

종이 콘크리트 화재 저항 내력 실험

손기상 · 조병헌
서울산업대학교 안전공학과

Fire Resistance Characteristic of Paper-Mixing Concrete

CHO Byung Heon · SON Ki Sang

Dept. of Safety Engineering Seoul National University of Technology

1. 서론

종이산업은 그 역사가 오래되었으며 공식적으로 AD 600년에 한국에 전파되어 현재에는 그 중요성이 큰 산업으로 발전하고 있고 종이 생산량과 소비량이 세계 최대 수준으로 나타나고 있는 실정이다. 그런만큼 종이의 재료인 목재 또한 대부분 수입목에 의존하고 있는 실태이다. 폐지는 전체 도시고형물 중 48%를 차지하며 이중 매일 쏟아져 나오는 신문지는 전체의 14%를 차지하고 있고, 2004년 현재 폐신문지 회수율 70%에 이르고 있다. 이렇듯 폐지의 재활용은 환경보전 및 자원절약 측면에서 많은 분야로 재활용되고 있다.

본 연구에서는 문서 파쇄기로 갈아진 종이조각을 콘크리트에 혼입하여 콘크리트의 강도적 특성, 고온의 특성, 열전도 특성, 철근콘크리트보의 휨강도 특성을 실험하여 종이 혼입된 콘크리트의 특성과 인쇄지와 신문지를 나누어 비교한 실험하여 앞으로의 활용방안과 기본자료로 제공하는데 연구의 목적을 둔다.

콘크리트강도는 현재 가장 많이 사용하는 24N/mm^2 , 27N/mm^2 의 각 강도별로 배합 무게 비율에 따라 종이의 양을 Normal, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%로 총 6가지 비율로 나누어 공시체를 제작하였다. 이 배합이 나온 배경은 기존 논문인 “폐툼밥이 혼입된 콘크리트의 특성에 관한 연구”를 바탕으로 예비 실험결과 최적의 배합을 찾았으며, 1.0%이상의 종이 비율은 사실 배합하는 과정에서 불가능하였기에 제외시켰다.

우선 콘크리트의 압축강도 시험은 지름 10cm에 높이 20cm인 공시체를 만들어 압축강도(KS F2405)와 활열인장강도(KS F2423), 휨강도(KS F 2408)시험을 하였고, 각 강도별, 비율별로 나누어 시험하였고 공시체의 중량도 체크하였다.

고온을 받은 콘크리트 시험은 콘크리트가 고온에 노출되었을시 콘크리트 강도에 미치는 영향을 알아보려고 수행하기로 한다. 본 시험은 콘크리트 내화시험방법(KS F 2257)에 의한 표준화재온도 곡선을 참조하여 온도영역을 200°C , 400°C , 600°C 로 나누어

노출시킨 후 콘크리트의 압축강도를 분석하였다.

본 연구에서는 종이를 혼입한 콘크리트의 각 특성별로 시험하여 종이와 콘크리트의 관계, 인쇄지와 신문지와의 관계 등을 분석하여 실제 적용성과 함께 향후 이 분야의 기본자료를 제공하기 위한 기본적인 시험 위주로 범위를 진행시킨다.

2. 이론적 고찰

2.1 종이이론

종이란 식물성 섬유를 분해시켜 섬유소(Cellulose)로 만든 뒤, 물에 풀어서, 어떤 종류의 매개체(Screen)를 통해 건져낸, 필터(filter)상태의 얇은 섬유조직이다.

셀룰로오스(Cellulose)는 비휘발성이며, 무색·무취의 불활성 물질로서 가수분해에 의해 당질로 전환되는 탄수화물의 일종으로 목질, 지방, 단백질, 펙틴(pectin)질, 광물질 등의 불순물과 함께 대부분의 식물성 섬유를 구성하고 있다. 그러므로 종이제작에 유해한 불순물이 제거된 뒤, Cellulose를 주성분으로 하는 섬유질이 직물처럼 고른 두께의 조직으로 압축되면 이것을 '종이'라고 정의할 수 있다.

