

원형 철근콘크리트 교각의 내진성능 영향인자에 관한 연구

A study on Influence Parameter of Seismic Performance for Circular RC Bridge Piers

이대형* 박창규** 김현준*** 정영수****

Lee, Dae Hyoung Park, Chang Kyu Kim, Hyun Jun Chung, Young Soo

This paper presents evaluation of seismic design code for AASHTO, Eurocode 8, NZS 3101, and ATC-32 and influence of parameter such as confinement steel ratio, axial force ratio, aspect ratio and longitudinal steel ratio. These seismic design code prescribe confinement steel ratio for appropriate seismic performance which is considered various design parameter. But there is doubt that these parameters are considered rationally in seismic design code.

The object of this research is rational evaluation of seismic performance by analysis of existing related experimental research. According to this research, most influence parameter of seismic performance is axial force ratio.

1. 서론

현행 도로교설계기준의 내진설계에 대한 기본 개념은 지진시 인명피해를 최소화하고 구조물의 부분적인 피해는 허용하나 완전붕괴는 허용하지 않으며 기본적인 기능은 발휘할 수 있도록 하는 것이다. 즉, 붕괴를 방지하기 위해서는 구조물이 취성이 아닌 연성거동을 하여야 한다. 지진발생시 도로교의 연성거동 개념은 교량의 상부구조는 탄성거동을 하고 교량하부구조에 소성힌지가 형성되어 비탄성거동을 하도록 하는 것이다. 콘크리트 교각의 경우에는 전단파괴나 큰 강도의 손실 없이 상대적으로 큰 연성거동이 이루어지도록 하기 위해서는 콘크리트 교각의 소성힌지구간에 적절한 심부구속철근을 배근하여야 한다. 이러한 심부구속철근은 주철근의 좌굴을 방지하고 교각전체의 전단파괴를 방지하여 연성을 확보하게 한다. 따라서 각국은 소성힌지 구간에서의 심부구속철근량에 대한 규정을 명시하고 있다. 우리나라의 경우 1992년 도로교표준시방서에 내진설계편이 도입

* 정회원 · 경도대학 토목공학과, 교수

** 학생회원 · 중앙대학교 토목공학과, 박사수료

*** 학생회원 · 중앙대학교 토목공학과, 석사과정

**** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과, 교수

된 이후, 철근콘크리트 교각의 심부구속철근의 과도한 배근으로 인하여 시공상에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이러한 원인으로서는 기존의 연구자^{1)~2)}들의 지적과 같이 심부구속철근량에 대한 현행 국내기준이 너무 과도하게 규정되어 있으며, 이는 별다른 검증 없이 외국 강진지역의 규정을 인용한 결과로 사료된다.

본 연구의 목적은 국내 도로교설계기준에서 제시하는 심부구속철근비의 기준이 철근의 항복강도에 대한 콘크리트의 설계기준강도 비와 심부구속콘크리트의 단면적에 대한 교각의 총 단면적의 비로만 규정되어 내진성능에 영향을 미치는 영향인자를 추가로 도출하고자 하는 것이다. 본 연구를 위해서 기존 연구자들의 실험결과와 각국의 요구 구속철근비와 비교하였다. 본 연구에서는 심부구속철근량의 산정에 큰 영향을 미치는 인자들인 축하중비, 형상비, 재료강도비 그리고 주철근비가 내진 연성능력에 미치는 영향을 국내 실험연구결과를 바탕으로 정량적으로 평가 분석하였다. 이러한 연구결과를 이용하여 보다 합리적인 내진 심부구속철근비에 관한 기준을 제시하고자 하였다.

2. 국내·외 내진규정 분석

주요 각국의 내진규정에서 규정하고 있는 심부구속철근량의 산정식을 Table 1에 비교정리 하였으며, 심부구속철근량 산정식에 사용되는 변수를 다음 Table 2와 같이 정리하였다. Table 2에서 기호 “○”는 고려하고 있는 변수를 나타내며, 이 중에서 콘크리트 압축강도, 횡방향철근의 항복강도 및 강도, 심부콘크리트의 치수 및 비율 등은 모든 설계기준에서 공통적으로 고려하고 있으나, 축하중비는 도로교설계기준(AASHTO 등)을 제외한 모든 식에서 적용하고 있으며, 축방향 철근비는 ATC-32와 NZS3101에서만 고려하고 있다. 그러나 도로교설계기준(AASHTO 등)에서는 콘크리트의 압축강도 및 횡방향철근의 강도와 심부콘크리트의 단면적비 만을 고려하고 있다. 특히, 기존의 연구결과에 따르면 축하중비는 교각의 내진성능에 상당한 영향을 미치는 것으로 평가하였으나, 도로교설계기준 등에서는 이러한 인자를 전혀 고려하지 않고 있는 실정이다.

