

345kV 송전선에 의한 TV전파의 산란특성

論 文

32~3~3

Scattering Characteristics of Television Waves by 345KV Power Transmission Lines

池 哲 根* · 梁 培 德** · 李 光 遠***

(Chol - Kon Chee · Bae - Deuk Yang · Kwang - Won Lee)

Abstract

In this paper, theoretical equations have been obtained on scattering of television waves from the multi-conductor of 345kV power lines. Intensities of the scattered fields are calculated for a single conductor, "bundle", and 4-conductor phase lines of our 345kV power transmission system. The fields have very complex patterns with variation of observing angle and wave length. The effect of scattering, however, increases with the number of phase line conductors, and the scattered field strength from the 4-conductor line is about 10dB higher than that from a single conductor line in the UHF range.

1. 서 론

초고압 송전선에는 코로나 임계전압을 높이기 위하여 상선을 다중화한다. 상선을 다중화하면 코로나 임계전압이 높아지고 코로나에 의한 전력손실은 감소하지만 다중도체에 의한 전파산란^{1)~3)}이 분제되는 경우가 있다. 이 때문에 TV 시청에 장애를 줄 수도 있다.^{4),5)}

우리나라 345 kV 초고압 송전선로는 기간선로인 신여수, 신울산, 서서울선이 모두 복도체를 사용하였고⁶⁾, 그 뒤 새로이 건설, 확장되는 선로에는 주로 4도체를 사용하고 있다. 본고는 이들 다중도체에 의한 전파산란의 크기를 VHF 및 UHF 파대에 걸쳐 계산하고 단일도체의 경우와 비교한 것이다.

2. 송전선 단일도체에 의한 전파산란^{7), 8)}

전자장 변수가 각속도 ω 인 주기함수이면 정상 상태에서의 전자장 변수는 모두 위치만의 함수가 되는 페이서(phasor)로 나타낼 수 있고 이때의 막스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega \mathbf{B} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

송전선 주위에서의 장을 구하기 위하여 원주좌표(ρ, ϕ, z)를 사용하고, 벡터포텐셜 \mathbf{A} 가 z 축 성분만을 가지며, z 의 값에 따라 변하지 않는다면 \mathbf{A} 의 z 축 성분 A_z 는 $\sigma = 0$ 인 공간에서

$$A_z(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} a_n H_n^{(2)}(-j r \rho) e^{jn\phi} \tag{2}$$

*正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 洪陵機械(株) 責任研究員

*** 正 會 員 : 亞洲大 工大 電子工學科 助教授

接受日字 : 1982年 12月 6日

$H_n^{(2)}$: 제 2종 n 계 한켈 (Hankel) 함수
 $r = j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}$

의 형태로 구하여 진다. $A_z(\rho, \phi)$ 가 ϕ 에 따라서도 변하지 않으면

$$A_z(\rho) = a_0 H_0^{(2)}(-jr\rho) \quad (3)$$

가 된다. 식 (3)은 2차원 그린 (Green) 함수와 같은 형태이다.

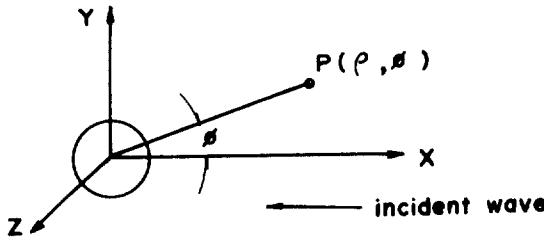


그림 1. 단일도체에 의한 평면파의 산란
 Fig. 1. Scattering of plane wave by a single conductor

그러면, 그림 1과 같이 좌표의 원점에 반경 a 인 도체가 z 축에 나란히 있고 z 축으로 편파된 전장을 갖는 전파가 x 축에 나란히 입사하는 경우 $P(\rho, \phi)$ 점의 산란파 전장 $E^S(\rho, \phi)$ 를 구하기로 한다. 입사파를 먼 파원으로 부터의 원주파로 생각할 때, 식 (2)와 베셀함수의 가법정리⁹⁾를 이용하면 P 점에서의 입사파 $E^i(\rho, \phi)$ 는,

$$E^i(\rho, \phi) = E_0 \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n (j)^n J_n(\beta\rho) \cos n\phi \quad (4)$$

