

# 철근 콘크리트용 봉강의 역학적 특성의 통계적 변동성

## Statistical Variability of Mechanical Properties of Reinforcements

김지상\* · 백민희\*\*

Kim, Jee Sang · Paek, Min Hee

### Abstract

The strength of reinforced concrete members has uncertainty from material properties of, concrete and reinforcements, section dimensions, and construction errors and so on. The accurate evaluation of these uncertainties is necessary to assure the reasonable safety. The uncertainties should be taken into account in design using structural reliability theory which requires probabilistic models for such uncertainties. In current Korean design code, most reliability evaluations were performed based on foreign data because of lack of local data. In this paper, the probabilistic models for yield strength of reinforcements were developed based on local data. The effects of various factors, nominal yield strength, diameter of reinforcements, and companies, on the models are also examined. According to data analysed, the effects of those factors are not significant. The probability model for yield strength of reinforcements in Korea can be expressed with Beta distribution based on collected data.

**Keywords** : yield strength of reinforcement, probability model of yield strength

### 요 지

철근콘크리트 부재의 강도는 시공오차, 부재단면치수, 철근 및 콘크리트 재료의 역학적 특성 등의 불확실성 때문에 통계적인 변동성을 보인다. 부재 저항강도의 불확실성을 고려하고 신뢰성을 확보하기 위하여는 이러한 불확실성에 대한 정확한 평가가 필요한데, 국내의 경우 특히 철근의 역학적 특성 변동성에 대한 실험 및 연구가 활발하지 못하여 국내 설계기준작성의 기초가 되는 자료는 주로 외국의 연구 성과를 인용하고 있다. 이 논문에서는 우리나라 실정에 맞는 철근의 확률모델을 개발하기 위하여 국내에서 생산된 철근의 강도특성자료를 수집하여 강도와 지름, 생산회사별로 분석하였다. 그 결과 철근의 항복강도의 확률특성은 베타분포로 모델링 하는 것이 타당한 것으로 나타났으며 공칭항복강도와 철근제조회사, 그리고 철근의 직경이 철근강도에 통계적 특성에 큰 영향은 미치지 않는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 철근 항복강도, 철근 확률모델

### 1. 서 론

현재 콘크리트 관련 국내 기준들은 강도 설계법을 기초로 하고 있는데 이 설계법은 국내외의 주요 콘크리트 설계기준의 근간을 이루는 방법으로 구조물에 작용하는 극한 하중과 구조물의 설계저항강도가 일정한 안전 여유를 갖고 평형을 이루도록 설계하는 개념을 원칙으로 하고 있다. 여기서 안전 여유(margin of safety)는 한계상태방정식의 하중과 저항간의 차이를 뜻한다. 한계상태방정식에서 하중과 저항의 변수들은 변수의 불확실성 때문에 확률변수로 취급되며 각 파괴형태(failure mode)에 대한 파괴확률 또는 신뢰도 지수가 구조물의 성능이나 안전도를 나타내는 기준이 된다. 강도 설계법은 각 파괴형태에 대하여 하중계수와 저항계수에 대한 조합을 갖고 있으며 계수 조합의 선정은 대상 파괴에 대하여 규정

된 파괴확률에 적합하도록 이루어져야한다. 이 과정에서 하중 및 저항에 대한 통계적 모델이 필요하며 그 중 저항모델의 구성에 가장 큰 영향을 주는 것이 재료강도 및 단면치수의 불확실성에 대한 정확한 정보이다. 부재 저항강도의 불확실성을 고려하고 신뢰성을 확보하기위해 철근의 역학적 특성에 내재된 불확실성에 대한 엄밀한 평가가 필요하다 (Nowak 등, 2003).