종이의 원료가 되는 펄프는 기계펄프와 반화학펄프, 재생펄프, 화학펄프 등으로 크게 분류되며, 펄프의 원료가 되는 목재는 침엽수와 활엽수로 분류가 된다. 섬유의 길이는 침엽수가 0.7~5.0mm, 활엽수가 0.7~3.0mm정도이다. 따라서 긴 섬유의 화학펄프를 사용하는 경우는 인열강도, 벌크, 불투명도 및 투과도가 높은 종이가 얻어질 수 있으나, 평활도 및 인쇄품질이 불량하기 때문에 이 결함을 보완하기 위해서 짧은 섬유인 활엽수 펄프를 혼합하여 사용하는 것이 일반적이다.

『자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률』에 의하면 폐지란 '일정비율이상 사용한 다음의 재생종이 또는 재생종이제품', '중량기준으로 원료의 40%이상 사용한 신문지 또는 전자복사용지'등 으로 정의 되고 있다. 폐지는 목질계 기질에 따라 조금씩 차이는 있지만 주요성분은 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌과 같은 성분으로 구성되어 있다.

폐지를 재활용 할 경우 천연펄프에 비해 재생 펄프가 질적으로 나쁜 이유는 섬유자체의 강도는 재생됨에 따라 거의 변화를 일으키지 않으나 각질화에 의한 섬유 결합력의 감소로 종이의 강도적 성질이 천연 펄프에 비해 약화된다는 점이다.

인쇄용지는 국내의 KS규격(KS M 7102)에 따라 특급, 1급, 2급, 3급으로 나뉘며, 보통 인쇄용지의 평량은 63.2~235g/m², 인장강도 29.8~129.0N, 인열강도 38.0~146.0gf, 신장률 1.4~2.1%, 비인열도 60.1~62.3, 백색도 70.0~83.8%로 나타나고 있다.

신문지는 이미 기계적, 화학적 전처리를 거친 상태로 보통 평량 40~50g/m²으로 크게 신문용지와 잉크로 나누어 생각할 수 있다. 신문용지의 주요 구성성분은 저질의 침엽수와 활엽수 찌꺼기를 이용하고, 폐지와 거의 동일하지만 제지공정과 표백공정상에

서 다양한 성분이 포함되고, 제조시 잉크가 첨가되나 그 성분은 미비하다 할 수 있겠다. 신문의 잉크는 신문용지 중량의 1~2%를 차지한다.

2.2 콘크리트압축강도 이론

콘크리트란 시멘트, 물, 골재를 주원료로 하고 경우에 따라 콘크리트의 여러 성질을 개선할 목적으로 혼화재료를 구조물이 요구하는 크기와 형태의 거푸집 속에 넣어 시간의 경과에 따라 시멘트와 물의 수화반응에 의해 경화하는 성질을 가진 것이다.

콘크리트의 강도에는 여러 가지를 들 수 있는데 그 중 중요한 것은 압축강도(Compressive strength), 할열인장강도(Tensile strength), 휨강도(Bending strength), 전단강도(Shearing strength) 등이 있으며 그들의 강도관계는 대체로 압축강도(150~300kg/cm²)를 기준으로 인장강도는 10~15%, 휨강도는 1/5~1/7 정도(인장강도의 1.6~2배), 전단강도는 35~80%정도(이것은 전단력이 다른 응력과 분리하여 시험하기 힘들기 때문에 변화가 크다)이며, 콘크리트 강도에 영향을 미치는 요인으로는

