

방사성동위원소 열전 발전기 최적설계를 위한 차폐 및 열전달 해석

손광재*†, 홍진태*, 양영수**

* 한국원자력연구원 연구로이용연구본부, ** 전남대학교 기계공학과

Heat Transfer and Radiation Shielding Analysis for Optimal Design of Radioisotope Thermoelectric Generator

Kwang Jae Son*†, Jintae Hong* and Young Soo Yang**

* Dept. of Research Reactor Applications, Korea Atomic Energy Research Institute,

** Dept. of Mechanical Engineering, Jeonnam Nat'l Univ.

(Received July 19, 2013 ; Revised September 5, 2013 ; Accepted September 5, 2013)

Key Words: Radioisotope(방사성동위원소), Radioisotope Thermo-Electric Generator(방사성동위원소 열전 발전기), Heat Transfer Analysis(열전달 해석), Radiation Shielding(방사선 차폐)

초록: 방사성동위원소 열전발전기는 장반감기 알파 혹은 베타 핵종에서 방출하는 하전입자를 차폐하여 방사선 에너지를 열에너지로 전환하고 이때 발생하는 열전재료의 온도차를 이용하여 전력을 생산하는 시스템이다. 이 기술은 에너지 밀도가 높고 수명이 길며 신뢰성이 높아 우주개발, 국방 등 극한 환경에서 사용되는 장치, 센서 및 로봇 등의 에너지원으로 그 효용성이 매우 높다. 본 연구에서는 방사선 차폐 해석 및 열전달 해석을 통하여 차폐체, 그리고 최대 온도구배를 가지는 열전재료의 형상과 배치를 결정하여 열전발전기 기초설계를 도출하였다.

Abstract: To supply electric power in certain extreme environments such as a spacecraft or in military applications, a radioisotope thermoelectric generator has been highlighted as a useful energy source owing to its high energy density, long lifetime, and high reliability. A radioisotope thermoelectric generator generates electric power by using the heat energy converted from the radioactive energy of a radioisotope. In this study, FE analyses such as radiation shield analysis, heat transfer analysis, and power recovery rate analysis have been carried out to achieve an optimal design for a radioisotope thermoelectric generator using SrTiO₂.

1. 서론

방사성동위원소가 붕괴하면서 방출하는 광자 또는 하전입자의 에너지를 전기에너지로 변환하여 전력원으로 이용할 수 있도록 구성된 장치 및 기기를 핵전지(Nuclear Battery) 또는 방사성동위원소 전지(Radioisotope Battery) 라고 한다.⁽¹⁾ 방사성동위원소의 특성상 단위 질량당 에너지 밀도가 높고 수명이 10 년 이상으로 길며 극한환경에서 신뢰성이 높아 미국, 러시아 등 선진국에서는 우주개발

및 국방분야에서 활용가치가 높은 전략기술로 분류되고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 기술적으로 방사성동위원소의 자연붕괴에너지 활용기술은 방출하는 하전입자를 직접 이용하는 “비열식”과 방사성 입자의 에너지를 열원으로 변환하여 이용하는 “열 활용식”으로 크게 구분할 수 있다. 열 활용식은 방사성동위원소의 자연 붕괴열 발열체(Radioisotope Heating Unit)와 반도체형 온도차 발전기술인 열전발전(Thermoelectric Generation) 기술의 조합을 통해 전력을 생산한다. 비열식은 방사성동위원소에서 방출하는 하전입자를 이용 반도체나 압전재료를 이용하여 전력을 생산한다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 열 활용방식의 대표적인 기술인 열전재료 내부의 온도차에 의한 열기전력을 이용

† Corresponding Author, kjson@kaeri.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

