

BSPE 00545-888-5

## 동해 남부 울릉분지의 지구조적 진화 연구

A Study of Tectonic Evolution of  
the Southern Ulleung Basin, East Sea

1996. 3

한국해양연구소

## 제 출 문

한국해양연구소 소장 귀하

본 보고서를 “동해 남부 울릉분지의 지구조적 진화 연구”의 최종  
보고서로 제출합니다.

1996년 3월

연구책임자 : 최 동 립

# 요 약 문

## I. 제 목

동해 남부 울릉분지의 지구조적 진화 연구

## II. 연구내용 및 결과

탄성과 탐사 단면도와 시추자료들을 이용하여 울릉분지 남쪽 연변부에 대한 신생대 지질구조 및 지구조 진화과정을 연구하였다. 대한해협 하부 기반암에는 일련의 정단층들이 북동-남서 방향으로 발달해 있다. 정단층들은 울릉분지가 초기 리프팅 및 확장의 신장성 지구조운동 동안 형성된 것으로 해석된다. 쓰시마단층대가 대한해협과 쓰시마해협의 경계를 이루며 쓰시마 섬 서측 연안에서 울릉분지 중심부를 향해 북동-남서 방향으로 발달했다. 쓰시마해협의 중기 마이오세 및 고기 퇴적층은 압축성 지구조운동에 의한 북동-남서 방향의 습곡 및 단층구조들이 우세하게 발달해 있다. 후기 마이오세에서 제4기 퇴적층은 거의 지층변형을 받지 않았으나, 쓰시마해협에는 동-서 방향의 단층구조들이 우세하게 발달해 있다.

초기 울릉분지는 올리고세의 리프팅에 의해 형성되었으며, 이어서 초기 마이오세 부터 중기 마이오세 초기까지 확장운동과 침강이 활발하게 진행되었다. 이 때 서남 일본지괴는 한반도로 부터 분리되어 남동방향으로 이동하였으며, 울릉분지는 발산성 우수주향이동 신장운동을 받으며 인리형 분지(pull-apart basin)를 형성한다. 쓰시마단층대는 한반도와 서남 일본지괴를 분리시키는 주 구조선으로서, 서남 일본지괴가 남동쪽으로 이동할 때 정단층과 함께 우수주향이동 운동을 한다. 중기 마이

오세 중기에서 후기 마이오세 초기 동안 울릉분지 남쪽 연변부는 열개운동이 중단되고 압축성 지구조 운동에 의한 지층의 용기작용이 일어난다. 서남 일본지괴의 한반도쪽으로의 수렴운동은 울릉분지의 남쪽 연변부에 대해 압축응력을 미쳤으며, 이는 곧 수렴성 좌수 주향이동에 의한 지층의 압축변형을 야기한다. 쓰시마 단층대는 트러스트단층과 함께 좌수 주향이동 단층운동을 한다. 후기 마이오세 중기에서 현재 동안 울릉분지 남쪽 연변부는 압축성 지구조 운동의 지배를 받는다. 쓰시마 단층대는 압축응력을 받아 트러스트단층 운동이 일어난다.

# SUMMARY

## I. Title

A Study of Tectonic Evolution of the southern Ulleung Basin, East Sea

## II. Abstract

The Cenozoic geological structures and the tectonic evolution of the southern Ulleung Basin were studied with seismic profiles and exploration well data. Basement structure of the Korea Strait is distinctly characterized by normal faults trending northeast to southwest. The normal faults of the basement are most likely related to the initial rifting and extensional tectonics of Ulleung Basin. Tsushima fault along the west coast of Tsushima islands runs northeastward to the central Ulleung Basin. The Middle Miocene and older sequences in the Tsushima Strait show folds and faults mostly trending northeast to southwest. These folds and faults may be interpreted as a result of compressional tectonics. The Late Miocene to Quaternary sequences are not much deformed, but numerous faults mostly N-S trending are dominated in the Tsushima Strait.

The Ulleung Basin was in initial rifting during Oligocene, and then active extension and subsidence from Early to early Middle Miocene. Therefore SW Japan separated from Korea Peninsula and drifted toward southeast, and Ulleung Basin was formed as a pull-apart basin under dextral transtensional tectonic

regime. During rifting and extensional stage, Tsushima fault as a main tectonic line separating SW Japan block from the Korean Peninsula acted as a normal faulting with right-lateral strike-slip motion as SW Japan drifted southeastward. During middle Middle Miocene to early Late Miocene, the opening of Ulleung basin stopped and uplifted due to compressional tectonics. The southwest Japan block converging on the Korean Peninsula caused compressional stress to the southern margin of Ulleung Basin, resulting in strong deformation under sinistral transpressional tectonic regime. Tsushima fault acted as thrust fault with left-lateral strike-slip motion. From middle Late Miocene to Quaternary, the southern margin of Ulleung Basin has been controlled by compressional motion. Thus the Tsushima fault still appears to be an active thrust fault by compressional tectonic regime.

## 차 례

표 목차(List of Table)	8
그림 목차(List of Figures)	9
제 1 장 서론	12
제 1 절 연구자료	14
제 2 절 해저지형	16
제 2 장 연구 방법	18
제 3 장 일반 지질	24
제 1 절 동해의 지질	24
제 2 절 울릉분지의 지구조 연구	26
제 4 장 지질구조 분석 및 해석	28
제 1 절 지질구조 분석	28
제 2 절 지질구조 해석	42
제 5 장 분지의 진화과정	48
제 6 장 결론	52
참고 문헌	54

## 표 목차(List of Table)

Table 1. Stratigraphic correlation of the study area and adjacent area. ——— 23



## 그림 목차(List of Figures)

- Fig. 1. Tectonic map of the East Sea(modified after Jolivet and Tamaki, 1992) and the study area outlined by heavy line. 1, continental blocks; 2, oceanic crust; 3, oceanic crust and extremely thinned continental crust(ruled); 4, thinned continental crust. BTL, Butsuzo Tectonic Line; IBR, Izu-Bonin Ridge; ISTL, Itoigawa-Shzuoka Tectonic Line; KPR, Kyushu-Palau Ridge; kyb, Kita Yamato Bank; MTL, Median Tectonic Line; nkr, North Korean Ridge; ob, Oki Bank; TF, Tsushima Fault; TTl, Tanakura Tectonic Line; skr, South Korean Ridge; yb, Yamato Bank; YF, Yangsan Fault. Pb-Zn and Cu-W represent the metallogenic belts offset by the Yangsan and Tsushima faults described in Sillitoe(1977). —————13
- Fig. 2. Map of ship's track with locations of 6 exploration wells in the study area. Heavy line segments with number show location of profiles illustrated in figures of this text. D-1=Dolgorae-1; HG-1=Hagi-1; HM-1=Hamada-1; K-1=Kokubu-1; O-1=Oki-1; Y-1=Yamaguchi-1. —————15
- Fig. 3. Bathymetric map of the Korea-Tsushima Strait region. Contours are in meters. —————17
- Fig. 4. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing 5 Units, such as Unit Q(Quaternary), Unit P(Pliocene), Unit ML(Late Miocene), and Unit MM(middle Miocene and Older) in descending order. —————19
- Fig. 5. An example of multi-channel seismic profile showing sequences that are divided into 5 Groups(X through D)(after Itoh et al., 1992). X through K-Group sequences are strongly deformed by compressional tectonics. ———20
- Fig. 6. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing 4 Units(Unit Q, Unit P, Unit ML, and Unit MM) that are divided by geologic information of Dolgorae-1 and Yamaguchi-1 wells. —————21

- Fig. 7. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing 4 Units(Unit Q, Unit P, Unit ML, and Unit MM) that are divided by geologic information of Hamada-1 well. —————22
- Fig. 8. Time structural map of the top Unit MM(middle Miocene). Contour depth(in second) are below present sea level. 1=thrust fault(sawteeth on upthrown side); 2=normal fault(bar on downthrown side); 3=fault(type uncertain); 4=anticline, showing plunge; 5=syncline, showing plunge; 6=monocline, showing plunge. —————29
- Fig. 9. An example of interpreted seismic section showing 4 Units(Unit Q, Unit P, Unit ML, and Unit MM) that are divided by geologic information of Dolgorae-1 well(modified after Park, 1987). Right side of section showing the folding structure and the Tsushima fault. —————30
- Fig. 10. An example of single-channel seismic profile with interpreted section across the Korea Strait showing the Tsushima fault as act thrust fault. —31
- Fig. 11. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing evidently folding structures of Unit MM that is unconformably covered by undeformed younger units. Note that mass flow sediments showing chaotic seismic facies(ch) occur in lower slope area. —32
- Fig. 12. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing depressed trough filled by thick sediment. —————34
- Fig. 13. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing strongly deformed and uplifted Unit MM with faults and folds structures by NNW-SSE compressional regime. Note that massflow sediments showing chaotic seismic facies(ch) occur in lower slope area. —35
- Fig. 14. An example of single-channel seismic profile with interpreted section across the Korea Strait showing slightly deformed sequences compared with strongly deformed in the Tsushima Strait. —————36
- Fig. 15. Time structural map of the top Unit ML(late Miocene). Contour depth(in second) are below present sea level. Note that hatched areas indicate outcrops of pre-Unit ML. 1=thrust fault(sawteeth on upthrown side); 2=normal fault(bar on downthrown side); 3=fault(type uncertain). —37

- Fig. 16. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing the Tsushima thrust faults that cut through sedimentary layers from Unit MM to Unit Q. —————38
- Fig. 17. Time structural map of the top Unit P(Pliocene). Contour depth(in second) are below present sea level. Note that hatched areas indicate outcrops of pre-Unit P. 1=thrust fault(sawteeth on upthrown side); 2=normal fault(bar on downthrown side); 3=fault(type uncertain). —————40
- Fig. 18. Structural map of the Unit Q(Quaternary). 1=normal fault(bar on downthrown side); 2=fault(type uncertain). Water depth are in meters. ———41
- Fig. 19. The structural map of southern Ulleung Basin. Normal faults off SE Korea occurred in basement and folds and thrust faults off SW Japan including the Tsushima Islands formed from basement(?) through early Late Miocene sequences. The map is compiled and synthesized, in addition to Fig. 7 in this text, from the following : Shimada(1977); Minami(1979); KIER(1982). 1=normal fault on basement(bar on downthrown side); 2=thrust fault(sawteeth on upthrown side); 3=Anticline; 4=syncline. —————43
- Fig. 20. An example of multi-channel seismic profile with interpreted section across the Korea Strait showing normal faults on basement overlain by thick Cenozoic sediment(courtesy of KIER). —————44
- Fig. 21. Folding structural map of Tsushima Islands(Shimada, 1977) compared with left simple shear model by Sylvester(1988). En echelon folds in Tsushima Islands have been produced as a result of sinistral strike-slip along Tsushima fault. —————46
- Fig. 22. Summary diagram of tectonic evolution of southern Ulleung Basin with tectonic role of Tsushima fault. Width of the tectonic activity bars are proportional to the displacement rate. —————49
- Fig. 23. Possible basin evolution across the Korea-Tsushima Strait in southern Ulleung Basin. TF=Tsushima fault; T=displacement toward viewer; A=away from viewer. —————50

## 제 1 장 서 론

동해는 지형적으로 돌출된 해저산맥이나 해산들과 이들에 의해 경계되어진 3개의 퇴적분지 즉, 북쪽의 일본분지, 북동쪽의 야마토 분지, 그리고 남쪽의 울릉분지로 각각 구성되어 있다. 이들 분지중 울릉분지는 서쪽으로 한반도 동해안과 동쪽으로는 서남 일본이 접하고 있으며, 남쪽으로는 대한-쓰시마 해협에 둘러싸여 있다.

울릉분지 남쪽 연변부에 해당되는 대한-쓰시마해협에는 신생대 퇴적층이 약 10 km 이상 쌓여있으며, 석유 및 가스 등 지하자원의 부존가능성이 높은 지역으로 알려져 있다. 따라서 한국 및 일본에서는 1970년대 부터 각각 조사구역을 설정하여 해양지질 및 지구물리탐사가 활발히 진행되었고, 상당량의 자료들이 축적되어 있는 상태이다. 그러나 이들 자료들의 이용은 매우 제한적이며 또한 지질 및 지구물리학적 연구는 한,일 양국의 경제적, 정치적 이익을 고려하여 일부 국한된 지역에서 제한적으로 시행되어 왔다. 또한 이미 발표된 연구결과도 한국 및 일본의 국가 경계선을 기준하여 한국 측은 대한해협에 대해서(Choi and Park, 1985; Barg, 1986; KIER, 1982; Park, 1990), 그리고 일본측은 쓰시마 해협에 대해서만 각각 독자적으로 연구 발표되고 있는 바(Minami, 1979; Itoh et al., 1992), 울릉분지 남쪽 연변부 즉 대한-쓰시마 해협에 대한 종합적이고 통일된 자료 해석과 연구결과가 요구되고 있다.

연구지역인 울릉분지 남쪽 연변부(그림 1)에는 많은 지질구조가 발달해 있으며 특히 연변부 중앙지역에 쓰시마 단층대가 북동-남서 방향으로 발달해 있다(Minami, 1979; Inoue, 1982). 쓰시마 단층은 트러스트 단층으로서 심한 횡압력을 받아 형성된 것으로 사료된다. 쓰시마 단층은 주로 주향이동운동을 한 것으로 보고되었다(Shimada, 1977; Jolivet et al., 1991; Park, 1990). 쓰시마 단층은 동해의 형성에 있어서 중요한 역할을 하였을 것으로 판단된다. 그 주변에 발달한 습곡 및 단층구조들도 동해 형성으로 부터 생겨난 지질구조들이다. 쓰시마 단층대 및 주변의 지질구조의 성격파악과 이에 대한 해석은 동해의 열림과정(opening)에 매우 중요한 단서를 제공

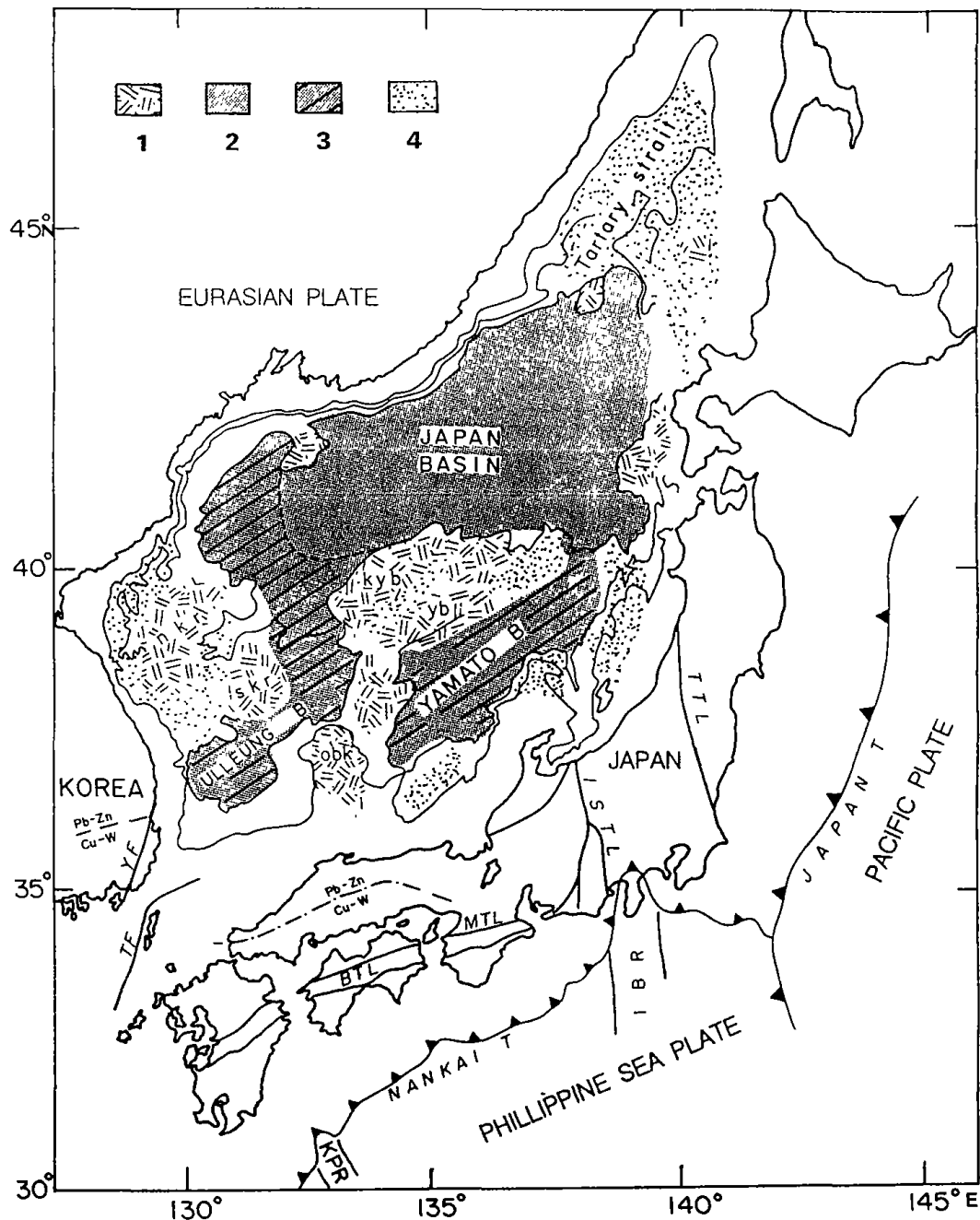


Fig. 1. Tectonic map of the East Sea(modified after Jolivet and Tamaki, 1992) and the study area outlined by heavy line. 1, continental blocks; 2, oceanic crust; 3, oceanic crust and extremely thinned continental crust(ruled); 4, thinned continental crust. BTL, Butsuzo Tectonic Line; IBR, Izu-Bonin Ridge; ISTL, Itoigawa-Shzuoka Tectonic Line; KPR, Kyushu-Palau Ridge; kyb, Kita Yamato Bank; MTL, Median Tectonic Line; nkr, North Korean Ridge; ob, Oki Bank; TF, Tsushima Fault; TTL, Tanakura Tectonic Line; skr, South Korean Ridge; yb, Yamato Bank; YF, Yangsan Fault. Pb-Zn and Cu-W represent the metallogenic belts offset by the Yangsan and Tsushima faults described in Sillitoe(1977).

할 것으로 생각된다.

연구목적은 각 퇴적층서에 발달한 지질구조 발달양상 해석과 시대별 변천과정 연구, 그리고 동해 울릉분지 발달과정의 초기형성에서 부터 현재에 이르기까지 지구 조적 진화(tectonic evolutions)을 밝히는 것이다.

## 제 1 절 연구자료

연구에 이용된 자료는 한국해양연구소와 일본지질조사소가 대한-쓰시마 해협에서 획득한 탄성과 단면도들이다(그림 2). 대한해협의 탄성과 탐사 단면도는 한국해양연구소에서는 1989년, 1993년과 1994년 3년간 걸쳐 대한해협에 대해 단채널 스파커 탄성과 탐사를 실시하였다(KORDI, 1989, 1993, 1994). 탐사 축선의 위치는 1989년도 항해시 로란씨(Loran-C) 항법장치를 그리고 1993년과 1994년 항해시에는 인공위성항법장치 시스템(GPS)을 이용하였다. 축선조사시 조사선의 항속은 8노트를 유지하였다. 쓰시마 해협에 대한 탄성과 탐사자료는 일본 지질조사소가 1985년과 1986년 2년에 걸쳐 획득한 탄성과 탐사자료 중 일부이다(GSJ, 1985, 1986). 탄성과 탐사자료는 단채널 에어건 탄성과 탐사시스템을 이용하여 획득하였다. 조사선의 속도는 약 10 노트(knots)를 유지하였으며, 위치는 NNSS-Loran-C 통합항법시스템(Magnavox Model 200)을 사용하였다. 탄성과 탐사자료 해석 결과에 대한 암상, 지사, 퇴적환경 등을 검증하기 위해 연구해역 및 주변해역에 분포하는 6개의 석유시추자료(Dolgarae-1, Hagi-1, Hamada-1, Kokubu-1, Oki-1, Yamaguchi-1,)(Minami, 1979 ; KIER, 1982)와 오키제도 해역의 탄성과 탐사 자료와 코아 및 그랩 퇴적물에서 얻은 지질정보도 이용하였다(Tamaki et al., 1982).