그러나 현재 철근 및 콘크리트의 역학적 특성의 불확실성에 대한 국내 실험 및 연구 자료는 매우 부족한 실정으로 대부분의 연구가 외국의 자료에 의존하고 있는 상황이다. 또한 최근 설계기준의 개정작업을 위해 철근콘크리트 부재의 재료강도의 변동성에 대한 연구가 발표되었으나 철근의 통계적 불확실성에 대한 연구는 부족하다(김지상, 신정호, 2009). 따라서 이 논문에서는 우리나라에 적합한 설계기준

\*정회원 · 서경대학교 토목공학과 교수 (E-mail : zskim@skuniv.ac.kr)

\*\*정회원 · 교신저자 · 서경대학교 도시환경시스템공학과 석사과정 (E-mail : minikko@skuniv.ac.kr)

작성을 위한 기초단계로 국내 철근의 강도시험 자료에 근거한 정확한 철근의 역학적 특성의 통계적 변동성에 관한 분석을 수행하였다. 철근의 항복강도 자료를 바탕으로 철근의 확률분포를 확인하고 확률모델을 제시하였으며 공칭항복강도와 철근 제조회사, 그리고 철근의 직경에 대하여 각 변수가 항복강도의 변동성에 미치는 영향을 파악하였다. 이 논문의 결과는 실험의 다양성과 자료의 수가 제한된 국내 자료를 바탕으로 하여 설계기준에 직접 적용하는 것에는 한계가 있을 수 있으나 국내 고유의 철근강도 특성에 대한 확률모델을 개발하는 첫 단계로 의미가 있을 것으로 판단된다.

## 2. 자료의 수집 및 분석

### 2.1 현장시험자료

#### 2.1.1 자료의 수집 및 분석

현장시험자료는 2005년부터 2007년까지 국내에서 생산된 철근에 대하여 공인시험기관에서 이루어진 항복강도시험자료

를 수집하여 사용하였다. 공칭항복강도( $f_y$ ) 300 MPa 철근의 시험횟수가 100회 이상인 5개사를 선정하여 철근콘크리트용 봉강에 관한 인장시험결과를 분석하였다. 공칭항복강도 300 MPa인 철근에 대하여는 1567개, 공칭항복강도 500 MPa인 철근에 대하여는 123개의 자료를 수집 및 분석하였다. 수집한 현장시험자료를 표 1과 표 2에 강도, 제조회사 및 공칭 지름별로 나누어 정리하였다.

### 2.2 실내시험자료

철근의 역학적 특성은 항복점과 탄성계수로 대표할 수 있는데 수집할 수 있는 현장시험자료가 철근의 인장강도와 항복강도의 결과가 대부분이어서 철근의 탄성계수를 분석하기 위하여 응력-변형률 곡선을 얻기 위한 실내시험을 실시하였다. D16, D19, D25의 철근을 각각 3회 실험하였고, 국내회사 중 D사와 E사에서도 응력-변형률 자료를 받아 D사는 응력-변형률 실험을 3회 실시하였고, E사는 표준가공의 경우를 더하여 총 5회 실험하였다.

표 1. 철근의 항복강도( $f_y = 300$  MPa)

공칭지름 \ 제조사	A사	B사	C사	D사	E사	총 자료수	평균항복강도 (MPa)	표준편차 (MPa)
D10	8	29	6	17	5	65	327.46	3.55
D13	38	84	27	80	19	248	341.58	4.17
D16	51	94	25	70	36	276	353.84	3.03
D19	38	83	26	66	22	235	363.03	2.33
D22	39	66	13	62	28	208	370.25	2.08
D25	45	69	10	57	32	213	378.90	3.01
D29	43	42	3	76	26	190	392.21	4.70
D32	18	27	3	53	31	132	411.20	7.45
총자료수	281	494	113	481	199	1567		
평균항복강도(MPa)	368.28	363.72	358.27	369.81	373.50		367.25	
표준편차	20.56	20.91	18.85	22.85	23.16			21.85
실제항복강도/ 공칭항복강도	1.23	1.21	1.19	1.23	1.24	1.22		

표 2. 철근의 항복강도 ( $f_y = 500$  MPa)

