

# 스프링 보강 정적 실의 스프링 강성에 따른 기밀 성능 해석

장수연 · 성인하<sup>†</sup>

한남대학교 기계공학과

## Analysis of Sealing Effectiveness Based on Spring Stiffness of a Spring-Energized Static Seal

Soo Yeon Jang and In-Ha Sung<sup>†</sup>

*Dept. of Mechanical Engineering, Hannam University*

(Received September 28, 2018; Revised November 24, 2018; Accepted November 25, 2018)

**Abstract** - Unlike a typical static seals, spring-energized static seals exhibit improvement in leak-tightness by reinforcing the spring inside the aluminum lining. Thus, spring-energized static seals are widely used in various industrial fields, such as aerospace, semiconductors, and petrochemical industries. The primary objective of this study is to develop design guidelines for spring-energized static seals in a wide range of temperatures, including that of cryogenic environments, by analyzing the required performance and influence of design variables through simulations. There are various parameters that can be controlled to design a leak-tight seal. In this study, the finite element analysis (FEA) is performed by controlling the parameters related to the spring and the thickness of the aluminum lining, and the result of the leakage between the seal and the casing is confirmed. Considering the influence of each parameters, all of them are found to be important. However, it is observed that the spring-related variables are more important than the aluminum lining or other variables when complexity is considered. We can identify the threshold value of spring stiffness that changes leak-tight performance of the seal by performing FEA. Simulation results, under the conditions that are considered in this study, show that spring stiffness should be at least 3.6 N/m to maintain leak-tightness caused by the sufficient contact force between the aluminum lining and the upper and lower casings.

**Keywords** - finite element analysis(유한요소해석), leakage(누설), static seal(정적 실)

### Nomenclature

$Y_0$  : Load on the compression curve above which leak rate is at required level (N/mm) (항복하중)  
 $e_2$  : Optimum compression (mm) (최적압축량)  
 $Y1$  : Load on the decompression curve below which leak rate exceeds required level (N/mm) (기밀 유지를 위한 감압 하에서의 최소하중)

$Y2$  : Load required the reach optimum compression  $e_2$  (N/mm)(최적압축량에서의 하중)  
 $\alpha$  : Helix angle (deg.) (코일 각도)  
 $E$  : Elastic modulus (GPa) (탄성계수)  
 $d$  : Wire diameter (mm) (코일 직경)  
 $n$  : No. of coils (코일 감긴 횟수)  
 $D$  : Spring diameter (스프링 직경)

### 1. 서 론

기계 부품내에 유체가 밀봉된 상태일 경우 압력이나 온도의 차이 때문에 밀봉되어 있던 유체가 외부로 유출

<sup>†</sup>Corresponding author: [isung@hnu.kr](mailto:isung@hnu.kr)  
Tel: +82-42-629-8316, Fax: +82-42-629-8293  
<http://orcid.org/0000-0003-4758-3832>  
© 2018, Korean Tribology Society

되거나 외부에서 다른 유체가 침투되는 상황이 발생할 수 있는데 이를 방지하기 위해서 실(seal)을 사용한다[1]. 실은 사용 목적에 따라 극저온에서부터 고온까지 넓은 온도와 압력 범위 내에서 사용되며, 기계 부품의 상대적인 운동의 존재여부에 따라 동적 실(dynamic seal)과 정적 실(static seal)로 구분하여 사용된다[2]. 실이 제 기능을 다하지 못하여 유체가 누설되거나 침투될 경우에는 예기치 못한 발화나 사고로 이어질 수 있기 때문에 실의 기밀 성능은 매우 중요하다[3, 4].

스프링 보강 정적 실(spring-energized static seal)은 라이닝(lining)으로 이루어진 실 내부에 스프링을 보강하여 스프링 복원력을 더하여 실의 기밀 유지 성능을 강화시킨 기계 요소이다. 다양한 온도와 압력에서 실링 기능이 우수하기 때문에 우주항공, 반도체 뿐만 아니라 일반 산업에 이르기까지 여러 가지 다양한 분야에서 사용이 되고 있다. 이렇게 여러 분야에서의 다양한 응용이 가능함에도 불구하고 국내에서는 아직 자체 설계 기술로 생산되고 있지 못하다. 스프링 보강 실의 설계 및 제조 기술 확보를 위하여 시뮬레이션을 통해 성능을 해석하여 필수적으로 요구되는 중요 설계 변수를 파악하고 설계 가이드라인을 제시하는 것이 본 연구의 최종 목표이다.

