

# 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용한 철근콘크리트 기둥부재의 합리적인 극한강도 평가 방안

Realistic Estimate Method of Reinforced Concrete Column's Ultimate Strength  
Using the Nonlinear Finite Element Analysis Program

천 주 현\*      김 기 호\*\*      성 대 정\*\*\*      박 재 근\*\*\*\*  
Cheon, Ju-Hyoun      Kim, Ki-Ho      Seong, Dae-Jeong      Park, Jae-Guen

## Abstract

The design method of the reinforced concrete structures is converting from the current limit state design method to the reliability based design method and active studies have been done in the US, Europe, and Japan etc. Performance based design method is considering lots of uncertainty of current design provision rationally and make sure that structure have a reliable reliability and safety. The main area of these studies is to secure the non-linear analysis technology with high reliability. The data for reinforced concrete columns tested by many researchers are used to verify the applicability of the nonlinear finite element analysis program (RCAHEST, Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology). A comparison is made between analysis and test, calculated safety factor based on reliability theories to applies to analysis result.

## 요 지

콘크리트 구조물에 대한 설계법이 현재의 한계상태 설계법에서 성능기반 설계법으로 전환되고 있는 추세이며, 이에 대한 연구가 미국, 유럽 및 일본 등에서 이루어지고 있다. 성능기반 설계법은 현행의 설계기준에서의 많은 불확실성(uncertainty)을 합리적으로 고려함으로써, 구조물이 일정한 신뢰성과 안전성을 확보하도록 하기 위한 연구로서, 신뢰도 높은 비선형 해석기술의 확보와 함께 이를 직접 설계에 적용하기 위한 방안에 대한 연구가 필요하다. 이 연구에서는 저자 등에 의하여 개발된 비선형 유한요소 해석 프로그램(RCAHEST)을 신뢰성 있는 철근콘크리트 기둥 실험체 적용하여 그 적용성과 타당성을 검증하였고, 신뢰성 이론을 바탕으로 파괴에 대한 목표 신뢰지수를 확보할 수 있도록 하는, 비선형 유한요소해석으로부터의 해석 결과에 적용할 안전계수를 산정하여 현행의 설계 기준등과의 비교·분석을 수행하였다.

**Keywords :** Nonlinear finite element analysis, Performance-based design, Reliability analysis

**핵심 용어 :** 비선형 유한요소해석, 성능기반설계, 신뢰성 해석

\* 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과, 박사수료

\*\* 정희원, (주)삼안, 구조부 대리, 공학석사

\*\*\* 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과, 박사사료

\*\*\*\* 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사후 연구원

E-mail : chenju2000@skku.edu 031-290-7533

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내  
주시면 2008년 11월호에 토론회결과를 게재하겠습니다.

# 1. 서론

세계적으로 콘크리트 구조물에 대한 설계법이 현재의 한계상태 설계법에서 성능기반 설계법으로 전환되고 있는 추세이며, 이에 대한 연구가 미국, 유럽 및 일본 등에서 이루어지고 있다. 성능기반 설계법은 현행의 설계기준이 하중과 강도, 부재의 단면치수의 변화성 및 구조해석 방법의 불확실성 등과 같은 많은 불확실성(uncertainty)을 합리적으로 고려하지 못함에 따른 비경제성과 설계기준의 모순을 지양하고, 작용하중과 구조저항의 불확실성을 확률적으로 고려함으로써, 구조물이 일정한 신뢰성과 안전성을 확보하도록 하기 위한 연구이다. 불확실성을 고려하기 위하여 구조해석에 사용되는 요소들을 확률변수로 정의하고, 확률-통계이론을 적용하여 파괴의 가능성을 구조물의 안전성에 대한 정량적인 지표인 신뢰도 지수로 계산해내고, 파괴확률을 산정한다는 점에서 기존의 정성적인 입장에서의 안전계수를 이용하는 방법보다 더욱 합리적이라고 할 수 있다. 이 분야에 관한 연구는 Ang, Shinozuka, Moses, MacGregor, Gallambos, Cornell, Ellingwood, Lind, Corotis, Wen, Turkstra, Benjamin 등과 같은 많은 연구자들에 의해 이루어지고 있다. 한편, 구조물의 강도뿐만 아니라 변형 능력의 정보를 포함한 신뢰도 높은 비선형 해석기술의 확보와 함께 이를 직접 설계에 적용하기 위한 방안으로서, 해석결과에 대한 안전율을 확보하기 위한

