

# Bayesian parameter estimation을 적용한 RC 접합부 전단거동의 주요영향 요인 결정

## Determination of Key Influence Parameters on RC Joint Shear Behavior Using the Bayesian Parameter Estimation

김 재 흥\* · 양 종 호\*\* · 임 덕 기\*\*\*

Kim, Jaehong · Yang, Jongho · Im, Duk Ki

### 요 약

준정적 횡하중을 재하 받는 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 전단강도에 대한 주요 영향요인을 Bayesian parameter estimation의 신뢰성 이론 접목을 통해 검토하였다. 이와 같은 연구 scope의 수행을 위해 철근 콘크리트 보-기둥의 실험 database가 구축되었다. 실험 database는 일정한 criteria를 적용하여 구축되었으며, 포함된 시편들은 최종적으로 접합부 내의 전단파괴가 지배하는 경우들이다. 포함된 시편들의 상재는 ACI (American Concrete Institute) 352R-02를 기준으로 평가되어졌다. 보-기둥 접합부의 전단강도에 영향 요인을 편중되지 않게 평가하고자, Bayesian parameter estimation의 신뢰성 이론을 적용하였다. Bayesian parameter estimation의 적용을 통해 전단강도에 영향이 적은 변수 (not informative parameter)를 순차적으로 제거 (stepwise removal process)함으로 주요 영향요인의 우선 순위를 확인할 수 있었다. 검토된 8개의 변수들 중에서, 횡하중을 재하 받는 철근콘크리트 보-기둥의 전단강도는 주로 콘크리트 압축강도, in-plane geometry, 종방향 보의 주철근 그리고 접합부 내의 구속철근 순으로 영향을 줄 수 있었다.

**keywords** : 보-기둥 접합부, 실험 database, Bayesian parameter estimation

### 1. 서 론

횡하중 (지진하중, 바람하중 등)을 재하 받는 철근콘크리트 구조물의 경우, 휨이 구조물의 거동을 지배하면 연성적인 거동을 유지하는 반면, 전단이 구조물의 거동을 지배하는 경우 취성적인 거동이 나타난다. 따라서 취성적인 파괴양상인 전단파괴가 방지되도록 철근콘크리트 구조물의 설계가 이루어져야 한다. 특히 철근 콘크리트 구조물 중 횡하중을 재하 받는 보-기둥 접합부는 전단에 대해 취약하다고 할 수 있다. 그러므로, 전단거동에 영향을 주로 미치는 요인들에 대한 명확한 이해 확립이 요구되어진다. 그러나, 현재까지 진행된 연구결과들을 통해 전단강도에 영향을 미치는 요인들에 대한 의견일치가 이루어졌다고 볼 수 없다. 본 연구에서는 실험 database의 구축 및 신뢰성 이론의 접목을 통하여, 횡하중을 재하 받는 보-기둥 접합부의 전단 강도 영향요인에 대한 정량적인 평가를 실시하였다.

\* 삼성물산 건설부문 · 토목기술실 교량구조파트 과장 jaehong71.kim@samsung.com

\*\* 삼성물산 건설부문 · 토목기술실 교량구조파트 부장(파트장) yjhg@samsung.com

\*\*\* 삼성물산(주) 건설부문 도로/철도팀 부장 dk.im@samsung.com

## 2. 실험 Database 구축

실험 database의 구축을 위해, 미국, 뉴질랜드, 일본 및 한국에서 발행된 논문 및 보고서를 참조하였다. 실험 database 구축을 위해 적용된 criteria는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 재하 하중 : 준정적 반복 하중 (Quasi static cyclic lateral loading)
- 파괴 모드 : 보의 주철근의 항복 이후 접합부내 전단파괴 (BJ)  
보의 주철근의 항복 이전 접합부내 전단파괴 (J)
- 주철근 정착방법 : 일반적인 anchorage type (headed bar 및 anchorage plate가 있는 경우 포함 않됨)  
In-plane geometry에 따라, 보와 기둥의 주철근이 통과하거나 혹은 접합부내에서 90도 갈고리에 의해 정착이 되어짐.
- 철근 : 주철근이 이형철근 (deformed bar)인 경우
- 실험체 scale : 실험체의 scale이 최소 1/3 이상인 경우

구축된 실험 database는 in-plane geometry에 따라 interior, exterior 그리고 knee connections으로 분류되었다 (그림 1). Kim and LaFave (2009)에서 구축된 실험 database에 대한 상세한 설명이 제공되어진다.

