한국신·재생에너지학회 2007년도 춘계학술대회논문집 pp.693~697

태양열발전 제어시스템

박 영칠

A Control System for Solar Thermal Power Plant

Young Chil Park

Key words : Control System for Solar Thermal Power Plant, Distributed Control System, Heliostat Sun Tracking Control System

Abstract : A control system for solar thermal power plant is the control system to coordinate the whole system's operation, including management of distributed control systems, process control for optimal operation of total system, monitoring system operating conditions and doing administrative functions. This work, as a progress report, presents the results obtained so far in building a control system for the 1MW solar thermal power plant. To make the control system, we first defined the control system's hierarchy and classified the role of each layer. Then, as the first stage of making control system, we designed and developed the sun tracking control system for heliostat.

Nomenclature

A_H : heliostat azimuth, degree

α_H : heliostat elevation, degree

$He(e_H, n_H, z_H)$: coordinate of the location of heliostat installation position, m

$T(0,0,z_T)$: coordinate of target position on receiver, m

R : unit vector pointing from He to T

S : unit vector pointing from He to sun position

H : unit normal vector of heliostat surface

subscrip

H : heliostat

e : direction along east

n : direction along north

z : direction along zenith

1. 서 론

태양열 발전시스템은 지표면으로 복사되는 태양열을 고밀도로 집광하기 위하여 사용되는 태양열 집열시스템의 구조에 따라 다양한 형태를 가지고 있기는 하나, 크게 (1) Solar Tower형 (2) Parabolic Dish형 또는 (3) Parabolic Trough 형으로 구분된다. 그 중 Solar Tower형 태양열 발전시스템은 Fig. 1 에서와 같이 Heliostat Filed라고 하는 수백 혹은 수천 개의 평판형 거울들이 각각 태양추적을 수행하여 지표면으로 복사되는 태양열을 Filed 중앙에 설치된 타워로 반사시켜 태양열을 집광하는 시스템으로, 대단히 높은 온도와 열량의 획득이 가능하고, 열손실이 작으며, 아울러 높은 밀도의 열에너지 저장이 가능하다는 이점을 가지고 있는 태양열 발전시스템이다.

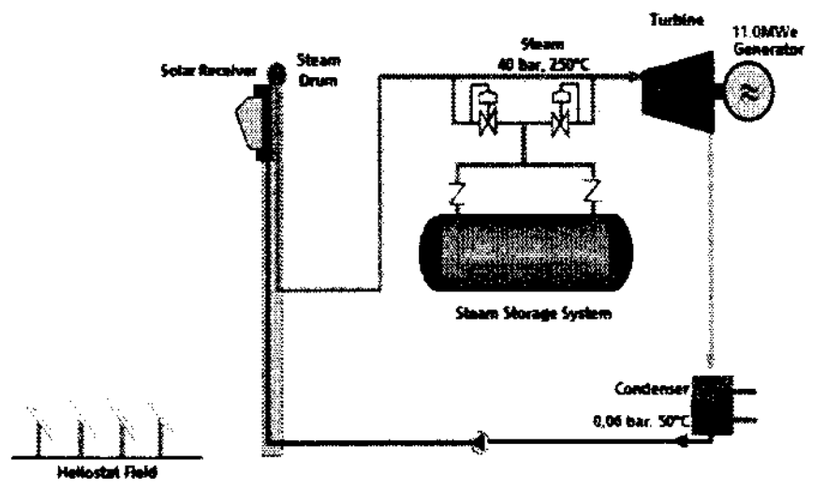

Fig. 1 Schematic Diagram of Solar Thermal Power Plant

태양열 발전시스템은 집광을 위하여 Heliostat가 태양을 추적하는 태양추적시스템을 가지고 있으며, 따라서 구동부를 포함하고 있고, 이에 따른 집열기 또는 반사거울의 안전 운전을

위한 자동운전보호장치를 가지고 있다. 아울러, 집광식 태양열 집열기를 사용하는 고온 태양열 활용시스템은, 태양열 발전시스템에서와 같이 흡수기, 고온 열 이송 및 저장 시스템, 발전 터빈 그리고 전력 변환시스템 등과 같은 여러 종류의 요소시스템들이 복합적으로 구성되어 있으며, 따라서 이들 요소 시스템들의 정상 및 안전 운전을 위한 개별 요소제어시스템은 물론, 요소시스템의 통합된 운전을 위한 통합운전제어시스템을 가지고 있어야 한다.

