

비례압력제어밸브의 신뢰성에 영향을 미치는 인자에 대한 고찰

Study on Design Parameters impacted into Reliability of a Proportional Pressure Control Valve

윤 소 남

S. N. Yun

1. 서 론

먼저, 이 해설을 읽기 전에 밝혀둘 것은, 순수한 신뢰성 설계 문제로 해당 비례압력제어밸브를 연구하는 과정에서 유압유의 오염에 의한 고장이 매우 치명적이며, 고장 빈도도 높다는 것이 확인되었다. 따라서, 이 해설은 직접적으로 유압시스템의 윤활문제를 다루고 있지는 않지만, 마찰이나 마모의 원인이 되는 오염도의 중요성을 제시하게 되면 유공압 관련 연구자나 사용자들이 윤활 문제를 고려한 설계에 관심을 가질 수 있을 것이라는 기대감이 있었기에 가능했다.

유공압 시스템 및 부품 역시 설계/제작/시험, 품질관리, 신뢰성, 안전의 4대 요소가 가미되어 개발이 이루어진다.

신뢰성은 “아이템(대상 제품 혹은 부품)이 주어진 시간 동안 주어진 조건에서 요구 기능을 수행할 수 있는 가능성”으로 정의되고, 신뢰도는 “시스템이나 제품, 부품 등이 주어진 조건에서, 규정의 기간 중 요구되어진 기능을 달성하는 확률” 정의되어 있다. 여기에서 아이템이라 하면, 개별적으로 고려될 수 있는 단품, 부품, 디바이스, 서브시스템, 기능 유닛, 장비 또는 시스템을 의미하며, 광의적으로는 하드웨어, 소프트웨어 또는 이들 모두로 구성될 수 있고, 특별한 경우에는 사람을 포함할 수도 있다. 또한, 여러 아이템들이 하나의 아이템으로 간주될 수 있다.

주어진 기간의 의미는 아이템의 임무 수행을 위하여 설정된 목표 시간이며, 시간은 단순히 시간(time)이라는 척도 이외에 아이템의 특성에 따라 사용 회수, 거리 및 사이클 등이 될 수 있다. 목표 시간이 명시된 건축물, 인공위성 등의 아이템도 있고, 일반 소비자를 대상으로 하는 가전제품과 같이 묵시적인 아이템도 있다. 또한, 목표 시간이 성능 규격으로 명시되기도 한다. 주어진 조건의 의미는 아이템을 사용하기 시작하여 폐기될 때까지 아이템의 기능과 성능에 영향을 줄 수 있는 모든 조건으로, 환경 조건과 사용

조건으로 나눌 수 있다. 환경 조건은 온도, 습도, 진동 또는 소음 등 외부로부터의 자연적인 조건들이 있으며, 사용 조건에는 설치 장소, 연속 사용 시간과 사용 회수 등 사용자의 조절이 가능한 조건들이 있다. 부품의 경우, 완제품 제조업체의 제조 공정도 포함한다.

본 해설에서는 2단형 비례압력제어밸브를 대상으로 하여, 신뢰성 설계 및 시험에 대한 기초적인 정보를 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 본 해설에서는 신뢰성 블록선도에서 품질기능전개까지 만을 고려하는 것으로 한다. 또한 이 해설을 통하여 2단형 비례전자밸브를 구성하는 부품들 중에서 중요도를 결정하기로 하며, 더 나아가서는 시험항목들을 제안하고, 제안된 시험항목들 중에서 어떠한 시험항목이 2단형 비례압력제어밸브의 성능과 신뢰성을 향상시키는 데 핵심적인 역할을 하는지에 대한 고찰도 하기로 한다.

서두에서도 언급했던 바와 같이, 이 해설은 신뢰성 전반에 걸친 연구 과정에서 나온 결과이기 때문에 되도록 최하위의 데이터를 모두 수록하는 것으로 하였다.