하여 전력을 생산하는 방사성동위원소 열전발전기 (Radioisotope Thermo-electric Generator; RTG)의 최적 설계를 위한 열전달 해석에 관하여 논의하고자 한다. 이 기술의 기본원리는 다음과 같다. 먼저 장반감기 알파 혹은 베타 핵종에서 방출하는 하전입자를 차폐하여 방사선에너지를 열에너지로 전환한다. 이때 발생하는 열을 단열재 혹은 진공 등으로 차폐하고 발생된 열이 열전재료를 통하여 방출되도록 한다. 여기에서 발생하는 열전재료의 온도차를 이용하여 전력을 생산하게 된다.^(6,7)

열전현상은 두 개의 서로 다른 금속의 접합에 온도차가 있을 때 폐회로에 전류가 흐르는 현상으로 1821년 독일 과학자인 Thomas Johann Seebeck에 의해 발견되었다. 이 접합이 열전쌍 혹은 열전대 (Thermocouples)이라고 불린다. 방사성동위원소 열전발전기는 다른 전력원과 비교하여 다음과 같은 큰 장점이 있어 미국과 구 소련의 우주개발에 주로 사용되었다. 첫째로 Pu-238 등 반감기가 매우 긴 핵종을 연료로 사용하여 그 수명이 길다는 것이다. 둘째, 극저온이나 고온 또는 방사선이 많은 환경에서도 안정적으로 작동이 된다. 셋째, 위성이나 우주구조물의 위치, 방향 등과 무관하게 지속적으로 전력을 공급할 수 있다. 마지막으로 지난 40여년 간 사용한 결과 그 신뢰성이 검증되었다는 것이다.^(8,9)

본 연구에서는 국내에서는 처음으로 방사성동위원소 열전발전기의 개념설계를 실시하였다. 국내외여건, 생산가능성을 고려하여 방사성동위원소 핵종을 선정하고 열원캡슐을 설계하였다. 또한 방사선 차폐해석을 통하여 최적의 차폐체의 재료 및 형상을 결정하였고 여기서 발생하는 발열량을 평가하였다. 열전재료의 온도구배는 발전기의 효율을 결정하는 주요변수로 열전재료의 형상에 의해 큰 변화를 보인다. 따라서, 최대 온도구배를 가지도록 열전재료의 형상을 다양한 열전달 해석을 통하여 결정하였다.

2. 방사선차폐 해석

2.1 MCNP 모델링

방사선 차폐와 발열량해석은 미국의 로스 알라모스 국립연구소 (LANL)에서 개발한 Monte-Carlo N-Particles (MCNP) 코드를 사용하여 수행하였다. 이 코드는 신뢰성이 검증되어 방사선 수송해석분야에서 가장 널리 사용되고 있다. 연료로 사용되는 핵종은 단위질량당 에너지가 크고 반감기가 긴 Pu-238 등 장반감기의 알파방출 핵종을 사용하는

것이 가장 유리하다. 그러나, Pu-238은 IAEA에 의해 엄격한 통제를 받는 물질로서, 동위원소의 수급 및 국제적인 생산현황 등을 고려할 때, Sr-90 핵종을 사용하는 것이 현실적으로 구현이 가능한 것으로 평가되어 본 연구에서는 Sr-90을 연료로 선정하였다. 동위원소 열원으로 사용되는 화합물은 SrTiO₂이며 동위원소인 Sr-90은 순수 베타 방출체로 최대에너지는 546 keV 이고, 반감기는 28.79년이다. Sr-90의 딸핵종인 Y-90은 순수 베타 방출체로 최대에너지 2280.1 keV, 반감기는 64시간이다. 모핵종의 반감기가 딸핵종의 반감기보다 아주 길기 때문에 딸핵종의 반감기가 몇 번 지나면 두 핵종의 세기는 모핵종의 세기와 같아지는 영연평형 (Secular Equilibrium) 상태를 이룬다. 방사성 동위원소 열원에 대한 방사능은 Sr-90에 대하여 1000 Ci이며, MCNP 계산에 사용된 동위원소 Sr/Y의 방사능은 2000 Ci로 사용하였다. Sr-90 및 Y-90 핵종의 최대에너지 값은 각각 546 keV 및 2280 keV 이므로 방출되는 최대 베타선의 에너지는 2280 keV가 되고, Sr/Y 동위원소 열원에서 방출되는 베타선의 에너지는 Fig. 1에 나타내었다.

