

QFD와 고장메커니즘 분석에 의한 농기계부품의 신뢰성평가

정 원[†]

대구대학교 산업시스템공학과

Reliability Estimation of Agricultural Machinery Components Based on QFD and Failure Mechanism Analysis

Won Jung[†]

Industrial and Systems Engineering Daegu University

Reliability tools such as QFD and FMEA identify voice of customer related to product design, its use, how failures may occur, the severity of such failures, and the probability of the failure occurring. With these identified items, a development team can focus on the design process and the major issues facing the product in its potential use environment for the customer.

The purpose of this research is to develop a reliability estimation process of agricultural machinery components using QFD, FMEA, and field failure data. Based on QFD method, customer requirements, engineering design elements and part characteristics were deployed. Using the field failure data, failures are investigated, and Weibull B10 life are estimated. This estimation process is useful for preparing the design input and planning the durability target.

Keywords : Reliability Estimation, FMEA, B10 Life, Engineering Specification

1. 서론

시스템의 고장해석 또는 신뢰성 해석의 실체는 소요 기능 및 성능을 설계 목표와 확인하고, 이것을 신뢰성 측면에서 평가하여, 요구의 합치여부, 취약부분의 확인 등의 검토와 더불어 실시 결과를 설계에 피드백한다. 이것에 의해 설계개선, 시험, 검사에 반영하여 신제품 설계 등에 활용된다. 현재 트랙터의 파워트레인(동력전달장치)과 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 파잉 설계를 부르거나 클레임 증가 등 제품 신뢰도 저하를 야기할 수 있어 반드시 해결하지 않으면 안 될 과제이다.

트랙터의 파워트레인을 크게 조립 모듈에 따라 두 가지로 구분 하면, 뒷차축을 포함한 트랜스미션조합과 앞차축조합으로 구분할 수 있다. 여기서 연구대상인 트랜스미션조합은 엔진을 제외한 주 변속기어조합, 전후진 Shuttle 조합, 부변속기어조합, PTO기어조합, 전륜구동기어조합, 뒷차축조합으로 구성되어 있다. 앞차축 조합은 트랜스미션조합에서 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. 파워트레인을 구성하는 다수의 모듈 중에서 신뢰성 향상을 위한 본

논문접수일 : 2010년 11월 27일 논문수정일 : 2010년 12월 07일 게재확정일 : 2010년 12월 10일

[†] 교신저자 wjung@daegu.ac.kr

* 본 논문은 2009년도 대구대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

연구의 대상모듈은 트랜스미션조합이다.

트랙터의 주요 구성품 중 파워트레인의 제조원가는 완성품의 약 1/3을 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 작업시간을 필요로 하여 간단한 고장이라 할지라도 높은 수리비가 청구되기 때문에 제품 초기 품질 안정이 절대적으로 필요한 부분이라고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 QFD와 FMEA, 그리고 필드고장데이터를 활용하여 농기계부품에 대한 정확한 신뢰성평가 프로세스를 제시하는데 있다. 우선 QFD의 고객요구사항을 기반으로 품질특성 및 부품특성을 전개하고, FMEA 분석을 통하여 시스템 작동에 문제가 되는 고장모드와 영향 및 고장메커니즘에 대한 분석을 행한다. A/S 데이터에 의한 부위별 문제점 분석으로 Weibull 또는 Lognormal에 의한 고장발생확률 기반의 B10 수명을 정확히 평가하여, 각 부품단위 또는 모듈단위의 설계입력자료를 확보하고, 목표수명결정에 활용할 수 있도록 한다.

2. QFD에 의한 품질요소 중요도 분석

2.1 단계 1 : 고객 요구사항 vs. 품질특성

트랙터 파워트레인에 대한 고객요구사항(VOC, Voice of Customer)을 신뢰성 향상 대상품별로 품질특성(엔지

<표 1> QFD에 의한 품질특성 중요도 Top 10

순위	품질 특성	중요도
1	트랜스미션/뒷차축조합-변속시스템 형태 (ex. Mechanical, Hydraulic)	528
2	공통-차량 무게	432
3	공통-엔진 정격 출력	396
4	공통-미션 오일 온도	387
5-1	공통-엔진 최대 토크	363
5-2	앞차축조합-타이어사양	363
5-3	트랜스미션/뒷차축조합-크기	363
6	트랜스미션/뒷차축조합-타이어사양	354
7	공통-보증 시간	339
8	공통-케이스 소재 두께	330
9	트랜스미션/뒷차축조합-브레이크 패드 재질	314
10	공통-윤활유	302

니어링 설계요소)을 정렬하여 VOC vs. 품질특성을 분석하였다. VOC와 품질특성의 상관 관계에 따라 높음 9점, 보통 3점, 낮음 1점, 없음 0점으로 점수를 각각 부여하여 각 품질특성별로 중요도를 계산하였다. 또한, 중요도 점수에 따라 엔지니어링 설계요소의 순위(Rank)를 정하였으며, 상위 10위까지 품질특성을 분석한 결과는 <표 1>과 같다.