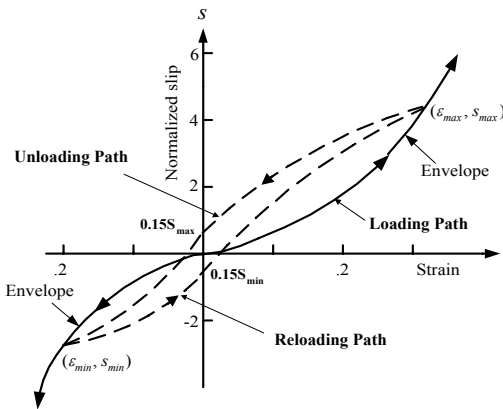


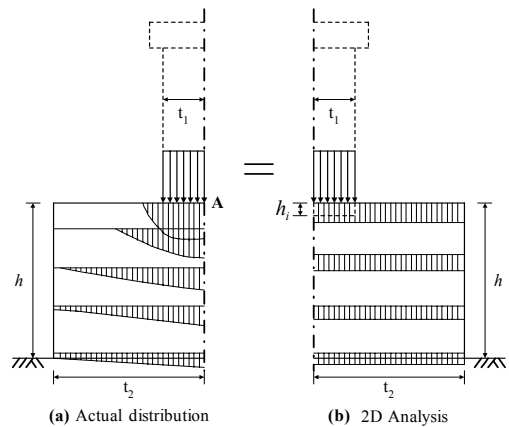
Fig. 1 철근의 변형률 - 슬립 모델

연구가 필요하다. 이를 위하여, 이 연구에서는 그동안 저자 등에 의하여 개발된 비선형 유한요소 해석 프로그램(RCAHEST)을 신뢰성 있는 철근콘크리트 기둥 실험체 적용하여 해석 및 실험결과와의 비교·분석을 통하여 그 적용성과 타당성을 검증하고, 신뢰성 이론을 바탕으로 파괴에 대한 목표 신뢰지수를 확보할 수 있도록 하는, 비선형 유한요소해석으로부터의 해석결과에 적용할 안전계수를 산정한다. 이를 통해 철근콘크리트 부재에 대하여 성능기반 설계기준의 개발에 필요한 전반적인 기초 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 비선형 유한요소해석 프로그램

### 2.1 철근콘크리트 비선형 재료모델

성능기반설계를 위한 철근콘크리트 기둥 부재의 거동특성 및 극한강도 평가를 위한 이 연구에서, 저자 (Kim 등, 2003; 김태훈, 2003)등에 의하여 그 동안 개발된 철근과 콘크리트의 비선형성을 고려하기 재료모델과 횡방향 구속효과를 고려하기 위한 Mander (1998) 등이 제안한 모델 및 Darwin(1995)등이 제안한 겹침 이음된 철근 모델을 사용하였다. 여기에, 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서의 단면 강성의 급변에 따른 철근의 정착슬립(Fig. 1)과 접합면에서의



$$\delta_A = \delta_{(h)}^{actual} = \delta_{(h)}^{2-d} + \delta_{(h)}^{2-d}$$

Fig. 2 압축부 관입 모델

미끄러짐, 및 접합면의 관입(Fig. 2) 등의 국부적인 불연속 변위를 고려하기 위한 경계면 요소(Interface element) 등을 적용하였다.

## 2.2 해석 프로그램(RCAHEST)

이 연구에서는, 아래의 Fig. 3에서와 같이 저자 등(Kim 등, 2003; 김태훈, 2003)에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소 그리고 탄성요소 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology) (Kim 등, 2003; 김태훈, 2003)를 사용하였다.

## 3. 해석 프로그램의 검증

### 3.1 대상 실험체

본 연구에서 제시한 해석기법과 재료적 비선형성을 고려한 해석모델의 타당성을 검증하기 위해 아래의 Fig. 4에서 Fig. 9에 나타난 것과 같은 다양한 단면상세, 압축강도, 배근상세 및 파괴형태를 갖는 철근콘크리트 기둥 실험체를 선정하였다. 아래에서와 같이 각각의 실험체들은 형상비와 주철근 비를 변화시키면서 전단 파괴를 유도한 실험체(Fig. 4), 겹침이음된 주철근과 크로스타이의 형상 변화에 따른 휨과괴 유도

2D or 3D Spring element	4 nodes PSC shell element	2D or 3D Flexibility-based fiber beam-column element	4 nodes Elastic shell element
Joint element	<b>FEAP</b>		4 nodes RC shell element
Reinforcing or Prestressing bar element	Interface element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