- ① 수습 : 수중침지(浸漬)하였을 때 강도는 증가한다.
- ② 온도 : 상온(25℃)까지는 온도가 높을수록 강도가 증진된다. -3℃ 이하는 콘크리트가 동결되고, 65℃ 이상이면 냉각시 수축열구(龜裂)이 발생하므로 유의하여야 한다. 단, 특수설비로 고온 고압(120~170℃, 5~10mmHg)양생시는 강도증진을 저해하지 않으며 건조수축도 극히 적어 공장제품의 콘크리트에 많이 이용된다.
- ③ 재령 : 콘크리트는 일반적으로 재령이 증가하면 강도는 증진되는데 그 중에서도 초기강도일수록 증진이 더 크다.
- ④ 혼합 : 콘크리트는 사용재료를 충분히 혼합하면(15분 정도까지) 강도는 증진된다. 콘크리트가 구비해야 할 일반적인 성질로는 소요강도를 얻을 수 있을 것, 적당한 워커빌리티(Workability)를 가질 것, 균일성을 유지하도록 할 것, 내구성이 있을 것, 경제적인 것, 수밀성 등 기타 수요자가 요구하는 성능을 만족시켜야 한다.

2.3 고온 노출시 콘크리트 강도이론

콘크리트는 고온 노출시에 강도에 영향을 미치게 된다. 배합, 환경조건 등이 규명되지 않고 단순히 고온에서의 거동을 평균 곡선으로 나타낼 수는 없지만, 예를 들어, 150℃에서의 압축강도를 측정해 보면 원래의 강도의 30%~120%정도의 영역 내에 놓이게 되고, 350℃ 이상에서 급격한 강도저하를 보인다는 것이 중론이다.

- 가) 100℃ - 이 단계에서는 수화반응도 거의 완료되었고, 100℃라는 온도에 의한 물리적, 화학적 변화가 거의 없으므로 강도에 있어서 경미한 감소를 보인다.
- 나) 150℃ - 대체로 강도감소효과가 커서 약 28%를 기록하였다.

이 온도범위(100℃~200℃)에서 나타난 강도감소는 가열시의 수분손실과 시멘트 페이스트와 골재간의 열팽창성에 있어서의 부적합성에 기인한 것으로 보인다. 시멘트페이스트의 수축으로 인한 수분손실은 100℃에서 일어나며 150℃에서 페

이스트의 수축은 그의 열팽창정도를 초과한다. 결국 시멘트페이스트와 석회암 골재간의 열팽창계수 차이로부터 열적 부적합성이 나타나고 그것은 열응력을 유발한다. 그 응력은 골재와 그를 둘러싼 시멘트페이스트 사이의 부착의 파괴를 가져와 강도손실을 보게 한다.

다) 200℃ - 이 단계에서는 강도감소율이 현저히 감소하고 평균 잔류압축강도가 79%이다 이것은 아마도 물의 손실의 계속적인 영향에 기인한 것이다. 또한 물리적으로 흡수된 물의 손실로 인한 시멘트겔의 밀화과정에 의한 것으로 보인다. 이 단계에서는 수축으로 인한 시멘트페이스트의 수축은 감소하기 시작하고 열팽창영향이 지배하기 시작한다.

라) 400℃ - 원래강도의 48%~74%정도의 강도를 보유하며 강도감소가 계속 일어난다. 외관상으로는 철의 산화로 인하여 분홍색을 띠게되며 미세균열이 시편 표면에 분명히 나타난다.

또한 200℃보다 0.76%의 중량손실률을 보이는데 이는 남아있는 결합수의 손실을 의미한다. 즉 점토성분으로 부터의 수분증발과 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (400℃에서 CaO를 분리하여 수분성을 잃기 시작한다.)로 부터의 수분의 증발, MgCO_3 로 부터의 CO_2 의 증발을 의미한다. 남은 CaO가 냉각 후 젖게 되거나 습한 공기에 접하게 되면 그것은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 로 재수화되어 부피팽창이 일어나 콘크리트의 열화를 낳게 된다. 그 두 가지 반응이(골재의 팽창과 시멘트페이스트의 수축)결국 콘크리트를 약화시키고 균열을 생기게 한다.

