

내구수명향상을 위한 서비스 데이터 수집 및 고장률 분석[†]

(Field Data Collection and Failure Analysis for Durability Improvement)

김 종 환*, 정 원*
(Jong-hwan Kim, Won Jung)

요 약 신제품 개발 또는 개선 과정에 있어서 내구 수명의 평가는 장기간이 소요되는 작업으로서, 제품의 개발 또는 개선 기간에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 고장 메커니즘을 분석하여 제품의 신뢰성을 정확히 평가하는 것은 제품의 초기 시장 진입 기간을 단축하여 시장 경쟁력을 강화하는데 중요한 요소로 작용하게 된다. 본 논문에서는 트랙터의 무상보증기간에 이루어진 고장 데이터에 근거하여 주요 고장 부품에 대한 고장 메커니즘 분석을 통하여 고장형태를 규명하고, 신뢰성 분석을 통하여 파워트레인에 대한 B10 수명을 향상시키기 위한 대상 부품을 규명하였다.

핵심주제어 : 신뢰성분석, 서비스데이터, 고장메커니즘, 미니탭

Abstract The purpose of this paper is to develop a reliability estimation process of agricultural machinery components using field failure data. Estimating the durability is a time-consuming in the product development process. Using the field data of tractor, failures for major parts are investigated and databases are developed. Accelerated life test using the stress analysis could improve Weibull B10 considerably. This estimation process is useful for preparing the design input and planning the durability target.

Key Words : reliability analysis, service data, failure mechanism, Minitab

1. 서 론

시스템의 고장 해석 또는 신뢰성 분석의 목적은 소요 기능 및 성능을 설계 목표와 확인하고, 이것을 신뢰성 측면에서 평가하여, 요구의 합치여부, 취약부분의 확인 등의 검토와 더불어 실시 결과를 설계에 피드백

하기 위한 것이다. 이것에 의해 설계개선, 시험, 검사에 반영하여 신제품 설계 등에 활용된다. 현재 농기계의 트랜스미션과 관련된 여러 가지 요소들은 실제 사용 환경에서 발생한 고장 데이터가 정확히 반영되어 있지 않기 때문에 제품의 신뢰성평가에 있어 중대한 오류를 포함하고 있을 수 있다. 이것은 결과적으로 과잉 설계에 의한 원가 상승을 야기하거나 클레임 증가 등 제품 신뢰도 저하를 야기 할 수 있어 반드시 해결하지 않으면 안 될 과제이다.

[†] 이 논문은 2009학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임
* 대구대학교 산업경영공학과

트랙터의 파워트레인(동력전달장치)을 크게 조립 모듈에 따라 두 가지로 구분 하면, 뒷차축을 포함한 트랜스미션 조합과 앞차축 조합으로 구분할 수 있다. 여기서 연구대상 트랜스미션 조합은 엔진을 제외한 주 변속기어 조합, 전후진 Shuttle 조합, 부변속기어 조합, PTO 기어조합, 전륜구동기어 조합, 뒷차축 조합으로 구성되었다. 앞차축 조합은 트랜스미션 조합에서 전달된 동력을 선택적으로 전륜 구동력을 발생시키는데 사용할 수 있는 시스템으로 별도의 조립 모듈이다.

또한 파워트레인에는 사용자의 작동 편의성을 위해 기어의 선택적 또는 동기적 물림 방식이 아닌 동력의 연결과 끊김을 발생시킬 수 있는 유압식 클러치조합이 포함되어 있으며, 유압 출력을 발생시킬 수 있는 동력원으로서 유압 펌프가 포함된다.

트랙터의 주요 구성품 중 파워트레인의 제조원가는 완성품의 30% 이상을 차지한다. 따라서 파워트레인에 대한 내구수명 및 신뢰성 재평가로 인한 제조 공정 개선, 설계 변경 등을 통해 원가절감 목표를 달성할 때 그 파급 효과는 매우 높다고 할 수 있다. 특히, 외장 부품과 다르게 파워트레인의 고장은 많은 공수와 작업시간이 필요로 하기 때문에 간단한 고장이라 할 지라도 높은 수리비가 청구되기 때문에 제품 초기 품질 안정이 절대적으로 필요한 부분이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 5년간 수집된 A/S 데이터에 근거하여 부위별 문제점을 분석하고, 고장발생 확률을 기반으로 하여 B₁₀ 수명을 평가한다. 또한 B₁₀ 수명을 4,000시간 이상으로 유지하기 위해 개선해야 할 부품을 규명하고자 한다.

