

아크 플래시 위험 분석

(Arc Flash Hazard Analysis)

Contents

- 1. 용어의 정의
- 2. 분석 및 평가 절차
 - 2.1 자료 조사
 - 2.2 전력계통 운용모드 결정
 - 2.3 단락전류(1φ: bolted fault current) 계산
 - 2.4 아크 고장전류(Ia) 계산
 - 2.5 보호기기 동작특성과 아크 지속시간
 - 2.5.1 퓨즈
 - 2.5.2 저압 차단기
 - 2.5.3 보호계전기 및 차단기 동작시간
- 2.6 부스 간격
- 2.7 작업거리(최소 안전거리)
- 2.8 사고에너지 레벨 계산
- 2.9 아크 플래시 보호범위 계산
- 2.10 아크 플래시 위험분석 적용방법
 - 2.10.1 분석 결과 예
 - 2.10.2 개인 안전보호구 선정
 - 2.10.3 경고 라벨 제작 및 부착
 - 2.10.4 보호계전기 현장 셋팅
 - 2.10.5 분석 및 평가 주기
- 3. 맺음말

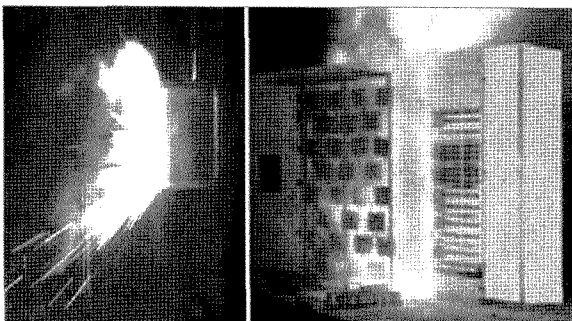
글_ 이 성 우 (No. 7371)
파워세븐엔지니어링 대표 / 기술사

전기설비에 접근하여 활선작업을 수행하는 과정에서 「안전조치, 작업공구, 먼지, 분진, 쥐, 절연」 등의 문제로 기인하는 단락사고가 발생하면 플라즈마(plasma) 아크 형태의 전기적 방전이 일어나므로, 아크 플래시 위험에 노출된 작업자는 심각한 화상은 물론 생명에 위험을 초래할 수 있다. 이러한 위험으로부터 근로자를 보호하기 위하여 IEEE Std. 1584에 수행절차와 방법에 대하여 상세히 해설하고 있고, NFPA 70E는 보호기준 등을 규정하고 있다. 국내에서도 이 기준 등을 참고하여 산업안전기준에 관한 규칙에 의거, 활선작업 및 활선근접작업에 관한 기술지침(KOSHA CODE E-30-2005)과 난연성 전기 작업복 선정에 관한 기술지침(KOSHA CODE E-32-2006)을 규정하고 있다. 그러나 국내에서는 외국 기업 일부를 제외하고는 아크 플래시 위험분석 업무를 실무에 적용하는 사례를 찾아보기 어렵다. 또한 적용 범위에 있어서도 난연성 전기 작업복 선정에 관한 기술지침을 600V 이상의 활선작업 및 활선근접 작업시만 적용하도록 한정된 것은 아크 플래시 위험에 대한 보호가 충분하지 않은 것으로 판단된다. 오히려 고압보다도 저압회로 고장 지점의 최소 단락전류에서 차단기의 동작시간이 지연되는 경우, 사고에너지를 더 증가시키기 때문에 위험성과 빈도는 높아질 수 있다. 이와 관련하여 본문에서는 「아크 플래시 위험」 분석 및 평가방법에 대하여 살펴보기로 한다.

1. 용어의 정의

1) 전기위험의 종류

전기위험은 전격, 아크 섬광, 폭발 등이 있다. [그림 1][그림 2]는 아크 플래시 위험을 보여주는 예이다.



[그림 1] 저압 아크 플래시 위험



[그림 2] 인체 화상

2) 아크 플래시 위험이란?