Fig. 3 유한요소해석 프로그램 요소 라이브러리

한 실험체(Fig. 5), 띠철근과 나선형 철근에 대하여 축력비와 수평철근 간격, 주철근비를 변화시킨 휨과괴 실험체(Fig.6), 사각형 단면에 대하여 크로스타이 변형에 따른 휨 파괴 유도 실험체(Fig. 7) 등이 있다. 여기에 주철근비, 띠철근비와 단면의 형상 등을 변화시키면서 양단을 힌지 및 고정 처리한 압축 파괴 실험체(Fig. 8, Fig. 9)등으로 나누어진다. 이상 총 118개의 대상 실험체 가운데, 실험 및 측정오차로 인한 실험체를 제외한, 나머지 총 115개의 실험체에 대한 검증을 수행하였다.

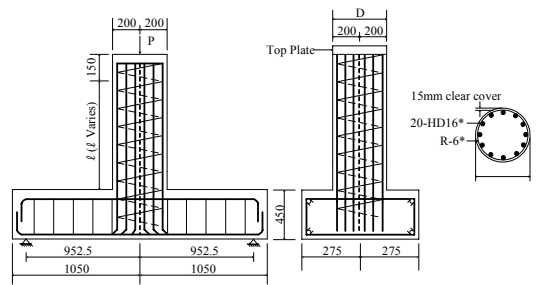


Fig. 4 실험체 형상 및 제원 (Ang et al., 1998)

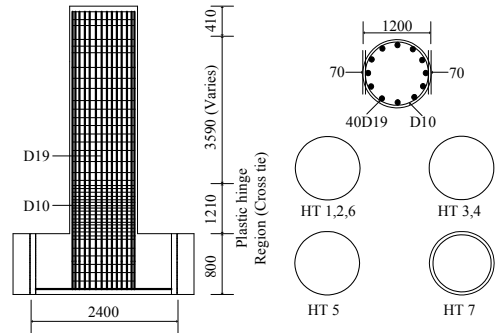


Fig. 5 실험체 형상 및 제원 (정영수 et al., 2001)

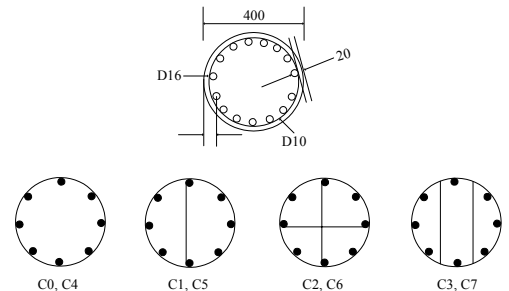


Fig. 6 실험체 형상 및 제원 (이재훈 et al., 2002, 2003)

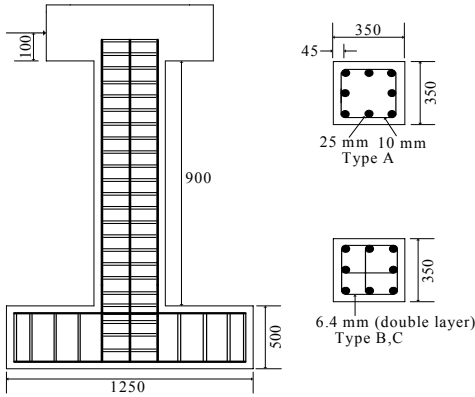


Fig. 7 실험체 형상 및 제원 Guney et al., 1987)

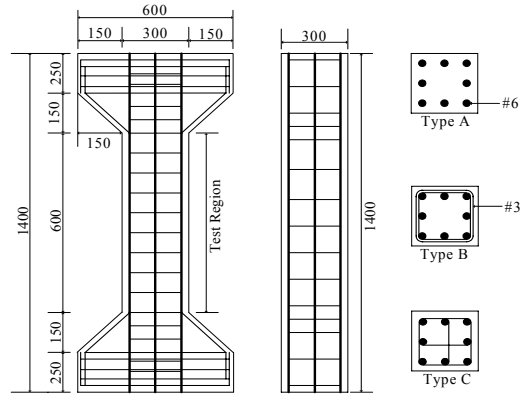


Fig. 8 실험체 형상 및 제원 (Lin et al., 2004)

