

GIS에서의 유한요소법을 이용한 전계계산 적용사례

김 희 진 · 송 원 표
(효성중공업 기술연구소 차단기팀)

1. 서 론

최근의 송변전기는 고전압, 대용량화 및 축소화가 진행되고 있으며, 차단기 등의 개폐장치 분야에서도 이러한 추세에 따라 변전소의 Gas Insulated Switchgear(이하 GIS라한다)화가 확산되고 있다. GIS는 주지하는 바와 같이 차단기, 단로기, 접지개폐기, 모선, 계기용변성기(VT, CT)등을 일체화한 것으로, GIS 그 자체가 변압기를 제외한 변전소이다.

GIS는 절연성능과 소호성능이 매우 뛰어난 SF₆ Gas를 사용하고 있기 때문에 종래의 공기절연형 변전소에 비해 대폭적인 축소화가 되며, 고전위도 체부를 금속탱크내에 밀봉하고 있어서 고신뢰성·안전성이 보증되며, 환경오손에 의한 절연저하가 거의 없는 구조로 되어있다. 그러나 SF₆ Gas공간내에 도체를 지지하는 스페이서 및 기중에 노출되어 있는 Gas 부싱(Bushing)등의 고체절연물은 습기, Gas압력, Gas에의 혼합물, 분진, 금속입자등에 의해 표면이 오손되는 경우 고전계집중현상이 일어나서 절연성능에 큰 영향을 준다. 이러한 요인들에 의하여 절연성능이 저하되는 것을 최소화하기 위해서는 복잡한 형상으로 이루어진 전극 및 유전체에 대한 고정도의 전계계산기술이 필요하다.

특히 초고압 전력기기는 단위길이당 매우 높은 전

계가 형성되므로, 전극형상과 절연물의 설계에 있어서 전계가 균등히 분포될 수 있게하는 최적형상설계를 하여야한다. [1] 전극 및 절연물등의 형상이 복잡한 실제 전력기기에서는 일반적인 이론식에 의한 최적설계가 불가능하기 때문에, 최근에는 수치해석법에 의한 전계계산이 주로 사용되고 있으며, Computer의 급속한 발달에 의해 유한차분법, 유한요소법, 경계요소법등의 여러가지 수단이 응용되고 있다. [2~5]

당사에서는 유한 요소법에 의한 정전계계산기술을 개발하여 신뢰성이 높은 전력기기의 설계를 위한 합리적 절연설계를 하고있다. [6, 7] 본고에서는 GIS의 SF₆ Gas공간, 고전위도체부를 절연지지하는 스페이서 및 SF₆ Gas와 공기의 경계를 갖는 Gas 부싱에 대해서 유한요소법에 의한 전계계산의 적용사례를 기술하고자 한다.

2. 정전계계산의 기본방정식 [8, 9]

GIS에서의 SF₆ Gas중 절연내력은 도체와 탱크(enclosure)의 형상에 의한 최대전계강도에 의해서 좌우되기 때문에, 일반적으로 GIS에서의 절연설계에는 정전계계산 기술을 적용하고있다. 정전계계산에서 정상전계의 경우 전계에 관한 Maxwell방정식은 (1)식과 같다.

$$\text{rot}\vec{E}=0 \quad (1)$$

\vec{E} : 전기장의 세기

전계의 세기와 전위(Scalar Potential)는

$$\vec{E} = -\text{grad}\phi \quad (2)$$

ϕ : 전위

의 관계가 있으며, 유전율이 일정한 경우에는 (3)식의 관계가 있다.

$$\text{div}\vec{E} = \text{div}\vec{D}/\epsilon = \rho/\epsilon \quad (3)$$

\vec{D} : 전속밀도, ρ : 공간전하밀도, ϵ : 유전율

(2), (3)식으로부터 정전계계산의 기본방정식 (4), (5)식이 얻어진다.

$$\nabla^2\phi = -\rho/\epsilon \quad (\text{Poisson방정식}) \quad (4)$$

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (\text{Laplace방정식}) \quad (5)$$