태양열발전의 제어시스템은 이상과 같은 요소시스템을 통합하고 통합된 시스템의 운전을 위한 자동제어시스템이다.

본 연구는 Solar Tower와 Steam Turbine을 사용하는 1MW급의 태양열 발전시스템의 통합운전제어시스템에 개발에 관한 것으로, 태양열 발전시스템의 자동제어시스템의 구조와 현재까지 본 연구에서 개발된 Heliostat의 태양추적제어기에 관하여 기술한 것이다.

2. 자동제어시스템의 구조

Fig. 2는 현재 본 연구에서 구축하고 있는 태양열발전시스템의 자동제어시스템의 구조를 도식적으로 나타낸 것이다.

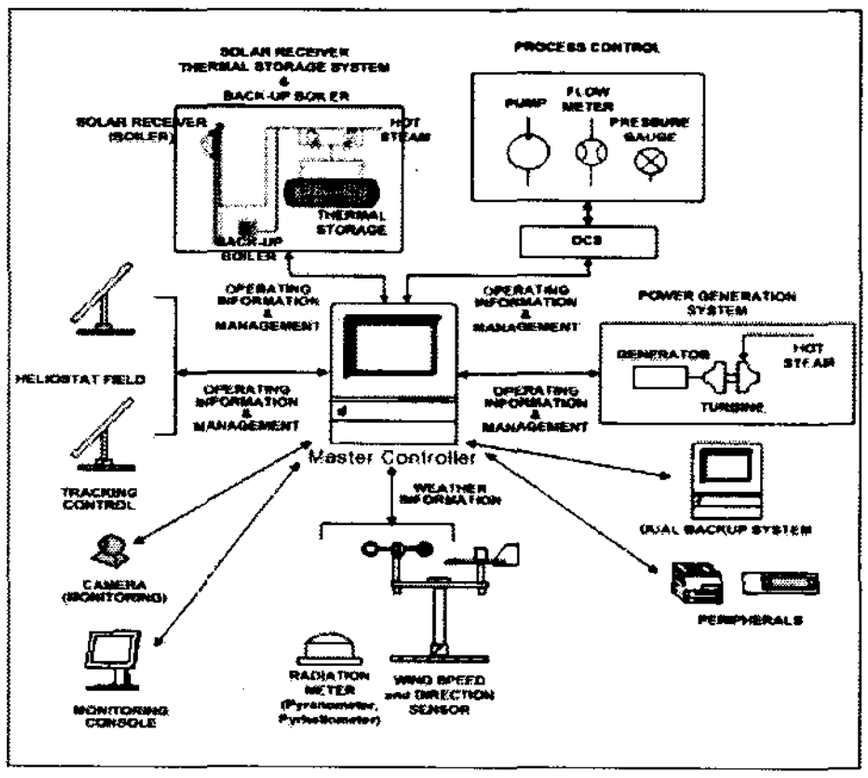

Fig. 2 Block Diagram of Control System

그림에서와 같이, 본 연구에서 구축하고 있는 자동제어시스템은 우선 태양열 발전시스템을 구성하는 Heliostat, 집열기, 발전기 등과 같은 요소시스템의 개별 제어시스템을 통합 관리하는 분산제어시스템(Distributed Control System), 통합된 시스템의 정상 및 최적 운전을 위한 공정제어시스템(Process Control for Optimal Operation of Whole System), 통합된 시스템의 운전상태 감시를 위한 운전상태 모니터링시스템(Monitoring System Operating Condition) 그리고 운전 데이터의 저장 및 처리 등과 같은 시스템 관리 기능으로 구성되어 있다.