전력계통에서 아크 플래시 위험은 도체와 도체 간의 단락전류 또는 직접접지 계통에서 도체와 대지 간의 가혹한 지락전류로 인하여 발생한다. 이때 플라즈마 형태의 아크는 외견적으로 방사 에너지의 폭발 현상임으로 기화된 금속에 의해서 만들어진

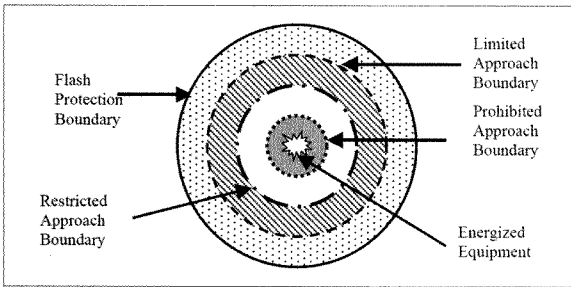
고온의 조각들은 [그림 1]처럼 빠른 속도로 공기 중으로 확산된다. 이 현상에 관련된 위험성은 압력, 소음 및 고온 파편 중의 하나이다.

3) 위험 등급

작업자에 대하여 아크 플래시 위험으로부터 인체 노출과 위험을 경고하기 위해 위험성을 분석하고 평가한다. 이 결과에 근거하여 안전작업 수행지침을 작성하고, 작업자를 보호하기 위한 개인 안전보호구(Personal Protective Equipment, PPE)의 위험 등급은 0, I, II, III, IV로 구분하고 있다. 세부내용은 [표 10]과 (주)해설을 참조한다.

4) 아크 플래시 보호범위

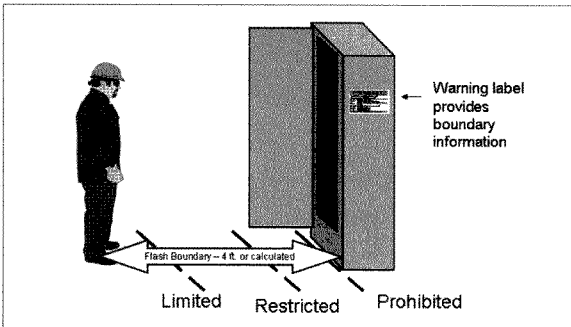
고장 지점으로부터 작업자를 위험에 노출시키지 않도록 접근을 제한하는 보호범위를 말한다. [그림 3]에서 외곽의 경계선을 아크 플래시 보호범위(flash protection boundary)라고 한다.



[그림 3] 위험 보호범위(NFPA 70E)

5) 전격 위험

노출된 충전부에 접근하는 작업자를 전기 충격(감전) 등의 위험으로부터 보호하기 위하여 접근 제한거리를 정하고 있다. 이 개념은 [그림 4]와 같이 나타낼 수 있고 접근 제한, 한계, 금지 거리는 [표 6]을 참조한다.



[그림 4] 노출 충전부의 접근 제한거리 개념

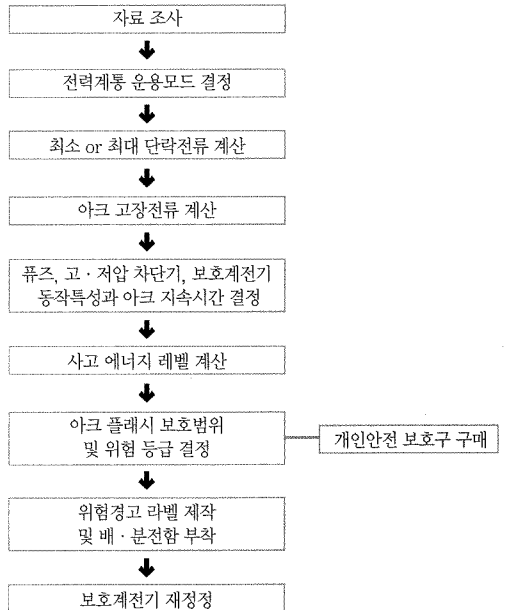
6) 사고 에너지 단위

아크 플래시 위험을 평가하기 위한 사고 에너지의 단위는 cal/cm² 또는 J/cm²를 사용한다. 사고에너지는 1.2cal/cm² = 5.0 J/cm²로 환산되며, 치료 가능한 2도 화상을 일으키기 직전의 크기이다. 이 에너지가 전달되는 거리를 아크 플래시 보호범위로 정한다.

7) 난연성(Flame resistant; FR)

난연성이라 함은 점화 중 또는 점화 후에 일련의 화염이 진행 되는 것을 막거나 종결 또는 억제하는 물질특성을 말한다.