E_0 : 원점에서의 입사파 전장 페이서, $E^i(0,0)$

ϵ_n : Neumann 수 ($n=0$ 이면 1, $n \neq 0$ 이면 2)

J_n : 제 1종 n 계 베셀함수

로 얻을 수 있다. 산란파 $E^S(\rho, \phi)$ 는 식 (2)와 비슷한 형태로서

$$E^S(\rho, \phi) = E_0 \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n (j)^n a_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \cos n\phi \quad (5)$$

로 나타낼 수 있으므로 합성된 전장 $E(\rho, \phi)$ 는

$$E(\rho, \phi) = E_0 \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n (j)^n \{ J_n(\beta\rho) + a_n H_n^{(2)}(\beta\rho) \} \cos n\phi \quad (6)$$

가 된다. 전선표면에서의 경계조건 $E(a, \phi) = 0$ 을 이용하면

$$\frac{E^S(\rho, \phi)}{E_0} = - \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n (j)^n \frac{J_n(\beta a)}{H_n^{(2)}(\beta a)} H_n^{(2)}(\beta\rho) \cos n\phi \quad (7)$$

식 (7)은 $\beta a \ll 1$ 이면 $J_n(\beta a) \ll J_0(\beta a)$ ($n \neq 0$)이므로 근사식으로써

$$\frac{E^S(\rho, \phi)}{E_0} = - \frac{J_0(\beta a)}{H_0^{(2)}(\beta a)} H_0^{(2)}(\beta\rho) \quad (8)$$

로 간단히 쓸 수 있고 $\beta\rho \rightarrow \infty$ 일 때는

$$\frac{E^S(\rho, \phi)}{E_0} = - \frac{J_0(\beta a)}{H_0^{(2)}(\beta a)} \sqrt{\frac{2}{\pi\beta\rho}} e^{-j(\beta\rho - \frac{\pi}{4})} \quad (9)$$

의 근사식을 사용할 수 있다. 식 (8)과 식 (7)을 비교하기 위하여 $\beta\rho \rightarrow \infty$ 일때 식 (7)÷식 (8)의 절댓값 $D(\beta, \phi)$ 를 구하면

$$D(\beta, \phi) = \left| \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n (-1)^n \frac{J_n(\beta a) / J_0(\beta a)}{H_n^{(2)}(\beta a) / H_0^{(2)}(\beta a)} \cos n\phi \right|$$

가 되며 이것을 계산한 결과가 그림 2이다. 1dB

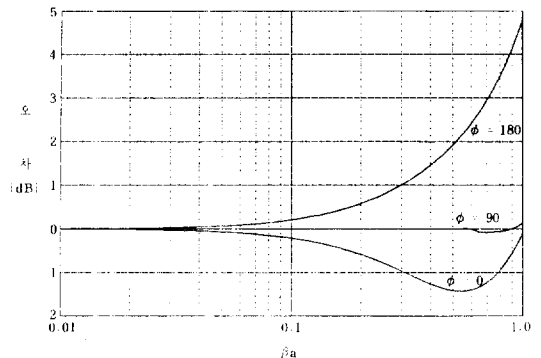


그림 2. βa 에 따른 식(8)의 오차
 Fig. 2. Error of Eq.(8) vs. the magnitude of βa

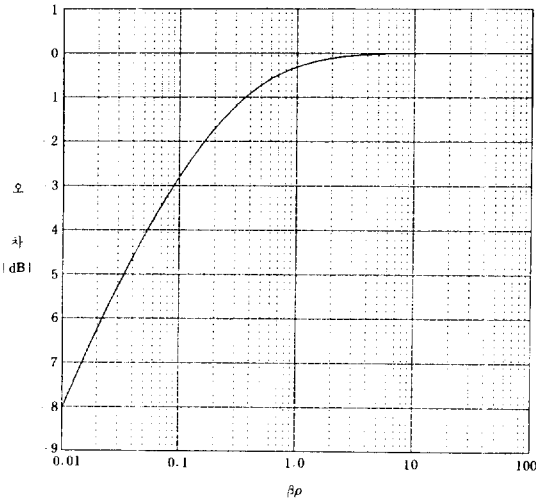


그림 3. $\beta\rho$ 에 따른 식(9)의 오차
 Fig. 3. Error of Eq. (9) vs. the magnitude of $\beta\rho$