2. 신뢰성 데이터 분석기준

신뢰성 분석을 위해 사용된 데이터는 2005년부터 2009년까지 국내외에서 수집된 고장 데이터를 기초로 하여 진행되었다. 이 데이터는 제품의 무상보증(warranty) 기간 동안 수집되기 때문에 무상보증 데이터가 수집되기 시작한 2005년부터 생산된 제품을 대상으로 하였다.

분석은 35~50 HP 트랙터를 대상으로 분석하였으며 2005년부터 2009년까지의 기간 동안 판매 실적은 <표

1>과 같다.

<표 1> 트랙터 판매 실적

월	2005	2006	2007	2008	2009	계
1	218	179	499	312	345	1,553
2	331	100			45	476
3	230	195	378		136	939
4	273	133			161	567
5	141		108	63	251	563
6	62		264		76	402
7	130	50			25	205
8	182	108		2	108	400
9	98		105	48	32	283
10	191		255	91	96	633
11	122	256			292	670
12	137	198		434	70	839
계	2,115	1,219	1,609	950	1,637	7,530

고장 데이터는 무상보증기간 동안 접수된 경우에 대하여 집계가 되고 있다. 그러나 무상보증기간은 국내 판매분과 해외 수출분이 다르게 설정되어 있다.

국내의 경우 엔진부 및 미션부는 2년, 그 외의 부위는 1년으로 설정되어 있으며, 해외의 경우에는 2008년 2월까지의 엔진부 및 미션부 3년, 그 외의 부위 2년으로 설정되어 있다. 또한, 2008년 2월 이후에는 엔진 및 미션부 4년으로 기간이 연장되었다. 이렇게 A/S기간이 다르기 때문에 국내 판매분과 수출분을 통합하여 분석하기는 곤란하다. 따라서 고장 데이터에 대한 신뢰성 분석은 그 정확성을 높이기 위해 데이터의 양이 많은 해외 수출분만을 대상으로 실시하였다.

또한 보증기간이 만료되기 전의 고장 데이터는 제품의 초기상태의 고장만을 반영하여 일정기간 동안 제품이 정상기능을 하는가를 평가하는 신뢰성분석에 사용하기 곤란하므로, 분석은 2005년부터 2007년까지 생산된 트랙터의 2005년에서 2009년까지 접수된 고장 데이터를 대상으로 하였다. 동일 트랙터에 대한 중복 고장은 제품의 고유번호인 기대번호를 기준으로 하여 최초의 고장이 발생한 시점을 사용하였다. 이렇게 중

복 고장 데이터가 제외된 해외 고장 데이터의 기본적인 특성은 <표 2>와 같다.

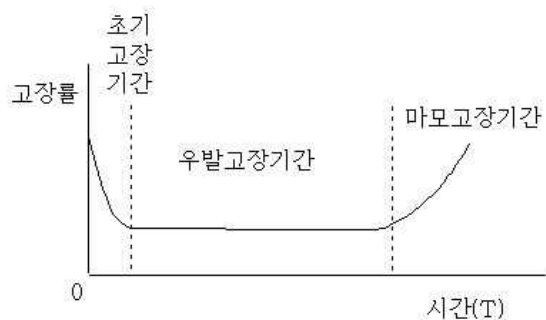
<표 2> 해외 클레임 데이터 분석

년도	판매량	고장대수	고장 부위					
			밋션부	엔진부	외장부	유압부	전장부	기타
2005	1,756	248	72	18	47	46	64	1
2006	1,056	93	28	7	13	24	20	1
2007	1,324	115	22	27	17	18	31	
계	4,136	456	122	52	77	88	115	2

3. 육조곡선의 결정

일반적으로 제품의 고장률은 아래의 그림과 같이 시간의 경과에 따라 육조(bath-tub)의 형태를 따르고 있으며, 이때의 고장률 곡선을 육조곡선(Bath-tub curve)이라고 한다.

