

KOSHA GUIDE

M-191-2017

안전제어시스템 설계를 위한
평균위험고장시간(MTTF_d)계산 지침

2017. 11.

한국산업안전보건공단

안전보건기술지침의 개요

◦ 작성자 : 한국산업안전보건공단 이 진 우

◦ 제·개정경과

- 2017년 11월 기계안전분야 제정위원회 심의

◦ 관련규격 및 자료

- KS B ISO 13849-1, 기계안전 - 제어시스템의 안전관련 부품 - 제1부: 설계 일반원칙
- KS B ISO 13849-2, 기계안전 - 제어시스템의 안전관련 부품 - 제2부: 검증
- KS C IEC 60204-1, 기계류의 안전성 - 기계의 전기장비 - 제1부: 일반 요구사항
- KS C IEC 61508-1, 전기/전자프로그램 가능한 전자장치 안전관련 시스템의 기능안전성 - 제1부: 일반 요구사항
- KS C IEC 61508-4, 전기/전자프로그램 가능한 전자장치 안전관련 시스템의 기능안전성 - 제4부: 정의 및 약어
- KS C IEC 62061, 기계안전-전기/전자프로그램 가능한 전자장치 안전관련 시스템의 기능안전성

◦ 관련 법규·규칙·고시 등

- 산업안전보건 기준에 관한 규칙 제2편 안전기준 제1장(기계·기구 및 그 밖의 설비에 의한 위험예방 관련)

◦ 기술지침의 적용 및 문의

이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈 페이지 안전보건기술지침 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2017년 11월 27일

제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

안전제어시스템 설계를 위한 평균위험고장시간(MTTF_d)계산 지침

1. 목 적

이 지침은 사업장에서 사용되는 각종 기계·기구 및 설비에 설치되는 제어시스템의 안전 관련부품의 설계시 적용하는 성능수준(PL)을 결정함에 있어 주요한 파라미터인 평균위험고장시간을 계산하는 방법을 제시함을 목적으로 한다.

2. 적용범위

이 지침은 소프트웨어의 설계를 포함한 제어시스템의 안전관련 부품(SRP/CS)의 설계 시 성능수준(PL)을 결정함에 있어 주요 파라미터인 평균위험고장시간(MTTF_d)을 계산할 때 적용되는 지침을 제공한다. 또한 이 지침은 전기, 유압, 공압, 기계 등 사용되는 에너지 형태에 관계없이 모든 종류의 기계류를 위한 제어시스템의 안전관련 부품에 적용된다.

3. 용어의 정의

(1) 이 지침에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

(가) “제어시스템의 안전관련부품(SRP/CS: Safety-Related Part of a Control System)”이라 함은 안전관련 입력신호에 응답하고 안전관련 출력신호를 발생시키는 제어시스템의 부품류를 말한다.

(나) “범주 (Category)”이라 함은 결함에 대한 내성 및, 부품의 구조적 배치, 결함의 감지 및/또는 감지 신뢰성에 의해 달성되는 결함 상태에서의 후속조치 관점에서의 제어시스템 안전관련 부품들의 분류를 말한다.

(다) “결함(Fault)”이라 함은 예방정비작업 중이나 기타 계획된 활동 또는 외적 자원의 부족에 기인한 경우를 제외하고, 주어진 기능을 수행할 능력이 상실된 품목의 상태를 말한다.

(라) “고장(Failure)”이라 함은 요구되는 기능을 수행할 수 있는 능력이 중단된 것을 말한다.

