

## Heat Pipe를 이용한 지중전력케이블 냉각방법의 실제

### Application of Cooling Method for Underground Power Cable by Heat Pipe

김 재 근\*, 박 만 흥\*  
J. G. Kim, M. H. Park

#### 1. 서 론

전세계적으로 산업의 고도성장과 생활수준의 향상에 따른 에너지 수요는 계속적으로 증가되고 있고, 특히 전력에너지의 안정된 공급은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다.

또한 도시의 인구집중 현상에 따라 전력수요가 급격히 증가하여 도심의 대용량 송전의 필요성이 날로 증대되고 있으며, 인구 밀집지역에서 지상으로의 고전압 송전은 많은 문제점 및 어려움을 갖고 있다. 이러한 도심지의 전력부하 집중현상, 도시미관 및 전력수용가에서의 전력에너지 안정공급에 대한 인식증가 등의 영향으로 전력케이블의 지중화 필요성이 점증되어 지중송전계통이 도입되고 있으며, 이러한 추세는 계속 확산될 전망이다.

또한 지중송전계통의 도입과 더불어 전력수요의 증대에 따른 지중전력 케이블의 대용량화 연구가 많이 행하여지고 있는데 그 방법으로는 케이블의 초고압화 연구와 케이블의 대전류화 연구로 나눌 수 있다.

그러나 초고압 전력케이블은 전압이 상승함에 따라 절연체에서 발생하는 유전체 손실이 증가하며, 전력케이블에 대용량의 전류가 흐르면 도체에서 Joule 손실이 크게 발생하게 된다. 이러한 전력케이블의 초고압화 및 대전

류화에 따른 발생손실은 필연적으로 나타나며, 이러한 초고압, 대전류의 지중송전 케이블에서 전력케이블의 발생손실을 줄이면서 송전용량을 증대시키는 방안으로 강구되어지고 있는 방법중의 하나가 지중송전 계통에 강제냉각방식을 도입하는 것이다. 강제냉각방식은 전압 및 전류의 상승에 따라 케이블에서 발생하는 열을 효과적으로 케이블 외부로 방출시켜 케이블의 도체온도를 낮추므로써 도체 열손실을 줄여서 강제냉각을 적용하지 않은 같은 용량의 케이블 보다도 더 많은 전류를 흐르게 할 수 있다. 지금까지 알려진 바에 의하면 강제냉각을 병행하여 지중송전을 운전할 경우의 송전용량은 기존의 자연냉각에 비해 약 1.5 ~ 2.0 배 증대되는 것으로 알려져 있다.

이러한 강제냉각방식을 도입한 지중송전은 일본 및 구미각국에서 실용화되고 있지만 국내에서는 아직 강제냉각 방식이 도입된 지중송전 계통이 운용되지 않고 있는 실정이다.

현재 국내에서 154 kv 까지 지중송전이 이루어지고 있고, '90년초에 원활한 대전력 수송을 위해 345 kv 까지 격상하여 운용될 전망에 있으며,<sup>1),2)</sup> 앞으로 강제냉각 방식의 도입을 전제로 한 345 kv 케이블을 수용할 전력구 공사가 진행중에 있다.<sup>3)</sup>

그러나 국내에서는 이에 대한 대처방안이 아

\* 한국전력기술주식회사, 기술개발부

직은 미흡한 상태에 있으며, 지중송전연구<sup>4</sup>와 더불어 강제냉각방식 도입을 위한 연구가 중요한 연구과제로 대두되고 있다.<sup>5)</sup>

지중송전 계통에 적용되는 강제냉각방식은 전력케이블의 포설방법에 따라 관로냉각방식 및 전력구 냉각방식으로 나눌 수 있으며, 이는 냉각방법에 따라 각각 직접냉각방법, 간접냉각방법 및 도체내부냉각방법 등으로 나눌 수 있다.