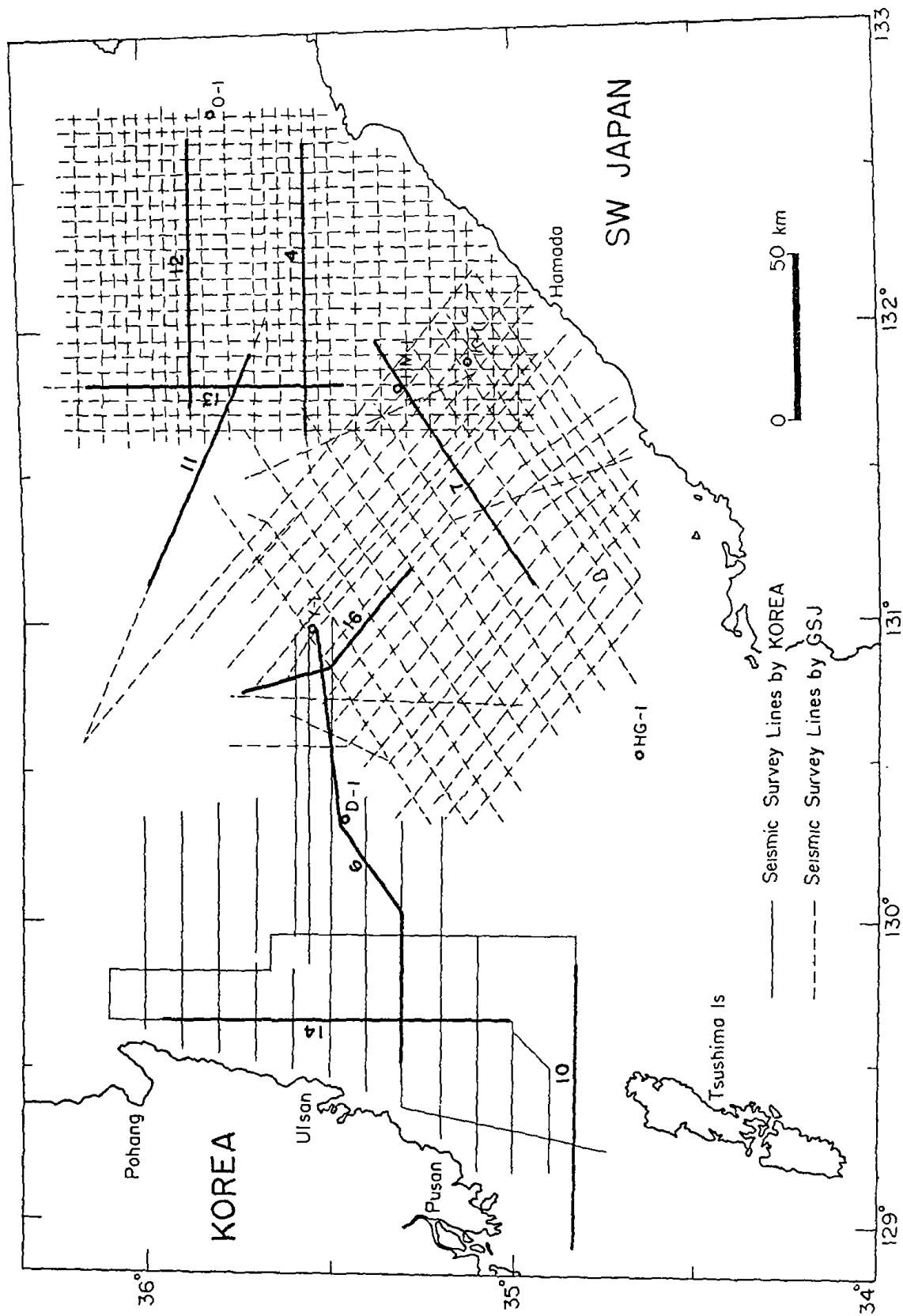


Fig. 2. Map of ship's track with locations of 6 exploration wells in the study area. Heavy line segments with number show location of profiles illustrated in figures of this text. D-1=Dolgorae-1; HG-1=Hamada-1; K-1=Kokubu-1; O-1=Oki-1; Y-1=Yamaguchi-1.

## 제 2 절 해저지형

연구해역은 동해 울릉분지 남쪽 연변부로서 수심 150 m 이하의 비교적 평탄한 해저지형의 대륙붕해역과 급사면의 대륙사면, 그리고 심해분지로 구성된다(그림 3). 대륙붕은 쓰시마 섬을 중심으로 서측의 대한해협 그리고 동측의 쓰시마해협이 위치한다. 대한해협은 쓰시마 해협에 비해 좁으며 해저지형이 한반도 해안에서 부터 서서히 깊어진다. 해안에서 수심 110 m 까지 비교적 급하게 깊어진다. 서남 일본의 해안에도 수심 120 m 까지 해저지형이 비교적 급하다. 한반도와 쓰시마섬 서측 해역에는 200 m 이상 깊이의 해저골(trough)이 북동-남서 방향으로 발달해 있다. 대륙붕단 지역에도 수심 150 m 이상의 해저 수로가 북쪽의 울릉분지를 향해 발달해 있다. 쓰시마해협은 대한해협에 비해 넓으며, 매우 복잡한 해저지형을 보인다. 서남 일본의 해안에서 부터 깊어지는 양상을 보이나, 돌출된 해저지형이 일부지역에 발달해 있다. 돌출된 해저지형은 위도 131° 에서 남-북 방향으로 발달해 있다. 대한-쓰시마 해협에는 완만한 경사의 평탄한 해저지형을 갖은 해저평탄면(marine terrace)가 수심 110-150 m 와 200-400 m 사이에 분포한다. 해저평탄면의 발달 폭은 대한해협은 비교적 좁은 반면 쓰시마해협은 넓게 분포한다. 이들 해저대지는 제 4기 해수면 변동과 관련하여 형성된 것으로 사료된다(Japan Association for Quaternary Research, 1987). 남쪽의 대륙붕 지역에서 북쪽으로 향해 수심이 급격히 깊어지는 대륙사면이 심해분지를 둘러싸는 반원형 형태로 발달해 있다. 대한해협쪽 대륙사면은 비교적 급경사를 이루며 깊어지나, 쓰시마해협쪽의 대륙사면은 보다 완만한 경사면을 이루며 심해로 이어진다. 주로 수심 500 m 에서 1000 m 사이에 불규칙한 해저지형이 발달해 있는데 이는 대륙사면을 따라 발생한 사태 및 함몰운동에 의한 침식 및 퇴적작용 결과로 해석된다(GSJ, 1986; KORDI, 1993). 대륙사면을 지나서 매우 완만하고 평탄한 해저지형의 울릉분지 심해지역으로 이어진다.



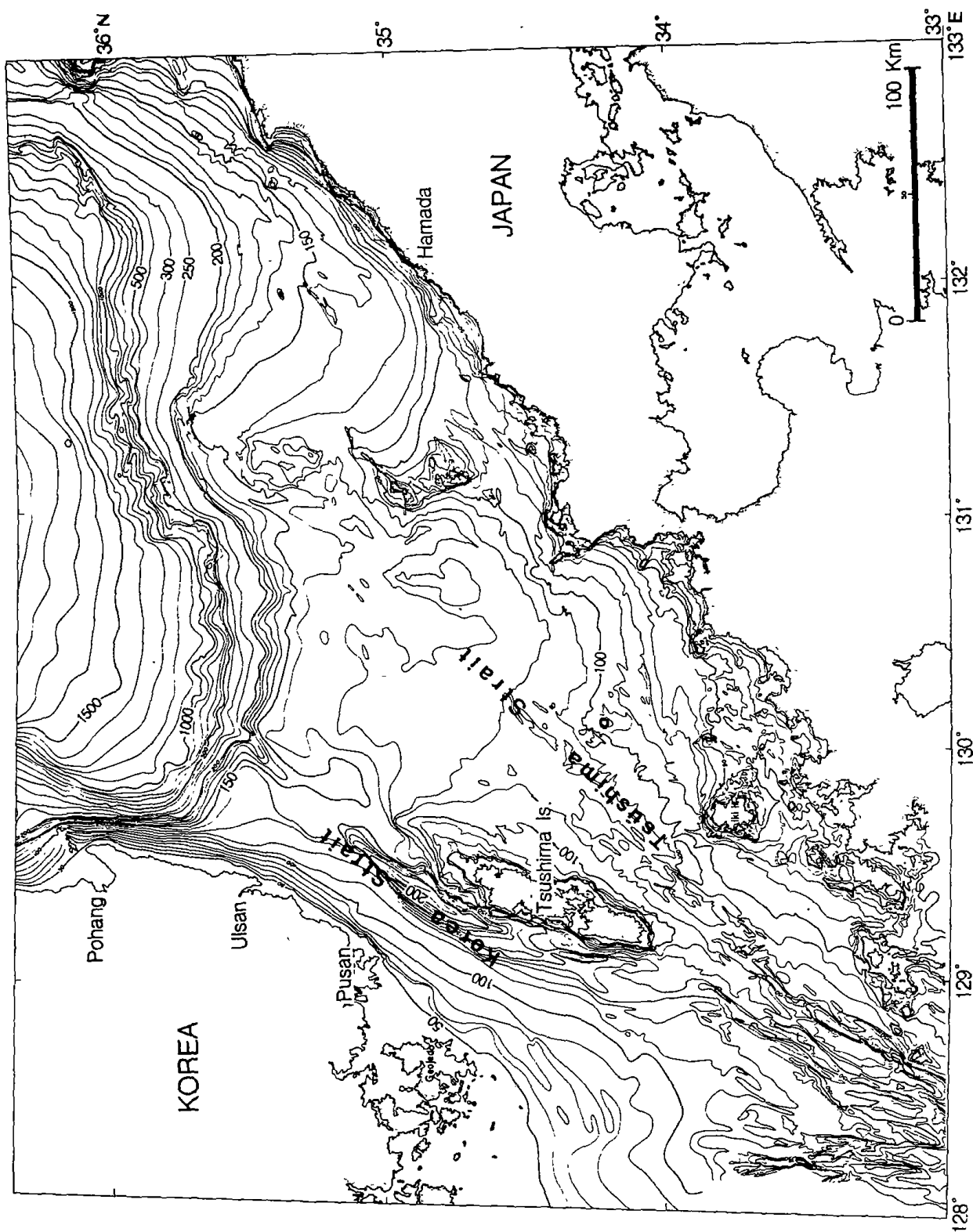


Fig. 3. Bathymetric map of the Korea-Tsushima Strait region. Contours are in meters.

## 제 2 장 연 구 방 법

연구해역에 대한 시대별 지질구조도 작성을 위해 탄성과 층서 분석을 하였다. 탄성과 단면도 분석은 탄성과 층서해석 방법(Vail 등, 1977)과 기존의 석유시추공의 층서 자료 및 해저퇴적물의 자료들을 상호대비하여 탄성과 층서분류를 하였다. 각 층서 분류는 하위층서에서 상위층서로 가면서 Unit MM, Unit ML, Unit P, 그리고 Unit Q의 4개 Unit로 구분하였다(그림 4). 각 Unit의 층서구분은 후기 마이오세 이전의 지층인 경우 연구해역에 위치하는 석유시추공 자료 및 심부 탄성과 단면도(그림 5)(Minami, 1979; 한국동력자원연구소, 1982; Itoh et al., 1992)와 본 연구에 이용된 탄성과 단면도(그림 6, 7)를 상호비교하여 결정하였다. 또한 플라이오세와 제4기 층서는 연구 해역 동측에 위치하는 오키제도 주변 해역에 대한 탄성과 퇴적층서 분류 기준과 해저 퇴적물의 년대측정 결과들을 상호대비하여 결정하였다(Tamaki et al., 1982). Unit MM(후기 마이오세 초기 및 고기 퇴적층)의 퇴적층서는 지층변형을 심하게 받아 습곡 및 단층구조가 특징적이며, 특히 쓰시마해협에 지층이 우세하다. Unit ML(후기마이오세), Unit P(플라이오세) 그리고 Unit Q(제4기)의 상부지층은 하부의 Unit MM과 뚜렷한 경사 부정합면을 이룬다. 이들 지층은 거의 변형을 받지 않았으며 상호 정합적 관계의 퇴적층서를 이룬다. 각 Unit에 대한 층서 및 시대분류는 다음 표 1과 같다.

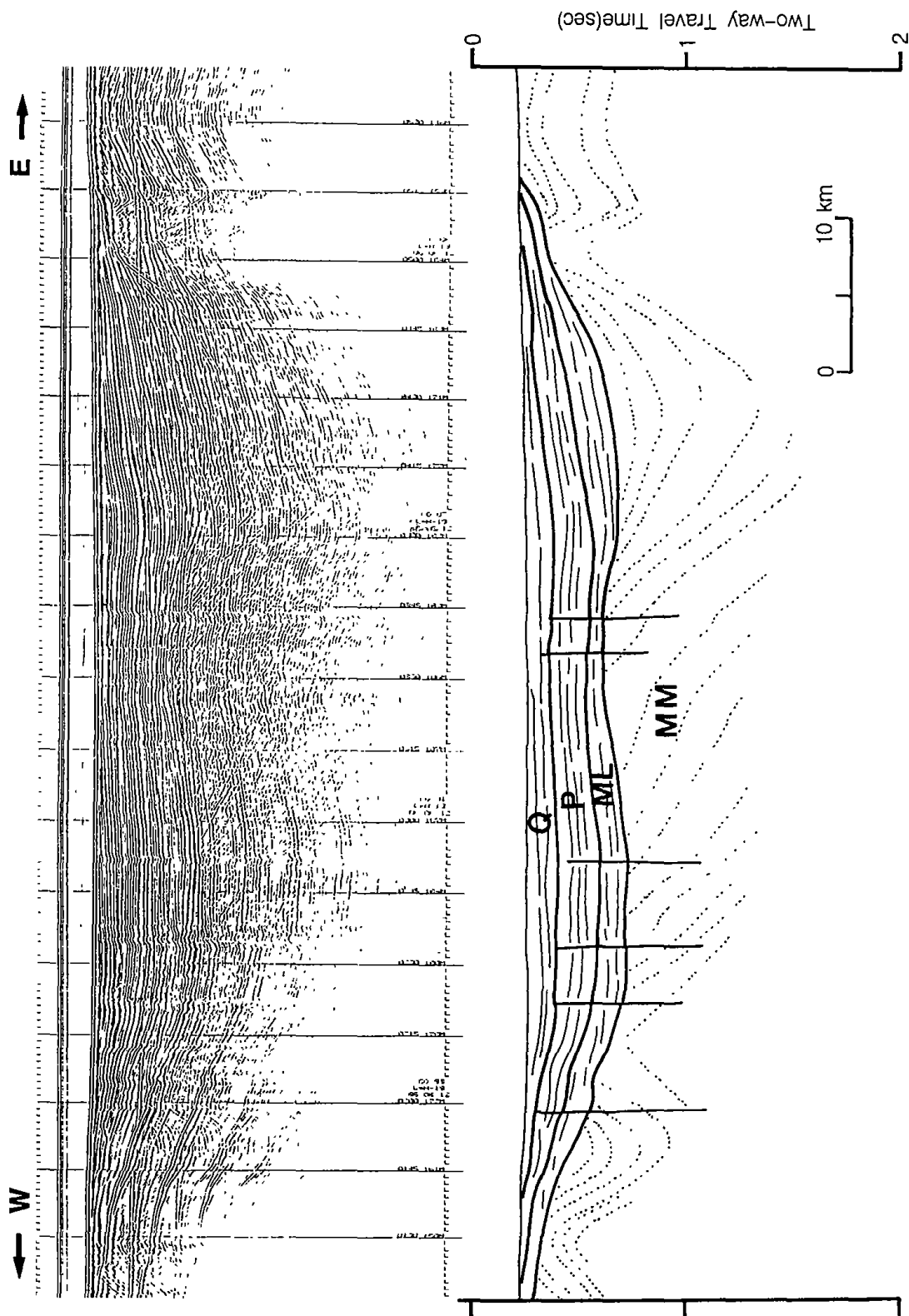


Fig. 4. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing 5 Units, such as Unit Q(Quaternary), Unit P(Pliocene), Unit ML(Late Miocene), and Unit MM(middle Miocene and Older) in descending order.

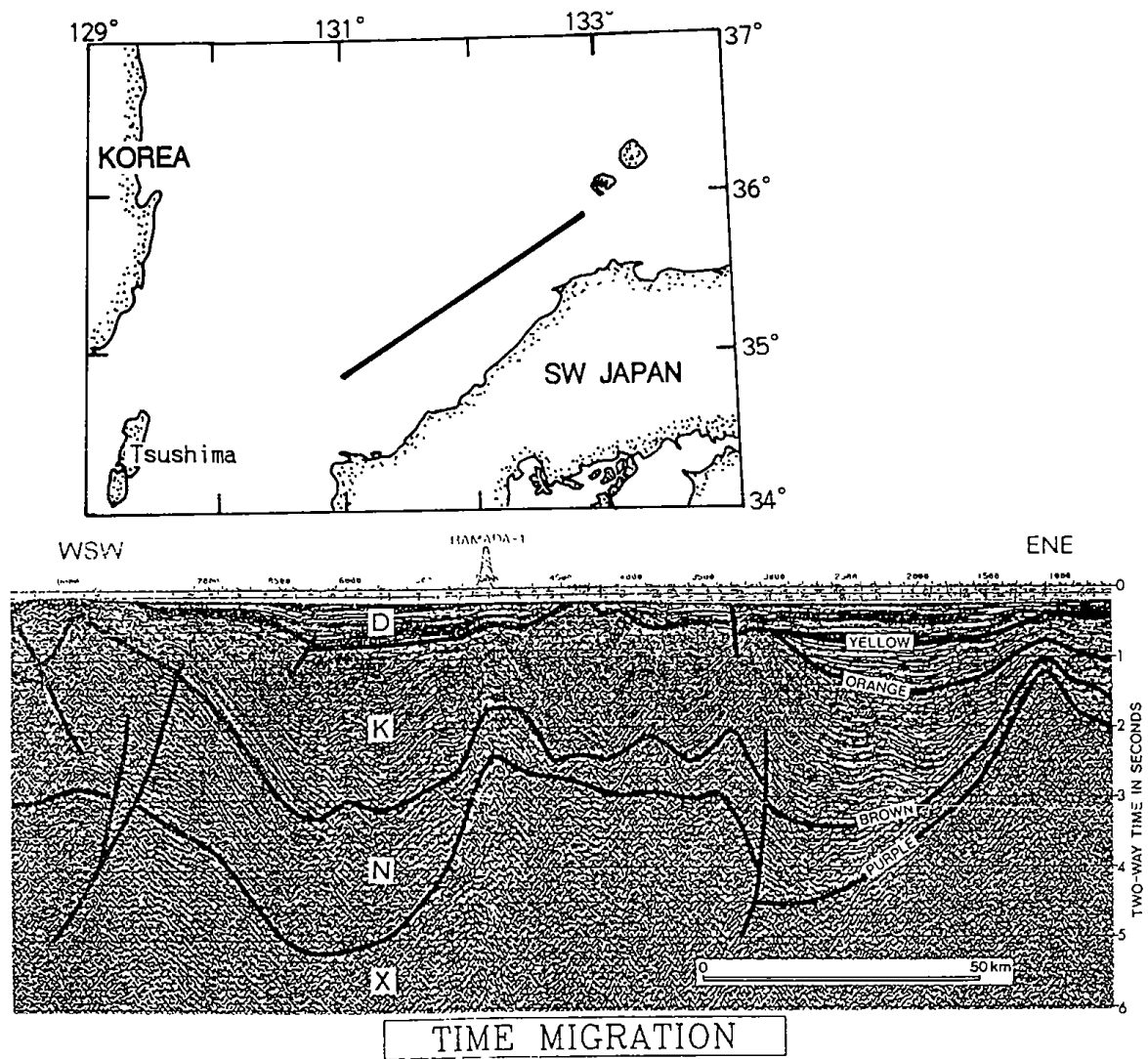


Fig. 5. An example of multi-channel seismic profile showing sequences that are divided into 5 Groups(X through D)(after Itoh et al., 1992). X through K-Group sequences are strongly deformed by compressional tectonics.

