

## 군쇄석다짐말뚝의 지지력 특성에 관한 연구

### A Study on Bearing Capacity Characteristics of Group Crushed-Stone Compaction Piles

황근배<sup>1)</sup>, Hwang, Geun-Bae, 이민희<sup>2)</sup>, Lee, Min-Hee, 신현철<sup>3)</sup>, Shin, Hyeon-Cheol, 최용규<sup>4)</sup>, Choi, Yongkyu

- 1) 경성대학교 공학기술연구소 연구원, 공학석사, Master, Researcher, Research Institute of Engineering & Technology, Kyungsung Univ.
- 2) 경성대학교 공학기술연구소 연구원, 공학박사, Ph.D, Researcher, Research Institute of Engineering & Technology, Kyungsung Univ.
- 3) 부산광역시 감사관실, Audit & Inspection Office, Busan Metropolitan City
- 4) 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsung Univ.

**SYNOPSIS** : Among soft ground treatment methods with granular soil used in domestic, the sand compaction pile method has been utilized greatly, but, as a result of exhaustion of sand and increase of unit cost, a necessity of an alternative method is suggested.

In this study, the static load tests for group crushed-stone compaction piles which were constructed at in-situ site were performed. Pile diameter was 700mm and area of loading plates were changed. The static load tests of single and group piles were performed for area replacement ratio of 20, 30 and 40%. Based on test results, bearing capacity of group crushed-stone compaction pile were estimated.

The more both single pile and group pile increase, the more yield bearing capacity tended to increase. Also, the yield bearing capacity of a group pile is about 50% less than the yield bearing capacity of a single pile. If the ground reinforced with the crushed-stone compaction pile is replacement ratio of 20~40%, RIYB of both single pile and group pile increases qualitative tendency of linear more than original ground

**Key words** : group crushed-stone compaction piles, Replacement ratio, Bearing capacity, static load test

## 1. 서론

최근 건설공사 시 양호한 공사부지를 확보하기가 점차 어려워지고 있으며, 3면이 바다인 우리나라의 경우 국토의 효율적인 이용을 위해서 해상 연약지반 개발의 필요성이 점차 증대되고 있다.

조립토 다짐말뚝공법은 다양한 연약지반 처리공법 중 적절한 크기의 상부구조물 하중을 지지하기 위한 연약지반보강에 효율적이고 경제적인 공법으로 알려져 있다. 그러나, 국내에서는 조립토를 이용한 연약지반 처리공법 중 모래다짐말뚝공법은 많이 활용되고 있지만, 모래자원의 고갈과 단가상승으로 인해 적용이 제한되고 있어 대체공법이 필요한 실정이다.

유럽 및 미국 등의 경우, 기초지반의 지지력 증가와 침하량의 감소를 위한 지반보강 효과를 얻을 수 있는 쇄석다짐말뚝(Crushed-stone compaction piles)공법이 개발되어 사용되었으나, 설계는 반경험적

인 방법에 의해 이루어져 왔다. 그러나 국내에서는 그 연구가 미약하여 공법의 설계기준조차도 없을 뿐만 아니라 현장실험 및 실제시공 사례가 거의 없어 실무에서 적용이 이루어지지 않고 있다.

본 공법은 대상지반조건에 따라 개량 메카니즘(Mechanism)은 차이가 있으나 기본적으로 연약점성토 지반 및 실트질 지반이나 사질토 지반에 모두 적용이 가능한 공법이다. 연약한 사질토 지반에서는 진동과 함께 압력수를 지중에 가하여 토립자 사이에 유효응력이 영이 되게 하고 구속력이 해제된 토립자는 가능한 더 조밀한 층으로 재배열 됨으로서 다짐효과를 얻게 된다. 반면, 실트 및 점성토 지반에서는 진동과 압력수로 연약토를 탈락, 분출시켜 밖으로 흘러보내고 연약토가 빠져 나간 공간에 자갈이나 쇄석을 다져 자갈기둥을 형성하여 배수 또는 지반강도를 증대시켜 지반을 개량한다. 즉, 말뚝과 같은 원주형 개량체를 지중에 형성하여 지지력의 증가, 침하량의 감소, 압밀도의 증가 그리고 연약하거나 느슨한 퇴적지반에서의 액상화 방지 등을 목적으로 사용되어질 수 있는 공법이다.

