

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.12.1275>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

건설기계용 카운터웨이트 시험장비 및 가속수명시험법 개발[§]

이기천* · 이용범*[†] · 최병오* · 강보식* · 김도식* · 최종식* · 김재훈**

* 한국기계연구원 신뢰성평가센터, ** 충남대학교 기계설계공학과

Development of the Accelerated Life Test Method & Life Test Equipment for the Counterweight of the Construction Machinery

Gi-Chun Lee^{*}, Young-Bum Lee^{*†}, Byung-Oh Choi^{*}, Bo-Sik Kang^{*}, Do-Sik Kim^{*}, Jong-Sik Choi^{*} and Jae-Hoon Kim

^{*} Korea Institute of Machinery & Materials, Reliability Assessment Center

^{**} BK21 Mechatronics Groups, Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received September 4, 2014 ; Revised September 4, 2015 ; Accepted October 5, 2015)

Key Words: Counterweight(카운터웨이트), Construction Machinery(건설기계), Exciter(가진기), Reliability Assessment(신뢰성평가), Accelerated Life Test(가속수명시험)

초록: 카운터웨이트를 수명시험 하기 위해서는 실제 현장과 유사하게 2 톤의 무게를 가진시켜 주는 대형 가진기가 필수적이다. 그렇지만 이러한 장비를 일반업체에서 보유하여 시험하기는 어려우므로, 이러한 애로점을 해소하기 위해 본 연구에서는 첫번째로 2 톤의 중량물일지라도 건설기계의 신뢰성을 평가하는 전기모터들로 구성되는 회전식 가진기를 사용하여 실제 현장조건을 재현하는 시험장비를 개발하였고, 주요 구성품에 대해 카운터웨이트의 고장해석을 수행하였다. 두번째로 현장으로부터 필드데이터를 측정하여 수명시험에 활용할 수 있도록 하였다. 마지막으로 성능과 수명을 확인하기 위해 가속수명시험법을 개발하였고, 제품의 고장발생 없이 B₅ 10,000 시간을 만족하는 가속수명시험을 완료하였다.

Abstract: A large-sized exciter that vibrates a two-ton component is required to simulate the field operating conditions of a counterweight of an excavator. However, it is difficult for a small-medium sized company to obtain a large exciter for the life test of a counterweight which is an equivalent counterbalancing weight that balances a load. Therefore, in this study, we developed life test equipment for evaluating the reliability of construction machinery weighing about two tons. It simulates the field operating conditions using rotational vibrators consisting of electric motors. A failure analysis of the counterweight was also performed for the major components. Field data acquired from various sites were applied to the life test design of the counterweight. Finally, a zero-failure qualification test based on the accelerated life test was designed, and there was no failure during the test, which guarantees a B₅ life of 10,000 hours.

- 기호설명 -

t_n : 무고장 시간
t_{na} : 가속수명 시간
β : 형상모수
AF : 가속계수
m : 가속지수

B_{100p} : 보증수명
n : 시료수
p : 불신뢰도

1. 서론

굴삭기, 크레인, 로더, 고소작업차, 도저 등은 건설, 토목 등의 작업을 위한 건설중장비들이다. 이러한 건설기계에는 일반적으로 중량물을 이동하거나 설치하기 위해 필요한 장비들이므로 장비 자체의 무게에 따라서 작업하는 중량의 차이가 발생하게 된다. 이러한 작업을 수행하기 위해서는 작업

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 충청지회 춘계학술대회(2014. 5. 9., 충남대) 발표논문임.

† Corresponding Author, lyb662@kimm.re.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

환경에 적합하게 장비의 무게 중심을 잡아주기 위해 건설중장비의 주요 구성품인 카운터웨이트가 장착된다.⁽¹⁻²⁾ 카운터웨이트는 주로 고소작업차, 굴삭기, 지게차와 같은 중장비의 뒷 무게를 지탱하고 앞쪽에 화물을 실었을 때 한쪽으로 쏠리는 것을 방지해주기 위해 균형을 잡아주는 평행 추로써 연결 부위가 파손이 되어 분리가 되면 무게중심을 잃고 전복되는 현상이 일어나 매우 큰 위험이 따르므로 신뢰성의 확보가 필수적이다.

