

태양광 발전(Photovoltaics)의 설계, 감리 및 유지관리



글 _ 이 현 화 (회원 No.8532)
(주)한빛디엔에스 대표이사/기술사

1. 개 요

가. 태양광 이용기술

- 태양광 발전은 태양광을 직접 전기에너지로 변환시키는 기술
- 햇빛을 받으면 광전효과에 의해 전기를 발생하는 태양전지를 이용한 발전방식
- 태양광 발전시스템은 태양전지(solar cell)로 구성된 모듈(module)과 축전지 및 전력변환장치로 구성됨

나. 태양전지에 의한 발전원리

(1) 태양전지 (太陽電池 : solar cell)

- 태양에너지를 전기에너지로 변환할 목적으로 제작된 광전지¹⁾로서 금속과 반도체의 접촉면 또는 반도체의 pn접합에 빛을 조사(照射)하면 광전효과²⁾에 의해 광기전력³⁾이 일어나는 것을 이용한 것

¹⁾ 광전지(光電池 : photocell) : 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 장치

²⁾ 광전효과(光電效果 : Photovoltaic effect) : 일반적으로 물질이 빛을 흡수하여 자유로이 움직일 수 있는 전자, 즉 광전자(光電子)를 방출하는 현상

³⁾ 광기전력(光起電力 : photoelectro-motive force): 반도체에 빛을 조사했을 때 발생하는 전압

⁴⁾ 반도체(半導體 : semiconductor) : 전기전도(電氣傳導)가 전자(電子 : electron)와 정공(正孔:hole)에 의해 이루어지는 물질로서 그의 전기저항률 즉 비저항(比抵抗)이 도체와 절연체 비저항값의 중간 값을 취하는 것 반도체의 재료로서는 실리콘, 갈륨비소, 황화카드뮴 등이 있으나 보통 실리콘이 많이 사용됨

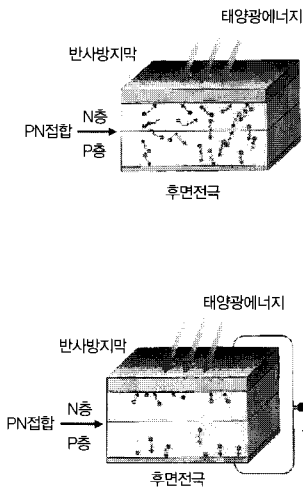
- 금속과 반도체⁴⁾의 접촉을 이용한 것으로는 셀렌광전지, 아황산구리 광전지가 있고, 반도체 pn접합을 사용한 것으로는 태양전지로 이용되고 있는 실리콘 광전지가 있음

(2) PN접합에 의한 발전원리

- 태양전지는 실리콘으로 대표되는 반도체이며 반도체기술의 발달과 반도체 특성에 의해 자연스럽게 개발됨
- 태양전지는 전기적 성질이 다른 N(negative)형의 반도체와 P(positive)형의 반도체를 접합시킨 구조를 하고 있으며 2개의 반도체 경계부분을 PN접합(PN-junction)이라 일컫음
- 이러한 태양전지에 태양 빛이 닿으면 태양 빛은 태양전지 속으로 흡수되며, 흡수된 태양 빛이 가지고 있는 에너지에 의해 반도체내에서 정공(正孔: hole)(+)과 전자(電子:electron)(-)의 전기를 갖는 입자(정공과 전자)가 발생하여 각각 자유롭게 태양전지 속을 움직이게 되지만, 전자(-)는 N형 반도체 쪽으로, 정공(+)은 P형 반도체 쪽으로 모이게 되어 전위가 발생하게 되며 이 때문에 앞면과 뒷면에 붙여 만든 전극에 전구나 모터와 같은 부하를 연결하게 되면 전류가 흐르게 되는 데 이것이 태양전지의 PN접합에 의한 태양광발전의 원리임

〈PN접합에 의한 태양광 발전의 원리〉

대표적인 결정질 실리콘 태양전지는 실리콘에 보론(boron:붕소)을 첨가한 P형 실리콘반도체를 기본으로 하여 그 표면에 인(phosphorous)을 확산시켜 N형 실리콘 반도체층을 형성함으로써 만들어짐