특히, 진동쇄석말뚝공법은 기존의 모래다짐말뚝공법에 비하여 지지력증대 또는 복합지반효과를 극대화 할 수 있는 경제적인 공법이다(최용규 외, 2003). 따라서, 본 연구에서는 시험 시공된 쇄석다짐말뚝에 대한 정재하시험을 수행하여, 단일말뚝과 군말뚝의 지지력 특성에 대하여 연구하였다(경성대학교 지반공학연구실, 2003).

## 2. 지반과 쇄석의 물성

시험 부지의 지층개요 및 흙의 특성을 그림 1에 나타내었다. 시험 부지의 상부에는 매립층이 6.3m 정도 분포하고 있으며, 연약한 실트질층이 11.4m, 풍화토층이 6.1m 정도 분포하고 있었다.

종래의 연구에 의하면 쇄석말뚝은 파괴 형태는 대부분 별징 파괴가 발생하고, 파괴 영역이 말뚝 직경의 2~3배 정도이었다. 그래서, 시험 대상 지반의 파괴영역을 시험목적에 부합하도록 쇄석말뚝 시공 전에 상부 매립층과 모래층 6.3m 정도를 하부 연약 실트를 이용하여 혼합하였다. 이때, 연약실트는 교각부에 쇄석다짐말뚝을 실시공할 때 밀려나온 것을 사용하였다.

혼합층에서 베인전단시험을 수행한 결과, 비배수 전단강도가 36.6~91.4 kN/m<sup>2</sup>이었다. 각 지층의 비중은 2.64~2.71 정도이었다. 연약한 실트질층에 대하여 현장 콘관입시험 결과, 콘관입저항치는 대부분 245.3~490.5 kN/m<sup>2</sup>범위에 분포하였고, 최대 저항치는 490.5 kN/m<sup>2</sup>이었다. 연약한 실트질층의 일축 압축강도  $q_u$ 는 32.4~60.8 kN/m<sup>2</sup> 범위에 분포하였고, 비배수 전단강도  $c_u$ 는 27.5~39.2 kN/m<sup>2</sup>범위에 분포하였다.

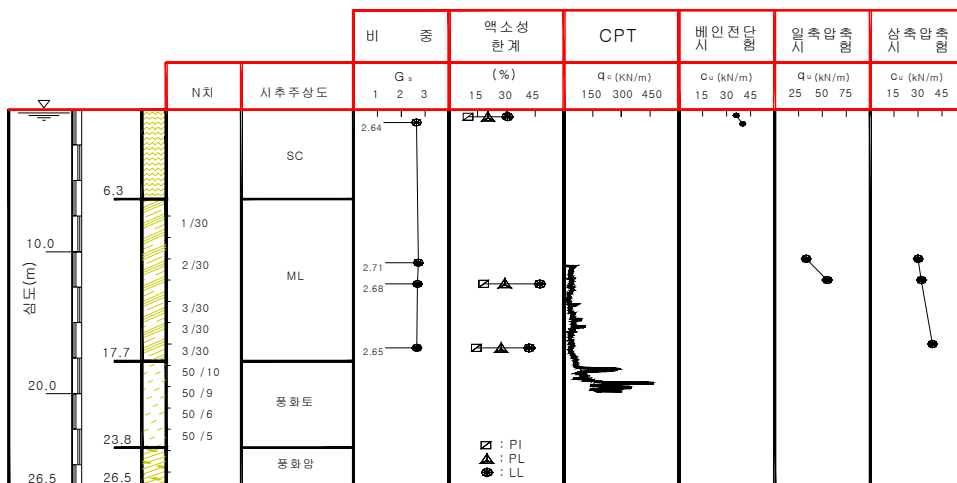


그림 1. 시험부지의 지층개요 및 흙의 특성(이민희, 2003)

그림 2에는 쇄석말뚝 재료와 주변 연약지반의 입도분포곡선을 나타내었다. 쇄석의 입경은 3.2mm~25.4mm범위에 있어 입도분포가 균등함을 알 수 있었다. 연약지반의 입경은 No. 10체를 모두 통과하는 세립분으로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

