

고강도 열연재의 홀 플랜징시 립 형상이 플랜징성에 미치는 효과

김정운* · 김봉준* · 문영훈†
(2001년 5월 2일 접수, 2001년 10월 29일 심사완료)

Effect of Lip Shape on the Hole Flangeability of High Strength Steel Sheets

JungWoon Kim, BongJun Kim and YoungHoon Moon

Key Words: Hole Flanging(홀 플랜징), TRIP(트립), Ferrite-Bainite Duplex Steel(페라이트-베이나이트 복합조직강), Lip(립), FEM(유한요소해석)

Abstract

Effect of lip shape on the hole flangeability of high strength steel sheets is investigated. Circular plates of various hole sizes are tested and the variation of lip length as well as the variation of thickness on the sectional views of the finished lip were studied. The conventional hole flanging process is limited to a certain limit hole diameter below which failure will ensue during the hole expansion. The intention of this work is to examine the effect of lip shape on the flangeability of TRIP steel and Ferrite-Bainite duplex steel and find out major parameters which can affect flanging shape of high strength hot rolled steels. Over the ranges of conditions investigated, the minimum hole diameter of F+B steel is better than TRIP steel. while, the lip-shape accuracy of TRIP steel is better than that of F+B steel. although the tensile strength and elongation of TRIP steel are superior than those of Ferrite-Bainite duplex steel, the flangeability is found to be not so strongly sensitive to the tensile properties but sensitive to displacement on the circumferential direction of hole edge.

1. 서론

홀 플랜징(hole flanging)은 원통형이나 원뿔형의 목 또는 플랜지를 형성하기 위해 여러 형상의 펀치를 이용하여 판재의 가장자리 홀부분의 재료를 변형시키는 성형기법이다.⁽¹⁾ 성형시 커다란 소성변형은 판재의 홀 주위로 제한되며 홀 주변에 대한 강재의 변형은 벤딩(bending)과 스트레칭(stretching)의 조합으로 나타난다.⁽²⁾ 홀은 립(lip)을 생성하기 위해 큰 직경을 가진 펀치에 의해서 성

형시 원주방향의 단축인장응력을 받게 되며⁽³⁾ Fig. 1에 성형중 립 가장자리에서의 변형양상을 3축으로 나타내었다. Wang⁽³⁾과 Asnafi⁽⁴⁾는 이러한 홀 가장자리에서의 과도한 응력과 원주방향의 변형으로 인하여 플랜징시 네킹(necking)또는 티어링(tearing) 등과 같은 파단을 야기시킨다고 보고하였다. Yoshida⁽⁵⁾는 플랜지의 성형시 소성등방성 이론을 적용하였으며 특히 플랜지에서 홀의 원주방향으로의 파단에 대한 많은 실험적인 연구를 제시하였다. 이러한 재료의 플랜징성은 주로 플랜지 경계부에서의 노치의 감수성과 연성에 의존하며 특히 소재의 물성치 뿐만 아니라 펀치의 직경과 각도, 홀의 크기와 가공상태, 판재의 두께, 클리어런스(clearance), 윤활상태 등과 같은 공정 변수도 소재의 변형에 많은 영향을 준다.

본 연구에서는 최근 자동차용 고장력 열연강판

* 부산대학교 정밀기계공학과
† 책임저자, 회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터/정밀기계공학과
E-mail : yhmoon@hyowon.pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2472 FAX : (051)512-1722

의 경우에 강도뿐만 아니라 고도의 가공성이 요구됨에 따라 높은 강도와 우수한 성형성을 가진 TRIP(Transformation Induced Plasticity)강과 페라이트-베이나이트 복합조직 (Ferrite-Bainite Duplex Microstructure)강을 대상으로 홀 플랜징 시험을 행함으로써 성형성과 성형공정인자가 플랜지 형상에 미치는 영향도를 분석하고자 한다.

