

전력케이블의 열화현상

구 자훈

(한양대 공대 전기공학과 조교수, CIGRE 전문위원)

1. 머릿말

1968년에 최초로 선진공업국가에서 케이블 열화에 의한 지중 Power Cable의 사고가 발생된후, utility company는 여러연구기관과 협력하여 지중배전용 케이블을 수거하여, 케이블의 열화가 계통사고의 원인이 된다는 것을 입증하였다. 또한 고전압 전력계통에 설치된 기존의 OF 케이블(oil filled power cable)은 점차로 절연층이 매우 두꺼운 polymer insulated extruded power cable로 대체되어 가는 것이 세계적인 추세이다.

국내에서도 이러한 extruded power cable의 매설이 증가되고 있어, 이에의한 사고가 발생할수 있는 potential이 커지고 있기 때문에 우선 전력케이블이 어떠한 이유로 열화되고 어떠한 형태로 나타나는가에 대해 많은 해외연구기관의 연구들을 토대로 간단히 살펴보기로 한다.

열화진단시험방법이나 열화원인분석을 위한 물리화학적 mechanism에 대해서는 다음기회에 언급하기로 한다.

2. 전력케이블의 구조적인 문제점

지중케이블을 하나의 시스템으로 볼때, 이 시스템의 전기적양상은 케이블을 구성하고 있는 금속재료와 절연재료의 특성에 영향을 받기때문에, 전력케이블을 설계 또는 설치를 하는 기술자들은 구성재료에 대한 충분한 기초지식을 토대로 시스템의 한계를 인식하여야한다.

지중 케이블에 쓰이는 절연재료의 발달과정을 살펴보면, 천연고무나 가공된 고무로 시작하여 liquid impregnated paper를 사용하다가, 과거 20여년간 고분자 절연재료의 연구발전 덕분에 점차로 solid extruded dielectric으로 대체 되어왔다. 이러한 여러절연재료를 extruded cable의 개발이란 관점에서 살펴보면 다음과 같다.

부틸고무의 절연케이블은 부틸고무로 절연 하고 chloroprene-vinyl을 사용하여 보호를 한다. 부틸고무는 열이나 증기, 오존에대한 저항력이 좋으므로 고전압케이블 절연에 적합하다. 따라서 66KV급이나 77KV급에 사용되고있던 impregnated paper나 천연고무를 사용한 케이블을 대체해왔다. 부틸고무 절연케이블은 습기가 많고 운전온도가 높거나, 또는 매우 추운조건에서도 좋은 결과를 보이고 있다. 그러나 환경에 기인된 잘 알려지지 않는 원인에 의해 고장이 많이 발생하였으며 또한 생산가격도 점차로 높아지고 하여 폴리에틸렌이나 XLPE를 사용한 케이블로 대체되어 나갔다.

EPR(ethylene propylene rubber)은 EPM(ethylene-propylene-copolymer)과 EPDM(ethylene-propylene-diene terpolymer)의 두가지가 있다. EPM은 오존, 노화, 기후, 화학물질에 잘 견디어내며 전기특성도 좋다.그러나 포화된 분자구조 때문에 화학적인 활성이 없다. 따라서 crosslinking을 위하여 monomer를 첨가하는데, 이렇게 하여 생성된 terpolymer를 EPDM이라 한다. 미국의 몇몇 산업체에서는 EPR로 절연을하고 납피장(lead sheath)

을 한 케이블을 생산하고 있는데 송전용량 비상시의 운전 온도특성, 습기에대한 저항력, 접속과 단말처리가 paper-lead cable보다 우수한것으로 나타나 있다.

XLPE 케이블은 열안정도가 좋아 여러나라에서 쓰이고 있지만, 프랑스의 EHV 케이블의 경우 폴리에틸렌 절연케이블을 주로 쓰고 있다. Polyethylene 절연은 thick extrusion process에 의해 내부에 미세한 기포가 형성되어 부분방전에 약하지만 유기물로 이루어진 voltage stabilizer를 사용하여 그성능을 높이고 있다. 특히 HDPE 절연 고전압케이블의 경우 이러한 방법을 사용하여 절연과 괴강도와 열안정도를 향상시키고 있다.