아울러 본 연구에서 구축하고 있는 자동제어시스템은 데이터 통신을 위한 Network으로 구성된 분산제어시스템(Networked Distributed Control System)으로 구성되어 있으며, 분산제어기 층(Distributed Controller Layer), 통합제어기(Master Controller/Host Level Controller Layer) 그리고 운전정보 관리 층(Information Management Layer)와 같은 3개의 계층으로 구성된다.

2.1 분산제어기 층

분산제어기 층은 태양열 발전시스템을 구성하는 각각 요소시스템의 자동제어시스템들로 구성된 층으로서, 각각의 요소 시스템에 설치된 마이크로프로세서 기반의 독립 제어기가 센서를 사용하여 요소시스템의 운전 정보를 취득하고, 이를 기반으로 하여 각각의 요소시스템의 운전을 수행하는 자동제어시스템이다.

현재 본 연구에서 구성하고 있는 태양열 발전시스템의 분산제어기에는 다음과 같은 것들이 있으며, 이들 개별 제어기에 대한 개발 및 분석이 현재 진행되고 있다.

① Heliostat 태양추적시스템
② Receiver Process Control System
③ 열저장시스템의 자동제어시스템
④ Back Up Boiler의 자동제어시스템
⑤ 발전시스템의 자동제어시스템
⑥ 공정제어시스템(DDC)
⑦ 운전정보 취득시스템(DDC)

2.2 통합제어기

통합제어기는 분산제어기 층을 통합하는 기능을 수행하는 제어시스템으로, 태양열 발전시스템의 통합된 운전과 전체시스템의 최적 운전을 위한 제어 기능의 구현을 위한 시스템이다. 또한 태양열 발전시스템의 통합제어기는 각각의 Heliostat가 반사시키는 태양광의 집열기 상의 목표지점을 통제하는 역할을 수행하는 시스템이다.

태양열 발전시스템의 모든 분산제어시스템들은 통신 네트워크에 의하여 연결되어 있으며, 또한 운전 중 발생 가능한 오동작에 대비하여 Dual Back Up System으로 구성되어 있다.

2.3 운전 정보 관리 층

운전 정보 관리 층은 태양열 발전시스템의 자동제어시스템의 가장 상위에 위치하는 계층으로, 각각의 분산제어기로부터 전송되어 오는 각각 요소시스템의 운전 정보를 취합하고, 저장 관리하며, 아울러 취득한 정보의 분석, 가공, 표시 그리고 출력을 위한 기능을 수행한다.

또한 운전 정보 관리 층은 시스템 운전 중 발생 가능한 오동작에 대한 예측 및 대응, 안전 운전을 위한 데이터의 분석 등과 같은 기능을 동시에 수행한다.

3. 통신 네트워크

태양열 발전시스템의 통신 네트워크(Communication Network)는 Master Controller와 분산제어기 층에 소속되어 있는 개별 제어시를 연결하기 위한 통신망으로서 태양열 발전시스템을 구성하는 중요한 요소 시스템이다. 또한 태양열 발전시스템의 통신 네트워크는 발전시스템의 통합 관리를 수행하고 있는 Master Controller와 원격지에 위치하는 컴퓨터 간의 데이터 통신을 위한 통신망으로서의 역할도 수행한다.

현재 본 연구에서는 구성하고 있는 통신 네트워크는 LAN을 기반으로 하여, Fig. 3에서와 같은 TCP/IP 프로토콜을 사용하는 IEEE 802.3 규약을에 따른 통신망이다.

