

## 고강도 철근과 콘크리트 강도수준에 따른 최적조합에 관한 연구

### A Study about the Optimal Mixing in accordance with High-Strength Steel and Concrete Strength Levels

최 판 길\*      이 봉 학\*\*  
Choi, Pan-Gil      Lee, Bong-Hak

#### Abstract

The reinforced concrete structure is one of the most popular structures in real construction. Concrete has been strengthened rapidly due to the development of new material and construction technology. But as the concrete has been getting stronger, the brittleness of material has increased and the better ductility has been required. So, the study for strengthening stiffener has been urgently needed. As we said above, it is expected that the use of high strength steel and concrete will be increased. However, The experimental data is not enough for solving problems of the use of high strengthened steel and concrete.

In this research, we analyzed 45 combinations of the strength levels of concrete, the thickness of material and the steel strength with regard to simple Reinforced Concrete SLAB Beam bridge. The program MIDAS CIVIL was used to find the optimal combination. As a result, it was found that strength ratio per unit section is in inverse proportion to the strength of material and that the strengths of steel are respectively 400 MPa for low strengthened concrete and 300 MPa for high strengthened concrete. For economic aspect and usability, the effect of high strength steel is not as high as we expected it would be.

키워드 : RC구조물, 고강도철근, 고강도콘크리트

Keywords : reinforced concrete structure, high strength steel, high strength concrete

#### 1. 서론

철근콘크리트 구조란 현대 사회의 건설에서 가장 많이 쓰이는 구조로 철근과 콘크리트라는 서로 전혀 다른 두 가지의 자재가 합쳐져, 또 다른 형태의 강한 구조물이 만들어진 것이다. 철근은 탄력이 있어 어느 한계까지는 충격을 받아도 원상회복이 가능하나 그 한계를 벗어나 한번 힘을 잃으면 원상회복이 불가능해지고, 콘크리트는 견고하지만 탄

력이 없어 충격에 약하다. 그러나 두 재료가 합쳐지게 되면 콘크리트가 철근이 원상회복의 한계를 벗어나지 않도록 힘을 보태주게 됨으로써 견고하면서도 탄력이 있는 충격에 강한 구조물이 된다. 한마디로 철근의 탄력과 콘크리트의 견고함이 서로 보완작용을 하는 그런 이상적인 구조물이 되는 것이다. 그러므로 무엇보다도 중요한 것은 앞서 말한 바와 같이 철근과 콘크리트의 보완작용을 이해하고 두 자재가 가장 이상적인 보완관계를 이루도록 설계하여야 한다는 것이다[1].

최근 토목 구조물의 초고층화, 대형화 및 장대화 되면서 새로운 구조시스템의 개발 및 건설재료

\* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

표 1 SD500의 화학적 성분

종류의 기호	화 학 성 분 (%)					
	C	Si	Mn	P	S	CEQ.
SD500	-	-	-	0.050이하	0.050이하	-
SD500W	0.22이하	0.60이하	1.80이하	0.050이하	0.050이하	0.50이하

\*CEQ = C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15

성능 향상에 대한 필요성이 대두되게 되었고[2], 세계 각국에서 콘크리트의 고성능 및 고부가가치화의 일환으로 고강도 콘크리트에 관한 연구가 1960년대부터 미국을 중심으로 활발히 추진되어 왔다[3,10,11]. 고강도 콘크리트란 일반적으로 압축강도 60MPa 이상인 것을 지칭하지만 한국 콘크리트 학회 제정 “콘크리트 표준 시방서”에서는 설계기준강도 40MPa 이상인 경우를 고강도 콘크리트로 정의하고 있으며[9], 일본에서는 설계기준강도 60MPa~80MPa 정도를 고강도 콘크리트로 다루고 있다. 콘크리트의 고강도화로 단면 축소와 그에 따른 구조체의 자중감소, 고내구성 및 고성능 감소제 사용에 따른 유동성 증진으로 고품질의 콘크리트가 가능한 장점에도 불구하고 여전히 실용화가 늦어지는 것은 단순히 콘크리트 강도만 높이는 것은 철근비가 상승되어 취성적인 재료가 되고 이런 취성적 특성에 대한 보완조치가 없으면 부재의 연성이 확보되지 않아 안전상의 문제가 야기될 수 있다는 단점 때문이다[4,5]. 이런 고강도 콘크리트의 단점을 보완할 대안으로 보강재의 고강도화와 다양화가 활발히 연구되고 있고 그 대표적인 예가 고강도 철근과 FRP Bar이다[7,8].