Extruded plastic-insulated cable은 OF케이블에 비하여 oil을 쓰지 않으므로 유지 보수가 용이하고, 가볍고 취급하기 쉬워서 설치하기가 비교적 간단하다. 따라서 점차적으로 oil filled 고전압 배전케이블을 대체해 나가고 있으며 일반적으로 다음과 같은 구조를 갖고있다.

- ① Concentric stranded conductor
- ② Semiconducting conductor shield
- ③ Extruded insulation
- ④ Semiconducting dielectric shield
- ⑤ Metallic sheath and jacket

그러나 이러한 케이블은 두꺼운 절연층이 압축(extrude)되어 제조되기 때문에 구조적인 결함을 갖고 있으며, 그 크기에 따라 수백 micron 이상의 macro defect와 그 이하의 micro defect로 분류하는 방법과 defect의 외적인 형태나 물리적인 특성에 따라 분류하는 방법 두가지가 있다.

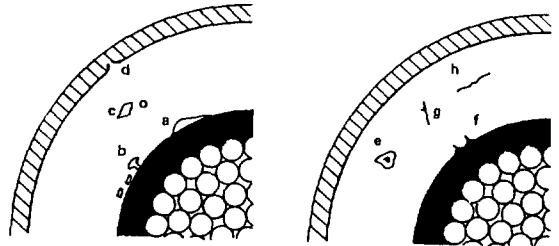
Extruded 케이블의 경우 모든 절연층이 거의 동시에 도체를 따라 입혀지게 되므로 고립된 결함이 형성될수 있어서, 절연과괴현상이나 부분적인 절연층의 열화현상이 바로 이러한 결함에서 발생할 가능성이 높다. 이로인한 피해는 다음과 같은 방법으로 최소화 할수있다 :

- 원자재를 깨끗하게 유지, 관리하고 다른 이물질이 섞이지 않도록 제조공정을 개선한다.
- simultaneous three layer extrusion process단계에서 절연층의 표면과 반도전층의 표면을 매끄럽게 되도록하고, macrovoid가 형성되지 않도록 공정조건을 적절하게 조절한다.

케이블의 결함에 대한 외적인 형태에 의한 분류는 일반적으로 다음과 같이 하고있다. :

- 기포(voids),
- 반도전 층의 돌출부분(protrusion),
- 불순물(contaminants),
- 절연층의 비균질성(inhomogeneities)

이네가지를 도식적으로 표현하면 그림1과 같고 위험한 정도로는 도체의 차폐층에 있는 돌출부분, 절연체보다 높은 전기전도도를 갖고있는 절연내부의 입자, 그리고 교류 전압을 가할때 부분방전이 발생하는 void순으로 열거할 수있다.



- a) loose semi-conductive screen.
- b) bubbles caused gas-evolution in the conductive screen.
- c) cavities due to shrinkage or gas-formation in insulation.
- d) defects in the core-screen
- e) inclusion of foreign particles that separate gases, often due to moisture in the particles.
- f) projections or point on the semi-conductie screen.
- g) splinters
- h) fibers

그림1. Extruded cable dielectrics에 존재하는 여러형태의 결함.

3. 열화현상과 원인분석

3.1 열화현상

일반적으로 폴리에틸렌은 PVC를 제외하고는 어떤 다른 고분자재료 보다도 물의 침투성에 대한 저항이 크다고는 하지만, 케이블 운전중에 접속부부분이라든지 말단부분을 통하여 하하여 여러가지 이유로 물이 스며들게 된다. 특히 XLPE 케이블은 대개 납피장을 사용하지 않고 그 대신 PVC나 PE jacket에 금속제 테이프로 차폐하기 때문에 케이블절연이 주위환경에 상당히 노출이 되어있는 상태이다. 따라서 불순물이나 습기가 절연층 내로 확산될수있는 가능성이 많다.

실험적인 한 예로서 Hamilton과 Eichhon은 전계가 없을때 폴리에틸렌에 대한 물의 침투성에 관한 실험을 하였고, Auckland와 Cooper는 Nacl 용액속에서 폴리에틸렌에 전계를 가하여 물의 침투력을 시험하였다. 이러한 실

험의 결과 폴리에틸렌에 전계를 가하였을때 물의 침투는 전계가 없을때보다 훨씬 용이하다는 것이 실험적으로 증명되었다.