이 PN접합에 의해 전계(電界)가 발생함 이 태양전지에 빛이 입사되면 반도체내의 전자(-)와 정공(+)이 여기되어 반도체 내부를 자유로이 이동하는 상태가 됨

자유로이 이동하다가 PN접합에 의해 생긴 전계에 들어오게 되면 전자(-)는 N형 반도체

에, 정공(+)은 P형 반도체에 이르게 됨

P형 반도체와 N형반도체 표면에 전극을 형성하여 전자를 외부회로로 흐르게 하면 전류가 발생됨

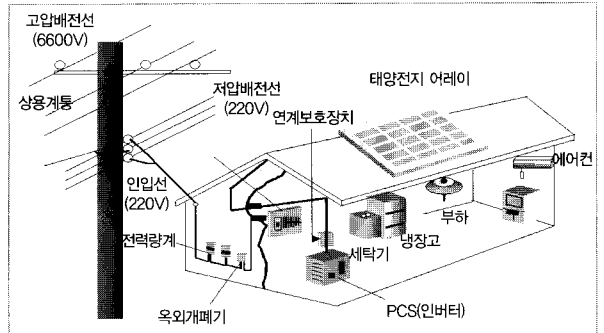
다. 태양전지의 역사

- 1839년 E. Becquerel(프랑스)이 최초로 광전효과(Photovoltaic effect)를 발견
- 1870년대 H. Hertz의 Se의 광전효과연구이후 효율 1~2%의 Se cell이 개발되어 사진기의 노출계에 사용
- 1940년대~1950년대초 초고순도 단결정 실리콘을 제조할 수 있는 Czochralski process가 개발됨
- 1954년 Bell Lab.에서 효율 4%의 실리콘 태양전지를 개발
- 1958년 미국의 Vanguard 위성에 최초로 태양전지를 탑재한 이후 모든 위성에 태양전지를 사용
- 1970년대 Oil shock 이후 태양전지의 연구개발 및 상업화에 수 십억 달러가 투자되면서 태양전지의 상업화가 급진전
- 현재 태양전지효율 7~17%, 수명 20년 이상, 모듈가격 \$6/W 내외, 발전단가 \$0.25~0.5/kWh

라. 태양광의 특징 및 시스템 구성도

장점	단점
- 에너지원이 청정·무제한	- 전력생산량이 지역별 일사량에 의존
- 필요한 장소에서 필요량 발전가능	- 에너지밀도 낮아 큰 설치면적 필요
- 유지보수가 용이, 무인화 가능	- 설치장소가 한정적, 시스템 비용이 고가
- 장수명(20년 이상)	- 초기투자비와 발전단가 높음

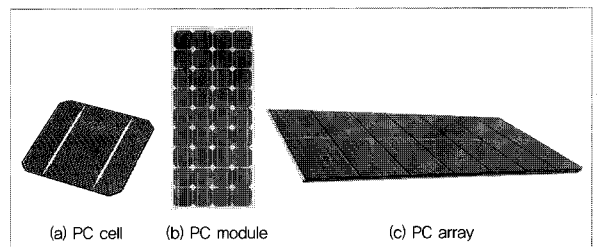
<태양광 발전시스템 구성도>



2. 태양광 발전

태양광 발전시스템은 반도체 소자를 이용하여 광 에너지를 흡수시켜 전기에너지를 발생시키는 태양전지와 태양전지에서 발생된 전력을 부하 측에 이용될 수 있도록 연결해 주는 주변기기(BOS : balance of system)로 나누어진다. 광전 변환 소자인 태양 전지를 직·병렬로 연결시켜 적절한 단위의 전력을 얻도록 상품화한 태양전지 연결 판을 태양전지 모듈(photo voltaic module 또는 solar cell module)이라고 한다. 또한 태양광 발전을 위해서는 이와 같은 모듈을 직·병렬로 연결시켜 원하는 출력을 얻도록 배열시킨 것을 태양광 전지 어레이(photovoltaic array)라고 한다. 그림 2.1 (a)은 PV cell의 사진이며 그림 2.1(b)는 PV module, 그림 2.1(c)는 PV array의 사진을 보여주고 있다.