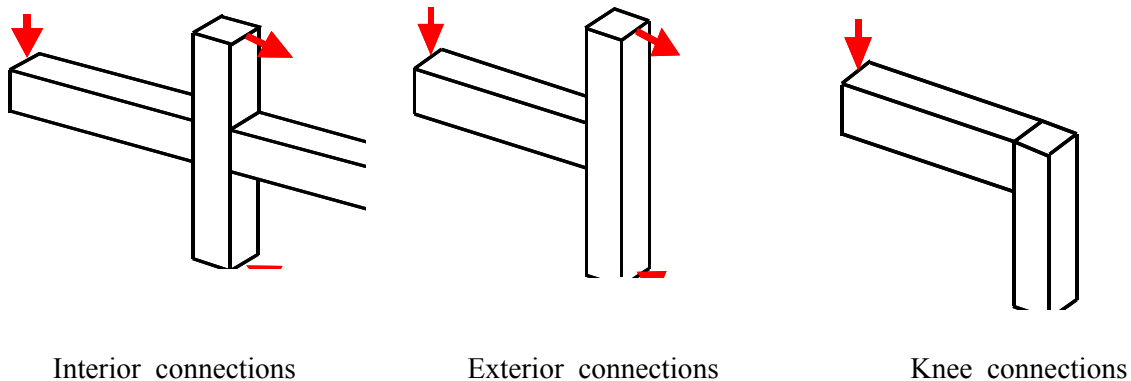


그림 1 In-plane geometry에 따른 보-기둥 접합부의 분류

준정적 횡하중을 재하 받는 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 free body diagram을 고려할 때, 대각선 방향으로 압축 스트럿 (strut)이 형성이 됨을 알 수 있다. 즉 접합부 내에서 작용하는 전단력은 콘크리트 스트럿 (strut)과 트러스 (truss)에 의해 저항 메커니즘 (resistance mechanism)이 형성된다. 작용하는 전단하중이 전단강도를 초과하는 경우, 전단파괴가 시작이 되며, 이는 out-of-plane 방향으로 접합부의 팽창을 야기한다. 따라서, 접합부내 적절하게 배근되지 않은 횡방향 철근에 의해 전단강도의 저하를 초래할 수 있다. Kim and LaFave (2007)은 횡방향 철근의 양과 전단강도와의 상관관계를 검토하였다. 그림 2는 횡방향 철근의 양에 대한 전단강도의 영향을 표시하였다. 가로축은 접합부 내에 배근된 철근의 양을 ACI 352R-02의 비 (Ash, ratio)로 표현이 되었으며, 세로축은 실험에 의한 전단응력을 콘크리트 압축강도로 normalization을 하였다. 접합부 내에 배근된 철근의 양이 ACI 352R-02 규정의 70% 미만인 경우, 횡방향 철근의 양에 의해 전단강도가 저하됨을 알 수 있다. 접합부 내에 횡방향 철근의 양이 ACI 352R-02의 규정보다 70%이상 실험체 경우는 interior, exterior, knee connection이 각각 78, 48, 13개이다.

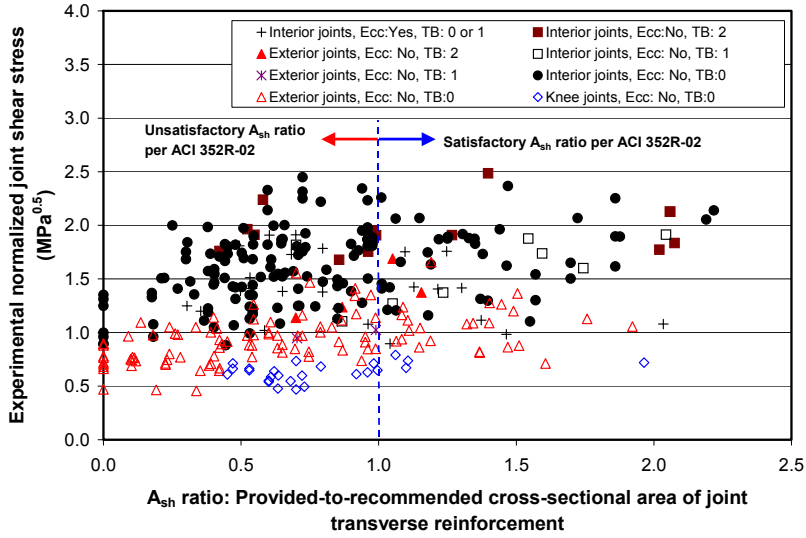


그림 2 실험전단응력 vs. Ash ratio

### 3. Bayesian Parameter Estimation Method

최근 들어 신뢰성 이론은 철근콘크리트 부재의 전단강도 예측에 접목되어 사용되어지고 있다. Gardoni et al. (2002)는 실험 자료를 기초로 하여 Bayesian methodology를 접목한 철근콘크리트 기둥의 전단강도를 예측하는 procedure를 제안하였다. 전단강도 ( $C$ )는 아래의 형태로 표현을 할 수 있다.