경계조건으로는 고정경계조건(Dirichlet Condition), 자연경계조건(Neumann Condition), 미지등전위 경계조건을 적용한다. 고정 경계조건은 경계상 절점의 전위값을 알고있는 경우, 자연경계조건은 전체의 방향이 경계면에 평행한 경우에 적용하며, 미지등전위 경계조건은 비접지부유도체와같이 전위값을 모르는 경우에 적용한다.

$$\text{고정경계조건} : \phi = \phi_i, \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

$$\text{자연경계조건} : \partial\phi/\partial n = 0 \quad (7)$$

또 유한요소법에 있어서 최소화해야 할 범함수는 축대칭 3차원 문제에서 (8)식과 같다.

$$x = 2\pi \iint \left[\frac{\epsilon}{2} \left\{ \left(\frac{\partial\phi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z} \right)^2 \right\} r \right] dr dz \quad (8)$$

3. 적용사례

3.1 SF₆ Gas 공간

GIS는 기본적으로 SF₆ Gas를 절연매질로 사용하고 있기때문에, SF₆ Gas공간에서의 각종 구조, 형상에 대한 절연설계기준을 확립하는 것이 중요하다. GIS 내부에서의 전계분포는 균등히 분포되는 준평등전계로 설계되어지기 때문에 일차적으로 평판전극에서의 전계계산을 검토하고자 한다.

SF₆ Gas 공간의 절연설계는 예상파괴전압과 인가전압을 비교함으로써 가능하며, 예상파괴전압은 전계계산결과로부터 구할 수 있다. AC상용주파전압의 경우 평판전극에서 SF₆ Gas의 절연파괴장도 계산식은 (9)식과 같다. [10, 11]

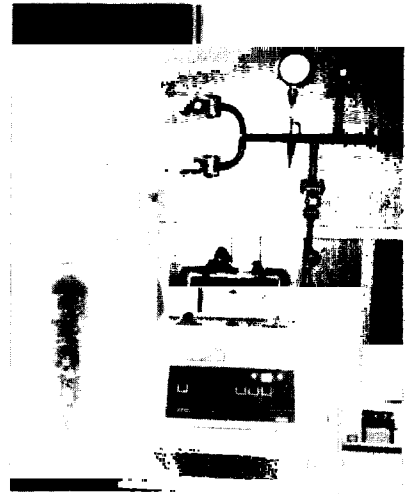


그림 1. 절연내력 시험장치

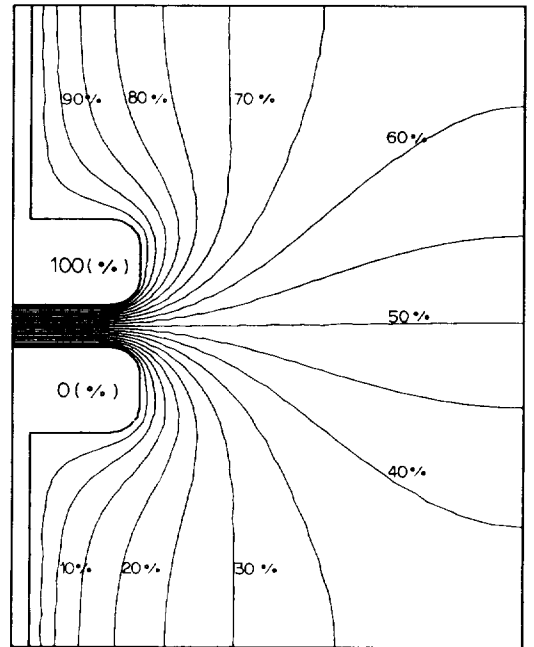


그림 2. 평판전극에서의 전계계산결과(등전위선도)

$$E_0 = 7.5P_0 \quad [\text{kV rms/mm}] \quad (9)$$

E_0 : SF₆ Gas의 파괴전계강도

P_0 : SF₆ Gas의 압력[bar]

이하 SF₆ Gas중 평판전극에서의 불꽃파괴전압의 계산값과 시험값을 비교하고자 한다. 그림1은 본 시험에서 사용한 절연내력 시험장치로서, 각종 규격에 의한 고체·기체·액체의 절연내력시험이 가능하며,

