

진하-일광 지역의 해안 단구

최성자*

한국지질자원연구원

Marine Terrace of the Jinha-Ilgwang Area, Southeast Korea.

Sung-Ja Choi*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-dong, Daejeon, 305-350, Korea

The southeasternmost coastal area of the Korean peninsula has been regarded as a seismologically stable area as neither Quaternary faults nor earthquake activity has been reported. To clarify whether the active tectonic movement has occurred or not, a digital marine terrace mapping and fracture mapping have been done in the coastal area. Bed rocks are composed of the Cretaceous volcanic and sedimentary rocks and the Paleogene granite. Wave-cut platform in the area is smaller and narrower relative to that of the northern coastal area. Most of the platforms in the area have little Quaternary sediment. The platforms except the Holocene terrace (1st terrace) can be divided into three steps. The lowest platform (2nd terrace) has an altitude of 8-11m. The broad middle one (3rd terrace) is 17 to 22 m high. The highest terrace (4th terrace) is a narrow and sporadic bench with an altitude of about 44 m high. The lowest terrace is correlated to the 2nd terrace of the northern area, which corresponds to the oxygen isotopic stage 5a. The uplift rate calculated from a graphic method is 0.19 m/ky. This low uplift is typical of an intra-plate, suggesting that the area is tectonically stable. The elevation of the platforms tends slightly lower from the north to the south in the survey area. The decreasing altitude of the platforms towards the south is interpreted to result from a local block tilting during the Latest Pleistocene. This also indicates that the eastern coast of the Korean peninsula has been suffering a subsidence to the south.

Key words : 2nd terrace, 5a, 0.19 m/ky, subsidence

우리나라 남동해안의 최남단 지역에서는 지금까지 안정된 지괴로 알려져 왔으며 4기단층이나 지진 발생 보고가 알려져 있지 않다. 이 연구는 우리나라 최초로 시행된 디지털(digital) 기법에 의한 단구조사와 단열조사를 통하여 이 지역에 대한 제 4기 지구조운동 여부를 규명하고자 하였다. 조사지역의 기반암은 백악기의 퇴적암류와 화산암류 및 불국사 화강암류로 구성되어 있다. 이 지역에는 매우 협소하고 간헐적인 분포를 하는 해안단구가 발달하고 있으며 타 지역과는 달리 단구 퇴적물이 거의 발달하지 않고 있는 점이 특징이다. 이 지역에는 최하위의 홀로세 단구를 포함하여 4개의 단구면이 형성되어 있으며, 이들은 최하위의 것부터 1, 2, 3, 4 단구로 분류된다. 1단구의 구정선은 1 m 이하, 2단구의 구정선은 8~11 m, 3단구의 구정선은 17~22 m, 4단구의 구정선은 약 44 m이다. 2단구의 형성시기는 MIS 5a이고 이 곳의 3단구 형성시기는 MIS 5c이다. 단구 형성시기와 융기된 단구 고도간의 상관관계 그래프와 고해수면 변동곡선과 단구고도간의 대비에 의하여 산출된 융기율은 0.19 m/ky이다. 이와 같은 값은 판 경계부보다 활동성이 적은 판 내부에서 나타나는 값으로 우리나라의 남동해안의 지각은 대체로 안정된 지괴로 판명된다. 그러나, 각 단구의 구정선 고도는 매우 미약하지만 점이적으로 남쪽으로 가면서 감소하는 현상을 보이고 있어 우리나라의 남동해안의 남단부에는 침강운동이 일어나고 있는 것으로 해석된다.

주요어 : 2단구, MIS 5a, 0.19 m/ky, 침강

*Corresponding author: sjchoi@kigam.re.kr

1. 서 론

우리나라 남동지역에는 현재 30여개소에서 제 4기 단층이 발견되고 있으며, 이 중에는 지표까지 연장된 제 4기 단층도 다수 있다. 지표면까지 연장 발달된 제 4기 단층들은 모두 하안 단구와 해안 단구의 지형면에 발달하고 있어 제 4기 지구조운동 규명에 있어서 단구조사는 가장 주요한 분야이다.

우리나라에서 체계적인 활성단층(신기단층) 조사는 1995년에 시작되었으나, 당시에는 활성단층에 대한 구체적인 접근방법이 정립되어 있지 않았기 때문에 많은 시행착오를 겪었다. 선진 외국의 활성단층연구 동향과 연구방법 등의 파악을 통해 선진 외국의 전문가들로부터 첨단 조사 기술을 습득하여 활성단층연구 분야는 획기적인 발전을 하였다. 지난 7년간의 활성단층 연구 기간 동안에 습득된 조사 기술 중 하나가 해안단구연구 분야이다.

신기시각운동 해석을 위한 해안단구연구는 1998년부터 도입하여 적용하기 시작하였다. 당시에는 국내에서 해안 단구 조사연구를 지구조운동 연구 분야에 적용하여 연구된 바가 없었으며, 미국의 컨설턴트 회사(WLA)로부터 이 기술에 대한 국제적 동향을 알게 되었다. 그 후 5년간 해외의 우수한 연구 기술진과 협력하여 국제수준에 달하는 기술을 습득하게 되었고 현재는 독자적 연구 기술로 남동 해안지역의 해안단구 분류를 정립하였고 이를 기반으로 지금까지 불모지로 되어있던 우리나라의 단구 변위 단층운동과 제 4기 지구조사(地構造史)에 대한 새로운 연구 결과들을 국내 최초로 도출하였다.

우리나라의 해안 단구 연구는 1973년 고 김서운 박사가 최초이며, 그 후 여러 학자들에 의하여 수행되었다. 지금까지의 단구 연구는 단구 분류가 주 연구목적이었을 뿐, 단구의 구정선 변위에 의한 지구조운동과 단구면 변위를 일으킨 단층운동에 연구는 단 한건도 보고된 바 없다.

이 연구는 진하와 일광지역의 해안 단구의 분류와 형성 시기에 관한 것으로 해안단구도를 작성하여 이를 규명하였다. 이와 같은 체계적인 해안단구의 연구결과로 이 지역에 대한 제 4기 지구조 활동성을 용기율을 통하여 정량적으로 제시하였다.