카운터웨이트의 고장원인 분석 및 시험평가는 건설기계산업에서 필수적으로 필요하지만 제작 업체의 자체적인 연구인력과 시험장비 구축으로 시험평가를 수행하기에는 많은 어려움이 따른다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 건설기계의 카운트웨이트는 장비의 회전, 이동 및 다양한 작업들을 원활히 수행하기 위한 필수적인 구성품으로 장비 후단에 주로 장착되어 있다. Fig. 2 는 시험대상품인 카운터웨이트를 나타내고 있다.

본 연구에서는 카운터웨이트의 주요 구성품에 대한 고장분석을 실시하고, 현장작동조건을 통한 작업시 발생하는 진동가속도를 측정하여 현장조건 적용에 활용하였으며, 현장에서 얻어진 데이터를 기반으로 무고장시험 및 가속수명시험법을 설계하

여 현장에서 발생하는 진동 조건을 재현하도록 하였다. 또한 시험 시료를 시험장비의 상부에 고정시킨 후 가진 조건을 부여할 수 있는 시험장비를 개발하였다. 개발된 시험장비로 가속수명시험을 완료하여 제품의 신뢰성이 확보되었음을 확인할 수 있었다.

2. 시험장치 개발 및 가속수명시험

2.1 현장조건 및 고장분석

시험장비를 개발하기 위해서는 현장에서 사용되는 조건들을 확인하고 이를 근거로 시험조건을 설정하여 사용 조건과 동일하거나 유사하게 시험을 진행할 필요가 있다. Fig. 3(a)와 (b)는 건설기계에서 가혹한 조건으로 사용되는 굴삭기에 착암기(breaker)를 장착하여 타격하는 것을 보여주고 있으며, 진동을 측정하기 위해 굴삭기 후면에 고정되어 있는 카운터웨이트에 진동센서를 장착하여 X, Y, Z 방향으로 가속도 값을 측정하였다. Fig. 4 는 측정데이터의 Z 축 방향값을 나타내고 있다.

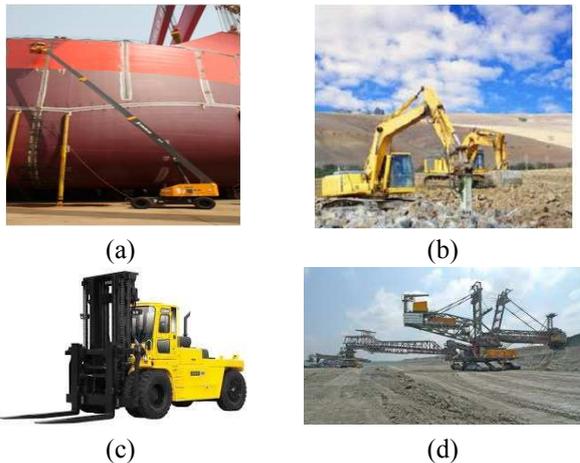


Fig. 1 Construction equipments using a counterweight; (a)High operation car, (b)Excavator, (c)Fork lift, (d)Bucket wheel excavator



Fig. 2 Photo of the counterweight

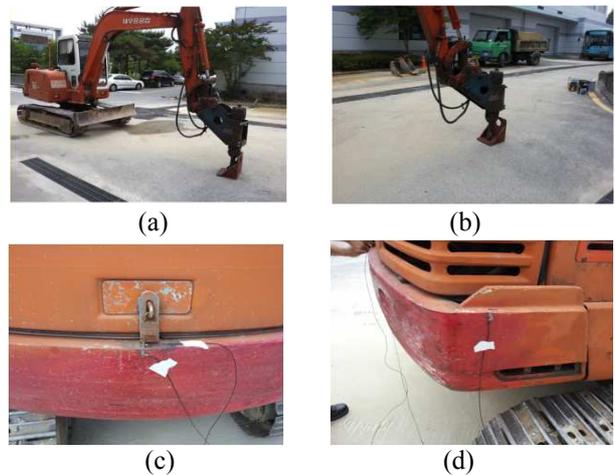


Fig. 3 Measuring acceleration values of counterweight in the excavator during operating conditions