마) 600℃ - 콘크리트 중량손실은 약 0.74%(400℃ 이후)로 이것은 CaCO_3 , MgCO_3 로 부터의 CO_3 증발에 기인한 것으로 물은 이 단계에 이르기 전에 완전 소멸한다. Lea에 의하면 CaCO_3 는 가열하였을 때는 900℃에서 분해되나 다른 물질과 섞여 있을 때는 보다 낮은 온도에서 분해한다고 전한다. 또한 이 온도범위에서는 흐릿한 회색을 띄며 표면에는 보다 넓은 균열이 나타난다.

흥미로운 것은 배합, 노출시간 90분의 경우에 600℃에서 폭발한다는 사실이다. 이는 골재의 주성분인 CaCO_3 의 많은 양이 CaO와 CO_2 로 분해되었기 때문인 것으로 사료된다.

3. 실험

3.1 실험계획

중이가 혼입된 콘크리트의 최적의 배합을 위해서 배합설계는 D레미콘 회사의 배합표를 이용하여 아래와 같은 표로 배합하는 것으로 하였고, 잔골재와 굵은골재 및 혼화재 또한 실제 D레미콘 회사에서 사용하는 것을 사용하므로서 최소한의 오차도 줄이려

고 노력하였다.

공시체 제작은 KS F 2425 규정에 따라 제작하였으며, 공시체의 제작 및 양생 중의 온도는 특수한 규정이 없는 한 성형 후 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 습윤상태에서 재령 28일까지 양생 후 강도시험을 행한다. 압축강도 인장강도 공시체는 “지름의 2배 높이로 한다.”라는 규정에 따라 $\varnothing 10\text{cm}\times 20\text{cm}$ 의 원주형으로 만들고 3개 이상의 공시체를 만듦을 원칙으로 한다.

배합은 강제식 믹서기를 이용하며, 압축시험기는 KS B 5533의 시험기 등급에 규정하는 1등급 이상의 것으로 한다.

Table 1 콘크리트 배합표

강도-슬럼프	W/C	C	W	G	S	ad.	total
240-15	52.3	344	180	942	838	1.72	2302
270-15	48.2	371	179	947	811	1.86	2308

(단위 : kg)

Table 2 종이 배합표

비율 강도	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
240	4.604	9.208	13.812	18.416	23.02
270	4.616	9.232	13.848	18.464	22.88

(단위 : kg)

3.2 실험방법

“내화구조”라 함은 화재에 견딜 수 있는 성능을 가진 구조로서 표준화재 조건에 노출 시킨 건축구조 부재의 내화성을 측정하기 위한 시험방법으로 KS F 2257에 의한 표준화재 온도곡선을 참조하여 나타낸 표를 이용한다.

