

## 유압 브레이커(Hydraulic breaker)의 고장분석을 통한 수명분석 연구

하호진, 김광섭

아주대학교

## A Study About Reliability Analysis of Hydraulic Breakers through Failure Mode Effect Analysis

Ho-jin Ha, Gwang-sub Kim

Ajou University

### Abstract

Hydraulic breakers, the attachment devices of the excavators, refer to a machine that converts back and forth motions of pistons into energies to break objects down finely. As the use of hydraulic breakers has been steadily increasing world-wide, consumers have become more interested in not just the quality of hydraulic breakers but their reliability. This study show functions and usages of several main parts on hydraulic breakers. In addition, based on the effect of action of hydraulic breakers, FMEA was performed to figure out the major causes and manifestations of malfunctioning. As abovementioned, we analyzed reliability of hydraulic breakers by models, and the data that had been used for the analyses were obtained from malfunctioning data in the field.

Keyword : Hydraulic breaker, Life analysis

## 1. 서론

굴삭기의 Attachment 장비인 유압 Breaker란, 유압 Pump에서 공급되는 동력원을 Piston의 왕복 운동 Energy로 변환하여, 암반이나 콘크리트를 파쇄하거나, 건축물의 해체 작업, 기초 공사장에서의 파일 박기, 토목 공사에서의 기초 다기지등 타격에 의해 각종 파쇄 대상을 잘게 깨는 타격 파쇄 장비이다. <그림 1>에서처럼 유압 Breaker는 주로 굴삭기나 스키드 로더, 백호 로더 등의 각종 장비에 Attachment로 장착하여 건설, 건축, 토목 공사 현장이나 석산, 터널 공사장 등에서 사용되고 있으며, 고정식 동력 전달 장치를 이용하여 탄광이나 제철소등지에서 널리 사용되는 다용도의 건설 중장비이다.



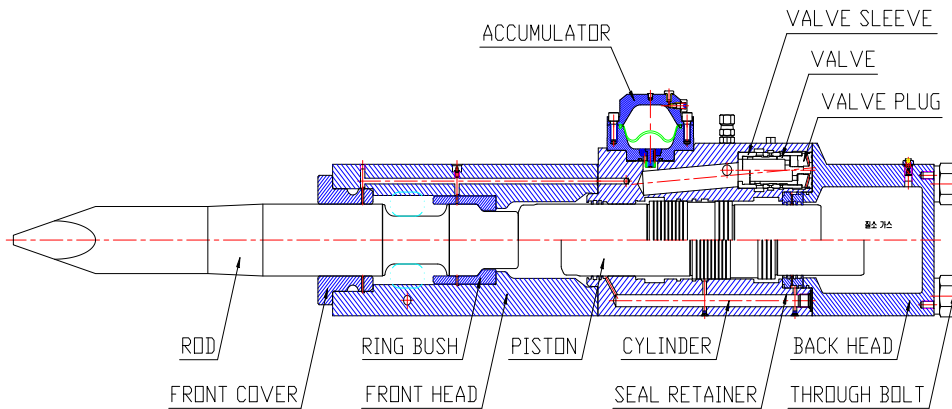
<그림 1> 굴삭기에 장착된 유압 Breaker

유압 Breaker 제조회사 간의 경쟁을 위해 고성능, 고품질 및 신속한 A/S 등 여러 가지 방향으로 소비자의 만족을 위해 기술 발전 및 영업대응을 행하고 있다. 소비자의 만족을 충족시키는 기술 발전으로 새롭게 관심을 갖는 분야가 바로 제품의 수명(Life Time)이다. 산업기술의 발전은 제품의 고급화, 다기능화를 가져와 우리의 환경을 풍요롭게 만들었지만, 제품의 구조는 점점 더 복잡해져가고 있다. 이에 따라 내부 부품을 포함한 제품 전체의 품질보증(Quality Assurance)과 제품이 일정 기간 동안 제 기능을 원활히 작동하기 위한 신뢰성과 관련된 문제들이 큰 비중을 차지해 가고 있다. 소비자가 제품을 구입할 때에 고장이 나지 않고 오래 사용할 수 있을 것에 대한 요구는 고가의 내구성 제품일수록 더 많이 뒷받침 되어야 하는 특성이다. 또한 제조물 책임(PL : Product Liability)에 관한 중요성이 날로 커져가는 이 시기에, 하자를 조기에 발견할 수 있는 신뢰성 기술이야말로 절실히 필요한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 고객의 Needs에 한발자국 앞서 나가기 위해 유압 Breaker의 사용 수명을 예측하는데 그 목적이 있다. 수명예측을 하기에 앞서 유압 Breaker의 주요 부품 및 기능을 확인하고 각각의 부품들이 어떻게 작동이 되는지에 대한 원리를 알아보았다. 그리고 유압 Breaker를 구성하고 있는 부품에 대한 FMEA를 실시하여 주요 하자를 도출하고, 도출된 하자의 주요 원인을 살펴보았다. 이렇게 분석된 사항으로 유압 Breaker의 사용수명을 예측하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 유압 Breaker의 주요 부품 및 기능



<그림 2> 유압 Breaker의 내부 부품

유압 Breaker는 여러 가지 부품으로 구성되어 있고, 그 모습은 <그림 2>와 같다. 크게 Back Head와 Cylinder, 그리고 Front Head가 본체를 구성하고 그 속에 Valve 및 Piston이 움직여 Rod를 타격하게 구성되어 있다. 유압 Breaker의 각 부품에 대해 기능과 용도는 어떠한지를 <표 1>에 정리하여 보았다.

<표 1> 유압 Breaker의 구성 부품의 기능 및 용도

No.	부품명	기능 및 용도
1	Piston	유압과 Gas압에 의해 상·하 왕복운동을 진행하면서 Rod를 타격하는 기능을 함. 유압에 의한 Energy를 타격 Energy로 전환하는 기능을 함.
2	Cylinder	Breaker의 핵심 부품으로 Piston을 왕복시키고, 유압 회로를 지니고 있음.
3	Back Head	N2 Gas를 저장하고 Piston 하강시, Gas 팽창에 의한 Power 전달 및 Seal Retainer를 고정시키는 역할을 함.
4	Front Head	Breaker를 지탱하며 Front Cover 및 Ring Bush가 조립되어 Rod를 잡아주고, Piston이 타격할 수 있는 공간을 만들어 준다.
5	Valve	유압에 의해 왕복운동을 하면서 Piston의 왕복운동을 제어하는, 인체의 심장과 같은 중요한 기능을 함.

