

지열에너지 시스템을 적용한 발전용 수차의 유동과 전력 특성 Flow and Electricity Power Characteristics of Hydraulic Turbine for Power Generation with Geothermal Energy System

서충길*† · 원종운**

Choong-Kil Seo*† and Joung-Wun Won**

(Received 02 September 2014, Revision received 01 December 2014, Accepted 04 December 2014)

Abstract: Geothermal energy is used in various types, such as power generation, direct use, and geothermal heat pumps. Geothermal energy with high temperature have been used for power generation for more than a century. The purpose of the study is to investigate flow and electricity power characteristics of hydraulic turbine for power generation of geothermal heat pump type with closed-system. The differences between the four types of hydraulic turbine, are different from the blade shape, volume, angle and etc. In case of prototype(1), pressure at blade was reduced to 2.1 bar, the kinetic energy of blade increased by increasing flow velocity(4.1 m/s). The increase of flow velocity at the blade edge markedly appeared, to increase the kinetic energy of the rotating shaft. In case that gateway in hydraulic turbine was installed, operating torque and RPM(1,080) of the rotating shaft increased respectively. Although rotational speed of prototype(2) compared to prototype(1) was reduced, the power generation capacity was greater about 3.4 times to 97 W. The most power of 255W was generated from prototype (4).

Key Words : Energy, Geothermal, Power Generation, Hydraulic Turbine, Flow

— 기 호 설 명 —

P : 압력 [kg/m²]
 Re : 레이놀즈 수
 d_{hyd} : 평균 수력 직경

그리스 문자

u : i-방향의 속도 [m/s]

ρ : 밀도 [kg/m³]
 μ : 점도 계수
 μ_t : 와류 점도 계수
 δ_{ij} : 크로네커 델타
 γ : 유동 균일 지수
 κ : 난류 운동 에너지
 λ_L : 층류 튜브 마찰
 λ_T : 난류 튜브 마찰

*† 서충길(교신저자) : 호원대학교 자동차기계공학과
 E-mail : ckseo@howon.ac.kr, Tel : 063-450-7215

** 원종운 : 선뱅크

*† Choong-Kil Seo(corresponding author) : Department of
 Automotive & Mechanical Engineering, Howon University
 E-mail : ckseo@howon.ac.kr, Tel : 063-450-7215

**Joung-Wun Won : Sunbank

1. 서 론

석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료에서 유발되는 환경오염문제를 해결하며, 에너지 자원 고갈의 대안으로 신재생에너지에 관한 사회적인 관심이 증가하고 있다. 그 중 지열에너지는 세계에서 거대하며, 신뢰할 만한 환경친화적인 에너지 자원이다. 지열을 이용하는 방식으로는, 지열을 이용하여 전력을 생산하는 지열발전과 지중에서 얻어진 열을 산업공정이나 건물난방 그리고 온천 등에 이용하는 지열직접이용 그리고 그대로 이용하기에 적절하지 않은 낮은 온도의 지열로 히프펌프를 이용하여 냉난방에 이용하는 지열히프펌프가 있다.^{1,2)} 최근에는 지열히트펌프를 이용하여 냉난방을 하는 관심이 늘어나는 추세이다. 지열히트펌프는 다른 신재생에너지에 비해 초기 투자비가 소폭 높지만 사용 기간이 늘어남에 따라 에너지 이용이 친환경적이고 경제성을 확보할 수 있어서 연구 개발이 이루어지고 있다.^{3,4)}

이 연구는 지열히트펌프 방식의 밀폐형 지열에너지 시스템에서 냉난방을 하고 순환되는 지열수의 유량을 이용하여 운동에너지를 발생시키는 수차⁵⁾의 유동과 전력 특성을 파악하는 것이다.

