신뢰성응용연구
제16권, 제2호. pp.162-170, 2016

자동 전환 개폐기의 신뢰성 향상에 관한 연구*

조형준[1] · 백정호[2] · 여봉기[2] · 강태석[2] · 김길수[2] · 양일영[3] · 유환희[3] · 유상우[3] · 김용수[1†]

[1]경기대학교 산업경영공학과, [2]비츠로테크, [3]한국산업기술시험원

Reliability Improvement of an Auto Transfer Switch*

Hyung Jun Cho[1] · Jung-Ho Baek[2] · Bong-Ki Yeu[2] · Tae-Seok Kang[2] · Kil-Sou Kim[2]
Il Young Yang[3] · Hwan Hee Yoo[3] · Sang Woo Yu[3] · Yong Soo Kim[1†]

[1]Department of Industrial and Management Engineering, Kyonggi University
[2]Vitzro Tech
[3]Korea Testing Laboratory

Purpose: The purpose of this study was to analyze the failure modes of an auto transfer switch (ATS), determine the most common failure mechanisms, and iterate the design to improve reliability.
Methods: We carried out failure mode and effect analysis (FMEA) to determine the failure modes and mechanisms. We identified the parts or modules that required improvement via two-stage quality function deployment based on FMEA, and improvements to reliability were monitored using the Gomperz growth model.
Results: The main failure modes of the ATS were damage to, and deformation of, the stator / movable element due to repetitive movements. Five iterations of design modification were carried out, and the mean time to failure (MTTF) increased to 14,539 cycles, corresponding to 85% of the target MTTF. The Gompertz growth model indicates that the 10th iteration of design modification is expected to achieve the target MTTF.
Conclusion: We improved the reliability of mechanical parts via failure mode analysis, and characterized the iterative improvements in the MTTF using the Gompertz growth model.

Keywords: ATS, FMEA, QFD, Gompertz Growth Model

1. 서 론

자동 전환 개폐기(ATS)는 예기치 못한 사고에 의해 사용전원의 사용이 불가한 경우, 상용전원을 차단하고 비상 발전기의 전원을 목표 시스템에 인가하기 위해 사용되는 장치이다. 즉, 정전 또는 비상시에 전원을 절체 하여 안정적으로 전기를 공급해야하므로 높은 신뢰성이 요구된다. 신뢰성이 높다는 것은 부품 및 시스템이 명시된 기간 동안 어떤 환경조건에서도 이상 없이 원하는 기능이 정상적으로 구현이 된다는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 자동 전환 개폐기의 신뢰성을 향상하기 위해 주요 고장원인 및 스트레스 인자를

* 이 연구는 한국산업기술진흥원 신뢰성향상사업 연구비의 지원으로 수행되었습니다
† 교신저자 kimys@kyonggi.ac.kr
2016년 6월 3일 접수; 2016년 6월 15일 수정본 접수; 2016년 6월 20일 게재 확정.

파악하고 기존 제품의 개선이 수행되어야 한다. 먼저, 고장모드 및 원인을 분석하기 위해 고장모드와 영향도 분석(FMEA)이 활용되며, 진도훈 외[1]는 FMEA를 통해 기계류 시스템에 대한 고장모드와 영향을 분석하고 타 부품 또는 관련 기능의 고장 유발을 파악하였다. 또한, 정원[2]은 QFD와 FMEA, 필드데이터를 활용하여 기계부품에 대한 정확한 신뢰성평가 프로세스를 제안하였으며, 정원선 외[3]는 자동 부하 전환 개폐기를 안정적으로 조작하기 위해 구동부의 주요 고장모드 및 원인을 반영하여 동적 모델을 검증하였다.