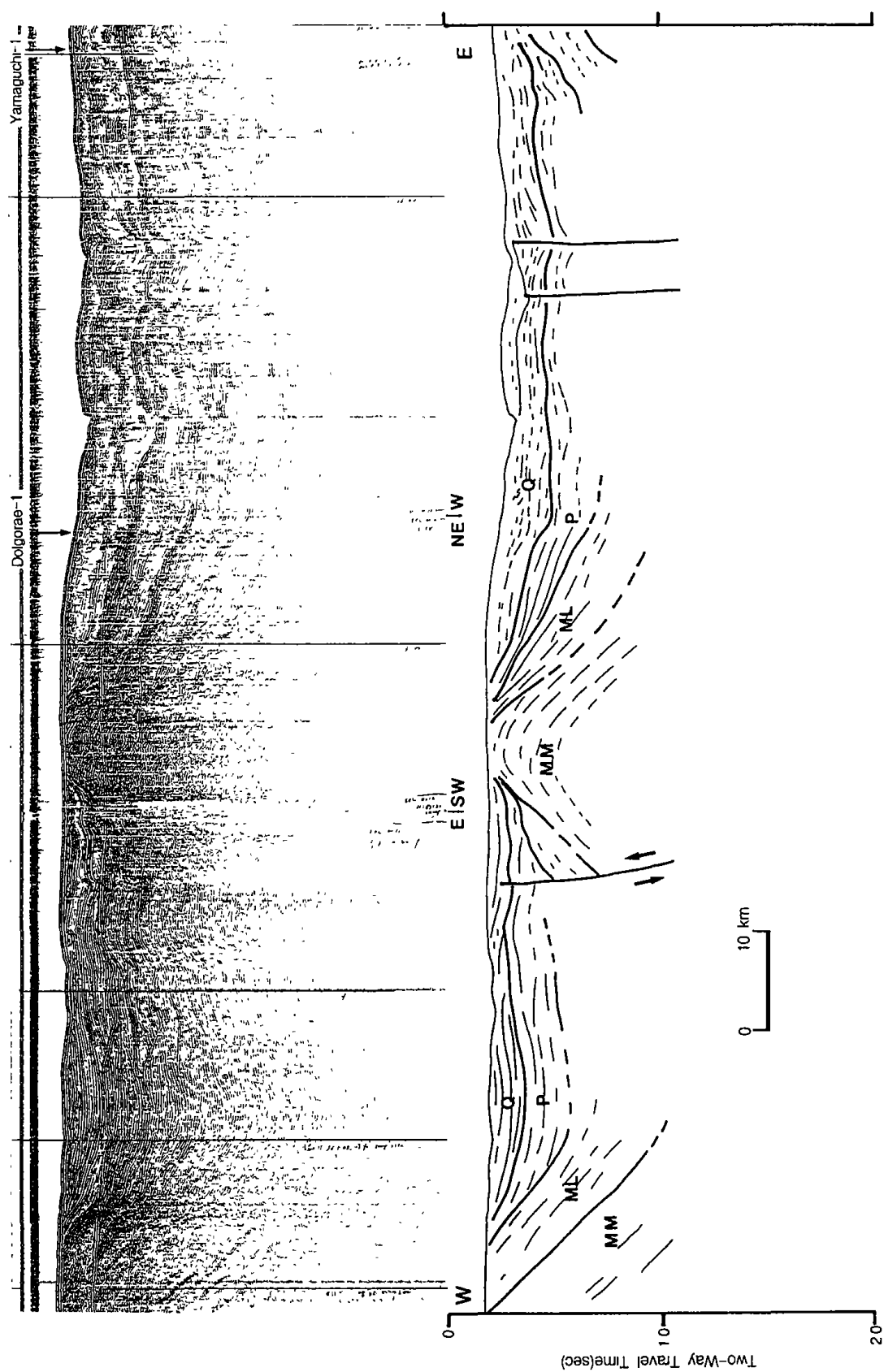


Fig. 6. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing 4 Units(Unit Q, Unit P, Unit ML, and Unit MM) that are divided by geologic information of Dolgorae-1 and Yamaguchi-1 wells.

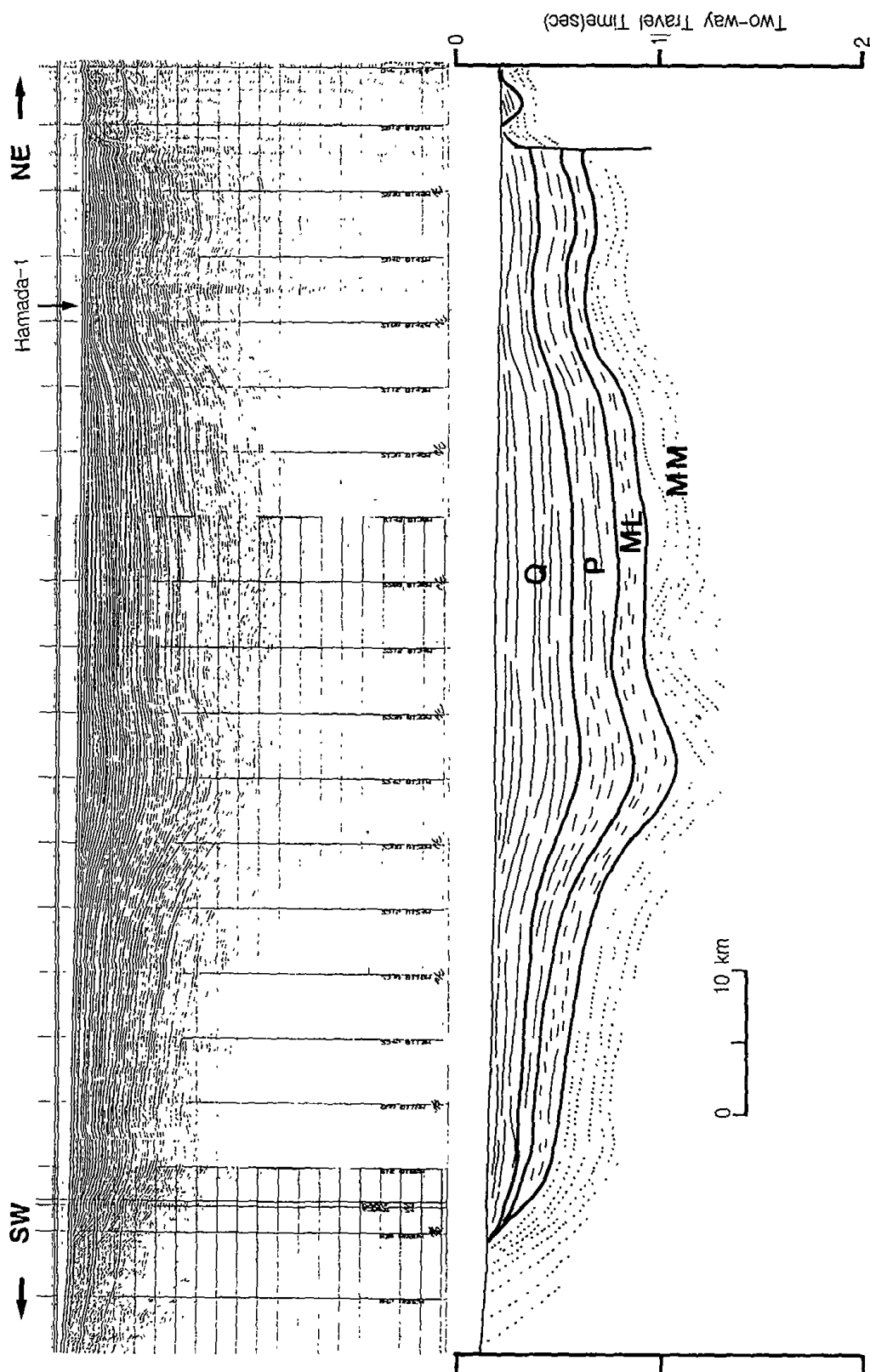


Fig. 7. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing 4 Units (Unit Q, Unit P, Unit ML, and Unit MM) that are divided by geologic information of Hamada-1 well.

Table 1. Stratigraphic correlation of the study area and adjacent area.

Age			Tsushima Strait (modified after Minami, 1979; Inoue, 1982; Itoh et al., 1992)		This study area	Oki Strait (Tamaki et al.,1982)
Quaternary	Holocene		D Group	A Formation	Unit Q	Q1 Layer
	Pleistocene			B Formation		Q2 Layer
Neogene	Pliocene			C Formation	Unit P	P Layer
	Miocene	Late		D Formation	Unit ML	M1 Layer
		Middle	K Group		Unit MM ----- ? -----	M2 Layer
		Early	N Group			
	Paleogene		X Group			

## 제 3 장 일 반 지 질

### 제 1 절 동해의 지질

동해는 일본 열도 배후에 놓여있는 배호상 분지로서 태평양 서측연변부에 발달해 있는 연변해(marginal sea)중 하나이다(Karig, 1971). 동해는 지형적으로 크게 3개의 분지 즉 일본 분지, 야마토 분지, 그리고 울릉 분지가 해령(ridges)과 해저대지(Korea Plateau)들로 경계 분리되면서 독립적으로 각각 발달해 있다(그림 1). 해령이나 해저대지들은 일본 열도가 유라시아 대륙으로 부터 분리될 때 동해에 남아 있는 대륙지각의 조각들이다(Tamaki, 1985; Jolivet et al., 1991). 동해 북쪽에 위치한 일본 분지는 3개의 분지들 중 가장 규모가 크며 최대수심도 가장 깊어 3500 m 이상에 이른다. 퇴적층 두께는 약 2 sec(two-way travel time)이상(Ishiwada et al., 1984)으로 분포한다. 북동쪽의 야마토 분지는 야마토 해령에 의해 일본 분지와 분리되며 최대 수심은 약 2500 m 이고, 최대 1.5 sec이상의 퇴적층이 쌓여 있다. 하부 기반암은 퇴적물과 현무암(basalt sill)이 교호층을 이루고 있다(Tokuyama, 1987). 남부에 위치하는 울릉분지는 한국 해저 대지에 의해 북쪽의 일본 분지와 그리고 오키해령에 의해 북동쪽의 야마토 분지와 각각 분리된다. 최대수심이 2200 m 정도이고, 퇴적층의 두께는 3 sec 이상이다(Lee, 1992). 울릉분지의 음향기반암의 깊이는 울릉분지 중심부에서 최대 약 6 sec. 이상을 보인다(Lee, 1992). 그리고 일본분지의 최대 음향기반암의 깊이는 약 7 sec. 이상이며, 야마토분지의 약 5 sec. 의 깊이를 보인다(Tamaki, 1988). 퇴적층하부의 기반암은 주로 화산암류(volcanic flow와 sill)로서 야마토 분지의 기반암과 유사한 것으로 추정하고 있다(Chough and Lee, 1993). 일본 분지의 하부 지각은 동해가 열개 작용(sea-floor spreading processes)에 의해 전형적인 해양지각이 모호면까지 약 8 km의 두께로 구성된다(Isezaki and Uyeda, 1973; Ludwig et al., 1975; Hirata et al., 1992). 그러나 야마토 분지와 울릉분지 하



부의 지각은 해양지각보다 2배 정도 두껍게(약 16 km) 분포하고 있으며 해저면 지진계(OBS) 탐사 결과 해양성지각에 가까운 성질을 보이고 있으나 아직까지 논의 중이다(Hirata et al., 1989; Kim et al., 1994).

동해의 형성은 태평양 해양판이 유라시아 대륙판과 접한 해구(trench)를 따라 하강 섭입하면서(subduction) 후 열개작용(back-arc spreading)발생으로 유라시아 대륙의 동편쪽 대륙지각일부가 떨어져 나가면서 생긴 배호상분지(back-arc basin)로 해석하고 있다(Uyeda and Kanamori, 1979; Uyeda and Miyashiro, 1974). 동해의 후 열개작용에 대한 메카니즘은 다음 3가지 이론으로 설명되고 있다. 첫번째는 지각 확장과 맨틀 하부의 다이어피릭(diapiric) 상승작용(upwelling)에 의해서 대륙지각의 확장작용이 일어나면서 배호상 분지가 형성되었고 주장하였다(Karig, 1971). 두번째는 판의 상대적 운동(plate kinematic motion)이론(Dewey, 1980)을 도입하여 윗판(overriding plate)에 대한 밑판(underriding plate)의 섭입 양식(mode)에 따른 힌지(hinge)선의 상대적 롤백(roll-back) 운동에 의한 배호상 분지의 형성과 소멸로 설명하였다(Tamaki, 1985). 세번째로 인도(India)판과 유라시아 판과의 충돌에 의한 내대륙 변형 작용(intracontinental deformation)은 전단(shear)지역의 발생을 야기하며 이 지역을 따라서 확장작용을 받으면서 인리형 분지(pull-apart basin)의 형태로 배호상 분지가 형성된다고 설명하고 있다(Lallemand and Jolivet, 1986; Kimura and Tamaki, 1986; Jolivet et al., 1991).

동해의 열림 양식(opening mode)는 서남 일본이 동해의 형성과 관련하여 시계 방향 및 북동일본의 반시계방향으로의 회전운동 경험하였음을 고지자기연구 결과(Otofuji and Matsuda, 1983; Hayashida and Ito, 1984; Otofuji et al., 1985; Otofuji and Matsuda, 1987)와 육상의 지질구조 발달 특성(Celaya and McCabe, 1987; Faure and Lalevee, 1987; Murata, 1987; Yanai, 1988; Kano et al., 1990; Kanaori, 1990)을 통해 부채꼴 형태의 열림으로 해석하였다. 또 다른 양식은 동해의 형성시 남서와 북동지역에 각각 남-북 방향성의 주 단층대(master fault zone)가 위치하여 이들이 우수 주향이동 단층운동을 하면서 분지를 형성하는 인리형 분지(pull-apart basin)형태로 설명하고 있다(Lallemand and Jolivet, 1986; Jolivet et al., 1991).

동해의 형성 시기는 초기에 해저와 육상에 분포하는 암석의 연령 등을 상호대비하여 후기 백악기에서 제3기 초로 추정하였다(Hilde and Wageman, 1973; Uyeda and Miyashiro, 1974; Ludwig et al., 1975). 최근에는 육상 및 해상에서 얻은 새로운 많은 지질 및 지구물리학적 자료의 축적과 분석을 통해 형성 시기가 좀 더 젊어졌다. 결과에 의하면 적어도 올리고세에서 리프팅이 시작되었으며, 초기 마이오세를 걸쳐 중기 마이오세까지 매우 활발한 신장운동과 함께 해저확장이 있었던 것으로 알려져 있다(Tamaki, 1986; Chough and Barg, 1987; Ingle, 1992; Jolivet and Tamaki, 1992; Tamaki et al., 1992).

## 제 2 절 울릉분지의 지구조 연구

유라시아대륙과 서남일본지괴의 경계 구조선의 쓰시마 단층은 동해 남서부의 울릉분지 형성에 중요한 역할을 하였을 것이다. 북동-남서 방향의 쓰시마 단층은 서남 일본이 한반도와 분리될 때 주 구조선의 역할을 하였을 것으로 사료된다. 쓰시마 단층은 압축응력을 받아 형성된 트러스트 단층이다. Jolivet 등(1991)은 동해가 인리형 분지로서 형성될 때 주 구조선인 쓰시마 단층이 우수 주향이동 운동을 하였을 것으로 해석되고 있다. 그리고 탄성과 단면도상에서 보여주는 쓰시마 단층의 주향이동단층으로서의 특징과 주변의 습곡 및 단층구조선의 발달양상으로 부터 쓰시마 단층의 우수주향이동을 주장하고 있다(Park, 1990). 반면 쓰시마섬에 발달한 습곡구조와 단층 구조들은 주 단층구조선인 쓰시마 단층의 좌수 주향이동운동에 의해 형성된 엔 에쉬론(en echelon) 구조로 해석되는 상반된 주장을 하고 있다(Shimada, 1977; Inoue, 1982). 최근에는 쓰시마섬에서의 고지자기 연구를 통해 쓰시마섬이 중기 마이오세에 반시계방향의 회전운동을 하였으며, 이때 쓰시마 단층선이 좌수 주향이동 운동을 하였을 것으로 해석하고 있다(Ishikawa and Tagami, 1991). 동해 및 주변 육상에 발달한 지질구조의 분석에 의한 인리형 분지형성과 고지자기 연구결과에 의한 서남일본지괴의 회전운동으로 부터 분지형성에 대한 주장을 종합하면, 울릉분지 열림과정에서 인리형 확장운동과 회전운동의 지구조적 운동을 받았던 것으로 해석된

다(Kimura and Tamaki, 1986; Hayashida et al., 1991; Jolivet et al., 1990; Fournier et al., 1994). 쓰시마 단층대는 울릉분지가 처음 인리형 분지형성시에는 우수 주향이동단층운동을 그리고 서남 일본이 회전운동시에는 좌수 주향이동운동을 한 것으로 해석된다. 울릉분지 남쪽 연변부에 발달한 지질구조와 주변의 지구조적 상관관계를 종합해석함으로써, 울릉분지 형성에 대한 시대적으로 지구조적 운동의 변천과정을 해석할 수 있다.

## 제 4 장 지질구조 분석 및 해석

### 제 1 절 지질구조 분석

Unit MM(middle Miocene and older) : 대한해협 지질구조 해석을 위해 사용한 단채널 스파커 단면도상에서는 투과 깊이의 한계와 많은 잡음으로 인해 정확한 구조적 특성을 확인하기가 매우 어려웠다. 다중채널 탄성과 단면도상에서의 중기 마이오세 지층은 쓰시마 단층대 부근에서만 구조적 변형을 받았고, 거의 구조적 변형을 받지 않은 것으로 보고되었다(KIER, 1982). 다채널 탄성과 단면도 상에서는 단층 등의 지질구조의 확인이 불가능하였다. 상부 Unit MM 의 지질구조도는 트러프가 한반도와 쓰시마 단층대 사이에 남서-북동 방향으로 발달해 있으며, 점차 북동쪽 분지 중심을 향해 깊어진다(그림 8).