본고에서는 위에 언급한 지중송전계통에 적용되는 각종 강제냉각방식에서 열효율이 양호하고, 비교적 설치가 간편한 heat pipe를 이용한 지중전력케이블의 강제냉각방법에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. Heat Pipe 를 이용한 냉각방식

관로나 전력구(tunnel)내에 설치된 전력케이블은 케이블에서 발생된 열을 효과적으로 발산시키므로써 케이블 도체가 규정온도 이하(보통 80~90℃)로 유지되어야만 한다. 지중에 설치된 케이블은 케이블의 접속부 및 종단부에서 케이블의 다른 부분보다도 열저항이 커서 이러한 부분에서 hot spot가 발생하게 되어, 케이블에서 흐를 수 있는 허용전류에 많은 제약을 주게 된다. 또한 발·변전소 주위에 공간확보의 어려움으로 많은 케이블이 집중되는 곳이나, 복잡한 도심구간에서 케이블 설치시 증기관 및 열발생 장치 등에 근접되어 설치되는 경우에 hot spot가 발생하게 된다. 이러한 짧은 구간의 케이블에서 발생하는 hot spot를 제거하는 효과적인 냉각방식이 heat pipe를 이용한 냉각방식이다.

heat pipe는 특성상 긴 구간의 케이블에서 냉각은 불가능하며, hot spot가 발생하는 10m~20m의 국소구간을 냉각하는데 유용하게 운용된다.

최근 일본에서는 100~200m길이의 heat pipe가 개발되어 실용화에 성공하였다.<sup>6)</sup>

heat pipe를 이용한 강제냉각방식의 특징은 다음과 같다.

(1) 잠열을 이용하는 기기로 거의 등온적으

로 작동하여 열손실없이 임의의 장소로 열을 방출할 수 있다.

(2) 외부 구동장치에 의해 작동하지 않으므로 구동전력이 필요없고, 소음없이 안정하게 작동한다.

(3) 다른 열교환기에 비해 높은 열전도율을 가지고 있으므로 많은 양의 열을 제거할 수 있다.

(4) 전기적으로 절연되는 여러가지 형태로 설계가 가능하며, 중심부가 비어있어 기기를 가볍게 제작할 수 있다.

(5) 거의 보수유지가 필요하지 않다.

(6) 계통 구성시 냉매의 귀환파이프가 필요없다.

(7) 케이블의 전류용량 및 포설장소에 따라 heat pipe의 길이가 제한을 받는다.

heat pipe의 성능을 알아보기 위해 그림 1에 외경 50mm, 길이 50m인 heat pipe(shell 및 wick재질은 구리)에 직류전류를 통과하여 균일하게 가열시키고, 종단부는 수냉시킬때의 heat pipe의 온도와 발생된 열량과의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 구리 파이프는 열량 0.2 W/cm에 온도가 80℃까지 올라가지만 heat pipe에서는 열량이 3.2 W/cm가 될때 온도가 80℃가 되었다.<sup>6),7)</sup>

Heat pipe의 반경방향 열방산을 줄이기 위해 단열을 하였지만 이 열저항을 고려하여

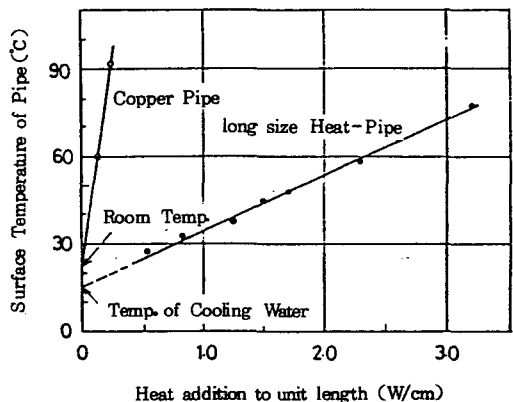


그림 1. Heat pipe의 열수송 성능실험결과 (외경 50mm, 길이 50m)

heat pipe 종단의 응축 방열기까지 수송된 열량을 계산하면 약 15 kw 정도가 된다. 이 실험에서는 방열기 단면적 0.3 m<sup>2</sup>에 약 16°C의 물로 냉각하였지만 더 큰 용량의 방열기를 이용하면 그림 1의 기울기는 더욱 완만하게 될 것이고, 수송열량의 한계까지 증대시킬수있다.

