

직업적 외상 노출이 역치 하 외상 후 스트레스 증상을 보이는 소방공무원의 뇌 기능적 연결성에 미치는 영향: 휴지기 기능적 자기공명영상 연구

허 율 · 방민지 · 이상혁 · 이강수

차의과학대학교 분당차병원 정신건강의학교실

Effects of Occupational Trauma Exposure on Brain Functional Connectivity in Firefighters With Subclinical Post-Traumatic Stress Symptoms: A Resting-State Functional Magnetic Resonance Imaging Study

Yul Heo, MD, Minji Bang, MD, PhD, Sang-Hyuk Lee, MD, PhD, and Kang Soo Lee, MD, PhD

Department of Psychiatry, CHA Bundang Medical Center, CHA University, Seongnam, Korea

ABSTRACT

Objective : This study investigated brain functional connectivity in male firefighters who showed subclinical post-traumatic stress disorder (PTSD) symptoms.

Methods : We compared the data of 17 firefighters who were not diagnosed with PTSD and 18 healthy controls who had no trauma exposure. The following instruments were applied to assess psychiatric symptoms: Korean version of the Post-traumatic stress disorder Checklist for DSM-5 (PCL-5-K), Beck Depression Inventory-II (BDI-II), Beck Anxiety Inventory (BAI). For all subjects, functional magnetic resonance imaging was performed, and functional connectivity was compared between the two groups (family-wise error-corrected $p < 0.05$). Additionally, correlations between psychiatric symptoms and functional connectivity were explored.

Results : The following connectivity was higher than that of healthy controls: 1) the central opercular cortex-superior temporal gyrus, 2) planum polare-parahippocampal gyrus, 3) angular gyrus-amygdala, and 4) temporal fusiform cortex-parahippocampal gyrus. The functional connectivity of 1) the lateral occipital cortex-inferior temporal gyrus, 2) superior parietal lobule-caudate, and 3) middle temporal gyrus-thalamus were lower in firefighters. In firefighters, the connectivity of the planum polare-parahippocampal gyrus showed a negative correlation with the severity of arousal symptoms ($\rho = -0.586$, $p = 0.013$). The connectivity of the middle temporal gyrus-thalamus showed a positive correlation with the severity of intrusion ($\rho = 0.552$, $p = 0.022$) and arousal symptoms ($\rho = 0.619$, $p = 0.008$). The connectivity of the temporal fusiform cortex-parahippocampal gyrus was negatively correlated with intrusion ($\rho = -0.491$, $p = 0.045$) and arousal ($\rho = -0.579$, $p = 0.015$).

Conclusion : Our results indicate that the brain functional connectivity is associated with occupational trauma exposure in firefighters without PTSD. Therefore, this study provides evidence that close monitoring and early intervention are important for firefighters with traumatic experience even at a subthreshold level. (Anxiety and Mood 2022;18(2):39-47)

KEYWORDS : Post-traumatic stress disorder; Fire fighters; Functional magnetic resonance imaging.

서 론

소방공무원은 현장 업무 수행 중 물리적, 화학적 위험에 노

출되는 일차 외상과 시민, 동료의 죽음을 경험하는 이차적 외상 가능성이 높으며 80%가 외상 노출을 경험한다.¹⁻³ 정신 질환의 진단 및 통계 편람 제 5판(Diagnostic and Statistical

Received : September 20, 2022 / Revised : October 14, 2022 / Accepted : October 24, 2022

Address for correspondence

Minji Bang, M.D., Ph.D., Department of Psychiatry, CHA Bundang Medical Center, CHA University, 59 Yatap-ro, Bundang-gu, Seongnam 13496, Korea
Tel : +82-31-780-5874, Fax : +82-31-780-5992, E-mail : minjibang@cha.ac.kr

Address for correspondence

Kang Soo Lee, M.D., Ph.D., Department of Psychiatry, CHA Bundang Medical Center, CHA University, 59 Yatap-ro, Bundang-gu, Seongnam 13496, Korea
Tel : +82-31-780-5874, Fax : +82-31-780-5992, E-mail : kpsimon@hanmail.net

Manual of Mental Disorders, Fifth Edition, DSM-5)의 외상 후 스트레스장애(Posttraumatic stress disorder, PTSD)에서는 '실제적이거나 위협적인' 외상성 사건에 대한 직접적인 경험뿐만 아니라 생생하게 목격하는 것, 반복적인 노출 경험을 진단 기준에 담고 있고 12개월 유병률은 약 3.5%로 알려져 있다.⁴ 국내 K-CIDI (한국어판 Composite International Diagnostic Interview)로 진행한 전국 규모 정신질환 역학 조사에서의 PTSD의 평생 유병률(Lifetime Prevalence)은 1.2%이다.^{5,6} 그러나 본 연구 대상자인 소방공무원의 경우 6.5%~37%로 유병률이 높으며 일반 인구집단에 비해서도 높은 수준이다.^{7,8}

더불어 기존 선행 문헌에서 반복적 외상 노출이 PTSD에 유의한 영향을 미치는 변인으로 검증되었다.^{1,8-10} 직업적 특성상 빈번한 외상 노출을 경험하는 소방공무원은 주관적 고통, 기능의 저하를 경험한다.¹¹ 이러한 변화는 뇌의 기능적 변화를 동반할 것인데 선행 문헌에서 소방공무원의 공포 회로(fear circuitry)를 관심 영역으로 삼아 반복적 외상 노출이 편도(amygdala), 복내측 전전두피질(ventromedial prefrontal cortex)과 연결된 섬엽(insula)의 기능적 뇌 연결성을 강화한다는 결과를 확인하였다.¹² 또한 다른 연구자는 소방공무원의 직업적 스트레스가 중앙 집행 네트워크(central executive network)와 관련된 뇌 연결망과 음의 상관관계를 보이고 돌출 네트워크(salience network)와 중앙 집행 네트워크 사이 연결과는 양의 상관관계가 있다는 점을 확인했으며 PTSD 진단된 소방공무원에서 집행조절영역과 섬엽 사이의 약화된 연결성을 확인하였다.^{13,14} 그 외 소방공무원에서 높게 확인된 영역 중 기본상태회로(default mode network) 내에 중심탈개피질(central opercular cortex)과 전두두정회로(fronto-parietal network) 연관 부위 중 모이랑(angular gyrus)은 소방공무원에서 높은 연결성이 확인된 곳이었으며, 중간측두이랑(middle temporal gyrus)-위마루소엽(superior parietal lobule)은 기존 PTSD 환자에서 기능적 연결성이 줄어든 부위였다.^{15,16} 따라서 PTSD가 진단되기 전 직업상 외상 경험 시 뇌 연결성 변화를 살펴볼 필요가 있다.