대한해협과 쓰시마 해협사이에 분명한 단층대가 동북동-서남서 방향으로 발달해 있으며 이를 쓰시마 단층대라고 한다(Inoue, 1982; Jolivet et al., 1991). 쓰시마 단층대는 동쪽 지층이 서쪽 지층을 향해 미끄러져 올라간 트러스트 단층이다(그림 9, 10). 트러스트단층은 압축성 지구조환경하에 형성된다(Ramsay and Huber, 1987). 쓰시마 단층대의 동측 지층은 매우 심하게 구조적 변형을 받아 일련의 트러스트단층과 함께 습곡구조가 잘 발달하고 있다. 즉 쓰시마 해협에는 쓰시마 트러스트-습곡대가 형성된다. 또한 쓰시마 단층대는 주향이동단층으로서 동해 남서측의 주 단층대이다(Inoue, 1982; Park, 1990; Jolivet et al., 1991; Jolivet and Tamaki, 1992).

쓰시마 해협에서의 지층단면도상에서 최하부층으로서 중기 마이오세 및 고기퇴적층에 해당되며, 상위 지층과는 뚜렷한 경사 부정합 관계를 이루며 경계진다(그림 11). Unit MM의 상부 구조도(그림 8)에서 0.5 sec 이하의 용기지역은 서남 일본의 해안을 따라 근해역과 연구해역 중앙부에 대체로 북동-남서 방향으로 발달 분포한

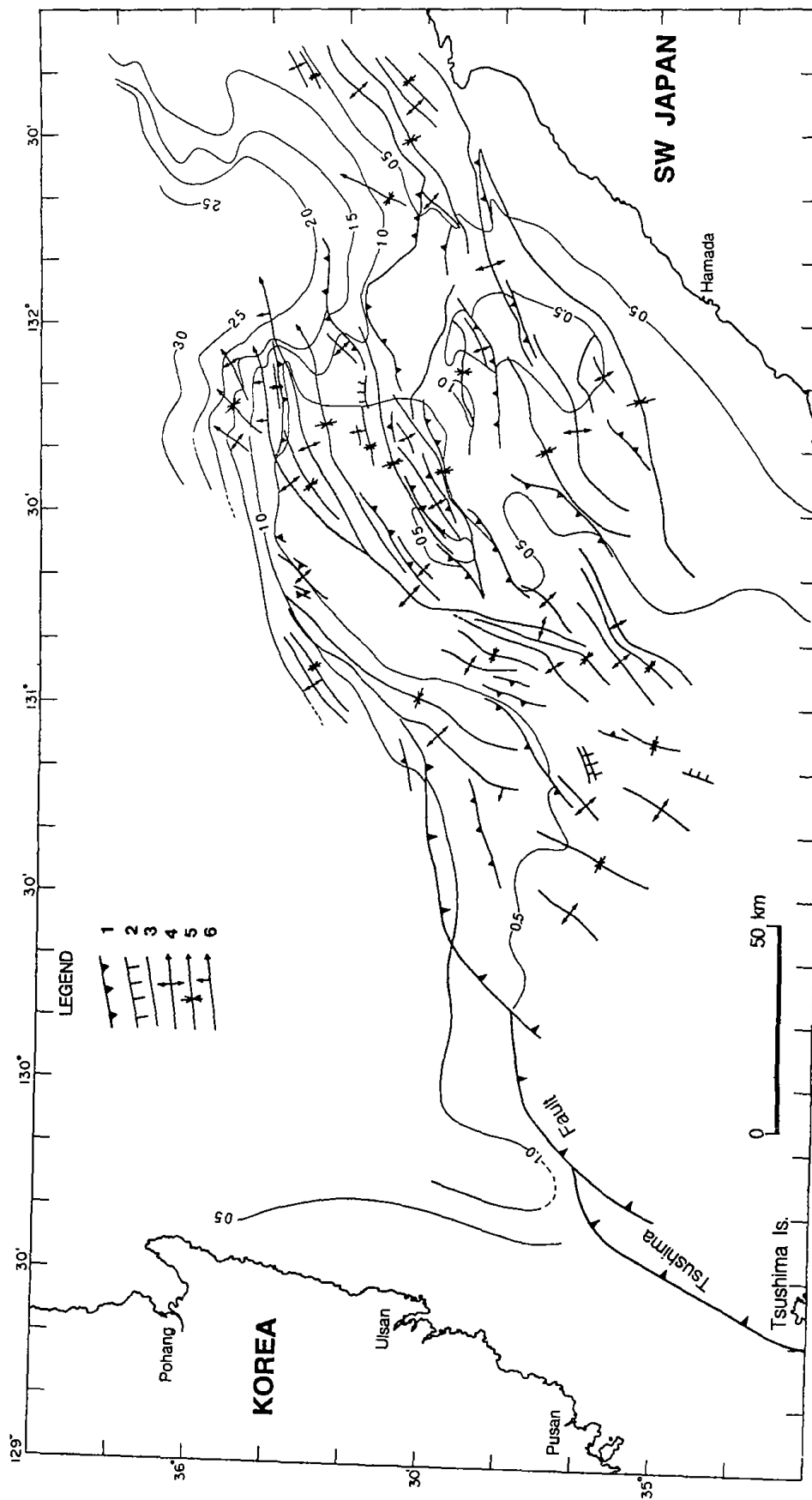


Fig. 8. Time structural map of the top Unit MM (middle Miocene). Contour depth (in second) are below present sea level. 1=thrust fault (sawteeth on upthrown side); 2=normal fault (bar on downthrown side); 3=fault (type uncertain); 4=anticline, showing plunge; 5=syncline, showing plunge; 6=monocline, showing plunge.

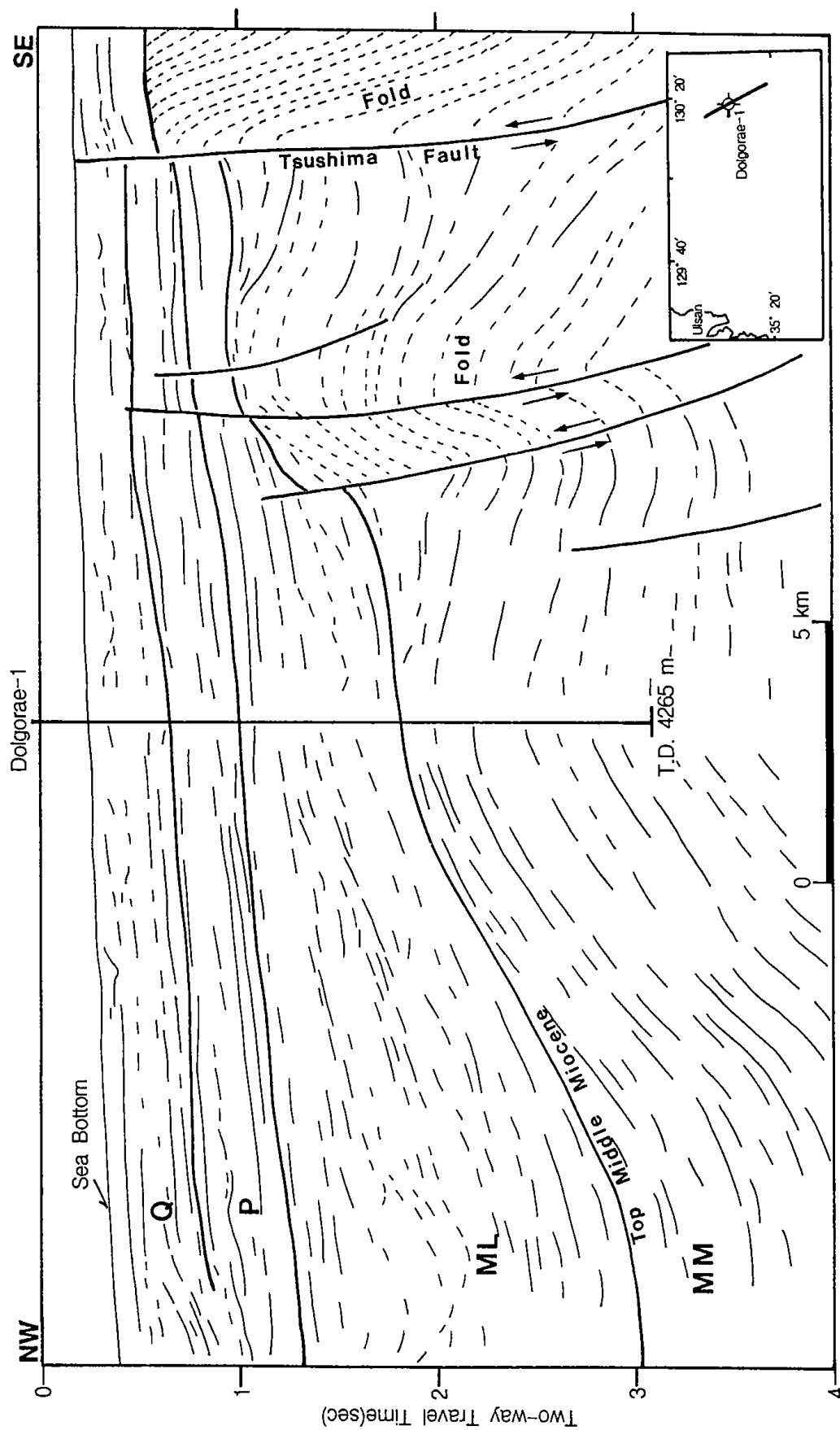


Fig. 9. An example of interpreted seismic section showing 4 Units(Unit Q, Unit P, Unit ML, and Unit MM) that are divided by geologic information of Dolgorae-1 well(modified after Park, 1987). Right side of section showing the folding structure and the Tsushima fault.

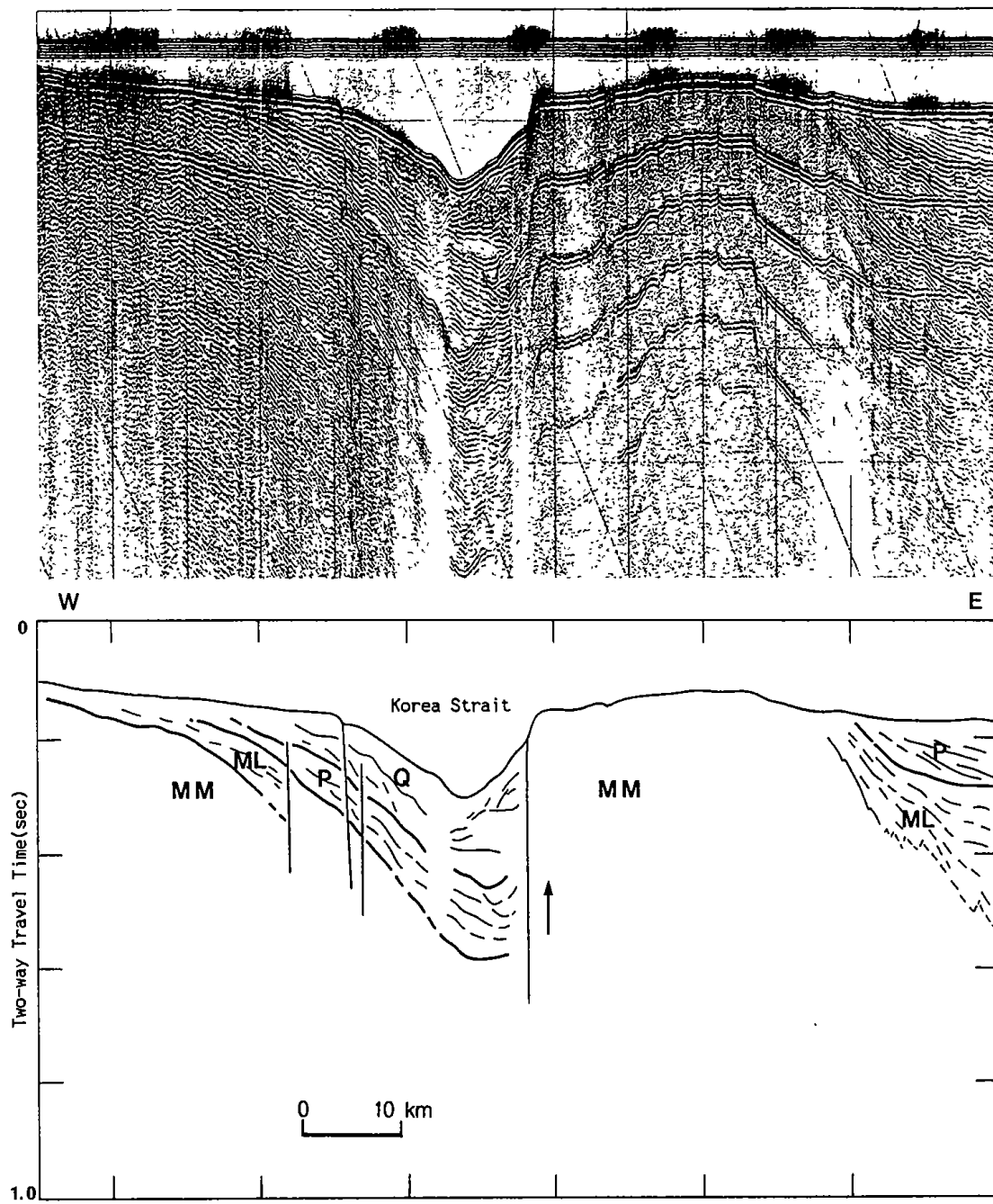


Fig. 10. An example of single-channel seismic profile with interpreted section across the Korea Strait showing the Tsushima fault as act thrust fault.

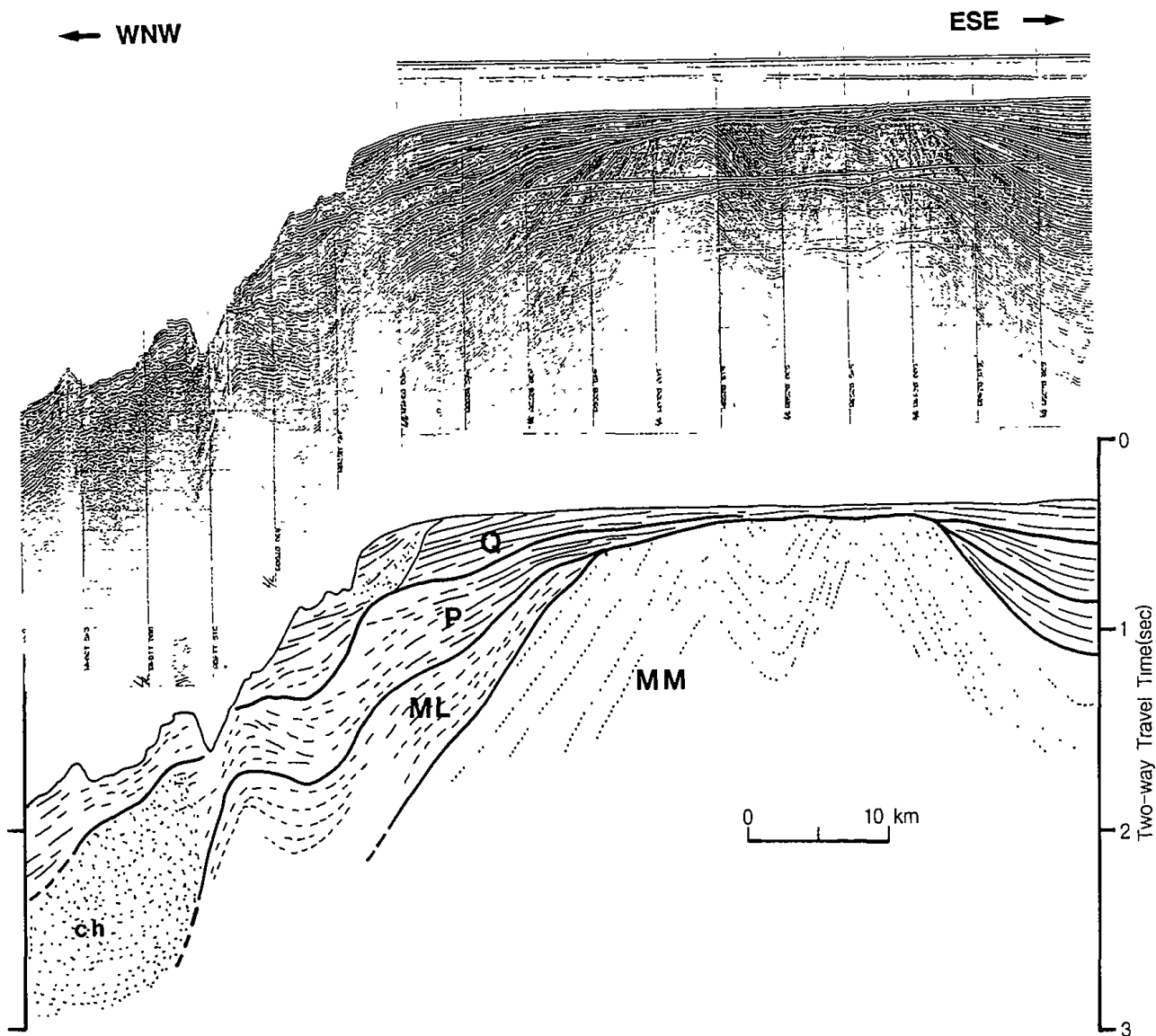


Fig. 11. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing evidently folding structures of Unit MM that is unconformably covered by undeformed younger units. Note that mass flow sediments showing chaotic seismic facies(ch) occur in lower slope area.



다. 그 이상 깊이의 침강지역은 중앙부의 융기지역과 연구해역 동쪽에 위치하는 오키뱅크사이에 발달해 있다. 발달양상은 남쪽에서 북쪽의 울릉분지를 향해 점차 깊어지는 트러프(trough) 형태를 이룬다(그림 12). 내부지층은 매우 심하게 구조적 변형을 받아 단층 및 습곡구조가 우세하게 발달해 있다(그림 11, 13). 단층은 주로 트러스트단층 구조가 매우 우세하며 지역적으로 일부 정단층구조가 분포하고 있다. 향사 및 배사 습곡구조도 잘 발달해 있다. 이들 구조들은 Unit MM이 강한 압축력을 받아 융기 및 침강운동 등 지질구조의 단축변형(shortening)되었음을 시사하고 있다. 습곡 및 단층 구조선의 발달 방향은 거의 같은 방향성을 보여주며,  $131^{\circ} 30'$  을 경계로 하여 서측 지역에 발달한 구조선 방향은 대체로 북동-남서방향이 우세하지만, 동측지역으로 향하면서 동북동-서남서방향에서 동-서방향으로 그리고 다시 동북동-서남서방향으로 점차 변화한다.

**Unit ML(Late Miocene) :** 대한해협을 후기 마이오세 지층은 탄성과 단면도상에 구조적 변형을 거의 받지 않았으나, 부분적으로 일부 단층 및 습곡구조가 발달해 있다(그림 6, 14). 쓰시마 단층대 부근에는 일부 변형받은 습곡구조가 발달해 있다. 상부 Unit ML 구조도상에는 북동-남서 방향성의 트러프가 발달해 있으며 1.0 sec 이상의 깊이를 보이며 점차 분지 중심부로 가면서 깊어진다(그림 15).

중기 마이오세까지 매우 강한 압축성 지구조 변형을 받아 형성된 쓰시마 트러스트 단층대가 후기 마이오세 동안에도 지층의 변형이 발생한 것으로 탄성과 단면도상에 나타난다(그림 9, 16). 후기 마이오세 동안의 쓰시마 단층대는 압축력을 받아 형성된 것으로 보이는 작은 변위(offset)의 트러스트 단층으로 해석된다(그림 16). 중기 마이오세까지의 주향이동운동을 한 쓰시마 단층대는 후기 마이오세 부터는 단지 압축력에 의한 단층운동을 한 것으로 판단된다.

