

장기유입량 변화에 의한 소수력발전소 성능특성분석

박 완순¹⁾, 이 철형²⁾

Analysis of Performance Characteristic for Small Scale Hydro Power Plant with Long Term Inflow Condition Change

Wansoon Park, Chulhyung Lee

Key words : Small scale hydro power(소수력), Diversion dam(월류댐), Design parameter(설계변수), Design flowrate(설계유량), Rainfall condition(강우상태)

Abstract : The variation of inflow at stream and hydrologic performance for small scale hydro power(SSHP) plants due to climate change have been studied. The model, which can predict flow duration characteristic of stream, was developed to analyze the variation of inflow caused from rainfall condition. And another model to predict hydrologic performance for SSHP plants is established. Monthly inflow data measured at Andong dam for 32 years were analyzed. The existing SSHP plant located in upstream of Andong dam was selected and analyzed hydrologic performance characteristics. The predicted results from the developed models show that the data were in good agreement with measured results of long term inflow at Andong dam and the existing SSHP plant. Inflow and ideal hydro power potential had increased greatly in recent years, however, these did not lead annual energy production increment of existing SSHP plant. As a results, it was found that the models represented in this study can be used to predict the primary design specifications and inflow of SSHP plants effectively.

Nomenclature

A : basin area, km²
 C : capacity, kW
 $D(Q)$: flow duration function
 E_a : annual energy production, kWh
 $F(Q)$: cumulative distribution function
 g : gravitational acceleration, m/s²
 He : effective head, m
 k : discharge coefficient
 L_f : load factor of small hydropower plants, %
 P : power, kW
 P_a : output per unit time, kWh
 P_{ia} : ideal hydropower potential, kWh
 P_1 : partial output, kWh
 P_2 : rated output, kWh
 $P(Q)$: probability density function
 Q : flowrate, m³/s
 Q_a : annual mean flowrate, m³/s
 Q_m : monthly mean flowrate, m³/s
 Q_r : design flowrate, m³/s
 R_t : annual rainfall amount, mm
 R_m : monthly rainfall amount, mm

T : time ratio, %
 U_f : utility factor of small hydropower, %
 α : shape parameter of Weibull distribution
 β : scale parameter of Weibull distribution, m³/s
 ρ : density of water, kg/m³
 η : efficiency of small hydropower plant

1. 서론

지난 10년간 한반도의 기후는 과거 30년간에 비하여 많이 달라졌다. 소수력자원과 관련이 있는 강우량의 경우, 최근 10년간 연평균강수량은 1485.5mm로 과거 30년보다 11% 증가하였으며, 여름 강수량 증가비율은 18%로 여름철 집중호우가 특히 많이 늘고 있는 것으로 분석되었다.

본 연구는 기후변화에 의한 강우형태의 변화가 소수력발전소의 수문학적 성능특성에 미치는 영향

-
- 1) 한국에너지기술연구원
E-mail : pwsn@kier.re.kr
Tel : (042)860-3432 Fax : (042)860-3739
- 2) 한국에너지기술연구원
E-mail : lchg@kier.re.kr
Tel : (042)860-3437 Fax : (042)860-3739

을 분석한 것이다. 소수력발전소의 수문특성은 대담에서 측정된 유입량을 이용하여 면적비법 등을 사용하고 있으나, 대부분의 소수력발전소는 이러한 방법을 사용하기 어렵기 때문에 소수력발전소의 수문학적 성능특성을 위한 해석적인 방법이 연구되어 왔다.^{1),2)}

본 연구에서는 소수력발전소에서 수문특성을 예측할 수 있는 수문분석모델을 정립하고, 이를 소수력발전소의 성능특성과 결합하여 기후변화에 의한 강우형태변화가 소수력발전소의 수문학적 성능특성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 위하여 안동댐으로 유입되는 32년간의 장기유입량 자료를 이용하여 예측모델로부터 획득한 자료를 비교 분석하였으며, 안동댐 상류에 위치한 소천소수력발전소를 대상으로 수문학적 성능특성의 변화를 도출하였다.