3.2 절연스페이서

GIS에는 SF₆ Gas내의 고전위 도체부를 지지절연하고, Gas공간을 구획관리할 목적으로 고체절연물인 스페이서가 사용된다. 스페이서 그 자체는 매우 뛰어난 절연내력을 갖지만, SF₆ Gas등의 기체와 함께 사용되는 경우에는, Gas, 전극, 스페이서가 공존하는 부위(Triple Junction)가 생기며, 스페이서 연면에는 전계의 왜곡이 일어나기 때문에 금속입자 및

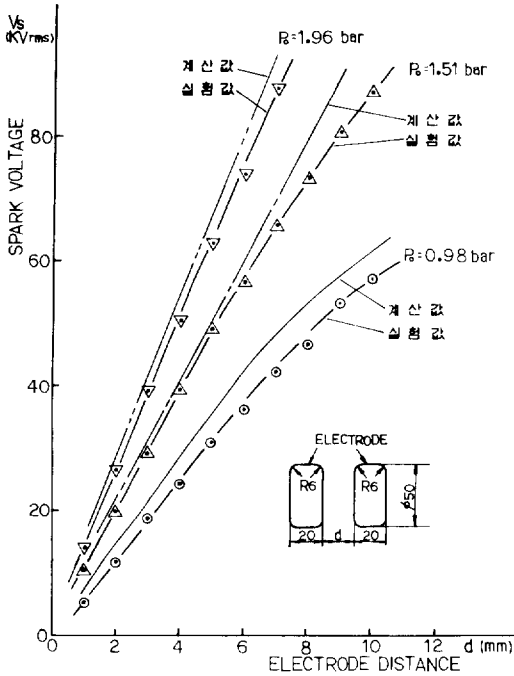


그림 3. 평판전극에서의 SF₆ Gas 절연파괴전압

전압상승률은 0.5kV/s에서 5kV/s까지 조정할 수 있다. 그림2는 지름 50mm, 두께20mm, 곡률반경6mm인 평판전극에 대해서 전극거리 10mm인 경우의 전계계산 결과를 보여준다. 양전극의 전위는 각각 0%와 100%로 하여 계산했으며, 등전위선 간격은 5%이다. 계산결과를 보면 평판전극의 곡면부위에 전계집중현상이 일어남을 볼 수 있다.

그림3에 이 계산결과로부터 구해진 전극거리에 따른 불꽃파괴예상전압과 시험값을 보인다. 시험시 사용된 전극의 재질은 청동이고, 전극간 거리는 2mm에서 10mm까지, SF₆ Gas 압력은 0.8bar에서 2.5bar까지 변화시켜 시험하였다. 그림3에서 보면 전극간 거리가 멀어질 수록 파괴전압은 거의 직선적으로 상승하며, SF₆ Gas 압력에 대한 의존성이 크다는 것을 알 수 있다. 파괴전압치의 시험값과 계산값을 비교해 보면 최대 오차5%이내에서 잘 일치하고 있으며, 이것은 실제 전극의 제작오차, 측정기기오차 및 시험오차등에 기인한 것으로 사료된다. 실제 고전압 전력기기의 절연설계시에는 절연파괴 확률편차, 해석오차, 제작오차, SF₆ Gas의 오순계수 및 Gas순도 등의 영향을 고려하여 전계계산 결과를 적용하고 있다.



그림 4. 스페이서의 절연내력시험장치

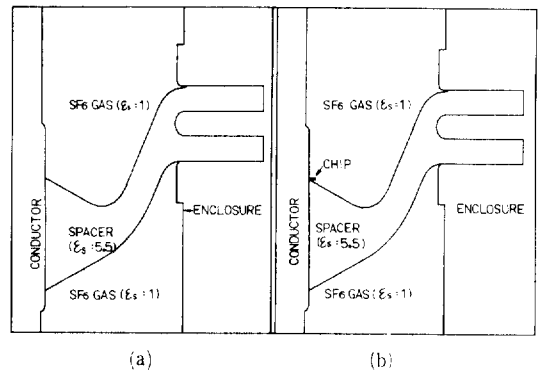


그림 5. 스페이서의 전계계산 모델 형상

- (a) 정상상태
- (b) 금속입자가 존재하는 상태

이물질에 의해서 절연내력이 현저히 저하하게 된다. [12] 따라서 신뢰성이 높고, 금속입자·이물질 등의 영향을 거의 받지않은 고절연내력 스페이서의 최적형상설계가 필요하며, 이 때에는 고전위부인 도체,