PTSD의 위험인자를 탐색한 선행연구는 성별에 따라 신경성, 우울, 신체적 불안 민감도와 같은 변수가 매개 효과(mediation effects)를 유발해 성별 차이의 조절 효과(moderation effects)를 밝혔다.¹⁷ 또 다른 선행연구는 남성의 불안은 주로 교감신경의 항진으로 인한 투쟁-도피 반응(fight-or-flight system)으로 이어지지만, 여성의 불안은 추가적인 돌봄-도움 반응(tend-and-befriend system)의 활성화로 위협에 대처한다는 점을 언급하였다.¹⁸ 게다가 안전하고 신속한 임무를 해야 하는 소방공무원의 직업적 특성은 남성성, 문제 해결방식 차이라는 행동적 양상의 차이로 나타날 수 있어 PTSD에서

성별 차이를 고려해야 하는 근거가 된다.^{19,20} PTSD의 초기 치료 중요성을 고려할 때, 소방공무원은 직업을 유지 시 반복적인 외상에 노출될 것이므로, PTSD 진단기준을 만족하지 않으나 두드러지지 않는 증상까지는 배제되지 않은 상태를 '임상 증상 발현 이하 상태(subclinical state)'로 정하였다.²¹

이에 본 연구에서는 휴지기 기능적 뇌 자기공명영상(Resting-state Functional Magnetic Resonance Imaging, rs-fMRI)을 통해 직업적 외상 노출을 경험하는 소방공무원에서 PTSD가 진단되지 않았음에도 확인되는 뇌 기능적 연결성 차이를 건강대조군과 비교해 보고자 하였다. 또한 뇌 기능적 연결성 차이와 역치 하 증상과의 연관성도 검증하고자 한다. 따라서 연구 목표로 1) PTSD의 임상적 진단 기준을 만족하지 않는 남성 소방공무원에서도 PTSD에서 확인되는 공포 네트워크와 연관된 부위의 뇌 기능적 연결성의 변화가 발생할 것이며 2) 연결성 차이는 소방공무원의 역치 하 PTSD 증상과 유의하게 연관될 것이라는 가설을 세웠다.

대상 및 방법

연구 대상

본 연구는 횡단적 연구이며 경기도 성남시 및 주변 도시 소방공무원 및 일반인을 대상으로 2016년 3월부터 2018년 1월 동안 온라인과 오프라인의 임상 연구 참여 공고를 통해 참여자를 모집 하였다. 모든 참여자는 PTSD를 비롯한 정신과적 질환의 현증 및 과거력을 배제하기 위하여 숙련된 정신건강의학과 전문의가 시행하는 Mini-International Neuropsychiatric Interview-Plus (MINI-Plus) 인터뷰를 거쳐 연구에 참여하였다.²²

참여자는 만 60세 이하 성인 남성으로, 연령과 성별을 일치한 17명의 소방공무원 및 18명의 건강대조군으로 구성되었다. 모든 참여자에서 1) 현재 및 과거 정신건강의학과 병력, 2) 심각한 의학적 문제, 3) 기질적 외상성 뇌 손상, 4) 그 외 MRI 검사의 금기에 해당하는 경우에는 배제하였고, 건강대조군은 본인 및 1차 친족에서 정신과적 질환의 과거력, 투약력이 없고 외상 경험이나 노출의 과거력이 없다고 보고된 대상 중 외상 노출과 거리가 먼 사무직군에 한하여 선정하였다.

연구의 모든 과정은 헬싱키 선언(declaration of Helsinki)에 입각해 시행되었고 CHA의과학대학교 분당차병원 연구윤리심의위원회(Institutional Review Board)의 승인 하 모든 연구 대상자들로부터 자발적인 연구 참여에 대한 동의(informed consent)를 받았다.

임상적 평가

소방공무원에 대하여 다음과 같은 임상적 평가가 시행되었다. 임상적 척도로는 한글판 외상후 스트레스 장애 체크리스트-5 (The Korean version of Posttraumatic stress disorder Checklist for DSM-5; PCL-5-K), 벡 우울척도 2판(Beck Depression Inventory-II, BDI-II), 벡 불안척도(Beck Anxiety Inventory, BAI)를 사용하였다.²³⁻²⁵ PCL-5-K는 PTSD의 DSM-5 진단기준에 해당하는 잠입성 사고(intrusion), 회피(avoidance), 부정적 변화(negative alteration), 각성과 반응성(arousal and reactivity)을 지난 한 달간 0점 “괴롭지 않음”에서 4점 “아주 많이 괴로움”까지의 리커트 5점 척도로 평가하며, 총 20개의 문항에 총점 80점으로 구성되어 있다. 한국판인 PCL-5-K는 37점 이상일 때 PTSD로 진단 시 민감도 88.1%, 특이도 96.3%, 양성예측도 86.0%, 음성예측도 96.9%를 보였고 문항 간 내적신뢰도 크론바흐 알파(Cronbach’s alpha) 0.972, 국내 표준화된 외상노출 측정 척도인 한국어판 Impact of Event Scale-Revised (IES-R)에 대해서 0.87로 높은 타당도를 갖는 것으로 보고되었다.^{23,26} 더불어 0-3점의 리커트 4점 척도의 자기보고식 21개 문항인 BDI-II를 통해 2주 간의 우울을 평가했고 0점 “전혀 괴롭지 않다”에서 3점 “심하게 견디기 힘들다”까지의 리커트 4점 척도의 자기보고식 21개 문항인 BAI를 통해 1주간의 불안을 평가하였다. 또한 PTSD 위험성을 높이는 요인에 해당하는 알코올 사용 정도를 파악하고자 0-4점의 리커트 5점 척도의 알코올 사용장애 알코올소비점수(Korea Version of Alcohol Use Disorder Identification Test, Alcohol Consumption Questions, AUDIT-C)를 사용해 문제 음주 여부를 판단하였고 현재 흡연량에 대해 주관식 질문으로 파악하였다.^{27,28}