태양광 발전시스템(photovoltaic power system)이라고 하는 것은 발전부인 태양전지 어레이와 제어 또는 전력 조정부인 주변기기를 이용목적에 적합하도록 조화시켜서 전력공급을 피하는 시스템을 말한다. 따라서 태양광 발전시스템의 핵심소자는 태양전지이며 그의 전기적 특성과 재료에 대하여 간단히 설명한다.



[그림 2.1] 태양광 전지의 셀과 모듈 및 어레이

가. 태양전지

(1) 태양전지의 전기적 특성

태양전지는 실리콘 등의 반도체 소자가 광 에너지를 받아서 전기 에너지로 변환되는 특성인 광기전력 효과(photovoltaic effect)와 광전류 효과(photo-current effect)를 이용하는 다이오드 접합(diode junction)구조를 갖는 반도체 소자이다. 따라서 암(dark) 상태의 태양전지는 넓은 pn접합의 면적을 갖는 다이오드의 전압-전류특성과 유사하다. 그림 2.2는 일반 Si 다이오드의 전압-전류특성과 태양전지의 전압-전류특성을 하나의 전압 전류 평면에 나타내고 있다. 그림 2.2에서 점선의 곡선은 일반 Si

그림 2.2의 4사분면에서 특성은 빛이 태양전지에 입사될 때이다. 즉, 광이 태양전지에 입사될 때, 광 에너지는 자유전하 캐리어(carrier)를 발생시키며, 태양전지 등가회로에 광 전류원(I_{ph})을 생성시킨다. 또한 이 광전류는 태양광의 입사량에 의존하는 크기를 갖는다. 따라서 태양전지의 전압-전류 특성곡선은 암(dark) 상태 태양전지의 전압-전류 특성곡선에 광전류(I_{ph})를 중첩시켜 나타낸 것이다. 즉, 암(dark) 상태에서의 태양전지 전압-전류 특성곡선을 전류축의 아래쪽으로 광전류(I_{ph})만큼 이동시킨 것이다. 이때 이상적인 태양전지의 등가회로의 출력전압과 전류는 다음식과 같다.

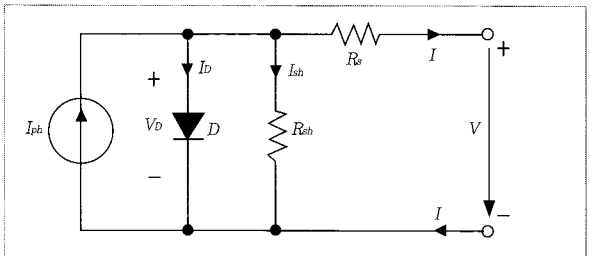
$$V = V_D \tag{2-3}$$

$$I = I_{ph} - I_D, \quad (I_{ph} = c_o k) \tag{2-4}$$

여기서 c_o 는 광전류 계수(m^2/V)이며, k 는 태양전지의 입사량(W/m^2)이다.

그림 2.3은 이상적인 전류원(I_{ph})과 다이오드(D), 직렬저항(R_s) 및 누설전류에 의한 병렬저항(R_{sh})으로 구성된 태양전지의 등가 회로이다.

또한 그림 2.3의 태양전지 전류와 전압은 다음 식과 같다.



【그림 2.3】 태양전지의 등가회로

$$I = I_{sh} - I_D - I_{Rsh}, \quad I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}}$$

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{(V + IR_s)}{V_T}} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \tag{2-5}$$

여기서 I_o 는 식 다이오드의 역포화 전류를 나타낸다. 전압은 식 (2-5)에 그림 2.3을 이용하여 보완한다.

$$V = V_T \ln \left\{ \frac{(I_{ph} - I + I_o)}{I_o} \right\} - IR_s \tag{2-6}$$

다이오드의 특성곡선이며, 순방향 문턱전압이 0.7(V)이고 역방향 breakdown전압이 150(V)임을 알 수 있다. 그러나 암 상태에서 단결정 태양전지의 특성은 전압-전류 평면의 4사분면에서 실선의 곡선과 같이 일반 Si 다이오드의 특성과 유사하나 문턱전압(threshold voltage)이 대략 0.5(V)이고 역방향 breakdown전압은 20(V) 근처에 있다. 또한 암 상태에서 이상적인 태양전지의 등가 회로는 광 전류원이 없는 다이오드와 같으며, 외부회로와 연결할 경우 p형인 양극(anode)이 (+)출력 단자이며, n형인 음극(cathode)이 (-)출력 단자가 된다. 이때 출력 전압과 전류는 다음식과 같다.

$$V = V_D \tag{2-1}$$

$$I = -I_D = -I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \tag{2-2}$$

여기서 V_D 는 다이오드 양단의 전압이며, V_T 는 열 전압($\frac{kT}{q}$)이다.

