

# 대형 유조선용 조타장치의 안전성 분석

문준식 · 임현교\*

충북대학교 안전공학과 대학원 · \*충북대학교 안전공학과

## 1. 서 론

선박 내 대형 기계시스템 중의 하나인 조타장치는 선박에서 가장 신뢰성이 높은 장비 중의 하나라고 인식되어왔다. 그러나 1978년 5월 17일에 대형 유조선인 "Amoco Cadiz"호가 프랑스 연안에서 조타장치의 고장으로 좌초되어 프랑스 연안 241 km를 오염시킨 심각한 환경문제를 야기한 이후, 조타장치의 신뢰성에 대한 인식을 달리하게 되었다. Amoco Cadiz"호 사고 조사 결과, 단일 유압회로의 기본적인 취약성에 그 원인이 있다고 판명되었다. 이후에 국제해사기구는 조타장치에서 발견된 결점들을 보완하여 1981년 11월에 개최된 45차 해상안전위원회 (Maritime Safety Committee) 에서 관련 규정을 개정하였다. 신 규칙은 유압식 조타장치 시스템에 단일한 고장이 발생하더라도 유압회로의 적어도 한 부분이 완전함을 유지하여 조타능력을 유지할 수 있도록 이중성을 확보하는 방향으로 개정되었다 [1]. 그러나 신 규칙에 따른 조타장치는 원자력 발전소 및 화학플랜트 등 다른 산업 분야에서 사용되었던 시스템안전(System Safety) 분석 기법에 의해 그 안전성이 평가된 것은 아니었다. 최근 국제해사기구에서는 선박에서의 인명, 건강, 해양 환경 및 재산의 보호를 포함하는 해상 안전의 증진을 목적으로 시스템안전 분석기법을 도입하여 선박의 다양한 시스템에 대한 정량적인 분석을 시도하고 있다. 그러나 아직까지는 기초적인 단계에 머물러 있고, 특히 선박의 기계와 관련된 시스템에 대한 분석은 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대형 유조선용 조타장치를 대상으로, FMEA 기법을 이용하여 시스템의 안전성을 정성적으로 분석하고, 한편으로는 FTA 기법을 이용하여 시스템의 안전성을 정량적으로 분석하여, 선박에서 대형 시스템의 안전성을 평가하는 방법을 실용적으로 제시하고자 한다.

## 2. 조타장치의 기능 및 구조

조타장치는 선박의 진행방향을 조종하는 장치이다. 본 연구에서는 다양한 조타장치에 적용할 수 있는 범용성을 부여하기 위해, 10만톤 이상의 대형 유조선에 설치되는 조타장치 중 각각 50%의 토크를 발휘하는 두 개의 독립 동력을 가진 전동유압식 조타장치를 연구의 대상으로 선정하였다. Fig. 1은 조타장치의 외형도와 구조이고, Fig. 2는 기능성 블록다이어그램을 나타낸 것이다.

