

電氣設備의 트러블 對策

4

IV. 眞空低下로 發生하는 트러블

1966년 日本에서 최초의 진공차단기가 제품화된 이래 진공기기는 큰 발전을 이루어 지금이야말로 低壓에서 高壓에 이르는 개폐기기의 주요기종이 되어 그 定格도 지금보다 더 高壓化, 大容量化에로 진보하고 있다.

동시에 기초재료기술, 제조기술, 품질관리기술의 진보에 따라 진공밸브 자체의 신뢰성도 급속히 향상되고 眞空度 저하도 현재로서는 거의 문제되지 않는다. 量産機種의 하나인 柱上眞空開閉器가 약 10¹⁰시간의 累積稼動時間中, 眞空低下를 포함하는 진공밸브의 故障皆無記錄을 계속하고 있는 것이 그 일례이다. 이 信賴性은 모든 工業製品과 비교하여도 매우 높은 값이라고 할 수 있다.

그러나 만일의 경우를 생각하여 實使用狀態에서 眞空度가 低下할 때의 現象 혹은 진공도의 체크방법 등에 관하여 明確히 하는 것은 앞으로 眞空機器의 발전에 있어서도 매우 중요한 일이다.

1. 眞空開閉機器의 種類

진공개폐기기는 眞空의 우수한 絶緣耐力과 消

弧能力을 이용한 것으로 알고 있는 바와 같이 眞空遮斷器, 眞空컨덕터(Conductor), 眞空開閉器의 세가지로 大別된다.

이들의 기기에 사용되는 眞空밸브도 기본구조는 동일하나 細部는 그 用途別로 차단기용, 컨덕터용, 개폐기용으로 구별된다.

표 1 에 현재 제조되고 있는 眞空機器의 일반적인 定格事項 등의 一覽을 나타내었다.

2. 眞空도와 電氣的 性能



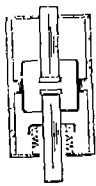
가. 眞空도와 絶緣耐力

진공밸브의 内部가 완전한 진공상태라고 가정하고 이것에 壓力을 印加하여 放電시켰다고 하자, 이 경우 電極間의 導電媒體로부터 供給되는 以外에는 아무것도 없다. 따라서 形狀을 일정하게 하면 絶緣耐力은 반드시 전극재료에 의존하게 된다.

이 眞空의 絶緣 파괴에 관한 이론은 아직 완전하게 確立되어 있지 않으므로 자세한 것은 생략하지만 (i) 電界放出說, (ii) 粒子交換說, (iii) 크램프說 등이 있다.

실제로는 어느것이든 이론에 맞다는 것이 아니라 條件에 따라서 서로 관련을 맺으면서 作用

<표 1> 眞空開閉機器의 種類

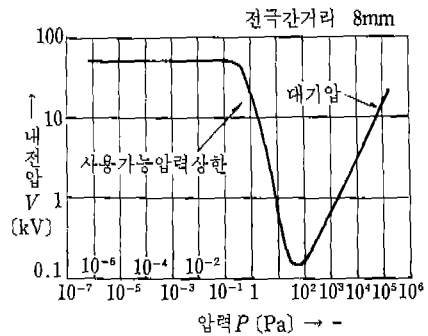
區分	眞空遮斷器	眞空컨덕터	眞空開閉器
眞空밸브構造	㉓ 	㉔ 	㉕ 
定格範圍	電壓(kV)	3.6~168	0.4~12
	電流(A)	400~3,000	150~800
	遮斷電流(kA)	8~100	400~600
	開閉回數(回)	1만~5만	1.25~10
			(短時間電流 12.5~25) 投入電流 31.5~63
	1만~5만	5만~500만	0.5만~1만

하는 것이라고 推定된다.

그런데 이 세상에는 완전한 眞空은 없으며 또 만든다는 것도 不可能하다. 따라서 眞空밸브로서 高耐壓을 기대하기 위해서는 실제로 어느 정도의 眞空度가 필요한가를 알아야 한다. 완전한 진공이 아니라도 電子의 平均自由行程(Mean Free Path:空間中の 電子가 氣體分子와 충돌하는 일 없이 走行하는 거리의 평균치)이 電極間 距離보다도 훨씬 크면 실질적으로 氣體分子의 衝突電離에 의한 절연파괴는 無視된다. 이와 같은 조건이 성립하는 것은 현실적인 眞空밸브의 크기에 있어서 약 10^{-1} Pa(Pa:Pascal, 133Pa=1Torr) 이하의 壓力에 관해서이다.