<표 1>의 품질특성들은 모두 트랙터를 구매하는 고객의 입장에서 중요한 선택 항목이라 할 수 있으며, 파워트레인의 성능을 결정하는 중요한 엔지니어링 설계요소이다. 순위 1과 3, 5-1, 7의 경우는 트랙터 개발 단계에서의 개념설계 항목으로 초기 개발목표 설정의 중요성을 말해준다.

순위 2, 5-2와, 5-3, 6, 8, 9의 경우 파워트레인 강도 설계 시 반드시 고려해야 할 사항으로 최적 설계의 중요성을 보여준다고 판단되며, 순위 4와 10의 경우 파워트레인에 사용되는 트랜스미션 오일의 사양이 트랙터 성능에 끼치는 영향이 크다는 것을 보여 준다.

2.2 단계 2 : 품질특성 vs. 부품특성

<표 2>는 QFD의 2단계로서 품질특성과 부품특성에 대한 HOQ의 일부이다. <표 2>의 분석에 근거한 부품별 중요도를 순서대로 나열하면 <표 3>과 같다.

실제적으로, 제품에 대한 중요도는 사용자의 관점에 따라 다를 수 있다. 앞서 실시된 QFD 전개결과는 제품을 만드는 설계자와 시험자의 관점이 많이 반영되어 중요도가 결정된 것이 사실이다. 실제 사용자가 평가 관점이 다른 관계자의 기준으로 점수를 재계산한다면 중요 항목이 다소 변경될 수도 있다고 판단된다. 이러한 작업은 한 번에 국한되지 않고 설계 단계에서부터 후에 시장의 현황을 반영하여 지속적으로 Feed-back 함으로써 제품의 개선 방향을 재설정할 수 있는 좋은 자료가 될 수 있을 것이다.

<표 2>에서 파워트레인 부품 별로 품질특성의 중요도를 분석한 결과를 볼 때, 파워트레인 내부 부품 중 기어(Gear)들의 중요도가 가장 높은 것으로 분석되었으며 이는 기어에 대한 신뢰성 확보가 무엇보다 우선시 되어야 한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 파워트레인 기어라인에 대한 내구수명 평가법을 정립하는 것은 매우 중요한 과제이며, 이를 통해 VOC와 기술적인 요구사항을 동시에 만족시킬 수 있다고 판단된다.

다음 단계인 고장 원인 및 영향 분석에 있어서는 현재 판매 중인 모델에 대하여 고객의 필요를 만족시키기 못하는 주요 고장 부품들에 대한 고장 모드와 메커니즘을 분석하고, 이를 보완함으로써 제품의 수명을 높이기 위한 개선 작업을 하려고 한다. FMEA 분석과 고장물리

<표 2> 품질특성 vs. 부품특성 HOQ(일부)

Quality Characteristics	Part Characteristics		트랜스 미션/뒷차축 조합																	유압펌프 조합	
	1차	2차	서틀주변속		부변속 초저속		4WD	브레이크		뒷차축부			케이스			PTO기어조합		베어링	축		
	3차	기어	싱크로	기어	Constant	기어	디스크	프레이트	기어	미션 케이스	중간 케이스	클러치하우징	기어	디스크	플레이트	피스톤	베어링	축	기어 1st	기어 2nd	
	1차	2차	가중치																		
공통	재질(기어)	5	9	9	9	9	9	0	0	9	0	0	0	9	0	0	0	0	0	9	9
	기어강도(치폭)	5	9	3	9	3	9	0	0	9	0	0	0	9	0	0	0	0	0	9	9
	기어잇수 및 모듈	5	9	0	9	0	9	0	0	9	0	0	0	9	0	0	0	0	0	9	9
	베어링 종류	5	1	0	1	0	1	0	0	1	3	3	3	1	0	0	0	9	9	0	0
	보증시간	5	9	9	9	9	9	9	9	9	3	3	3	9	9	9	9	9	9	9	9
	엔진정격 출력	5	9	3	9	3	9	3	3	9	0	0	0	9	3	3	3	9	9	9	9
	차량무게	5	3	0	3	0	3	0	0	3	9	9	9	3	0	0	0	0	3	3	3
PTO	PTO 출력효율	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	3	3	3	0	0	1	1	
유압펌프 조합	유압토출 유량	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	
	최대출력	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	
	기계효율	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	
	용적효율	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	

에 관하여서는 기존의 많은 자료를 참고하였다[2, 4, 5, 6, 11].