쓰시마 해협에서의 본 Unit는 하위 Unit와 부정합관계를 이루며 퇴적된 지층이다. 지층 변형은 하부 지층에 비해 매우 약하다. Unit ML 상부 구조도에서의 등구조심도(그림 15)는 서남일본 근해역의 하위층의 노두지역과 중앙부의 노두지역사이에 트러프가 형성되어 점차 북동방향에서 다시 북쪽방향으로 울릉분지를 향해 3.0

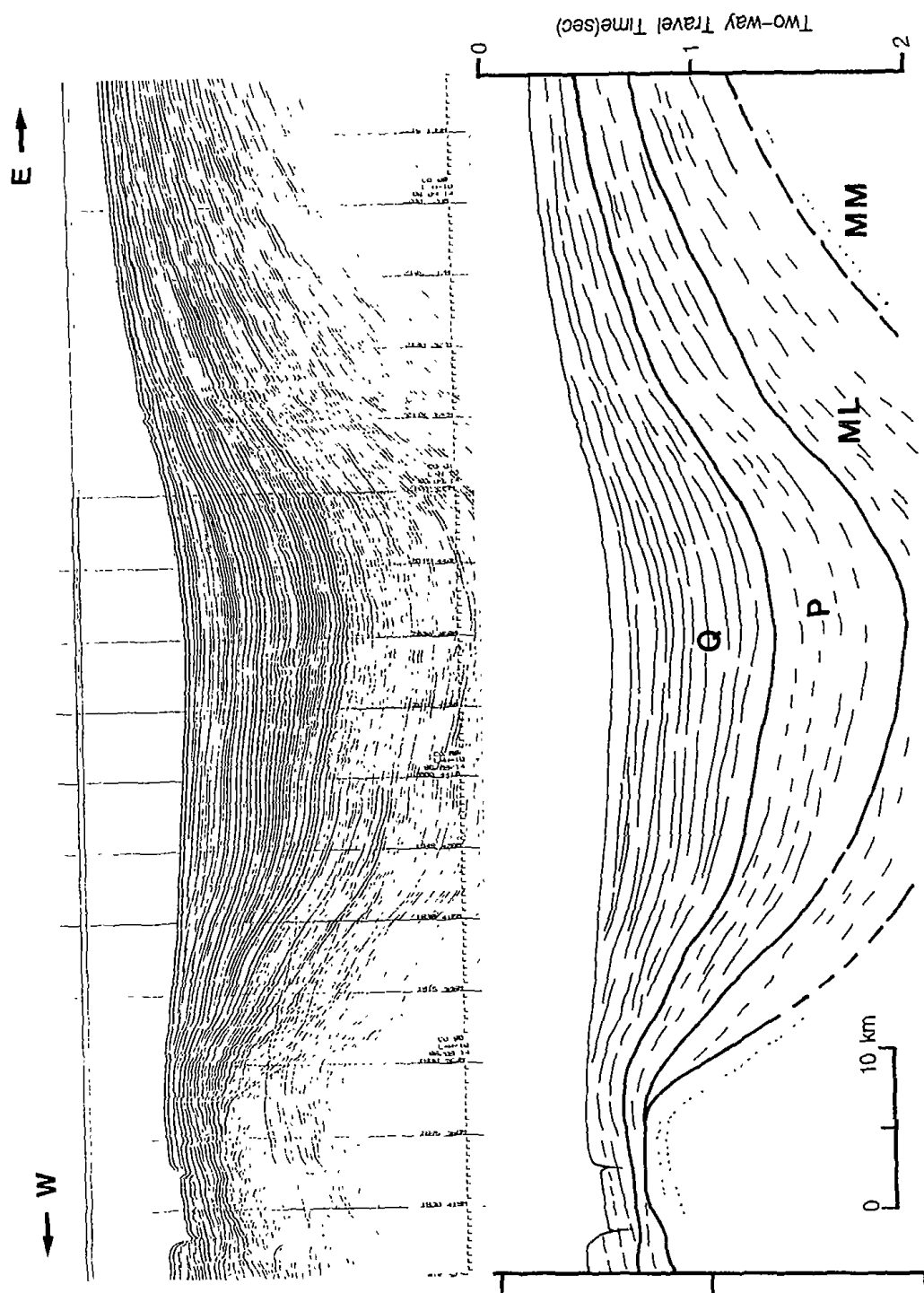


Fig. 12. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing depressed trough filled by thick sediment.

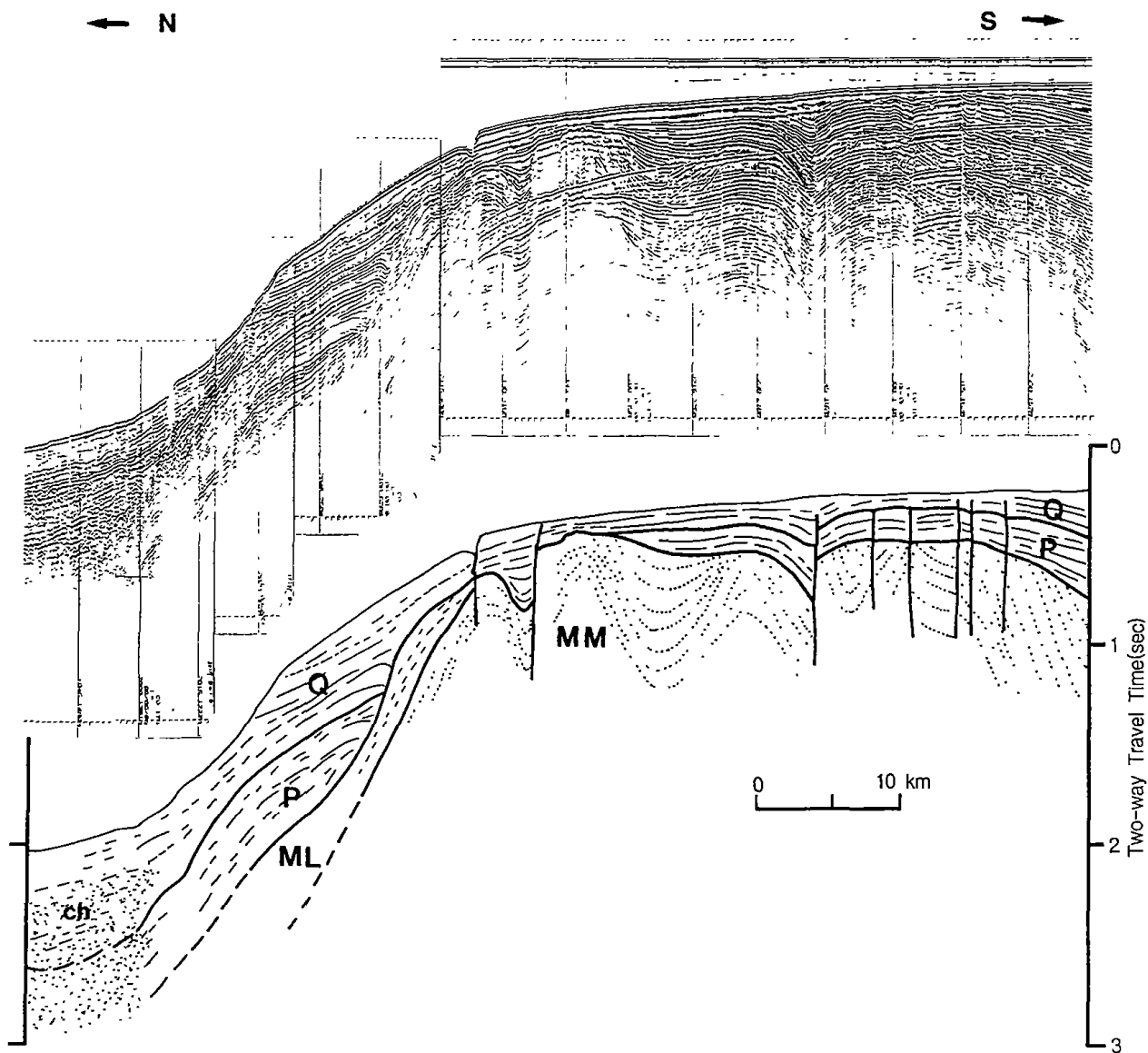


Fig. 13. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing strongly deformed and uplifted Unit MM with faults and folds structures by NNW-SSE compressional regime. Note that massflow sediments showing chaotic seismic facies(ch) occur in lower slope area.

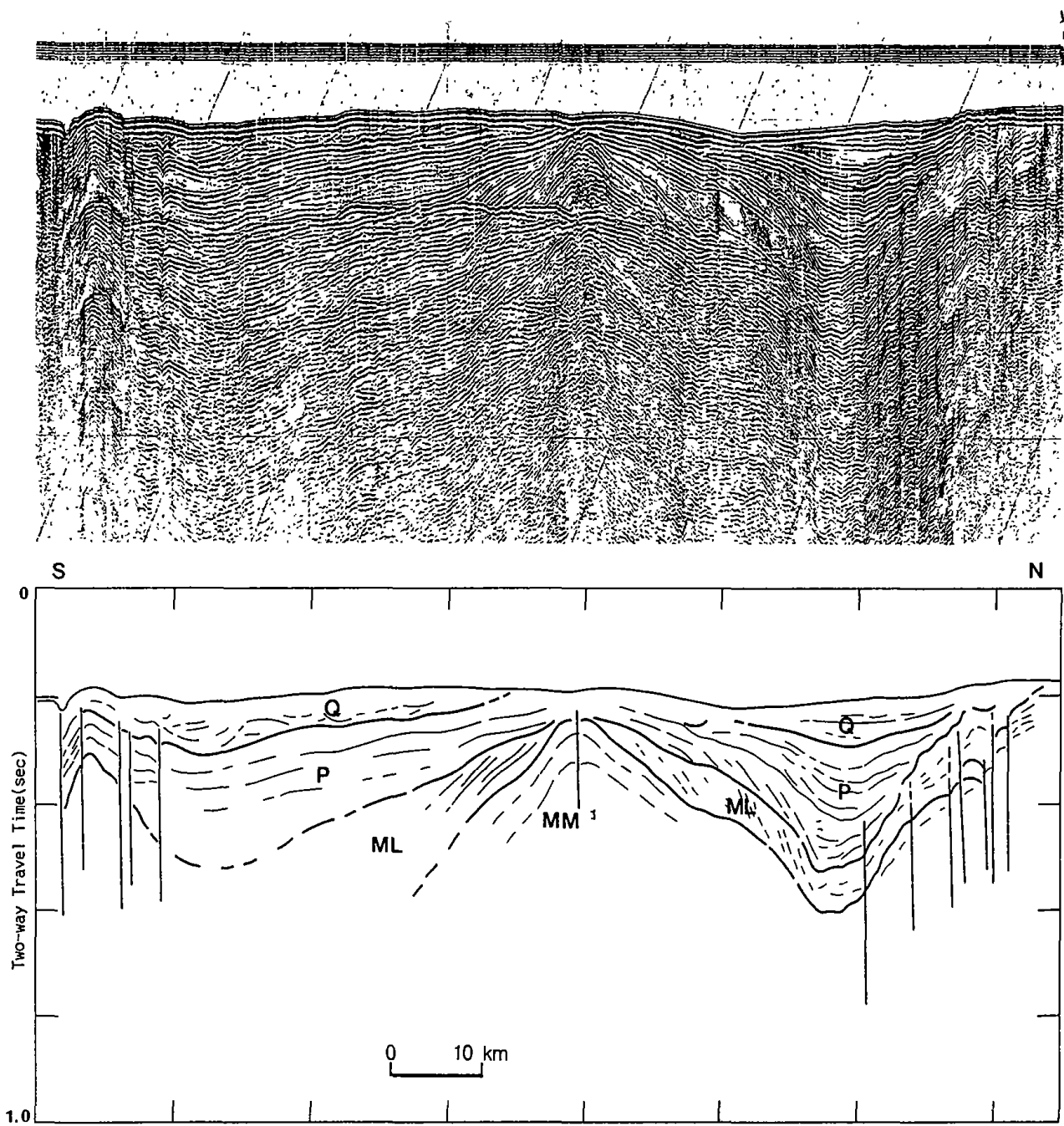


Fig. 14. An example of single-channel seismic profile with interpreted section across the Korea Strait showing slightly deformed sequences compared with strongly deformed in the Tsushima Strait.

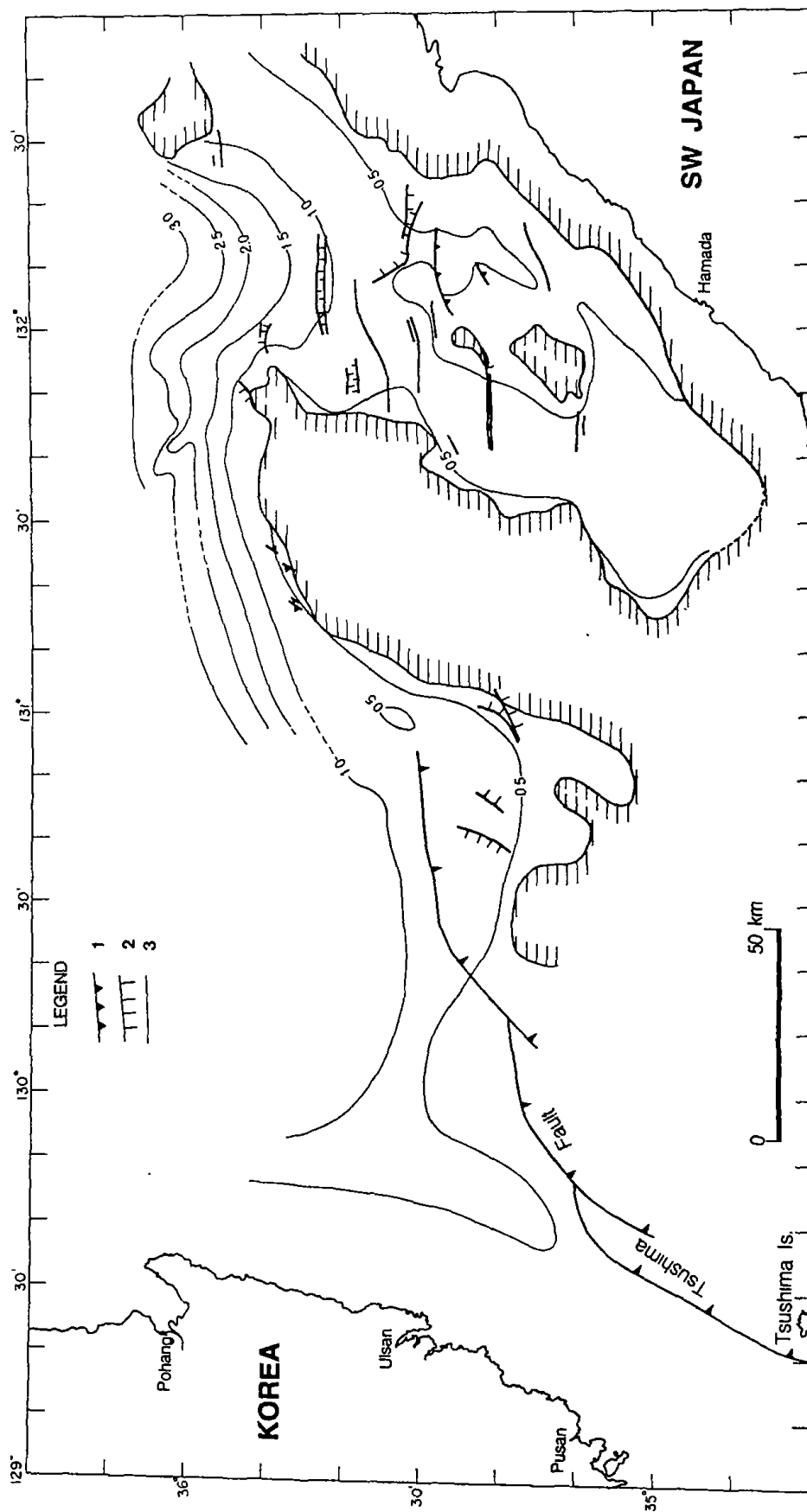


Fig. 15. Time structural map of the top Unit ML (late Miocene). Contour depth (in second) are below present sea level. Note that hatched areas indicate outcrops of pre-Unit ML. 1=thrust fault (sawtooth on upthrown side); 2=normal fault (bar on downthrown side); 3=fault (type uncertain).

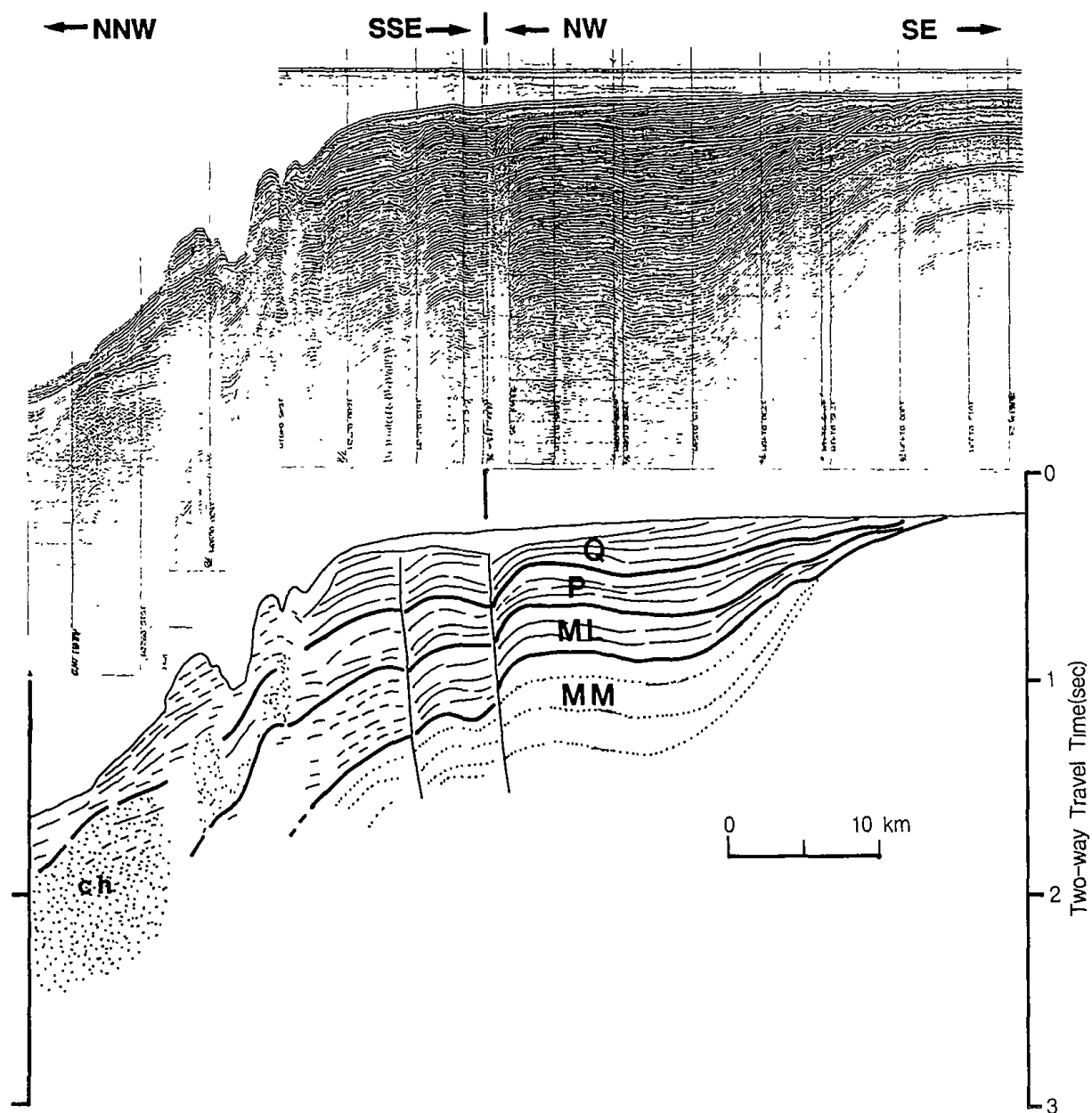


Fig. 16. An example of single-channel seismic profile with interpreted section showing the Tsushima thrust faults that cut through sedimentary layers from Unit MM to Unit Q.

sec 이상 깊어지는 양상을 보인다. 중앙부 노두의 서측은 북북서쪽을 향해 깊어진다. 단층들은 중앙부 하위층의 노두지역을 경계로 하여 동측지역에 많이 발달해 있다. 단층구조선은 대체로 동-서방향이 우세하게 발달해 있다.

