

양식장 용수 추가 확보를 위한 수압파쇄 적용성 평가

이병선¹ · 김영인² · 박학윤³ · 조정환³ · 송성호^{1*}

¹한국농어촌공사 농어촌연구원

²한국농어촌공사 지하수지질처

³한국농어촌공사 전남지역본부

Feasibility of Hydraulic Fracturing for Securing Additional Saline Groundwater in the Land-based Aquaculture Farm

Byung Sun Lee¹ · Young In Kim² · Hak Yun Park³ · Jung Hwan Cho³ · Sung-Ho Song^{1*}

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

²Groundwater and Geological Technology Office, Korea Rural Community Corporation

³Jeonnam Regional Headquarter, Korea Rural Community Corporation

ABSTRACT

Feasibility tests for the hydraulic fracturing were conducted in order to secure additional saline groundwater for irrigating to the land-based aquaculture farm. Two boreholes were placed to the aquaculture farm A and B, respectively. A hydraulic fracturing using single packer was applied to major fracture zones within two boreholes. To identify effects of hydraulic fracturing on securing additional saline groundwater, some selective methods including well logging methods, pumping tests, and groundwater quality analysis were commonly applied to the boreholes before and after the hydraulic fracturing. Enlarging/creating fracture zones, increasing water contents in bedrock near boreholes, and increasing transmissivity were observed after the hydraulic fracturing. Even though the hydraulic fracturing could be an alternative to secure additional saline groundwater to the land-based aquaculture farm, salinity of the groundwater did not meet optimal thresholds for each fingerling in two farms: Fresh submarine groundwater discharge flowed the more into borehole of the farm A that resulted in decreasing a salinity value. Increased saline groundwater quantity in the borehole of the farm B rarely affect to the salinity. Although salinity problem of groundwater limited its direct use for the farms, the mixing with seawater could be effectively used for the fingerlings during the early stage. A horizontal radial collector well placed in the alluvial layer could be an alternative for the farms as well.

Key words: Hydraulic fracturing, Land-based aquaculture farm, Saline groundwater, Well logging method, Pumping test

1. 서 언

국내 해안변 어가에서는 다량의 양식어종 생산을 위해 「육상해수양식장 및 종묘생산장(이하 육상양식장)」을 운영 중이다. 육상양식장은 2014년 1월말 현재 전국 2,163 개소로서 대부분 전라남도(59%, 1,262개소) 및 경상남도(24%, 524개소)에 소재하며, 경상북도(6%, 125개소), 충청남도(6%, 133개소), 강원도(3%, 66개소), 전라북도(1%, 31개소), 인천광역시·경기도(1%, 22개소) 등에도 일부 소

재한다(제주도 소재 양식장 및 축제식 양식장은 집계 제외)(KRC, 2015). 대부분의 육상양식장에서는 필요 용수로써 해수를 직접 취수하여 이용한다. 그러나 적조 및 이상해류 등 뜻하지 않은 해수 수질사고로 인해 매년 양식어류의 폐사가 발생하여, 양식어가의 경제적 손실을 유발하는데, 2014년에는 약 53억원(322만 마리 피해)의 적조피해가 발생된 바 있다(NFRDI, 2014). 이러한 이유로 선제적 적조 특보 발령을 통하여 2013년(약 247억원)에 비하여 약 20% 줄어들긴 하였으나, 여전히 큰 피해를 주고

*Corresponding author : shsong@ekr.or.kr

Received : 2015. 6. 19 Reviewed : 2015. 9. 9 Accepted : 2015. 9. 22

Discussion until : 2016. 2. 29

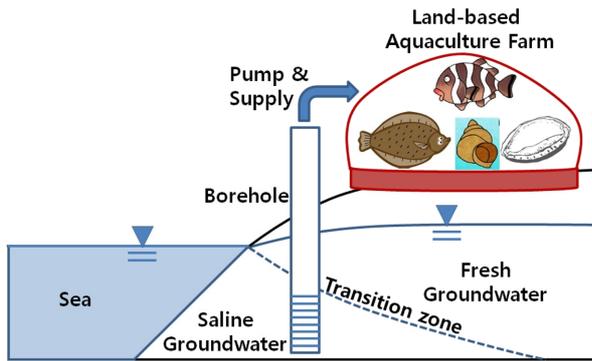


Fig. 1. A schematic view of a land-based aquaculture farm system using saline groundwater.

있다. 그리고 양식어가에서는 경제성 확보를 위해, 양식어류의 단기간 성장속진 및 체중 증가를 유도하여 양식어류의 출하시기를 앞당기는데, 수온이 체중 증가에 가장 중요한 요인으로 작용한다. 해수를 직접 취수하여 이용하는 양식어가에서는, 겨울철에 해수 수온을 15°C 내외로 가온하고, 여름철에 냉방기를 이용하여 해수를 냉온시킨다. 이때 가온냉온에 소요되는 유틸비, 전기료 등은 최대 약 1,700 원/m³으로 양식어가의 부담을 초래한다(KRC, 2015).

이에 따라 해안변에 관정을 설치하고, 양수를 통해 대수층을 통한 해수의 유입을 유도하여, 각종 유해물질을 대수층에서 여과한 후 용수를 취수하는 방법(지하해수 취수 방법)이 대안으로 고려된다(Fig. 1). 이 과정을 통하여 수질오염 우려가 낮은 용수가 취수되기 때문에, 적조 등에 의한 육상양식장의 피해를 차단할 수 있다. 또한 지하해수는 수온이 상시 15°C 내외로 일정하기 때문에, 기존의 해수 가온냉온에 따른 유틸비, 전기료 등의 생산원가절감이 가능하다. 이러한 생산원가절감은 저가의 수입수산물의 국내시장 잠식에 대응한 국내 육상양식어가의 경쟁력 확보로 이어져, 육상양식어가 소득증대를 비롯하여 녹색양식어업의 활성화를 가능케 한다.

