

자주포 보조동력장치 엔진 마운트 강도안전을 향상에 관한 연구

김병현^{*,1)} · 서재현¹⁾ · 박영일¹⁾ · 김용욱¹⁾ · 김병호¹⁾

¹⁾ 국방기술품질원 창원센터

A Study on Improvement of Strength Safety Factor for K55A1 APU Engine Mounts

Byung Hyun Kim^{*,1)} · Jae Hyun Seo¹⁾ · Young Il Park¹⁾ · Yong Wook Kim¹⁾ · Byung Ho Kim¹⁾

¹⁾ Changwon Center, Defense Agency for Technology and Quality, Korea

(Received 2 November 2015 / Revised 3 February 2016 / Accepted 29 April 2016)

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the vibration characteristics and develop a mounting which can improve the strength safety factor to replace the high failure rate APU(auxiliary power unit) imported metal mounts with rubber mount that can be domestically produced. For this study, we analyzed in 3 kinds of rubber mounts hardness for the natural frequency to avoid the average excited frequency of the APU. In addition, allowed vibration acceleration of rubber mount confirmed to 90.8 g by adding a strength safety factor. To assure the validity of the design, we measure the vibration acceleration equipped with a metal mount and rubber mount 2 species(Hs 50 and 60). As a result, the proposed design method in this study is reasonable because the rubber mounts is excellent strength safety factor and vibration transmissibility than metal mounts.

Key Words : Self Propelled Artillery(자주포), Auxiliary Power Unit(보조동력장치), Natural Frequency(고유진동수), Strenth Safety Factor(강도안전율)

1. 서론

자주포(Self propelled artillery)는 스스로 움직여 사격할 수 있도록 무한궤도 등의 차체에 탑재한 야전포를 말하며, 제2차 세계대전에서 전차와 작전행동을 함께 하면서 대포에 기동력을 부여하기 위해 개발되었다.

미국 M108 자주포를 도입하여 생산한 K55 자주포는 군의 작전 수행 능력을 월등히 향상시켰다. 그러나 사격훈련 등 포탑 운용 시 주엔진인 디젤엔진의 동력을 사용함에 따라 운용이 불편하고 정차상태에서 장시간 사용에 따른 주엔진 내부 부품의 파손 발생가능성이 존재한다. 이와 같은 운용상의 문제점을 해결하기 위해 K55자주포의 성능개량의 일환으로 보조동력장치(APU : Auxiliary Power Unit)를 설치하였다. APU는 자주포 운용 시 차량 축전지 충전 및 주엔진 미가

* Corresponding author, E-mail: tkdkim16@dtaq.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

동 상태에서 포탑 구동 및 차량에 탑재된 전기, 전자 장비 작동에 필요한 전원을 공급하는 기능을 한다.

APU는 차량의 포탑 후방 외부에 4개의 마운트로 설치되어 있다. 마운트는 큰 변위가 요구되거나 높은 온도 조건, 사용 환경을 고려하여 스테인레스 재질의 덮개와 강철선인 완충재로 구성된 수입품을 적용중이다. 하지만 운용 중 발생하는 발전기의 진동으로 인해 Fig. 1과 같이 간헐적으로 마운트 내부의 완충재의 수축 변형 및 파손되어 감쇠기능이 저감된다. 이에 따라 전기배선용 커넥터 파손, 푸시로드 휨, 스로틀 축 누유 등이 발생하여 APU의 고장현상이 발생한다^[1].

이러한 수입 금속마운트의 단점 개선 및 국내 자체 제작이 가능한 고무재질의 방진마운트를 개발하였다. 이러한 고무마운트는 고무의 탄성을 이용한 대표적인 비금속제 방진마운트로 주로 진동이나 소음이 문제되는 경우에 사용하며, 금속마운트에 비해 방진재 내부의 댐핑 효과가 좋고, 강성 조절이 쉬우며, 형상설계가 쉽기 때문에 산업 전반적으로 사용한다^[3].

마운트의 설계 시 과거에는 공진회피의 관점에서만 선정해 왔지만, 본 연구에서는 강도안전율의 관점을 추가하였다. 또한, 자주포의 주행진동 등과 같은 운용 특성을 고려한 시험을 실시하여 개발의 타당성을 입증하였다.