3. 고장영향 및 메커니즘 분석

3.1 DFMEA 분석

<표 3> QFD에 의한 부품 별 중요도 Top 10

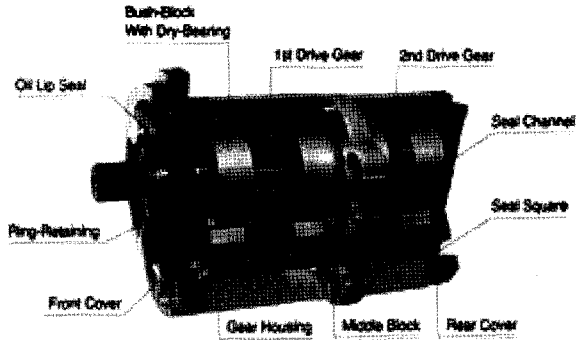
순위	단위 부품	중요도
1	트랜스미션/뒷차축조합-4WD 기어	1238
2	트랜스미션/뒷차축조합-서틀, 주변속 기어	1235
3	앞차축부-기어	1203
4	트랜스미션/뒷차축조합-부변속, 초저속 기어	1193
5	트랜스미션/뒷차축조합-뒷차축부 기어	1117
6	유압펌프조합-기어 1st	1069
7	유압펌프조합-기어 2nd	1069
8	트랜스미션/뒷차축조합-PTO기어	1000
9	앞차축 타이어	687
10	앞차축 케이스	633

DFMEA 항목을 선정하기 위하여 2003~2007년까지 생산하여 미주지역에 수출된 35~50 HP 트랙터 6,956대의 필드 고장 데이터를 조사하였다. 조사한 전체 고장 데이터 중 파워트레인 고장 데이터만을 따로 분류하여 발생된 A/S 클레임 비용을 정리 하였다. 이를 이용하여 DFMEA 항목을 선정하였는데 필드 클레임 비용이 가장 큰 품목 상위 10위까지 선정한 상세 부품 목록은 아래 <표 4>와 같다.

선정된 부품들의 주요 고장 원인 및 고장 메커니즘을 파악하고 가속수명시험(ALT) 부품을 선정하기 위하여 DFMEA를 실시하였다. 우선적으로 DFMEA를 수행하기 위하여 각 부품들의 기능을 명확히 정의하고, 예상되는 고장 형태 및 고장 메커니즘을 파악하였다. DFMEA를 위한 신뢰성기능블럭도(Functional Block Diagram)는 <그림 1>과 같다.

<표 4> 2003~2007 필드클레임 비용

순위	품목	건수	비용(US\$)
1	앞차동장치조합	27	21,760
2	트랜스미션케이스	9	11,648
3	오일시일, O링	29	8,976
4	PTO클러치조합	4	5,600
5	뒷차축, 앞차축	7	3,664
6	브레이크케이스(우)	6	3,424
7	볼베어링	10	3,376
8	롤러베어링	6	2,752
9	스파이럴 베벨기어	6	2,480
10	싱크로조합	2	1,856
합 계		106	\$65,536

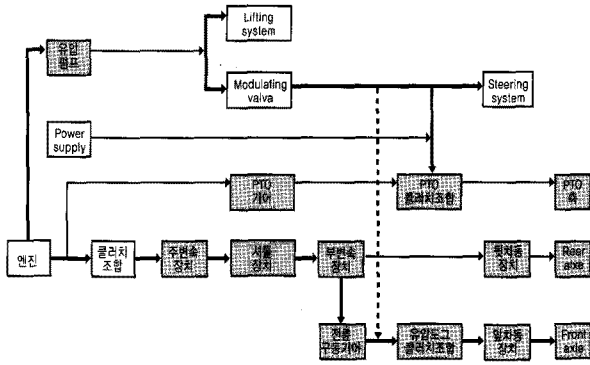


<그림 2> 유압펌프조합의 내부부품 구성도

5년 간의 A/S부품 수량이므로 내구수명의 총 기간을 10년으로 가정하고 앞으로 고장률이 선형적으로 증가한다는

<표 5> 유압펌프조합 DFMEA(일부)

고장 형태	고장의 잠재적영향	심각도	고장 메커니즘	발생도	검출방법	검출도	RPN
전달 유량 저하 전달 유량 부정확	유압부 작동 속도가 저하된다. 스티어링 조작력이 증대된다. 로터작업 속도가 느려진다. 로터리 작업성능이 저하된다. 수평 및 경심 제어가 안된다.	8	이물질발생 -기어소재불량	5	열처리 결과 확인		
			마모 -기어소재불량	5	열처리 결과 확인		
			마모-하우징 소재 불량	5	열처리 결과 확인		
			부압과대-펌프 흡입 홀이작음	6	열처리 결과 확인		
			공기혼입-실링불량-커넥터/파이프 /호스조립불량	6	열처리 결과 확인		
			배압과대-펌프 토출 홀이작음	6	유압펌프 성능시험	3	144
			기어펌프용량 선정 불량	6	로터실차 내구시험	8	384
			누유 발생-시일사양(재질, 크기)불량	6	소재검사 lot별 실시		
유압 파이프 연결 불량	유압펌프 몸체 조립부 파손. 미션오일 누유.	10	알루미늄 몸체 소재 불량	5	성능시험		
			조립토크 기준설정 오류				
			조립토크가 기준치 미달 또는 초과	5			
미션 오일 누유	엔진오일량 증가. 미션오일량 감소. 소음기 백연가스배출. 오일 타는 냄새.	6	오일시일 설계사양(불량 온도, 치수, 재질)	5	로터실차 내구시험	3	90