한편, 우리나라에서 실제 시공되는 철근콘크리트 교각에 맞추어 심부구속 철근량 산정식의 변수를 재분석 하면 다음과 같다. 한국도로공사, 중앙대, 영남대, 그리고 서울대가 공동 연구한 “고속도로 기존 교량의 유형별 내진 성능 평가를 위한 실험적 연구” 보고서⁴⁾에 따르면 우리나라 고속도로 상의 교량 교각에서 원형단면의 경우 직경 D 는 1.8m~3.5m, 높이 H 는 3m~13m 정도로 되어 있다. 그리고 교각에 작용하는 축방향력은 $f_{ck} \cdot A_g$ 의 5~10% 정도로 낮은 수준이며, 축방향 철근비의 경우 규정상 1~8%를 사용하도록 하나 직경 D29~D32 철근에 철근비 0.53~2.04%로 배근되어 있다. 이상의 현실을 고려하여 각국의 심부구속철근량 산정식에 실질적으로 적용되고 있는 변수를 분석해보면 다음 Table 2의 기호“●”와 같다. 대부분의 설계식에서 콘크리트와 심부구속철근의 재료강도만을 사용하게 되며, 축력비는 ATC-32에서만 적용이 되며, 특히 NZS3101는 주철근 좌굴을 방지하기 위한 조건으로 주철근에 대한 변수를 사용하게 된다.

전술한 바와 같이 각기 다른 내진기준을 비교하기 위해 원형콘크리트 교각의 소요 구속철근비를 변수별로 비교하였다. Fig. 1은 축하중비에 따른 요구 구속철근량을 보이고 있다. 콘크리트 압축강도 $f_{ck} = 24MPa$, 주철근 항복강도 $f_y = 300MPa$, $f_y = 300MPa$, 주철근비 $\rho_l = 0.01(40D19)$ 인 원형단면의 교각(직경 $D = 1,200\text{ mm}$, $D' = 1,060\text{ mm}$)인 경우 각국의 요구구속철근비를 나타내고 있다.

Table 1 The required volumetric ratio of transverse steel of each country

| Design code | The required volumetric ratio of transverse steel | Remark |
|-------------------------------------|---|---|
| KHBD (2000) AASHTO (2002) | $\rho_s = \text{Max} \left[0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y}, 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y} \right]$ | CSA Standard ⁸ (1994) ACI 318-02(2002) |
| ATC-32 ¹⁰⁾ (1996) | $\rho_s = 0.16 \frac{f'_{ce}}{f_{ye}} \left(0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f'_{ce} A_g} \right) + 0.13(\rho_t - 0.01)$ $\rho_s = \text{Max} \left[0.16 \frac{f'_{ce}}{f_{ye}} \left(0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f'_{ce} A_g} \right) + 0.13(\rho_t - 0.01), 0.0002n_b \right]$ | in case H/D ≤ 4 in case H/D > 4 |
| Caltrans ¹¹⁾ (2004) | $\rho_s = \text{Max} \left[0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y}, 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} \left(0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f'_c A_g} \right) \right]$ $\rho_s = \text{Max} \left[0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y}, 0.12 \frac{f'_c}{f_y} \left(0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f'_c A_g} \right) \right]$ | D ≤ 900 mm D > 900 mm |
| Eurocode 8 ¹²⁾ (1996) | $\rho_w = \omega_{wd,c} \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$ $\omega_{wd,c} = 1.4 \times \left\{ 1.74 \frac{A_c}{A_{cc}} (0.009\mu_c + 0.17)n_k - 0.07 \right\} \geq \omega_{w,min}$ | Limited ductile : $\mu_c = 7$ Ductile : $\mu_c = 13$ |
| NZS 3101 ¹³⁾ (1995) | $\rho_s = 1.4 \times \left[\frac{\{(\phi_u/\phi_y) - 33\rho_t m + 22\} A_g f'_c N^*}{111 A_c f_{yt} \phi f'_c A_g} \right] - 0.0084$ $\rho_{s,min} = \frac{A_{st} f_y}{110d' f_{yt} d_b}$ | $\phi_u/\phi_y = 20$ $\rho_t m \leq 0.4$ $m = f_y/0.85f'_c$ |

Table 2 Parameter of the required volumetric ratio of transverse steel of each design code

| Parameters | KHBD | AASHTO ACI318-02 | CSA Standard | ATC-32 | Caltrans | Eurocode 8 | NZS 3101 |
|------------------------------|--------|---------------------|-----------------|--------|----------|------------|-------------|
| f'_c | ○● | ○● | ○● | ○● | ○● | ○● | ○ |
| f_{yh} | ○● | ○● | ○● | ○● | ○● | ○● | ○● |
| A_g/A_c | ○ | ○ | ○ | | ○● | ○ | ○● |
| Axial force ratio | | | | ○● | ○ | ○ | ○ |
| Longitudinal steel | Ratio | | | ○● | | | ○ |
| | f_y | | | | | | ○● |
| | Area | | | | | | ● |
| | Number | | | | ● | | |
| Required curvature ductility | | | | | | ○ | ○ |