**Unit P(Pliocene)** : 대한해협 Unit P는 지층의 변형이 거의 없으나, 지역적으로 단층 및 습곡구조가 일부 발달해 있다(그림 14). 상부 Unit P 구조도에 의하면 후기 마이오세까지 특징적으로 발달해 있던 북동-남서 방향성의 트러프가 사라지고 북동쪽을 향해 완만하게 깊어진다(그림 17). 후기 마이오세에 이어서 플라이오세 동안에도 쓰시마 단층대는 압축력을 받아 형성된 습곡구조와 작은 변위의 트러스트 단층이 발달해 있다(그림 16). 쓰시마 해협에 대한 상부 구조도에서의 등구조심도(그림 17)는 중앙부 하위층 노두지역을 경계로 하여 동측 및 서측지역으로 구분 설명된다. 동측지역은 하마다(Hamada) 외해역에서 0.5 sec 내외의 함몰지역이 북동-남서방향으로 발달해 있으며, 다시 울릉분지를 향해 북북서방향으로 점차 깊어지는 트러프가 발달해 있다. 등구조심도는 2.5 sec 이상의 깊이를 보인다. 한편 서측지역의 등구조심도는 북북서방향으로 점차 깊어지는 경향을 보인다. 단층구조선의 발달양상은 대체로 동-서방향이 전지역에 걸쳐 우세하게 분포하며, 일부지역에 북동-남서방향성의 구조선을 갖은 단층들이 발달해 있다.

**Unit Q(Quaternary)** : 대한-쓰시마 해협에 발달한 제4기 지층의 지질구조는 주로 대륙붕지역에 발달한 단층들과 대륙사면의 표층부에서 주로 발달한 사퇴흔적구조(slump scars)들로 특징된다(그림 11, 13). 대한해협에는 단층이 일부 발달해 있으며(그림 6), 쓰시마 해협에는 다수의 동-서방향성의 단층들이 우세하게 발달 분포한다(그림 18). 연구지역 중앙부에는 북동-남서의 단층이 일부 발달해 있다. 쓰시마 단층대는 제4기 지층에서도 활발하게 움직이는 것으로 탄성과 단면도상에서 확인된다(그림 16). 쓰시마 단층대의 발달양상은 습곡구조와 함께 트러스트단층의 형태를 보인다. 쓰시마 단층대를 따라 제4기 동안에도 압축응력을 받은 것으로 사료된다.

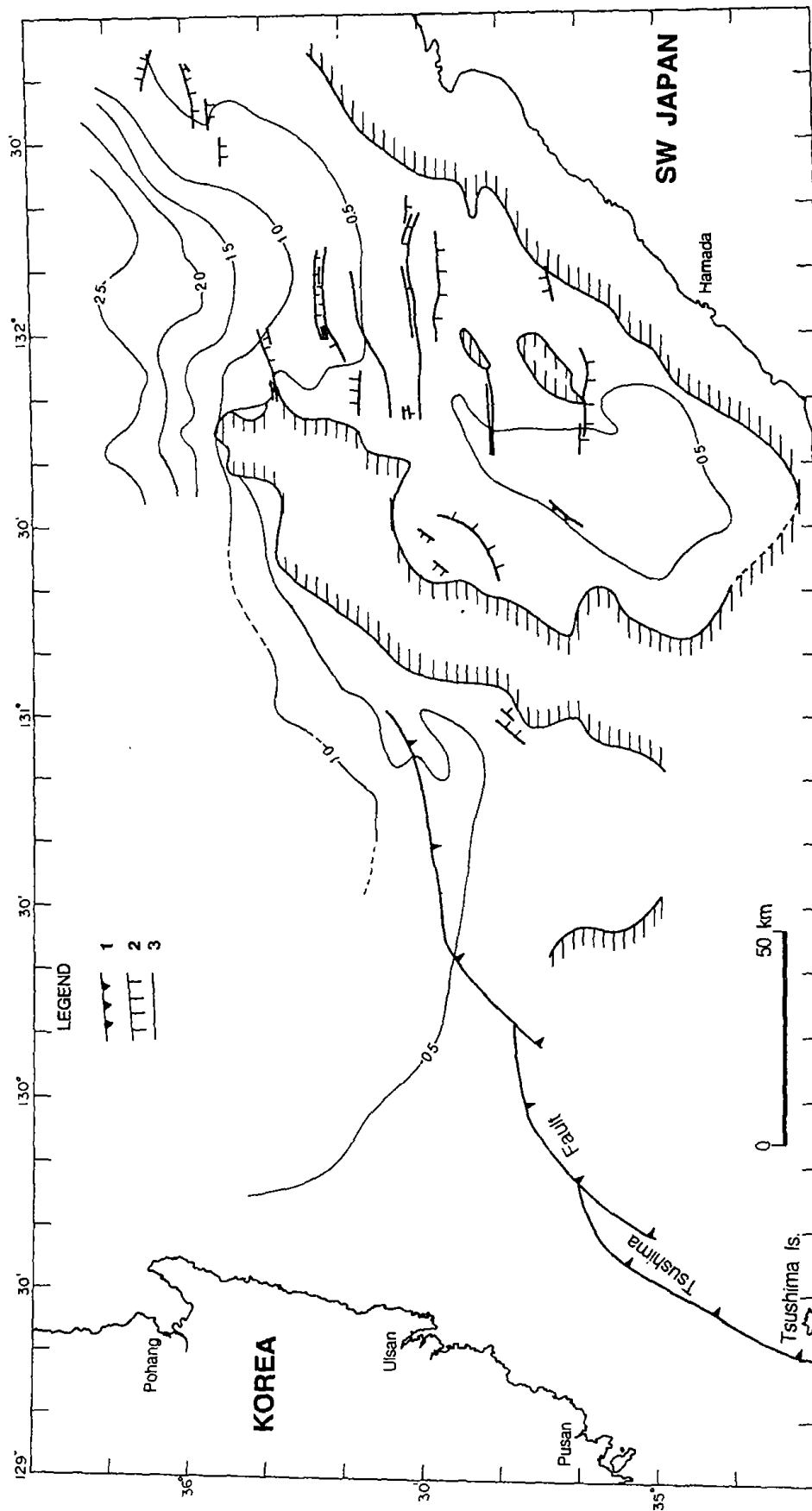


Fig. 17. Time structural map of the top Unit P(Pliocene). Contour depth(in second) are below present sea level. Note that hatched areas indicate outcrops of pre-Unit P. 1=thrust fault(sawteeth on upthrown side); 2=normal fault(bar on downthrown side); 3=fault(type uncertain).



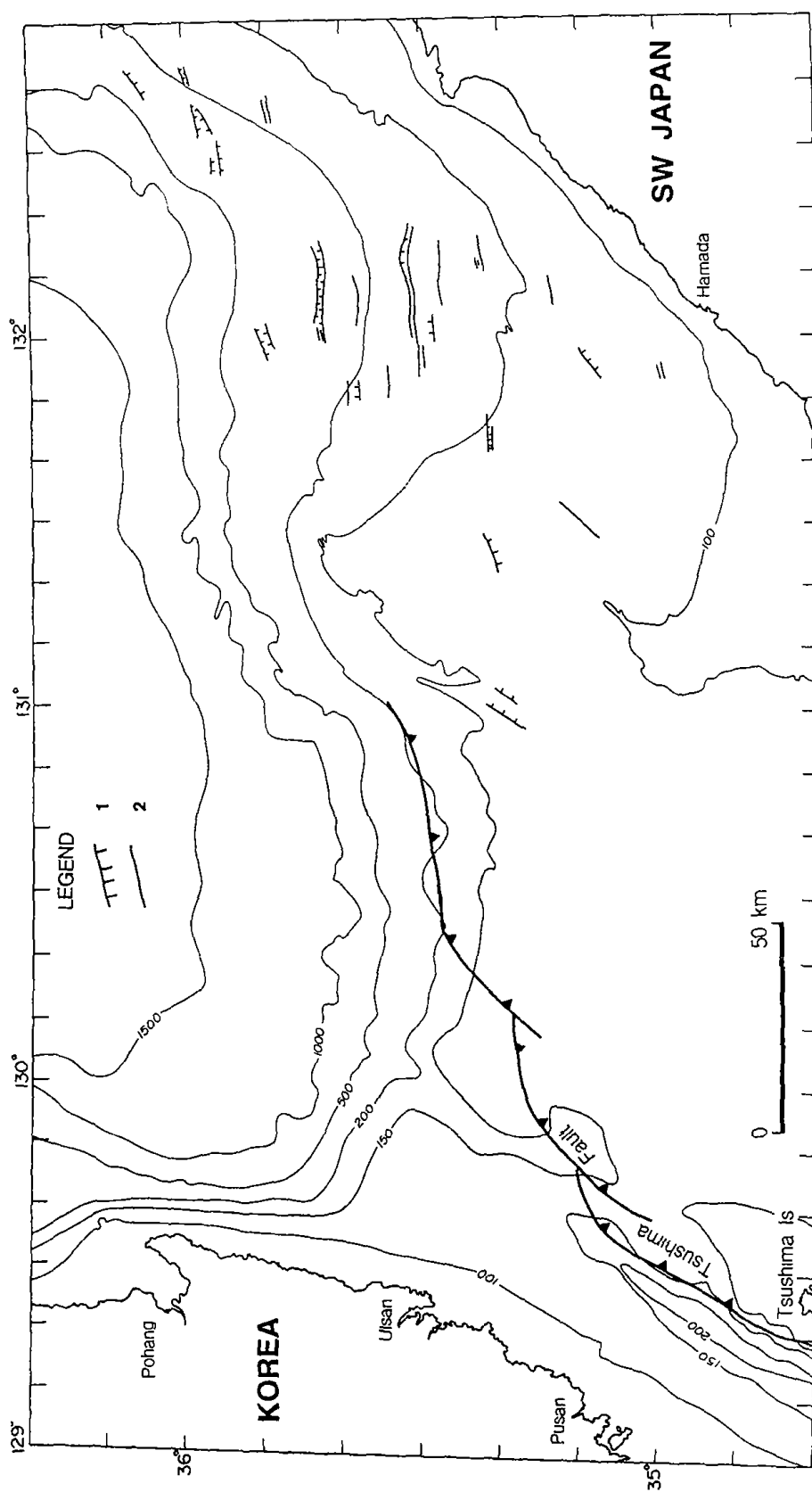


Fig. 18. Structural map of the Unit Q(Quaternary). 1=normal fault(bar on downthrown side); 2=fault(type uncertain). Water depth are in meters.

## 제 2 절 지질구조 해석

대한-쓰시마 해협의 지질구조도(그림 19)는 기존에 발표된 대한해협과 쓰시마 해협의 지질구조도와 본 연구결과를 종합하여 작성하였다(Shimada, 1977; Minami, 1979; Park et al., 1981; KIER, 1982; Park, 1990). 대한해협에서의 음향 기반암 지질구조도에는 일련의 정단층구조가 분포한다. 부산 외해역의 정단층들은 남-북 방향이고, 울산 외해역의 정단층들은 북동-남서 방향으로 발달해 있다. 정단층구조의 발달 방향은 쓰시마 단층대의 발달 방향과 거의 일치하고 있다. 초기 쓰시마 단층은 정단층으로서 올리고세에서 초기 마이오세동안 울릉분지가 리프팅하면서 형성되었다. 이와 함께 서남 일본이 한반도로 부터 분리되어 남동쪽으로 이동 할 때 (Hayashida et al., 1991), 주 구조선인 쓰시마 단층대는 정단층과 함께 우수 주향이동 운동을 하였으며, 이때 엔 에쉬론(en echelon) 정단층군(normal fault set)이 한반도측의 기반암에 형성된다(그림 20). 쓰시마해협의 북동-남서의 트러스트단층구조는 울릉분지가 리프팅될 때 역시 정단층구조였을 것이며, 쓰시마 단층대에 대한 서남 일본측 기반암에 발달한 엔 에쉬론 단층군으로 사료된다. 이들 정단층들이 중기 마이오세말경부터 압축성 조구조운동을 받아 지층의 용기와 함께 트러스트단층으로 변한 것으로 여겨진다. 초기 쓰시마 단층대는 한반도 남동지역에 발달한 북동-남서 방향의 양산단층과 함께 동해의 인리형분지(pull-apart basin) 형성과 관련하여 동해 남서부에 위치하는 주 단층대(master fault)로서 우수주향이동을 한 것으로 해석되었다(Sillitoe, 1977; Lallemand and Jolivet, 1986; Jolivet et al., 1991).

Unit MM(중기 마이오세 및 고기 퇴적층)은 쓰시마해협에 많은 역단층구조와 습곡구조가 분포하는 반면 대한해협에는 거의 구조적 변형을 받지 않았다. 횡압력 지구조운동(compressional tectonics)에 의해 지층의 단축변형됨으로서 남측의 동북동-서남서에서 북측으로 가면서 동-서 방향의 습곡 및 트러스트단층구조가 우세하게 발달한 것으로 해석된다(그림 19). 적어도 후기 마이오세 초까지 활발한 횡압력 작용이 발생한 것으로 사료된다(Minami, 1979). 횡압력은 남쪽 지역의 북서-남동에 서 북쪽 지역의 남-북 방향으로 이동하면서 지층을 변형시켰을 것으로 해석된다.

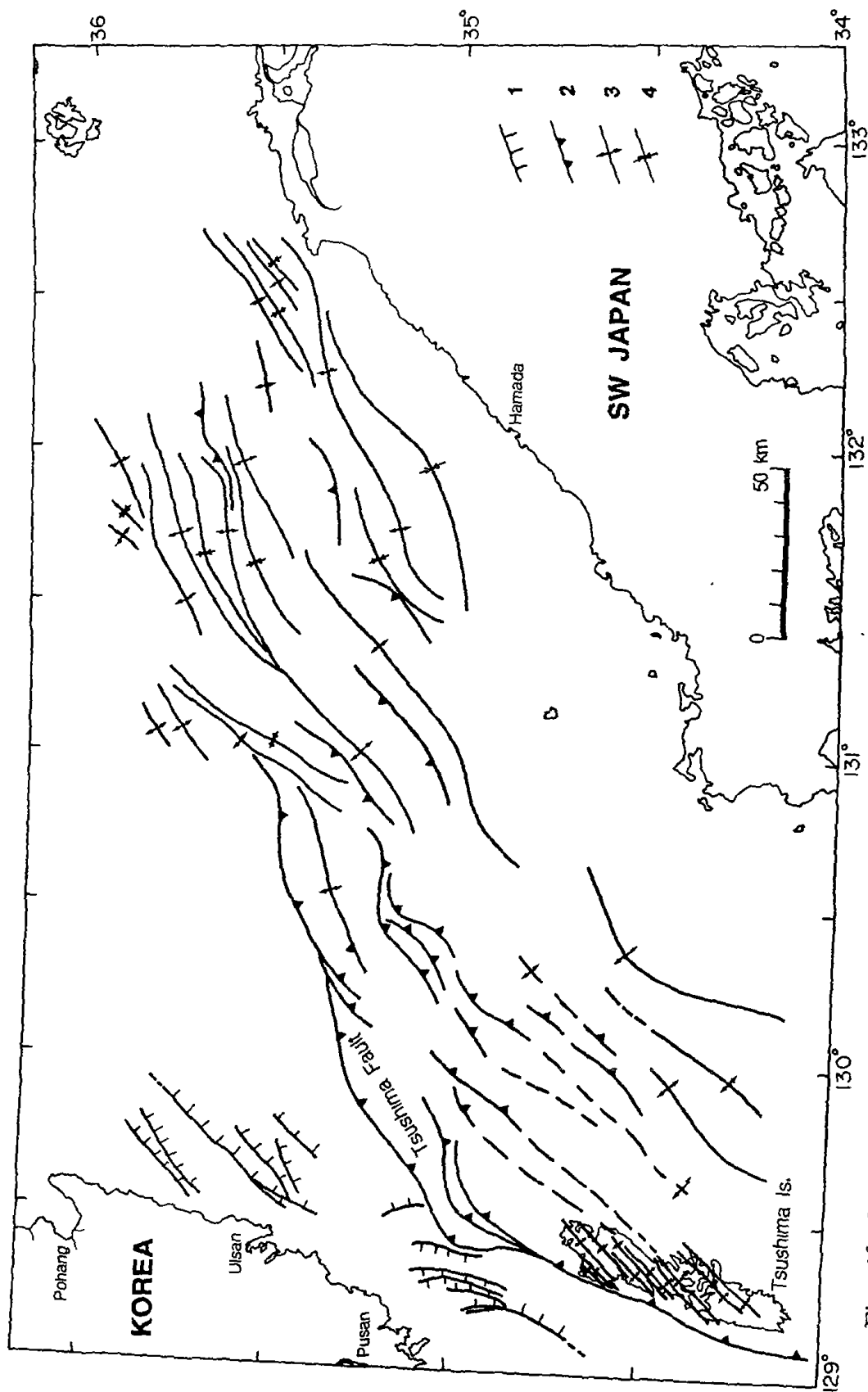


Fig. 19. The structural map of southern Ulleung Basin. Normal faults off SE Korea occurred in basement and folds and thrust faults off SW Japan including the Tushima Islands formed from basement(?) through early Late Miocene sequences. The map is compiled and synthesized, in addition to Fig. 7 in this text, from the following : Shimada(1977); Minami(1979); KIER(1982). 1=normal fault on basement(bar on downthrown side); 2=thrust fault(sawteeth on upthrown side); 3=Anticline; 4=syncline.

