

장기 경년변화에 따른 뿔칠내화피복재의 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Property of
Spray-Applied Fire Resistive Coatings with Long-Time Elapse

건축구조부 선임연구원 공학박사 최동호

1. 서 론

최근 그 비중이 크게 증가하고 있는 강구조 건축물은 비교적 경량으로 건축물의 고층 및 대형화가 가능하고, 시공에 있어서 타구조에 비하여 건축기간의 단축 및 공사의 효율성이 높아 경제적인 면에서 유리한 점이 있으나 화재시 강재가 고온에 노출될 경우 구조내력이 급격히 감소하는 단점이 있다. 따라서 강구조 건축물의 주요 구조부는 화재시 구조내력의 저하가 발생하지 않도록 부재에 대한 내화성능을 확보할 필요가 있으며, 이를 위한 방법 중 널리 사용되는 것이 강재 부재에 내화피복을 시공하는 방법이다. 이중 특히 단열성이 우수한 재료를 강재에 일정한 두께로 뿔칠 시공하여 내화피복을 구성하는 뿔칠 피복공법은 타공법에 비하여 내화성능이 우수하고 시공 및 경제성 측면에서도 유리한 점이 있어 현재 가장 일반적으로 적용되고 있다.

그러나 뿔칠 피복공법은 위와 같은 장점에도 불구하고 피복재가 시공된 후 시간 경과에 따라 피복재의 균열, 탈락 등에 의하여 내화성능 및

부착강도 등이 저하될 우려가 있으며, 이에 따라 장기적인 시간 경과에 따른 뿔칠 내화피복재의 특성 변화를 파악하고 이를 건물 설계 및 시공시에 적정하게 적용하는 것이 필요하다.

이에 본 연구에서는 국내에서 생산·시공되는 뿔칠 내화피복재를 대상으로 10경년에 대한 내화가열, 밀도 및 부착강도 측정실험을 실시하여 피복재의 경년변화에 따른 성능 특성을 파악하고, 이를 근거로 경년변화에 따른 기본적인 성능예측모델을 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 개요

실험대상인 뿔칠 내화피복재는 암면계 반습식 피복재, 질석계 및 석고계 습식 피복재의 3종으로 정하였으며, 피복재의 경년기준은 10년을 최대경년으로 하여, 1·2·3·5·10경년에 대한 가열등급별 내화가열실험, 밀도 및 부착강도 측정실험을 실시하였다.

표 1은 실험의 인자 및 수준을 나타낸 것이다.

표 1. 실험 인자 및 수준

| 요인 | 피복재 | 경년 |
|----|-----------------------------|----------------|
| 인자 | 암면계 반습식 질석계 습식 석고계 습식 | 1, 2, 3, 5, 10 |
| 수준 | 3 | 5 |

2.2 사용재료

(1) 암면계 반습식 피복재

본 실험에서 사용된 암면계 반습식 피복재는 A사의 제품으로 KS F 4701에 규정된 암면 및 KS L 5201에 규정된 보통 포틀랜드 시멘트를 주성분으로 하며, 피복재의 화학적 성분 및 성분 배합비는 표 2 및 표 3과 같다.

표 2. 암면계 반습식 피복재의 화학적 성분

| 구분 | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | lg-loss | 기타 |
|--------|------------------|------|--------------------------------|------|--------------------------------|------------------|-------------------|------------------|---------|------|
| 함량 (%) | 36.1 | 33.8 | 13.3 | 5.73 | 2.66 | 1.15 | 2.08 | 1.11 | 3.52 | 0.34 |

표 3. 암면계 반습식 피복재 성분배합비

| 구분 | 암면 | 보통 포틀랜드 시멘트 |
|--------|----|-------------|
| 배합비(%) | 60 | 40 |

(2) 질석계 습식 피복재

본 실험에서 사용된 질석계 습식 피복재는 B사의 제품으로 KS F 3702에 규정된 질석, KS F 3701에 규정된 펄라이트, KS F 3507에 규정된 석고플라스터, KS L 5201에 규정된 보통 포틀랜드 시멘트 및 KS M 6555에 규정된 탄산칼슘을 주성분으로 하고 있으며, 피복재의 화학적 성분 및 성분 배합비는 표 4 및 표 5와 같다.

표 4. 질석계 습식 피복재의 화학적 성분

| 구분 | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | lg-loss | S |
|--------|------------------|------|--------------------------------|------|--------------------------------|------------------|-------------------|------------------|---------|------|
| 함량 (%) | 24.6 | 26.2 | 6.38 | 13.4 | 5.32 | 3.10 | 1.82 | 0.68 | 6.04 | 4.96 |

표 5. 질석계 습식 피복재 성분배합비

| 구분 | 질석 | 시멘트 | 석고플라스터 | 펄라이트 | 탄산칼슘 | 기타 |
|--------|----|-----|--------|------|------|----|
| 배합비(%) | 33 | 24 | 20 | 13 | 6 | 4 |

(3) 석고계 습식 피복재

본 실험에서 사용된 석고계 습식 피복재는 C사의 제품으로 석고 및 KS M 3808에 규정된 발포폴리스티렌 보온재를 주성분으로 하고 여기에 지연제와 안정제 등이 첨가된 것으로 피복재의 화학적 성분 및 성분 배합비는 표 6 및 표 7과 같다.

표 6. 석고계 습식 피복재의 화학적 성분

| 구분 | SO ₂ | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | lg-loss | 기타 |
|--------|-----------------|------------------|-------|--------------------------------|------|--------------------------------|------------------|-------------------|------------------|---------|------|
| 함량 (%) | 36.25 | 2.61 | 39.37 | 2.36 | 1.35 | 0.20 | 0.67 | 0.80 | 0.02 | 16.18 | 0.02 |

표 7. 석고계 습식 피복재 성분배합비

| 구분 | 석고 | 발포 폴리스티렌 보온재 | 안정제 | 지연제 | 기타 |
|--------|----|--------------|-----|-----|-----|
| 배합비(%) | 85 | 3 | 4.5 | 1.6 | 5.9 |

2.3 실험체 제작

실험체는 뿔칠 내화피복재 3종을 크기 300mm

0 0 mm, 두께 1.6mm의 아연도금강판에 각 피복재의 제조 시방에 따라 뿔칠시공하여 제작하였으며, 제작이 완료된 시험체는 외부 실험실(상온)에서 각 경년 기간동안 보관하였다.

실험체별 사양 및 수량은 표 8과 같다.