의 오차를 허용한다면 $\beta a \leq 0.3$ 일때 식 (8)을 사용할 수 있다. 식 (9)의 오차를 알기 위하여 $\sqrt{\frac{\pi\beta\rho}{2}} H_0^{(2)}(\beta\rho)$ 를 계산한 결과는 그림 3과 같아서 역시 1 dB 정도의 오차를 허용한다면 $\beta\rho \geq 0.4$ 일때 식 (9)를 사용할 수 있다.

3. 다중도체에 의한 전파산란^{10), 11)}

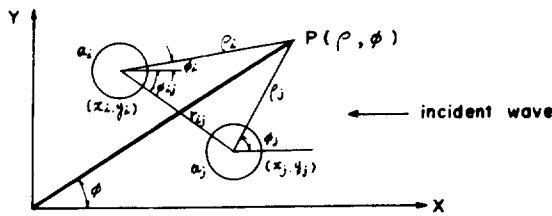


그림 4. 다중도체에 의한 평면파의 산란
 Fig. 4. Scattering of plane wave by multi-conductor

그림 4와 같이 도체 N 개가 나란히 있을때 $P(\rho, \phi)$ 점에서의 산란파 $E^S(\rho, \phi)$ 는 식 (5)로부터

$$\frac{E^S(\rho, \phi)}{E_0} = \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{\infty} \epsilon_n(j)^n a_{in} H_n^{(2)}(\beta\rho_i) \cos n\phi_i \quad (10)$$

가 되며 i 번째 도체 주위의 입사파는 식 (4)로부

터

$$\frac{E^i(\rho_i, \phi_i)}{E_0} = e^{j\beta x_i} \sum_{n=1}^{\infty} \epsilon_n(j)^n J_n(\beta\rho_i) \cos n\phi_i \quad (11)$$

가 된다. 상기 식에서 경계조건을 이용하여 a_{in} 을 모두 구하는 것은 불가능하므로 N 개 도체에 의한 산란파를 정확히 구할 수는 없지만 $\beta a_i \ll 1$ 이면 식 (10), 식(11)에서

$$\frac{E^S(\rho, \phi)}{E_0} = \sum_{i=1}^N b_i H_0(\beta\rho_i) \quad (12)$$

$$\frac{E^i(a_i, \phi_i)}{E_0} = e^{j\beta x_i} J_0(\beta a_i) \quad (13)$$

의 근사식을 얻을 수 있으므로 이때의 경계조건을 항렬식으로써 다음과 같이 쓸 수 있다. 그러므로

$$\begin{pmatrix} H_0(\beta a_1) & \dots & H_0^{(2)}(\beta r_{1N}) \\ \vdots & & \vdots \\ H_0(\beta r_{N1}) & \dots & H_0^{(2)}(\beta a_N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -e^{j\beta x_1} J_0(\beta a_1) \\ \vdots \\ -e^{j\beta x_N} J_0(\beta a_N) \end{pmatrix} \quad (14)$$

다도체에 의한 산란파는 식(14)에서 $b_i (i=1, 2, \dots, N)$ 을 구하고 이 값을 식(12)에 대입하면 된다. 식(12)에서 $\beta\rho_i \rightarrow \infty$ 일때는

$$\frac{E^S(\rho, \phi)}{E_0} = \sqrt{\frac{2}{\pi\beta\rho}} e^{-j(\beta\rho - \frac{\pi}{4})} \sum_{i=1}^N b_i e^{j\theta_i} \quad (15)$$

$$\theta_i = \beta(x_i \cos \phi + y_i \sin \phi)$$

의 근사식이 성립한다.

