

품질을 고려한 브레이크 저더의 동역학 해석 및 시험 검증

Dynamic Analysis and Experimental Verification of Brake Judder considering Quality

김 효 식*·임 홍 재**

Kim Hyo Sig, Yim Hong Jae

Key Words : Brake Judder (브레이크 저더), BTV (Brake Torque Variation, 제동 토크 변동), Quality defects (품질결함), Noise factors (잡음인자), Flexible multibody dynamic analysis (유연 다물체 동역학 해석), Finite element analysis (유한요소해석)

ABSTRACT

The problem of brake judder is typically caused by quality defects in manufacturing. This quality problem, however, can't be controlled deterministically and requires analyses and designs considering uncertainties. This paper presents a method for dynamic analysis of a brake judder considering uncertainties. Firstly, quality defects, which come from the uncertainties, are determined by examination of symptoms of the brake judder quality problem. Effective quality defects are selected by investigation of process capability and comparison of sensitivity of each quality defects and noise levels of the effective quality defects are determined. Secondly, Flexible multibody dynamic analysis and finite element analysis according to the proposed method are carried out. Finally, The analysis results are compared with the test results with noise levels of the effective quality defects.

1. 서론

드럼 브레이크의 저더는 제동시 라이닝과 드럼의 마찰에 의해서 발생하는 제동 토크 변동(BTV : Brake Torque Variation)의 가진력이 현가계, 조향계 및 제동계 등의 전달계를 통해서 증폭 및 감쇠되면서 차체, 핸들 및 브레이크 페달 등의 진동으로 운전자에게 전달되는 25Hz 미만의 이상 진동이다.^{(1),(2)} 가진력 즉 BTV가 발생하는 원인에 따라서 기계적 저더와 열적 저더로 분류된다. 기계적 저더는 25Hz미만의 저주파수 대역에서 발생하며 보통 휠 회전주파수의 1차 ~ 4차의 주파수를 기본 주파수로 갖는다. 반면 열적 저더는 기계적 저더에 비해 높은 주파수 대역에서 발생하며 제동시 마찰면의 국소부위에 발생하는 열점(hot spot)이 생성되고 이로 인한 변형에 의해서 발생된다.⁽³⁾

브레이크 저더는 자동차 회사들의 고질적인 품질문제로서 지속적인 개선노력에도 불구하고 지속적으로 필드 문제 및 클레임 비용이 발생되고 있다. 따라서 브레이크 저더에 대한 발생 원인 및 주요 인자를 규명하여 필드문제 및 클레임 비용을 최소화하여 고객 만족도를 향상시킬 필요가 있다. 여러가지 품질문제중에서 브레이크

저더는 부품 또는 조립체의 품질에 민감한 대표적인 품질문제이므로 품질을 고려한 해석 및 설계가 필수적으로 요구된다. 그런데 현재 많이 사용되고 있는 결정론적인 해석 및 이를 통한 설계는 품질을 고려하지 못하므로 품질에 대해서 민감한 브레이크 저더와 같은 문제에 적용하기 어려운 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 부품 및 조립체의 품질을 고려하여 다물체 동역학 및 유한요소법을 이용한 브레이크 저더의 동역학 해석을 수행하고 브레이크 다이내모를 이용한 시험 결과와 비교 및 검토하여 제안된 방법의 유효성을 검증하고자 한다. 본 연구를 위해서 사용된 해석 소프트웨어로서 유한요소해석은 MSC/NASTRAN⁽⁴⁾, ABAQUS 및 I-DEAS를 사용하였고 유연 다물체 동역학 해석은 Recur/Dyn⁽⁵⁾ 을 사용하였다.

