

斷熱性 鑲纖維의 材料性質 退化에 관한 實驗研究

성 시 창/방내화시험실

본고는 Canada Concordia대학 Bldg. Studies Center의 Norman M.P.Low씨가 유리섬유, 스테그암면 등과 같은 광(鑲)섬유들이 열 및 수분에 의해 그 재료성질이 퇴화하는 것을 연구한 논문으로서, 「Journal Thermal insulation(Vol8), 1984」에 기재된 것을 번역 정리한 것으로서 耐火피복재의 耐久性 研究업무에 참고로 하기 위한 것이다.

1. 개요(Abstract)

무기질 광섬유의 재료성질에 대한 수분의 영향을 조사하기 위해 광섬유를 약 3~4개월의 비교적 짧은 기간동안 모의환경조건(100°C이상의 열처리와 과수분 상태)에 노출시키는 실험이 실시되었으며, 그 결과 이러한 무기질 광섬유는 열 및 수분에 동시 노출되면 長絲形섬유들이 작은 조각과 미립자로 변형되는 물리적 변화가 있음을 나타내었다. 이러한 변화를 현미경으로 살펴본 결과, 각각의 섬유표면상에 그물망구조의 변형과 異물질이 생성된 모습을 보여 주었다. 이러한 재료성질의 퇴화과정의 원인은 화학적인 용해과정과 관계가 있는 것으로 해석되고 있다.

2. 서론

열전달과정을 방해하는 존재로서의 열저항은 2가

지 영역으로 규정되는데, 즉 재료의 특성과 열전달과정의 장애요인으로 재료가 위치할 때의 환경조건 등이다. 최적 열저항은 재료의 특성과 환경조건이 모두 그들의 이상적인 상태에 있을 때 실현된다. 재료특성과 환경조건중 어느 한쪽에 변화가 생기면 단열재의 열적성능에 변화를 가져올 수 있는 것이다.

과거 에너지보존 연구는 단열시스템의 효율상 환경적요소들을 최소화하려는 면에 집중되었으며, 단열재의 성능에 있어서 재료의 특성에 따른 영향, 혹은 내용연한과 관계되는 단열재의 내구성에 대한 연구는 거의 무시되어 왔다. 특히 단열재를 건물내부에 설치한 후 이의 물리적 조건에 관해서는 관심을 두지 않았다.

유리섬유, 스테그울, 암면섬유 등과 같은 광섬유들은 건물내에서 열에너지 전달을 차단하기 위해 주로 사용되고 있으며 이러므로써 에너지 보존을 실현할 수 있게 되었다. 이 무기질 섬유들은 고온에 견딜수 있고 화학적으로 불활성이므로 일반적으로 내구성 있는 제품으로 간주되고 있으며, 평상시 주위환경으로부터 수분에 의해 영향을 받지 않는 것으로 여겨진다. 그러나 한 연구결과는 무기질 광섬유들이 과도한 수분과 저온의 모의 환경속에서 약 3~4개월의 비교적 짧은 기간동안 노출된 후 흥미있는 물리적 변화와 재료성질의 퇴화를 보여주었다. 이 논문은 위의 연구로부터 얻은 실험결과중 일부를 실은 것이다.

3. 본론

가. 연구방법

실험연구에 사용한 광섬유는 스래그 암면 3종과 유리섬유 1종으로서, 모두 성긴(loose)섬유 형태의 상업적으로 이용가능한 제품들로서 4개의 서로다른 업체들에 의해 생산 시판되는 것이다. 광섬유의 시료는 제약된 절차에 따라 여러 모의환경에 노출시켰다.

모의환경은 실험실내의 밀폐된 유리용기 내부온도가 45~100°C범위의 다양한 온도상태가 되도록 물을 가열함으로써 만들었다. 연구는 2그룹의 실험으로 분류하였다. 실험의 첫째그룹은 성긴 섬유들을 기밀한 유리용기속의 증류수에 담가두어 섬유들이 지속적으로 물에 접촉되도록 하였다. 4개 업체로부터 얻은 각 섬유시료를 각각 별개의 유리용기속에 넣었다. 실험의 두번째 그룹은 약간 다른 절차를 따랐다. 먼저 증류수를 유리용기의 바닥에 붓고 두께 약 1.0cm의 깨끗한 유리한장을 물에 담근다. 그리고 나서 성긴 광섬유를 유리 뒷면에 놓아 섬유가 유리용기안의 물에 직접 접촉하지 못하도록 하였다. 4개 업체로부터 얻은 각 시료를 각각 별개의 유리용기속에 넣었다. 그리고 나서 모든 유리용기들을 기밀한 마개로 막아서 용기로 부터 물의 증발을 최소화 하였다. 광섬유를 넣어둔 용기들을 전기가열로에 설치한 후 서로다른 용도에서 물이 비등점에 이를 때까지 다양한 시간간격으로 가열한다. 이러한 실험에 이어 섬유들을 광학현미경과 SE(Scanning electron) 현미경으로 검사하였다.