2. 신뢰성 해석 대상 및 전개 방법

그림 1은 신뢰성 설계의 흐름도를 보이는 것으로, 신뢰성 설계 및 평가 절차에 대해서 개발 대상 제품의 설계 초기에서부터 개발 마지막 단계에 이르기까지의 흐름을 정리하여 나타낸 것이다. 그림 1과 같이 제품을 설계하기 전과 신뢰성 시험항목을 결정할 때에 품질기능전개를 하게 되는데, 이 해설에서는 후자의 품질 기능 전개만을 하는 것으로 한다. 또한, 고장 나무분석(FTA)을 하고 난 뒤에 고장모드 및 영향분석(FMEA) 혹은 고장모드 및 메카니즘 분석(FMMA)을 바로 수행하는 것이 보다 시스템을 이해하고, 좀 더 명확한 시험항목을 도출시키는데 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

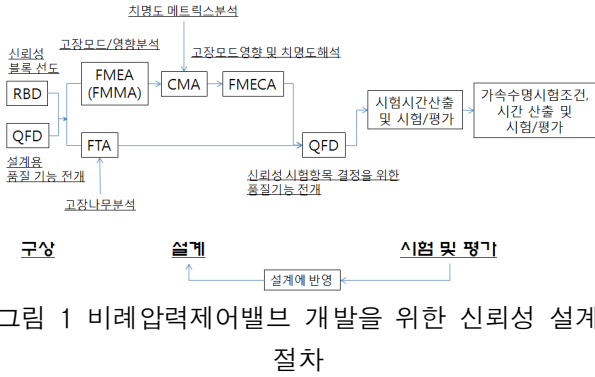


그림 1 비례압력제어밸브 개발을 위한 신뢰성 설계 절차

그림 2는 본 해설 대상인 2단으로 구동되는 비례압력제어밸브의 개략도를 나타내는 그림이다. 밸브의 구성은 크게 비례솔레노이드 액추에이터, 파이로트 밸브, 안전밸브 및 메인밸브로 이루어져 있다. 또한, 유압작동유 내에서 선형 작동되는 요소로서는 가동자, 파이로트 밸브용 포켓, 안전밸브용 포켓 및 메인밸브용 포켓이 있으며, 회로의 안정성 개선 방안으로 밸브 블록 내에 많은 오리피스들이 설치되어 있다. 이들은 모두 유체의 오염에 노출되어 구동되고 있으며, 더 나아가서는 윤활 문제로 귀착되기 때문에 비교적 상세히 다루어야 할 분야이기도 하다.