즉 고강도 콘크리트에 일반강도의 철근(SD300, SD400)을 적용시 철근비의 상승으로 인한 취성과 피, 처짐량의 증가, 조밀한 배근 구조를 띠게 되는 등 추가적인 문제점이 발생하게 되어 고강도 철근의 사용의 필요성 대두되어 국내에서는 2000년 초부터 고강도 철근을 이용하려는 움직임이 이루어지고 있으나[6], 고강도 철근을 병용하는 데는 설계 시방서의 미흡, 실험결과 등의 자료부재, 설계자의 공학적 판단의 어려움 등으로 인하여 실제로 설계 및 시공에 적용이 힘든 상황이다. 또한 국내 생산 고강도 철근이 500MPa 수준에 머물고 있어 초고강도 철근 사용이 용이 하지 않는 것이 현실이다. 그러나 이것 또한 수요가 현재에 만족할 만한 상황이 아닐 뿐, 국내 철강 기술로 미루어 향후 고강도 철근(900MPa 이상)의 생산이 가능할 것으로 사료되고 일본의 경우 700MPa, 900MPa, 1000MPa의 고강도 철근이 구조물에 사용되고 있다.

철근 콘크리트 구조물은 시공후 시간이 경과함에 따라 재료적, 환경적, 구조적 요인에 의해 성능이 저하된다[9]. 이는 콘크리트 구조물이 중성화

되거나, 보강재인 철근의 부식이 주원인이다. 이와 같은 철근 부식을 방지하기 위한 철근의 대체 재료로 연구되고 있는 대표적인 재료가 현재 건설 구조용 신소재 FRP (Fiber Reinforced Polymer) Bar이다. FRP는 일반적으로 높은 인장강도와 인장계수를 지니고 있어 구조부재를 보강하고 내력을 증진시키는데 유용하여 구조물의 보수·보강재로 사용되어 왔다. 1990년대 이후 미국, 유럽, 일본 등 기술 선진국에서 철근 대신 FRP Bar를 휨 보강근으로 사용하기 위한 연구가 진행 중이며 현재 설계기준을 확립해 가고 있으나 국내의 연구는 상당히 미흡한 실정이다.

## 2. 고강도철근과 특수철근

### 2.1 고강도 철근(SD500)

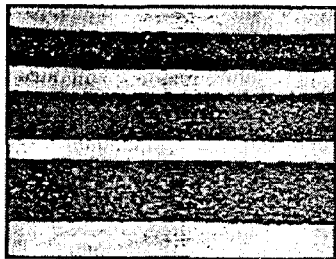
고강도 철근량 항복강도 500MPa이상의 고강도 고성능의 철근을 의미하는 것으로 철근콘크리트 공사의 경제성과 시공성을 획기적으로 개선한 특수철근 이다. 지금까지 국내 건설현장에서 고강도 철근이라 하면 항복강도 400MPa의 SD400 강종을 의미해 왔다. 그러나 최근의 건설시장은 시공기술의 급속한 발전으로 인해 토목구조물의 대형화와 건축구조물의 초고층화를 이룰 수 있게 되었으며, 이러한 요건을 만족시키기 위한 건설재료의 고강도, 고성능화에 대해 기존의 고강도 철근(SD400)은 경제적 및 시공적 문제점 해결에 크게 역할을 못하고 있는 것이 현실이다. 따라서 철근의 고강도화(SD500)는 공사비 절감과 공기단축, 부재의 단면감소 등 경제적 측면과 철근 배근량 감소로 인한 여유 있는 배근으로 콘크리트 타설 작업의 용이성 증대 등 시공적 측면의 장점을 가져 올 수가 있습니다. 이러한 이유로 가까운 일본의 경우 SD685~SD980 강종은 수요가 점차 확대되고 있으며, SD1275의 초고강도 철근까지도 개발한 상태이다[2].

국내에서도 SD500이 개발되어 2002년 3월 잠실 켈러리아펠리스 현장에 처음 적용되었고, 현재는 상용되고 있는 실정이다.

표 1은 SD500 고강도 철근의 화학적 성분을 나타낸다. 표 2에서는 SD500 고강도철근이 적용된 분야를 토목, 건축 및 기타 분야로 구분하여 기술하였다.