뇌 자기공명영상 수집

모든 참여자에 대한 rs-fMRI 데이터는 T2*-weighted gradient echo-planar imaging 시퀀스를 사용하여 3T GE Signa HDxt 자기공명영상 시스템(GE Healthcare, Milwaukee, WI, USA)를 통해 획득하였다. 영상 획득에 사용된 파라미터는 다음과 같다: repetition time (TR)=2600 ms; echo time (TE)=22.5 ms; flip angle=90°; matrix=64×64; voxel size=2.75×2.75×4 mm³; field-of-view (FOV)=240 mm; 31 interleaved slices without slice gap. 촬영 시간은 8분 40초이며, 총 200개의 볼륨으로 구성되었다. 모든 참여자에게 촬영하는 동안 눈을 감고, 잠을 자거나 특정 생각에 집중하지 않은 채로, 움직이지 말고 가만히 누워 있으라는 주의사항을 지시하였다. 고해상도 T1-weighted 영상은 3차원 turbo field echo 시퀀스를 사용하여 획득하였으며, 사용된 파라미터는

다음과 같다: TR=6.3 ms; TE=2.1 ms; flip angle=12°; matrix=256×256; voxel size=1×1×1 mm³; FOV=240 mm; 180 slices.

기능적 연결성 분석(Functional connectivity analysis)

영상 데이터 분석에는 Functional Connectivity (CONN) toolbox, version 18b (McGovern Institute for Brain Research, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA)가 사용되었다. CONN은 MATLAB (Mathworks Inc., Natick, MA, USA) 환경에서 작동하는 Statistical Parametric Mapping, version 12 (SPM12; Wellcome Trust Center for Neuroimaging, London, UK)에 기반한 분석 소프트웨어이다.

자화(magnetization)가 안정 상태에 도달하는 시간을 고려하여 각 참여자의 rs-fMRI 영상 데이터 200개 볼륨 중 처음 5개를 제거한 195개가 분석에 사용되었다. 영상 전처리는 CONN의 기본 전처리 파이프라인을 이용하여 이미지 realignment 및 unwrapping, 기능적 및 구조적 영상의 원점(0, 0, 0) 정렬, slice timing 보정, outlier 검출 및 제거, segmentation, Montreal Neurological Institute (MNI) template에 대한 공간 정규화, 6 mm full-width at half-maximum의 가우시안 커널(Gaussian kernel)을 적용한 공간 평활화가 적용되었다. 전처리된 영상 데이터의 voxel 크기는 3×3×3 mm³으로 resampling 하였고, Blood Oxygen Level Dependent (BOLD) 시계열에서 뇌 활성화 신호를 제외한 노이즈를 제거하기 위하여 머리 움직임, 백질 및 뇌척수액 영역과 관련된 신호를 제거하는 denoising을 시행하였다. 또한 저주파수 대역의 휴지기 뇌 활성화 신호에 초점을 맞추기 위해 band-pass filtering (0.008-0.09 Hz)과 linear detrending을 적용하였다.

뇌 영역들 간의 기능적 연결성을 계산하기 위하여 뇌 영역을 Harvard-Oxford cortical and subcortical atlas에 따라 소뇌와 뇌간을 제외한 대뇌의 피질 및 피질하영역 105개로 분할하였고, 각 영역들을 seed로 하여 나머지 영역들과의 연결성을 영역별 시계열 데이터 간의 상관계수(correlation coefficient)로 계산하였다.

통계 분석

건강대조군과 소방공무원 집단의 인구통계학적 특성을 비교하기 위해 연속변수에 대해서는 독립 t-검정을, 범주형 변수에 대해서는 카이제곱검정을 시행하였다. 건강대조군 및 소방공무원의 뇌 기능적 연결성 차이를 보기 위하여 인구통계학적 차이를 공변량 처리한 그룹 간 비교를 시행하였고, 유의수준은 다중비교보정을 위해 family-wise error (FWE) 보

정법을 적용한 FWE-corrected $p < 0.05$ 로 설정하였다. 두 그룹 간 차이를 보이는 뇌 기능적 연결성과 PTSD 증상 사이의 연관성에 대해서는 스피어만 상관관계 분석(Spearman correlation analysis)을 사용하였다. 상관관계 분석은 탐색적 목적으로 시행되었으며, 다중비교 교정은 적용되지 않았다. 통계적 유의수준은 0.05 미만으로 하였고 통계프로그램은 Statistical Package for the Social Sciences 26.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 이용하였다.

결 과

인구통계학적 및 임상적 특성

연구대상자의 인구통계학적 특성은 Table 1과 같다. 모든 연구 대상자들은 오른손 잡이이며 PTSD의 DSM-5 기준을 만족하지 않았다. 학력 기간은 평균 14.8년($SD=1.9$)을 보인 소방공무원보다 평균 17.0년($SD=3.0$)을 보인 건강대조군에서 높았고($t=2.51, p=0.017$) 흡연 비율은 건강대조군에 비해 소방공무원에서 높았다($\chi^2=2.20, p=0.028$). 그 외 연령($t=0.31, p=0.761$), AUDIT-C ($t=1.33, p=0.197$)에서는 유의한 차이가 없었다. 연구에 참여한 소방공무원은 화재진압 업무에 평균 112.2개월($SD=107.7$) 근무하였고, 구급 업무에 평균 20.9개월($SD=46.9$) 근무하였다. 소방공무원의 PCL-5-K는 평균 7.6점($SD=11.7$), BDI-II는 평균 6.6점($SD=7.2$), BAI는 평균 2.8점($SD=4.1$)으로 임상증상의 심각도는 역치 하 수준에 해당하였다.