- (마) “위험한 고장(Dangerous Failure)”이라 함은 SRP/CS를 위험한 상태나 기능장애 상태로 만들 수 있는 가능성이 있는 고장을 말한다.
- (바) “공통원인고장(Common Cause Failure)”이라 함은 단일사건으로부터 유발된 다른 품목들의 고장으로 이 고장은 품목간 상호작용의 결과가 아니다.
- (사) “계통적 고장(Systematic Failure)”이라 함은 특정한 원인에 대해 확정적으로 관계된 고장으로, 설계나 제조공정, 작업절차, 문서화 또는 다른 관련 요소의 수정에 의해서만 제거 가능한 고장을 말한다.
- (아) “위험한 상황(Hazardous Situation)”이라 함은 사람이 한 가지 이상의 위험요인에 노출되어 즉시 또는 장기간에 걸친 상해를 야기할 수 있는 가능성이 있는 상황을 말한다.
- (자) “구성요소의 10% 위험한 고장(B_{10d})”이라 함은 구성하고 있는 전체부품 중에서 단지 10 %의 부품이 위험한 고장을 발생할 때까지의 평균작동횟수를 말한다.
- (차) “고장형태영향분석(Failure Mode Effect Analysis)”이라 함은 기계부품의 고장이 기계전체에 미치는 영향을 예측하는 해석방법으로, 기계부품 등의 기계요소가 고장을 일으킨 경우에 기계전체가 받는 영향을 규명해 나가는 것을 말한다.
- (타) “프로그램 가능한 전자시스템(PES: Programmable Electronic System)”이라 함은 하나 이상의 프로그램 가능한 전자 장치를 사용하는 제어, 보호 또는 감시를 위한 시스템. 전원공급 장치, 센서, 그 외의 입력장치, 전원보호장치 및 그 외의 출력장치가 포함된 것을 말한다.
- (카) “성능수준(PL: Performance Level)”이라 함은 예측 가능한 상태에서 안전기능을 수행할 수 있는 제어시스템의 안전관련 부품의 능력을 규정하는 불연속적인 수준을 말한다.
- (파) “성능요구수준(PLr: Required Performance Level)”이라 함은 각 안전기능에 대한 위험성감소를 달성하기 위해 요구되는 성능수준(PL)을 말한다.
- (하) “평균위험고장시간(MTTF_d: Mean Time to Dangerous Failure)”이라 함은 위험한 평균 고장시간의 기대값을 말한다.
- (거) “진단범위(DC: Diagnostic Coverage)”이라 함은 감지된 위험한 고장의 고장률과 모든 위험한 고장의 고장률의 비율로 결정되는 진단 유효성의 척도를 말

한다.

(너) “기계제어시스템(Machine Control System)”이라 함은 기계요소, 작업자, 외부 제어장치 또는 이들의 조합으로부터의 입력신호에 반응하고 의도한 방식으로 기계가 동작하도록 출력신호를 생성하는 시스템을 말한다.

(2) 그 밖에 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 이 지침에 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙, 안전보건규칙 및 고용노동부 고시에서 정하는 바에 의한다.

4. 평균위험고장시간(MTTF_d) 고려사항

(1) 각 채널의 MTTF_d 값은 3개의 수준(<표 1> 참조)으로 주어지고, 단일채널, 다중 시스템의 각 채널마다 개별적으로 고려되어야 한다.

(2) MTTF_d는 100년을 최대값으로 고려한다.

<표 1> 각채널의 위험한 평균 고장시간(MTTF_d)

MTTF _d	
각 채널의 표기	각 채널의 범위
하	3년 ≤ MTTF _d < 10년
중	10년 ≤ MTTF _d < 30년
상	30년 ≤ MTTF _d ≤ 100년

(3) 각 채널의 3년 미만의 MTTF_d 값은 시장에 나온 1년 후에 모든 시스템의 약 30%가 고장나거나 교체할 필요가 있다는 것을 의미하기 때문에 실제 SRP/CS에서 발견되지 않을 것으로 예상한 것이다.

(4) 고위험성에 대한 SRP/CS는 단일요소만의 신뢰성에 의존하지 않는 것이 좋으므로 각 채널의 100년 이상의 MTTF_d 값은 허용되지 않는다.

(5) 체계상의 고장과 우발적인 고장에 대하여 SRP/CS를 강화하기 위해 중복성과 시험과 같은 추가 수단이 요구되는 것이 좋으나 실용적인 목적을 위해 범위는 3개로 제한되어 있다.

(6) 구성품의 $MTTF_d$ 의 예측을 위해 데이터를 찾기 위한 계층적 절차는 다음 순서와 같아야 한다.

- ① 제조사의 데이터 사용
- ② 단일구성요소의 $MTTF_d$ 값 계산 또는 결정/결과 평가
- ③ 각각의 채널에 대한 $MTTF_d$ 추정의 간단한 방법
- ④ 10년을 선택

5. 단일구성요소의 $MTTF_d$ 값 계산

5.1 일반적 적용방법

다음의 기준을 충족하는 경우 구성요소의 $MTTF_d$ 또는 B_{10d} 값을 <표 2>에 따라 추정할 수 있다.