표 2 SD500의 적용분야

구 분		적용대상 및 용도
토목분야	교 량	도로 및 철도교, 장대교량, 연륙교
	발전소	원자력·화력발전소, 공용 취·배수구조물
	대형 저장시설물	LNG·LPG인수기지
	지하철 / 철도	역사구조물 및 대심도 선로, 복합민자역사
건축분야	건축물	초고층 주상복합, 오피스텔 빌딩
	중저층 대형건축	할인점, 공연시설, 경기장, APT형 공장
	응용기술	PC복합화 공법, 신조립 공법
기 타		Micro Pile, Anchor Pile 등



Bar type FRP

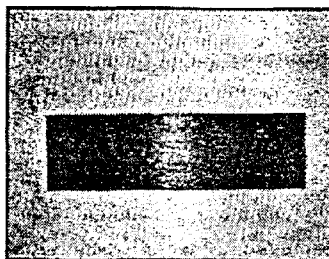
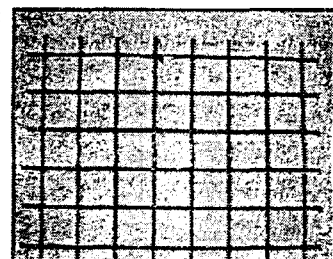


Plate type FRP



Grid type FRP

그림 1 FRP의 종류

SD 500 고강도 철근을 항복비, 파괴양상, 연신율, 강도 등의 측면에서 특성을 기술하면 다음과 같다[3].

- 항복비 향상(0.73~0.78)으로 내진성능개선(강구조 한계상태설계기준 : 0.8이하)
- 엄격한 연신을 관리로 취성파괴 방지
- 합금설계 및 재질제어기술 적용한 강도와 가공성 충족
- 고온시 안정된 강도확보 가능
- 항복강도 25% 신장(철근비 절감)

## 2.2 특수 철근

### 2.2.1 FRP 개요 및 종류

Fiber Reinforced Polymer(FRP)는 일반적으로 강성이 큰 섬유로 보강된 고분자 중합체(polymer matrix)로 정의된다. FRP는 glass, aramid, carbon 등과 같은 높은 일축 강도를 가지는 섬유(fiber)들과 이들이 일체가 되어 거동하도록 하는 폴리머를 기지(matrix) 재료로 하여 구성된다. FRP는 사용된 섬유(fiber)와 기지(matrix)에 따라 역학적 특성이 달라지며 그 기하학적 형상도 다양하다. 이는 일반적인 강재와는 달리 어떤 표준을 가지고 제작된 것이 아니라 세계 여러 제조사들이 각각 그들의 FRP를 개발, 발전시켜 왔기 때문이다. FRP는 주로 사용된 섬유에 분류되며, 크게 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer),

AFRP(Aramid Fiber Reinforced Polymer), CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer) 그리고 HFRP(Hybrids Fiber Reinforced Polymer)로 나뉘어진다. 그리고 FRP는 봉(re. bar), 케이블(cable), 텐던(strand), 격자(grid), 쉬트(sheet), 판(plate) 등의 형태로 생산되어지고 있다. 그림 1은 현재 많이 쓰이고 있는 FRP의 형태별 사진을 나타낸 것이다.

### 2.2.2 FRP의 재료적 특성과 역학적 특성

FRP는 사용된 섬유의 종류와 형태별로 다른 특성을 갖고 있기는 하지만, 여기서는 FRP가 가지는 일반적 특성을 다음과 같이 정리하였다.

#### (1) FRP의 장점

- FRP는 우수한 비부식성을 가지고 있다. 현재 FRP가 주목받고 있는 가장 큰 장점이다. 현재 해양 구조물의 염화물의 침투, 확산에 의한 철근의 부식, 콘크리트 교량 상판 등의 강수, 습기, 제설제 등의 사용으로 인한 철근의 부식 등은 철근의 대체재로서 FRP의 사용성 연구를 촉진시키고 있다.
- FRP는 매우 높은 인장강도를 가지고 있다. FRP rebar를 이용한 주인장 배근 (FRP rebar), 외부 부착 공법에 따른 보수·보강(grid, sheet, plate), 외부 텐던에 의한 보강공법(strand, cable) 등으로 휨 내력을 증진시킬 수 있는 탁월한 효과를 가질 수 있다.
- FRP는 비자성체(non-magnetic)이면서 비도전체

(non-conductive)이다, 고속철도, 자기 부상열차를 위한 구조물과 같이 전자기장의 영향을 받게 되는 곳에서의 건설 재료로서 적용시킬 수 있다. 그 외의 MRI와 같은 특별한 설비가 들어가는 병원, 레이다용 구조물 같은 곳에 적용시킬 수 있다.

d. 구조물에 자중을 감소시킬 수 있으며, 시공자들의 편의를 도모하여 공사기간을 단축시킬 수 있으며, 직·간접적으로 전체적인 건설비용의 절감을 가져올 수 있다.