2.1 관로간접냉각<sup>6),7),8)</sup>

발전소 입구 등과 같은 관로에 케이블이 집중되어 있는 곳의 hot spot를 제거하기 위해 케이블에 근접하여 관로에 heat pipe를 설치하는 경우로써 그림 2에 heat pipe를 이용한 간접냉각의 원리를 나타내었는데 지중케이블에서 발생된 열을 heat pipe의 증발부에서 흡수하여 방열부(응축부)가 설치된 낮은 온도의 토양 및 자연대류에 의해 공기로 열을 방출하는 방식이다.

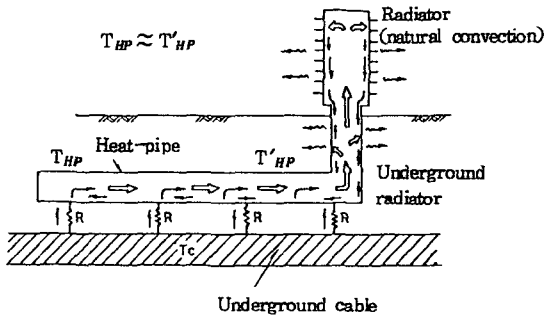


그림 2. Heat pipe의 간접냉각의 기본원리

그림 3은 외경 50mm, 길이 15m인 2개의 heat pipe를 설치한 실제의 예를 보여준다. heat pipe의 방열부는 토양속에 3m 길이로 묻혀 있고, 종단부에서는 자연대류에 의해 공기로 냉각되는 방식으로 되어있다.

도체 단면적이 325 mm<sup>2</sup>인 XLPE(cross-linked polyethelene) 3상, 6kv 케이블이 설치된 관로에 인접하여 heat pipe를 매설하였고, No.8과 No.9 케이블은 400 A의 전류로 열손실이 0.37 W/m이고, 나머지 케이블은 300 A의 전류로 열손실이 0.21 W/m인 경우에 대해 실험하였다.

그림 4는 이 경우에 대한 실험결과로 heat pipe가 설치된 경우와 설치안된 경우에 대한 관로의 표면온도를 시간에 따라 나타내었다.

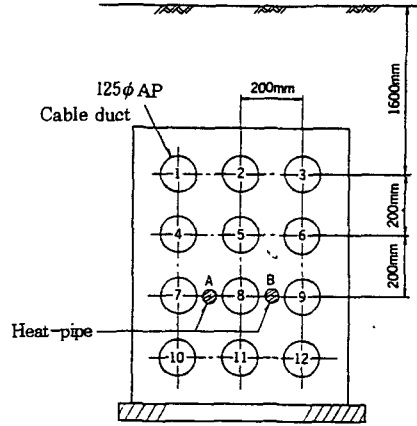


그림 3. Heat pipe를 이용한 관로간접냉각 계통

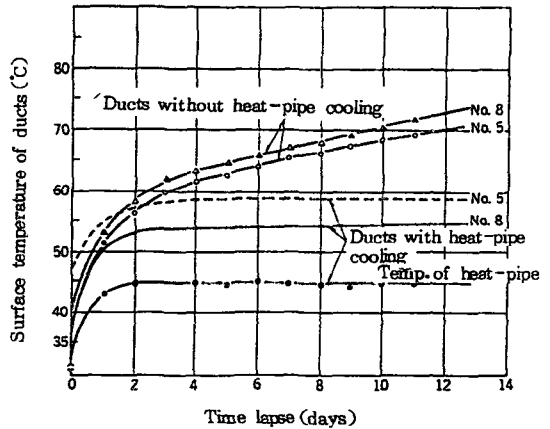


그림 4. 관로간접냉각의 Heat pipe 냉각효과

그림에서 보는 바와 같이 heat pipe가 없는 경우에는 No.8 케이블에서 최고온도를 나타낸 반면 heat pipe를 사용한 경우에는 No. 8 케이블의 온도가 55°C로 내려갔다. Heat pipe의 온도는 45°C로 일정하게 유지되며, 케이블중 No.8 케이블이 heat pipe에 근접하여 있어 가장 많이 냉각되었다.