ATS는 장시간 사용으로 인한 가동자 및 고정자의 파손 및 변형, 스프링의 탄성 감소 등이 수명에 많은 영향을 미친다. 이종석 외[4]는 자동 부하 전환 개폐기에서 수용가의 고장을 최소화하기 위해 시스템 개선 및 구축을 제안하였으며, 박우진 외[5]는 자동 부하 전환 개폐기에 대한 충격해석을 통해 충격이 수명에 영향을 주는 인자임을 검증하여, 제품 개발 시 동작 메커니즘에 발생하는 충격에 대한 영향을 고려하도록 제안하였다. 송중천 외[6]는 가동자의 전자 반발력을 구하고, 접압력과 관성모텐트를 고려한 동적해석을 통해 성능확보의 기본적인 자료를 얻을 수 있도록 제안하였다. 또한, ATS는 필드환경에 따라 온습도, 온도, 먼지 등 다양한 스트레스에 영향을 받으며, 절체 성능 저하에 따른 아크 발생은 화재 사고로 이어질 가능성이 높다. 따라서 수명주기 중에 노출될 수 있는 환경에 대한 조사가 필요하다. 박정원 외[7]는 환경시험 설계를 통해 저장, 운송, 사용 중에 노출될 수 있는 환경요인에 대한 분석절차를 제안하였다.

이와 같이 노출환경, 고장모드 및 메커니즘을 파악하여 목표 내구수명을 보증하기 위해 필드에서의 사용환경과 부하조건을 정확하게 측정하고, 이를 바탕으로 내구시험을 설계하여 시험을 실시해야 한다. 고정 외[8]는 힘, 토크 등 기계적 부하에 의한 파괴, 마모, 열화, 부식 등의 고장이 발생하는 기계부품의 내구시험 설계를 위한 절차를 제시하였다. 또한 내구시험을 통해 얻은 데이터를 활용하여 신뢰성을 평가해야 한다. 이와 관련하여 장무성 외[9]는 다수의 고장모드를 가지는 기계부품에 대하여 신뢰성 분석방법을 제시하였다. 마지막으로 개선 제품에 대한 신뢰성 시험 및 분석을 수행한 후 추정된 신뢰성 측도를 활용하여 신뢰성이 개선되는 정도를 파악해야한다. 소영국 외[10]는 일반적인 신뢰성 성장시험에서 나타날 수 있는 성장률변화가 발생하였을 경우 Duane 및 AMSAA 모형을 이용하여 고장정보를 반영한 평가방법을 제시하였으며, 고정 외[11]는 자동차, 기계 등 하드웨어에 신뢰성 성장시험을 적용하기 위한 신뢰성 성장 모니터링을 제안하였다. 또한 Kececioglu 외[12]는 Gompertz 모형을 적용하여 신뢰성이 개선되는 정도를 확인할 수 있는 방법론을 제안하였다.

최근 해외 선진사의 경우 신뢰성과 관련된 구체적인 요구기준을 제시하는 등 기업 경쟁력의 핵심요인으로 신뢰성이 부각되고 있다. 그러나 ATS는 국내시장에 판매되지 않는 관계로 직접적인 필드 데이터 분석 및 고장률을 확인하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 ATS의 신뢰성을 향상하기 위해 필드에서 발생할 수 있는 고장 유형을 분석하여 고장 원인을 도출하고 그 결과를 바탕으로 설계를 변경하였으며, 신뢰성 시험을 실시하여 신뢰성 향상을 모니터링 하였다.

2. ATS의 사용환경 및 고장원인 분석

2.1 환경요인 분석

제조상에 문제가 없는 제품이 필드에서 고장 나는 원인 중 가장 큰 비중을 차지하는 것이 설계할 때 고려하지 못한 사용 환경에 노출되는 경우이다. 따라서 ATS의 수명주기 중 겪을 수 있는 환경에 대한 조사가 필요하며, 본 연구에서는 해당 제품의 저장, 운송, 사용 중에 노출될 수 있는 환경요인을 분석하였다. ATS는 일반적으로 수명주기 동안 <Fig. 1>과 같은 예상경로를 거친다. 먼저 공장에서 출하되어 트럭으로 선착장까지 운송 후 대기된다. 이후 배로 수출지역까지 운송되어 판매지역 창고에 보관되고, 차로 소비자 집까지 운송 후 실내에서 사용된다.