이렇게 유압 Breaker를 구성하고 있는 부품들은 각각의 기능을 수반하여 정상적으로 타격이 되도록 성능을 발휘하게 된다. 그러면 상기 부품들이 조립되어 어떻게 작동이 되는지에 대한 유압 Breaker의 작동원리를 알아보겠다.

## 2.2 유압 Breaker의 작동 원리

유압 Breaker의 작동원리는 다음과 같다. 우선 Piston의 위쪽 압력을 상단부 수압면과 Piston 아래쪽 압력을 받는 하단부 수압면과는 “상단부 수압면 > 하단부 수압면”이라는 관계가 성립되고, 하단부 수압면에는 상시 고압이 작용하며 상단부 수압면이 고압과 저압으로 변함에 따라 Piston이 왕복운동을 하게 된다. 또한 Piston 상부에는 고압 Gas가 채워져 있어, Piston의 상승 행정에 의해 축적된 Gas Energy가 타격 행정에 있어서 효과 있게 작용한다.

### 2.3.1 상승

Piston이 상사점이 닿으면 Valve 고압포트로부터 고압유가 Piston 상단부 수압면에 작용하여 Piston이 상승행정에서 타격행정으로 반전된다. 이때 Valve에는 자압실 수압면과 Valve 전환실 수압면에 고압유가 작용하여 “전환실 수압면 > 자압실 수압면”의 관계에 의해 Valve 위쪽에서 그 상태를 유지한다.

### 2.3.2 전환

Cylinder 저압포트가 Cylinder 전환포트와 함께 통하면 Valve 전환포트가 저압으로 바뀌고 Valve에 작용하는 힘은 자압실 수압면에만 미치게 되고, Valve는 하강을 시작하게 된다. 이 Valve의 하강행정에 있어서 Valve 고압포트가 잠기고 역으로 Valve 저압포트가 Piston 위쪽과 함께 통하여 저압으로 전환된다.

### 2.3.3 타격

Piston이 타격점에 이르면 타격행정 중에 얻은 운동 Energy를 Rod에 전달하고, 파쇄에 필요한 타격 Energy를 전환한다. 이때 Piston에는 고압이 작용하기 때문에 Valve는 아래쪽에서 그 상태를 유지하게 된다.

### 2.3.4 상승

Cylinder 전환포트가 Cylinder 저압포트에 통하여 고압유가 저압 Out포트에 연결되면 Valve는 하강을 개시한다. 이때 Valve 저압포트가 닫히고 역으로 Valve 고압포트가 Piston 뒤쪽과 통하게 되어 Piston 위쪽에 고압으로 전환되는 행정을 반복한다.

지금까지 유압 Breaker를 구성하는 내부 부품에 대한 명칭과 각각의 기능을 알아보고, 유압 Breaker를 작동하게 하는 원리에 대해 알아보았다. 그러면 유압 Breaker의 고장은 어떤 것이 있으며 그 고장으로 발생하는 영향과 고장원인에 대해서 알아보도록 하겠다.

### 3. 유압 Breaker의 고장 Mode 및 영향 분석

#### 3.1 유압 Breaker의 주요 부품 FMEA

유압 Breaker의 수명분석을 위해 고장에 대한 정의를 내리고자 주요 부품에 대한 고장 모드 및 고장 영향 분석인 FMEA(FMEA : Failure Mode Effect Analysis)를 실시하였고, 이는 <표 2>에 나타내었다. 상기 표에 나와 있는 내용은 유압 Breaker를 구성하고 있는 부품에 대한 사항중에 가장 RPN(Risk Priority Number : 위험 우선 순위도) 지수가 높게 나온 부품 4가지를 표현한 것이다. FMEA상에 나와 있는 중요도는 해당 부품의 성능 관점으로, 발생율은 하자추이 관점으로, 그리고 발견율은 하자접수에 대한 많은 빈도를 차지하는 항목을 기준으로 파악하였다.

유압 Breaker의 부품별 FMEA를 실시한 결과, Piston / Cylinder와 Seal Kit, 그리고 Valve에 대한 이물질에 의한 굽힘 및 파손 하자의 RPN지수가 가장 높게 나왔다. 실제적으로 유압 Breaker의 실패비용인 F-Cost(Failure Cost)에서 Piston과 Cylinder의 굽힘 하자로 인한 실패비용이 약 60%를 차지한다고 한다. 이는 타 부품에 비해 Piston과 Cylinder의 제조원가가 높고, 하자가 바로 유압 Breaker 자체의 성능에 영향을 미치기 때문에 공임비 또한 상당부분을 차지하는 유압 Breaker의 핵심 하자임을 알 수 있다. 굽힘 하자는 이물질에 의해 발생하는 것이 대부분이기에 Valve와 Seal Kit 하자에도 영향을 준다. 실패비용이 높고 RPN 지수가 높게 나온 Piston과 Cylinder 굽힘 하자에 대한 세부적 발생원인, 고장형태 그리고 발생 시기를 알아보도록 하겠다.

#### 3.2 Piston / Cylinder 굽힘의 원인과 현상

유압 Breaker의 중요 부품인 Piston과 Cylinder의 굽힘 하자에 대한 발생원인 및 굽힘 형태에 대하여 크게 두 가지로 구분될 수 있는데 첫 번째는 내부적 요인인 유압 Breaker 자체의 이물질에 의한 하자가 있고, 두 번째는 외부적인 요인 즉, 굴삭기나 사용 환경 및 사용자의 방법 등을 들 수 있다. 각각의 요인에 대한 현상을 알아보겠다.