연료인 SrTiO₂의 크기는 길이 20 mm, 직경 20 mm인 원통형이며, 그 주위를 선원 캡슐인 Hastelloy 금속이 두께 1 mm로 감싸고 있다. 그리고 그 주위를 방사선 차폐체인 텅스텐이 역시 원통형으로 존재한다. 텅스텐의 두께는 75 mm로 모델링 하였다. Fig. 2는 MCNP로 모델링 한 열원과 캡슐 및 방사선 차폐체인 텅스텐을 나타낸 것이다. 각 재료의 열적 물성치는 Table 1에 보인 바와 같다.

2.2 차폐 및 발열량 해석 결과

방사성동위원소 열원에 대한 발열량 계산을 위하여 선원자체, 캡슐 및 차폐체의 결과는 단위질

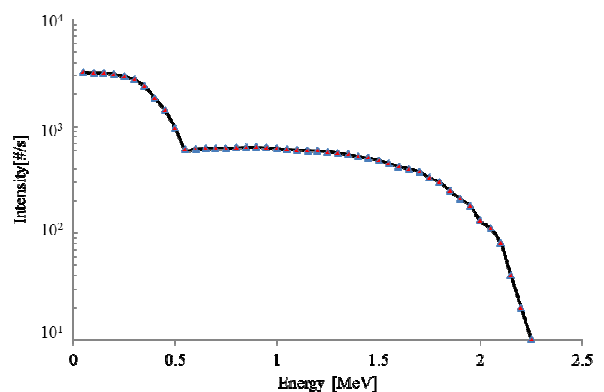


Fig. 1 Energy spectrum of ⁹⁰Sr/⁹⁰Y

량당 흡수에너지로 하였고, 방사선 차폐체 표면에서의 선량을 계산을 위하여 차폐체 원통형의 옆표면, 위 및 밑 표면에는 단위면적당 지나가는 입자의 수를 출력하도록 설정하였다. 또한, 차폐체 표면에서 1 m 떨어진 거리에 대한 출력은 원통형을 설정하여 옆 표면, 위 및 밑 표면에 각각 단위면적당 지나가는 입자의 수로 설정하였다.

베타선에 의한 X-선의 선량 계산에 사용된 Flux-to-Dose Conversion Factor 로는 ICRP 60 기반의 ICRP 74 값을 사용하였다.

해석 결과, 베타선 및 X-선에 의한 각각의 발열량은 동위원소 선원 자체의 발열량은 6.73 W, 선원 캡슐인 Hastelloy 발열량은 0.254 W 그리고 방사선 차폐체인 텅스텐 발열량은 0.117 W 로 계산되었으며, 94.83%의 발열은 선원자체에서 발생되었다 (Table 2). 방사선 차폐체 표면에서의 선량 제한치는 2 mSv/h 이고 1 m 거리에서의 선량 제한치는 0.1 mSv/h 이다. 표면에서 최대 선량률은 0.784 mSv/h (상대오차 = 6.36%)이고, 1 m 거리에서의 선량률은 3.6×10^{-3} mSv/h (상대오차 = 2.47%)로 선량 제한치를 모두 만족하였고, 상대오차는 모두 10% 미만으로 나타났다.

즉, 2000 Ci 의 SrTiO₂ 를 이용한 방사성 동위원소 전지에서 외경 150 mm, 두께 65 mm 인 텅스텐 차폐체를 사용할 경우, 법적 안전성요건을 만족함을 확인하였다.

3. 열전달 해석

3.1 열전달 모델링

방사성동위원소 열전발전기는 Fig. 3 에 보인 바와 같이 방사성동위원소 연료와 캡슐, 방사선 차폐체, 열 차폐체, 외부구조물 그리고 열전재료로 구성된다.