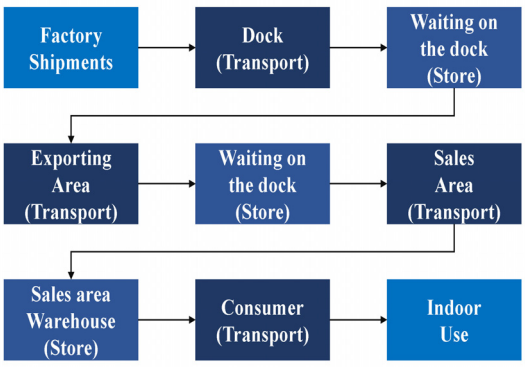


Fig. 1 Predictive path during life cycle of ATS

박정원 외[5]의 연구에서 제시한 수명주기 중에 노출될 수 있는 환경요인을 참고하여 <Table 1>과 같이 ATS가 신뢰성에 영향을 미칠 수 있는 주요 환경요인을 작성하였다.

Table 1 Induced environment during life cycle of ATS

		Induced environment	Natural environment
Transportation	Vehicle	- Road shock & Vibration - Mishandling shock	High temperature, Low temperature, Rain, Hail, Sand and Dust
	Train	- Rail shock & Vibration - Mishandling shock	High temperature, Low temperature, Rain, Hail, Sand and Dust
	Vessel	- Shock of Wave & Storm - Mishandling shock	High temperature, Low temperature, Rain, Salt fog
Store	Indoor	-	High temperature, Low temperature, Rain, Salt fog, Fungus
	Outdoor	-	High temperature, Low temperature, Freeze, Rain, Hail, Sand and Dust, Salt fog, Sunshine, Fungus
Use	Indoor	- Mishandling shock	Shock, High temperature, Low temperature, Humidity, Immersion

Table 2 FMEA of ATS

Part name	Failure symptom	Failure Mode	Failure mechanism	Occurrence (1~10)
Movable element	Transport current decrease	Arc strike	Electrical stress	5
	Heating	Contact resistance increment	Electrical stress	4
	Changeover failure	Break	Fatigue by repetitive movement	9
Stator	Transport current decrease	Arc strike	Electrical stress	4
	Bend	Contact resistance increment Arc strike	Fatigue by repetitive movement	5
	Contact departure	Contact resistance increment / Transport current decrease	Fatigue by repetitive movement	5
Lead wire	Heating	Coil disconnection	Fatigue by repetitive movement	7
	Changeover failure	Joint disconnection	Fatigue by repetitive movement	7
Moving coil	Changeover failure	Disconnection	Coil degradation and by long term use / Exposure to high temperature	1
	Switchover speed decrease	Coil resistance increment / Operating current increment	Coil degradation and by long term use	1
Bridge diode	Changeover failure	Sort-circuit / Disconnection	Degradation by electrical over stress and high temperature	1
Varistor (TNR)	Changeover failure	Destruction	Degradation by electrical over stress and high temperature	1
Micro switch	Coil heating	Poor Contact	Contact damage by log term use	1
	Changeover failure	Contact / short circuit	Coil disconnection by incoming over current	1
Export / Accessory	Warp	Deformation	Deformation of injection by high temperature and temperature change	2
Metallic part	Corrosion	Corrosion	Corrosion by temperature and humidity	2
Bond	Disassembly part	Secession / Deformation	Vibration and Shock	2

*10 Point : Occurrence frequency of failure is very high, 1 Point : Occurrence frequency of failure is very low.

2.2 고장 메커니즘 분석

일반적으로 ATS의 A/S 및 클레임, 필드 재현시험 등을 통하여 고장모드 분석을 실시한 결과 크게 기계적, 전기적으로 가동부와 가동코일 모듈에서 주로 고장이 발생했다. 또한 장시간 사용으로 인하여 접점의 마모, 스프링 탄성 감소로 인한 성능 절하, 가동자 및 고정자의 부러짐, 리드와이어의 단선 등이 발생한다. 본 연구에서는 ATS의 노출 환경과 구성품과의 관계, 기존 고장 발생 현황 등을 고려하여<Table 2>와 같이 FMEA를 작성하였다.

2.3 고장 원인 및 스트레스 인자 도출

FMEA 결과를 바탕으로 주요 고장 원인과 유효 스트레스 인자를 정량화 하고 순위를 확인하기 위하여 2 Stage QFD를 다음과 같이 실시하였다. <Table 3>은 QFD 1단계 매트릭스를 나타낸 것이다. QFD 1단계 결과 ATS의 주 고장부위는 고정자 및 가동자, 리드와이어 등으로 추정되었고, 주요 고장원인은 피로(동작)으로 확인되었다.