Fig. 1. Deformation of APU metal mount

2. APU 마운트 설계방안

2.1 고유진동수 회피를 위한 경도 설계

2.1.1 경도별 고유진동수 산출

마운트의 설계 시 고유진동수가 중요한 이유는 마운트에 가진되는 가진주파수(f_e)와 고유진동수(f_n)의 비율 f_e/f_n 에 따라 진동이 증폭 또는 감쇠가 될 수 있기 때문이다.

우리가 적용하고자 하는 고무 마운트는 Fig. 2와 같은 물리적 모델로 표현되며, 식 (1)로 나타낼 수 있다.

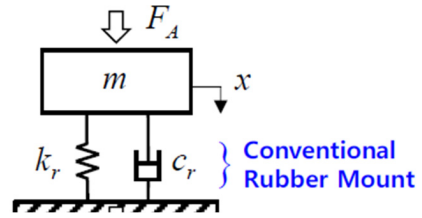


Fig. 2. Rubber mount vibration model

$$m\ddot{x} + c_r\dot{x} + k_r x = F_A \quad (1)$$

이 때, m : Mass(APU 엔진의 중량)
 c_r : Damping(마운트의 댐핑상수)
 k_r : Stiffness(마운트의 스프링상수)
 F_A : Exciting Force(APU의 가진력)

APU와 마운트의 고유진동수 계산이 주 고려대상이므로 가진력에 의한 영향은 무시할 수 있으므로 식 (2)와 같이 간단히 나타낼 수 있다^(4,5).

$$m\ddot{x} + k_r x = 0 \quad (2)$$

위와 같은 1차 자유도의 진동 거동에서 고유진동수는 다음 식 (3)과 같이 계산이 가능하다.

$$f_n (Hz) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{m}} \quad (3)$$

위 식에서 APU의 중량은 일정한 값을 가지므로 스프링상수에 의해 고유진동수의 값이 변화한다. 스프링상수는 마운트의 경도에 따라 변화하므로 적절한 경도의 설계가 중요하다.

최적의 경도를 가진 마운트를 선정하기 위해 APU의 중량을 고려하여 Hs(쇼어경도) 50, 60, 70 세가지 경도의 마운트로 고유진동수를 산출하였다. 경도에 따른 스프링상수를 산출하기 위해 압축하중 시험을 실시하였다. Fig. 3은 변위-압축력 그래프이며 식 (4)와 같이 스프링상수를 계산할 수 있다. 여기에서 계산된 스프링상수를 이용하여 고유진동수를 계산하기 위해 식 (3)에 대입하였고, 그 결과는 Table 1과 같다.

$$Stiffness = \frac{Compressive\ Force\ (N)}{Dispalcement(mm)} \quad (4)$$

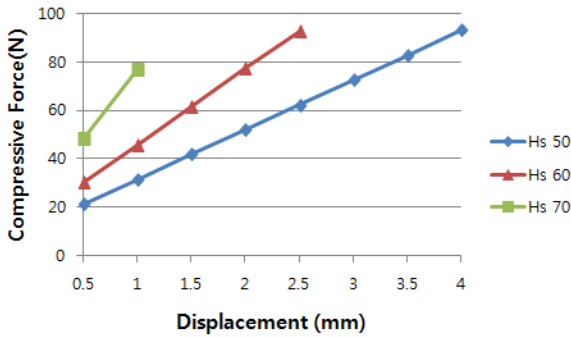


Fig. 3. Displacment-Compressive force graph

Table 1. Natural frequency in accordance with the hardness

Hardness	Hs 50	Hs 60	Hs 70
Mass(kg)	$\frac{\text{Mass of APU engine}}{\text{The number of mounts}} = \frac{131kg}{4} = 32.75kg$		
Stiffness(N/m)	205,939	313,812	574,389
Natural frequency(Hz)	12.6	15.4	21.1

2.1.2 APU 전달 가진주파수 검토

APU용 엔진은 1기통이며, 4행정 사이클이다. 엔진은 2550~3000 rpm 사이에서 작동하며, 평균 2800 rpm으로 작동한다. 따라서, 일반적인 작동조건에서의 가진주파수 계산을 위해 아래 식 (5)를 적용하여 23.3 Hz의 결과를 도출하였다.

$$\begin{aligned} \text{가진주파수}(Hz) &= \frac{\text{초당엔진회전수}}{1\text{폭발당회전수}} \quad (5) \\ &= \frac{2800rpm/60s}{2\text{회}} \\ &= 23.3Hz \end{aligned}$$