이보다도 氣壓이 높아지고 平均自由行程이 적어지면 당연히 절연파괴전압은 低下한다. 壓力을 P_1 , 電極間距離를 d 라고 하면 空氣의 경우 $P \cdot d = 760(\text{Pa} \cdot \text{mm})$ 으로 절연내력은 最小值를 나타낸다.

더욱이 壓力이 높아지고 平均自由行程이 적어지면 電子와 分子의 衝突回數는 증가하지만 電子는 충분히 加速되지 않은 상태에서 다음의 分子에 충돌하게 되고 오히려 電離는 일어나기 어렵게 된다. 이 때문에 氣壓의 증가에 따라 절연내력은 반드시 증가한다. 그림 1에 典型的인 眞空



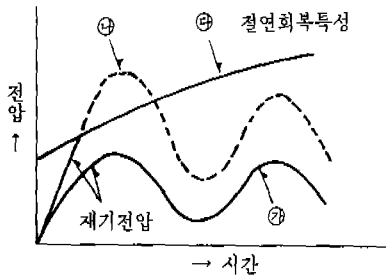
<그림 1> 眞空밸브의 壓力對耐 電壓特性

밸브의 壓力과 絶緣耐壓의 關係를 나타낸다.

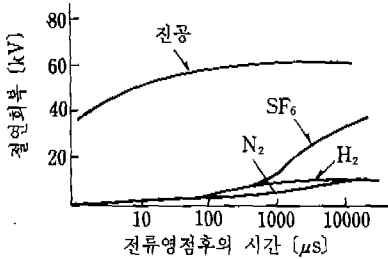
이상과 같이 耐壓에서는 진공밸브의 内部壓力은 10^{-1} Pa 이상인 것이 필요하다.

나. 眞空度의 遮斷能力

일반적으로 전류의 차단에 의한 차단기의 成功 여부는 電流零點通過直後 電極間的 절연회복이 再起電壓의 상승보다도 빠르거나 그렇지 않은가에 의한다. 그림 2에 그 모양을 나타내었다. ㉗의 경우는 차단성공, ㉘의 경우는 차단실패이다. 그러므로 電極間的 절연회복특성 ㉘의 曲線이 그 차단기의 차단특성을 결정한다. 그림 3에 각종



〈그림 2〉 遮斷時의 絶縁回復 電壓과 再起電壓



〈그림 3〉 各種 遮斷媒質의 絶縁回復

媒質의 절연회복특성을 나타내었다. 그림에서도 진공의 절연회복은 매우 빠르고 이 때문에 진공 차단기는 다른 遮斷器보다도 아주 우수하여 遮斷性能이 좋은 것을 알 수 있다. 특히 再起電壓의 발생이 빠른 近距離線路故障遮斷이나 高周波電流의 차단에 뛰어난 성능을 발휘한다.

이와 같이 진공의 절연회복이 빠른 것은 아크 期間中에 발생한 金屬蒸氣, 電子, 이온이 극히

짧은 시간에 포착되기 때문이라고 생각하고 있다.

遮斷時 아크의 내부압력은 1氣壓($\approx 10^5\text{Pa}$)을 초과한다고 하며 이때 아크柱 周圍의 容器內壓力이 0 Pa나 10^{-1}Pa 라도 아크 内部와의 압력차는 거의 10^5Pa 이기 때문에 압력차에 의존하는 擴散速度는 동일하다고 간주할 수 있다. 진공밸브는 통상 10^{-1}Pa 이하의 壓力으로 제조되는데 上記理由에 따라 性能上은 10^{-1}Pa 이하이면 사용상 支障은 없다.