그러나, 해안에 설치되는 암반관정을 통하여 유입되는 지하해수의 수질 및 수온은 일반적으로 양식어가의 수요 조건을 만족하고 있으나, 유입 통로인 암반균열대의 발달 상태에 따라 관정의 토출량이 용수수요를 충족하지 못하는 경우가 발생한다. 이를 해결하기 위해서 지하해수 유로의 추가 확보가 필요하며, 균열대 확장 및 균열빈도 증대가 가능한 수압파쇄공법 적용이 하나의 대안으로 고려될 수 있다. 이 연구에서는 단일패커를 이용한 수압파쇄공법을 개별 지하해수 관정에 적용한 후 수량 증대를 정량적으로 평가하였다.

2. 연구지역

지하해수 산출량 증대를 위해 수압파쇄공법이 적용된 육상양식장 내 시추공은 전라남도 무안군 및 해남군에 소재한 2개소이다. 2개 시추공 모두 암반지하수 관정이며, 시추공 내부 붕락을 방지하기 위하여 지표로부터 신선한 암반이 나타날 때까지 케이싱을 설치하였다. 시추공이 설치된 육상양식장의 특성은 아래와 같다.

2.1. A육상양식장

전라남도 무안군에 소재한 A육상양식장은 압해도와 고이도를 가로지르는 서해의 육지부 해안에 위치한다(KRC, 2014b). 주변 지형은 50 m 내외의 구릉성 산계를 이루고 있으며, 간척지에 논과 염전 등이 조성되어 있다(Fig. 2(a)). A육상양식장 주변 지질은 화강암질편마암이 기반암을 이루며 제4기 층적층이 부정합을 이룬다(MISP, 1973). A육상양식장에 대한 지하해수 공급을 위하여, 해안으로부터 90 m 내륙(해발고도 5 m) 지점에 115 m 심도 시추공을 설치하였고, 이 시추공은 A육상양식장 내부에 소재한다. 시추 주상도 상 해성퇴적물(지표~3 m 심도), 풍화대(3~24 m) 및 암반(24~100 m)으로 구성되어 있다(Fig. 3(a)). 지표 하 24 m 심도 부근 균열대에서 약 100 m³/day의 지하해수가 산출되었다.

2.2. B육상양식장

전라남도 해남군에 소재한 B육상양식장은 흑일도와 백일도를 가로지르는 남해의 육지부 해안에 위치한다(KRC, 2014a). 주변 지형은 80~120 m 내외의 해안산지이며, 해안변에 B육상양식장이 위치한다(Fig. 2(b)). B육상양식장 주변 지질은 백악기 흑운모화강암이 기반암을 이루며 제4기 층적층이 부정합을 이룬다(MISP, 1997). B육상양식장에 대한 지하해수 공급을 위하여, 해안으로부터 20 m 내륙(해발고도 13 m)에 140 m 심도 시추공을 설치하였고, 이 시추공은 B육상양식장 내부에 소재한다. 시추 주상도 상 미사질토사(지표~4 m 심도), 해성퇴적층(4~7 m) 및 암반(7~140 m)으로 구성되어 있다(Fig. 3(b)). 지표 하 12~15 m 심도 부근 균열대에서 약 110 m³/day의 지하해수가 산출되었다.