공칭지름 \ 제조사	A사	B사	D사	E사	총 자료수	평균항복강도 (MPa)	표준편차 (MPa)
D10	1	0	0	0	1	506.00	0
D13	7	0	0	0	7	506.14	0.38
D16	7	3	0	0	10	511.20	1.93
D19	2	2	3	1	8	518.00	2.27
D22	9	0	2	2	13	522.85	0.99
D25	15	3	3	6	27	530.37	3.94
D29	9	7	2	7	25	543.76	4.78
D32	13	10	3	6	32	558.44	6.26
총자료수	63	25	13	22	123		
평균항복강도(MPa)	531.86	542.12	535.69	539.18		535.66	
표준편차	18.87	18.03	16.93	12.54			17.84
실제항복강도/ 공칭항복강도	1.06	1.08	1.07	1.08	1.075		

### 3. 철근 항복강도의 변동성

철근 콘크리트 휨 부재의 재료강도 변동성을 일으키는 변수 중에서 철근 항복강도의 변동성은 매우 중요하다. 철근의 강도는 철근콘크리트 부재의 저항특성에 중요한 변수로 작용하며, 이 중 인장에 대한 항복강도가 철근의 역학적 특성을 대표적으로 나타낸다. 철근의 항복강도는 상대적으로 변동성은 크지 않으나 국내 연구 자료가 거의 없는 실정이며 외국 연구 자료를 보면 철근의 항복강도에 영향을 주는 요소는 크게 다섯 가지로 재료 자체의 항복강도 편차, 철근 단면적에서의 편차, 하중속도에 의한 효과, 철근의 직경에 대

표 3. 국내철근 자료의 통계량

$f_y$	개수	편중계수	변동계수(%)
300 MPa	1567	1.22	5.90
500 MPa	123	1.07	3.31

한 효과, 항복이 생긴 곳의 변형의 효과 등에서 편차를 가진다고 보고되고 있다(Mirza, 1979).

이 논문에서는 참고문헌의 다섯 가지 변수를 참고하여 공칭항복강도와 철근제조회사, 그리고 철근의 직경, 이 세 가지의 변동성에 관하여 분석하고 확률밀도함수를 도출하였다.