2. 본론

2.1 브레이크 시스템 및 저더의 증상

드럼 브레이크의 기계적 저더에 대한 BTV의 발생원인은 제동시 드럼과 라이닝의 국소 접촉에 의한 마찰력의 국소 집중으로서 각 부품들의 초기 품질 불만족, 조립에 의한 부품의 결함 또는 장기간의 사용으로 인한 변형 등은 BTV의 과도한 발생에 큰 영향을 미치게 된다. 그런데 최근 자동차 회사에서는 각 부품에 대한 초기 품질관리를 엄격히 수행하여 이로 인한 문제는 거의 발생하지 않고 있으며 최근까지 문제가 되어온 기계적 저더의 대표적인 예는 조립에 의한 부품의 결함 또는

* 국민대학교 자동차공학 전문대학원
E-mail : hskim001@kookmin.ac.kr
Tel.:(02)910-4819, Fax:(02)910-4718

** 국민대학교 자동차공학 전문대학원

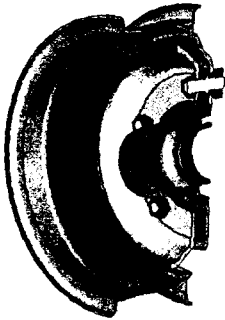
장기간의 사용으로 인한 변형에 기인한 경우가 많다.

본 연구의 대상이 되는 브레이크는 드럼 브레이크 시스템으로서 Fig. 1과 같이 휠, 드럼 및 허브들이 스테드볼트로 체결된 조립체와 라이닝, 슈, 실런더, 스프링 및 백 플레이트 등이 조립된 브레이크 조립체로 구성된다.

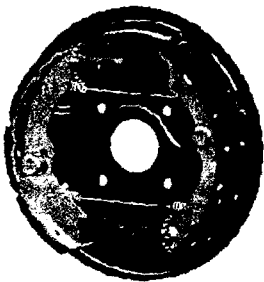
또한, 브레이크 저더 품질문제의 증상중 주요한 특징을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 열과 관계없이 발생.
- (2) 60Km/h ~ 80Km/h에서 제동시 발생.
- (3) 휠, 드럼 및 허브 등의 부품 및 조립품에 대한 설계 규제치(Runout, Flatness, 직각도, Unbalance 등) 만족품을 장착한 차량에서도 발생.
- (4) Fig. 2에 주어진 제동시 문제 차량의 차축의 진동 분석결과를 검토해보면 차축에서 윗회전의 조화가진 성분 중 2차 오더성분이 제동 토크변동(BTV)의 기본 주파수로 관찰됨.

상기된 브레이크 저더 발생 현상을 정리해 보면 (1) 및 (2)항으로부터 기계적 저더로 판단되며 (3)항으로부터 설계규제와 관련된 부품 단위의 품질불량과 관계없이 발생하는 문제인 것을 알 수 있고 (4)항으로부터 브레이크 저더진동의 BTV 기본 주파수가 휠 회전의 2차 오더로 발생하는 것을 알 수 있다.



(a) Assembly of wheel, drum and hub



(b) Assembly of brake system

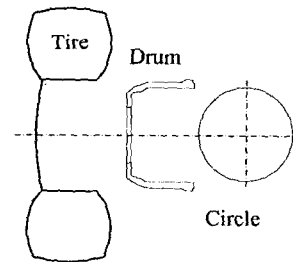
Fig. 1 Drum brake system



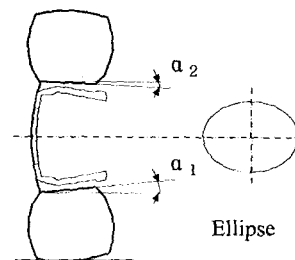
Fig. 2 Waterfall Diagram

2.2 품질결함 및 잡음 인자

본 절에서는 실차 문제현상을 공통적으로 만족하는 품질결함을 유추한 후, 실험 및 해석을 통해 이를 검증하고 이 중에서 가장 영향이 큰 품질결함을 고려하여 브레이크 저더의 동역학 해석을 수행하고자 한다. 먼저 실차 문제현상을 만족하는 드럼브레이크의 주요한 품질결함을 검토해 보면 Fig. 3과 같이 휠에 드럼이 장착되면서 휠에 대해서 드럼이 편심 및 변형되는 것이다. 이와 같은 드럼의 편심과 변형의 경우, BTV의 조화가진(harmonic excitation) 기본 주파수는 각각 윗회전의 2차 오더를 갖는다.