2. 실험절차 및 해석조건

2.1 실험절차

Fig. 2와 3에 실험적인 장치와 펀치보다 작은 직경을 가진 홀을 성형하여 립이 생성된 과정을 개략적으로 나타내고 있으며 Fig. 4에서는 실제 성형된 시편의 형상을 성형전과 성형후의 형상으로 나타내었다. 장비는 최대용량이 50ton인 복동식 유압프레스를 사용하였고 펀치와 금형은 HRc60을 가지는 STD11로 제작하였으며, 클리어런스는 20%로 설정하였다. 시험편은 외경이 170mm인 원판형 시편으로 Wire cutting기로 가

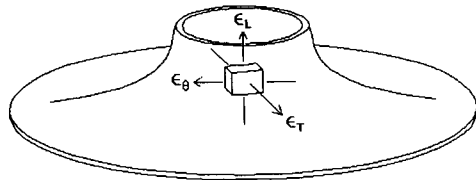


Fig. 1 Geometry of circular plate in hole flanging process: ϵ_T =thickness direction, ϵ_L =length direction, ϵ_θ =circumference direction strain

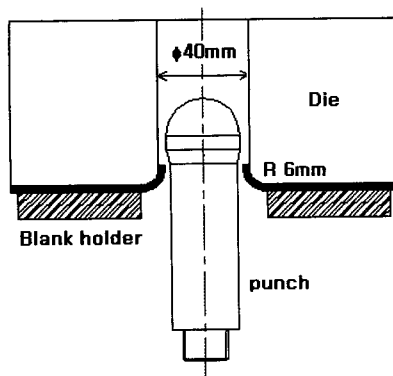


Fig. 2 Schematic process diagram of hole flanging test

Table 1 Tensile properties

Material	Yield strength (kgf/mm^2)	Tensile strength (kgf/mm^2)	Elongation (%)
F+B	48.3	58.0	13.7
TRIP	59.6	77.9	17.9

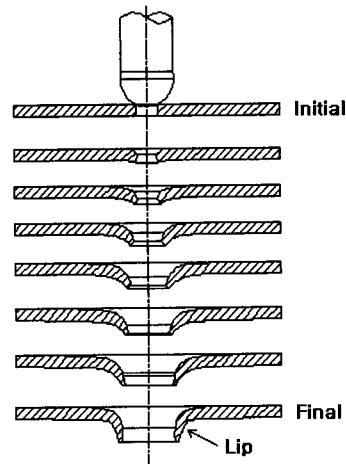
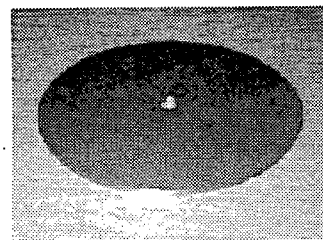
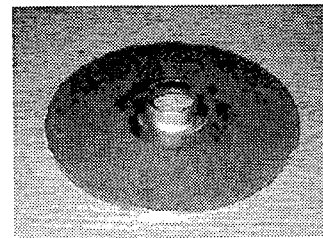


Fig. 3 Progressive sectional views of deformed plates with lip



(a)



(b)

Fig. 4 Specimen shape before and after test (a) before forming operation, (b) after forming operation

공하고 펀치가 맞닿는 원판 중심부의 홀은 드릴링(drilling)으로 균일하게 가공하여 시편의 가공조건을 동일하게 하였다. 이때 최초 홀직경(Hole diameter:Hd)은 12.5mm이며 14~34mm에서는 2mm간격으로 설정하였고 시편의 두께는 1.0, 2.0, 3.1mm로 가공하였다. 실험에 사용된 소재의 인장물성치를 Table 1에 나타내었다.

2.2 해석 조건

성형중 시편의 홀 가장자리에서의 변형양상을 예측하기 위해 강소성 유한요소해석 프로그램인 MARC를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 시편의 형상은 해석의 단순화를 위해 4분의 1만을 모델링하여 일반적인 쉘요소(shell element)를 사용하여 해석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공정인자에 따른 성형성