<표 2> 유압 Breaker의 부품별 FMEA

부품	고장 Mode	가능한 고장영향	중요도	고장 원인 / 고장 Mechanism	발생율	발견율	RPN	
Cylinder / Piston	긱힘	작동불가, 성능저하	10	유압 Breaker Body 내부 이물질 미제거	8	8	640	
				외부 이물질 유입	5	9	450	
				소재/열처리 이상	2	5	100	
				Seal 파손/이상	4	5	200	
				내부관로 용접불량	1	4	40	
	크랙	성능저하, 장비손상	10	유압 Breaker Body 내부 이물질 미제거	8	8	640	
				외부 이물질 유입	5	9	450	
				소재/열처리 이상	2	5	100	
				Seal 파손/이상	4	5	200	
				내부관로 용접불량	1	4	40	
	누유	성능저하	2	Seal 파손 / 이상	4	5	40	
				내부관로 용접불량	1	4	8	
		유압손실	7	7	과도한 압력과 과열	2	3	42
					잘못된 배열, 표면 결함, 윤활작용 미흡	2	3	42
열적 Aging 및 Cracking					2	2	20	
오염에 의한 화학적 성능저하					1	2	6	
3	3	윤활유 불일치에 의한 성능저하	1	2	6			
Seal Kit	뜯김	누유, 성능저하	7	유압 Breaker Body 내부 이물질 미제거	8	8	640	
				외부 이물질 유입	5	9	450	
				소재 이상	2	5	100	
				내부관로 용접불량	1	4	40	
	뒤집힘	누유, 성능저하	7	Seal 조립부 압력 과다	3	8	168	
<td>CYL 가공 불량</td> <td>2</td> <td>6</td> <td>84</td>	CYL 가공 불량	2	6	84				
Valve	긱힘	작동불가, 성능저하	10	유압 Breaker Body 내부 이물질 미제거	8	8	640	
				외부 이물질 유입	5	9	450	
				소재/열처리 이상	2	5	100	
	크랙	작동불가, 성능저하	10	유압 Breaker Body 내부 이물질 미제거	8	8	640	
				외부 이물질 유입	5	9	450	
				소재/열처리 이상	2	5	100	

### 3.2.1 내부적 요인

내부적 요인에는 유압 Breaker를 구성하고 있는 각각의 부품들의 품질에 관련된 부분과, 이동 및 굴삭기에 장착시로 구분하여 볼 수 있다. 또한 부품들의 품질에 관련된 부분의

대체적인 원인은 내부 부품이 설계된 대로 제작되지 않아 발생하는 부분과 세척 미비로 인한 가공 Chip 미제거로 나눌 수 있다. 굽힘을 초래하는 내부적 요인에 대하여 자세히 알아보겠다.

부품들의 품질에 관련된 부분으로 우선 가공상의 공차를 말할 수 있다. 윤활면의 틈새가 작은 경우, 사용 중 유온의 상승으로 인한 체적 변화에 의해 굽힘 발생될 수 있다. 반대로 윤활면의 틈새가 큰 경우에는 작동 중 충격력에 의해 윤활막의 파손에 기인하여 굽힘이 발생될 수 있다. 윤활면의 틈새가 작을 때에는 원주면과 길이 방향으로 굽힘이 발생되고, 윤활면의 틈새가 클 때에는 국부적인 굽힘이 발생되다가 충격력에 의해 접촉부위에서 찍힘 현상이 발생될 수 있다.

가공상의 정밀도 또한 굽힘 원인에 큰 요인이 된다. 진원도(Roundness), 동심도(Concentricity), 원통도(Cylindricity) 등의 형상공차의 부적합이나 조립 부품(Seal, Seal Retainer 등)의 편심(eccentricity)에 의해 굽힘이 발생될 수 있고, Piston과 Cylinder의 습동면의 조도(Illuminance)가 거친 경우에도 발생될 수 있다. 형상 공차의 부적합으로 발생된 굽힘은 정밀도에 따라 굽힘이 발생됨으로 일정 경향이 없고, 조도에 의한 굽힘은 원주면 전체적으로 미세 굽힘으로 시작하여, 습동면에 길게 확산되는 굽힘 현상이 발생된다. 조도에 의한 굽힘은 Seal의 조기 마모 및 편마모(Uneven Wear)로 이어져 누유 발생도 야기시킨다.

내부 부품의 소재품질과 열처리 상태도 중요한 요인이 된다. 열처리 이후에 시효 변화에 따른 변형에 의해 굽힘 발생될 수 있는데, 이때에는 굽힘 부위가 Piston의 상부, 대경부, 하부로 대칭적으로 발생한다. 그리고 부품의 경도 부족 및 내구성 부족으로 인한 압력차에 의해 발생하는 공동현상(Cavitation)도 굽힘의 원인이 된다. Cavitation에 의한 굽힘 형태는 바늘로 조아낸 듯한 기공이 발생 하거나, 유체 흐름 방향으로 윤활 마모가 진행되는 현상을 볼 수 있다.

그리고 가공 중에 발생한 Burr 미제거와 미세한 흠집에 대한 사상처리 미흡에 의해 굽힘이 발생될 수 있고, 가공 잔여물인 Chip이나, 열처리 Scale등이 조립 전에 완벽하게 제거 되지 않아 작동 시에 굽힘을 유발할 수 있다. 이물질에 의한 굽힘은 길이 방향의 굽힘 보다는 아주 산발적이고 방향성이 없으며 국부적인 형상을 띄고 있다.

그 밖에도 제작중, 보관중, 이동중, 조립중에 취급부주의에 의한 부식과 흠집 발생으로 인한 굽힘 발생과 배관장착 중 발생한 용접 Slug나 밀봉 Tape, Fitting류, 나사산의 박피물, Hose, Pipe내 이물질 유입 등에 의한 굽힘이 발생될 수 있다.