Fig. 1은 스프링 보강 정적 실의 특성 곡선을 나타낸 것이다. 여기서, Y축(linear load)은 단위변형을 일으키는데 필요로 되는 하중, 즉 강성을 의미한다.  $Y_0$ 는 스프링이 압축(compression)될 때 탄성을 유지하여 원래의 형태로 돌아올 수 있는 최대 스프링 강성 계수를 나타낸다. 스프링이 압축 변형이 될 때  $Y_0$ 보다 강성이 작게 나타날 경우 압축을 가하기 전 원래의 상태로 스프링이 탄성 복원되는 것을 나타낸다. 즉,  $Y_0$ 의 강성에 상응하는 하중으로 실을 압축 변형시킨 후 복원시켰을 경우에는 탄성력을 유지하고 있기 때문에 원래의 상태로 돌아갈 수 있다.  $Y_0$ 보다 크게 압축하게 될 경우 스프링에 소성이 일어나게 되어 원래의 복원력을 잃게 된다. 그림에서  $e_0$ 는 이때 발생하는 영구변형을 나타낸다.  $Y_2$  이상으로 스프링을 압축하면 큰 변형이 일어나게 되는데, 이때 압축후 감압(decompression)할 경우는 스프링에 영구 변형이 발생하여 스프링 보강 정적 실이 마운트된 상하부 케이싱(casing)간 간격이 발생하여 누설이 발생하게 된다. 따라서, 이로부터 상하부 케이싱(내부에 실이 마운트됨)간 간격을  $e_2$ (최적 압축량)로 설계하여 상하부 케이싱을 체결시키기 위해 필요로 되는 임계하중과 스프링 강성을  $Y_2$ 로 설정할 수 있다.  $e_1$ 은 영구변형

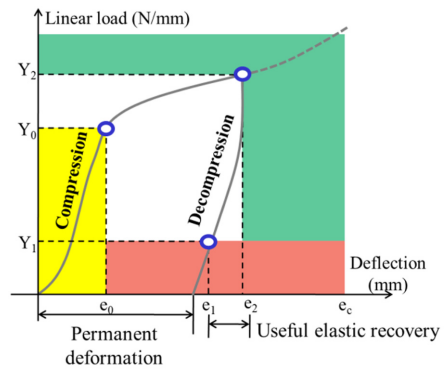


Fig. 1. Characteristic curve of a spring-energized static seal.

을 유발하는 큰 하중에 의한 압축후 감압시에 스프링이 본래의 기능을 하며 누설이 발생하지 않도록 권장되는 스프링의 변형량으로서, 그림에서 유용한 탄성복원량(useful elastic recovery)은 실(seal)의 요구조건(기밀정도, 압력 등)과 설계에 좌우된다. 이와 같이, 압축 특성 곡선에 의해 스프링에 최대로 가해지는 하중, 기밀을 유지하기 위한 최소 하중, 탄성 복원되는 양 등 여러 가지의 값들을 참고하여 실을 최적 설계하는데 필요한 정보들을 얻을 수 있다.

스프링 보강 정적 실의 성능을 해석하는데 있어 다양한 변수들이 존재하지만[5, 6], 그 중 스프링 복원력에 의해 많은 영향을 받을 것으로 예상하여 스프링 강성에 대한 요소들을 제어하여 해석을 진행하였다. 다음은 스프링 강성에 대한 이론식이다.

$$k = \frac{\pi^2 d^4 n E \alpha}{3.74 D^3 (1 + 8.86 \sin^2 \alpha)}$$

상기 식에서 스프링 강성은 코일의 직경, 스프링 직경, 코일의 감긴 횟수, 탄성계수 등에 따라 영향 받는 것을 알 수 있다. 많은 요소들 중 이번 연구에서는 코일의 직경, 코일의 감긴 횟수, 스프링의 탄성계수, 이 세 가지 조건을 변수로 하여 해석을 진행하였다.