Table 1. Descriptive statistics of the participants

	HCs (n=18)	Firefighters (n=17)	Statistics
Age (years), mean \pm SD	43.3 \pm 9.8	42.4 \pm 7.9	$t=0.31, p=0.761$
Education (years), mean \pm SD	17.0 \pm 3.0	14.8 \pm 1.9	$t=2.51, p=0.017$
AUDIT-C, mean \pm SD	3.4 \pm 3.4	4.9 \pm 2.7	$t=1.33, p=0.197$
Problem drinking (AUDIT-C \geq 4)			
Yes, n (%)	10 (55.6)	11 (64.7)	$\chi^2=0.55, p=0.581$
No, n (%)	8 (44.4)	6 (35.3)	
Current smoking			
Yes, n (%)	1 (5.6)	6 (35.3)	$\chi^2=2.20, p=0.028$
No, n (%)	17 (94.4)	11 (64.7)	
Duration of firefighting activity (months), mean \pm SD		112.2 \pm 107.7	
Duration of rescue activity (months), mean \pm SD		20.9 \pm 46.9	
PCL-5-K, mean \pm SD		7.6 \pm 11.7	
BDI-II, mean \pm SD		6.6 \pm 7.2	
BAI, mean \pm SD		2.8 \pm 4.1	

HCs, healthy controls; SD, standard deviation; AUDIT-C, Alcohol Use Disorders Identification Test-Concise; PCL-5-K, Korean version of Post-traumatic Stress Disorder Checklist for DSM-5; BDI-II, Beck Depression Inventory-II; BAI, Beck Anxiety Inventory

소방공무원과 건강대조군 간의 뇌 기능적 연결성 차이

그룹 간 차이를 보인 학력과 흡연 비율을 공변량 처리한 뇌 기능적 연결성 분석에서 105개의 대뇌 영역을 서로 연결하는 연결성 중, 7개의 연결성이 소방공무원과 건강대조군 간에 유의한 차이가 나는 것으로 확인되었다(Figure 1). 건강대조군과 비교하여 소방공무원에서 연결성이 증가되어 있는 부분은 1) 우측 중심담개피질 및 위측두이랑(superior temporal gyrus) 후방분지 좌측 간 연결, 2) 좌극면(left planum polare) 및 해마결이랑(parahippocampal gyrus) 전방 분지의 좌측 간 연결, 3) 우측 모이랑 및 좌측 편도 간 연결, 4) 측두방추피질(temporal fusiform cortex) 전방 분지의 좌측 및 해마결이랑 후방 분지의 우측 간 연결이었으며, 건강대조군과 비교하여 소방공무원에서 연결성이 저하되어 있는 부분은 1) 가측후두피질(lateral occipital cortex)의 위분지 좌측 및 아래측두고랑(inferior temporal gyrus)의 뒤분지 좌측 간 연결, 2) 좌측 위마루소엽 및 우측 꼬리핵(caudate) 간 연결, 3) 중간측두이랑 전방분지 좌측 및 좌측 시상(left thalamus) 간의 연결로 확인되었다(Figure 2).

우울 및 불안 증상, 그리고 PTSD 증상과 뇌 연결성 간의 상관분석

우울, 불안, PTSD 증상과 뇌 연결성 사이의 상관분석에서는 PCL-5-K와는 3가지 연결성 부위에서, BDI-II와는 1가지 연결성 부위에서 상관관계가 확인되었다(Table 2). 좌극면과 해마결이랑 전방 분지의 좌측 사이의 연결성은 PCL-5-K의 결과와 총 합산 점수($\rho=-0.592, p=0.012$) 및 각성($\rho=-0.586, p=0.013$)과 음의 상관관계를 보였다. 중간측두이랑 전방 분지

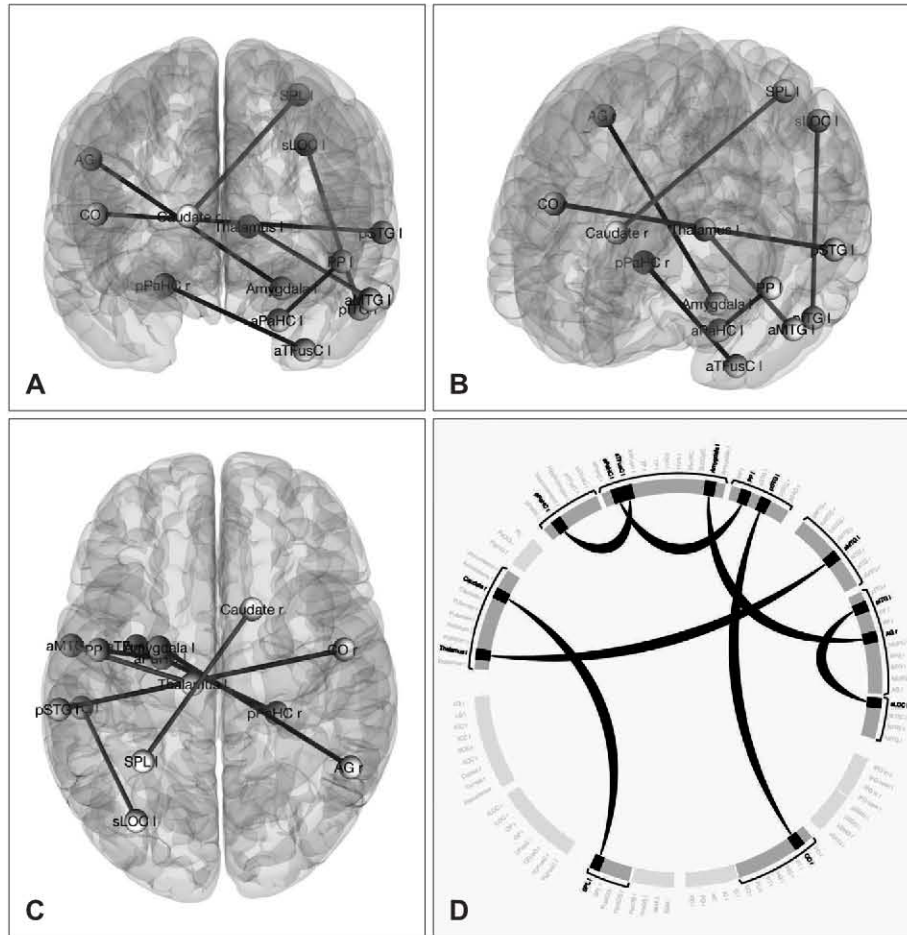


Figure 1. Differences in the functional brain connectivity between firefighters and health controls (family-wise error-corrected $p < 0.05$). (A) Coronal view. (B) Oblique view. (C) Axial view. (D) Connectogram between cerebral cortical and subcortical regions. Red indicates functional connectivity higher in healthy controls than in firefighters. Blue indicates vice versa. CO r, Central Opercular Cortex Right; pSTG l, Superior Temporal Gyrus Posterior division Left; PP l, Planum Polare Left; aPaHC l, Parahippocampal Gyrus Anterior division Left; AG r, Angular Gyrus Right; Amygdala l, Amygdala Left; sLOC l, Lateral Occipital Cortex Superior division Left; pITG l, Inferior Temporal Gyrus Posterior division Left; SPL l, Superior Parietal Lobule Left; Caudate r, Caudate Right; aMTG l, Middle Temporal Gyrus Anterior division Left; Thalamus l, Thalamus Left; aFusC l, Temporal Fusiform Cortex Anterior division Left; pPaHC r, Parahippocampal Gyrus Posterior division Right.