- (1) 구성요소가 ISO 13849-2에 따른 기본적이고 충분한 시험을 거친 안전원칙 또는 부품의 설계를 위한 관련 표준(<표 2> 참조)에 의해 제조되었다.(부품 제조사의 데이터시트에서 확인 가능)
- (2) 부품 제조자가 사용자에게 적절한 적용범위와 작동조건을 지정하였다.
- (3) 구성요소의 구현 및 작동을 위해 SRP/CS의 설계가 ISO 13849-2:2012에 따른 기본적이고 충분한 시험을 거친 안전 원리를 충족하였다.

5.2 유압부품의 $MTTF_d$

다음의 기준을 충족했을 때 밸브 같은 단일유압부품의 $MTTF_d$ 값은 150년으로 추정될 수 있다.

- (1) 유압부품이 ISO 13849-2:2012(<표 2>, <표 3> 참조)를 따라 유압부품의 설계를 위한 기본적이고 충분한 시험을 거친 안전원칙에 따라 제조되었다 (부품 제조사의 데이터시트에서 확인)
- (2) 유압부품의 제조자가 사용자에게 적절한 적용범위와 작동조건을 지정했을 때 SRP/CS 제조자는 유압부품의 구현 및 운영을 위해 ISO 13849-2:2012(<표 2>

과 <표 3>에 의한 기본적이고 충분히 시험된 안전성의 원칙 적용의 책임에 관계된 정보를 제공해야 한다.

- (3) 본 항의 (1)와 (2) 중 하나가 충족되지 않았을 경우 단일유압부품의 $MTTF_d$ 값은 제조자가 제공해야 한다.

5.3 공압, 기계, 기전 부품의 $MTTF_d$

5.3.1 일반사항

- (1) 공압, 기계 그리고 기전(공압 밸브, 릴레이, 차단기, 위치스위치, 위치스위치 캠 등)관련 부품의 $MTTF_d$ 는 연간단위로 주어지며 이 표준에 의해 요구되는 위험한 평균 고장시간(구성요소의 $MTTF_d$)을 계산하는 것은 어려울 수 있다.
- (2) 대부분 이런 종류의 부품제조자는 단지 10 %의 부품이 위험한 고장을 발생할 때까지의 평균 작동횟수 (B_{10d})만을 제공한다.
- (3) 이 절은 제조자가 제공하는 B_{10} (부품의 10%가 고장을 발생할 때까지의 평균작동횟수) 또는 T(수명)을 이용하여 부품에 대한 $MTTF_d$ 를 계산하는 방법을 제공한다.
- (4) 다음 조건이 충족 되었을 때 단일 공압용, 기전용 또는 기계용 부품 $MTTF_d$ 값은 5.4.2에 따라 추정 될 수 있다.
 - ① 부품들은 부품의 설계를 위해 <표 9>에 따른 기본 안전원칙에 따라 제조된다.(이 정보는 부품제조사의 데이터시트에 기재되어 있다).
 - ② 범주 1, 2, 3 또는 4에 사용되는 부품들은 부품의 설계를 위해 ISO 13849-2:2012에 따라 충분히 시험된 안전원칙에 따라 제조된다.
 - ③ 부품제조사가 사용자에게 적절한 적용분야와 작동조건을 제시한다. 즉 SRP /CS 제조자는 부품의 구현 및 운영을 위해 KS B ISO 13849-2:2012에 의한 기본적이고 충분히 시험된 안전성의 원칙을 적용하는 책임에 관계된 정보를 제공해야 한다. 범주 1, 2, 3 또는 4 의 경우 사용자는 부품의 구현 및 작동을 위해 ISO 13849-2:2012(표 B.2나 표 D.2)에 의한 충분히 검토된 안전원칙을 충족하기 위한 사용자의 책임에 대해 통보받아야 한다.

5.3.2 B_{10d} 를 이용한 부품의 $MTTF_d$ 계산

- (1) 부품의 10 %가 위험한 고장(B_{10d})¹⁾ 을 발생할 때까지의 평균동작 횟수는 반드시 부품의 제조자에 의해 시험방법(예를 들면 IEC 60957-5-1, ISO 19973, IEC 61810)에 대한 관련 제품표준에 따라 결정되는 것이 좋다.
- (2) 시험 중에 모든 부품이 위험한 고장을 나타낸 것이 아니라면 (예를 들면, 시험된 7개의 부품 중 오직 5개만 위험한 고장 발생), 위험하지 않게 고장난 부품들을 고려한 분석이 수행되는 것이 좋다.

