

보강된 철근콘크리트 기둥의 구조거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Structural Behavior of Strengthened Reinforced Concrete Columns

이 승 엽 [*]	정 성 원 ^{**}	황 규 표 ^{**}
Lee, Seung-Yeob	Chung, Sung-Won	Hwang, kyu-Pyo
장 성 재 ^{**}	음 성 우 ^{***}	이 수 곤 ^{****}
Jang, Sung-Jae	Eum, Seong-Woo	Lee, Soo-Gon

ABSTRACT

In this paper, sixteen column specimens were tested under the concentrated and eccentric load condition to examine the structural behavior of strengthened columns. 16 column specimens were divided into four groups. One group is not strengthened, the other three groups are strengthened by the materials : 1) steel plate, 2) carbon fiber sheet, and 3) glass fiber sheet, each group is composed of four specimens. As a result, strengthened columns have larger bearing capacity and energy absorption after ultimate load than unstrengthened columns. The column group strengthened with steel plate has the best bearing capacity among the strengthened column groups. Also, the columns strengthened with the carbon fiber sheet are similar to glass fiber sheet in bearing capacity. If necessary to strengthen columns in trouble, care should be taken to treat the joint between beam and column because of crack propagation in tension side.

1. 서 론

최근 국내에서는 철근콘크리트 구조물의 내력증진이나 손상부재의 내력확보를 위해 보강분야에 대한 관심이 고조되고 있으며, 국내외적으로 이 분야의 연구진들에 의해 많은 연구결과가 보고되고 있는

*정회원, 전남대학교 건축공학과 석사과정

**정회원, 금호건설기술연구소 주임연구원

***정회원, 금호건설기술연구소 전임연구원

****정회원, 전남대학교 건축공학과 교수

추세이다.^{1)~4)} 이러한 실험적 연구는 주로 철판이나 탄소섬유 쉬트 등을 이용하여 보강된 철근콘크리트 보에 집중되는 경향이 있으며, 압축부재에 대한 연구는 미진한 실정이다.^{5),6)} 또한 국내에서는 아직 보강재료에 따른 철근콘크리트 구조물 보강설계 및 시공지침이 제대로 정립되어 있지 않기 때문에, 이 분야의 기술자들로서는 철근콘크리트 부재를 보강할 경우 이에 대한 신뢰성을 갖기가 어려운 경우가 많으며, 지금까지의 국내에 발표된 많은 연구결과에도 불구하고, 보강부재의 구조적 성능확인에 대한 필요성을 절감하는 경우가 많다. 본 연구는 상기와 같은 배경에서 시도한 연구로서 국내에서 아직 연구실적이 미흡한 철근콘크리트 기둥을 대상으로 하여 보강효과 및 보강부재와 무보강 부재간의 구조적 거동 등의 차이를 확인 하고자 한 것이다. 이를 위해 철근콘크리트 기둥 16개를 일단 제작하고 이를 이용하여 무보강과 철판보강 및 탄소섬유와 유리섬유쉬트 보강 등 4개 그룹의 시험체를 보강 전문업체의 도움을 받아 각각 4개씩 제작한 후 중심축 및 편심하중을 가력하여 각 시험체에 대한 구조적 거동을 실험적으로 고찰한 것이다.

2. 실험

2.1 실험개요

2.1.1 시험체 계획 및 형상

본 연구에서의 실험변수는 편심거리($e=0, 4, 8, 15\text{cm}$), 보강재의 종류로 하였다. 단면 $20 \times 20\text{cm}$ 이고 총길이가 120cm 이며, 브라켓 부분을 제외한 길이가 70cm 인 철근콘크리트 무보강 기둥 4개의 시험체와 각 보강 계열별로 4개씩 총 16개의 시험체를 제작하였다. 보강전 철근콘크리트 기둥의 형상은 그림 1과 같고, 시험체의 보강 형상은 그림 2와 같다. 시험체의 일람과 실험결과는 표 1과 같다.