의 좌측과 좌측 시상 사이의 연결성은 PCL-5-K의 결과와 총 합산 점수($\rho=0.501, p=0.041$) 및 잠입성 사고($\rho=0.552, p=0.022$), 각성($\rho=0.619, p=0.008$)과 양의 상관관계를 보였다. 측두방추피질 전방 분지의 좌측과 해마결이랑 후방분지의 우측 사이의 연결성은, PCL-5-K의 잠입성 사고($\rho=-0.491, p=0.045$), 각성($\rho=-0.579, p=0.015$)과 음의 상관관계를 보였으며, BDI-II 총 합산 점수($\rho=-0.552, p=0.022$)와도 음의 상관관계를 보였다. 그 외 결과들에서는 통계적으로 유의하지 않았다.

고 찰

본 연구는 직업적 외상 노출을 경험하는 소방공무원을 대

상으로 뇌 기능적 연결성 차이 비교, 뇌 기능적 연결성과 PTSD 증상 사이의 연관성을 본 연구이다. 본 연구에서는 관심영역 설정 없이 전체 뇌를 대상으로(whole-brain approach) 결과를 도출하였다.

본 연구의 분석 결과는 크게 두 가지이다. 건강대조군에 비해 1) 소방공무원에서 높은 연결성을 보인 부분은 우측 중심 턱개피질 및 위측두이랑 후방분지 좌측 간 연결, 좌극면 및 해마결이랑 전방 분지의 좌측 간 연결, 우측 모이랑 및 좌측 편도 간 연결, 측두방추피질 전방 분지의 좌측 및 해마결이랑 후방 분지의 우측 간 연결이었으며, 2) 소방공무원에서 낮은 연결성을 보인 부분은 가측후두피질의 위분지 좌측 및 아래 측두고랑의 뒤분지 좌측 간 연결, 좌측 위마루소엽 및 우측 꼬리핵 간 연결, 중간측두이랑 전방분지 좌측 및 좌측 시상

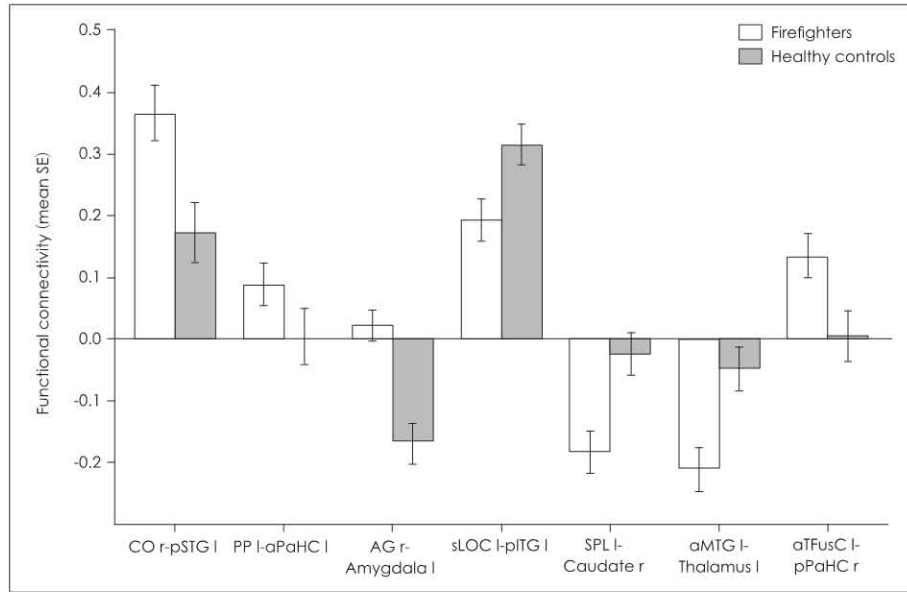


Figure 2. Mean functional connectivity values in firefighters and health controls showing significant between-group differences. CO r, Central Opercular Cortex Right; pSTG l, Superior Temporal Gyrus Posterior division Left; PP l, Planum Polare Left; aPaHC l, Parahippocampal Gyrus Anterior division Left; AG r, Angular Gyrus Right; Amygdala l, Amygdala Left; sLOC l, Lateral Occipital Cortex Superior division Left; pITG l, Inferior Temporal Gyrus Posterior division Left; SPL l, Superior Parietal Lobule Left; Caudate r, Caudate Right; aMTG l, Middle Temporal Gyrus Anterior division Left; Thalamus l, Thalamus Left; aTFusC l, Temporal Fusiform Cortex Anterior division Left; pPaHC r, Parahippocampal Gyrus Posterior division Right.

Table 2. Correlations between the brain functional connectivity and psychiatric symptoms

	Functional connectivity between						
	CO r and pSTG l	PP l and aPaHC l	AG r and amygdala l	sLOC l and pITG l	SPL l and caudate r	aMTG l and thalamus l	aTFusC l and pPaHC r
PCL-5-K							
Intrusion	-0.358 (0.159)	-0.284 (0.269)	-0.315 (0.219)	0.280 (0.276)	-0.108 (0.681)	0.552* (0.022)	-0.491* (0.045)
Avoidance	-0.152 (0.560)	-0.103 (0.693)	-0.399 (0.113)	0.085 (0.745)	0.006 (0.981)	0.353 (0.164)	-0.416 (0.097)
Negative alteration	-0.357 (0.160)	-0.449 (0.071)	-0.434 (0.082)	0.300 (0.242)	0.003 (0.992)	0.278 (0.280)	-0.450 (0.070)
Arousal	-0.291 (0.257)	-0.586* (0.013)	-0.340 (0.182)	0.470 (0.057)	-0.092 (0.726)	0.619** (0.008)	-0.579* (0.015)
Total	-0.344 (0.177)	-0.592* (0.012)	-0.337 (0.185)	0.416 (0.096)	-0.105 (0.688)	0.501* (0.041)	-0.475 (0.054)
BDI-II, Total	-0.109 (0.677)	-0.369 (0.145)	-0.255 (0.324)	0.376 (0.137)	-0.34 (0.897)	0.277 (0.281)	-0.552* (0.022)
BAI, Total	-0.302 (0.239)	-0.277 (0.281)	-0.268 (0.299)	0.180 (0.490)	0.132 (0.614)	0.218 (0.400)	-0.404 (0.108)