3. 眞空밸브의 眞空度 維持

가. 内部壓力增加要因과 對處方法

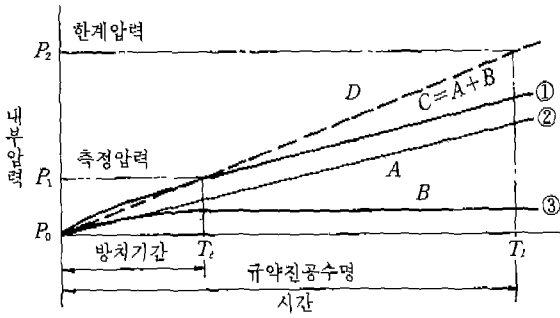
진공밸브가 그 기능을 충분히 발휘하기 위해서는 앞에서 기술한 바와 같이 어느 일정한 眞空度(約 10^{-1}Pa) 이하로 유지할 필요가 있다. 진공밸브의 内部壓力增加 要因으로는 外因的인 이상을 제거하고 가스透過, 가스放出, 리크(Leak)가 있으나 현재로서는 표 2에 나타난 方法에 따라 해결되어 전혀 문제가 없다.

나. 眞空밸브의 壽命管理

진공밸브는 제조후 곧바로 出荷하지 않고 一定 期間 放置하여 그후 내부압력을 측정하여 放置前 後의 압력차에 의하여 그 수명관리를 소중히 하

〈표 2〉 眞空밸브의 内部壓力增加要因과 對處方法

内部壓力增加要因		對處方法
가스透過	진공밸브의 절연용기나 金屬部分을 투과하여 氣體가 内部로 侵入한다(주로 水素).	진공밸브의 구성재료 선택과 용기의 구조설계에 의하여 解決할 수 있어 별 문제가 없다.
가스放出	진공밸브의 内壁에 吸着하고 있는 气体와 진공밸브 構成部 材料가 内藏되어 있는 气体가 放出된다.	가스含有量이 적은 材料를 사용하고, 또한 진공밸브의 제조공정에서 加熱·脱가스에 의하여 가스放出量을 아주 적게 할 수 있다. 또 眞空밸브内部에 설치되어 있는 가스吸收材, 혹은 게터가 화학적으로 또는 물리적으로 가스를 吸收하고 放出가스를 적게 할 수 있다.
리크	작은구멍, 리크홀이 있으면 眞空밸브 内外의 壓力差에 따라 공기가 유입된다.	제조기술과 품질관리기술에 따라 피할 수가 있다. 高度한 것이나 현재는 確立된 기술이다.



- ① 진공벨브의 내부압력 변화
- ② 누설에 의한 압력변화
- ③ 내부방출가스에 의한 압력변화

〈그림 4〉 眞空벨브의 壽命管理方法

고 있다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 리크에 의한 압력변화 A와 내부방출가스 B가 만나는 곡선 C와 같이 변화한다고 생각된다. 이제 제조직후의 내부壓력을 P_0 , 一定期間 T_0 경과후의 내부壓력을 P_1 로 하고, 直線的으로 外插하여 限界壓力 P_2 에 도달할 때까지의 時間 T_1 를 구하면

$$T_1 = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \times T_0$$

가 된다. 이 T_1 를 規約壽命이라 칭하고, 일반적으로 T_1 로 진공벨브의 수명을 設定하여 全數測定 管理하여 出荷된다. 다만, 실제로는 内部가스放出, 리크는 극히 적고, 실질적인 수명은 規約壽命보다도 훨씬 길다.

4. 眞空도가 低下할 경우의 트러블

가. 眞空度 低下의 原因

앞에 설명한 바와 같이 眞空벨브의 진공도저하를 완전히 0으로 하는 것은 불가능하지만 實際使用壽命을 고려한 진공도관리가 全數에 대하여 실시되기 때문에 사용중에 진공불량이 발생하게 되면 그것은 아래에 표시하는 것과 같은 眞空벨브가 제조된 다음의 外部的인 要因에 의하는 경우가 많다.

- (i) 落下, 타격 등의 충격에 의한 容器的 破損

- (ii) 可動軸의 뒤틀림, 動粘度過多, 開閉回数過多 등에 의한 벨로즈(Bellows)의 파손
- (iii) 定格을 초과한 通電 또는 차단에 의한 破損
- (iv) 金屬部の 腐食

나. 眞空도가 低下할 경우의 현상

眞空度低下時의 현상은 다음의 각 모드에 관하여 생각할 필요가 있다.