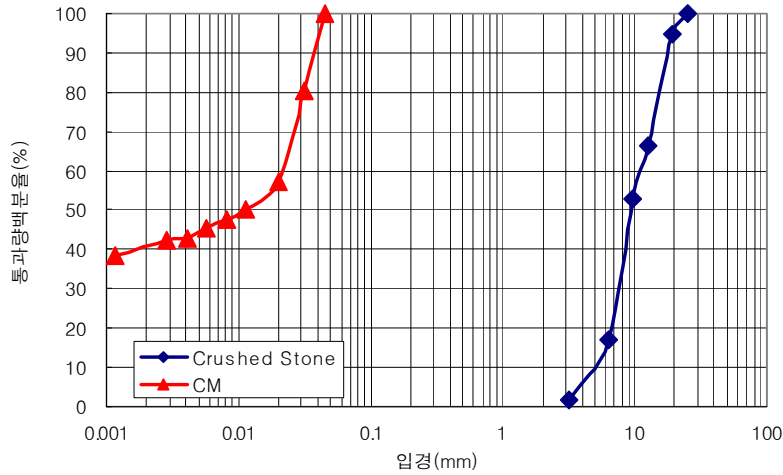


그림 2. 쇄석 및 주변 연약지반의 입도분포곡선

### 3. 현장재하시험

#### 3.1 현장시험시공 계획

시험 시공된 쇄석다짐말뚝의 배치는 그림 3과 같으며 치환율 20, 30, 40%의 단일말뚝 및 군말뚝을 그림 3과 같이 시공하였다.

말뚝구분 \ 치환율 (%)	20	30	40
평판재하시험 (무보강)			
단일말뚝			
군말뚝			

비고 ;

● : 지중반력앵커, ⊗ : 쇄석말뚝, ○ □ : 재하판

그림 3. 현장 정재하시험 계획

구체적인 시험 종류를 표 1에 수록하였다. 본 연구에서는 쇄석말뚝의 직경을 일정하게 유지시키면서 쇄석말뚝의 배치간격을 변화시켜 치환율을 조정해주었다. 즉, 각 치환율에 대한 정재하시험을 수행할 때

에는 각 치환율 별로 재하판의 면적을 달리 하였다.

표 1. 현장시험의 종류

(a) 원지반 평판재하시험

(b) 쇄석다짐말뚝 정재하시험

시험 종류	재하판 크기 (mm)	말뚝구분	치 환 율 (%)	재하판 크기 (mm)
평판 재하 시험	$\phi = 300$	단일말뚝	20	1387 × 1387
	$\phi = 400$		30	1133 × 1133
	$\phi = 750$		40	981 × 981
		군말뚝	20	2774 × 2774
			30	2266 × 2266
			40	1962 × 1962

### 3.2 재하대 및 재하용량

쇄석 단일말뚝의 극한지지력을 알기 위해서는 충분한 재하하중이 필요하므로 재하시험에서는 반력지중앵커방식을 사용하였다. 재하하중에 충분히 견딜 수 있는 재하대를 설치하였다(그림 4). 반력앵커의 지지력은 1.18MN/본, 총 반력 지지력은 단일말뚝의 경우 4.72MN, 군말뚝의 경우 9.44MN으로 예상되었다(표 2).



(a) 재하프레임 설치광경



(b) 하중재하

그림 4. 쇄석다짐말뚝의 현장재하시험 광경

표 2. 시험말뚝의 재하시험 계획

말뚝 형태	말뚝 직경 (mm)	치환율 (%)	재하판면적 (m <sup>2</sup> )	반력앵커의 총반력용량 (MN)	비고
단말뚝	700	20	1.924	4.72 (1.18 MN/본)	앵커 4본
		30	1.284		
		40	0.962		
군말뚝	700	20	7.695	9.44 (1.18 MN/본)	앵커 8본
		30	5.135		
		40	3.849		

### 3.3 정재하시험 수행

쇄석다짐말뚝의 파괴가 발생할 때까지 하중을 재하하였다(그림 4(b)). 재하판 상단 4개소에 LVDT를 설치하여 하중 재하시 발생하는 침하량을 측정하였다.