QFD 2단계는 1단계에서 우선적으로 개선이 필요한 부품 및 모듈의 고장모드 및 메커니즘을 확인할 수

Table 3 Step 1 QFD: analysis between failure mechanism and failure cause

Failure mechanism / Failure cause	Stator/Movable element of damage and deformation	Lead wire of disconnection	Contact resistance increment	Deformation of injection	Joint failure	Metal part Corrosion
Low temperature	-	◇	-	◇	◇	-
High temperature	◇	-	◇	○	-	◇
Temperature change	○	-	-	◎	-	-
High temperature and humidity	◇	-	◇	-	-	○
Vibration and Shock	○	○	-	○	○	-
Salt fog	○	◇	-	-	-	○
Fatigue(operation)	◎	◎	○	-	-	-

1 Marking in accordance with importance of reliability: ◎Very important ○ important ◇ Moderate
2 Failure mechanism indicates all failure modes involved in those materials and components.

Table 4 Step 2 QFD: analysis between test method and failure mechanism

Test method / Failure mechanism	Low temperature	High temperature	Temperature change	High temperature and humidity	Vibration	Shock	Salt spray	Continuos operation
Stator/Movable element of damage and deformation	-	◇	○	◇	○	○	○	◎
Lead wire of disconnection	◇	-	-	-	○	◇	◇	◎
Contact resistance increment	-	◇	-	◇	-	-	-	○
Deformation of injection	◇	○	◎	-	○	○	-	-
Joint failure	◇	-	-	-	○	○	-	-
Metal part Corrosion	-	◇	-	○	-	-	○	-

1 Marking in accordance with importance of reliability : ◎Very important ○ important ◇ Moderate
2 Failure mechanism indicates all failure modes involved in those materials and components.
3 Test method indicates environment test involved in those failure.

있는 시험방법을 결정한다. <Table 4>는 국내 및 국제 규격 등을 적용하여 QFD 2단계를 도출하였다.

3. 신뢰성 향상을 위한 설계 변경 및 시험장치 개발

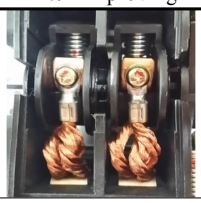
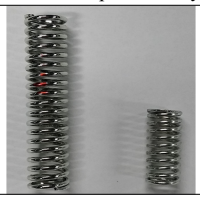
3.1 ATS 설계 변경

수요 기업의 요구조건과 제품 특성 상 ATS는 높은 수준의 신뢰성이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 ATS HS 100A 제품의 신뢰성 향상을 위해 FMEA와 QFD로부터 도출된 결과를 바탕으로 <Table 5>과 같이 설계를 변경 하였다.

3.2 ATS 신뢰성 시험장치 개발

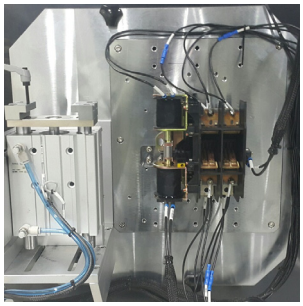
ATS의 고장모드 분석에 따른 주요 고장 메커니즘은 반복 동작이다. 따라서 상온 조건에서 ATS의 동작 사양(ON/OFF 사이클)에 따라 분당 1 회씩 반복동작

Table 5 Design change of ATS HS 100A

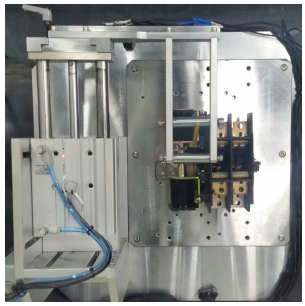
No	Before improving	After improving
1		
	(a) Lead wire ring terminals pressing	(b) Spot welding
2		
	(c) Contact brazing after Press	(d) Press after contact brazing
3		
	(e) Movable element embo 1.0mm	(f) Embo 0.0mm, 0.5mm
4		
	(g) Embo separation type	(h) Embo integral type
5		
	(i) Closing spring & Wipe spring	(j) Closing & Wipe Spring: 80%, 90%, 95%

(a) Tester appearance

(b) Control panel



(c) Electrical operating test



(d) Mechanical operating test

Fig. 2 Reliability test equipment of ATS

이 가능하도록 하였다. 또한, 전원인가 및 사이클 시간을 정확하게 맞추기 위하여 전용 장비를 이용해 지정된 사이클 동안ON/OFF를 반복하도록 하였다.