방사성동위원소는 SrTiO₂ 펠릿으로 고온에서 안

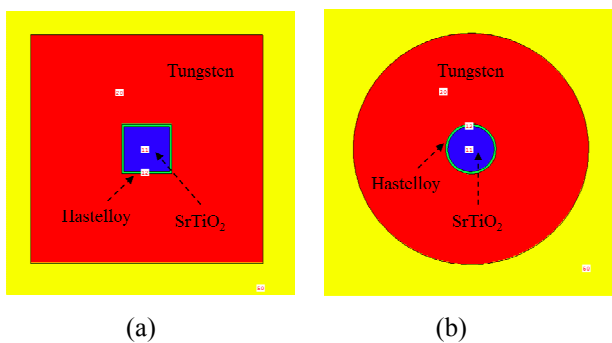


Fig. 2 MCNP modeling of RI heater unit and tungsten shielding, (a) side view, (b) top view

정성이 우수한 화합물을 선택하였고 열원캡슐은 Hastelloy 합금으로 설계하였는데 동위원소 연료와 반응성이 낮고 고온강도가 우수하기 때문이다. 방사선 차폐체는 납, 텅스텐, 열화우라늄 등이 대상

Table 1 Material properties

Material	Density (10 ⁻⁶ kg/mm ³)	Conductivity (10 ³ W/mm ² C)	Specific Heat (J/kg°C)
SrTiO ₂	4.6	4.15	500
Hastelloy	8.69	10.1	414
W	19.3	155.0	138
Cu	8.89	388.0	385
Al ₂ O ₃	3.98	39	775
N-type	7.55	0.986	0.157
P-type	6.613	1.308	0.190
Insulator	0.23	0.019	800.0
Al6061	2.7	180.0	896.0

Table 2 Heat generation by radiation

Material	SrTiO ₂	Hastelloy	Tungsten
Heat Gen.[W]	6.730	0.250	0.117
Ratio[%]	94.83	3.52	1.65

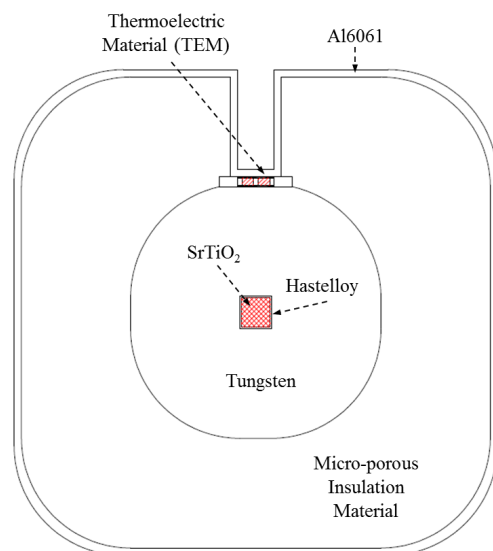


Fig. 3 Schematic diagram of RI thermoelectric generator

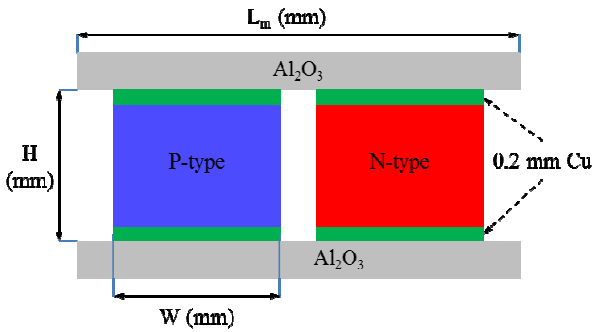


Fig. 4 Detail view of thermoelectric material

이 될 수 있는데 차폐 능이 우수하고 핵 통제 등 규제 측면에서 텅스텐이 가장 적합한 재료로 판단되었다. 열 차폐체는 현재 Unifrax사에서 시판되고 있는 단열재 중 열전도도가 낮은 미세기공단열재 (Micro-porous Insulation Material)를 고려하였고 외부구조물은 가볍고 강도가 우수한 Al 6061 재료를 선정하였다.