<그림 1> 파워트레인 신뢰성기능블럭도

고장에 대한 심각도 평가는 고장 형태에 따라 제품 및 소비자에 끼치는 영향력을 분석하고 각 부품별로 정의된 심각도 기준표에 따라 심각도 점수(1~10점)를 평가하였다. 그러나, 고장 메커니즘의 발생 빈도를 정확히 평가하기에는 고장 데이터의 수가 너무 적은 문제점이 있었다. 이는 현재의 고장 데이터가 제조사의 보증기간 내의 고장데이터이기 때문이며, 보증기간 내에 문제가 없는 제품에 대한 정보는 매우 부족하기 때문이다. 따라서 발생도를 좀 더 정확히 평가하기 위해 2003년에서 2007년까지 생산 공장에서 각 대리점으로 보급된 A/S부품 수량을 추가로 파악하였다. 이는 보증기간이 지난 트랙터의 고장발생 빈도를 유추하기 위해서이다. 선정된 부품들 중 일부 부품들이 여러 트랙터에 공용으로 사용되는 부품임을 감안하여 공용 부품을 사용 중인 트랙터들의 총 생산대수에서 35~50 HP 트랙터의 생산대수가 차지하는 비를 구한 다음, 각 공용 A/S부품 수량에 그 비율을 곱하여 FMEA 분석 부품에 대한 A/S부품 수량을 계산하였다. 이렇게 구한 A/S부품 수량은

가정 아래 계산한 A/S부품 수량에 두 배를 곱하여 발생률을 구하였다.

마지막으로 이러한 고장 메커니즘을 현 설계 및 시험 단계에서 검출할 수 있는 검출 방법을 정의하고 검출도 점수(1~10점)를 평가표에 따라 평가하였다. 상기 기준으로 고장 메커니즘 별로 평가된 심각도, 발생도, 검출도의 점수를 모두 곱하여 RPN(위험순위)값을 최종적으로 도출하여 각 부품별 RPN이 높은 고장메커니즘을 선정하였다.

FMEA 분석사례를 보여주기 위해 파워트레인의 주요 모듈 중 하나인 유압펌프조합에 대한 사례를 살펴 보려고

한다. <그림 2>는 유압펌프조합의 내부부품구성도이며, <표 5>는 유압펌프조합에 대한 DFMEA 실시사례이다.

3.2 PFMEA 분석

고장메커니즘을 분석하는데 있어서 설계에 의한 고장 모드 뿐 아니라 제조 공정상 문제로 기인되는 고장모드를 찾아야한다. 제조신뢰성 문제는 Bathtub-Curve 분석에서 주로 초기의 고장으로 나타난다. 고장원인 중 생산현장에서 발생가능한 부적합사항을 각 협력회사의 제조공정

<표 6> 유압펌프조합 PFMEA 결과(일부)

공정명	고장형태	고장의 잠재적 영향	심각도	고장메커니즘	발생도	현 공정 관리	검출도	RPM	권고 조치 사항
하우징 가공	가공불량 (평행도)	펌프효율 저하	8	chip 제거 불량	3	육안 검사	8	192	검사 방식 보완
				셋팅 오류	2	jig 셋팅	4	64	작업 표준 개정
	가공불량 (knocker pin 위치)	펌프효율 저하	8	기계 이설	1	검사지그 확인	3	30	
	가공불량 (치수)	펌프효율 저하	8	공구 세팅 불량	2	검사 지그 확인	3	60	검사 방식 보완
가공불량 (평행도)	펌프효율 저하	8	chip 제거 불량	3	육안 검사	8	192	검사 방식 보완	
			셋팅 오류	2	jig 셋팅	4	64	작업 표준 개정	
가공불량 (knocker pin 위치)	펌프효율 저하	8	기계 이설	1	검사 지그 확인	3	30		
									조립불가능
가공불량 (Seal 홈 깊이)	펌프효율 저하	8	chip 제거 불량	4	육안 검사	8	320	검사 방식 보완	
									조립불가능
가공불량 (치수)	펌프효율 저하	8	공구 세팅 불량	2	검사 지그 확인	3	60	검사 방식 보완	
									조립불가능
가공불량	펌프효율		chip 제거 불량	3	육안 검사	8	192	검사 방식 보완	

<표 7> 파워트레인 핵심 고장 모드 분석(일부)