2. 연구사

대표적인 해안단구 연구는 김서운(1973), 오건환

(1977, 1981), 이동영(1987) 등에 의하여 수행된 바 있으며 이들에 의한 단구 분류는 다음과 같다.

김서운(1973)은 포항에서부터 울산지역의 방어진까지 해안 단구를 6개의 단구면으로 분류하였으며 각각 봉화재(90~130 m), 염포리(70~80 m), 화정리(50~60 m), 방어진(30~40 m), 정자리(10~20 m), 주전리(3~7 m)면으로 정의하였다. 주전리 단구를 제외한 상위 면들의 시대는 모두 후기 플라이스토세로 보았다. 오건환(1977, 1981)은 동서해안의 해안단구를 조사하여 각 해안단구면을 저위면 I과 II, 중위면, 고위면 등 4개로 분류하였으며, 구정선 고도 30~50m를 갖는 단구면의 형성시기를 마지막 간빙기에 속할 것으로 보았다. 그리고 그 하위의 산하리 단구(소위 2단구)는 마지막 빙기동안에 형성된 단구로 해석한 바 있다. 한편, 이동영(1987)은 동해안의 해안 단구를 5개의 단구면으로 구분하고 10~12 m는 후기 플라이스토세, 25~30 m와 40~45 m 단구면을 중기 플라이스토세, 80~90 m 단구면을 최상부 3기에 대비하였다. 그 이외에 최성길(1999), 황상일과 윤순옥(1996), 윤순옥과 황상일(2000) 등이 해안단구에 대해 지리·지형학적 연구를 한 바 있다. 특히 최성길은 18 m 내외의 고도를 갖는 단구가 우리나라 전 해안에 걸쳐 분포하고 있고 이의 형성 시기는 마지막 간빙기(5e)라고 발표한 바 있다.

최근 Miyauchi (2001)은 한반도의 해안단구면의 용기와 양산과 울산단층대의 제 4기 단층발달은 한반도에서 제 4기 동안의 조구조적인 운동에 의하여 일어난 것으로 해석하였다.

지금까지의 단구 연구는 주로 해안 단구를 대상으로 하여 단구를 저위면, 중위면, 고위면으로 세분하고 단구 형성시기에 대해 논하였으나 각 저지들마다 단구면의 고도와 형성시기에서 차이를 보이고 있다. 현재 발견된 제 4기 단층들 중에는 하안 단구나 해안 단구의 단구면을 끊고 있어, 단구면의 형성시기가 제 4기 단층활동 연령을 제한할 수 있는 첫번째 도구로서 아주 주요한 역할을 한다. 그러나, 단구 분류가 학자마다 서로 다를 뿐만 아니라, 각 단구면의 구정선 고도에 대하여도 애매모호한 아날로그(Analogue)식의 지형도상 고도 값을 제안하거나, 한 지점상의 자료 값만이 제안되었기 때문에 구정선을 따라서 측정된 명확한 정량적인 값으로 단구 형성시기를 규명한 바 없었다.

또한, 단구 조사지역도 동해안의 북쪽 지역을 주 대상으로 하여 연구하였으며 남쪽의 서생-기장 간 지역에 대한 해안 단구 연구는 오건환(1981) 외에는 지금까지 없었다.

3. 연구방법 및 내용

국립지리원에서 발행되는 1:20,000 축척의 항공사진 판독과 이 자료를 이용한 1:5,000 축척의 수치지형도 해석을 선행하였다. 이를 토대로 정밀야외조사를 수행하였다. 야외조사는 해안 단구 발달지역에 십여 조의 횡단측선 지역을 설정하여 GPS(Global Positioning System)를 이용한 단구 조사를 하여 각 단구의 구정선 값을 도출한다. 이때 단구별 구정선 값은 재래식의 아날로그 조사방법에서 탈피하여 단열 조사(Fracture Mapping)에서 실행되고 있는 디지털 기법으로 자료를 정량화 하였다.

디지털단열 조사를 통한 실측조사 자료를 이용하여 구정선 해안 단구도와 단면도를 작성한다. 이와 같은 자료를 바탕으로 하여 융기 및 침강 등의 지구조운동을 해석하고 국지적으로 일어나는 단구 변위 단층 징후를 예측하여 해석한다. 즉, 단구 형성 연령과 단구의 고도 값을 기초로 하여 지반 융기율을 도출하고 다른 지역들과의 융기율 대비를 통해 지구조운동량을 산출한다.

조사지역은 진하에서부터 기장까지로 해안선 연장 길이는 직선길이로 16.6 km이다. 이 지역의 북쪽에 위치하고 있는 방어진 지역은 해안 단구 지형이 잘 발달되어 있었던 지역이었으나, 온산공단과 울산공단조성 지역으로 현재 모든 지형이 훼손되어 단구도 작성은 불가능하다. 진하에서 기장까지 계단상의 해안 단구들은 구정선을 기준으로 분류하였으며, 타 지역과의 단구대비를 하였다. 또한, 단구의 분포양상, 퇴적층 특성, 지

표면의 토양, 절대연대 측정값들을 종합적으로 해석하여 각 단구의 형성시기를 결정하였다.

우리나라의 남동해안에는 홀로세에 형성된 최하위의 단구를 포함하여 모두 6개의 해안 단구면이 형성되어 있다. 이 6개의 단구면은 지역에 따라 다르게 분포하거나 서로 다른 고도를 보이고 있다. 특히, 최남단 구역인 진하-기장은 타 지역과는 많은 차이를 보이고 있다.

단구의 순서를 최상위의 단구부터 순위를 정하는 것이 일반적인 경향이나, 혼돈을 피하기 위하여 기존에 상용적으로 사용하였던 하위에서 상위의 단구 순서를 그대로 유지하여 사용하였다. 즉, 아래 최하위의 단구를 1단구로 정하고 그 상위로 올라가면서 2, 3, 4, 5로 구분 지었다. 하위면 단구의 구정선 고도는 대체로 일정한 고도값을 유지하고 있으나, 누적변위에 의하여 상위로 갈수록 지역간의 구정선 고도차는 커진다.