## 2. 연구방법 및 내용

### 2-1. 유한요소해석 모델링

실을 설계하는데 있어 설계자가 제어할 수 있는 변수들을 고려하여 실의 사양에 따라 실의 기밀이 유지되는지 파악하기 위해 유한요소법(Finite Element Method;

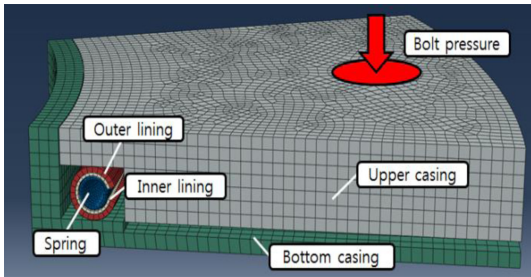


Fig. 2. A 3D model of spring-energized seal for finite element analysis.

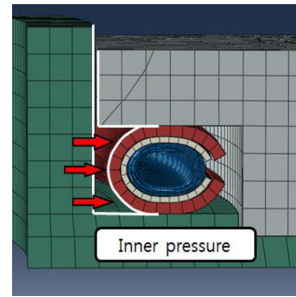


Fig. 3. Inner pressure applied to outer lining and casings.

Table 1. Material properties used in FE analysis

Material properties	Outer lining	Inner lining	Spring
	Al alloy	Inconel	Ninomic
Young's modulus (GPa)	71	214	220
Poisson's ratio	0.33	0.324	0.28
Yield strength (MPa)	103	310	1175
Density (g/cc)	2.705	8.47	8.18
Thermal conductivity (W/m°C)	222	14.9	11.5
Heat capacity (J/g°C)	0.904	0.444	0.446
Thermal expansion (µm/m°C)	23.6	13.3	12.7

FEM)으로 해석하였다.

Fig. 2는 해석에 사용된 유한요소 모델로서, 기존 제품의 사양을 토대로 하여 모델링한 것이다. 실 전체의 형상이 대칭이고 14개의 볼트에 의해 체결되는 것을 고려하여 1/14로 나누어 유한요소 해석을 진행하였다.

그림에서 보이듯이 유한요소 모델은 ‘C’자 형태의 단면 형상을 가진 알루미늄과 인코넬로 이루어진 이중 라이닝(dual lining) 및 이중 라이닝 내부에 니모닉(Nimonic) 재질의 헬리컬 스프링(helical spring)으로 구성되었으며, 상하부 케이싱(casing)으로 둘러싸여 있다.

실의 해석에 필요한 각 재료에 대한 물성 데이터는 Table 1에 보이는 바와 같다[7].

상하부 케이싱 간 간격은 0.9 mm이고, 하부 케이싱은 모든 방향에 대해 고정된 상태에서 상부 케이싱 플랜지부에 일정한 볼트 체결 압력(bolt pressure)이 가해지게 되면 상하부 케이싱이 완전 체결이 된다. 케이싱이 체결되면서 체결력으로 인해 각 라이닝과 스프링에

압력이 가해져 압축 변형을 하게 되며 스프링의 복원력으로 알루미늄 라이닝과 각 케이싱 사이에 접촉이 이루어진다.

상하부 케이싱의 체결후에, Fig. 3에서 보이는 바와 같이 알루미늄 라이닝과 상하부 케이싱의 일부분에 유체에 의한 내부 압력(inner pressure)을 가하였고, 시뮬레이션을 통해 알루미늄 라이닝과 상하부 케이싱 사이에 접촉력(contact force)이 나타나면 기밀이 유지된다고 판단하였다.

실의 기밀 성능은 스프링의 탄성 계수, 표면 거칠기, 마찰력 등 여러 가지의 변수들에 따라 변화하는데, 앞서 기술한대로 예비 시뮬레이션을 통해 그 중 상대적으로 영향이 큰 것으로 나타난 스프링 코일 두께와 코일의 감긴 횟수, 그리고 스프링의 탄성계수 총 세 가지의 변수를 고려하여 해석을 진행하였다. 각각 변수에 따라 유한요소 해석을 진행한 후 알루미늄 라이닝과 상하부 케이싱 사이에 발생하는 최소 접촉력으로 누설 여부를 확인한 후, 기밀 유지에 필요한 최소 스프링 강성을 결정하였다.

스프링 코일의 두께는 0.3, 0.4, 0.5 mm로 나누어 해석을 진행하였고, 스프링 코일의 감긴 횟수는 스프링 코일 두께에 따라 기밀 여부를 파악하기 위해 코일간 갭(gap)이 없이 최대로 감긴 횟수로 설정하였다. 이에 따라, 코일 두께가 0.3 mm일 때에는 코일의 감긴 횟수를 116회, 두께가 0.4 mm일 때에는 40, 50회, 두께가 0.5 mm일 때에는 20, 30회로 나누어 해석을 수행하였다. 마지막 변수로는 스프링의 재료가 달라질 경우를 가정하여 탄성 계수를 변화시켰다. 니모닉의 탄성 계수는 220 GPa로 알려져 있지만, 탄성 계수값을 100, 130, 150, 180, 220 GPa로 변화시켜가며 해석을 진행하여 기밀이 유지되는지 확인하였다.