이렇게 Piston과 Cylinder의 굽힘을 초래하는 여러 가지 내부적 요인들을 살펴보았다. 이 부분들은 유압 Breaker의 품질을 평가하게 하는 중요한 인자들이다. 상기와 같은 인자들로

인한 굽힘이 발생되지 않도록 관리하는 것이 유압 Breaker 제조사가 평생 풀어야 할 숙제로 남을 것으로 판단된다. 다음은 제품 자체의 요인이 아닌 환경적, 사용적 측면인 외부적 요인이 대해서 알아보겠다.

### 3.2.2 외부적 요인

외부적 요인으로는 예기치 못한 요인으로 제품 내에 이물질의 유입, 유압 Breaker의 편타 작업, 인위적인 유압 Breaker의 타격력 조정, 작업전 예열작업 미비, 고온 및 저온의 주위 환경 이렇게 5가지로 나누어 볼 수 있다. 상기 요인에 대하여 설명해 보겠다.

첫째는 이물질 유입에 관한 요인이다. 굴삭기 배관 계통의 먼지나 작동 중에 발생하는 먼지 및 기타 이물질이 유압 System 내부로 유입 되어 발생하는 굽힘을 말하고, 증상은 아주 산발적이고 방향성이 없으며, 국부적인 형상으로 굽힘이 발생한다. 그리고 이 굽힘은 초기 발견 시에만 원인 규명이 가능하다는 어려운 점이 있다.

둘째는 유압 Breaker의 편타 작업으로 수직 자세에서의 작업이 아닌 비스듬한 상태로 작업하는 것을 말한다. 이 조건에서는 Front Cover나 Ring Bush등의 마모가 규정 이상인 경우 Rod와 Piston의 면 접촉에 의한 타격이 이루어 지지 않아, 편타에 의한 굽힘 발생을 초래한다. 굽힘 형태는 주로 Cylinder의 정면과 후면에 굽힘이 발생된다.

셋째는 유압 Breaker의 타격력 조정으로 몇몇의 작업자는 유압 Breaker의 Gas 압력을 인위적으로 높이거나, 설정 유압을 상향 조정하여 높은 타격력으로 작업할 때가 있다. 제품에 무리가 가도록 설정을 하여 작업을 하면 Piston의 하강 속도가 빨라지고, 높은 충격력에 의해 순간적으로 윤활막이 파손 되어 굽힘이 유발될 가능성이 높다. 이렇게 작업을 하여 굽힘이 발생되면 원주면과 길이방향에 전체적으로 발생된다.

넷째로는 예열작업에 대한 미흡을 들 수 있다. 날씨가 추운 겨울철이나 평균온도가 낮은 지역에서 유압 Breaker를 사용할 시에 충분한 예열작업 없이 작동하면 순간적인 동작에 의해 Seal의 뒤집힘이나 파손이 발생되고, 이로 인하여 Piston이 동심을 유지하지 못하여 굽힘을 유발한다. Piston의 심한 편심에 의해 굽힘이 발생되어 Piston의 상·하부에 굽힘이 발생된다.

다섯째로는 주위환경에 대한 부분으로 대기 온도가 높거나, 밀폐된 장소에서의 작업할 때를 말한다. 더운 날씨에서의 지속적인 장비 가동과, 파쇄가 어려운 파쇄물을 무리하게 연속해서 타격 하는 경우, 엔진 RPM을 상당히 높게 작업 하여 굴삭기의 냉각 System의 고장을 유발하게 된다. 그리고 온도 상승으로 인해 작동유의 점도가 떨어지고, 윤활 특성이 저하



되어 굽힘이 발생될 수 있다. 무리한 온도 상승으로 인해, 유압 부품의 팽창에 의한 윤활 틈새가 축소되고, 특히 Piston과 Rod의 충격 부위는 상당한 고열이 발생하여 Piston의 체적 변화가 발생되어 굽힘이나 협착(Areole)이 발생될 수 있다. 이때의 굽힘 형태를 보면 원주면과 길이방향 전체적으로 굽힘이 발생되고, 각종 유압 부품의 굽힘과 중요 부품(Rod, Piston, Front Cover Ring Bush, seal등)의 조기 마모 및 파손으로도 연계될 수 있다.

지금까지 유압 Breaker의 부품에 대한 FMEA를 실시하여 Piston 및 Cylinder의 굽힘 하자가 중요 하자라는 것을 알았고, 그 하자에 대해 세부적인 원인과 현상에 대해서 내부적 요인과 외부적 요인으로 알아보았다. 유압 Breaker의 여러 가지 고장을 바탕으로 수명분석을 하기에는 여러 가지 변수가 작용하고 각각의 부품들이 상호 연관성이 많아서, 본 연구에서는 상기에 분석된 결과를 바탕으로 유압 Breaker의 고장을 내부 굽힘 하자로 정하여, Piston 및 Cylinder의 굽힘과 Seal의 굽힘 및 파손, Valve 굽힘으로 고장을 한정하여 수명분석을 실시하였다. 이 고장에는 외부적 요인으로 인한 하자는 배제하고 내부적 요인으로 발생한 하자만을 고장으로 정하였다.

## 4. 유압 Breaker의 수명분석

### 4.1 수명분석시 가정 설정

본 연구에서 수명분석으로 사용될 Data는 유압 Breaker의 현장 고장 Data(Field Failure Data)이다. 현장 고장 Data를 수집하기에는 많은 시간과 비용이 필요하고, Data 수집 자체에도 어려운 점이 많은 것이 현실이다. 따라서 대부분의 수명분석시에는 수명시험(Life Test)을 통해 해당 제품의 수명을 파악하고 있다. 하지만 일반 실험실에서 이루어지는 시험은 실제 사용되는 주위 환경적 요소들을 많이 배제하고 있다. 따라서 현장 고장 Data야말로 제품의 실사용에 대한 측정 결과물이고, 환경적 요인을 배제하지 않기에 해당 제품의 수명분석을 하기에는 매우 적합한 자료이다. 현장 고장 Data에도 제약적 부분이 있어서 분석에 앞서 다음 사항에 대해 가정을 하고 분석을 실시하겠다.