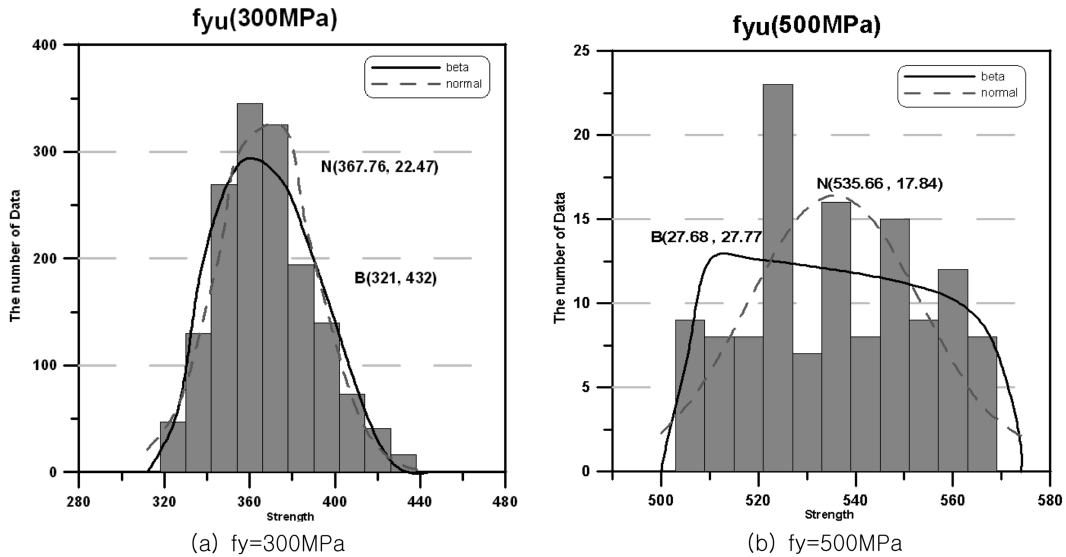


그림 1. 공칭항복강도 자료의 확률밀도함수

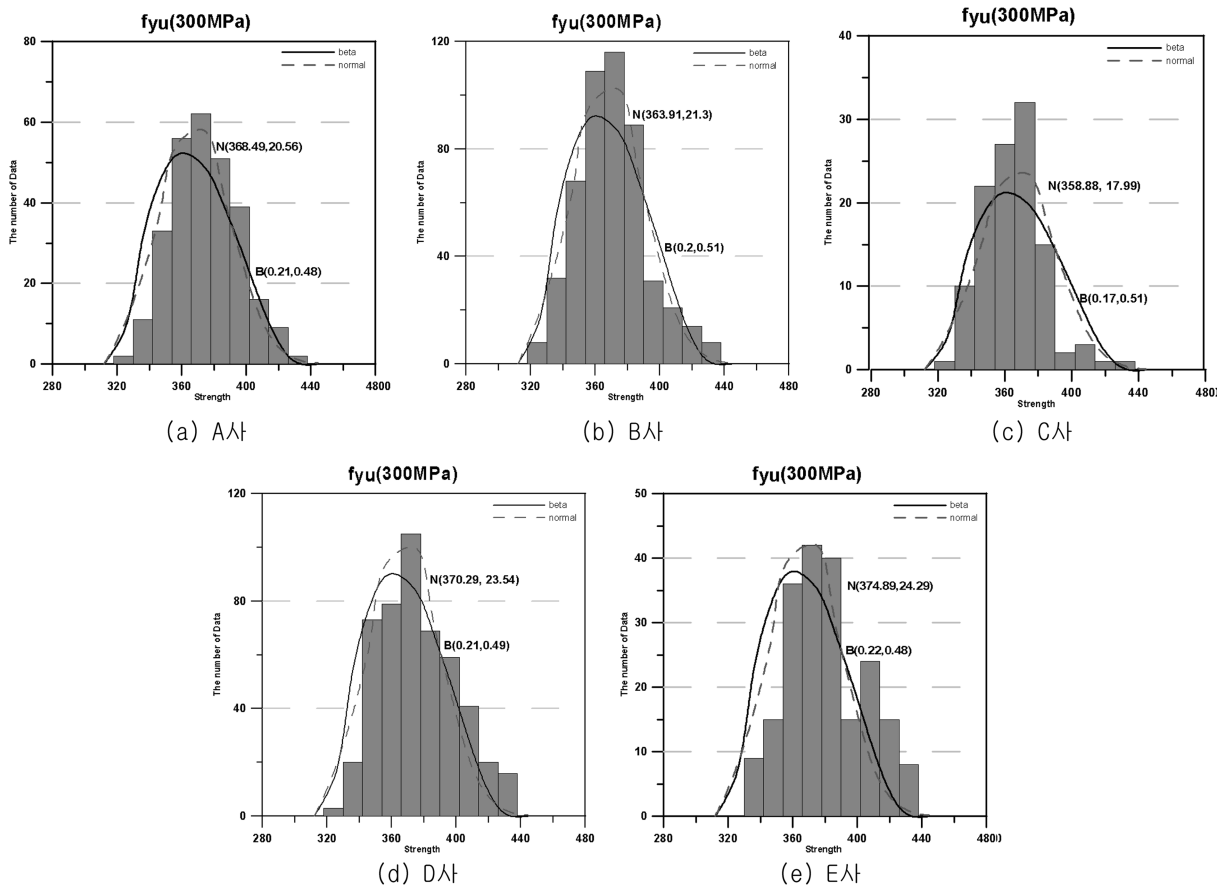


그림 2. 제조회사자료의 확률밀도함수

구자료(김상효 등, 1991)에서는 부재의 안전도 분석에서 일반적으로 저항강도가 낮은 부분(하부꼬리, lower tail)의 확률 특성을 가능한 정확하게 모형화 하는 것이 중요하고 작용하중에서는 상부(upper tail)에 대해 정확하게 모형화 하는 것이 중요하다고 있다. 따라서 이 연구에서도 확률밀도 함수의 상부가 아닌 하부꼬리(lower tail)의 일치정도에 따라 확률분포를 결정하였다.