<Fig. 2>와 같이 ATS의 전기적 동작과 기계적 동작 시험을 수행할 수 있으며, 전기적 동작 시험은 완제품 및 가동코일 모듈의 수명 측정 시 사용한다. 또한 기계적 동작 시험은 고정자, 가동자, 리드와이어 모듈 수명 측정 시 사용하게 된다.

내구성 수명시험은 시간이 많이 소요되기 때문에3대를 동시 시험할 수 있도록 시험 장치를 설계하였다. 또한 주접점 및 보조접점을 자동 감지하여24시간 동작이 가능하며, 고장 즉시 멈추도록 하였다.

4. 개선품 신뢰성 시험 및 결과

4.1 개선품 내구성시험 조건

무부하 개폐 내구성시험에 있어서 절체(Cycle)속도 기준을 아래의 <Table 6>과 같이 UL규격의 원칙으로

Table 6 UL 1008 standard of ATS

Switch rating	Rate of operation[a]	Number of cycles of operation		
		With current[b]	Without current	Total
0 ~ 300	1 per minute	4,000	2,000	6,000
301 ~ 400	1 per minute	1,000	3,000	4,000
401 ~ 600	1 per minute	1,000	2,000	3,000
601 ~ 1,600	1 per 2 minute	500	2,000	2,500
1,601 ~ 2,500	1 per 4 minute	500	2,000	2,500
Over 2,500	1 per 4 minute	250	1,250	1,500

[a] Conducting the test at a faster rate is not prohibited if agreeable th those concerned. but not faster than one operation per minute for tungsten ratings unless a synthetic load is employed.
[b] The test shall be conducted at 100 percent of rated current.

시행하였다. 인가전압은 240V이며, 상온 25±5°C에서 분당 1회씩 반복동작을 시키는 것으로 하였다. UL 기준에서 요구하는 MTTF는 6,000회이며, 수요 기업에서는 약 20,000회를 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 양산품의 설계 변경을 통해 목표MTTF를 달성하도록 하였다.

4.2 개선품 내구성시험 결과

1차 개선품은 내구시험 결과 가동자와 리드와이어의 절체 진동으로 인한 볼트의 풀림 현상은 사라졌으나, 개선 전과 동일하게 가동자에 크랙이 발생하면서 간헐적 접촉 불량 또는 휘어지거나 부러지는 현상이 발생하였다. 2차 개선품은 1차 개선품에서 빈번하게 발생한 가동자의 접점이 용접부에 이탈되는 현상을 개선하기 위해 가동자 공정순서를 변경하였다. 3차 개선품은 2차 개선품의 고장을 참고하여 Wipe Spring 부분의 가동자가 부러지는 현상을 개선하기 위해 Wipe Spring의 위치를 고정해주는 엠보의 눌림양을 1.0mm에서 0.5mm와 0.0mm로 조절하였다.

4차 개선품은 가동자가 휘어지고 부러지는 현상을 개선하기 위해 Wipe Spring 고정부까지 일체형으로 엠보 굴곡을 주어 구부러짐을 방지하였으며, 고정자와 가동자간의 접점이 코일의 기자력에 의해 닫는 충격에 의한 고장을 고려하여 저전압 80% 개폐수명 시험을 동시에 진행하였다. 시험 후 가동자 엠보일체형 개선품의 상태를 확인한 결과 Wipe Spring이 이탈하는 현상이 나타났으며, 가동자 파손, 접촉 불량 등은 이전 고장모드와 유사하였다. 또한, 가동자일체형에 저전압 80%로 수명 시험을 실시한 결과 접촉 불량의 고장모드가 발생하였다.