표 8. 실험체 사양 및 수량

| 피복재 | 가열등급 (시간) | 피복두께 (mm) | 실험체 수량 | |
|---------|-----------|-----------|--------|----|
| 압면계 반습식 | 1 | 30 | 225개 | |
| | 2 | 40 | | |
| | 3 | 50 | | |
| 습식 | 질석계 석고계 | 1 | | 20 |
| | | 2 | | 30 |
| | | 3 | | 40 |

2.4 실험방법

(1) 내화가열 실험

각 피복재별 실험체 2개에 이면온도 측정용 열전대 3개씩을 부착하여 실험체틀에 설치하고 이를 유효가열면적 1m×1m인 수직가열로에서 표

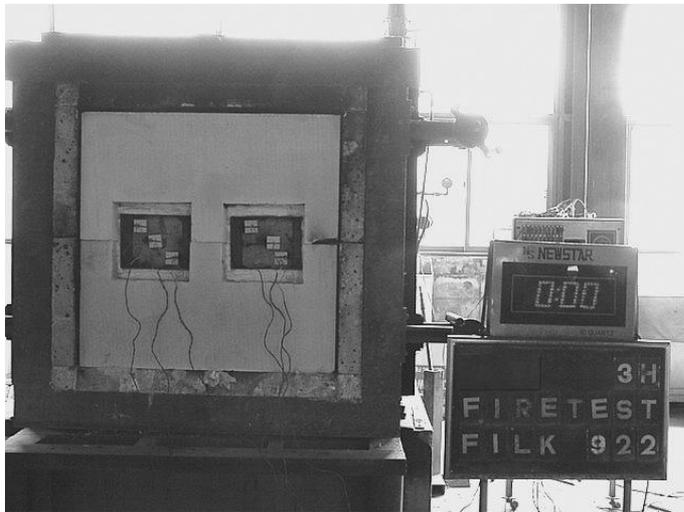


그림 1. 내화가열 실험 모습

KS F 2257에 규정된 표준시간온도곡선에 따라 가열등급별로 1·2·3시간 동안 가열하였으며, 가열중 설치된 열전대를 통하여 실험체의 이면 온도를 측정하였다.

그림 1은 실험 모습을 나타낸 것이다.

(2) 밀도 측정 실험

밀도 산정을 위한 실험체의 중량은 측정범위 500~10,000g, 정밀도 0.1g이상의 전자 저울을 사용하여 실험체별로 10회를 측정해낸 값의 평균으로 정하였으며, 실험체의 두께는 실험체별로 10개소에서 두께 측정기로 측정해낸 측정값의 평균을 실험체의 두께로 정하였다.

실험체의 밀도는 측정된 실험체의 중량, 두께 측정값과 실험체의 길이, 폭 측정값을 ASTM E 605에 규정된 밀도 산정식에 대입하여 산정하였다.

(3) 부착강도 측정 실험

부착강도 측정 실험은 금속접시 (5.36×10⁻³m²)에 2액형 우레탄 수지를 25cm³ 가량 혼합하여 이를 실험체 표면에 접착시키고 24시간 동안 경화시킨 후 금속접시 중앙에 부착된 후크에 부착강도 측정용 용수철 저울을 걸어 분당 약 5kg로 힘을 가해 피복재가 강판에서 탈락할 때의 수치를 측정하는 방법으로 진행되었으며, 실험체의 부착강도는 측정값을 ASTM E 736에 규정된 부착강도 산정식에 대입하여 산정하였다

표 9. 피복재 경년별 내화가열 실험결과

| 가열등급 | 경년 | 이면온도 (°C) | | |
|------|----|-----------|--------|--------|
| | | 암면계 반습식 | 질석계 습식 | 석고계 습식 |
| 1 시간 | 1 | 211 | 239 | 319 |
| | 2 | 214 | 249 | 321 |
| | 3 | 213 | 251 | 321 |
| | 5 | 234 | 270 | 330 |
| | 10 | 242 | 286 | 336 |
| 2 시간 | 1 | 220 | 246 | 254 |
| | 2 | 216 | 242 | 263 |
| | 3 | 228 | 246 | 264 |
| | 5 | 230 | 268 | 297 |
| | 10 | 239 | 299 | 303 |
| 3 시간 | 1 | 228 | 236 | 240 |
| | 2 | 238 | 245 | 252 |
| | 3 | 244 | 255 | 267 |
| | 5 | 251 | 266 | 268 |
| | 10 | 277 | 279 | 283 |

표 10. 피복재 경년별 밀도 측정실험결과

| 가열등급 | 경년 | 밀도 (g/cm³) | | |
|------|----|------------|--------|--------|
| | | 암면계 반습식 | 질석계 습식 | 석고계 습식 |
| 1 시간 | 1 | 0.31 | 0.43 | 0.41 |
| | 2 | 0.32 | 0.50 | 0.40 |
| | 3 | 0.34 | 0.51 | 0.41 |
| | 5 | 0.34 | 0.54 | 0.42 |
| | 10 | 0.35 | 0.50 | 0.44 |
| 2 시간 | 1 | 0.30 | 0.35 | 0.34 |
| | 2 | 0.33 | 0.41 | 0.35 |
| | 3 | 0.36 | 0.47 | 0.33 |
| | 5 | 0.36 | 0.50 | 0.36 |
| | 10 | 0.35 | 0.52 | 0.43 |
| 3 시간 | 1 | 0.33 | 0.35 | 0.36 |
| | 2 | 0.33 | 0.42 | 0.35 |
| | 3 | 0.34 | 0.48 | 0.38 |
| | 5 | 0.34 | 0.49 | 0.37 |
| | 10 | 0.36 | 0.51 | 0.42 |

2.5 실험결과

뿔칠 내화피복재 3종을 대상으로 10경년에 대한 내화가열실험, 밀도 및 부착강도 측정실험을 실시한 결과는 다음 표 9~표 11과 같다

표 11. 피복재 경년별 부착강도 측정실험결과

| 가열등급 | 경년 | 부착강도 (kgf/cm²) | | |
|------|----|----------------|--------|--------|
| | | 암면계 반습식 | 질석계 습식 | 석고계 습식 |
| 1 시간 | 1 | 0.18 | 0.71 | 0.76 |
| | 2 | 0.15 | 0.62 | 0.71 |
| | 3 | 0.08 | 0.65 | 0.63 |
| | 5 | 0.07 | 0.56 | 0.60 |
| | 10 | 0.04 | 0.37 | 0.56 |
| 2 시간 | 1 | 0.34 | 0.67 | 0.80 |
| | 2 | 0.26 | 0.67 | 0.73 |
| | 3 | 0.09 | 0.65 | 0.64 |
| | 5 | 0.09 | 0.58 | 0.54 |
| | 10 | 0.06 | 0.49 | 0.52 |
| 3 시간 | 1 | 0.13 | 0.76 | 0.74 |
| | 2 | 0.13 | 0.69 | 0.75 |
| | 3 | 0.11 | 0.62 | 0.65 |
| | 5 | 0.07 | 0.62 | 0.57 |
| | 10 | 0.05 | 0.58 | 0.55 |

3. 경년변화에 따른 피복재 성능 특성

3.1 피복재 이면온도

(1) 암면계 반습식 피복재

암면계 반습식 피복재는 그림 2에 나타난 것과 같이 가열등급 1시간은 1년 경과시의 211°C에서 10년 경과시의 242°C로 31°C가 상승하였으며, 가열등급 2시간은 1년 경과시의 220°C에서 10년 경과시의 239°C로 19°C, 가열등급 3시간은 1년 경과시의 228°C에서 10년 경과시의 277°C로 49°C가 상승하여 15%, 9%, 20%의 온도상승율을 나타냈다.