2.1.3 진동수 비 분석

각 경도별 마운트의 진동전달율을 분석한 결과는 아래 Table 2와 같다. 진동전달율은 가진력에 대비 응답부의 힘으로 정의하며, 본 연구에서는 APU 엔진의 가진력 대비 APU마운트 하단부의 힘이다. 분석 결과 Hs 70은 진동수 비(f_e/f_n)가 1.11으로 이때의 진동전달율이 4이므로 APU에서 발생하는 진동을 증폭시키기 때문에 사용이 불가하다. 진동수 비에 따른 진동전달율

을 고려하였을 때 진동 감쇠가 가능한 주파수 비($\sqrt{2}$)를 초과하는 Hs 50, 60의 고무를 적용해야 한다.

Table 2. Vibration transmissibility calculation in accordance with hardness

Hardness	Hs 50	Hs 60	Hs 70
Natural frequency(Hz)	12.6	15.4	21.1
Excitation frequency(Hz)	23.3	23.3	23.3
Frequency ratio(f_e/f_n)	1.84	1.50	1.11
Vibration transmissibility	0.5	0.9	4.0
$f_e/f_n > \sqrt{2}$	Satisfy	Satisfy	Dissatisfy

2.2 강도안전율을 고려한 인장강도 설계

기존의 고무마운트 설계 시 공진회피 관점에서 주로 설계를 하였으나, 본 연구에서는 고무가 외력에 버틸 수 있는 능력인 강도 안전율 개념을 추가하였다. 유사 장비의 강도안전율을 참고하여, K55A1 APU 마운트의 필요 강도안전율을 분석한 결과 4수준 이상의 강도안전율이 필요한 것을 확인하였다²⁾.

강도 안전율은 식 (6)와 같이 표현이 가능하며, 계산을 위해서는 설계단계에서 마운트의 허용 가속도 산출이 필요하다. Table 3과 같이 인장강도, 작용 중량, 마운트 단면적 등으로 허용 진동 가속도 계산이 가능하다. 고무의 인장강도는 고유진동수 분석 결과에 따라 Hs 50, 60의 인장강도를 적용하며, 신장률 및 운용 특성을 고려하여 10.30 MPa(1.05 kgf/mm²)으로 허용진동 가속도를 산출한다.

$$\text{강도안전율} = \frac{\text{마운트 허용 가속도}}{\text{장치대 작용 최대 가속도}} \quad (6)$$

Table 3. Calculation rubber anti-vibration mounts permit vibration acceleration

Rubber tensile strength	1.05 kgf/mm ²
Mass applied each mount	32.75 kg
Area of mounts	(Width-Diameter×2)×길이 = (70-22)×59 = 2832 mm ²
A permitted vibration acceleration	$\frac{\text{Tensile strength}}{\text{Mass/Area}} = \frac{1.05kgf/mm^2}{32.75kg/2832mm^2} = 90.8g$

3. 설계방안에 대한 검증

3.1 내구성 시험

민수 차량보다 가혹한 조건에서 운용되는 군용 차량의 특성을 고려하여 내구성 충족여부를 파악하기 위해 진동 및 충격시험을 실시하였다.

3.1.1 진동내구성 시험

진동내구성을 확인하기 위해 Mil-Std-810F:2003의 514.5, Procedure I(General Vibration)에 따라 실험을 실시하였다. 시험 방법은 APU를 진동·충격시험기 테이블에 설치한 후 각 축(X,Y,Z) 당 270분 동안 진동을 인가하였다. 그 결과 Fig. 4와 같이 시험 전·후의 외관상태(체결력, 파손상태)에 이상이 없었으므로 개선된 APU 마운트는 진동에 대한 내구성을 가지고 있다.



(a) Before test



(b) After test

Fig. 4. The results of the vibration duration test according to Mil-Std-810F

3.1.2 충격내구성 시험

충격내구성은 진동내구성시험을 완료한 후 실시하였다. 시험 방법은 Mil-Std-810F:2003의 516.5, Procedure I(Functional Shock)과 V(Crash Hazard Shock)에 따라 실험을 실시하였으며, APU를 진동·충격시험기 위에 설치한 후 Functional Shock 톱니파 충격을 각 축(X,Y,Z)당 양/음 각 방향에 대하여 3회, 6번 실시한 후 Crash Hazard 톱니파 충격을 동일하게 실시한다. 그 결과 Fig. 4와 같이 시험 전·후 외관상태 비교결과 이상이 없었으므로 APU 마운트는 충격에 대한 내구성도 확보하였다.