5차 개선품은 4차 개선품의 엠보일체형과 저전압 80%의 시료에서 개선효과를 보였으므로, 4차 개선품에 투입 Spring과 Wipe spring을 복합적으로 적용하여 개폐수명 시험을 진행하였다. 시험 후 시료 분석 결과 4차 개선품보다 향상 될 것으로 예상하였으나 동일한 고장모드가 발생하였고, 추가적으로 가동자를 브레이징 한 접점부가 이탈하는 현상이 발견되었다. 각 개선품의 내구성시험과 신뢰성 평가를 실시한 결과<Table 7>과 같이 UL 기준에서 요구하는 MTTF 6,000회를 만족하는 것으로 확인되었다. 그러나 목표MTTF를 달성하기 위해서는 추가 개선이 필요한 것으로 나타났다.

4.3 개선품의 신뢰성 성장모형

신뢰성 성장모형은 설계된 제품의 시제품을 제작하여 시험을 실시하고, 시험으로부터 발견된 결함을 개선해나가는 과정을 통해 신뢰성이 개선되는 정도를 확인할 수 있는 모형이다. 즉, 목표 신뢰성을 달성하기 위해 체계적인 계획을 수립하고 데이터를 분석하여 목표와 실적을 비교함으로써 신뢰성 목표를 달성할 수 있다.

Table 7 Reliability analysis results of improved products

No	Sample	Distribution	Scale parameter	Shape parameter	Confidence level: 95% MTTF (cycle)	Target MTTF (cycle)
1	-	Weibull	8,385	8.20	7,909	20,000
2	-		8,795	3.33	7,893	
3	Embo 0.0mm		8,504	9.67	8,078	
	Embo 0.5mm		8,381	7.74	7,880	
4	Embo integral type		10,934	19.60	12,697	
	Voltage 80%		15,269	10.37	14,546	
5	Closing 95% & Wipe 80%		12,245	12.20	11,741	
	Closing 80% & Wipe 100%		13,001	6.10	12,073	
	Closing 95% & Wipe 100%		12,081	61.00	11,970	
	Closing 80% & Wipe 80%		13,898	29.40	13,641	

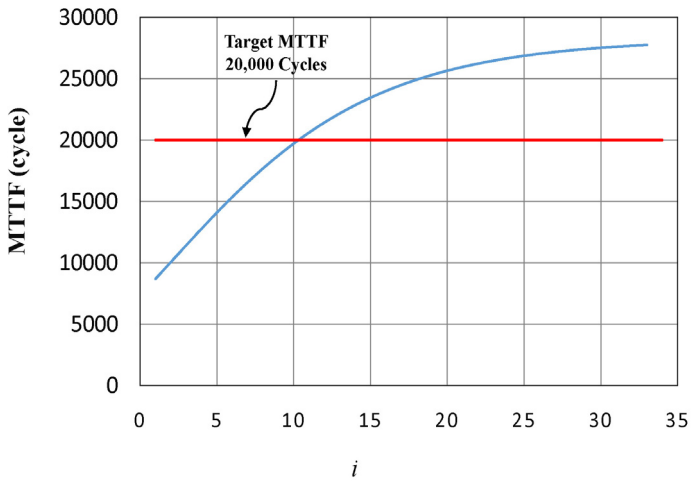


Fig. 3 Gompertz growth model of HS 100A

본 연구에서는 Gompertz 모형을 통해 HS 100A의 성장 과정을 모니터링 하였다. Gompertz 모형은 특정 제품이 개발시간, 누적시험시간, 임무횟수 내에서 신뢰성을 얼마나 달성하는지 예측하며, 성장모형의 식은 아래와 같이 정의된다. 이때, Y_i는 개선횟수 i시점의 MTTF, a는 Y의 상한 점근값, b와 c는 모수, i는 개선횟수를 뜻한다.

$$Y_i = ab^{c^i} \quad (0 < b < 1,\ 0 < c < 1)$$

HS 100A는 총 5차 개선이 수행되었으며, 각 개선품에서 신뢰성 시험을 통해 추정된 MTTF를 활용하여 다음과 같이 Gompertz 성장모형 식을 산출하였다.