전반적으로 경년변화에 따른 암면계 반습식 피복재의 이면온도는 1~3년에서는 가열등급별로 이면온도의 변화가 뚜렷한 경향을 나타내지

않았으나 3년 이후로는 가열등급에 관계없이 이면온도의 상승경향이 뚜렷하게 나타났다.

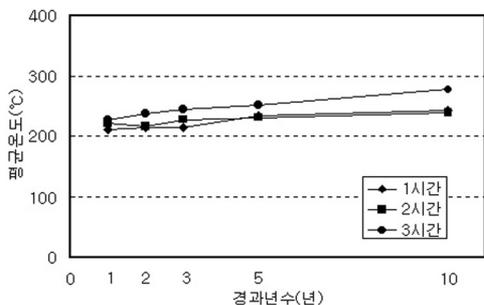


그림 2. 경년에 따른 가열등급별 이면온도 (암면계 반습식)

(2) 질석계 습식 피복재

질석계 습식 피복재는 그림 3에 나타난 것과 같이 가열등급 1시간은 1년 경과시의 239℃에서 10년 경과시의 286℃로 47℃가 상승하였으며, 가열등급 2시간은 1년 경과시의 246℃에서 10년 경과시의 299℃로 53℃, 가열등급 3시간은 1년 경과시의 236℃에서 10년 경과시의 279℃로 43℃가 상승하여 20%, 22%, 18%의 온도 상승율을 나타냈다.

전반적으로 경년변화에 따른 질석계 습식 피복재의 이면온도는 1년 경과시부터 이면온도의

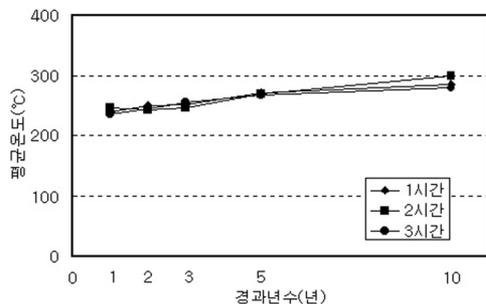


그림 3. 경년에 따른 가열등급별 이면온도 (질석계 습식)

상승경향이 나타나기 시작하여 암면계 반습식 피복재의 초기 경년에서 나타난 이면온도 변화 경향과는 차이를 나타냈으며, 이러한 질석계 습식 피복재의 이면온도 상승경향은 3년 이후로 더욱 뚜렷하게 나타났다.

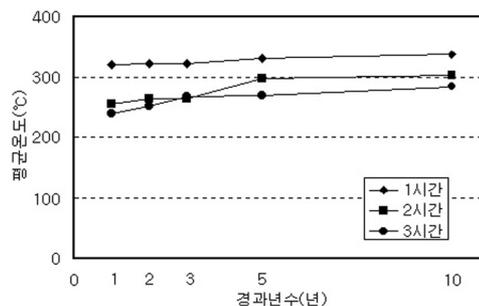


그림 4. 경년에 따른 가열등급별 이면온도 (석고계 습식)

(3) 석고계 습식 피복재

석고계 습식 피복재는 그림 4에 나타난 것과 같이 가열등급 1시간은 1년 경과시의 319℃에서 10년 경과시의 336℃로 17℃가 상승하였으며, 가열등급 2시간은 1년 경과시의 254℃에서 10년 경과시의 303℃로 49℃, 가열등급 3시간은 1년 경과시의 240℃에서 10년 경과시의 283℃로 43℃가 상승하여 6%, 17%, 16%의 온도상승율을 나타냈다.

전반적으로 경년변화에 따른 석고계 습식 피복재의 이면온도는 1년 경과시부터 이면온도의 상승경향이 나타나기 시작하고 3년 이후부터 이면온도의 상승경향이 더욱 뚜렷해지는 질석계 습식 피복재와 유사한 경향이 나타났다.

3.2 피복재 밀도

(1) 암면계 반습식 피복재

암면계 반습식 피복재의 밀도는 그림 5에 나타난 것과 같이 가열등급 1시간은 1년 경과시의 $0.31\text{g}/\text{cm}^3$ 에서 10년 경과시의 $0.35\text{g}/\text{cm}^3$ 로 $0.04\text{g}/\text{cm}^3$ 증가하였으며, 가열등급 2시간은 $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 에서 $0.35\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 $0.05\text{g}/\text{cm}^3$, 가열등급 3시간은 $0.33\text{g}/\text{cm}^3$ 에서 $0.36\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 이 증가하여 각각 10%, 16%, 9%의 밀도 증가율을 나타냈다.

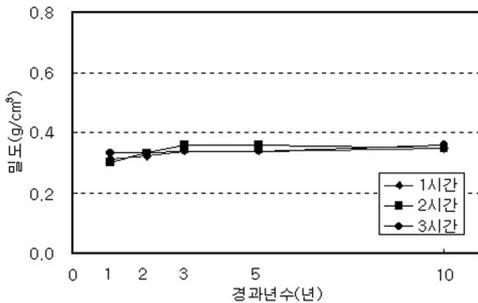


그림 5. 경년에 따른 가열등급별 밀도 (암면계 반습식)

전반적으로 암면계 반습식 피복재는 경년변화에 따라 1~3년에서는 평균 5%의 증가율을 나타냈으나, 3~10년에서는 밀도 증가율이 평균 1%이내로 나타나 3년 이후에서는 밀도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

(2) 질석계 습식 피복재

질석계 습식 피복재의 밀도는 그림 6에 나타난 것과 같이 가열등급 1시간은 1년 경과시의 $0.43\text{g}/\text{cm}^3$ 에서 10년 경과시의 $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ 로 $0.07\text{g}/\text{cm}^3$ 증가하였으며, 가열등급 2시간은 $0.35\text{g}/\text{cm}^3$

에서 $0.52\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 $0.17\text{g}/\text{cm}^3$ 증가하였고, 가열등급 3시간은 $0.35\text{g}/\text{cm}^3$ 에서 $0.51\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 $0.16\text{g}/\text{cm}^3$ 이 증가하여 16%, 46%, 45%의 밀도 증가율을 나타냈다

전반적으로 질석계 습식 피복재는 경년변화에 따라 1~3년에서는 평균 30%의 밀도 증가율을 나타냈으며, 3~10년에서는 평균 6%의 밀도 증가율을 나타냈다.

위와 같은 질석계 습식 피복재의 밀도 증가 경향은 1~3년에서 밀도 증가가 크고 3년 이후에서는 밀도의 증가가 작은 암면계 반습식 피복재의 밀도 증가경향과 유사하게 나타났으며, 전체적인 밀도 증가율은 암면계 반습식 피복재보다 큰 것으로 나타났다.