표 1. 금속입자 존재시 스페이서의 전계계산 결과

항 목	단 위	정상상태	금속입자존재
전계강도계산치	%/mm	1.18	3.44
뇌충격전압* 인가시 전계 강도	kV _p /mm	8.85	25.8

* 뇌충격전압 : 750kV_p (1.2×50μs)

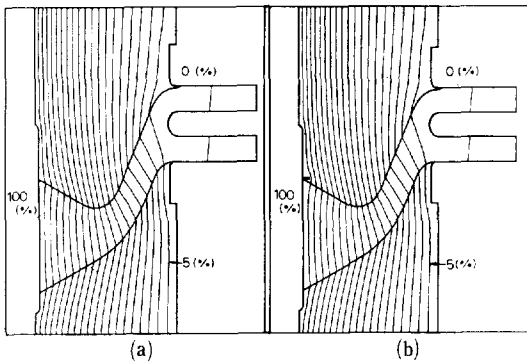


그림 6. 스페이서의 전계계산 결과

- (a) 정상상태의 등전위선도
- (b) 금속입자 존재시의 등전위선도

접지탱크 및 절연물의 형상에 대한 최적설계를 해야 한다. [13]

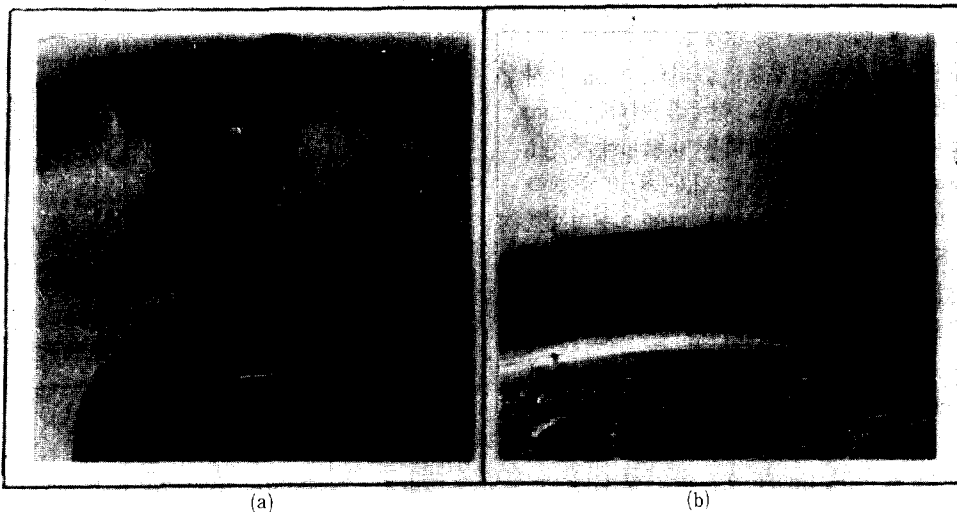
본고에서는 전계계산을 적용하여 최적형상설계된 스페이서에 대해서 절연성능을 검토하였다. 그림4는 스페이서의 절연내력 시험장면이며, 시험용기는 Impulse 1650kV_p까지의 시험이 가능하다.

그림5는 본 시험에 사용된 스페이서의 형상이며, (a)는 정상상태의 경우이고, (b)는 중심도체와 스페이서의 접촉부에 금속입자(chip)가 돌기된 경우이다. 스페이서의 비유전율ε_s는 5.5이고, 유전정접 tanδ는 0.2%이며, 에폭시수지로 제작되었다. 그림6은 전계계산 결과의 등전위선도인데 (a)와 (b)를 비교하면, 금속입자가 존재하는 경우 그 부위에 전계가 매우 집중된 것을 볼 수 있다.

표1에 뇌충격전압(1.2×50μs)인가시 최대전계강도의 비교를 보이는데, 금속입자의 존재에 의해 정상상태보다 약3배정도 전계강도가 집중되어 스페이서와 도체의 접촉부분에서 전계강도가 급격히 높아짐을 알 수 있다.