표1 시험체 일람 및 실험결과

시험체명	단면(cm) 및 배근	편심을 (e/h)	보강방법	최대 축력(ton)	최대 모멘트(t·m)	비고
1	RC-0-1	0	무보강	129.8	0.00	
2	RC-0-2	0.2		83.10	3.32	
3	RC-0-3	0.4		38.50	3.08	
4	RC-0-4	0.75		12.34	1.85	
5	RC-ST-1	0	강판보강 ($t=2.3\text{mm}$)	140.5	0.00	브라켓 모서리 파괴
6	RC-ST-2	0.2		126.3	5.05	
7	RC-ST-3	0.4		70.10	5.61	
8	RC-ST-4	0.75		24.60	3.69	
9	RC-CA-1	0	탄소섬유 보강 (2ply)	160.00	0.00	
10	RC-CA-2	0.2		90.00	3.64	
11	RC-CA-3	0.4		53.50	4.28	
12	RC-CA-4	0.75		19.60	2.94	
13	RC-GF-1	0	유리섬유 보강 (2ply)	98.7	0.00	브라켓 보강강판 파괴
14	RC-GF-2	0.2		93.30	3.73	
15	RC-GF-3	0.4		53.30	4.26	
16	RC-GF-4	0.75		18.60	2.79	

2.1.2 실험재료

본 실험에 사용한 콘크리트는의 설계강도는 28 일을 기준으로 240kg/cm^2 이고, 기둥주근(SD40)은 항복강도 $4,000\text{kg/cm}^2$ 인 국내산 HD10 철근을 사용하였다. 또한 보강강판은 항복강도가 $2,400\text{kg/cm}^2$ 인 SS41을 사용하였고, 보강에 사용한 접착제는 보강전문업체인 K와 P사에서 공급하는 표준제품을 사용하였다. 보강시 사용한 섬유쉬트의 역학적 성질은 표 2와 같다.

표2 섬유쉬트의 역학적 성질

구분	인장강도 (kg/cm^2)	실제탄성율E (kg/cm^2)	파단변형 ($\times 10^{-6}$)	밀도 (g/cm^3)	신율 (%)
탄소섬유	25,000	2.4×10^9	10417	1.82	1.0
유리섬유	4,745	2.3×10^9	20000	2.54	4.2

2.1.3 시험체 제작

실험을 위해 인장축과 압축축 주근 및 스티럽에 각각 1개씩의 변형게이지를 부착한 후 강판거푸집에 콘크리트를 타설하여 철근콘크리트 기둥을 제작하였다. 이를 이용하여 보강전문업체들의 도움을 받아 보강을 실시하였다. 시험체의 보강형상은 그림 2와 같다.