(2) FRP의 단점

a. FRP는 소성 거동을 하지 않는다. 그림 2에서 보는 바와 같이 철근과는 달리 재료가 파단 될 때까지 선형-탄성 거동을 한다. 이로 인해 FRP가 사용된 구조물은 연성이 매우 낮게 된다. 또, 구조물의 파단시 급격한 취성 파괴로 인해 사용자에게 상당한 위험을 줄 수 있다. FRP의 많은 장점에도 불구하고 FRP가 널리 사용되지 못하는 이유가 바로 낮은 연성을 가지고 있다는 점이다. 그림 2는 철근과 FRP 재료의 응력-변형률선도를 나타낸 것이다.

b. FRP는 높은 인장강도에 비해 낮은 전단 강도를 갖는다. 섬유 방향으로는 강재 보다 훨씬 높은 인장강도를 가지고 있으나 섬유 직각방향으로는 비교적 낮은 전단강도를 갖는다.

c. FRP는 높은 인장응력 하에서의 응력파손, 강도 저하와 같은 현상이 생긴다.

d. FRP는 고가이다. FRP의 비용으로 인해 시공비가 상승하게 된다. 현재 기존의 철근비용이 많은 상승에도 불구하고 FRP는 수요에 대한 불확실한 전망, 생산 기술의 부족 등으로 인해 가격이 상당히 비싼 편이다. 하지만, 이 문제는 최근 구조물의 보수·보강에의 성공적인 적용, FRP 재료의 설계 개념의 정립으로 인해 건설 시장에서의 수요가 증가하고 있어 점차 해결 가능할 것으로 생각된다.

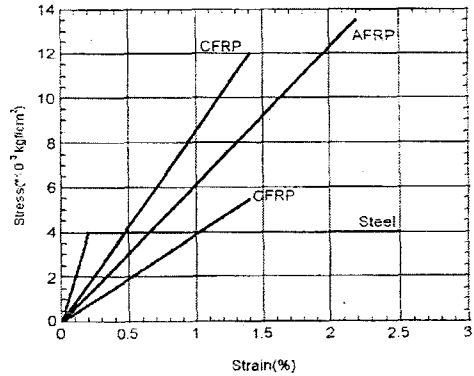


그림 2 FRP와 강철의 응력변형률 관계[7]

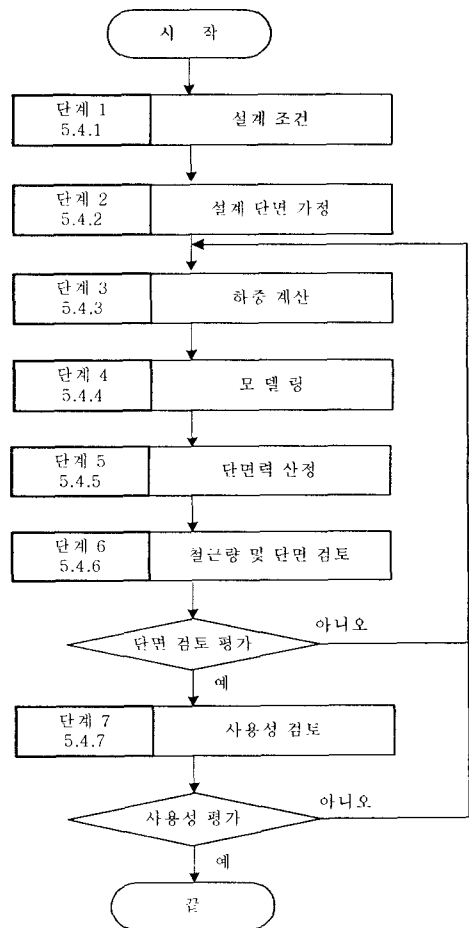


그림 3 RC SLAB교 해석 흐름도

3. 해석모델

3.1 해석수행 흐름도

효율성 높은 RC 구조물 설계를 위한 최적의 강도 조합을 유추하기 위해 콘크리트(5Case) 강도를 설계 변수로 결정하고, 단순 RC Slab교 해석을 통하여 부재력을 산출하였다. 그림 3은 해석수행에 적용된 알고리즘이다.

3.2 설계조건

본 연구에 사용된 교량제원은 1등급 RC Slab교로써 연장이 12m인 교량을 선택하였고, 기타 제원은 표 3과 같다. 표 4, 5는 각각 콘크리트와 철근의 강도별 탄성계수를 나타낸다.