### 3.1 공칭항복강도 수준의 영향

공칭항복강도 300 MPa 철근의 시험횟수가 100회 이상인 5개 업체의 총 1690개(300 MPa 1567개, 500 MPa 123개)의 시험성적서 자료를 바탕으로 공칭항복강도별로 분류하여 실제 항복강도에 대하여 확률 모델을 제시하였다. 그림 1의 (a)와 (b)는 공칭항복강도 300 MPa 자료와 500 MPa 자료의 히스토그램과 모멘트 법으로 매개변수를 구한 베타분포 확률밀도함수와 정규분포 확률밀도 함수를 도시한 것이다. 공칭항복강도 500 MPa의 경우 상대적으로 자료수가 많지 않아 히스토그램의 모양이 고르지 않았다. 그림 1의 (a)와 (b)에서 보면 상부부분(upper tail)에서 히스토그램과 기존의 확률밀도함수를 비교하여 볼 때 상부부분에서 정규분포와 더 비슷해 보이거나 하부꼬리부분(lower tail)을 보면 Beta 분포와 더 유사한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 철근의 확률적 특성에는 상부부분(upper tail) 보다 하부부분(lower tail)이 중요하므로 공칭항복강도를 모델링하는 확률분포는 Beta 분포가 적합한 것으로 보인다. 또한 표 3에서 편중계수는 항복강도와 공칭항복강도의 비( $f_{yul}/f_u$ )의 평균값을 나타내며 공칭항복강도 300 MPa에서의 변동계수는 5.9% 이고 공칭항복강도 500 MPa에서의 변동계수는 3.31%로 확인되었다. 이는 변동계수가 4~7%가 일반적이라는 외국의 연구결과(Mirza, 1979)와 유사한 결과이다.

### 3.2 제조회사의 영향

앞의 표 1과 표 2에서 보면 공칭항복강도 500 MPa의 시험성적서 자료 중 A사의 자료가 50%이상을 차지하고 있어 다양성이 작기 때문에 공칭항복강도 300 MPa의 시험성적서 자료 1567개를 가지고 제조회사별로 나누어 분석하였다. 표 4는 공칭항복강도 300 MPa 자료를 제조회사별로 나누어 얻은 자료의 통계량이다. 변동계수와 편중계수는 회사별로 비슷한 값을 가지고 있는 것으로 나타났다.

제조회사별로 변동계수는 5.2~6.2%의 값을 가지고 있었으며 이 중 E사의 변동계수가 6.20%로 제일 크고 C사의 변동계수가 5.26%로 제일 작은 값을 가지고 있었다. 전체 공칭항복강도 300 MPa의 자료의 변동계수가 5.9%이었으므로 평균적으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 공칭항복강도 기준의 확률분포모델이 제조회사의 영향을 받지 않는 것으로 판단되었으며 이 결과는 그림 2(a)~(e)에 도시하였다.

표 5. 300 MPa 자료의 통계량 (지름별)

종류	D10	D13	D16	D19	D22	D25	D29	D32
개수	65	248	276	235	208	213	190	132
평균(MPa)	327.46	341.58	353.84	363.03	370.25	378.90	392.21	411.20
변동계수(%)	1.08	1.22	0.86	0.06	0.56	0.79	1.12	1.81

표 4. 300 MPa 자료의 통계량 (회사별)

회사	A사	B사	C사	D사	E사
개수	280	494	113	481	199
편중계수	1.23	1.21	1.19	1.24	1.25
변동계수 (%)	5.50	5.75	5.26	6.18	6.20