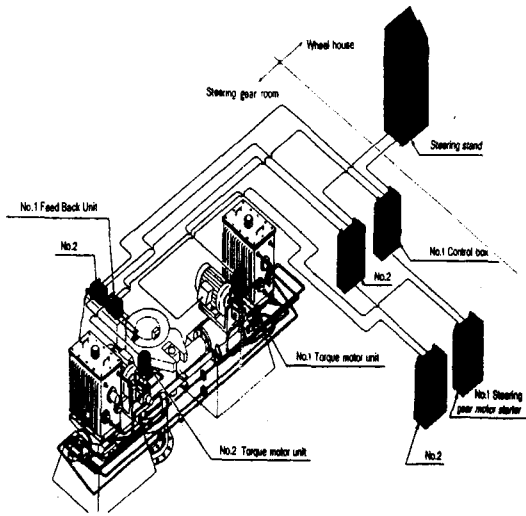


Fig. 1 Schematic diagram of S/G

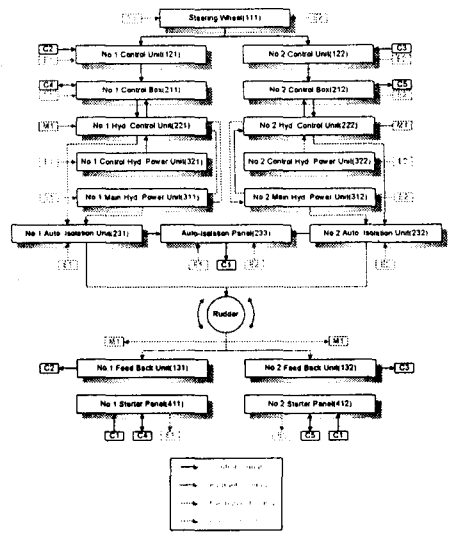


Fig. 2 Block diagram of S/G

조타장치의 제어방식에는 추종(FU, Follow Up) 제어와 비추종 (NFU, Non Follow Up) 제어로 대별할 수 있다. 추종 제어에는 3가지 운용모드가 있는데 자동조타 (Auto Pilot) 모드, 수동조타 (Hand Steering) 모드 및 원격조타 (Remote Control) 모드가 있다. 본 연구에서는 추종제어 중 선박의 입·출항시 이용되는 수동조타 운전모드(FU)와 수동조타가 고장났을 때 비상 수단으로 이용하는 비추종조타 운전모드(NFU)를 고려하였다. FU 운전모드는 한 대의 동력장치를 이용하는 FU1 운전모드와 두 대의 동력장치를 이용하는 FU2 운전모드로 나누었다.

Table 1 List of components of steering gear are analyzed

1st step	2nd step(Sub. Ass'y)	3rd step(Unit)
Command Part (100)	Steering Command(110)	Steering Wheel(111) NFU Lever(112)
	Control Unit(120)	No. 1 Control Unit(121) No. 2 Control Unit(122)
	Feed Back Unit(130)	No.1 Feed Back Unit(131) No.2 Feed Back Unit(132)
Control Part (200)	Control Box(210)	No. 1 Control Box(211) No. 2 Control Box(212)
	Hydraulic Control(220)	No.1 Hyd. Control Unit(221) No.2 Hyd. Control Unit(222)
	Auto Isolation Unit(230)	No.1 Auto Isolation Unit(231) No.2 Auto Isolation Unit(232)
		Auto-Isolation Panel(233)
Power Generation Part (300)	Main Hydraulic Power(310)	No.1 Main Hyd. Power(311) No.2 Main Hyd. Power(312)
	Hydraulic Control Power(320)	No.1 Control Hyd. Power(321) No.2 Control Hyd. Power(322)
Electric Power Supply Part (400)	Electric Starter Panel(410)	No.1 Starter Panel(411) No.2 Starter Panel(412)

Table 1은 제 3수준까지 분류된 부품목록만을 나타내고 있으며, 제 4수준까지는 62개의 부품으로 분류하였다. 조타장치는 수많은 부품으로 구성되어 있으나 분석을 위해 기능적인 측면을 고려하여 명령발생부 (Command Part), 제어부 (Control Part), 동력발생부 (Power Generation Part) 및 전원공급부 (Electric Power Supply Part)로 분류하였고, 이들을 다시 2수준, 3수준, 4수준으로 단계적으로 분류하였다.

### 3. 분석

#### 3.1 정성적인 분석

정성적인 분석에 이용되는 FMEA는 ISO 60812, 1985 Analysis Techniques for System Reliability - Procedure for Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)의 국제규격을 이용하였다 [2]. Table 1과 같이 시스템을 기능적 구조로 분류하여, 각 계통이나 부품 등에서 발생할 수 있는 고장모드를 결정하고, 그로 인한 사건의 영향과 연쇄를 평가하여 시스템 전체에 미치는 영향을 평가하였다. 분석은 전기계통의 전문가 1명, 배관계통의 전문가 2명과 실제 조타장치의 운전 경험이 있는 2명의 선박검사원과 함께 팀을 이루어 실시하였다. FU1 운용모드에서 No.2 계통의 고장은 No.1 계통이 먼저 고장 상태에 있다는 조건부로 분석을 수행하였다. 고장모드의 발생도, 영향도 및 검출도는 각각에 대해 5 단계, 10점을 최고점으로 하여 평가하였다. Table 2는 분석된 FMEA 작업표에서 위험우선순위 (RPN : Risk Priority Number)가 높은 상위 7개의 고장모드이다. RPN이 100 이상인 고장모드가 전체 79 항목에 대한 RPN 총합의 약 40.1%를 차지하고 있기 때문에 Table 2에 나타난 고장모드가 위험도가 높은 것으로 판단하였다.