4. 지질 및 지질구조

해안 단구 발달 지역에는 기반암으로써 하양층군의 퇴적층과 유천층군의 화산암류가 주를 이루고 있으며, 불국사층군의 화강암류가 이들을 관입하고 있다(Fig. 1). 하양층군의 퇴적층은 임랑-일광지역에 분포하고 있으며, 안산암류 등의 화산암은 퇴적층 분포지를 제외한 전역에 걸쳐서 분출되어 있다. 화강암류는 나사-서생-비화지역과 일광 남쪽의 기장지역에 분포하고 있다. 이 지역에서는 지금까지 알려져 있지 않았던 제 3기의 소분지가 남북방향의 단층에 규제되어 발달하고 있으며, 이분지를 월내분지라 명명한다. 임랑-일광지역에는 주

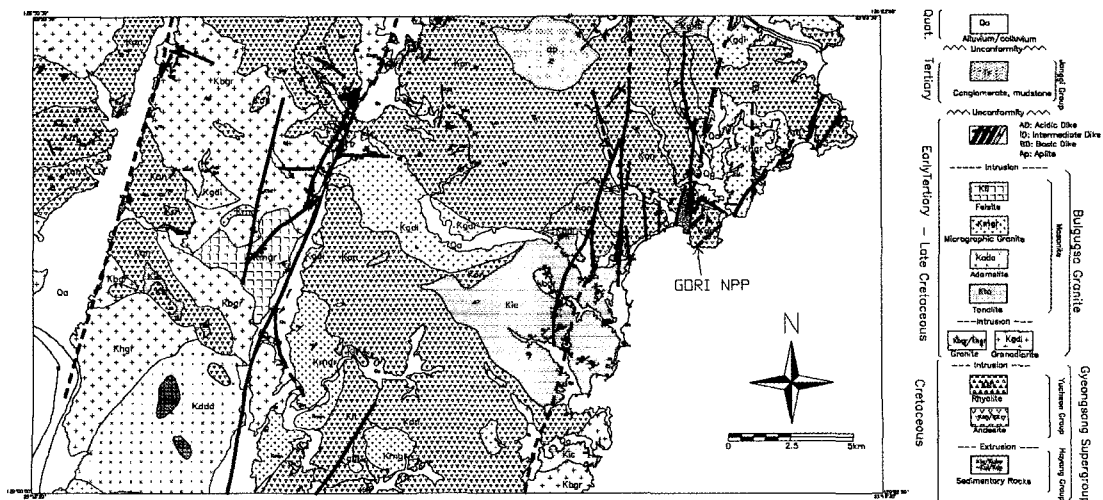


Fig. 1. Geological map of the Jinha-Ilgwang area, SE Korea.

로 하양층군의 퇴적층이 분포하고 있으며, 월내 북쪽과는 상이한 단구지형 발달에 주요한 역할을 한 요소 중의 하나이다.

조사지역 서쪽에는 양산단층대, 동래단층, 일광단층 분포하고 있다. 이 양산단층에서는 언양과 통도사 간에 10개소, 양산에서 2개소의 제 4기 단층이 발견되었다.

동래단층은 유천층군의 화산암류를 끊고 있으나, 불국사 화강암류 분포지에서는 소강상태인 것으로 보아 불국사층군 관입 이전에 활발한 운동을 한 단층임을 지시한다. 화산암류가 분포하는 부산 노포동에는 동래단층에 의하여 형성된 파쇄대가 약 50m 이상의 폭으로 발달하고 있다.

해안선에 가장 인접해 있는 일광단층은 수조(組)로 분절된 양상을 보이고 있다. 일광단층은 남창에서 기장까지 N10E의 주향으로 발달하고 있으며 장안에서 기장까지는 NS 주향으로 분기된 단층을 수반한다. 일광단층의 노두는 매우 간헐적으로 출현하며 3~7m의 폭으로 단층 각력대 및 파쇄대를 수반하거나 2~3cm 폭의 단층비지가 관찰된다. 일광단층은 장안과 좌천에서 각각 NS 단층으로 분지되고 화전리에서 소멸된다. 그러나, 다른 분절단위의 일광단층은 좌천 남쪽에서 시작하여 기장과 부산으로 연장 발달하고 있다.

일광단층은 N40W, N40E, N70E 등의 소단층을 수반하고 있다. 소단층들은 일광단층의 주향이동 운동에 수반된 전단단층으로 분류된다. 일광단층은 하양층군의 퇴적암, 유천층군의 화산암류, 불국사층군의 화강암류를 모두 끊고 있으나 제 3기 퇴적층이나 제 4기 퇴적층을 끊고 있는 노두는 발견되지 않았다.

남창에서 월내 방향으로 남북방향의 단층(이하 월내 단층이라 칭함)이 발달하고 있으며 월내단층은 월내지역에 소규모의 제 3기 퇴적분지인 월내분지를 형성하였다. 서생과 비학지역에는 해안선을 따라서 N40~50E의 주향을 갖는 암맥들이 십여 조 이상 발달하고 있는 것이 특징이다. 암맥들 중에서는 단층의 재활동에 의하여 암맥이 단층 각력화 되어 있는 곳도 있다.

월내소분지는 남북 장축이 1.8 km, 동서 폭이 약 0.6 km의 규모로써, 하부에는 안산암질 역암대(간혹 화강암역 포함), 상부에는 유백색-담회색의 점토질암대로 구성된다. 월내단층은 이 소분지를 남북방향으로 절단하고 있으며, 단층운동에 의해 서쪽이 수 m~십여 m 정도 떨어져 있으나, 정.역단층 여부는 아직 확실하지 않다. 이 단층을 경계로 하여, 월내 북동쪽과 남서쪽의 단구고도가 약간의 차이를 보이며, 남서쪽이 약간 낮

아지는 경향이 있어 플라이스토세 후기의 단층운동을 시사한다.

5. 해안단구의 분포와 특성

진하에는 북서방향의 남창천이 동해로 흐르고 있다. 남창천에는 넓은 면적의 홀로세 충적층이 형성되어 있으며, 동해와 연결되는 하구 역할을 하고 있다. 남창에서 진하지역까지 남창천을 따라서 2와 3단구의 하안 단구가 소규모로 형성되어 있으나, 도시가 들어서면서 대부분의 하안 단구 지형은 파괴되어 있다.

