

# 실리카흙 및 강섬유보강 슛크리트의 실험적 연구

## An Experimental Study on the Silica Fume and Steel Fiber Reinforced Shotcrete

오병환\*      박철립\*\*      백신원\*\*\*      장성욱\*\*\*\*  
Oh Byung Hwan, Park Chil Lim, Baik Shin Won, Jang Sung Wuk

### 요 약

최근들어 고속도로, 고속철도, 지하철 등의 건설이 급격히 증가함에 따라 터널의 건설이 늘어나고 있다. 이러한 터널등의 건설에서 필수적으로 따르는 것이 슛크리트의 시공이며 이러한 슛크리트의 시공은 앞으로 더욱 증가할 추세에 있다. 그러나 슛크리트의 광범위한 시공에도 불구하고 현재 여러가지 문제점을 내포하고 있는 것이 사실이다. 따라서, 본 연구에서는 우리나라 현행 슛크리트의 현황과 문제점을 도출하여, 성능개선을 위한 최적배합을 도출하고, 고품질의 슛크리트 시공을 위하여 실리카흙 슛크리트의 개발 및 적용과 인성(Toughness)과 연성(Ductility)을 대폭 증가시키고 시공속도를 빠르게 하여 안전성과 함께 경제성을 확보할 수 있는 강섬유보강 슛크리트의 개발 및 적용에 대한 연구를 집중적으로 수행하였다. 본 연구로부터 슛크리트의 최적배합을 도출하였고, 강도와 내구성을 함께 증가시키고 리바운드율을 대폭 감소시킬 수 있는 실리카흙 슛크리트를 개발하였다. 또한, wire mesh를 대체할 수 있는 강섬유보강 슛크리트를 개발하여 실내시험 및 현장 적용성 시험을 수행하였다.

### Abstract

Recently, tunnels are increasingly constructed in this country with the increased construction of highways, high-speed railways and subways. Shotcreting is one of the major processes in the tunnel construction. Many problems, however, exist in the current shotcreting practice. The purpose of the present study is, therefore, to explore the troubles in the current shotcreting practice, to derive an optimum mix for efficient shotcreting, to develop high-quality silica fume shotcrete, and finally to develop steel-fiber reinforced shotcrete for high toughness and ductility. Optimum mixes with high quality and economy were derived and the silica fume shotcrete developed in the present study showed much lower rebound rate. The steel-fiber reinforced shotcrete, which can replace the wire-mesh reinforcement in the conventional shotcrete and thus can save considerable labor activity, was developed through extensive experiments. The proposed steel-fiber shotcrete was verified through field tests in actual tunnel construction sites. The main advantages of silica fume and steel-fiber shotcretes were also explored.

#### 1. 서 론

NATM(New Austrian Tunnelling Method) 공법이 소개되면서 터널시공에서는 이 공법

이 획기적인 공법으로 인정받게 되었다. 재래식 터널공법과 비교해 NATM 공법의 가장 큰 차이는 지보재로서 Steel Rib, Rock Bolt, 슛크리트가 지반의 이완을 억제해 준다는 점이다. 이중 특히 슛크리트분야는 슛크리트 타설장비의 발달로 점점 그 기술이 발전을 해 왔으며, 이러한 추세는 1973년 ASCE와 ACI가 공동으로 주최한 Special Conference이후 더욱 가속화되었다. 그러나

- \* 서울대학교 토목공학과 부교수
- \*\* (주)대우 건설기술연구소 소장
- \*\*\* 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료
- \*\*\*\* (주)대우 건설기술연구소 연구원

현재까지의 모든 정보를 집대성하고 이를 다시 체계있게 정리하여 슛크리트의 설계 및 시공에 관한 지침서가 될만한 업적은 희귀한 상태이다.

더욱이 우리나라에서는 슛크리트에 관한 경험 및 연구실적이 일천하여 슛크리트용 골재, 급결제, 공법 및 장비 등의 선택에 일관성이 없고 특히 표준배합을 결정하기 위한 연구가 미미하여, 슛크리트 배합은 외국의 시방서나 시공사례를 참고하고 있는 실정이다. 따라서 이 분야의 연구는 절실하다 하겠다.

본 연구는 슛크리트의 성능개선을 위하여 현행 슛크리트의 기술 수준 파악 및 문제점 도출, 실내 및 모형시험을 통한 최적배합 도출, 개선된 슛크리트의 현장 적용시험, 강섬유 보강 슛크리트의 현장적용 시험 등을 통해 슛크리트 기술의 실용화 연구를 그 목적으로 한다.