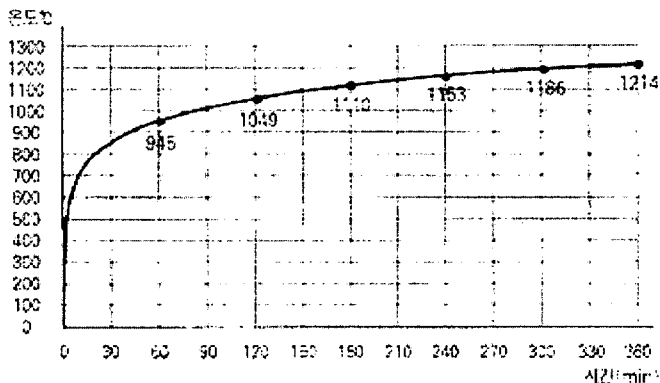


Fig 1 내화구조의 표준가열곡선

본 연구의 시험은 위의 양생방법으로 제작된 Ø10×20cm의 공시체를 이용하여 각 비율별로 인쇄지와 신문지가 혼입된 콘크리트와 종이 혼입되지 않은 공시체를 가스가마에 넣고 내화 시험방법(KS F 2257)의 규정에 따라 200℃~600℃의 온도 내에서 200℃, 400℃, 600℃ 3간격으로 구분하여 강도값에 따른 종이의 혼입비율별로 나누어 구분하고 노출지속시간을 1시간으로 유지하는 것으로, 200℃온도에서 1시간유지, 400℃ 1시간유지, 600℃ 1시간유지한 후 3시간 경과로 식혀서 아직 온열이 있는 상태에서 압축강도 시험을 하는 것으로 하였다. 이 때, 가열로 내부 및 공시체 중심부 온도는 K타입 열전대(NiCr-Ni, 온도측정 범위 -200℃~1370℃)를 사용하여 측정한다.

콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405에 따라 Ø10×20cm의 공시체를 각 형태별 3개씩 재령 28일간 20±3℃로 수중 양생한 직후 규정에 맞는 압축강도 시험기로 시험하였다. 강도 시험기는 충격을 주지 않도록 똑같은 속도로 하중을 가하며, 하중을 가하는 속도는 압축응력 증가율이 매초 0.6±0.4MPa(N/mm²)가 되도록 한다. 공시체가 파괴될 때까지 시험기가 나타내는 최대 하중을 유효숫자 1자리까지 읽도록 한다.

압축강도의 식은

$$f_c(\text{압축강도}) = \frac{P}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

f_c : 압축강도 (N/mm²)
 d : 공시체 지름(mm)
 P : 최대하중(N)