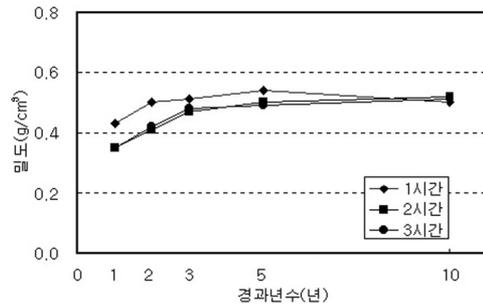


그림 6. 경년에 따른 가열등급별 밀도 (질석계 습식)

(3) 석고계 습식 피복재

석고계 습식 피복재의 밀도는 그림 7에 나타난 것과 같이 가열등급 1시간은 $0.41\text{g}/\text{cm}^3$ 에서 $0.44\text{g}/\text{cm}^3$ 로 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 증가하였으며, 가열등급 2시간은 $0.34\text{g}/\text{cm}^3$ 에서 $0.43\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 $0.09\text{g}/\text{cm}^3$, 가열등급 3시간은 $0.36\text{g}/\text{cm}^3$ 에서 $0.42\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 $0.06\text{g}/\text{cm}^3$ 가 증가하여 7%, 25%, 15%의 밀도 증가율을 나타냈다.

또한 석고계 습식 피복재는 경년변화에 따라 1~3년에서는 평균 5%의 밀도 증가율을 나타냈으며, 3~10년에서는 평균 8%의 밀도 증가율을 나타냈다

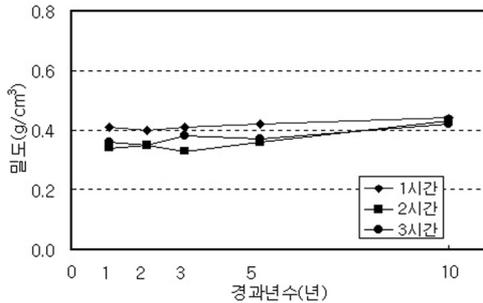


그림 7. 경년에 따른 가열등급별 밀도 (석고계 습식)

전반적으로 석고계 습식 피복재의 밀도변화는 경년에 따라 1~10년에서 평균 6% 정도로 일관성있게 증가하는 경향이 나타나 1~3년과 3년 이후의 밀도 증가율에 차이가 있는 암면계 반습식 피복재 및 질석계 습식 피복재의 밀도 변화 경향과는 차이를 나타냈다.

3.3 피복재 부착강도

(1) 암면계 반습식 피복재

암면계 반습식 피복재의 1~10년간의 부착강도 변화를 가열등급별로 비교하면 그림 8과 같이 가열등급 1시간은 1년 경과시의 0.18kgf/cm²에서 10년 경과시의 0.04kgf/cm²로 0.14kgf/cm² 저하하였으며, 가열등급 2시간은 0.34kgf/cm²에서 0.06kgf/cm²으로 0.28kgf/cm², 가열등급 3시간은 0.13kgf/cm²에서 0.05kgf/cm²으로 0.08kgf/cm²이 저하하여 77%, 82%, 61%의 부착강도 저하

율을 나타냈다.

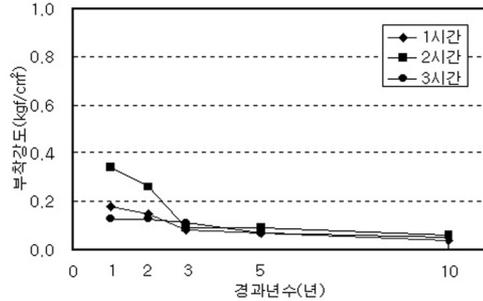


그림 8. 경년에 따른 가열등급별 부착강도 (암면계 반습식)

전반적으로 암면계 반습식 피복재는 1~3년에서 1시간 가열등급은 55%, 2시간 가열등급은 70%의 부착강도 저하율을 나타냈으며, 3시간 가열등급은 부착강도가 15% 증가하여 가열등급별로 부착강도의 변화에 일관성이 없었다. 반면 3~10년에서는 각 가열등급에서 50%, 40%, 55%의 부착강도 저하율이 나타나 1~3년에 비하여 부착강도의 저하 경향이 뚜렷하게 나타났다. 또한 암면계 반습식 피복재의 10년 경과시 부착강도는 평균 0.05kgf/cm²으로 이를 UBC Standard 7-6에서 정하는 부착강도 성능기준 0.07kgf/cm²과 비교할때 이에 미달하는 것으로 나타났다.

(2) 질석계 습식 피복재

질석계 습식 피복재의 부착강도는 그림 9에 나타난 것과 같이 가열등급 1시간은 1년 경과시의 0.71kgf/cm²에서 10년 경과시의 0.37kgf/cm²로 0.34kgf/cm² 저하하였으며, 가열등급 2시간은 0.67kgf/cm²에서 0.49kgf/cm²으로 0.18kgf/cm², 가열등급 3시간은 0.76kgf/cm²에서 0.58kgf/cm²으

로 0.18kgf/cm²이 저하하여 48%, 27%, 24%의 부착강도 저하율을 나타냈다.

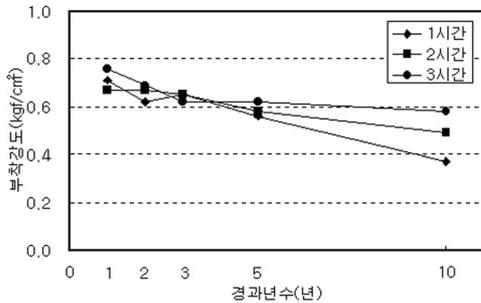


그림 9. 경년에 따른 가열등급별 부착강도 (질석계 습식)

전반적으로 질석계 습식 피복재의 경년별 부착강도 저하율은 1~3년에서 1·2·3시간 가열등급이 각각 8%, 3%, 18%로 나타났으며, 3년 이후의 부착강도 저하율은 43%, 25%, 6%로 나타났다. 또한 10년 경과시의 부착강도는 평균 0.48kgf/cm²로 UBC Standard 7-6의 부착강도 성능기준을 상회하는것으로 나타났다.

(3) 석고계 습식 피복재

석고계 습식 피복재의 부착강도는 그림 10과 같이 가열등급 1시간은 1년 경과시의 0.76kgf/cm²에서 10년 경과시의 0.56kgf/cm²로 0.11kgf/cm² 저하하였으며, 가열등급 2시간은 0.8kgf/cm²에서 0.52kgf/cm²로 0.07kgf/cm², 가열등급 3시간은 0.74kgf/cm²에서 0.55kgf/cm²로 0.19kgf/cm²이 저하하여 27%, 35%, 26%의 부착강도 저하율을 나타냈다.