1) B_{10} 이 주어지지 않는다면 B_{10d} 의 50 %가 사용될 수 있다. 따라서 $B_{10d} = 2B_{10}$ 이 추천된다.

<표 2> 구성요소의 **MTTF_d** 또는 **B_{10d}**에 대한 국제표준

구성요소	KS B ISO 13849-2:2012 에 의한 기본적인 고 충분히 시험된 안전원칙	기타 관련 표준	전형적인 값: MTTF _d (년) B _{10d} (횟수)
기계부품	표 A.1 과 표 A.2	-	MTTF _d =150
유압부품	표 C.1 과 표 C.2	EN 982	MTTF _d =150
공압장비	표 B.1 과 표 B.2	EN 983	B _{10d} = 20,000,000
릴레이와 차단기 작은 부하를 갖는 릴레이(기계 적 부하>	표 D.1 과 표 D.2	EN 50205 IEC61810 IEC 60947	B _{10d} = 20,000,000
릴레이와 차단기 최대부하를 갖는 릴레이	표 D.1 과 표 D.2	EN 50205 IEC61810 IEC 60947	B _{10d} = 400,000
작은 부하를 가진 근접스위치 (기계적 부하)	표 D.1 과 표 D.2	IEC 60947 EN 1088	B _{10d} = 20,000,000
최대부하를 가진 근접스위치	표 D.1 과 표 D.2	IEC 60947 EN 1088	B _{10d} = 400,000
작은 부하를 갖는 차단기(기계 적 부하>	표 D.1 과 표 D.2	IEC 60947	B _{10d} = 20,000,000
정격부하를 가진 차단기	표 D.1 과 표 D.2	IEC 60947	B _{10d} = 2,000,000
부하에 관계없는 위치스위치 a	표 D/I 과 표 D.2	IEC 60947 EN 1088	B _{10d} = 20,000,000
부하에 관계없는 위치스위치 a (독립적인 액추에이터, 보호 잠 금 장치를 갖는)	표 D.1 과 표 D.2	IEC 60947 EN 1088	B _{10d} = 2,000,000
부하에 관계없는 비상정지장치 a	표 D.1 과 표 D.2	IEC 60947 KS B ISO 13850	B _{10d} =100,000
최대작동요구에 따른 비상정지 장치 a	표 D.1 과 표 D.2	IEC 60947 KS B ISO 3850	B _{10d} = 6,050
부하에 관계없는 누름 버튼(예: 가동스위치>	표 D.1 과 표 D.2	IEC 60947	B _{10d} =100,000

- (3) 부품의 $MTTF_d$ 는 부품의 10 %가 위험한 고장인 평균동작횟수 B_{10d} 와 연간작업의 평균개수인 n_{op} 로 다음과 같이 계산된다.

$$MTTF_d = \frac{B_{10d}}{0.1 \times n_{op}} \quad (5.1)$$

여기에서

$$n_{op} = \frac{d_{op} \times h_{op} \times 3600s/h}{t_{cycle}} \quad (5.2)$$

부품의 활용에 대해 다음을 가정하였다.

h_{op} 는 일간 시간으로 나타내는 평균작업이다.

d_{op} 는 연간 일수로 나타내는 평균작업이다.

t_{cycle} 은 부품의 2개 연속사이클의 시작 사이의 평균시간이며, (예를 들면, 밸브의 스위칭) 사이클당 초로 나타낸다.

- (4) 10%의 부품이 위험한 고장을 일으킬 때까지의 평균동작 횟수인 B_{10d} 는, 연간 작업의 평균수인 n_{op} 을 사용하여, 10%의 부품이 위험한 고장을 일으킬 때까지의 평균시간인 T_{10d} 로 변환될 수 있다.

$$T_{10d} = \frac{B_{10d}}{n_{op}} \quad (5.3)$$

- (5) 식(5.3)을 식(5.1)에 대입하면

$$MTTF_d = \frac{T_{10d}}{0.1} \quad (5.4)$$

5.4 전기부품의 $MTTF_d$ 데이터

5.4.1 일반사항

- (1) <표 3>~<표 8>는 전자부품에 대한 $MTTF_d$ 의 몇 가지 전형적인 평균값을 보여준다. 데이터는 SN 29500 시리즈의 데이터베이스에서 추출되었다.
- (2) 모든 데이터는 일반적인 유형이다. 다양한 전자부품의 $MTTF_d$ 값을 나타내는