No.	고장 모드	고장 원인	2차 고장 원인	주요 인자
1	차동 피니언 및 사이드기어 파손	강도 부족	변동 부하	축 토크, 회전수 열처리
		치합 불량	적용 shim(Shim)량 불량 차동 와서 마모	심 두께
		소착	윤활 부족	오일량
		과부하	작업기 개조 포장 지형	작업기 무게 진동, 충격
2	Seal 파손 (찢어짐)	이물질 유입	작업 환경 비 청결	이물질
3	싱크로나이저 링 파손	변속 불량으로 소착	싱크로조합 용량 부족	싱크로나이저 용량
4	시프터 변속빠짐	기어 접촉각 적음	기어 면압 적음	기어 접촉 각도
5	차축 파손	강도 부족	변동 부하	축 토크, 회전수, 기동토크
		과부하	작업기 개조 포장 지형	작업기 무게 진동, 충격
6	유압펌프 기어, 스톱스트블럭과 기어간 소착	윤활 부족	오일 유입이 작다	오일 온도
		강도 부족	변동 부하	압력, 회전수
7	누유	시일 파손	조립시 이물질 혼입 및 가공 Burr 발생	이물질
		가공 불량	O링 취부면 평행도 불량	가공 평행도
		시일 경화	오일 온도 상승	오일 온도
8	유압클러치 디스크 소착	용량 부족	변동 부하	PTO축 토크, 작업기 부하
		디스크(마찰재) 마모, 소손	윤활 부족	윤활 오일량
		스플라인 (케이스, 허브) 마모	강도 부족	축토크, 열처리, 회전수

별로 구분하여 공정상의 부적합 발생에 따른 영향, 발생빈도 및 원인을 규명하고 위험우선순위를 결정하였으며 위험우선순위에 대한 평가에 의거 개선활동을 실시하여 초기고장 감소를 통해 파워트레인의 평균수명 및 B10 Life 연장을 달성할 수 있다.

유압펌프조합의 공정부적합 사항은 주로 가공불량, 동심도 불량, Burr 제거불량, 이물질 유입 등으로 조사되었으며, 이를 제조공정 순으로 구분하여 고장형태를 정의하였다. 각 고장형태별 잠재적 고장영향, 고장영향의 심각도, 잠재적 고장원인 및 메커니즘, 발생빈도, 현 공정 관리방법을 예방과 검출로 구분하여 검출도를 평가하였으며 유압펌프조합의 고장은 펌프 효율저하, 파워트레인 조립 불가능 등 고장의 심각도가 매우 높으므로 현재 정의된 고장뿐만 아니라 협력업체에서 경험하고 있는 공정 부적합사항을 포함한 개선활동을 통하여 펌프조합의 초기 고장이 감소되도록 권고조치사항을 검토하고 개선활동을 실시하였다. <표 6>은 PFMEA 실시 결과이다.

고장원인 중 협력회사 현장에서 발생 가능한 부적합 사항을 각 협력회사의 제조공정별로 구분하였으며, RPN이 높은 공정에 대하여 각 협력회사별로 개선 조치 결과를 정리하였다. PFMEA는 제조과정에서의 신뢰성을 높이는 데 중요한 사항으로 판단하여 신뢰성 향상 대상품 별 설계 변경 및 공정 개선 사항에 반영하였다. 판매된 제품의 고장 데이터와 주요 부품에 대한 PFMEA를 실시한 결과를 토대로 파워트레인의 핵심 고장 모드를 추출할 수 있었으며 그 결과는 <표 7>과 같다.

4. 필드데이터 분석

4.1 신뢰성 데이터 분석 기준

고장 데이터는 무상보증기간 동안 접수된 경우에 대하여 집계가 되고 있다. 그러나 무상보증기간은 국내 판매 분과 해외 수출 분이 다르게 설정되어 있다.

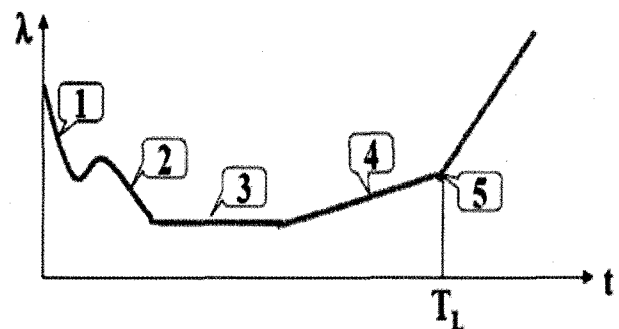
국내의 경우 엔진부 및 미션부는 2년, 그 외의 부위는 1년으로 설정되어 있으며, 해외의 경우에는 2006년 2월까지는 엔진부 및 미션부 3년, 그 외의 부위 2년으로 설정되어 있다. 또한, 2006년 2월 이후에는 엔진 및 미션부 4년으로 기간이 연장되었다. 이러한 점을 고려하여 고장 데이터에 대한 신뢰성 분석은 그 정확성을 높이기 위해 해외 수출 분에 대하여만 실시하였다.

보증기간이 만료되기 전의 고장 데이터는 신뢰성분석에 반영하기 곤란하므로, 분석은 2003년부터 2005년까지 생산된 트랙터의 2003년에서 2007년까지 접수된 고장 데이터를 대상으로 하였다. 동일 트랙터에 대한

중복 고장은 기대번호를 기준으로 하여 최초의 고장이 발생한 시점을 사용하였다.