(a) Pre assembly



(b) Post assembly

Fig. 3 Eccentricity and deformation of a drum

조립시 드럼의 편심 및 변형을 유발하는 주요한 품질 인자들을 정리한 후, 부품들의 조립을 고려한 유한요소 해석을 Fig. 4의 유한요소모델을 이용해서 수행하고 결과를 조사해보면 휠의 평면도 및 드럼의 동심도 등이 주요한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

휠의 평면도 및 드럼의 동심도에 대한 공정능력 (process capability)을 조사해 보면 다음의 Fig. 5와 같고 각각의 분포에 대한 6-시그마 위치의 값을 품질을 표현하기 위한 잡음인자의 수준으로 선정하여 정리하면 Table 1과 같다.

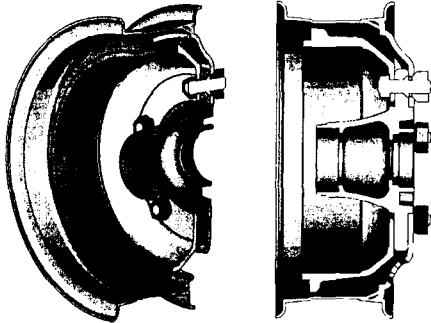
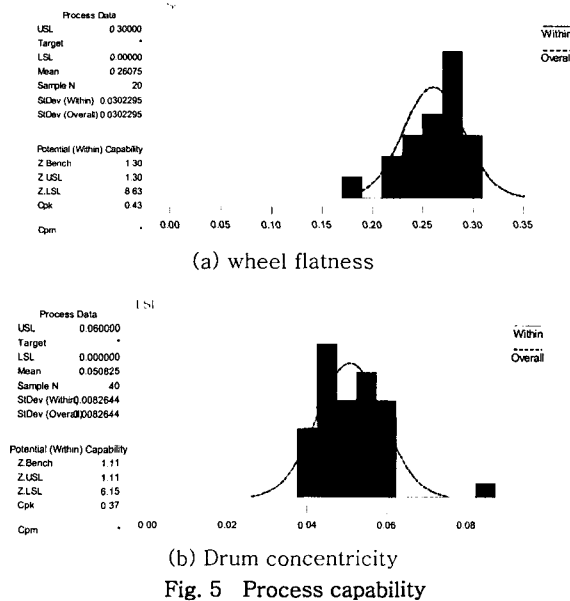


Fig. 4 Finite element model for an assembly of wheel, drum and hub by stud bolts



(a) wheel flatness
(b) Drum concentricity
Fig. 5 Process capability

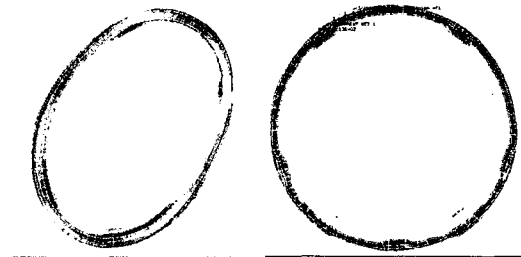
Table 1. Kind and level of noise factors

Factor		Level	Level 1 N1 ⁽¹⁾	Level 2 N2 ⁽²⁾
Noise	I	Drum concentricity	I1	I2
	J	Wheel flatness	J1	J2

(1) N1 : mean value + 6σ

(2) N2 : mean value - 6σ

잡음인자의 수준에 따른 현사양의 휠, 드럼 및 허브 조립체에서 드럼의 변형을 Fig. 4의 유한요소모델을 이용한 유한요소해석을 수행해서 계산하고 드럼 마우스 부위의 확대된 변형 형상을 비교해 보면 Fig. 6에서와 같다. 수준 1 (N1)에 대한 드럼의 변형이 수준 2 (N2)에 대한 드럼의 변형보다 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며 수준 2 (N2)의 경우 5군데의 규칙적인 변형형상이 나타나는 것은 드럼이 5개의 스테드 볼트로 휠에 체결 되기 때문이다.



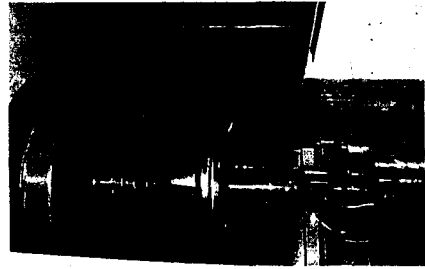
(a) N1
(b) N2
Fig. 6 Deformation shape of Drum mouth

2.3 동역학 해석 및 시험 검증

본 절에서는 브레이크 다이내모 시험기 및 실험방식과 동일한 조건의 품질결합이 고려된 유연 다물체 모델을 제작하고 동역학 해석을 수행한 후, 시험 결과와 비교 및 검토하여 제안된 방법의 유효성을 검증하고자 한다.