4. 우리나라 345kV 송전선의 다중도체에 의한 산란파 계산

우리나라 345KV 송전선의 다중도체 배열은 그림 5와 같아서 TV 파대(파장 0.1m ~ 10m)를 생각하면 βa 는 0.0093 ~ 0.93이며 송전선의 높이 등을 고려한 예상 장해범위⁴⁾ 인 $\rho = 20m \sim 500m$ 에서 $\beta\rho$ 는 최소 12.6이다. 약 1dB의 오차를 감안한 식(15)의 적용한계는 $\beta a < 0.3, \rho \gg 2d$ 로 볼 수 있는데 이때의 산란파 강도는 단일도체, 복도체, 4도체의 각 경우에 대하여 다음 식으로 정리된다.

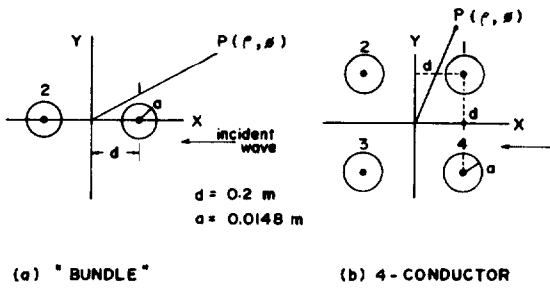


그림 5. 345KV 송전선의 다중도체배열

Fig. 5. Configuration of multi-conductor phase line of 345KV system

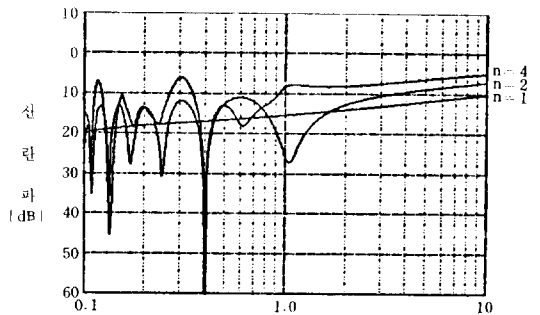
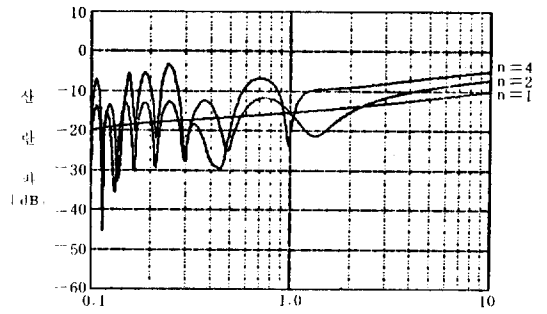
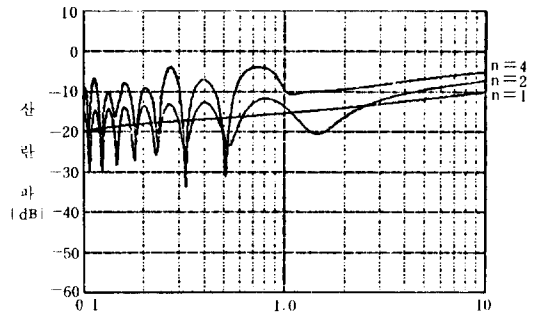
$$\sqrt{\rho} \left| \frac{E^s(\rho, \phi)}{E_0} \right| = \sqrt{\frac{2}{\pi \beta}} \times \left| \frac{n J_0(\beta a)}{H_0^{(2)}(\beta a)} \right| \times \left| \frac{D(\beta, \phi)}{C(\beta)} \right| \quad (16)$$