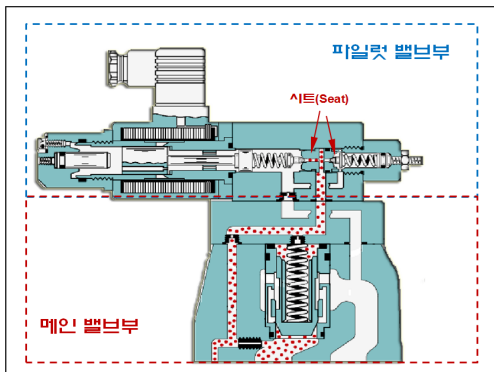


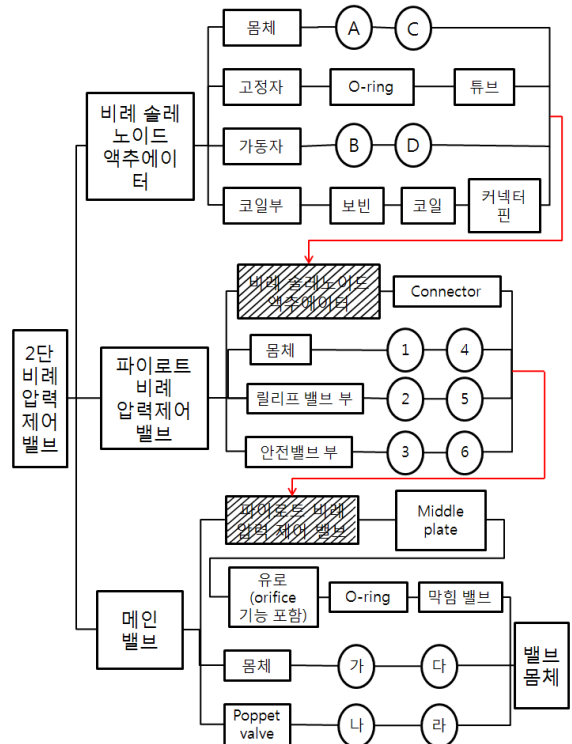
그림 2 해설 대상 2단 비례압력제어밸브의 개략도

3. 해석 결과 및 분석

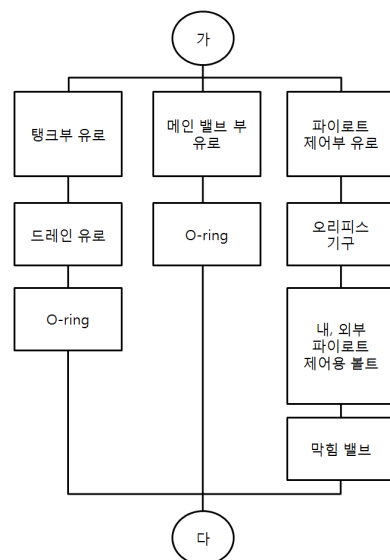
3.1 신뢰성 블록선도(RBD)

신뢰성 블록선도(Reliability Block Diagram)는 진술한 바와 같이 “제품이 정상적으로 작동할 확률과 작동 경로를 파악하는 그래피컬한 기법”이며, 본 해설에서 대상으로 하는 밸브는 그림 3과 같이 크게 비례솔레노이드 액추에이터, 파이로트 비례압력제어밸브, 메인밸브로 나누어서 각각의 부품에 대한 블록을 구성하였다. 표현 공간의 부족으로 1, 2 혹은 A, B 혹은 가, 나 방식으로 축약된 블록들이 있는데, 이 해설

의 전반에 걸쳐 필요한 부분에서 나열하는 것으로 한다. 비례솔레노이드 액추에이터에서 A와 C는 비례솔레노이드 액추에이터를 구성하는 몸체 부위를 분해한 것이고, B와 D는 가동자의 부품들을 분해한 것이다. 또한, 파이로트 비례압력제어밸브에 있어서, 1과 4는 몸체의 부품들을 분해한 것이고, 2와 5는 릴리프 밸브를 분해한 것이고, 3과 6은 안전밸브 부를 분해한 것이다. 몸체 ㉠-㉡의 예는 그림 3의 b)에 나타내었다.



a) 조립체 신뢰성 블록선도



b) 메인밸브 몸체의 신뢰성 블록선도

그림 3 2단 비례압력제어밸브의 신뢰성 블록선도

3.2 고장나무 분석(FTA)

2단 비례압력제어밸브에 있어 고장나무를 작성하는 과정에 있어서는 기존의 고장분석 및 진단 관련 자료를 이용하였으며, 특히 유압 관련 서적으로부터 많은 인용이 있었다. 본 해설의 대상인 2단 비례압력 제어밸브는 솔레노이드 및 파이로트비례압력제어밸브로 이루어진 1단과 메인밸브로 이루어진 2단의 구조를 가지고 있으며, 크게 솔레노이드 액추에이터 부, 파이로트 밸브 부, 메인밸브 부로 나누어 생각 할 수 있다. 고장나무를 고려할 때는 우선적으로는 압력제어 여부를 가지고 솔레노이드 액추에이터, 파이로트 밸브, 안전밸브, 메인밸브의 고장을 유추할 수 있다. 이와 같은 절차를 통하여 분석된 고장나무 분석 결과를 나타내면 다음과 같다.

그림 4는 해설 대상 2단 비례압력제어밸브의 주목적인 압력이 제어되지 않을 때의 고장나무분석 결과를 도시한 것으로, 여기에서 SN은 솔레노이드, PV는 파이로트 밸브, SV는 안전밸브, MV는 메인밸브를 의미한다.