전반적으로 석고계 습식 피복재는 경년별로 1~5년에서 1시간 가열등급은 21%, 2시간 가열등급은 32%, 3시간 가열등급은 22%의 부착강

도 저하율을 나타냈으며, 5~10년에서는 1·2·3시간 가열등급별로 각각 7%, 4%, 4%의 부착강

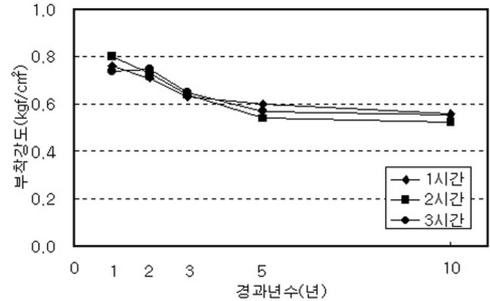


그림 10. 경년에 따른 가열등급별 부착강도 (석고계 습식)

도 저하율을 나타내 5년 이후에 비하여 1~5년에서 부착강도가 비교적 크게 저하하는 것으로 나타났다. 또한 석고계 습식 피복재의 10년 경과시 부착강도는 평균 0.54kgf/cm²로 나타나

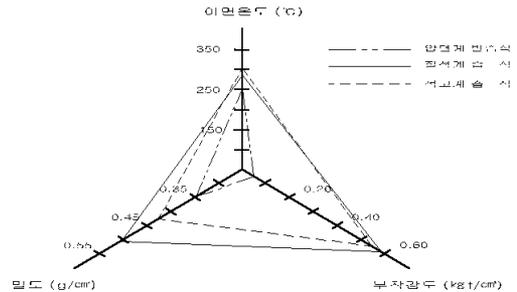


그림 11. 경년에 따른 피복재별 성능 비교

UBC Standard 7-6의 부착강도 성능기준인 0.07kgf/cm²을 상회하였다.

3.4 종합

그림 11은 실험결과인 피복재별 10년 경과시

의 이면온도, 밀도 및 부착강도를 비교하여 나타낸 것이다.

10년 경과시의 피복재별 이면온도는 질석계 습식 피복재의 이면온도가 암면계 반습식 피복재에 비하여 18%, 석고계 습식 피복재에 비하여 7% 낮게 나타났으며, 1~10년까지의 이면온도 상승율은 암면계 반습식 피복재와 석고계 습식 피복재가 14%, 질석계 습식 피복재가 28%로 나타나 질석계 습식 피복재가 다른 피복재보다 내화성능 저하율이 큰 것으로 나타났다.

10년 경과시의 피복재별 밀도는 질석계 습식 피복재가 암면계 반습식 피복재에 비하여 27%, 석고계 습식 피복재에 비하여 18% 높은 것으로 나타났으며, 1~10년까지의 밀도 증가율은 질석계 및 석고계 습식 피복재가 38% 및 18%, 암면계 반습식 피복재가 12%로 나타났다.

10년 경과시의 피복재별 부착강도는 암면계 반습식 피복재의 부착강도가 질석계 및 석고계 습식 피복재의 10% 정도인 평균 0.05kgf/cm²으로 나타나 부착강도를 거의 상실하는 것으로 나타났다으며, 1~10년까지의 부착강도 저하율도 암면계 반습식 피복재가 55%, 질석계 및 석고계 습식 피복재가 15%로 나타나 습식 피복재에 비하여 암면계 반습식 피복재의 부착강도 성능이 낮은 것으로 나타났다.

1~10년까지의 습식 피복재의 부착강도와 부착강도 저하율은 평균 0.64kgf/cm²와 15%의 범위로 유사한 수준을 나타냈으며 10년 경과시의 부착강도도 평균 0.50kgf/cm²으로 UBC Standard 7-6의 부착강도 성능기준을 만족하는 것으로 나타났다.

4. 경년변화에 따른 뽕칠 내화피복재의 성능 예측

본 연구에서는 뽕칠 내화피복재를 대상으로 실시한 10경년에 대한 성능실험결과와 경년과 피복재 성능들간의 상관분석을 통하여 경년변화에 따른 뽕칠 내화피복재의 내화성능, 밀도 및 부착강도 예측모델을 제시하였으며, 최종적으로 경년변화에 대한 피복재별 이면온도, 밀도 및 부착강도에 대한 다중회귀분석을 실시하여 밀도 및 부착강도 성능이 고려된 뽕칠 내화피복재의 이면온도 예측 모델을 제시하였다.

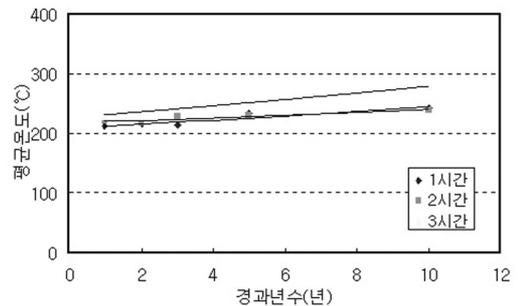


그림 12. 경년변화와 이면온도 (암면계 반습식)

4.1 암면계 반습식 피복재

경년변화에 따른 암면계 반습식 피복재의 내화성능 예측을 위하여 경년과 이면온도의 관계를 상관분석한 결과 그림 12 및 식 1~식 3과 같은 경년변화에 따른 가열등급별 이면온도 증가에 대한 상관식이 도출되었다.

$$T_1 = 207.60e^{0.016Y} \quad (R^2 = 0.868) \quad (\text{식 } 1)$$

$$T_2 = 217.04e^{0.018Y} \quad (R^2 = 0.829) \quad (\text{식 } 2)$$

$$T_3 = 226.89e^{0.020Y} \quad (R^2 = 0.979) \quad (\text{식 } 3)$$

여기서, T_1 :이면평균온도 (°C, 1시간 가열등급)
 T_2 :이면평균온도 (°C, 2시간 가열등급)
 T_3 :이면평균온도 (°C, 3시간 가열등급)
 Y :소요 년수 (년)

위의 식에 의하여 이면온도 산정 결과 피복재의 이면온도가 538°C에 도달하는데 소요되는 년수는 1시간 가열등급은 60년, 2시간 가열등급은 51년, 3시간 가열등급은 44년으로 나타났으며, 이러한 결과로 볼 때 가열등급별로 차이가 있지만 암면계 반습식 피복재는 시공후 약 50년 동안은 내화성능의 유지가 가능할 것으로 판단되었다.

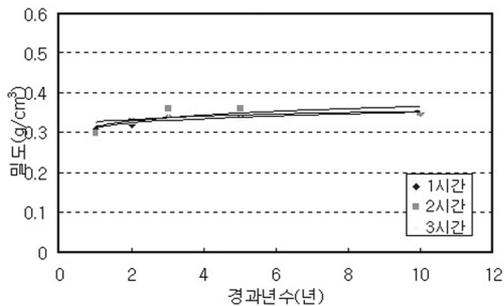


그림 13. 경년변화와 밀도 (암면계 반습식)

경년변화에 따른 암면계 반습식 피복재의 밀도를 예측하기 위하여 가열등급에 따른 경년과 밀도의 관계를 상관분석한 결과 그림 13 및 식 4~식 6과 같은 경년변화에 따른 가열등급별 밀도 변화에 대한 상관식이 도출되었다.

$$D_1 = 0.018\text{Ln}(Y) + 0.312 \quad (R^2 = 0.905) \quad (\text{식 } 4)$$

$$D_2 = 0.023\text{Ln}(Y) + 0.314 \quad (R^2 = 0.618) \quad (\text{식 } 5)$$

$$D_3 = 0.013\text{Ln}(Y) + 0.326 \quad (R^2 = 0.830) \quad (\text{식 } 6)$$

여기서, D_1 :밀도 (g/cm^3 , 1시간 가열등급)
 D_2 :밀도 (g/cm^3 , 2시간 가열등급)
 D_3 :밀도 (g/cm^3 , 3시간 가열등급)
 Y :소요 년수 (년)

위의 식에 의하여 밀도 산정 결과 1시간 가열등급의 60년 경과시 밀도는 $0.39\text{g}/\text{cm}^3$, 2시간 가열등급의 51년 경과시밀도는 $0.4\text{g}/\text{cm}^3$, 3시간 가열등급의 44년 경과시 밀도는 $0.38\text{g}/\text{cm}^3$ 로 산정되었다.