재하시험 개요도 및 계측장치 배치도를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서와 같이 재하시험시 쇄석다짐말뚝의 침하량을 고려하여 2층으로 하여 유압잭을 배치하였다. 하중재하방법은 ASTM 1143-81에서 규정하고 있는 표준재하방법과 주기반복재하방법을 사용하였다.

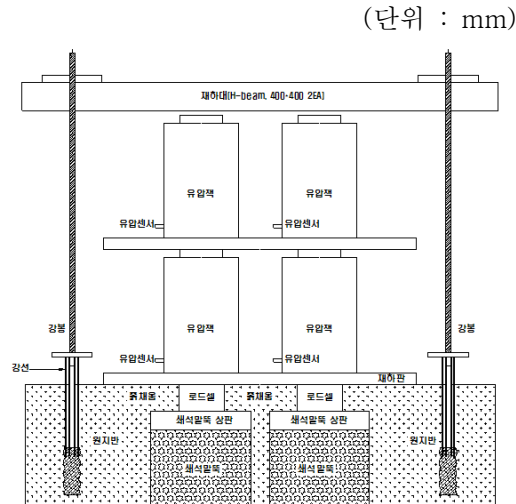


그림 5. 계측장비의 배치도

### 3.4 평판재하시험

쇄석다짐말뚝의 보강효과를 파악하기 위하여 원 지반에 대한 평판재하시험을 그림 6과 같이 실시하였다. 직경이 30, 40, 75cm의 세가지 크기의 재하판에 대하여 시험을 실시하였다.



(a) 평판재하시험 장치 설치광경



(b) 계측 광경

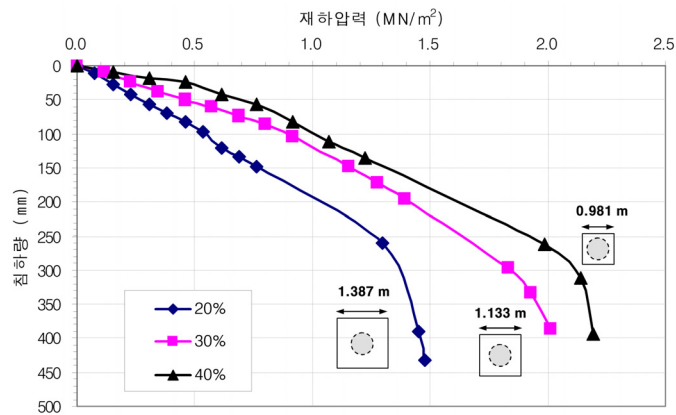
그림 6. 평판재하시험 광경

## 4. 시험 결과 및 고찰

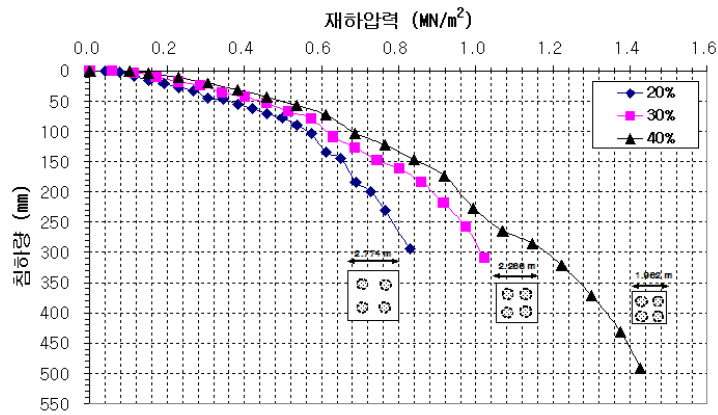
### 4.1 지지력 특성

치환율 20, 30, 40%의 단일쇄석말뚝 및 균쇄석말뚝에 대하여 각각 정재하시험을 실시하였으며, 재하압력과 침하량의 관계를 그림 7에 나타내었다. 임의 재하압력에서 치환율이 클수록 침하량이 감소되는

것을 알 수 있었다. 또한, 치환율이 증가함에 따라 항복지지력이 증가하는 경향을 나타내었다.



(a) 단일쇄석말뚝



(b) 균쇄석말뚝

그림 7. 치환율 변화에 따른 재하압력-침하량 관계곡선

단일말뚝과 균말뚝에서 치환율 변화에 따른 항복지지력 관계를 그림 8에 나타내었다. 항복지지력은 단일말뚝과 균말뚝 모두에서 치환율이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 균말뚝의 경우 단일말뚝보다 항복지지력이 약 50%정도 작게 나타나는 것을 알 수 있었다.