2. 하천의 유량지속특성 분석모델

하천의 연평균유량 Q_a 는 연간강수량 R_t , 유역면적 A , 그리고 유출계수 k 를 이용하여 다음과 같이 산정된다.

$$Q_a = \frac{R_t \times 10^{-3} \times A \times 10^6 \times k}{365 \times 24 \times 60 \times 60} \quad (1)$$

k 가 일정하다면 하천의 월평균유량 Q_m 은 월간강수량 R_m 을 이용하여 다음과 같이 산정된다.

$$Q_m = \frac{R_m \times 10^{-3} \times A \times 10^6 \times k}{30.42 \times 24 \times 60 \times 60} \quad (2)$$

식(2)를 이용하여 관측소에서 측정된 월강수량 자료를 단위유역면적(1km²)당의 월평균유량 q 로 환산할 수 있으며, 이를 이용하여 단위유역면적당의 유량지속곡선을 작성할 수 있다. 유량을 크기별로 누적시킨 유량지속곡선은 특정한 누가확률분포함수의 형태로 표시할 수 있다.

Weibull분포의 확률밀도함수와 누가확률분포함수는 다음과 같이 표시된다.

$$P(q) = (\alpha/\beta) (q/\beta)^{\alpha-1} \exp(-(q/\beta)^\alpha) \quad (3)$$

$$F(q) = \int_0^q P(q) dq = 1 - \exp(-(q/\beta)^\alpha) \quad (4)$$

소수력발전소를 통과하는 유량은 다음과 같이 표시된다.

$$Q = A q \quad (5)$$

따라서 소수력발전소에서의 누가확률분포함수와 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$F(Q) = A(1 - \exp(-(q/\beta)^\alpha)) \quad (6)$$

$$P(Q) = A((\alpha/\beta) (q/\beta)^{\alpha-1} \exp(-(q/\beta)^\alpha)) \quad (7)$$

따라서 소수력발전소에서의 유량지속곡선을 나타내는 유량지속함수 $D(Q)$ 는 다음과 같이 구해진다.³⁾

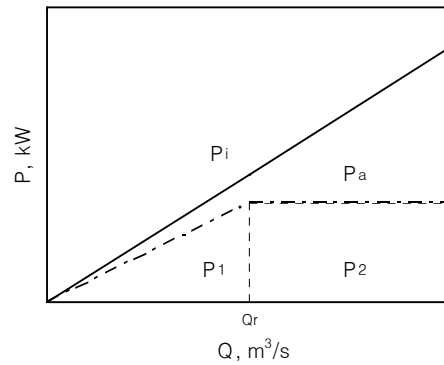
$$D(Q) = 1 - AF(q) = A \exp(-(q/\beta)^\alpha) \quad (8)$$

3. 소수력발전소의 성능예측모델

[그림 1]은 낙차가 일정한 경우, 월류댐을 갖는 소수력발전소의 유량변화에 따른 출력성능특성을 나타내는 그림이다. 소수력에너지는 사용유량이 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.

소수력발전소에서 얻을 수 있는 이상적인 소수력가용량 P_{ia} 를 구하면 다음과 같다.⁴⁾

$$P_{ia} = \rho g H \eta \int_0^\infty P(Q) Q dQ \quad (9)$$



[그림 1] 소수력발전소의 출력특성

소수력발전소는 월류댐을 사용하기 때문에 설계유량 이하의 유량이 유입될 경우에는 모두 에너지로 변환할 수 있으나, 설계유량 이상의 유량이 유입될 경우에는 설계유량에 해당되는 유량만을 사용하고 초과유량은 월류댐 상단을 통하여 방류하게 된다. 소수력발전소에서 얻을 수 있는 단위시간당 출력량 P_a 를 구하면 다음과 같다.

$$P_a = \rho g H \eta \int_0^{Q_r} P(Q) Q dQ + \rho g H Q_r \eta \int_{Q_r}^\infty P(Q) dQ = P_1 + P_2 \quad (10)$$

소수력발전소의 시설용량 C , 가동율 L_f 와 연간에너지생산량 E_a 는 다음과 같다.

