

초전도 케이블용 Aluminum Cryostat 제조기술 개발

김수연, *이창호, 김도운, 장현만, 김동욱
LG전선(주) 전력연구소, *LG전선(주) 기계연구소

The Development of Manufacturing Technology of Aluminum Cryostat for Superconducting Cable

Soo-Yeon Kim, *Chang-Ho Lee, Do-Woon Kim, Hyun-Man Jang, Dong-Wook Kim
LG Cable, Ltd, Electric Power Technology Group, *Mechanical Technology Group

sykim@cable.lg.co.kr.

Abstract - The method to fabricate the cryostat of superconducting cable is extrusion type which is used Aluminum ingot under high temperature such as 450°C and the cryostat is formed above cable core and MLI layer. In this case, it is expected to occur thermal injury in cable core and MLI layer, so it is necessary to study to prevent thermal injury.

So in this paper, using simulation on radiation and convection which are accompany with fabricating cryostat, it is suggested to reduce the thermal injury.

By measuring simulation temperature and real temperature, it is possible to check the temperature on cable core and MLI layer and using these temperature, it is possible to predict whether thermal injury is occurred or not on cable core and MLI layer.

1. 서 론

LG전선(주)은 21세기 프론티어 사업의 일환인 배전급 초전도 전력 케이블을 개발하고 있으며 개발중인 초전도 케이블의 구성은 다음과 같다.

액체 질소 유통로인 stainless steel 또는 copper 재질 등의 former와 stabilizer인 stainless tape, 초전도 선재, 절연층인 synthetic laminated paper, 차폐층, 이중 단열관인 corrugated aluminum cryostat 그리고 이중 단열관 사이의 복사열 차단을 위한 MLI(multi-layer insulation)으로 구성되어 있다^{1,2,3)}.

특히 이중 단열관인 corrugated aluminum cryostat을 제조시 450°C 이상의 고온에서 aluminum이 압출되기 때문에 inner cryostat을 제조할 경우에는 케이블 코어의 열손실이 우

려되며, outer cryostat을 제조할 경우에는 MLI 층의 열손상이 우려된다.

이러한 열손상이 케이블 코어에 발생할 경우, 절연층의 손상을 받은 부분에서 breakdown이 발생할 수 있으며, MLI 층에서 발생할 경우 MLI층이 눌러 붙어 단열 특성을 확보할 수 없게 된다.

따라서 본 논문에서는 상용해석 S/W를 사용하여 aluminum cryostat 압출기인 Aluminum press기를 모의하여 복사와 대류에 대한 열해석을 실시하여 열손상 발생 여부를 확인하였으며, 열해석 신뢰성 확인을 위해 실제 온도를 측정하여 비교하였다.

그리고 제조된 cryostat을 절단하여 케이블 코어와 MLI층의 열손상 유무를 확인하였다.

2. 본 론

2.1 Aluminum cryostat 제조 공정

Aluminum cryostat 제조 방법은 주조된 A1000계열의 ingot을 aluminum press기에 장착한 후 450°C로 pre-heating 된 압출 다이스를 통하여 케이블 코어 또는 MLI 층 위로 압출하는 방법으로 한다. 특히 고온의 압출 다이스와 케이블 코어 사이엔 열적인 단열을 위하여 Fig. 1과 같은 열보호 장치를 사용한다.

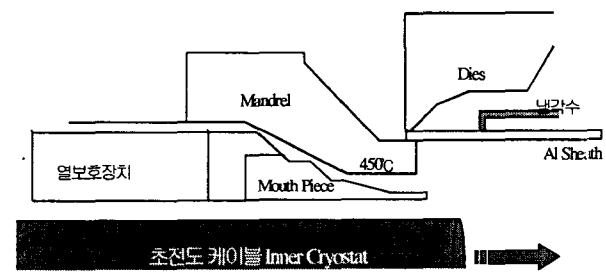


Fig. 1 Aluminum Extrusion Machine

2.2 열해석 방법 및 온도측정

열해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 aluminum cryostat 압출설비인 press기의 온도 경계 조건을 정하여 해석하였다. 특히 aluminum ingot 압출 다이스를 통해 압출되는 cryostat와 케이블 코어 사이에서의 대류와 복사의 효과를 고려하여 케이블이 진행되는 방향을 제어하는 M.P(mouth piece)부의 온도분포를 해석하였으며, 케이블의 열손상을 감소시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 이때 M.P의 Emissivity는 0.3에서 1.0까지 하였다.

수치해석시 대류해석을 위해서는 QUICK scheme, SIMPLEC 알고리즘을 사용하였고 복사해석을 위해서는 Discrete ordinate model을 사용하였다.