본 진동 및 충격 내구성 시험을 바탕으로 개선된 APU 마운트는 군용 장비에서 요구하는 내구성을 만족하였기 때문에 자주포에 적용 가능한 신뢰성을 확보하였다고 할 수 있다.

3.2 차량장착 시험

2장의 설계방안에 대한 검증을 위해 기존의 금속마운트와 Hs50, 60의 고무마운트로 시험을 실시하였다.

APU 시동 또는 작동 시 발생하는 가속도 측정 및 마운트에 따른 진동전달율을 계산하기 위해 가속도 센서를 Fig. 5와 같이 마운트의 상단 및 하단에 설치하며 설치 위치는 Fig. 6과 같이 총 10군데 이다. 가속도 센서 설치위치는 Table 5와 같이 차량 전진 방향 기준 전·후방, 좌·우측, 상·하단에 이며, 후방측은 수직, 전후에 가속도 센서를 설치하여 진동 가속도를 측정한다.

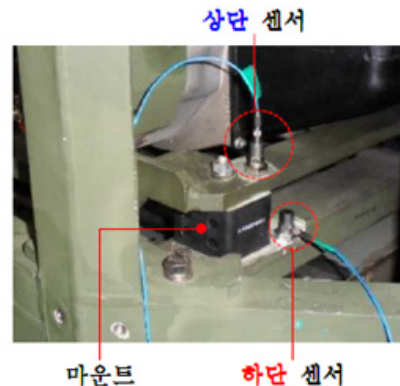


Fig. 5. Installation of acceleration sensor on APU mounts

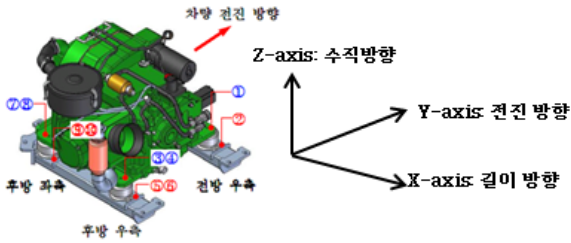


Fig. 6. Installation position of acceleration sensor on APU engine and measuring axis

APU의 시험기준은 차량이 정차된 상태에서 시동 및 가동 시 가속도 값을 측정하고, 차량 속도 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 km/h에서 주행하면서 속도별 가속도를 측정한다. 데이터 수집을 위한 조건은 아래 Table 4와 같다.

Table 4. Conditions of vehicle test

Acceleration Sensor	PCB 1-Axis Sensor
Data Acquisition	System 6200(Vishay)
Sampling Frequency	1024 Hz
Filter	50 Hz Low Pass Filter

Table 5. Acceleration sensor position and direction

No.	Sensor Position		Direction
1	Rear Right Side	Upper	Z-axis
2		Lower	Z-axis
3	Front Right Side	Upper	Z-axis
4			Y-axis
5		Lower	Z-axis
6			Y-axis
7	Rear Left Side	Upper	Z-axis
8			Y-axis
9		Lower	Z-axis
10			Y-axis

3.3 측정 결과

3.3.1 APU 시동 시 결과

APU의 다양한 모드로 시험을 실시하여 10개의 센서

중 가속도가 가장 크게 측정되는 지점의 결과를 정리 하였다.

진동전달율은 아래 식 (7)과 같이 계산이 가능하며 낮을수록 APU에서 발생하는 진동을 마운트가 흡수하여 차체쪽으로 전달하지 않으므로 값일 작을수록 우수하다.

$$\text{진동전달율}(\%) = \frac{\text{마운트하부브래킷진동가속도}}{\text{APU엔진작동진동가속도}} \times 100 \quad (7)$$