$$C = \rho g H_c Q_r \eta \quad (11)$$

$$L_f = P_a / C \quad (12)$$

$$E_a = 8,760 C L_f \quad (13)$$

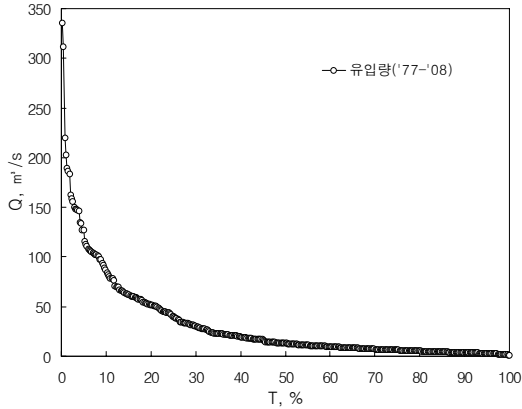
또한 소수력발전소에서의 소수력에너지 이용율 U_f 는 다음과 같다.

$$U_f = P_a / P_{ia} \quad (14)$$

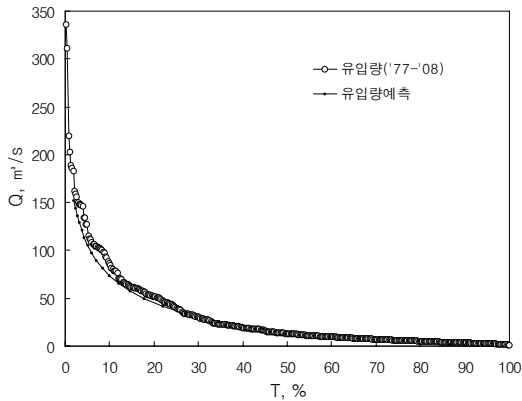
4. 안동댐의 장기유입량 분석

본 연구에서는 유역면적이 $1,584\text{km}^2$ 인 낙동강 수계의 안동댐을 대상으로 32년간('77~'08) 실측된 유입량자료를 분석하였다.

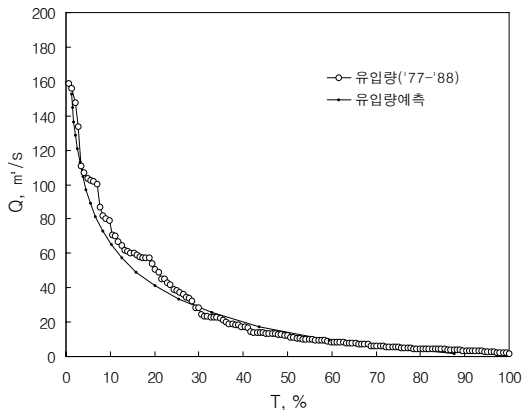
[그림 2]는 안동댐의 장기유입량에 대하여 1년을 100%의 시간으로 한 시간비율에 따른 유입량으로 표시한 것이다.



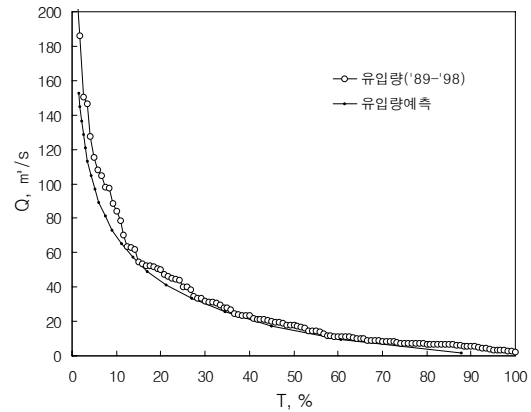
[그림 2] 안동댐의 장기유입량



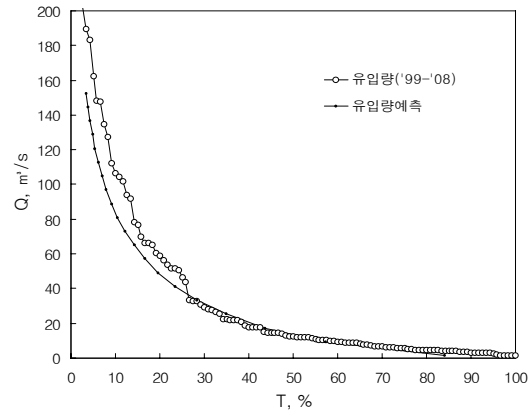
[그림 3] 안동댐의 장기유입량 비교



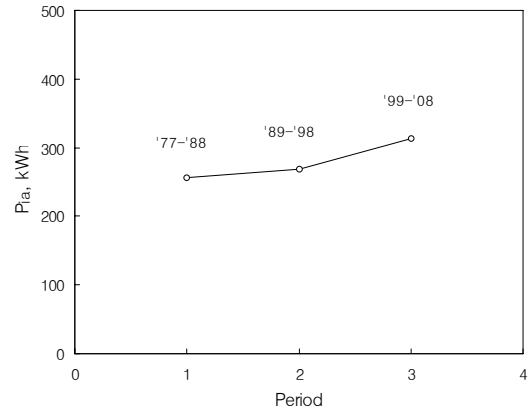
[그림 4] 안동댐의 기간별 유입량 비교('77-'88)