**가정 1)** 본 연구에서 유압 Breaker의 고장은 Piston, Cylinder, Seal, Valve의 굽힘 및 파손하자만으로 가정한다.

**가정 2)** 수명분석을 위해 설정된 기간에 발생한 하자는 관측기간 동안 첫 번째 발생한 하자이고 수리할 수 없는 것으로 가정한다.

**가정 3)** 굽힘 하자에는 여러 가지 원인이 있고 서로 관련성 있게 발생할 수 있으나, 각각의

고장은 독립적으로 발생되었다고 가정한다.

**가정 4)** 수집된 현장 고장 Data에는 정상적으로 발생된 하자만이 포함되어 있고, 미접수된 하자는 없다고 가정한다.

기존 연구 자료에서 현장 고장 Data에는 실제로 발생한 고장의 Data와 고장은 발생하였으나 접수가 되지 않은 Data, 그리고 접수는 되었으나 실제로 고장은 발생되지 않은 Data로 나눌 수 있다고 한다. 김영복, 이창훈(2007) 또한 제품의 보증기간(Warranty Period) 내에 현장 고장 Data 수집은 활발하나, 보증기간 이후에 발생하는 고장에 대한 Data는 불충분하여 비모수적인 방법으로 제품의 신뢰도를 추정하는 방법도 소개 되었다 Lim(2002). 본 연구에서는 ‘가정 4’에서처럼 수집된 Data에는 미접수된 고장은 없고, 발생되지 않은 하자에 대한 Data도 없으며, 보증기간 이후의 Data가 미포함 되지 않았다고 가정하여 분석을 실시하였다.

## 4.2 데이터 수집

유압 Breaker의 수명분석을 하기 위해 첫 번째로 Data를 수집하였다. Data는 2007년 이후에 생산되어 판매된 각각의 제품에 대한 판매일과 하자일로 수집하였고, 이 Data는 임의 관측중단 자료(Arbitrary Censored Data)로 판매일을 시작, 하자일을 끝으로 설정하였다. Data의 시간단위는 일(Date)로 표시하였고, 수명분석을 위해 2007년 3월 1일을 시간 1로 변환하여 기준점 설정을 하였다. 기준점 설정에 대한 Data 모습은 아래 <표 3>에 나타내었다.

<표 3> 판매일 및 하자일 Data 변환

판매일	하자일	수량		판매일	하자일	수량
2007-03-08	2008-02-19	1		7	355	1
2007-03-10	*	3		9	*	3
2007-03-11	2007-04-13	1		10	43	1
2007-03-11	*	7		10	*	7
2007-03-12	*	7	⇒	11	*	7
2007-03-13	*	8		12	*	8
2007-03-14	*	3		13	*	3
2007-03-15	2007-06-18	1		14	109	1
2007-03-15	*	1		14	*	1
2007-03-17	2007-08-13	1		16	165	1
• • •	• • •	• • •		• • •	• • •	• • •

여기서 판매일은 제품이 출하된 후, 고객에게 인도되어 제품을 사용하는 시점을 말하고, 하자일은 그 제품이 상기에 고장으로 정해 놓은 Piston 및 Cylinder의 긁힘과 Seal의 긁힘 및 파손, 그리고 Valve 긁힘이 발생한 일자를 의미한다.

### 4.3 분포의 적합도 검정

추출된 Data로 신뢰성 자료의 통계적 분석을 위한 첫 단계인 분포의 적합도 검정 (Goodness of Fit Test)을 실시하였다. 본 검정에서는 경험적 누적분포함수(Empirical CDF)를 이용한 Anderson-Darling 검정값을 사용하고, 이때 추정방법은 최소제곱 추정방법 (LSE : Least Squares Estimation)과 최대우도 추정방법(MLE : Maximum Likelihood Estimation)을 둘 다 사용해 보았다. 최소제곱 추정방법은 회귀선을 확률도에 있는 점에 적합시켜 계산하고, 선은 수명 또는 Log(수명)과 변환된 백분율에 대한 회귀를 통해 구하는 방법이다. 그리고 최대우도 추정방법은 우도 함수를 최대화하여 계산하고, 우도 함수는 각 분포 모수의 세트에 대하여 고려하고 있는 분포가 표본을 근거로 할 때 이러한 모수 값을 갖게 되는 가능성을 나타낸다. 매우 많이 관측 중단된 표본의 경우에는 최소제곱 추정방법이 최대우도 추정방법보다 더 정확하고, 분포 모수 추정치는 최대우도 추정방법이 최소제곱 추정방법보다 정확하다. 본 적합도 검정은 두가지 방법을 모두 사용하여 결과를 비교해서 최적의 분포를 선정하였다. 분포 적합도 검정 결과는 다음과 같다.

#### 4.3.1 최소제곱 추정방법(LSE)으로 적합도 검정 결과

<표 4> LSE 분포 적합도 검정 결과

분포	Anderson-Darling	상관 계수
Weibull 분포	3301.908	0.989
로그 정규 분포	3301.908	0.981
지수 분포	3301.917	*
로그 로지스틱 분포	3301.908	0.989
<b>3-모수 Weibull 분포</b>	<b>3301.908</b>	<b>0.994</b>
<b>3-모수 로그 정규 분포</b>	<b>3301.908</b>	<b>0.994</b>
2-모수 지수 분포	3301.916	*
<b>3-모수 로지스틱 분포</b>	<b>3301.908</b>	<b>0.994</b>
최소극단값 분포	3301.917	0.957
정규 분포	3301.911	0.972
로지스틱 분포	3301.917	0.958