일반적으로 스래그암면과 퇴화된 스래그암면의 열전도성은 ASTM C518 시험방법(1)에 따라 열류계 장치로 정확히 측정하였다.

나. 연구결과

유리섬유와 스래그암면을 포함한 광섬유들은 대체로 그림 1에 보여진 것과 같이, 細長絲形섬유형태로 나타났고, 각 섬유의 표면은 부드럽고 결함이 없는 것으로 나타났다. 이 섬유모양의 형태는 대기온도로 500°C에 다다를 때까지 5~6시간동안 가열하고 나서 수분이 없는 환경조건의 대기온도까지 냉각시켰을 때 아무런 변화도 없는 것으로 관측되었다. 이러한

건조 가열처리는 섬유에 아무런 영향도 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나 수증기 또는 액체상태의 수분에 섬유를 접촉시키고 나서 대기온도상의 온도로서 비교적 짧은 시간동안에 100°C까지 이르도록 가열하게 되면, 유리섬유와 스래그암면은 본 연구에서는 물리적인 변화를 보이는 것으로 관측되었다. 섬유의 이러한 물리적 변화의 정도는 섬유형태, 수분 그리고 열처리를 하는 온도상태에 따라 다양하게 나타났다.

광섬유를 증류수에 담근 후 서로 다른 온도상태로 가열한 첫째 그룹 실험결과는 중요한 변화를 보여 주었다. 약 8개월간 25°C의 증류수에 계속 담가둔 스래그암면과 유리섬유시편은 서로 다른 결과를 나타내었다. 스래그암면의 시료 2개(섬유A와 섬유B로 칭함)는 물속에서 섬유를 심하게 요동시키자 쉽사리 소편으로 부서지는 것으로 나타났으며, 반면 세번째 스래그암면(섬유 C로 칭함)과 유리섬유시료는 아무런 변화가 없었다. 물의 온도를 45°C로 높이고 4개월 동안 가열한 후 스래그암면 시료 A와 B를 요동시켰을 때 쉽게 소편으로 부서지는 것으로 나타났다. 건조후 섬유소편들을 SE현미경으로 자세히 살펴 본 결과, 섬유소편들은 그림 2의 SE현미경 사진에서 보여주는 것처럼 표면이 거칠고 움푹파인 모습으로 나타났다. 섬유 표면에서의 물리적 변화의 특성은 섬유표면에서 화학적 반응과정이 발생했음을 보여주는 것이다. 가열온도를 더 높여 60°C가 되게 하자, 섬유의 퇴화과정은 더욱더 분명하게 관측되었다. 가열 약 3개월 후, 증류수에 담가둔 스래그암면시료 A와 B는 유리용기속에서 약간의 요동과정에서도 미립자형태로 변화되는 것으로 나타났다. 보다 세밀히 관측해보면 그림 3의 광학현미경사진에서 볼 수 있듯이 섬유표면에 異물질이 생성 또는 퇴적된 것을 볼 수 있다. 가열온도를 85°C로 높였을 때는 역시 유사한 결과가 관측되나 그러한 결과를 나타내는데 단지 27일이라고 하는 아주 짧은 시간이 소요되었다. 증류수에 담가둔 스래그암면 A와 B는 모두 아무런 요동과정 없이도 완전히 미립자형태로 변형되었다. 異물질의 생성과정은 그림 4의 광학현미경사진에서 볼 수 있듯이 부러진 짧은 섬유들의 대부분을 덮어 싸고 있