Fig. 5는 실험을 통해 얻어진 변위에 따른 성형하중곡선으로써 소재의 두께는 2.0mm일 때 홀직경의 감소에 따른 성형하중의 변화를 나타내었다. 홀 직경이 작아짐에 따라 과도한 변형으로 인하여 성형하중이 급격히 증가하는 현상을 나타내고 있으며 성형하중의 증가양상에서 TRIP 강은 F+B 강에 비해 훨씬 높은 성형하중을 보이고 있다. 이것은 홀 직경이 작아지면서 플랜지 변형에 대한 변형저항이 Table 1에서 알 수 있는바와 같이 TRIP 강이 F+B 강에 비해 더 크기 때문이다. 두 강재에 대하여 시편의 두께와 홀 직경을 공정변수로 설정하여 실험 후 얻어진 시편의 두께에 따른 성형 가능한 최소 홀 직경을 Fig. 6에 나타내었다. 전체적으로 F+B 강이 TRIP 강에 비해 우수한 성형성을 보여주고 있으며, 특히 두께 3.1mm에서 TRIP 강은 최소 홀 직경 22mm까지 성형이 가능하였으나 F+B 강은 홀 직경 12.5mm까지 성형이 가능한 것으로 보아서 시편의 두께가 훨씬 두꺼워질수록 F+B 강의 성형가능한 홀 직경은 TRIP 강에 비해 훨씬 작을 것으로 예상된다. 따라서 성형이 가능한 최소 홀 직경 면에서는 F+B 강이 TRIP 강에 비해 홀 플랜징성이 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 고강도 열연재의 홀 플랜징성은 소재의 연신에 비례하지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서

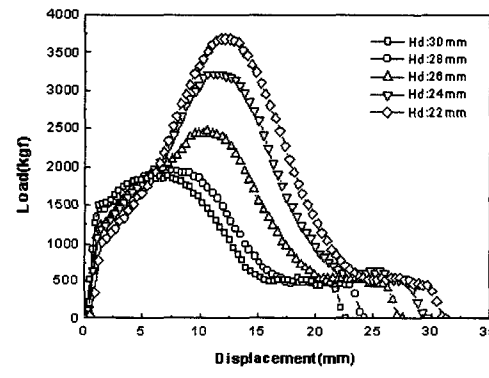
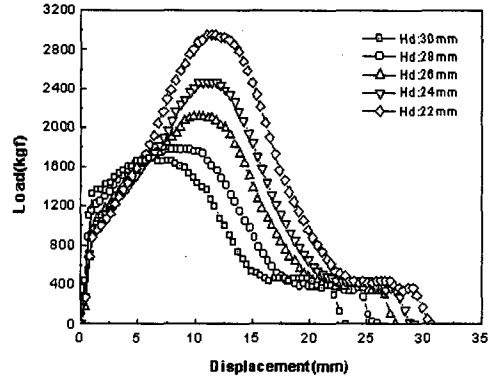


Fig. 5 Comparison of load-displacement curves at various hole diameters (a)F+B steel, (b)TRIP steel

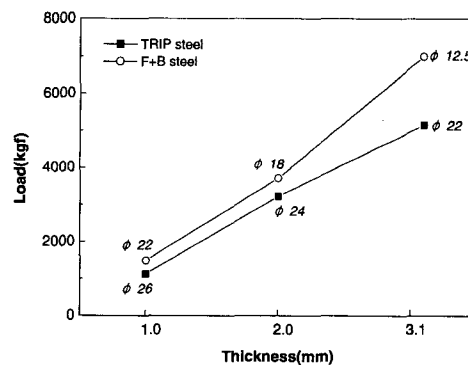


Fig. 6 Comparison of minimum hole diameters at given specimen thickness

는 고강도 열연재의 홀 플랜징성에 영향을 미치는 주요인자들 중에서 성형 후 생성된 플랜지 형

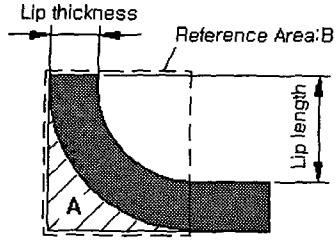


Fig. 7 Experimental section of the finished lip

상이 성형성에 미치는 영향도를 규명하고자 성형시 홀 가장자리에서의 변형양상과의 상관성을 조사하였다.