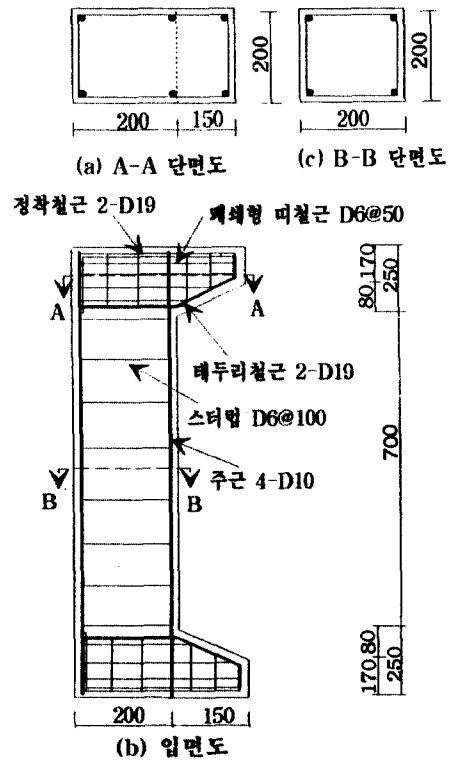


그림1 철근콘크리트 기둥의 형상

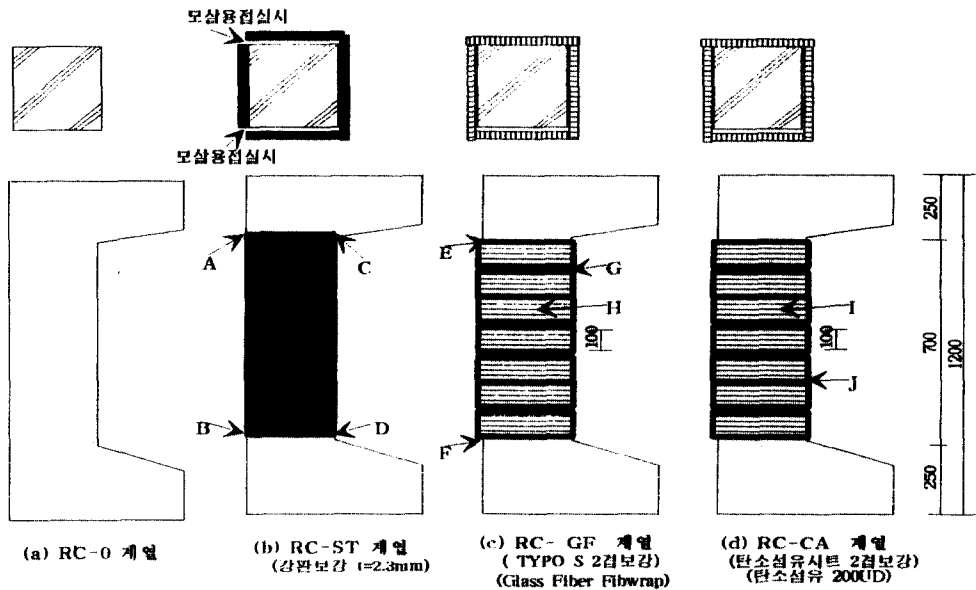


그림2 시험체 보강형상

2.1.4 가력 및 측정방법

축력과 휨모멘트의 조합하중하에서 각 시험체에 대한 내력을 비교하기 위하여 각 편심거리에 따라 시험체 양단부에 반원형 핀 구좌를 설치하여 양단 단순지지 조건으로 한 후 시험체가 파괴될 때까지 U.T.M(300ton)을 사용하여 하중을 가력하였다. 또한 파괴 전에 브라켓이 파괴되는 것을 방지하기 위하여 브라켓 측면은 강판($t=40\text{mm}$)을 사용하여 보강하였다. 이 때 시험체는 일방향 휨을 유도하기 위하여 일방향으로만 회전이 가능한 핀구좌를 시험체 상하부에 설치하였다.⁷⁾ 가력하중 단계별로 시험체의 축변위, 횡변위 그리고 각변위를 측정하기 위해 LVDT를 시험체 중앙 및 상하부에 각각 설치하고, 시험체 중앙부에 위치한 주근과 보강재의 변형을 측정하기 위하여 W.S.G를 부착하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험체의 파괴양상

(1) RC-1 계열($e/h=0$ 인 경우)

RC-1계열은 중심축 하중을 가력한 경우로서, 파괴형상은 무보강 시험체(RC-0-1)는 주근이 항복하면서 최대하중에 도달 후 급격하게 파괴되는 현상을 나타냈다. 한편 탄소섬유쉬트로 보강된 기둥시험체(RC-CA-1)에서는 주근이 항복한 후 하중의 증가에 따라 탄소섬유쉬트의 저항에 의해 최대하중에 도달하였으며, 이 후 파단되는 현상을 나타냈다. 강판으로 보강된 시험체(RC-ST-1)에서는 브라켓 상하부 모서리 부분의 파괴로 인하여 최대하중 이전에서 실험을 중단하였으며, 유리섬유쉬트로 보강된 시험체(RC-GF-1)도 브라켓 보강강판의 국부좌굴로 최대하중 이전에서 실험을 중단하였다.