그림7은 각각 뇌충격전압 750kV_p(1.2×50μs)를 인가했을 때 정상상태와 금속입자 존재시의 시험후 스페이서 형상을 보인다. 표1의 결과와 같이 금속입자에 의하여 정상상태보다 약 3배의 전계가 집중됨으로서, 금속입자가 존재한 스페이서는 절연파괴되었음을 알 수 있다.

상기와 같이 금속입자가 존재하게 되면 스페이서



- (a) 시험전 금속입자 존재형상
- (b) 시험후 스페이서의 절연파괴 형상

그림 7. 스페이서의 절연내력시험 결과 모습

의 절연내력이 크게 저하되므로 설계시에는 이러한 인자들의 영향을 충분히 고려한 최적형상 절연설계를 해야 한다.

3.3 Gas 부상

GIS의 고전압화, 축소화 등의 추세에 따라 Gas부상의 축소화도 요구되고 있다. 이러한 경우 절연내력의 저하를 방지하기 위해서는 정도높은 전계계산 기술이 필요하다. 특히 부상은 Gas와 공기의 복합조건에서 사용되기 때문에, 외부오손 및 기타조건(금속분진, 염해, 눈, 비)등에 의해서 절연내력이 현저히 저하하므로 상기요인등의 영향을 충분히 고려해야한다. [14] 본 절에서는 Gas부상에서의 전계계산 적용례를 보이는데, 특히 인공오손인 주수조건 하에서의 전계계산 결과를 검토하고자 한다. 부상의 절연내력을 향상시키기 위해서는 형상이 복잡한 애자와 쉴드의 최적형상 절연설계가 요구된다.

그림8은 170k V급 Gas부상의 주수조건 하에서 AC상용주파 전압인가시 절연내력 시험장면이다. 그림9에 본 시험에 사용된 Gas부상의 형상과 개선전·후 각 부위의 전계계산 결과를 보인다. 그림10에서와같이 개선전·후의 등전위선도를 비교하면, E2와 E3 부위의 전계가 특히 완화되었음을 알 수 있다.

시험결과에 따르면 개선전의 Gas부상은 주수량



그림 8. SF₆ GAS 부상의 주수 내력시험 장면

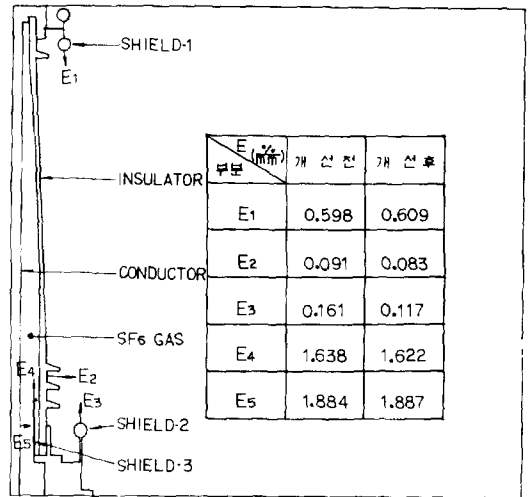
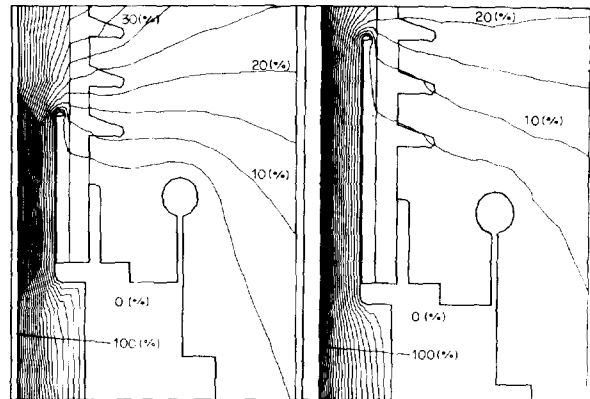


그림 9. SF₆ GAS 부상의 전계계산 Model 및 전계계산결과 비교



(a) 개선전

(b) 개선후

그림 10. SF₆ Gas 부상의 전계분포도

1~1.5mm/min에서 규격시험전압 325k V_{rms}이하에서 기중연면 파괴가 발생되었고, 개선후에는 주수량 최대 4.3mm/min로서 376k V_{rms}에서 기중절연파괴가 발생되었으므로 인공오손 조건인 주수절연내력이 현저히 상승되었음을 알 수 있다. 상기 결과에 따라 주수조건 AC 상용주파 절연내력은 E2와 E3 부위의 전계강도에 의해 크게 영향을 받는다고 할 수 있다. 따라서 Gas부상과 같이 SF₆ Gas공간, 애자 및 쉴드가 함께 존재하는 복잡한 형상의 조건하에서 유한요소법에 의한 전계계산은 매우 유효할 것으로 사료된다.