3.2 립의 형상이 홀 플랜지성에 미치는 영향

홀 플랜지의 립 성형시 변형은 인장시험과는 달리 균일 변형을 초과하는 변형이며, 이때 립 가장자리는 평면변형상태로 볼 수 있으나 그 변형과정은 단순 평면변형과는 매우 다르다. 특히 길이방향의 변형과 두께방향의 변형보다는 원주방향의 변형이 변형의 가장 큰 요소로 작용한다. 이러한 립의 형상변화를 구체화하기 위해 실험 후 성형된 립의 단면형상을 Fig. 7과 같이 두께와 길이를 도식적으로 정의하고, 성형치밀도의 척도로 기준면적 B에 대한 A면적의 비율을 정의하였다. Fig. 8~10에 측정된 립의 단면형상에 관한 값들을 비교하여 보았다. Fig. 8에 성형 후 형성된 립의 길이변화를 최초 시편의 두께에 대해 나타내었다. 시편의 두께변화에 따라 TRIP 강이 F+B 강에 비해 립의 길이변화가 컸다. 이것은 길이방향의 변형량에서는 TRIP 강이 F+B 강에 비해 상대적으로 높은 것으로 판단된다. Fig. 9에서는 립 가장자리의 두께를 최초 시편의 두께변화에 대해 나타내었다. 두께방향의 변형량은 반대로 TRIP 강이 F+B 강에 비해 낮은 값을 나타내었다. 또한 홀 주위에서의 두께방향의 변형은 홀 플랜징시 주된 변형인 원주방향의 변형에 의해 야기되는 것이므로 이러한 원주방향의 변형은 홀 플랜지성과 직접적인 상관관계에 있다고 판단된다. 두 소재의 성형중 립에서의 과단은 립의 두께가 가장 작을 때 립의 주위에서 국부적인 내킹으로 야기된다. 즉, 성형가능한 최소 홀 직경면에서는 F+B 강이 TRIP 강에 비해 홀 플랜지성이 높게 나타났지만 동일한 시편두께와 홀 직경에서

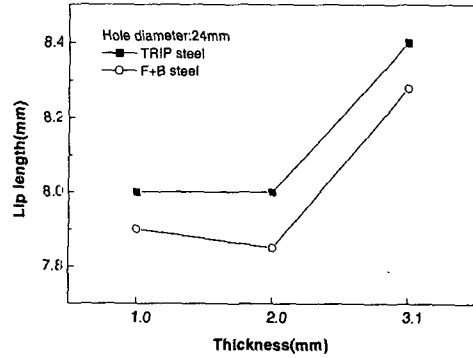


Fig. 8 Comparison of lip length with respect to the specimen thickness

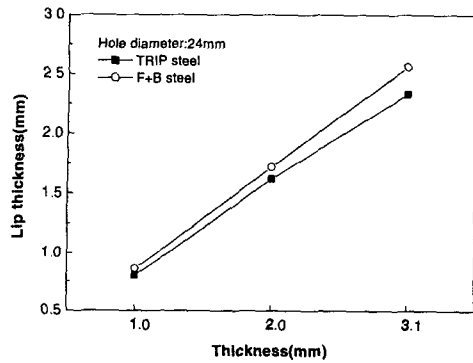


Fig. 9 Comparison of lip thickness with respect to the specimen thickness

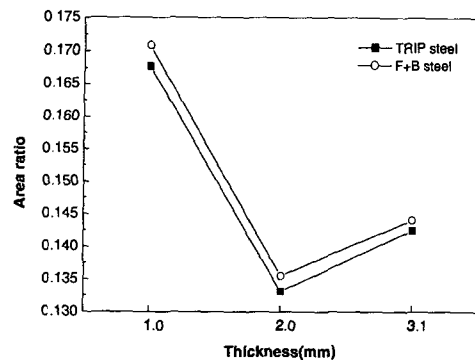


Fig. 10 Comparison of area ratio with respect to the specimen thickness

는 립 부위에서 원주방향의 변형량이 적은 소재일수록 성형성이 우수하다는 것을 예측할 수 있다. 이러한 원인을 확인하기 위해 Fig. 7에서 정의한 면적A를 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. 시편의 두께에 따라 전체적으로 F+B 강이 TRIP 강에 비해 넓은 면적을 가졌다. 즉, 동일한 시편두께와 홀 직경에서 홀 플랜징성은 성형 후 생성된 립의 길이가 길고 두께가 얇을수록 성형성이 우수하기 때문에 A의 면적이 작은 TRIP 강의 홀 플랜징성이 F+B 강에 비해 훨씬 우수하다고 할 수 있다. 따라서 성형된 립의 두께변화를 보다 구체적으로 규명하기 위해 단면의 두께분포를 관찰하였다.