(2) RC-2 계열($e/h=0.2$ 인 경우)

무보강 시험체(RC-0-2)는 최대하중에 도달시 압축철근이 항복후 파괴되는 압축파괴 현상을 보였다. 한편 강판으로 보강된 시험체(RC-ST-2)에서는 최대하중 이전에 압축측 강판의 중앙에서 국부좌굴 현상이 발생하였으며, 이어서 지속적으로 하중을 증가시킴에 따라 인장측 주근이 항복하기 전에 인장측(그림 2의 A부분)에 균열이 발생하고 최대하중 이후 압축측 상하단부 용접부위가 찢어지는 현상이 나타났다. 또한 탄소섬유쉬트로 보강된 시험체(RC-CA-2)에서는 먼저 압축철근이 항복하고 최대하중 이전에 인장측 보강섬유쉬트결 사이(그림 2의 I)가 분리된 현상이 나타났다. 이후 최대하중에 도달하면서 압축측 보강섬유쉬트가 파단되었다. 한편 유리섬유쉬트로 보강된 시험체(RC-GF-2)는 압축철근이 항복하고 인장측 보강섬유쉬트의 결 사이(그림 2의 H)가 분리되는 현상은 보이지 않고 보강섬유쉬트 간의 경계부위(그림 2의 G)가 콘크리트면에서 탈락현상이 발생하면서 최대하중에 도달 후 압축측 섬유쉬트가 파단되는 현상을 나타냈다.

(3) RC-3 계열($e/h=0.4$)

무보강 시험체(RC-0-3)는 최대하중 이전에 인장철근이 먼저 항복하고 압축 측 콘크리트 파괴로 이어지는 전형적인 휨압축파괴 형태를 보였다. 한편 강판으로 보강된 시험체(RC-ST-3)에서는 최대하중에 도달하기 전에 인장측 상단부와 브라켓 접합부(그림 2의 A)에 균열이 발생되었고 이후에 하중을 지속적으로 증가시킴에 따라 최대하중에 도달하였고 동시에 압축측 상하단부에는 국부좌굴 현상이 나타났다. 또한 탄소섬유쉬트로 보강된 시험체(RC-CA-3)에서는 인장측 보강섬유쉬트결 사이가 분리되는 현상이 나타났다. 이후 하중을 증가시켜 최대하중에 도달시 압축측 콘크리트의 압축파괴로 인하여 보강섬유쉬트가 블록해지는 현상을 보였다. 유리섬유로 보강된 시험체(RC-GF-3)는 인장측 먼저 중앙부분의 보강섬유쉬트 사이 경계면이 탈락되는 현상이 나타났고 이어서 하중의 증가와 더불어 최대하중 이후에 압축측 보강섬유쉬트가 블록해지는 현상을 나타내었다.

(4) RC-4 계열($e/h=0.75$)

본 계열의 시험체는 편심률이 가장 큰 경우이며, 무보강 시험체(RC-0-4)에서는 인장철근이 항복한 후 압축 측 콘크리트의 파괴로 이어지는 전형적인 휨 파괴 형태를 보였다. 한편 강관으로 보강된 시험체(RC-ST-4)에서는 주근과 보강강관이 항복하기 전에 인장측의 보강재 상단부(그림 2의 A)에 균열이 발생하면서 압축측의 하단부의 보강강관에 국부좌굴 현상이 나타났다. 탄소섬유쉬트로 보강된 시험체(RC-CA-4)에서는 최대하중 이전에 인장측 보강섬유쉬트결 사이가 분리되기 시작하고 최대하중에 도달 이후에 압축측 보강섬유쉬트가 블록해지는 현상을 나타내었다. 한편 유리섬유로 보강된 시험체(RC-GF-4)는 주근과 보강재가 항복하기 전에 인장측 보강재 상하단부(그림 2 E와 F)에 균열이 발생하면서 파괴되었다.