표 3 교량제원

구분	교량형식	연장	교폭	교량등급
특성	RC Slab	12.0m	9.60m	1등급

표 4 콘크리트 강도별 탄성계수

구분	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
fck	24MPa	27MPa	30MPa	40MPa	60MPa
Ec	2.3 × 10 <sup>4</sup>	2.5 × 10 <sup>4</sup>	2.6 × 10 <sup>4</sup>	3.0 × 10 <sup>4</sup>	3.7 × 10 <sup>4</sup>

표 5 철근 강도별 탄성계수

구분	Type A	Type B	Type C
fy	300MPa	400MPa	500MPa
ES	2.0 × 10 <sup>5</sup>		

### 3.3 모델링

RC 슬래브를 사각형의 판 요소로 모델링한다. 횡방향에 대하여 그림과 같이 방호벽, 받침 위치 등과 활하중 재하 거리를 감안하여 분할하였다. 본 구조물의 구조해석을 위해 상용 프로그램인 Midas Civil Program의 Plate요소를 이용하였으며, 이때 252개의 Joint와 221개의 PLATE 요소로 구성되어 있다. 전체 모델링은 그림 4와 같다.

고정하중, 활하중, 충격하중, 지점침하 및 온도하중을 적용하였다. 활하중은 DB-24, DL-24에 의한 부재력 중 악조건을 고려하여 적용하였고, 충격하중을 충격계수(  $i=15/(40+L) \leq 0.3$  )를 고려하여 적용하였다. 지점침하는 10mm의 지점변위를 적용하여 Case별로 산출하였고, 슬래브 상·하면의 온도차를 5°C하여 온도하중을 고려하였다. 그림 5는 본 연구에 프로그램 상에서 적용된 하중 재하도를 나타내는 그림이다.

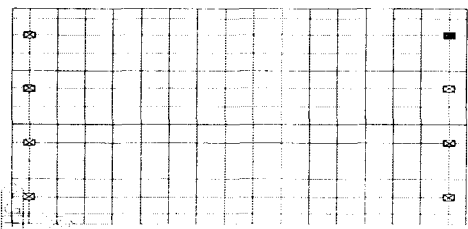


그림 4 RC SLAB교 모델링

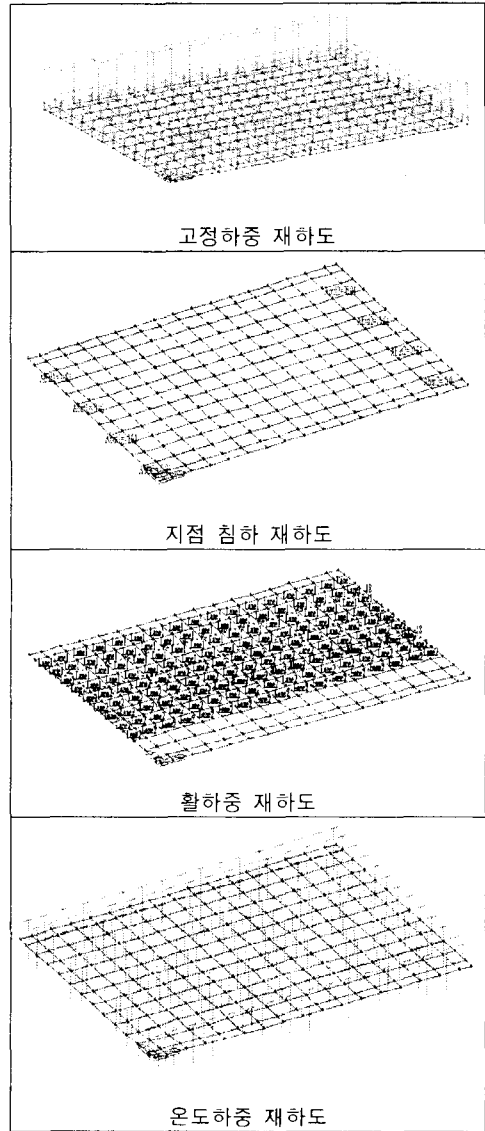


그림 5 하중 재하도

### 3.4 부재력 정리

그림 6은 Case 1에 대한 부재력을 나타내며, 극한 모멘트, 사용모멘트, 최대반력, 처짐 순으로 정리한 그림이다. 표 6에 15가지의 Case별 부재력을 정리하여 비교하였다.