## 2. 슛크리트의 최적배합

### 2.1 실험방법

스�크리트의 초기강도 및 장기강도에 영향을 미치는 요인은 단위시멘트량, 물-시멘트비, 잔골재율, 급결제의 종류 및 급결제의 양, 온도 등을 들 수 있다. 그러나 이들 인자들을 모두 조합하여 시험을 실시하는 것은 작업량이 비효율적으로 과대하기 때문에 본 실험시험에서는 슛크리트의 초기강도 및 장기강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 단위시멘트량, 잔골재율, 급결제량 3가지를 시험변수로 택하였다. 물-시멘트비는 45%로 하고 단위시멘트량은 400kg/m<sup>3</sup>, 450kg/m<sup>3</sup>, 500kg/m<sup>3</sup> 등 3단계로 변화시키면서 시험을 실시하였고, 잔골재율(S/a)은 50%, 60%, 70% 등 3단계로 변화시켜서 시험을 진행하였다. 또한 급결제량(A/C)은 3%, 5%, 7% 등 3단계로 변화시키면서 시험을 실시, 총 27가지의 배합조합에 의해 시편을 제작하였다.

배합설계에 따라 재료를 계량하고 삽빔으로 시료를 고르게 섞은후 10x20cm 원주형 강몰드에 각층마다 25회씩의 3층다짐을 하고, 이후 진동기에 1분가량 진동다짐으로 공시체를 제작하였다. 공시체를 제작한후 24시간이 경과하기 이전에 몰드를 제거하고 시험전까지 20±2°C의 항온수조에 넣어 수중양생을 실시하였다. 한 조합의 배합설계마

다 6개의 공시체를 제작하였고 이중에서 3개는 1일 압축강도를, 나머지 3개는 28일 압축강도를 측정하는데 사용하였다.

공시체의 압축강도 시험은 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험의 규정에 따라 실시하였다. 압축강도 시험기는 최대용량 200t인 유압식 MORI 압축시험기로 충격하중을 주지 않도록 세심한 주의를 기울이면서 매초 3.5kg/cm<sup>2</sup>를 표준으로 하중을 공시체가 파괴될 때까지 가압하고 이때의 하중을 기록하여 이것을 단면적으로 나눈 값을 압축강도로 하고 0.1kg/cm<sup>2</sup>의 정밀도까지 계산하였다. 압축강도는 각 공시체의 압축강도의 평균치를 말하며 10%이상의 편차를 보이는 공시체는 계산에 포함시키지 않았다.

### 2.2 실험결과

#### 가) 급결제량에 따른 1일 및 28일 압축강도

급결제량이 3%, 5%, 7%인 경우에 대하여 1일 압축강도는 그림 2.1에서 볼 수 있는 바와 같이 5% 급결제량일때 일반적으로 가장 큰 압축강도 경향을 보였다. 이는 기존의 보고된 자료의 경향과 동일한 결과로서 급결제량이 5%를 상회하는 경우 오히려 초기강도는 더 떨어지는 역효과를 가져옴을 알 수 있다. 따라서 슛크리트에서 무엇보다도 중요시하는 초기강도의 발현을 위해서는 급결제량이 5%일때가 최적임을 알 수 있었다.

급결제량이 3%, 5%, 7%인 경우에 대하여 28일 압축강도는 그림 2.2에서 볼 수 있는 바와 같이 점점 감소하는 경향으로 기존의 자료와 동일한 결과를 보였으며, 리바운드량이나 초기강도 발현을 위해 첨가되는 급결제는 장기강도에 상당한 악영향을 끼침을 알 수 있었다. 따라서 과다한 급결제사용은 지양되어야 하며 필요최소한의 양을 사용해야 할 것이다.

#### 나) 잔골재율에 따른 1일 및 28일 압축강도

잔골재율이 50%, 60%, 70% 증가함에 따라 1일 및 28일 압축강도는 전반적으로 감소하는 경향으로 일반콘크리트와 같은 결과를 보였다. 이것은 실내에서 슛크리트 배합을 하여 몰드로 공시체를 제작하였기 때문에 슛크리트와 같은 재료의 리바운드가 없으며 단지 일반콘크리트에 급결제만이 더 들어가 것

으로 일반콘크리트의 경향을 보이는 것은 지극히 당연한 사실이다. 따라서 강도측면에서는 잔골재율이 낮은 것을 사용하는 것이 좋으나 실제의 숏크리트 시공에서는 뿔어 붙일때 잔골재율이 낮으면 리바운드가 많이 생기기때문에 잔골재율에 있어 상호 상반된 관계에 있는 리바운드와 강도를 고려한다면 잔골재율이 60%가 적당할 것이다.