전체 동역학 해석의 개념적인 흐름도는 Fig. 7과 같이 2단계로 수행된다. 먼저 1단계인 유한요소해석 단계에서는 각각의 부품들에 대한 고유치 및 정적해석을 수행해서 다물체 모델내 대응 부품의 유연성 정보 데이터를 계산한다. 이어서 Table 1에 정리된 잡음인자의 수준에 따른 유한요소해석을 수행해서 조립 과정에서 발생하는 드럼의 변형을 Fig. 6과 같이 계산한다. 2단계인 다물체 동역학 해석단계에서는 1단계에서 계산된 각각의 부품들의 유연성 정보 데이터를 대응되는 부품에 입력하고 드럼의 변형 데이터를 이용해서 드럼의 내부 접촉면을 정의한다. 그리고 브레이크 다이내모 시험의 조건에 따라서 동역학 해석을 수행한 후, 브레이크 토크를 계산한다.

브레이크 다이내모 시험기는 Fig. 8과 같으며 크게 3개의 부분 시스템 즉, 모터 및 관성 질량체 시스템, 브레이크 시험 시스템 및 하중 계측부 시스템 등으로 구성된다. 브레이크 다이내모 시험기의 동역학 해석용 유연 다물체 모델은 Fig. 9와 같다. 여기서 모터 및 관성 질량체 시스템 및 하중 계측부 시스템은 등가의 단순화된 모델을 만들어서 고려하였고 브레이크 시험 시스템 중에서 드럼과 라이닝간의 마찰계수는 지수함수를 이용해서 정의하였으며 각 부품의 고유진동수 및 주파수는 실험적 모드해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 모달 보정(modal correlation)해서 구하였다. 또한, 슈를 연결하는 2개의 스프링 및 백플레이트에 슈를 고정하는 스프링등의 등가 강성치는 각각의 스프링에 대한 공정능력을 조사한 후, 평균값을 취해서 사용하였다.



(b) Sub system for Brake test
Fig. 8 Brake dynamo test device



(a) Whole layout

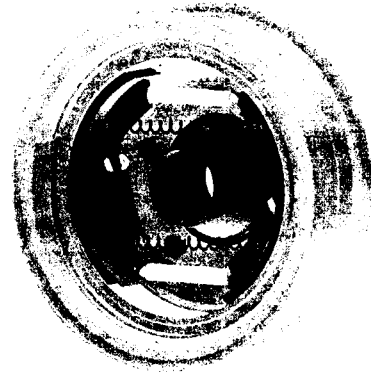


Fig. 9 Flexible multibody model for an brake dynamo test device

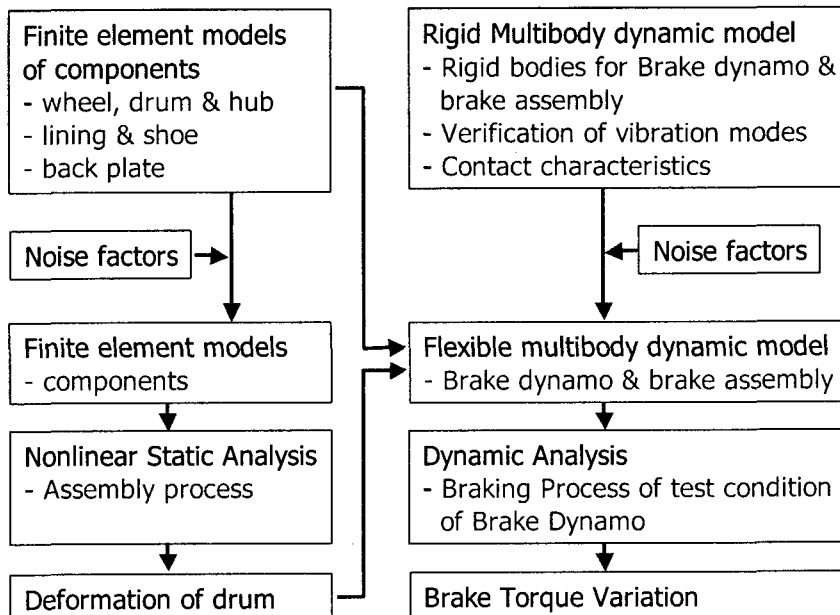
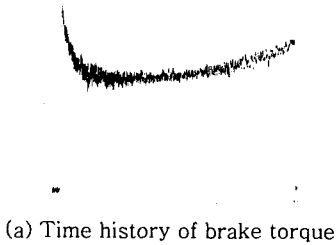
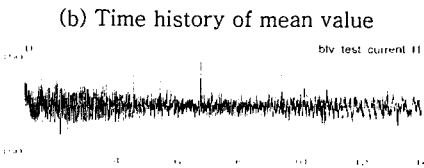