3. 연구방법

수압파쇄는 단일패커를 이용한 방법을 이용하였으며, 수압파쇄로 인한 지하해수 수량 및 수질의 변화를 확인하고

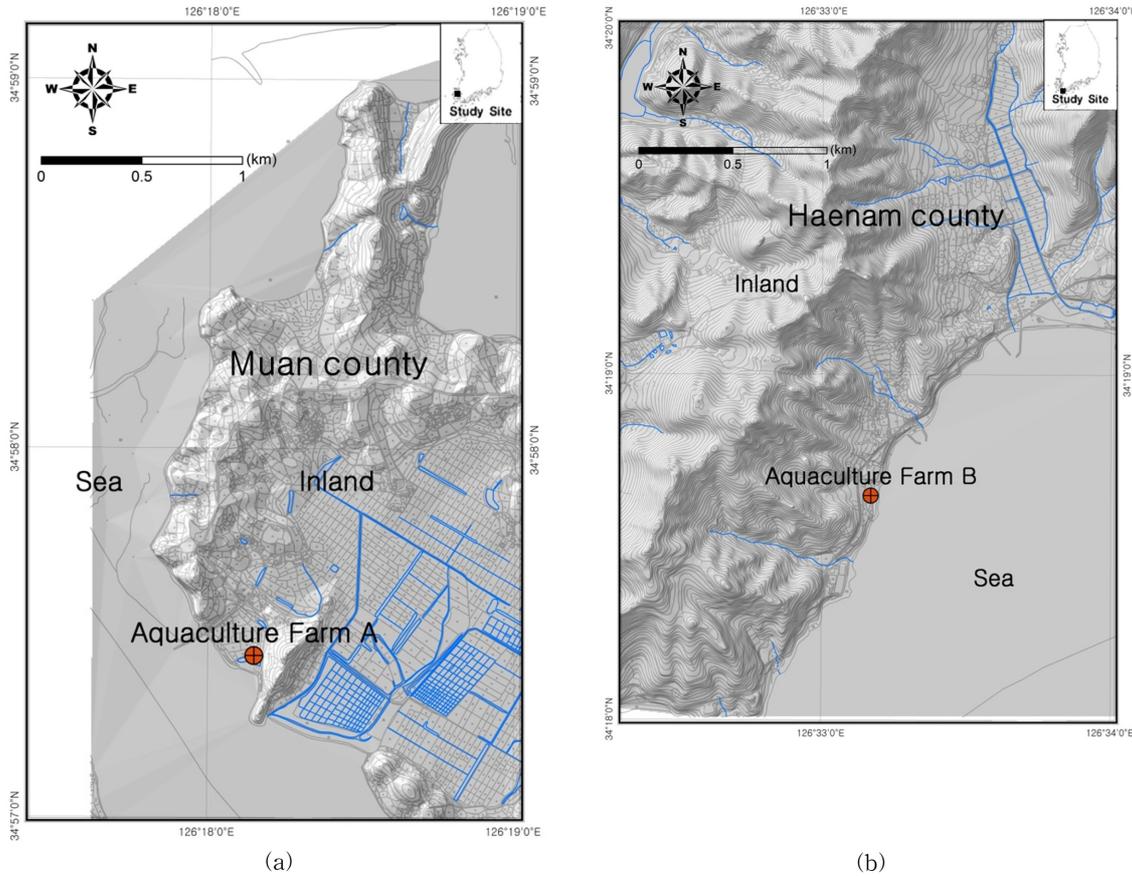


Fig. 2. Maps of study areas; (a) aquaculture farm A, (b) aquaculture farm B.

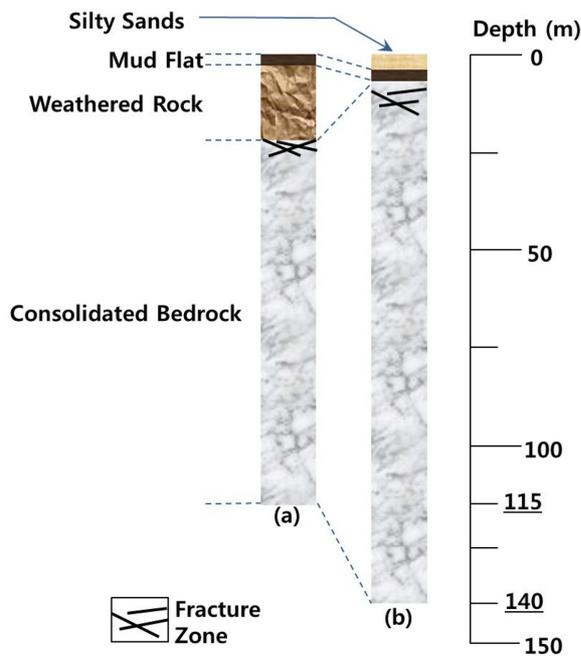


Fig. 3. Simplified geologic sections of each borehole; (a) aquaculture farm A, (b) aquaculture farm B.

자 수압파쇄 전·후에 물리검층, 대수성시험 및 수질분석을 실시하였다.

3.1. 수압파쇄

수압파쇄는 개발 당시 토출량이 적거나, 개발 이후 저하된 시추공의 토출량을 증대시킬 수 있는 방법으로서 (Williamson and Wooley, 1980), 국내외 여러학자들에 의해 그 효용성이 보고된 바 있다(Gale, 1982; Hahn et al., 2002, 2003; Kim et al., 2005; Macaulay, 1987). 수압파쇄를 위해서는 시추공 내 패커를 설치해야 하는데, 설치방법에 따라 이중패커(double-packer)와 단일패커(single-packer)로 구분된다. 이중패커를 이용한 방법은 시추공 내 목적 심도 상·하부에 각기 1개의 패커를 삽입하여 해당 심도 구간을 밀폐한 뒤 고압의 물을 주입하여 균열을 확대 및 신규 생성시켜 추가 수량을 확보를 도모한다. 단일패커를 이용한 방법은 목적 심도 직상부에 1개의 패커를 설치하고, 패커 설치 하부 심도 전구간을 대상으로 균열면 확대 및 신규생성을 도모한다. 이중패커는 목적 심도만을 집중 파쇄 대상으로 함에 비해 단일패커는

설치지점 하부로부터 공저까지 전구간을 대상으로 하므로, 이중패커에 의한 수압파쇄 효과가 단일패커에 비해 상대적으로 높다. 그러나, 단일패커 작업도 우물개선을 위한 파쇄에 이용되며, 단일패커 작업으로도 기존의 투수성 파쇄대의 확장에 많은 영향을 주는 것으로 보고된 바 있다 (Kim et al., 2005). 이 연구에서는 목적 심도 직상부에 밀폐가 가능한 단일패커를 사용하여 수압파쇄를 실시하였다.

시추공마다 주변 지반의 상대적 강도를 고려하여 수압파쇄 압력을 다르게 설정하였다. 시추공 굴착 시 지반이 견고한 A육상양식장은 상대적으로 압력을 높여 시험할 수 있었고, 지반이 무른 B육상양식장의 경우 수압파쇄에 따른 시추공 내부의 붕락 우려 때문에 부득이하게 압력을 낮추어 시험하였다. A육상양식장 시추공은 균열대가 케이싱 하단부인 24 m 심도에 위치하여, 패커를 케이싱 하단부에 설치한 후 10 kgf/cm²의 압력을 1시간 동안 주입하였다. B육상양식장 시추공은 균열대가 12~15 m 심도에 위치하여, 12 m, 15 m, 17 m 및 30 m 심도에 각각 패커를 설치하여 0.5 kgf/cm²의 압력으로 각 30분씩 시행되었고, 이 과정은 1일 내에 완료되었다. 수압파쇄 장비는 JCR사의 Hydro Fracturing Unit HFU 140(수압파 주입량 400 L/min, 최대주입압력 150 kgf/cm², 물탱크 8 m³)을 이용하였다. 수압파쇄에 이용된 물은 인근 저수지에서 양수한 담수를 이용하였다.