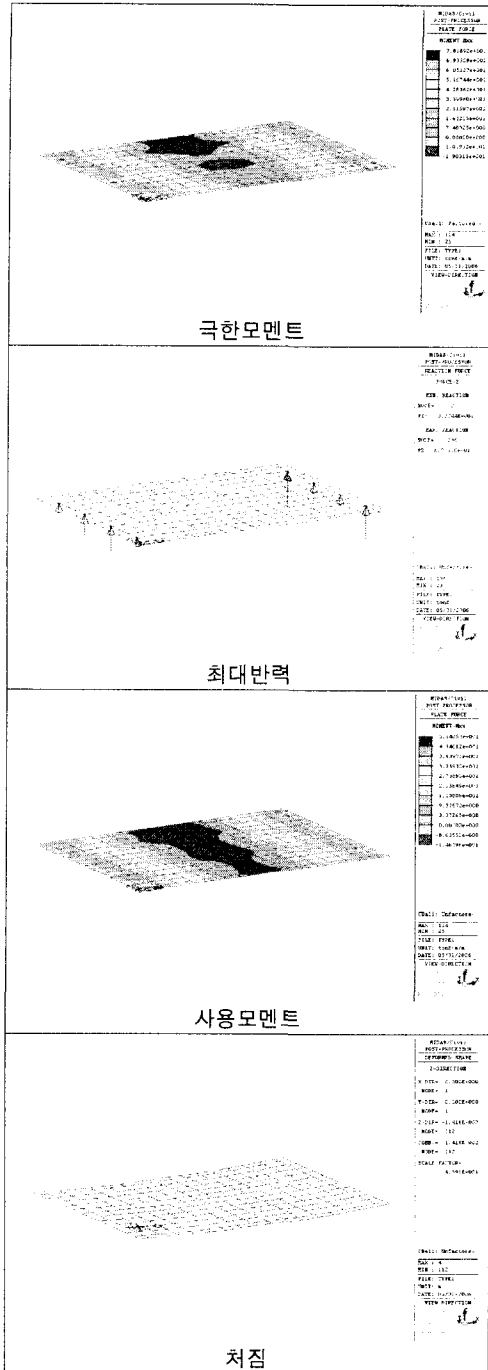


그림 6 Case 1 부재력

표 6 Case별 부재력

CASE	TYPE	부재 두께	극한 모멘트 (t·m)	사용 모멘트 (t·m)	반력 (ton)	처짐량 (mm)
1	1 (24MPa)	75cm	78.189	51.405	67.35	14.16
2	2	75cm	78.189	51.410	67.97	13.65
3	(27MPa)	70cm	75.345	49.230	64.44	15.06
4	3 (30MPa)	75cm	78.189	51.415	68.56	13.25
5		70cm	75.345	49.234	64.95	14.54
6		65cm	72.496	47.051	61.41	16.27
7	4 (40MPa)	75cm	78.189	51.422	69.50	12.69
8		70cm	75.345	49.240	65.78	13.82
9		65cm	72.496	47.056	62.13	15.41
10		60cm	69.639	44.871	58.54	17.49
11	5 (60MPa)	75cm	78.189	51.439	71.58	11.71
12		70cm	75.345	49.254	67.61	12.66
13		65cm	72.496	47.068	63.72	13.91
14		60cm	69.639	44.881	59.91	15.67
15		55cm	66.775	42.691	56.19	18.05

#### 4. 해석결과

##### 4.1 안전성 검토

그림 6은 SD300, 400, 500의 안전성 검토(극한강도/공칭강도)를 바탕으로 콘크리트강도 Case별 강도비를 나타낸 그래프이다. 콘크리트 강도별로 강도비가 90%에 근접할 때 부재 두께는 모두 75cm이고, 저강도 콘크리트 24, 27, 30MPa의 경우 효율적인 철근 강도는 400MPa이고, 고강도40, 60MPa의 경우 효율적인 철근 강도가 300MPa인 것으로 나타났다. 그림 8은 콘크리트강도 Case에 대한 철근비를 비교한 그래프로써, 동일한 부재두께 변수에서 콘크리트의 강도가 증가하면 철근비가 감소함을 알 수 있다.