## 2.2. 해석 조건 및 방법

온도 조건은 상온에서 진행되었다. 유한요소 해석은 우선 해석 대상인 모델에 볼트 체결 압력이 일정하게 가해지게 되고, 상하부 케이싱이 체결되어 안정되면 그 이후에 유체에 의한 내압이 가해지게 되는데 일정 시간 선형적으로 증가하다가 이후에는 일정하게 유지되는 것으로 설정하였다.

해석 모델 형상은 전체 모델이 아닌 1/14로 나누어 모델링한 것이기 때문에 몇 가지 경계조건을 설정해 주었다. 하부 케이싱은 모든 방향에 대해 고정시켜 놓았고, 상부 케이싱은 해석의 목적상 상하 운동만 가능하도록 고정시켰다.

각각의 변수에 따라 해석을 진행한 후, 알루미늄 라이닝과 상하부 케이싱 사이에서 발생하는 최소 접촉력을 확인하여 실의 기밀 여부를 확인하였다.

## 3. 결과 및 고찰

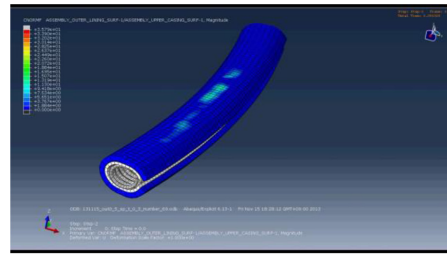
### 3.1. 스프링 코일 두께와 스프링 코일의 감김 횟수의 영향

첫 번째 변수로 스프링 코일 두께에 따라 해석을 진행하였다. 두께는 0.3, 0.4, 0.5 mm 세 가지 경우로 나누었고, 스프링 코일 두께를 제외한 나머지 스프링의 변수들은 동일하게 설정하였다.

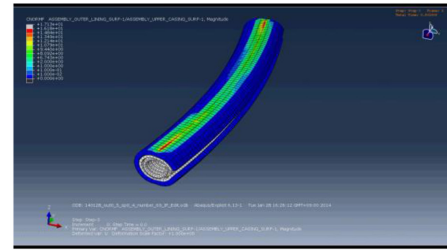
Fig. 4는 코일 두께에 따른 시뮬레이션 결과의 이미지로서 상하부 케이싱과 실 라이닝간의 최소 접촉력을 보여주고 있다. 제시된 이미지에서 보이는 바와 같이, 접촉이 발생할 경우 라이닝 외부 표면의 요소에 접촉력의 크기 및 분포에 따른 색상의 변화가 나타나며, 이러한 접촉력을 확인함으로써 누설의 발생여부를 확인할 수 있다.

우선 0.3 mm일 때에는 알루미늄 라이닝과 상하부 케이싱 사이에 발생하는 접촉력이 발생하지 않아 누설이 발생하는 것을 확인하였다. 하지만 0.4, 0.5 mm일 경우에는 상하부 케이싱 사이에서 발생하는 최소 접촉력이 2.80, 3.33 N으로 나타나 누설이 발생되지 않고 기밀 성능이 유지됨을 확인하였다.

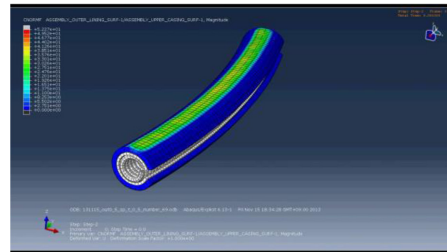
또 다른 변수로서 스프링 코일의 감김 횟수의 영향을 해석을 통해 고찰하였다. 스프링 코일 두께가 0.3 mm일 때 코일의 감김 횟수를 코일간 갭(gap)이 없이 최대 감을 수 있는 116회로 설정하였다. 이 경우 시뮬레이션 결과 누설이 발생하였고, 스프링 코일 두께가 0.4 mm일 때에는 코일의 감김 횟수를 40, 50회로 나누어 해석하