3.2. 물리검층

물리검층은 시추공이 설치된 지층이 대수층으로서 충분한 공극 및 투수성을 가진 지층인지 여부를 판단할 때 사용하는 방법으로, 센서가 부착된 검층기를 시추공 내에 주입하며 심도별 물리량을 측정한다(Min et al., 1996). 이 연구에서는 수압파쇄 전·후 공내수의 전기전도도와 수온, 전기비저항, 시추공 공경검층을 시행하였다. 전기전도도 검층은 전류를 운반할 수 이온의 수직적인 부하량 변화를 측정하는 검층방법으로, 결과값은 비저항의 역수($\mu\text{S}/\text{cm}$)로 표현된다. 전기비저항 검층은 시추공 주변의 전기비저항($\text{ohm}\cdot\text{m}$)을 측정하는 검층방법이며, 시추공 내에 삽입한 한쌍의 전류 및 전위 전극의 간격에 따라 단노말(short normal, 16")과 장노말(long normal, 64") 검층으로 나뉜다(Min et al., 1996). 공경 검층은 시추공의 직경(cm)을 심도에 따라 연속적으로 측정하는 방법으로, 파쇄대 확인과 다른 검층결과를 보정하는데 이용된다. 수압파쇄 후 1주일 이내에 약 70시간 이상 장기양수시험을 실시하고, 장기양수 시험 후 약 10일 내외에 물리검층을 실시하였다. 장기양수시험을 통해 수압파쇄로 교란된 대수

층을 충분히 안정화 시킨 후 물리검층을 실시하였으므로, 검층자료는 수압파쇄 후의 대수층 정보를 적절하게 반영한다. 시추공 내 지하해수의 수직 심도별 전기전도도 및 수온 변화를 살펴보기 위해 Hydrolab사의 Minisonde4a 검층기를 이용하였다. 그리고 지하해수 수체의 비저항, 자연감마, 전기비저항 및 공경검층은 Mount Sopris사의 Matrix 장비를 이용하였다.

3.3. 장기양수시험

수압파쇄로 인해 시추공의 토출량이 증가되었는지 여부를 정량적으로 분석하기 위하여 장기양수시험을 실시하였다. 장기양수시험은 양수량을 일정하게 하면서 시추공의 수위강하를 장기간 관측하여 대수층의 수리상수(투수량계수, 저유계수 등)를 산출하는 방법이다(Freeze and Cherry, 1979). 대수층의 수리상수는 일반적으로 양수정과 관측정으로 구성된 2개 이상의 관정을 이용하여, 관측정에서의 수위강하자료를 해석에 활용한다. 그러나 이 연구에서는 관측정을 확보할 수 없어서 양수정(시추공)의 수위강하자료를 이용하여 수리상수를 산출하였다(Theis, 1935). A육상양식장 시추공의 경우, 장기양수시험을 위해 수압파쇄 이전 수중모터(3.0 마력)를 55 m 심도에 설치하고 97 m³/day로 70.7시간 시험하였고, 수압파쇄 이후 동일 수중모터를 동일 심도에 설치하고 100 m³/day로 70.2시간 시험하였다. B육상양식장 시추공의 경우, 장기양수시험을 위해 수압파쇄 이전 수중모터(3.0 마력)를 80 m 심도에 설치하고 116 m³/day로 72시간 시험하였다. 수압파쇄 이후 약 40 m 심도에서 공내 이물질 발생으로 40 m 심도 이하로는 수중모터 주입이 불가능하였다. 따라서 동일 수중모터를 30 m 심도에 설치하고 112 m³/day로 71.2시간 시험하였다.

3.4. 수질분석

수압파쇄로 생성된 시추공 내 추가 균열대를 통해 해수가 유입되는지, 이외는 반대로 내륙에서 해안으로 배출되는 담수(해안유출지하수)가 유입되는지를 살펴보고자 수질분석을 시행하였다. 수압파쇄 전, 지하해수 배경수질을 확인하기 위하여 양음이온 8개 항목(Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO₃, SO₄, NO₃-N)에 대한 수질시료를 채수 후, 고려대학교 전라광물연구센터에 의뢰하여 분석하였다. 그리고 수압파쇄 전·후 수질의 변화를 살펴보기 위하여, 수압파쇄 전·후 장기양수시험 시 지하수 46개 분석항목(지하수(음용수 기준))에 대한 수질시료를 채수 후, 국가공인 먹는물분석기관에 의뢰하여 분석하였다.