2.2 전력구 냉각<sup>5),6)</sup>

케이블이 많이 포설되어 있는 전력구내에서는 케이블의 발생열에 의해 전력구내의 온도가 상승하게 된다. 전력구내의 케이블을 점검 및 보수하기 위한 보수원들의 작업환경 조성 및 케이블의 허용전류를 유지하기 위해서 전력구내의 온도를 37~40°C이하로 유지해야만

한다.

전력구내의 heat pipe를 이용한 냉각방법에는 여러가지가 있으며, 일반적인 냉각방법을 그림 5에 나타내었다.

자연대류를 고려하여 전력구의 상부에 fin이 부착된 heat pipe를 설치하여 전력구내 공기에서 열을 흡수하여 외부로 열을 전달하는 방법이다. heat pipe의 방열부는 자연대류를 이용하여 공기로 방열하는 방법(방법 B) 및 냉각탑에 연결하여 냉각효과를 증가시키는 방법(방법 A) 등이 있다. 또한, 전력구내에 풍냉을 병용하여 냉각시키면 전력구내의 공기온도를 균일화 하고, 장거리 냉각도 가능하게 된다.

전력구내에 trough가 설치되어 있는 경우에 heat pipe를 이용한 냉각방법을 그림 6에 나타내었다. 각 trough내에 heat pipe를 설치하고 방열부는 냉각효과를 높이기 위해 기존의 간접냉각방식에 사용되는 수냉 파이프에 연결하였다.

복잡한 도심구간에서 냉각탑 및 풍냉을 위한 환기구 설치는 부지확보의 어려움 때문에 설치가 점점 어려워지고 구간간격도 점점 길어지고 있는 형편이다. 그러므로 전력구내에 heat pipe를 설치한 후에 heat pipe의 방열부를 전력구 벽면에 구멍을 내어 온도가 전력구보다 낮은 땅속에 설치하는 방법도 있다. 이

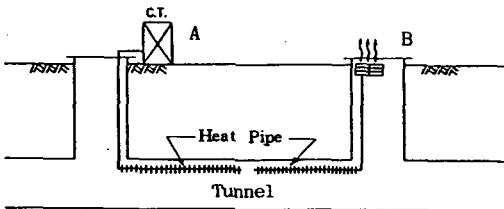


그림 5. 전력구내 일반적인 Heat pipe에 의한 냉각

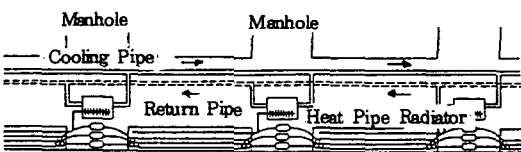


그림 6. 전력구 Trough내 Heat pipe에 의한 냉각

경우 지중에 지하수위가 높은 위치에 방열부를 설치하면 더욱 냉각효과를 높일 수 있다. 또한, 전력구가 2개이상 건설된 지역에서는 방열부를 온도가 낮은 다른 전력구 쪽으로 열을 방출하는 방법도 있다.

### 2.3 도체내부냉각<sup>6),9)</sup>

도체내부 냉각이란 케이블 도체의 중심부에 냉각매체가 흐를 수 있는 통로를 만들어 냉각매체를 순환시킴으로써 케이블을 냉각하는 방법으로 냉각효과가 뛰어난 냉각방식이다. heat pipe를 이용한 도체내부 냉각은 도체내부의 냉각매체가 순환되는 통로에 heat pipe를 설치하여 도체에서 발생된 열을 제거하는 방식으로 개략적인 그림을 그림 7에 나타내었다.