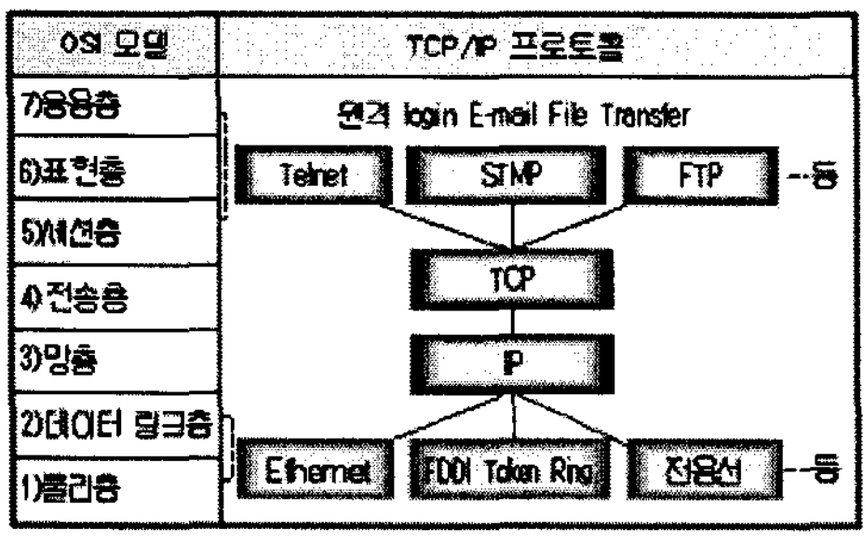

Fig. 3 TCP/IP Protocol

또한 본 연구에서는 1MW급 태양열 발전시스템이 설치되는 중국 현지와 실시간 운전 데이터의 송수신을 위한 통신망으로서 INTERNET을 사용하며, FTP에 의한 데이터 전송, Telnet을 이용한 원격 Login 기능을 사용하는 시스템을 구축하고 있다.

4. Heliostat 태양추적시스템

Heliostat 태양추적시스템은 Heliostat Field를 구성하는 각각의 Heliostat로 입사되는 태양광을 집열기의 지정된 목표 지점으로 반사시키기 위하여 개별 Heliostat의 방위각 및 고도각을 제어하는 자동제어시스템이다.

Fig. 4는 현재 본 연구에서 개발된 Heliostat 태양추적제어기의 구조를 도식적으로 나타낸 것이다.

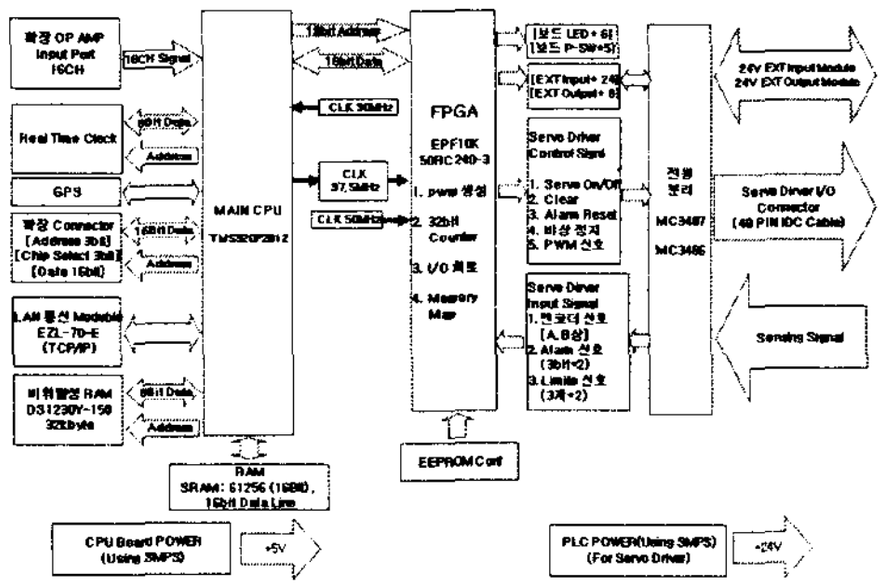

Fig. 4 Heliostat Sun Tracking Controller

그림에서와 같이 본 연구에서 개발된 태양추적제어기는 DPS(TMS320F2812) 기반의 독립형 제어기로서, Heliostat의 태양추적을 위하여 RTC(Real Time Clock) 및 GPS 수신모듈에 의하여 설정되는 시간과 Heliostat가 설치되어 있는 지점의 위도 및 경도를 사용하여 현재 시간에서의 태양위치를 계산한다. 태양추적시스템은 이와 같이 계산된 태양위치와 Master Controller로부터 LAN을 통하여 전송되어오는 집열기의 목표지점(Target Position)을 사용하여, 현재 시간에서 요구되는 Heliostat의 방위각과 고도각을 계산한다.