*p < 0.05; **p < 0.01. PCL-5-K, Korean version of Post-traumatic Stress Disorder Checklist for DSM-5; BDI-II, Beck Depression Inventory-II; BAI, Beck Anxiety Inventory; CO r, Central Opercular Cortex Right; pSTG l, Superior Temporal Gyrus Posterior division Left; PP l, Planum Polare Left; aPaHC l, Parahippocampal Gyrus Anterior division Left; AG r, Angular Gyrus Right; Amygdala l, Amygdala Left; sLOC l, Lateral Occipital Cortex Superior division Left; pITG l, Inferior Temporal Gyrus Posterior division Left; SPL l, Superior Parietal Lobule Left; Caudate r, Caudate Right; aMTG l, Middle Temporal Gyrus Anterior division Left; Thalamus l, Thalamus Left; aTFusC l, Temporal Fusiform Cortex Anterior division Left; pPaHC r, Parahippocampal Gyrus Posterior division Right

간의 연결이었다.

연결성 높은 부위에는 청각네트워크(auditory network)에 포함되는 위측두이랑, 측두방추피질이 포함되어 있다. 위측두이랑은 외상 기억(traumatic memory)의 회상(recall) 동안 비언어적 청각(nonverbal auditory) 및 언어처리(language processing)를 담당하고 사회적 인지(social cognition)에도 관여하여 회피 행동(avoidant behavior)을 유발하는 곳이며 측두방추피질은 안면 인식(facial recognition)과 긍정적 감

정 처리를 하는 곳이다.²⁹⁻³¹ 또한 PTSD 증상이 심할 경우 해마결(parahippocampus)은 전전두엽 방향으로의 뇌연결성이 강화된다고 보고된 부위이다.³² 따라서 측두방추피질-해마결이랑 간의 기능적 연결성이 강할수록 측두방추피질의 긍정적 감정처리 및 해마결이랑에 영향을 주는 전전두엽의 도움으로 기억 억제(memory suppression)를 통해 잠입성 사고, 각성, 우울이 줄어든다고 해석할 수 있다.³³

중간측두이랑-시상 간 연결은 선행연구에서 정서적 의사

소통 부위이자 감정적 위협을 인지하는 부위이며, 이 중 중간 측두이랑의 경우 잠입성 사고, 비자발적 회상의 증상을 동반하여 외상 흔적과 연관성이 보고된 부위이며 생생하고 침습적인 해리성 반응인 플래시백과 관련된 부위에 해당한다.³⁴⁻³⁶ 시상은 감각 여과(sensory filtering), 시각 처리(visual processing)를 담당하는 중심(hub)이며 특히 외상 하에서 편도체, 전대상피질(anterior cingulate cortex)과 기능적 연결이 강화되므로 PTSD의 병리 기전 중 하나이다.³⁷ 따라서 기존 문헌을 토대로, 이 부위가 강화될 경우 각성, 잠입성 사고에 이어지는 감정적 외상이 남는다고 해석할 수 있다.

또한 좌극면-해마결이랑의 연결성과 각성 사이에 음의 상관관계가 확인되었는데 좌극면은 기본상태회로 연관영역으로 해부학적으로 측두엽의 표면이자 횡측두회(transverse temporal gyrus, Heschl's gyrus)의 전면에 해당한다.¹⁶ 해마결이랑은 해마에서 발생하는 비정상적인 예측(aberrant predictions)을 청각 피질로 전달하며 휴지기 상태에서 이명을 유발할 수 있어 좌극면-해마결이랑의 연결이 강할수록 청각적 간섭이 각성에 영향을 줄 것이라 추론해볼 수 있다.^{38,39} 또한 기본상태회로와의 연결이 강화된다면 각성을 줄이는 방향으로 조절이 가능하겠다는 추론도 가능할 것인데 다만 이러한 변화가 외상 노출의 결과인지, 보상적 변화인지의 인과성에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

종합하자면 증상과 양의 상관관계가 있던 중간측두이랑-시상은 높은 연결성 상태에서, 좌극면-해마결이랑과 측두방추피질-해마결이랑은 낮은 연결성 상태에서 잠입성 사고, 각성으로 인해 주변을 과하게 지각(perception)하거나 적합하지 않은 수준의 반응을 하는 뇌의 변화가 나타나는 것이라 해석할 수 있다. 지각적 점화(perceptual priming)를 토대로 이해해보면 PTSD처럼 공포 네트워크가 활성화 되는 경우 생존, 안전을 위해 더 빠른 단서를 다뤄야하는 상황에 자주 놓이게 되고 소방공무원들은 정보를 수용, 통합하는 과정에서 맥락적 정보(contextual information)를 누락하고 지각된 정보(perceptual information)를 더 활용하게 되는 셈이다.⁴⁰⁻⁴² 즉 PTSD의 치료에 있어서 외상 기억의 맥락적 재구성이 중요하다는 점을 상기한다면 본 연구에서 확인된 외상경험 후 기능적 연결성 변화 결과는 기존의 PTSD의 병리적 기전을 지지하는 근거이다.

본 연구는 외상에 노출되었으나 PTSD 진단은 되지 않은 역시 하 PTSD 증상을 가진 소방공무원에 대한 연구이므로 질병이 뚜렷하게 발생하기 전에 초기의 뇌 변화 상태에 대한 탐색적 연구이다. 상기의 본 연구 결과와 해석을 토대로 본 연구의 의의는 다음과 같다. 첫째로 재맥락화 개념이 PTSD의 치료에서 중요한 부분을 차지하기 때문에 본 연구에서 확인된 내용은 치료적으로도 의미가 있다. 지각적 점화로 인해