해석 결과의 정확성을 판단하기 위해 실제 M.P부의 온도를 측정하였으며 K-type의 thermal couple를 이용하여 온도를 측정하였다.

이때 케이블 코어와 MLI 층의 열손상 유무의 판단은 코어의 경우, 절연층의 유리전이온도인 130℃, MLI 층의 경우 MLI tape의 유리전이온도인 210℃를 기준으로 하였다.

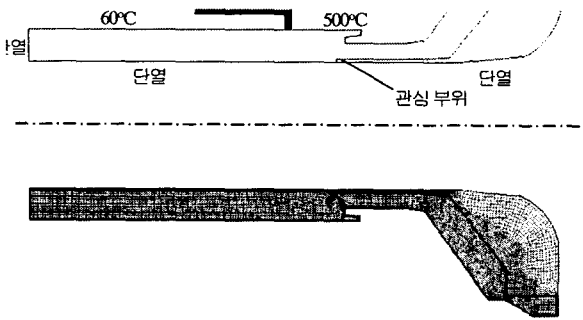


Fig. 2 The simulation condition

2.3 열손상 판단

열손상 유무를 평가하기 제조된 이중 aluminum cryostat을 절단하여 절연층의 열손상 유무 및 MLI층의 열손상 유무를 확인하였다. 제조된 cryostat은 inner cryostat 작업시에는 진공상태에서 압출하였으며, outer cryostat 작업시에는 대기상태에서 압출한 cryostat을 사용하였다.

3. 결과 고찰

3.1 열해석 및 온도측정

열해석은 수치해석을 통하여 aluminum cryostat과 케이블 코어 사이에서 대류와 복사에 의한 열분포가 어떻게 구성되어지는가를 확인하였다.

Fig. 3은 outer cryostat 제작시 M.P의 끝단에서의 온도를 해석한 결과이다.

여기서 cryostat와 케이블 코어 사이에 복사

와 대류가 동시에 존재할 경우, M.P 끝단의 온도가 Emissivity가 0.7일때 160℃ 이상이나, 복사열만 존재할 경우 140℃ 이하의 온도, 대류열만 존재할 경우 80℃의 온도가 됨을 알 수 있다. 그리고 M.P의 표면 상태에 따른 Emissivity의 변화에 따라 온도가 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 cryostat와 케이블 코어 사이엔 대류열과 복사열 차단을 통해 열손상을 방지할 수 있으며, Emissivity가 낮은 M.P가 사용하면 상당히 효과적임을 알 수 있다.

위와 같은 해석내용을 바탕으로 실제 M.P의 끝단의 온도가 어떠한지를 평가하였다. 사용 환경은 outer cryostat 제작과 동일한 환경에서 K-type의 thermal couple를 M.P 끝단에 부착하여 10분 동안 유지한 후 온도를 측정하였다.

측정결과, Fig. 4와 같이 일반적인 금속의 Emissivity인 0.7일 때의 해석 결과인 160℃와 유사한 156℃의 결과를 얻었으며, 본 해석 결과의 신뢰성이 있음을 보여주었다.

그리고 MLI층의 유리전이온도인 210℃ 보다 낮은 온도이므로 열손상은 발생하지 않음을 알 수 있었다.

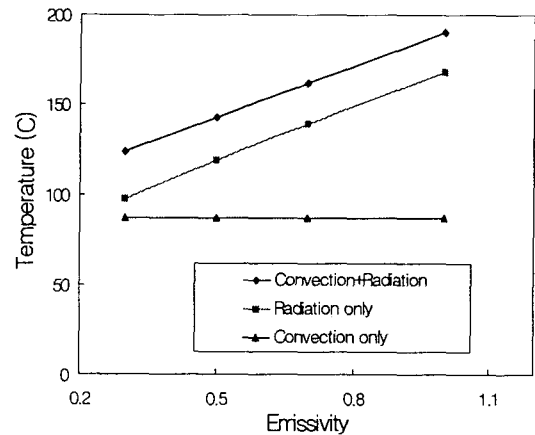


Fig. 3 Temperature of M.P in outer cryostat (simulation)

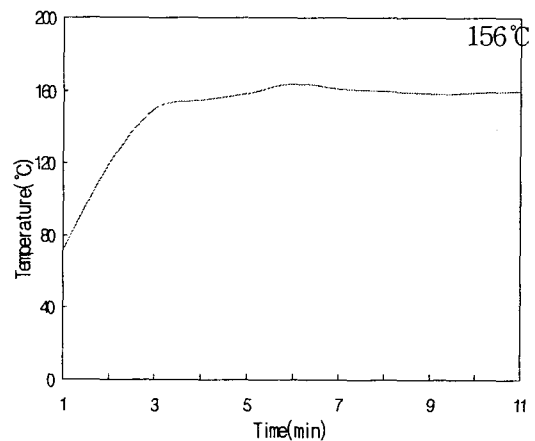


Fig. 4. Temperature of M.P in outer cryostat(real)