그림 2의 (a)~(e)는 제조회사별 철근자료의 히스토그램과 확률밀도 함수이다. 히스토그램과 비교하여보면 공칭항복강도별로 나누었을 때와 비슷하게 상부부분에서 정규 분포와 더 비슷해 보이거나 하부꼬리부분을 보면 베타분포와 더 유사한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 제조회사별로 나누었을 때 또한 확률분포는 베타분포라고 할 수 있으며 제조회사는 확률분포특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

### 3.3 철근 지름의 영향

철근 지름의 영향 분석 또한 공칭항복강도 300 MPa인 철근 자료를 이용하였다. 이중 이형철근으로 D10, D13, D16, D19, D22, D25, D29, D32의 8가지 종류의 철근으로 분류하여 분석하였다. 표 5에는 공칭항복강도 300 MPa인 철근 자료를 규격별로 나누어 평균과 변동계수를 정리하였고, 그림 3에 도시하였다.

철근의 지름별 변동계수는 평균 1.02%로 공칭항복강도 300 MPa 전체 자료 변동계수에 비하여 매우 작았으며 D16, D19, D22, D25 철근의 변동계수는 1%를 넘지 않았다. 특히 D19 철근의 변동계수는 0.06으로 매우 작은 값을 나타냈다. 국내문헌(김상효 등, 1991)에서는 공칭항복강도 300 MPa는 변동계수가 0.06, 공칭항복강도 400 MPa는 0.05로 조사되었고 외국문헌(Mirza, 1979)에서도 일반적으로 단일 공장에서 생산된 철근만을 대상으로 실험한 경우에는 변동계수가 매우 작고, 여러 공장에서 생산된 제품을 철근

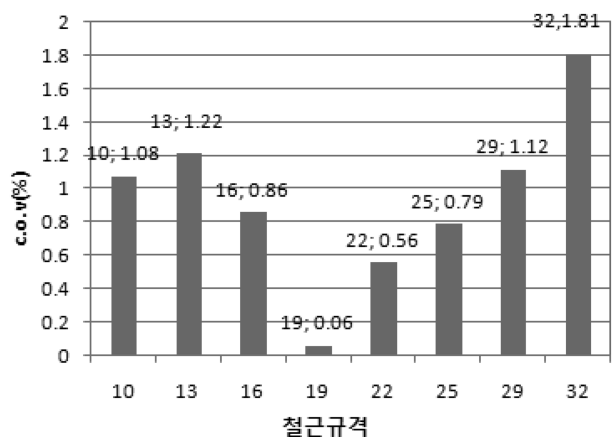


그림 3. 철근규격-변동계수

표 6. 철근 항복강도 확률분포

연구자	확률분포
김상효 등 1989	정규
Mirza and Macgregor 1979	베타
Israel 등 1987	대수정규

규격별로 분류한 변동계수가 전체로 통합한 것보다 작은 값이라고 하고 있다.

3.4 철근 항복강도 확률모델의 제안

국내의 문헌을 살펴보면 철근의 분포를 정규분포(김상효 등, 1989) 또는 대수정규분포(Israel 등, 1987), 베타분포(Mirza MacGregor, 1979) 등으로 정의하고 있으며 이는 표 6에 정리되어있다.

외국 문헌자료에서는 편중계수가 1.12~1.22의 범위에 있고 변동계수는 9~11%정도로 나타났으며 국내 문헌자료는 편중계수가 1.07~1.18의 범위에 있고 변동계수는 5~6%로 변동성이 작은 편이었다. 국내문헌자료(김상효 등, 1989)의 경우 2개회사 자료를 대상으로 했기 때문에 변동계수가 작게 나온 것으로 판단된다. 국내문헌자료를 이 논문의 자료와 비교하면 편중계수는 1.07~1.25의 범위로 좀 더 넓게 분포하고 있고 변동계수는 0.6~6.5%로 작게 나왔다. 국내문헌자료는 2개회사이고 이 논문의 자료는 5개회사를 대상으로 하였기 때문에 이 연구의 결과가 좀 더 신뢰성을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