Table 2 List of High Risk-Priority Number

Equip. Name	ID. No.	Operation Mode	Failure Mode	Failure Cause	End Effect	발생도	영향도	검출도	RPN
No.2 Control Box	212	FU1	-No.2 Main Motor 기동신호 전달 실패	-No.2 Relay for Power 고장	-조타불능	5	10	5	250
No.2 Main Hyd. Power Unit	312	FU1, NFU	-주유압 발생실패	-No.2 Main motor 고장 -No.2 Main Pump 고장	-조타불능	5	10	5	250
No.2 Control Hyd. Power Unit	322	FU1, NFU	-Control Hyd. Power 발생 실패	-No.2 Control Hyd. Filter 막힘 -No.2 Control Pump 고장 -No.2 Control Motor 고장	-조타불능	5	10	5	250
NFU Lever	112	NFU	-비추종 신호발생 실패	-NFU Lever 고장	-조타불능	2	10	7	140
No.2 Control Box	212	FU1, NFU	-No.2 Unloading Valve 작동 신호 발생 실패	-No.2 Relay for Control 고장	-조타불능	5	10	2	100
No.2 Control Box	212	FU1	-Torque Motor에 편차신호 전달 실패	-No.2 Relay for Signal 고장 -No.2 Power Amplifier 고장 -No.2 Control Amplifier 고장	-조타불능	5	10	2	100
No.2 Auto. Isolation Unit	232	FU1, NFU	-No.2 동력발생계통 누설감지 실패	-No.2 Low Level Switch 고장	-조타불능	5	10	2	100

정성적인 분석결과, RPN 이 100 이상인 유닛(Unit)는 NFU Lever를 제외하고는 모두 No.2 계통의 동력발생장치에서 해당되었다. 이는 FU1 운용모드에서 No.2 계통의 고장은 No.1 계통이 고장이 발생하였다는 조건부로 분석을 수행한 결과이다. 다시 말해, FU1 모드와 NFU 모드에서는 No.2 계통에서 발생하는 고장은 단일 동력발생계통

을 가진 조타장치 시스템을 분석한 결과와 동일하다는 것을 나타낸다. No.2 계통의 유니트는 No.1 유니트에 비해 약 5배 크게 평가되었다. 이 결과에서 시스템의 이중화가 전체 조타장치 시스템의 위험성이 그 만큼 감소하는데 기여를 했다는 것을 알 수 있었다. 다만, No.2 Control Box 내부의 "Relay for Power"와 "Relay for Control" 부품은 단일 부품고장에 의해 조타불능이 되므로 고신뢰성의 Relay를 사용할 필요가 있다는 것을 알 수 있었다. NFU Lever가 높은 위험성으로 평가된 것은 고장모드가 타각 명령 발생에 직접적으로 간여하는 부품이며, 또한 자체의 고장에 대한 경보나 표시기능이 없어 검출도가 높게 평가되었기 때문이다. 전반적으로 모든 부품 및 유니트에 대한 RPN 이 비교적 낮은 수치로 평가되었는데, 이는 분석대상으로 선정된 조타시스템이 경보 및 표시기능을 충분히 갖추고 있고, 철저한 이중화에 따른 결과라고 판단된다.

### 3.2 정량적인 분석

본 연구에서는 IEC 50 (191) : 1990, International Electro technical Vocabulary (IEV), Chapter 191 : Dependability and quality of service 에 규정된 FTA 기법을 이용하였다 [3]. 조타장치가 고장나는 상황인 조타불능에 연구의 초점을 맞추고 있기 때문에 조타불능 상태를 정상사상으로 설정하였다. 기본사상의 발생은 서로 통계적으로 독립이고, 예방 보전 및 사후 보전을 수행하지 않으며, 시스템에 관여하는 인간 에러는 없는 것으로 가정하였다. 해사분야에는 아직까지 각 기기에 대한 고장을 데이터가 축적되지 않았기 때문에, 기본사상에 대한 고장확률은 미국방성 소속인 Reliability Analysis Center에서 1995년에 발행한 Nonelectronic Parts Reliability Data에 있는 고장율을 이용하였다 [4]. 고장은 지수분포로 발생한다고 가정하였다. 입 · 출항 및 협수로 통과 시에 최대한 소요되는 시간을 48시간으로 가정하고, 48 시간당 고장확률로 환산하여 계산을 수행하였다. 기초사상에 대해 주어진 확률값은 Table 3 과 같다.