Caltrans는 축하중비 40%이하에서는 AASHTO의 심부구속철근비 산정식과 동일하게 되어 축하중비의 영향을 전혀 반영하지 못한다. ATC-32는 심부구속철근비는 축하중이 증가함에 따라 일정한 비율로 증가한다. 여기서 다른 설계기준과는 달리 콘크리트의 압축강도 및 철근의 강도를 설계기준 강도가 아닌 기대되는 실제 값을 사용하게 되어 $f'_{ce} = 1.3f'_c$ 를 $f_{ye} = 1.1f_y$ 를 적용하는 것이 특징이다. Eurocode8의 심부구속철근비는 축하중비가 25% 이하에서는 최소철근비($\omega_{w,min}$) 규정에 의해, 25% 이상에서는 심부구속철근비 규정식에 의해서 산출된다. NZS3101의 심부구속철근비는 축하중비가 25% 이하에서는 주철근의 좌굴을 방지하기 위한 최소규정식($\rho_{s,min}$)을 적용해야하며 축하중비가 25%이상에서 축하중비에 따라 선형적으로 구속철근비를 증가시키도록 규정하고 있다.

또한, Fig. 2에서와 같이 주철근비의 경우 ATC-32와 NZS3101에서 설계규정에 고려하고 있으

며 ATC-32의 경우에는 주철근비가 증가할수록 많은 심부구속철근을 요구하고 있다. 특히, NZS3101의 경우에는 주철근비가 증가할 수록 심부구속철근비가 감소하도록 되어 있으나 $\rho_t m \leq 0.4$ 에 의해 제한을 받게되며, 축하중비가 25% 이하에서는 주철근 좌굴방지를 위한 최소규정에 따라 심부구속철근비가 증가한다. 또한, 축하중비가 30% 이상인 경우에는 주철근비에 따라 각각 다른 규정에 의해 심부구속철근비가 산출된다. 즉, 축하중비가 30%이고 주철근비가 1%인 경우 심부구속철근비 산정식에 의해 산출되다가 주철근비 2% 이후에는 다시 주철근 좌굴방지를 위한 최소규정에 의해 심부구속철근비가 산출된다. 따라서, NZS3101의 심부구속철근비는 대부분이 콘크리트 심부구속철근비 산정식 보다는 주철근 좌굴방지를 위한 식에 의해 심부구속철근비가 산정된다.