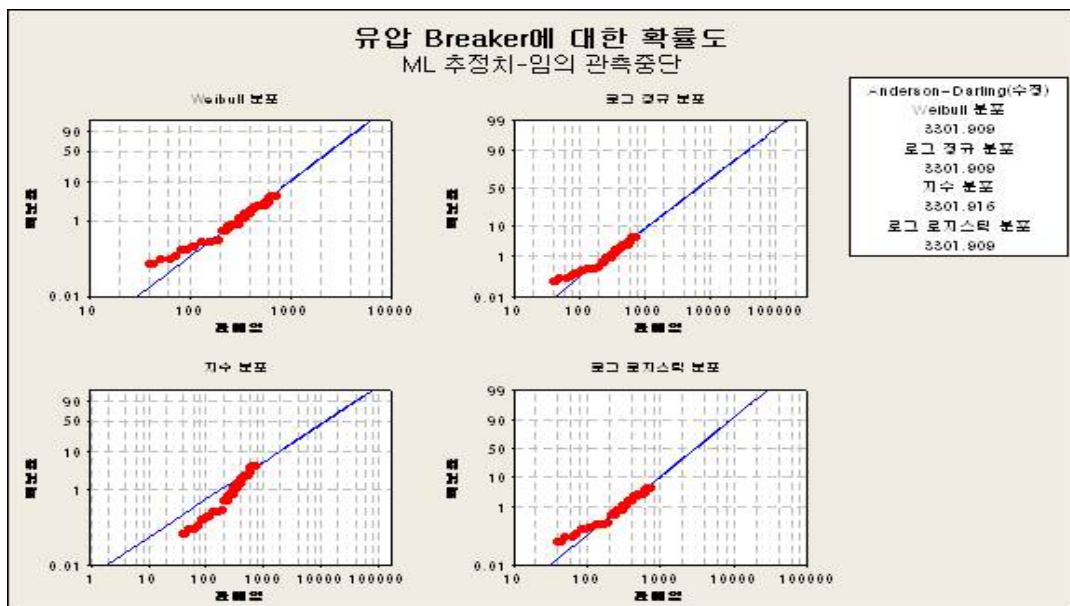
<표 5> MLE 분포 적합도 검정 결과

분포	Anderson-Darling
Weibull 분포	3301.909
로그 정규 분포	3301.909
지수 분포	3301.916
로그 로지스틱 분포	3301.909
3-모수 Weibull 분포	3301.909
3-모수 로그 정규 분포	3301.909
2-모수 지수 분포	3301.916
3-모수 로지스틱 분포	3301.909
최소극단값 분포	3301.913
정규 분포	3301.912
로지스틱 분포	3301.913

적합도 검정은 Minitab을 사용하여 실시하였고, 결과가 <표 4>와 같이 분석되었다. Anderson-Darling 값이 가장 낮고, 상관계수가 가장 높은 분포는 3모수 Weibull 분포, 3모수 로그정규분포, 3모수 로지스틱분포로 3가지 분포 모형으로 검정되었다.

#### 4.3.2 최대우도 추정방법(MLE)으로 적합도 검정

적합도 검정 결과가 <표 5>과 같이 분석되었고, Anderson-Darling 값이 가장 낮은 분포는 Weibull 분포, 로그 정규분포, 로그 로지스틱 분포, 3모수 Weibull 분포, 3모수 로그정규분포, 3모수 로지스틱분포로 6가지 분포 모형으로 검정되었다.

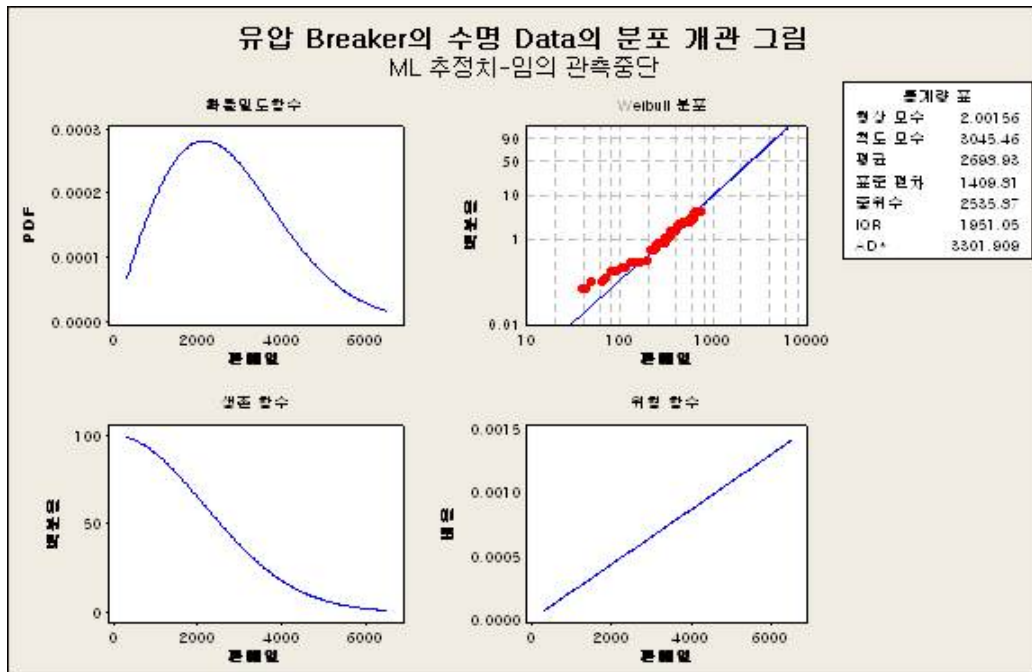


<그림 3> MLE 분포 적합도 검정 확률도

두가지 분포 적합도 검정 결과, 두 번 모두 검정된 분포는 3모수 Weibull 분포, 3모수 로그정규분포, 3모수 로지스틱분포이다. 그러나 3모수 분포모형은 신뢰성 수명분석시 활용도가 낮아, 본 연구에서는 최대우도 추정방법에서 Anderson-Darling 값이 가장 낮게 나온 분포 모형 중, 신뢰성 분석에서 널리 사용되는 Weibull 분포로 수명분석을 실시하겠다. <그림 3>은 최대우도 추정방법으로 분포 적합도 검정된 확률도를 나타낸다.