는 새로운 물질들에 의해 방해받고 있는 것으로 관측되었다. 지금까지 물질의 변화는 단지 스래그암면 A와 B에서만 관측되었다. 유리섬유와 세번째 스래그암면 C는 그러한 재질상의 변형을 보여 주지는 않았다. 그러나, 온도를 더 높여 92~100°C가 되게 하자 증류수에 담가둔 스래그암면 3개(섬유 A, B, C) 모두 단지 6일간의 가열후 부분적으로 미립자형태로 변형되었음이 관측되었다. 완전한 변형은 가열 14일 이후로 나타났다. SE현미경으로 관측한 결과 6일간 100°C로 가열한 후의 퇴화된 스래그암면은 섬유표면에서 흥미있는 모습을 보여 주었다. 섬유표면이 그림 5에 나타난 것처럼 하나의 벌집구조 또는 그물 망구조로 둘러싸여 있었다. 100°C로 가열하여 3개월후 암면 또한 그림 6의 광학현미경사진처럼 섬유상에 異물질의 생성과 물리적인 변화를 보였다.

광섬유를 수증기에 노출시켜 첫째그룹에서와 같은 온도에서 가열한 둘째그룹 실험결과도 역시 섬유퇴화과정을 보였으나 매우 느리게 진행되었다. 모두 4개의 유리섬유와 스래그암면을 8개월동안 대기온도상의 수증기에 노출시켰으나 아무런 물리적인 변화도 보이지 않았으며 섬유들은 細絲形의 형태를 보존하고 있었다. 수증기의 온도를 45°C까지 높이고 4개월동안 노출시킨 후, 섬유에서의 물리적 변화 조짐이 역시 정밀한 관측을 통해 나타났다. 스래그암면 A와 B시료는 그림 3에 보여지는 것과 같이 각개 섬유표면에서 異물질이 생성 또는 퇴적된 모습을 보여 주었으나 그 범위는 작았다. 큰 섬유덩어리는 細섬유형태로 남아 있었고 아무런 외적 손상이 없었다. 60°C에서 3개월 노출된 후, 스래그암면시료 A와 B는 가볍게 손으로 문지르는 과정에서 쉽게 미립자형태로 부서졌다. 모두 3개의 스래그암면은 40~50일 동안 85~100°C온도의 수증기상태에 노출된 후 유사한 퇴화현상을 보였으며, 특히 유리용기속의 큰 섬유덩어리의 외부면에 위치한 섬유에서 나타났다. 보다 세밀히 관찰한 결과, 퇴화된 스래그암면은 85°C이상의 온도에서 수증기처리에 노출된 후 그림 4에서 처럼 증류수에 담가둔 섬유에서 관측된 것과 똑같은 異물질이 생성했음을 보여 주었다. 그러나, 그러한 물리적 변화와 異물질의 생성은 비슷한 시간에 걸쳐 유사한

가열처리를 하면서 수증기에 노출시킨 유리섬유에서는 관측되지 않았다. 둘째그룹실험의 전반적인 결과들은 다양한 온도에서 수증기에 노출시킨 스래그암면이 유사한 물리적 변화와 재질적 퇴화를 가져오지만 비교적 적은 범위라는 것을 보여 주고 있다.

두 가지 모의 환경조건아래서의 실험연구결과 이례적인 재료변화가 무기질 섬유에서 발생하고 있음이 명백히 증명되었다. 섬유표면에서 발생한 물리적 변화와 재질적 퇴화과정의 정도는 스래그암면과 유리섬유간에 약간의 차이가 있었다. 이것은 아마도 두 제품간의 서로 다른 화학적 구성과 관계되는 것으로 볼 수 있다.

細長絲形의 일반 스래그암면의 물리적 변화가 단열성에 미치는 영향에 관한 연구는 열유계 장치를 설치하여 섬유덩어리, 일반섬유, 그리고 퇴화된 섬유의 소편 및 미립자들의 열전도성을 지속적으로 측정하는 것으로 하였다. 측정에 앞서 모든 섬유시료들을 먼저 82°C에서 72시간 동안 건조시켰다. 다음으로 오븐에서 건조시킨 섬유들을 손으로 목재용기속에 쏟아 붓고 그 밀도는 약 152kg/m³가 되게 하였다.

측정결과 용기속의 일반 스래그암면덩어리의 열전도성은 0.0449-0.0457W/(m°C)의 범위에 있었고 소편과 미립자로 구성되어 있는 퇴화된 섬유들의 열전도성은 0.0446-0.0449W/(m°C)의 범위에 있었다. 이 측정결과는 두 섬유형태간의 열전도성에는 거의 차이가 없음을 보여 주는 것이다.