3.2 실험결과

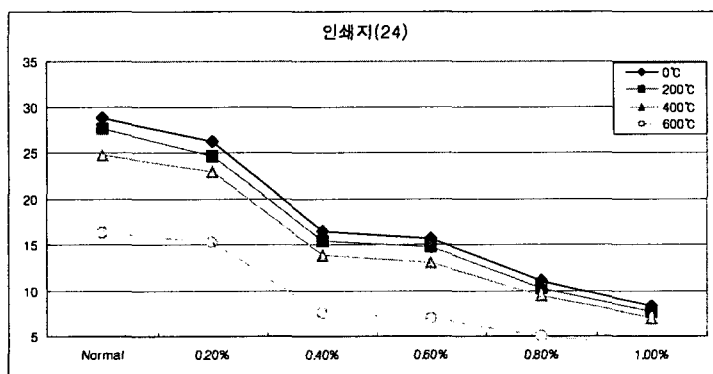


Fig 2 인쇄지가 혼입된 24N/mm² 강도값의 온도에 따른 변화

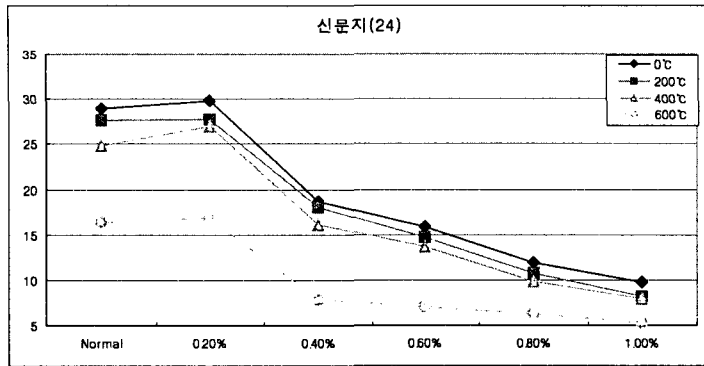


Fig 3 신문지가 혼입된 24N/mm² 강도값의 온도에 따른 변화

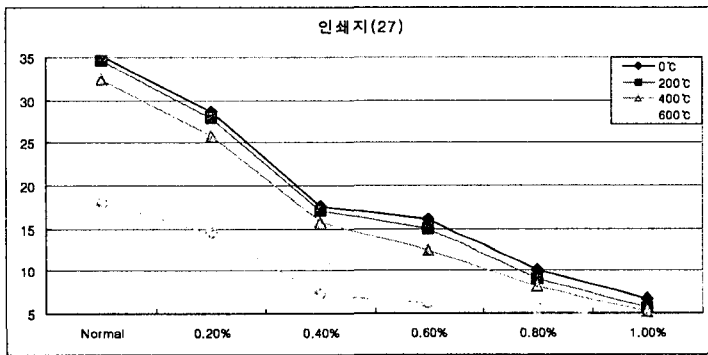


Fig 4 인쇄지가 혼입된 27N/mm² 강도값의 온도에 따른 변화

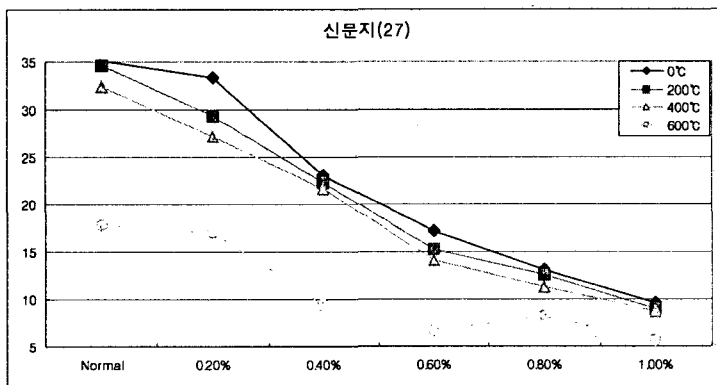


Fig 5 신문지가 혼입된 27N/mm² 강도값의 온도에 따른 변화

24N/mm²의 인쇄지와 신문지 유사한 감소비율을 나타냈고, 400°C ~ 600°C 사이에 강도하락 값이 약 50%의 차이를 나타냈다.

400℃~600℃사이에서 강도하락 값이 약 60%의 차이가 나타났고, 종이 혼입률 0.2%~0.4%에서 강도차이가 큰 것은 종이 배합의 밀도차이에 기인한 것으로 볼 수 있다.

Table 3 200℃에서의 압축강도

강도 및 종류 배합률	24N/mm ²		27N/mm ²	
	인쇄지	신문지	인쇄지	신문지
Normal	27.62	27.62	34.65	34.65
0.2%	24.63	27.74	27.89	29.32
0.4%	15.31	18.03	17.05	22.35
0.6%	14.67	14.75	14.94	15.20
0.8%	10.22	10.76	9.00	12.56
1.0%	7.60	8.19	5.70	8.98

(단위 : N/mm²)

Table 4 400℃에서의 압축강도

강도 및 종류 배합률	24N/mm ²		27N/mm ²	
	인쇄지	신문지	인쇄지	신문지
Normal	24.84	24.84	32.46	32.46
0.2%	23.00	27.01	25.88	27.21
0.4%	13.77	16.08	16.77	21.62
0.6%	12.93	13.64	12.36	14.15
0.8%	9.51	9.85	8.14	11.22
1.0%	7.03	7.94	5.15	8.73

(단위 : N/mm²)

Table 5 600℃에서의 압축강도

강도 및 종류 배합률	24N/mm ²		27N/mm ²	
	인쇄지	신문지	인쇄지	신문지
Normal	16.31	16.31	17.87	17.87
0.2%	15.16	16.92	14.44	17.10
0.4%	7.45	7.79	7.25	9.41
0.6%	6.97	7.08	6.10	6.73
0.8%	5.05	6.23	5.58	8.15
1.0%	3.84	5.25	4.28	5.70

(단위 : N/mm²)