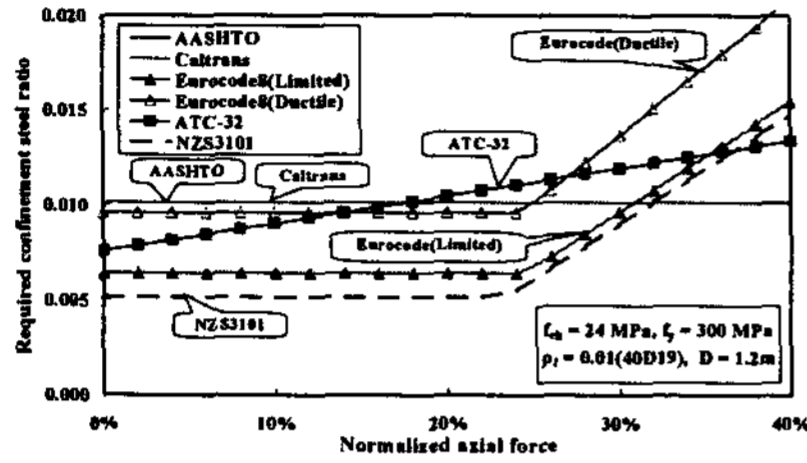


Fig. 1 Required confinement steel ratio in terms of normalized axial force ratio

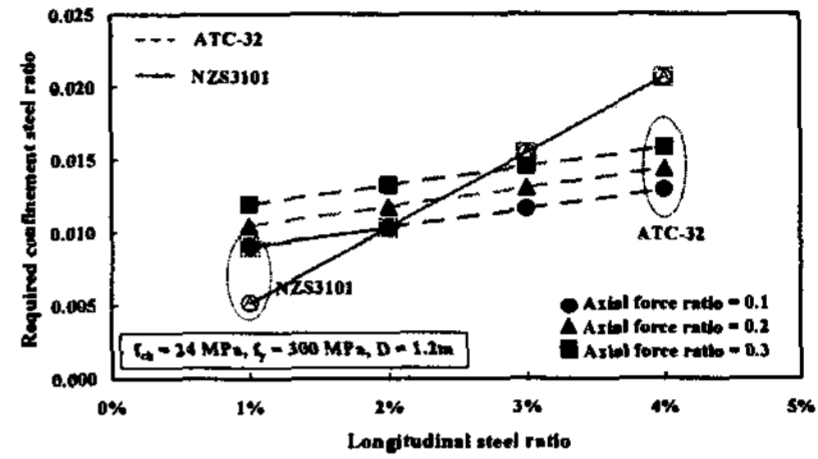


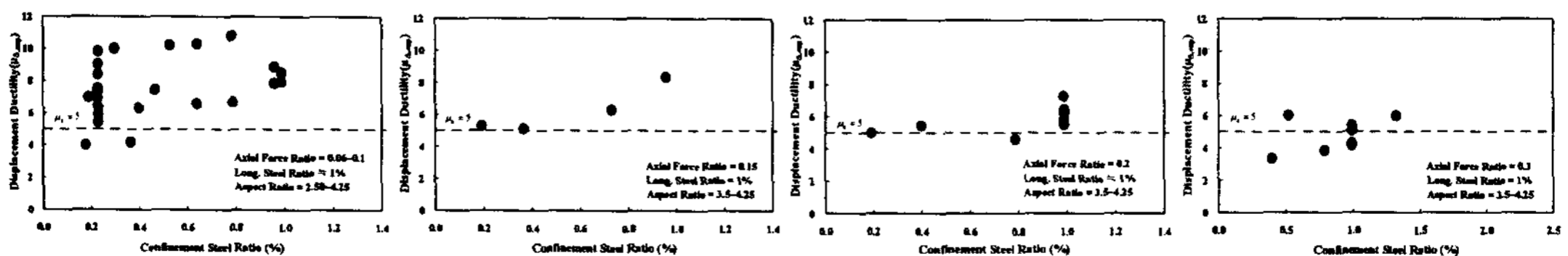
Fig. 2 Required confinement steel ratio in terms of longitudinal steel ratio for ATC-32 and NZS3101

3. 내진영향도 분석

주요 내진규정 및 내진영향인자를 비교하기 위하여 기존 연구결과²⁻¹⁰⁾를 이용하였다. 본 연구에서는 축하중비, 주철근비 및 형상비에 따른 내진영향을 조사하고자 주철근의 겹침이음 및 보강된 실험체는 제외하였다.

3.1 축하중비의 영향

축하중비는 교각의 단면적과 콘크리트 강도비인 $P/f_c A_g$ 로 정의하였으며, 다음 Fig. 3는 축하중비에 따른 변위연성도를 나타내고 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 축하중의 증가는 교각의 연성능력 저하를 야기한다. Fig. 3 (a) 축하중비가 10%인 경우 심부구속철근량이 0.4% 이상이면 도로교 설계기준에서 요구하는 변위연성도 $\mu=5$ 이상의 연성능력을 보이고 있다. 그러나, Fig. 3 (d) 축하중비가 30% 이상인 경우는 심부구속철근비가 증가하더라도 연성능력의 증가가 미미하며 대부분 도로교설계기준 연성도 $\mu=5$ 를 만족시키지 못하는 것으로 조사되었다. 이러한 결과로부터 축하중이 내진성능에 상당한 영향을 미치고 있으며, 축하중비 10%이하의 낮은 축하중비 하에서 현행 내진규정보다 적은 심부구속철근비로도 충분한 연성능력을 발휘하며, 축하중비가 30% 이상일 경우 현행 규정보다 많은 심부구속철근비를 필요로 하는 것으로 판단된다.



(a) Axial force ratio 10% (b) Axial force ratio 15% (c) Axial force ratio 20% (d) Axial force ratio 30%

Fig. 3 Experimental displacement ductility in terms of axial force ratio

3.2 형상비의 영향

본 연구에서는 형상비 2.5 미만의 전단거동을 보이는 교각은 그 파괴거동이 다르므로 형상비 영향 분석에서 제외시켰다. 또한, 같은 휨거동 중에서 형상비가 매우 큰 시험체의 실험결과를 취득하지 못하여 본 분석에 포함되지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 형상비 영향은 형상비 2.5에서 10.0까지의 실험결과에 따른 분석으로 제한되었다. 분석결과 Fig. 4에 보이는 바와 같이 형상비에 따른 변위연성능력의 차이는 발견할 수 없었다. 특히, 정영수 등은⁸⁾ 형상비 2.5인 시험체의 경우 심부구속철근이 0.23%로 작은 경우 초기 휨균열 이후 연성거동을 보이다가 최종에는 전단파괴가 발생하며 취성거동을 나타낸다고 조사하였다. 그럼에도 불구하고 휨파괴 거동인 Fig. 4(b)와 매우 유사한 연성도 결과를 나타내었다.