(2) 태양전지의 재료

태양전지 제조에 가장 많이 사용된 반도체 재료는 단결정 실리콘이다. 단결정 실리콘으로 만든 태양전지의 효율이 기타 재료로 만든 태양전지에 비해 변환효율이 높기 때문이다. 또한 다결정 실리콘 태양전지는 원재료로 low level의 실리콘 웨이퍼를 사용함으로써 효율은 단결정 실리콘에 비해 낮은 반면 가격은 싸다. 따라서 응용분야도 주택용 시스템 등 주로 분산형 시스템 등에 이용된다. 단결정 및 다결정 실리콘은 bulk 상태의 원재료로부터 태양전지를 만들기 때문에 원 재료비는 비싸고, 공정 자체도 복잡하여 가격의 절감 측면에서는 한계가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 고안된 방법이 유리와 같이 값싼 기판위에 박막형태의 태양전지를 증착시키는 방안이 출현되었다. 이는 기존의 박막 제조공정을 이용할 경우, 제조 가격을 보다 저렴한 방법으로 태양전지의 대량생산이 가능하다. 박막 태양전지 중에 초기에 개발된 것이 비정질 실리콘으로 기존 결정질 실리콘 태양전지의 약 1/100에 해당하는 두께만으로도 태양전지의 제조가 가능하였다. 그러나 결정질 실리콘 태양전지에 비해 효율이 낮고, 특히 초기 빛에 노출될 경우 효율이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 따라서 대규모 발전용으로는 사용하지 못하고, 소규모 가전제품의 소용량 전원용으로 주로 사용되고 있다. 최근에 출현한 박막 태양전지는 화합물 반도체의 핵심 재료로서 CdTe, CuInSe2 계열이 있다. 특히 CdTe는 비정질 실리콘에 비해 효율이 높고, 또한 초기 열화 현상이 없는 등 비교적 안정성이 높은 태양전지로서 소규모 가전 제품용으로 실용화 되어 있으며, 대규모 전력용으로도 사용할

수 있는 방법을 연구 개발 중에 있다. CuInSe2는 실험실적으로 만든 박막 태양전지 중에서 가장 높은 변환효율을 기록하고 있지만 아직 대량생산을 위해서는 많은 문제를 해결해야 한다. 가장 큰 문제는 공정이 복잡하여 대면적화가 어렵다는 점이다. 그 밖에 화합물 반도체 태양전지의 문제점으로는 사용 가능한 재료로서의 자원의 한계가 있다는 점, 그리고 일부 사용 재료의 경우 인체나 환경에 유해할 수 있다는 가능성 등이 있다. 최근에 주목을 받는 다결정 박막 실리콘은 자원이 풍부한 실리콘을 원재료로 하고 있으며, 박막 태양전지 제조공정을 이용하여 대량생산을 통해 가격을 획기적으로 절감할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그러나 유리 등 값싼 기판위에 양질의 다결정 실리콘 박막을 제조할 수 있는 공정에 대해선 계속 연구 개발 중에 있다.