2. 모델링 및 실험장치

2.1 모델링

수차의 유동해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다. 식(1)은 연속방정식을 나타내며 수차의 운동량 방정식은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

여기서, μ_{eff} 와 난류 점성 계수(μ_t)는 아래와 같다.

$$(\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon})$$

수차구조는 여러 구성품으로 조립되어 있어 유체유동 시 난류가 발생한다. 식(3)은 난류 운동 에너지(k)식과 소산률(dissipation rate) 식(4)을 나타낸다. 이때 난류모델상수는 Table 1과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

여기서, P는 난류 운동에너지 생성항으로서 아래와 같다.

$$P = -u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

Table 1 Turbulent constant

C_μ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	C_k	C_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

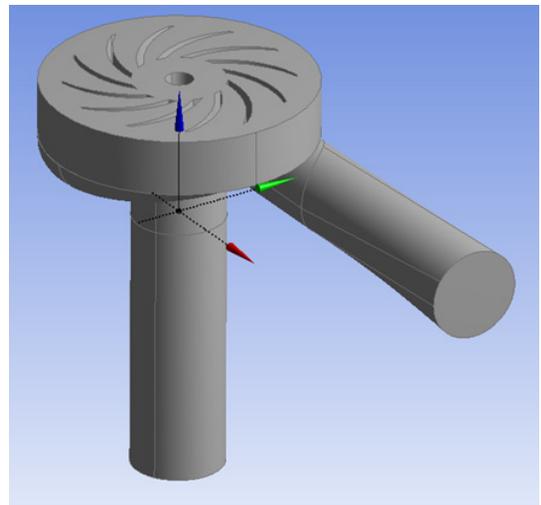


Fig. 1 Fluid dynamics mode of hydraulic turbine prototype(1)

Fig. 1은 시제품(1)의 유체 역학적인 해석을 위한 모델링이며, 해석코드인 FLUENT를 이용하여

시작품(1)의 유속만을 가시화하였다. Mesh는 약 120만개, node는 약 32만개로 설정하였다. 경계조건은 유속 2 m/s, 유량 55 m³/h, 압력 4 bar 및 유체는 비압축성 물로 해석하여 수차 개발을 위한 기초데이터로 이용하였다.

2.2 실험장치

Fig. 2는 밀폐형 전체 지열에너지 시스템과 개발하고자하는 발전장치의 개략도이다. 지열에너지는 일반적으로 약 150 m로 천공하여 관로(Φ 30 mm)를 매설한 후 순환펌프(C/P)에서 4 bar의 압력으로 펌핑된 지열수는, 약 유량 55 m³/h로 히트 펌프로 공급된다. 히트펌프는 냉매의 증발이나 응축을 극대화하여 동하절기에 냉난방을 제어한다. 이 연구는 지열수의 순환되는 라인에서 발전장치를 개발·장착 후 전력을 측정하였다.

Fig. 3은 지열에너지의 발전장치(수차+AC발전기)의 test rig이다. 실험조건은 유체해석 모델링과 동일하게 유량 55 m³/h, 유속 2 m/s, 지열수 온도 20℃ 그리고 4 bar의 유압을 이용하였다. 밀폐형 지열에너지 시스템에서 발전량이 많은 수차를 개발하기 위해 네 타입의 시작품을 개발하였다. Fig. 4는 네 타입 수차의 분해도를 나타내고 있다. 수차는 casing(lower, upper), 유로를 안내하며 유속을 증가시키는 gateway, gateway가 장착되는 holder, 유체의 유동을 운동에너지로 전환시켜주는 회전축(blade+shaft)로 구성되어 있다.