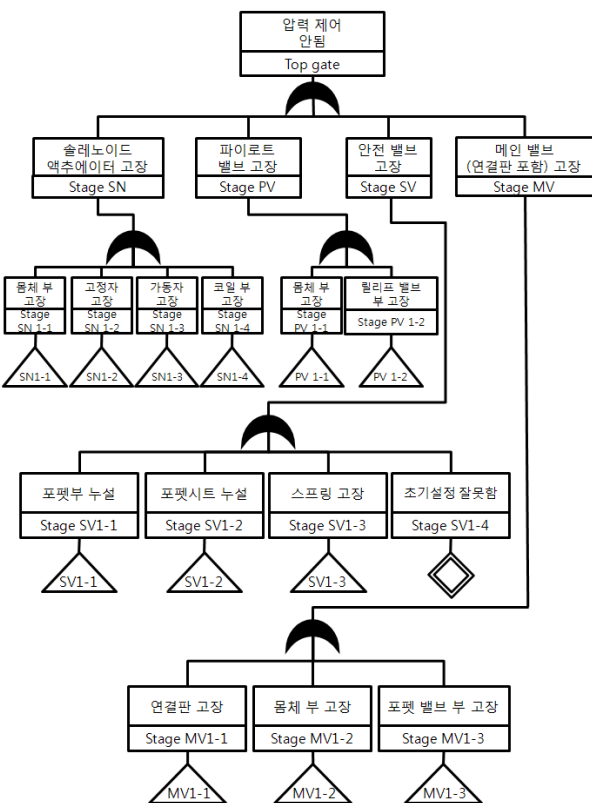
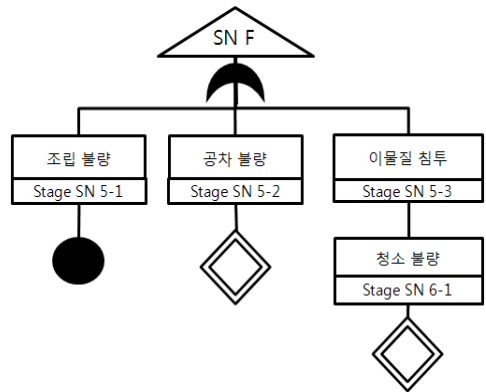


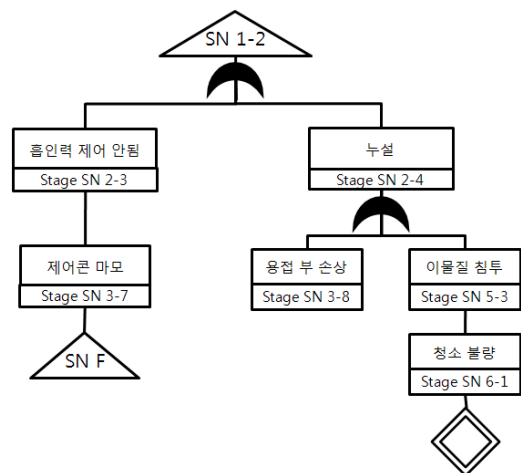
그림 4 2단 비례압력제어밸브에서 압력이 제어되지 않을 때의 고장나무 분석 결과

그림 5는 비례솔레노이드부 고장시의 FTA를 나타낸 것으로, 코일부를 제외하고는 주로 조립 불량, 공

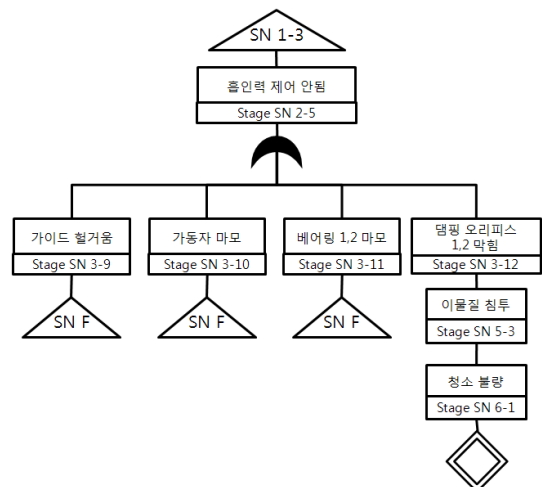
차 불량, 청소 불량에 의해서 몸체부가 고장이 나고 있다는 것을 알 수 있다. 결국, 설계 단계에서 공차 불량 요소를 제거하고, 조립단계에서 문제점을 해결하고 나면 운용단계에서는 거의 작동유의 이물질 침투에 의한 고장으로 볼 수 있다.



a) 비례솔레노이드 몸체부 FTA



b) 비례솔레노이드 고정자부 FTA



c) 비례솔레노이드 가동자부 FTA

그림 5 비례솔레노이드부의 고장나무분석 결과

그림 6은 파이로트밸브 고장시의 FTA를 나타낸 것으로, 파이로트밸브 또한 유체내에서 작동하는 부위는 오염에 의한 마모에 의해 고장이 빈번히 일어난고 있음을 예측할 수 있다.

그림 7은 밸브가 과부하일 때, 안전밸브가 동작하지 않는 경우의 FTA를 보이는 것으로, 치명적인 고장 요소가 오염도 관리 및 초기 설계시의 문제로 귀착되고 있음을 확인할 수 있다.