Table 3 List of Probability of Basic Event

Basic Event	Part List	Constant Probability	Basic Event	Part List	Constant Probability	Basic Event	Part List	Constant Probability
C1	Steering Wheel	1.95E-05	A9	No.1 LVDT	7.64E-05	B17	No.2 Main Hyd. P/P	6.11E-03
C2	NFU Lever	2.16E-05	A10	No.1 Regulator	1.69E-03	A18	No.1 Control E/M	4.96E-04
A1	No. 1 Control Unit	7.75E-04	A11	No.1 Unloading Device	5.33E-04	A19	No.1 Control Hyd. P/P	6.11E-03
B1	No. 2 Control Unit	1.28E-04	A12	No.1 Unloading Valve	2.21E-04	A20	No.1 Cont. Hyd. L/F	1.11E-04
A2	No.1 Feed Back Unit	3.48E-04	B8	No.2 Torque Motor	3.18E-04	B18	No.2 Control E/M	4.96E-04
B2	No.2 Feed Back Unit	3.48E-04	B9	No.2 LVDT	5.53E-05	B19	No.2 Control Hyd. P/P	6.11E-03
A3	No.1 Relay for Power	1.25E-05	B10	No.2 Regulator	1.69E-03	B20	No.2 Cont. Hyd. L/F	1.11E-04
A4	No.1 Relay for Signal	1.25E-05	B11	No.2 Unloading Device	5.33E-04	A21	No.1 Starter Panel	1.15E-04
A5	No.1 Control Amplifier	1.49E-04	B12	No.2 Unloading Valve	2.20E-04	A22	No.1 Power Supply Unit	3.98E-04
A6	No.1 Relay for Control	1.25E-05	A14	No.1 L-L Lev. Switch	2.23E-03	A23	No.1 DC Conv. for C/B	1.23E-03
A7	No.1 Power Amplifier	1.49E-04	A15	No.1 Isolation Valve	1.43E-03	A24	No.1 DC Conv. for S/S	1.23E-03
B3	No.2 Relay for Power	1.25E-05	B14	No.2 L-L Lev. Switch	2.23E-03	B21	No.2 Starter Panel	1.15E-04
B4	No.2 Relay for Signal	1.25E-05	B15	No.2 Isolation Valve	1.43E-03	B22	No.2 Power Supp. Unit	3.98E-04
B5	No.2 Control Amplifier	1.25E-05	C3	Auto-Isolation Panel	1.15E-04	B23	No.2 DC Conv. for C/B	1.23E-03
B6	No.2 Relay for Control	1.25E-05	A16	No.1 Main E/M	4.96E-04	B24	No.2 DC Conv. for S/S	1.23E-03
B7	No.2 Power Amplifier	1.49E-04	A17	No.1 Main Hyd. P/P	6.11E-03			
A8	No.1 Torque Motor	3.18E-04	B16	No.2 Main E/M	4.96E-04			

조타장치는 명령발생부 고장, 제어부 고장 또는 동력발생부 고장 중 하나라도 발생하는 경우에 조타불능이라는 정상사상이 발생한다. 전원 공급 기능은 다른 기능을 발휘하기 위해 필요한 하부 기능으로 분석하였다. Fig. 1 및 2와 위에서 설명한 내용을 토대로 Fault Tree를 Fig. 3과 같이 구성하였다. FTA 계산을 위한 Tool은 Relex Software Corporation 사에서 개발한 Relex 7.1을 사용하였다.