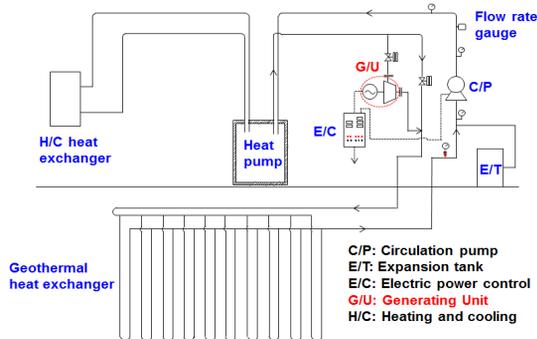


Fig. 2 Schematic of geothermal energy system

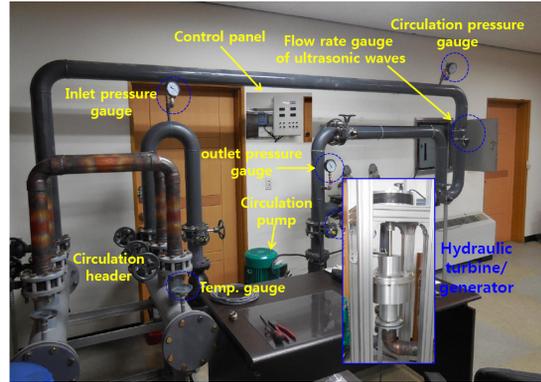


Fig. 3 Test rig for power generation of geothermal energy system

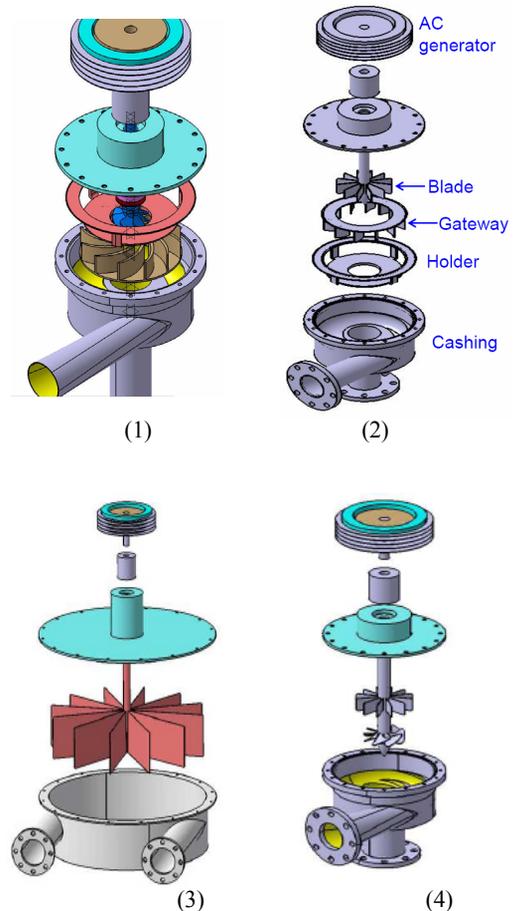


Fig. 4 Schematic of hydraulic turbine of four type prototypes

Table 2 Prototype specification

Proto type	Blade specification(mm,°)
1	φ: 97mm, number: 8, angle: 60°
2	φ: 170mm, number: 12, angle 90°
3	φ: 760mm, number: 12, angle 90°
4	φ: 170mm, number: 12, angle 90°(upper) + φ: 120mm, number: 8, angle 45°(lower)

Table. 2는 시작품의 blade 사양을 나타내고 있다. 시작품(4)는 시작품(2) 끝단에 유체의 운동에너지를 증가시키기 위해 프러펠러를 추가 장착시킨 구조이다. AC 발전기는 2,000 RPM, 구동 토크 16 Nm 조건에서 2 kW 삼상 AC 발전이 가능하다. 삼상 AC를 변환기를 이용하여 AC 단상으로 전환하였다. 시작품의 전력은 다음과 같은 식(6)으로 구하였다.

$$\text{Power (W)} = V \cdot A \cdot \sqrt{3} \quad (6)$$

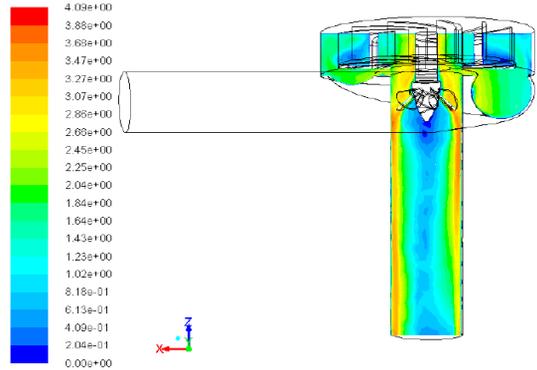
3. 결과 및 고찰

3.1 수차의 유동 특성

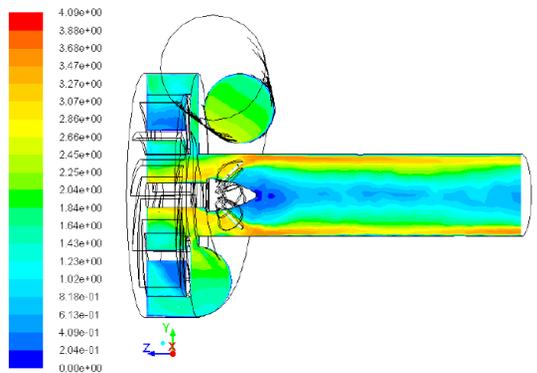
지열에너지 시스템을 이용하여 발전장치의 개발에 가장 중요한 장치는 수차이며, 수차의 유동 특성을 파악하는 것은 시작품 개발에 중요하다.