지형적으로 진하에서 기장까지 지형기복이 거의 없고 구릉지의 산지로 구성되어 있는 것이 특징이며, 대부분 200m 이하의 고도이다. 진하-기장 간에는 해안선의 굴곡이 심하지 않으며, 간절곳은 이 지역의 대표적인 곳 지형이고, 나사리와 월내, 일광지역에는 만입지 지형이 발달하고 있다. 진하와 비학 사이에는 간절곳 이외에도 작은 곳 형태의 헤들랜드(headland) 지형이 발달하고 있으며, 이와 같은 지형에 해안 단구 평탄면이 연속적으로 분포한다. 이와는 달리 월내 이남에서 기장까지는 월내에서 형성된 만입부의 지형이 일광까지 연장되는 경향을 가지며, 이 곳에서는 해안 단구 지형이 간헐적으로 분포한다.

진하-일광사이의 지역은 단구지형 발달이 남동해안 지역 중 가장 미약하게 발달한 지역으로, 단구조사가 다른 지역에 비해 매우 어려운 곳이다. 또한 단구면이 매우 협소하여, 단구도 작성을 할 때에 정밀한 현장 재검토 과정이 없이 항공사진이나 지형도 판독만으로는 침식 삭박된 침식면인지, 또는 해성 기원의 단구면 인지를 전혀 구별할 수 없는 난이도가 높은 지역이다. 특히, 4단구는 사면 퇴적층에 의하여 구정선이 덮여 있어, 정확한 구정선 위치 판단과 측정이 곤란한 지역이다.

위에서 언급하였듯이, 월내를 중심으로 하여 북동쪽과 남서쪽의 단구 분포가 서로 다른 양상을 보이고 있는 것이 가장 큰 특징이다. 월내 북쪽지역, 즉 진하에서 비학까지는 2와 3단구가 연속적으로 잘 발달하고 있는 반면에, 고리 남쪽에는 2와 3단구가 소규모로 산발적인 분포를 보이고 있다. 월내 남쪽에서는 신평리와 동백리 지역에 2와 3단구가 다소 넓게 발달하고 있을 뿐이다. 진하-기장간 단구면의 구정선은 대보-감포 지역의 구정선과 잘 대비된다.

조사지역의 해안 단구는 4개의 단구가 발달되어 있으며, 1단구(<1 m), 2단구(10 m), 3단구 하위면(22 m),

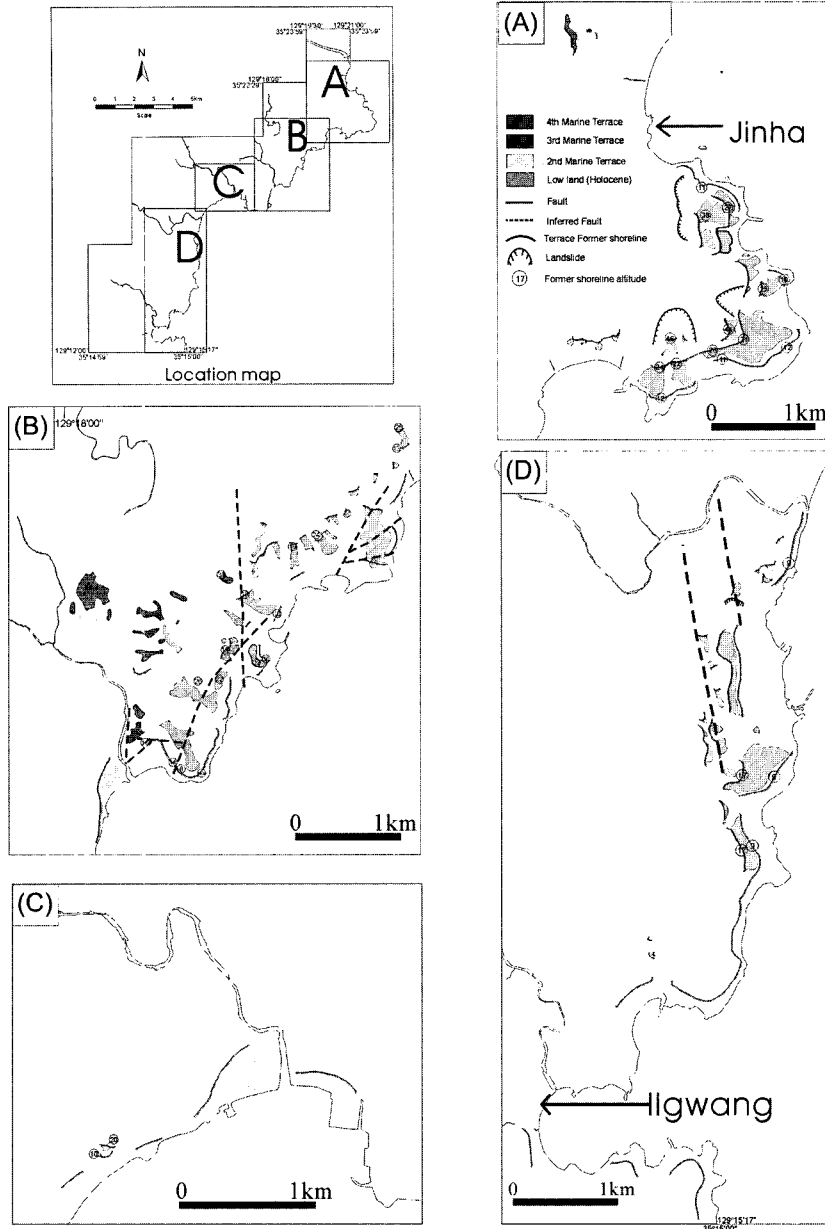


Fig. 2. Distribution of marine terrace along the coastal line from the jinha-Ilgwang area, SE Korea.

4단구(44 m)로 분류되고(Fig. 2), 이 중 2와 3단구 하위면(3b)이 잘 발달하고 있는 편이나, 이 두개의 단구는 다른 지역과 비교해보면 매우 미약한 편이다.