2. 분석 및 평가 절차



2.1 자료 조사

신규 전력계통은 설계도면을 참조하여 자료를 파악할 수 있지만, 운전 중인 전력계통은 그동안 변경된 저압회로까지 조사하여 단선 결선도를 수정 보완하는 데 많은 시간과 노력이 요구된다. 수개월 동안 아크 플래시 위험분석의 전체 일정 중에서 50%정도를 이 과정에서 소요하게 되는 어려움이 있다. 세부적인 자료조사는 다음 사항을 참조하여 정리한다.

- ① 전원 측부터 구내 저압계통의 배분전함, 케이블, 전동기까지 조사한다. 단 소용량 변압기 3상 125kVA 이하로 공급하는

240V이하의 저압기기와 단상 3선식 계통은 제외한다.

- ② 전동기 용량은 37kW 이상을 적용한다.
- ③ 계통접지방식을 조사한다. 단 고저항 접지방식은 비접지 방식으로 취급한다.
- ④ 조사된 기기 구성요소들을 식별하고, 계통해석, 유지관리를 목적으로 단선 결선도를 수정 보완한다.
- ⑤ 적용범위는 [표 1]과 같다.

[표 1] 아크 플래시 위험분석 적용범위

구분	적용 범위
계통 전압	3상 208V~15,000V
주파수	50Hz 또는 60Hz
3상 단락전	700A~106,000A
도체간격	13mm~152mm
큐비클, 배분전함	open air, box, MCC, panel, switchgear, cables
계통 접지방식	비접지, 직접접지, 저항접지
고장 조건	3상 단락고장

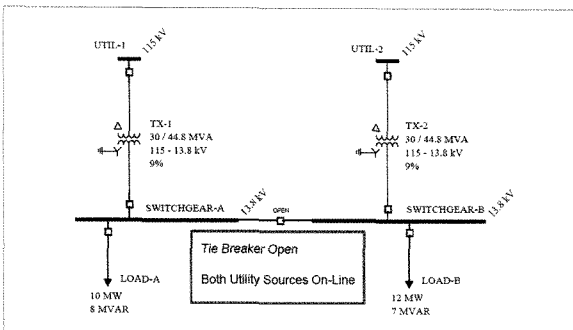
(출처) IEEE Std 1584-2002

- (주) 1. 단상 부하 또는 DC 계통은 이 조건을 적용하지 않음.
- 2. 저압 전동기는 37kW 이상을 조사하여 단락전류 계산.
- 3. 초기 대칭분 3상 단락전류(A) : I_b (bolted fault current)
- 4. 15,000V를 초과하는 계통은 Ralph Lee에 의한 수식으로 계산.

2.2 전력계통 운용모드 결정

방사형의 단순한 전력계통은 최대 단락전류와 최소 단락전류 차이가 거의 없지만, 대용량 플랜트와 같이 운용조건이 복잡한 전력계통은 수전 또는 모선방식에 따라 여러 개의 단락전류 계산조건이 발생한다. 예를 들어 [그림 5]와 같이 구성된 계통에서 UTIL-1, UTIL-2와 BUS TIE 차단기 투입 또는 개방 모드에 따라 단락전류의 차이가 크게 나타나므로 다음 사항을 고려하여 계통운용 모드를 결정한다.