고체절연재료에 고전압을 장시간 인가한후에 전압을 일단 제거한후 다시 절연과괴 전압을 측정하면 낮은전압에서 절연과괴가 발생하는 경우가 많다. 이는 treeing현상에 기인된 것으로 절연재료내의 강전계부분에서 아주는 수지상으로 열화현상이 생기기 때문이다. 이와같은 treeing 현상은 그 생성원인이나 구조에따라 다음과 같이 두가지로 분류가 된다 : electrical tree, water tree.

전력케이블의 경우 케이블의 도체와 절연체 사이에 있는 반도체층과의 접촉면이 매끄럽지 못하거나 절연층 내부에 이물질이 있을때 그곳에 높은 electrical stress가 가해져서 그곳에서 tree가 시작되어 서서히 성장하기 시작한다. Treeing 현상은 주로 ac에 의한 주기적인 부분방전에 의하여 생성되는 electrical tree와, 한편으로는 케이블 내부에 물이 침투하거나 습기의 존재로인하여 전계가 가해져 오랜시간이 흐르면 electrical tree가 생성되는 전압보다도 더 낮은 전압에서 부분방전이 없이 발생하는 water tree가 있다.

전자의 electrical tree는 오늘날 제조공정의 개선으로, 발생을 억제내지는 그 영향을 다음과 같은 방법으로 최소화할수 있기때문에 그다지 큰 문제점으로 인식되어 있지는 않다 :

가. cable제조기술의 진보

- ① semicon-shield와 절연층사이의 접촉면을 최대한 매끄럽게 만든다.
- ② coaxial emission shield를 사용함으로써 전자주입을 막도록 cable을 제조한다.

나. voltage stailizer의 사용

전극으로부터 주입되는 전자를 유전체 내부에서 재빨리 흡수할수 있도록 첨가제를 넣는데 주로 방향족 화합물을 사용한다.

케이블 절연층내부에 나무가지 모양으로 미세한 구조를 갖는 열화현상이 발생하는 water tree는, 여리기초실험 결과로 볼때, wet condition 하에서 표면결함이나 전계의 집중이 일어난점에서 시작되어 서서히 진전될수 있다는 것이 밝혀졌다. water tree는 tree의 발생원인 즉 voltage나 source of water가 사라지면 이미 침투된 water는 시간이 지남에 따라 거의 증발해 버리고 tree의 관측은 불가능 해진다.

Water tree는 현미경으로 관측하였을때 그모양은 electrical tree와는 분명히 다르나 때로는 분간하기 쉽지 않을때도 있다. 그러나 구별되는 특징은, water tree는 코

로나 방전이 발생되지 않고 영구적인 hallow channel을 형성치 않으며 그 성장속도는 년단위로 오랜기간에 걸쳐 진행되고 급격한 케이블 고장을 일으키지 않는다. 그러나 electrical tree의 경우 케이블의 제조공정이 개선 발달되어 거의 제거하거나 그 파괴효과를 억제시키고 있는 반면, water tree에 대해서는 아직도 모든것이 분명치 않은 상태이다. 따라서 water tree의 형성에 의한 케이블의 절연과괴전압의 감소현상및 수명단축현상은 케이블업체의 중요한 문제로 대두되어 실험실에서 시편이나 또는 실제 케이블을 이용하여 가속시험을 하거나, 또는 사고에 의해 못쓰게된 케이블을 이용하는 실험을 하는 등 많은 연구를 하고 있으며, water tree에 대한 대응책을 여러가지로 강구하고 있는데 정리해보면 아래와 같다 :

- 반도체층과 절연층과의 접촉면을 완벽하게 매끄럽게한다.
- 유전체 내부의 void나 이물질의 분포정도를 작게한다.
- voltage stabilizer를 사용한다.
- 케이블 절연층을 cross-linking 하는경우, 습기의 침투방지를 위하여 steam trapping chemical이 함유된 반도체층을 사용하거나 습기를 빨아들이는 무기첨가제가 함유된 PVC외피를 사용한다.
- 케이블에 금속외장을 임히는데 이방법은 비용이 많이들고 splicing이나 jointing에 어려움이 많다.
- 케이블을 오래보관하거나 설치할 할때 케이블 끝단을 통하여 습기가 침투하게 되는데 이를 최대한으로 방지한다.