Fig. 5는 시작품 수차(1)의 XYZ 방향에 대한 유동의 단면도이며, 좌측의 수차는 수차에서의 유속을 나타내고 있다.

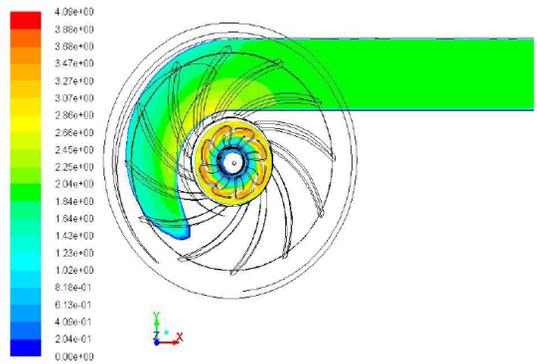
Fig. 5(a) 경우, gateway를 통과한 유체는 회전축에서 유속이 증가하되, blade 가장자리에서는 약 4 m/s로 유속이 증가하며 난류 유동이 형성된다. 유속이 증가되면 blade의 운동에너지를 더 크게 하여 발전에 유리하다. Blade로 유도된 유체는 blade 가장 자리에서는 유속이 증가하지만, 청색으로 표시되는 회전축 중앙 끝단에서는 유속이 증가하지 않고 있다. 운동에너지는 속도에 의존하므로 실제적으로 회전축의 외경이 35 mm인 점을 고려한다면, 외경을 감소시키고 blade의 면적을 크게 하는



(a) XZ plane



(b) YZ plane



(c) XY plane

Fig. 5 Contours of velocity magnitude at several section view

것이 더 큰 운동에너지 발생에 도움이 될 수 있을 것이다.

Fig. 5(b)와(c)에서 수차의 유동 특성을 살펴보

면, 수차에 유입된 유체는 층류 유동(linear flow)이 형성된다. 수차 내부 구성품 중 blade에서는 난류 유동이 가속화된다. Fig. 5(c)의 유동에서는 명확하게 관찰되지 않지만 유체가 gateway로 유입되는 3시에서 11시 방향의 약 5 부위 guide 판 끝단에서 3 m/s로 유속이 증가하고 있다. 그러나 나머지 guide 판에서 유속 증가 효과는 크지 않다. 12개 guide 판에 균등한 유량이 공급되어 유속이 증가할 수 있도록 설계가 고려되어야 하며, 이는 회전축의 운동에너지를 증가시킬 수 있다. 또한, 회전축 끝 부위는 약 1.43 m/s 수준으로 입력되는 유속에 비해 유속 감소가 두드러진다. 그러나 8개로 구성된 blade의 끝 가장자리의 유속은 3.5 m/s로 증가하여 운동에너지로 전환된다.

3.2 순환펌프의 전력 소모와 압력 변동

지열에너지 시스템에서 개발하고자 하는 발전 장치의 전력은 순환유량에 의존하며, 발전 장치는 전력 생산에 비해 수차의 유체부하로 인하여 순환펌프의 전력 소모는 적어야 한다.

Fig. 6은 지열에너지 시스템에서 유량을 조절하는 밸브 개도율과 순환펌프 간의 전력 소모를 나타내고 있다. 유량조절밸브를 완전히 100% 개방하였을 경우 약 63 m³/h의 유량이 순환된다. 유량조절밸브를 25%로 개방하였을 경우 유량은 20 m³/h로 감소하였고 순환펌프 전력 소모량은 약 1.5 kW급으로 감소하였다. 순환되는 유량이 클수록 순환펌프 소모 전력은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 원심식 회전펌프의 특성상 유량에 따라 일량이 증가해 전력 소모도 증가하기 때문이다. 수차가 배관에 장착되면 유체 저항이 발생하여 순환펌프의 전력 소모량이 감소될 것으로 지열에너지 시스템에서 중요한 이점이 된다.