생존반응으로써 인식된 정보에 반사적으로 반응하지 않고 맥락 정보를 참조, 활용함으로써 경험한 외상 상황을 재구성하여 뇌 가소성을 긍정적인 방향으로 변화시켜야 한다는 근거를 제시할 수 있다. 둘째로 네트워크 분석을 시행한 선행 연구에서는 PTSD가 진단된 환자군에서 시각처리 관련 측두부위(temporal region)와 피질하영역(subcortical region) 간의 연결성이 증가된 결과가 확인되는데 이 때 PTSD의 진단기준을 충족하지는 않는 외상 노출 대조군(trauma-exposed controls)에서는 PTSD와 건강대조군의 중간에 위치한 정도의 뇌 연결성 변화가 보고됐다.⁴³ 따라서 이번 연구는 외상 노출 경험에 의한 뇌 연결성 변화가 정상군과 PTSD군 사이에 있는 임상적 역시 하 상태에서 이미 발생한다는 점을 시사한다. 그러나 뇌 기능적 변화가 외상에 의한 전구기적 변화인지, 보상적 변화인지에 대한 인과성에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 끝으로, 뇌 연결성이 높게 나타난 결과는 신경 전달 방향까지 예측하기는 어려울 수 있으나 해당 네트워크를 통한 신경 전달이 존재한다는 추론은 가능하다.⁴⁴ 최근에는 휴먼 커넥톰 프로젝트(Human Connectome Project, HCP) 이후에 기능적 커넥톰(functional connectome)이 지문(fingerprinting)으로서 가능한지에 대한 관심도 점차 높아지고 있다.⁴⁵ 비록 개인의 네트워크 분석의 기능적 함의까지 살펴보는 것은 어렵고 방법론적 발전을 동반한 지속적인 뇌과학 연구가 진행되어야 하겠지만, 이번 연구에서처럼 같은 직업이나 유사한 경험을 하는 집단을 대상으로 진행한 연구를 통해 정신 병리적 기전을 이해해볼 수 있을 것이다.

본 연구에는 다음과 같은 제한점이 있다. 첫째, 이번 연구가 소방공무원 17명, 건강대조군 18명에 대한 소규모 집단에 대한 연구로 일반화하기 어렵다. 둘째, 상관분석에서 주된 척도 결과로 활용한 PCL-5-K가 자기보고식 검사이기 때문에 회상편견(recall bias)이 나타날 수 있다. 셋째, 건강대조군에서 PCL-5-K, BDI-II, BAI를 비롯한 임상 증상의 심각도는 평가되지 않아 소방공무원과 증상을 비교하지 못하였다. 넷째, 횡단적 분석 연구의 특성 상 인과관계보다는 상관관계만을 확인할 수 있다. 다섯째, PTSD의 기억 외상 극복에 있어서는 자서전적(autobiographical) 부분도 중요한데 본 연구에서는 동일한 경험을 받아들이는 개인의 성격(personality)이나 성향(trait)이 고려되지 못했으며 특히 '소명의식'처럼 어려운 상황에서도 회복탄력성을 보이는 소방공무원들에의 기존 연구를 참고할 때 결과에 영향을 미칠 수 있는 이러한 점을 확인하지 못하였다.⁴⁶ 끝으로, 소방공무원이 경험하는 직업적 외상이 다른 PTSD 환자군이 경험하는 외상과의 차이에 대해서 확인하지 못하였기에 추후 연구에서는 세분화된 외상 경험에 대한 연구로 확장되기를 기대하는 바이다.

결론

본 연구는 국민의 생명과 재산을 지키기 위해 사회에서 중추 역할을 수행하는 소방공무원에서 외상 노출 경험이 PTSD 진행 과정에 있을 수 있다는 점을 기억하여 외상 경험을 다룰 수 있는 제도 마련의 근거로 활용될 수 있겠으며 정신건강의학과 적으로 예방적 접근의 필요성을 확인한 연구로서 의미가 있다.

중심 단어 : 외상 후 스트레스 장애; 소방공무원; 기능적 자기공명 영상.