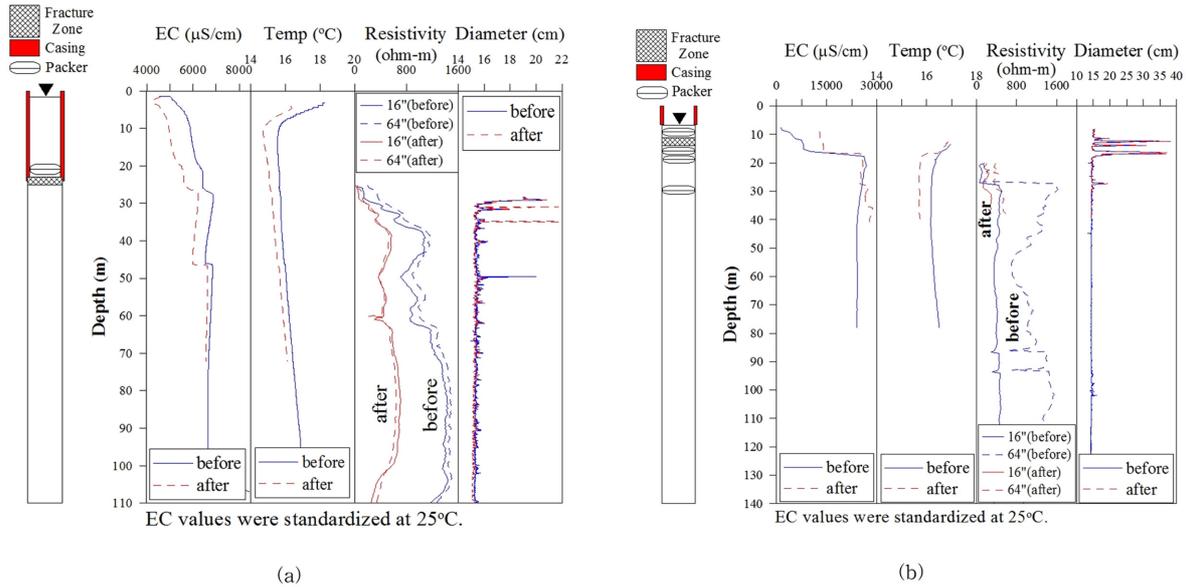


Fig. 4. Vertical profiles including electric conductivity, temperature, fluid resistivity, normal resistivity, and borehole diameter before and after hydraulic fracturing; (a) a borehole in aquaculture farm A, (b) a borehole in aquaculture farm B.

4. 연구결과

4.1. A육상양식장

물리검층 결과, 수압파쇄로 인하여 시추공 내 균열대의 확장 및 균열면 빈도가 증가됨에 따른 특징들이 나타났다 (Fig. 4(a)). 수압파쇄 시 패커설치 심도와 인접한 약 32 m 심도 공경은 수압파쇄 이전(17.95 cm)보다 이후(21.80 cm)에 약 1.85 cm 확장되었다. 시추공 공벽 주변 지반에 대한 노말 전기비저항 탐사 결과, 수압파쇄 이전 단노말 및 장노말은 평균 1,075 ohm-m 및 1,183 ohm-m 이었으나, 수압파쇄 이후 평균 481 ohm-m 및 470 ohm-m로서, 수압파쇄 이후 약 50% 이상 감소되었다. 이는 수압파쇄 이후 시추공 공벽의 균열 확장 및 빈도 증가로 지반의 포화도가 증가되었기 때문으로 판단된다. 장기양 수시험 결과, 수압파쇄 전·후 양수량이 유사(수압파쇄 전·후 97 m³/day 및 100 m³/day)하였음에도 불구하고, 최대 수위 강하는 수압파쇄 이전(43.12 m)보다 이후(38.12 m)에 약 5.0 m 적었다(Fig. 5(a)). 이는 수압파쇄로 인해 시추공으로 유입되는 지하해수 수량의 증가에 따른 영향으로 판단된다. 투수량계수는 수압파쇄 이전 1.30 m²/day에서 수압파쇄 이후 1.66 m²/day로서, 수압파쇄 결과, 대수층을 통해 유동하는 지하해수 수량이 증가한 것으로 판단된다.

수압파쇄로 인해 시추공 내부로 유입되는 수량은 증가하였지만, 전기전도도 변화에 따르면 수압파쇄 이후 염수

보다는 담수의 영향을 발견할 수 있다. 수압파쇄 이후 물리검층에서 공내수의 전기전도도의 감소/변화, 온도감소는 수압파쇄에 이용한 저수지 물의 영향과 수압파쇄로 인한 균열대의 간극 증대로 인한 지하수 유입의 영향이 반영된 것으로 판단된다. 수압파쇄 이전 첫 번째 전이대(25~30 m 심도)의 전기전도도는 약 6,400~6,900 μS/cm 범위, 두 번째 전이대(48 m)는 약 6,500~6,900 μS/cm 범위였다. 그러나 수압파쇄 이후 약 300~800 μS/cm의 감소(25~30 m 구간, 약 5,600~6,200 μS/cm; 48 m 구간, 약 6,000~6,600 μS/cm)가 관찰되는데 이는 담수의 유입을 시사한다. 특히, 두 번째 전이대 구간은 수온, 전기전도도, 공경의 변화가 공통적으로 발견되므로 투수성 파쇄대로 판단된다.

수질분석 결과, A육상양식장의 지하해수는 염도 2.4‰, (Na+K)-Cl 유형이었다. 수압파쇄 전·후 수질항목의 변화를 살펴보면 총 46개 수질항목 중 15개 항목에서 분석 값이 확인되었다(Table 1). 이 가운데 5개 항목(일반세균, 질산성질소, 경도, 염소이온, 황산이온)에서 수압파쇄 전·후 유의미한 변화가 관찰되었고, 나머지 항목들은 수압파쇄 전·후 값이 유사하였다. 3개 항목(일반세균, 질산성질소, 황산이온)은 값이 증가한 반면, 2개 항목(경도, 염소이온)은 값이 감소하였다. 이러한 증감은 수압파쇄 이후 염수유입량의 증가 뿐 아니라 담수 유입량의 증가가 함께 발생된 원인으로 분석된다. 담수의 유입으로 대표적인 지표오염물질인 질산성질소 농도가 약간 증가(수압파쇄 전·후 각각 8.2 mg/L 및 9.6 mg/L)하였고, 해수의 주이온인

Table 1. Concentrations of groundwater constituents before and after hydraulic fracturing

