	36	1.976	1.383	0.831	0.405	0.193	0.121	0.151	0.303	0.638	1.186	1.805	2.179
	37	2.054	1.432	0.861	0.425	0.207	0.134	0.164	0.320	0.663	1.227	1.874	2.268
	38	2.136	1.483	0.892	0.444	0.222	0.146	0.178	0.337	0.688	1.270	1.946	2.363
	39	2.224	1.537	0.923	0.464	0.236	0.159	0.192	0.355	0.714	1.315	2.023	2.465

Table 4. Values of \bar{K}_T

Location	Lat.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Gangreung	37° 45'	0.392	0.342	0.353	0.334	0.318	0.277	0.253	0.275	0.294	0.337	0.359	0.399
Seoul	37° 34'	0.396	0.413	0.408	0.384	0.391	0.353	0.288	0.320	0.381	0.432	0.420	0.442
Chungju	36° 58'	0.287	0.345	0.352	0.565	0.371	0.349	0.304	0.343	0.374	0.380	0.354	0.286
Cheongju	36° 38'	0.324	0.324	0.309	0.309	0.295	0.289	0.274	0.293	0.331	0.343	0.314	0.365
Gimcheon	36° 08'	0.367	0.346	0.359	0.357	0.368	0.361	0.302	0.383	0.383	0.383	0.399	0.414
Iri	35° 55'	0.351	0.355	0.404	0.408	0.409	0.385	0.335	0.413	0.357	0.365	0.333	0.378
Gyeongju	35° 50'	0.301	0.290	0.355	0.317	0.305	0.310	0.275	0.345	0.338	0.310	0.343	0.364
Gimhae	35° 14'	0.309	0.301	0.339	0.258	0.291	0.283	0.269	0.321	0.306	0.304	0.308	0.349
Jinju	35° 11'	0.444	0.466	0.478	0.461	0.445	0.401	0.327	0.433	0.408	0.442	0.453	0.464
Gwangju	35° 08'	0.354	0.352	0.408	0.428	0.442	0.429	0.375	0.476	0.438	0.417	0.400	0.384
Mogpju	34° 47'	0.407	0.379	0.422	0.368	0.365	0.372	0.344	0.429	0.413	0.450	0.486	0.442
Jeju	33° 31'	0.282	0.279	0.426	0.434	0.438	0.444	0.469	0.517	0.413	0.448	0.433	0.340

Table 5. Values of \bar{R}

ϕ -S	Location	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
15°	Seoul	1.377	1.257	1.132	1.031	0.972	0.950	0.961	0.999	1.083	1.221	1.357	1.463
	Cheongju	1.285	1.186	1.088	1.017	0.972	0.955	0.963	0.995	1.064	1.164	1.248	1.362
	Gimcheon	1.313	1.194	1.103	1.023	0.973	0.952	0.963	1.002	1.075	1.178	1.305	1.390
	Jinju	1.342	1.236	1.127	1.031	0.973	0.951	0.963	1.004	1.075	1.188	1.314	1.393
	Mogpo	1.308	1.191	1.110	1.021	0.973	0.953	0.963	1.003	1.073	1.185	1.320	1.367
0°	Seoul	1.542	1.350	1.152	0.994	0.905	0.873	0.893	0.947	1.076	1.293	1.510	1.676
	Cheongju	1.410	1.249	1.092	0.978	0.909	0.884	0.897	0.945	1.052	1.212	1.349	1.532
	Gimcheon	1.458	1.264	1.116	0.986	0.907	0.875	0.895	0.952	1.069	1.236	1.444	1.582
	Jinju	1.516	1.338	1.156	0.998	0.905	0.872	0.894	0.954	1.071	1.259	1.468	1.601
	Mogpo	1.465	1.270	1.132	0.986	0.908	0.876	0.893	0.954	1.070	1.257	1.483	1.564

南向傾斜面の月平均全日射量

$\phi-S$	Location	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
-15°	Seoul	1.625	1.373	1.116	0.913	0.802	0.766	0.795	0.859	1.019	1.297	1.581	1.797
	Cheongju	1.464	1.253	1.048	0.900	0.814	0.783	0.800	0.859	0.994	1.203	1.386	1.622
	Gimcheon	1.528	1.273	1.077	0.907	0.806	0.767	0.796	0.862	1.013	1.234	1.508	1.688
	Jinju	1.607	1.369	1.126	0.918	0.800	0.762	0.793	0.863	1.017	1.265	1.544	1.720
	Mogpo	1.546	1.286	1.099	0.908	0.809	0.768	0.791	0.863	1.016	1.265	1.565	1.675
Vert.	Seoul	1.450	1.128	0.806	0.567	0.450	0.428	0.473	0.526	0.691	1.028	1.388	1.654
	Cheongju	1.272	1.003	0.746	0.565	0.481	0.456	0.476	0.527	0.669	0.932	1.175	1.459
	Gimcheon	1.339	1.019	0.763	0.555	0.447	0.415	0.458	0.499	0.673	0.957	1.304	1.532
	Jinju	1.423	1.108	0.788	0.534	0.414	0.391	0.440	0.480	0.665	0.978	1.338	1.565
	Mogpo	1.354	1.023	0.765	0.541	0.439	0.402	0.429	0.477	0.660	0.975	1.360	1.515

参 考 文 献

1. J. K. Page, The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S, Proc. UN Conf. on New Sources of Energy, Paper No. S/98, 1961
2. M. Iqbal, Estimation of the monthly average of the diffuse component of total insolation on a horizontal surface, Solar Energy, Vol. 20, No. 1, PP. 101-105, 1978
3. B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation, Solar Energy, Vol. 4, No. 3, PP. 1-19, 1960
4. B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, Daily insolation on surfaces tilted toward the equator, Trans. ASHRAE, PP. 526-541, 1962
5. S. A. Klein, Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces, Solar Energy, Vol. 19, No. PP. 325-329, 1977
6. 金孝徑, 韓國의 地方別 日射量, 空氣調和・冷凍工學, 第5卷, 第3號, PP. 178-197, 1976
7. W. A. Bechman, S. A. Klein and J. A. Duffie, Solar Heating Design by the f-chart Method, Chap. 3, PP. 25-46, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977
8. B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, Availability of solar energy for flat-plate Solar heat collectors, Chapt. V, Application of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings, ASHRAE GRP 170, New York, 1977