3.2 하중-변위 관계

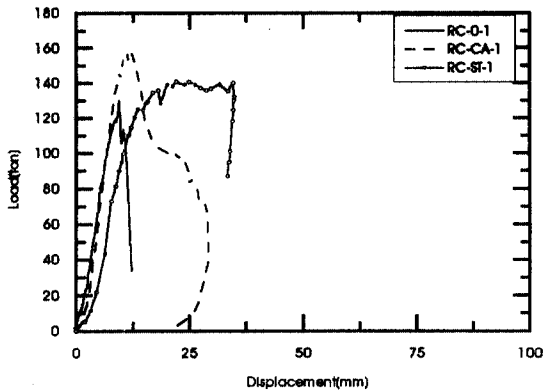


그림3 RC-1 계열($e/h=0$)의 하중-축변위 곡선

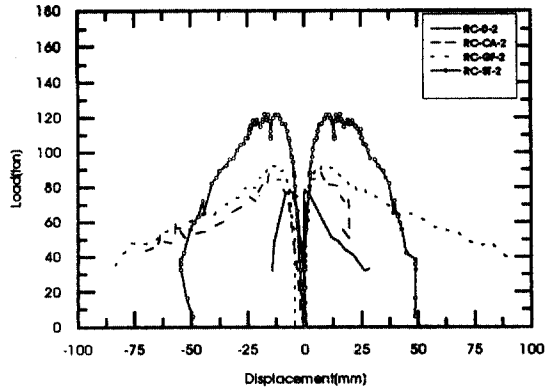


그림4 RC-2 계열($e/h=0.2$)의 하중-횡변위 곡선

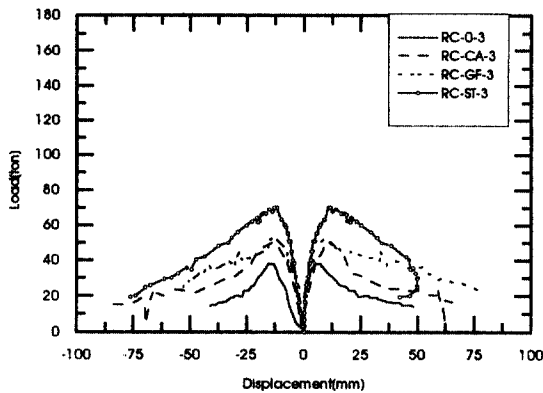


그림5 RC-3 계열($e/h=0.4$)의 하중-횡변위 곡선

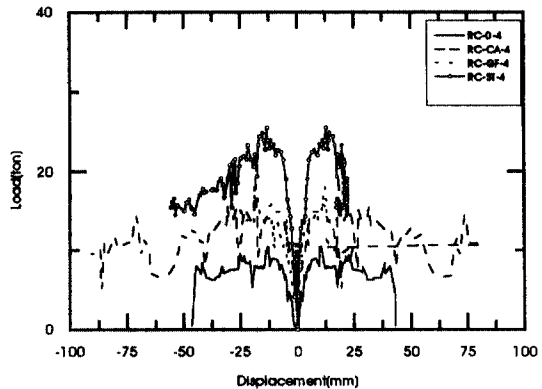


그림6 RC-4 계열($e/h=0.75$)의 하중-횡변위 곡선

그림 3에 나타난 바와 같이 중심축하중($e/h=0$)을 받는 RC-1계열 시험체는 보강여부에 관계없이 기동 주근이 항복전까지는 비슷한 하중-변위관계를 보였으며, 최대하중은 RC-0-1에 비하여 RC-CA-1가 1.23배 정도 높게 나타났다. 또한 최대하중이후의 하중-변위 관계를 통해서 보면, 무보강 시험체