- ① 1회선 또는 2회선 수전방식
- ② Bus tie 차단기 투입 또는 개방
- ③ 발전기 병렬운전 조건



[그림 5] 전력계통 운용모드 예

2.3 단락전류(I_b : bolted fault current) 계산

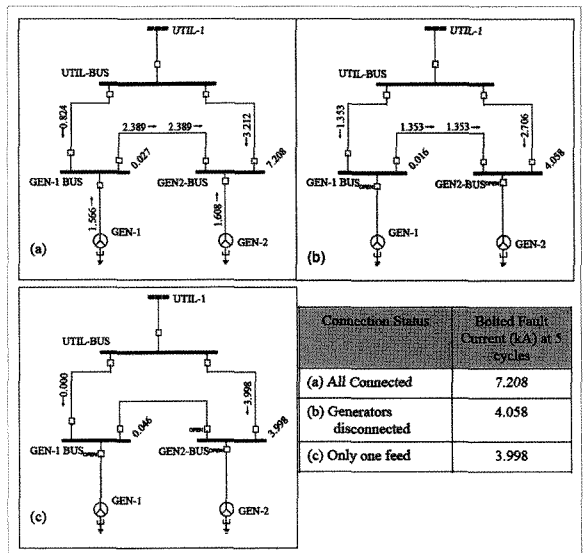
즉 [그림 5]와 같이 어느 고장 지점의 3상 단락전류는 전력계통 운용모드에 따라 최대 단락전류와 최소 단락전류의 차이가 분명하기 때문에 이 것을 구분하여 계산한다. 왜냐하면 기기정격은 최대 단락전류를 적용하면 되지만, 과전류 보호계전기의 반한시 동작특성은 최소 단락전류에서 보호계전기의 동작시간이 지연되므로 아크 플래시 사고에너지가 더 증가하기 때문이다.

1) 최소 단락전류(Tie 차단기 개방)

[그림 5]의 13.8kV switchgear-A 모선 고장조건일 때 전원측(UTIL-1)으로부터 공급되는 단락전류와 부하측(LOAD-A)의 회전기로부터 공급되는 단락전류를 합해서 구한다.

2) 최대 단락전류(Tie 차단기 투입)

[그림 5]의 LOAD-A 회로 고장조건일 때, 전원측(UTIL-1)과 전원측(UTIL-2)으로부터 공급되는 단락전류와 부하측(LOAD-A, LOAD-B)의 회전기로부터 공급되는 단락전류를 합해서 구한다.

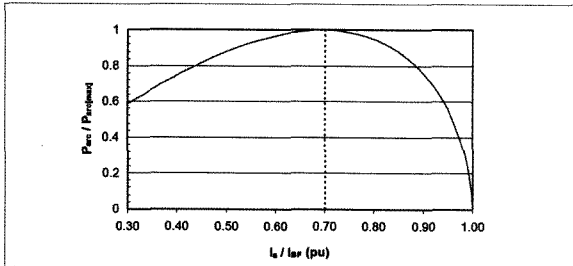


[그림 6] 계통 운용모드에 따른 단락전류 흐름도 예

2.4 아크 고장전류(I_a) 계산

아크 고장전류를 정확히 계산하는 일은 어려운 일이므로 계산 모델을 정하여 구하고 있다. 아크 고장전류는 고장지점의 아크 임피던스 때문에 단락전류보다 낮게 계산된다. [그림 7]은 테브난의 등가회로로부터 고장 지점의 아크 임피던스를 0으로

하여 완전 3상 단락전류를 구한 후 아크 고장전류 변화에 따른 사고에너지 변화정도를 보여주고 있다. 이론적으로 3상 단락전류와 아크 고장전류의 크기가 같은 조건 $I_a/I_{bf} = 1.0pu$ 에서 사고에너지의 크기는 변화하지 않는다. 그러나 3상 단락전류의 70%로 감소하는 아크 고장전류에서 사고에너지는 가장 크게 변화되는 것을 알 수 있다. 따라서 [표 2] 조건처럼 전압, 기기 형태, 도체간격, 거리계수 등을 적용하여 실험결과에 의한 아크 고장전류는 고·저압에 따라 (수식1)과 (수식2)로 계산한다.



【그림 7】 아크 고장전류 변화에 따른 사고에너지 변화특성

① 저압인 경우 (<1,000V)

$$\log_{10} I_a = K + 0.662 \log_{10} I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V (\log_{10} I_{bf}) - 0.00304 G (\log_{10} I_{bf}) \quad (\text{수식 1})$$

여기서

I_a : 아크 고장전류(kA)

K : -0.153(open 형태), -0.097(box 형태)

I_{bf} : 대칭분 3상 단락전류(kA)

V : 계통 전압(kV)

G : 도체 사이의 갭(mm), [표 2] 참조

② 고압인 경우 ($\geq 1,000V$)

$$\log_{10} I_a = 0.00402 + 0.983 \log_{10} I_{bf} \quad (\text{수식 2})$$

$$I_a = 10^{(0.00402 + 0.983 \log_{10} I_{bf})} \quad (\text{수식 3})$$

【표 2】 전압 및 기기 형태에 따른 적용 계수

계통 전압(kV)	기기 형태	도체 사이의 간격(mm)	거리 계수(λ)
0.208 ~ 1	open air	10~40	2.000
	switchgear	32	1.473
	MCC and panels	25	1.641
	cable	13	2.000
>1 ~ 5	open air	102	2.000
	switchgear	13~102	0.973
	cable	13	2.000
>5 ~ 15	open air	13~153	2.000
	switchgear	153	0.973
	cable	13	2.000

(출처: IEEE Std 1584-2002 Table 4)

(주) 거리 계수(λ)는 사고에너지 계산을 위한 factor 임

여기서, 고압인 경우는 open, box 형태를 구별하지 않으므로 K 값을 적용하지 않는다.