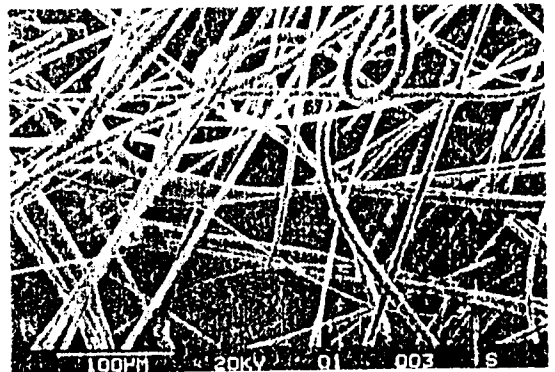


그림 1. 부드럽고 결점이 없는 섬유표면 상태를 보여주는 광섬유의 SE현미경 사진



그림 2. 45°C로 가열한 물에 4개월 동안 담근후의 슬래그 암면을 SEM미경으로 관찰한 사진으로, 표면이 거칠고 패인모습이 보임.

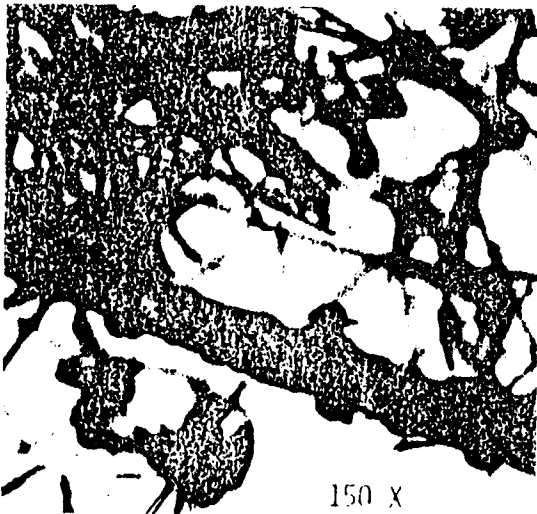


그림 3. 60°C로 가열한 물에 3개월동안 담근 슬래그암면의 광학현미경 사진으로, 섬유표면에 뿔물질이 생성·퇴적한 모습이 보임.



그림 4. 85°C로 가열한 물에 27일동안 담근 슬래그암면의 광학현미경사진으로, 광범위하게 생성된 뿔물질이 소편상태의 섬유를 전체적으로 덮어 싸고 있는 모습.



그림 5. 100°C로 가열한 물에 6일동안 담근 슬래그암면의 SEM미경 사진으로, 섬유표면에 벌집구조 또는 그물망구조를 보이고 있음.

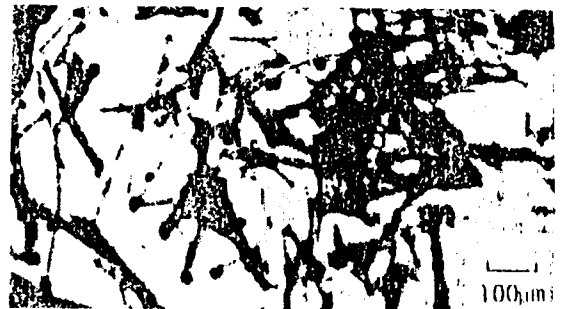


그림 6. 100°C로 가열한 물에 3개월 동안 담근 유리섬유의 광학현미경 사진으로, 섬유줄기에 뿔물질의 생성과 섬유에 물리적인 변화가 있음을 보여줌.

4. 검토

물의 온도가 100°C에 이르기 까지 가열처리에 노출시켜본 결과 무기질 섬유유 표면상에서의 물리적 변화는 아마도 광섬유유 표면과 수분사이에서 발생하는 화학적 반응에 의한 것으로 보인다. 이러한 화학적 반응을 명시하는 것은 광섬유, 특히 스래그암면형 섬유유 화학적 특성의 견지에서 볼때 전적으로 비현실적인 것은 아니다. 관련자료에 따르면 스래그울과 암면은 주로 야금 스래그 및 또는 천연암석을 기계적으로 혼합해서 가공하는데, 이 재료들은 산화철(Fe_2O_3)과 알카리(Na_2O 혹은 K_2O)와 같은 소량의 다른 산화물을 함유하고 있는 실리카(SiO_2) 알루미늄(Al_2O_3), 산화칼슘(CaO) 그리고 산화마그네슘(MgO)을 주성분으로 하고 있다. 용해된 혼합물의 점도(viscosity)를 조절하기 위하여 다른 산화성분들이 기존의 성분에 추가되기도 한다.