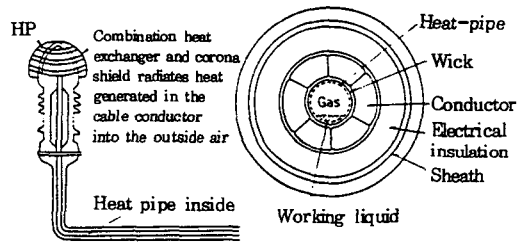


그림 7. Heat pipe를 이용한 도체내부냉각

Heat pipe의 방열부는 heat pipe에 의해 모아진 열을 대기중으로 방출하기 위해 케이블 종단부에 설치한다. 케이블 도체 단면적이 2,500mm<sup>2</sup>이고, 전압이 66 kv인 케이블에서 길이 50m의 heat pipe를 이용하여 냉각시킨 실험결과에서 비냉각시보다 약 2.5배 정도의 허용전류를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

### 2.4 POF 케이블 냉각<sup>5),6)</sup>

POF(Pipe-type Oil-Filled) 케이블은 높은 강도의 강관내에 회로를 구성하는 3개의 케이블 설치하고, 강관내의 나머지 빈공간에는 전기적인 절연을 위하여 절연유를 채워 넣은 것으로 절연내력이 우수한 케이블이다.

POF 케이블의 강제냉각은 절연역할 뿐만 아니라, 냉매 역할도 하는 강관내에 충전된 기름을 냉각설비에 통과시켜 강제 순환시킴으로써 가능하다.

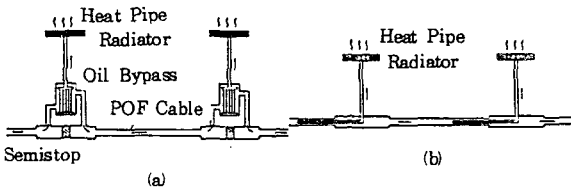


그림 8. Heat pipe를 이용한 POF 케이블 냉각

그림 8은 heat pipe가 POF 케이블에 설치된 것을 나타낸 그림이다. 그림(a)는 POF 케이블의 semistop부의 bypass에 heat pipe 식 열교환 장치를 설치해서 케이블 절연유의 열을 빼앗아 냉각하는 형태이다. 그리고, 절연유가 천천히 순환되도록 하기 위하여 펌프 등의 특별한 장치나 전원에 의한 냉각이 이루어지며, 기존에 설치된 케이블의 적용에 용이하다. 그림(b)는 케이블의 강관내에 heat pipe를 삽입해서 접속상에서 heat pipe의 방열부를 뽑아내어 열을 방열하는 형태이다.

Heat pipe의 방열부에서 방출 방식은 전력구내의 공기에 의한 자연대류 냉각방식, 맨홀내에 냉각탱크를 설치하여 강제냉각하는 방식 및 전력구내에 기존 설치된 수냉관에 연결하여 강제냉각시키는 방식 등이 있다.

2.5 케이블 접속부의 국부냉각<sup>6),7),8)</sup>

케이블의 접속부는 케이블의 다른 부분보다 두껍게 절연되어 높은 열저항이 일어나며, 결과적으로 접속부에서 hot spot가 발생한다. 이러한 국부적인 hot spot가 발생하는 곳에 냉각은 heat pipe에 의한 냉각이 효과적인 방

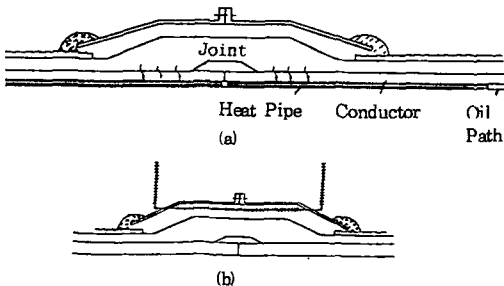


그림 9. 케이블 접속부에서의 Heat pipe 국부 냉각

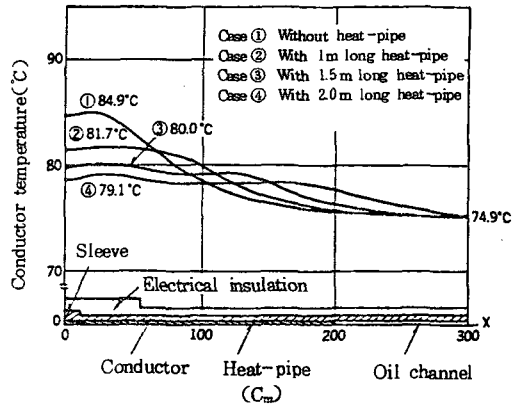


그림 10. OF 케이블(275 kv, 1,000mm<sup>2</sup>) 접속부의 Heat pipe 냉각 효과

법이다.