파워트레인 고장데이터에 의한 신뢰성 분석은 FMEA에서 고장 확률이 높다고 판단된 11개 부품군에 대하여 실시하였다. 주요 고장 부품으로는 앞차동장치조합, 차동케이스카버, 트랜스미션케이스, 브레이크케이스(우), PTO클러치조합, 스파이럴 베벨기어조, 23스파이럴베벨기, 롤러베어링, 볼베어링, 오일시일, O링, 싱크로조합, 뒷차축, 앞차축, 전륜변속암, 포크로부변속, 유압펌프조합 등이다.

파워트레인에 대한 12,000여건의 고장 데이터에 대한 분석을 한 결과, <그림 3>과 같이 전형적인 Bathtub Curve의 형태로 나타났다. 여기서 1번 영역은 초기고장으로 환경에 의한 과부하 고장 메커니즘 또는 결합에 의한 과부하 고장 메커니즘에 의한 문제이므로 초기 3개월에 해당하는 기간의 고장은 제조공정상의 품질 문제로 간주하여 신뢰성 분석에서는 제외하였다[7, 8]. 그림에서 영역 2는 비정상적 오르내림으로 결합에 의한 마모고장 메커니즘으로 분석되며, 영역 3은 과부하 고장 메커니즘에 의한 일정고장으로 해석된다. 영역 4는 사용 중 경사선 고장으로서 사용기간 중의 마모고장 메커니즘이며, 수명시점인 5지점에 이르면 노화에 의한 급격한 마모고장 메커니즘의 영향을 받게 되는 것으로 해석된다 [3].



<그림 3> Bathtub Curve

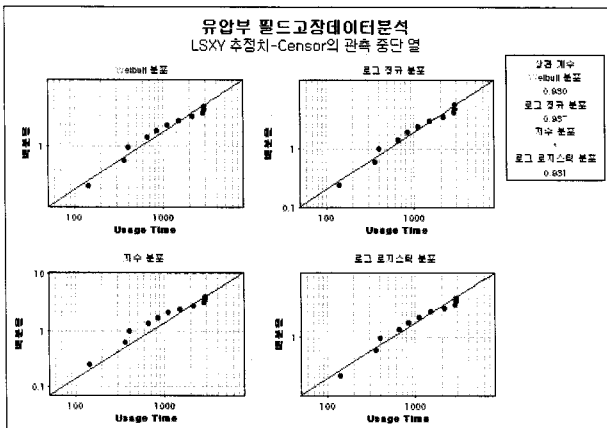
4.2 미니탭에 의한 신뢰성평가

<표 8>은 미주의 M지역에 판매된 제품의 A/S 고장 데이터이다. 사용시간은 A/S 의뢰된 제품만 기록되었고, 보증기간인 3,000시간 이후에 대한 고장정보는 확실하지 않다. 따라서 3,000시간에 관측중단된 것으로 분석을 하였으며, 중단시점까지 문제가 발생하지 않은 제품은 375대 중 264대이었다. 표에서 Censor는 중단시점에 대한 Indicator이다.

<표 8> 미주M지역 A/S 고장 데이터

사용시간 (Hour)	Censor	Count
142	1	1
364	1	1
401	1	1
663	1	1
847	1	1
1108	1	1
1522	1	1
2154	1	1
2796	1	1
2861	1	1
2929	1	1
3000	0	264

아래의 <그림 4>는 Minitab의 ‘분포 ID 그림’ 기능을 이용하여 고장데이터를 주요 분포에 적합 시킨 것이다. 파워트레인에 대한 고장 분포를 신뢰성 분석에 일반적으로 적용하는 Weibull 분포, 로그정규분포 및 로그 로지스틱 분포 중 어느 분포가 적합한지를 보여준다.



<그림 4> 분포 ID 그림

적합한 통계적 분포를 추정하기 위해 주요 분포에 대한 Anderson-Darling 적합도 검정 및 Pearson 상관계수를 확인한 결과는 <표 9>와 같다.

세 개의 분포 중 대수정규 분포(상관계수 0.987)에 가장 적합되나, 와이블 분포(0.981)와 차이가 거의 없으므로 제품의 수명분포로 널리 쓰이는 와이블 분포를 택하여 분석하였다. 와이블분포의 확률밀도함수는

$$f(t, \lambda, \beta) = \lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1} \exp[-(\lambda t)^\beta], t \geq 0$$

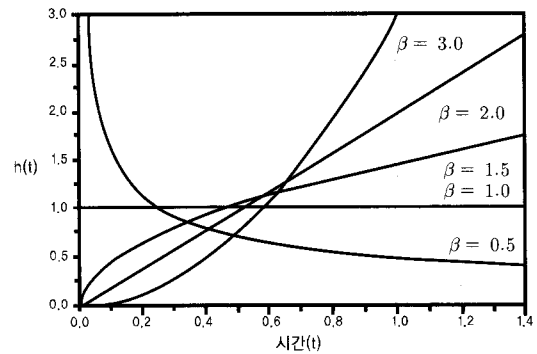
<표 9> Anderson-Darling 적합도 검정

분포	A-D 계수	상관계수
Weibull 분포	269.861	0.981
대수정규 분포	269.861	0.987
로그로지스틱 분포	269.861	0.981

이고, 고장률 함수는

$$h(t) = \lambda\beta(\lambda t)^{\beta-1}, t \geq 0$$

이다. 형상모수 β 에 따른 고장률 함수의 그래프는 <그림 5>와 같다.