Fig. 7은 유량조절밸브 개도율과 순환펌프의 outlet의 압력 변동 관계를 나타내고 있다. 개도율이 25%에서 100%까지 증가할수록 순환펌프의 전력 또한 3.145에서 4.44 kW 까지 증가하고 있다. 그러나 유량조절밸브 개도율이 증가할수록 순환펌프의 outlet 압력은, 배관 관로 면적이 커짐에 따라 압력은 저하된다. 여기에서 개발하고자 하는

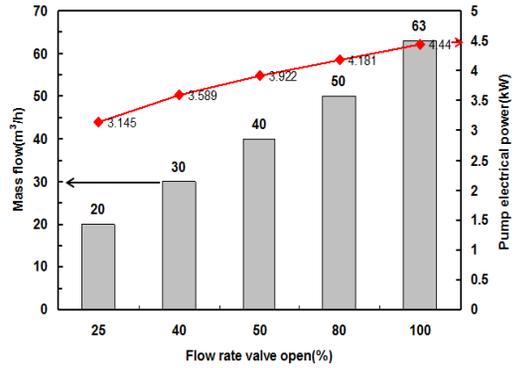


Fig. 6 Electrical power of recirculation Pump according to flow rate valve open ratio

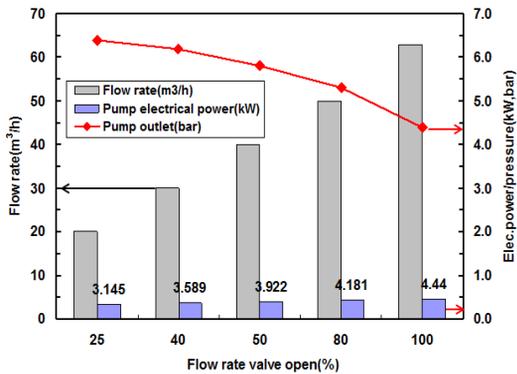


Fig. 7 Pressure variation of recirculation pump outlet according to flow rate valve open ratio

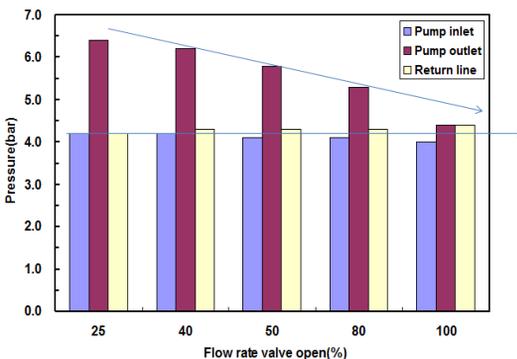


Fig. 8 Several position pressure of recirculation pump according to flow rate valve open ratio

밀폐형 지열에너지 시스템에 발전장치(수차+증속기+발전기)가 장착될 경우, 부하가 걸리게 되면 순환펌프의 outlet 압력은 증가하게 되며 압력 손실은 최소로 컨트롤 되어야 한다. 이를 달성하기 위해서는 수차의 vane 사이즈 및 각도 등 설계에 관한 최적화가 도출되어야 한다.

Fig. 8은 유량조절밸브의 개도율에 따른 순환펌프의 각부에서의 압력을 나타내고 있다. 순환펌프의 입력과 순환되는 배관에서의 압력의 경향을 살펴보면, 약 4 bar에서 일정한 압력을 유지하나 출구 쪽에서의 압력은 증가한다. 또한, 유량조절밸브를 작게 열수록 출구에서의 압력은 작아지는데, 이는 단면적이 작아지므로 인해 힘이 커졌기 때문이다. 유량조절밸브를 100% 열었을 때는 단면적이 커짐으로 인해 압력은 일정하다. 수차가 장착되어 유체저항으로 순환펌프의 출구에서 압력 변화는 일어나겠지만, 지열에너지 시스템의 리턴 압력 변동은 일정하다. 이는 베르누이 원리 측면에서 볼 때, 수차가 장착되는 부위에 국부적으로 유체의 유속과 압력 변동은 일어나겠지만 지열에너지 시스템의 전체적인 압력변동은 미미하다.

3.3 지열에너지 시스템의 수차에 따른 발전 전력 및 분당회전수

Table 3은 시작품 네 종류에 따른 전력과 회전축의 분당회전수를 나타내고 있다. 밀폐형 지열에너지 시스템의 발전 전력은 회전축의 토크와 분당회전수가 가장 중요한 설계 인자이다. 시작품(1)은 부하가 걸리지 않을 때에 시작품(2)에 비해 분당회전수는 크다. 그러나 부하가 걸릴 경우 시작품(2)에 비해 더 많은 분당회전수 감소가 발생된다. 이는 작은 사이즈의 blade 면적, 익형 개수 등으로 인하여 회전축 토크가 감소하였기 때문이다. Gateway는 유로를 안내하면서 출구에서의 유속을 증가시키는 역할을 한다. 시작품(1)에 대한 gateway 장착 유무에 따라 RPM을 측정하였다. Gateway가 장착된 경우, 회전축은 토크 증가와 더불어 1,080 RPM을 나타내고 있다. 반면에, gateway