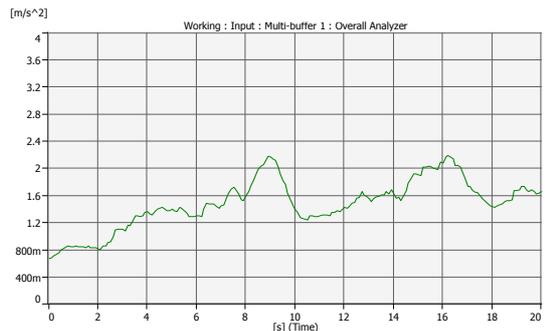


Fig. 4 Vibration data operating condition in z-axis

Table 1 Acceleration values acquired from the excavator

Division	Overall Analyzer [m/s ²]
X-axis	1.60 (0.16 G)
Y-axis	1.79 (0.18 G)
Z-axis	2.18 (0.22 G)

Table 2 Acceleration values acquired from the high place operation car equipment

Division	Low speed (mG)	High speed (mG)	Boom operation (mG)
X-axis	47.5	61.8	58.6
Y-axis	218	101	100
Z-axis	119	246	491



Fig. 5 Vibration measurements during operation; (a) x-axis, (b) y-axis & z-axis

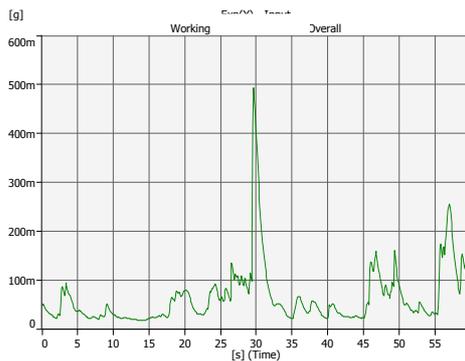


Fig. 6 Vibration data in operating condition in z-axis

Table 1 에서와 같이 카운터웨이트의 X, Y, Z 방향의 최고 진동가속도는 각각 1.60 m/s², 1.79 m/s², 2.18 m/s²로 측정되었다.

Fig. 5 는 건설기계차량의 카운터웨이트의 현장 작동 조건을 확인하기 위해 저속운전, 고속운전, 고속운전 상태에서의 붐(boom) 동작의 3 가지 조건으로 운전하여 진동 값 0.491G를 Fig. 6 과 같이 얻게 되었다.

Table 2 는 저속운전, 고속운전, 고속상태에서 붐동작시 얻어진 각축의 진동값을 나타내고 있다.

카운터웨이트의 주 고장모드는 제품 하부 고정 나사부의 파손으로 조사되었다. 주요 원인은 작업 시 발생하는 진동과 충격으로 인한 것이다. 두번째로 많이 발생하는 고장은 작업 중 이물질들과의 부딪힘과 동작오류 등으로 발생하는 외형 커버부의 손상이다. 또 다른 고장발생으로는 내부 콘크리트의 균열 및 깨짐으로 인한 소음발생과 도색의 벗겨짐이나 부식 등으로 조사되었다.

Table 3 Failure modes and mechanism analysis

Primary components	Function	Failure modes	Failure mechanisms
Cover	Exterior maintenance. Protect internal components	Breakage	Disfiguring
Concrete unit	Weight	Fracture	Shock and Vibration
Threaded part	Cover fixed	Breakage	Counterweight Release

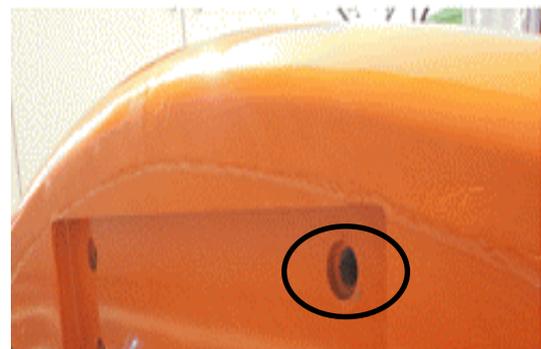


Fig. 7 Mounting part bolted under the counterweight

Table 3 에서 보는 바와 같이 카운터웨이트의 주요 구성품은 콘크리트부, 외부커버, 고정나사 설치부이며, 각 주요구성품에 대한 주요기능, 고장모드 및 고장 메카니즘이 분석되었다.