립의 두께변화를 구체적으로 평가하기 위해 홀 플랜징후 성형된 립의 단면을 각 시편두께별로 Fig. 11에 나타내었다. 이때 단면의 두께분포를 Fig. 12과 같이 호의 길이방향으로 10°의 간격으로 9등분을 나누어 두께의 변화양상을 그래프 상에 나타내었다. 이때 펀치의 곡률이 시작되는 부분, 즉 시편의 성형이 시작되는 부분인 단면1과 45°방향으로 성형된 립의 단면4를 각각 드로잉 개시점(drawing start-point), 드로잉 종료점(drawing end-point)으로 정의하여 최초 변형이 시작되는 시점에서부터 립의 가장자리까지의 단면의 두께분포를 Fig. 13에 나타낸 결과, 각 시편의 두께별로 F+B 강이 TRIP 강보다 높은 두께 분포를 가졌다. 단면 1에서 4까지는 드로잉 부위(drawing length)로써 두 소재가 거의 차이가 나지 않았지

만 드로잉 종료점에서 립 가장자리까지의 두께분포에서는 F+B 강이 높은 두께분포를 나타내었다. 시편의 두께별로는 두께 1.0mm와 2.0mm에서는 다소 차이가 없이 증가하다가 drawing length 지점을 지나서는 F+B 강이 립 가장자리까지 TRIP 강에 비해 높은 값을 가지면서 진행된 것을 알 수 있었다. 시편두께 3.1mm에서는 립 단면의 두께차이가 현저하게 나타났다. 드로잉 부위에서 다소 큰 폭의 두께차이를 나타내다가 드로잉 종료점에서 일치하는 현상을 나타내었지만 다시 립 가장자리까지 큰 폭의 두께차이를 나타내며 증가하는 양상을 보였다. 실제로 드로잉 종료점은 성형시 금형과 시편의 접촉부위 중에서 가장 많은 변형을 받는 부분이므로 두 소재의 기계적 성질에 상관없이 거의 일치하는 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 이러한 결과로 TRIP 강은 홀 플랜징시 원주방향의 변형량이 F+B 강에 비해 작