$$Y_i = 28234.50 \times (0.261)^{0.876^i}$$

산출된 식을 통해 HS 100A는 위의 <Fig. 3>과 같이 개선회수에 따라 어느 시점에서 MTTF가 목표치에 도달하는지 예측할 수 있다. 선진사의 요구조건은 MTTF 20,000회이며, 약 10차 개선 시점에서 목표치를 달성할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 연구에서는 선진사가 요구하는 신뢰성을 확보하기 위해 ATS의 고장모드 및 메커니즘을 분석하기 위해 FMEA를 실시하였고, 이를 바탕으로 QFD를 작성하여 개선이 필요한 부품 및 모듈을 결정하였다. 또한, 해당 제품을 개선하고, 각 개선품에 대한 내구성 시험을 실시하여 신뢰성의 성장과정을 모니터링 하였다. ATS의 주요 고장원인은 반복동작에 의한 고정자/가동자의 파손 및 변형으로 나타났으며, 총 5차 설계 변경을 수행하여 각 개선품에 대한 신뢰성 시험 및 분석을 실시하였다.

개선 전에 발생하였던 고장모드는 개선품에서도 유사하게 발생하였으나, 4차 개선품의 MTTF가 14,538회로 목표 MTTF의 약 85%를 달성하였다. 또한 도출된 결과를 바탕으로 기존 HS 100A의 양산품을 대상으로 신뢰성 성장시험을 통해 개선회수에 따라 해당 제품의 신뢰성이 목표치에 어느 정도 도달했는지 모니터링 하였으며, 약 10차 개선시점에 목표치를 달성할 것으로 예상된다. 향후 HS 200A의 제품에 대하여 동일한 방법을 적용하여 신뢰성을 향상하도록 할 예정이다.

References

[1] Chin, D. H., Woo, T. S. and Lee, C. W. (2002). “Reliability Analysis of Machinery System for Failure Mode and Effect Analysis”. Proceedings of the KSMTE Autumn Conference, pp. 30-35.

[2] Jung, W. (2010). “Reliability Estimation of Agricultural

Machinery Components Based on QFD and Failure Mechanism Analysis". Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 209-217.

[3] Chung, W. S., Kwon, B. H., Ahn, K. Y. and Oh, I. S. (2003). "Dynamic Analysis of Driving Mechanism for ALTS with High-Speed Transfer Characteristics". Proceedings of the KSME 2003 Spring Annual Meeting, pp. 1530-1535.

[4] Yi, J. S., Lee, E. C., Kang, G. E., Sin, H. S. and Choi, M. C. (2015). "A Study on Operating of Automatic Load Transfer Switches(ATLS)". Proceedings of KIEE Annual Conference, pp. 199-199.

[5] Park, W. J., Ahn, K. Y. and Jeong, K. Y. (2005). "Impact and Fatigue Analysis of Superposed Leaf Spring in Electric Power Switch". Proceedings of the KSPE 2005 Autumn Conference, pp. 800-803.

[6] Song, J. C., Kim, Y. G., Ryu, M. J. and Seo, J. M. (2002). "Dynamic Motion Analysis of a Moving Contact by Electromagnetic Repulsion Force in MCCB". Proceedings of the KIEE Summer Conference, pp. 786-789.

[7] Park, J. W. *et al*. (2005). "Design of Environmental Tests". Journal of Applied Reliability, Vol. 5, No. 3, pp. 301-314.

[8] Koh, J. *et al*. (2005). "Design of Durability Test for Mechanical Components". Journal of Applied Reliability, Vol. 5, No. 2, pp. 193-202.

[9] Chang, M. S., Choi, B. O., Kang, B. S., Park, J. W. and Lee, C. S. (2013). "Reliability Analysis of Mechanical Component with Multiple Failure Modes". Transactions of the KSME A, Vol. 37, No. 9, pp. 1169-1174.

[10] So, Y. K., Jeon, Y. R. and Ryu, B. J. (2014). "Assessing Process and Method Improvement of Reliability Growth Test Data with Growth Rate Changing During Testing". Journal of Applied Reliability, Vol. 14, No. 2, pp. 129-136.

[11] Ko, J. *et al*. (2006). "Reliability Growth Program". Journal of Applied Reliability, Vol. 6, No. 1, pp. 13-26.

[12] Kececioglu, D., Jiang, S. and Vassiliou, P. (1994). "The modified Gompertz reliability growth model". Reliability and Maintainability Symposium, 1994. Proceedings. Annual. IEEE, pp. 160-165.