5.1. 1단구

1단구의 구경선은 0.5 m 이내에 위치하고 있으며 단구 퇴적물이 형성되어 있지 않은 침식 삭박형 해안 단구이며, 만(灣)입지역에서는 홀로세의 퇴적물로 충전된

저지대가 형성되어 있다.

5.2. 2단구

2단구는 진하에서 일광까지 연속적으로 잘 발달하고 있는 단구로서, 간절곶, 서생, 신리, 신평리, 동백리 지역에 형성되어 있으며, 조사지역의 남쪽보다 북쪽에 잘 발달하고 있다. 조사지역 북쪽의 2단구 구경선은 11~13 m 내외이며(Fig. 3), 진하서생-신리-비화까지 연

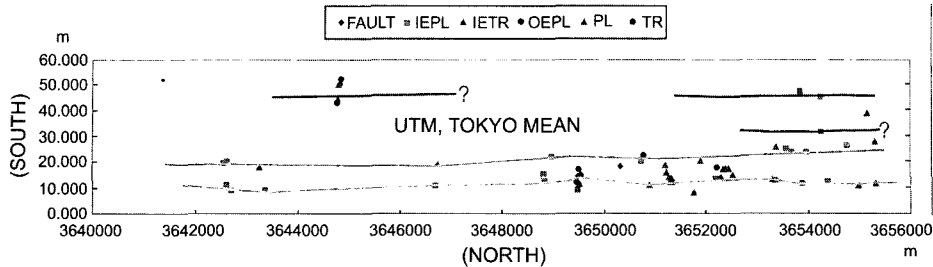


Fig. 3. Profile of marine terraces from the Jinha to Ilgwang.

장 추적된다. 남쪽은 이보다 낮은 9~10 m 고도의 구정선을 보이고(Fig. 3), 측면 연장이 없는 간헐적 분포를 한다. 연구지역의 구정선은 대보-감포지역에 발달하고 있는 2단구와 잘 대비되며, 오건환(1981)의 산하리 및 월내 단구에 각각 대비된다.

문중리에는 2와 3단구 단구면과 동일한 지형 고도면을 갖는 평탄지(platform)가 발달하고 있어 이를 해안 단구면으로 보았다. 그러나, Yoko Ota(현장자문)는 4단구면의 해식절벽 지형이 산사태가 일어난 지형 특성을 지니고 있고, 문중리의 위치가 다소 만입형이므로, 이곳은 2와 3단구의 실제 단구면이 아닌 홀로세 퇴적물로 채워진 지역으로 해석하였다. 따라서 고도와 지형 평탄면의 특성으로는 해안단구로 간주할 수 있으나, 단구애가 산사태 지형을 보이고 있어 Yoko Ota의 의견에 이의를 제기하기는 어렵다. 이에 대한 증명을 위해 시추를 통한 퇴적물 검증이 필요한 지역이다. 그러나, 미국의 해안 단구 전문가인 D. Merritts(현장자문)는 Yoko Ota와는 달리 이 지역이 산사태에 의한 홀로세 퇴적물이 약간 덮여 있으나, 해안 단구 발달지역임에 의심의 여지가 없다고 하였다.

남창천을 따라서 간헐적으로 2단구의 하안 단구가 발달하고 있다. 남창지역에서 관찰되는 하안 단구의 2단구면은 소규모이고, 현재 단구면상에는 아파트가 건립되어 있다. 이 지역의 2단구에는 수 m 층후를 갖는 하성 퇴적층과 이를 덮고 있는 토양층으로 구성되어 있으며 해침의 증거가 될 수 있는 해성퇴적층은 없다.

해안 단구의 퇴적층은 나사리와 비학마을에서 관찰되고 있으며, 모두 단구면의 외측부에 위치하고 있는 것이 특징이다. 남쪽에서는 2단구의 지표면에 암갈색의 토양과 함께 해빈 자갈들의 잔존물로 남아있을 뿐 층후를 이루고 있는 해성 단구 퇴적층은 없다.

5.3. 3단구

3단구는 남동해안에서 학자들 사이에 큰 혼돈을 일으키고 있는 단구면이다. 2단구 상위에 바로 발달하는

3단구는 지역에 따라 다르게 발달하고 있기 때문에, 학자들마다 서로 다른 결론을 내리고 있는 단구이다. 3단구의 혼돈을 피하고자 지금까지 사용된 3단구라는 용어를 그대로 사용하면서 정량적으로 단구 분류를 재검토하였다. 3단구는 2개의 단구로 세분되며, 상위의 3단구면을 3a, 하위의 3단구면을 3b로 분류하였다. 즉, 대보-감포 지역에서 11 m의 2단구 상위에 약 20 m의 구정선을 갖는 3단구(하위 3단구: 3b)가 발달하고, 그 직상위에 32 m 내외의 3단구(상위 3단구: 3a)가 형성되어 있다.

이와 대비하여 볼 때, 고리지역의 19~24 m 구정선(Fig. 3)은 3단구의 하위면인 3b에 속하며, 간절곶에서만 나타나고 있는 30 m의 단구면은 구정선의 고도값만으로 3단구의 3a에 대비할 수 있거나, 신기구조운동의 산물인 개방형 습곡구조로 해석할 수 있다. 후자의 경우는 2와 4단구에 연장 발달되지 않으므로 습곡구조로 해석하기는 어렵다. 또한, 전자의 경우는 측면으로 3단구 상위면(3a)이 발달되지 않고 있어 확실하게 3단구의 상위면으로 해석하기가 어려우나 침식·삭박이 어려운 구릉지의 능선부분으로 생각할 수 있다.

진하-일광지역에서 3b의 해안 단구는 고리 남쪽의 월내와 동백리까지 간헐적이고 협소한 분포를 하고 있는 반면에, 북쪽에는 고리 인접의 비학, 서생까지 잘 발달하고 있다.

왜성에는 3단구와 2단구가 발달하고 있으며, 3단구면 사이에 2단구면이 놓여 있어, 단구변위 단층이 발달할 수 있을 것으로 추측되었으나, 현장 조사에서 단층의 증거가 될 수 있는 단구면의 변위가 없었다. 따라서, 3단구 사이에 놓여 있는 2단구의 섭입(embayment)은 2단구 형성시기에 있었던 해침에 의한 것으로 해석된다.