Fig. 7 에서는 카운터웨이트를 본체에 고정시키기 위해 제작된 너트부를 나타내고 있다. 볼트 고정부의 응력집중으로 인하여 접합부에 균열이 진행하여 파손이 일어나는 것을 현장조사를 통하여 확인하였다. 이러한 고장은 작업 중 발생하는 충격이나 진동 등의 영향으로 점차적으로 균열이 진전되어 파손이 일어난 것으로 조사되었으며, 초기의 균열에서 점차적으로 카운터웨이트의 중량과 흔들림에 의해서 급격한 균열이 발생하는 것을 알 수 있었다.

카운터웨이트의 낙하를 예방하기 위해서는 여러

방향에서 추락을 방지하는 추가적인 고정장치의 설계 및 제작을 통해 안전사고를 예방할 수 있다.

진동, 충격으로 인하여 발생하는 카운터웨이트의 연결부 파손으로 인한 가장 큰 문제는 전체 중장비 시스템의 작동불능과 중장비의 전복사고로 인한 안전사고 및 작업장의 피해이다.

2.2 수명시험장비 개발

건설기계용 카운터 웨이터에 현장작동조건과 재현하는 진동을 가하기 위해서는 2 톤의 무게를 가진 할 수 있는 초대형 유압 가진기가 필요하다. 그렇지만 이를 보유하고 있는 기관이나 업체가 드물어서 제작업체에서 시험을 완료한 후 시장에 출시하는 것은 현실적으로 어려운 상황이다.

그러므로 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 3.7 kW 급 전동기를 활용한 중량물을 가진할 수 있는 시험장비를 구축하였다. 시험장비에서는 현장작동조건을 재현을 위해 가속도 범위 2G 까지 변화를 주면서 가진할 수 있도록 하였다.

Fig. 8 (a), (b)에서와 같이 가진시험장비는 하부에 2 개의 전기모터가 부착되어 있으며, 상부에는 시

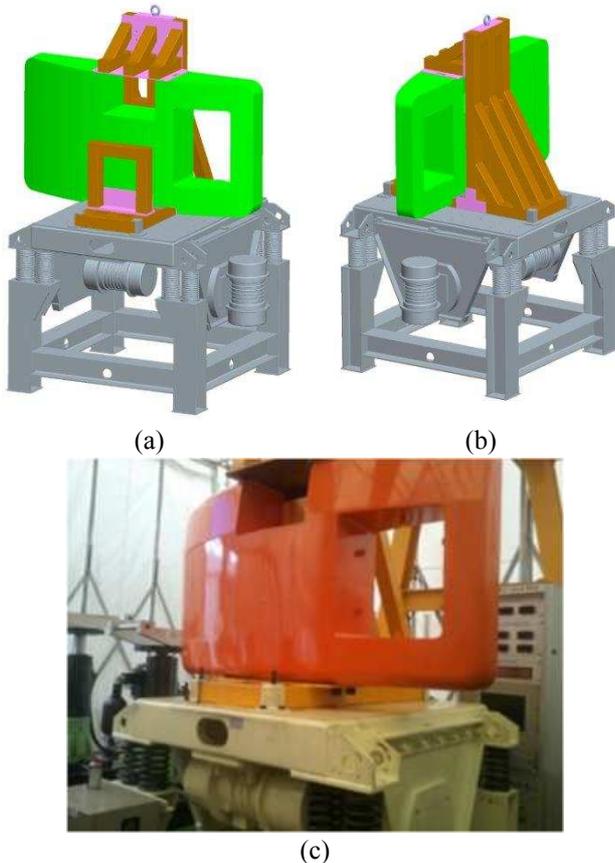


Fig. 8 Life test equipment design & manufacturing (a) front view (b) side view (c) test equipment

험대상품을 고정할 수 있도록 베드가 설치되어 있다. 베드와 가진기 사이에는 스프링이 설치되어 진폭이 조절될 수 있도록 하였다.

2.3 무고장 시험시간 계산

카운터웨이트의 사용현황 조사결과 1 일 8 시간 작동되고, 연간 240 일 가동되므로 연간 2,000 시간 작동하는 것으로 조사되었다. 따라서, 카운터웨이트의 보증기간 5 년과 등가되는 수명 10,000 시간을 보장하는 것으로 설정하였다.