機器의 상태 혹은 動作에 관하여

- (i) 閉路狀態
 - (ii) 閉路動作
 - (iii) 閉路狀態
 - (iv) 閉路動作
- 眞空도에 관하여

- (i) 리크塗上에 있을 경우($10^{-1}(\text{Pa}) < P < 10^{-5}(\text{Pa})$)
- (ii) 完全大氣壓($P = 10^5(\text{Pa})$)

(1) 閉路狀態에 있는 경우

閉路狀態에서는 通電性能이 문제가 된다. 무엇인가의 原因으로 공기중의 산소가 진공벨브内部에 들어가면 接觸部의 酸化에 의하여 접촉저항이 증가하고 과열하는 일이 일어난다. 특히 진공도저하의 상태에서 負荷電流程度의 閉路를 한 후에는 비교적 빨리 酸化가 진행된다. 다만, 이것은 점점에 산화하기 쉬운 材料가 이용되는 경우이다. 또 일부의 진공컨덕터와 같이 接觸의 접촉하중을 자신의 自閉力에 의존하고 있는 경우, 진공도가 저하되고 自閉力이 상실되면 당연히 접촉력이 불충분하게 되어 과열되는 일이 있다. 다만, 차단기나 개폐기의 경우 자폐력은 外部加壓力이 自閉보다 훨씬 크기 때문에 이 영향은 받지 않는다.

이러한 것은 어느 것이나 完全大氣壓이 된 경우에 나타나는 현상이며 리크塗上에서는 거의 발생하지 않는다.

(2) 開路動作을 한 경우

일본을 예로 들면, 30kV級 系統까지는 中性點 非有效接地方式이고 이 경우 3相中이 진공불량이라도 負荷電流로부터 定格遮斷電流까지의 모든 電流를 차단할 수가 있다. 그림 5 는 6.6kV 43.7kA를 1相大氣壓의 진공벨브를 설치하여 차단한 오실로그래프의 예인데 아크시간 15ms로 문제없이 차단이 되며 진공불량의 A相은 65ms후에 零相電流도 차단하고 있다. 大氣壓벨브의 경우 20A 정도의 零相電流까지 차단할 수가 있다. 만일의 경우 진공벨브가 리크途上에 있고 또한 絶緣耐力이 아주 낮은 10Pa에 있을 경우에는 負荷電流 혹은 短路電流의 차단은 가능하지만 零相電流의 차단은 불가능하다. 이 경우 전류의 크기에 따라서 진공벨브는 熱的으로 破壞되는 경우가 있다. 다만, 파괴의 형태는 靜的으로서 세라믹 혹은 유리 容器에 금이 생기는 정도이다.

磁氣遮斷器와 같이 아크電壓을 높여 차단하는 타입의 차단기에 있어서는 1상의 消弧能力이 손상된 상태에서 차단하면 不良相의 아크電壓分擔 分단 차단능력이 低下되고 경우에 따라서는 차단이 불가능하게 된다. 이에 대하여 眞空遮斷器의 경우 아크전압은 겨우 수십V이며 차단은 오로지 電流零點通過直後の 絶緣回復에 의해서만 행해진다. 이 때문에 1相眞空不良時에 건전한 2相에 부과되는 가혹도는 적다. 즉 3相中 1相의 消弧能力

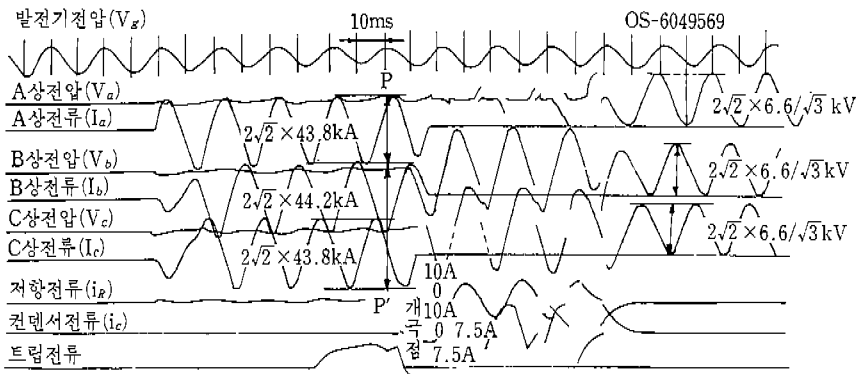
이 손실된 경우의 차단에 관한 信賴性은 다른 차단기에 비하여 진공차단기가 높다고 한다.