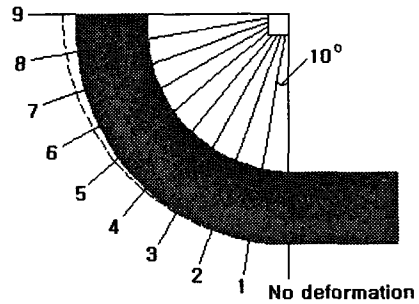


Fig. 12 Notations on sectional views of the finished lip

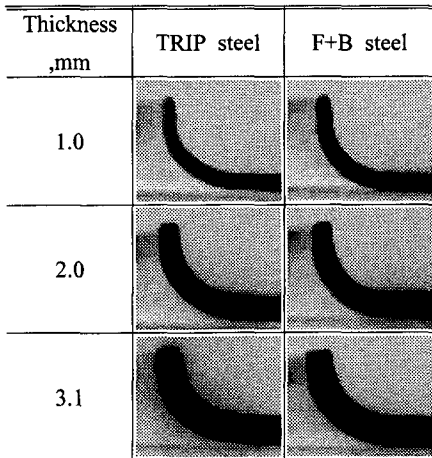


Fig. 11 Sectional diagram of finished lip with respect to specimen thickness

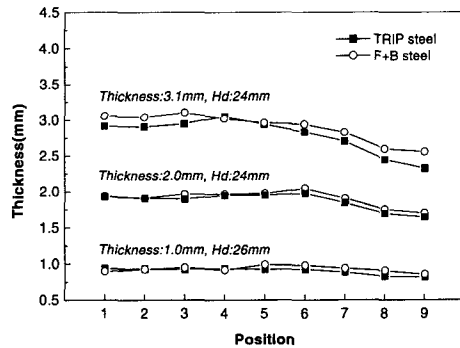


Fig. 13 Thickness distribution of sectional views of the finished lip

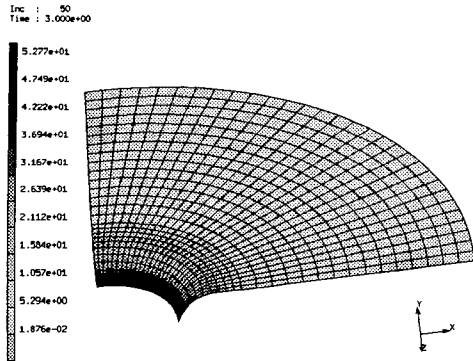


Fig. 14 Simulated equivalent stress (material:TRIP steel, thickness:3.1mm)

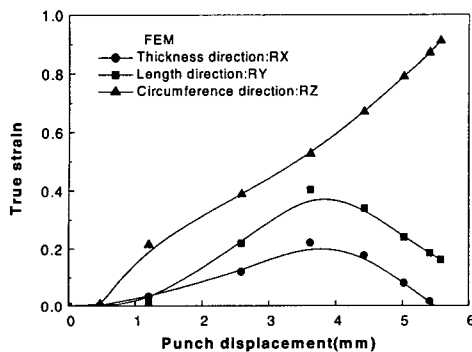


Fig. 15 Punch displacement and true strain relationship measured at the flange edge (Thickness:3.1mm, Hole diameter:30mm)

다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 14는 유한요소해석 결과로써 성형된 립에 대한 상당응력(equivalent stress)의 분포를 나타내고 있다. 이때 응력분포는 홀 가장자리 부분에서의 응력이 가장 크게 나타나고 있는데 이것은 펀치의 직경에 비해 작은 홀 직경의 시편을 성형하기 때문에 홀 가장자리에서의 응력이 높게 나타나는 것이다. Fig. 15에서는 립의 가장자리 끝부분에서의 변형 거동을 나타내었다. 성형 후 변형양상을 3축으로 정의하였으며, 특히 두께방향(R_x), 길이방향(R_y)의 변형량보다는 원주방향(R_z)의 변형량이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상으로 성형시 홀 가장자리에서의 변형은 원주방향의 변형량이 가장 큰 요인으로 작용한다고 볼 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 고강도 열연강재의 홀 플랜징시 공정인자가 홀 플랜지성과 플랜지 형상에 미치는 영향도를 분석하였다.

(1) 홀 플랜지성은 소재의 인장값보다는 성형시 립에서의 원주방향의 변형량과 상관관계가 높게 관찰되었으며, 립 가장자리의 변형양상을 예측하기 위한 강소성 유한요소해석의 결과에서도 확인되었다.

(2) 성형 가능한 최소 홀 직경면에서는 F+B 강이 TRIP 강에 비해 우수한 성형성을 가졌다.

(3) 실제 동일 홀 직경에서 플랜지의 단면 형상을 비교한 결과, 성형치밀도 측면에서는 TRIP 강이 F+B 강에 비해 플랜지의 형상이 훨씬 우수하므로 판명되었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 학술연구조성비(4년과제)에 의한 연구이며, 연구에 도움을 주신 POSCO(주)의 박성호, 조열래 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kumagai, T. and Saiki, H., 1999, "Deformation Analysis of Hole Flanging with Ironing of Thick Sheet Metals," *Metal and Materials*, Vol. 4, No. 4, pp. 711~714.
- (2) Lew, D-K., 1996, "Finite-Element Simulation of Hole-Flanging Process of Circular Sheets of Anisotropic Materials," *Int. J. Mesh. Sci.*, Vol. 38, Nos 8-9, pp. 917~933.
- (3) Wang, N.M. and Wenner, M.L., 1974, "An Analytical and Experimental Study of Stretch Flanging," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 16, pp. 135~143.
- (4) Asnafi, N., 1999, "On Stretch and Shrink Flanging of Sheet Aluminium by Fluid Forming," *J. Mate. Pro. Tech.*, Vol. 96, pp. 198~214.
- (5) Ycshida, K., 1959, "Classification and Systematization of Sheet Metal Press-Forming Process," *Inst. Phys. Chem. Res.*, 53, 125.