신뢰성 평가 기준에서 규정된 카운터웨이트의 수명 10,000 시간(B_5 수명)을 보장하기 위한, 무고장 합격 기준⁽³⁾을 만족하는 시험 시간의 계산은 형상 모수(β)가⁽⁴⁾ 1.1 인 와이블(Weibull) 분포, 불신뢰도(p)는 B_5 수명이면 $p = 0.05$, 보증 수명은 B_5 수명 10,000 시간, 신뢰 수준은 90 %이며, 시료수(n)는 2 개를 적용한 무고장 수명시험 시간은 식 (1) 과 같이 산출된다.

$$\begin{aligned} t_n &= B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \\ &= 10000 \cdot \left[\frac{\ln(1-0.90)}{2 \cdot \ln(1-0.05)} \right]^{\frac{1}{1.1}} \\ &= 169159.1 \text{ hours} \end{aligned} \quad (1)$$

2.4 가속수명시험

카운트웨이트의 무고장 시험을 수행하기 위해서는 많은 시간이 소요되므로 실제 사용 조건보다 가혹한 조건에서 시험하여 시험시간을 단축한다. 카운트웨이트의 가속 인자는 FMECA 결과에서 주요 고장 모드인 파손에 영향을 미치는 볼트부의 파손으로 선정하였으며, 현장조사를 통해 얻은 정상조건의 가속도는 0.5 G로 하며, 가속 조건은 1.3 G로 설정하여 가속 수명 시험을 수행할 수 있도록 하였다. 또한 가속계수를 산출하기 위해 필요한 수명모델과 가속지수(n)는^(5,6) 참고 문헌에서 인용한다. 식 (2)는 가속계수를 산출하기 위한 것이며, 식 (3)을 통해 가속 수명시험 시간이 산출되었다.

$$AF = \left(\frac{G_{\text{가속조건}}}{G_{\text{사용조건}}} \right)^n = \left(\frac{1.3G}{0.5G} \right)^{6.0} = 308.9 \quad (2)$$

$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} = \frac{169159.1}{308.9} = 547.6 \cong 600 \text{ hours} \quad (3)$$

3. 시험결과 및 검토

3.1 충격시험

카운터웨이트의 주 고장모드는 하부에 고정되는



Fig. 9 Counterweight internal photo and impact test equipment

나사부에서 발생하는 균열 및 파손 이다. Fig. 9 는 카운터웨이트를 충격시험기의 상부에 설치하여 10G의 충격을 가한 후 시험시료의 외부철판을 절단하여 콘크리트의 균열 및 이상유무를 확인하였다. 충격에 대한 수치는 10G 인 외국 선진사 현장 조건으로 시험을 수행하였으며, 시험 수행 후 시료에는 이상이 없음을 확인하였다. 비파괴시험은 수명시험 기간에 필요한 대표성시험으로 자분탐상법을 사용하여 내·외부의 결함 및 균열을 검사하였으며, 시료에는 이상이 없음을 확인하였다.

3.2 수명시험

시험대상품을 실제 장착위치와 동일하게 시험장치에 설치하고 상부와 하부에 고정 조건과 동일하게 시험 대상품을 시험 장치에 장착한 다음 가속도 센서는 x, y, z 축 방향으로 설치한다. x 축과 y 축은 z 축에 비해 상대적으로 낮은 진동가속도가 발생함을 Table 2의 고속상태에서의 불 작동시 조건을 고려하여 x 축(전후)과 y 축(좌우)은 100 시간, z 축(상하)은 400 시간 시험을 수행하는 것으로 총 600 시간 가속수명시험을 실시하였다.

수명 시험 전과 완료 후에 종합 성능 시험을 실시하고 총 수명 시험 사이클의 50% 구간에서 대표 성능 시험을 실시하였다. Fig. 10은 시험대상품이 가진기의 상부에 장착되어 수명시험을 수행하는 것을 나타내고 있으며, Fig. 11는 가속수명시험시 가해지는 시험대상품에 장착된 가속도센서로부터 얻어진 가속도 그래프를 나타내고 있다. 또한 Fig. 12는 수명시험 중 실시한 비파괴시험 장면이며, 시험대상품 하부의 볼트 고정부가 용접부로서 취약한 부분이어서 이 부분에 대해 자분탐상시험을 수행하고 있는 것을 나타내고 있다. 600 시간의 가속 수명시험 초기에 시험을 실시하여 균열여부를 확인하고, 수명시험 중에 파손 및 고장이 발생되지 않는지를 확인하기 위해, 수명시험 50%에 자분탐상법을 실시하였다. 수명시험을 완료한 후