3단구의 퇴적층은 전반적으로 대보에서 남쪽의 일광에 이르기까지 아주 드물게 분포하고 있다. 특히, 진하-일광지역에는 3단구 퇴적물이 신리지역에 박층으로 발달하고 있을 뿐이다. 왜성지역의 3단구에는 육성 기원

의 퇴적물인 붕적층(colluvium)이 단구면을 형성하고 있는 기반암을 부정합으로 덮고 있다. 이 붕적층 상위에 놓였을 3단구 해성 및 하성퇴적물은 모두 침식·삭박된 것으로 해석된다. 3단구 상위의 토양층은 적갈색을 띠고 있어 2단구와 쉽게 구분된다.

5.4. 4단구

진하에서 일광까지 간헐적으로 분포하고 있으며, 아주 협소한 면적으로 발달하고 있다. 대부분의 단구면에는 산사면을 따라 이동된 분급이나 원마도 등이 매우 불량한 쇄설성의 퇴적층으로 덮여있어, 확실한 구정선 고도를 측정할 수 없다. 그러나, 나사리와 문동리에 구정선 지형면이 잘 보존되어 있으며 이곳의 평균 고도는 44 m(Fig. 3)이다. 4단구에는 퇴적층이 없으며 단지 토양층과 섞여 있는 해변 자갈들이 있을 뿐, 충후를 형성하지는 않는다.

6. 단구 형성시기와 용기울

6.1. 단구 형성시기

국내 동향 : 단구면의 형성 시기는 단구면에 고착하여 사는 산호화석과 연체동물화석, 혹은 단구 퇴적층 내에서 발견되는 동식물 화석들에 의하여 우라늄 비평형계, 탄소연대측정 등으로 결정한다. 그러나, 남동해안에서는 아직까지 동물화석은 산출된 바 없고, 단지 단구퇴적물 상부에 형성되어 있는 토탄층이 불연속적으로 발견되었을 뿐이다.

현재 우리나라에서는 OSL에 의하여 단구형성시기를 규명하려는 노력을 1998년 이후부터 지금까지 해왔다. 그러나, OSL 연대는 단구 평탄면에 퇴적된 퇴적층에 대한 연대로서 단구 형성 연대를 직접적으로 지시하지 않는 경우가 더 많다. 해침에 의하여 해안 단구의 평탄면이 형성되며 퇴적층은 평탄면 형성 후 해퇴가 일어나는 시점에서부터 단구퇴적층이 형성되므로 단구 평탄면 형성시기보다는 빙기가 시작되는 초기를 지시한다.

지금까지 단구연대에 대하여 많은 학자들이 서로 다른 견해를 보이고 있으나 단구의 형성시기를 논하기 전에, 조사지역에 몇 개의 단구가 형성되어 있는지를 우선적으로 규명하여야 한다. 지금까지는 구정선의 연장 추적 및 고도 값의 변위 추세와 각 단구들에 대한 지역간의 대비가 정량적으로 제시되지 않은 채로, 막연하게 10 m 이상의 범위 값을 갖는 구정선을 기준으로 하여 단구의 차수를 논하여 왔기 때문에, 2와 3단구가 혼동되어 적용되었다. 즉, 20 m의 구정선은 2단

구라는 개념으로 모든 지역에 대비하였거나, 30~40 m의 구정선이 3단구라는 막연한 개념으로 모든 지역에 적용하였으므로, 각 차수의 단구 형성연대를 정의하는데 상호 혼란을 초래하였다.

예를 들면, 왜성의 20 m 구정선을 갖는 단구를 경북 경주시 양남면 지역의 2단구에 대비하였고, 왜성지역 퇴적물의 OSL 연대에 근거하여 2단구의 형성연대가 MIS 5e라고 정의한 적도 있었다. 그러나, 단구 조사 결과, 왜성의 20 m 단구는 다른 지역의 3단구 하위면과 대비됨이 규명되었고, 단구 형성 시기도 OSL 연대로 지지되는 MIS 5c로 정의되었다.

또한, 포항 북쪽의 용한리 고사구층이 퇴적된 단구들은 고도에 의해 3단구와 2단구면으로 일컬어지고 있다. 각 단구에서 OSL 연대가 측정되었으며, 이를 근거로 일부 학계에서는 용한리의 3단구 형성시기를 마지막 간빙기(MIS 5c~5e)로 보는 경향이 있다. 그러나, 용한리 고사구층이 발달하고 있는 단구면들은 그 지역 일원에 대한 전체적인 단구 발달사가 아직 규명되어 있지 않기 때문에, 타 지역(양남면 일원)과 지형 고도만으로 대비하여 그 곳의 단구를 2와 3단구로 정의하기는 어렵다. 즉, 해안 단구에 대한 정량적인 분류가 확립되어 있지 않은 곳에서 연대측정만으로 단구의 형성시기를 정할 경우에는 혼란을 가져올 수 있으므로, 단구 조사 자료를 바탕으로 각 단구의 형성시기와 용기울을 논하는 것이 바람직하다.

위에서 정의되어진 각 지역의 2단구와 3단구 중의 한 단구가 마지막 간빙기의 시대인 MIS 5조(組, stage)(80,000년~125,000년)에 해당된다는 것은 대부분의 국내 학자들이 동의한 결과이나, MIS 5조(stage) 중 최후기 간빙기인 5e(substage)에 형성된 단구에 대해서는 많은 논란이 있다.

단구 형성시기 : 대보-일광 지역에 대한 정량적인 해안단구조사(mapping) 결과에 의하면, 제 3단구의 상위면(3a)이 마지막 간빙기 중 5e 아조에 대비된다. 그 이유는 다음과 같다.