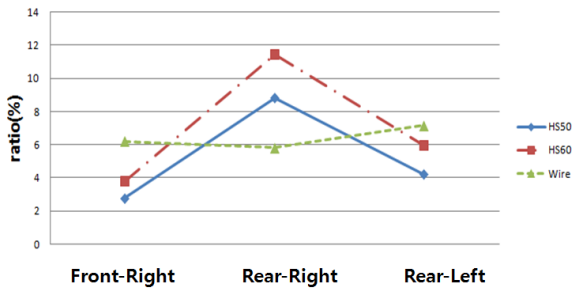
APU 시동 시 금속마운트에 가해지는 진동은 수직 방향 최대 7.1 g, 차량 진행 방향 최대 7.6 g로 마운트 허용진동 가속도 7.0 g 보다 높기 때문에 마운트의 손상발생 가능성이 있다. Hs 50, 60 고무마운트에 가해지는 진동은 각각 13.9 g, 12.57로 기존의 금속마운트 보다는 높지만 강도안전율은 6.54, 7.22로 설계 시 강도안전율인 4.0보다는 높기 때문에 금속마운트보다 우수하다. 또한 진동전달율은 평균적인 가속도의 크기로 계산하기 위해 R.M.S(Root Mean Square)로 계산하여 Fig. 7과 같이 그래프로 나타냈다. 시동 시의 진동전달을 분석결과 금속마운트보다 고무마운트가 전반적인 경향이 낮기 때문에 우수하다.

Table 6. The maximum acceleration and strength safety factor of start-up period

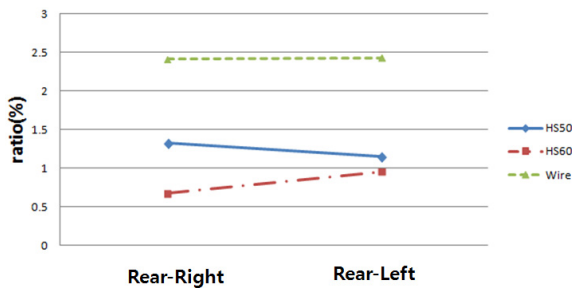
		Metal		Hs50		Hs60	
		Accel-eration (m/s ²)	Safety Ratio	Accel-eration (m/s ²)	Safety Ratio	Accel-eration (m/s ²)	Safety Ratio
Z axis	F-R	6.19	1.13	13.89	6.54	12.57	7.22
	R-R	7.08	0.99	7.81	11.63	7.05	12.88
	R-L	4.56	1.54	11.72	7.75	9.90	9.17
Y axis	F-R	7.18	0.97	6.77	13.41	6.68	13.59
	R-R	7.59	0.92	7.13	12.73	6.60	13.76
A permitted acceleration		7.00	-	90.8	-	90.8	-

3.3.2 APU 가동 시 결과

차량이 정차된 상태에서 APU를 가동한 상태의 진동가속도를 분석하였으며, 시동 시와 동일한 방법으로 Table 7과 같이 분석하였다.



(a) Vertical axis(Z-axis)



(b) Longitudinal axis(X-axis)

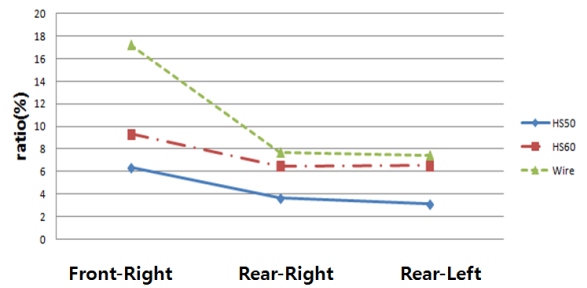
Fig. 7. The acceleration transmissibility of start-up period

Table 7. The maximum acceleration and strength safety factor of operation period

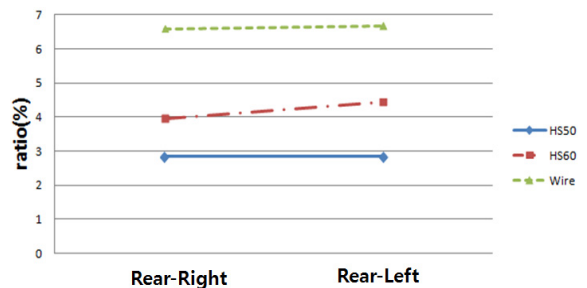
		Metal		Hs50		Hs60	
		Acceleration (m/s ²)	Safety Ratio	Acceleration (m/s ²)	Safety Ratio	Acceleration (m/s ²)	Safety Ratio
Z axis	F-R	1.55	4.51	5.63	16.12	5.16	17.60
	R-R	5.01	1.40	4.14	21.93	3.73	24.34
	R-L	3.41	2.05	1.58	57.47	0.76	119.4
Y axis	F-R	5.30	1.32	3.54	25.65	2.94	30.88
	R-R	5.71	1.23	3.78	24.02	3.11	29.20
A permitted acceleration		7.00	-	90.8	-	90.8	-