4.1 Heliostat 방위각 및 고도각 계산

Heliostat로 입사되는 태양광을 집열기의 특정 목표지점(Target Position)으로 반사시키기 위하여 Heliostat는 태양위치의 변화에 따라 Heliostat의 방향(Surface Normal Direction)을 변화시켜 주어야 한다. 즉 Heliostat 태양추적시스템은 태양위치의 변화에 따라 Heliostat의 방향을 제어함으로서 태양으로부터 입사되는 태양광이 항상 지정된 목표지점으로 반사되도록 한다.

Heliostat 태양추적시스템이 Heliostat의 방향 제어를 수행하기 위하여 태양추적시스템은 우선 현재 시간의 태양위치를 계산하고 이를 기준으로 하여 요구되는 Heliostat의 방향을 계산한다. Fig. 5는 임의 시간에서의 태양 방위각(Sun Azimuth Angle)과 고도각(Sun Elevation Angle)으로 표시되는 태양위치에 대하여 태양으로부터 입사되는 태양광을 집열기의 목표지점으로 반사시키기 위한 Heliostat의 방향을 나타내는 Heliostat 방위각(Heliostat Azimuth) A_H 과 고도각(Heliostat Elevation) α_H를 표시한 것이다. 그림에서와 같이 Heliostat 방위각 A_H는 Heliostat가 설치되어 있는 지점의 정북 방향으로부터 Heliostat의 법선방향을 나타내는 벡터가 지표면에 투영되어 형성되는 선분까지의 각도로 정의되며, Heliostat 고도각 α_H는 지표면과 Heliostat 법선방향 벡터가 이루는 각으로 정의된다.