열전재료는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 알루미늄 산화물로 구성된 지지체와 구리전극 사이에 P형과 N형의 반도체로 구성되어 있다. 이 열전재료의 크기와 길이는 열전달 해석결과에 따라 최적의 값을 가지는 형상으로 제작할 예정이다.

3.2 열전달 해석

열전달 해석은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 열전재료가 외부 공기와 접촉하는 경우 (경계조건 1)와 알루미늄 구조체와 접촉하는 경우 (경계조건 2)에 대한 두 가지 경계조건과 열전재료의 모듈사이즈가 각각 다른 16개 경우에 대하여 실시하였다. 각 부품에서 발생하는 발열량은 방사선 차폐해석결과 도출된 결론을 사용하였다. 상용코드인 ABAQUS를 사용하였으며 3차원 열전달 해석을 실시하였다.

열전모듈의 크기 (Lm)는 제작공정 등을 고려하여 한번이 13 ~ 31 mm인 정사각형으로 설계하였다. 모듈에는 각각 두 개의 P형, N형 반도체가 위치하며, 높이 2 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm에 대해 각각 해석을 진행하였다. 열전재료의 너비와 높이 그리고 모듈크기에 대한 열전달 해석결과를 Table 3에 나타내었다.

해석결과 경계조건 1의 경우가 경계조건 2에 비해서 더 큰 온도 차를 가짐을 확인하였다. 이는 열전재료에서 외부와 접촉하고 있는 알루미늄 몸체로 많은 열이 빠져나가기 때문이다. 따라서 열전재료의 저온부에는 반드시 냉각을 위한