(RC-0-1)에 비하여 보강시험체는 에너지 흡수능력이 우수하게 나타났다. 이러한 현상은 보강재료의 횡방향 구속효과(Confinement Effect)에 의하여 최대하중이후에도 보강기둥이 소성적 거동을 가능케 한데서 비롯된 것으로 사료된다. RC-ST-1은 브라켓 모서리의 국부파괴로 인하여 변위가 다른 시험체에 비하여 증가되는 현상을 나타냈다. 그림 4는 편심거리가($e/h=0.2$)인 RC-2계열 하중-변위 곡선으로 보강재료와는 무관하게 압축철근이 항복하기 전까지는 비슷한 곡선으로 나타나며, 최대하중은 RC-0-2, RC-CA-2, RC-GF-2, RC-ST-2순으로 증가한다. 또한 RC-CA-2와 RC-GF-2는 최대하중 및 하중-변위 곡선이 거의 같게 나타났으며, 무보강 시험체는 최대하중 이후 급격한 내력저하를 나타내었다. 그림 5~6은 편심률이 0.4와 0.75인 RC-3와 RC-4 계열 시험체의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 편심에 관계없이 주근이 항복하기 전까지는 비슷한 곡선으로 나타내고 있다. 한편 최대하중은 RC-0-3~4, RC-GF-3~4, RC-CA-3~4, RC-ST-3~4순으로 증가한다. 또한 RC-CA-3~4와 RC-GF-3~4는 최대하중 및 변위곡선이 거의 같게 나타나며, 최대하중이 후 무보강 시험체(RC-0-3~4)에 비하여 보강시험체의 에너지 흡수 능력이 우수하게 나타났다.

이상에서 나타난 결과를 볼 때, 편심거리에 관계없이 탄소섬유와 유리섬유는 최대하중은 물론이고 하중-변위곡선도 거의 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 강판보강은 위의 두 경우에 비해 보강에 따른 내력증진효과가 가장 우수함을 발견할 수 있었으나, 주두 부분에 보강처리가 기둥의 내력에 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 실무에서 기둥을 보강시에는 보-기둥 접합부 처리에 특히 신경을 써야 할 것으로 사료된다.

3.3 주근 및 보강재의 변형도

RC-2 계열의 주근과 보강재의 변형도를 나타낸 그림 7을 살펴보면, 모든 보강시험체는 압축철근이 먼저 항복한 후에 인장철근이 항복함을 알 수 있으며, 압축측 주근의 항복하중이 RC-0-2, RC-GF-2, RC-CA-2, RC-ST-2순서로 증가되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 보강재가 횡방향 구속효과를 발휘하여 주근의 하중지지 능력을 향상시킨 데서 비롯된 것으로 판단된다. RC-2계열 시험체에서는 주근이 항복한 후에 보강재의 변형이 점증적으로 증가하면서 최대하중에 도달하는 현상을 발견할 수 있는데 이는 기둥에 사용되는 보강재가 횡방향 구속효과를 통하여 내력을 증진시키는 보강 매커니즘을 보여준 예로 사료된다.