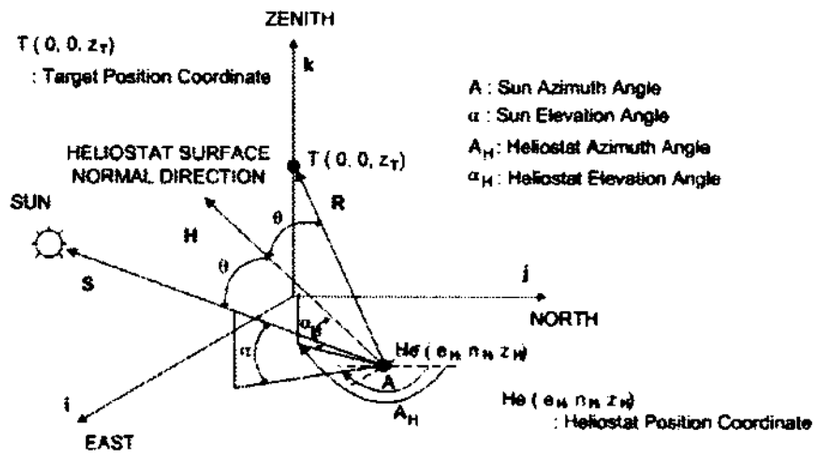

Fig. 5 Heliostat Azimuth and Elevation

Heliostat의 방위각 및 고도각 계산을 위하여, Heliostat가 위치하고 있는 지점의 좌표 $He(e_H, n_H, z_H)$, Heliostat에서 반사된 태양광이 집광되는 목표지점의 좌표 $T(0,0,z_T)$를 사용하여, He 로부터 목표지점 T를 향하는 단위벡터 R, 태양을 향하는 단위벡터 S, 그리고 Heliostat 반사면의 법선방향 단위벡터 H를 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\boldsymbol{R} = \frac{(0-e_H)\boldsymbol{i} + (0-n_H)\boldsymbol{j} + (z_T - z_H)\boldsymbol{k}}{\sqrt{e_H^2 + n_H^2 + (z_T - z_H)^2}} = R_e\boldsymbol{i} + R_n\boldsymbol{j} + R_z\boldsymbol{k} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{H} = H_e\boldsymbol{i} + H_n\boldsymbol{j} + H_z\boldsymbol{k} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{S} = S_e\boldsymbol{i} + S_n\boldsymbol{j} + S_z\boldsymbol{k} = \cos\alpha\ \sin A\ \boldsymbol{i} + \cos\alpha\ \cos A\ \boldsymbol{j} + \sin\alpha\ \boldsymbol{k} \quad (3)$$

또한 Heliostat 법선을 기준으로 하는 태양광의 입사각 및 반사각을 나타내는 각도 θ는 단위벡터의 내적(Dot Product)의 정의에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$\cos(2\theta) = \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{R} = R_eS_e + R_nS_n + R_zS_z = R_e\cos\alpha\ \sin A + R_n\cos\alpha\ \cos A + R_z\sin\alpha \quad (4)$$

Heliostat 법선방향을 표시하는 단위벡터 H는 Fig. 6에서와 같이 단위벡터 R 및 S로부터 Cosine 법칙을 사용하여 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$1^2 = 1^2 + L^2 - 2\times 1\times L\times\cos\theta \rightarrow L = 2\cos\theta \quad (5)$$

$$\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{R} + \boldsymbol{S}}{2\cos\theta}$$

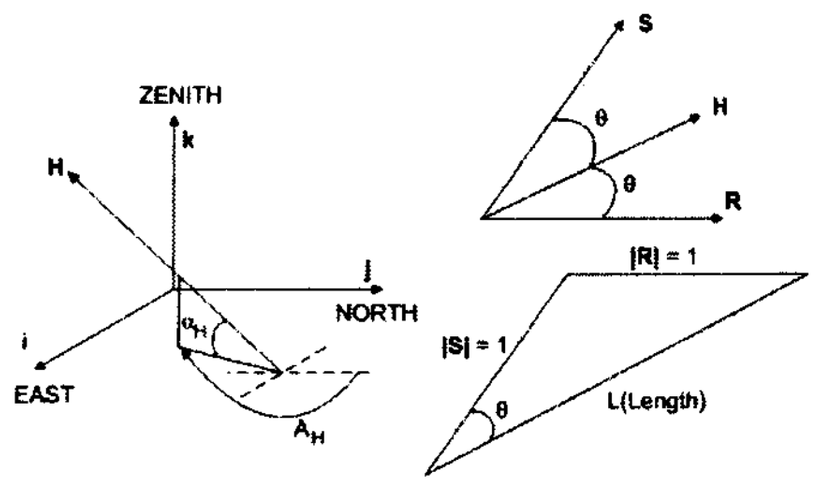

Fig. 6 Heliostat Unit Surface Normal Vector

$$= \frac{(R_e + S_e)\boldsymbol{i} + (R_n + S_n)\boldsymbol{j}}{2\cos\theta} + \frac{(R_z + S_z)\boldsymbol{k}}{2\cos\theta} \quad (6)$$

또한 단위벡터 H는 Fig. 6에서와 같이 Heliostat 방위각 및 고도각을 사용하여 다음과 같이 표시된다.

$$\boldsymbol{H} = \cos\alpha_H\ \sin A_H\ \boldsymbol{i} + \cos\alpha_H\ \cos A_H\ \boldsymbol{j} + \sin\alpha_H\ \boldsymbol{k} \quad (7)$$

Heliostat 방위각 및 고도각은 식 (6) 과 식 (7)을 사용하여 다음과 같이 표시된다.