제품의 사용 초기에는 고장률이 감소(DFR: Decreasing Failure Rate)하는 기간을 초기고장기간이라고 하고, 중간부분의 고장률이 낮고 일정한(CFR: Constant Failure Rate)기간을 우발고장기간이라고 하며, 시스템의 마모 및 노화 등으로 인하여 고장률이 증가(IFR: Increasing Failure Rate)되는 기간을 마모고장기간이라고 한다.

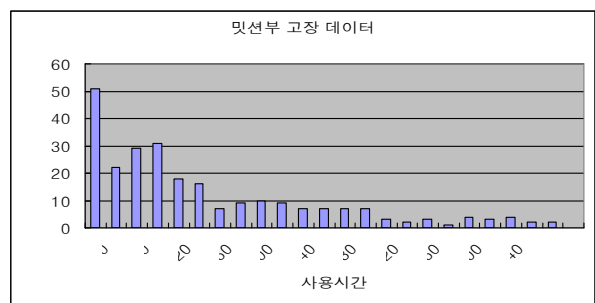


<그림 1> 일반적인 육조곡선

육조곡선의 규명은 주로 제조공정 또는 사용상의 미숙에 의해 발생하는 초기고장기간이 언제까지인가를 판단하기 위한 것이다. 초기고장기간의 고장은 제

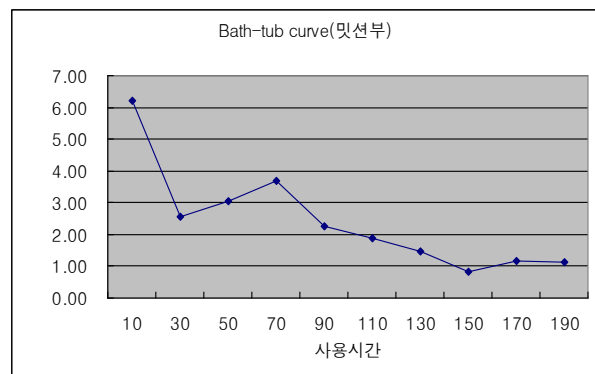
품의 신뢰성이나 내구성과 관련되지 않은 이유로 발생하기 때문에 신뢰성분석에서는 고려하지 않기 때문이다. 또한 마모고장기간은 제품의 수명이 거의 도달했을 때의 고장이므로 신뢰성 분석에 사용되지 않지만, 현재 확보된 고장 데이터는 보증기간 동안의 데이터로 한정되어 있기 때문에 육조곡선 상의 우측 끝 부분인 정확히 추정하기 곤란하다.

클레임 데이터에서 가장 큰 비중을 차지하는 파워트레인 밋션부의 고장 데이터에서 첫 고장까지의 사용시간은 <그림 2>와 같은 형태를 가지고 있다.



<그림 2> 파워트레인(밋션부) 고장 데이터 분포

고장률은 사용초기에 높게 나타나다가 약 100시간 전후의 시기가 되면 비교적 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.



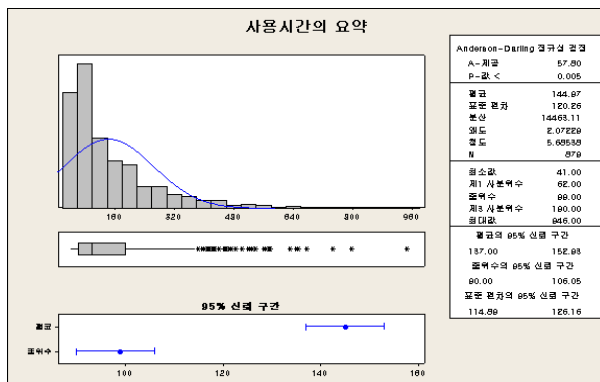
<그림 3> 파워트레인 고장률에 대한 육조곡선

20시간 간격의 각 구간 내에서 고장률이 일정하다는 가정 하에서 고장률을 추정하여 그래프로 나타낸 것이 <그림 3>이다. 초기고장기간과 우발고장기간의 경계점은 80에서 120시간 사이로 추정할 수 있으며,