$n = \begin{cases} 1 : \text{단도체} \\ 2 : \text{복도체} \\ 4 : \text{4도체} \end{cases}$

$$C(\beta) = \begin{cases} 1 & : \text{단도체} \\ \left\{ 1 + \frac{H_0^{(2)}(2\beta d)}{H_0^{(2)}(\beta a)} \right\} \left\{ 1 - \frac{H_0^{(2)}(2\beta d)}{H_0^{(2)}(\beta a)} \right\} & : \text{복도체} \\ \left\{ 1 + \frac{2H_0^{(2)}(2\beta d)}{H_0^{(2)}(\beta a)} + \frac{H_0^{(2)}(\sqrt{8}\beta d)}{H_0^{(2)}(\beta a)} \right\} \times \\ \left\{ 1 - \frac{H_0^{(2)}(\sqrt{8}\beta d)}{H_0^{(2)}(\beta a)} \right\} & : \text{4도체} \end{cases}$$

$$D(\beta, \phi) = \begin{cases} 1 & : \text{단도체} \\ \cos\{\beta d(1 + \cos\phi)\} - \frac{H_0^{(2)}(2\beta d)}{H_0^{(2)}(\beta a)} \cos\{\beta d(1 - \cos\phi)\} & : \text{복도체} \\ \left\{ \cos(\beta d \sin\phi) \right\} \left[\left\{ 1 + \frac{H_0^{(2)}(2\beta d)}{H_0^{(2)}(\beta a)} \right\} \times \right. \\ \left. \cos\{\beta d(1 + \cos\phi)\} - \left\{ \frac{H_0^{(2)}(2\beta d)}{H_0^{(2)}(\beta a)} + \frac{H_0^{(2)}(\sqrt{8}\beta d)}{H_0^{(2)}(\beta a)} \right\} \cos\{\beta d(1 - \cos\phi)\} \right] & : \text{4도체} \end{cases}$$

식 (16)을 보면 $\beta a \ll 1$ 의 경우 관측각도 ϕ 의 변화에 따른 산란파 강도는 복도체주위에서는 대략 $\cos\{\beta d(1 + \cos\phi)\}$ 에 따라 변하고 4도체 주위에서는 여기에 다시 $\cos(\beta d \sin\phi)$ 를 곱한 값에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 2개의 도체가 만드는 평면이 입사파와 평행한 경우 2개의 도체에 의한 간섭이 대략 $\cos\{\beta d(1 + \cos\phi)\}$ 가 되는 것을 나타내며, 한편 2개의 도체가 만드는 평면이 입사파와 수직인 경우에는 2개의 도체에 의한 간섭이 대략 $\cos(\beta d \sin\phi)$ 로 변하는 것을 나타내는 것이다.



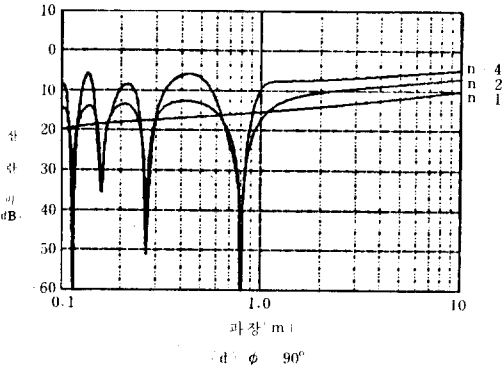


그림 6. 입사파파장에 따른 산란파강도

Fig. 6. Scattered field strength vs. the wave length

0.1m < λ < 10m (TV파대)의 범위에서 식 (16)을 계산한 결과가 그림 6이다. 이 결과는 $\beta a > 0.3$ 인 1GHz ($\lambda = 0.3m$)이상의 UHF대에서 오차가 1dB 넘을 수 있지만 장애에 문제가 되는 반사의