지금까지 20여년간 사용했던 고전압케이블에서 관측된 water tree의 형태는 다음과 같이 분류되고 있다 :

- ① Broccoli는 테이프형 도체 차폐층에서 나타나고 있는데 그 전형적인 길이는 250 μ m정도이다.
- ② String(Stremers)은 테이프에서 발생되는데 가끔 extruded 케이블의 도체차폐층에서도 발생하며 길이는 절연층의 두께만큼 될수도 있다.
- ③ Delta는 도체차폐층과 절연차폐층에서 발생하기 시작하는데 길이는 string처럼 절연층의 두께만큼 될수도 있다.
- ④ Bow-tie는 절연층 내부의 이물질이나 micro-void에서 발생하는데 대부분 250 μ m보다 작으며 간혹 3mm까지 커질수도 있다. 오늘날 생산되는 케이블에 전형적으로 발생된다.
- ⑤ Plume은 도체차폐층 가까이에 있는 절연층 내부의 이물질에서 발생하는데 길이는 500 μ m까지 큰것도 있다.

- ⑥ Dendrite는 매우 드물게 나타나며 케이블내의 사고부분에서 주로 발견되고 있다. treeing은 도체차폐층이나 절연차폐층에서 시작하여 길이도 상당히 큰편인데 electrical tree인지 water tree인지 아직 확실한 확증이 없다.
- ⑦ Spike는 extruded케이블의 도체차폐층에서 나타나는 데 길이가 120 μ m정도이다.
- ⑧ Fans은 절연층 내부의 이물질에서 발견되는데 길이는 120 μ m이내이다.

이 여러형태의 water tree에 대해 성장 방향을 살펴보면 ①에서 ⑥까지는 전체의 방향을 따라서 성장이 진행되었으며 ⑦과 ⑧은 불규칙한 방향으로 성장진행되는 것으로 관측이 되어있다.

3.2 열화요인과 그분석

1968년이후 지금까지 20여년간에 걸쳐 수많은 연구가 수행되었지만, water tree에 대한 비교적 완전한 해석이 되어 있지 않으며, 또한 utility가 매설하는 cable의 절연층에 어떠한 절연재료를 어떠한 디자인에 의해 어떻게 제조를 해야 water tree가 발생하지 않는가에 대한 utility의 걱정을 누그러지게 할수있는 충분한 연구결과가 아직도 미흡한 상태이다. 게다가 지금까지 선진공업국에 매설된 old design에 의해 제조된 케이블은 거의 water tree가 발생되어 전력수송에 문제가 제기되고 있는 현실정은 그냥지나칠 간단한 문제가 아니다. 따라서 간단히 water treeing과 cable failure와의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

Water tree는 매우 작고 넓게 분포되어있지만, 이러한 문제점이 커다란 사고의 원인이 될수있다는 인식이 utility에 널리 파급되기 시작하여, 1973년에 Lawson과 Vahlstrom은 water tree와 cable이 예측된 제 수명을 다하지 못하고 사고를 일으키는 것은 서로 상관관계가 있음을 제시하였다. 그후에 많은 연구결과는 water tree가 cable의 ac breakdown strength를 저하시키며 케이블열화의 일반적인 척도가 될수있음을 제시하였다.

Water tree가 electrical tree를 initiate할 수 있다는 좀더 명확한 결과가 현미경 관찰을 통하여 1979년에 처음으로 제시되었고, 뒤이어 많은 연구기관의 직접 혹은 간접측정을 통하여 water tree가 electrical tree로 transition될수 있는 가능성이 확인되고있으며, 실험실에서 인위적인 failure에 의해서 cable failure가 water tree를 통하여 일어나는것이 관측되었다. 그러나 cable에서 water tree가 어느정도 진행되었을때 electrical tree로 전환되어 cable

failure가 발생하는가에 대한 결과는 아직 발표되고 있지 않다.

한편 다양하고 정밀한 실험방법에 의하여 수행된 지금까지의 연구결과들을 살펴보면, 현재까지는 서로 다른결과가 발표되어 water tree문제가 중요하고 매우 복잡하기 때문에, 유수연구기관의 연구결과를 토대로 water treeing의 propagation에 관련된 여러 요인과 mechanism에 대하여 간단히 검토하고자 한다.