<그림 5> Weibull 분포의 고장률 함수

Weibull 분포의 누적분포함수는

$$F(t, \lambda, \beta) = 1 - \exp[-(\lambda t)^\beta], t \geq 0$$

이고, 신뢰도함수는

$$R(t) = \exp[-(\lambda t)^\beta]$$

이다.

평균고장시간은 다음과 같이 계산된다.

$$MTTF = \Gamma(1+1/\beta)/\lambda$$

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

$0 < \beta < 1$: 고장률이 감소한다(DFR, Decreasing Failure Rate).

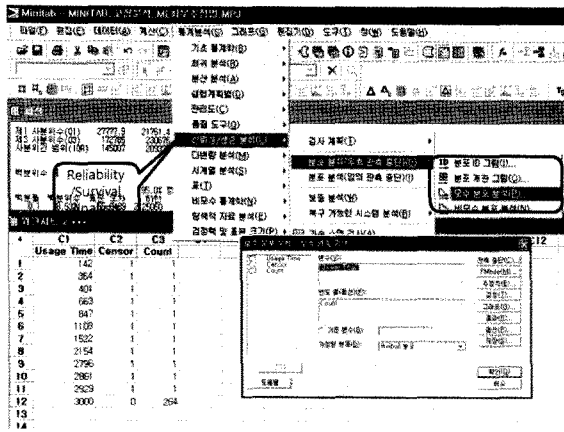
$\beta = 1$: 고장률이 일정하다(CFR, Constant Failure Rate)

- $\beta > 1$: 고장률이 증가한다(IFR, Increasing Failure Rate).
- $1 < \beta < 2$: 시간의 흐름에 따라 서서히 증가함.
- $\beta = 2$: 고장률이 직선적으로 증가함.
- $2 < \beta$: 급격히 증가함.

또한 β 값에 따라 다른 분포를 나타낼 수 있는 장점이 있다.

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

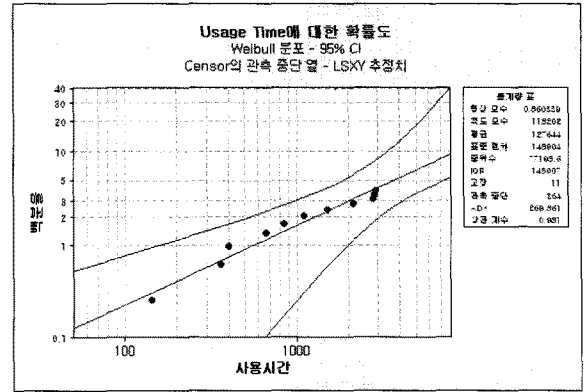
따라서, Weibull 분포는 기계부품(볼 베어링, 모터) 및 피로고장의 모형화에 널리 활용되고 있다. Minitab에 의한 분석은 <그림 6>과 같이 신뢰성/생존분석 메뉴를 사용하였으며, 분석에 있어서 최소제곱법을 주로 사용하고, 최대우도법은 참고 자료로 이용하였다. 이는 최대우도법이 일반적으로 최소제곱법보다 정확한 모수 추정치를 제공할 가능성이 크지만, 소 표본 또는 관측중단비율이 높은 경우에는 최소제곱법이 보다 정확할 수 있으며, 특히 신뢰성 분석에서 많이 이용되는 와이블분포의 경우에는 최대우도법이 형상모수를 과대 추정하는 경향이 있기 때문이다[1].



<그림 6> Minitab 에서의 신뢰성/생존분석

Minitab에 의한 모수분포분석의 결과는 <그림 7>과 같다. 참고로, 미주 M지역으로 수출된 신뢰성 향상 대상 모델의 판매량 275대 중에서 파워트레인에 대한 고장 데이터가 58건에 불과하여 관측중단비율이 96%이다.

Weibull 분포의 모수추정치는 <표 11>에 나타난 것과 같이 형상모수가 0.86으로서 분석기간 중에는 마일리지가 높아질수록 단위시간당 고장률이 감소한다는 것을 알 수 있다. 척도모수는 118,202로서 95% 신뢰구간은(10866, 1285776)이다.



<그림 7> Weibull 모수분포 분석

<표 10> 모수 추정치

모수	추정치	표준 오차	95.0% 정규 CI	
			하한	상한
형상	0.860339	0.276052	0.458722	1.61358
척도	118202	143939	10866.3	1285776

<표 11>의 분포의 특성을 보면, 평균수명은 127,644 시간이고, 25%가 고장나는 시점은 27,777.9시간이 된다.