2.5 보호기기 동작특성과 아크 지속시간

과부하 또는 단락 사고로부터 변압기, 콘덴서, 전동기, 발전기, 케이블, 부스, 기기 등을 보호하기 위해 적절한 보호기기를 사용한다. 보호기기는 과전류 보호계전기, 퓨즈, 차단기 등이 사용되며 보호협조를 통해 고장 지점을 선택차단하고, 아크 플래시 위험으로부터 작업자를 보호할 수 있어야 한다. 특히 보호기기의 동작시간은 아크 플래시 사고에너지 증감에 영향을 크게 미치게 된다.

2.5.1 퓨즈

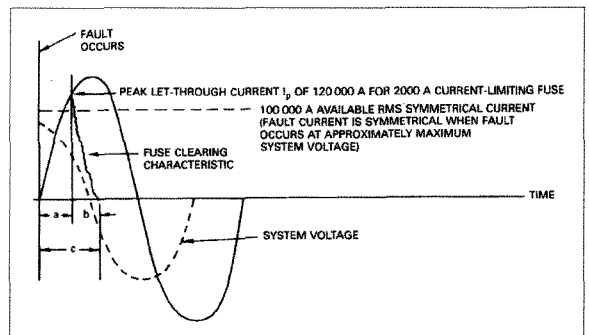
퓨즈의 동작특성은 제작사로부터 용단시간, 아킹 제거시간을 입수할 수 있으나, 만일 평균 용단시간을 알고, 아킹 제거시간을 모를 때는 평균 용단시간 0.03초까지 15%, 0.03초를 넘는 경우 10%의 아킹 시간을 더해서 아킹 지속시간을 구한다.

〈참고 1〉

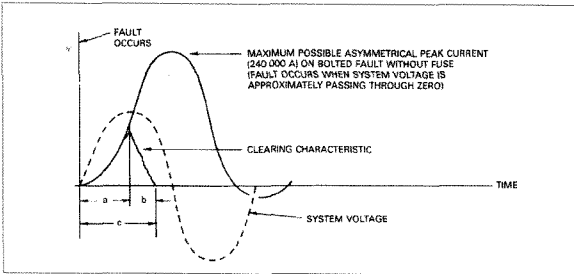
퓨즈 평균 용단시간이 0.03초 이내라고 가정하면, 고장지점의 아킹 지속시간은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\text{평균 용단시간 } 0.03\text{초} + (0.03\text{초} \times 0.15) = 0.0345\text{초}$$

[그림 8]과 [그림 9]는 초기 단락전류를 제한하는 퓨즈의 동작시간 예를 나타낸 것이다. 여기서 a: 용단시간, b: 아킹 시간, c: 단락전류 제한시간을 말한다. 이와 같이 퓨즈는 매우 빠르게 초기 비대칭 단락전류를 제한하는 특성이 있으므로 열적 스트레스로부터 기기를 보호하게 된다. 퓨즈 동작특성은 제작사 카다로그를 참조한다.



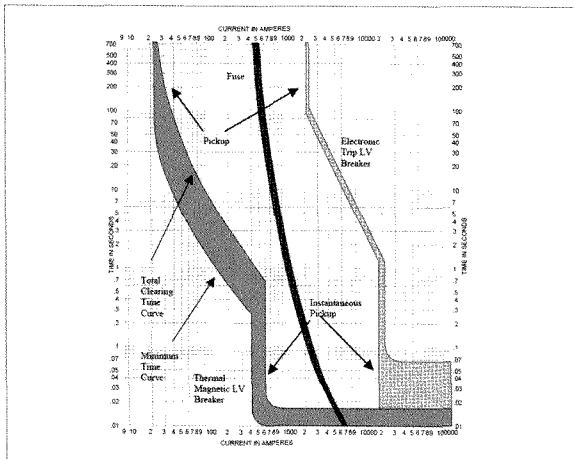
【그림 8】 전압 피크일 때 단락전류 제한



[그림 9] 전압 영점일 때 단락전류 제한

2.5.2 저압 차단기

저압 차단기의 동작특성은 제작사의 카다로그를 참조한다. [그림 10]에서 배선용 차단기의 고장 제거시간(total clearing time curve)이란 차단기의 트립핑과 아킹 제거시간을 포함한다.