Constituent	Aquaculture farm A		Aquaculture farm B		unit
	Before	After	Before	After	
Aerobic Bacteria	66	340	–	–	CFU/mL
Se	0.01	0.01	0.07	0.06	mg/L
NH ₃ -N	0.02	–	0.03	0.02	mg/L
NO ₃ -N	8.2	9.6	0.3	0.2	mg/L
Cd	–	–	0.02	0.01	mg/L
B	0.03	–	0.91	0.53	mg/L
Hardness	12,151	10,274	22,094	17,565	mg/L
KMnO ₄ consumption	3.2	3.8	2.5	1.9	mg/L
Taste	deteted	deteted	deteted	deteted	–
Anion Surfactant	0.06	0.04	0.09	0.08	mg/L
pH	6.8	6.6	7.1	6.0	–
Zn	0.06	0.07	0.13	0.12	mg/L
Cl	2,118	1,836	9,356	9,180	mg/L
Mn	0.11	–	1.48	1.42	mg/L
Turbidity	0.10	0.24	0.17	0.32	NTU
SO ₄	166	196	1,080	1,146	mg/L
Others (30 constituents)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	

염소이온농도가 약간 감소(수압파쇄 전·후 각각 2,119 mg/L 및 1,836 mg/L)하는 경향을 보였다. 이에 따라 염도는 오히려 감소하였고, A육상양식장 어패류 생산을 위한 요구 염도(약 30‰)에 크게 미치지 못하였다.

4.2. B육상양식장

물리검층 결과, 수압파쇄 이후 시추공 내부로 염수의 유입량이 증가하였다(Fig. 4(b)). 그러나 수압파쇄 이후 약 40 m 심도에서 공내 함몰에 의해 40 m 심도 이하로는 검층이 불가능함에 따라, 수압파쇄 전·후 비교는 약 40 m 심도 이내로 한정되었다. 수압파쇄로 인하여 시추공 내 균열대의 확장 및 균열면 빈도가 증가되어 시추공 내 수체의 유입량이 증가하였다. 공경검층 결과, 패커를 설치했던 심도(12 m, 15 m 및 17 m 심도)부근에서는, 수압파쇄 이전(각각 25.49 cm, 29.97 cm 및 35.89 cm)보다 이후(37.68 cm, 30.93 cm, 37.54 cm)에 약 0.96~12.19 cm 공경이 확장되었다. 약 40 m 심도까지 시추공 공벽 주변 지반에 대한 노말 전기비저항 탐사 결과, 노말 전기비저항은 수압파쇄 이전(단노말 평균 243 ohm-m, 장노말 평균 749 ohm-m)보다 이후(각각 208 ohm-m 및 410 ohm-m)에 35~339 ohm-m 감소하였다. 이는 수압파쇄 이후 패커 설치 구간 주변 공벽의 균열 확장 및 빈도 증가로 지반의 포화도가 증가되었기 때문으로 판단된다. 장기양수시험 결과, 수압파쇄 전·후 양수량이 유사(수압파쇄 전·후

116 m³/day 및 112 m³/day) 하였음에도 불구하고, 최대 수위 강하는 수압파쇄 이전(7.35 m)보다 이후(4.98 m)에 약 3.37 m 적게 강하되었다(Fig. 5(b)). 이는 수압파쇄로 인해 시추공으로 유입되는 수량이 증가하였음을 시사한다. 투수량계수는 수압파쇄 이전 14.25 m²/day에서 수압파쇄 이후 16.09 m²/day로서, 수압파쇄로 인하여 대수층을 통해 유동하는 지하해수 수량이 증가한 결과로 판단된다.

전기전도도 검층 결과 수압파쇄 이전 전이대(16 m 심도, 시추주상도 상 균열대)의 전기전도도는 약 8,000~26,000 μS/cm 범위인 반면, 수압파쇄 이후에는 약 14,000~26,000 μS/cm로서 약 6,000 μS/cm의 증가가 관찰되는데 이는 염수의 유입으로 인한 영향으로 판단된다. 전이대 이하부터 40 m 심도까지, 수압파쇄 이전 약 24,000~27,000 μS/cm였으나, 수압파쇄 이후 약 25,000~29,000 μS/cm로서 약 1,000~2,000 μS/cm의 증가폭을 보여, 수압파쇄 이후 전기전도도가 높은 염수가 유입된 결과로 판단된다.

수질분석 결과, B육상양식장의 지하해수는 염도 12.5‰, (Na+K)-Cl 유형이었다. 수압파쇄 전·후 수질항목의 변화를 살펴보면 총 46개 수질항목 중 15개 항목에서 분석 값이 확인되었다(Table 1). 이 가운데 경도에서 수압파쇄 전·후 유의미한 변화가 관찰되었고, 나머지 항목들은 수압파쇄 전·후 값이 유사하였다. 해수의 주이온인 염소이온농도가 수압파쇄 이후 약간 감소(수압파쇄 전·후 각각 9,357 mg/L 및 9,180 mg/L)하였으나, 약 177 mg/L의 염