(3) 開路狀態에 있는 경우

대기압의 진공벨브가 開極狀態에서 사용되고 있는 경우, 통상 極間耐壓은 正規電壓 이상이기 때문에 外部에는 異常現象으로 나타나지 않는다. 만일 불량진공벨브가 리크途上에 있고 또한 10Pa 가까운 절연내력이 낮은 領域인 경우에는 極間에 글로(Glow) 放電이 생긴다. 만일 負荷側의 對地 容量이 크면 對地充電電流가 極間에 흐른다.

(4) 投入動作을 한 경우

정상인 경우라도 投入時에는 接點이 접촉하기 직전에 절연과괴를 발생시키고 電流가 흐르기 시작한다(이것을 플레이크라 한다). 1相眞空不良狀態에서 投入動作을 하면 정상적인 경우보다도 不良相은 빠르게 절연과괴된다. 그러나 중성점 非有效接地系의 경우 다른 健全相이 發弧할 때까지 전류는 흐르지 않기 때문에 실질적으로 플레이크 期間이 대폭 증가하지는 않는다. 따라서 플레이크는 점점을 손상하는 원인의 하나이지만 일반적으로 1相眞空度低下의 상태에서도 投入動作은 지장없이 행할 수 있다. 다만, 後者와 같이 眞空컨덕터의 일부에는 自閉力이 손실된 경우에 투입동



<그림 5> 一相眞空不良時의 短路試驗 오실로그래프

〈표 3〉 1相眞空度低下인 경우의 現象

區分	現 象	
	리크塗上 $10^{-1}Pa < P < 10^0Pa$	完全大氣壓 $P = 10^0Pa$
通電 狀態 ↓	○異常없음	○異常없음(컨덕터 일부로 接觸荷重을 眞空自閉力에 의지하는 경우 過熱되는 경우가 있다.) ○接點酸化에 의한 過熱(酸化하기 쉬운 接點材料使用의 경우)
遮斷 動作 ↓	○負荷電流 事故電流의 遮斷可(非有效接地인 경우) ○零相電流의 遮斷은 不可, 電流의 크기에 따라서는 眞空밸브	○負荷電流, 事故電流의 遮斷可(非有效接地의 경우) ○通常의 零相電流(20A 이하)는 遮斷可
開極 狀態 ↓	○不良相의 電極間에 글로 放電發生 ○零相電流가 있으면 계속 흐르고, 電流의 크기에 따라서는 眞空밸브 破損	○異常없음
投入 動作	○異常없음	○異常없음

작을 로크하는 安全裝置가 설치되어 있는 것도 있다. 이상의 各 모드別現象을 표 3에 종합하였다.

되어진다. 다음에 여러 가지 방법에 관하여 간단히 설명한다.