경년변화에 따른 암면계 반습식 피복재의 부착강도를 예측하기 위하여 가열등급에 따른 경년과 부착강도의 관계를 상관분석한 결과 그림 14 및 식 7~식 9와 같은 경년변화에 따른 가열등급별 부착강도 변화에 대한 상관식이 도출되었다.

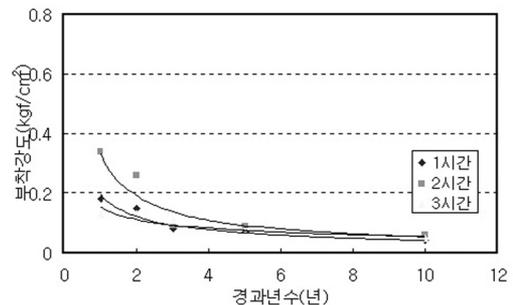


그림 14. 경년변화와 부착강도 (암면계 반습식)

$$BS_1 = 0.195Y^{-0.675} \quad (R^2 = 0.949) \quad (\text{식 } 7)$$

$$BS_2 = 0.334Y^{-0.801} \quad (R^2 = 0.870) \quad (\text{식 } 8)$$

$$BS_3 = 0.154Y^{-0.453} \quad (R^2 = 0.880) \quad (\text{식 } 9)$$

여기서, BS_1 :부착강도(kgf/cm^2 , 1시간 가열등급)
 BS_2 :부착강도(kgf/cm^2 , 2시간 가열등급)
 BS_3 :부착강도(kgf/cm^2 , 3시간 가열등급)
 Y :소요 년수 (년)

위의 식에 의하여 부착강도 산정 결과 1시간 가열등급의 60년 경과시 부착강도는 0.01kgf/cm², 2시간 가열등급의 51년 경과시 부착강도는 0.01kgf/cm², 3시간 가열등급의 44년 경과시 부착강도는 0.03kgf/cm²로 산정되었다. 단 5~7년 경과시 피복재의 부착강도가 UBC Standard 7-6의 성능기준 0.07kgf/cm² 이하로 저하되는 것으로 나타나 실제 시공에 암면계 반습식 피복재를 적용하는 경우 경년변화에 따른 부착강도 저하에 대한 고려가 필요한 것으로 판단되었다.

이상과 같은 경년변화에 따른 이면온도와 부착강도 및 밀도와의 관계에 대한 상관분석 결과를 바탕으로 경년과 부착강도 및 밀도 변화를 고려한 다중회귀분석을 실시한 결과 식 10~식 12와 같은 암면계 반습식 피복재의 경년변화에 대한 이면온도 예측식이 도출되었다.

$$T_1 = 3.50Y - 608.33BS - 2247.22D + 1019.44 \quad (R^2=0.817) \quad (\text{식 } 10)$$

$$T_2 = (-8.1E-04)Y - 169.55BS - 555.54D + 443.97 \quad (R^2=0.922) \quad (\text{식 } 11)$$

$$T_3 = 5.09Y + 38.64BS + 127.27D + 179.16 \quad (R^2=0.980) \quad (\text{식 } 12)$$

여기서, T₁₋₂₋₃ : (이면온도 ℃, 1 · 2 · 3시간

가열등급)

Y : 경년 (년)

BS : 부착강도(kgf/cm²)

Y : 밀도 (kgf/cm³)

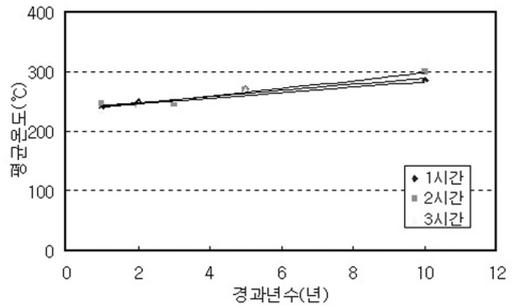


그림 15. 경년변화와 이면온도 (질석계 습식)

4.2 질석계 습식 피복재

경년변화에 따른 질석계 습식 피복재의 내화 성능 예측을 위하여 경년과 이면온도의 관계를 상관분석한 결과 그림 15 및 식 13~식 15과 같은 경년변화에 따른 가열등급별 이면온도 증가에 대한 상관식이 도출되었다.

$$T_1 = 238.15e^{0.015Y} \quad (R^2 = 0.939) \quad (\text{식 } 13)$$

$$T_2 = 234.16e^{0.024Y} \quad (R^2 = 0.949) \quad (\text{식 } 14)$$

$$T_3 = 237.31e^{0.018Y} \quad (R^2 = 0.905) \quad (\text{식 } 15)$$

여기서, T₁ : 이면평균온도 (℃, 1시간 가열등급)

T₂ : 이면평균온도 (℃, 2시간 가열등급)

T₃ : 이면평균온도 (℃, 3시간 가열등급)

Y : 소요 년수 (년)

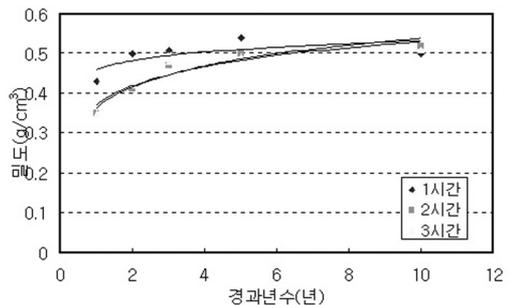


그림 16. 경년변화와 밀도 (질석계 습식)

위의 식에 의하여 이면온도 산정 결과 피복재의 이면온도가 538℃에 도달하는데 소요되는 년수는 1시간 가열등급은 41년, 2시간 가열등급은 35년, 3시간 가열등급은 46년으로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 가열등급별로 차이가 있지만 질석계 습식 피복재는 시공 후 약 40년 동안은 내화성능의 유지가 가능하고, 이 기간을 전후로 내화성능의 저하에 대한 고려가 필요할 것으로 판단되었다

경년변화에 따른 질석계 습식 피복재의 밀도를 예측하기 위하여 가열등급에 따른 경년과 밀도의 관계를 상관분석한 결과 그림 16 및 식 16~식 18과 같은 경년변화에 따른 가열등급별 밀도 변화에 대한 상관식이 도출되었다.

$$D_1 = 0.032\text{Ln}(Y)+0.460 \quad (R^2=0.481) \quad (\text{식 } 16)$$

$$D_2 = 0.077\text{Ln}(Y)+0.362 \quad (R^2=0.934) \quad (\text{식 } 17)$$

$$D_3 = 0.070\text{Ln}(Y)+0.370 \quad (R^2=0.882) \quad (\text{식 } 18)$$

여기서, D_1 : 밀도 (g/cm^3 , 1시간 가열등급)