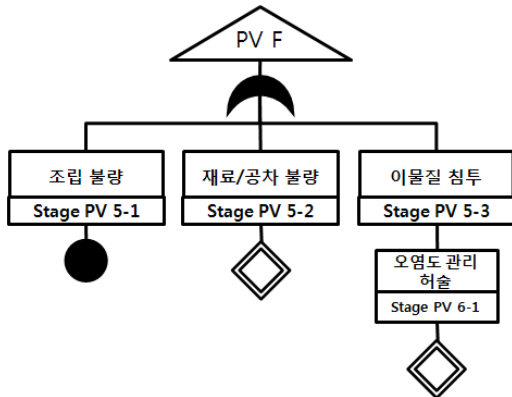


그림 6 파이로트밸브부의 FTA

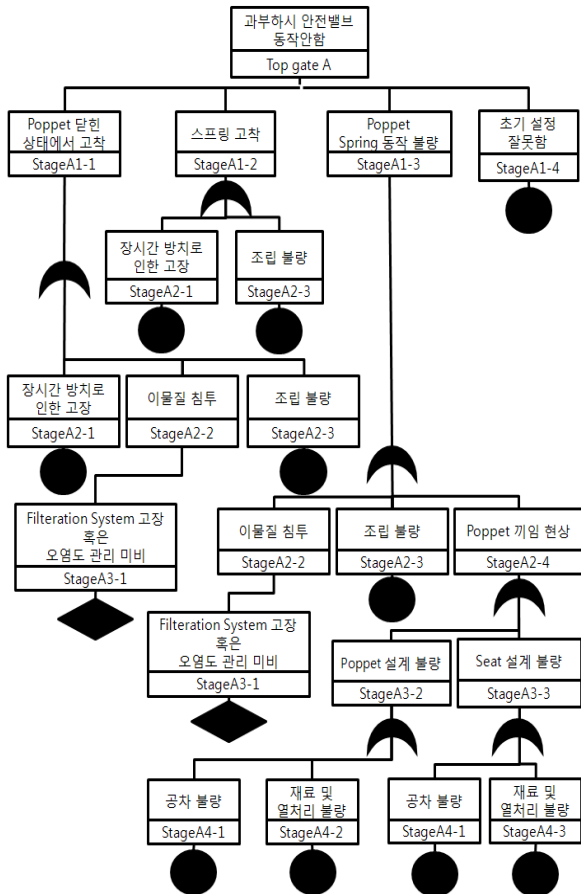


그림 7 과부하시에 안전밸브가 동작하지 않을 때의 FTA

3.3 고장모드/영향 및 메커니즘 해석

다단 비례압력제어밸브의 고장모드/고장영향 분석 및 고장메카니즘 분석은 RBD 기법과 FTA를 통하여 얻어진 결과를 이용하였다. Table 1로부터 알 수 있는 것은, 고장 메카니즘의 원인은 크게 설계, 조립, 작동 환경, 수명(영구변형)에 기인하며, 수명을 다하여 고장나는 경우를 제외하며 설계→조립→작동 환경 순으로 고장이 일어나는 것을 알 수 있다. 또한, 진동, 충격과 같은 이상 운전이 아닌 경우에는 적절한 사용 온도와 오염도 관리를 통하여서 쉽게 작동 환경도 극복할 수 있음을 알 수 있다. 조립에 의한 고장을 줄이기 위해서는 설계 도면에 기재된 상세 조립 방법 및 조립시의 각종 규제 내용들을 사전에 확인할 필요가 있으며, 조립되는 부품 단계 단계마다 정확한 조립이 되어 있는지를 확인할 수 있다. 마지막으로 고장의 대부분은 설계에 기인하고 있음을 알 수 있는데, 이것은 얼마나 설계가 중요한 지를 알려주는 것이며, 기본적으로 설계 이전에, 설계되는 부품은 어떠한 요구 기능을 가지는지에 대해서 파악하고 요구 기능을 수행하기 위해서는 재료, 크기, 조립공차 등 최소한의 성능 한계를 먼저 정하여 수행하는 것이 신뢰성을 향상시키는 방안중의 우선이라 할 수 있다.