#### 4.4 유압 Breaker의 확률밀도함수, 생존함수, 위험함수 산출

적합된 Weibull 분포로 유압 Breaker의 확률밀도함수(PDF : Probability Density Function), 생존함수(SF : Survival Function ; 신뢰도), 위험함수(HF : Harzard Function ; 고장율 함수)를 산출하여 보았고, 그 결과는 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 유압 Breaker 수명 Data의 분포 개관 그림

수명 Data의 분포 개관 그림을 보면 첫 번째로 통계량을 확인할 수 있다. 형상모수(m)가 2.00156으로 나왔고, 척도모수( $\eta$ )는 3045.46으로 산출되었다. 형상모수가 1보다 크게 나왔으므로 시간의 증가에 따라 고장이 증가하는 마모고장(IFR : Increasing Failure Rate)의 모습을 띄고 있다. 생존함수와 위험함수 또한 마모고장의 모습을 띄고 있다. 그리고 Weibull 분포의 척도모수는 특성수명이라고 하는데, 이는

$$R(t) = \exp[-(\frac{t}{\eta})^m] \text{에서 } t=\eta \text{를 대입하면, } F(\eta) = 1 - \exp(-1) = 0.632 \text{ 이 된다.}$$

즉, Weibull 분포를 따르는 제품들의 약 63.2%가 고장나는 시간을 의미한다.

### 4.5 유압 Breaker의 수명분석

유압 Breaker의 현장 고장 Data를 임의 관측중단 자료로 설정하고, 적합한 분포를 Weibull 분포로 하여 수명분석을 실시한 결과가 다음과 같다.

<표 6> 유압 Breaker의 모수 추정치 (95.0% 정규 CI)

모수	추정치	표준 오차	하한	상한
형상	2.00156	0.125049	1.77088	2.26228
척도	3045.46	346.731	2436.36	3806.83

<표 7> 유압 Breaker 분포의 특성 (95.0% 정규 CI)

구분	추정치	표준 오차	하한	상한
평균(MTTF)	2698.93	310.19	2154.59	3380.80
표준 편차	1409.81	238.93	1011.35	1965.25
중위수	2535.87	261.16	2072.37	3103.05
제1 사분위수(Q1)	1634.25	126.80	1403.71	1902.66
제3 사분위수(Q3)	3585.30	443.23	2813.82	4568.30
사분위간 범위(IQR)	1951.05	319.11	1415.95	2688.35

<표 8> 유압 Breaker 백분위수 표 (95.0% 정규 CI)

백분율	백분위수	표준 오차	하한	상한
0.1	96.6	10.8	77.5	120.3
1	305.9	14.9	278.1	336.4
2	433.5	15.7	403.8	465.5
3	532.2	18.0	498.1	568.7
4	616.1	21.6	575.3	659.8
5	690.5	25.8	641.7	743.1
6	758.4	30.5	700.8	820.7
7	821.3	35.5	754.6	893.8
8	880.3	40.5	804.4	963.3
9	936.1	45.6	850.9	1029.9
10	989.4	50.7	894.9	1093.9
...	...	...	...	...

상기 분석결과를 종합해 보면, 유압 Breaker의 수명은 형상모수가 2가 넘는 증가 고장형태를 띄고 있고, 평균고장시간 MTTF(MTTF :Mean Time To Failure) 은 약 2,699일이다. 그리고 B1 수명은 306일(약 10개월), B10 수명은 989일(약 2년 9개월) 이다. 유압 Breaker의 Piston, Cylinder, Valve 하자에 대한 보증기간이 1년이라는 점을 미루어 볼 때 100대의 유압 Breaker가 판매되면 한 개정도는 무상 수리를 한다는 결론을 지을 수 있다.

유압 Breaker는 장착되는 굴삭기의 크기 및 성능에 따라 여러 가지 Model로 나뉜다. 흔히 크기에 따라서 소형, 중형, 대형으로 구분되어 지는데, 유압 Breaker의 각 Model 간의 수명은 어떠한지 알아보겠다.

#### 4.6 유압 Breaker의 Model별 수명분석

수명분석에 앞서서 유압 Breaker를 세가지 Model로 구분하여, 분포의 적합도 검정을 실시하였다. 이때에 검정방법은 최대우도 추정방법(MLE)으로 실시하였고, 세가지 Model 모두 Weibull 분포가 가장 적합하게 검정되었다. 따라서 Weibull 분포 모형으로 각각의 Model 간의 수명을 알아보았다.

<표 9> 유압 Breaker Model별 분포의 특성 (95.0% 정규 CI)

구분	소형		중형		대형	
	추정치	표준오차	추정치	표준오차	추정치	표준오차
평균(MTTF)	5725.45	1999.94	1434.29	190.58	1461.47	152.91
표준 편차	3660.70	1690.57	366.61	96.40	790.64	137.25
중위수	5080.03	1576.61	1448.24	187.42	1362.01	121.16
제1 사분위수(Q1)	2933.51	717.83	1187.64	121.15	862.59	51.88
제3 사분위수(Q3)	7831.39	2843.00	1693.36	256.44	1952.29	224.67
사분위간 범위(IQR)	4897.88	2132.16	505.72	137.12	1089.70	179.45

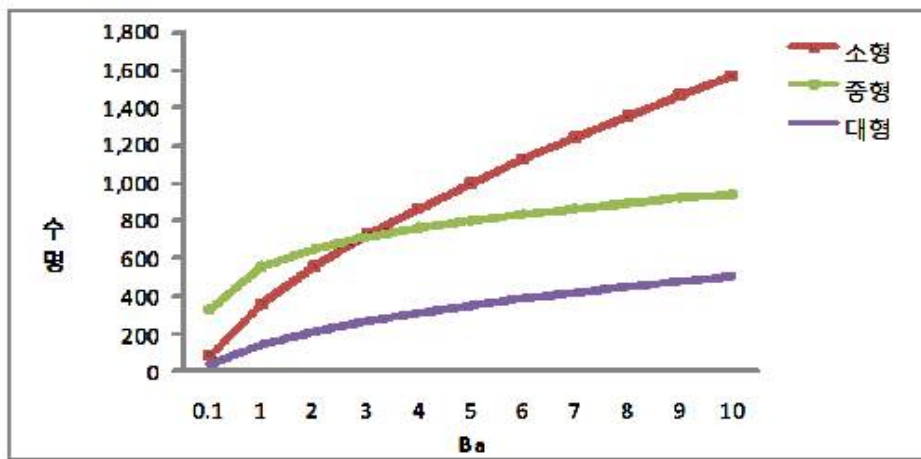
<표 10> 유압 Breaker Model별 백분위수 표 (95.0% 정규 CI)