1) 3단구가 2단구보다 넓은 면적에 걸쳐서 발달하고 있으며 또한 분지되지 않았다는 점은 3단구가 MIS 7이나 MIS 9에 속할 가능성이 적음을 지시한다. 적색토양은 마지막 간빙기인 5e시기에 형성되며, 이미 형성되어 있는 4단구면의 토양층을 적색토양으로 만든다. 대보에서 일광지역의 단구를 조사한 결과 적색토양은 4단구에 형성되어 있다. 오건환(1981)도 역시 3단구에는 적색토양이 아닌 황색 토양이 발달하고 있으며 적색토는 4단구면에 대비되는 감포면에 발달하고 있음을 보고 하

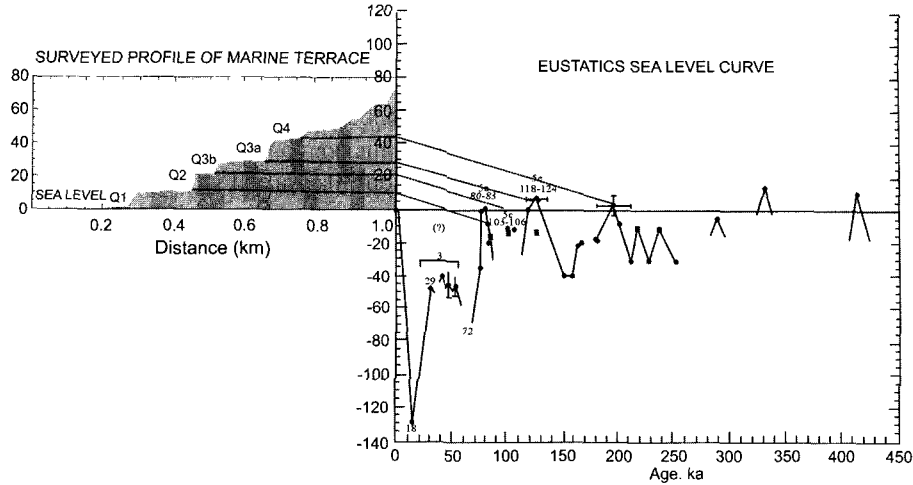


Fig. 4. Eustatic sea level curve(Chappell and Shackleton, 1986; Gallup *et al.*, 1994) and correlation of interglacial and interstadial sea-level high stands with emergent marine terraces on Jinha-Ilgwang.

였다. 따라서, 적색토는 3단구면이 형성하고 있는 시기에 이미 융기되어 있던 4단구면에 발달한 것이다. 일부 학계에서는 3단구 퇴적층(예, 수렴)의 최상위 토양을 적색토라고 하였다. 그러나 이는 갈색~황갈색이며, 때로는 진한 갈색 부분이 적갈색을 띠는 경우도 있는데, 이를 적색으로 오인한 것으로 보인다.

2) 하구에 위치하고 있는 양남면 하서리의 2단구면 최하부에는 하성층이 퇴적되어 있으며, 상위에 해성 퇴적층이 형성되어 있다. 또한, 읍천지역의 3단구에도 하부로부터 하성층-해성층-하성층의 순서로 놓인다. 그러므로 하구에 위치하고 있는 2와 3단구에는 해침을 지시하는 퇴적층이 발달하고 있으며, 이와 같은 일련의 퇴적층들은 2와 3단구면이 마지막 간빙기인 5조에 형성되었다는 사실을 지시한다.

3) 또한, 정자리의 2단구 퇴적층은 하부에 해성 퇴적층이 퇴적되어 있으며 그 붕적층은 3매의 토탄층을 겹쳐하고 있다. 정자리의 해성 퇴적층은 간빙기가 끝난 직후의 이수(離水)시기부터 형성된 초기 빙기의 퇴적물이며, 상위의 붕적층은 이보다 훨씬 젊은 층이다. 따라서 오류리, 정자리, 비학 등지에서 도출된 50,000~70,000년의 2단구 OSL 연대(한국수력원자력(주) a와 b, 2002; 최위찬 등, 2000)와 정자리 토탄층의 ¹⁴C AMS의 연대인 30,000년에서 35,000년(최위찬 등, 2000)은 매우 합리적인 연령 값으로 해석된다. 따라서, 2단구는 빙기가 시작되기 전의 간빙기가 2단구의 형성시기가 되므로 2단구는 산소동위원소 5a에 대비된다.

4) 최근 일본인들에 의하여 정자 2단구 퇴적층에서 발견된 아타테프라(ATA Tephra) 산사태에 의하여 형

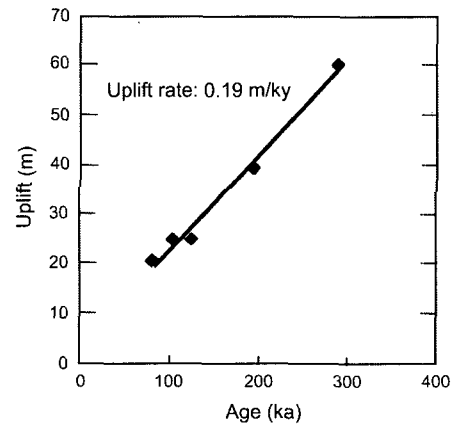


Fig. 5. Plot of uplift versus age of the marine terraces at Jinha-Ilgwang area.

성된 퇴적층 내의 토탄층에서 발견된 것으로, 상위의 3단구면에 있었던 것이 재 퇴적된 것으로 검증되었다. 그러므로, 아타테프라 연대에 대비하여 주장되는 2단구의 MIS 5e는 그 의미를 잃어버렸다.

5) 이와 같은 사실들을 종합하여, 각각의 단구를 고해수면곡선의 간빙기 시대에 대비하는 그래픽 방법(Graphic method)에 대입하여 보았을 때, 3단구 상위면(3a)은 MIS 5e, 3단구 하위면(3b)은 MIS 5c, 2단구는 MIS 5a에 대비된다(Fig. 4). 또한, 3단구보다 상위에 있는 4단구는 MIS 7에 대비된다.

6) 단구 형성시기와 융기된 단구고도간의 상관관계 그래프(Fig. 5)에서 각 단구를 도시화하면 일련의 선상에 놓이므로 5)에서 제시되었던 단구 형성시기는 합리적 결론이다.