$$C(x, \theta) = c_d(x) + \gamma(x, \theta) + \sigma\epsilon \quad (1)$$

$x$ 는 실험 input parameter vector이고,  $\theta = (\theta, \sigma)$ 는 모델과 실험결과의 오차를 줄이기 위한 unknown model parameters,  $c_d(x)$ 는 deterministic model,  $\gamma(x, \theta)$ 는 bias correction term,  $\epsilon$ 는 zero mean과 unit variance를 가지고 있는 normal random variable, 그리고  $\sigma$ 는 오차 수정 이후 여전히 존재하는 model error를 나타낸다. 실제로 bias-correction term의 형태를 알 수 없으므로, 아래의 식 2와 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma(x, \theta) = \sum_{i=1}^p \theta_i h_i(x) \quad (2)$$

식 (1)은 "homoskedsticity"가정 (model error의 variance는 input parameter  $x$ 에 독립적)을 만족해야 한다. Gardoni et al. (2002)과 Song et al. (2006)은 이러한 조건을 만족시키기 위해 natural logarithms을 적용하였으며, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln [C(x, \theta)] = \ln [c_d(x)] + \sum_{i=1}^p \theta_i h_i(x) + \sigma\epsilon \quad (3)$$

Bayesian parameter estimation이 unknown parameter를 발견하기 위해 적용되어졌다. Bayesian 방법을 적용하는 경우 parameter의 prior 분포가 실험data를 근거로 posterior distribution으로 update된다.

#### 4. 진단강도 주요 영향요인 도출

보-기둥 접합부의 진단강도 주요 영향요인을 도출하기 위해 8개의 변수들이 사용되어졌다. 선택된 변수들은 문헌조사를 통해 지속적으로 issue가 되었던 변수들을 선택하였다 (Kim and LaFave 2009). Table 1에서 보여지는 것과 같이, 8개의 변수를 모두 포함하는 경우의 unbiased model의 mean of  $\sigma$ 는 0.148 (분산의 정도)이다. Table 1은 진단강도에 영향이 적은 변수들부터 하나씩 제거하며, 분산의 정도를 정량화한 것이다. 변수 JI(접합부내 횡방향 철근)가 제거된 이후 분산이 급격히 증가함을 알 수 있다.

Table 1: 보-기둥 접합부 진단강도 변수 제거 순서 (Stepwise removal process)

	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_c'$	O	O	O	O	O	O	O	O
JP	O	O	O	O	O	O	O	X
BI	O	O	O	O	O	O	X	X
JI	O	O	O	O	O	X	X	X
$h_b/h_c$	O	O	O	O	X	X	X	X
$A_{sh,pro}/A_{sh,req}$	O	O	O	X	X	X	X	X
$b_b/b_c$	O	O	X	X	X	X	X	X
$s_{pro}/s_{req}$	O	X	X	X	X	X	X	X
mean of $\sigma$	0.148	0.147	0.147	0.149	0.151	0.156	0.190	0.366

#### 5. 토의 및 결론

횡하중을 재하 받는 보-기둥의 경우, 취성적인 파괴를 유도하는 진단에 대한 명확한 이해가 요구되어진다. 구축된 실험 database와 Bayesian parameter estimation의 접목을 통해 진단강도에 영향을 주는 요인을 규명해 보았다. Out-of-plane geometry의 영향 및 보와 기둥의 편심을 고려하지 않는 경우, 콘크리트 압축강도가 가장 중요한 요인임을 알 수 있었다. 또한 in-plane geometry, 보와 주철근, 접합부 내의 횡방향 철근이 진단강도를 결정함에 있어서 주요 영향요인이라 할 수 있다.

#### 참고문헌

- ACI-ASCE Committee 352 (2002) Recommendations for design of beam-column joints in monolithic reinforced concrete structures (ACI 352R-02) American Concrete Institute, Farmington Hills, MI
- Kim, J. and LaFave, J.M. (2007) Key influence parameters for the joint shear behavior of reinforced concrete (RC) beam-column connections, Engineering Structures, 29(10), 2523-2539
- Kim, J. and LaFave, J.M. (2009) Joint shear behavior of reinforced concrete beam-column connections subjected to seismic lateral loading NSEL Report 20, University of Illinois of Urbana-Champaign, IL
- Gardoni, P., Kiureghian, A.D., and Mosalam, K.M. (2002) Probabilistic capacity models and fragility for reinforced concrete columns based on experimental observations, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 128(10), 1024-1038
- Song, J., Kang, W.H., Kim, K.S., and Jung, S. (2007) Probabilistic shear strength models for reinforced concrete beams by Bayesian updating on experimental observations. 5th Conference on Computational Stochastic Mechanics, Rodos, Greece, 623-632