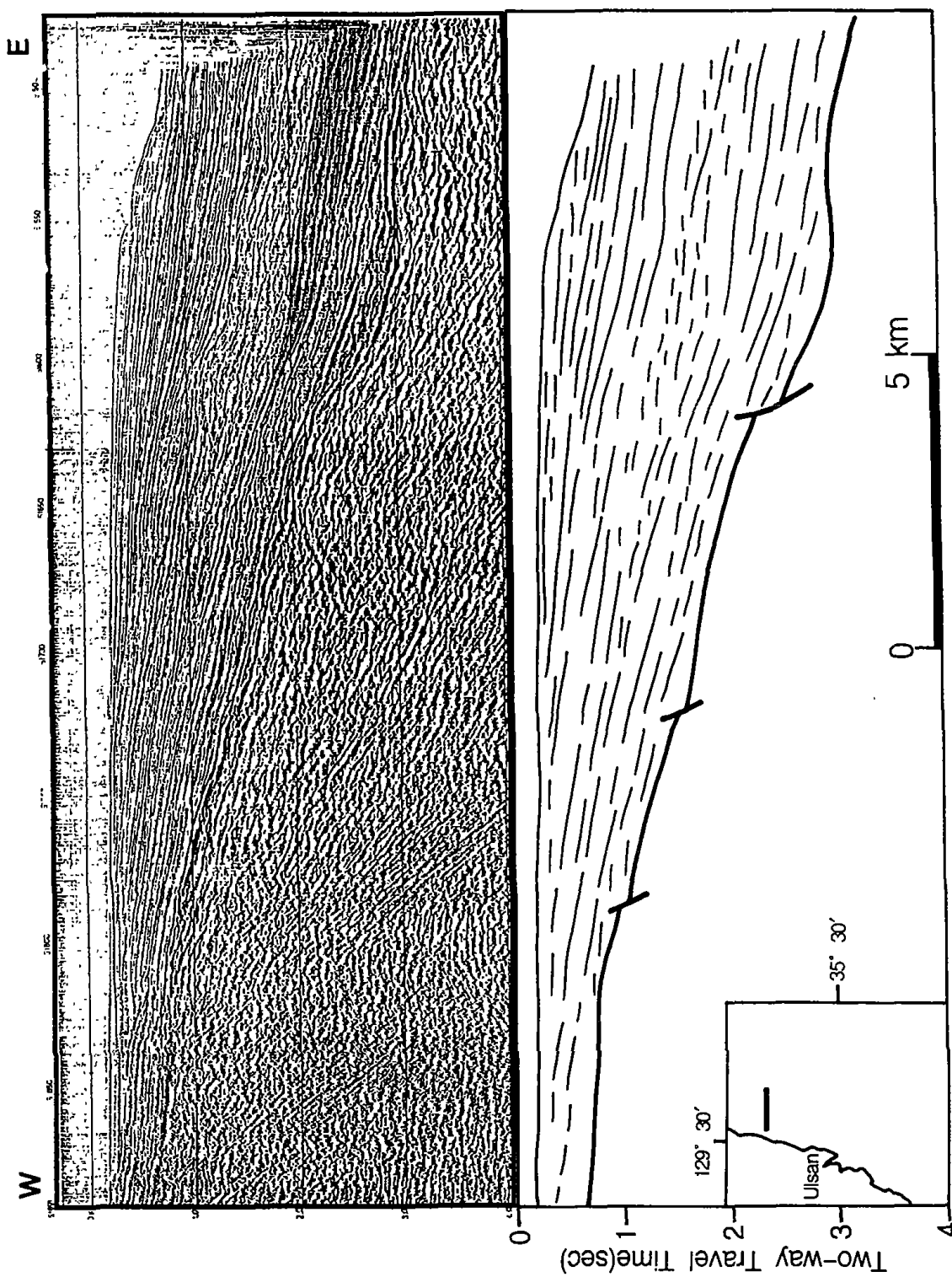


Fig. 20. An example of multi-channel seismic profile with interpreted section across the Korea Strait showing normal faults on basement overlain by thick Cenozoic sediment(courtesy of KIER).

쓰시마 단층대는 쓰시마 섬의 고지자기 연구결과에 의하면 중기 마이오세에 반시계 방향의 회전운동이 일어났으며, 이 때 좌수 주향이동과 함께 압축력이 작용한 것으로 해석했다(Ishikawa and Tagami, 1991). 또한 올리고세에서 초기 마이오세까지의 두꺼운 해성층(Taishu Group)으로 구성된 쓰시마 섬에서의 주로 북동-남서 방향의 습곡 축은 쓰시마 단층대의 좌수 주향이동운동에 의한 엔 에쉬론 습곡으로 해석하였다(Shimada, 1977; Inoue, 1982). 쓰시마 섬에 발달한 습곡 및 단층구조와 좌수향의 단순 전단(left simple shear) 모델(Sylvester, 1988)과 상호비교를 통해 쓰시마 섬의 타이슈(Taishu) 층군이 좌수 주향이동운동에 의해 변형 받았음을 알 수 있다(그림 21). 서남 일본에 발달한 습곡 및 굴곡(bending) 지질구조의 발달 양상과 고지자기 측정결과는 중기 마이오세에 서남 일본열도의 시계방향 회전운동 지구조운동이 일어났음을 지시한다(Faure and Lalevee, 1987; Murata, 1987; Otofujii and Matsuda, 1987; Kano et al., 1990; Otofujii et al., 1991). 이는 서남 일본지괴는 강한 단일지괴보다는 연성(ductile)의 비교적 연약한 지괴(non-rigid)로서 외부의 힘에 의해 쉽게 변형됨을 시사하고 있다(Itoh, 1988). 따라서 서남 일본 열도의 동해 형성과 관련한 시계방향 회전운동은 서남 일본의 남서쪽 지괴가 북서쪽으로 이동하면서 쓰시마 해협지역에 대해 압축력이 작용하였을 것이고, 반면 서남 일본의 북동쪽 지괴는 남동 방향으로 이동하면서 울릉분지 심해지역의 확장이 일어났을 것으로 해석된다(Hayashida et al., 1991; Ishikawa and Tagami, 1991). 중기 마이오세에 서남 일본이 회전하면서 남서쪽 지괴가 북서방향으로의 이동은 쓰시마 해협지역에 분포하는 퇴적층에 대해 압축 응력(compressive stress)이 작용하였을 것이며, 이는 Unit MM(중기 마이오세 및 고기 퇴적층)의 지층변형을 야기시켰다. 이때 쓰시마 단층대는 트러스트단층과 함께 좌수 주향이동 운동을 하였을 것으로 추측된다. 서남 일본의 고지자기 연구결과는 중기 마이오세때 서남 일본과 노히(Nohi) 지역의 회전운동은 약간의 차이를 보였으며, 이는 지괴의 프라스틱 벤딩(plastic bending)에 의한 차별적 회전운동(differential rotation)을 시사한다(Itoh, 1988). 일본 열도의 차별적 회전운동은 쓰시마 단층대 뿐 만 아니라 쓰시마 해협에 발달한 동북동-서남서 방향에서 동측의 동-서 방향으로 지질구조선 변화 원인에 대한 좋은 설명이 될 수 있다.

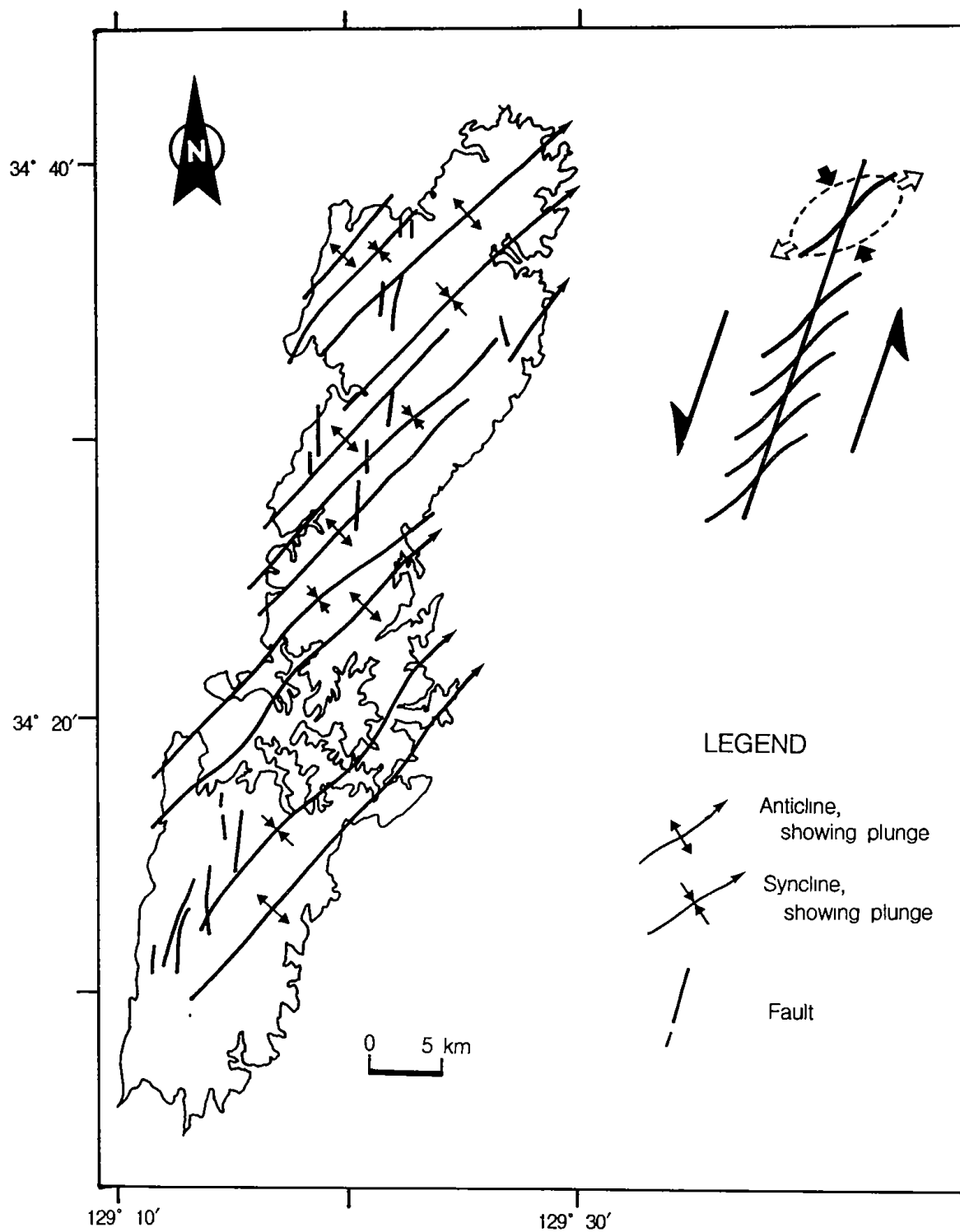


Fig. 21. Folding structural map of Tsushima Islands(Shimada, 1977) compared with left simple shear model by Sylvester(1988). En echelon folds in Tsushima Islands have been produced as a result of sinistral strike-slip along Tsushima fault.

하부층(Unit MM)과 뚜렷한 경사 부정합 관계(그림 4, 11, 13)를 이루며 후기 마이오세 이후 제4기 퇴적층이 발달해 있다. 후기 마이오세 퇴적층은 하부 지층과 비교하면 거의 변형을 받지 않았으나, 부분적 지구조운동에 의한 다수의 단층구조가 쓰시마해협 지층에 발달 분포한다. 단층구조선의 발달방향은 주로 동-서방향으로 이는 남-북 방향으로의 지구조적 응력장이 우세함을 시사하고 있다. 또한 쓰시마해협의 플라이오세 및 제4기 층에서도 거의 유사한 동-서 방향의 단층 구조선으로 부터 남-북 방향의 지구조적 힘의 영향을 받은 것으로 사료된다. 이는 쓰시마해협이 최근까지도 지구조 활동이 활발하게 일어나고 있다는 결과를 얻을 수 있다. 특히 쓰시마 단층구조선은 후기 마이오세뿐 만 아니라 플라이오세와 제4기 퇴적층까지 발달한다. 따라서 쓰시마 단층대는 제4기까지도 압축의 지구조적 운동의 영향을 받은 것으로 판단된다(그림 18).

## 제 5 장 분지의 진화과정

동해 남부 울릉분지의 지구조적 진화과정은 지질구조의 분석으로 부터 지구조적 환경이 시대적으로 다르게 나타난 것으로 해석된다(그림 22). 특히 쓰시마 단층대의 지구조적 상황과 변화를 정확히 해석하는 것이 울릉분지의 진화과정 해석에 매우 중요할 것이다. 대한-쓰시마해협 해저 퇴적분지의 발달과정을 시대적으로 재구성하였다(그림 23). 처음부터 리프팅 단계인(rifting stage) 올리고세( Oligocene), 신장 및 침강운동 단계(extension and subsidence stage)인 초기 마이오세-중기 마이오세 초기(Early Miocene-early Middle Miocene), 압축 및 융기운동 단계 (compression and uplifting stage)인 중기 마이오세 중기-후기 마이오세 초기(middle Middle Miocene-early Late Miocene), 그리고 마지막으로 압축운동 단계(compressional stage)인 후기 마이오세 중기-현재(middle Late Miocene-Present)까지로 구분하였다.

**리프팅 단계(올리고세) :** 서남 일본지괴가 한반도로 부터 분리되기 이전으로서 한반도와 서남 일본이 거의 근접하여 분지의 폭이 현재보다 좁았을 것이다. 기반암은 한반도 남동지역 및 서남 일본에 분포하는 백악기 화산암류와 관입 화강암들이 주를 이루었을 것이다. 한반도와 서남 일본 사이에는 구조적 약선인 쓰시마 단층(proto-Tsushima fault)과 일부 단층들이 발달한다.

**신장 및 침강운동 단계(초기 마이오세-중기 마이오세 초기) :** 올리고세부터 울릉분지가 리프팅되면서 서남 일본이 한반도로 부터 분리되어 남동쪽으로 이동한다. 그리고 초기 마이오세까지 신장성 지구조운동(extensional tectonics)이 계속해서 일어난다. 기반암에 일련의 정단층 구조를 형성하면서 계속해서 침강이 이루어진다(그림 20). Ingle(1992)은 동해의 초기 형성시 후기 올리고세에서 초기 마이오세에 신장운동과 함께 침강운동이 활발하였던 것으로 주장하고 있다. 신장운동시 쓰시마



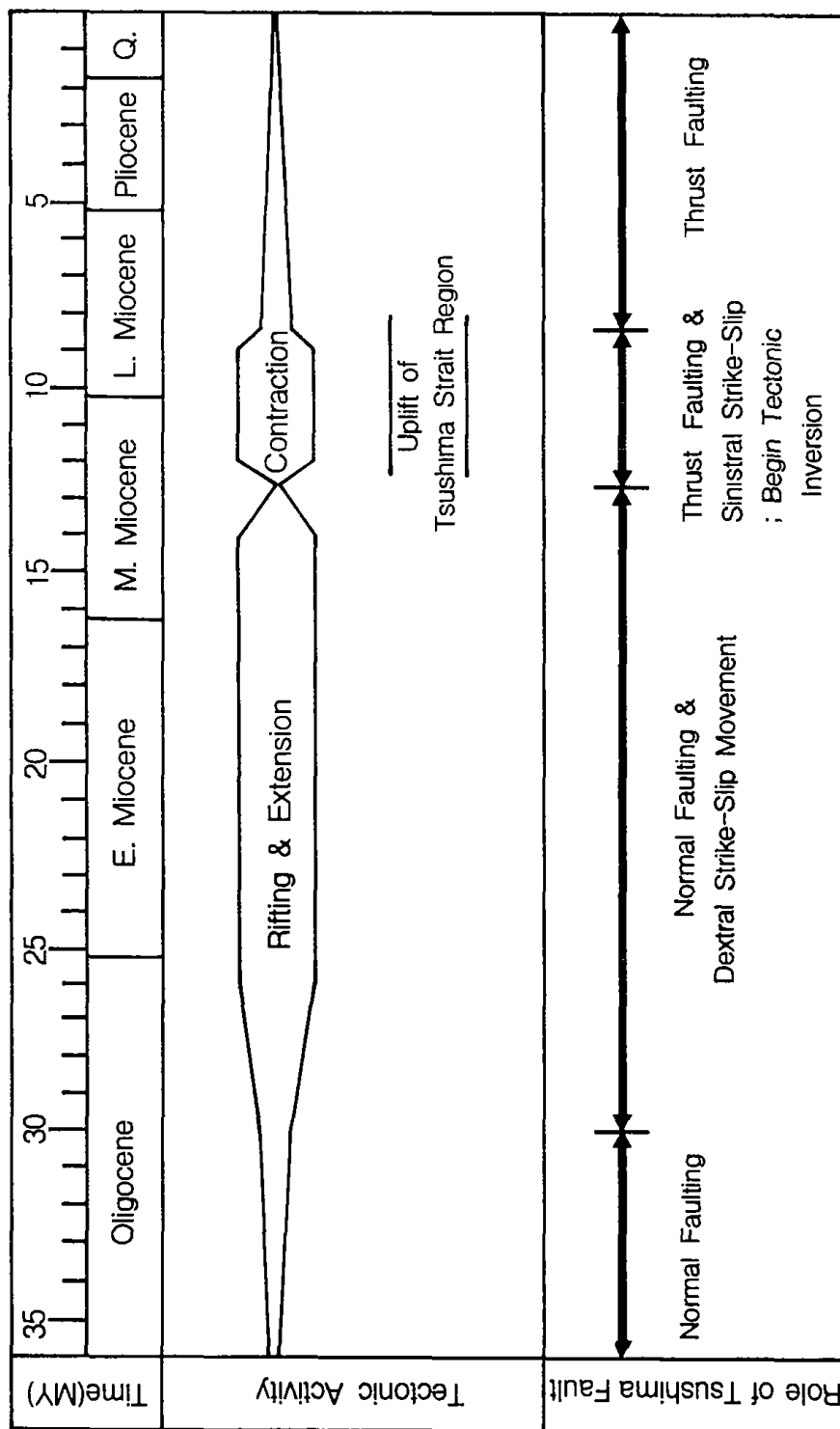
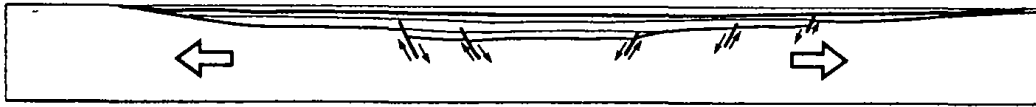
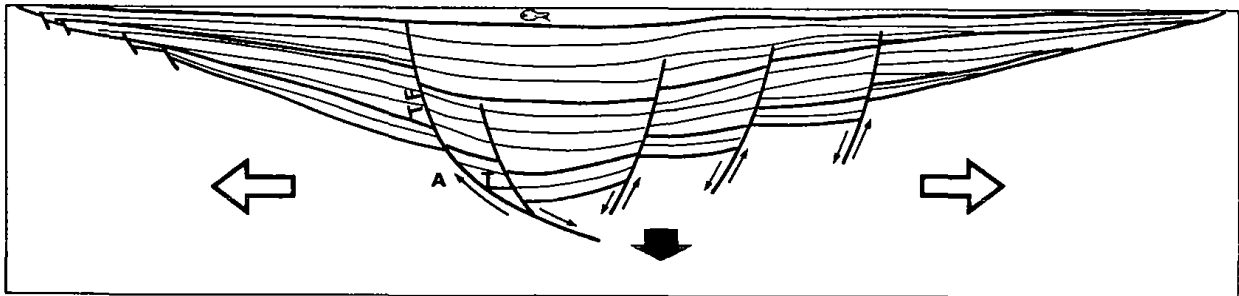


Fig. 22. Summary diagram of tectonic evolution of southern Ulleung Basin with tectonic role of Tsushima fault. Width of the tectonic activity bars are proportional to the displacement rate.