(a) coil thickness - 0.3 mm



(b) coil thickness - 0.4 mm



(c) coil thickness - 0.5 mm

**Fig. 4. Contact forces between the outer lining and upper/lower casings shown in the FE analysis results with respect to coil thickness.**

였는데, 40회일 때에는 Fig. 5에서 보이는 것처럼 상부 케이싱에서는 최소 접촉력이 0 N으로 나타나 누설이 발생하였다. 반면, 50회인 경우 상하부 케이싱 사이에 발생하는 최소 접촉력은 그래프에서 보이는 바와 같이 각각 3.06, 2.62 N으로 나타나 기밀이 유지되는 것을 확인하였다. 스프링 코일 두께가 0.5 mm일 때는 20, 30회의 2가지 경우로 해석을 진행하였다. 20회일 때에는 누설이 발생하였지만 30회의 경우에는 기밀이 유지되는 것으로 확인되었다.

### 3.2. 스프링의 탄성 계수의 영향

탄성 계수를 변수로 하여 앞서 기술한 대로 100, 130, 150 GPa로 나누어 해석을 진행하였다. 탄성 계수를 제외한 나머지 스프링 변수들은 상기 기술한 해석결과로부터 기밀이 유지되는 조건인 코일 두께 0.4 mm,

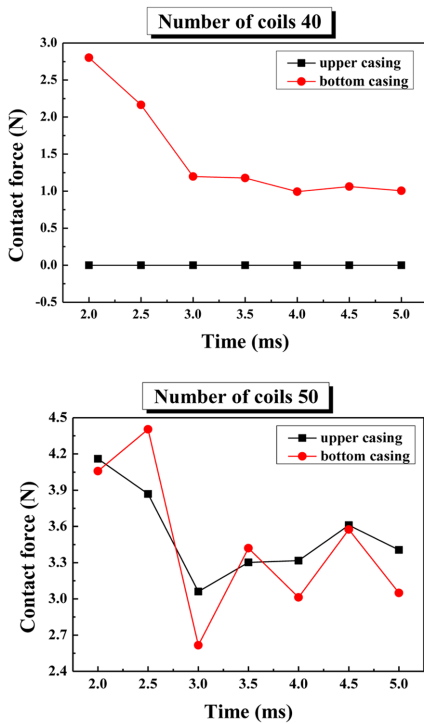


Fig. 5. Contact forces between outer lining and casings obtained from the case of 0.4 mm coil thickness.

코일의 감긴 횟수는 50회로 정하였다.

탄성 계수가 100, 130 GPa의 경우에는 알루미늄 라이닝과 상하부 케이싱 사이에 발생하는 최소 접촉력이 0 N으로 누설이 발생되지만 150 GPa일 경우에는 상하부 케이싱과의 최소 접촉력이 각각 2.9, 3.1 N으로 나타나 기밀이 유지되는 것을 확인하였다.

Table 2, 3은 각 변수에 따른 해석 결과에 대하여 해석 모델의 스프링 강성과 기밀 여부를 요약해놓은 것이다. 앞서 제시한 스프링 강성의 이론식에서 확인되는 바와 같이, 본 연구에서 다룬 세 가지 변수 모두 스프링 강성과 비례하는 요소임을 알 수 있다. 스프링 강성이 높을수록 실이 압축될 경우 알루미늄 라이닝과 상하부 케이싱 사이에 발생하는 최소 접촉력 또한 비례하여 증가하기 때문에 누설 발생 위험이 없고, 기밀 성능이 우수하게 유지될 것이며, 해석 결과로부터도 알 수 있다.

세 가지 변수에 의한 스프링 강성 변화를 종합적으로 정리하여 설계 가이드라인으로 제시한 것이 Fig. 6이다. 스프링에 대한 주요 설계변수들의 모든 가능한 변화 범

Table 2. Effect of coil thickness and number of coils

Spring coil thickness (mm)	No. of coils	Spring stiffness (N/m)	Contact/leakage
0.3	69	1.05	Leakage
0.3	116	1.11	Leakage
0.5	20	2.78	Leakage
0.4	40	3.47	Leakage
0.4	50	3.60	Contact
0.4	69	3.60	Contact
0.5	30	4.17	Contact
0.5	69	9.58	Contact