5. 眞空度 判定方法

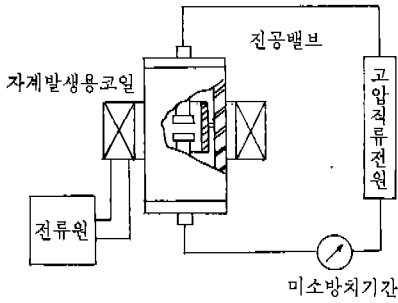
가. PIG法

진공밸브의 眞空度を 판정하는 데에는 표 4에 나타낸 바와 같은 여러 가지의 方法이 있으나 각기 특징이 있으며 사용하는 狀況에 따라서 分類

그림 6과 같이 眞空밸브를 開極狀態로 하여 磁界를 加하면서 電極間에 直流電壓을 印加한다. 그러므로 이른바 페닝(Paning)放電(마그네트론

〈표 4〉 眞空度の 判定方法

方 法	原 理	特 徵	適 用			
			리크 塗上	完 全 大氣壓	閉路 狀態	開路 狀態
① PIC法	眞空밸브에 外部로부터 電界와 磁界를 증가시키고 이때의 放電電流에 의하여 内部壓力을 안다.	定量的인 測定을 할 수 있으나 專用裝置가 필요하므로 일반적이 아니다	○	○		○
② 自閉力法	接點에 의하여 大氣壓에 의한 自閉力을 檢出한다.	간편한 方法으로 機器에 조립. 安全裝置로 할 수 있다.		○		○
③ 耐電壓法	耐電壓值를 포터블 耐壓計로 測定한다.	비교적 간편하며 확실	○			○
④ 게 터 法	유리容器 内面에 蒸着한 금속비름 등이 가스의 變色하는 性質을 이용한다.	특별한 裝置를 필요로 하지 않으나 유리製 眞空밸브에 한한다.		○	○	○
⑤ 電 壓 檢 出 法	負荷側에서 誘起된 電壓을 檢出한다.	機器에 組立, 安全裝置로 할 수가 있다. CR 分壓器 등을 사용	○			○
⑥ 電 界 檢 出 法	眞空度の 變化에 의한 中間 실드의 電位分布의 變化를 檢出한다.	機器에 組立, 安全裝置로 할 수 있으나 복잡하여 高價	○		○	○



〈그림 6〉 PIG 방식에 의한 内部壓力의 測定原理

Magnetron放電)이 생기고 μA 오더의 전류가 흐른다. 이 電流는 内部壓力과 相關性이 있기 때문에 이에 따라 眞空度를 알 수가 있다.

이 方法은 眞空도가 定量的으로 측정될 수 있으나 專用裝置를 필요로 하기 때문에 주로 메이커에 있어서 壽命管理에 이용되고 있다.

나. 自閉力 利用法

진공벨브의 接點은 벨로즈를 통하여 大氣壓을 받기 때문에 항상 일정한 自閉力을 가지고 있다. 만약 氣密이 파괴되어 内部가 大氣壓이 되면 이 自閉力을 상실한다. 따라서 진공벨브 可動軸을 引張하고 自閉力을 측정하는 바에 따라서 진공의 良否를 判定할 수가 있다. 이 方法은 내부압력이 대개 大氣壓에 가깝지 않으면 不良의 判定가 곤란하지만 간편하기 때문에 잘 이용된다. 특히 진공컨덕터(Vacuum Conductor)와 같이 接點의 接觸荷重中 自閉力이 접하는 비율이 큰 것에 대하여는 自閉力의 異常을 檢知하여 自動적으로 投入動作을 로크(Lock)하는 安全機能을 설치할 수 있으며 實用化되어 있다.

다. 耐電壓法

진공벨브는 반드시 그림 1과 같은 耐電壓特性을 가지고 있기 때문에 이것을 이용하여 진공도 저하를 간단하게, 그렇지만 비교적 정확하게 판

정할 수 있다. 각 메이커는 포터블(Portable)式의 耐電壓체커(checker)를 준비하고 있다.

라. 게터法(Getter Method)

게터는 예를 들어 金屬바륨을 유리容器的 内部에 蒸着시킨 것으로서 化學變化에 따라 内部가스를 吸着하면 黑銀色으로 변화하는데 따라 眞空度의 劣化를 알게 하는 것이다. 다만, 안전하게 大氣壓이 되지 않으면 判定는 어려울 경우가 많다. 유리容器式眞空벨브에는 여전히 이 플래시게터(Flash Getter)가 이용되는 것도 있다.

마. 電壓檢出法

리크途上의 耐電壓이 저하하는 領域에서는 開極狀態에서도 極間에 글로放電(Glow Discharge)이 생기고 負荷側에 電壓이 유지된다. 이 電壓을 檢출하여 不良을 체크하고, 혹은 警報를 발할 수가 있다. 전압의 檢출에 CR서지(CR Surge) 서프레서(Suppressor)와의 컨덴서分壓을 이용한 眞空不良檢出裝置도 실용화되고 있다. 이 方法은 開極狀態에서 진공도가 완전한 大氣壓이 되기 전의 진공도저하시에 檢출되는 것이 특징이다.

바. 電位鮎布의 變化檢出法

中間실드와 大地間的 靜電容量이 충분하고 클 경우 진공도가 저하하면 中間실드의 電位가 변화한다. 이것을 이용하여 眞空不良을 檢출하는 方法도 最近 제안되고 있다.

* * *

工業製品에 있어서 어떻게 信賴性이 向上되는가 하면 「萬一의 경우」를 무시할 수는 없다. 특히 各種 保護를 目的으로 한 機器에 관하여는 여러 각도에서 검토가 필요하다. 여기서는 眞空機器의 심장부인 眞空벨브의 진공도가 低下할 경우의 現象 등에 관하여 기술하였다.