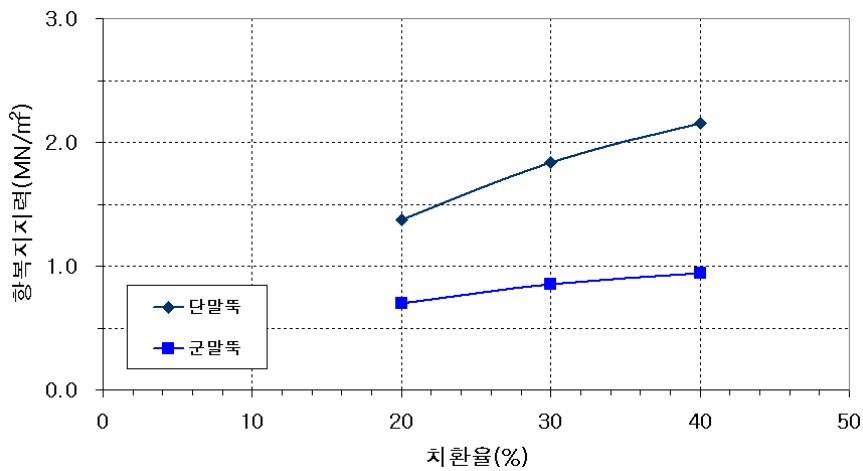


그림 8. 치환율별 항복지지력

원지반에 대한 평판재하시험을 수행한 결과는 그림 9와 같다. 표 3과 같이 평판 직경이 0.3, 0.4, 0.75m에 대하여 항복지지력은 각각 265, 343, 461 kN/m<sup>2</sup>이었다.

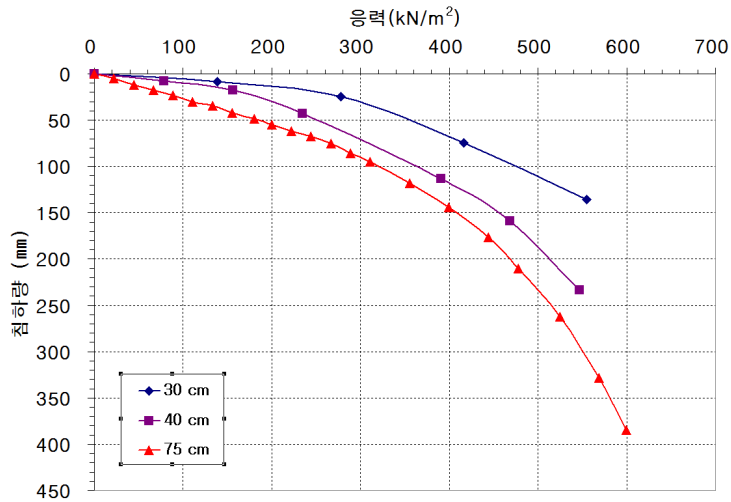


그림 9. 평판재하시험 결과

원지반에 대한 평판재하시험 결과를 토대로 각 치환율 별 강성재하판 크기에 대한 원지반의 항복지지력을 House1이 제안한 식으로 결정하였으며, 여기서, 현장재하시험에서 사용한 정방형 재하판 면적을 원형면적으로 환산하여 등가 직경을 결정하였다(그림 10). 여기서, 평판재하시험에 의한 실험치를 활용하였으며, 외삽된 부분은 House1 공식에 의하여 추정되었다.