다) 단위시멘트량에 따른 1일 및 28일 압축강도

단위시멘트량이 400kg/m<sup>3</sup>, 450kg/m<sup>3</sup>, 500kg/m<sup>3</sup>으로 점점 증가할수록 1일압축강도에서는 점점 증가하는 경향으로 일반콘크리트와 같은 결과를 보였으나, 그 증가폭은 그리 크지 않았다. 28일 압축강도도 단위시멘트량이 증가할수록 점점 증가하는 경향으로 1일 압축강도와 같은 결과를 보였으나 그 증가폭은 1일 압축강도보다도 더 큰 결과를 보였다. 일반적으로 숏크리트에서는 초기강도가 무엇보다도 중요하다. 따라서 단위시멘트량이 점증됨에 따라 초기강도의 증가폭이 그리 크지 않은 점과 숏크리트의 재료비용에서 시멘트가 차지하는 비중이 크다는 경제적인 측면을 고려한다면 본 실내시험의 단위시멘트량은 400kg/m<sup>3</sup>이 최적이라 사료된다.

### 3. 실리카폼 숏크리트

#### 3.1 실험방법

본 실리카폼 숏크리트시험에서는 시멘트 중량의 10%를 실리카폼으로 대체, 단위시멘트량 360kg/m<sup>3</sup>, 잔골재율 60%, 급결제량을 3%, 5%의 2단계로 변화시켜 2개의 Panel에 숏크리트를 타설하였다.

배합설계는 최적배합의 실내시험과 동일한 방법으로 하였으며 리바운드되는 양을 고려하여 60%를 할증, 160%를 배합량으로 하여 시험을 실시하였다. 먼저 Panel을 78°로 기울어진 벽면에 세우고 천막을 Panel 밑의 주위에 깔아놓고 숏크리팅을 하여 천막에 떨어진 숏크리트를 계량, 리바운드를 측정하였고 3일이 경과한 이후부터 있는 코아 채취기를 이용하여 직경 10cm인 코아를 채취하기 시작하였다. 숏크리트 Panel로부터 채취된 시료들은 20±2°C의 항온수조에서 수중양생을 한 후 시료들의 면이 고르지 못하기때문에 Grinder와 Cutter기를 이용하여 시료의 면을 일정하게 하고 유향으로 캘핑, KS F 2405 콘

크리트의 압축강도 시험 규정에 따라 코아 압축강도 시험을 실시하였다.

#### 3.2 실험결과

##### 가. 리바운드율

두개의 Panel에 배합조건에 따라 숏크리팅을 한후 Panel 밑에 깔아놓은 천막에 떨어진 숏크리트를 모아 계량을 하여 리바운드율을 측정된 결과 그림3.1과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 결과들은 운반에 따른 재료의 손실뿐만 아니라 천막을 벗어난 양을 정확히 고려할 수 없었기때문에 약간의 오차가 있을 것으로 생각된다.

그림3.1에서 보는 바와 같이 급결제량이 3%보다 5%일때 리바운드가 더 낮은 결과로 실리카폼으로 대체하지 않은 최적배합 모형 시험의 리바운드율과 비슷한 경향을 보였으며 실리카폼을 혼입한 실리카폼 숏크리트는 대체하지 않은 경우에 비해 급결제량이 3%, 5%일때 각각 7.5%, 6.7%의 리바운드 감소를 보였다. 실제로 실리카폼 숏크리트를 Panel에 전부 타설한 후 두께는 대체하지 않은 두께보다 상당히 두꺼운 것을 육안으로 확인할 수 있었고 또한 실리카폼을 첨가하지 않은 코아시료의 평균높이는 11cm인 반면, 실리카폼 숏크리트는 16cm를 보임으로써 실리카폼의 리바운드 감소효과가 큼을 알 수 있었다.