위에서 국내 5개회사의 철근자료를 공칭항복강도별, 제조회사별, 지름별로 나누어 그린 히스토그램과 그 자료의 평균 표준편차를 이용하여 그린 분포곡선을 비교분석한 결과 우리나라의 철근자료는 베타분포에 매우 근접한 것으로 나타났다. 그림 4의 (a)와 (b)는 자료를 정규분포확률지에 정규분포와 베타분포의 누적분포함수를 비교한 것이다. 위에 그림 1, 그림 2에서 볼 수 있듯이 히스토그램과 비교할 때 중앙부에서는 정규분포와 비슷한 모습을 보이지만 끝부분에서는 베타분포가 더 적합한 것을 알 수 있다. 베타분포의 확률밀도 함수는 식 (1)과 식 (2)로 표현되는데 식 (1)의  $f_{yu}$ 는

표 7. 철근 확률분포모델에 대한  $\chi^2$ -test 결과

$f_y$	분포	a	b	q	r	p
300 MPa	Beta	1.07	1.44	2.08	2.86	0.225
500 MPa	Beta	1.01	1.14	0.99	1.11	0.115

321~426 MPa의 범위이고, 식 (2)의  $f_{yu}$ 는 506~569 MPa의 범위로 각각 공칭항복강도 300 MPa 및 500 MPa 철근에 대한 확률분포모델이다. 확률분포 모델의 검정을 위해  $\chi^2$ -test를 통해 분포의 적합도 검정을 하였으며 그 결과는 표 7에 나타내었고 p-value가 유의수준 0.05이상으로 베타분포가 더 적합한 것을 확인할 수 있다. 정규확률지 도시 및 적합도 검정결과 철근의 확률분포는 베타분포가 더 적합한 것으로 확인된다.

$$PDF = \frac{1}{3} \left( \frac{(f_{yu} - 1.07)^{1.08}}{0.0198} \right) \left( \frac{(1.44 - f_{yu})^{1.86}}{0.0198} \right) \quad (1)$$

$$PDF = \frac{1}{3} \left( \frac{(f_{yu} - 1.01)^{-0.01}}{0.106} \right) \left( \frac{(1.14 - f_{yu})^{0.11}}{0.106} \right) \quad (2)$$

4. 결 론

- 2005년부터 2007년까지 국내에서 생산된 철근의 시험자료 중 공칭항복강도  $f_y$ 가 300 MPa인 자료수가 100개 이상인 5개사를 선정하여 공칭항복강도 300 MPa인 철근에 대하여는 1567개, 공칭항복강도 500 MPa인 철근에 대하여는 123개의 자료를 수집 및 분석하였다.
- 공칭항복강도로 분류한 경우 철근의 확률분포는 Beta 분포로 나타났으며 변동계수는 공칭항복강도 300 MPa인 철근은 5.9%이고 공칭항복강도 500 MPa인 철근에서의 변동계수는 3.31%로 확인되었다. 제조회사로 분류한 경우 철근의 확률분포는 평균부분에는 정규분포가 더 잘 맞는 것으로 보여지나 하부 꼬리 부분에서는 Beta 분포가 더 적합한 것으로 로 확인되었다. 지름으로 분류한 경우 변동계수는 평균 1.02%로 공칭항복강도 300MPa 전체 자료 변동계수에 비하여 매우 작았으며 D16, D19, D22, D25