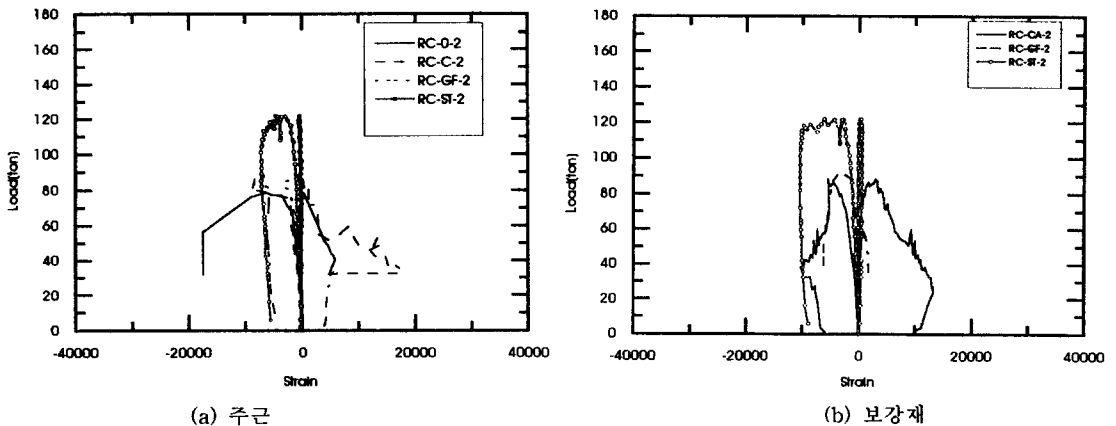


그림7 RC-2 계열($e/h=0.2$) 하중-변형도 곡선

그림 8은 RC-3계열 시험체의 경우로 압축측 주근의 항복하중이 RC-0-3, RC-GF-3, RC-CA-3, RC-ST-3순서로 증가됨을 보여 주고 있다. 한편 RC-ST-3 시험체에서는, 압축측 상하단부(그림 2의 C와 D)에 위치한 보강강관의 국부좌굴 및 인장측 상하단부(그림 2의 A와 B)에 균열발생으로 인하여, 인장측 주근 및 같은 위치의 보강강관의 항복현상은 나타나지 않았다. 반면 압축측 주근과 같은 위치의 보강강관의 경우에는 변형이 크게 증가하는 현상을 나타냈다. 이를 통해서 볼 때, 보강기둥의 보강효과를 제대로 발휘하기 위해서는 기둥 상하단의 보강재 단부치리에 신중을 기해야 할 것으로 사료된다.

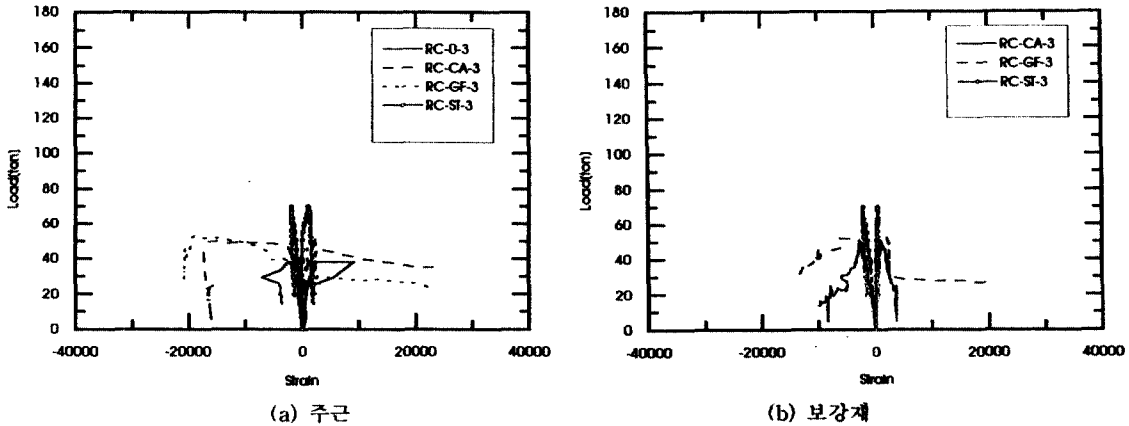


그림8 RC-3 계열($e/h=0.4$) 하중-변형도 곡선

3.4 P_n-M_n 상관도

휨과 압축을 받는 기둥의 내력은 P_n-M_n 상관곡선을 통해서 비교해 볼 수 있다. 그림 9은 극한강도설계법³⁾에 의하여 편심하중을 받는 무보강 철근콘크리트 기둥의 P_n-M_n 이론곡선과 16개의 시험체의 실험결과에 의해 작성한 P_n-M_n 상관곡선 보인 것이다. 그림 9을 통해서 볼 때, RC-0-계열(무보강) 시험체에서는 RC-0-1와 RC-0-3인 경우에 최대하중이 이론치보다도 약 140%와 124%이상으로 나타났다. RC-CA-계열(탄소섬유쉬트 보강) 시험체에서는 RC-CA-1인 경우에 최대하중이 무보강시험체보다도 약 124%이상으로 나타났으나, RC-CA-2~4의 경우에는 약 109%~159%정도로 나타났다. RC-GF-계열(유리섬유쉬트 보강) 시험체에서는 무보강(RC-0-계열) 시험체보다도 최대하중이 RC-GF-2~4의 경우에 약 113%~151%이상으로 나타났다. RC-ST-계열(강판보강) 시험체에서는 강판으로 보강되지 않은 같은 단면의 순수 철근콘크리트 기둥의 계산치와 무보강(RC-0-계열) 시험체보다도 최대하중이 RC-ST-V-2~4의 경우에 약 201%~372%와 100%~199%이상으로 나타났다.