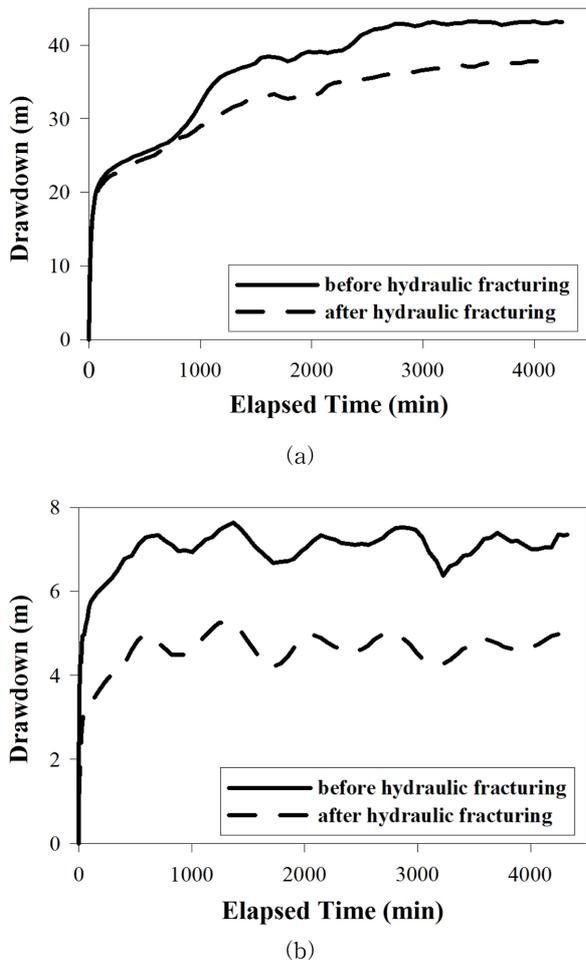


Fig. 5. Drawdown in each borehole by a long-term pumping test before and after hydraulic fracturing; (a) a borehole in aquaculture farm A, (b) a borehole in aquaculture farm B.

소이온 감소는 고농도 시료에서 별다른 의미가 없을 것으로 판단된다. 수압파쇄 이후 염수 유입량이 증가하였으나, 염도는 유사하여, B육상양식장 어패류 생장을 위한 요구 염도(약 31‰)에 미치지 못하였다.

5. 토 의

지하해수는 육상양식어가에서 사용 시, 각종 해양사고에 따른 수질오염피해 우려가 적고 수온이 15°C 내외로 안정적인 장점이 있다. 반면, 단일 시추공으로 양식용수 수요량을 충족시키기에는 상대적으로 토출량이 적으며, 어패류 생장에 요구되는 적정염도 확보가 쉽지 않은 단점이 있다. 따라서 수압파쇄 방법은 염도가 낮고 토출량이 적은 시추공에 대해서, 염도가 높은 해수를 시추공 내부로 유입시켜 추가 토출량을 확보할 수 있는 좋은 대안이 될

수 있다. 그러나, 지하해수 개발 대상매체인 해안대수층은 그 특성상 해수의 유입과 담수(해안유출지하수)의 배출이 동시에 일어나기 때문에, 수압파쇄 방법으로 해수만을 선택적으로 시추공 내로 유입시키기는 쉽지 않다. 따라서 수압파쇄로 시추공 내 확장된 균열대가 해수유입 유로인 경우에는 충분한 염도의 지하해수 확보가 가능하지만, 담수 유입 유로인 경우에는 지하해수의 염도가 낮아지는 문제가 발생한다.

5.1. 적정염도 확보

A 및 B육상양식장 어패류 생육을 위한 적정 염도는 해수(35‰)보다 조금 낮은 약 30~31‰ 범위이다. A 및 B육상양식장 시추공에서 채수한 지하해수의 염도는 수압파쇄 이전 각기 2.4‰ 및 12.5‰이었으므로, 수압파쇄를 통해 염도가 높은 해수의 추가 확보가 필요하였다. A육상양식장 시추공은 수압파쇄로 인해 시추공 상부구간에 담수가 추가로 유입되어 오히려 염도가 낮아졌다. B육상양식장 시추공에는 수압파쇄로 염수가 유입되었지만, 고염도 해수의 직접 유입이 아닌 균열면에 확장에 따른 기존 유체의 유입수량 증가로 판단되므로 염도는 수압파쇄 이전과 유사하였다. 수압파쇄 이후에도 두 개 시추공으로부터 확보한 지하해수는 어패류 생육을 위해 직접 이용하기에는 부적합하여, 향후 이용 시에는 해수와 적정비율로 혼합하여 30~31‰ 내외로 염도를 조절하는데 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 결과적으로 염도가 낮은 시추공에서 염도가 높은 해수만을 선택적으로 시추공 내로 유입시키기 위해서는, 투수성 파쇄대의 확인을 위한 물리검층을 수행한 후 수압파쇄 구간으로 선정해야 한다. 또한 기존의 파쇄대를 확장시킬 것인지, 염도가 높은 하부구간에서 새로운 투수성 파쇄대를 생성시킬 것인지를 결정해야 한다. 마지막으로 확인된 구간에 대해서만 이중패커를 설치한 후, 수압파쇄를 통한 양질의 해수를 추가 취수하는 것이 필요하다.

5.2. 추가수량 확보

A 및 B육상양식장의 용수 수요량은 각기 4,000 m³/day 및 15,000 m³/day이다. 그러나 A 및 B육상양식장의 경우, 수압파쇄 이후에도 1개 시추공 당 100~112 m³/day을 상회하는 토출량을 확보하여 양식장 용수 수요량에 크게 미치지 못하였다. 필요수량 확보를 위해 시추공 개수를 늘리는 방법도 있지만, 1개 육상양식장 면적 대비 40~150개의 시추공 굴착은 비현실적이다. 다만, A 및 B육상양식장은 치어 생장 초기단계에서 운용하는 육상양식수조 개

수가 적고, 치어 성장초기단계에는 해수보다 더 높은 수준의 수질이 요구된다. 따라서, 이 시기에 수질이 우수한 지하해수를 양수하여 해수와 적정비율로 혼합 활용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