Table 1 비례솔레노이드 액추에이터의 FMEA/FMMA

세부구성표 (Sub-components)	고장형태 (Failure mode)	고장메카니즘(Failure mechanism)
몸체	누설 조절불량 고정불량	부식/폴립 O-ring 손상 나사산 손상 이물질침투 깨짐/영구변형
고정자	제어불량 외부누설 운동안내불량	제어부손상 손상 영구변형 이물질침투
가동자	제어불량 작동불량 운동안내불량 충격발생	조립불량 변형 이물질침투
코일부	보빈	온도변화율 큼 조립불량/변형
	코일	온도변화율 큼 감김불량
	몰당부	온도변화율 큼 변형/기포함유
	커넥터 핀	전원불안정 단선/단락 접점부 변형

Table 2는 고장 모드 영향 및 치명도 해석 결과를 보이는 것으로(1(9)→2(7)→3(5)→4(3)→5(1) 순으로 하여 점수를 배치함), 솔레노이드 액추에이터에 있어서는 구동부를 구성하는 가동자와 고정자, 그리고 가동자와 고정자 사이의 응답성과 흡인력 특성을 결정짓는 코일부의 고장이 매우 치명적임이 분석 결과 확인되었다.

Table 2 비례솔레노이드 액추에이터의 FMEA/FMECA

세부구성품 (Sub-components)	기능 (Function)	치명도 평가 (Criticality)	
		순위	
몸체	솔레노이드 액추에이터 보호	2	
End cap	가동자 보호	2	
Adjust screw	가동자 변위 조절	4	
Spacer	가동자 변위 조절	6	
Wave washer	스페이서 고정	6	
O-ring	드레인 누설 방지	2	
O-ring	외부 누설 방지	2	
Bolt	End cap 고정	2	
Seal washer	Bolt 고정	5	
Plate	몸체 고정	3	
Coil case	코일 고정	3	
고정자	비례흡인력 발생	1	
O-ring	파이로트 밸브부 누설방지	2	
튜브	가동자 운동 안내	1	
가동자	비례흡인력 제어	1	
댐핑 오리피스	저충격 작동	1	
베어링_1	가동자 무마찰 운동 안내	1	
베어링_2	가동자 무마찰 운동 안내	1	
댐핑 오리피스	저충격 작동	1	
코일부	보빈	코일 저장	2
	코일	자력 발생	2
	몰딩부	코일 보호	2
	커넥터 핀	전원 입력	1

Table 1, 2와 같은 기법으로 릴리프밸브 및 안전밸브에 대한 FMEA/FMMA 및 FMECA를 수행하였으며, 포펫, 밸브 시트와 스프링이 매우 중요한 역할을 하고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 품질기능 전개 해석

Table 3 및 Table 4는 각각 연구 대상 비례압력제어밸브의 솔레노이드부의 품질기능 전개 레벨_1과 레

벨_2를 보이는 것이다. 솔레노이드 부는 크게 몸체, 고정자, 가동자 및 코일부로 나누어 고장모드를 평가하였으며, 고장 모드의 기호는 각각, ①: 내부누설, ②: 조절 불량, ③: 고정 불량, ④: 제어 불량, ⑤: 외부누설, ⑥: 작동 불량, ⑦: 운동안내 불량, ⑧: 충격발생, ⑨: 온도변화율 큼, ⑩: 전원 불안정을 의미한다.

Table 3으로부터 객관적인 사고로 솔레노이드 부품 중에서는 코일, 가동자, 고정자, 몸체 순으로 중요도가 있음을 예측할 수 있다. Table 4로부터 시험은 수명시험, 작동시험, 흡인력시험, 내진동시험 순으로 중요하다는 것을 알 수 있다.

Table 3 비례솔레노이드부의 QFD level_1

Requirement vs. Failure Mode/Mechanisms Matrix		솔레노이드 부																
No	주요 구성품 고장모드 요구사항	몸체				고정자				가동자				코일부				
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮		
1	솔레노이드 액추에이터 보호	●		●														
2	가동자 보호	●		●														
3	가동자 변위 조절		●															
4	드레인 누설 방지	▲																
5	외부누설 방지			●		●												
6	코일 고정																	●
7	비례흡인력 발생				●		◎	●	●	◎								
8	저충격 작동																	●
9	자력발생					◎			◎									◎
10	코일보호																	◎
11	전원 입력																	◎
12	저소음 작동				●				●		●				●			
13	부식				▲				▲									▲
14	내구 시험 후 성능 만족	▲	▲	▲	▲	●	▲	●	●	●	●	●	●	▲	●	▲	●	▲
Score		16	8	18	25	10	12	27	10	19	10	13	23	15				

Table 4에서 점수는 각각 ◎(9), ●(5), ▲(3)로 하였으며, 중요도(Effect score)는 ∑(score×point)를 적용하였다.