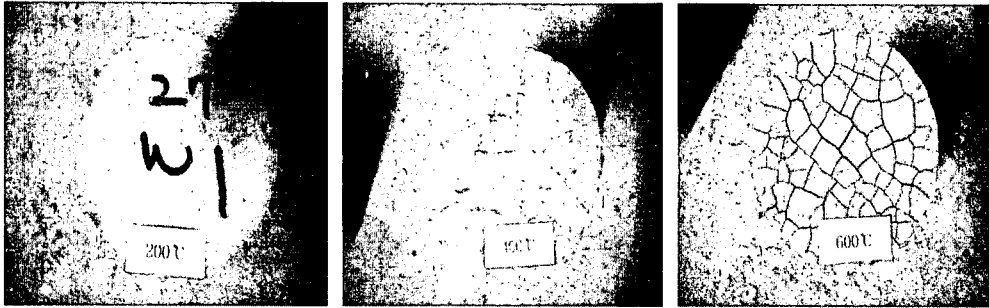


Fig 6 200°C, 400°C, 600°C의 공시체모습

4. 분석

고온노출시험은 급격한 온도상승으로 콘크리트 내부수분의 팽창으로 인해 공시체에 심한 손상을 가할 우려가 있기에 각 온도까지 올리는데 충분한 시간을 주었다.

200°C에서는 공시체의 변화는 없었으며, 0°C의 종이 혼입 비율 콘크리트에 비해 약 5%정도 강도값이 저하되었다.

400°C에서는 공시체의 약간의 황색 빛과 함께 시멘트 페이스트 캐핑(Capping)의 급격한 건조로 인해 수축균열 현상이 약간 나타났으며, 0°C의 종이 혼입 비율 콘크리트에 비해 약 10%정도 강도값이 저하되었다.

600°C에서는 공시체 전체적으로 탄 흔적과 함께 시멘트 페이스트 캐핑(Capping)의 급격한 건조로 인해 수축균열 현상이 심하게 나타났으며, 0°C의 종이 혼입 비율 콘크리트에 비해 약 50%~60%정도 강도값이 저하되었다.

종이 혼입 콘크리트는 고온에 노출시 기존의 압축강도와 같이 비율별 비슷한 강도 하락값을 보였으며, 단지 온도의 크기에 따라 강도값이 저하되었다. 강도값 측정시 종이 비율이 높을수록 순간적으로 으스러지는 현상이 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 종이를 혼입한 콘크리트를 이용하여 일반 콘크리트보다 더 뛰어난 성질을 찾아내기 위한 여러 가지 시험을 하였으며, 더 나아가서는 기존의 이런 자료가 흔하지 않은 결과, 앞으로 종이와 콘크리트와의 관계에 있어 기초자료로 사용되길 바라는 마음으로 본 연구에 임했으며, 위의 같은 여러 가지의 실험과 분석을 통하여 다음과 같은 최종 결론에 도달하였다.

1) 종이의 특성상 고온에 약할 것으로 기대했으나 400°C까지 압축강도 값에 큰 영향을 주지 못했다. 반면에 400°C~600°C까지는 강도값의 하락폭이 상대적으로 커 고온에서의 종이 특성이 반영된다.

2) 실험결과를 통해 고온 노출시 인쇄지와 신문지혼입에 상관없이 강도값이 비슷한 것으로 보아 고온에는 종이의 성질 종류보다는 단지 목재라는 특성이 더 크게 작용한다.

참고문헌

1. 손기상, "페타이어 콘크리트 화재 특성에 관한 실험적 연구", 한국 화재소방학회지 제16권 제1호, 2002.4.17, pp 22~26
2. 정상진, 이영도, "고온하에서의 콘크리트 성상변화", 콘크리트학회지, 9권 4회, 1997.8, pp 25~30
3. A.M. Neville, "resistance of concrete to fire and influence of temperature on strength", properties of concrete, 1982, pp 498~506
4. 임진규, "경량단열기포콘크리트의 특성에 관한 실험적연구", 健國大 대학원, 1997, pp 13~36