Morgan의 연구결과에 의하면 슬래브의 천정부위에 실리카폼 숏크리트를 적용하면 무근 숏크리트의 40%에서 15%가 감소한 25%의 리바운드를 보이는 것으로 알려졌는데, 본 시험에서는 Morgan시험의 감소폭보다 적은 평균 7.1%의 리바운드 감소를 보였다. 이렇게 감소폭이 적은 이유는 Morgan은 천정부위에 시험을 했지만 본 시험에서는 Panel을 78°로 세워놓고 숏크리팅을 했기때문에 전반적으로 리바운드가 적어 리바운드 감소폭이 그리 크지 않은 것으로 생각된다. 그러나 실리카폼은 점착력과 부착력이 우수하여 리바운드 감소효과가 상당히 큼을 본 실험을 통해 여실히 증명되었으며 경제성만 확보된다면 실제로 현장에 적용할 수 있는 좋은 재료임이 판명되었다.

##### 나. 압축강도

두개의 Panel에 숏크리팅을 하고 3일이 경과한 후부터 각 Panel마다 9개씩, 총 18개의 코아를 채취하여 7일, 14일, 28일 압축강

도를 측정하였다. 그러나 이렇게 채취된 코아들은 높이가 일정하지 않기때문에 압축강도를 측정하기에 앞서 각 코아시료의 높이를 기록하여 강도를 측정한 후 각 높이에 따른 압축강도 보정계수를 곱해 재령별 압축강도를 구할 수 있었고, 그림3.2는 이렇게 구한 두 배합조합의 7일, 14일, 28일의 재령별 평균 압축강도를 나타낸 것이다.

그림3.2에서 보는 바와같이 실리카폼으로 대체했을 경우 재령이 커짐에 따라 대체하지 않은 경우에 비해 압축강도 증가폭이 더 큰 경향을 보였다. 이는 급결제 첨가에 의한 장기 강도하락을 실리카폼이 효과적으로 보완해 줌을 증명해 주는 결과로 실리카폼이 리바운드 감소뿐만 아니라 장기 강도증진에도 상당한 효과를 보이는 것을 알 수 있었다. 그래서 외국에서는 이미 전부터 이러한 결과들을 토대로 실제 현장에 적용, 시공하고 있으며 심지어는 급결제를 사용하지 않고 실리카폼만을 사용하여 시공하는 예도 있다.

#### 4. 강섬유 보강 슛크리트

##### 4.1 실험방법

일반적으로 슛크리트에서 강섬유는 부피비로 0.5%에서 2%까지 사용되는데 강섬유 자체가 비싸기때문에 강섬유 혼입률을

0%, 0.5%, 0.75%, 1%로 변화시켜 시험을 실시하였다.

배합조건은 최적배합에서 도출된 단위시멘트량 400kg/m<sup>3</sup>, 잔골재율 60%, 급결제량 5%로 하고 일반적으로 강섬유가 혼입되면 Workability가 나빠지므로 물-시멘트비를 50%로 하여 시험을 실시하였다. 배합설계는 최적배합의 실내시험과 동일한 방법으로 하였으며 강섬유는 30-50개씩 수용성아교로 묶쳐 있기때문에 강섬유가 골고루 분산될 수 있도록 미리 물에 적셔 풀어서 사용하였다.

배합설계에 따라 재료를 계량하고 먼저 골재, 시멘트, 급결제를 잘 혼합한후 물에 풀어놓은 강섬유를 다시 넣고 삽비빔으로 잘 배합을 하여 15x15x55cm 강몰드에 붓다짐후에 진동기에 1분가량 진동다짐으로 공시체를 제작하였다. 이때 강섬유가 골고루 섞일 수 있도록 세심한 주의를 기울였다. 한편 Wire Mesh를 넣은 공시체는 먼저 잘 혼합된 슛크리트를 2.5cm 깔아 놓은후 자른 Wire Mesh를

넣고 공시체를 제작하였다.

이와같이 각 배합조건마다 3개씩 총 15개의 공시체를 제작하였으며 24시간이 경과한후 몰드를 제거하고 시험전까지 20±2°C의 항온수조에 넣어 수중양생을 실시하였다.

공시체를 제작일로부터 28일이 경과한후 휨시험을 KS F 2408 콘크리트의 휨시험의 규정에 따라 그림4.1과 같이 4 Point Bending Test로 실시하였다.

이때 휨시험은 서울대학교 재료시험실에 있는 Instron을 사용하였고 Cross Head Speed를 0.5mm/min, Chart speed를 10mm/min으로 하여 하중-변위곡선을 얻을 수 있었다.