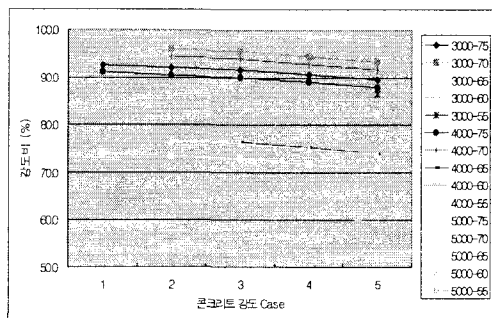


그림 7 부재두께가 동일할 때 재료의 강도비

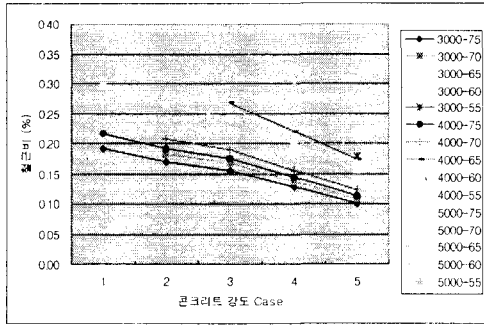


그림 8 부재두께가 동일할 때 재료의 철근비

RC-Slab교예선 안전성 확보를 위해 부재의 극한 모멘트( $M_u$ )를 보다 공칭모멘트( $\phi M_n$ )가 크도록 설계한다.  $M_u$ 에 비해  $\phi M_n$ 이 클수록 (강도비가 클수록) 안전한 구조물이나 실무에선 강도비가 85~95%가 되도록 설계하고 있다. 이런 측면에서 콘크리트 강도별로 강도비가 90%에 근접한 철근 강도를 보면 부재 두께는 모두 75cm이고, 저강도 콘크리트 24, 27, 30 MPa의 경우 철근 강도가 400MPa이고, 고강도 40, 60 MPa의 경우에는 철근 강도가 300 MPa인 것으로 나타났다.

동일한 부재두께 내에서는 콘크리트의 강도가 증가하면 철근비는 감소하고 철근의 강도가 증가하면 철근비는 증가한다.

4.2 사용성 검토

강도설계법에 의해 설계된 휨 부재는 균열·피로에 대한 시방규정과 휨 철근의 배근에 대한 규정을 만족하여야 한다. 또한 처짐 조절에 대한 시방규정도 충족되어야 한다.

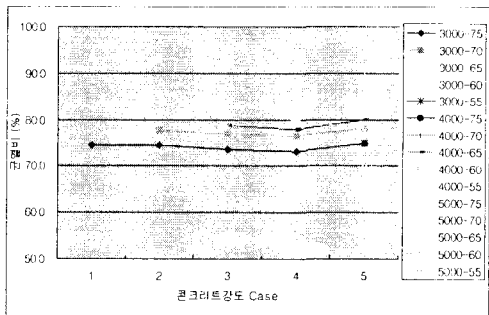


그림 9 부재두께가 동일할 때 재료의 균열비

SD500의 경우 요구 철근량은 SD400보다 감소하나 사용성 검토에서 철근량을 요구 철근량에 맞출 경우 N.G가 발생하여 SD400과 동일한 철근량을 사용하였다. 그래서 SD400과 SD500의 균열비

그래프는 동일하게 나타난다. 균열비는 부재 두께가 동일할 경우 콘크리트 강도가 400일때가 가장 낮았고, 철근 강도가 낮을수록 감소하였다. 현재 사용중인 콘크리트 강도와 균열 효율성 면에서 적합 철근의 강도는 400MPa이고, 이때 부재 두께는 기존에 설계된 슬래브 교량에 대하여 조사한 결과 1/16~1/20 정도가 적당한 것으로 알려져 있다. [도로설계실무편람 1.1]에서 구한  $1/16 = 12/16 = 75\text{cm}$ 일 때가 적절한 것으로 사료된다.

4.3 경제성 검토

표 7은 해석결과 소요되는 Case별 필요 철근량을 계산한 표이며, Case별 사용된 철근량에 준하여 경제성 분석을 실시하였다. 그림 9는 부재의 두께가 동일한 경우의 필요 철근량을 나타내는 그림으로써, 고강도 철근이 사용되며 단면이 커질수록 소요되는 철근량이 줄어드는 것으로 나타났다.

동일 부재 두께의 경우 콘크리트 및 철근의 강도가 증가 할수록 필요 철근량은 감소한다. 철근량의 감소로 사용 철근의 직경이 감소하고 이음 및 정착길이의 감소로 15%정도의 경비 절감 효과를 기대하였으나, 사용성 검토 규정을 만족시키기 위해서는 철근량 또는 부재 두께가 증가가 요구되므로 최종적인 경제성은 다소 15%보다 다소 저하될 것으로 판단된다.