[그림 5] 안동댐의 기간별 유입량 비교('89-'98)



[그림 6] 안동댐의 기간별 유입량 비교('99-'08)



[그림 7] 안동댐의 기간별 이상적인 소수력가용량의 변화

[그림 3]은 안동댐의 32년간 장기유입량을 예측한 것으로 유입량예측 모델이 실제 유입량의 형태를 매우 효과적으로 표현해 주고 있다는 것을 알 수 있다.

[그림 4]에서 [그림 6]까지는 기간별 유입량을 비교한 것으로, 그림들을 통하여 본 연구에서 제시한 식(8)의 유량지속함수로 표시된 유입량예측 모델이 실측된 유입량의 형태를 [그림 2]와 더불어 효과적으로 표현해 준다는 것을 알 수 있다.

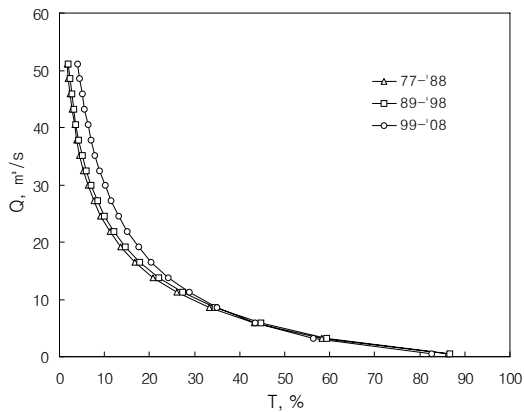
[그림 7]은 식(9)를 이용하여 구한 기간별 이상적인 소수력가용량 P_{ia} 의 변화를 분석한 것이다. 소수력가용량은 '77~'88기간의 경우 255.75kWh, '89~'98기간의 경우 268.5kWh, '99~'08기간의 경우 313.09kWh로 나타나서 소수력가용량이 '77~'88기간에 비하여 5.0%, 22.4% 증가한 것으로 나타났다.

5. 소수력발전소의 성능특성변화

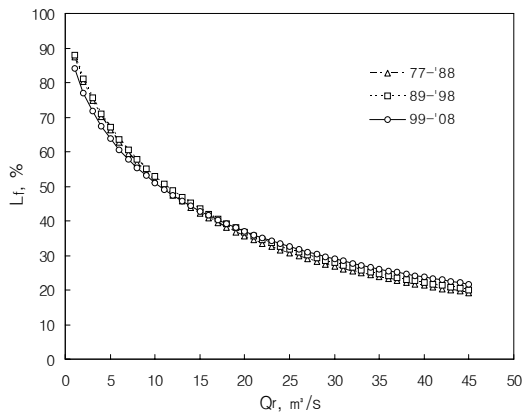
기후변화에 의한 강우형태의 변화가 소수력발전소에 미치는 영향을 분석하기 위하여 안동댐상류에 위치한 소천소수력발전소를 대상으로 성능특성을 분석하였다. 소천소수력발전소의 설계제원은 <표 1>과 같다.