##### 4.2 실험결과

휨시험을 통해 얻어진 각 섬유혼입률의 하중-변위곡선을 하나의 그림으로 나타낸 것이 그림4.2의 섬유혼입률에 따른 하중-변위곡선이다.

그림에서 보는 바와같이 강섬유가 혼입되지 않은 무근스�크리트의 경우 초기균열이 발생함과 동시에 파괴가 일어나 강섬유가 혼입된 강섬유보강 슛크리트는 초기균열이 발생한 후에도 계속해서 하중을 전달하고 상당한 변위가 생길 때까지 완전파괴가 일어나지 않았다. 따라서 강섬유를 혼입함으로써 연성이 크게 증진됨을 알 수 있었다. Wire Mesh를 혼입한 경우에는 강섬유를 혼입한 것과 동일한 양상을 보이다가 어느정도의 변위에서 Wire Mesh가 끊어지면서 완전한 파괴가 일어났다. 또한 그림에서 알 수 있는 바와같이 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 감소구간의 하중-변위곡선이 점점 더 커지는 경향을 보였는데, 이는 섬유혼입률이 증가함에 따라 연성이 점점 증대됨을 의미한다.

본 시험의 초점은 강섬유는 Wire Mesh를 대체할 수 있는가? 그렇다면 어느정도의 강섬유를 혼입해야 Wire Mesh를 넣은 것과 동일한 효과를 보이는지에 있었는데, 그림에서 보는 바와 같이 강섬유를 0.75% 혼입한 경우에 Wire Mesh를 혼입한 것과 동일한 하중-변위곡선을 나타내었다. 따라서 강섬유를 0.75% 혼입할 때 Wire Mesh와 동일한 연성을 확보할 수 있기때문에 Wire Mesh를 대체하기 위해서는 강섬유를 최소 0.75%혼입해야 함을 알 수 있었다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 숏크리트의 성능개선을 위하여 광범위한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 단위시멘트량이 증가함에 따라 일반 콘크리트와 같이 1일 및 28일강도는 증가하는 경향을 보였으나 증가폭은 그리 크지 않았으며, 잔골재율이 증가할수록 1일 및 28일 강도가 감소하는 경향으로서 일반콘크리트와 같은 경향을 보였다. 또한 급결제량에 따른 1일 강도에서는 급결제 5%인 경우가 전반적으로 큰 결과를 나타냈으며 28일 강도에서는 급결제량이 증가할수록 강도가 하락하는 결과를 보였다. 따라서, 최적배합은  $C=400\text{kg/m}^3$ ,  $S/a=60\%$ ,  $A/C=5\%$ 로 나타났다.

② 모형시험에서 실리카폼 숏크리트는 약 7.1%의 리바운드 감소를 보였으며, 28일 압축강도는 약 18%이상의 증진을 보였다. 또한 터널의 측벽부에 현장 적용성 시험에서는 실리카폼을 대체하지 않은 무근 숏크리트의 경우 38.23%의 리바운드를 보인 반면 실리카폼을 혼입한 실리카폼 숏크리트는 약 9%가

감소한 28.40%의 리바운드를 보였다.

③ 휨시험을 통한 하중-변위곡선으로부터 강섬유혼입률이 증가함에 따라 연성이 크게 증진되는 결과를 보였으며 0.75%의 강섬유를 혼입하면 Wire Mesh이상의 연성을 보이는 결과를 나타냈다.

## 6. 참고문헌

- (1) D.R.Morgan, "High Early Strength Blended-Cement Wet-Mix Shotcrete," Concrete International, 1991, pp.35-39
- (2) D.R.Morgan, "Freeze-Thaw Durability of Shotcrete," Concrete International, 1989, pp.86-93
- (3) G.W.Seegbrecht, A.Litvin, And S.H.Gebler, "Durability of Dry-Mix Shotcrete," Concrete International, 1989, pp.47-50
- (4) S.H.Gebler, "Durability of Dry Mix Shotcrete Containing Regulated-Set Cement," Concrete International, 1989, pp.56-58

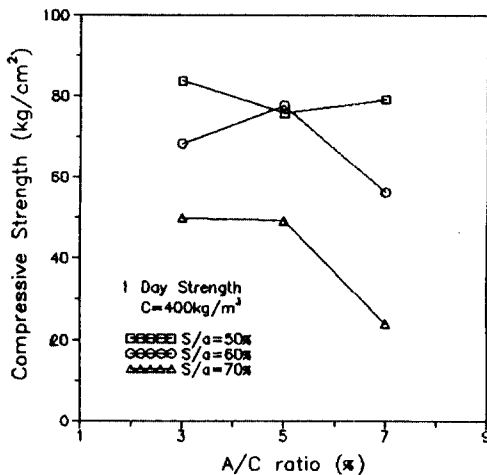


그림2.1 급결제량에 따른 1일 압축강도 ( $400\text{kg/m}^3$ )