Fig. 10 Life test equipment for the counterweight

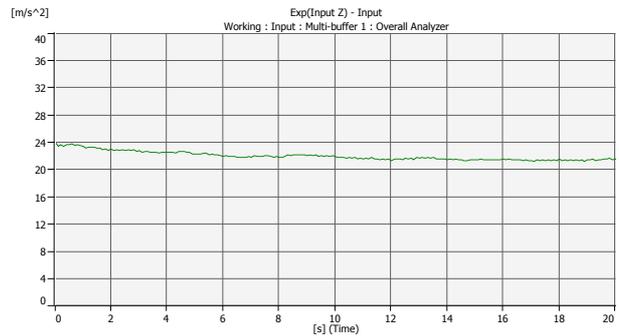


Fig. 11 Life test measurements of the vibration



Fig. 12 Non destructive examination after life test

에도 파손이나 균열여부를 확인하기 위해 균열이 발생할 경우 자분이 이상부위에 모이게 되어 고장유무를 판단할 수 있도록 한 자분탐상법을 적용하여 용접부 및 두께가 얇은 부분에 대해 이상유무를 확인하였으며, 시험결과 균열의 발생이나 변형 등이 발생되지 않았으며, 이상이 없음을 확인하였다. 비파괴 시험은 외부기관에 의뢰하여 신뢰를 확보하도록 하였다.

4. 결 론

일반적으로 카운트웨이트는 건설기계인 고소작업차, 굴삭기, 지게차 등에 부하의 균형을 유지하기 위해서 후단부에 장착될 수 있도록 제작되므로 연결부의 파손 및 결함은 전체 시스템의 동작에

많은 영향을 주는 핵심요소이다. 아래와 같이 본 연구의 내용을 요약한다.

(1) 2 톤 이상의 중량물을 수명 시험하는 것은 대형 가진기로 수행되어야 하지만, 이를 수행하기 위해서는 많은 비용과 시간이 필요하므로 현실적으로 적용이 어렵다. 또한 실차 시험을 수행하기 위해서는 보다 더 많은 비용과 시간이 소요되므로, 일반 중소기업에서도 카운트웨이트의 수명시험을 수행할 수 있도록 가진시험 장비를 개발하였다.

(2) 건설기계용 카운터웨이트에 대한 고장모드 및 메커니즘 분석을 실시하였고, 이를 토대로 필요 시험항목을 도출하고, 무고장 수명시험 시간을 계산하였으며, 건설기계용 고소작업차와 굴삭기의 현장 작동조건을 확인하였다. 또한 고소작업차와 굴삭기의 사용조건에 따른 가속도 값을 취득하여 진동을 가속인자로 하는 가속시험법을 개발하였다.

(3) 카운트웨이트의 종합성능, 환경 및 수명시험 결과 시험대상품은 600 시간의 수명시험 동안 고장이 발생하지 않았다. 자분탐상시험을 통해 하부 나사부의 균열 및 파손이 없는 것이 확인되어 B₅ 수명 10,000 시간을 보장하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 “신뢰성향상 기반구축사업 및 신뢰

성향상사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

(References)

- (1) Bošnjak, S. M., Petković, Z. D., Atanasovska, I. D., Milojević, G. Z. and Mihajlović, V. M., 2013, "Bucket Chain Excavator: Failure Analysis and Redesign of the Counterweight Boom Supporting Truss Columns," *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 32, pp. 322~333.
- (2) Rusiński, E., Czmochocki, J., Iluk, A. and Kowalczyk, M., 2010, "An Analysis of the Causes of a BWE Counterweight Boom Support Fracture," *Eng. Fail. Anal.* Vol. 17, 179~191.
- (3) ISO No. 19973-1, Pneumatic Fluid Power - Assessment of Component Reliability by Test - Part 1: General Procedures, 2007.
- (4) Heinz, P. and Bloch, F. K. G., 1997, *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. (Gulf Publishing Company), pp. 490~493
- (5) MIL-STD-810G Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests
- (6) Stephens, R. L., Fatemi, A., Stephens, R. R. and Fuchs, H. O., 2001, "Metal Fatigue in Engineering," 2 Edition, John Wiley & Sons.