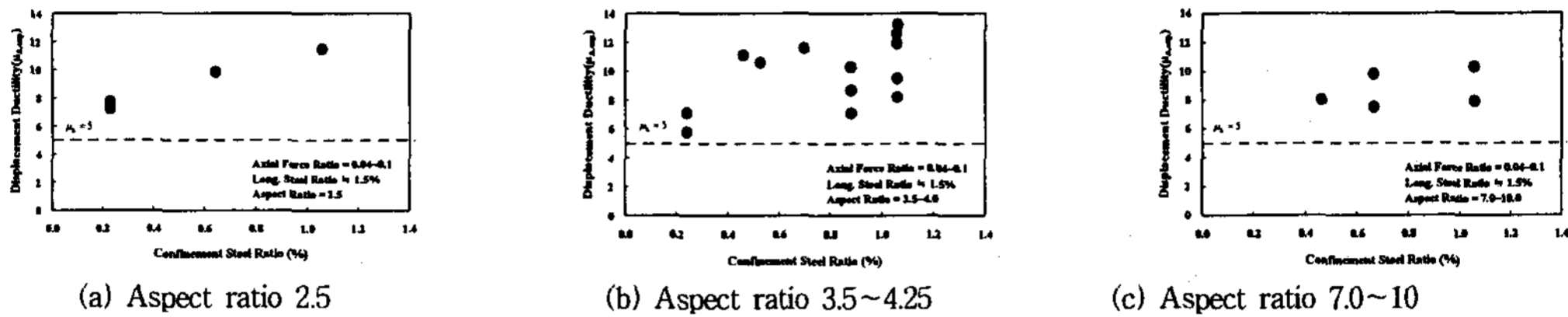


Fig. 4 Experimental displacement ductility in terms of aspect ratio

3.3 주철근의 영향

Fig. 5(a),(b)는 축하중비가 10%인 경우, Fig. 5(c) 및 5(d)는 축하중비가 20%인 경우의 주철근비에 따른 변위연성능력을 조사하였다. 두 경우 모두 주철근비가 증가함에 따라 변위연성도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 축하중비가 20%인 경우에 비하여 축하중비가 10%인 경우는 그 영향이 적은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 주철근비의 증가에 따라 심부구속철근비를 선형적으로 증가시키는 ATC-32 규정과 잘 부합되고 있으나 및 NZS3101규정의 주철근비 증가에 따른 심부구속철근비의 감소를 보이는 것과는 차이를 보이고 있다.

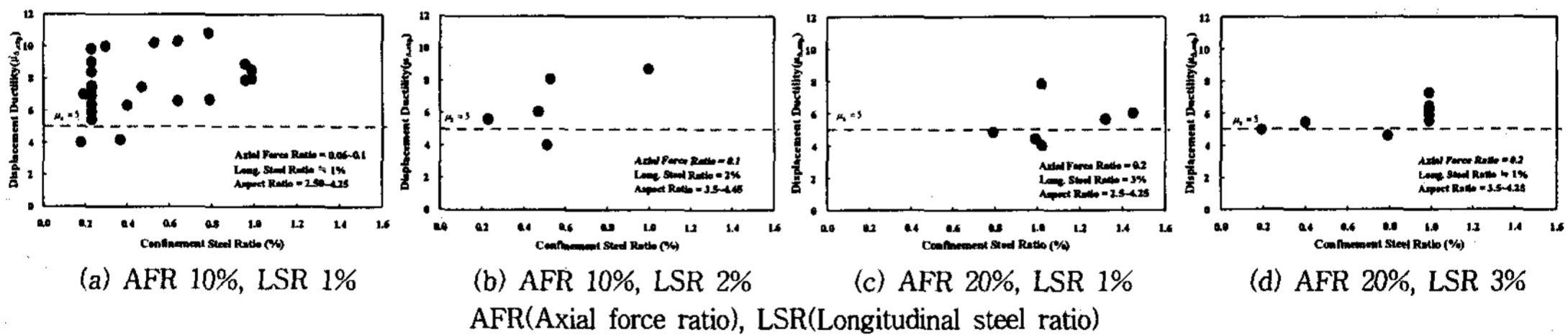


Fig. 5 Displacement ductility of experimental results versus Longitudinal steel ratio

4. 각국의 구속철근비에 따른 연성도 분석

본 연구에서 조사된 실험결과를 대상으로 하여 세계 각국의 심부구속철근비를 정량적으로 평가하였다. 각 시험체의 심부구속철근비와 변위연성도 실험결과를 각국의 내진규정에서 요구되는 구속철근비와 변위연성도로 나누어 정규화(normalize)하였다. 다음 Fig. 7에서 μ_{reqd} 는 요구연성도, μ_{exp} 는 실험결과에 의한 변위연성도이며 ρ_{reqd} 는 요구 심부구속철근비, ρ 는 실험체의 심부구속철근비를 나타낸다.

4.1 AASHTO

요구연성도는 단주의 응답수정계수(R)에 응답수정계수와 변위연성도의 관계식, $R = \sqrt{2\mu_{\Delta} - 1}$, 을 적용하여 이에 해당하는 변위연성도를 구할 수 있다. 국내 도로교설계기준, CSA Standard, ACI 318-02 및 AASHTO는 동일한 심부구속철근비를 요구하고 있다. AASHTO의 요구연성도에 대한 실험연성도 비를 ρ/ρ_{rqd} 에 대해서 Fig. 6에 나타내었다. 분석결과 Fig. 6(a)에 보이는 바와 같이 10%의 낮은 축하중비에서는 횡철근비에 상관없이 대부분이 요구연성도 “5”를 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 축하중비가 15%, 20%, 30%로 커질수록 Fig. 6(b)~(d)에 보이는 바와 같이 변위연성도비가 낮아지는 경향을 보이고 있으며 축하중비가 약 30%일 때 요구철근비 이상이 배근 되어야 즉 $\rho/\rho_{rqd} > 1.0$ 이어야 요구연성도를 만족하는 것으로 나타났다.