그림 9에 접속부에서의 heat pipe를 이용한 냉각방법을 나타내었다. 그림(a)는 도체 내부 중심부에 heat pipe를 설치하여 직접냉각하는 방식이고, 그림(b)는 접속상 일부에 heat pipe를 삽입하여 도체에서 발생된 열을 간접적으로 냉각하는 방식이다.

그림 10은 OF (Oil-Filled) 케이블(275 kv, 1,000mm<sup>2</sup>) 접속상에서 도체내부에 heat pipe가 설치되어 있는 경우의 heat pipe의 성능을 실험한 예이다. 케이블의 길이 방향에 따라 온도분포를 살펴보면 케이블에 1,500 A의 전류가 흐를 경우에 heat pipe가 없으면 접속부와 케이블 다른 부분의 온도차는 10°C이다. 2m길이의 heat pipe를 설치한 경우, 같은 전류에서 접속부와 다른 부분의 온도차는 4.2°C 정도가 되었다.

2.6 케이블 중단부에서의 국부냉각<sup>6),7),8)</sup>

케이블 중단부에서도 hot spot가 발생하는 곳으로 여러가지 냉각방식이 제안되었다.

그림 11에는 케이블 중단부에서의 heat pipe를 이용한 전형적인 냉각방식을 나타내었다. 그림(a)는 heat pipe를 도체의 기름통로에 삽입하여 케이블 중단부에서 발생된 열을 방열부로 방출하는 직접냉각방식이다. 이 방식은 케이블 중단부의 hot spot를 냉각하는 가장 효과적인 방법이다.