D_2 : 밀도 (g/cm^3 , 2시간 가열등급)

D_3 : 밀도 (g/cm^3 , 3시간 가열등급)

Y : 소요 년수 (년)

위의 식에 의하여 밀도 산정 결과 1시간 가열등급의 41년 경과시 밀도는 $0.58\text{g}/\text{cm}^3$, 2시간 가열등급의 35년 경과시밀도는 $0.64\text{g}/\text{cm}^3$, 3시간

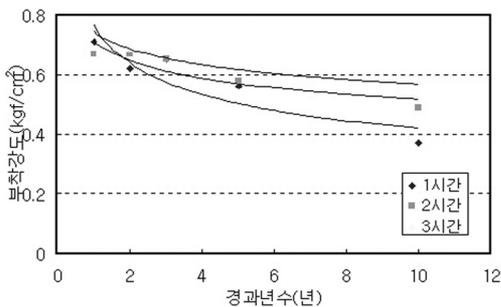


그림 17. 경년변화와 부착강도 (질석계 습식)

가열등급의 46년 경과시 밀도는 $0.64\text{g}/\text{cm}^3$ 로 산정되었다.

경년변화에 따른 질석계 습식 피복재의 부착강도를 예측하기 위하여 가열등급에 따른 경년과 부착강도의 관계를 상관분석한 결과 그림 17 및 식 19~식 21과 같은 경년변화에 따른 가열등급별 부착강도 변화에 대한 상관식이 도출되었다.

$$BS_1 = 0.766Y^{-0.262} \quad (R^2=0.811) \quad (\text{식 } 19)$$

$$BS_2 = 0.713Y^{-0.140} \quad (R^2=0.834) \quad (\text{식 } 20)$$

$$BS_3 = 0.743Y^{-0.116} \quad (R^2=0.916) \quad (\text{식 } 21)$$

여기서, BS_1 : 부착강도 (kgf/cm^2 , 1시간 가열등급)

BS_2 : 부착강도 (kgf/cm^2 , 2시간 가열등급)

BS_3 : 부착강도 (kgf/cm^2 , 3시간 가열등급)

Y : 소요 년수 (년)

위의 식에 의하여 부착강도 산정 결과 1시간 가열등급의 41년 경과시 부착강도는 $0.28\text{kgf}/\text{cm}^2$, 2시간 가열등급의 35년 경과시 부착강도는 $0.43\text{kgf}/\text{cm}^2$, 3시간 가열등급의 46년 경과시 부착강도는 $0.48\text{kgf}/\text{cm}^2$ 로 산정되었으며, 초기 경년에서 약 50년 경과시까지 부착강도가 $0.3\sim 0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ 저하하는 것으로 나타나 UBC Standard 7-6의 성능기준 이상으로 부착강도가 유지되는 것으로 판단되었다.

이상과 같은 경년변화에 따른 이면온도와 부착강도 및 밀도와의 관계에 대한 상관분석 결과를 바탕으로 경년과 부착강도 및 밀도 변화를 고려한 다중회귀분석을 실시한 결과 식 22~식 24와 같은 질석계 습식 피복재의 경년변화에 대한 이면온도 예측식이 도출되었다.

$$T_1 = 3.97Y - 20.09BS + 93.15D + 207.82$$

$$(R^2 = 0.930) \quad (\text{식 } 22)$$

$$T_2 = 0.33Y - 338.22BS - 63.07D + 494.18$$

$$(R^2 = 0.922) \quad (\text{식 } 23)$$

$$T_3 = 3.41Y + 272.22BS + 389.72D - 111.54$$

$$(R^2 = 0.962) \quad (\text{식 } 24)$$

T_2 :이면평균온도 (°C, 2시간 가열등급)

T_3 :이면평균온도 (°C, 3시간 가열등급)

Y :소요 년수 (년)

여기서, T_{1-2-3} : (이면온도°C, 1·2·3시간 가열등급)

Y :경년 (년)

BS :부착강도(kgf/cm²)

Y :밀도 (kgf/cm³)

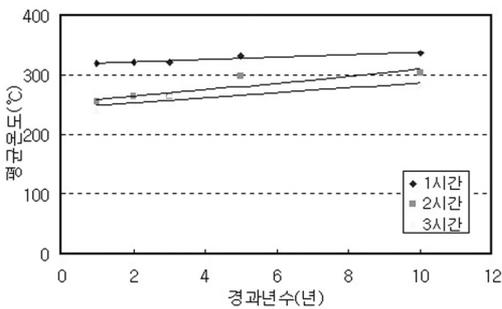


그림 18. 경년변화와 이면온도 (석고계 습식)

위의 식에 의하여 이면온도 산정 결과 피복재의 이면온도가 538°C에 도달하는데 소요되는 년수는 1시간 가열등급은 66년, 2시간 가열등급은 38년, 3시간 가열등급은 50년으로 나타나 가열등급별로 차이가 있지만 석고계 습식 피복재는 시공 후 약 50년 동안은 내화성능의 유지가 가능하고, 이 기간을 전후로 내화성능의 저하에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 경년변화에 따른 석고계 습식 피복재의 밀도를 예측하기 위하여 가열등급에 따른 경년과 밀도의 관계를

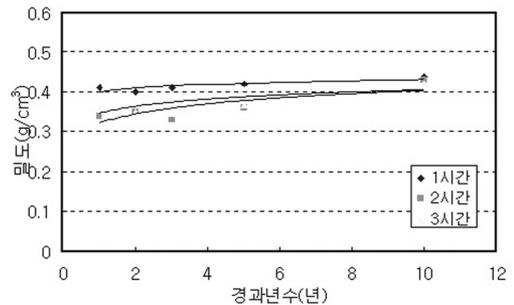


그림 19. 경년변화와 밀도 (석고계 습식)

4.3 석고계 습식 피복재

경년변화에 따른 석고계 습식 피복재의 내화성능 예측을 위하여 경년과 이면온도의 관계를 상관분석한 결과 그림 18 및 식 25~식 27과 같은 경년변화에 따른 가열등급별 이면온도 증가에 대한 상관식이 도출되었다.

$$T_1 = 317.18e^{0.008Y} \quad (R^2 = 0.933) \quad (\text{식 } 25)$$

$$T_2 = 253.11e^{0.020Y} \quad (R^2 = 0.819) \quad (\text{식 } 26)$$

$$T_3 = 244.66e^{0.016Y} \quad (R^2 = 0.805) \quad (\text{식 } 27)$$

여기서, T_1 :이면평균온도 (°C, 1시간 가열등급)

상관분석한 결과 그림 19 및 식 28~식 30과 같은 경년변화에 따른 가열등급별 밀도 변화에 대한 상관식이 도출되었다.

$$D_1 = 0.014\text{Ln}(Y) + 0.400 \quad (R^2 = 0.685) \quad (\text{식 } 28)$$

$$D_2 = 0.036\text{Ln}(Y) + 0.321 \quad (R^2 = 0.626) \quad (\text{식 } 29)$$

$$D_3 = 0.025\text{Ln}(Y) + 0.347 \quad (R^2 = 0.679) \quad (\text{식 } 30)$$

위의 식에 의하여 밀도 산정 결과 1시간 가열등급의 66년 경과시 밀도는 0.46g/cm³, 2시간 가열등급의 38년 경과시밀도는 0.45g/cm³, 3시간 가열등급의 50년 경과시 밀도는 0.44g/cm³로 산정되었다.