이는 기업에서 내부적으로 품질상의 문제에 의한 고장과 내구성에 의한 고장의 경계점을 80시간으로 설정하고 있는 것과 큰 차이를 보이지 않는 결과이다. 따라서 추가적인 데이터에 의한 분석이 이루어질 때까지는 80시간까지를 초기고장으로 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

4. 현 양산품의 신뢰성 평가

파워트레인에 대한 최초의 고장이 발생할 때까지의 사용시간에 대한 기초통계량은 <그림 4>와 같다. 여기서는 앞에서의 육조곡선 분석에서도 확인된 것처럼 최초 80시간 이전의 고장은 제조공정상의 품질 문제로 간주하여 신뢰성 분석에서는 제외한다.



<그림 4> 사용시간에 대한 기초통계량

이 데이터에 대하여 적합한 통계적 분포를 추정한 결과 주요 분포에 대한 Anderson -Darling 적합도 검정의 결과인 A-D계수 및 Pearson 상관계수는 <표 3>과 같다.

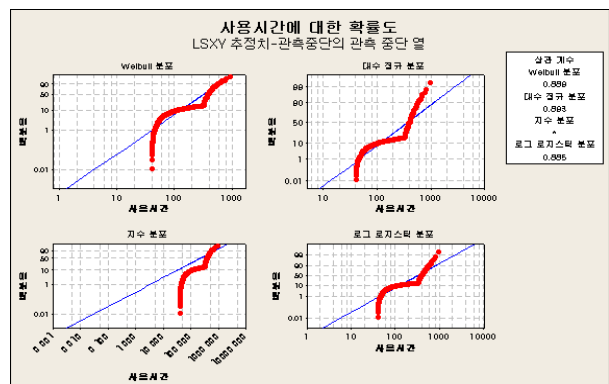
<표 3> Anderson-Darling 적합도 검정 결과

	A-D 계수	상관계수
와이블 분포	81.650	0.889
대수 정규 분포	90.169	0.893
로그로지스틱 분포	93.297	0.885

아래의 <그림 5>는 Minitab의 ‘분포개관그림’ 기능을 이용하여 주요 분포에 적합 시킨 것을 보여주고 있다. 따라서 파워트레인에 대한 고장 분포가 신뢰성 분석에 일반적으로 적용하는 와이블 분포에 적합함을 알 수 있었다.

와이블 분포에 의한 고장분석의 장점은 형상모수인 β 값에 따라 고장율의 증가와 감소를 간단히 모형화할 수 있다는 것이다[9, 10]. 예를 들면,

- $0 < \beta < 1$: 고장률이 감소(DFR)
- $\beta = 1$: 고장률이 일정(CFR)
- $\beta > 1$: 고장률이 증가(IFR)
- $1 < \beta < 2$: 고장률이 서서히 증가
- $\beta = 2$: 고장률이 직선적으로 증가
- $\beta > 2$: 급격히 증가



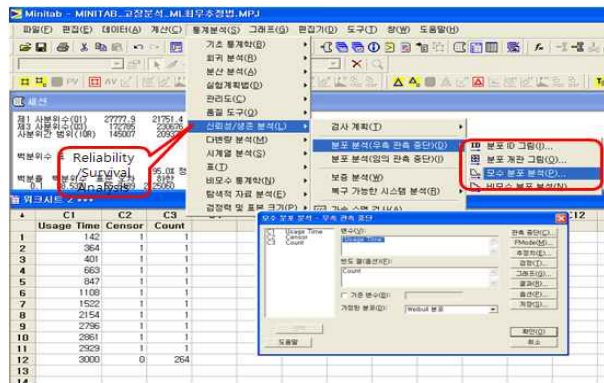
<그림 5> Minitab을 이용한 분포 개관 차트

또한 β 값에 따라 다른 분포로도 나타낼 수 있는 장점이 있다.