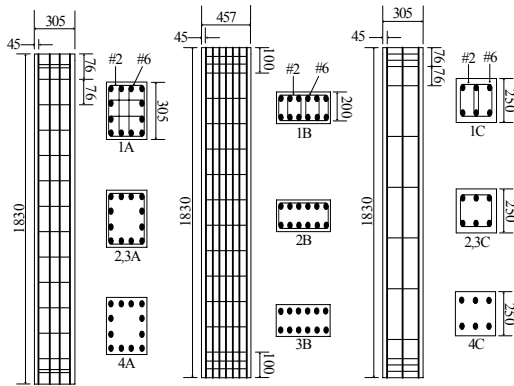


Fig. 9 실험체 형상 및 제원 (James F. PFISTER, 1964)

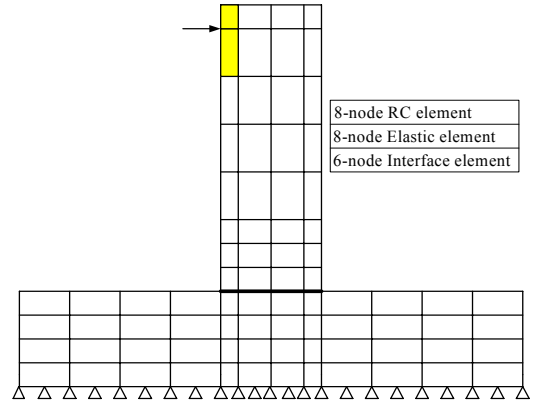


Fig. 10 유한요소해석을 위한 요소 Modeling

### 3.2 실험 및 해석결과와의 비교·분석

이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)의 신뢰성 평가를 위하여, 앞 절의 신뢰성 있는 연구자들이 실험한 총 115개의 철근콘크리트 기둥 시험체에, Fig. 10에서와 같은 실험체의 모델링과 요소를 적용한 후, 실험과 해석 및 현행의 콘크리트 구조설계기준으로부터의 극한강도에 대한 결과를 아래의 Table 1에 나타내었다. 아래의 결과에서 보는 바와 같이 총 115개의 대상 실험체에 대한 해석과 실험으로부터의 극한강도 비(比)에 대한 평균, 표준편차 및 변동계수가 각각 1.01, 6% 및 0.08정도로 산정되었다. 이는 이 연구에서 적용한, 재료적 비선형성을

고려한 비선형 유한요소해석 프로그램이 비교적 큰 신뢰도를 나타냄을 알 수 있다. 이에 반해, 현행의 콘크리트 구조설계기준과 실험에 의한 극한강도 비(比)는 평균이 0.62정도로서, 콘크리트 구조설계기준이 극한강도에 대하여 상당히 보수적인 평가를 하고 있음을 알 수 있고, 표준편차와 변동계수가 각각 8%와 0.12로서, 그 결과에 대한 신뢰도가 비교적 작다고 할 수 있다. 이는 현행의 콘크리트 구조설계기준이, 철근콘크리트 기둥 부재의 다양한 파괴 양상에 따른 극한강도 평가를 비교적 잘 반영하고 있지 못하는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과를 종합해 볼 때, 철근콘크리트 기둥 부재에 대하여, 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소 해석 프로그램은 그 거동특성 및 극한강도를 비교적 정확히 예측하고 있으며, 향후 성능기반설계를

위한 기초자료로서 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 해석 프로그램에 대한 신뢰도 평가

이 연구에서 적용한, 비선형 유한요소해석프로그램 (RCAHEST)의 결과에 대한 신뢰도를 평가하기 위하

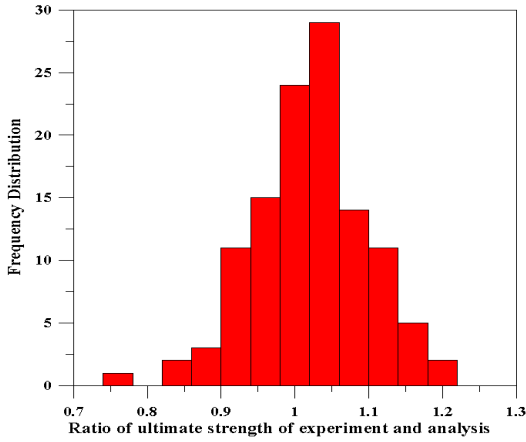


Fig. 11 극한강도 비(比)에 대한 도수분포표

여, Cyclic과 Monotonic 하중 재하 방법에 따른 변동성 및 횡방향 구속효과 등을 고려하기 위한, Mander 등(1998)과 CEB/FIB 제안 모델을 각각 적용한 경우의 극한강도에 대하여, 통계 소프트웨어 SAS를 이용하여 검증하였다. 그 결과, 두 가지 하중 경우에 대한, Shapiro-Wilk 검정 통계량이 95% 신뢰 수준에서 모두 정규분포를 따르며, 그 결과 또한 매우 유사한 것으로 나타났다. Fig. 11에 이러한 결과에 대한 도수분포표를 나타내었으며, 아래의 식(1)에서와 같이 종형(Bell Shape)의 확률밀도함수로 근사화 시킬 수 있으며, 식(2)에서와 같은 신뢰수준을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는, 향후 성능기반 설계에의 적용을 위하여, 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소 해석 프로그램을 통한 비선형 유한요소해석시의 편의성과 경제성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < \infty \quad (1)$$