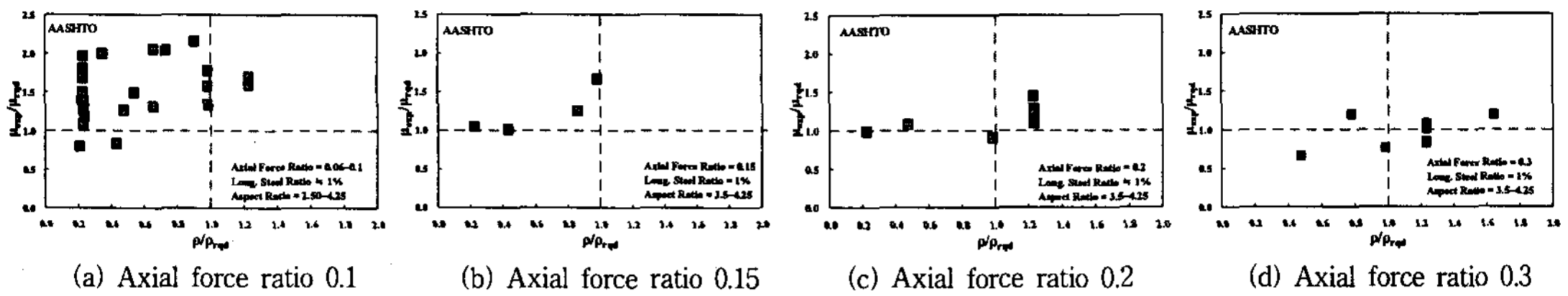


Fig. 6 Displacement Ductility Analysis in terms of Normalized Confinement Steel Ratio in AASHTO

4.2 ATC-32

ATC-32는 AASHTO와 달리 축하중비와 주철근비를 요구 심부구속철근비 산정식에 포함하고 있는 것이 특징이며, ATC-32에서 사용되는 응답수정계수는 완전연성일 경우 R=4를, 한정연성일 경우 R=3을 적용함으로 Fig. 7에서의 요구연성도 μ_{rqd} 은 식(1)에 의해서 완전연성일 경우 $\mu_{\Delta} = 8.5$, 한정연성일 경우 $\mu_{\Delta} = 5$ 를 적용하였다. Fig. 7에 보이는 바와 같이 완전연성일 경우 축하중비 10% 이상에서는 현행기준보다 많은 심부구속철근비를 요구하는 것으로 나타났으며, 한정연성의 경우 축하중비가 30%로 높은 경우 현행기준의 83% 정도의 심부구속철근비가 필요한 것으로 조사되었다.

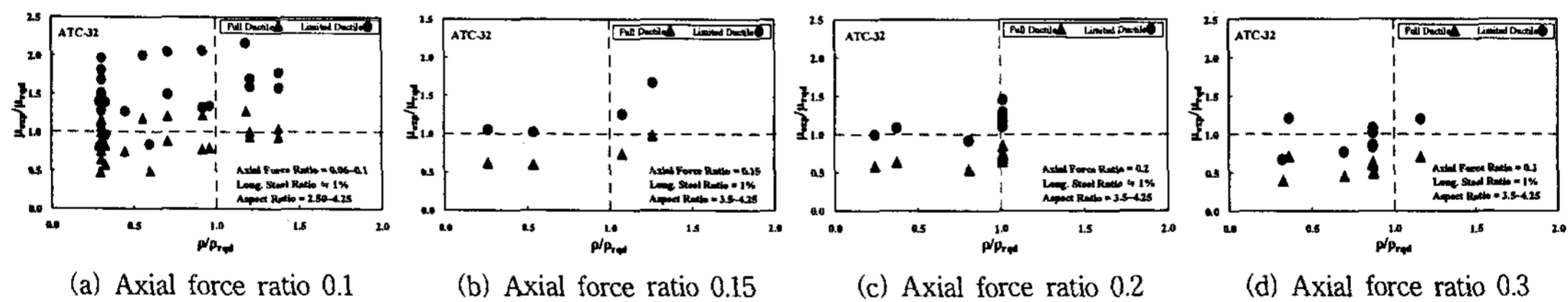


Fig. 7 ATC-32

4.3 Eurocode 8

Eurocode 8의 요구심부구속철근비에는 축하중비가 포함되어 있으며, 다른 설계기준과는 달리 한정연성 및 완전연성에 대한 요구곡률연성도가 달리 적용되고있다. 그리고 요구곡률연성도에 따른 최소철근비가 규정되어 있는 것이 특징이다. 따라서 요구철근비는 축하중비가 약 25% 이하인 경우의 요구심부구속철근비 ρ_{rqd} 는 최소철근비에 결정되며, 25% 이상에서 심부구속철근비식에 의해 산출된다. 분석결과 Fig. 8에 보이는 바와 같이 완전연성 및 한정연성모두 축하중비 15% 이하에서는 과도한 철근비이며, 완전연성인 경우에 최소철근비 및 심부구속철근비 산정식은 각각 축하중비 20%, 30%에 적합한 기준인 것으로 나타났다. 그리고 한정연성인 경우 축하중비 20%, 30%