한편 inner cryostat 제작시 나타날 수 있는 온도 분포를 outer cryostat 해석과 동일하게 실시하였으며 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

inner cryostat 제조 조건과 동일한 진공 상태에서 온도는 110°C 미만의 온도가 예상되며 케이블 코어의 유리전이온도인 130°C 보다 낮은 온도이므로 열손상이 발생하지 않을 것이 예측된다.

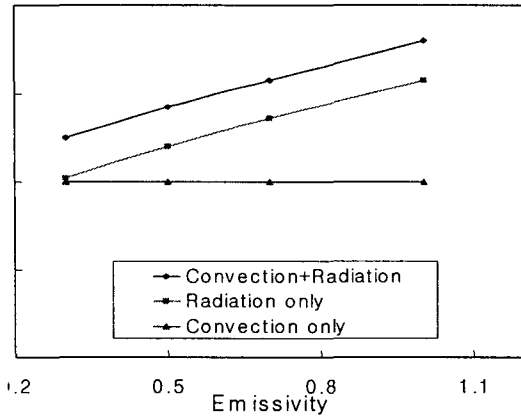


Fig. 5. Temperature of M.P in inner cryostat (simulation)

3.2 열손상 평가 결과

열해석 결과와 실제 온도를 측정하여 케이블 코어와 MLI 층에 열손상이 발생되지 않음을 예측할 수 있었으며, 제작된 cryostat에 절단하여 열손상 받았는지 여부를 판단하였다.

평가 방법은 육안으로 검사하였으며 그결과 Fig. 6과 같이 절연층 및 MLI층의 열손상에 의한 눌러붙음은 발생하지 않았음을 확인하였다.

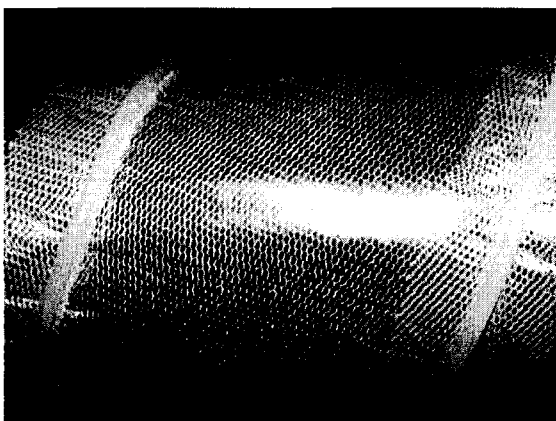


Fig. 6 MLI layer without thermal injury

4. 결 론

Aluminum cryostat 압출시 450°C 이상의 고온으로 인한 케이블 코어와 MLI층의 열손상

유무를 확인하기 위해 열해석, 온도 측정 및 cryostat의 육안 평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Aluminum cryostat 압출시 발생하는 온도 분포의 해석을 통해 복사에 의한 열전달의 비중이 크다는 것을 확인하였다.

2. 복사에 의한 열손상 감소를 위해 Emissivity가 낮은 재료, 즉 Mouth Piece의 표면을 polishing을 하거나 coating을 한다면 복사 차단이 효과적임을 알 수 있었다.

3. Aluminum cryostat 제조시 진공작업을 하지 않아도 열손상은 발생되지 않으나, 진공 작업시 열손상 온도보다 15% 이상 낮은 온도에서 제작이 가능함을 알 수 있었다.

4. 제작된 cryostat을 절단하여 열손상 유무를 확인하였으나 열손상은 발생하지 않았으며, cryostat 제조 기술은 문제가 없음을 확인 하였다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대 초전도 응용기술 개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이인호, 김도운, 김수연, 김도형, 김동욱, "22.9kV 고온초전도 케이블의 설계", 대한전기학회 추계학술대회, 2002
- [2] M.J.Gouge, J.A.Demko, P.W.Fisher, C.A. Foster, J.W.Lue, J.P.Stovail, "Development and Testing of HTS Cables and Terminations at ORNL" IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL.11, NO.1, 2001
- [3] J.W.Lue, M.S.Lubell, E.C.Jones, J.A.Demko, D.M.Kroeger, P.M.Martin, "Test of Two Proto type High-Temperature Superconducting Transmission Cables" IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL.7, NO.2, 1997