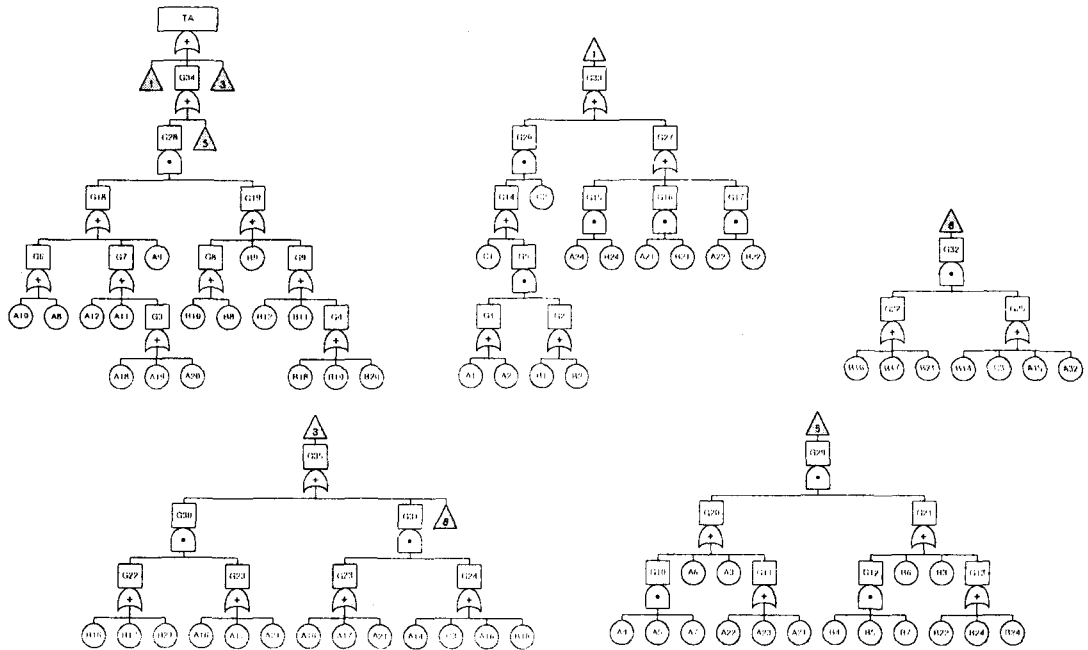


Fig. 3 Fault Tree Diagram for Steering Gear

Table 4 Minimal Cut Sets having high probability

No.	Value	f-v	Accumulation	Cut sets
1	3.74e-5	0.1783	0.1783	No.1 Cont. Hyd. Pump, No.2 Cont. Hyd. Pump
2	3.74e-5	0.1783	0.3566	No.1 Main Elec. Pump, No.2 Main Elec. Pump
3	1.36e-5	0.0648	0.4214	No.1 Main Elec. Pump, No.1 Low-Low Level Switch
4	1.36e-5	0.0648	0.4862	No.2 Main Elec. Pump, No.2 Low-Low Level Switch
5	1.03e-5	0.0490	0.5352	No.1 Regulator, No.2 Cont. Hyd. Pump
6	1.03e-5	0.0490	0.5842	No.2 Regulator, No.1 Cont. Hyd. Pump
7	8.7e-6	0.0415	0.6257	No.1 Isolation Valve, No.1 Main Hyd. Pump
8	8.7e-6	0.0415	0.6672	No.2 Isolation Valve, No.1 Main Hyd. Pump
9	8.7e-6	0.0415	0.7087	No.1 Isolation Valve, No.2 Main Hyd. Pump
10	8.7e-6	0.0415	0.7502	No.2 Isolation Valve, No.2 Main Hyd. Pump

계산 결과를 보면 조타불능이라는 정상사상에 이르는 확률값은 2.098e-4 이다. Table 4는 조타불 능에 이르게 되는 126개의 최소절단집합(Minimal Cut Sets)의 고장 확률 중 상위 10개에 대한 최소절단집합을 나타낸 것이다. 상위 10개의 최소절단집합이 차지하는 f-v 누적값은 75%를 차지한다. 이들 상위 10개에 포함되는 기본사상들에 해

당되는 부품들, 유압장치에 사용되는 각종 Pump들, 자동절환을 위한 작동유 탱크의 Level Switch 및 Isolation Valve, Main Pump의 유량 및 유로를 조절하는 Regulator는 높은 신뢰도를 가진 부품을 사용하여야 함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대형 유조선용 조타장치를 대상으로, FMEA 기법을 이용하여 시스템의 안전성을 정성적으로 분석하고, 한편으로는 FTA 기법을 이용하여 시스템의 안전성을 정량적으로 분석하였다. FMEA 기법을 이용한 분석결과, 조타장치의 이중화에 의해 안전성이 상당한 수준으로 향상되었다는 것을 알 수 있었다. 특히, Control Box 내부에 있는 Relay, Main Hyd. Motor/Pump, Control Hyd. Motor/Pump 및 자동절환을 위한 작동유탱크의 Level Switch 등이 조타장치의 안전성에 중요한 부품으로 파악되었다. FTA 기법에 의한 분석결과, FMEA 기법에 의한 분석결과와 유사하게 Main Hyd. Pump, Control Hyd. Pump 및 자동절환을 위한 작동유 탱크의 Level Switch/Isolation Valve 등이 조타불능에 이르게 하는데 중대한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 조타장치의 안전성을 높이기 위해 상기에 기술된 부품들에 대한 신뢰성을 높이고, 유지·보수를 위한 조치 및 검사의 빈도를 높일 필요가 있다는 것을 알 수 있었다.

선박은 많은 대형 기계 시스템들의 조합에 의해 구성되어 있으나, 아직까지도 객관적이고 정량적인 안전성에 대한 분석이 이루어지지 않았다. 본 연구를 수행한 결과, 선박 내에 설치된 대형 기계 시스템도 체계적이고 과학적인 분석기법에 의해 안전성을 분석할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 추후 다른 시스템들에 대한 안전성을 분석하고, 각 시스템간에 유기적인 연관성을 규명해 나간다면, 해상에서의 선박 안전을 향상시키는데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] J. Cowley, "Steering Gear, New Concepts and Requirements, The Institute of Marine Engineers", 1981.
- [2] ISO, "Analysis Techniques for System Reliability - Procedure for Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)", ISO 60812, 1985
- [3] IEC, "International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 191 : Dependability and quality of service.", IEC 50 (191), 1990
- [4] Reliability Analysis Center, "Nonelectronic Parts Reliability Data", 1995