$$\sin\alpha_H = \frac{R_z + \sin\alpha}{2\cos\theta} \quad (8)$$

$$\sin A_H = \frac{R_e + \cos\alpha\ \sin A}{2\ \cos\theta\ \cos\alpha_H} \quad (9)$$

$$\cos A_H = \frac{R_n + \cos\alpha\ \cos A}{2\ \cos\theta\ \cos\alpha_H} \quad (10)$$

즉 Heliostat 방위각 및 고도각은, 우선 현재시간의 태양 방위각 A 및 고도각 α 그리고 Heliostat가 설치된 지점의 좌표 $He(e_H, n_H, z_H)$ 및 목표지점의 좌표 $T(0,0,z_T)$ 를 식 (4)에 대입함으로서 태양광의 Heliostat의 입사각 또는 반사각을 나타내는 θ를 계산하고, 식 (8)을 사용하여 고도각 α_H를 계산하며, 마지막으로 $0^o \sim 360^o$ 범위의 방위각 A_H를 얻기 위하여 $\sin^{-1}()$ 또는 $\cos^{-1}()$ 함수 대신 식 (9) 및 식 (10)에서 얻어진 $\sin A_H$ 및 $\cos A_H$ 값을 다음과 같이 Atan2() 함수에 사용하여 Heliostat 방위각을 계산한다.

$$A_H = Atan2(\sin A_H,\ \cos A_H) \quad (11)$$

4.2 Heliostat 태양추적시스템 운영체계

Heliostat 태양추적시스템의 운영체계는 Heliostat의 운전을 위한 시스템 운영 프로그램으로 Fig. 7과 같은 구조를 가지고 있다.

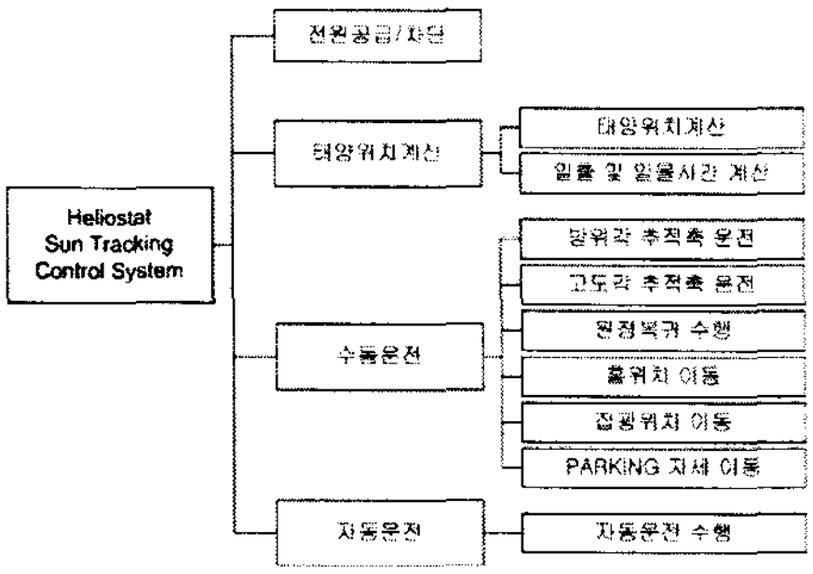

Fig. 7 Heliostat Sun Tracking System O/S

그림에서와 Heliostat 태양추적시스템의 운영체계는 크게 시스템의 전원공급 및 차단 기능 수행, 현재 시간에서의 태양의 방위각 및 고도각과 일출 및 일몰시간 계산을 위한 태양위치계산, Heliostat의 각종 운전 상태를 수동으로 제어하기 위한 수동운전, 그리고 Heliostat의 지속적 태양추적을 자동으로 수행하는 자동운전으로 구성되어 있다.

Heliostat의 자동운전은 우선 현재 시간이 당일 일출 이후이고 일몰 이전 시간인지를 확인하고, Master Controller로부터 송출되어 오는 현재의 운전 모드, 즉 기상 상황 등에 따른 동작 중지 상태인지, 대기상태인지 또는 정상추적 상태인지를 파악하고, 만약 정상추적상태이면, 현재 시간의 태양위치를 계산하고 계산된 태양위치와 목표지점을 기준으로 Heliostat의 방위각 및 고도각을 계산하여 Heliostat의 위치 제어를 지속적으로 수행한다.