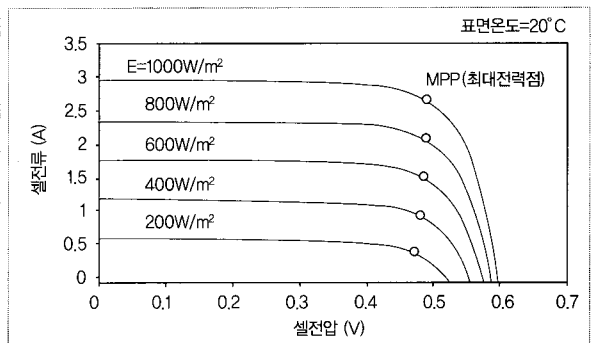
GaAs, InP 등의 결정체로부터 만든 화합물 태양전지는 결정질 실리콘 태양전지보다 매우 높은 효율을 나타내고 있지만, 가격이 매우 높다는 단점이 있다. 따라서 그 용도가 지상 발전용보다는 우주선 등의 전원 공급용으로 국한되어 있다. 가격을 절감하는 문제를 극복해야 지상용으로 사용할 수 있다. 태양전지의 재료는 이용 용도에 따라 표 2.1과 같다.

(3) 태양전지의 최대 전력점과 효율

태양전지의 전기적인 특성은 태양광이 조사될 때에 태양광의 강도에 따라 태양전지의 출력전압과 출력전류가 변화하게 된다. 이때 태양전지 표면에 조사된 태양광의 강도를 일사강도 또는 일사량이라고 하며, 지표면에서는 적도부근에서 최대 1kW/m²의 에너지가 조사되며, 위도가 높아질수록 일사강도는 적어진다. 그리고 태양전지의 용량 표기는 Wp(watt peak) 등으로 표시되고, 여기서 태양전지 출력 측정조건은 태양전지 표면온도가 25℃에서 Isun(일사강도가 1kW/m²)일 때의 용량

[표 2.1] 태양전지에 이용되는 반도체 재료

(1) 태양전지의 재료		
	실리콘 계	단결정 실리콘 (single-crystalline silicon)
		다결정 실리콘 (poly-crystalline silicon)
		비정질 실리콘 (amorphous silicon)
Compound semiconductor	III-V족 화합물 계	GaAs, InP, GaAlAs, GaP, GaInAs 등
	II-VI족 화합물계	CuInSe2, CdS, CdTe, ZnS 등
화합물 또는 적층형	화합물/IV족 계열	GaAs/Ge, GaAlAs/Si, InP/Si 등
	화합물/화합물 계열	GaAs/InP, GaAlAs/GaAs, GaAs/CuInSe2 등
(2) 태양전지의 이용 목적에 따른 재료		
지상용	결정질 형	단결정, 다결정 실리콘, GaAs/Si 등
	박막형	비정질 실리콘, CdS, CdTe, CuInSe2 등
	집광형	GaAs 계열, 적층형 등
위성용	IV족	단결정 실리콘, Ge(저온용)
	GaAs 계열	GaAs/GaAs, GaAs/Ge, InP 등
	적층형(Tandem)	GaAs/Ge, GaInP/GaAs, GaAs/GaAs, GaInAs/InP, GaInAs/GaAs/Ge 등



[그림 2.4] 태양전지 출력 전압-전류 특성에서 일사량(E)의 영향

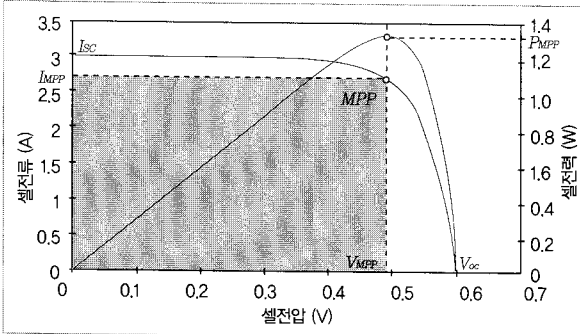


그림 2.5 최대 전력 점을 나타내는 태양전지의 전압-전류와 전압-전력 특성

을 나타낸다. 그림 2.4는 태양전지의 표면온도가 25°C일 때 일사량에 대한 태양전지의 출력 전압-전류특성을 보였다. 특성의 그림에서는 각각의 일사량에 따른 최대 전력점(maximum power point)을 나타내고 있다. 태양전지의 가장 중요한 전기적 파라미터는 단락전류(ISC), 개방전압(VOC), 최대전력전압(VMPP), 최대전력전류(IMPP), 최대 전력점(MPP)이다. 따라서 태양전지의 출력전압, 전류는 부하저항에 따라 크게 변화될 수 있음을 알 수 있다.