에서는 각각 최소철근비 및 심부구속철근비 산정식의 약 73%면 요구연성도를 만족하는 것으로 나타났다.

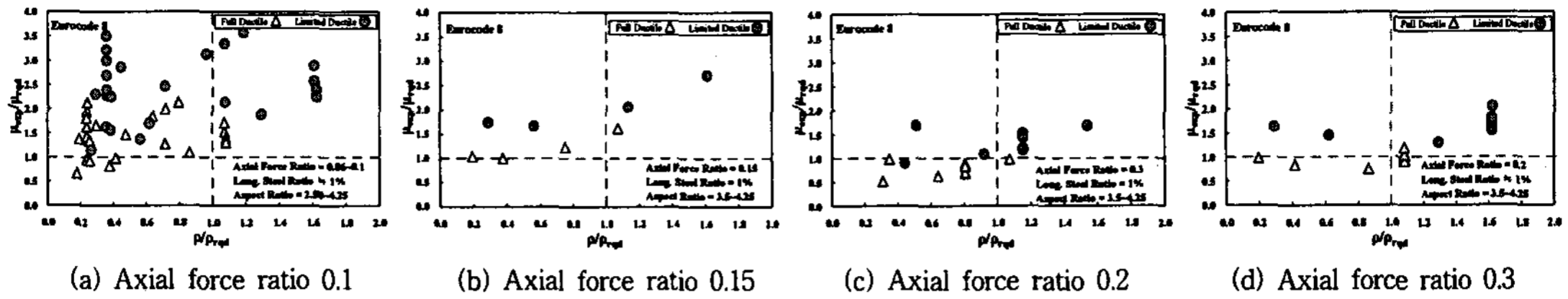


Fig. 8 Eurocode 8

4.4 NZS3101

NZS 3101의 요구곡률연성도가 20이므로 다른 관련 기준에 비교하여 요구연성도가 가장 크다. 그리고 NZS 3101의 요구심부구속철근비식도 축하중비 약 25% 이상에서만 해당되며 그 이하에서는 주철근 좌굴을 방지하기 위한 최소규정을 적용하게 된다. 따라서 축하중비가 25%이하인 경우에는 요구심부구속철근비가 약 0.5% 부근의 값을 보이게 되므로 다른 설계식보다 오히려 적은 심부구속철근비를 요구한다. 따라서 Fig. 9에 보이는 바와 같이 축하중비 증가에 따른 결과가 매우 일정하지 않는 것을 볼 수 있다. 즉 요구연성도는 매우 높으나 축하중비 25% 이하에서는 주철근 좌굴을 방지하기 위한 최소철근 규정을 적용하게 되므로 사용된 철근비에 따른 연성도비가 적게 나온 결과로 판단된다. 또한 심부구속철근비 산정식을 적용하는 축하중비 30%에도 규정보다 많은 약 3배의 철근비가 소요되는 것을 알 수 있다.