Fig. 8은 현재 본 연구에서 개발된 Heliostat 태양추적제어기의 사진이다.

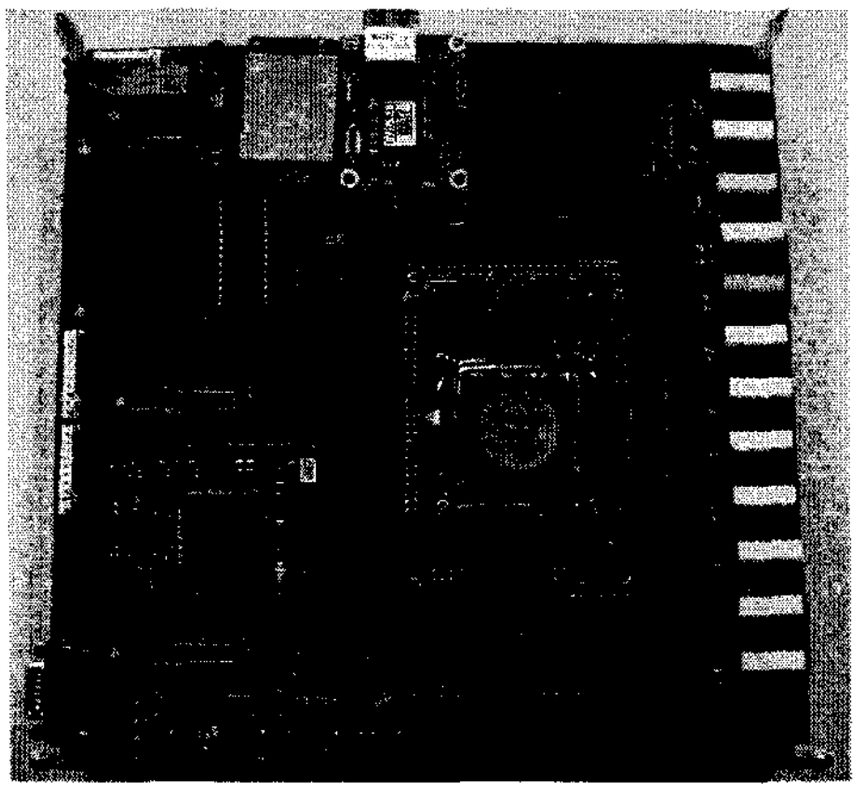

Fig. 8 Photo of Heliostat Sun Tracking Controller

5. 결 론

본 연구는 1MW 태양열 발전시스템의 자동제어시스템 개발을 위한 지금까지의 연구 결과를 정리한 것이다. 현재까지 본 연구에서는 자동제어시스템을 구축하기 위한 제어시스템의 구조를 설계하였으며, 각 계층의 역할을 정의하였다.

설계된 자동제어시스템의 구현을 위하여 본 연구에서는 우선 Heliostat 태양추적제어시스템의 개발을 완성하였으며, 개발된 태양추적제어시스템의 적용 시험을 완료하였다.

본 연구에서 제안된 자동제어시스템의 구성을 위한 연구가 지속될 것이며, 이를 위하여 개별 요소시스템의 운전 조건 분석 및 통합에 대한 연구가 진행되고 있으며, 시스템 통합을 위한 관련 소프트웨어의 개발이 진행되고 있다.

References

[1] Consultant Report, 1999, "Solar Two Central Receiver", California Energy Commission

[2] Alexis B. Zavoico, 2001, "Solar Power Tower Design Basis Document", SAND 2001-2100, Sandia National Laboratories

[3] Dickinson, W. C. and Chermisinoff, P. N., 1982, "Solar Energy Technology Handbook", Dekker Inc.