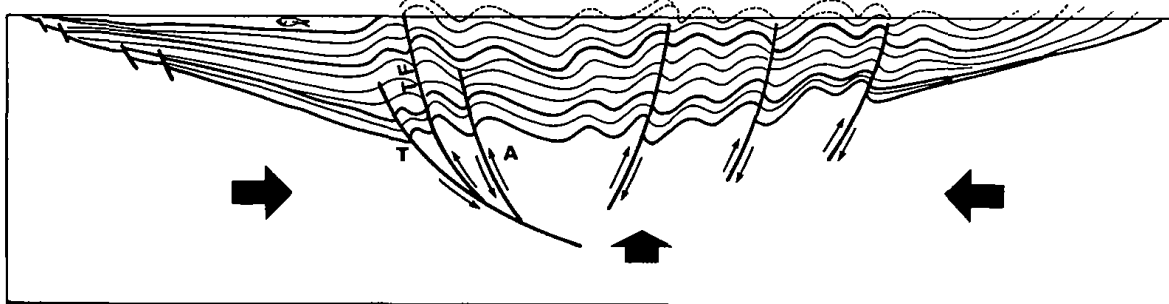
1) Rifting Stage(Oligocene)



2) Extension & Subsidence Stage(E. Miocene-early M. Miocene)



3) Compression & Uplifting Stage(middle M. Miocene-early L. Miocene)



4) Compressional Stage(middle L. Miocene-Present)

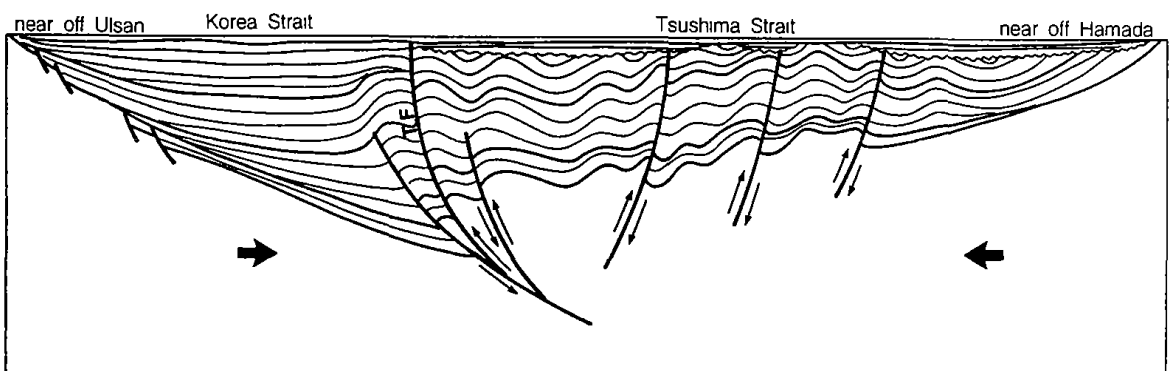


Fig. 23. Possible basin evolution across the Korea-Tsushima Strait in southern Ulleung Basin. TF=Tsushima fault; T=displacement toward viewer; A=away from viewer.

단층 뿐만 아니라 소규모 단층들도 정단층운동을 하면서 분지의 침강이 계속된다. 쓰시마 단층은 주 단층대로서 한반도 지괴와 서남 일본지괴를 가르는 경계 구조선으로 서남 일본이 남동쪽으로 이동할 때 정단층운동과 함께 우수 주향이동을 한다. 대한해협에 발달한 정단층들은 엔 에쉬론 단층들로 해석된다(그림 19).

**압축 및 융기운동 단계(중기 마이오세 중기-후기 마이오세 초기) :** 중기 마이오세 중기에 들어서 신장운동은 중지되고 압축성 조구조운동(contractinal tectonics)이 대한-쓰시마 해협에 발생한다. 매우 강한 압축성 조구조 운동은 지각을 단축변형시켜 중기 마이오세 및 하부 지층을 변형을 시켜 융기작용을 일으킨다(그림 9). 압축운동은 습곡구조와 트러스트 단층을 형성하였다. 압축성 조구조 운동은 후기 마이오세 초기까지 일어났다(Minami, 1979). 15 Ma 경을 전후로 하여 서남 일본이 시계방향으로의 회전운동 있었으며(Otofuji and Matsuda, 1987; Hayashida et al., 1988), 이 때 대한-쓰시마 해협이 압축성 조구조 운동이 있었을 것으로 사료된다. 쓰시마 단층은 트러스트 단층운동으로 바뀌며, 동시에 좌수 주향이동 운동을 한다. 쓰시마 해협에는 압축에 의한 동측 지괴가 서측 지괴로 밀리면서 대규모 쓰시마 트러스트-습곡대(thrust-fold belt)을 형성한다. 쓰시마 섬의 습곡구조는 쓰시마 단층의 좌수 주향이동에 의한 엔 에쉬론 습곡구조로 해석한다(그림 21).

**압축운동 단계(후기 마이오세 중기-현재) :** 후기 마이오세 초기까지의 강한 압축운동에 의해 융기된 지층이 침식되고 뚜렷한 부정합면을 보이면서 후기 마이오세 중기에서 제4기의 상부지층이 덮여 있다. 후기 마이오세 중기에서 현재까지 비교적 약한 압축운동에 의해 일부 지층이 단층 및 습곡에 의한 변형을 받고 있다. 특히 쓰시마 단층은 제4기층까지 연장 발달한다. 이는 쓰시마 단층대가 압축 변형을 받고 있는 것으로 해석된다.

## 제 6 장 결 론

탄성과 단면도상으로 부터 하부층서에서 상부층서로 향하면서 Unit MM-중기 마이오세 및 고기 퇴적층, Unit ML-후기 마이오세, Unit P-플라이오세, 그리고 Unit Q-제4기의 4개 탄성과 층서를 구분하여 각각의 지질구조도를 작성하였다.

한반도 남동지역에는 북동-남서 방향의 주향단층인 양산단층이 발달해 있고, 올리고세에서 초기 마이오세층으로 구성된 쓰시마섬에는 일련의 북동-남서 방향의 엔 에쉬론 습곡구조가 잘 발달해 있다. 한반도 남동해역의 대한해협 하부 기반암에는 일련의 정단층들이 북동-남서 방향으로 발달해 있으며, 대한해협과 쓰시마해협의 경계를 이루는 쓰시마단층대는 쓰시마 섬 서측 연안에서 울릉분지 중심부로 연장 발달한다. 또한 쓰시마해협의 중기 마이오세 및 고기 퇴적층(Unit MM)는 북동-남서 방향의 습곡 및 단층구조들이 우세하게 발달해 있다. 대한해협 하부 기반암에 발달한 정단층들은 울릉분지가 초기 리프팅 및 확장의 신장성 지구조운동을 받았음을 지시한다. 트러스트 단층인 쓰시마 단층대, 쓰시마 섬에 발달한 엔 에쉬론 습곡구조, 그리고 쓰시마해협에 발달한 습곡 및 트러스트 단층구조들은 심한 압축성 지구조운동을 받았음을 의미한다. 압축성 지구조운동은 Unit MM의 지층변형과 함께 융기 작용을 발생시켰다. 대한-쓰시마해협에서 압축운동이 일어나는 동안에 쓰시마단층대는 좌수 주향이동운동을 하였다. 압축성 지구조운동 시기는 적어도 후기 마이오세 초기까지로 해석된다. 후기 마이오세에서 제4기 퇴적층은 Unit MM 과 비교하면 거의 지층변형을 받지 않았으나, 특히 쓰시마해협에는 동-서 방향의 단층구조들이 우세하게 발달해 있다. 또한 쓰시마단층대도 압축작용에 의한 지층변형과 트러스트단층운동이 일어났다.

대한-쓰시마해협의 퇴적분지 발달과정을 시대별 지구조운동과 관련하여 설명하였다. 첫번째 단계로서 올리고세의 리프팅운동이 발생하여 초기 분지형태를 이루었으며, 이 때 분지의 중앙을 거의 남-북으로 가로지르는 주 구조선인 초기 쓰시마단

층대는 정단층운동이 일어났다. 두번째 단계는 초기 마이오세에서 중기 마이오세 초기 동안 신장운동과 함께 및 침강운동에 의한 분지의 형성이 활발하였다. 이 때 서남 일본지괴는 한반도로 부터 분리되어 남동방향으로 이동하였으며, 울릉분지는 발산성 우수주향이동 신장운동을 받으며 인리형 분지를 형성한다. 쓰시마단층대는 정단층운동과 함께 우수 주향이동운동을 하였다. 대한해협과 쓰시마해협의 기반암에도 분지의 침강운동과 함께 정단층운동이 발생하였다. 세번째 단계는 중기 마이오세에서 후기 마이오세 초기 동안의 압축 및 융기운동 단계로서 북서-남동방향으로의 횡압력에 의한 압축성 지구조운동이 일어났다. 이때 서남 일본지괴의 시계방향 회전운동은 울릉분지의 남쪽 연변부 지역에 대한 압축응력을 미쳤으며, 이는 곧 수렴성 좌수 주향이동에 의한 지층의 압축변형을 야기한다. 쓰시마단층대는 트러스트단층운동과 함께 좌수 주향이동운동을 하였다. 마지막 네번째 단계는 후기 마이오세에서 현재까지 약한 압축운동을 받고 있으며, 쓰시마단층대는 압축력에 의한 트러스트단층운동이 일어나고 있다.

## 참 고 문 헌

- Barg,E., 1986. Cenozoic geohistory of the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea. Ms. thesis, Seoul National Univ., 174p.
- Celaya,M. and McCabe,R., 1987. Kinematic model for the opening of the Sea of Japan and the bending of the Japanese islands. *Geology*, 15, 53-57.
- Choi,H.I. and Park,K.S., 1985. Cretaceous/Neogene stratigraphic transition and post-Gyeongsang tectonic evolution along and off the southeast coast,Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 21(4), 281-296.
- Chough,S.K. and E.Barg,E., 1987. Tectonic history of Ulleung Basin margin, East Sea(Sea of Japan). *Geology*, 15, 45-48.
- Chough,S.K. and Lee,K.E., 1992. Multi-stage volcanism in the Ulleung back-arc Basin, East Sea(Sea of Japan). *The Island Arc*, 1, 32-39.
- Dewey,J.F., 1980. Episodicity, sequence, and style at convergent plate boundaries. In: Strangeway,D.W.(editor),The Continental Crust and its Mineral Deposits. *Geological Association of Canadadian Special Paper*, 20, 553-573.
- Faure,M. and Lalevee,F., 1987. Bent structural trends of Japan: Flexural-slip folding related to the Neogene opening of the Sea of Japan. *Geology*, 15, 49-52.
- Fournier,M., Jolivet,L., Huchon,P., Sergeyev,K.F., and Oscorbin,L.S., 1994. Neogene strike-slip faulting in sakhalin and the Japan Sea opening. *Journal of Geophysical Research*, 99(B2), 2701-2725.
- GSJ, 1985. Report on the marine geology of the continental shelf around southwest Japan(Hibikinada-Mishimaoki). Geological Survey of Japan, 192p.(in Japanese).
- GSJ, 1986. Report on the marine geology of the continental shelf around southwest Japan(Hinomisaki-Tottorioki). Geological Survey of Japan, 233p.(in Japanese).

- Hayashida,A. and Ito,Y., 1984. Paleoposition of Southwest Japan at 16Ma : implication from paleomagnetism of the Miocene Ichishi Group. *Earth and Planetary Science Letters*, 68, 335-342.
- Hayashida,A., Fukui,T., and Torii,M., 1991. Paleomagnetism of the early Miocene Kani Group in Southwest Japan and its implication for the opening of opening of the Japan Sea. *Geophysical Research Letters*, 18(6), 1095-1098.
- Hayashida,A., Otofui,Y. ,and Torii,M., 1988. Paleoposition of Southwest Japan and convergence between Eurasia and Pacific plates in pre-Neogene time. *Modern Geology*, 12, 467-480.
- Hilde,T.W.C. and Wageman,J.M., 1973. Structure and origin of the Japan Sea. In : Coleman,P.J.(Editor), *The Western Pacific: Island Arcs, Marginal Seas, Geochemistry*, Univ.Western Australia Press, 413-434.
- Hirata,N., Karp,B.Y., Yamaguchi,T., Kanazawa,T., Suyehiro,K., Kasahara,J., Shiobara,H., Shinohara,M., and Kinoshita,H., 1992. Oceanic crust in the Japan Basin of the Japan Sea by the 1990 Japan-USSR Expedition. *Geophysical Research Letters*, 19(20), 2027-2030.
- Hirata,N., Tokuyama,H., and Chung,T., 1989. An anomalously thick layering of the crust of the Yamato Basin, southeastern Sea of Japan:the final stage of back-arc spreading. In : G.G.R.Buchbinder, Ansorge,J. and Crampin,S. (Convenors), *Fine Structure and Anisotropy of the Lithosphere. Tectonophysics*, 165(Spec.Sect.), 304-314.
- Ingle,J.C.Jr., 1992. Subsidence of the Japan Sea : stratigraphic evidence from ODP sites and onshore sections. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Science Results*, 127/128(part 2), 1197-1218.
- Inoue,E., 1982. Geological problems on Cretaceous and Tertiary rocks in and around Tsushima-Korea Strait. *UN ESCAP, CCOP Technical Bulletin*, 15, 85-121.
- Isezaki,N. and Uyeda,S., 1973. Geomagnetic anomaly pattern of the Japan Sea *Marine Geophysical Research*, 2, 51-59.

- Ishikawa,N. and Tagami,T., 1991. Paleomagnetism and fission-track geochronology on the Goto and Tsushima Islands in the Tsushima Strait area : Implications for the opening mode of the Japan Sea. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 43, 229-253.
- Ishiwada,Y., Honza,E., and Tamaki,K., 1984. Sedimentary basins of the Japan Sea. Proc.27th International Geological Congress(Paris), 23, 43-65.
- Itoh,Y., 1988. Differential rotation of the eastern part of Southwest Japan inferred from paleomagnetism of Cretaceous and Neogene rocks. *Journal of Geophysical Research*, 93(B4), 3401-3411.
- Itoh,Y., Nagasaki,Y., and Ishii,Y., 1992. Geohistory of the San-in and Kita-Kyushu areas inferred from seismic studies. *Journal of Japanese Association Petroleum Technologists*, 57(1), 53-58.(in Japanese).
- Japan Association for Quaternary Research, 1987. Explanatory text for Quaternary maps of Japan. Univ.Tokyo Press, 119p.(in Japanese).
- Jolivet,L. and Tamaki,K., 1992. Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the Northeast Japan arc. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Science Results, 127/128(part 2), 1311-1331.
- Jolivet,L., Davy,P., and Cobbold,P., 1990. Right-lateral shear along the northwest Pacific margin and the India-Eurasia collision. *Tectonics*, 9(6), 1409-1419.
- Jolivet,L., Huchon,P., Brun,J.P., LePichon,X., Chamot-Rooke,N., and Thomas,J.C., 1991. Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a case study. *Journal of Geophysical Research*, 96(B3), 4367-4384.
- Kanaori,Y., 1990. Late Mesozoic-Cenozoic strike-slip and block rotation in the inner belt of Southwest Japan. *Tectonophysics*, 177, 381-399.
- Kano,K., Kosaka,K., Murata,A., and Yanai,S., 1990. Intra-arc deformation with vertical rotation axes : the case of the pre-middle Miocene terranes of southwest Japan. *Tectonophysics*, 176, 333-354.
- Karig,D.E.,1971. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 76(11), 2542-2561.



- KIER, 1982. Petroleum resources potential in the continental shelf of Korea, 342p(Unpub.)(in Korean).
- Kim,H.J., Jou,H.T., Park,C.H., Hong,J.K., and Chung,T.W., 1994. The crustal structure of the Ulleung Basin by tau-sum inversion of ocean bottom seismometer data. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 2(1), 39-42.
- Kimura,G. and Tamaki,K., 1986. Collision, rotation, and back-arc spreading in the region of the Okhotsk and Japan seas. *Tectonics*, 5(3), 389-401.
- KORDI, 1989. Report of acoustic and magnetic surveys in Southeast Sea of Korea. 151p(Unpub.)(in Korean).
- KORDI, 1993. A study of the atlas of marine environments in the adjacent seas to Korea-Korea Strait(second year)-. BSPN 00185-601-3, 392p.(in Korean).
- KORDI, 1994. A study of the atlas of marine environments in the adjacent seas to Korea-Korea Strait(third year)-. BSPN 00227-733-3, 715p.(in Korean).
- Lallemand,S. and Jolivet,L., 1986. Japan Sea: a pull-apart basin? *Earth and Planetary Science Letters*, 76, 375-389.
- Lee,K.E., 1992. Geological structure of Ulleung back-arc basin, East Sea. MS thesis, Seoul National Univ., 121p.
- Ludwig,W.J., Murauchi,S., and Houtz,R.E., 1975. Sediments and structure of the Japan Sea. *Geological Society of American Bulletin*, 86, 651-664.
- Minami,A., 1979. Distribution and characteristics of the sedimentary basin offshore San-in to Tsushima island. *Journal of Japanese Association Petroleum Technologists*, 44(5), 321-328(in Japanese).
- Murata,A., 1987. Conical folds in the Hitoyoshi bending, south Kyushu, formed by the clockwise rotation of the Southwest Japan arc. *Journal of Geological Society of Japan*, 93(2), 91-105.
- Otofuji,Y. and Matsuda,T., 1983. Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of southwest Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 62, 349-359.

- Otofuji,Y. and Matsuda,T., 1987. Amount of clockwise rotation of southwest Japan-fan shape opening of the southwestern part of the Japan Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 85, 289-301.
- Otofuji,Y., Itaya,T., and Matsuda,T., 1991. Rapid rotation of southwest Japan-paleomagnetism and K-Ar ages of Miocene volcanic rocks of southwest Japan. *Geophys. J. Int.*, 105, 397-405.
- Otofuji,Y., Matsuda,T., and Nohda,S.,1985. Opening mode of the Japan Sea inferred from the Paleomagnetism of the Japan Arc. *Nature*, 317, 603-604.
- Park,K.S., 1990. The seismic stratigraphy, structure and hydrocarbon potential of the Korea Strait. Ph.D.thesis, Imperial College. 441p.
- Park,K.P., 1987. Seismic stratigraphic interpretation and its application for hydrocarbon exploration in the southern part of the East Sea, Korea. Ph.D.thesis, Seoul National Univ., 156p.(in Korean).
- Ramsay J.G. and Huber,M.I., 1987. The techniques of modern structural geology, volume 2 : Folds and Fractures. Academic press, 700p.
- Shimada,N., 1977. Lead-zinc ore deposits of the Tsushima Islands, Nagasaki prefecture, with special reference to shigekuma-type mineralization. Mem.Fac.Sci., Kyushu Univ., Ser.D.Geol., XXIII(3), 417-480.
- Sillitoe,R.H., 1977. Metallogeny of Andean-type continental margin in south Korea : Implications for opening of the Japan Sea. In : Talwani,M. and Pitman,W.C.,III(editors), Island arcs, deep-sea trenches and back arc basins ; American Geophysical Union Maurice Ewing Series 1, 303-310.
- Sylvester,A.G., 1988. Strike-slip faults. *Geological Society of American Bulletin*, 100, 1666-1703.
- Tamaki,K., 1985. Two modes of back-arc spreading. *Geology*, 13, 475-478.
- Tamaki,K., 1986. Age estimation of the Japan Sea on the basis of stratigraphy, basement depth, and heat flow data. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 38(5), 427-446.
- Tamaki,K.,1988. Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications. *Bulletin Geological Survey of Japan*, 39(5), 269-365.

- Tamaki,K., Suyehiro,K., Allan,J., Ingle,Jr.J.C., and Pisciotto,K.A., 1992. Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP Drilling. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Science Results, 127/128(part 2), 1333-1348.
- Tamaki,K., Yuasa,M., and Murakami,F., 1982. Geologic map of Oki Strait, Marine geologic map series 20, 1:200,000, Geological Survey of Japan.
- Tokuyama,H., Suyemasu,M., Tamaki,K., Nishiyama,E., Kuramoto,S., Suyehiro,K., Kinoshita,H., and Taira,A., 1987. Report on the DELP 1985 cruises in the Japan Sea Part, III : Seismic reflection studies in the Yamato Basin and Yamato Rise area. Bulletin of Earthquake Research Institute University of Tokyo, 62, 367-390.
- Uyeda,S. and Miyashiro,A., 1974. Plate tectonics and the Japanese island: a synthesis. *Geological Society of American Bulletin*, 85, 1159-1170.
- Uyeda,S. and Kanamori,H., 1979. Back-arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research*, 84, 1049-1061.
- Vail,P.R.,et al., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level(a series of papers), In: Payton,C.E.(editor), Seismic stratigraphy- application to hydrocarbon exploration, American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, 49-212.
- Yanai,S., 1988, A horizontal buckle model as a dynamic mechanism for back-arc spreading of the Japan Sea. *Journal of Geology*, 97, 569-583.