Table 3 Power and shaft RPM according to prototypes

Prototype	Power (W)	Shaft RPM			
		Load	Unload	w/o gateway	w/ gateway
(1)	28	350	1,080	650	1,080
(2)	97	450	900	-	900
(3)	4.6	10	48	10	-
(4)	255	679	1,013	-	1,013



Fig. 9 Photo of power generation system and prototype(4)

가 장착되지 않을 경우 토크 감소와 더불어 회전축 RPM은 650으로 약 40% 감소하였다.

대형 수차 시작품(3)은 대형 수차로써 유체에너지에서 운동에너지로의 많은 전환을 위해 소형 수차 시작품(1)과 (2)에 비해 약 13배 큰 체적을 갖는 blade를 설계·제작하였다. 시작품(3)은 유체 물이 너무 큰 blade 체적으로 인하여 유체 부하가 커져 lower casing이 부풀어 오르는 현상이 두드러졌다. 큰 blade 체적으로 인하여 토크는 증가하지만, 무부하/부하조건에서 48/10 RPM이 나와 가장 작은 값의 전력이 발생되었다. 이러한 결과를 토대로 수차 및 blade의 체적을 크게 하는 것보다는 유체의 배출 및 전달효율 등을 고려한 설계 인자를 충분히 고려해야한다.

소형 수차 시작품(4)는 시작품(2)에 더 많은 발전 전력을 만들기 위해 회전축 끝단에 프로펠러

타입의 blade를 설계·제작한 하이브리드 소형 수차이다. 무부하/부하조건에 따라 1,013/679 RPM으로 가장 많은 전력으로 255 W를 발생시켰다.

Fig. 9는 가장 많은 전력을 발생한 시작품(4)가 장착된 지열에너지 시스템의 발전 장치를 나타내고 있다. 지열에너지 시스템용 발전 장치 layout은 수차+증속기+AC 발전기로 구성되어있다. 이중 기어비가 3대1인 증속기를 개발하여 장착할 경우 2 kW급 발전 전력이 가능할거라 판단되며 추후 이에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

지열에너지 시스템을 적용한 발전용 수차의 유동 및 전력 특성에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

1) 수차 시작품(1)의 경우, blade에 도달한 압력은 2.1 bar로 감소하였으며, 유속이 4.1 m/s로 증가함에 따라 회전축의 운동에너지는 증가하였다.

2) Gateway가 장착된 경우, 회전축은 토크 증가와 더불어 1,080 RPM, gateway가 없을 때는 토크와 회전축 RPM은 650으로 약 40% 감소하였다.

3) 수차 시작품(4)로 구성된 발전 장치의 전력은 255 W로 가장 컸으며, 수차의 체적보다는 유체 유동이 원활하면서 수차 회전체의 토크와 RPM이 커지는 것이 중요하다.

후 기

이 논문은 중소기업청에서 시행하는 산학연협력 기술개발사업(C0135363) 지원을 받아 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

References

1. J. S. Kim and C. K. Lee, 2007, "A Study of the Influence of Condensing Water Temperature on Low Temperature Geothermal Power Generation", Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 3, No. 7, pp.17-23.

2. J. L. Fannou, C. Rousseau, L. Lamarche and K. Stanislaw, 2014, "Experimental analysis of a direct expansion geothermal heat pump in heating mode" Energy and Buildings, Vol. 75, No. 4, pp. 290-300.

3. H. Hofmann, S. Weides, T. Babadagli, G. Zimmermann, I. Moeck, J. Majorowicz and M. Unsworth, 2014, "Potential for Enhanced Geothermal System in Alberta, Canada", Energy, Vol. 69, No. 6, pp. 578-591.

4. M. Bravi and R. Basosi, 2014, "Environmental Impact of Electricity from selected Geothermal Power Plants in Italy", Journal of Cleaner Production, Vol. 66, No. 2, pp. 301-308.

5. O. S. Kim, J. S. Choi and I. S. Kim, 2005, "Analysis of Hydraulics Power Characteristics according to Changable Design Conditions for Francis Turbines", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 39-43.