$$\left(\bar{X} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad (2)$$

Table 1 실험, 해석 및 현행 설계 기준에 의한 극한 강도

Specimen	Exp.	Code	Ana.	Code /Exp.	Ana. /Exp.	Specimen	Exp.	Code	Ana.	Code /Exp.	Ana. /Exp.
N1	3443	2182.86	3281.60	0.63	0.95	MS-HT5-N-L2	629	355.43	589.82	0.57	0.94
N2	4434	2793.52	4351.50	0.63	0.98	MS-HT5-H-L2	610	355.43	675.46	0.58	1.11
N3	4925	3127.56	4466.34	0.64	0.91	MD-HT6-N-L2	897	551.92	896.10	0.62	1.00
N4	3762	2219.40	3547.65	0.59	0.94	MD-HT7-N-L2	855	551.92	936.36	0.65	1.10
N5	4358	2725.67	4487.82	0.63	1.03	MS-HT4-N-L2	1007	604.23	1027.30	0.60	1.02
N6	4932	3122.34	5240.18	0.63	1.06	MS-HT4-N-FS	1494	839.21	1435.70	0.56	0.96
N7	4547	2712.04	4548.72	0.60	1.00	CN-C0-80-10	103	52.71	93.01	0.51	0.90
N8	4500	2905.75	4548.72	0.65	1.01	CN-C0-80-20	112	68.19	112.86	0.61	1.01
N9	4293	2704.80	4459.67	0.63	1.04	CN-C0-80-30	126	77.81	128.73	0.62	1.02
N10	4438	2819.62	4656.79	0.64	1.05	CN-C1-80-10	109	54.43	97.38	0.50	0.89
N11	4405	2819.62	4873.12	0.64	1.11	CN-C1-80-20	111	69.06	113.47	0.62	1.02
N12	4302	2730.89	4543.62	0.64	1.06	CN-C1-80-30	117	78.02	128.51	0.67	1.10
N13	4036	2548.22	4160.37	0.63	1.03	CN-C2-80-10	105	52.44	97.48	0.50	0.93
N14	4224	2652.60	4357.58	0.63	1.03	CN-C2-80-20	118	67.33	116.38	0.57	0.99
N15	4261	2699.58	4434.27	0.63	1.04	CN-C2-80-30	128	77.70	130.92	0.61	1.02
H1	3449	2198.52	2955.92	0.64	0.86	CN-C3-80-10	124	52.70	98.61	0.42	0.80
H2	4216	2689.14	3926.68	0.64	0.96	CN-C3-80-20	119	67.80	115.24	0.57	0.97
H3	4854	3101.46	4727.88	0.64	0.97	CN-C3-80-30	126	77.74	115.24	0.62	0.91
H4	3539	2276.81	3981.89	0.64	1.13	CN-C4-80-20	121	68.78	128.00	0.57	1.06
H5	4323	2704.80	4451.34	0.63	1.03	CN-C5-80-20	117	67.77	112.53	0.58	0.96