다양한 데이터베이스 참고문헌의 목록 참조가 사용 가능하다. SRP/CS 설계자가 사용된 부품에 대한 다른 신뢰할 수 있고, 구체적인 데이터를 가지고 있다면 그 데이터를 대신 활용하는 것이 좋다

- (3) <표 3>~<표 8>에 나타나 있는 값은 40℃ 온도, 전류와 전압에 대한 정격부하에 대해서 유효하다.
- (4) <표 3>~<표 8>의 MTTF 열에서 SN 29500로부터 얻어진 값은 일반적 부품의 모든 가능한 고장모드(항상 위험한 고장은 아닌)에 적용된다.
- (5) 부품의 전형적인 MTTF_d를 결정하는 정확한 방법은 FMEA를 수행하는 것이다.
- (6) 스위치로 사용되는 트랜지스터와 같은 몇몇의 부품은 고장으로 인해 합선 또는 기능중지가 발생할 수 있다. 이 두 가지 모드 중 단지 하나만이 위험할 수 있다. 따라서 “비고” 열은 단지 50 %의 위험한 고장을 가정하게 된다.

5.4.2 반도체 MTTF_d 데이터

SN 29500로부터 얻어진 반도체에 적용되는 부품에 대한 MTTF_d 값은 <표 3>와 <표 4>를 참조하라

<표 3> (스위치로 사용되는)트랜지스터

트랜지스터	예시	부품의 MTTF _d 년	일반적 부품의 MTTF 년	비고
양극성	T018, T092, SOT23	34 247	68 493	50 % 위험한 고장
양극성, 낮은 전력	T05, T039	5 708	11 416	50% 위험한 고장
양극성, 전력	T03, TO220, D-Pack	1 941	3 881	50 % 위험한 고장
FET	Junction MOS	22 831	45 662	50 % 위험한 고장
MOS, 전력	T03, TO220, D-Pack	1 142	2 283	50 % 위험한 고장

<표 4> 다이오드, 전력 반도체와 집적회로

다이오드	예시	부품의 MTTF _d 년	일반적 부품 의 MTTF 년	비고
일반적 목적	-	114 155	228 311	50% 위험한 고장
억제형 다이오드	-	15 981	31 963	50 % 위험한 고장
제너다이오드 P _{tot} < 1 W	-	114 155	228 311	50 % 위험한 고장
정류 다이오드	-	57 078	114 155	50 % 위험한 고장
사이리 스티	-	2 283	4 566	50 % 위험한 고장
트라이악, 다이 악	-	1 484	2 968	50 % 위험한 고장
집적회로(프로그램 가능하거나 프로 그램 불가능한 것)	제조사 데이터 사용			50 % 위험한 고장

5.4.3 수동회로소자 MTTF_d 데이터

SN 29500로부터 얻어진 수동회로소자에 적용되는 부품에 대한 MTTF_d 값은
<표 5> ~ <표 8>을 참조하라

<표 5> 커패시터

커패시터	예시	부품의 MTTF _d 년	일반적 부품 의 MTTF년	비고
표준형, 무전력	KS, KP, KC, KT, MKT, MKC, MKP, MKU, MP, MKV	57 078	114 155	50 % 위험한 고장
세라믹	-	22 831	45 662	50 % 위험한 고장
전해질 알루미늄	비고체 전해 질	22 831	45 662	50 % 위험한 고장
전해질 알루미늄	고체 전해질	37 671	75 342	50 % 위험한 고장
전해질 탄탈륨	비고체 전해 질	11 415	22 831	50 % 위험한 고장
전해질 탄탈륨	고체 전해질	114 155	228 311	50 % 위험한 고장

<표 6> 저항

저항	예시	부품의 MTTF _d 년	일반적 부품 의 MTTF년	비고
카본필름	-	114 155	228 311	50 % 위험한 고장
금속필름	-	570 776	1 141552	50% 위험한 고 장
금속산화물과 와이어와운드	-	22 831	45 662	50 % 위험한 고장
가변형	-	3 767	7 534	50 % 위험한 고장

<표 7> 인덕터

저항	예시	부품의 MTTF _d 년	일반적 부품의 MTTF 년	비고
MC 응용의 경우	-	37 671	75 342	50 % 위험한 고장
저주파 인덕터와 변압기	-	22 831	45 662	50% 위험한 고 장
주 변압기, 스위치 모드 변압기 및 전원공급기	-	11 415	22 831	50 % 위험한 고장