위와 같은 수순으로 비례압력제어밸브의 파이로트 제어부 및 메인밸브부의 품질 기능 전개를 수행하였으며, 결과로 수명 및 작동시험이 중요하다는 것을 예측할 수 있었다.

Table 5에서도 ◎ 9점, ● 5점, ▲3점을 부가하고, 고장모드 기호의 정의를 ①: 누설, ②: 불완전제어, ③: 소음, ④: 작동 불량로 하여 분석된 결과를 보이는 것이다.

Table 6은 ◎ 9점, ● 5점, ▲ 3점을 부가하고, 중요도(Effect score) = ∑(score×point)의 관계를 이용하여, 시험항목을 결정한 것으로, 수명시험, 제어특성시험, 보중내압력시험 순으로 중요도 결과가 도출되었다.

Table 4 비례솔레노이드부의 QFD level_2

Failure Mechanism vs. Standard Test Matrix				시험항목											
No	주요구성품	고장모드	Score	작동시험	내부저항시험	온도상승시험	유체누설시험	흡인력시험	내전압시험	소음시험	내진동시험	내습 및 내수시험	온도충격시험	전기누설시험	수명시험
				1	몸체	㉠	16	▲			●				▲
㉡	8	▲					●								●
㉢	18	▲					●				◎	▲	▲		●
2	고정자	㉣	25	▲			▲	▲			▲		▲		◎
		㉤	10	▲			●								●
		㉥	12	▲			▲	▲							●
3	가동자	㉦	27	▲			▲	◎		▲	▲		▲		●
		㉧	10	▲				●						●	
		㉨	19	◎			●	●			▲			▲	
		㉩	10	▲				▲		●	●				●
4	코일부	㉪	13	▲					●			▲	▲		▲
		㉫	23	▲	●	◎		●					▲	◎	▲
		㉬	15	▲								▲			▲
Effect Score				732	115	207	507	684	65	131	518	93	318	207	912
Rank				2	9	7	5	3	11	8	4	10	6	7	1

Table 5 메인밸브부 QFD level_1

Requirement vs. Failure Mode/Mechanisms Matrix										
No	주요 구성품		파이로트 비례압력제어 밸브 부							
	요구사항	고장모드	중간연결판		몸체			포켓밸브		
			㉠	㉡	㉢	㉣	㉤	㉥	㉦	
1	파이로트 밸브 연결		◎							
2	파이로트 압력제어			●		◎				▲
3	누설방지		◎		◎	●		◎		▲
4	유로보호			●	●					▲
5	메인밸브 보호				●	●				
6	유체이송		◎		◎				▲	▲
7	압력제어			▲		◎			◎	●
8	포켓밸브 안내						◎		▲	
9	포켓안내						●		▲	
10	스프링 안내						●		▲	
11	드레인 제어			▲	▲	▲		▲	▲	
12	저소음 작동						◎		◎	●
13	부식			●		●				
14	내구 시험 후 성능 만족			●	●	●	●	●	●	●
Score			37	21	41	36	36	14	38	27

Table 6 메인밸브부 QFD level_2

Failure Mechanism vs. Standard Test Matrix														
No	주요구성품	고장모드	Score	시험항목										
				작동시험	분해능시험	반복성시험	유체누설시험	제어압력특성시험	소음시험	내진동시험	내습 및 내수시험	온도충격시험	보증내압력시험	수명시험
1	중간연결판	㉠	37	●			◎					▲	◎	◎
		㉡	21	▲	●	●		◎		●	●		▲	◎
2	몸체	㉢	41	●			◎				▲	◎	◎	◎
		㉣	36	▲	●	●		◎		●	●		▲	◎
		㉤	36	▲				◎	◎	◎				▲
3	포켓밸브	㉥	14	●			◎					◎	◎	◎
		㉦	38	◎				◎		●	▲		▲	◎
		㉧	27	●	●	●	●	◎	●	◎	●	●	●	●
Effect Score				1216	420	420	963	1278	405	1042	768	963	1248	1926
Rank				4	8	8	6	2	9	5	7	6	3	1