더구나, 황(Sulfur)은 야금 스래그와 천연암석에서 자주 보이며 용선로(Cupola furnace)에서의 광섬유 제조공정상 주요 연료인 코우크에서도 볼 수 있다. 용해과정에서 그리고 용해된 섬유덩어리를 섬유화하는 과정에서 이러한 모든 화학적 성분들을 균일하게 혼합한다는 것은 어려운 일이 될 것이다. 따라서, 생산된 많은 섬유질의 고품질들은 다양한 화학적 성분을 포함하게 되므로 균일한 섬유가 되기는 매우 어렵다. 그러므로 수증기 또는 물이 광섬유 표면에 접촉할 때 화학적인 용해과정이 발생할 수 있다고 상상하는 것이 불합리한 것은 아니다. 어떤 화학적 성분들은 섬유로부터 이탈한다. 그러한 화학적 용해과정의 정도는 가열의 정도와 용해기간에 대해 민감하게 나타난다. 계속적인 이탈과 이렇게 용해된 성분들의 누적으로 일부 성분들은 물의 화학적 반응에 영향을 받지 않는 섬유들의 일부에 퇴적되기 시작하며 그림 4에서 볼 수 있는 바와같이 섬유표면에 異물질의 생성을 가져오게 된다. 반면, 섬유로부터 화학적 성분들이 이탈됨에 따라 섬유줄기에 약점부를 형성하거나 용력의 집중을 가져올 수 있다. 기계적 요동이나 진동에 의해 섬유를 움직이면 약점부로 인해 섬유가 부서지고 파괴되어, 결과적으로 細長絲의 고체형 섬유

유가 소편과 미립자들로 변형되어 버린다. 스래그암면과 열과 수분의 영향을 받는 스래그암면 및 유리 섬유유 재료성질에 대해서는 문헌으로 보고된 것이 거의 없는 실정이다. 따라서, 문헌 연구에서 찾을 수 있는 정보란 거의 없다. 그러나 프랑스의 Lejeune은 몇가지 흥미있는 자료를 제시했다. 그는 열과 수분의 영향을 받는 스래그암면이 더 연약해지고 섬유형태의 파괴점에 이르기까지 퇴화가 진행된다는 사실과, 퇴화상태를 검색하는 가장 쉬운 방법은 문지르는 시험방법을 적용하는 것이라고 밝혔다. 따라서 이 연구에서 관측된 결과들은 이 보고결과와 일치하고 있다.

열류계 장치로 측정된 일반 스래그암면과 미립자 상태의 섬유 소편들의 열전도성에 있어서 유사한 값들이 관측된 것은 섬유형태의 재료와 미립자형태의 재료에 주어진 공간의 단열이론 견지에서 예측되는 것이다. 그러나, 퇴화과정에 의한 섬유덩어리의 물리적 변화는 점유공간속에서 재료의 분포를 크게 바꿀 수 있었다. 공간내에서의 이러한 재료 분포의 변화는 단열성능에 대한 이같은 무기질 섬유유 열적성능의 효율에 있어서도 변화를 가져올 수 있다는 것이다.

5. 결론

본 연구결과는 액체 혹은 수증기상태의 물 매개체는 스래그암면과 유리섬유유 재료특성에 해로운 영향을 미치는 것을 보여준다. 물 매개체는 섬유표면을 침범하여 細長絲形의 섬유유를 소편과 미립자로 변형시킨다. 이러한 재료 퇴화과정은 유리섬유보다 스래그암면에서 보다 더 심한 것으로 관측되었다. 현재로서는 실험실 연구에서 관측했던 광섬유유 재료 퇴화 과정이 이 분야의 유사한 재료들과 제품들에서도 발생할 수 있는지는 확실하지 않으며 아직까지 연구중에 있다. 모의환경조건하에서 물가열 처리에 노출시킨 결과 무기질 광섬유유 물리적인 변화와 재료의 퇴화원인은 섬유유 표면과 물 매개체사이에서 발생하는 화학적인 용해과정과 관계가 있는 것으로 해석되고 있다. 외부의 異물질의 생성과 細長絲形 섬유유가 소편 혹은 미립자로 파열되는 것은 이러한 용해과정때문인 것으로 여겨진다.