REFERENCES

- Jung YK, Lim KY, Cho SM, Cho JP, Kim KU, Shin YM, et al. Post-traumatic stress analysis study for firefighters. Fire and Disaster Prevention Agency, Republic of Korea 2008;Registration Number 11-1660000-000125-14.
- Lee NY, Hah YS. Post-traumatic stress experienced by firefighters and paramedics. Perspectives in Nursing Science 2012;9:83-93.
- Figley CR. Compassion fatigue as secondary traumatic stress disorder: an overview in CR figley. Compassion Fatigue: Coping with Secondary Stress Disorder in Those Who Treat the Traumatized; Brunner/Mazel: Bristol, UK 1995.
- Arlington V, Association AP. Diagnostic and statistical manual of mental disorders. American Psychiatric Association 2013;5:612-613.
- Cho MJ, Jang SM, Hahm BJ, Chung IW, Bae A, Lee YM, et al. Prevalence and correlates of major mental disorders among Korean adults: a 2006 national epidemiologic survey. Journal of the Korean Neuropsychiatric Association 2009;48:143-152.
- Wittchen HU, Zhao S, Abelson J, Abelson J, Kessler RC. Reliability and procedural validity of UM-CIDI DSM-III-R phobic disorders. Psychological medicine 1996;26:1169-1177.
- Ryu JA, Ha EH, Jeong-Choi KH, Kim JE, Park SW, Kim HJ. Firefighters and posttraumatic stress disorder. Korean Journal of Biological Psychiatry 2017;24:10-18.
- Del Ben KS, Scotti JR, Chen YC, Fortson BL. Prevalence of post-traumatic stress disorder symptoms in firefighters. Work & Stress 2006;20:37-48.
- Jo IS, Sung GH, Lee KS. Exposure frequency of job related trauma types and PTSD symptoms of firefighters: the moderating effect of anger rumination. Anxiety and Mood 2018;14:1-6.
- Wagner D, Heinrichs M, Ehlert U. Prevalence of symptoms of post-traumatic stress disorder in German professional firefighters. American Journal of Psychiatry 1998;155:1727-1732.
- Lee WH, Lee YR, Yoon JH, Lee HJ, Kang MY. Occupational post-traumatic stress disorder: an updated systematic review. BMC Public Health 2020;20:1-12.
- Jeong HS, Park SW, Dager SR, Lim SM, Lee SJL, Hong HJ, et al. Altered functional connectivity in the fear network of firefighters with repeated traumatic stress. The British Journal of Psychiatry 2019; 214:347-353.
- Lee DJ, Kim WJ, Lee JE, Lee JH, Kim YT, Lee SK, et al. Changes in intrinsic functional brain connectivity related to occupational stress of firefighters. Psychiatry Research 2022;314:114688.
- Lee DJ, Lee JE, Lee JH, Kim CS, Jung YC. Insular activation and functional connectivity in firefighters with post-traumatic stress disorder. BJPsych Open 2022;8:e69, 1-7.
- Li B, Liu J, Liu Y, Lu HB, Yin H. Altered resting-state functional connectivity in post-traumatic stress disorder: a perfusion MRI study. Medical Imaging 2013: Image Perception, Observer Performance, and Technology Assessment 2013;8673:318-326.
- Irem A, Semra İ. Analysis of gender differences with functional connectivity and default mode network and fronto-parietal network. European Journal of Science and Technology Special Issue 2020;298-303.
- Christiansen DM, Hansen M. Accounting for sex differences in PTSD: a multi-variable mediation model. European Journal of Psychotraumatology 2015;6:26068.
- Christiansen DM, Elklit A. Risk factors predict post-traumatic stress disorder differently in men and women. Annals of General Psychiatry 2008;7:1-12.
- Jakubowski TD, Sitko-Dominik MM. The impact of the traditional male role norms on the posttraumatic stress disorder among Polish male firefighters. PloS One 2021;16:e0259025.
- Olf M. Sex and gender differences in post-traumatic stress disorder: an update. European Journal of Psychotraumatology 2017;8:1351204.
- Kessler RC, Sonnega A, Bromet E, Hughes M, Nelson CB. Posttraumatic stress disorder in the national comorbidity survey. Archives of General Psychiatry 1995;52:1048-1060.
- Sheehan DV, Lecrubier Y, Sheehan KH, Amorim P, Janavs J, Weiller E, et al. The Mini-International Neuropsychiatric Interview (MINI): the development and validation of a structured diagnostic psychiatric interview for DSM-IV and ICD-10. Journal of Clinical Psychiatry 1998;59:22-33.
- Kim JW, Chung HG, Choi JH, So HS, Kang SH, Kim DS, et al. Psychometric properties of the Korean version of the PTSD checklist-5 in elderly Korean veterans of the Vietnam War. Anxiety and Mood 2017; 13:123-131.
- Beck AT, Steer RA, Brown G. Beck depression inventory-II. Psychological Assessment 1996.
- Beck AT, Epstein N, Brown G, Steer RA. An inventory for measuring clinical anxiety: psychometric properties. Journal of Consulting and Clinical Psychology 1988;56:893.
- Park SW, Jeong HSS, Im JYJ, Jeon YJ, Ma JY, Choi YR, et al. Reliability and validity of the Korean version of the post-traumatic stress disorder checklist in public firefighters and rescue workers. Korean Journal of Biological Psychiatry 2016;23:29-36.
- Jeon KS, Kang KA. Effect of Post-traumatic stress and ways of stress coping on problem drinking in firefighters. Korean Journal of Occupational Health Nursing 2017;26:218-226.
- Bush K, Kivlahan DR, McDonell MB, Fihn SD, Bradley KA. Project ACQI. The AUDIT alcohol consumption questions (AUDIT-C): an effective brief screening test for problem drinking. Archives of Internal Medicine 1998;158:1789-1795.
- Nasr S, Tootell RB. Role of fusiform and anterior temporal cortical areas in facial recognition. Neuroimage 2012;63:1743-1753.
- Jatzko A, Schmitt A, Demirakca T, Weimer E, Braus DF. Disturbance in the neural circuitry underlying positive emotional processing in post-traumatic stress disorder (PTSD). European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience 2006;256:112-114.
- Shang J, Lui S, Meng Y, Zhu H, Qiu C, Gong Q, et al. Alterations in low-level perceptual networks related to clinical severity in PTSD after an earthquake: a resting-state fMRI study. PloS One 2014;9:e96834.
- Cisler JM, Steele JS, Smitherman S, Lenow JK, Kilts CD. Neural processing correlates of assaultive violence exposure and PTSD symptoms during implicit threat processing: a network-level analysis among adolescent girls. Psychiatry Research: Neuroimaging 2013;214:238-246.
- Steward T, Das P, Malhi GS, Bryant RA, Felmingham KL. Dysfunctional coupling of the parahippocampal cortex and inferior frontal gyrus during memory suppression in posttraumatic stress disorder. European Neuropsychopharmacology 2020;41:146-151.
- Yun JY, Kim JC, Ku JH, Shin JE, Kim JJ, Choi SH. The left middle temporal gyrus in the middle of an impaired social-affective communication network in social anxiety disorder. Journal of Affective Disorders 2017;214:53-59.
- Clark I, Holmes EA, Woolrich M, Mackay C. Intrusive memories to traumatic footage: the neural basis of their encoding and involuntary recall. Psychological Medicine 2016;46:505-518.
- Bourne C, Mackay C, Holmes EA. The neural basis of flashback formation: the impact of viewing trauma. Psychological Medicine 2013; 43:1521-1532.
- Yoshii T. The role of the thalamus in post-traumatic stress disorder. International Journal of Molecular Sciences 2021;22:1730.

38. Billig AJ, Lad M, Sedley W, Griffiths TD. The hearing hippocampus. *Progress in Neurobiology* 2022;102:326.
39. De Ridder D, Vanneste S, Weisz N, Londero A, Schlee W, Elgoyhen AB, et al. An integrative model of auditory phantom perception: tinnitus as a unified percept of interacting separable subnetworks. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 2014;44:16-32.
40. Sündermann O, Hauschildt M, Ehlers A. Perceptual processing during trauma, priming and the development of intrusive memories. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry* 2013;44:213-220.
41. Ehlers A, Clark D. A cognitive model of posttraumatic stress disorder. *Behavior Research and Therapy* 2000;38:319-345.
42. Choi YK, Jang YJ. The perceptual priming following analogue traumatic situation: a comparison between traumatic stimuli and general threat stimuli. *Korean Journal of Clinical Psychology* 2017;36:165-176.
43. Breukelaar IA, Bryant RA, Korgaonkar MS. The functional connectome in posttraumatic stress disorder. *Neurobiology of Stress* 2021; 14:100321.
44. Bowyer SM. Coherence a measure of the brain networks: past and present. *Neuropsychiatric Electrophysiology* 2016;2:1-12.
45. Finn ES, Shen X, Scheinost D, Rosenberg MD, Huang J, Chun MM, et al. Functional connectome fingerprinting: identifying individuals using patterns of brain connectivity. *Nature Neuroscience* 2015;18: 1664-1671.
46. Kim JW, Song HS. Factors influencing the resilience of firefighters. *The Korean Journal of Emergency Medical Services (KJEMS)* 2021; 25:37-48.