그림(b)는 케이블 중단부 도체 주위에 heat

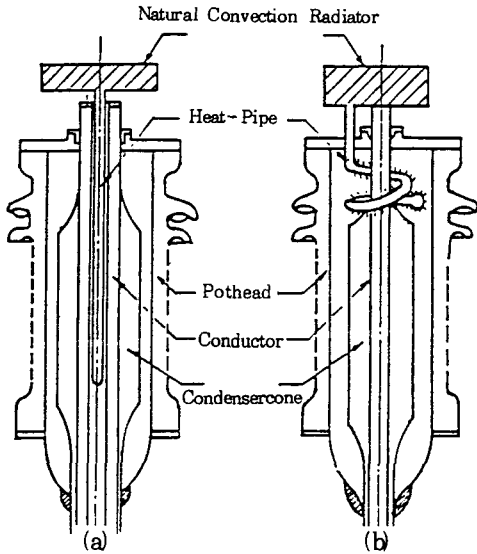


그림 11. Heat pipe를 이용한 케이블 종단부 국부냉각

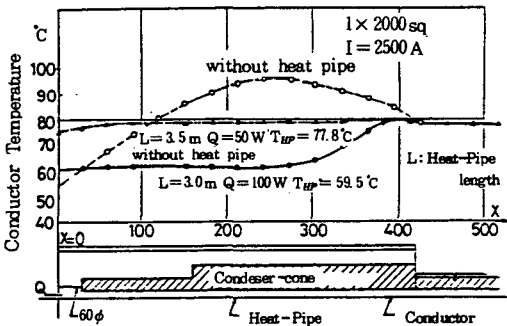


그림 12. OF 케이블 (500 kv, 1,200 mm<sup>2</sup>) 종단부에서의 Heat pipe 냉각 효과

pipe를 설치하여 냉각하는 간접냉각 방식이다. 그림 12에 500 kv, 1,200mm<sup>2</sup> OF 케이블 종단부에서의 heat pipe로 직접냉각을 하였을 때 도체 온도분포를 나타내었다. heat pipe가 없는 경우 케이블 종단부에서 가장 높은 온도는 약 100 °C 정도이다. 길이 3.5m이며, 용량이 50 W인 heat pipe를 설치한 경우에 heat pipe 온도는 약 78 °C이고, 케이블 도체 온도도 허용 온도 이하로 유지할 수 있다. 또 heat pipe의 길이가 3m이고, 용량이 100 W 것을 케이블 종단부에 설치하였을 때는 heat pipe 온도와 케이블 종단부 온도가 약 60 °C 정도를 유지하였다.

## 2.7 열공급 파이프에 근접된 케이블냉각<sup>5)6</sup>

최근에 지역집중난방 등의 보급으로 열공급 파이프와 케이블간의 접근 또는 교차로 인해 국부적으로 hot spot가 발생하여 케이블 도체 온도가 허용치를 넘어 송전용량에 문제가 발생하는 경우가 종종 있다.

종래에는 케이블과 열공급 사이에 단열판을 매설하는 방법이 이용되었으나, 단열판의 경년변화 문제 및 케이블의 열방산이 단열판에 의해 오히려 방해를 받아서 hot spot를 제거할 수 없는 등의 문제가 있었다. 이에 heat pipe를 이용한 냉각은 보수가 필요없고, 냉각 방식에 따라서는 지상 구조물이 필요없는 우수한 냉각방식이라 할 수 있다.

그림 13에 케이블 주변의 열공급 파이프에 의한 hot spot를 제거하기 위한 heat pipe 이용한 냉각방법을 나타내었다. 그림(a)는 등온법(equalizing method)으로 긴 heat pipe를 hot spot 지점에서 케이블 따라 설치함으로써 낮은 온도지역으로 열이 확산되어 hot spot를 제거하는 방법으로 10~20 m의 heat pipe를 여러개 설치한다.

그림(b)는 토양분산법(in-soil dissipation method)으로 hot spot의 열을 토양속으로 방열하는 방법으로 포설된 케이블의 hot spot

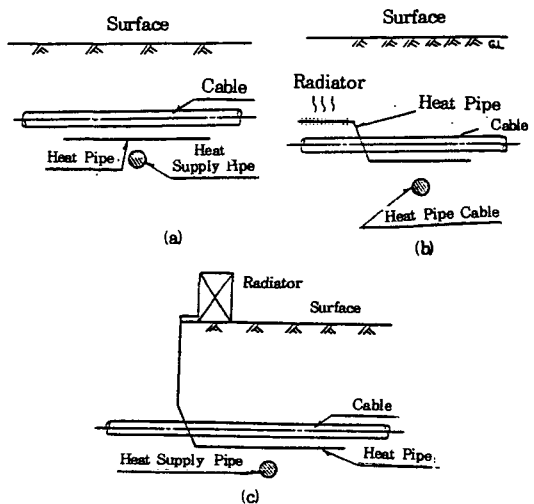


그림 13. 열공급 파이프에 인접한 Heat pipe 국부냉각

를 지나는 heat pipe의 끝을 온도가 낮은 토양에 설치함으로써 냉각효과를 얻는 방법이다.

그림(c)형태는 heat pipe의 자연공기냉각이나 강제냉각 방열기를 지상에 설치하는 방식으로 방열량을 용이하게 조절할 수 있는 냉각효과가 우수한 방법이다. Denmark의 수도 Copenhagen에서는 145 kv XLPE 케이블 지중매설 공사시 케이블에 인접하여 증기관이 통과하는 지점에 (a) 및 (b) 방식의 heat pipe를 이용한 국부냉각방식이 지중케이블 공사에 적용되었다.<sup>10)</sup>

### 3. 결 론

인구가 밀집된 도심지역에서는 전력케이블의 지중화 필요성이 점증되어 지중송전 계통의 도입이 확산되고 있으며, 지중송전 계통의 도입과 더불어 전력수요의 증대에 따른 지중 전력 케이블의 대용량화가 이루어지고 있다. 이에 지중전력 케이블의 송전용량 증대방안의 일환으로 이미 선진국에서는 지중송전 계통의 강제냉각을 위한 여러가지 방법이 제안되고, 활발한 연구가 진행되어 실용화되고 있으나, 우리나라에서도 아직도 이러한 연구가 초보적인 단계에 있으며, 전문인력 또한 부족한 형편이다.