H6	4956	3216.29	5758.37	0.65	1.16	CN-C6-80-20	121	67.87	114.69	0.56	0.95
H7	3899	2601.52	4677.58	0.67	1.20	CN-C7-80-20	121	67.84	114.69	0.56	0.95
H8	4704	3014.33	4950.40	0.64	1.05	CN-SP-60-10	95	55.82	110.22	0.59	1.16
H9	4175	2647.38	4347.97	0.63	1.04	CN-SP-60-20	106	72.27	119.05	0.68	1.12
H10	4278	2704.80	4433.88	0.63	1.04	CN-SP-60-30	122	83.39	134.99	0.68	1.11
H11	4039	2605.63	4248.04	0.65	1.05	CN-SP-80-10	99	56.30	91.29	0.57	0.92
H12	4292	2699.58	4473.60	0.63	1.04	CN-SP-80-20	122	73.62	115.67	0.61	0.95
H13	4401	2788.30	4967.56	0.63	1.13	CN-SP-80-30	123	83.06	115.67	0.67	0.94
H14	4454	2803.96	4641.19	0.63	1.04	CN-SP-100-10	98	56.75	93.24	0.58	0.95
H15	4085	2605.63	4260.01	0.64	1.04	CN-SP-100-20	113	72.41	112.11	0.64	0.99
1A	3043	2213.15	3242.37	0.73	1.07	CN-SP-100-30	121	83.39	128.87	0.69	1.07
2A	3092	2224.12	3244.92	0.72	1.05	CNH-SP-60-20	193	112.82	188.16	0.58	0.97
3A	3114	2224.12	3252.28	0.71	1.04	CNH-SP-80-20	185	112.93	182.24	0.61	0.99
4A	2891	2231.44	3265.32	0.77	1.13	CNH-SP-80-20	179	112.93	180.06	0.63	1.01
1B	3390	2404.32	3756.34	0.71	1.11	UNIT-1	320	222.99	322.69	0.70	1.01
2B	3443	2418.94	3497.84	0.70	1.02	UNIT-2	228	157.94	231.44	0.69	1.02
3B	3341	2418.94	3281.89	0.72	0.98	UNIT-3	298	177.59	256.49	0.60	0.86
1C	2909	2030.96	2878.64	0.70	0.99	UNIT-5	340	218.48	335.61	0.64	0.99
2C	2875	2055.71	3014.17	0.72	1.05	UNIT-6	390	291.31	417.48	0.75	1.07
3C	2776	2086.10	2804.02	0.75	1.01	UNIT-7	280	222.60	308.03	0.80	1.10
4C	2767	2058.75	2631.81	0.74	0.95	UNIT-8	475	288.45	432.74	0.61	0.91
U3	268	195.30	336.94	0.73	1.26	UNIT-9	385	234.23	355.09	0.61	0.92
U4	326	189.70	351.96	0.58	1.08	UNIT-10	450	294.96	429.27	0.66	0.95
U6	343	200.20	346.36	0.58	1.01	UNIT-11	404	292.79	403.98	0.73	1.00
U7	342	202.30	337.47	0.59	0.99	UNIT-12	527	337.98	523.66	0.64	0.99
NS-HT1-A-L2	678	355.43	549.46	0.52	0.81	UNIT-13	443	271.77	429.34	0.61	0.97
NS-HT2-A-L2	612	355.43	549.46	0.58	0.90	UNIT-14	311	219.60	329.17	0.71	1.06
NS-HT2-H-L2	683	355.43	575.36	0.52	0.84	UNIT-15	230	140.33	200.79	0.61	0.87
NS-HT3-A-L2	576	355.43	542.02	0.62	0.94	UNIT-16	379	265.05	371.77	0.70	0.98
NS-HT3-H-L2	653	355.43	584.92	0.54	0.90	UNIT-17	329	213.77	315.72	0.65	0.96
NS-HT4-A-L2	576	355.43	542.02	0.62	0.94	UNIT-18	507	358.52	490.50	0.71	0.97
NS-HT4-H-L2	624	355.43	584.92	0.57	0.94	UNIT-19	436	356.60	469.35	0.82	1.08
MS-HT3-N-L2	604	355.43	620.91	0.59	1.03	UNIT-20	487	368.76	438.61	0.76	0.90
MS-HT3-H-L2	598	355.43	574.21	0.60	0.96	UNIT-22	280	217.08	301.61	0.78	1.08
MS-HT4-N-L1	565	355.43	620.58	0.63	1.10	UNIT-23	339	216.37	312.83	0.64	0.92
MS-HT4-N-L2	632	355.43	620.91	0.56	0.98	UNIT-24	338	217.95	319.24	0.65	0.94
MS-HT4-N-L3	600	355.43	616.38	0.59	1.03	UNIT-25	233	207.65	246.21	0.89	1.06
MS-HT4-H-L2	629	355.43	721.89	0.57	1.15						
Total Mean				0.62	1.01						
Standard Deviation				0.08	0.06						
Variation				0.12	0.08						

#### 4. 파괴에 대한 목표신뢰도 지수 산정

##### 4.1 신뢰도 지수 산정

성능기반설계의 기초자료로서 앞 절의 연구결과를 바탕으로, 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석으로부터의 결과에 적용할 추가적인 감소계수를 신뢰성 이론을 바탕으로 산정한다. 신뢰도 지수 산정에는 식