백분율	소형		중형		대형	
	백분위수	표준 오차	백분위수	표준 오차	백분위수	표준 오차
0.1	85.5	19.9	331.2	32.9	45.6	9.3
1	361.2	33.7	557.3	22.7	151.1	16.9
2	558.6	49.6	652.3	25.0	217.1	18.7
3	721.8	73.0	715.6	30.7	268.7	19.3
4	866.7	99.4	764.5	37.0	312.8	19.6
5	999.5	127.2	804.9	43.0	352.2	19.9
6	1123.7	155.6	839.7	48.7	388.3	20.3
7	1241.3	184.2	870.5	54.0	421.8	20.8
8	1353.8	213.1	898.2	59.1	453.3	21.5
9	1462.0	242.1	923.5	63.9	483.3	22.3
10	1566.7	271.2	946.8	68.4	511.9	23.4
• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •	• • •

먼저 각 Model별 평균고장시간을 보면 소형 Model이 다른 Model에 비하여 약 3배정도로 상당히 높고, 중형과 대형 Model의 평균고장시간은 거의 흡사하다고 볼 수 있다. 그리고 흥미로운 점을 발견할 수 있는데  $B\alpha$  수명은 각 Model 별로 약간의 차이를 볼 수 있다는

것이다. 이를 <그림 5>로 나타내어 설명하겠다.

우선 대형 Model의 수명이 가장 저조하고,  $B\alpha$  수명에서  $\alpha$ 가 3인 시점 전에는 중형 Model의 유압 Breaker가 가장 높은 수명을 보이고 있으나,  $\alpha$ 가 3인 시점 이후에는 소형 Model의 유압 Breaker의 수명이 다른 Model에 비해 압도적으로 높아진다. 이는 소형 Model의 초기하자가 중형에 비해 많이 발생되지만 전체적으로 시간이 경과될수록 소형 Model의 수명은 안정된 추세로 간다고 볼 수 있다.



<그림 5 > 유압 Breaker Model별  $B\alpha$  수명

## 5. 결 론

본 연구를 통해 유압 Breaker를 구성하는 주요 부품에 대해 알아보고, 그 부품의 기능 및 용도와 유압 Breaker의 작동원리를 확인할 수 있었다. 또한 유압 Breaker의 FMEA를 실시하여 고장 Mode와 고장원인 및 고장영향을 확인하고, 가장 높은 위험 우선 순위도 (RPN)를 나타내는 고장 인자가 Piston / Cylinder 굽힘이라는 점을 확인하였다. 이에 따라 굽힘을 유발하는 요인을 내부적 요인과 외부적 요인으로 구분하여 살펴보았다.

상기사항을 바탕으로 유압 Breaker의 수명분석을 위해 현장 고장 Data를 수집하여 통계 모수를 추정된 결과 형상모수(m)가 약 2.0으로 증가 고장형임을 알았고, 척도모수( $\eta$ )가 3,045임을 확인하였다. 그리고 평균고장시간은 2,699일(7년 5개월)이고, B1 수명이 306일(10개월)임을 분석 결과로 도출하였다. 그리고 유압 Breaker를 세가지 Model로 구분하여 각각의 수명에는 어떠한 관계가 있는지 알아보았다. 유압 Breaker의 세가지 Model의 현장 고장 Data로 수명 분석한 결과, 형상모수가 1이 넘는 증가고장 형태이고 소형 Model의 평균고장시간이 중형 및 대형 Model의 평균고장시간에 비해 약 3배 정도 높음을 확인



하였다.

기전에 연구되지 않았던 유압 Breaker의 수명분석을 실시하여 평균수명 및 B $\alpha$  수명을 확인할 수 있었고, 본 연구가 유압 부품 및 건설장비의 고장분석과 수명분석에도 활용될 수 있고, 유압 제품의 수명을 높이기 위한 개선안 모색에도 중요한 자료가 될 것으로 판단된다. 그리고 향후에는 유압 Breaker의 수명 향상을 위한 공정개선을 실시하여, 수명에 얼마나 작용하는지 살펴보겠다.

## 참고문헌

- [1] 백현엽, 장효환, 이일재(2005), “Taguchi 방법을 이용한 유압브레이커의 최적설계”, 대한기계학회 춘추학술대회
- [2] 이정권, 채기상, 이종화, 박성하, 하태광, 임종혁(1999), “저소음형 유압 브레이커의 개발”, 대한기계학회 춘추학술대회
- [3] 이영규, 성원준, 송창섭(2000), “유압 브레이커의 해석용 TOOL 개발 및 성능 분석”, 한국정밀공학회지 제17권 제4호
- [4] 변동우(2006), “유압 브레이커의 저소음화를 위한 소음-진동 설계에 관한 연구”, 아주대학교 공학 석사 학위 논문
- [5] 이원해(2007), “공타방지구조가 구비되어 있는 유압브레이커(Oil hydraulic braker)”, 한국과학기술학회
- [6] 김봉석 외 4명(2006), “저유압 브레이커의 구조 소음·진동 저감을 위한 브래킷 하우징의 구조 개선에 관한 연구”, 한국정밀공학회
- [7] 이근호, 이용범, 정동수(2004), “저유압 브레이커의 타격 에너지 측정을 위한 유압 변환 장치 개발”, 한국정밀공학회
- [8] 강보식, 지상원, 장지성(2006), “공기압 실린더의 고장분석 및 신뢰성 시험기준에 관한 연구”, 한국동력기계공학회
- [9] 박수완, 최창록, 김정현, 배철호(2009), “상수관로의 잔존수명 평가를 위한 통계적 방법론” 상하수도학회지
- [10] 권영일, 김승진(2007), “건설자재의 사용수명 예측모형에 관한 연구”, 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회
- [11] 최귀현, 송창섭(1998), “유압 브레이커의 성능 향상을 위한 연구”, 대한정밀공학회