<표 1> 소천소수력발전소 설계제원

Q_r , m^3/s	H_e , m	P, kW	A, km^2
12.5	22.5	2,400	533



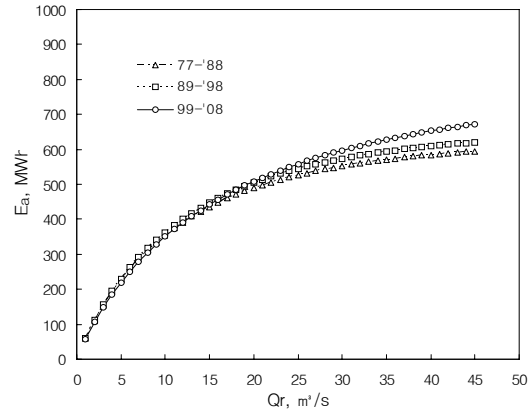
[그림 8] 소천소수력발전소의 기간별 유량지속곡선의 변화 예측



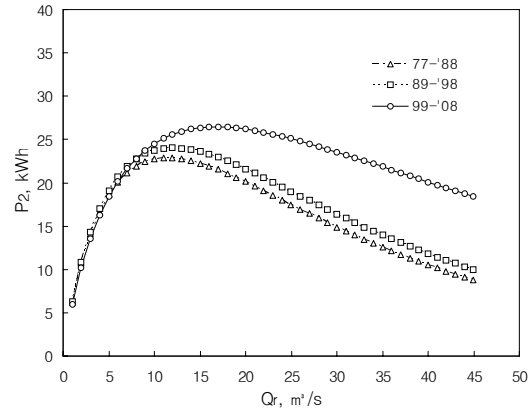
[그림 9] 소천소수력발전소의 기간별 연간가동율의 변화 예측

[그림 8]은 소천소수력발전소에서의 유량지속 특성을 식(8)의 유량지속함수를 이용하여 예측한 것으로, '77~'88기간에 비하여 '99~'08기간은

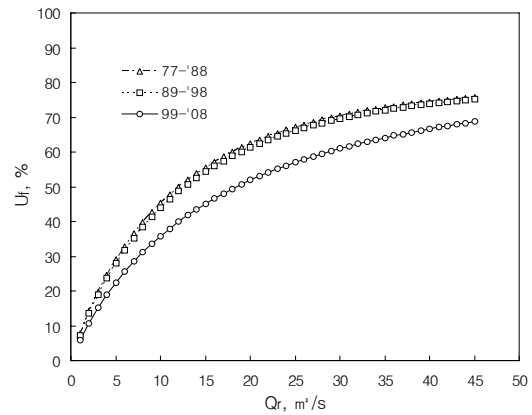
강우량의 증가와 더불어 폭우에 대한 빈도가 커졌다는 것을 알 수 있다.



[그림 10] 소천소수력발전소의 기간별 연간에너지생산량의 변화 예측



[그림 11] 소천소수력발전소의 기간별 정격출력량의 변화 예측



[그림 12] 소천소수력발전소의 기간별 이용율의 변화 예측

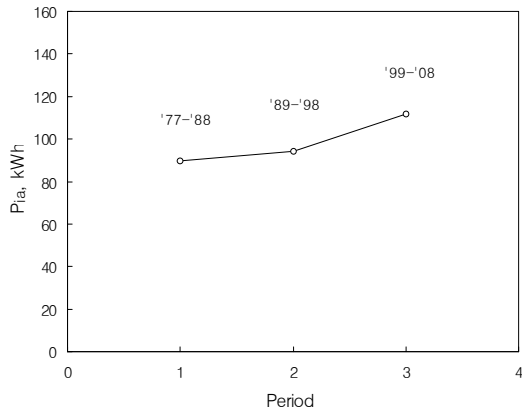
[그림 9]는 연간가동율 L_f 의 변화를 나타내는 것으로, 소천소수력발전소의 설계유량이 $12.5m^3/s$ 이므로 '89~'98까지의 연간가동율은 47.7%, '99~'08까지의 연간가동율은 46.6%로 예측되어 연간

가동율이 증가하지 않는다는 것을 보여준다. 이러한 현상은 기존의 소수력발전소가 월류댐을 채택하여 강우량 증가에 따라 유입량이 증가하여도 설계유량 이상의 유입량은 월류댐 상단으로 방류하기 때문이다.