Fig. 7 Conceptual Process for dynamic analysis with noise factors

브레이크 다이내모를 이용한 제동 실험 방식은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 2가지의 상용 작동 압력에 따라서 발생하는 제동 토크의 변동량을 계측하고 동역학 해석 결과와 비교하고자 한다. 그런데 제동 토크 시간 이력은 Fig. 10. a와 같이 비정상적인 스파이크 및 제동 압력의 작동상태에 따른 기울기를 갖으므로 직접 비교하기가 어려운 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 제동토크 시간이력을 Fig. 10. b의 평균값 시간이력과 Fig. 10. c의 제동토크변동 시간이력으로 분해하고 평균값 시간이력의 평균값과 제동토크변동 시간이력의 표준편차를 이용해서 비교하고자 한다.



(a) Time history of brake torque



(b) Time history of mean value

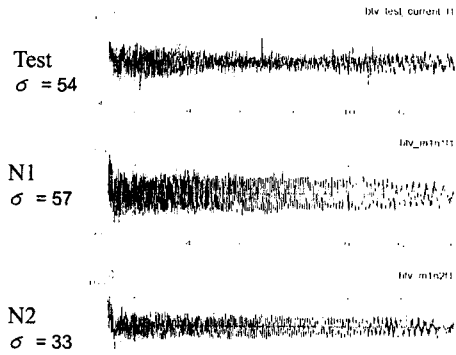
(c) Time history of brake torque variation

Fig. 10 Time history of brake torque

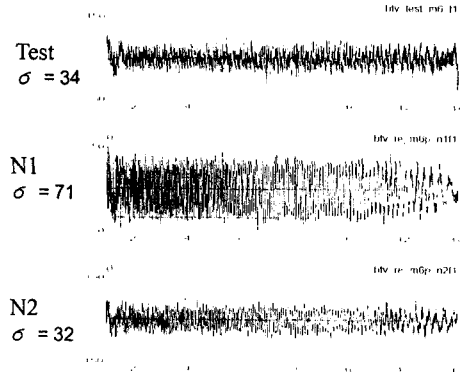
먼저 제동토크변동 시간이력에 대한 현사양에 대한 브레이크 다이내모 시험(Test) 및 해석(N1, N2)의 결과를 비교해 보면 다음의 Fig. 11. a와 같다. 또한 강건설계를 수행하기 위해서 제작된 다꾸찌 직교표(L18)내 임의의 사양에 대한 시험(Test) 및 해석결과(N1, N2)를 비교해 보면 Fig. 11. b와 같다. 그림에 표기되어 있는 제동토크변동의 표준편차(σ)를 검토해 보면 각각의 사양에 대한 무작위로 선택된 시험 샘플에 대해서 표준편차(σ)가 $\sigma_{CAE}^{N2} < \sigma_{Test} < \sigma_{CAE}^{N1}$ 의 관계를 만족함을 볼 수 있다. 또한, 각각의 설계 사양에 대해서 제동압력에 따른 제동토크변동의 표준편차(σ)를 정리해서 비교하

면 다음의 Fig. 13과 같으며 $\sigma_{CAE}^{N2} < \sigma_{Test} < \sigma_{CAE}^{N1}$ 의 관계를 만족함을 볼 수 있다. 또한, Fig. 14로부터 평균값(μ)이 $\mu_{CAE}^{N2} < \mu_{Test} < \mu_{CAE}^{N1}$ 의 관계를 만족하는 것을 볼 수 있다.