(3)과 같은 일계이차모멘트법 (First-Order Second-Moment method)을 적용하였다. 이는 정규분포 확률 변수  $x_i$ 의 평균과 표준편차가 각각  $\mu_i$ 와  $\sigma_i$ 일 때, 확률 변수  $X_i$ 의 선형 합으로 정의되는 한계상태식으로 나타낼 수 있다.

$$g = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n \quad (3)$$

이러한 한계상태식  $g$ 의 값을 새로운 확률변수  $G$ 라고 하면, 확률변수  $G$ 의 확률분포는 정규분포가 되며, 파괴확률은 새롭게 정의된 정규분포 확률변수  $G$ 가 0보다 작을 확률 이므로, 식(4)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_f = P[G \leq 0] = \Phi\left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) \quad (4)$$

그리고 한계상태식의 표준편차에 대한 평균의 비인  $\mu_G/\sigma_G$ 을 신뢰도지수(reliability index)  $\beta$ 라 정의하며, 파괴확률  $P_f$ 는 식(5)과 같다.

$$P_f = \Phi(-\beta), \text{ where } \beta = \mu_G/\sigma_G \quad (5)$$

#### 4.2 목표 신뢰도 지수 산정

철근콘크리트 기둥 부재의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 Euro Code에서 정의하고 있는 구조물의 중요도에 기준을 바탕으로, 구조물의 중요도 Very Large에 해당하는 신뢰도 지수 3.72이상을 확보할 수 있도록 하였다. 아래의 Table 2에서와 같이, 실험 및 콘크리트 구조설계기준에 의한 극한강도 비(比)에 대한 신뢰도 지수는 4.89정도로서, 목표 신뢰도를 만족하고 있으나, 그 결과에 대한 표준편차와 변동계수가 각각 8%와 0.12로서, 결과에 대한 신뢰도가 비교적 작음을 알 수 있다. 이에 반해, 해석과 실험에 의한 극한강도 비(比)에 대한 신뢰도 지수는, 해석과 실험에 의한 결과와 거의 유사함에 따라 비교적 낮은 신뢰도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 철근콘크리트 기둥부재의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 확보하기 위하여, 해석 결과에 적용할 추가적인 감소계수가 필요함을 알 수 있으며, 현행의 콘크리트 구조설계기준에서의 강도 감소계수 개념을 바탕으로, 이 연구에서 적용할 추가적인 감소계수를 다양하게 변화시켜 적용하였다. 그 결과, Table 2에서와 같이, 비선형 유한요소해석으로부터의 결과에 0.76을 적용시켜, 파괴에 대한 목표신뢰도 지수 및 그 결과에 대한 신뢰도를 확보 할 수 있었다. 이는, 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프

로그래م RCAHEST를 통한, 철근콘크리트 기둥 부재의 극한강도에 0.76(76%)을 적용하여, 파괴에 대한 안정성을 확보 할 수 있음을 의미하며, 실험 및 해석결과에 감소계수를 적용한 결과를 아래의 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 나타내었다. 추후 구조물의 파괴를 포함한 모든 거동특성에 대한 신뢰도 지수 확보와 함께 성능기반 설계에의 적용을 위한 방안 마련이 필요할 것으로 판단된다.

Table 2 신뢰도 지수 산정 및 파괴 확률

	평균	표준편차	변동계수	신뢰도지수
code	0.62	0.08	0.12	4.89
Ana.	1.01	0.06	0.08	0.17
Ana.(×0.76)	0.76	0.06	0.08	3.88