<표 11> 분포의 특성

	추정치	표준오차	95.0% 정규 CI	
			하한	상한
평균(MTTF)	127644	179436	8117.52	2007141
표준 편차	148904	258285	4970.80	4460497
중위수	77198.6	83937.6	9164.38	650303
제1 분위수 (Q1)	27777.9	21751.4	5986.45	128893
제3 분위수 (Q3)	172785	230676	12621.5	2365375
사분위간 범위(IQR)	145007	209375	8557.43	2457169

<그림 12>의 백분위수 표는 B_0 수명을 나타낸다. 즉, B_5 설계수명은 5%가 고장 나는 시점으로서

$$B_5 = \frac{[-\ln(1-p)]^{\frac{1}{\beta}}}{\lambda} = \frac{[-\ln(0.95)]^{\frac{1}{\beta}}}{\lambda}$$

으로 구할 수 있다. 따라서, <표 12>에서 B_5 시점은 3,743.56 시간이고, 95% 신뢰구간은 (1888.73, 7419.95)시간이다. 가장 많이 활용되는 B_{10} 시점은 8,642.71시간으로 분석되었다.

〈표 12〉 백분위수 표

백분율	백분위수	표준오차	95.0% 정규 CI	
			하한	상한
0.1	38.5371	55.8489	2.25060	659.873
1	562.981	363.919	158.585	1998.59
5	3743.56	1306.71	1888.73	7419.95
10	8642.71	4112.14	3401.38	21960.7
20	20675.8	14455.7	5252.13	81393.1
30	35662.8	30520.4	6664.27	190843
40	54142.6	53057.8	7932.16	369561
50	77198.6	83937.6	9164.38	650303
60	106781	126695	10436.2	1092552
70	146665	188362	11833.8	1817719
80	205517	285444	13508.5	3126704
90	311629	473265	15883.0	6114237
95	423134	683121	17876.0	10015769
99	697485	1235558	21660.8	22459194

파워트레인에 대한 고장 데이터는 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 무상보증 기간인 3,000시간만을 가지고 분석했기 때문에 발생한 결과로 판단된다. 좀 더 장기간의 고장 데이터가 있다면 고장률의 변화를 보다 정확히 추정할 수 있겠으나, 보증 기간 이후의 고장에 대해서는 데이터가 수집되기 곤란한 현실에 비추어보면 보다 많은 필드 테스트 및 사용자에 대한 직접적인 현황 파악이 필요하다고 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 사용자 요구사항(VOC)에 근거한 QFD의 실행과 주요 고장부품에 대한 고장 메커니즘 분석을 통하여 DFMEA(설계단계 잠재적 고장형태 및 영향분석)와 PFMEA(제조공정단계 잠재적 고장형태 및 영향분석)를 통하여 신뢰성평가 절차를 제시하였다. 특히 PFMEA 분석 결과는 중소협력업체의 현장 작업관리, 사용계측기의 관리, 공구교환, 현장 청결유지 및 검사의 실시 등을

보완하는데 활용하여 공정불량과 고객 클레임을 감소시켰다.

신뢰성 향상 대상품의 필드 고장데이터분석을 실행하기 위한 조치로서 신뢰성 Tool을 적용하고, Minitab 소프트웨어를 활용하여 수명 예측 방법을 정립하였다.

향후 추가연구로는 고장모드 및 고장메커니즘을 근거로 한 가속수명모델의 개발이 필요하다. 스트레스 량의 정밀 측정을 통하여 가속계수를 결정하고, 제품에 적합한 가속 수명시험법을 개발하여야 한다. 이를 활용하여 제품별 시험계획을 수립하고 B₁₀ 수명시간을 기준으로 한 신뢰성 향상 목표를 설정한다. 농기계의 특성상 년 중 사용기간이 집중되고 기계가 작동되고 있지 않은 경우에도 노후화는 진행되어 고장발생에 영향을 주게된다. 따라서, 이러한 점을 고려하여 가용수명대비 실제 작동시간을 정확히 평가할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 서순근, 미니랩 신뢰성분석. 이레테크, 281-348, 2007.
- [2] Collins, J. A.; Failure of Materials in Mechanical Design, John Wiley and Sons, 557-568, 1993.
- [3] Crowe, D. and A Feinberg; Design For Reliability, CRC Press, 2001.
- [4] Ford Production System, Failure Mode and Effect Analysis-Handbook Supplement for Machinery, Ford Automotive, 10-29, 1996.
- [5] ISO/TS 16949 : 2009, Quality management systems, 2009.
- [6] Johnson, K. G. and M. K. Khanb; A study into the use of the PFMEA in the automotive industry in the UK, *Journal of Materials Processing Technology*, 348-356, 2003.
- [7] J. D. Power; IQS-Initial Quality Study, J. D. Power and Associates, 2010, 01-03, 2010.
- [8] J. D. Power; VDS-Vehicle Dependability Study, J. D. Power and Associates, 2010, 01-03, 2010.
- [9] Nelson, W.; Applied Life Data Analysis. John Wiley and Sons, 162-180, 1982.
- [10] Hoang, Pham; Handbook of reliability engineering, Springer, 1st edition, ISBN 1852334533, chapter 22, 2003.
- [11] Rhee, S. J. and Kosuke Ishii; Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability, *Advanced Engineering Informatics*, 17 : 179-188, 2003.