그림 2.5의 음영은 1000 W/m²의 태양 입사광에서 태양전지의 표면온도가 25°C일 때 부하에 공급되는 전력을 나타내는 넓이로 나타낸다. 따라서 부하저항의 크기는 이 넓이가 최대인 범위 안에 있어야 한다. 만약에 부하저항을 너무 적게 하면 전류는 증가하지만 전압강하가 매우 크게 떨어져 이용할 수 있는 전기적 에너지는 감소한다. 태양전지의 특성을 평가하는 파라미터(parameter)에는 fill-factor(FF)가 있으며, FF는 다음과 같이 정의한다.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{V_{OC} \times I_{SC}} = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (2-7)$$

Fill-factor는 태양전지의 단락전류(ISC)와 개방전압(VOC)으로 구성된 직사각형 내에 그의 전압-전류 특성곡선이 얼마나 잘 일치하는가를 설명하는 품질의 척도를 나타낸다. FF는 항상 1보다는 작으며, 보통 0.75에서 0.85사이에 있다. 따라서 최대 전력점(MPP)의 전력(PMPP)과 입사량(E), 태양전지의 면적(A)을 알면 fill-factor에 의해서 태양전지의 효율은 다음과 같이 나타낸다.

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{E \times A} = \frac{FF \times V_{OC} \times I_{SC}}{E \times A} \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned} \eta (\%) &= \frac{P_o(\text{출력전력})}{P_i(\text{광에너지})} \\ &= \frac{P_o(\text{max})}{A(\text{cm}^2)(100\text{mW/cm}^2)} \times 100\% \quad (2-9) \end{aligned}$$

식 (2-8)에서 태양전지의 높은 효율을 얻으려면 개방전압(VOC)과 단락전류(ISC) 및 fill-factor를 증가시키면 된다. 일반적으로 fill-factor의 저하는 태양전지 내의 직렬저항(RS)의 값이 크기 때문이다. 태양전지의 직렬저항을 작게 하려면 도핑 농도는 크고, pn접합의 깊이를 깊게 하여야 하지만 이 경우 전류 크기가 감소하므로 최적의 상태로 제작하기 위해서는 접합의 깊이를 0.3~0.5(μm)로 하고 표면저항은 50±5(Ω)정도를 유지시키면서 전극면적을 1(cm²)당 1(Ω)이하의 값으로 최소화하면 높은 fill-factor의 값을 얻을 수 있다.

현재 상용되고 있는 전형적인 단결정 silicon 태양전지의 모양과 물리적 크기 및 규격을 그림 2.5와 표 2.2에 보였다. 또한 태양전지의 동작 효율은 출력전력을 광원에 의해 주어진 전력으로 나누는 것으로 식 (2-9)와 같이 나타낸다. 전형적인 태양전지의 변환 효율의 범위는 10%~20%안에 있으며, 현재의 연구진행 상황을 관심 있게 주시해 보면 이 보다 더 개선된 효율을 갖는 태양 전지가 출현될 것으로 예상된다.

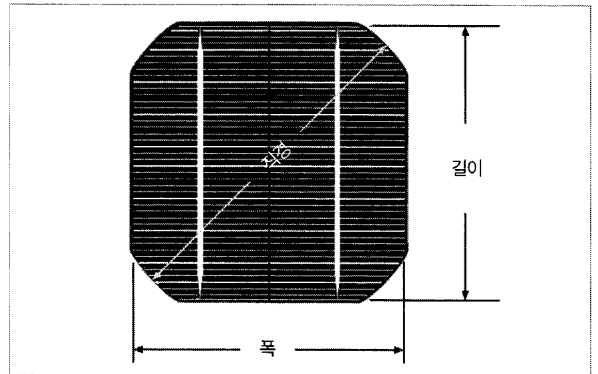


그림 2.6 상용되고 있는 태양전지

표 2.2 상용되고 있는 태양전지의 전기적 특성

물리적 크기				전기적 특성(규격)				
길이 (mm)	폭 (mm)	직경 (mm)	두께 (mm)	단락전류 (A)	개방전압 (V)	최대전력 전류(A)	최대전력 전압(V)	최대전력 (Wp)
125	125	150	240/270	2.95	0.60	2.78	0.495	1.38

다음호에 계속 ▶▶