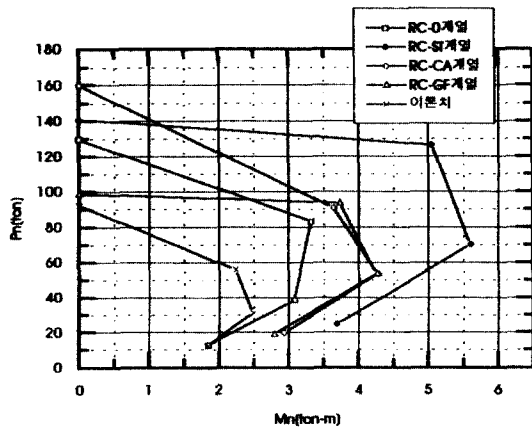


그림9 P_n-M_n 상관도

4. 결론

본 연구는 강판, 탄소섬유 및 유리섬유 쉬트로 보강한 12개의 시험체와 무보강한 4개 시험체 등 총 16개 시험체를 중심축 및 편심하중을 가력하여 이의 구조적기동을 고찰하고자 한 것으로 실험을 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 보강시험체는 무보강시험체에 비하여 하중지지 능력 및 주근의 항복하중이 증대되었으며, 최대 내력 이후 에너지 흡수능력이 우수한 것으로 나타났다. 이는 보강제의 횡방향구속 효과에 의해서 비롯된 것으로 사료된다.

(2) 보강시험체는 무보강시험체에 비하여, 강판보강의 경우 약 152~199%이상, 탄소섬유 쉬트 및 유리섬유 쉬트의 경우 약 112~150%이상의 내력을 발휘하는 것으로 나타났다.

(3) 보강시험체중 강판보강의 경우가 성능이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 탄소섬유쉬트와 유리섬유쉬트 보강의 경우는 거의 동일한 내력을 발휘하는 것으로 나타났다.

(4) 강판 보강된 시험체는 압축측에 있는 상하단부 보강강판의 국부좌굴을 일으키면서 반대편 인장측 상하단 브라켓 접합부(보-기둥 접합부에 해당)에 균열이 발생하여 시험체가 최대하중에 도달하기 이전에 파괴되는 경향을 보이고 있으므로, 강판보강시에는 소정의 보강효과를 얻기위해서는 기둥-보 접합부 처리에 신중을 기해야할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 수행을 위해 보강 시험체 제작에 도움을 주신 (주) 국제건설 및 풍림본드 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. "에폭시 접착 강판보강 철근콘크리트보의 역학적 거동에 관한 연구", 숭실대학교 생산기술연구소, 1994.10
2. 최완철, 연구석, 홍영균, "철근콘크리트 보수보강 재료 및 공법", 한국콘크리트학회지 제 7권 6호, 1995.12
3. Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Baluch, and B. N. Ghaleb, "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates", ACI Structural Journal / Mar.-Apr., 1994, pp160-168
4. Swamy, R.N., Jones, R., Bloxham, J.W., "Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy - bonded Steel Plates", The Structural Engineer/Vol. 65A, No.2, February, 1987, pp59-68.
5. 박주현, 홍기섭, 홍영균, 신영수, 최완철, "압축 및 휨을 받는 철근 콘크리트 기둥의 강판 보강효과에 대한 실험적 연구", 대한건축학회 학술발표 논문집 제 16권 2호, 통권 32집, 1996, pp. 601-605
6. 박주현, 홍기섭, 홍영균, 신영수, 최완철, "강판 보강된 철근 콘크리트 기둥의 거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 1997, pp. 557-564
7. 조용원, "휨과 축력을 받는 철근콘크리트 기둥의 내력 및 연성에 관한 연구", 한양대학교대학원 박사학위 논문, 1987.6
8. 극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계기준 및 해설, 건설부, 1990