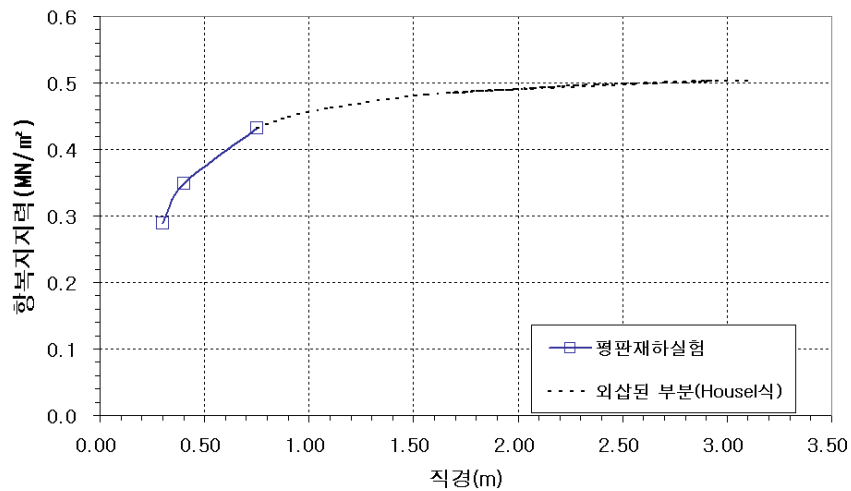


그림 10. 각 치환율 별 원지반의 항복지지력

그림 11은 각 치환율 별 원지반에 대한 쇄석다짐말뚝으로 보강된 지반의 항복지지력 증가비를 나타낸 것이다. 현장실험에서 치환율 별 항복지지력 증가비가 선형적으로 증가하는 정성적인 경향성을 보이고 있는 것을 알 수 있었다. 그림 11에서 RIYB(Ratio Increasing Yield Bearing Capacity)는 항복지지력 증가비를 나타내며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$RIYB = \frac{q_{ry}}{q_{ly}} = \frac{\text{보강시 항복지지력}}{\text{무보강시 항복지지력}} \quad (1)$$

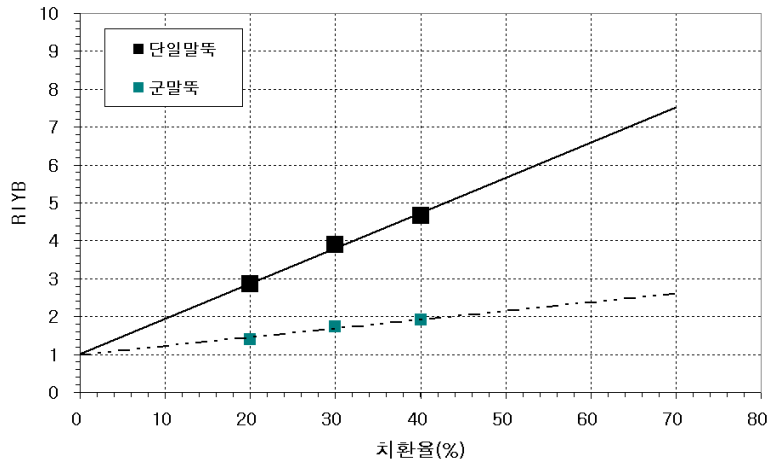


그림 11. 치환율 별 항복지지력 증가비

## 5. 결론

본 연구에서는 특정 현장에서 직경 700mm 쇠석다짐말뚝을 시공하여 저치환율에서 군쇠석다짐말뚝에 대한 현장재하시험을 실시하였다. 치환율에 따른 재하 실험 결과를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 항복지지력은 단일말뚝과 군말뚝 모두에서 치환율이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 군말뚝의 경우 단일말뚝보다 항복지지력이 약 50%정도 작게 나타나는 것을 알 수 있었다.
- (2) 쇠석말뚝으로 보강된 지반은 치환율 20~40%일 때, 원지반에 비하여 단일말뚝과 군말뚝 모든 경우에 RIYB가 선형적으로 증가하는 정성적인 경향을 보이고 있었다.

## 참고문헌

1. 경성대학교 지반공학연구실(2003), “저소음저진동 쇠석다짐말뚝공법에 대한 현장시험시공 및 정재하시험 연구용역 보고서”, KSU/GT-03-02, 한국지반환경공학회.
2. 최용규, 이민희, 황근배, 정성민(2003), "저소음 저진동 쇠석다짐말뚝의 현장시험연구", 한국지반공학회 기초기술위원회, 2003년 기초기술 학술발표회, pp. 155~164.
3. 이민희, 최용규, 임종철, 황근배(2003), “현장재하시험을 통한 쇠석다짐말뚝의 응력분담에 관한 연구”, 한국지반공학회, 한국지반공학회논문집 제 19권 제6호, pp. 107~114.