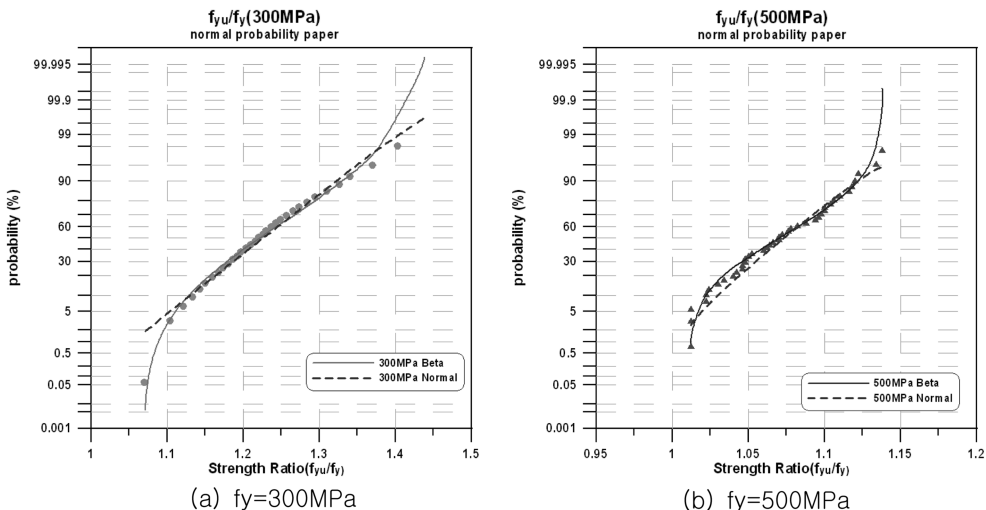


그림 4.공칭항복강도 자료의 정규분포 확률지

철근의 변동계수는 1%를 넘지 않았다.

3. 제조회사별로 나누어서 비교하였을 때 변동계수의 차이가 작게 나타나며 회사 규모는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 지름별로 나누어 비교하였을 때 D16, D19, D22, D25철근은 다른 규격의 철근보다 생산량이 좀 더 많아 변동계수도 작은 값으로 나타난 것으로 보인다. 여러 공장에서 생산된 제품을 철근 규격별로 분류한 변동계수가 전체로 통합한 것보다 매우 작은 값인 것을 확인하였다
4. 현재 이 논문에서 사용된 국내 철근자료는 외국의 자료에 비교하여 자료의 개수가 적은 편이므로, 더 많은 자료를 바탕으로 확률모델을 제시하고 검증하면 신뢰도가 높은 국내 철근 확률모델을 확립할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 “성능중심의 건설기준 표준화 연구단”에 의해 수행되는 2006건설교통 R&D 정책 및 인프라 사업(06-기반구축-A-01)의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

김상효, 배규웅, 박홍석(1991) 철근콘크리트 부재강도의 확률적

특성 분석. 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, 제3권 4호, pp. 117-123.

김상효, 조형근, 배규웅, 박홍석(1989) 구조물의 신뢰성에 관한 연구-고정하중·적재하중 및 풍하중하에서의 R.C.건물. 한국건설기술연구원 결과보고서, 한국건설기술연구원.

김지상, 신정호(2009) 통계적 분산을 고려한 콘크리트의 역학적 특성. 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, 제21권 6호, pp. 791-798.

김지상, 신정호, 문재흠, 김주형(2009) 철근콘크리트용 봉강의 역학적 성질의 통계적 특성. 2009년 봄학술대회논문집, 한국콘크리트학회, pp. 429-430.

백민희, 신정호, 김지상, 문재흠(2010) 공칭강도에 따른 철근콘크리트용 봉강의 역학적 특성. 2010년 봄학술대회논문집, 한국콘크리트학회, pp. 311-312.

신정호(2009) 콘크리트와 철근의 역학적 특성의 통계적 분석. 석사학위논문, 서경대학교.

한국콘크리트학회(2007) 콘크리트구조설계기준, 기문당.

Israel, M., Elingwood, B., and Corotis, R. (1987) Reliability-based code formulations for reinforced concrete buildings, *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 10, pp. 2235-2252.

Mirza, S.A. and MacGregor, J.G. (1979) Variability of mechanical properties of reinforcing bars, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 105, No. ST5, pp. 921-937.

Nowak, A.S. and Szerszen, M.M. (2003) Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 1-Statistical Model for Resistance, *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 3, pp. 377-382.

(접수일: 2010.10.29/심사일: 2010.12.13/심사완료일: 2011.1.31)