- $\beta < 1$: 감마분포
- $\beta = 1$: 지수분포
- $\beta = 2$: 대수정규분포

와이블 분포는 기계부품(볼 베어링, 모터) 및 피로고장의 모형화에 널리 활용되고 있다. Minitab에 의한 분석은 <그림 6>과 같이 신뢰성/생존분석 메뉴를 사용하였으며, 분석에 있어서 최소제곱법을 주로 사용하고, 최대우도법은 참고 자료로만 이용하였다. 최대우도법이 일반적으로 최소제곱법보다 정확한 모수 추정치를 제공할 가능성이 크지만, 본 연구와 같이 소표본 또는 관측

중단 비율이 높은 경우에는 최소제곱법이 보다 정확할 수 있기 때문이다. 또한 신뢰성 분석에서 많이 이용되는 와이블분포의 경우에는 최대우도법이 형상모수를 과대 추정하는 경향이 있기 때문이기도 하다[1].



<그림 6> Minitab 에서의 신뢰성/생존분석

본 연구에 사용된 신뢰성 향상 대상품의 해외 판매분의 파워트레인에 대한 고장은 485건이다. 이상의 고장 데이터에 의한 신뢰성 분석은 다음과 같은 가정 하에서 수행되었다.

- 트랙터 사용에 대한 실태조사의 결과에 따라, 연평균 320시간을 사용하는 것으로 가정한다.
- 80시간(3개월) 이내의 고장은 생산과정에서의 품질 문제로 판단하여 신뢰성 분석에서는 제외한다.
- 동일 트랙터에 대한 중복 고장은 최초 발생한 고장시점 만을 반영한다.
- 2005~2007년까지의 생산분에 대한 2005~2009의 해외 고장 데이터만을 대상으로 한다. 이는 판매 실적 데이터가 국내와 해외 생산분에 대하여 구분되어 있지 않음에 따라, 국내와 해외 판매분에 대한 보증기간의 차이를 반영하기 곤란하기 때문이다.
- 보증기간은 판매일자를 기점으로 하여 산정되므로 보증기간 내의 고장임을 분석하기 위해서는 판매일자부터 보증기간까지 접수된 고장을 대상으로 하여야 하지만, 월별 판매실적에 대한 데이터가 집계되어 있지 못하여 부득이하게 생산실적 데이터를 이용하였다. 생산일자와 판매일자의 차이는 해외 판매분의 경우 평균 230일 이었으며, 생산일과 판매일 사이에는 고장이 없는 것으로 간주하였다.

- 파워트레인에 대한 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) 분석 결과를 활용하여, 고장이 주로 발생하는 부위별로 예상 수명과 고장률의 변화를 분석하였다.

- 분석에 있어서 최소제곱법을 주로 사용하고, 최대우도법은 참고 자료로 이용하였다. 이는 최대우도법이 일반적으로 최소제곱법보다 정확한 모수 추정치를 제공할 가능성이 크지만, 소 표본 또는 관측중단비율이 높은 경우에는 최소제곱법이 보다 정확할 수 있으며, 특히 신뢰성 분석에서 많이 이용되는 와이블분포의 경우에는 최대우도법이 형상모수를 과대 추정하는 경향이 있기 때문이다.

<표 4> 주요 고장 부품

No.	Part name
1	앞차동장치조합
	차동케이스카버
2	트랜스밋션케이스
	브레이크케이스(우)
3	PTO클러치조합
4	스파이럴베벨기어조합
	2 3스파이럴베벨기어
5	롤러베어링
	볼베어링
6	오일시일
7	O 링
8	싱크로조합
9	뒷차축
	앞차축
10	전륜변속암
	포크로드 (부변속)
11	유압펌프조합

파워트레인 고장데이터에 의한 신뢰성 분석은 FMEA에서 고장 확률이 높다고 판단된 <표 4>의 11개 부품군에 대하여 실시하였다.

2005~2007년에 생산되어 해외로 수출된 모델을 대상으로 한 파워트레인 전체의 2009년까지의 고장 건수는 에 총 54건이며, 연도별로는 2005년 생산분이 35건, 2006년 생산분이 11건, 2007년 생산분이 13건으로 나타났다. 단, 고장 데이터 중에서 누유·누수 등 제품

의 신뢰성 문제로 보기 어려운 고장 데이터는 제외하였다.