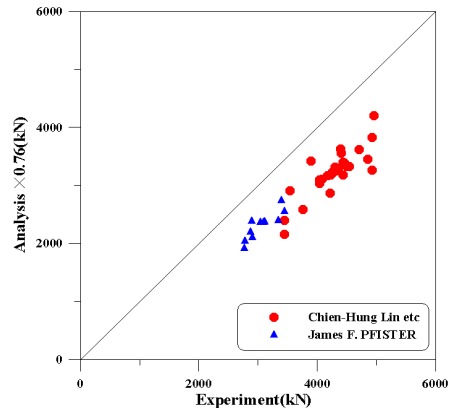


Fig. 12 안전계수를 적용한 해석과 실험의 극한강도

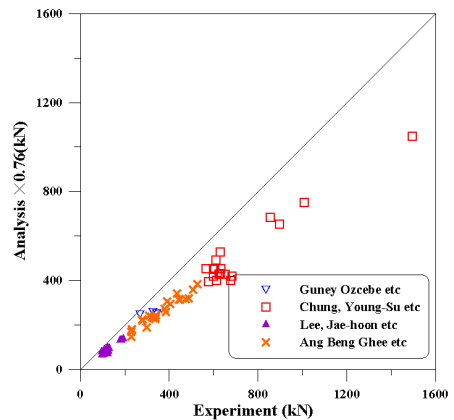


Fig. 13 안전계수를 적용한 해석과 실험의 극한강도

## 5. 결 론

본 논문에서는 성능기반설계를 위한 기초자료로서, 철근콘크리트 기둥 부재에 대한 합리적인 거동특성 및 극한강도 평가를 위하여, 저자 등에 의하여 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST를 신뢰성 있는 철근콘크리트 기둥 실험체에 적용하였고, 통계 및 신뢰성 이론을 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 연구 결과의 비교·분석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 유한요소해석에 있어 Monotonic 하중재하와 Mander 등(1988) 등이 제안한 구속효과 모델을 적용한 경우에 대한 적용성과 타당성을 통계학적인 방법으로부터 검증하였다. 이는 향후, 철근콘크리트 기둥부재의 비선형유한요소해석 프로그램 RCAHEST를 통한 강도 예측에 있어 편의성과 경제성을 확보할 수 있도록 하였다.
- 2) 현행 설계기준이 극한강도 예측에 있어 상당히 보수적이며, 이는 하중의 조합에 따른 부재의 실제 거동을 효과적으로 고려하지 못하고 있는 것으로 판단된다. 반면, 해석 결과의 경우 압축파괴, 휨파괴, 전단파괴에 대한 강도예측이 상당한 수준의 정밀도와 정확도를 갖는 것이 통계학적인 방법으로 검증하였다.
- 3) 철근콘크리트 기둥 부재의 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 Euro Code을 바탕으로 설정한 후, 이를 만족 하도록 하는 새로운 감소계수 0.76을 신뢰성 해석을 통하여 산정하였다. 이러한 결과들을 바탕으로, 구조물 및 부재의 파괴를 포함한 모든 거동 단계에 대한 신뢰도 지수 확보와 함께 이의 성능기반설계의 직접적인 적용을 방안 마련을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업(KBRC)의 2007년도 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 김기호, 성능기반 설계를 위한 철근콘크리트 구조용 비선형 유한요소해석 프로그램의 신뢰성 평가, 성균관대

- 학교, 석사학위논문, 2004.
2. 이재훈, 배성용, 윤석구, "나선철근교각의 내진 성능실험", 대한토목학회논문집, 제21권, 제1호, 2001, pp. 109-121.
3. 이재훈, 석상근, 윤석구, "원형띠철근 교각의 내진성능에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, 제22권, 1호, 2002, pp. 159-171.
4. 정영수, 박진영, 이재훈, 조대연, 이대형, "원형 실물 철근 콘크리트 교각의 철근 상세에 따른 내진성능 평가", 콘크리트공학회 가을 학술발표회 논문집, 제13권, 2호, 2001, pp. 965-970.
5. 천주현, 김태훈, 이상철, 신현목, "철근콘크리트 깊은 보의 내하력에 대한 신뢰성 평가, 한국콘크리트학회 논문집, 제17권, 제6호, 2005, pp. 955-962.
6. Ang Beng Ghee, M. J. N. Priestley, and T. Paulay, "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Column", ACI Structural Journal, Vol 86, No. 1, 1989, pp. 45-59.
7. Chien-Hung Lin, Shih-Ping Lin, and Chih-Han Tseng, "High-Workability Concrete Columns Under Concentric Compression", ACI Structural Journal, Vol. 101, No. 1, 2004, pp. 85-93.
8. Guney Ozcebe, and Murat Saatcioglu, "Confinement of Concrete Columns for Seismic Loading", ACI Structural Journal, Vol 84, No. 4, 1987, pp. 308-315.
9. James F. Pfister, "Influence of Ties on the Behavior of Reinforced Concrete Columns", Journal of ACI, Vol. 61, No. 8, 1964, pp. 521-537.
10. J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
11. Okamura, H. and Maekawa, K., "Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete structures", ASCE, 1985, pp. 528-543.
12. Taylor, R. L. FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2 Users Manual, Vol. 1 and Vol. 2. 2000.
13. Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Column", Engineering Structures, 2005, Vol. 27, No. 4, 2005, pp. 576-592.

(접수일자 : 2007년 11월 1일)

(심사완료일자 : 2008년 3월 10일)