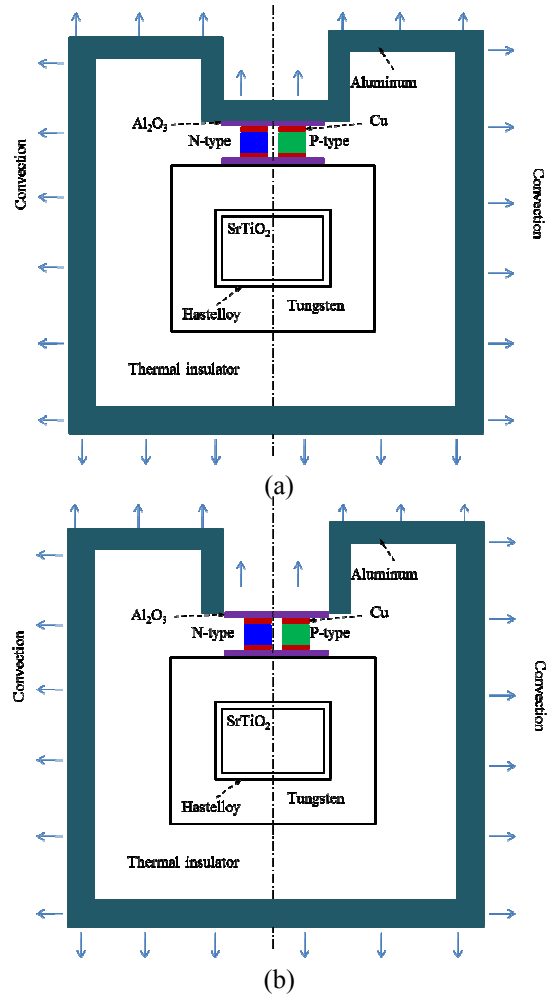


Fig. 5 Boundary conditions for heat transfer analysis (a) BC 1 (b) BC 2

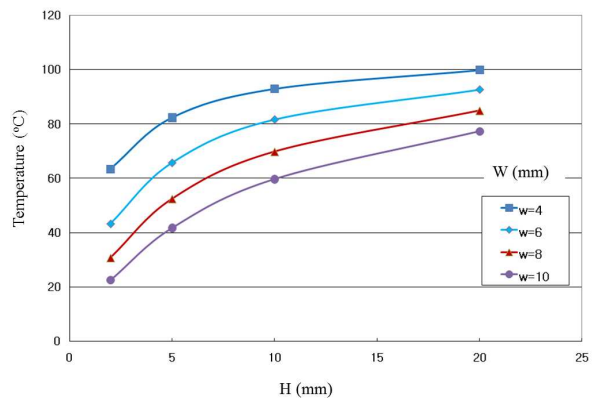


Fig. 6 Temperature difference according to height change of thermoelectric material

구조체를 설치하여야 함을 알 수 있다.

경계조건 2의 경우를 살펴보면 Fig. 6에 보인 바와 같이 열전재료의 높이가 높아질수록 모든 경우에 대해서 온도 구배가 커짐을 알 수 있다. Fig. 7은 열전재료의 높이가 일정할 때 폭의 변화에

Table 3 Temperature difference according to module size and shape

Case	L _m (mm)	W (mm)	H (mm)	BC-1 △ T1	BC-2 △ T2
1	13	4	2	63.4	2.4
2	13	4	5	82.3	5.9
3	13	4	10	92.9	11.2
4	13	4	20	99.8	20.4
5	19	6	2	43.3	2.3
6	19	6	5	65.7	5.5
7	19	6	10	81.6	10.4
8	19	6	20	92.6	19.3
9	25	8	2	30.7	2.3
10	25	8	5	52.4	5.3
11	25	8	10	69.8	10.0
12	25	8	20	84.9	18.6
13	31	10	2	22.5	2.3
14	31	10	5	41.7	5.3
15	31	10	10	59.7	9.9
16	31	10	20	77.3	18.2

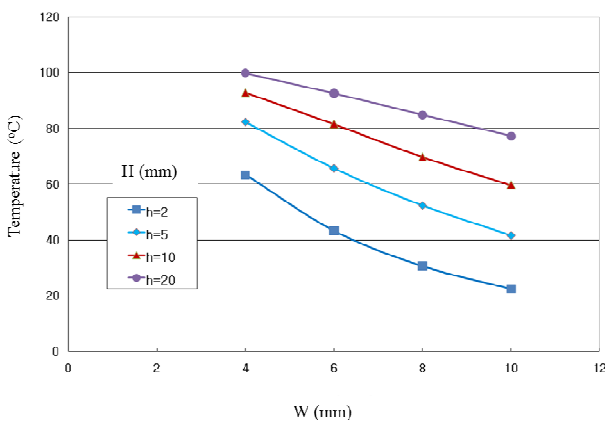


Fig. 7 Temperature difference according to width change of thermoelectric material

따른 온도차를 나타낸다.

즉, 열전재료의 높이가 높을수록, 너비가 작을수록 열전재료 양단의 온도차는 커짐을 알 수 있다. 그러나 열전재료의 높이가 높으면 내부저항이 증가하여 전력회수율이 낮아지고 너비가 작을수록

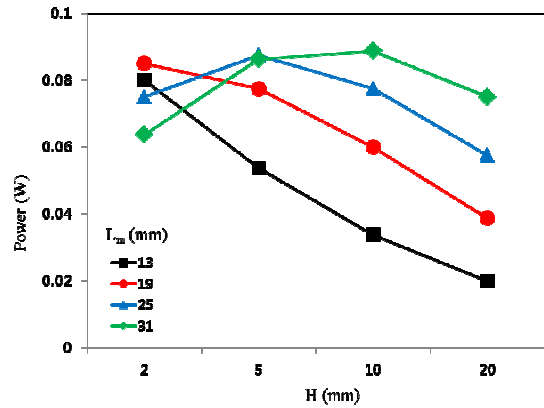


Fig. 8 Electrical power output in accordance with thermoelectric module shape change

수율이 작아지는 특성이 있다. 따라서 전력회수에 대한 정량적인 값을 도출하여 최적의 너비와 높이를 가지는 열전재료를 선정할 필요가 있다.