파워트레인의 주요 신뢰성 향상 대상에 대한 신뢰성 수준의 정량적 목표를 B₁₀ life기준 3,000시간에서 4,000시간으로 향상시키는 것으로 설정하였으므로, 이미 4,000시간 이상인 부품을 제외하면 분석의 대상이 되는 주요 제품별 고장 건수는 <표 5>와 같다.

<표 5> 신뢰성 향상 대상품 주요 고장 건수

부위 \ 생산년도	2005	2006	2007	계
트랜스미션조합	6	1	0	7
뒷차축조합	1	0	1	2
앞차축조합	20	5	8	33
PTO기어조합	0	0	0	0
유압클러치조합	1	1	1	3
유압펌프조합	2	4	2	8
기타	5	0	0	5
계	35	11	12	58

주) PTO기어조합에 대한 필드 고장 건수 없음.

현 양산품에 대한 신뢰성 수준을 파악하기 위해 필드 고장 데이터에 대한 모수분포분석을 실시하였다.

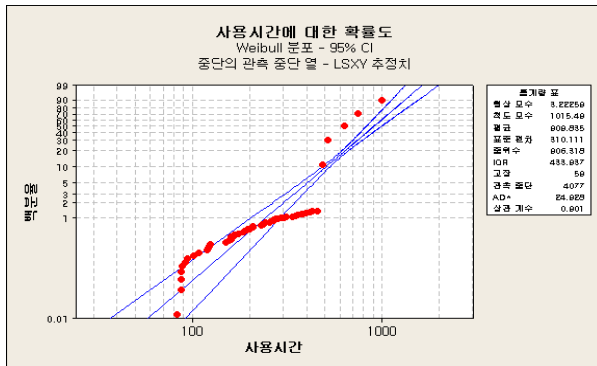
뒷차축조합 고장 건수 2건에 대해서는 트랜스미션 조합과 통합하여 분석하였으며, PTO 기어조합의 경우는 고장이 전혀 없는 것으로 조사되었지만, 베이즈(Bayes) 분석방법을 이용하여 관측 중단된 4,136건의 데이터를 이용하여 형상 모수를 2.0으로 가정하고 90%의 신뢰구간에서 4,000시간에 대한 생존 확률 추정치, B₁₀ 및MTTF를 분석하였다.

분석 결과를 요약하면 <표 6>과 같다. 분석은 와이블 분포를 대상으로 하였으며 트랙터가 작동되고 있지 않은 경우에도 노후화가 진행되고 고장이 발생하는 점을 고려하여 가용수명은 실제 작동시간의 1.3배로 가정하였다. 파워트레인 전체에 대한 모수분포분석의 결과는 <그림 6>과 같다.

참고로, 해외로 수출된 신뢰성 향상 대상 모델의 판매량 4,136대 중에서 파워트레인에 대한 고장 데이터가 58건에 불과하여 관측중단비율이 98.57%이다. 파워트레인에 대한 고장 데이터는 연간 트랙터 가동시간을 320시간으로 볼 때, 6개월 단위의 고장 건수가 초기 6개월을 제외하고 나면, 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 트랙터의 상태가 초기의 불안정 상태에서 안정 상태로 변화하고 있는 추세에 있음을 보여준다. 이는 확보된 고장 데이터가 무상보증기간인 3년분만을 가지고 분석했기 때문에 발생한 결과로 판단된다.

<표 6> 신뢰성 향상 대상 현 양산품 수명 평가 결과

부위	B ₁₀ (시간)	MTTF(시간)	형상모수	관련 부품
트랜스미션 조합 및 뒷차축 조합	3,131	9,353	1.86	트랜스미션케이스 브레이크케이스(우) 뒷차축
앞차축 조합	2,534	6,839	2.02	앞차동장치조합 차동케이스카버 앞차축 스파이럴베벨기어-1 스파이럴베벨기어-2 볼베어링-1 볼베어링-2 볼베어링-3
PTO기어 조합	11,975	32,695	2.00	
유압클러치 조합	4,664	15,183	1.74	PTO클러치조합
유압펌프 조합	2,315	5,569	2.25	기어펌프조합