표 7 각 CASE별 필요 철근량 (cm<sup>2</sup>)

CASE	TYPE	부재 두께	SD300	SD400	SD500
1	1 (24MPa)	75cm	46.769	35.077	28.061
2	2	75cm	46.485	34.864	27.891
3	(27MPa)	70cm	48.577	36.433	29.146
4	3 (30MPa)	75cm	46.263	34.697	27.758
5		70cm	48.313	36.234	28.988
6		65cm	50.754	38.066	30.453
7	4 (40MPa)	75cm	45.778	34.334	27.467
8		70cm	47.738	35.804	28.643
9		65cm	50.060	37.545	30.036
10		60cm	52.855	39.642	31.713
11		75cm	45.313	33.985	27.188
12	5 (60MPa)	70cm	47.191	35.393	28.314
13		65cm	49.403	37.052	29.642
14		60cm	52.049	39.036	31.229
15		55cm	55.275	41.457	33.165

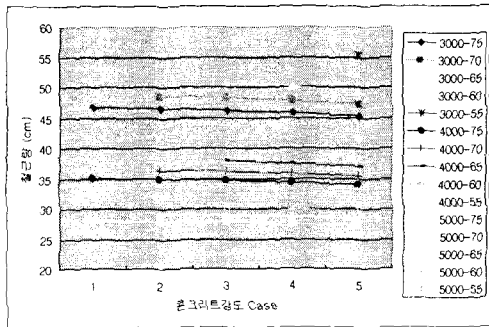


그림 10 부재두께가 동일할 때 필요 철근량

## 6. 결 론

고강도콘크리트에 고강도 철근 및 FRP가 보수로 사용된 경우를 RC Slab 교량구조물에 적용하여 철근강도, 콘크리트강도 및 단면치수에 대한 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 동일한 부재 두께 내에서 재료의 강도가 증가할수록 강도비는 감소하고, 콘크리트 강도별로 강도비가 90%에 근접한 부재두께는 75cm로 나타났다. 저강도콘크리트(24, 27, 30MPa)의 경우 철근 강도는 400MPa, 고강도콘크리트(40, 60MPa)의 경우에는 철근 강도가 300MPa 인 것으로 나타났다.
- (2) 재료의 강도가 증가하면 강도비가 증가하여 부재의 단면 감소 효과가 있을 것으로 기대하였으나, 처짐 검토 규정상 철근의 강도가 증가 할 때 마다 처짐 계산을 생략할 수 있는 경우의 휨 부재의 최소높이로 인해, 대략 14~15%정도로 단면이 증가되어야 하는 것으로 나타났다.
- (3) 동일 부재 두께의 경우 콘크리트 및 철근의 강도가 증가 할수록 필요철근량은 감소한다. 철근량의 감소로 사용 철근의 직경이 감소하고 이음 및 정착길이의 감소로 15%정도의 경비 절감 효과가 있으므로, 콘크리트 강도증가로 인한 단면 감소 및 자중의 감소로 부가적인 경제 효과를 기대된다.
- (4) 본 연구를 토대로 효율성 높은 RC 구조물 설계를 위한 최적의 강도 조합을 유추하면 저강도콘크리트의 경우에는 강도가 400MPa인 철근을 사용하는 것이 바람직하고, 고강도콘크리트의 경우, 강도측면에서는 300MPa 강도, 사용성 측면에서는 400MPa 강도의 철근을 각각 사용하는 것이 효과적이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 부성욱, "Hybrid Reinforcement System을 이용한 코크리트 슬래브의 휨 거동과 연성", 제주대학교 대학원, 공학석사학위논문, 2005
- [2] 여제기, "고강도 철근과 고강도 콘크리트를 이용한 과소철근보 부재의 연성특성에 관한 실험적 연구", 금오공과대학교 대학원, 공학석사학위논문, 2004
- [3] 윤동훈, "초고강도 철근을 사용한 고강도 콘크리트 보 부재의 연성평가", 금오공과대학교 대학원, 공학석사학위 논문, 2005
- [4] 이병재, "콘크리트 보강근으로서의 하이브리드 FRP로드의 자기단단 특성에 관한 연구", 대전대학교 대학원, 공학석사학위논문, 2004
- [5] 이병철, "GFRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 휨과파괴 거동", 창원대학교 산업정보대학원, 공학석사학위논문, 2005
- [6] 정철규, "초고강도 철근콘크리트보의 휨 거동", 한양대학교 대학원, 공학석사학위논문, 1997
- [7] 정지홍, "FRP Bar 콘크리트 보의 휨보강근비 변화에 따른 콘크리트 전단강도", 부경대학교 산업대학원, 공학석사학위논문, 2005
- [8] 최 현, "Carbon FRP Grid로 보강한 RC 슬래브의 휨 거동", 제주대학교 대학원, 공학석사학위논문, 2004
- [9] 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조설계기준 해설", pp. 73-87, 2003
- [10] ACI 224R-01, "Control of Cracking in Concrete Structures"
- [11] ACI 318-02, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary"
- [12] ACI 318-95, "Building Code Requirements for Structural Concrete"
- [13] ACI 318-99, "Building Code Requirements for Structural Concrete with Commentary"