또한, 전력회수율은 열전재료의 형상변화에 따른 내부저항의 변화에 영향을 받기 때문에 최적값의 개념을 갖게 되어 최적화가 필요하게 된다. Fig. 8 에 보인 바와 같이, 각각의 경우에 대한 전력회수율 계산 결과를 살펴보면 열전모듈의 크기가 31 mm 이고, 열전재료의 너비와 높이가 각각 10 mm 일 때 최대 전력회수율을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 방사성동위원소를 이용한 장수명 열전발전기 개발의 기초연구로서 MCNP 해석을 통한 방사선차폐 및 발열량 해석을 수행하였고 열전재료의 최적형상을 도출하기 위한 열전달 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 국내외 상황을 고려할 때, 수급이 가능한 동위원소는 Sr-90 이 현실적으로 적합하며 수 W 급의 열전발전기에 1000 Ci 이상의 방사능이 필요하다.

(2) 이때 법적요건을 만족하는 차폐체는 텅스텐 기준으로 75 mm 의 차폐두께가 필요함을 확인하였다.

(3) 각 부품별 발열량은 선원에서 6.73 W, 선원 캡슐에서 0.254 W 그리고 텅스텐에서 0.117 W 가 생성된다.

(4) 열전달 해석결과 최적의 전력을 회수하는 열전재료의 크기는 모듈이 13 mm, 폭과 높이가 10 mm 일 때로 평가되었다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 산업융합원천기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(10043868).

참고문헌

- (1) George R., Thomas J. and Leonard A. Dudzinski, "Radioisotope Power: A Key Technology for Deepspace Mission," *www.intechopen.com*, pp. 419~456.
- (2) Leopold Summerer, Jean Pierre Roux, Alexey Pustovalov, Viacheslav Gusev and Nikolai Rybkin, 2009, "Technology-Based Design and Scaling Laws for RTGs for Space Exploration in the 100 W Range," *ICA-09*, C4.7~C3.5.5.
- (3) Bennett, G. L., Lombardo, J. J., Hemler, R. J., Silverman, G., Whitmore, C.W., Amos, W. R., Johnson, E.W., Schock, A., Hagen, J. C. and Englehart, R. W., 2006, "Mission of Daring: The General-Purpose Heat Source Radioisotope Thermoelectric Generator," 4th *IECEC*, AIAA 2006-4096.
- (4) El-Genk, M. S. and Saber, H. H., 2006, "Thermal and Performance Analyses of Efficient Radioisotope Power Systems," *Energy Conversion and Management*, Vol.47, pp.2290~2307.
- (5) Richard, R. and Furlong, J., 1999, "U.S. Space Mission Using Radioisotope Power System," *Nuclear News*, pp. 26~34.
- (6) Anderson, D. J., 2005, "NASA Radioisotope Power Conversion Technology NRA," *NASA/TM. 2005-213981*.
- (7) Cassady, R. J., Frisbee, R. H., Gilland, J. H., Houts, M. G., LaPointe, M. R., Maresse-Reading, C. M., Oleson, S. R., Polk, J. E., Russell, D. and Sengupta, A., 2008, "Recent Advances in Nuclear Powered Electric Propulsion for Space Exploration," *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 412~435.
- (8) Fleurial, J.-P., Snyder, G.J., Patel, J., Herman, J.A., Caillat, T., Nesmith, B. and Kolawa, E.A., 2000, "Miniaturized Radioisotope Solid State Power Sources," *Space Technology and Applications International Forum Proceedings*, Albuquerque, New Mexico.
- (9) Balint, T. S., 2005, "Comparison of Power System Options Between Future Lunar and Mars Missions," *International Lunar Conference 2005 Proceedings*.