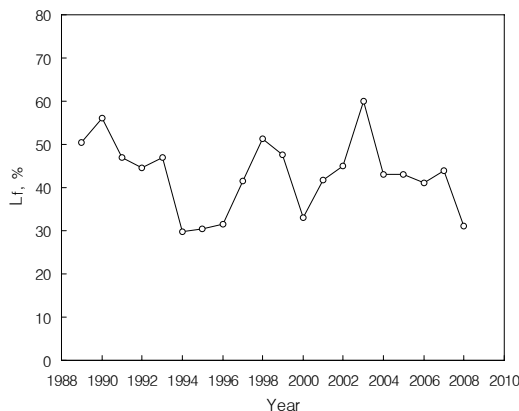
[그림 10]은 연간에너지 생산량 E_a 의 변화를 나타내는 것으로 연간 가동율의 변화와 같이 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

[그림 11]은 정격출력량 P_2 의 변화를 나타내는 것으로 최근 10년간의 강우형태 변화가 정격출력량이 나타나는 설계유량을 많이 변화시킨다는 것을 알 수 있다. '89~'98기간의 경우, 설계유량이 $12\text{m}^3/\text{s}$ 에서 정격출력량이 최대가 되며, '99~'08기간의 경우에는 설계유량이 $17\text{m}^3/\text{s}$ 에서 정격출력량이 최대가 되는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 강우형태의 변화로 인하여 신규로 소수력발전소를 건설할 경우에는 설계유량을 크게 선정하여야 한다는 것을 나타낸다.

[그림 12]는 소수력에너지 이용율 U_f 의 변화를 나타내는 것으로, '89~'98기간의 설계유량 $12\text{m}^3/\text{s}$ 에서의 이용율과 '99~'08기간의 설계유량 $17\text{m}^3/\text{s}$ 에서의 이용율이 48%로 동일하다는 것을 보여준다.



[그림 13] 소천소수력발전소의 기간별 이상적인 소수력가용량의 변화 예측



[그림 14] 소천소수력발전소의 연도별 연간가동율의 변화

[그림 13]은 식(9)를 이용하여 소천소수력발전소의 이상적인 소수력가용량 P_{2a} 의 변화를 분석한 것이다. 소수력가용량은 '77~'88기간의 경우 89.58kWh, '89~'98기간의 경우 94.04kWh, '99~'08기간의 경우 111.79kWh로 나타나서 소수력 가용량이 '77~'88기간에 비하여 5.0%, 24.8% 증가한 것으로 나타났다.

[그림 14]는 20년간 측정된 소천소수력발전소의 연간가동율 L_f 의 변화를 나타내는 것으로 '89~'98까지의 평균가동율은 42.98%, '99~'08까지의 평균가동율은 42.95로 나타나 [그림 14]에서와 같이 최근 10년간의 강우량의 증가에 따른 소수력가용량의 증가가 [그림 11]에서 분석한 바와 같이 실제 기존의 소수력발전소의 가동율을 증가시키지는 않는다는 것을 보여준다.

6. 결론

기후변화에 따른 강우형태의 변화가 소수력발전소의 수문학적 성능특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 본 연구에서 사용한 장기유입량예측 모델이 소수력발전소의 수문학적 특성을 분석하는데 효과적으로 사용될 수 있다는 것이 밝혀졌다.

분석 결과, 최근 10년간의 강우량 증가는 소수력가용량을 증가시키지만, 소수력발전소는 월류댐을 채택하기 때문에 기존의 소수력발전소의 가동율 향상에는 기여하지 못하는 것으로 밝혀졌다.

또한 강우형태의 변화로 인하여 폭우에 대한 빈도가 많아져 신규로 설계하는 소수력발전소의 경우에는, 기존의 소수력발전소와는 달리 설계유량을 크게 선정하여야 할 것으로 분석되었다.

정격출력량이 최대가 되는 유량을 설계유량으로 선정할 경우, 주어진 소수력에너지를 효과적으로 사용할 수 있으며, 수문학적으로 최적의 설계상태임을 나타낸다.

References

- (1) 박완순, 이철형, 심명필, "국내 소수력발전입지의 개발타당성 분석", 대한토목학회논문집, 제17권, 제II-3호, 1997.
- (2) Park, W. S., Lee, C. H., and Jeong, S. M., "An Analysis of Performance Characteristics for Small Hydro Power Plants", KWRA, Vol.2, No1, 2001.
- (3) 박완순, 이철형, "강우상태에 의한 소수력발전소 설계인자의 영향", 한국태양에너지학회 논문집, Vol.28, No. 1, 2008.
- (4) 박완순, 이철형, " 강우상태에 의한 소수력발전소 성능변수의 변화", 한국신재생에너지학회 논문집, Vol.4, No.3, 2008.