APU엔진 시동이 켜지면서 0 rpm에서 약 2750 rpm으로 상승하는 중에 가진주파수와 마운트의 고유진동수가 상충하는 주파수대역이 발생한다. 그러므로 APU에서 발생하는 진동을 증폭시키므로 Tables 6, 7과 같

이 시동 시의 최대 가속도가 가동 시보다 높게 측정된다. 하지만, APU의 운용 개념 상 정지 상태의 가동 상태에서의 운용시간이 가장 길기 때문에 가동 시의 결과도 중요하다. 금속마운트는 설계 시 요구사항인 강도안전율 4를 충족하지 못하지만 고무마운트는 강도안전율을 만족한다. 또한 진동전달율도 Fig. 8과 같이 금속 마운트보다 고무 마운트가 낮으므로 설계 방안이 타당한 것을 확인하였다.



(a) Vertical axis(Z-axis)



(b) Longitudinal axis(X-axis)

Fig. 8. The acceleration transmissibility of operation period

4. 결론

본 연구는 간헐적으로 파손 및 변형이 발생하는 수입 금속마운트의 국내 대체품을 개발하기 위해 국내 제작이 가능한 고무 마운트의 설계 방안을 제시하는 연구이다. 본 연구를 위해 고유진동수 이론 및 강도안전율을 적용하여 마운트를 설계하고, 실제 자주포에 장착하여 시험을 수행한 결론은 다음과 같다.

(1) APU 엔진에 가진되는 평균 가진주파수는 23.3 Hz

이다. 이 가진주파수를 회피하기 위하여 경도에 따른 마운트의 고유진동수를 분석하였고, 그 결과 Hs 50, 60의 경도를 가지는 고무마운트가 가진주파수를 회피가 가능한 설계방법이었다.

- (2) 기존의 공진회피의 개념에 강도안전율을 추가하여 분석하였으며, 지상궤도장비 마운트의 강도안전율을 분석한 결과 4수준 이상이 요구되었다. 마운트의 신장률 및 장비의 운용특성을 고려하여 인장강도를 설계하였고 그에 따른 고무마운트의 허용진동수준은 90.8 g 이다.
- (3) 고무재료의 적절성 여부를 확인하기 위해 금속마운트, 고무마운트 2종(Hs 50, 60)을 실제 차량에 장착하여 정차된 상태에서의 시동 및 가동상태에서의 가속도 값을 측정하여 분석하였다. 그 결과 고무마운트가 금속마운트보다 강도 안전율 및 진동 전달율이 운용 개념 상 가장 중요한 시동 시와 정차 중 가동 시에서 우수하여 본 연구방법이 타당한 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 금속마운트에서 국내제작이 가능한 고무마운트로 적용이 가능토록 하였으며, 마운트 설계 시 고려해야 할 고유진동수 개념 및 강도안전율과 같은 필수 요인의 설계법을 제시하였다. 이에 따라 추후 궤도장비 APU 개발에 본 연구 결과를 적용가능하다. 이 외에도 소음진동이 심한 궤도차량 및 차륜형 장갑차 등 소음진동 저감이 필요한 분야에 본 연구를 이

용한 응용이 가능할 것으로 사료되며, 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 한다.

References

- [1] B. H. Kim, H. J. Kang, Y. I. Park, J. H. Seo, "The Optimal Design Technique for Improving Durability of Spline Shaft of the Self Propelled Artillery Generator," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 18, No. 5, pp. 1~7, 2015.
- [2] DTaQ, "A Report on the Improvement for the Auxiliary Power Unit(APU) Mounts of K55A1," 2014.
- [3] S. Y. Youn, S. C. Lee, "Development of Shear Type Rubber Isolator," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 10, 1998.
- [4] S. J. Moon, Y. H. Shin, J. H. Chung and C. K. Song "Experimental Review on Dynamic Characteristics of the Commercial Mounts for Vibration Reduction," Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., Vol. 24, No. 9, pp. 687~694, 2014.
- [5] Y. K. Ahn, D. W. Kim "Hybrid Rubber Mount by Using Magnetic Force," Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., Vol. 24, No. 3, pp. 236~246, 2014.