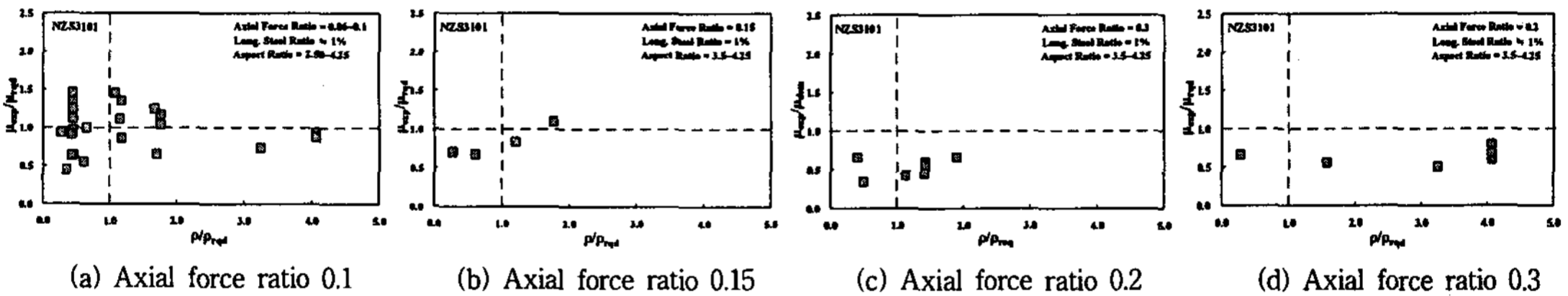


Fig. 9 NZS3101

Table 4에 4장에서 분석에 사용된 실험체들을 대상으로 하여 세계각국의 요구 연성도를 만족하기 위한 소요심부구속철근비를 요구철근비에 대한 비로 나타내었다. Table 3에 보이는 바와 같이 NZS3101는 요구연성도와 요구심부구속철근비가 매우 적합하지 않은 결과를 보이고 있으며, Eurocode 8의 경우에는 축하중비 15% 이하에서는 최소철근비가 상당히 과다함을 알 수 있다. ATC-32 규정에서는 요구연성은 완전연성과 한정연성으로 구분되어 있으나 심부구속철근비 산정식은 동일한 관계로 완전연성에는 적합하지 않은 결과를 보였다. AASHTO는 축하중비를 고려하고 있지 않아 축하중비가 증가함에 따라 소요 철근비가 일정 비율로 증가함을 알 수 있으며 AASHTO 식에 축하중비의 영향을 고려하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

Table 3 The normalized confinement steel ratio for satisfying the required ductility

| Axial Force Ratio | 10% | 15% | 20% | 30% |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | ρ/p_{req} | ρ/p_{req} | ρ/p_{req} | ρ/p_{req} |
| AASHTO | 0.321 | 0.452 | 0.833 | 1.191 |
| ATC-32 | Full | 0.779 | 1.116 | 1.376 |
| | Limited | 0.402 | 0.568 | 0.691 |
| EC 8 | Full | 0.345 | 0.438 | 0.934 |
| | Limited | 0.284 | 0.365 | 0.734 |
| NZS 3101 | 1.376 | 1.119 | 5.914 | 3.164 |

5. 결론

본 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 원형철근콘크리트 교각의 내진성능에 가장 지배적인 영향인자는 축하중비인 것으로 조사되었다.
- (2) 현행 도로교설계기준에서는 축하중비의 영향을 전혀 고려하고 있지 않으며, 이에 낮은 축하중비에서는 과도한 심부구속철근비를 요구하고 있으며 반대로 높은 축하중비에서는 다소 적게 산정되었다. 따라서 축하중비를 심부구속철근비 산정식에 도입해야 한다.
- (3) 10% 정도의 낮은 축하중비에서는 주철근의 좌굴의 영향을 고려한 심부구속철근비를 제시하고 그 이상의 축하중비에서는 축하중비에 비례하는 합리적인 설계기준이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 정영수, 이강균, 한기훈, 이대형 (1999), "유리섬유보강 원형철근콘크리트 교각의 내진성능에 관한 준정적 실험연구", 한국콘크리트학회, 한국콘크리트학회 논문집, 11권, 5호, pp.107~118.
2. 이재훈, 배성용, 윤석구(2001), "나선철근교각의 내진성능 실험", 대한토목학회, 대한토목학회논문집, Vol. 21, No. 1-A, pp.109~121.
3. 이재훈, 고성현, 이대형, 정영수 (2004), "반복 횡하중을 받는 원형교각의 휨-전단 거동", 한국콘크리트학회, 한국콘크리트학회 논문집, 16권, 6호, pp.823~831.
4. 정영수, 이재훈, 김재관 등 (2001), "고속도로 기존교량의 유형별 내진성능 평가를 위한 실험적 연구", 한국도로공사.
5. 이재훈, 석상근, 윤석구(2002), "원형띠철근 교각의 내진성능에 관한 실험적 실험", 대한토목학회, 대한토목학회논문집, Vol. 22, No. 1-A, pp.159~170.
6. 정영수, 박종협, 박희상 (2002), "원형철근콘크리트 교각의 내진성능 평가 및 향상에 관한 유사동적 실험 연구", 대한토목학회, 대한토목학회논문집, Vol. 22, No. 3-A, pp.499~509.
7. 이대형, 정영수, 이재형, 송호진 (2002), "주철근 겹침이음된 형상비 4.0의 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가", 대한토목학회, 대한토목학회논문집, Vol. 22, No. 5-A, pp.1193~1201.
8. 정영수, 박창규, 이은희 (2003), "지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위연성도", 한국지진공학회, 한국지진공학회논문집, 제7권, 제3호, pp.79~88.
9. 이재훈, 손혁수, 고성현 (2004), "축방향 연결상세에 따른 철근콘크리트 원형교각의 내진성능", 한국콘크리트학회, 한국콘크리트학회 논문집, 16권, 2호, pp.249~260.
10. 박창규, 정영수, 고성현, 이재훈 (2004), "주철근 겹침이음된 실물교각의 횡구속 정도에 따른 내진성능 평가", 한국콘크리트학회, 한국콘크리트학회 논문집, 16권, 5호, pp.687~696.