Table 3. Effect of the elastic modulus of spring

Spring coil thickness (mm)	Young's modulus (GPa)	Spring stiffness (N/m)	Contact/leakage
0.4	100	1.64	Leakage
	130	2.13	Leakage
	150	2.45	Contact
	180	2.94	Contact
	220	3.60	Contact

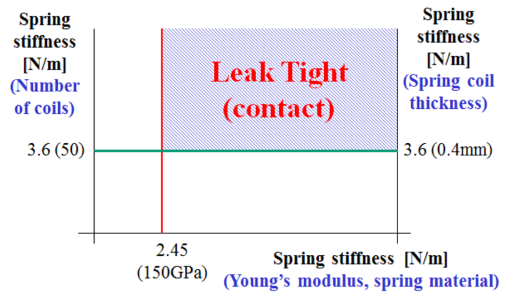


Fig. 6. Spring stiffness and related parameters.

위와 조건에 대하여 스프링 보강 정적 실의 기밀성능이 유지되어야 하므로, 본 연구에서 수행한 해석 결과로부터 종합해 볼 때, 알루미늄 라이닝과 상하부 케이싱 사이에 발생하는 최소 접촉력을 유지할 수 있는 조건의 스프링 강성 3.6 N/m의 값을 최소 스프링 강성 기준으로 결정하였다. 실제 스프링을 설계할 시에 각각의 설계 변수에 의한 스프링 강성을 계산하여 최적의 스프링을 설계할 수 있도록 설계 가이드라인으로 제시하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 스프링 보강 정적 실(seal)의 설계 기술을 확보하기 위하여, 요구되는 필수 성능을 시뮬레이션을 통해 해석하고 설계 변수에 따른 영향을 분석하여 높은 신뢰성의 실을 개발하기 위한 설계 가이드라인을 제시하고자 하였다. 기밀(leak-tight) 성능이 우수한 실을 설계하기 위해서 제어되는 더 많은 변수들이 존재하지만, 이 논문에서는 우선 알루미늄 라이닝의 두께와 스프링에 관련된 변수들을 제어하여 유한요소 해석을 진행한 후, 실과 케이싱 사이에 누설이 발생하는지에 대한 결과를 확인하였다.

다양한 변수들 중 각각의 영향을 고려하면 모두 중요한 변수이지만, 복합적으로 고려하였을 때 알루미늄 라이닝이나 다른 변수들보다 스프링에 관련된 변수가 더 중요한 것을 알 수 있었다. 유한요소 해석을 통해 기밀 성능이 바뀌는 스프링 강성의 임계값을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 고려된 조건하에서의 시뮬레이션 결과, 스프링 강성은 최소 3.6 N/m 이상은 되어야 알루미늄 라이닝과 상하부 케이싱 사이에 충분한 최소 접촉력이 발생하여 기밀이 유지된다는 결과를 도출하였으며 이때의 기밀이 유지되기 위한 각 스프링 변수의 설계 범위를 얻을 수 있었다.

#### Acknowledgements

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업 지원을 받아 수행된 것임.

#### References

- [1] Park, S. H., Shin, D. P., Bae, J. S., Rhee, H. J., Jung, H. G., Park, T. J., "Failure of mechanical seals in pumps for commercial ships", Proc. of KSTLE Autumn Conference, pp. 139-144, 2005.
- [2] Jo, J. H., Rhim, Y. C., Lee, S. C., Kim, C. H., "Development of cryogenic test rig for ball-bearing and evaluation of the performance of the prototype ball-bearing of turbo pump", *J. Korean Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 28, No. 4, pp. 167-172, 2012.
- [3] Park, M. J., Jeon, S. M., Yoon, S. H., Kim, J. H., "Cryogenic leak test of LOX pump static seal", *Aerospace Eng. Technol.*, Vol. 8, No. 1, pp. 73-81, 2009.
- [4] Seok, H. S., Ha, T. W., "Prediction of annular type seal leakage using 3D CFD", *J. Korean Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 25, No. 3, pp. 150-156, 2009.
- [5] Kwak, H. D., Jeon, S. M., Kim, J. H., "Development of inter-propellant seal for high thrust turbo pump," *J. Korean Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 24, No. 6, pp. 349-354, 2008.
- [6] Gillen, P., "Verification of back-plate sealing performance against Li-infiltration and corrosion-induced damage based on the bayonet back-plate concept", *Fusion Eng. Design*, Vol. 82, No. 15, pp. 2601-2607, 2007.
- [7] Matweb, <http://www.matweb.com>