5. 결 론

이 해설에서는 일반 산업용으로 사용되는 전자유압식 비례압력제어밸브의 신뢰성 설계 및 시험을 위한 기초연구로서, 신뢰성 블록선도(RBD), 고장나무분석(FTA), 고장모드 및 영향분석(FMEA) 혹은 고장모드 및 메카니즘 분석(FMMA)을 수행하였다. 마지막으로 품질기능전개를 통하여, 비례솔레노이드 액추에이터, 파이로트 비례압력제어밸브, 메인밸브에서의 신뢰성을 예측하기 위한 시험 순위를 결정하는 결과를 얻을 수 있었다.

이 해설을 통하여 얻은 결과로는, 제품을 설계하는데 있어서 설계 초기에 품질기능전개를 수행하는 것이 매우 중요하며, 사용중에는 환경 조건이 매우 중요하고, 더 나아가서는 오염도 관리가 신뢰수명을 결정하는 가장 중요한 변수인 것도 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) So-nam Yun, Jae-Seop Ryu, Young-bog Ham, Go-Do Kim, "Pressure control technique using proportional solenoid actuator", 9th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp. 1~15, 2005.
- 2) KS A 3004-2007: 용어-신뢰성 및 서비스 품질 (Vocabulary-Dependability and quality of service)
- 3) JIS Z 8115-1981: 신뢰성 용어(the glossary of terms used in reliability)
- 4) BS 4778-3.1-1991: Quality vocabulary. Availability, reliability and maintainability terms. Guide to concepts and related definitions
- 5) MIL-STD-721C-1981, MILITARY STANDARD: DEFINITIONS OF TERMS FOR RELIABILITY AND MAINTAINABILITY
- 6) MIL-HDBK-189: Reliability growth management
- 7) MIL-HDBK-217F: Reliability prediction of electronic equipment
- 8) MIL-HDBK-251: Reliability/Design thermal applications
- 9) MIL-HDBK-338: Electronic reliability design handbook.
- 10) MIL-HDBK-344: Environmental stress screening of electronic equipment
- 11) MIL-HDBK-781: Reliability test methods, plans and environments for engineering development, qualification and production

- 12) MIL-HDBK-2155: Failure reporting, analysis and corrective action system(FRACAS)
- 13) MIL-HDBK-2164: Environmental stress screening process for electronic equipment
- 14) MIL-STD-690C: Failure rate sampling plans and procedures
- 15) MIL-STD-790F: Reliability assurance program for electronic parts specifications
- 17) MIL-STD-810: Environmental test methods and engineering guidelines
- 18) MIL-STD-883: Test method and procedures for microelectronics
- 19) <http://www.enre.umd.edu/mainnojs.html>
- 20) <http://www.cnde.iastate.edu/faa.html>
- 21) <http://www.u.arizona.edu/~dimitri>
- 22) <http://ewh.ieee.org/soc/rs>
- 23) <http://sre.org>
- 24) <http://www.iest.org>
- 25) ISO/TR 19972-1, Hydraulic fluid power -methods to assess the reliability of hydraulic components-, 2009.
- 26) ISO-2394, General principals on reliability for structures, 1998.
- 27) RS B 0004, Hydraulic relief valve, 2008.
- 28) RS B 0165, Cartridge type hydraulic solenoid directional control valve, 2008.
- 29) <http://opera.ieee.org>
- 30) <http://www.enre.umd.edu/mainnojs.html>
- 31) IEC 60300: Dependability management
- 32) IEC 60605: Equipment reliability testing
- 33) IEC 60706: Guide on maintainability of equipment
- 34) IEC 60812: Analysis techniques for system reliability
- 35) IEC 61163: Reliability stress screening

[저자 소개]

윤소남(책임저자)

E-mail : ysn688@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7155

1963년 7월 29일생.

1990년 부경대학교 기계공학부 석사, 1994년 동 대학원 박사과정 졸업, 2005년 어번대 마이크로나노시스템/재료 연구실 객원연구원, 1994년~현재 한국기계연구원 책임연구원, 스마트 액추에이터, 유공압밸브 및 에너지 수확기 개발 연구에 종사. 유공압건설기계학회, 대한기계학회, 동력기계공학회, 한국정밀공학회, 자동차공학회, 일본유공압시스템학회 등 회원, 공학박사.