<표 8> 광커패시터

저항	예시	부품의 MTTF _d 년	일반적 부품의 MTTF 년	비고
양 극성 출력	SFH610	7 648	15 296	50 % 위험한 고장
FET 출력	LH 1056	2 854	5 708	50 % 위험한 고장

6. 각각의 채널에 대한 평균위험고장시간(MTTF_d)값 추정 방법

6.1 부품수 계산방법

- (1) '부품수 계산방법'의 사용은 각 채널에 대한 MTTF_d를 추정하는데 적합하다.
채널의 부분인 모든 단일 부품의 MTTF_d 값이 이 계산에 사용된다.

(2) 일반적인 공식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{MTTF_d} = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \frac{1}{MTTF_{di}} = \sum_{j=1}^{\tilde{N}} \frac{n_j}{MTTF_{dj}} \quad (6.1)$$

여기서 $MTTF_d$ 는 완전한 채널에 대한 값이다.

$MTTF_{di}$ 와 $MTTF_{dj}$ 는 안전기능에 기여도를 갖는 각 부품의 $MTTF_d$ 이다.

(3) 식(6.1)에서 첫번째 합은 각 부품들에 대해 각각 더한 값이다. 두번째 합은 같은 $MTTF_{dj}$ 을 가진 모든 n_j 개의 동일한 컴포넌트가 함께 묶인 동등하면서 단순화된 형태이다.

(4) <표 9>에 제시된 예시는 21.4년 채널의 $MTTF_d$ 값을 보여주는데, <표 1>에 따라 그 값은 '중간'이다.

(5) 이 방법은 채널 내의 어떤 컴포넌트의 위험한 고장이 그 채널의 위험한 고장을 야기시킬 수 있다는 가정에 기초한다.

<표 9> 회로판의 부품목록들의 예시

j	부품	단위 n_j	$MTTF_{dj}$ 최악의 경우 년	$1/MTTF_{dj}$ 최악의 경우 1/년	$n_j/MTTF_{dj}$ 최악의 경우 1/년
1	트랜지스터, 양극성, 저전력 (표 3 참조)	2	1 142	0.000 876	0.001 752
2	저항, 카본필름 (표 6 참조)	5	22 831	0.000 044	0.000 219
3	커패시터, 표준, 무 전력 (표 5 참조)	4	11416	0.000 088	0.000 350
4	릴레이(작은 부하를 갖는, 3 참조) ($B_{10d} = 20\ 000\ 000\ cycle$, $n_{op}=633\ 600$)	4	315,66	0.003 168	0.012 672
5	차단기(정격 부하, 3 참조) ($B_{10d} = 20\ 000\ 000\ cycle$, $n_{op}=633\ 600$)	1	31,57	0.031 676	0.031 676
$\sum n_j / MTTF_{dj}$					0.046 669
$MTTF_d = 1 / \sum n_j / MTTF_{dj} \text{ [years]}$					21.43

6.2 다양한 이중화채널의 MTTF_d 계산방법

- (1) 채널의 MTTF_d 값이 다를 경우 두 가지 가능성이 존재하는데 첫째는 최악의 상황을 가정 했을 때, 낮은 값을 고려하는 것이 좋고, 둘째는 식(6.2)를 활용하여 각 채널의 MTTF_d 값으로 치환될수 있는 추정값으로 사용될 수 있다.

$$MTTF_d = \frac{2}{3} \left[MTTF_{dC1} + MTTF_{dC2} - \frac{1}{\frac{1}{MTTF_{dC1}} + \frac{1}{MTTF_{dC2}}} \right] \quad (6.2)$$

- (2) 식(6.2)에서 MTTF_{dC1} 과 MTTF_{dC2}는 두 개의 다른 이중화 채널에 대한 값이다. 한 개의 채널은 MTTF_{dC1} = 3 years의 값을 가지고, 다른 채널은 MTTF_{dC2}= 100 years의 값을 가지면, 각 채널당 MTTF_d = 66 years의 값을 가지게 된다.
- (3) 식(6.2)를 이용하여, 두 개의 채널과 각 채널당 다른 MTTF_d 값을 가진 한 개의 중복시스템이 각 채널에 동일한 MTTF_d 값을 가진 한 개의 중복시스템으로 치환될 수 있다. 이 방법은 독립적인 병렬채널로 가정한 것이다.