본고에서는 이러한 강제냉각방식 중의 하나로 heat pipe를 이용한 냉각방식에서 heat pipe가 지중송전 계통의 대용량 송전을 위한 전력케이블 냉각의 적용 가능성 및 그의 성능을 각 냉각방식에 따라 검토하였다.

Heat pipe는 작은 온도차만 있어도 열회수 및 열방출이 가능하며, 열전달 효율이 좋고, 사용용도에 알맞게 제작 가능하고, 보수유지 없이 안정되게 작동되므로 전력케이블의 냉각에 효율적으로 사용할 수 있다. 특히, heat pipe를 이용한 냉각방식은 전력케이블의 국부적인 hot spot가 발생하는 부분에서 효과적으로 냉각시킬 수 있는 냉각방식이다.

그러나, heat pipe는 이러한 특징을 가지고 있지만 일반적으로 길이가 긴 전력케이블의 냉각에 적용하기에는 무리가 있다. 전력케이블에서 단위 길이당 발열량이 작아도 전력케

이블은 길이가 길다는 특수성을 고려하지 않으면 안된다. 지금까지 heat pipe는 단거리의 열교환기로서 주로 이용되어 왔으며, 길이가 길어지면 heat pipe의 특징상 최대 열수송 한계에 이르게 되므로 무한정 길이가 긴 heat pipe를 제작할 수 없다. 그러므로, 길이가 긴 전력케이블의 냉각에 사용할 수 있는 길이가 긴 heat pipe의 개발을 위한 연구가 요망된다.

또한 앞으로의 국내 공업발전에 따른 전력수요는 계속하여 증가될 전망으로, 지중송전 계통에서 대용량 송전을 위한 강제냉각방식의 국산화를 위한 완전 기술자립을 성취하기 위해 보다 많은 연구와 전력관련 회사의 과감한 투자가 절실히 요구되는 바이다.

### 참 고 문 헌

1. 김세일, "지중송전 현황과 전망", 한국전력공사 기술연구원, 지중송배전 워크샵, pp. 3~29. 1984. 3.
2. 김세일, "송전계통의 지중화 계획", 대한전기학회지, Vol.27, No. 10, pp. 4~10. 1988.
3. 한국전력기술(주), "기본설계보고서 - 345 kv 동서울 왕십리 S/S간 전력구 건설공사", 1987. 12.
4. 유인근 외 5명, "내외 지중송전 실태 및 연구동향조사", 한국전기연구소, 7EA030. 1987.
5. 이종범 외 5명, "지중송전 계통의 냉각방식에 관한 연구", 한국전기연구소, 8EA 030. 1989.
6. Z. Iwata, etc., "Application of Heat Pipe to Cooling in Underground Power Transmission Systems", The Furukawa Electric Review, Vol. 71, pp. 219~228. 1981.
7. Z. Iwata, N Ichianagi, "New Local Cooling Method for Underground Power Transmission By Heat Pipe", IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-99, No. 3, pp. 1038~1045.

- 1980.
8. Z. Iwata, N. Ichiyangi, H. Furusawa, S. Sakuma and K. Matsumoto, "Application of Heat pipe to Power Cable Systems", Furukawa Review, pp. 6~10, Sep., 1980.
  9. Z. Iwata and N. Ichiyangi, "High Power Transmission with Conductor-Cooled Cables", Furukawa Review, No. 2, pp. 61~69, 1982.
  10. M. Dam-Andersen, E. Jacobsen and Z. Iwata, "Heat Pipe Local-Cooling System Applied to 145kv XLPE Cable Line in Copenhagen", The Furukawa Electric Co., LTD., Sep., 1987.