경년변화에 따른 석고계 습식 피복재의 부착 강도를 예측하기 위하여 가열등급에 따른 경년과 부착강도의 관계를 상관분석한 결과 그림 20 및 식 31~식 33과 같은 경년변화에 따른 가열등급별 부착강도 변화에 대한 상관식이 도출되었다.

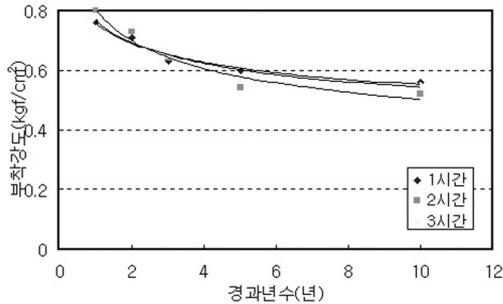


그림 20. 경년변화와 부착강도 (석고계 습식)

$$BS_1 = 0.759Y^{-0.139} \quad (R^2=0.961) \quad (\text{식 } 31)$$

$$BS_2 = 0.806Y^{-0.206} \quad (R^2=0.942) \quad (\text{식 } 32)$$

$$BS_3 = 0.769Y^{-0.152} \quad (R^2=0.865) \quad (\text{식 } 33)$$

여기서, BS_1 : 부착강도 (kgf/cm^2 , 1시간 가열등급)
 BS_2 : 부착강도 (kgf/cm^2 , 2시간 가열등급)
 BS_3 : 부착강도 (kgf/cm^2 , 3시간 가열등급)
 Y : 소요 년수 (년)

위의 식에 의하여 부착강도 산정 결과 1시간 가열등급의 66년 경과시 부착강도는 $0.42\text{kgf}/\text{cm}^2$, 2시간 가열등급의 38년 경과시 부착강도는 $0.38\text{kgf}/\text{cm}^2$, 3시간 가열등급의 50년 경과시 부착강도는 $0.42\text{kgf}/\text{cm}^2$ 로 산정되었으며, 초기 경년에서 약 70년 경과시까지 부착강도가 $0.3\sim 0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ 저하하는 것으로 나타나 질석계 습식 피복재와 유사한 경향을 나타냈다.

이상과 같은 경년변화에 따른 이면온도와 부착강도 및 밀도와와의 관계에 대한 상관분석 결과를 바탕으로 경년과 부착강도 및 밀도 변화를

고려한 다중회귀분석을 실시한 결과 식 34~식 36과 같은 석고계 습식 피복재의 경년변화에 대한 이면온도 예측식이 도출되었다.

$$T_1 = 1.55Y - 9.02BS + 61.68D + 299.11 \quad (R^2=0.937) \quad (\text{식 } 34)$$

$$T_2 = -10.14Y - 267.05BS - 766.95D + 213.65 \quad (R^2=0.981) \quad (\text{식 } 35)$$

$$T_3 = 1.56Y + 88.08BS + 91.96D - 278.32 \quad (R^2=0.885) \quad (\text{식 } 36)$$

여기서, T_{1-2-3} : (이면온도 $^{\circ}\text{C}$, 1·2·3시간 가열등급)
 Y : 경년 (년)
 BS : 부착강도 (kgf/cm^2)
 D : 밀도 (kgf/cm^3)

5. 결론

국내에서 생산되는 암면계 반습식 피복재, 질석계 및 석고계 습식 피복재 3종을 대상으로 10경년에 대한 내화가열실험, 밀도 및 부착강도 측정 실험을 실시하여 경년변화에 따른 피복재의 성능 특성을 파악하고 이에 대한 성능예측모델을 제시하고자 수행한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 경년 실험 결과 피복재의 종류에 관계없이 피복재의 이면온도와 부착강도는 경년변화에 따라 각각 상승 및 저하하는 경향을 나타냈으며 이면온도는 3년 이후, 부착강도는 5년 이후부터 상승률과 저하율이 크게 나타났다.

피복재의 밀도는 이면온도와 부착강도와는 달리 3년까지의 증가 외에는 경년에 따른 변화가 미비한 것으로 나타났다.

(2) 경년 변화에 따른 피복재의 성능을 평가한 결과 내화성능은 10년까지는 질석계 습식 피복재, 10년 이후는 석고계 습식 피복재가 우수한 것으로 나타났다.

피복재별 부착강도는 습식 피복재의 경우 10년 이후에도 성능을 유지하는 것으로 나타났으나, 암면계 반습식 피복재는 10년 이전에 부착강도를 거의 상실하는 것으로 나타났다.

(3) 경년과 피복재의 성능변화에 대한 분석 결과 피복재의 내화성능 유지 년수는 피복재에 상관없이 40~50년의 범위로 산정되었다. 단암면계 반습식 피복재는 7년 이상 경과시 부착강도를 거의 상실하는 것으로 산정되어 실제 시공시 부착강도 저하에 따른 내화성능의 변화를 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

(4) 경년변화에 따른 피복재의 이면온도를 예측하기 위하여 경년에 대한 이면온도, 부착강도 및 밀도 변화의 관계를 다중회귀분석하여 피복재별 이면온도 예측식을 제시하였다.

향후 본 연구를 기초로 하여 피복재의 열적 특성에 대한 조사, 실대 피복 부재에 대한 성능 실험 및 피복재 시공 건물에 대한 현장 조사를 실시하여 피복재의 성능에 대한 데이터 베이스를 구축할 필요가 있으며, 이를 적용한 보다 신뢰성 있는 경년변화에 대한 피복재의 성능예측모델 개발 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 강구조 내화설계 기준 및 기법에 관한 연구, (주)포항종합제철, 1995. 3.
2. 권인규, 구조용 강재의 내화특성에 관한 실험적 연구, 한양대 대학원 박사학위논문, 2002.

3. 권인규, 구조용 강재의 내화피복두께 설정에 관한 실험적 연구, 2002.
4. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1976.
5. T.T.Lie, Fire Resistance of Structural Steel, American Institute of Steel Construction, 1978.
6. Robert H. White, Use of Coatings to improve Fire Resistance of Wood, 1983.
7. Kathleen Bardell, Spray-Applied Fire Resistive Coatings for Steel Building Columns, 1983.
8. F.M.Stumpf & Morris Lieff. Fire Resistive Coatings, ASTM Committee, 1990.
9. John A. Purkiss, Fire Safety Engineering Design of Structures, 1996.
10. ASTM E 1513, Standard Practice for Application of Sprayed Fire Resistive Materials, 1993.
11. ASTM E 605, Standard Test Methods for Thickness and Density of Sprayed Fire-Resistive Material Applied to Structural Members, 1993.
12. ASTM E 736, Standard Test Method for Cohesion / Adhesion of Sprayed Fire-Resistive Materials Applied to Structural Members, 1992. **FILK**