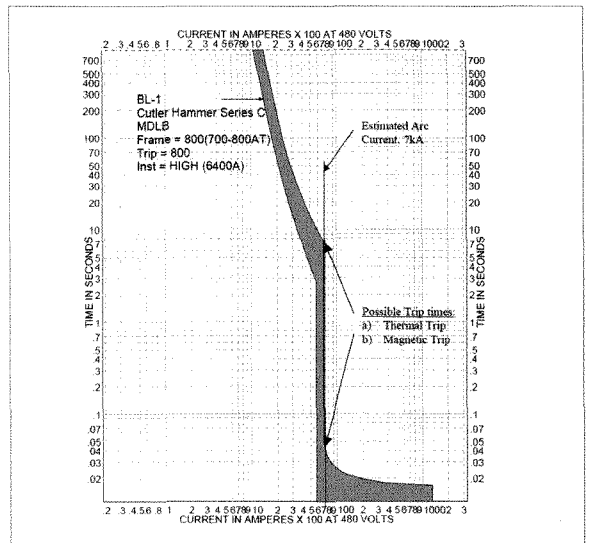
[그림 10] 보호기기 동작특성 예

<참고 2>

아킹 지속시간은 고장 지점을 보호하는 퓨즈, 저압 차단기, 과전류 보호계전기 등의 동작시간에 관계된다. [그림 10]에서 보는 바와 같이 보호기기별 동작특성과 같이 band 폭이 두껍고 얇은 것의 차이를 알 수 있다. Thermal magnetic breaker 타입의 배선용 차단기는 Minimum time curve와 Total clearing time curve의 분명한 차이를 보여주고 있다. Electronic breaker 타입의 배선용 차단기는 상대적으로 band 폭의 차이가 크지 않다.

<참고 3>

[그림 11]에서 보는 바와 같이 아크 고장전류가 7kA인 회로에서 배선용 차단기가 0.04초로 순시 동작하는 경우와 6초 정도로



[그림 11] 배선용 차단기 동작특성 예

지연 동작하는 경우 아크 플래시 사고에너지의 크기는 상당한 차이를 보이게 된다. 이 조건에서 IEEE 계산에 의하면 0.04초에 순시 동작할 때 사고에너지는 $2.5 cal/cm^2$ 이므로 개인 안전보호구(PPE)의 카테고리 1에 해당된다. 그러나 6초에 지연 동작하는 경우 $9 cal/cm^2$ 이므로 PPE 카테고리 1에서 3으로 높아진다. 따라서 PPE를 착용하지 않은 상태에서 카테고리 3의 사고에너지에 노출되면 더 심각한 화상을 입게 된다. 여기서 주의할 사항은 배선용 차단기의 순시 동작 값이 6400A이고, band 폭을 고려할 때 아크 고장전류에 순시 부동작의 우려가 있다. 따라서 배선용 차단기의 순시 동작 값은 최소한 2상 단락전류에서도 충분히 순시 동작할 수 있도록 $7,000A \times 0.866 \approx 6,000A$ 값에 재조정할 수 있다.

이와 같이 저압회로의 아크 플래시 위험을 최소화하고자 하는 경우 분기회로 또는 Local 회로의 배선용 차단기 용량은 다음 조건을 검토하도록 권한다.

- ① (배선용 차단기 정격전류 $\times 10$ 배 < 3상 단락전류) 조건을 만족할 것. 가급적 2상 단락전류에서도 순시 동작
- ② 배선용 차단기 차단용량: 차단기 설치 지점의 3상 단락전류를 차단할 수 있을 것
- ③ 저압차단기의 사고에너지 및 아크 플래시 보호는 [표 7] 참조

▶▶ 다음호에 계속