이와 같은 결과로부터 본 연구에서 선정한 잡음인자가 제동토크변동에 큰 영향을 미치는 사실을 알 수 있으며 적용된 해석방법이 제동토크와 제동토크의 변동량을 계산하는 데 정밀한 방법이라는 사실을 알 수 있다.

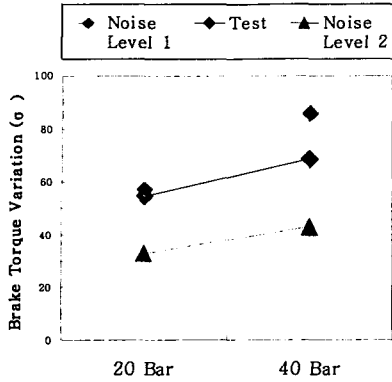


(a) Current design

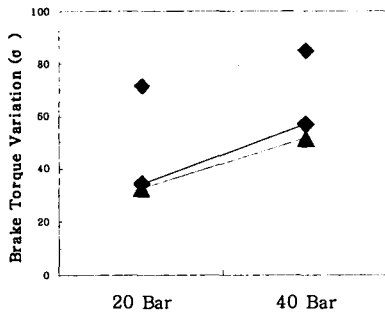


(b) The other design

Fig. 11 Comparison of brake torque variation

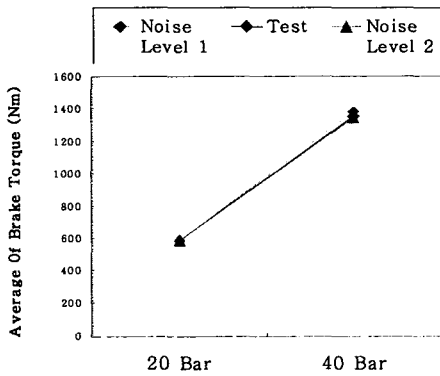


(a) Current design

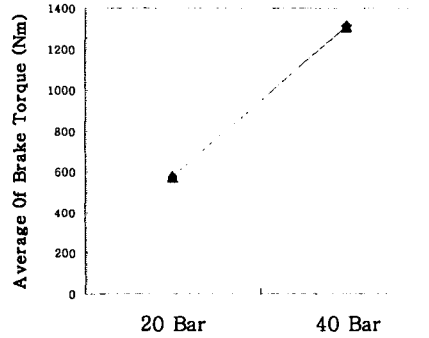


(b) The other design

Fig. 12 Comparison of standard deviation of brake torque variation w.r.t applied pressure



(a) Current design



(b) The other design

Fig. 13 Comparison of mean value of brake torque variation w.r.t applied pressure

3. 결론

브레이크 저더는 부품 또는 조립체의 품질에 민감한 대표적인 품질문제이므로 품질을 고려한 해석 및 설계가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 현재 발생되고 있는 드럼브레이크의 기계적 저더에 대해서 브레이크 저더의 증상에 대한 조사 및 중요한 품질결함의 선정과정을 통해서 2개의 주요한 품질결함을 선정한 후, 공정능력의 검사를 통해서 구한 품질분포로부터 각각의 품질결함에 대한 잡음인자의 수준을 결정하였다. 선정된 품질결함을 고려하여 다물체 동역학 및 유한요소법을 이용한 브레이크 저더의 동역학 해석을 수행하고 브레이크 다이내믹을 이용한 시험 결과와 비교 및 검토하여 제안된 방법의 유효성을 검증하였다.

참고 문헌

- (1) H. S. Kim, H. J. Yim and C. B. Kim, 2002, "Robust Design for Brake Judder using Design for Six Sigma", SAE 2003-01-0882.
- (2) J. Helena, 1999, "Analysis of Brake Judder by use of Amplitude Functions", SAE 1999-01-1779.
- (3) 홍일민 등, 2002, "실차상태에서의 제동시 이상떨림 현상에 관한실험적 연구", 한국소음진동공학회 논문집 제12권 제5호, pp.338-345.
- (4) MSC/NASTRAN Theoretical Manual, 1983, MacNeal-Schwendler Corp., LA, CA, USA.
- (5) RecurDyn, Theoretical Manual, 2001, Rev. 4.0, Function Bay, Inc.