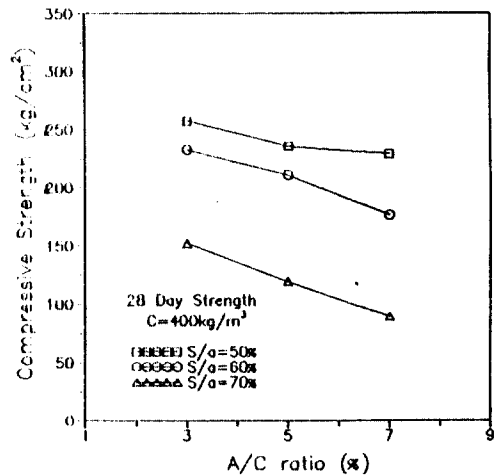


그림2.2 급결제량에 따른 28일 압축강도 ( $400\text{kg/m}^3$ )

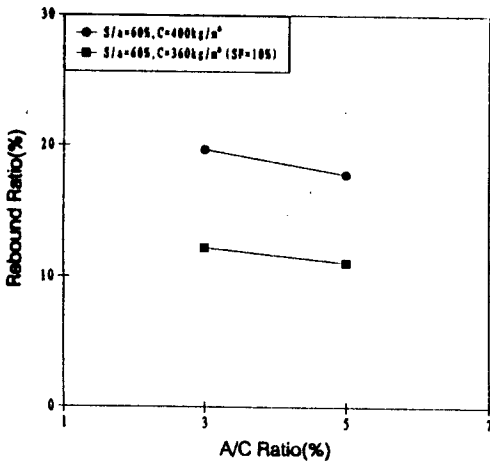


그림3.1 급결제량에 따른 리바운드율

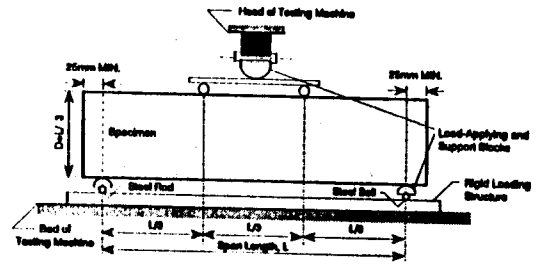


그림4.1 휨 강도 시험

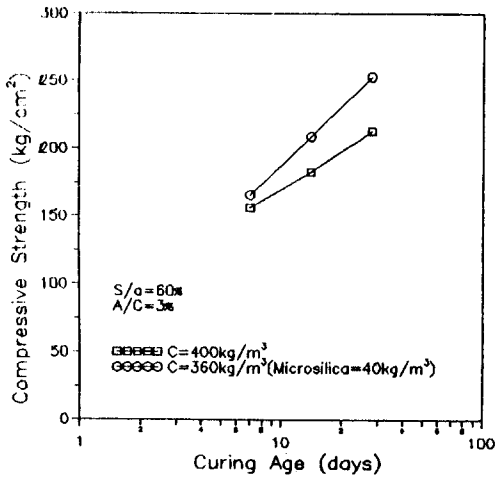


그림3.2 재령별 압축강도의 실리카흙 대체효과 비교(A/C=3%)

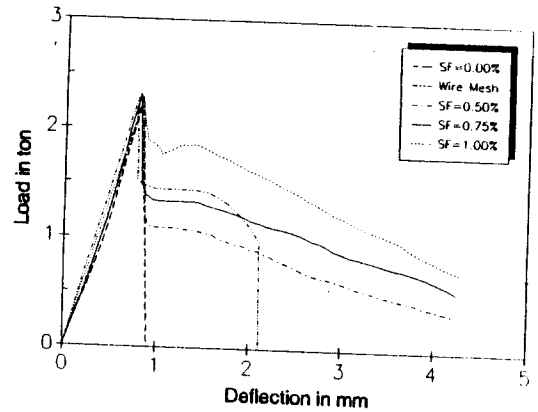


그림4.2 섬유혼입률에 따른 하중-변위곡선