5.3. 수압파쇄 방법

수압파쇄 방법을 이용한 토출량 증대 시 가장 중요한 요인은 추가 균열의 확보이다. 이를 위해서는 상대적으로 높은 수압과 목적 심도 구간을 집중적으로 파쇄할 수 있는 이중패커의 적용이 필요하다. 그러나 이 연구에서는 시추공 붕락을 우려하여 수압의 크기를 작게(0.5~10 kgf/cm²) 조절하였기 때문에 균열면 추가 확보가 적었고, 이로 인해 투수량 증가분도 작았던 한계가 있다. 실제로 약한 수압에도 불구하고 B육상양식장 시추공의 40 m 심도 연약대에서는 공벽이 함몰되는 예상치 않은 결과도 발생하였다. 그리고 단일 패커를 이용하였기 때문에 목적 심도 구간을 집중적으로 파쇄하지 못했던 한계가 있다. 이에 따라 담수가 유입되어 수질측면에서 오히려 담수의 유입을 초래하는 등의 한계를 보였다. 향후 수압파쇄 시에는, 이중 패커를 이용하여 목적 심도에 대한 집중적인 파쇄가 필요하며, 지반상태에 따른 수압파쇄 강도를 정량화한 뒤 적용하여 수압파쇄 시 발생 가능한 공내 함몰 등을 사전에 차단할 필요가 있다. 또한 수압파쇄 전·후 수질검사 시, 주양음이온에 대한 분석과 Piper 도표 등을 이용하여 수압파쇄 전·후의 수질변화 등이 종합적으로 검토될 필요가 있다.

6. 결 언

전남 무안군 및 해남군에 위치한 육상양식장에 지하해수를 공급하고자 시추공을 설치하고 단일패커를 이용한 수압파쇄를 실시하여 염도가 높은 지하해수를 추가 확보하고자 하였다. 수압파쇄로 인한 지하해수 수량 및 수질의 변화를 확인하고자 수압파쇄 전·후에 물리검층, 대수성시험 및 수질분석을 실시한 결과, 2개소 시추공에서 공통적으로 수압파쇄로 인한 균열면 확장 및 빈도 증가, 이에 따른 공벽 주변 지반의 포화도 증가 및 지하해수 토출량 증가 등을 확인할 수 있었다. 그러나 무안군에 위치한 육상양식장 시추공은 상부구간에 담수가 유입되어 오히려 염도가 감소하였고, 해남군에 위치한 육상양식장 시추공은 수압파쇄 후에도 염도의 변화가 크지 않았다. 2개소 육상양식장처럼 용수수요량이 많은 곳에서는 시추공 지하해수를 해수와 적정 비율로 섞어 치어의 초기 성장단

계에서 이용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 나아가, 용수수요량이 큰 육상양식장에 대해서는 소형집수정 내지 방사상집수정 등을 해안충적층에 적용하여 지하해수를 확보하는 것도 방법이 될 수 있다.

사 사

본 원고는 농림축산식품부 첨단생산기술개발사업(과제번호 114049-2)에 의해 이루어진 것임.

References

- Freeze, R.A. and Cheery, J.A., 1979, Groundwater, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 p.
- Gale, J.E., 1982, Assessing the permeability characteristics of fractured rock, Geological Society of America, Special Paper, 189, 163-181.
- Hahn, J.S., Ahn, J.S., Yun, Y.Y., Kim, H.S., and Baek, G.H., 2002, Improving groundwater recovery by hydrofracturing, *J. Soil Groundw. Environ.* (In Korean), 7(2), 23-33.
- Hahn, J.S., Ahn, J.S., Yun, Y.Y., Lee, J.H., Jeon, J.S., Kim, E.J., Kim, H.S., Baek, G.H., and Won, E.J., 2003, Improvement of groundwater well recovery by hydrofracturing, *J. Soil Groundw. Environ.* (In Korean), 8(3), 74-85.
- Kim, J.H., Kim, H.S., and Suk, H., 2005, A study on feasibility of hydraulic fracturing with evaluation of yield variance by rock types, *J. Soil Groundw. Environ.* (In Korean), 10(6), 10-19.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2014a, A Report of Geologic Survey on Developing Saline Groundwater for Hae-Song (I) Agricultural Watershed, Hae-Nam, Jeolla-Namdo, Korea (In Korean), Korea, 243 p.
- KRC, 2014b, A Report of Geologic Survey on Developing Saline Groundwater for Mu-Woon Agricultural Watershed, Mu-An, Jeolla-Namdo, Korea (In Korean), Korea, 339 p.
- KRC, 2015, An Affirmative Action Plan for Geologic Survey on Developing Saline Groundwater in 2015 Korea (In Korean), Korea, 167 p.
- Macaulay, D., 1987, Hydro-fracturing the hard rock well, *Groundw. Age*, 21(7), 22-25.
- Min, K.D., Seo, J.H., and Kwon, B.D., 1996, Applied Geophysics (In Korean), 2nd Ed., Sungwoo, Korea, 772 p.
- MISP (Ministry of Science, ICT and Future Planning), 1973, Geologic Map of Mok-Po, Korea (1:250,000) (In Korean), Korea.
- MISP, 1997, Geologic Map of Gwang-Ju, Korea (1:250,000) (In

Korean), Korea.

NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute), 2014, Financial Loss Decreased although a Large-Scaled Red Tide Occurred in 2014 (In Korean), A press release on Oct. 14 in 2014, Korea. 2 p.

Theis, C.V., 1935, The lowering of the piezometer surface and

the rate and discharge of a well using groundwater storage, *Trans.*, **16**, 519-524.

Williamson, W.H. and Wooley, D.R., 1980, Hydraulic Fracturing to Improve the Yield of Bores in Fractured Rock, Australian Water Resources Council Technical Paper 55, Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia, 77 p.