6.2. 용기울

단구의 용기울은 지각운동이 제 4기 동안에 있었음을 지시하고 있으며, 이는 지각균형(Isostasy)이나 지구조적인 운동에 의하여 일어난다. 일반적으로 지각균형에 의하여 형성된 용기울은 주변지역이 빙하의 직접적인 영향권 내에 있거나(예를 들어 스칸디나비아 반도), 화산 활동에 의하여 지각의 두께가 달라 질 경우에 일어나는 것으로 알려져 있다. 또한, 지각균형에 의한 용기울 일 경우에는 점이적 지형 변화를 가져오는 것이 특징이다. 한반도의 제 4기 지구조사(地溝造史)와 고기(古期)환경을 감안하여볼 때, 우리나라는 지각균형 보다는 지구조운동에 의하여 일어난 용기울작용으로 해석되며, 이는 울산단층과 양산단층에 발달하고 있는 제 4기 단층과 유관한 것으로 생각된다.

용기울 산출은 단구의 형성시기와 단구의 구정선 고도가 결정되어야 한다. 이들을 고해수면 변동곡선에 대입하여 단구 형성시기 뿐만 아니라 용기울도 계산해낸다. 고해수면 변동곡선은 New Guinea와 Barbados 지역의 해안 단구로부터 도출된 곡선을 이용한다. 고해수면 곡선은 해면 변화자료를 많이 취할 수 있는 곳에서 만들어질 수 있기 때문에 지속적인 용기울운동이 일어나는 곳에서 이루어진다. 두 곳에서 만들어진 해수면 변동곡선은 일반적으로 신기 단층운동 연구에 적용되고 있다.

단구 형성시기는 각각 2단구가 MIS 5a의 80,000년, 3단구 하위면은 MIS 5c, 3단구 상위면은 MIS 5e의 125,000년이다. 따라서, 이 지역의 각 단구별 용기울은 2단구가 약 0.25 m/ky, 3단구가 약 0.22 m/ky, 4단구가 약 0.2 m/ky로 계산되며, 평균 용기울은 0.19 m/ky로 산출된다.

이 지역의 0.19 m/ky 용기울은 활동성이 적은 판내부에서 보여주는 값으로 우리나라의 지각은 대체로 안정된 곳임을 알 수 있다. 그러나, 각 지역마다 서로 다른 용기울을 보이고 있음은 지역간에 불연속면이 존재함을 지시하고 있으며, 이는 울산단층대와 양산단층대에서 출현하는 제 4기 단층과 유관한 지구조운동의 영향으로 분석된다.

7. 결 론

해안 단구지형이 약하게 발달하고 있기는 하나 구정선의 고도 변위를 근거로 하여 남동해안지역에 대한 지구조 운동을 논할 수 있는 조사자료들이 축적되었다.

가) 해안 단구면은 홀로세를 포함하여 4개의 단구로

분류된다. 2단구와 3단구는 연속적인 발달 양상을 보이나 4단구는 간헐적인 양상을 보인다.

나) 3과 2단구는 각각 마지막 간빙기에 형성되었으며, 이들은 5c, 5a에 대비되고 이 지역에는 마지막 간빙기인 약 125,000년(5e)에 형성된 단구는 분포하지 않는다.

다) 진하-기장 지역의 평균 지반 용기울은 0.19 m/ky이고, 구정선 고도는 남쪽으로 침강하는 현상을 보인다.

진하-일광사이의 지각 용기울은 0.19 m/ky로서 이는 활동성이 적은 판내부에서 보여주는 값으로 남동해안의 지각은 대체로 안정된 곳으로 규정지을 수 있다.

그러나, 뚜렷하게 차이를 보이지는 않지만, 북쪽에서 남쪽을 향하여 구정선이 점이적으로 감소하는 고도차는 남쪽이 하강하는 양상을 띄고 있다. 이는 남쪽으로 가면서 용기울이 감소함을 의미하며 서해안과 연루된 침강작용을 하고 있는 것으로 해석된다.

참고문헌

- 윤순옥, 황상일 (2000) 한국 남동해안 해안 단구의 지형형성 Mechanism. 대한지리학회, 35권, p. 17-38.
- 조화룡 (1978) 한국포항주변해안평야의 지형발달. 동북지리, 30권 p. 152-160.
- 최위찬 외 (2000) 신기지각변형연구. 지진재해대응기술개발사업. 한국자원연구소. 과학기술부. N2-01-02-A-01.
- 한국수력원자력(주)a (2002) 신월성 1,2호기 예비 안정성 분석 보고서. 2권, 451p.
- 한국수력원자력(주)b (2002) 신고리 1,2호기 예비 안정성 분석 보고서. 3권, 401p.
- 황상일과 윤순옥 (1996) 한국 동해안 금곡지역 해안단구의 퇴적물 특성과 지형 발달. 한국지형학회지, 3권, p. 99-114
- Chappell, J.M. and Shackleton, N.J. (1986) Oxygen isotopes and sea level. Nature, v. 324, p. 137-140.
- Choi, S.G. (1999) Tectonic Movement indicated by the Last Interglacial Shorelines in the Eastern Coast of Korea. Proceedings Korea-Japan/Japan-Korea Geomorphological Conference. The Summer Meeting of GAK in 1999, p. 7-10.
- Gallup, C.D., Edwards, R.L. and Johnson, R.G.(1994) The timing of high sea levels over the past 200,000 years. Science, v. 263, p. 796-800.
- Kim, S.W. (1973) A study on the terraces along the southeastern coast(Bangeo jin-Pohang) of the Korean Peninsula. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 9, p. 89-121.
- Lee, D.Y. (1987) Stratigraphical research of the Quaternary Deposits in the Korean Peninsula. Korean Jour. Quat. Research, v. 1, p. 3-20.
- Miyauchi (2001) Late Quaternary Regional Crustal Movement in the Korean Peninsula and Japanese Islands through Paleoshoreline Analysis. Japanese Geomorphological Union, v. 22, p. 277-285
- Oh, G.H. (1977) The geomorphic history of the south-

eastern coast of the Korean Peninsula. Geographical Review of Japan, v. 50, p. 689-699 (in Japanese).
Oh, G.H. (1981) Marine Terraces and their Tectonic Deformation on the Coast of the Southern Part of the

Korean Peninsula. Bull. Dept. Geography, Univ. of Tokyo, v. 13. p. 1-61.

2003년 5월 13일 원고접수, 2003년 6월 18일 게재승인.