4. 결 론

이상으로 GIS에서의 유한요소법을 이용한 전계 계산의 적용례를 기술하였다. GIS의 절연성능향상 및 고신뢰성을 위해서는 정도높은 전계계산 수단이 필요하며, GIS와 같은 고전압 전력기기의 절연설계시에는 정전계계산기술이 필수적이다. 당사에서는 본고에서 서술한 전계계산기술을 적극적으로 활용, 고신뢰성의 중전기를 생산공급하여, 양질의 전력공급 및 계통의 안정화에 더욱 공헌하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] S. Sato, W. S. Laengl & A. Knecht ; A Numerical Analysis of Accumulated Surface Charge on DC Epoxy Resin Spacer, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-22, No. 3, p. 333, 1987.

[2] T. Sakakibara, S. Sato, N. Kobayashi & S. Menju ; The Application of Charge Simulation Method to Three Dimensional Asymmetric Field With Two Dielectric Media, Proceedings of the S. I. S. on Gaseous Dielectrics, March 9-13, p. 312, 1980.

[3] K. Itaka, M. Kaji & T. Hara ; New Finite Element Field Calculation Technique in which Continuity of Electric Flux is Satisfied, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, Nov/Dec, 1980.

[4] H. M. Ryan, J. M. Mattingley & M. F. Scott ; Computation of Electric Field Distributions in High-Voltage Equipment, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-6, No. 4, December, 1971.

[5] H. Fujinami, T. Takuma, M. Yashima & Kawamoto ; Mechanism and Effect of DC Charge Accumulation on SF₆ Gas Insulated Spacers, IEEE Transactions of Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July,

1989.

[6] 고창섭, 최경, 이기식, 한송엽 ; 다층요소망법을 이용한 전자장 수치해석에 관한 연구, 전기학회 논문지, 37권, 5호, 1988년 5월.

[7] 최홍순, 최경, 정현교, 한송엽 ; 적응요소분할을 위한 오차추정에 관한 연구, 전기학회 논문지, 37권, 3호, 1988년 3월.

[8] 中田高義, 高橋則雄 ; 電氣工學の有限要素法(第2版), 森北出版社, 1986.

[9] 日本電氣學會 ; 有限要素法による電力機器の電磁界解析の現狀, 電會技術報告(Ⅱ)部 第118號, 日本電氣學會, 1981.

[10] Y. Kawaguchi, K. Sakata & S. Menju ; Dielectric Breakdown of Sulfur Hexafluoride in Nearly Uniform Field, IEEE Trans., Vol. PAS-90, No. 3, pp. 1072-1078, 1971.

[11] Y. Kawaguchi, K. Sakata & S. Menju ; Effect of a Grounded Cylinder Enclosure on the Breakdown Gradient of Rod Gaps in SF₆, IEEE Trans., Vol. PAS-90, No. 3, pp. 1079-1085, 1971.

[12] T. Yamagiwa, T. Ishikawa & F. Endo ; Particle Initiated Breakdown Characteristics on a Ribbed Spacer Surface For SF₆ Gas Insulated Switch gear, IEEE PES, 87 WM 193-6, 1987.

[13] H. OOTERA, K. NAKANISHI ; Analytical Method For Evaluating Surface charge Distribution on A Dielectric From Capacitive probe Measurement -Application To a Cone-Type Spacer In $\pm 500kV$ DC-GIS, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, January, 1988.

[14] M. Hosokawa, K. Okumura, T. Yamagiwa, T. Ishikawa & J. Ozawa ; Dielectric Performance of Improved Gas Insulated Bushing For UHV GIS, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, April, 1987.