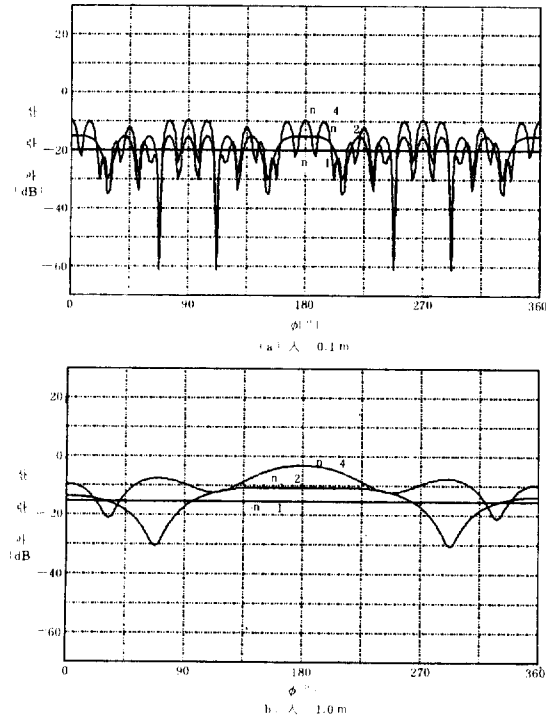


그림 7. 산란파강도의 방향특성

Fig. 7. Directional pattern of the scattered fields

경우 ($|\phi| \leq 90^\circ$)에는 오차가 별로 크지 않을 것으로 생각된다. (그림 2 참조) 그림 6을 보면 파장이 2m 이상되는 파대에서는 도체를 다중화할수록 산란파 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 식 (16)에서 βd 가 작기 때문에 산란파 강도가 ϕ 의 영향을 별로 받지 않기 때문이다. 그러나 그림 7의 방향특성을 보면 UHF 파대에서는 βd 가 증가하기 때문에 관측각도가 조금 틀려도 산란파 강도가 많이 변한다.

5. 결 론

가. 우리나라 345 kV 송전선의 1개 상에 의한 TV 전파의 산란 강도는 입사파 강도를 기준으로 할 때 도체 중심으로부터 10m 떨어진 곳에서, 단도체의 경우 최대 -20dB ~ -30dB, 복도체의 경우 최대 -17dB ~ -25dB, 4도체의 경우 최대 -15dB ~ -20dB의 값을 갖는다.

나. 산란파의 최대강도는 주파수가 낮아질수록 대체적으로 증가하며, 송전선 도체가 다중화될수록 증가한다. VHF 파대에서는 4도체가 단일도체보다 약 5dB, UHF 파대에서는 4도체가 단일도체보다 약 10dB 증가한다.

다. VHF 파대에서는 관측각도의 변화에 따른 산란파 강도의 변화율이 완만하므로 산란파 강도의 계산에 관측각도를 고려하는 것이 좋다.

라. UHF 파대에서는 관측각도의 변화에 따른 산란파 강도의 변화율이 크므로 송전선 도체가 흔들리는 것을 감안하여 최대값만을 생각하는 것이 좋다.

참 고 문 헌

- 1) S. Takeshita; "Scattering of VHF and UHF radio waves from extra-high voltage power transmission lines," IEEE Symposium on EMC, July 1970.
- 2) Sakae Toyoda and H. Hashimoto; "Scattering characteristics of VHF television broadcasting waves by steel towers of overhead power transmission lines," IEEE Trans., vol. EMC-21, no. 1, pp. 62-65, 1979.

- 3) 일본 전력 중앙연구소, 500kV 송전에 관한 연구보고(전파문제), 1971.
- 4) 한국과학기술연구소, 345kV 송전로 주변의 방송전파강도측정 및 잡음전파 강도측정을 위한 용역, BS I331-708-4, 1975. 12.
- 5) 한국과학기술연구소; 345kV 초고압 계통으로 인한 전파장해 연구, BS I579(6) 1090 4, 1978. 5.
- 6) 한국전력주식회사; 장기 송배전 시설계획, pp. 3~10, 1971. 9.
- 7) Kohei Hongo, et al.; "Scattering of electromagnetic plane waves by a circular cylinder," IEEE Trans., vol. AP-25, no. 6, pp. 898~900, Nov. 1977.
- 8) Leonard Eyges; The classical electromagnetic field, pp. 319~321, Addison Wesley Pub. Co., 1972.
- 9) M. Abramowitz and I. A. Stegun; Handbook of mathematical functions, Dover Publications, Inc., New York, 1965.
- 10) Kohei Hongo; "Multiple scattering by two conducting circular cylinders;" IEEE Trans., vol. AP-26, no. 5, pp. 748-751, Sep. 1978.
- 11) 竹下信也; "송전선에 의한 UHF대 VHF대 전파의 산란특성(다도체전선에 의한 산란)," 기술연구소 연구보고 no. 69036, 일본전력중앙연구소, 1969.