3.2.1 온도

발표된 결과에 의하면 대부분은 온도가 증가함에 따라 treeing에 관련된 여러 process의 진행속도는 증가하는것으로 나타나있다. 그러나 반대의 경우를 나타내는 결과를 아주 무시할수는 없다. Tree growth rate나 또는 열화에 의한 ac breakdown strength가 감소하는 비율은 실험적인 관점에서 볼때 많은 error를 내포할수 있다고 볼수있는 이유는 연구결과에 activation energy에 대한 명확한 식별이 되어있지않거나 계산이 되어있지 않기 때문이다.

온도의 영향에 대해서 여러 반대되는 결과가 나타나는 것은 material의 선택에도 큰이유가 있다. 그이유는 polyethylene은 70 $^{\circ}$ C와 90 $^{\circ}$ C사이에서 가열냉각이 매우 빨리 되어 온도상승 변화에 따라 물리적으로 변화되어 treeing rate가 감소되거나 ac breakdown strength가 감소하고 molecular weight도 70 $^{\circ}$ C와 90 $^{\circ}$ C사이에서 몇몇 사이에도 증가하거나 감소하기 때문이다.

3.2.2 절연재료와 첨가제

절연재료에 관한 많은 연구들이 대개는 PE와 XLPE를 비교하여 tree 연구를 하였는데 다음과 같이 요약될수 있다. :

- XLPE를 dicumyl peroxide를 사용하여 curing을 했을경우 acetophenone 이 존재하게되어 PE에 비하여 water treeing resistance가 높게된다.
- 그러나 시간이 지나서 acetophenone 이 제거되면 XLPE는 PE보다 water treeing에 대해 매우 민감한 반응을 나타낸다.
- XLPE를 steam curing을 했을경우 XLPE내에 존재하는 water phase의 seperation에 의해 bow-tie tree가 쉽게 형성될 수 있다. 첨가제에 의한 연구들은 두가지 모순점을 안고 있다.
- 채택된 additive가 electrical tree와 water tree를 동시에 억제할수 있는가?
- 사용된 additive의 chemical structure가 매우 다양하다는것.

3.2.3 전기적요인

전기적요인으로는 frequency, polarity, electrical stress 등의 영향이 상대적으로 많이 연구가 되어있다 : electrical stress가 증가하면 tree growth rate는 증가하고, tree initiation rate도 대체적로 증가하지만 감소한다는 결과가 대등하게 거론되고 있다. 일반적으로 electrical stress와 frequency가 breakdown strength에 미치는 영향은 water treeing에 미치는 영향과 대체적으로 같은 경향을 나타내는 결과를 얻고있다.

A.C. stress에 관한 발표된 결과들이 서로 일치하지 못하여 electrical variable이 tree growth에 미치는 영향이 어떠한가 하는 일반적인 결론을 얻기에는 어려움을 안고 있다. 확실히 material 자체에 따른 차이와 treeing을 얻는 방법의 차이로 이러한 일치하지 않는 결과들을 설명할 수도 있다. D.C. stress를 가했을때 water tree와 비슷한 structure 가 발견되어 보고되어 있지만 서로 상반된 결과들이 크게 대두되고 있다.

3.2.4 환경적인 요인

URD cable은 다양한 chemical이 존재하는 땅속에 매설된채로 운전되기 때문에 Chemical이 water tree growth 나 tree initiation에 미치는 영향에 관련된 연구가 수행되어왔다.

Chemical factor에대한 실험결과에 의하면 약간의 salt 를 첨가할때 tree growth에 대한 효과는 증가한다는 것이 일반적으로 공통된 견해이지만, 이결과를 명확히 설명할 수있는 연구는 아직도 미흡한 실정이다. Organic이나 nonorganic substance를 이용한 (물이 포함되지 않은)water tree연구결과는 어떠한 결론을 얻기에는 미흡한 어려움을 안고있다.

3.2.5 기계적인 요인

Treeing process 중이거나 또는 그이전에 stress의 형태로 material에 가해지는 mechanical variable이 tree growth에 미치는 기계적인 영향에 대해서 연구가 주로 수행되었다.

Polymeric sample에 기계적인 응력을 가하여 treeing을 연구한 Noto에 의하면, strain을 받은 polymer insulation 은 쉽게 tree가 발생된것으로 나타나 있다. 한편 실제 cable 에 stress를 다양하게 가하여 tree growth에 미치는 영향이 연구되고있으며 isotropic pressure, hydrostatic pressure 등을 이용하여 tree에 미치는 영향이 많이 연구되고 있으나 그 결과는 미흡한 실정이다.