<그림 6> 파워트레인 전체에 대한 모수분포분석

분석 결과에 의하면 트랜스미션 조합 및 뒷차축 조합, 앞차축 조합, 그리고 유압펌프 조합이 트랙터의 신뢰성 및 내구성 향상을 위해 개선해야 할 대상 부품임을 확인하였다. PTO기어 조합은 현재 상태에서 내구성이 충분하므로 신뢰성 향상의 대상이 아니라고 판단되며, 원가의 절감을 위하여 과잉설계의 가능성도 확인해 볼 필요가 있다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 신뢰성 향상 대상품의 시장 고장 데이터 분석을 통하여 신뢰성예측 기법을 적용하고, Minitab 소프트웨어를 활용하여 수명을 예측하였다. 신뢰성 확보를 위해 해당 부품의 사용자 조건에서 데이터를 계측하기 위해서는 관련 부품의 A/S 데이터를 기반으로 하여 주요 고장 부위에 대한 B₁₀ 예상 수명을 추정하였다. 이를 통하여 제품의 신뢰성 및 내구성 향상을 위해 개선해야 할 대상 부품을 규명하였다.

본 논문에서는 3년간 생산된 제품에 대하여 5년간의 A/S데이터만을 대상으로 실시하였다. 좀 더 장기간의 고장 데이터가 있다면 고장률의 변화를 보다 정확히 추정할 수 있겠으나, 보증기간 이후의 고장에 대해서는 데이터가 수집되기 곤란한 현실에 비추어보면 보다 많은 필드 테스트 및 무상 A/S 이외의 수리에 대한 현황 파악이 필요하다고 생각된다.

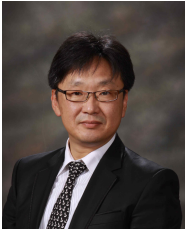
또한 지역별로도 그곳의 토양 조건에 따라 트랙터의 파워트레인이 감당해야 할 작업 부하는 달라질 것

이며, 따라서 시험 장소에 대한 토양 조건을 정확히 구분하고 세분화 시켜 데이터베이스를 구축하는 것이 필요하며 중요 측정 인자를 결정해야 한다.

이러한 한계점에도 불구하고 본 논문에서 제시한 파워트레인의 수명 평가방법은 제품의 내구성 향상을 위한 설계 개선에서 대상 부품을 한정함으로써 시간 단축을 가능하게 한다. 또한, A/S 대상 부품의 생산 및 공급 계획과 제품의 성능 개선에 기여할 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 서순근, 미니탭 신뢰성분석, 이레테크, pp. 281-348, 2007.
- [2] Collins, J. A., Failure of materials in mechanical design. John Wiley and Sons, pp. 557-568, 1993.
- [3] Crowe, D. and Feinberg, A., Design for reliability, CRC Press, 2001.
- [4] Ford Production System, Failure mode and effect analysis - Handbook supplement for machinery, Ford Automotive, pp. 10-29, 1996.
- [5] ISO/TS 16949: 2009, Quality management systems, 2009.
- [6] Johnson, K. G. and Khanb, M. K., A study into the use of the PFMEA in the automotive industry in the UK, Journal of Materials Processing Technology, pp. 348 - 356, 2003.
- [7] J. D. Power, IQS - Initial Quality Study, J. D. Power and Associates 2010, pp. 1-3, 2010.
- [8] J. D. Power, VDS - Vehicle Dependability Study, J. D. Power and Associates 2010, pp. 1-3, 2010.
- [9] Nelson, W., Applied life data analysis, John Wiley and Sons, pp. 162-180, 1982.
- [10] Pham, H., Handbook of reliability engineering, Springer, pp. 415-428, 2003.
- [11] Rhee, S. J. and Ishii, K., Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability, Advanced Engineering Informatics 17, pp. 179-188, 2003.



김 중 환 (Jong-hwan Kim)

- 종신회원
 - 서울대학교 산업공학과
 - KAIST 경영과학과 공학박사
 - 대구대학교 산업경영공학과 교수
- 관심분야 : 경영과학, 시뮬레이션, 공학설계



정 원 (Won Jung)

- 한양대학교 산업공학과
 - Wayne State Univ., Ph.D.
 - The College of New Jersey, 조
교수
- 현재 대구대학교 산업경영공학과 교수
- 관심분야 : 신뢰성공학, Risk Analysis