지금까지 여러요인에 대하여 연구결과들을 토대로 하

여 간략히 검토하였고, 요인분석에 필요한 treeing mechanism 은 treeing과정 중에서 propagations에 관련된 mechanism은 다음과 같다 : dielectrophoresis, electrophoresis, electrosmosis, electrostriction, electrostatic pressure. Electric field를 가한상태에서 발생하는 force는 위에 언급된 여러 mechanism에 관련되어 직접 water를 polymer속으로 이동시키거나 아니면 polymer 자체에 pressure 형태로 작용하여 polymer내에 이미 형성된 channel을 좀더 크게 하거나 microcrack이나 microcavity등을 야기시킬수 있다. 이에대한 자세한 언급은 다음기회로 미루기로 한다.

4. 맺음말

먼저 전력케이블의 구조적인 문제점에 대해, 그리고 이어서 열화현상과 그열화요인에 대해 간략하나마 살펴보았다. 우선 전력케이블은 구조적으로 문제점을 안고 있기 때문에, impervious metallic sheath를 한다 하더라도 접속이나 단말등 여러경로를 통하여 다양한 형태의 열화현상이 진전되어 나아가서는 cable failure를 일으킬수 있는 여지가 많다는 것이 여러연구결과 분석에서 알수 있었다.

이러한 것을 토대로 케이블 열화진단을 위한 시험방법에 대해 지면관계상 다음기회에 살펴 볼것이며, 또한 이러한 연구과정을 통하여 water treeing phenomena에 대한 이해를 도모하고, 나아가 시험규격을 규정하는 CIGRE SC-21에 참여하여, 케이블 운전기간중 water tree에 의한 사고를 일으킬수 있는 케이블에 대한 서어비스보장을 향상시킬수 있도록 국내 기업체의 조직적이고 적극적인 참여가 요망된다.

참 고 문 헌

- 1) 구자윤, 기술해설 "전력케이블에 쓰이는 절연재료의 변천과 발달과정" 대한전기학회 제 34권 제8호, pp 476-488(1985)
- 2) G. Badher et al, IEEE Trans. PAS, vol PAS-93, p977(1974)
- 3) Dr. H. Karner at Braunschweig University, private communication
- 4) L.Deschamps et al, RGE vol 5 /38 pp343-350
- 5) T.Tanka at CRIEPI, H. Auclair at SILEC, Iwata at Furukawa, Irie at Sumitomo, private communication.
- 6) Jocteur et al, CIGRE 21-07(1972)

- 7) G.Badher et al, IEEE PAS vol 95, May, pp1582 (1976)
- 8) Eager et al, IEEE PAS vol 88, April pp342(1969)
- 9) Study committee discussion(CIGRE SC-21 1986, 1987, 1988)
- 10) G. Badher, CIGRE 21-11(1978)
- 11) H. Matsubara et al, Sumitomo Technical Reiew N°18(1978)
- 12) J.H. Lawson et al, IEEE INT'L Symp, on Electrical Insulation pp 100-104(1980)
- 13) B.S. Bernstein et al, CEIDP pp 296-302(1958)
- 14) W.Kalkner et al, CEIDP pp200-210(1973)
- 15) Z.Iwata et al CEIDP pp200-210(1973)
- 16) J.Y. Koo et al, IEEE Trans, EI-18 pp376-401(1983)
- 17) J.Y. Koo et al, CEIDP pp301-305(1983)
- 18) T.Mizukami et al, CEIDP pp316-323(1979)
- 19) E.Favrie et al, IEEE Trans PAS-99 pp1225(1980)
- 20) C.T.Meyer et al, Polymer, vol 20, pp1186(1979)
- 21) D.W. Kitchin et al, Trans AIEE(PAS) vol 77, p180 (1958)
- 22) Y.Namiki, et al, IEEE Trans EI-15, pp473-480 (1980)
- 23) T.Tanaka et al, IEEE Trans on PAS, vol 95, N°6 P1892(1976)
- 24) C.T. Meyer et al, CEIDP, pp374-381(1978)
- 25) J.Y. Koo et al, JICABLE p108(1984)
- 26) J.Y. Koo et al, IEEE Trans on E.I. to be published (1989)
- 27) J.Y. Koo et al, IEEE Beijing Conference(1988)